

火災加熱後の冷却中における
集成材の自己燃焼性状および燃え止まり条件の解明

茶谷 友希子

目次

第1章 序論

1.1	研究の社会的背景.....	1
1.2	既往の研究と課題.....	1
1.3	本論文の目的.....	3
1.4	本論文の構成.....	4

第1部 火災加熱後の冷却中における集成材炭化層の 赤熱反応停止条件の解明と赤熱反応速度式の作成

第2章 木材の燃焼と燃え止まり

2.1	木材の燃焼	8
2.2	火災後の燃え止まり	9
2.3	木質耐火部材の燃え止まり性能.....	10

第3章 通常雰囲気における集成材の赤熱反応

3.1	実験の目的	12
3.2	実験の方法	12
3.2.1	実験装置.....	12
3.2.2	試験体.....	14
3.2.3	実験条件.....	15
3.3	代表的な実験結果.....	18
3.3.1	カラマツの燃え止まった実験.....	18
3.3.2	カラマツの燃え止まらなかった実験.....	20
3.3.3	スギの燃え止まった実験.....	22
3.3.4	スギの燃え止まらなかった実験.....	24
3.4	カラマツの実験結果の比較.....	28
3.4.1	燃え止まり条件.....	28
3.4.2	赤熱反応速度式の作成.....	31
3.4.3	単位燃焼熱.....	33
3.5	カラマツとスギの比較.....	34
3.5.1	燃焼の様子.....	34
3.5.2	燃え止まり条件.....	35
3.5.3	赤熱反応速度式.....	37
3.5.4	単位燃焼熱.....	37
3.6	3章のまとめ	38

第4章 赤熱反応に対する試験体表面の気流の影響

4.1	実験の目的	41
4.2	実験の方法	41
4.2.1	実験装置.....	41
4.2.2	試験体.....	42
4.2.3	実験条件.....	42
4.3	代表的な実験結果.....	44
4.3.1	燃え止まった実験.....	44
4.3.2	燃え止まらなかった実験.....	46
4.4	気流が存在する場合のコーンカロリメータの対流熱伝達率.....	50
4.4.1	測定方法.....	50
4.4.2	測定結果.....	51
4.4.3	対流熱伝達率の算出.....	52
4.5	実験結果の比較と赤熱反応性状の定量化.....	54
4.5.1	燃焼の様子.....	54
4.5.2	燃え止まり条件.....	55
4.5.3	試験体表面の熱収支.....	57
4.5.4	赤熱反応速度式の作成.....	59
4.6	4章のまとめ	62

第5章 赤熱反応に対する酸素濃度の影響

5.1	実験の目的	64
5.2	実験の方法	64
5.2.1	実験装置.....	64
5.2.2	試験体.....	66
5.2.3	実験条件.....	66
5.3	予備実験	70
5.3.1	測定チャンバー内の温度分布	70
5.3.2	供給ガス温度 400°Cにおける試験体温度	71
5.4	代表的な実験結果.....	73
5.4.1	5mm 厚の実験結果.....	73
5.4.2	15mm 厚の実験結果.....	77
5.5	実験結果の比較.....	82
5.5.1	試験体厚みの違いの影響.....	82
5.5.2	赤熱反応速度式の作成.....	86
5.6	5章のまとめ	87

第 1 部のまとめ	89
-----------------	----

第2部 集成材の燃え止まり予測手法の改良と検証

第6章 木材の燃焼予測

6.1	木材の着火、熱分解の予測.....	92
6.2	木材の赤熱、燃え止まりの予測.....	93

第7章 燃え止まり予測解析プログラムにおける赤熱反応分布モデルの作成

7.1	燃え止まり予測解析プログラムの概要.....	95
7.1.1	計算の前提.....	95
7.1.2	支配方程式.....	95
7.1.3	温度上昇に伴う物性値の変化.....	98
7.1.4	形状の変化.....	99
7.1.5	境界条件.....	99
7.1.6	要素分割.....	101
7.2	炭化層内の赤熱反応分布モデルの作成.....	101
7.2.1	正味の距離を求める方法.....	103
7.2.2	収縮を無視する簡易法.....	103
7.3	7章のまとめ.....	104

第8章 燃え止まり予測解析プログラムを用いた解析検証

8.1	耐火炉実験を対象とした計算.....	108
8.1.1	計算対象とする実験.....	108
8.1.2	計算条件.....	110
8.1.3	詳細モデルと簡易モデルの計算結果.....	111
8.1.4	炭化層の赤熱反応分布モデルの効果と係数の検討.....	112
8.2	コーンカロリメータ実験を対象とした計算.....	117
8.2.1	計算対象とする実験.....	118
8.2.2	計算条件.....	118
8.2.3	①加熱強度 50kW/m^2 の燃え止まらない条件.....	119
8.2.4	②加熱強度 8.7kW/m^2 の燃え止まる条件.....	121
8.2.5	③試験体内部温度を測定した実験.....	122
8.2.6	④表面気流を与えた実験.....	123
8.3	8章のまとめ.....	125

第2部のまとめ.....	127
--------------	-----

第9章 結論

9.1	本研究のまとめ.....	128
9.2	今後の課題	130
付録 1	コーンカロリメータによる放射加熱実験データ集.....	133
付録 2	大型熱重量分析装置による加熱実験データ集	229
発表論文一覧.....		262
謝辞.....		264

第1章 序論

1.1 研究の社会的背景

木材は、日本で古くから寺社建築や住宅等の低層建築物に使用されてきた材料である。軽く強い材料であることや断熱性・調湿性に優れていることに加えて、近年では、戦後に造林された多くの人工林が伐採期を迎えていることにより、国産材を活用して林業・林産業を活性化させ、かつ、木材を建材として活用して炭素を建材に固定した上で新しく植林し直すことにより二酸化炭素の吸収量を増やし、地球温暖化防止に貢献出来ることもあり、木材を建築に活用する社会的機運が高まっている。一方で木材は、鉄やコンクリートといった不燃性の建材と比較して、木材自身の可燃性や腐朽、虫害などの木材特有の性質に対して適切に対処する必要がある。

木材はその可燃性から、1923年の関東大震災で発生した大規模な市街地火災以降、防火構造以下の小規模な建築物のみに使用が制限された。しかし、1.2節で示すような研究の積み重ねにより木造建築の火災安全性が示され、法改正が行われてきている。1987年に燃えしろ設計の考え方が建築基準法に導入され、小・中規模の準耐火建築物を木現わしで実現することが出来るようになった。さらに、2000年施行の改正建築基準法により、これまでは鉄やコンクリートといった材料による制限を仕様の課していた防耐火に関する基準が性能規定化され、“所定の防耐火性能”を満たすことが出来れば、木材等の可燃物でも耐火建築物を建てられるようになり、中・大規模の木造建築が可能となった。2011～2013年に実施された木造三階建て学校の実大火災実験^{1),2),3)}をきっかけに、それまでは耐火建築物とすることが要求されていた用途・規模への準耐火構造の適用が検討されて、2014年以降、延焼防止建築物、火災時倒壊防止建築物などの既存の準耐火建築物よりも防耐火性能が高い準耐火建築物の考え方が導入されたことにより、木造で建てられる用途・規模の範囲が広がった。同時に、木造建築を振興する政策として、2010年に“公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律”が制定され、まずは公共建築物の木造化が推奨され、さらに2020年には“脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律”と名前を変えて、法の対象が建築物一般に拡大されている。

このような法制度の整備を受けて、国内では木材を用いた耐火部材、耐火建築物の開発が盛んに行われ、2025年現在では、10階建てを超える純木造建築物が実現するようになっており^{4),5),6)}、今後もその動きは活発であると見込まれる。

1.2 既往の研究と課題

火災に対して安全に木材を建築物に使用するための最も簡便な方法は、石こうボード等の不燃材で木材を隙間無く覆い、木材が火炎に直接晒されないようにすることである。しかし、日本では、古くから木造建築に親しんできた国民性からか、木材が目に見えるかたちで使用されることを好む傾向にある。そこで、木材を現わしで建築物に使用するために、様々な研究開発が為されてきた。

中村ら⁷⁾は、トドマツ、ベイマツ、スギの集成材と製材の柱・梁の加熱実験を行い、断面寸法

に応じて 20～60 分の火災加熱を受けても全断面が燃え尽きることは無いことを報告した。一定以上の断面寸法を有する木材は、表面が燃えて形成された炭化層が、内部への熱の侵入を遮る断熱層となって燃焼が緩やかになるため、防火被覆が無くても火災時に必要な構造耐力を保持できるとの考えが示され、燃えしろ設計が制定される際の根拠の一部となっている。

原田⁹⁾は、木材の燃焼性状を材料レベルで詳細に実験調査し、その後の木材の耐火性研究の基礎となるデータをまとめた。例えば、木材の着火時間は樹種や年輪の方向に依らず熱慣性（密度、熱伝導率、比熱の積）に比例することを明らかにし、厚さ 20mm の木板について着火後 300 秒間の平均発熱速度や裏面温度が 260℃に達する時間の予測式の提案を行うなどした。

1.1 節で述べた木造で耐火建築物を建てるために求められる“所定の防耐火性能”とは、室内の収納可燃物が炎をあげて燃えて雰囲気温度が上昇している火災中に構造体が壊れないことはもちろん、収納可燃物が燃え尽きて雰囲気温度が下降に転じた後、常温に戻るまでの間にも構造体が壊れないことである。加えて、消防隊や消防設備等による消火を受けずとも木質部材自身で自己燃焼を停止する、いわゆる「燃え止まる」ことが要件となる。木材の燃焼は熱分解に伴う有炎燃焼と赤熱と呼ばれる無炎燃焼の 2 つに大別出来るが、「燃え止まり」では有炎燃焼が停止した後、さらに無炎燃焼も停止する必要がある。

有炎燃焼の停止条件については、主にアメリカやヨーロッパ、オーストラリア等の国外において、近年研究が盛んに行われており、木質部材への入射熱が 30～51kW/m² の範囲で有炎燃焼が停止することが報告されている^{例え9),10)}。前述の諸国においては有炎燃焼が停止すれば建物内に消防隊が容易に侵入することができ、無炎燃焼の停止は消防隊によって成し遂げることが出来ると考えられているため、木質部材自身によって有炎燃焼が停止すれば十分とされている。しかし、日本は密集市街地の多い地震大国であるため、消防隊の到着に時間がかかることを想定して放任火災に対する耐火性が求められる。特に木造では無炎燃焼の自己停止、つまり「燃え止まり」まで求められるが、無炎燃焼（赤熱）の反応速度や停止条件は十分に解明されているとは言い難い。

木質耐火部材の燃え止まり性能は、耐火炉を用いた加熱実験によって個別に確かめられており、図 1-1 に示すような様々な仕様が研究開発され、実用化している。1999～2003 年度に実施された建設省（現国土交通省）総合技術開発プロジェクト「木質複合建築構造技術の開発」（通称、木質ハイブリッド総プロ）では、木製の耐火部材を実現するために、構造材と被覆材の種類を様々な組み合わせで燃え止まり性能を検証した¹¹⁾。その中で、荷重支持部の木材を石こうボードで覆った上に薄い木板で仕上げた仕様と、H形鋼を荷重支持部としてカラマツおよびベイマツ集成材で覆って木材で仕上げた仕様について、燃え止まりを含む 1 時間耐火性能を確認した。荷重支持部を木材とする耐火部材については、他にも、難燃薬剤を注入した木材を被覆層とする仕様^{例え12)}や、モルタル等の熱容量の大きい材料と木材を組み合わせる仕様^{例え13)}などがある。これらの部材は安定した性能が確認され実用化されている^{4),5),6)}が、木造耐火建築物が運用を終えて解体される際に、木材とその他の不燃材との分解・分別が困難であり、リユースやリサイクル、カスケード利用が出来ず、埋め立て処理等で処分するほかないという課題がある。

環境配慮の観点からは、木材と不燃材が容易に分離可能な仕様、もしくは不燃材を使用せず木材のみで燃え止まる性能を安定して実現することが望まれる。金城ら¹⁴⁾は、密度 0.53g/cm^3 のカラムツ大断面集成材梁の非載荷加熱実験を行い、燃え止まりを含む 1 時間耐火性能を確認した。蛇石ら¹⁵⁾は、密度 $0.46\sim 0.53\text{g/cm}^3$ のカラムツ大断面集成材梁の載荷加熱実験を行い、燃え止まりを含む 1 時間耐火性能および 1.5 時間耐火性能を確認した。このように、一定以上の密度を有するカラムツの大断面集成材は燃え止まることが研究的には確認されているが、安定してその性能を担保することが出来ず実用化には至っていない。

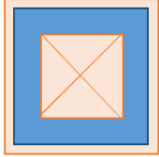
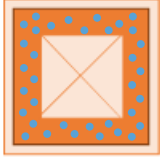
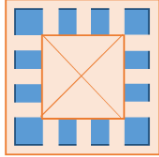
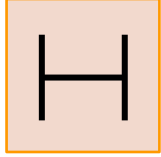
	メンブレン型	燃え止まり型			ハイブリッド型
		薬剤処理	不燃材使用	純木	
構造種別	木造				鉄骨造
耐火被覆材の種類	不燃材	木材と不燃材との複合		木材	木材
形状略図					
メリット	・実用化済 ・コスト安	・実用化済	・実用化済	・コスト安 ・製造容易 ・環境配慮	・実用化済
デメリット	・仕上げ木材の割れ、反り ・施工手間	・コスト高 ・製造手間 ・リサイクル難	・コスト高 ・製造手間 ・リサイクル難	・実用化未 ・性能安定化未	・製造手間

図 1-1 木質耐火部材の分類

また、先述の通り木質耐火部材の燃え止まり性能は、現状では、耐火炉を用いた加熱実験によって個別に確かめられている。多様な木質耐火部材を開発、利用するために、また、その火災安全性を確かめるために、耐火実験による性能確認だけではなく、数値計算により性能を予測出来るようになることが期待される。木材の燃焼は、水分蒸発、熱分解、赤熱に伴う吸発熱や、収縮と亀裂の発生といった木材特有の現象が重なり合った複雑な現象である。木質部材の耐火性能を予測する計算モデルは様々に提案されており^{例えば16),17)}、木質部材の着火や熱分解を考慮して、加熱中（雰囲気温度上昇中）の木材の内部温度や熱分解反応を予測する計算モデルは複数存在し、その予測精度も良好であるものが多い。一方で、木質部材の無炎燃焼（赤熱）を考慮して、放冷中（雰囲気温度下降中）の木材の内部温度や燃え止まりを予測する計算モデル^{例えば18),19)}は少なく、その予測精度も高いとは言い難い。

1.3 本論文の目的

木材のみで燃え止まる仕様を実用化するには、燃え止まり性能が安定して発揮されるように

制御出来なければならない。そのために、木材の燃え止まりがどのような条件で発生しているのか、そのメカニズムを理解する必要がある。さらには、燃え止まり性能が数値解析により予測出来ることで、実験と併せて、様々な条件下における燃え止まり性能を検証することが出来る。そこで本研究では、カラマツ集成材の赤熱反応性状と燃え止まり条件を解明することと、木質部材の燃焼予測プログラムを改良し予測精度を向上させた上で、測定した赤熱・燃え止まり条件をプログラムに適用して測定結果の検証を行うことを目的とする。

1.4 本論文の構成

図 1-2 に本論文の構成を示す。

第 1 部では、炭化層の赤熱反応性状を測定し、分析した結果を述べる。第 2 章では、木材の燃焼に関する基礎知識と既往研究のレビューを行う。第 3 章では、コーンカロリメータを用いて、通常の雰囲気条件下でカラマツ集成材とスギ集成材の赤熱反応性状を測定し、燃え止まり条件を求め、反応速度式を作成する。第 4 章では、コーンカロリメータを用いて、カラマツ集成材の赤熱反応に対し、試験体表面に気流が発生している場合の影響を考察する。第 5 章では、大型熱重量分析装置を用いて、カラマツ集成材の赤熱反応に対し、雰囲気酸素濃度の影響を考察する。

第 2 部では、燃え止まり予測解析モデルの改良と、第 1 部で求めた燃え止まり条件および赤熱反応速度式を適用、検証した結果を述べる。第 6 章では、熱伝導解析に関する基礎知識と既往研究のレビューを行う。第 7 章では、燃え止まり予測解析モデルの概要の説明と、炭化層に赤熱反応分布を設定する計算手法の作成をはじめとした解析モデルの改良について述べる。第 8 章では、改良した燃え止まり予測解析モデルを用いて、耐火炉による 1 時間耐火実験およびコーンカロリメータによる放射加熱試験を対象として計算を行い、実験結果と計算値を比較し、第 1 部で求めた燃え止まり条件および赤熱反応速度式、第 7 章で作成した赤熱反応分布モデルの評価を行う。

第 9 章では、本研究で得られた成果を総括して、今後の課題について述べる。

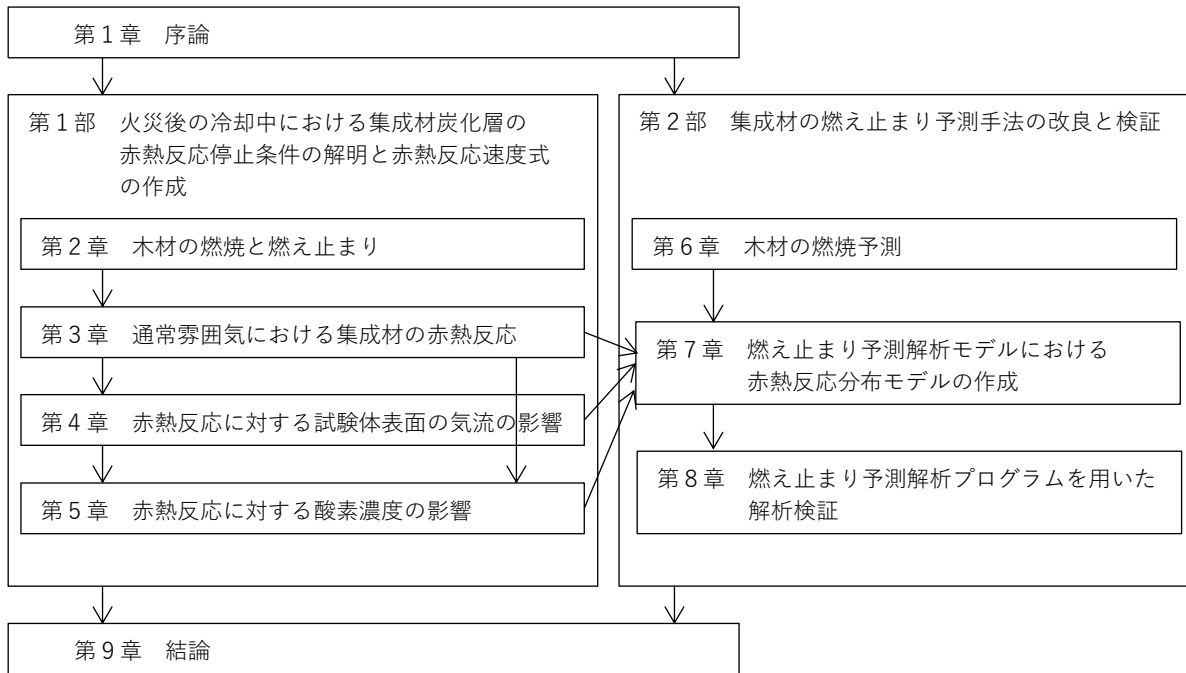


図 1-2 本論文の構成

[第1章の参考文献]

- 1) 長谷見雄二，他，「木造3階建て学校の実大火災実験（予備実験）：その1～14」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.287-314，2012/9
- 2) 長谷見雄二，他，「木造3階建て学校の実大火災実験（準備実験）：その1～23」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.163-208，2013/8
- 3) 長谷見雄二，他，「木造3階建て学校の実大火災実験（本実験）：その1～24」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.285-332，2014/9
- 4) 林野庁 ウッド・チェンジ協議会，「高層木造ビル事例集」，令和3年度版
- 5) 林野庁，「建築物の木造化・木質化事例、参考資料」，
https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/kidukai/zirei_sankou/index.html（2025/8/22 アクセス）
- 6) 国土交通省，「公共建築物における木材の利用の取組に関する事例集」，
https://www.mlit.go.jp/gobuild/moku_torikumi.html（2025/8/22 アクセス）
- 7) 中村賢一，宮林正幸，他，「大断面木材の耐火性能」，木材工業，第40巻，第12号，pp.563-567，1985/12
- 8) 原田寿郎，「木材の燃焼性および耐火性能に関する研究」，森林総合研究所研究報告，No.378，pp.1-85，2000/3
- 9) L. Terrei, Z. Acem, "Study of wood self-extinguishment with a double sliding cone calorimeter", Fire Safety Journal, Vol.122, 103316, 2021/6, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103316>
- 10) J. Cuevas, J.L. Torero, C. Maluk, "Flame extinction and burning behaviour of timber under varied oxygen concentrations", Fire Safety Journal, Vol.120, 103087, 2021/3,

<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103087>

- 11) 遊佐秀逸, 他, 「木質系構造の耐火性能に関する研究 その 1 ～28」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 2003～2007
- 12) 原田寿郎, 服部順昭, 他, 「耐火集成材の開発 (その 1) ～ (その 19)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 2006～2014
- 13) 堀長生, 西村俊彦, 他, 「燃え止まり性能を有する木質構造部材に関する研究 (その 1) ～ (その 8)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 2004～2008
- 14) 金城仁, 遊佐秀逸, 他, 「標準火災加熱を受けたカラマツ集成材梁の放冷過程における挙動」, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻, 第 711 号, pp.831-840, 2015/5
- 15) 蛇石貴宏, 茶谷友希子, 他, 「木材の耐火性に関する研究 (その 1) ～ (その 4)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 2018～2019
- 16) W.G.Weng, Y.Hasemi, W.C.Fan, “Predicting the pyrolysis of wood considering char oxidation under different ambient oxygen concentrations”, *Combustion and Flame*, Vol.145, Issue 4, pp.723-729, 2006/6, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.12.016>
- 17) R.Emberley, T.Do, J.Yim, J.L.Torero, “Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber”, *Fire Safety Journal*, Vol.91, pp.252-258, 2017/7, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.008>
- 18) A.Sun, K.Harada, D.Nii, “Numerical model investigating heat and mass transfer of wood during the heating and cooling period of fire”, *International Journal of Fire Science and Engineering*, Vol.39, No.1, pp.28-44, 2025/3, <https://doi.org/10.7731/kifse.f03f9a8c>
- 19) 原田和典, 「数値計算プログラムを活用した耐火性能評価手法」, 2023 年度日本建築学会 (近畿) 防火部門パネルディスカッション 木質部材の耐火性能評価技術の今を知る, pp. 39-47, 2023 年 9 月

第 1 部

火災加熱後の冷却中における集成材炭化層の
赤熱反応停止条件の解明と赤熱反応速度式の作成

第2章 木材の燃焼と燃え止まり

2.1 木材の燃焼

木材の燃焼は大きく3段階の反応に分けられる。水分の蒸発、セルロース等の熱分解(炭化)、炭の酸化(赤熱)である。図2-1に火災時の木材の燃焼過程のイメージ図を示す。

木材が外部から火災加熱を受けると、最初に100℃付近で木材中に含まれている水分が蒸発する。さらに加熱を受けて木材の温度が上昇すると、木材の90%以上を構成する主成分であるセルロース、ヘミセルロース、リグニンが熱分解して炭に変化する。木材の熱分解が開始する温度は一般に木分の熱重量分析の結果から250～260℃と言われているが、板材で測定すると樹種や密度、木取り(年輪の向き)によって異なることが今福ら¹⁾により報告されている。例えば、スギ、カラマツ、ヒノキ等の樹種の中では、スギが最も熱分解開始温度が低く250～270℃である一方、カラマツの熱分解開始温度は270～290℃である。熱分解反応において、セルロース等が炭化する過程でメタンやエタン等の可燃性ガスが発生する。これらの可燃性ガスは炭化層の中を通過して木材表面から噴出し、外部からの火災により引火して有炎燃焼する。熱分解が完了した時点の温度や質量残存率も樹種や密度、木取りによって異なり、孫ら²⁾によると、熱分解完了温度は368～389℃(例えば、カラマツ(密度490kg/m³)は389℃、スギ辺材(密度330kg/m³)は368℃)、質量残存率は、水分蒸発がおよそ完了している110℃の時の質量を1としたとき、0.24～0.42(例えば、カラマツ(密度490kg/m³)は0.246、スギ辺材(密度330kg/m³)は0.289)である。杉田ら³⁾による測定では、熱分解完了時の質量残存率は、カラマツ(密度510～522 kg/m³)、スギ(密度359～386 kg/m³)共に約0.378であった。

セルロース等の揮発性成分が熱分解すると、木材は収縮して亀裂が発生する。収縮率は、収縮係数を用いて転化率(=1-質量残存率)の二次関数となることがDavidssonら⁴⁾により報告されている。収縮係数の値は樹種や年輪との位置関係によって異なり、孫ら⁵⁾によると、年輪の半径方向、年輪の接線方向、材軸方向について、カラマツではそれぞれ0.72、0.69、0.22、スギではそれぞれ0.58、0.69、0.13である。

熱分解により生成した炭は、さらに外部からの加熱を受けて高温になると、赤熱反応を発生して焼失する。赤熱反応は炭が酸素と結合して二酸化炭素や一酸化炭素に変わる固相酸化反応であり、発熱を伴う。赤熱反応が開始する温度は、Swannら⁶⁾によりカエデの合板で約400℃という値が報告されている。筆者ら⁷⁾はカラマツの集成材について測定を行い、赤熱開始温度は366～487℃であることを確認している。赤熱反応に伴う発熱量は炭素が完全燃焼すると32.8MJ/kgであるが、木材の表面に生成された炭は炭素のみで構成されておらず、また、一酸化炭素への不完全燃焼等を含むため、様々な値が報告されている。柏木ら⁸⁾によるとセルロース紙から生成した粉末の炭の燃焼熱は約25MJ/kg、MacLeodら⁹⁾によるとヨーロッパアンホワイトウッド(スプルース)の炭の燃焼熱は約21MJ/kgである。カラマツやスギの集成材から生成された炭の燃焼熱の報告は確認されていない。

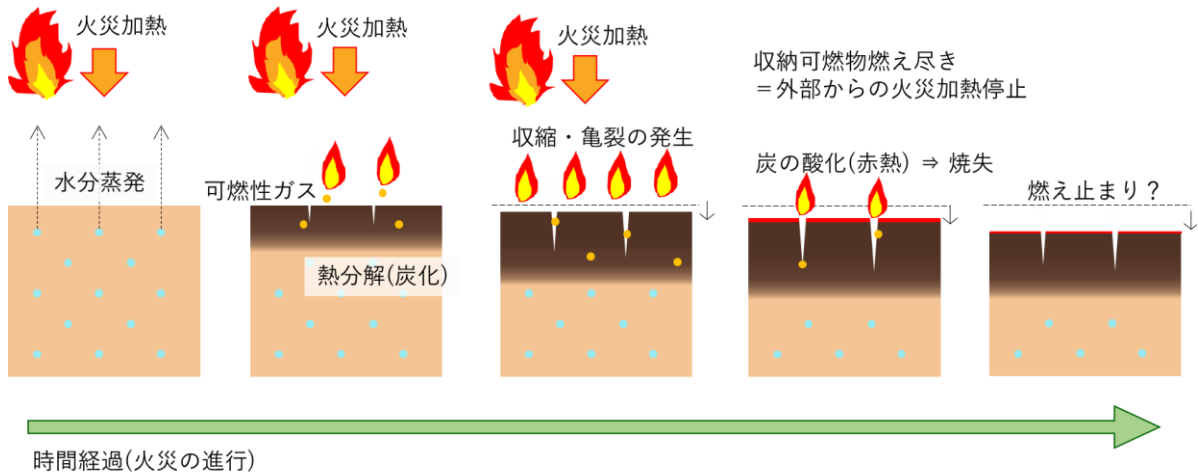


図 2-1 火災時の木材の燃焼

2.2 火災後の燃え止まり

柱や梁といった木質構造部材の表面が木材の現わしになっている室における火災を考える。収納可燃物から発火し火炎が発生すると、前述のように木材は水分蒸発、熱分解し、部材表面に炭化層が生成される。炭は木材と比較して熱伝導率が小さいため、ある程度の厚みの炭化層が生成されると炭が断熱層となり、部材内部への熱伝導は緩やかとなる。炭化層の表面は赤熱し焼失するが、有炎燃焼が発生している状況においては、先に可燃性ガスが酸素を消費するため、赤熱反応は発生しづらい。

室内の収納可燃物が燃え尽きて外部からの火災加熱が無くなると、周辺雰囲気温度低下に伴い木材内部の温度はゆっくりと低下する。熱分解が緩やかになり可燃性ガスの発生量が少なくなると、有炎燃焼が停止する。有炎燃焼の停止条件については、様々な報告がある。Bartlett ら¹⁰⁾によると、針葉樹の直交集成材(Cross Laminated Timber、以降 CLT と呼ぶ)は入射熱 31kW/m^2 、質量減少速度 $3.5\text{g/m}^2\text{s}$ で有炎燃焼を停止する。スプルース CLT については、Emberley ら¹¹⁾によると入射熱 $43.6 \pm 4.7\text{kW/m}^2$ 、質量減少速度 $3.93 \pm 0.45\text{g/m}^2\text{s}$ で有炎燃焼を停止し、Terrei ら¹²⁾によると有炎燃焼の停止は $44 \sim 51\text{kW/m}^2$ で発生し、そのときの質量減少速度は $3.95\text{g/m}^2\text{s}$ であり、この値は加熱時間や入射熱にほとんど依存しない。Crielaard ら¹³⁾によると入射熱 75kW/m^2 では有炎燃焼が続くが 10kW/m^2 では停止する。Cuevas ら¹⁴⁾によると CLT の有炎燃焼の停止条件は入射熱 30kW/m^2 、質量減少速度 $3.6\text{g/m}^2\text{s}$ である。さらに、有炎燃焼の停止条件に対する酸素濃度の影響も調査し、酸素濃度 19% と 17% において、有炎燃焼が停止する限界の質量減少速度はそれぞれ $3.7\text{g/m}^2\text{s}$ と $3.8\text{g/m}^2\text{s}$ に増加することを報告している。

有炎燃焼が停止すると可燃性ガスによる酸素の消費が無くなるため、炭の酸化反応である赤熱反応が活発となる。赤熱反応は大きな発熱を伴う反応であるため、赤熱による発熱と、雰囲気温度が低下することによる放射・対流による冷却効果の熱収支のバランスにより、赤熱反応が継続するか、停止するかが決定する。冷却効果の方が大きくなり、赤熱反応が停止することを「燃え止まり」と呼ぶ。燃え止まり条件について調査された例は多くない。Crielaard ら¹³⁾は、

スプルー ス CLT の赤熱反応は入射熱 6kW/m^2 で停止すると報告した。筆者ら⁷⁾は、カラマツ集成材の赤熱反応を測定し、加熱強度 0kW/m^2 では試験体表面温度 166°C で燃え止まったが、加熱強度 8.7kW/m^2 では試験体表面温度 360°C よりも下がらず燃え止まらなかったことを報告している。しかしながら、いずれも特定の条件における測定データであり、普遍性のある定式化には到っていない。

前述のとおり赤熱反応は炭の酸化反応であるため、炭化層表面への酸素の供給量は赤熱反応性状に大きな影響を与える。赤熱反応をより詳細に理解するためには、炭化層表面に発生する気流速度（酸素の供給頻度）や、炭化層表面に接する空気の酸素濃度が、赤熱反応性状に与える影響を把握する必要がある。有炎燃焼の停止に対する表面気流の影響については、Arnórsson ら¹⁵⁾により、有炎燃焼の停止条件となる質量減少速度は、表面気流の流速の二乗の関数となることが報告されている一方、赤熱反応の停止に対する表面気流の影響については、Crielaard ら¹³⁾は、入射熱 6kW/m^2 のとき、スプルー ス CLT の赤熱反応は、表面気流 0.5m/s では停止し、 1.0m/s では停止しなかったことを報告しているが、これらは試験体数が 1 つのみの測定結果であり、定式化するには不十分である。赤熱反応の停止に対する酸素濃度の影響については、Richter ら¹⁶⁾により、パーティクルボードは入射熱 30kW/m^2 のとき、酸素濃度 15% で有炎燃焼を、酸素濃度 4% で赤熱反応を停止し、これらの酸素濃度の閾値は入射熱が増加するにつれて減少すると報告しているが、こちらも定式化には至っていない。

2.3 木質耐火部材の燃え止まり性能

第 1 章で述べたように、木質耐火部材は、消防隊や消防設備等による消火を受けずとも木質部材自身で自己燃焼を停止する、つまり「燃え止まる」性能が求められる。木質部材の燃え止まり性能は、耐火炉を用いた加熱実験によって確かめられる。その部材が用いられる空間の用途や規模等に応じて定められた火災継続時間に応じて、火災加熱を模してガスバーナーで木質部材を加熱し、その後、常温に戻るまで放冷され、その間に「燃え止まる」かどうか調べられる。実火災において、木質耐火部材周辺の高温になった床や壁等からの放射熱を受けながら、雰囲気温度の低下に伴い燃え止まる状況は、耐火炉の床や壁からの放射熱で再現される。しかしながら、部材の燃え止まり性能は 1 例ずつ部材実験により確かめられている状態で、そのメカニズムの解明は 2.2 節で述べたようにまだ課題が残っている。

第 1 部では、実火災の収納可燃物が燃え尽きた後や、耐火実験の放冷中における、木質耐火部材の燃え止まりが発生し得る状況を、材料実験で再現しながら、赤熱反応性状や燃え止まり条件の定量化、定式化を目指す。既往研究により、木材の燃焼性状は樹種の影響を受けることが分かっているが、本研究では、日本の国産材で木質耐火部材に多く使われているカラマツを主な測定対象として、比較としてスギの測定も一部条件において実施した。

燃え止まりメカニズム（赤熱反応性状や燃え止まり条件）を解明することで、多様な木質耐火部材の開発に寄与することはもちろん、木材の燃焼を数値計算により予測することが可能となり、木質耐火部材や木質空間の火災安全性の検討に大きく寄与することが期待できる。

[第2章の参考文献]

- ¹⁾ 今福康平, 小宮祐人, 他, 「樹種・密度が炭化のしやすさへ及ぼす影響に関する実験的検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.243-244, 2021 年 9 月
- ²⁾ 孫安陽, 原田和典, 他, 「各種木材の熱分解速度の測定と反応速度パラメータの推定」, 日本火災学会論文集, 第 71 巻, 第 2 号, pp.25-36, 2021 年 9 月,
https://doi.org/10.11196/kasai.71.2_25
- ³⁾ 杉田敬太郎, 大橋宏和, 他, 「各種木材の示差熱分析による熱分解性状に関する検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.807-808, 2014 年 9 月
- ⁴⁾ K.O. Davidsson, J.B.C. Pettersson, "Birch wood particle shrinkage during rapid pyrolysis", *Fuel*, Vol.81, Issue.3, pp.263-270, 2002/2, [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00169-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00169-7)
- ⁵⁾ 孫安陽, 原田和典, 他, 「カラマツとスギの定温加熱による収縮量測定」, 日本建築学会近畿支部研究報告集 (環境系), pp.97-100, 2021 年 6 月
- ⁶⁾ J. Swann, J. Hartman, C. Beyler, "Study of Radiant Smoldering Ignition of Plywood Subjected to Prolonged Heating Using the Cone Calorimeter, TGA and DSC", *Fire Safety Science – Proceedings of the ninth International Symposium*, pp.155-160, 2008, <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-155>
- ⁷⁾ 茶谷友希子, 原田和典, 他, 「カラマツ集成材の火災加熱後における炭化層の赤熱反応速度の測定」, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 736 号, pp.491-499, 2017 年 6 月,
<http://doi.org/10.3130/aije.82.491>
- ⁸⁾ T. Kashiwagi, H. Nambu, "Global Kinetic Constants for Thermal Oxidative Degradation of a Cellulosic Paper", *Combustion and Flame*, Vol.88, Issues.3-4, pp.345-368, 1992/3,
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(92\)90039-R](https://doi.org/10.1016/0010-2180(92)90039-R)
- ⁹⁾ C.E. Macleod, Angus Law, R.M. Hadden, "Quantifying the heat release from char oxidation in timber", *Fire Safety Journal*, Vol.138, 103793, 2023/6, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103793>
- ¹⁰⁾ A. Bartlett, R. Hadden, etc., "Auto-extinction of engineered timber as a design methodology", *World Conference on Timber Engineering e-book*, pp.3902-3909, 2016
- ¹¹⁾ R. Emberley, Tam Do, etc., "Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber", *Fire Safety Journal*, Vol.91, pp.252-258, 2017/7,
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.008>
- ¹²⁾ L. Terrei, Z. Acem, "Study of wood self-extinguishment with a double sliding cone calorimeter", *Fire Safety Journal*, Vol.122, 103316, 2021/6, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103316>
- ¹³⁾ R. Crielaard, Jan-Willem van de Kuilen, etc., "Self-extinguishment of cross-laminated timber", *Fire Safety Journal*, Vol.105, pp.244-260, 2019/4, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.008>
- ¹⁴⁾ J. Cuevas, J.L. Torero, C. Maluk, "Flame extinction and burning behaviour of timber under varied oxygen concentrations", *Fire Safety Journal*, Vol.120, 103087, 2021/3,
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103087>
- ¹⁵⁾ S.M. Arnorsson, R.M. Hadden, A. Law, "The Variability of Critical Mass Loss Rate at Auto-Extinction", *Fire Technology*, Vol.57, pp.233-246, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01002-z>
- ¹⁶⁾ F. Richter, F.X. Jervis, etc., "Effect of Oxygen on the Burning Rate of Wood", *Combustion and Flame*, Vol.234, 111591, 2021/12, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111591>

第3章 通常雰囲気における集成材の赤熱反応

第3章～第5章では、カラマツ集成材とスギ集成材の赤熱反応の反応速度と停止条件を解明するために、材料実験を実施した。赤熱反応性状には雰囲気空気の気流速度や酸素濃度が影響するが、第3章では最初に、酸素濃度や表面気流を強制的に変化させていない通常の雰囲気条件下において測定を行い、基本となる赤熱反応速度式や赤熱反応の停止条件を求めた。

なお、本章の一部は、文献 8)～12)で発表済の内容をもとに書き改めたものである。

3.1 実験の目的

火災後の柱や梁等の木質部材が周囲の高温の壁や床等からの放射熱を受ける状況を想定し、コーンカロリメータ¹⁾による一定の放射加熱強度での集成材の加熱実験を行う。加熱強度 4.2～24.0kW/m² でそれぞれ実験を行い、炭化層の赤熱反応の燃焼性状を観察し、燃焼速度（質量減少速度）や表面温度を測定する。測定した結果から、炭化層の赤熱反応速度式と、赤熱反応の停止条件（燃え止まり条件）を定量化することが目的である。この実験で得られた結果を、第2部で燃え止まり予測プログラムへ適用して解析を行い、予測精度の検証を行う。

3.2 実験の方法

3.2.1 実験装置

実験装置の概要を図 3.2- 1 に、状況写真を図 3.2- 2 に示す。試験体をコーンヒーターで放射加熱し、コーンカロリメータに付属の電気スパークを用いて着火する。加熱開始から 350 秒に到っても電気スパークにより着火しなかった場合、表面が十分に炭化していることを確認して、360 秒にガスライターを用いて接炎させて強制的に点火する。また、試験体の着火限界熱流束を下回る加熱強度における赤熱反応の測定を目的とする実験では、加熱強度 15kW/m² 以上（表 3.2-2 の Period 1 を参照）で着火、炭化させた後に、試験体に入射する加熱強度を目標の値（表 3.2-2 の Period 2 を参照）に低減させた。測定中に加熱強度を低減させるにあたり、ヒーターの温度を急に変化させることは出来ないため、ヒーターの温度は測定中を通じて一定に保った上で、試験体とヒーターの間の距離を遠ざける方法か、試験体とヒーターの間にステンレス網を挿入する方法、あるいはその両方の組み合わせによる方法を、Period 1 と Period 2 の目標加熱強度に応じて適切に選択した。試験体とヒーター間の距離については、土橋ら²⁾による研究を参考に、加熱面寸法が 50×50mm² の場合に試験体表面が均一に加熱される 25～60mm の範囲内で選択した。ステンレス網は、透過率が約 0.53 と約 0.38 のものから選択した。図 3.2-2 に示すように、試験体の周囲にフレームを組んでステンレス網を載せる台を作成した。

実験中を通じて、質量減少速度（ロードセル）、表面温度（赤外線カメラ）の経過を連続的に測定する。また、ビデオカメラで燃焼の様子を記録する。なお、コーンカロリメータに付属のガス分析機能を用いて酸素消費法により発熱速度を算出することが出来るが、本研究で実施した実験条件では十分な量の煙を収集することが出来なかったため、実験結果として採用していない。実験終了後には、試験体を切断し、断面から焼失深さや炭化深さを測定する。実験に用いた測定機器の概要を表 3.2- 1 に示す。

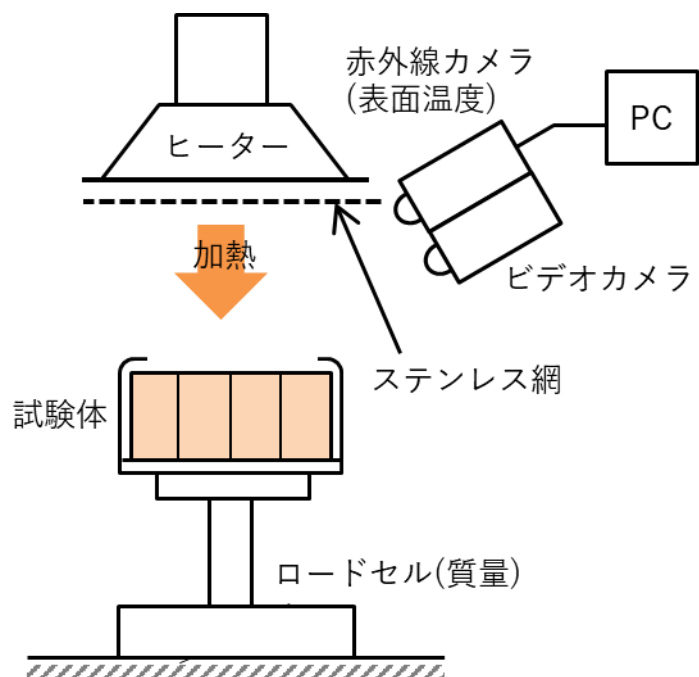


図 3.2-1 実験装置の概略図



図 3.2-2 実験装置の状況写真

表 3.2-1 測定機器の概要

器具	名称、性能等
コーンカロリメータ	Cone Calorimeter, 東洋精器製作所, ISO5660-1
コーンヒーター	容量 5kW (AC200V)
ロードセル	分解能 0.1g
赤外線カメラ	FLIR E85 画素数 384×288 pixel 測定温度範囲-20～1200℃, 温度分解能 0.03℃
ビデオカメラ	JVC Everio GZ-R300 動画有効画素数 229 万画素

3.2.2 試験体

試験体は、加熱面が約 100×100mm もしくは約 50×50mm、厚さ約 50mm の集成材である。樹種はカラマツおよびスギの 2 種類とした。国産材で構造材に用いられる樹種の中で、カラマツは燃え止まり易く、スギは燃え止まりにくいことが知られていることから、本研究ではカラマツとスギの赤熱反応性状を比較する。木材には異方性があるが、試験体の年輪方向が赤熱反応性状に与える影響は、既往研究³⁾において有意な差が見られなかったことから、1 体 (No.14_L-8.8m) をのぞく全ての試験体で板目面を加熱面とした。試験体の写真を図 3.2- 3 に示す。試験体の側面及び裏面はセラミックファイバーで覆って断熱し、一面のみを加熱した。表 3.2- 2 に全 47 回の実験の試験体の樹種、寸法および物性値を示す。

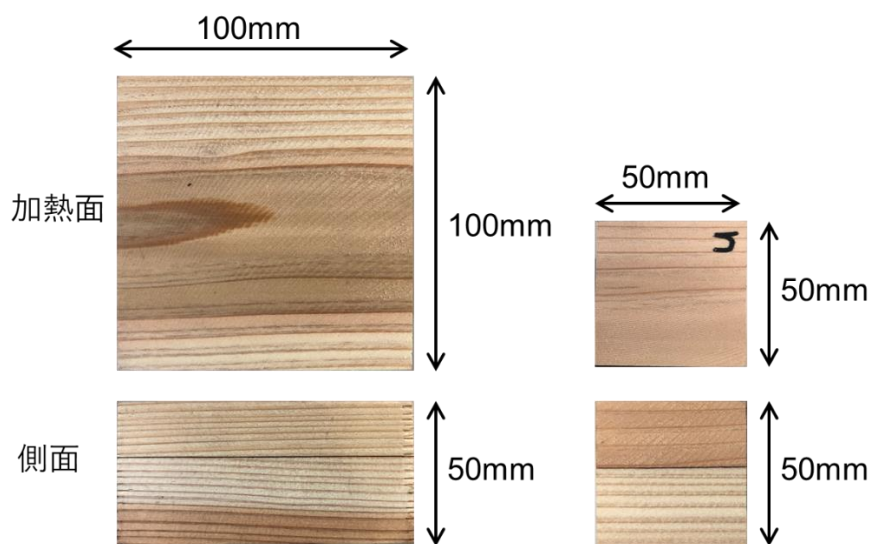


図 3.2- 3 試験体

3.2.3 実験条件

表 3.2- 2 に全 47 回の実験の加熱条件を併せて示す。加熱強度は最小 4.2kW/m^2 から最大 24.0kW/m^2 の間で段階的に設定した。各実験で試験体を炭化させる強い加熱強度の Period1 と、燃え止まりに近い弱い加熱強度の Period2 の 2 種類の加熱強度を設定している。特に、燃え止まりの境界条件となる加熱強度（カラマツの 8.8kW/m^2 とスギの 6.0kW/m^2 ）付近では再現性の確認のために、同条件で複数回測定を実施した。

表 3.2-2 試験体初期物性値と実験条件

実験 No.	樹種	試験体			加熱強度[kW/m ²]		測定スケジュール[s]		
		加熱面[mm ²]	寸法 厚さ[mm]	密度[kg/m ³]	含水率[%]	Period 1	Period 2	点火	加熱強度変更
1 L-7.6	カラマツ	49×49	49	488.7	14.1	19.0	7.6	360	1440～1560
2 Lf-7.9-1*1		48×47	48	529.8	12.0	19.0	7.9	360	1080～1260
3 Lf-7.9-2		48×47	48	499.4	11.3	19.0	7.9	360	1070～1260
4 L-8.0-1		98.7×98.7	50.4	425.7	9.6	20.0	8.0	360	840～960
5 L-8.0-2		98.7×98.7	50.4	429.8	11.1	20.0	8.0	360	1440～1560
6 L-8.0-3		49×49	48	488.6	15.0	20.0	8.0	360	1440～1560
7 L-8.4		98.7×98.7	50.4	466.4	11.4	21.0	8.4	360	1440～1560
8 L-8.6		49×48	50	487.7	15.5	21.0	8.6	360	1440～1560
9 L-8.8-1		62×56	60	578.4	14.9	17.0	8.8	360	1560
10 L-8.8-2		61×55	60	619.2	15.2	17.0	8.8	360	1560
11 L-8.8-3		62×56	60	633.8	15.2	17.0	8.8	360	1560
12 Lf-8.8-4		48×48	47	489.1	10.1	17.0	8.8	360	1260
13 Lf-8.8-5		48×47	49	441.5	9.5	17.0	8.8	360	1560
14 L-8.8-m*2		98.7×98.7	50.0	464.6	13.2	21.0	8.8	360	1440～1560
15 L-9.0		98.7×98.7	50.0	457.8	11.8	22.0	9.0	360	1440～1560
16 L-9.3		98.7×98.7	50.0	444.0	10.7	22.0	9.3	360	1440～1560
17 L-9.8		48×47	50	497.6	14.3	23.0	9.8	360	1380～1500
18 L-12.4-1		60×56	60	610.5	14.8	24.0	12.4	360	1260
19 L-12.4-2		62×53	60	591.3	13.2	24.0	12.4	360	1260
20 L-12.4-3		62×55	60	662.8	15.1	24.0	12.4	360	1260
21 Lf-12.7-1		50×48	47	500.1	11.5	24.0	12.7	360	1080
22 Lf-12.7-2		48×48	47	469.3	11.6	24.0	12.7	360	1090
23 Cf-4.2-1	スギ	50×48	50	351.7	9.9	16.0	4.2	360	1260
24 Cf-4.2-2		48×48	48	480.6	12.0	16.0	4.2	360	1200

実験 No.	樹種	試験体				加熱強度[kW/m ²]		測定スケジュール[s]		
		寸法		密度[kg/m ³]	含水率[%]	Period 1	Period 2	点火	加熱強度変更	実験終了
		加熱面[mm ²]	厚さ[mm]							
25	C-4.4	50×49	45	425.8	14.6	16.0	4.4	360	1550	2760
26	C-6.0-1	50×47	46	390.7	12.3	16.0	6.0	360	1245	3060
27	C-6.0-2	50×50	47	368.2	10.9	16.0	6.0	360	1250	2460
28	C-6.0-3	50×49	50	364.2	11.3	16.0	6.0	360	1250	3060
29	C-6.0-4	50×48	47	369.5	11.3	20.8	6.0	360	1410～1560	2760
30	C-6.0-5	48×48	47	333.1	9.2	20.8	6.0	360	1140～1260	2460
31	C-6.0-6	48×48	49	333.1	8.5	20.8	6.0	360	1140～1260	2460
32	C-6.0-7	50×48	45	420.6	11.7	21.0	6.0	360	1140～1260	2460
33	C-6.0-8	98.7×98.7	48.0	356.8	10.3	21.0	6.0	360	1140～1260	2760
34	Cf-6.0-9	50×50	50	360.6	11.0	16.0	6.0	360	1260	3060
35	Cf-6.0-10	50×50	50	372.0	10.6	16.0	6.0	360	1260	3060
36	Cf-6.0-11	47×47	46	371.6	9.5	16.0	6.0	360	1260	3060
37	Cf-6.0-12	48×48	48	361.5	9.0	16.0	6.0	360	1260	3060
38	C-6.8-1	48×48	48	364.9	10.4	18.0	6.8	360	1560	2760
39	C-6.8-2	49×49	48	386.6	11.8	18.0	6.8	360	1560	2760
40	C-7.0	48×48	48	383.8	10.9	18.0	7.0	360	1440～1560	2760
41	C-7.5	48×48	49	360.3	9.4	20.0	7.5	360	1560	2460
42	C-7.6-1	98.7×98.7	50.0	342.0	10.4	19.0	7.6	360	1440～1560	2760
43	C-7.6-2	48×48	48	380.5	11.1	19.0	7.6	360	1440～1560	2760
44	Cf-7.9-1	48×48	48	380.0	11.4	15.0	7.9	360	1260	3060
45	Cf-7.9-2	48×48	48	368.9	10.1	15.0	7.9	360	1260	3060
46	C-8.6	98.7×98.7	50.0	359.8	11.2	21.0	8.6	360	1380～1500	2700
47	Cf-8.8	48×48	48	391.3	11.8	17.0	8.8	360	1260	3060

*1“f”記号付は第4章で示す強制的に表面気流を発生させる試験のうち、表面気流を発生させていない期間の測定値を抜粋して本表に記載している。

*2“m”記号付のみ加熱面が楕円となる向きで試験を行った。

3.3 代表的な実験結果

本節では、全 47 回の実験のうち、代表的な実験結果 4 つを取り上げて示す。全ての実験結果の代表値は表 3.3- 1 に、実験結果の詳細は付録 1 にまとめて掲載する。

3.3.1 カラマツの燃え止まった実験

樹種がカラマツで、燃え止まった実験の例として No.7_L-8.4 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 3.3- 1 に示す。加熱強度 21.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で、試験体表面が十分に炭化していることを確認してガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になり、650 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1440 秒にヒーターと試験体間の距離を 25mm から 60mm に遠ざけ、かつヒーターと試験体の間に透過率 0.53 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 8.4kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱燃焼は徐々に弱くなり、最終的に、赤熱反応により赤く発光する様子も発煙も目視では確認出来なくなった。3600 秒においても再燃焼する兆候は見られなかったため、赤熱反応は停止し燃え止まったと判断して測定を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 3.3- 2 に示す。360 秒に着火すると質量減少速度は急激に大きくなるが、すぐにピーク値を迎えて低下し、650 秒に消炎すると時間的な変化は少なくなり一定値に落ち着く。このとき (900~1400 秒) の質量減少速度の平均値を Period1 の加熱強度 21.0kW/m^2 における質量減少速度とすると、その値は $3.27 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ となる。1440 秒に加熱強度を低減すると質量減少速度は低下し、2400 秒頃以降には質量減少速度は非常に小さくなり 0 に近い値となる。このとき (2400~3500 秒) の質量減少速度の平均値を Period2 の加熱強度 8.4kW/m^2 における質量減少速度とすると、その値は $0.12 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ となる。

表面温度の時間変化を図 3.3- 3 に示す。実験装置の都合上 (Period1 は試験体とヒーター間の距離を 25mm としていたが、この時、サーモカメラにより試験体表面温度を測定することが物理的に困難であった)、Period1 の期間は表面温度を測定出来なかった。ここで、表面温度は試験体表面全体の温度の平均値を示している。1440 秒に加熱強度を低減すると表面温度は低下し、2400 秒以降はほぼ一定となり、赤熱反応が終了している (赤熱反応による発熱が生じていない) ことが温度からも判定できる。Period2 の表面温度の平均値は 286.2°C である。

図 3.3- 4 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における焼失深さと炭化深さはそれぞれ、6mm と 17mm であった。

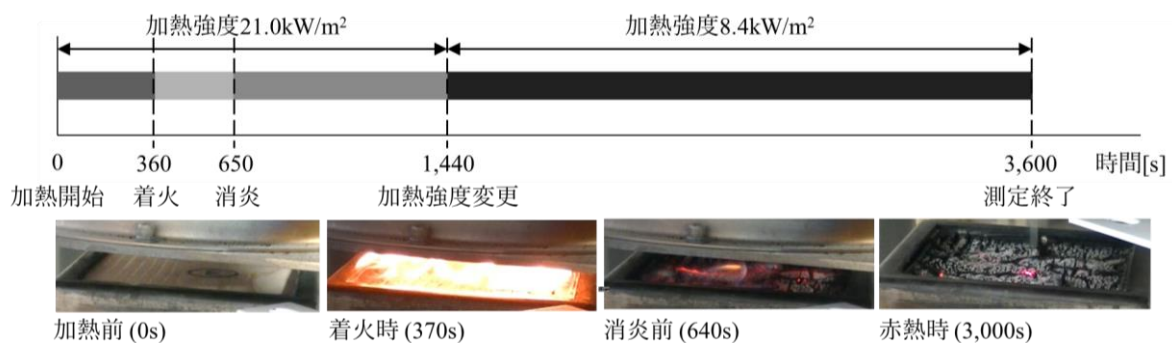


図 3.3- 1 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.7_L-8.4)

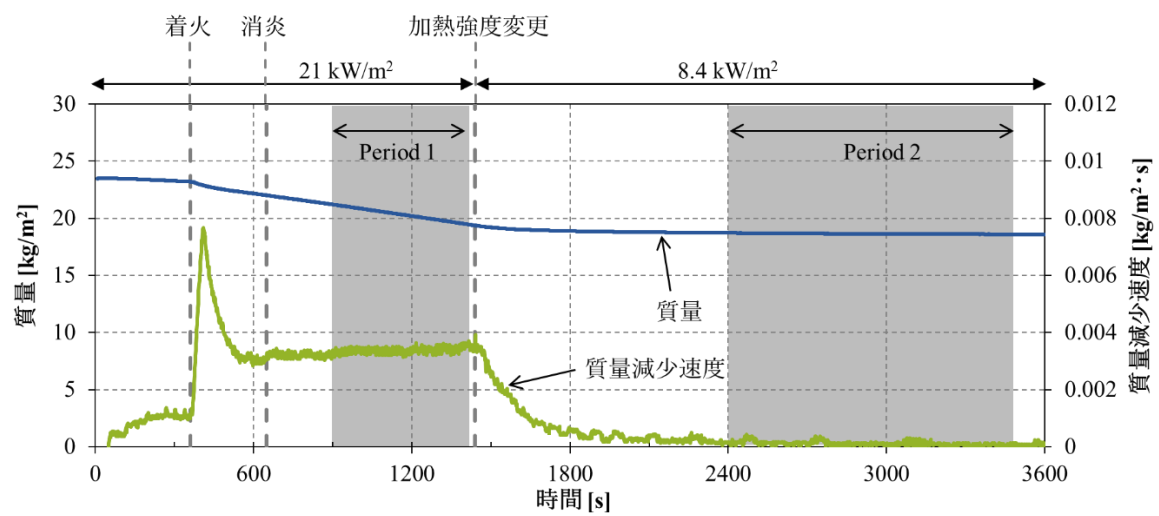


図 3.3-2 質量と質量減少速度の時間変化 (No.7_L-8.4)

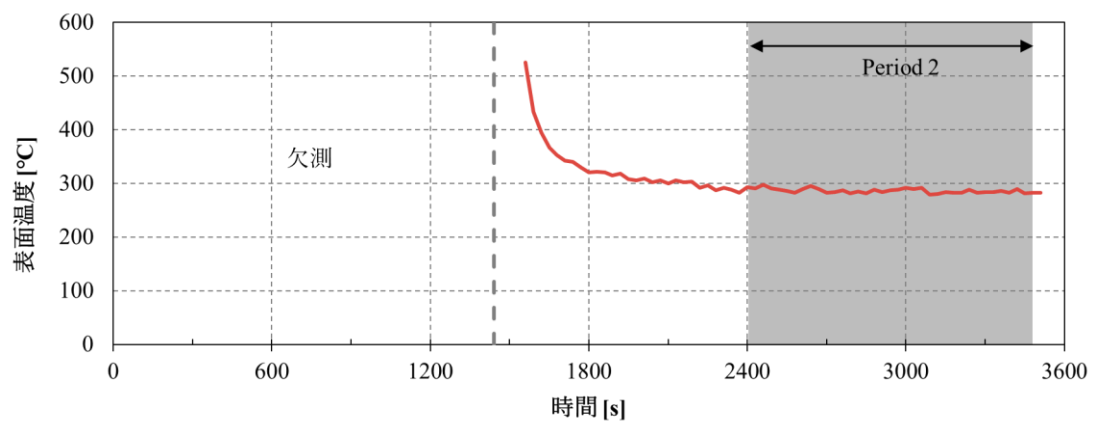


図 3.3-3 表面温度の時間変化 (No.7_L-8.4)

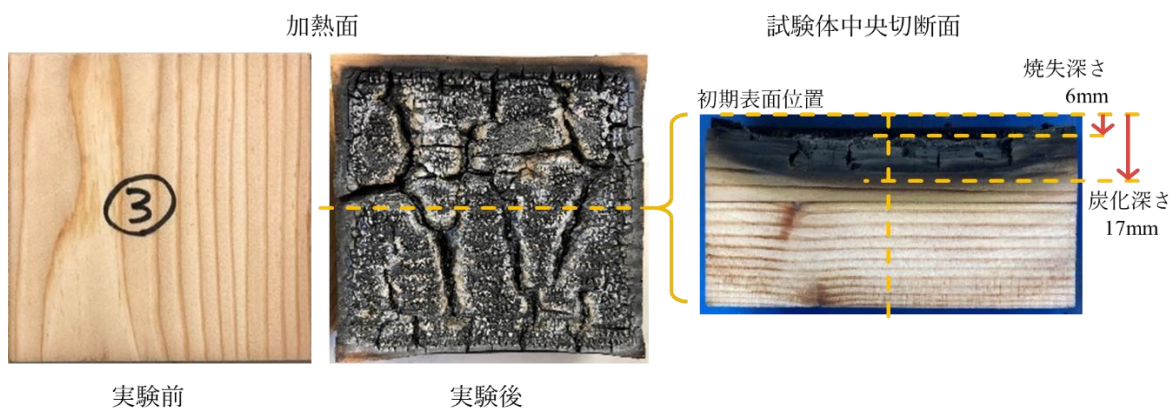


図 3.3-4 試験体の表面と切断面 (No.7_L-8.4)

3.3.2 カラマツの燃え止まらなかった実験

樹種がカラマツで、燃え止まらなかった実験の例として No.18_L-12.4-1 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 3.3- 5 に示す。加熱強度 24.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で、試験体表面が十分に炭化していることを確認してガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になり、760 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1260 秒にヒーターと試験体の間に透過率 0.53 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 12.4kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱反応や発煙は徐々に緩やかになったが、停止することなく継続した。30 分以上加熱を継続しても赤熱反応が停止しなかったため、燃え止まらなと判断して測定を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 3.3- 6 に、表面温度の時間変化を図 3.3- 7 に示す。340 秒に着火すると質量減少速度は急激に大きくなるが、すぐにピーク値を迎えて低下し、760 秒に消炎すると時間的な変化は少なくなり一定値に落ち着く。表面温度も 340 秒で急上昇するが、すぐに緩やかな上昇速度となり一定値に落ち着く。このとき (900～1200 秒) の質量減少速度および表面温度の平均値を Period1 の加熱強度 24.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、その値はそれぞれ $5.47 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 634.9°C となる。1260 秒に加熱強度を低減すると質量減少速度と表面温度はどちらも低下するが、加熱を続けると徐々に上昇する。表面温度は 2400 秒頃以降は一定値に落ち着く。このとき (2400～3000 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period2 の加熱強度 12.4kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、それぞれ $2.41 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ および 501.8°C である。3060 秒時点で、質量減少速度および表面温度の値が約 10 分間一定値を保っていたことから、これ以上加熱を続けても燃え止まらなと判断した。

図 3.3- 8 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における焼失深さと炭化深さはそれぞれ、9mm と 21mm であった。

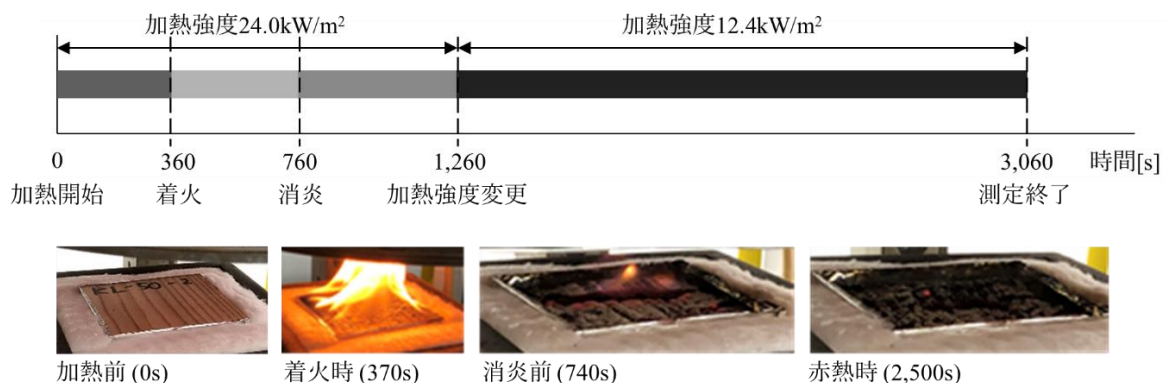


図 3.3- 5 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.18_L-12.4-1)

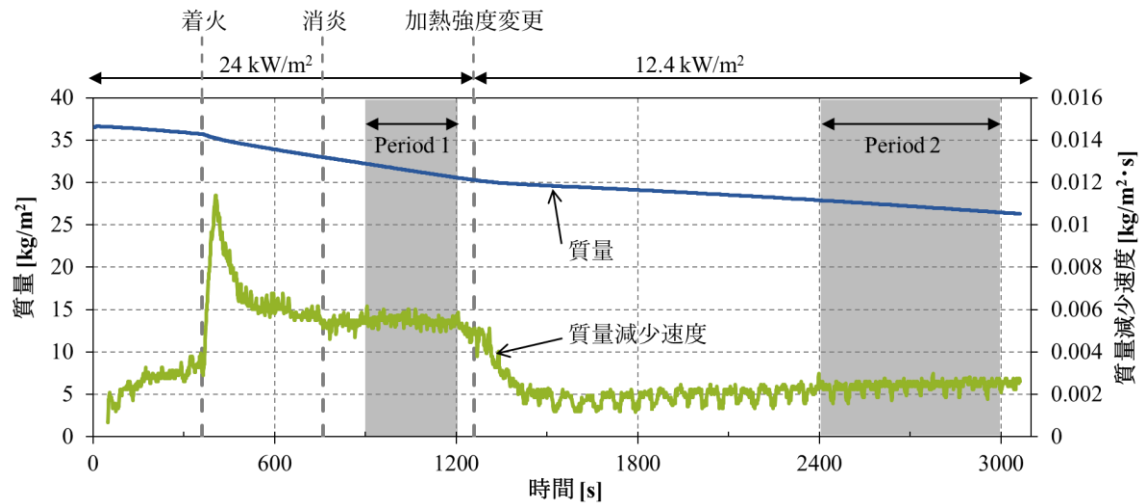


図 3.3-6 質量と質量減少速度の時間変化 (No.18_L-12.4-1)

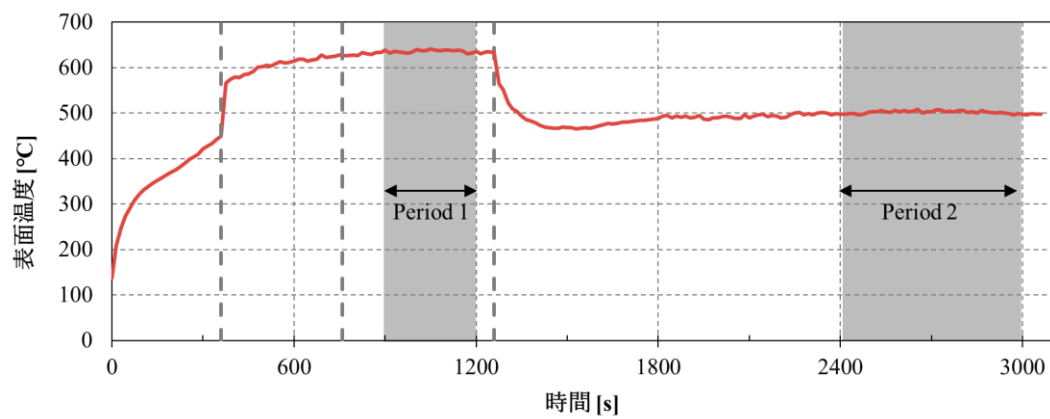


図 3.3-7 表面温度の時間変化 (No.18_L-12.4-1)

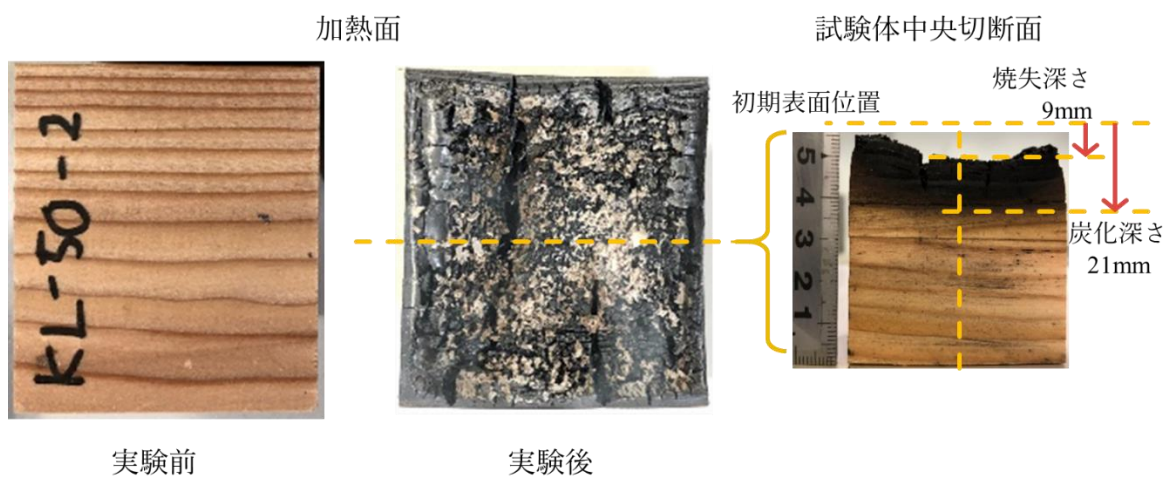


図 3.3-8 試験体の表面と切断面 (No.18_L-12.4-1)

3.3.3 スギの燃え止まった実験

樹種がスギで、燃え止まった実験の例として No.25_C-4.4 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 3.3- 9 に示す。加熱強度 16.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で試験体表面が十分に炭化していることを確認して、ガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になり、665 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1550 秒に、ヒーターと試験体の間に透過率 0.38 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 4.4kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱燃焼は徐々に弱くなり、最終的に赤熱反応により赤く発光する様子も発煙も目視では確認出来なくなった。2760 秒においても再燃焼する兆候は見られなかったため、赤熱反応は停止し燃え止まったと判断して測定を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 3.3- 10 に、表面温度の時間変化を図 3.3- 11 に示す。360 秒に着火すると質量減少速度は急激に大きくなるが、すぐにピーク値を迎えて低下し、665 秒に消炎すると時間的な変化は少なくなり一定値に落ち着く。表面温度も 360 秒で急上昇するが、すぐに緩やかな上昇速度となり一定値に落ち着く。このとき (900~1400 秒) の質量減少速度および表面温度の平均値を Period1 の加熱強度 16.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、その値はそれぞれ $3.89 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 522.4°C である。1550 秒に加熱強度を低減すると、質量減少速度と表面温度はどちらも低下する。2400 秒頃以降は質量減少速度はほぼ 0 となり、表面温度は一定値となる。このとき (2400~2700 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period2 の加熱強度 4.4kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、それぞれ $0.06 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ および 221.7°C となる。なお、質量減少速度が周期的に増加と減少を繰り返している明確な原因は不明であるが、試験体サイズが小さく軽いために、ロードセルが周辺環境からの振動の影響を受けてしまっている可能性がある。本論文では時間的な平均値をとることでその影響を無視できるものとした。

図 3.3- 12 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における焼失深さと炭化深さはそれぞれ、6mm と 16mm であった。

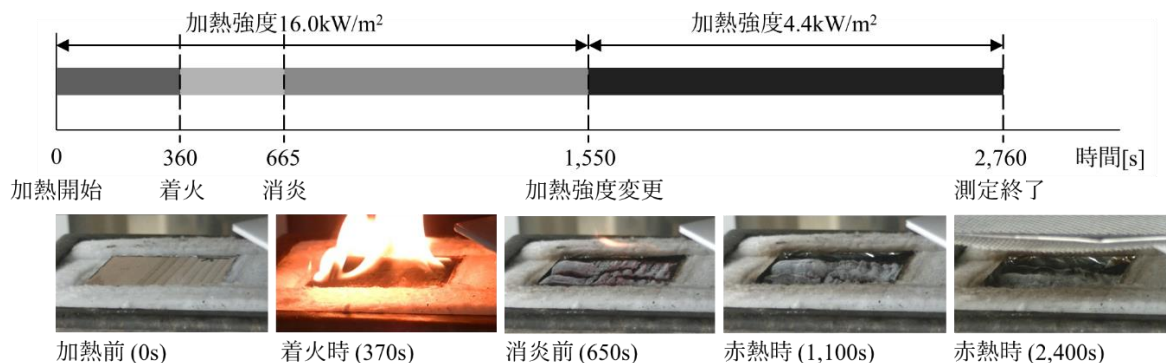


図 3.3- 9 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.25_C-4.4)

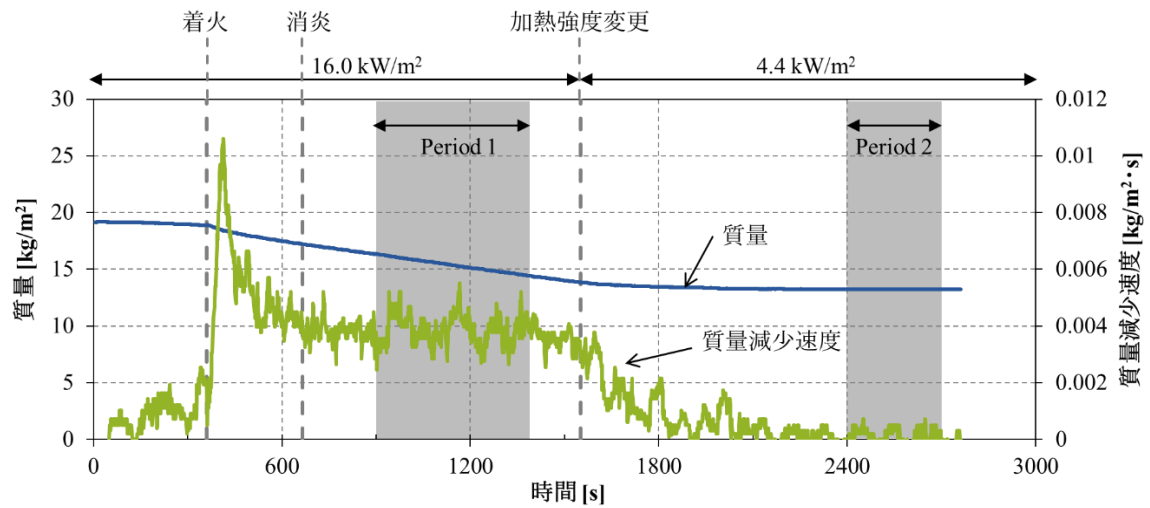


図 3.3-10 質量と質量減少速度の時間変化 (No.25_C-4.4)

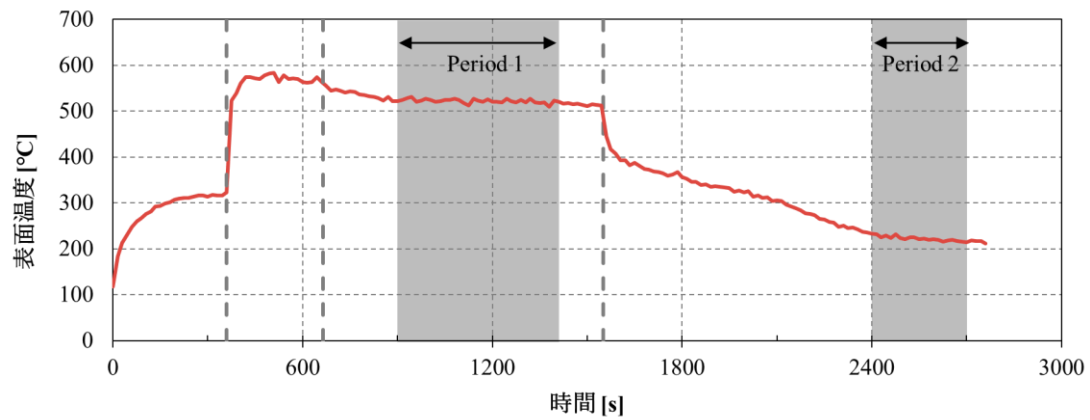


図 3.3-11 表面温度の時間変化 (No.25_C-4.4)

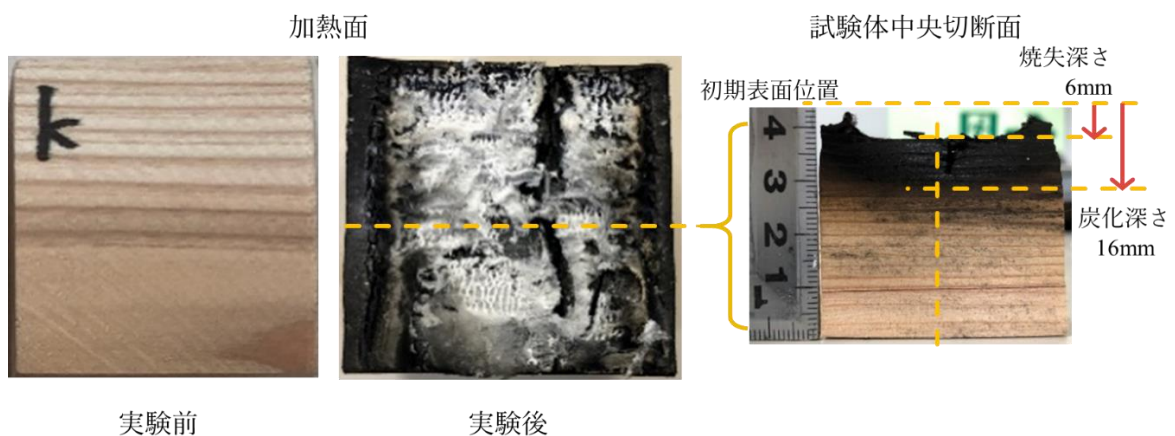


図 3.3-12 試験体の表面と切断面 (No.25_C-4.4)

3.3.4 スギの燃え止まらなかった実験

樹種がスギで、燃え止まらなかった実験の例として No.38_C-6.8-1 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 3.3- 13 に示す。加熱強度 18.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で試験体表面が十分に炭化していることを確認して、ガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になり、690 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1560 秒にヒーターと試験体の間に透過率 0.38 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 6.8kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱反応や発煙は徐々に緩やかになったが、停止することなく継続した。30 分以上加熱を継続しても赤熱反応が停止しなかったため、燃え止まらなと判断して測定を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 3.3- 14 に、表面温度の時間変化を図 3.3- 15 に示す。360 秒に着火すると質量減少速度は急激に大きくなるが、すぐにピーク値を迎えて低下し、690 秒に消炎すると時間的な変化は少なくなり一定値に落ち着く。表面温度も 360 秒で急上昇するが、すぐに緩やかに低下し一定値に落ち着く。このとき（1200～1500 秒）の質量減少速度および表面温度の平均値を Period1 の加熱強度 18.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、その値はそれぞれ $3.42 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 533.2°C となる。1560 秒に加熱強度を低減すると、質量減少速度と表面温度はどちらも低下するが、加熱を続けると徐々に上昇する。表面温度は 2400 秒頃以降は一定値に落ち着く。このとき（2400～2700 秒）の質量減少速度と表面温度の平均値を Period2 の加熱強度 6.8kW/m^2 における質量減少速度および表面温度とすると、それぞれ $1.58 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 431.4°C である。2760 秒時点で質量減少速度および表面温度の値が約 5 分間一定値を保っていたことから、これ以上加熱を続けても燃え止まらなと判断した。

図 3.3- 16 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における焼失深さと炭化深さはそれぞれ、10mm と 25mm であった。

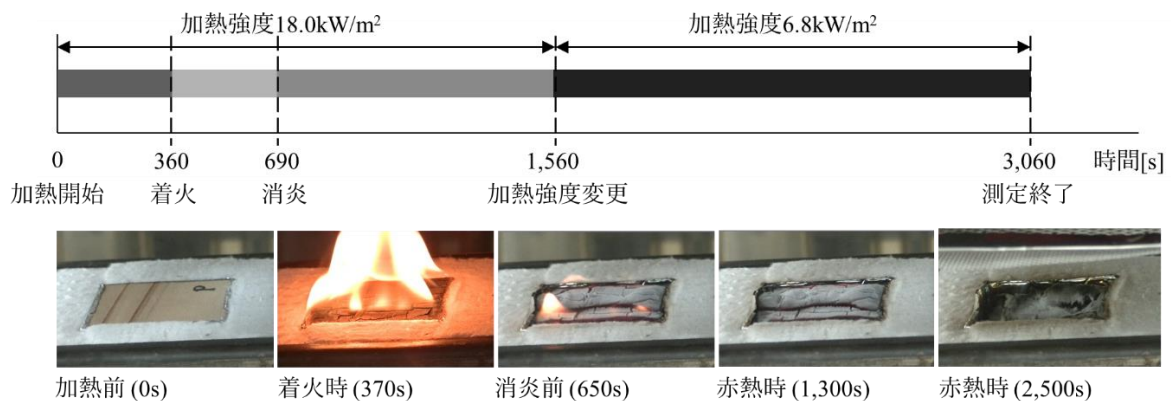


図 3.3- 13 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.38_C-6.8-1)

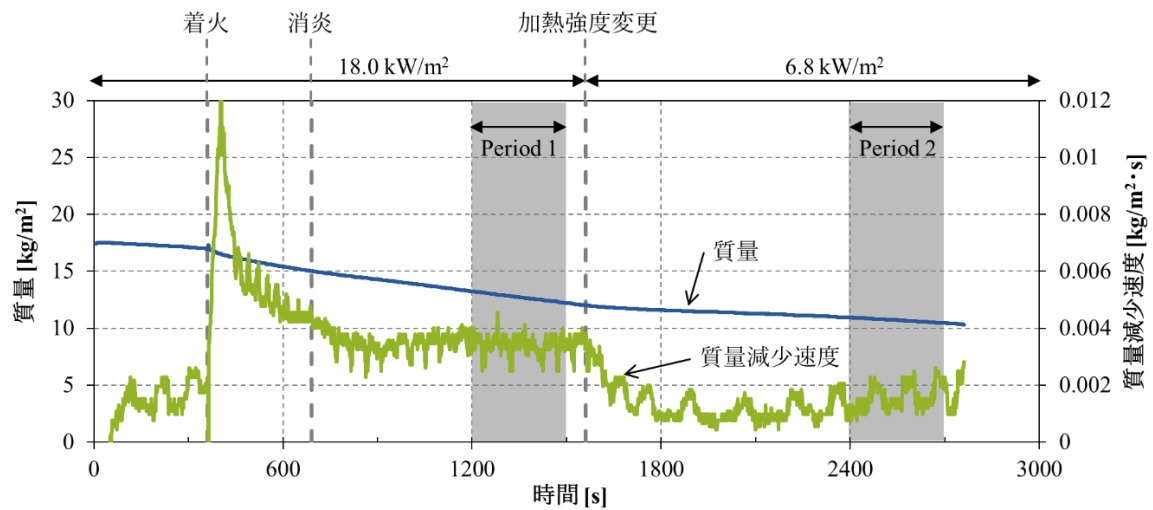


図 3.3-14 質量と質量減少速度の時間変化 (No.38_C-6.8-1)

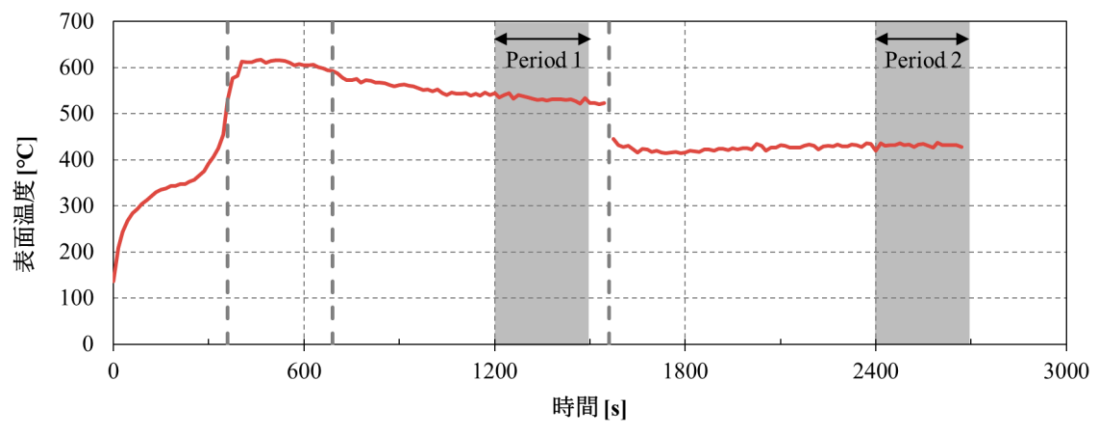


図 3.3-15 表面温度の時間変化 (No.38_C-6.8-1)

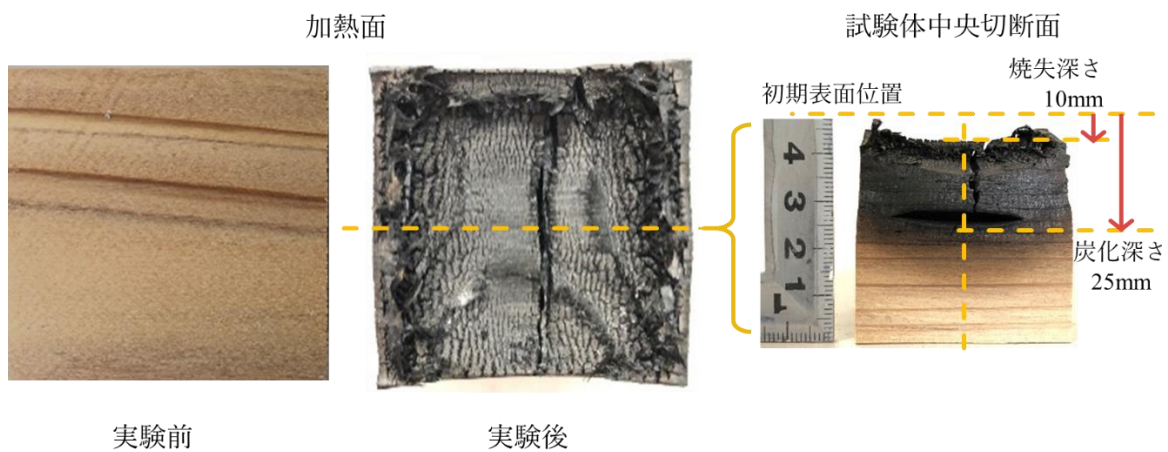


図 3.3-16 試験体の表面と切断面 (No.38_C-6.8-1)

表 3.3-1 実験結果一覽

実験 No.	Period 1					Period 2					炭化層厚 [mm]	燃え 止まり
	加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温度 [°C]	加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温度 [°C]				
		[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]			[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]					
1	L-7.6	19.0	0.00410	0.41012	—	7.6	0.00016	0.01576	269.3	10.0	○	
2	Lf-7.9-1*1	19.0	0.00539	0.49010	621.5	7.9	—	—	—	11.0	○	
3	Lf-7.9-2	19.0	0.00418	0.38037	585.5	7.9	0.00011	0.01002	256.5	11.0	○	
4	L-8.0-1	20.0	0.00286	0.47719	—	8.0	0.00007	0.01134	266.2	6.0	○	
5	L-8.0-2	20.0	0.00301	0.30109	—	8.0	0.00010	0.01027	262.0	10.0	○	
6	L-8.0-3	20.0	0.00378	0.53998	—	8.0	0.00013	0.01905	278.5	7.0	○	
7	L-8.4	21.0	0.00338	0.30703	—	8.4	0.00008	0.00743	284.8	11.0	○	
8	L-8.6	21.0	0.00619	0.61892	—	8.6	0.00011	0.01109	289.8	10.0	○	
9	L-8.8-1	17.0	0.00322	0.32166	563.2	8.8	0.00053	0.05337	314.2	10.0	×	
10	L-8.8-2	17.0	0.00296	0.29645	490.2	8.8	0.00060	0.06026	337.0	10.0	×	
11	L-8.8-3	17.0	0.00324	0.32426	525.8	8.8	0.00076	0.07617	351.3	10.0	×	
12	Lf-8.8-4	17.0	0.00364	0.45514	581.0	8.8	0.00024	0.02951	284.9	8.0	○	
13	Lf-8.8-5	17.0	0.00225	0.20455	460.9	8.8	0.00028	0.02540	267.2	11.0	○	
14	L-8.8-m*2	21.0	0.00313	—	—	8.8	0.00040	—	307.0	欠測	×	
15	L-9.0	22.0	0.00350	0.25017	—	9.0	0.00041	0.02921	316.8	14.0	×	
16	L-9.3	22.0	0.00327	0.27235	—	9.3	0.00068	0.05667	378.4	12.0	×	
17	L-9.8	23.0	0.00609	0.35842	—	9.8	0.00154	0.09061	383.3	17.0	×	
18	L-12.4-1	24.0	0.00547	0.45625	635.2	12.4	0.00239	0.19944	501.8	12.0	×	
19	L-12.4-2	24.0	0.00509	0.50883	643.5	12.4	0.00212	0.21248	482.0	10.0	×	
20	L-12.4-3	24.0	0.00474	0.52700	623.2	12.4	0.00240	0.05713	494.7	9.0	×	
21	Lf-12.7-1	24.0	0.00476	0.31761	645.2	12.7	0.00231	0.15374	525.2	15.0	×	
22	Lf-12.7-2	24.0	0.00537	0.44710	653.9	12.7	0.00170	0.14176	505.3	12.0	×	
23	Cf-4.2-1	16.0	0.00513	0.57018	590.1	4.2	0.00001	0.00115	196.1	9.0	○	
24	Cf-4.2-2	16.0	0.00297	0.37094	525.1	4.2	0.00011	0.01323	190.9	8.0	○	

実験 No.	Period 1				Period 2						
	加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温度 [°C]	加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温度 [°C]	炭化層厚 [mm]	燃え 止まり	
		[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]			[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]				
25	C-4.4	16.0	0.00389	0.38898	522.4	4.4	0.00006	0.00554	221.7	10.0	○
26	C-6.0-1	16.0	0.00416	0.46231	572.5	6.0	0.00008	0.00863	235.5	9.0	○
27	C-6.0-2	16.0	0.00484	0.60561	579.6	6.0	0.00009	0.01138	249.7	8.0	○
28	C-6.0-3	16.0	0.00344	0.34431	563.5	6.0	0.00011	0.01126	242.2	10.0	○
29	C-6.0-4	20.8	0.00512	0.24403	—	6.0	0.00068	0.03218	449.6	21.0	○
30	C-6.0-5	20.8	0.00588	0.53434	—	6.0	0.00028	0.02530	339.5	11.0	○
31	C-6.0-6	20.8	0.00599	0.59884	—	6.0	0.00024	0.02358	348.0	10.0	○
32	C-6.0-7	21.0	0.00458	0.38202	549.3	6.0	0.00078	0.06465	297.2	12.0	×
33	C-6.0-8	21.0	0.00377	0.41849	589.2	6.0	0.00011	0.01178	232.5	9.0	○
34	Cf-6.0-9	16.0	0.00446	0.49588	584.9	6.0	0.00010	0.01143	223.4	9.0	○
35	Cf-6.0-10	16.0	0.00371	0.33707	597.8	6.0	0.00087	0.07895	347.0	11.0	×
36	Cf-6.0-11	16.0	0.00672	0.51703	519.6	6.0	0.00056	0.04284	270.7	13.0	×
37	Cf-6.0-12	16.0	0.00726	0.48423	545.2	6.0	0.00109	0.07248	387.4	15.0	×
38	C-6.8-1	18.0	0.00342	0.22771	533.2	6.8	0.00158	0.10514	431.4	15.0	×
39	C-6.8-2	18.0	0.00478	0.25163	612.8	6.8	0.00097	0.05117	463.9	19.0	×
40	C-7.0	18.0	0.00373	0.28695	—	7.0	0.00135	0.10349	418.0	13.0	×
41	C-7.5	20.0	0.00375	0.23432	511.3	7.5	0.00127	0.07965	389.1	16.0	×
42	C-7.6-1	19.0	0.00270	0.27036	—	7.6	0.00179	0.17855	429.1	10.0	×
43	C-7.6-2	19.0	0.00409	0.25557	—	7.6	0.00154	0.09650	429.1	16.0	×
44	Cf-7.9-1	15.0	0.00354	0.29520	553.3	7.9	0.00157	0.13119	423.4	12.0	×
45	Cf-7.9-2	15.0	0.00339	0.19945	533.8	7.9	0.00324	0.19046	416.3	17.0	×
46	C-8.6	21.0	0.00345	0.34465	—	8.6	0.00096	0.09586	395.6	10.0	×
47	Cf-8.8	17.0	0.00350	0.23354	540.2	8.8	—	—	—	15.0	×

3.4 カラマツの実験結果の比較

全実験の Period1 および Period2 の質量減少速度と表面温度の平均値、実験終了後の試験体切断面の炭化層厚み、燃え止まり判定を表 3.3- 1 にまとめて示す。これらの実験結果を用いて、カラマツの赤熱反応性状を比較、考察する。

3.4.1 燃え止まり条件

表 3.3- 1 に示す質量減少速度はロードセルによって測定された値であり、水分蒸発や熱分解による質量減少も含まれている。そのため、赤熱による質量減少のみに分解する必要がある。既往研究⁴⁾を参考に、赤熱反応が発生している準定常状態において、試験体内部における熱分解と水分蒸発の進行速度[mm/s]は同等であると仮定して、式(3- 1)を用いる。表 3.3- 1 に示す質量減少速度の測定値 dm/dt を、赤熱による質量減少 dm_{ox}/dt のみに分解した値を表 3.4- 1

表 3.4- 1 赤熱による質量減少速度（単位：kg/m²s）

実験 No.		Period1	Period2	実験 No.		Period1	Period2
1	L-7.6	0.00088	0.00003	25	C-4.4	0.00096	0.00001
2	Lf-7.9-1	0.00118	—	26	C-6.0-1	0.00119	0.00002
3	Lf-7.9-2	0.00092	0.00002	27	C-6.0-2	0.00102	0.00002
4	L-8.0-1	0.00064	0.00002	28	C-6.0-3	0.00085	0.00003
5	L-8.0-2	0.00067	0.00002	29	C-6.0-4	0.00126	0.00017
6	L-8.0-3	0.00081	0.00003	30	C-6.0-5	0.00145	0.00007
7	L-8.4	0.00075	0.00002	31	C-6.0-6	0.00147	0.00006
8	L-8.6	0.00132	0.00002	32	C-6.0-7	0.00113	0.00019
9	L-8.8-1	0.00069	0.00011	33	C-6.0-8	0.00093	0.00003
10	L-8.8-2	0.00063	0.00013	34	Cf-6.0-9	0.00099	0.00002
11	L-8.8-3	0.00069	0.00016	35	Cf-6.0-10	0.00082	0.00019
12	Lf-8.8-4	0.00081	0.00005	36	Cf-6.0-11	0.00101	0.00013
13	Lf-8.8-5	0.00051	0.00006	37	Cf-6.0-12	0.00112	0.00025
14	L-8.8-m*2	0.00068	0.00009	38	C-6.8-1	0.00084	0.00039
15	L-9.0	0.00077	0.00009	39	C-6.8-2	0.00118	0.00024
16	L-9.3	0.00073	0.00015	40	C-7.0	0.00092	0.00033
17	L-9.8	0.00131	0.00033	41	C-7.5	0.00092	0.00031
18	L-12.4-1	0.00117	0.00051	42	C-7.6-1	0.00131	0.00087
19	L-12.4-2	0.00111	0.00046	43	C-7.6-2	0.00101	0.00038
20	L-12.4-3	0.00101	0.00051	44	Cf-7.9-1	0.00078	0.00035
21	Lf-12.7-1	0.00105	0.00051	45	Cf-7.9-2	0.00076	0.00072
22	Lf-12.7-2	0.00118	0.00037	46	C-8.6	0.00167	0.00047
23	Cf-4.2-1	0.00115	0.00002	47	Cf-8.8	0.00077	—
24	Cf-4.2-2	0.00065	0.00002				

に示す。以降の検討においては、赤熱のみによる質量減少速度に分解した後の値を用いる。これらの仮定と式(3-1)の妥当性については4.5.3項で検証する。

$$\frac{dm_{ox}}{dt} = \frac{dm}{dt} \times \frac{R_{\infty}}{1 + \frac{w_0}{100}} \quad (3-1)$$

ここで、各記号については本章末の記号表に示す。(以下同様)

全実験の Period1 および Period2 における、加熱強度と赤熱による質量減少速度の関係を図 3.4-1 に、加熱強度と表面温度の関係を図 3.4-2 に示す。既往研究 4)により求めた値もグラフ中に合わせて示す。加熱強度が低いほど、質量減少速度と表面温度は低下する。加熱強度 8.4kW/m² 以下において、質量減少速度は 0 に十分近い値となり、そのときの表面温度は 286.2℃以下であった。

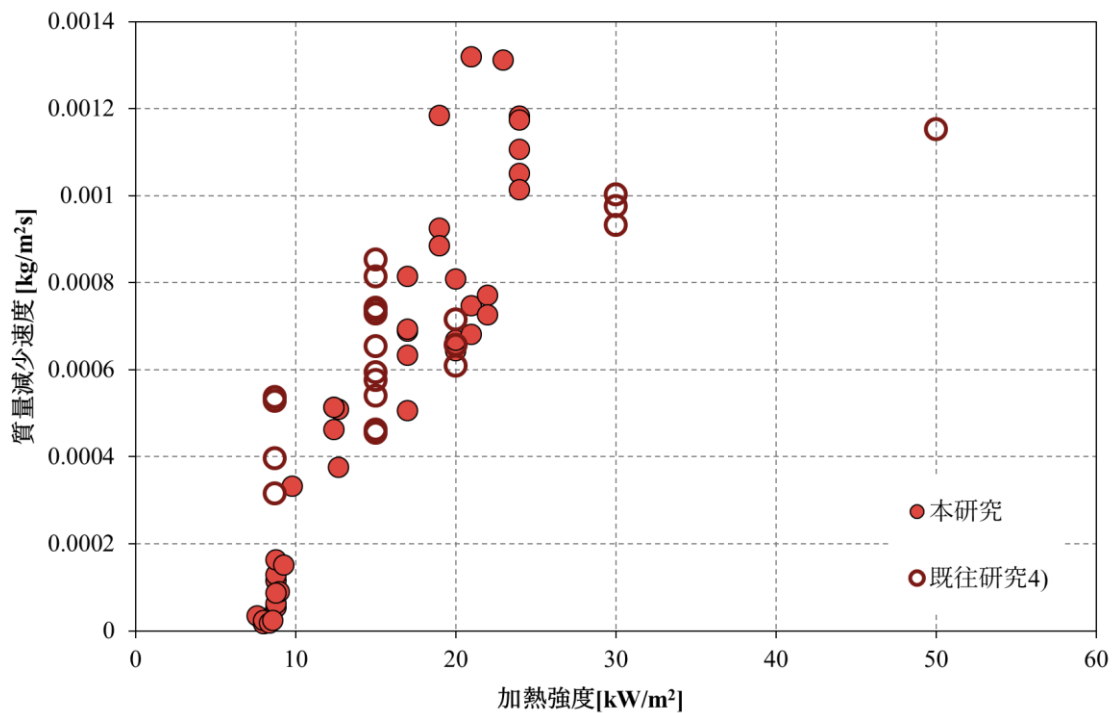


図 3.4-1 加熱強度と赤熱による質量減少速度の関係

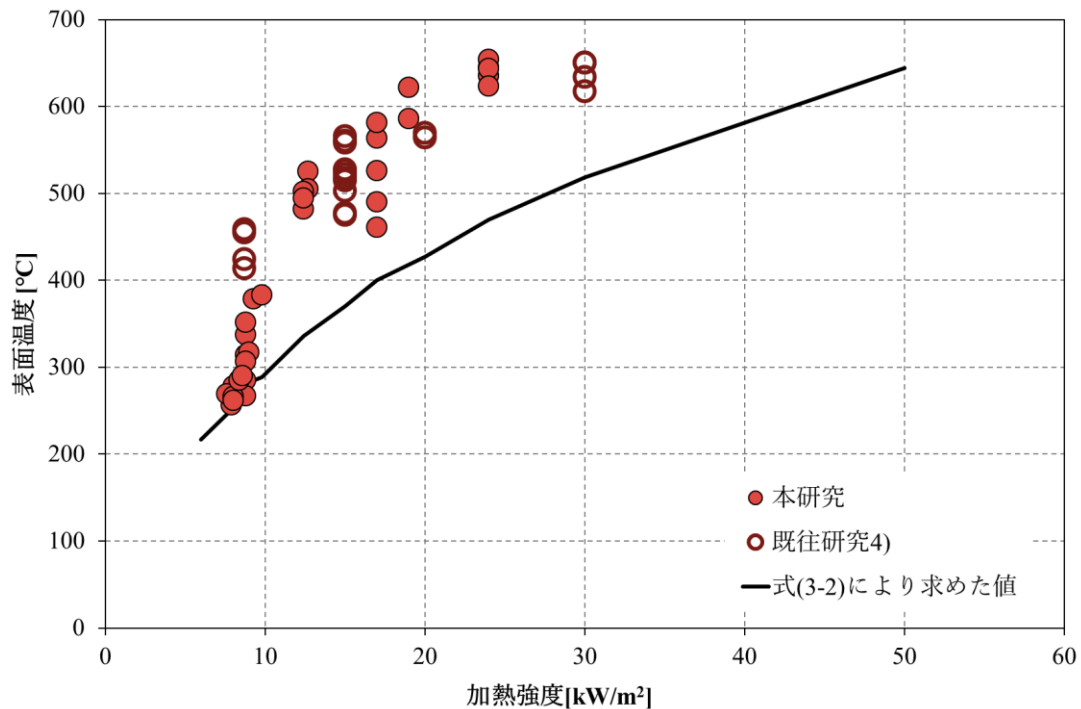


図 3.4- 2 加熱強度と試験体表面温度の関係

試験体表面の熱収支から、各加熱条件で燃え止まった場合の試験体表面温度を算出する。燃え止まっているため、試験体表面での赤熱反応速度は 0 とする。試験体は準定常状態になっていると見做し、試験体内部における含水による蒸発潜熱と木材の熱分解潜熱が試験体表面の熱収支へ与える影響は無視できるほど小さいと仮定すると、試験体表面の熱収支は式(3-2)によって表される。試験体表面の熱収支の模式図を図 3.4- 3 に示す。

(試験体に入射する熱量)

= (試験体表面から対流により損失する熱量) + (試験体表面から放射により損失する熱量)
+ (試験体内部への熱伝導により損失する熱量)

$$\varepsilon q_e = \alpha_s(T_s - T_0) + \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4) + \frac{1}{\frac{d_{char}}{\lambda_{char}} + \frac{d_{wood}}{\lambda_{wood}}}(T_s - T_r) \quad (3-2)$$

3.3.1 項で示した測定 No.7_L-8.4 の Period2 における測定値を図 3.4- 4 に示す。これらの値を式(3-2)に代入し、試験体表面温度 T_s について解くと、544.0K (=270.8°C) となる。実際に実験で測定した表面温度の値は 559.4K (=286.2°C) であり、近い値であることが確認出来た。これにより、測定 No.7_L-8.4 の Period2 において、赤熱等による発熱は生じておらず、燃え止まっていることが実験と計算の双方により確認された。

他の加熱条件においても同様に、式(3-2)を用いて燃え止まった場合の試験体表面温度を算出した結果を図 3.4- 2 に示す。加熱強度 8.4kW/m² 以下では、実験で測定した表面温度と式(3-

2)で算出した表面温度がおよそ一致し、この加熱強度範囲では燃え止まることが計算によっても確認出来た。

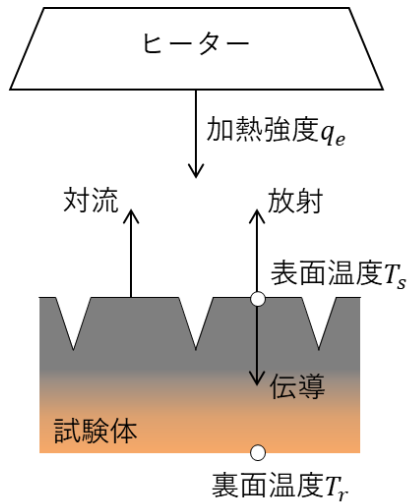


図 3.4-3 試験体表面の熱収支

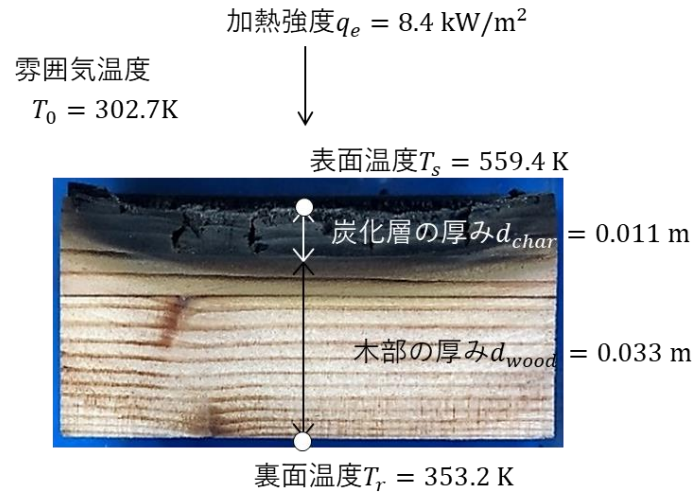


図 3.4-4 測定 No.7_L-8.4 の Period2 における値

3.4.2 赤熱反応速度式の作成

全実験の Period1 および Period2 における、表面温度と赤熱による質量減少速度の関係を図 3.4-5 に示す。表面温度が低いほど、質量減少速度は小さくなる関係がある。

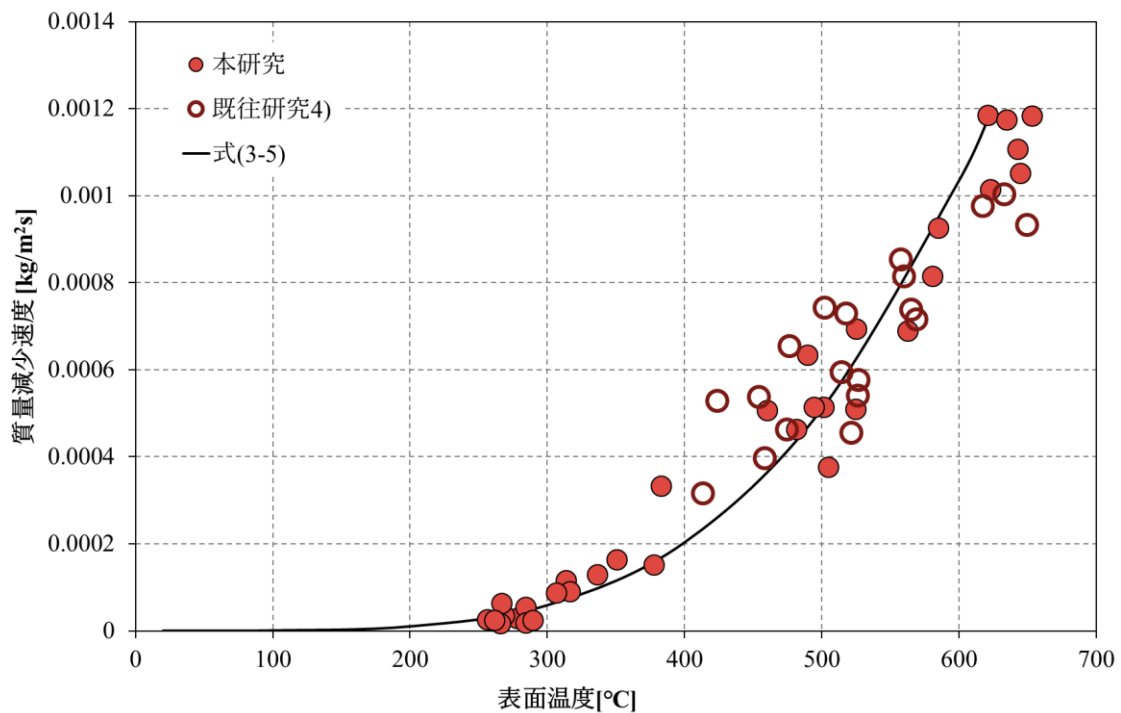


図 3.4-5 表面温度と赤熱による質量減少速度の関係

ここで、赤熱反応速度はアレニウス型の温度依存性を持つと仮定して、表面温度と質量減少速度の関係をアレニウス式(3-3)で表わしてみる。表面温度の逆数 $1/T_s$ を x 軸に、質量減少速度の自然対数 $\ln(dm_{ox,A}/dt)$ を y 軸にとってアレニウスプロットを作成すると図3.4-6となる。回帰直線を求めると式(3-4)となり、式変形をして式(3-5)により、赤熱反応における単位表面積あたりの質量減少速度 $dm_{ox,A}/dt$ と表面温度 T_s の関係式を求めることが出来る。

$$\frac{dm}{dt} = m_0 A_0 \times \exp\left(-\frac{E_{ox}}{R_g T_s}\right) \quad (3-3)$$

$$\ln\left(\frac{dm_{ox,A}}{dt}\right) = -4785.2 \frac{1}{T_s} - 1.3956 \quad (3-4)$$

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = m_0 A_0'' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,A}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5)$$

単位表面積あたりの質量減少速度式は、一次元の熱伝導計算を行うには有用であるが、二次元あるいは三次元の熱伝導計算を行うためには、単位体積あたりの質量減少速度式が必要となる。実験後の試験体断面から赤熱が発生しうる炭化層の厚みを測定（表 3.3- 1 参照）し、単位表面積あたりの質量減少速度の値を割ることで、単位体積あたりの質量減少速度に変換する。アレニウスプロットは図 3.4- 7、反応速度式は式(3-6)となる。

$$\frac{dm_{ox,V}}{dt} = \frac{d\rho_{ox}}{dt} = m_0 A_0''' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,V}}{R_g T_s}\right) = 14.791 \times \exp\left(-\frac{37.689 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-6)$$

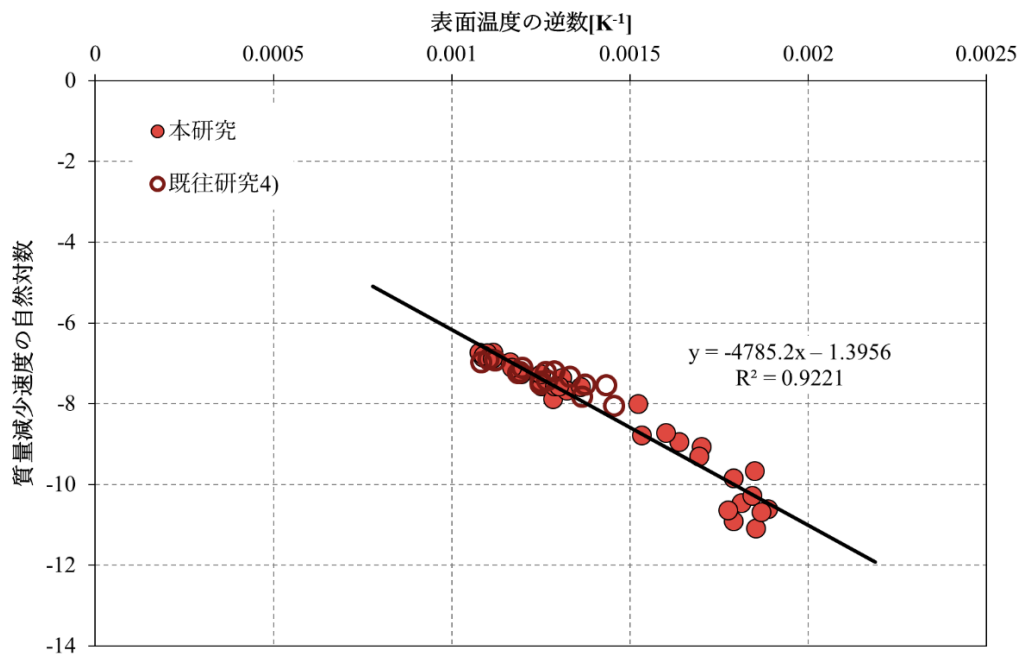


図 3.4- 6 アレニウスプロット（単位表面積あたりの質量減少速度による整理）

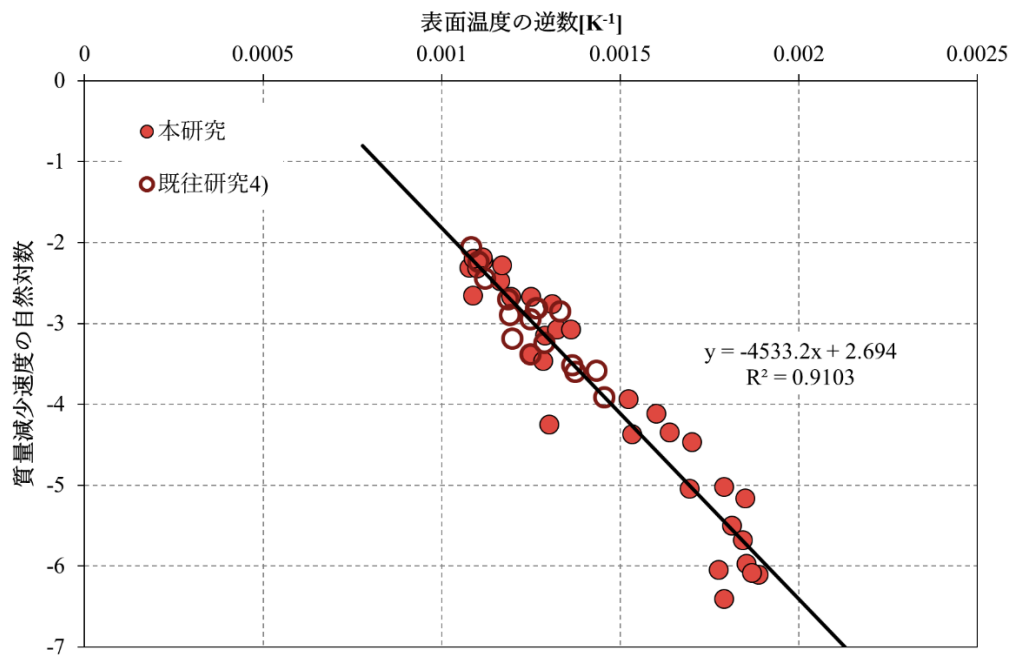


図 3.4-7 アレニウスプロット（単位体積あたりの質量減少速度による整理）

3.4.3 単位燃焼熱

3.3.2 項で示した燃え止まらなかったカラマツの測定 No.18_L-12.4-1 の Period2 の測定値を式(3-2)に代入して試験体表面温度を算出すると、611.1K (=337.9°C) となる。実際に測定した試験体表面温度は 775.0K (=501.8°C) であったことから、この差分 163.9K が赤熱反応によって生み出された熱量による温度上昇だと考えられる。

式(3-2)に赤熱による発熱の項を追加すると、式(3-7)となる。燃え止まらなかった実験の試験体表面の熱収支から赤熱による単位燃焼熱 ΔH を算出する。

$$\begin{aligned} & (\text{試験体に入射する熱量}) + (\text{赤熱により発生する熱量}) \\ & = (\text{試験体表面から対流により損失する熱量}) + (\text{試験体表面から放射により損失する熱量}) \\ & \quad + (\text{試験体内部への熱伝導により損失する熱量}) \end{aligned}$$

$$\varepsilon q_e + \Delta H \frac{dm_{ox,A}}{dt} = \alpha_s(T_s - T_0) + \varepsilon \sigma(T_s^4 - T_0^4) + \frac{1}{\frac{d_{char}}{\lambda_{char}} + \frac{d_{wood}}{\lambda_{wood}}}(T_s - T_r) \quad (3-7)$$

測定 No.18_L-12.4-1 の測定値を式(3-7)および(3-1)に代入して赤熱による単位発熱量 ΔH について解くと、28.07MJ/kg となった。同様に、その他の加熱条件についても ΔH を算出した結果を図 3.4-8 に示す。赤熱による単位発熱量は加熱強度に依存せず、その平均値は 23.41MJ/kg であった。この値は柏木ら⁵⁾によるセルローズ紙の赤熱による単位発熱量 25.0MJ/kg や、MacLeod ら⁶⁾によるスプリースの赤熱による単位発熱量 21MJ/kg に近い値であり、妥当であると言える。

第2部の解析においては、赤熱による単位発熱量には23.41MJ/kgを用いることとする。

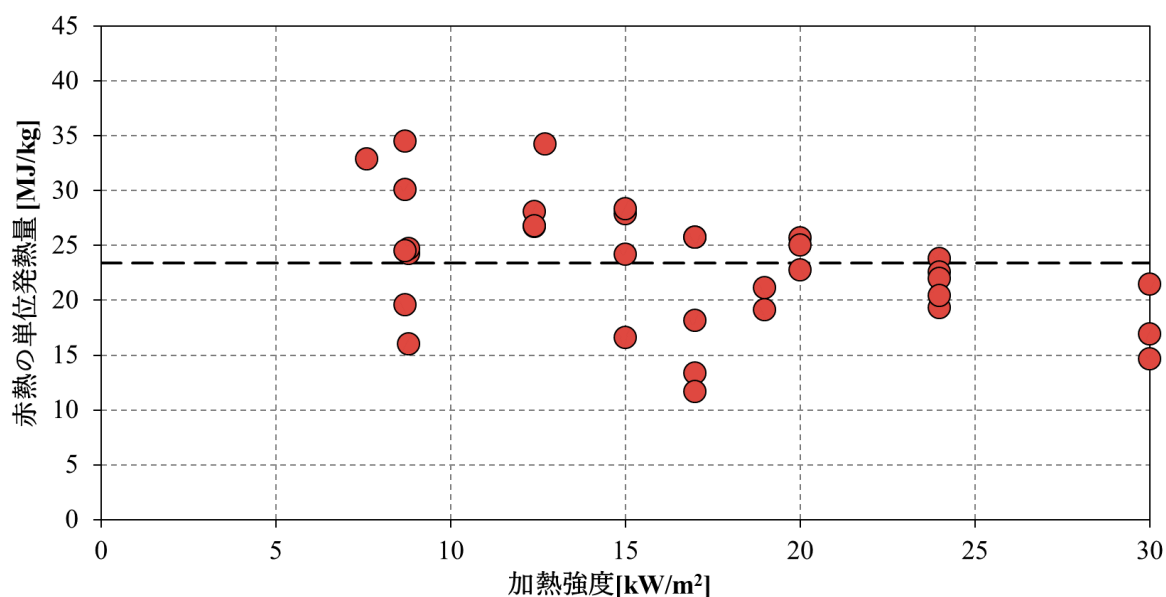


図 3.4-8 加熱強度と赤熱による単位発熱量の関係

3.5 カラマツとスギの比較

3.5.1 燃焼の様子

表 3.5-1 に Period1 の加熱強度が 17.0kW/m²、Period2 の加熱強度が 8.8kW/m²である、カラマツの測定 No.9_L-8.8-1 とスギの測定 No.47_Cf-8.8 における、試験体表面の様子を並べて示す。カラマツは測定中を通じて黒い炭化層が目視できるのに対して、スギは表面に灰が堆積し炭化層が目視出来なくなっている。これはカラマツと比較してスギは灰分の元となるリン等の成分を多く含有している⁷⁾ことに由来すると考えられる。このため、スギの測定においては、Period1 の前の有炎燃焼の段階で試験体表面に灰分の層が生成されるため、炭化層の表面に入射する熱量は、想定している加熱強度よりも低くなっている可能性があるが、灰分の影響を除去して測定を行うことは困難であった。本論文で示すスギの測定値は全て、灰分の影響を含むものであることに留意されたい。

表 3.5-1 カラマツとスギの燃焼の様子と比較

加熱強度 [kW/m ²]	カラマツ No.9_L-8.8-1	スギ No.47_Cf-8.8
17.0		
8.8		
測定 終了後		

3.5.2 燃え止まり条件

加熱強度と赤熱による質量減少速度の関係について、図 3.4- 1 に示すカラマツのグラフにスギの値を加えて図 3.5- 1 に示す。同様に、加熱強度と表面温度の関係について、図 3.4- 2 に示すカラマツのグラフにスギの値を加えて図 3.5- 2 に示す。

カラマツは加熱強度 8.4kW/m² 以下において、質量減少速度は十分に 0 に近い値となり、そのときの表面温度は 286.2℃以下であったのに対し、スギは加熱強度 6.0kW/m² 以下において、質量減少速度は 0 に近い値となり、そのときの表面温度は 221.7℃以下であった。カラマツと比較して、スギは低い加熱強度、低い表面温度でも赤熱反応が継続する。

スギは部材実験等により経験的に、様々な樹種の中でも燃え止まりにくい樹種として知られており、スギがカラマツより低い温度で赤熱反応が継続することはそれを裏付ける結果となった。スギが燃え止まりにくい理由は明確でないが、密度が低く炭化層が不安定で脱落しやすいことや、灰分の含有率が高くその触媒効果により赤熱反応が発生しやすいことなどがある。

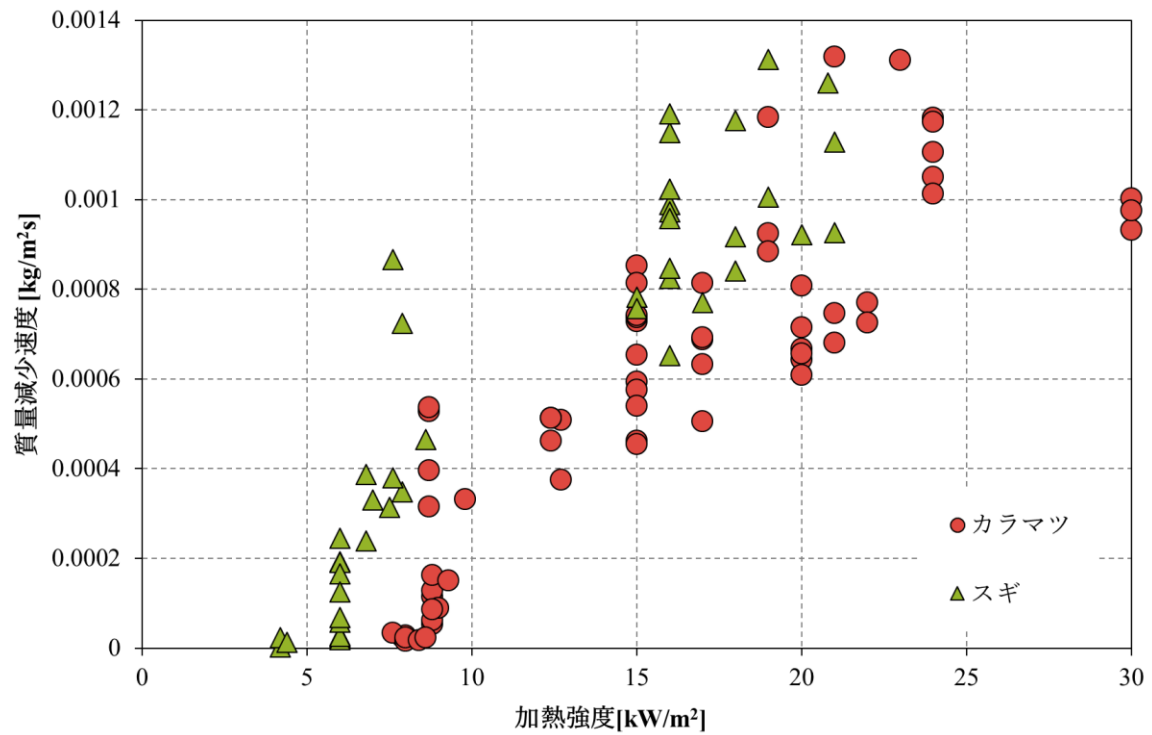


図 3.5-1 加熱強度と質量減少速度（カラマツとスギの比較）

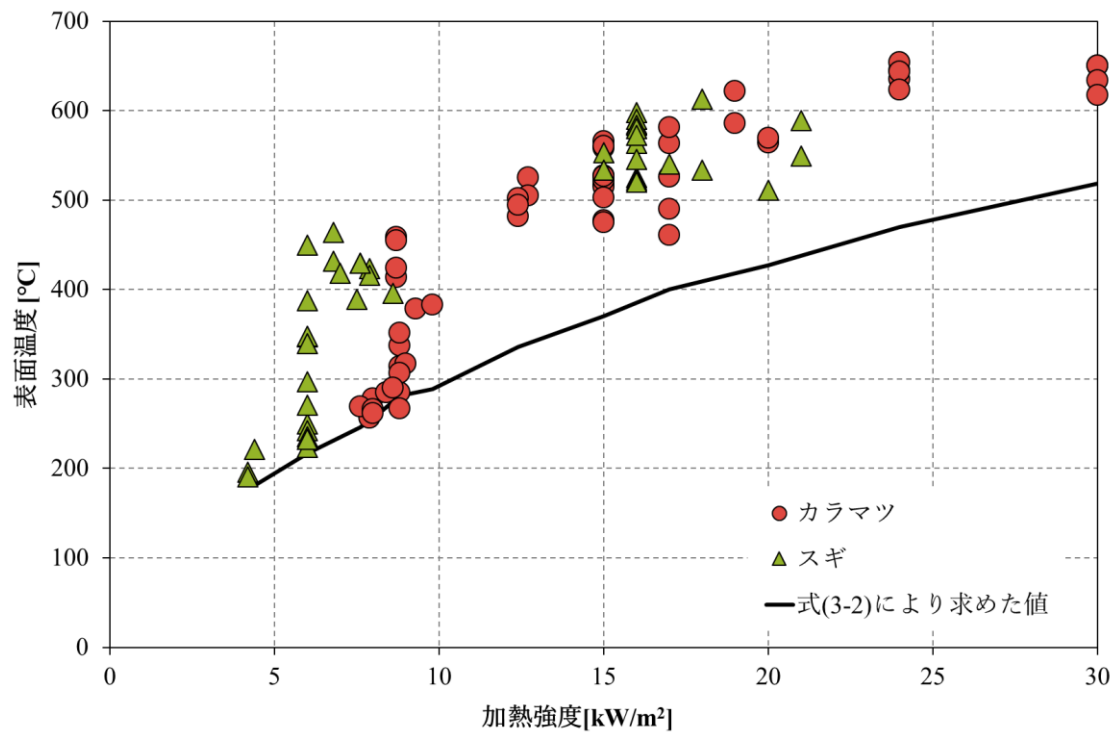


図 3.5-2 加熱強度と表面温度（カラマツとスギの比較）

3.5.3 赤熱反応速度式

表面温度と赤熱による質量減少速度の関係について、図 3.4- 5 に示すカラマツのグラフにスギの値を加えて図 3.5- 3 に示す。カラマツについて作成した赤熱反応速度式(3- 5)も併せて示す。表面温度と質量減少速度の関係においては、カラマツと比較してスギの方が値のバラツキは大きいものの、カラマツとスギの差は有意とは言えず、カラマツについて作成した速度式はスギにも適用出来る可能性がある。

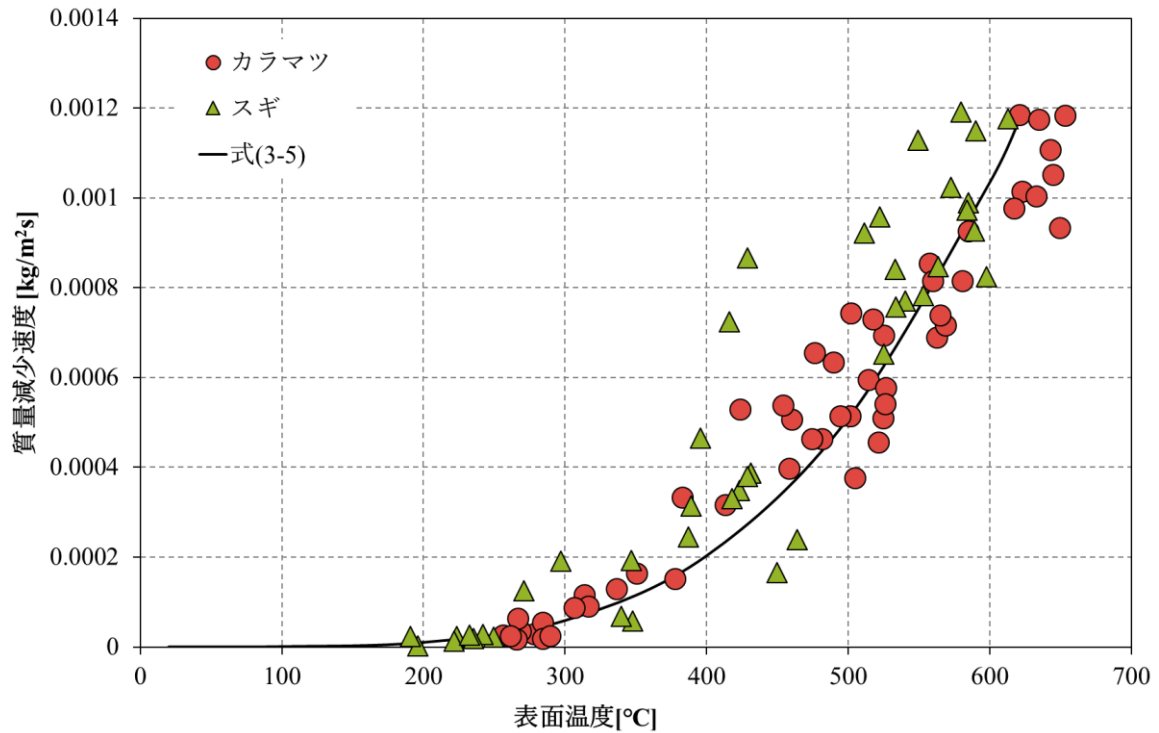


図 3.5- 3 表面温度と質量減少速度の関係（カラマツとスギの比較）

3.5.4 単位燃焼熱

スギについてもカラマツと同様に式(3- 7)を用いて赤熱による単位発熱量 ΔH を求めた結果を図 3.5- 4 に示す。加熱強度 10kW/m^2 以上においては、カラマツと同様に単位燃焼熱 ΔH は約 23.41MJ/kg に近い値を示している。一方、燃え止まり付近の低い加熱強度においては、スギの値は大きくばらついて単位燃焼熱 ΔH が一意に求まらなかった。

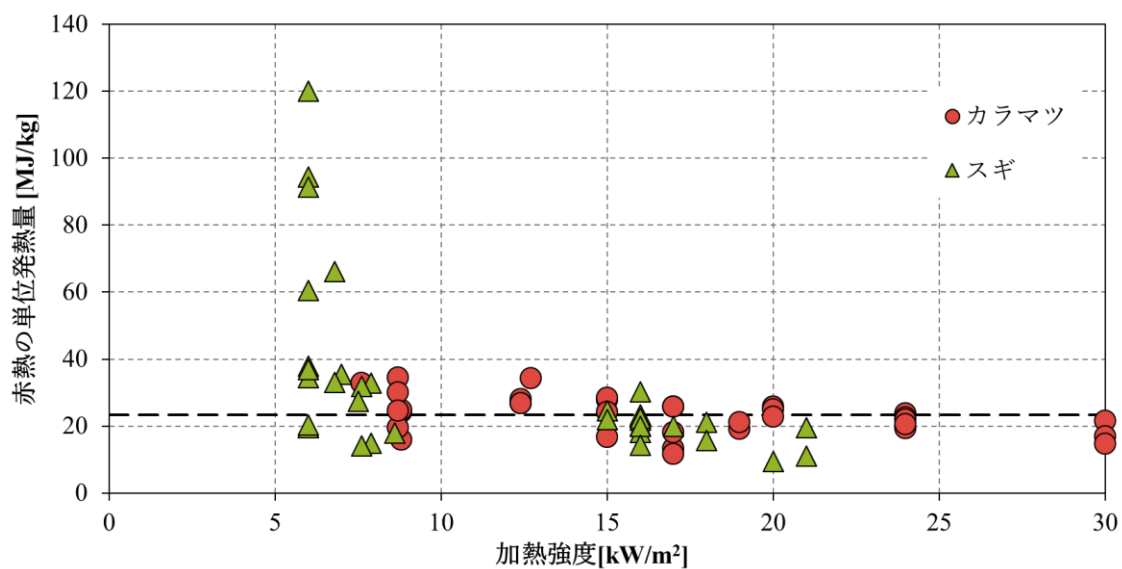


図 3.5-4 加熱強度と赤熱による単位発熱量の関係（カラマツとスギの比較）

3.6 3章のまとめ

第3章ではカラマツとスギの赤熱反応性状を測定した。赤熱反応の停止条件は、カラマツとスギで異なり、カラマツは加熱強度 8.4kW/m^2 、表面温度 286.2°C 、スギは加熱強度 6.0kW/m^2 、表面温度 221.7°C であった。赤熱反応速度は、カラマツの表面温度と質量減少速度の関係式を作成し、スギにも適用出来る可能性があることが分かった。赤熱反応の単位燃焼熱はスギの燃え止まり付近の加熱強度を除き、 23.41MJ/kg と求まった。

第 3 章で用いた記号表

記号	定義	値	単位
d_{char}	炭化層の厚み	—	m
d_{wood}	木材層の厚み	—	m
E_{ox}	赤熱反応の活性化エネルギー	—	kJ/kmol
ΔH	赤熱による単位発熱量	—	kJ/kg
$m_0 A_0$	頻度因子	—	s ⁻¹
dm/dt	ロードセルで測定した質量減少速度	—	kg/m ² s
dm_{ox}/dt	赤熱反応のみによる質量減少速度	—	kg/m ² s
q_e	試験体表面の入射熱量（ヒーターの加熱強度）	—	kW/m ²
R_∞	熱分解完了時の残量比	0.246	kg/kg
R_g	気体定数	8.31	kJ/kmol K
T_s	試験体表面温度	—	K
T_r	試験体裏面温度	—	K
T_0	雰囲気温度	—	K
w_0	試験体の初期含水率	—	kg/kg
α_s	試験体表面の対流熱伝達率	0.014 ⁸⁾	kW/m ² K
ε	試験体表面の放射率	0.95	—
λ_{char}	木炭の熱伝導率	—	kW/mK
λ_{wood}	木材の熱伝導率	—	kW/mK
ρ	密度	—	kg/m ³
σ	ステファン・ボルツマン定数	5.67×10^{-11}	kW/m ² K ⁴
添字A	単位面積あたり	—	m ⁻²
添字V	単位体積あたり	—	m ⁻³

[第 3 章の参考文献]

- ¹⁾ ISO 5660-1 : 2015, Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate, Part 1 : Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)
- ²⁾ 土橋常登, 原田和典, 他, 「縮小 LIFT 試験装置による内装材料の燃え広がり測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.353-358, 2018/9
- ³⁾ 茶谷友希子, 「大断面集成材の火災後の燃え止まり予測に関する研究」, 修士論文, 京都大学大学院工学研究科建築学専攻, 2016/3
- ⁴⁾ 茶谷友希子, 原田和典, 他, 「カラマツ集成材の火災加熱後における炭化層の赤熱反応速度の測定」, 日本建築学会環境系論文集, 第 82 巻, 第 736 号, pp.491-499, 2017 年 6 月, <http://doi.org/10.3130/aije.82.491>

-
- ⁵⁾ T. Kashiwagi, H. Nambu, "Global Kinetic Constants for Thermal Oxidative Degradation of a Cellulosic Paper", *Combustion and Flame*, 88, pp.155-166, 2008,
<https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-155>
- ⁶⁾ C.E. Macleod, Angus Law, R.M. Hadden, "Quantifying the heat release from char oxidation in timber", *Fire Safety Journal*, Vol.138, 103793, 2023/6, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103793>
- ⁷⁾ 関野登, 小藤田久義, 他, 「元素組成と化学成分から見た針葉樹樹皮チップ発熱量の特徴およびボイラー燃料としての発熱量変動範囲」, *木材学会誌*, 第 57 巻, 第 2 号, pp.101-109, 2011 年, <https://doi.org/10.2488/jwrs.57.101>
- ⁸⁾ 土橋常登・原田和典, 「コーンカロリーメータ試験装置と着火性試験装置における材料表面の熱伝達」, *日本建築学会環境系論文集*, 第 80 巻, 第 709 号, pp.193-201, 2015 年 3 月, <https://doi.org/10.3130/aije.80.193>
- ⁸⁾ 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その 2 : 弱い加熱強度における測定と速度式の改良」, *日本火災学会研究発表会概要集*, pp.3-4, 2021/5
- ⁹⁾ 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのスギ集成材の赤熱反応速度の測定」, *日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火)*, pp.253-254, 2021/9
- ¹⁰⁾ Y. Chatani, K. Harada, "Measurement of Char Oxidation Rate of Larch Glue Laminated Timber", presented at the 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Safety Science and Technology, 2021/12
- ¹¹⁾ Y. Chatani, K. Harada, "Measurement of Char Oxidation Rate of Glue Laminated Timber of Japanese Cedar and Larch under Forced Air Flow", *Fire Safety Journal*, Vol.141, 103913, 2023/10, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103913>
- ¹²⁾ Y. Chatani, K. Harada, "Measurement of Char Oxidation Rate of Larch Glue Laminated Timber", *International Journal for Fire Safety and Technology*, Vol.43, Issue 1, pp.1-16, 2024, <https://doi.org/10.3210/fst.43.1>

第4章 赤熱反応に対する試験体表面の気流の影響

第3章では、酸素濃度や表面気流を強制的に変化させていない雰囲気条件下において測定を行い、基本となる反応速度式と停止条件を求めた。第4章では、赤熱反応に対する表面気流の影響を測定し、赤熱反応速度式に気流の影響を変数として組み込み、停止条件を求める。

なお、本章の一部は、文献3)～6)で発表済の内容をもとに再構成した内容を含んでいる。

4.1 実験の目的

本章では、3章と同様に、火災後の柱や梁等の木質部材が周囲の高温の壁や床等からの放射熱を受ける状況を想定し、コーンカロリメータによる一定の放射加熱強度での集成材の加熱実験を行う。試験体表面に強制的に一定速度の気流を吹き付けながら、加熱強度 $4.4 \sim 24.0 \text{ kW/m}^2$ でそれぞれ実験を行い、炭化層の赤熱反応の燃焼性状を観察し、燃焼速度（質量減少速度）と表面温度を測定する。測定した結果から、炭化層の赤熱反応速度と、赤熱反応の停止条件（燃え止まり条件）を定量化することが目的である。

4.2 実験の方法

4.2.1 実験装置

実験装置の概要を図4.2-1に、写真を図4.2-2に示す。第3章で用いた装置に表面気流を発生させるためのファンを追加したものである。その他の試験方法、測定項目は第3章の実験と同じとした。

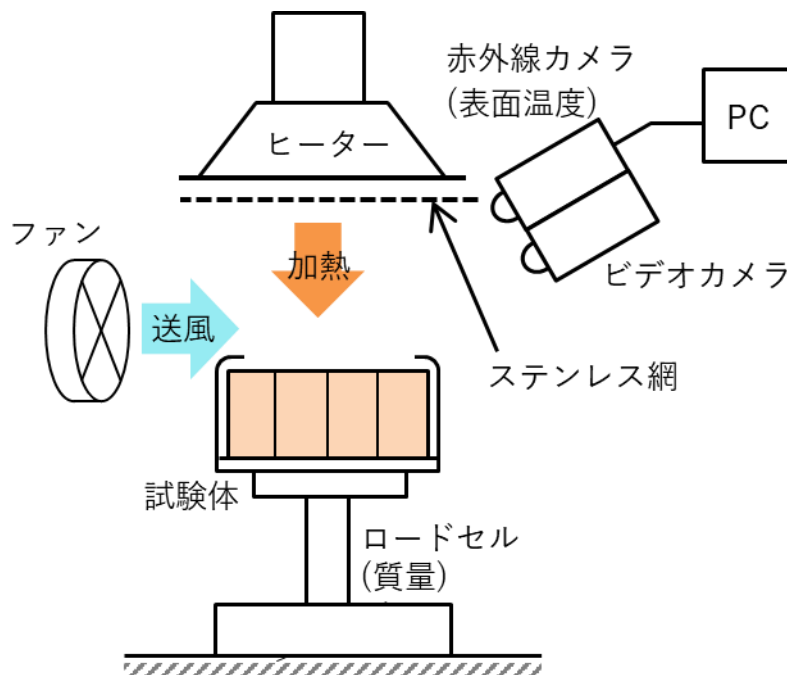


図 4.2-1 実験装置の概要図

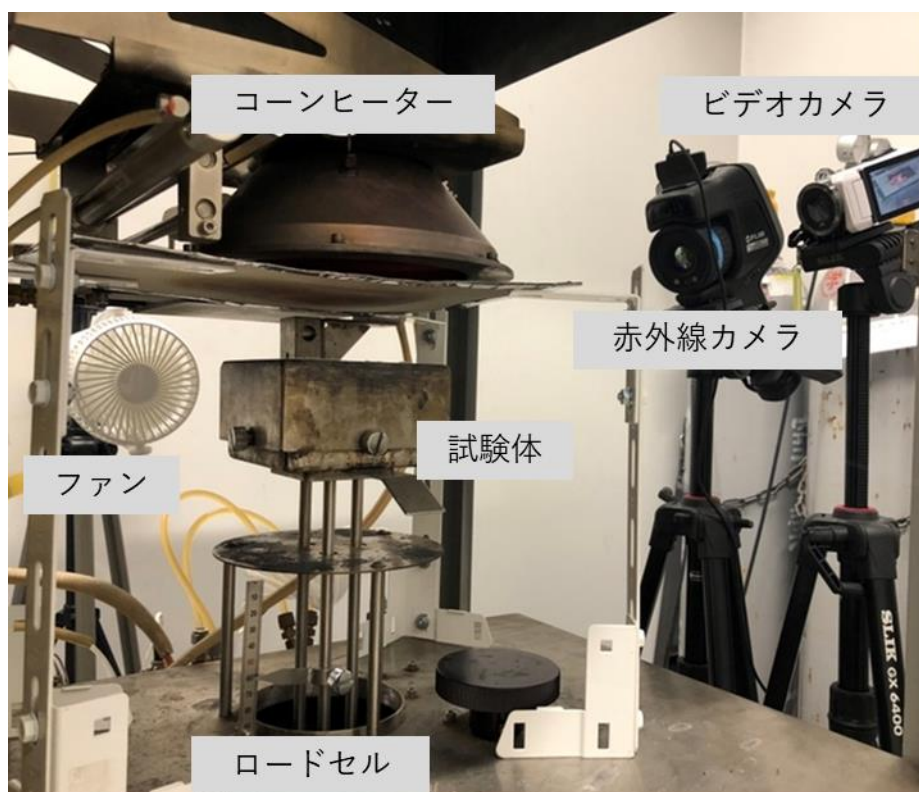


図 4.2-2 実験装置の写真

4.2.2 試験体

試験体は、第 3 章と同様に、加熱面が約 $50 \times 50 \text{mm}$ 、厚さ約 50mm の集成材である。樹種はカラマツおよびスギの 2 種類である。表 4.2-1 に全 15 回の実験の試験体の加熱前の物性値等を示す。

4.2.3 実験条件

表 4.2- 1 に全 15 回の実験の加熱条件を併せて示す。加熱強度は最小 4.2kW/m^2 から最大 24.0kW/m^2 の間で段階的に設定した。表面気流は 0.5m/s と 1.1m/s の 2 種類を設定した。表面気流の設定は、試験体表面中央の位置においた風速計で加熱前に予め計測して、ファンの強さを調整した。

表 4.2-1 試験体初期物性値と実験条件

実験 No.*		試験体					加熱強度[kW/m ²]		強制 気流 [m/s]	実験スケジュール[s]				
		樹種	寸法		密度 [kg/m ³]	含水率 [%]	Period 1	Period 2		点火	送風開始	加熱強度 変更	送風停止	実験終了
			加熱面 [mm ²]	厚さ [mm]										
2	Lf-7.9-1	カラ	48×47	48	529.8	12.0	15.0	7.9	0.5	360	1140	1080～1260	3060	3060
3	Lf-7.9-2		48×47	48	499.4	11.3	15.0	7.9	1.1	360	1130	1070～1260	2730	3060
12	Lf-8.8-4		48×48	47	489.1	10.1	17.0	8.8	0.5	360	1080	1260	2460	3060
13	Lf-8.8-5		48×47	49	441.5	9.5	17.0	8.8	1.1	360	1080	1560	2460	3060
21	Lf-12.7-1	マツ	50×48	47	500.1	11.5	24.0	12.7	0.5	360	1680	1080	2580	2880
22	Lf-12.7-2		48×48	47	469.3	11.6	24.0	12.7	1.1	360	1680	1090	2280	2280
23	Cf-4.2-1	スギ	50×48	50	351.7	9.9	16.0	4.2	0.5	360	1080	1260	2400	3060
24	Cf-4.2-2		50×48	46	367.6	12.0	16.0	4.2	1.1	360	1080	1200	1800	2100
34	Cf-6.0-9		50×50	50	360.6	11.0	16.0	6.0	0.5	360	1080	1260	2400	3060
35	Cf-6.0-10		50×50	50	372.0	10.6	16.0	6.0	1.1	360	1080	1260	2380	3060
36	Cf-6.0-11	スギ	47×47	46	371.6	9.5	16.0	6.0	0.5	360	1080	1260	2460	3060
37	Cf-6.0-12		48×48	48	361.5	9.0	16.0	6.0	1.1	360	1080	1260	2460	3060
44	Cf-7.9-1		48×48	48	380.0	11.4	15.0	7.9	0.5	360	1150	1260	2450	3060
45	Cf-7.9-2		48×48	48	368.9	10.1	15.0	7.9	1.1	360	1080	1260	2410	3060
47	Cf-8.8		48×48	48	391.3	11.8	17.0	8.8	0.5	360	1080	1260	3060	3060

* 実験 No.は第3章で示したものと共通である。同じ実験において気流を発生させた期間の測定値を抜粋して本表に記載している。

4.3 代表的な実験結果

本節では、全 15 回の実験のうち、代表的な実験結果 2 つを取り上げて示す。全ての実験結果の代表値は表 4.3- 1 に、実験結果の詳細は付録 1 にまとめて掲載する。

4.3.1 燃え止まった実験

燃え止まった実験の例としてカラマツ試験体 No.3_Lf-7.9-2 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 4.3- 1 に示す。加熱強度 19.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で試験体表面が十分に炭化していることを確認して、ガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になり、560 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1070 秒に、ヒーターと試験体間の距離を 25mm から 60mm に遠ざけて加熱強度を 8.4kW/m^2 に低下させ、1130 秒に 1.1m/s の表面気流を発生させた。表面気流が発生すると試験体表面は激しく赤熱したが、再度の有炎燃焼には到らなかった。1260 秒に、ヒーターと試験体の間に透過率 0.53 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 7.9kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱燃焼は徐々に弱くなり、最終的に、赤熱反応により赤く発光する様子も発煙も目視では確認出来なくなった。2760 秒においても再燃焼する兆候は見られなかったため、赤熱反応は停止し燃え止まったと判断して、 1.1m/s の表面気流を停止し、気流なしの状態での測定を行った後、実験を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 4.3- 2 に、表面温度の時間変化を図 4.3- 3 に示す。ここで、表面温度は、試験体表面全体の温度の平均値を示している。360 秒に着火すると質量減少速度と表面温度は急激に大きくなるが、すぐにピーク値を迎えて低下し、650 秒に消炎すると質量減少速度と表面温度ともにゆっくりと上昇するが一定値に落ち着く。1070 秒に加熱強度を 19kW/m^2 から 15kW/m^2 に低下させると表面温度は少し低下する。1130 秒に 1.1m/s の表面気流を発生させると、質量減少速度と表面温度は急上昇し一定値となる。このとき (1150~1250 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period1 の加熱強度 15.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度として扱い、その値はそれぞれ $7.11 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 648.8°C である。なお、強制的に表面気流を発生させている期間の質量減少速度の値は、ロードセルが風圧の影響を受けて小刻みに揺れてしまうため、測定値も振動しているが、時間的な平均値をとることで値を算出している。1260 秒に加熱強度を低減すると、質量減少速度と表面温度はどちらも低下する。1800 秒頃以降では質量減少速度は非常に小さくなり 0 に近い値となり、表面温度は一定値となる。このとき (2100~2700 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period2 の加熱強度 7.9kW/m^2 における質量減少速度および表面温度として扱い、それぞれ $0.01 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2$ および 156.3°C である。2760 秒に表面気流を停止すると、質量減少速度には変化がないが表面温度は上昇し、 256.5°C となった。この温度差は、表面気流による対流熱損失によるものと考えられる。

図 4.3- 4 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における、焼失、炭化深さはそれぞれ、6mm と 17mm であった。

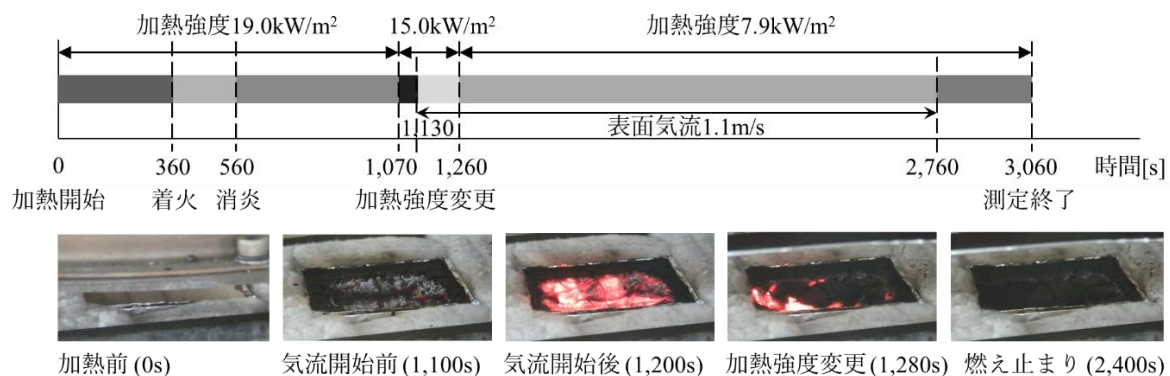


図 4.3-1 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.3_Lf-7.9-2)

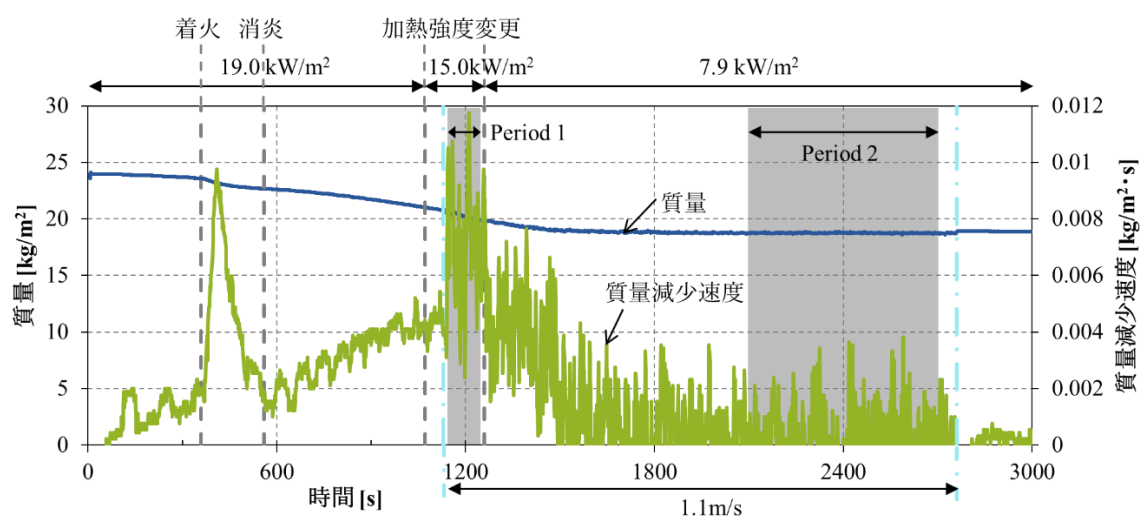


図 4.3-2 質量と質量減少速度の時間変化 (No.3_Lf-7.9-2)

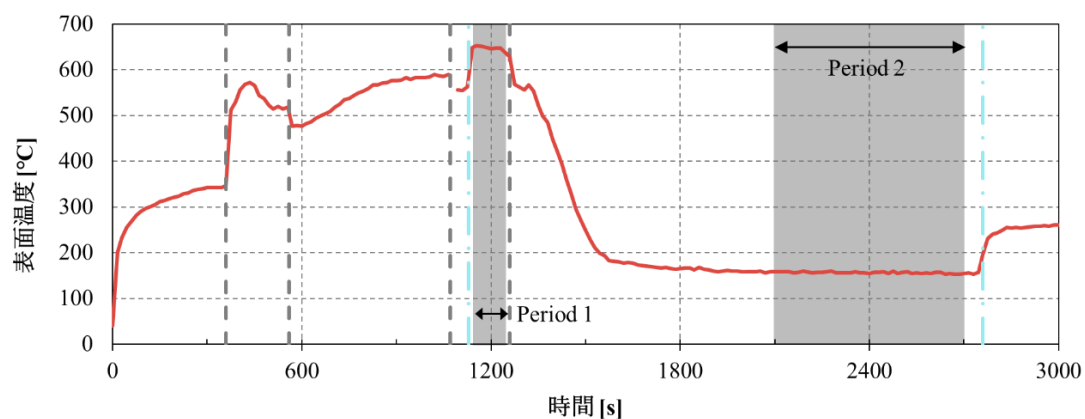


図 4.3-3 表面温度の時間変化 (No.3_Lf-7.9-2)

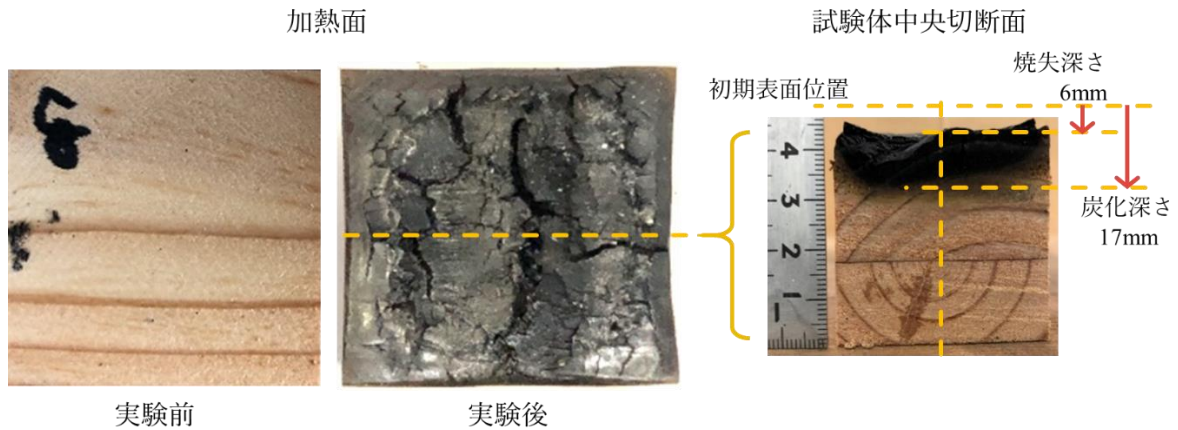


図 4.3- 4 試験体の表面と切断面 (No.3_Lf-7.9-2)

4.3.2 燃え止まらなかった実験

燃え止まらなかった実験の例としてスギ試験体 No.35_Cf-6.0-10 の実験結果を示す。

実験の時間経過と試験体の燃焼の様子を図 4.3- 5 に示す。加熱強度 16.0kW/m^2 での加熱開始から 360 秒時点で試験体表面が十分に炭化していることを確認して、ガスライターにより強制的に着火した。着火直後は激しく発炎燃焼したが、炭化層が厚くなると燃焼が緩慢になる。600 秒頃に再度燃焼が激しくなったが、964 秒で自然に消炎した。消炎後は赤熱反応が継続した。1080 秒に 1.1m/s の表面気流を発生させた。表面気流が発生すると、スギ試験体であったために表面に堆積していた灰が飛び散り、試験体表面は激しく赤熱したが、再度有炎燃焼には到らなかった。1260 秒に、ヒーターと試験体の間に透過率 0.38 のステンレス網を挿入することで、試験体に入射する加熱強度を 6.0kW/m^2 に低下させた。その後、赤熱燃焼は徐々に弱くなり、1800 秒頃には目視で赤熱が確認出来なくなったが、2100 秒頃に再度赤熱が発生し始め、2300 秒頃には激しく赤熱した。そのため、燃え止まらなと判断し、 1.1m/s の表面気流を停止して気流なしの状態での測定を行った後、実験を終了した。

質量と質量減少速度の時間変化を図 4.3- 6 に、表面温度の時間変化を図 4.3- 7 に示す。ここで、表面温度は、試験体表面全体の温度の平均値を示している。360 秒に着火すると質量減少速度と表面温度は急激に大きくなる。質量減少速度はすぐにピーク値を迎えて低下し、600 秒に消炎するとゆっくりと上昇するが一定値に落ち着く。1080 秒に 1.1m/s の表面気流を発生焦ると、質量減少速度と表面温度は急上昇し一定値となる。このとき (1100～1200 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period1 の加熱強度 16.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度として扱い、その値はそれぞれ $7.74 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 650.0°C である。1260 秒に加熱強度を低減すると、質量減少速度と表面温度はどちらも低下するが、加熱を続けると赤熱が再発生する。このとき (2200～2350 秒) の質量減少速度と表面温度の平均値を Period2 の加熱強度 6.0kW/m^2 における質量減少速度および表面温度として扱い、それぞれ $4.10 \times 10^{-3}\text{kg/m}^2\text{s}$ および 421.3°C である。2380 秒に表面気流を停止すると、赤熱燃焼は弱くなり、質量減少速度と表面温度はともに低下した。

図 4.3- 8 に実験前後の試験体表面の写真と、実験後の試験体を中央で切断した断面の写真を示す。試験体中央における、焼失、炭化深さはそれぞれ、21mm と 32mm であった。

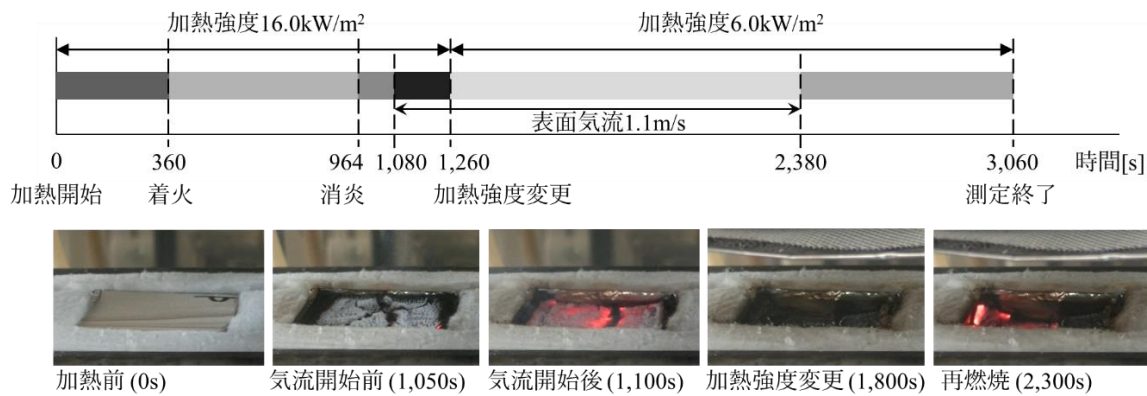


図 4.3- 5 実験の時間経過と試験体の燃焼の様子 (No.35_Cf-6.0-10)

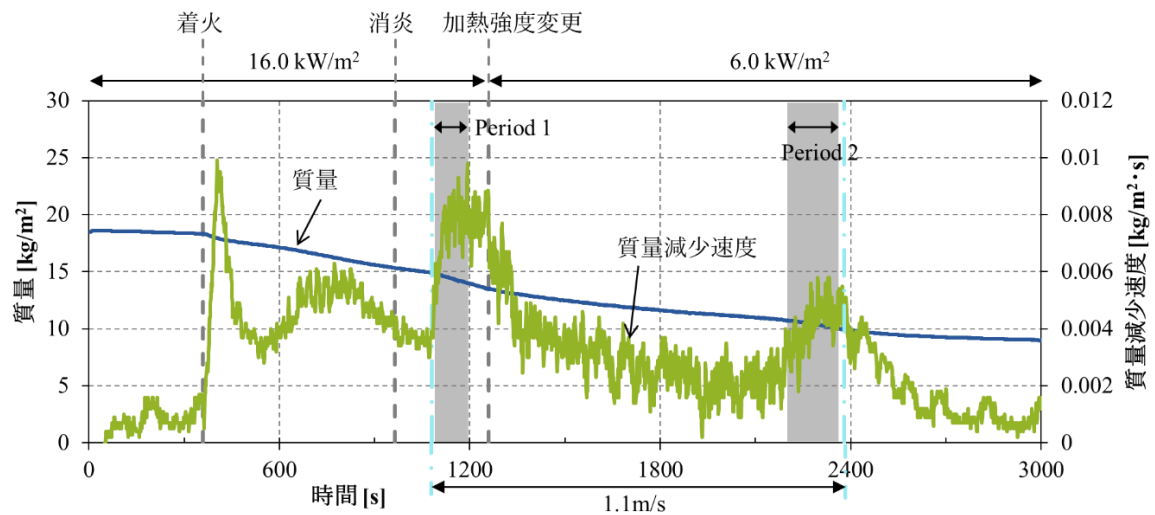


図 4.3- 6 質量と質量減少速度の時間変化 (No.35_Cf-6.0-10)

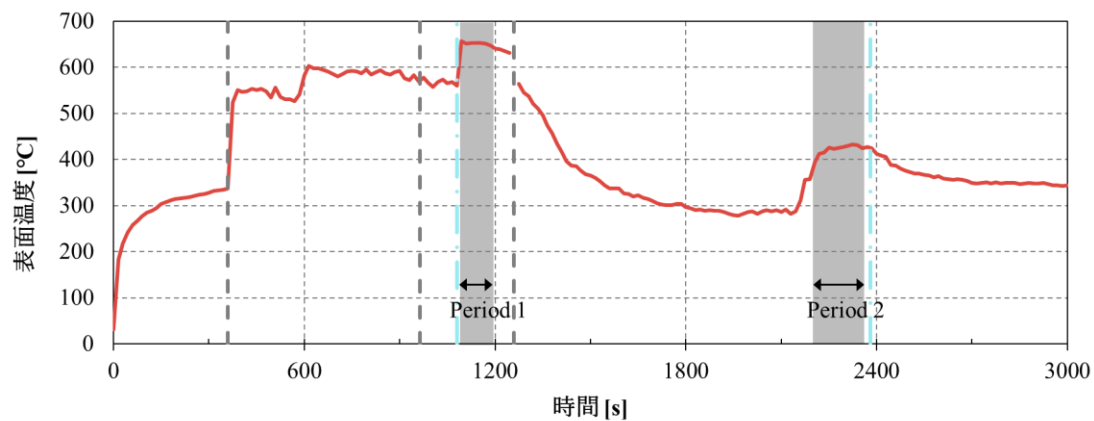


図 4.3- 7 表面温度の時間変化 (No.35_Cf-6.0-10)

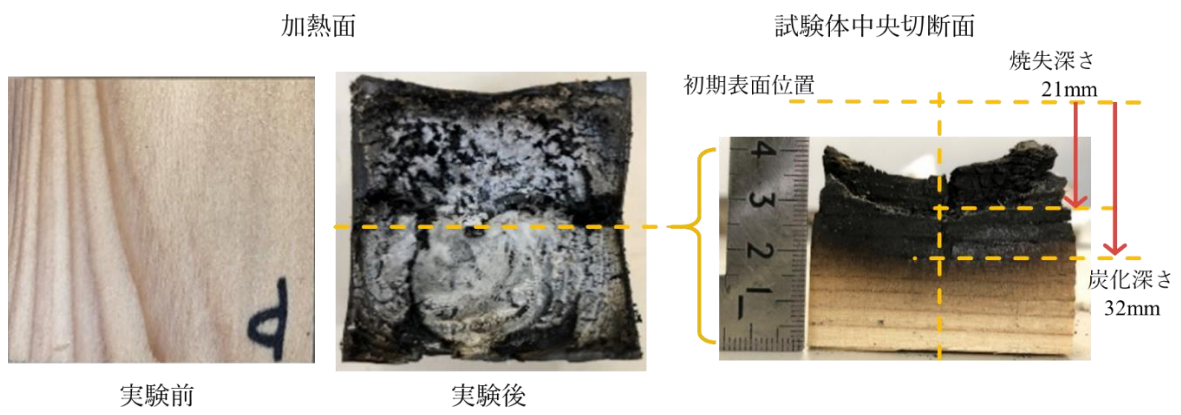


図 4.3- 8 試験体の表面と切断面 (No.35_Cf-6.0-10)

表 4.3-1 実験結果一覧

実験 No.	強制 気流 [m/s]	Period 1				Period 2						
		加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温 度[°C]	加熱強度 [kW/m ²]	質量減少速度		表面温度 [°C]	炭化層厚 [mm]	燃え 止まり	
			[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]			[kg/m ² s]	[kg/m ³ s]				
2	Lf-7.9-1	0.5	15.0	0.00382	0.34723	496.6	7.9	0.00007	0.00596	182.9	11.0	○
3	Lf-7.9-2	1.1	15.0	0.00711	0.64634	648.8	7.9	0.00001	0.00062	156.3	11.0	○
12	Lf-8.8-4	0.5	17.0	0.00494	0.61801	622.4	8.8	0.00041	0.05135	258.1	8.0	○
13	Lf-8.8-5	1.1	17.0	0.00592	0.53830	655.2	8.8	0.00031	0.02825	211.0	11.0	○
21	Lf-12.7-1	0.5	24.0	—	—	—	12.7	0.00325	0.21647	523.3	15.0	×
22	Lf-12.7-2	1.1	24.0	—	—	—	12.7	0.00463	0.38618	573.6	12.0	×
23	Cf-4.2-1	0.5	16.0	0.00477	0.52980	593.7	4.2	0.00001	0.00138	201.5	9.0	○
24	Cf-4.2-2	1.1	16.0	—	—	—	4.2	0.00022	0.02740	151.6	8.0	○
34	Cf-6.0-9	0.5	16.0	0.00514	0.57140	602.4	6.0	0.00015	0.01722	216.7	9.0	○
35	Cf-6.0-10	1.1	16.0	0.00774	0.70338	650.0	6.0	0.00410	0.37273	421.3	11.0	×
36	Cf-6.0-11	0.5	16.0	0.01034	0.79566	558.4	6.0	0.00146	0.11198	298.3	13.0	×
37	Cf-6.0-12	1.1	16.0	0.01453	0.96876	634.8	6.0	0.00443	0.29531	474.5	15.0	×
44	Cf-7.9-1	0.5	15.0	0.00566	0.47190	577.7	7.9	0.00322	0.26839	504.2	12.0	×
45	Cf-7.9-2	1.1	15.0	0.00698	0.41068	598.7	7.9	0.00369	0.21678	454.4	17.0	×
47	Cf-8.8	0.5	17.0	0.00638	0.42523	594.7	8.8	0.00223	0.14885	500.0	15.0	×

4.4 気流が存在する場合のコーンカロリメータの対流熱伝達率

実験結果を比較、考察するにあたり、試験体表面の熱収支を明らかにするためには、気流が存在する場合のコーンカロリメータ装置における対流熱伝達率を知る必要がある。強制的な気流が存在しない通常雰囲気のコーンカロリメータの対流熱伝達率については、土橋ら¹⁾によって求められており、表面温度 200～400℃において対流熱伝達率は 13～15W/m²K である。本節では、土橋らの対流熱伝達率の測定方法を参考に、試験体表面に強制的な気流が存在する場合の対流熱伝達率を測定した。

4.4.1 測定方法

測定装置を図 4.4- 1 に示す。第 3 章で実施した実験と同様に、試験体の表面に強制的に気流を発生させるためのファンをコーンカロリメータ装置に追加している。試験体を図 4.4- 2 に示す。試験体は、98×98×0.2mm の亜鉛めっき鋼板とし、裏面に K 熱電対を設置して試験体温度を測定した。

第 3 章の測定条件範囲に対応するように、コーンヒーターの加熱強度を 7 種類 (5, 10, 15, 20, 30, 40, 50kW/m²)、ファンの気流速度を 3 種類 (0 (与えない), 0.5, 1.1m/s) に設定し、それぞれの組み合わせにより 21 条件の測定を実施した。加熱強度と気流速度はそれぞれ、試験体表面中央と同じ位置で測定して、コーンヒーターの温度とファンの強度を設定した。それぞれの加熱強度と気流速度において、約 10 分間加熱を続けて試験体温度が安定したことを確認して、次の設定に切り替えた。全ての条件で 2 回ずつ測定を行った。



図 4.4- 1 対流熱伝導率の測定装置

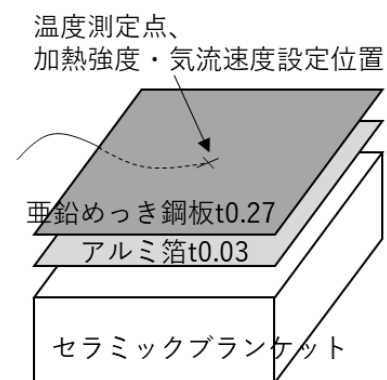


図 4.4- 2 試験体

4.4.2 測定結果

図 4.4- 3 および図 4.4- 4 に加熱強度および表面気流速度の設定値と、試験体温度の時間変化を示す。最初に加熱強度 60kW/m^2 で加熱して試験体全体を十分に昇温させて酸化させた後、 50kW/m^2 から順に加熱強度を下げていった。各加熱強度において、表面気流を 0m/s （強制的に与えない）、 0.5m/s 、 1.1m/s と変化させて、それぞれの条件で約 10 分間加熱を続けると、試験体温度は最大 1 分程度でおよそ一定値に収束した。同様の測定を 2 回行った。

各条件における試験体温度の平均値を表 4.4- 1 と図 4.4- 5 に示す。土橋ら¹⁾による強制気流が無い条件の測定値も併せて示す。2 回の測定値のばらつきは $0\sim 25^\circ\text{C}$ と小さく、再現性が確認できたため、以降の検討では 2 回の測定値の平均値を用いることとした。強制気流が無い条件については、今回の 2 回の測定値は、土橋らの測定値より少し低い（最大 9°C ）が大きな差は見られず、同じ条件で測定できていることが確認できた。

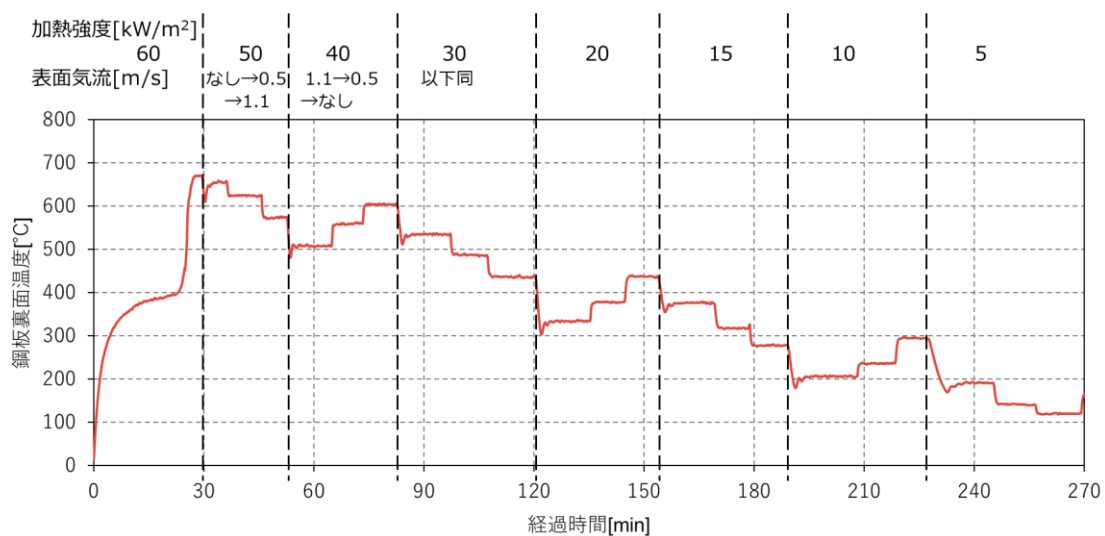


図 4.4- 3 試験体温度の時間変化（1 回目）

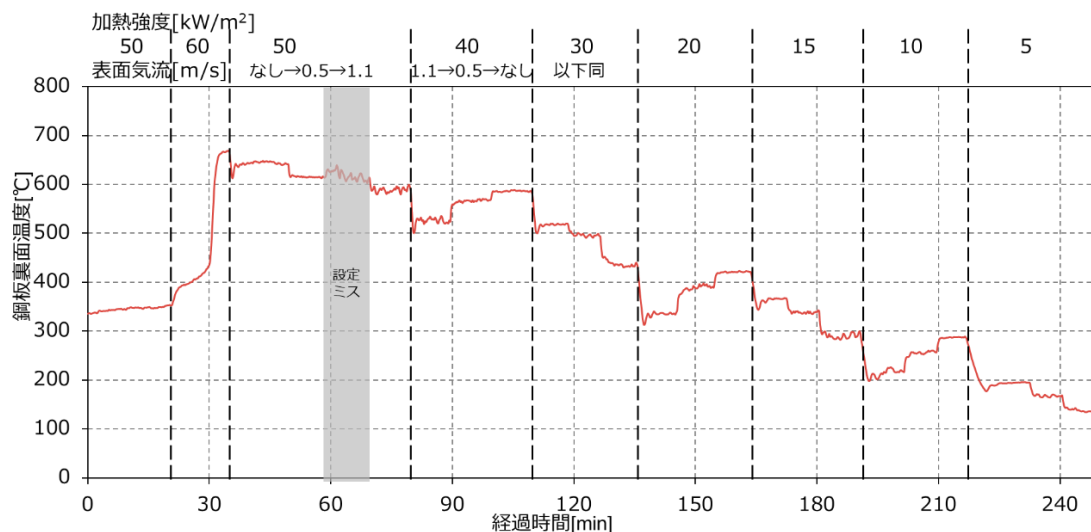


図 4.4- 4 試験体温度の時間変化（2 回目）

表 4.4-1 加熱強度と表面気流、試験体温度の一覧

設定 加熱 強度 [kW/m ²]	試験 体の 入射 強度 [kW/m ²]	試験体温度[°C]									
		強制 気流 なし (土橋 ¹⁾)	強制気流なし			0.5m/s			1.1m/s		
			ave.	1 回目	2 回目	ave.	1 回目	2 回目	ave.	1 回目	2 回目
5	6.4	199.6	193.1	194.3	191.8	155.0	167.6	142.3	128.2	136.2	120.1
10	12.0	298.9	291.2	287.3	295.2	246.2	256.0	236.4	210.2	213.8	206.7
15	17.4	377.4	371.6	366.6	376.7	328.1	338.1	318.1	283.2	288.2	278.2
20	22.6	441.5	429.6	421.4	437.8	384.1	390.0	378.1	334.8	335.3	334.2
30	34.0	540.2	526.5	518.2	534.8	491.9	496.4	487.5	435.5	434.3	436.8
40	42.7	601.9	595.7	586.9	604.5	563.3	566.6	560.0	517.9	527.2	508.6
50	53.7	663.7	650.1	645.0	655.1	620.4	615.8	624.9	581.4	589.1	573.7

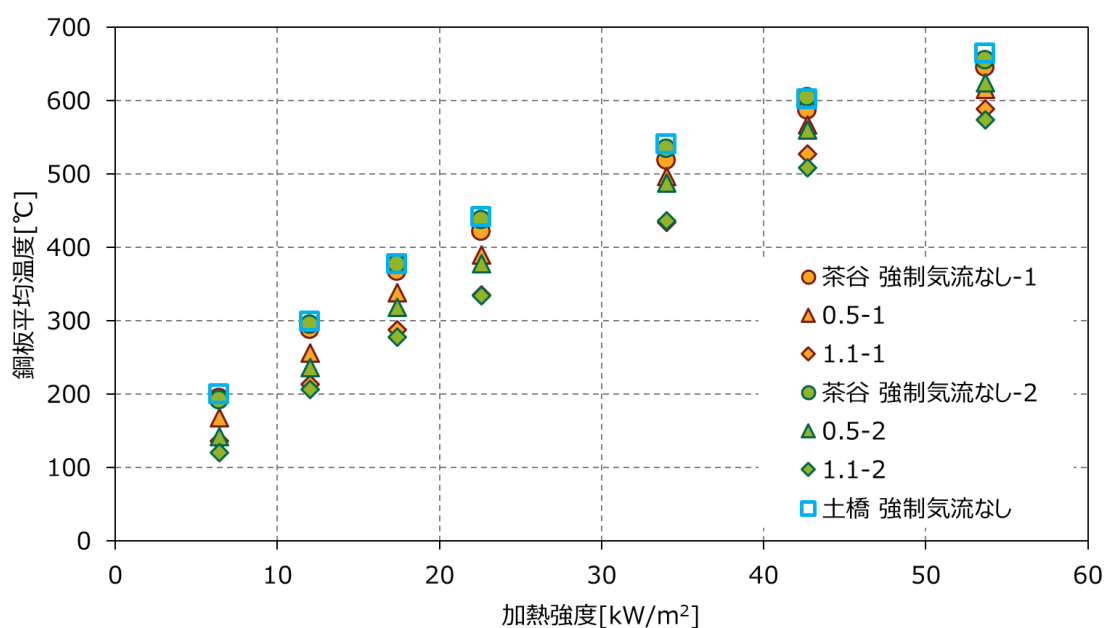


図 4.4-5 加熱強度と表面気流、試験体温度の関係

4.4.3 対流熱伝達率の算出

試験体表面が熱平衡状態になっていると見做して試験体表面の熱収支を計算して、各条件における対流熱伝達率を算出する。熱収支の模式図を図 4.4-6 に示す。試験体内部（セラミックブランケット）への熱伝導は十分に小さいとして無視すると、熱収支は式(4-1)～(4-4)で表される。

(試験体に入射する熱量)

= (試験体表面から反射する熱量) + (試験体表面から放射により損失する熱量)
 + (試験体表面から対流により損失する熱量)

$$q_e = q_{ref} + q_{rad} + q_{cv} \quad (4-1)$$

ここで、

$$q_{ref} = (1 - \varepsilon)q_e \quad (4-2)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4) \quad (4-3)$$

$$q_{cv} = \alpha_{s,v}(T_s - T_0) \quad (4-4)$$

各記号については本章末の記号表に示す。(以下同様)

式(4-1)～(4-4)に表 4.4- 1 の測定結果を代入すると、各条件における対流熱伝達率 $\alpha_{s,v}$ が求まる。

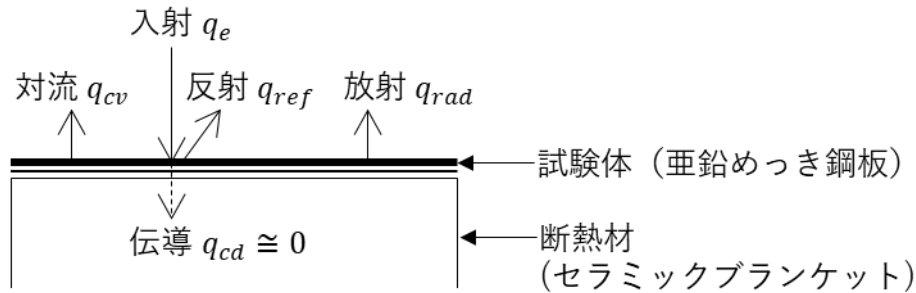


図 4.4- 6 試験体表面の熱収支の模式図

各表面気流速度における試験体温度と対流熱伝達率の関係を図 4.4- 7 に示す。試験体温度が約 450℃以下の範囲において、対流熱伝達率は試験体温度に依存せずおよそ一定となり、強制気流が無い条件では約 16.8W/m²K で土橋ら¹⁾の結果とおおよそ一致した。表面気流速度 0.5m/s では約 25.1 W/m²K、1.1m/s では約 34.5W/m²K であった。試験体温度 450℃を超え、650℃以下の範囲においてもおよそ一定値となり、気流なしでは約 15.0W/m²K、0.5m/s では約 22.0 W/m²K、1.1m/s では約 31.0W/m²K であった。

図 4.4- 8 に表面気流速度と対流熱伝達率の関係を示す。対流熱伝達率 $\alpha_{s,v}$ [kW/m²K]は、表面気流速度 v [m/s]を用いて式(4-5)で表される。

$$\alpha_{s,v} = \begin{cases} (16.9 + 16.1v) \times 10^{-3} & (150 \leq T_s \leq 450) \\ (14.9 + 14.5v) \times 10^{-3} & (450 < T_s \leq 650) \end{cases} \quad (4-5)$$

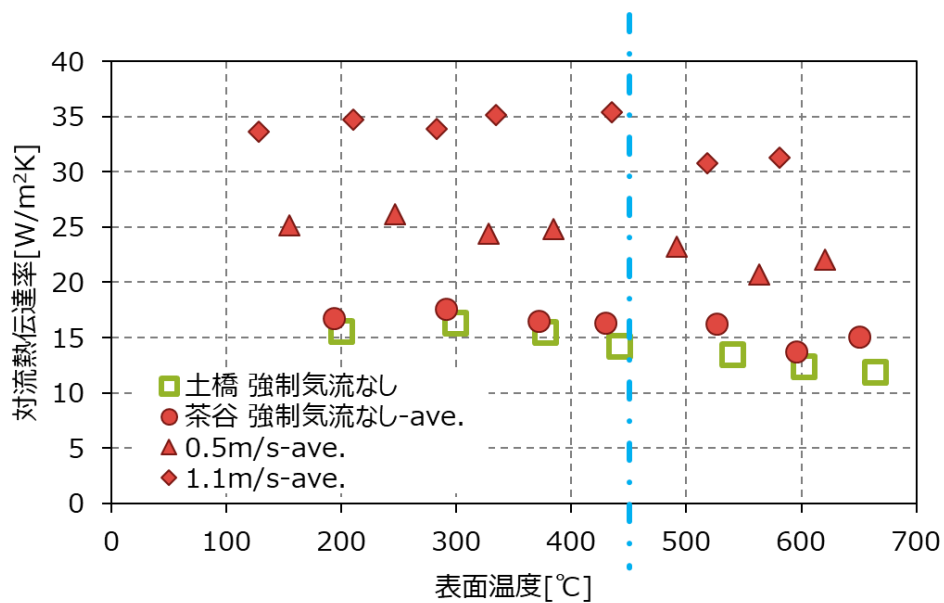


図 4.4-7 気流速度と試験体温度、対流熱伝達率の関係

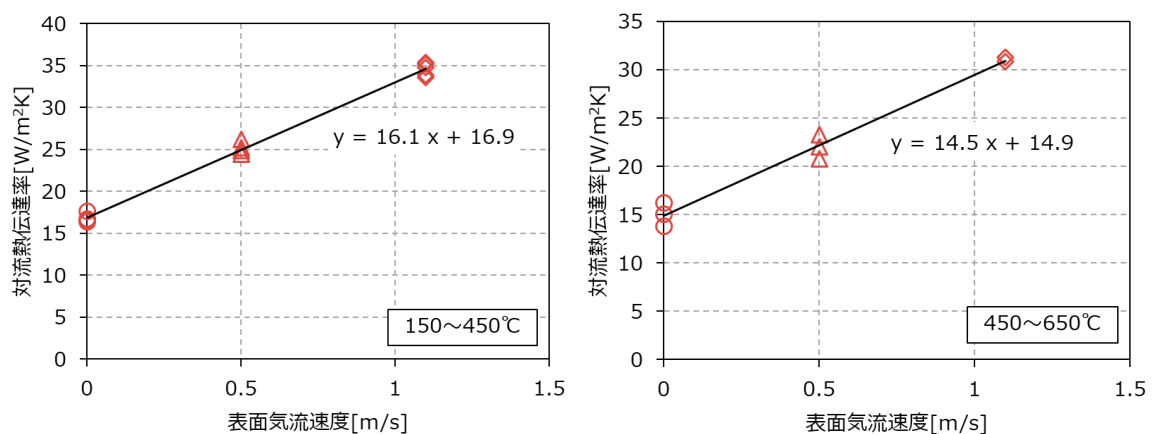


図 4.4-8 表面気流と対流熱伝達率の関係

4.5 実験結果の比較と赤熱反応性状の定量化

4.3 節の実験結果と、4.4 節で求めた対流熱伝達率を用いて、実験結果の考察を行い、赤熱反応速度と停止条件への表面気流の影響を定量化する。

4.5.1 燃焼の様子

加熱強度 15kW/m^2 の測定において、表面気流による赤熱反応の目視観察の違いを図 4.5-1 に示す。表面気流を与えていない場合、目視ではぼんやりと赤らんでいることが分かる程度の赤熱しか発生していない。0.5m/s の表面気流を与えると、亀裂の角部の気流が直接当たっている箇所でのみ赤く発光して赤熱していることが観察できる。1.1m/s の表面気流では、試験体の表面全体が赤く発光して赤熱している。さらに、気流が当たる亀裂の角部では黄色く発光して、

より激しく赤熱している。同じ加熱強度でも、表面気流が強いほど、赤熱が激しくなっていることが目視観察から確認出来る。



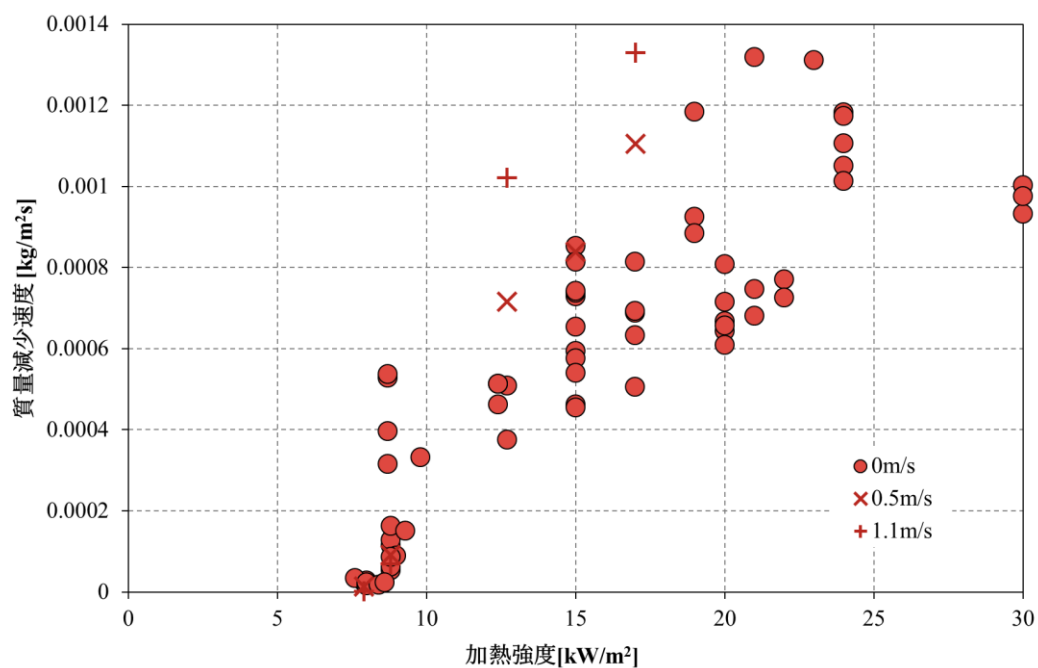
図 4.5-1 表面気流速度による赤熱燃焼の違い

4.5.2 燃え止まり条件

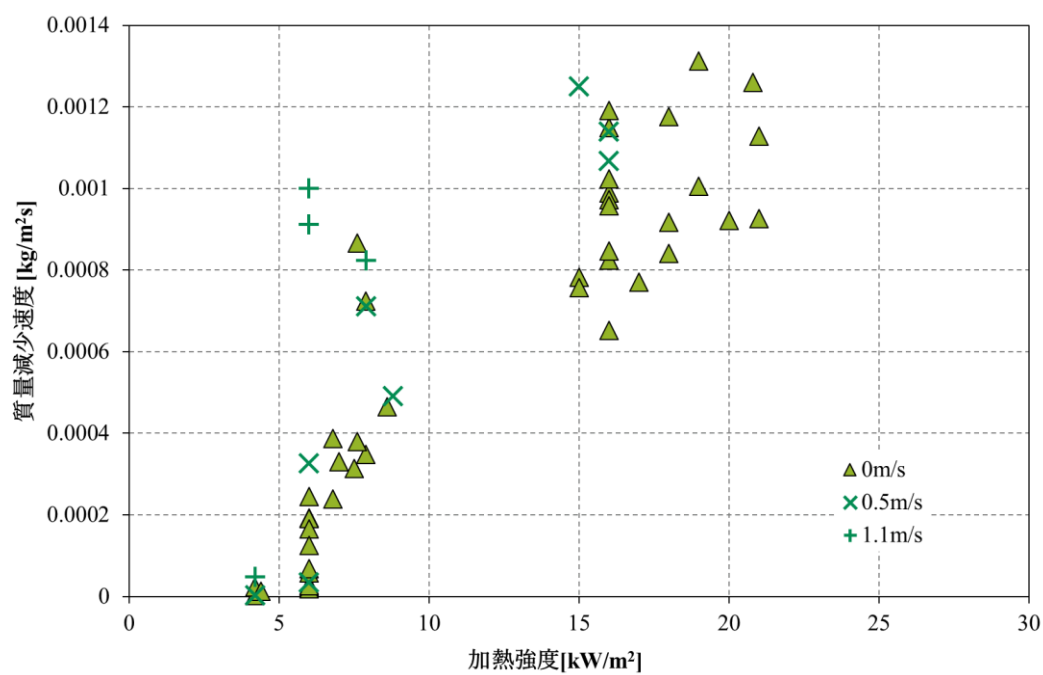
赤熱反応中の加熱強度と質量減少速度の関係を図 4.5- 2 に、加熱強度と表面温度の関係を図 4.5-3 に示す。第 3 章で示した強制気流を与えていない測定データも併せて示す。気流がない場合に燃え止まっていない加熱強度域においては、気流がない場合のデータと比較して、0.5m/s の気流速度ではわずかに質量減少速度が大きく、1.1m/s では明確に質量減少速度が大きい。表面温度は、0.5m/s では気流がない場合と同程度で、1.1m/s では気流がない場合よりも大きい。同じ加熱強度において、気流が生じていると質量減少速度は増加するにも関わらず、表面温度上昇が少ないのは、表面気流による対流熱損失の増加が原因と考えられる。

気流がない場合に燃え止まっている加熱強度域において、今回測定した気流速度では、同様に燃え止まった。スギの加熱強度 6.0kW/m^2 では、気流がない場合でも燃え止まった実験と燃え止まらなかった実験が混在しているが、気流がある場合も同様であった。燃え止まっている場合、表面温度は気流が生じていると、気流がない場合と比較して明確に低下しており、これも対流熱損失によるものと考えられる。

Crielaard ら²⁾によるスプルース CLT の赤熱反応の測定では、気流無しで燃え止まった加熱強度 6.0kW/m^2 において、0.5m/s では燃え止まり、1.0m/s では燃え止まらなかったと報告しており、本研究の測定結果とは異なっている。ただし、Crielaard らの測定は各条件 1 体ずつとなっており、スギの加熱強度 6.0kW/m^2 と同様に、バラツキがある可能性もある。

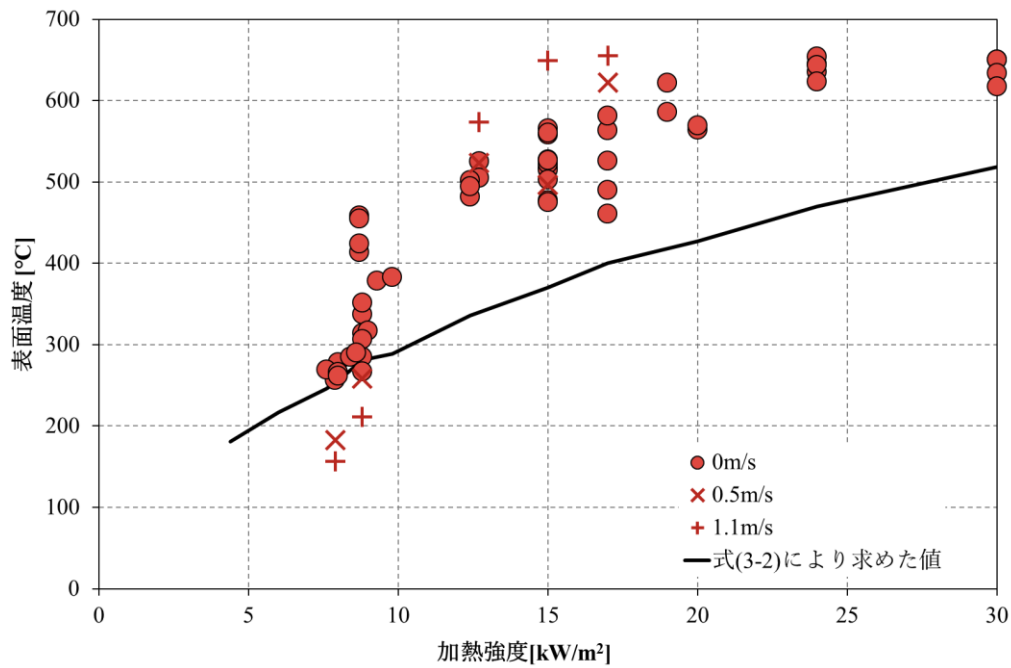


(a) カラマツ

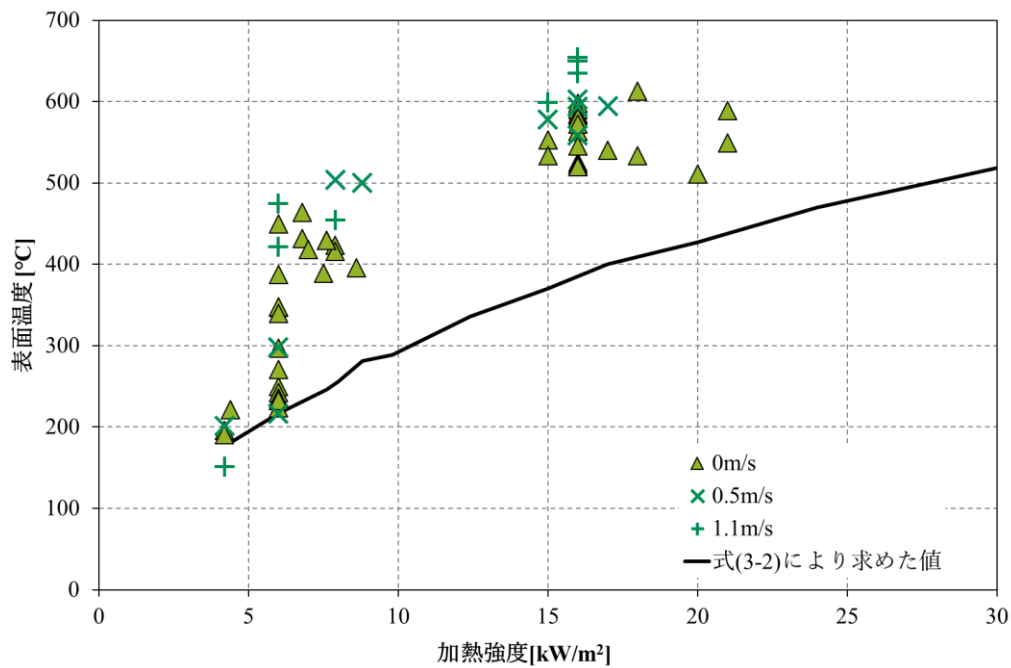


(b) スギ

図 4.5-2 表面気流速度と加熱強度、質量減少速度の関係



(a) カラマツ



(b) スギ

図 4.5-3 表面気流速と加熱強度、表面温度の関係

4.5.3 試験体表面の熱収支

4.4 節で求めた対流熱伝達率を用いて、試験体表面の熱収支を計算する。図 4.5-4 に試験体表面の熱収支の模式図を示す。表面温度と質量減少速度は時間的に一定となった期間に測定したため、試験体表面は準定常状態になっていると仮定すると、熱収支は式(4-6)～(4-9)で表される。試験体内部への熱伝導は他の項に比べて十分に小さいため、無視するものとする。これ

らを解くことにより、赤熱による発熱量 q_{ox} を求めることが出来る。

(試験体に入射する熱量)+(赤熱により発生する熱量)
 =(試験体表面から反射する熱量)+(試験体表面から放射により損失する熱量)
 +(試験体表面から対流により損失する熱量)

$$q_e + q_{ox} = q_{ref} + q_{rad} + q_{cv} \quad (4-6)$$

ここで、

$$q_{ref} = (1 - \varepsilon)q_e \quad (4-7)$$

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_0^4) \quad (4-8)$$

$$q_{cv} = \alpha_{s,v}(T_s - T_0) \quad (4-9)$$

対流熱伝達率 $\alpha_{s,v}$ には式(4-5)を用いる。

また、赤熱による発熱速度は、実験による質量減少速度の測定値を用いて、次式で求めることも出来る。

$$q_{ox,m} = \Delta H \times \frac{dm_{ox}}{dt} \quad (4-10)$$

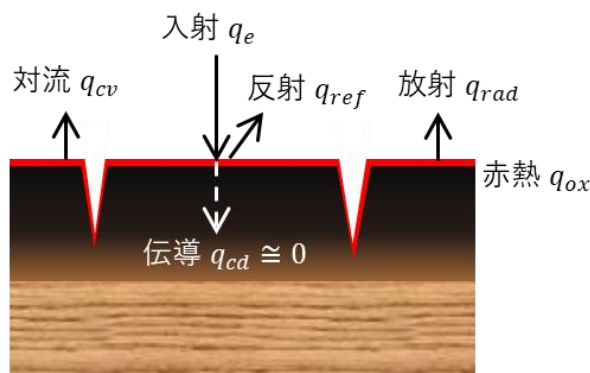


図 4.5-4 試験体表面の熱収支模式図

式(4-6)～(4-9)を用いて求めた発熱速度の値と、式(4-10)を用いて求めた発熱速度の値を比較して、これまでの検証で用いてきた下記の仮定が妥当なものであることを確かめる。

- ・ 赤熱反応が発生している準定常状態において、試験体内部における熱分解面と水分蒸発面の進行速度[mm/s]は同等である (3.4.1 項より)
- ・ 試験体内部への熱伝導は他の項に比べて十分に小さい

例えば、実験 No.3 の測定値を代入して計算すると、赤熱による発熱速度はそれぞれ式(4-6)～(4-9)からは 26.23kW/m²、式(4-10)からは 29.27kW/m² となり、十分に近い値といえる。

その他の実験についても同様に求めた結果を図 4.5-5 に示す。式(4-6)～(4-9)を用いて求めた値の方が少し大きい傾向にはあるが、全体的には良い精度で一致している。よって上述の仮定は妥当と言える。

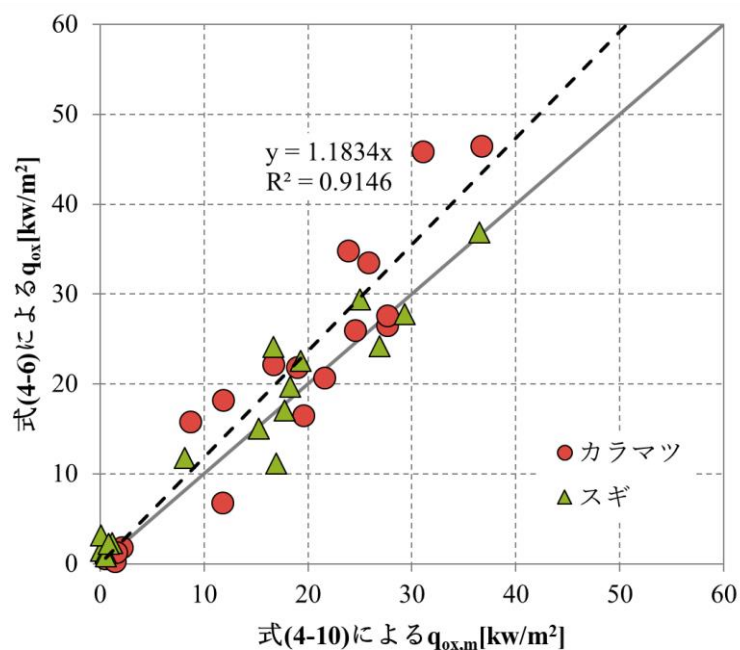


図 4.5- 5 赤熱による発熱速度の 2 種類の算出値の比較

4.5.4 赤熱反応速度式の作成

表面温度と質量減少速度の関係を図 4.5- 6 に示す。第 3 章で示した表面気流を与えていない実験データと、作成した速度式(3-5)も併せて示す。バラツキはあるものの、同じ表面温度のデータを比較すると、表面気流が存在する場合の質量減少速度は、表面気流を与えていない場合の質量減少速度以上の値となっており、気流が強いほど質量減少速度も大きい傾向にある。

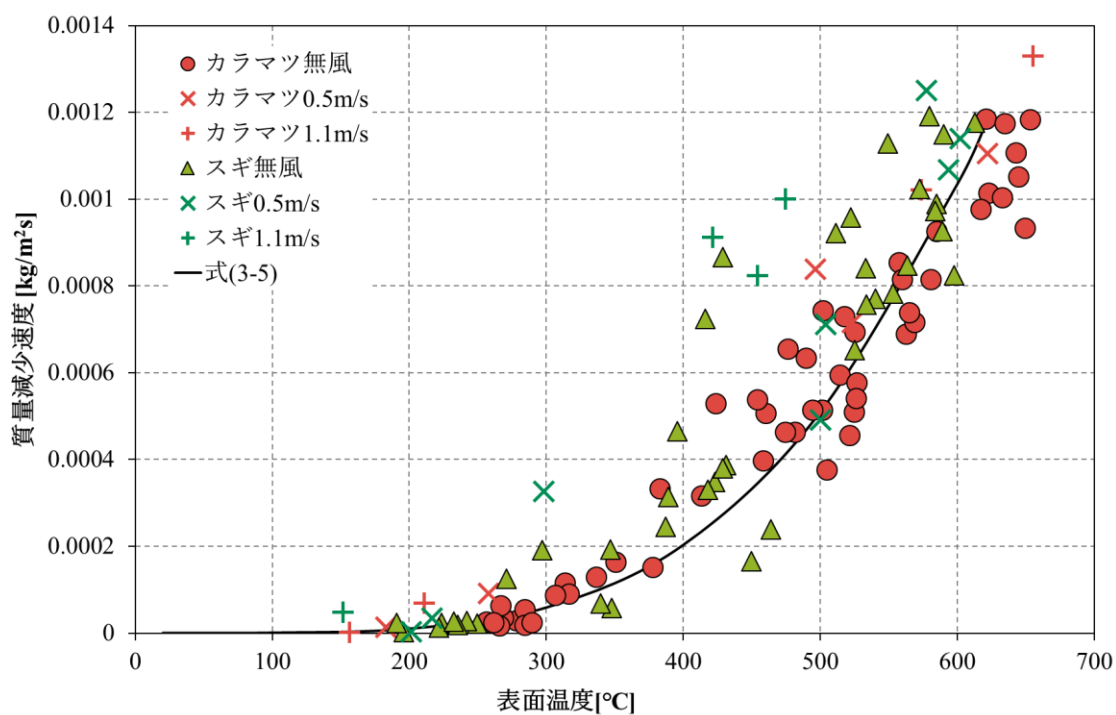


図 4.5- 6 表面気流速度と表面温度、質量減少速度の関係

そこで、赤熱反応速度に対する表面気流の影響を、気流を与えていない場合の赤熱反応速度式(3-5)をベースにして、式(3-5')のように頻度因子 m_0A_0'' と活性化エネルギー $E_{ox,A}$ に対する係数 $f(v)$ および $g(v)$ として組み込むことにする。第3章において表面気流を与えない場合の考察から、カラマツの赤熱反応速度式がスギにも適用出来る可能性を示したが、表面気流を与える場合も同様と考えて、本項ではカラマツとスギの実験値を一括して扱って速度式を作成した。

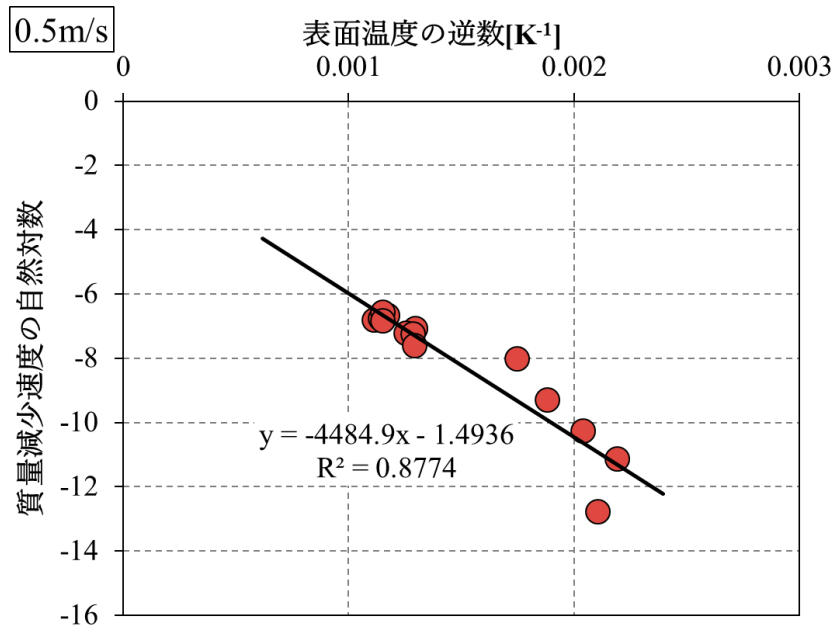
まず、各気流速度の実験値を用いて、それぞれアレニウス型の速度式を作成する。表面温度の逆数を x 軸に、質量減少速度の自然対数を y 軸にとってアレニウスプロットを作成すると図 4.5- 7 となる。回帰直線を求めると式(4-11)となり、式変形をして式(4-12)で各表面気流速度における質量減少速度と表面温度の関係式を求めることが出来る。さらに、式(3-5')の形に合わせて各項を分解すると、頻度因子と活性化エネルギーに対する係数 $f(v)$ および $g(v)$ を求めることが出来る。それぞれ、 $f(0.5) = 0.907$ 、 $f(1.1) = 0.577$ 、 $g(0.5) = 0.937$ 、 $g(1.1) = 0.832$ である。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = m_0A_0'' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,A}}{R_gT_s}\right) = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5)$$

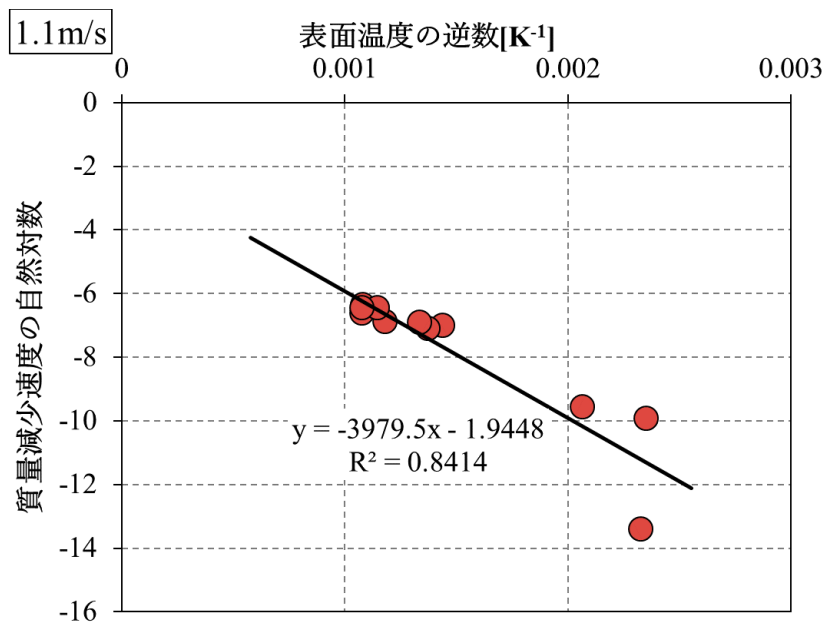
$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times f(v) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3 \times g(v)}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5')$$

$$\begin{cases} \ln\left(\left|\frac{dm_{ox,A}}{dt}\right|_{v=0.5}\right) = -4484.9\frac{1}{T_s} - 1.4936 \\ \ln\left(\left|\frac{dm_{ox,A}}{dt}\right|_{v=1.1}\right) = -3979.5\frac{1}{T_s} - 1.9448 \end{cases} \quad (4-11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left|\frac{dm_{ox,A}}{dt}\right|_{v=0.5} = 0.225 \times \exp\left(-\frac{37.287 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \\ \qquad \qquad \qquad = 0.248 \times 0.907 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 0.937 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \\ \left|\frac{dm_{ox,A}}{dt}\right|_{v=1.1} = 0.143 \times \exp\left(-\frac{33.086 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \\ \qquad \qquad \qquad = 0.248 \times 0.577 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 0.832 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (4-12-1) \\ (4-12-2) \end{array}$$



(a) 0.5m/s



(b) 1.1m/s

図 4.5-7 有風実験のアレニウスプロット

係数 $f(v)$ および $g(v)$ と表面気流速度 v の関係を図 4.5- 8 に示す。 $v = 0.0$ のときに係数 $f(0.0)$ および $g(0.0)$ が 1 となるように回帰直線を作成すると、式(4-13)となる。

$$\begin{cases} f(v) = -0.3508 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \\ g(v) = -0.1483 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \end{cases} \quad (4-13)$$

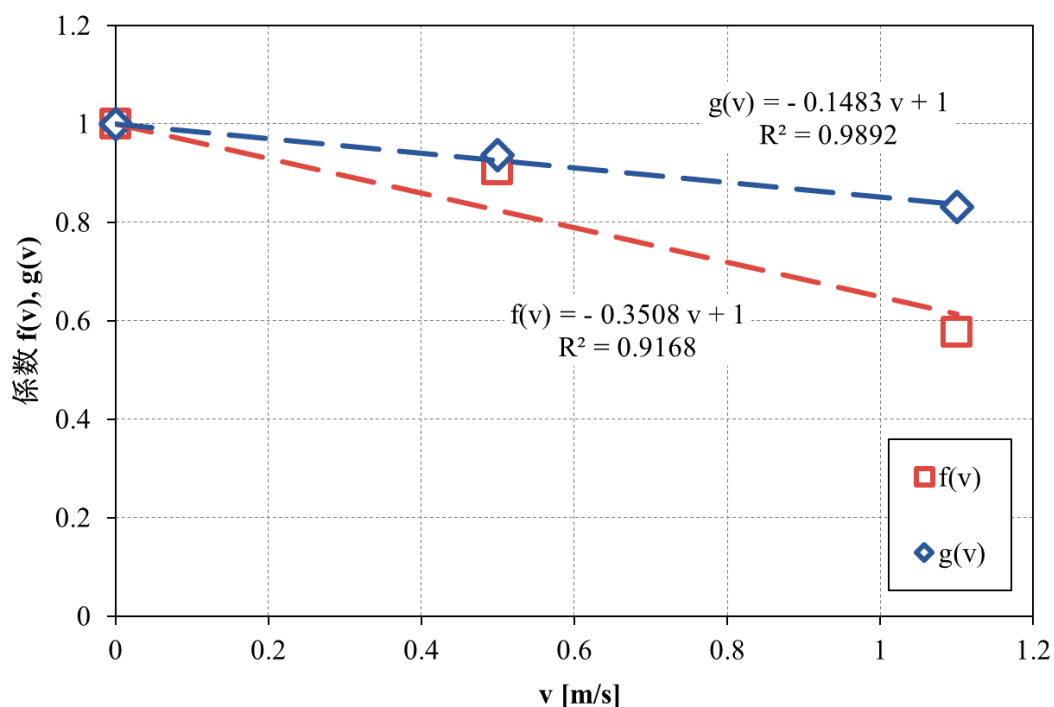


図 4.5- 8 表面気流の影響を速度式に組み込むための係数

4.6 4 章のまとめ

第 4 章では試験体表面に気流が発生している場合の赤熱反応性状を測定した。本章で測定した気流速度 0.5m/s および 1.1m/s においては、赤熱反応の停止条件は気流を与えない場合と同等であった。赤熱反応速度は、同じ表面温度で比較すると表面気流が強いほど質量減少速度が増加するため、第 3 章で作成した赤熱反応速度式に表面気流の影響を組み込んだ。

第 4 章で用いた記号表

記号	定義	値	単位
E_{ox}	赤熱反応の活性化エネルギー	—	kJ/kmol
ΔH	赤熱による単位発熱量	—	kJ/kg
$m_0 A_0$	頻度因子	—	s ⁻¹
dm_{ox}/dt	赤熱反応のみによる質量減少速度	—	kg/m ² s
q_e	試験体表面の入射熱量（ヒーターの加熱強度）	—	kW/m ²
q_{ref}	試験体表面で反射する熱量	—	kW/m ²
q_{rad}	試験体表面における放射による損失熱量	—	kW/m ²
q_{cv}	試験体表面における対流による損失熱量	—	kW/m ²
q_{ox}	赤熱によって発生する熱量	—	kW/m ²
R_g	気体定数	8.31	kJ/kmol K
T_s	試験体表面温度	—	K
T_0	雰囲気温度	—	K
v	表面気流速度	—	m/s
$\alpha_{s,v}$	表面気流速度 v [m/s]における対流熱伝達率	—	kW/m ² K
ε	試験体表面の放射率	0.95	—
σ	ステファン・ボルツマン定数	5.67×10^{-11}	kW/m ² K ⁴
添字 A	単位面積あたり	—	m ⁻²
添字 V	単位体積あたり	—	m ⁻³

[第 4 章の参考文献]

- 1) 土橋常登, 原田和典, 「コーンカロリメータ試験装置と着火性試験装置における材料表面の熱伝達」, 日本建築学会環境系論文集, 第 80 巻, 第 709 号, pp.193-201, 2015 年 3 月, <https://doi.org/10.3130/aije.80.193>
- 2) R. Crielaard, Jan-Willem van de Kuilen, etc., "Self-extinguishment of cross-laminated timber", Fire Safety Journal, Vol.105, pp.244-260, 2019/4, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.01.008>
- 3) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のための木材の赤熱反応速度の測定－表面気流の影響の確認－」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.143-146, 2022/9
- 4) 茶谷友希子, 原田和典, 「コーンカロリメータにおける強制気流を与えた材料表面の熱伝達」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.31-32, 2023/9
- 5) 茶谷友希子, 原田和典, 「木材の赤熱反応に対する表面気流の影響の定式化」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.175-176, 2024/9
- 6) Y. Chatani, K. Harada, "Measurement of Char Oxidation Rate of Glue Laminated Timber of Japanese Cedar and Larch under Forced Air Flow", Fire Safety Journal, Vol.141, 103913, 2023/10, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103913>

第5章 赤熱反応に対する酸素濃度の影響

第3章では、酸素濃度や表面気流を強制的に変化させていない通常雰囲気の状態において測定を行い、基本となる反応速度式や停止条件を求め、第4章では表面気流の影響を組み込んだ。第5章では、赤熱反応に対する雰囲気酸素濃度の影響を測定し、赤熱反応速度式に酸素濃度の影響を変数として組み込む。

なお、本章の一部は、文献 2)～5)で発表済の内容をもとに再編成したものである。ただし、一部の実験データは考察を見直したため、数値が異なっている場合がある。

5.1 実験の目的

本章では、大型熱重量分析装置を用いてカラマツ材の加熱実験を行う。一定温度の気体を供給してカラマツ材を炭化させたのち、供給気体の酸素濃度を 2～21% に設定して赤熱させて、炭化層の赤熱反応速度（質量減少速度）を測定する。測定結果から、炭化層の赤熱反応速度式と赤熱反応の停止条件（燃え止まり条件）を定量化することが目的である。

5.2 実験の方法

5.2.1 実験装置

大型熱重量分析装置は株式会社 K R I が独自に開発した試験装置である。一般的に用いられる熱重量分析装置¹⁾は試験体が粉末である必要があるが、本装置は大型化することで試験体を最大 30mm 角のブロック体としたものである。第3章および第4章ではコーンカロリメータを用いて放射加熱により赤熱反応性状を測定したが、コーンカロリメータの雰囲気空気の酸素濃度をコントロールすることは困難であるため、本章では大型熱重量分析装置を用いて測定を実施することとした。

図 5.2- 1 に実験装置の概要を、図 5.2- 2 に実験装置の写真を示す。加熱炉は熱交換器、測定チャンバー、上部チャンバーの 3 つから構成されている。空気と窒素、水蒸気を任意の割合で混合して目標の酸素濃度とした混合ガスを熱交換器で目標の温度まで昇温した後、測定チャンバーに一定速度で供給する。測定チャンバー内でガスの温度が低下しないように、測定チャンバーの側壁もヒーターとなっている。試験体は図 5.2- 2 に示す測定かごに入れられ、加熱炉上部に設置された電子天秤から窒素シールされた上部チャンバーを通して、測定チャンバーまで吊るされている。加熱炉を出た高温のガスはターレットラップで冷却され廃棄される。測定チャンバーは外径 89.1mm、内径 83.1mm の円筒形である。

測定チャンバー内を観察することが出来ないため、本測定の測定項目は質量減少速度（電子天秤）および、供給ガス温度、測定チャンバー内温度のみである。実験終了後には残った試験体の様子を観察した。

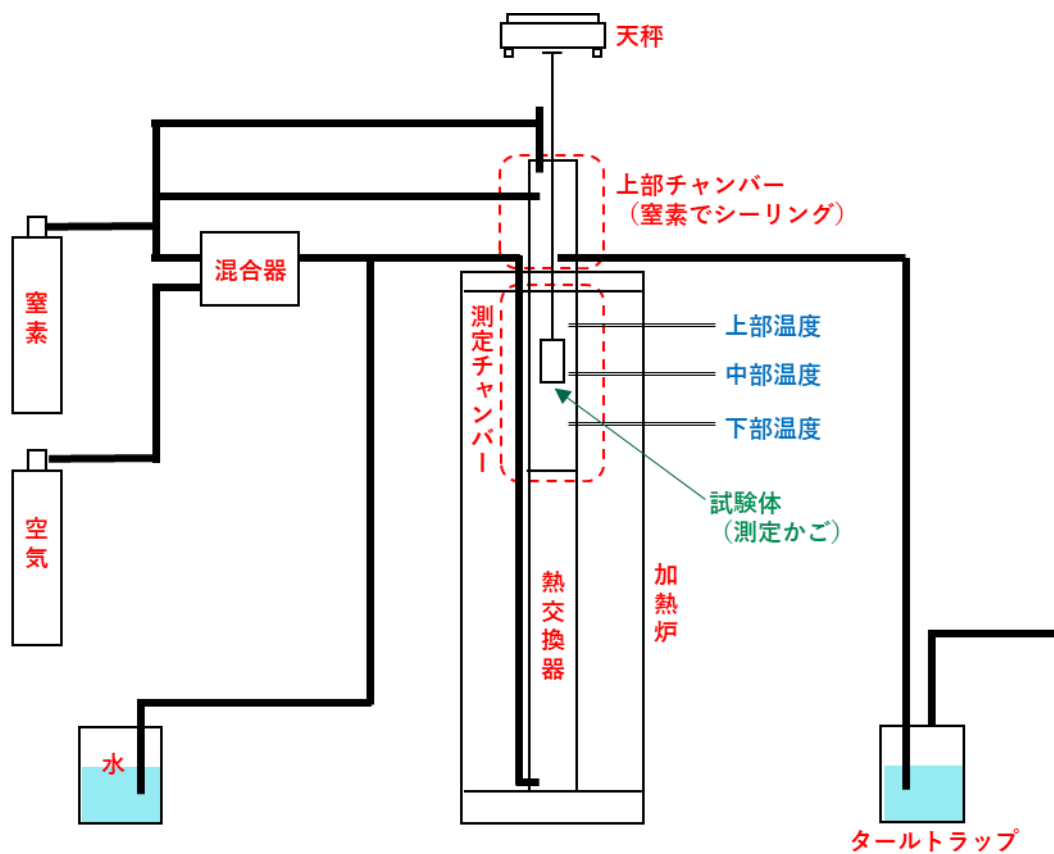


図 5.2-1 大型熱重量分析装置の概要図

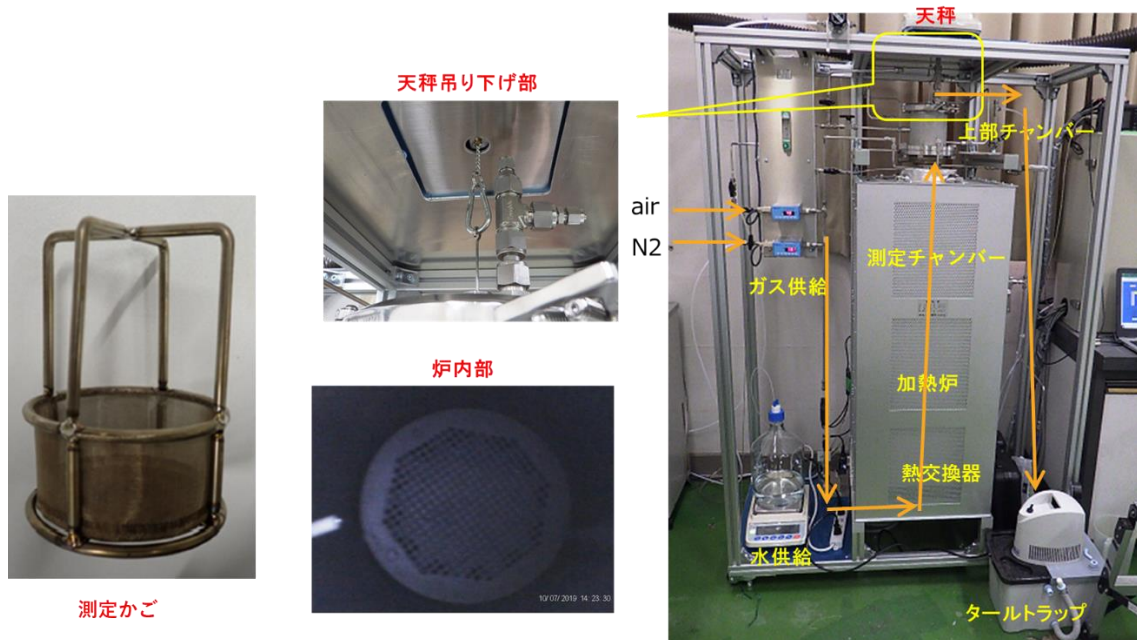


図 5.2-2 大型熱重量分析装置の写真

5.2.2 試験体

試験体は直方体形のカラマツ板材（一部は集成材）である。2 辺の長さは 30mm で固定とし、もう 1 辺の長さを 5, 10, 15, 30mm の 4 種類とした。試験体の写真を図 5.2- 3 に示す。表 5.2- 1 に全 31 回の実験の加熱前の試験体の物性値を示す。含水率は個別に測定していないが、試験体を切り出した母材の含水率は 10~12% の範囲であった。



図 5.2- 3 試験体

5.2.3 実験条件

測定は図 5.2- 4 に示す温度パターンで実施した。試験体を測定チャンバー内に設置した状態で窒素ガスを供給し、供給ガス温度を 400°C まで約 5°C/min の速度で昇温する。その後 400°C を保持しながら、試験体が完全に炭化し質量がほとんど減少しなくなるまで窒素ガス中で試験体を加熱し続ける。その後、供給ガスを任意の酸素濃度の混合ガスに切り替えて赤熱を発生させて、赤熱反応性状を測定した。測定終了後は供給ガスを窒素ガスに切り替えてヒーターを停止して常温に下がるまで放冷した。実験中を通じてガスの供給速度は、加熱中は 5NL/min（空塔速度 38mm/s）、冷却中は 2NL/min である。

酸素濃度は 3~21% の間で段階的に設定した。各実験の酸素濃度と加熱時間を表 5.2- 1 に併せて示す。一部の実験では、窒素ガスにより試験体を炭化させた後、酸素混合ガスに切り替えることなく測定を終了し、炭化後の試験体を観察した。

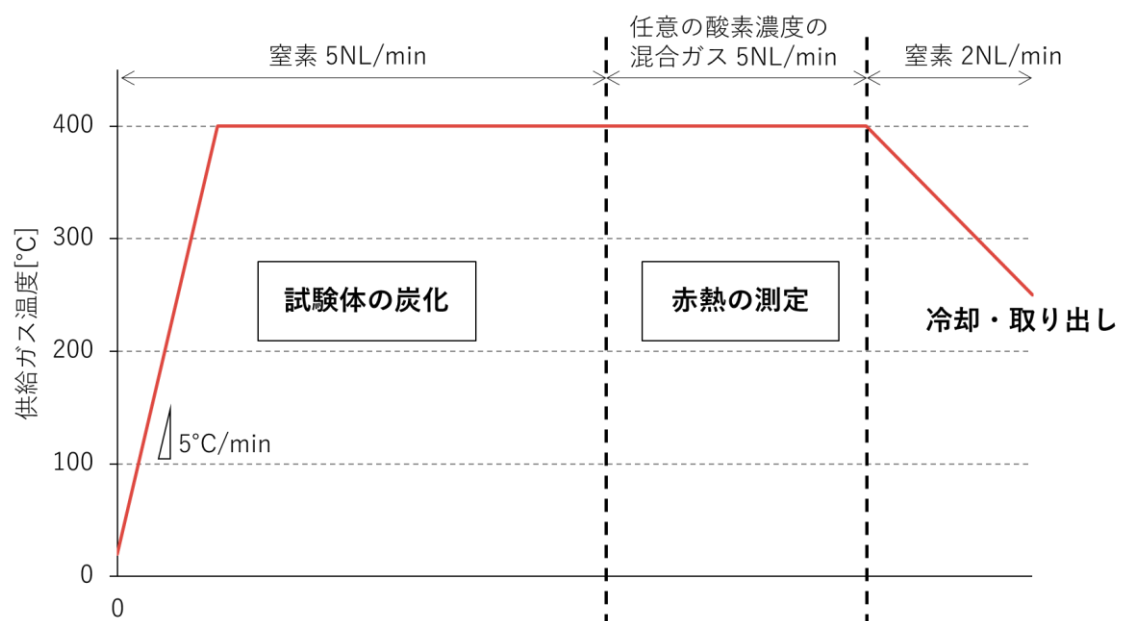


図 5.2-4 測定スケジュール

表 5.2-1 試験体の物性値と実験条件

実験 No.		試験体				酸素濃度[%]		実験スケジュール[min]	
		樹種	寸法		密度[kg/m³]	目標値	実測値	酸素ガス切替	加熱終了
			2 辺 [mm]	1 辺 [mm]					
48	Lo-5-21-1	カラマツ	30×30	5	0.41	21	21.0～21.3	251	450
49	Lo-5-21-2				0.41	21	21.0～21.3	251	370
50	Lo-5-20				0.40	20	20.2～20.4	251	450
51	Lo-5-19-1				0.40	19	19.2～19.4	250	450
52	Lo-5-19-2				0.40	19	18.9～19.2	250	450
53	Lo-5-18				0.42	18	17.7～18.0	250	450
54	Lo-5-15				0.40	15	15.1～15.3	250	450
55	Lo-5-12				0.41	12	12.2～12.3	250	450
56	Lo-5-N2				0.42	—	—	—	267
57	Lo-10-21				0.48	21	21.4～21.6	256	405
58	Lo-10-15				0.51	15	15.4～15.5	260	410
59	Lo-10-10				0.58	10	10.3	320	540
60	Lo-10-6				0.46	6	6.17～6.23	320	590
61	Lo-10-N2				0.54	—	—	—	325
62	Lo-15-21				0.45	21	21.4～21.6	260	440
63	Lo-15-15-1				0.44	15	15.3～15.5	260	440
64	Lo-15-15-2				0.48	15	15.3～15.5	270	450
65	Lo-15-12				0.48	12	12.1～12.2	255	435
66	Lo-15-9				0.53	9	9.00～9.05	300	450
67	Lo-15-6				0.54	6	6.05～6.07	308	490
68	Lo-15-3-1				0.53	3	3.00～3.02	310	490

実験 No.	試験体				酸素濃度[%]		実験スケジュール[min]	
	樹種	寸法		密度[kg/m ³]	目標値	実測値	酸素ガス切替	加熱終了
		2 辺 [mm]	1 辺 [mm]					
69	カラマツ	30×30	15	0.40	3	3.03～3.05	312	490
70				0.51	2	1.89～1.91	324	790
71				0.49	—	—	—	262
72		30×30	30	0.53	21	21.6～21.7	670	745
73				0.53	15	15.4～15.5	540	665
74				0.49	15	14.9	540	700
75				0.52	9	9.19～9.26	540	755
76				0.52	3	3.06～3.08	540	780
77				0.52	—	—	—	540
78				0.53	—	—	—	540

5.3 予備実験

本測定において試験体の加熱は、測定チャンバーへの供給ガス温度と測定チャンバーの炉壁ヒーターによりコントロールしている。供給ガス温度の制御は図 5.3- 1 に示す TC2 で行っている。加熱状況の把握のために、下記の 2 種類の予備実験を実施した。

- ・測定チャンバー内の温度分布の測定
- ・供給ガス温度 400℃における試験体温度の測定

5.3.1 測定チャンバー内の温度分布

(i) 測定条件

測定チャンバー内の温度は図 5.3- 1 に示す 3 つの熱電対 TC1, TC2, TC3 を用いて、測定チャンバーの鉛直方向長さ 480mm に対して、それぞれ下側（ガス供給側）から 288, 183, 88mm の位置で、測定チャンバーの直径（内径）83.1mm に対して炉壁から 10mm（炉中心から 31.55mm）の位置で、通常測定している。

試験体を入れる測定かご近傍の熱電対 TC2 が 400℃となるように供給ガス温度と測定チャンバーの炉壁ヒーターを制御した状態で、測定チャンバー内の温度分布を測定した。水平方向の温度分布を調べるために、TC2 が炉壁から 10mm の位置で 400℃になるまで供給ガスを加熱し熱交換器を制御した後、TC1, 2, 3 をそれぞれ炉内へ差し込み、炉壁から 20mm と 30mm の位置で測定を行った。このとき、測定かごには何も入れず、かごのみの状態で測定した。

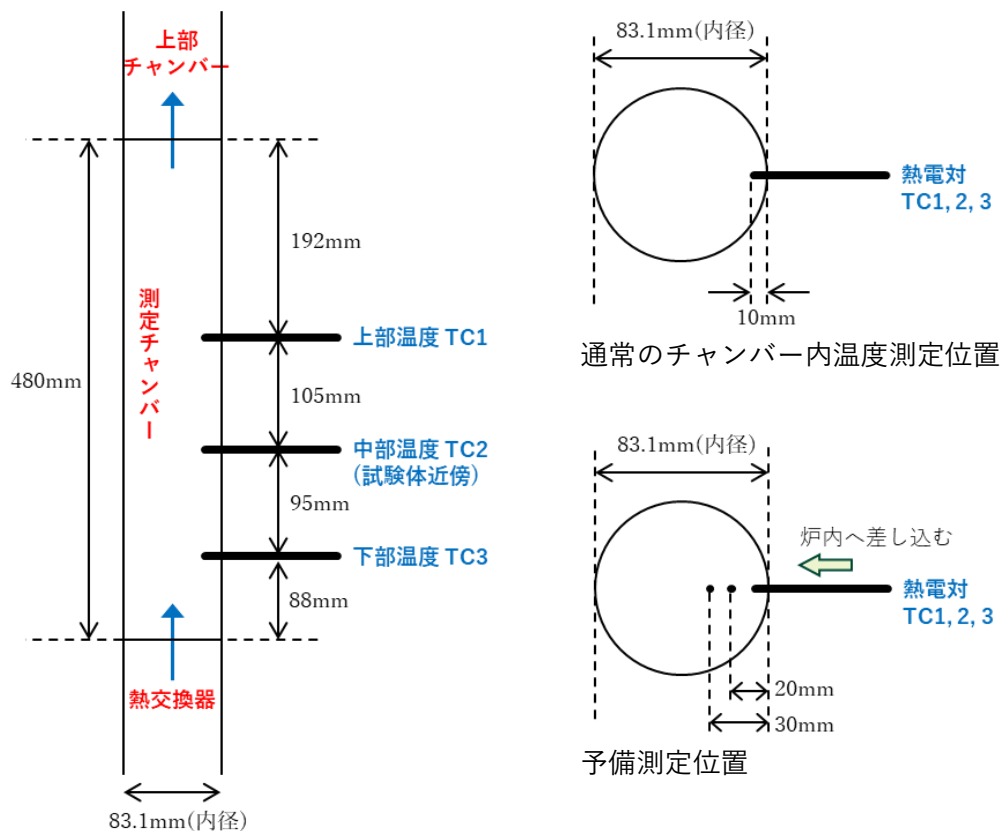


図 5.3- 1 測定チャンバーの炉内温度測定位置

(ii) 測定結果

測定結果を図 5.3-2 に示す。チャンバー内の鉛直方向の温度分布は、制御の TC2 と下部（供給口付近）の TC3 はほとんど差が無いが、上部の TC1 は他 2 つと比較して 30～70℃低くなっている。半径方向の温度分布は、炉の中心ほど炉壁ヒーターから遠ざかるため、低くなっている。しかし、その差は TC2 と TC3 については 10℃未満であり軽微と言える。

よって、試験体を入れる測定かご近傍においては、雰囲気ガス温度が 400℃で問題無く制御出来ていることを確認した。

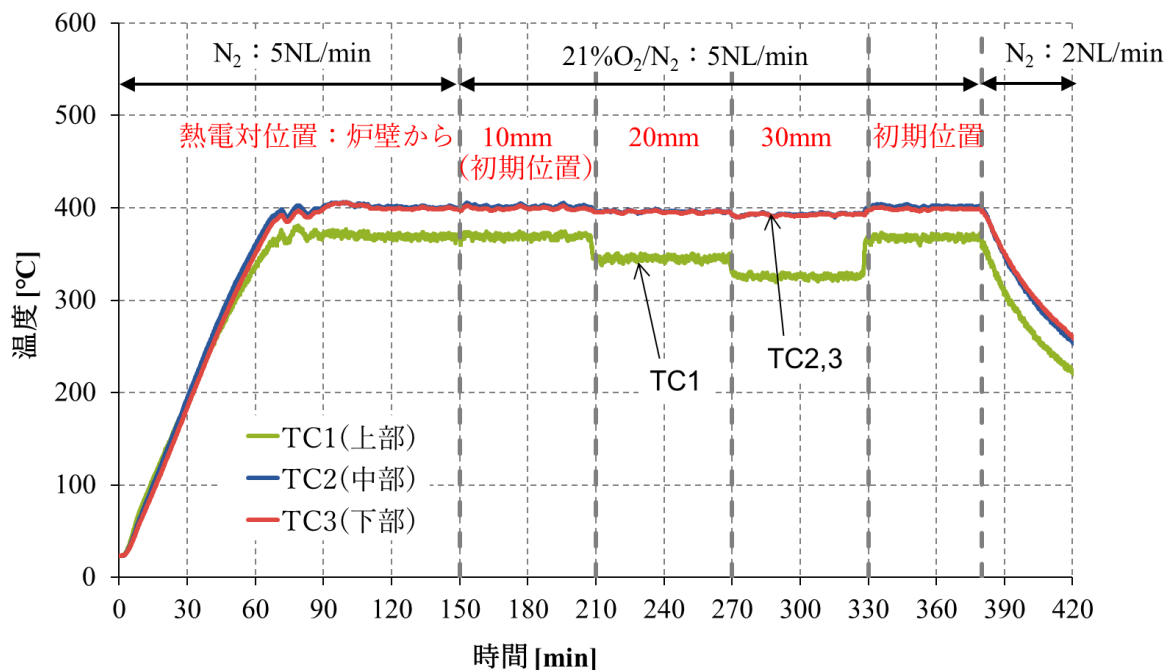


図 5.3-2 測定チャンバー内の温度分布

5.3.2 供給ガス温度 400℃における試験体温度

(i) 測定条件

本測定では、試験体の質量を吊り下げ式により測定しているため、試験体に熱電対を取り付けると質量の測定へ影響が出てしまう。そのため、試験体温度と質量を同時には測定できない。そこで、試験体の質量測定は行わずに、試験体の温度のみを測定する予備実験を実施した。

試験体は 30×30×5mm と 30×30×15mm の 2 種類で、図 5.3-3 に示すように試験体の中央に φ2mm、深さ各試験体厚みの半分となる約 2.5mm と 7.5mm の孔を開けてシース熱電対を挿入した。また、厚さ 15mm の試験体の測定時には測定かご内に K 熱電対を沿わせて、測定かご内の試験体直近の温度も測定した。

加熱は、本測定と同様に図 5.2-4 の温度パターンで実施した。酸素濃度は 21%とした。



厚み 5mm

15mm

図 5.3-3 試験体

(ii) 測定結果

厚み 5mm および 15mm の試験体の測定結果をそれぞれ図 5.3-4 と図 5.3-5 に示す。窒素加熱中の試験体中央の温度は 5mm 厚の試験体で約 340℃となっている。一方で、15mm 厚の試験体は 90～120 分にかけて 400℃付近まで温度が上昇したのち緩やかに約 370℃まで低下しており、5mm 厚の試験体よりも試験体中央の温度が高くなっている。理論的には、試験体が厚い方が試験体中央の温度が上昇するのには時間がかかると考えられるが、今回の測定では試験体が厚い方が温度が上昇している。秋田²⁾は、木材の熱分解中により発生した揮発性ガスが木材内部から表面に移動する過程において、高温の炭と接触分解あるいは接触重合を起こして発熱する可能性について言及しているが、本測定により観測された温度上昇がこの反応によるものかは定かではない。

酸素濃度 21%の混合ガスに切り替えると、試験体は赤熱し約 20 分で焼失する。赤熱反応は発熱反応であるため、試験体温度は約 450℃まで上昇する。

厚みによって多少の温度差はあるものの、熱分解完了時（混合ガスへの切り替え時）の温度が 350℃付近の測定値として、各厚みの試験体は同条件で加熱されているとして測定結果を取り扱うものとする。

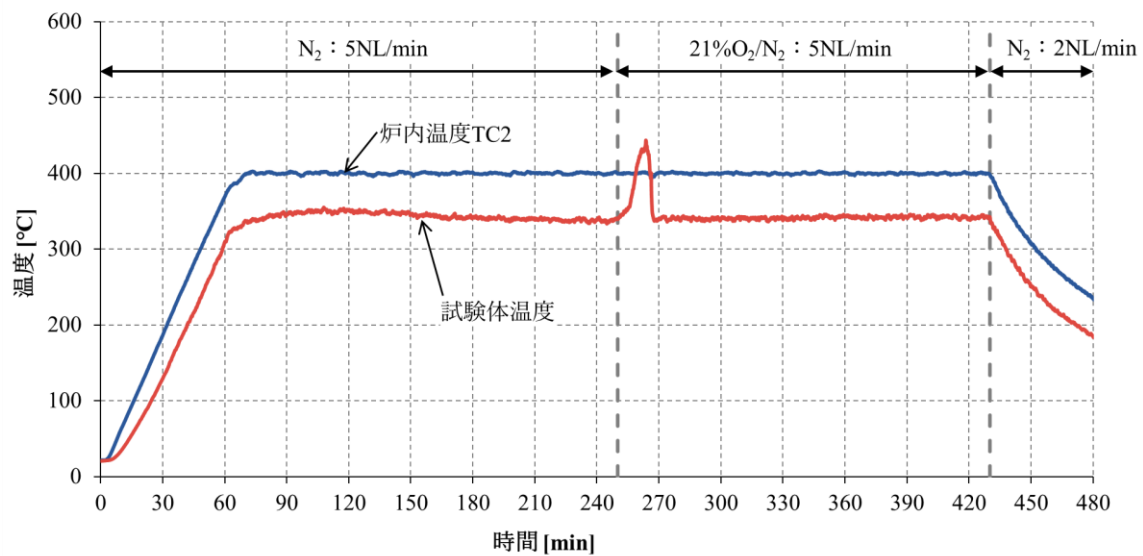


図 5.3- 4 厚み 5mm の試験体の測定結果

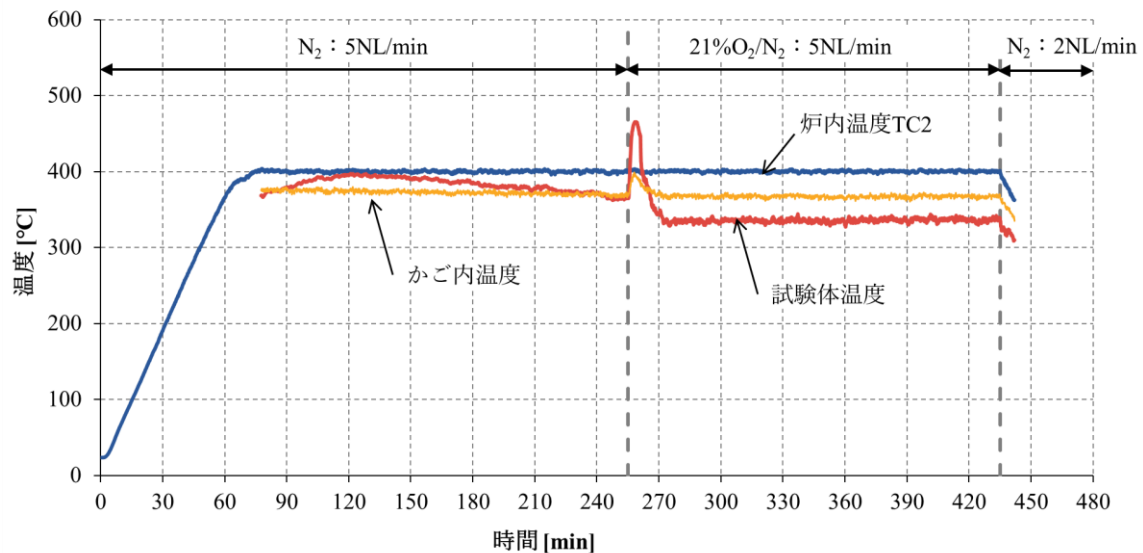


図 5.3- 5 厚み 15mm の試験体の測定結果

5.4 代表的な実験結果

本節では、全 31 回の実験のうち、5mm 厚と 15mm 厚の実験結果について、代表的なものをそれぞれ取り上げて示す。全ての実験結果の代表値は表 5.4- 1 に、実験結果の詳細は付録 2 にまとめて掲載する。

5.4.1 5mm 厚の実験結果

5mm 厚の試験体について、酸素濃度 21% (No.49_Lo-5-21-2)、19% (No.51_Lo-5-19-1)、18% (No.53_Lo-5-18) の供給ガス温度と試験体質量、質量減少速度の測定結果を図 5.4- 1～図 5.4- 6 にそれぞれ示す。

図 5.4- 1 に示すように、酸素濃度 21%では酸素混合ガスを供給するとすぐに赤熱して質量減少して燃え尽きる。このときの質量減少速度は 0.000845g/s （残量比減少速度 $0.000462\text{g/(g}\cdot\text{s)}$ ）であった。図 5.4- 7 に実験後に測定チャンバーから取り出した試験体の写真を示す。灰と微少な炭片が残っているのみであった。

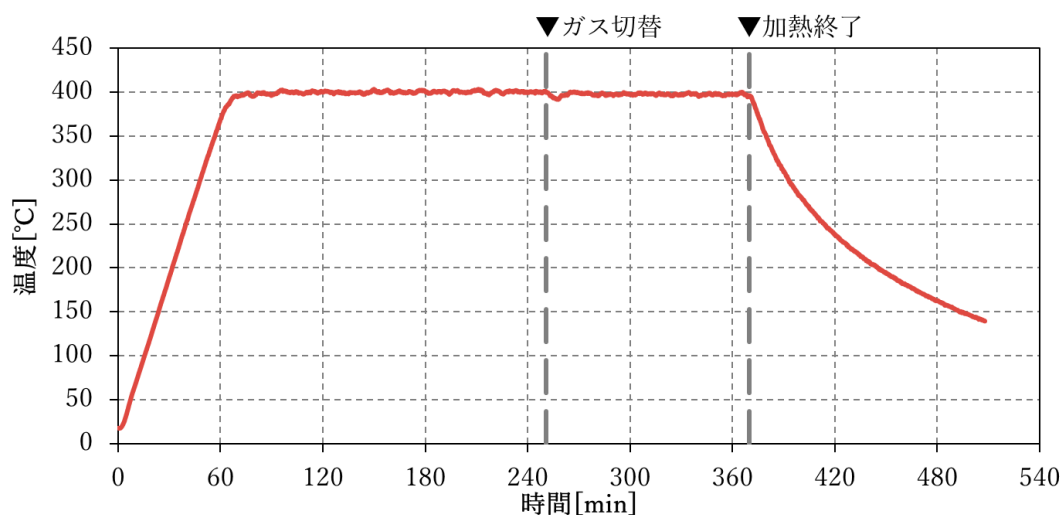


図 5.4- 1 供給ガス温度 (No. 49_Lo-5-21-2)

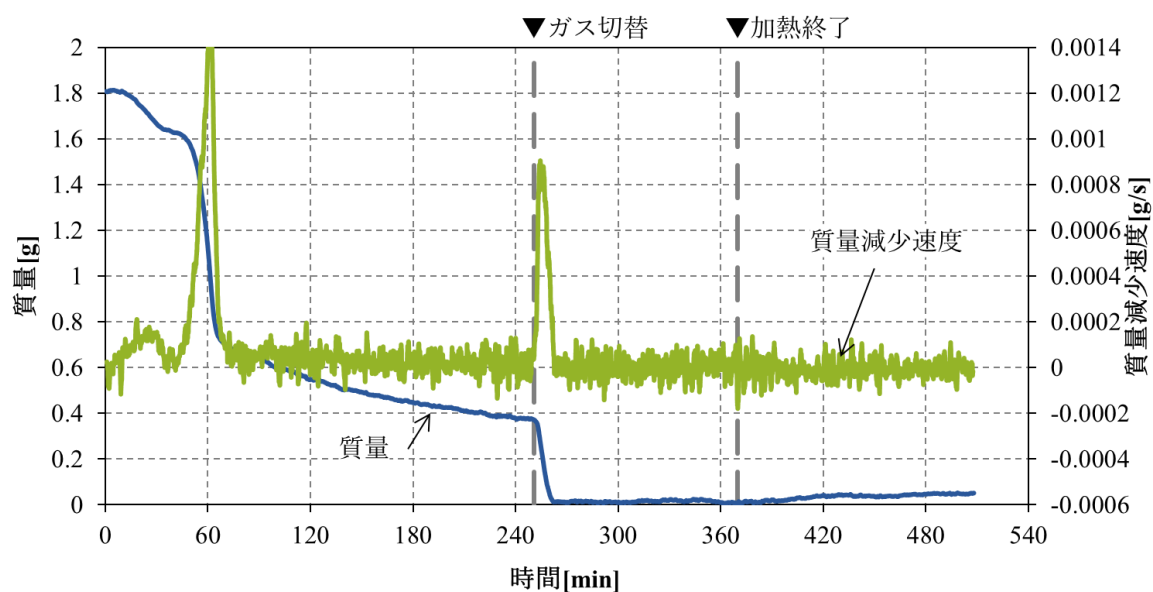


図 5.4- 2 試験体質量と質量減少速度 (No. 49_Lo-5-21-2)

一方、図 5.4-4 に示したように、酸素濃度 19%では酸素混合ガスを供給すると最初の約 10 分は急激に質量減少するが、以降は質量減少速度が緩やかに変化した。質量減少速度（残量比減少速度）はそれぞれ、 0.000537g/min ($0.000299\text{g/(g}\cdot\text{s)}$) と 0.000169g/min ($0.000094\text{g/(g}\cdot\text{s)}$) で

あり、それぞれ酸素濃度 21%の測定値と比較すると 69%と 22%まで低下している。実験後の試験体は、灰と炭片が混じっている状態であったが、酸素濃度 21%の試験体よりも残っている炭片の割合が多く寸法も大きかった。

酸素濃度 18%では、図 5.4- 6 に示すように、酸素混合ガスを供給しても急激な質量減少は発生せず、微少な質量減少が続いた。質量減少速度（残量比減少速度）は $0.000022\text{g}/\text{min}$ ($0.000012\text{g}/(\text{g}\cdot\text{s})$) であり、酸素濃度 21%の測定値と比較すると 3%まで低下している。実験後の試験体は板状の炭であり、一辺の長さが約 16mm まで収縮しているものの、初期形状を保っており、燃え止まったと判断した。

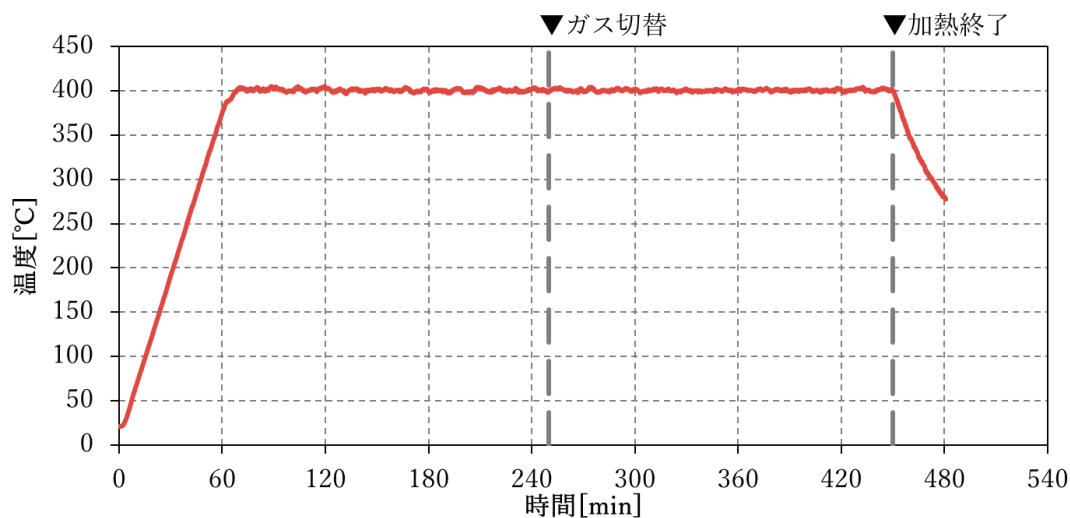


図 5.4- 3 供給ガス温度 (No. 51_Lo-5-19-1)

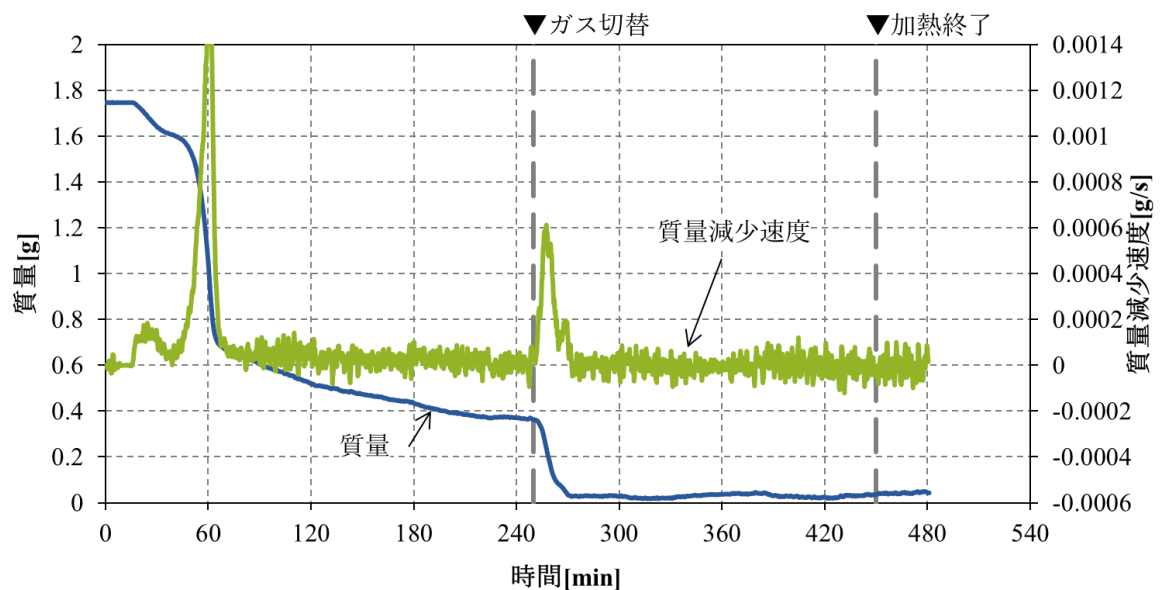


図 5.4- 4 試験体質量と質量減少速度 (No. 51_Lo-5-19-1)

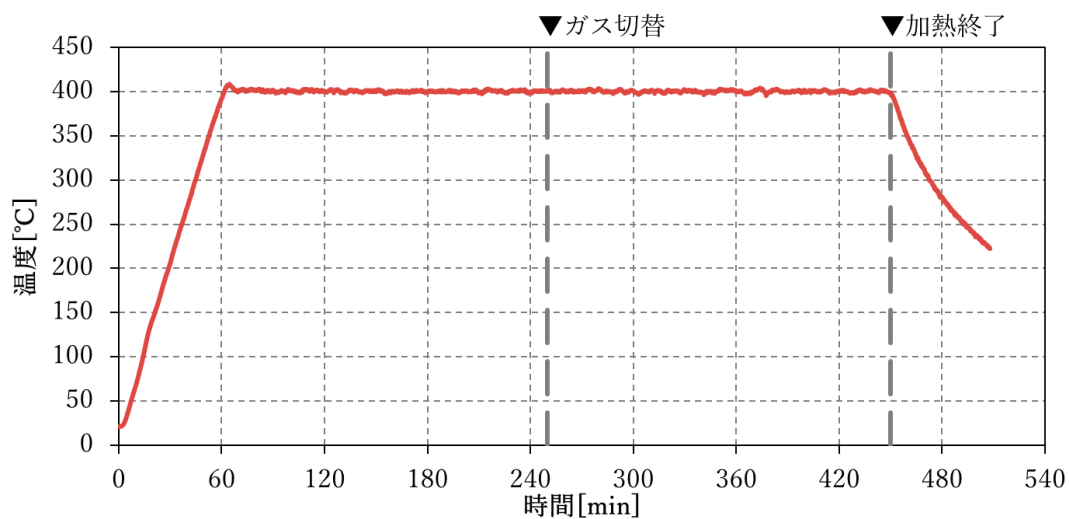


図 5.4- 5 供給ガス温度 (No. 53_Lo-5-18)

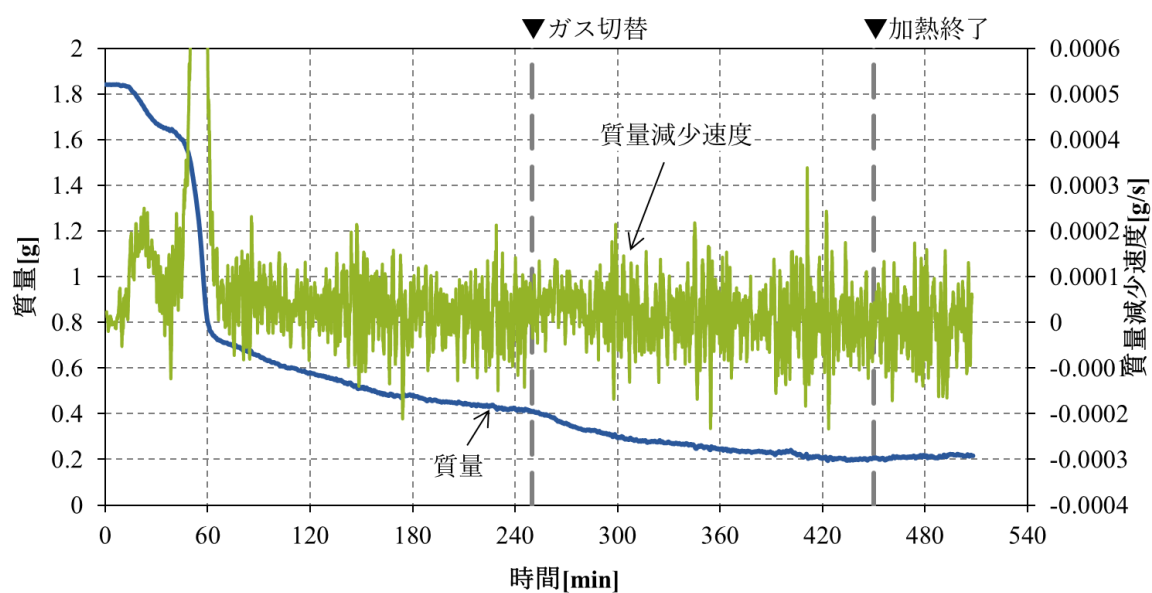


図 5.4- 6 試験体質量と質量減少速度 (No. 53_Lo-5-18)

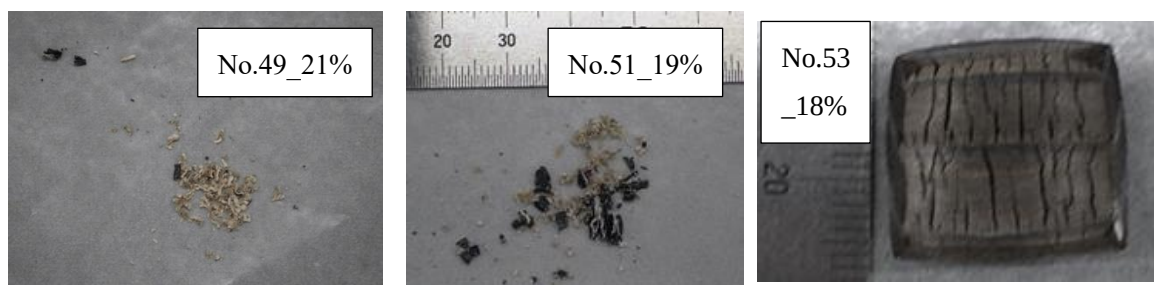


図 5.4- 7 実験後の試験体 (No. 49_21%および No. 51_19%、No. 53_18%)

5.4.2 15mm 厚の実験結果

15mm 厚の試験体について、酸素濃度 15% (No.63_Lo-15-15-1)、3% (No.68_Lo-15-3-1) の供給ガス温度と試験体質量の測定結果を図 5.4- 8～図 5.4- 11 にそれぞれ示す。

5mm 厚の試験体では酸素濃度 19% でほぼ燃え止まっていたのに対し、図 5.4- 9 に示すように 15mm 厚の試験体は酸素濃度 15% でも燃え尽きた。このときの質量減少速度は 0.001314g/min (残量比減少速度 $0.000221\text{g/(g}\cdot\text{s)}$) であった。図 5.4- 12 に実験後に測定チャンバーから取り出した試験体の写真を示す。灰と微少な炭片が残っているのみであった。

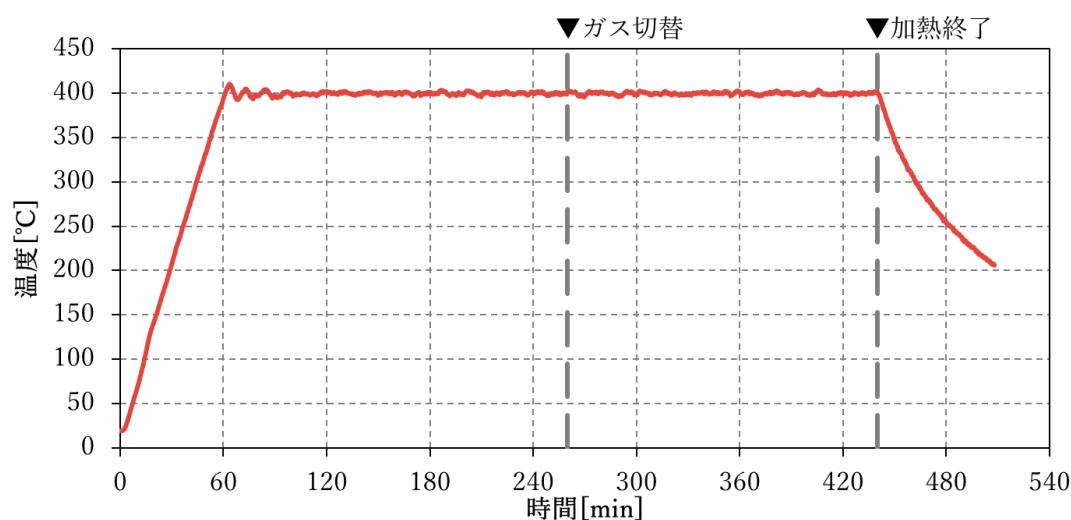


図 5.4- 8 供給ガス温度 (No. 63_Lo-15-15-1)

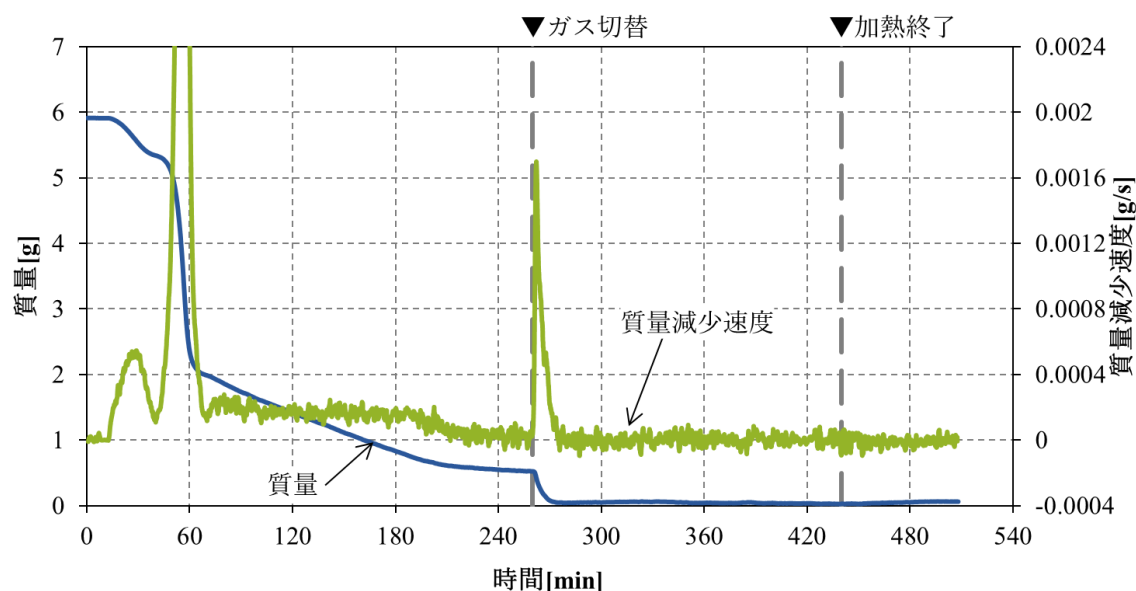


図 5.4- 9 試験体質量と質量減少速度 (No. 63_Lo-15-15-1)

図 5.4- 11 に示すように、酸素濃度 3%まで下げると酸素混合ガスを供給すると最初の約 20 分は急激に質量減少するが、以降は質量減少速度が緩やかに変化するようにになった。質量減少速度（残量比減少速度）はそれぞれ、0.000164g/min (0.000023 g/(g・s)) と 0.000023g/min (0.000003 g/(g・s)) であり、それぞれ酸素濃度 21%の測定値と比較すると 8%と 1%まで低下している。実験後の試験体は、崩れた炭片となっており、初期形状を留めてはいなかった。

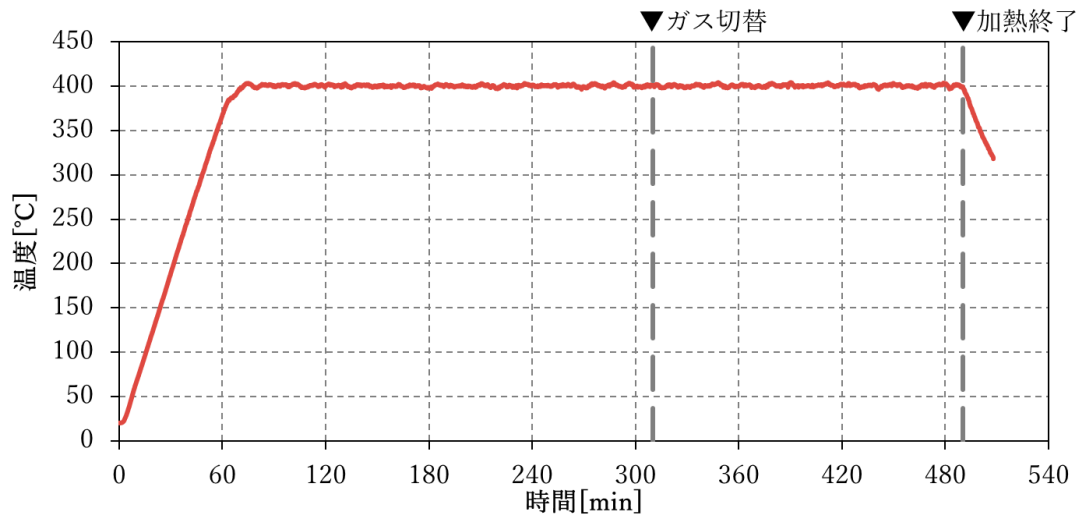


図 5.4- 10 供給ガス温度 (No. 68_Lo-15-3-1)

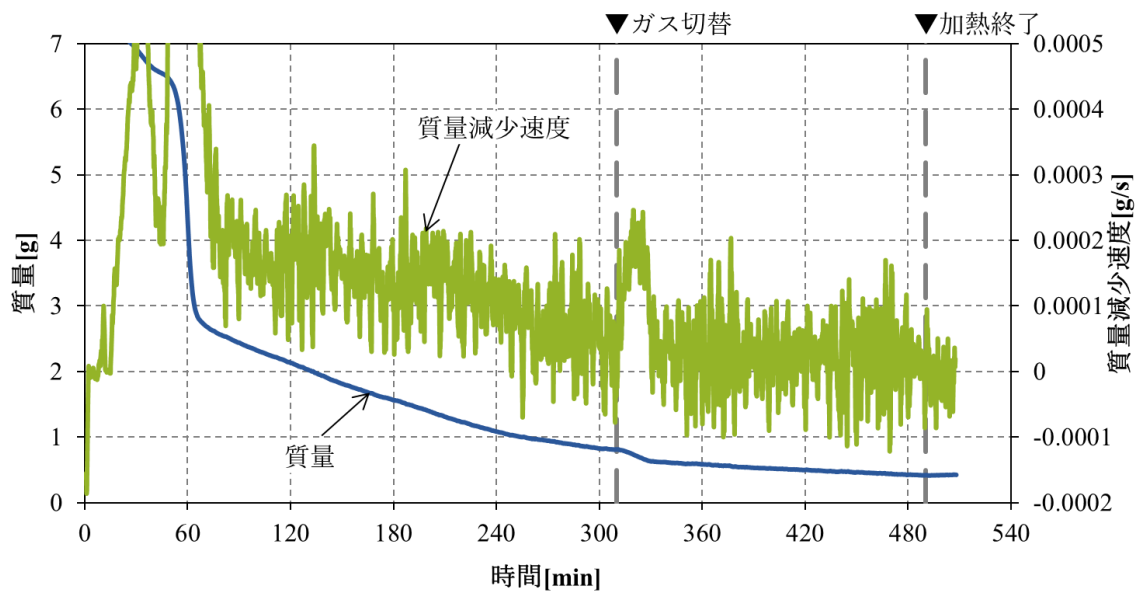


図 5.4- 11 試験体質量と質量減少速度 (No. 68_Lo-15-3-1)

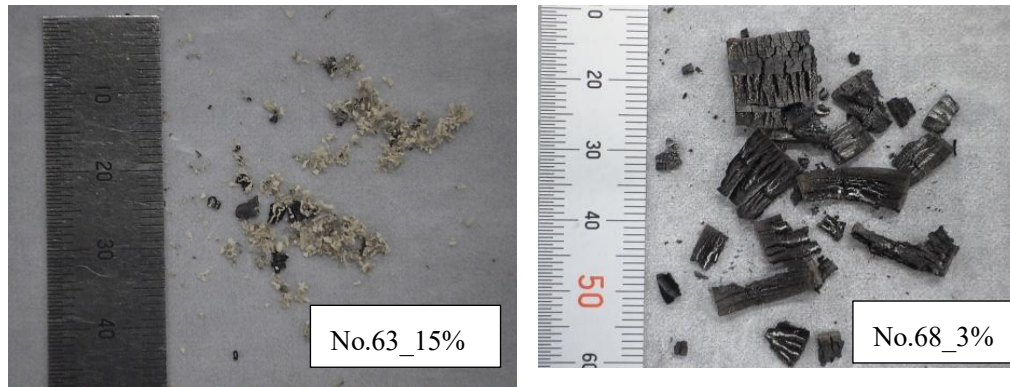


図 5.4- 12 実験後の試験体 (No.63_15%と No.68_3%)

表 5.4-1 実験結果一覧

実験 No.	酸素濃度[%]		反応速度			燃え止まり	試験後の試験体形状	
	目標値	実測値	質量減少速度 [g/s]	残量比減少速度 [g(g·s)]	同じ厚みの試験 体の 21%の測定 値に対する割合			
48	Lo-5-21-1	21	21.0～21.3	0.000808	0.000434	1	×	灰
49	Lo-5-21-2	21	21.0～21.3	0.000845	0.000462	1.06	×	灰
50	Lo-5-20	20	20.2～20.4	0.000629	0.000346	0.80	△	炭片 + 灰
51	Lo-5-19-1	19	19.2～19.4	0.000537 0.000169	0.000299 0.000094	0.69 0.22	△	炭片 + 灰
52	Lo-5-19-2	19	18.9～19.2	0.000139 0.000020	0.000077 0.000011	0.18 0.03	○	板状の炭
53	Lo-5-18	18	17.7～18.0	0.000022	0.000012	0.03	○	板状の炭
54	Lo-5-15	15	15.1～15.3	0.000017	0.000009	0.02	○	板状の炭
55	Lo-5-12	12	12.2～12.3	0.000018	0.000010	0.02	○	板状の炭
56	Lo-5-N2	—	—	—	—	—	—	板状の炭
57	Lo-10-21	21	21.4～21.6	0.001233	0.000284	1	×	灰
58	Lo-10-15	15	15.4～15.5	0.000915	0.000198	0.70	×	炭片 + 灰
59	Lo-10-10	10	10.3	0.000183	0.000035	0.12	△	板状の炭
60	Lo-10-6	6	6.17～6.23	0.000062	0.000015	0.05	△	板状の炭
61	Lo-10-N2	—	—	—	—	—	—	板状の炭
62	Lo-15-21	21	21.4～21.6	0.001757	0.000250	1	×	灰
63	Lo-15-15-1	15	15.3～15.5	0.001314	0.000221	0.77	×	炭片 + 灰
64	Lo-15-15-2	15	15.3～15.5	0.001117	0.000173	0.60	×	炭片 + 灰
65	Lo-15-12	12	12.1～12.2	0.001108	0.000172	0.60	×	炭片

実験No.	酸素濃度[%]		反応速度			燃え止まり	試験後の試験体形状
	目標値	実測値	質量減少速度 [g/s]	残量比減少速度 [g/(g・s)]	同じ厚みの試験 体の21%の測定 値に対する割合		
66	Lo-15-9	9	9.00～9.05	0.000772	0.000107	×	炭片
67	Lo-15-6	6	6.05～6.07	0.000465	0.000064	×	炭片
68	Lo-15-3-1	3	3.00～3.02	0.000164 0.000023	0.000023 0.000003	△	板状の炭が割れた状態
69	Lo-15-3-2	3	3.03～3.05	0.000018	0.000003	△	板状の炭が割れた状態
70	Lo-15-2	2	1.89～1.91	0.000027	0.000004	○	板状の炭
71	Lo-15-N2-1	—	—	—	—	—	ブロック状の炭
72	Lo-30-21	21	21.6～21.7	0.002763	0.000193	×	炭片+灰
73	Lo-30-15-1	15	15.4～15.5	0.001445	0.000101	×	炭片+灰
74	Lo-30-15-2	15	14.9	0.001249	0.000094	×	炭片+灰
75	Lo-30-9	9	9.19～9.26	0.000398	0.000028	×	炭小塊
76	Lo-30-3	3	3.06～3.08	0.000087	0.000006	○	ブロック状の炭
77	Lo-30-N2-1	—	—	—	—	—	ブロック状の炭
78	Lo-30-N2-2	—	—	—	—	—	ブロック状の炭

5.5 実験結果の比較

5.5.1 試験体厚みの違いの影響

全 31 回の実験の質量減少速度と酸素濃度の関係を図 5.5- 1 に示す。酸素濃度 21%の値を比較すると、試験体が厚いほど質量減少速度が大きい。これは、表面積あたりの質量減少速度が一定であると考え、試験体が厚いほど試験体の表面積は増えるため、試験体全体の質量減少速度は大きくなったと考えられる。残量比（＝質量／初期質量）減少速度と酸素濃度の関係を図 5.5- 2 に示す。試験体が薄いほど残量比減少速度が小さい。これは、試験体内部までは酸素が到達しづらく赤熱反応が発生しにくいいため、試験体の体積が大きいほど試験体全体で見ると残量比減少速度は小さくなったためである。

酸素濃度が低いほど、質量減少速度は小さくなるが、燃え止まる酸素濃度は試験体厚みによって異なる結果となった。試験体厚み 5mm では、酸素濃度 19%で質量減少速度の値がばらつき、18%以下では質量減少速度が 1/10 以下の極めて小さい値となった。一方で試験体厚み 10mm 以上では酸素濃度 6%でも燃え止まらず、酸素濃度 3%で質量減少速度の値がばらつき、2%で質量減少速度が 1/10 以下の極めて小さい値となった。

さらに、試験体厚み 5mm では酸素濃度 18%以下で燃え止まっているが、10mm 以上では酸素濃度 3%でも燃え止まっていない。

厚みの異なる試験体の反応速度を比較するために、試験体厚みごとに酸素濃度 21%の残量比減少速度に対する残存率で整理した結果を図 5.5- 3 に示す。同じ酸素濃度で比較すると、残存率が大きい順に 15mm、30mm、10mm、5mm となっており、酸素濃度 21%の残量比減少速度に対する各酸素濃度における残量比減少速度の残存率と試験体厚みの関係には明確な傾向が見られない。

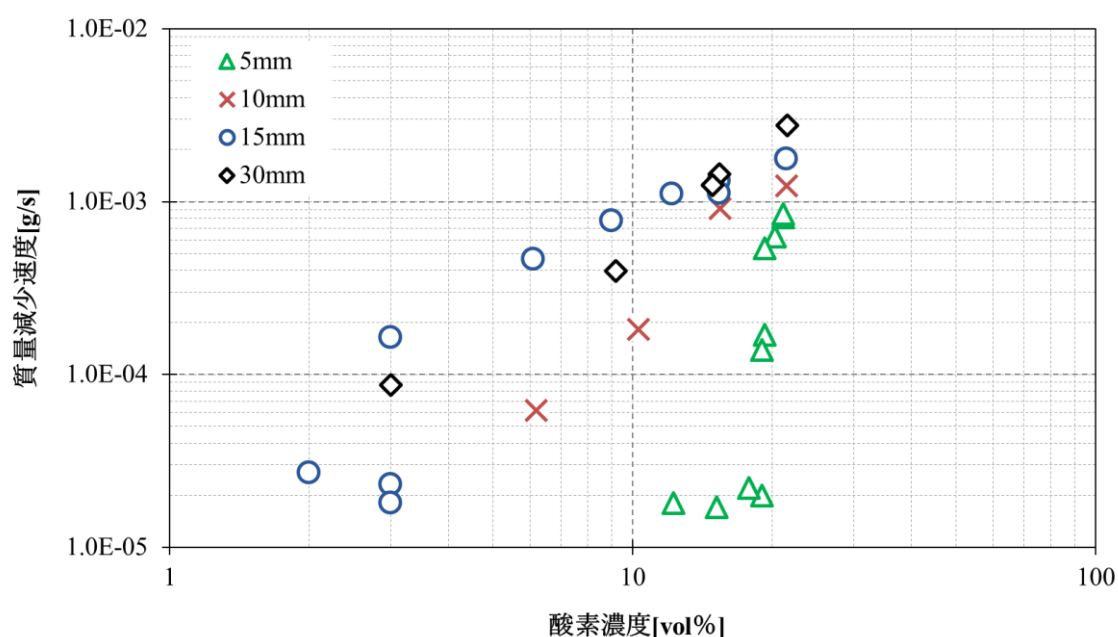


図 5.5- 1 酸素濃度と質量減少速度の関係

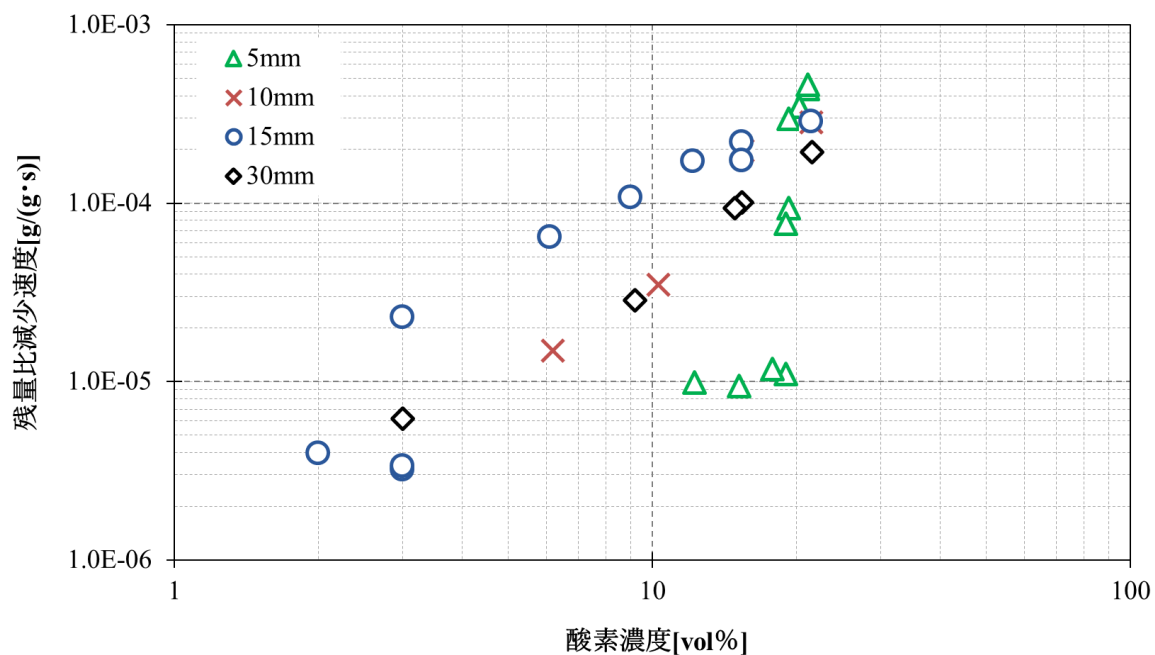


図 5.5- 2 酸素濃度と残量比減少速度の関係

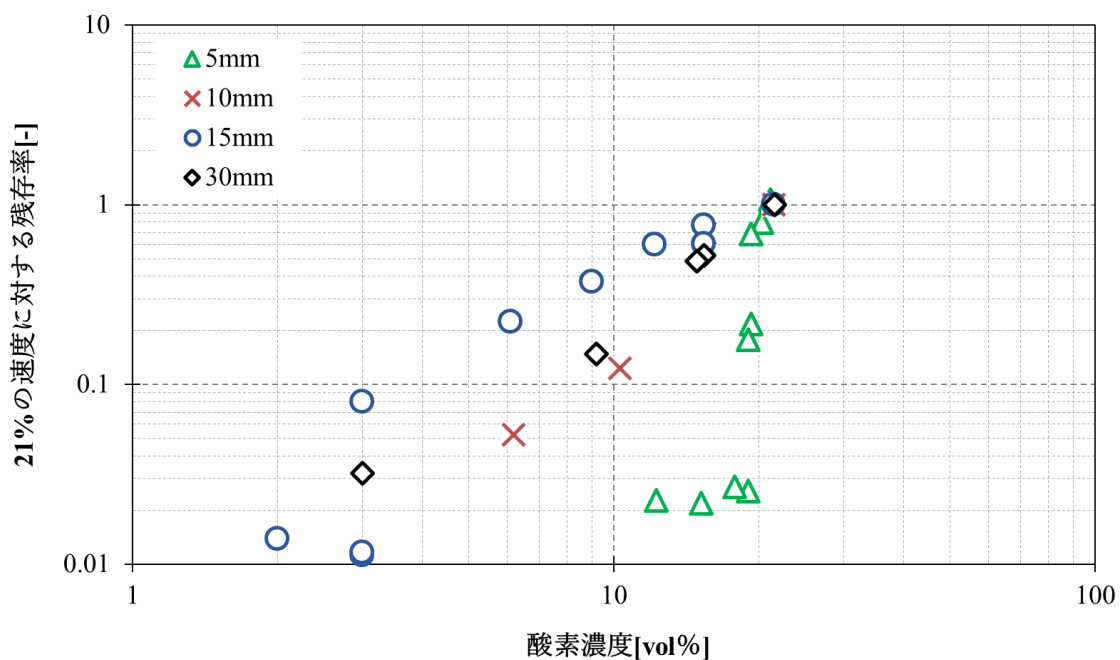


図 5.5- 3 残量比減少速度の各厚みにおける 21%に対する残存率

試験体厚みによって燃え止まる酸素濃度が異なることと、試験体厚みと残量比減少速度の残存率の関係について詳しく調べるために、窒素により炭化させた後、酸素混合ガスに切り替えずに冷却して取り出した試験体の様子を観察する実験を 5 回 (No.56, 61, 71, 77, 78) 実施した。

各試験体の炭化前後の写真と寸法、残量比を表 5.5- 1 に示す。一辺の長さの収縮率を見ると、厚さ 5mm≒厚さ 30mm>厚さ 10mm≒厚さ 15mm となっており、試験体厚みとの明確な関係性は見られない。炭化後の写真から亀裂の入り方を観察すると、厚さ 5mm の試験体は亀裂が少なく、小さい。厚みが増すほど亀裂が大きくなり、厚さ 30mm の試験体では裏面に貫通する亀裂が発生していた。

亀裂の影響を定量化するために、各試験体の亀裂長さを図 5.5- 4 のように写真から計測した。亀裂の大きさを大小 2 種類に大別し、小さい方の亀裂は試験体厚み d の半分まで、大きい方の亀裂は試験体の裏面まで到達していると仮定し、式(5-1)を用いて亀裂内部の表面積 A_{crack} を概算した。そこから炭化後の試験体全体の表面積 A_{char} (式(5-2))と平均厚さ $d_{ave,char}$ (式(5-3))を算出した結果を表 5.5- 1 に併せて示す。平均厚さは、体積を表面積で割った値である。平均厚さが小さい順に、試験体厚み 15mm, 30mm, 10mm, 5mm となっており、先述した同じ酸素濃度で比較したときの残量比減少速度の 21%の値に対する残存率が大きい順と一致する。平均厚さが小さいと、酸素が試験体内部まで入り込みやすいと考えることが出来るため、今回実施した試験体の中では 15mm 厚が最も燃えやすくなったと考えられる。

$$A_{crack} = L_{crack,L} \times d + L_{crack,S} \times \frac{d}{2} \quad (5-1)$$

$$A_{char} = A_{surface} + A_{crack} \quad (5-2)$$

$$d_{ave,char} = \frac{V_{char}}{A_{char}} \quad (5-3)$$

ここで、各記号については本章末の記号表に示す。(以下同様)

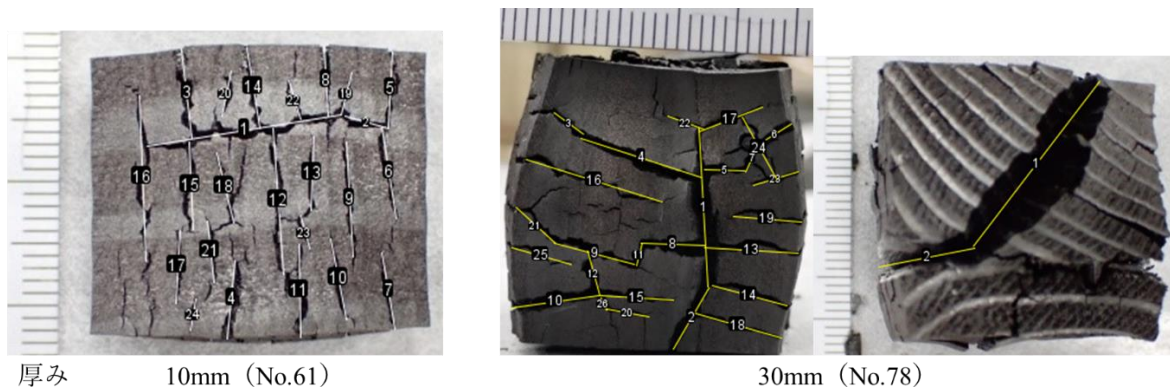
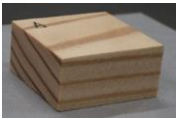
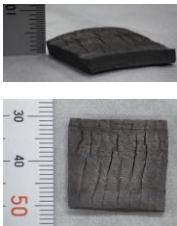
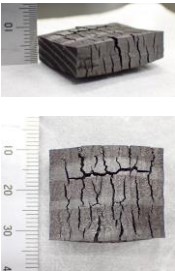
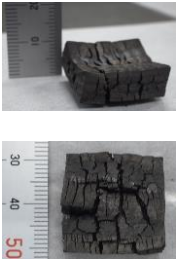
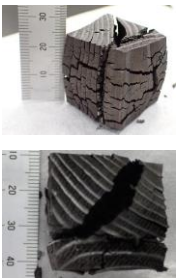
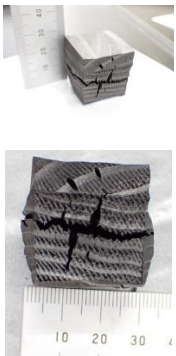


図 5.5- 4 亀裂寸法の測定の様子

表 5.5- 1 炭化前後の試験体の比較

No.		56	61	71	78	79
初期厚み		5mm	10mm	15mm	30mm	
炭化前	写真					
	寸法 [mm]	5×30×30	10×30×30	15×30×30	30×30×30	30×30×30
	表面積 [mm ²]	2,400	3,000	3,600	5,400	5,400
	体積 [mm ³]	4,500	9,000	13,500	27,000	27,000
	平均 厚さ [mm]	1.88	3.00	3.75	5.00	5.00
炭化後	写真					
	寸法 [mm]	3×20×20	7×28×22	11×22×22	25×20×20	26×24×20
	収縮率	約 0.33	約 0.27	約 0.27	約 0.33	約 0.33
	亀裂大 長さ [mm]	—	33.71	66.91	36.30	36.81
	亀裂小 長さ [mm]	—	125.73	148.84	146.09	128.91
	表面積 [mm ²]	1,040	4,374	6,683	11,919	11,865
	増減率	0.43	1.46	1.86	2.21	2.20
	体積 [mm ³]	1,200	4,620	5,324	10,000	12,480
	増減率	0.27	0.51	0.39	0.37	0.46
	平均 厚さ [mm]	1.15	1.06	0.80	0.84	1.05

5.5.2 赤熱反応速度式の作成

赤熱反応速度に対する酸素濃度の影響を、酸素濃度 21% のコーンカロリメータ試験により求めた赤熱反応速度式(3-5)をベースにして、式(3-5'')のように頻度因子に対する係数 $h(Y_{O_2})$ として組み込む。図 5.5-3 に示す、酸素濃度 21% の質量減少速度に対する残存率と酸素濃度の関係を用いて、 $h(Y_{O_2})$ を算出する。本節で実施した測定は供給ガス温度 400°C でしか実施していないが、本測定で得られた赤熱反応速度と酸素濃度の関係性が他の温度帯にも適用出来るものと仮定した。

各試験体厚みについて、酸素濃度 21% の質量減少速度に対する残存率 r と酸素濃度 Y_{O_2} の関係式を求めると、式(5-4)～(5-7)となる。安全側として最も残存率が高い試験体厚み 15mm の関係式(5-6)を $h(Y_{O_2})$ に適用することとする。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = m_0 A_0'' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,A}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5)$$

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times h(Y_{O_2}) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5'')$$

$$r_5 = 2072.48 \times Y_{O_2}^{4.89} \quad (5-4)$$

$$r_{10} = 49.11 \times Y_{O_2}^{2.49} \quad (5-5)$$

$$r_{15} = 7.03 \times Y_{O_2}^{1.25} = h(Y_{O_2}) \quad (5-6)$$

$$r_{30} = 18.46 \times Y_{O_2}^{1.87} \quad (5-7)$$

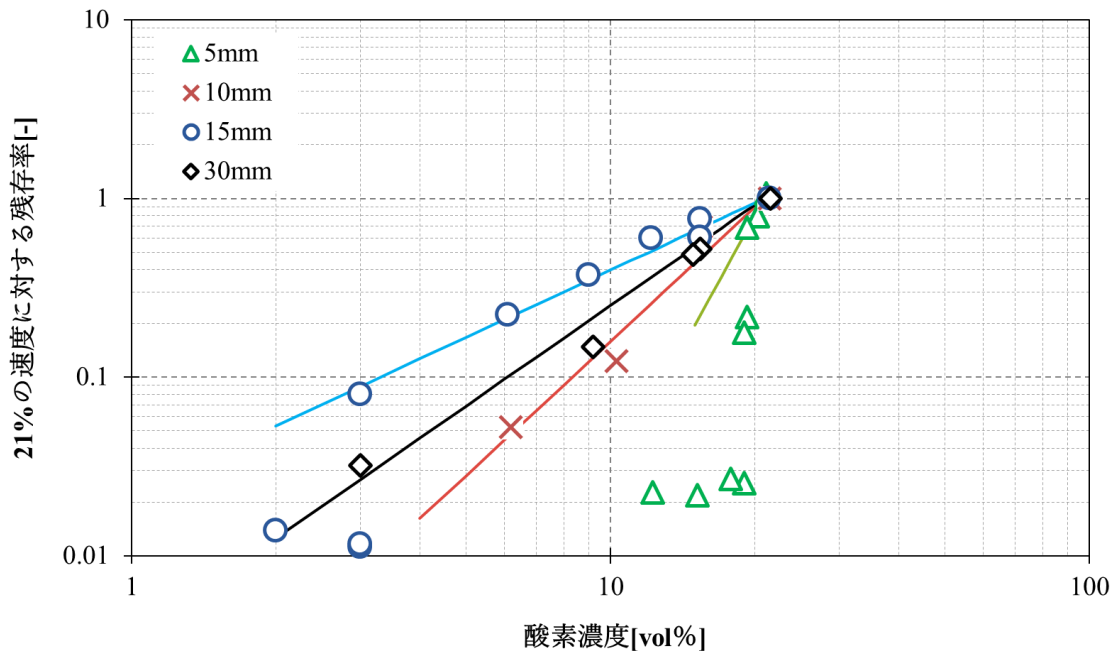


図 5.5- 3-2 残量比減少速度の各厚みにおける 21% に対する残存率

5.6 5章のまとめ

第5章では試験体周辺の酸素濃度を变化させた場合の赤熱反応性状を測定した。本論文で測定した条件下では試験体の大きさによって、試験体の収縮と亀裂の発生状況に差が発生し、燃え止まる酸素濃度と、試験体厚みと残量比減少速度の残存率の関係にも影響が出ることを確認した。赤熱反応速度は、同じ供給ガス温度で比較すると、酸素濃度が低いほど質量減少速度が減少するため、第3章で作成した赤熱反応速度式に酸素濃度の影響を組み込んだ。

第 5 章で用いた記号表

記号	定義	値	単位
A_{char}	総表面積	—	m^2
$A_{surface}$	亀裂を除く外表面積	—	m^2
A_{crack}	亀裂内表面積	—	m^2
d	炭化後の試験体の厚み	—	m
$d_{ave, char}$	平均厚さ	—	m
E_{ox}	赤熱反応の活性化エネルギー	—	kJ/kmol
$L_{crack, L}$	大きい亀裂の長さの総和	—	m
$L_{crack, S}$	小さい亀裂の長さの総和	—	m
$m_0 A_0$	頻度因子	—	s^{-1}
dm_{ox}/dt	赤熱反応のみによる質量減少速度	—	kg/m^2s
R_g	気体定数	8.31	kJ/kmol K
r	酸素濃度 21% の赤熱速度に対する残存率	—	—
T_s	試験体表面温度	—	K
V_{char}	炭化後の試験体の体積	—	m^3
Y_{O_2}	酸素濃度	—	%
添字 A	単位面積あたり	—	m^{-2}

[第 5 章の参考文献]

- ¹⁾ ISO 11358 : 2022, Plastics – Thermogravimetry (TG) of polymers
- ²⁾ 秋田一雄、「木材の発火機構に関する研究」、消防研究所報告、Vol.9、No.1~2、pp.48-49、1959/3
- ²⁾ 茶谷友希子，原田和典，「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その 3：低酸素濃度における測定」，日本火災学会研究発表会概要集，pp.97-98，2022/5
- ³⁾ 茶谷友希子，原田和典，「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その 4：厚みの異なる試験体の低酸素濃度における測定」，日本火災学会研究発表会概要集，pp.33-34，2023/5
- ⁴⁾ 茶谷友希子，原田和典，「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その 5：収縮・亀裂に関する考察と速度式の作成」，日本火災学会研究発表会概要集，pp.131-132，2024/5
- ⁵⁾ 茶谷友希子，原田和典，「(仮題)木材の赤熱反応に酸素濃度が与える影響の測定と定式化」，日本火災学会論文集，投稿予定

第1部のまとめ

第1部では、カラマツとスギの集成材の赤熱反応性状を測定し、赤熱反応速度式と赤熱反応の停止（＝燃え止まり）条件を求めた。

第3章では、コーンカロリメータを用いてカラマツとスギの集成材の赤熱反応を測定した。赤熱反応の停止条件は、カラマツとスギで異なり、カラマツは加熱強度 8.4kW/m^2 、表面温度 286.2°C 、スギは加熱強度 6.0kW/m^2 、表面温度 221.7°C であった。赤熱反応速度として、カラマツの表面温度と赤熱による質量減少速度の関係式(3-5)を作成し、この式はスギにも適用出来る可能性があることを示した。赤熱反応の単位燃焼熱はスギの燃え止まり付近の加熱強度を除き、 23.41MJ/kg と求めた。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = m_0 A_0'' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,A}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5)$$

第4章では、試験体表面の気流が赤熱反応に与える影響を確認した。表面気流速度 0.5m/s および 1.1m/s においては、赤熱反応の停止条件は気流を与えない場合と同等であった。赤熱反応速度については、気流を与えない場合の速度式（式(3-5)）の頻度因子と活性化エネルギーに対する係数の形式で、表面気流速度の影響を組み込んで、式(3-5')および(4-13)を作成した。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times f(v) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3 \times g(v)}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5')$$

$$\begin{cases} f(v) = -0.3508 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \\ g(v) = -0.1483 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \end{cases} \quad (4-13)$$

第5章では、雰囲気酸素濃度が赤熱反応に与える影響を確認した。ガス温度 400°C で酸素濃度を様々に変化させて赤熱反応を発生させて、質量減少速度を測定した。酸素濃度が低いほど赤熱反応速度は低下し、酸素濃度が一定値を下回ると赤熱反応が発生しなくなることが分かった。赤熱反応速度式（式(3-5)）の頻度因子に酸素濃度の影響を組み込んで、式(3-5'')および(5-6)を作成した。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times h(Y_{O_2}) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5'')$$

$$h(Y_{O_2}) = 7.03 \times Y_{O_2}^{1.25} \quad (5-6)$$

なお、試験体の大きさによって収縮と亀裂の発生状況に差が発生し、それにより燃え止まる酸素濃度と、酸素濃度 21% の場合の赤熱反応速度に対する低酸素濃度の場合の赤熱反応速度の低下率に影響が出ることを確認した。

第 2 部

集成材の燃え止まり予測手法の改良と検証

第6章 木材の燃焼予測

6.1 木材の着火、熱分解の予測

第2章で述べたように、木質部材の耐火性能は、耐火炉を用いた加熱実験によって確かめられている。しかし、加熱実験には膨大な費用が必要となり、また、準備から結果が出るまでに数ヶ月以上の時間を要するのが一般的であるため、様々なパラメータを変化させて耐火性能を検証することが難しい。そこで、数値計算によって木質部材の耐火性能を予測することが期待されている。

これまでも木質部材の耐火性能を予測する様々な計算モデルの提案が行われている。例えば、Eurocode 5¹⁾では、質量移動を考慮しない単純な熱伝導計算法が提案されている。この計算法では、ISO834 標準加熱曲線に従い加熱した場合には実験値と計算値はそれなりに良い一致を示しているが、その他の実火災の状況を想定した加熱曲線を適用すると正しく計算できない。König²⁾は Eurocode 5 の熱伝導計算法に加熱温度曲線の測定値を適用して解析を行った。加熱中は Eurocode 5 の有効熱伝導率をガス温度に応じて低減することにより計算値は実験値と良い一致を示した。減衰段階では有効ガス温度と有効熱伝導率を大きく見積もることにより、炭の酸化による発熱を考慮しようとしたが、計算値と実験値は一致しなかった。

Spearpoint と Quintiere³⁾は、一定の放射熱を受ける半無限の厚さの木材の熱分解を考慮した 1 次元積分モデルを作成した。このモデルを用いて計算すると、計算値と実験値は定性的な傾向は再現出来るものの、特に減衰段階の後期において定量的には一致しなかった。Weng ら⁴⁾は、試験体内部の酸素分圧分布を線形と仮定して、Janse ら⁵⁾によるマツの木炭の酸化速度式を用いて Spearpoint らの 1 次元積分モデルを拡張した。その結果、計算値は定性的には実験値とより良い一致を示した。減衰段階の計算値は定量的にもある程度実験値に近づいたが、それでもなお一致しているとは言い難い。

Lautenberger ら⁶⁾は、木材を含む様々な可燃性固体の熱分解モデル Gpyro を作成した。このモデルの計算結果は、発熱性の炭の酸化反応を含まない窒素環境下での実験結果と良い一致を示した。Huang ら^{7),8)}は、泥炭のくすぶり燃焼（酸化）を Gpyro に組み込んだ。その結果、くすぶり燃焼の閾値は、泥炭の密度、熱伝導率、酸化燃焼熱によって決定されることを解明し、その閾値は泥炭の実験結果と良い一致を示した。

Chen ら⁹⁾は、オープンソースプラットフォーム OpenSees を用いて、実火災における木材の熱伝導解析を試み、コンクリートスラブと集成材梁の合成床で構成された区画火災実験に対して、集成材梁の内部温度と炭化速度を予測出来ることを確かめた。

Li ら¹⁰⁾は、木材の水分蒸発と熱分解反応について、有限要素法ソフト Abaqus 6.14 と有限体積法ソフト OpenFOAM 5.0 を用いて、3 次元熱伝導解析を実施し、150mm 厚のスプルー CLT の 1 時間加熱実験の試験体内部温度を精度良く予測した。

Emberley ら¹¹⁾は、炭の酸化反応による発熱を組み込んだ炭化層のエネルギー収支モデルを作成した。コーンヒーターを用いた実験と併せて、木材が有炎燃焼からくすぶり燃焼へと移行する閾値となる条件を求めた。

Sun ら¹²⁾は、加熱および放冷中も含めた火災全期間における木材の熱・物質同時移動モデル

を提案し、集成材壁の耐火実験について、木材内部温度と含水率、炭化深さを概ね予測出来ることを確かめた。ただし、放冷中の赤熱による温度上昇の予測には課題が残った。

6.2 木材の赤熱、燃え止まりの予測

以上のように木質部材の着火や熱分解を考慮して、加熱中（雰囲気温度上昇中）の木材の内部温度や熱分解反応を予測する計算モデルは複数存在し、その予測精度も良好であるものが多い。一方で、木質部材の赤熱反応を考慮して、放冷中（雰囲気温度下降中）の木材の内部温度や燃え止まりを予測する計算モデルは少なく、その予測精度も高いとは言い難い。

原田ら¹³⁾は、2次元非定常熱伝導モデルを用いて、放冷中の赤熱を考慮した木質部材の燃焼性を予測する計算プログラムを作成した。筆者ら¹⁴⁾は本研究に先立って、コーンカロリメータ試験により求めたカラマツ集成材の赤熱反応速度式と燃え止まり条件を本プログラムに適用し、放射加熱実験の計算を行い、一部の加熱条件においては木材の内部温度と炭化深さを精度良く予測出来ることを示した。

第2部では、第1部で求めたカラマツ集成材の赤熱反応速度式と燃え止まり条件を本プログラムに適用し、カラマツ集成材壁の耐火炉加熱実験とコーンカロリメータ実験の2種類の加熱条件の計算を行い、計算結果と実験結果を比較、検証する。

[第6章の参考文献]

- ¹⁾ EN 1995:2004(E), Eurocode 5 – Design of timber structures
- ²⁾ Jürgen König, “Effective thermal actions and thermal properties of timber members in natural fires”, Fire and Materials, Vol.30, Issue 1, pp.51-63, 2006/1, <http://dx.doi.org/10.1002/fam.898>
- ³⁾ M.J.Spearpoint, J.G.Quintiere, “Predicting the Burning of Wood Using an Integral Model”, Combustion and Flame, Vol.123, Issue 3, pp.308-325, 2000/11, [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(00\)00162-0](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(00)00162-0)
- ⁴⁾ W.G.Weng, Y.Hasemi, W.C.Fan, “Predicting the pyrolysis of wood considering char oxidation under different ambient oxygen concentrations”, Combustion and Flame, Vol.145, Issue 4, pp.723-729, 2006/6, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2005.12.016>
- ⁵⁾ A.M.C.Janse, H.G.de Jonge, W.Prins, W.P.M. van Swaaij, “Combustion Kinetics of Char Obtained by Flash Pyrolysis of Pine Wood”, Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol.37, Issue 10, pp.3909-3918, 1998/9, <https://doi.org/10.1021/ie970705i>
- ⁶⁾ C.Lautenberger, C.Fernandez-Pello, “A model for the oxidative pyrolysis of wood”, Combustion and Flame, Vol.156, Issue 8, pp.1503-1513, 2009/8, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.04.001>
- ⁷⁾ X.Huang, G.Rein, “Smouldering combustion of peat in wildfires: Inverse modelling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics”, Combustion and Fire, Vol.161, Issue 6, pp.1633-1644, 2014/6, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.12.013>
- ⁸⁾ X.Huang, G.Rein, H.Chen, “Computational smoldering combustion: Predicting the roles of moisture and inert contents in peat wildfires”, Proceedings of the Combustion Institute, Vol.35, Issue 3,

pp.2673-2681, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2014.05.048>

- ⁹⁾ C.Chen, L.Jiang, J.Qiu, etc., “OpenSees development for modelling timber structural members subjected to realistic fire impact”, *Fire and Material*, Vol.47, Issue 3, pp.461-478, 2022/11, <http://dx.doi.org/10.1002/fam.3115>
- ¹⁰⁾ Q.Li, B.Xu, K.Chen, etc., “Experimental and three-dimensional numerical investigations of dehydration and pyrolysis in wood under elevated and high temperatures”, *Buildings*, Vol.14, Issue 6, 1547, 2024/5, <https://doi.org/10.3390/buildings14061547>
- ¹¹⁾ R.Emberley, T.Do, J.Yim, J.L.Torero, “Critical heat flux and mass loss rate for extinction of flaming combustion of timber”, *Fire Safety Journal*, Vol.91, pp.252-258, 2017/7, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.008>
- ¹²⁾ A.Sun, K.Harada, D.Nii, “Numerical model investigating heat and mass transfer of wood during the heating and cooling period of fire”, *International Journal of Fire Science and Engineering*, Vol.39, No.1, pp.28-44, 2025/3, <https://doi.org/10.7731/kifse.f03f9a8c>
- ¹³⁾ 原田和典, 「数値計算プログラムを活用した耐火性能評価手法」, 2023 年度日本建築学会 (近畿) 防火部門パネルディスカッション 木質部材の耐火性能評価技術の今を知る, pp. 39-47, 2023 年 9 月
- ¹⁴⁾ 茶谷友希子, 原田和典, 「一定の放射加熱を受けるカラマツ集成材の赤熱燃焼性状の予測」, 日本建築学会環境系論文集, 第 86 巻, 第 790 号, pp.863-872, 2021/12, <https://doi.org/10.3130/aije.86.863>

第7章 燃え止まり予測解析プログラムにおける赤熱反応分布モデルの作成

第7章では、燃え止まり予測解析プログラムの概要および計算に採用した変数の説明と、炭化層に赤熱反応分布を設定する計算モデルの作成について述べる。

なお、本章の一部は文献 16),17)で発表済の内容を再構成したものである。

7.1 燃え止まり予測解析プログラムの概要

本研究で用いる解析プログラム（以降、本プログラムと呼ぶ）は、原田ら^{1),2),3)}により開発され、(一社)建築性能基準推進協会傘下の木造耐火燃え止まり WG にて改良ののち限定公開⁴⁾された。その後、筆者ら⁵⁾による赤熱反応速度式の研究成果などを加えて、日本建築学会の防火部門パネルディスカッション⁶⁾にて最新の計算結果が公開されている。

7.1.1 計算の前提

本プログラムは木材のみで構成された構造部材の断面を要素分割し、有限要素法を用いて二次元非定常熱伝導計算を行うものである。計算にあたり、いくつかの前提事項（仮定）を置いている。

- ・木材の燃焼に特有の反応として、水分蒸発、熱分解、赤熱を考慮する。熱分解により発生した揮発性ガスは材料表面まで移動した後に火炎を形成して発熱する。
- ・部材内の温度上昇および毛管内圧力上昇による部材内部での水分の移動は考慮しない。
- ・木材の燃焼による形状変化を考慮する。具体的には、質量減少による収縮と亀裂の発生である。亀裂の形状は一定と仮定し、亀裂の発生位置と幅深さ比を入力条件として与える。
- ・部材周囲の雰囲気温度等の加熱条件は、入力条件として与える。特に、耐火炉実験の放冷中においては、実験では部材の発熱が炉内温度に影響を与えるが、本プログラムでは考慮せず、任意の実験における炉内温度の測定値を入力する。

7.1.2 支配方程式

木材の燃焼に特有の反応（水分蒸発、熱分解、赤熱）を考慮し、二次元非定常熱伝導方程式(7-1)を支配方程式とする。単位体積に正味流入する熱量 q_x および q_y はフーリエの熱伝導式より式(7-2)および(7-3)で表わされる。

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - Q_{evap} - Q_{decomp} + Q_{ox} \quad (7-1)$$

$$q_x = -\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7-2)$$

$$q_y = -\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (7-3)$$

ここで、各記号については本章末の記号表に示す。（以下同様）

(i) 水分蒸発潜熱

水分蒸発による潜熱吸収速度 Q_{evap} は、図 7.1- 1 に示すように水分蒸発開始温度 $T_{evap1}(=90^{\circ}\text{C})$ と水分蒸発終了温度 $T_{evap2}(=110^{\circ}\text{C})$ の間で温度 1°C 上昇あたりの水分蒸発量が一定であると考え、線形補間し、式(7-4)で表わす。

$$Q_{evap} = -L_w \rho_0 \times \frac{\partial w}{\partial t} = -L_w \rho_0 \times \frac{\partial w}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = -L_w \rho_0 \times \frac{w_0}{T_{evap2} - T_{evap1}} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7-4)$$

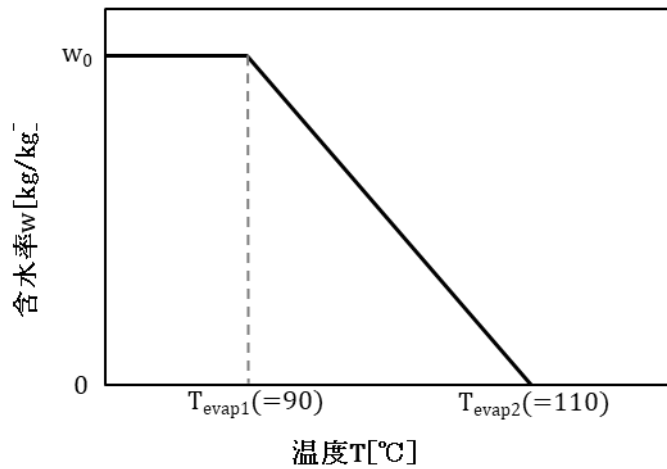


図 7.1- 1 含水率と温度の関係

(ii) 熱分解潜熱

熱分解による潜熱吸収速度 Q_{decomp} は、図 7.1- 2 に示すカラムツ木粉の熱重量分析結果から、熱分解開始温度 $T_{decomp1}(=250^{\circ}\text{C})$ のとき残量比 1、熱分解終了温度 $T_{decomp2}(=360^{\circ}\text{C})$ のとき残量比 R_{∞} となるように線形近似して式(7-5)で表わす。ここで、残量比とは、任意時点の質量を初期質量（加熱前の常温時質量）で除した値である。熱分解速度はアレニウス型の速度式も提案⁷⁾されているが、本研究では熱重量分析による関係式を採用した。熱分解終了時（炭化完了時）の残量比 R_{∞} は、孫ら⁷⁾による値 0.246 を採用した。

$$Q_{decomp} = -L_v \rho_0 \times \frac{\partial R}{\partial t} = -L_v \rho_0 \times \frac{\partial R}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = -L_v \rho_0 \times \frac{1 - R_{\infty}}{T_{decomp1} - T_{decomp2}} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad (7-5)$$

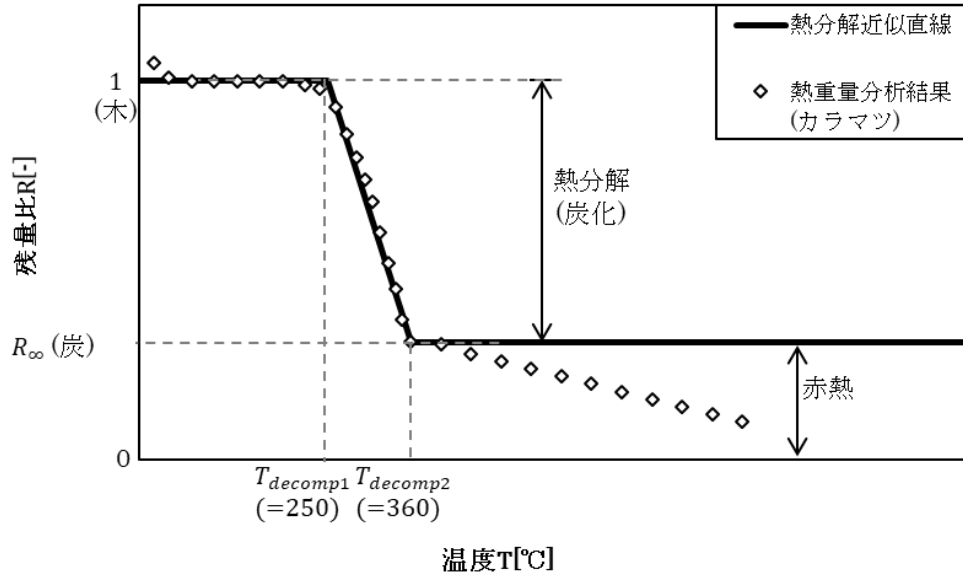


図 7.1-2 残量比と温度の関係（カラマツ）

(iii) 赤熱による発熱速度

赤熱による発熱速度 Q_{ox} は、第 1 部で作成した赤熱反応速度式(3-6)を用いて、式(7-6)で表す。ここで、赤熱反応は熱分解の完了後に開始し、カラマツの赤熱反応は 286°Cまで下がった段階で停止するとした。赤熱による単位発熱量 ΔH は 23.41MJ/kg とした。また、図 3.5-2 より、赤熱反応時の試験体表面温度は約 625°Cに収束することから、 $T_s=625^\circ\text{C}$ のときの値を赤熱反応速度の上限値とすることにした。

$$Q_{ox} = \Delta H \times \frac{dR}{dt} \times \rho_0 = \Delta H \times \frac{d\rho_{ox}}{dt} \quad (7-6)$$

$$\frac{d\rho_{ox}}{dt} = m_0 A_0''' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,V}}{R_g T_s}\right) = 14.791 \times \exp\left(-\frac{37.689 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-6)$$

式(7-6)を基本として、部材の表面気流と部材近傍酸素濃度の影響を考慮した式(3-6'), (4-13), (3-6''), (5-6)も解析対象とする実験条件に応じて使い分けることとする。

$$\frac{d\rho_{ox}}{dt} = m_0 A_0''' \times \exp\left(-\frac{E_{glow,V}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times f(v) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3 \times g(v)}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-6')$$

$$\begin{cases} f(v) = -0.3508 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \\ g(v) = -0.1483 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \end{cases} \quad (4-13)$$

$$\frac{d\rho_{ox}}{dt} = m_0 A_0''' \times \exp\left(-\frac{E_{glow,V}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times h(Y_{O_2}) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-6'')$$

$$h(Y_{O_2}) = 7.03 \times Y_{O_2}^{1.25} \quad (5-6)$$

(iv) 支配方程式

以上の式(7-2)～(7-6)を式(7-1)に代入して整理すると、式(7-7)となる。

$$C\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + L_w \rho_0 \times \frac{\partial w}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + L_v \rho_0 \times \frac{\partial R}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} + \Delta H \rho_0 \frac{dR}{dt}$$

より、

$$\left(C\rho - L_w \rho_0 \frac{\partial w}{\partial T} - L_v \rho_0 \frac{\partial R}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \Delta H \rho_0 \frac{dR}{dt} \quad (7-7)$$

7.1.3 温度上昇に伴う物性値の変化

(i) 熱伝導率

常温における木材の熱伝導率 λ_{20} は Kollmann の式⁸⁾より、全乾密度 ρ_0 を用いて式(7-8)で表わす。高温域の木材の熱伝導率 λ_{wood} は牧野の式⁹⁾より、常温の熱伝導率に対する比率として式(7-9)で表わす。木炭の熱伝導率 λ_{char} も牧野の式より、式(7-10)で表わす。木材から炭に変化する熱分解進行中は、熱分解の進行度に応じて木材と炭の値を線形補間して式(7-11)とする。

$$\lambda_{20} = (0.0001952\rho_0 + 0.0257) \times 10^{-3} \quad (7-8)$$

$$\frac{\lambda_{wood}}{\lambda_{20}} = \begin{cases} 0.0007351(T - 20) + 1.0 & (0 \leq T \leq 100) \\ -0.0007351(T - 100) + 1.059 & (100 \leq T) \end{cases} \quad (7-9)$$

$$\lambda_{char} = 4.236 \times 10^{-11} T^3 + 0.0801 \quad (7-10)$$

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{wood} & (R = 1.0) \\ \lambda_{wood} + (\lambda_{char} - \lambda_{wood}) \frac{1-R}{1-R_\infty} & (1.0 \leq R \leq R_\infty) \\ \lambda_{char} & (R_\infty \leq R) \end{cases} \quad (7-11)$$

(ii) 比熱

木材の比熱は Dunlap の式¹⁰⁾より式(7-12)とする。木炭の比熱はカーボンの値¹¹⁾で代用して式(7-13)で表わす。木材から炭に変化する熱分解進行中は、熱分解の進行度に応じて木材と炭の値を線形補間して式(7-14)とする。

$$C_{wood} = \{-213 + 4.87(T + 273)\} \times 10^{-3} \quad (7-12)$$

$$C_{char} = 1432 + 0.356(T + 273) - \frac{7.33 \times 10^7}{(T + 273)^2} \quad (7-13)$$

$$C = \begin{cases} C_{wood} & (R = 1.0) \\ C_{wood} + (C_{char} - C_{wood}) \frac{1-R}{1-R_\infty} & (1.0 \leq R \leq R_\infty) \\ C_{char} & (R_\infty \leq R) \end{cases} \quad (7-14)$$

7.1.4 形状の変化

(i) 収縮

木材の熱分解が進行すると炭化した部分は収縮し、収縮が大きくなると亀裂が発生する。収縮による寸法変化は、Davidsson ら¹²⁾による残量比 R の関係式(7-15)を用いる。ここで、収縮率 s は、収縮した長さを初期長さで除した値である。カラマツの収縮係数 σ_s は孫ら^{13),14)}による値0.705を採用した。熱分解完了後は赤熱により炭が焼失するプロセスであるので、収縮率は残量比に対して線形の関係とする。

$$s = \begin{cases} \sigma_s(1-R)^2 & (R_\infty < R \leq 1) \\ 1 - \frac{R}{R_\infty} \{1 - \sigma(1 - R_\infty)^2\} & (R < R_\infty) \end{cases} \quad (7-15)$$

(ii) 亀裂の発生

表面幅方向の収縮が一定量を超えると、亀裂が発生する。亀裂間隔 C_i は一定であるとする、1つの亀裂に対する収縮量は sC_i となる。この収縮量が1mmを超えた場合に亀裂が生じると考える。よって、亀裂幅 C_w は式(7-16)で表わす。亀裂の幅深さ比 R_{crack} (=亀裂深さ/亀裂幅)は一定であるとする、亀裂深さ C_d は式(7-17)で求められる。カラマツの亀裂の幅深さ比は齋藤ら²⁾による値3.15を採用した。

$$C_w = sC_i > 0.001 \quad (7-16)$$

$$C_d = C_w \times R_{crack} \quad (7-17)$$

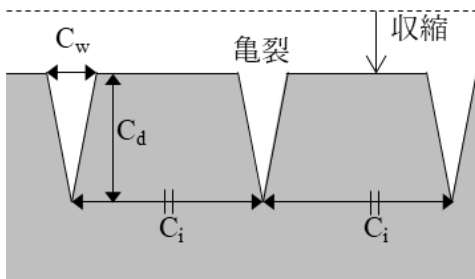


図 7.1-3 炭化層の亀裂

7.1.5 境界条件

(i) 耐火炉実験

部材が耐火炉内においてガスバーナーで加熱される場合、加熱表面の境界条件として、部材表面温度 T_s の境界面で温度 T_{inf} の気体に接しており、放射および対流による熱伝達、表面火炎から部材表面へのフィードバック熱流があると考え。境界上の点 p における内向き方向単位ベ

クトルを n_p とすると、点 p における熱収支は式(7-18)となる。このとき、温度 T_{inf} には実験による耐火炉内温度の測定値を入力値として与える。この耐火炉内温度の測定値は、ガスバーナーによる加熱と耐火炉壁からの加熱の両方の影響が反映された値と考える。表面火炎からのフィードバック熱流 q_{fire} は、熱分解により生成された可燃性ガスが材料表面で完全燃焼し、その1/3が放射成分となり、放射成分の1/2が試験体に戻ってくると考えると、式(7-19)で表わされる。

非加熱面は常温の空気と接していると考え、境界条件は式(7-18)において、 $T_s = T_r$ 、 $T_{inf} = T_0$ 、 $q_{fire} = 0$ とする。

$$-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial n_p} = \alpha_s(T_{inf} - T_s) + \varepsilon \sigma \left\{ (T_{inf} + 273)^4 - (T_s + 273)^4 \right\} + \varepsilon q_{fire} \quad (7-18)$$

$$q_{fire} = \frac{1}{2} \times \frac{1}{3} \times \frac{\int_s L_b \rho_0 \frac{dR}{dt} dS}{P_f} \quad (7-19)$$

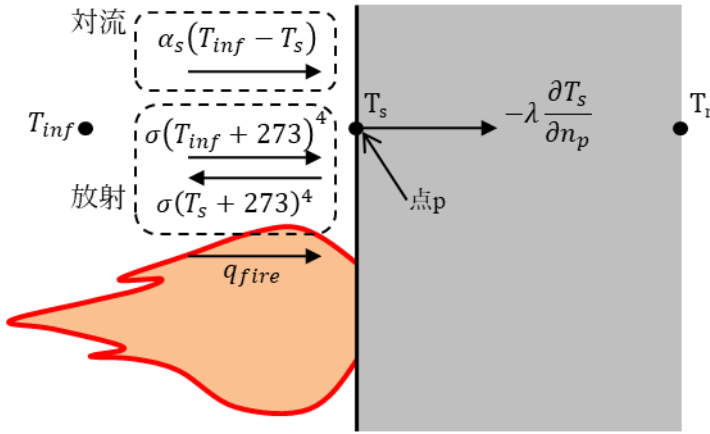


図 7.1-4 耐火炉実験の境界条件

(ii) コーンカロリメータ実験

部材がコーンカロリメータ装置において電気ヒーターにより放射加熱される場合、加熱表面の境界条件は、式(7-18)に電気ヒーターからの放射熱 q_{cone} の項を加えて、式(7-20)となる。このとき、温度 T_{inf} はコーンヒーターの温度と常温空気の平均値とする。

非加熱面はセラミックファイバーで覆っているため、断熱条件とする。

$$-\lambda \frac{\partial T_s}{\partial n_p} = \alpha_s(T_{inf} - T_s) + \varepsilon \sigma \left\{ (T_{inf} + 273)^4 - (T_s + 273)^4 \right\} + \varepsilon (q_{fire} + q_{cone}) \quad (7-20)$$

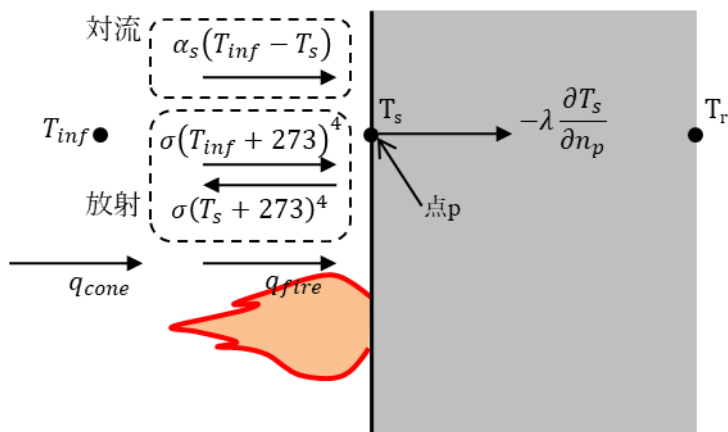


図 7.1-5 コーンカロリメータ実験の境界条件

7.1.6 要素分割

解析対象とする部材は三角形要素により図 7.1-6 のように要素分割する。亀裂が発生すると想定する位置は入力条件として与える必要がある。通常は、解析対象とする実験で実際に測定された亀裂間隔を入力する。亀裂と亀裂の間には、少なくとも 4 つの要素が存在するように、要素の分割長さを決定する。

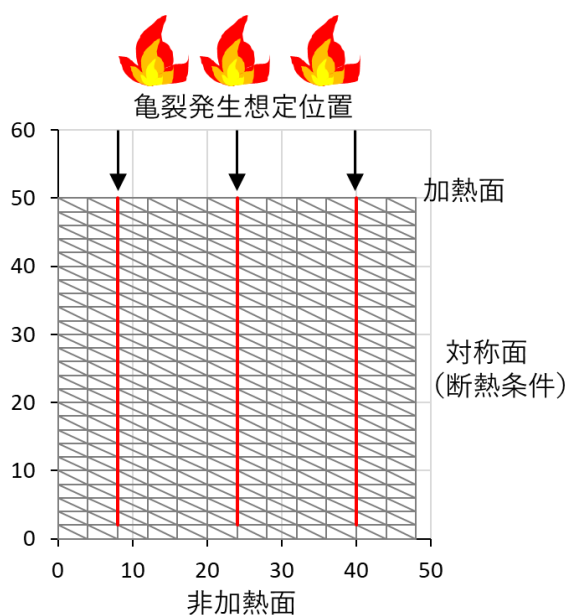


図 7.1-6 要素分割の例

7.2 炭化層内の赤熱反応分布モデル

炭化層の赤熱反応について考える。赤熱反応は炭の酸化反応であるため、第 5 章で測定を行ったように酸素濃度の影響を強く受ける。そのため、外気と接する部材表面付近では外気の酸

素濃度に応じて式(7-6)で求まる速度で赤熱反応するが、炭化層内部では部材表面から離れるほど酸素濃度が低下して赤熱反応速度も低下すると考えられる。

第8章でも改めて計算を行い検証するが、筆者ら¹⁵⁾は図7.2-1左側のように炭化層内の赤熱反応分布なしに、炭化層全体が表面と同じ酸素濃度で赤熱すると考えて計算すると、実験と比較して解析の赤熱反応が過剰となることを確認している。そこで、図7.2-1右側のように、炭化層内に赤熱反応分布を設定する計算モデルを作成する。

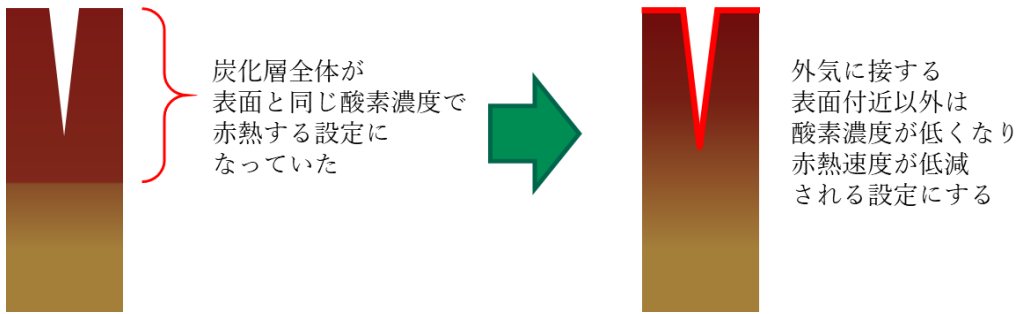


図 7.2-1 炭化層における赤熱発生位置の考え方

部材表面における酸素濃度による赤熱反応速度を基準として、低減係数 $fctr$ を部材表面からの深さ方向の距離 d の関数として考える。部材表面から深さ d_{min} までは炭化層が疎であり酸素が十分に行き渡り、外気に接している状態とあまり変わらないとして浸透深さと呼ぶ。この浸透深さまでは低減係数 $fctr$ を1とし、浸透深さ以深は部材表面からの距離 d に応じて式(7-22)により低減係数を決定する。ここで、緩和係数 $coeff$ と浸透深さ d_{min} の値については、第8章で実験値と解析値を比較して決定する。

$$fctr = \min(1, \exp(-coeff \times (d - d_{min}))) \quad (7-22)$$

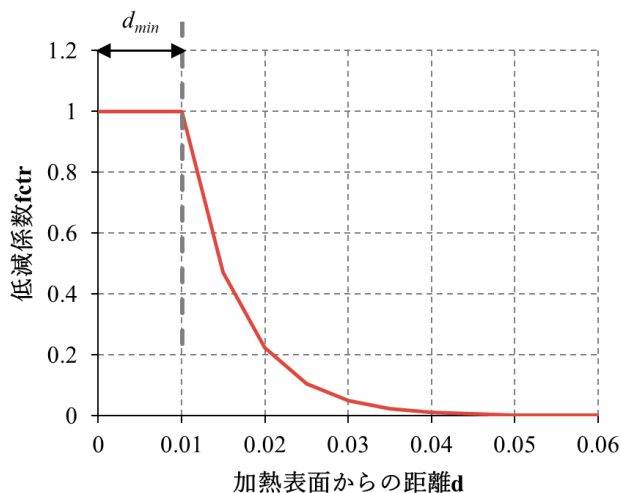


図 7.2-2 低減係数と部材表面からの距離の関係の例

要素 i の部材表面からの距離 $d_{e,i}$ は式(7-26)により求まる。

$$d_{e,i} = elm_i \times \frac{d_y}{2} \quad (7-26)$$

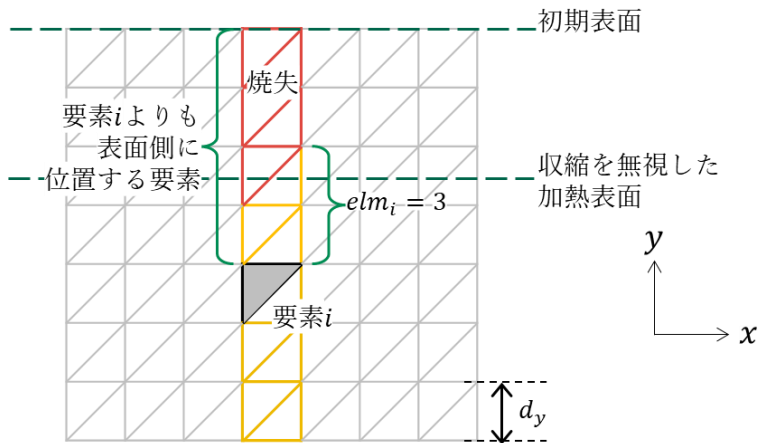


図 7.2-4 要素 i の部材表面からの距離を求める模式図

7.3 7章のまとめ

第7章では、燃え止まり予測解析プログラムの概要を説明し、本研究での計算に採用した各変数を示した。さらに、炭化層に深さ方向の赤熱反応分布を設定する計算モデルを2種類作成した。

第7章で用いた記号表

記号	定義	値	単位
C	比熱	—	kJ/kg K
C_i	亀裂間隔	—	m
C_w	亀裂幅	—	m
C_d	亀裂深さ	—	m
$coeff$	緩和係数	—	m ⁻¹
d	加熱表面からの距離	—	m
d_e	収縮を無視した加熱表面からの距離	—	m
d_{min}	浸透深さ	—	m
d_{tot}	初期表面からの距離	—	m
d_s	深さ方向の収縮量の総和	—	m
d_y	要素の深さ方向の分割長さ	—	m
E_{ox}	赤熱反応の活性化エネルギー	—	kJ/kmol
elm	焼失していない要素の総数	—	個
ΔH	赤熱による単位発熱量	23.41×10^3	kJ/kg
L_w	水の蒸発潜熱	2.258×10^3	kJ/kg
L_v	木材の熱分解潜熱	3.59×10^3	kJ/kg
L_b	熱分解により発生した可燃性ガスの燃焼熱	16.0×10^9	kJ/kg
$m_0 A_0$	頻度因子	—	s ⁻¹
dm_{ox}/dt	赤熱反応のみによる質量減少速度	—	kg/m ² s
P_f	加熱面の周長	—	m
q	熱流量	—	kW/m ²
Q_{evap}	水分蒸発による吸熱量	—	kW/m ²
Q_{decomp}	熱分解による吸熱量	—	kW/m ²
Q_{ox}	赤熱による発熱量	—	kW/m ²
q_{fire}	表面火炎からのフィードバック熱流	—	kW/m ²
q_{cone}	コーンヒーターからの入射熱量	—	kW/m ²
R	残量比 (= 質量 / 初期質量)	—	kg/kg
R_∞	熱分解完了時の残量比	0.246	kg/kg
R_g	気体定数	8.31	kJ/kmol K
R_{crack}	亀裂の幅深さ比 (= 亀裂深さ / 亀裂幅)	3.15	m/m
s	収縮率	—	m/m
T	温度	—	K
T_{evap1}	水分蒸発開始温度	363	K
T_{evap2}	水分蒸発終了温度	383	K
$T_{decomp1}$	熱分解終了温度	523	K

記号	定義	値	単位
$T_{decomp2}$	熱分解終了温度	633	K
T_s	試験体表面温度	—	K
T_r	試験体裏面温度	—	K
T_{inf}	雰囲気温度（加熱空間温度）	—	K
T_0	雰囲気温度（非加熱空間温度）	—	K
t	時間	—	s
v	表面気流速度	—	m/s
w	試験体の初期含水率	—	kg/kg
Y_{O_2}	酸素濃度	—	%
α_s	試験体表面の対流熱伝達率	—	kW/m ² K
ε	試験体表面の放射率	0.95	—
λ	熱伝導率	—	kW/mK
ρ	密度	—	kg/m ³
σ	ステファン・ボルツマン定数	5.67×10^{-11}	kW/m ² K ⁴
σ_s	カラマツの収縮係数	0.705	—
添字 V	単位体積あたり	—	—
添字 $wood$	木材の値	—	—
添字 $char$	炭の値	—	—
添字 0	初期値	—	—
添字 i	要素 i の値	—	—
添字 j	要素 i の値	—	—

[第 7 章の参考文献]

- 1) 梶山幸祐，原田和典，他，「木質系構造の耐火性能に関する研究－その 5：燃え止まり設計に関する数値解析」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.341-344，2003/9
- 2) 齋藤悠輔，原田和典，他，「火災加熱後の冷却過程における集成材の燃え止まり性状の実験と解析」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.79-84，2006/9
- 3) 齋藤悠輔，原田和典，山口純一，「火災時の加熱性状を考慮した木質部材の燃え止まり予測燃え止まり発生機構の解明」，日本建築学会大会学術講演梗概集（防火），pp.293-296，2008/9
- 4) 「木質耐火構造部材の燃え止まり解析とその利用法に関する報告書」，(一社)建築性能基準推進協会 防耐火構造・材料部会 木質耐火燃え止まり WG，2014/3
- 5) 茶谷友希子，原田和典，土橋常人，「カラマツ集成材の火災加熱後における炭化層の赤熱反応速度の測定」，日本建築学会環境系論文集，第 82 巻，第 736 号，pp.491-499，2017/6，

<https://doi.org/10.3130/aije.82.491>

- 6) 原田和典,「数値計算プログラムを活用した耐火性能評価手法」, 2023 年度日本建築学会 (近畿) 防火部門パネルディスカッション 木質部材の耐火性能評価技術の今を知る, pp. 39-47, 2023 年 9 月
- 7) 孫安陽, 原田和典, 他,「各種木材の熱分解速度の測定と反応速度パラメータの推定」, 日本火災学会論文集, 第 71 巻, 第 2 号, pp.25-36, 2021/9, https://doi.org/10.11196/kasai.71.2_25
- 8) F.F.P. Kollmann, W.A. Côté, “Principles of Wood Science and Technology_I Solid Wood”, Springer, 1968, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9>
- 9) Shoma Makino, Kazunori Harada, Anyang Sun, Daisaku Nii, “A charring model of glue laminated timber wall considering shrinkage, cracking, and falling off of surface layer”, to be presented at interflam 2025, Royal Holloway, UK, 2025/6
- 10) F.Dunlap, “The Specific Heat Of Wood”, Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, 1912
- 11) 高橋洋一,「炭素の熱的性質」, 炭素, 第 1971 巻, 第 65 号, pp.53-59, 1971, <https://doi.org/10.7209/tanso.1971.53>
- 12) K.O. Davidsson, J.B.C. Pettersson, “Birch wood particle shrinkage during rapid pyrolysis”, Fuel, Vol.81, Issue 3, pp.263-270, 2002/2, [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00169-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00169-7)
- 13) 孫安陽, 原田和典, 他,「カラマツとスギの定温加熱による収縮量測定」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 61 号, pp.97-100, 2021/6
- 14) 孫安陽, 原田和典, 他,「カラマツの高温加熱による質量と寸法変化関係の定式化」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.245-246, 2021/9
- 15) 茶谷友希子, 原田和典,「一定の放射加熱を受けるカラマツ集成材の赤熱燃焼性状の予測」, 日本建築学会環境系論文集, 第 86 巻, 第 790 号, pp.863-872, 2021/12, <https://doi.org/10.3130/aije.86.863>
- 16) 茶谷友希子, 原田和典,「炭化層に赤熱反応分布を設けた計算モデルによる木質耐火部材の燃え止まり予測」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.229-230, 2025/5
- 17) 茶谷友希子, 原田和典,「(仮題) 炭化層の赤熱反応を考慮した計算モデルによる木質耐火部材の燃焼予測」, 日本建築学会環境系論文集, 投稿予定

第8章 燃え止まり予測解析プログラムを用いた解析検証

第8章では、第7章で示した燃え止まり予測解析プログラムを用いて、耐火炉を用いた加熱実験とコーンカロリメータを用いた放射加熱実験の2種類の加熱条件の実験を対象として計算を行い、実験結果と計算結果を比較、検証する。

なお、本章の一部は、文献8)～10)で発表した内容を再構成したものである。

8.1 耐火炉実験を対象とした計算

8.1.1 計算対象とする実験

まず、耐火炉を用いて木質部材をガスバーナーで加熱した実験について計算する。計算対象とするのは、原田ら¹⁾による厚さ100mmのカラマツ集成材壁を、ISO834標準加熱曲線に従い1時間加熱した後、炉内で3時間放冷した実験である。文献では耐火炉への給気量を変化させて複数の実験を実施しているが、燃焼型支配因子が0.082となる実験7（給気量 $0.0410\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ）を計算対象とした。該当の実験7の炉内温度、試験体図面、試験体内部温度、焼失・炭化深さをそれぞれ図8.1-1～図8.1-4に引用する。深さ20mmでの試験体内部温度は60分過ぎに約700℃でピークを迎え、深さ40mmでの温度は60分過ぎから150分頃にかけて約300℃でなだらかなピークを迎えている。実験終了後の焼失深さは約10mm、炭化深さは約50mmである。

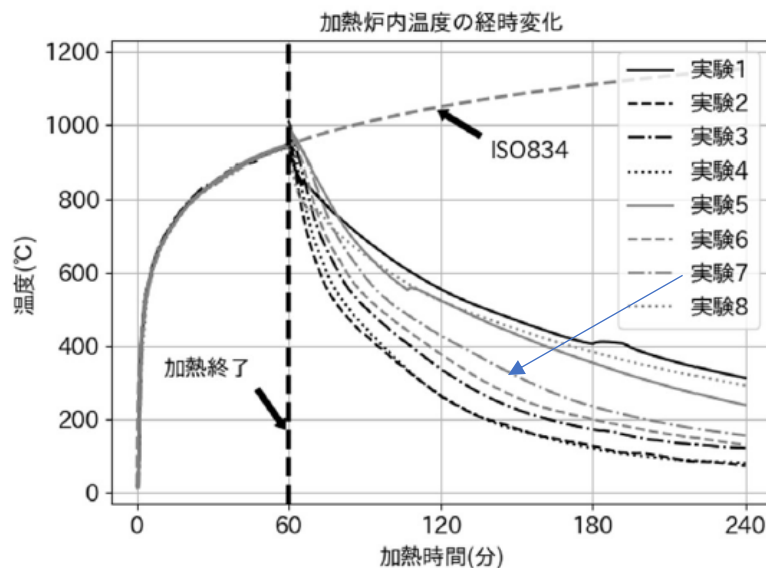


図 8.1-1 炉内温度の実験値¹⁾

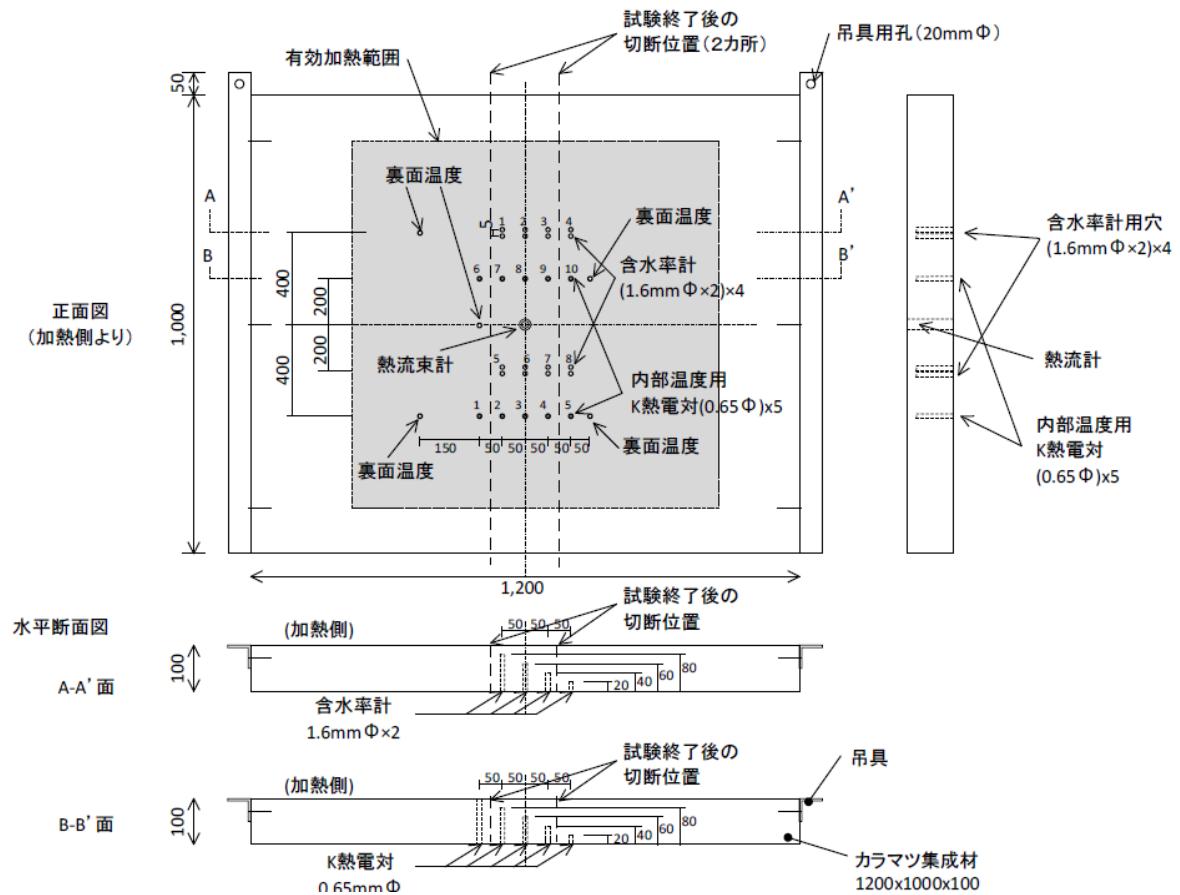


図 8.1-2 試験体図¹⁾

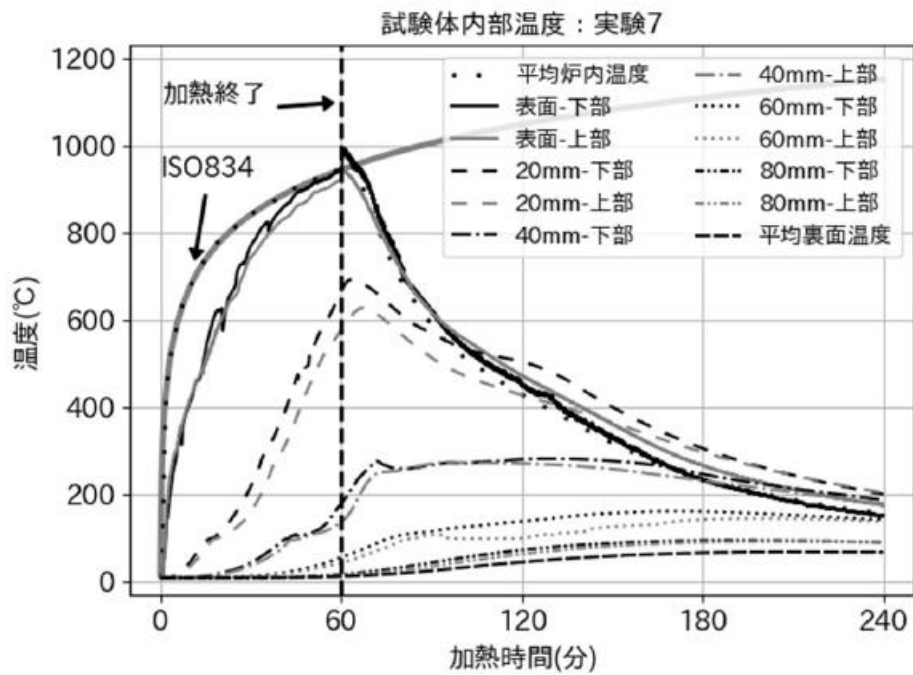


図 8.1-3 試験体内部温度の実験値¹⁾

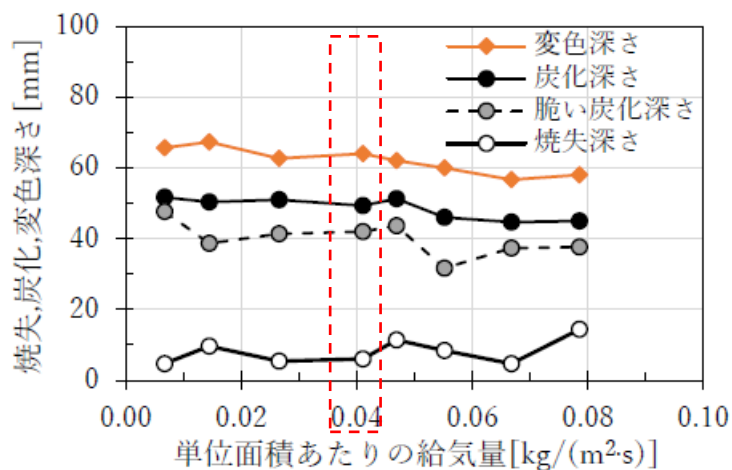


図 8.1-4 試験体の焼失、炭化深さの実験値 ¹⁾

8.1.2 計算条件

実験の試験体のうち厚さ 100mm×幅 40mm の部分を解析対象とした。要素分割を図 8.1-5 に示す。x 方向は 2.5mm、y 方向は 2mm 間隔で三角形要素に分割し、亀裂は 20mm 間隔で発生するとした。炉内温度 (図 8.1-1)、試験体の初期密度 (463kg/m³)、含水率 (12.2%-wt.) は実験に用いた試験体の値をそのまま入力値とした。炉内の酸素濃度は、実験の測定結果 ¹⁾ から、加熱中は酸素濃度 3%、放冷中は 21% で一定とした。

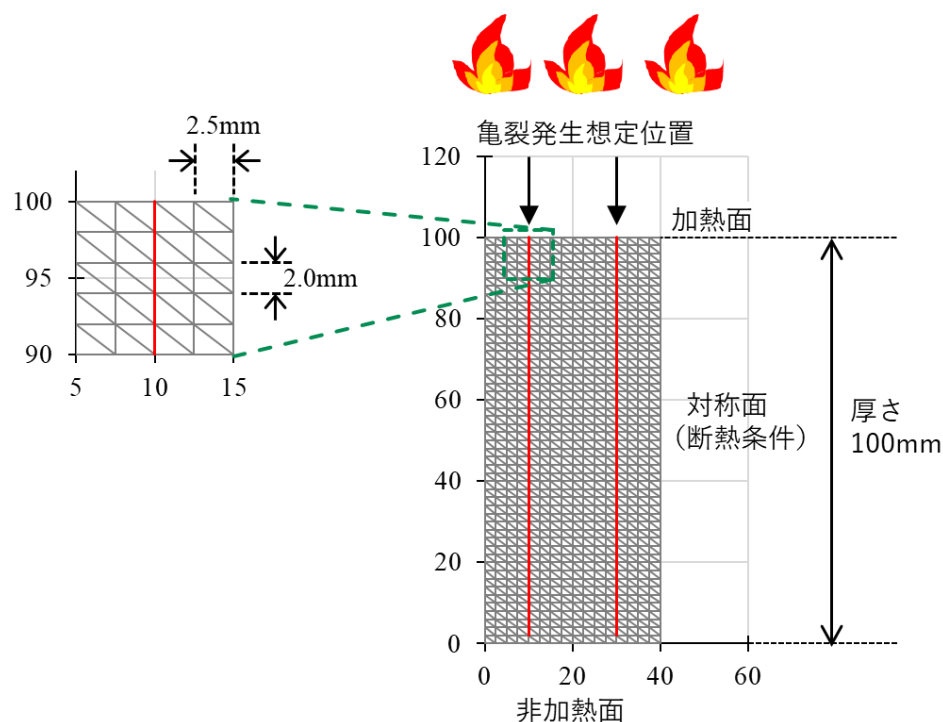


図 8.1-5 解析対象の要素分割 (耐火炉加熱実験)

8.1.3 詳細モデルと簡易モデルの計算結果

炭化層内の赤熱反応分布モデルにおいて、各要素の部材表面からの距離を求める方法として、7.2.1 項で示した収縮を考慮して正味の距離を求める方法（以降詳細モデルと呼ぶ）と、7.2.2 項で示した収縮を無視して加熱表面位置の時間変化のみ考える方法（以降簡易モデルと呼ぶ）について、それぞれ同条件で計算した結果を比較する。式(7-22)において、緩和係数 $coeff$ を 150 m^{-1} 、浸透深さ d_{min} を 0.010 m として 2 種類の計算モデルでそれぞれ計算を実施した結果を図 8.1-6 および図 8.1-7 に示す。なお、計算結果の断面図において、炭化深さの判定には孫ら²⁾により報告されているカラマツ集成材の炭化温度 381°C を基準とした。

詳細モデルではデスクトップパソコン（CPU インテル Corei7, メモリ 32Gbytes）を用いて計算を実施したところ、実験時間の 4 時間分を計算するのに、計算時間が約 48 時間以上必要であった。計算結果は、深さ 20mm と 40mm の最高温度は実験結果を上回っているが定性的には良く予測出来ており、安全側の予測として十分な精度である。

簡易モデルでは、同じパソコンを用いて実験時間の 4 時間分を計算するのにかかった計算時間は約 3 分であり、簡易化の効果は十分であることが確認出来た。計算結果は、60 分の加熱時間中は詳細モデルと大差ないが、放冷時間中の 60 分以降、簡易モデルでは急激な温度上昇と温度低下が段階的に発生している。これは、詳細モデルと簡易モデルにおける、各要素の加熱表面からの距離の時間変化の計算手法の違いが影響している。第 7 章で述べたように、詳細モデルでは加熱表面からの距離を収縮を考慮して毎時間刻み変化するように計算しているが、簡易モデルでは収縮を考慮せず要素の焼失のみを考慮しているため、要素が焼失するタイミングで一気に加熱表面からの距離が変化する。このタイミングで急激な温度変化が発生すると考えられる。計算結果の詳細は 8.1.4 項(ii)および図 8.1-12 にて改めて考察している。

詳細モデルの方が滑らかな解が得られるものの、計算時間による利便性を鑑みて、今後の検討では簡易モデルを用いて計算を実施し、上述の簡易モデルの問題は 8.1.4 項(ii)において解決を図った。

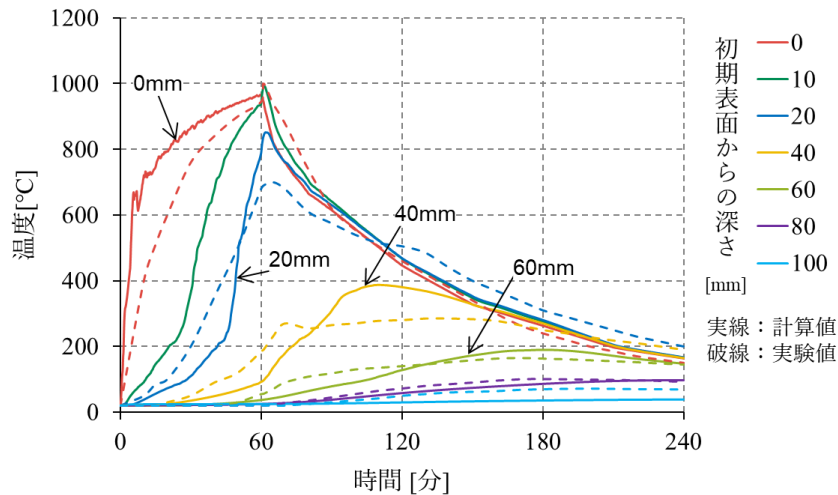


図 8.1-6 詳細モデルによる計算結果 ($\text{coeff}=150$ 、 $d_{\min}=0.010$)

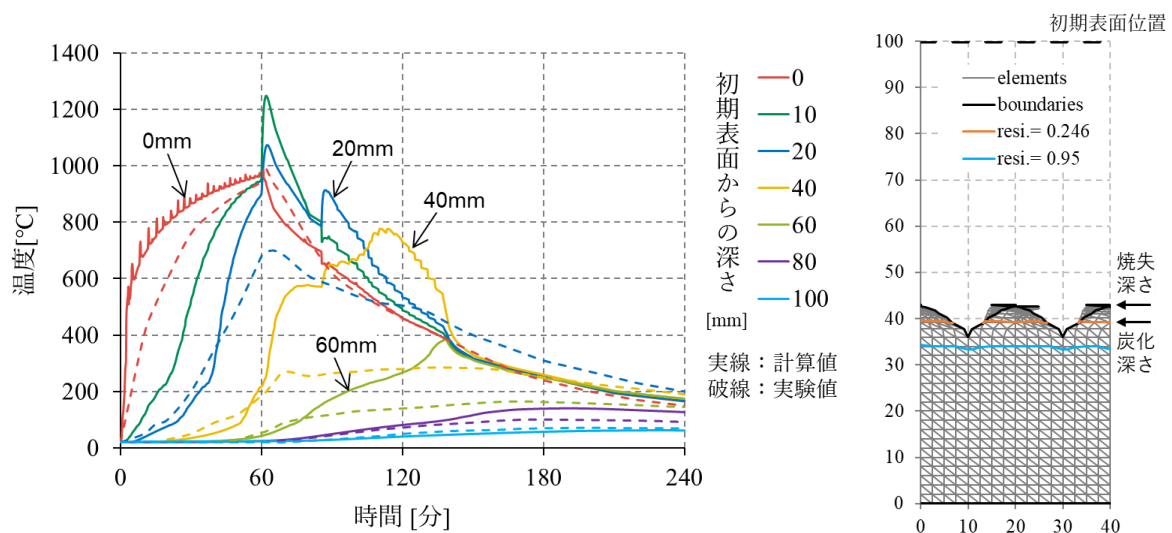


図 8.1-7 簡易モデルによる計算結果 ($\text{No.2_coeff}=150$ 、 $d_{\min}=0.010$)

8.1.4 炭化層の赤熱反応分布モデルの効果と係数の検討

簡易モデルを用いて、炭化層の赤熱反応分布モデルの効果と、式(7-22)内の緩和係数 coeff および浸透深さ $d_{\min}$ の適切な値について検討する。実施した計算条件と計算結果の概要を表 8.1-1 に示す。

表 8.1-1 耐火炉実験を対象とした簡易モデルによる計算条件と計算結果

No.	計算条件		計算結果			
	緩和係数 <i>coeff</i> [m ⁻¹]	浸透深さ <i>d_{min}</i> [m]	最高温度[°C]		240 分時点の試験体中央の 燃焼の進み具合[mm]	
			深さ 20mm	深さ 40mm	焼失深さ	炭化深さ
1	赤熱分布なし		1418.2	1096.9	70.62	72.42
2	150	0.010	1073.7	777.4	56.95	60.30
3	200	0.010	1037.9	752.8	55.26	59.37
4	300	0.010	998.6	711.7	52.72	57.64
5	150	0.006	1003.1	655.6	48.81	55.64
6	150	0.002	955.9	556.6	38.39	52.19

(i) 炭化層の赤熱反応分布モデルの効果の確認

炭化層の赤熱反応分布を設定しない、つまり炭化層全体に酸素が行き渡り赤熱すると仮定した場合の計算結果を図 8.1- 8 に示す。前述の通り加熱中は酸素濃度が低いため赤熱が発生しない計算になっているが、加熱が終了して炉内の酸素濃度が回復し赤熱が発生すると、炭化層全体が赤熱することにより一気に発熱し、深さ 20mm の温度は 1400°C を超えて上昇し、初期表面から深さ 70mm 以上まで焼失してしまう。文献3)でも示したように、炭化層の赤熱反応分布なしに赤熱する計算を行うと、赤熱反応が過剰な結果となることを改めて確認した。

前項の図 8.1- 7 に示した図は、簡易モデルにおいて緩和係数 $coeff = 150 m^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.010 m$ と設定した計算結果（計算 No.2）である。深さ 20mm の最高温度は 1073°C、焼失深さは 56.95mm まで低下しており、炭化層に赤熱反応分布モデルを設けることで、計算結果が実験結果に近づくことが確認出来る。しかし実験結果と比較すると、まだ温度は高く、焼失・炭化深さも大きく、赤熱が過剰に設定されている。

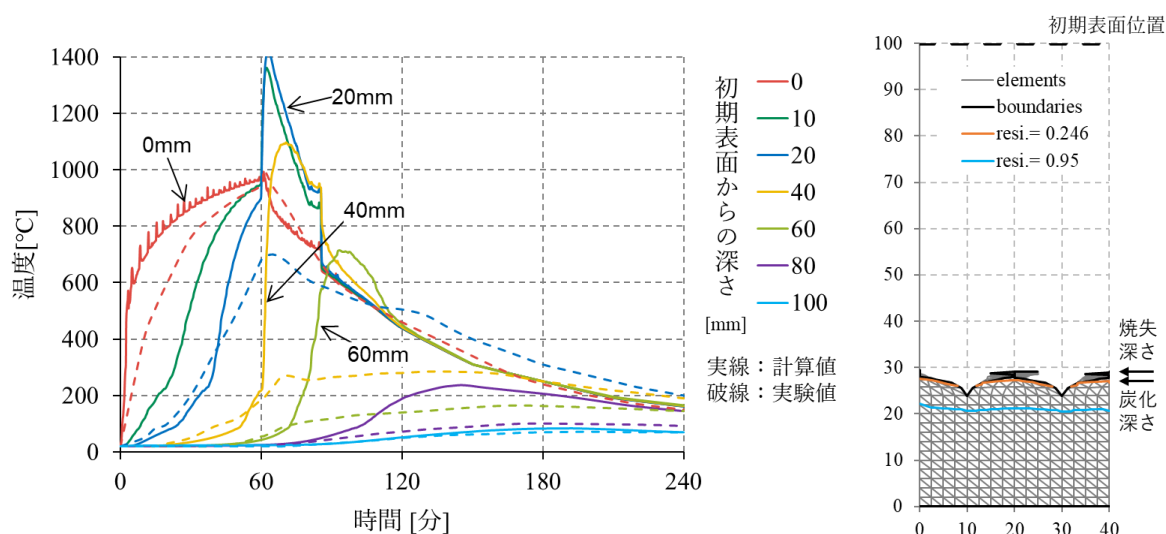


図 8.1- 8 簡易モデルによる計算結果 (No.1_赤熱分布なし)

(ii) 炭化層の赤熱反応分布形状（緩和係数 $coeff$ および浸透深さ d_{min} ）の検討

計算 No.2 の緩和係数 $coeff = 150 \text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.010 \text{ m}$ では、まだ赤熱が過剰な計算結果となっていたことから、より低減を強くする分布形状を検討する。表 8.1- 1 に示した計算条件に対する低減係数 $fctr$ を図 8.1- 9 に示す。

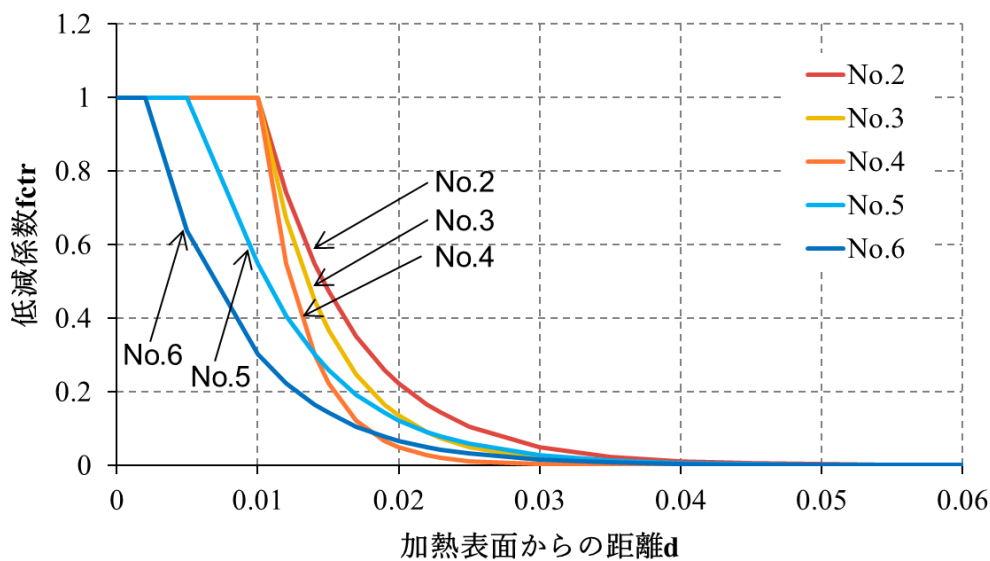


図 8.1- 9 赤熱反応分布形状の比較（耐火炉実験における比較）

はじめに、浸透深さ d_{min} は 0.010 m のままで緩和係数 $coeff$ を 150 よりも大きくし、 10 mm 以上の低減が強くなるように変化させて、その影響を確認する。緩和係数を 200 とした計算結果を図 8.1- 10 に、 300 とした計算結果を図 8.1- 11 に示す。緩和係数が大きくなるほど、深さ 20 mm の最高温度は下がり、焼失・炭化深さも小さくなるが、その差は小さく効果は薄い。

また、No.2～4 のいずれの計算においても、放冷中の 85 分頃に急激な温度上昇が見られる。図 8.1- 12 に計算 No.4 の深さ $0 \sim 20 \text{ mm}$ の 2 mm ごとの要素の残量比の時間変化を示す。この図に見られるように、 60 分に加熱が終了し赤熱が開始すると、表面から浸透深さ $d_{min} = 0.010 \text{ m}$ までの全 6 つの要素は低減係数 $fctr = 1$ であるため最大速度で赤熱し始め、 86 分に同時に燃え尽きる。その後、表面から 10 mm までの全要素が燃え尽きたことにより、深さ $10 \sim 20 \text{ mm}$ の全要素の低減係数 $fctr$ が 1 に変わるため、最大速度で赤熱し始める。これにより、深さ 10 mm 分の要素が燃え尽きるごとに急激な発熱が発生することを繰り返す計算になっている。実際の試験体では、表面の炭化層の脱落により内側の炭が急に赤熱し始めることは起こり得るが、本計算では脱落は考慮していないため、計算は実際の現象とは異なる性状を示している。

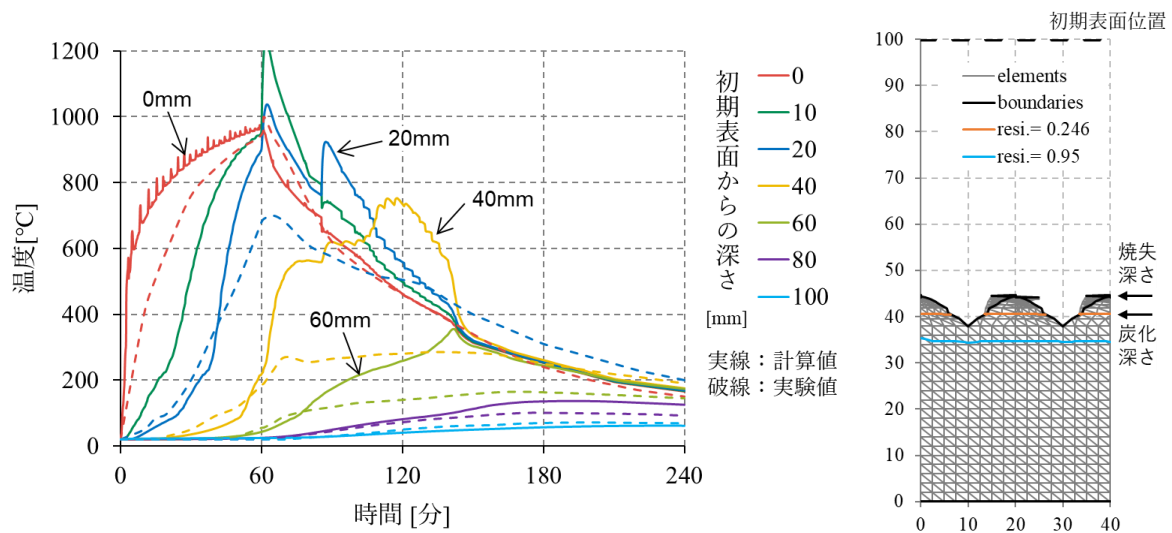


図 8.1-10 簡易モデルによる計算結果 (No.3_coeff=200、 $d_{min}=0.010$)

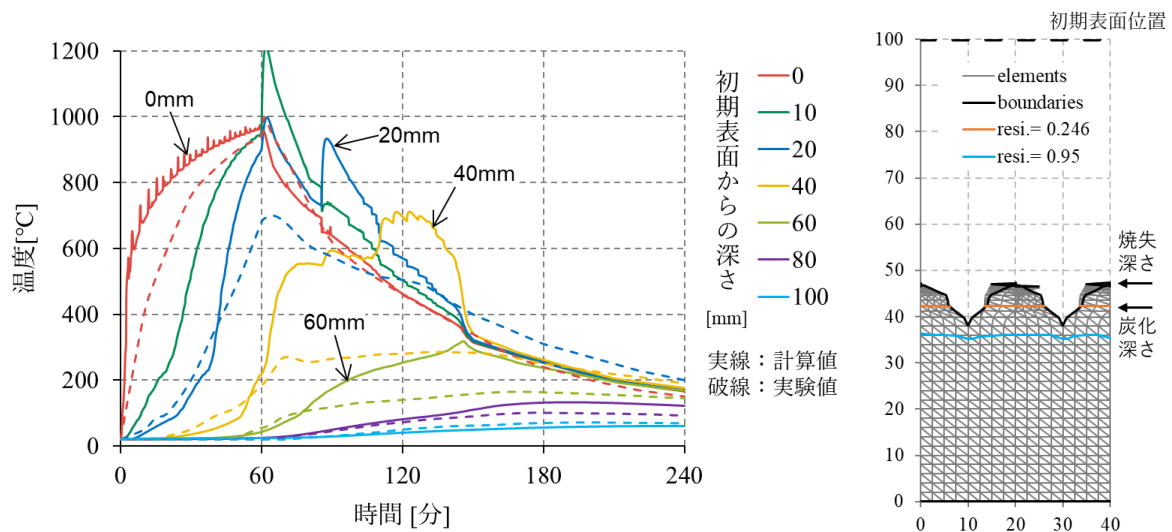


図 8.1-11 簡易モデルによる計算結果 (No.4_coeff=300、 $d_{min}=0.010$)

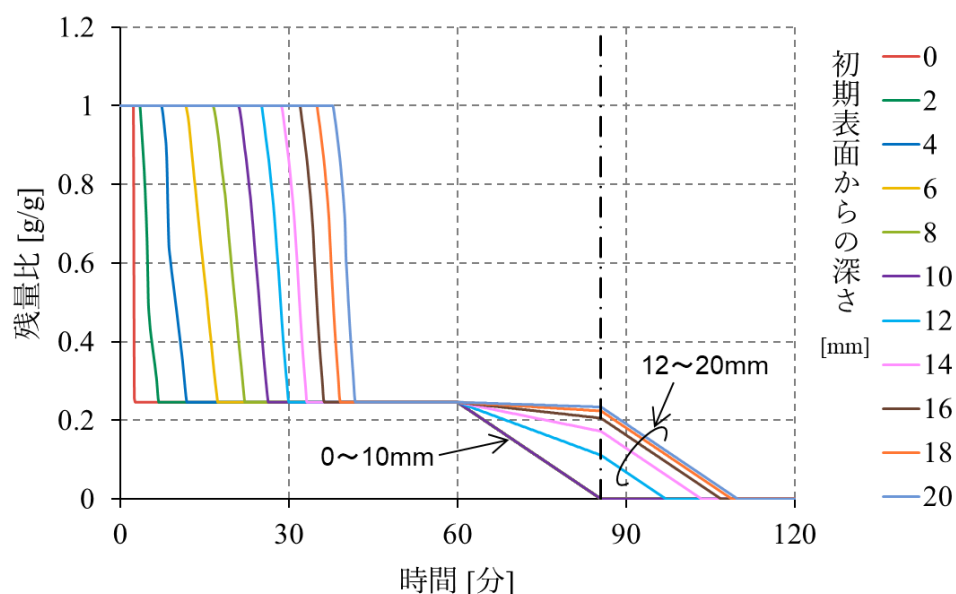


図 8.1- 12 簡易モデルによる計算結果（残量比／No.4_coeff=300、 $d_{min}=0.010$ ）

そこで、緩和係数 $coeff$ は $150m^{-1}$ のままで浸透深さ d_{min} を $0.010m$ よりも小さくし、低減係数 $fctr$ が1となる範囲が少なくなるように変化させてみる。浸透深さを $0.006m$ とした計算結果を図 8.1- 13 に、 $0.002m$ とした計算結果を図 8.1- 14 に示す。浸透深さを $0.006m$ とすると、深さ $20mm$ の最高温度は $1003^{\circ}C$ 、 240 分時点の焼失深さは $48.81mm$ 、炭化深さは $55.64mm$ となる。浸透深さが $0.010m$ の計算結果と比較すれば実験値に近づくものの、まだ実験値よりも燃焼が激しく、 85 分頃の温度上昇も残っている。

浸透深さを $0.002m$ とすると、深さ $20mm$ の最高温度は $956^{\circ}C$ 、 240 分時点の焼失深さは $38.39mm$ 、炭化深さは $52.19mm$ となり、より実験値に近づいた。また、 85 分頃の温度上昇も実験で実際に観測され得る程度に収まっている。

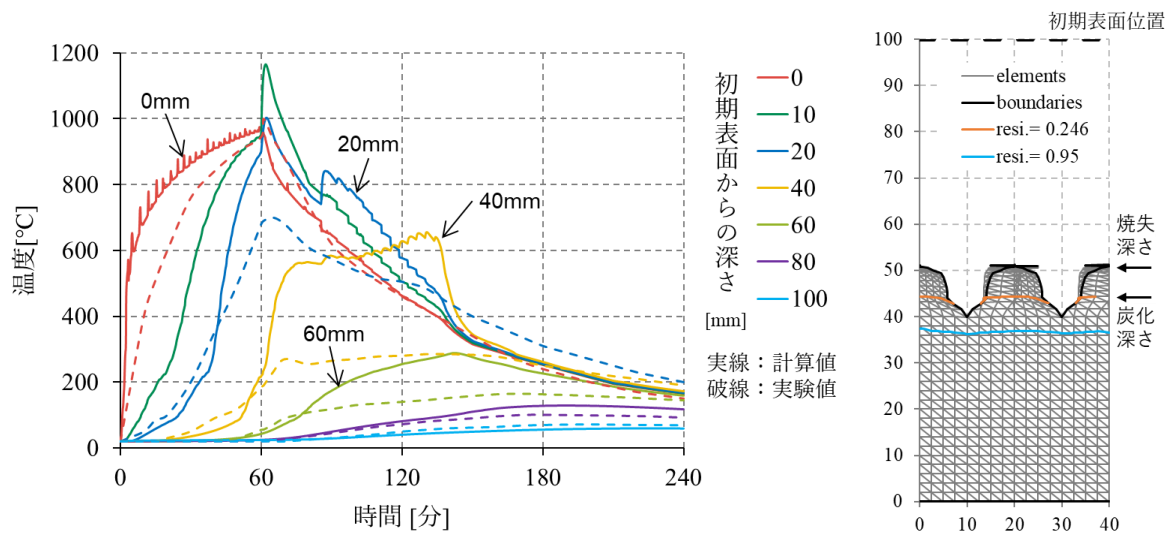


図 8.1-13 簡易モデルによる計算結果 (No.5_coeff=150、 $d_{min}=0.006$)

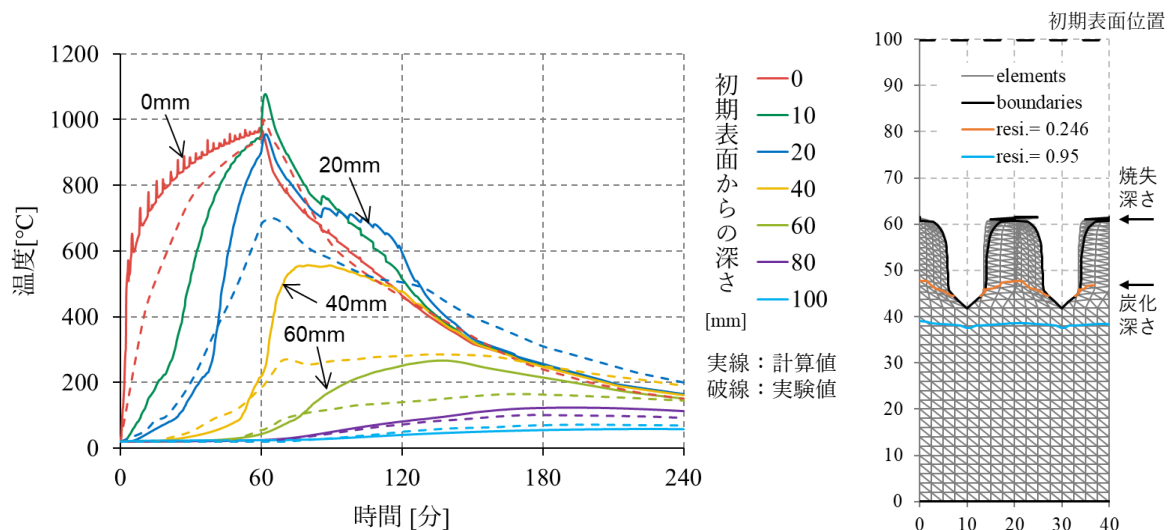


図 8.1-14 簡易モデルによる計算結果 (No.6_coeff=150、 $d_{min}=0.002$)

以上の検討により、耐火炉実験における ISO834 標準加熱曲線に基づく 1 時間加熱実験の場合、浸透深さ d_{min} は 0.002 m とし、緩和係数 $coeff$ は 150 m^{-1} とすることで、安全側の予測が出来ることが分かった。

8.2 コーンカロリメータ実験を対象とした計算

8.1 節で求めた設定値にて、放射加熱によるコーンカロリメータ実験を対象とした計算を行い、加熱条件の異なる実験に対しても適用出来るか検討する。

8.2.1 計算対象とする実験

計算対象として、4 種類の異なる加熱条件の実験を用いる。いずれもコーンカロリメータによる放射加熱実験であり、試験体は厚さ 50mm、加熱面が一辺 50mm もしくは 100mm のカラマツ集成材である。①加熱強度 50kW/m² で燃え止まらない実験 (文献4,5))、②加熱強度 8.4kW/m² で燃え止まった実験 (第 3 章の実験 No.7)、③試験体内部温度を測定した実験 (文献6))、④表面気流を与えた実験 (第 4 章の実験 No.3) である。

各実験結果の概要は 8.2.3～8.2.6 項にてそれぞれの計算結果と併せて説明する。

表 8.2-1 コーンカロリメータ実験を対象とした簡易モデルによる計算条件と計算結果

No.	対象実験	計算条件		計算結果			
		緩和係数 <i>coeff</i> [m ⁻¹]	浸透深さ <i>d_{min}</i> [m]	最高温度[°C]		実験終了時点の試験体中央での燃焼の進み具合[mm]	
				表面	裏面	焼失深さ	炭化深さ
7	①	150	0.002	846.04	93.28	26.72	36.10
8	①	100	0.002	836.60	115.43	29.65	38.38
9	①	50	0.002	844.90	227.94	35.75	44.26

8.2.2 計算条件

実験の試験体のうち厚さ 50mm×幅 48mm を解析対象とした。要素分割を図 8.2-1 に示す。x 方向は 4mm、y 方向は 2mm 間隔で三角形要素に分割し、亀裂は 16mm 間隔で 3 本が発生するとした。炉内温度、試験体の初期密度、含水率は実験値をそのまま入力値とした。

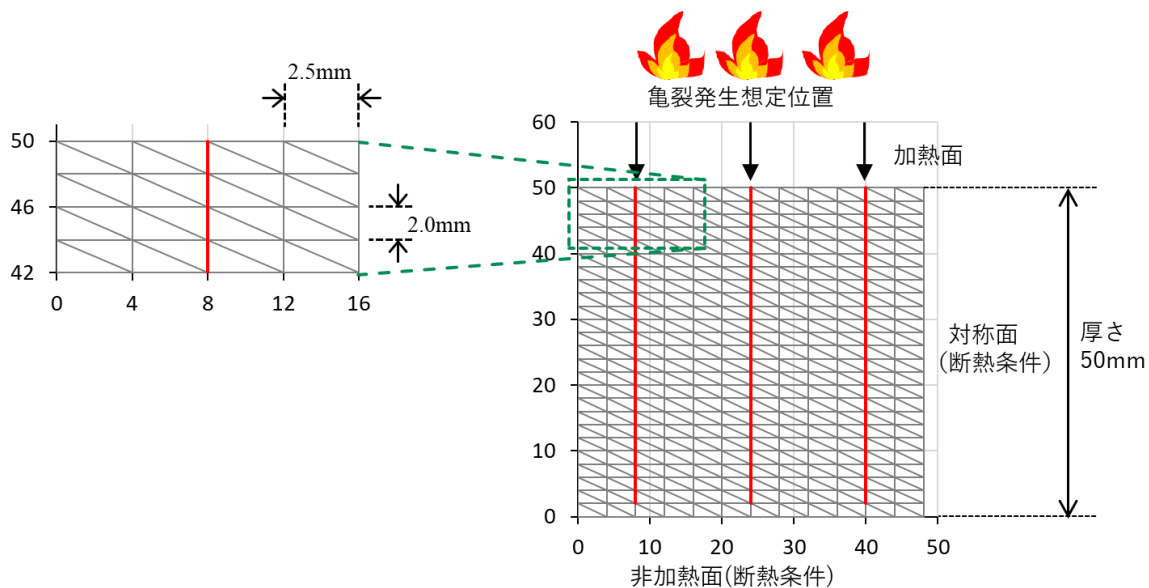


図 8.2-1 解析対象の要素分割 (コーンカロリメータ実験)

8.2.3 ①加熱強度 50kW/m^2 での燃え止まらない条件

(i) 実験概要

計算対象とするのは、筆者ら^{4),5)}が過去に実施した、カラマツ集成材（密度 548 kg/m^3 、含水率 15.4% ）を加熱強度 50kW/m^2 にて 4050 秒間加熱した実験である。実験後の試験体断面は図 8.2-2 に示す。実験終了後の焼失深さは約 24mm 、炭化深さは約 46mm である。

該当の実験の試験体表面温度と裏面温度は計算結果のグラフに併せて示す。表面温度は着火後すぐに測定していたサーモカメラの測定上限 670°C を超えている。裏面温度はゆっくりと上昇し、実験終了時には約 180°C になっている。



図 8.2-2 加熱強度 50kW/m^2 の実験の終了後断面写真

(ii) 計算結果

耐火炉実験で得られた設定値である緩和係数 $coeff = 150\text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.002\text{ m}$ を用いて計算した結果（計算 No.7）を図 8.2-3 に示す。表面温度は 670°C を超えており、実験終了後の焼失深さは 26.7mm と実験値に近く、表面付近は実験を良く再現出来ている。一方、裏面温度は実験終了時点で 93°C と実験値よりも低く、実験終了後の炭化深さも 36.1mm と実験値よりも小さくなっている。よって、耐火炉実験と同じ設定値では、試験体内部の燃え進みが実験よりも遅いことが分かった。

そこで、浸透深さ d_{min} は 0.002 のままで緩和係数 $coeff$ を 150 よりも小さくし、 0.002 m 以深の赤熱反応速度の低減が弱くなるように変更して、その影響を確認する。

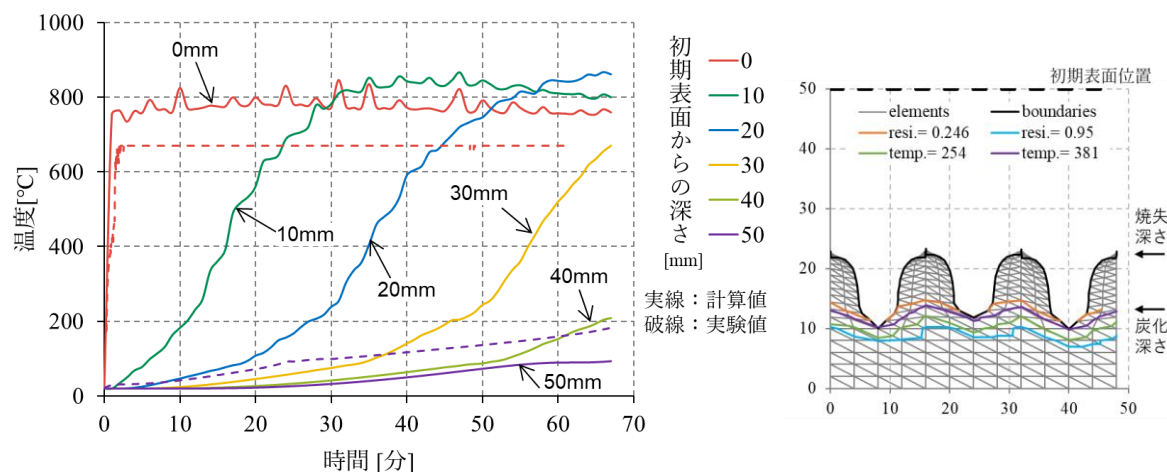


図 8.2-3 コーンカロリメータ実験の計算結果 (No.7)

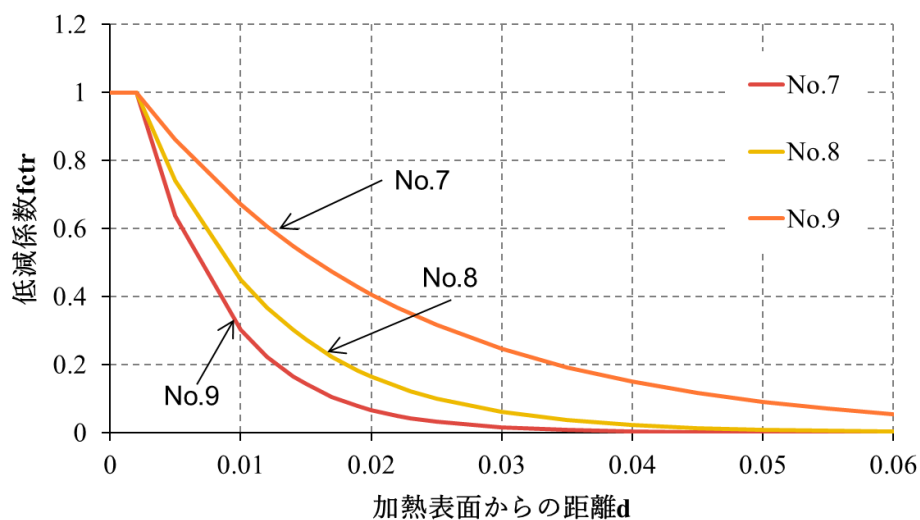


図 8.2-4 低減係数の設定値の比較 (コーンカロリメータ実験)

緩和係数を 100 とした計算結果を図 8.2- 5 に、50 とした計算結果を図 8.2- 6 に示す。緩和係数が小さくなるほど、実験終了時の裏面温度は上昇し、炭化深さも大きくなる。緩和係数を 50 まで小さくすると、実験終了時の裏面温度は 228°C、炭化深さは 44.3mm と実験値に近い値となった。ただし、表面温度はほとんど変わらない一方で、焼失深さは 35.8mm まで増加しており実験値よりも焼失が大きくなっている。まだ改良の余地は残るが、本研究ではコーンカロリメータ実験の安全側の予測が出来る設定値として、緩和係数 $coeff = 50 \text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.002 \text{ m}$ を採用する。

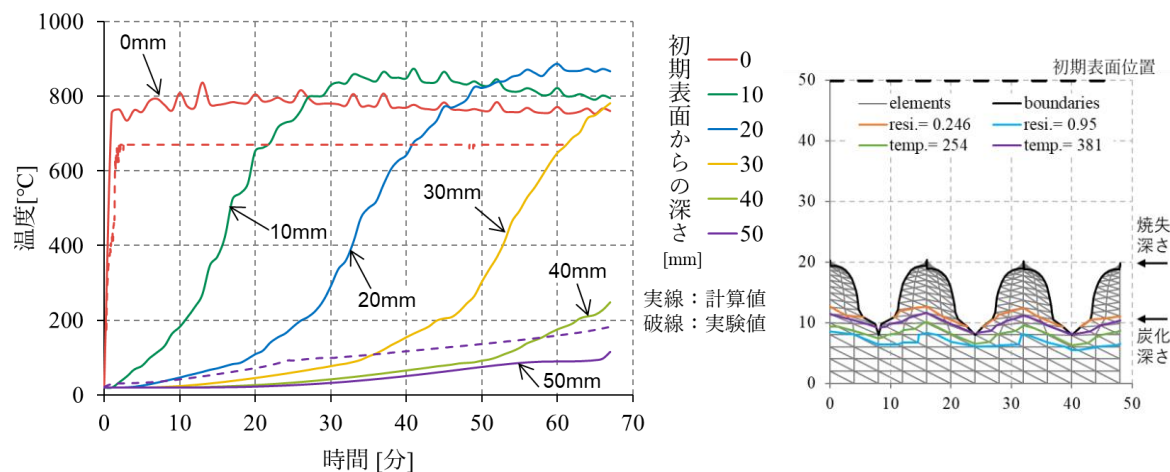


図 8.2-5 コーンカロリメータ実験の計算結果 (No.8)

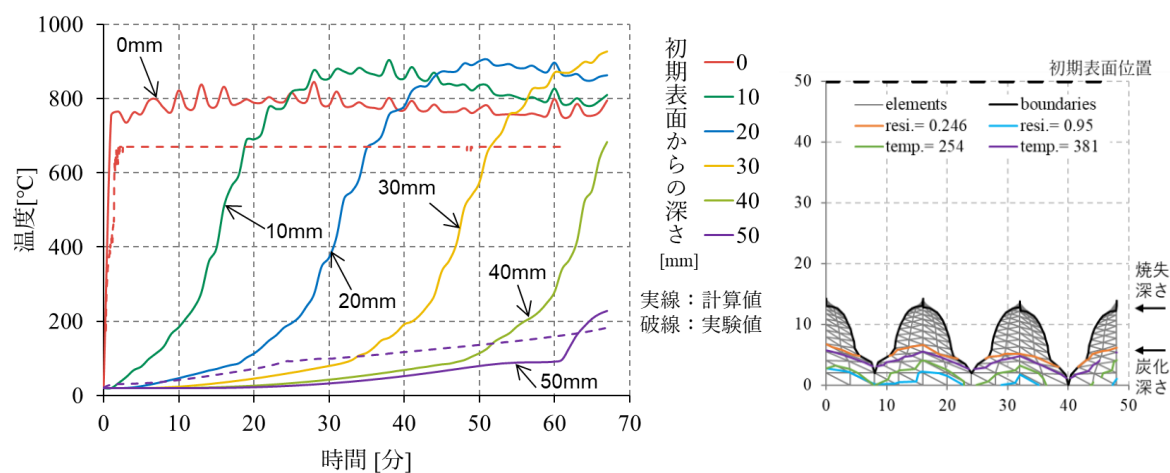


図 8.2-6 コーンカロリメータ実験の計算結果 (No.9)

8.2.4 ②加熱強度 8.7kW/m² の燃え止まる条件

前項で得られた設定値（緩和係数 $coeff = 50 \text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.002 \text{ m}$ ）をコーンカロリメータ実験の他の加熱条件に適用して計算してみる。計算の設定条件をに示す。

表 8.2-2 コーンカロリメータ実験を対象とした簡易モデルによる計算条件と計算結果

No.	対象 実験	計算条件		計算結果			
		緩和係数 $coeff \text{ [m}^{-1}\text{]}$	浸透深さ $d_{min} \text{ [m]}$	最高温度[°C]		実験終了時点の試験体中央 での燃焼の進み具合[mm]	
				表面	裏面	焼失深さ	炭化深さ
10	②	50	0.002	556.53	65.33	4.28	5.19
11	③	50	0.002	860.31	77.59	24.77	32.07
12	④	50	0.002	578.02	50.96	2.45	3.57

(i) 実験概要

計算 No.10 で計算対象とするのは、3.3.1 項で説明した実験 No.7 で、カラマツ集成材（密度 466kg/m³、含水率 11.4%）を加熱強度 21kW/m² で 1440 秒加熱した後、加熱強度を 8.4kW/m² に変更して 3600 秒まで加熱した実験で、2400 秒頃には燃え止まったものである。実験結果の詳細は 3.3.1 項を参照されたい。表面温度は燃え止まった 2400 秒以降は 286.2℃で一定となっている。裏面温度は測定していない。実験終了後の焼失深さは約 6mm、炭化深さは約 17mm である。

(ii) 計算結果

計算結果を図 8.2- 7 に示す。加熱強度 8.4kW/m² における表面温度は約 400℃となっており、実験値よりも約 100℃高いが、一定値に収束して準定常状態になる傾向は一致している。実験終了時の焼失深さは 4.3mm、炭化深さは 5.2mm となっており、表面温度が高い割には実験値よりも少し燃え進みが遅い。断面図を見てみると、亀裂部において炭化深さよりも深い位置（約 10mm まで亀裂が入り込んでおり、弱い加熱強度の場合、亀裂内部の境界条件や炭化速度に検討の余地があると考えられる。

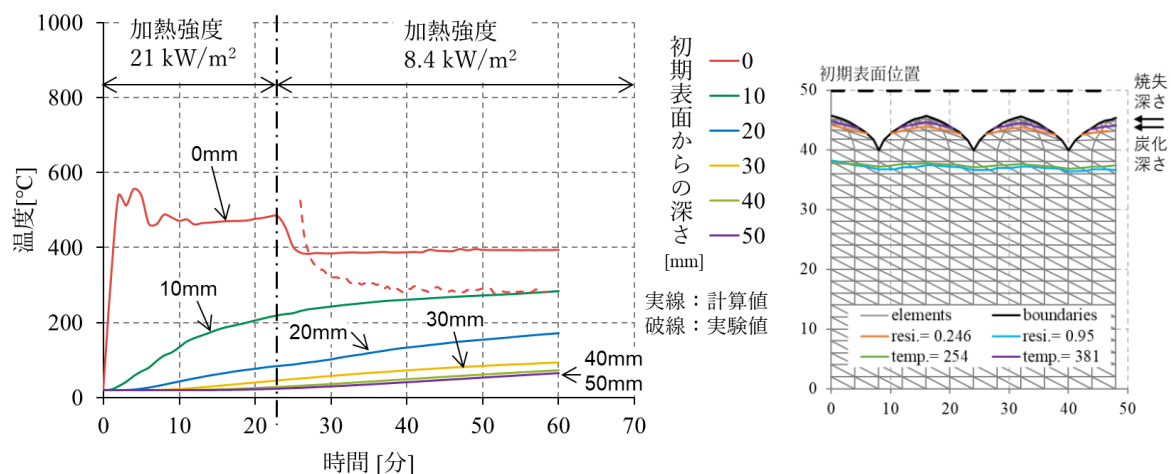


図 8.2- 7 コーンカロリメータ実験の計算結果 (No.10)

8.2.5 ③試験体内部温度を測定した実験

①②は筆者らによる実験で、質量を測定するために試験体内部温度の測定は実施できていない。そこで、原田ら⁶⁾によって実施された実験について計算し、試験体内部への熱の伝わり方を比較してみる。

(i) 実験概要

計算 No.11 で計算対象とするのは、原田ら⁶⁾によって実施されたカラマツ集成材（密度 565kg/m³、含水率 10.7%）を加熱強度 50kW/m² で 3000 秒加熱した実験である。表面温度を測定

していないかわりに、深さ 10, 20, 30, 40, 50mm の試験体内部温度を測定している。試験体内部温度は計算結果のグラフに併せて、実験後の試験体断面は図 8.2- 8 に引用する。実験終了後の焼失深さは約 9.5mm、炭化深さは約 33mm である。



図 8.2- 8 原田らによる実験の終了後断面写真⁶⁾

(ii) 計算結果

計算結果を図 8.2- 9 に示す。実験値は全体的に緩やかに温度上昇するのに対し、計算値は炭化が終了して赤熱が開始する 400℃付近から温度上昇速度が大きくなる。最終的に深さ 10mm と 20mm の温度は計算値のほうが 100～200℃高くなっているが、深さ 40mm の温度は計算値のほうが約 300℃低くなっており、計算において試験体内部への伝熱が弱いことが改めて確認された。実験終了時の焼失深さは 24.8mm、炭化深さは 32.1mm となっており、3.2.3 項の計算 No.9 と同様に炭化深さは良い一致を示しているが、焼失深さが計算値のほうが大きい。

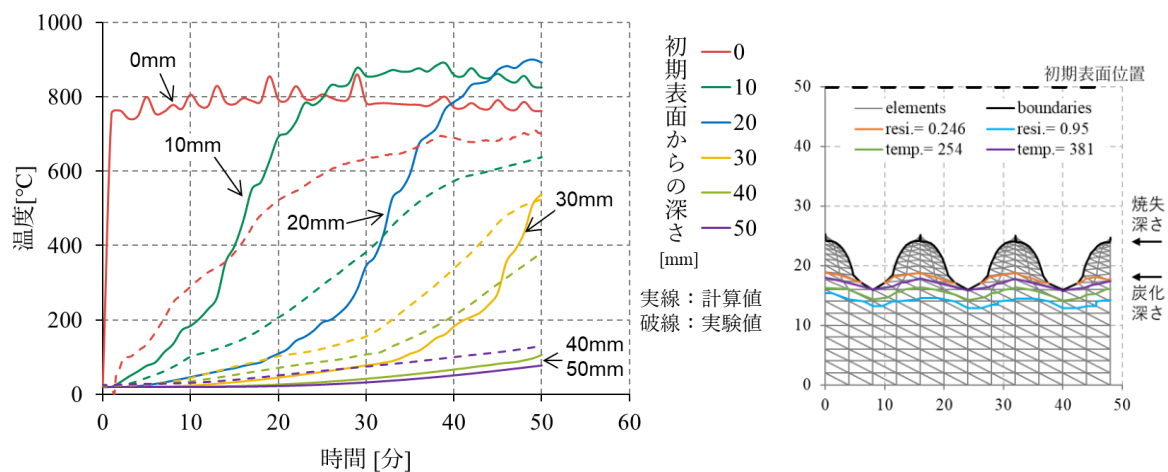


図 8.2- 9 コーンカロリメータ実験の計算結果 (No.11)

8.2.6 ④表面気流を与えた実験

①～③はすべて、試験体表面に強制的に気流を与えていない実験である。第 4 章で実施した

試験体表面に強制的に気流を与えた実験について、第4章で作成した表面気流の影響を組み込んだ赤熱反応速度式を用いて計算を行った。

(i) 実験概要

計算 No.12 で計算対象とするのは、4.3.1 項で説明した実験 No.3 で、カラマツ集成材（密度 499kg/m^3 、含水率 11.3%）を加熱強度 19kW/m^2 で 1070 秒加熱した後、加熱強度を 15kW/m^2 に変更して 1260 秒まで、 7.9kW/m^2 に変更して 3060 秒まで加熱した実験である。1.1m/s の表面気流を 1130～2760 秒にかけて与えた。実験結果の詳細は 4.3.1 項を参照されたい。実験終了後の焼失深さは約 6mm、炭化深さは約 17mm である。

(ii) 計算結果

計算結果を図 8.2-10 に示す。表面温度の計算値は加熱強度 19kW/m^2 で約 490°C 、 7.9kW/m^2 で約 320°C となっており、気流の有無の影響がほとんど見られず、実験結果を再現できていると言いはない。2760 秒に気流を止めた際にわずかに表面温度が上昇したのみである。最表面の要素の赤熱による残量比減少速度の時間変化を図 8.2-11 に示す。赤熱による残量比減少速度は表面気流があると、ない時間帯と比較して約 2 倍程度増加するように正しく計算されているため、表面温度に対して気流の影響が小さいのは、表面気流による対流熱損失の増加とのバランスが取れていたものと考えられる。実験終了後の焼失深さは 2.45mm、炭化深さは 3.57mm と実験値よりも小さい。

3.2.4 項で述べたように弱い加熱強度においては、表面温度が計算値のほうがかなり高いにも関わらず焼失、炭化深さは計算値のほうが小さくなっている。

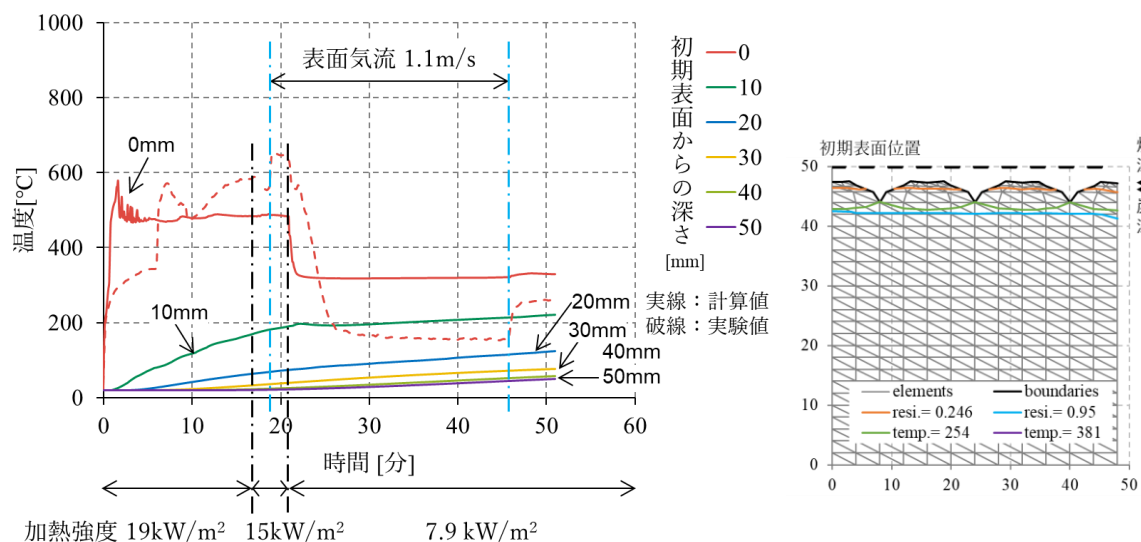


図 8.2-10 強制気流を与えたコーンカロリメータ実験の計算結果 (No.12)

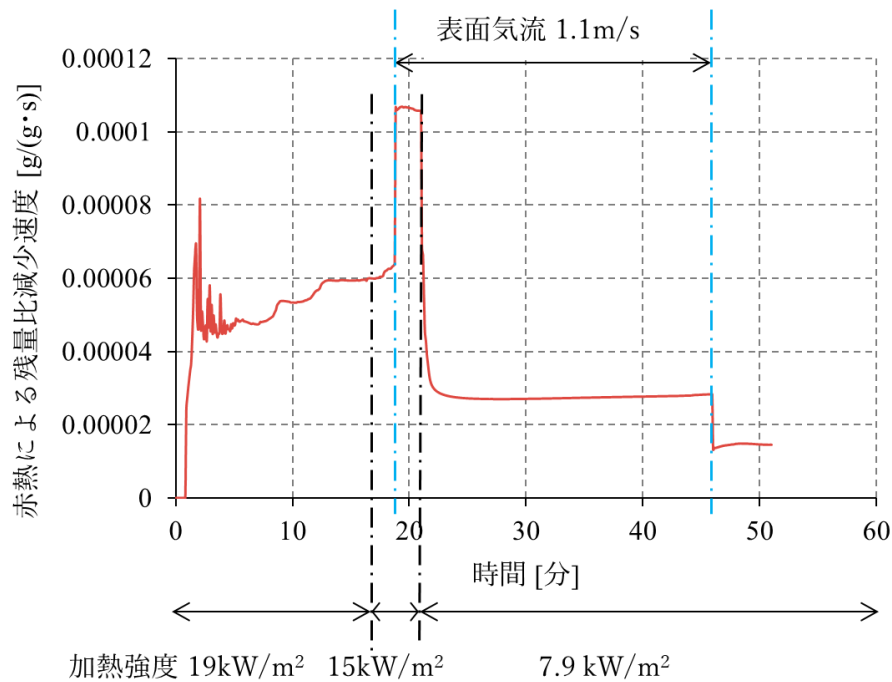


図 8.2- 11 強制気流を与えたコーンカロリメータ実験の計算結果
(No.12／赤熱による残量比減少速度)

8.3 8 章のまとめ

第 8 章では、燃え止まり予測解析プログラムを用いて、耐火炉を用いた加熱実験とコーンカロリメータを用いた放射加熱実験を対象として計算を行い、実験結果と計算結果を比較、検証した。

耐火炉実験における ISO834 標準加熱曲線に基づく 1 時間加熱実験の場合、浸透深さ d_{min} は 0.002 m とし、緩和係数 $coeff$ は 150 m^{-1} とすることで、安全側の予測が出来ることが分かった。

コーンカロリメータによる放射加熱実験の場合、耐火炉実験と同じ設定値では試験体内部の燃え進みが遅くなった。浸透深さ d_{min} は 0.002 m のまま、緩和係数 $coeff$ を 50 m^{-1} とすることで、焼失深さが実験値よりも大きくなるが、炭化深さを良く予測できるようになるため、安全側の予測となる。加熱強度が弱いと、表面温度は計算値が実験値よりも 100°C 以上高くなるが焼失、炭化深さは計算値が実験値よりも小さく、試験体内部への燃え進みの予測精度には課題が残る。

[第 8 章の参考文献]

- 1) K. Harada, A. Sun, S. Makino, D. Nii, “Burning Behaviour of GLT Walls during Cooling Period after ISO 834 Exposure in a Small Furnace”, *Fire Technology*, Vol.60, Issue 4, pp.2539-2557, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01483-8>
- 2) A. Sun, K. Harada, D. Nii, “Experimental research about moisture transfer, burning behavior and charring behavior of glue laminated larch under fire heating using cone calorimeter”, *Fire Technology*, Vol.60, pp.2559-2579, 2024/3, <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-024-01545-5>
- 3) 茶谷友希子, 原田和典, 「一定の放射加熱を受けるカラマツ集成材の赤熱燃焼性状の予測」、日本建築学会環境系論文集、第 86 巻、第 790 号、pp.863-872、2021/12、<https://doi.org/10.3130/aije.86.863>
- 4) 茶谷友希子, 原田和典, 土橋常人, 「カラマツ集成材の火災加熱後における炭化層の赤熱反応速度の測定」、日本建築学会環境系論文集、第 82 巻、第 736 号、pp.491-499、2017/6、<https://doi.org/10.3130/aije.82.491>
- 5) 茶谷友希子, 「大断面集成材の火災後の燃え止まり予測に関する研究」、修士論文、京都大学大学院工学研究科建築学専攻、2016/3
- 6) 原田和典, 孫安陽, 仁井大策, 「カラマツ集成材の炭化深さと温度履歴の関係に関する考察」、日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）、pp.105-106、2022/9
- 8) 茶谷友希子, 原田和典, 「炭化層に赤熱反応分布を設けた計算モデルによる木質耐火部材の燃え止まり予測」、日本火災学会研究発表会概要集、pp.229-230、2025/5
- 9) 茶谷友希子, 原田和典, 「放射加熱条件における木質耐火部材の燃え止まり予測」、日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）、投稿済、2025/9 発表予定
- 10) 茶谷友希子, 原田和典, 「(仮題) 炭化層の赤熱反応を考慮した計算モデルによる木質耐火部材の燃焼予測」、日本建築学会環境系論文集、投稿予定

第2部のまとめ

第2部では、第1部で求めたカラマツ集成材の赤熱反応速度式と燃え止まり条件を燃え止まり予測解析モデルに適用し、カラマツ集成材を対象に耐火炉加熱実験とコーンカロリメータ実験の2種類の加熱条件の計算を行い、計算結果と実験結果を比較、検証した。

第7章では、解析モデルの概要と本研究で適用した計算条件についてまとめた。計算に使用した燃え止まり予測解析モデルは、原田らにより開発され日本建築学会の防火部門パネルディスカッションにて最新の内容が公開されているものをベースとした。赤熱反応速度式と燃え止まり条件に第1部で求めた値を適用した上で、炭化層内部に深さ方向の赤熱反応分布を設定する計算モデルを作成した。計算モデルの作成においては、深さ方向の収縮と焼失を考慮して正味の距離を求めて分布を設定する詳細モデルと、深さ方向の収縮は考慮せず焼失による加熱表面位置の時間変化のみを考慮して分布を設定する簡易モデルの2種類を作成した。

第8章では、耐火炉加熱実験とコーンカロリメータ実験の2種類の加熱条件の実験を対象に解析計算を実施し、計算結果と実験結果を比較してモデルの妥当性を検証した。

カラマツ集成材の壁の耐火炉による1時間耐火実験を対象とした計算では、詳細モデルと簡易モデルの計算結果を比較し、簡易モデルでは詳細モデルと比較して計算時間が約1/200まで短縮出来ることと、簡易モデルと詳細モデルの計算結果に有意な差は見られないことを確認した。簡易モデルを用いた計算により、炭化層の赤熱反応分布を設定する低減係数の式(7-22)について、緩和係数 $coeff = 150 \text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.002 \text{ m}$ とすることで、実験値を安全側に予測出来ることを確認した。

$$fctr = \min(1, \exp(-coeff \times (d - d_{min}))) \quad (7-22)$$

カラマツ集成材のコーンカロリメータによる放射加熱実験を対象とした計算では、複数の加熱条件の実験の計算を実施した。緩和係数 $coeff$ と浸透深さ d_{min} は耐火炉実験と同じ設定値では試験体内部の燃え進みが遅くなることが分かった。浸透深さ d_{min} は 0.002 m のまま、緩和係数 $coeff$ を 50 m^{-1} とすることで、焼失深さが実験値よりも大きくなるが、炭化深さを良く予測できるようになるため、安全側の予測となる。弱い加熱強度では、表面温度は計算値が実験値よりも 100°C 以上高くなるが焼失、炭化深さは計算値が実験値よりも小さく、試験体内部への燃え進みの予測精度に課題が残る。

第9章 結論

9.1 本研究のまとめ

第1章では、中大規模の木造建築を実現するために法規制上、あるいは社会的に求められる性能と課題について概説した。そして、本研究の目的は、木材のみで安定して燃え止まる木質耐火部材を実現するために、木材の燃え止まり条件を解明することと、様々な条件下における燃え止まり性能を検証できるようにするために、数値解析による燃え止まり性能の予測精度を向上させることであると示した。

第1部（第2～5章）では、カラマツとスギの集成材の赤熱反応性状を測定し、赤熱反応速度式と赤熱反応の停止（＝燃え止まり）条件を求めた。

第2章では、木材の燃焼反応がどのように進行するのかを示した上で、各燃焼過程における反応速度や停止条件に関する既往研究をまとめた。赤熱反応の停止条件について調査された例は多くなく、定式化するには既往のデータが足りないことを示した。

第3章では、ISO5660-1に規定されるコーンカロリメータ試験装置を用いて、種々の加熱強度で試験体を放射加熱した。試験体を十分に炭化させた後、加熱強度を燃え止まり近傍まで低減して、有炎燃焼が停止した後の赤熱反応の性状を観測した。このとき、ロードセルにより質量減少を、赤外線カメラにより表面温度を継続して測定した。質量減少が停止し、表面温度が一定値に漸近することで燃え止まりを判定した。

赤熱反応の停止条件は、カラマツとスギで異なり、カラマツは加熱強度 8.4kW/m^2 、表面温度 286.2°C 、スギは加熱強度 6.0kW/m^2 、表面温度 221.7°C であり、これより強い加熱強度では赤熱反応が持続した。赤熱反応速度については、カラマツの表面温度 $T_s[\text{K}]$ と質量減少速度 $dm_{ox,A}/dt[\text{kg/m}^2\text{s}]$ の関係式(3-5)を作成し、この式はスギにも適用出来る可能性を示した。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = m_0 A_0'' \times \exp\left(-\frac{E_{ox,A}}{R_g T_s}\right) = 0.248 \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5)$$

赤熱反応の単位燃焼熱はスギの燃え止まり付近の加熱強度を除き、 23.41MJ/kg と求まった。

第4章では、試験体表面の気流が赤熱反応性状に与える影響について、コーンカロリメータ試験装置に送風ファンを追加して、 0.5m/s および 1.1m/s の気流を試験体の表面に平行方向に与えて測定を行った。赤熱反応の停止条件は気流を与えない場合と同等であった。赤熱反応速度は、気流により増加する傾向が見られた。その効果を、頻度因子と活性化エネルギーに対する係数の形式で、表面気流速度 $v[\text{m/s}]$ を赤熱反応速度式(3-5)に組み込んで、式(3-5')および(4-13)を作成した。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times f(v) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3 \times g(v)}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5')$$

$$\begin{cases} f(v) = -0.3508 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \\ g(v) = -0.1483 \times v + 1 & (0.0 \leq v \leq 1.1) \end{cases} \quad (4-13)$$

第5章では、雰囲気酸素濃度が赤熱反応性状に与える影響について、大型熱重量分析装置を用いて測定した。400℃に設定した電気炉内に種々の酸素濃度の気流を流通させ、その雰囲気中の試験体の質量減少速度を測定した。酸素濃度が低いほど赤熱反応速度は低下し、酸素濃度が一定値を下回ると赤熱反応が発生しなくなることが分かった。赤熱反応速度式(3-5)に頻度因子の係数の形式で酸素濃度 Y_{O_2} [%]の影響を組み込んで、式(3-5'')および(5-6)を作成した。

$$\frac{dm_{ox,A}}{dt} = 0.248 \times h(Y_{O_2}) \times \exp\left(-\frac{39.784 \times 10^3}{8.314 \times T_s}\right) \quad (3-5'')$$

$$h(Y_{O_2}) = 7.03 \times Y_{O_2}^{1.25} \quad (5-6)$$

なお、試験体の大きさによって、試験体の収縮と亀裂の発生状況に差が発生し、燃え止まる酸素濃度と、試験体厚みと残量比減少速度の残存率の関係に影響が出ることが確認された。

第2部(第6～8章)では、第1部で求めたカラマツ集成材の赤熱反応速度とその停止条件を燃え止まり予測解析モデルに適用し、耐火炉加熱実験とコーンカロリメータ実験の2種類の加熱条件の計算を行い、計算結果と実験結果を比較、検証した。

第6章では、木材の燃焼反応を数値解析により予測する手法の既往研究をまとめた。火災加熱を受けている最中の木材の燃焼を予測する手法は数多く提案されており、その予測精度も良好であるものが多いが、放冷過程の木材の燃焼を予測する手法は少なく、その予測精度も高いとは言い難いことを示した。

第7章では、解析モデルの概要と赤熱反応の計算方法について示した。計算に使用した燃え止まり予測解析モデルは、原田らにより開発され日本建築学会の防火部門パネルディスカッションにて最新の内容が公開されているものをベースとした。赤熱反応速度とその停止条件には第1部で求めた値を適用した上で、炭化層内部に深さ方向の赤熱反応速度分布を設定する計算モデルを作成した。これは、炭化層の深い位置には酸素が届かないことにより赤熱反応速度が低下することを考慮するためである。計算モデルの作成においては、深さ方向の収縮と焼失を考慮して加熱表面までの正味の距離を求めて分布を設定する詳細モデルと、深さ方向の収縮は考慮せず焼失による加熱表面位置の時間変化のみを考慮して分布を設定する簡易モデルの2種類を作成した。

第8章では、第7章で説明した解析モデルを用いて複数の実験を対象として計算を実施し、実験結果と解析結果を比較して、解析モデルの妥当性、実用性の検証を行った。

カラマツ集成材の壁の耐火炉による1時間耐火実験を対象とした計算では、詳細モデルと簡易モデルの計算結果を比較し、簡易モデルでは詳細モデルと比較して計算時間が約1/200まで短縮出来ることと、簡易モデルと詳細モデルの計算結果に有意な差は見られないことを確認した。簡易モデルを用いた計算により、炭化層の赤熱反応速度を補正する低減係数 f_{ctr} の式(7-

22)について、緩和係数 $coeff = 150 \text{ m}^{-1}$ 、浸透深さ $d_{min} = 0.002 \text{ m}$ とすることで、耐火炉実験の値を安全側に予測出来ることを確認した。

$$fctr = \min(1, \exp(-coeff \times (d - d_{min}))) \quad (7 - 22)$$

カラマツ集成材のコーンカロリメータによる放射加熱実験を対象とした計算では、複数の加熱条件の実験の計算を実施した。緩和係数 $coeff$ と浸透深さ d_{min} を耐火炉実験と同じ設定値にすると試験体内部の燃え進みが遅くなることが示された。そのため、浸透深さ d_{min} は 0.002 m のまま緩和係数 $coeff$ を 50 m^{-1} に調整すると、焼失深さが実験値よりも大きくなるが、炭化深さを良く予測できるようになった。弱い加熱強度では、表面温度は計算値が実験値よりも 100°C 以上高くなるが、焼失、炭化深さは計算値が実験値よりも小さくなった。

9.2 今後の課題

本研究では、赤熱反応速度に関する諸性状を解明し、燃え止まり予測モデルを改良した。その結果、次に示す課題が明示的になった。

(i) 赤熱反応に対する試験体表面の気流の影響

本研究では速度 0.5m/s と 1.1m/s の表面気流を試験体表面に対して平行に与えた場合の赤熱反応性状を測定し定式化した。実建築において部材表面に発生する気流は、その範囲に収まっているとは限らない。より強い速度の表面気流が与えられている場合には、赤熱反応速度が単調増加するわけではなく、いずれかの風速で吹き消え現象が発生して燃え止まることも考えられる。また、試験体表面に対して垂直に気流を与えた場合の赤熱反応性状についても、測定し解明する必要がある。

(ii) 赤熱反応に対する酸素濃度の影響

本研究では供給ガス温度 400°C の条件において、酸素濃度をパラメータとして赤熱反応性状を測定して定式化し、その式が他の温度でも適用出来ると仮定した。この仮定が適切であることを検証するために、他の供給ガス温度においても同様の測定を行い、反応速度を解明することが望まれる。

(iii) 赤熱反応に対する表面気流の影響と酸素濃度の影響の組み合わせ

本研究では赤熱反応に対する表面気流の影響と酸素濃度の影響を個別に測定し、それぞれが赤熱反応速度式に与える影響を個別に定式化した。そのため、酸素濃度が低い状態で表面気流が発生している場合の赤熱反応性状がどうなるかは未確認である。それぞれの影響を明確にした後のステップとして取り組むことが望ましい。

(iv) カラマツ集成材以外の樹種や木質建材の赤熱反応

本研究では主にカラマツ集成材を試験体として赤熱反応の測定を行い定式化した。表面気流を与えていないコーンカロリメータ実験から作成した速度式は、スギ集成材にも適用出来る可能性を示した。カラマツ集成材は日本において木質耐火部材に主に用いられる材料であるが、集成材以外の木質建材（例えば CLT (Cross Laminated Timber) や LVL (Laminated Veneer Lumber) 等）や、カラマツ以外の樹種（例えばスギやヒノキ等）も用いられる可能性がある。日本国外では NLT (Nail Laminated Timber) 等の建材やスプルス等の樹種も用いられる。より多くの木質耐火部材の性能を予測出来るようにするために、より様々な木質建材の赤熱反応性状を測定し定式化する必要がある。

(v) 炭化層の赤熱反応速度分布モデルの更なる改良

本研究では、炭化層表面の亀裂は無視して、試験体の深さ方向のみを変数として炭化層内の赤熱反応速度分布を設定した。そのため、実際の炭化層では亀裂内表面は雰囲気ガスに接しており赤熱反応が発生しやすい状態と考えられるが、計算上は加熱表面からの距離に応じて一律に深さ方向の低減係数を掛けている。解析モデルを改良して亀裂内表面近傍での赤熱反応速度分布も考慮出来るようになると、予測精度の向上が期待できる。

また、赤熱反応速度分布の形状を、指数関数形と仮定して設定したが、炭化層の密度や透気率等の分布を把握することが出来れば、より実態に即した分布形状とすることが可能と考えられる。

(vi) 放射加熱条件における弱い加熱強度の場合の予測

コーンカロリメータによる放射加熱条件の計算において、弱い加熱強度の場合、表面温度や焼失深さの予測精度を高めると、試験体内部への燃え進みが実験値よりも弱く、内部温度や炭化深さの予測が不十分となる課題が残っている。

(vii) 燃え止まり予測と室温予測の統合

本解析モデルは部材の燃焼を予測することに特化したものであるため、1時間耐火実験の計算を実施するにあたり、炉内温度は実験の測定値を入力条件として与えている。一方で、実火災における木質部材の燃焼を予測するには、火災室温度は室の設計条件等により様々な変化し得るため、火災室温度自体も予測する出来るように解析モデルを拡張することが望まれる。

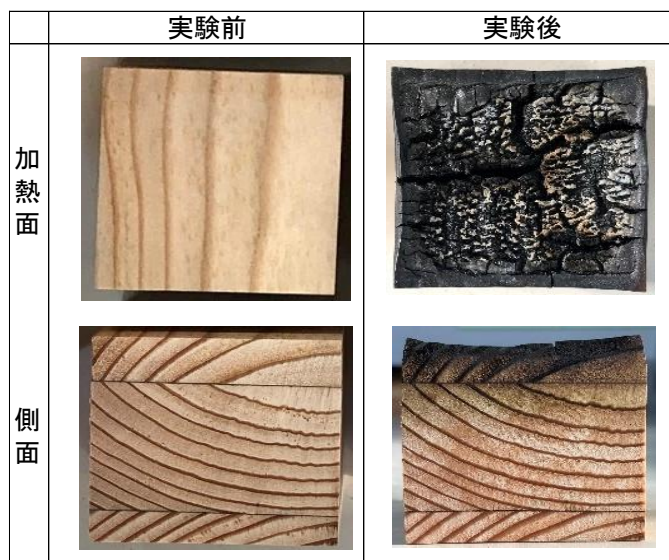
付録1 コーンカロリメータによる放射加熱実験データ集

第3章および第4章で実施したコーンカロリメータを用いた放射加熱実験について、全47回の実験データを次頁以降にまとめる。

実験条件一覧

実験 No.		樹種	試験体				加熱強度[kW/m ²]		強制気流 [m/s]
			寸法		密度 [kg/m ³]	含水率[%]	Period 1	Period 2	
			加熱面[mm ²]	厚さ[mm]					
1	L-7.6	カラ マツ	49×49	49	488.7	14.1	19.0	7.6	—
2	Lf-7.9-1		48×47	48	529.8	12.0	19.0	7.9	0.5
3	Lf-7.9-2		48×47	48	499.4	11.3	19.0	7.9	1.1
4	L-8.0-1		98.7×98.7	50.4	425.7	9.6	20.0	8.0	—
5	L-8.0-2		98.7×98.7	50.4	429.8	11.1	20.0	8.0	—
6	L-8.0-3		49×49	48	488.6	15.0	20.0	8.0	—
7	L-8.4		98.7×98.7	50.4	466.4	11.4	21.0	8.4	—
8	L-8.6		49×48	50	487.7	15.5	21.0	8.6	—
9	L-8.8-1		62×56	60	578.4	14.9	17.0	8.8	—
10	L-8.8-2		61×55	60	619.2	15.2	17.0	8.8	—
11	L-8.8-3		62×56	60	633.8	15.2	17.0	8.8	—
12	Lf-8.8-4		48×48	47	489.1	10.1	17.0	8.8	0.5
13	Lf-8.8-5		48×47	49	441.5	9.5	17.0	8.8	1.1
14	L-8.8-m		98.7×98.7	50.0	464.6	13.2	21.0	8.8	—
15	L-9.0		98.7×98.7	50.0	457.8	11.8	22.0	9.0	—
16	L-9.3		98.7×98.7	50.0	444.0	10.7	22.0	9.3	—
17	L-9.8		48×47	50	497.6	14.3	23.0	9.8	—
18	L-12.4-1		60×56	60	610.5	14.8	24.0	12.4	—
19	L-12.4-2		62×53	60	591.3	13.2	24.0	12.4	—
20	L-12.4-3		62×55	60	662.8	15.1	24.0	12.4	—
21	Lf-12.7-1		50×48	47	500.1	11.5	24.0	12.7	0.5
22	Lf-12.7-2		48×48	47	469.3	11.6	24.0	12.7	1.1
23	Cf-4.2-1	スギ	50×48	50	351.7	9.9	16.0	4.2	0.5
24	Cf-4.2-2		48×48	48	480.6	12.0	16.0	4.2	1.1
25	C-4.4		50×49	45	425.8	14.6	16.0	4.4	—
26	C-6.0-1		50×47	46	390.7	12.3	16.0	6.0	—
27	C-6.0-2		50×50	47	368.2	10.9	16.0	6.0	—
28	C-6.0-3		50×49	50	364.2	11.3	16.0	6.0	—
29	C-6.0-4		50×48	47	369.5	11.3	20.8	6.0	—
30	C-6.0-5		48×48	47	333.1	9.2	20.8	6.0	—
31	C-6.0-6		48×48	49	333.1	8.5	20.8	6.0	—
32	C-6.0-7		50×48	45	420.6	11.7	21.0	6.0	—
33	C-6.0-8		98.7×98.7	48.0	356.8	10.3	21.0	6.0	—
34	Cf-6.0-9		50×50	50	360.6	11.0	16.0	6.0	0.5
35	Cf-6.0-10		50×50	50	372.0	10.6	16.0	6.0	1.1
36	Cf-6.0-11		47×47	46	371.6	9.5	16.0	6.0	0.5
37	Cf-6.0-12		48×48	48	361.5	9.0	16.0	6.0	1.1
38	C-6.8-1		48×48	48	364.9	10.4	18.0	6.8	—
39	C-6.8-2		49×49	48	386.6	11.8	18.0	6.8	—
40	C-7.0		48×48	48	383.8	10.9	18.0	7.0	—
41	C-7.5		48×48	49	360.3	9.4	20.0	7.5	—
42	C-7.6-1		98.7×98.7	50.0	342.0	10.4	19.0	7.6	—
43	C-7.6-2		48×48	48	380.5	11.1	19.0	7.6	—
44	Cf-7.9-1		48×48	48	380.0	11.4	15.0	7.9	0.5
45	Cf-7.9-2		48×48	48	368.9	10.1	15.0	7.9	1.1
46	C-8.6		98.7×98.7	50.0	359.8	11.2	21.0	8.6	—
47	Cf-8.8		48×48	48	391.3	11.8	17.0	8.8	0.5

実験	1	L-7.6	
試験体	初期質量		57.5 g
	初期寸法	厚	49 mm
		幅	49 mm
		奥	49 mm
	初期密度		488.7 kg/m3
	初期含水率		14.1 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	19→14 kW/m2
		②	7.6 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		480 s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		3660 s



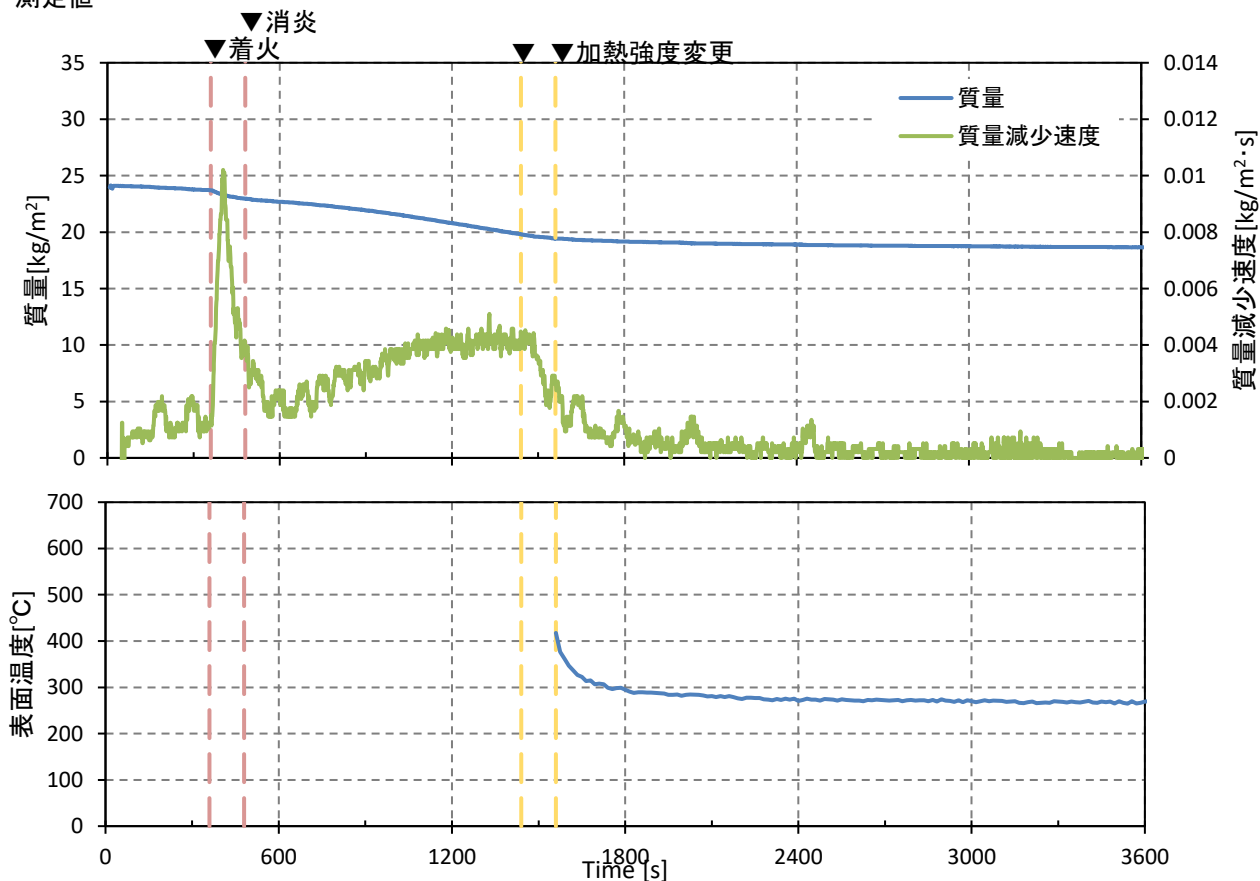
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1400 s	19.0 kW/m ²	0.00410 kg/m ² s	0.41012 kg/m ³ s	°C
	2700 ~ 3600 s	7.6 kW/m ²	0.00016 kg/m ² s	0.01576 kg/m ³ s	269.3 °C

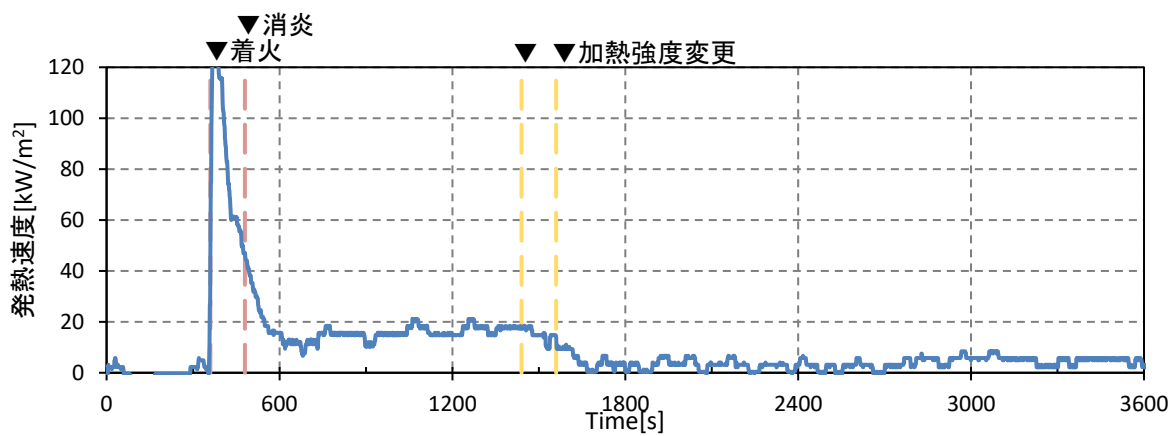
実験終了後試験体切断面



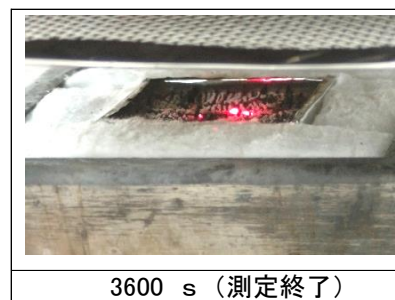
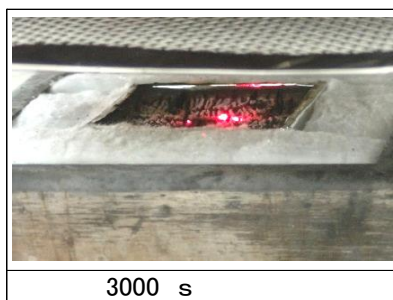
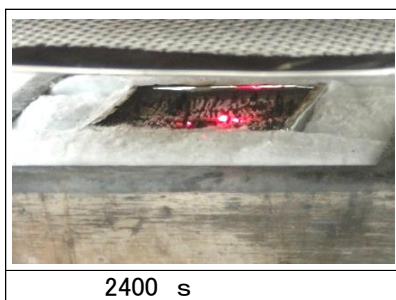
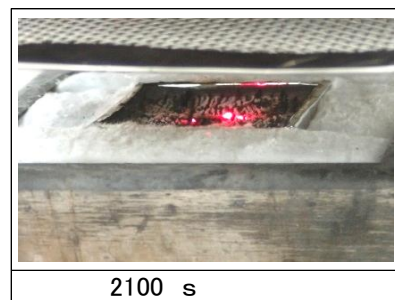
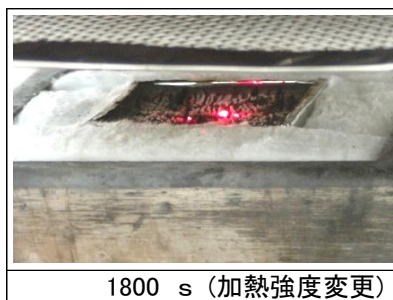
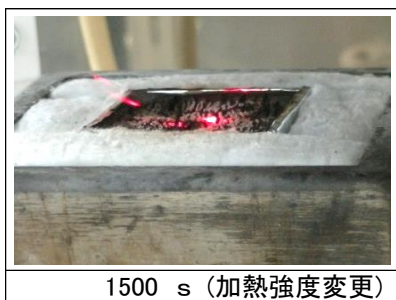
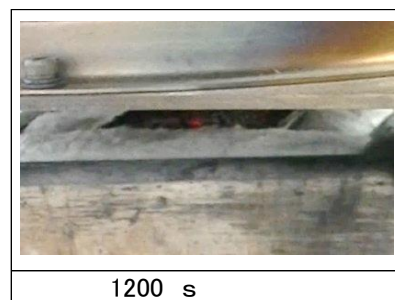
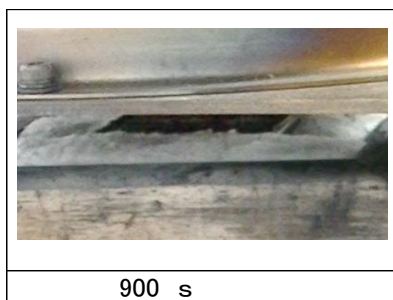
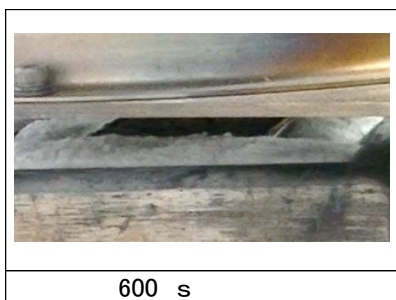
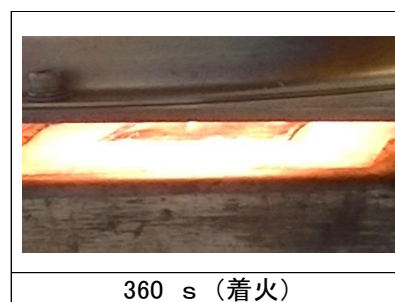
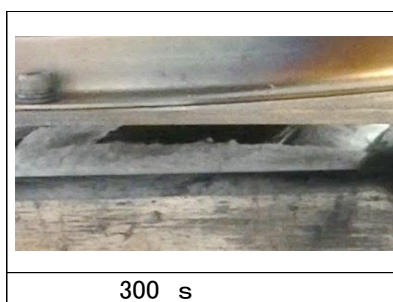
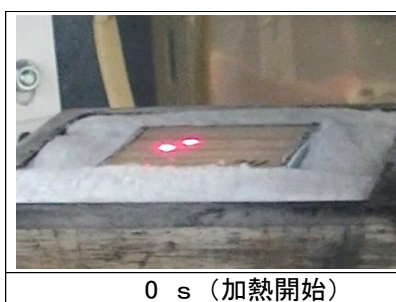
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	5 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	12 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	15 mm	総炭化層	10 mm
変色	18 mm	健全部	34 mm

測定値

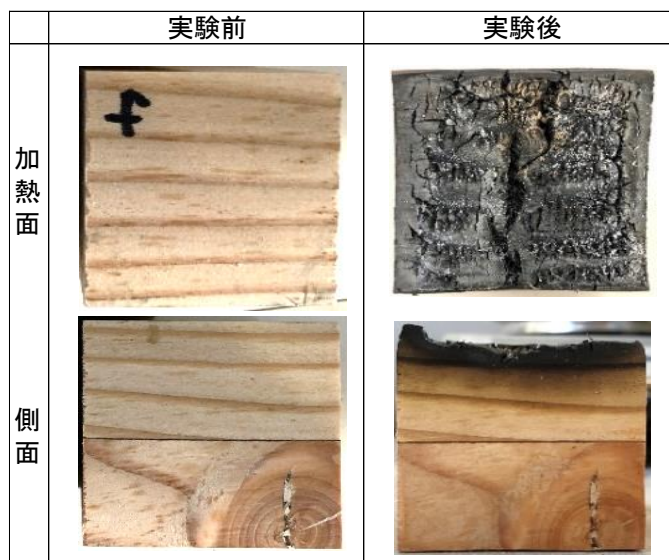




燃焼の様子

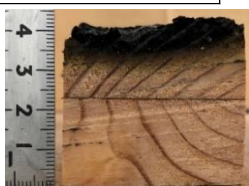


実験	2	Lf-7.9-1	
試験体	初期質量		57.4 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	47 mm
		奥	48 mm
	初期密度		529.8 kg/m3
	初期含水率		12.0 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	19→15 kW/m2
		②	7.9 kW/m2
	表面気流		0.5 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		1100 s
	加熱強度変更		1080 s
	送風開始		1140 s
	加熱強度変更		1260 s
	実験終了		3060 s



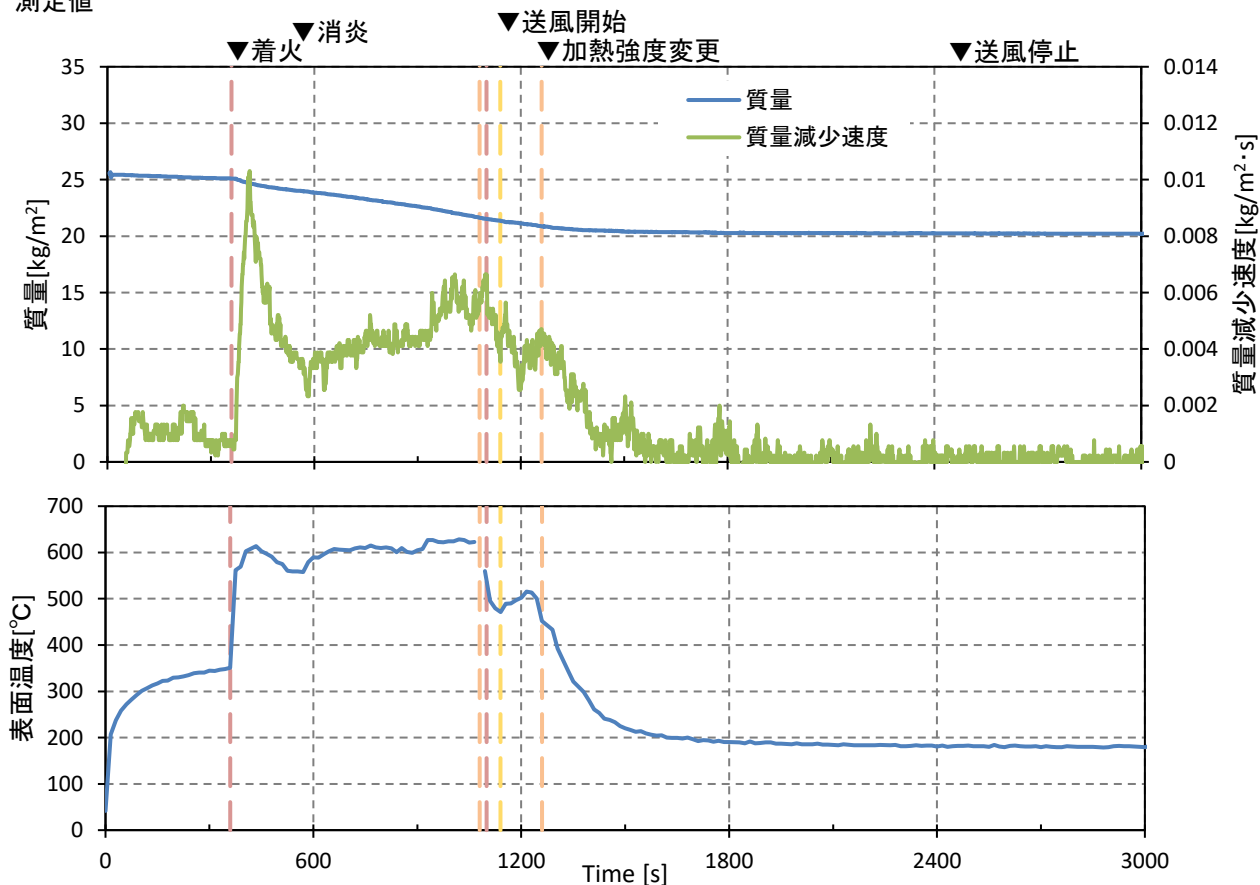
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	19.0 kW/m ²	0 m/s	0.00539 kg/m ² s	0.49010 kg/m ³ s	621.5 °C
	1200 ~ 1260 s	15.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00382 kg/m ² s	0.34723 kg/m ³ s	496.6 °C
	1800 ~ 3000 s	7.9 kW/m ²	0.5 m/s	0.00007 kg/m ² s	0.00596 kg/m ³ s	182.9 °C
	~ s	kW/m ²	m/s	kg/m ² s	kg/m ³ s	°C

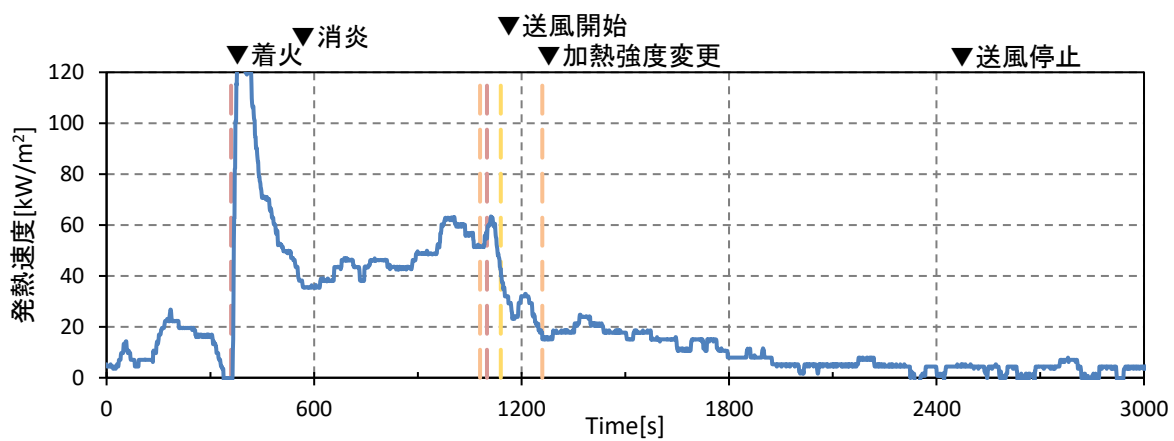
実験終了後試験体切断面



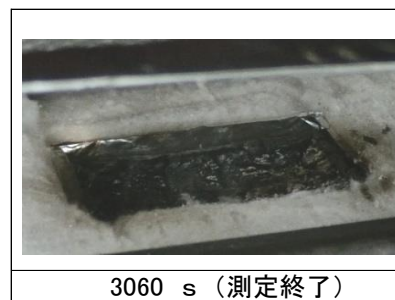
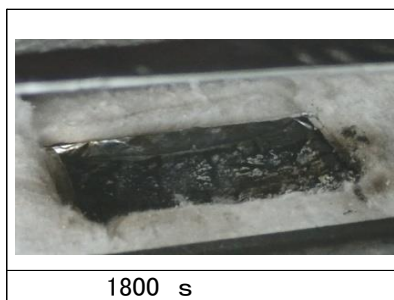
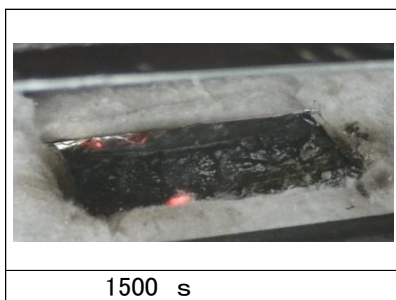
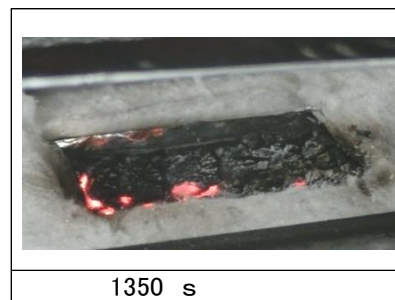
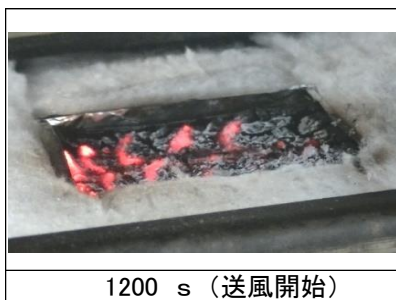
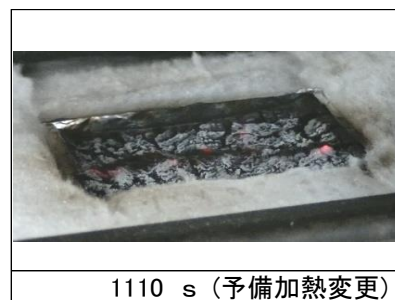
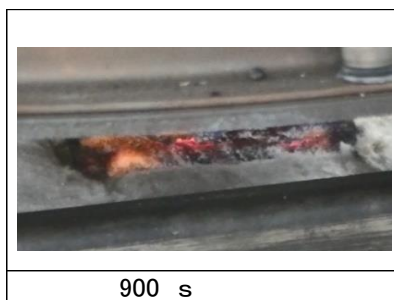
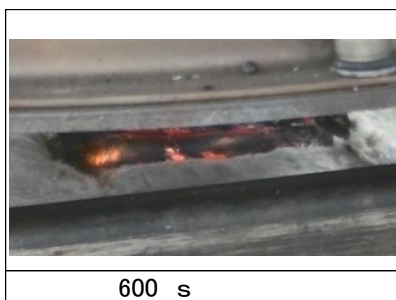
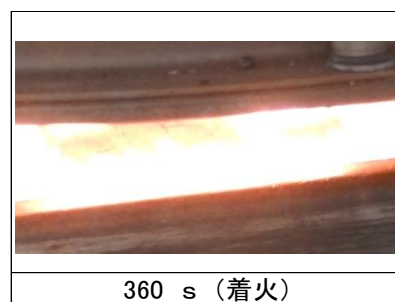
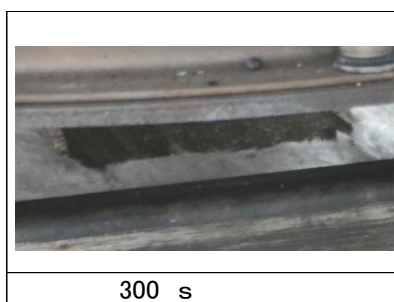
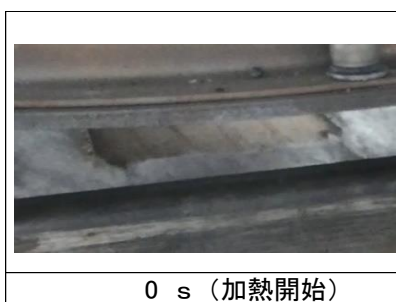
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	7 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	15 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	18 mm	総炭化層	11 mm
変色	21 mm	健全部	30 mm

測定値

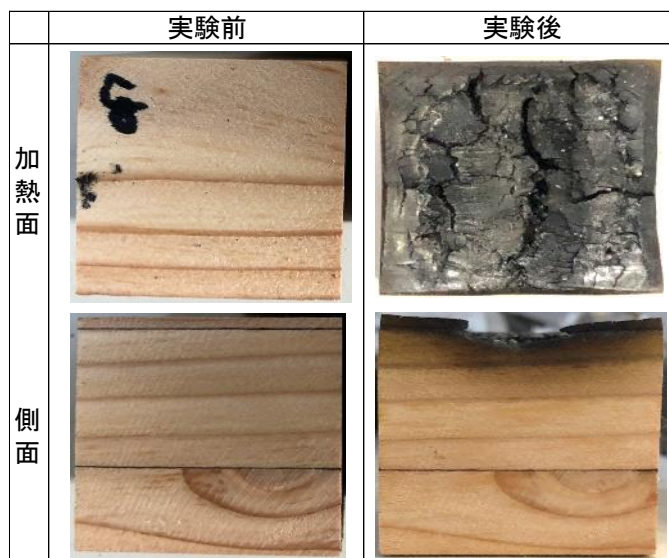




燃焼の様子



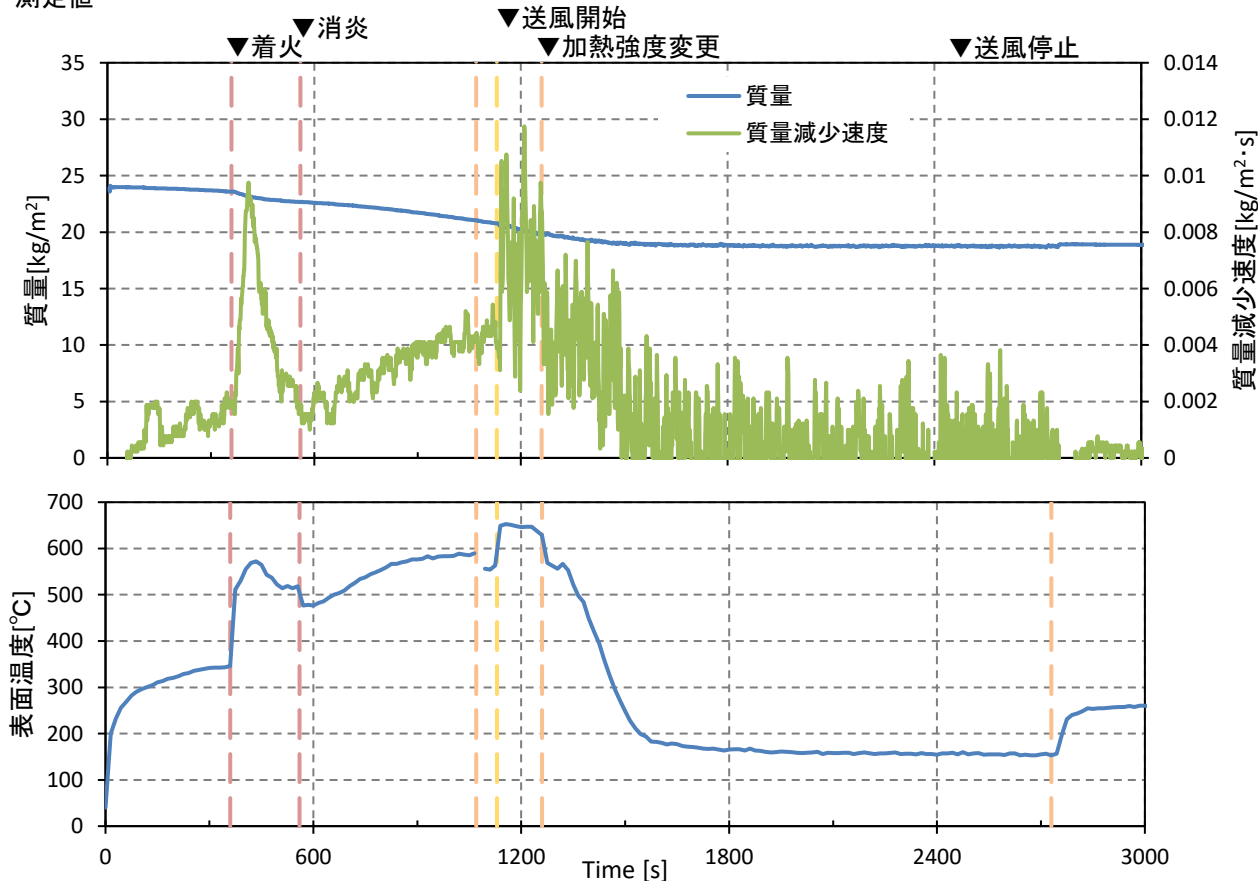
実験	3	Lf-7.9-2
試験体	初期質量	54.1 g
	初期寸法	厚 48 mm
		幅 47 mm
		奥 48 mm
	初期密度	499.4 kg/m ³
	初期含水率	11.3 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 19→15 kW/m ²
		② 7.9 kW/m ²
経過	表面気流	1.1 m/s
	着火	360 s
	消炎	560 s
	加熱強度変更	1070 s
	送風開始	1130 s
	加熱強度変更	1260 s
	送風停止	2730 s
	実験終了	3060 s

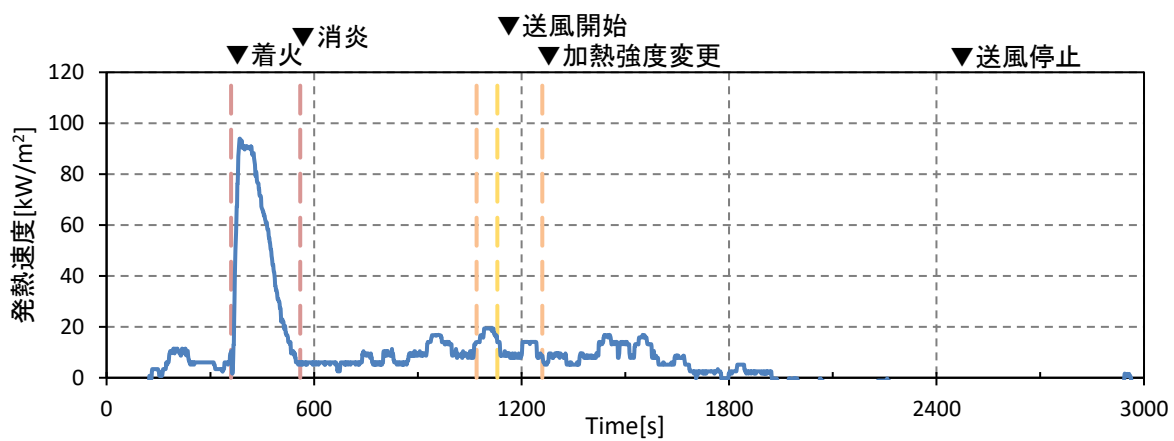


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	950 ~ 1060 s	19.0 kW/m ²	0 m/s	0.00418 kg/m ² s	0.38037 kg/m ³ s	585.5 °C
	1150 ~ 1250 s	15.0 kW/m ²	1.1 m/s	0.00711 kg/m ² s	0.64634 kg/m ³ s	648.8 °C
	2100 ~ 2700 s	7.9 kW/m ²	1.1 m/s	0.00001 kg/m ² s	0.00062 kg/m ³ s	156.3 °C
	2800 ~ 3000 s	7.9 kW/m ²	0 m/s	0.00011 kg/m ² s	0.01002 kg/m ³ s	256.5 °C

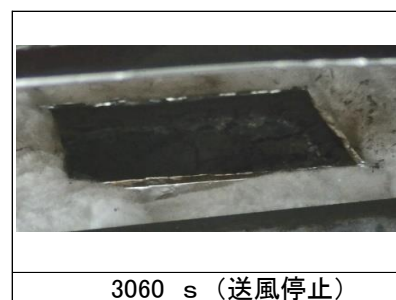
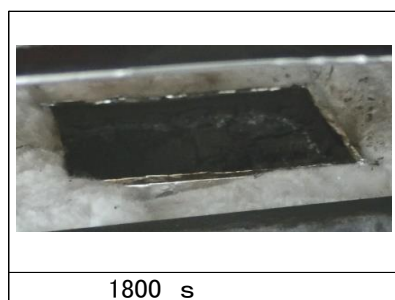
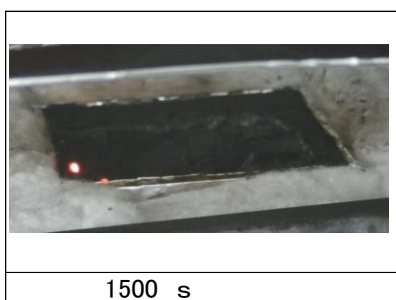
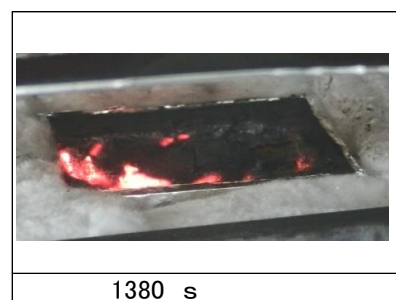
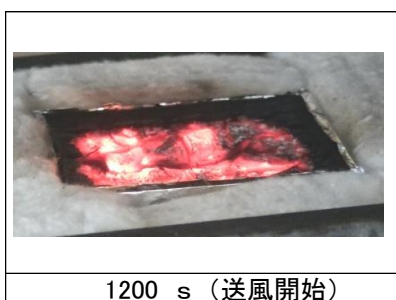
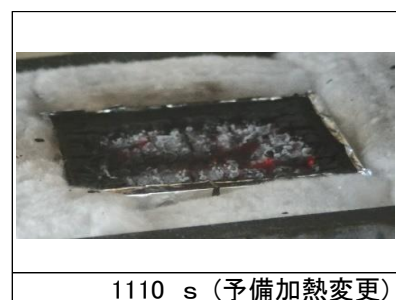
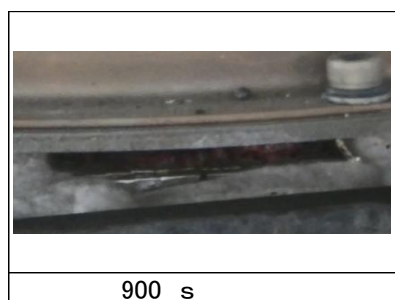
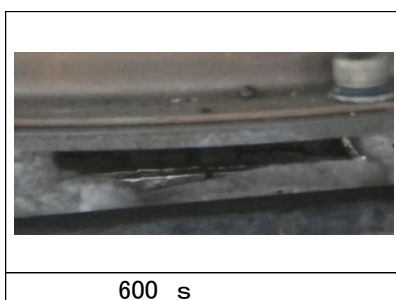
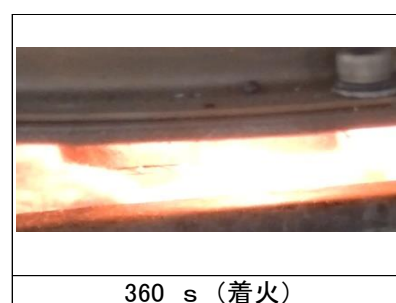
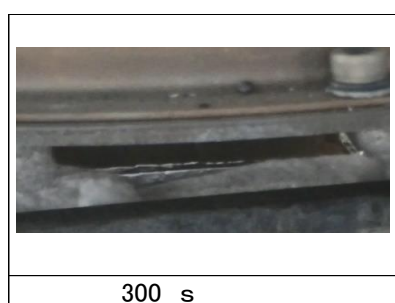
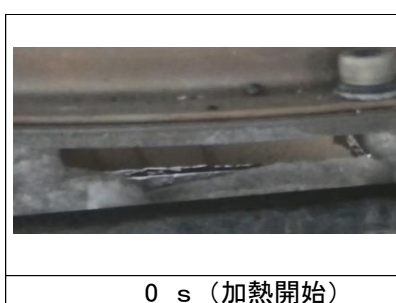
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
		焼失	6 mm	脆い炭化層	6 mm
		赤熱	12 mm	堅い炭化層	5 mm
		炭化	17 mm	総炭化層	11 mm
		変色	22 mm	健全部	31 mm

測定値

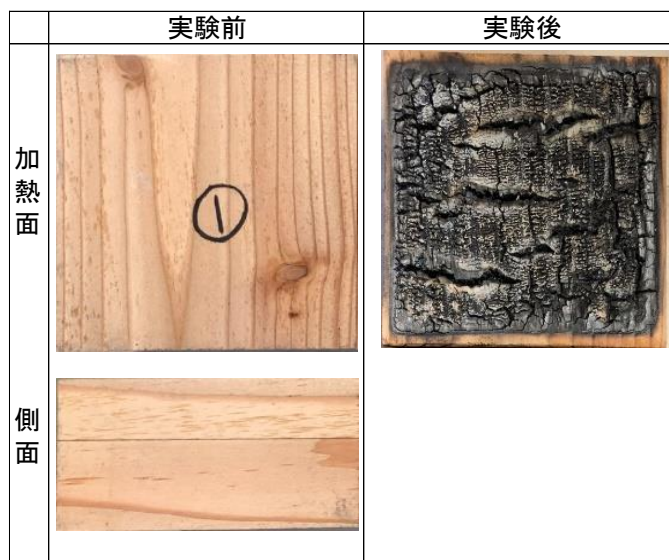




燃焼の様子



実験	4	L-8.0-1	
試験体	初期質量		209.0 g
	初期寸法	厚	50.4 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		425.7 kg/m3
	初期含水率		9.6 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	20→15 kW/m2
		②	8.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		s
	加熱強度変更		840 s
	加熱強度変更		960 s
	実験終了		3600 s



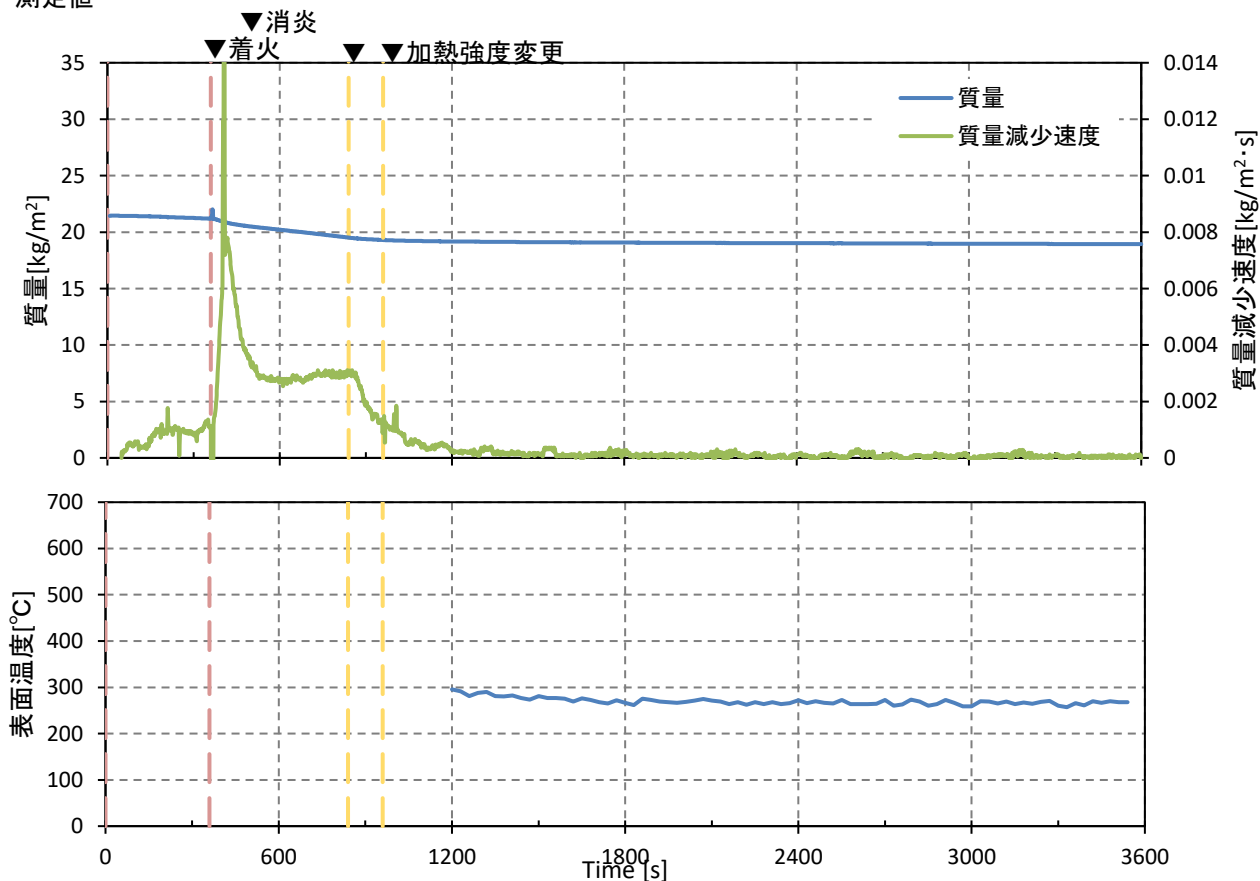
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	600 ~ 800 s	20.0 kW/m ²	0.00286 kg/m ² s	0.47719 kg/m ³ s	°C
	2400 ~ 3600 s	8.0 kW/m ²	0.00007 kg/m ² s	0.01134 kg/m ³ s	266.2 °C

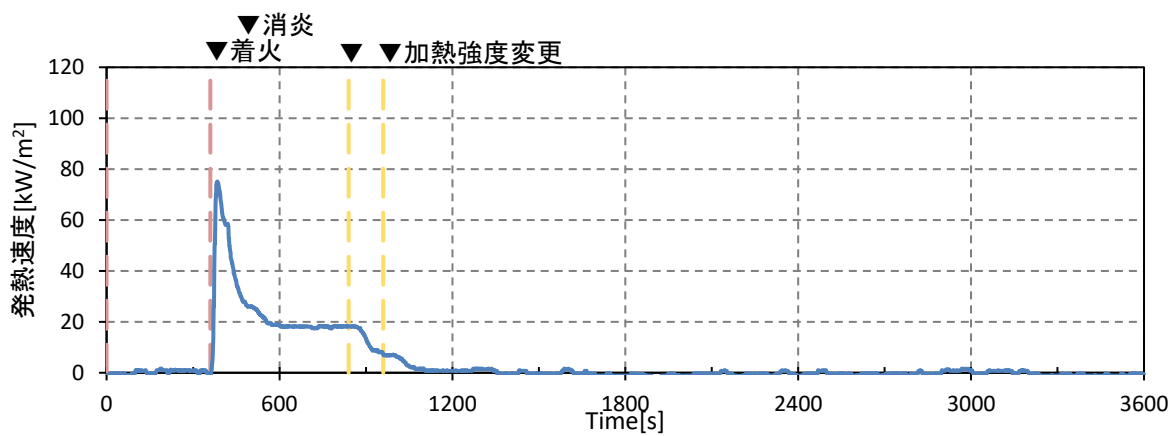
実験終了後試験体切断面



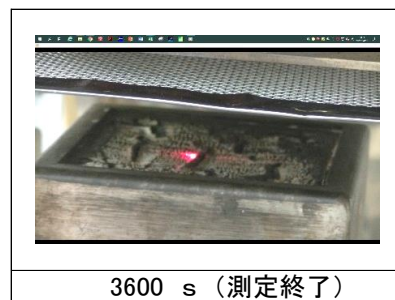
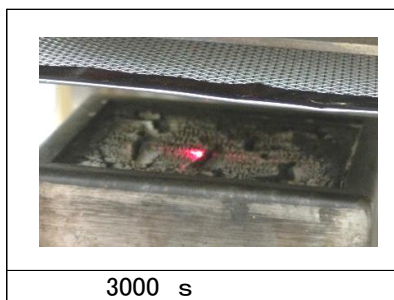
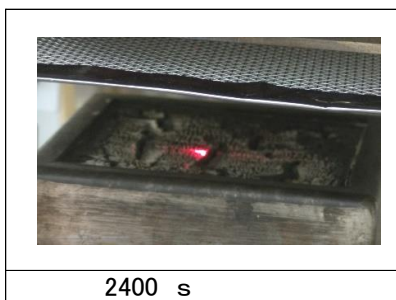
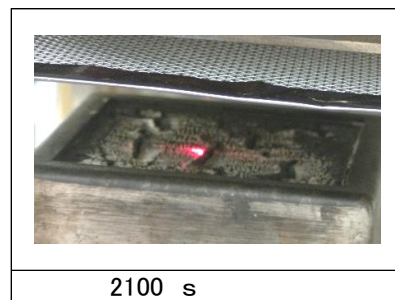
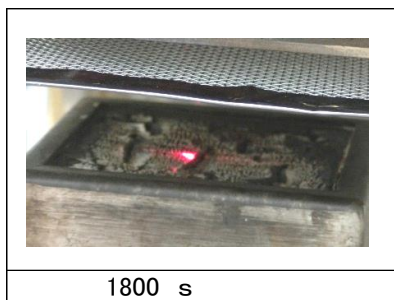
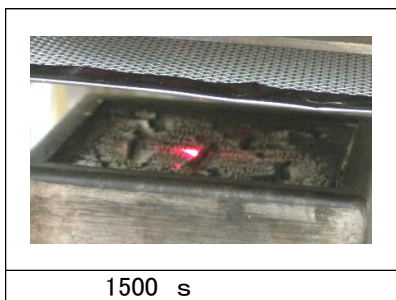
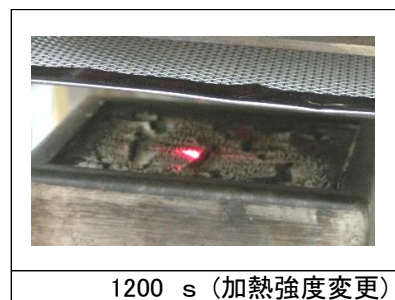
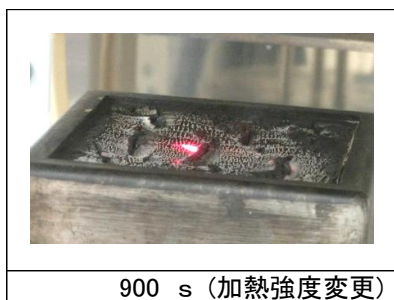
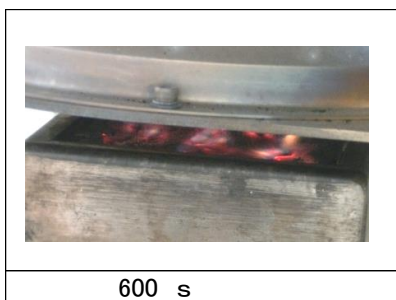
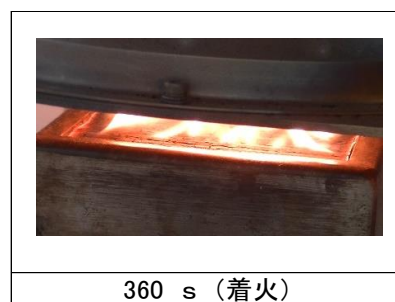
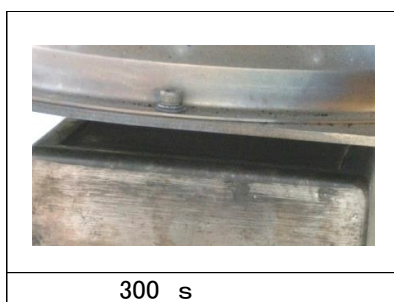
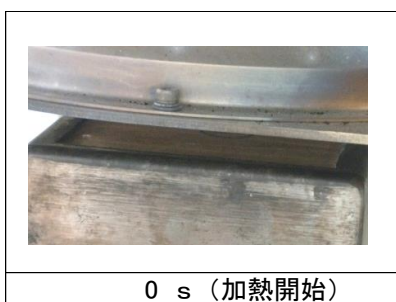
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	4 mm	脆い炭化層	5 mm
赤熱	9 mm	堅い炭化層	1 mm
炭化	10 mm	総炭化層	6 mm
変色	12 mm	健全部	40 mm

測定値





燃焼の様子



実験	5	L-8.0-2	
試験体	初期質量		211.0 g
	初期寸法	厚	50.4 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		429.8 kg/m3
	初期含水率		11.1 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	20→15 kW/m2
		②	8.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		3600 s



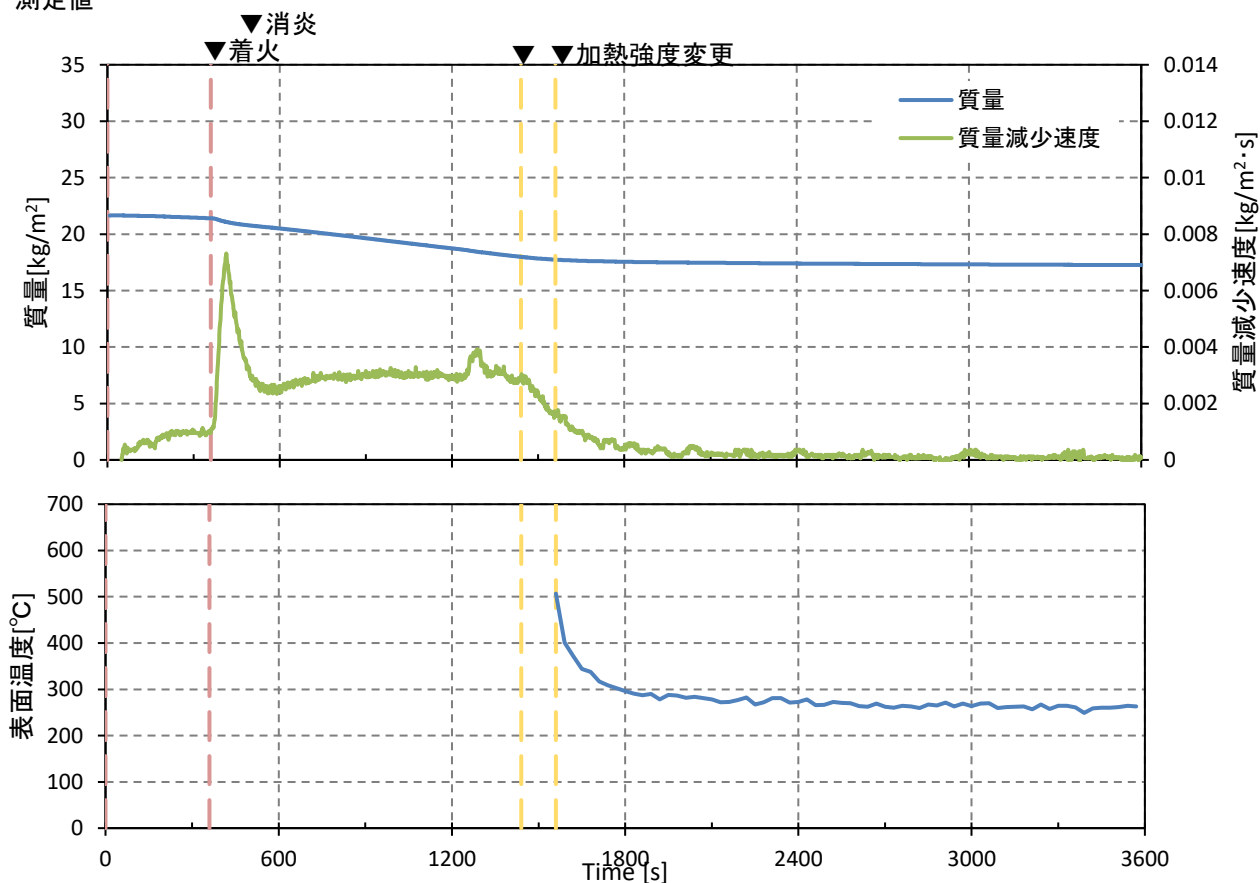
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1200 s	20.0 kW/m ²	0.00301 kg/m ² s	0.30109 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	8.0 kW/m ²	0.00010 kg/m ² s	0.01027 kg/m ³ s	262.0 °C

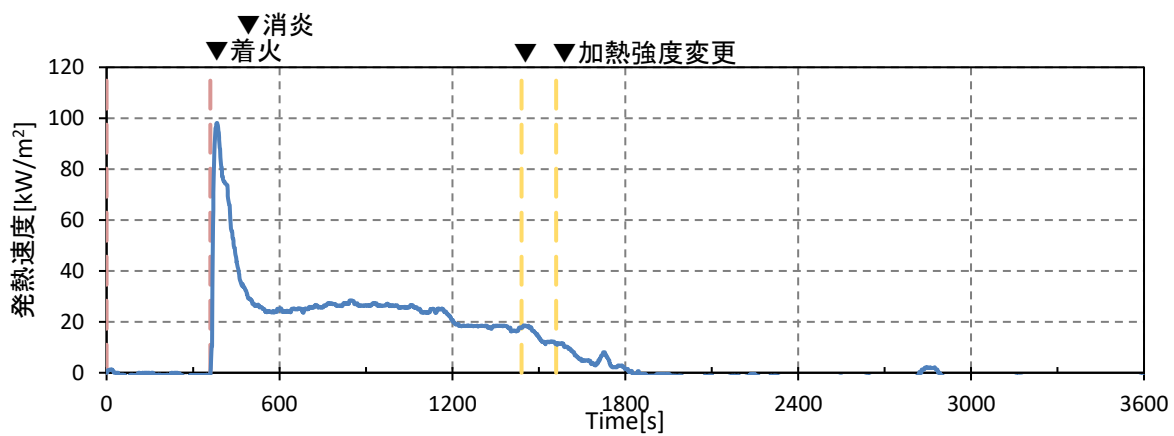
実験終了後試験体切断面



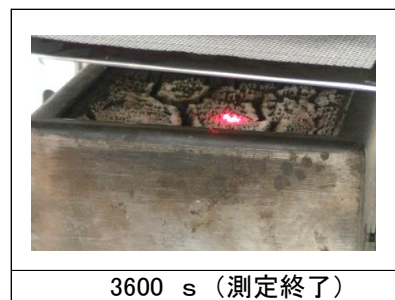
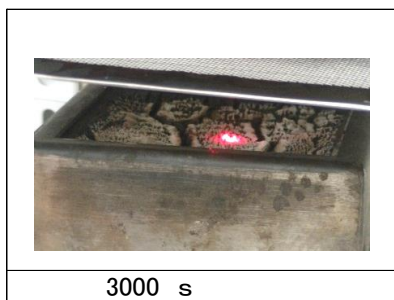
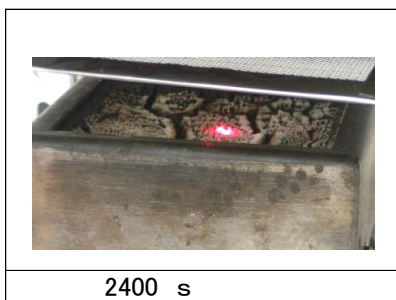
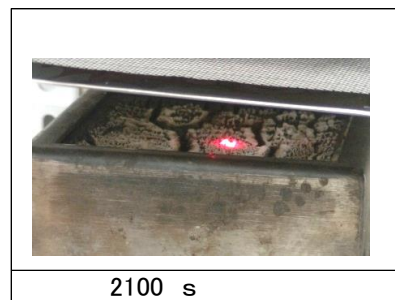
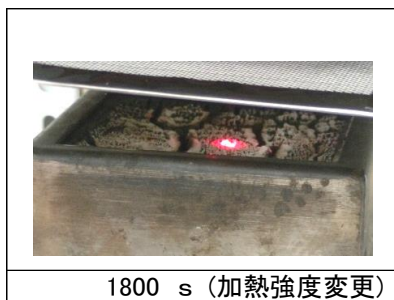
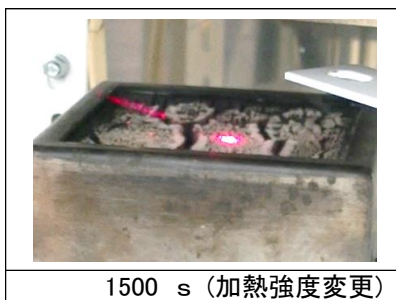
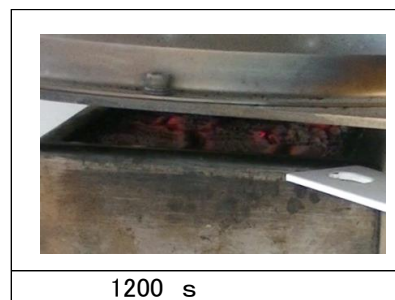
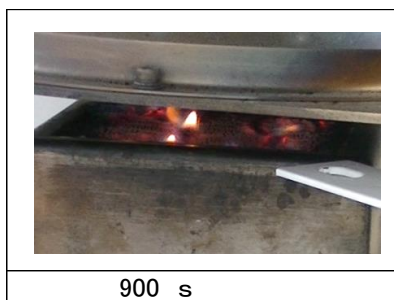
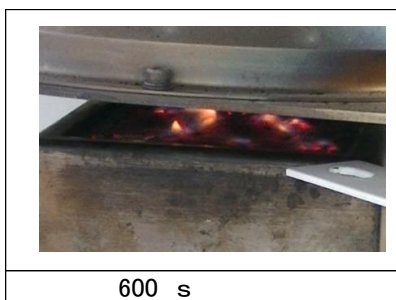
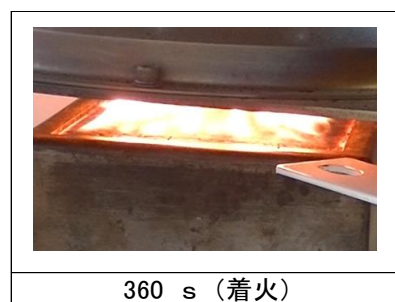
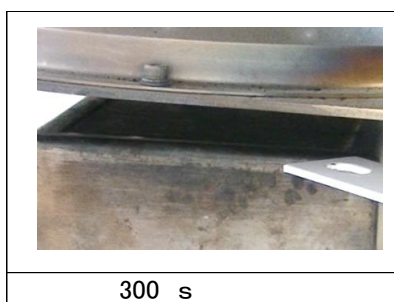
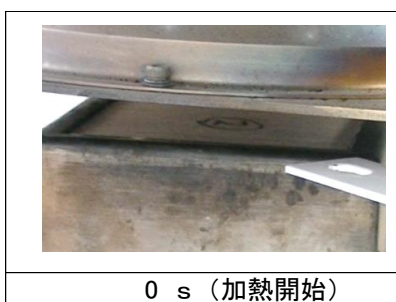
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	6 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	14 mm	堅い炭化層	2 mm
炭化	16 mm	総炭化層	10 mm
変色	21 mm	健全部	34 mm

測定値

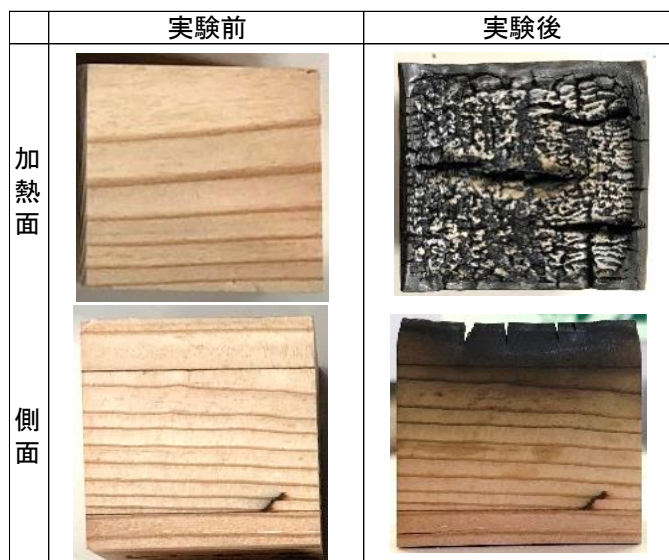




燃焼の様子

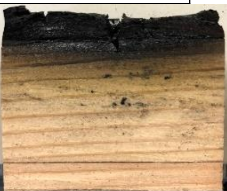


実験	6	L-8.0-3
試験体	初期質量	56.3 g
	初期寸法	厚 48 mm
		幅 49 mm
		奥 49 mm
	初期密度	488.6 kg/m ³
	初期含水率	15.0 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 20→15 kW/m ²
		② 8.0 kW/m ²
経過	着火	360 s
	消炎	1440 s
	加熱強度変更	1440 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	3600 s



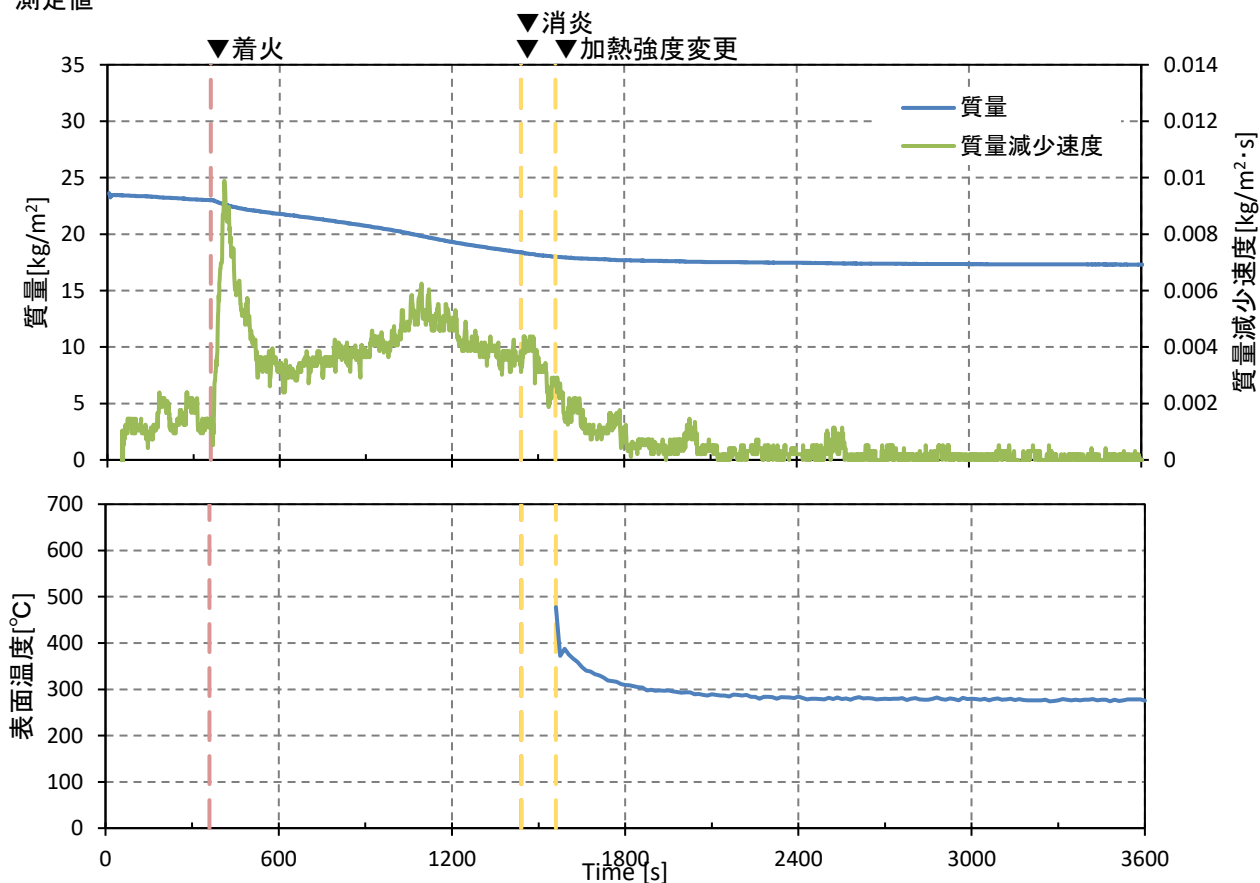
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1300 ~ 1400 s	20.0 kW/m ²	0.00378 kg/m ² s	0.53998 kg/m ³ s	°C
	2400 ~ 3600 s	8.0 kW/m ²	0.00013 kg/m ² s	0.01905 kg/m ³ s	278.5 °C

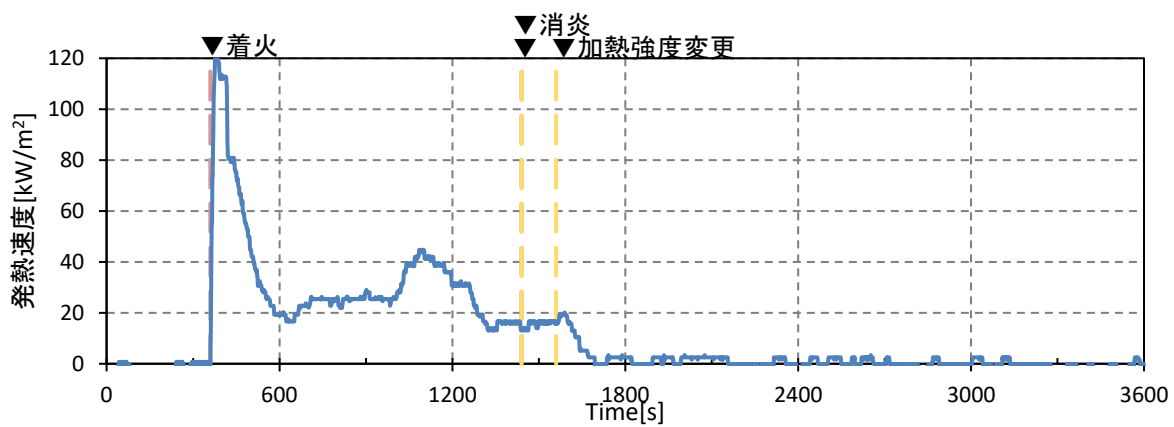
実験終了後試験体切断面



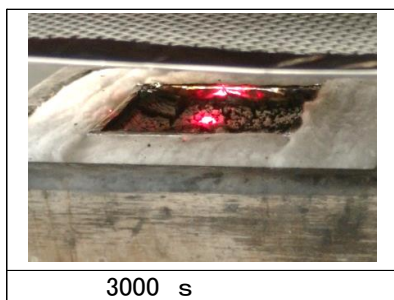
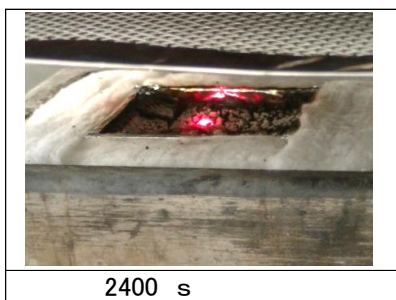
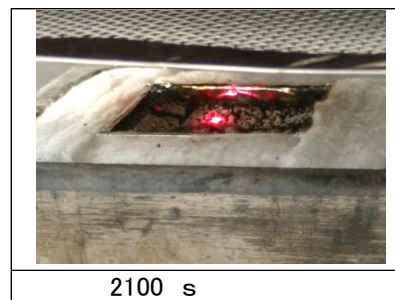
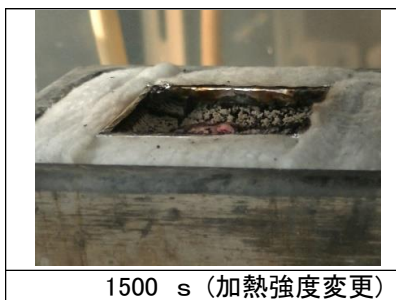
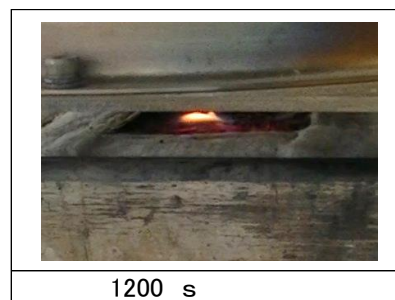
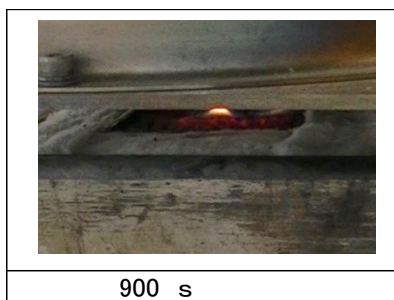
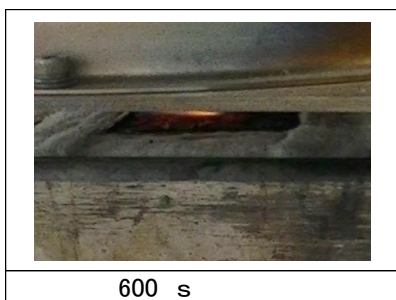
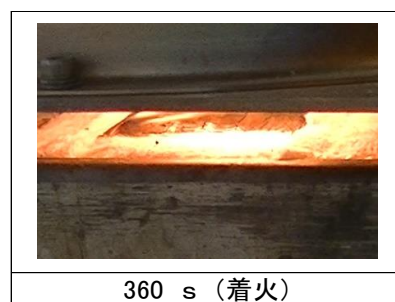
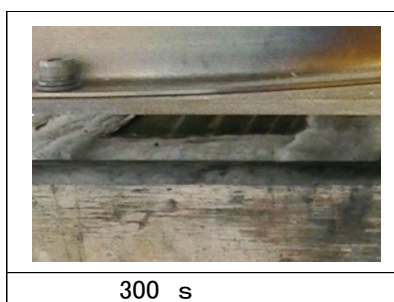
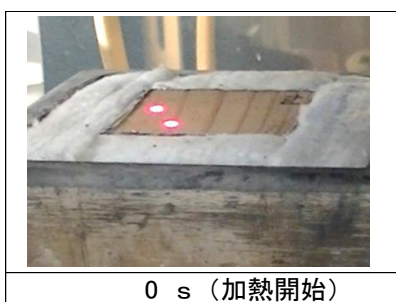
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	8 mm	脆い炭化層	4 mm
赤熱	12 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	15 mm	総炭化層	7 mm
変色	21 mm	健全部	33 mm

測定値





燃焼の様子



実験	7	L-8.4
試験体	初期質量	229.0 g
	初期寸法	厚 50.4 mm
		幅 98.7 mm
		奥 98.7 mm
	初期密度	466.4 kg/m ³
	初期含水率	11.4 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 21→16 kW/m ²
		② 8.4 kW/m ²
経過	着火	360 s
	消炎	s
	加熱強度変更	1440 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	3600 s



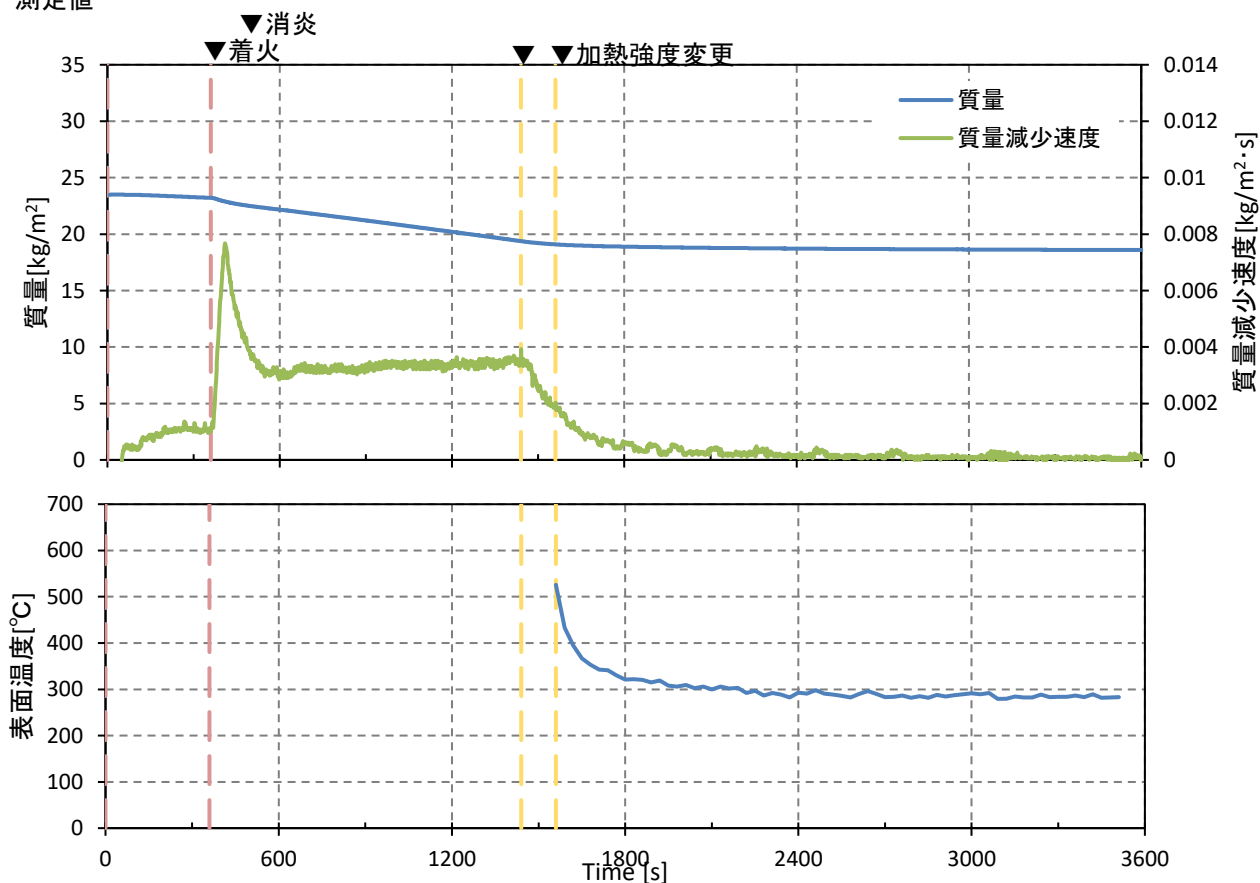
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1400 s	21.0 kW/m ²	0.00338 kg/m ² s	0.30703 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	8.4 kW/m ²	0.00008 kg/m ² s	0.00743 kg/m ³ s	284.8 °C

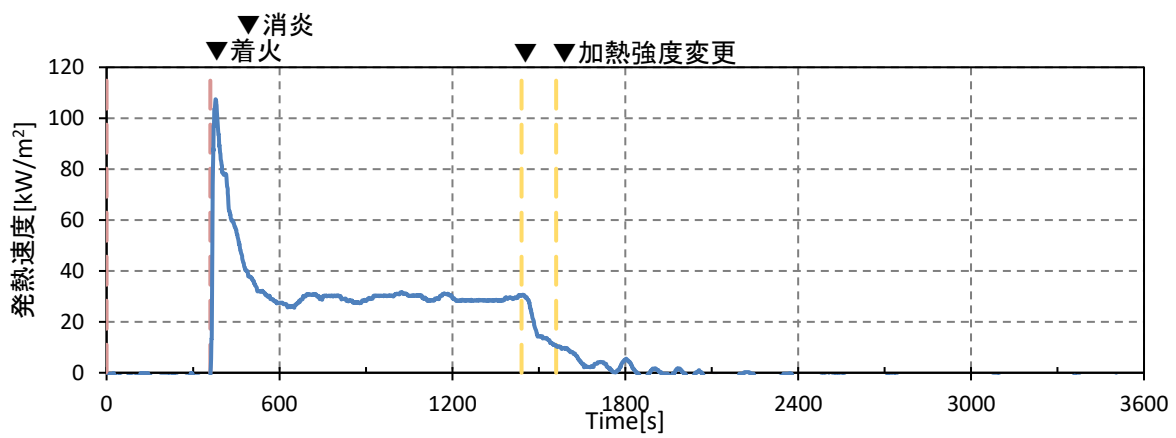
実験終了後試験体切断面



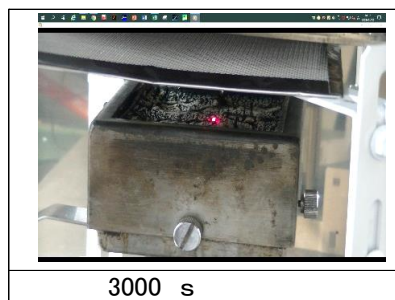
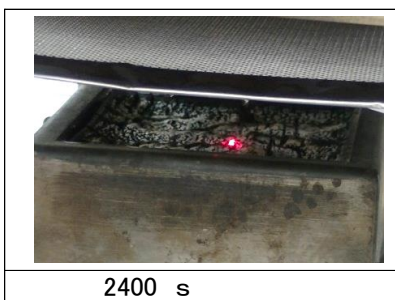
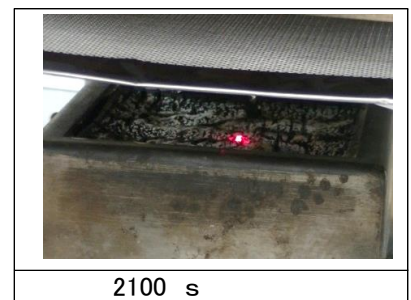
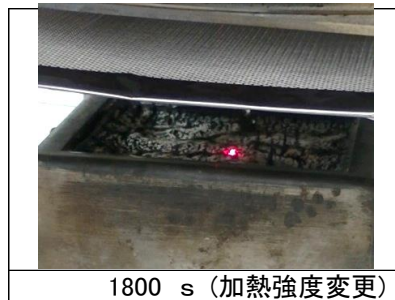
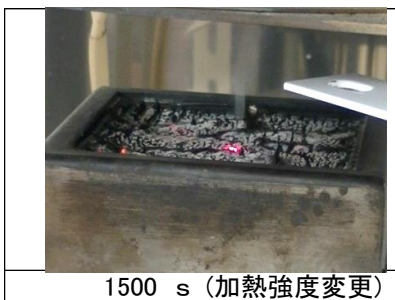
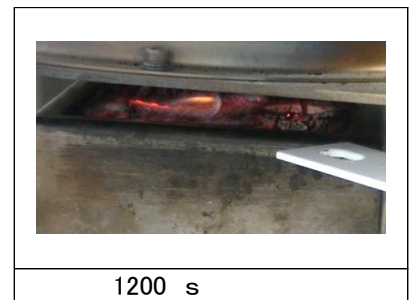
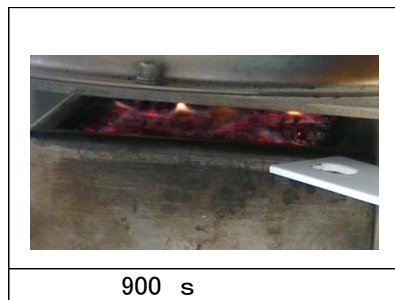
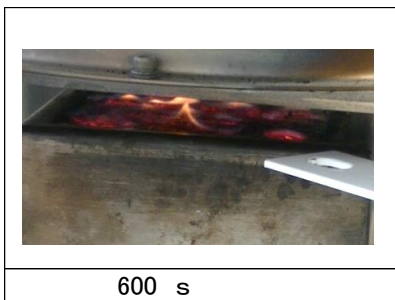
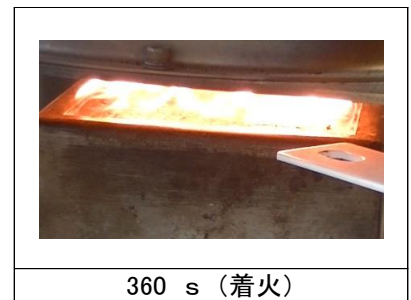
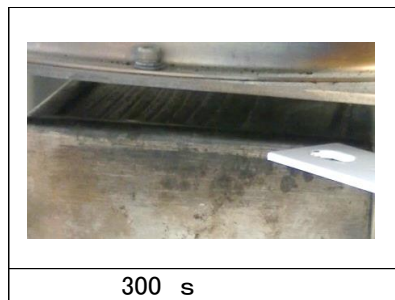
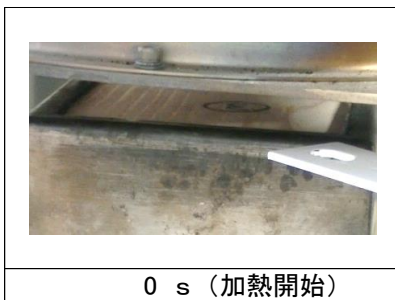
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	6 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	14 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	17 mm	総炭化層	11 mm
変色	22 mm	健全部	33 mm

測定値

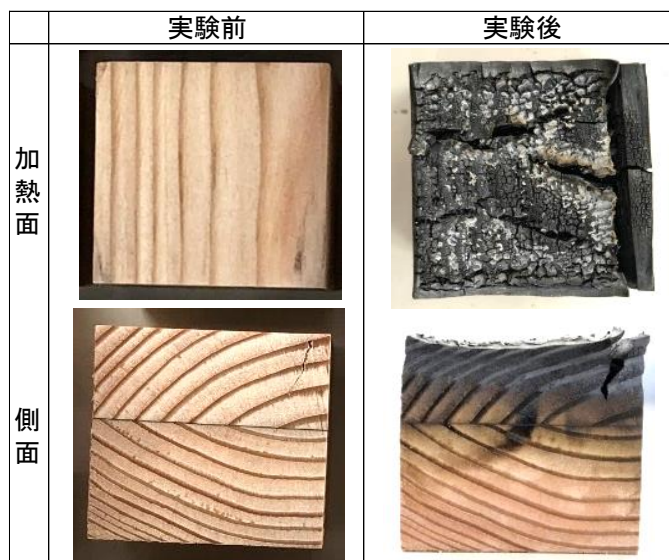




燃焼の様子



実験	8	L-8.6
試験体	初期質量	57.4 g
	初期寸法	厚 50 mm
		幅 49 mm
		奥 48 mm
	初期密度	487.7 kg/m ³
	初期含水率	15.5 %-wt.
試験条件	加熱面 板目	
	加熱強度	① 21→16 kW/m ²
		② 8.6 kW/m ²
経過	着火	360 s
	消炎	s
	加熱強度変更	1440 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	3600 s



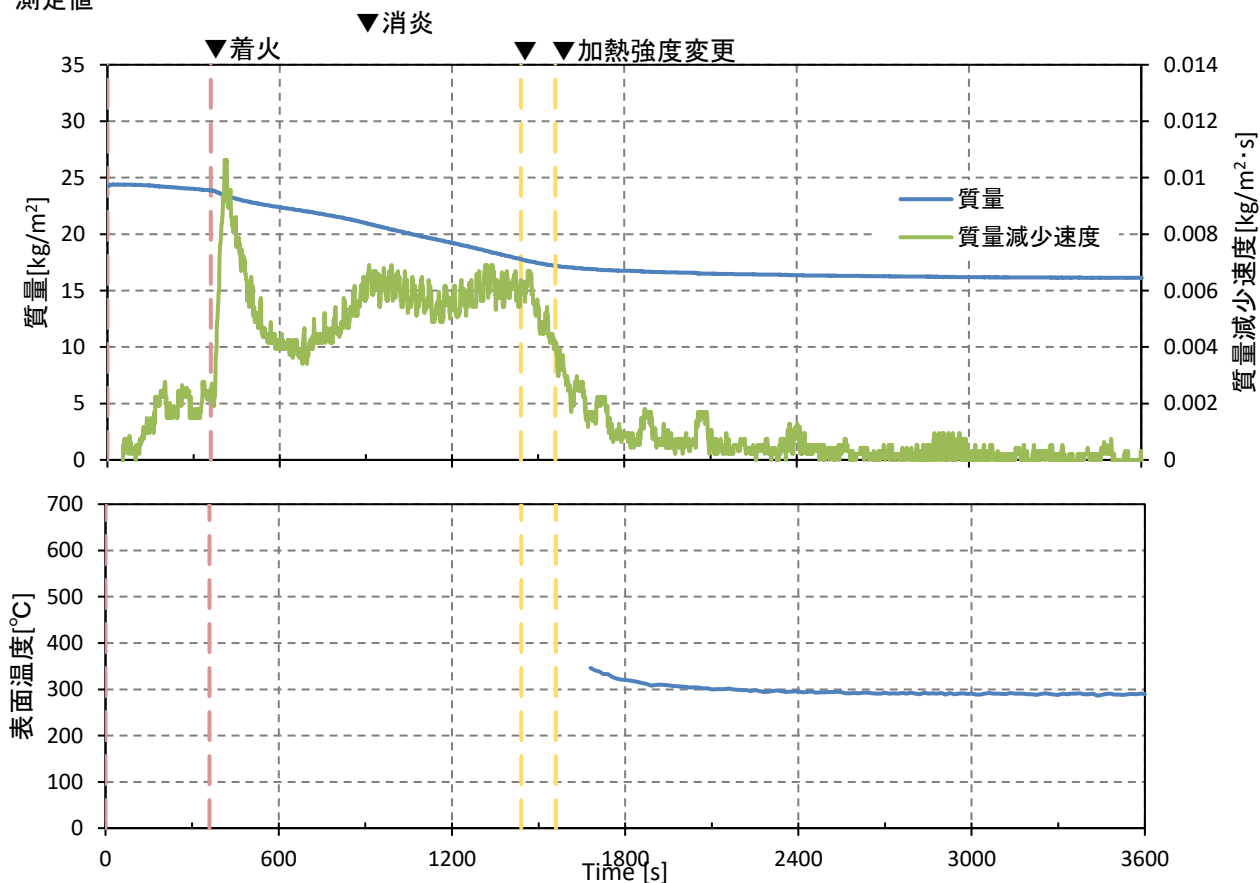
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1300 ~ 1400 s	21.0 kW/m ²	0.00619 kg/m ² s	0.61892 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	8.6 kW/m ²	0.00011 kg/m ² s	0.01109 kg/m ³ s	289.8 °C

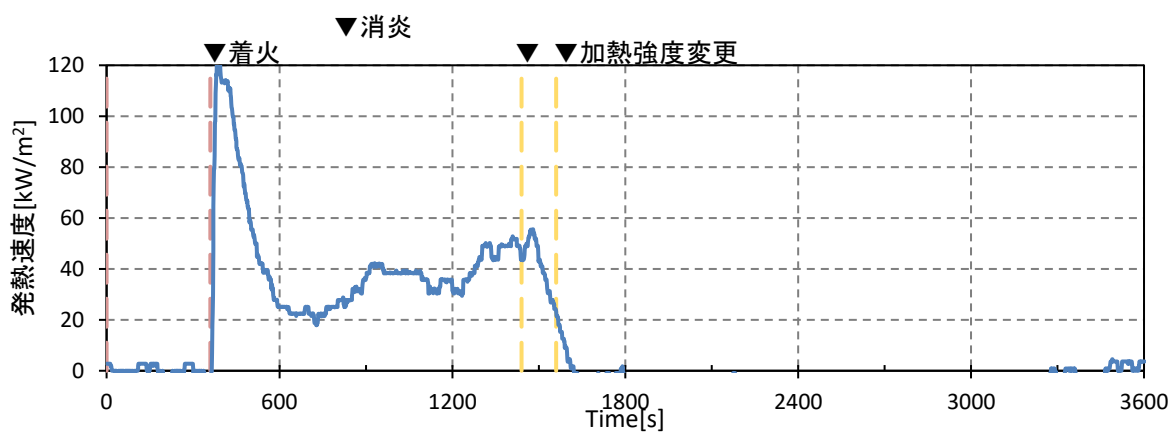
実験終了後試験体切断面



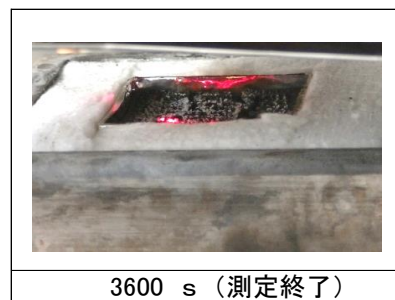
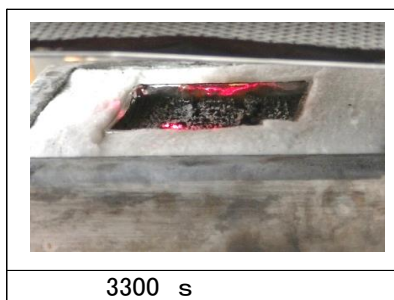
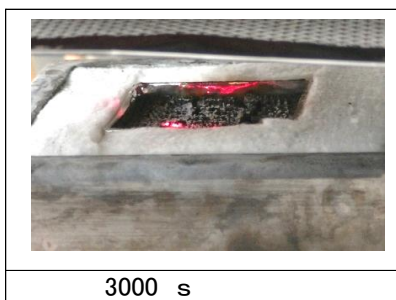
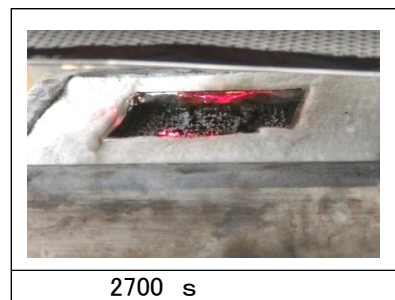
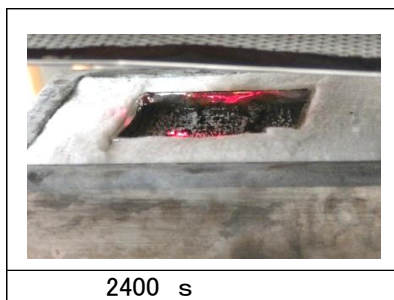
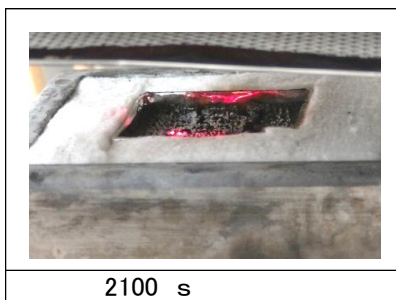
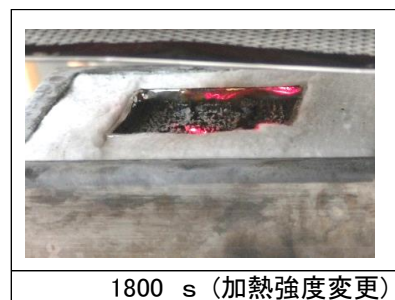
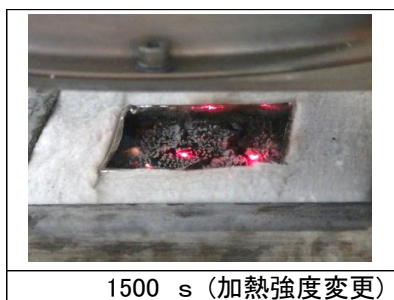
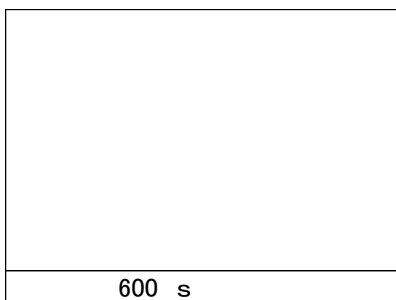
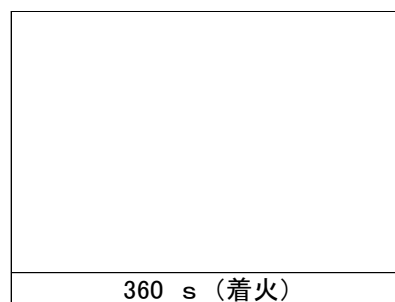
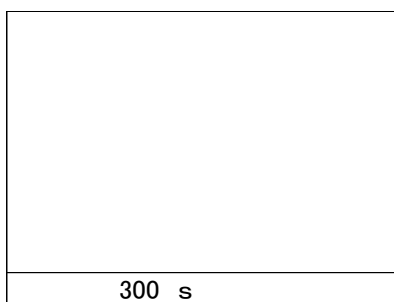
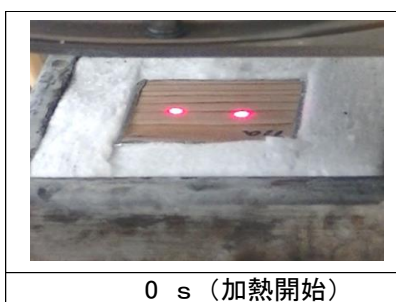
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	12 mm	脆い炭化層	5 mm
赤熱	17 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	22 mm	総炭化層	10 mm
変色	27 mm	健全部	28 mm

測定値

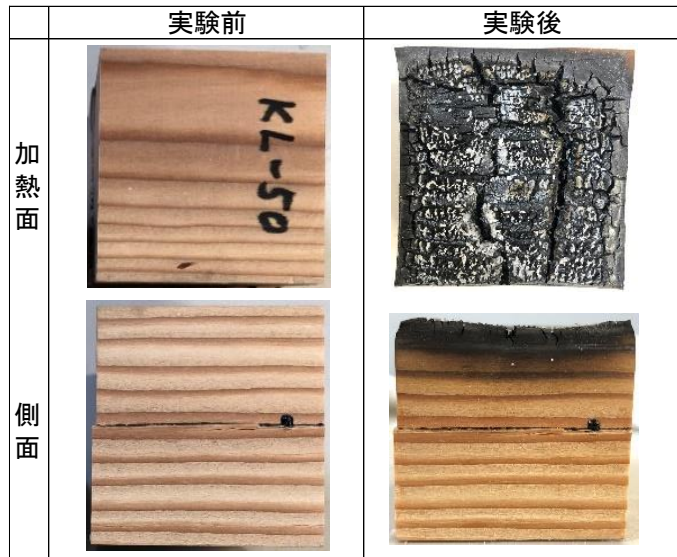




燃焼の様子



実験	9	L-8.8-1
試験体	初期質量	120.5 g
	初期寸法	厚 60 mm
		幅 62 mm
		奥 56 mm
	初期密度	578.4 kg/m ³
	初期含水率	14.9 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	灰分量	0.032 %
経過	加熱強度	① 17.0 kW/m ²
		② 8.8 kW/m ²
	着火	360 s
	消炎	1425 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	2760 s



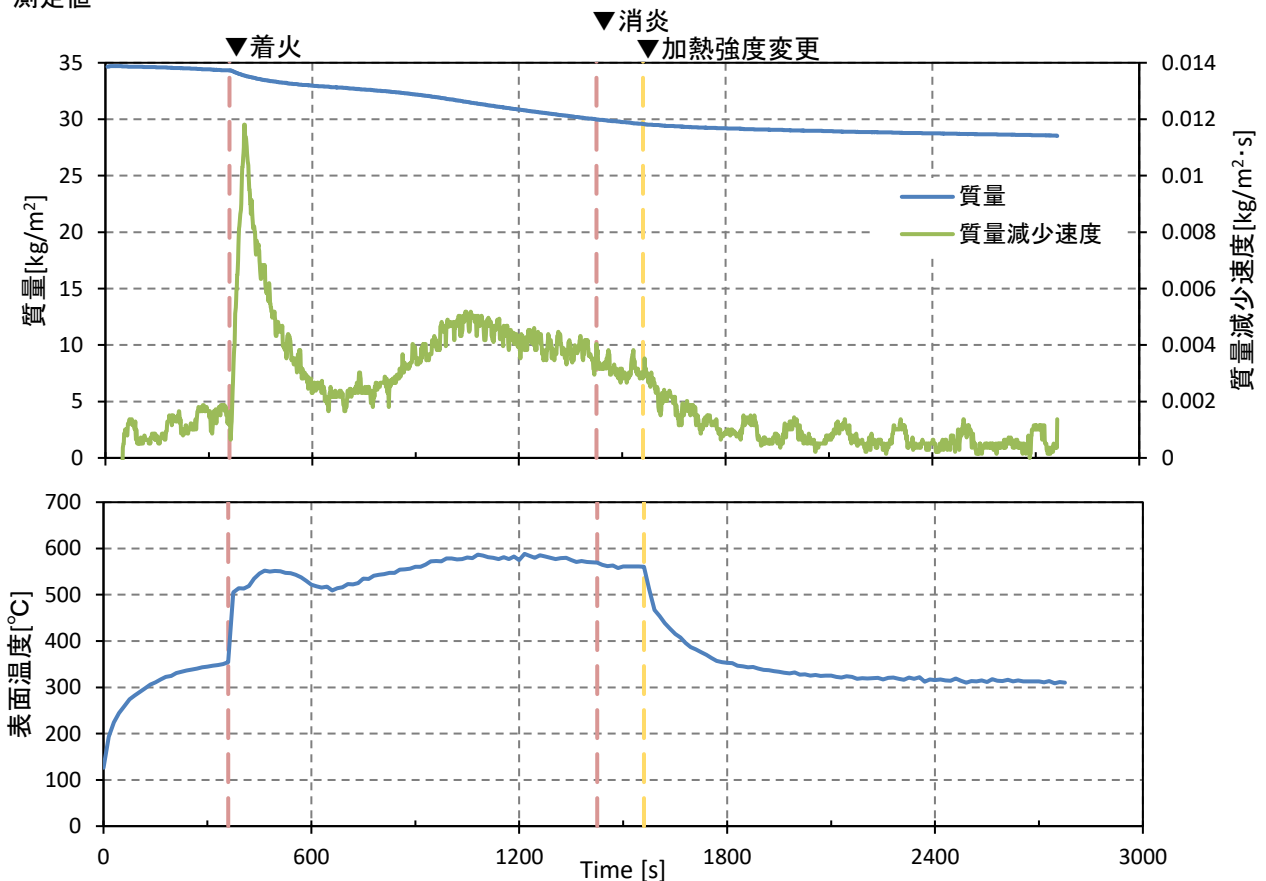
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1400 ~ 1550 s	17.0 kW/m ²	0.00322 kg/m ² s	0.32166 kg/m ³ s	563.2 °C
	2400 ~ 2700 s	8.8 kW/m ²	0.00053 kg/m ² s	0.05337 kg/m ³ s	314.2 °C

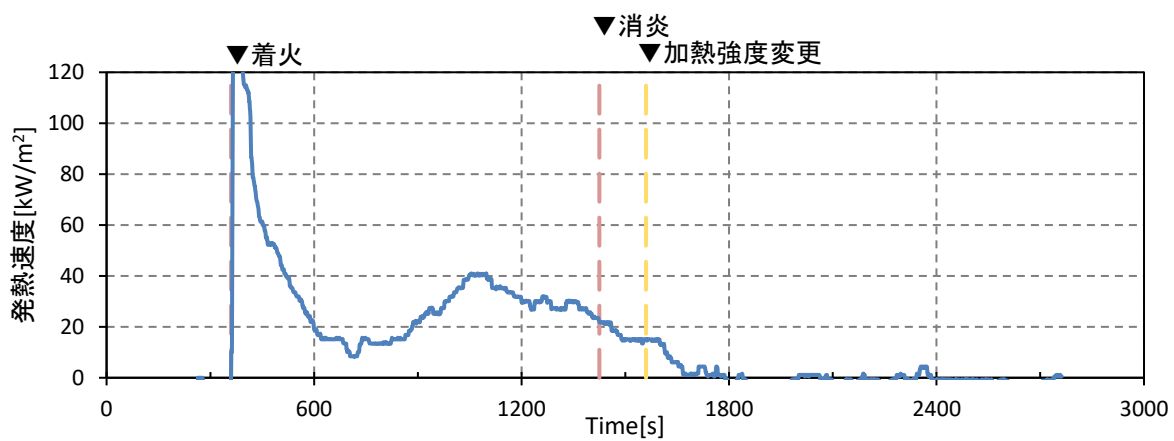
実験終了後試験体切断面



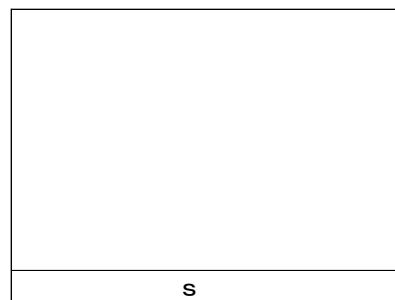
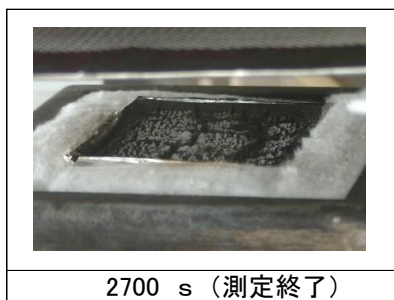
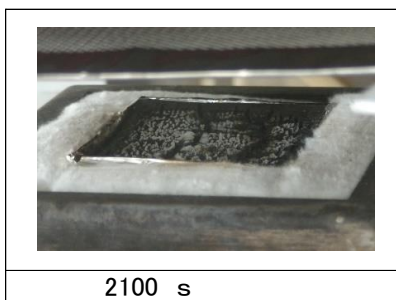
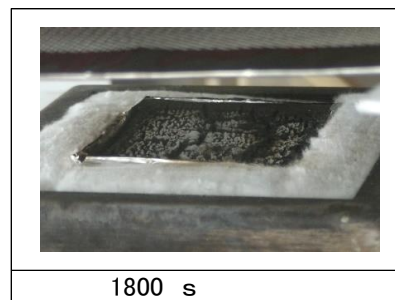
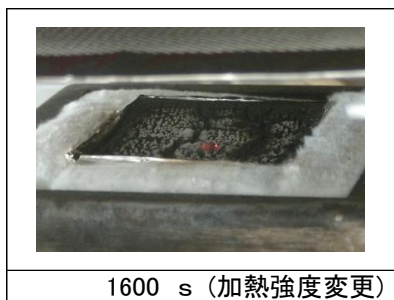
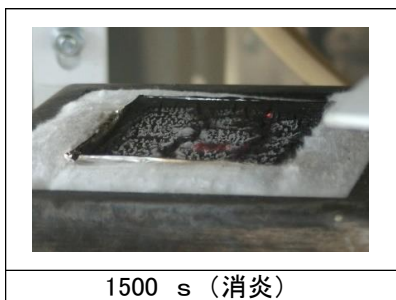
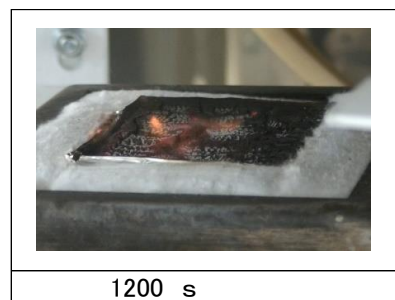
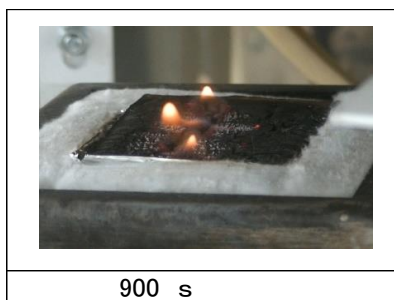
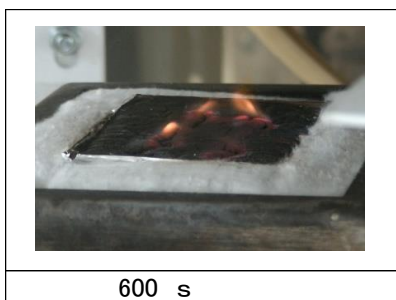
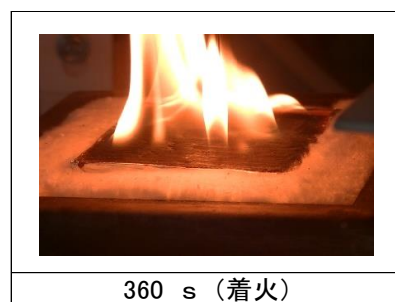
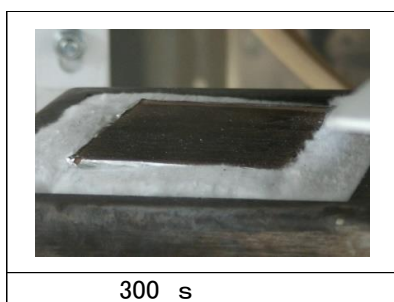
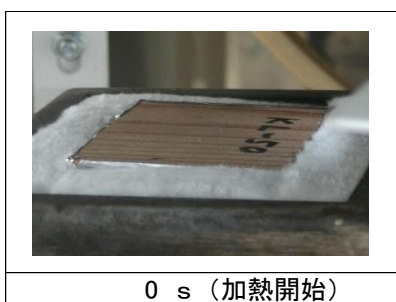
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	4 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	11 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	14 mm	総炭化層	10 mm
変色	18 mm	健全部	46 mm

測定値

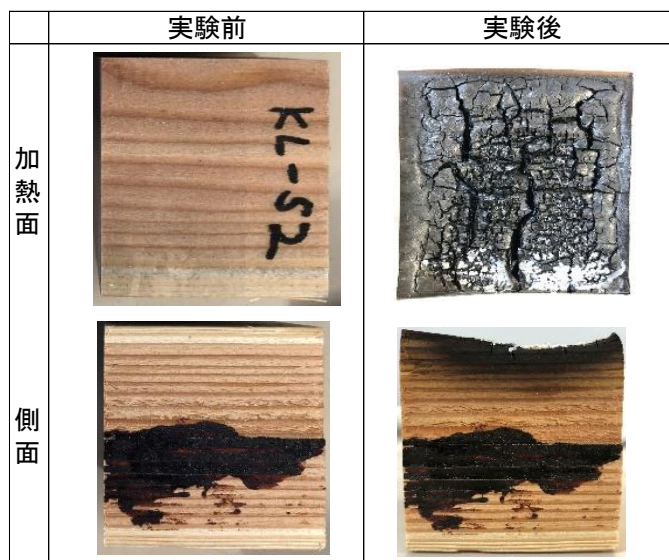




燃焼の様子

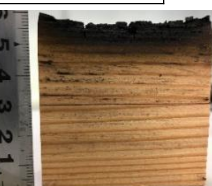


実験	10	L-8.8-2	
試験体	初期質量		124.7 g
	初期寸法	厚	60 mm
		幅	61 mm
		奥	55 mm
	初期密度		619.2 kg/m3
	初期含水率		15.2 %-wt.
	加熱面		板目
	灰分量		0.057 %
試験条件	加熱強度	①	17.0 kW/m2
		②	8.8 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		580 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



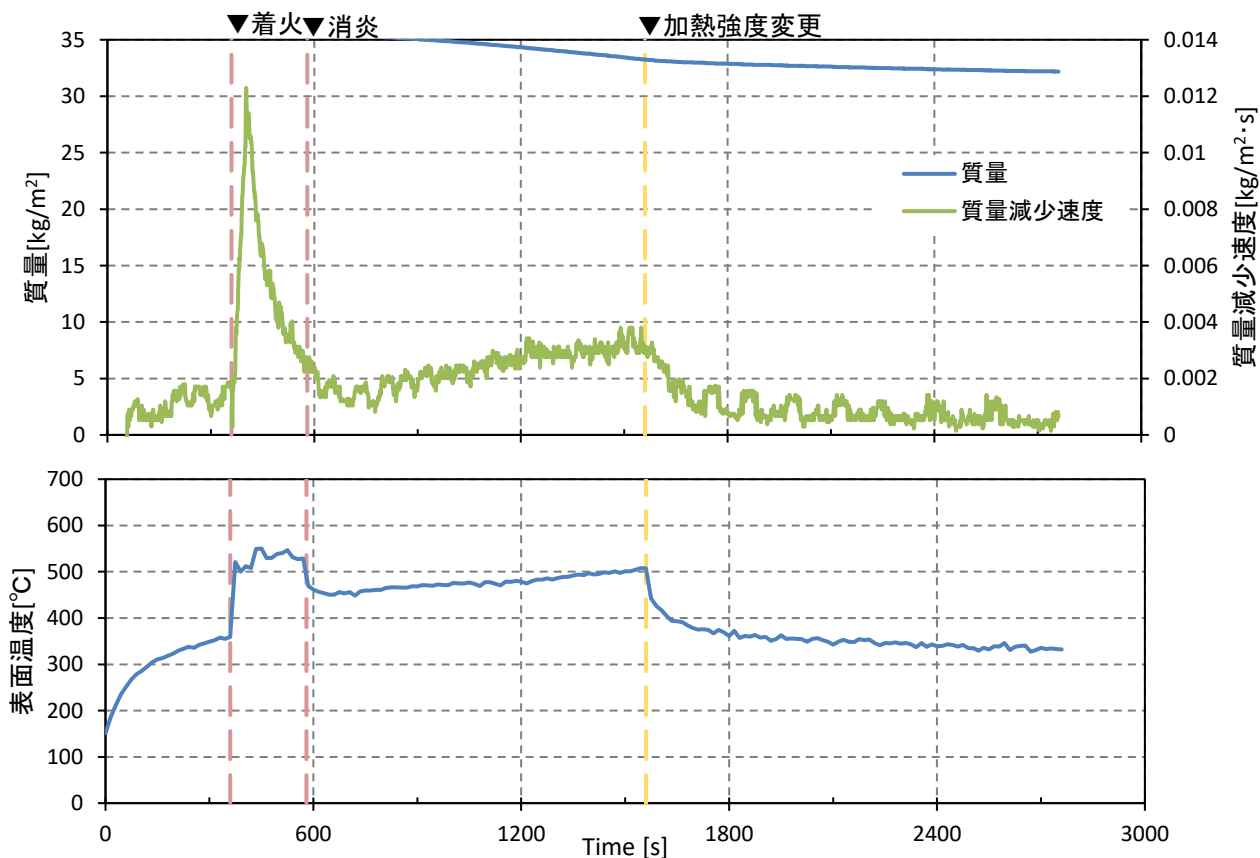
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1500 s	17.0 kW/m ²	0.00296 kg/m ² s	0.29645 kg/m ³ s	490.2 °C
	2400 ~ 2700 s	8.8 kW/m ²	0.00060 kg/m ² s	0.06026 kg/m ³ s	337.0 °C

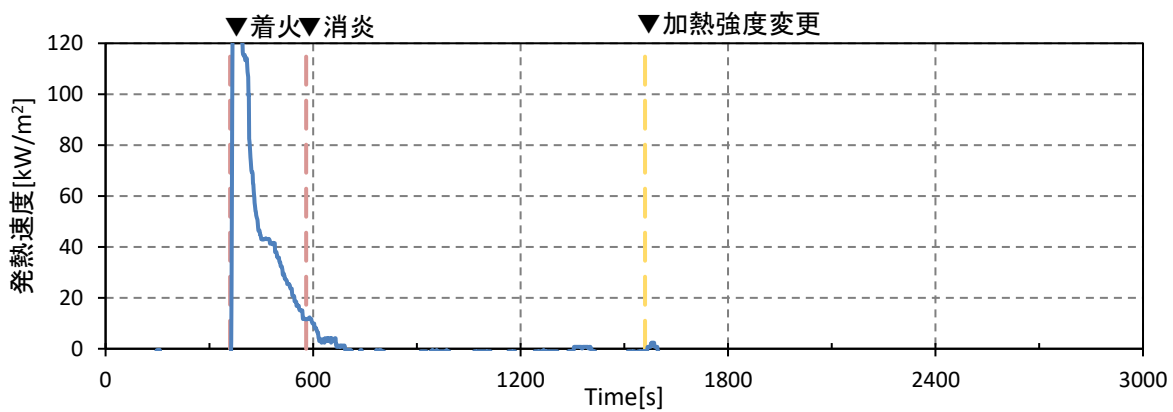
実験終了後試験体切断面



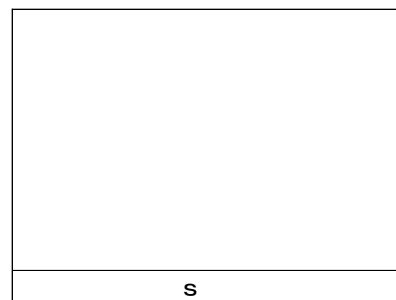
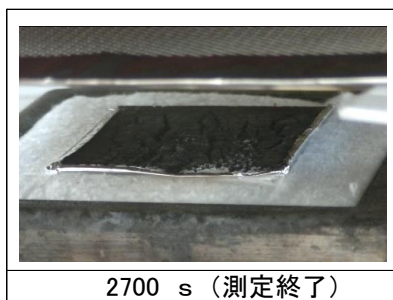
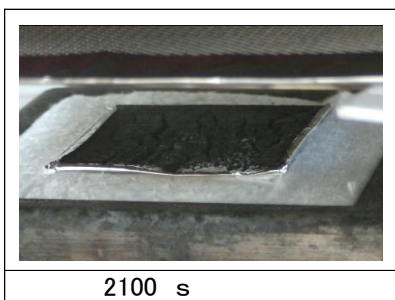
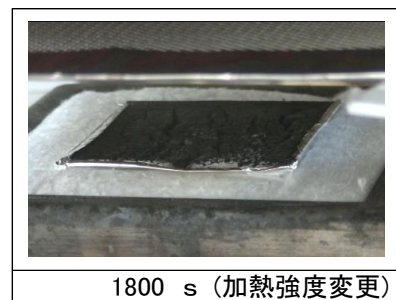
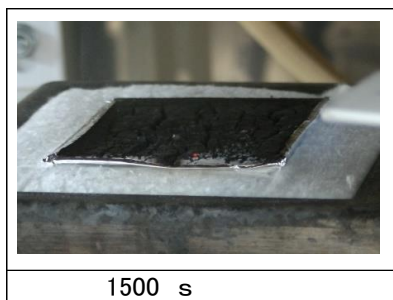
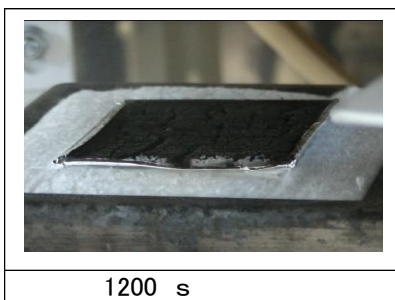
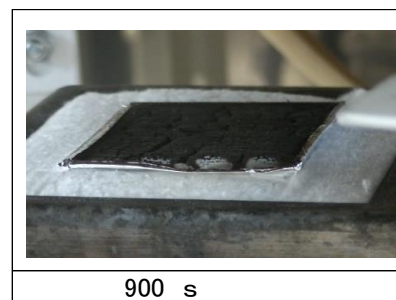
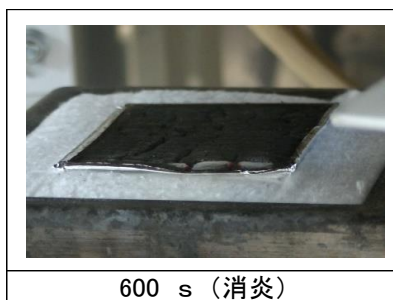
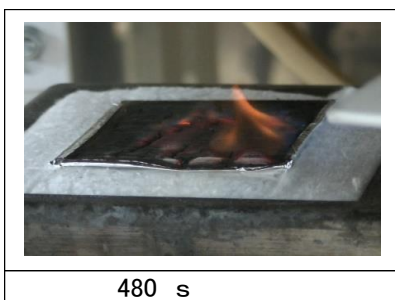
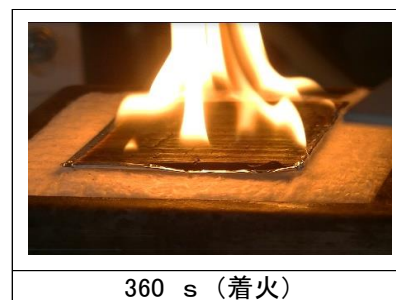
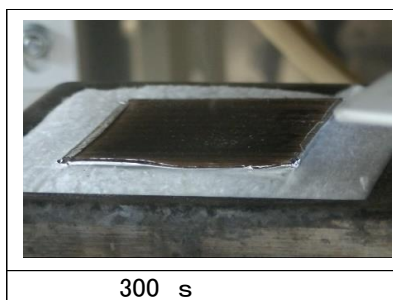
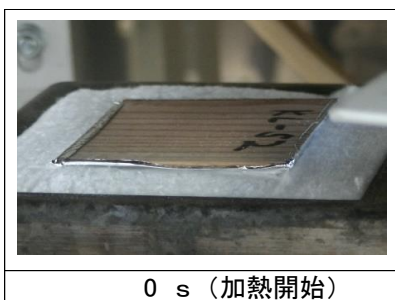
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	2 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	9 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	12 mm	総炭化層	10 mm
変色	14 mm	健全部	48 mm

測定値

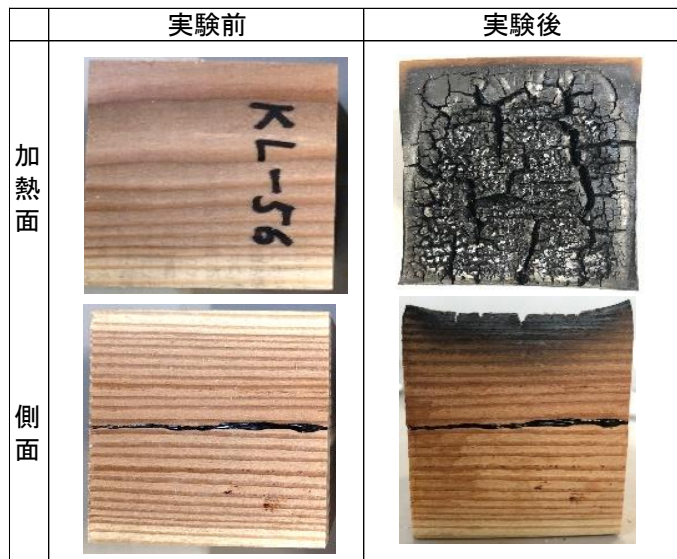




燃焼の様子



実験	11	L-8.8-3	
試験体	初期質量		132.0 g
	初期寸法	厚	60 mm
		幅	62 mm
		奥	56 mm
	初期密度		633.8 kg/m3
	初期含水率		15.2 %-wt.
	加熱面		板目
	灰分量		0.033 %
試験条件	加熱強度	①	17.0 kW/m2
		②	8.8 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		743 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



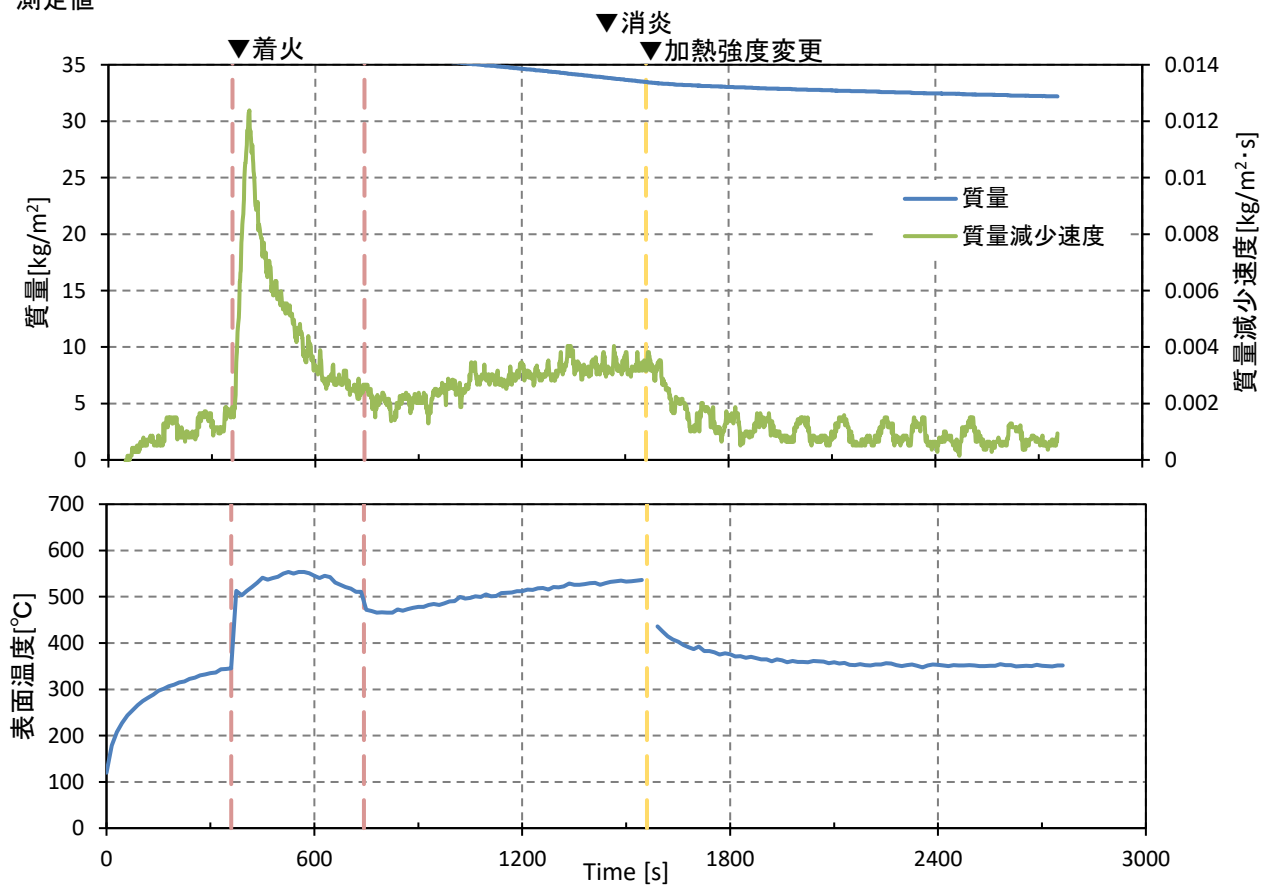
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1550 s	17.0 kW/m ²	0.00324 kg/m ² s	0.32426 kg/m ³ s	525.8 °C
	2400 ~ 2700 s	8.8 kW/m ²	0.00076 kg/m ² s	0.07617 kg/m ³ s	351.3 °C

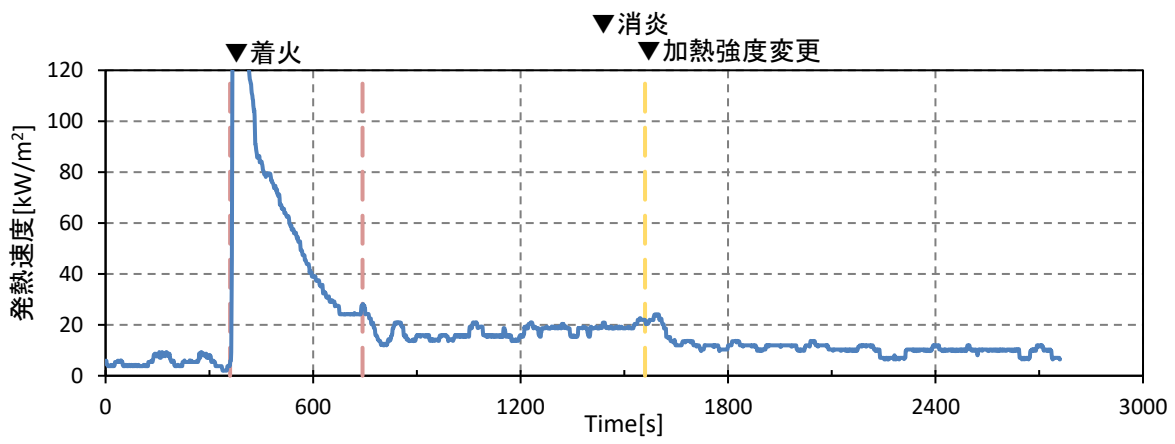
実験終了後試験体切断面



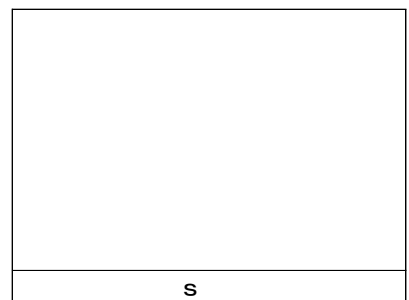
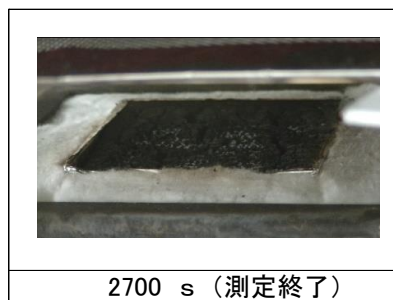
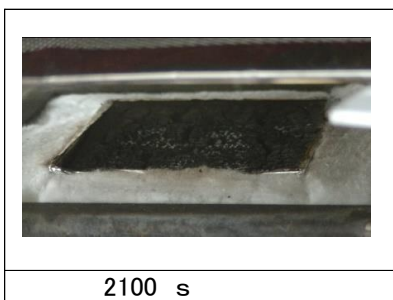
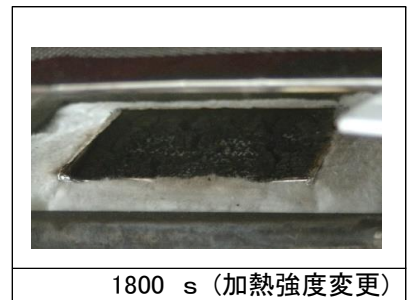
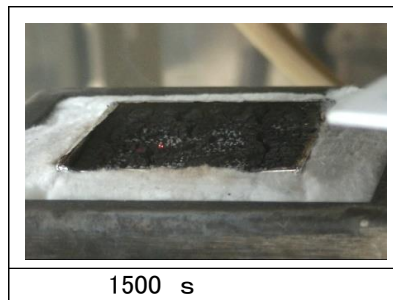
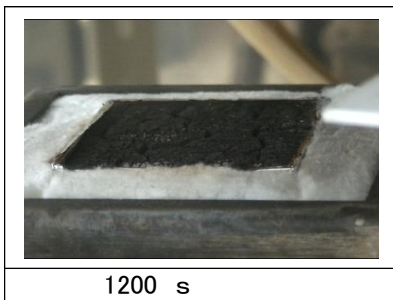
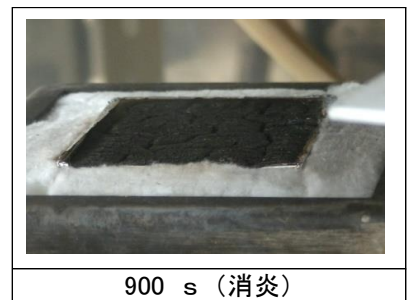
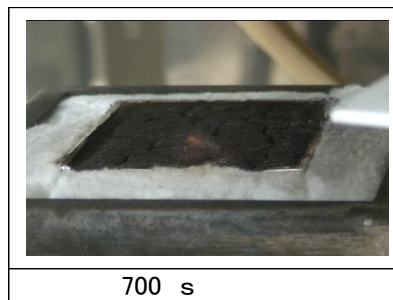
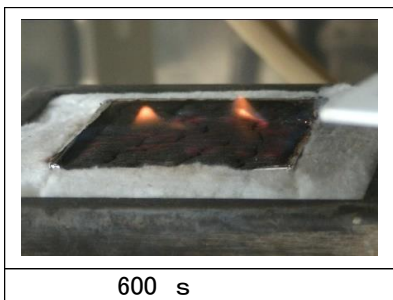
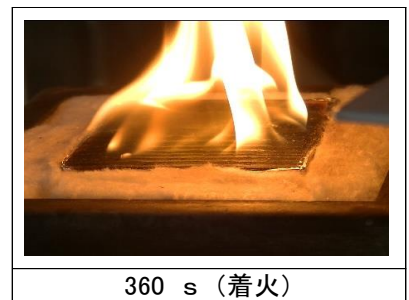
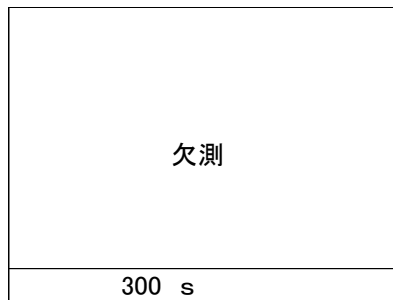
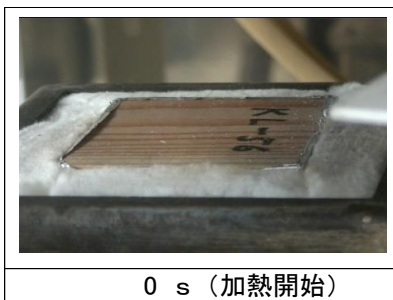
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	2 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	10 mm	堅い炭化層	2 mm
炭化	12 mm	総炭化層	10 mm
変色	18 mm	健全部	48 mm

測定値

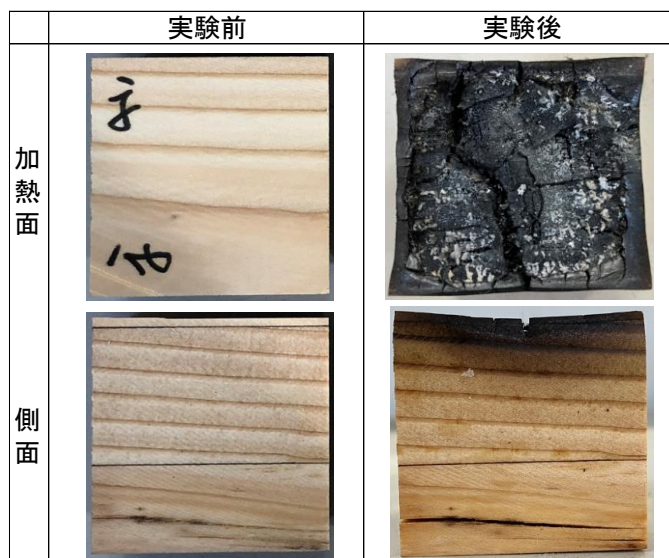




燃焼の様子



実験	12	Lf-8.8-4	
試験体	初期質量		53.0 g
	初期寸法	厚	47 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		489.1 kg/m3
	初期含水率		10.1 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	17.0 kW/m2
		②	8.8 kW/m2
	表面気流		0.5 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2460 s
	実験終了		3060 s



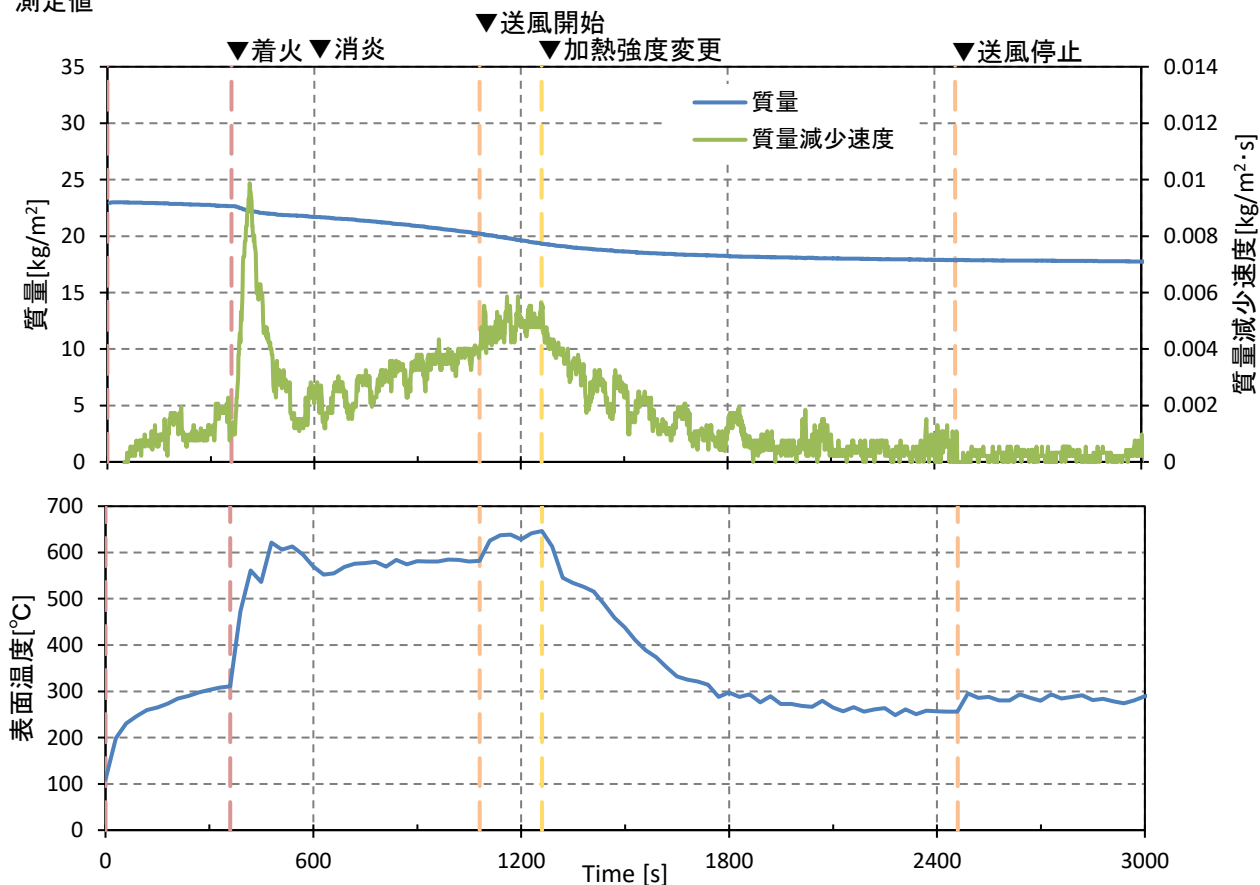
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1050 s	17.0 kW/m ²	0 m/s	0.00364 kg/m ² s	0.45514 kg/m ³ s	581.0 °C
	1150 ~ 1250 s	17.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00494 kg/m ² s	0.61801 kg/m ³ s	622.4 °C
	2200 ~ 2400 s	8.8 kW/m ²	0.5 m/s	0.00041 kg/m ² s	0.05135 kg/m ³ s	258.1 °C
	2700 ~ 3000 s	8.8 kW/m ²	0 m/s	0.00024 kg/m ² s	0.02951 kg/m ³ s	284.9 °C

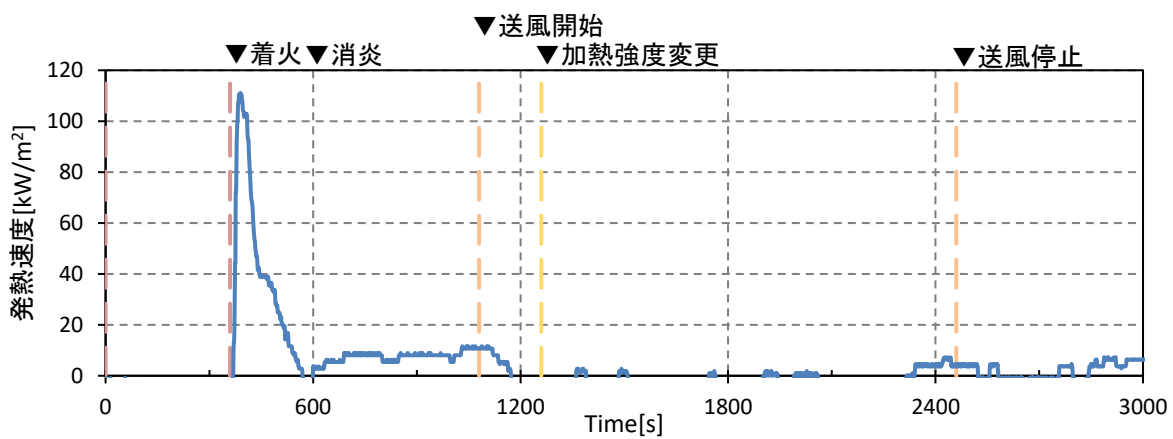
実験終了後試験体切断面



初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	6 mm	脆い炭化層	4 mm
赤熱	10 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	14 mm	総炭化層	8 mm
変色	19 mm	健全部	33 mm

測定値

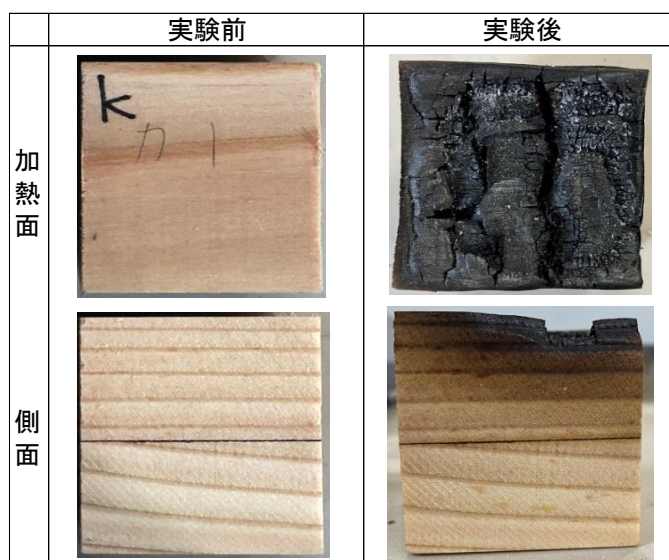




燃焼の様子



実験	13	Lf-8.8-5	
試験体	初期質量		48.8 g
	初期寸法	厚	49 mm
		幅	48 mm
		奥	47 mm
	初期密度		441.5 kg/m3
	初期含水率		9.5 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	17.0 kW/m2
		②	8.8 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1560 s
	送風停止		2460 s
	実験終了		3060 s



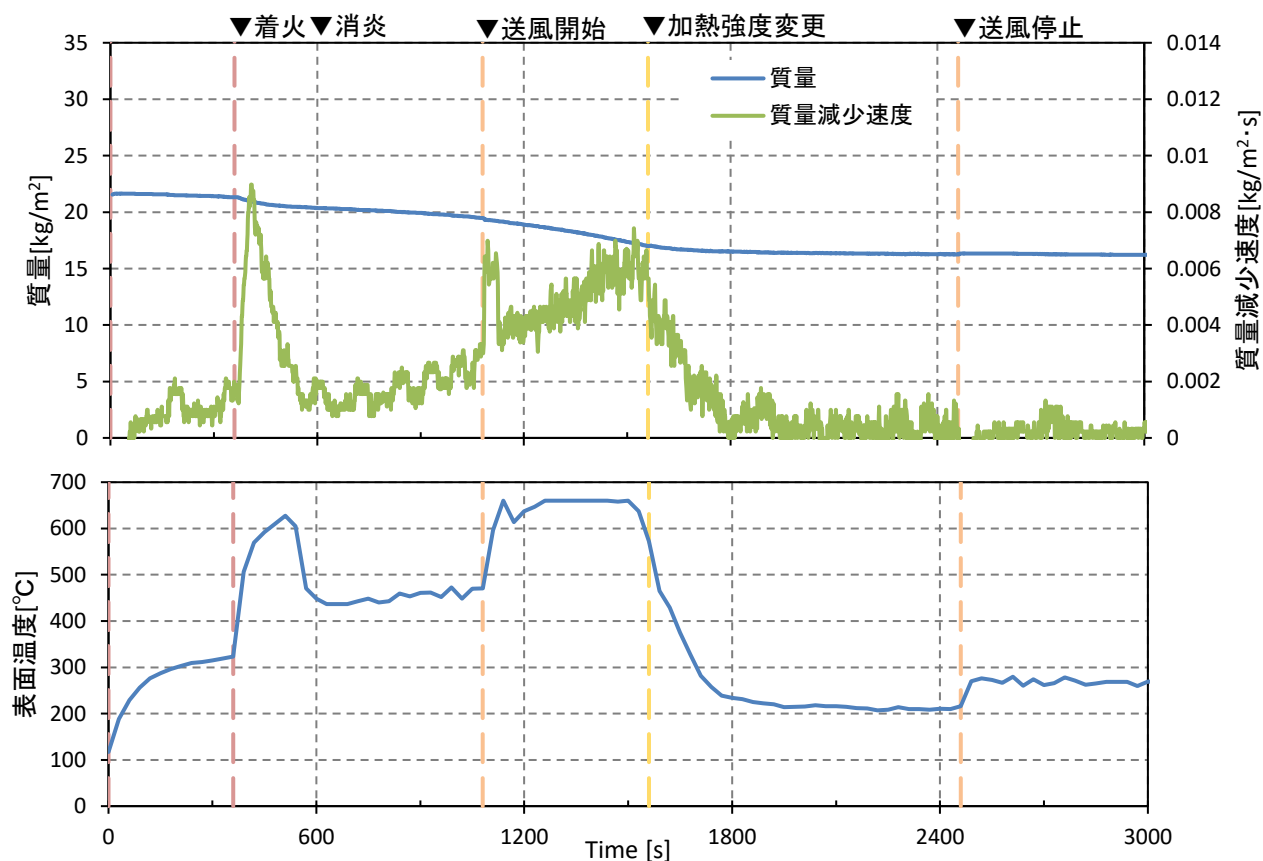
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1050 s	17.0 kW/m ²	0 m/s	0.00225 kg/m ² s	0.20455 kg/m ³ s	460.9 °C
	1400 ~ 1550 s	17.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00592 kg/m ² s	0.53830 kg/m ³ s	655.2 °C
	2100 ~ 2400 s	8.8 kW/m ²	0.5 m/s	0.00031 kg/m ² s	0.02825 kg/m ³ s	211.0 °C
	2700 ~ 3000 s	8.8 kW/m ²	0 m/s	0.00028 kg/m ² s	0.02540 kg/m ³ s	267.2 °C

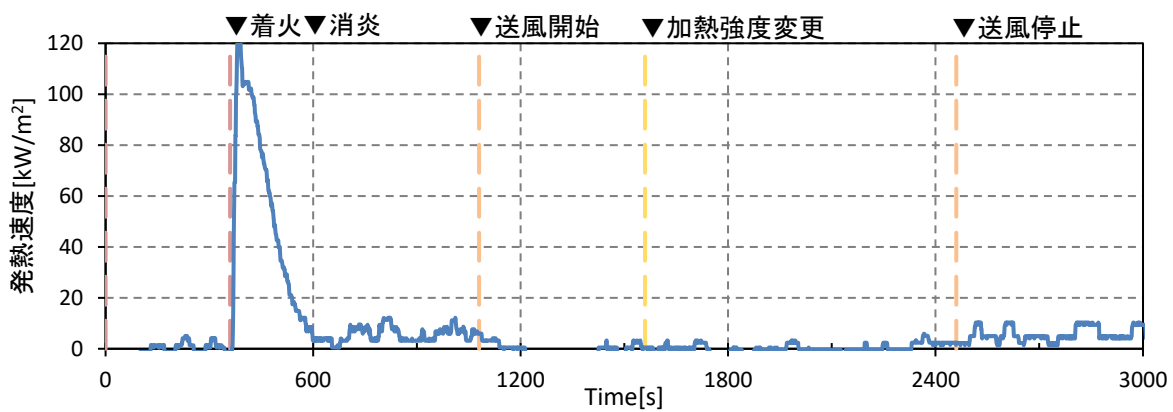
実験終了後試験体切断面



初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	5 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	12 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	16 mm	総炭化層	11 mm
変色	22 mm	健全部	33 mm

測定値

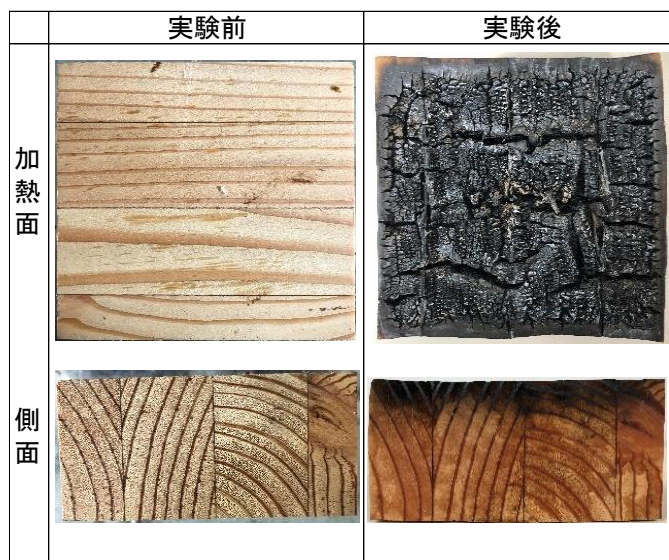




燃焼の様子

0 s (加熱開始)	300 s	360 s (着火)
600 s	900 s	1200 s (加熱強度変更)
1500 s	1700 s (送風開始)	1800 s
2100 s	2200 s (測定終了)	s

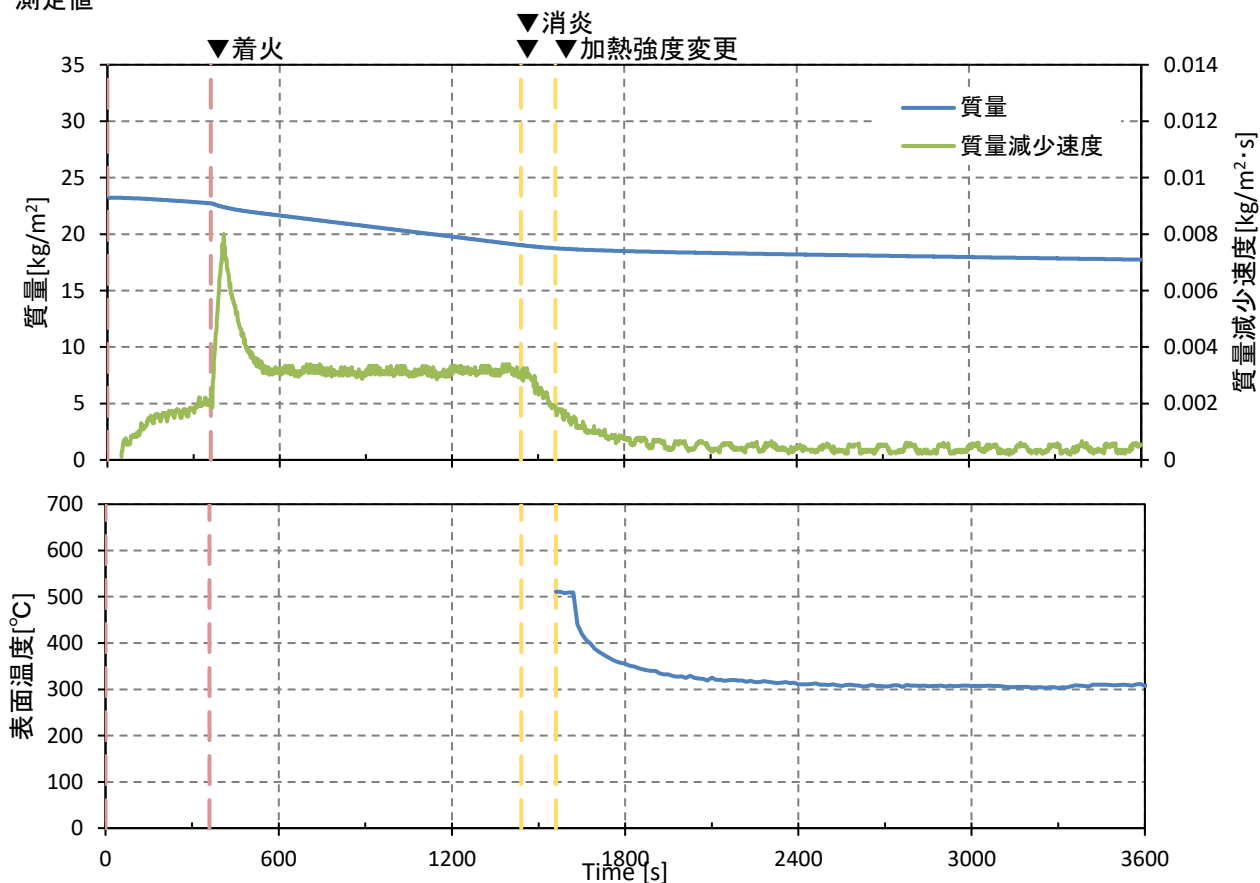
実験 14	L-8.8-m		
試験体	初期質量		226.3 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		464.6 kg/m ³
	初期含水率		13.2 %-wt.
試験条件	加熱面		柱目
	加熱強度	①	21→16 kW/m ²
		②	8.8 kW/m ²
経過	着火		360 s
	消炎		s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		3900 s

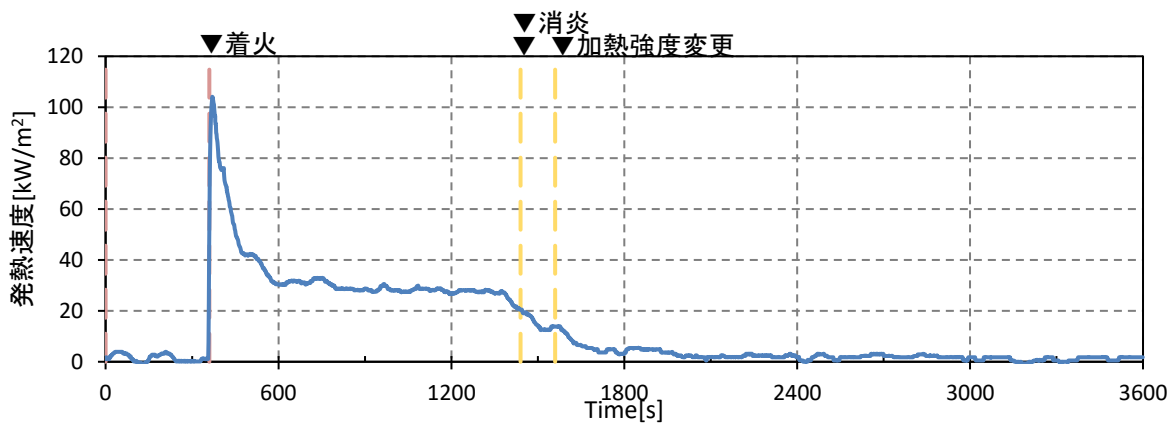


結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1400 s	21.0 kW/m ²	0.00313 kg/m ² s	#DIV/0! kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	8.8 kW/m ²	0.00040 kg/m ² s	#DIV/0! kg/m ³ s	307.0 °C

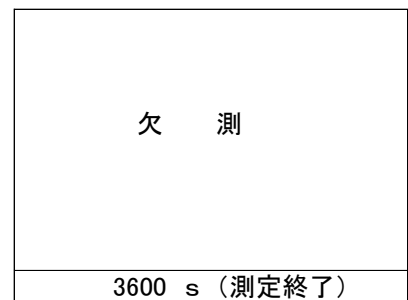
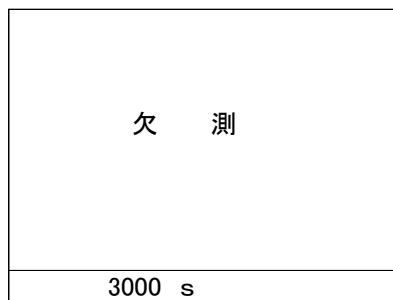
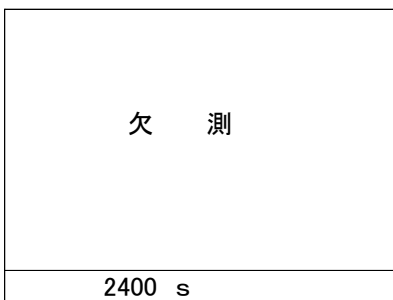
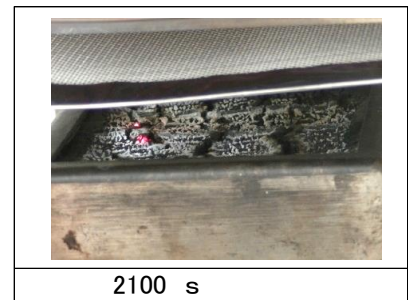
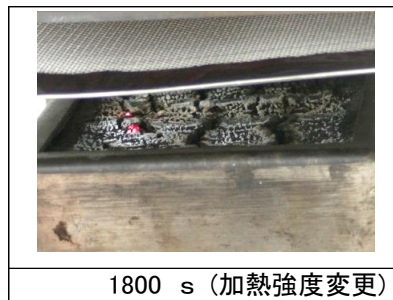
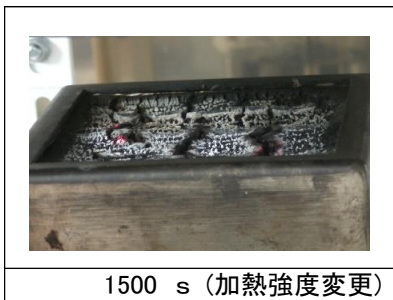
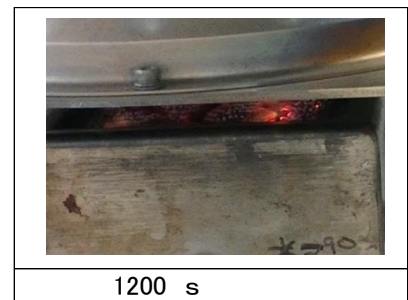
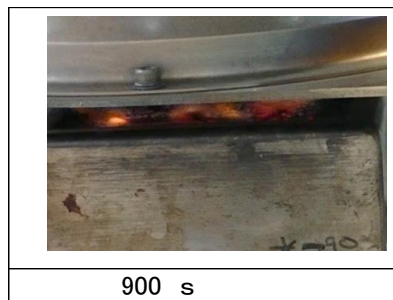
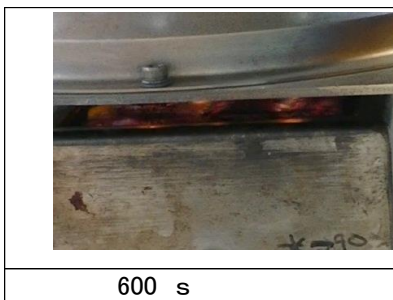
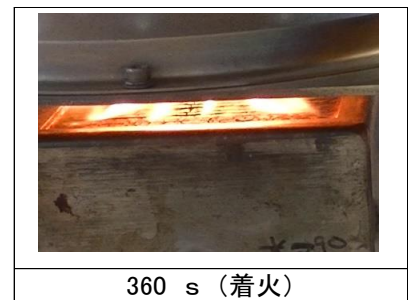
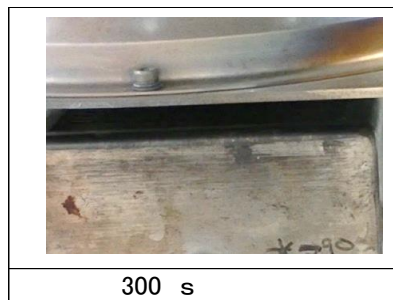
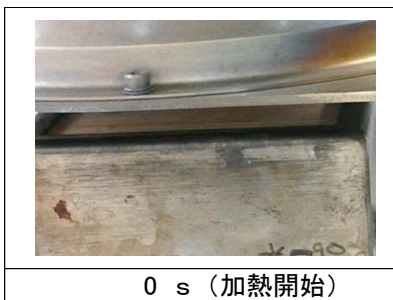
実験終了後試験体切断面					
初期表面位置からの距離			層厚み		
焼失	mm		脆い炭化層	0 mm	
赤熱	mm		堅い炭化層	0 mm	
炭化	mm		総炭化層	0 mm	
変色	mm		健全部	50 mm	

測定値

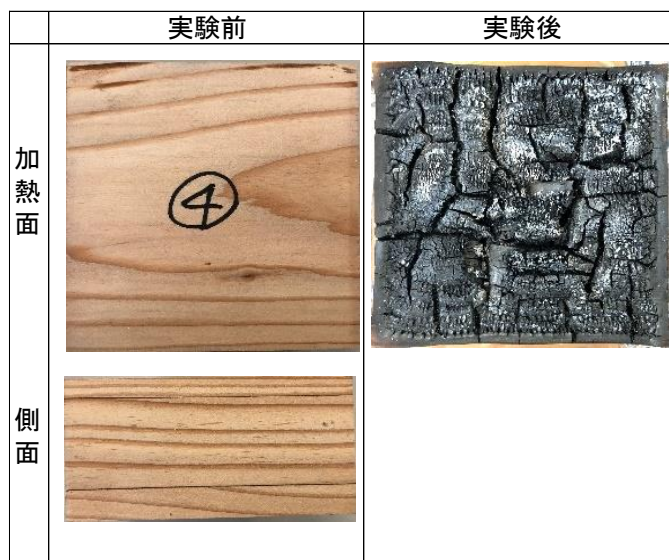




燃焼の様子



実験	15	L-9.0	
試験体	初期質量		223.0 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		457.8 kg/m3
	初期含水率		11.8 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	22→17 kW/m2
		②	9.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		3600 s



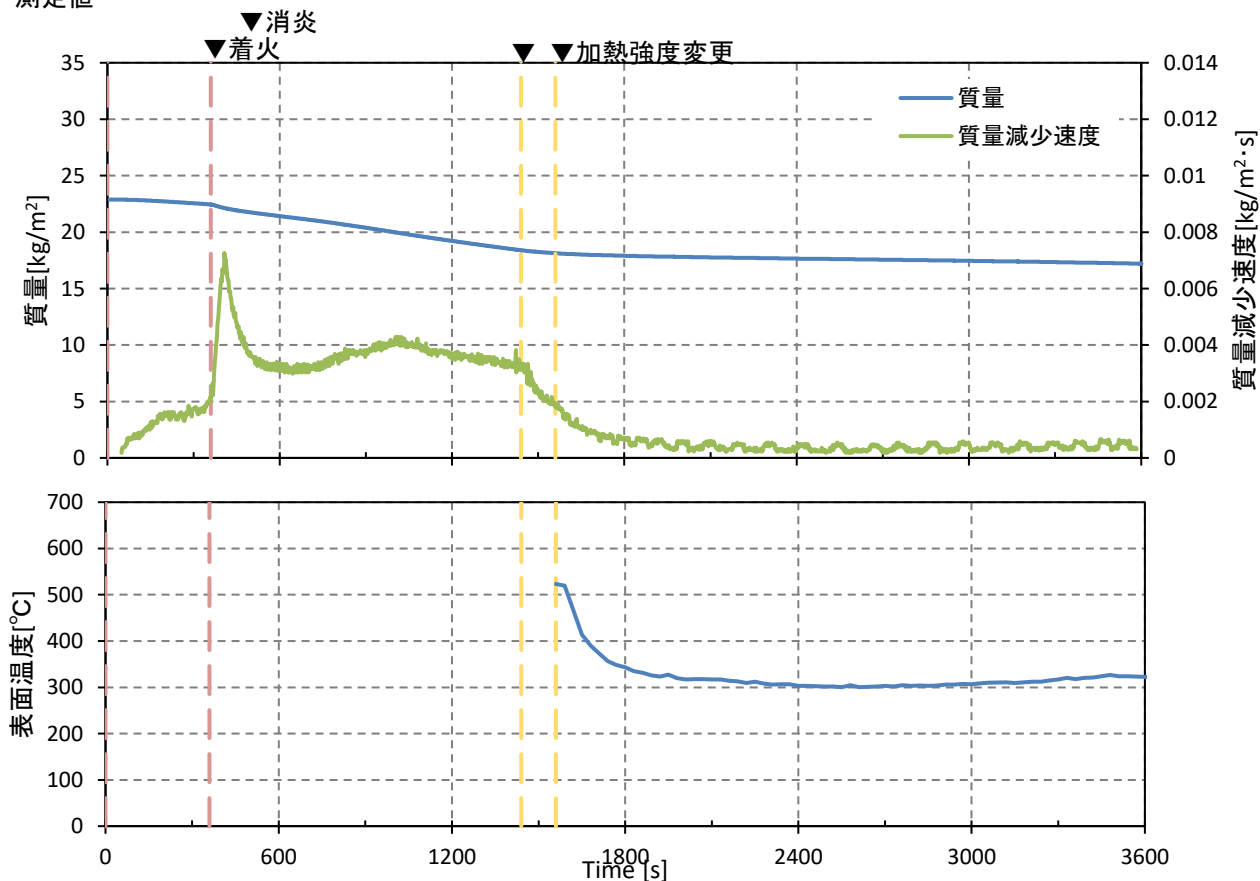
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1400 s	22.0 kW/m ²	0.00350 kg/m ² s	0.25017 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	9.0 kW/m ²	0.00041 kg/m ² s	0.02921 kg/m ³ s	316.8 °C

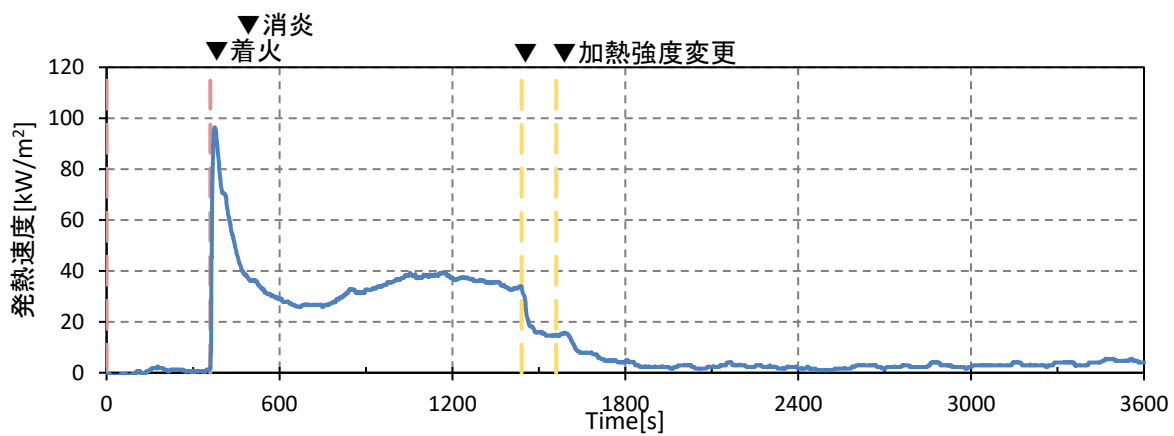
実験終了後試験体切断面



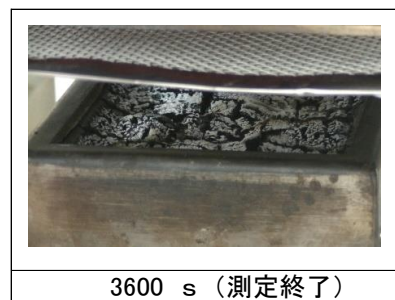
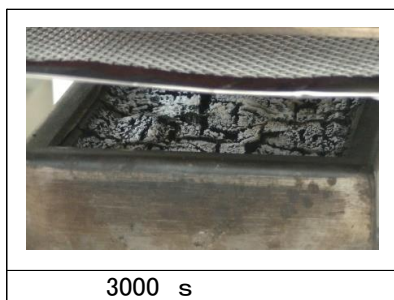
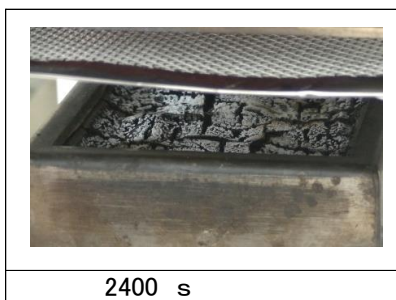
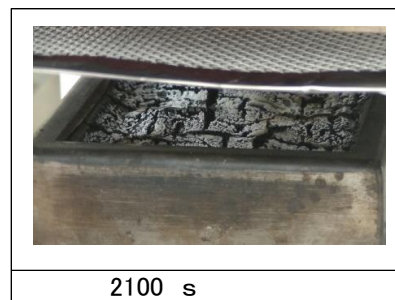
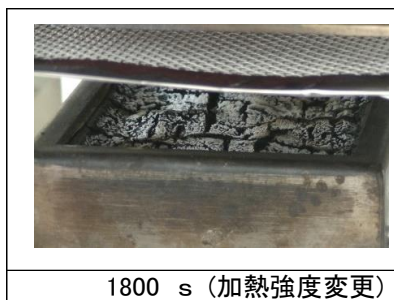
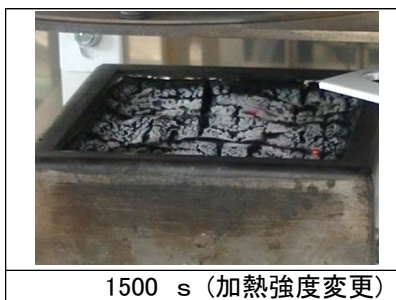
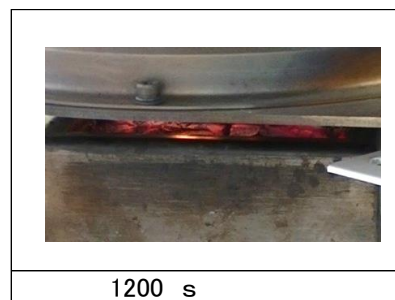
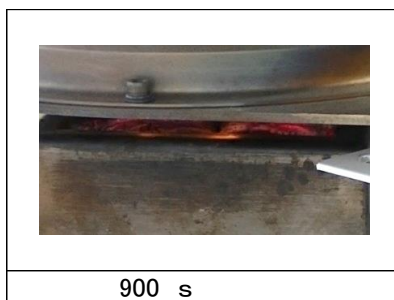
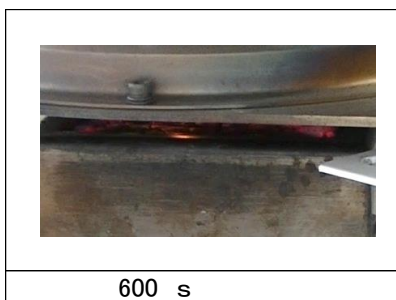
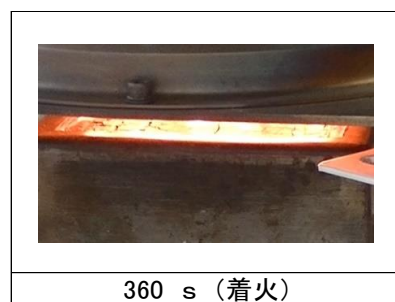
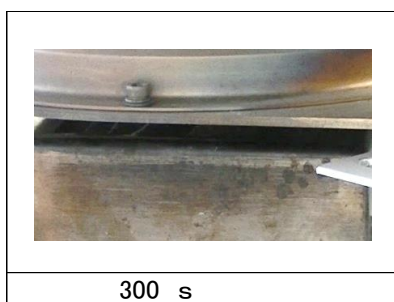
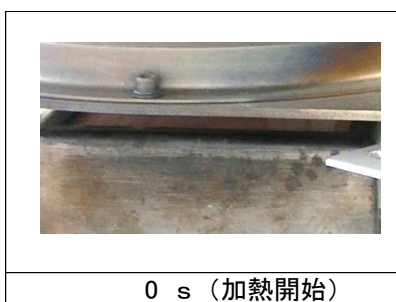
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	6 mm	脆い炭化層	11 mm
赤熱	17 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	20 mm	総炭化層	14 mm
変色	27 mm	健全部	30 mm

測定値

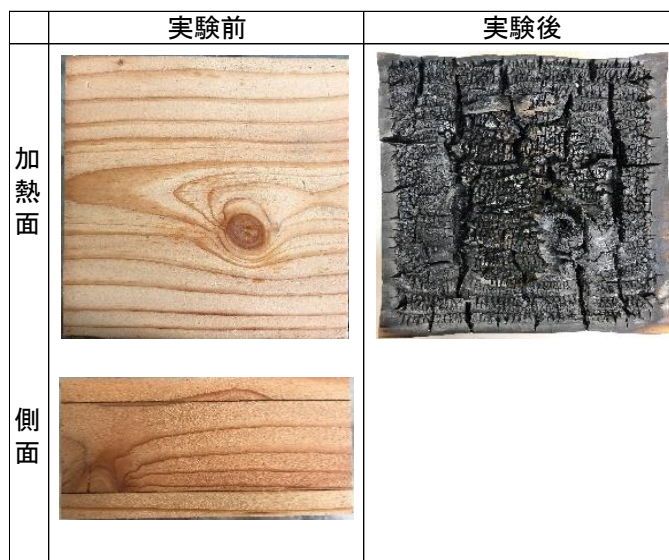




燃焼の様子



実験	16	L-9.3	
試験体	初期質量		216.3 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		444.0 kg/m3
	初期含水率		10.7 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	22→17 kW/m2
		②	9.3 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		3900 s



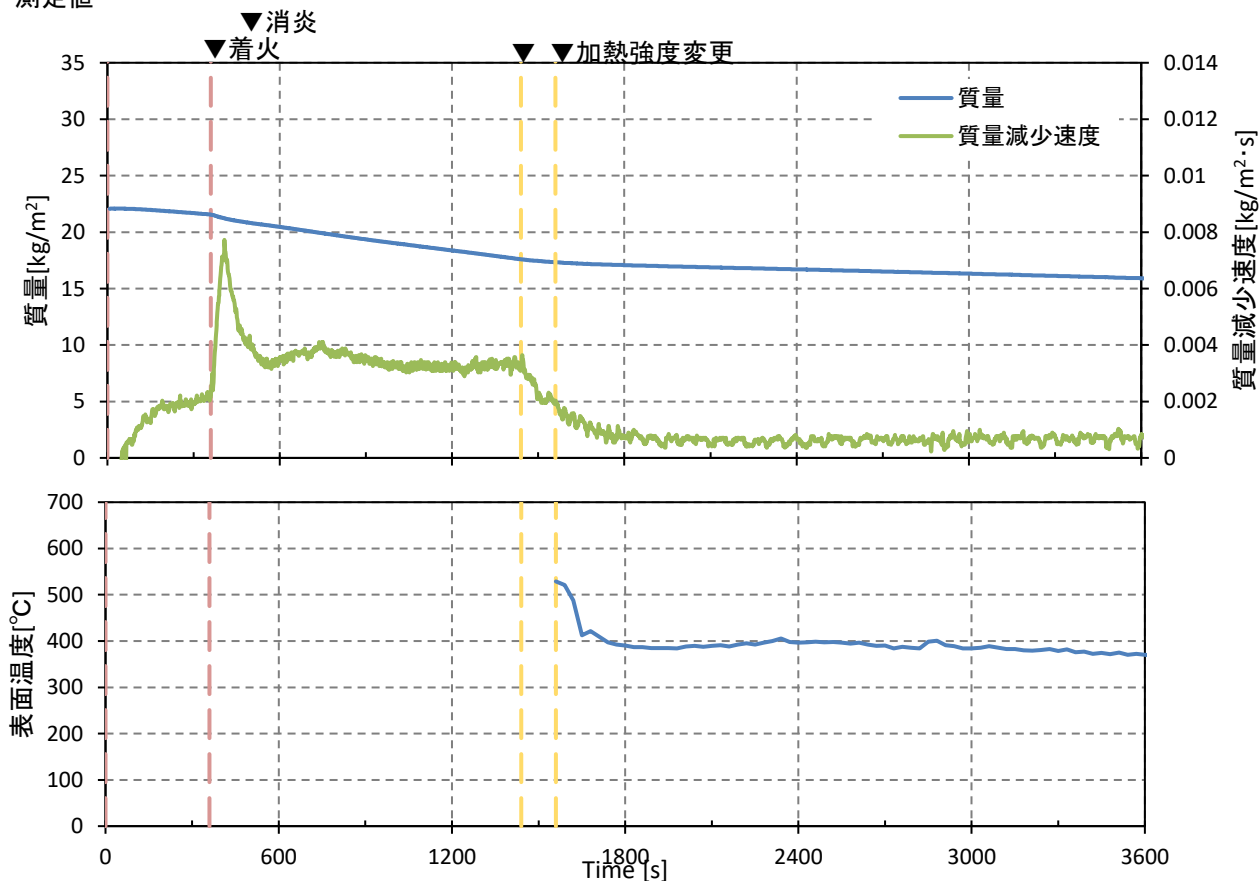
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1400 s	22.0 kW/m ²	0.00327 kg/m ² s	0.27235 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3600 s	9.3 kW/m ²	0.00068 kg/m ² s	0.05667 kg/m ³ s	378.4 °C

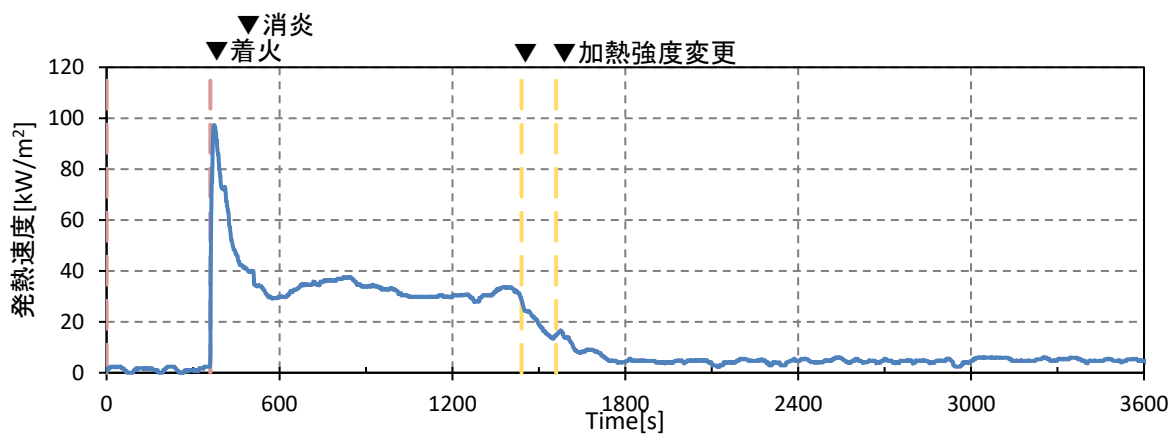
実験終了後試験体切断面



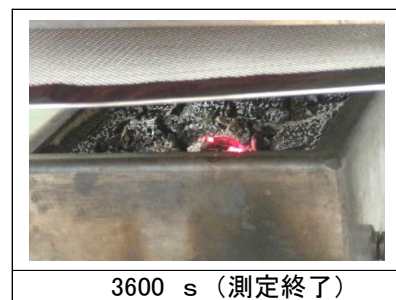
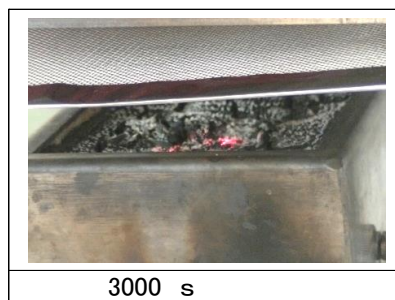
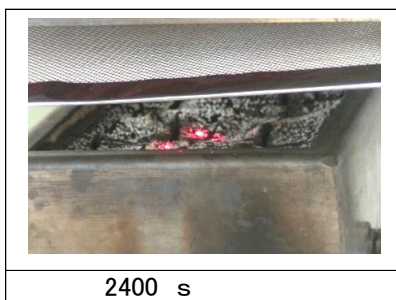
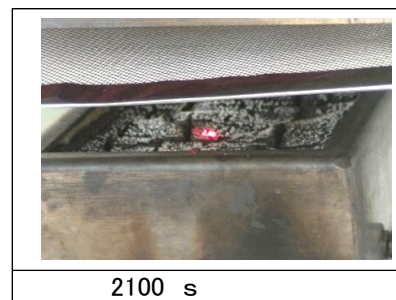
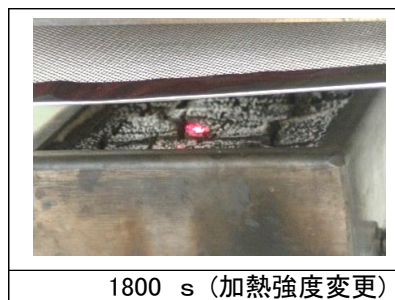
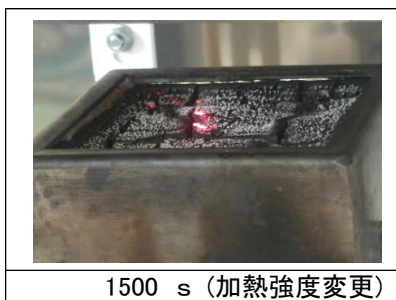
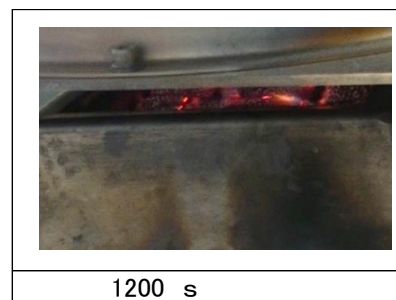
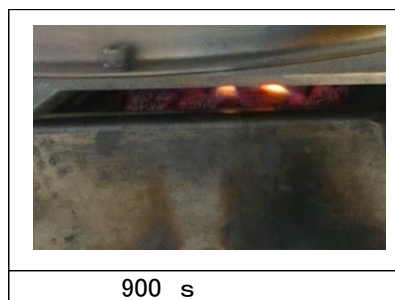
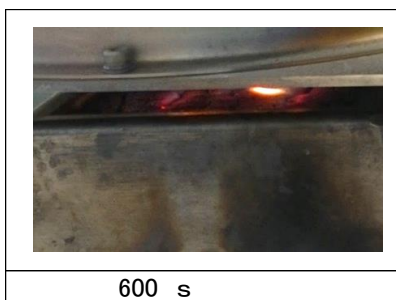
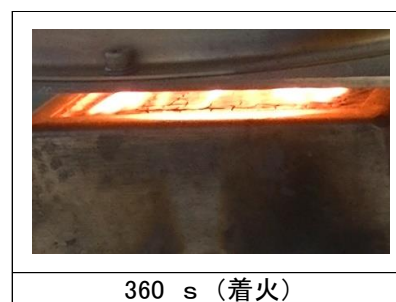
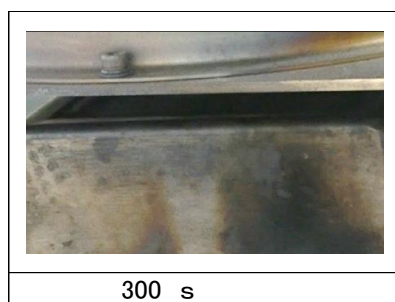
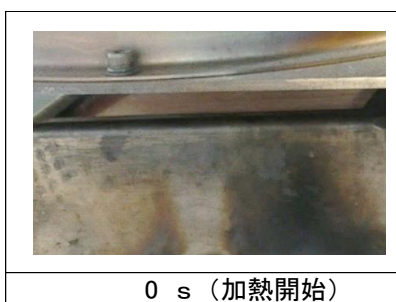
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	14 mm	脆い炭化層	10 mm
赤熱	24 mm	堅い炭化層	2 mm
炭化	26 mm	総炭化層	12 mm
変色	34 mm	健全部	24 mm

測定値

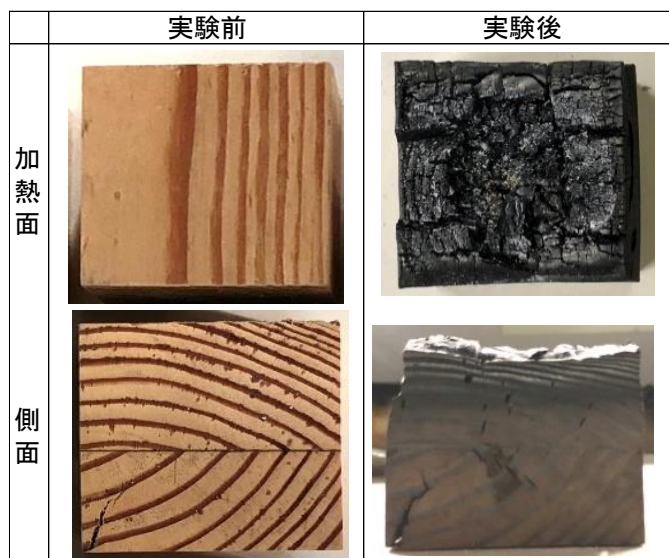




燃焼の様子



実験	17	L-9.8	
試験体	初期質量		56.1 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	48 mm
		奥	47 mm
	初期密度		497.6 kg/m3
	初期含水率		14.3 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	23→18 kW/m2
		②	9.8 kW/m2
経過	着火		300 s
	消炎		s
	加熱強度変更		1380 s
	加熱強度変更		1500 s
	実験終了		3500 s



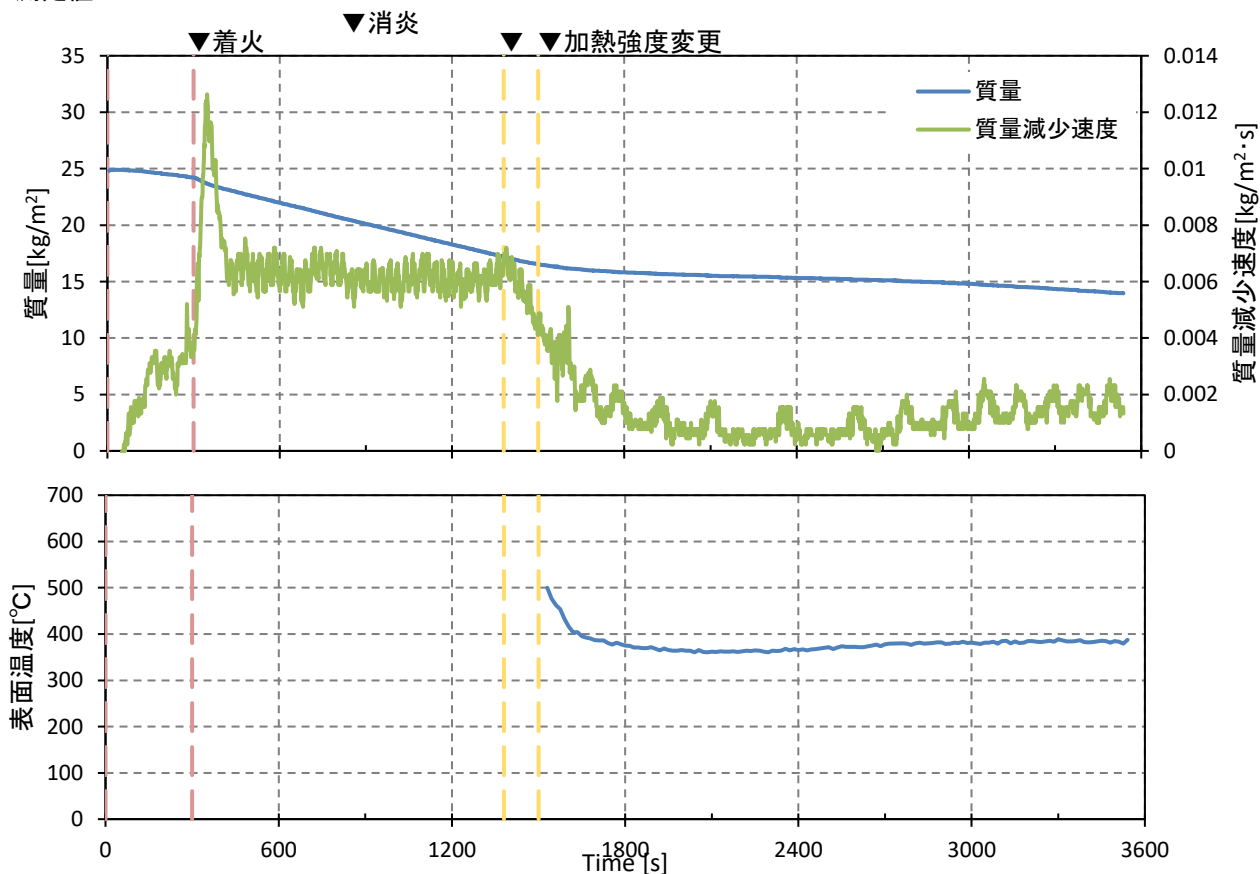
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1200 s	23.0 kW/m ²	0.00609 kg/m ² s	0.35842 kg/m ³ s	°C
	3000 ~ 3500 s	9.8 kW/m ²	0.00154 kg/m ² s	0.09061 kg/m ³ s	383.3 °C

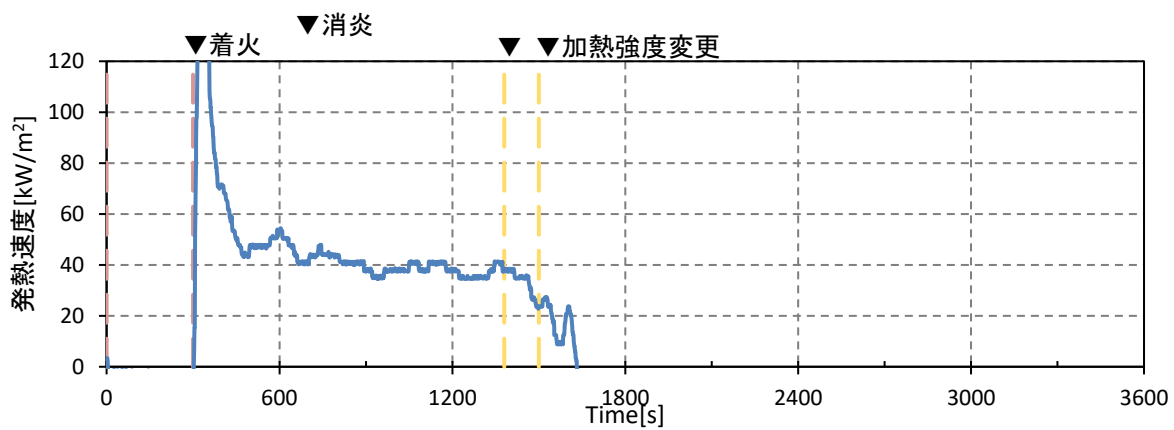
実験終了後試験体切断面



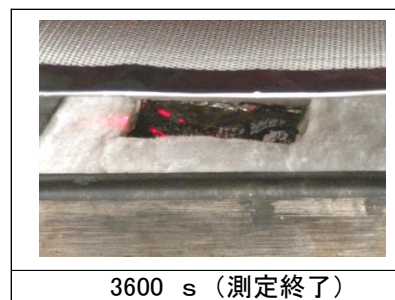
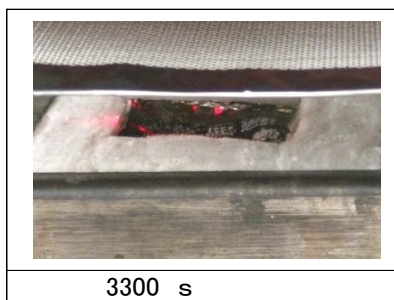
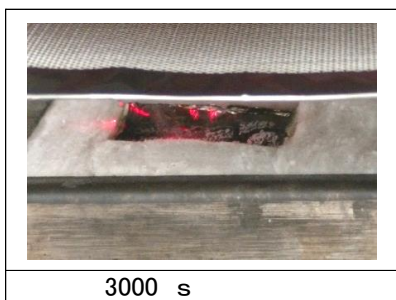
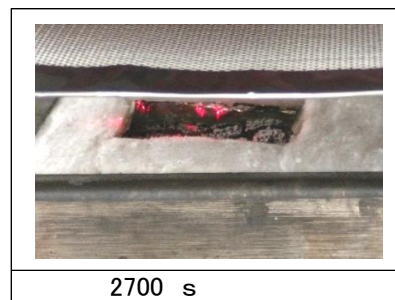
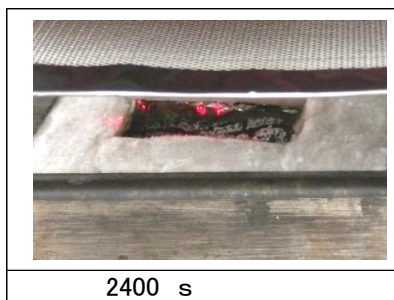
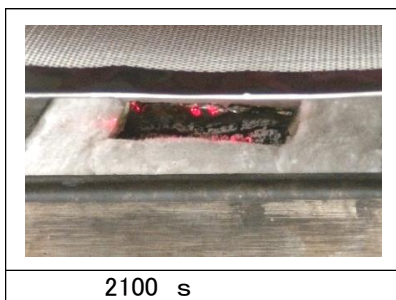
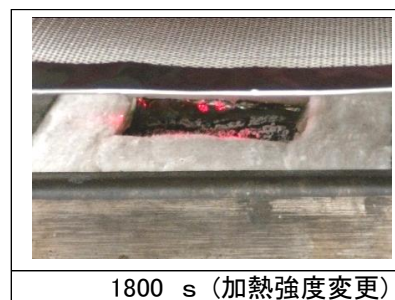
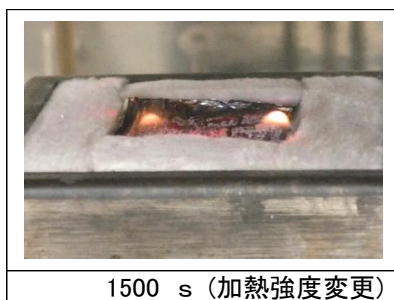
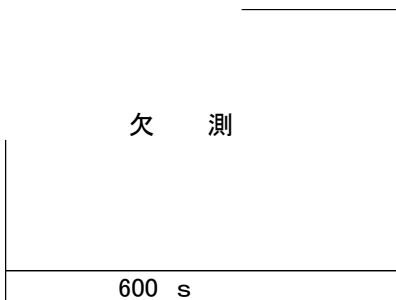
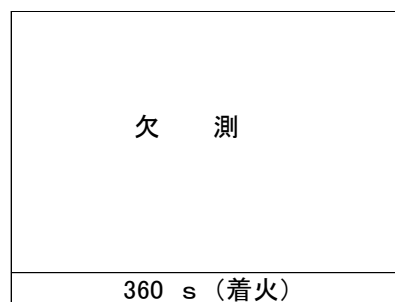
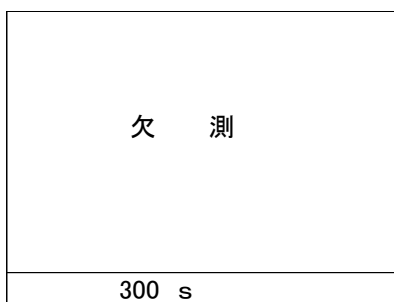
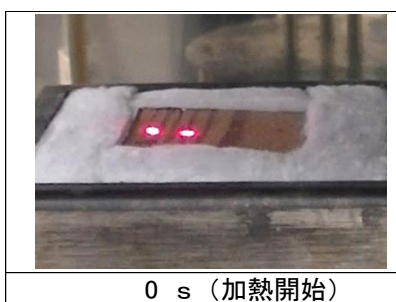
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	13 mm	脆い炭化層	12 mm
赤熱	25 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	30 mm	総炭化層	17 mm
変色	45 mm	健全部	20 mm

測定値

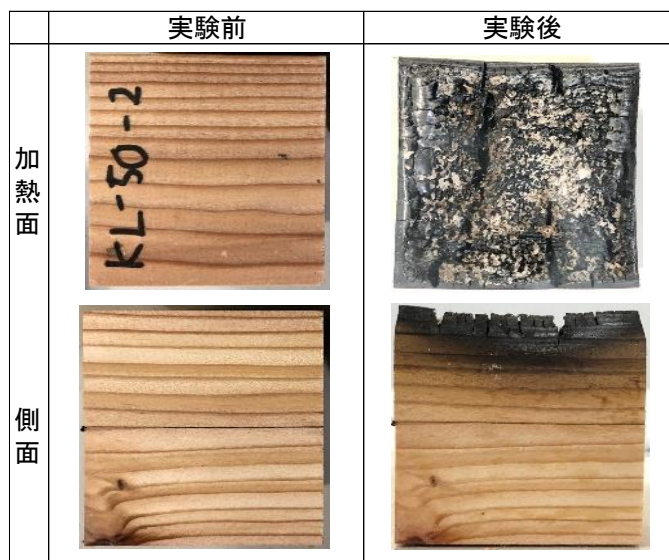




燃焼の様子



実験	18	L-12.4-1
試験体	初期質量	123.1 g
	初期寸法	厚 60 mm
		幅 56 mm
		奥 60 mm
	初期密度	610.5 kg/m ³
	初期含水率	14.8 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	灰分量	0.032 %
経過	加熱強度	① 24.0 kW/m ²
		② 12.4 kW/m ²
	着火	360 s
	消炎	760 s
	加熱強度変更	1260 s
	実験終了	3060 s



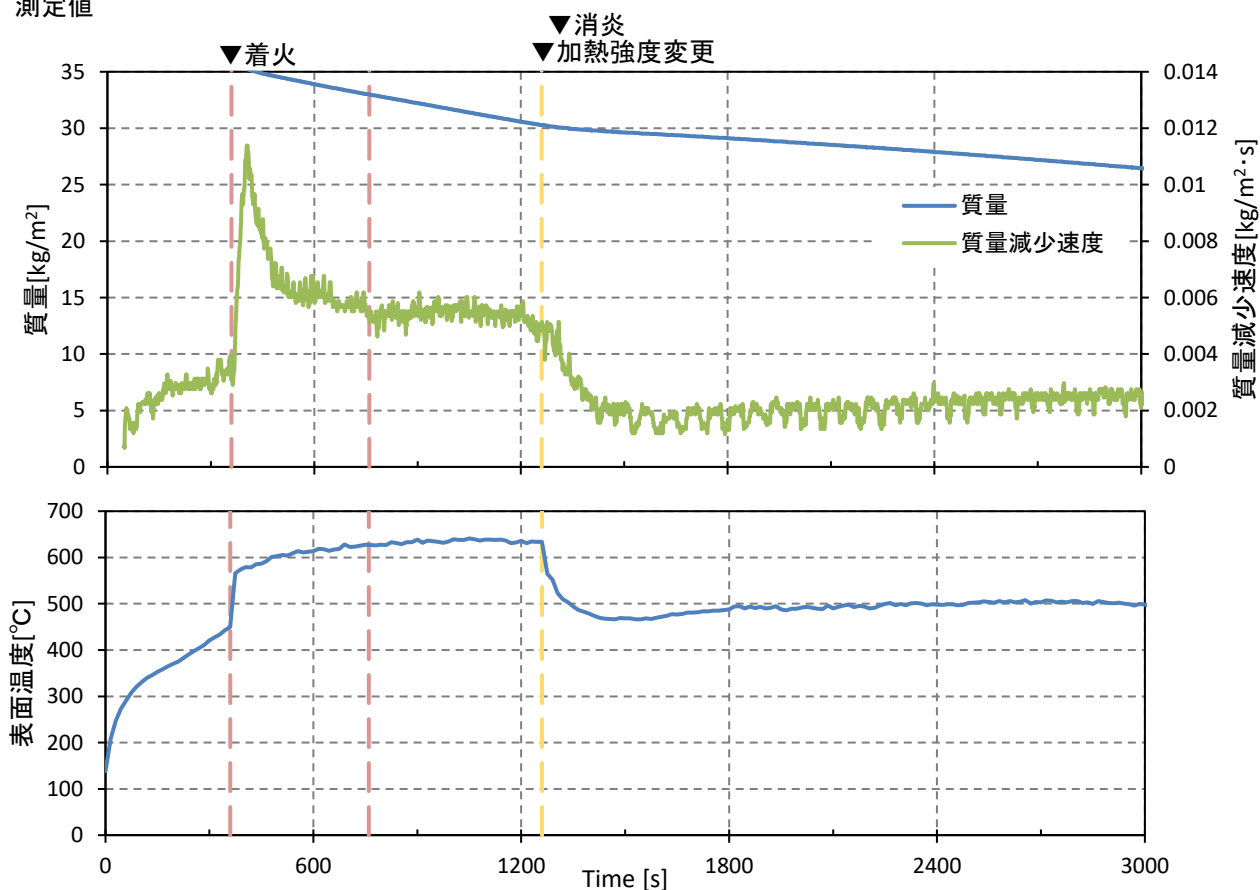
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	800 ~ 1200 s	24.0 kW/m ²	0.00547 kg/m ² s	0.45625 kg/m ³ s	635.2 °C
	2400 ~ 3000 s	12.4 kW/m ²	0.00239 kg/m ² s	0.19944 kg/m ³ s	501.8 °C

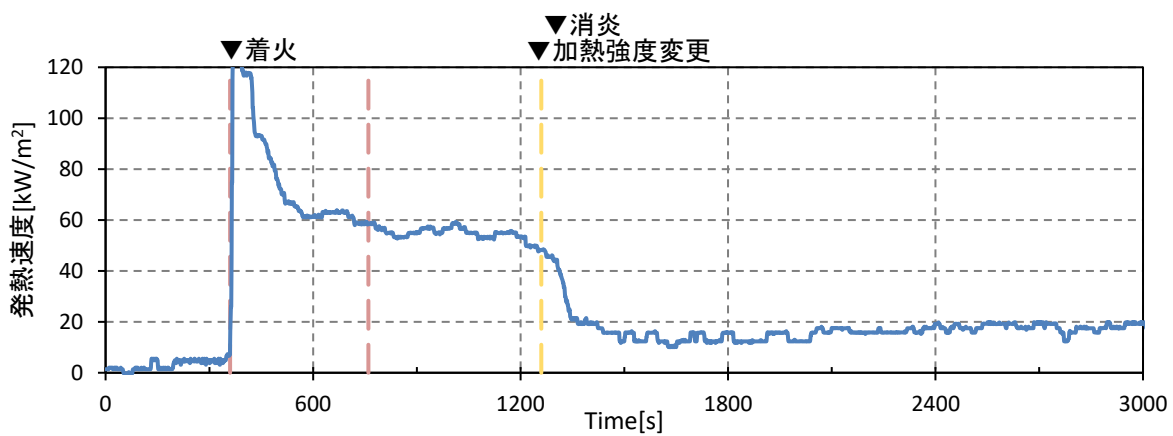
実験終了後試験体切断面



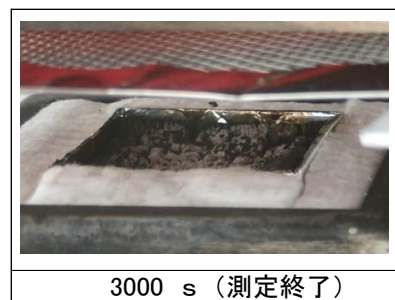
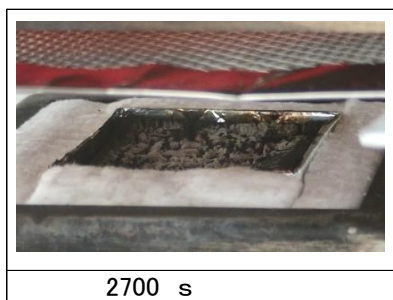
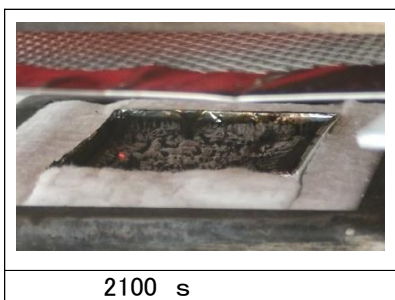
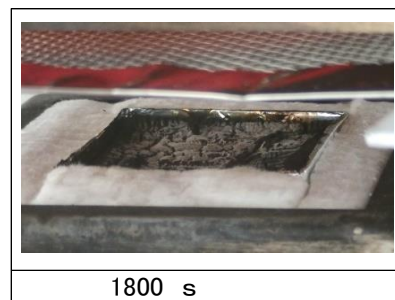
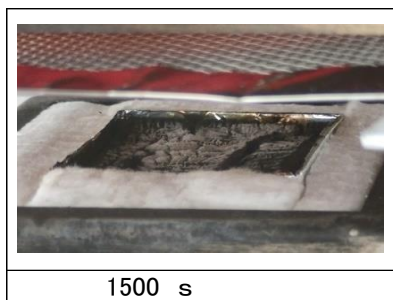
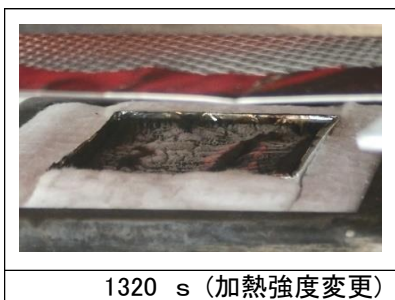
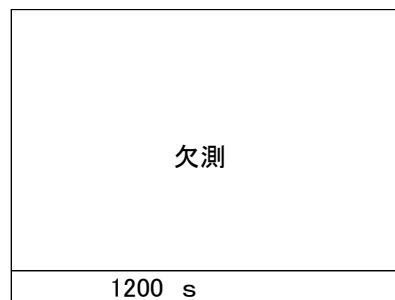
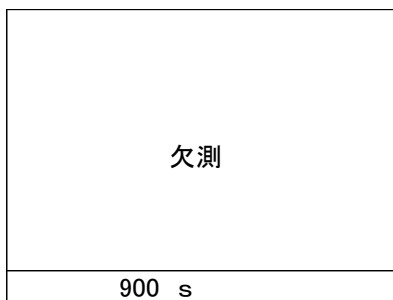
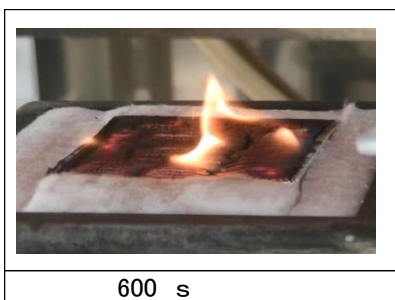
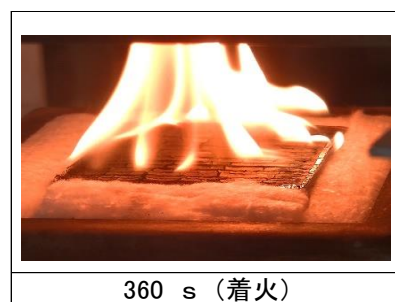
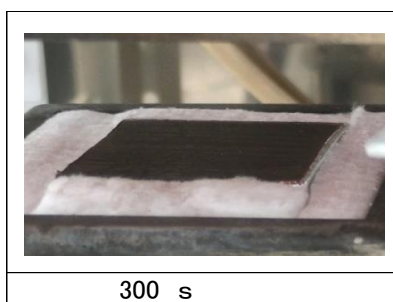
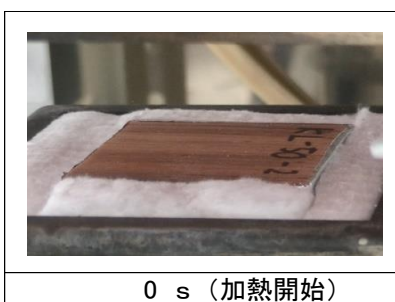
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	9 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	17 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	21 mm	総炭化層	12 mm
変色	26 mm	健全部	39 mm

測定値

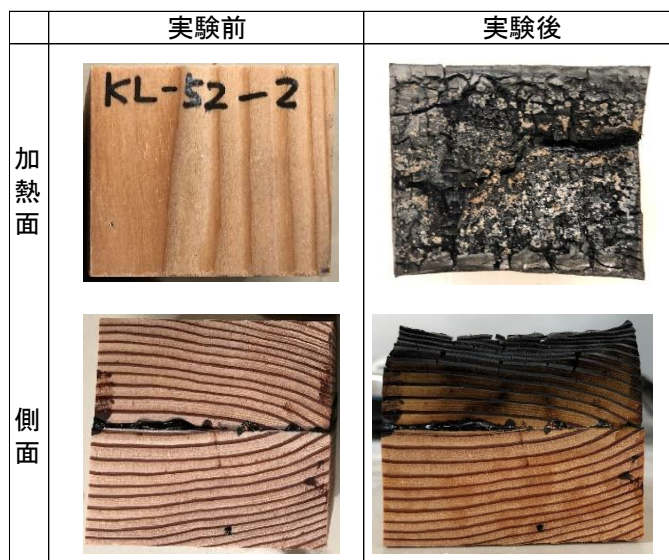




燃焼の様子



実験	19	L-12.4-2
試験体	初期質量	116.6 g
	初期寸法	厚 60 mm
		幅 53 mm
		奥 62 mm
	初期密度	591.3 kg/m ³
	初期含水率	13.2 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	灰分量	0.057 %
経過	加熱強度	① 24.0 kW/m ²
		② 12.4 kW/m ²
	着火	360 s
	消炎	1330 s
	加熱強度変更	1260 s
	実験終了	3060 s



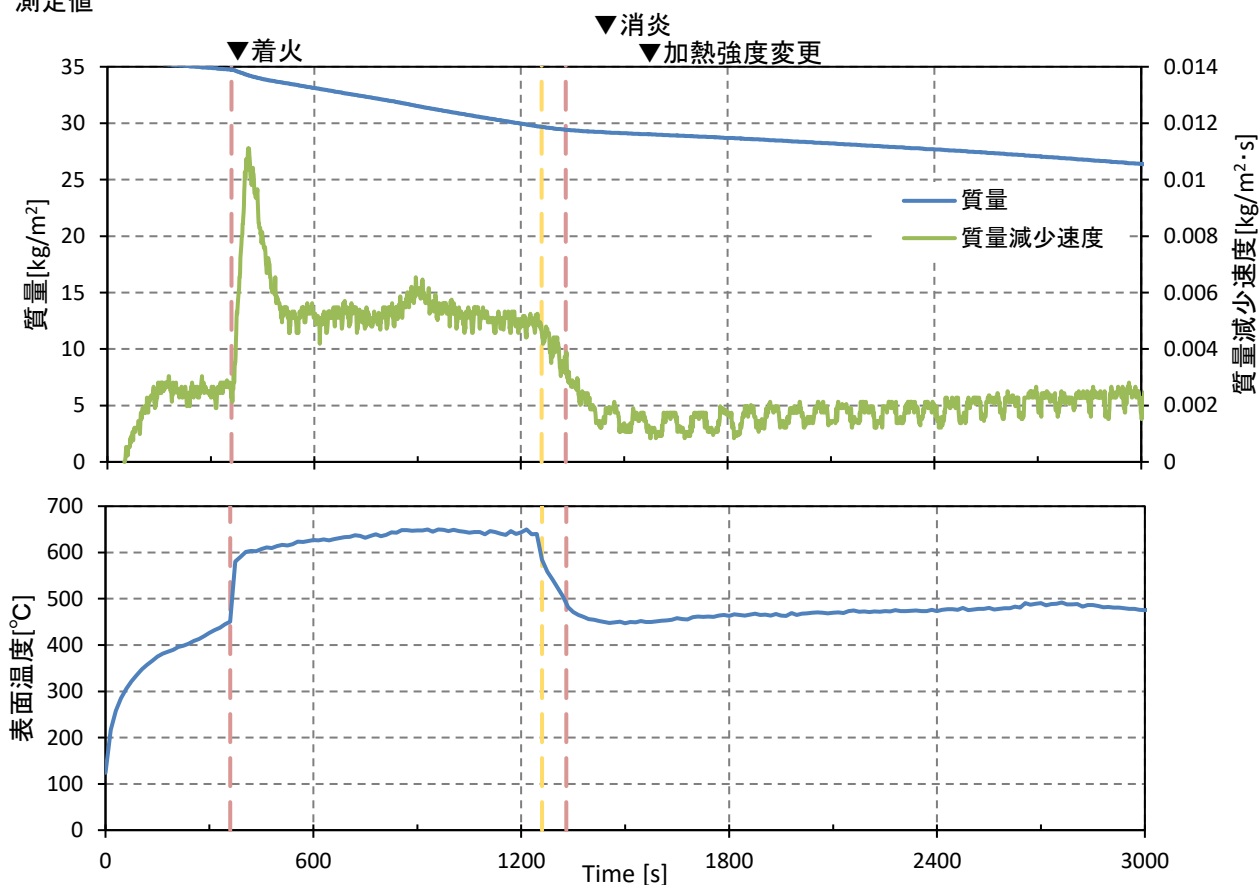
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1000 ~ 1200 s	24.0 kW/m ²	0.00509 kg/m ² s	0.50883 kg/m ³ s	643.5 °C
	2400 ~ 3000 s	12.4 kW/m ²	0.00212 kg/m ² s	0.21248 kg/m ³ s	482.0 °C

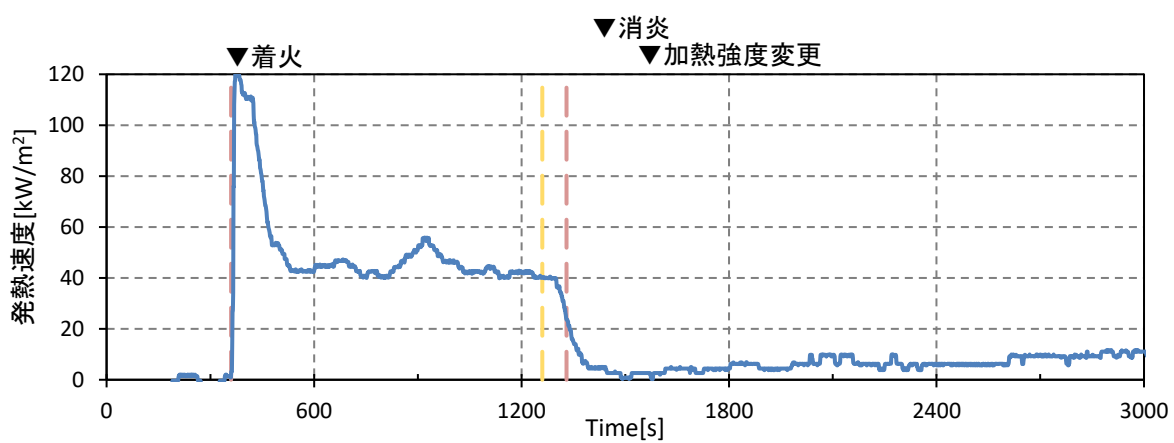
実験終了後試験体切断面



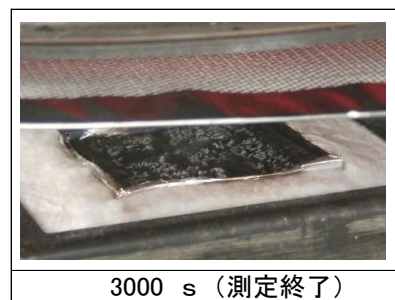
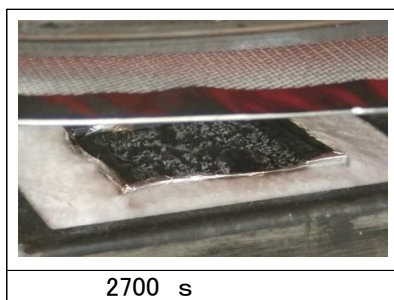
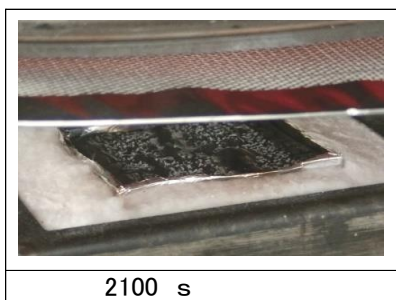
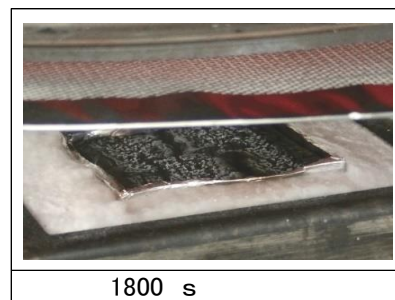
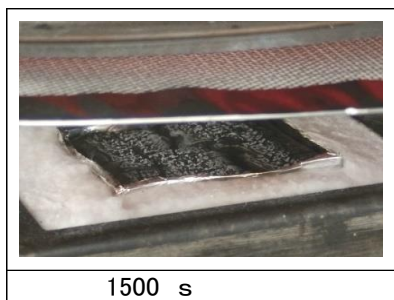
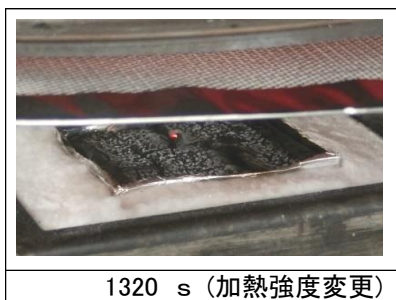
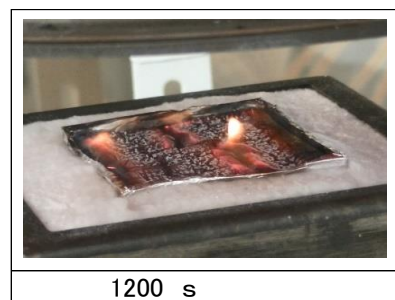
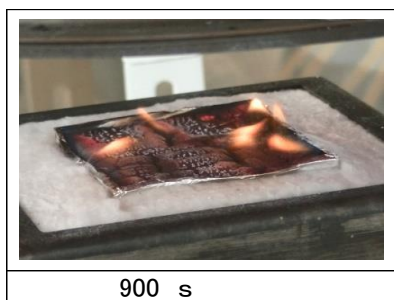
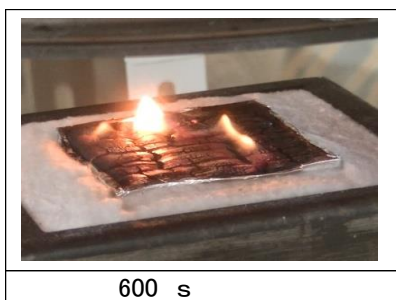
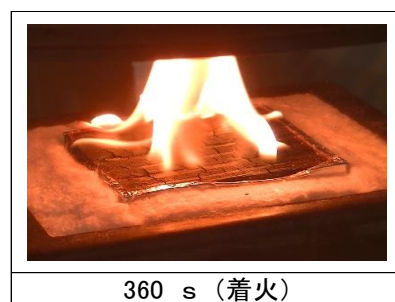
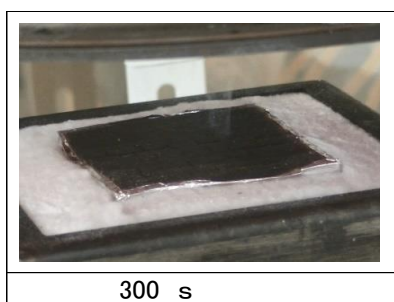
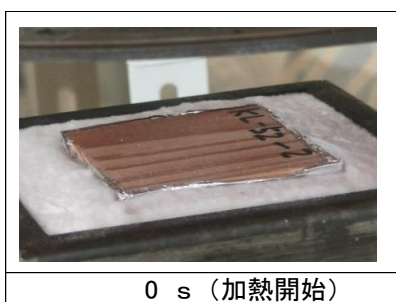
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	9 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	16 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	19 mm	総炭化層	10 mm
変色	26 mm	健全部	41 mm

測定値

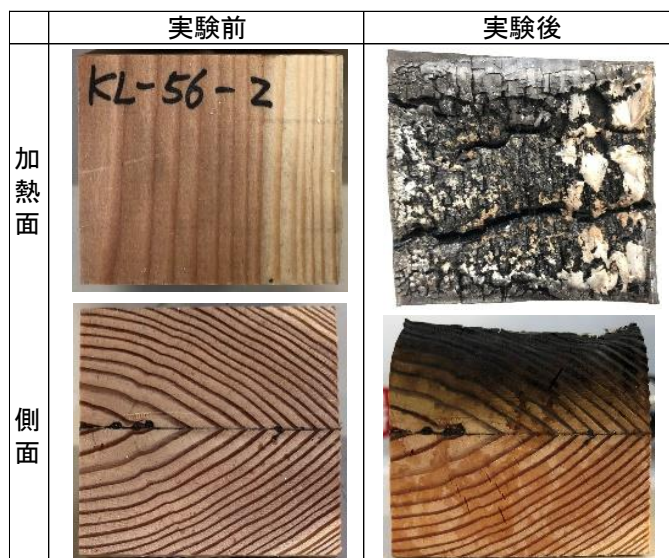




燃焼の様子

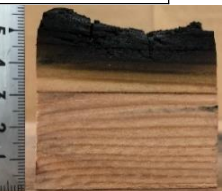


実験 20	L-12.4-3	
試験体	初期質量	135.6 g
	初期寸法	厚 60 mm
		幅 55 mm
		奥 62 mm
	初期密度	662.8 kg/m ³
	初期含水率	15.1 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	灰分量	0.033 %
経過	加熱強度	① 24.0 kW/m ²
		② 12.4 kW/m ²
	着火	360 s
	消炎	1310 s
	加熱強度変更	1260 s
	実験終了	3060 s



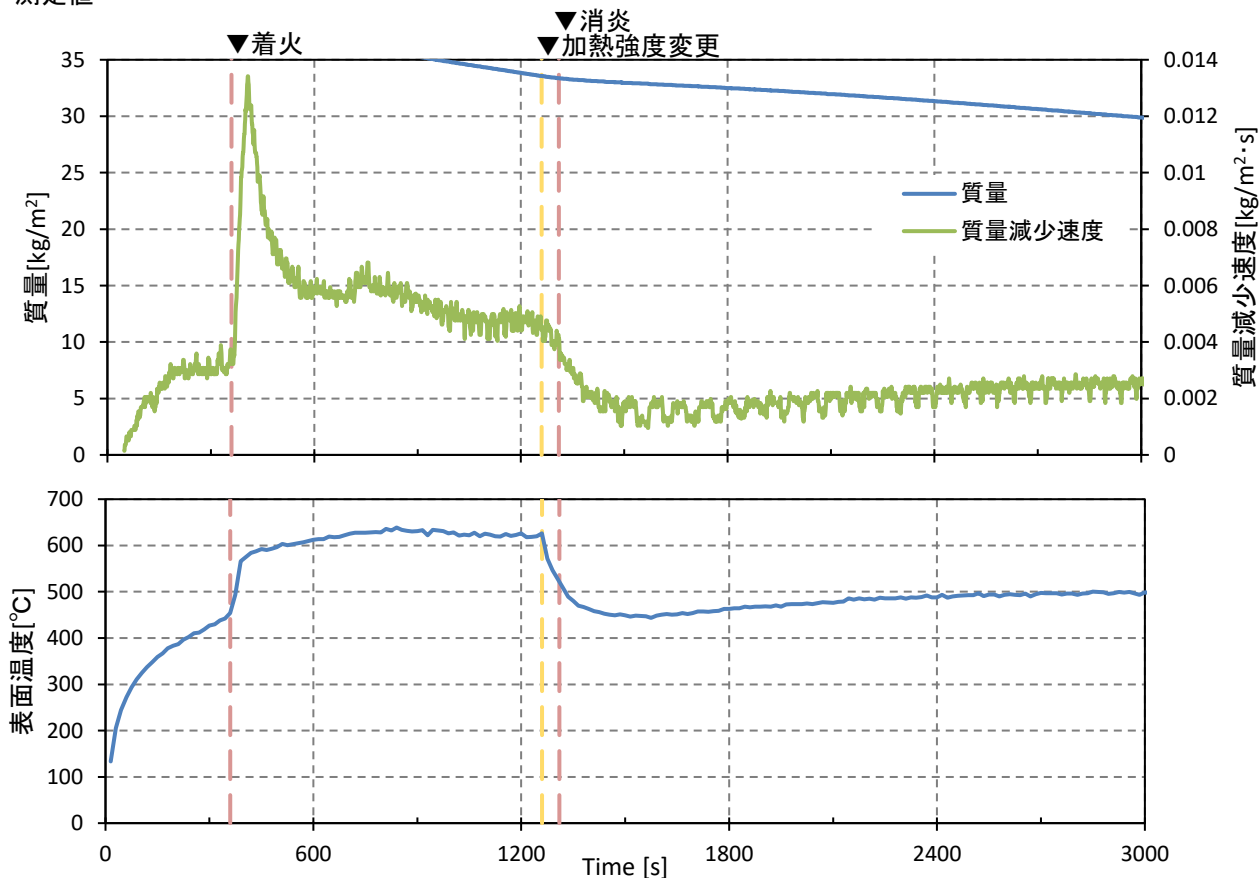
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1000 ~ 1200 s	24.0 kW/m ²	0.00474 kg/m ² s	0.52700 kg/m ³ s	623.2 °C
	2400 ~ 3000 s	12.4 kW/m ²	0.00240 kg/m ² s	0.05713 kg/m ³ s	494.7 °C

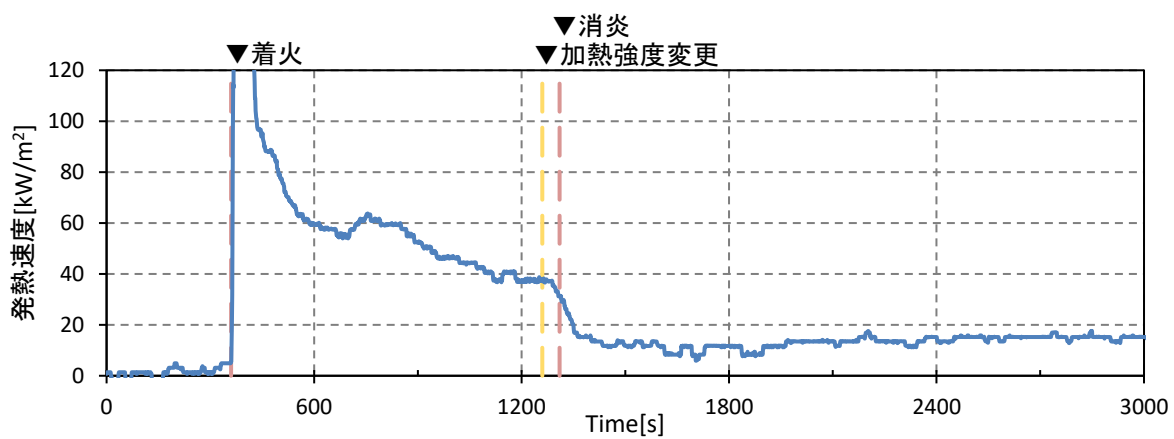
実験終了後試験体切断面



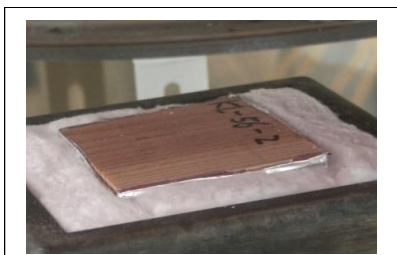
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	9 mm	脆い炭化層	6 mm
赤熱	15 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	18 mm	総炭化層	9 mm
変色	24 mm	健全部	42 mm

測定値

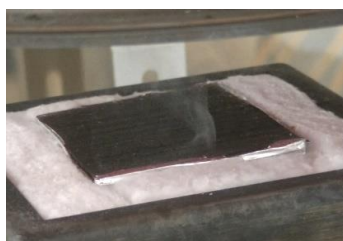




燃焼の様子



0 s (加熱開始)



300 s



360 s (着火)



600 s



900 s



1200 s



1320 s (加熱強度変更)



1500 s



1800 s



2100 s

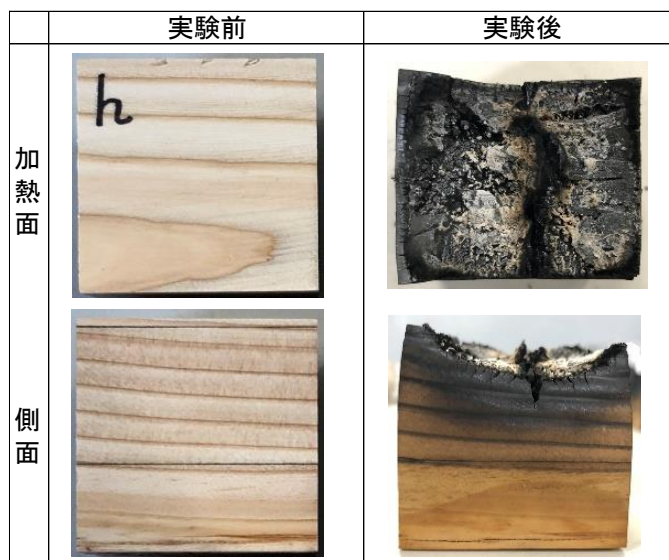


2700 s

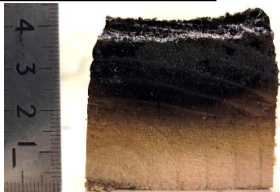


3000 s (測定終了)

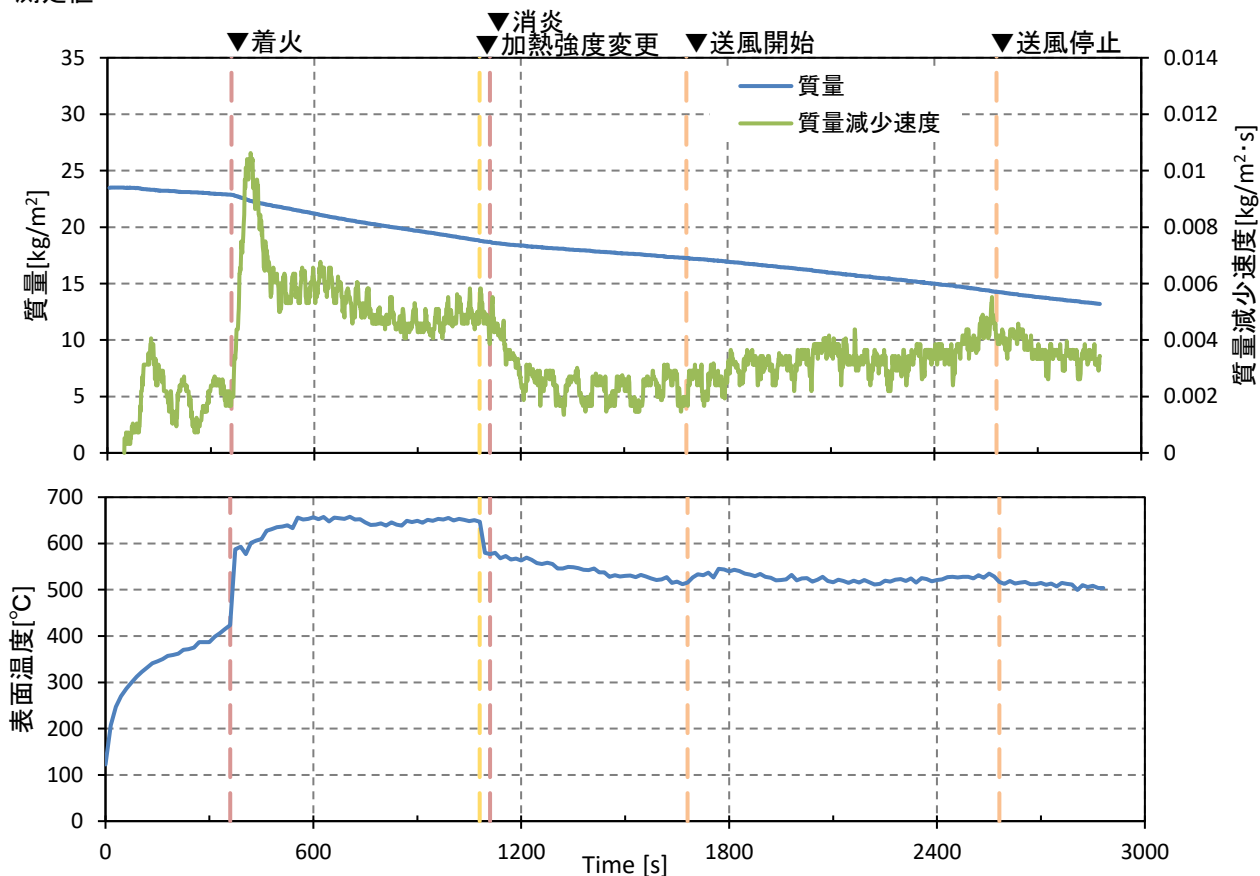
実験	21	Lf-12.7-1	
試験体	初期質量		56.4 g
	初期寸法	厚	47 mm
		幅	48 mm
		奥	50 mm
	初期密度		500.1 kg/m3
	初期含水率		11.5 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	24.0 kW/m2
		②	12.7 kW/m2
	表面気流		0.5 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		1110 s
	加熱強度変更		1080 s
	送風開始		1680 s
	送風停止		2580 s
	実験終了		2880 s

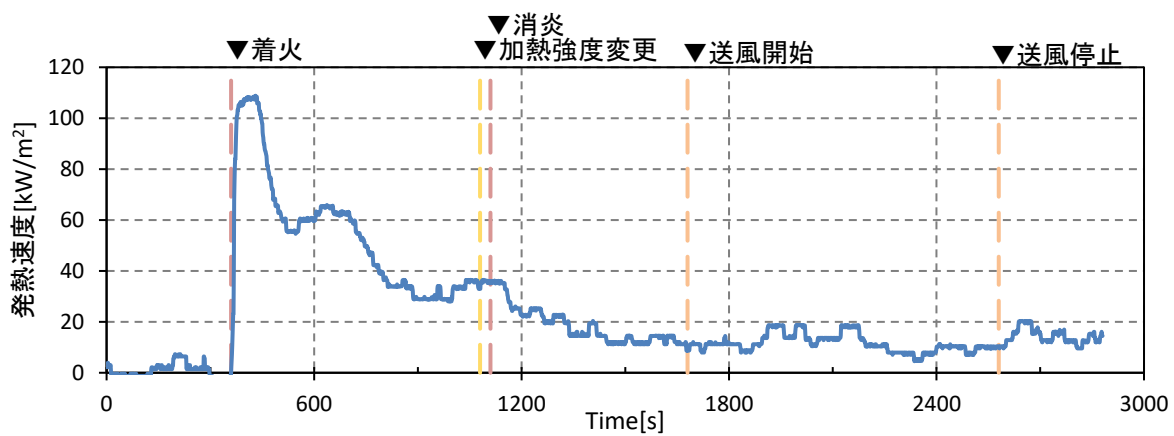


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	24.0 kW/m ²	0 m/s	0.00476 kg/m ² s	0.31761 kg/m ³ s	645.2 °C
	1500 ~ 1650 s	12.7 kW/m ²	0 m/s	0.00231 kg/m ² s	0.15374 kg/m ³ s	525.2 °C
	1800 ~ 2400 s	12.7 kW/m ²	0.5 m/s	0.00325 kg/m ² s	0.21647 kg/m ³ s	523.3 °C
	~ s	kW/m ²	m/s	kg/m ² s	kg/m ³ s	°C

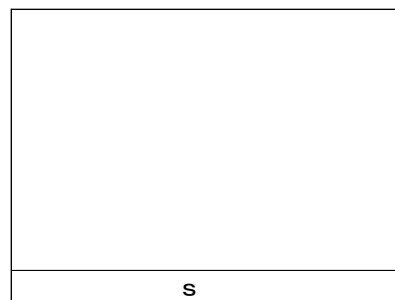
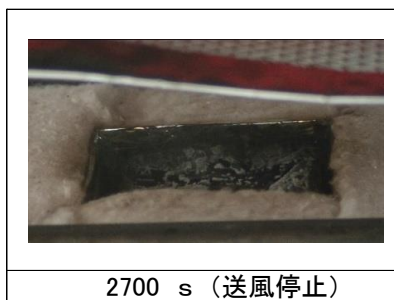
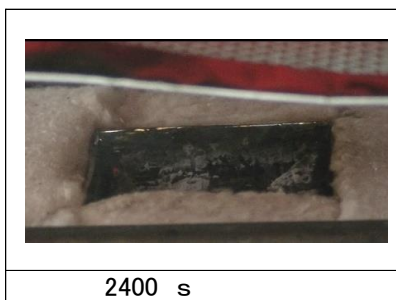
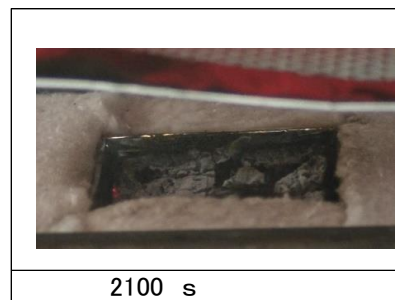
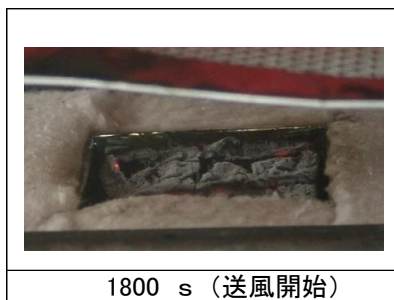
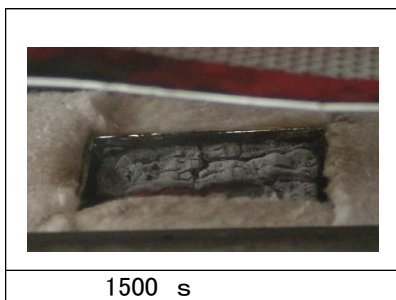
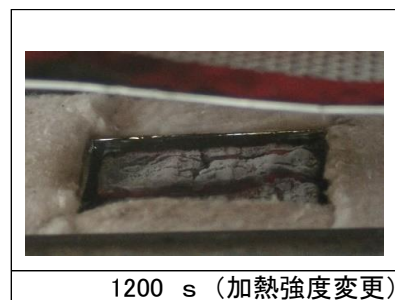
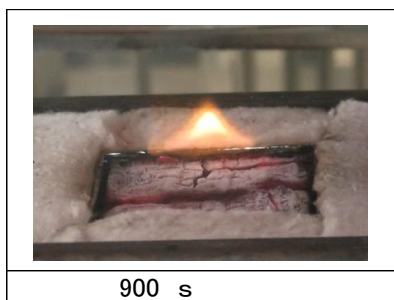
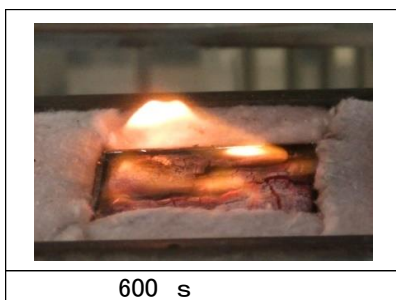
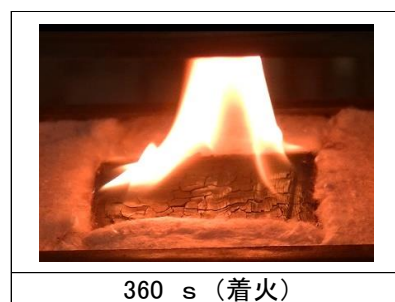
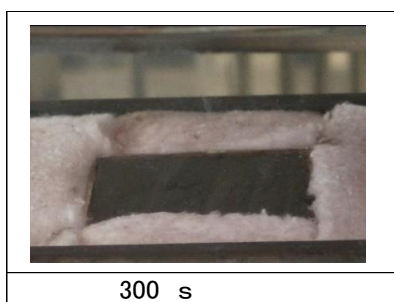
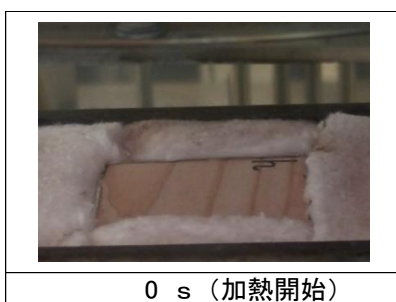
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	10 mm		脆い炭化層	8 mm
	赤熱	18 mm		堅い炭化層	7 mm
	炭化	25 mm		総炭化層	15 mm
	変色	35 mm		健全部	22 mm

測定値

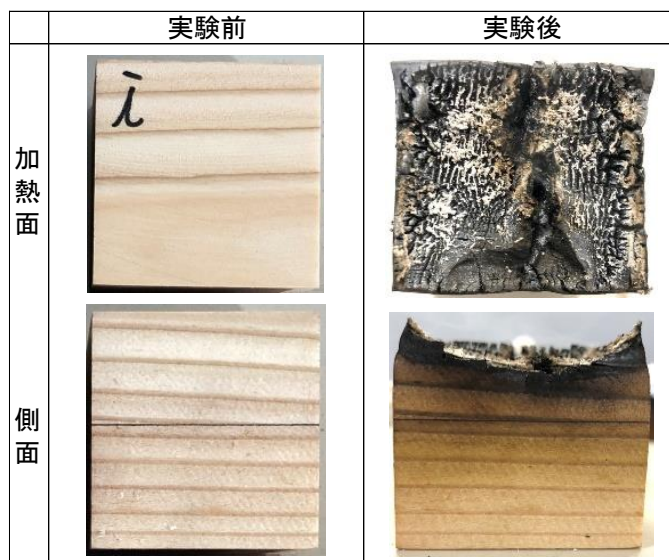




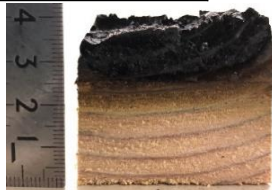
燃焼の様子



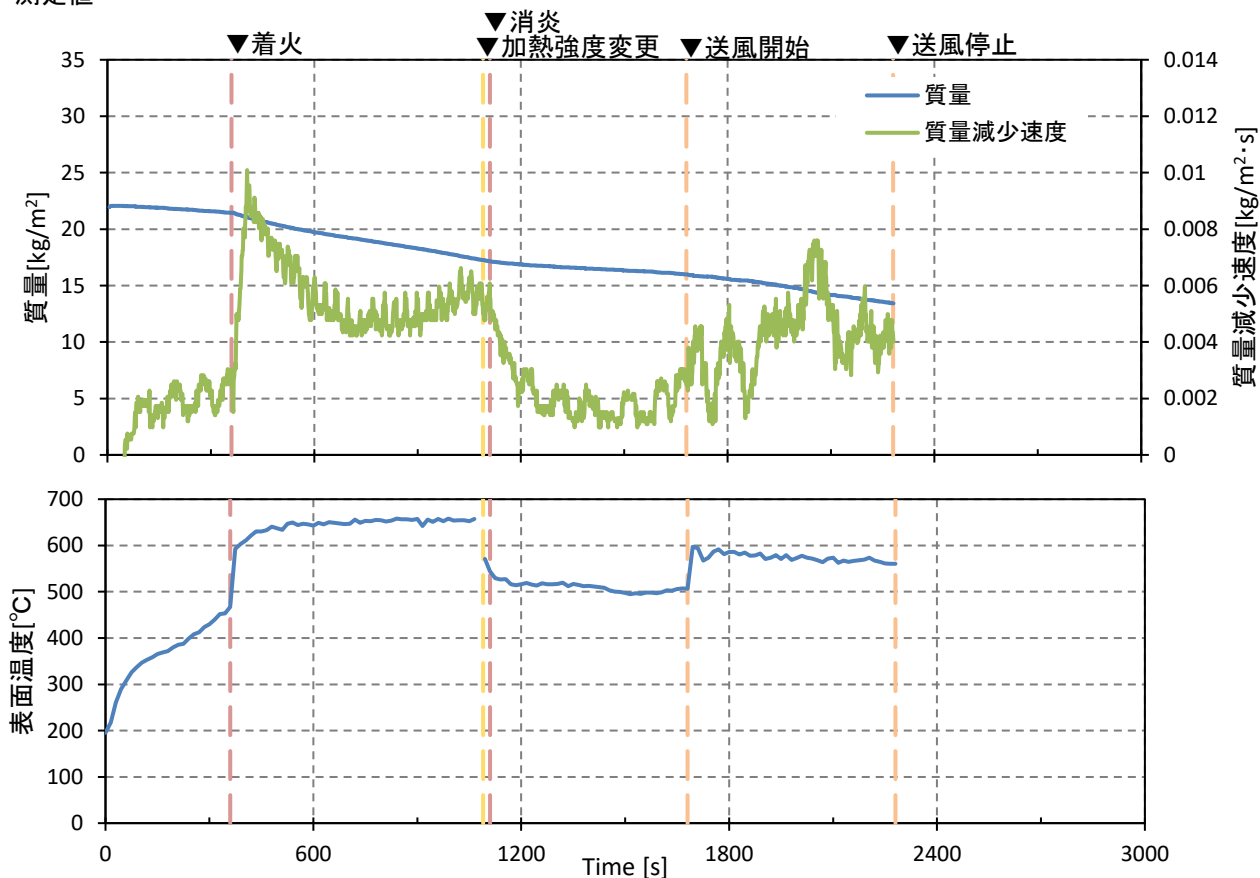
実験	22	Lf-12.7-2	
試験体	初期質量		50.8 g
	初期寸法	厚	47 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		469.3 kg/m3
	初期含水率		11.6 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	24.0 kW/m2
		②	12.7 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		1110 s
	加熱強度変更		1090 s
	送風開始		1680 s
	送風停止		2280 s
	実験終了		2280 s

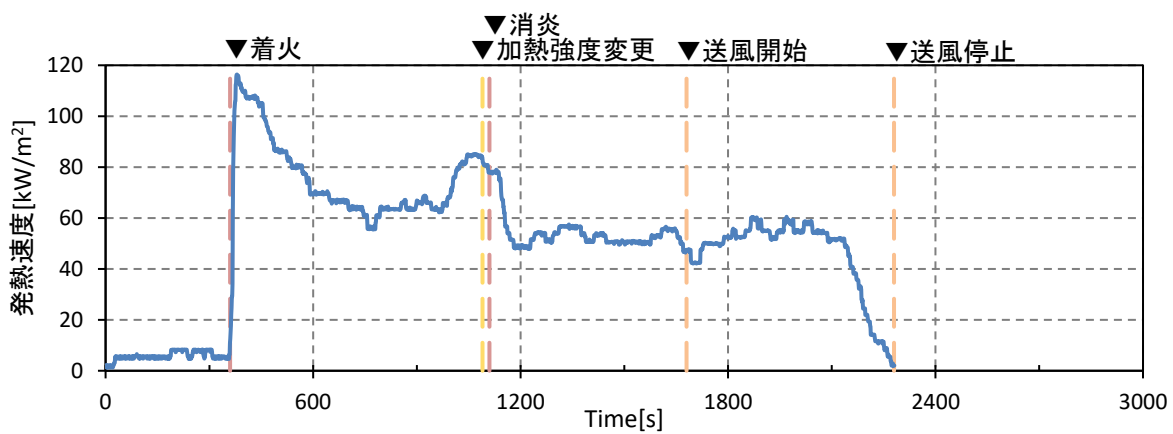


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	24.0 kW/m ²	0 m/s	0.00537 kg/m ² s	0.44710 kg/m ³ s	653.9 °C
	1300 ~ 1650 s	12.7 kW/m ²	0 m/s	0.00170 kg/m ² s	0.14176 kg/m ³ s	505.3 °C
	1900 ~ 2000 s	12.7 kW/m ²	1.1 m/s	0.00463 kg/m ² s	0.38618 kg/m ³ s	573.6 °C
	~ s	kW/m ²	m/s	kg/m ² s	kg/m ³ s	°C

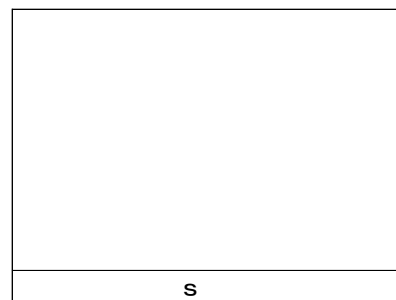
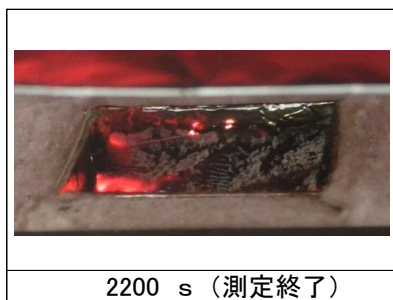
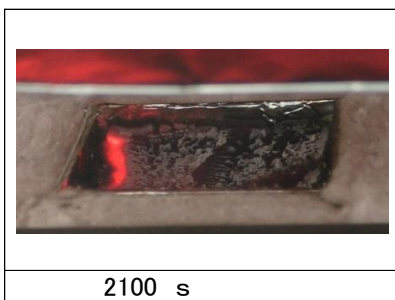
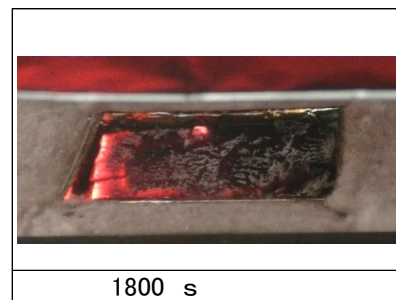
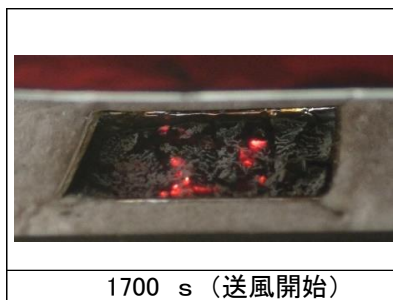
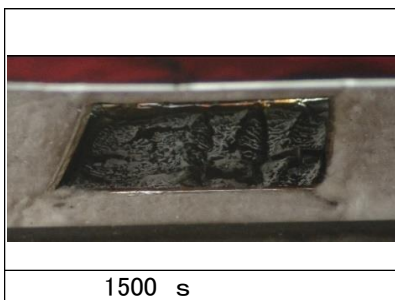
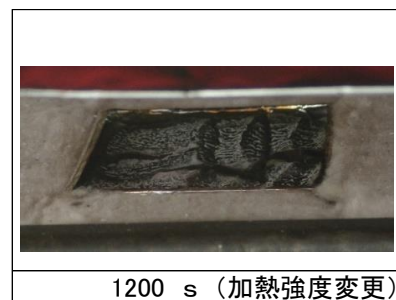
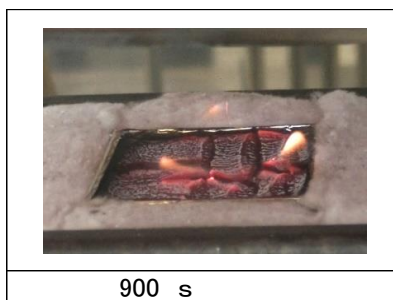
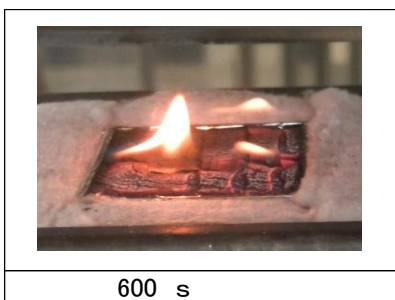
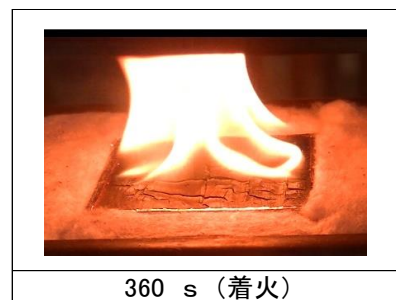
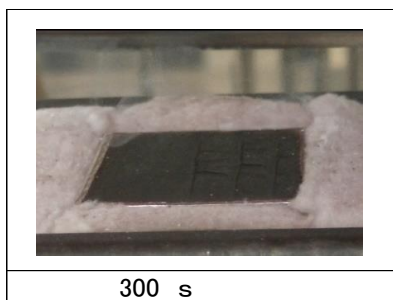
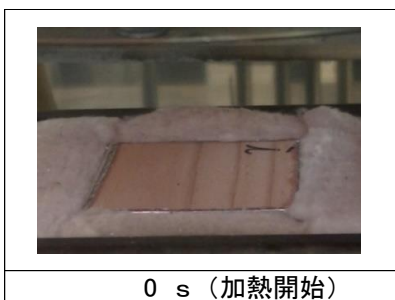
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	10 mm		脆い炭化層	7 mm
	赤熱	17 mm		堅い炭化層	5 mm
	炭化	22 mm		総炭化層	12 mm
	変色	27 mm		健全部	25 mm

測定値

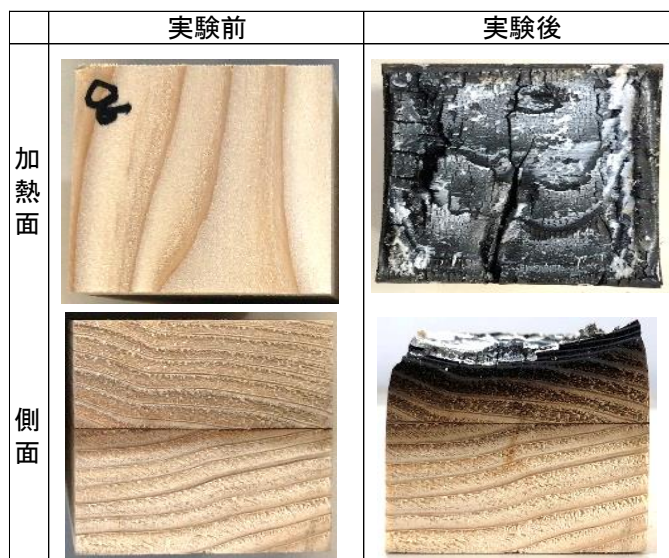




燃焼の様子



実験 23	Cf-4.2-1	
試験体	初期質量	42.2 g
	初期寸法	厚 50 mm
		幅 48 mm
		奥 50 mm
	初期密度	351.7 kg/m ³
	初期含水率	9.9 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 16.0 kW/m ²
		② 4.2 kW/m ²
経過	表面気流	0.5 m/s
	着火	360 s
	消炎	1120 s
	送風開始	1080 s
	加熱強度変更	1260 s
	送風停止	2400 s
	実験終了	3060 s

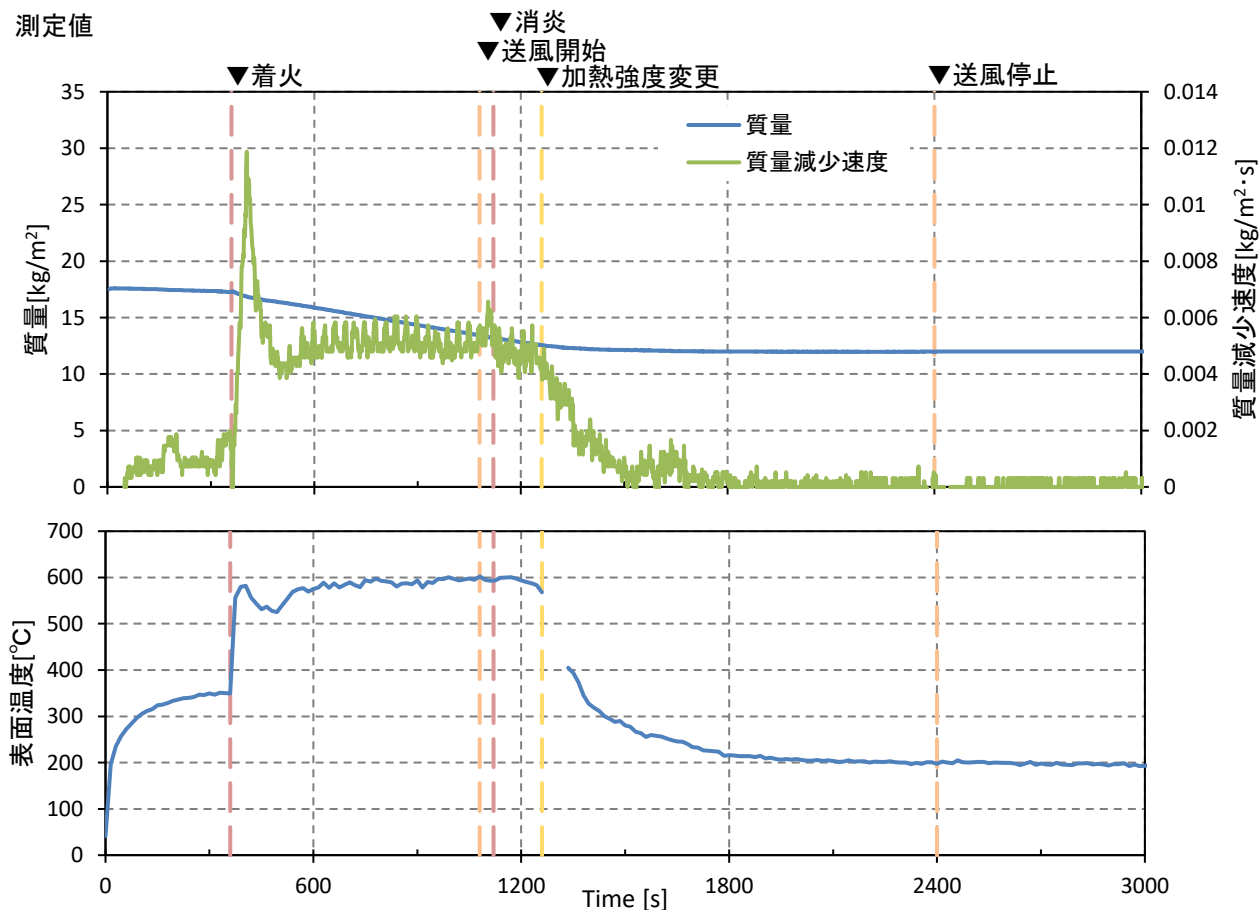


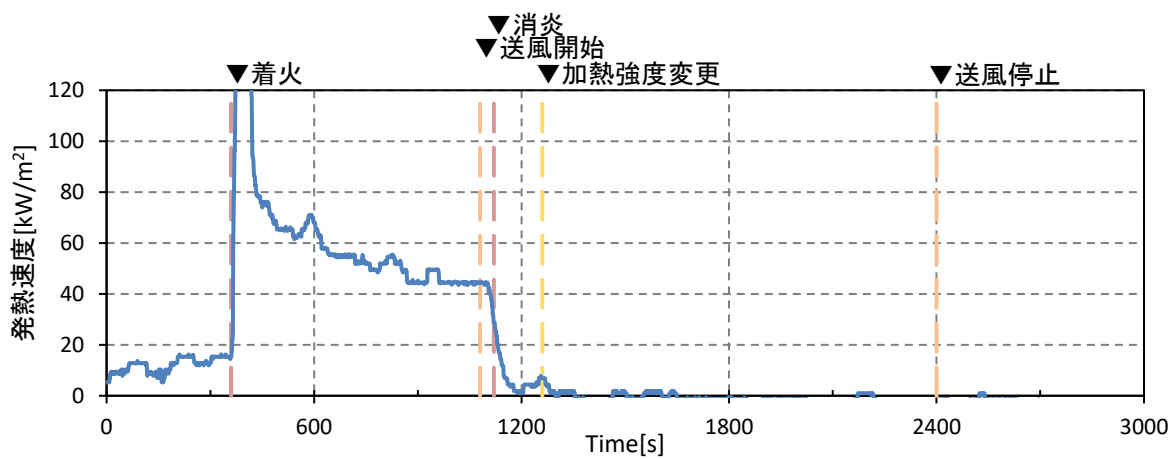
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	800 ~ 1000 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00513 kg/m ² s	0.57018 kg/m ³ s	590.1 °C
	1120 ~ 1250 s	16.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00477 kg/m ² s	0.52980 kg/m ³ s	593.7 °C
	2100 ~ 2350 s	4.2 kW/m ²	0.5 m/s	0.00001 kg/m ² s	0.00138 kg/m ³ s	201.5 °C
	2700 ~ 3000 s	4.2 kW/m ²	0 m/s	0.00001 kg/m ² s	0.00115 kg/m ³ s	196.1 °C

実験終了後試験体切断面

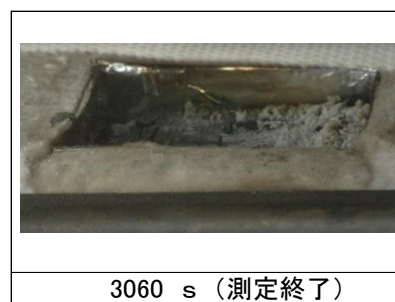
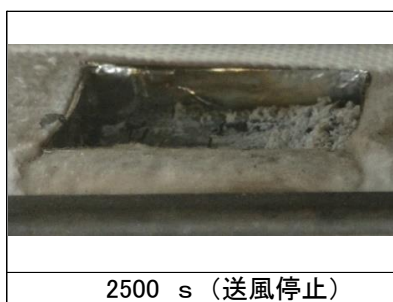
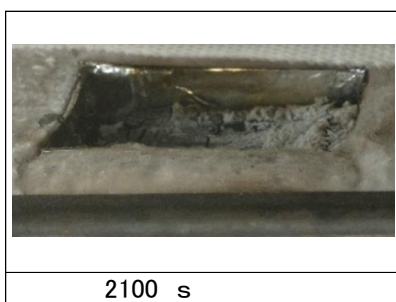
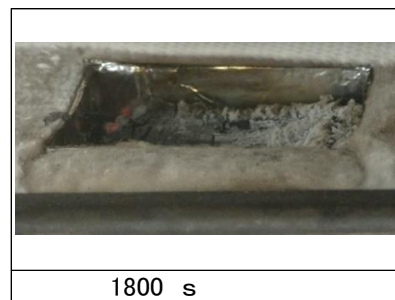
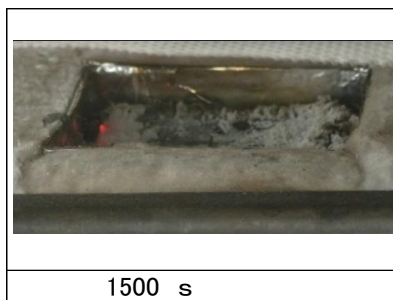
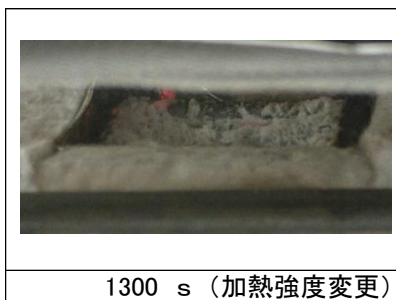
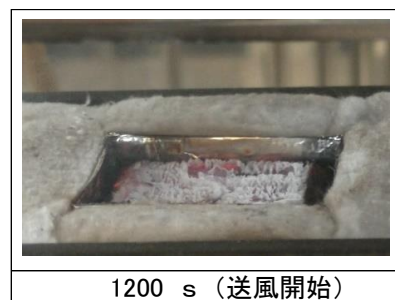
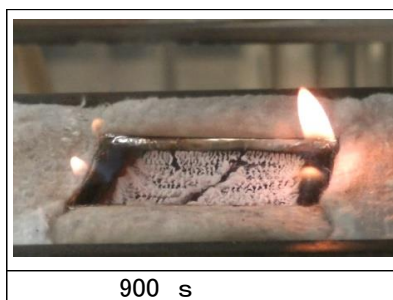
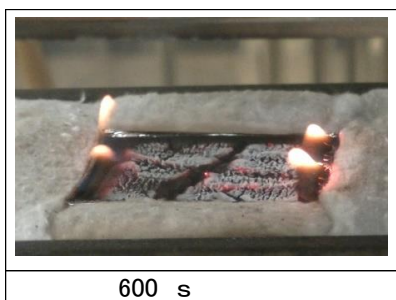
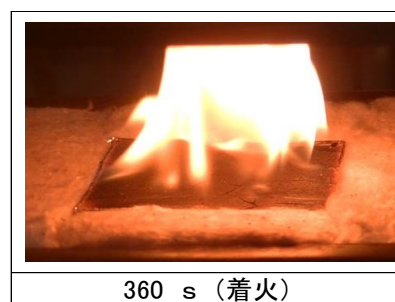
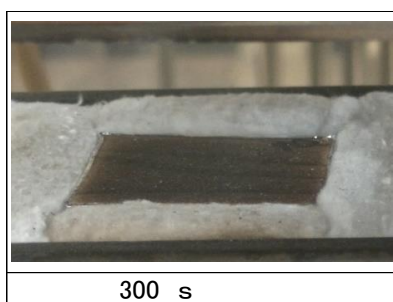
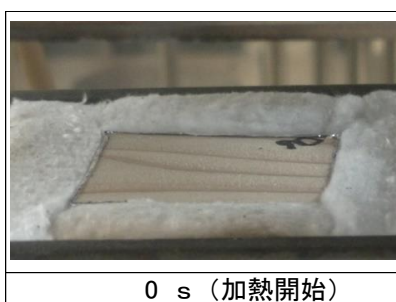


初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	7 mm	脆い炭化層	4 mm
赤熱	11 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	16 mm	総炭化層	9 mm
変色	21 mm	健全部	34 mm

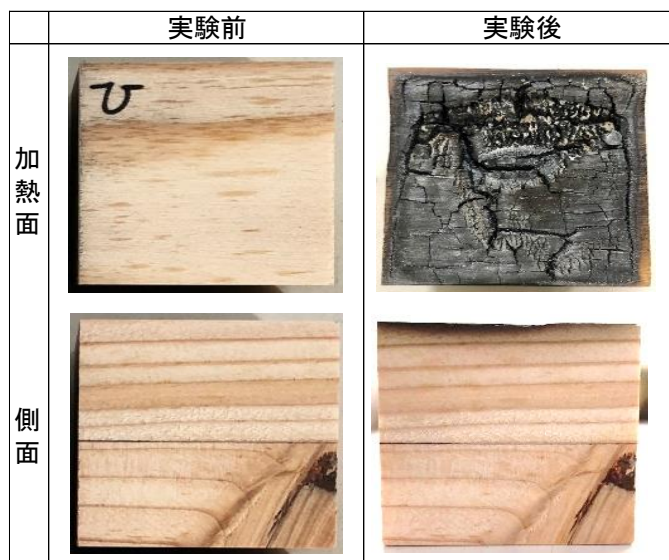




燃焼の様子



実験	24	Cf-4.2-2	
試験体	初期質量		53.2 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		480.6 kg/m3
	初期含水率		12.0 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	4.2 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		510 s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1200 s
	送風停止		1800 s
	実験終了		2100 s



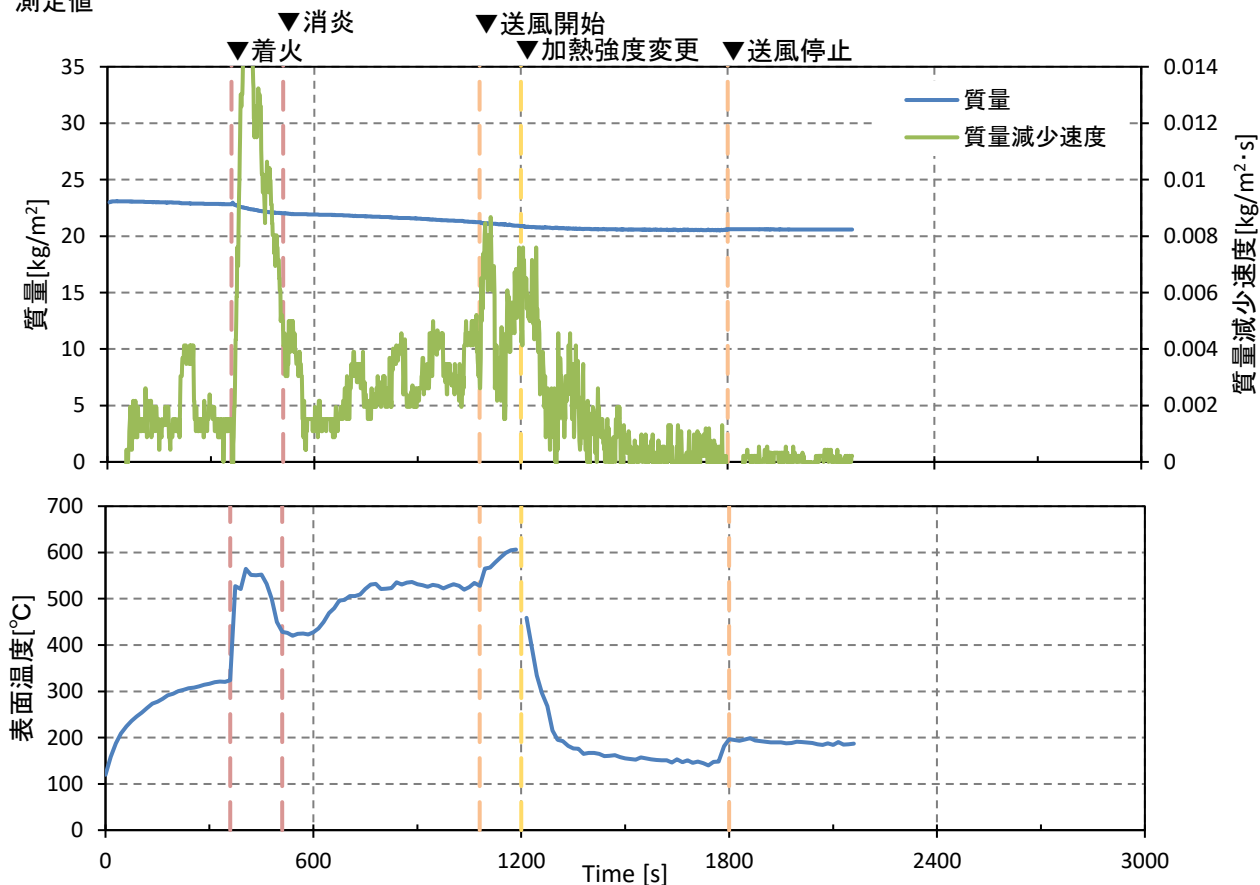
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	700 ~ 1000 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00297 kg/m ² s	0.37094 kg/m ³ s	525.1 °C
	1500 ~ 1700 s	4.2 kW/m ²	1.1 m/s	0.00022 kg/m ² s	0.02740 kg/m ³ s	151.6 °C
	1850 ~ 2050 s	4.2 kW/m ²	0 m/s	0.00011 kg/m ² s	0.01323 kg/m ³ s	190.9 °C
	~ s	kW/m ²	m/s	kg/m ² s	kg/m ³ s	°C

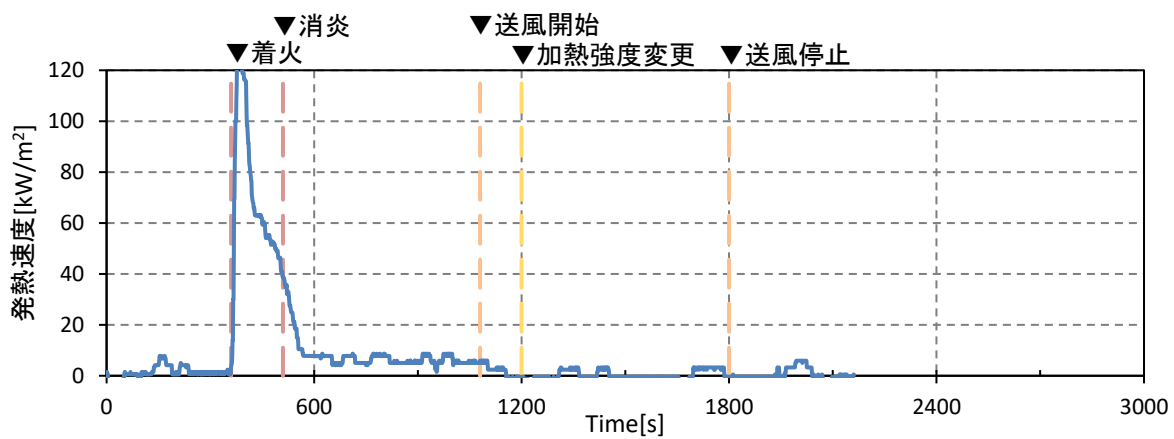
実験終了後試験体切断面



初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	3 mm	脆い炭化層	3 mm
赤熱	6 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	11 mm	総炭化層	8 mm
変色	13 mm	健全部	37 mm

測定値

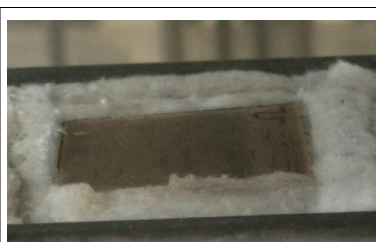




燃焼の様子



0 s (加熱開始)



300 s



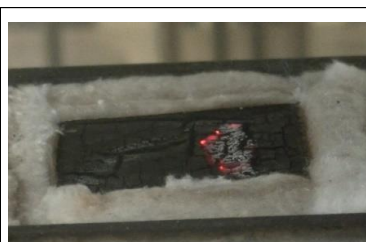
360 s (着火)



480 s



600 s (消炎)



900 s



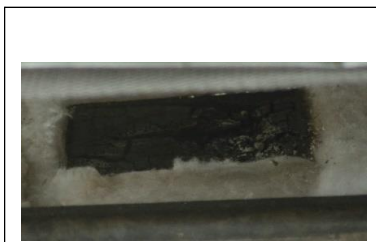
1100 s (送風開始)



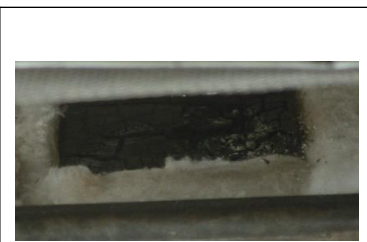
1300 s (加熱強度変更)



1500 s



1700 s

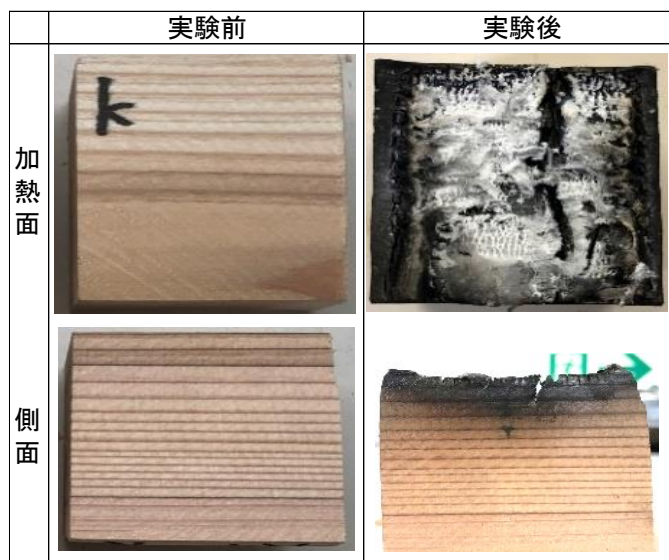


1900 s (送風停止)

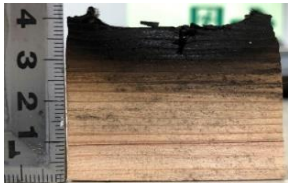


2100 s (測定終了)

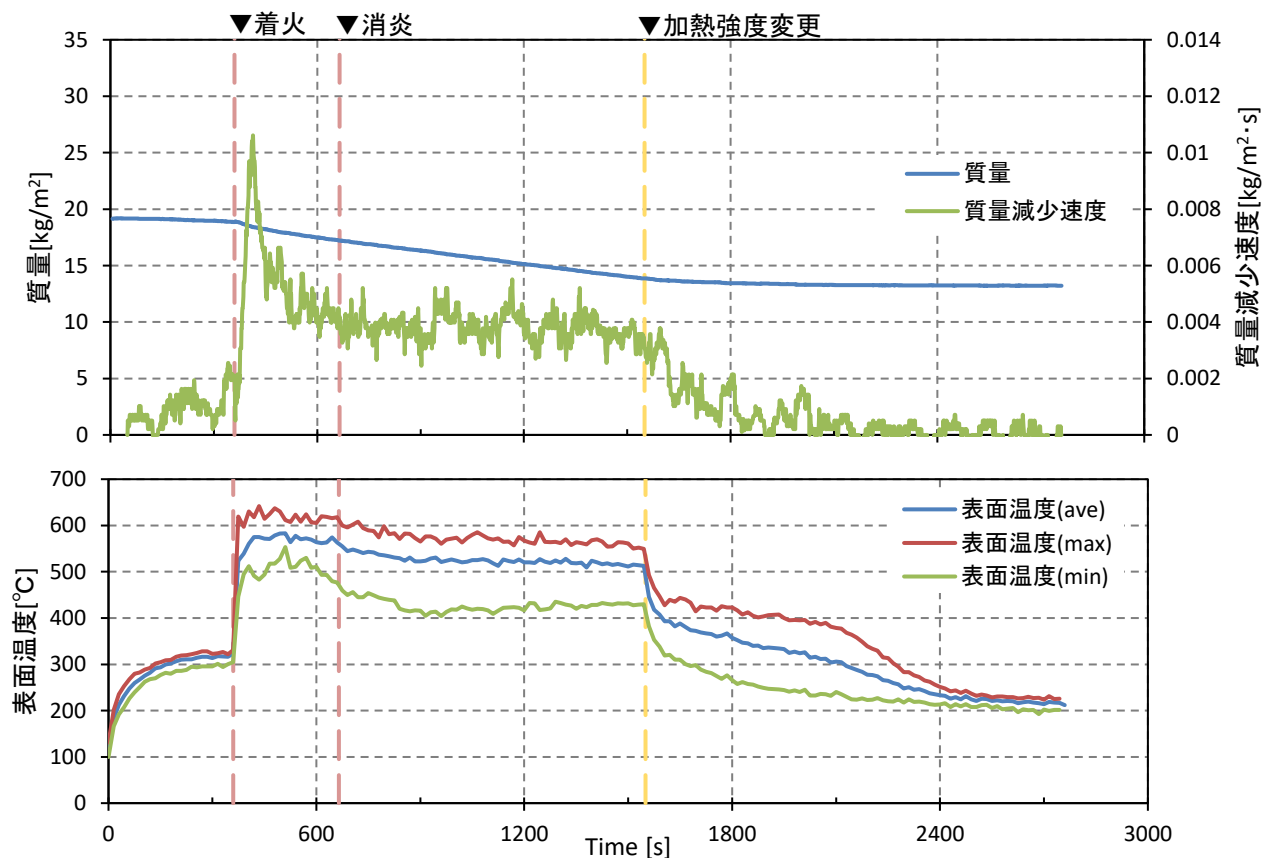
実験	25	C-4.4	
試験体	初期質量		46.9 g
	初期寸法	厚	45 mm
		幅	49 mm
		奥	50 mm
	初期密度		425.8 kg/m3
	初期含水率		14.6 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	4.4 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		665 s
	加熱強度変更		1550 s
	実験終了		2760 s

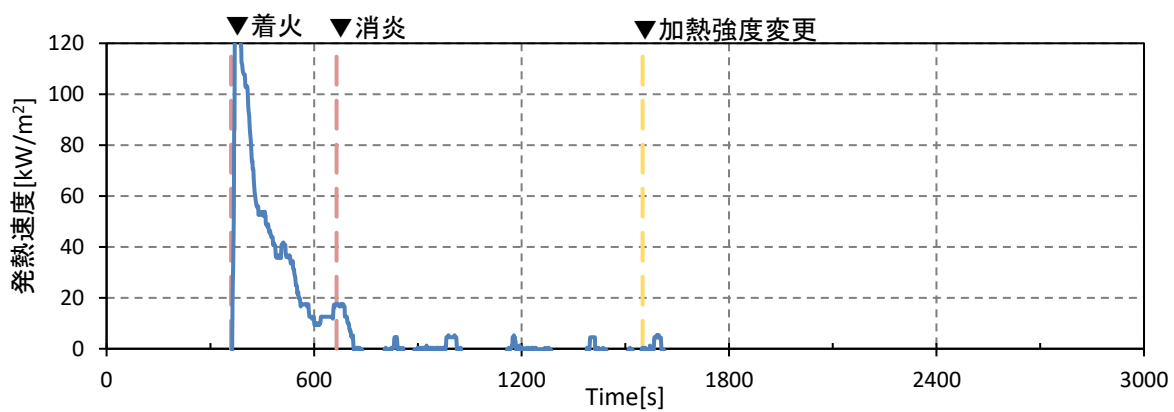


結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1400 s	16.0 kW/m ²	0.00389 kg/m ² s	0.38898 kg/m ³ s	522.4 °C
	2400 ~ 2700 s	4.4 kW/m ²	0.00006 kg/m ² s	0.00554 kg/m ³ s	221.7 °C

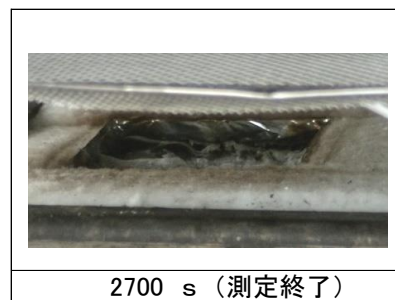
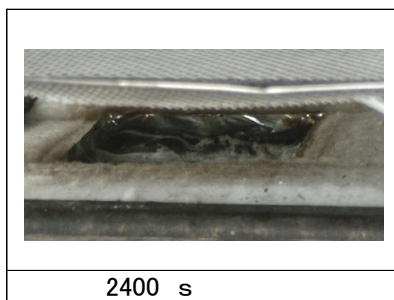
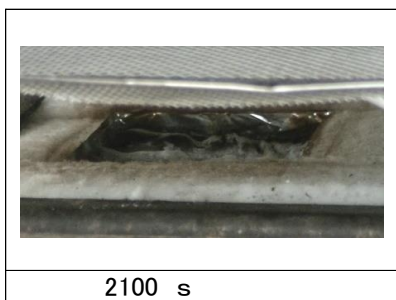
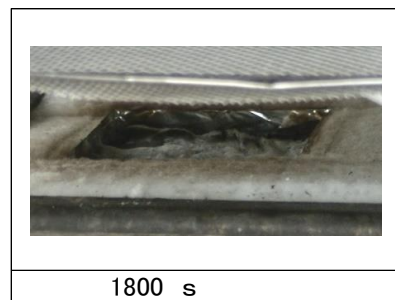
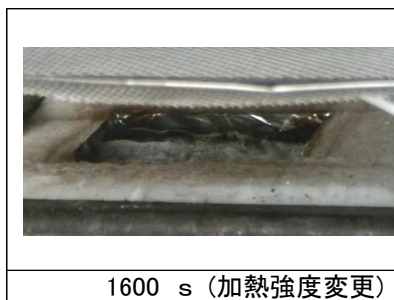
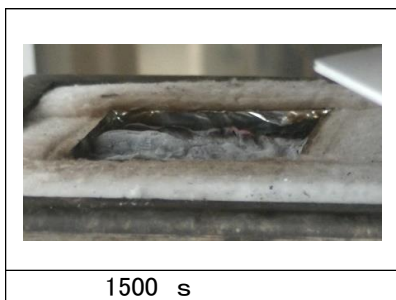
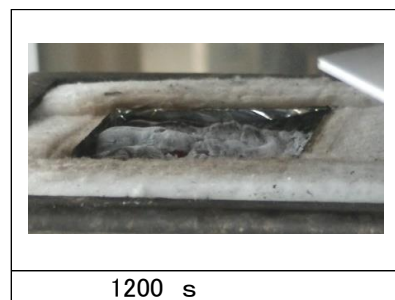
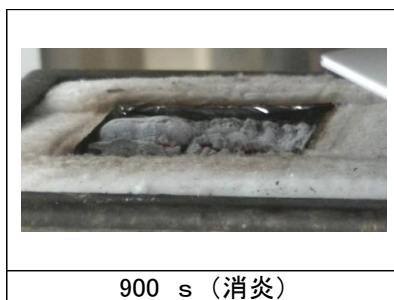
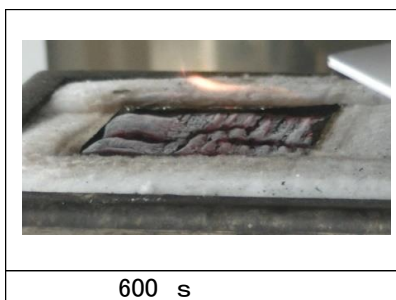
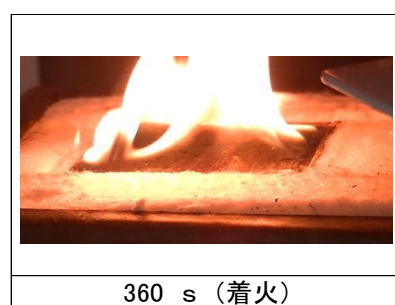
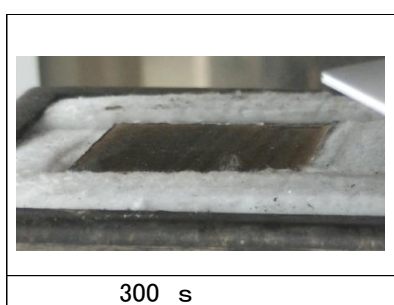
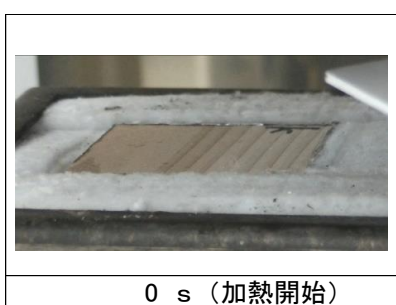
実験終了後試験体切断面			初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	6 mm	脆い炭化層		5 mm	
	赤熱	11 mm	堅い炭化層		5 mm	
	炭化	16 mm	総炭化層		10 mm	
	変色	21 mm	健全部		29 mm	

測定値

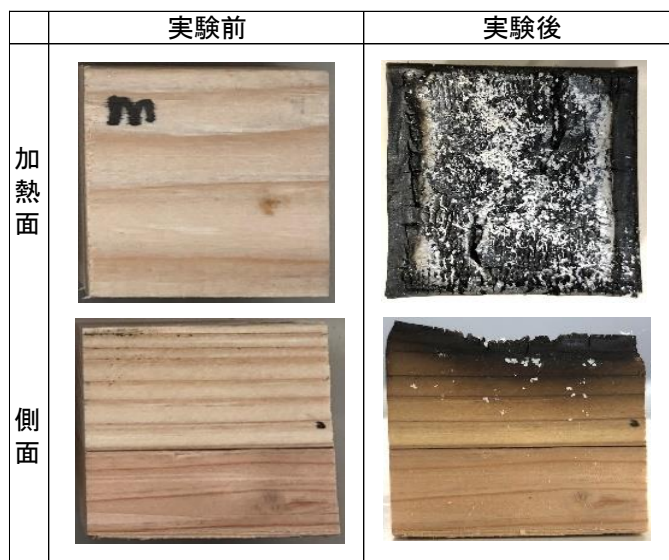




燃焼の様子



実験	26	C-6.0-1	
試験体	初期質量		42.2 g
	初期寸法	厚	46 mm
		幅	50 mm
		奥	47 mm
	初期密度		390.7 kg/m3
	初期含水率		12.3 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		1270 s
	加熱強度変更		1245 s
	実験終了		3060 s



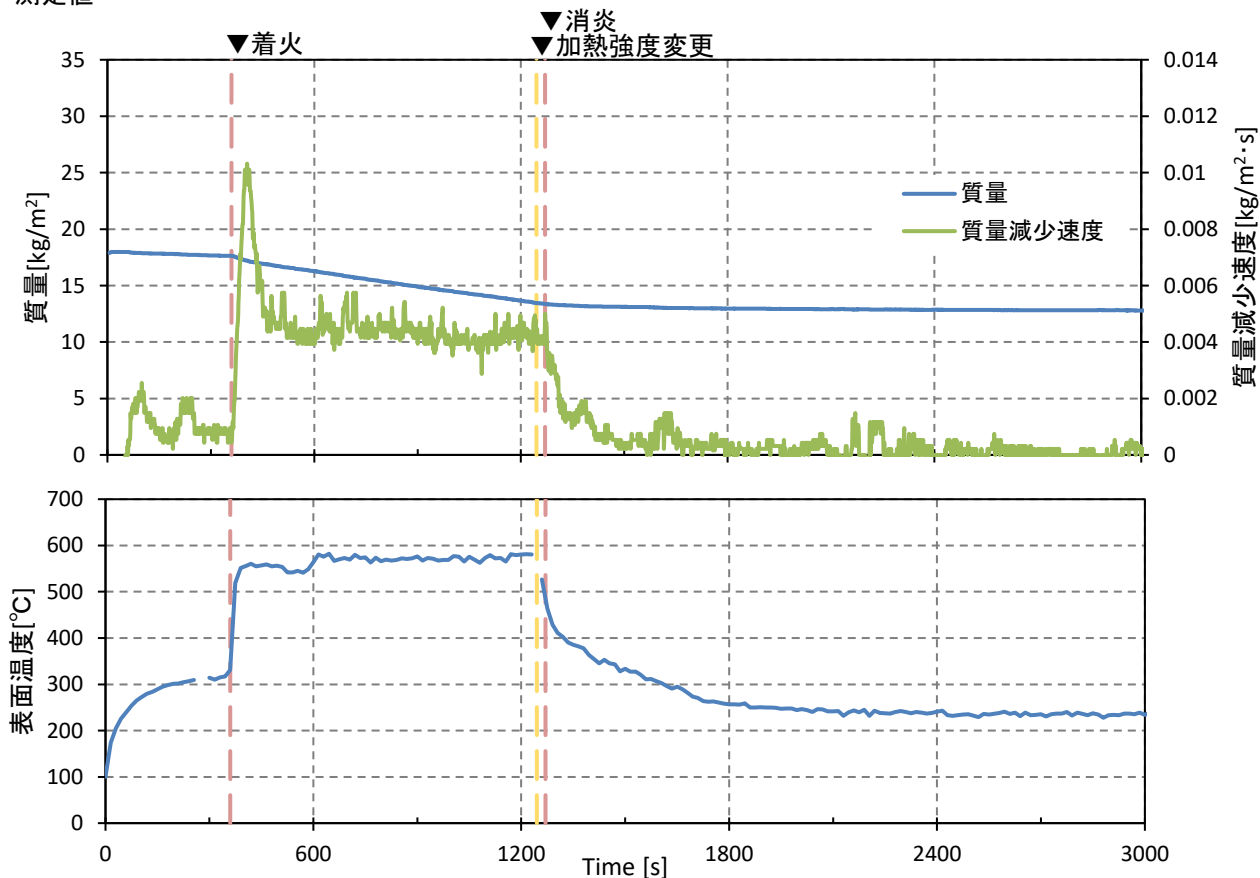
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1200 s	16.0 kW/m ²	0.00416 kg/m ² s	0.46231 kg/m ³ s	572.5 °C
	2400 ~ 3000 s	6.0 kW/m ²	0.00008 kg/m ² s	0.00863 kg/m ³ s	235.5 °C

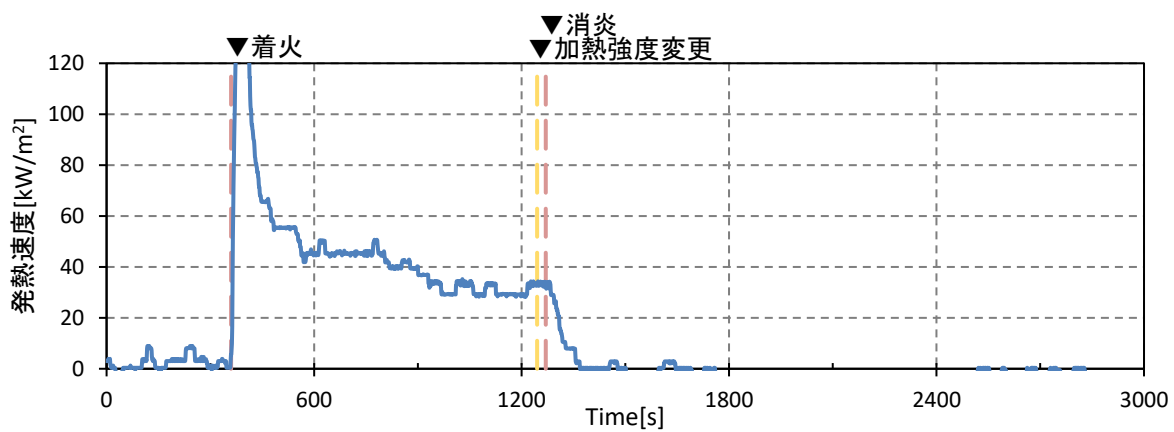
実験終了後試験体切断面



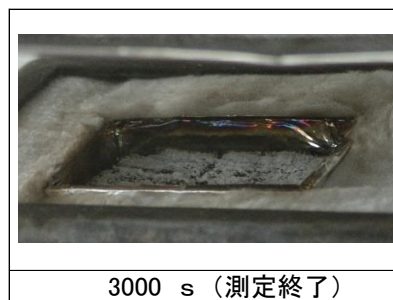
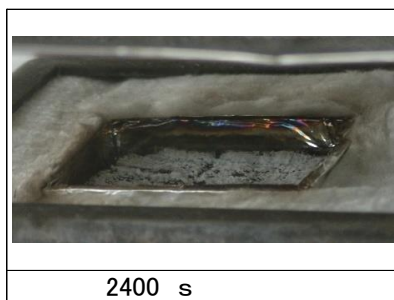
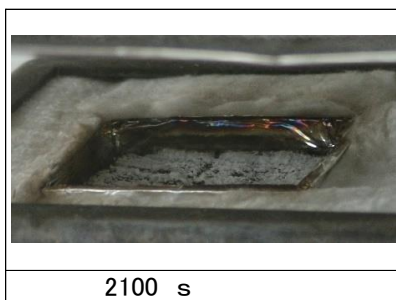
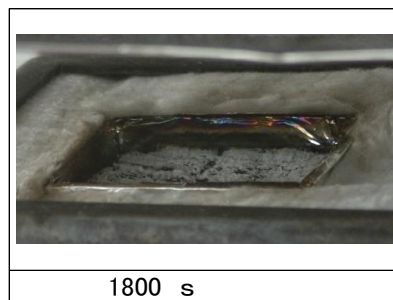
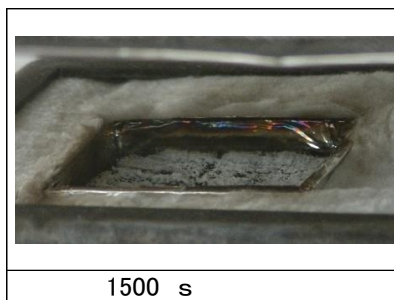
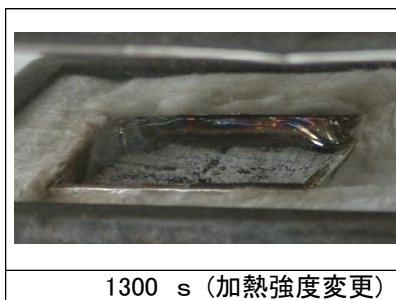
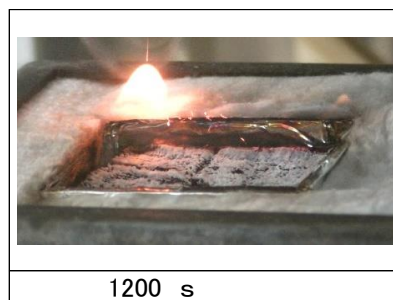
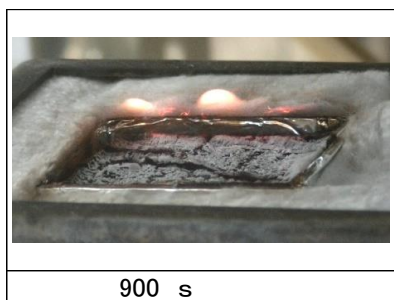
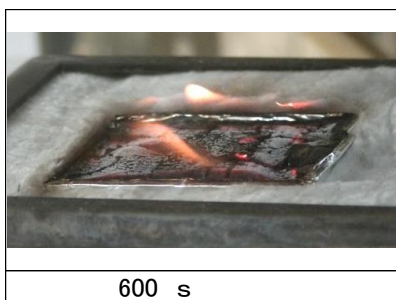
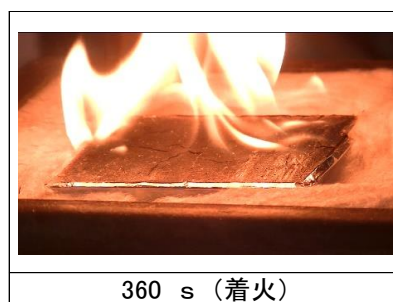
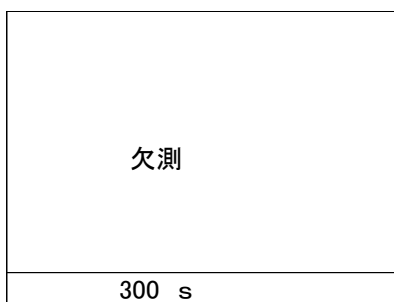
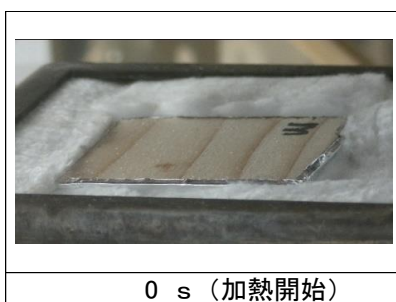
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	5 mm	脆い炭化層	5 mm
赤熱	10 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	14 mm	総炭化層	9 mm
変色	18 mm	健全部	32 mm

測定値

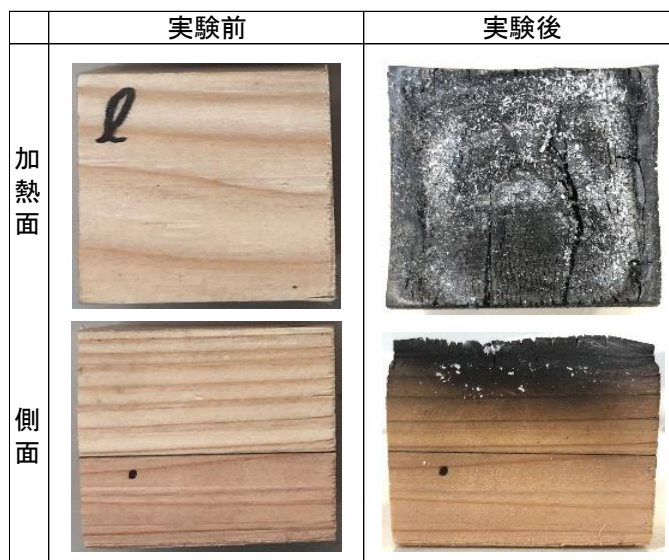




燃焼の様子

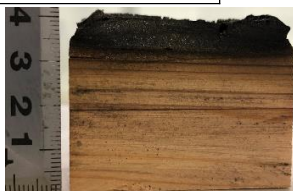


実験	27	C-6.0-2	
試験体	初期質量		43.3 g
	初期寸法	厚	47 mm
		幅	50 mm
		奥	50 mm
	初期密度		368.2 kg/m3
	初期含水率		10.9 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面に堆積する灰を都度取り除いた		
経過	着火		360 s
	消炎		1330 s
	加熱強度変更		1250 s
	実験終了		2460 s
	灰を除去した時刻		1360, 1590



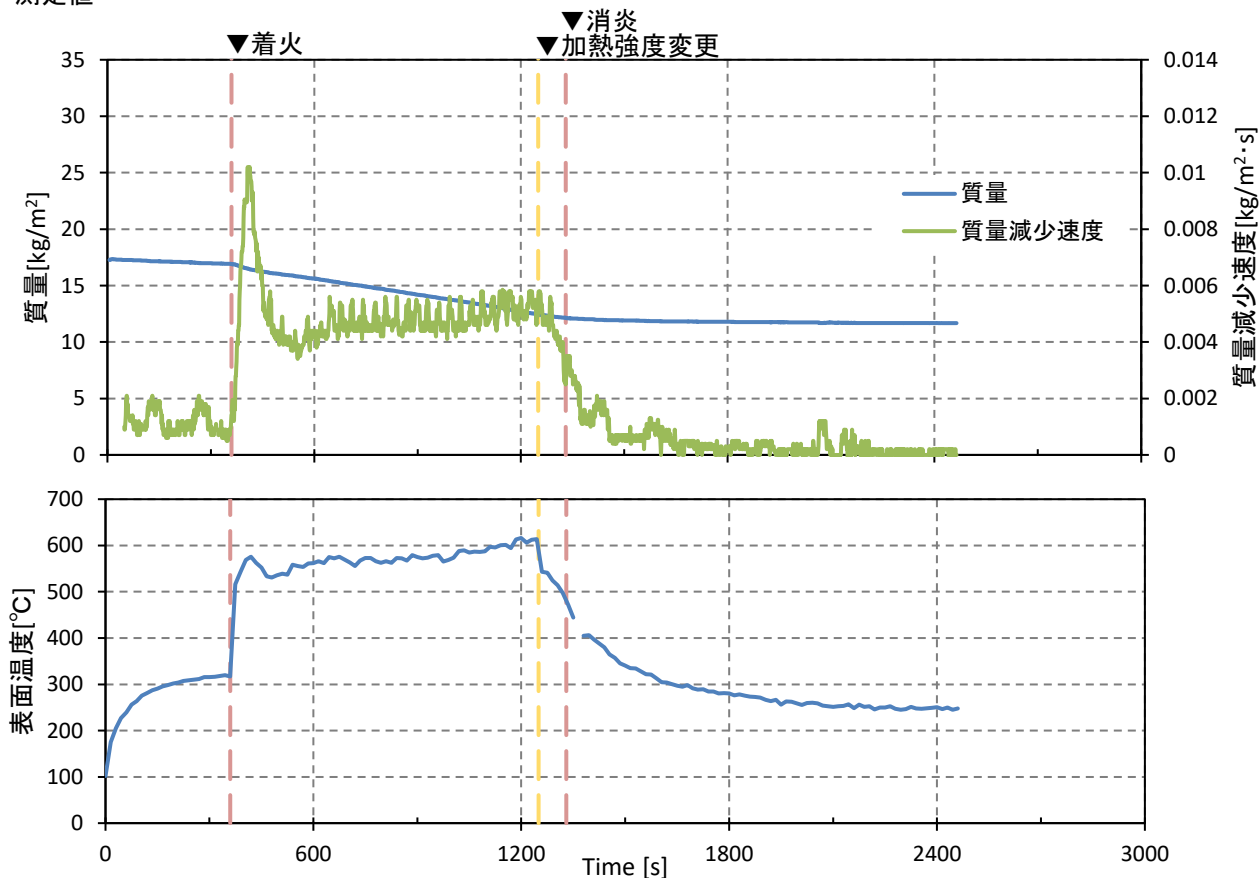
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	700 ~ 1200 s	16.0 kW/m ²	0.00484 kg/m ² s	0.60561 kg/m ³ s	579.6 °C
	2100 ~ 2400 s	6.0 kW/m ²	0.00009 kg/m ² s	0.01138 kg/m ³ s	249.7 °C

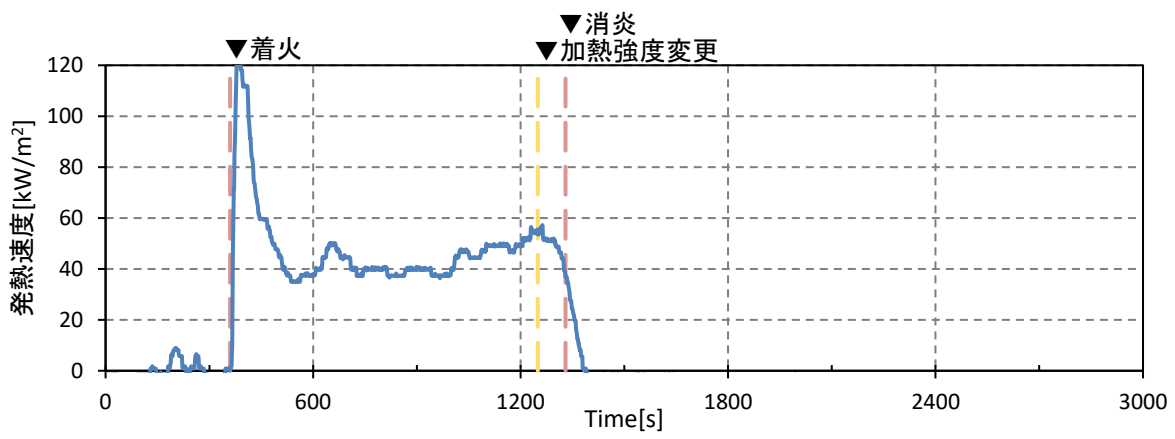
実験終了後試験体切断面



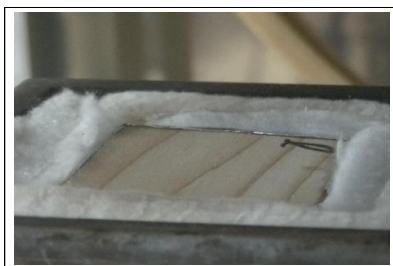
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	6 mm	脆い炭化層	3 mm
赤熱	9 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	14 mm	総炭化層	8 mm
変色	20 mm	健全部	33 mm

測定値

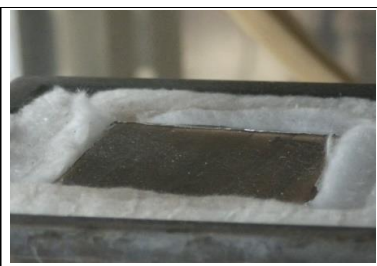




燃焼の様子



0 s (加熱開始)



300 s



360 s (着火)



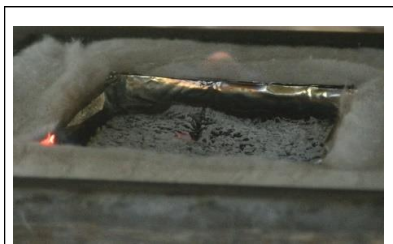
600 s



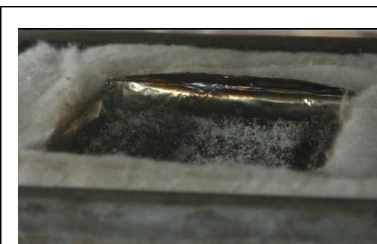
900 s



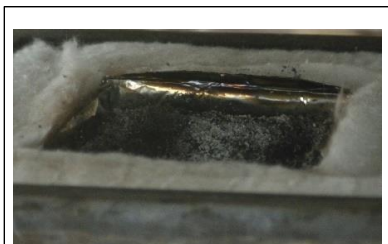
1200 s



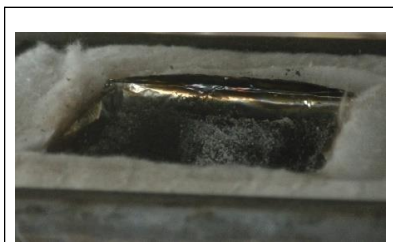
1300 s (加熱強度変更)



1500 s (消炎)



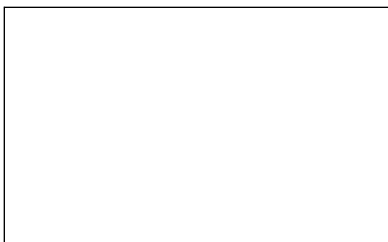
1800 s



2100 s

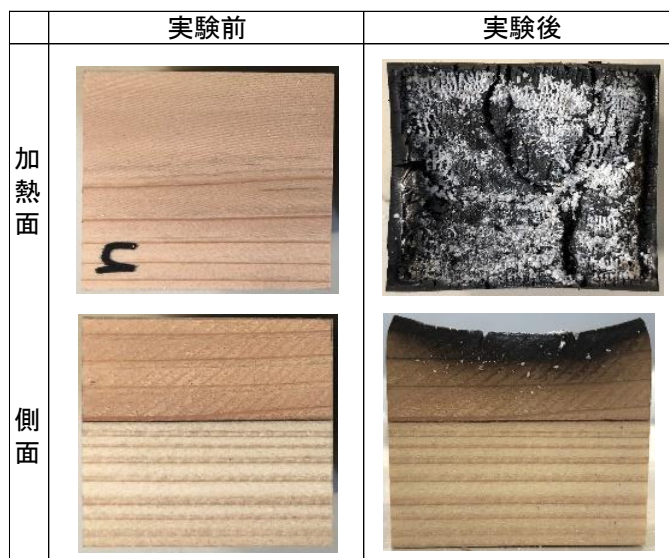


2400 s (測定終了)



s

実験	28	C-6.0-3	
試験体	初期質量		44.6 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	50 mm
		奥	49 mm
	初期密度		364.2 kg/m3
	初期含水率		11.3 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面に堆積する灰を都度取り除いた		
経過	着火		360 s
	消炎		715 s
	加熱強度変更		1250 s
	実験終了		3060 s
	灰を除去した時刻		735, 850, 1100 1290.



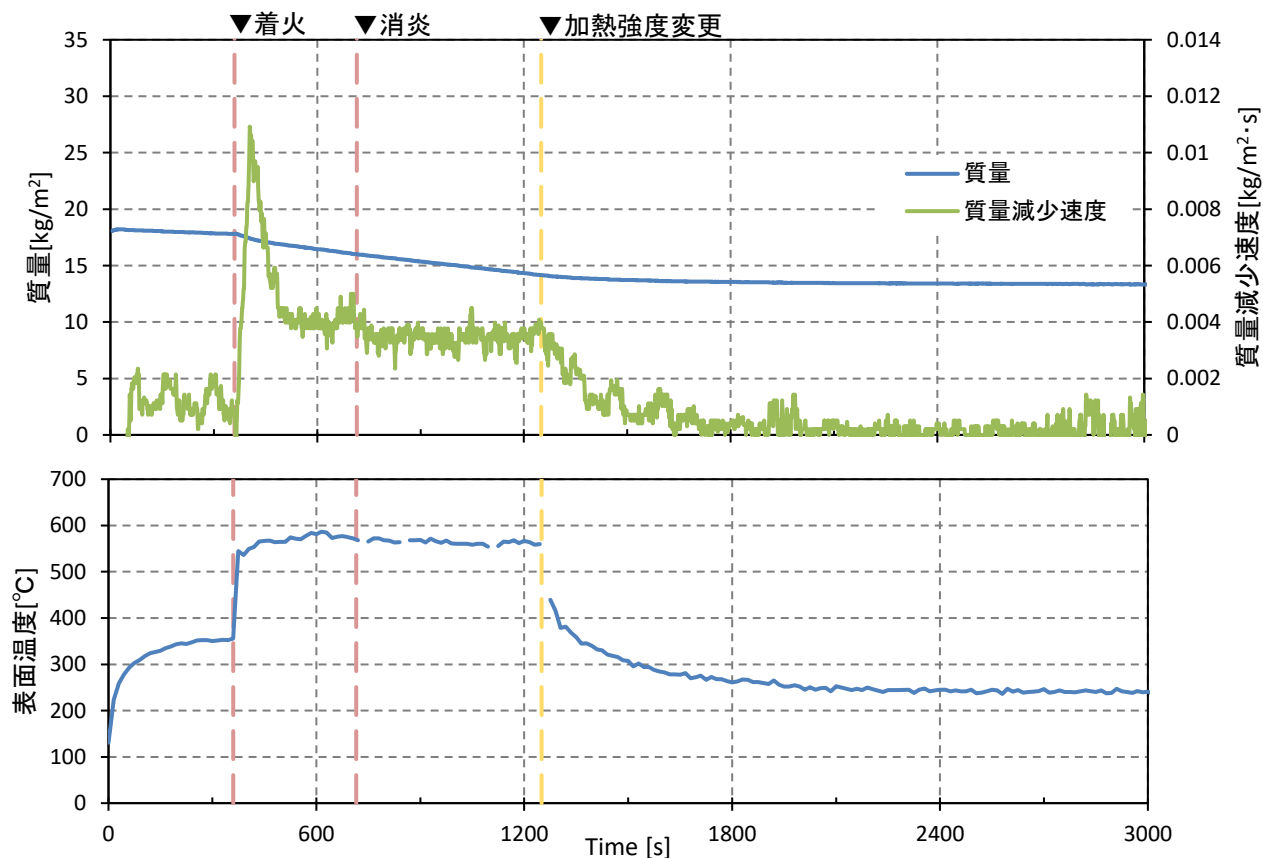
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	800 ~ 1200 s	16.0 kW/m ²	0.00344 kg/m ² s	0.34431 kg/m ³ s	563.5 °C
	2400 ~ 2700 s	6.0 kW/m ²	0.00011 kg/m ² s	0.01126 kg/m ³ s	242.2 °C

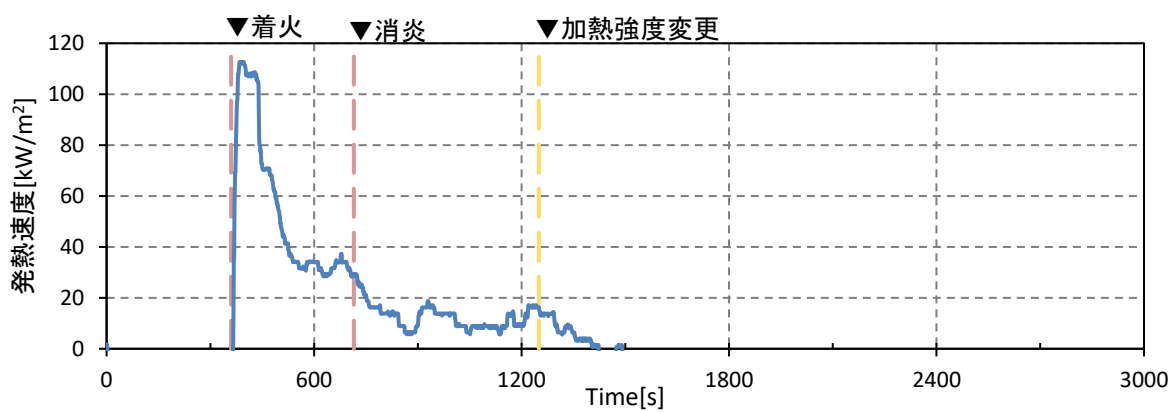
実験終了後試験体切断面



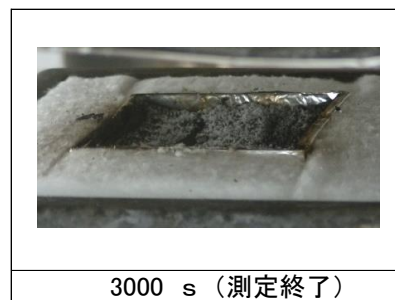
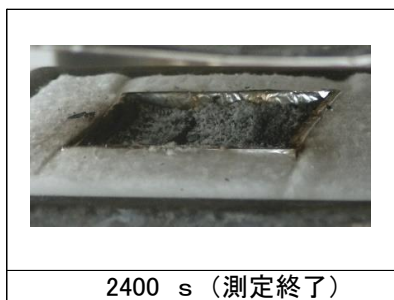
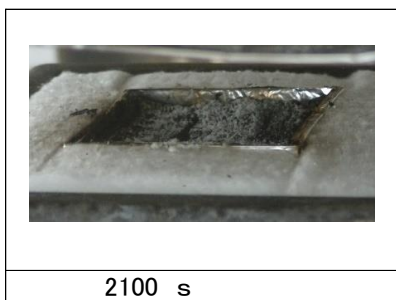
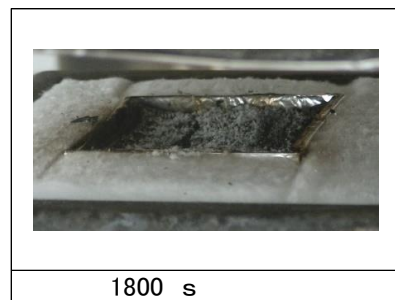
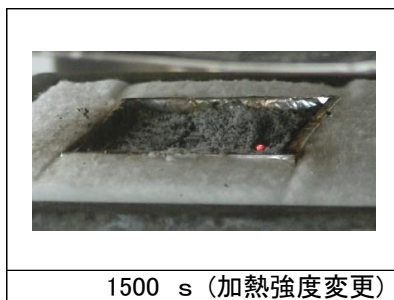
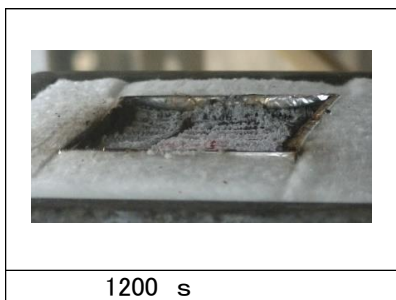
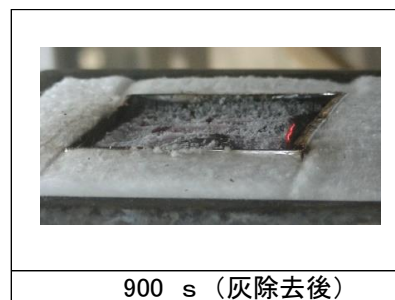
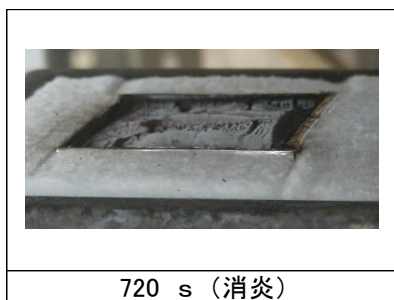
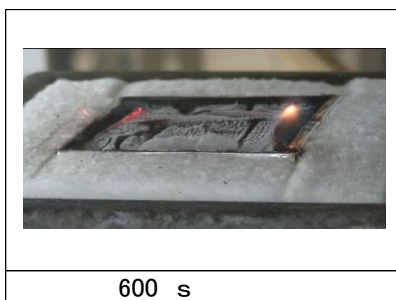
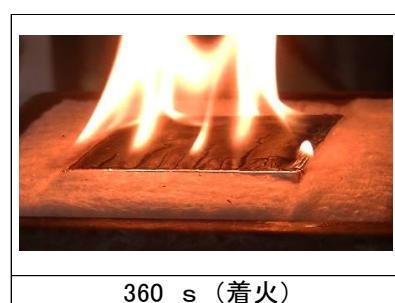
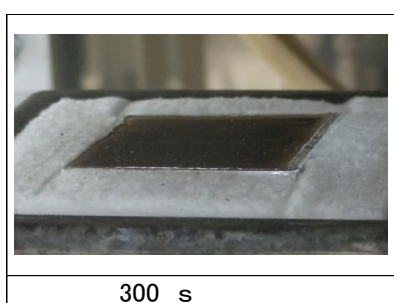
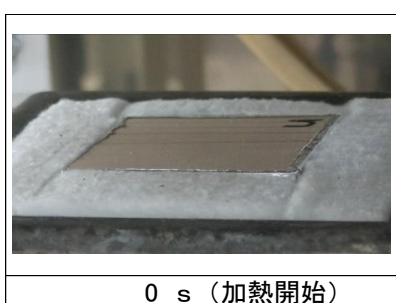
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	5 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	12 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	15 mm	総炭化層	10 mm
変色	21 mm	健全部	35 mm

測定値

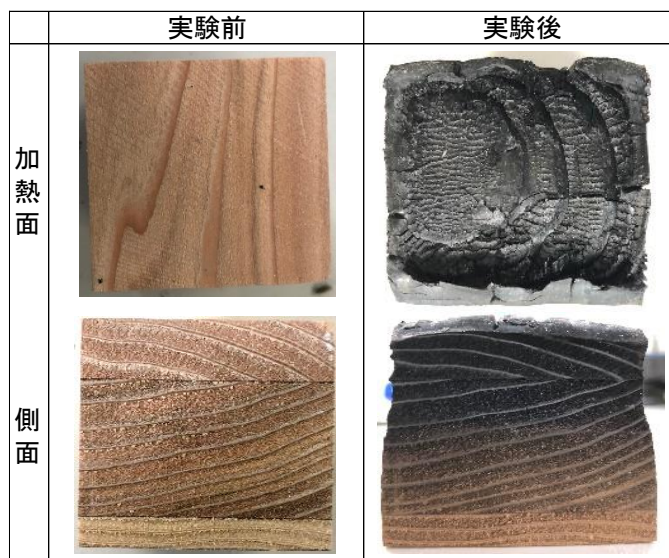




燃烧の様子



実験	29	C-6.0-4
試験体	初期質量	41.7 g
	初期寸法	厚 47 mm
		幅 48 mm
		奥 50 mm
	初期密度	369.5 kg/m ³
	初期含水率	11.3 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 20.8→16 kW/m ²
		② 6.0 kW/m ²
経過	着火	360 s
	消炎	1600 s
	予備加熱強度変更	1410 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	2760 s
		250s頃から着火前に赤熱開始



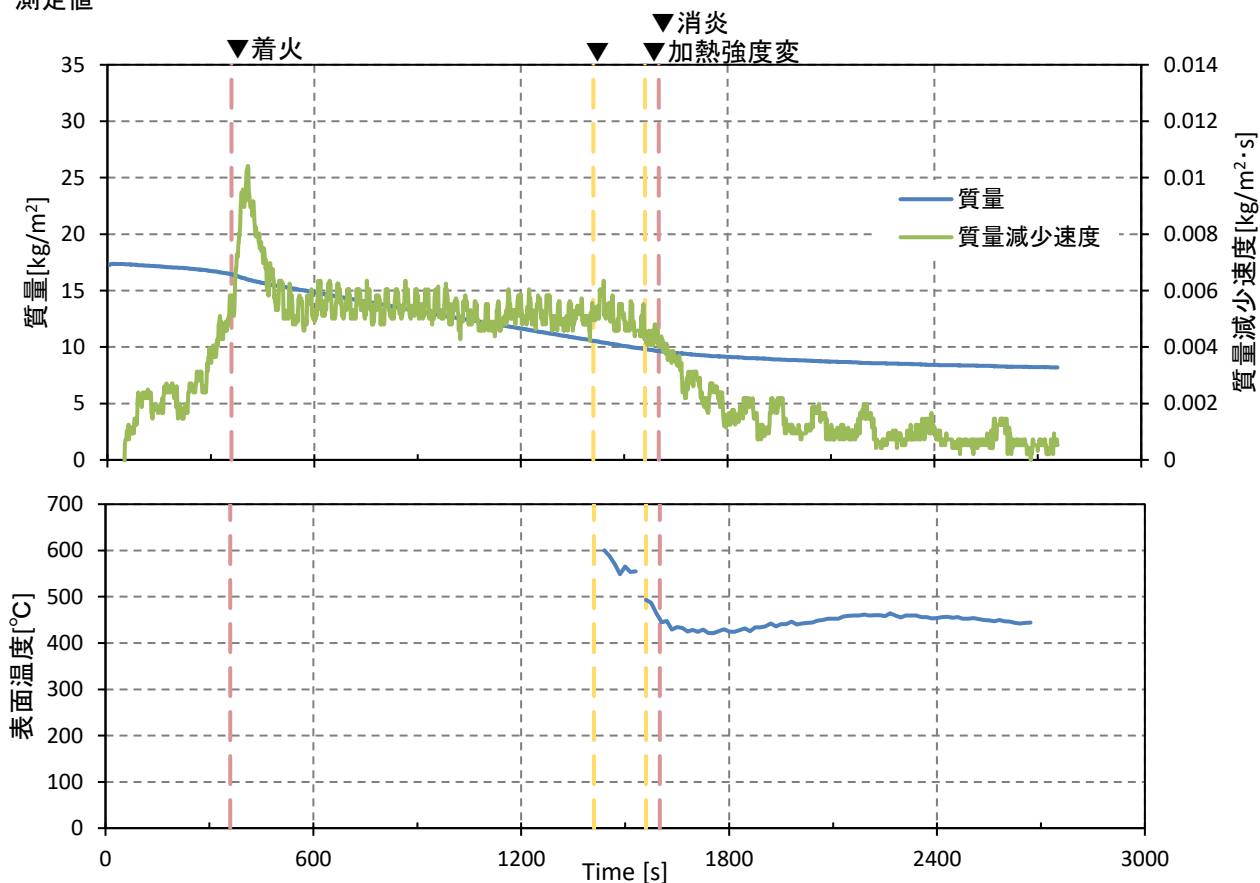
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1400 s	20.8 kW/m ²	0.00512 kg/m ² s	0.24403 kg/m ³ s	°C
	2400 ~ 2700 s	6.0 kW/m ²	0.00068 kg/m ² s	0.03218 kg/m ³ s	449.6 °C

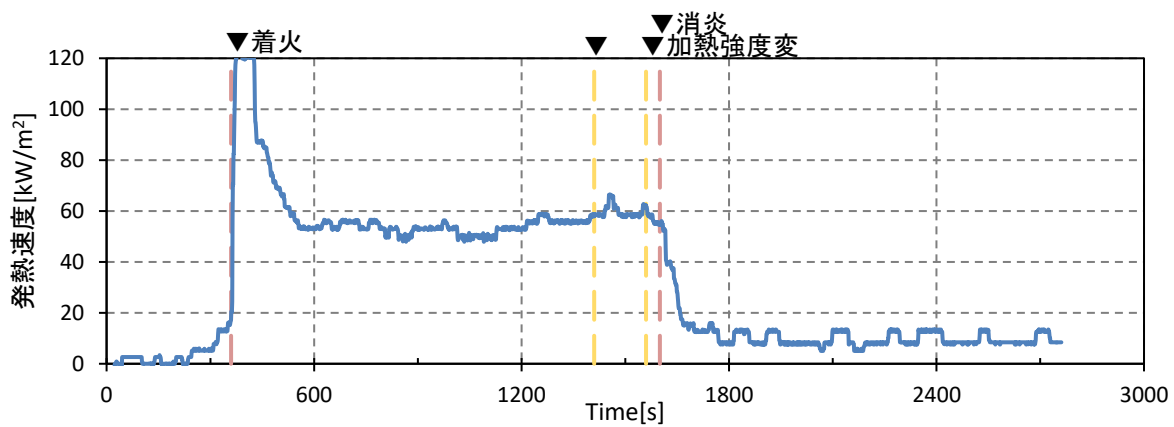
実験終了後試験体切断面



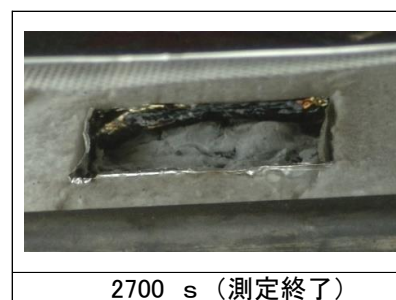
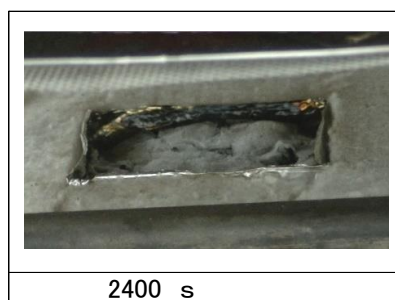
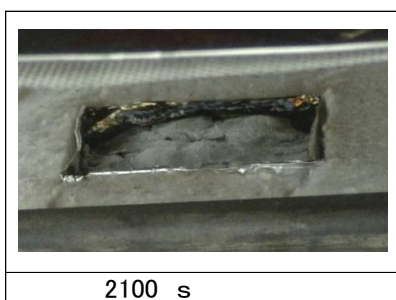
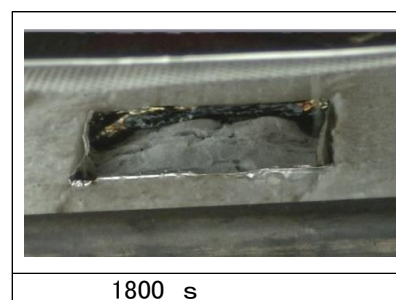
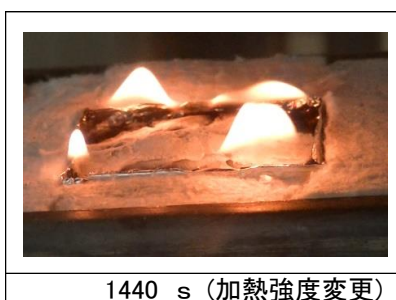
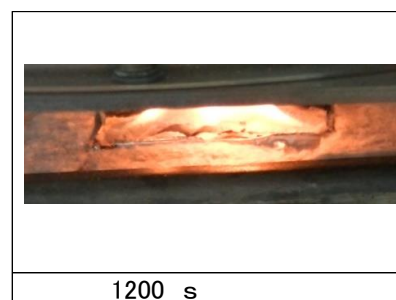
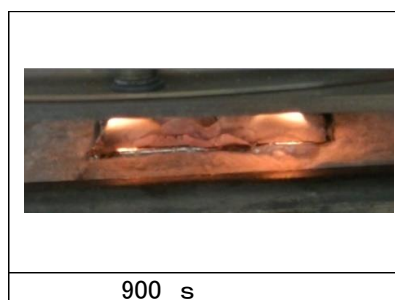
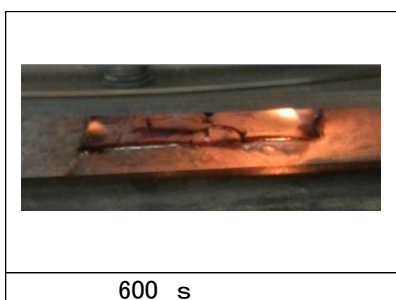
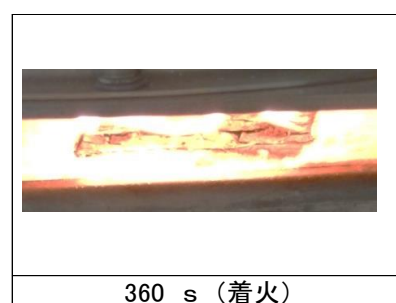
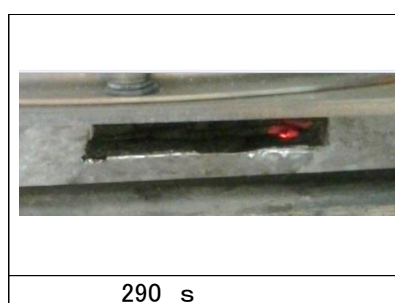
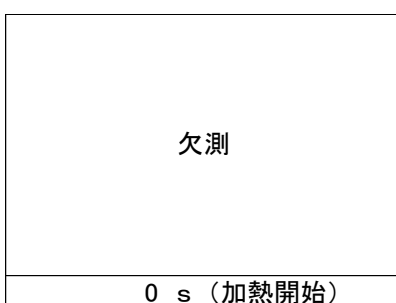
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	9 mm	脆い炭化層	16 mm
赤熱	25 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	30 mm	総炭化層	21 mm
変色	44 mm	健全部	17 mm

測定値

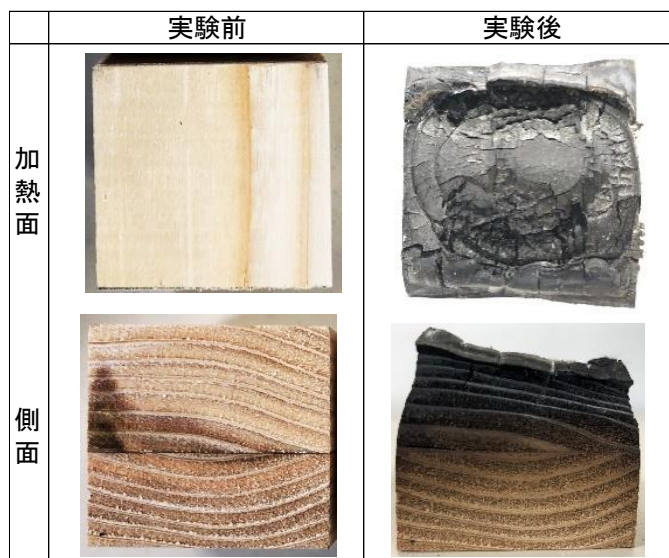




燃焼の様子



実験	30	C-6.0-5	
試験体	初期質量		36.1 g
	初期寸法	厚	47 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		333.1 kg/m3
	初期含水率		9.2 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	20.8→16 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		1285 s
	予備加熱強度変更		1140 s
	加熱強度変更		1260 s
	実験終了		2460 s
			260s頃から着火前に
			赤熱開始



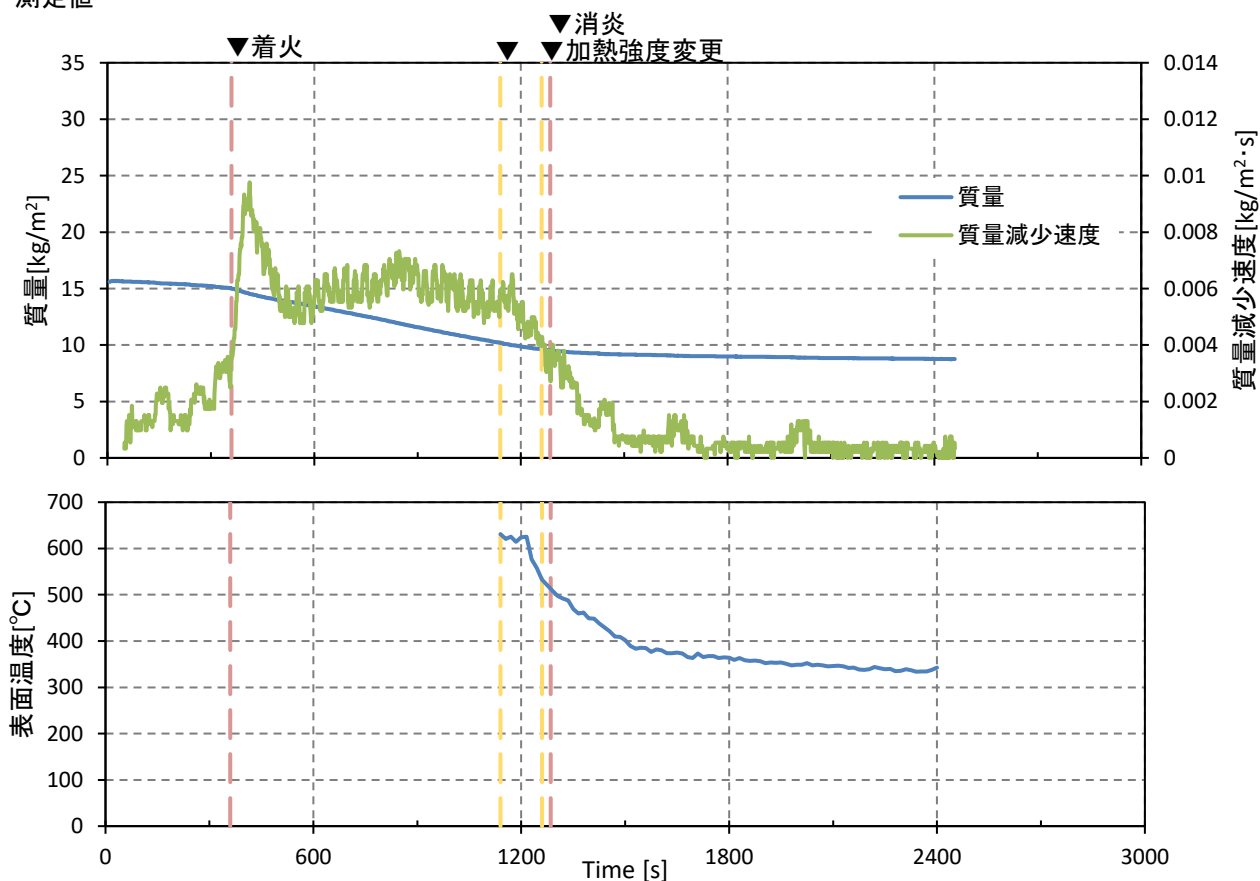
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	20.8 kW/m ²	0.00588 kg/m ² s	0.53434 kg/m ³ s	°C
	2100 ~ 2400 s	6.0 kW/m ²	0.00028 kg/m ² s	0.02530 kg/m ³ s	339.5 °C

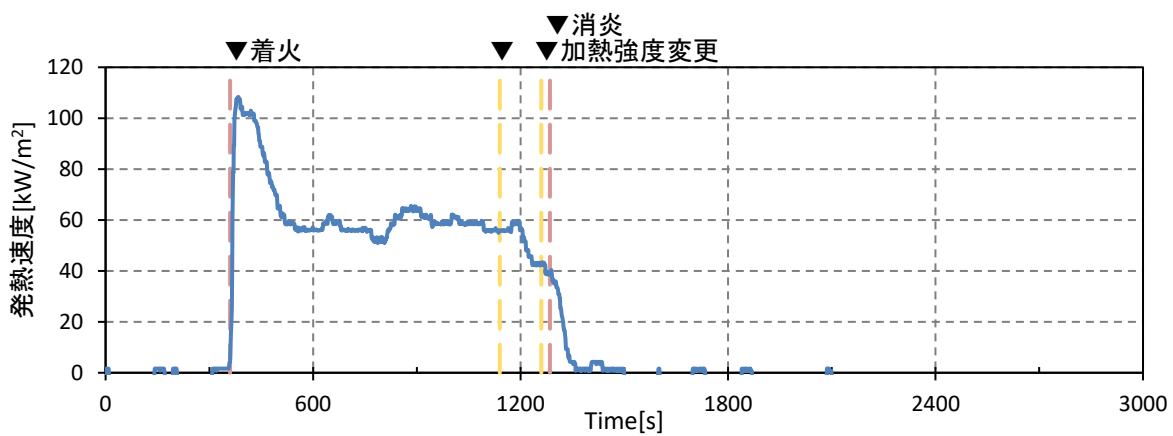
実験終了後試験体切断面



初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	12 mm	脆い炭化層	9 mm
赤熱	21 mm	堅い炭化層	2 mm
炭化	23 mm	総炭化層	11 mm
変色	33 mm	健全部	24 mm

測定値





燃焼の様子



0 s (加熱開始)



270 s



360 s (着火)



600 s



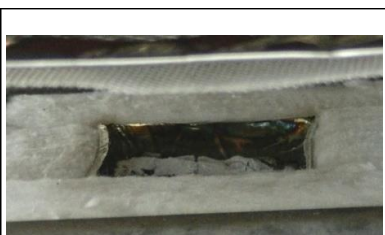
900 s



1200 s (加熱強度変更)



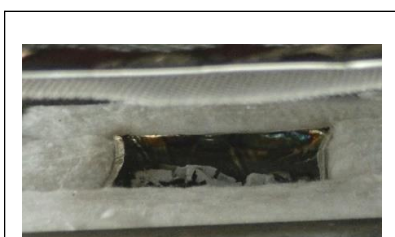
1260 s (加熱強度変更)



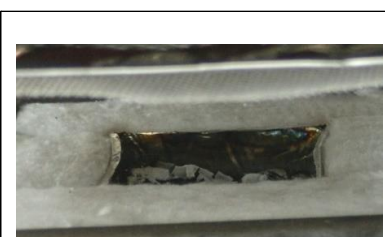
1500 s (消炎)



1800 s



2100 s

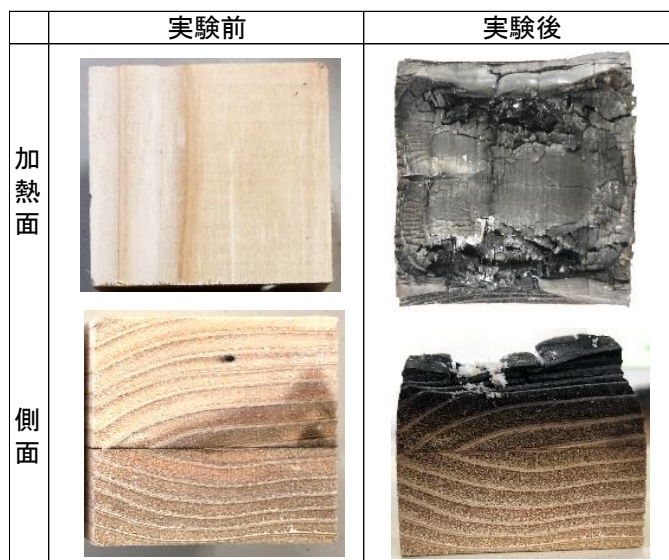


2400 s (測定終了)



s

実験	31	C-6.0-6	
試験体	初期質量		37.6 g
	初期寸法	厚	49 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		333.1 kg/m3
	初期含水率		8.5 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	20.8→16 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		1277 s
	予備加熱強度変更		1140 s
	加熱強度変更		1260 s
	実験終了		2460 s



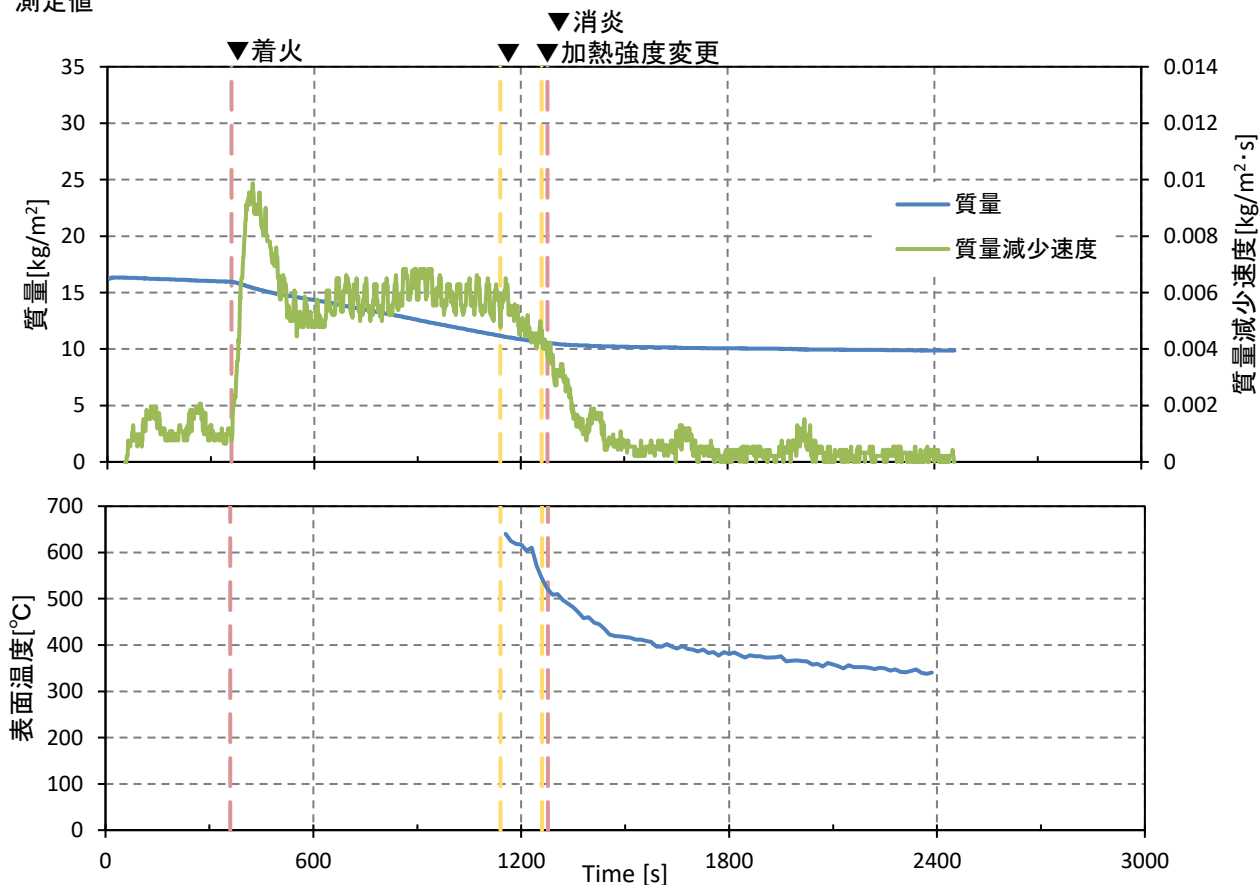
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	20.8 kW/m ²	0.00599 kg/m ² s	0.59884 kg/m ³ s	°C
	2100 ~ 2400 s	6.0 kW/m ²	0.00024 kg/m ² s	0.02358 kg/m ³ s	348.0 °C

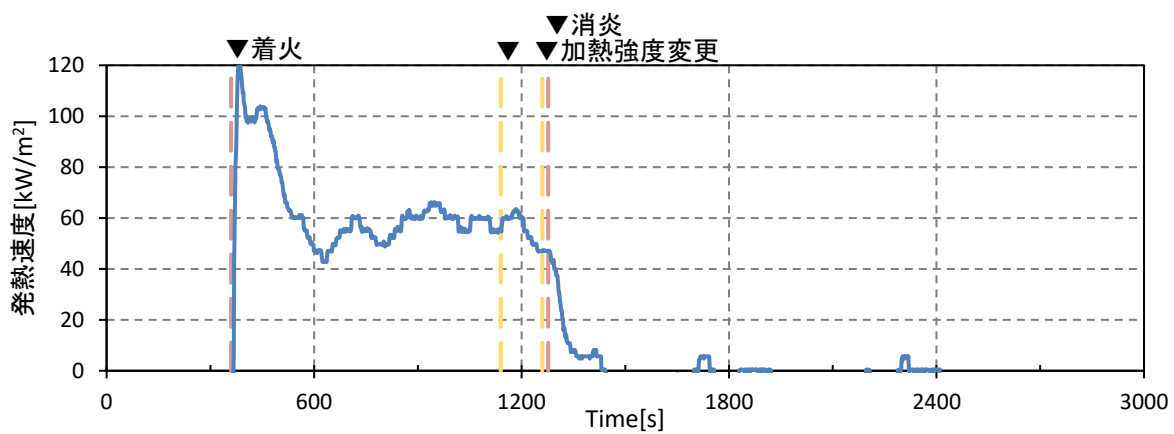
実験終了後試験体切断面



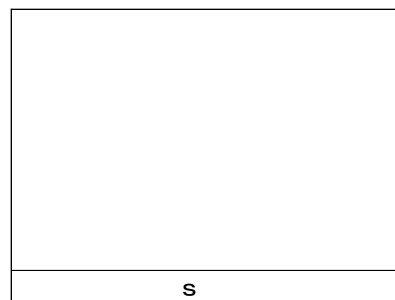
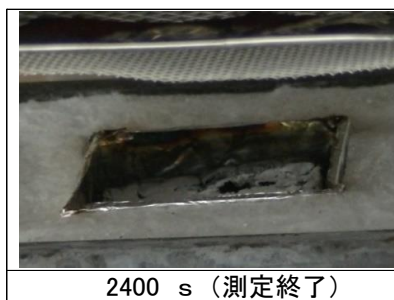
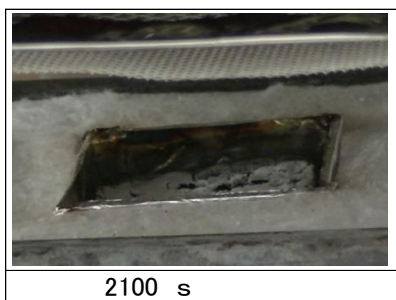
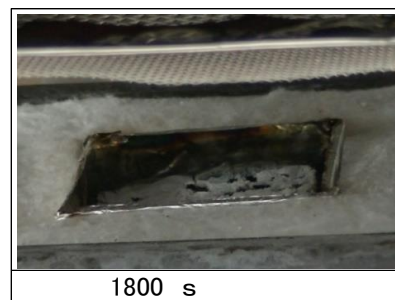
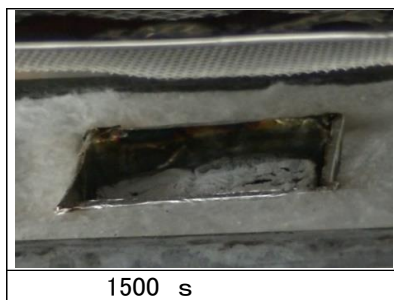
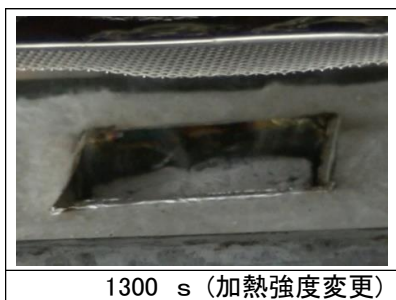
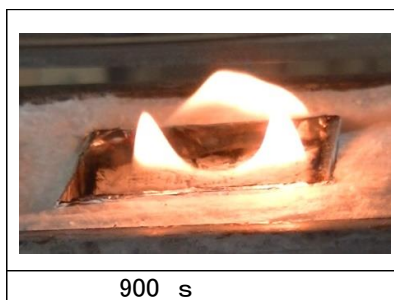
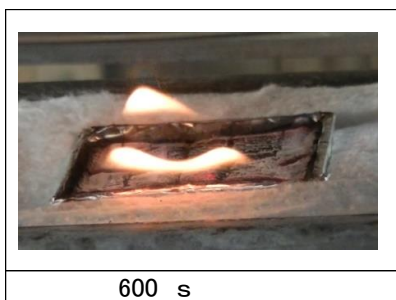
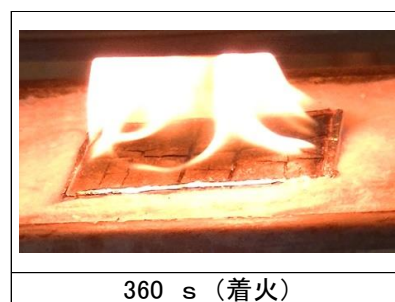
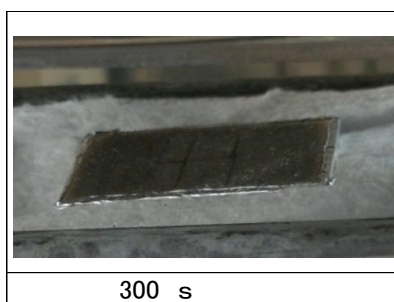
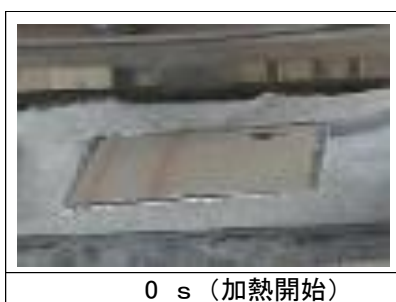
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	10 mm	脆い炭化層	4 mm
赤熱	14 mm	堅い炭化層	6 mm
炭化	20 mm	総炭化層	10 mm
変色	33 mm	健全部	29 mm

測定値

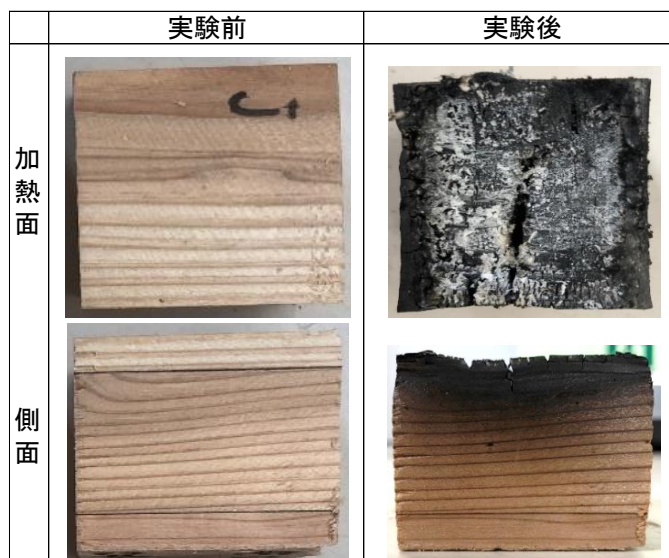




燃焼の様子



実験	32	C-6.0-7	
試験体	初期質量		45.4 g
	初期寸法	厚	45 mm
		幅	48 mm
		奥	50 mm
	初期密度		420.6 kg/m3
	初期含水率		11.70 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	21→16 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面に堆積する灰を都度取り除いた		
経過	着火		360 s
	消炎		700 s
	予備加熱強度変更		1140 s
	加熱強度変更		1260 s
	実験終了		2460 s
	灰を除去した時刻	780, 840, 960, 1190,	
		1350, 1450, 1620	

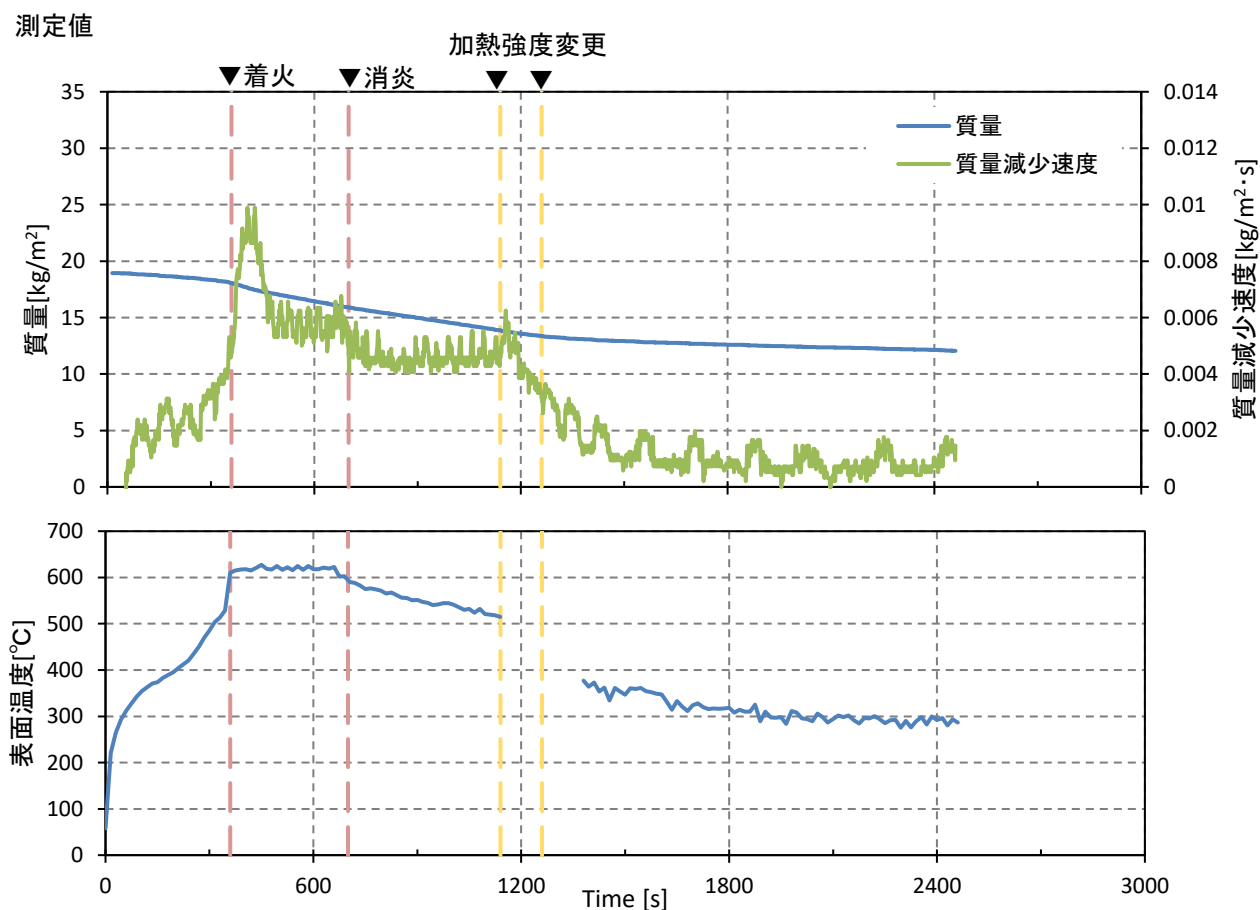


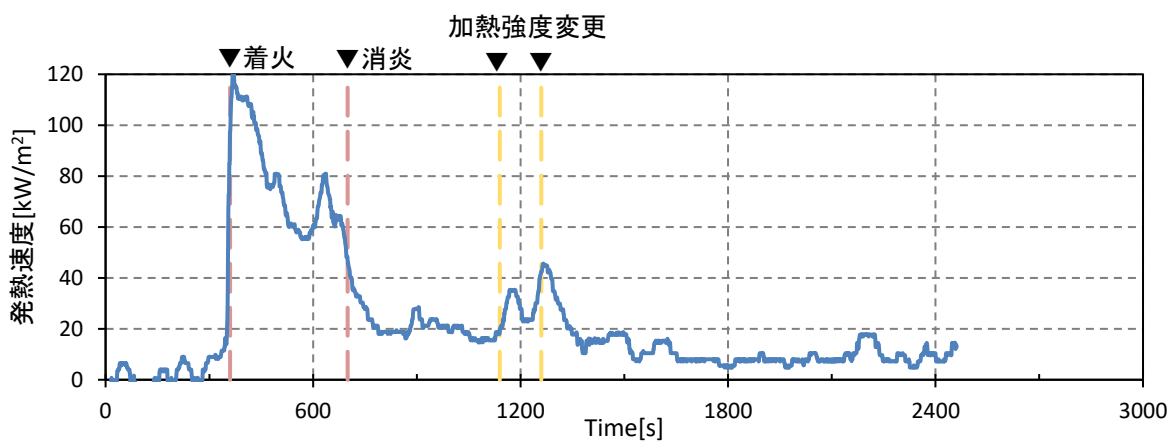
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	750 ~ 1100 s	21.0 kW/m ²	0.00458 kg/m ² s	0.38202 kg/m ³ s	549.3 °C
	1800 ~ 2400 s	6.0 kW/m ²	0.00078 kg/m ² s	0.06465 kg/m ³ s	297.2 °C

実験終了後試験体切断面

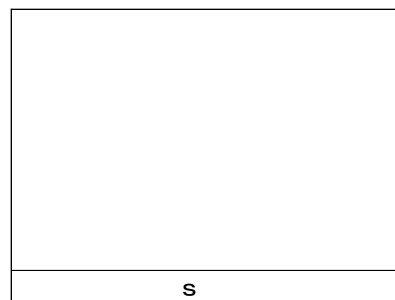
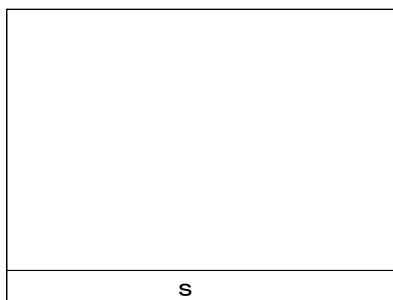
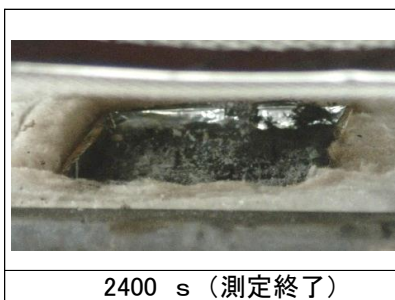
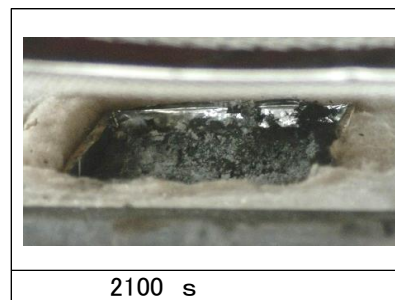
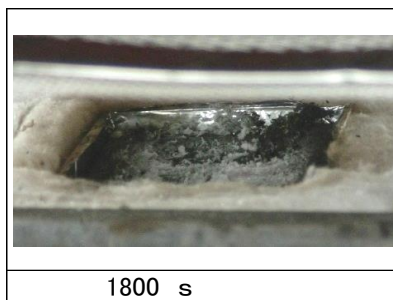
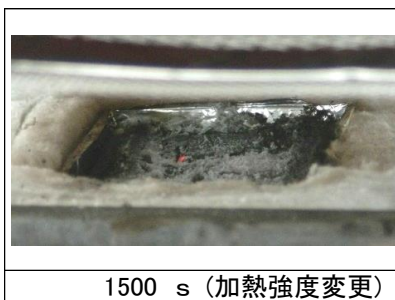
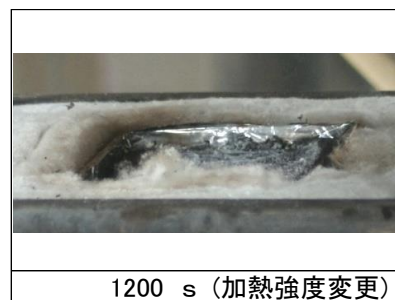
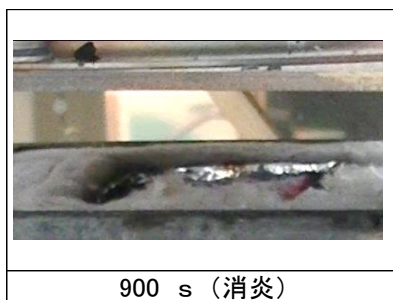
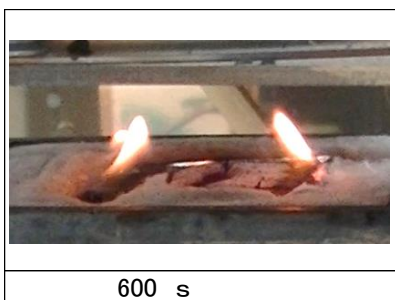
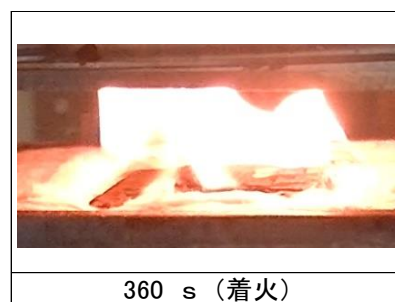
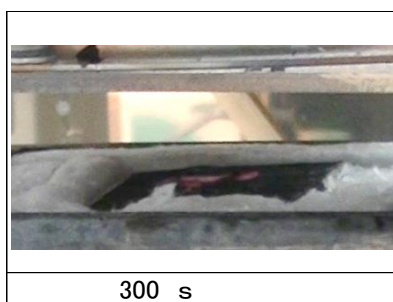
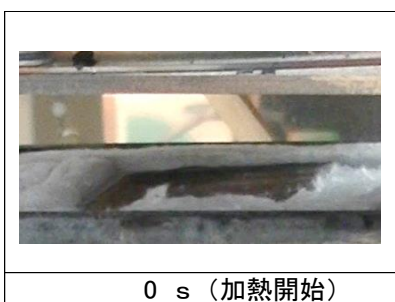


初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	8 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	15 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	20 mm	総炭化層	12 mm
変色	28 mm	健全部	25 mm

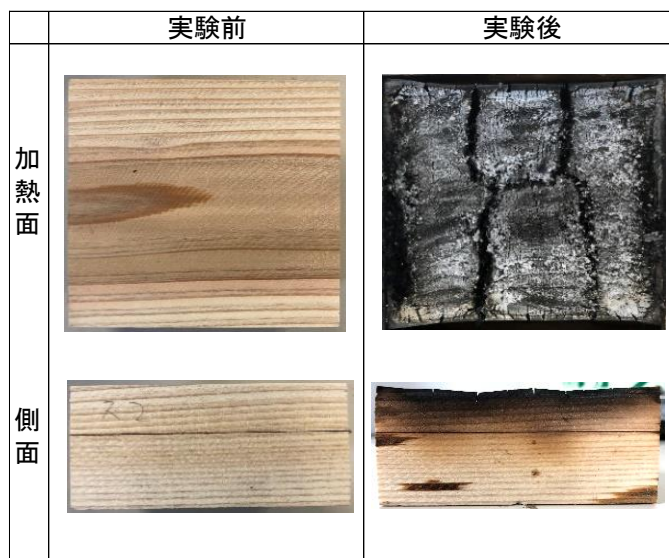




燃焼の様子



実験	33	C-6.0-8	
試験体	初期質量		166.8 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		356.8 kg/m3
	初期含水率		10.3 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	21→16 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面に堆積する灰を都度取り除いた		
経過	着火		360 s
	消炎		440 s
	予備加熱強度変更		1140 s
	加熱強度変更		1260 s
	実験終了		2760 s
	灰を除去した時刻	580, 720, 870, 930,	
		1160, 1510	

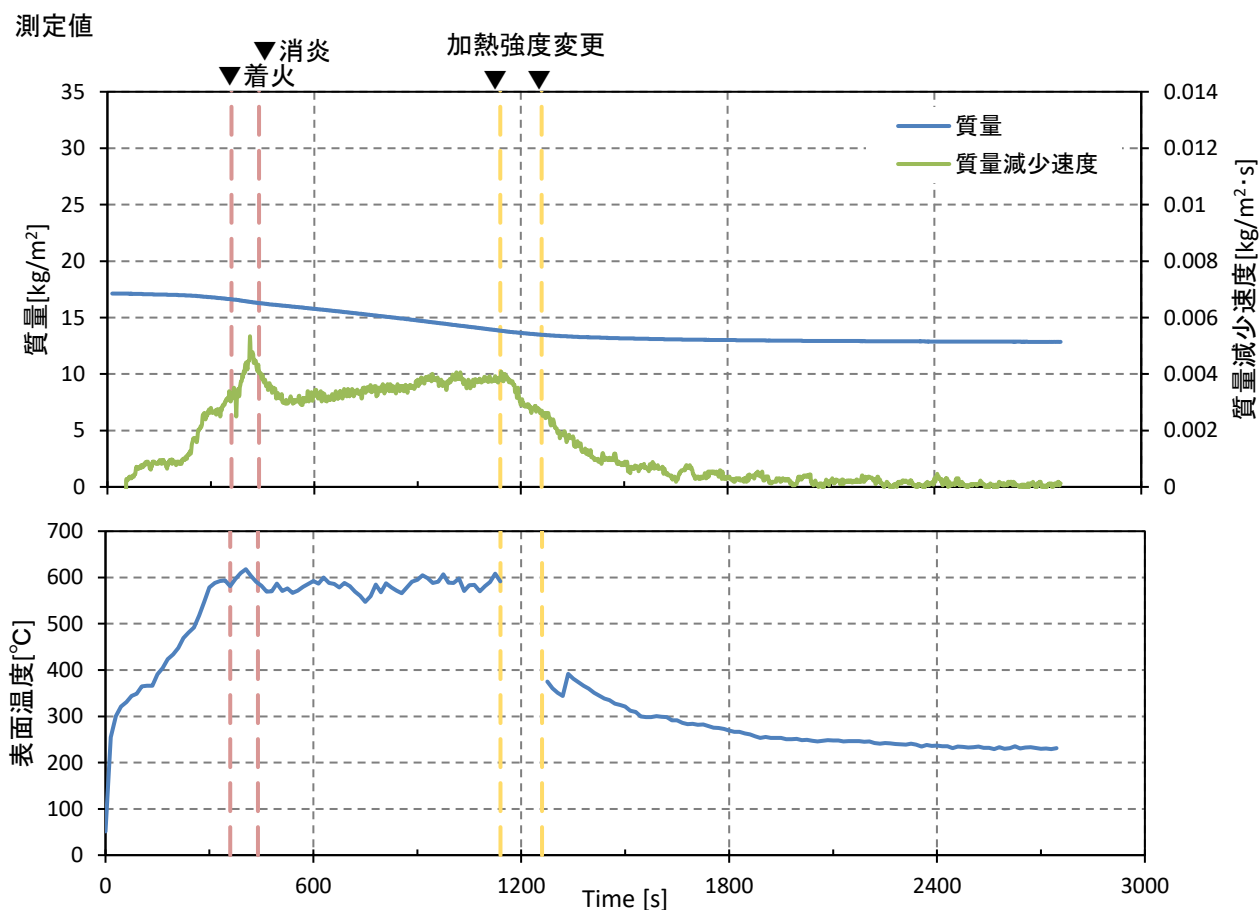


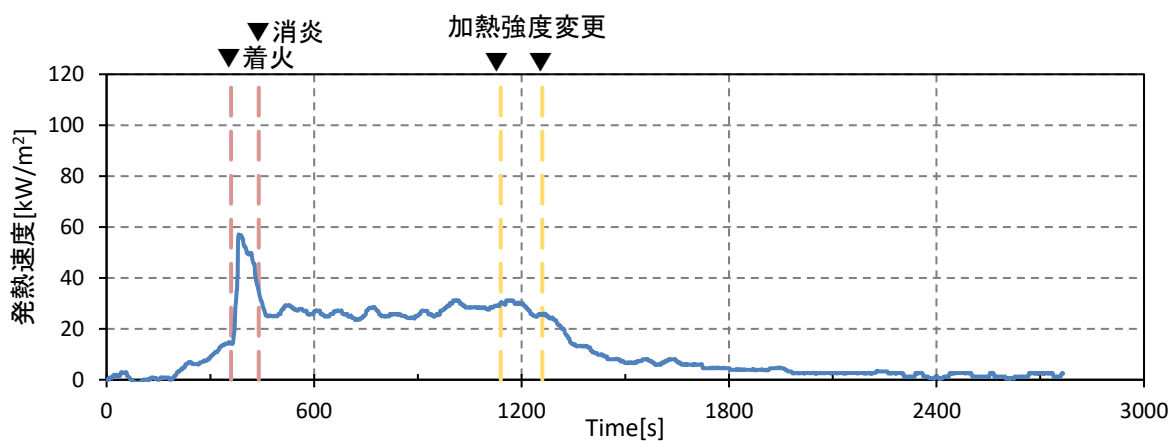
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	21.0 kW/m ²	0.00377 kg/m ² s	0.41849 kg/m ³ s	589.2 °C
	2400 ~ 2700 s	6.0 kW/m ²	0.00011 kg/m ² s	0.01178 kg/m ³ s	232.5 °C

実験終了後試験体切断面

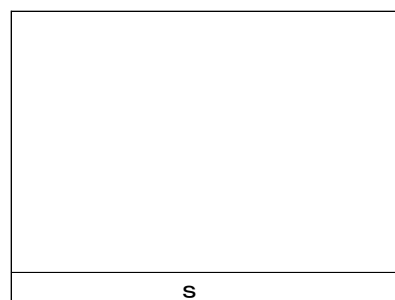
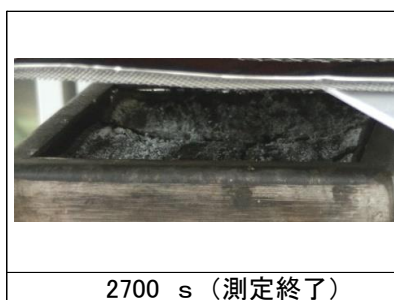
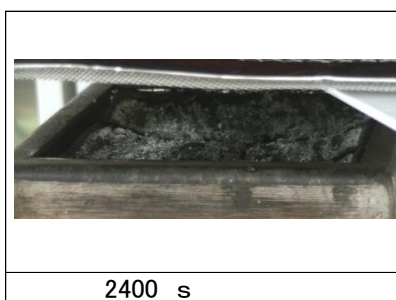
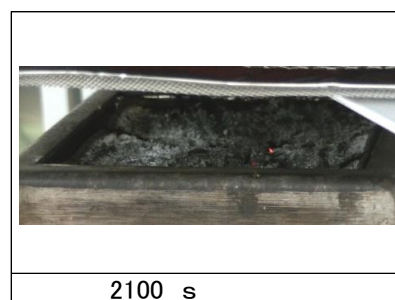
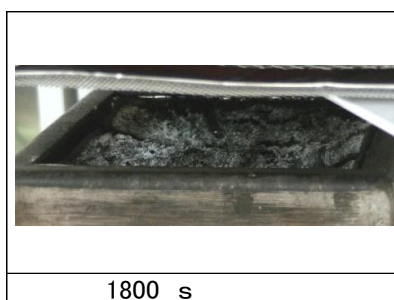
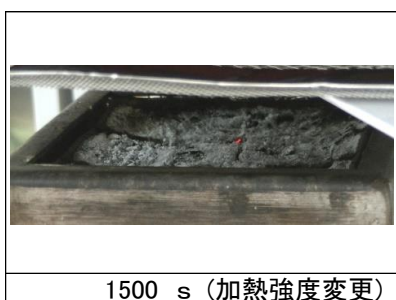
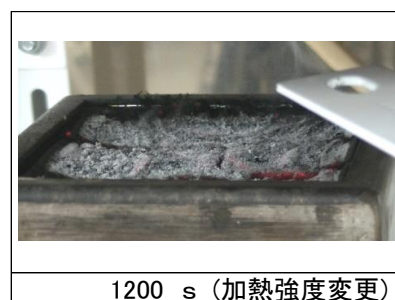
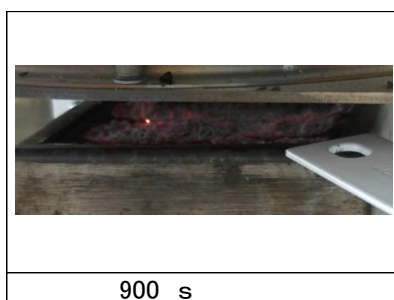
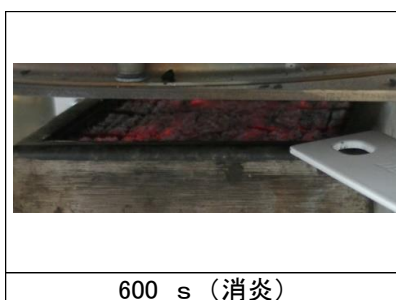
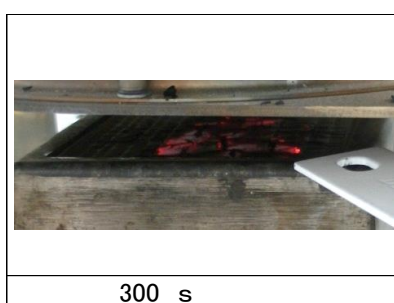
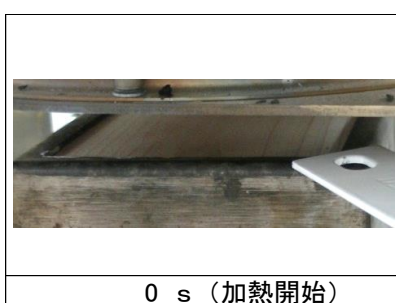


初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	9 mm	脆い炭化層	5 mm
赤熱	14 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	18 mm	総炭化層	9 mm
変色	22 mm	健全部	30 mm

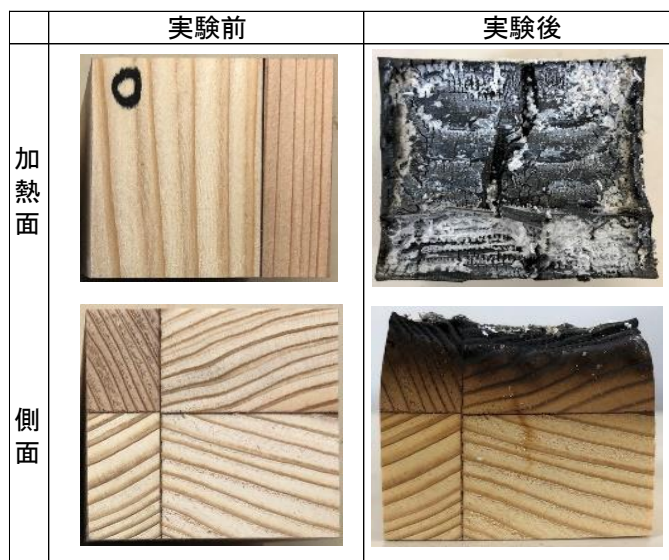




燃焼の様子



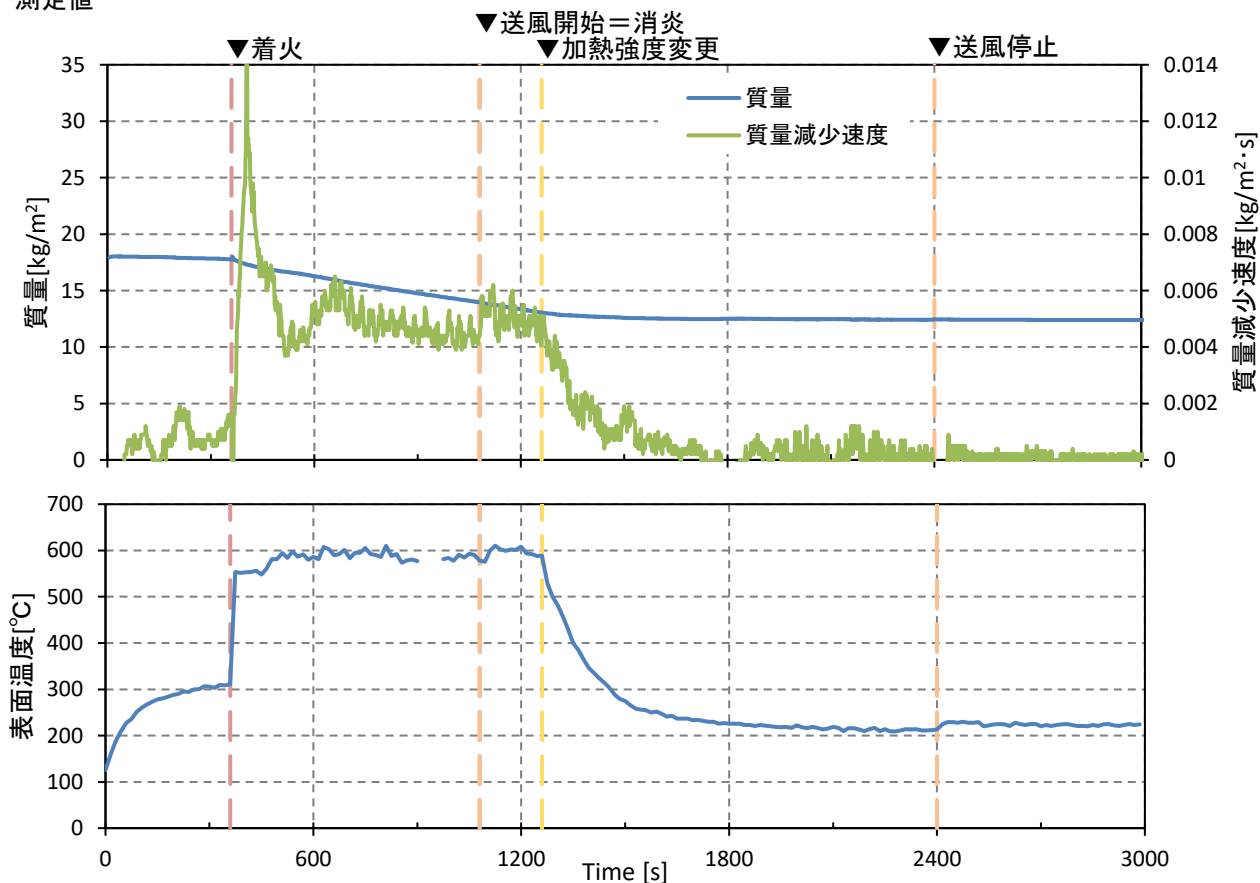
実験 34	Cf-6.0-9		
試験体	初期質量		45.1 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	50 mm
		奥	50 mm
	初期密度		360.6 kg/m ³
	初期含水率		11.0 %-wt.
試験条件	加熱面		板目
	加熱強度	①	16.0 kW/m ²
		②	6.0 kW/m ²
経過	表面気流		0.5 m/s
	着火		360 s
	消炎		1080 s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2400 s
	実験終了		3060 s

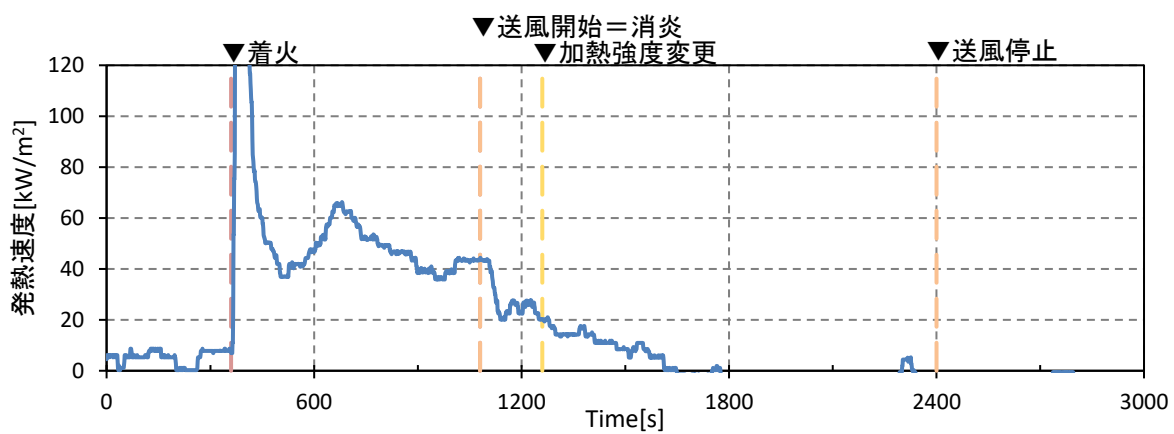


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1050 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00446 kg/m ² s	0.49588 kg/m ³ s	584.9 °C
	1100 ~ 1200 s	16.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00514 kg/m ² s	0.57140 kg/m ³ s	602.4 °C
	1800 ~ 2300 s	6 kW/m ²	0.5 m/s	0.00015 kg/m ² s	0.01722 kg/m ³ s	216.7 °C
	2450 ~ 3000 s	6 kW/m ²	0 m/s	0.00010 kg/m ² s	0.01143 kg/m ³ s	223.4 °C

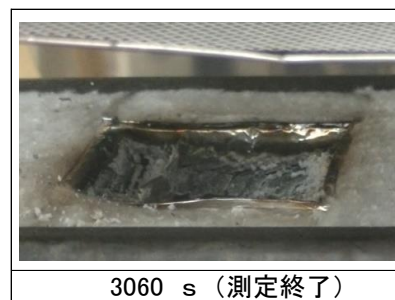
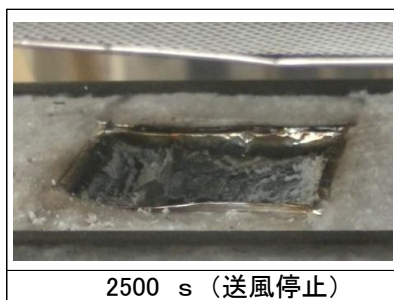
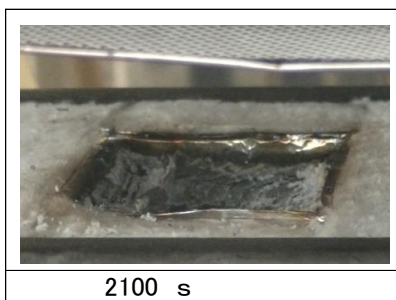
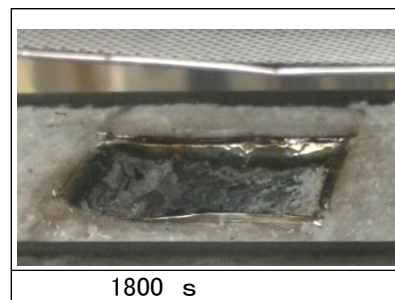
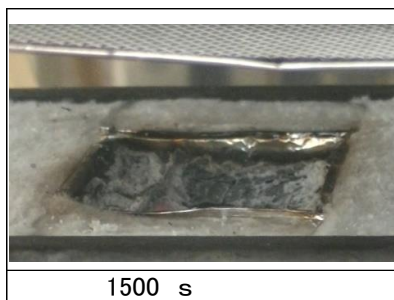
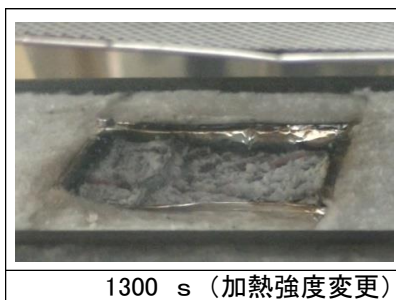
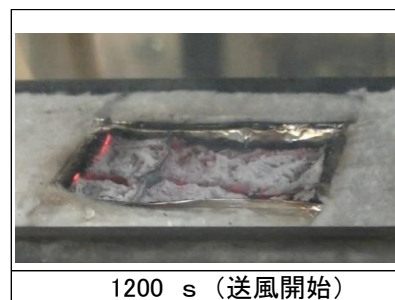
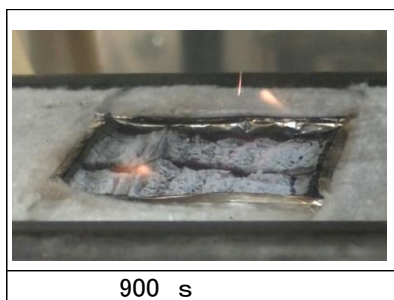
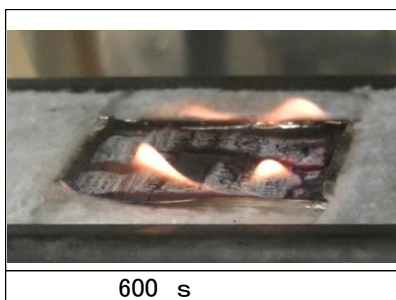
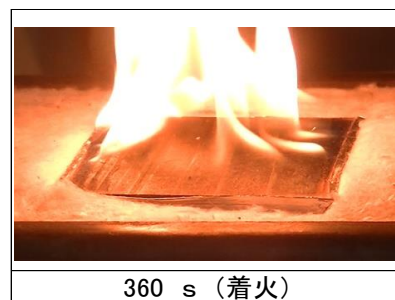
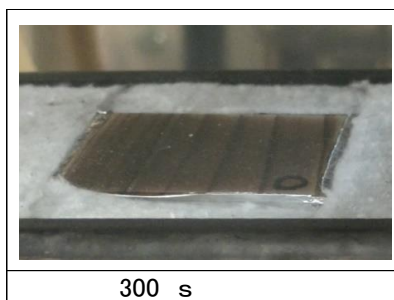
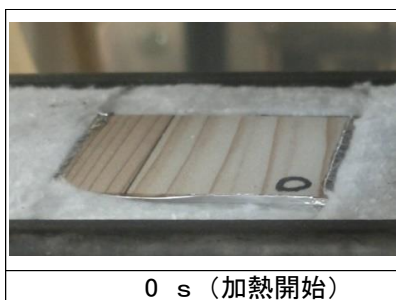
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	6 mm		脆い炭化層	4 mm
	赤熱	10 mm		堅い炭化層	5 mm
	炭化	15 mm		総炭化層	9 mm
	変色	24 mm		健全部	35 mm

測定値

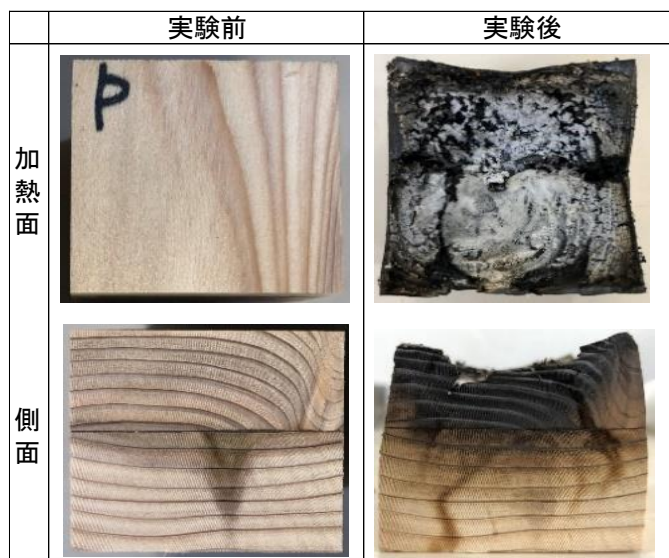




燃焼の様子



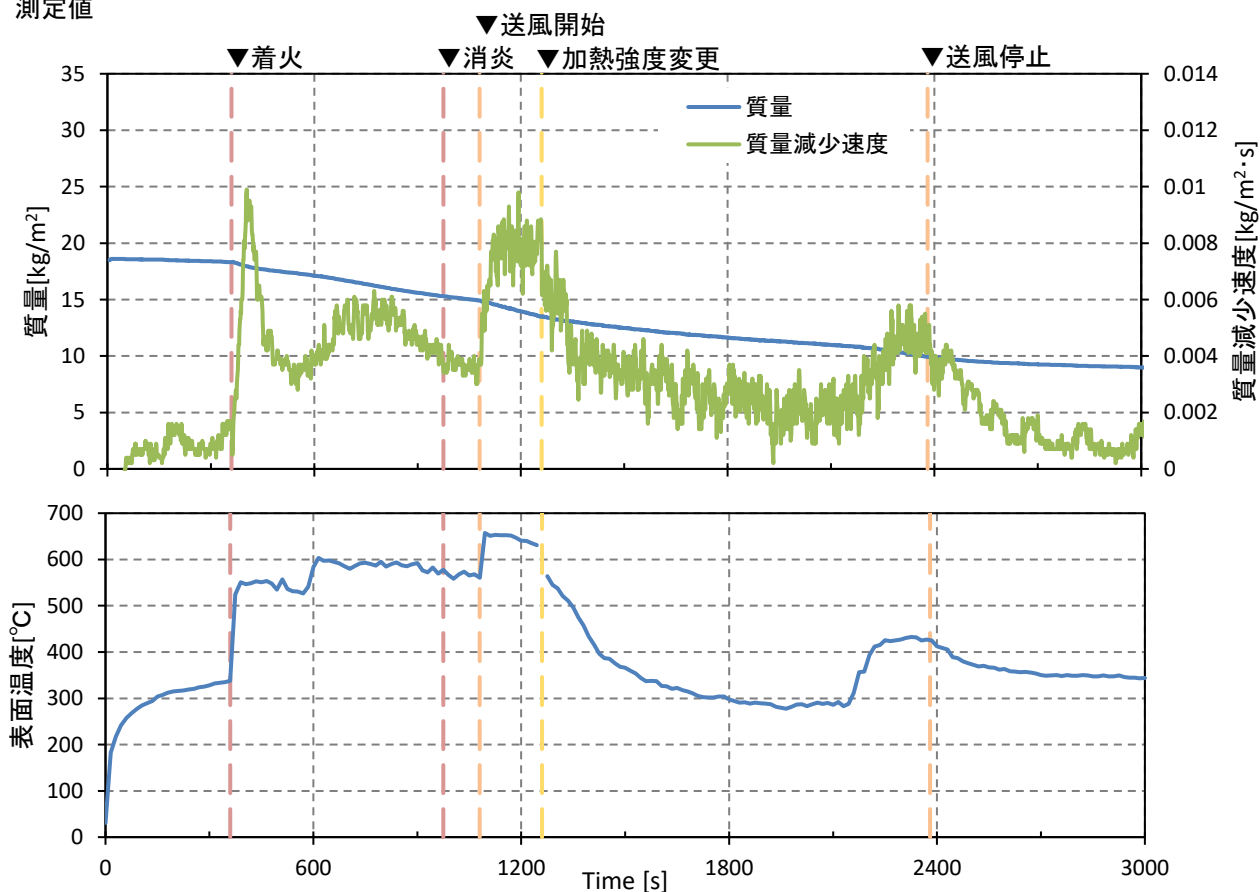
実験	35	Cf-6.0-10	
試験体	初期質量		46.5 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	50 mm
		奥	50 mm
	初期密度		372.0 kg/m3
	初期含水率		10.6 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		975 s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2380 s
	実験終了		3060 s

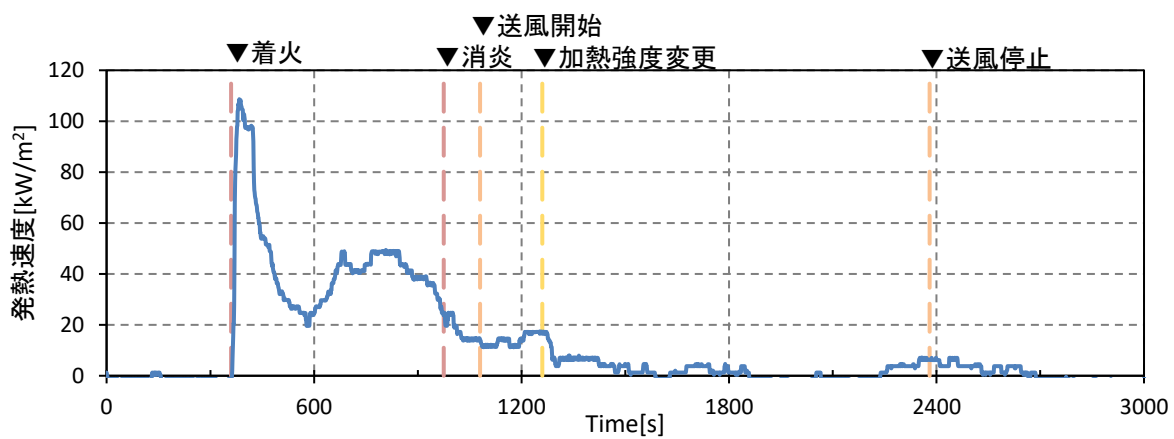


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	980 ~ 1050 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00371 kg/m ² s	0.33707 kg/m ³ s	597.8 °C
	1100 ~ 1200 s	16.0 kW/m ²	1.1 m/s	0.00774 kg/m ² s	0.70338 kg/m ³ s	650.0 °C
	2200 ~ 2350 s	6 kW/m ²	1.1 m/s	0.00410 kg/m ² s	0.37273 kg/m ³ s	421.3 °C
	2700 ~ 3000 s	6 kW/m ²	0 m/s	0.00087 kg/m ² s	0.07895 kg/m ³ s	347.0 °C

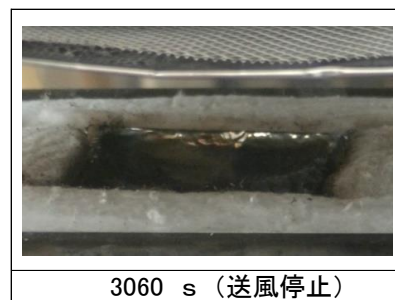
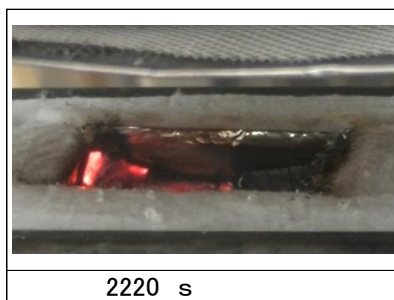
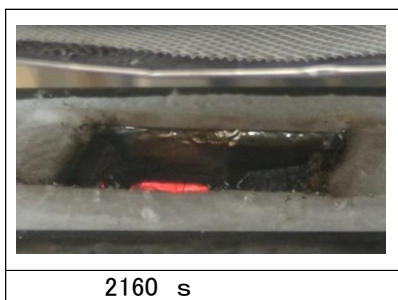
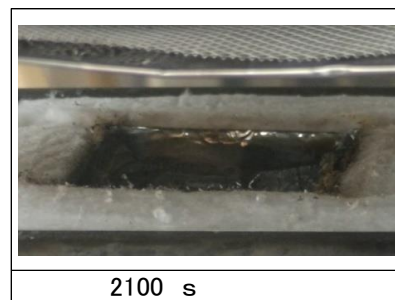
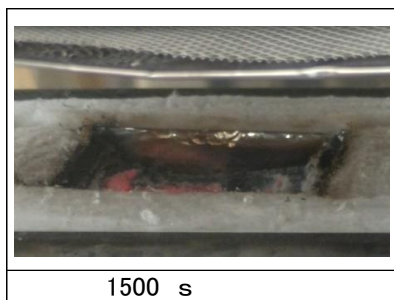
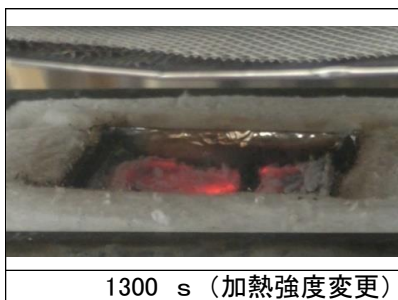
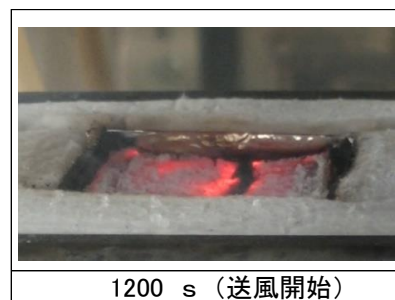
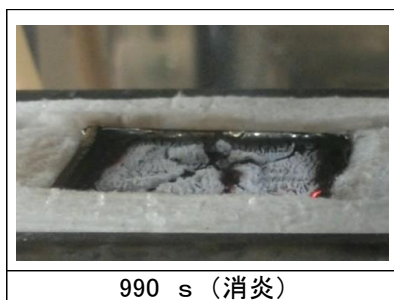
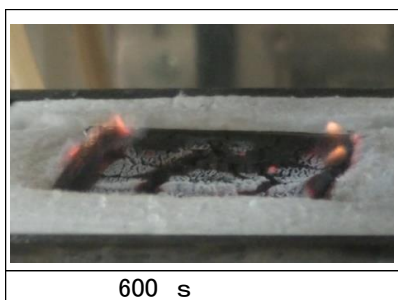
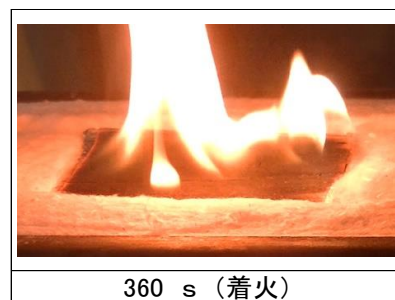
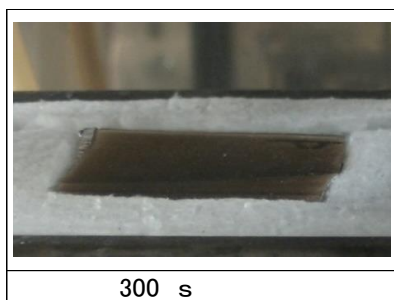
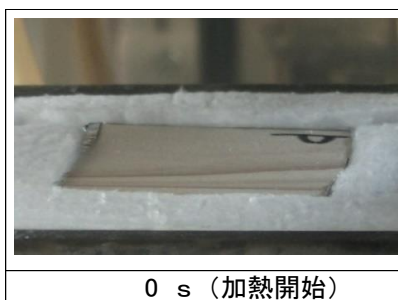
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	21 mm		脆い炭化層	5 mm
	赤熱	26 mm		堅い炭化層	6 mm
	炭化	32 mm		総炭化層	11 mm
	変色	40 mm		健全部	18 mm

測定値

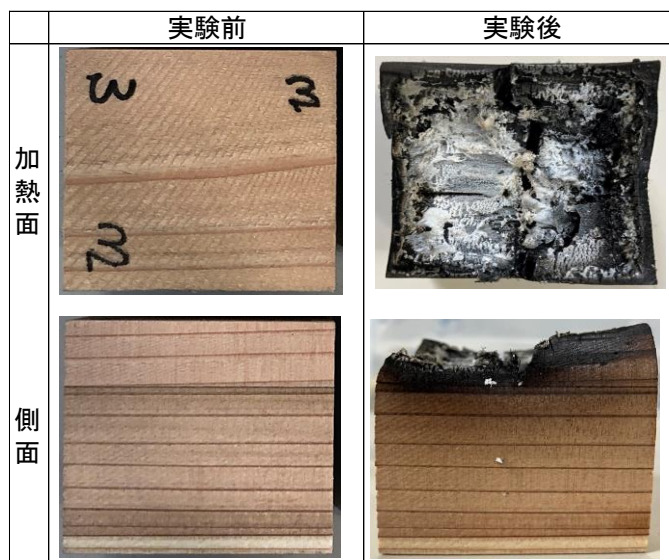




燃焼の様子

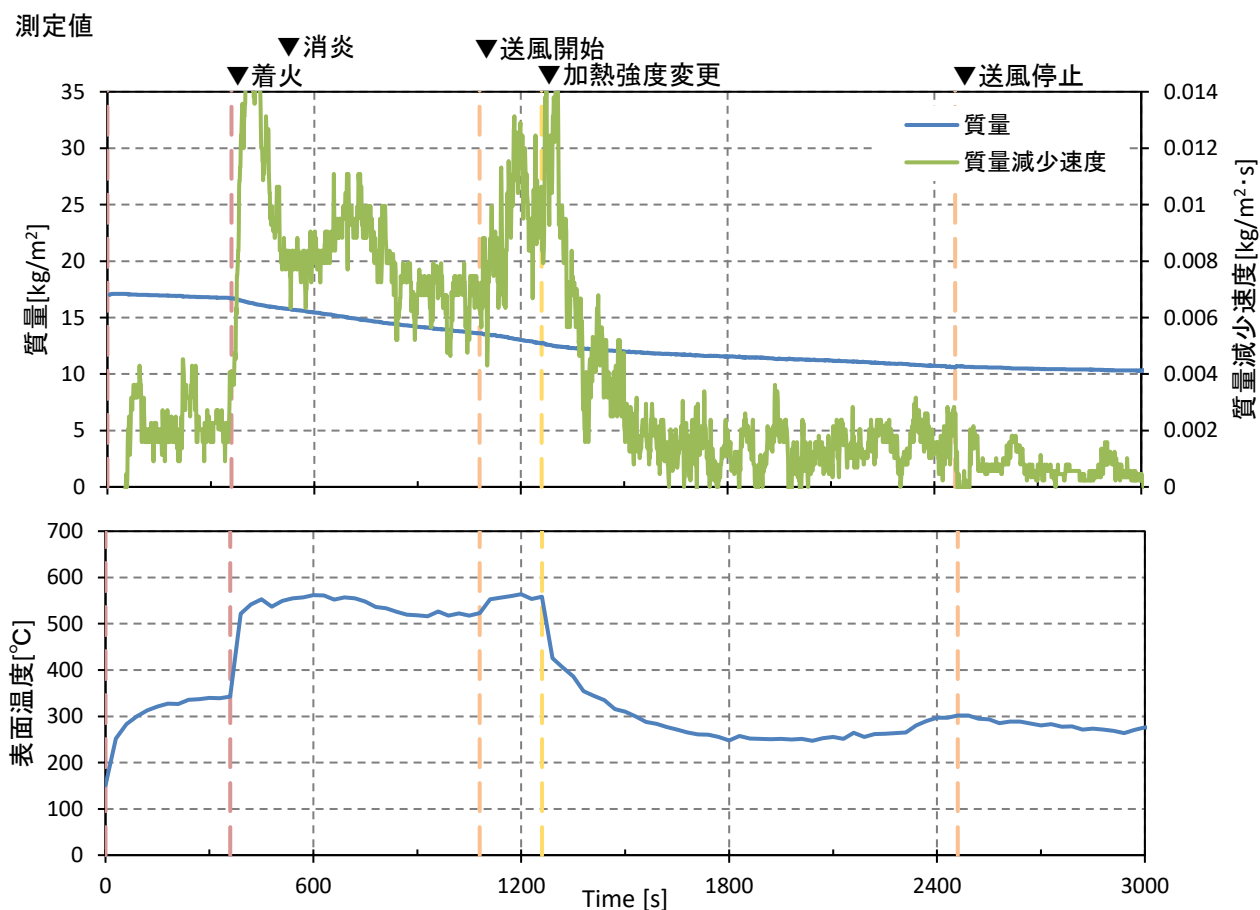


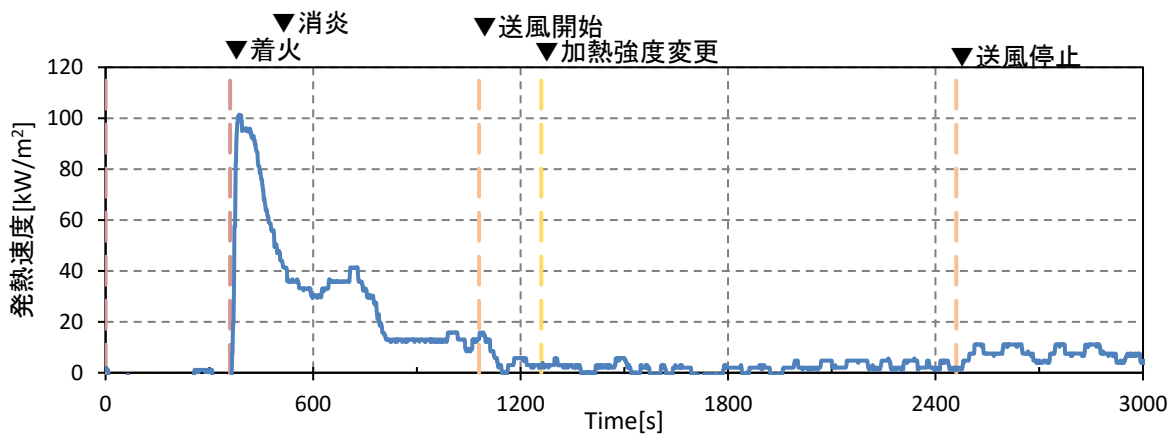
実験	36	Cf-6.0-11	
試験体	初期質量		37.8 g
	初期寸法	厚	46 mm
		幅	47 mm
		奥	47 mm
	初期密度		371.6 kg/m3
	初期含水率		9.5 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面気流		0.5 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2460 s
	実験終了		3060 s



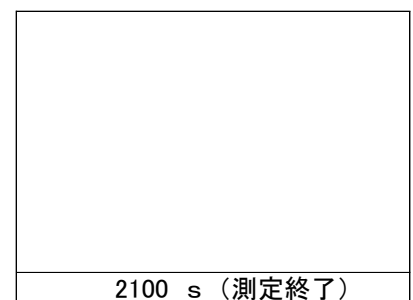
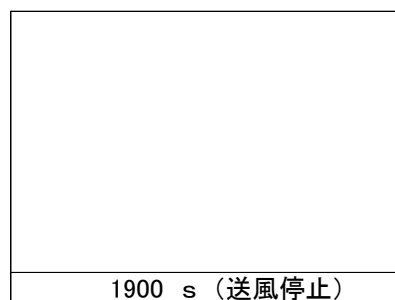
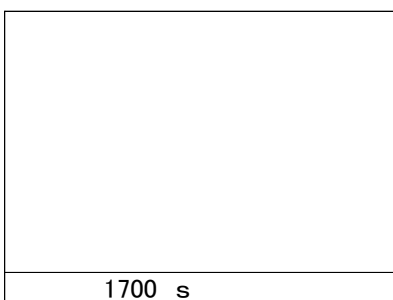
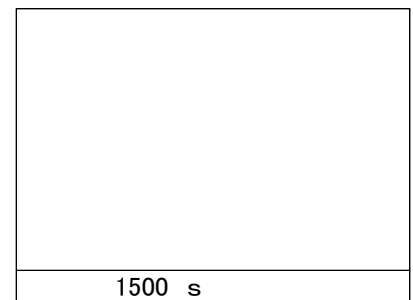
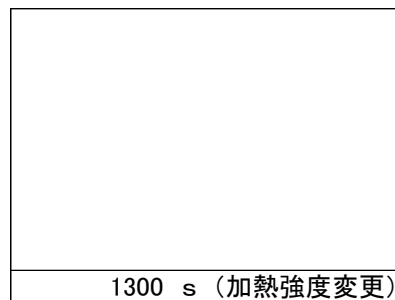
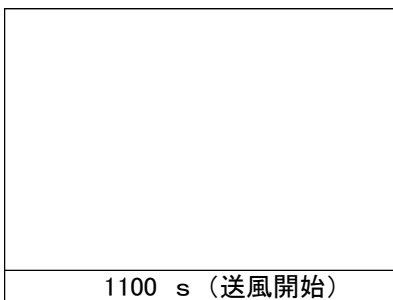
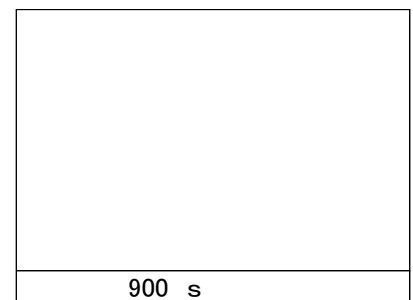
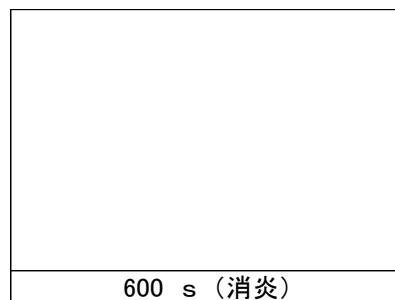
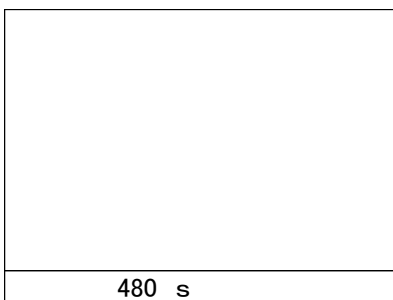
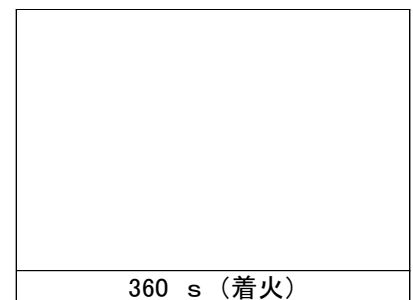
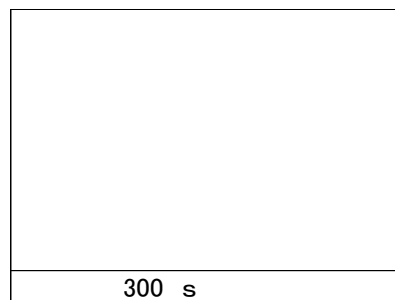
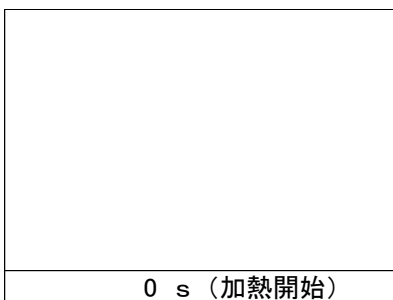
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1050 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00672 kg/m ² s	0.51703 kg/m ³ s	519.6 °C
	1150 ~ 1250 s	16.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.01034 kg/m ² s	0.79566 kg/m ³ s	558.4 °C
	2400 ~ 2450 s	6.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00146 kg/m ² s	0.11198 kg/m ³ s	298.3 °C
	2800 ~ 3000 s	6.0 kW/m ²	0 m/s	0.00056 kg/m ² s	0.04284 kg/m ³ s	270.7 °C

実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
		焼失	7 mm	脆い炭化層	5 mm
		赤熱	12 mm	堅い炭化層	8 mm
		炭化	20 mm	総炭化層	13 mm
		変色	30 mm	健全部	26 mm

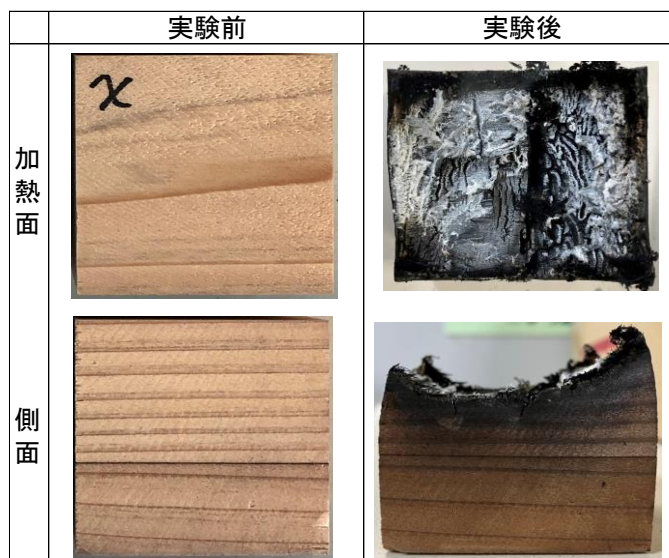




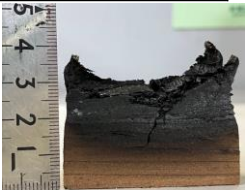
燃焼の様子



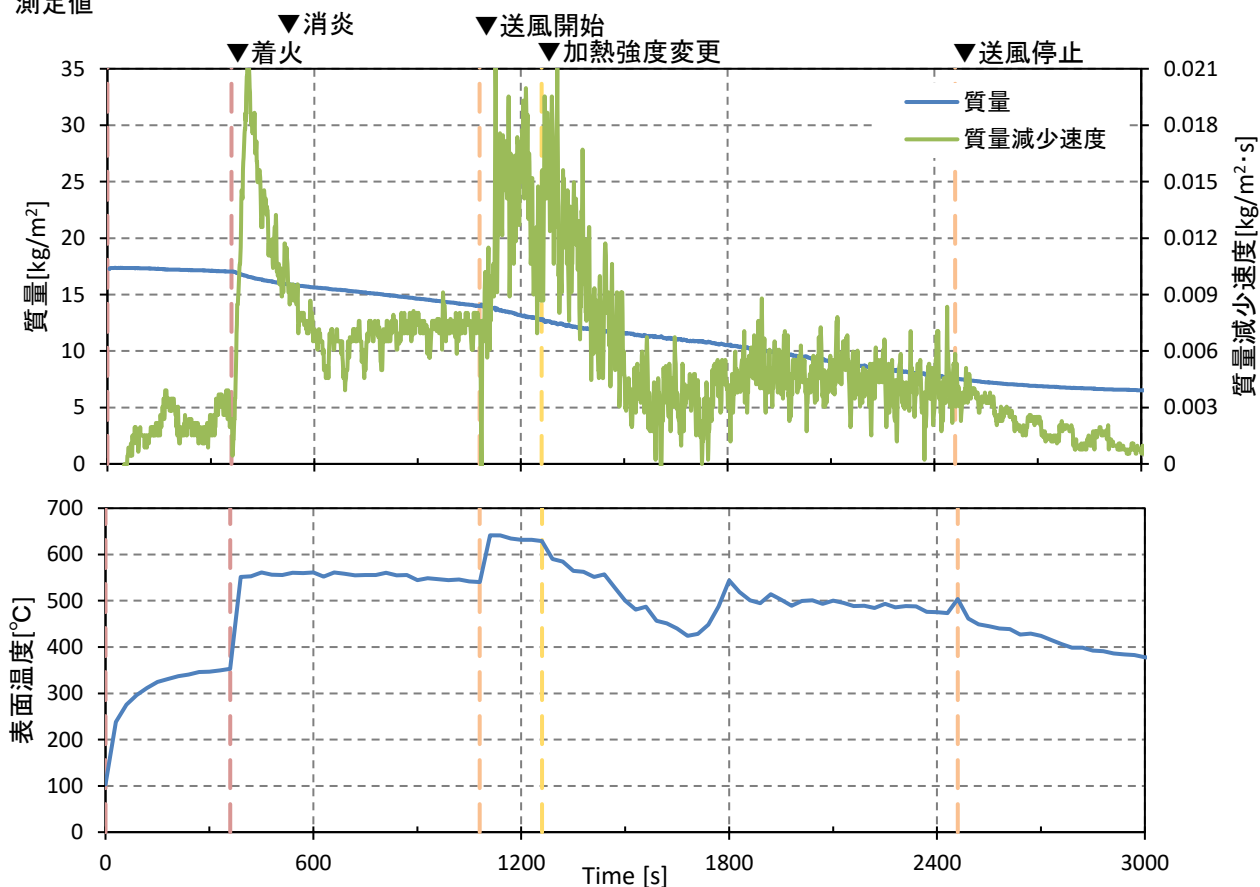
実験	37	Cf-6.0-12	
試験体	初期質量		40.0 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		361.5 kg/m3
	初期含水率		9.0 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	16.0 kW/m2
		②	6.0 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2460 s
	実験終了		3060 s

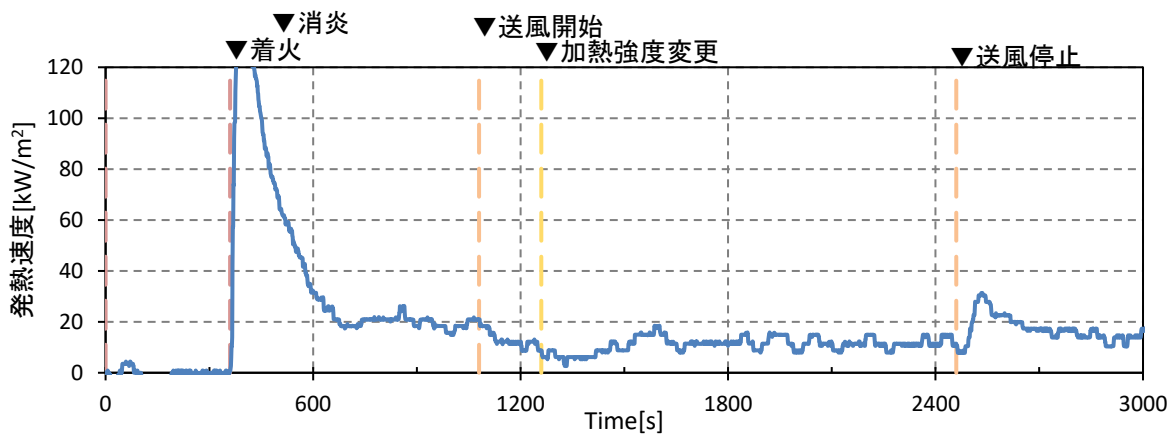


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1050 s	16.0 kW/m ²	0 m/s	0.00726 kg/m ² s	0.48423 kg/m ³ s	545.2 °C
	1150 ~ 1250 s	16.0 kW/m ²	1.1 m/s	0.01453 kg/m ² s	0.96876 kg/m ³ s	634.8 °C
	2400 ~ 2450 s	6.0 kW/m ²	1.1 m/s	0.00443 kg/m ² s	0.29531 kg/m ³ s	474.5 °C
	2800 ~ 3000 s	6.0 kW/m ²	0 m/s	0.00109 kg/m ² s	0.07248 kg/m ³ s	387.4 °C

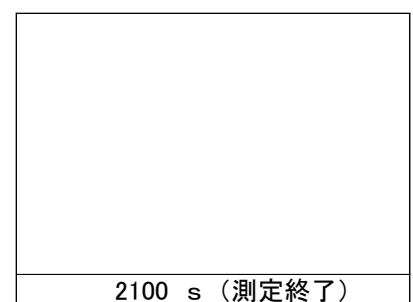
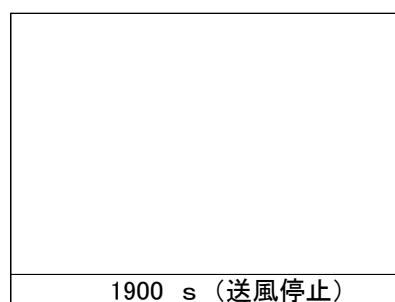
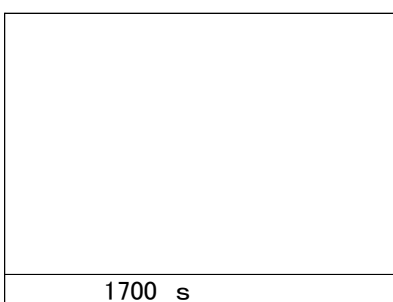
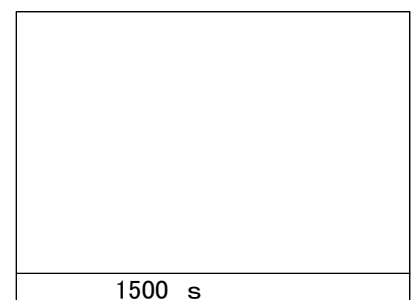
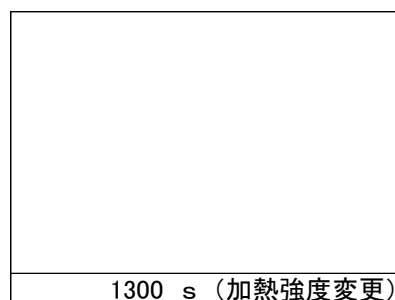
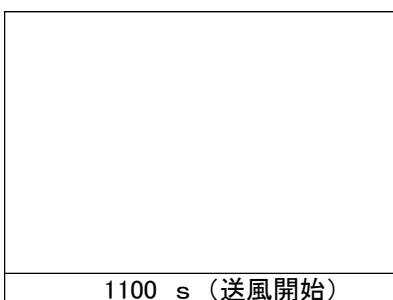
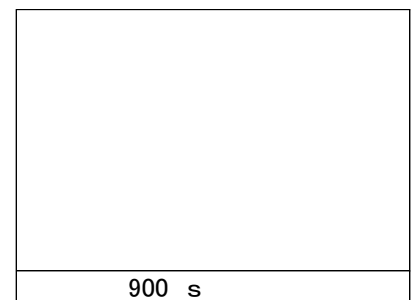
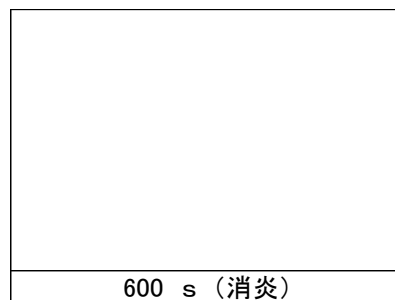
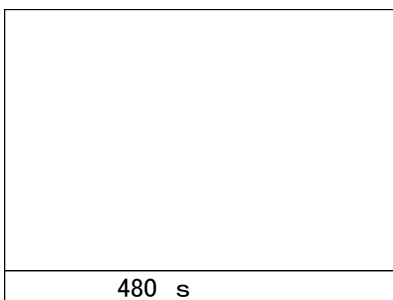
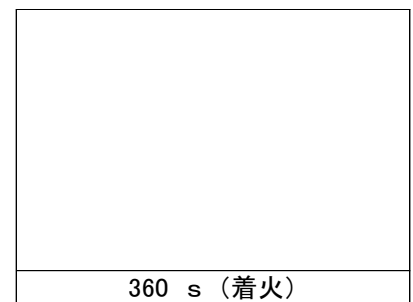
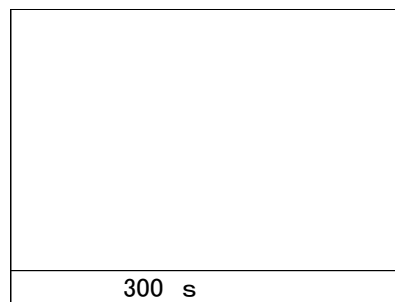
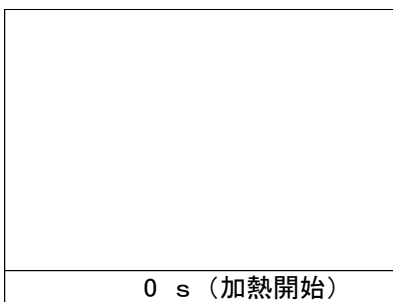
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	20 mm		脆い炭化層	10 mm
	赤熱	30 mm		堅い炭化層	5 mm
	炭化	35 mm		総炭化層	15 mm
	変色	48 mm		健全部	13 mm

測定値

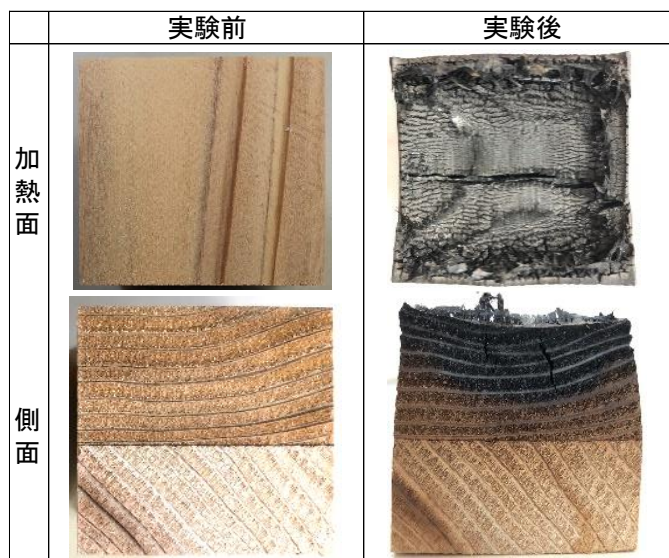




燃焼の様子

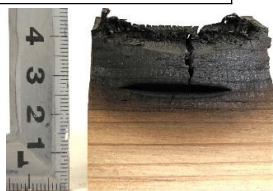


実験	38	C-6.8-1	
試験体	初期質量		40.4 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		364.9 kg/m3
	初期含水率		10.4 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	18.0 kW/m2
		②	6.8 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		690 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s
			330s頃から着火前に赤熱開始



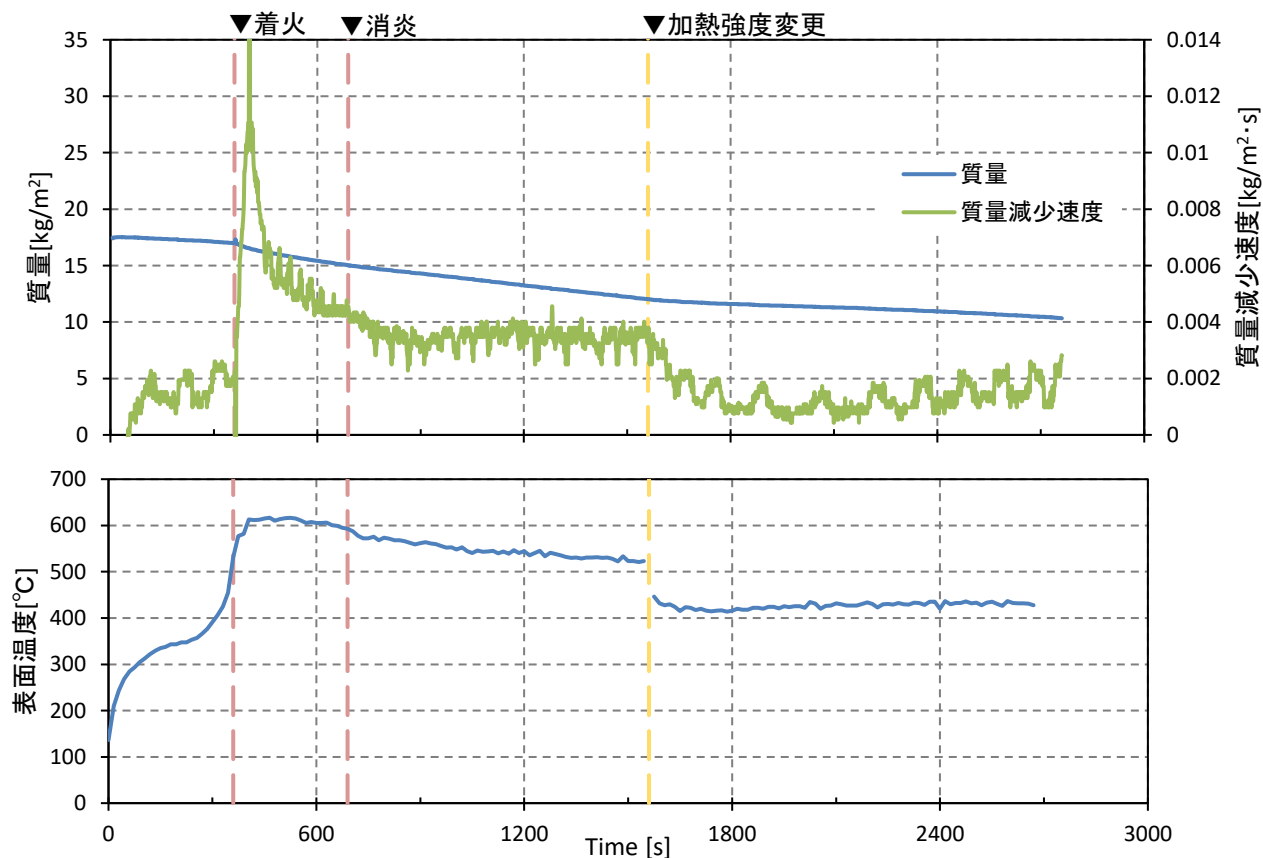
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1500 s	18.0 kW/m ²	0.00342 kg/m ² s	0.22771 kg/m ³ s	533.2 °C
	2400 ~ 2700 s	6.8 kW/m ²	0.00158 kg/m ² s	0.10514 kg/m ³ s	431.4 °C

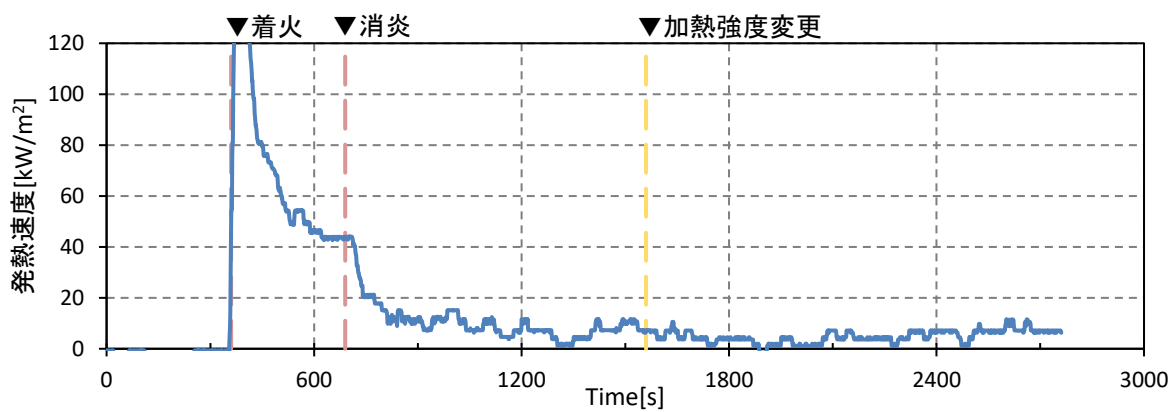
実験終了後試験体切断面



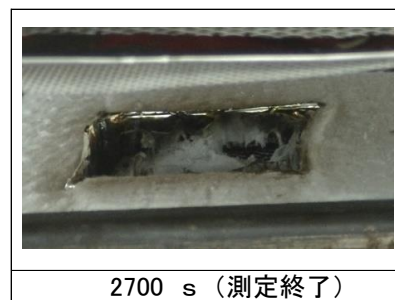
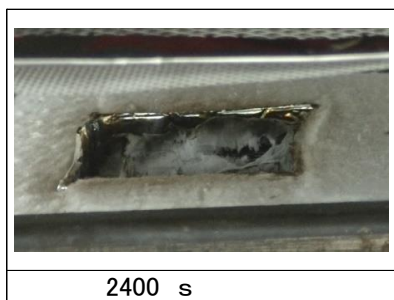
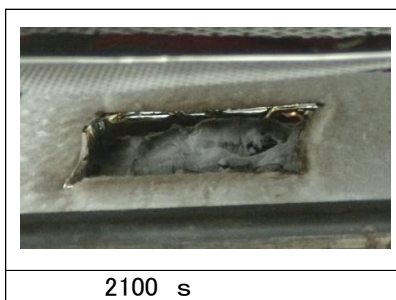
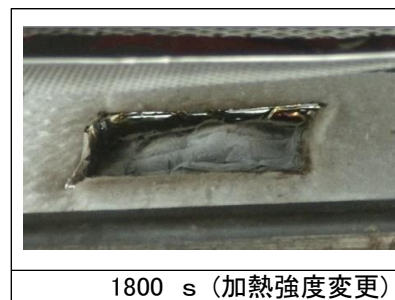
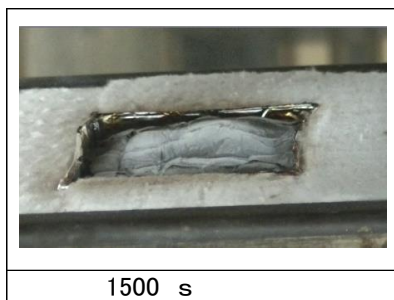
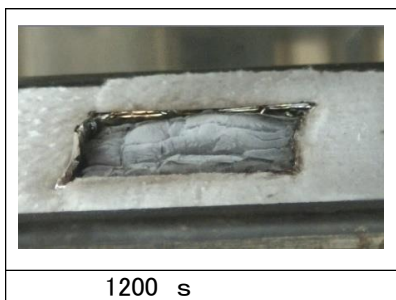
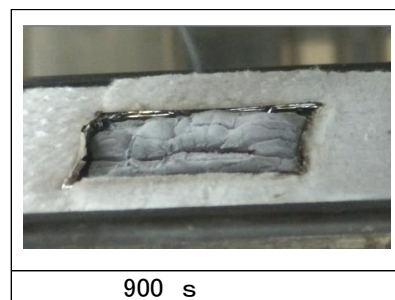
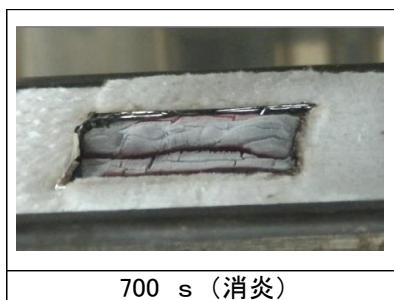
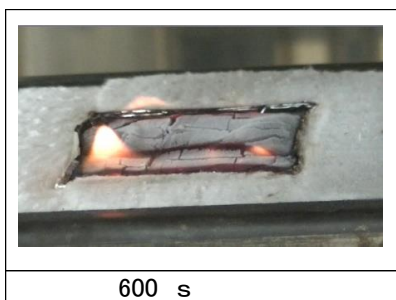
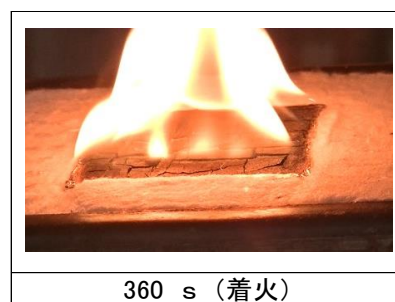
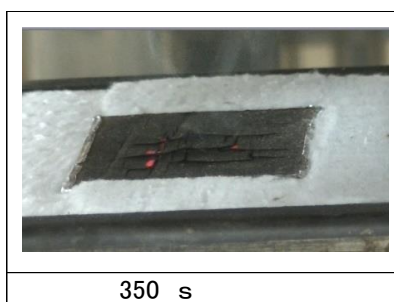
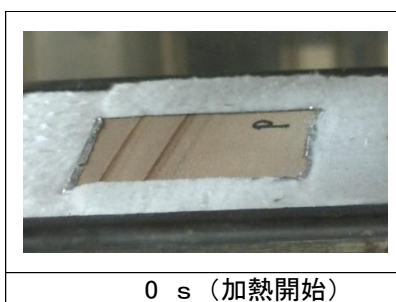
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	10 mm	脆い炭化層	10 mm
赤熱	20 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	25 mm	総炭化層	15 mm
変色	36 mm	健全部	23 mm

測定値

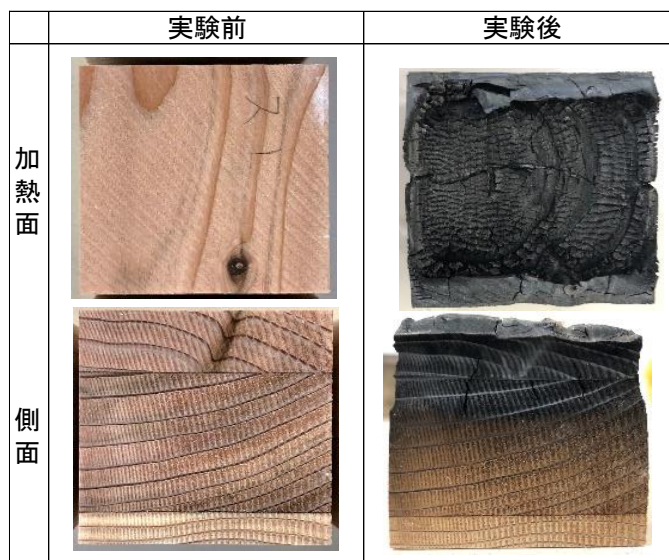




燃焼の様子



実験	39	C-6.8-2	
試験体	初期質量		44.6 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	49 mm
		奥	49 mm
	初期密度		386.6 kg/m3
	初期含水率		11.8 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	18.0 kW/m2
		②	6.8 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		1609 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



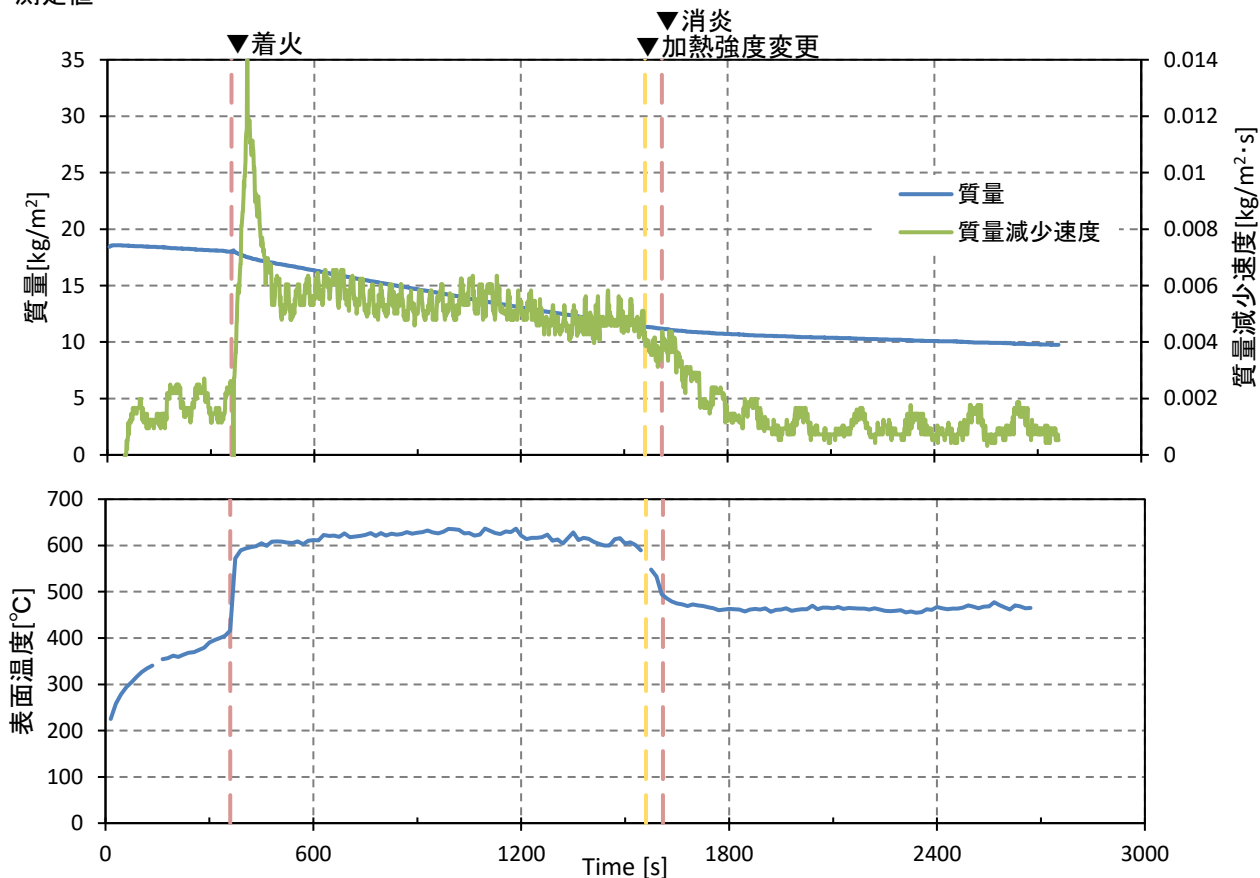
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1500 s	18.0 kW/m ²	0.00478 kg/m ² s	0.25163 kg/m ³ s	612.8 °C
	2100 ~ 2700 s	6.8 kW/m ²	0.00097 kg/m ² s	0.05117 kg/m ³ s	463.9 °C

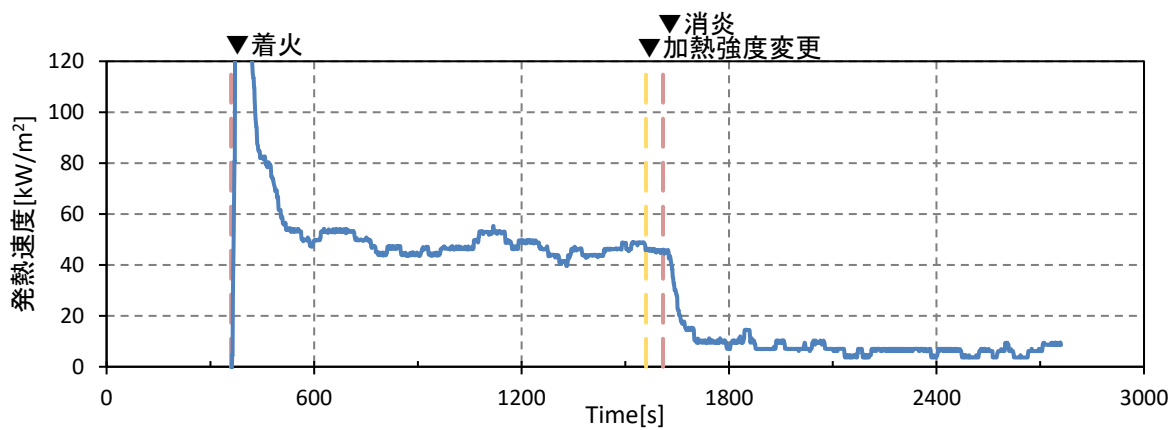
実験終了後試験体切断面



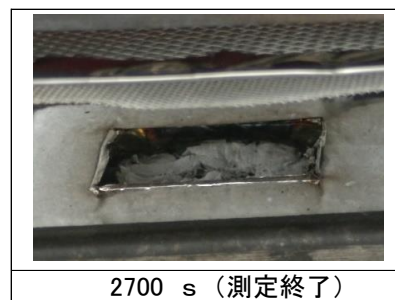
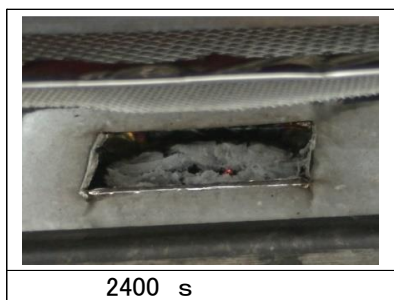
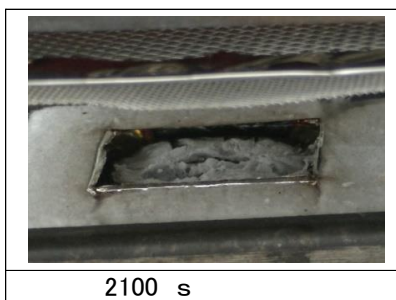
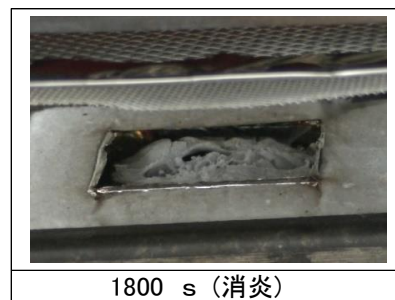
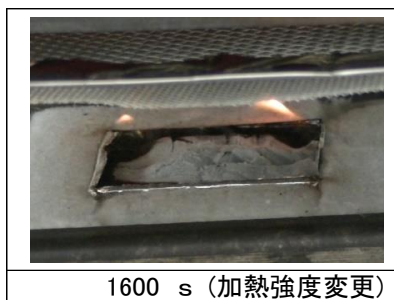
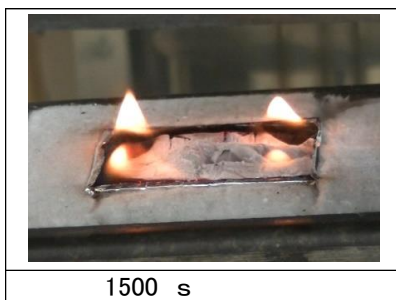
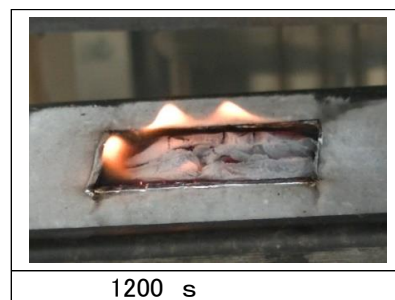
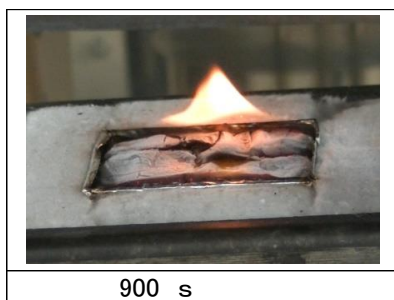
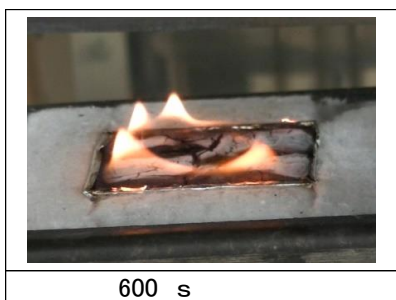
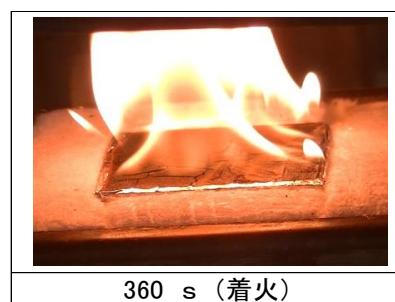
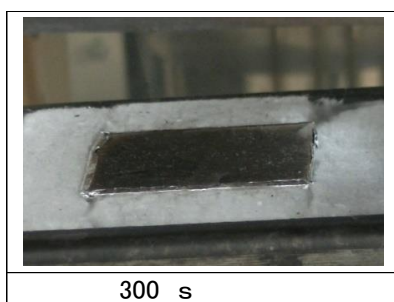
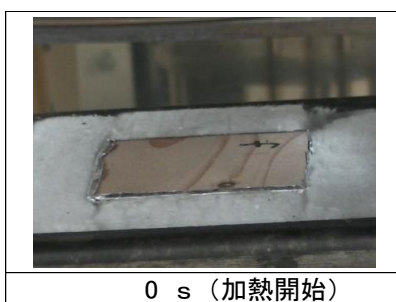
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	8 mm	脆い炭化層	12 mm
赤熱	20 mm	堅い炭化層	7 mm
炭化	27 mm	総炭化層	19 mm
変色	37 mm	健全部	21 mm

測定値

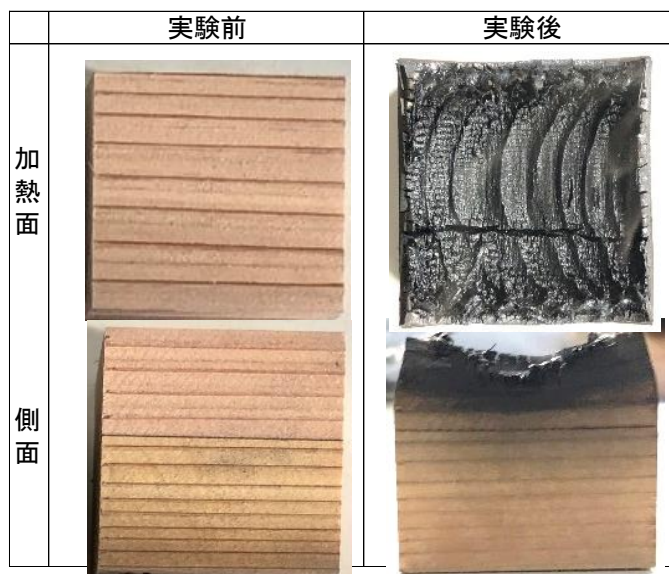




燃焼の様子



実験	40	C-7.0	
試験体	初期質量		42.5 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		383.8 kg/m3
	初期含水率		10.9 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	18→13 kW/m2
		②	7.0 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		720 s
	予備加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



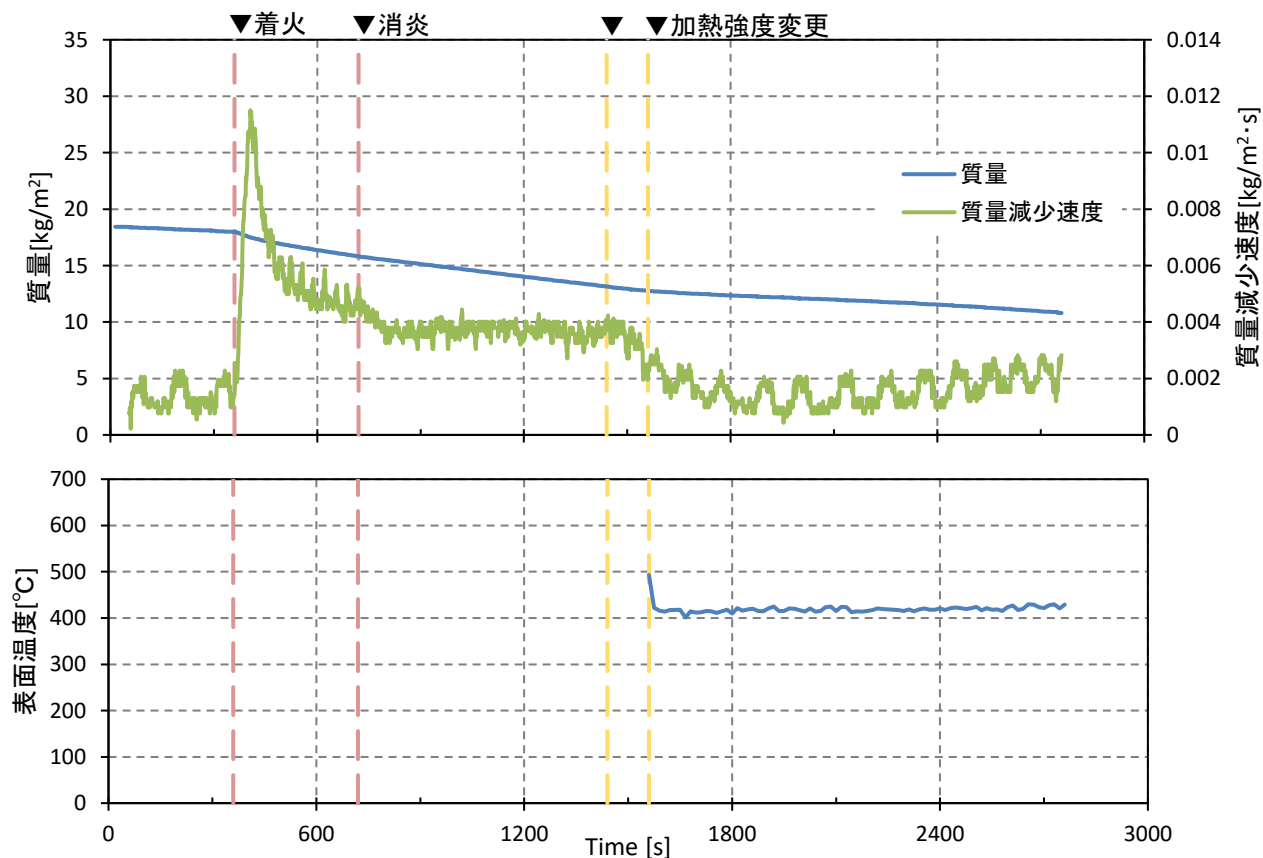
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1300 s	18.0 kW/m ²	0.00373 kg/m ² s	0.28695 kg/m ³ s	°C
	1800 ~ 2400 s	7.0 kW/m ²	0.00135 kg/m ² s	0.10349 kg/m ³ s	418.0 °C

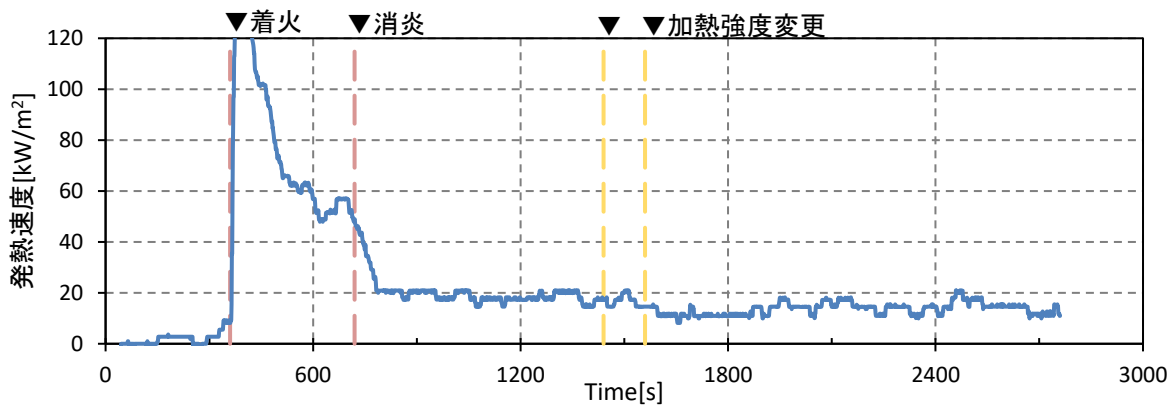
実験終了後試験体切断面



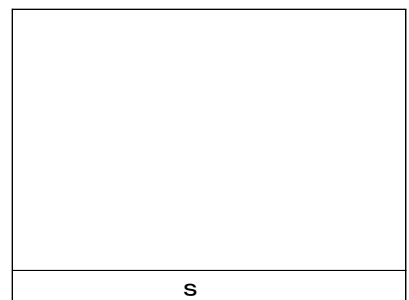
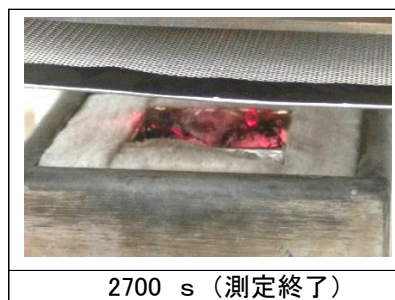
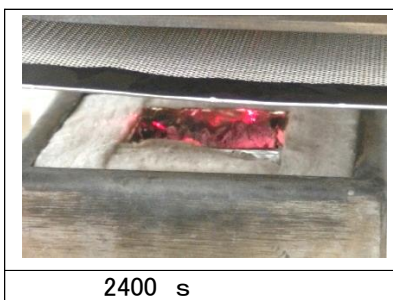
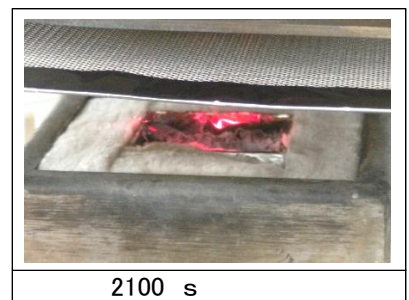
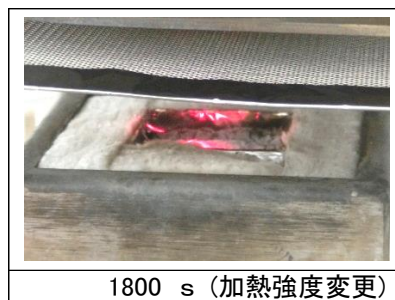
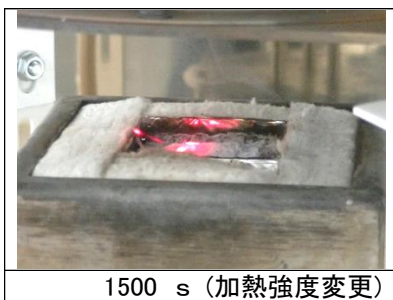
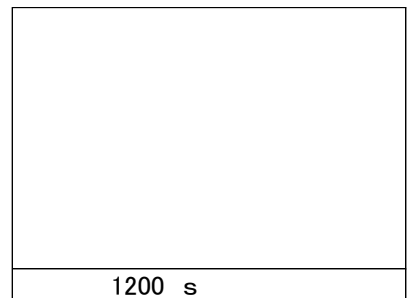
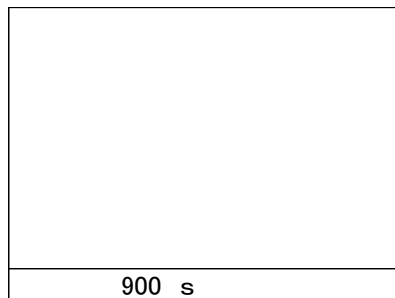
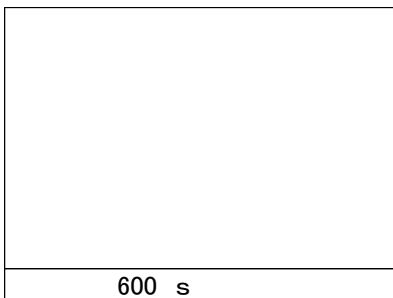
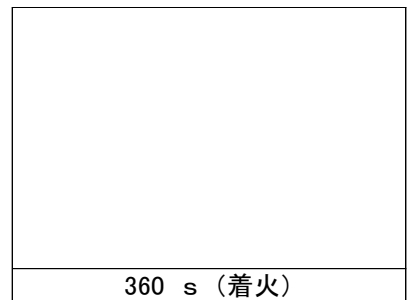
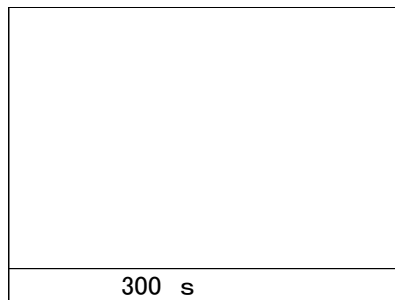
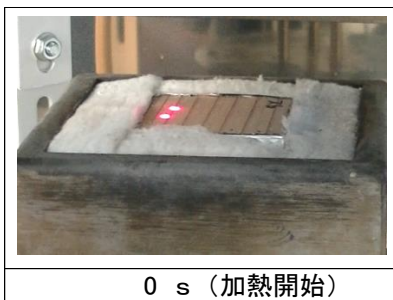
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	17 mm	脆い炭化層	8 mm
赤熱	25 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	30 mm	総炭化層	13 mm
変色	38 mm	健全部	18 mm

測定値

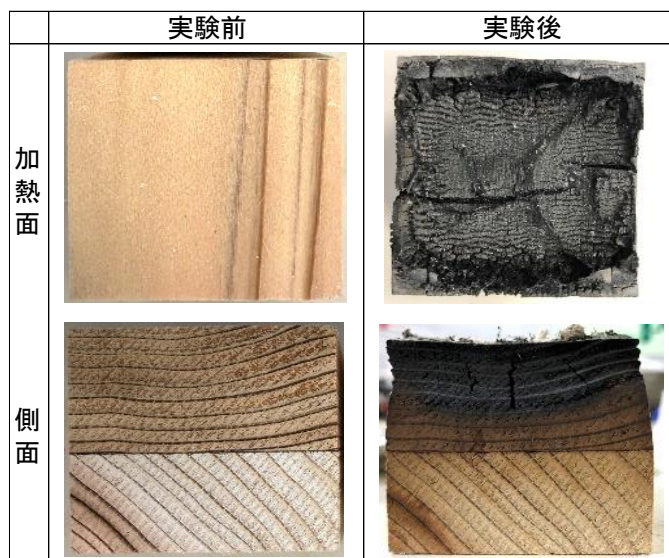




燃焼の様子



実験	41	C-7.5
試験体	初期質量	40.7 g
	初期寸法	厚 49 mm
		幅 48 mm
		奥 48 mm
	初期密度	360.3 kg/m ³
	初期含水率	9.4 %-wt.
試験条件	加熱面	板目
	加熱強度	① 20.0 kW/m ²
		② 7.5 kW/m ²
経過	着火	360 s
	消炎	855 s
	加熱強度変更	1560 s
	実験終了	2460 s
		240s頃に着火前に赤熱開始



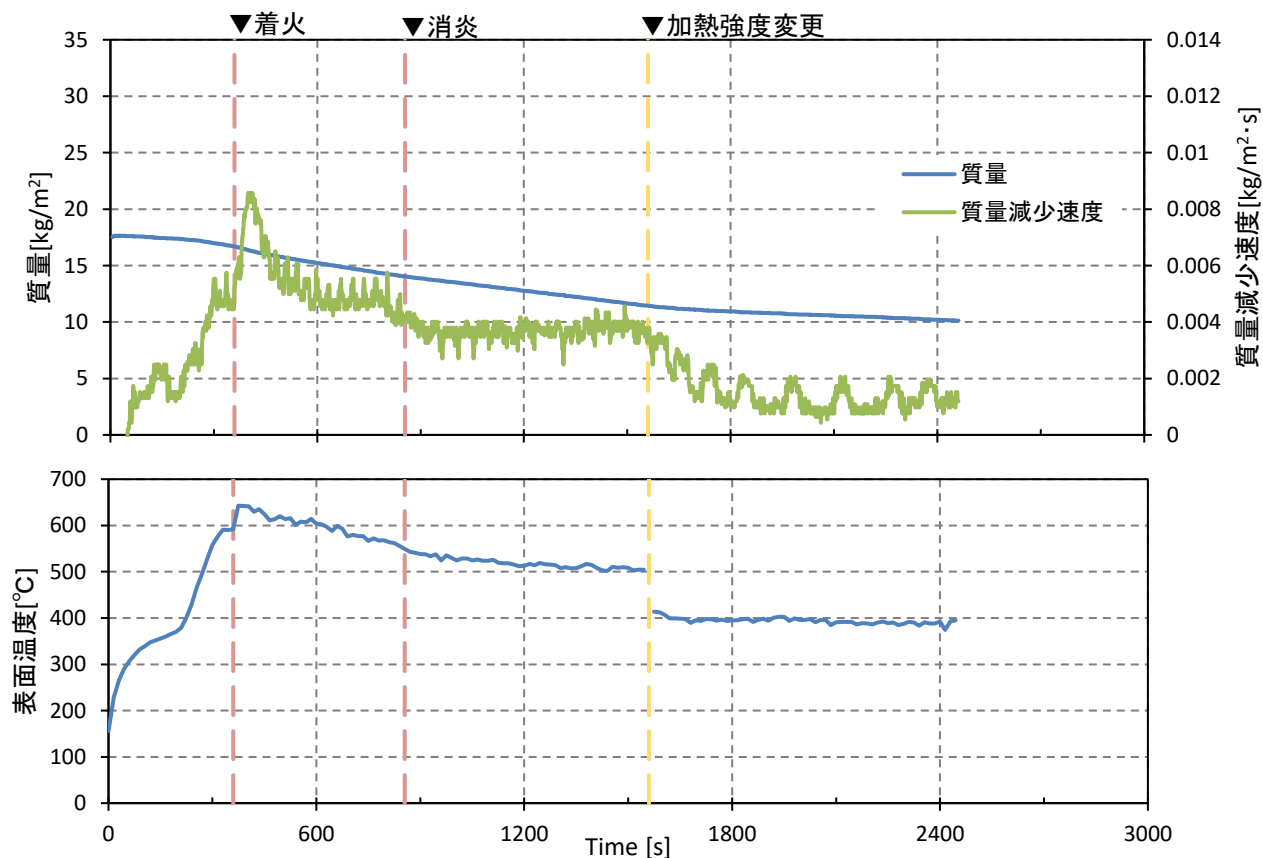
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1500 s	20.0 kW/m ²	0.00375 kg/m ² s	0.23432 kg/m ³ s	511.3 °C
	2100 ~ 2400 s	7.5 kW/m ²	0.00127 kg/m ² s	0.07965 kg/m ³ s	389.1 °C

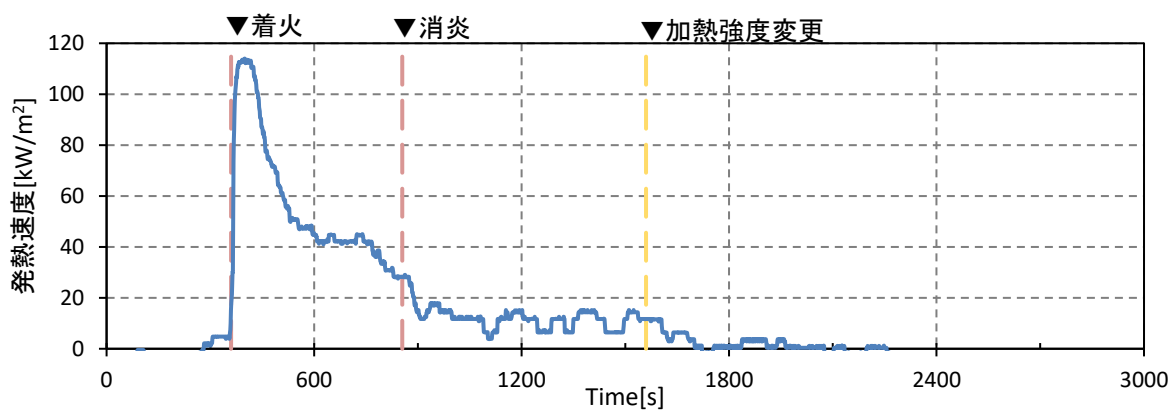
実験終了後試験体切断面



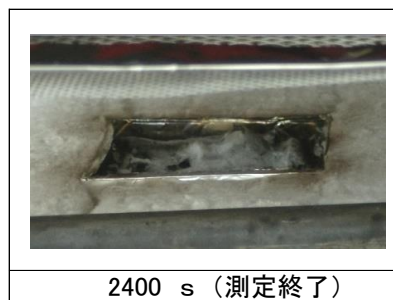
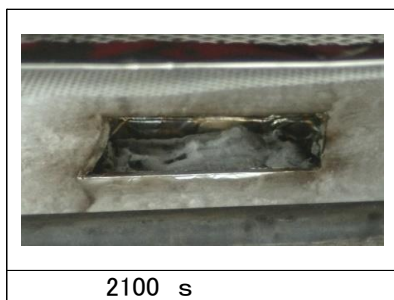
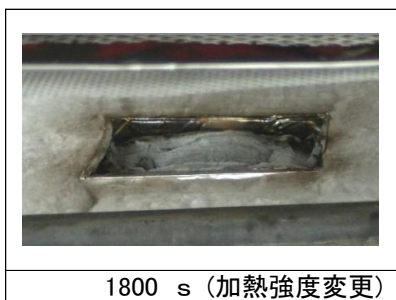
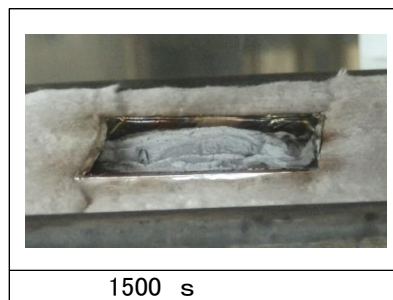
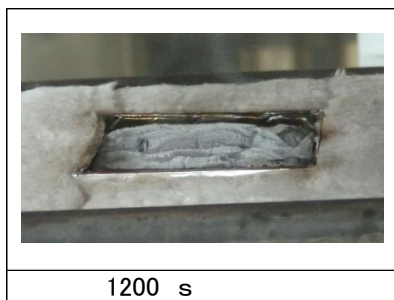
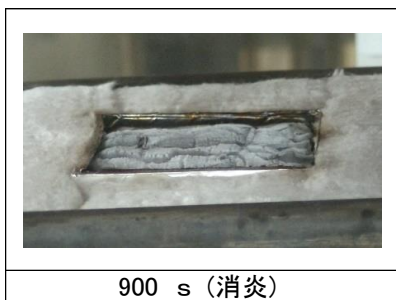
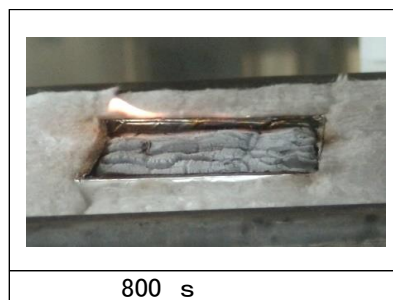
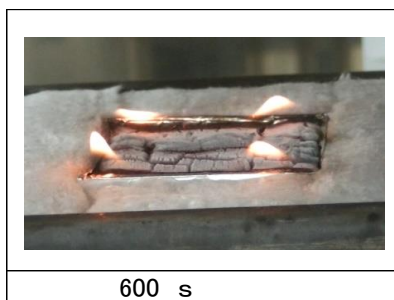
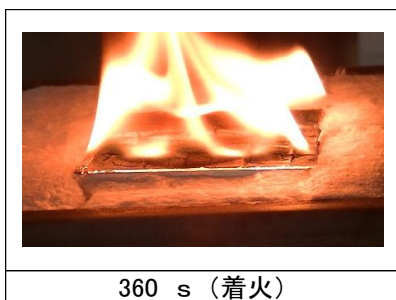
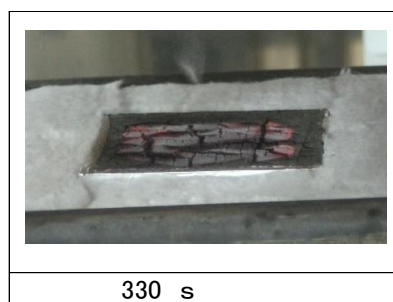
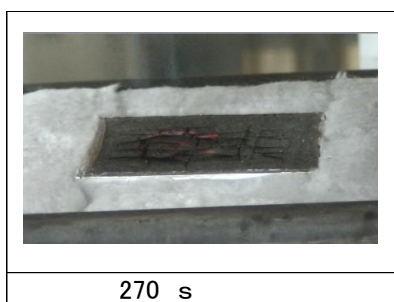
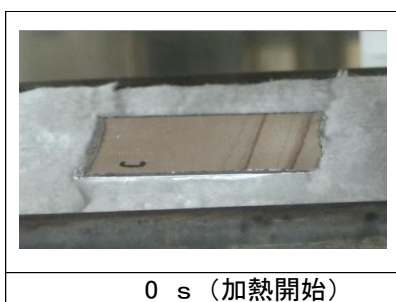
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	12 mm	脆い炭化層	9 mm
赤熱	21 mm	堅い炭化層	7 mm
炭化	28 mm	総炭化層	16 mm
変色	33 mm	健全部	21 mm

測定値

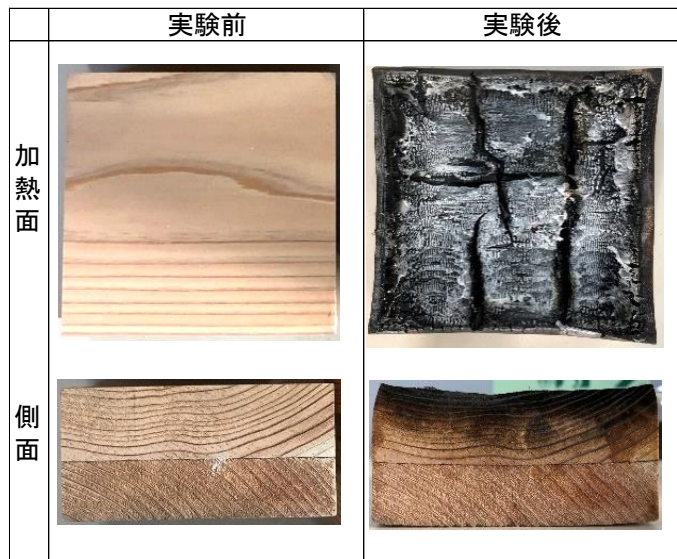




燃焼の様子



実験	42	C-7.6-1	
試験体	初期質量		166.6 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		342.0 kg/m3
	初期含水率		10.40 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	19→14 kW/m2
		②	7.6 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		1560 s
	加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



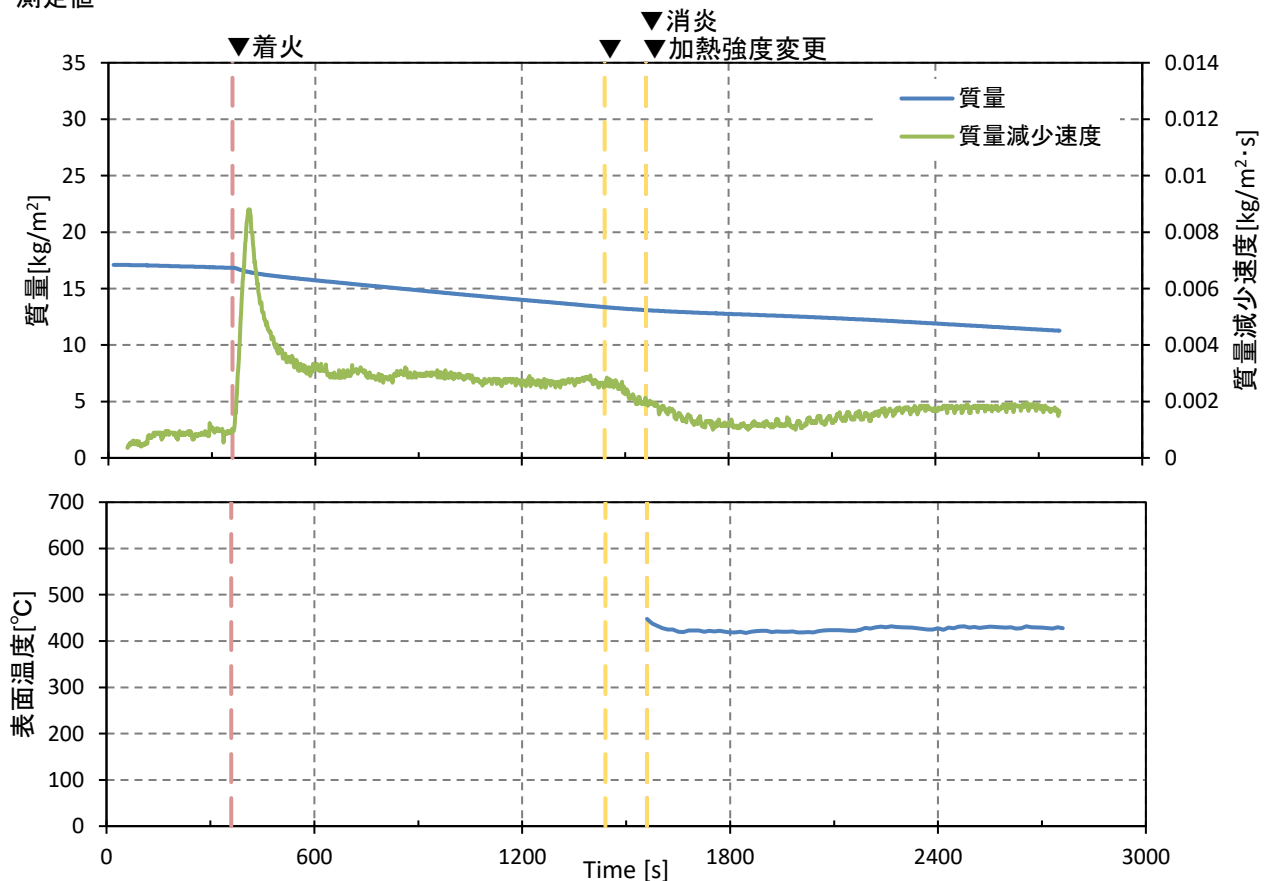
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1400 s	19.0 kW/m ²	0.00270 kg/m ² s	0.27036 kg/m ³ s	°C
	2400 ~ 2700 s	7.6 kW/m ²	0.00179 kg/m ² s	0.17855 kg/m ³ s	429.1 °C

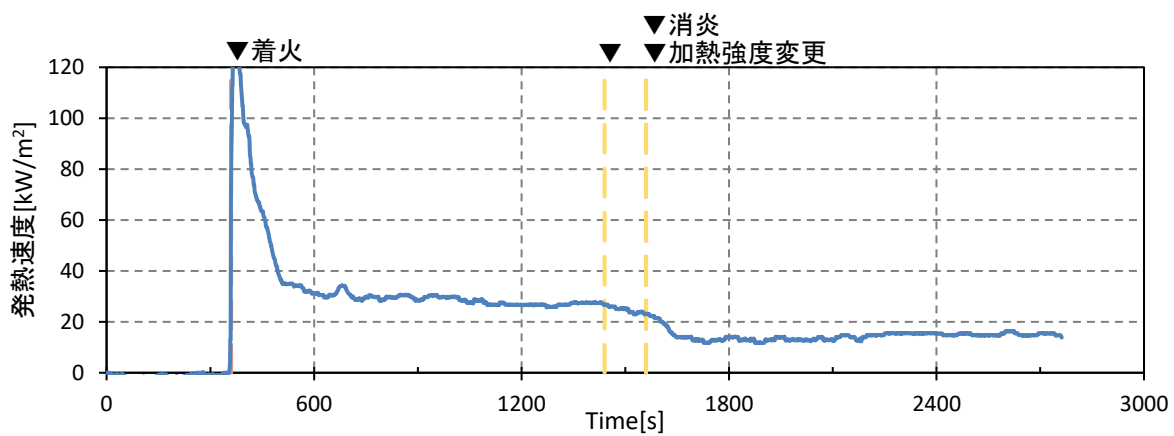
実験終了後試験体切断面



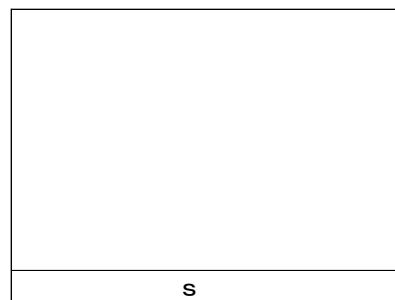
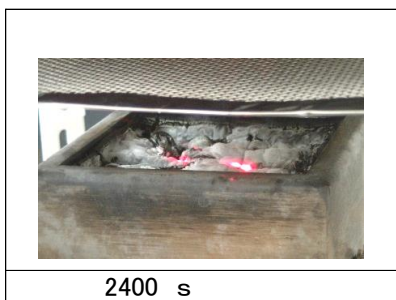
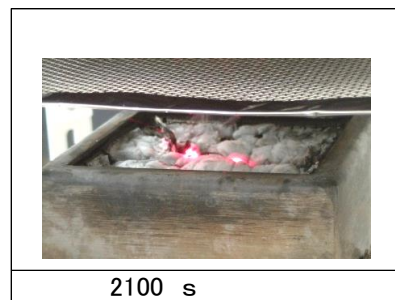
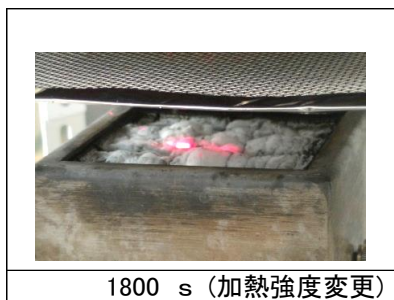
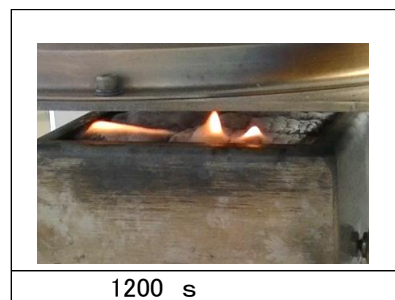
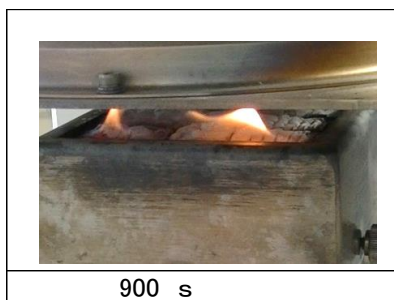
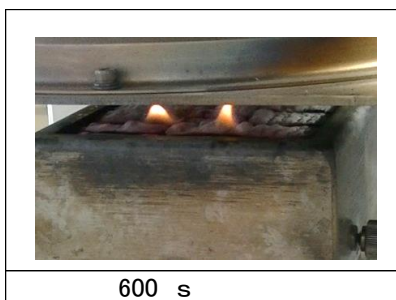
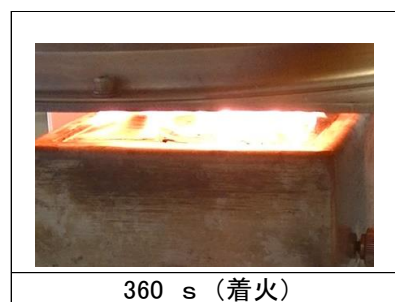
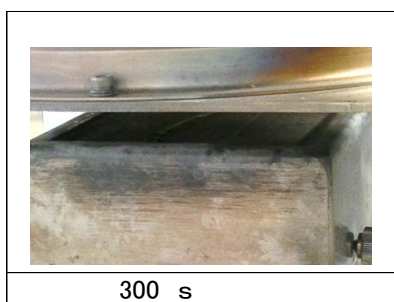
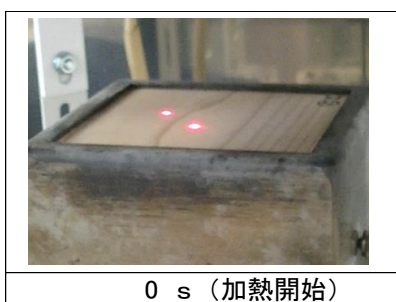
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	16 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	23 mm	堅い炭化層	3 mm
炭化	26 mm	総炭化層	10 mm
変色	36 mm	健全部	24 mm

測定値

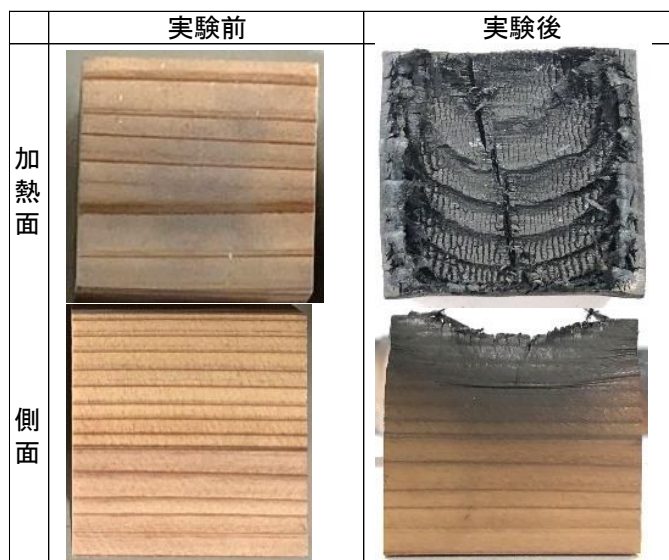




燃焼の様子

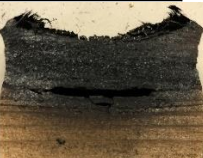


実験	43	Cf-7.6	
試験体	初期質量		42.1 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		380.5 kg/m3
	初期含水率		11.1 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	19→14 kW/m2
		②	7.6 kW/m2
経過	着火		360 s
	消炎		720 s
	予備加熱強度変更		1440 s
	加熱強度変更		1560 s
	実験終了		2760 s



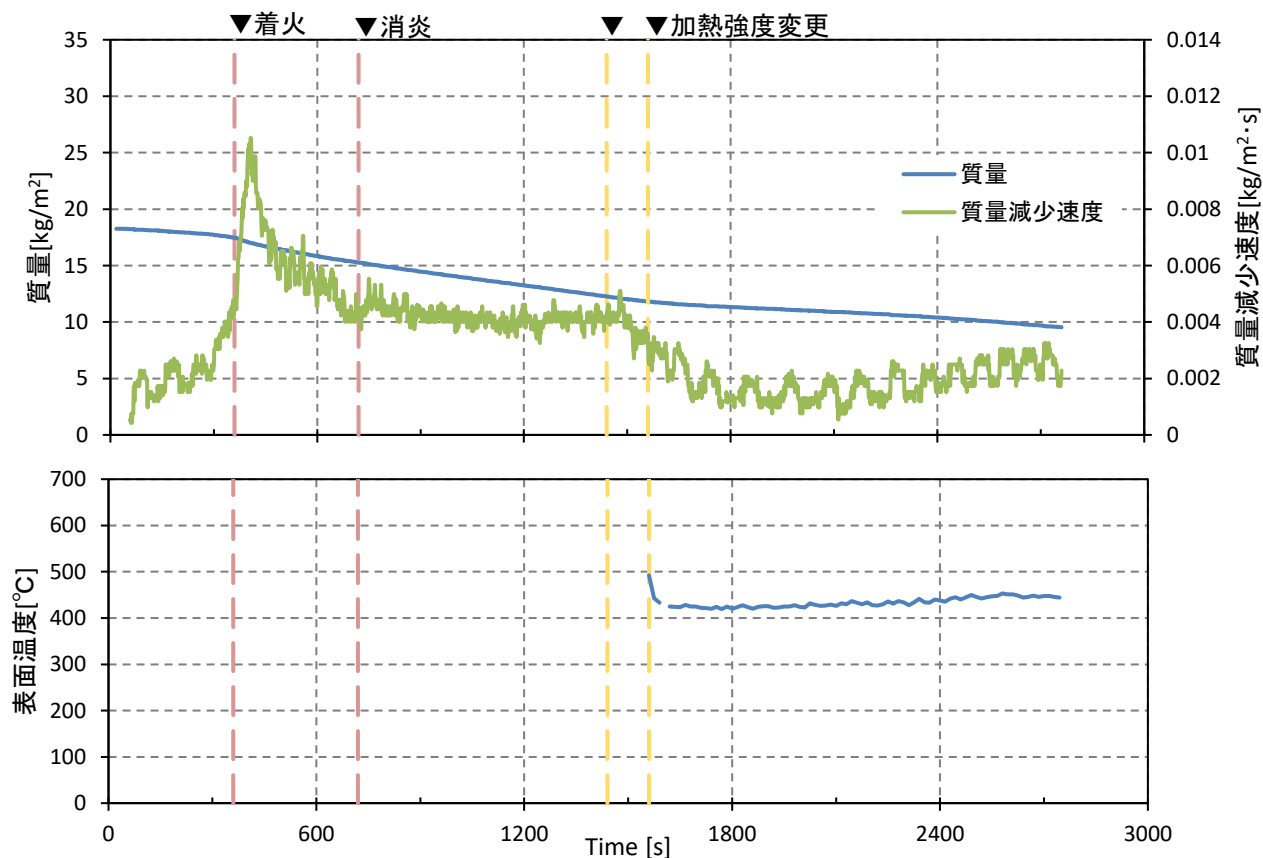
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1300 s	19.0 kW/m ²	0.00409 kg/m ² s	0.25557 kg/m ³ s	°C
	1800 ~ 2400 s	7.6 kW/m ²	0.00154 kg/m ² s	0.09650 kg/m ³ s	429.1 °C

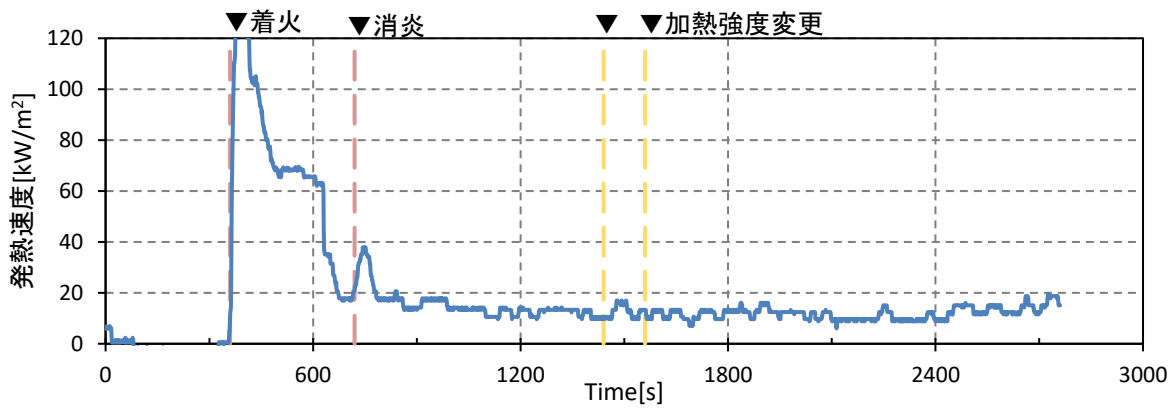
実験終了後試験体切断面



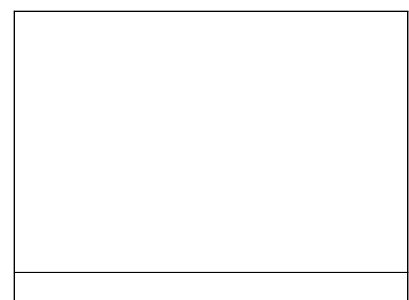
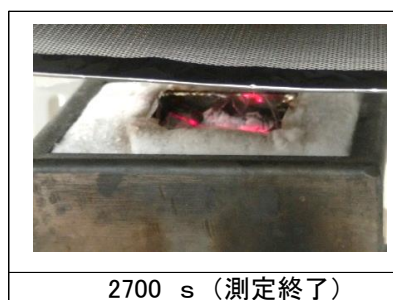
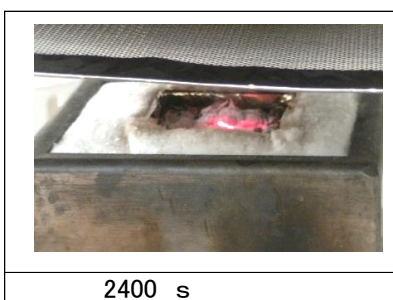
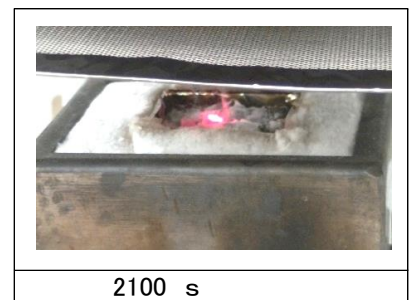
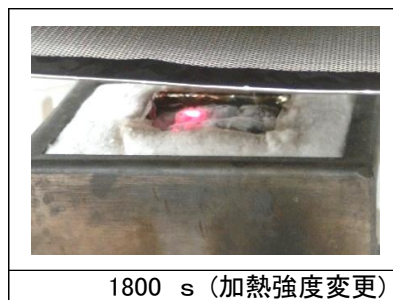
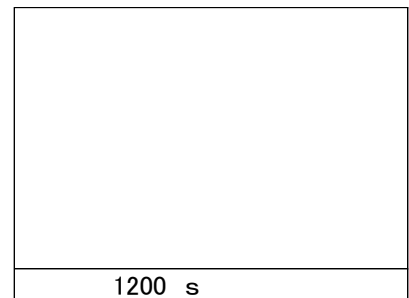
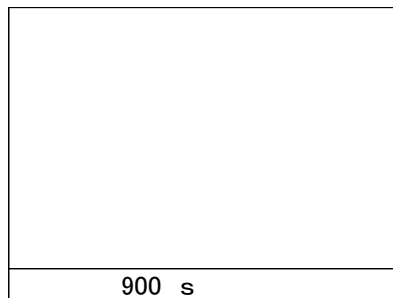
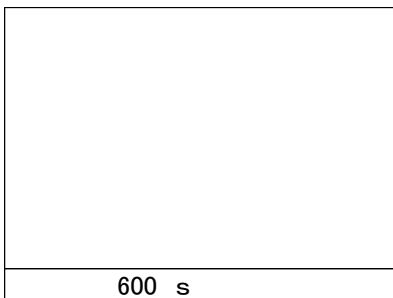
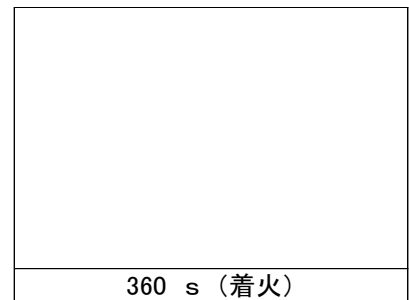
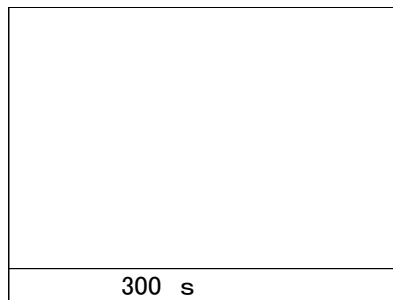
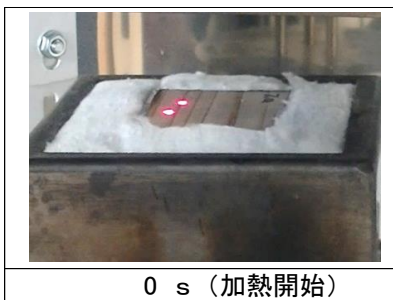
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	16 mm	脆い炭化層	11 mm
赤熱	27 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	32 mm	総炭化層	16 mm
変色	40 mm	健全部	16 mm

測定値

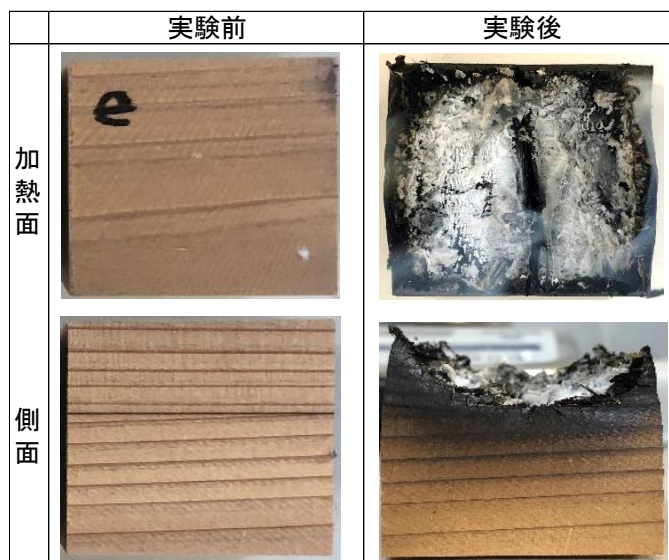




燃焼の様子



実験 44	Cf-7.9-1		
試験体	初期質量		42.0 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		380.0 kg/m ³
	初期含水率		11.4 %-wt.
試験条件	加熱面		板目
	加熱強度	①	15.0 kW/m ²
		②	7.9 kW/m ²
経過	表面気流		0.5 m/s
	着火		360 s
	消炎		555 s
	送風開始		1150 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2450 s
	実験終了		3060 s



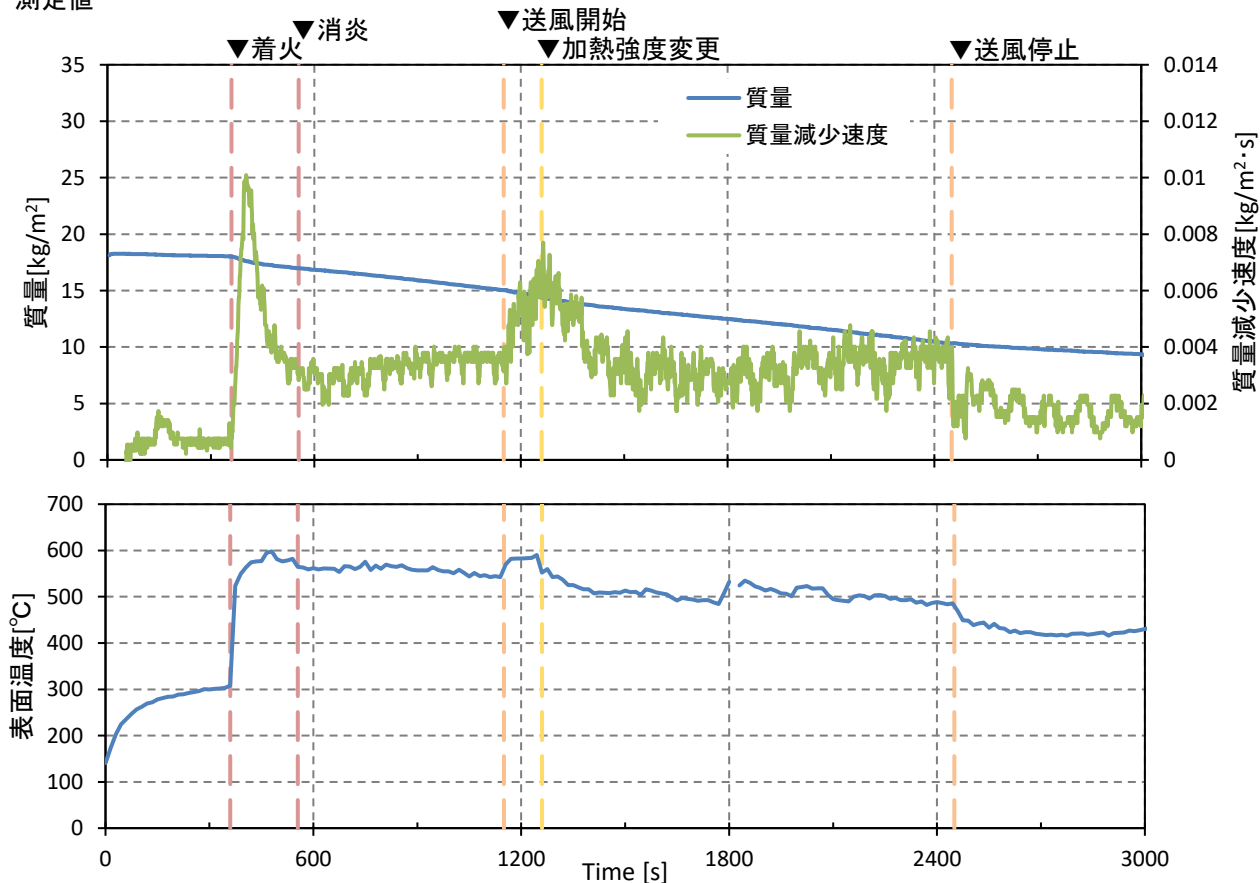
結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	900 ~ 1100 s	15.0 kW/m ²	0 m/s	0.00354 kg/m ² s	0.29520 kg/m ³ s	553.3 °C
	1200 ~ 1260 s	15.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00566 kg/m ² s	0.47190 kg/m ³ s	577.7 °C
	1500 ~ 2400 s	7.9 kW/m ²	0.5 m/s	0.00322 kg/m ² s	0.26839 kg/m ³ s	504.2 °C
	2700 ~ 3000 s	7.9 kW/m ²	0 m/s	0.00157 kg/m ² s	0.13119 kg/m ³ s	423.4 °C

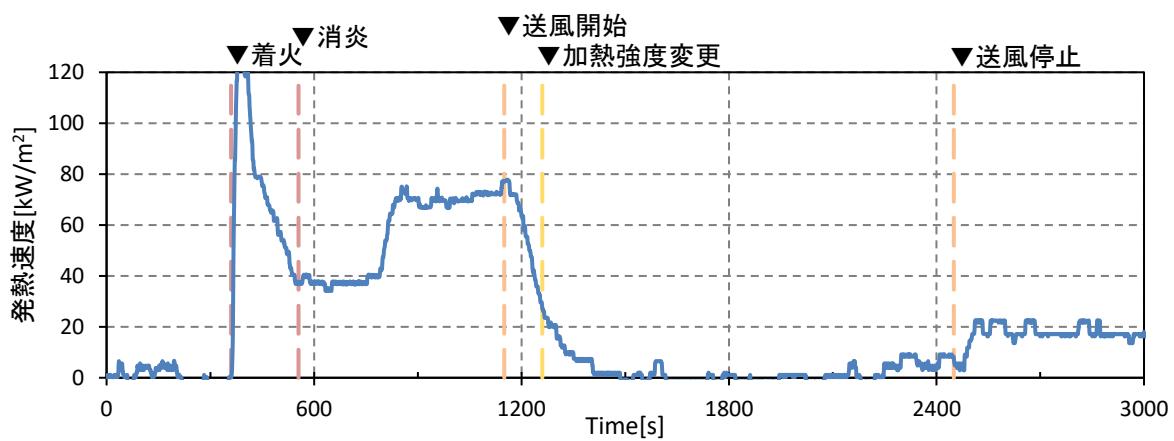
実験終了後試験体切断面



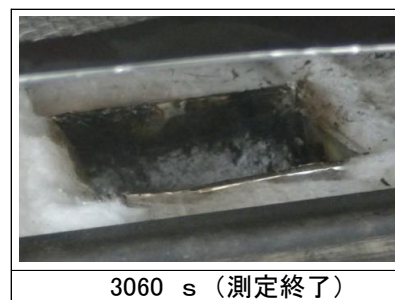
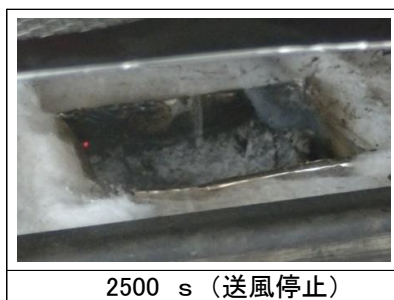
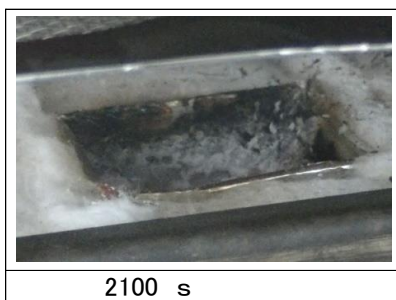
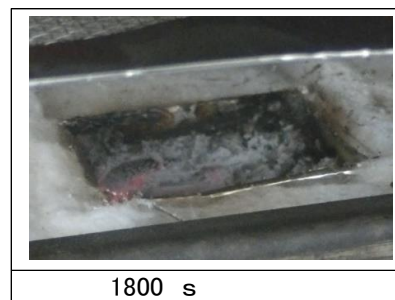
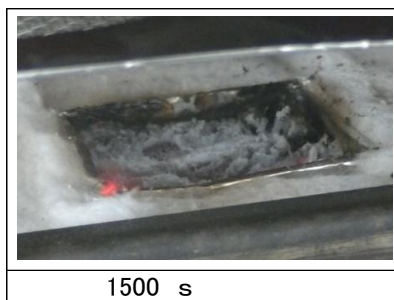
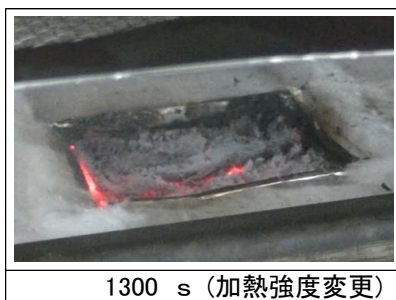
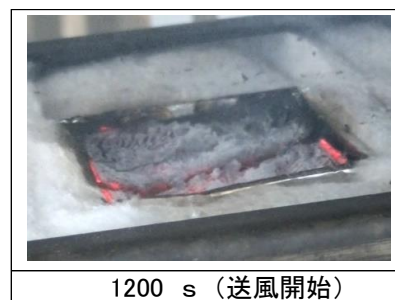
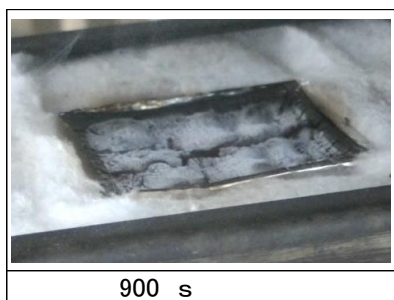
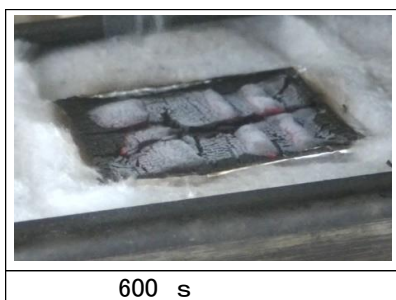
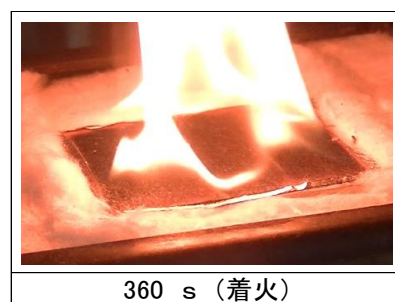
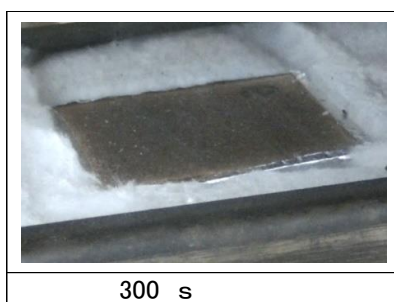
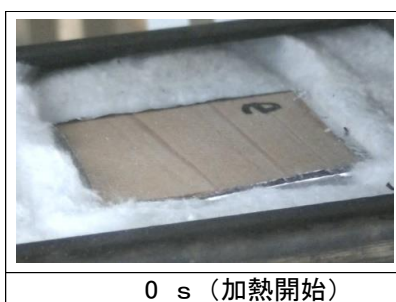
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	20 mm	脆い炭化層	7 mm
赤熱	27 mm	堅い炭化層	5 mm
炭化	32 mm	総炭化層	12 mm
変色	38 mm	健全部	16 mm

測定値

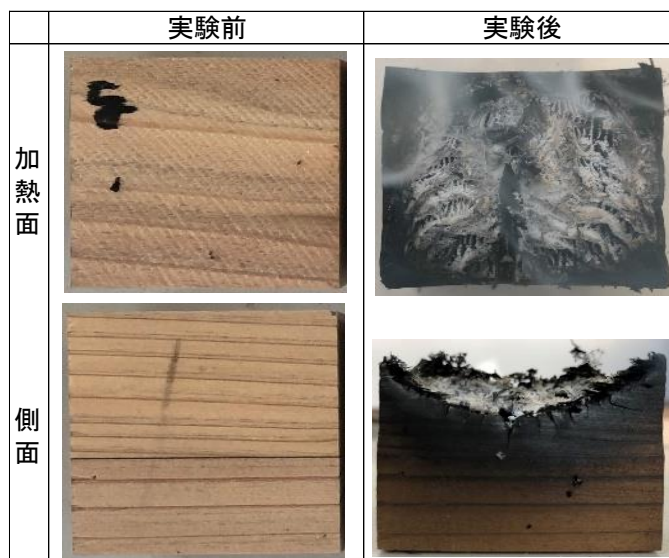




燃焼の様子



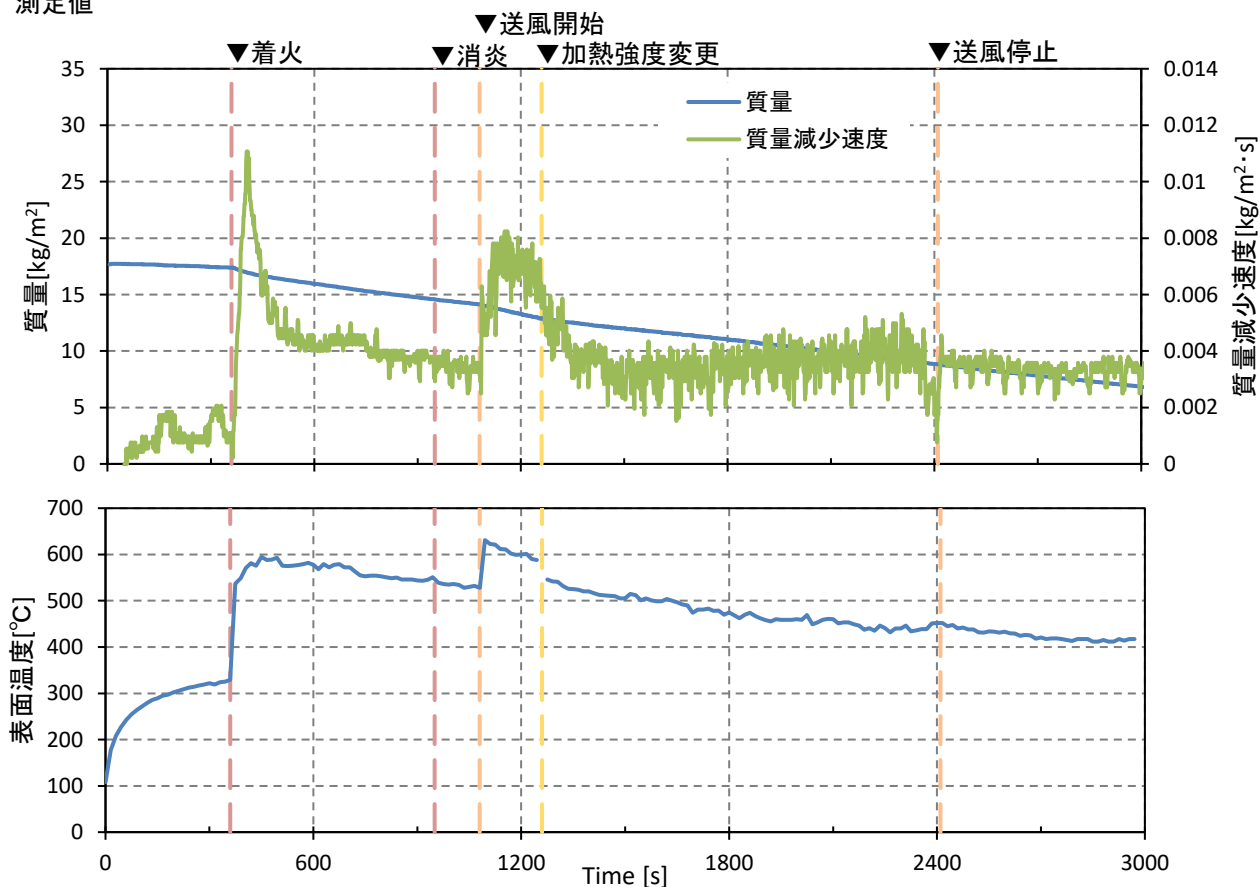
実験	45	Cf-7.9-2	
試験体	初期質量		40.8 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		368.9 kg/m3
	初期含水率		10.1 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	15.0 kW/m2
		②	7.9 kW/m2
	表面気流		1.1 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		950 s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	送風停止		2410 s
	実験終了		3060 s

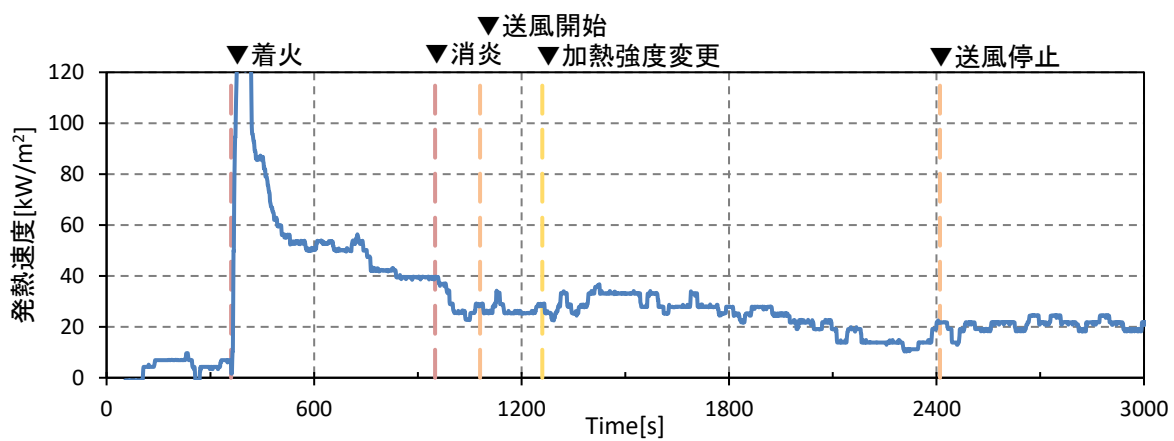


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	960 ~ 1070 s	15.0 kW/m ²	0 m/s	0.00339 kg/m ² s	0.19945 kg/m ³ s	533.8 °C
	1150 ~ 1250 s	15.0 kW/m ²	1.1 m/s	0.00698 kg/m ² s	0.41068 kg/m ³ s	598.7 °C
	1800 ~ 2300 s	7.9 kW/m ²	1.1 m/s	0.00369 kg/m ² s	0.21678 kg/m ³ s	454.4 °C
	2700 ~ 3000 s	7.9 kW/m ²	0 m/s	0.00324 kg/m ² s	0.19046 kg/m ³ s	416.3 °C

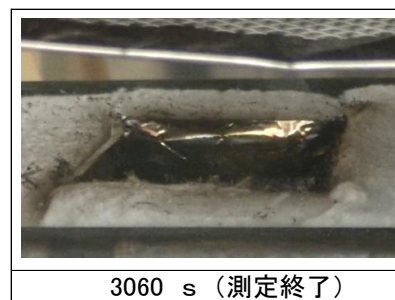
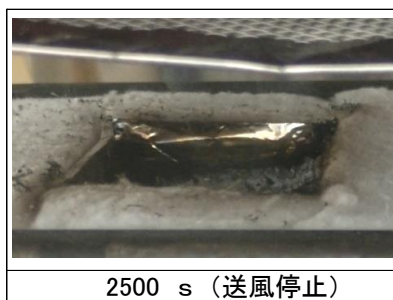
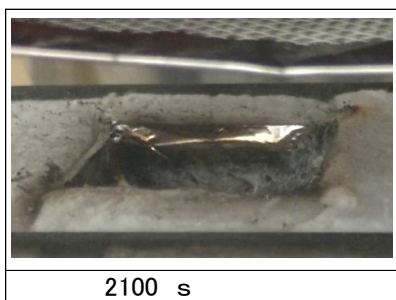
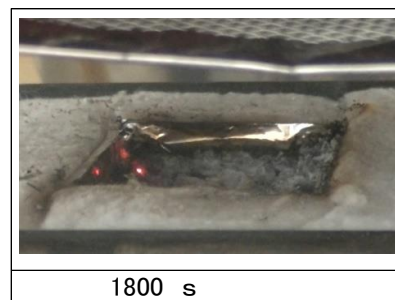
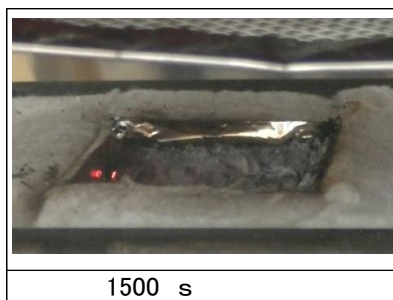
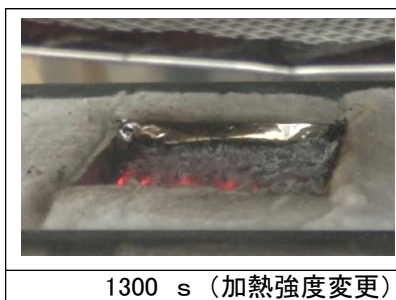
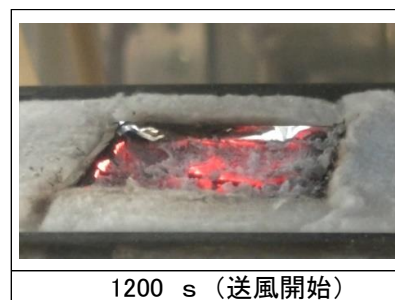
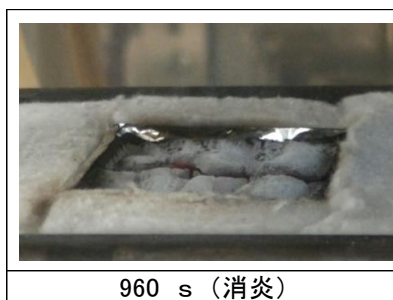
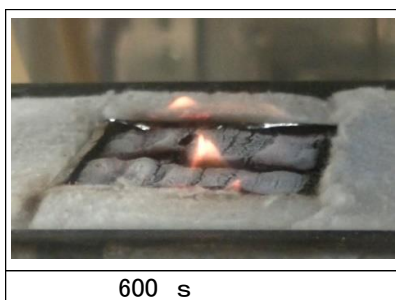
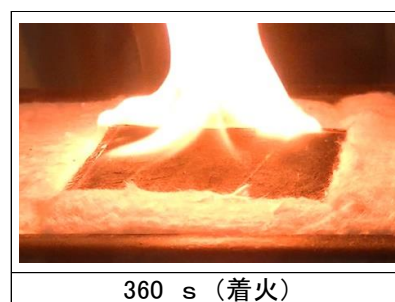
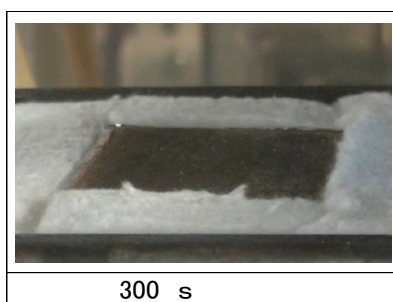
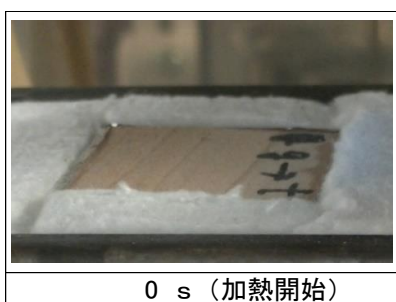
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
		焼失	23 mm	脆い炭化層	12 mm
		赤熱	35 mm	堅い炭化層	5 mm
		炭化	40 mm	総炭化層	17 mm
		変色	48 mm	健全部	8 mm

測定値

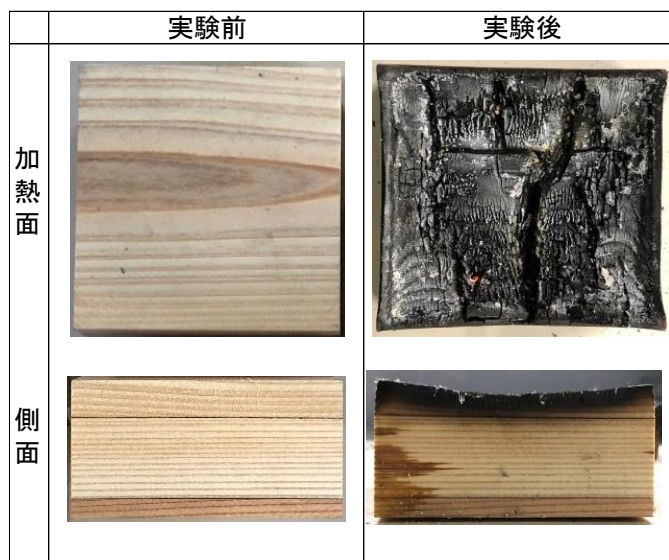




燃焼の様子



実験	46	C-8.6	
試験体	初期質量		175.3 g
	初期寸法	厚	50 mm
		幅	98.7 mm
		奥	98.7 mm
	初期密度		359.8 kg/m3
	初期含水率		11.2 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	21→16 kW/m2
		②	8.6 kW/m2
経過	着火		300 s
	消炎		480 s
	加熱強度変更		1380 s
	加熱強度変更		1500 s
	実験終了		2700 s



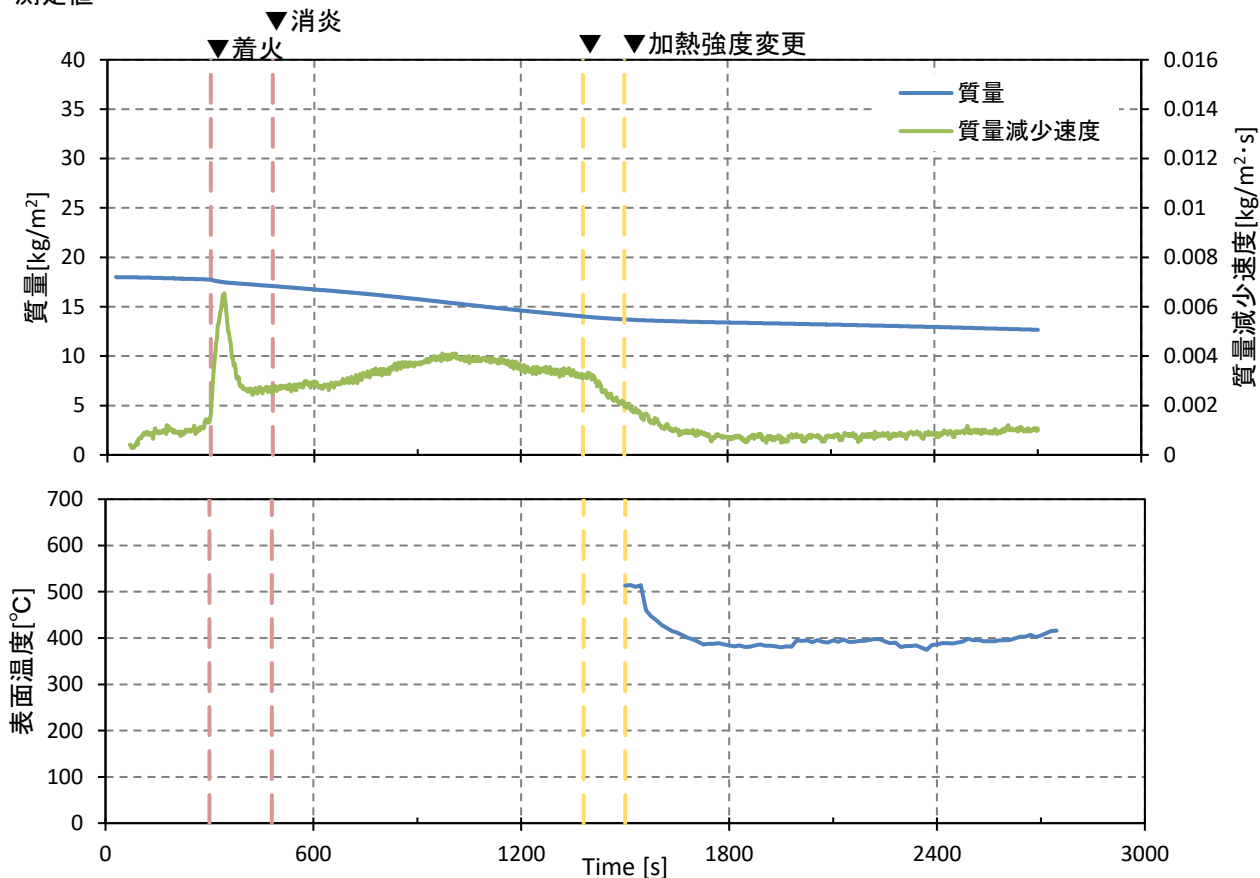
結果	期間	加熱強度	質量減少速度		表面温度
	1200 ~ 1300 s	21.0 kW/m ²	0.00345 kg/m ² s	0.34465 kg/m ³ s	°C
	2400 ~ 2700 s	8.6 kW/m ²	0.00096 kg/m ² s	0.09586 kg/m ³ s	395.6 °C

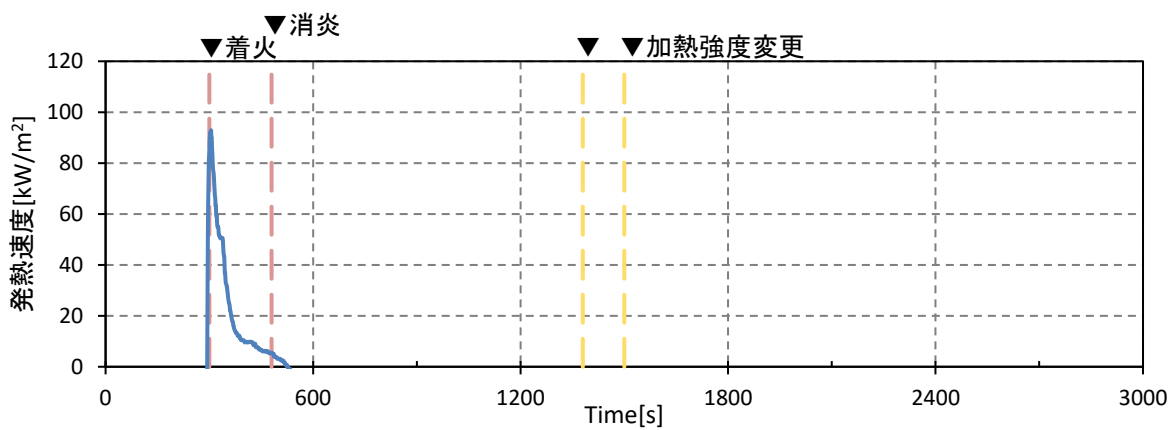
実験終了後試験体切断面



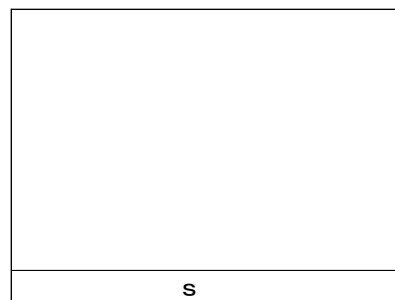
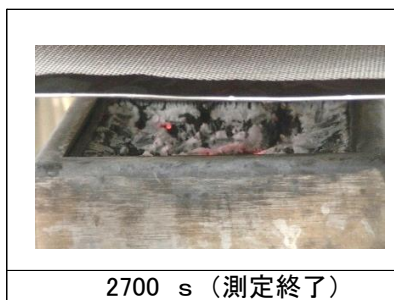
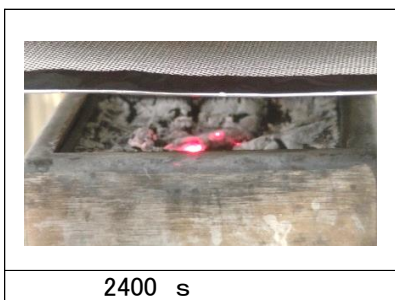
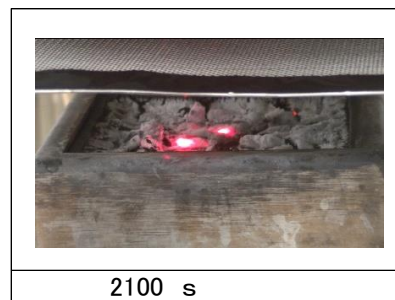
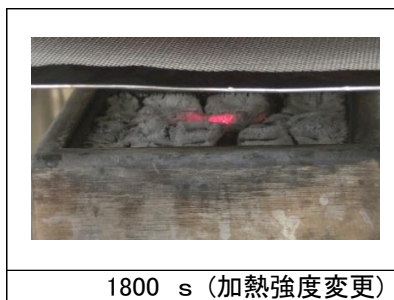
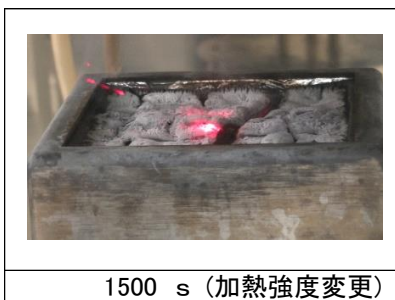
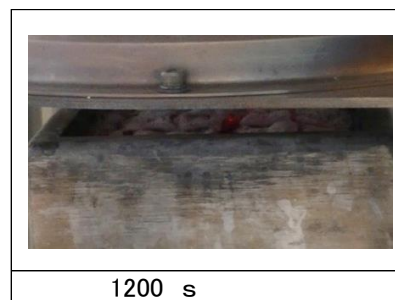
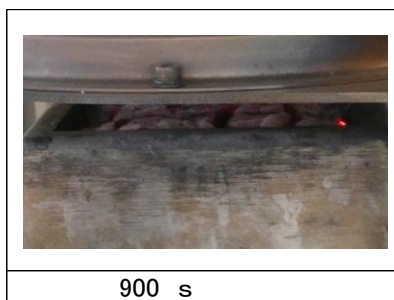
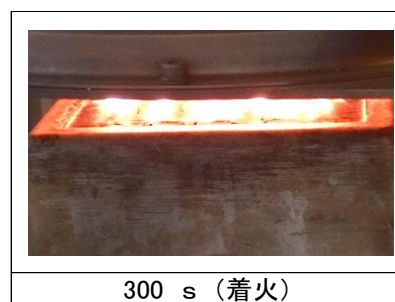
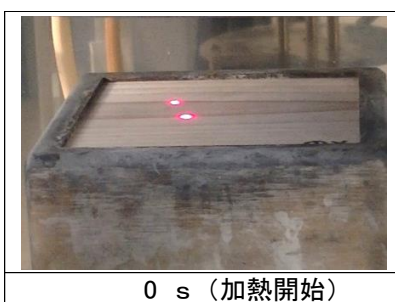
初期表面位置からの距離		層厚み	
焼失	15 mm	脆い炭化層	6 mm
赤熱	21 mm	堅い炭化層	4 mm
炭化	25 mm	総炭化層	10 mm
変色	30 mm	健全部	25 mm

測定値

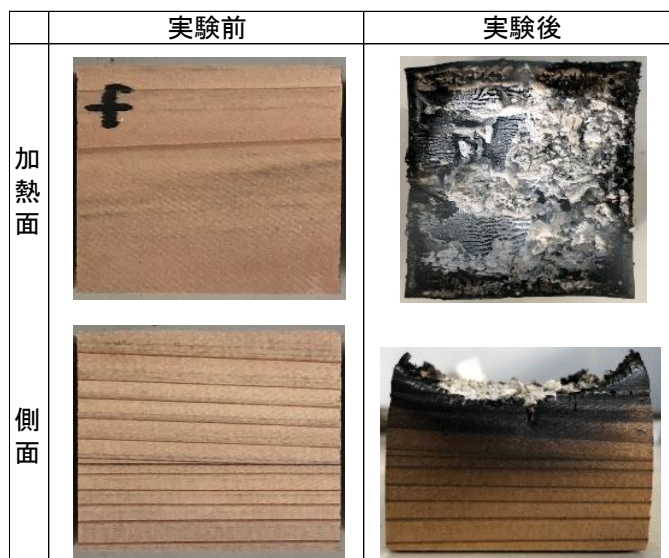




燃焼の様子



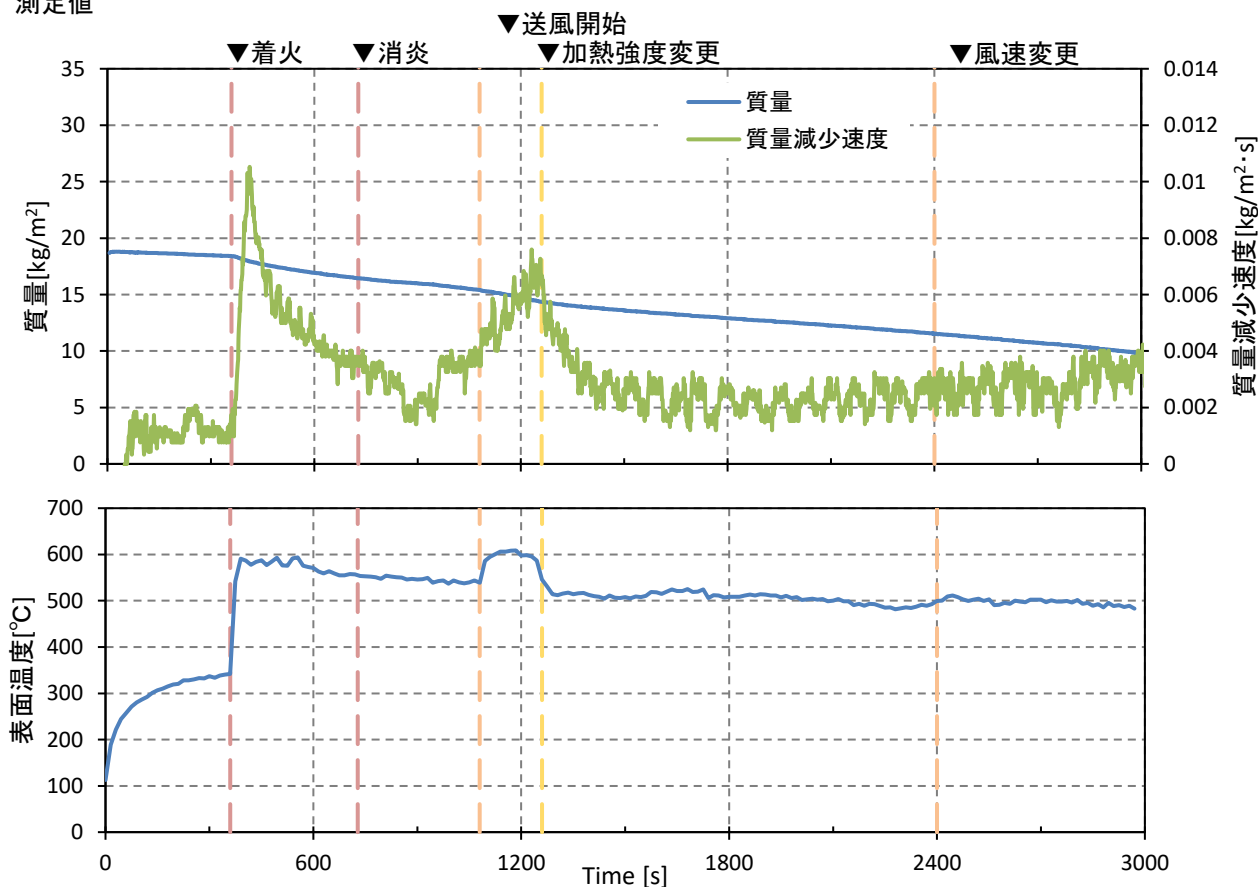
実験	47	Cf-8.8	
試験体	初期質量		43.3 g
	初期寸法	厚	48 mm
		幅	48 mm
		奥	48 mm
	初期密度		391.3 kg/m3
	初期含水率		11.8 %-wt.
	加熱面		板目
試験条件	加熱強度	①	17.0 kW/m2
		②	8.8 kW/m2
	表面気流		0.5 m/s
経過	着火		360 s
	消炎		728 s
	送風開始		1080 s
	加熱強度変更		1260 s
	風速変更		2400 s
	実験終了		3060 s

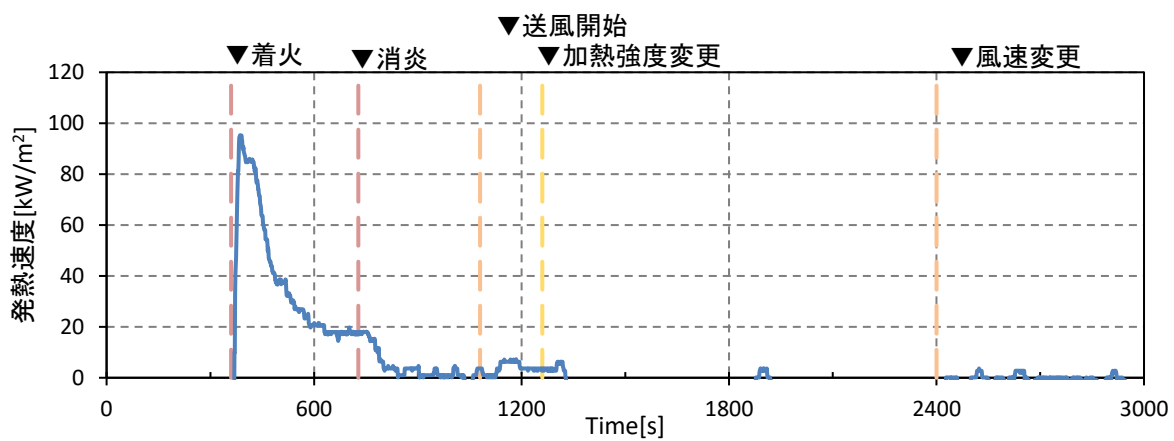


結果	期間	加熱強度	表面気流	質量減少速度		表面温度
	1000 ~ 1050 s	17.0 kW/m ²	0 m/s	0.00350 kg/m ² s	0.23354 kg/m ³ s	540.2 °C
	1200 ~ 1250 s	17.0 kW/m ²	0.5 m/s	0.00638 kg/m ² s	0.42523 kg/m ³ s	594.7 °C
	1800 ~ 2350 s	8.8 kW/m ²	0.5 m/s	0.00223 kg/m ² s	0.14885 kg/m ³ s	500.0 °C
	2700 ~ 3000 s	8.8 kW/m ²	0.8 m/s	0.00301 kg/m ² s	0.20058 kg/m ³ s	491.3 °C

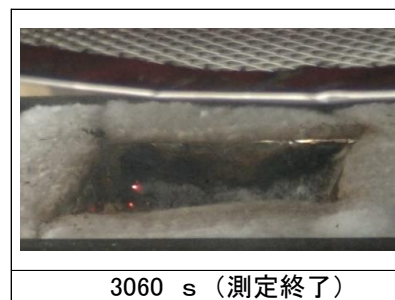
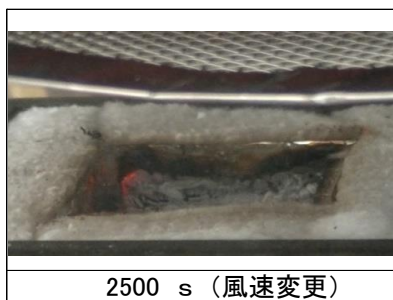
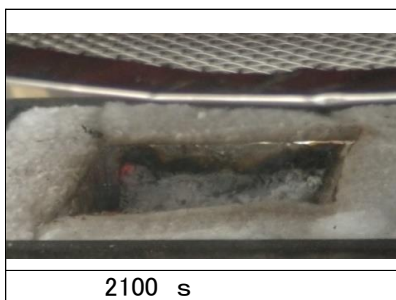
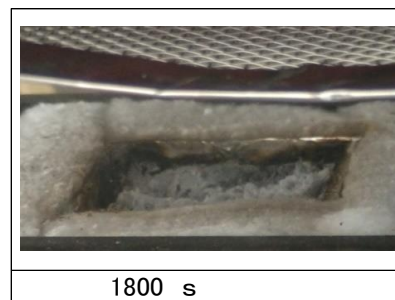
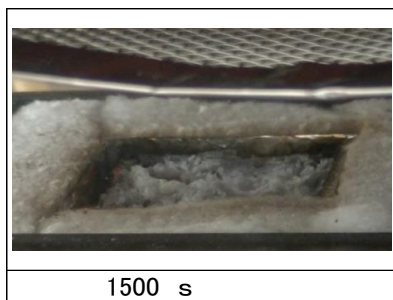
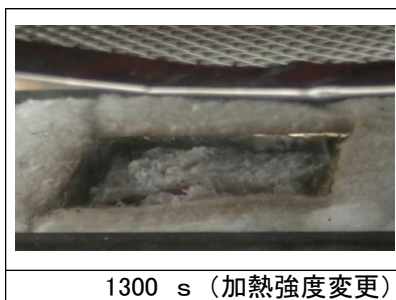
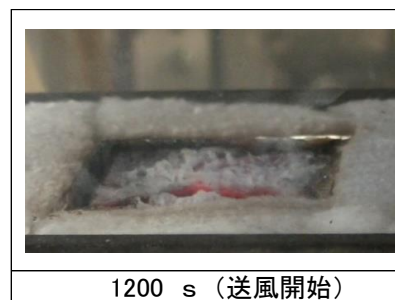
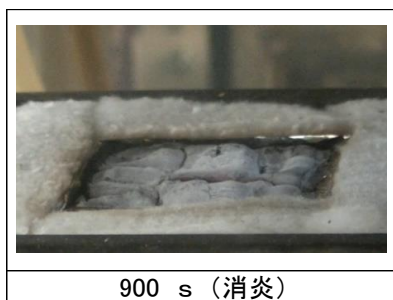
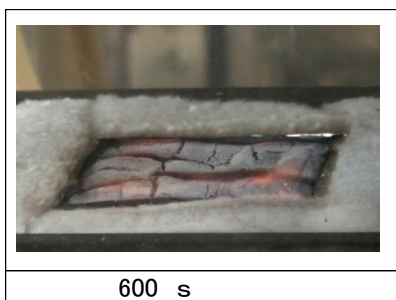
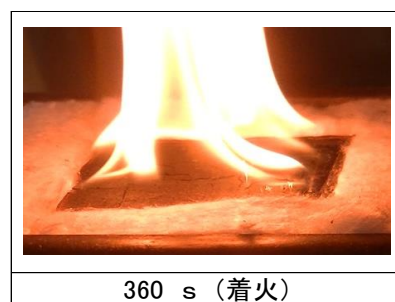
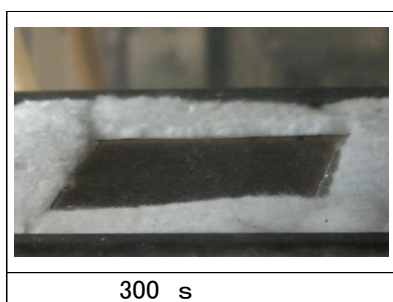
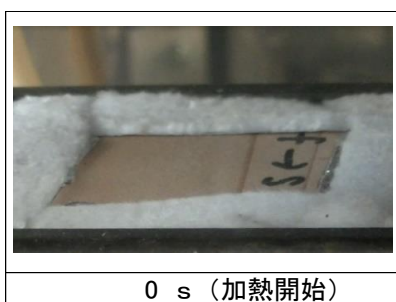
実験終了後試験体切断面		初期表面位置からの距離		層厚み	
	焼失	17 mm		脆い炭化層	5 mm
	赤熱	22 mm		堅い炭化層	10 mm
	炭化	32 mm		総炭化層	15 mm
	変色	40 mm		健全部	16 mm

測定値





燃焼の様子



付録2 大型熱重量分析装置による加熱実験データ集

第5章で実施した大型熱重量分析装置を用いた加熱実験について、全31回の実験データを以降にまとめる。

実験条件一覧

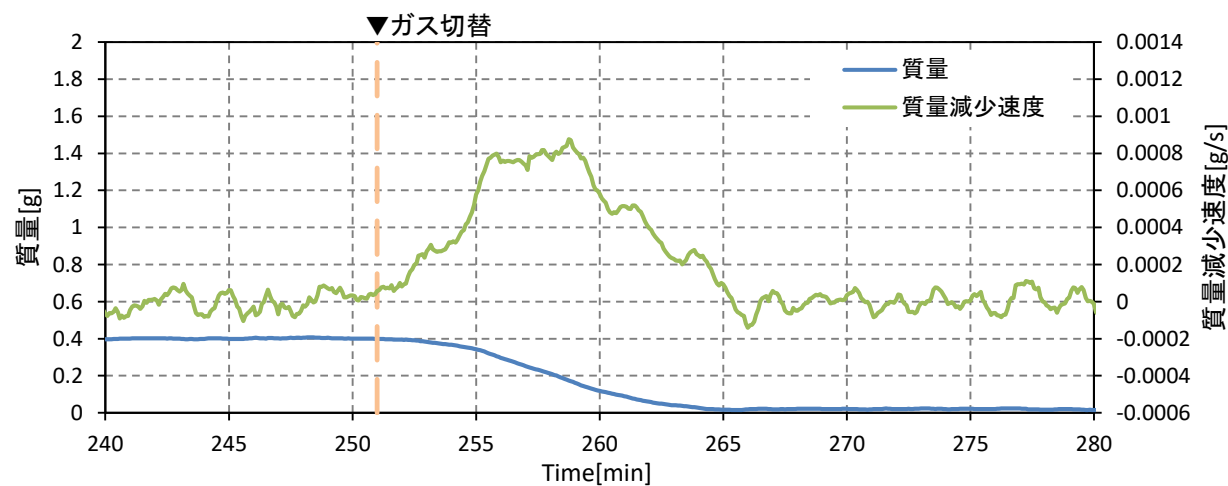
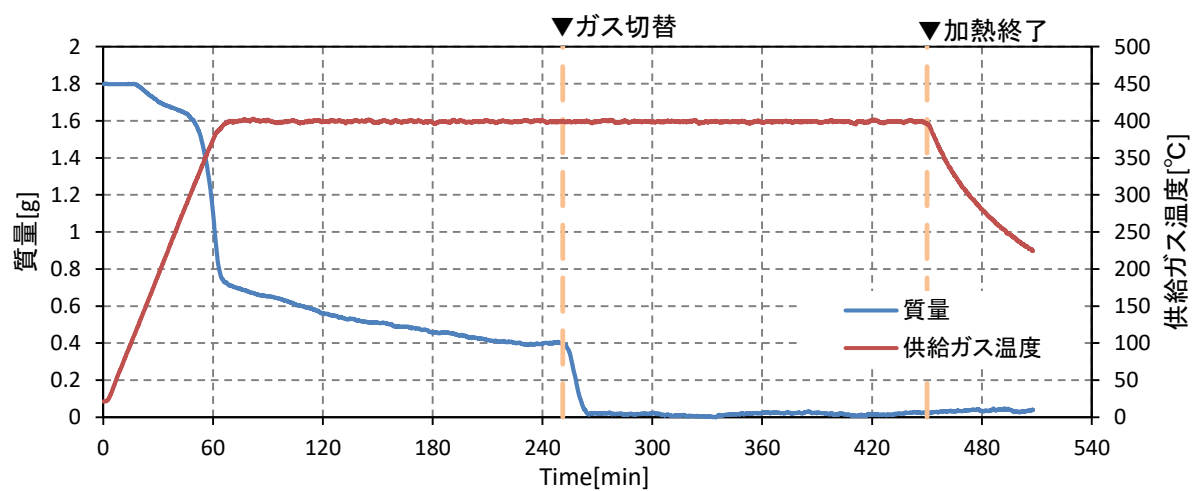
実験 No.		試験体				酸素濃度[%]	
		樹種	寸法		密度[kg/m ³]	目標値	実測値
			2 辺 [mm]	1 辺 [mm]			
48	Lo-5-21-1	カラマツ	30×30	5	0.41	21	21.0～21.3
49	Lo-5-21-2				0.41	21	21.0～21.3
50	Lo-5-20				0.40	20	20.2～20.4
51	Lo-5-19-1				0.40	19	19.2～19.4
52	Lo-5-19-2				0.40	19	18.9～19.2
53	Lo-5-18				0.42	18	17.7～18.0
54	Lo-5-15				0.40	15	15.1～15.3
55	Lo-5-12				0.41	12	12.2～12.3
56	Lo-5-N2				0.42	—	—
57	Lo-10-21		30×30	10	0.48	21	21.4～21.6
58	Lo-10-15				0.51	15	15.4～15.5
59	Lo-10-10				0.58	10	10.3
60	Lo-10-6				0.46	6	6.17～6.23
61	Lo-10-N2				0.54	—	—
62	Lo-15-21		30×30	15	0.45	21	21.4～21.6
63	Lo-15-15-1				0.44	15	15.3～15.5
64	Lo-15-15-2				0.48	15	15.3～15.5
65	Lo-15-12				0.48	12	12.1～12.2
66	Lo-15-9				0.53	9	9.00～9.05
67	Lo-15-6				0.54	6	6.05～6.07
68	Lo-15-3-1				0.53	3	3.00～3.02
69	Lo-15-3-2		30×30	15	0.40	3	3.03～3.05
70	Lo-15-2				0.51	2	1.89～1.91
71	Lo-15-N2-1				0.49	—	—
72	Lo-30-21		30×30	30	0.53	21	21.6～21.7
73	Lo-30-15-1				0.53	15	15.4～15.5
74	Lo-30-15-2				0.49	15	14.9
75	Lo-30-9				0.52	9	9.19～9.26
76	Lo-30-3				0.52	3	3.06～3.08
77	Lo-30-N2-1				0.52	—	—
78	Lo-30-N2-2				0.53	—	—

実験 48	Lo-5-21-1	
試験体	初期質量	1.86 g
	初期寸法	厚 5 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	413.3 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	21 % (21.0~21.3%)
	ガス切り替え	251 s
	加熱終了	450 s

結果	測定期間	256 ~ 259 min
	質量減少速度	0.000808 g/s
	残量比減少速度	0.000434 g/(g·s)
	21%の残量比減少速度に対する残存率	1

実験前	実験後
	

測定値

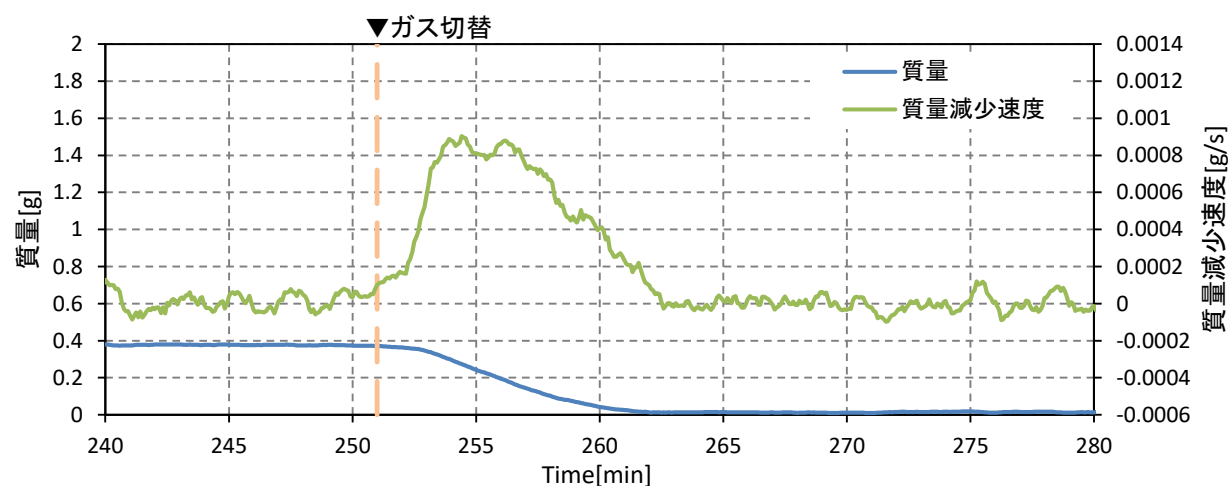
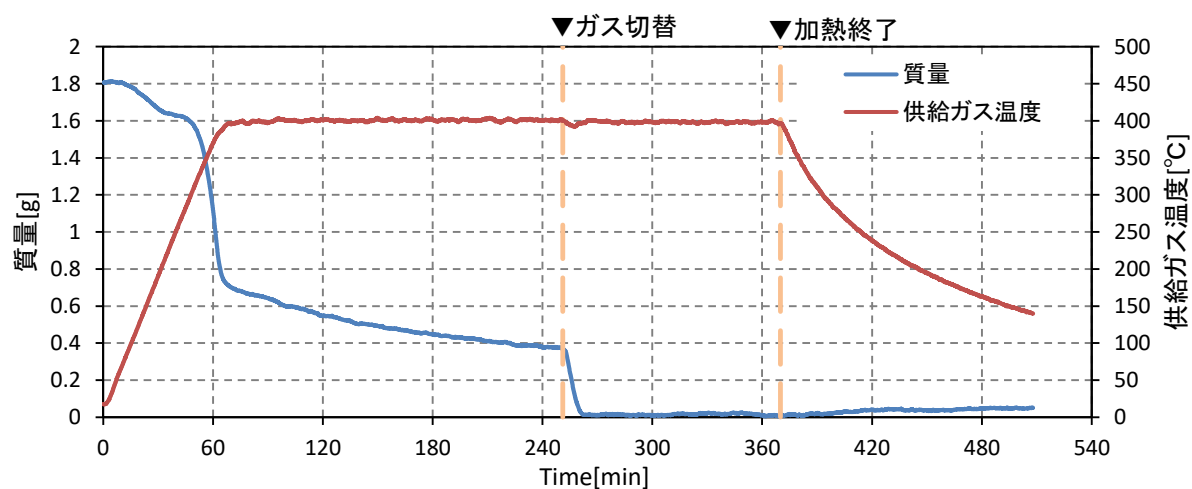


実験 49	Lo-5-21-2	
試験体	初期質量	1.83 g
	初期寸法	厚 5 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	406.7 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	21 % (21.0~21.3%)
経過	ガス切り替え	251 s
	加熱終了	370 s

結果	測定期間	253 ~ 256 min
	質量減少速度	0.000845 g/s
	残量比減少速度	0.000462 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	1.06

実験前	実験後
	

測定値

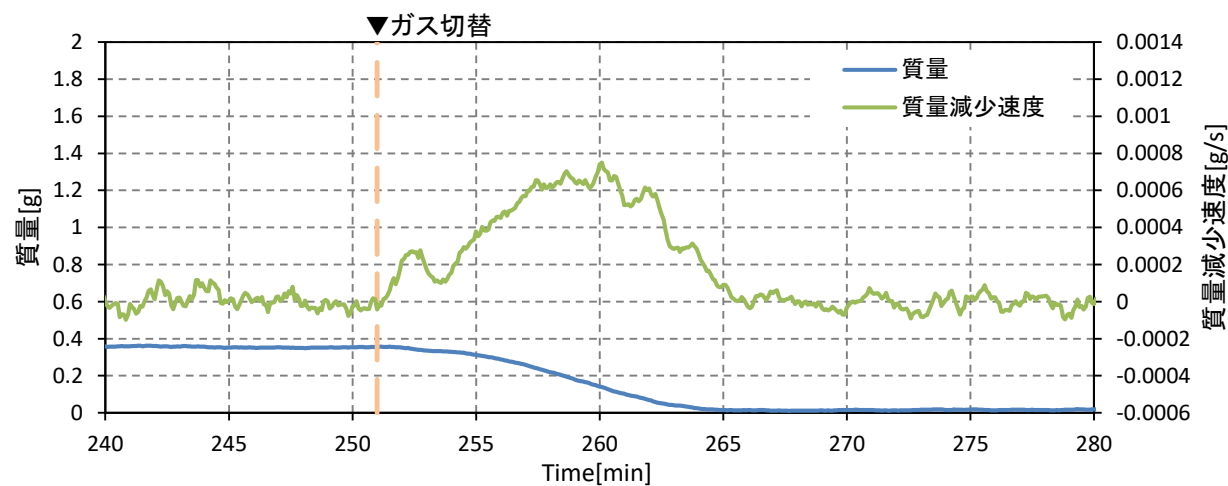
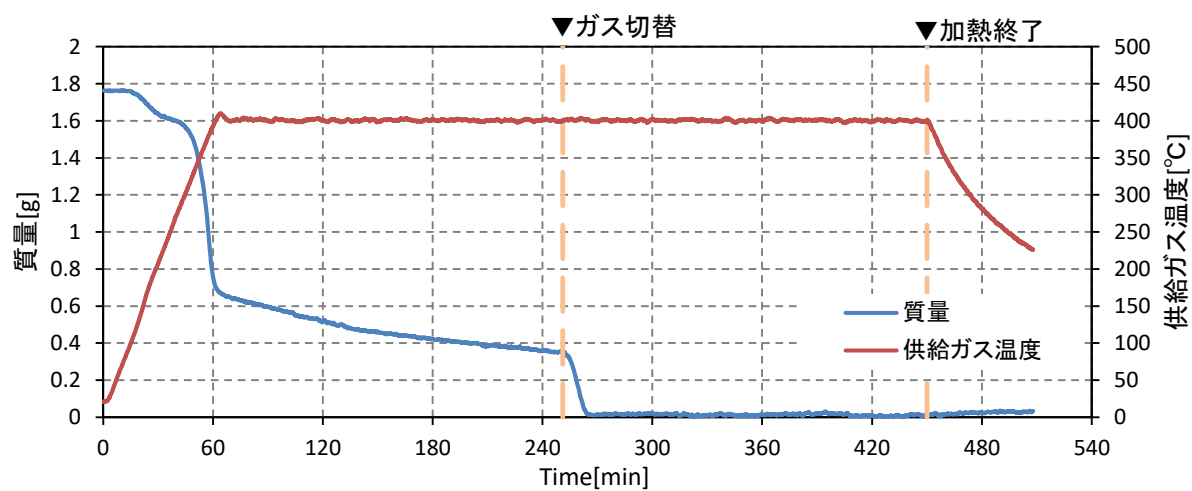


実験	50	Lo-5-20	
試験体	初期質量		1.82 g
	初期寸法	厚	5 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		404.4 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		20 % (20.2～20.4%)
経過	ガス切り替え		251 s
	加熱終了		450 s

結果	測定期間 257 ~ 261 min	
	質量減少速度	0.000629 g/s
	残量比減少速度	0.000346 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.80

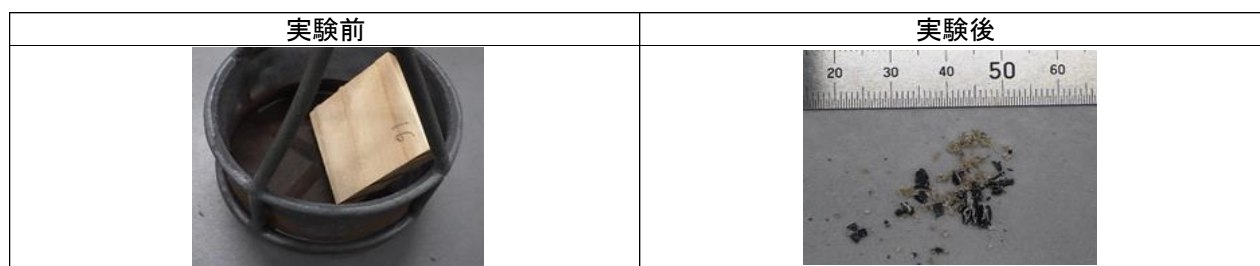
実験前	実験後
	

測定値

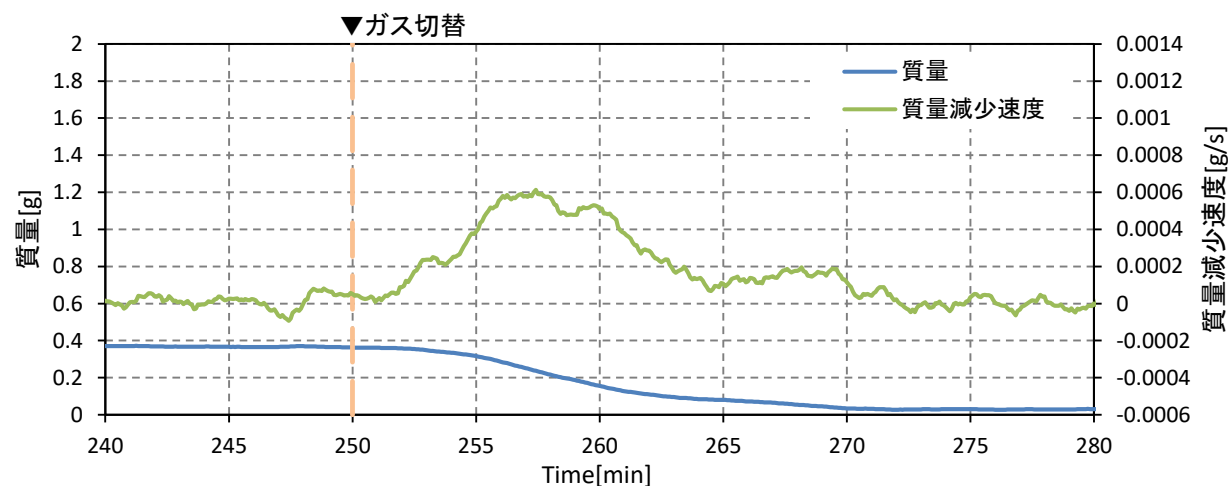
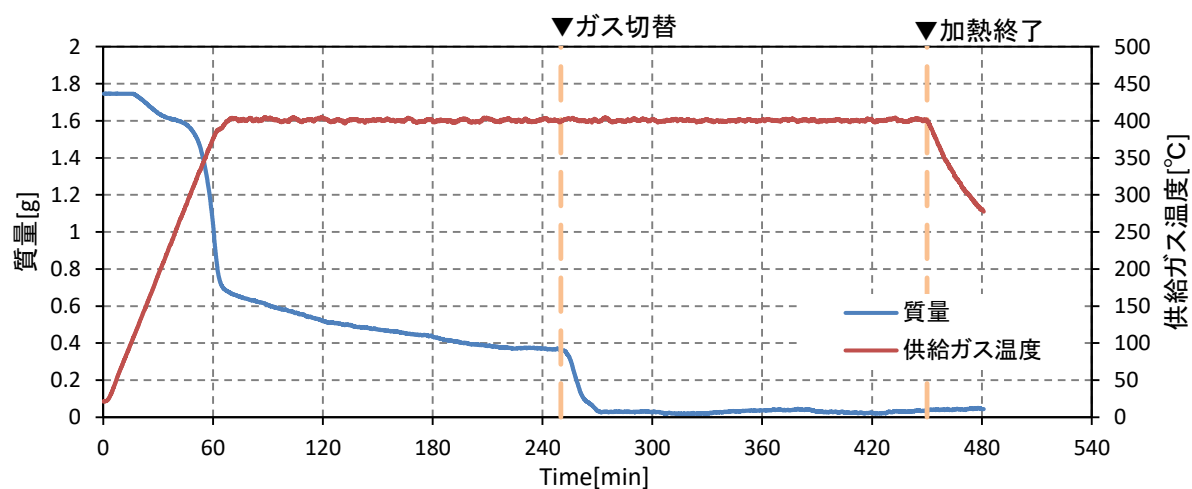


実験 51	Lo-5-19-1	
試験体	初期質量	1.80 g
	初期寸法	厚 5 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	400.0 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	19 % (19.2~19.4%)
	ガス切り替え	250 s
	加熱終了	450 s

結果	測定期間	256 ~ 260 min
	質量減少速度	0.000537 g/s
	残量比減少速度	0.000299 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.69
	測定期間	267 ~ 270 min
	質量減少速度	0.000169 g/s
	残量比減少速度	0.000094 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.22



測定値

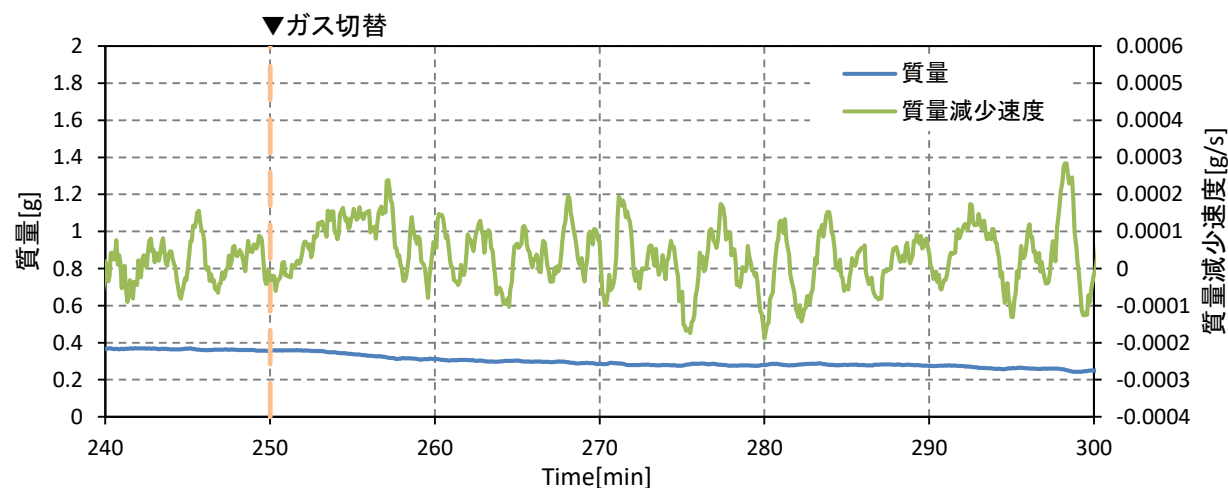
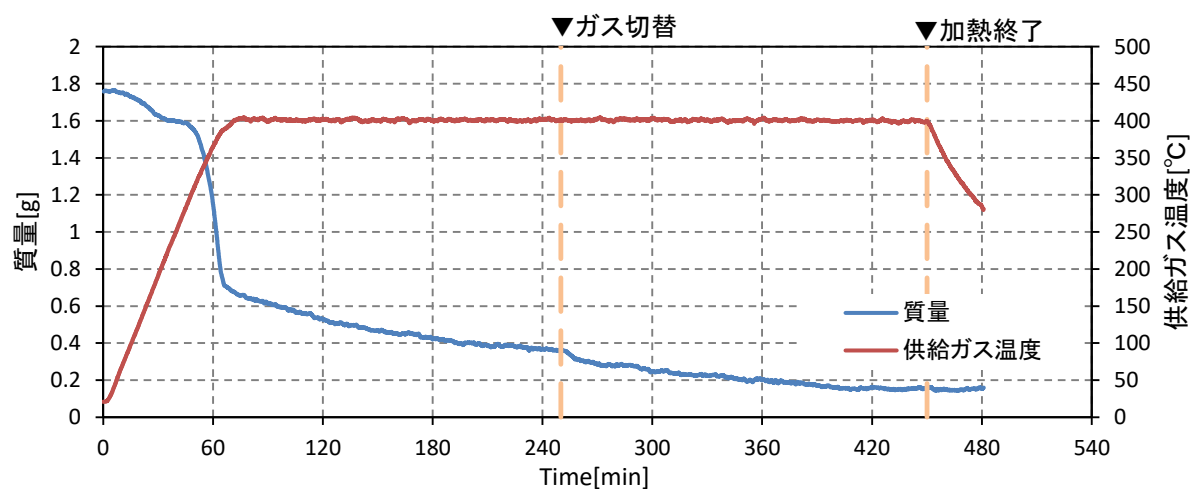


実験	52	Lo-5-19-2	
試験体	初期質量		1.81 g
	初期寸法	厚	5 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		402.2 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		19 % (18.9~19.2%)
経過	ガス切り替え		250 s
	加熱終了		450 s

結果	測定期間	252 ~ 257 min
	質量減少速度	0.000139 g/s
	残量比減少速度	0.000077 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.18
	測定期間	260 ~ 450 min
	質量減少速度	0.000020 g/s
	残量比減少速度	0.000011 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.03

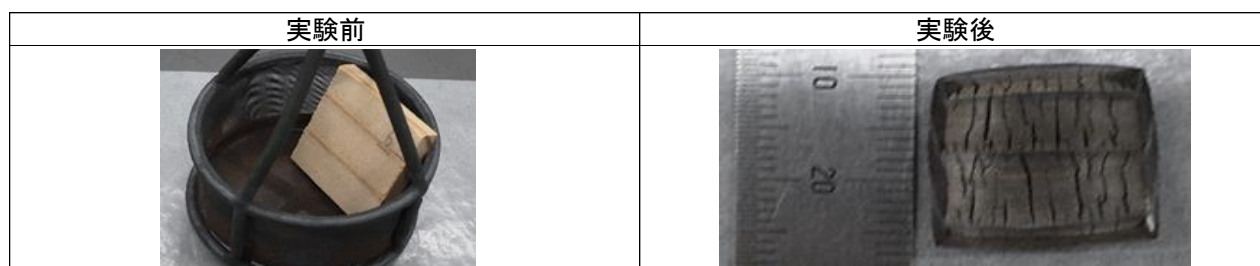


測定値

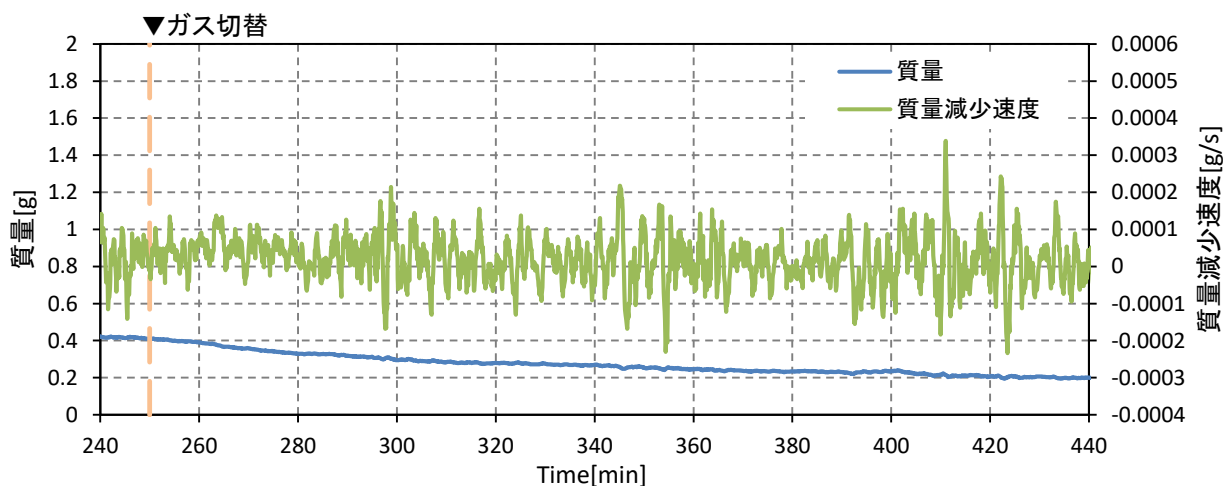
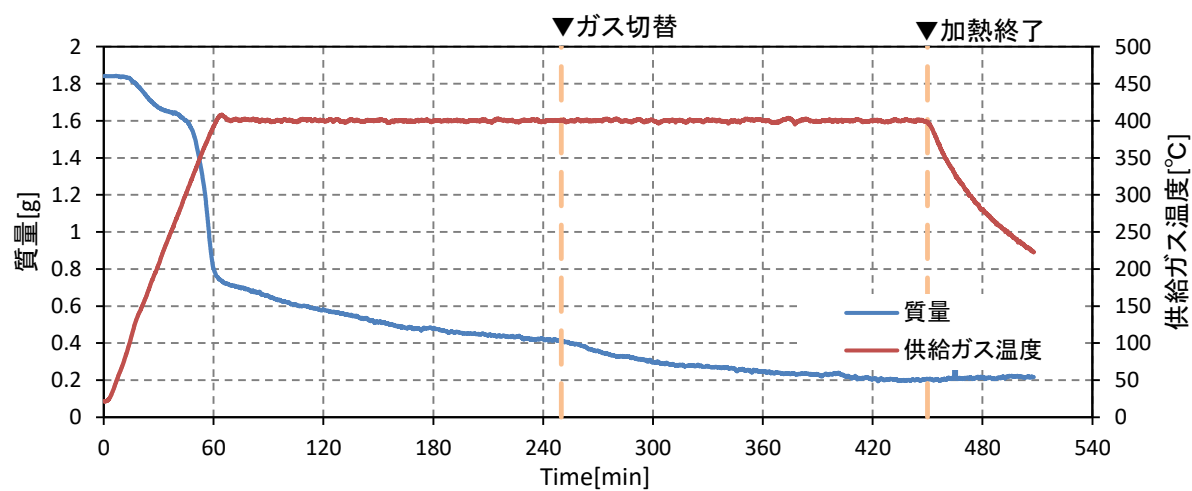


実験 53	Lo-5-18		
試験体	初期質量		1.88 g
	初期寸法	厚	5 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		417.8 kg/m ³
試験条件	樹種		カラマツ
	設置向き		板目(上面)
	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		18 % (17.7~18.0%)
経過	ガス切り替え		250 s
	加熱終了		450 s

結果	測定期間 250 ~ 400 min	
	質量減少速度	0.000022 g/s
	残量比減少速度	0.000012 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.03



測定値

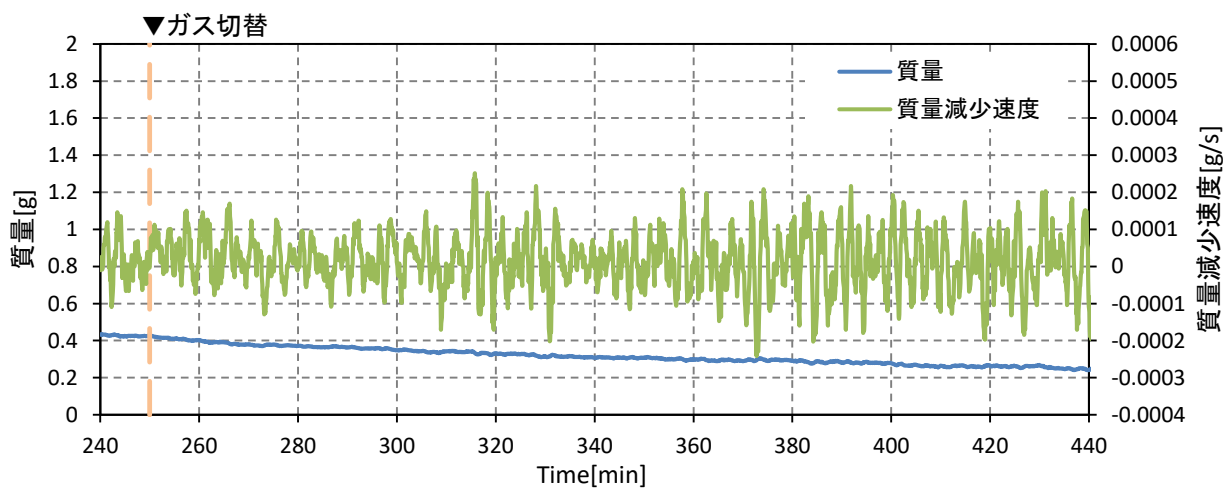
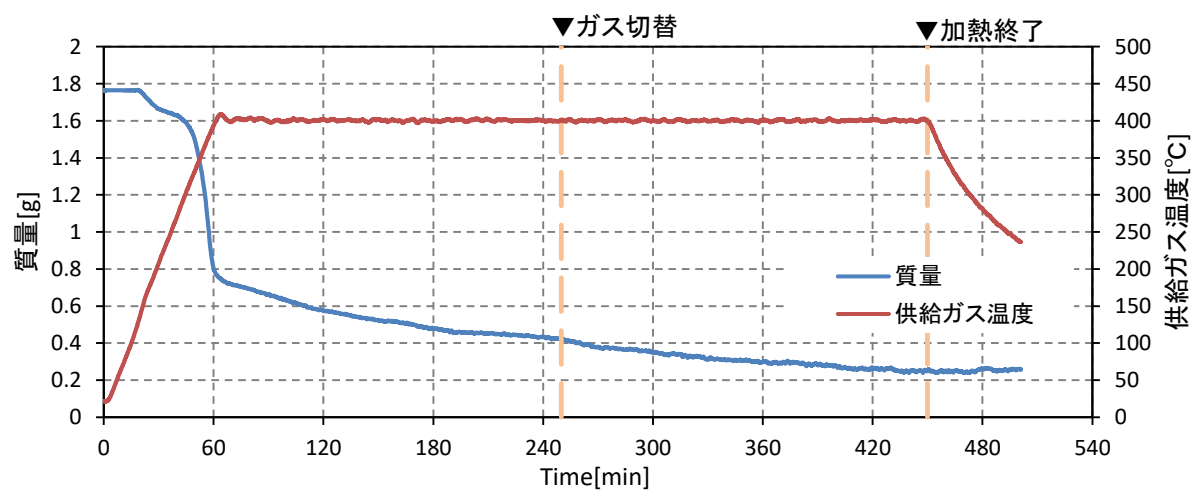


実験 54	Lo-5-15	
試験体	初期質量	1.80 g
	初期寸法	厚 5 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	400.0 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	15 % (15.1~15.3%)
経過	ガス切り替え	250 s
	加熱終了	450 s

結果	測定期間	250 ~ 400 min
	質量減少速度	0.000017 g/s
	残量比減少速度	0.000009 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.02



測定値

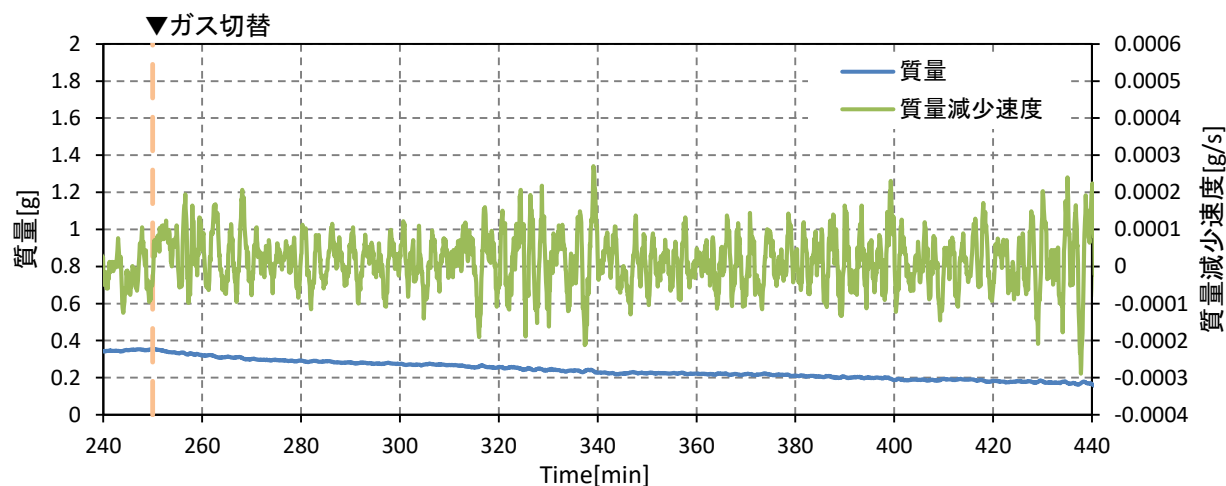
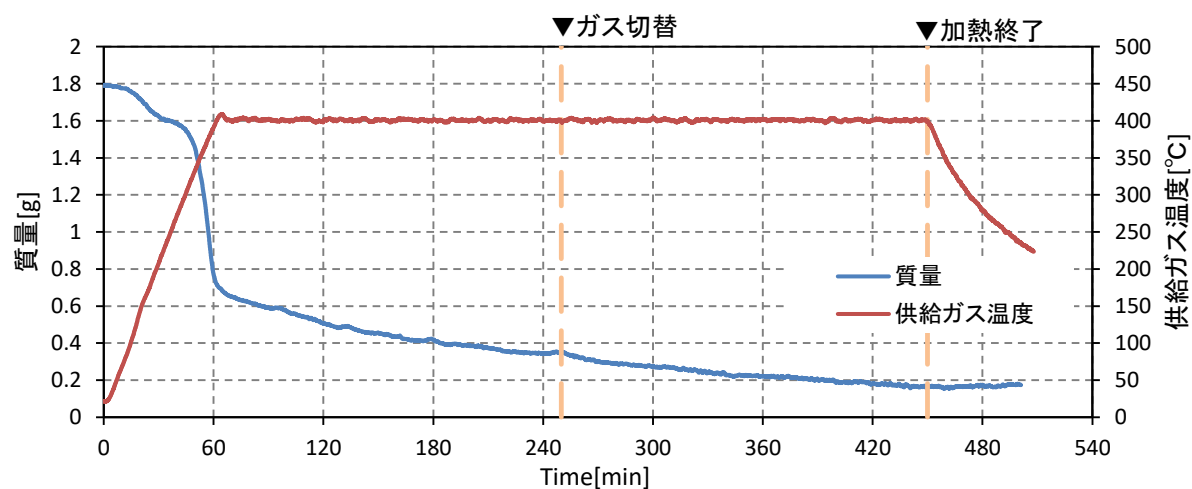


実験	55	Lo-5-12	
試験体	初期質量		1.83 g
	初期寸法	厚	5 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		406.7 kg/m3
	樹種		カラムツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		12 % (12.2～12.3%)
経過	ガス切り替え		250 s
	加熱終了		450 s

結果	測定期間 250 ~ 400 min	
	質量減少速度	0.000018 g/s
	残量比減少速度	0.000010 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.02



測定値

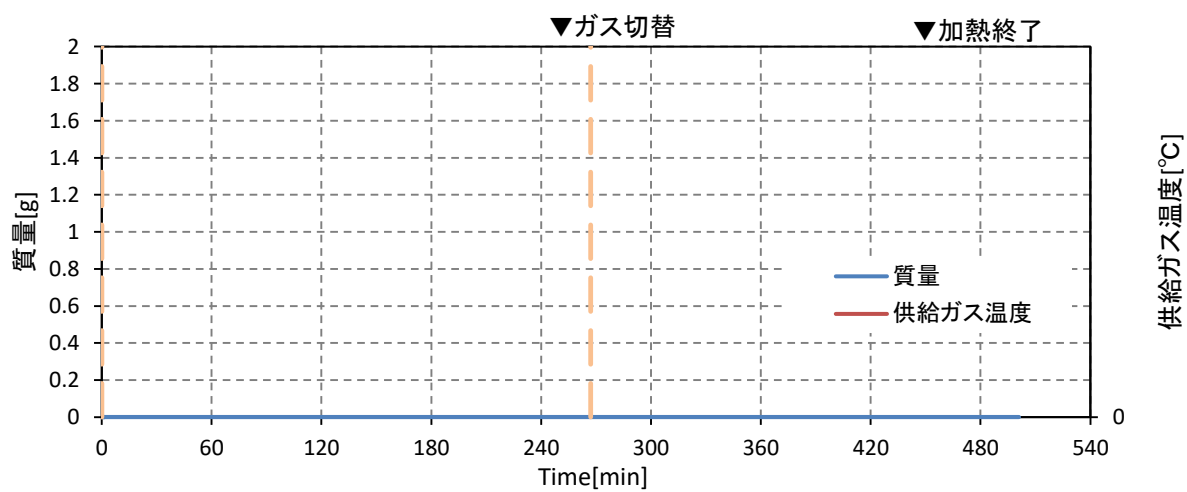


実験 56	Lo-5-N2	
試験体	初期質量	1.88 g
	初期寸法	厚 5 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	417.8 kg/m ³
試験条件	樹種	カラムツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	%
	ガス切り替え	s
	加熱終了	267 s

結果	実験後質量		0.39 g
	実験後残量比		0.21
	実験後寸法	厚	3 mm
		幅	20 mm
		奥	20 mm
	亀裂総長	小	- mm
		大	- mm
	表面積	実験前	2400 mm ²
		実験後	1040 mm ²
	体積	実験前	4500 mm ³
		実験後	1200 mm ³
	平均厚さ	実験前	1.88 mm
		実験後	1.15 mm

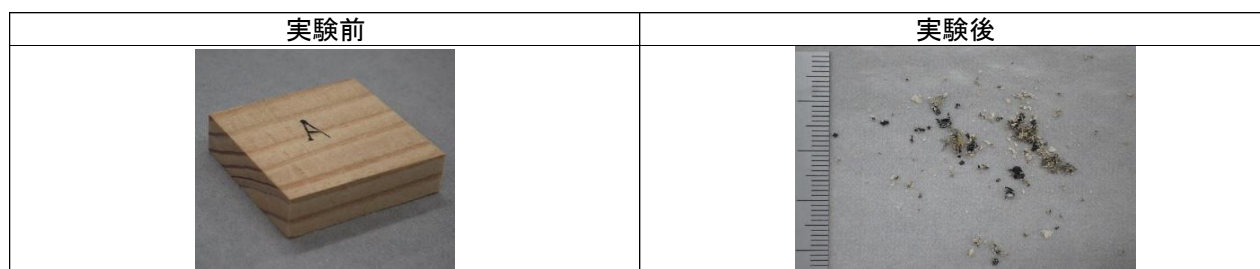


測定値

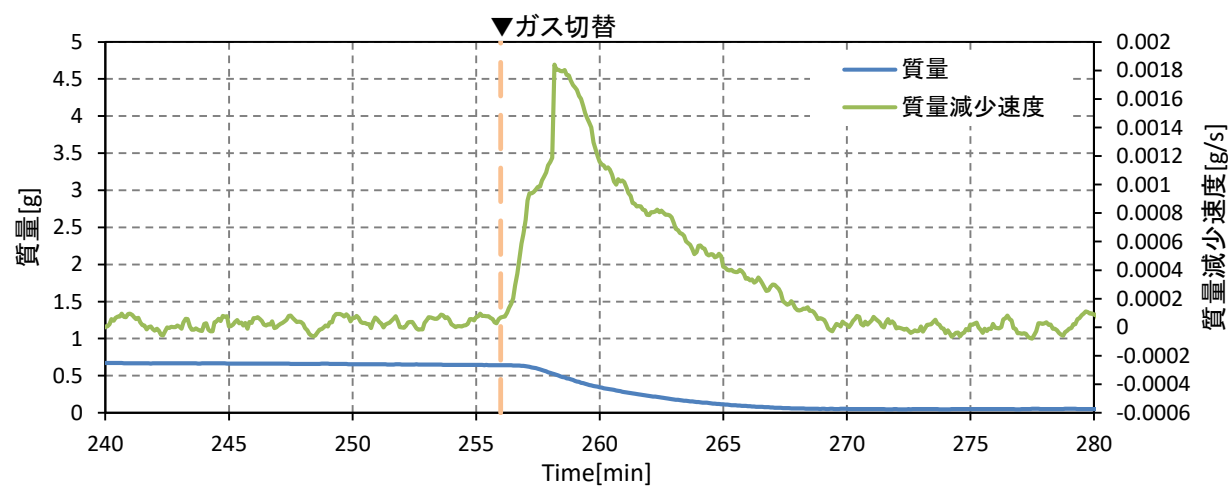
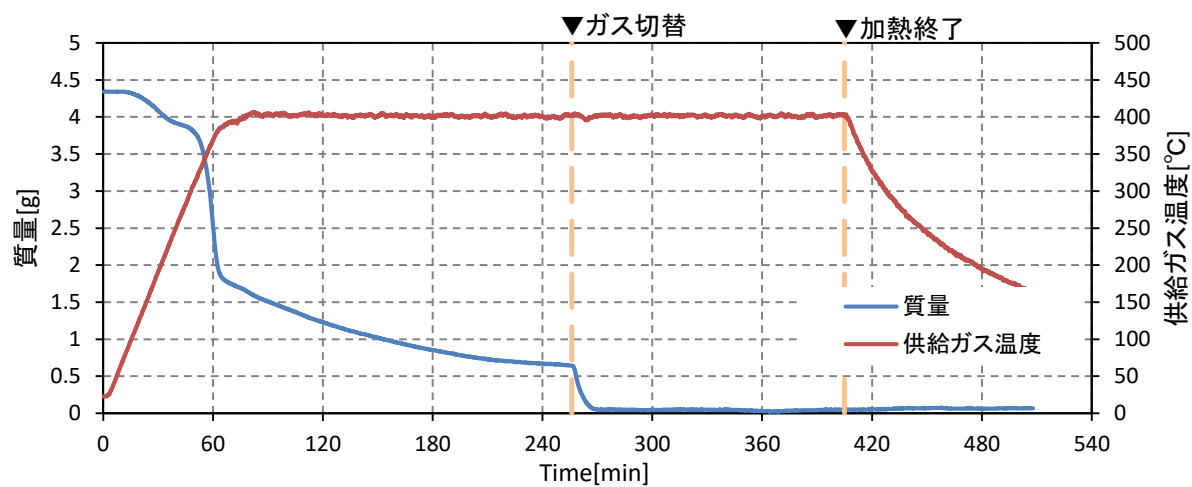


実験 57	Lo-10-21	
試験体	初期質量	4.34 g
	初期寸法	厚 10 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	482.2 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	21 % (21.4~21.6%)
経過	ガス切り替え	256 s
	加熱終了	405 s

結果	測定期間	256 ~ 261 min
	質量減少速度	0.001233 g/s
	残量比減少速度	0.000284 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	1

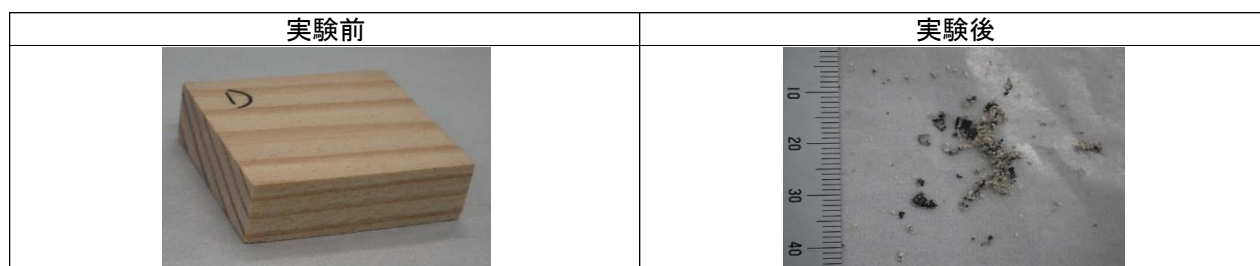


測定値

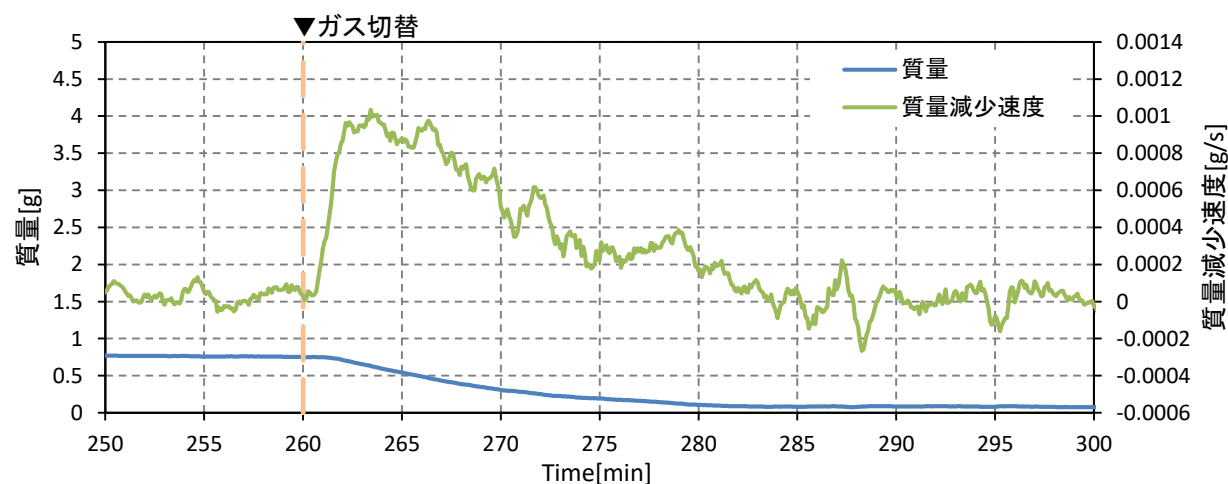
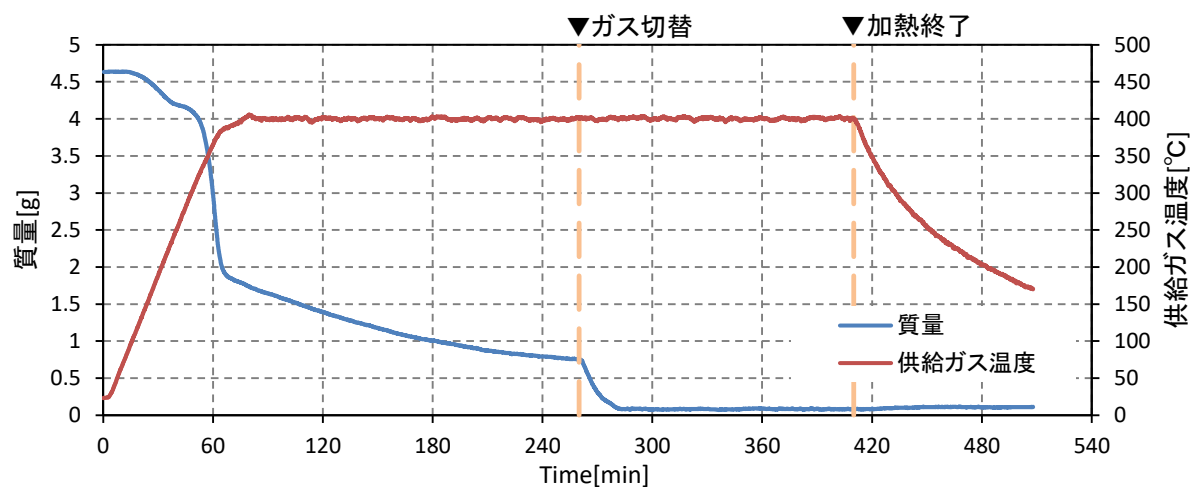


実験 58	Lo-10-15		
試験体	初期質量		4.63 g
	初期寸法	厚	10 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		514.4 kg/m ³
試験条件	樹種		カラムツ
	設置向き		板目(上面)
	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		15 % (15.4~15.5%)
経過	ガス切り替え		260 s
	加熱終了		410 s

結果	測定期間 261 ~ 267 min	
	質量減少速度	0.000915 g/s
	残量比減少速度	0.000198 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.70



測定値

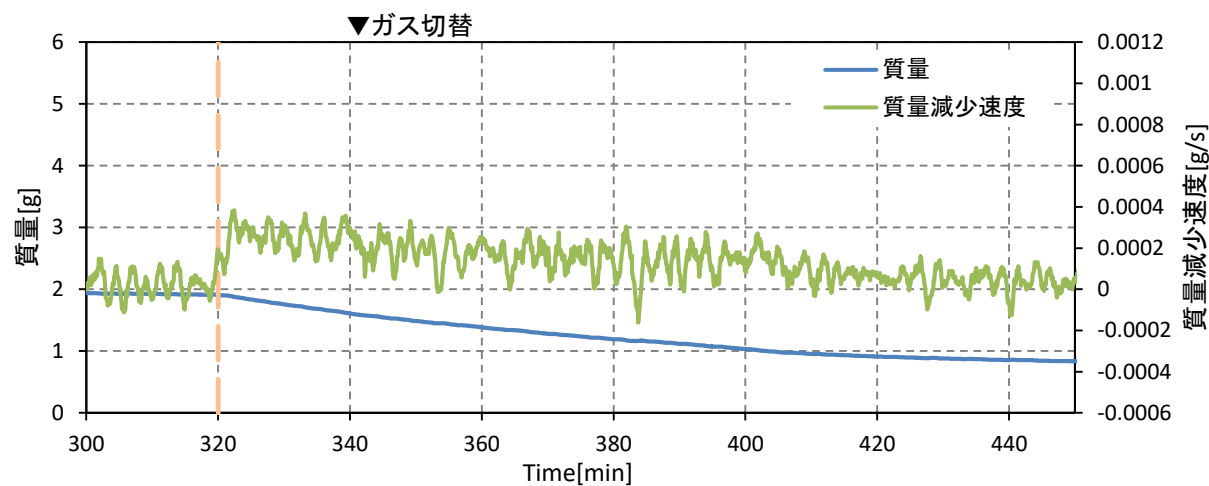
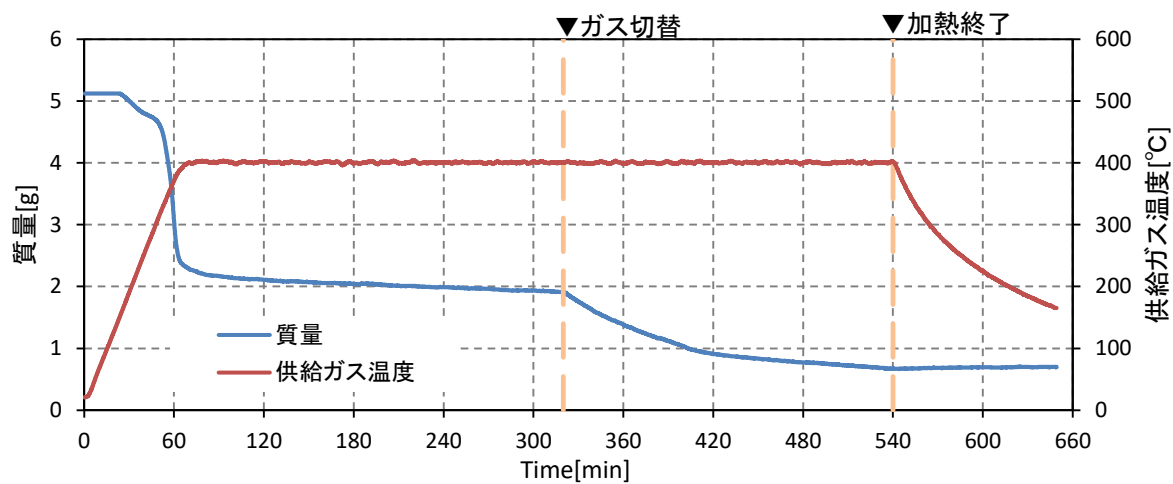


実験 59	Lo-10-10	
試験体	初期質量	5.22 g
	初期寸法	厚 10 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	580.0 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	10 % (10.3%)
経過	ガス切り替え	320 s
	加熱終了	540 s

結果	測定期間	321 ~ 400 min
	質量減少速度	0.000183 g/s
	残量比減少速度	0.000035 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.12

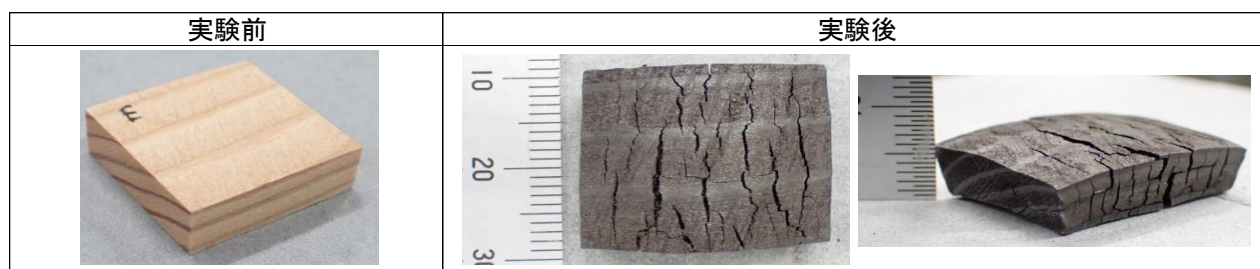


測定値

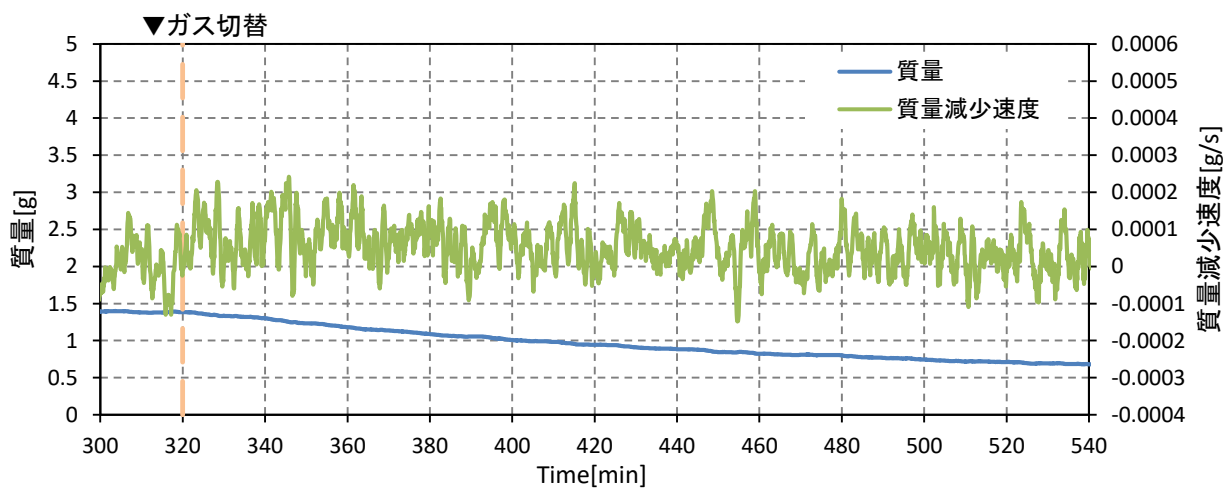
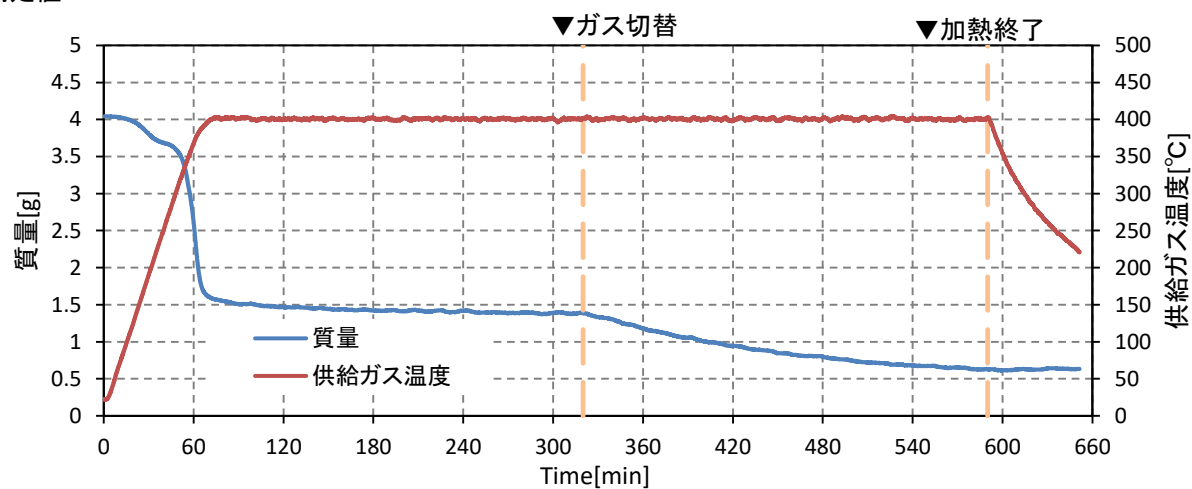


実験	60	Lo-10-6	
試験体	初期質量		4.15 g
	初期寸法	厚	10 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		461.1 kg/m3
	樹種		カラムツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		6 % (6.17~6.23%)
経過	ガス切り替え		320 s
	加熱終了		590 s

結果	測定期間 325 ~ 480 min	
	質量減少速度	0.000062 g/s
	残量比減少速度	0.000015 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.05

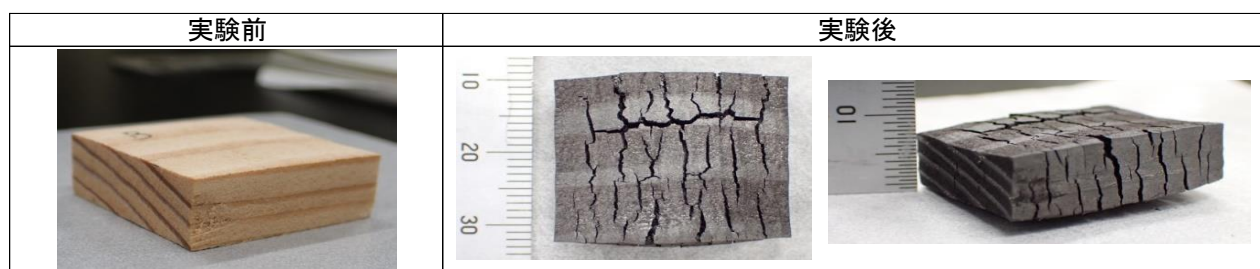


測定値

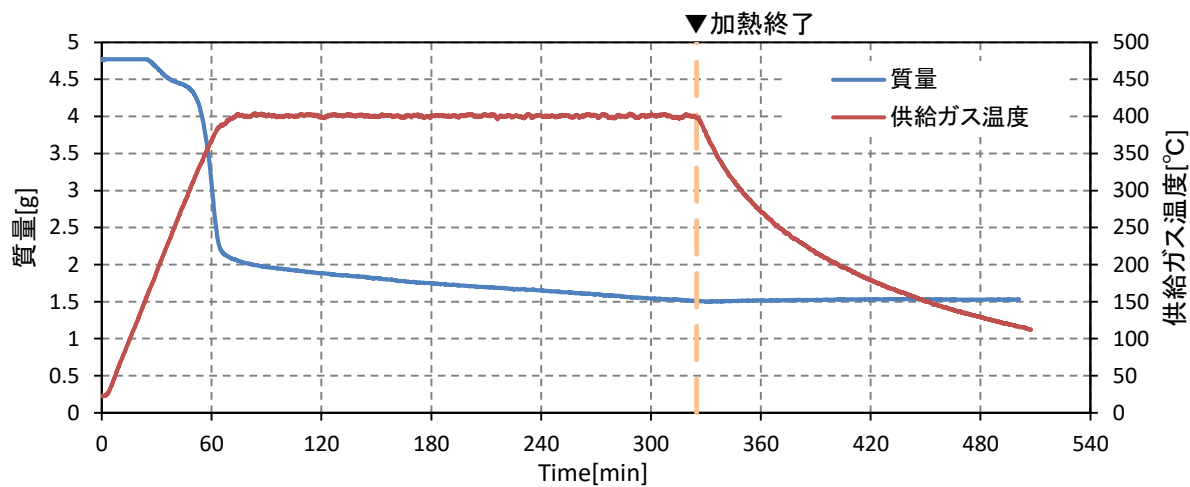


実験 61	Lo-10-N2	
試験体	初期質量	4.83 g
	初期寸法	厚 10 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	536.7 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	%
	ガス切り替え	s
	加熱終了	325 s

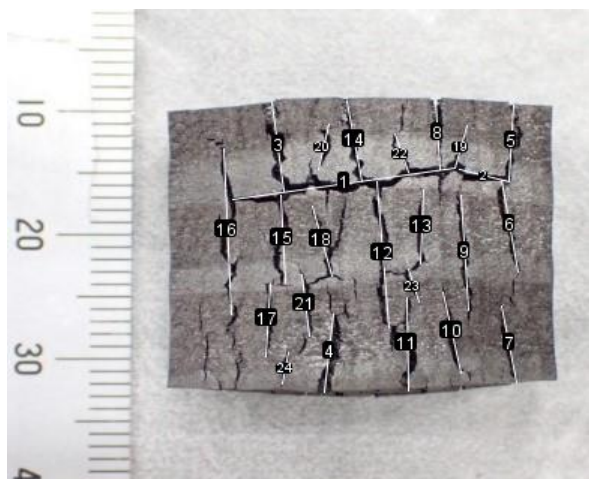
結果	実験後質量		1.5 g
	実験後残量比		0.31
	実験後寸法	厚	7.5 mm
		幅	28 mm
		奥	22 mm
	亀裂総長	小	125.73 mm
		大	33.71 mm
	表面積	実験前	3000 mm ²
		実験後	4374 mm ²
	体積	実験前	9000 mm ³
		実験後	4620 mm ³
平均厚さ	実験前	3.00 mm	
	実験後	1.06 mm	



測定値



亀裂の測定

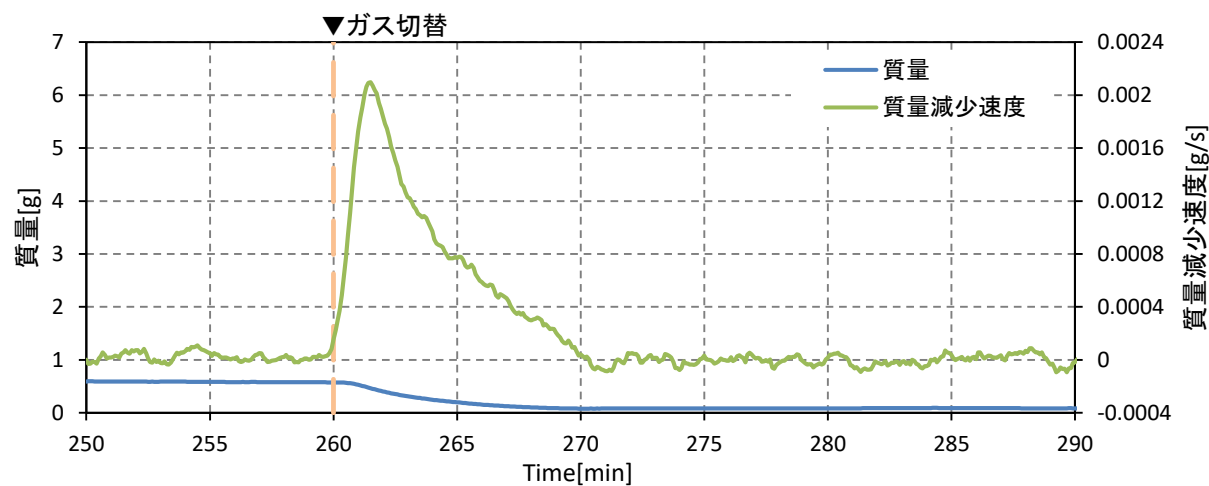
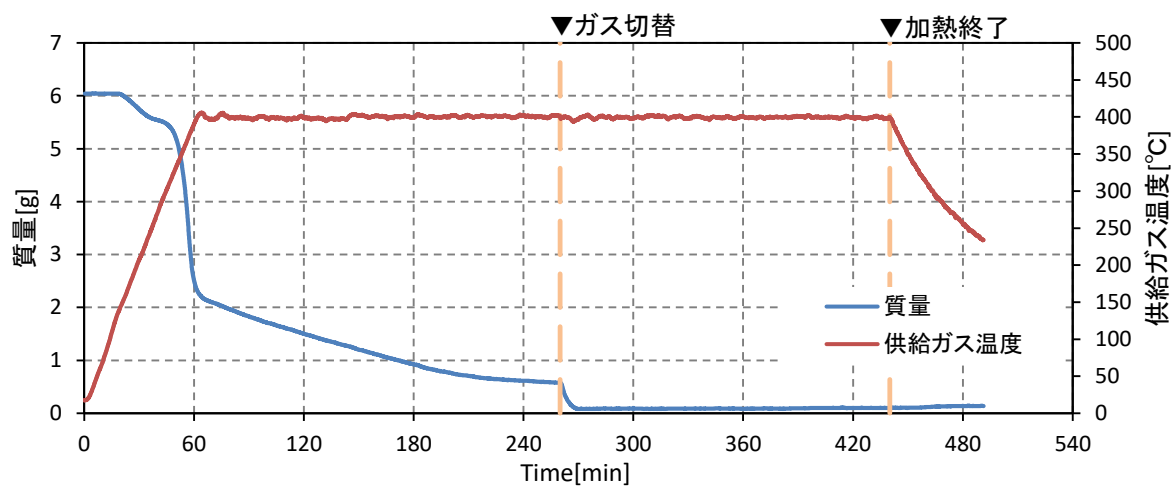


実験 62	Lo-15-21	
試験体	初期質量	6.12 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	453.3 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	21 % (21.4~21.6%)
経過	ガス切り替え	260 s
	加熱終了	440 s

結果	測定期間	261 ~ 262 min
	質量減少速度	0.001757 g/s
	残量比減少速度	0.000287 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	1

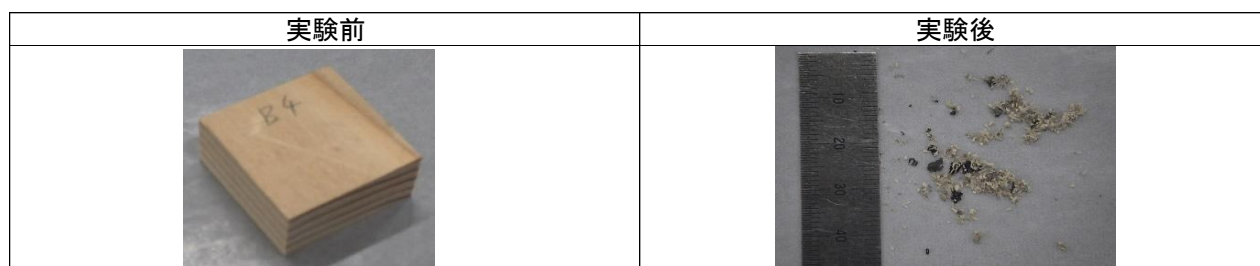
実験前	実験後
	

測定値

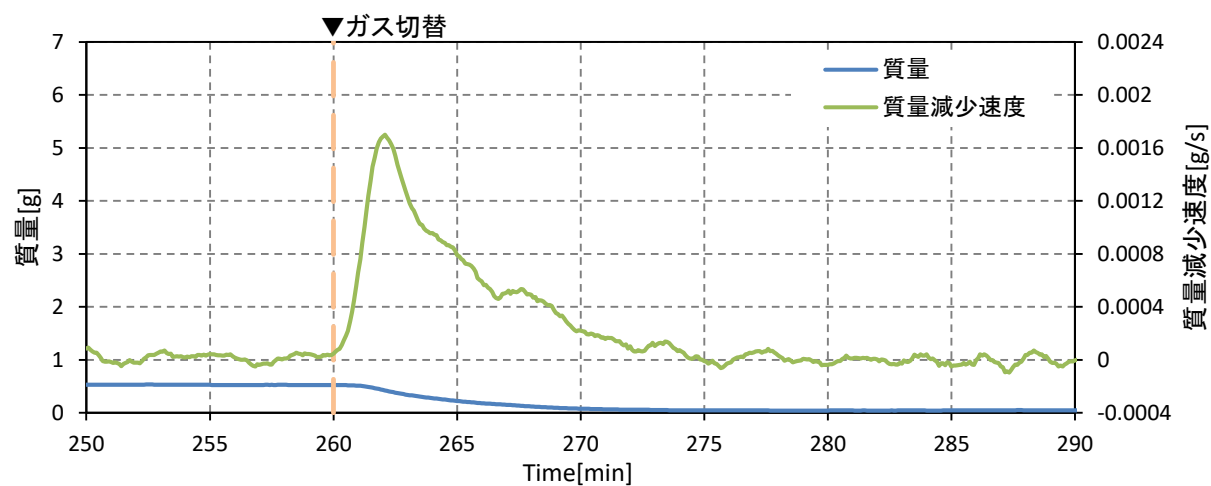
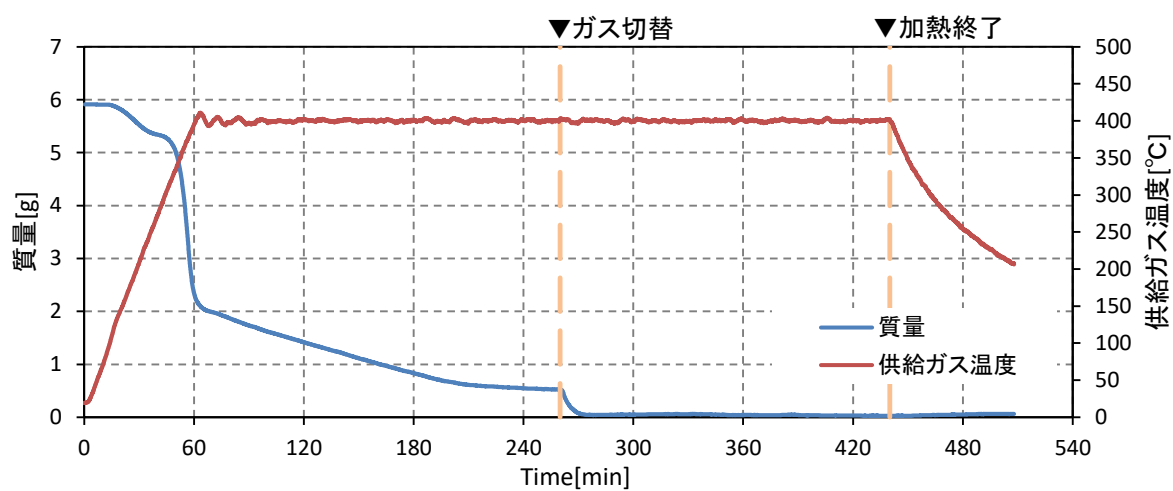


実験 63	Lo-15-15-1	
試験体	初期質量	5.96 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	441.5 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	15 % (15.3~15.5%)
経過	ガス切り替え	260 s
	加熱終了	440 s

結果	測定期間	261 ~ 263 min
	質量減少速度	0.001314 g/s
	残量比減少速度	0.000221 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.77

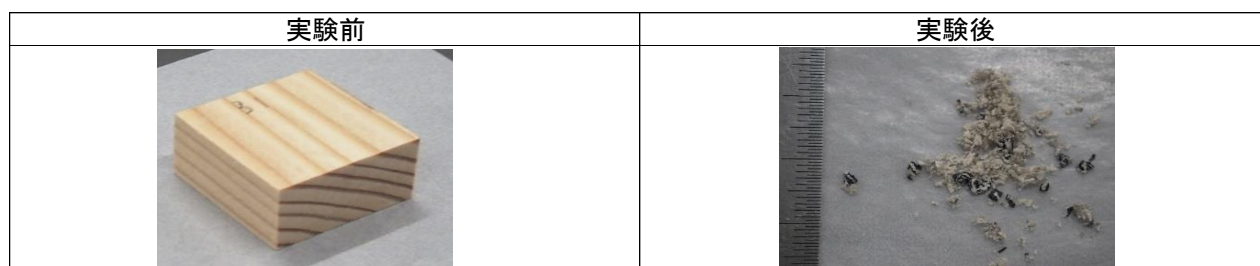


測定値

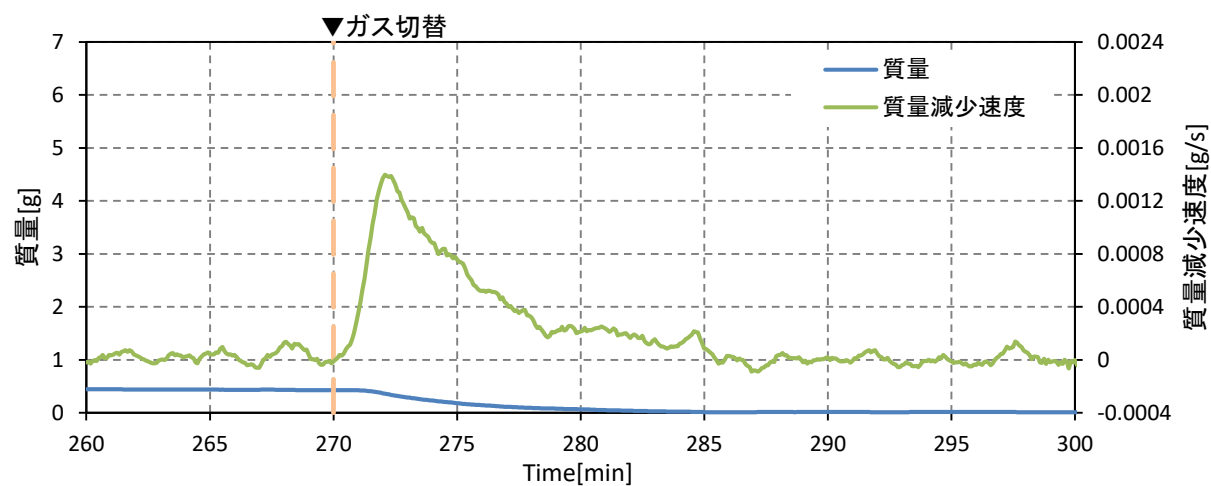
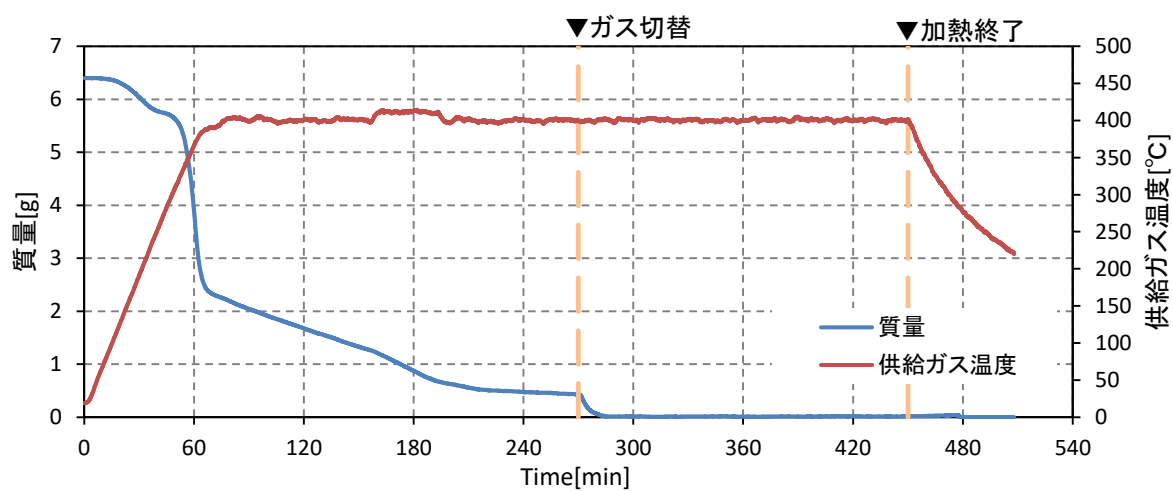


実験 64	Lo-15-15-2	
試験体	初期質量	6.46 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	478.5 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	15 % (15.3~15.5%)
経過	ガス切り替え	270 s
	加熱終了	450 s

結果	測定期間	271 ~ 273 min
	質量減少速度	0.001117 g/s
	残量比減少速度	0.000173 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.60



測定値

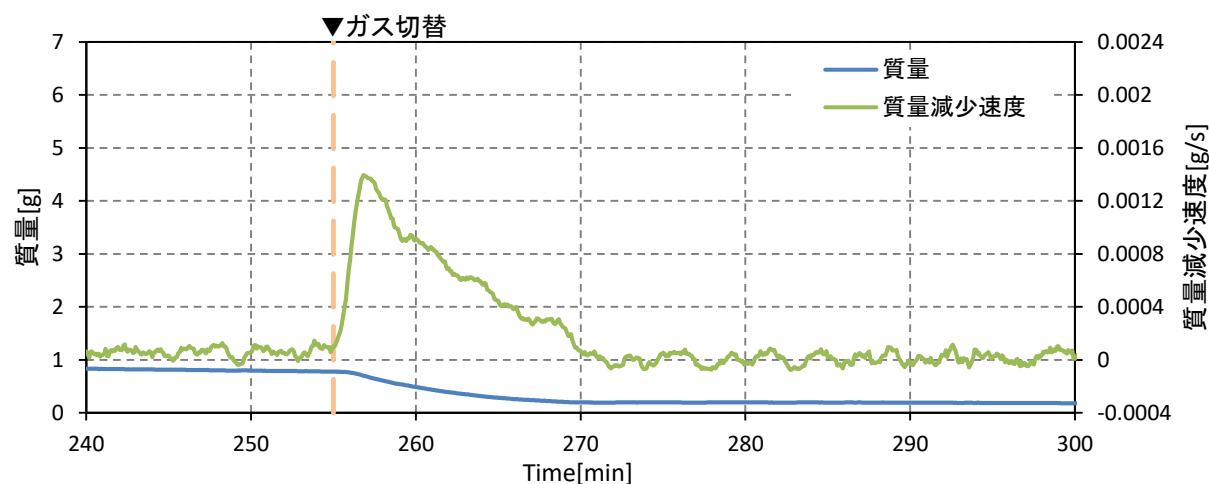
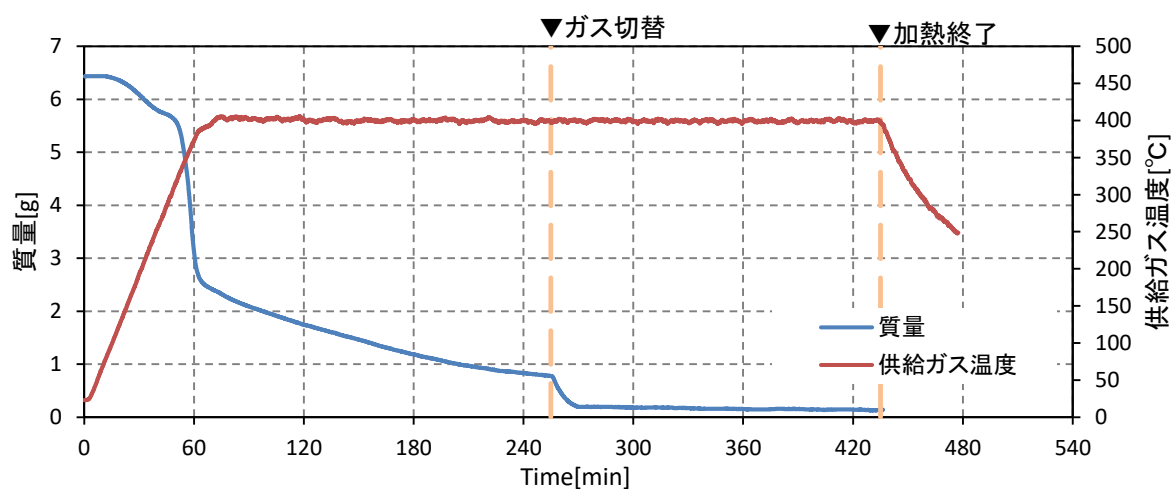


実験 65	Lo-15-12	
試験体	初期質量	6.44 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	477.0 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	12 % (12.1~12.2%)
	ガス切り替え	255 s
	加熱終了	435 s

結果	測定期間	256 ~ 259 min
	質量減少速度	0.001108 g/s
	残量比減少速度	0.000172 g/(g·s)
	21%の残量比減少速度に対する残存率	0.60

実験前	実験後
	

測定値

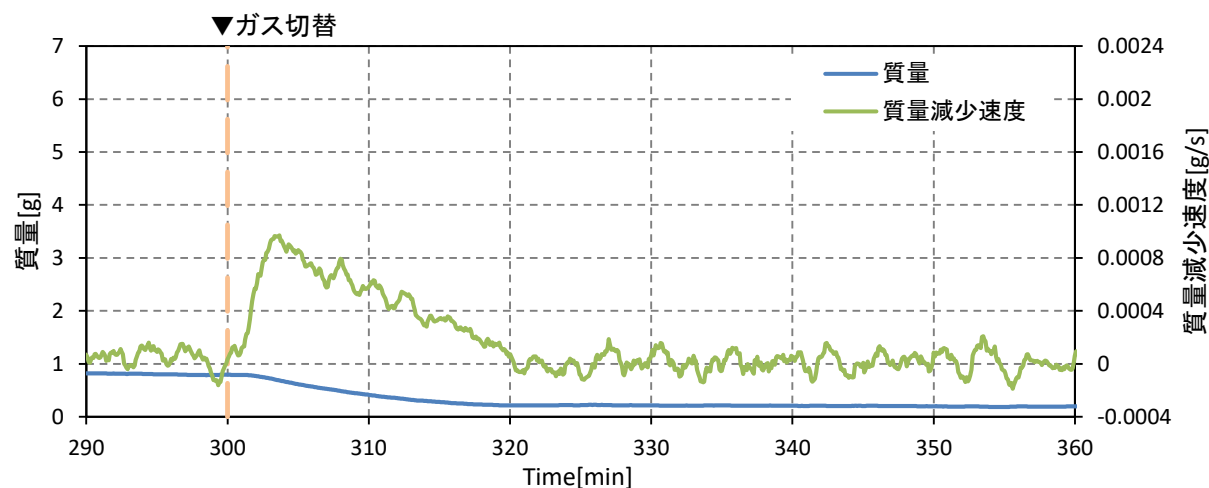
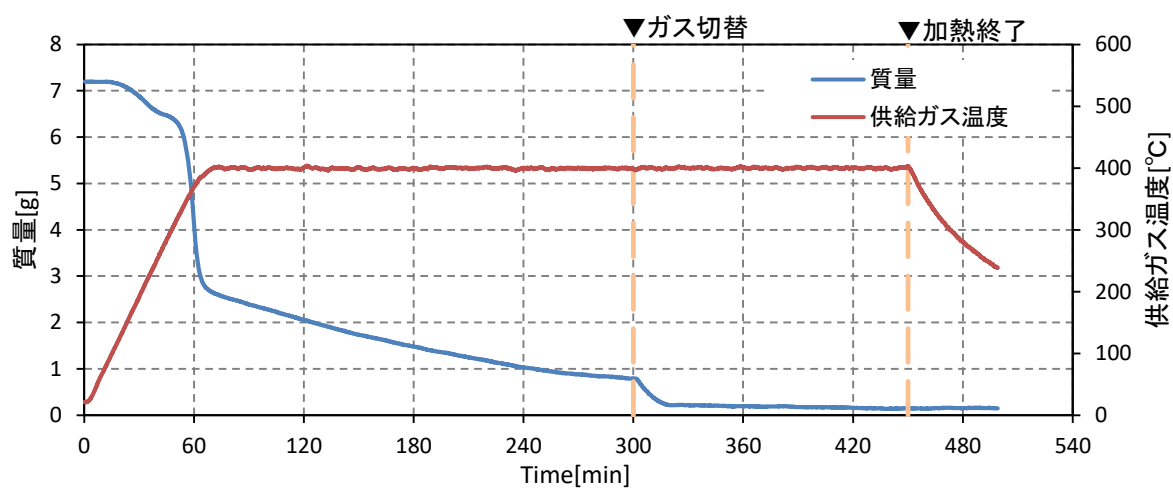


実験 66	Lo-15-9	
試験体	初期質量	7.20 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	533.3 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	9 % (9.00~9.05%)
	ガス切り替え	300 s
	加熱終了	450 s

結果	測定期間	302 ~ 309 min
	質量減少速度	0.000772 g/s
	残量比減少速度	0.000107 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.37

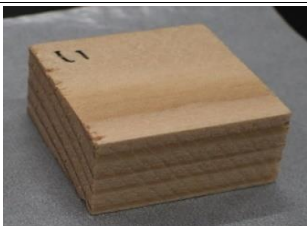
実験前	実験後
	

測定値

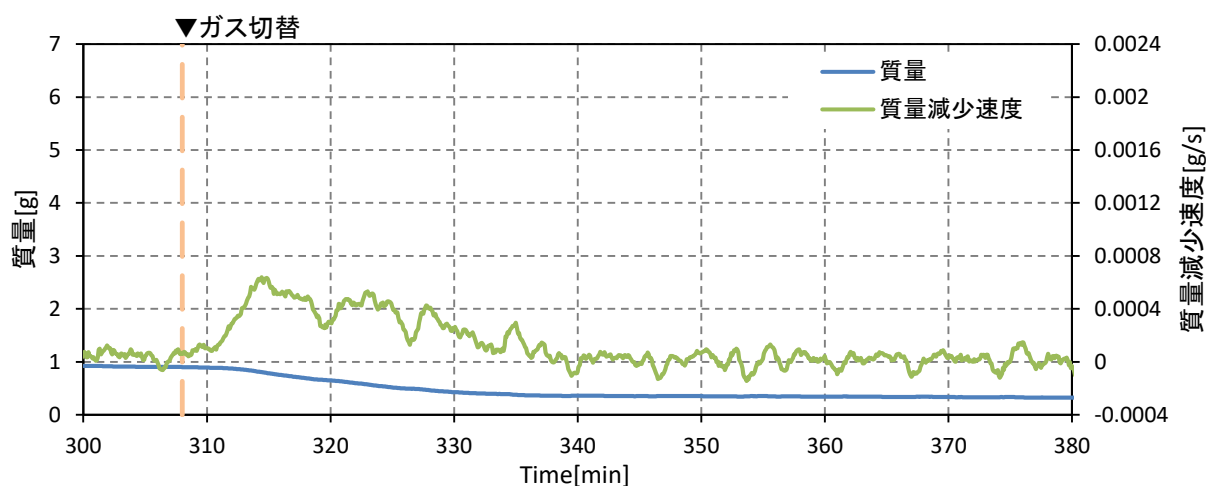
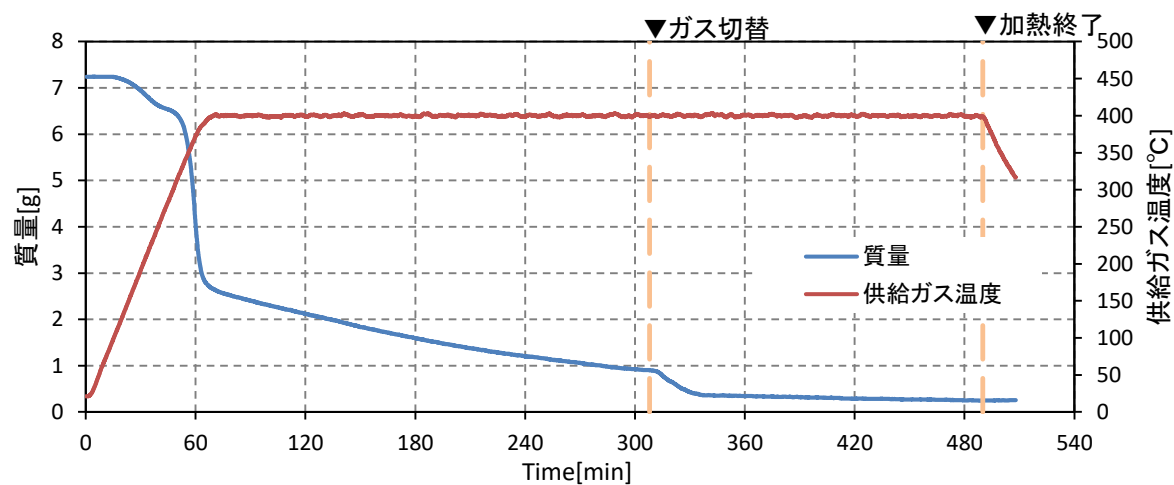


実験 67	Lo-15-6	
試験体	初期質量	7.24 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	536.4 kg/m ³
試験条件	樹種	カラムツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	6 % (6.05~6.07%)
経過	ガス切り替え	308 s
	加熱終了	490 s

結果	測定期間	313 ~ 325 min
	質量減少速度	0.000465 g/s
	残量比減少速度	0.000064 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.22

実験前	実験後
	

測定値

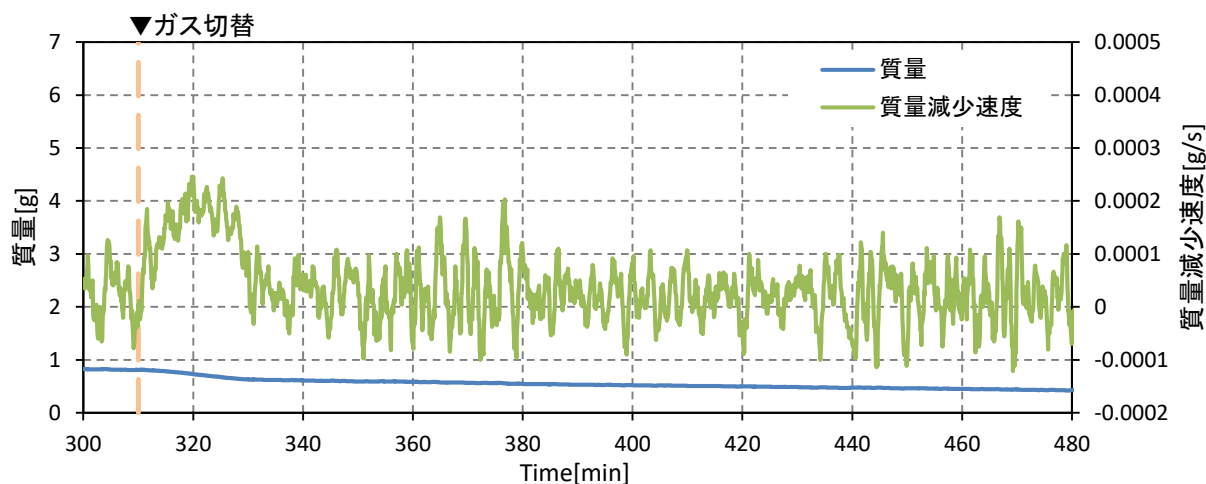
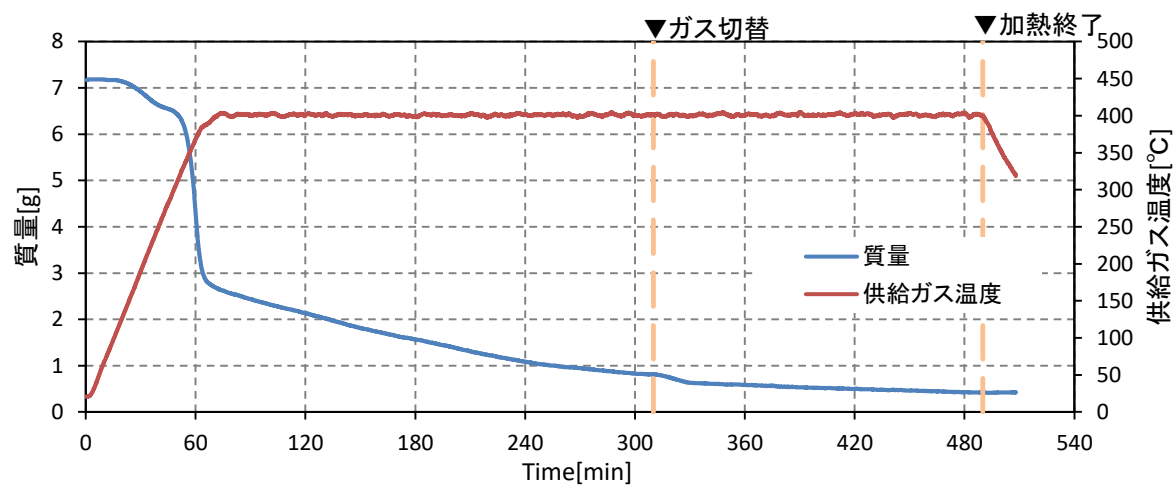


実験 68	Lo-15-3-1	
試験体	初期質量	7.17 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	531.3 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	3 % (3.00~3.02%)
	ガス切り替え	310 s
	加熱終了	490 s

結果	測定期間	311 ~ 328 min
	質量減少速度	0.000164 g/s
	残量比減少速度	0.000023 g/(g·s)
	21%の残量比減少速度に対する残存率	0.08
	測定期間	340 ~ 450 min
	質量減少速度	0.000023 g/s
	残量比減少速度	0.000003 g/(g·s)
	21%の残量比減少速度に対する残存率	0.01

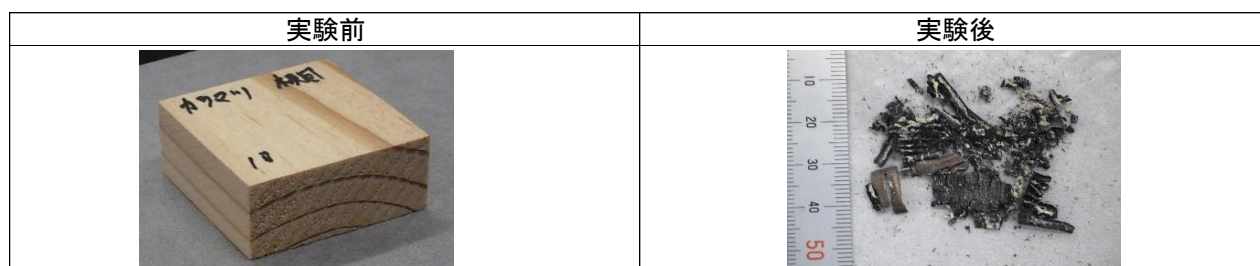
実験前	実験後
	

測定値

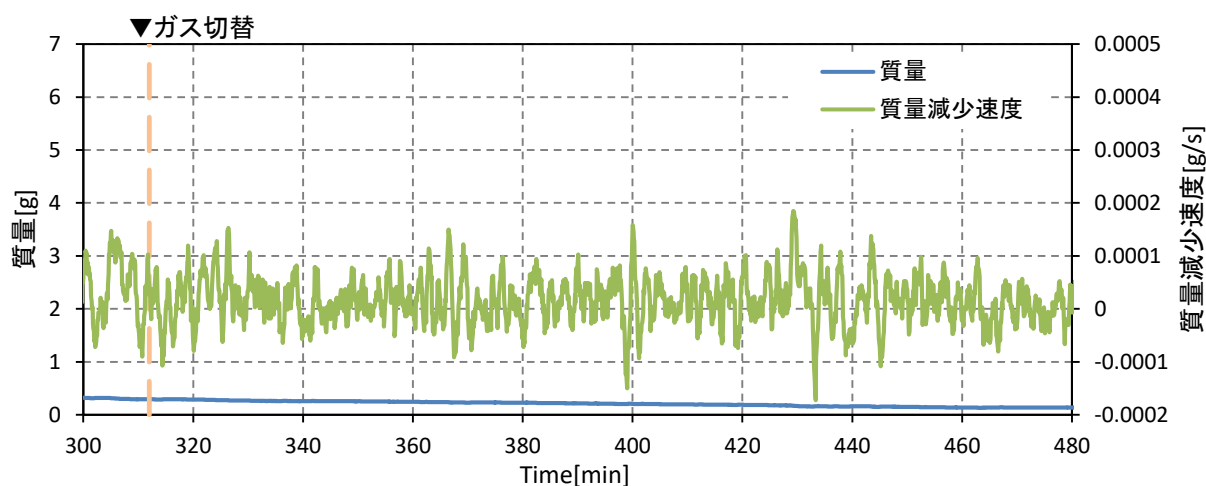
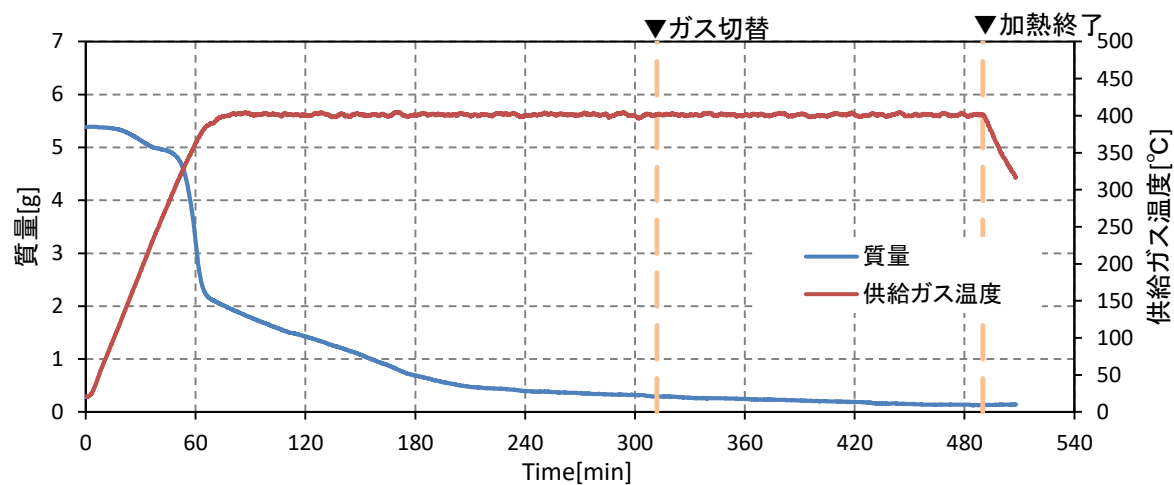


実験 69	Lo-15-3-2	
試験体	初期質量	5.39 g
	初期寸法	厚 15 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	399.2 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
経過	酸素濃度 (実測値)	3 % (3.03~3.05%)
	ガス切り替え	312 s
	加熱終了	490 s

結果	測定期間	315 ~ 450 min
	質量減少速度	0.000018 g/s
	残量比減少速度	0.000003 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.01



測定値

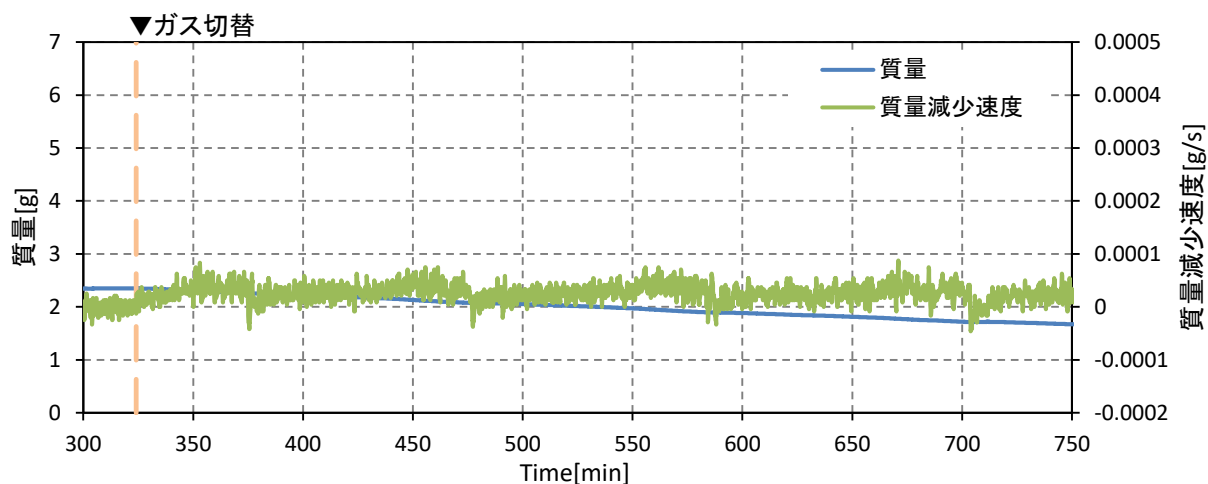
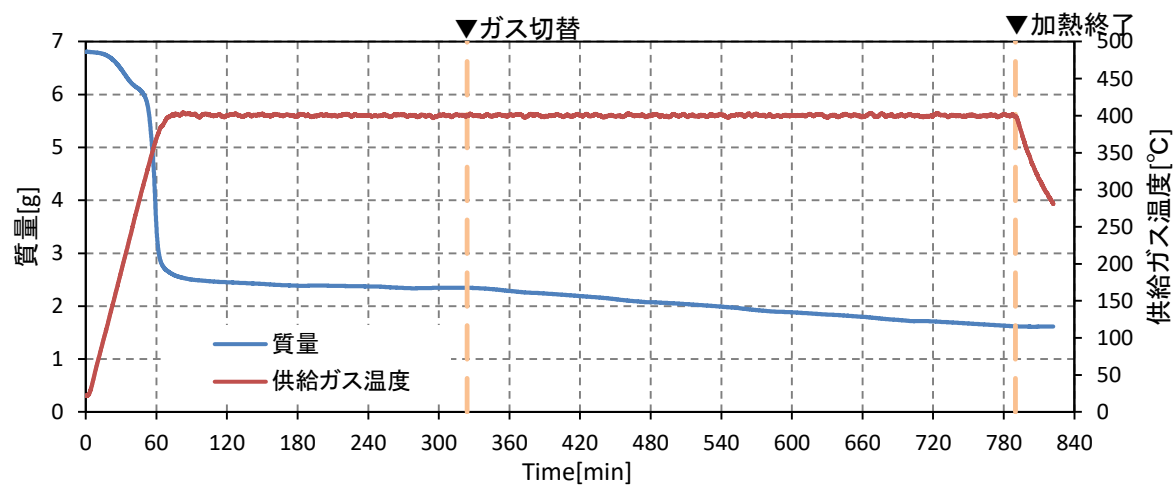


実験	70	Lo-15-2	
試験体	初期質量		6.82 g
	初期寸法	厚	15 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		505.0 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		2 % (1.89~1.91%)
経過	ガス切り替え		324 s
	加熱終了		790 s

結果	測定期間 350 ~ 750 min	
	質量減少速度	0.000027 g/s
	残量比減少速度	0.000004 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.01



測定値

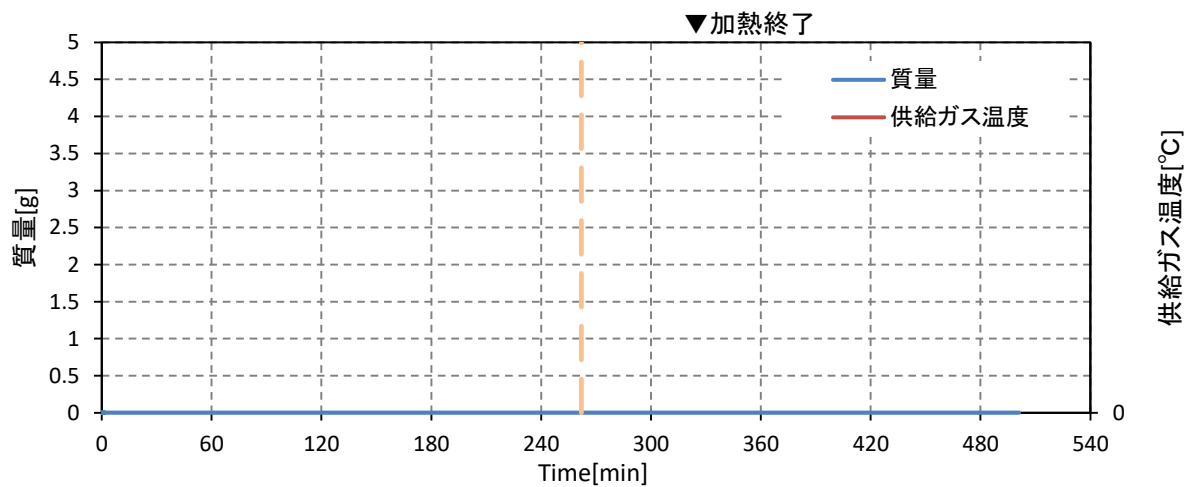


実験	71	Lo-15-N2	
試験体	初期質量		6.63 g
	初期寸法	厚	15 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		491.2 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		%
経過	ガス切り替え		s
	加熱終了		262 s

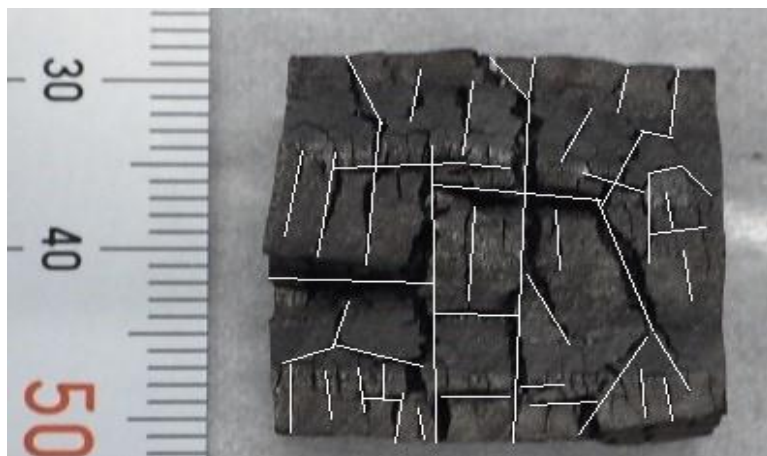
結果	実験後質量		0.726 g
	実験後残量比		0.11
	実験後寸法	厚	11 mm
		幅	22 mm
		奥	22 mm
	亀裂総長	小	148.84 mm
		大	66.91 mm
	表面積	実験前	3600 mm ²
		実験後	6683 mm ²
	体積	実験前	13500 mm ³
		実験後	5324 mm ³
	平均厚さ	実験前	3.75 mm
		実験後	0.80 mm



測定値

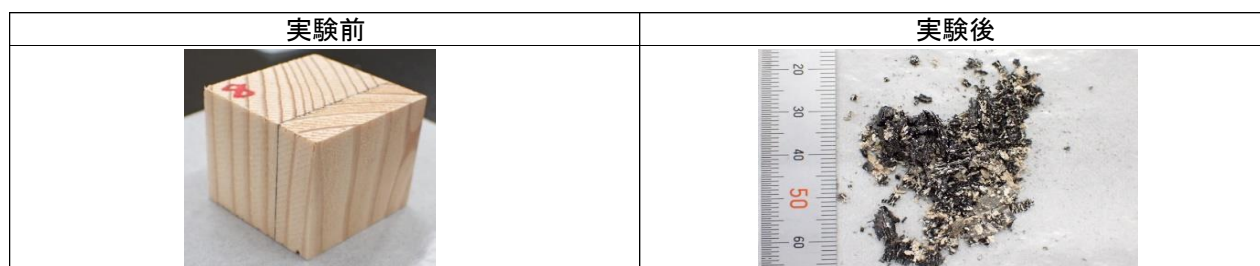


亀裂の測定

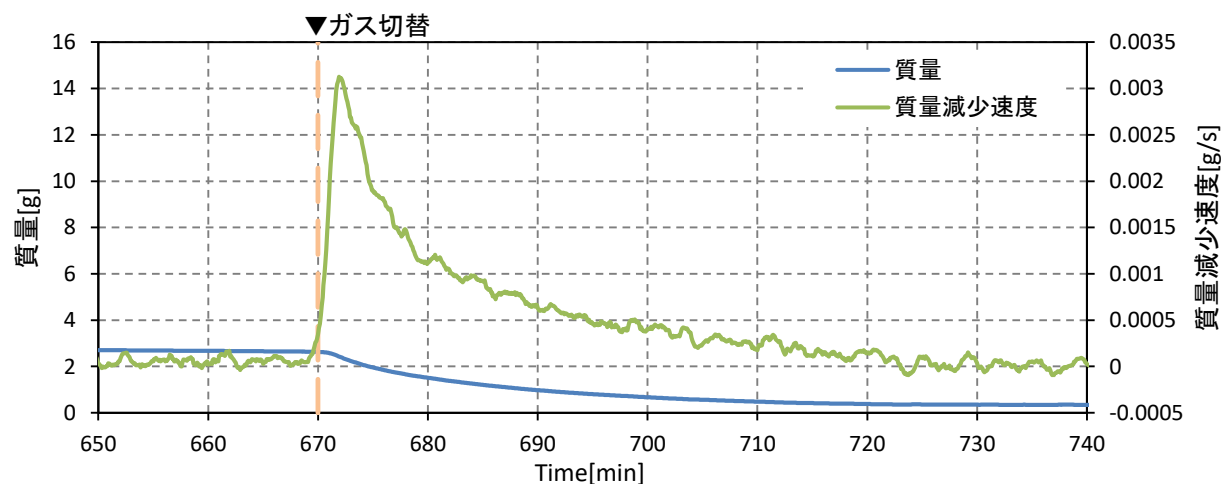
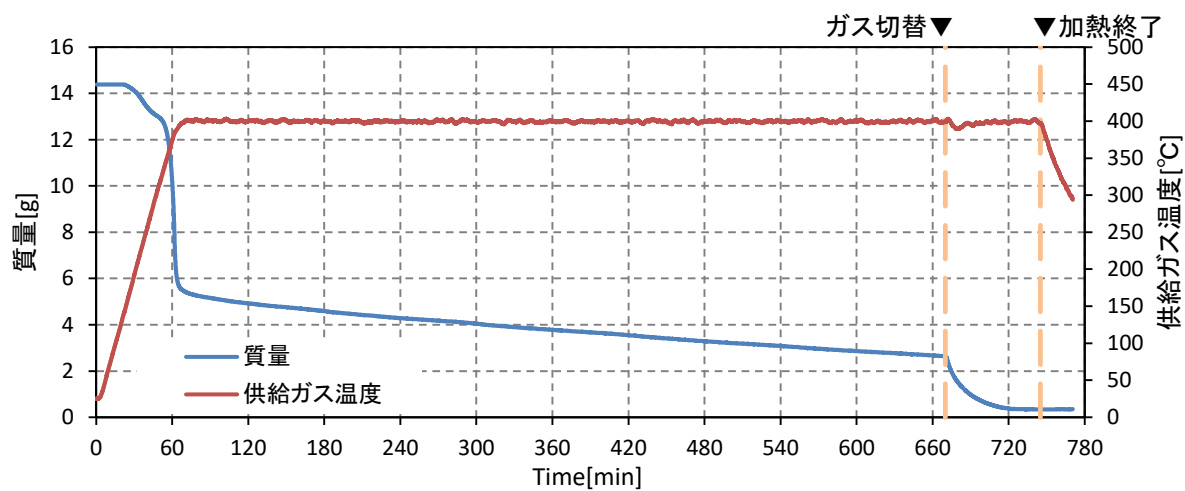


実験	72	Lo-30-21	
試験体	初期質量		14.31 g
	初期寸法	厚	30 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		530.0 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		21 % (21.6～21.7%)
経過	ガス切り替え		670 s
	加熱終了		745 s

結果	測定期間 671 ~ 674 min	
	質量減少速度	0.002763 g/s
	残量比減少速度	0.000193 g/(g・s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	1



測定値

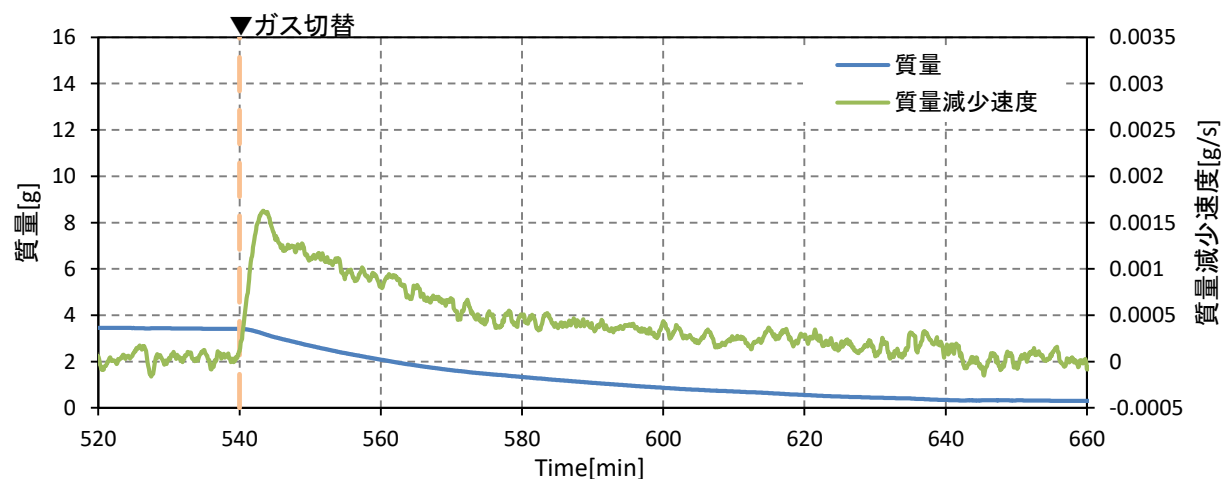
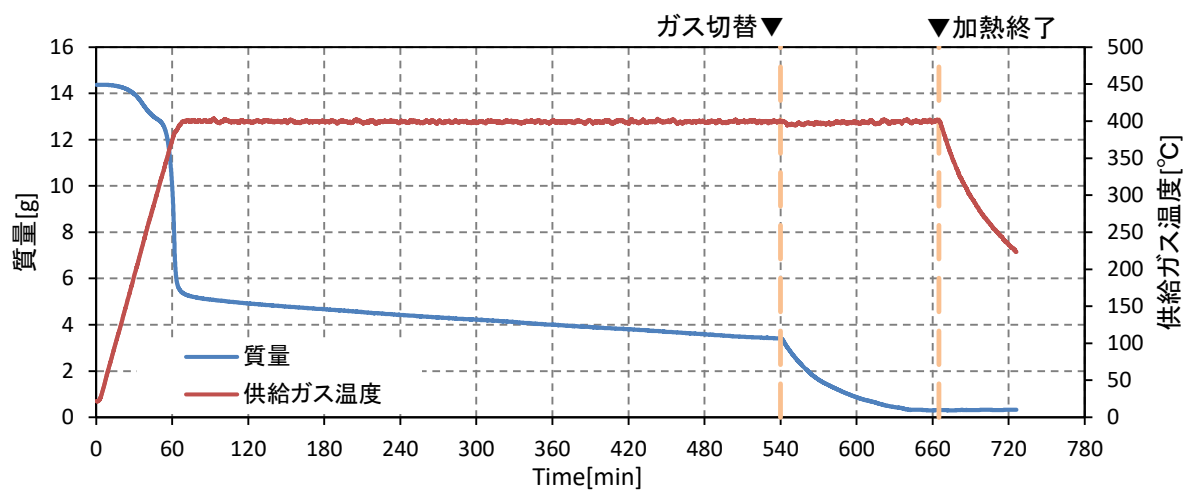


実験 73	Lo-30-15-1		
試験体	初期質量		14.34 g
	初期寸法	厚	30 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		531.1 kg/m ³
試験条件	樹種		カラマツ
	設置向き		板目(上面)
	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		15 % (15.4~15.5%)
経過	ガス切り替え		540 s
	加熱終了		665 s

結果	測定期間 541 ~ 546 min	
	質量減少速度	0.001445 g/s
	残量比減少速度	0.000101 g/(g·s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.52

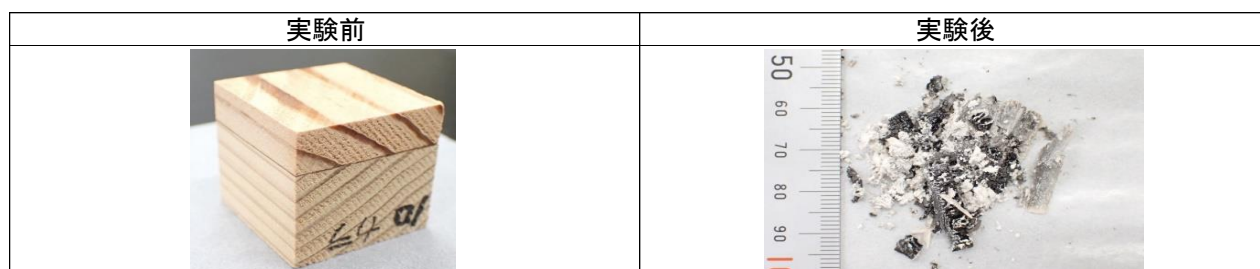
実験前	実験後
	

測定値

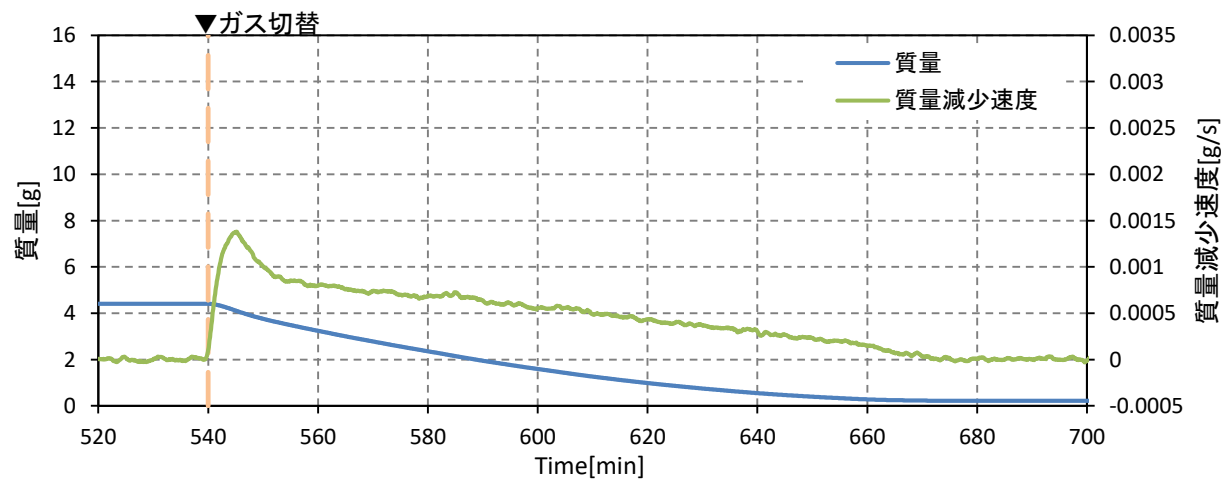
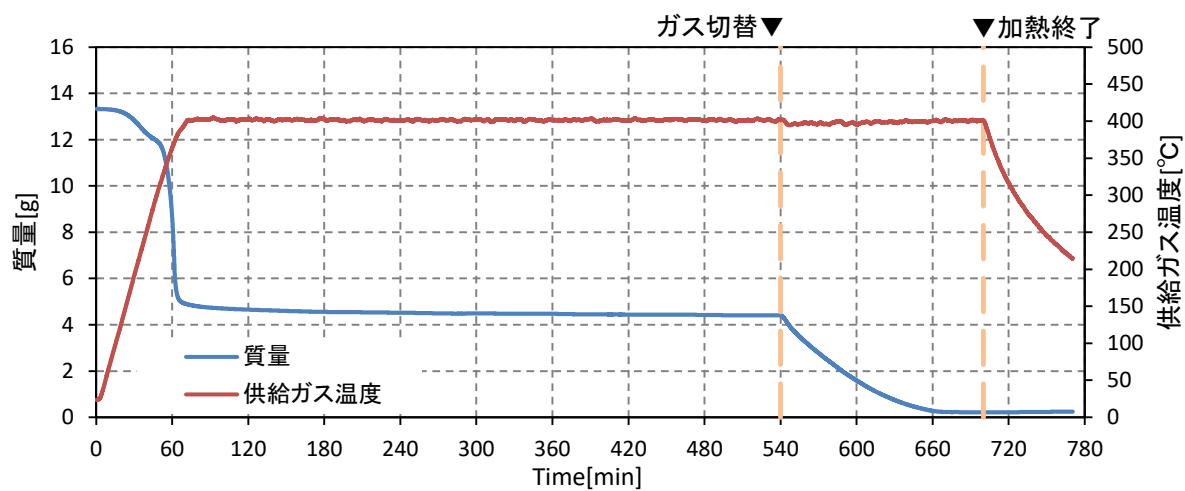


実験 74	Lo-30-15-2	
試験体	初期質量	13.30 g
	初期寸法	厚 30 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	492.6 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	15 % (14.9%)
経過	ガス切り替え	540 s
	加熱終了	700 s

結果	測定期間	541 ~ 548 min
	質量減少速度	0.001249 g/s
	残量比減少速度	0.000094 g/(g・s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.49



測定値

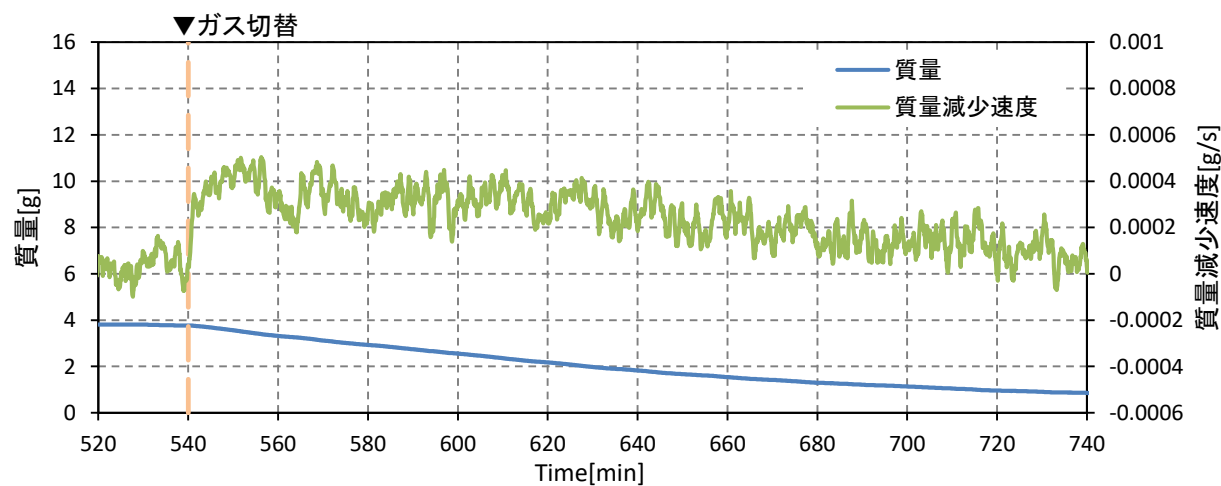
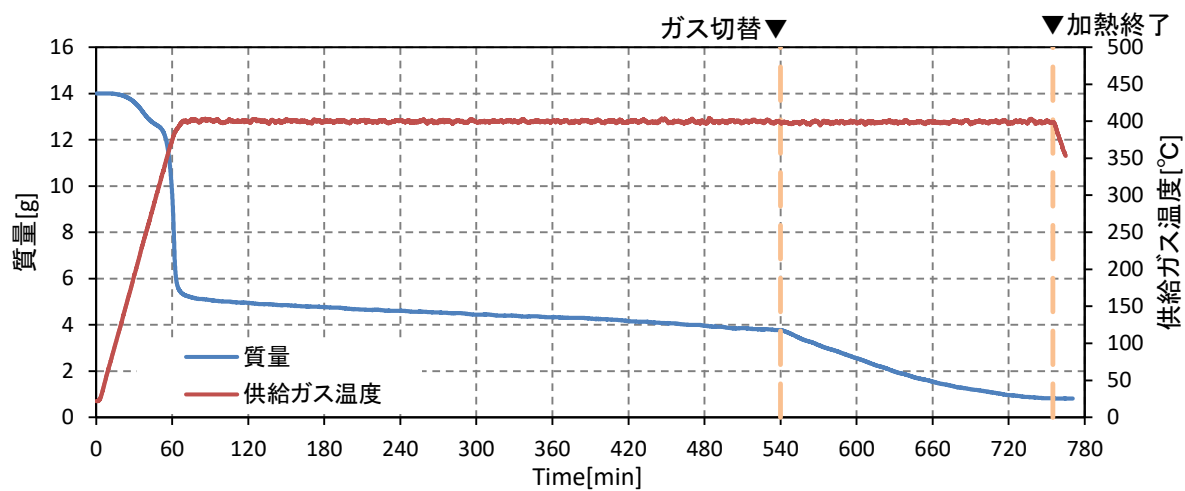


実験	75	Lo-30-9	
試験体	初期質量		14.00 g
	初期寸法	厚	30 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		518.5 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		板目(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		9 % (9.19~9.26%)
経過	ガス切り替え		540 s
	加熱終了		755 s

結果	測定期間 542 ~ 555 min	
	質量減少速度	0.000398 g/s
	残量比減少速度	0.000028 g/(g・s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.15



測定値

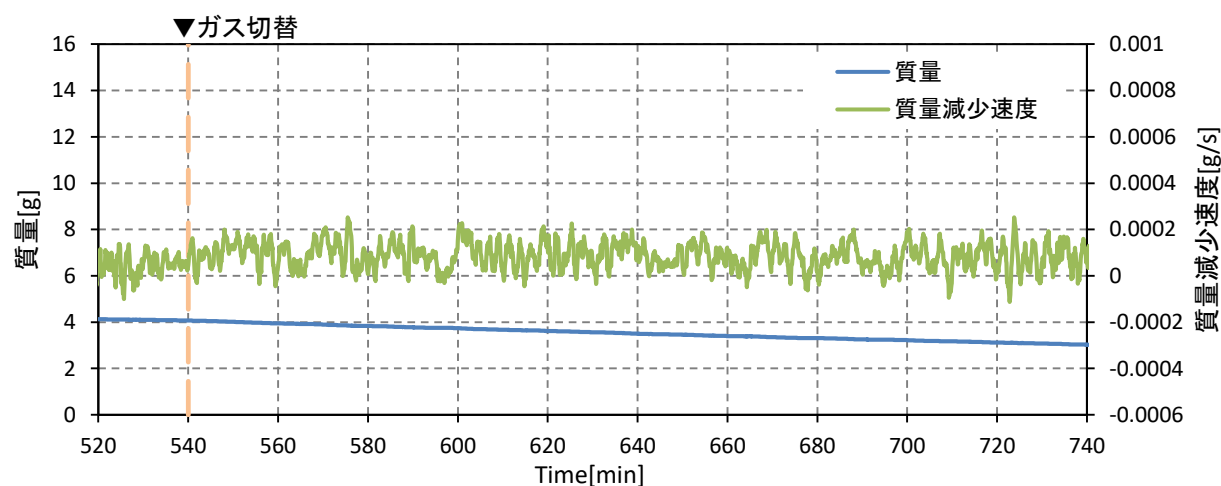
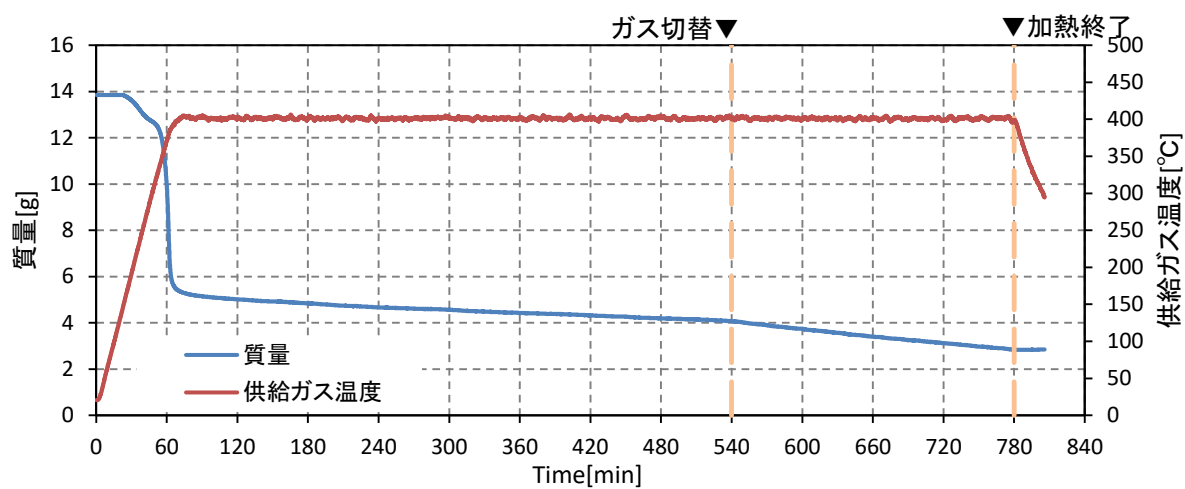


実験	76	Lo-30-3
試験体	初期質量	14.02 g
	初期寸法	厚 30 mm
		幅 30 mm
		奥 30 mm
	初期密度	519.3 kg/m ³
試験条件	樹種	カラマツ
	設置向き	板目(上面)
	供給ガス温度	400 °C
	酸素濃度 (実測値)	3 % (3.06~3.08%)
経過	ガス切り替え	540 s
	加熱終了	780 s

結果	測定期間	545 ~ 740 min
	質量減少速度	0.000087 g/s
	残量比減少速度	0.000006 g/(g・s)
	21%の残量比 減少速度に 対する残存率	0.03



測定値

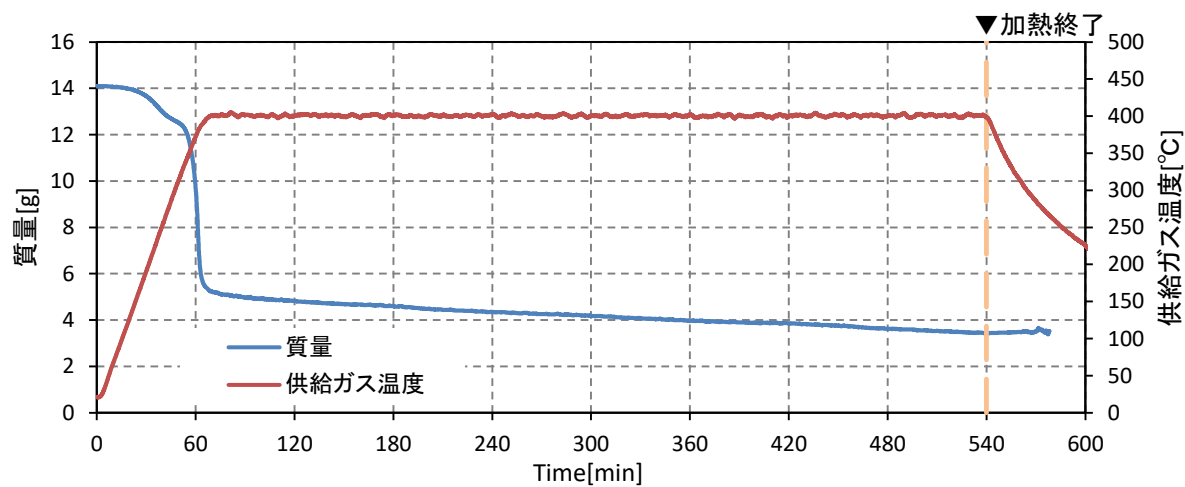


実験	77	Lo-30-N2-1	
試験体	初期質量		14.03 g
	初期寸法	厚	30 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		519.6 kg/m3
	樹種		カラマツ
設置向き		木口(上面)	
試験条件	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		%
経過	ガス切り替え		s
	加熱終了		540 s

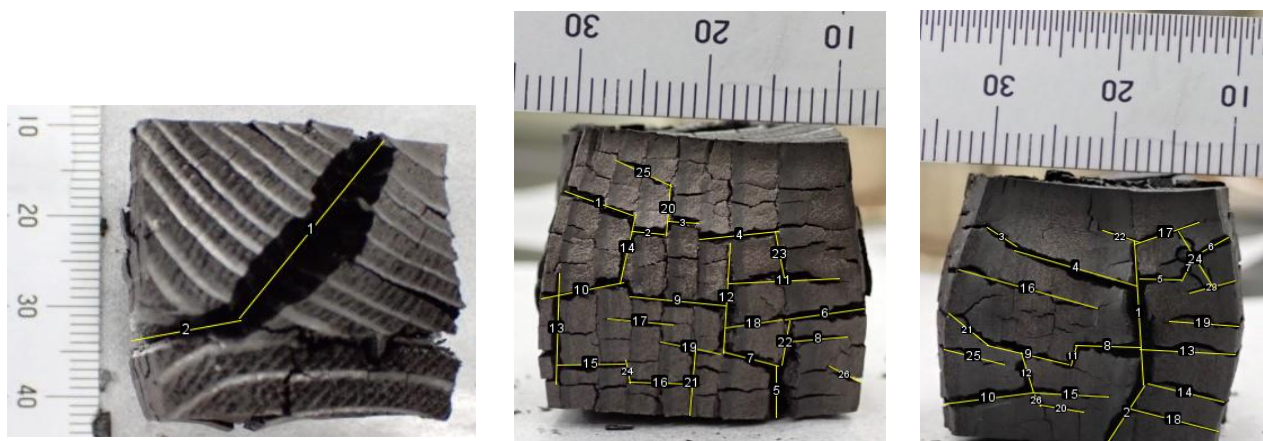
結果	実験後質量		3.6 g
	実験後残量比		0.26
	実験後寸法	厚	25 mm
		幅	20 mm
		奥	20 mm
	亀裂総長	小	146.09 mm
		大	36.30 mm
	表面積	実験前	5400 mm ²
		実験後	11919 mm ²
	体積	実験前	27000 mm ³
		実験後	10000 mm ³
平均厚さ	実験前	5.00 mm	
	実験後	0.84 mm	



測定値

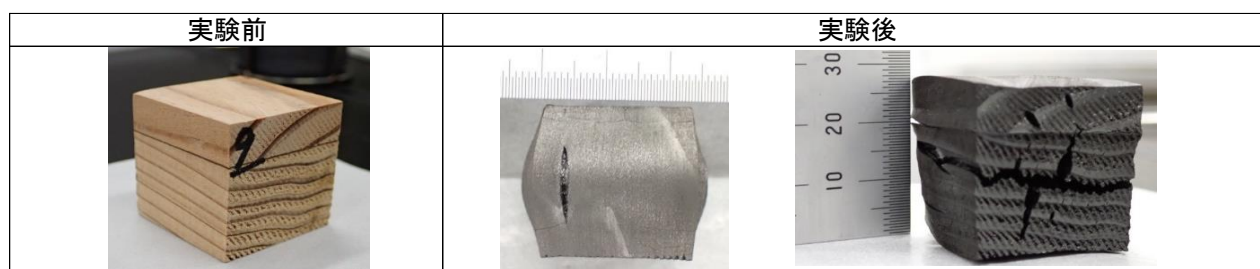


亀裂の測定

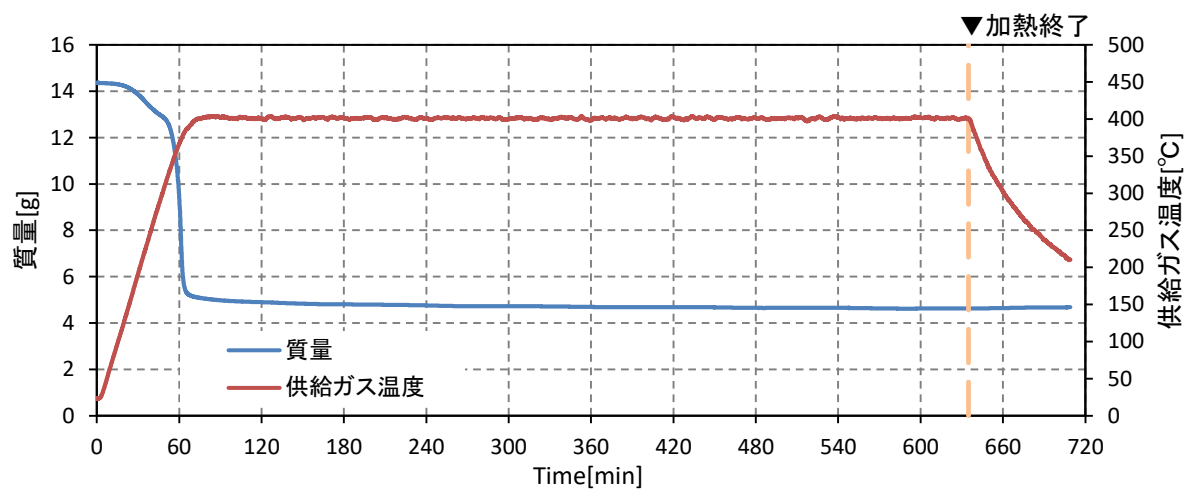


実験	78	Lo-30-N2-2	
試験体	初期質量		14.32 g
	初期寸法	厚	30 mm
		幅	30 mm
		奥	30 mm
	初期密度		530.4 kg/m3
	樹種		カラマツ
試験条件	設置向き		板目(上面)
	供給ガス温度		400 °C
	酸素濃度 (実測値)		%
経過	ガス切り替え		s
	加熱終了		635 s

結果	実験後質量		4.6 g
	実験後残量比		0.32
	実験後寸法	厚	26 mm
		幅	24 mm
		奥	20 mm
	亀裂総長	小	128.91 mm
		大	36.81 mm
	表面積	実験前	5400 mm ²
		実験後	11865 mm ²
	体積	実験前	27000 mm ³
		実験後	12480 mm ³
	平均厚さ	実験前	5.00 mm
		実験後	1.05 mm



測定値



発表論文一覧

査読付き論文（予定を含む）

- 1) Y. Chatani, K. Harada, “Measurement of Char Oxidation Rate of Glue Laminated Timber of Japanese Cedar and Larch under Forced Air Flow”, Fire Safety Journal, Vol.141, 103913, 2023/10, <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103913>
- 2) Y. Chatani, K. Harada, “Measurement of Char Oxidation Rate of Larch Glue Laminated Timber”, International Journal for Fire Safety and Technology, Vol.43, Issue 1, pp.1-16, 2024, <https://doi.org/10.3210/fst.43.1>
- 3) 茶谷友希子, 原田和典, 「(仮題) 炭化層の赤熱反応を考慮した計算モデルによる木質耐火部材の燃焼予測」, 日本建築学会環境系論文集, (投稿準備中)
- 4) 茶谷友希子, 原田和典, 「(仮題)木材の赤熱反応に酸素濃度が与える影響の測定と定式化」, 日本火災学会論文集, (投稿準備中)

学会発表（口頭発表、フルペーパー査読付）

- 1) Y. Chatani, K. Harada, “Measurement of Char Oxidation Rate of Larch Glue Laminated Timber”, AOSFST 2021 - 12th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, 2021/12/9
- 2) Y. Chatani, K. Harada, “Measurement of Char Oxidation Rate of Larch Glue Laminated Timber”, 14th International Symposium on Fire Safety Science, 2023/10/26

学会発表（口頭発表、査読なし）

- 1) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その2：弱い加熱強度における測定と速度式の改良」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.3-4, 2021/5
- 2) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのスギ集成材の赤熱反応速度の測定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.253-254, 2021/9
- 3) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その3：低酸素濃度における測定」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.97-98, 2022/5
- 4) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のための木材の赤熱反応速度の測定－表面気流の影響の確認－」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.143-146, 2022/9
- 5) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定 その4：厚みの異なる試験体の低酸素濃度における測定」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.33-34, 2023/5
- 6) 茶谷友希子, 原田和典, 「コーンカロリメータにおける強制気流を与えた材料表面の熱伝達」, 日本建築学会大会学術講演梗概集（防火）, pp.31-32, 2023/9
- 7) 茶谷友希子, 原田和典, 「燃え止まり予測のためのカラマツ集成材の赤熱反応速度の測定

その5：収縮・亀裂に関する考察と速度式の作成」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.131-132, 2024/5

- 8) 茶谷友希子, 原田和典, 「木材の赤熱反応に対する表面気流の影響の定式化」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), pp.175-176, 2024/9
- 9) 茶谷友希子, 原田和典, 「炭化層に赤熱反応分布を設けた計算モデルによる木質耐火部材の燃え止まり予測」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp.229-230, 2025/5
- 10) 茶谷友希子, 原田和典, 「放射加熱条件における木質耐火部材の燃え止まり予測」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (防火), 投稿済, 2025/9 発表予定

謝辞

本研究を実施するにあたり、多くの方のご指導、ご協力を賜りました。ここに心からの感謝の意を表します。

京都大学大学院 工学研究科建築学専攻 原田和典教授には、学士課程、修士課程から引き続き、博士後期課程の6年間にわたり、研究の進め方から研究内容の検討まで様々な側面から厳しくも暖かいご指導、ご鞭撻を賜りました。社会人博士後期課程として民間企業で働きながらの研究は、順調に進んでいたとは言い難い時期もありましたが、原田先生のご助言と励ましのおかげで乗り越えることが出来ました。ここに深く感謝を申し上げます。

同専攻 小椋大輔教授、石田泰一郎教授には、ドクターセミナーと学位論文審査において、貴重など意見、ご助言を頂きました。また、ドクターセミナーの場において、同専攻 仁井大策准教授をはじめとした多くの方にご助言をいただき、意見交換させて頂いた経験は、本研究を進める活力となりました。ここに感謝の意を表します。

同専攻 孫安陽助教（元京都大学博士後期課程）、大林組 牧野翔馬氏（元京都大学修士課程）には、同じ分野の研究を進める同志として、お互いの研究内容について闊達な意見交換とご助言をいただき、研究を深めることが出来ました。ここに深く感謝いたします。

早稲田大学 長谷見雄二名誉教授、岡山大学 中村昇教授には、研究内容に対して様々な視点からご指摘、ご助言をいただき、研究の幅を広げることが出来ました。学会発表においては、建築研究所 野秋政希氏、日本建築総合試験所 小宮祐人氏をはじめとした多くの方々に本研究に興味を持って頂き、ご指摘とご議論をいただきました。ここに心より感謝を申し上げます。

社会人博士後期課程として本研究を進めるにあたり、住友林業 筑波研究所 町田健一氏、村田泰治氏、関真理子氏、黒田瑛一氏、渡辺秀太氏、古田佳祐氏、石田雄大氏をはじめとした上司、同僚、後輩の方々に、多大なるご理解とご支援を頂きました。ここに深く感謝いたします。

竹中工務店（元住友林業） 蛇石貴宏氏には、博士後期課程の入学に際し、背中を強く押していただきました。また、働きながら研究出来る環境の下地を整えていただきました。ここに心からの感謝を表します。

最後に、社会人博士後期課程として忙しく帰省の頻度が下がったにも拘わらず、いつも暖かく見守り支援してくださった家族と、息抜きに付き合ってくださった友人たちに、心から感謝いたします。

2025 年 8 月 22 日

茶谷 友希子