

京都大学	博士 (工学)	氏名	孫 安陽(Sun Anyang)
論文題目	物質移動が木質部材の火災後の燃え止まり現象へ及ぼす影響に関する研究		
<p>本研究は、火災加熱を受ける木質部材で発生する熱と物質移動の解析モデルを提案したものである。コーンカロリメーターと小型耐火炉でのカラマツ集成材加熱実験を行って燃焼状況や炭化状況を調べた後、実験での測定結果と比較して解析モデルを検証した。最後に、検証した解析モデルを用いて感度解析を行い、各種条件が火災加熱を受ける木質部材の燃焼性状と加熱後の燃焼停止（燃え止まり）に及ぼす影響を調べている。論文は9章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べ、関連する既往研究をレビューして、研究課題を整理している。</p> <p>第2章では、火災加熱を受ける木質部材で発生する熱と物質移動の解析モデルを作成した。解析モデルでは、木質部材を揮発性成分と不揮発性成分に分け、空隙内部の液体と気体に関しては液水、水蒸気、熱分解ガス、二酸化炭素、酸素と窒素に分けて分析することとし、固体、液体と気体物質の質量保存および物質全体のエンタルピー保存関係を用いた。解析モデルにおいては木質部材の温度上昇に伴う炭化、亀裂、収縮などの形状変化を考慮している。反応と相変化については揮発性成分の熱分解、不揮発性成分の酸化反応、熱分解ガスの燃焼と水分の吸着および脱着を考慮した。</p> <p>第3章では、解析モデルで使用する比熱、熱伝導率、拡散係数などの各種物性値の決定方法を述べた。</p> <p>第4章では、第2章で示した解析モデルの数値計算手法の概要を述べ、Pythonによるプログラムの構成、計算の流れ、入力と出力の内容及び使用例を示した。</p> <p>第5章では、カラマツ集成材のコーンカロリメーター加熱実験を行い、試験体の温度、含水率、発熱速度と焼失、炭化、変色深さなどを測定した。内部温度の測定結果では、水分の脱着による100℃付近での温度の横ばいが存在し、非加熱面に近いほど横ばい時間が長くなることを示した。燃焼による発熱速度は、全ての試験体で着火直後に急激に上昇し、ピーク値は最大で約190kW/m²であった。その後は急激に減少し、約50kW/m²の一定値になった。発熱速度は、板目面からと柃目面からの加熱で差はほとんどなかった。電気抵抗法で測定した含水率は、温度が60～80℃付近から上昇しはじめ、100～120℃で最大となった。加熱面側から非加熱面側への含水率ピーク位置の移動速度は概ね1.3mm/分であることを明らかにした。試験体の焼失深さ、炭化深さ、変色深さは加熱時間に対してほぼ線形に増加した。炭化速度の平均値は約0.72～0.76mm/分、変色面進行速度の平均値は約0.98～1.00mm/分であった。温度履歴と炭化/変色深さから推定した炭化温度と変色温度はそれぞれ約380℃と260℃であり、従来から言われている値よりも高いことを明らかにした。</p> <p>第6章では、小型耐火炉を用いて厚さ100mmのカラマツ集成材壁のISO 834規格による60分加熱実験を行った。加熱後の冷却時における炉内への給気量を変化させた条件で実験を行い、給気量が冷却過程に及ぼす影響を測定した。冷却時の給気量が多いと冷却開始直後の有炎燃焼が激しくなった。ただし、給気量が多いほど、炉内温度の低下が早くなり、有炎燃焼の継続時間は短くなった。加熱・冷却終了後に試験体を炉から取り出した時点では、多くの実験で試験体表面での炭化層の赤熱が確認された。また、脱落や焼失による炭化層の表面損傷は、給気量が多いほど激しくなる傾向があった。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	孫 安陽(Sun Anyang)
<p>焼失深さは給気量が多いほど深くなるが、炭化深さと変色深さは給気量が多いほど小さくなる傾向が観測された。試験体内部温度は、加熱面に近い位置では給気量が少ない実験 (0.0144 kg/m²·s) で最も高くなった。ただし、給気量が極めて少ない実験では、燃焼そのものが緩慢となり炉内温度が低くなるため、試験体温度も低くなる傾向が見られた。電気抵抗法により測定した含水率はすべての実験で同様な傾向が観測された。ガス分析計で測定した炉内酸素濃度は、給気量が多いほど酸素濃度の回復が早くなる傾向が観測された。実験後に試験体を切断して測定した炭化深さおよび変色深と温度履歴を対応させて推定した炭化温度の平均値は 237℃、変色温度の平均値は 162℃であった。既往文献で示されている炭化温度 (260℃) と比べると大きな違いはないが、5章のコーンカロリメーター加熱実験から推定した炭化温度 (380℃) と変色温度 (260℃) を大幅に下回った。</p> <p>第7章は、2～4章で作成した解析モデルを用いて5～6章で示したカラマツ集成材のコーンカロリメーター加熱実験及び小型耐火炉実験の条件で解析を行い、温度、含水率、発熱速度、焼失深さ、炭化深さ、変色深さを実験と比較した。また、試験体内部の全圧、水蒸気分圧、酸素質量分率、熱分解ガス質量分率、残量比などの実測が困難な値の計算結果も併せて示した。</p> <p>コーンカロリメーター加熱実験の解析では、各実験で測定した着火直後の表面温度変化を再現できた。発熱速度は、着火直後の急激な燃焼が発生する 0～10 分の時間範囲では解析値は実験値を正確に再現したが、安定燃焼時の発熱速度の解析値は実験値より小さくなった。温度分布については、加熱時間が短い条件では実験値を概ね再現できた。加熱時間が長い条件では加熱表面から 20mm 位置での温度の解析値が実験値より低くなった。焼失深さ、炭化深さ、変色深さも温度分布と同様に、加熱時間が短い条件では実験値を概ね再現できたが、加熱時間が長い条件では解析値は実験値と比べると過小であった。</p> <p>小型耐火炉実験の条件での解析では、試験体内部温度は実験値をほぼ再現できた。特に、加熱期間中の解析値と実験値の一致は良好である。冷却に入った後は、給気量が少ない条件では、加熱面に近い位置での温度は実験値よりも高いが、給気量が多い条件では解析値と実験値の差は小さかった。含水率の変化も実験結果の傾向を再現できた。炭化深さについては、実験で測定した脆い炭化層深さを再現できた。しかし、焼失深さについては、解析値は実験値より過大になった。</p> <p>検証結果をまとめると、本研究で提案した火災加熱を受ける木質部材で発生する熱・物質移動解析モデルは小型耐火炉で IS0834 標準火災加熱を受ける木質部材の加熱・冷却過程中的熱・物質移動の傾向及び炭化状況を概ね再現できると考えられる。</p> <p>第8章では、提案する解析モデルを用いて各種物性値等が冷却時の燃焼停止 (燃え止まり) へ及ぼす影響を検討した。基準状態に対して、比透気率、空隙率、初期含水率、全乾密度、熱伝導率、熱分解速度パラメータ・炭化層 (不揮発性成分) 比率、亀裂間隔と亀裂深さ-幅比の全部で7種のパラメータを変化させて感度解析を行った。検討の結果、初期含水率が高く、比透気率が高く、熱伝導率が小さいものが燃え止まり易いことを示した。</p> <p>第9章は、本研究で得られた知見と今後の課題をまとめている。</p>			

本論文は、木質建築部材の耐火性に関して、火災加熱時の材料内の熱および物質移動の観点から実験および解析を実施し、火災加熱後の冷却時における燃焼停止（燃え止まり）現象に及ぼす影響を考察したものである。以下、その内容と得られた成果を記す。

(1) 火災加熱を受ける木質部材内部の熱・物質移動の解析モデルを構築し、部材内部の温度、含水率、空隙内ガス流速、空隙内ガスの化学種成分（酸素、二酸化炭素、可燃性ガス、窒素等）の質量分率を予測する方法を提案した。解析モデルでは、水分蒸発、揮発性成分の熱分解、不揮発性成分の酸化（いわゆる炭の赤熱反応）を考慮した。さらに、燃焼による材料の劣化による密度、比熱、熱伝導率等の物性値の変化と炭化層の収縮および亀裂による熱および物質移動機構への影響を考慮した包括的なものである。火災加熱中だけでなく、火災加熱後の冷却過程における赤熱燃焼の停止（燃え止まり）も予測対象としている。

(2) モデルに用いる物性値に関して、基本的なものは木材の乾燥工学等に関する文献等を網羅的に調査して収集した。熱伝導率と比熱に関しては、未炭化の木材と炭化後の炭の値を収集した。炭化に伴う収縮率、平衡含水率については代表的な樹種について、木材小片を用いた測定を行ない定式化した。熱分解速度については熱重量分析で得られた反応速度にアレニウス式をあてはめて反応速度式を求めた。炭化層の亀裂パターンについては、コーンカロリメーター加熱実験での炭化層形状をモデル化して定量化した。炭化層の赤熱反応速度については文献値を用いた。

(3) 数値解析手法と計算プログラムに関しては、連立偏微分方程式となる支配方程式をコントロールボリューム法で定式化し、プログラミング言語 Python で記述して数値解析を行なうアルゴリズムを考察した。

(4) コーンカロリメーターによるカラマツ小片の加熱実験および小型耐火炉による壁の加熱実験を行い、温度および含水率の時間的経過を加熱中および冷却中を通じて測定し、最終的な炭化性状を加熱冷却後に測定した。実験結果と解析モデルによる計算とを比較し、温度や炭化深さ等が比較的良く一致することを確認した。さらに、解析モデルを用いて、各種条件が燃え止まりへ及ぼす影響を検討し、影響が大きい物性値を抽出している。これらのことにより、木質部材の火災時の耐火性能予測とそれに基づく部材開発および設計に有用となる知見を得ている。

以上のように、本論文は、木質構造部材の火災時の燃焼性状を予測し、燃え止まり現象に基づいて耐火性を工学的に設計することへの端緒を拓くものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年1月23日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。