

耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性の解明と
国際整合化に関する研究

新屋 一馬

目次

第1章 序論

- 1. 1 研究の背景
- 1. 2 既往の研究
- 1. 3 本研究の目的
- 1. 4 本論文の構成

第2章 消防用耐火電線の耐火試験法

- 2. 1 目的
- 2. 2 我が国の耐火試験法の変遷
- 2. 3 各国の耐火試験法の概要と告示との比較
- 2. 4 耐火試験法で検討すべき事項

第3章 小型加熱炉の炉内温度の測定

- 3. 1 実験の目的
- 3. 2 検討項目の整理
- 3. 3 実験方法
- 3. 4 実験結果
- 3. 5 考察
- 3. 6 結論

第4章 小型加熱炉の炉内温度および風速分布の測定

- 4. 1 実験の目的
- 4. 2 測定方法
- 4. 3 測定結果
- 4. 4 考察
- 4. 5 結論

第5章 数値解析による炉内温度と熱流の予測

- 5. 1 目的
- 5. 2 耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達のモデル化
- 5. 3 計算結果
- 5. 4 結論

第6章 数値解析を用いた比較

- 6. 1 目的
- 6. 2 実施方法
- 6. 3 計算結果の比較
- 6. 4 考察
- 6. 5 結論

第7章 国際的に整合する合理的な試験法の検討

- 7. 1 実験の目的
- 7. 2 検討項目の整理
- 7. 3 実験方法
- 7. 4 実験結果
- 7. 5 考察
- 7. 6 結論

第8章 数値解析による試験体温度と絶縁抵抗の予測

- 8. 1 目的
- 8. 2 電線内の熱伝達のモデル化
- 8. 3 モデルの精度検証
- 8. 4 パラメータによる影響の定量化
- 8. 5 結論

第9章 結論

第1章 序論

1. 1 研究の背景

建築物の火災時には、日常的に使用する電力が途切れたとしても、非常用エレベータや消防用ポンプ等の非常用動力設備が必要になる。これらは、在館者の避難や消防隊による消火活動の安全を確保するために必要不可欠なものである。

これらの設備に電力を供給するための消防用電力ケーブルは耐火電線と呼ばれ、我が国では、平成9年消防庁告示第10号¹⁾「耐火電線の基準」に基づく耐火試験（以下、告示法）により、合否判定が行われている。告示法は我が国独自の耐火試験方法であり、専用の小型加熱炉を用いて、JIS A 1304²⁾の標準加熱曲線 B に規定の温度で耐火電線を30分間加熱し、その時の耐火電線の電気特性と電線被覆樹脂の延焼距離を測定する。

しかし、告示制定から年月が経過したこともあり、試験法が定められた経緯とその趣旨が必ずしも明確でない。また、これまで消防庁告示の小型加熱炉の加熱特性に関する研究は乏しく、炉内の温度特性は明らかでない。加えて、建材等の分野では、国際的に ISO 834-1³⁾の耐火試験が普及しているが、これとの整合性が十分ではないのが実態である。近年の経済のグローバル化の中、世界貿易機関（WTO）の貿易の技術的障害に関する協定（TBT 協定）⁴⁾では、関連する国際規格、国際的な指針等がある場合には、原則として当該規格、指針等を基礎として使用することを求めていることから、告示法も将来的には ISO 等の国際規格への整合化が進められると考えられる。したがって、告示法の炉内の温度特性の解明と国際整合化に向けた技術的な検討が求められる。

1. 2 既往の研究

消防庁告示の耐火電線用の小型加熱炉の加熱特性に関する既往の研究は乏しいものの、壁材や床材といった建築構造部材を対象とした耐火炉（壁炉や水平炉等）に対しては、これまで様々な研究が行われている。

壁炉を用いた実験的な研究として、例えば、吉谷ら⁵⁾は、小型の壁炉を用いて、無筋 ALC を ISO 834-1 の加熱曲線に従って150分間加熱し、試験体表面及び試験体内部の温度を測定した。そして、加熱実験の結果から包括熱伝導率を推定し、実験に用いた無筋 ALC よりも厚い試験体の ALC の裏面温度を予測している。松山ら⁶⁾は、耐火炉内の伝熱特性を解析するために、壁炉を用いて30分間加熱し、炉内壁（セラミックファイバー）及び試験体（鉄板）の温度や試験体への熱流等を測定した。熱流の測定には、2種類の熱流計を用いることで全熱流と放射熱流を分けて測定し、全熱流から放射熱流を差し引くことで、壁面の対流熱流を求めている。対流熱流について、王ら⁷⁾は、電気炉内を ISO 834-1 の加熱曲線で昇温し、熱流計を用いて加熱時の全熱流を測定した。そして、全熱流から放射成分の理論値を差し引くことで対流成分を推定し、対流熱流と対流熱伝達率を求めている。

解析的な手法として、原田ら⁸⁾は、耐火試験炉の内張材料や制御用熱電対の形状の違いが

加熱特性に与える影響を調査するために、建築構造用の壁炉内の熱伝達をモデル化し、その影響を定量的に示している。また、熱伝達モデルにより、試験体表面における熱流は、加熱初期においては対流熱流が支配的であるが、加熱 10 分以降は放射熱流が支配的となることを明らかにしている。なお、提案された熱伝達モデルでは、炉内温度は炉内どこでも一様であると仮定している。

水平炉については、古平ら⁹⁾は、耐火試験炉内に設置した合成梁を ISO 834-1 の加熱曲線に従って加熱し、試験体表面及び内部の温度を測定した。そして、2 次元差分法を用いた熱伝導解析により、試験体内部の温度分布を計算し、計算値と実測値の差を考察している。遠藤ら¹⁰⁾は、標準スパンの水平炉と大スパンの水平炉を用いて、ISO 834-1 の加熱曲線に従って無機材料の梁試験体を加熱し、炉内の温度や熱流の時間変化及びそれらの分布を測定することで、水平炉の加熱特性を考察している。鈴木¹¹⁾らは水平炉を用いて、ISO 834-1 の加熱曲線に従って角形鋼管柱、H 形鋼柱及び H 形鋼梁を加熱し、鋼材の温度を測定するとともに、耐火試験時の鋼材の温度上昇予測式を提案している。四元ら¹²⁾は、水平炉を用いて、ISO 834-1 の加熱曲線に従って合成梁を加熱し、試験体内部温度を測定するとともに、3 次元熱伝導解析により、試験体温度を考察している。

告示法と ISO 834-1 の相違点の詳細は、第 2 章の 2.3 節で後述するが、告示法と ISO 834-1 とでは試験条件の細部が異なり、例えば告示法では、炉内温度制御用熱電対に慣用的に露出型シース熱電対を用いるのに対し、ISO 834-1 ではプレート熱電対¹³⁾が指定されている。高野¹⁴⁾は、建築構造部材用の耐火試験炉において、制御用熱電対の形状が異なる試験炉では、等しい加熱条件にはならないことを指摘している。松山ら⁶⁾は、壁用耐火試験炉において鋼管入り熱電対、シース熱電対、裸熱電対およびプレート熱電対により炉内温度を測定し、その差を検討している。原田ら¹⁵⁾は、建築構造用の耐火炉を用いて、制御用熱電対の形状の違いが試験体への流入熱流に影響を与えることを指摘している。また、Sultan^{16,17)}は、プレート熱電対で制御する場合、壁炉と床炉といった炉の形状の違いが、試験体への流入熱流に影響を与えることを示している。内川ら¹⁸⁾は、壁用耐火試験炉を用いて試験体を加熱し、試験体が可燃物(杉)の場合には、シース熱電対とプレート熱電対に温度差が顕著に表れることを示している。

1. 3 本研究の目的

本研究の目的は、消防庁告示に規定される耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性を解明することと、試験条件を ISO 834-1 に整合化すると仮定した場合の影響を明らかにすることである。国際整合化の方法としては、耐火電線の耐火試験法である IEC 60331-1~3^{19,20,21)}や建築構造部材を対象とした耐火試験法である ISO 834-1 の試験方法を直接採用する方法と、告示の小型加熱炉をベースに試験条件を ISO 834-1 等に整合させるという方法がある。本研究では、まずは告示の小型加熱炉をベースに試験条件を ISO 834-1 等に整合させるというアプローチで国際整合化を検討することとし、IEC 60331-1~3 や ISO 834-1 の試験方

法を直接採用する場合の調査は、次の段階で別途検討することとしている。これらの研究を進めることにより、将来的に告示の耐火試験法の国際整合化が必要になった場合に、本研究の成果が告示改正のための検討材料となり、スムーズな移行が可能になると期待できる。

本研究では、まず、我が国の電線の耐火試験法の変遷と諸外国の耐火試験法を調査し、告示の耐火電線用小型加熱炉をベースとして、試験条件を国際規格に整合化すると仮定した場合に検討すべき事項を抽出する。

消防庁告示の耐火電線用小型加熱炉を対象とした、炉内の加熱特性に関する既往の研究は見当たらないので、耐火電線用小型加熱炉を用いて、ケーブルを設置しない空炉の状態では加熱実験を行い、炉内温度と熱流束といった基礎的なデータを収集する。その際、試験条件の一部を ISO 834-1 に変更することで、ISO 834-1 に整合すると仮定した場合の影響を考察する。また、耐火電線用小型加熱炉に対して、炉内温度分布と炉内温度風速を測定した事例は見当たらないので、熱電対と双方向プローブを用いた加熱実験により、炉内温度分布と炉内風速分布を明らかにする。炉内温度分布と風速分布についても、ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を調査する。そして、得られた測定結果を基に対流熱流及び対流熱伝達率を算出する。

炉内の熱伝達を解明するために、ケーブルを設置しない空炉の状態の炉内の熱伝達をモデル化する。建築構造部材用耐火炉を対象とした既往の研究の熱伝達モデルでは、炉内温度は炉内で一様であると仮定して扱われているが、耐火電線用小型加熱炉と建築構造部材用耐火炉ではバーナの構成が異なるので、そのまま建築構造部材用耐火炉の熱伝達モデルを適用することは困難である。そこで、本研究では、建築構造部材用耐火炉に提案されたモデルを改良し、炉内を制御用熱電対側の炉内ガス空間とバーナ側の火炎空間の二つの空間に分割することで、異なる温度として扱うこととする。そして、得られた熱伝達モデルを用いて、ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を明らかにする。

実際に試験体である耐火電線を炉内に設置して加熱実験を実施する。その際、ISO 834-1 の試験条件に変更して炉内温度と耐火電線の電気的な絶縁性を測定する。この時、加熱中の耐火電線の絶縁性を連続的に測定する方法を検討する。そして、測定結果を比較することで、ISO 834-1 へ整合化すると仮定した場合の影響を考察する。また、整合化の影響を定量的に把握するために、耐火電線内の熱伝達をモデル化し、加熱中の耐火電線の絶縁抵抗を予測する手法を提案する。耐火電線の熱伝達は、円筒座標系の一次元熱伝導方程式を用いて計算し、露出試験では、樹脂は着火温度に達すると着火し、一定時間燃焼後、燃え尽きるモデルとする。電線管試験では、樹脂は完全融解温度に達すると速やかに消失して空気層になるモデルとする。それらのモデルから耐火層（マイカ）の温度を計算し、耐火電線の絶縁抵抗を予測する。また、加熱中の絶縁抵抗の実測値と比較することでモデルの精度検証を行うとともに、導体寸法およびマイカ厚さを変更する場合の影響を計算によって定量化する。

1. 4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.1 に示す。

第 1 章では、本研究の背景と既往の研究、本研究の目的について記述する。

第 2 章では、我が国の耐火電線の耐火試験法の変遷をまとめるとともに諸外国の耐火試験法との比較を行い、国際整合化すると仮定した場合の告示の耐火試験法の検討すべき事項を抽出する。

第 3 章では、消防庁告示に規定の耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体を設置せずに加熱を行い、炉内温度特性を実験的に調べる。その際、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体保持面（ケイカル板）との距離を ISO 834-1 の条件に変更し、炉内温度等を比較することで、ISO 834-1 に整合化すると仮定した場合の影響を考察する。

第 4 章では、耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体を設置せずに加熱を行い、炉内温度分布と炉内風速分布を測定する。その際、制御用熱電対と試験体保持面との距離の違い等による影響を比較する。また、炉内温度と風速の測定結果を用いて、対流熱流と対流熱伝達率を求める。

第 5 章では、試験体未設置の場合の耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達をモデル化する。熱伝達モデルは、炉内を炉内制御用熱電対側の炉内ガス空間とバーナ側の火炎空間の二つの空間に分割することで、異なる温度として扱う。その際、第 4 章で得られる炉内温度と炉内風速データを用いる。また、第 3 章と第 4 章で得られる炉内温度と熱流束の測定結果を用いて、モデルの精度検証を行う。

第 6 章では、第 5 章で作成した熱伝達モデルを用いて、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体との距離を ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を明らかにする。また、①加熱炉の大きさ、②炉の内張材料、③加熱開始時のガス温度の違いといった、実験での確認が困難な項目についても変更による影響を調べる。

第 7 章では、耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体である耐火電線を炉内に設置して加熱を行い、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体の距離を ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を考察する。その際、加熱中の試験体の電気的な絶縁性を連続的に測定する方法を検討する。

第 8 章では、耐火電線内の熱伝達をモデル化して耐火層（マイカ）の温度を計算し、その温度を基に絶縁抵抗を予測する手法を提案する。その際、第 5 章の熱伝達モデルで得られる放射熱流や対流熱流等の計算値を用いる。また、第 7 章で得られる加熱中の絶縁抵抗の測定結果を用いて、絶縁抵抗の予測値の精度を検証する。

第 9 章では、本研究の結論をまとめる。

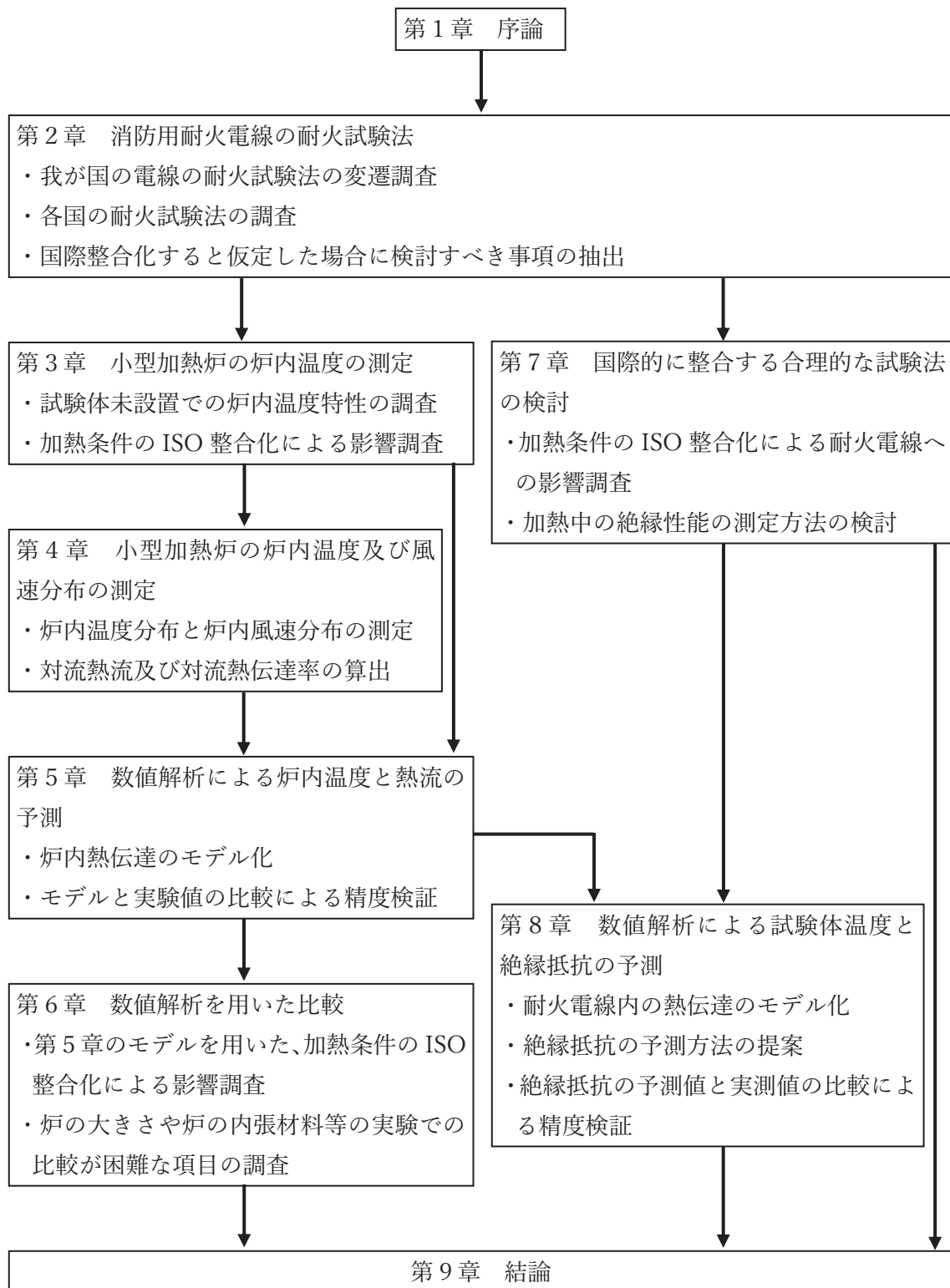


図 1.1 本論文の構成

引用・参考文献

- 1) 平成9年消防庁告示第10号「耐火電線の基準」
- 2) JIS A 1304、建築構造部分の耐火試験方法、2017
- 3) ISO 834-1, Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999
- 4) 世界貿易機関、貿易の技術的障害に関する協定、
https://www.mofa.go.jp/mofaj/ecm/it/page25_000410.html#article0 2024年5月18日閲覧
- 5) 吉谷公江、清水貴史、吉田正友、防耐火試験における包括熱伝導率を用いたALCの遮熱性能予測、日本火災学会論文集、Vol. 68、No. 3、pp. 63-73、2018
- 6) 松山賢、茂木武、田中孝義、若松孝旺、耐火試験用加熱炉の伝熱特性解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2、防火、pp. 19-20、1996
- 7) 王俞翔、鈴木淳一、大宮喜文、成瀬友宏、耐火被覆の損傷等を考慮した鋼部材の温度上昇特性、日本建築学会環境系論文集、Vol. 88、No. 809、pp. 556-564、2023
- 8) K. Harada, Y. Yabuki, T. Terai, A Theoretical Consideration on Heat Transfer in Fire Resistance Furnaces for Furnace Harmonization, Proc. 5th IAFSS, pp. 1033-1044, 1997
- 9) 古平章夫、藤中英生、大橋宏和、西村俊彦、H形鋼のウェブ部分にコンクリートを充填した合成梁の耐火性能、日本建築学会構造系論文集、Vol. 68、No. 563、pp.193-198、2003
- 10) 遠藤智紀、長谷見雄二、鈴木淳一、鍵屋浩司、伯耆原智世、梁の非損傷性評価における水平炉の加熱特性の検討 梁の加熱試験における試験体入射熱の分布・時間推移とスパンの関係、日本建築学会環境系論文集、Vol. 88、No. 814、pp. 869-880、2023
- 11) 鈴木淳一、石原慶大、島村誠、大宮喜文、遊佐秀逸、原田和典、若松孝旺、火災時における無被覆鋼材の温度上昇簡易予測式、日本建築学会構造系論文集、Vol. 67、No. 553、pp. 143-148、2002
- 12) 四元順也、平島岳夫、豊田康二、標準加熱を受ける無耐火被覆合成梁とその被覆接合部の温度分布解析手法、2019年度日本火災学会研究発表会概要集、pp122-123、2019
- 13) Wickstrom, U., A proposal regarding temperature measurements in fire test furnaces, Nordtest project 335-82, SP-RAPP 1986:17, Swedish National Testing Institute, 1986
- 14) 高野孝次、建築構造部材の耐火試験方法、コンクリート工学、Vol.11、No.8、pp.83-89、1973
- 15) 原田和典、耐火試験炉内の熱伝達 一炉の構造と制御用熱電対の差異に起因する加熱力の変動に関する実験一、日本火災学会論文集、Vol. 48、No. 2、pp. 53-61、1998
- 16) Sultan M. A., A Comparison of heat exposure in fire resistance test furnaces controlled by plate thermometers and by shielded thermocouples, Interflam 2004, pp. 219-229, 2004

-
- 17) Sultan, M. A., Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples, Fire Technology, 42, July 3, pp. 253-267, 2006
 - 18) 内川恒知、遊佐秀逸、阪口明弘、西田一郎、高田峰幸、内川恒知、水上点晴、耐火炉の性能を測るラウンドロビン試験報告 その2 試験体概要と試験装置比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、防火、pp. 327-328、2008
 - 19) IEC 60331-1:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 1: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830°C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV and with an overall diameter exceeding 20 mm
 - 20) IEC 60331-2:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 2: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830 ° C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV and with an overall diameter not exceeding 20 mm
 - 21) IEC 60331-3:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 3: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830 ° C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV tested in a metal enclosure

第2章 消防用耐火電線の耐火試験法

2. 1 目的

現行の耐火電線の基準は、平成9年消防庁告示10号¹⁾で規定されており、小型加熱炉を用いた耐火試験が運用されてきた。試験法の制定当初から長期間が経過し、その経緯が不明な項目も生じてきている。その一方で、製品製造と流通の国際化が浸透した今日では、試験法の国際整合化や性能化が将来的な方向となるであろう。そのためには、試験法が制定された経緯と目的を明らかにしておく必要がある。また、各国の電線の耐火試験法を調査し、国際整合化に求められる条件を明らかにする必要がある。本章では、2.2節で我が国の試験法の変遷をまとめ、2.3節で諸外国の試験法との比較を行う。

2. 2 我が国の耐火試験法の変遷

2. 2. 1 耐火電線と消防庁告示の耐火試験法の概要

耐火電線は、火災時でも電氣的な絶縁性能を保ち、一定時間の通電が可能な電線であり、消防法および建築基準法で定める各種非常用設備（非常用エレベータ、屋内消火栓設備、排煙設備など）に電力を供給するための配線として使用される。耐火電線には、一般の電線と異なり、高温時においても電氣的な絶縁性能を維持するために、特殊な耐火層が設けられている。耐火電線の構造の一例を図2.1に示す。一般的な耐火電線の構造は、図に示すように、純銅製の導体の外側に耐火層としてマイカテープが巻かれ、その外側にポリエチレンベースの絶縁体が被覆される。多心ケーブルでは、これらの絶縁線心が撚り合わせられ、ケーブルを丸く仕上げるために絶縁線心間の隙間を埋めるようにポリプロピレン等の介在物が充填される。更にその外側に、外力や水、油等から絶縁体を保護するために耐燃性ポリエチレンベースのシースが被覆される。

一般の電線には耐火層がないため、火災時にはプラスチック製のシースと絶縁体が燃焼し、容易に線間短絡（ショート）や地絡が起こりえるが、耐火電線はシースと絶縁体が燃え尽きたとしても導体上に設けられた耐火層により、電氣的な絶縁性能を維持し、各種非常用設備へ電力を供給することができる。この耐火性能を評価するための試験方法と要求値は平成9年消防庁告示10号に規定されている。



図 2.1 一般的な耐火電線の構造

現行の告示は、平成 9 年 12 月 18 日に公布及び施行された。以下、告示に規定の試験方法の概要を記す。図 2.2 に示す専用の小型加熱炉を用いて、炉内に設置した熱電対の温度を JIS A 1304²⁾の標準加熱曲線 B に規定の温度に一致するようガスバーナを調整し、炉内に設置した試験体を 30 分間加熱する。標準加熱曲線 B は、図 2.3 に示すように 5 分毎の温度を規定している。炉内温度を制御するための熱電対には、K 熱電対を指定している。

耐火性能の評価は、絶縁抵抗試験と絶縁耐力試験による電気的な絶縁性の評価に加え、加熱終了後の電線被覆材の燃え広がりを評価することで合否判定を行う。測定方法と合否判定の基準（低圧耐火ケーブル）を表 2.1 に示す。絶縁抵抗は、絶縁物の絶縁性を電気抵抗[MΩ]として表すものであり、絶縁物に直流電圧を印加した際に流れる微量の電流（漏れ電流）を測定することで算出される。告示では、直流 500V の絶縁抵抗計を用いて、加熱前及び加熱終了直前に測定し、基準値はそれぞれ 50MΩ 以上、0.4MΩ 以上である。0.4MΩ の基準値は、電気設備に関する技術基準を定める省令第 58 条（低圧の電路の絶縁性能）を基に設定されたと考えられる。絶縁耐力試験は、絶縁物に直流または交流の高電圧を一定時間印加した際に、絶縁破壊せずにその電圧に耐えるかどうかを確認する試験である。告示では、絶縁耐力試験を加熱前、加熱中及び加熱終了直後に実施し、加熱前と加熱終了直後は交流 1,500V を 1 分間、加熱中は低圧耐火ケーブルの定格電圧である交流 600V を印加し、絶縁破壊せずに耐えることを要求している。耐延焼性は、加熱終了後に電線被覆樹脂の炎が自然に消えてから、加熱によって燃焼したシース部分の長さを加熱炉内壁から端部側へ測定することで行う。耐延焼性は、露出試験のみ実施し、150mm 以内であることを要求している。

試験体は、図 2.4 に示すように、長さ 1.3m の耐火電線に規定の荷重を吊るして加熱する露出試験と金属製の電線管に耐火電線を収めて加熱する電線管試験の 2 種類が規定されており、いずれも厚さ 10mm のケイ酸カルシウム板（以下、ケイカル板と呼ぶ）製の試験体保持面に試験体を固定した上で、加熱炉内に設置する。露出試験は、図 2.5 の左図に示すようなケーブルラック等に敷設された電線の状態を、電線管試験は、図 2.5 の右図に示すよう

な電線管内に敷設された電線の状態を模擬している。露出試験では、加熱中に被覆材である樹脂の引火点を超えるため、電線被覆材が激しく燃焼するのが特徴である。一方、電線管試験では、電線を長さ 40cm の電線管に収め、電線管の両端をロックウール等の不燃材料で塞ぐため、電線管内の電線が蒸し焼きになるのが特徴である。

小型加熱炉の寸法は図 2.2 に示した通りであるが、告示では炉内高さや幅、バーナや制御用熱電対の形状、炉の材質等の詳細は規定していないため、試験炉間で試験結果に不整合が生じる可能性がある。また、加熱曲線について、JIS A 1304:2017 の解説の懸案事項において、“今回の改正では、標準加熱曲線は、対応国際規格による“標準加熱曲線 A”及び旧規格による“標準加熱曲線 B”を併記したが、将来的には、標準加熱曲線 A に統一すべきと考えられる。”と記していることから、近い将来、告示の加熱曲線（標準加熱曲線 B）は、ISO 834-1³⁾ の加熱曲線（標準加熱曲線 A）に変更される可能性がある。

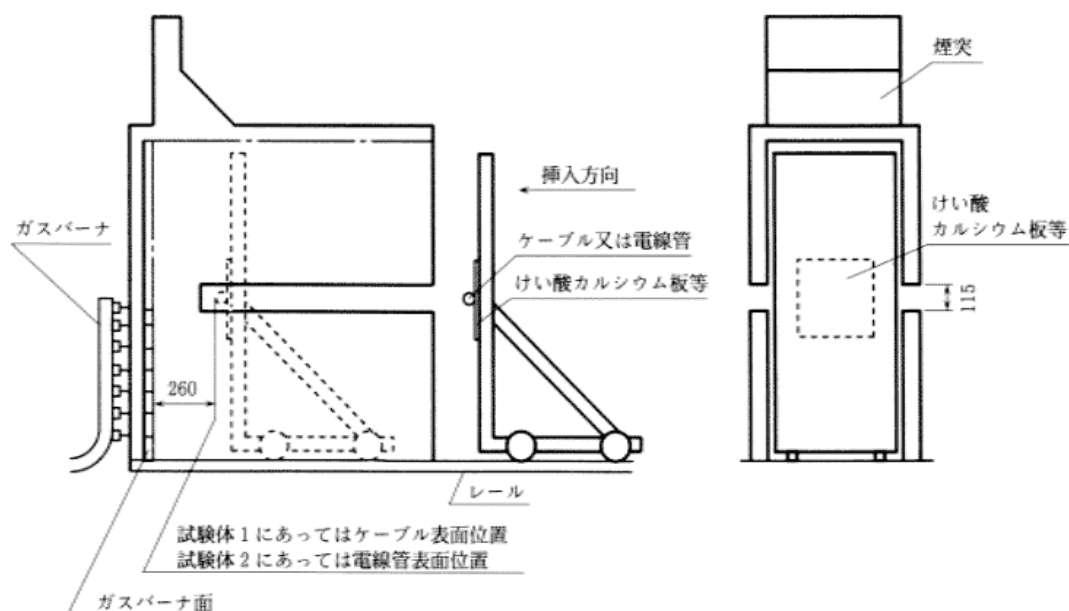


図 2.2 小型加熱炉の概要（平成 9 年消防庁告示第 10 号より引用）

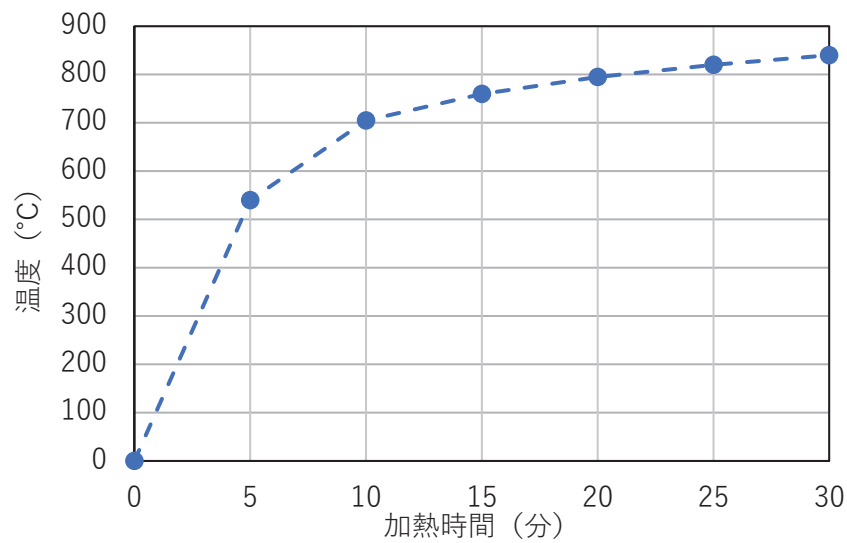


図 2.3 JIS A 1304 の標準加熱曲線 B

表 2.1 測定方法と合否判定の基準（低圧耐火ケーブル）

評価項目	測定タイミング	基準値
絶縁抵抗（直流 500V）	加熱前	50MΩ 以上
	加熱終了直前	0.4MΩ 以上
絶縁耐力（交流）	加熱前	1,500V に 1 分間耐えること
	加熱中	600V に 30 分間耐えること
	加熱終了直後	1,500V に 1 分間耐えること
耐延焼性	加熱終了後	炉壁から 150mm 以内

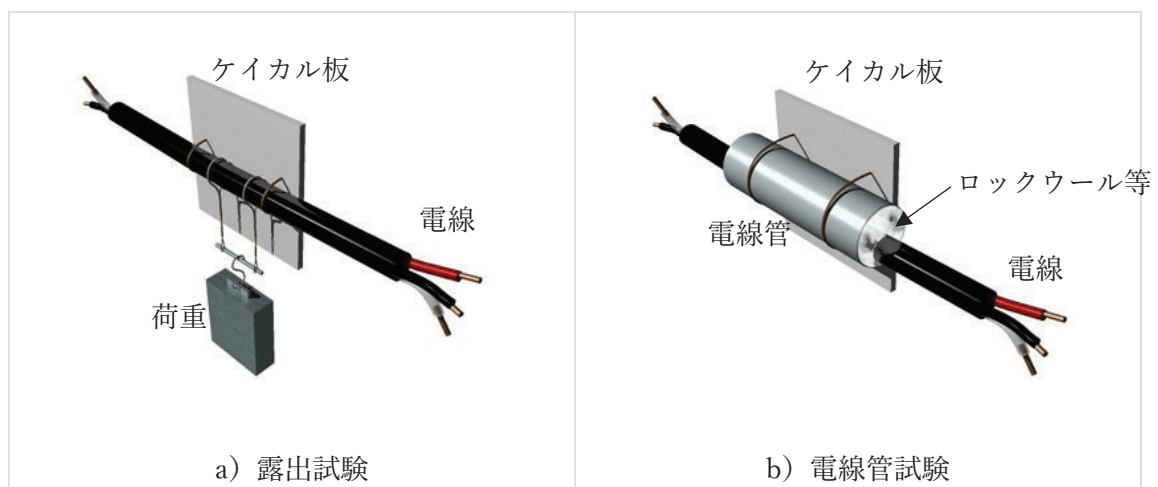


図 2.4 露出試験と電線管試験の試験体の模式図

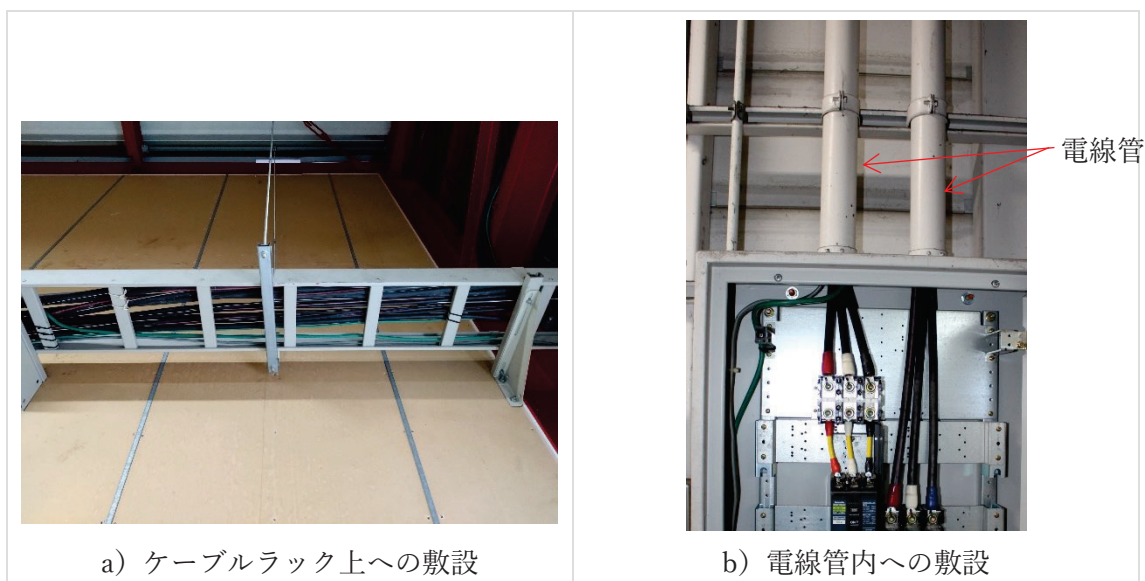


図 2.5 耐火電線の敷設例

2. 2. 2 告示の耐火試験法の変遷

現行の耐火電線の基準は、平成 9 年 12 月 18 日に公布及び施行された消防庁告示であるが、それ以前から耐火電線の基準は存在し、平成 9 年消防長告示第 10 号も旧告示を置き換えたものである。ここでは、耐火電線の基準と試験法の変遷について、旧告示と文献から調べた結果を概括する^{4,5)}。耐火電線の試験基準の変遷を表 2.2 に示す。その概要は以下の通りである。

(1) 基準の制定^{6,7,8)}

昭和 44 年 6 月の消防法改正により、非常警報設備、排煙設備、屋内消火栓設備などの設置が義務化された。これらの設備に電力を供給する電線については、火災時に 30 分間送電を継続し、電線の周囲温度が 80℃を超えないことが目標とされた。そのため、非常電源の配線は、耐熱ビニル電線以上の耐熱度を有する電線を金属管に入れて耐火壁の中に埋め込むことが原則であり、埋込み不可能な場合は、金属管の周囲にロックウール、石綿などの断熱層を施すこととされていた。保護を施さずに配線できるケーブルとして、MI ケーブル（無機絶縁電線）があるが、構造上、配線、接続、端末処理に手間がかかるという欠点があった。

そこで、一般のケーブルと同等の取り扱い性を持ち、火災時の高温に耐えることのできる耐火電線の基準が定められ、昭和 46 年 3 月 26 日に消防庁通達「消防予第 48 号」⁹⁾として、露出配線が可能な耐火電線の試験基準が定められた。試験方法は、図 2.6 に示すように長さ 1.3m のケーブルを厚さ 10mm、縦横 300mm のパーライト板にステップ止めたものを試験体とし、パーライト板中央部のケーブルに自重の 2 倍の荷重をかけた状態で JIS A 1302¹⁰⁾の屋内火災温度曲線（30 分で 835℃）に従って 30 分間加熱するものである。その結果、1) 加熱中に短絡しないこと、2) 加熱終了直後に測定した絶縁抵抗が 0.4MΩ以上であること、3) 加熱終了直後に交流 1,500V の電圧に 1 分間耐えることを合格の条件とした。

これらの条件は、低圧（600V）回路が火災時においても 30 分間機能することを目標に設定されたと考えられている。加熱終了後に定格電圧を大きく上回る 1,500V の電圧を印加して絶縁耐力を判定する目的は不明であるが、安全側の余裕として設定されたと推測される。耐火電線の耐火試験法の骨格はこの時に定められ、今日まで大きくは変わっていない。

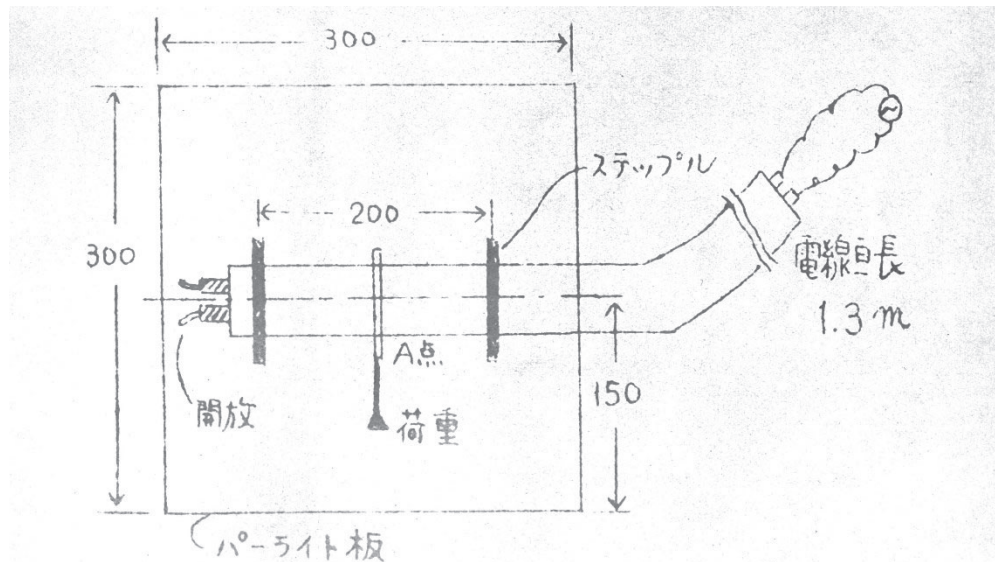


図 2.6 試験体の模式図（昭和 46 年消防庁通達より引用）

表 2.2 耐火電線の試験法の変遷

項目		国の基準				工業会規格
		昭和 46 年通達 消防予 48 号 (1971 年)	昭和 48 年消防 庁告示第 3 号 (1973 年)	昭和 53 年消防 庁告示第 7 号 (1978 年)	平成 9 年消防 庁告示第 10 号 (1997 年)	日本電線工業 会 規 格 JCS 7509 (2020 年)
加熱炉	構造	規定なし	JIS A 1305 0.5m × 1.15m × 1.2m 耐火煉瓦で内 張りする	同左	JIS A 1305 の 廃止により、 概略図のみ	概略図のみ
	加熱温度曲線	JIS A 1302 (30 分で 835℃)	JIS A 1304 (30 分で 840℃)	同左	同左	JIS A 1304 (60 分で 925℃)
	バーナ壁と試 験体距離	規定なし	200mm	260mm	同左	同左
	熱電対の仕様	規定なし	JIS C 1602 K 熱電対 素線 0.65mm	JIS C 1602 露出型 K 熱電 対 素線 1mm	JIS C 1602 K 熱電対	JIS C 1602 K 熱電対 素線 1mm
	熱電対の位置	規定なし	試 験 体 から 20mm の位置	試 験 体 から 10mm の位置	同左	同左
試験体	おもり	ケーブル自重 の 2 倍	同左	同左	同左	同左
	事前の屈曲	なし	同左	4 回	同左	同左
	板への固定方 法	ステーブル	1.6mm の銅線	1.6mm の金属 線	同左	同左
絶縁耐力	加熱前	なし	1500V/1 分	同左	同左	同左
	加熱中	600V/30 分	同左	同左	同左	600V/1 時間
	加熱終了後	1500V/1 分	同左	同左	同左	同左
絶縁抵抗	加熱前	なし	50MΩ以上	同左	同左	同左
	加熱終了時	加熱終了直後 0.4MΩ以上	同左	加熱終了直前 0.4MΩ以上	同左	同左
難燃性	耐延焼性(露出 配線のみ)	なし	ケイカル板か ら 150mm 未 満	炉 壁 か ら 150mm 未満	同左	同左
区分	露 出 配 線 / 電 線管用	露出配線のみ	同左	露 出 / 電 線 管 用(新区分)	同左	同左
	低圧/高圧	低圧のみ	同左	低圧/高圧(新 区分)	同左	低圧のみ
	大径ケーブル (大型加熱炉)	非対応	同左	同左	対応(新区分)	非対応
	高難燃ノンハ ロゲングレード	非対応	同左	同左	対応(新区分)	同左
	60V 以下の弱 電用ケーブル	非対応	同左	同左	対応(新区分) ※令和 3 年追加	非対応

(2) 告示の制定

昭和 48 年 2 月 10 日には、消防庁告示第 3 号「耐火電線の基準」が告示され、同年 6 月 1 日から施行された¹¹⁾。従来の通達を消防庁告示に位置付けたものであるが、技術的内容が一部改正され、細部が規定された。1) 加熱炉が JIS A 1305:1963¹²⁾に定める都市ガス加熱

炉に準じたものに限定された（図 2.7）。これは当時の建材分野の難燃性試験規格である JIS A 1321¹³⁾と共通の小型加熱炉を採用したものと推定される。また、炉内制御用熱電対の仕様と設置位置が規定された。2) 加熱曲線が JIS A 1302 から、現行と同じ JIS A 1304 に定める火災温度曲線（30 分で 840℃）に変更された（図 2.8）。3) シースの耐延焼性の規定が追加された。これにより、電線のシース材料は、難燃材料の使用が必須となった。4) パーライト板へのケーブルの取り付け位置が見直され、ケーブルの中央がパーライト板の中心の位置になるよう変更された。また、荷重の取り付けはケーブル外径の 2 倍の間隔を空けることとなった（図 2.9）

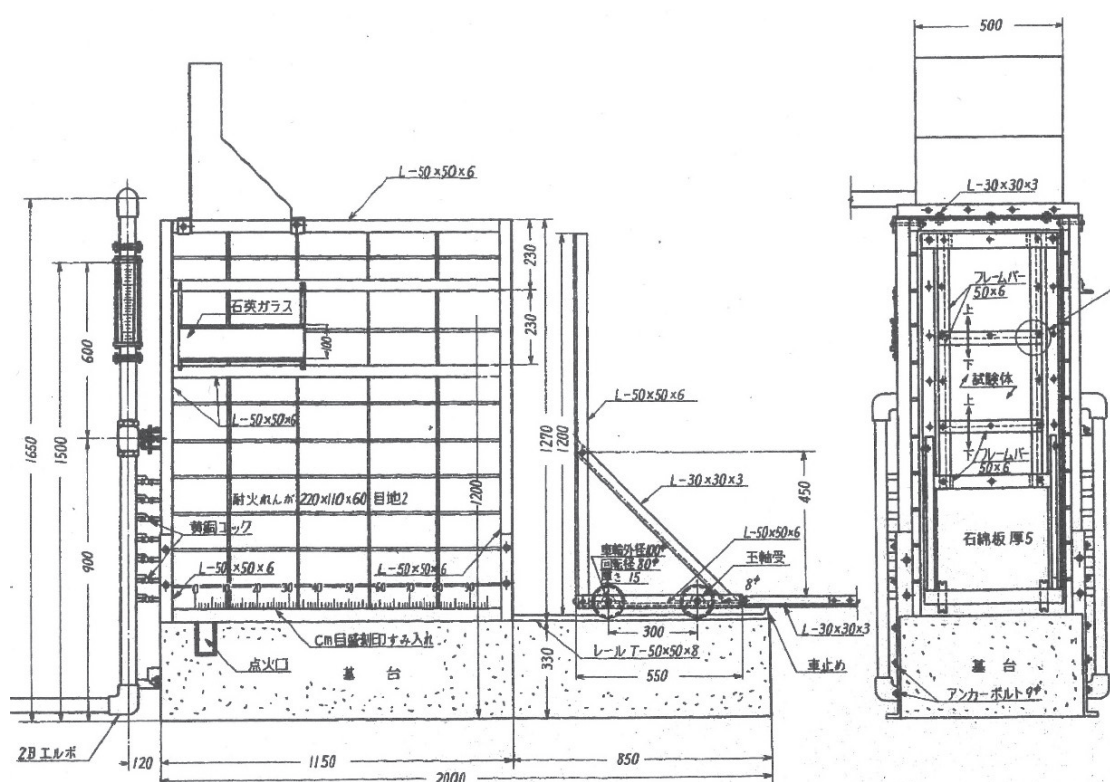


図 2.7 JIS A 1305 に規定の鉛直式小型加熱炉の都市ガス加熱炉（JIS A 1305 より引用）

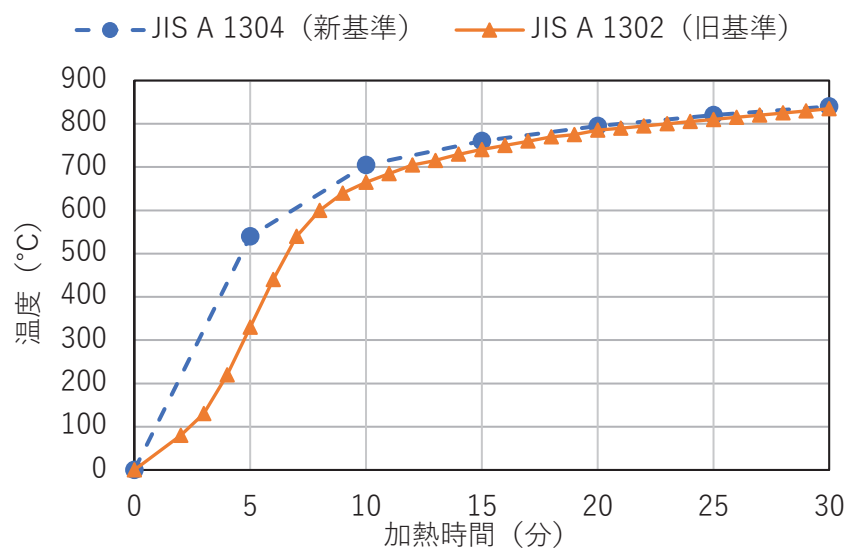


図 2.8 加熱曲線の違い（昭和 46 年消防予 48 号と昭和 48 年消防庁告示第 3 号）

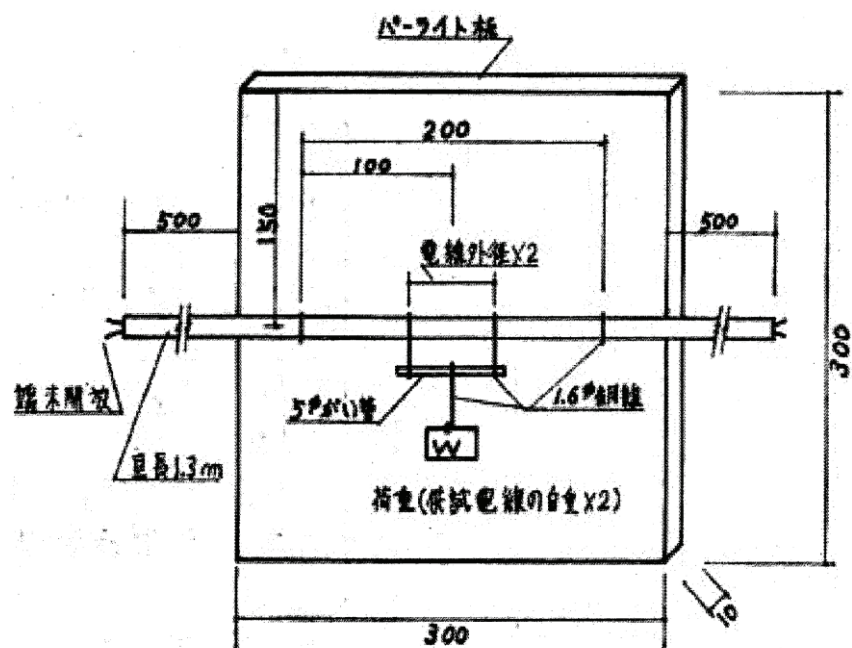


図 2.9 試験体の模式図（昭和 48 年消防庁告示第 3 号より引用）

（3）試験条件の変更と試験区分の追加^{14,15)}

昭和 53 年 10 月 16 日に告示され、翌年 4 月 1 日に施行された消防庁告示第 7 号¹⁶⁾では、細部が改正され試験法としては、現行の試験法とほぼ同様のものとなった。変更点は以下の通りである。1) 電線を挿入する際の炉の貫通部の高さを 65mm から現行と同じ 115mm へ改めた（図 2.10）。これは太いサイズの電線に対応するためである。2) 電線とバーナとの水平距離を従来の 200mm から現行と同じ 260mm（電線と制御用熱電対間が 10mm、制御用

熱電対とバーナ間が 250mm) に修正した (図 2.11)。これは試験体表面における温度のばらつきを低減するためである。3) 炉内制御用熱電対の位置を、試験体から前方へ 20mm、下方へ 20mm の位置から、現行と同じ前方へ 10mm、下方へ 75mm の位置へ修正した (図 2.12)。これは、従来の熱電対位置では、電線が燃焼するとその熱で制御用熱電対の温度が上昇し、規定の温度に従った加熱ができない場合があるためである。4) 制御用熱電対の仕様の規定が、素線径 0.65mm の K 熱電対から、素線径 1mm の露出型の K 熱電対となった。5) 従来の露出配線の区分に加えて、電線管用の区分を新設し、耐火電線を金属管内に敷設する場合の耐火性能を評価可能とした。6) 現場施工時に受ける曲げにも耐えるよう事前に電線に屈曲を与える屈曲試験を露出試験に追加した。7) 市場ニーズに対応して高圧耐火ケーブルの試験区分を新設した。なお、小型加熱炉の形状等を規定した JIS A 1305:1963 は、当告示制定以前の昭和 51 年 (1976 年) に既に廃止されていた。

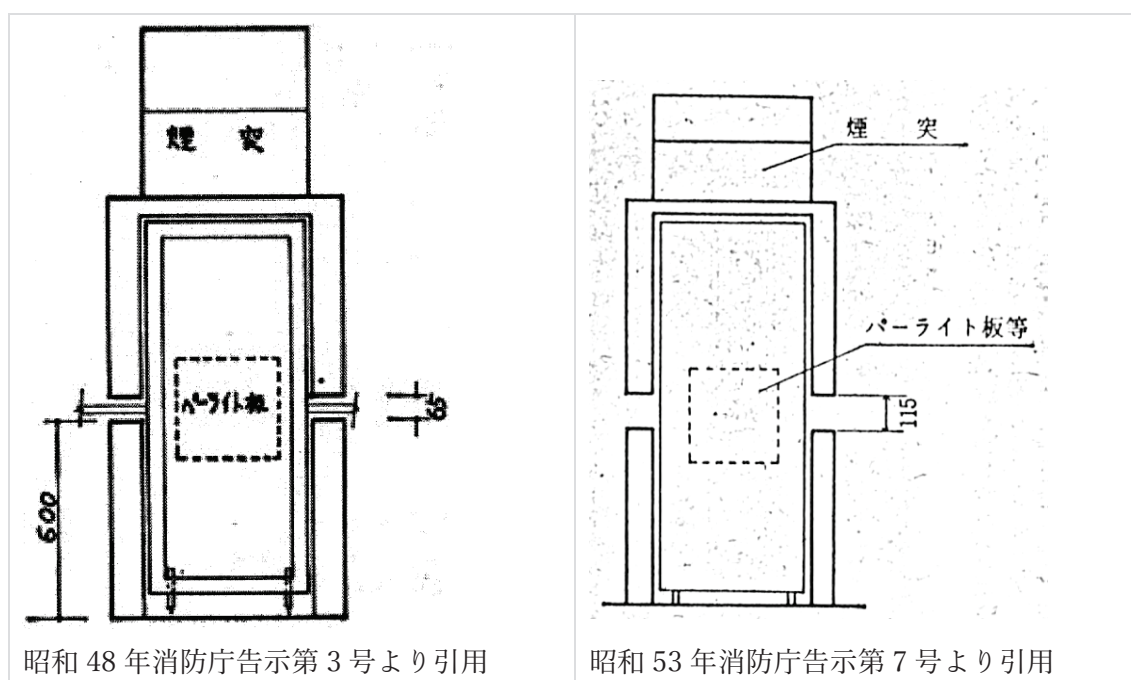
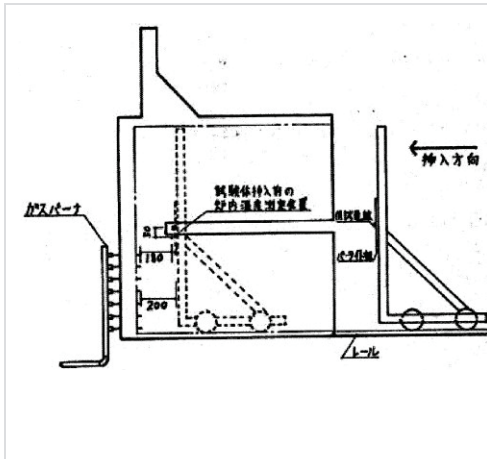
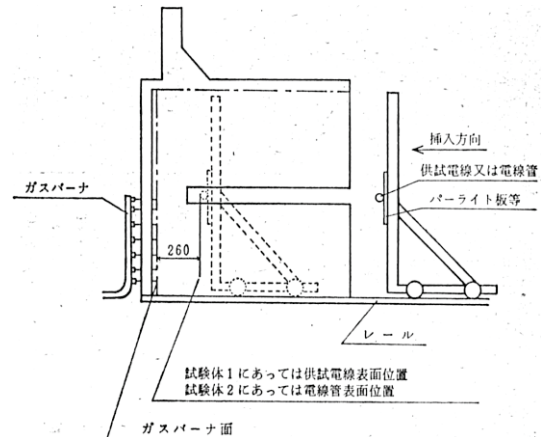


図 2.10 小型加熱炉の電線を挿入する隙間の高さの変更

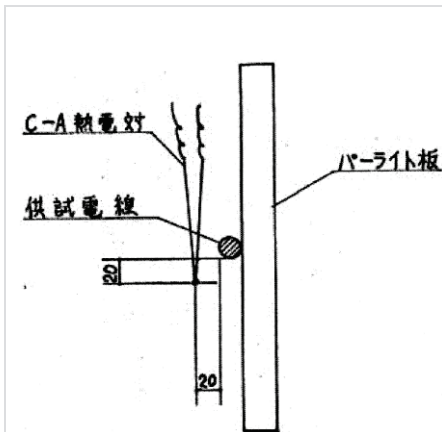


昭和 48 年消防庁告示第 3 号より引用

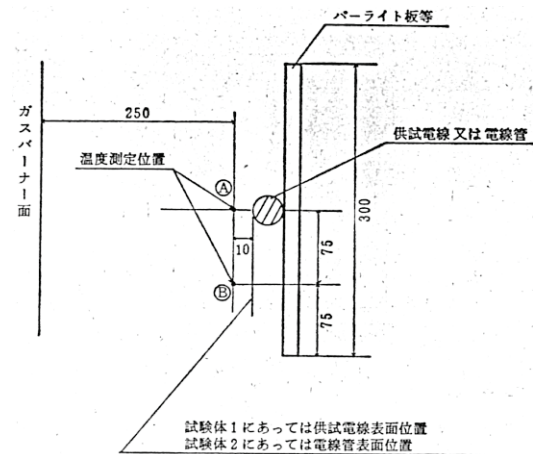


昭和 53 年消防庁告示第 7 号より引用

図 2.11 バーナから試験体までの水平距離の変更



昭和 48 年消防庁告示第 3 号より引用



昭和 53 年消防庁告示第 7 号より引用

(B が制御用熱電対)

図 2.12 制御用熱電対の設置位置の変更

(4) 現行基準

現行基準は平成 9 年 12 月 18 日制定の消防庁告示第 10 号である。変更点は以下の通りである。1) 高難燃ノンハロゲングレード（垂直トレイ試験、発煙性試験、発生ガス試験の実施）の区分が新設された。2) 大型加熱炉を新たに規定し、導体サイズが単心ケーブルで $1,000\text{mm}^2$ 、多心ケーブルで 325mm^2 を超える大サイズの耐火電線および耐火バスダクト用の耐火試験の区分が新設された。ただし、従前からの小型加熱炉による耐火試験法の変更は以下の軽微な変更のみであった。3) 加熱炉の形状等を規定した JIS A 1305 が昭和 51 年（1976 年）に廃止されたのに伴い、JIS A 1305 の引用が削除された。これにより炉の形状の規定が大幅に簡素化され、炉の寸法や炉壁材料等の規定がなくなった。4) 制御用熱電対

の仕様が、従来の素線径 1mm の露出型 K 熱電対から、素線径の規定と露出型熱電対の規定が削除され、K 熱電対を使用することのみの規定となった。

なお、令和 3 年 5 月 24 日には大規模倉庫火災での教訓を踏まえ、令和 3 年消防庁告示第 7 号¹⁷⁾として、平成 9 年消防庁告示を一部改正する告示が公布された。これは、従来は耐火電線の対象外であった 60V 以下の弱電用ケーブル（小勢力回路用耐熱電線）で耐火電線の基準を満たす区分を追加するための改正である。これに伴う、従来の耐火電線の試験方法に変更はない。

（５）長時間耐火ケーブルの業界規格の制定

非常用電源との接続が必要な消防用設備は、消防法施行令で定められ、作動時間等の詳細は消防法施行規則に規定されている。主な消防用設備の作動時間を表 2.3 に示す。大部分の消防用設備の作動時間は 30 分以下であるため、それらに接続される耐火電線の要求性能も 30 分の規定であると推測されるが、一部の設備には 60 分以上の作動時間が要求されている。

表 2.3 主な消防用設備の作動時間

消防用設備の種類	作動時間
非常警報設備	10 分
誘導灯	20 分
屋内消火栓設備、スプリンクラー設備、水噴霧消火設備、泡消火設備、屋外消火設備、排煙設備、非常コンセント設備、無線通信補助設備の増幅器	30 分
特定の誘導灯	60 分
連結送水管の加圧送水装置	120 分

また、建築物の大規模化、高層化、複雑化等に伴い、30 分間ですべての在館者が避難することができない場合¹⁸⁾も起こり得る。そこで、告示が規定する 30 分間の耐火性能を超える 1 時間の耐火性能を持つ耐火電線として、日本電線工業会規格 JCS 4524¹⁹⁾「1 時間低圧耐火ケーブル」が 2020 年 10 月に制定された。試験方法は、JCS 7509²⁰⁾に定められ、2020 年から業界内の自主的な運用が始まった。試験方法は、加熱時間が 60 分に延長されたことと加熱終了後の試験体の断線確認が追加されたこと以外は平成 9 年消防庁告示第 10 号と同様である。加熱曲線は JIS A 1304 の標準加熱曲線 B を 60 分まで延長したものであり、図 2.13 の通りである。

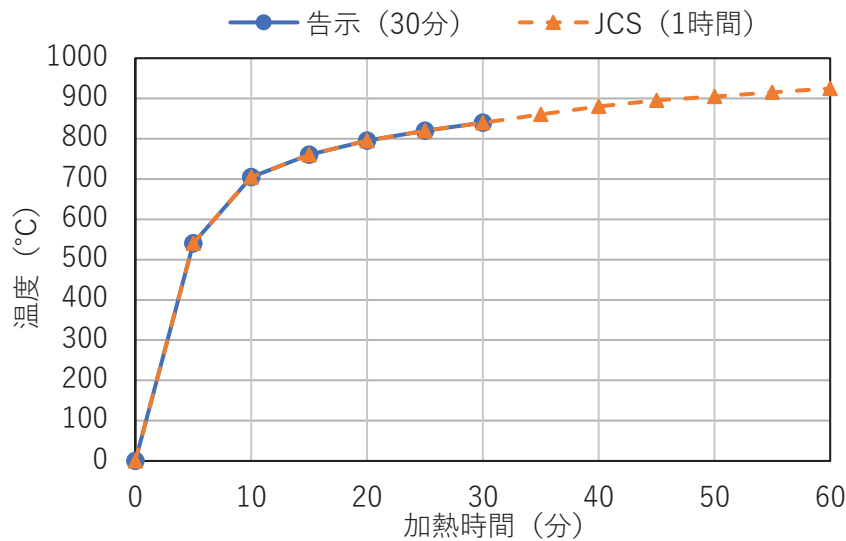


図 2.13 1 時間耐火ケーブルの耐火試験の加熱温度 (JIS A 1304 の標準加熱曲線 B)

(6) まとめ

耐火電線の耐火試験法は、昭和 46 年 (1971 年) の通達で定められ、試験法の骨格は今日まで大きくは変わっていない。その後、昭和 48 年 (1973 年) の告示化と昭和 53 年 (1978 年) の改正を経て、試験法の細部が変更され、現在の平成 9 年 (1997 年) の告示に至っている。試験法は昭和 53 年の改正時に、現行の試験法とほぼ同様となっており、40 年以上前の試験法が現在も使用されている。

2. 3 各国の耐火試験法の概要と告示との比較

2. 3. 1 各国の耐火試験法の概要

(1) 電線の耐火試験の国際規格 (IEC)

消防用耐火電線の国際的な試験方法には、国際電気標準会議 (IEC) が発行する IEC 60331 規格群があり、主に欧州で使用されている。国内では船舶用の一部の電線で使用されている。本規格群は、パート 1 から 3 に分かれており、パート 1 ²¹⁾ はケーブルの外形が 20mm を超える露出配線用耐火電線、パート 2 ²²⁾ は外形が 20mm 未満の露出配線用耐火電線、パート 3 ²³⁾ は電線管内配線用耐火電線を対象とした耐火試験方法である。それぞれ試験台へのケーブルの取付け方法は異なるが、加熱条件や絶縁性能の評価方法といった試験方法の骨格は共通である。試験体の加熱は、事前に火炎温度が 830°C となるように調整したプロパンガス流量一定のリボンバーナを用いて、図 2.14 のように、試験体にバーナ火炎を直接当てることにより行う。告示の試験法のような時間と共に炉内温度が増加する加熱方法ではなく、バーナの温度は一定である。加熱中の電線の絶縁性の評価方法も告示とは異なり、図 2.15 に示すように、3 相交流電源を用いて、試験体である耐火電線を含めて電気回路を構成し、電線の定格電圧で回路中に設置した電球を点灯させる。その際、試験体を固定するための金

属製留め具は接地する。同様に試験体にシールド線、中性線、アース線がある場合も接地する。中性線やアース線がある場合は、図中の 3 で示す位置で、L1、L2 または L3 の導体と接続し、電気回路を構成する。電流を回路に流すため、実際の電線の使用環境を模擬した課電方法といえる。IEC の測定方法では、回路中の電球の消灯で断線を検知でき、電線の導体から電線固定用の金属留め具への地絡だけでなく、3 相交流電源を用いることで線間短絡も検知できるのが特徴である。告示とは異なり、加熱後に電線の定格電圧を超える電圧での絶縁耐力試験は要求されていない。加熱時間は、電線の製品規格に規定がない場合には、30、60、90、120 分から選択することとなっており、例えば IEC 60331-1 の耐火試験に 90 分以上耐えた耐火電線には、「IEC 60331-1 (90)」と製品に表示することができる。

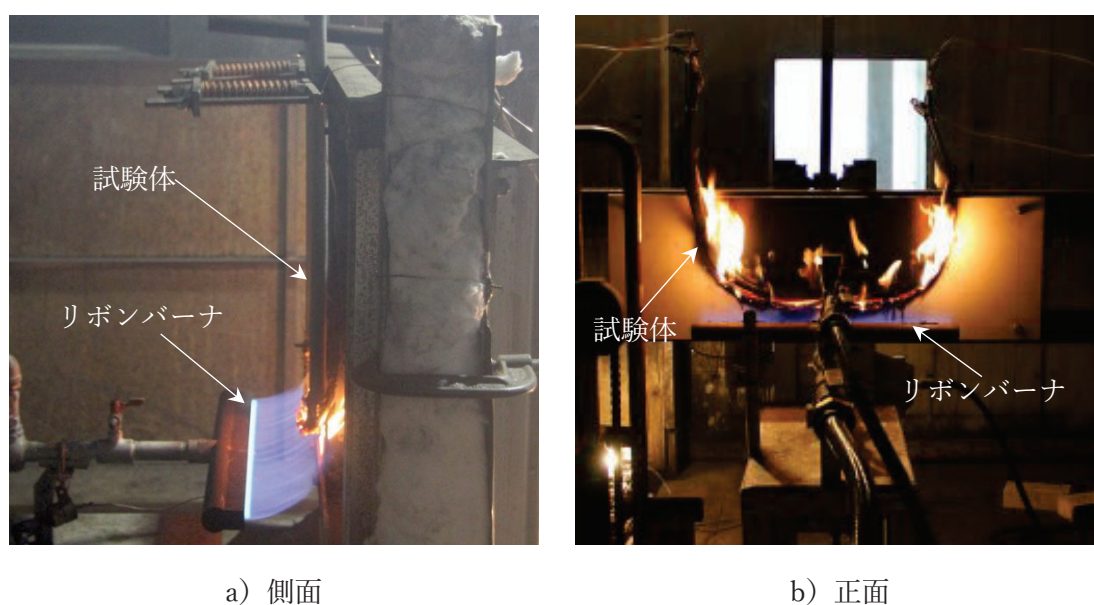
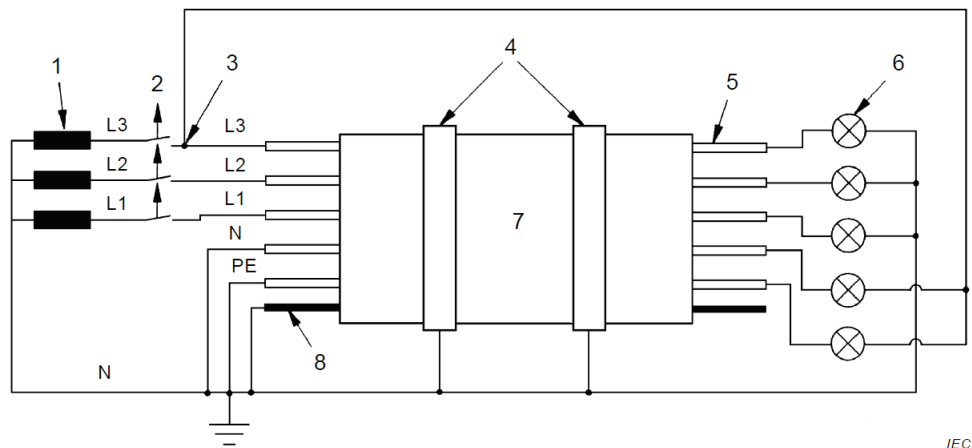


図 2.14 IEC 60331-1 の試験時の様子



- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 変圧器（3 相交流電源） | 7 試験体（耐火電線） |
| 2 ヒューズ（2A） | 8 シールド線（ある場合） |
| 3 N と PE を L1、L2 または L3 へ接続 | L1、L2、L3 相導体（L2 と L3 はある場合） |
| 4 金属製留め具 | N 中性線（ある場合） |
| 5 試験体の導体 | PE アース線（ある場合） |
| 6 電気抵抗と点灯表示器（電球） | |

図 2.15 IEC 60331-1 による耐火試験時の電気回路の模式図

（図は IEC 60331-1 から引用）

（2）電線の耐火試験の北米規格（UL）

北米では、アメリカ保険業者安全試験所（UL）が発行する UL 2196²⁴⁾によるケーブルの耐火試験が採用されている。加熱炉は縦 3.66m、横 3.66m 以上の大型の壁炉であり、試験体である耐火電線を壁面に取り付ける。耐火電線は、炉内で少なくとも 3m にわたって熱に曝される長さであることが規定されている。炉内温度制御用熱電対の設置位置は、試験体表面から 6 インチ（約 152mm）である。制御用熱電対は、時定数が 5.0～7.2 分、導体サイズ 18AWG（約 0.82mm²）のクロメル-アルメル線（K 熱電対に相当）を磁器絶縁体で保護したものであり、それを金属パイプに収めて使用する。

加熱中は、IEC 60331 シリーズと同様に回路を組み、3 相交流電源でケーブルの最大使用電圧または定格電圧で印加し、その時の負荷電流が 0.25～0.50A の電流値となるような仕様の電球を設置する。用いるヒューズは 3A である。加熱終了後は、5 分以内に通電を止めた状態で放水試験を実施する。その後、試験体乾燥後に加熱中と同じ電圧を印加し、破壊しないことを確認する。

加熱曲線には、図 2.17 に示す加熱曲線が規定されており、消防庁告示の加熱曲線と類似している。規格書のグラフには、8 時間の加熱時間が図示されているが、米国での耐火ケーブルの要求値は 2 時間である²⁵⁾。絶縁性の判定基準は、加熱中及び放水試験後の測定において、3A のヒューズが飛ばず、電球が点灯することである。

なお、試験体を加熱炉に設置後、加熱を開始する前と放水試験後に、導体相互間及び導体対地間に耐火試験時の交流電圧以上の直流電圧で絶縁抵抗測定を実施することが規定されているが、UL 2196 の規格中には絶縁抵抗の判定値は定められていない。

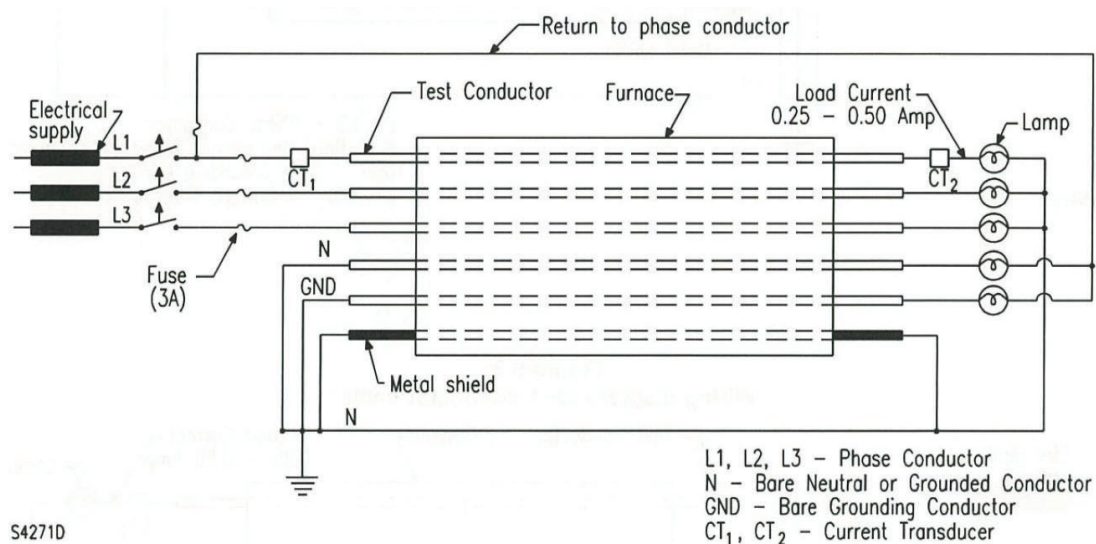


図 2.16 UL 2196 による耐火試験時の電気回路の模式図
(図は UL 2196 から引用)

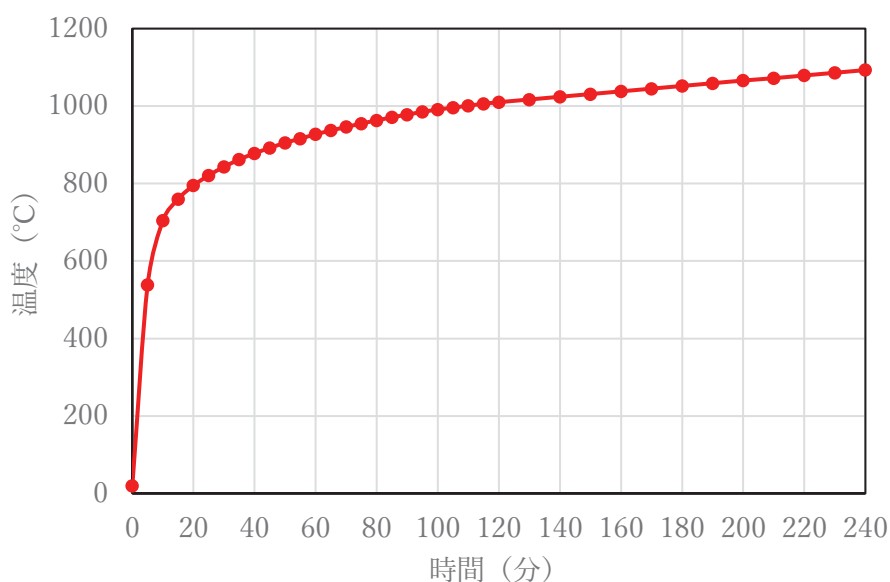


図 2.17 UL 2196 の加熱曲線

(3) 建材等の耐火試験

柱、梁、床、壁等の建築構造部材の耐火性評価には、ISO 834-1 が国際的に普及しており、国内の建材等の耐火試験法にも採用されている。試験体の加熱は、壁炉や水平炉等を用いて行う。壁炉では、加熱面の大きさは縦 3m、横 3m 以上であり、告示の小型加熱炉に比べて大型である。加熱温度は以下の式で計算され、図 2.18 に示す通りである。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (2.1)$$

ここで、 T は炉内の平均温度[°C]

t は時間[分]

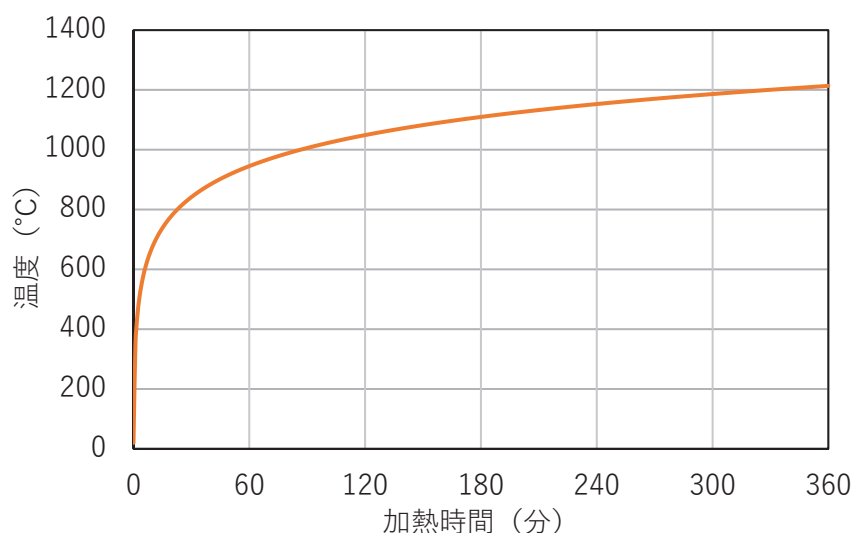


図 2.18 ISO 834-1 の加熱曲線

炉内温度制御用熱電対は縦 100mm、横 100mm の大きさのプレート熱電対が指定されており、設置位置は試験体表面から 100 ± 50 mm 離れた位置である。

2. 3. 2 告示と各国の耐火試験法の比較

告示の試験法と 2.3.1 節で示した各種耐火試験法の比較表を表 2.4 に示す。告示、IEC 60331、UL 2196 のいずれも、露出配線と電線管配線を想定した試験法（露出試験及び電線管試験）が規定されている。

加熱炉は UL 2196 が ASTM E119 と類似の大型の壁炉を用いるのに対し、告示は日本独自の小型の加熱炉である。IEC 60331 は加熱炉を用いた加熱ではなく、リボンバーナによる加熱であり、加熱条件が大きく異なる。加熱方法は、告示、UL 2196、ISO 834-1 では加熱曲線に従って炉内の雰囲気温度を時間と共に上昇させるのに対し、IEC 60331 では一定の温度に設定したリボンバーナの火炎を、直接試験体に当てて加熱する点が大きく異なる。そ

それぞれの温度を表 2.4、図 2.19 に示す。告示と UL 2196 の加熱曲線はほぼ一致している。告示と ISO 834-1 を比較すると、類似の温度上昇ではあるものの、加熱開始直後は ISO 834-1 の方が温度上昇はやや大きい。その後、10 分時点では告示の方が高くなり、30 分時点ではほぼ同じ温度である。加熱時間は、告示は 30 分のみの規定であるが、IEC 60331 と UL 2196 は、より長時間までの評価を想定した試験法となっている。ISO 834-1 は、機能保持時間を測定することが基本的な考え方であり、IEC 60331 や UL 2196 と同様の思想である。

制御用熱電対の設置位置は、告示では試験体から水平方向に 10mm と非常に近いのに対し、UL 2196 と ISO 834-1 はそれぞれ 152mm と 100 ± 50 mm であり、告示よりも距離が離れている。告示では制御用熱電対と試験体との距離が近いために、試験体であるケーブルの被覆樹脂が燃焼することで制御用熱電対が火炎で直接加熱されて温度が上昇し、結果的にバーナ出力が低下することが危惧される。一方、UL 2196 と ISO 834-1 では、制御用熱電対と試験体が十分に離れているので、試験体が燃焼しても制御用熱電対への熱の影響は小さいと考えられる。

制御用熱電対は、ISO 834-1 がプレート熱電対であるのに対し、告示を含めて他の試験法では一般的な K 熱電対である。プレート熱電対は、試験体側が断熱材で覆われているため、電線のように被覆樹脂が燃焼する試験体においても、試験体の燃焼による制御用熱電対への影響は小さくなると考えられる。なお、ISO 834-1 の国内対応 JIS (JIS A 1304) では、国内の実情に合わせてシース熱電対の使用を認めている。

加熱中の電気的な評価方法は、IEC 60331 と UL 2196 は類似しており、いずれも三相交流電源で回路を組み、ケーブルの定格電圧で実際に電流を流して、電球を点灯させる。これにより、加熱中のケーブルの線間短絡、地絡、断線を検知できるのに対し、告示では単相交流電源を用いて、絶縁耐力試験（回路は組まずに単に電圧を印加する）を行うため、加熱中のケーブルの線間短絡と断線は検知できない。IEC 60331 と UL 2196 のような三相交流電源を用いた手法の方が実使用状態に則していると考えられる。

その他の違いとしては、告示のみ試験体表面の延焼性基準があること、IEC 60331 のみ 5 分毎に試験体に衝撃を与えること、UL 2196 のみ加熱後に放水試験があることが特徴的である。

表 2.4 告示と各種耐火試験法の比較

規格	平成 9 年消防庁告示第 10 号		IEC 60331 シリーズ (国際規格)		UL 2196 (米)	ISO 834 (建材等)
区分	露出試験	電線管試験	露出試験(part-1/-2)	電線管試験(-3)	露出試験、電線管試験	
対象ケーブル	導体サイズ 単心:1000mm ² 以下、多心 325mm ² 以下		外径 20mm 超(-1)	外径 20mm 以下(-2)	電力ケーブル、計測制御用ケーブル、光ファイバケーブル	
炉の構造	告示に図示された小型加熱炉		炉は不使用 (20m ³ 以上の無風空間)		壁炉 (3.66m×3.66m 以上)	壁炉 (3m×3m 以上)
炉の内張材質	規定なし		炉は不使用		レンガとモルタル	密度 1,000kg/m ³ 以下 (厚さ 50mm 以上)
加熱方法	加熱曲線に沿って昇温		ガス流量一定のリボンバーナで加熱		加熱曲線に沿って昇温	加熱曲線に沿って昇温
加熱曲線	JIS A 1304 B (30 分で 840°C)		830°C 固定		927°C (1 時間)、1010°C (2 時間)	ISO 834-1
加熱時間	30 分		30、60、90、120 分		通常 2 時間	
熱電対	JIS C 1602 K 熱電対		φ 1.5mm K 熱電対(事前の温度測定時)		時定数 5.0~7.2 分の K 熱電対	プレート熱電対 (ISO) シース熱電対 (国内)
熱電対位置	ケーブル表面から水平に 10mm		バーナ口から 110mm (事前の温度測定時の熱電対の位置)		試験体表面から 152mm	試験体表面から 100±50mm
おもり	ケーブル自重の 2 倍	規定なし	規定なし		有り (電線管配線のみ)	
屈曲	事前に 4 回	規定なし	最小曲げ半径で取付け	規定なし	最小曲げ半径で取付け	
衝撃試験	規定なし		5 分毎に衝撃		規定なし	
放水試験	規定なし		規定なし		有 (加熱終了後)	
試験電圧	・単相交流電源 ・加熱前・後: 1500V/1 分、加熱中: 600V/30 分		・三相交流電源 ・加熱中: ケーブルの定格電圧		・三相交流電源 ・加熱中: ケーブルの定格電圧 (一般に 600、480、208、120V)	
判定基準	①絶縁抵抗: 加熱前 50MΩ 以上、加熱終了直前: 0.4MΩ 以上 ②絶縁耐力: 試験電圧に耐えること ③延焼性 (露出試験のみ): 延焼距離が 150mm 未満		①規定の電圧が維持されること ②断線しないこと		①規定の電圧が維持されること ②断線しないこと	

表 2.5 加熱温度

時間 (分)	温度(°C)			
	告示	IEC 60331	UL 2196	ISO 834-1
0	(規定なし)	830	20	20
5	540	830	538	576
10	705	830	704	678
15	760	830	760	739
20	795	830	795	781
25	820	830	821	815
30	840	830	843	842
60	(925)	830	927	945
90	(980)	830	978	1006
120	(1010)	830	1010	1049

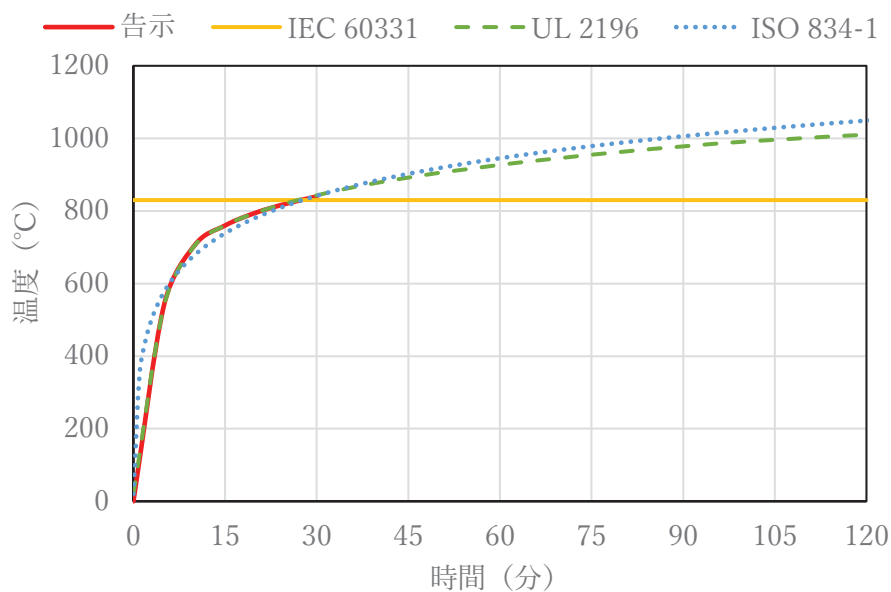


図 2.19 加熱曲線の比較

2. 4 耐火試験法で検討すべき事項

2.2 節で示したように国内の耐火電線の耐火試験法は、昭和 46 年（1971 年）の通達で制定され、昭和 53 年（1978 年）の改正時には、既に現行の試験法とほぼ同様となった。告示化の当初は、建築分野の難燃性試験用の小型加熱炉が採用され、建築分野との整合化が図られていた時期もあったが、小型加熱炉を規定した JIS A 1305 が昭和 51 年（1976 年）に廃止されて以降は、建築分野との整合性は失われた。また、2.3 節で示したように告示の耐火

試験法は、各国の耐火試験法とも細部が異なり、加熱条件や絶縁性の評価方法が異なる。そこで、国際整合化を見据えて告示の耐火試験法の検討すべき事項を抽出する。

国際規格等を踏まえた上で、耐火試験法の今後の検討すべき事項を表 2.6 に示す。加熱炉は UL 2196 や ISO 834-1 に規定されるような大型の炉へ変更する場合の影響を検討する必要がある。ISO 834-1 は世界的に普及しており、国内の建築分野で長年の実績がある上、建築分野と整合化されれば、建材の耐火試験との比較も可能になり、利便性が高い。

加熱曲線は、2.2.1 節で示したように、告示の加熱曲線である JIS A 1304 標準加熱曲線 B は将来的に ISO 834-1 の加熱曲線（JIS A 1304 標準加熱曲線 A）に変更される可能性があることが JIS A 1304 の解説に記されているため、ISO 834-1 の加熱曲線へ変更する場合の影響を検討する必要がある。

制御用熱電対の形状は、炉内の加熱に影響を与える可能性があるため、告示の加熱炉で使用されている露出型熱電対から ISO 834-1 で規定されているプレート熱電対へ変更する場合の影響を検討する必要がある。

制御用熱電対と試験体との距離は、2.3.2 節で示したように、試験体である電線の被覆樹脂が燃焼した場合に制御用熱電対へ影響を与える可能性があるため、制御用熱電対と試験体との距離が 100mm の場合で検討する必要がある。

耐火電線の加熱時間は、30 分の耐火性能では不十分になりつつあり、2.2.2 (5) 項で示したように 1 時間の耐火試験に対応した試験法が業界規格として制定され、自主的な運用が始まっている。IEC 60331、UL 2196、ISO 834-1 を参考に、加熱時間は 1 時間以上にも対応できることが望ましい。

絶縁性評価方法は、告示では加熱中のケーブルの線間短絡と断線は検知できず、十分な測定法ではないため、IEC 60331 と UL 2196 のような加熱中のケーブルの線間短絡、地絡、断線が検知可能な測定法を検討する必要がある。

表 2.6 耐火試験法の検討すべき事項

項目	現在の告示	検討事項	備考
加熱炉の大きさ	小型加熱炉	大型の壁炉	UL 2196、ISO 834-1 との比較
加熱曲線の種類	JIS A 1304 標準加熱曲線 B	JIS A 1304 標準加熱曲線 A	ISO 834-1 との比較
制御用熱電対の形状	K 熱電対（認定炉は露出型 K 熱電対を使用）	プレート熱電対	ISO 834-1 との比較
制御用熱電対と試験体との距離	10mm	100mm	ISO 834-1 との比較
加熱時間	30 分	1 時間以上	IEC、UL、ISO との比較
絶縁性評価方法	耐電圧（加熱前、中、後） 絶縁抵抗（加熱前、後）	三相交流回路（線間短絡、地絡、断線）	IEC 60331、UL 2196 との比較

引用・参考文献

- 1) 平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」
- 2) JIS A 1304:2017 建築構造部分の耐火試験方法
- 3) ISO 834-1:1999、Fire-resistance tests - Elements of building construction -Part 1: General requirements
- 4) 原田和典、新屋一馬、耐火電線の試験法の変遷に関する文献調査、2022 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.161-162、2022.5
- 5) 新屋一馬、低圧耐火ケーブルの耐火試験法の変遷に関する調査、JECTEC NEWS、No.97、pp.19-21、2023
- 6) 佐々木浩、関昭二、坂井弘一、消防用耐火電線の動向、日立論評、1974 年 12 月号、pp.91-95
- 7) 八橋元治、消防用電線 その 1、電線時報、26(12)、pp.12-19、1973
- 8) 次郎丸誠男、予防行政のあゆみ 消防設備規制と火災予防、pp.326-328、2009
- 9) 昭和 46 年 3 月 26 日付消防庁通達、消防予第 48 号「消防用設備の非常電源回路の配線に用いる耐熱電線の基準について（通知）」
- 10) JIS A 1302 建築物の不燃構造部分の防火試験方法
- 11) 昭和 48 年消防庁告示第 3 号「耐火電線の基準」
- 12) JIS A 1305:1963 鉛直式小型加熱炉および調整方法
- 13) JIS A 1321:1959 建築物の内装材料及び工法の難燃性試験方法
- 14) 八橋元治、消防用電線 その 2、電線時報、27(5)、pp.40-56、1974
- 15) 高田昭、清水正夫、耐火・耐熱電線認定業務委員会の活動報告、33(12)、pp.9-26、1980
- 16) 昭和 53 年消防庁告示第 7 号「耐火電線の基準」
- 17) 令和 3 年消防庁告示第 7 号、耐火電線の基準（平成 9 年消防庁告示第 10 号）の一部改正
- 18) 朴聖經ら、高層事務所ビルにおける全館避難訓練の実測調査、平成 30 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.166-167、2018
- 19) JCS 4524:2020、1 時間耐火ケーブル、日本電線工業会、2020
- 20) JCS 7509:2020、1 時間耐火ケーブル試験方法（小型加熱炉）、日本電線工業会、2020
- 21) IEC 60331-1:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 1: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830°C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV and with an overall diameter exceeding 20 mm
- 22) IEC 60331-2:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 2: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830 ° C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV and with an overall diameter not exceeding

20 mm

- 23) IEC 60331-3:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 3: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830 ° C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV tested in a metal enclosure
- 24) UL 2196:2017、Fire Test for Circuit Integrity of Fire-Resistive Power, Instrumentation, Control and Data Cables
- 25) 電気設備学会誌、防災設備用配線の要求性能に関する調査研究、第 37 巻、pp.385-390、2017

第3章 小型加熱炉の炉内温度の測定

3. 1 実験の目的

第2章で示したように、現行の消防庁告示¹⁾では試験炉の規定が十分ではなく、試験結果に影響を与える制御用熱電対の形状や炉の内張材料の材質等を規定していない。そのため、試験炉間で試験結果に不整合が生じることが予想される。また、告示の耐火試験法（以下、単に告示法と呼ぶ）は日本独自の試験方法であり、国際規格 IEC 60331²⁾とは大きく異なる。さらに、国内外の建築分野で一般的な ISO 834-1³⁾の耐火試験法（以下、単に ISO 法と呼ぶ）とは類似しているものの、制御用熱電対や炉壁材料に関する規定の細部が異なるが、これらの違いによる試験結果への影響を検証した事例は見当たらない。

そこで、本章では、ケーブルを設置しない空炉の状態で加熱実験を行い、現行の告示法に規定されていない制御用熱電対の位置と形状の影響を評価するとともに、告示の小型加熱炉に ISO 834-1 の試験条件を取り入れた場合の炉内温度特性の違いを測定し、比較した⁴⁾。

3. 2 検討項目の整理

告示法と ISO 法の耐火試験法の相違点は第2章に示したようにいくつかあるが、そのうち主要な項目を表 3.1 に示す。

①加熱温度曲線については、告示法と ISO 法で若干異なる曲線が採用されており ISO 法の方が初期の立ち上がりが急である¹⁾。②制御用熱電対の違いでは、告示法では K 熱電対を使用することのみを規定し、熱電対の形状までは規定していないが、耐火電線の認定機関の小型加熱炉では、露出型熱電対が制御用熱電対として慣習的に使用されている。一方、ISO 法では、国内ではシース熱電対が、海外ではプレート熱電対が使用されている。③制御用熱電対の設置位置では、告示法では制御用熱電対と試験体の水平距離が 10mm であるのに対し、ISO 法では 100mm である。制御用熱電対の設置位置は、試験体への加熱強度に強く影響すると予想される。④炉内寸法については、告示法の炉は ISO 法と比べて小型である。そのため、炉内ガスのガス塊としての放射率が異なることが予想される。また、⑤炉の内張材料については、ISO 法では熱慣性の上限が定められているが、告示法では内張材料の規定がなく、ISO 法には該当しない耐火レンガを床面等の一部で使用している。そのため、炉壁からの放射熱が ISO 法に比べて弱くなる懸念がある。

実験実施にあたり、告示法の小型加熱炉を ISO 法に規定の炉に置き換えることは困難なので、本研究では告示法の小型加熱炉の試験条件を ISO 法に整合させることを目的に、①～③の項目をパラメータとして炉内温度特性を比較した。ただし、④と⑤については、解析でその影響を把握することとし、実験からは除外する。

¹⁾ ちなみに、JIS A 1304:2017 建築構造部分の耐火試験方法では、告示の加熱曲線を標準加熱曲線 B、ISO 834-1 の加熱曲線を標準加熱曲線 A として併記している。

表 3.1 告示法と ISO 法の主な違い

項目	告示法	ISO 834-1
①加熱温度曲線	告示 (JIS A 1304 B)	ISO 834-1 (JIS A 1304 A)
②制御用熱電対	規定なし (慣例で素線径 1mm の露出型 熱電対を使用)	プレート熱電対 (海外) シース熱電対 (国内)
③制御用熱電対と 試験体の水平距離	10mm	100mm
④炉内寸法	詳細寸法の規定なし (旧 JIS A 1305 に準じ、幅 0.46m×高さ 1.24m)	幅 3m×高さ 3m 以上 (壁炉)
⑤炉の内張材料	規定なし (実態としては耐火断熱材 (嵩 密度 250kg/m ³ 、厚さ 175mm) と耐火レンガ (密度 2,300kg/m ³ 、厚さ 150mm) を 併用)	耐火断熱材 (密度 1,000kg/m ³ 以 下、厚さ 50mm 以上)

(1) 加熱温度曲線

加熱温度曲線について、告示法では JIS A 1304 の標準加熱曲線 B (旧昭和 44 年建設省告示 2999 号) を採用しており、表 3.2 に示すように 5 分毎の温度が規定されている。一方、ISO 法では、ISO 834-1 に規定の式(3.1)に示す計算式を用いている。

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (3.1)$$

T : 温度[°C]

t : 時間[分]

告示法の加熱温度は、JIS A 1304 において 5 分毎の温度のみを規定しているが、電線の耐火試験においては、実用上、滑らかな温度上昇となるように試験機関で 1 分毎に補間値を定め、加熱曲線用の温度制御プログラムとしている。表 3.3 に 1 分毎の補間値を含めた告示の温度、ISO 834-1 の温度及びそれらの温度差を示す。また、告示と ISO 834-1 の加熱温度曲線を図 3.1 に示す。

表 3.2 告示法の加熱温度 (JIS A 1304 標準加熱曲線 B)

加熱時間[分]	5	10	15	20	25	30
告示[°C]	540	705	760	795	820	840

表 3.3 告示を基にした 1 分毎の温度と ISO 834-1 の加熱温度の比較

加熱時間[分]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
告示[°C]	180	310	410	480	540	590	635	670	690	705
ISO 834-1[°C]	349	445	502	544	576	603	626	645	663	678
温度差[°C]	169	135	92	64	36	13	-9	-25	-27	-27

加熱時間[分]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
告示[°C]	720	730	740	750	760	770	780	785	790	795
ISO 834-1[°C]	693	705	717	728	739	748	757	766	774	781
温度差[°C]	-27	-25	-23	-22	-21	-22	-23	-19	-16	-14

加熱時間[分]	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
告示[°C]	800	805	810	815	820	825	830	835	838	840
ISO 834-1[°C]	789	796	802	809	815	820	826	832	837	842
温度差[°C]	-11	-9	-8	-6	-5	-5	-4	-3	-1	2

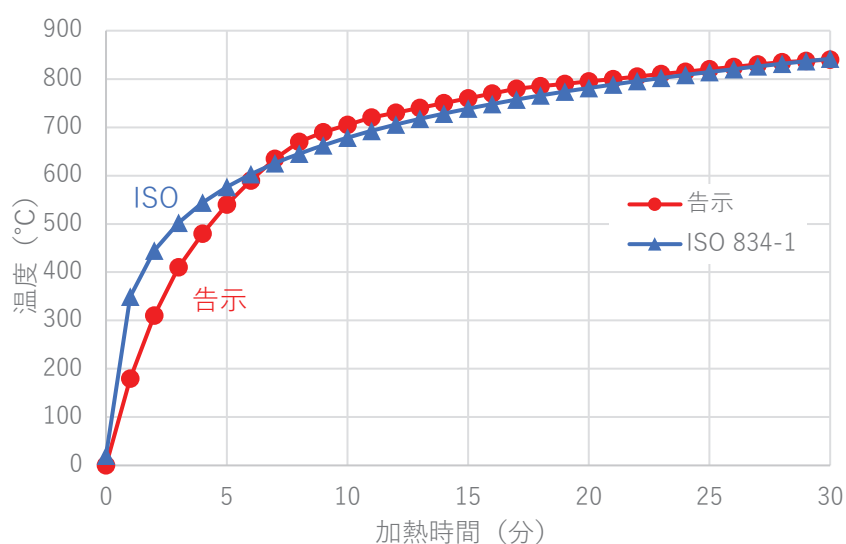


図 3.1 告示法と ISO 法の加熱温度曲線

図 3.1 に示すように、告示法の加熱温度曲線は、加熱開始直後の温度上昇が ISO 曲線と

比べて緩やかであるが、7分で逆転し、それ以降は告示法の方がやや高くなる。

なお、JIS 1304 の解説には、告示の加熱曲線である標準加熱曲線 B は、将来的に標準加熱曲線 A (ISO 834-1 と同等) に統一すべき旨が記されていることから、将来的な告示の改正に備えて、告示の小型加熱炉で、現行の標準加熱曲線 B と ISO 834-1 の加熱温度曲線による違いを比較することは実務的にも有益である。

(2) 制御用熱電対の仕様

告示法では炉内の温度制御用熱電対の仕様について、K 熱電対を用いることのみを規定し、応答性に影響を与える熱電対の太さや形状は規定していない。実務的には、耐火電線の認定試験用の加熱炉には、金属シース外径 6.4mm、素線径 1mm の露出型熱電対が従来から慣用的に用いられている (図 3.2a、図 3.4a)。露出型熱電対は応答性に優れる反面、測温接点直接炉内の火炎や燃焼ガスに曝されるため、劣化しやすく、定期的な交換が必要である。特に、1 時間耐火ケーブルの試験⁵⁾を実施すると制御用熱電対が高温で長時間にわたって使用されるようになり、更に劣化が早まり、制御用熱電対の交換頻度が高まっている。一方、国内の建築構造用の耐火試験では、JIS A 1304 (基本は ISO 834-1 と同じであるが、制御用熱電対の仕様のみ独自に規定)において、金属シース外径 3.2mm の非接地形シース熱電対 (以下、単にシース熱電対と呼ぶ) が規定されている (図 3.2b、図 3.4b)。シース熱電対は、測温接点が金属シース内にあり、直接外気に触れないため、耐久性が高く、耐火試験に適しているが、一般的に応答性は露出型熱電対よりも劣る。

また、海外の建築構造用の耐火試験では、炉内の輝炎ガスからの放射と炉の内張材料の熱慣性の差により耐火試験結果が試験炉によって異なることを避けるため、入射熱流を標準化する目的でプレート熱電対が使用されている。プレート熱電対の構造を図 3.3、外観を図 3.4c に示す。プレート熱電対は、金属シース外径 1~3mm のシース熱電対を、0.7mm 厚のインコネル板 (ニッケル合金板) と 10mm 厚の無機断熱材で挟んだ構造であり、インコネル板をバーナ側、無機断熱材面を試験体側に向けて使用される。本章の実験では、これら 3 種類の熱電対を用いて空炉で加熱試験を行い、炉内温度分布、炉壁 (試料保持面であるケイカル板) への入射熱流などの伝熱特性を比較した。

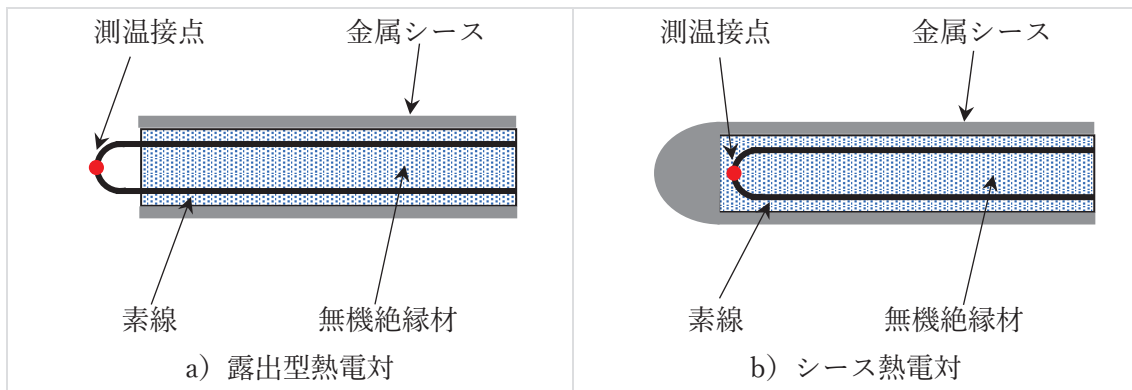


図 3.2 露出型熱電対とシース熱電対の構造の模式図

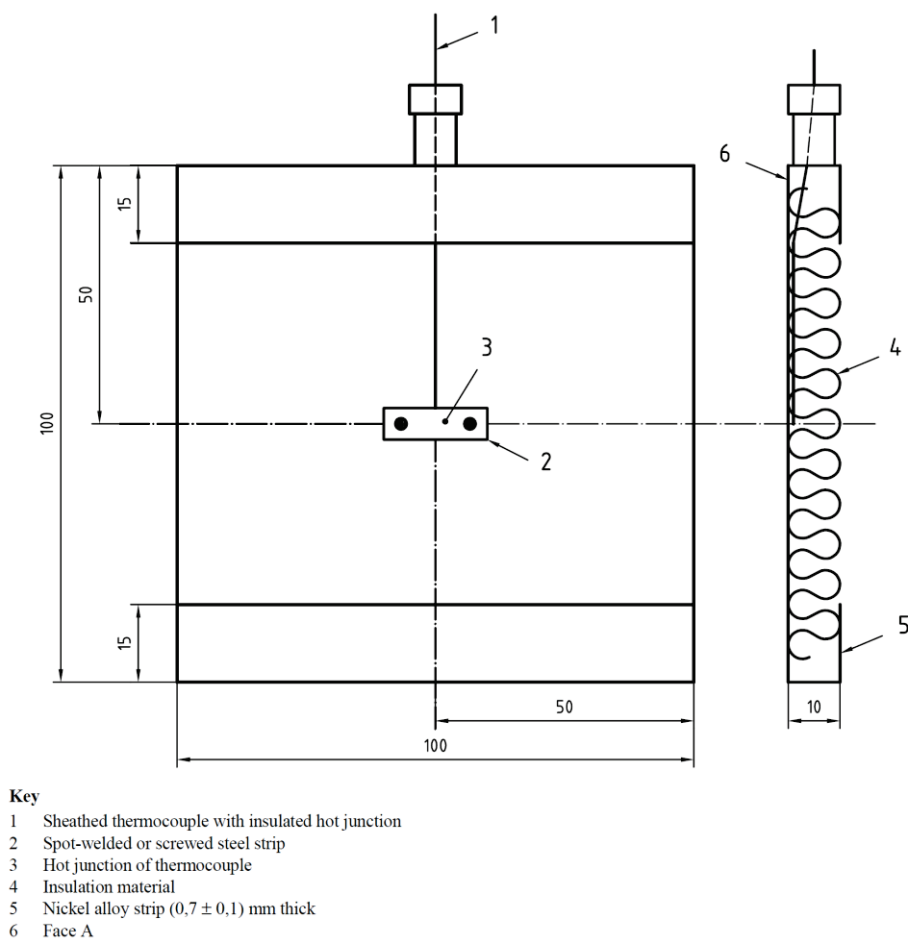


図 3.3 プレート熱電対の構造 (ISO 834-1 より引用)

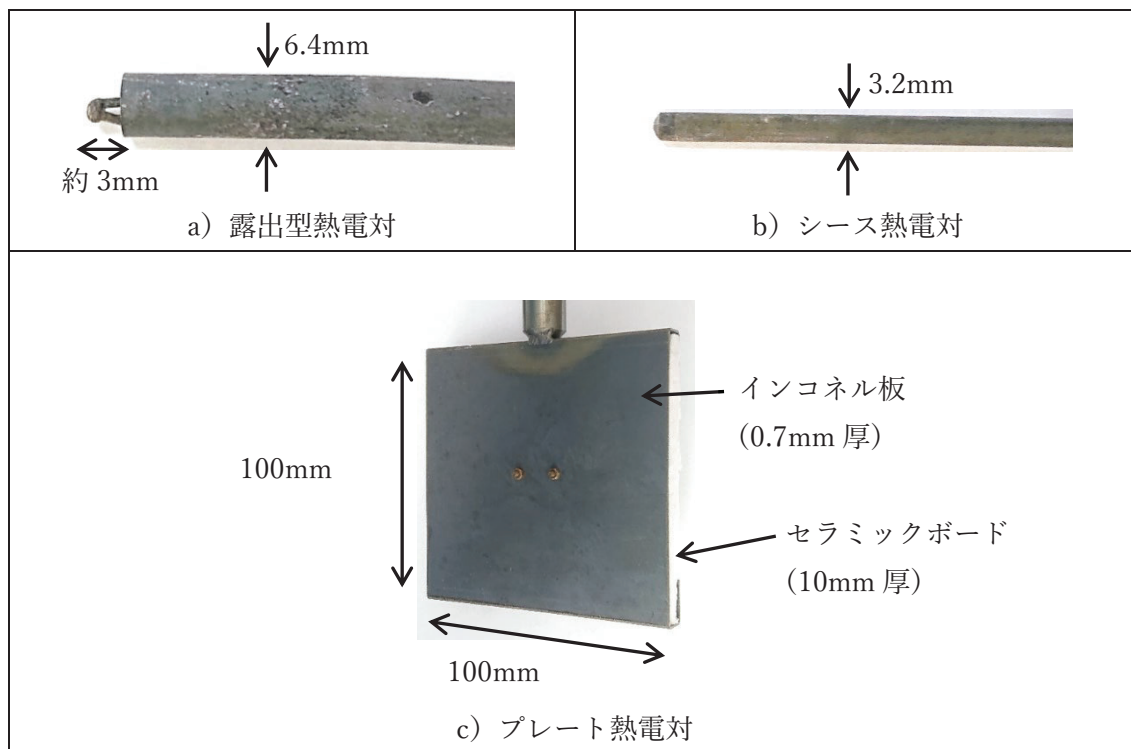


図 3.4 各熱電対の外観

(3) 制御用熱電対と試験体の水平距離

3 点目の告示法と ISO 法の相違点は制御用熱電対の設置位置の違いである。告示法では図 3.5 に示すように制御用熱電対と試験体の水平距離が 10mm、試験体中心高さから下方に 75mm の位置に制御用熱電対を設置する。これに対して、ISO 法では試験体表面から 100mm 離れた位置に制御用熱電対を設置する。この距離の差は、試験体（ケイカル板）への加熱力に影響を及ぼす可能性がある。そのため、試験体からの水平距離が 10mm と 100mm に相当する位置に制御用熱電対を設置して加熱性状（炉内温度、ケイカル板表面温度、熱流など）を比較した。

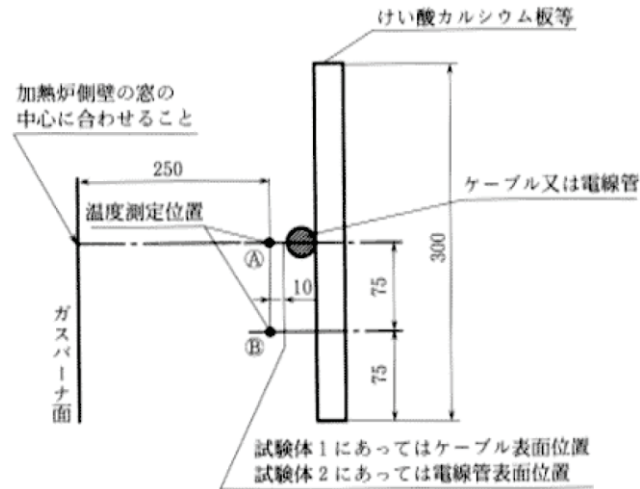


図 3.5 制御用熱電対と試験体の位置関係（消防庁告示より引用、①が制御用熱電対）

3. 3 実験方法

（1）共通事項

実験は消防庁告示に規定の小型加熱炉を用いて、試験体を設置せずに 30 分間加熱した。告示ではバーナの燃料にプロパンガス又は都市ガスのどちらかを使用するよう規定しているが、実験にはプロパンガスを使用した。実験に使用した加熱炉の構造を図 3.6 に示す。試験体保持面側の炉壁は、図 3.6 a) に示すように、上部、中央部、下部で炉の内張材料が異なっており、上部と下部はセラミックファイバである。中央部は 300mm 角のケイカル板が主要材料であるが、その周囲は耐火レンガで囲まれている。炉の内部は、図 3.6 b) で示すように炉の側壁とバーナ面（写真の正面）の上部の内張材料はセラミックファイバである。バーナ面の下部と床面の内張材料は耐火レンガである。プロパンガスを供給するバーナ口は計 46 本あり、千鳥配置である。

通常のケーブルを試験体とした試験では、図 3.5 に示したようにケーブル表面と制御用熱電対の水平距離を 10mm とするが、本実験では試験体を設置せずに加熱を行うため、ケイカル板表面を試験体想定位置として、ケイカル板と制御用熱電対までの距離を 10mm 又は 100mm とした。

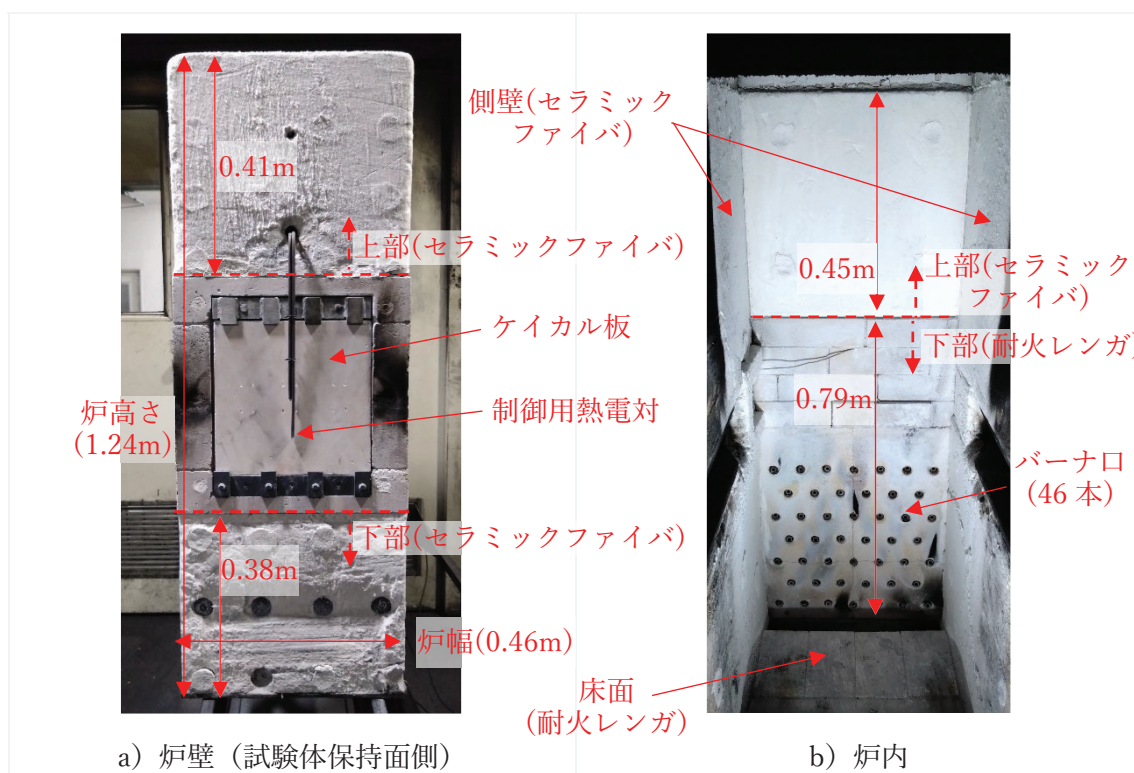


図 3.6 加熱炉の構造

(2) 加熱温度曲線の変更

炉内温度の制御は、制御用熱電対の温度があらかじめ設定した加熱温度プログラムの設定値に一致するように、燃料であるプロパンガスの流量を PID 制御温度調節器で自動制御することで行った。告示法と ISO 法で加熱する際の温度調節器の加熱温度プログラムの時間毎の温度設定値は、それぞれ表 3.3 に記載の通りである。

(3) 制御用熱電対の変更

制御用熱電対の種類の違いの影響を調べるため、露出型熱電対、シース熱電対及びプレート熱電対を使用した。用いた 3 種類の K 熱電対の仕様を表 3.4 に示す。各実験では、露出型熱電対又はプレート熱電対のいずれかを制御用熱電対とした。その際、他の 2 種類の熱電対は測定用熱電対とした。ただし、制御用熱電対とケイカル板の水平距離を告示に規定の 10mm とすると、プレート熱電対に厚みがあるためにケイカル板と干渉し、炉内にプレート熱電対を設置できなかったため、プレート熱電対での測定は、表 3.5 の制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm の条件でのみ実施した。それぞれの熱電対の設置位置は (5) 項で示す。

表 3.4 使用した熱電対の仕様

熱電対の形状	金属シース外径	素線径	プレートの有無	備考
露出型熱電対	6.4mm	1.0mm	無	
シース熱電対	3.2mm	0.5mm	無	JIS A 1304 準拠
プレート熱電対	1.0mm	不明	有	ISO 834-1 準拠

(4) 制御用熱電対とケイカル板距離の変更

バーナ面から制御用熱電対までの水平距離は、図 3.5 に示したように告示では 250mm と規定されているため、本実験でも 250mm とした。本実験では、制御用熱電対とケイカル板までの水平距離を、図 3.7 に示すように告示法の 10mm と ISO 法の 100mm の 2 条件とした。制御用熱電対とケイカル板までの距離は、ケイカル板が取り付けられた台車を前後に移動させることで調整した。

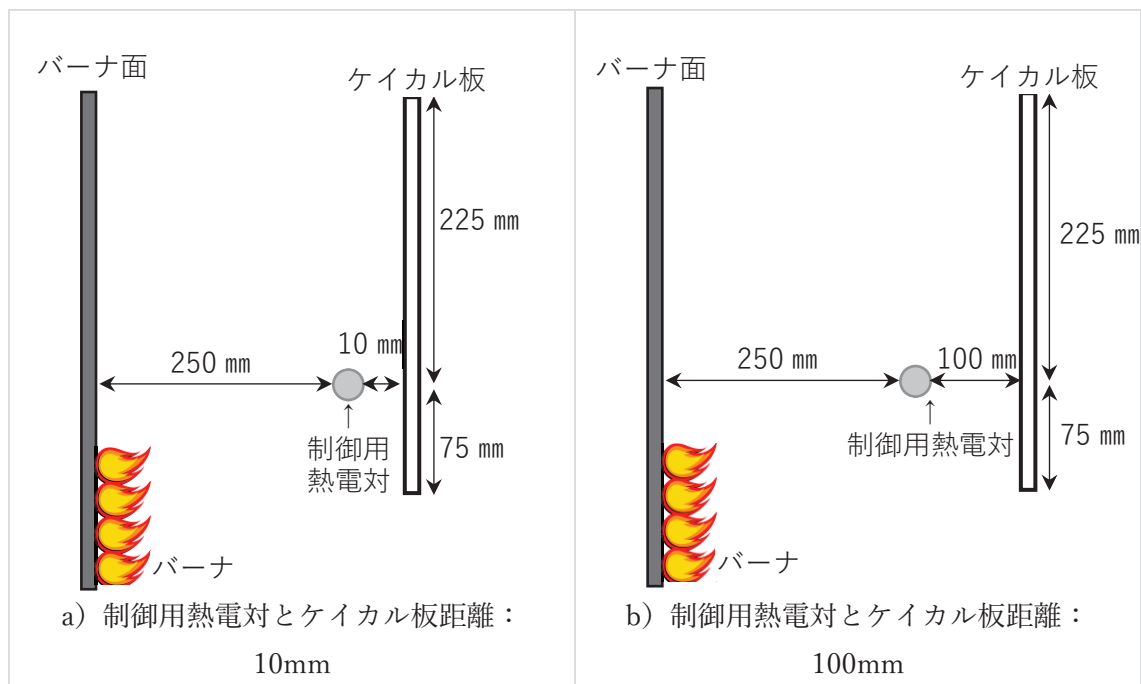


図 3.7 制御用熱電対とケイカル板距離の模式図（側面図）

(5) 測定方法

本実験では、ケイカル板表面温度とケイカル板表面への熱流束及び(3)項で示した制御用熱電対位置における3種類の熱電対の温度を2秒間隔で測定した。これらの位置関係を図 3.8 及び図 3.9 に示す。ケイカル板表面温度とケイカル板表面の熱流束はケイカル板の中央位置で測定した。ケイカル板表面温度の測定に使用した熱電対は、シース外径 1.6mm のシース熱電対である。また、ケイカル板表面の熱流束の測定に使用した熱流束計は、感熱部直径が 25.4mm の水冷式熱流束計である。

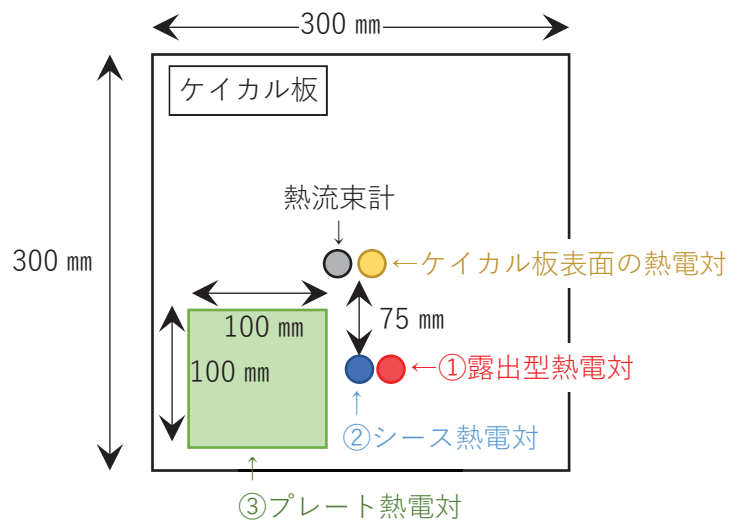


図 3.8 ケイカル板上の測定位置の模式図（正面図）

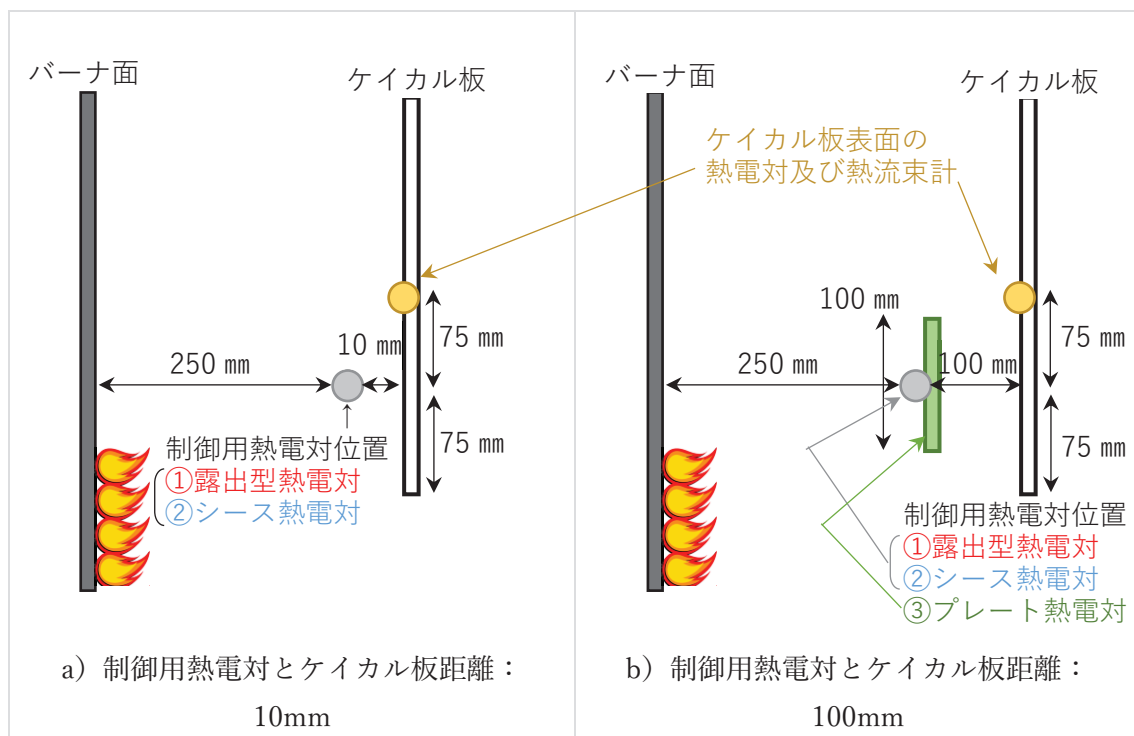


図 3.9 熱電対と熱流束計の炉内位置の模式図（側面図）

（６）試験条件一覧

試験を行った条件を表 3.5 に示す。実験は全部で 6 回行い、そのうち 3 回が告示法の加熱曲線、3 回が ISO 法の加熱曲線である。制御用熱電対は露出型熱電対が 4 回、プレート熱電対が 2 回である。制御用熱電対とケイカル板距離は、告示法の規定である 10mm が 2 回、

ISO 法の規定である 100mm が 4 回である。実験 1 は、3 条件ともすべて告示の条件である。実験 2 は、告示法の条件から熱電対とケイカル板との距離のみを ISO 法に変更した条件である。実験 6 は、告示法の条件から加熱曲線のみを ISO 法に変更した条件である。実験 4 は、全てを ISO 法にした条件である。

これらの実験より、実験 1 と実験 6、実験 2 と実験 5 あるいは実験 3 と実験 4 を比較すると告示と ISO の加熱曲線の違いによる影響を知ることができる。また、実験 2 と 3 あるいは実験 4 と実験 5 を比較すると制御用熱電対の種類の影響、実験 1 と実験 2 あるいは実験 5 と実験 6 を比較すると制御用熱電対の設置位置の影響を知ることができる。

表 3.5 試験条件一覧

実験 No.	加熱曲線	制御用熱電対	制御用熱電対と ケイカル板の距離	備考
実験 1	告示曲線	露出型熱電対	10mm	すべて告示の条件
実験 2	告示曲線	露出型熱電対	100mm	距離のみ変更
実験 3	告示曲線	プレート熱電対	100mm	熱電対と距離を変更
実験 4	ISO 曲線	プレート熱電対	100mm	すべて ISO の条件
実験 5	ISO 曲線	露出型熱電対	100mm	加熱曲線と距離を変更
実験 6	ISO 曲線	露出型熱電対	10mm	加熱曲線のみ変更

3. 4 実験結果

(1) 実験 1 の実験結果

実験 1 (加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm) の温度とケイカル板への熱流束の測定結果を図 3.10 に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対である露出型熱電対の温度は、加熱 3 分頃までは告示の加熱曲線よりも低いが、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、加熱開始から加熱終了まで露出型熱電対とほぼ一致し、同等の応答性であった。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも常に高く、30 分時点では、約 50°C 高かった。これは、火炎からの放射熱のためと考えられる。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30 分時点で約 $125\text{kW}/\text{m}^2$ であった。30 分時点での炉内温度(840°C)に対応する黒体放射は $87\text{kW}/\text{m}^2$ であり、それよりもかなり大きい。このような大きな熱流束となるのは、ケイカル板表面に火炎が接触している状況と考えられる。

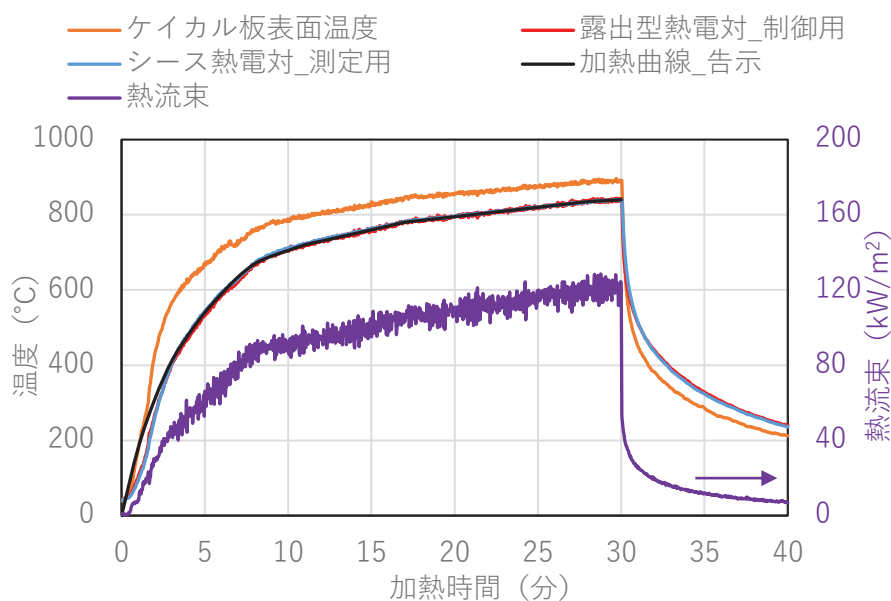


図 3.10 炉内温度及び熱流束

(実験 1：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板の距離 10mm)

(2) 実験 2 の実験結果

実験 2（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）の温度と熱流束の測定結果を図 3.11 に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対である露出型熱電対の温度は、加熱 3 分頃までは告示の加熱曲線よりもやや低いが、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、露出型熱電対の温度よりも加熱開始から加熱中盤までやや高く、その後は露出型熱電対とほぼ一致した。プレート熱電対の温度は、加熱開始から 10 分頃までは露出型熱電対よりも低いが、それ以降は露出型熱電対とほぼ一致した。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30 分時点では、約 250°C 低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30 分時点で約 70kW/m² であった。

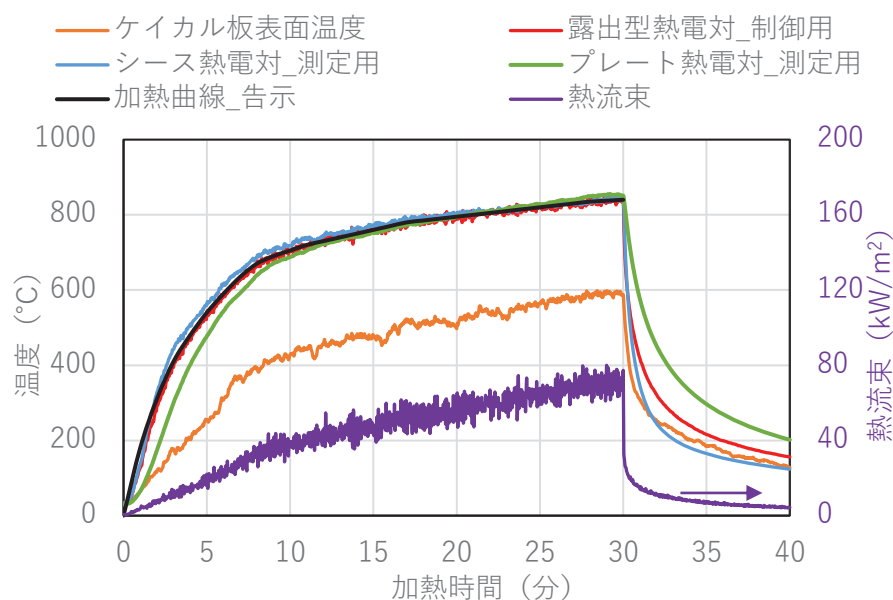


図 3.11 炉内温度及び熱流束

(実験 2：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(3) 実験3の実験結果

実験3（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は100mm）の温度と熱流束の測定結果を図3.12に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対であるプレート熱電対の温度は、加熱2分頃までは告示の加熱曲線よりも低いが、それ以降は加熱曲線と良好に一致し、告示の小型加熱炉の装置構成でもプレート熱電対による温度制御が可能であった。露出型熱電対とシース熱電対の温度は、加熱開始から加熱中盤まではプレート熱電対よりも高かった。特に加熱開始直後は、露出型熱電対およびシース熱電対の温度はプレート熱電対の温度よりもかなり高かった。露出型熱電対とシース熱電対を比較すると、加熱開始から15分頃まではシース熱電対の方が温度は高い。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30分時点では、約240℃低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、加熱開始直後に急増し、小さなピークが見られるが、その後は時間と共に増加し、30分時点で約70kW/m²であった。

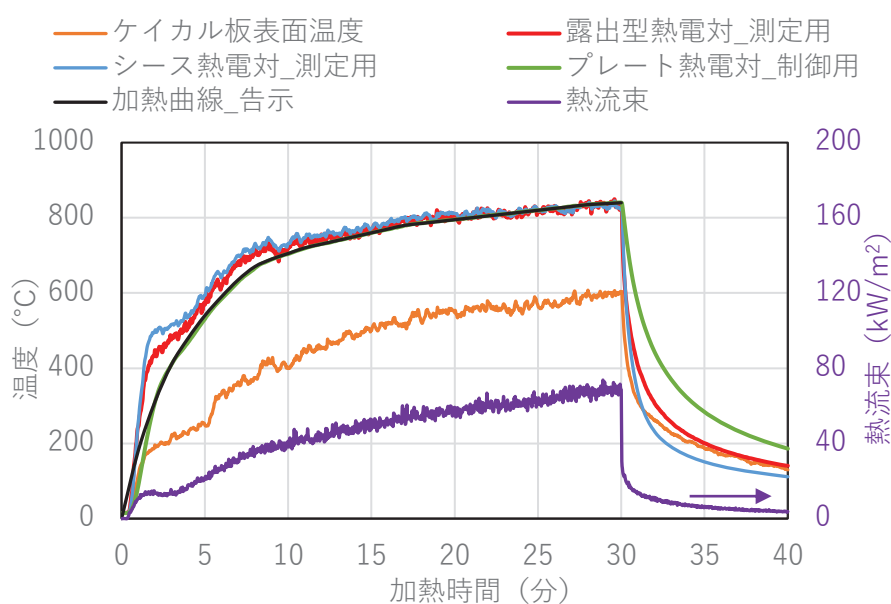


図 3.12 炉内温度及び熱流束

(実験3：告示曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離100mm)

(4) 実験 4 の実験結果

実験 4 (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm) の温度と熱流束の測定結果を図 3.13 に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対であるプレート熱電対の温度は、加熱 2 分頃までは ISO の加熱曲線よりも低いが、2 分から 3 分頃にかけて加熱曲線をわずかに上回り、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。ISO 曲線は加熱開始直後の温度上昇が非常に大きいため、加熱開始直後にバーナ出力が大きくなり、炉内の加熱がオーバーシュートしたと考えられる。露出型熱電対とシース熱電対の温度は、加熱開始から 3 分頃まではプレート熱電対よりも高いが、その後は逆転し、プレート熱電対の方が高かった。この傾向は、その後も続き、加熱終了時点で約 30°C の差が生じた。露出型熱電対とシース熱電対を比較すると、加熱開始から 10 分頃まではシース熱電対の方が温度はやや高かった。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30 分時点では、約 280°C 低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、加熱開始直後に急増し、小さなピークが見られるが、その後は時間と共に増加し、30 分時点で約 68kW/m² であった。

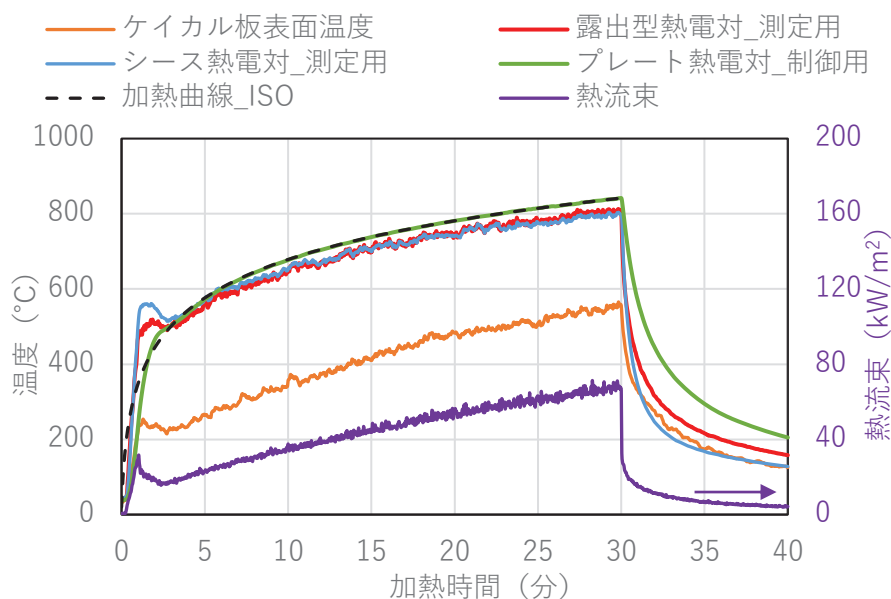


図 3.13 炉内温度及び熱流束

(実験 4 : ISO 曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(5) 実験5の実験結果

実験5（加熱曲線はISO曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は100mm）の温度と熱流束の測定結果を図3.14に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対である露出型熱電対の温度は、加熱2分頃まではISOの加熱曲線よりも低いですが、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、加熱開始から15分頃までは露出型熱電対よりもやや高かった。プレート熱電対の温度は、加熱開始から15分頃までは露出型熱電対よりも低かった。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30分時点では、約240℃低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30分時点で約70kW/m²であった。

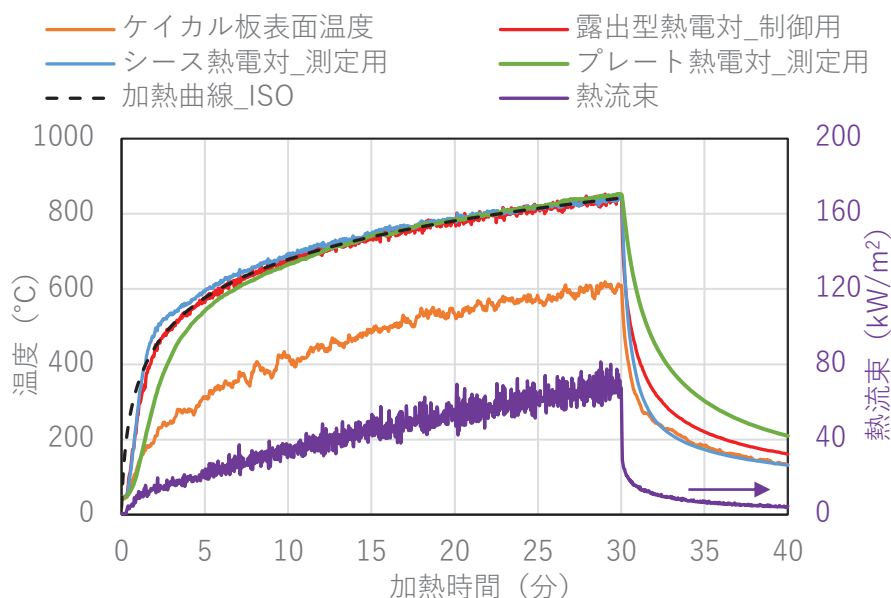


図 3.14 炉内温度及び熱流束

(実験5：ISO曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離100mm)

(6) 実験 6 の実験結果

実験 6 (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm) の温度と熱流束の測定結果を図 3.15 に示す。温度は左縦軸、熱流束は右縦軸である。炉内制御用熱電対である露出型熱電対の温度は、加熱 3 分頃までは ISO の加熱曲線よりも低い、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、加熱開始から加熱終了まで露出型熱電対とほぼ一致した。

ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも常に高く、30 分時点では、約 50°C 高かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30 分時点で約 $125\text{kW}/\text{m}^2$ であった。

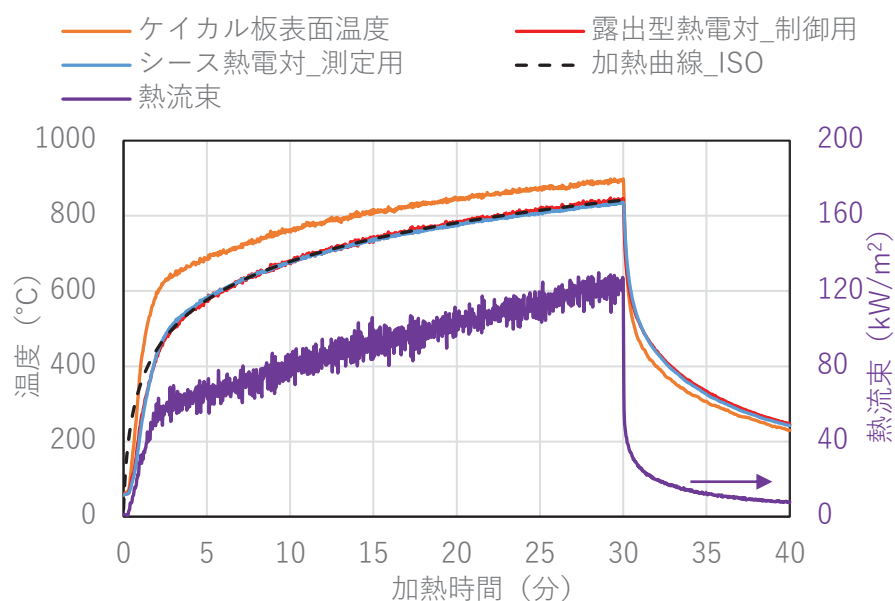


図 3.15 炉内温度及び熱流束

(実験 6 : ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

3. 5 考察

3. 5. 1 加熱温度曲線の比較

告示法と ISO 法の加熱曲線の違いによる影響を比較するため、実験 1 と実験 6、実験 2 と実験 5 及び実験 3 と実験 4 を比較する。

(1) 実験 1 と実験 6 の比較

加熱温度曲線だけが異なる実験 1 と実験 6（制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm）のケイカル板表面温度を図 3.16 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.17 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.16 に示すように加熱開始直後は ISO 曲線（実験 6）の方が高いが、7 分以降は逆転し、告示曲線（実験 1）の方が高くなり、加熱曲線を反映した結果となっている。また、いずれのケイカル板表面温度も加熱曲線よりも高いが、これは、3.5.3 項で後述するが、バーナ火炎がケイカル板に接触するために、バーナ火炎からケイカル板への放射が強いためである。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.17 に示すように ISO 曲線（実験 6）では、加熱開始直後に熱流束が急激に増加し、その後は時間と共に直線的に増加する。ケイカル板表面温度と同様に、熱流束も加熱初期は ISO 曲線（実験 6）の方が高いが、7 分以降は逆転して告示曲線（実験 1）の方が高い。30 分間の総熱量は、告示曲線（実験 1）は 163.7MJ/m^2 、ISO 曲線（実験 6）は 159.2MJ/m^2 であり、告示曲線（実験 1）の方が 2.7% 多い。

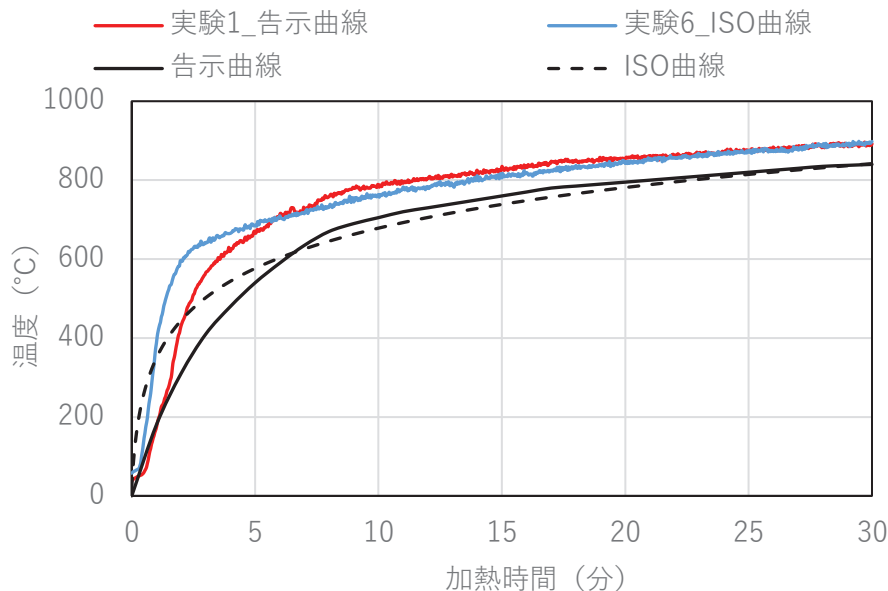


図 3.16 ケイカル板表面温度（加熱曲線の比較：実験 1 と実験 6）

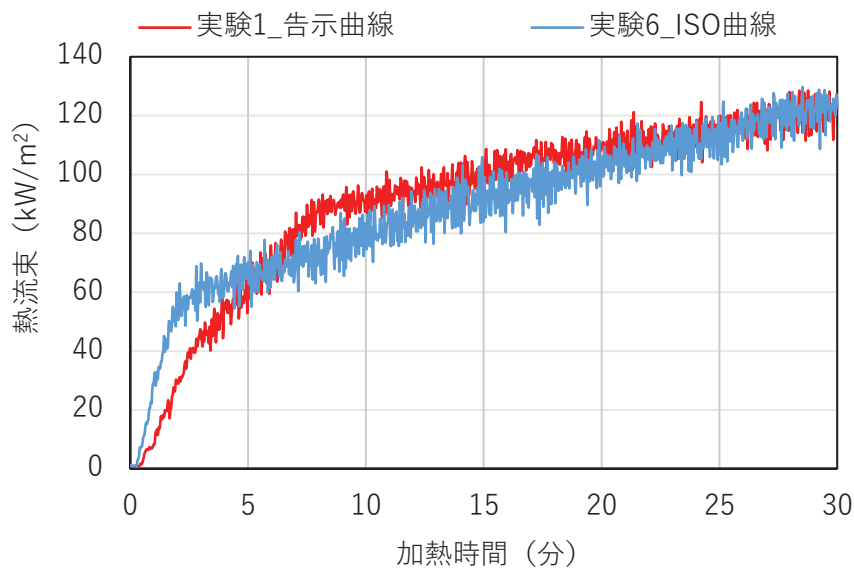


図 3.17 ケイカル板表面位置での熱流束（加熱曲線の比較：実験 1 と実験 6）

（２）実験 2 と実験 5 の比較

加熱温度曲線だけが異なる実験 2 と実験 5（制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）のケイカル板表面温度を図 3.18 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.19 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.18 に示すように加熱開始直後は ISO 曲線（実験 5）の方が高いが、7 分以降は告示曲線（実験 2）とほぼ同等の温度となり、加熱曲線を反映した結果となっている。また、いずれのケイカル板表面温度も加熱曲線よりも低いですが、これは、3.5.3 項で後述するが、バーナ火炎からケイカル板までの距離が遠いために、バーナ火炎からケイカル板への放射が弱いためである。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.19 に示すように ISO 曲線（実験 5）は、加熱開始直後に熱流束が急激に増加し、その後は時間と共に直線的に増加する。ケイカル板表面温度と同様に、熱流束も加熱初期は ISO 曲線（実験 5）の方が高いが、7 分以降は告示曲線（実験 2）とほぼ同等の熱流束である。30 分間の総熱量は、告示曲線（実験 2）は 78.9MJ/m^2 、ISO 曲線（実験 5）は 76.2MJ/m^2 であり、告示曲線（実験 2）の方が 3.4% 多い。

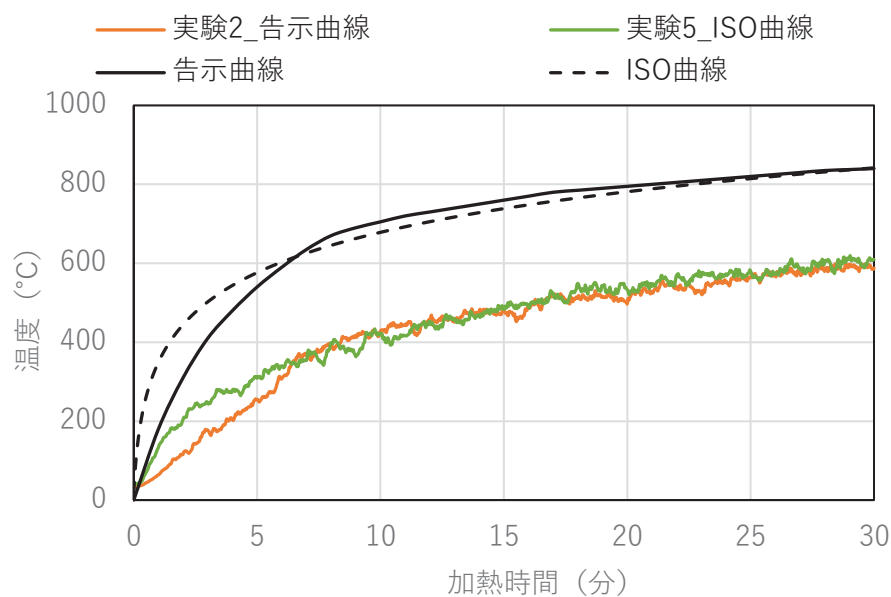


図 3.18 ケイカル板表面温度（加熱曲線の比較：実験 2 と実験 5）

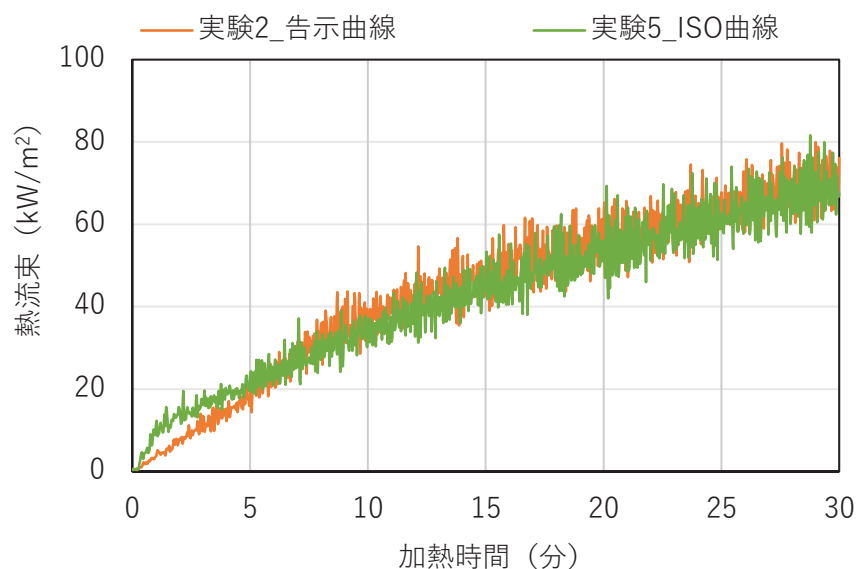


図 3.19 ケイカル板表面位置での熱流束（加熱曲線の比較：実験 2 と実験 5）

（3）実験 3 と実験 4 の比較

加熱温度曲線だけが異なる実験 3 と実験 4（制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）のケイカル板表面温度を図 3.20 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.21 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.20 に示すように加熱 3 分頃までは ISO 曲線（実験 4）の方が高いが、6 分以降は逆転して告示曲線（実験 3）の方が高くなり、加熱曲線を反映した結

果となっている。また、いずれのケイカル板表面温度も加熱曲線よりも低いが、これは、3.5.3 項で後述するが、バーナ火炎からケイカル板までの距離が遠いために、バーナ火炎からケイカル板への放射が弱いためである。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.21 に示すように ISO 曲線（実験 4）は、加熱開始直後に熱流束が急激に増加し、一旦低下した後は時間と共に直線的に増加する。ケイカル板表面温度と同様に、熱流束も加熱開始直後は ISO 曲線（実験 4）の方が高いが、6 分以降は逆転し、告示曲線（実験 3）の方が高い。30 分間の総熱量は、告示曲線（実験 3）は 81.3MJ/m^2 、ISO 曲線（実験 4）は 77.7MJ/m^2 であり、告示曲線（実験 3）の方が 4.4% 多い。

(1) から (3) のいずれの比較においても、ISO 曲線による炉内加熱の方が加熱開始直後は、炉内温度、熱流束共に高いものの、30 分間の総熱量では告示曲線の方が若干多い。

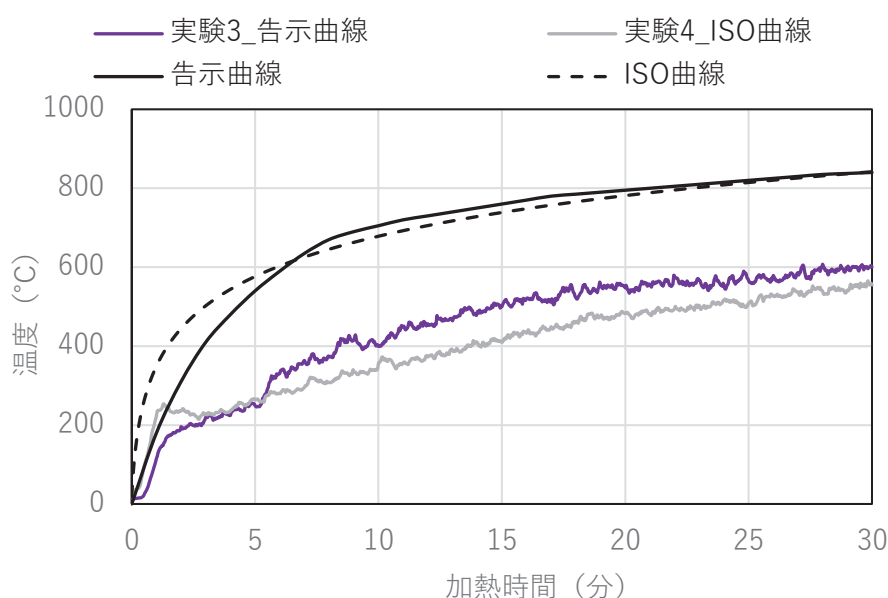


図 3.20 ケイカル板表面温度（加熱曲線の比較：実験 3 と実験 4）

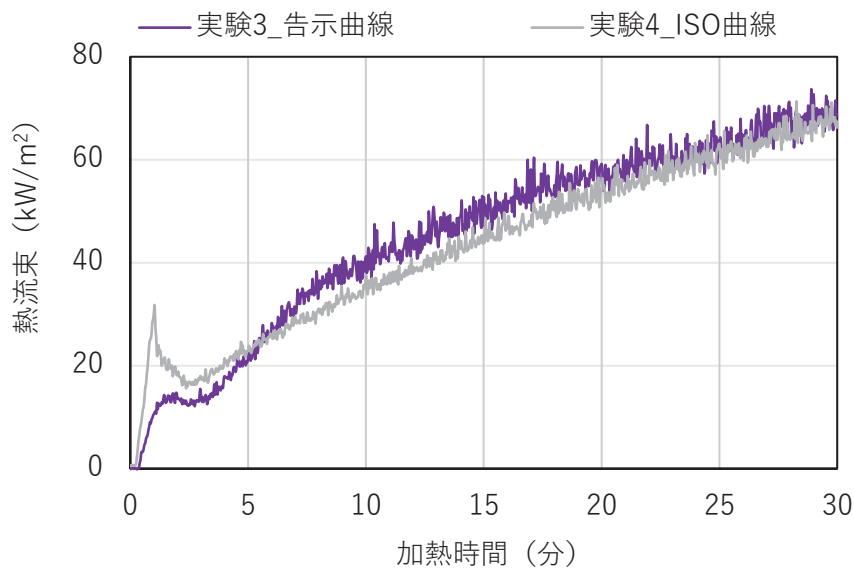


図 3.21 ケイカル板表面位置での熱流束（加熱曲線の比較：実験 3 と実験 4）

3. 5. 2 制御用熱電対の比較

露出型熱電対制御とプレート熱電対制御の違いによる影響を比較するため、実験 2 と実験 3 及び実験 4 と実験 5 を比較する。

（1）実験 2 と実験 3 の比較

制御用熱電対の種類だけが異なる実験 2 と実験 3（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）のケイカル板表面温度を図 3.22 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.23 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.22 に示すように、プレート熱電対制御（実験 3）では加熱開始直後の上昇が急激であるが、加熱 5 分を過ぎるとほぼ同じ温度となる。加熱曲線の温度と比べるとケイカル板表面温度は大幅に低い、3.5.3 項で後述するように、制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm であることに起因する。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.23 に示すように、ケイカル板表面温度と同様、プレート熱電対制御では加熱開始直後のケイカル板表面の熱流束の上昇が顕著であるが、加熱 3 分ごろには落ち着く。その後、加熱 10 分頃まではプレート熱電対制御の方がやや高いが、それ以降はほぼ同等の熱流束である。露出型熱電対制御とプレート熱電対制御を比較すると、プレート熱電対制御の方が熱流束の変動幅が小さく、炉内の温度制御が安定しているといえる。30 分間の総熱量は、露出型熱電対制御では 78.9MJ/m²、プレート熱電対制御では 81.3MJ/m²であり、露出型熱電対の方が 3.0%低い。

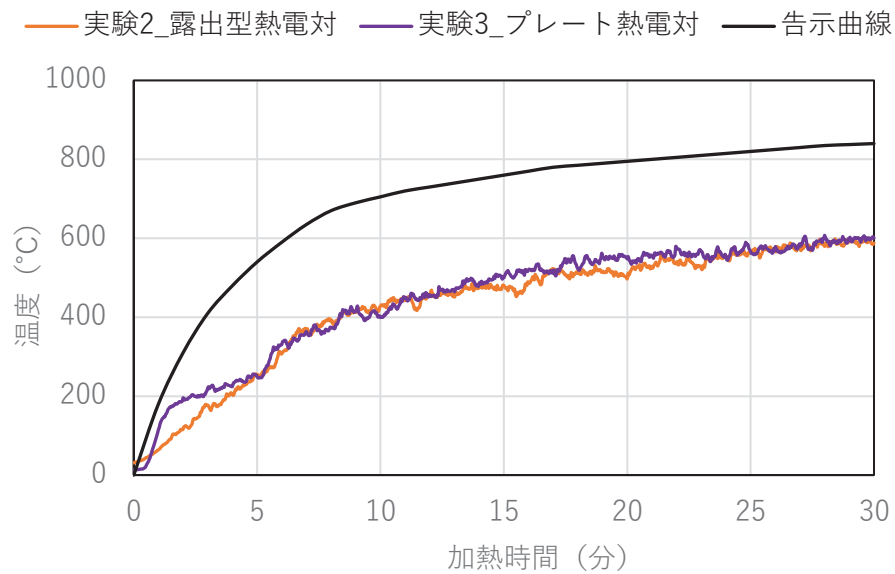


図 3.22 ケイカル板表面温度（制御用熱電対の比較：実験 2 と実験 3）

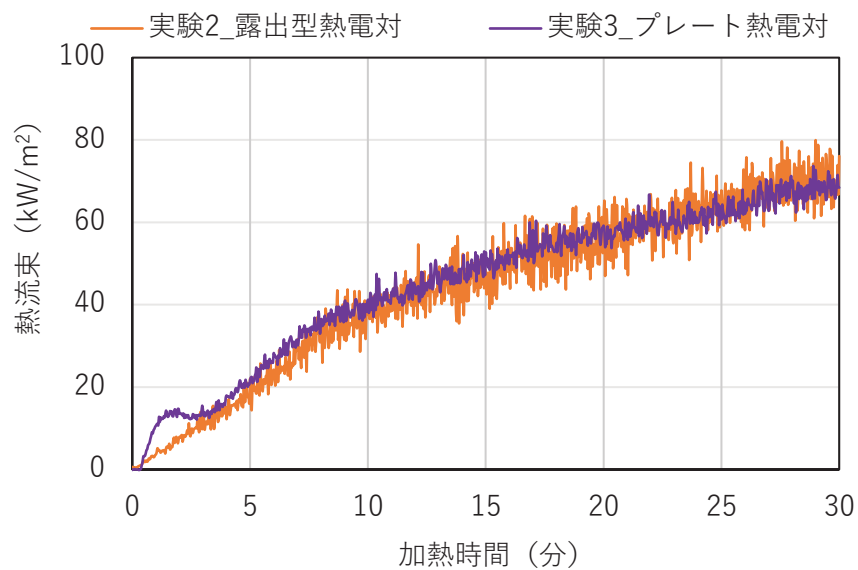


図 3.23 ケイカル板表面位置での熱流束（制御用熱電対の比較：実験 2 と実験 3）

（2）実験 4 と実験 5 の比較

制御用熱電対の種類だけが異なる実験 4 と実験 5（加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）のケイカル板表面温度を図 3.24 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.25 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.24 に示すように、プレート熱電対制御（実験 4）では加熱開始直後のケイカル板表面温度の上昇が大きい、3 分以降は逆転し、露出型熱電対制御（実

験 5) の方が高くなる。加熱曲線の温度と比べるとケイカル板表面温度は大幅に低いが、3.5.3 項で後述するように、制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm であることに起因する。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.25 に示すように、ケイカル板表面温度と同様、プレート熱電対制御では加熱開始直後のケイカル板表面の熱流束の上昇が顕著であるが、加熱 3 分ごろには落ち着く。それ以降は露出型熱電対制御とほぼ同等の熱流束である。露出型熱電対制御とプレート熱電対制御を比較すると、プレート熱電対制御の方が熱流束の変動幅が小さく、炉内の温度制御が安定しているといえる。30 分間の総熱量は、露出型熱電対制御では 76.2MJ/m^2 、プレート熱電対制御では 77.7MJ/m^2 であり、プレート熱電対制御の方が僅かに多い。

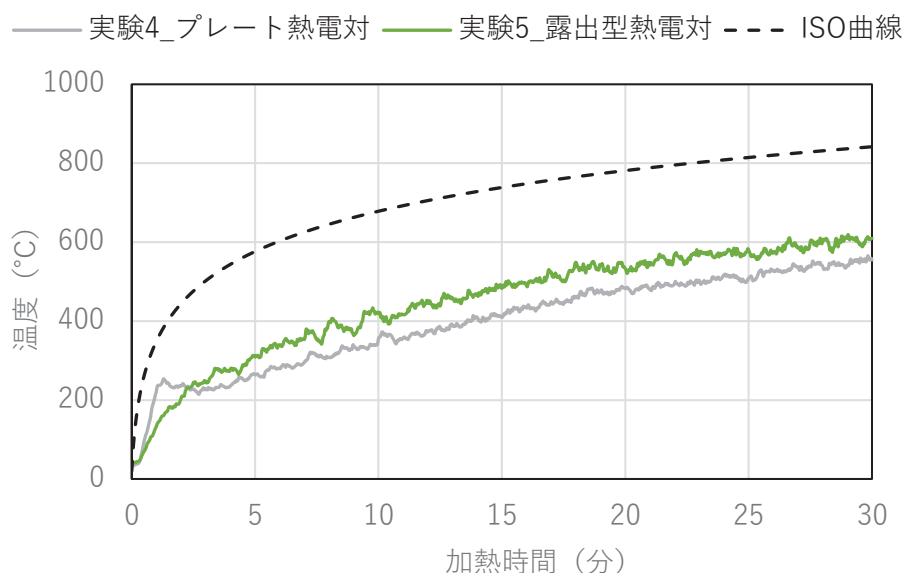


図 3.24 ケイカル板表面温度（制御用熱電対の比較：実験 4 と実験 5）

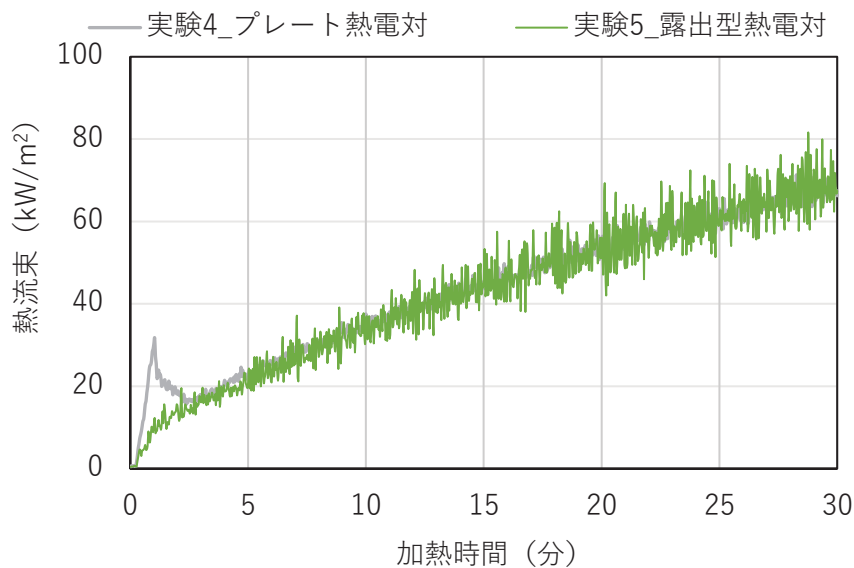


図 3.25 ケイカル板表面位置での熱流束（制御用熱電対の比較：実験 4 と実験 5）

（３）シース熱電対と露出型熱電対の比較

３種類の熱電対の温度を同時に測定した図 3.11 から図 3.14 の結果より、温度に対する応答はシース熱電対が最も速く、次いで露出型熱電対、プレート熱電対の順であった。加熱開始直後はシース熱電対の温度の方が露出型熱電対よりもやや高いものの、シース熱電対は露出型熱電対とほぼ同等の応答性であった。露出型熱電対の特徴は応答性の速さであるため、予想とは逆の結果といえる。この理由として、図 3.4 に示したように用いた露出型熱電対は、露出している素線部と保護管部までの距離が短いため、保護管部の熱容量が無視できないためだと考えられる。金属シース外径が 3.2mm のシース熱電対であれば、現在使用されている金属シース外径 6.4mm の露出型熱電対と応答性が類似しており、露出型熱電対の代替として適しているといえる。

プレート熱電対と露出型熱電対を比較すると、加熱初期はプレート熱電対の温度の方が露出型熱電対の温度よりも低く、応答が遅かった。これはプレート熱電対の熱容量が大きく、加熱初期に温まりにくいためである。そのため、図 3.12 と図 3.13 のようにプレート熱電対で炉内温度を制御した場合には、プレート熱電対の温度を加熱曲線の温度に合わせるためにバーナの出力が高くなり、炉内ガスの温度は加熱温度曲線よりも高くなる。

３．５．３ 制御用熱電対とケイカル板距離の比較

制御用熱電対とケイカル板との距離の違いによる影響を比較するため、実験 1 と実験 2 及び実験 5 と実験 6 を比較する。

（１）実験 1 と実験 2 の比較

制御用熱電対とケイカル板の水平距離だけが異なる実験 1 と実験 2（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対）のケイカル板表面の温度測定結果を図 3.26 に、ケイカル板表面位置での熱流束の測定結果を図 3.27 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.26 に示すように制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm（実験 1）では、ケイカル板表面温度は加熱曲線よりも高いが、100mm（実験 2）では加熱曲線よりも低く、非常に大きな差が見られ、30 分時点で約 300℃の差がある。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.27 に示すようにケイカル板表面温度と同様に、制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm（実験 1）の方が全体的に熱流束は高い。30 分間の総熱量は、10mm（実験 1）が 163.7MJ/m²、100mm（実験 2）が 78.9MJ/m²であり、約 2.1 倍の大きな差がある。

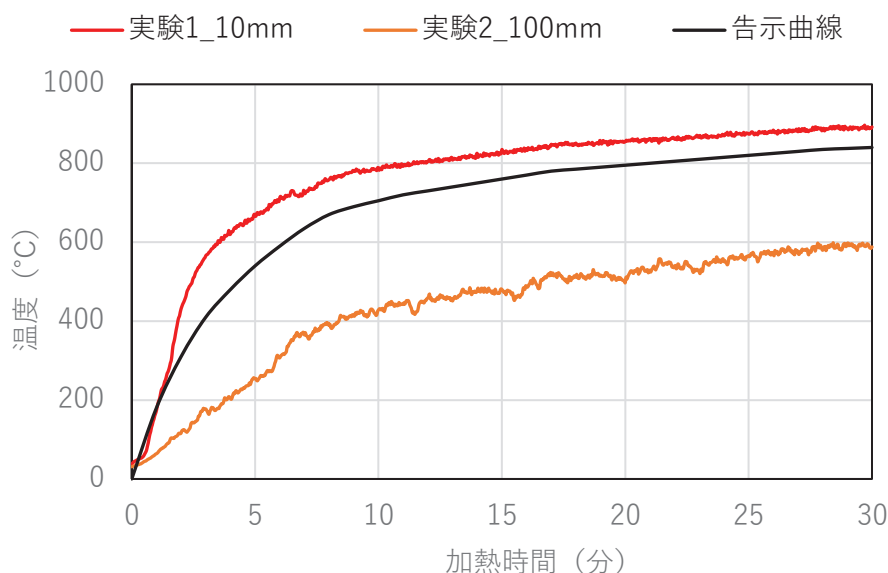


図 3.26 ケイカル板表面温度（制御用熱電対とケイカル板距離の比較：実験 1 と実験 2）

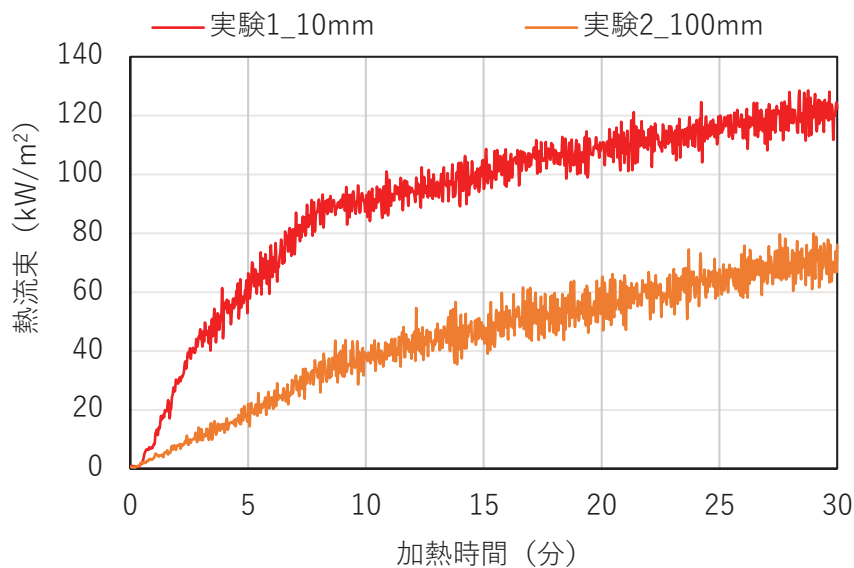


図 3.27 ケイカル板表面位置での熱流束
(制御用熱電対とケイカル板距離の比較の比較：実験 1 と実験 2)

(2) 実験 5 と実験 6 の比較

制御用熱電対とケイカル板の水平距離だけが異なる実験 5 と実験 6 (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対) のケイカル板表面の温度測定結果を図 3.28 に、ケイカル板表面位置での熱流束の測定結果を図 3.29 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.28 に示すように制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm (実験 6) では、ケイカル板表面温度は加熱曲線よりも高いが、100mm (実験 5) では加熱曲線よりも低く、非常に大きな差が見られ、30 分時点で約 290℃の差がある。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.29 に示すようにケイカル板表面温度と同様に、制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm (実験 6) の方が全体的に熱流束は高い。30 分間の総熱量は、10mm (実験 6) が 159.2MJ/m²、100mm (実験 5) が 76.2MJ/m²であり、約 2.1 倍の大きな差がある。

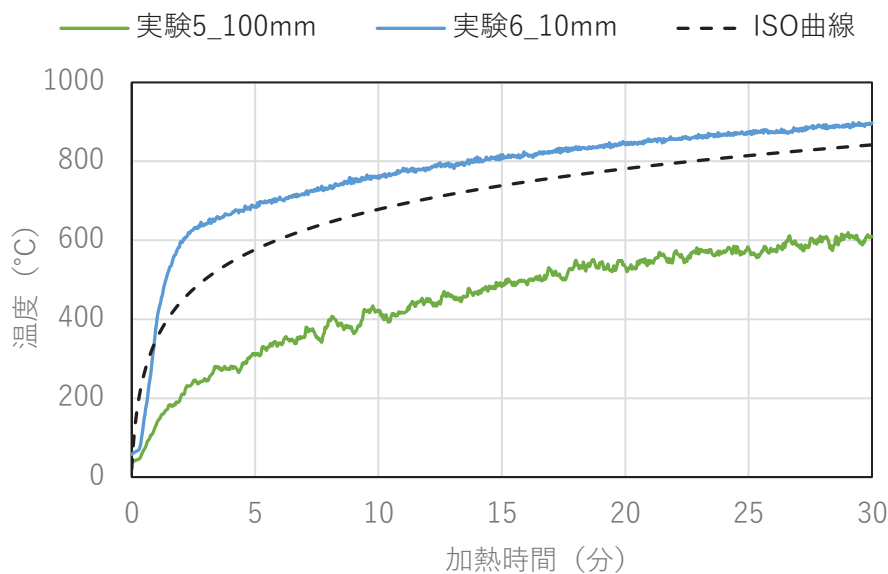


図 3.28 ケイカル板表面温度（制御用熱電対とケイカル板距離の比較：実験 5 と実験 6）

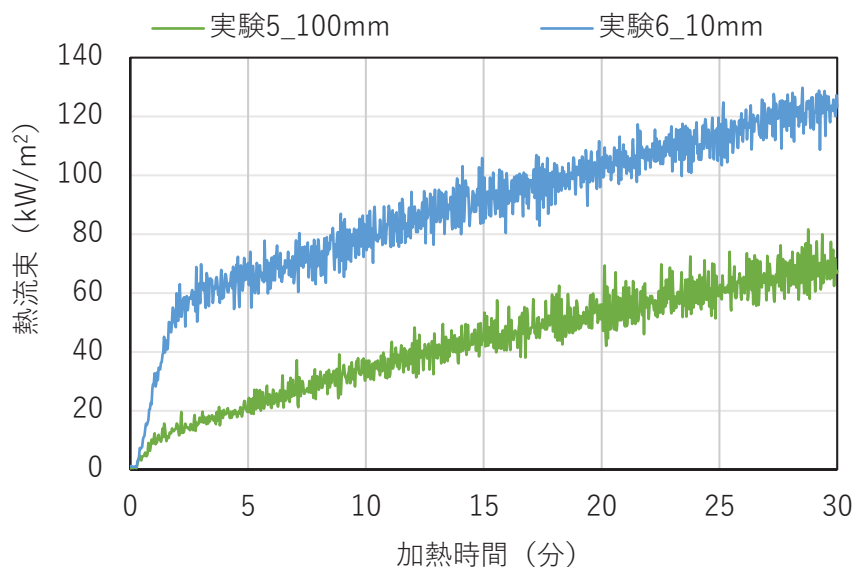


図 3.29 ケイカル板表面位置での熱流束
（制御用熱電対とケイカル板距離の比較の比較：実験 5 と実験 6）

3.5.1 項の加熱温度曲線の違いや 3.5.2 項の制御用熱電対の違いによる差に比べて、制御用熱電対とケイカル板までの距離の違いがケイカル板表面温度とケイカル板表面の熱流束に与える影響として支配的である。図 3.30 に加熱中の炉内を側面から撮影した加熱 30 分時点の写真を示す。制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm の場合は、ケイカル板の表面付近までバーナ火炎が広がっていることから、バーナ火炎の接炎と放射によりケイカ

ル板表面温度が高くなったと考えられる。一方、制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm の場合は、バーナ火炎からケイカル板までの距離が遠いことから、接炎はなく、火炎からケイカル板への放射熱が弱まり、ケイカル板の温度が 10mm の場合に比べて小さくなったと考えられる。

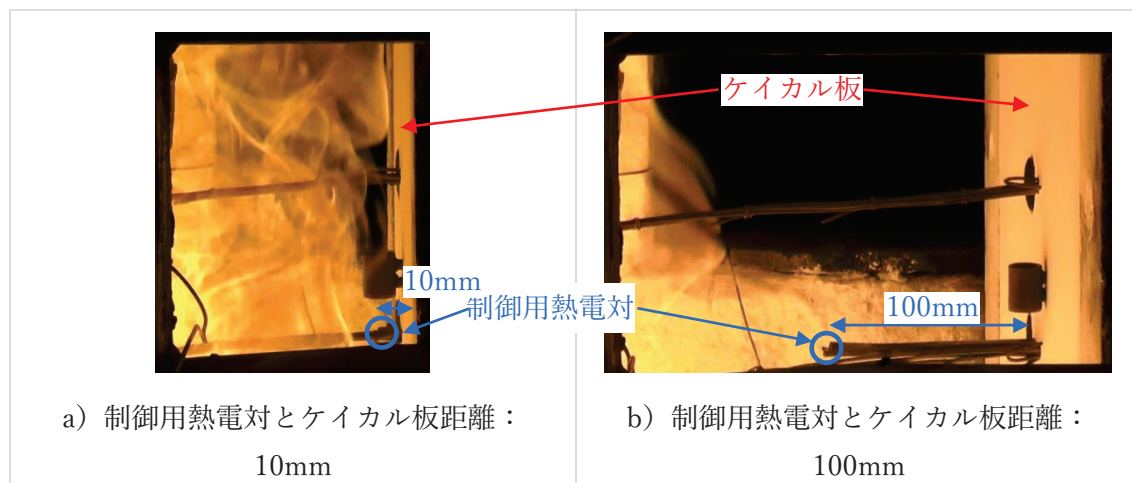


図 3.30 本実験と同条件で実施した別の実験時の炉内の様子
(加熱 30 分時点、左側がバーナ側、右側がケイカル板側)

3. 5. 4 告示法と ISO 法の比較

本実験のパラメータである、①加熱曲線、②制御用熱電対、③制御用熱電対とケイカル板との距離について、すべて告示の条件である実験 1 とすべて ISO の条件である実験 4 のケイカル板表面の温度測定結果を図 3.31 に、ケイカル板表面位置での熱流束の測定結果を図 3.32 に示す。

ケイカル板表面温度は、図 3.31 に示すようにすべて告示の条件である実験 1 とすべて ISO の条件である実験 4 では、ケイカル板表面温度に非常に大きな差が見られ、30 分時点で約 330°C の差である。

ケイカル板表面位置での熱流束は、図 3.32 に示すようにすべて ISO の条件（実験 4）の方が、加熱数分までは熱流束が一時的に高いが、その後はすべて告示の条件（実験 1）の方が大幅に大きい。30 分間の総熱量は、すべて告示の条件（実験 1）が 163.7MJ/m²、すべて ISO の条件（実験 4）が 77.7MJ/m²であり、約 2.1 倍の大きな差がある。

これらの結果より、告示の小型加熱炉で、①加熱曲線、②制御用熱電対、③制御用熱電対とケイカル板との距離の 3 条件を ISO に整合させると、現行の告示法と比べてケイカル板への加熱力が大幅に低下することが明らかとなった。

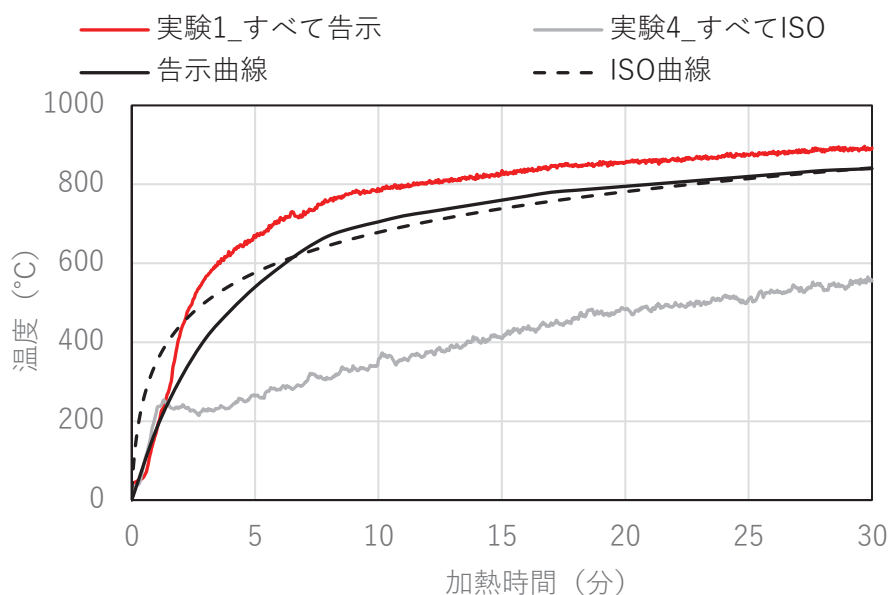


図 3.31 ケイカル板表面温度（告示と ISO の条件の比較：実験 1 と実験 4）

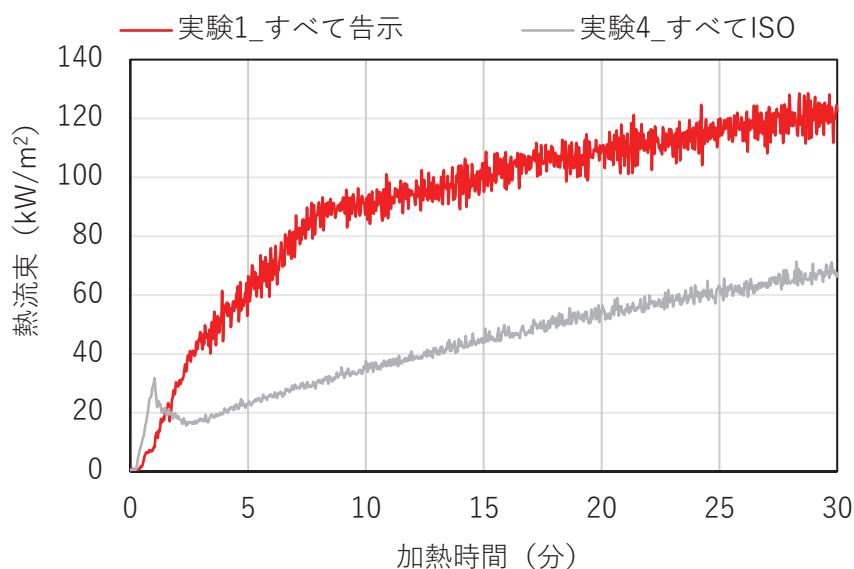


図 3.32 ケイカル板表面位置での熱流束（告示と ISO の条件の比較：実験 1 と実験 4）

3. 5. 5 各パラメータの影響度

実施した 6 つの実験の 30 分時点のケイカル板表面温度を図 3.33 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 3.34 に示す。ただし、瞬間的な温度変動の影響を低減するために、29 分 50 秒から 30 分 00 秒までの測定値の平均を用いた。すべて告示の条件である実験 1 を基準とし、加熱温度曲線による温度差を ΔT_{curve} 、制御用熱電対による温度差を ΔT_{TC} 、制御用熱電対とケイカル板距離による温度差を ΔT_{dist} とする。近似的に重ね合わせが成り立つと仮定す

れば、実験 1 とそれぞれの棒グラフとの温度差は、図 3.33 に示すように ΔT_{curve} 、 ΔT_{TC} 、 ΔT_{dist} の和で表せる。同様に、すべて告示の条件である実験 1 を基準とし、加熱温度曲線による熱流束の差を Δq_{curve} 、制御用熱電対による熱流束の差を Δq_{TC} 、制御用熱電対とケイカル板距離による熱流束の差を Δq_{dist} とすると、実験 1 とそれぞれの棒グラフとの熱流束の差は、図 3.34 に示すように Δq_{curve} 、 Δq_{TC} 、 Δq_{dist} の和で表せる。

3.5.1 項で示したように加熱温度曲線の違いによる影響は、実験 1 と実験 6、実験 2 と実験 5 又は実験 3 と実験 4 を比較すればよい。また、3.5.2 項で示したように制御用熱電対の違いによる影響は、実験 2 と実験 3 又は実験 4 と実験 5 を比較すればよい。同様に、3.5.3 項で示したように制御用熱電対とケイカル板距離の違いによる影響は、実験 1 と実験 2 又は実験 5 と実験 6 を比較すればよい。

それぞれの実験から求めた温度差を表 3.6 に示す。温度差はいずれも告示の条件を基準としたので、温度差の符号がマイナスの場合には、ISO の条件の方が 30 分時点の温度が低いことを意味する。なお、すべて告示の条件である実験 1 とすべて ISO の条件である実験 4 の温度差を ΔT_{all} とする。ここで、各パラメータの実験値の差を合算した値を $\Delta T_{all,cal}$ とすると、

$$\Delta T_{all,cal} = \Delta T_{curve} + \Delta T_{TC} + \Delta T_{dist} \quad (3.2)$$

である。式(3.2)及び表 3.6 の平均値より、各条件による差を重ね合わせて求めた $\Delta T_{all,cal}$ は -319°C であり、実験値の ΔT_{all} である -332°C と概ね一致した。

同様に、熱流束の 30 分値を比較する。それぞれの実験から求めた熱流束の差を表 3.7 に示す。なお、すべて告示の条件である実験 1 とすべて ISO の条件である実験 4 の熱流束の差を Δq_{all} とする。ここで、各パラメータの実験値の合算値を $\Delta q_{all,cal}$ とすると、

$$\Delta q_{all,cal} = \Delta q_{curve} + \Delta q_{TC} + \Delta q_{dist} \quad (3.3)$$

である。式(3.3)及び表 3.7 の平均値より、各条件による差を重ね合わせて求めた $\Delta q_{all,cal}$ は -53.8kW/m^2 であり、実験値の -52.8kW/m^2 と概ね一致した。

また、各パラメータの全体の温度差又は熱流束の差に対する割合を寄与率として算出すると、図 3.35 で表せる。各パラメータのうち、熱電対とケイカル板までの距離の違いによる寄与率は、ケイカル板表面温度では 92.1%、ケイカル板表面の熱流束では 96.9%であり、支配的である。

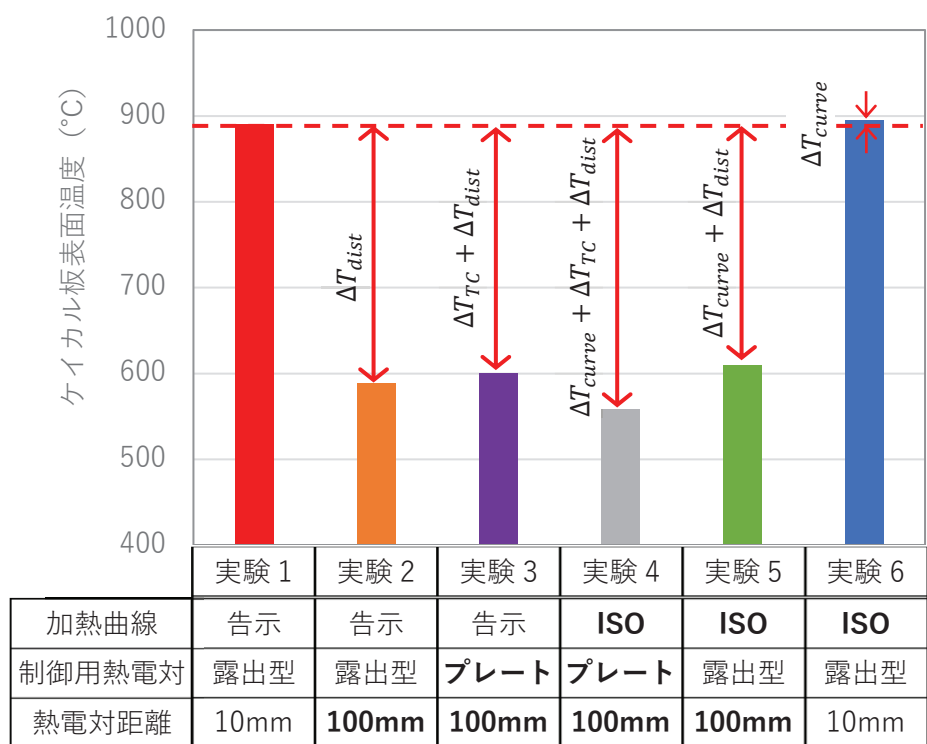


図 3.33 ケイカル板表面温度の比較 (加熱 30 分)

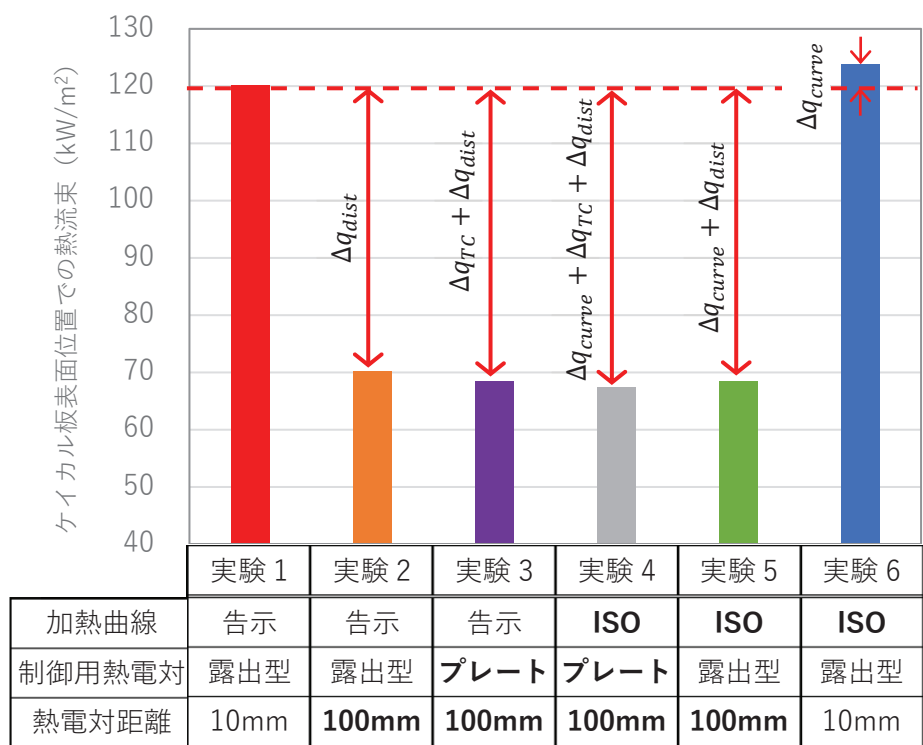


図 3.34 ケイカル板表面位置での熱流束の比較 (加熱 30 分)

表 3.6 実験値から求めた温度差

記号	計算	温度差[°C]	平均[°C]
ΔT_{curve}	実験 6-実験 1	5	-5
	実験 5-実験 2	21	
	実験 4-実験 3	-42	
ΔT_{TC}	実験 3-実験 2	12	-20
	実験 4-実験 5	-51	
ΔT_{dist}	実験 2-実験 1	-301	-293
	実験 5-実験 6	-286	
ΔT_{all}	実験 4-実験 1	-332	—

表 3.7 実験値から求めた熱流束の差

記号	計算	熱流束差[kW/m ²]	平均[kW/m ²]
Δq_{curve}	実験 6-実験 1	3.6	0.2
	実験 5-実験 2	-1.7	
	実験 4-実験 3	-1.1	
Δq_{TC}	実験 3-実験 2	-1.7	-1.4
	実験 4-実験 5	-1.1	
Δq_{dist}	実験 2-実験 1	-50.0	-52.6
	実験 5-実験 6	-55.2	
Δq_{all}	実験 4-実験 1	-52.8	—

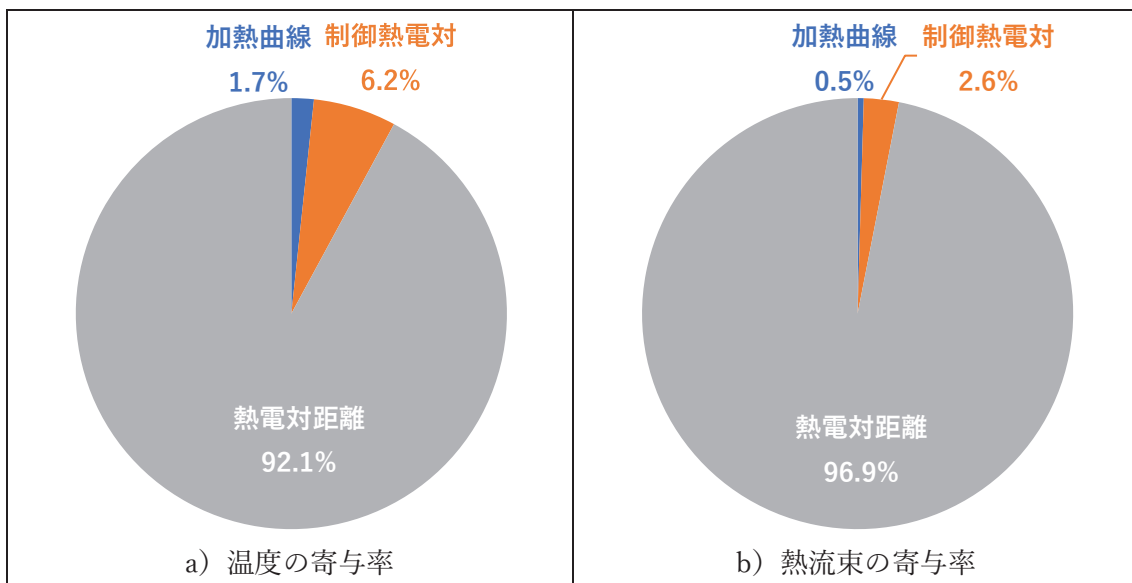


図 3.35 各パラメータの寄与率

3. 6 結論

本章では消防庁告示の小型加熱炉に ISO 834-1 の試験条件を取り入れた場合の加熱特性の違いを測定し、比較した。また、現行の告示に規定されていない制御用熱電対の形状の影響を調べるため、告示の小型加熱炉を用いて、露出型熱電対とプレート熱電対の2種類の熱電対による加熱特性の違いを測定し、比較した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 告示の小型加熱炉で、金属シース外径 3.2mm のシース熱電対を用いれば、金属シース外径 6.4mm、素線径 1mm の露出型熱電対とほぼ同等の応答性が得られる。
- 2) 告示の小型加熱炉の装置構成でも、プレート熱電対で炉内温度制御が可能である。ただし、加熱 15 分頃までは、従来の露出型熱電対制御よりも炉内ガス温度は高くなる。
- 3) 加熱曲線のみを ISO 法に整合させた実験の比較（実験 1 と実験 6、実験 2 と実験 5、実験 3 と実験 4）より、加熱開始直後は ISO 曲線の方が試験体保持面（ケイカル板）表面温度は高いが、6～7 分頃に逆転し、告示曲線の方が高くなる。30 分間の総熱量はいずれも告示曲線の方が高いが、その差は最大でも 4.4%であり、影響は小さい。
- 4) 制御用熱電対のみを ISO 法に整合させた実験の比較（実験 2 と実験 3、実験 4 と実験 5）より、加熱初期は一時的にプレート熱電対制御の方が試験体保持面表面温度は高いが、その後は露出型熱電対制御とほぼ同等である。30 分間の総熱量はいずれも露出型熱電対制御の方が低く、その差は最大でも 3.0%と小さい。
- 5) 制御用熱電対と試験体保持面までの距離を ISO 法に整合させた実験の比較（実験 1 と実験 2、実験 5 と実験 6）より、制御用熱電対と試験体保持面までの距離を 100mm にすると試験体保持面表面温度及び熱流は大幅に低下し、30 分時点では約 300℃低い。30 分間の総熱量はいずれも告示法の方が約 2.1 倍大きい。
- 6) 加熱曲線、制御用熱電対の種類、制御用熱電対と試験体保持面までの距離 3 つの試験条件のうち、制御用熱電対と試験体保持面までの距離が、加熱力に与える影響として支配的である。また、告示の小型加熱炉の試験条件を ISO 法に整合させると、現行の告示と比べて試験体保持面への加熱力が大幅に低下する。

引用・参考文献

- 1) 平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」
- 2) IEC 60331 Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity -
- 3) ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests - Elements of building construction
- 4) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性に関する研究、2021 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.212-213、2021.5
- 5) 日本電線工業会、JCS 7509:2020、1 時間耐火ケーブル試験方法（小型加熱炉）

第4章 小型加熱炉の炉内温度および風速分布の測定

4. 1 実験の目的

第3章で示したように、制御用熱電対とケイカル板との距離の違いにより、ケイカル板表面温度は大きく変化した。これは、制御用熱電対とケイカル板との距離が離れることで、バーナ火炎からケイカル板への放射熱が弱くなるためだと予想される。つまり、炉内温度は均一ではなく、バーナ側の火炎を含む炉内ガス温度は高く、ケイカル板に近づくにつれて炉内ガス温度が低下すると推測される。そこで、本章では小型加熱炉の炉内温度分布を測定により明らかにすることを目的とする。また、対流熱伝達率は一般に風速の関数であることから、第5章の数値解析で風速の測定値を使用するために、炉内の風速分布測定を行う。

4. 2 測定方法

4. 2. 1 炉内温度分布の測定方法

(1) 実験概要

平成9年消防庁告示第10号¹⁾に規定された小型加熱炉の炉内温度分布を把握するため、試料を設置しない状態で30分の加熱を行い、熱電対を用いて炉内温度データを取得した²⁾。加熱は、消防庁告示に基づく加熱曲線とISO 834-1³⁾に基づく加熱曲線の双方で行った。また、制御用熱電対とケイカル板との水平距離は、10mmと100mmの場合で実施した。

(2) 測定条件

測定を行った条件の組み合わせを表4.1に示す。加熱曲線の違い及び制御用熱電対とケイカル板との距離の違いは、3.2節の説明の通りである。測定は全部で4回行い、そのうち2回が告示曲線、2回がISO曲線である。炉内温度制御用の熱電対は、シース外径6.4mm、素線径1mmの露出型シース熱電対（以下、露出型熱電対）を全測定で使用した。制御用熱電対とケイカル板距離は、告示の規定である10mmが2回、ISO 834-1の規定である100mmが2回である。実験1は、すべて告示の条件である。実験2は、加熱曲線のみをISO 834-1に変更した条件である。実験3は、制御用熱電対とケイカル板との距離のみをISO 834-1に変更した条件である。実験4は、加熱曲線及び制御用熱電対とケイカル板との距離の両方をISO 834-1に変更した条件である。

表 4.1 測定条件一覧

実験 No.	加熱曲線	制御用熱電対	制御用熱電対とケイカル板との距離
実験 1	告示	露出型熱電対	10mm
実験 2	ISO 834-1	露出型熱電対	10mm
実験 3	告示	露出型熱電対	100mm
実験 4	ISO 834-1	露出型熱電対	100mm

炉内温度分布の測定は、シース外径が 1.6mm のシース熱電対を図 4.1 及び図 4.2 に示す位置に設置し、加熱中の炉内温度を 2 秒間隔で記録した。図 4.1 及び図 4.2 に示すように、炉内温度は 3 つの高さで測定し、上から順に、ケイカル板の中央の高さ（以下、上段と呼ぶ）、そこから 75mm 下方の制御用熱電対の高さ（以下、中段と呼ぶ）、そこからさらに 75mm 下方（ケイカル板表面のみ 60mm 下方）（以下、下段と呼ぶ）の高さとした。制御用熱電対の設置位置は告示の規定により、バーナ面から水平方向に 250mm 離れた位置とした。炉内温度は水平方向に概ね 50mm 間隔で設置しており、バーナ面の熱電対は、バーナ面側の炉壁に熱電対の先端を接触させて測定した。同様に、ケイカル板側の熱電対は、ケイカル板の表面に熱電対の先端を接触させて測定した。

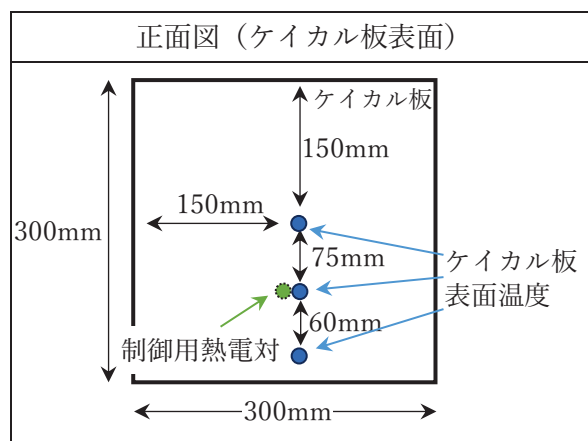


図 4.1 熱電対設置位置の模式図（ケイカル板表面付近、加熱側から）

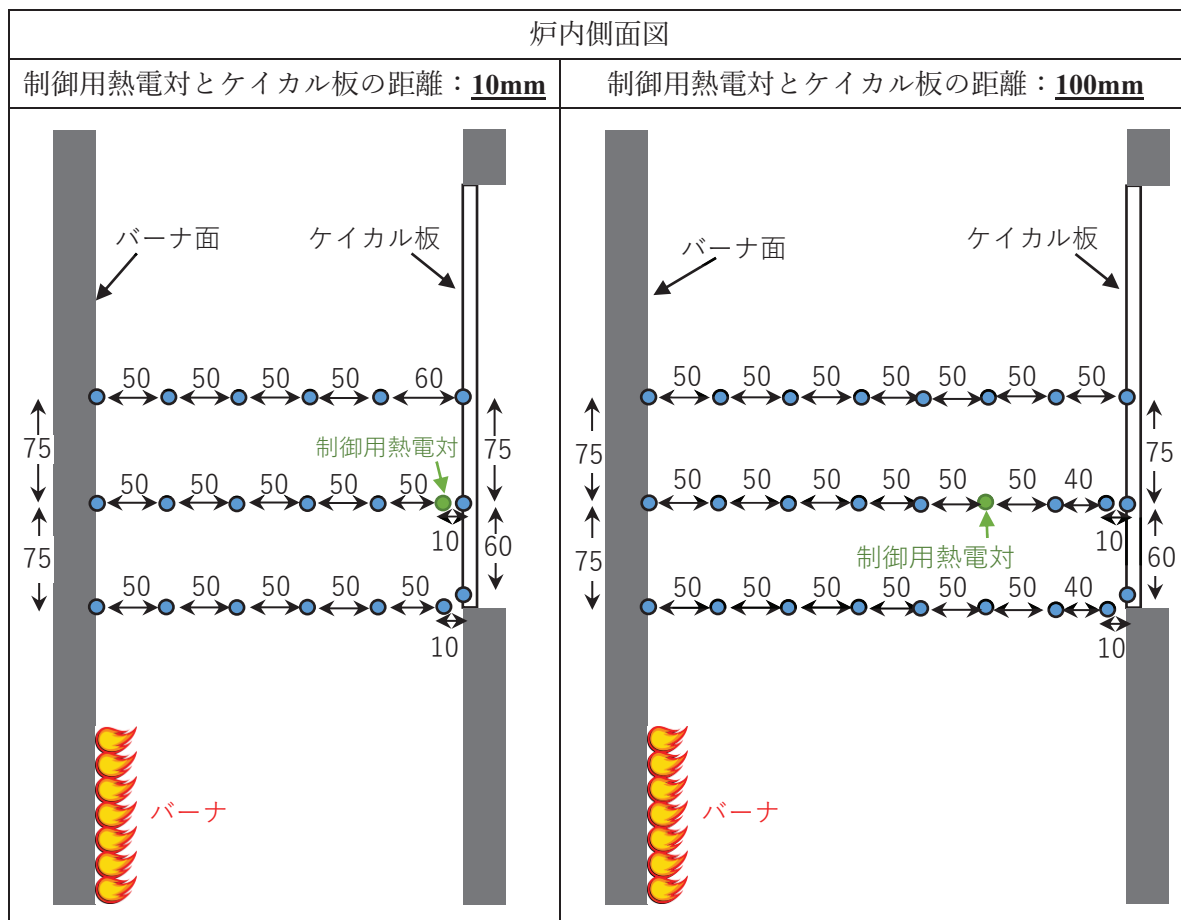


図 4.2 熱電対の設置位置の模式図（●は炉内温度測定用熱電対、数値の単位は mm）

4. 2. 2 炉内風速分布の測定方法

(1) 実験概要

平成9年消防庁告示第10号「耐火電線の基準」に規定された小型加熱炉の炉内風速分布を把握するため、試料を設置しない状態で60分の加熱を行い、双方向プローブを用いて炉内風速データを取得した。測定は、制御用熱電対とケイカル板との水平距離が10mmと100mmの2条件で実施した。

(2) 測定条件

測定を行った条件の組み合わせを表4.2に示す。加熱曲線はいずれも告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対とした。制御用熱電対とケイカル板距離は、告示の規定である10mmとISO 834-1の規定である100mmで実施し、実験5は10mm、実験6は100mmである。

表 4.2 測定条件一覧

実験 No.	加熱曲線	制御用熱電対	制御用熱電対とケイカル板との距離
実験 5	告示	露出型熱電対	10mm
実験 6	告示	露出型熱電対	100mm

炉内風速 v [m/s]は、双方向プローブでの差圧 ΔP [Pa]とその位置での炉内温度 T (°C)を測定することで、以下の式により計算できる。

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{C \times \rho}} \quad (4.1)$$

ここで、 C ：双方向プローブ係数 (=1.2)

ρ ：密度 ($= \frac{353}{T+273}$) [kg/m³]

炉内の差圧と温度の測定位置を図4.3に示す。測定位置は、ケイカル板中央より75mm下方の制御用熱電対の高さとした。炉内温度測定用熱電対には、シース外径が1.6mmのシース熱電対を用いた。双方向プローブの側面と熱電対は約4mm離れた距離とした。

双方向プローブによる風速測定位置は、実験5（ケイカル板と制御用熱電対の距離が10mm）では、図4.4a)に示すようにバーナ面から水平方向に100、160、185、210、230、250mmの距離とし、実験6（ケイカル板と制御用熱電対の距離が100mm）では、図4.4b)に示すようにバーナ面から水平方向に200、250、275、300、320、340mmの距離とした。測定を開始するタイミングは、2.5、5、7.5、10、12.5、15、20、30、40、50、58分とし、それぞれのタイミングでケイカル板から10mmの位置で10秒間測定後、測定位置をケイカ

ル板から 30mm の位置に移動して 10 秒間測定する手順を 150mm の位置まで繰り返した。

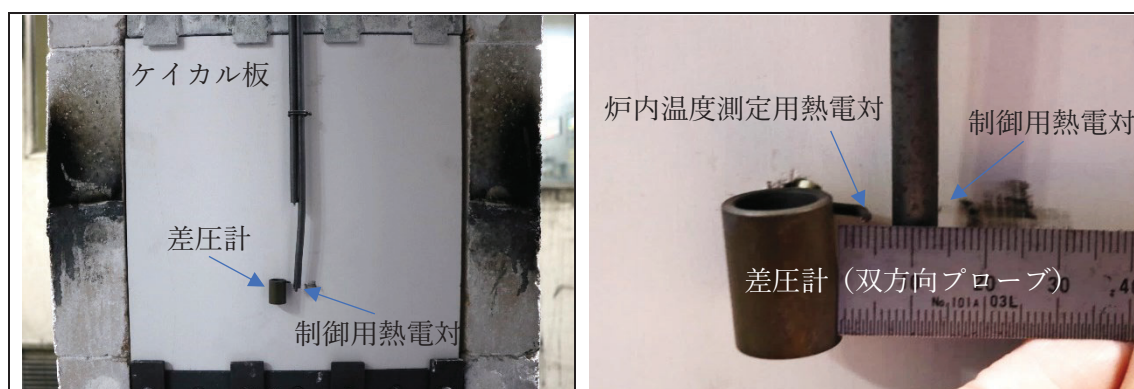
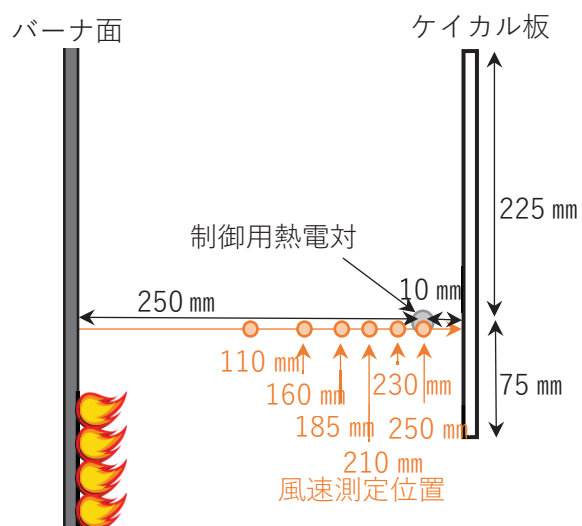
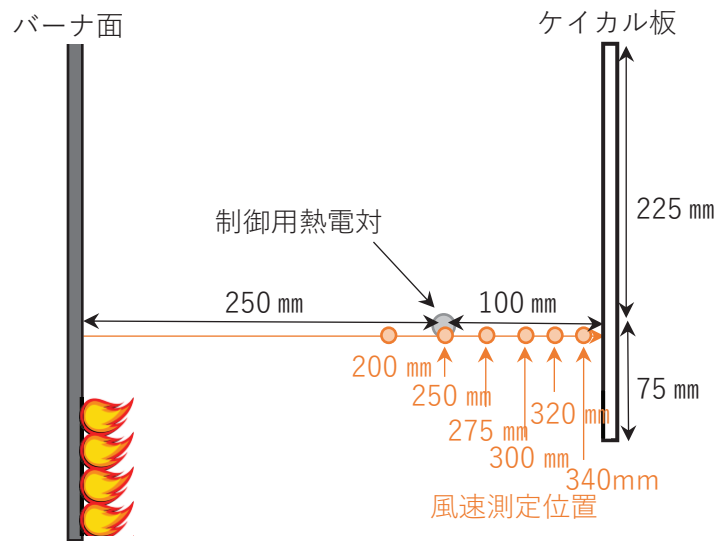


図 4.3 風速計と熱電対の位置 (ケイカル板付近)



a) ケイカル板と制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm の場合



b) ケイカル板と制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm の場合

図 4.4 風速測定位置の模式図

4. 2. 3 ガス消費量

炉に供給したプロパンガスの流量は、ガスメーターを読み取って記録した。

4. 3 測定結果

4. 3. 1 炉内温度分布の測定結果

(1) 実験 1 の測定結果

実験 1 (加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離は 10mm) の炉内温度測定について、上段の結果を図 4.5 に、中段の結果を図 4.6 に、下段の結果を図 4.7 に示す。それぞれ破線は加熱曲線である。凡例内の数値はバーナ面からの距離であり、0mm はバーナ壁面の温度、260mm はケイカル板表面温度である。図 4.6 のバーナからの距離が 250mm の位置の熱電対が制御用熱電対である。

上段の図 4.5 では、バーナ面から 0mm と 250mm が加熱曲線とほぼ同等の温度である。バーナ面からの距離が 100mm から 200mm の温度が高く、30 分時点で 1,000°C 以上である。中段の図 4.6 と下段の図 4.7 では、バーナ面からの距離が 50mm から 200mm の温度が高く、30 分時点で 1,000°C 以上である。上段、中段、下段いずれも、バーナ面からの距離が 200mm の位置に比べて 250mm の位置では大幅に温度は低い。

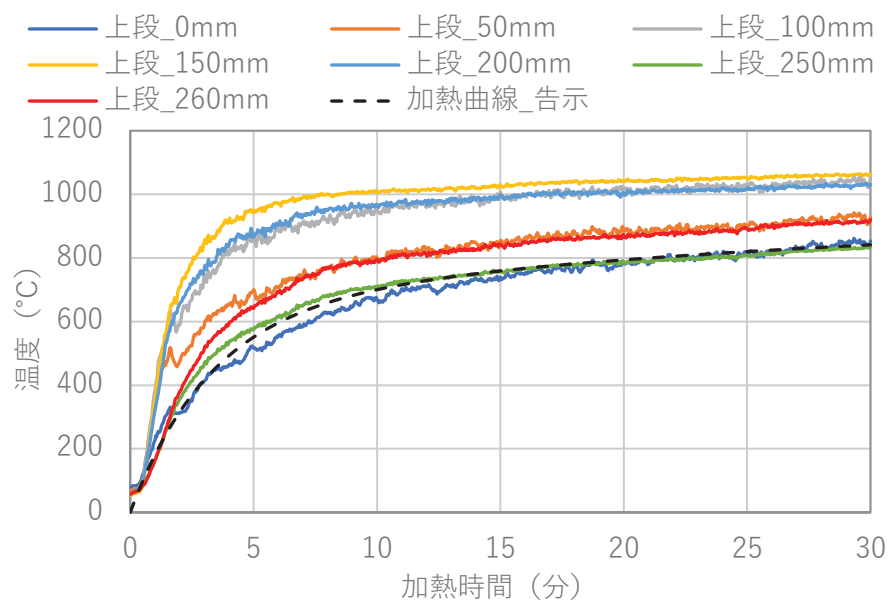


図 4.5 炉内温度測定結果：上段位置
(実験 1：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

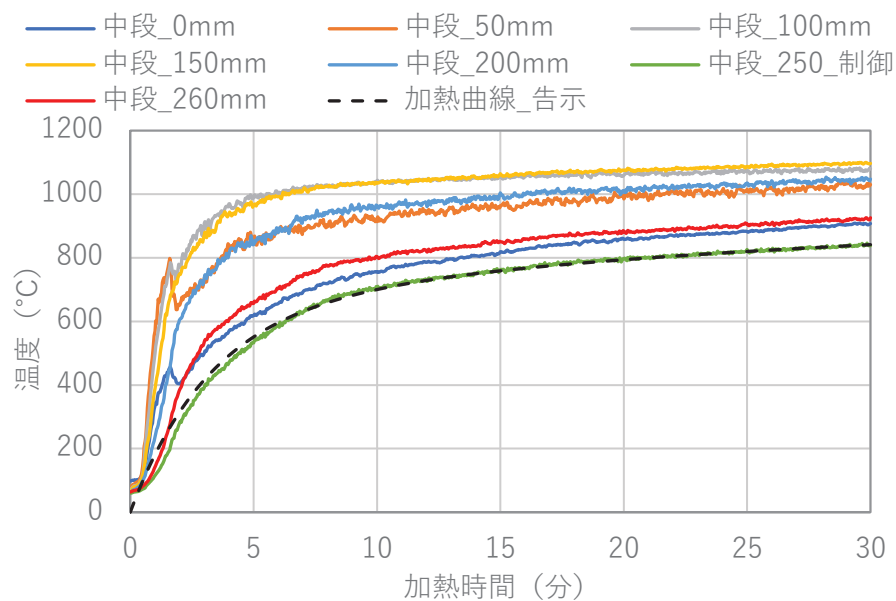


図 4.6 炉内温度測定結果：中段位置
(実験 1：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

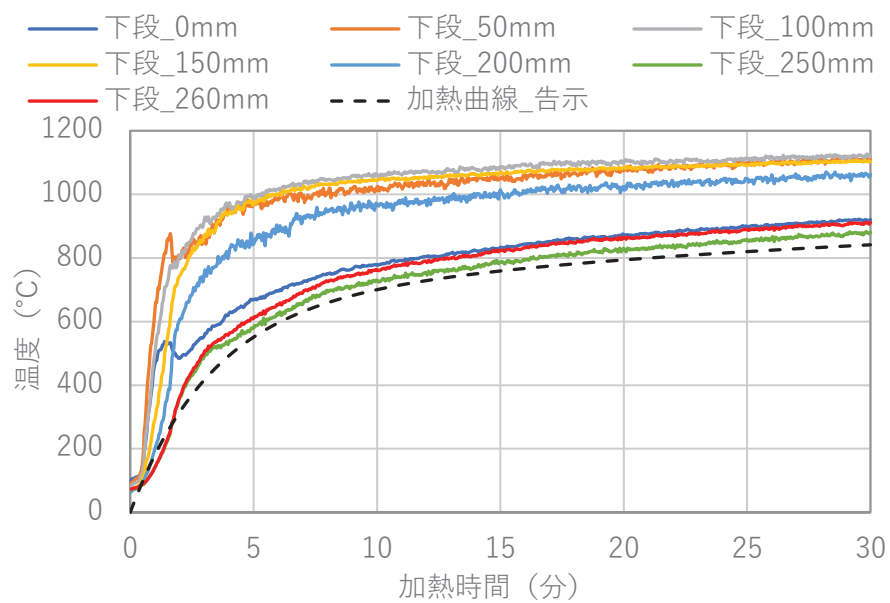


図 4.7 炉内温度測定結果：下段位置
(実験 1：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

(2) 実験2の測定結果

実験2（加熱曲線はISO曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離は10mm）の炉内温度について、上段の測定結果を図4.8に、中段の測定結果を図4.9に、下段の測定結果を図4.10に示す。それぞれ破線は加熱曲線である。凡例内の数値はバーナ面からの距離であり、0mmはバーナ壁面の温度、260mmはケイカル板表面温度である。図4.9のバーナからの距離が250mmの位置の熱電対が制御用熱電対である。本実験では、下段のバーナ面から250mmの位置の温度は熱電対の不具合により欠測である。

上段の図4.8では、バーナ面から0mmと250mmが加熱曲線とほぼ同等の温度である。バーナ面からの距離が100mmから200mmの温度が高く、30分時点で1,000°C以上である。中段の図4.9と下段の図4.10では、バーナ面からの距離が50mmから200mmの温度が高く、30分時点で1,000°C以上である。上段と中段ともに、バーナ面からの距離が200mmの位置に比べて250mmの位置では大幅に温度は低い。

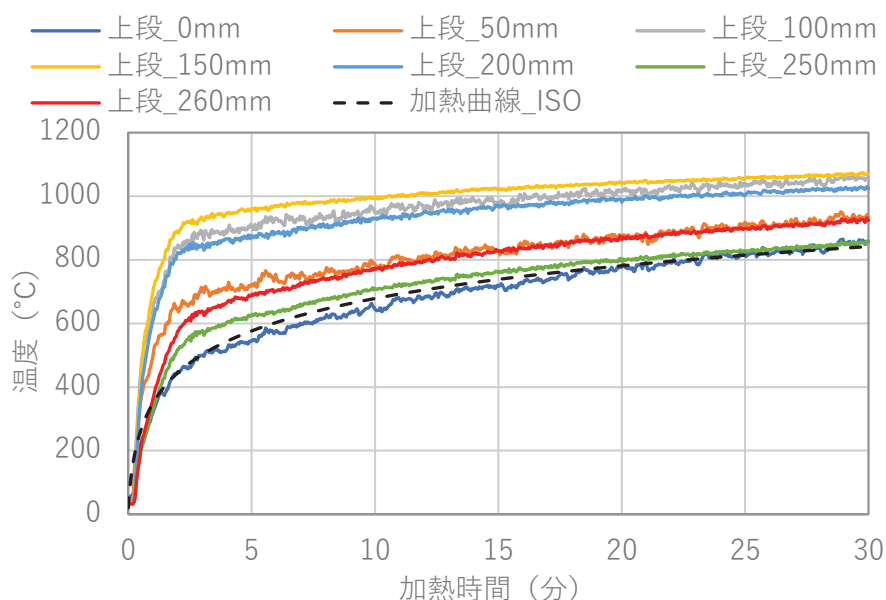


図 4.8 炉内温度測定結果：上段位置

(実験2：ISO曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離10mm)

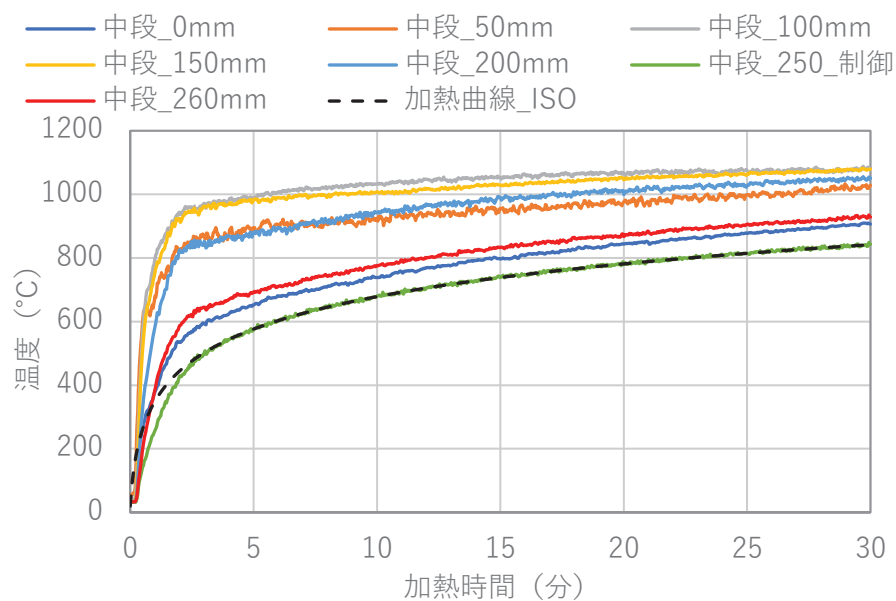


図 4.9 炉内温度測定結果：中段位置
(実験 2：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

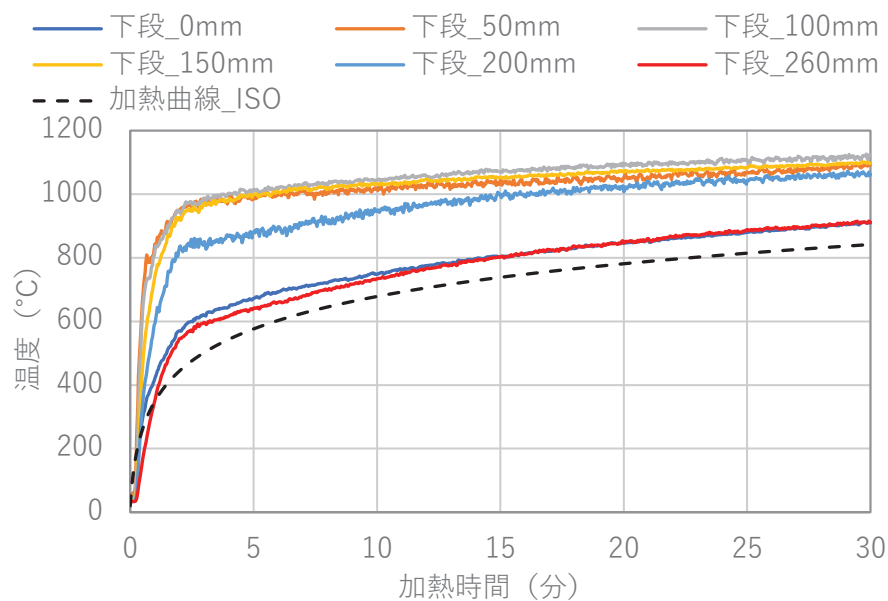


図 4.10 炉内温度測定結果：下段位置
(実験 2：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

※バーナ面から 250mm の温度は欠測

(3) 実験3の測定結果

実験3（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離は100mm）の炉内温度測定について、上段の結果を図4.11に、中段の結果を図4.12に、下段の結果を図4.13に示す。それぞれ破線は加熱曲線である。凡例内の数値はバーナ面からの距離であり、0mmはバーナ壁面の温度、350mmはケイカル板表面温度である。図4.12のバーナからの距離が250mmの位置の熱電対が制御用熱電対である。

上段、中段、下段いずれも、バーナ面からの距離が50mmの位置の温度が最も高く、50mm以降はバーナ面からの距離が大きくなるほど温度は低下した。バーナ面からの距離が300mmと350mmは、加熱曲線よりも低かった。

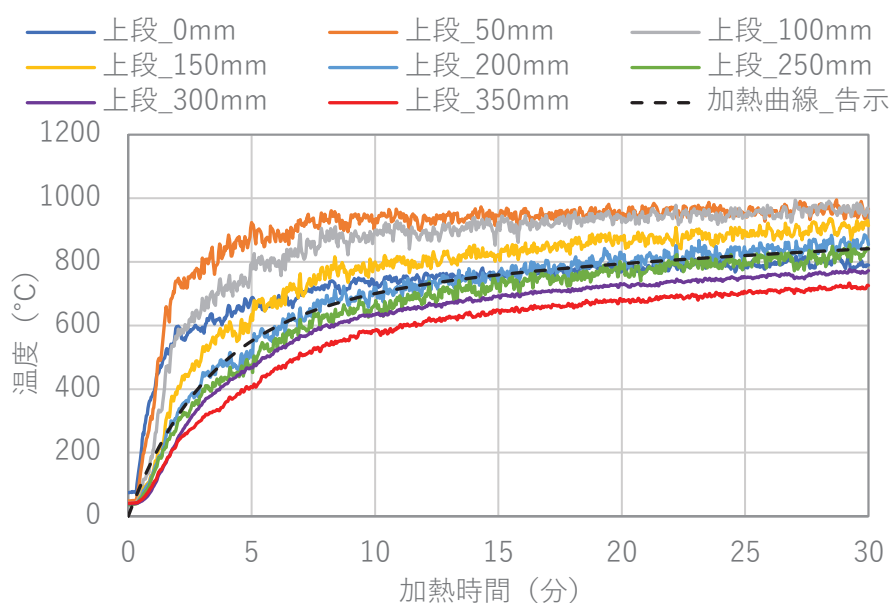


図4.11 炉内温度測定結果：上段位置

(実験3：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離100mm)

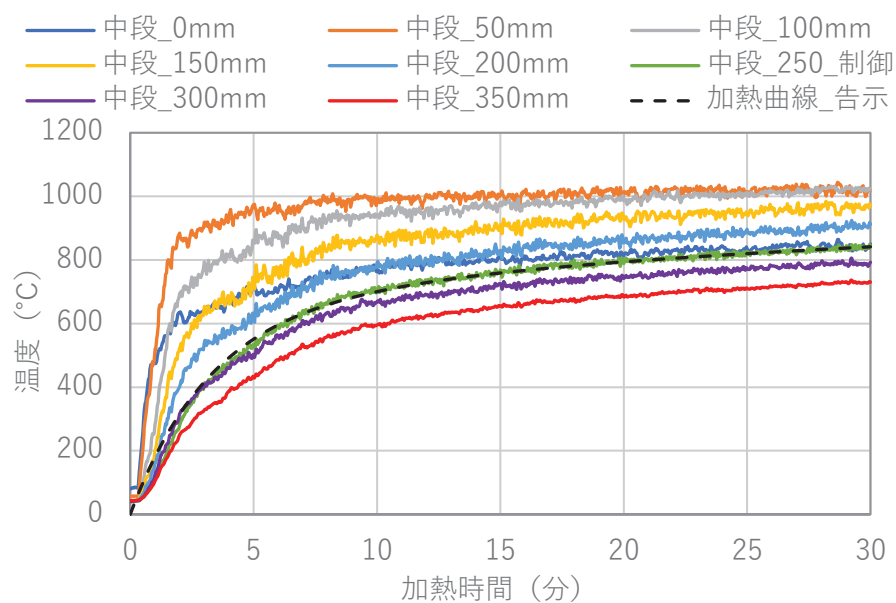


図 4.12 炉内温度測定結果：中段位置
(実験 3：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

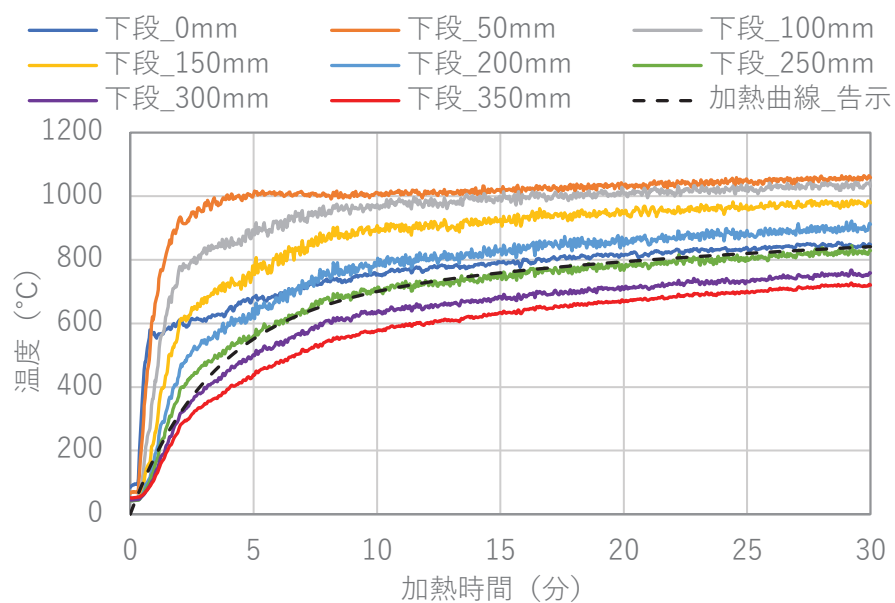


図 4.13 炉内温度測定結果：下段位置
(実験 3：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(4) 実験4の測定結果

実験4（加熱曲線はISO曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離は100mm）の炉内温度測定について、上段の結果を図4.14に、中段の結果を図4.15に、下段の結果を図4.16に示す。それぞれ破線は加熱曲線である。凡例内の数値はバーナ面からの距離であり、0mmはバーナ壁面の温度、350mmはケイカル板表面温度である。図4.15のバーナからの距離が250mmの位置の熱電対が制御用熱電対である。

上段、中段、下段いずれも、バーナ面からの距離が50mmの位置の温度が最も高く、50mm以降はバーナ面からの距離が大きくなるほど温度は低下した。バーナ面からの距離が300mmと350mmは、加熱曲線よりも低かった。

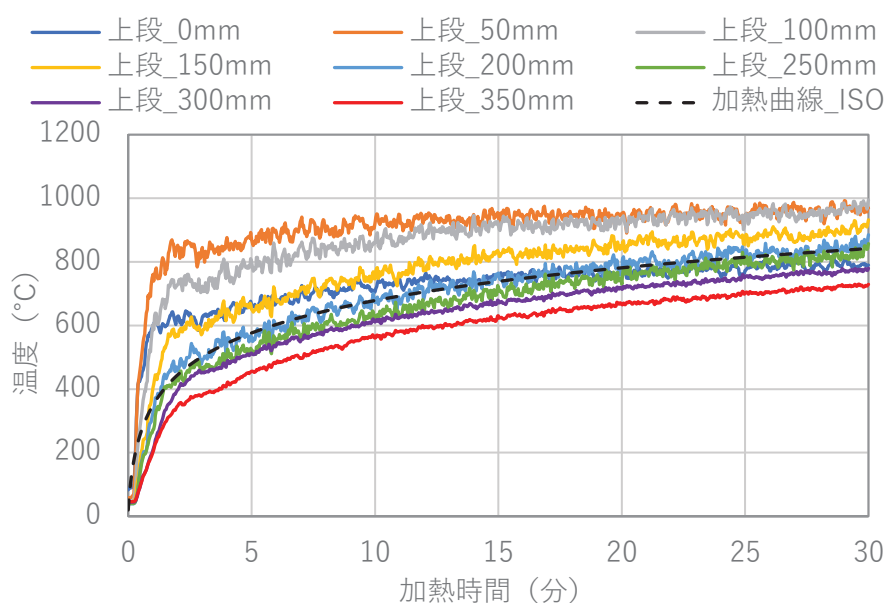


図 4.14 炉内温度測定結果：上段位置

(実験4：ISO曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離100mm)

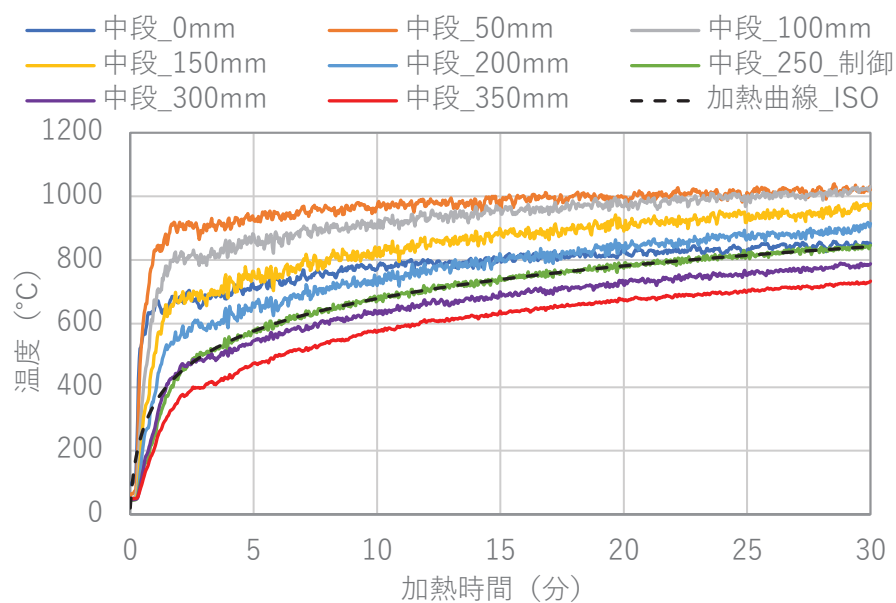


図 4.15 炉内温度測定結果：中段位置
(実験 4：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

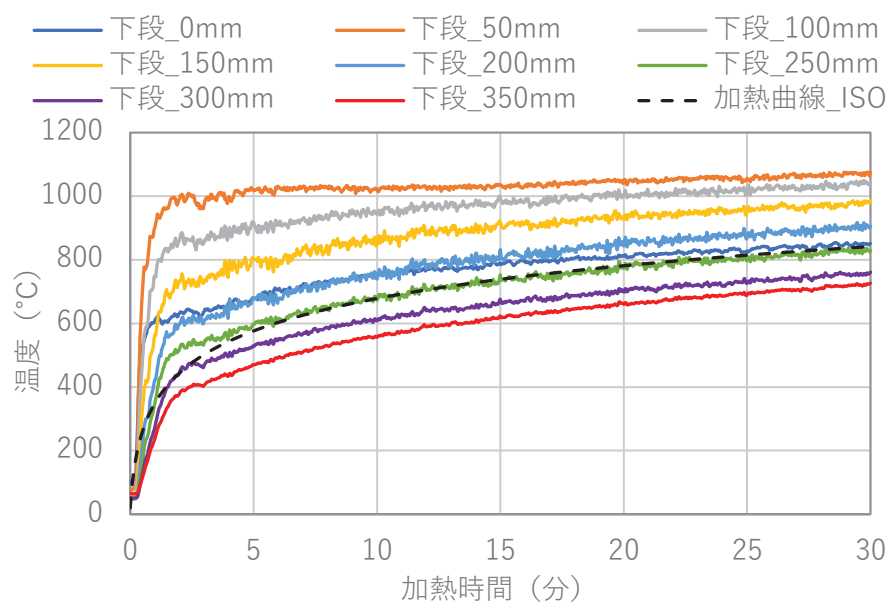


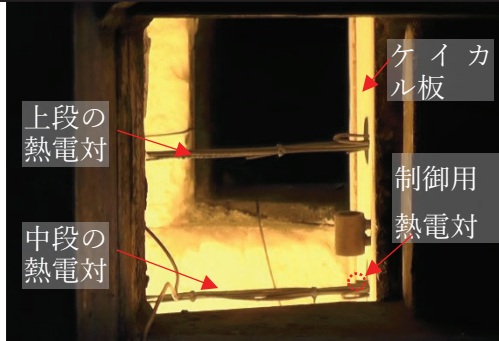
図 4.16 炉内温度測定結果：下段位置
(実験 4：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

（５）炉内の状況

実験１と実験２の加熱中の炉内の様子を炉の側面から撮影した写真を図 4.17 に、実験３と４の写真を図 4.18 に示す。図 4.17 に示すように実験１と実験２では、時間と共にバーナの火炎（左側）がケイカル板（右側）へ伸びていき、加熱開始５分頃にはケイカル板表面に近い位置まで火炎が届いている。実験２は ISO 曲線であり、加熱直後の加熱曲線の温度上昇が大きいので、１分後には火炎が確認でき、３分後も実験１より火炎が大きいですが、それ以降は実験１と実験２で大きな差は見られない。

一方、図 4.18 に示す実験３と実験４では、30 分間を通して、バーナ火炎が一定しておらず、間欠的に伸びる火炎は見えるもののバーナ火炎はケイカル板表面には到達せず、図 4.17 とは炉内の様子は大きく異なった。

実験 1: 告示曲線、ケイカル板と制御用熱電対の距離 10mm



1 分



3 分



5 分



10 分

実験 2: ISO 曲線、ケイカル板と制御用熱電対の距離 10mm



1 分



3 分



5 分



10 分

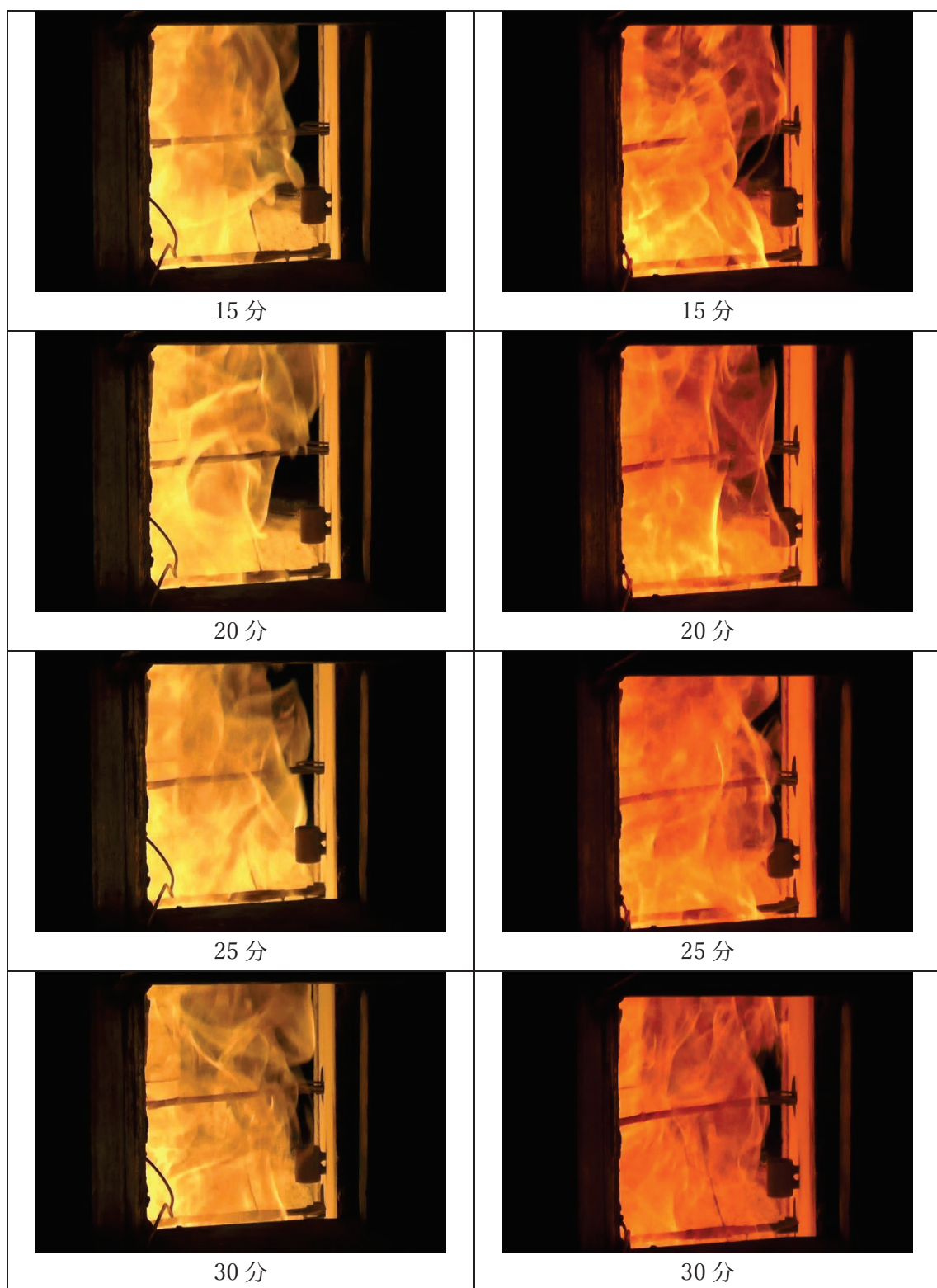
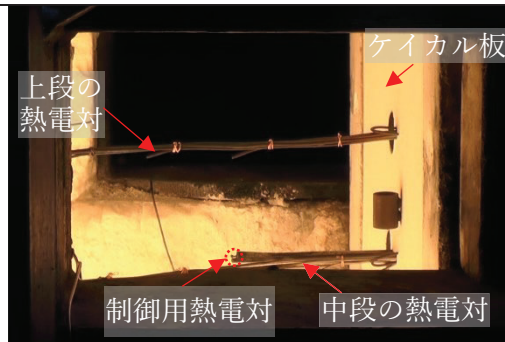


図 4.17 炉内温度測定時に側面から撮影した炉内の様子（実験 1、実験 2）

※写真の左側がバーナ面、右側がケイカル板面

実験 3：告示曲線、ケイカル板と制御用熱電対の距離 100mm



1 分



3 分



5 分



10 分

実験 4：ISO 曲線、ケイカル板と制御用熱電対の距離 100mm



1 分



3 分



5 分



10 分

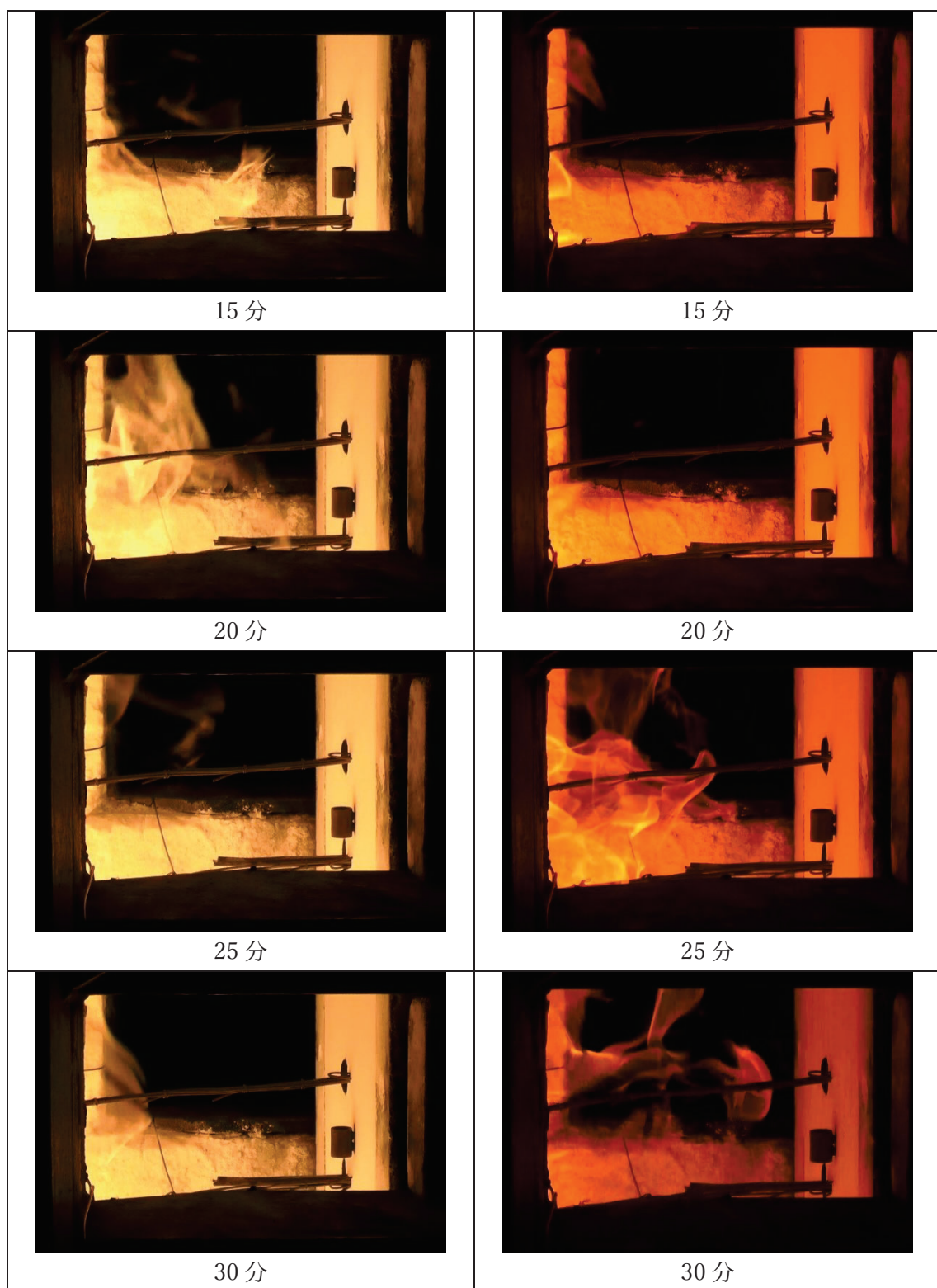


図 4.18 炉内温度測定時に側面から撮影した炉内の様子（実験 3、実験 4）

※写真の左側がバーナ面、右側がケイカル板面

(6) プロパンガス消費量

バーナへ供給するプロパンガスの1分毎の消費量の時間変化を図4.19に示す。告示曲線である実験1と実験3のプロパンガス消費量は、加熱10分頃まで増加し、その後はほぼ一定となった。ISO曲線である実験2と4では、加熱開始数分で急激に増加し、その後は緩やかに増加した。制御熱電対とケイカル板との距離が10mmである実験1と実験2のプロパンガス消費量は、制御熱電対とケイカル板との距離が100mmである実験3と実験4に比べて高い。

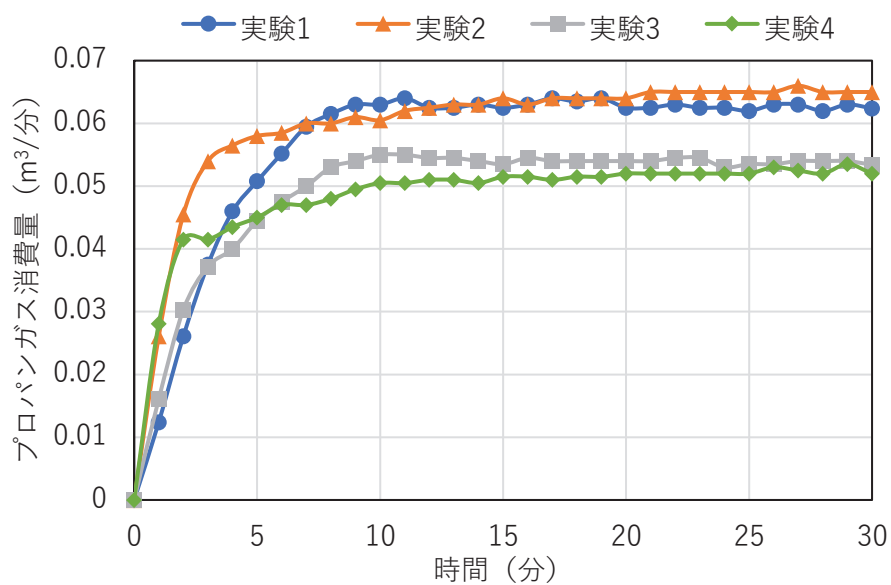


図 4.19 プロパンガス消費量の時間変化

4. 3. 2 炉内風速分布の測定結果

(1) 測定位置

加熱 30 分時点の炉内の様子を炉の側面から撮影した写真について、実験 5 の写真を図 4.20 に、実験 6 の写真を図 4.21 に示す。実験 5 は制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm、実験 6 は制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm である。

図 4.20 の実験 5 では、火炎がケイカル板に接近しており、双方向プローブがバーナ面から 185mm 以内（ケイカル板から 50mm 以上離れた）である③から⑥の場合には、双方向プローブは火炎に接触していると考えられる。

また、図 4.21 に示す実験 6 では、双方向プローブがバーナ面から 200mm（ケイカル板から 150mm の位置）である⑥のみ、双方向プローブが火炎に接触していると考えられる。

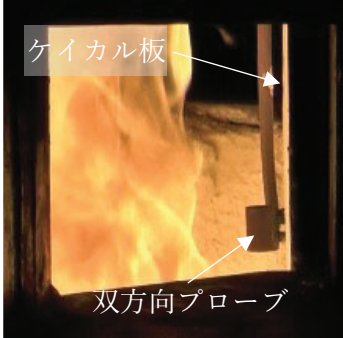
実験 5：制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm		
 ケイカル板 双方向プローブ ①バーナ面から 250mm (ケイカル板から 10mm)	 制御用熱電対 ②バーナ面から 230mm (ケイカル板から 30mm)	 ③バーナ面から 210mm (ケイカル板から 50mm)
 ④バーナ面から 185mm (ケイカル板から 75mm)	 ⑤バーナ面から 160mm (ケイカル板から 100mm)	 ⑥バーナ面から 110mm (ケイカル板から 150mm)

図 4.20 風速測定時に側面から撮影した炉内の様子（実験 5、加熱 30 分時）

※写真の左側がバーナ面、右側がケイカル板面

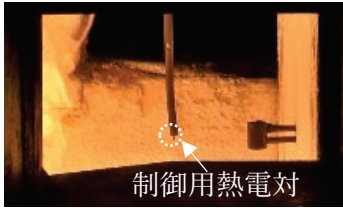
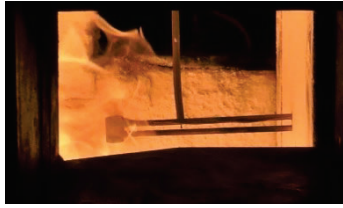
実験 6：制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm		
 ①バーナ面から 340mm (ケイカル板から 10mm)	 ②バーナ面から 320mm (ケイカル板から 30mm)	 ③バーナ面から 300mm (ケイカル板から 50mm)
 ④バーナ面から 275mm (ケイカル板から 75mm)	 ⑤バーナ面から 250mm (ケイカル板から 100mm)	 ⑥バーナ面から 200mm (ケイカル板から 150mm)

図 4.21 風速測定時に側面から撮影した炉内の様子（実験 6、加熱 30 分時）

※写真の左側がバーナ面、右側がケイカル板面

（２）炉内温度

双方向プローブに並列設置して測定した炉内温度について、実験 5（制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm）の結果を図 4.22 に、実験 6（制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm）の結果を図 4.23 に示す。凡例の数値は、測定位置のバーナ面からの距離を示す。図 4.22 に示すように、バーナ面からの距離が 230mm と 250mm の差は小さいが、210mm 以下ではバーナ面に近くなるほど、温度が高くなり、110mm と 250mm では大きな温度差がみられた。ただし、110mm と 160mm の温度差は比較的小さい。一方、図 4.23 に示す実験 6 では、実験 5 よりも全体的に温度が低く、バーナ面からの距離による差が小さい。

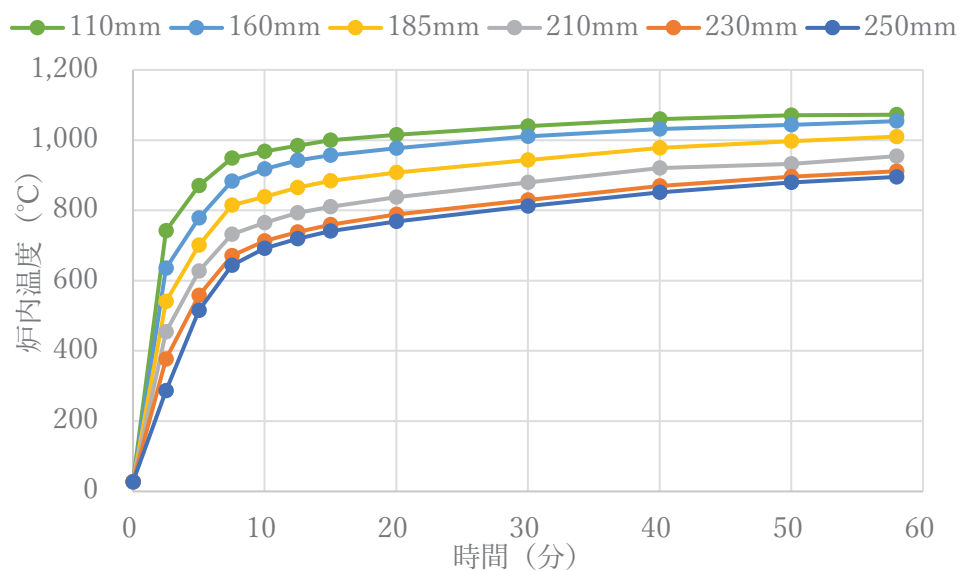


図 4.22 各位置の炉内温度の時間変化
(実験 5：制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

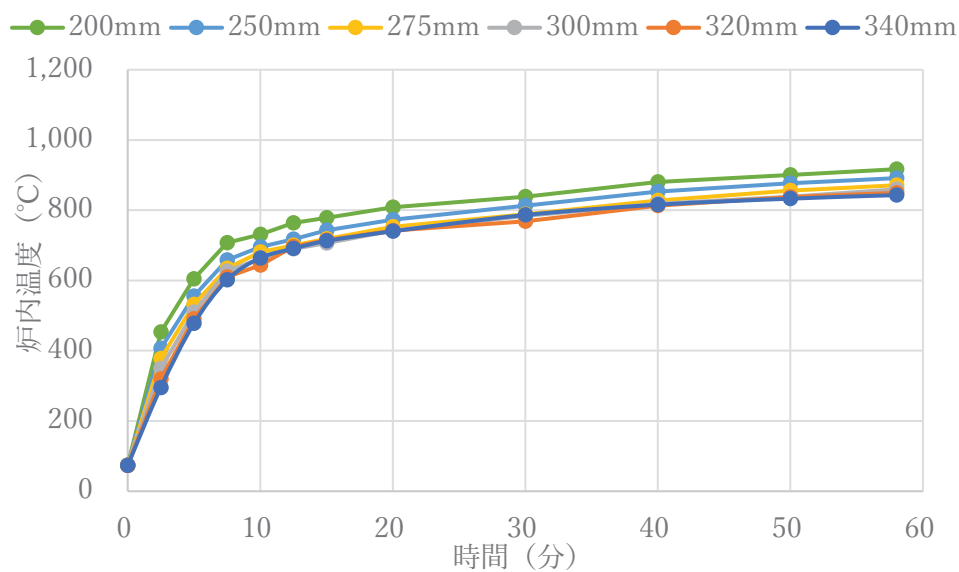


図 4.23 各位置の炉内温度の時間変化
(実験 6：制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(3) 炉内風速

双方向プローブで測定した炉内風速について、実験 5（制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm）の結果を図 4.24 に、実験 6（制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm）の結果を図 4.25 に示す。凡例の数値は、測定位置のバーナ面からの距離を示す。図 4.24 に示す実験 5 では、いずれの条件も 10 分頃までは風速が増加するが、それ以降はほぼ一定となった。また、バーナ面からの距離が近いほど風速は増加したが、測定位置 110mm と 160mm では、ほぼ同じ風速値であった。10 分以降では、測定位置 250mm の風速は約 1.8m/s、測定位置 110mm の風速は約 2.8m/s であった。

図 4.25 に示す実験 6 では、いずれの条件も 10 分頃までは風速が増加するが、それ以降はほぼ一定となった。また、バーナ面からの距離が近いほど風速は増加した。10 分以降では、測定位置 340mm の風速は約 1.3m/s、測定位置 200mm の風速は約 2.0m/s であった。実験 6 では全体的に実験 5 よりも風速が低かった。

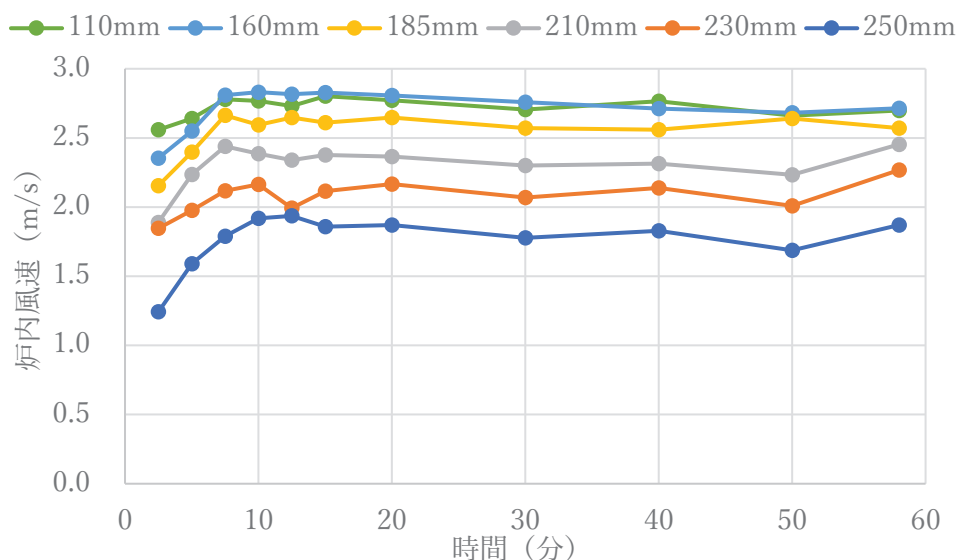


図 4.24 各位置の炉内風速の時間変化
(実験 5：制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

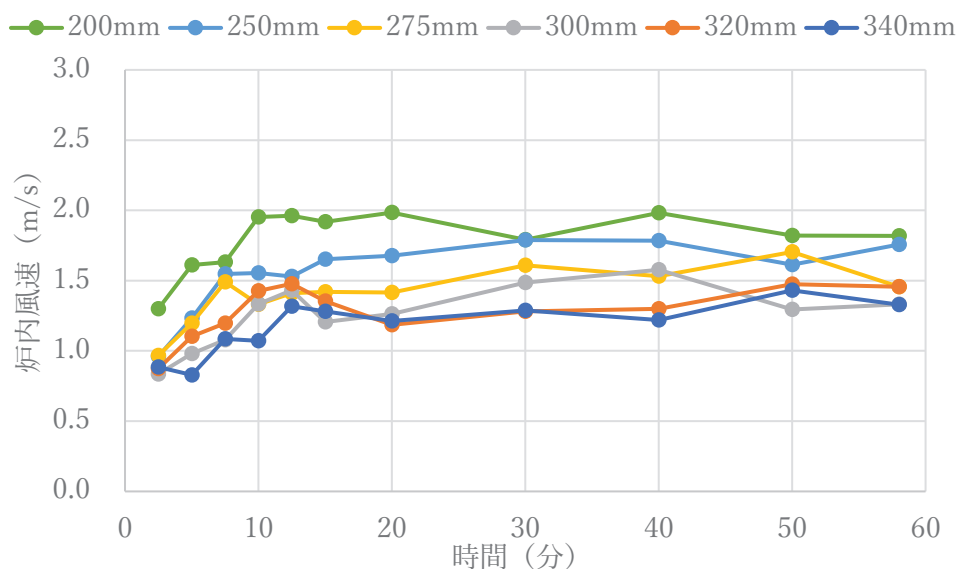


図 4.25 各位置の炉内風速の時間変化
(実験 6：制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

4. 4 考察

4. 4. 1 炉内温度分布

(1) 各実験の上段、中段、下段位置における炉内温度の時間変化

上段、中段、下段位置における 5 分毎の炉内温度分布について、制御用熱電対とケイカル板距離が 10mm である実験 1 と実験 2 の結果を図 4.26 に、制御用熱電対とケイカル板距離が 100mm である実験 3 と実験 4 の結果を図 4.27 に示す。いずれの位置及び実験でも、炉内温度分布は時間と共に相似的に高温側にシフトし、加熱中は水平方向の炉内温度分布の傾向は変化しない。図 4.26 より、制御用熱電対とケイカル板距離が 10mm である実験 1 と実験 2 のケイカル板表面温度は制御用熱電対の温度よりも高く、図 4.27 より、制御用熱電対とケイカル板距離が 100mm である実験 3 と実験 4 では制御熱電対の温度よりも低く、傾向が異なる。

制御用熱電対とケイカル板距離が 10mm である実験 1 と実験 2 の温度分布は、バーナ面からの距離が 150mm の測定位置が概ね最も高く、200mm ではやや下がり、200mm と 250mm の間では大きな温度差がみられた。制御用熱電対とケイカル板距離が 100mm である実験 3 と実験 4 の温度分布は、バーナ面からの距離が 50mm の測定位置が概ね最も高く、バーナ面から離れるほど、なだらかに温度は低下した。

各実験の 30 分時点の最高温度、制御用熱電対温度、最低温度及び最高温度と最低温度の温度差を図 4.28 に示す。炉内の最高温度は実験 1 と実験 2 が同等で、それぞれ 1,121℃、1,122℃である。実験 3 と実験 4 の最高温度はそれぞれ 1,059℃、1,076℃であり、実験 1 と実験 2 より約 50℃低い。炉内の最低温度は、実験 1 と実験 2 がそれぞれ 836℃、855℃であ

り、加熱曲線の温度（実験 1 が 840°C、実験 2 が 842°C の設定値）とほぼ同じ温度である。実験 3 と実験 4 の最低温度は基準曲線の温度よりも大幅に低く、それぞれ 701°C、658°C である。最高温度と最低温度の差は、実験 1 と実験 2 は、それぞれ 284°C、267°C と類似の温度差である。実験 3 と実験 4 では、温度差はそれぞれ 358°C、417°C であり、実験 1、実験 2 に比べて温度差が大きい。

火炎温度とガス温度の温度差の時間変化を図 4.29 に示す。火炎温度は、実験 1 と実験 2 ではバーナ面からの距離が 150mm と 200mm の中段の温度の平均値、実験 3 と実験 4 ではバーナ面からの距離が 100mm と 150mm の中段の温度の平均値とし、ガス温度は、制御用熱電対の温度とした。いずれも加熱序盤は火炎とガスの温度差は大きいですが、時間とともに温度差は小さくなり、20 分以降では実験 1 と実験 2 は 230°C へ、実験 3 と 4 は 150°C へ収束した。

30 分時点の制御用熱電対とケイカル板表面の温度を図 4.30 に、30 分時点の制御用熱電対とケイカル板表面の温度差を図 4.31 に示す。図 4.30 より、いずれもケイカル板表面温度は、上段、中段、下段位置の温度差は小さく、上下方向の温度差は小さいといえる。実験 1 と実験 2 のケイカル板表面温度はほぼ同等であり、約 920°C である。また、実験 3 と実験 4 のケイカル板表面温度はほぼ同等であり、約 730°C である。図 4.31 より、ケイカル板表面温度は、実験 1 と実験 2 では制御用熱電対の温度よりも約 80°C 高く、実験 3 と実験 4 では約 120°C 低い。

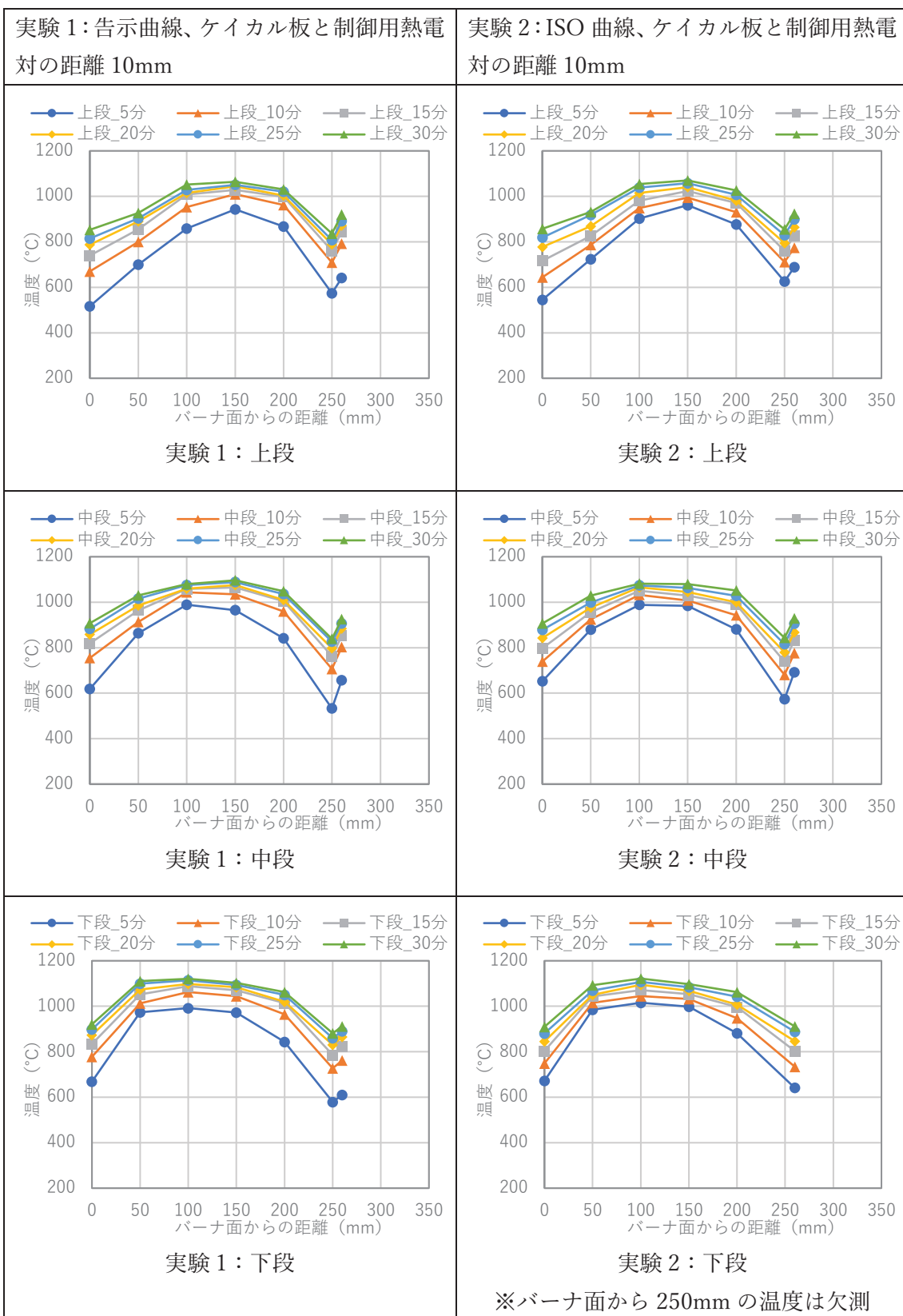


図 4.26 炉内温度の時間変化（実験 1、実験 2）

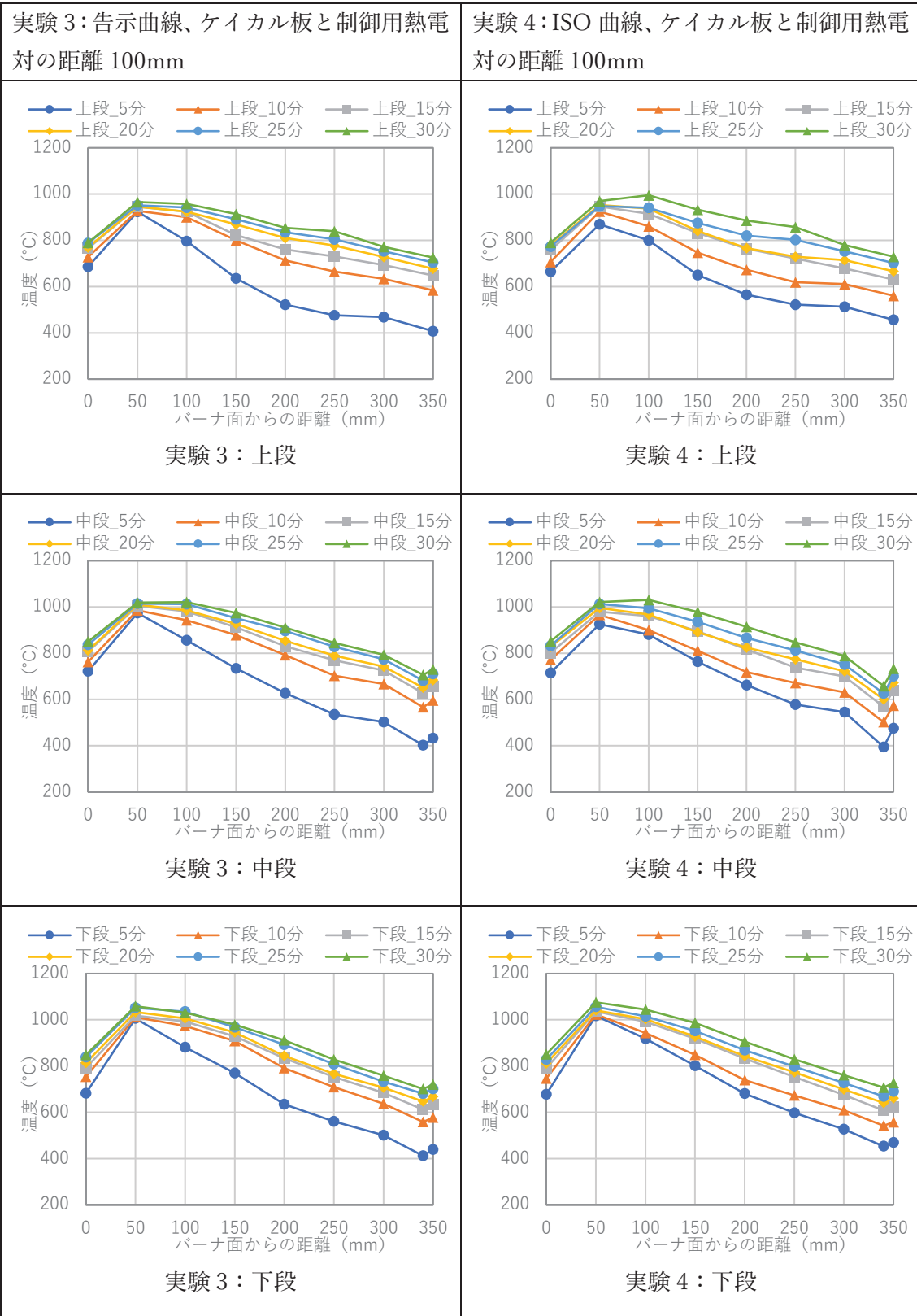


図 4.27 炉内温度の時間変化（実験 3、実験 4）

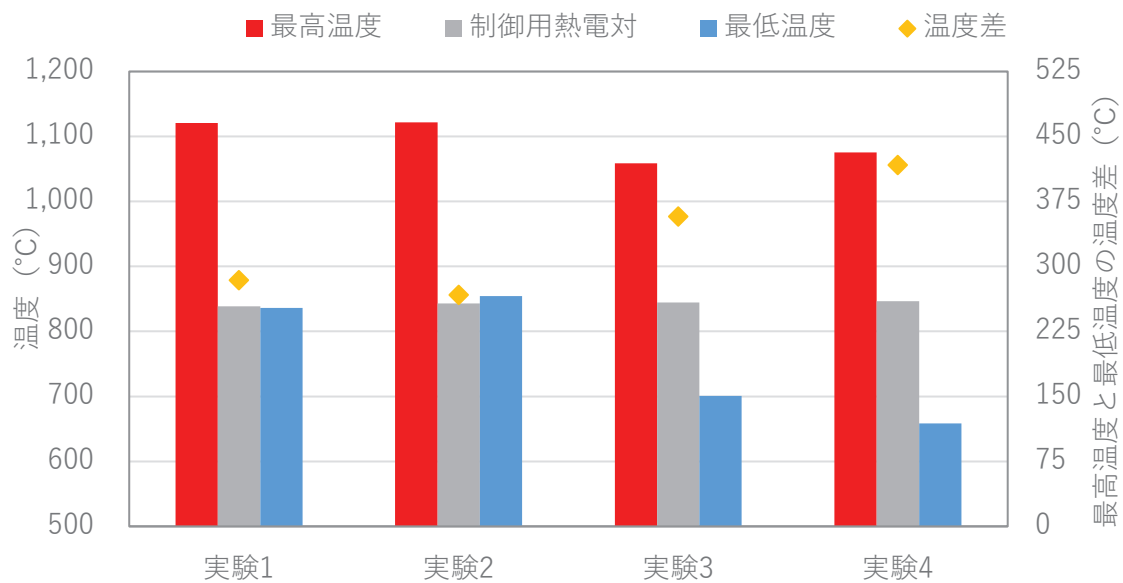


図 4.28 30 分時の炉内最高温度、制御用熱電対温度、最低温度及び最高温度と最低温度の温度差（温度差は右縦軸）

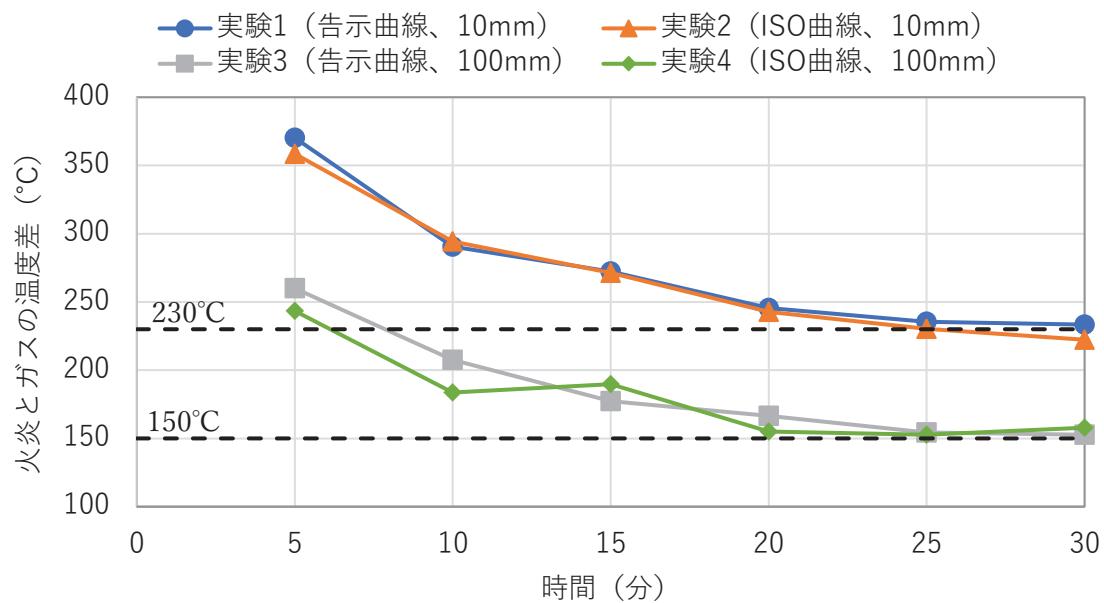


図 4.29 火炎とガスの温度差の時間変化

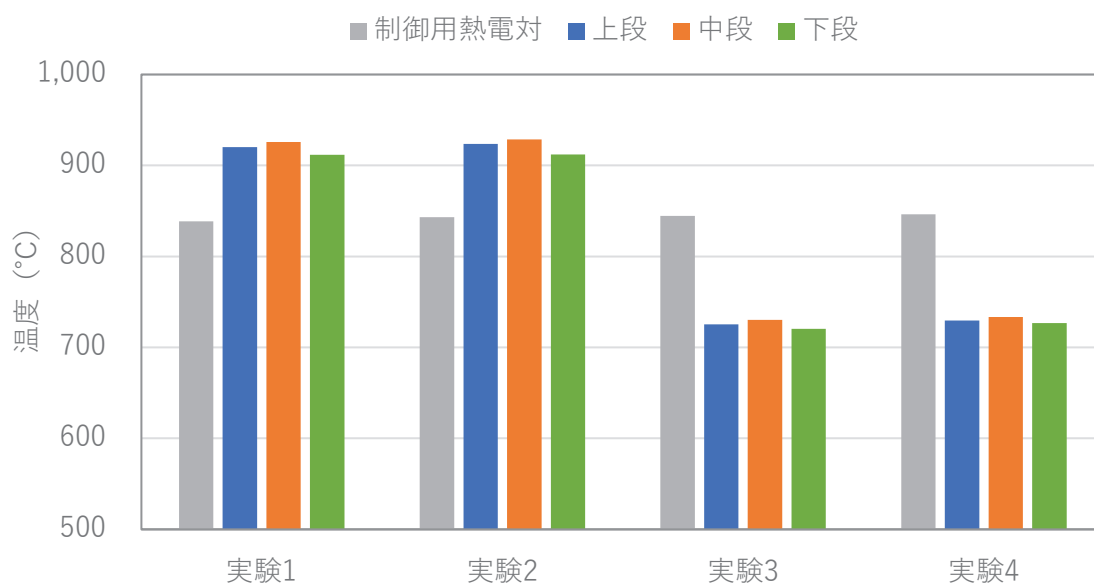


図 4.30 30 分時の制御用熱電対とケイカル板表面（上段、中段、下段）の温度

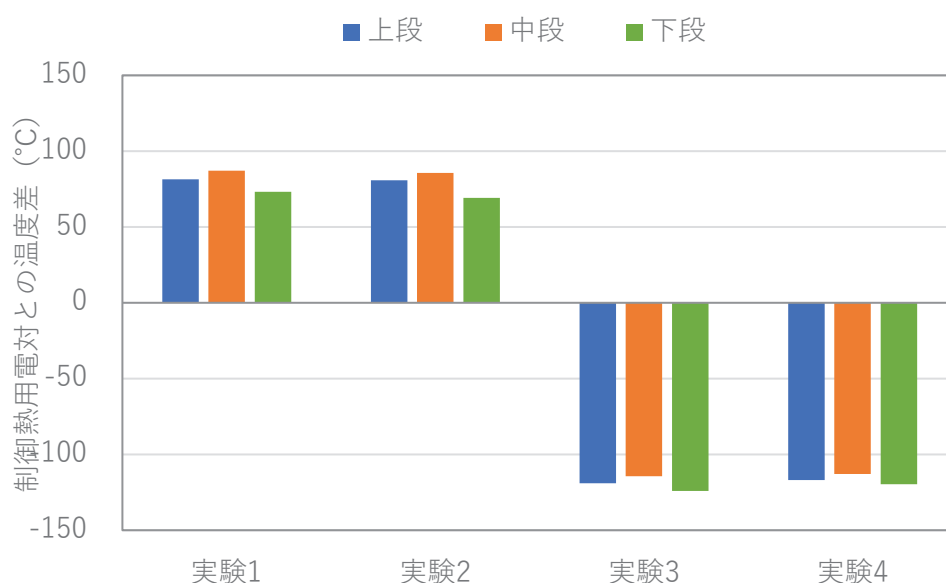


図 4.31 30 分時の制御用熱電対とケイカル板表面（上段、中段、下段）の温度差
（正数は制御用熱電対よりもケイカル板表面温度が高く、負数は低い）

（2）上下方向の温度分布

実験 1 から実験 4 の加熱 30 分時点の炉内温度をそれぞれ図 4.32 から図 4.35 に示す。いずれもバーナ面に近い位置では、下段の温度が高く、上段の温度が低い傾向であるが、実際の試験時にケーブルを設置するケイカル板表面及びケイカル板に近い位置（図 4.32、図 4.33 では 150～260mm、図 4.34、図 4.35 では 200～350mm）では上段、中段、下段の差は小さ

く、測定した範囲内では上下の温度分布は小さいといえる。

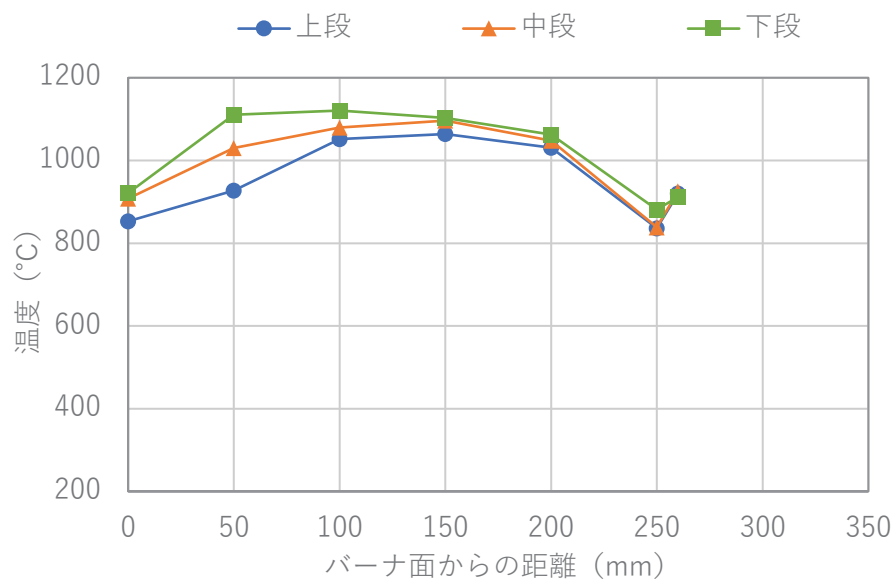


図 4.32 熱電対の測定高さの違い：加熱 30 分時
(実験 1：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

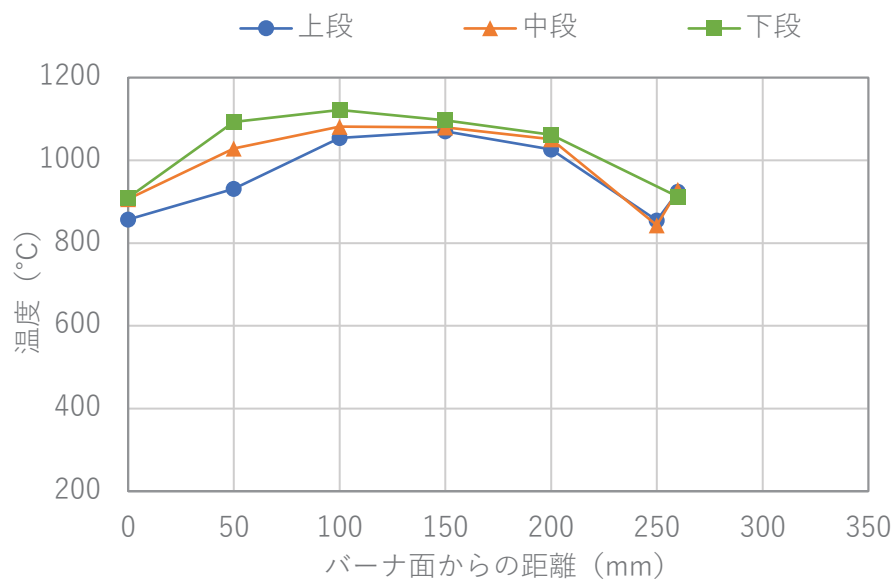


図 4.33 熱電対の測定高さの違い：加熱 30 分時
(実験 2：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 10mm)

※下段のバーナ面からの距離 250mm は欠測

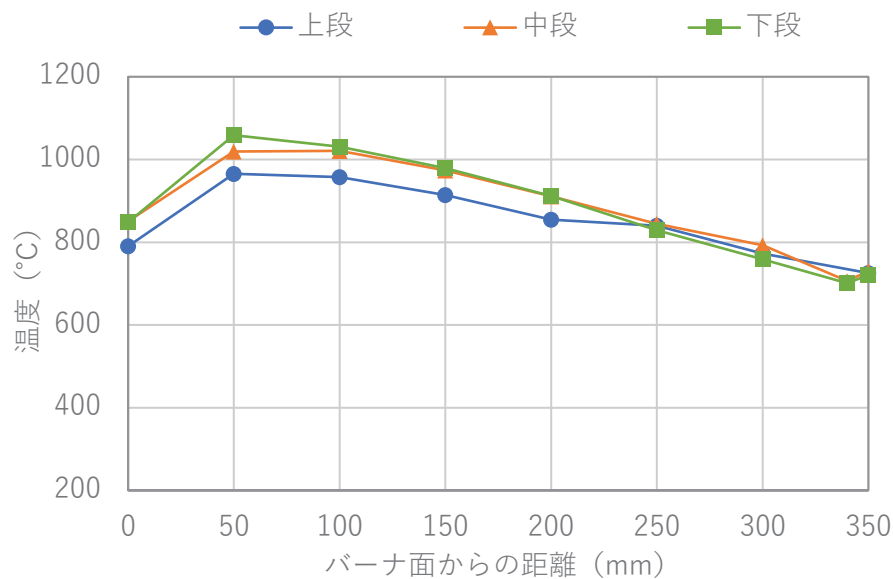


図 4.34 熱電対の測定高さの違い：加熱 30 分時
(実験 3：告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

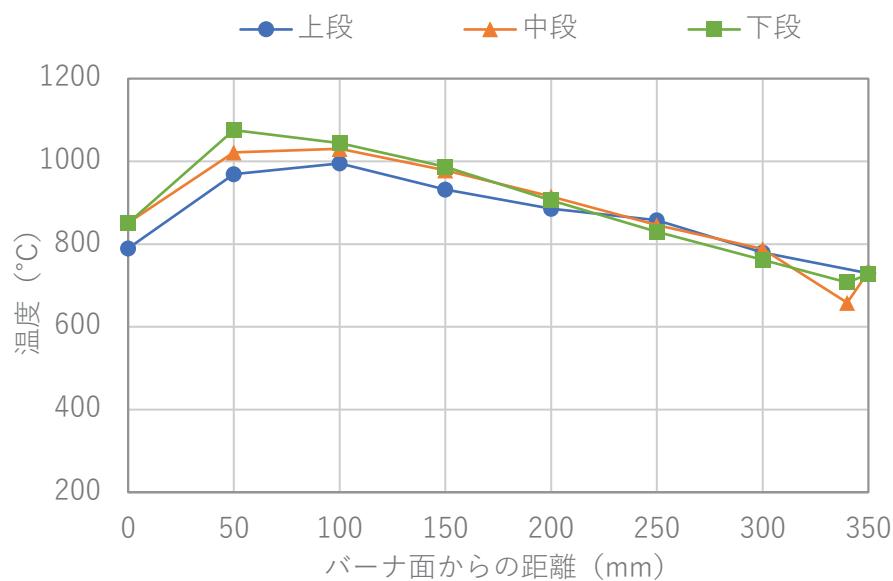


図 4.35 熱電対の測定高さの違い：加熱 30 分時
(実験 4：ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(3) 各加熱条件の比較及び水平方向の温度分布

各実験の中段に設置した熱電対の 10 分、20 分、30 分時点の温度をそれぞれ図 4.36 から図 4.38 に示す。加熱曲線のみが異なる実験 1 と実験 2、実験 3 と実験 4 を比較すると、図 4.36 の 10 分時点では ISO 曲線である実験 2 と実験 4 の温度の方がやや低い、図 4.37 の

20 分ではその差は縮まり、図 4.38 の 30 分では加熱曲線による差はほとんど見られない。このことから加熱曲線の違いは炉内温度分布へ与える影響は小さいといえる。

制御用熱電対とケイカル板との距離のみが異なる実験 1 と実験 3、実験 2 と実験 4 を比較すると、バーナ面及びバーナ面から 50mm までの範囲ではそれぞれの温度差は小さいが、バーナ面からの距離が 100mm を超えると温度差は顕著となる。これは図 4.17 と図 4.18 の写真で示したように、制御用熱電対とケイカル板との距離の違いにより、炉内の火炎の状況が大きく異なるためである。実験 1 と実験 2 ではケイカル板付近までバーナ火炎が迫っており、図 4.38 の測定においてもバーナ面からの距離が 200mm 付近までは 1,000°C 以上の高温である。ただし、バーナからの距離が 250mm では急激に温度が低下していること及び図 4.20 の写真から、バーナ火炎と火炎を含まない炉内ガスの境界は、バーナ面からの距離が 200mm 付近にあると考えられる。バーナからの距離が 200mm と 150mm の平均温度を火炎温度とすると、火炎温度と制御熱電対（ガス温度）の温度差は、30 分時点で約 230°C である。

一方、実験 3 と実験 4 は、図 4.36 から図 4.38 より、バーナからの距離が 50mm から 100mm の温度が最も高く、バーナ面からの距離が離れるほど温度は直線的に低下した。図 4.18 の写真で示したように、実験 3 と実験 4 ではバーナ火炎とケイカル板までの距離が離れていることから、実験 1 や実験 2 ほど火炎からの放射熱が大きくないために、ケイカル板表面及びその近傍の温度が上がらなかったと考えられる。図 4.27 の温度と図 4.21 の写真から、バーナ火炎と火炎を含まない炉内ガスの境界は、バーナ面からの距離が 150mm 付近にあると推測される。バーナからの距離が 150mm と 100mm の平均温度を火炎温度とすると、火炎温度と制御熱電対（ガス温度）の温度差は、30 分時点で約 150°C である。

また、いずれの実験でもケイカル板の表面温度（実験 1 と実験 2 では 260mm、実験 3 と実験 4 では 350mm）は、その 10mm 手前の炉内ガス温度（実験 1 と実験 2 では 250mm、実験 3 と実験 4 では 340mm）よりも高いが、これは高温の火炎からの放射が炉内ガスを通してケイカル板表面に到達することにより、ケイカル板表面が加熱されたためだと考えられる。

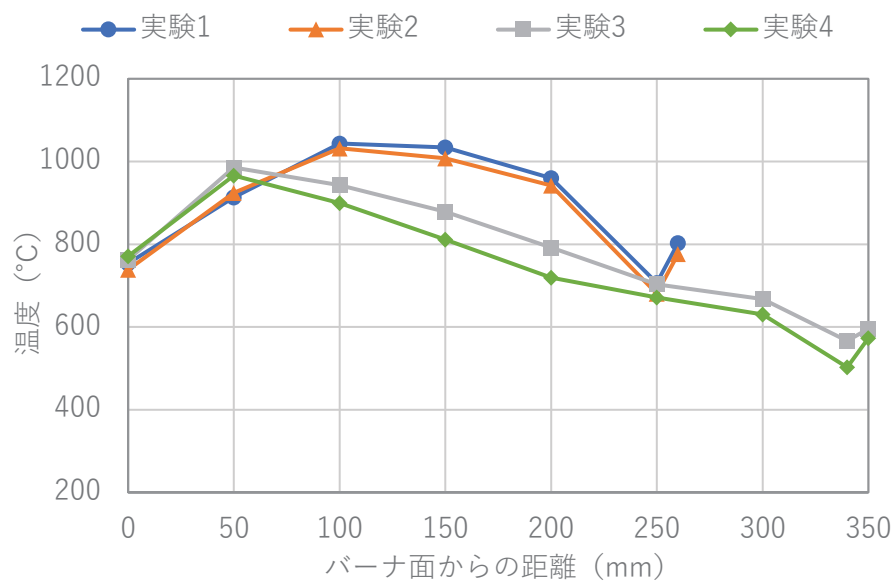


図 4.36 中段の炉内熱電対の 10 分時の各実験の温度 (0mm：バーナ面)

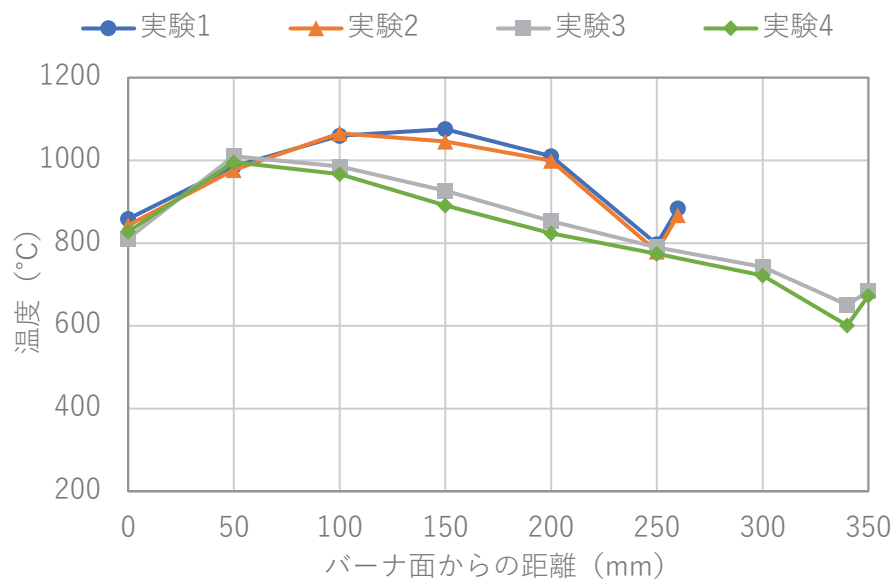


図 4.37 中段の炉内熱電対の 20 分時の各実験の温度 (0mm：バーナ面)

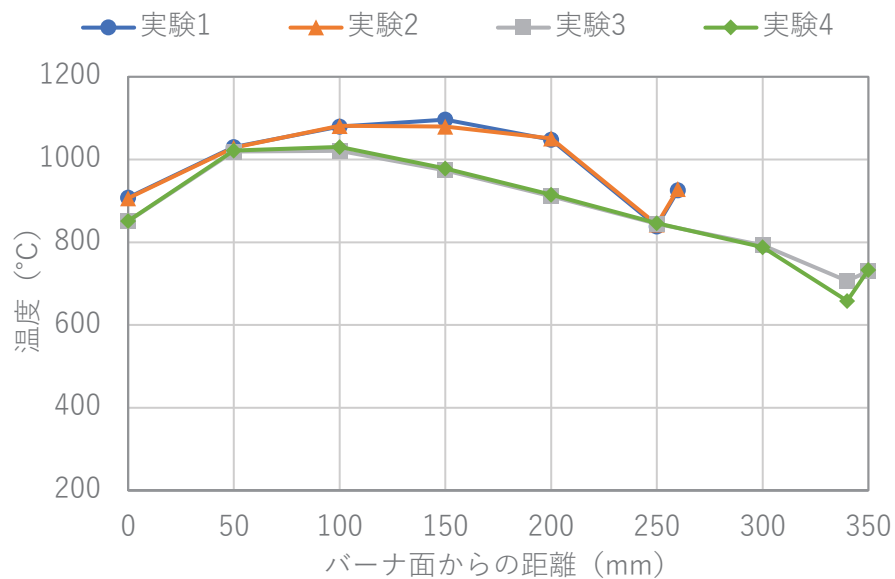


図 4.38 中段の炉内熱電対の 30 分時の各実験の温度 (0mm：バーナ面)

4. 4. 2 炉内風速

(1) 炉内風速分布

実験 5 と実験 6 の加熱 30 分時点の炉内風速分布を図 4.39 に示す。実験 5 ではバーナ面からの距離が 260mm の位置がケイカル板表面、実験 6 ではバーナ面から 350mm の位置がケイカル板表面位置に相当する。いずれもバーナ面からの距離が近づくほど炉内風速はほぼ直線的に大きくなったが、実験 5 では 110mm 以下はほぼ一定となった。同様に、実験 6 では 250mm 以下はほぼ一定となった。実験 5、6 とともにバーナ面からの距離が 250mm での風速が 1.8m/s で等しいことは興味深い。

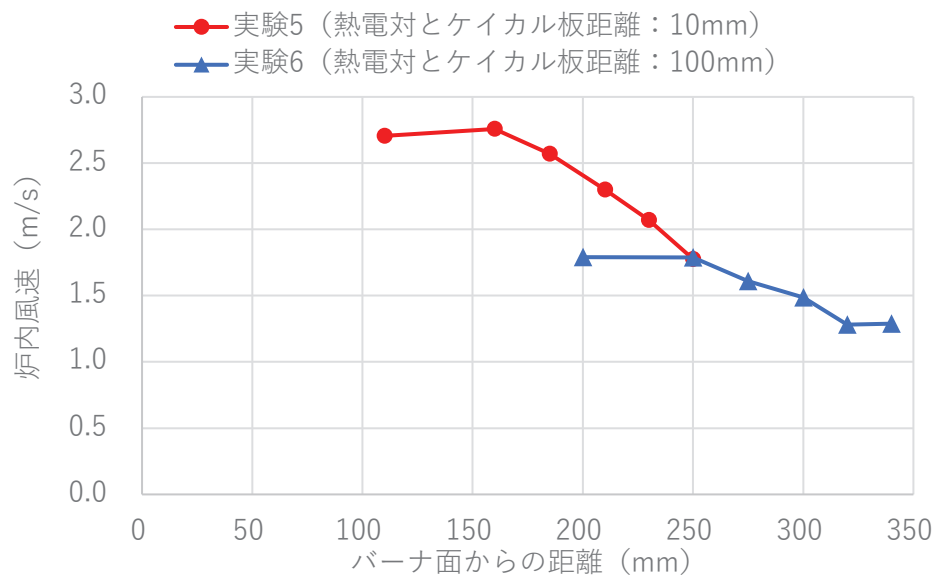


図 4.39 30 分時の炉内風速の比較

また、実験 5 では 110mm、実験 6 では 200mm の測定位置で炉内風速はほぼ最大となるため、この測定位置における実験 5 と実験 6 の時間変化を比較する。炉内風速の比較を図 4.40 に示す。炉内風速は実験 5 の方が常に高く、およそ 1m/s の差がある。炉内ガスとケイカル板との対流について、対流熱伝達率は風速の関数であり、風速が大きいほど対流熱伝達率も大きいので、実験 5 の条件の方が対流熱伝達率は大きいと推測される。

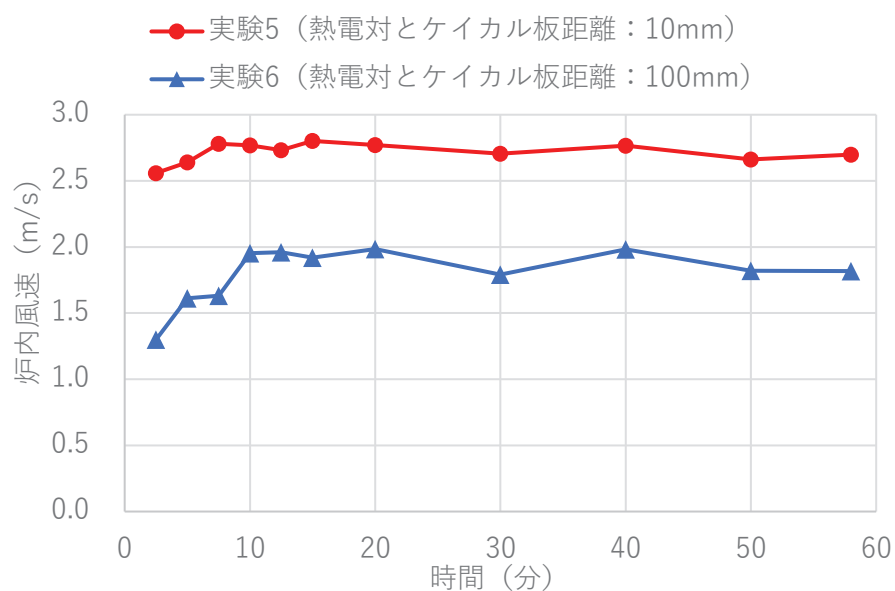


図 4.40 炉内風速の比較

(バーナ面からの距離：実験 5 は 110mm、実験 6 は 200mm)

(2) 対流熱流の推定

ケイカル板表面の単位面積当たりへの対流熱流 Q [W/m²] は、対流熱伝達率 h [W/(m² K)] と流体と固体の温度差 ΔT [K] を用いて、以下の式で計算できる。

$$Q = h \times \Delta T \quad (4.2)$$

ΔT は炉内温度とケイカル板表面温度の差である。 h は慣用値として炉内風速 v を用いて以下の式により求める。

$$h = 10 \times \sqrt{v} \quad (4.3)$$

炉内温度と炉内風速には、それぞれの値が最も大きかった、ケイカル板から 150mm 離れた測定位置での測定値を使用する。また、ケイカル板表面温度には、実験 1 と実験 3 で測定したケイカル板中心位置での測定値を使用する。

対流熱伝率及び対流熱流の計算結果をそれぞれ図 4.41、図 4.42 に示す。対流熱伝達率は、図 4.41 に示すように、時間によらずほぼ一定である。熱電対とケイカル板距離で比較すると、10mm の方が 100mm よりも全体的に対流熱伝達率は高い。対流熱伝達率は、熱電対とケイカル板との距離が 10mm では 16.5W/(m² K)、100mm の場合には 13.3W/(m² K) と見積もられる。

対流熱流は、図 4.42 に示すように、熱電対とケイカル板との距離が 10mm では、2.5 分値が 4.4 kW/m² と最も高く、その後は時間と共に低下し、30 分値は 1.9 kW/m² である。熱電対とケイカル板との距離が 100mm では、10mm の場合よりも全体的に対流熱流は小さく、変動幅も小さい。最大は 5 分値の 2.2 kW/m²、最小は 30 分値の 1.4 kW/m² である。

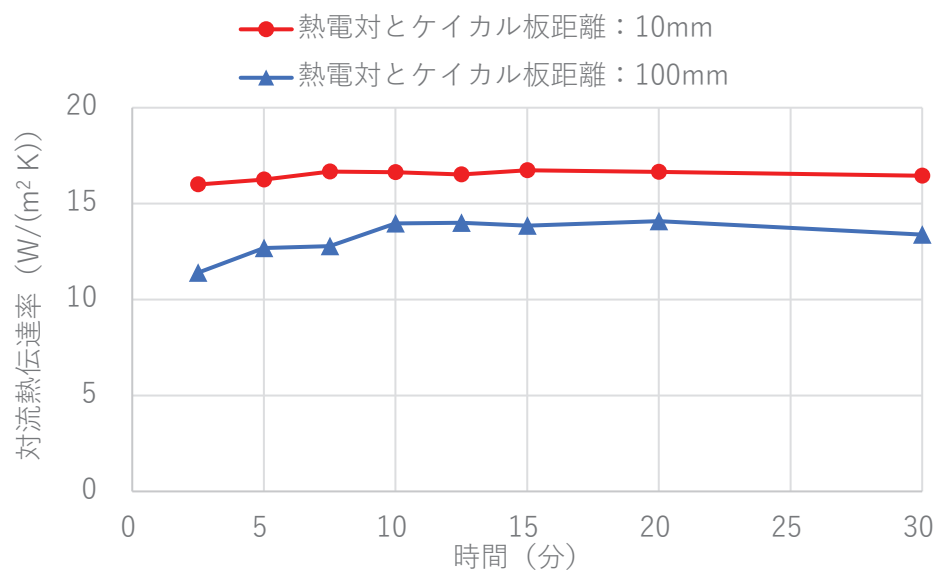


図 4.41 対流熱伝達率の計算値

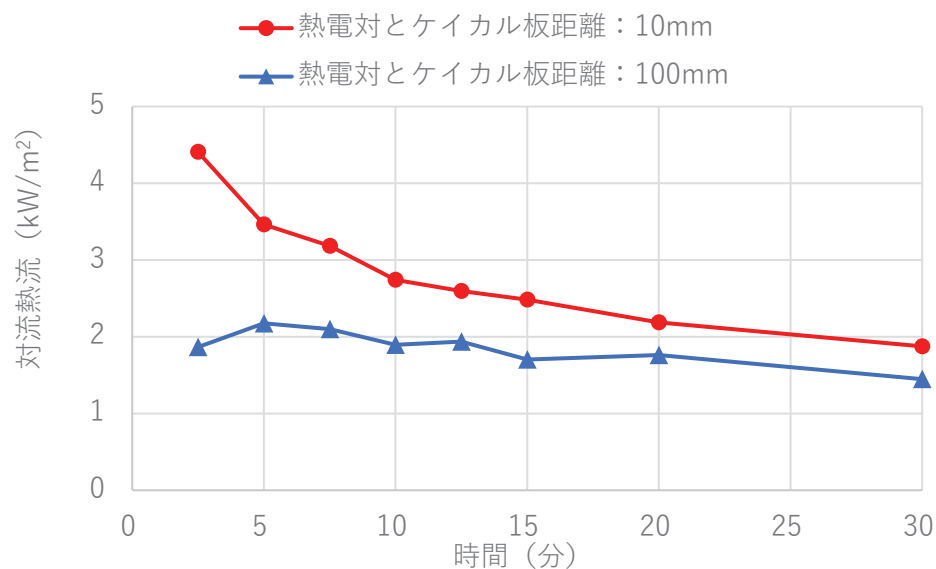


図 4.42 対流熱流の計算値

4. 5 結論

本章では告示の小型加熱炉の炉内温度分布を測定し、加熱曲線及び制御用熱電対と試験体保持面（ケイカル板）との距離の違いによる影響を比較した。また、炉内風速を測定し、制御用熱電対と試験体保持面との距離の違いによる影響を比較した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 炉内温度分布には、告示と ISO 834-1 の加熱曲線の違いによる影響は小さいが、制御用熱電対と試験体保持面との距離の違いによる影響は大きい。炉内のバーナ火炎の状況が異なるためである。
- 2) 試験体保持面付近の上下方向の温度分布は、測定した範囲（試験体保持面中央から 135mm 下方まで）では小さい。
- 3) 炉内温度分布は、時間と共に相似的に高温側にシフトし、水平方向の温度分布の傾向は変化しない。
- 4) 炉内の水平方向には温度分布があり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は、バーナ面からの距離が 200mm 付近まではバーナ火炎に覆われて高温であるが、250mm の位置からは大きく低下する。また、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合は、バーナ面からの距離が 50mm から 100mm の位置の温度が最も高く、バーナ面からの距離に従って温度は直線的に低下する。
- 5) 炉内風速は、加熱開始後 10 分以降はほぼ一定であり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は、バーナ面からの距離が 250mm では約 1.8m/s、110mm では約 2.8m/s である。また、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合は、バーナ面からの距離が 340mm では約 1.3m/s、200mm では約 2.0m/s であり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が近い方が風速は大きくなる。
- 6) 炉内風速分布は、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm と 100mm のいずれの条件も、バーナに近いほど（試験体保持面から遠ざかるほど）風速は大きくなる。
- 7) 炉内風速から対流熱伝達率を推算すると、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は $16.5\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、100mm の場合は $13.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と見積られる。

引用・参考文献

- 1) 平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」
- 2) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性に関する研究（第 2 報）
炉内温度分布、2023 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.195-196、2023.5
- 3) ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests - Elements of building construction Part 1 General requirements

第 5 章 数値解析による炉内温度と熱流の予測

5. 1 目的

第 4 章では、告示の小型加熱炉に ISO 834-1 の試験条件を取り入れた場合の炉内温度特性の違いを比較するため、実験的な検討を行った。しかし、実験的な手法では、例えば、試験結果に影響を与える可能性のある炉の材質等を変更して実験を行うことは試験炉の大幅な改造が必要であり、経済的にも時間的にも困難である。そのため、試験炉内の熱伝達をモデル化できれば有益である。

そこで本章では、耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達をモデル化することで、炉内の熱伝達メカニズムを解明し、加熱性状のメカニズムを定量的に調べることを目的とする。

5. 2 耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達のモデル化^{1,2)}

5. 2. 1 熱伝達モデルの概要

耐火電線用小型加熱炉の形状は図 5.1 に示すような直方体であり、炉内に炉内温度制御用熱電対を 1 本設置した構造である。建築構造用耐火炉の伝熱解析に提案された既往のモデル³⁾では、炉内温度は均一であると仮定しているが、小型加熱炉の炉内は、空間全体が均一なガスで満たされているわけではなく、4 章の 4. 3 節で示したように火炎はバーナ側にのみ存在する。そこで、本研究では、炉内を深さ方向に 2 分割し、バーナ面（面 2）を含む火炎で満たされた空間と、試験体面（面 1）を含む火炎を含まない炉内ガスで満たされた空間の二つの直方体に分けることにする。それぞれの直方体内の温度は均一と仮定する。炉壁は、炉内ガスに接する壁面を 5 面に、火炎に接する壁面を 5 面にそれぞれ分割する。本モデルでは、上記の炉壁、制御用熱電対、炉内ガス及び火炎を主たる構成部位とする。

炉内の熱伝達は図 5.2 に示すような、1) 炉壁表面間の放射及び反射、2) 炉内ガス又は火炎と炉壁間の放射及び対流熱伝達、3) 炉壁内の熱伝導から成る。炉内温度制御のためには制御用熱電対の熱収支が必要になるが、図 5.3 に示すように、4) 制御用熱電対と炉壁間の放射及び反射、5) 炉内ガス又は火炎と制御用熱電対間の放射及び対流熱伝達を考慮したモデルとする。このとき、制御用熱電対の形状に応じた熱収支を考慮することで、異なる形状の影響を解析に組み込むことができる。

第 4 章の実験では、告示の加熱条件を ISO 834-1 の試験条件に整合させるために、①加熱温度曲線、②制御用熱電対の種類、③制御用熱電対と試験体の水平距離の 3 種類のパラメータを扱った。本章でも、これらの条件をモデルに組み込むこととした。具体的には、加熱曲線は、告示に規定の JIS A 1304 標準加熱曲線 B と ISO 834-1 に規定の加熱曲線の双方で計算可能とし、制御用熱電対は、露出型熱電対、シース熱電対、プレート熱電対の 3 種類に対応し、制御用熱電対と試験体の水平距離は告示の 10mm の条件と ISO 834-1 の 100mm の条件を設定できるようにした。

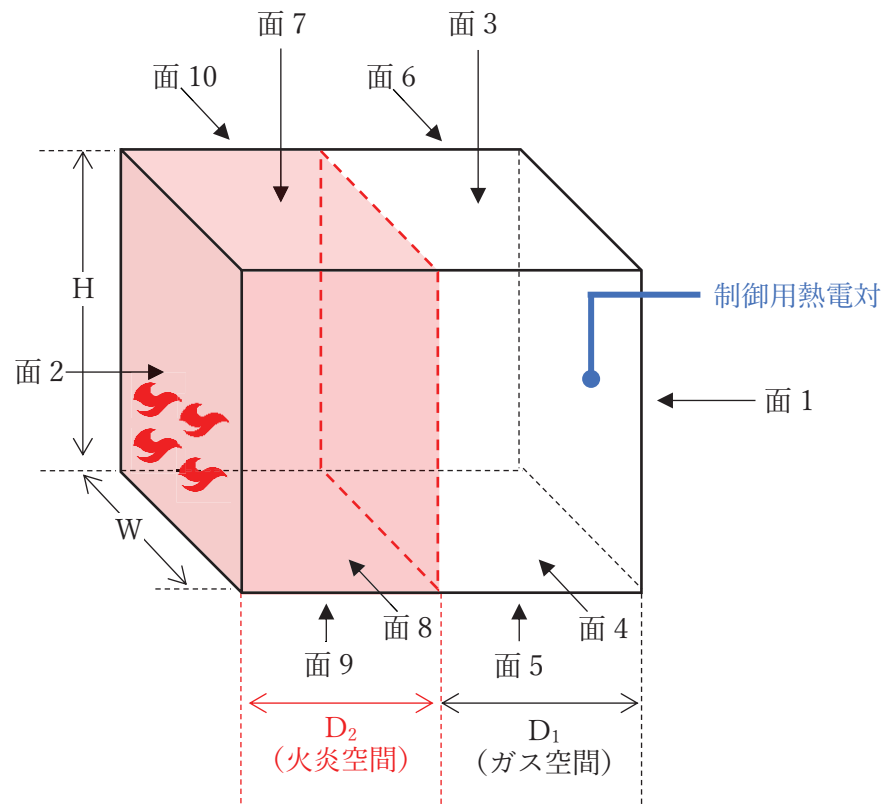


図 5.1 小型加熱炉内の寸法

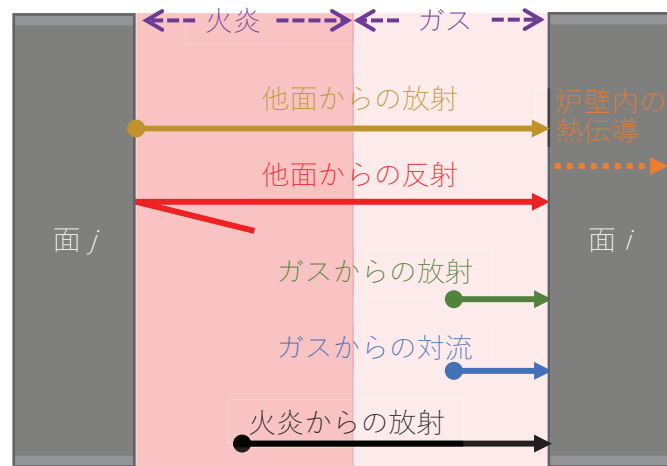


図 5.2 面 i への熱伝達

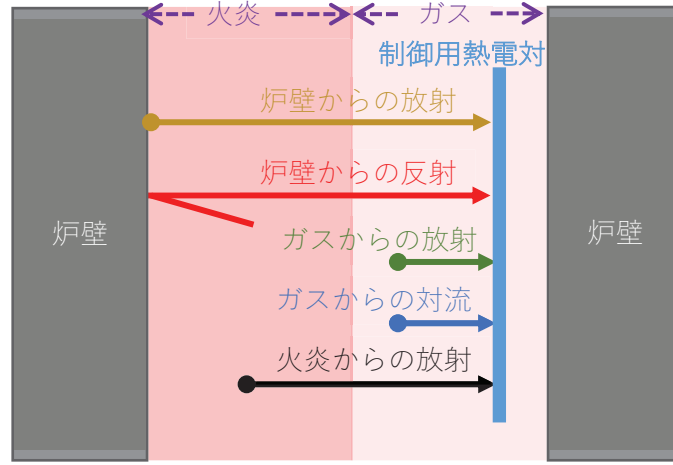


図 5.3 制御用熱電対への熱伝達

5. 2. 2 放射熱伝達

耐火電線用小型加熱炉内の放射熱伝達は、以下の近似によりモデル化した。

- 1) 図 5.1 に示すように壁面は 10 面から成る。
- 2) 各壁面の表面温度は、それぞれの炉壁面内で均一とする。
- 3) 炉内ガス及び火炎の温度は、それぞれの直方体空間で均一とする。
- 4) 炉内ガス及び火炎は灰色体と見なし、それぞれの吸収係数は温度によらず一定とする。
- 5) 炉内ガスと火炎の境界位置は変化しない。

5. 2. 2. 1 炉内ガスと火炎を考慮した放射熱流の計算

壁面 i に入射する放射熱流 $q_{inc,i}$ [W/m²] は、他の壁面 j ($j=1\sim10$, $j\neq i$) からの放射及び反射が炉内ガス及び火炎を通過して到達する分と、炉内ガス及び火炎からの放射の和である。

1) 炉内ガスに接する面が受熱面の場合

炉内ガスに接する面（面 1、3、4、5、6）が受熱面の場合には、他の壁面からの放射及び反射（右辺第 1 項）、炉内ガスからの放射（右辺第 2 項）、火炎からの放射が炉内ガスを通過して到達する放射（右辺第 3 項）の合計で入射熱流が表される。ただし、炉内ガスに接する面間の放射の場合は、火炎空間を通過しないので、火炎の透過率に相当する項 $(1 - \epsilon_f)$ を 1 とする。

$$S_i q_{inc,i} = \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^{10} (1 - \epsilon_{gas}) (1 - \epsilon_f) F_{i-j} S_j \{ (1 - \epsilon_j) q_{inc,j} + \epsilon_j \sigma T_j^4 \} + \epsilon_{gas} \sigma T_{gas}^4 S_i + (1 - \epsilon_{gas}) \epsilon_f \sigma T_f^4 F_{i-f} S_f \quad (5.1)$$

ここで、 ε_{gas} は炉内ガスの放射率[-]

ε_f は火炎の放射率[-]

F_{i-j} は壁面 j から壁面 i への形態係数[-]

S_j は壁面 j の面積[m²]

ε_j は壁面 j の放射率[-]

$q_{inc,j}$ は壁面 j に入射する放射熱流[W/m²]

σ はステファンボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8}$)[W/(m²K⁴)]

T_j は壁面 j の表面温度[K]

T_{gas} は炉内ガスの温度[K]

S_i は壁面 i の面積[m²]

T_f は火炎の温度[K]

F_{i-f} は火炎面から壁面 i への形態係数[-]

S_f は火炎面の面積[m²]

である。

2) 火炎に接する面が受熱面の場合

火炎に接する面（面 2、7、8、9、10）が受熱面の場合には、他の壁面からの放射及び反射（右辺第 1 項）、炉内ガスからの放射が火炎を通過して到達する放射（右辺第 2 項）、火炎からの放射（右辺第 3 項）の合計で入射熱流が表される。ただし、火炎に接する面間の放射の場合は、炉内ガス空間を通過しないので、ガスの透過率に相当する項($1 - \varepsilon_{gas}$)を 1 とする。

$$S_i q_{inc,i} = \sum_{j=1}^{10} (1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f) F_{i-j} S_j \{ (1 - \varepsilon_j) q_{inc,j} + \varepsilon_j \sigma T_j^4 \} + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_{gas} \sigma T_{gas}^4 F_{i-gas} S_{gas} + \varepsilon_f \sigma T_f^4 S_i \quad (5.2)$$

ここで、 F_{i-gas} は炉内ガス面から壁面 i への形態係数[-]

S_{gas} は炉内ガス面の面積[m²]

$q_{inc,1} \sim q_{inc,10}$ を連立方程式として解くため、 $q_{inc,1} \sim q_{inc,10}$ の項を左辺に移行すると、式(5.1)と式(5.2)はそれぞれ式(5.3)、式(5.4)で表され、各面に入射する熱流を未知数とする連立方程式となる。

① 炉内ガスに接する面（壁面 1、3、4、5、6）が受熱面の場合の式

$$S_i q_{inc,i} - \sum_{j=1}^{10} (1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_j) F_{i-j} S_j q_{inc,j} = \sum_{j=1}^{10} (1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f) F_{i-j} S_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 + \varepsilon_{gas} \sigma T_{gas}^4 S_i + (1 - \varepsilon_{gas}) \varepsilon_f \sigma T_f^4 F_{i-f} S_f \quad (5.3)$$

②火炎に接する面（壁面 2、7、8、9、10）が受熱面の場合の式

$$S_i q_{inc,i} - \sum_{j=1}^{10} (1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f)(1 - \varepsilon_j) F_{i-j} S_j q_{inc,j} = \sum_{j=1}^{10} (1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f) F_{i-j} S_j \varepsilon_j \sigma T_j^4 + (1 - \varepsilon_f) \varepsilon_{gas} \sigma T_{gas}^4 F_{i-gas} S_{gas} + \varepsilon_f \sigma T_f^4 S_i \quad (5.4)$$

この連立方程式は、係数として炉壁の表面温度 T_j 、炉内ガス温度 T_{gas} 及び火炎温度 T_f が与えられれば、各壁面に入射する放射熱流 $q_{inc,i}$ （ $i=1\sim 10$ ）を求めることができる。表面温度 T_j の計算方法は 5.2.4 項で、炉内ガス温度 T_{gas} は 5.2.5 項で、火炎温度 T_f は 5.2.7 項で後述する。 $q_{inc,i}$ が分かれば、壁面が放出する放射熱流 $q_{out,i}$ は、次式のように、壁面 i での反射（右辺第 1 項）と壁面 i からの放射（右辺第 2 項）の合計として、

$$q_{out,i} = (1 - \varepsilon_i) q_{inc,i} + \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (5.5)$$

で表され、壁面が吸収する正味の放射熱流 $q_{net,i}$ は、

$$q_{net,i} = q_{inc,i} - q_{out,i} \quad (5.6)$$

となる。

5. 2. 2. 2 ガスと火炎の放射率

式(5.3)及び式(5.4)で使用するガスの放射率 ε_{gas} は、ガスの吸収係数 k_{gas} とガスの平均光路長 L_{gas} を用いて、下記により求める。

$$\varepsilon_{gas} = 1 - \exp(-k_{gas} L_{gas}) \quad (5.7)$$

同様に火炎の放射率 ε_f は、火炎の吸収係数 k_f と火炎の平均光路長 L_f を用いて、下記により求める。

$$\varepsilon_f = 1 - \exp(-k_f L_f) \quad (5.8)$$

ガスの吸収係数と火炎の吸収係数はそれぞれ文献値を用いる。ガスの平均光路長 L_{gas} は、

次式⁴⁾により求める。

$$L_{gas} = 3.6V_{gas}/A_{gas} \quad (5.9)$$

ここで、 V_{gas} ガス塊の体積 ($V_{gas} = W \times H \times D_1$)

A_{gas} ガス塊を含む直方体の表面積

同様に火炎の平均光路長 L_f は、次式により求める。

$$L_f = 3.6V_f/A_f \quad (5.10)$$

ここで、 V_f 火炎を含む直方体の体積 ($V_f = W \times H \times D_2$)

A_f 火炎を含む直方体の表面積

なお、ガス塊の透過率 τ_{gas} は、ガス塊の放射率 ε_{gas} を用いて、

$$\tau_{gas} = 1 - \varepsilon_{gas} = \exp(-k_{gas}L_{gas}) \quad (5.11)$$

同様に火炎の透過率 τ_f は、火炎の放射率 ε_f を用いて、

$$\tau_f = 1 - \varepsilon_f = \exp(-k_fL_f) \quad (5.12)$$

と表すことができる。

5. 2. 2. 3 形態係数 F_{i-j} 、 F_{i-f} 、 F_{i-gas}

式(5.3)及び式(5.4)で放射熱流を計算するために、壁面間の形態係数 F_{i-j} 、火炎面から壁面への形態係数 F_{i-f} 、炉内ガス面から壁面への形態係数 F_{i-gas} を計算する必要がある。形態係数は、ある面から放出されたエネルギーのうち、ある受熱面に入射する割合を示す。添え字は、後ろの添え字の面から前の添え字の面への放射であり、 F_{i-j} は面 j からの放射のうち、面 i へ入射する割合を示す。

① 壁面間の形態係数 F_{i-j}

炉の形状は直方体であるので、壁面間の位置関係は平行面または垂直面のいずれかである。平行面には、図 5.1 の面 3 と面 5 のような向かい合う位置関係と面 3 と面 9 のような向かい合わない位置関係がある。垂直面には、面 1 と面 3 のような隣接する位置関係と面 1 と面 7 や面 3 と面 8 のような隣接しない位置関係がある。

図 5.4 a) に示すような向かい合う同面積の平行面の形態係数は、 $X = \frac{a}{c}$ 、 $Y = \frac{b}{c}$ とすると、

$$F_{2-1} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[\frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + X\sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} + Y\sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (5.13)$$

により計算できる⁴⁾。また、図 5.4 b) のような隣接する垂直面の形態係数は、 $H = \frac{h}{l}$ 、 $W = \frac{w}{l}$ とすると、

$$F_{2-1} = \frac{1}{\pi W} \left(W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - \sqrt{H^2 + W^2} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{H^2 + W^2}} \right) + \frac{1}{4} \ln \left\{ \left[\frac{(1+W^2)(1+H^2)}{(1+W^2+H^2)} \right] \left[\frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+W^2)(W^2+H^2)} \right]^{W^2} \left[\frac{H^2(1+H^2+W^2)}{(1+H^2)(H^2+W^2)} \right]^{H^2} \right\} \quad (5.14)$$

により計算できる。

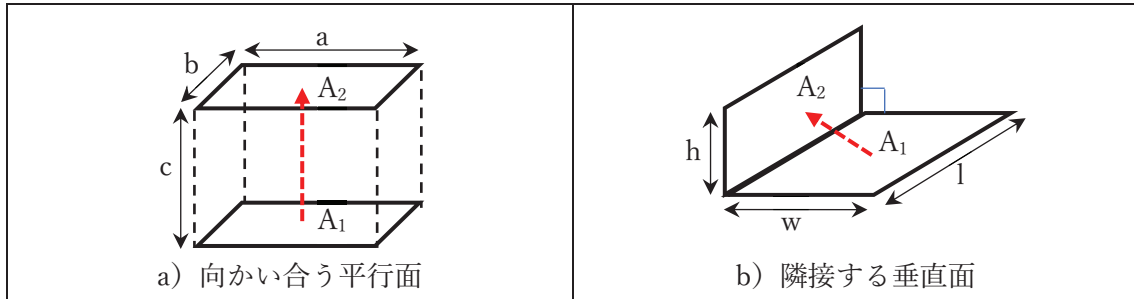


図 5.4 各面の位置関係

図 5.5 a) のような向かい合わない平行面は式(5.13)では直接計算できないが、例えば図 5.1 の面 9 から面 3 への形態係数 F_{3-9} は、形態係数の特性から、以下のように重ね合わせで求めることができる。

面 5 と面 9 から、向かい合う面 3 と面 7 への放射は、面積を S とすると

$$(S_5 + S_9)F_{(3+7)-(5+9)} = S_5(F_{3-5} + F_{7-5}) + S_9(F_{3-9} + F_{7-9}) \quad (5.15)$$

と表せる。右辺第 1 項は面 5 から面 3 及び面 7 への放射、第 2 項は面 9 から面 3 及び面 7 への放射である。ここで、相反法則により $S_5F_{7-5} = S_9F_{3-9}$ であるから、

$$S_5 F_{7-5} = S_9 F_{3-9} = \frac{1}{2} \{ (S_5 + S_9) F_{(3+7)-(5+9)} - S_5 F_{3-5} - S_9 F_{7-9} \} \quad (5.16)$$

となり、右辺の各形態係数を式(5.13)で計算すれば、 F_{3-9} を求めることができる。

図 5.5 b) のような隣接しない垂直面は式(5.14)では直接計算できないが、例えば図 5.1 の面 1 から面 7 への放射 F_{7-1} は、形態係数の特性から、計算可能な F_{3-1} と $F_{(3+7)-1}$ を用いて

$$F_{7-1} = F_{(3+7)-1} - F_{3-1} \quad (5.17)$$

と計算できる。

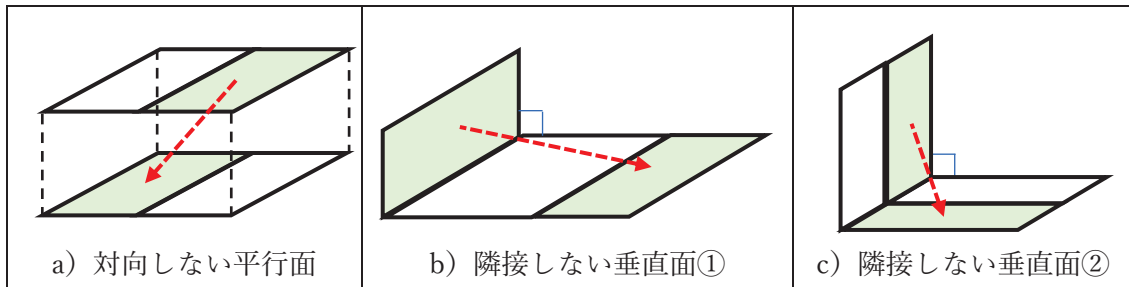


図 5.5 面の位置関係

また、図 5.5 c) のような隣接しない垂直面は、直接計算できないが、例えば図 5.1 の面 8 から面 3 への放射 F_{3-8} は、形態係数の特性から、以下のように求めることができる。

面 4 と面 8 から、隣接する垂直面の面 3 と面 7 への放射は、面 i の面積を S_i とすると

$$(S_4 + S_8) F_{(3+7)-(4+8)} = S_4 (F_{3-4} + F_{7-4}) + S_8 (F_{3-8} + F_{7-8}) \quad (5.18)$$

と表せる。右辺第 1 項は面 4 から面 3 及び面 7 への放射、第 2 項は面 8 から面 3 及び面 7 への放射である。ここで、相反法則により $S_4 F_{7-4} = S_8 F_{3-8}$ であるから、

$$S_4 F_{7-4} = S_8 F_{3-8} = \frac{1}{2} \{ (S_4 + S_8) F_{(3+7)-(4+8)} - S_4 F_{3-4} - S_8 F_{7-8} \} \quad (5.19)$$

となり、右辺の各形態係数を式(5.14)で計算すれば、 F_{3-8} を求めることができる⁵⁾。

②火炎面から壁面への形態係数 F_{i-f}

火炎塊とガス塊の火炎側の境界面を火炎面と定義する。火炎面から壁面への形態係数 F_{1-f} 、 F_{3-f} 、 F_{4-f} 、 F_{5-f} 、 F_{6-f} は、いずれも向かい合う平行面または隣接する垂直面として、式(5.13)及び式(5.14)を用いれば計算できる。

③ 炉内ガス面から壁面への形態係数 F_{i-gas}

火炎塊とガス塊の炉内ガス側の境界面を炉内ガス面と定義する。炉内ガス面から壁面への形態係数 F_{2-gas} 、 F_{7-gas} 、 F_{8-gas} 、 F_{9-gas} 、 F_{10-gas} は、いずれも対向面または隣接する垂直面として、式(5.13)及び式(5.14)を用いれば計算できる。

5. 2. 3 対流熱伝達

5. 2. 3. 1 対流熱流

図 5.6 に示すように、壁面 i に吸収される対流熱流 $q_{cnv,i}$ [W/m²] は、壁面 i の温度と壁面 i に接する炉内ガス又は火炎の温度との差と対流熱伝達率 h_i [W/(m²·K)] との積で求められる。

・ 壁面 i が炉内ガスに接する場合

$$q_{cnv,i} = h_i(T_{gas} - T_i) \quad (5.20)$$

・ 壁面 i が火炎に接する場合

$$q_{cnv,i} = h_i(T_f - T_i) \quad (5.21)$$

同様に、炉内ガス中に置かれる制御用熱電対の表面に吸収される対流熱流 $q_{cnv,tc}$ [W/m²] は、対流熱伝達率 h_{tc} [W/(m²·K)]、炉内ガス温度、制御用熱電対温度 T_{tc} [K] を用いて求められる。

$$q_{cnv,tc} = h_{tc}(T_{gas} - T_{tc}) \quad (5.22)$$

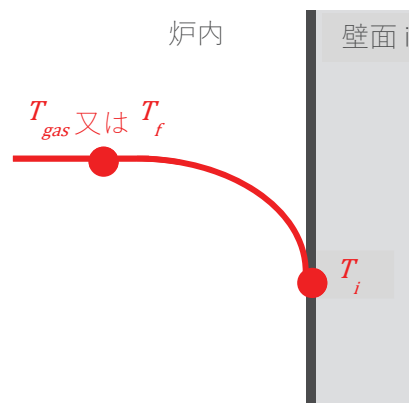


図 5.6 炉壁表面の対流熱伝達の模式図

5. 2. 3. 2 対流熱伝達率

(1) 壁面での対流熱伝達率の計算方法

壁面の対流熱伝達率は、風速の関数として算出する。炉内は強制対流であり、炉壁に沿って乱流で流れているとすると、壁面の平均ヌセルト数 Nu_i は、プラントル数 Pr とレイノルズ数 Re_i を用いて、

$$Nu_i = 0.037Pr^{1/3}Re_i^{4/5} \quad (5.23)$$

で与えられる⁶⁾。このときのレイノルズ数は炉の奥行き D [m]を代表長さとする、

$$Re_i = \frac{U_i D}{\nu} \quad (5.24)$$

で表される。ここで、 U_i は炉壁に沿う流れの代表速度[m/s]、 ν は空気の動粘性係数[m²/s]である。対流熱伝達率 h_i は、式(5.23)の平均ヌセルト数と式(5.24)のレイノルズ数の定義を用いて

$$h_i = \frac{\lambda}{D} Nu_i \quad (5.25)$$

と表される。ここで、 λ は空気の熱伝導率[W/m・K]である。

(2) 熱電対表面での対流熱伝達率の計算

①露出型熱電対とシース熱電対

露出型熱電対とシース熱電対の対流熱伝達率は、強制対流の気流中におかれた円柱とし

で計算する。熱電対表面の平均ヌセルト数 Nu_{tc} は、

$$Nu_{tc} = c_1 Re_{tc}^n Pr^{0.37} (Pr/Pr_{tc})^{0.25} \quad (5.26)$$

で与えられる³⁾。ここで、レイノルズ数が40～1,000の範囲では、 c_1 は0.51、 n は0.5である。レイノルズ数は、

$$Re_{tc} = \frac{U_{tc} d_{tc}}{\nu} \quad (5.27)$$

である。ここで、 U_{tc} は熱電対近傍の代表風速[m/s]、 d_{tc} は露出型熱電対又はシース熱電対の直径[m]である。 U_{tc} は、4章の4.3節の測定値を用いる。熱電対表面での熱伝達率 h_{tc} は、式(5.26)のヌセルト数を用いて

$$h_{tc} = \frac{\lambda}{d_{tc}} Nu_{tc} \quad (5.28)$$

である。

②プレート熱電対

プレート熱電対の対流熱伝達率は、強制対流の気流に直交する平板として計算する。気流に対して前面（バーナ面側）と背面（試験体側）の平均ヌセルト数は、それぞれプレート表面のレイノルズ数 Re_{pl} を用いて次式で与えられる⁴⁾。

・バーナ面側（加熱面側）の平均ヌセルト数：

$$Nu_{pl} = 0.60 \times Re_{pl}^{0.5} \quad (5.29)$$

・試験体側（非加熱面側）の平均ヌセルト数：

$$Nu_{pl} = 0.166 \times Re_{pl}^{2/3} \quad (5.30)$$

また、レイノルズ数は、

$$Re_{pl} = \frac{U_{pl} \times d_{pl}}{\nu} \quad (d_{pl}=0.1\text{m：プレートの長さ}) \quad (5.31)$$

として求める。ここで、代表風速 U_{pl} はプレート熱電対近傍の代表風速[m/s]であり、4章の4.3節の風速の測定値を用いて推定する。プレート表面での対流熱伝達率 h_{pl} は、式(5.29)又は式(5.30)のヌセルト数を用いて

$$h_{pl} = \frac{\lambda}{d_{pl}} Nu_{tc} \quad (5.32)$$

である。

5.2.4 炉壁内の熱伝導

5.2.4.1 熱伝導方程式

図 5.7 に炉壁の熱収支に関する模式図を示す。5.2.3 項で計算する対流熱伝達率と 5.2.5 項で計算するガス温度を使って各炉壁表面に吸収される対流熱流を計算し、5.2.2 項で計算する放射熱流と併せて壁体に吸収される熱流とする。これを境界条件として壁体内の熱伝導方程式を用いて壁体内部温度分布を計算する。

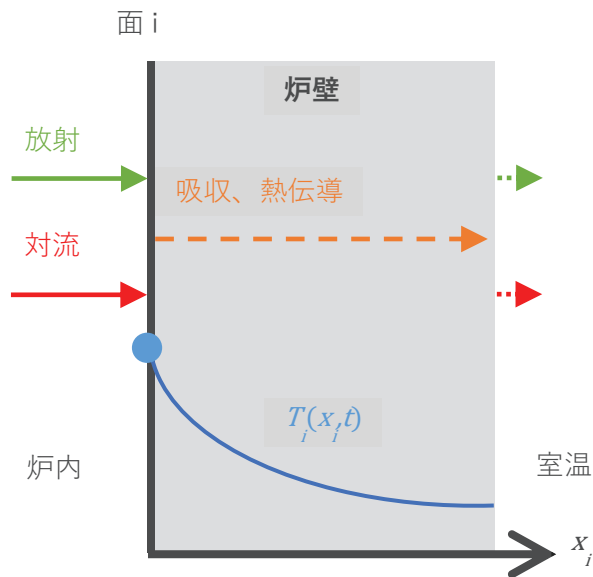


図 5.7 炉壁の熱収支

図 5.1 のように 10 面に分割した各炉壁の熱伝導は、壁面ごとに一次元熱伝導方程式により、以下のように表される。

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i(x_i, t)}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i(x_i, t)}{\partial x_i^2} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (5.33)$$

ここで、 ρ_i は壁面 i の密度[kg/m³]

c_i は壁面 i の比熱[J/kg・K]

λ_i は壁面 i の熱伝導率[W/m・K]

x_i は壁面 i の炉内表面から深さ方向に垂直な距離[m]

境界条件は、壁面 i の炉内表面が吸収する放射熱流 $q_{net,i}$ と対流熱流 $q_{cnv,i}$ を用いて、以下の
ように表される。

$$q_{net,i} + q_{cnv,i} = -\lambda \frac{\partial T_i(x_i, t)}{\partial x_i} \Big|_{x_i=0} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (5.34)$$

5. 2. 4. 2 熱伝導方程式の計算方法

式(5.33)の熱伝導方程式は、解析的に計算することが困難なので、コントロールボリューム法により微分方程式を離散化する。図 5.8 の模式図で示すように炉壁内を厚さ方向に 6 分割し、壁体内温度分布を計算する。

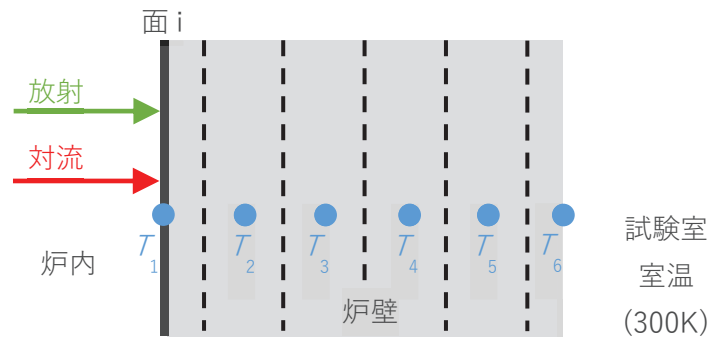


図 5.8 炉壁内および境界の格子点の模式図

一次元の格子の各接点の位置関係を図 5.9 とすると、離散化方程式は以下のように表せる⁷⁾。

$$a_n T_n = b_n T_{n+1} + c_n T_{n-1} + d_n \quad (5.35)$$

$T_2 \sim T_5$ ($n=2 \sim 5$) のコントロールボリュームでは、それぞれ、 $a_n = \frac{k_{n+1}}{\Delta x} + \frac{k_{n-1}}{\Delta x} + \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t}$ 、

$b_n = \frac{k_{n+1}}{\Delta x}$ 、 $c_n = \frac{k_{n-1}}{\Delta x}$ 、 $d_n = \frac{\rho c \Delta x}{\Delta t} T_n^0$ である。

ここで、 k ：熱伝導率

Δx ：炉壁の分割幅

ρ ：炉壁の密度

c ：炉壁の比熱

Δt ：時間刻み

T^1 ：節点の温度

T^0 ：節点の前時刻の温度

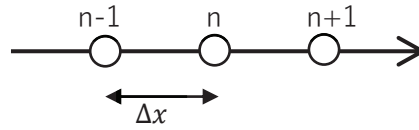


図 5.9 各節点の位置関係

加熱側境界 (T_1) では、図 5.10 の模式図で示すように、半コントロールボリュームとなる。加熱側の熱流は $q_{net,i} + q_{cnv,i}$ で与えられ、内部への熱伝導は $\frac{k}{\Delta x}$ なので、次式が成り立つ。

$$\frac{\rho c \Delta x}{2} \left(\frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t} \right) = q_{net,i} + h_i (T_{gas\ or\ f} - T_1) - \frac{k}{\Delta x} (T_1 - T_2) \quad (5.36)$$

整理すると

$$\left(\frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} + h_i + \frac{k}{\Delta x} \right) T_1 = \frac{k}{\Delta x} T_2 + q_{net,i} + h_i T_{gas\ or\ f} + \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} T_1^0 \quad (5.37)$$

すなわち、式(5.35)の形にすれば

$$a_1 = \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} + h_i + \frac{k}{\Delta x}$$

$$b_1 = \frac{k}{\Delta x}$$

$$c_1 = 0$$

$$d_1 = q_{net,i} + h_i T_{gas\ or\ f} + \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} T_1^0$$

である。

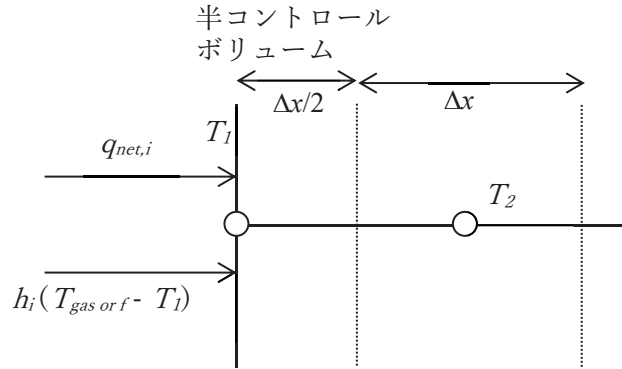


図 5.10 加熱側境界の模式図

非加熱側である室内側境界（ T_6 ）は加熱側境界（ T_1 ）と同様に、図 5.11 の模式図で示すように、半コントロールボリュームとなる。室内側の熱流は $-q_{net,i,rear} - q_{cnv,i,rear}$ で与えられ、内部への熱伝導は $\frac{k}{\Delta x}$ なので、次式が成り立つ。

$$\frac{\rho c \Delta x}{2} \left(\frac{T_6 - T_6^0}{\Delta t} \right) = \frac{k}{\Delta x} (T_5 - T_6) - q_{net,i,rear} - q_{cnv,i,rear} \quad (5.38)$$

ただし、 $q_{net,i,rear} = \varepsilon_{rear} \sigma (T_6^4 - T_{air}^4)$ 、 $q_{cnv,i,rear} = h_{i,rear} (T_6 - T_{air})$ である。

ここで、 T_{air} ：室温[K]

ε_{rear} ：炉体表面の放射率

$h_{i,rear}$ ：炉体表面の熱伝達率

整理すると

$$\left(\frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} + h_{i,rear} + \frac{k}{\Delta x} \right) T_6 = \frac{k}{\Delta x} T_5 - q_{net,i,rear} + h_{i,rear} T_{air} + \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} T_6^0 \quad (5.39)$$

すなわち、式(5.3.5)の形にすれば

$$a_6 = \frac{\rho c \Delta x}{2 \Delta t} + h_{i,rear} + \frac{k}{\Delta x}$$

$$b_6 = 0$$

$$c_6 = \frac{k}{\Delta x}$$

$$d_6 = -q_{net,i,rear} + h_{i,rear}T_{air} + \frac{\rho c \Delta x}{2\Delta t} T_6^0$$

である。

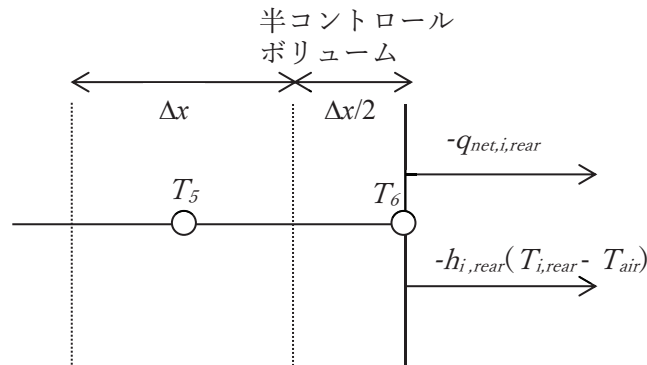


図 5.11 室内側境界の模式図

5. 2. 5 熱電対の熱収支及び炉内ガス温度

消防庁告示では、炉内温度制御用熱電対の仕様については、K 熱電対を用いることのみを規定しており、応答性に影響を与える熱電対の太さや種類を規定していない。そのため、耐火電線の認定試験では、応答性に優れた露出型熱電対（金属シース外径 6.4mm、素線径 1mm）が慣例的に用いられている。一方、国内の建築構造の耐火試験では耐久性に優れたシース熱電対（金属シース外径 3.2mm）が使用され、国際規格の ISO 834-1 では再現性に優れたプレート熱電対（シース熱電対を金属板とセラミックボードで挟んだ構造）が規定されている。本研究では、これら 3 種類の熱電対の特性を比較できるよう計算に組み込むことにする。

5. 2. 5. 1 露出型熱電対

露出型熱電対は、図 5.12 に示すように、測温接点部の素線が外気に直接さらされる。そのため、露出型熱電対の熱収支式は、直接熱に晒される素線部のみの熱収支を考慮することとすれば、次式で表される。

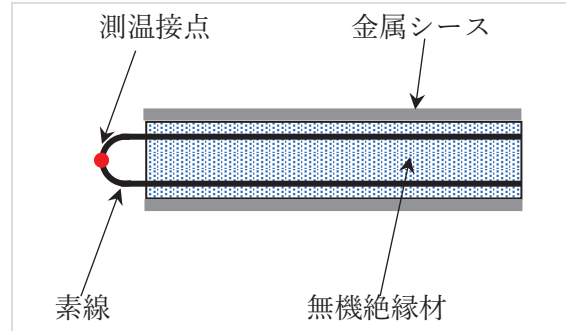


図 5.12 露出型熱電対の模式図

$$\left(\frac{\pi d_{tc}^2}{4}\right) \rho_{tc} c_{tc} \frac{\partial T_{tc}}{\partial t} = \{\epsilon_{tc} q_{inc,tc} - \epsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{tc}(T_{gas} - T_{tc})\} \pi d_{tc} \quad (5.40)$$

左辺は熱電対に蓄積される熱量である。右辺中括弧内の第 1 項は熱電対が吸収する放射熱流、第 2 項は熱電対が射出する放射熱流、第 3 項は熱電対が吸収する対流熱流を表している。

制御用熱電対温度 T_{tc} [K]を、加熱温度曲線に一致するように設定し、上記の式が満たされるような炉内ガス温度 T_{gas} [K]を算出するため、 T_{gas} で整理すると

$$T_{gas} = \left\{ \frac{1}{4} d_{tc} \rho_{tc} c_{tc} \left(\frac{T_{tc} - T_{tc}^{old}}{\Delta t} \right) - \epsilon_{tc} q_{inc,tc} + \epsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{tc} T_{tc} \right\} / h_{tc} \quad (5.41)$$

と表せる。

ここで、 ϵ_{tc} ：熱電対の素線の放射率[－]

$q_{inc,tc}$ ：熱電対の素線に入射する放射熱流[W/m²]

d_{tc} ：熱電対の素線の外径[m]

ρ_{tc} ：熱電対の素線の密度[kg/m³]

c_{tc} ：熱電対の素線の比熱[J/kg・K]

Δt ：時間刻み[s]

T_{tc} ：熱電対の温度[K]

T_{tc}^{old} ： Δt 前の熱電対の温度[K]

露出型熱電対への放射熱流は、図 5.13 のように床面から天井面までの長さを持った円柱状の露出型熱電対の素線へ入射する熱流として計算する。素線の表面へ入射する放射熱流 $q_{inc,tc}$ は、炉内ガスに接する面（面 1、3、4、5、6）及び火炎に接する面（面 2、7、8、9、

10) からの射出、炉内ガスからの射出、火炎からの射出の和であり、以下の式で計算できる。

$$S_{tc}q_{inc,tc} = \sum_{i=1}^{10}(1 - \varepsilon_{gas})(1 - \varepsilon_f)F_{tc-i}S_iq_{out,i} + \varepsilon_{gas}\sigma T_{gas}^4 S_{tc} + (1 - \varepsilon_{gas})\varepsilon_f\sigma T_f^4 F_{tc-f}S_f \quad (5.42)$$

ただし、ガスに接する面からの放射の場合は $(1 - \varepsilon_f) = 1$ とする。

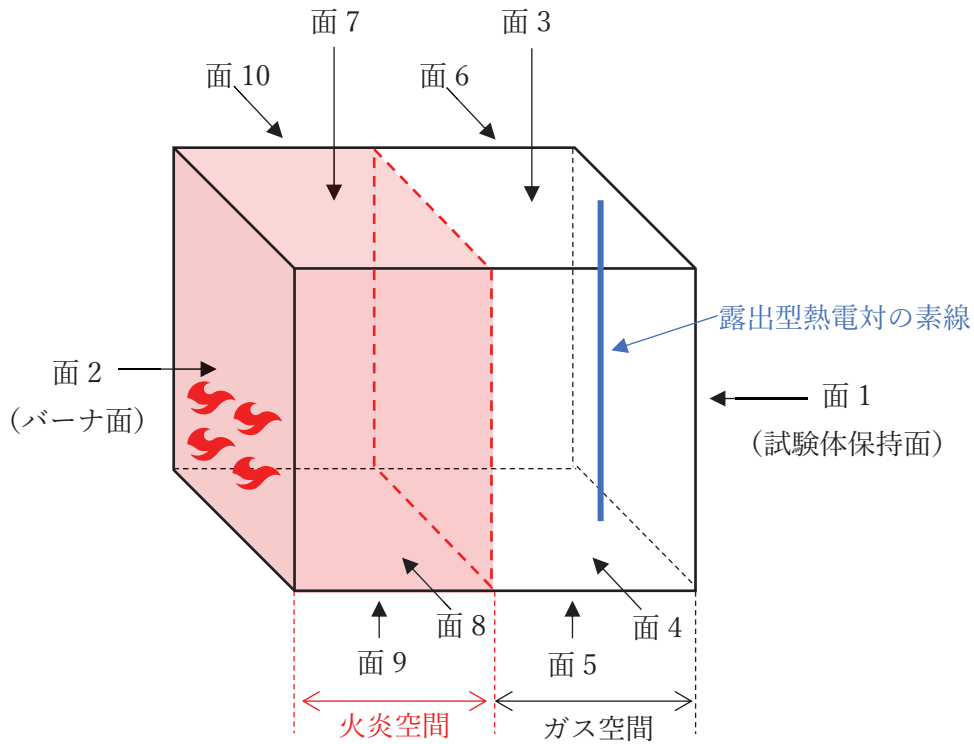


図 5.13 露出型熱電対と炉壁の位置関係

5. 2. 5. 2 シース熱電対

シース熱電対は、図 5.14 に示すように金属シース、素線、無機絶縁物（酸化マグネシウムが主成分）から構成されている。それぞれの寸法は図 5.15 の通りとする。これらを考慮すると、シース熱電対の単位長さあたりの熱収支は以下の式で表される。ただし、シース熱電対の金属シースは熱伝導率が大きく、かつ薄いので、熱電対内の温度分布は無視した。

$$\left[\frac{\pi}{4} \{ d_{tc}^2 - (d_{tc} - d_s)^2 \} \rho_{st} c_{st} + 2 \times \frac{\pi}{4} d_{tc}^2 \rho_{st} c_{st} + \frac{\pi}{4} \{ (d_{tc} - d_s)^2 - 2 \times d_{tc}^2 \} \rho_{Mgo} c_{Mgo} \right] \frac{\partial T_{tc}}{\partial t} = \{ \varepsilon_{tc} q_{inc,tc} - \varepsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{tc} (T_{gas} - T_{tc}) \} \pi d_{tc} \quad (5.43)$$

制御用熱電対温度 T_{tc} [K]を、加熱温度曲線に一致するように設定し、上記の式が満たされるような炉内ガス温度 T_{gas} [K]を算出するため、 T_{gas} について整理すると

$$T_{gas} = \left[\frac{1}{4d_{tc}} \left[\{d_{tc}^2 - (d_{tc} - d_s)^2\} \rho_{st} c_{st} + 2d_\ell^2 \rho_{st} c_{st} + \{(d_{tc} - d_s)^2 - 2 \times d_\ell^2\} \rho_{Mgo} c_{Mgo} \right] \left(\frac{T_{tc} - T_{tc}^{old}}{\Delta t} \right) - \varepsilon_{tc} q_{inc,tc} + \varepsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{tc} T_{tc} \right] / h_{tc} \quad (5.44)$$

ここで、 ε_{tc} ：熱電対の金属シースの放射率[－]

d_{tc} ：シース熱電対の金属シースの外径[m]

d_s ：シース熱電対の金属シースの厚さ[m]

d_ℓ ：熱電対の素線の外径[m]

ρ_{st} ：保護管及び素線の密度[kg/m³]

ρ_{Mgo} ：絶縁物の密度[kg/m³]

c_{st} ：保護管及び素線の比熱[J/kg·K]

c_{Mgo} ：絶縁物の比熱[J/kg·K]

また、シース熱電対の表面へ入射する放射熱流 $q_{inc,tc}$ は、図 5.13 の露出型熱電対の素線をシース熱電対の金属シースと置き換えれば、露出型熱電対と同様に式(5.42)で計算できる。

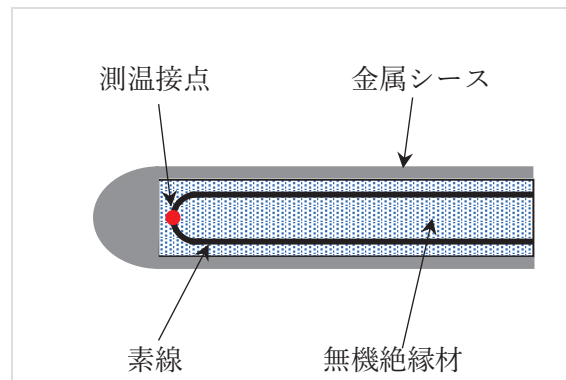


図 5.14 シース熱電対の模式図

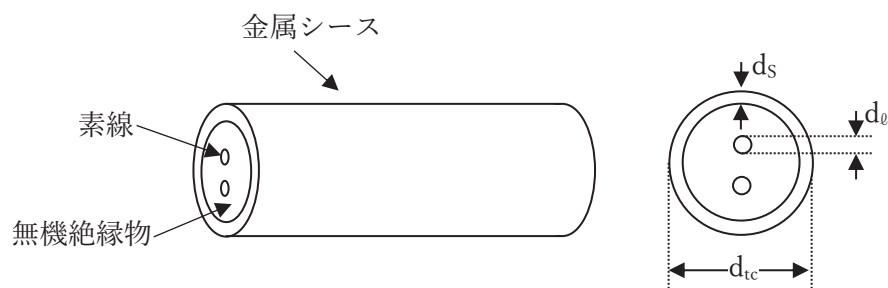


図 5.15 シース熱電対の構造の模式図

5. 2. 5. 3 プレート熱電対

プレート熱電対は、図 5.16 に示すように、金属シース外径 1mm のシース熱電対を、0.7mm 厚のニッケル合金板（インコネル板）と 10mm 厚の無機断熱材（セラミックボード）で挟んだ構造であり、ニッケル合金板をバーナ側、無機断熱材面を試験体側に向けて使用する。プレート熱電対の計算では、プレート熱電対内の板厚方向の熱伝導を考慮し、バーナに面したプレート面が吸収する放射熱流及び対流熱流がセラミックボード内で伝導により移動するものとする。

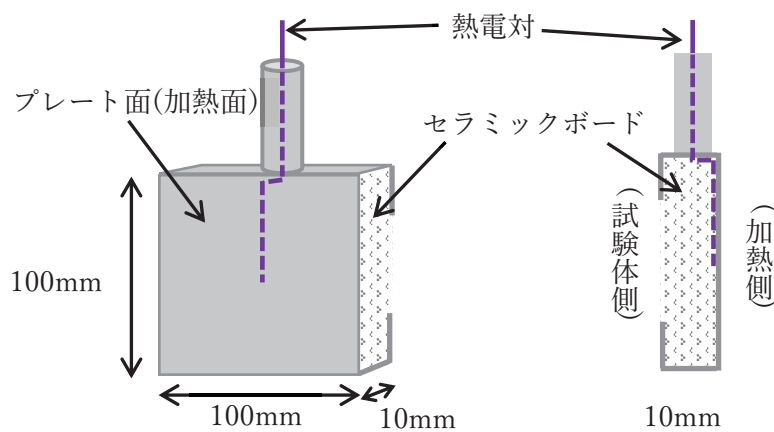


図 5.16 プレート熱電対の模式図

プレート熱電対のプレート面（加熱面）の熱収支は、プレート面での放射、対流及び熱伝導を考慮すると次式で表される。

$$\varepsilon_{tc} q_{inc,tc} - \varepsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{pl,front} (T_{gas} - T_{tc}) + \frac{k}{\Delta x_c} (T_1^{old} - T_{tc}^{old}) = \left(\rho_{pl} c_{pl} \Delta x_{pl} + \rho_c c_c \frac{\Delta x_c}{2} \right) \frac{T_{tc} - T_{tc}^{old}}{\Delta t} \quad (5.45)$$

ここで、
 ρ_{pl} : プレート（ニッケル合金）の密度[kg/m³]
 c_{pl} : プレート（ニッケル合金）の比熱[J/kg・K]
 Δx_{pl} : プレートの厚さ (=0.7×10⁻³m)
 ρ_c : セラミックボードの密度（規定により 280±30kg/m³）
 c_c : セラミックボードの比熱[J/(kg・K)]
 Δx_c : セラミックボードの分割幅 (=2×10⁻³m)
 T_{tc} : 熱電対温度[K]
 Δt : 時間刻み[s]
 $q_{inc,tc}$: プレート熱電対の加熱側に入射する熱流束[W/m²]
 $h_{pl,front}$: バーナ側プレート面の対流熱伝達率[W/(m²・K)]
 T_{gas} : 炉内ガス温度[K]
 T_1 : 節点 1 の温度[K]

ここで、肩字 old を付した値は前時刻の値とすると既知となる。制御用熱電対温度 T_{tc} [K] を、加熱温度曲線に一致するように設定し、上記の式が満たされるような炉内ガス温度 T_{gas} [K] を算出するため、 T_{gas} について整理すると

$$T_{gas} = \left\{ \left(\rho_{pl} c_{pl} \Delta x_{pl} + \rho_c c_c \frac{\Delta x_c}{2} \right) \frac{T_{tc} - T_{tc}^{old}}{\Delta t} - \varepsilon_{tc} q_{inc,tc} + \varepsilon_{tc} \sigma T_{tc}^4 + h_{pl,front} T_{tc} - \frac{k}{\Delta x_c} (T_1^{old} - T_{tc}^{old}) \right\} / h_{pl,front} \quad (5.46)$$

となる。

プレート熱電対に入射する熱流を計算するため、炉内空間を図 5.17 のように分割して考える。炉内は、計算の都合上、火炎に接する壁面を面 j ($j=1\sim5$) とし、プレート熱電対のプレート面から見える空間の内、炉内ガスに接する壁面を面 j' ($j'=1\sim4$) とし、プレート裏面から見える空間の炉内ガスに接する壁面を面 j'' ($j''=1\sim5$) とする。

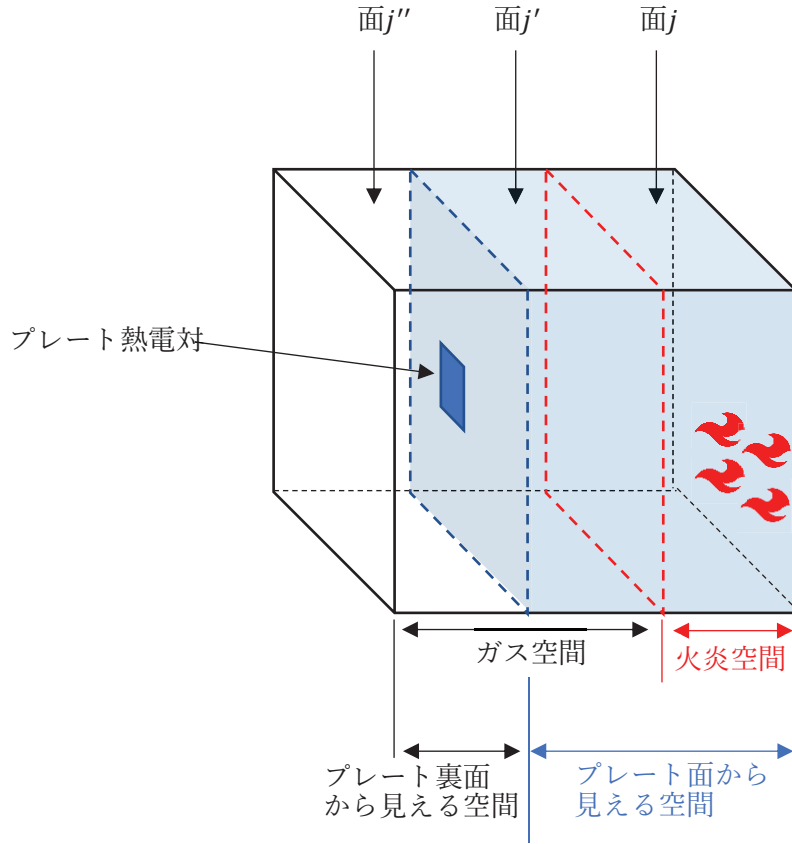


図 5.17 プレート熱電対と炉壁の位置関係

このように炉内壁面を分割することで、プレート熱電対の加熱側に入射する熱流束 $q_{inc,tc}$ [W/m²] は次式で求められる。

$$S_{pl} q_{inc,tc} = \sum_{j'} F_{pl-j'} S_{j'} \left\{ (1 - \epsilon_{j'}) q_{inc,j'} + \epsilon_{j'} \sigma T_{j'}^4 \right\} (1 - \epsilon_{gas,front}) + \sum_j F_{pl-j} S_j \{ (1 - \epsilon_j) q_{inc,j} + \epsilon_j \sigma T_j^4 \} (1 - \epsilon_{gas,front}) (1 - \epsilon_f) + S_{pl} \epsilon_{gas,front} \sigma T_{gas}^4 + (1 - \epsilon_{gas,front}) \epsilon_f \sigma T_f^4 F_{tc-f} S_f \quad (5.47)$$

両辺を S_{pl} で割り、式(5.5)により反射と放射の項を q_{out} で表すと

$$q_{inc,tc} = \sum_{j'} F_{pl-j'} \frac{S_{j'}}{S_{pl}} q_{out,j'} (1 - \epsilon_{gas,front}) + \sum_j F_{pl-j} \frac{S_j}{S_{pl}} q_{out,j} (1 - \epsilon_{gas,front}) (1 - \epsilon_f) + \epsilon_{gas,front} \sigma T_{gas}^4 + (1 - \epsilon_{gas,front}) \epsilon_f \sigma T_f^4 F_{tc-f} \frac{S_f}{S_{pl}} \quad (5.48)$$

となり、さらに形態係数の相反法則を用いると最終的に

$$\begin{aligned} q_{inc,tc} = \sum_{j'} F_{j'-pl} q_{out,j'} (1 - \varepsilon_{gas,front}) + \sum_j F_{j-pl} q_{out,j} (1 - \varepsilon_{gas,front}) (1 - \varepsilon_f) + \\ \varepsilon_{gas,front} \sigma T_{gas}^4 + (1 - \varepsilon_{gas,front}) \varepsilon_f \sigma T_f^4 F_{f-tc} \end{aligned} \quad (5.49)$$

となる。

ここで S_{pl} : プレート面又はプレート裏面の面積[m²] (=0.01m²)
 $\varepsilon_{gas,front}$: プレート面から見える空間中の炉内ガス部分の放射率[-]

同様に、節点 1 の熱収支は、

$$\rho_c c_c \Delta x_c \frac{T_1 - T_1^{old}}{\Delta t} = \frac{k_c}{\Delta x_c} (T_{tc}^{old} - 2T_1^{old} + T_2^{old}) \quad (5.50)$$

従って、

$$T_1 = T_1^{old} + \frac{\Delta t}{(\Delta x_c)^2} \frac{k_c}{\rho_c c_c} (T_{tc}^{old} - 2T_1^{old} + T_2^{old}) \quad (5.51)$$

節点 2～4 は、節点 1 と同様にして、

$$T_2 = T_2^{old} + \frac{\Delta t}{(\Delta x_c)^2} \frac{k_c}{\rho_c c_c} (T_1^{old} - 2T_2^{old} + T_3^{old}) \quad (5.52)$$

$$T_3 = T_3^{old} + \frac{\Delta t}{(\Delta x_c)^2} \frac{k_c}{\rho_c c_c} (T_2^{old} - 2T_3^{old} + T_4^{old}) \quad (5.53)$$

$$T_4 = T_4^{old} + \frac{\Delta t}{(\Delta x_c)^2} \frac{k_c}{\rho_c c_c} (T_3^{old} - 2T_4^{old} + T_5^{old}) \quad (5.54)$$

節点 5 は、節点 1 と同様にして、

$$T_5 = T_5^{old} + \frac{\Delta t}{\rho_c c_c \frac{\Delta x_c}{2}} \{ \varepsilon_{rear} q_{inc,rear} - \varepsilon_{rear} \sigma T_5^{old 4} + h_{pl,rear} (T_{gas} - T_5^{old}) + \frac{k_c}{\Delta x_c} (T_4^{old} - T_5^{old}) \} \quad (5.55)$$

とする。

ここで、 $q_{inc, rear}$ ：プレート裏面（試験体に対向する面）へ入射する熱流束[W/m²]

$h_{pl, rear}$ ：プレート裏面の対流熱伝達率[W/(m²・K)]

ここで、 $q_{inc, rear}$ は、以下の式で表される。

$$S_{pl}q_{inc, rear} = \sum_j F_{tc-j} S_j \{ (1 - \varepsilon_j) q_{inc, j} + \varepsilon_j \sigma T_j^4 \} (1 - \varepsilon_{gas, rear}) + \varepsilon_{gas, rear} \sigma T_{gas}^4 S_{pl} \quad (5.56)$$

両辺を S_{pl} で割り、式(5.5)により反射と放射の項を q_{out} で表すと

$$q_{inc, rear} = \sum_j F_{pl-j} \frac{S_j}{S_{pl}} q_{out, j} (1 - \varepsilon_{gas, rear}) + \varepsilon_{gas, rear} \sigma T_{gas}^4 \quad (5.57)$$

となり、さらに形態係数の相反法則を用いると

$$q_{inc, rear} = \sum_j F_{j-pl} q_{out, j} (1 - \varepsilon_{gas, rear}) + \varepsilon_{gas, rear} \sigma T_{gas}^4 \quad (5.58)$$

で求められる。ただし、 Σ はプレート裏面から見える面についての総和、 $\varepsilon_{gas, rear}$ [-]はプレート裏面から見えるガスの放射率である（図 5.17 の白色部分）。

5. 2. 5. 4 制御用熱電対の形態係数

壁面から制御用熱電対への形態係数 F_{tc-i} 、火炎面から制御用熱電対への形態係数 F_{tc-f} は、以下のように算出する。

①露出型熱電対及びシース熱電対

壁面又は火炎面から制御用熱電対への形態係数は、熱電対の形状を円柱とすれば、図 5.18 に示すような平面 A1 から円柱 A2 への形態係数 F_{2-1} を、以下の式により計算できる⁸⁾。

$$F_{2-1} = \frac{2}{Y} \int_0^Y f(\xi) d\xi \quad (5.59)$$

ここで、

$$f(\xi) = \frac{X}{X^2 + \xi^2} - \frac{X}{\pi(X^2 + \xi^2)} \times \left\{ \cos^{-1} \frac{B}{A} - \frac{1}{2Z} \left[\sqrt{A^2 + 4Z^2} \cos^{-1} \left(\frac{B}{A\sqrt{X^2 + \xi^2}} \right) + B \sin^{-1} \left(\frac{1}{\sqrt{X^2 + \xi^2}} \right) - \frac{\pi A}{2} \right] \right\} \quad (5.60)$$

$$A = Z^2 + X^2 + \xi^2 - 1$$

$$B = Z^2 - X^2 - \xi^2 + 1$$

$$X = \frac{a}{d}$$

$$Y = \frac{b}{d}$$

$$Z = \frac{c}{d}$$

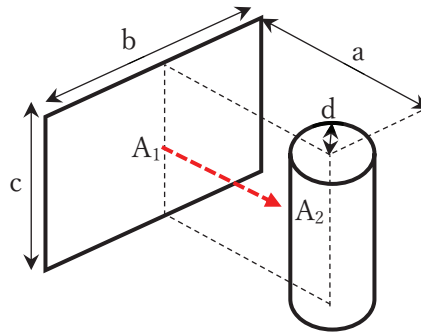


図 5.18 平面と円柱の位置関係

③プレート熱電対

壁面又は火炎面と制御用熱電対の位置関係は、図 5.19 に示すようなプレート面に平行な場合と、図 5.20 に示すようなプレート面に垂直な場合がある。それぞれ、以下の式により微小面 dA_1 （プレート熱電対）から平面 A_2 （壁面又は火炎面）への形態係数 F_{2-1} を計算できる。

・プレート面に平行な場合の形態係数

$$X = \frac{a}{c}, Y = \frac{b}{c} \text{とすると、}$$

$$F_{2-1} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \quad (5.61)$$

・プレート面に垂直な場合の形態係数

$$X = \frac{a}{b}, Y = \frac{c}{b} \text{とすると、}$$

$$F_{2-1} = \frac{1}{2\pi} \left(\tan^{-1} \frac{1}{y} - \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \tan^{-1} \frac{1}{\sqrt{x^2+y^2}} \right) \quad (5.62)$$

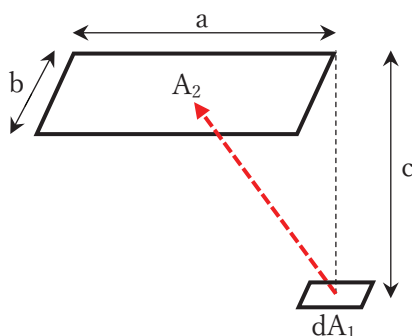


図 5.19 微小面 dA1 と dA1 に平行な長方形 A2 の位置関係

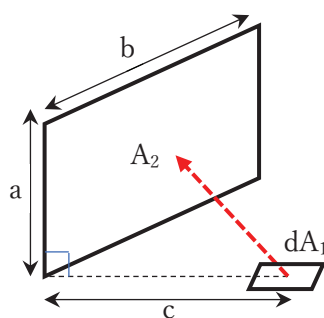


図 5.20 微小面 dA1 と dA1 に平行な長方形 A2 の位置関係

5. 2. 6 加熱温度曲線の設定

加熱温度曲線は、告示に規定の JIS A 1304 標準加熱曲線 B と ISO 834-1 に規定の加熱曲線の双方で計算ができるよう、制御用熱電対の温度 T_{tc} を設定する。計算における時間刻みは、2 秒とする。加熱時間は、告示の規定では 30 分間であるが、2020 年に（一社）日本電線工業会で 60 分間の加熱を規定した 1 時間耐火ケーブルの耐火試験方法が制定されているので⁹⁾、3,600 秒（60 分）まで計算ができるように 60 分までの加熱温度を設定する。

①告示の加熱温度曲線

告示の温度は、JIS A 1304 に 5 分毎の温度が規定されている。60 分までの温度を表 5.1 に示す。

表 5.1 告示の加熱温度 (JIS A 1304 標準加熱曲線 B)

加熱時間[分]	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
加熱温度[°C]	540	705	760	795	820	840	860	880	895	905	915	925

告示の加熱曲線は、JIS A 1304 では時間に対する温度式は与えられていないが、江口ら¹⁰⁾によって、温度式が提案されている。図 5.21 に示すように、告示で規定された 5 分毎の温度と提案式との差異は小さいため、本研究でも江口らの提案式を数値解析に用いた。ただし、原著の提案式の時間は[h]単位、温度は[°C]であるため、数値解析では秒単位、絶対温度で計算できるように、時間と温度の単位を修正した以下の式により、加熱時間 t [秒]における熱電対温度 T_{tc} [K]を算出する。

$$T_{tc} = 1080 - 340e^{-0.8 \times (\frac{t}{3600})} - 130e^{-5 \times (\frac{t}{3600})} - 610^{-19 \times (\frac{t}{3600})} + 273 \quad (5.63)$$

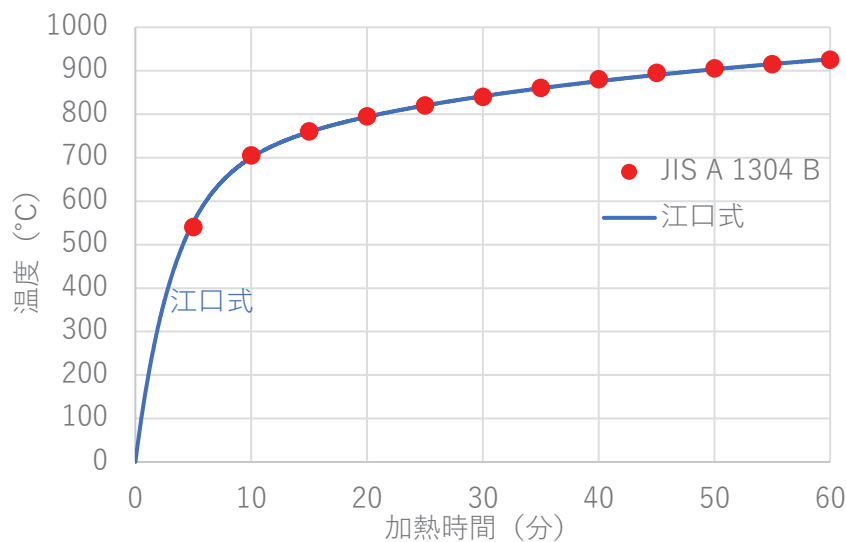


図 5.21 告示 (JIS A 1304 B) で規定された 5 分毎の温度と式(5.63)の比較

ただし、この式では、0°C (0 秒) から炉内初期温度 (常温) までの間は、 T_{tc} が常温以下の温度となるため、それを避けるために T_{tc} が常温以下の場合には「 T_{tc} =炉内初期温度」とする。

② ISO 834-1 の加熱温度曲線

ISO 834-1 の加熱曲線は、ISO 834-1 の規格書に計算式が規定されている。規格書の計算式は分単位、摂氏温度であるが、数値解析では秒単位、絶対温度で計算するため、時間と温度の単位を修正した以下の式により、加熱時間 t [秒]における熱電対温度 T_{tc} [K]を算出す

る。

$$T_{tc} = 345 \times \log_{10} \left(8 \times \frac{t}{60} + 1 \right) + 20 + 273 \quad (5.64)$$

5. 2. 7 制御用熱電対と試験体の水平距離

制御用熱電対と試験体の水平距離は、告示では 10mm、ISO 834-1 では 100mm である。第 4 章の炉内温度分布の測定結果より、10mm と 100mm の場合では、炉内の温度及び温度分布が異なることが分かったので、10mm と 100mm の違いを火炎温度の違いとして計算に組み込んだ。火炎温度 T_f は、ガス温度 T_{gas} に一定の温度 T_α [K]を加えることで与える。

$$T_f = T_{gas} + T_\alpha \quad (5.65)$$

T_α は 4.4.1 節の図 4.29 の火炎とガスの温度差から、制御用熱電対と試験体を想定したケイカル板との距離が 10mm の場合は 230K、100mm の場合は 150K とした。この温度は、実測において加熱終盤（20～30 分の範囲）で成り立つので、 T_α は固定値として扱った。

5. 2. 8 設定条件

本章の数値解析の計算で使用した各材料の物性値を表 5.2 に示す。

表 5.2 材料の物性値 ^{3)、11)、12)}

使用部位	材質		放射率 [-]	熱伝導率 [W/m K]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg K]
炉壁	セラミックファイバ		0.67	0.17	130	1,135
	耐火レンガ		0.75	0.41	1,820	1,100
	ケイ酸カルシウム		0.83	0.13	622	920
制御 熱電対	露出型 TC 素線部、 プレート TC 金属部	ニッケル合金	0.15	14.8	8,420	444
	シース TC シース部	ステンレス	0.36	—	7,820	527
	シース TC 無機絶縁部	酸化マグネシウム	—	—	3,440	1,234
	プレート TC 断熱材部	セラミックボード	0.67	0.06	280	840

試験体保持面は消防庁告示に従いケイ酸カルシウム板とし、その他の面については、実際の炉を参考に床面は耐火レンガ、それ以外の面はセラミックファイバとする。文献より、ガスの吸収係数は 0.128¹³⁾、火炎の吸収係数は 0.4¹⁴⁾ とする。

炉の寸法については、告示では明確な規定はないため、炉の横幅 W と炉の高さ H は、

認定試験で使用されている小型加熱炉の寸法を用いた。また、炉内ガスの奥行き D_1 と火炎の奥行き D_2 は、4.4.1 節の結果を基に設定した。計算に用いた数値を表 5.3 に記す。

表 5.3 炉の寸法

項目		長さ[m]
炉の横幅 W		0.46
炉の高さ H		1.24
炉内ガスの奥行き D_1	熱電対とケイカル板距離：10mm	0.06
	熱電対とケイカル板距離：100mm	0.20
火炎の奥行き D_2	熱電対とケイカル板距離：10mm	0.20
	熱電対とケイカル板距離：100mm	0.15

5. 2. 9 計算方法のまとめ

前項までに説明した計算方法を図 5.22 に示すフローチャートに従って数値解析プログラムに組み込んだ。それぞれの項目の要点を以下に記す。

1) 加熱炉のパラメータの入力

加熱炉の寸法 (W 、 H 、 D_1 、 D_2)、炉壁とケイカル板の放射率 (ε_i)、炉内ガス及び火炎の吸収係数 (k_{gas} 、 k_f)、炉内風速 (U_i 、 U_{tc} 、 U_{pl}) を入力する。

2) 平均光路長 L_{gas} 、 L_f の計算

加熱炉の寸法 (W 、 H 、 D_1 、 D_2) を用いて、平均光路長を計算する (5.2.2.2 項参照)。

3) 放射率 ε_{gas} 、 ε_f の計算

平均光路長 (L_{gas} 、 L_f) と吸収係数 (k_{gas} 、 k_f) を用いて、放射率 (ε_{gas} 、 ε_f) を計算する (5.2.2.2 項参照)。

4) 炉壁とケイカル板のパラメータの入力

加熱炉の炉壁及びケイカル板内部への熱伝導に影響を与える炉壁とケイカル板の熱伝導率、密度、比熱といった物性値と厚さを入力する。

5) 形態係数 F_{i-j} 、 F_{i-gas} 、 F_{i-f} 、 F_{tc-i} 、 F_{tc-f} の計算

加熱炉の寸法と熱電対の寸法を用いて、形態係数 (F_{i-j} 、 F_{i-gas} 、 F_{i-f} 、 F_{tc-i} 、 F_{tc-f}) を計算する (5.2.2.3 項、5.2.5.4 項)。

6) T_{tc} 、 T_{gas} 、 T_f 、 T_i へ初期温度を入力

それぞれの温度 (T_{tc} 、 T_{gas} 、 T_f 、 T_i) に初期値として外気温を入力する。

7) 経過時間

時間を計算時間刻み (Δt) だけ経過させる。

8) 熱電対の設定温度 T_{tc} の計算

告示に規定の JIS A 1304 標準加熱曲線 B または ISO 834-1 に規定の加熱曲線に従って、経過時間に対応する制御用熱電対の温度 T_{tc} を計算する (5.2.6 項参照)。

9) 対流熱伝達率 h_i 、 h_{tc} 、 $h_{pl,front}$ 、 $h_{pl,rear}$ の計算

レイノルズ数とプラントル数を用いてヌセルト数を計算し、ヌセルト数を用いて炉壁表面とガスの間の対流熱伝達率を計算する (5.2.3.2 項参照)。

10) 対流熱流 $q_{cnv,i}$ 、 $q_{cnv,tc}$ の計算

対流熱伝達率と炉内ガス温度 T_{gas} 、火炎温度 T_f 、壁面温度 T_i を用いて、壁面 i の対流熱流 $q_{cnv,i}$ と熱電対表面の対流熱流 $q_{cnv,tc}$ を計算する。

11) 放射熱流 $q_{inc,i}$ 、 $q_{out,i}$ 、 $q_{net,i}$ 、 $q_{inc,tc}$ 、 $q_{inc,rear}$ の計算

炉内ガス温度 T_{gas} 、火炎温度 T_f 、壁面温度 T_i 及び形態係数を用いて、放射に関する連立方程式を作成し、これを解いて放射熱流を計算する (5.2.2.1 項、5.2.5 項参照)。

12) 炉内ガス温度 T_{gas} と火炎温度 T_f の計算

熱電対の熱収支から炉内ガス温度 T_{gas} を計算する (5.2.5 項参照)。得られた T_{gas} を用いて T_f を計算する (5.2.7 項参照)。

13) 計算結果の出力 (T_{gas} 、 T_f 、 T_i 、 $q_{cnv,i}$ 、 $q_{inc,i}$ 、 $q_{out,i}$ 、 $q_{net,i}$)

現在の時間に対応するガス温度 T_{gas} 、火炎温度 T_f 、壁面 1～10 の表面温度 T_i 及び熱流 ($q_{cnv,i}$ 、 $q_{inc,i}$ 、 $q_{out,i}$ 、 $q_{net,i}$) を出力する。

14) 時間の判定

経過時間が終了時間未満であれば、7) に戻って次の時間のガス温度、火炎温度、壁面温度及び熱流を計算する。経過時間が終了時間に達していれば、計算を終了する。

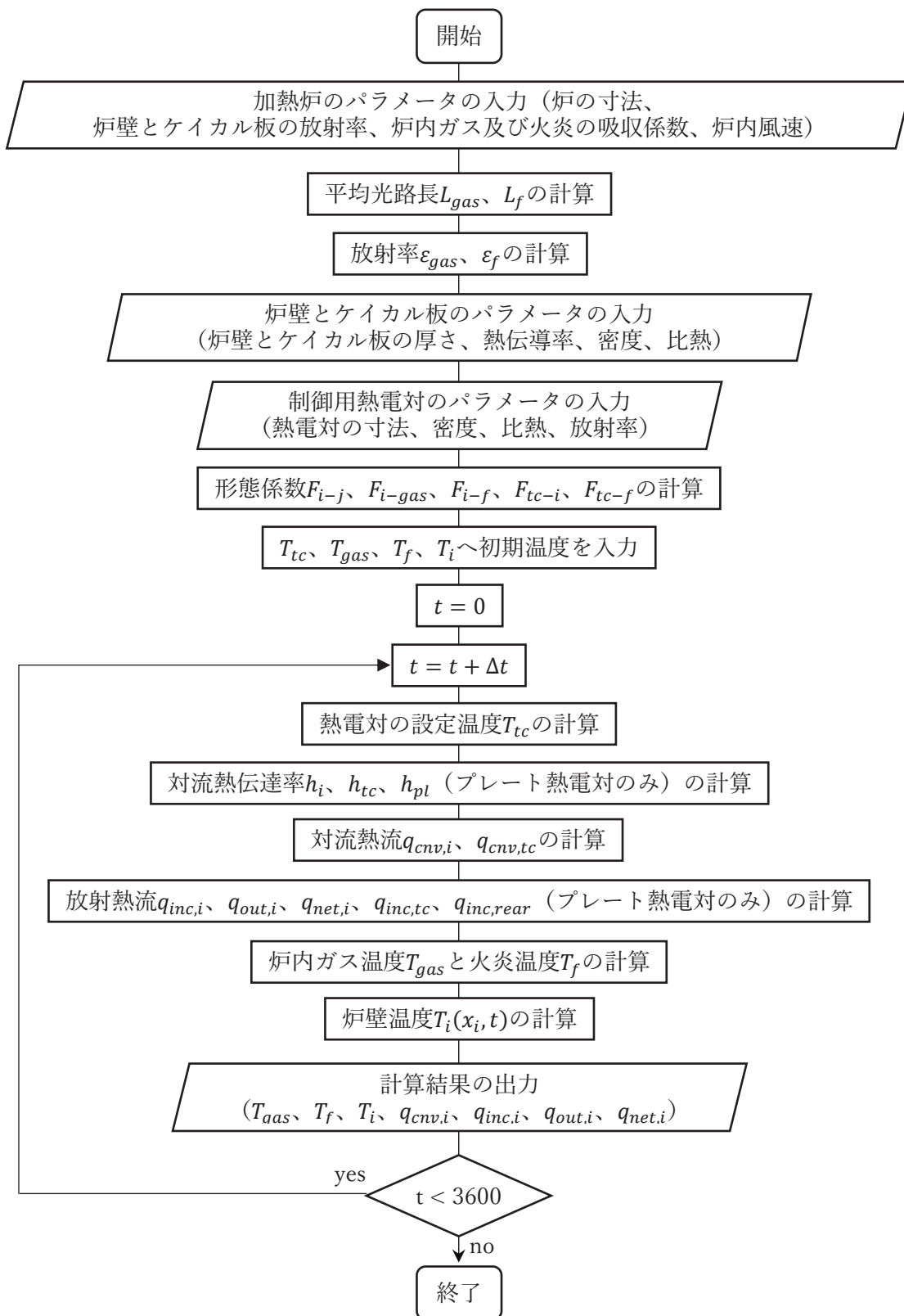


図 5.22 数値解析のフローチャート

5. 3 計算結果

5. 3. 1 モデルの精度検証

作成した熱伝達モデルの精度を検証するため、表 5.4 に示す 6 つの実験結果と数値解析結果を比較する。表中の計算条件①は、すべて告示の条件であり、第 4 章の実験 1 の測定結果との比較である。計算条件②は、加熱曲線のみを ISO 曲線に変更した条件であり、第 4 章の実験 2 の測定結果との比較である。計算条件③は、制御用熱電対とケイカル板との距離のみを ISO の 100mm に変更した条件であり、第 4 章の実験 3 の測定結果との比較である。計算条件④は、加熱曲線を ISO 曲線に、制御用熱電対とケイカル板との距離を ISO の 100mm に変更した条件であり、第 4 章の実験 4 の測定結果との比較である。計算条件⑤は、制御用熱電対をプレート熱電対に、制御用熱電対とケイカル板との距離を ISO の 100mm に変更した条件であり、第 3 章の実験 3 の測定結果との比較である。計算条件⑥は、加熱曲線を ISO 曲線に、制御用熱電対をプレート熱電対に、制御用熱電対とケイカル板との距離を ISO の 100mm に変更した条件であり、第 3 章の実験 4 の測定結果との比較である。

実験では、水冷式熱流束計を用いて、ケイカル板中央で表面に入射する熱流を測定した。ケイカル板表面に入射する熱流は、放射熱流と対流熱流の和であるが、熱流束計は冷却水により常に常温に冷却される。そのため、熱流束計で測定される熱流 q_{hfm} は、数値解析では以下の式で表される。

$$q_{hfm} = q_{inc,1} - \sigma T_{hfm}^4 + h_1(T_{gas} - T_{hfm}) \quad (5.66)$$

ここで、 $q_{inc,1}$ ：ケイカル板表面に入射する放射熱流[W/m²]

h_1 ：ケイカル板表面の対流熱伝達率[W/m²・K]

T_{hfm} ：熱流束計の表面温度 (=冷却水温度) [K]

表 5.4 計算条件の組み合わせ

計算条件	加熱曲線	制御 熱電対	制御用熱電対と ケイカル板の距離	比較する 実験データ	備考
計算条件①	告示曲線	露出型	10mm（告示）	第 4 章 実験 1	すべて告示の条件
計算条件②	ISO 曲線	露出型	10mm（告示）	第 4 章 実験 2	加熱曲線のみ ISO
計算条件③	告示曲線	露出型	100mm（ISO）	第 4 章 実験 3	制御用熱電対とケイカル板距離のみ変更
計算条件④	ISO 曲線	露出型	100mm（ISO）	第 4 章 実験 4	加熱曲線及び制御用熱電対とケイカル板距離を変更
計算条件⑤	告示曲線	プレート	100mm（ISO）	第 3 章 実験 3	制御用熱電対及び制御用熱電対とケイカル板距離を変更
計算条件⑥	ISO 曲線	プレート	100mm（ISO）	第 3 章 実験 4	すべて ISO の条件

第 3 章と第 4 章の実験における温度と熱流束の測定位置について、炉内を側面から見た場合の模式図を図 5.23 に示す。いずれもケイカル板の中央位置で表面温度と熱流束を測定した。ケイカル板裏面温度は、第 4 章の実験（計算条件①から④）で測定しており、ケイカル板裏面の中央付近で測定した。炉内側壁の表面温度は、ケイカル板の中央高さで、図 5.24 に示すバーナ側の壁面から水平に約 140mm 離れた位置の側壁で測定した。制御用熱電対の位置は、告示の規定に従い、いずれもバーナ側の壁面から水平に 250mm 離し、ケイカル板中央高さから 75mm 下方の位置である。火炎温度の測定位置は、第 4 章の実験（計算条件①から④）では、制御用熱電対と同じ高さであるが、第 3 章の実験（計算条件⑤と⑥）では、制御用熱電対の中心高さから下方へ 175mm の高さである。プレート熱電対と並列にシース熱電対を設置し、ガス温度を測定した。

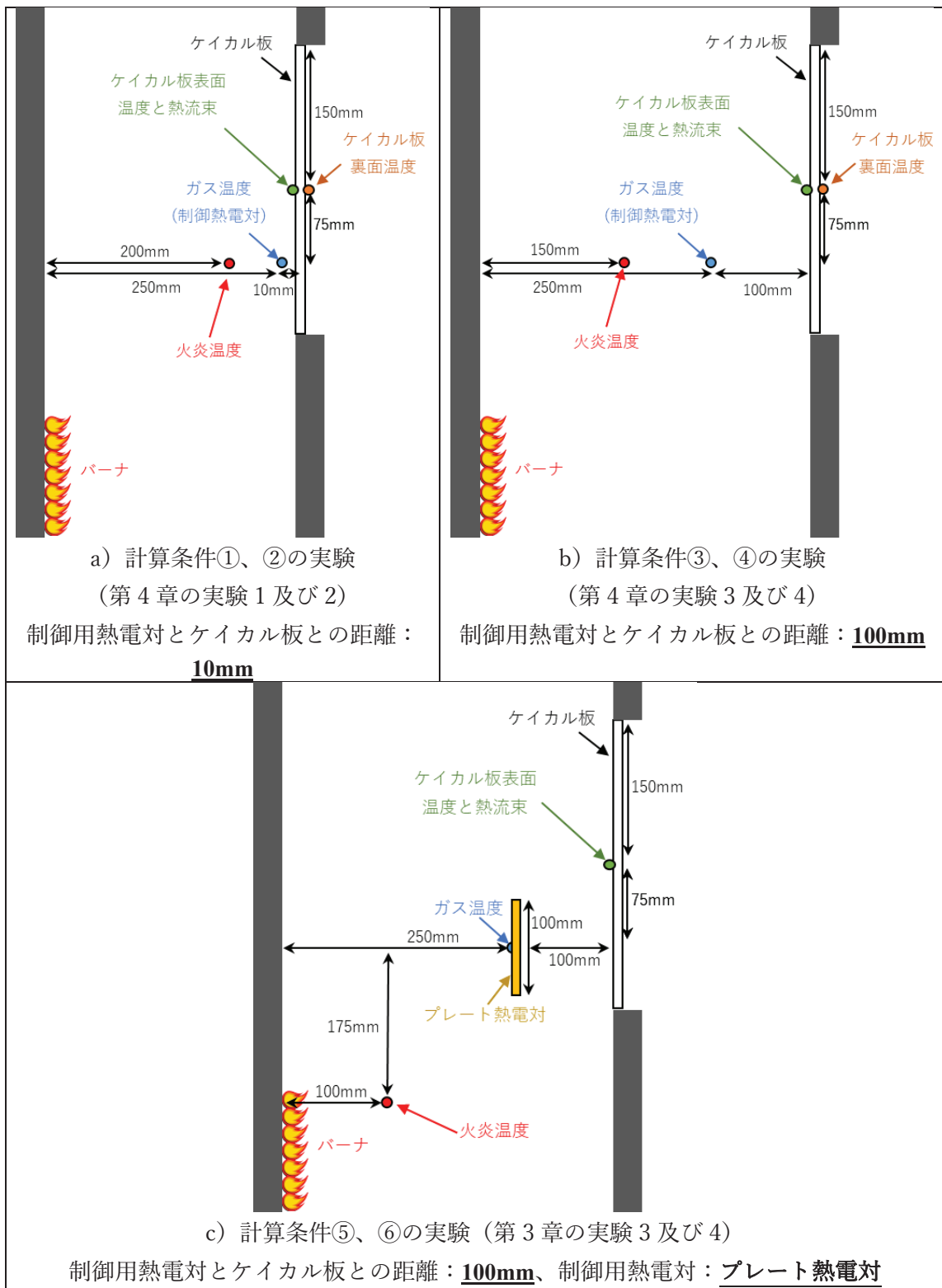


図 5.23 温度及び熱流束の測定位置の模式図

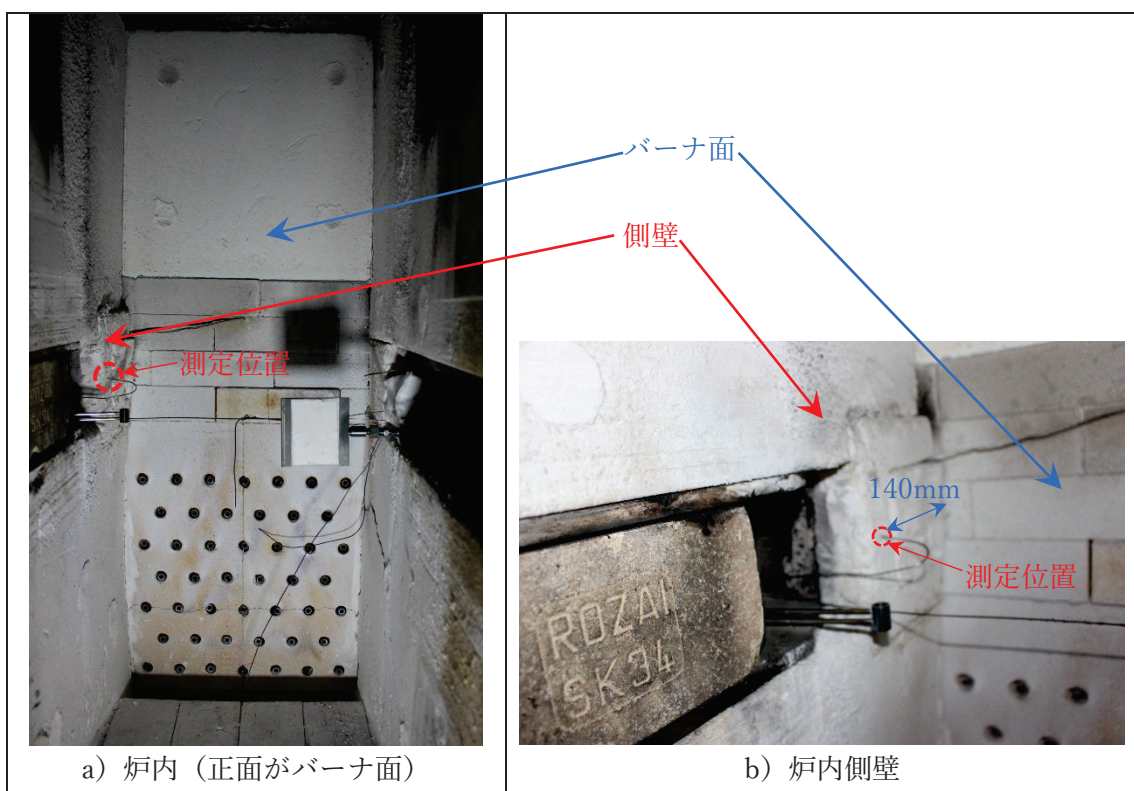


図 5.24 炉内側壁温度の測定位置

(1) 計算条件①

計算条件①（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm）は、すべて告示の条件である。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.25 に、ケイカル板温度を図 5.26 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.27 に示す。

図 5.25 に示すように火炎温度の計算値は、加熱開始直後に急激に上昇するのに対し、実測値はやや遅れて上昇した。これは、使用した小型加熱炉の PID による温度制御プログラムが、点火直後はやや緩やかに温度上昇するように設定されていることから、バーナ出力が加熱曲線の温度に追従できずに炉内温度の上昇が遅れたためである。火炎温度の計算値は、開始 10 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、開始 2 分以降は実測値と良好に一致した。

図 5.26 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、加熱前半では実測値よりもやや低いが、加熱後半では実測値との差が小さくなり、30 分時点ではほぼ一致した。また、ケイカル板表面温度が加熱曲線よりも高くなる状態が再現された。裏面温度の計算値は、実測値と概ね近い値が得られた。側壁表面温度の計算値は、30 分時点では実測値よりもやや高いものの概ね近い値が得られた。

図 5.27 に示すようにケイカル板表面位置での熱流束の計算値は、加熱前半は実測値の方がやや高く、加熱後半はやや低いが、比較的近い値が得られた。

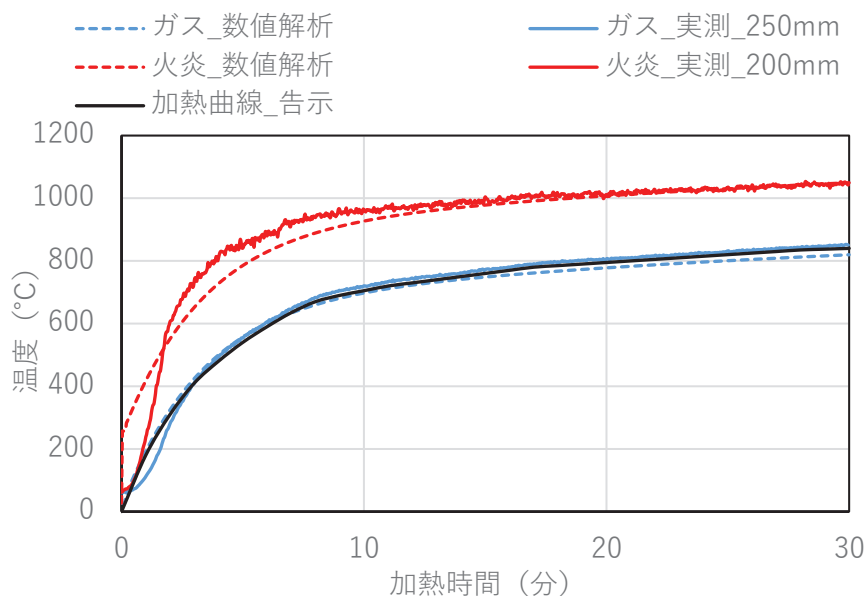


図 5.25 炉内温度の計算値と実測値：ガス温度と火炎温度

(計算条件①：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

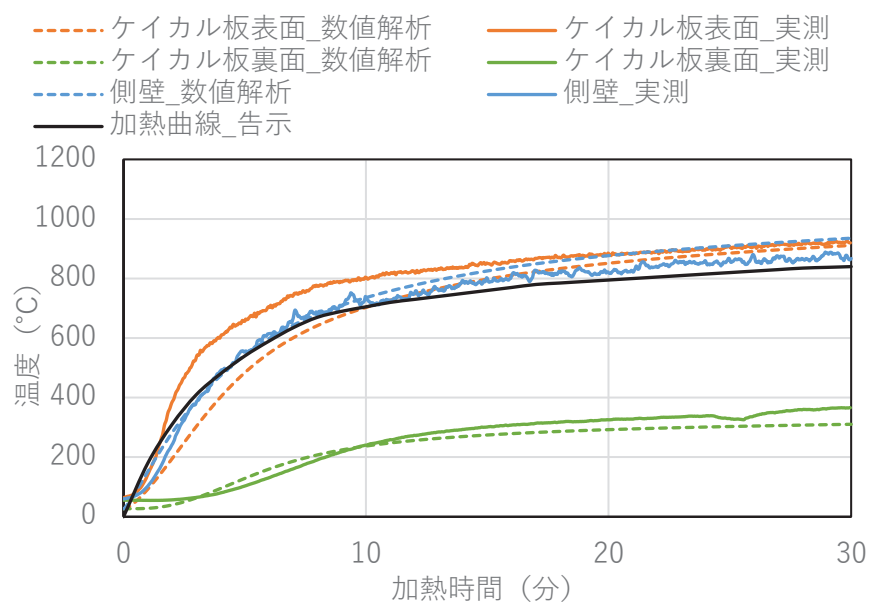


図 5.26 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面、裏面及び側壁温度
(計算条件①：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

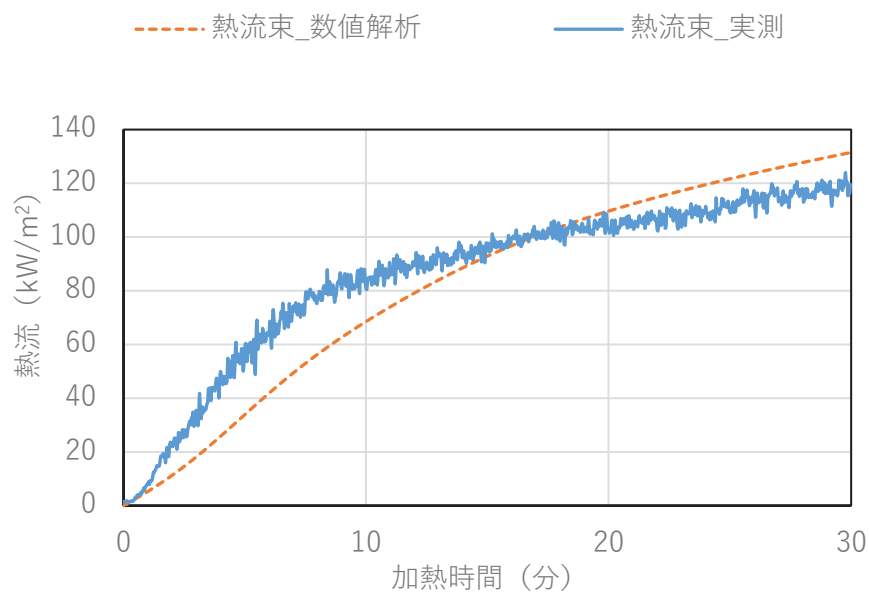


図 5.27 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件①：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

(2) 計算条件②

計算条件②（加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm）は、加熱曲線を ISO とし、他の条件は告示のままとした。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.28 に、ケイカル板温度を図 5.29 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.30 に示す。

図 5.28 に示すように火炎温度の計算値は、加熱開始直後に急激に上昇するのに対し、実測値はやや遅れて上昇し、約 90 秒後に一旦計算値よりも高くなった。これは、ISO の加熱曲線は、加熱開始直後の温度上昇が告示の加熱曲線に比べて非常に大きいために、加熱炉のバーナ出力が加熱曲線の温度に追従できずに遅れて炉内温度が上がり、その後、加熱開始約 90 秒後に温度がオーバーシュートしたと考えられる。火炎温度の計算値は、開始 10 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、開始 3 分以降は実測値と良好に一致した。

図 5.29 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、加熱前半では実測値よりもやや低いが、加熱後半では実測値との差が小さくなり、30 分時点ではほぼ一致した。また、この計算条件でも加熱後半では加熱曲線よりも高くなることが再現された。裏面温度の計算値は、実測値と概ね近い値が得られた。側壁表面温度の計算値は、30 分時点では実測値よりもやや高いものの概ね近い値が得られた。

図 5.30 に示すようにケイカル板表面位置での熱流束の計算値は、加熱前半は実測値の方がやや高く、加熱後半はやや低いが、比較的近い値が得られた。

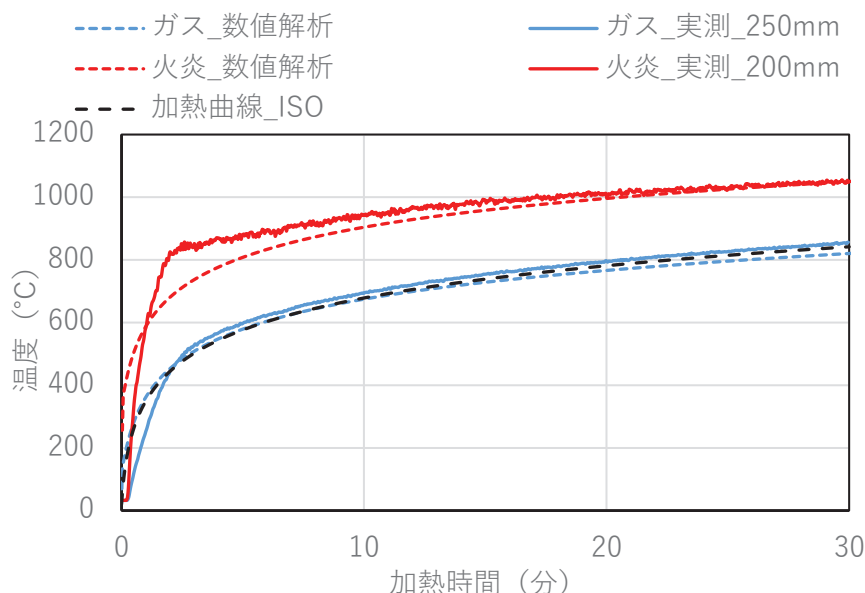


図 5.28 炉内温度の計算値と実測値：ガス温度と火炎温度
(計算条件②：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

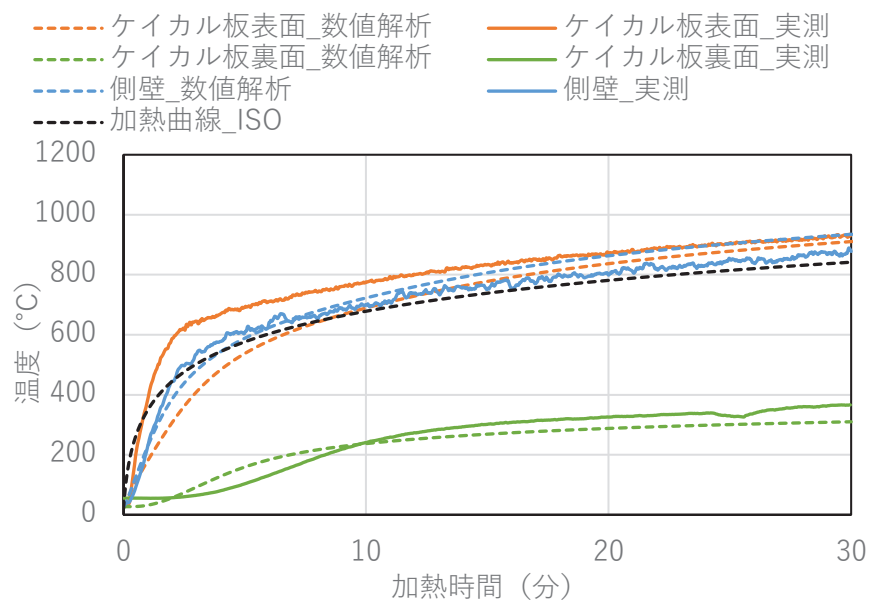


図 5.29 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面、裏面及び側壁温度
(計算条件②：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

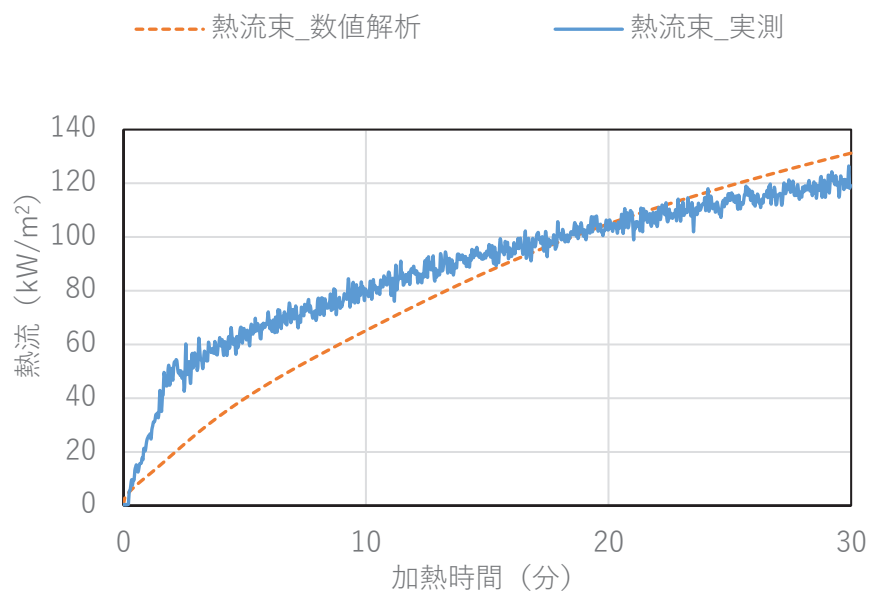


図 5.30 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件②：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 10mm)

(3) 計算条件③

計算条件③（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板との距離は 100mm）は、制御用熱電対とケイカル板との距離のみを ISO の条件に変えたものである。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.31 に、ケイカル板温度を図 5.32 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.33 に示す。

図 5.31 に示すように火炎温度の計算値は、開始 5 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、開始 2 分以降は実測値と良好に一致した。

図 5.32 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、加熱 10 分頃までは実測値よりもやや低いが、加熱 10 分以降では計算値の方がやや高くなった。また、ケイカル板表面温度が加熱曲線よりも低くなる状況が再現された。裏面温度の計算値は、実測値よりもやや高いが概ね近い結果となった。側壁表面温度の計算値は、加熱前半は実測値よりもやや低いものの加熱後半は概ね近い値が得られた。

図 5.33 に示すようにケイカル板表面位置での熱流束の計算値は、加熱 15 分頃までは実測値よりもやや低いが、加熱 15 分以降では計算値の方がやや高くなった。

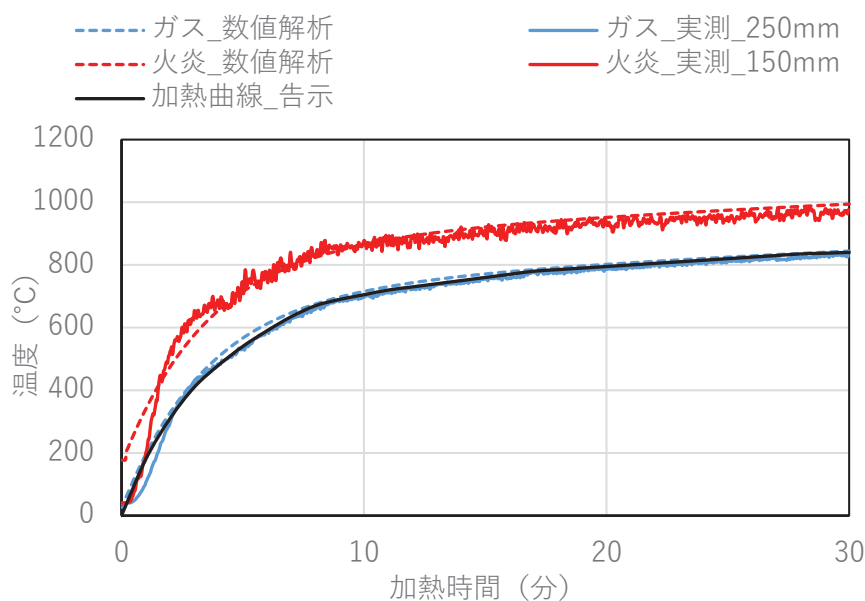


図 5.31 炉内温度の計算値と実測値：ガス温度と火炎温度
(計算条件③：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

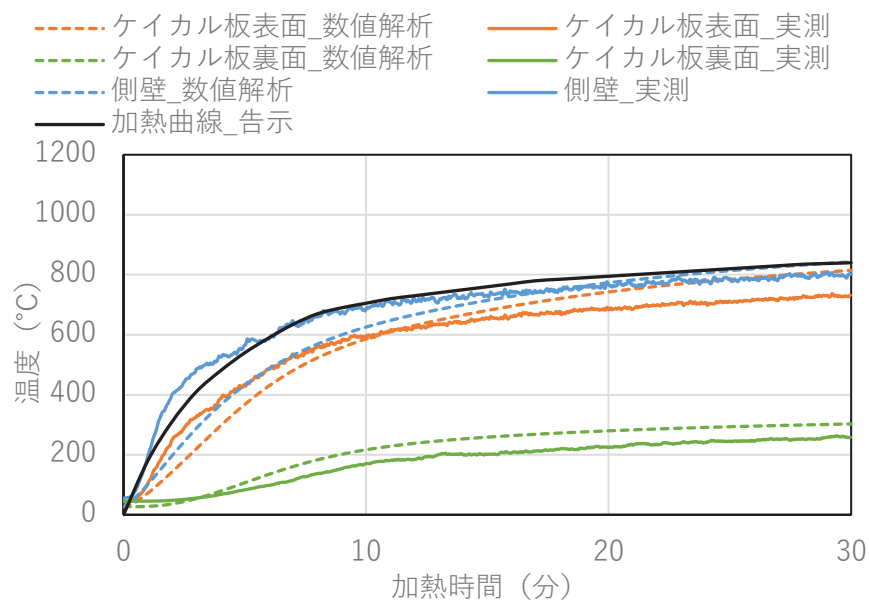


図 5.32 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面、裏面及び側壁温度
(計算条件③：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

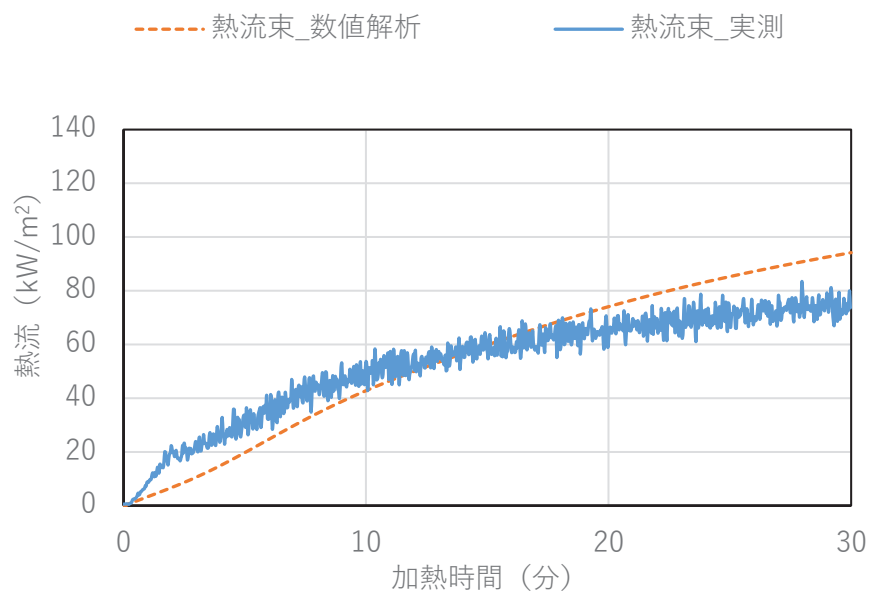


図 5.33 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件③：告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(4) 計算条件④

計算条件④（加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）は、加熱曲線及び制御用熱電対とケイカル板距離を ISO へ変更した条件である。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.34 に、ケイカル板温度を図 5.35 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.36 に示す。

図 5.34 に示すように火炎温度の計算値は、計算条件②と同様、加熱開始直後に急激に上昇するのに対し、実測値はやや遅れて上昇し、約 60 秒後に一旦計算値よりも高くなった。火炎温度の計算値は、開始 3 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、開始 3 分以降は実測値と良好に一致した。

図 5.35 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、加熱 10 分頃までは実測値よりもやや低いが、加熱 10 分以降では計算値の方がやや高くなった。また、ケイカル板表面温度が加熱曲線よりも低くなる状況が再現された。裏面温度の計算値は、実測値よりもやや高いが概ね近い結果となった。側壁表面温度の計算値は、加熱前半は実測値よりもやや低いものの加熱後半は概ね近い値が得られた。

図 5.36 に示すようにケイカル板表面位置での熱流束の計算値は、加熱 15 分頃までは実測値の方がやや高いが、加熱 15 分以降では計算値の方がやや高くなった。

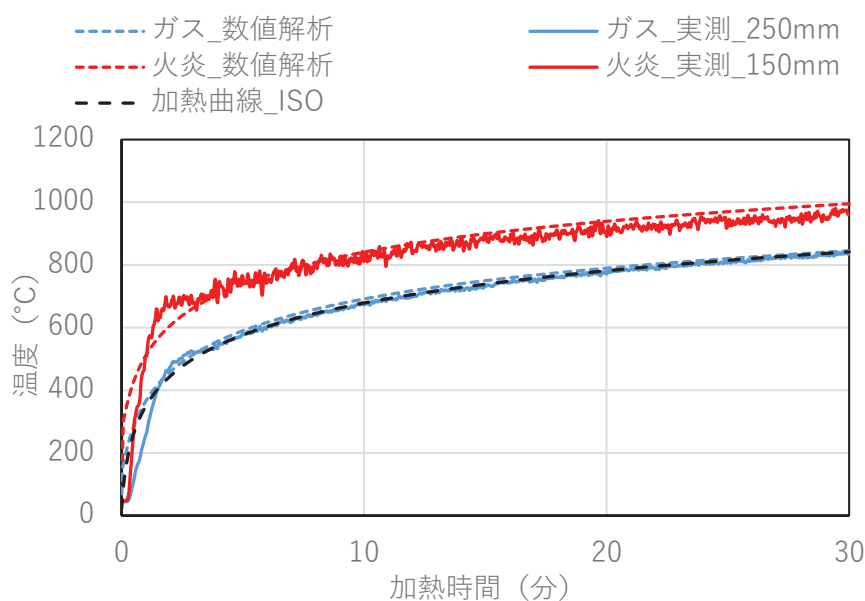


図 5.34 炉内温度の計算値と実測値：ガス温度と火炎温度
(計算条件④：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

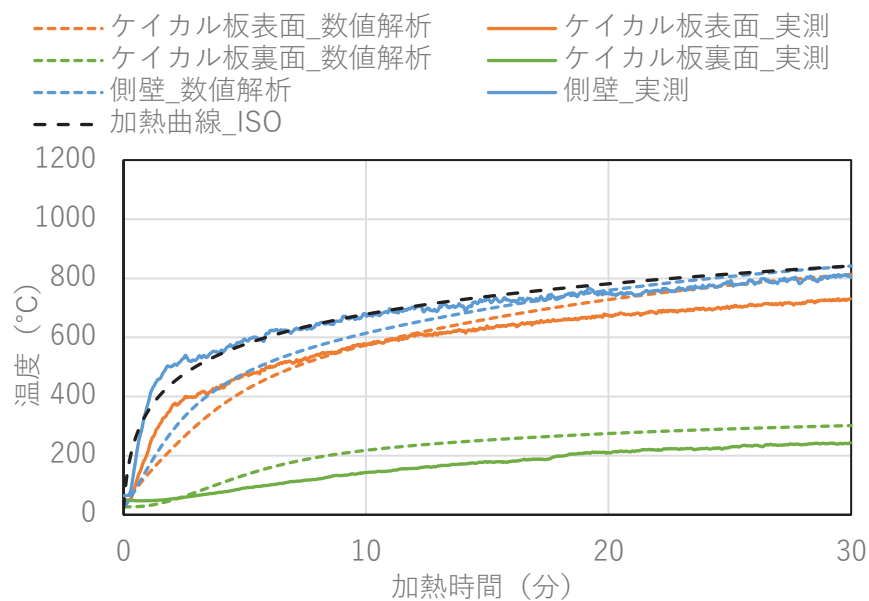


図 5.35 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面、裏面及び側壁温度
(計算条件④：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

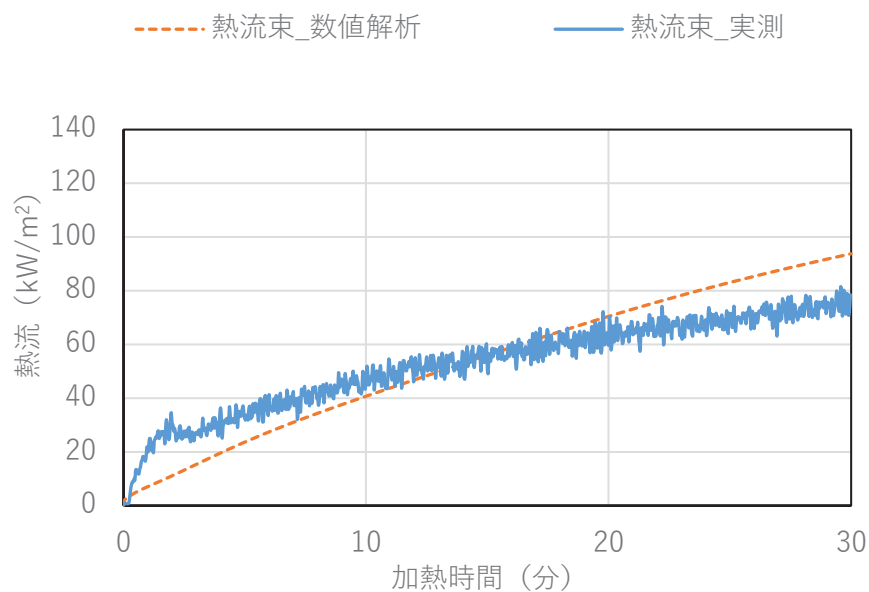


図 5.36 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件④：ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(5) 計算条件⑤

計算条件⑤（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）は、制御用熱電対及び制御用熱電対とケイカル板距離を ISO へ変更した条件である。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.37 に、ケイカル板温度を図 5.38 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.39 に示す。

図 5.37 に示すように火炎温度の計算値は、加熱開始直後に急激に上昇するのに対し、実測値はやや遅れて上昇し、開始 5 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、加熱前半は実測値よりもやや高いが、加熱後半は実測値と良好に一致した。火炎温度、ガス温度ともに加熱温度よりも高くなる状況が再現されている。

図 5.38 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、実測値よりも高く、乖離がみられた。また、図 5.39 に示すようにケイカル板表面の熱流束の計算値は、実測値よりも高く乖離がみられた。

これらの理由は、図 5.23 c) に示すように、実験においては制御用熱電対として 100mm 角のプレート熱電対を炉内に設置したことにより、バーナ火炎からの熱の一部が遮られることで、ケイカル板表面への加熱が低減されるが、このことを数値解析では考慮していないためだと考えられる。

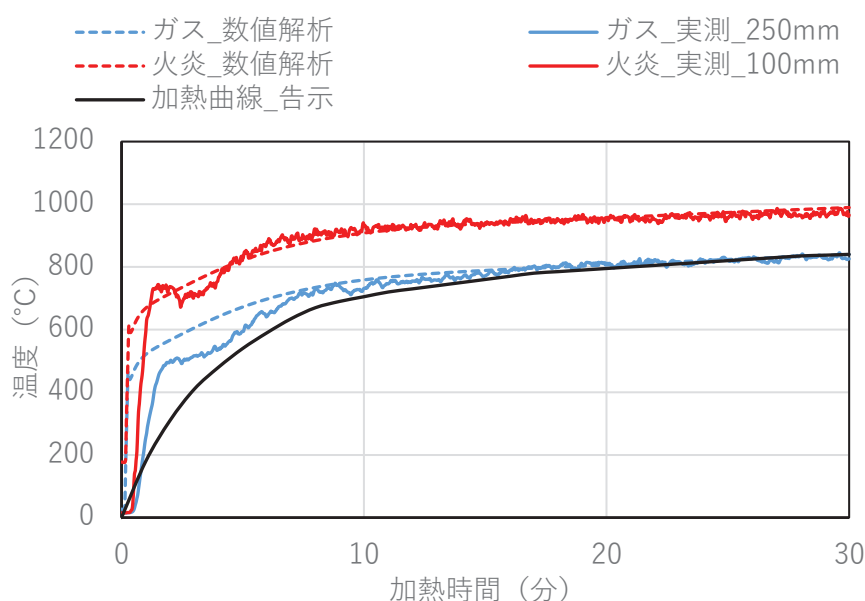


図 5.37 炉内温度の計算値と実測値：火炎温度

(計算条件⑤：告示曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

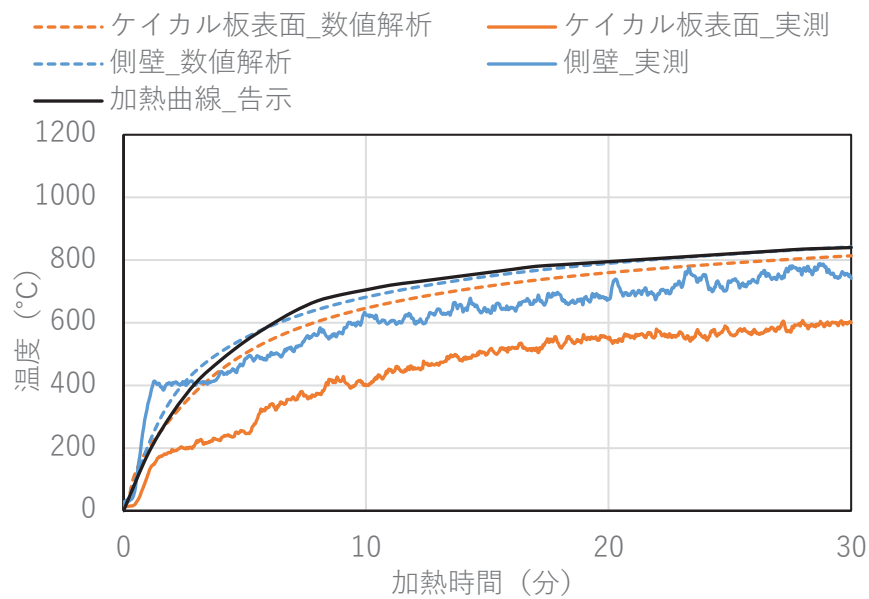


図 5.38 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面及び側壁温度
(計算条件⑤：告示曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

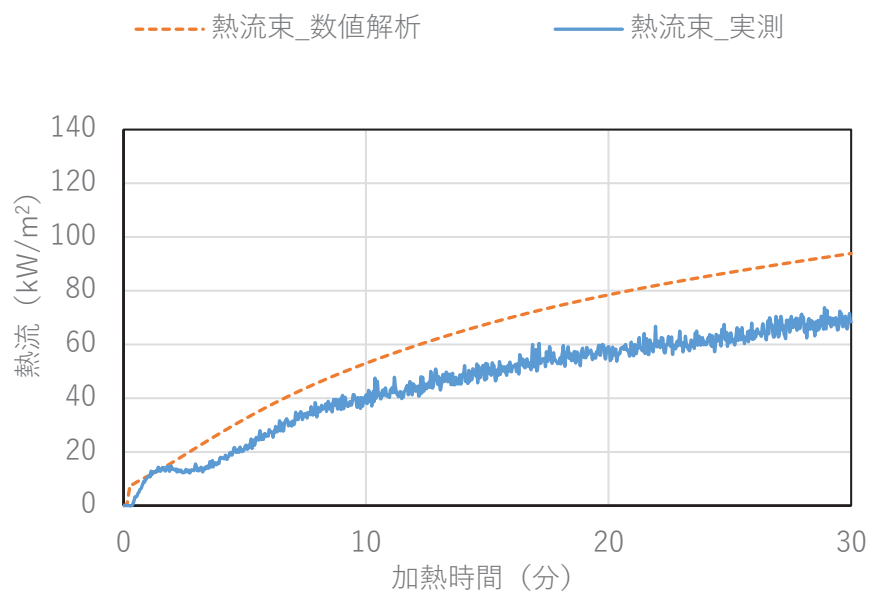


図 5.39 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件⑤：告示曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

(6) 計算条件⑥

計算条件⑥（加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm）は、すべて ISO の条件である。ガス温度と火炎温度の計算結果を図 5.40 に、ケイカル板温度を図 5.41 に、ケイカル板表面位置での熱流束を図 5.42 に示す。

図 5.40 に示すように火炎温度の計算値は、加熱開始直後に急激に上昇し、その後低下する。実験でも同様の変化が起こっており、これを再現することができている。開始 3 分以降は実測値と良好に一致した。ガス温度の計算値は、加熱前半は実測値よりもやや高いが、加熱後半は実測値と良好に一致した。

図 5.41 に示すようにケイカル板表面温度の計算値は、実測値よりも高く、乖離がみられた。

図 5.42 に示すようにケイカル板表面の熱流束の計算値は、実測値よりも高く乖離がみられた。

これらの理由は、計算条件⑤と同様、制御用熱電対として 100mm 四方のプレート熱電対を炉内に設置したことにより、バーナ火炎からの熱の一部が遮られることで、ケイカル板表面の温度と熱流束の測定値が小さくなることを数値解析では考慮していないためだと考えられる。

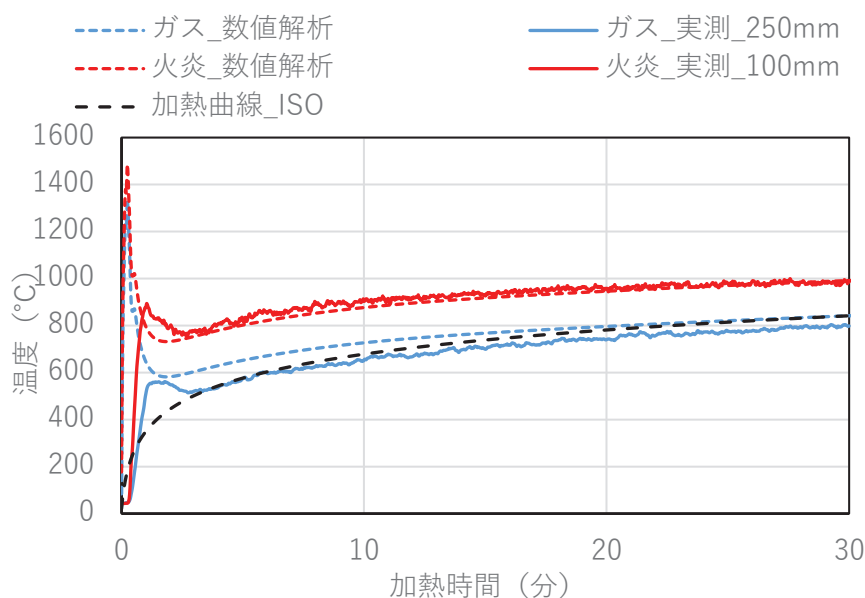


図 5.40 炉内温度の計算値と実測値：火炎温度
(計算条件⑥：ISO 曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

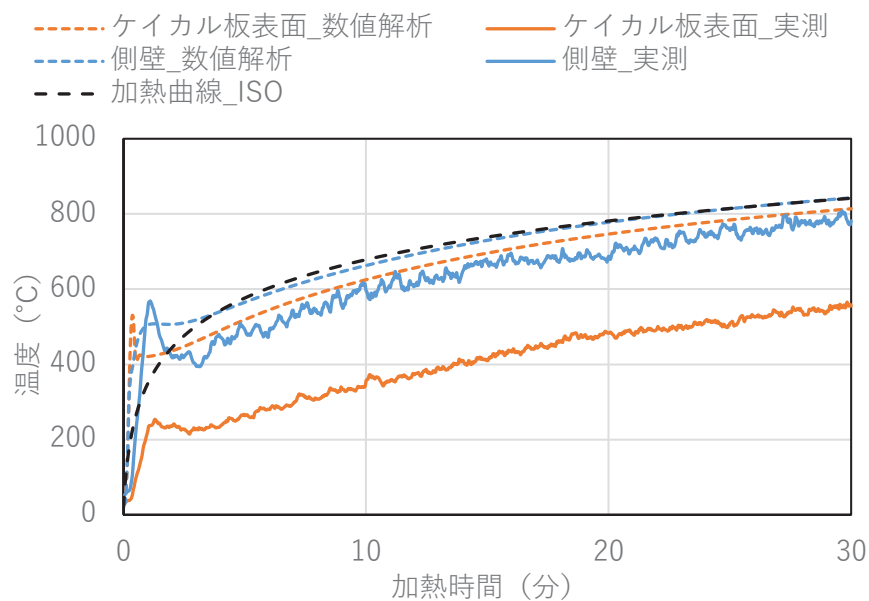


図 5.41 炉内温度の計算値と実測値：ケイカル板表面及び側壁温度
(計算条件⑥：ISO 曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

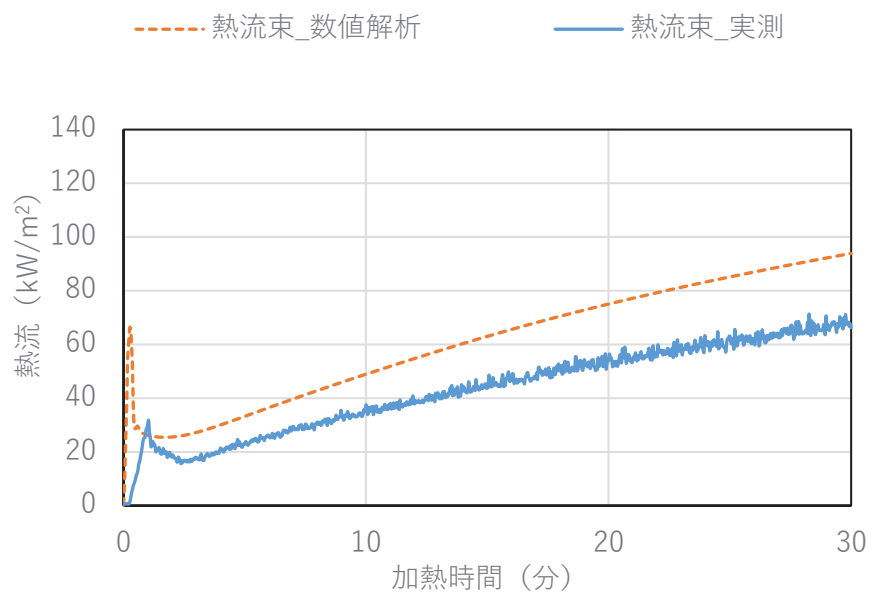


図 5.42 ケイカル板表面の熱流束の計算値と実測値
(計算条件⑥：ISO 曲線、プレート熱電対制御、熱電対とケイカル板との距離 100mm)

5. 3. 2 モデルの精度検証結果のまとめ

加熱開始 30 分時点での計算値と実測値について、炉内ガス温度の比較を図 5.43、火炎温度の比較を図 5.44、ケイカル板表面温度の比較を図 5.45、ケイカル板表面位置での熱流束の比較を図 5.46 に示す。図 5.43 と図 5.44 より、炉内ガス温度と火炎温度は、計算条件①から⑥のすべての条件で計算値と測定値は良好に一致した。

図 5.45 より、ケイカル板表面温度は、計算条件①と②では計算値と測定値は良好に一致し、計算条件③と④では計算値の方がやや高い。計算条件⑤と⑥では計算値の方が高く、乖離がみられる。

図 5.46 より、ケイカル板表面位置での熱流束は、計算条件①と②では計算値と測定値は概ね近い値が得られ、計算条件③と④では計算値の方がやや高い。計算条件⑤と⑥では計算値の方が高く、乖離がみられる。

上記と 5.3.1 項における熱伝達モデルの精度検証結果を表 5.5 にまとめる。耐火試験は装置側から見れば、ガスバーナを火源に用いるために一般にばらつきの大きい試験であることから、検証に用いた測定値も多少のばらつきがあると考えられる。一方、数値解析においては、炉壁材料等の物性値（放射率、比熱、熱伝導率）の温度依存性は無視し、文献値を基にした一般的な値を使用しているために、多少の誤差が生じることはやむを得ないが、それに関わらず、露出型熱電対制御である計算条件①から④では、数値解析結果は概ね実測値と一致しており、モデル化は適切に行われていると考えられる。計算条件⑤と⑥では、制御用熱電対として 100mm 角のプレート熱電対を炉内に設置したことで、バーナ火炎からの熱の一部が遮られ、ケイカル板表面の温度と熱流束の測定値が小さくなったために数値解析結果とは一致しなかったが、これらの影響を受けないガス温度と火炎温度は概ね一致していることから、プレート熱電対制御のモデルも良好といえる。

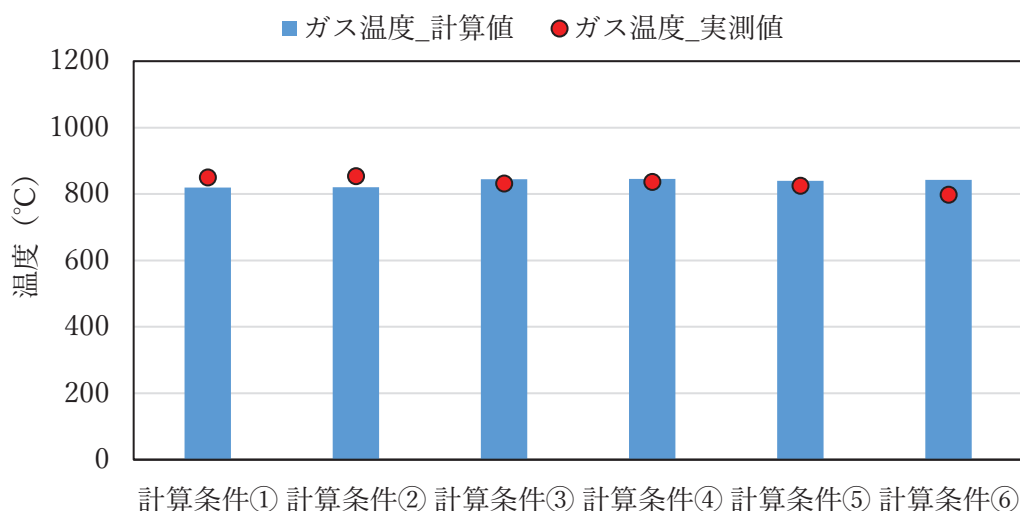


図 5.43 30 分時点での炉内ガス温度の計算値と測定値の比較

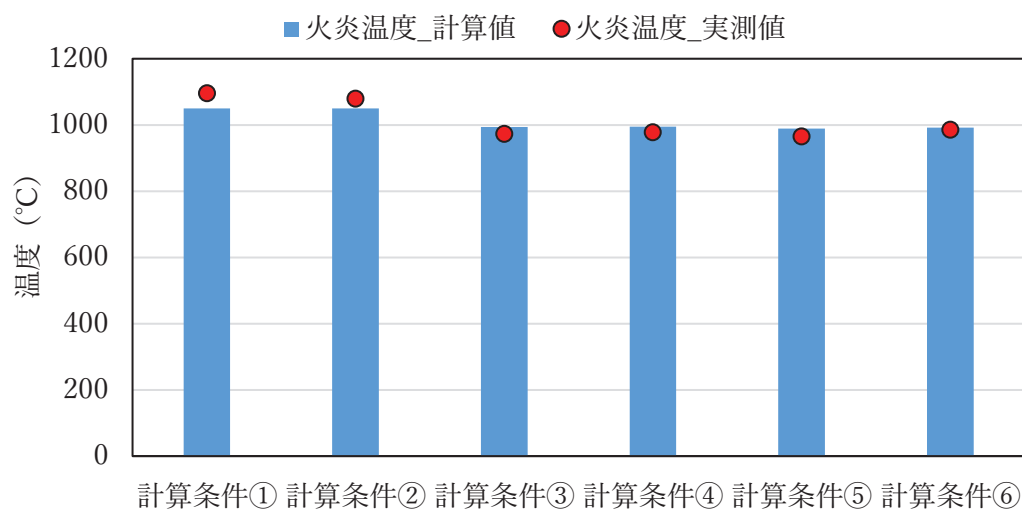


図 5.44 30 分時点での火炎温度の計算値と測定値の比較

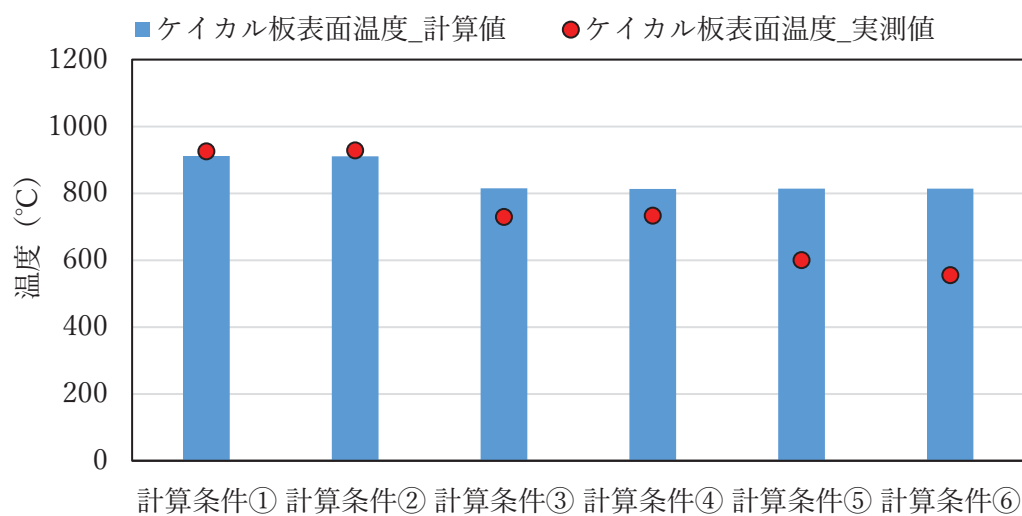


図 5.45 30 分時点でのケイカル板表面温度の計算値と測定値の比較

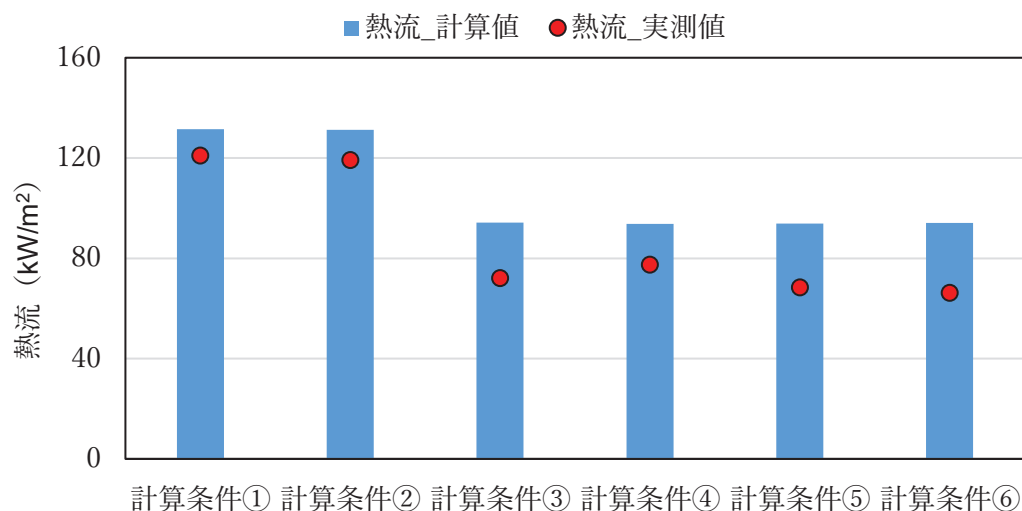


図 5.46 30 分時点でのケイカル板表面位置での熱流束の計算値と実測値の比較

表 5.5 精度検証結果のまとめ

計算条件	加熱 曲線	制御 熱電対	制御用熱電対 とケイカル板 の距離	検証結果				
				ガス 温度	火炎 温度	ケイカ ル板表	ケイカ ル板裏	熱流束
計算条件 ①	告示 曲線	露出型	10mm (告示)	◎	◎	◎	○	○
計算条件 ②	ISO 曲線	露出型	10mm (告示)	◎	◎	◎	○	○
計算条件 ③	告示 曲線	露出型	100mm (ISO)	◎	◎	○	○	○
計算条件 ④	ISO 曲線	露出型	100mm (ISO)	◎	◎	○	○	○
計算条件 ⑤	告示 曲線	プレート	100mm (ISO)	◎	◎	△	未測定	△
計算条件 ⑥	ISO 曲線	プレート	100mm (ISO)	◎	◎	△	未測定	△

備考 ◎：良好に一致 ○：概ね一致 △：傾向は類似しているが値は不一致

5. 4 結論

本章では、試験体未設置の場合の耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達をモデル化し、作成した熱伝達モデルの精度検証を行った。

- 1) 熱伝達モデルは、炉内を炉内制御用熱電対側の炉内ガス空間とバーナ側の火炎空間の二つの空間に分割することで、異なる温度として扱った。
- 2) 炉内の熱伝達は、①炉壁表面間の放射及び反射、②炉内ガス又は火炎と炉壁間の放射及び対流熱伝達、③炉壁内の熱伝導、④制御用熱電対と炉壁間の放射及び反射、⑤炉内ガス又は火炎と制御用熱電対間の放射及び対流熱伝達を考慮した。

- 3) 加熱曲線の種類、制御用熱電対と試験体の距離、制御用熱電対の形状をモデルに組み込むことで、これらの条件の違いによる影響を評価できるようにした。
- 4) 3 章及び 4 章の実測値を用いてモデルの精度検証を行った。いずれの条件も炉内ガス温度と火炎温度の計算値は、実測値と良好に一致した。試験体保持面（ケイカル板）の表面温度の計算値は、計算条件①と②では実測値と良好に一致したが、プレート熱電対制御の計算条件⑤と⑥では実測値の方が低かった。これは、実測では 100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの熱の一部を遮ったためである。

引用・参考文献

- 1) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度解析、2021 年度日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.215-216、2021.9
- 2) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度解析 第2報、2023 年度日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.33-34、2023.9
- 3) K. Harada, Y. Yabuki, T. Terai, A Theoretical Consideration on Heat Transfer in Fire Resistance Furnaces for Furnace Harmonization, Proc. 5th IAFSS, pp. 1033-1044, 1997
- 4) 田中哮義、平成 14 年 1 月 31 日、改訂版建築火災安全工学入門、日本建築センター
- 5) 木村建一、建築設備基礎（Ver.0.8.2）、2016 年、国際人間環境研究所
- 6) 日本機械学会、伝熱工学資料（改訂第 5 版）、2009 年、丸善出版
- 7) スハス V. パタンカー、1985 年、コンピュータによる熱移動と流れの数値解析、（水谷幸夫、香月正司訳）、森北出版
- 8) E.M.Sparrow & R.D.Cess, Augmented Edition, 1978, Radiation Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation.
- 9) JCS 7509:2020、1 時間耐火ケーブル試験方法（小型加熱炉）、日本電線工業会、2020
- 10) 江口和雄、川越邦雄、高温下二層壁の非線型熱伝導計算、日本建築学会論文報告集第 103 号、昭和 39 年 10 月、386 ページ
- 11) 日本機械学会編、伝熱ハンドブック、1993 年、丸善
- 12) 日本機械学会、機械工学便覧（新版）、1987 年、丸善
- 13) 矢吹幸大、原田 和典、寺井俊夫、耐火試験炉の熱伝達特性が試験結果に与える影響の解析、日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 1457-1458, 1994
- 14) M.A.Sultan, T.Z.Harmathy and J.R.Mehaffey, Heat transmission in fire test furnaces, Fire and Materials, Vol.10, pp.47-55 (1986)

第 6 章 数値解析を用いた比較

6. 1 目的

第 5 章では、平成 9 年消防庁告示¹⁾の小型加熱炉内の熱伝達をモデル化し、告示の加熱条件だけでなく、告示の小型加熱炉に ISO 834-1²⁾の加熱条件を取り入れた場合や制御用熱電対の種類を変更した場合にも対応したモデルとした。

本章では、第 5 章で作成したモデルを用いて、小型加熱炉に ISO 834-1 の試験条件を取り入れた場合の炉内温度や熱流への影響や実験での比較が困難な炉の内張材料の違いによる影響等を分析する。

6. 2 実施方法³⁾

6. 2. 1 加熱条件

告示の小型加熱炉内の熱伝達モデルを用いて、加熱条件を変更させた場合の炉内温度や熱流を計算し、告示の加熱条件の結果と比較する。変更する項目の一覧を表 6.1 に示す。

①～③は、3 章の 3.2 節で述べたように、告示の加熱条件を ISO 834-1 へ整合させた場合を想定した条件である。④と⑤は試験炉の構造による差を把握する条件である。

④内張材料は、告示では試験体設置部分にケイカル板を用いることを規定していること以外は内張材料の規定はなく、3 章の 3.3 節で述べたように、実態として認定炉では、床面に耐火レンガが、その他の壁面には主にセラミックファイバが使用されている。ここでは、認定炉を模擬した構成（床面が耐火レンガ、その他の壁面はセラミックファイバ）、試験体設置面以外がすべてセラミックファイバの構成、試験体設置面以外がすべて耐火レンガの構成の 3 種類で比較を行う。それぞれの材料の物性値を表 6.2 に示す。耐火レンガの熱慣性はセラミックファイバに比べて大きいので、耐火レンガの方が表面温度は上がりにくい。そのため、制御用熱電対の温度を加熱曲線と等しくするためには、炉内ガスと火炎の温度を高くする必要がある。

⑤炉の大きさの項目では、炉の大きさの違いによる影響を調べるために、告示の認定試験炉を想定した寸法の炉（以下、認定炉）と認定炉の各辺を 2 倍の長さにした 2 倍スケールの炉（以下、2 倍炉）で比較する。計算に使用した炉内の各辺の寸法を表 6.3 に示す。各辺の位置関係は、図 6.1 に示す通りである。炉内の温度分布は認定炉と同様と仮定し、炉内ガスの奥行きと火炎の奥行きの比率を認定炉の場合と同一とした。制御用熱電対とケイカル板との距離は、認定炉と 2 倍炉のいずれの場合も 10mm とした。炉が大きくなると炉内ガスと火炎の平均自由行程（5 章の式(5.9)及び式(5.10)参照）が大きくなり、炉内ガスと火炎の放射率が大きくなるので、炉壁温度等に影響を与えると推測される。

⑥加熱開始温度の項目は、加熱開始時の炉内温度の違いによる影響を調べるために、常温（27℃）の場合と 200℃の場合で比較する。加熱開始温度は告示では特に規定されていないが、電線工業会規格である JCS 7502 では、加熱開始温度は 200℃以下と規定されてい

ることから、上限値である 200℃とした。認定試験の実務では 1 日に数回の実験を同一の炉で行っている。そのため、炉壁への蓄熱により加熱開始温度は徐々に上がっていく影響を調べる。

表 6.1 変更する項目の一覧

項目	変更する条件
①加熱曲線	・ <u>告示曲線 (JIS A 1304 B)</u> ・ ISO 曲線 (ISO 834-1、JIS A 1304 A)
②制御用熱電対と試験体の水平距離	・ <u>10mm (告示)</u> ・ 100mm (ISO)
③制御用熱電対	・ <u>露出型熱電対 (認定炉では、慣例で露出型熱電対を使用)</u> ・ シース熱電対 (JIS A 1304) ・ プレート熱電対 (ISO 834-1)
④内張材料 (試験体面以外)	・ <u>認定炉 (床面：耐火レンガ、他面：セラミックファイバ)</u> ・ すべての面がセラミックファイバ ・ すべての面が耐火レンガ
⑤炉の大きさ	・ <u>認定炉の大きさ</u> ・ 認定炉の 2 倍スケール (各辺 2 倍)
⑥加熱開始温度	・ 27℃ (常温) ・ 200℃ (規格上限値)

※下線の条件が告示の炉を想定した条件

表 6.2 炉の内張材料の物性値^{4) 5)}

材質	放射率 [-]	熱伝導率 [W/m K]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg K]	熱慣性 [J/m ² K s ^{1/2}]
セラミックファイバ	0.67	0.17	130	1,135	158
耐火レンガ	0.75	0.41	1,820	1,100	906
ケイ酸カルシウム板	0.83	0.13	622	920	273

表 6.3 炉の大きさ

項目	長さ[m]	
	認定炉	2 倍炉
炉の横幅 W	0.46	0.92
炉の高さ H	1.24	2.48
炉内ガスの奥行き D_1	0.06	0.12
火炎の奥行き D_2	0.20	0.40

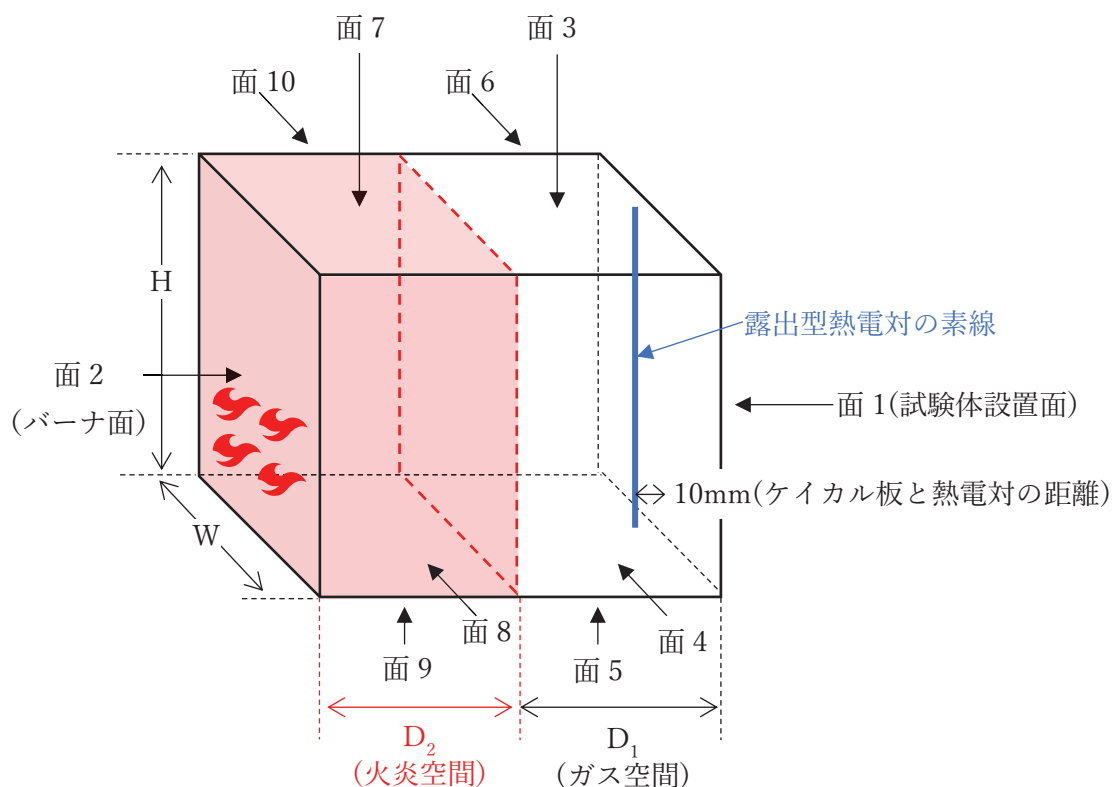


図 6.1 炉の寸法の模式図

表 6.1 に示す各パラメータの影響を調べるために、表 6.4 に示す組み合わせで炉内温度等の計算を行い、比較を行う。例えば、比較①では、制御用熱電対とケイカル板距離は 10mm、制御用熱電対は露出型熱電対、炉の内張材料は実態を想定した構成（試験体面：ケイカル板、床面：耐火レンガ、他面：セラミックファイバ）、炉の大きさは告示を想定した寸法とした上で、加熱曲線が告示曲線の場合と ISO 曲線の場合のそれぞれで計算を行い、計算結果を比較する。比較⑦は、加熱曲線、制御用熱電対とケイカル板距離、制御用熱電対の種類のをすべてを ISO の加熱条件にして計算し、すべて告示の条件の場合と比較する。

表 6.4 計算条件一覧

影響分析	計算条件					
	加熱曲線	制御用熱電対とケイカル板距離	制御用熱電対の形状	内張材料	炉の大きさ	加熱開始温度
比較①：加熱曲線の影響	①告示曲線 ②ISO 曲線	10mm	露出型	実態	認定炉	27°C
比較②：制御用熱電対とケイカル板距離	告示曲線	①10mm ②100mm	露出型	実態	認定炉	27°C
比較③：制御用熱電対の形状の影響	告示曲線	100mm	①露出型 ②シース ③プレート	実態	認定炉	27°C
比較④：内張材料の影響	告示曲線	10mm	露出型	①実態 ②セラミック ③耐火レンガ	認定炉	27°C
比較⑤：炉の大きさの影響	告示曲線	10mm	露出型	実態	①認定炉 ②2倍炉	27°C
比較⑥：加熱開始温度の影響	告示曲線	10mm	露出型	実態	認定炉	①27°C ②200°C
比較⑦：告示とISO の比較	①告示曲線 ②ISO 曲線	①10mm ②100mm	①露出型 ②プレート	実態	認定炉	27°C

6. 2. 2 比較する計算値

第 5 章で計算したケイカル板表面温度 (T_1)、火炎側の炉壁表面温度 (T_g)、ガス側の炉壁表面温度 (T_4)、炉内ガス温度 (T_{gas})、ケイカル板表面が吸収する正味の放射熱流 ($q_{net,1}$)、対流熱流 ($q_{cnv,1}$) を比較に用いる。

また、ケイカル板表面が吸収する熱流の 30 分間及び 60 分間の積算熱量について、加熱開始から 30 分までの熱流の積算熱量を Q_{30} 、加熱開始から 60 分までの熱流の積算熱量を Q_{60} とすると、それぞれ

$$Q_{30} = \int_0^{1800} (q_{net,1} + q_{cnv,1}) dt \quad (6.1)$$

$$Q_{60} = \int_0^{3600} (q_{net,1} + q_{cnv,1}) dt \quad (6.2)$$

で計算できるので、これらの計算結果も比較する。

6. 3 計算結果の比較

(1) 加熱曲線の影響（告示曲線、ISO 曲線）

加熱曲線が告示曲線と ISO 曲線の場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.2 に、炉壁表面温度を図 6.3 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.4 に示す。他の加熱条件はいずれも、制御用熱電対が露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm である。

図 6.2 は、ケイカル板表面温度 (T_1) と炉内ガス温度 (T_{gas}) の計算結果である。ケイカル板表面温度及び炉内ガス温度ともに、ISO 曲線の方が加熱開始直後の温度上昇が告示曲線よりも大きく、その後、10 分から 30 分まではわずかに告示曲線の方が高くなり、30 分以降はわずかに ISO 曲線の方が高くなる。これらは加熱曲線を反映した結果といえる。

図 6.3 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度 (T_8) と炉内ガスに接する壁面温度 (T_4) の計算結果である。壁面の材質はセラミックファイバである。図 6.2 のケイカル板表面温度と同様、加熱開始直後は ISO 曲線の方が壁面温度の温度上昇が大きい。また火炎側の壁面温度と炉内ガス側壁面温度を比較すると、火炎側の方がやや温度は高い。

図 6.4 に示すケイカル板表面の放射熱流は、加熱開始直後は ISO 曲線の方が短時間で増加するが、加熱 5 分後に逆転し、告示曲線の方が高くなる。30 分以降は ISO 曲線の方が高いが、その差は非常に小さい。対流熱流も加熱開始直後は ISO 曲線の方が短時間で増加するが、ISO 曲線では加熱 1 分後、告示曲線では加熱 2 分後にピークを迎え、その後はいずれも減少した。10 分以降は、対流熱流は負の値となり、告示曲線と ISO 曲線の場合でほぼ一致した。負の対流熱流は、ケイカル板表面温度がガス温度よりも高いことに対応している。

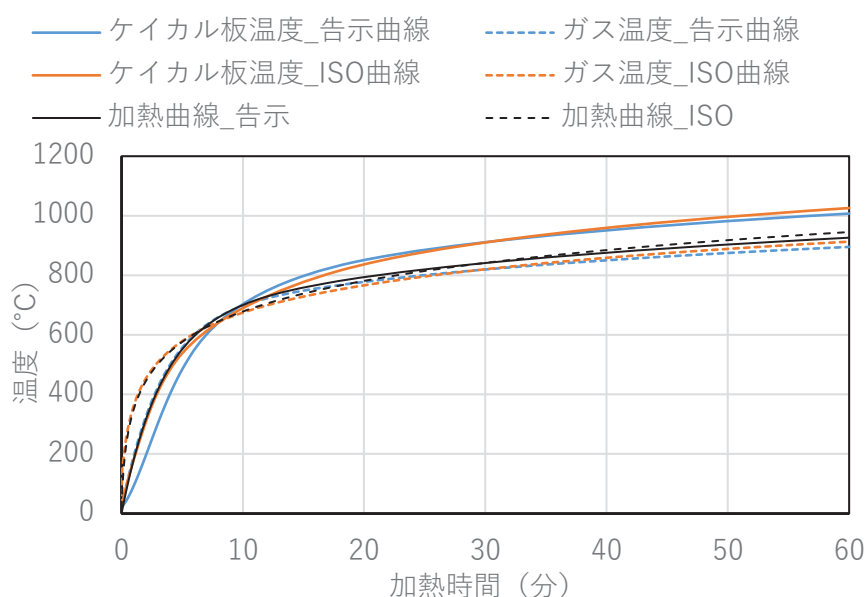


図 6.2 加熱曲線の違いによるケイカル板表面温度と炉内ガス温度の比較
(露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

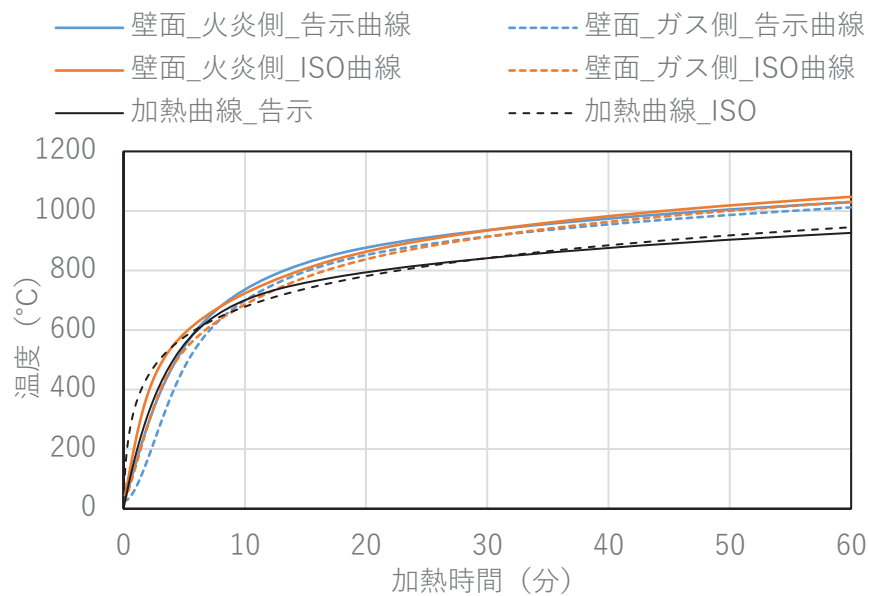


図 6.3 加熱曲線の違いによる炉壁表面温度の比較
 (露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

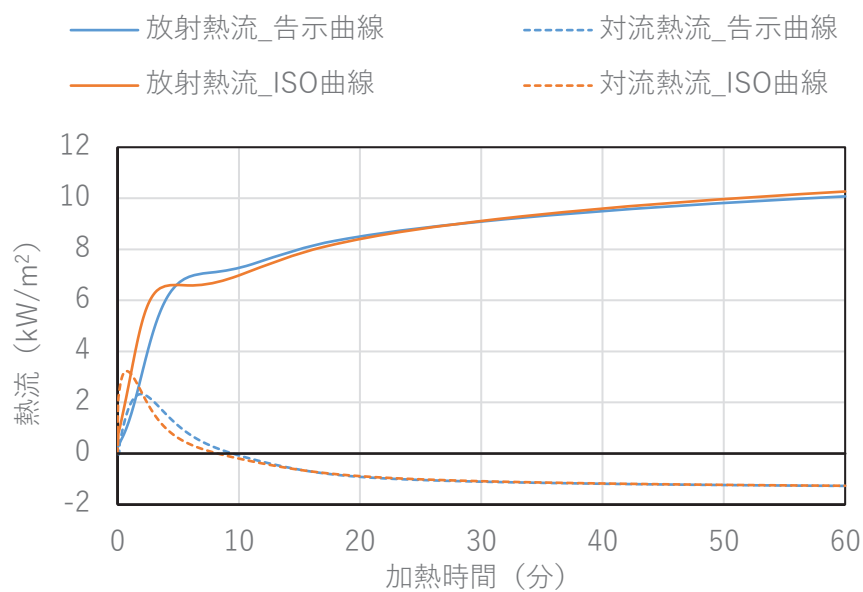


図 6.4 加熱曲線の違いによるケイカル板表面の熱流の比較
 (露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

(2) 制御用熱電対とケイカル板との距離 (10mm と 100mm)

制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm と 100mm の場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.5 に、炉壁表面温度を図 6.6 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.7 に示す。他の加熱条件はいずれも、加熱曲線が告示曲線、制御用熱電対が露出型熱電対である。

図 6.5 より、炉内ガス温度は 10mm と 100mm のいずれも加熱曲線にほぼ一致しているが、ケイカル板表面温度は、100mm の方が大幅に低い。

図 6.6 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度と炉内ガスに接する壁面温度の計算結果であり、壁面の材質はセラミックファイバである。図 6.5 のケイカル板表面温度と同様、壁面温度は 100mm の方が大幅に低く、30 分以降は加熱曲線と同程度の温度である。

図 6.7 に示すケイカル板表面の放射熱流は、終始 100mm の方が低く、大きな差がみられた。対流熱流は、加熱 2 分までは 10mm と 100mm も同様に増加し、ピークを迎えるが、それ以降は距離 100mm の方は緩やかに減少し、加熱 60 分でほぼゼロとなった。距離 10mm では 10 分以降は負の値となった。

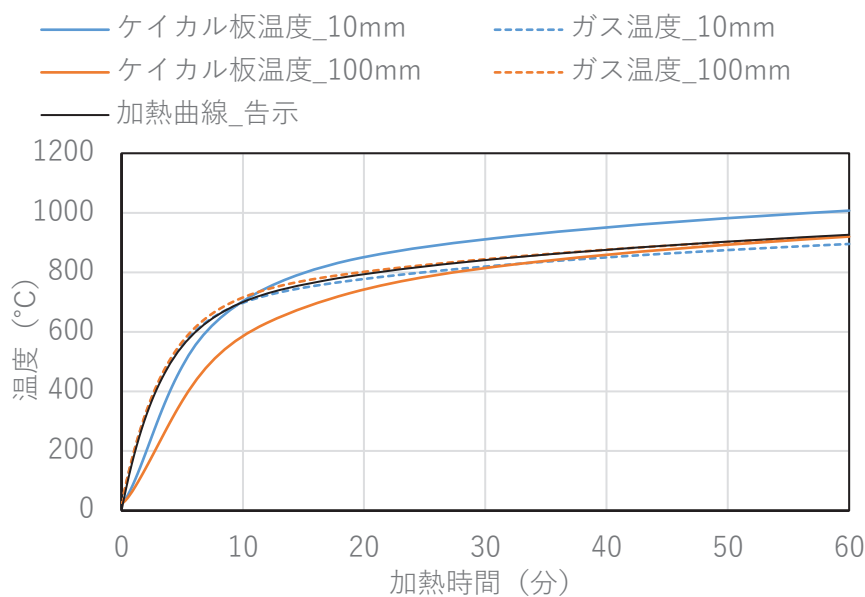


図 6.5 制御用熱電対とケイカル板距離の違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較 (告示曲線、露出型熱電対制御)

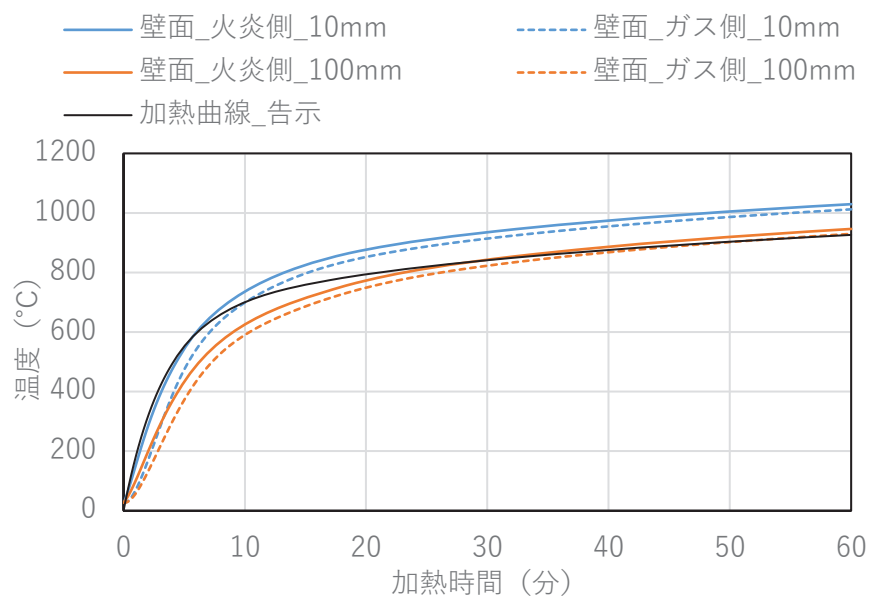


図 6.6 制御用熱電対とケイカル板距離の違いによる炉壁表面温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

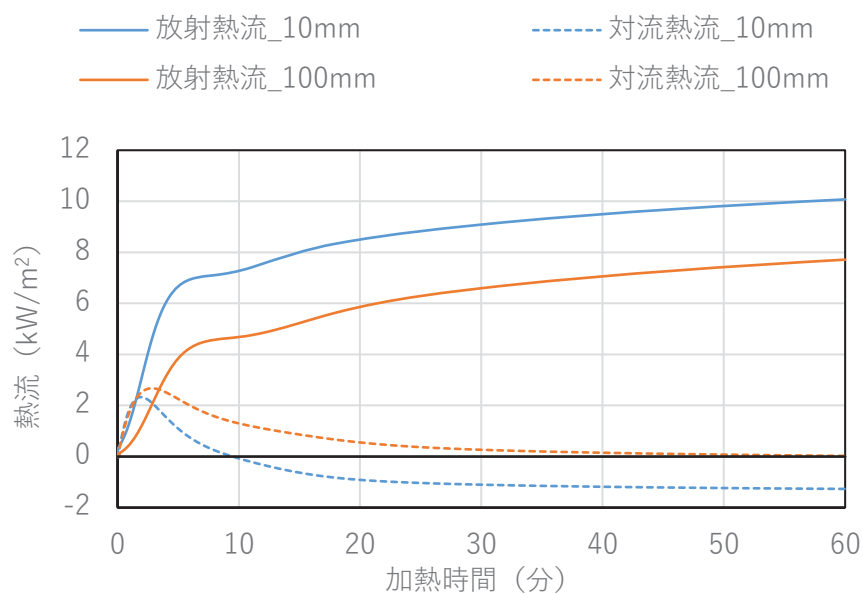


図 6.7 制御用熱電対とケイカル板距離の違いによる熱流の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

（３）制御用熱電対の影響（露出型熱電対、シース熱電対、プレート熱電対）

制御用熱電対が露出型熱電対、シース熱電対、プレート熱電対の場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.8 に、炉壁表面温度を図 6.9 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.10 に示す。他の加熱条件はいずれも、加熱曲線が告示曲線、制御用熱電対とケイカル板との距離が 100mm である。

図 6.8 より、炉内ガス温度は露出型熱電対制御ではほぼ加熱曲線に一致しているが、シース熱電対制御では加熱 30 分頃までは告示曲線よりもやや高い。プレート熱電対制御では加熱開始直後に他の熱電対に比べて大幅に温度が増加する。いずれの熱電対も 30 分以降はほとんど差がない。ケイカル板表面温度は、加熱 30 分までは露出型熱電対制御が最も低く、シース熱電対制御、プレート熱電対制御の順に高くなるが、30 分以降は、ほとんど差はない。

図 6.9 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度と炉内ガスに接する壁面温度の計算結果であり、壁面の材質はセラミックファイバである。図 6.6 のケイカル板表面温度と同様、壁面温度は加熱 30 分までは露出型熱電対制御が最も低く、シース熱電対制御、プレート熱電対制御の順に高くなるが、30 分以降は、ほとんど差はない。

図 6.10 に示すケイカル板表面の放射熱流は、加熱開始直後に差があり、プレート熱電対制御が最も短時間で増加し、次いでシース熱電対制御、露出型熱電対制御の順となった。いずれも 30 分以降はほぼ一致し、差は小さい。対流熱流は、プレート熱電対制御では加熱開始直後に急増し、その後、徐々に低下した。シース熱電対制御と露出型熱電対制御は、同様の傾向であり、加熱 2 分頃にピークを迎え、その後は徐々に低下した。いずれの制御用熱電対も対流熱流は、30 分以降はほぼ一致し、差はみられない。

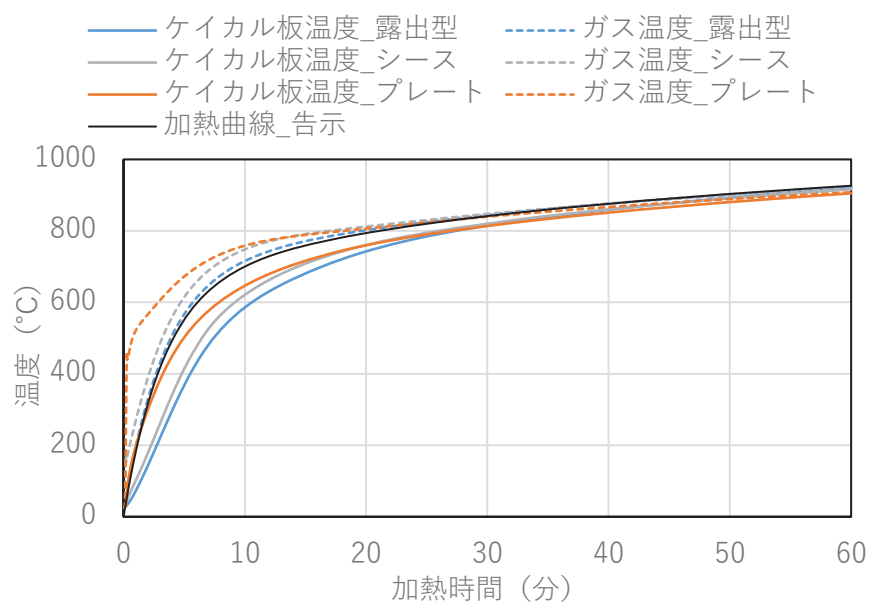


図 6.8 制御用熱電対の違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm)

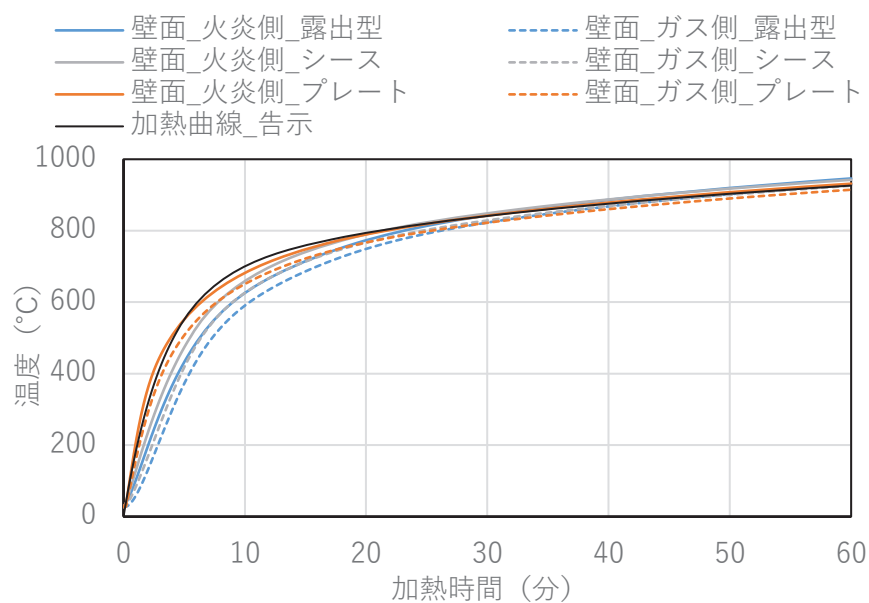


図 6.9 制御用熱電対の違いによる炉壁表面温度の比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm)

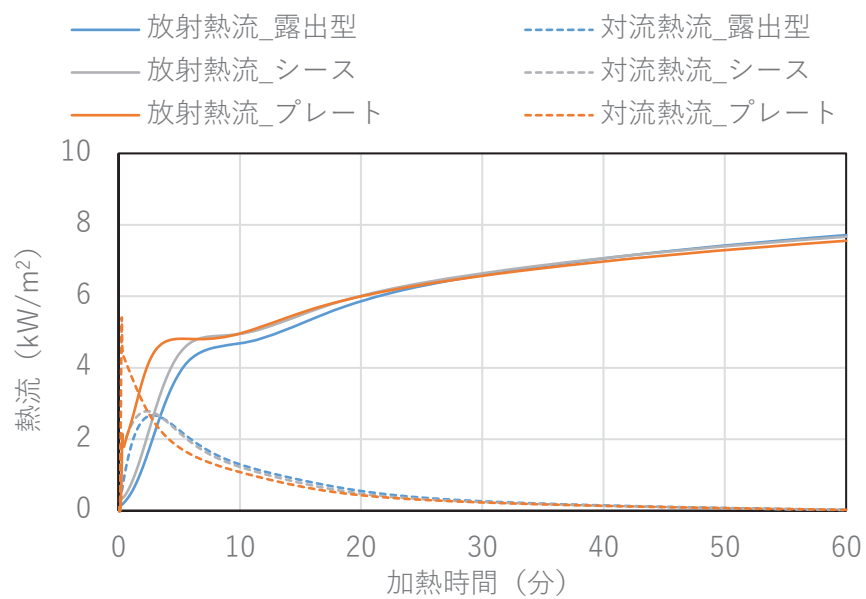


図 6.10 制御用熱電対の違いによる熱流の比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm)

（４）内張材料の影響（認定炉の実態、セラミックファイバ、耐火レンガ）

小型加熱炉の内張材料について、試験体を設置するケイカル板以外の面を認定炉の実態（床面を耐火レンガ、その他の壁面をセラミックファイバ）とした場合、すべてセラミックファイバとした場合、すべて耐火レンガとした場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.11 に、炉壁表面温度を図 6.12 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.13 に示す。他の加熱条件はいずれもすべて告示の条件であり、加熱曲線が告示曲線、制御用熱電対が露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板との距離が 10mm である。

図 6.11 より、炉内ガス温度は内張材料が実態の場合とすべてセラミックファイバの場合は基準曲線よりもわずかに低いが、すべて耐火レンガの場合は基準曲線よりもわずかに高い。ケイカル板表面温度は、内張材料が実態の場合とすべてセラミックファイバの場合で類似しているが、すべてセラミックファイバの方が、加熱開始から 20 分までの温度はやや高い。一方、内張材料が耐火レンガの場合は、他の条件と比べて温度上昇が大幅に遅く、また、60 分時点でも基準曲線程度の温度であり、他の条件よりも温度は低い。

図 6.12 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度と炉内ガスに接する壁面温度の計算結果である。図 6.11 のケイカル板表面温度と同様、内張材料が実態の場合とすべてセラミックファイバの場合で類似しているが、すべてセラミックファイバの場合の方が、炉壁温度はやや高い。一方、内張材料が耐火レンガの場合は、他の条件と比べて温度上昇が大幅に遅く、また、60 分時点でも基準曲線程度の温度であり、他の条件よりも温度は低い。

図 6.13 に示すケイカル板表面の放射熱流は、内張材料が実態の場合とすべてセラミックファイバの場合で傾向は類似しているが、加熱 3 分から 20 分までは、すべてセラミックファイバの場合の方がやや大きい。すべて耐火レンガの場合は、放射熱流は他の条件に比べて大幅に小さい。対流熱流は、内張材料が実態の場合とすべてセラミックファイバの場合で類似しているが、すべてセラミックファイバの方がやや小さい。すべて耐火レンガの場合は、終始、他の条件よりも対流熱流は大きい。すべて耐火レンガの場合には、炉内の放射熱が弱くなり、ケイカル板は対流で加熱される割合が大きくなる。

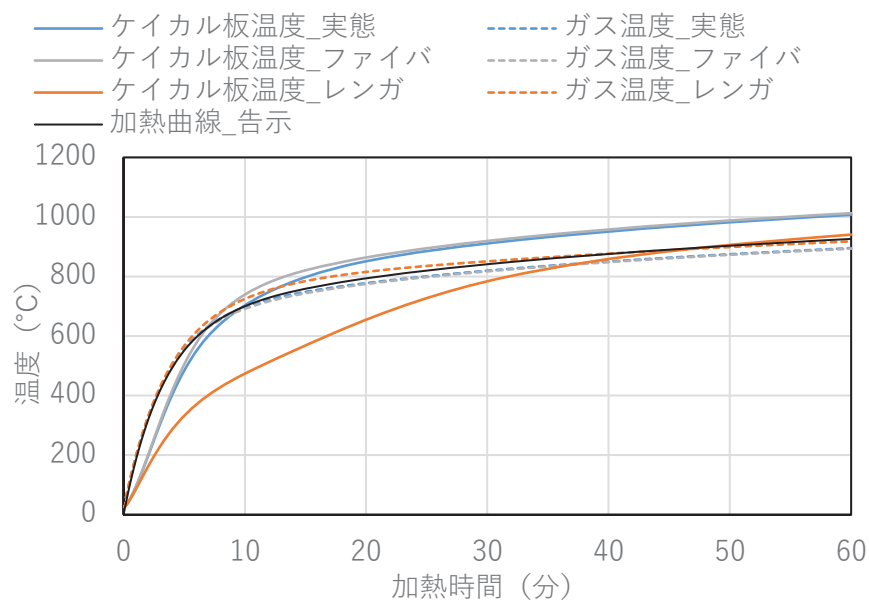


図 6.11 内張材料の違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

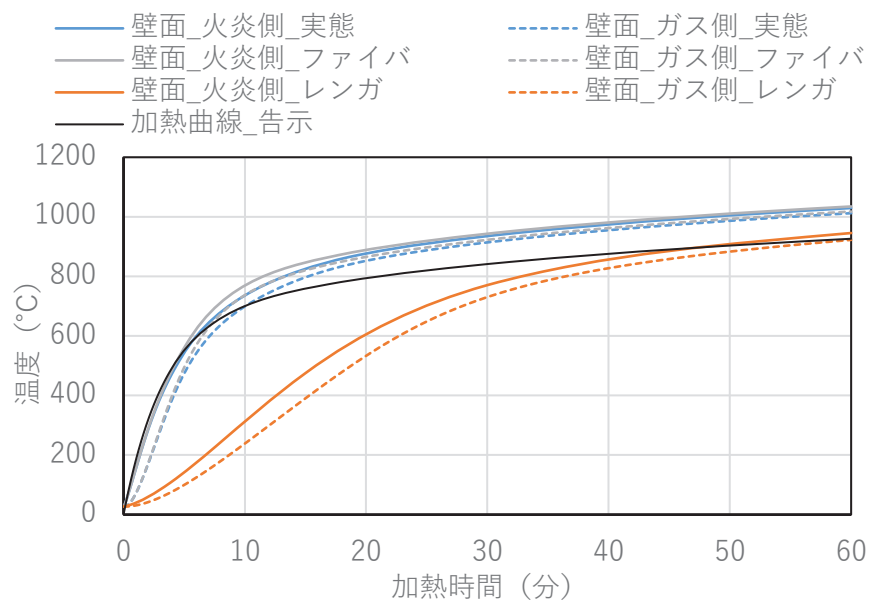


図 6.12 内張材料の違いによる炉壁表面温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

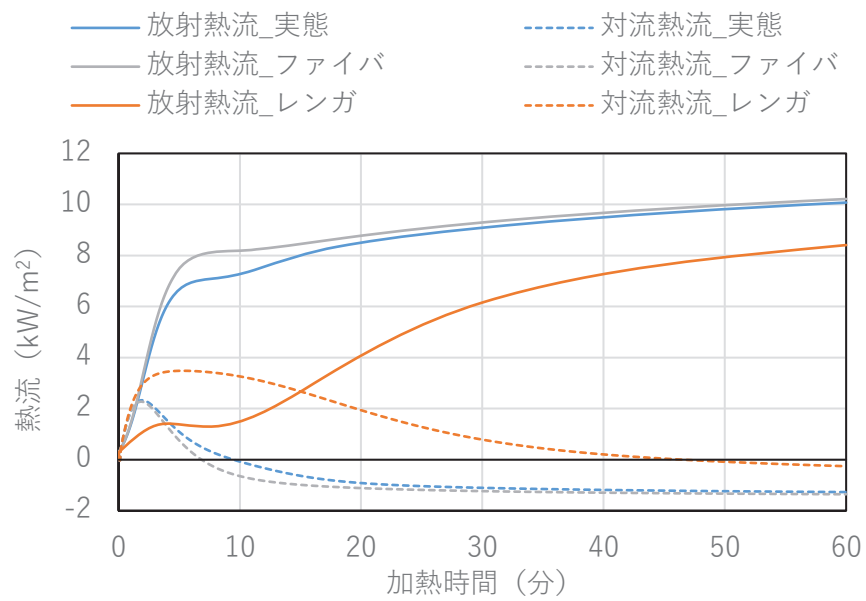


図 6.13 内張材料の違いによる熱流の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

(5) 炉の大きさの影響 (認定炉、2 倍炉)

炉の大きさについて、認定炉の場合と認定炉の各辺を 2 倍とした炉 (2 倍炉) の場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.14 に、炉壁表面温度を図 6.15 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.16 に示す。他の加熱条件はいずれも、加熱曲線が告示曲線、制御用熱電対が露出型熱電対である

図 6.14 より、炉内ガス温度は認定炉と 2 倍炉で差は非常に小さいが、ケイカル板表面温度は 2 倍炉の方が高い。

図 6.15 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度と炉内ガスに接する壁面温度の計算結果であり、壁面の材質はセラミックファイバである。図 6.14 のケイカル板表面温度と同様、2 倍炉の方が、炉壁温度はやや高い。

図 6.16 に示すケイカル板表面の放射熱流は、加熱 3 分頃まではほぼ同様であるが、それ以降は 2 倍炉の方が高い。対流熱流は、傾向は類似しているが、2 倍炉の方がやや小さい。

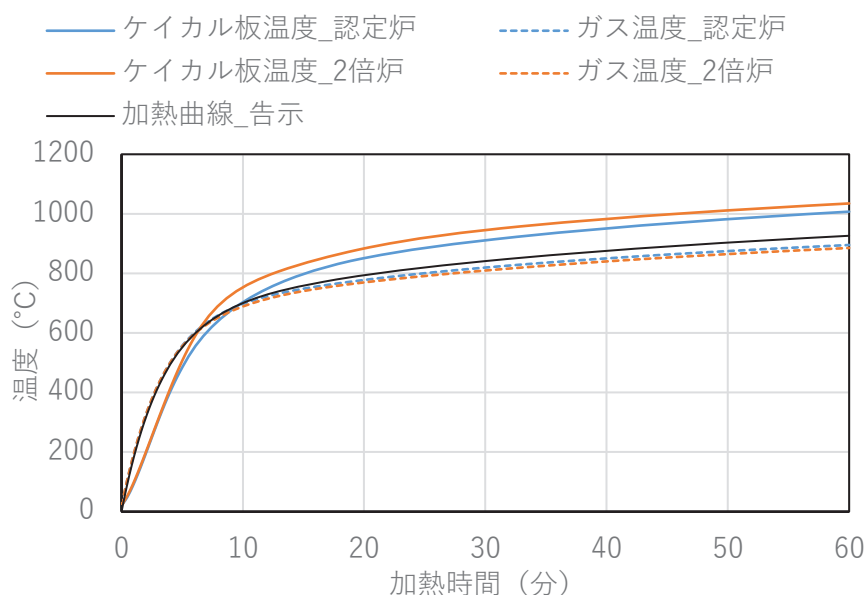


図 6.14 炉の大きさの違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

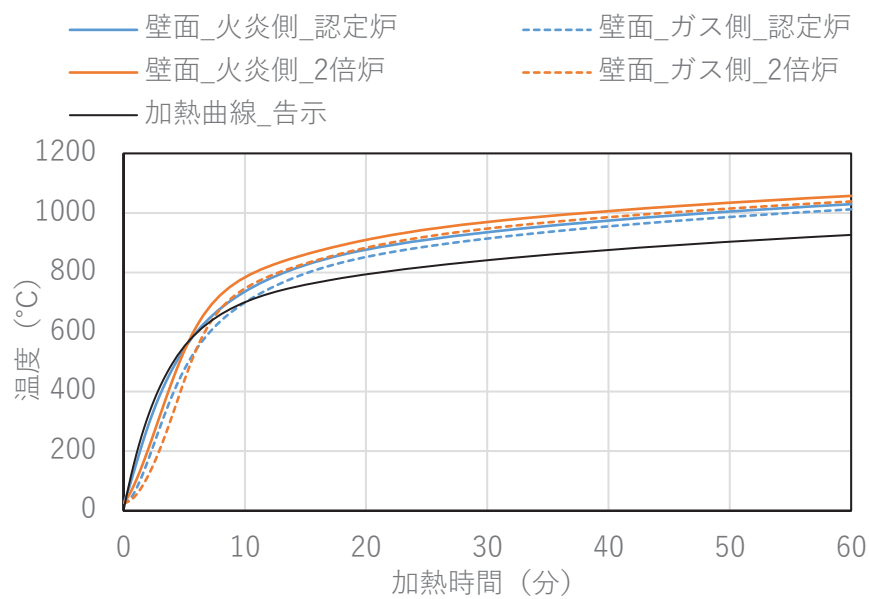


図 6.15 炉の大きさの違いによる炉壁表面温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

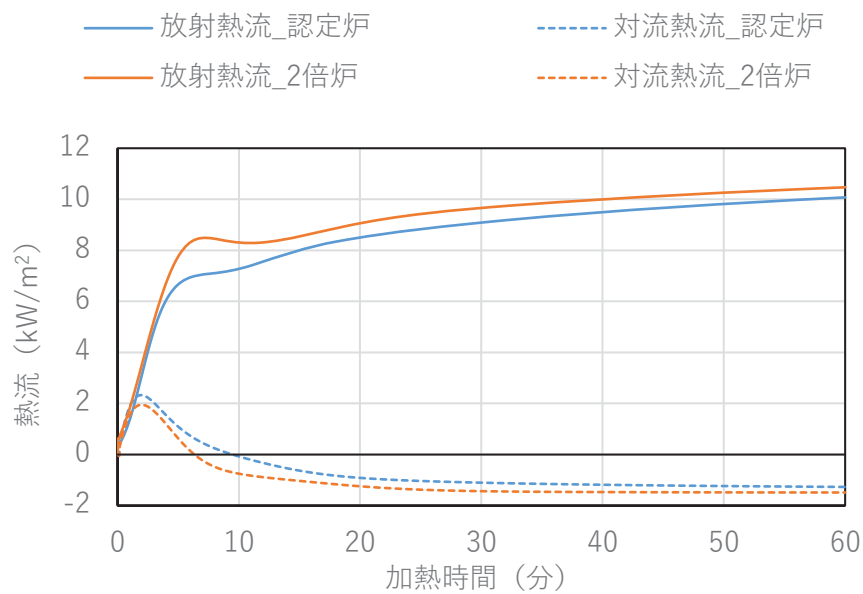


図 6.16 炉の大きさの違いによる熱流の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

(6) 加熱開始時の炉内ガス温度 (27°C、200°C)

連続して試験を行う場合には、前回の試験に伴い炉壁に蓄熱され、炉をセットした時の炉内温度が高くなる。この影響を考慮するため、加熱開始時の炉内ガス温度を 200°C に設定した。併せて、加熱開始時の炉壁（表面及び内部）の温度も適切に与える必要がある。そこで、第 5 章で作成した数値解析プログラムを用いて、バーナ停止後に炉内を自然冷却させた場合の炉壁温度を計算した。その際、バーナ停止後の制御用熱電対の温度は、第 3 章で示した 3.4 (1) の実測値を用いた。

壁面温度（図 5.1 の面 4）と床面温度（図 5.1 の面 5）の計算結果を図 6.17 に示す。図 6.17 は、30 分間加熱後、バーナを停止し、自然冷却した場合を想定しており、冷却時（30 分以降）の制御用熱電対の温度のみ実測値で、壁面温度、床面温度、ガス温度は計算値である。壁面の材質はセラミックファイバ、床面の材質は耐火レンガである。図より、炉内冷却中に炉内ガス温度が 200°C になるのは、加熱開始後 42.3 分であった。また、炉壁（図 5.1 の面 4）と床（図 5.1 の面 5）の表面及び内部温度をそれぞれ図 6.18、図 6.19 に示す。T1 から T6 の温度は、図 6.20 に示す位置の炉壁温度であり、T1 は炉内側の炉壁表面温度、T6 は試験室側の炉壁表面温度である。

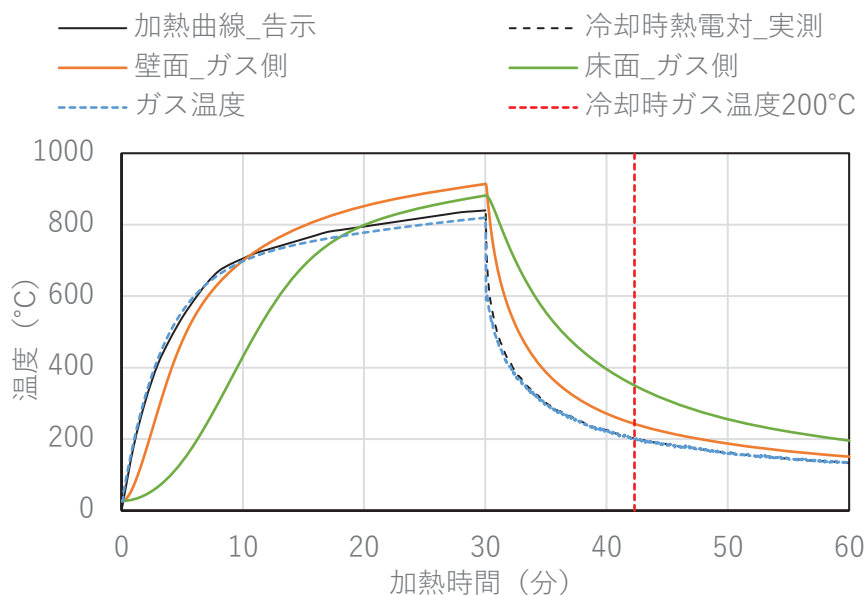


図 6.17 炉内温度および炉壁、炉床表面温度の計算結果 (30 分加熱)

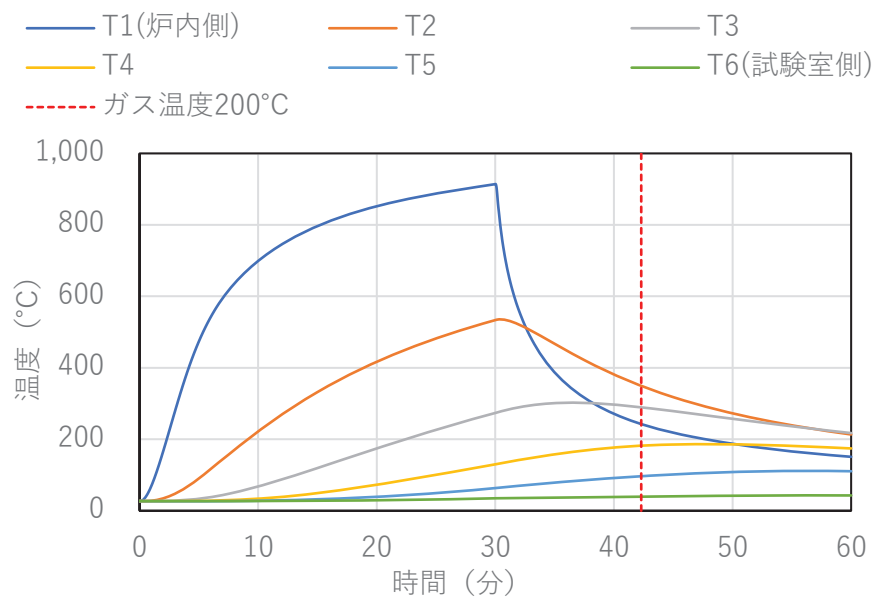


図 6.18 炉壁温度の時間変化（面 4：セラミックファイバ）

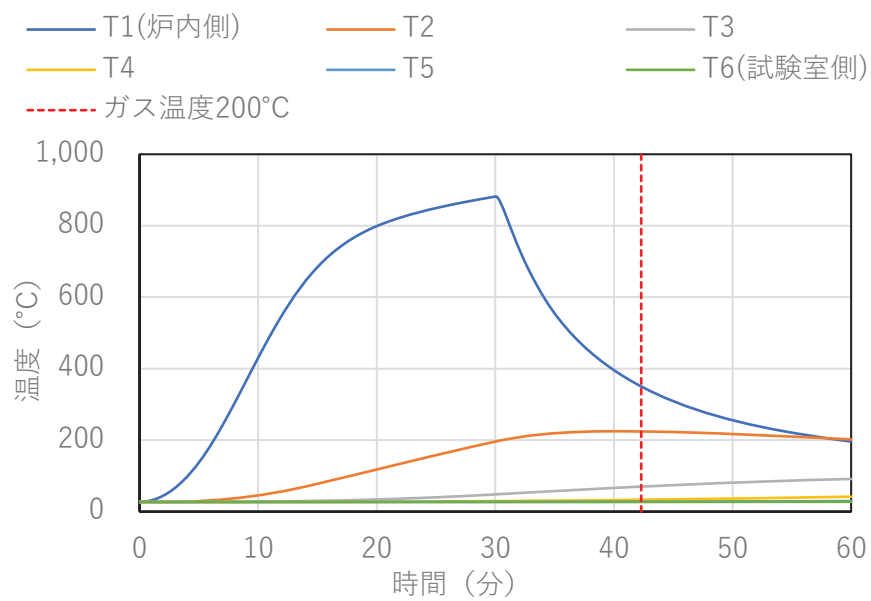


図 6.19 炉床温度の時間変化（面 5：耐火レンガ）

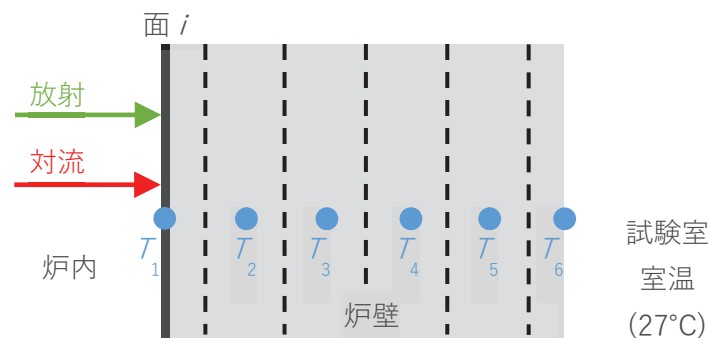


図 6.20 炉壁内および境界の格子点の模式図

図 6.18、図 6.19 より、ガス温度が 200℃になる 42.3 分時の炉壁温度は、表 6.5 の通りである。これらの温度を加熱開始時の温度として数値解析プログラムに入力する。その際、面 3 と 6 へは面 4 の温度を、面 2、7、10 へは面 8 の温度を加熱開始温度として使用した。ケイカル板設置面である面 1 については、実際のケーブルの耐火試験では、常温のケイカル板を用いるので、面 1 の加熱開始温度は、表面および内部 (T1~T6) のすべてを常温 (27℃) に設定した。

計算結果を図 6.21 から図 6.23 に示す。図 6.22 はケイカル板表面温度とガス温度の計算結果である。ガス温度は、200℃開始の場合は加熱 1 分頃まではほぼ 200℃であり、27℃開始の場合よりも高いものの、それ以降はほぼ一致し、図中の破線は重なっている。ケイカル板表面温度は、加熱 20 分頃までは 200℃開始の方がやや高く、差がみられるが、それ以降はほぼ一致した。

図 6.22 の炉壁表面温度は、炉内ガスに接する壁面 4 と床面 5 の計算結果である。いずれも 200℃開始の方が、開始時の温度が高いため、加熱 20 分頃までは 200℃開始の方が壁面 4 と床面 5 の温度は高い。

図 6.23 に示すケイカル板表面の放射熱流は、加熱 30 分頃までは 200℃開始の方がやや大きく、対流熱流は 27℃開始の方がやや大きく、差がみられた。

表 6.5 42.3 分時点の炉壁温度

材質	炉壁	炉壁温度[℃]					
		T1	T2	T3	T4	T5	T6
セラミック ファイバ	壁面ガス側 (面 4)	243	350	290	182	97	40
	壁面火炎側 (面 8)	246	358	299	189	101	40
耐火レンガ	床面ガス側 (面 5)	350	225	70	33	28	27
	床面火炎側 (面 9)	353	234	73	34	28	27

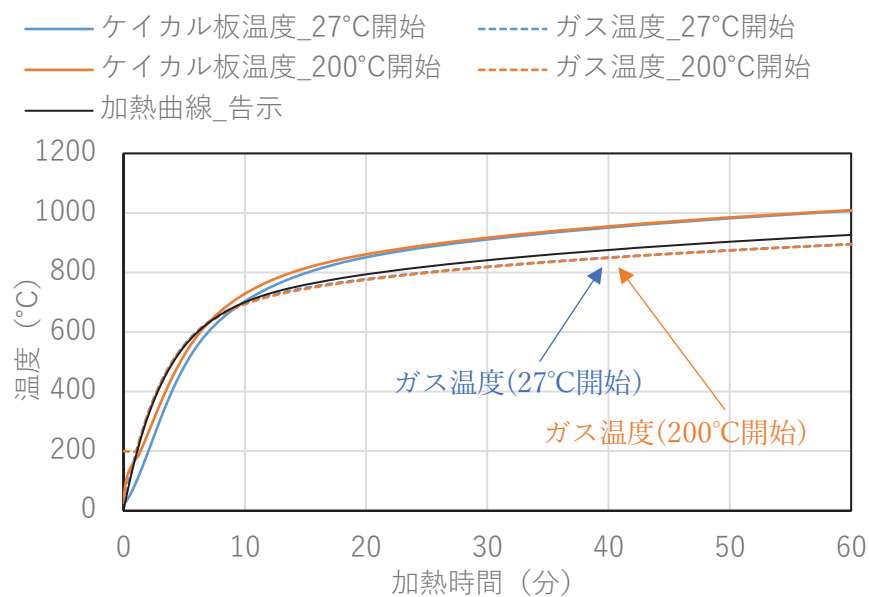


図 6.21 加熱開始温度の違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

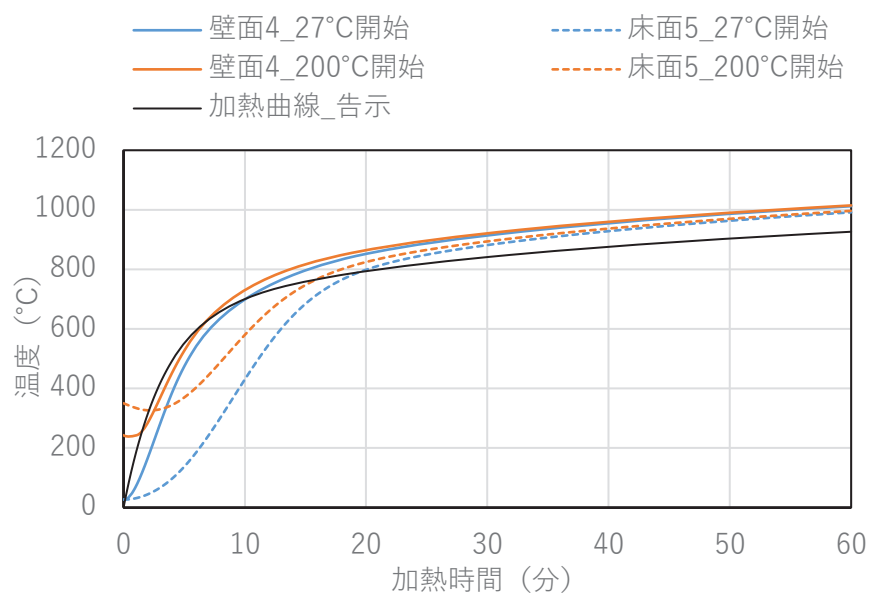


図 6.22 加熱開始温度の違いによる炉壁表面温度の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

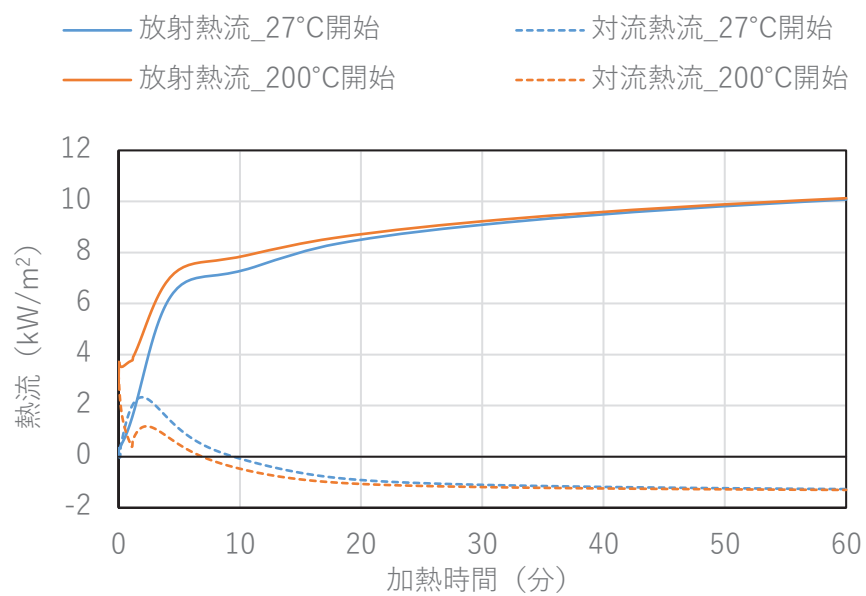


図 6.23 加熱開始温度の違いによる熱流の比較
(告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

(7) 告示と ISO の比較（加熱曲線、制御用熱電対とケイカル板距離、制御用熱電対の種類）

加熱曲線、制御用熱電対とケイカル板距離、制御用熱電対の種類のすべての条件を告示とした場合と ISO にした場合のケイカル板表面温度と炉内ガス温度を図 6.24 に、炉壁表面温度を図 6.25 に、ケイカル板表面の熱流を図 6.26 に示す。すべて ISO の場合は、加熱開始直後の炉内ガスの温度上昇が非常に大きく、刻み時間当たりの温度変化が大きいため、すべて ISO の場合のみ、刻み時間を 2 秒から 1 秒へ変更して計算した。

図 6.24 より、すべて ISO では、加熱開始直後にケイカル板表面温度と炉内ガス温度が急激に増加した。6 分以降は、ケイカル板表面温度はすべて ISO の加熱条件の方が低くなり、制御用熱電対とケイカル板距離を 100mm にした影響と考えられる。

図 6.25 の炉壁表面温度は、火炎に接する壁面温度と炉内ガスに接する壁面温度の計算結果である。壁面温度は、すべて ISO の加熱条件の方が加熱開始直後の温度上昇は大きい、6 分以降は逆転し、すべて告示の方が高くなった。

図 6.26 に示すケイカル板表面の放射熱流は、すべて ISO では加熱開始直後に急激に増加するが、すぐに減少し、3 分以降はすべて告示の方が大きくなった。対流熱流も加熱開始直後に急激に増加するが、すぐに減少し、60 分時点ではほぼゼロとなった。

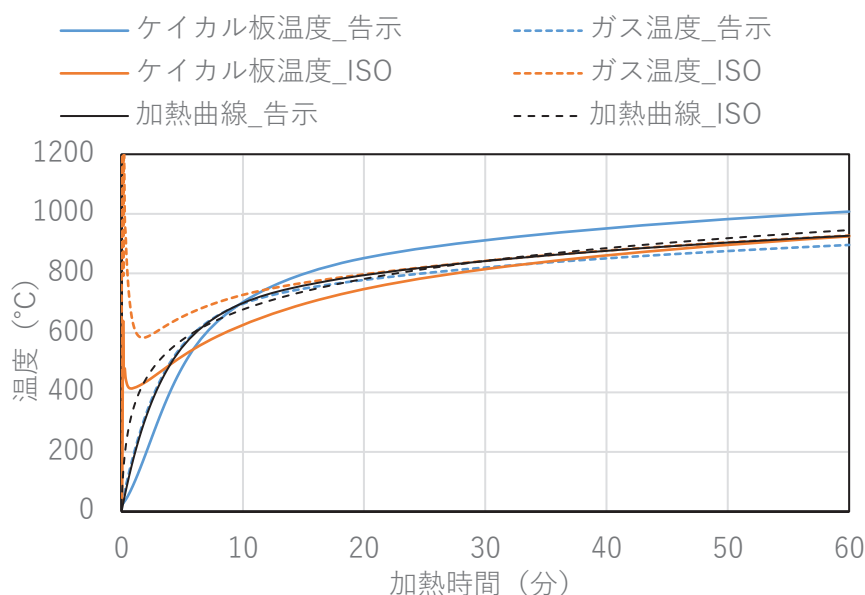


図 6.24 告示と ISO の加熱条件の違いによるケイカル板表面温度とガス温度の比較

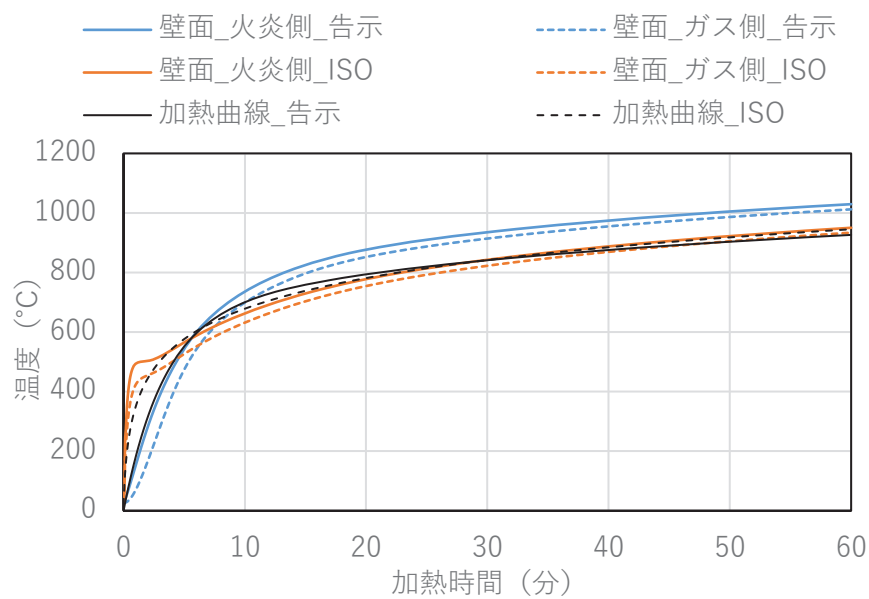


図 6.25 告示と ISO の加熱条件の違いによる炉壁表面温度の比較

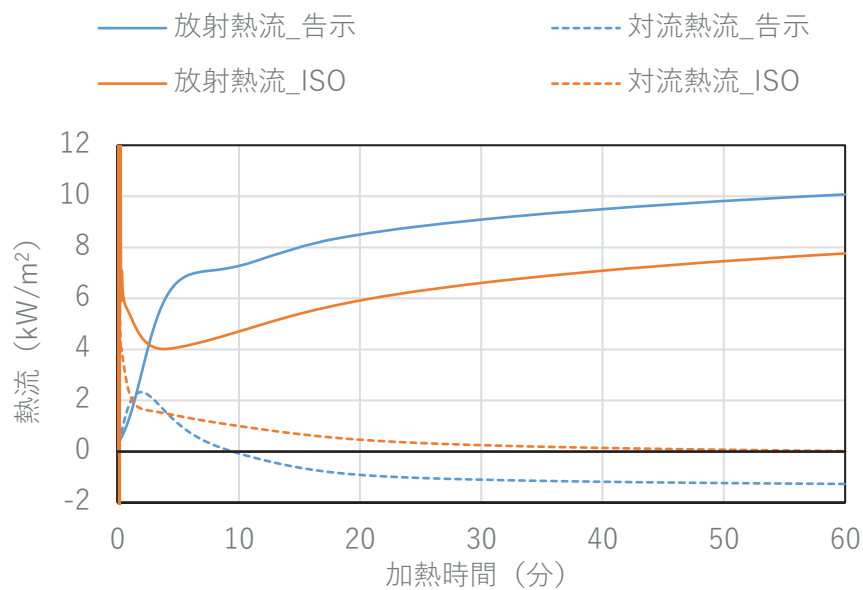


図 6.26 告示と ISO の加熱条件の違いによる熱流の比較

6. 4 考察

(1) 制御用熱電対の比較

加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離は 100mm として、制御用熱電対のみを変更した場合のケイカル板表面の積算熱量を図 6.27 に示す。 Q_{30} は加熱開始から 30 分までの積算熱量、 Q_{60} は加熱開始から 60 分までの積算熱量である。 Q_{30} を比較すると、露出型熱電対制御が最も小さく、それと比べてシース熱電対は 4%、プレート熱電対は 7% 大きい。 Q_{30} のうち、対流熱流はいずれも 1.9MJ/m^2 であり、熱電対の種類による差はほとんどない。

Q_{60} は、 Q_{30} と同様の傾向ではあるが熱電対による差は小さくなり、露出型熱電対とシース熱電対との差は 2%、プレート熱電対との差は 3% である。図 6.10 に示したように、放射熱流と対流熱流はそれぞれ、加熱 30 分以降は熱電対間で差がないため、 Q_{60} は Q_{30} よりも熱電対間の差が小さくなった。 Q_{60} のうち、対流熱流はいずれも 2.1MJ/m^2 であり、熱電対の種類による差はほとんどない。

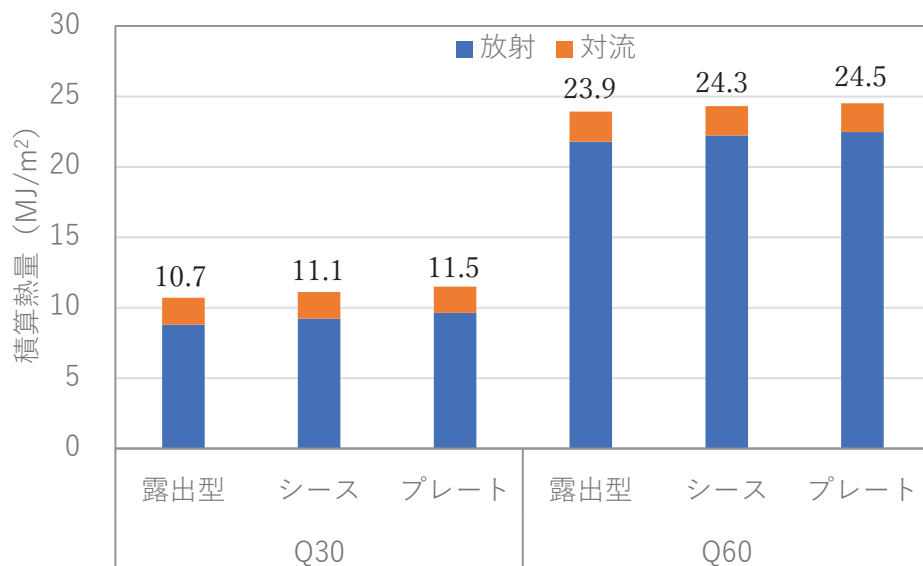


図 6.27 制御用熱電対の違いによる比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm)

(2) 加熱条件の ISO 834-1 への整合

告示の加熱条件から、加熱曲線のみを ISO 曲線へ変更した場合、制御用熱電対とケイカル板との距離のみを 100mm へ変更した場合、すべて ISO へ変更 (ISO 曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm、プレート熱電対制御) した場合のケイカル板表面の積算熱量を図 6.28 に示す。すべて告示の加熱条件の場合と加熱曲線のみを ISO 曲線とした場合を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれもほぼ一致しており、差は非常に小さい。いずれも熱流の大部分は放射熱流によるものであり、対流熱流は負の値である。

すべて告示の加熱条件の場合と、制御用熱電対とケイカル板距離のみを 100mm へ変更した場合を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれも制御用熱電対とケイカル板距離 100mm の方が小さく、 Q_{30} は 18%、 Q_{60} は 15% 小さい。告示の加熱条件では、対流熱流は負の値であるが、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm では、対流熱流は正の値である。

すべて告示の場合とすべて ISO の場合を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれもすべて ISO の方が小さく、 Q_{30} は 10%、 Q_{60} は 12% 小さい。

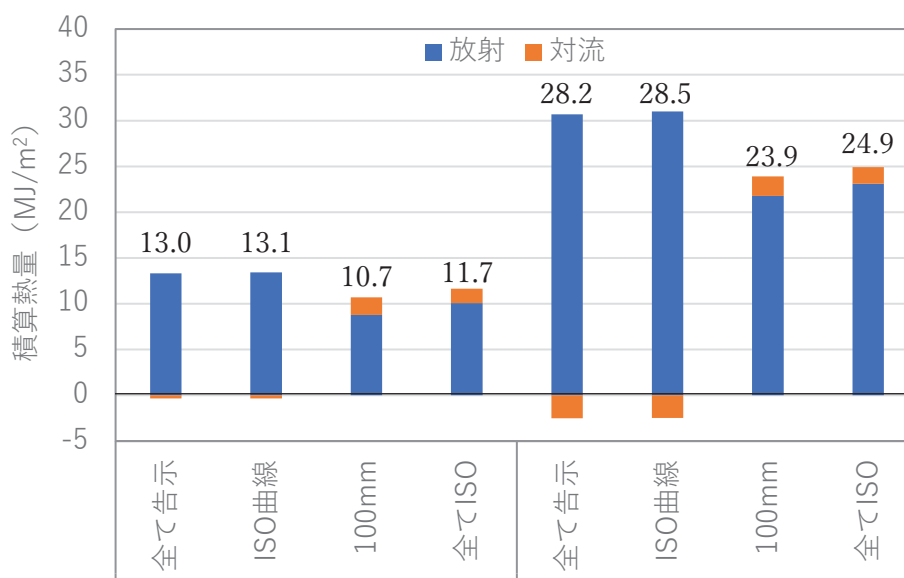


図 6.28 加熱条件の違いによる比較

(3) 炉の内張材料の影響

炉の内張材料について、試験体を設置するケイカル板以外の面を認定炉の実態（床面を耐火レンガ、その他の壁面をセラミックファイバ）とした場合、すべてセラミックファイバとした場合、すべて耐火レンガとした場合のケイカル板表面の積算熱量を図 6.29 に示す。図中の「ファイバ」は、ケイカル板以外の面をすべてセラミックファイバとした場合、「レンガ」はケイカル板以外の面をすべて耐火レンガとした場合である。

内張材料が実態の場合とセラミックファイバの場合を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれもセラミックファイバの場合の方がわずかに大きく、 Q_{30} は 3%、 Q_{60} は 1% 大きい。いずれも対流熱流は負の値である。

内張材料が実態の場合と耐火レンガの場合を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれも耐火レンガの場合の方が小さく、 Q_{30} は 25%、 Q_{60} は 17% 小さい。耐火レンガは表 6.2 で示したように熱慣性が大きいため、図 6.12 に示したように炉壁温度が上がりにくい。それにより、各壁面からケイカル板への放射が弱く、ケイカル板表面温度や放射熱流が小さくなったと考えられる。

対流熱流は耐火レンガの場合のみ正の値である。対流熱流の計算は、式(5.20)で示した

通りであり、ケイカル板表面（ $i=1$ ）の対流熱流は式(6.3)で表せる。

$$q_{cnv,1} = h_1(T_{gas} - T_1) \quad (6.3)$$

式で示す通り、炉内ガス温度とケイカル板表面温度の差が大きいほど、ケイカル板表面の対流熱流は大きくなるが、図 6.11 で示した通り、耐火レンガの場合には炉内の放射が弱く、ケイカル板の温度が低いために対流熱流が正になったといえる。

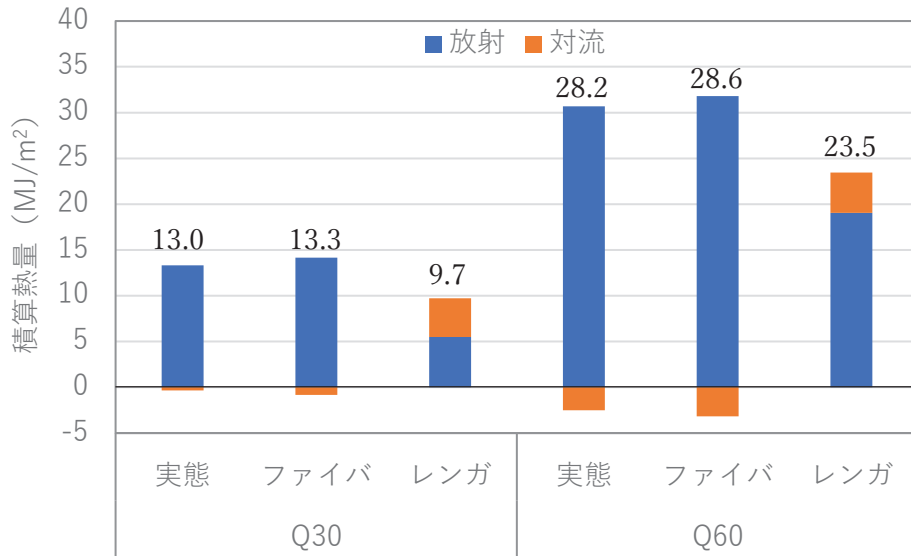


図 6.29 内張材料の違いによる比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm)

(4) 炉の大きさの影響

小型加熱炉の大きさについて、認定炉と 2 倍炉の場合のケイカル板表面の積算熱量を図 6.30 に示す。両者を比較すると、 Q_{30} 、 Q_{60} いずれも 2 倍炉の方がわずかに大きく、 Q_{30} は 5%、 Q_{60} は 3%大きい。いずれも対流熱流は負の値である。

炉が大きくなることで炉内ガスと火炎のそれぞれの平均自由行路は大きくなり、その結果、炉内ガスと火炎の放射率も大きくなる。具体的には、炉内ガスの放射率 ε_{gas} は 0.012 から 0.023 へ、火炎の放射率 ε_f は 0.086 から 0.165 へ増加する。炉内の放射熱流の計算は式(5.1)で示した通りであり、ケイカル板表面（ $i=1$ ）の放射は式(6.4)で表せる。なお、2 倍炉になっても壁面間の形態係数は変わらない。また、各面の面積はすべて 4 倍になるので各面の面積の比率は 2 倍炉になっても変わらない。

$$S_1 q_{inc,1} = \sum_{j=2}^{10} (1 - \varepsilon_{gas}) (1 - \varepsilon_f) F_{1-j} S_j \{ (1 - \varepsilon_j) q_{inc,j} + \varepsilon_j \sigma T_j^4 \} + \varepsilon_{gas} \sigma T_{gas}^4 S_1 + (1 - \varepsilon_{gas}) \varepsilon_f \sigma T_f^4 F_{1-f} S_f \quad (6.4)$$

右辺第一項は他面からの反射と放射の項であり、 $(1 - \epsilon_{gas})(1 - \epsilon_f)$ は、2 倍炉になると 0.903 から 0.816 へ減少するので、他の面からの反射と放射は減少する。右辺第二項は、ケイカル板に接する炉内ガスからの放射であり、ガスの放射率が 0.012 から 0.023 へ増加するため、炉内ガスからケイカル板への放射はおよそ 2 倍に増加する。右辺第三項は火炎からケイカル板への放射であり、 $(1 - \epsilon_{gas})\epsilon_f$ は、2 倍炉になると 0.085 から 0.161 へ増加するため、火炎からケイカル板への放射は約 1.9 倍に増加する。このことから、各壁面からケイカル板への放射及び反射は減少するものの、炉内ガスと火炎からの放射が増大するため、2 倍炉の方がケイカル板への放射熱流が大きくなったと考えられる。

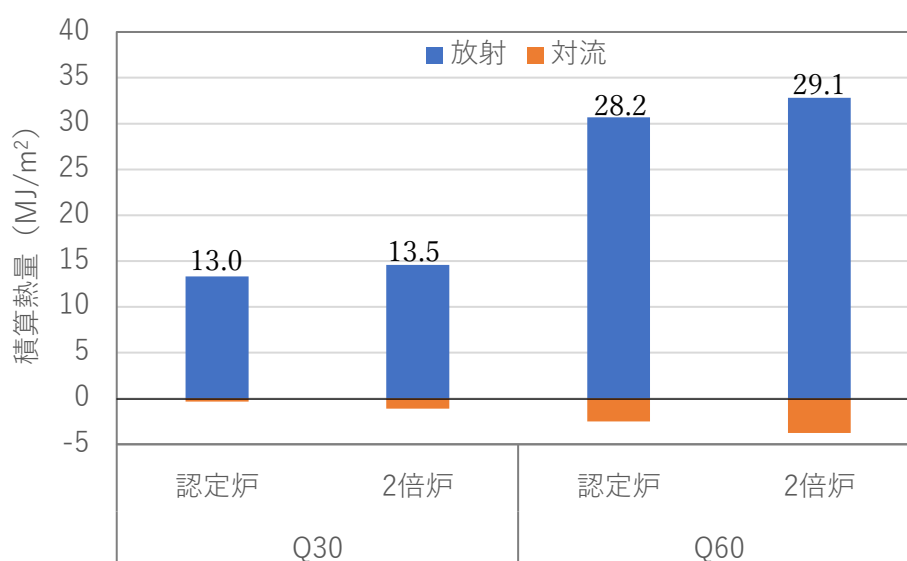


図 6.30 炉の大きさの違いによる比較
(告示曲線、露出型熱電対制御)

(5) 加熱開始温度の影響

小型加熱炉の加熱開始時の炉内ガス温度について、常温 (27°C) の場合と 200°C の場合のケイカル板表面の積算熱量を図 6.31 に示す。 Q_{30} 、 Q_{60} いずれも開始温度 200°C の方がわずかに大きく、 Q_{30} と Q_{60} は 3% 大きい。

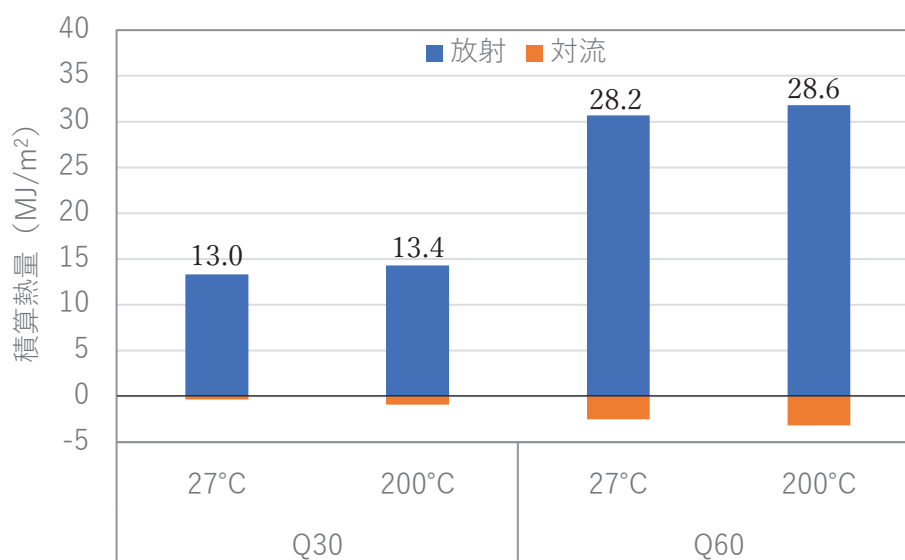


図 6.31 加熱開始時の炉内ガス温度の違いによる比較
(告示曲線、制御用熱電対とケイカル板距離 10mm、露出型熱電対制御)

(6) パラメータの影響のまとめ

加熱条件や炉の設定に関する各パラメータの変化がケイカル板表面温度と積算熱量へ与える影響の一覧を表 6.6 と表 6.7 に示す。表 6.6 は、すべて告示の場合の計算値との比較である。表 6.7 の制御用熱電対の項目については、シース熱電対とプレート熱電対のいずれも制御用熱電対とケイカル板距離を 100mm として計算しているので、制御用熱電対とケイカル板距離 100mm 以外の条件をすべて告示とした場合の計算値との比較である。告示の計算値を基準としているので、表中の正の数は告示の条件よりも温度が高いことあるいは積算熱量が大きいことを表す。

表 6.6、表 6.7 より、ケイカル板表面温度と積算熱量へ与える影響が大きいパラメータは、制御用熱電対とケイカル板との距離、炉の大きさ、炉の内張材料である。制御用熱電対とケイカル板距離を ISO の条件である 100mm とする場合と炉の内張材料を耐火レンガとする場合は、ケイカル板表面温度やケイカル板表面の合計熱量が大幅に小さくなる。逆に炉の寸法が大きくなるとケイカル板表面温度が大きくなる。炉の内張材料は告示に規定はないので、試験炉間による差を低減するためには、炉の内張材料を規定することが望ましいといえる。また、炉の寸法について、告示には炉の横幅と高さの規定が明確ではないので、併せて規定することが望ましいといえる。

加熱曲線を ISO 曲線にする場合の影響は比較的小さく、特に告示が規定する加熱時間である 30 分間では、告示曲線との差は非常に小さい。そのため、JIS A 1304 の標準曲線 B から ISO 曲線へ移行したとしても、その影響は小さいと考えられる。

加熱開始時の炉内ガス温度については、JCS 規格の上限温度である 200°C で比較したが、実際の試験では通常 100°C 以下まで十分冷却してから加熱を開始するので、影響はより小

さいと考えられる。

制御用熱電対については、露出型熱電対からシース熱電対やプレート熱電対へ変更しても、ケイカル板表面温度と積算熱量へ与える影響は比較的小さいといえる。ただし、6.3節で示したように加熱開始直後の特性が異なるため、試験炉間の差を低減するためには制御用熱電対の形状についても告示で規定することが望ましいといえる。

表 6.6 各パラメータがケイカル板表面温度と積算熱量へ与える影響
(すべて告示の条件との差)

比較項目		時間	ケイカル板表面			
			表面温度 [°C]	放射熱量 [MJ/m ²]	対流熱量 [MJ/m ²]	合計熱量 [MJ/m ²]
ISO 曲線		30 分	-1	+0.1	0.0	+0.1
		60 分	+19	+0.3	0.0	+0.3
制御用熱電対とケイカル 板距離 100mm		30 分	-96	-4.5	+2.3	-2.3
		60 分	-87	-8.9	+4.6	-4.3
2 倍炉（各辺 2 倍の長さ）		30 分	+34	+1.3	-0.8	+0.5
		60 分	+28	+2.1	-1.2	+0.9
炉の内 張材料	セラミック ファイバ	30 分	+8	+0.8	-0.5	+0.3
		60 分	+5	+1.1	-0.7	+0.4
	耐火レンガ	30 分	-127	-7.8	+4.6	-3.3
		60 分	-66	-11.6	+6.9	-4.7
加熱開始時のガス温度 200℃		30 分	+6	+1.0	-0.6	+0.4
		60 分	+2	+1.1	-0.7	+0.5

表 6.7 制御用熱電対の違いがケイカル板表面温度と積算熱量へ与える影響
(制御用熱電対とケイカル板距離が 100mm で、それ以外はすべて告示の条件との差)

比較項目		時間	ケイカル板表面			
			表面温度 [°C]	放射熱量 [MJ/m ²]	対流熱量 [MJ/m ²]	合計熱量 [MJ/m ²]
制御用 熱電対	シース熱電対	30 分	+6	+0.4	0.0	+0.4
		60 分	-4	+0.4	0.0	+0.4
	プレート熱電対	30 分	-1	+0.9	-0.1	+0.8
		60 分	-15	+0.7	-0.1	+0.6

6. 4 結論

本章では、第 5 章で作成したモデルを用いて、小型加熱炉に ISO 834-1 の試験条件を取り入れた場合の炉内温度や熱流への影響や実験での比較が困難な炉の内張材料の違いによる影響等を分析した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 加熱曲線を ISO 曲線に変更しても試験体保持面（ケイカル板）の表面温度と熱流への影響は小さい。
- 2) 制御用熱電対が異なると加熱開始直後のガス温度上昇が変わり、特にプレート熱電対制御では試験体保持面表面温度、炉内ガス温度、熱流が大きくなる。
- 3) 制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合と炉の内張材料が耐火レンガの場合は、試験体保持面表面温度や表面の熱流が大幅に小さくなる。
- 4) 炉の寸法を大きくすると炉内ガスと火炎の放射率が大きくなり、試験体保持面表面温度が 30 分時点で 35℃高く、試験体保持面表面への積算熱量が 5%ほど大きくなる。
- 5) 制御用熱電対の形状、炉の内張材料、炉の寸法は告示に明確な規定はないので、試験炉間による差を低減するためには、詳細を規定することが望ましく、条件を規定する重要性は、炉の内張材料、制御用熱電対の形状、炉の寸法の順である。
- 6) 加熱条件について、①加熱曲線、②制御用熱電対と試験体保持面との距離、③制御用熱電対の種類のすべてを ISO の加熱条件にすると、加熱開始直後に試験体保持面の表面温度は急上昇がするが、30 分間の積算熱量では ISO の方が 10%小さい。

引用・参考文献

- 1) 平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」
- 2) ISO 834-1:1999, Fire-resistance tests - Elements of building construction -Part 1:
General requirements
- 3) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度解析 第 2 報、2023 年度日本
建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、pp.33-34、2023.9
- 4) 日本機械学会編、伝熱ハンドブック、1993 年、丸善
- 5) 日本機械学会、機械工学便覧（新版）、1987 年、丸善

第7章 国際的に整合する合理的な試験法の検討

7. 1 実験の目的

第2章で示したように、平成9年消防庁告示¹⁾に基づく消防用耐火ケーブルの耐火試験法は、加熱条件の国際整合性が乏しいこと、加熱中の絶縁性評価方法が不十分であること、加熱時間が30分のみであり長時間の評価に対応していないこと等が課題として挙げられる。

そこで、本章では、告示の耐火試験法の将来的な国際整合化と性能化を見据え、告示の小型加熱炉にISO 834-1²⁾の加熱条件を取り入れて試験を行い、課題を抽出した。その際、加熱中にも耐火電線の絶縁抵抗を測定し、機能保持時間を測定する方法を検討した^{3,4)}。

7. 2 検討項目の整理

7. 2. 1 加熱炉の加熱条件の国際整合化に関する検討

消防庁告示に基づく耐火試験（以下、告示法）は、日本独自の試験方法のため国際整合性がなく、国内外の建築分野で一般的なISO 834-1の耐火試験（以下、ISO法）とも細部が異なる。告示法とISO法の加熱条件の主な違いを表7.1に示す。これらの違いの詳細は、3.2節で述べた通りである。本章では、告示法の加熱条件をISO法に整合させることを目的に、①～③の項目をパラメータとして、耐火電線の加熱中の絶縁性を比較する。⑤加熱時間については、告示は30分間の規定であるが、試料が絶縁破壊するまでを目標として、最長60分間の加熱とする。

表 7.1 告示法と ISO 834-1 の加熱条件の比較

項目	告示法（電線）	ISO 834-1（建材等）
①加熱温度曲線	告示（JIS A 1304 B）	ISO 834-1（JIS A 1304 A）
②制御用熱電対と試料の水平距離	10mm	100mm
③制御用熱電対	露出型熱電対（慣例で素線径 1mm の露出型熱電対を使用）	プレート熱電対
④炉内寸法	詳細寸法の規定なし（旧 JIS A 1305 に準じ、幅 0.46m×高さ 1.24m）	幅 3m×高さ 3m 以上（壁炉）
⑤加熱時間	30 分	4 時間以上まで対応

7. 2. 2 加熱中の機能保持時間の測定方法の検討

告示法では耐火電線の絶縁性を評価するために、表 7.2 に示すように加熱前及び加熱終了直前に絶縁抵抗測定を、加熱前、加熱中及び加熱終了直後に絶縁耐力試験を行い、電気的な絶縁性の有無を判定する。

絶縁抵抗は、図 7.1 に示すように、多心の電線を測定する場合には、測定する線心以外の線心と電線をケイカル板に固定するための金属線（固定線）を接地して行う。このことにより、線心間の短絡が検知でき、また、測定する線心を切り替えて測定すれば線心毎の絶縁性能を数値化できる。ただし、現行の告示試験では、加熱中は絶縁抵抗の測定を行わない。

絶縁耐力試験では、図 7.2 で示すように固定線をアースとし、すべての線心を一括したものに交流電圧を印加する。この方法では、印加電圧に耐えるか耐えないかといった定性的な判定であり、絶縁性能の加熱中の経時変化を数値化することはできない。また、すべての線心を一括して課電するため、線心間の短絡を検知できず、絶縁性能の評価方法としては十分ではない。

一方、国内外の建築分野で一般的な ISO 834-1 の耐火試験と同様の考え方に基づくと、絶縁性が失われるまでの時間（機能保持時間）を測定し、これを性能値として表示することが望ましい。そこで、線心間の短絡も検知でき、加熱中も継続的に絶縁性能を測定可能な方法として、2つの測定法を検討した。

表 7.2 告示の絶縁性測定方法と要求値

測定方法	タイミング	要求値
①絶縁抵抗	加熱前	50MΩ以上
	加熱終了直前	0.4MΩ以上
②絶縁耐力	加熱前	1500V/1 分に耐える
	加熱中	600V/30 分に耐える
	加熱終了直後	1500V/1 分に耐える

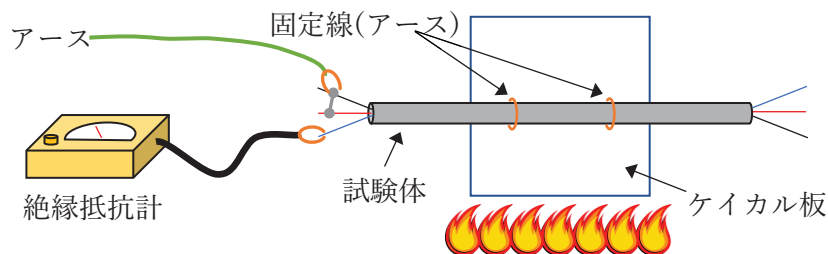


図 7.1 絶縁抵抗測定の模式図

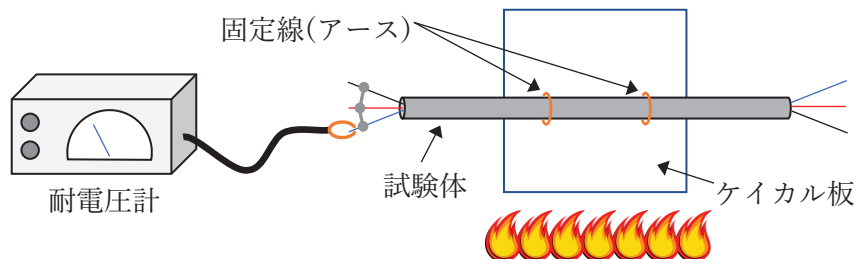


図 7.2 絶縁耐力試験の模式図

(1) 改良告示法

1 つ目の機能保持時間の測定方法は、告示法をベースに改良を加えたもので、告示の絶縁抵抗測定と絶縁耐力試験は維持しつつ、加熱中は定期的に絶縁耐力試験を中断し、その間にそれぞれの線心の絶縁抵抗を測定（以下、改良告示法）する。測定線心以外の線心を接地することで線間短絡が検知でき、また、線心毎の絶縁性能を数値化できると考えられる。

(2) IEC 法

2 つ目の機能保持時間の測定方法は、電気・電子分野の国際規格である IEC の電線の耐火試験（IEC 60331-1⁵⁾）に規定された絶縁性能評価方法（以下、IEC 法）である。2 章の 2.3.1 節で示したように、加熱中は試験体である耐火電線の定格電圧で印加し、回路中に設置した電球を点灯させる。そして、加熱中に電線に以下が起きないことを確認する。

- ・ 接地した金属製留め具で地絡しないこと（ブレーカを 2A に設定）
- ・ 線心間で短絡しないこと（電源が 3 相交流のため検知可能、ブレーカを 2A に設定）
- ・ 断線しないこと（電球の消灯で確認）

このため、表 7.3 に示すように、告示法に比べて IEC 法では、地絡だけでなく線間短絡も検知でき、断線も検知できる利点がある。IEC 法では、回路を構成して電流を流すのに対し、告示では回路とせず、単に電圧を印加して破壊の有無を確認する点異なる。

表 7.3 機能保持時間測定方法の告示法、改良告示法及び IEC 法の違い

項目	告示法	改良告示法	IEC 法
線間短絡	加熱中：× 加熱終了後：○(絶縁抵抗)	○	○
地絡	○	○	○
断線	×	×	○
加熱終了後の課電	○(絶縁耐力試験 1,500V)	○(同左)	—

7. 3 実験方法

7. 3. 1 告示法と ISO 法の加熱条件

(1) 共通事項

実験は消防庁告示に規定の小型加熱炉を用いて、試験体である耐火電線を加熱することで行った。告示では 30 分の加熱時間の規定であるが、耐火電線の絶縁性能の低下度合いを比較するため、絶縁破壊するまでを目標として、最長 60 分間の加熱とした。炉の燃料にはプロパンガスを使用した。

(2) 加熱温度曲線の変更

加熱温度曲線の違いによる影響を調べるため、3 章の 3.2 節で示した告示の加熱曲線である JIS A 1304 の標準加熱曲線 B（以下、告示曲線）または ISO 834-1 の加熱曲線（以下、ISO 曲線）で炉内を加熱した。

(3) 制御用熱電対の変更

制御用熱電対の種類の違いの影響を調べるため、露出型シース熱電対（以下、露出型熱電対）とプレート熱電対を制御用熱電対に使用した。それぞれの熱電対の仕様を表 7.4 に示す。告示では制御用熱電対に K 熱電対を指定しているため、いずれも K 熱電対を用いた。各実験では、露出型熱電対又はプレート熱電対のいずれかを制御用熱電対とした。

表 7.4 使用した熱電対の仕様

熱電対の形状	金属シース外径	素線径	プレートの有無	備考
露出型熱電対	6.4mm	1.0mm	無	
プレート熱電対	1.0mm	0.15mm	有	ISO 834-1 準拠

(4) 制御用熱電対とケイカル板距離の変更

バーナ面から制御用熱電対までの水平距離は、告示で 250mm と規定されているため、本実験でも 250mm とした。本実験では、制御用熱電対とケイカル板までの水平距離を告示法の 10mm と ISO 法の 100mm の 2 条件とした。露出型熱電対の場合には図 7.3 a) に示す制御用熱電対の位置とし、露出型熱電対とケイカル板までの水平距離が告示法の 10mm の場合は赤色で示す配置、ISO 法の 100mm の場合は緑色で示す配置である。プレート熱電対の場合には図 7.3 b) に示す位置とし、プレート熱電対とケイカル板までの水平距離は 100mm とした。

図中の青丸で示す炉内温度測定用熱電対は、(5) 項で後述する。制御用熱電対とケイカル板までの距離は、ケイカル板が取り付けられた台車を前後に移動させることで調整した。

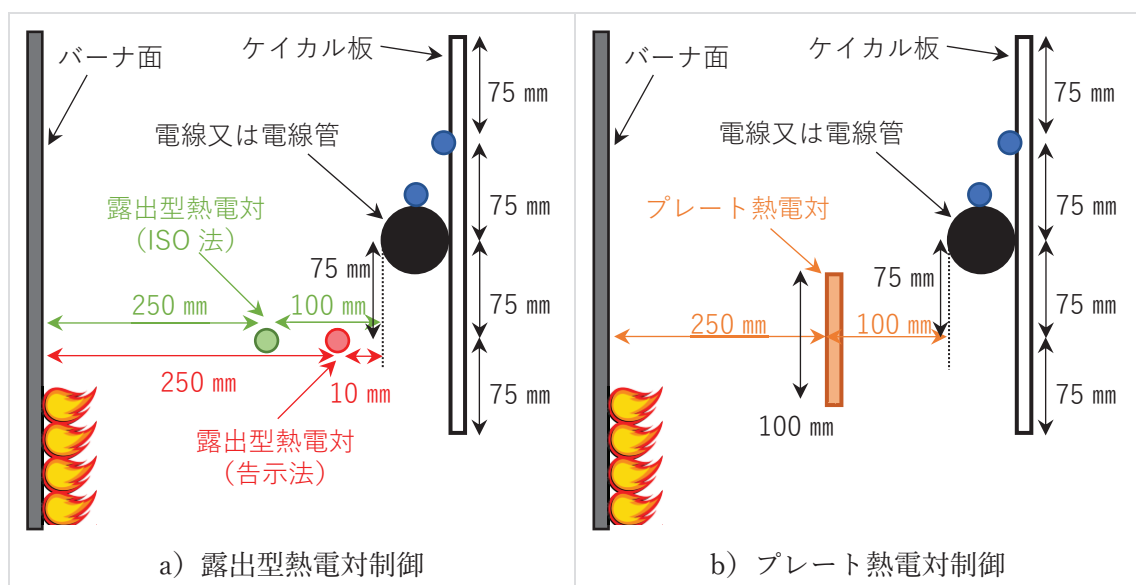


図 7.3 制御用熱電対とケイカル板距離及び炉内温度測定位置の模式図（側面図）

※青丸は炉内温度測定用熱電対

（５）試験の種類

２章の 2.2.1 節で示した露出試験と電線管試験の両方の試験法で実験を実施した。

（６）測定方法

本実験では、制御用熱電対の温度に加えて、図 7.3 及び図 7.4 の青丸で示す位置で、電線表面の温度（露出試験）、電線管表面の温度（電線管試験）及びケイカル板表面温度をシース外径 1.6mm のシース熱電対で測定した。いずれもケイカル板の左右中心を測定位置とした。電線表面及び電線管表面の温度は、試験体の上部に熱電対の先端を固定した。また、電線管試験では、電線管内部の温度も同様の仕様の熱電対を用いて、電線管の左右中心位置で測定した。ただし、露出試験時の電線表面温度は、樹脂が燃焼することで電線表面に固定した熱電対が動いてしまい、適切な位置で温度を測定することができなかった。

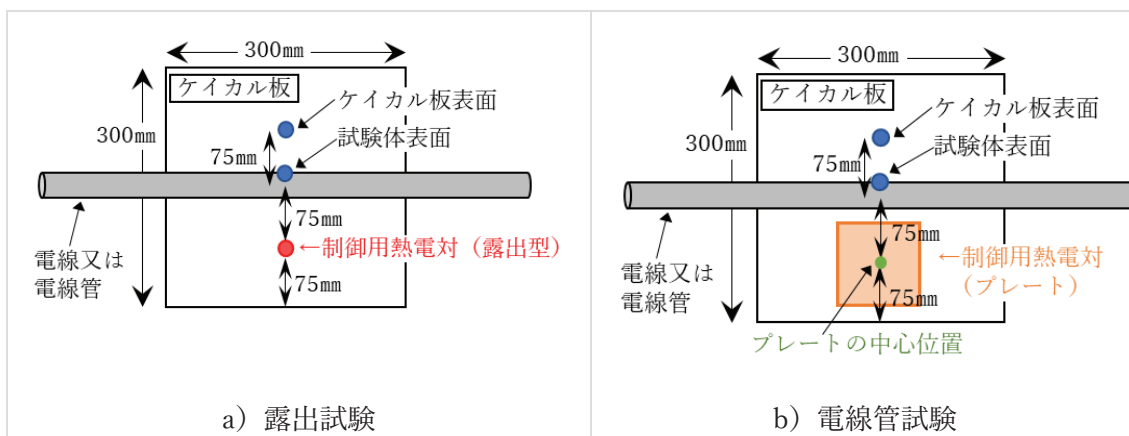


図 7.4 ケイカル板表面付近の温度測定位置の模式図（正面図）

7. 3. 2 加熱中の絶縁性測定方法

(1) 改良告示法

加熱中の各線心の絶縁性能を個別にかつ定量的に評価するため、告示では加熱前と加熱終了後に行う絶縁抵抗測定を、加熱開始から 1 分毎に測定した。絶縁抵抗の測定には、共立電気計器株式会社製 KEW3432（図 7.5 a）を用いて、直流 500V の印加電圧で測定した。後述するように実験に使用した電線は線心数が 3 本であるため、ある線心を測定するときは、残りの 2 線心は接地した。絶縁抵抗の測定時以外は、告示に規定された絶縁耐力試験を、3 線心を一括して実施した。絶縁耐力試験は絶縁抵抗測定とは異なり、60Hz の交流電圧である。絶縁耐力試験には、菊水電子工業株式会社製 TOS9300（図 7.5 b）を用いた。その際、漏れ電流（絶縁物に電圧を印加したときに流れる微弱な電流）の値も参考として 1 分毎に記録した。漏れ電流は耐火電線の絶縁性が低下すると増加し、漏れ電流と絶縁抵抗は概ね反比例の関係である。漏れ電流の値が装置の上限値である 110mA に達すると絶縁破壊と判定される。

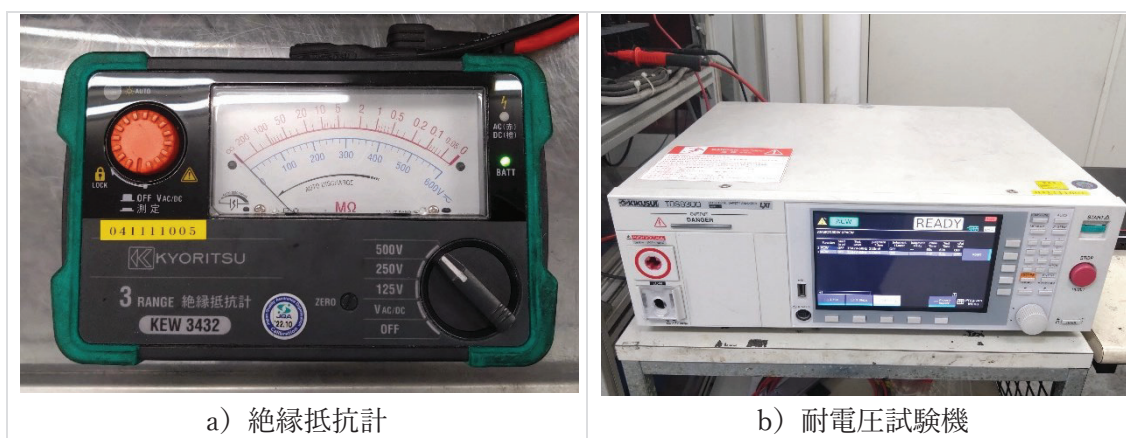


図 7.5 改良告示法の絶縁性能評価実験に使用した測定機器の外観

(2) IEC 法

IEC 60331-1 に従い、図 7.6 に示す模式図のように耐火電線を含めて電気回路を構成した。電圧を交流 600V に設定し、回路内の電球を点灯させた状態で、試験体を加熱した。使用した測定機器の外観を図 7.7 に示す。試料の絶縁性能の低下と共に漏れ電流が増加し、600V の電気回路に流れる電流も増加すると考えられるため、電気回路中に取り付けた電流計を用いて各線心に流れる電流値を記録した。

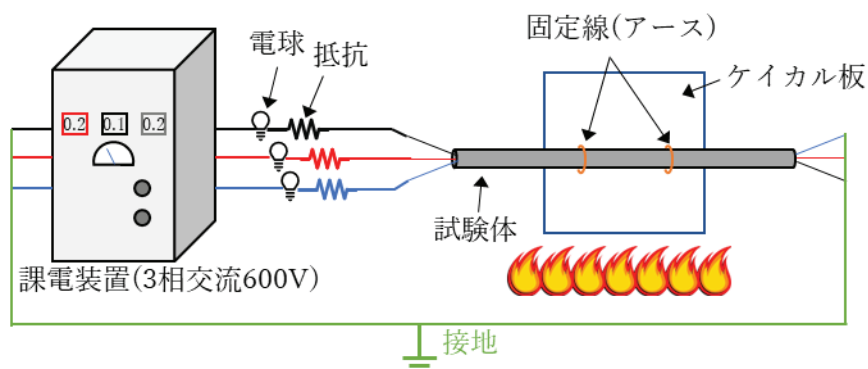


図 7.6 IEC の耐火試験の電気回路の模式図

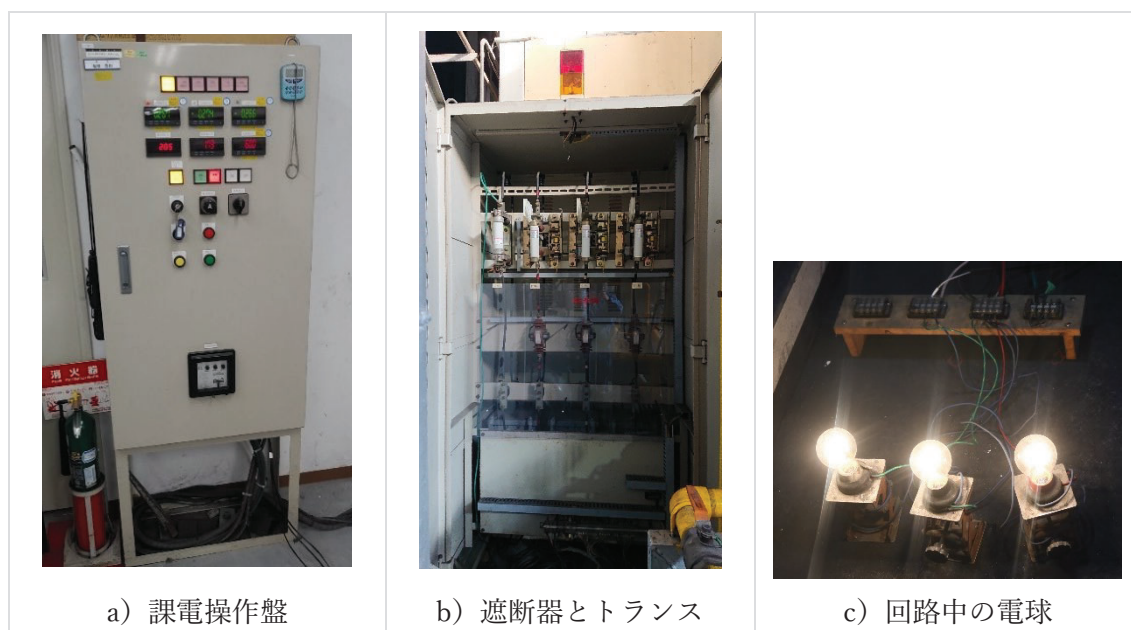


図 7.7 IEC 法の絶縁性能評価実験に使用した測定機器の外観

7. 3. 3 試料及び実験条件

(1) 試験試料

実験に使用した耐火電線は、線心数が 3 本の市販の低圧耐火ケーブルで、定格電圧 600V の消防庁告示認定品 (30 分耐火) とした。電線径の違いを確認するため、表 7.5 に示す導

体サイズの異なる 3 種類の試料を用いた。それぞれの試料の外観を図 7.8 に示す。電線径は異なるが、いずれも構成は類似しており、図 7.9 に示すように純銅製の導体の上に耐火層であるマイカテープが巻かれ、その上にポリエチレン樹脂が絶縁体として被覆される。撚り合わされた 3 本の絶縁体線心の断面を丸形状にするために、介在物としてポリプロピレンテープで隙間が埋められる。その上に耐燃性ポリエチレン製のシースが被覆される。図 7.10 に電線断面の模式図を、図 7.11 に電線管試験時の試験体断面の模式図を、表 7.6 に図 7.10 と図 7.11 の寸法を示す。導体サイズが大きいほど、絶縁体やシースの厚みが増すが、耐火層はいずれもほぼ同じ厚さである。

耐火電線は火災時の高温下においてもショートすることなく消防用設備に電力を供給することができるが、それを実現するために図 7.9 に示すように導体と絶縁体の間に耐火層が設けられている。耐火層は高い絶縁性能と高温での耐久性が求められるため、マイカ（雲母）テープが一般に用いられる。今回の実験に用いた耐火電線のマイカテープの仕様等を表 7.7 に示す。試料 a はフィルムマイカテープが、試料 b と c にはガラスマイカテープが用いられている。これらの違いは、マイカをテープ状にするための補強材の違いであり、フィルムマイカテープはポリエチレンフィルム上にマイカが貼られ、ガラスマイカテープはガラスクロス上にマイカテープが貼られた構造である。また、導体へのマイカテープの巻き方について、試料 a は縦添え、試料 b と c は横巻きである。縦添えは図 7.12a) に示すように導体の長手方向にマイカテープを沿わせて導体を包む方法であり、横巻きは図 7.12b) に示すようにマイカテープをらせん状に、マイカテープの一部を重ねながら導体上に巻く方法である。

表 7.5 実験に用いた耐火電線の概要

試料	導体サイズ	製造社	外形(mm)	重量(kg/1.3m)
a	2mm ²	A 社	12.7	0.24
b	8mm ²	B 社	17.5	0.56
c	38mm ²	B 社	27.4	1.86

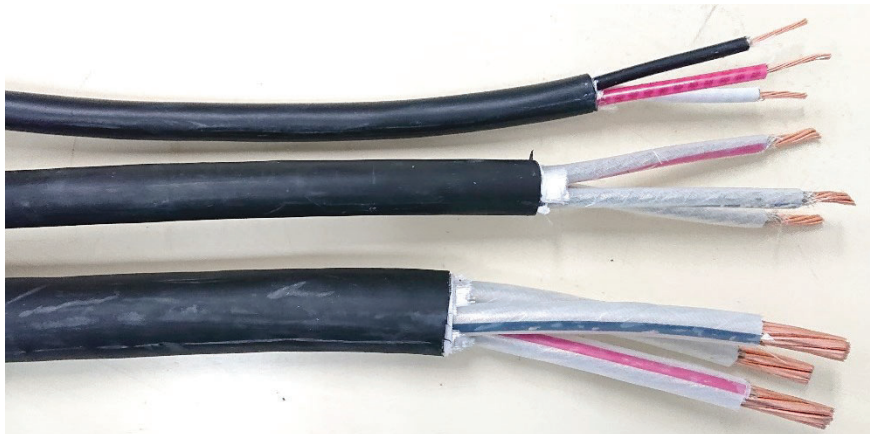


図 7.8 実験に用いた耐火電線の外観（上から順に試料 a、試料 b、試料 c）



図 7.9 実験に使用した電線（試料 a）

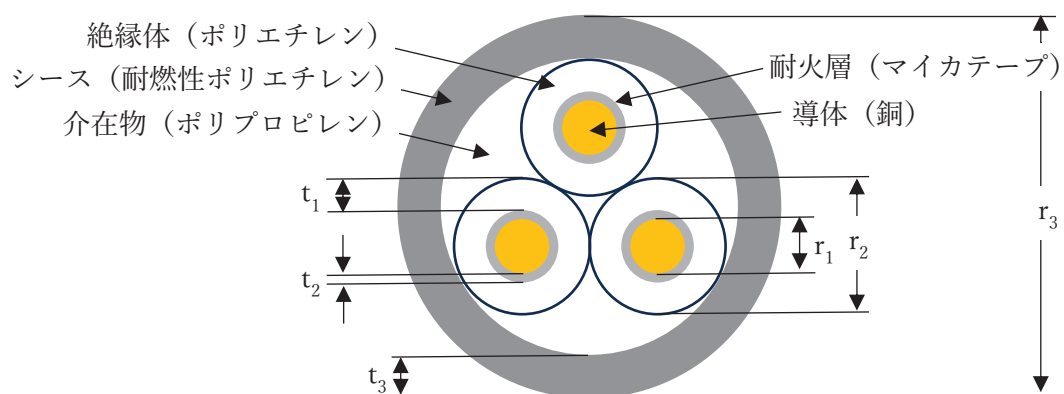


図 7.10 電線断面の模式図

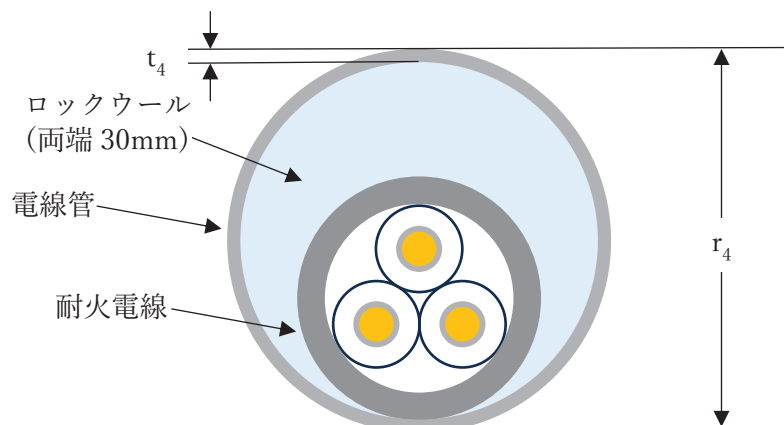


図 7.11 電線管試験時の試験体断面の模式図

表 7.6 試験体の構造詳細

試料	a	b	c
導体外径 r_1 [mm]	1.8	3.6	7.3
絶縁体外径 r_2 [mm]	4.5	6.3	10.4
電線外径 r_3 [mm]	12.7	17.5	27.4
電線管外径 r_4 [mm]	25.4	31.8	50.8
絶縁体厚さ t_1 [mm]	0.8	1.1	1.3
耐火層厚さ t_2 [mm]	0.3	0.3	0.3
シース厚さ t_3 [mm]	1.5	1.7	2.1
電線管厚さ t_4 [mm]	1.6	1.6	1.6

表 7.7 耐火層（マイカテープ）の構造

試料	マイカの種類	枚数	巻き方	1枚の厚さ	テープ幅	マイカテープの重なり部の幅
a	フィルムマイカテープ	2枚巻き	縦添え	0.16mm	10mm	約 2mm
b	ガラスマイカテープ	2枚巻き	横巻き	0.14mm	10mm	約 2mm
c	ガラスマイカテープ	2枚巻き	横巻き	0.15mm	25mm	約 5mm



図 7.12 マイカテープの巻き方の模式図

(2) 実験条件一覧

実験を行った条件の一覧を表 7.8 に示す。実験は試料 a を代表試料として、実験 1 から実験 10 のすべての条件で実施した。実験 1 から実験 8 は、絶縁性能の測定を改良告示法により実施した。実験 9 と実験 10 は、告示法で加熱し、絶縁性能の測定を IEC 法により実施した。

加熱条件は、実験 1 と実験 2 は、加熱条件が 3 条件ともすべて告示の条件である。実験 3 と実験 4 は、告示法の加熱条件から加熱曲線のみを ISO 法に変更した条件である。実験 5 と実験 6 は、告示法の加熱条件から加熱曲線、制御用熱電対とケイカル板の距離を ISO 法に変更した条件である。実験 7 と実験 8 は、さらに制御用熱電対もプレート熱電対とした、加熱条件が全て ISO 法の条件である。

これらの実験より、実験 1 と実験 3 (露出試験)、実験 2 と実験 4 (電線管試験) を比較すれば、告示曲線と ISO 曲線の違いによる影響を知ることができる。実験 3 と実験 5 (露出試験)、実験 4 と実験 6 (電線管試験) を比較すれば、制御用熱電対と試験体との距離の影響を知ることができる。実験 5 と実験 7 (露出試験)、実験 6 と実験 8 (電線管試験) を比較すれば、制御用熱電対の種類の影響を知ることができる。

試料 b と試料 c は、それぞれ実験 1、実験 2、実験 5、実験 6、実験 9、実験 10 の条件で実施した。同一加熱条件同士でそれぞれの試料の測定結果を比較すれば、電線の太さの違いの影響を知ることができる。3 章の 3.5.1 節の実験結果より、加熱曲線の違いによる影響は小さいことがわかったので、細い電線で比較すればその差が判別しやすいことから、実験 3 と実験 4 は電線外径の最も小さい試料 a で実施し、試料 b と試料 c では実施しなかった。同様に、3 章の 3.5.2 節の実験結果より、露出型熱電対とプレート熱電対の違いによる影響は、加熱初期の温度上昇の違いであり、細い電線で比較すればその差が判別しやすいことから、実験 7 と実験 8 は電線外径の最も小さい試料 a でのみ実施した。

電線管試験時に用いる電線管は、JIS C 8305 に適合する電線管を用い、そのサイズは JCS 7502⁶⁾ の規定に従い、試料 a では C25 (外径 25.4mm)、試料 b では C31 (外径 31.8mm)、試料 c では C51 (外径 50.8mm) の薄鋼電線管を用いた。

表 7.8 実験条件一覧

実験 No.	加熱 曲線	TC- 試 料距離	制御用 熱電対	試験種類	試験試料			絶縁性 評価方法	備考（加熱方法）	
					a	b	c			
実験 1	告示	10mm	露出型 熱電対	露出試験	○	○	○	改良告示法 （告示 +1 分毎絶縁抵 抗測定）	すべて告示の条件	
実験 2				電線管試験	○	○	○			
実験 3	ISO				露出試験	○	－		－	加熱曲線のみ変更
実験 4					電線管試験	○	－		－	
実験 5		100mm		露出試験	○	○	○		加熱曲線と試料距 離を変更	
実験 6				電線管試験	○	○	○			
実験 7			プレート 熱電対	露出試験	○	－	－		すべて ISO の条件	
実験 8				電線管試験	○	－	－			
実験 9	告示	10mm	露出型 熱電対	露出試験	○	○	○	IEC 法	すべて告示の条件	
実験 10				電線管試験	○	○	○			

7. 4 試験結果

7. 4. 1 燃焼状況の概要

試料 a の露出試験における燃焼状況を図 7.13 に、試料 a の電線管試験における燃焼状況を図 7.14 に、試料 b の燃焼状況を図 7.15 に、試料 c の燃焼状況を図 7.16 にそれぞれ示す。いずれも炉壁側面の開口を通じて炉内の一部をビデオ撮影した映像である。また、炉壁にセットした試験試料の加熱前後の様子について、試料 a の露出試験を図 7.17 に、試料 a の電線管試験を図 7.18 に、試料 b を図 7.19 に、試料 c を図 7.20 にそれぞれ示す。

露出試験について、試料 a の実験 1（実験 1a）を例に燃焼状況を記す。図 7.13 の一列目に示す実験 1a（告示曲線、制御用熱電対と試料距離 10mm、露出型熱電対）では、1 分時にケーブルシースが軟化して中央部がやや垂れ下がり始めている。3 分時にはケーブルシースに着火し、5 分頃にかけて激しく燃焼している。8 分時には、中央部のシース及び絶縁体は燃え尽きており、電線の端部に向かって燃焼が広がっている。15 分時には炉内の電線被覆樹脂は燃え尽きて、耐火層であるマイカテープが完全に露出している。その後、60 分の加熱終了時まで目立った変化はなかった。図 7.17 に示す実験 1a の写真の通り、中央部のシース及び絶縁体は完全に焼失しており、マイカテープに巻かれた導体が大きく撓んで残存している。露出試験時の燃焼後の電線の撓みは、図 7.17 で示すように試料 a では大きい、図 7.19 で示す試料 b ではやや小さく、図 7.20 で示す試料 c では電線の撓みはみられない。これは導体サイズが大きいほど導体が硬く、荷重を掛けても撓みにくいためである。

実験 1a 以外の加熱条件と試料 b 及び c の露出試験も燃焼状況は類似しているが、試料の着火のタイミングや被覆樹脂の燃焼時間はそれぞれの条件で異なっている。

電線管試験について、試料 a の実験 2（実験 2a）を例に燃焼状況を記す。図 7.14 の一列目に示す実験 2a（告示曲線、制御用熱電対と試料距離 10mm、露出型熱電対）では、中央部の電線は電線管内で蒸し焼き状態となるので、5 分時までは着火せず、電線管の端部から白煙が漏出している。8 分時には、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂に着火し、その後 10 分時には激しく燃焼している。15 分時には燃え尽きて、試験終了まで大きな変化は見られなかった。図 7.18 に示す実験 2a の写真の通り、電線管両端から露出した部分のシース及び絶縁体は燃え尽きている。電線管部分には変色がみられるが、露出試験とは異なり、全体として大きな変形等は生じていない。

実験 2a 以外の加熱条件と試料 b 及び c の電線管試験も燃焼状況は類似しているが、試料の着火のタイミングや被覆樹脂の燃焼時間はそれぞれの条件で異なっている。

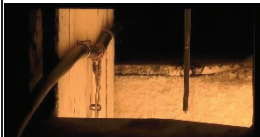
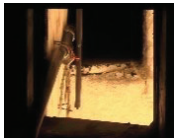
時間 (分)	実験 1a：告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対	実験 3a：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対	実験 5a：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対	実験 7a：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、プレー ト熱電対
1				
2				
3				
4				
5				
8				
10				
15				
20				
60				

図 7.13 露出試験における試験体の燃焼状況（試料 a）

※写真の右側がバーナ面、左側が試験体

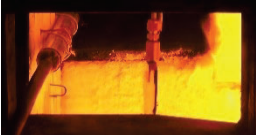
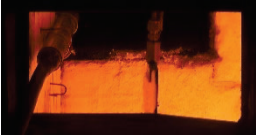
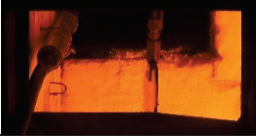
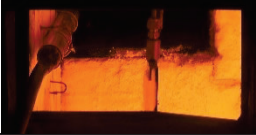
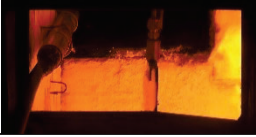
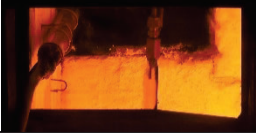
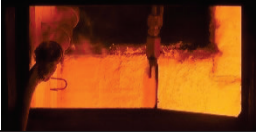
時間 (分)	実験 2a : 告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対	実験 4a : ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対	実験 6a : ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対	実験 8a : ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、プレー ト熱電対
1				
2				
3				
4				
5				
8				
10				
15				
20				
60				

図 7.14 電線管試験における試験体の燃焼状況（試料 a）

※写真の右側がバーナ面、左側が試験体

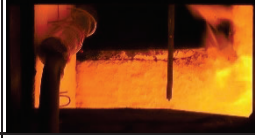
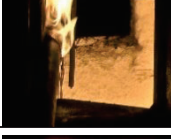
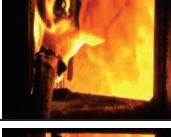
時間 [分]	実験 1b：告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対、露出試験	実験 5b：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対、露出試験	実験 2b：告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対、電線管試験	実験 6b：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対、電線管試験
1				
2				
3				
4				
5				
8				
10				
15				
20				
60				

図 7.15 露出試験及び電線管試験における試験体の燃焼状況（試料 b）

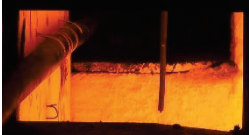
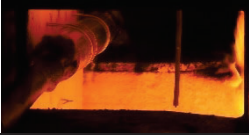
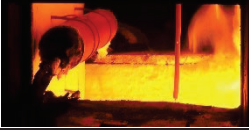
時間 [分]	実験 1c：告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対、露出試験	実験 5c：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対、露出試験	実験 2c：告示曲線、 制御用熱電対と試料 距離 10mm、露出型 熱電対、電線管試験	実験 6c：ISO 曲線、 制御用熱電対と試料 距離 100mm、露出型 熱電対、電線管試験
1				
2				
3				
4				
5				
8				
10				
15				
20				
60				

図 7.16 露出試験及び電線管試験における試験体の燃焼状況（試料 c）

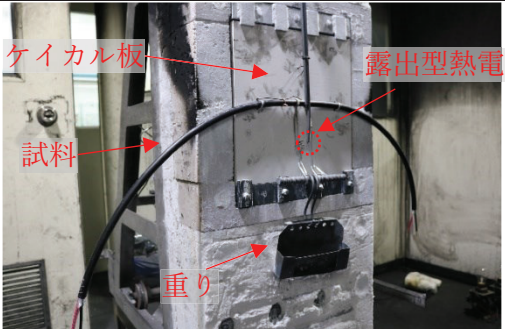
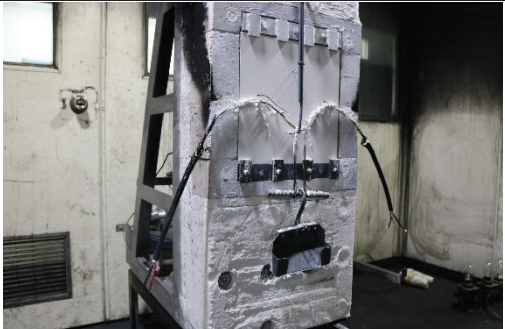
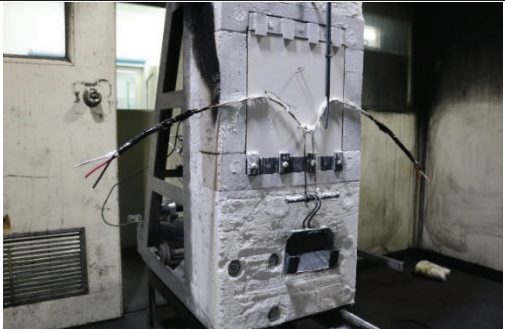
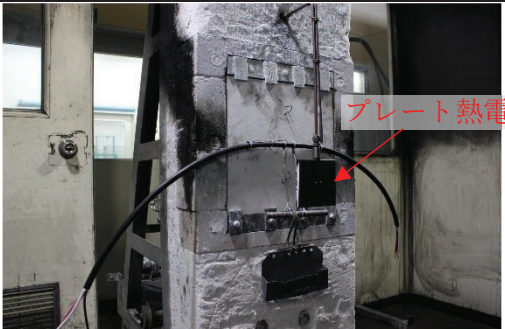
加熱前	加熱後
	
実験 1a (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、露出試験)	
	
実験 3a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、露出試験)	
	
実験 5a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、露出試験)	
	
実験 7a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、プレート熱電対、露出試験)	

図 7.17 露出試験における加熱前後の試験試料の様子 (試料 a)

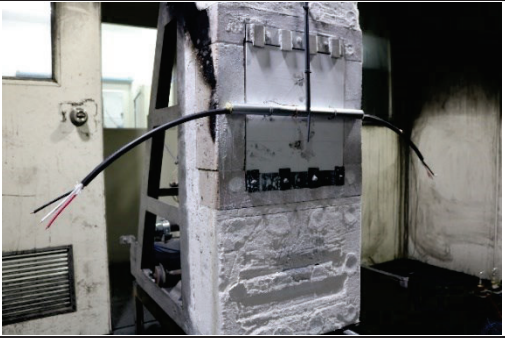
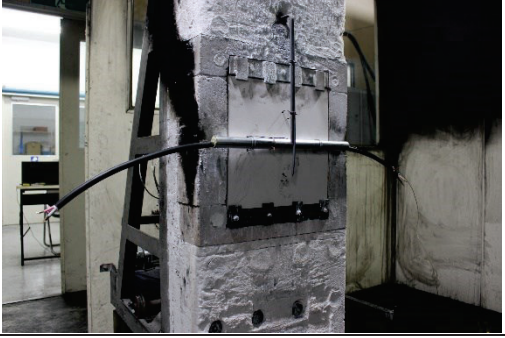
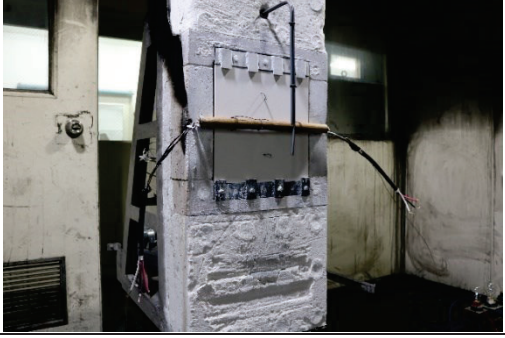
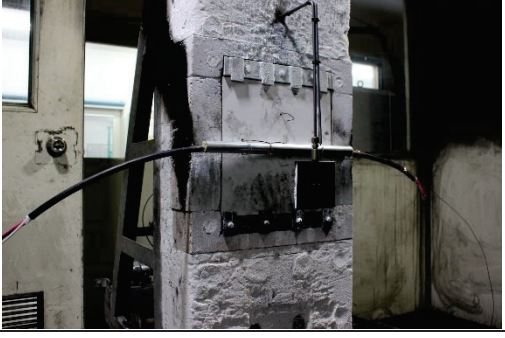
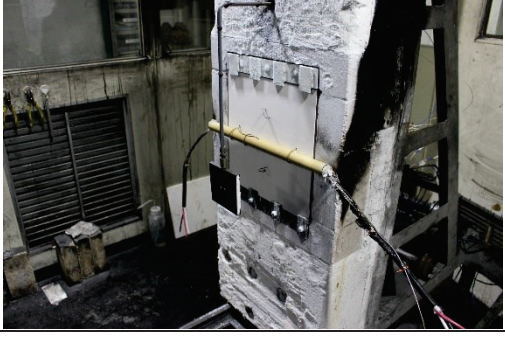
加熱前	加熱後
	
実験 2a (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、電線管試験)	
	
実験 4a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、電線管試験)	
	
実験 6a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、電線管試験)	
	
実験 8a (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、プレート熱電対、電線管試験)	

図 7.18 電線管試験における加熱前後の試験試料の様子 (試料 a : 2mm²)

加熱前	加熱後
実験 1b (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、露出試験)	
実験 5b (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、露出試験)	
実験 2b (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、電線管試験)	
実験 6b (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、電線管試験)	

図 7.19 加熱前後の試験試料の様子 (試料 b : 8mm²)

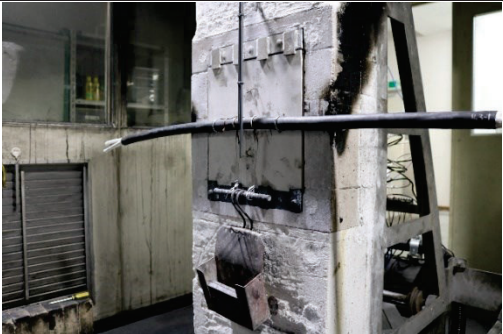
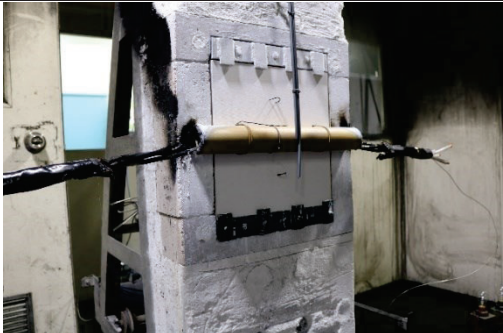
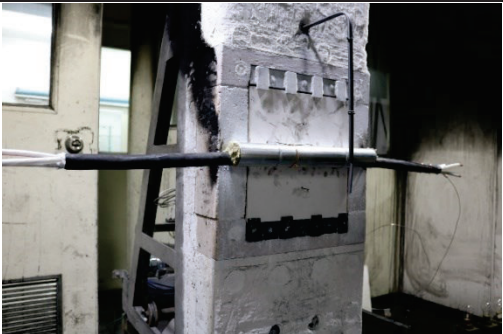
加熱前	加熱後
	
実験 1c (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、露出試験)	
	
実験 5c (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、露出試験)	
	
実験 2c (告示曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm、露出型熱電対、電線管試験)	
	
実験 6c (ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm、露出型熱電対、電線管試験)	

図 7.20 加熱前後の試験試料の様子 (試料 c : 38mm²)

7. 4. 2 炉内温度測定結果

7. 4. 2. 1 試料 a (2mm²)

導体サイズが 2mm²である試料 a の各実験の炉内温度の測定結果を図 7.21 に示す。露出試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度の測定結果を記した。本来であれば、電線表面温度で比較すべきものであるが、電線表面に設置した熱電対はシースの燃焼に伴い測定位置が移動してしまい、電線表面温度を適切に測定することができなかった。そのため、代替としてケイカル板表面温度を比較して熱入力の強さを比較することとした。

電線管試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度に加え、電線管表面と電線管内の温度を記した。

(1) 露出試験

①実験 1a (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 1a (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、適切に炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始 2 分 50 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎により急激に温度が上昇し、加熱開始 6 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで告示曲線よりも温度はやや低く、60 分時点で約 40°C 低かった。空炉での同様の加熱条件である 3 章の 3.4 (1) 項では、ケイカル板表面温度は告示曲線よりも高かったが、この違いは、電線を炉内に設置すると、ケイカル板と制御用熱電対の距離が電線外径分だけ遠くなるためだと考えられる。

②実験 3a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

加熱曲線のみを ISO 曲線とした加熱条件である実験 3a (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、ISO 曲線でも適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始 1 分 6 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎により急激に温度が上昇し、加熱開始 4 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで ISO 曲線よりも温度はやや低く、60 分時点で約 55°C 低かった。

③実験 5a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5a (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始 1 分 59 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎によりやや温度が上昇し、加熱開始 5 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低

下した。その後は、加熱終了まで ISO 曲線よりも温度は低く、60 分時点で約 100°C 低かった。

④実験 7a (ISO 曲線、プレート熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

すべて ISO の加熱条件とした実験 7a (露出試験) では、制御用熱電対であるプレート熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対をプレート熱電対に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始 1 分過ぎと 6 分頃にピークが見られた。一つ目のピークは、制御用熱電対としたプレート熱電対の熱容量が大きく、温まりにくいことから、炉内温度を加熱曲線に一致させるためにバーナ出力が一時的に大きくなったためと考えられる。二つ目のピークは電線被覆樹脂の着火に伴う温度上昇である。電線中央部の被覆樹脂が燃え尽き後は、加熱終了まで ISO 曲線よりも温度は低く、60 分時点で約 180°C 低かった。これは、プレート熱電対とケイカル板表面上の測定用熱電対が図 7.3b) で示す位置関係にあり、バーナ火炎からの熱エネルギーの一部が 100mm 角のプレート熱電対にさえぎられたためと考えられる

(2) 電線管試験

①実験 2a (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 2a (電線管試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、適切に炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後は告示曲線に沿って上昇するが 3 分頃からは告示曲線よりもやや低くなり、60 分時点で告示曲線よりも約 80°C 低かった。電線管表面温度は加熱曲線の温度上昇に比べてやや遅れて温度が上昇した。これは、鉄製の電線管の熱容量が大きく、温まりにくいと考えられる。電線管内の温度は電線管表面よりも更に遅れて温度が上昇したが、加熱開始 15 分以降は、電線管内の温度はケイカル板表面温度及び電線管表面とほぼ一致した。電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂は 5 分 58 秒に着火したが、露出試験とは異なり、ケイカル板表面温度や電線管表面温度、電線管内の温度に目立った変化はなかった。

②実験 4a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

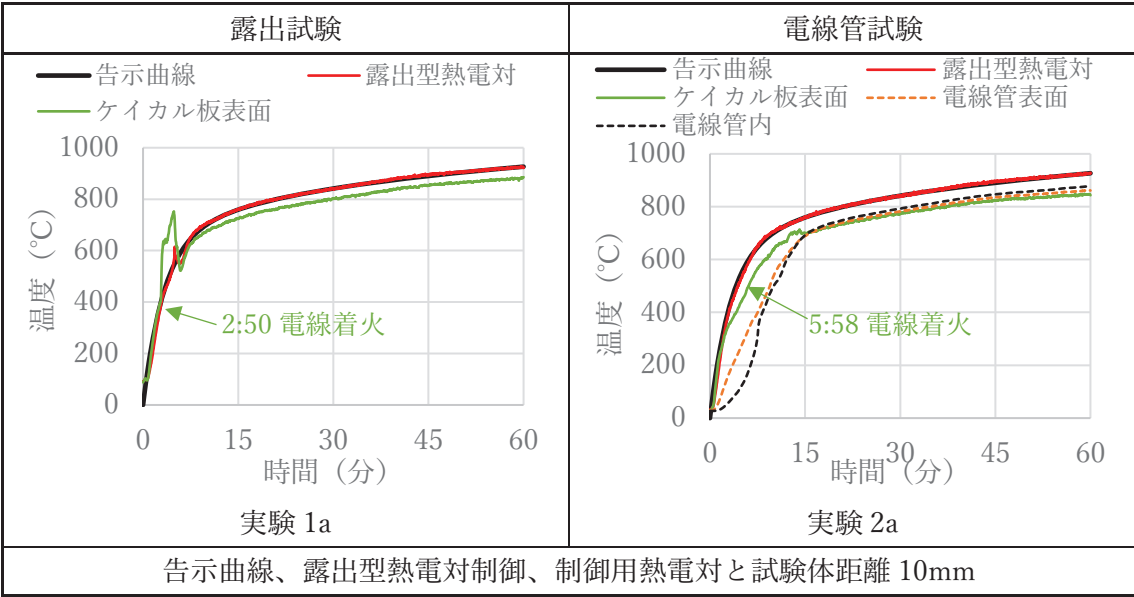
加熱曲線のみを ISO 曲線とした加熱条件である実験 4a (電線管試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、ISO 曲線でも適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度、電線管表面温度、電線管内の温度の挙動は実験 2a と類似している。ケイカル板表面温度は、加熱 60 分時点で ISO 曲線よりも約 80°C 低かった。

③実験 6a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6a（電線管試験）では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。電線管表面温度と電線管内の温度の挙動は実験 2a と類似しているが、ケイカル板表面温度は、加熱 15 分以降は電線管表面及び電線管内の温度よりも低く、加熱 60 分時点で ISO 曲線よりも約 120℃低かった。

④実験 8a（ISO 曲線、プレート熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm）

すべて ISO の加熱条件とした実験 8a（電線管試験）では、制御用熱電対であるプレート熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対をプレート熱電対に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。実験 7a の露出試験同様、加熱開始 1 分過ぎにピークがみられた。ケイカル板表面温度は、加熱 15 分以降は電線管表面及び電線管内の温度よりも低く、加熱 60 分時点で ISO 曲線よりも約 170℃低かった。これは、実験 7a と同様、プレート熱電対とケイカル板表面上の測定用熱電対が図 7.3b) で示す位置関係にあり、バーナ火炎からの熱エネルギーの一部が 100mm 角のプレート熱電対にさえぎられたためと考えられる。



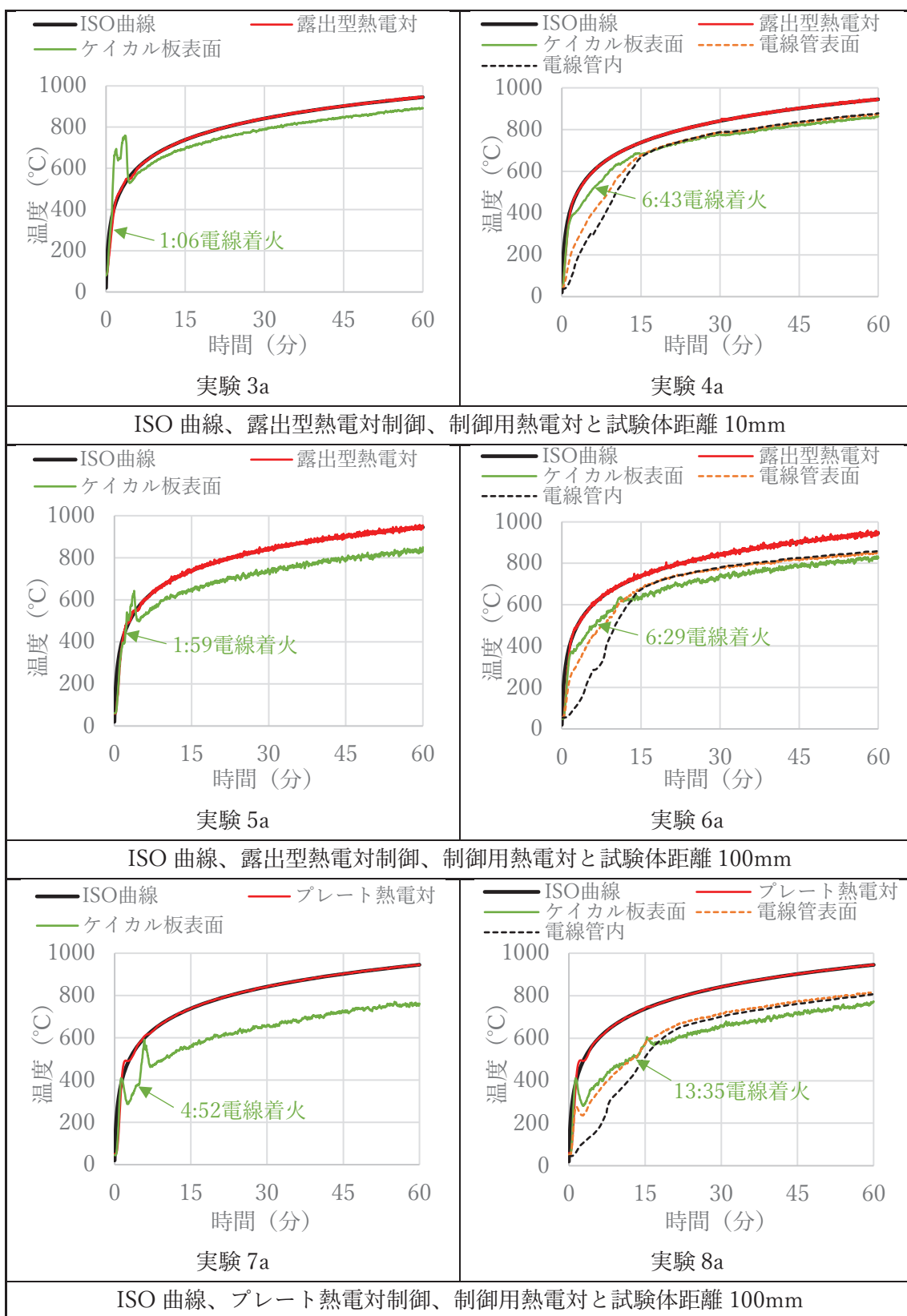


図 7.21 炉内温度の測定結果 (試料 a)

7. 4. 2. 2 試料 b (8mm²)

導体サイズが 8mm²である試料 b の各実験の炉内温度の測定結果を図 7.22 に示す。試料 a と同様、露出試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度の測定結果を、電線管試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度に加え、電線管表面と電線管内の温度を記した。

(1) 露出試験

①実験 1b (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 1b (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、適切に炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始 3 分 48 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎により急激に温度が上昇し、加熱開始 8 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで告示曲線よりも温度はやや低く、60 分時点で告示曲線よりも約 50℃低かった。

②実験 5b (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5b (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始 1 分 25 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎によりやや温度が上昇し、加熱開始 6 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで ISO 曲線よりも温度は低く、60 分時点で ISO 曲線よりも約 100℃低かった。

(2) 電線管試験

①実験 2b (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 2b (電線管試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、適切に炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後は告示曲線に沿って上昇するが、2 分頃からは告示曲線よりもやや低くなり、60 分時点で告示曲線よりも約 120℃低かった。電線管表面温度は加熱曲線の温度上昇に比べてやや遅れて温度が上昇した。これは、鉄製の電線管の熱容量が大きく、温まりにくいためと考えられる。電線管内の温度は電線管表面よりも更に遅れて温度が上昇したが、加熱開始 15 分以降は、電線管内の温度はケイカル板表面温度及び電線管表面とほぼ一致した。電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂は 6 分 49 秒に着火したが、ケイカル板表面温度や電線管表面温度、電線管内の温度に目立った変化はなかった。

②実験 6b (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6b（電線管試験）では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後は ISO 曲線に沿って上昇するが、1 分頃からは ISO 曲線よりもやや低くなり、加熱 15 分以降は電線管表面及び電線管内の温度よりも低く、60 分時点で ISO 曲線よりも約 100℃低かった。電線管表面温度は加熱曲線の温度上昇に比べてやや遅れて温度が上昇し、電線管内の温度は電線管表面温度よりも更に遅れて上昇したが、加熱開始 15 分以降は、電線管内の温度は電線管表面温度とほぼ一致した。電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂は 9 分 55 秒に着火したが、電線管内の温度に目立った変化はなかった。ケイカル板表面温度と電線管表面温度は電線被覆樹脂の着火直後にやや上昇しており、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂の燃焼時の火炎によるものと考えられる。

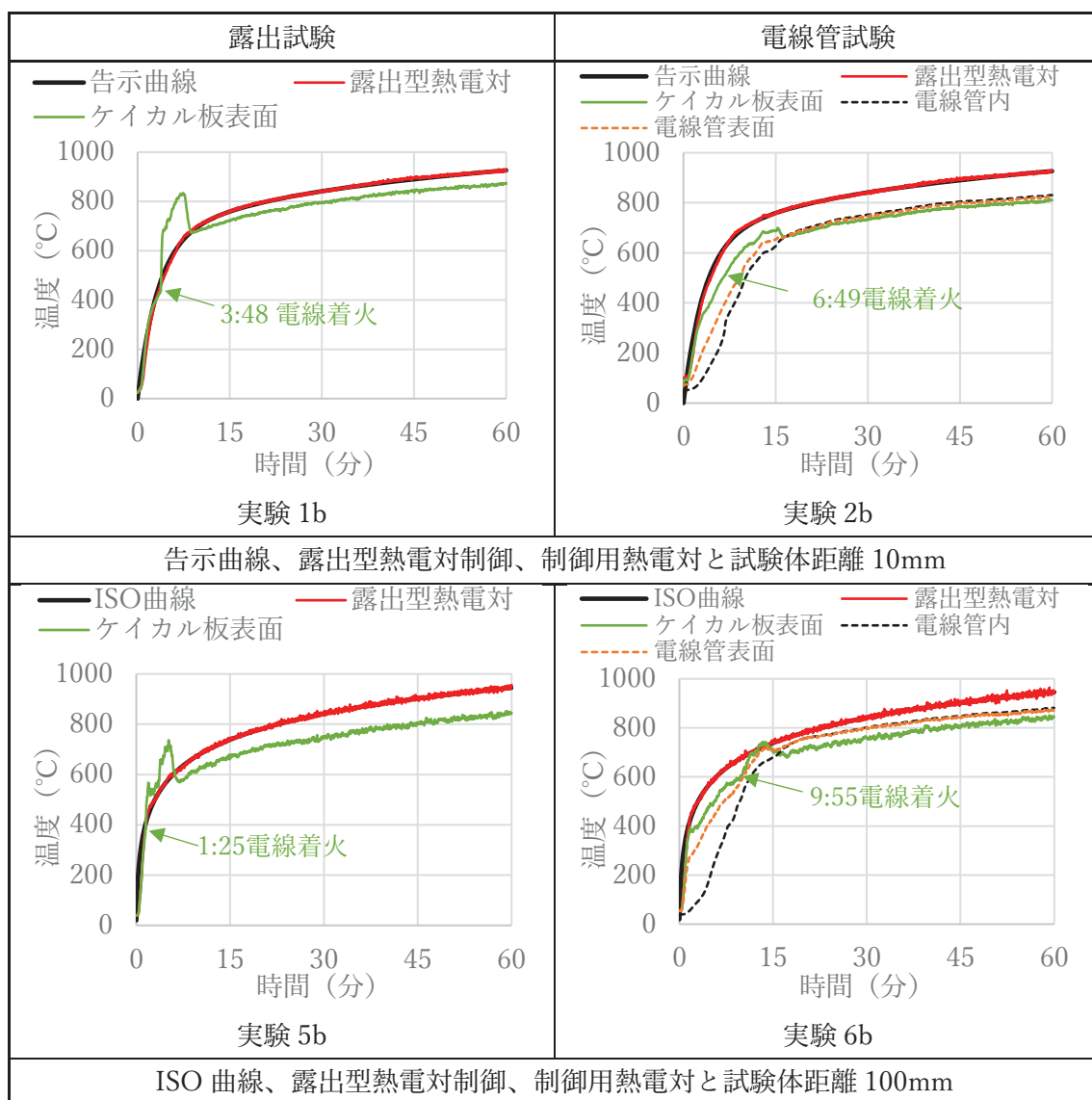


図 7.22 炉内温度の測定結果（試料 b）

7. 4. 2. 3 試料 c (38mm^2)

導体サイズが 38mm^2 である試料 c の各実験の炉内温度の測定結果を図 7.23 に示す。試料 a と同様、露出試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度の測定結果を、電線管試験では、制御用熱電対とケイカル板表面温度に加え、電線管表面と電線管内の温度を記した。

（1）露出試験

①実験 1c（告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm）

すべて告示の加熱条件である実験 1c（露出試験）では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始 2 分 50 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎により急激に温度が上昇し、加

熱開始 12 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで告示曲線よりも温度はやや低く、60 分時点で告示曲線よりも約 60℃低かった。

②実験 5c (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5c (露出試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始 1 分 25 秒の電線被覆樹脂の着火に伴い、その火炎により温度が上昇し、加熱開始 8 分頃には電線中央部の被覆樹脂が燃え尽きることで、温度が低下した。その後は、加熱終了まで ISO 曲線よりも温度は低く、60 分時点で約 110℃低かった。

(2) 電線管試験

①実験 2c (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 2c (電線管試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と告示曲線はほぼ一致しており、適切に炉内の加熱が行われた。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後は告示曲線に沿って上昇するが、1 分過ぎからは告示曲線よりもやや低くなり、60 分時点で告示曲線よりも約 160℃低かった。電線管表面温度は告示曲線の温度上昇に比べてやや遅れて温度が上昇した。これは、鉄製の電線管の熱容量が大きく、温まりにくいためと考えられる。電線管内の温度は電線管表面よりも更に遅れて温度が上昇したが、加熱開始 25 分以降は、電線管内の温度は電線管表面温度とほぼ一致した。電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂は 6 分 20 秒に着火後したが、ケイカル板表面温度や電線管表面温度、電線管内の温度に目立った変化はなかった。

②実験 6c (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6c (電線管試験) では、制御用熱電対である露出型熱電対の温度と ISO 曲線はほぼ一致しており、制御用熱電対と試験体距離を 100mm に変更しても適切に炉内の加熱を行うことが可能であった。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後は ISO 曲線に沿って上昇するが、2 分頃からは ISO 曲線よりもやや低くなり、加熱 25 分以降は電線管表面及び電線管内の温度よりも低く、60 分時点で ISO 曲線よりも約 120℃低かった。電線管表面温度は、加熱 17 分頃まではケイカル板表面温度と類似の温度であった。加熱開始 25 分以降は、電線管内の温度は電線管表面温度とほぼ一致した。電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂は 5 分 58 秒に着火したが、ケイカル板表面温度や電線管表面温度、電線管内の温度に目立った変化はなかった。

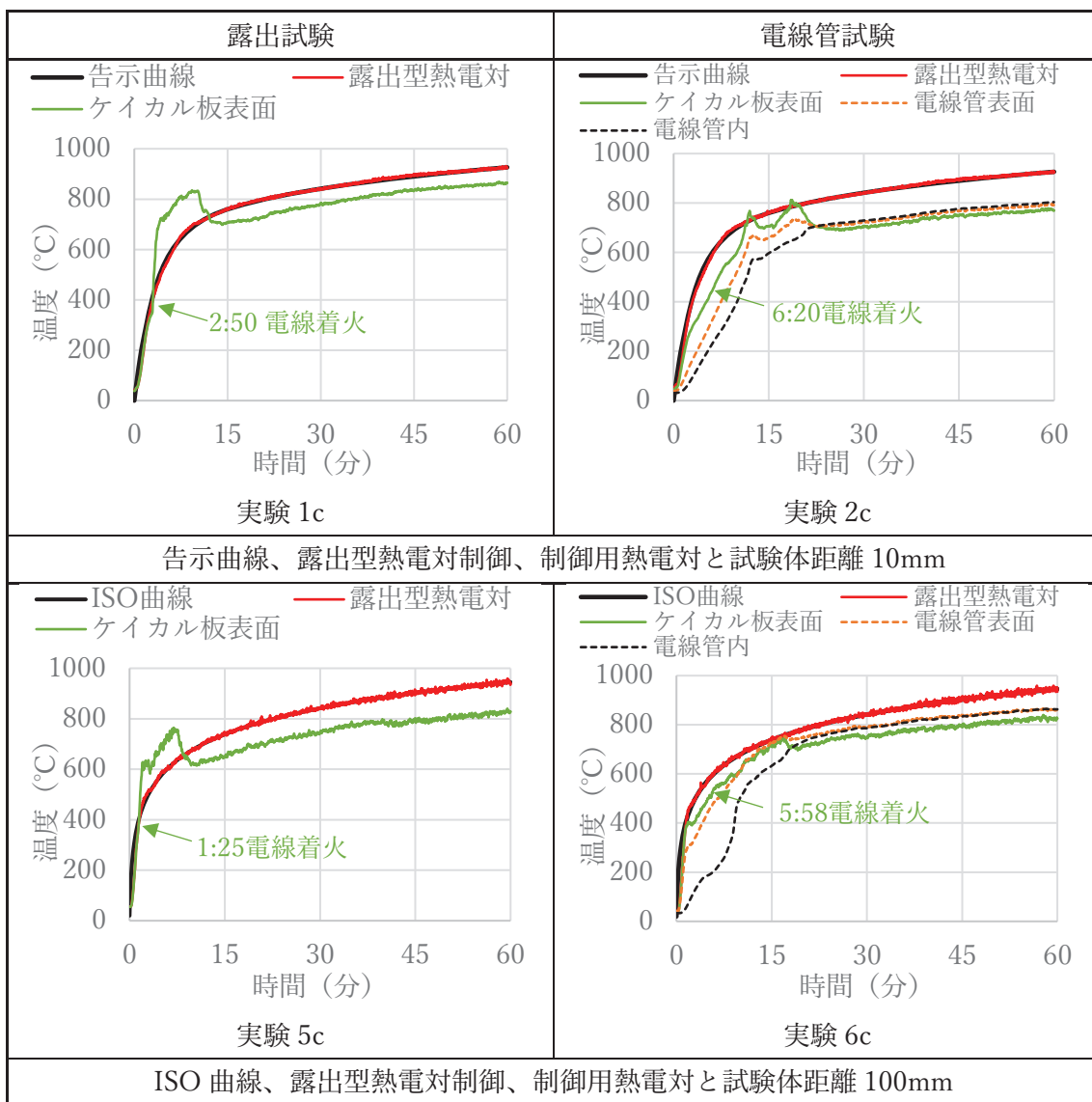


図 7.23 炉内温度の測定結果 (試料 c)

7. 4. 3 改良告示法による絶縁性測定結果

7. 4. 3. 1 試料 a (2mm^2)

導体サイズが 2mm^2 である試料 a の各実験の絶縁抵抗測定結果を図 7.24 に示す。図中の赤、黒、白は、3 心の耐火電線の赤線心、黒線心、白線心のそれぞれの絶縁抵抗値であり、縦軸は対数表示である。青色の破線は 600V の絶縁耐力試験中に耐電圧試験機で参考値として記録した 1 分毎の漏れ電流の値である。漏れ電流は耐火電線の絶縁性が低下すると増加し、漏れ電流と絶縁抵抗は概ね反比例の関係である。

(1) 露出試験

①実験 1a (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 1a (露出試験) では、絶縁抵抗は試料の着火後に急速に低下するが、その後は電線中央部が燃え尽きるとやや回復し、12 分以降は時間と共に徐々に低下した。絶縁抵抗は線心間で大きな差はみられなかった。最小値は加熱 60 分時の $0.65\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、試料の着火直後に急速に増加し、その後は電線中央部が燃え尽きると回復し、12 分以降は時間と共に徐々に増加した。

②実験 3a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

加熱曲線のみを ISO 曲線とした加熱条件である実験 3a (露出試験) は、実験 1a と類似の傾向であったが、電線被覆樹脂の燃え尽き後は赤線心の絶縁抵抗値がやや高かった。最小値は加熱 60 分時の $0.48\text{M}\Omega$ であった。

③実験 5a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5a (露出試験) は、実験 1a と類似の傾向であったが、絶縁抵抗は線心間で若干の差があった。最小値は加熱 60 分時の $1.2\text{M}\Omega$ であった。

④実験 7a (ISO 曲線、プレート熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

すべて ISO の加熱条件とした実験 7a (露出試験) は、実験 1a と類似の傾向ではあるが、全体的に絶縁抵抗は高く、漏れ電流も小さかった。絶縁抵抗の最小値は加熱 60 分時の $5\text{M}\Omega$ であった。これは、7.4.2.1(1)④の実験 7a のケイカル板表面温度の測定結果で示したように、プレート熱電対制御では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの熱エネルギーの一部をさえぎるため、露出型熱電対制御よりもケイカル板表面温度が低くなり、結果として耐火電線の損傷も小さくなったと考えられる。

告示の規定では絶縁抵抗は加熱前と加熱終了時だけの測定であるが、いずれの実験も1分毎に絶縁抵抗を測定することで、加熱中の絶縁性能の経時変化を把握できた。また、線心毎に個別に絶縁抵抗を測定することができた。

(2) 電線管試験

①実験 2a (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 2a (電線管試験) では、絶縁抵抗は電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に低下するが、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、35 分以降は概ね時間と共に徐々に低下したが、露出試験ほど直線的には低下しなかった。絶縁抵抗は3線心とも差があり、ばらつきがみられた。最小値は加熱 60 分時の $1.8\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に増加し、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、35 分以降は概ね時間と共に徐々に増加した。

②実験 4a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

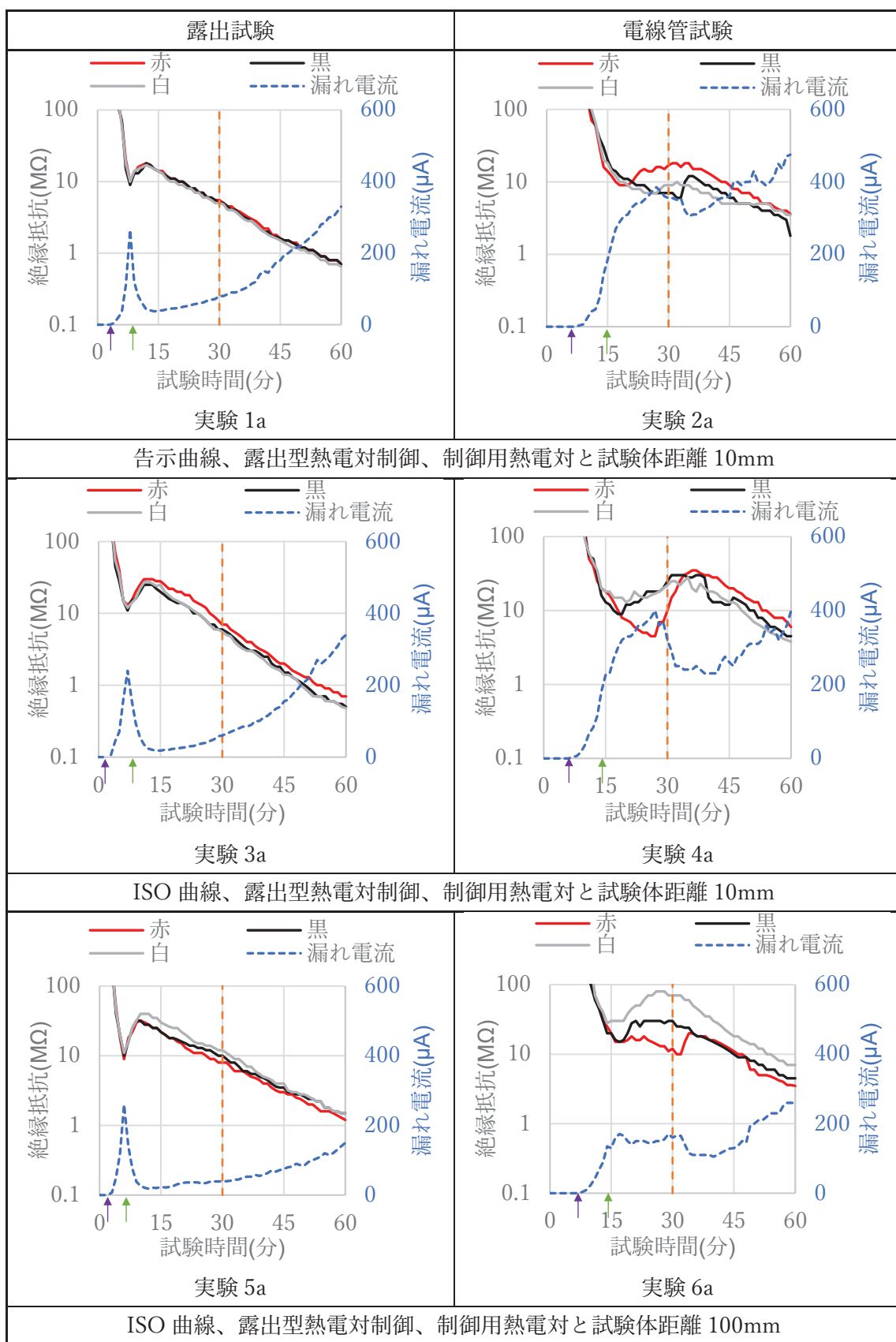
加熱曲線のみを ISO 曲線とした加熱条件である実験 4a (電線管試験) は、実験 2a と類似の傾向であった。最小値は加熱 60 分時の $3.8\text{M}\Omega$ であった。

③実験 6a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6a (電線管試験) は、実験 2a と類似の傾向であった。最小値は加熱 60 分時の $3.5\text{M}\Omega$ であった。

④実験 8a (ISO 曲線、プレート熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

すべて ISO の加熱条件とした実験 8a (電線管試験) は、実験 2a とは傾向がやや異なり、電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きても絶縁抵抗は回復せず、時間と共に徐々に低下した。また線心間で絶縁抵抗に差があり、赤線心が特に小さかった。全体的に絶縁抵抗は高く、漏れ電流も小さかった。絶縁抵抗の最小値は加熱 60 分時の $8\text{M}\Omega$ であった。絶縁抵抗が高い理由は、実験 7a と同様、プレート熱電対制御では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの熱エネルギーの一部をさえぎるため、露出型熱電対制御よりもケイカル板表面温度が低くなり、結果として耐火電線の損傷も小さくなったと考えられる。



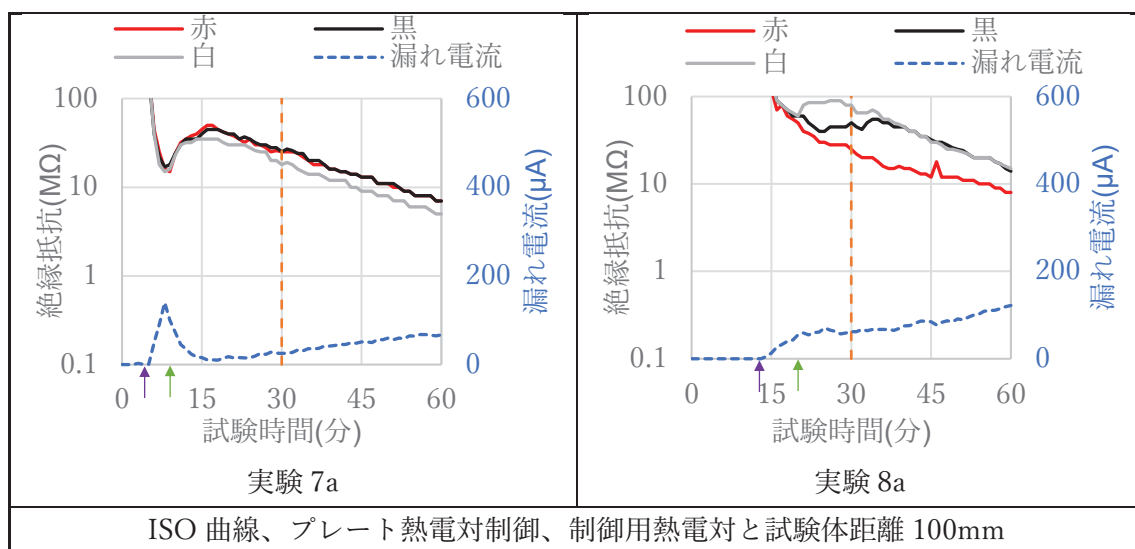


図 7.24 改良告示法による絶縁性測定結果

(試料 a、↑ : 被覆樹脂着火、↑ : 燃え尽き(露出試験:中央部、電線管試験:電線管端部))

7. 4. 3. 2 試料 b (8mm²)

導体サイズが 8mm²である試料 b の各実験の絶縁抵抗測定結果を図 7.25 に示す。図 7.24 と同様、図中の赤、黒、白は、3 心の耐火電線の赤線心、黒線心、白線心のそれぞれの絶縁抵抗値であり、縦軸は対数表示である。青色の破線は 600V の絶縁耐力試験中に耐電圧試験機で記録した際の 1 分毎の漏れ電流の値である。

①実験 1b (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 1b (露出試験) では、絶縁抵抗は試料の着火後に急速に低下するが、その後は電線中央部が燃え尽きるとやや回復し、17 分以降は時間と共に徐々に低下した。絶縁抵抗は赤線心がやや高かった。最小値は加熱 60 分時の 0.70MΩであった。告示の規定では加熱 30 分時に絶縁抵抗を測定し、その値を合否判定に使用するが、実験 1b では、加熱開始 9 分頃の電線中央部燃焼時の絶縁抵抗の方が、加熱 30 分時の絶縁抵抗よりも低かった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、試料の着火直後に急速に増加し、その後は電線中央部が燃え尽きると回復し、20 分以降は時間と共に徐々に増加した。

②実験 5b (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5b(露出試験)は、1b と類似の傾向であった。最小値は加熱 60 分時の 0.80MΩであった。

(2) 電線管試験

①実験 2b (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 2b（電線管試験）では、絶縁抵抗は電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に低下するが、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きると横ばいになり、30 分以降は概ね時間と共に徐々に低下したが、露出試験ほど直線的な低下ではなかった。絶縁抵抗は線心間で差があり、ばらつきがみられた。最小値は加熱 60 分時の $1.7\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に増加し、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きると横ばいになり、30 分以降は概ね時間と共に徐々に増加した。

②実験 6b（ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm）

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6b（電線管試験）では、絶縁抵抗は電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に低下するが、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、30 分以降は概ね時間と共に徐々に低下した。加熱 30 分前後の絶縁抵抗値は不安定であり、時間的な変動があった。最小値は加熱 60 分時の $1.4\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に増加し、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、35 分以降は概ね時間と共に徐々に増加した。

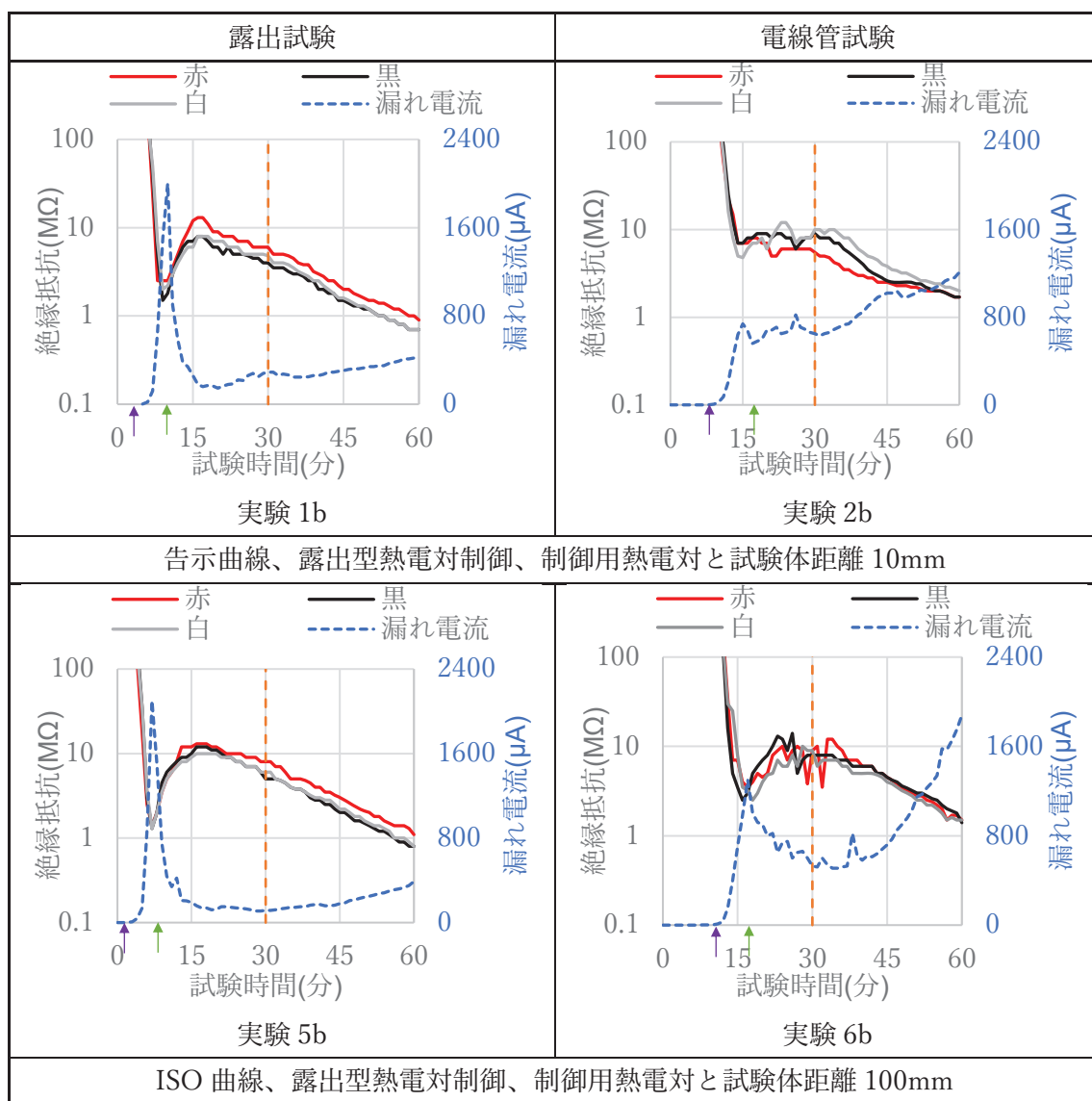


図 7.25 改良告示法による絶縁性測定結果

(試料 b、↑ : 被覆樹脂着火、↑ : 燃え尽き(露出試験:中央部、電線管試験:電線管端部))

7. 4. 3. 3 試料 c (38mm²)

導体サイズが 38mm²である試料 c の各実験の絶縁抵抗測定結果を図 7.26 に示す。図 7.24 と同様、図中の赤、黒、白は、3 心の耐火電線の赤線心、黒線心、白線心のそれぞれの絶縁抵抗値であり、縦軸は対数表示である。青色の破線は 600V の絶縁耐力試験中に耐電圧試験機で記録した際の 1 分毎の漏れ電流の値である。

①実験 1c (告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

すべて告示の加熱条件である実験 1c（露出試験）では、絶縁抵抗は試料の着火後に急速に低下するが、その後は電線中央部が燃え尽きるとやや回復し、15 分以降は時間と共に徐々に低下した。最小値は加熱 60 分時の $1.4\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、試料の着火直後に急速に増加し、その後は電線中央部が燃え尽きると回復し、20 分以降は時間と共に徐々に増加した。

②実験 5c（ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm）

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 5c（露出試験）は、1c と類似の傾向であった。最小値は加熱 60 分時の $1.5\text{M}\Omega$ であった。

（2）電線管試験

①実験 2c（告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm）

すべて告示の加熱条件である実験 2c（電線管試験）では、絶縁抵抗は電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に低下するが、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、30 分以降は時間と共に徐々に低下した。絶縁抵抗は赤線心がやや低く、他の線心と差がみられた。最小値は加熱 60 分時の $18\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は絶縁抵抗と同様、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に増加した。その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きると加熱終了時まで横ばいであった。

②実験 6c（ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm）

加熱曲線及び制御用熱電対と試験体距離を ISO の加熱条件とした実験 6c（電線管試験）では、絶縁抵抗は電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に低下するが、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きると一旦、横ばいになり、40 分以降は概ね時間と共に徐々に低下した。絶縁抵抗は線心間で差があり、ばらつきがみられた。最小値は加熱 60 分時の $3.0\text{M}\Omega$ であった。

漏れ電流は、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火後に急速に増加し、その後は電線管付近の被覆樹脂が燃え尽きるとやや回復し、一旦、横ばいとなった後、45 分以降は時間と共に増加した。

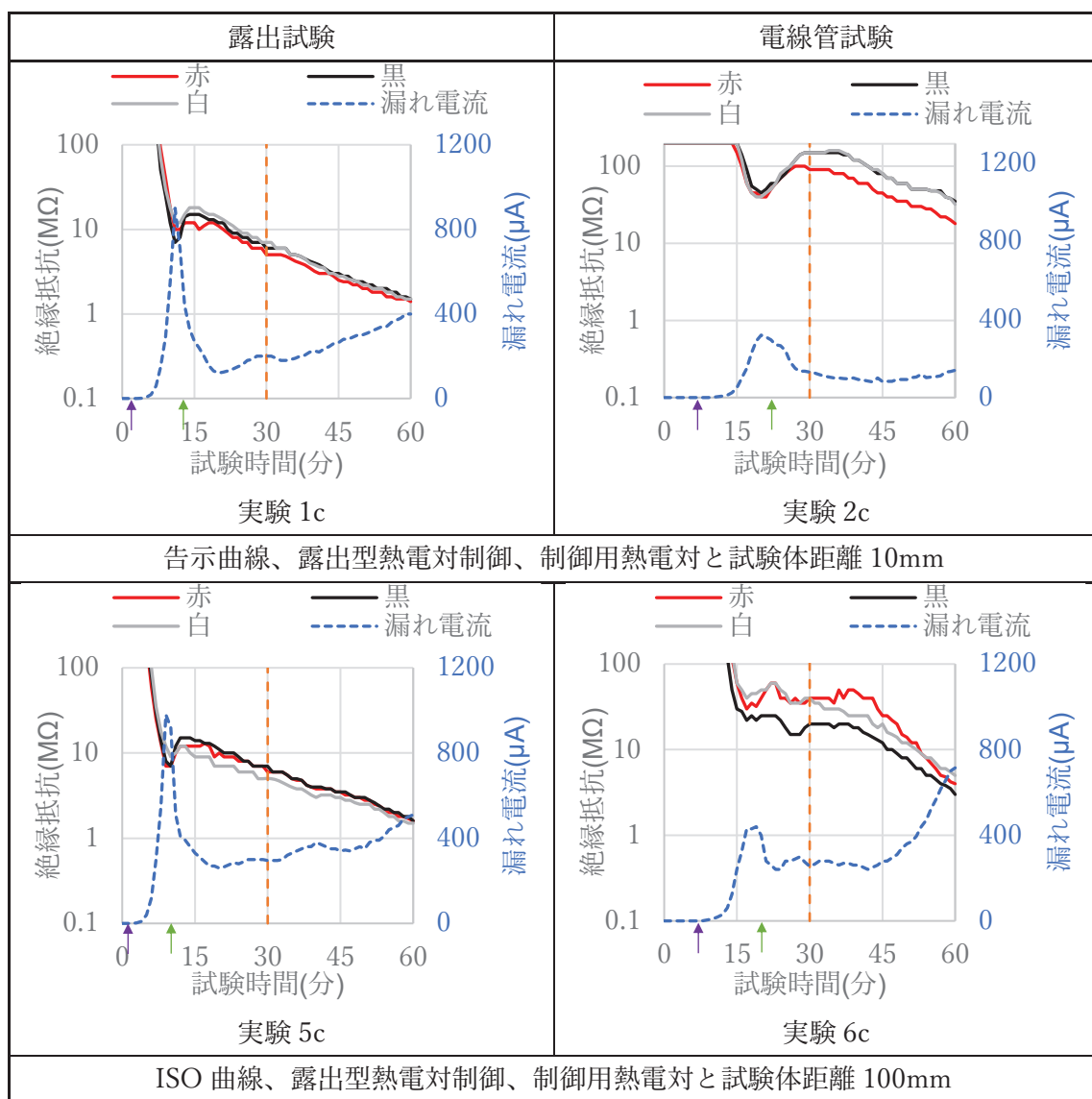


図 7.26 改良告示法による絶縁性測定結果

(試料 c、↑ : 被覆樹脂着火、↑ : 燃え尽き(露出試験:中央部、電線管試験:電線管端部))

7. 4. 3. 4 改良告示法での絶縁耐力試験結果

加熱中は 1 分毎の絶縁抵抗測定時以外は、交流 600V による絶縁耐力試験を実施した。試料 a～c の全ての改良告示法の試験において、60 分間の加熱中に絶縁破壊する試料はなかった。

60 分間の加熱終了後に実施した絶縁耐力試験の結果を表 7.9 に示す。表中の「○」で示した項目は、交流 1,500V の電圧に 1 分間耐えたことを示し、赤文字の電圧値は 1,500V への昇圧中に絶縁破壊した際の値を示し、赤文字の秒数は 1,500V へ昇圧後、絶縁破壊に至るまでの秒数を示す。

60 分の加熱中に実施した 600V の絶縁耐力試験と 7.4.3.1～7.4.3.3 節に示した 1 分毎の絶縁抵抗測定では、いずれも告示の規定（30 分耐火試験の基準）を満足したが、加熱時間を 60 分間に延長したことで、加熱終了後の絶縁耐力試験では、1,500V の絶縁耐力試験で絶縁破壊する試料があった。

試料 a では、実験 2a、4a、8a が絶縁破壊し、いずれも電線管試験であった。露出試験では、2.6m 当たりの電線重量を錘として試験体に掛けて加熱するため、太い電線ほど錘の重量が増えて、試験結果が厳しくなる傾向がある。試料 a は電線径が細く、錘が軽いため、露出試験において、いずれも絶縁破壊しなかったと考えられる。

試料 b では、実験 5b、6b が絶縁破壊し、いずれも ISO 曲線、制御用熱電対と試験体距離が 100mm の条件であった。試料 c では、実験 2c、5c、6c が絶縁破壊した。

表 7.9 加熱終了時の絶縁耐力試験結果

加熱条件			試験の種類	実験 No.	試験試料		
加熱曲線	TC-試験体 距離	制御 熱電対			試料 a	試料 b	試料 c
告示曲線	10mm	露出型	露出試験	実験 1	○	○	○
			電線管試験	実験 2	1,000V*1	○	8 秒*2
ISO 曲線			露出試験	実験 3	○		
			電線管試験	実験 4	1,070V*1		
	100mm	露出試験	実験 5	○	1,334V*1	1 秒*2	
		電線管試験	実験 6	○	1,356V*1	760V*1	
プレート		露出試験	実験 7	○			
		電線管試験	実験 8	1,078V*1			

*1：1,500V への昇圧中に絶縁破壊したため、絶縁破壊時の電圧値を記載

*2：1,500V で 1 分間保持中に絶縁破壊したため、昇圧後に絶縁破壊までの秒数を記載

電線管試験における、加熱中の電線管内の最高温度と絶縁破壊の有無を図 7.27 に示す。電線管内最高温度が高い 2a、4a、6b、6c に加えて、電線管内最高温度の低い 8a と 2c も絶縁破壊しているため、電線管内の最高温度と加熱終了時の絶縁耐力試験における絶縁破壊の有無には明確な相関はみられない。機能を保持した条件（6a 及び 2b）の平均最高温度は 845℃、絶縁破壊した条件の平均最高温度は 852℃である。

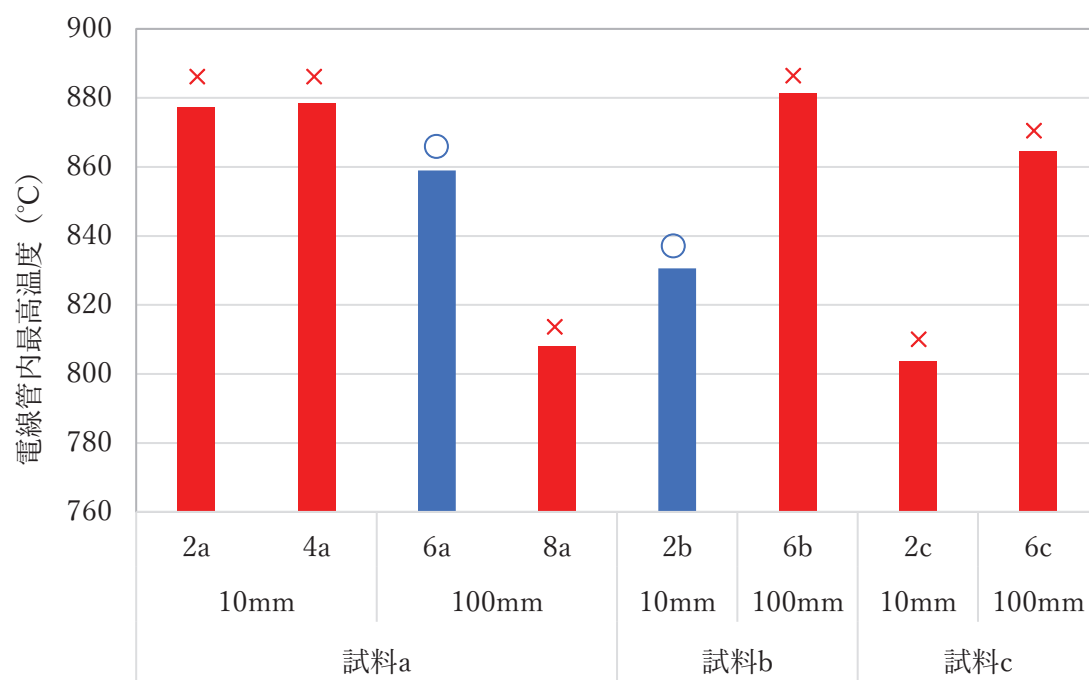


図 7.27 電線管内の最高温度と絶縁破壊の有無の関係
(○：絶縁破壊なし、×：絶縁破壊あり)

7. 4. 4 IEC 法による絶縁性測定結果

試料 a～c に対して、IEC 法により加熱中の絶縁性を測定した結果一覧を図 7.28 に示す。いずれも加熱方法は、加熱曲線、制御用熱電対と試験体距離、制御用熱電対のすべてが告示の条件である。各実験とも 3 線心の電流値の差は小さく、グラフはほぼ重なっている。また、60 分間の変動は非常に小さかった。すべての実験において、60 分間の加熱中に電流値が青色破線で示した IEC 60331 の 2A の基準値を超えなかった。

回路中に設置したランプも加熱中は常時点灯していたことから、いずれの線心も断線しなかった。

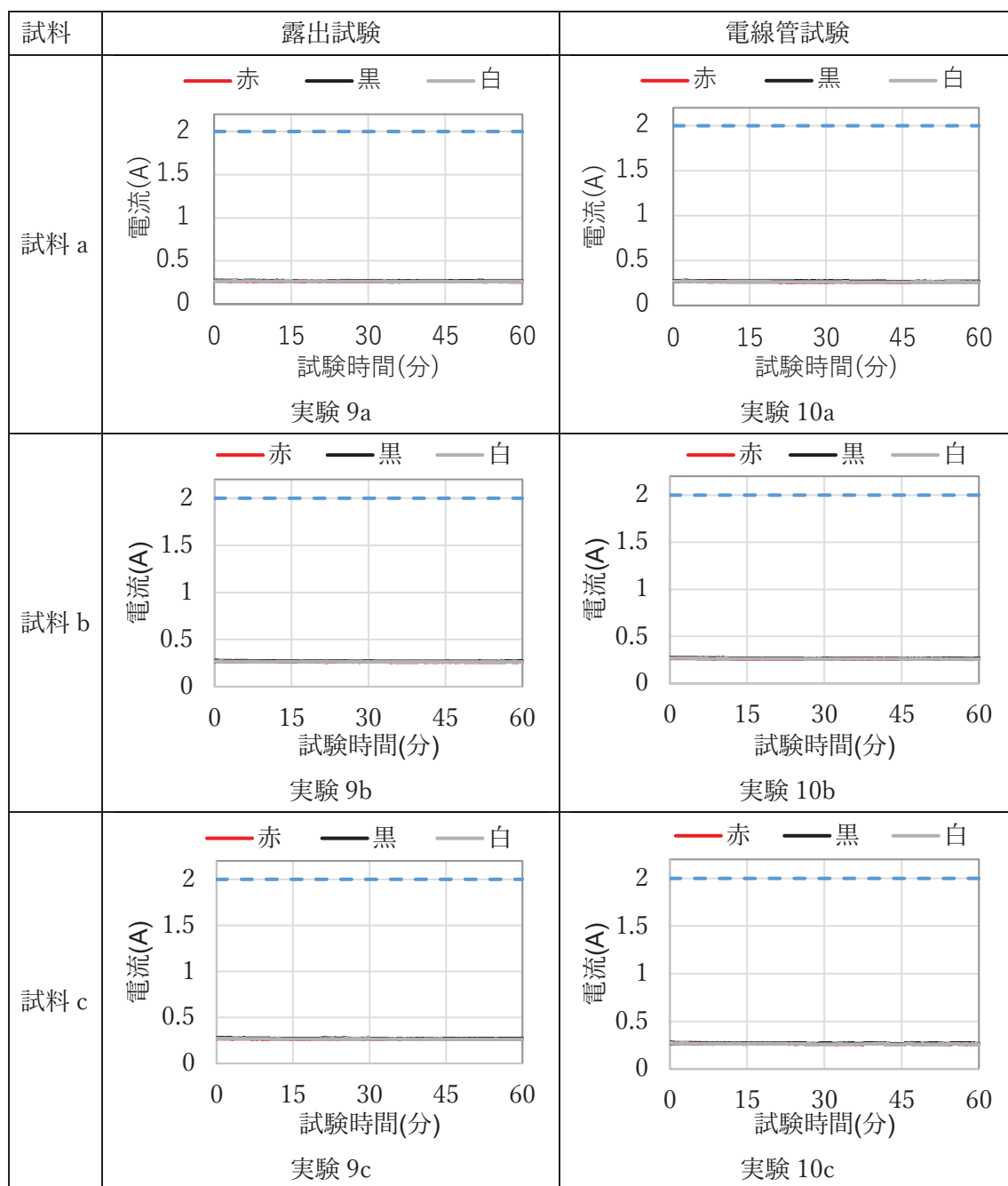


図 7.28 IEC 課電時の電流値

※青色破線は IEC 60331 の規格上限値

7. 5 考察

7. 5. 1 加熱条件による比較

7. 5. 1. 1 ケイカル板表面温度の比較

試料 a のケイカル板表面温度について、露出試験の比較を図 7.29 に、電線管試験の比較を図 7.30 に示す。露出試験の図 7.29 について、加熱曲線のみが異なる実験 1a（告示曲線）と実験 3a（ISO 曲線）を比較すると、ISO 曲線（実験 3a）の方が加熱開始直後に急激に温度が上昇する。これは 3 章の図 3.1 で示したように ISO 曲線の方が告示曲線よりも加熱開始直後の温度上昇が大きいことから、告示曲線（実験 1a）よりも早く電線被覆樹脂が着火し、その火炎がケイカル板を加熱したためである。30 分以降は曲線の違いによるケイカル板温度の差は小さい。

制御用熱電対と試験体との距離のみが異なる実験 3a（10mm）と 5a（100mm）を比較すると、大きな差がみられ、100mm（実験 5a）の方がケイカル板表面温度は低い。これは、制御用熱電対と試験体との距離が 100mm の方が制御用熱電対とケイカル板の距離が離れ、バーナ火炎からケイカル板への放射熱が小さくなるためと考えられる。

制御用熱電対のみが異なる実験 5a（露出型熱電対）と 7a（プレート熱電対）を比較すると、大きな差がみられ、プレート熱電対（7a）の方がケイカル板表面温度は低い。これは、プレート熱電対とケイカル板表面上の測定用熱電対が図 7.3b)で示す位置関係にあり、バーナ火炎からの熱エネルギーの一部が 100mm 角のプレート熱電対にさえぎられたためと考えられる。

電線管試験のケイカル板表面温度の比較を示した図 7.30 について、図 7.29 の露出試験とは異なり、加熱開始直後の電線被覆樹脂の着火に伴う急激な温度上昇はみられないが、それ以降は露出試験とほぼ同様の傾向である。

試料 a の各実験のケイカル板表面温度の試料着火時のピーク温度、30 分時及び 60 分時の比較を図 7.31 に示す。試料着火時のケイカル板表面温度の最大値は、実験 1a と 3a がそれぞれ 753°C、759°C と同等に高く、次いで実験 5a の 643°C、実験 7a の 591°C の順である。このことから実験 1a と 3a が最も激しく電線が燃焼したと考えられる。

30 分時と 60 分時は、同じ加熱条件で比較すると、露出試験の方が電線管試験よりもケイカル板表面温度は高い傾向である。これは図 7.3 で示すように、制御用熱電対とケイカル板の水平距離は試料外径により異なり、その距離は、表 7.10 に示すように露出試験では電線外径に 10mm（実験 1a、3a）又は 100mm（実験 5a、7a）を加えた距離、電線管試験では電線管外径に 10mm（実験 2a、4a）又は 100mm（実験 6a、8a）を加えた距離であることから、露出試験の方が電線管試験よりも制御用熱電対とケイカル板の水平距離が近く、バーナからケイカル板への放射熱が強いためと考えられる。

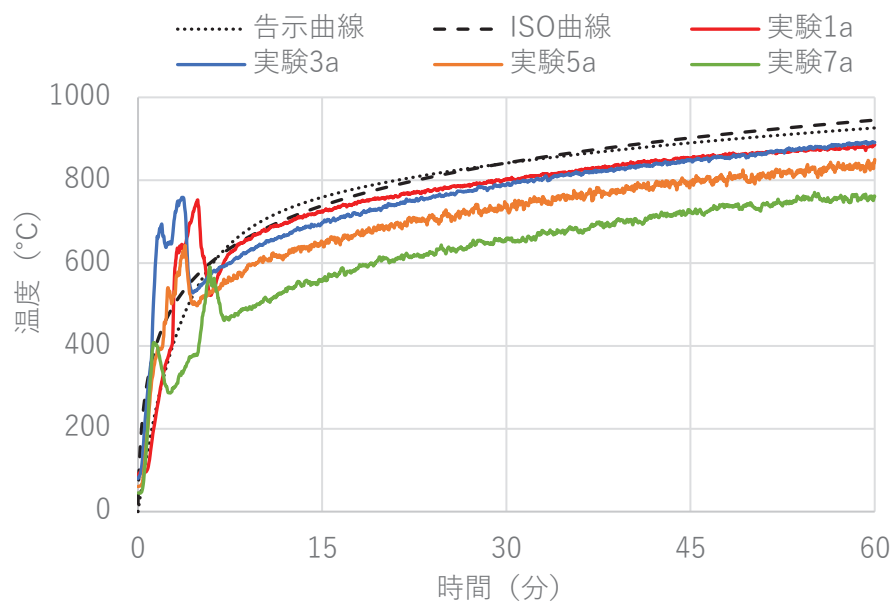


図 7.29 ケイカル板表面温度の比較（露出試験、試料 a）

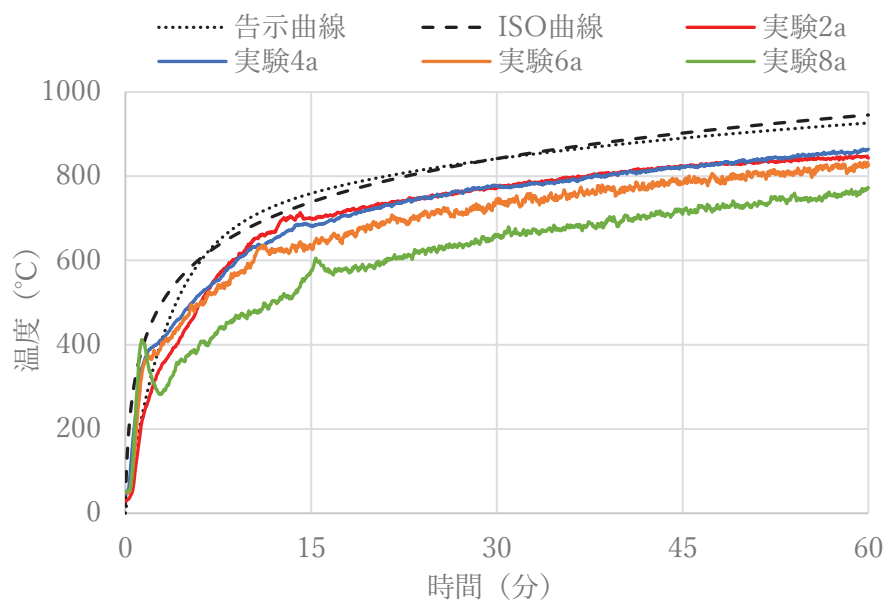


図 7.30 ケイカル板表面温度の比較（電線管試験、試料 a）

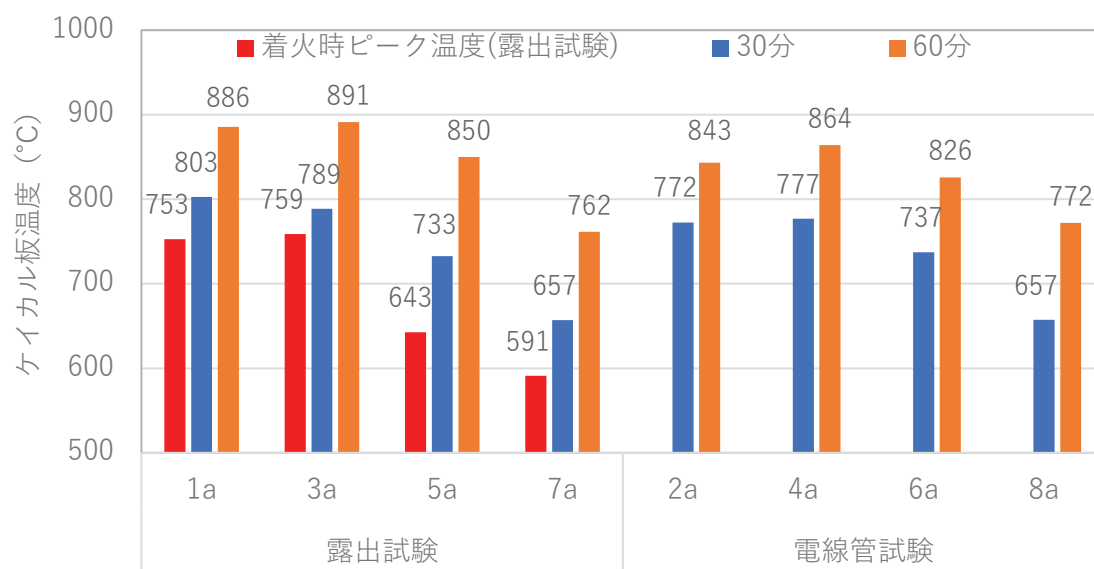


図 7.31 ケイカル板表面温度の比較
(試料 a、着火時ピーク温度（露出試験のみ）、30 分加熱時及び 60 分加熱時）

表 7.10 制御用熱電対とケイカル板の水平距離（試料 a）

試験の種類	実験番号	試料外径	制御用熱電対と試験体の水平距離	合計（制御用熱電対とケイカル板の水平距離）
露出試験	実験 1a、3a	12.7mm	10mm	22.7mm
	実験 5a、7a	(電線外径)	100mm	112.7mm
電線管試験	実験 2a、4a	25.4mm	10mm	35.4mm
	実験 6a、8a	(電線管外径)	100mm	125.4mm

7. 5. 1. 2 絶縁抵抗の比較

試料 a の加熱中の絶縁抵抗について、露出試験の比較を図 7.32 に、電線管試験の比較を図 7.33 に示す。露出試験の図 7.32 について、加熱曲線のみが異なる実験 1a（告示曲線）と実験 3a（ISO 曲線）を比較すると、告示曲線（実験 1a）の方が加熱前半の絶縁抵抗はやや低いが、50 分以降は ISO 曲線（実験 3a）の方がわずかに低い。これは耐火層に用いられるマイカテープは、温度依存性があり、高温ほど絶縁性能が低下するためであり、図 7.29 のケイカル板表面温度で示したように加熱前半は告示曲線の方が温度が高く、加熱終盤は ISO 曲線の方がケイカル板表面温度はやや高いためである。なお、ISO 曲線の方が加熱開始直後の炉内の温度上昇が大きいために着火時間は早いものの、試料が燃え尽きるまでの絶縁抵抗の差は小さい。また、加熱 30 分以降の絶縁抵抗の差も小さく、加熱曲線の違いが絶縁抵抗に与える影響は小さいといえる。

制御用熱電対と試験体との距離のみが異なる実験 3a (10mm) と 5a (100mm) を比較すると、大きな差がみられ、100mm (実験 5a) の方が絶縁抵抗は高い。これも上記と同様に、制御用熱電対と試験体との距離が 100mm の方がケイカル板表面温度は低く、試験体の温度も低いと考えられるためである。

制御用熱電対のみが異なる実験 5a (露出型熱電対) と 7a (プレート熱電対) を比較すると、大きな差がみられ、プレート熱電対 (7a) の方が絶縁抵抗は高い。これもプレート熱電対制御の方がケイカル板表面温度は低く、試験体の温度が露出型熱電対制御の場合よりも低いと考えられるためである。

電線管試験の絶縁抵抗の比較を示した図 7.33 について、実験 2a と 8a は時間と共に徐々に絶縁抵抗が低下した。実験 4a と 6a は加熱 27 分まではいずれも時間と共に徐々に絶縁抵抗は低下し、その後、一旦絶縁抵抗がやや回復するが、35 分以降は時間と共に徐々に低下した。

露出試験では被覆樹脂が燃え尽きるため、温度と絶縁抵抗の相関性は強いが、電線管試験では電線管内で被覆樹脂が不完全燃焼することで生成する導電性の炭化物の状況により、絶縁抵抗に影響を与えるため、絶縁抵抗の経時変化が露出試験ほど単純ではない。

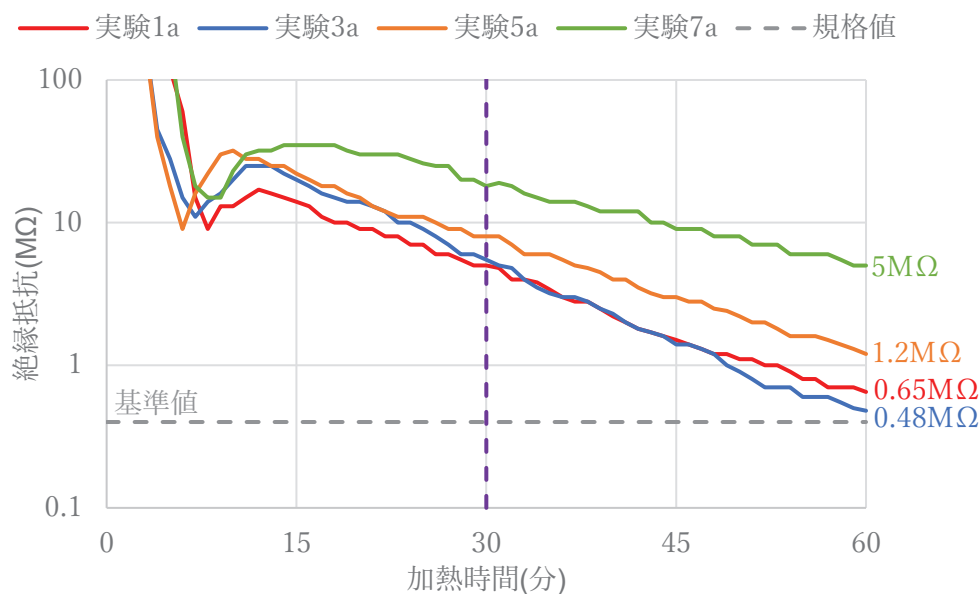


図 7.32 絶縁抵抗の比較 (露出試験、試料 a)

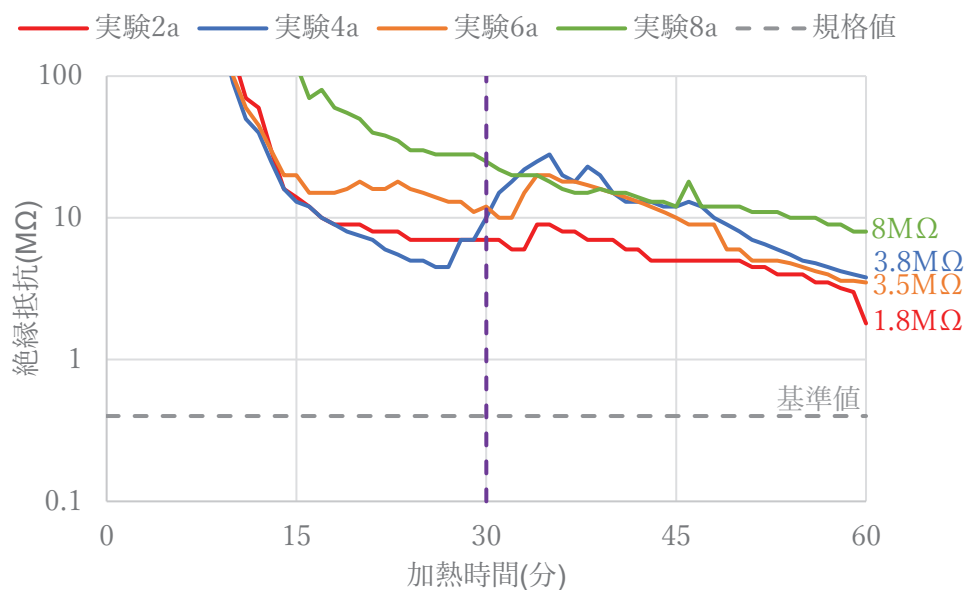


図 7.33 絶縁抵抗の比較（電線管試験、試料 a）

温度と絶縁抵抗の関係を調べるため、横軸に温度を、縦軸に絶縁抵抗をプロットする。図 7.34 は、試料 a の露出試験における 1 分毎のケイカル板表面温度と絶縁抵抗をプロットした図である。同様に、図 7.35 は、試料 a の電線管試験における 1 分毎の電線管内温度と絶縁抵抗をプロットした図である。

図 7.34 より、露出試験ではいずれの加熱条件でも、ケイカル板表面温度が高いほど絶縁抵抗は低い傾向であった。特に制御用熱電対とケイカル板距離が 10mm である実験 1a と 3a は、700°C 以上ではプロットがほぼ重なっており、ケイカル板表面温度と絶縁抵抗の関係が類似している。制御用熱電対とケイカル板距離が 100mm である実験 5a と 7a は、600°C 以上ではプロットが同一線上にほぼ重なっている。

図 7.35 より、電線管試験ではいずれの加熱条件でも、電線管内温度が 750°C 付近までは電線管内温度が高いほど絶縁抵抗は低い、実験 4a と 6a では 800°C 付近で一旦、絶縁抵抗が増加した。これは、図 7.24 に示すように実験 4a と 6a では加熱 30 分から 45 分にかけて、絶縁抵抗が一旦回復する現象がみられたためである。

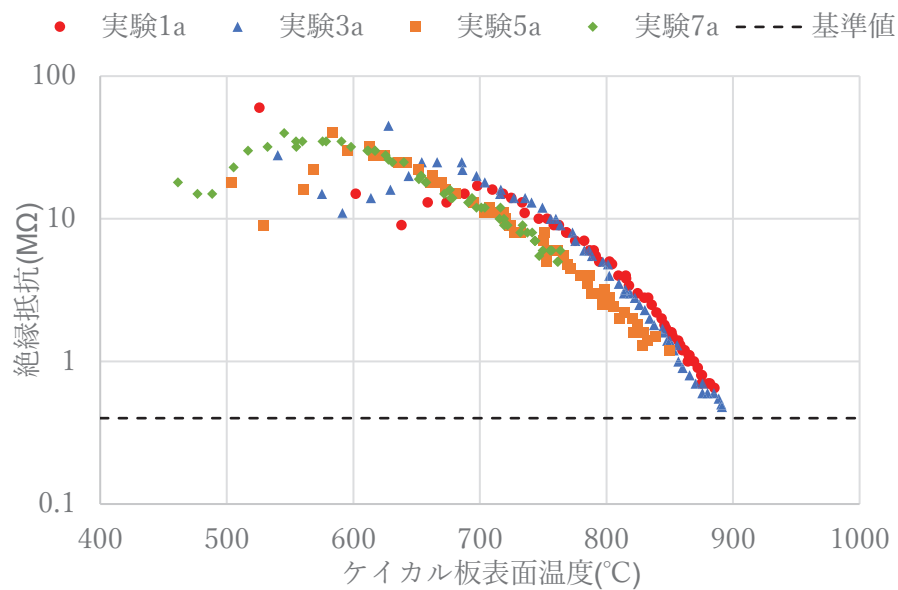


図 7.34 ケイカル板温度と絶縁抵抗の関係（露出試験、試料 a）

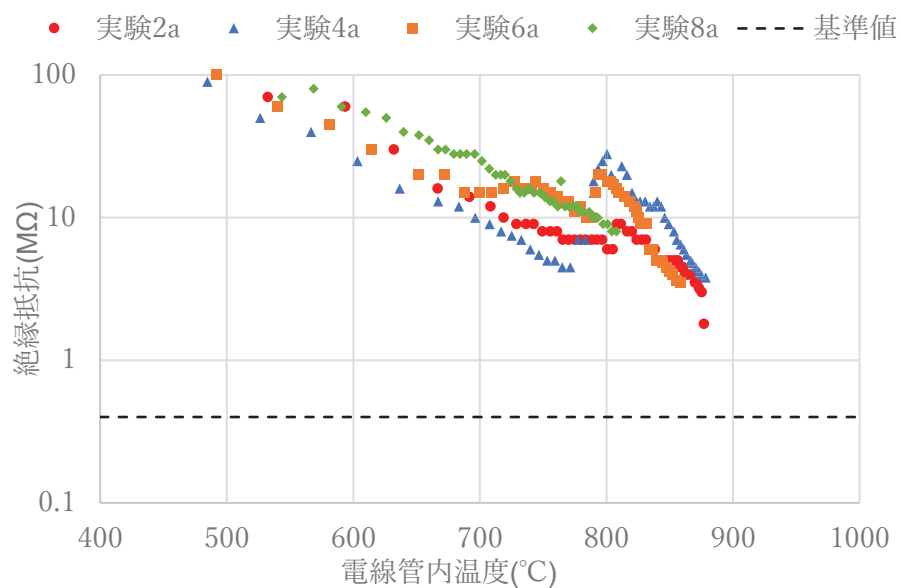


図 7.35 電線管内温度と絶縁抵抗の関係（電線管試験、試料 a）

試料 a の加熱中の絶縁抵抗について、30 分値と 60 分値の比較を図 7.36 に示す。絶縁抵抗の 30 分値は、いずれも告示の 30 分時の基準値である $0.4\text{M}\Omega$ を十分に超える数値であった。30 分値では、露出試験よりも電線管試験の方が絶縁抵抗は高かった。加熱条件で比較すると、すべて告示の条件である 1a（露出試験）と 2a（電線管試験）の絶縁抵抗が低く、すべて ISO の条件である 7a（露出試験）と 8a（電線管試験）の絶縁抵抗が高い。

絶縁抵抗の 60 分値は、いずれも告示の 30 分時の基準値である $0.4\text{M}\Omega$ を満たしたが、30 分値よりも絶縁抵抗は大幅に低かった。傾向は、30 分値と同様である。

加熱条件で比較すると、すべて告示の条件である 1a（露出試験）と 2a（電線管試験）の絶縁抵抗は低く、すべて ISO の条件である 7a（露出試験）と 8a（電線管試験）の絶縁抵抗は高く、耐火電線へ与える損傷度としては ISO 法の方が小さい。

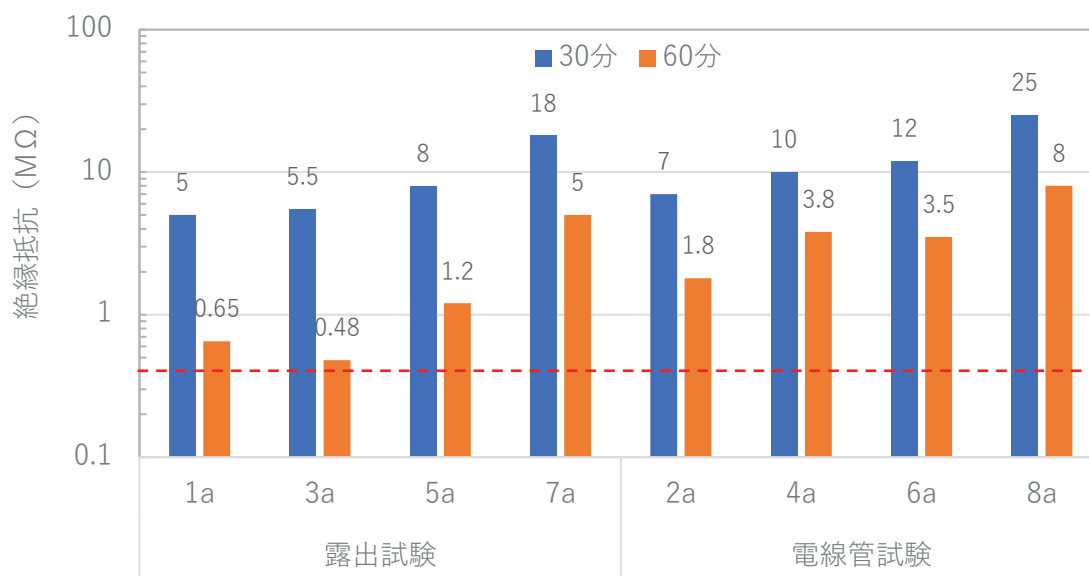


図 7.36 絶縁抵抗の比較（試料 a、30 分加熱時及び 60 分加熱時）

7. 5. 1. 3 着火時間の比較

試料 a の電線被覆樹脂の着火時間を図 7.37 に示す。露出試験において、加熱曲線のみが異なる実験 1a（告示曲線）と実験 3a（ISO 曲線）を比較すると、ISO 曲線（実験 3a）の方が着火時間は早い。これは加熱開始直後の温度上昇が、ISO 曲線の方が大きいためと考えられる。

制御用熱電対と試験体との距離のみが異なる実験 3a（10mm）と 5a（100mm）を比較すると、100mm（実験 5a）の方が着火時間は遅い。これは制御用熱電対と試験体との距離が遠い方が試験体への放射熱が小さいためだと考えられる。

制御用熱電対のみが異なる実験 5a（露出型熱電対）と 7a（プレート熱電対）を比較すると、プレート熱電対（7a）の方が着火時間は遅い。これは、プレート熱電対と試験体が図 7.3b) で示す位置関係にあり、バーナ火炎からの熱エネルギーの一部が 100mm 角のプレート熱電対にさえぎられたためと考えられる。

電線管試験の着火時間は、電線管端部の電線露出部分の被覆樹脂が着火した時間である。実験 2a、4a、6a の着火時間の差は小さく、加熱条件による明確な差はみられなかった。プレート熱電対制御である実験 8a は、電線管試験の他の加熱条件とは異なり、着火時間は大

幅に遅い。これは露出試験の実験 7a と同様、バーナ火炎からの熱エネルギーの一部が 100mm 角のプレート熱電対にさえぎられたためと考えられる。

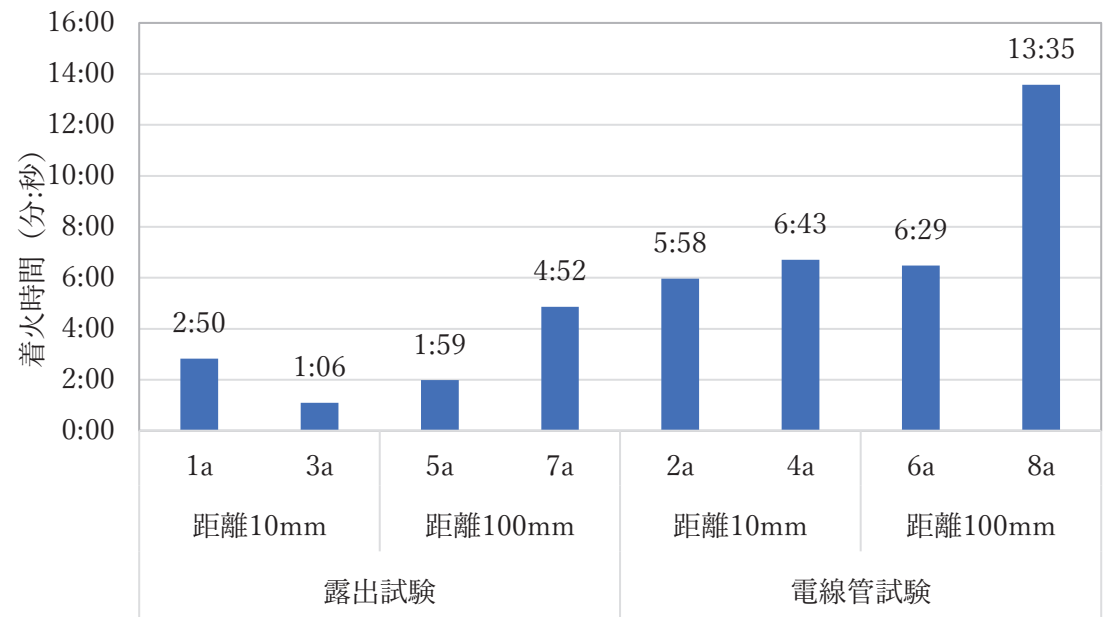


図 7.37 試料着火時間の比較

7. 5. 2 導体サイズの比較

7. 5. 2. 1 制御用熱電対とケイカル板の位置関係

試料 a～c について、実験 1、5、2、6 の各実験における制御用熱電対と試験体表面及びケイカル板までの水平距離を表 7.11 及び図 7.38 に示す。図 7.3a) に示したように、バーナ壁面から制御用熱電対までの水平距離は 250mm で共通であるが、制御用熱電対から試験体表面までの距離及びケイカル板表面までの距離は、試験体外径と加熱条件により異なる。

電線管試験では電線を電線管内へ収めるため、同じ電線であれば露出試験よりも電線管試験の方が試験体は太くなり、制御用熱電対とケイカル板の水平距離は大きくなる。

表 7.11 各実験における制御用熱電対と試験体及びケイカル板の水平距離

試験の種類	実験番号	試料外径	制御用熱電対と試験体の水平距離	合計（制御用熱電対とケイカル板の水平距離）
露出試験	実験 1a	12.7mm	10mm	22.7mm
	実験 5a	(電線外径)	100mm	112.7mm
	実験 1b	17.5mm	10mm	27.5mm
	実験 5b	(電線外径)	100mm	117.5mm
	実験 1c	27.4mm	10mm	37.4mm
	実験 5c	(電線外径)	100mm	127.4mm
電線管試験	実験 2a	25.4mm	10mm	35.4mm
	実験 6a	(電線管外径)	100mm	125.4mm
	実験 2b	31.8mm	10mm	41.8mm
	実験 6b	(電線管外径)	100mm	131.8mm
	実験 2c	50.8mm	10mm	60.8mm
	実験 6c	(電線管外径)	100mm	150.8mm

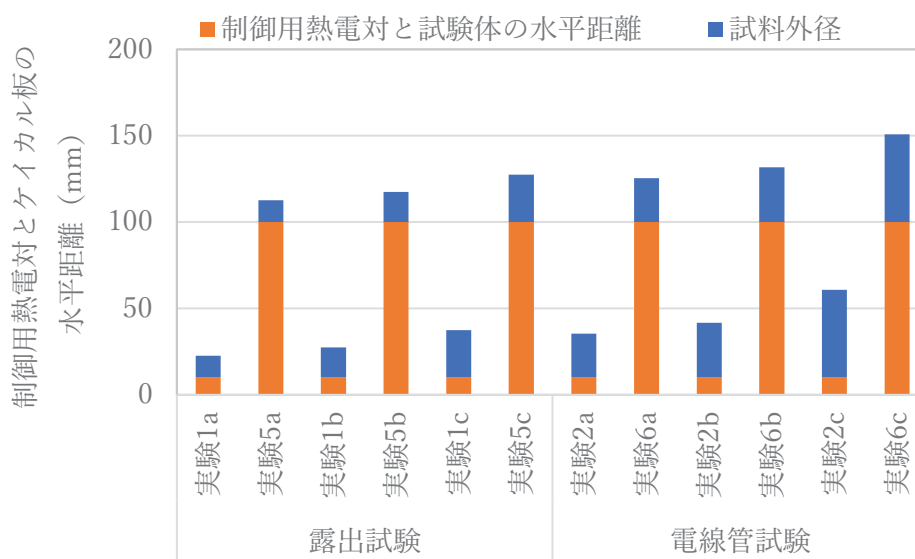


図 7.38 各実験における制御用熱電対と試験体及びケイカル板の水平距離

7. 5. 2. 2 ケイカル板表面温度

各試料のケイカル板表面温度について、実験 1 の比較を図 7.39 へ、実験 5 の比較を図 7.40 へ、実験 2 の比較を図 7.41 へ、実験 6 の比較を図 7.42 へそれぞれ示す。図 7.39 に示す実験 1 (露出試験) では、電線被覆樹脂の着火後にケイカル板表面温度は急激に高くなる。導体サイズが大きいほどケイカル板の温度が高い状態が長く続くが、これは、導体サイズが大きいほど被覆樹脂量が多く、被覆樹脂の燃焼持続時間が長くなるためと考えられる。加熱 15 分以降はケイカル板表面温度に大きな差はみられないが、温度は実験 1c、1b、1a の順に

わずかに高い。これは図 7.38 に示したように実験 1a の制御用熱電対とケイカル板の水平距離が最も小さく、バーナ火炎からの放射熱が大きいためと考えられる。

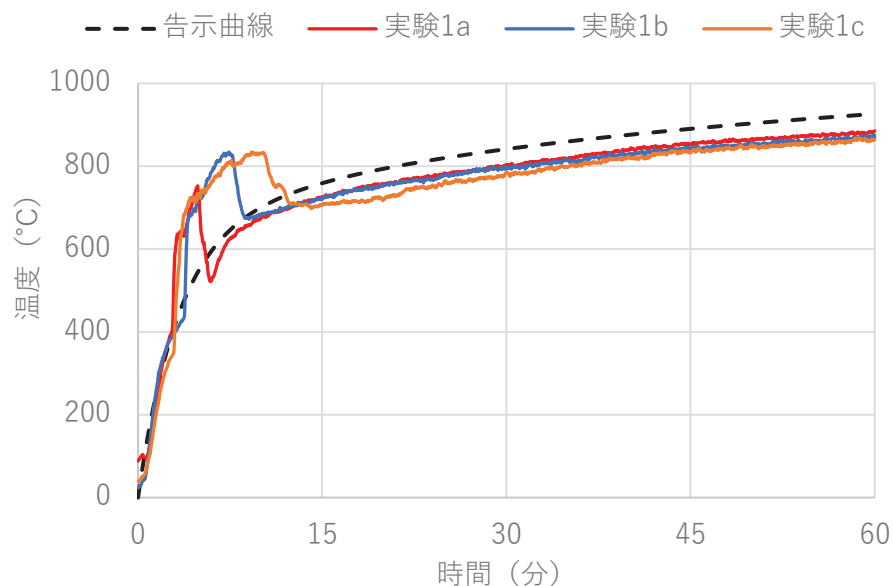


図 7.39 ケイカル板表面温度の比較

(実験 1：試料 a、b、c、露出試験、告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 10mm)

図 7.40 に示す実験 5（露出試験）では、電線被覆樹脂の着火後にケイカル板表面温度は急激に高くなる。実験 1 と同様、導体サイズが大きいほど被覆樹脂着火後のケイカル板表面温度が高い状態が長く続いた。加熱 10 分以降はケイカル板表面温度に大きな差はみられないが、実験 5c はわずかに温度が低く、これも制御用熱電対とケイカル板の水平距離が大きく、バーナ火炎からの放射熱が小さいためと考えられる。

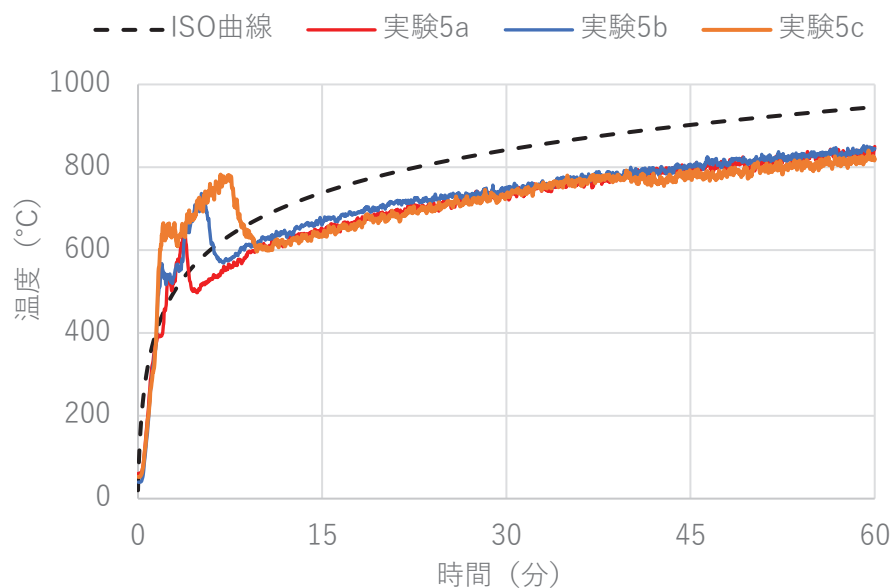


図 7.40 ケイカル板表面温度の比較

(実験 5：試料 a、b、c、露出試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

図 7.41 に示す実験 2（電線管試験）では、導体サイズの最も大きい試料 c のみ、12 分と 18 分にピークがみられた。これは、導体径が大きく被覆樹脂量が多いために、被覆樹脂燃焼時の火炎がケイカル板表面の中央付近まで拡大し、ケイカル板が加熱されたためと考えられる。加熱 25 分以降は、ケイカル板温度は実験 2c、2b、2a の順に高くなり、差がみられた。これも、図 7.38 に示したように実験 2a の制御用熱電対とケイカル板の水平距離が最も小さく、バーナ火炎からの放射熱が大きいと考えられる。

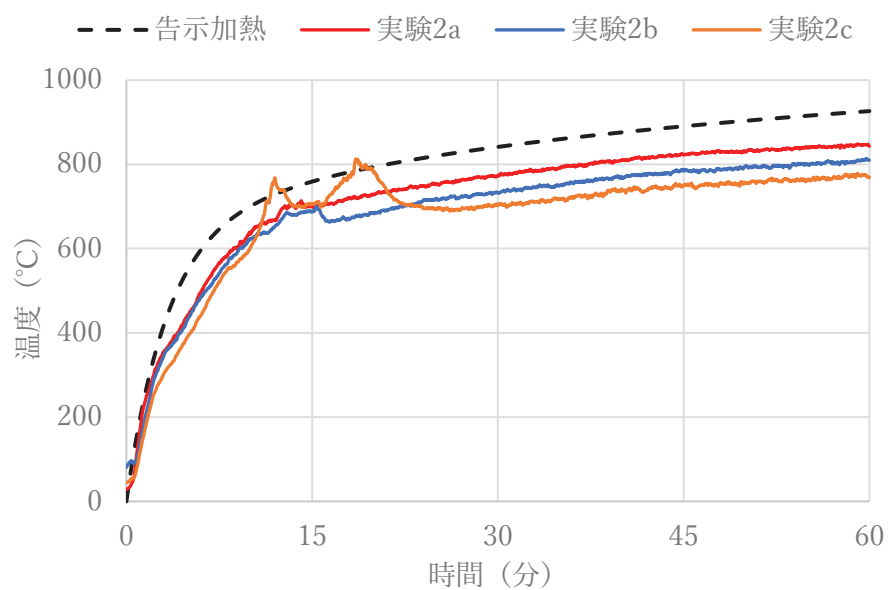


図 7.41 ケイカル板表面温度の比較

(実験 2：試料 a、b、c、電線管試験、告示曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 10mm)

図 7.42 に示す実験 6（電線管試験）では、導体サイズが中サイズの試料 b と最も大きい試料 c で、被覆樹脂の燃焼に伴うケイカル板温度の上昇がみられた。加熱 30 分以降は、導体サイズの違いによるケイカル板表面温度の差は小さかった。

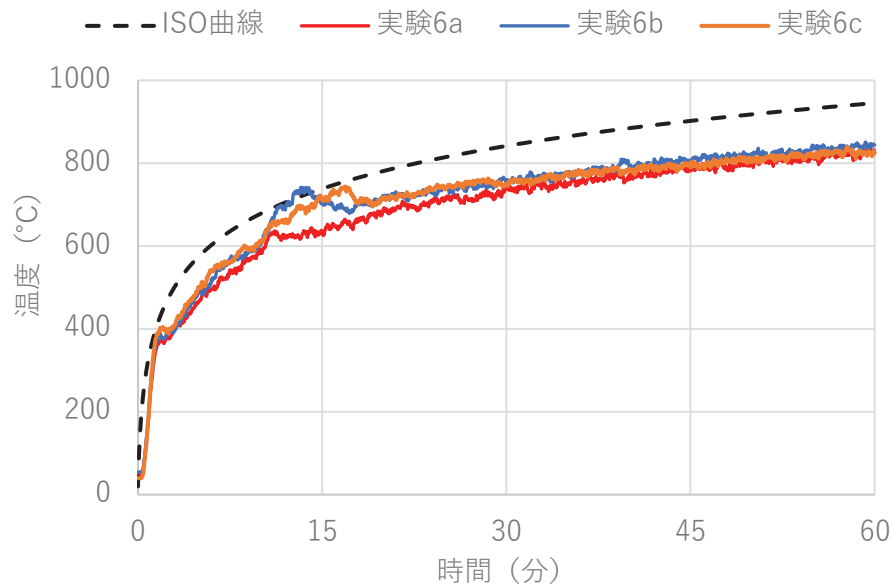


図 7.42 ケイカル板表面温度の比較

(実験 6：試料 a、b、c、電線管試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試験体距離 100mm)

3 つの導体サイズを用いた 4 種類の加熱実験について、加熱 30 分時と 60 分時のケイカル板表面温度の比較を図 7.43 に示す。制御用熱電対と試験体距離が 10mm である実験 1 (露出試験) と実験 2 (電線管試験) では、ケイカル板表面温度は導体サイズが大きくなるほど低下した。一方、制御用熱電対と試験体距離が 100mm である実験 5 (露出試験) と実験 6 (電線管試験) では、導体サイズによる温度差は小さく明確な傾向はみられない。これは図 7.38 に示すように、実験 5 と 6 では試料外径に比べて制御用熱電対とケイカル板表面までの距離が実験 1 と 2 に比べて十分に大きく、試料外径による影響が相対的に小さいためと考えられる。

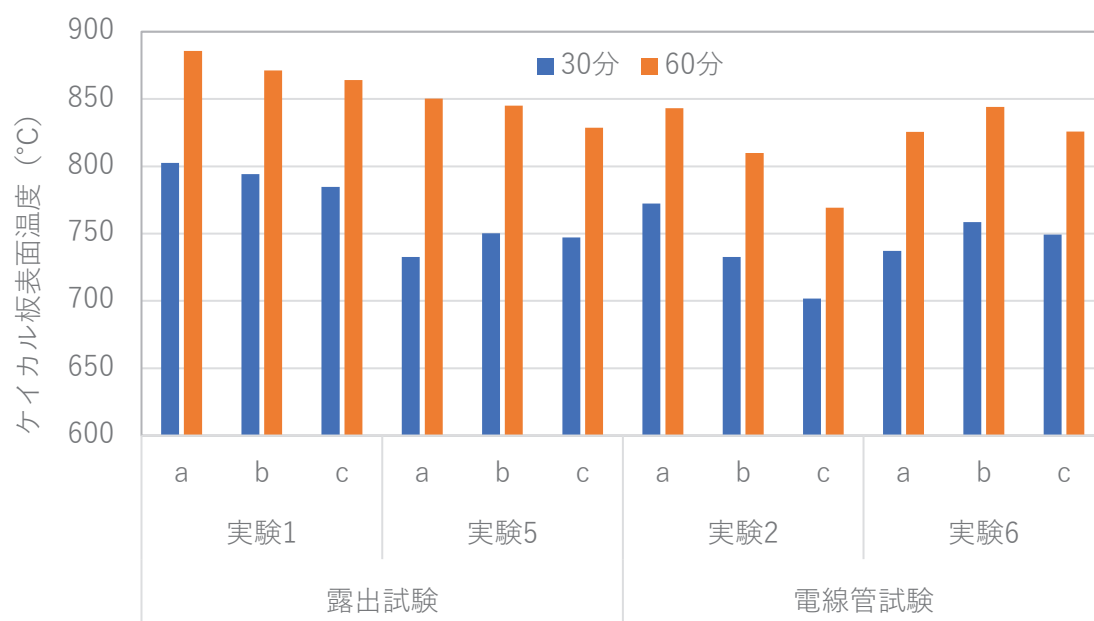


図 7.43 ケイカル板表面温度の比較

7. 5. 2. 3 電線管表面温度（電線管試験）

各試料の電線管試験における電線管表面温度について、実験 2 の比較を図 7.44 へ、実験 6 の比較を図 7.45 へ示す。図 7.44 に示す実験 2（電線管試験）では、導体サイズの最も大きい試料 c のみ、12 分と 18 分にピークがみられた。これは、導体径が大きく被覆樹脂量が多いために、被覆樹脂燃焼時の火炎が電線管中央付近まで拡大し、電線管表面が加熱されたためと考えられる。加熱 25 分以降は、電線管表面温度は実験 2c、2b、2a の順に高くなり、差がみられた。これは、電線管表面温度測定用の熱電対を電線管の上部に取り付けたので、電線管が細いほど、制御用熱電対と電線管表面測定用熱電対までの距離が短く、バーナ火炎からの放射熱が大きいと考えられる。

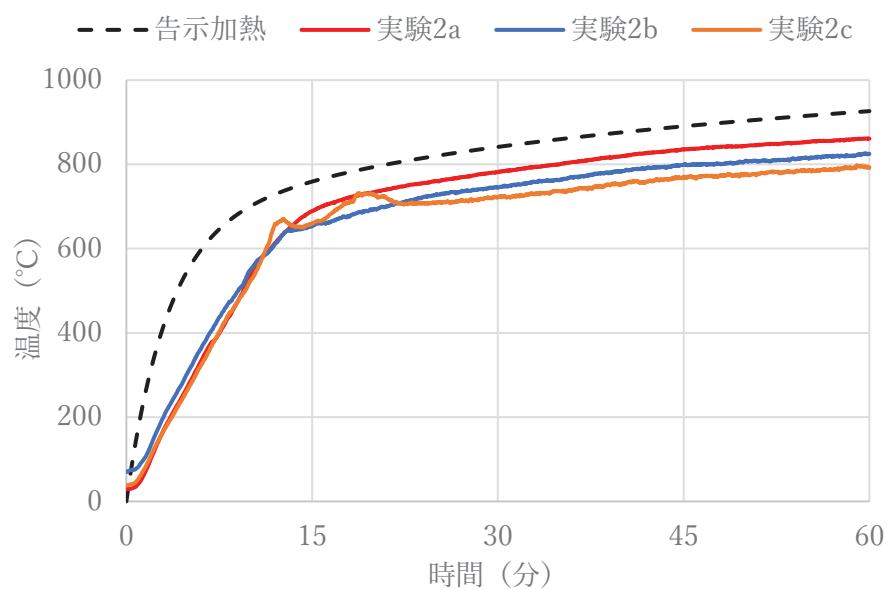


図 7.44 電線管表面温度の時間変化の比較（実験 2）

図 7.45 に示す実験 6（電線管試験）では、導体サイズが中サイズの試料 b と最も大きい試料 c で、被覆樹脂の燃焼に伴う電線管表面の温度上昇がみられた。加熱 20 分以降は、導体サイズの違いによる電線管表面温度の差は小さかった。

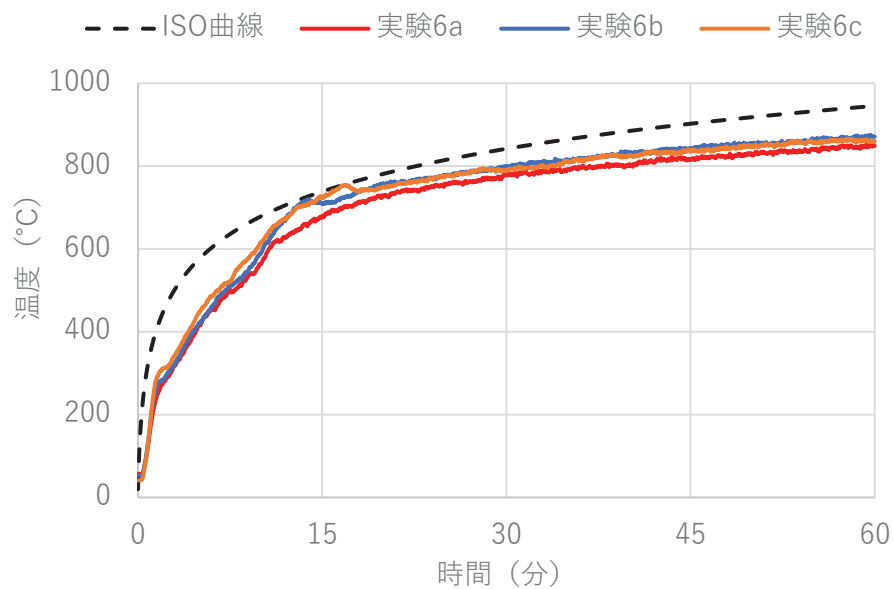


図 7.45 電線管表面温度の時間変化の比較（実験 6）

3 つの導体サイズを用いた 2 種類の電線管試験について、加熱 30 分時と 60 分時の電線管表面温度の比較を図 7.46 に示す。傾向は図 7.43 に示したケイカル板表面温度と同様であ

り、制御用熱電対と試験体距離が 10mm である実験 2（電線管試験）では、電線管表面温度は導体サイズが大きくなるほど低下した。一方、制御用熱電対と試験体距離が 100mm である実験 6（電線管試験）では、電線管表面の温度差は小さく明確な傾向はみられない。

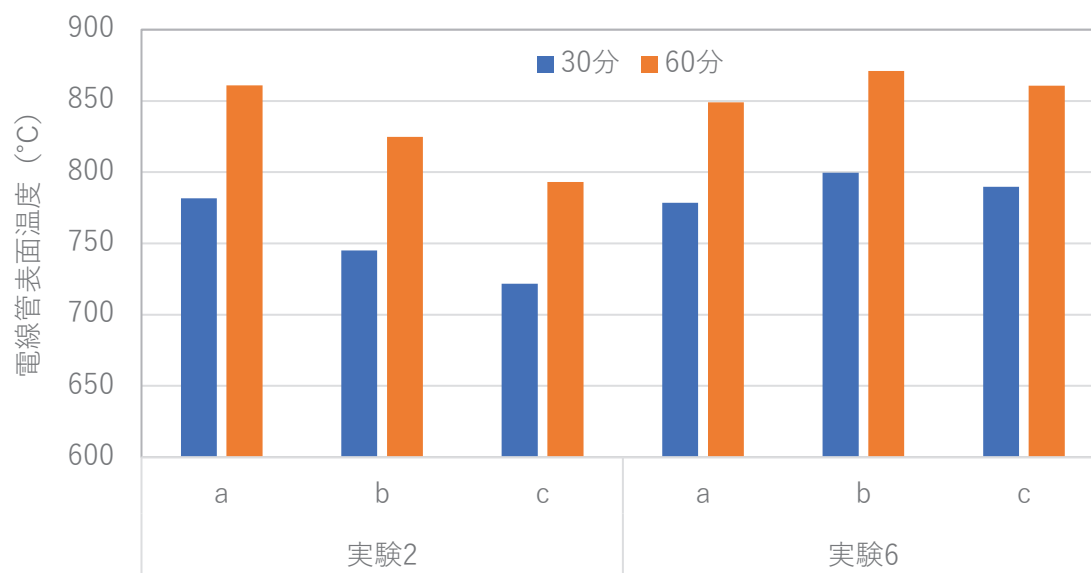


図 7.46 電線管表面温度の比較

7. 5. 2. 4 絶縁抵抗

各試料の絶縁抵抗について、実験 1 の比較を図 7.47 へ、実験 5 の比較を図 7.48 へ、実験 2 の比較を図 7.49 へ、実験 8 の比較を図 7.50 へそれぞれ示す。図 7.47 に示す実験 1（露出試験）では、電線被覆樹脂の着火後に絶縁抵抗は急激に低くなり、その中でも試料 b の低下度合いが最も大きかった。30 分までは試料 a と c は類似の傾向であるが、30 分以降は試料 a と b がほぼ同じ値となり、試料 c はやや高かった。

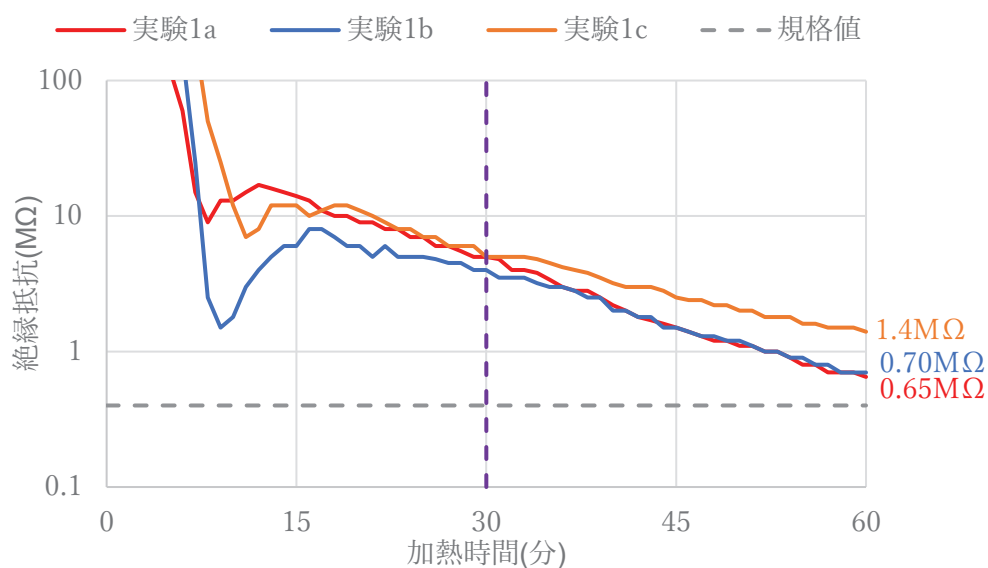


図 7.47 絶縁抵抗の比較

(実験 1：試料 a、b、c、露出試験、告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 10mm)

図 7.48 に示す実験 5（露出試験）では、実験 1 と同様、電線被覆樹脂の着火後に絶縁抵抗は急激に低くなり、その中でも試料 b の低下度合いが最も大きかった。電線サイズによる明確な傾向はみられない。

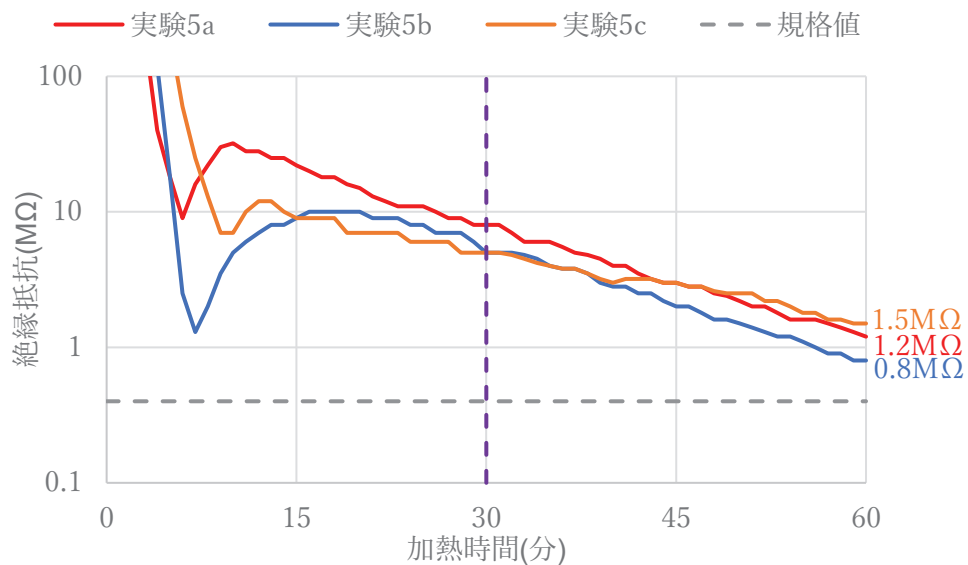


図 7.48 絶縁抵抗の比較

(実験 5：試料 a、b、c、露出試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 100mm)

図 7.49 に示す実験 2（電線管試験）では、導体サイズ間で絶縁抵抗に差がみられ、試料 c は試料 a と b に比べて絶縁抵抗が一桁高かった。

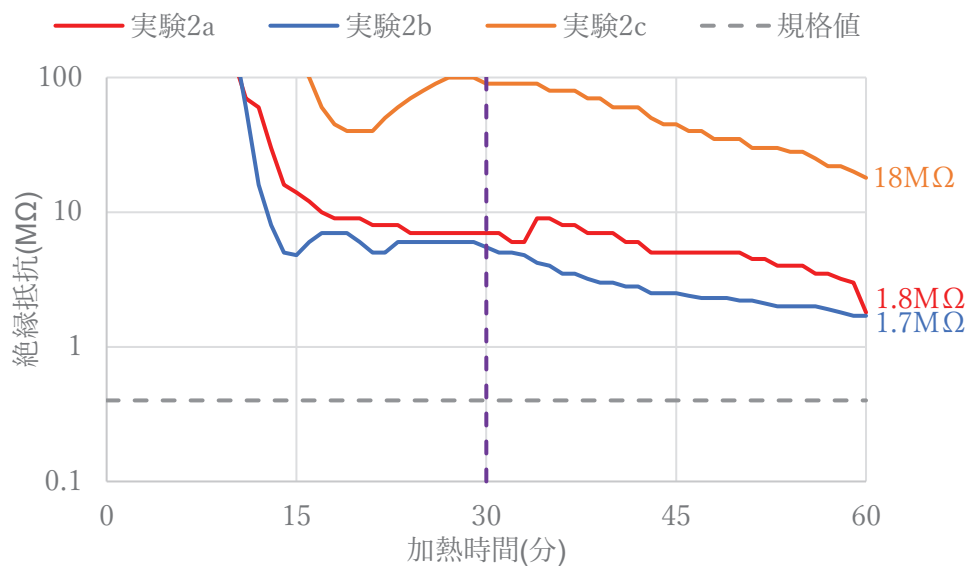


図 7.49 絶縁抵抗の比較

（実験 2：試料 a、b、c、電線管試験、告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 10mm）

図 7.50 に示す実験 6（電線管試験）では、試料 a と c は類似の傾向であるが、試料 b のみ絶縁抵抗が試料 a と c に比べてやや低かった。

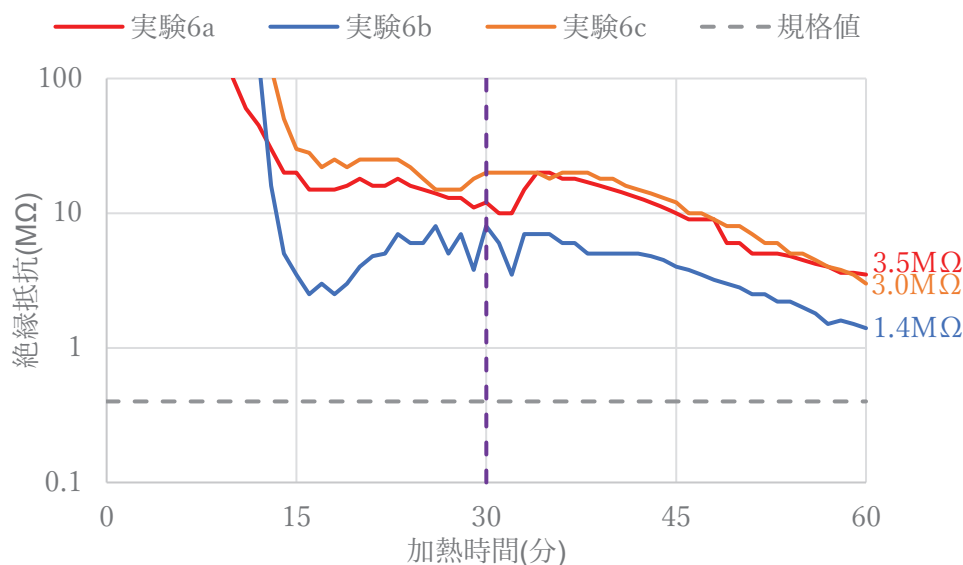


図 7.50 絶縁抵抗の比較

(実験 6：試料 a、b、c、電線管試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 100mm)

温度と絶縁抵抗の関係を調べるため、横軸に温度を、縦軸に絶縁抵抗をプロットする。露出試験の 1 分毎のケイカル板表面温度と絶縁抵抗について、実験 1 の比較を図 7.51 へ、実験 5 の比較を図 7.52 へ示す。同様に、電線管試験の 1 分毎の電線管内温度と絶縁抵抗について、実験 2 の比較を図 7.53 へ、実験 6 の比較を図 7.54 へ示す。

図 7.51 に示す実験 1（露出試験）では、図中に示す被覆樹脂の燃焼中を除いて、ケイカル板表面温度が 730℃以上では、試料によらず概ね同一線上のプロットとなった。

図 7.52 に示す実験 5（露出試験）でも、図 7.51 の実験 1 と類似の傾向であり、図 7.52 中に示す被覆樹脂の燃焼中を除いて、ケイカル板表面温度が 700℃以上では、試料によらず概ね同一線上のプロットとなった。

図 7.53 に示す実験 2（電線管試験）では、全体的な傾向としては電線管内温度が高いほど絶縁抵抗は低下したが、露出試験の図 7.51 や図 7.52 のような同一線上のプロットにはならなかった。

図 7.54 に示す実験 6（電線管試験）では、電線管内温度が 800℃以上では、試料によらず概ね同一線上のプロットとなった。

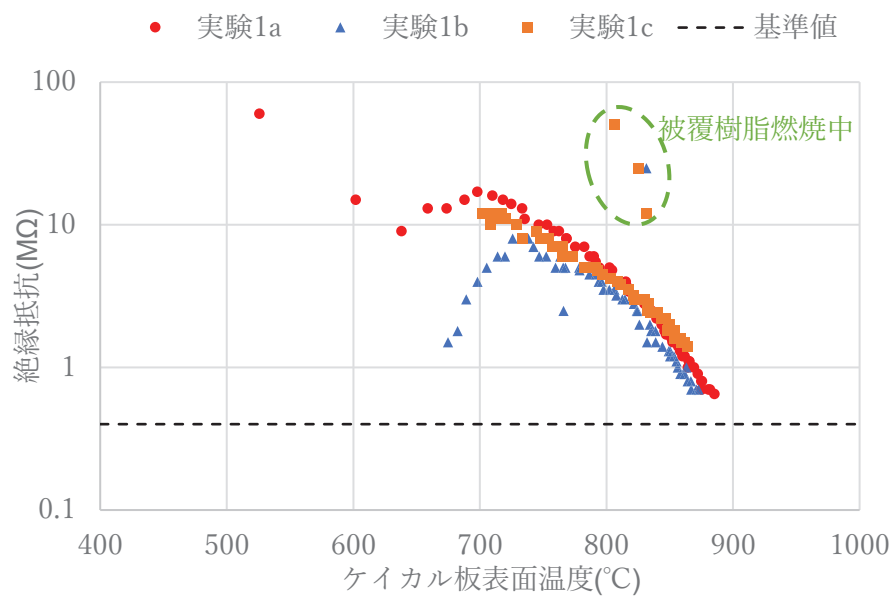


図 7.51 ケイカル板表面温度と絶縁抵抗の関係（実験 1：試料 a、b、c、露出試験、告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 10mm）

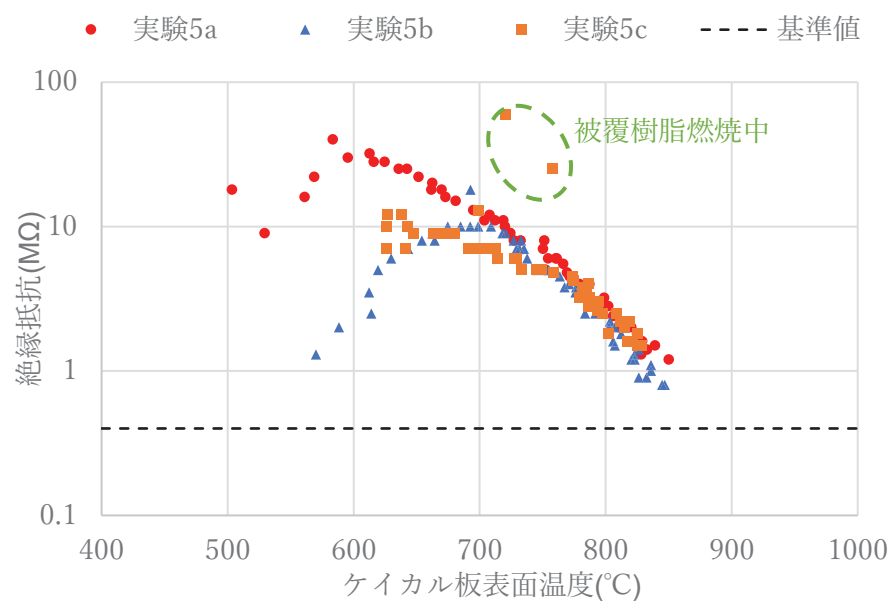


図 7.52 ケイカル板表面温度と絶縁抵抗の関係（実験 5：試料 a、b、c、露出試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 100mm）

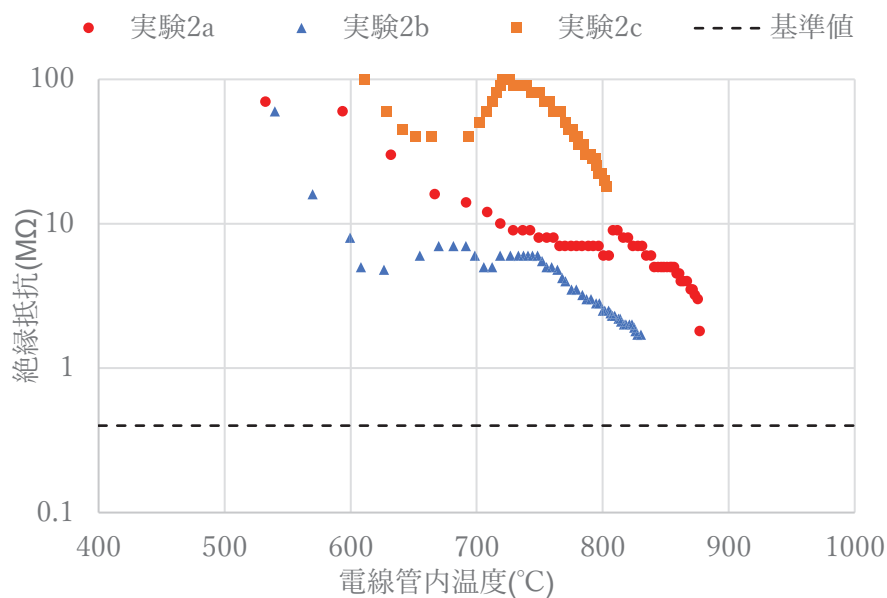


図 7.53 電線管内温度と絶縁抵抗の関係（実験 2：試料 a、b、c、電線管試験、告示曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 10mm）

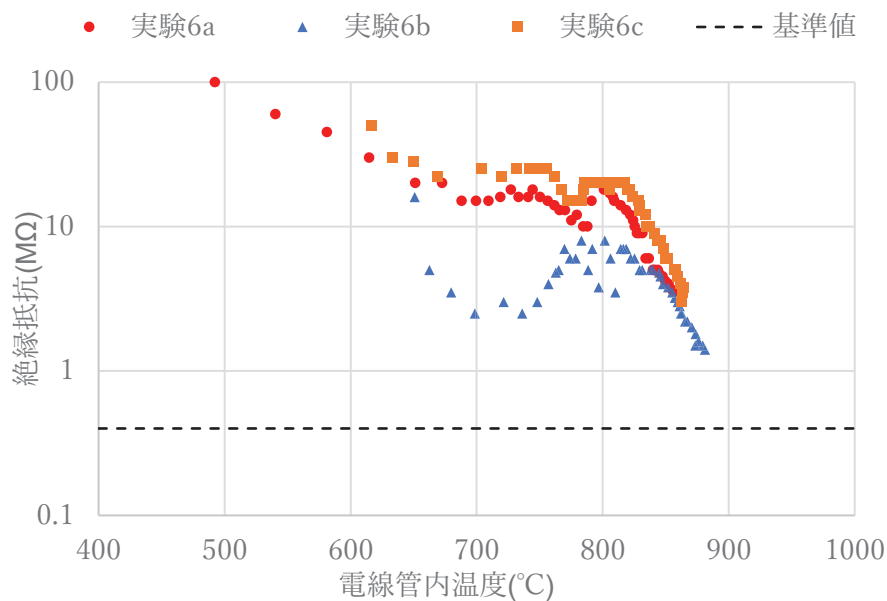


図 7.54 電線管内温度と絶縁抵抗の関係（実験 6：試料 a、b、c、電線管試験、ISO 曲線、露出型熱電対制御、熱電対と試験体距離 100mm）

3 つの導体サイズを用いた 4 種類の加熱実験について、加熱 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗の比較を図 7.55 に示す。試料 a～c で比較すると絶縁抵抗は導体サイズの違いによる傾向はみられないが、耐火層（マイカテープ）の構造が同一である試料 b と c を比較すると、導体サイズの大きい試料 c の絶縁抵抗の方が大きい傾向がみられる。

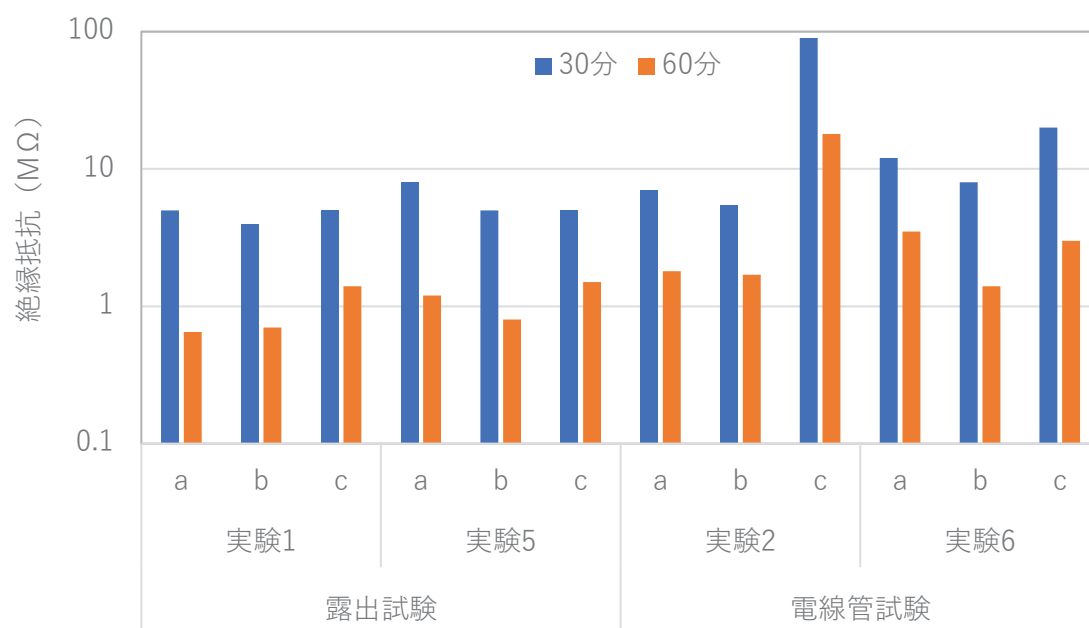


図 7.55 絶縁抵抗の比較

7. 5. 2. 5 着火時間

各試料の露出試験における試料の着火時間を図 7.56 に示す。実験 5 (ISO 加熱曲線、制御用熱電対と試験体距離 100mm) の方が、実験 1 (告示加熱曲線、制御用熱電対と試験体距離 10mm) よりも着火時間は早い。これは実験 5 の方が制御用熱電対と試験体までの距離が 100mm と遠いものの、ISO 加熱曲線の方が加熱開始直後の温度上昇が大きいためと考えられる。導体サイズの違いによる着火時間の傾向は特にみられない。

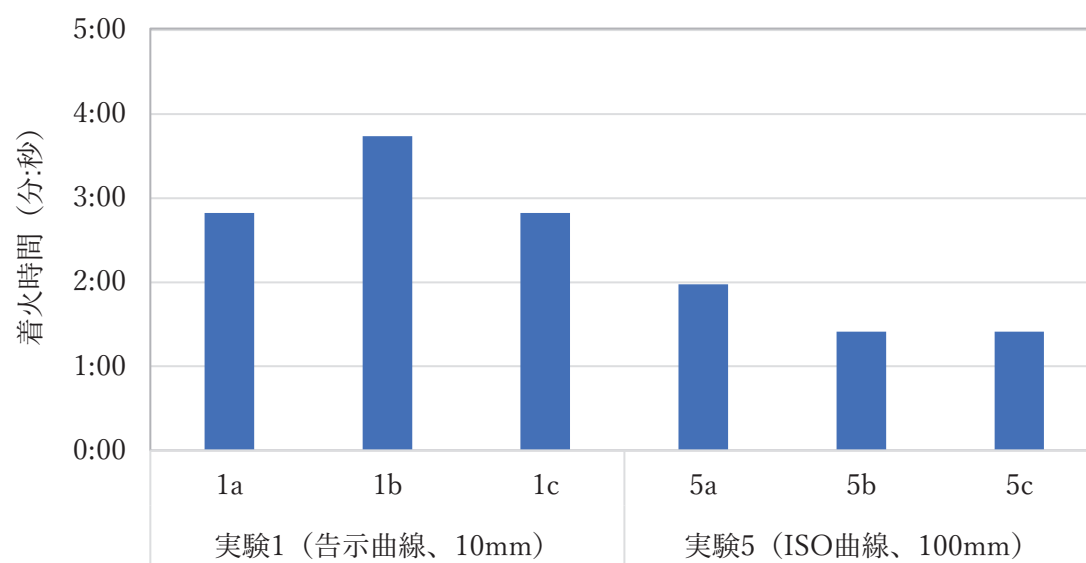


図 7.56 被覆樹脂着火時間の導体サイズの比較

7. 5. 3 その他の測定項目

7. 5. 3. 1 延焼距離

延焼距離は、告示に規定された要求項目の1つであり、露出試験の場合に測定を行う。延焼距離は、加熱終了後に電線被覆樹脂の残炎が自然に消えてから、加熱によって燃焼（炭化）したシース部分の長さとして定義され、図 7.57 に示すように加熱炉内壁位置を起点とし、端部側へそれぞれ測定する。告示の規定では、30 分加熱後の延焼距離が 150mm 未満であることを要求している。

測定結果の比較を図 7.58 に示す。告示の基準値は 30 分加熱後の規定であるものの、本実験では 60 分加熱していることから、150mm の破線は参考として記載した。

試料 a の範疇で比べると、加熱曲線のみが異なる実験 1a（告示曲線）と実験 3a（ISO 曲線）を比較すると、延焼距離は同様であり、加熱曲線による差はみられない。制御用熱電対と電線との距離のみが異なる実験 3a（10mm）と 5a（100mm）を比較すると、大きな差がみられ、実験 5a（100mm）の方が延焼距離は大きい。制御用熱電対のみが異なる実験 5a（露出型熱電対）と 7a（プレート熱電対）を比較すると、延焼距離は同様であり、制御用熱電対による差はみられない。

試料 a では、制御用熱電対と電線との距離が 100mm である実験 5a と実験 7a が告示の基準値（30 分の加熱時）である 150mm を超過した。制御用熱電対と電線との距離について、10mm よりも 100mm の方が燃え広がり距離が長くなった理由について、制御用熱電対と電線の距離が大きくなることは、同時に電線とバーナ面との距離が大きくなることを意味しており、電線端部からバーナ面をみた時の形態係数が大きくなるためと考えられる。

試料 a～c を比較すると、電線外径が大きくなるに従って延焼距離が増加し、実験 5b、1c、5c が告示の基準値（30 分加熱時の基準）である 150mm を超過した。外径が大きなもののほど、電線の自己燃焼による火炎が大きくなり、延焼を助長するためと考えられる。

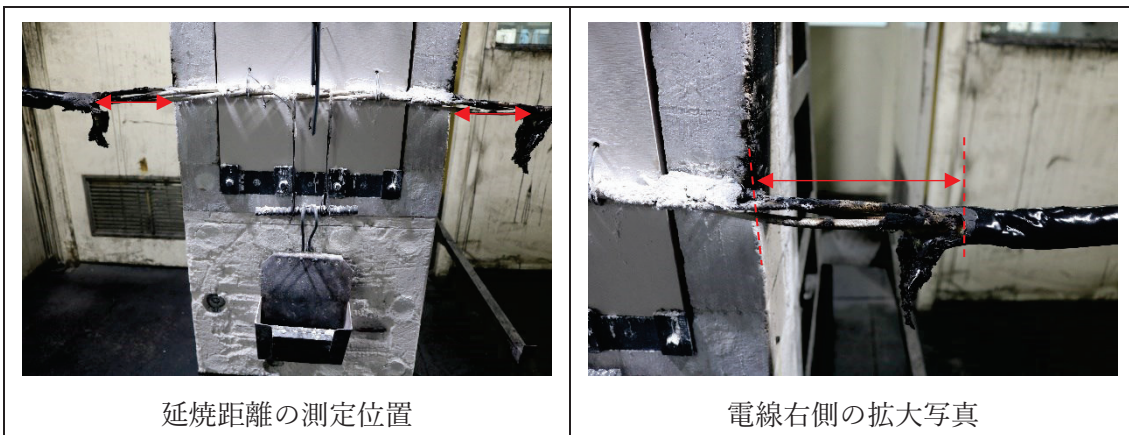


図 7.57 延焼距離の測定例（実験 1c）

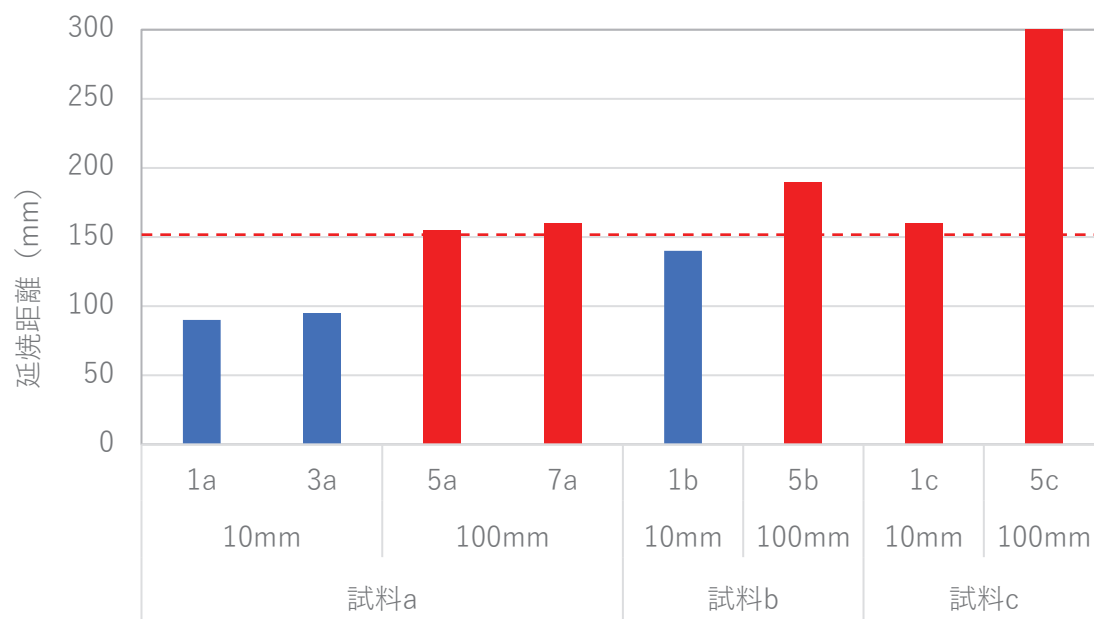


図 7.58 延焼距離の比較（赤破線は告示の基準値）

7. 5. 3. 2 燃料使用量

各試験における燃焼使用量を図 7.59 に示す。試料 a～c とともに、制御用熱電対と電線との距離が 10mm よりも 100mm の方が燃料使用量は多い。これは、100mm の方が炉内の体積が大きいために、より多くの燃料が必要なためだと考えられる。また、試料 a～c を比較すると、電線外径が大きいほど、燃料使用量が大きくなる傾向がみられた。これも、電線外径が大きいほど制御用熱電対とケイカル板までの距離が離れ、結果として炉内の体積が大きくなるためと考えられる。

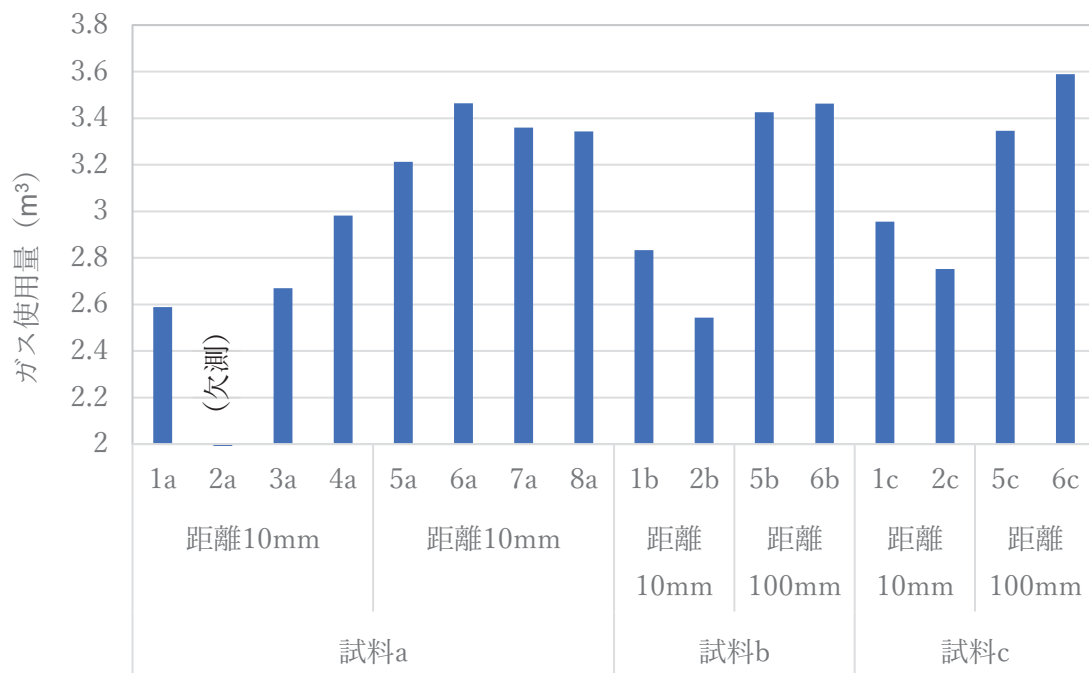


図 7.59 各試験における 60 分間の燃料使用量

7. 5. 4 IEC 法による絶縁性測定

図 7.28 で示したように、IEC 法による加熱中の絶縁性測定実験では、加熱中の電流値の変動は非常に小さかった。加熱による試験体（電線）の絶縁性能の低下と共に、電流は増加し、回路中に取り付けた電流計により、加熱中の絶縁性能の推移をモニタすることができるが、電流値の変化幅は非常に小さく、加熱中の絶縁性能の変化の程度を把握することはできなかった。

60 分間の加熱中に地絡、短絡、断線は起こらず、60 分間では機能保持時間を比較できなかったが、告示の加熱炉と IEC 60331 に規定される測定方法の組み合わせで問題なく測定可能であった。また、今回使用した市販の 30 分耐火認定品は 60 分間に耐えうる絶縁性能があった。

この方法では加熱中の地絡、短絡、断線を検出できるため、いずれかが検出されるまで加熱を続け、その時間を機能保持時間として示すことで製品の差別化ができると考えられる。

7. 6 結論

本章では、消防庁告示の耐火試験法の将来的な国際整合化と性能化を見据え、告示の小型加熱炉に ISO 834-1 の加熱条件を取り入れた試験を行い、結果へ与える影響を調査した。同時に、加熱中の耐火電線の絶縁性評価を行い、機能保持時間を測定する方法を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 告示の加熱条件について、加熱曲線、制御用熱電対と試験体との距離、制御用熱電対の種類を ISO の加熱条件に整合化する場合、加熱曲線を ISO 曲線へ変更しても試験体保持面（ケイカル板）の表面温度や加熱中の絶縁抵抗へ与える影響は小さいが、制御用熱電対と試験体との距離を 100mm へ変更又は制御用熱電対をプレート熱電対へ変更すると試験体保持面の表面温度が低下するとともに加熱中の絶縁抵抗は増加し、耐火電線へ与える損傷度は小さくなる。
- 2) 告示の加熱条件では、露出試験も電線管試験も導体サイズが大きいほど加熱 60 分時点の試験体保持面の板表面温度は低くなった。絶縁抵抗は、耐火層の構成が同じ試料 b（導体サイズ 8mm²）と試料 c（導体サイズ 38mm²）を比較すると、導体サイズの大きい試料 c の方が絶縁抵抗は大きくなった。
- 3) 消防庁告示による絶縁抵抗測定を 1 分毎に行うことで、加熱中の絶縁抵抗の時間的推移を測定することが可能であった。また、線心毎に接地を切り替えて測定することで、各線心の絶縁性を個別に評価可能であった。
- 4) 告示の方法で加熱しながら、IEC 60331 の測定方法により、電気回路としての機能を加熱中を通じて測定することができ、告示の耐火電線用の加熱試験炉と組み合わせて測定可能なことを世界で初めて示した。

引用・参考文献

- 1) 平成 9 年消防庁告示第 10 号「耐火電線の基準」
- 2) ISO 834-1:1999、Fire-resistance tests - Elements of building construction
- 3) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉による電力ケーブルの機能保持時間測定方法に関する研究、2022 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.163-164、2022.5
- 4) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉による電力ケーブルの機能保持時間測定方法に関する研究 第 2 報、2022 年度日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、pp.293-294、2023.9
- 5) IEC 60331-1:2018、Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity - Part 1: Test method for fire with shock at a temperature of at least 830°C for cables of rated voltage up to and including 0,6/1,0 kV and with an overall diameter exceeding 20 mm
- 6) 日本電線工業会、JCS 7502:2021、ケーブル耐火試験方法（小型加熱炉）

第 8 章 数値解析による試験体温度と絶縁抵抗の予測

8. 1 目的

第 7 章では、告示の小型加熱炉に ISO 834-1 の加熱条件を取り入れて試験を行い、加熱中の耐火電線の絶縁抵抗を 1 分毎に実験的に測定し、絶縁抵抗の時間的変化を調べた。しかし、加熱中の絶縁抵抗を計算により予測できれば耐火電線の開発に有益であるが、これまでそのような研究は行われていない。

そこで、本章では、試験体である耐火電線内の熱伝達をモデル化してマイカテープの温度を計算し、その温度を基に耐火電線の絶縁抵抗を予測する手法を提案することで、マイカテープの厚さ等の影響を、計算によって定量的に把握できるようにすることを目的とする。

8. 2 電線内の熱伝達のモデル化

8. 2. 1 熱伝達モデルの概要

耐火電線の耐火試験では、露出試験と電線管試験の 2 種類が規定されているため、それぞれにおいて熱伝達のモデル化を行う。露出試験における円筒座標系での電線断面の模式を図 8.1 に示す。試験体である耐火電線は、中心から順に導体である銅、電気的な絶縁層であるマイカテープ、ポリエチレン樹脂の絶縁体、耐燃性ポリエチレン樹脂のシースにより構成される。露出試験では、加熱炉からの放射と対流によりシースが直接加熱されて昇温するとともに、熱伝導により内部へも熱が伝わる。そして、シースと絶縁体は着火温度に達すると一定時間燃焼して焼失する。その後は、図 8.2 に示すように加熱炉からの放射と対流により、マイカが直接加熱されるとモデルとする。なお、第 7 章では 3 心の耐火電線を試験体として用いたが、本モデルではモデルを単純化するために、3 心分の導体断面積を合算して 1 本の導体で近似した。

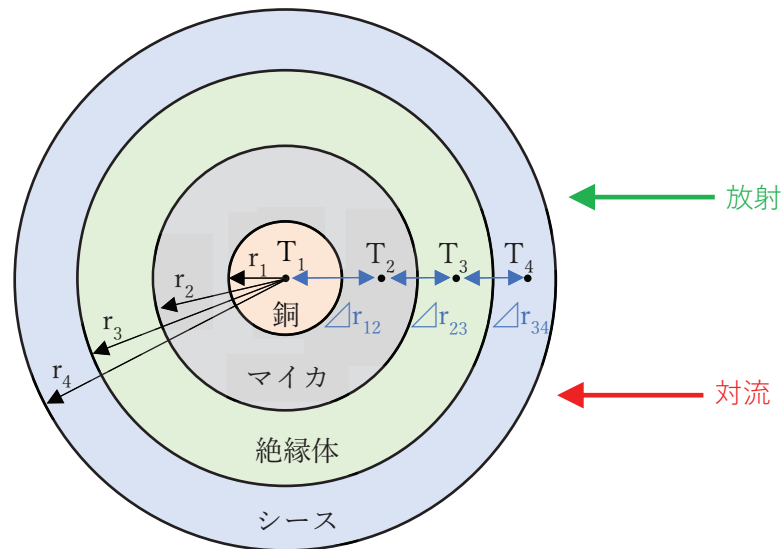


図 8.1 露出試験の円筒座標系の電線断面の模式図（樹脂燃焼前）

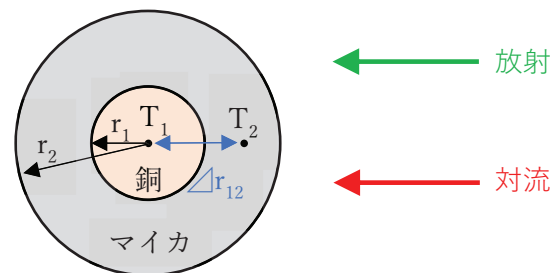


図 8.2 露出試験の円筒座標系の電線断面の模式図（樹脂焼失後）

電線管試験における円筒座標系での試験体断面の模式を図 8.3 に示す。電線管試験の試験体は、耐火電線の周囲が空気層、最外層が鋼鉄製の電線管からなる。実際の試験では、第 7 章の図 7.11 に示すように、耐火電線の底面は電線管内面に接しているが、本モデルでは単純化のために耐火電線は電線管の中心に位置するとした。電線管試験では、加熱炉からの放射と対流により電線管が加熱されて昇温するとともに、対流により電線管から空気層へ、放射により電線管からシースへ伝熱する。シースは電線管からの放射と空気層からの対流により加熱されて昇温するとともに、熱伝導によりシースから絶縁体、マイカ、銅へ熱を伝導する。シースが融解開始温度に達すると融解し始め、完全融解温度に達すると速やかに気化して消失し、シース温度は空気層温度と同一温度になると仮定する。また、シース融解後は、絶縁体は電線管からの放射と空気層からの対流により加熱され、融解開始温度に達すると融解し始め、完全融解温度に達すると速やかに気化して消失し、絶縁体温度は空気層温度と同一温度になると仮定する。その後は、図 8.4 に示すようにマイカは電線管からの放射と空気層からの対流により加熱されて昇温する。

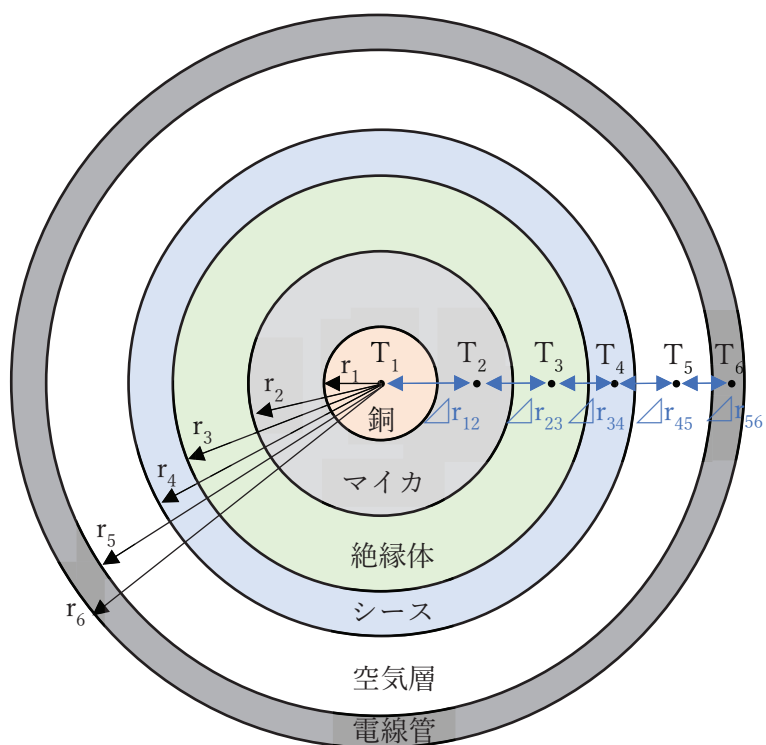


図 8.3 電線管試験の円筒座標系の試験体断面の模式図（樹脂融解前）

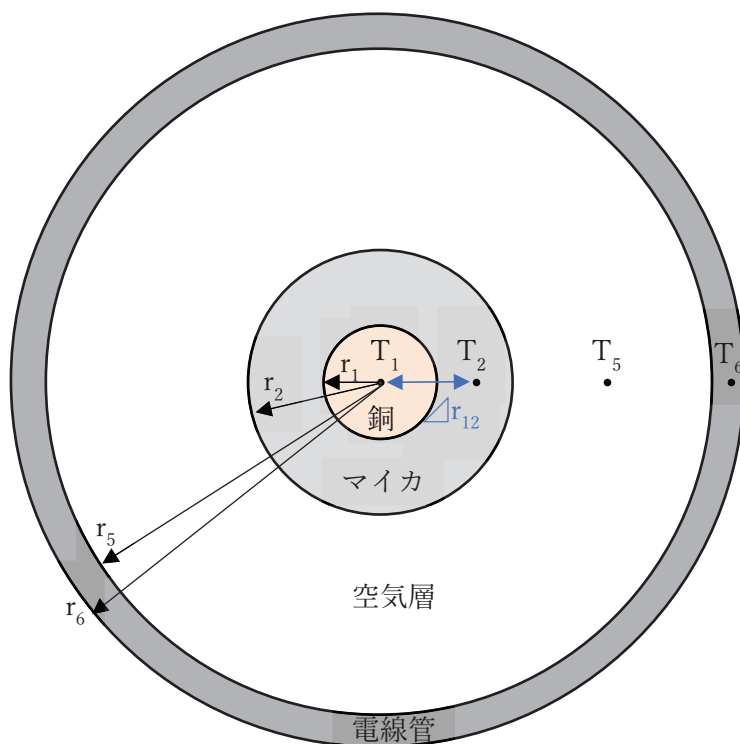


図 8.4 電線管試験の円筒座標系の試験体断面の模式図（樹脂完全融解後）

上述のように露出試験と電線管試験の熱伝達をモデル化してマイカテープの温度を計算する。そして、マイカの電氣的な絶縁性能には温度依存性があるので、マイカの電気抵抗と温度の関係式を用いて、耐火電線の加熱中の絶縁抵抗を予測することを試みる。

8. 2. 2 計算方法概要

絶縁抵抗を算出するまでの数値解析プログラムのフローチャートを図 8.5 に示す。それぞれの項目の要点は以下のとおりで、詳細は 8.2.3 節以降に示す。

1) 試験体のパラメータの入力

試験体の構成材料の密度 ρ 、比熱 c 、半径 r_i 、熱伝導率 k_i 、空気層内の対流熱伝達率 h_{ij} （電線管試験のみ）、放射率 ε_i を入力する。

2) 調和平均の熱伝導率 k_{ij} と格子間隔 Δr_{ij} の計算

試験体の構成材料の半径 r_i と熱伝導率 k_i を用いて、調和平均した熱伝導率 k_{ij} と格子間隔 Δr_{ij} を計算する。

3) 絶縁体とシースのパラメータの入力

絶縁体とシースの発熱量 q 、重量 w 、発熱速度 Q 、表面積 S を入力する。

4) 絶縁体とシースの燃焼継続時間 t_c の計算

絶縁体とシースの発熱量 q 、重量 w 、発熱速度 Q 、表面積 S を用いて、絶縁体とシースの燃焼継続時間 t_c を計算する（8.2.5 節参照）。

5) 格子点温度 T_i へ初期温度を入力

各格子点の温度 T_i に初期値として外気温（300K）を入力する。

6) 経過時間

時間を計算時間刻み（ Δt ）だけ経過させる。本章の計算では、 Δt を 0.2 秒とした。

7) 炉内ガス温度 T_{gas} 、ケイカル板温度 T_c^0 、対流熱伝達率 h_c 、放射熱流 $q_{inc,c}$ の入力

第 5 章で求めた加熱条件毎の炉内ガス温度 T_{gas} 、試験体保持面（ケイカル板）の温度 T_c^0 、試験体保持面と炉内ガス温度間の対流熱伝達率 h_c 、試験体保持面に入射する放射熱流 $q_{inc,c}$ を入力する。

8) 格子点温度 T_i の計算

各要素の熱収支に基づいて、各格子点の温度 T_i を計算する（8.2.3、8.2.4 節参照）。

9) 絶縁抵抗 R の計算

マイカ温度 T_2 から絶縁抵抗 R を計算する（8.2.6 節参照）。

10) 計算結果の出力（ T_i 、 R ）

現在の時間に対応する各格子点の温度 T_i 及び絶縁抵抗 R を出力する。

11) 時間の判定

経過時間が終了時間未満であれば、6) に戻って次の時間の各格子点の温度 T_i 及び絶縁抵抗 R を計算する。経過時間が終了時間に達していれば、計算を終了する。

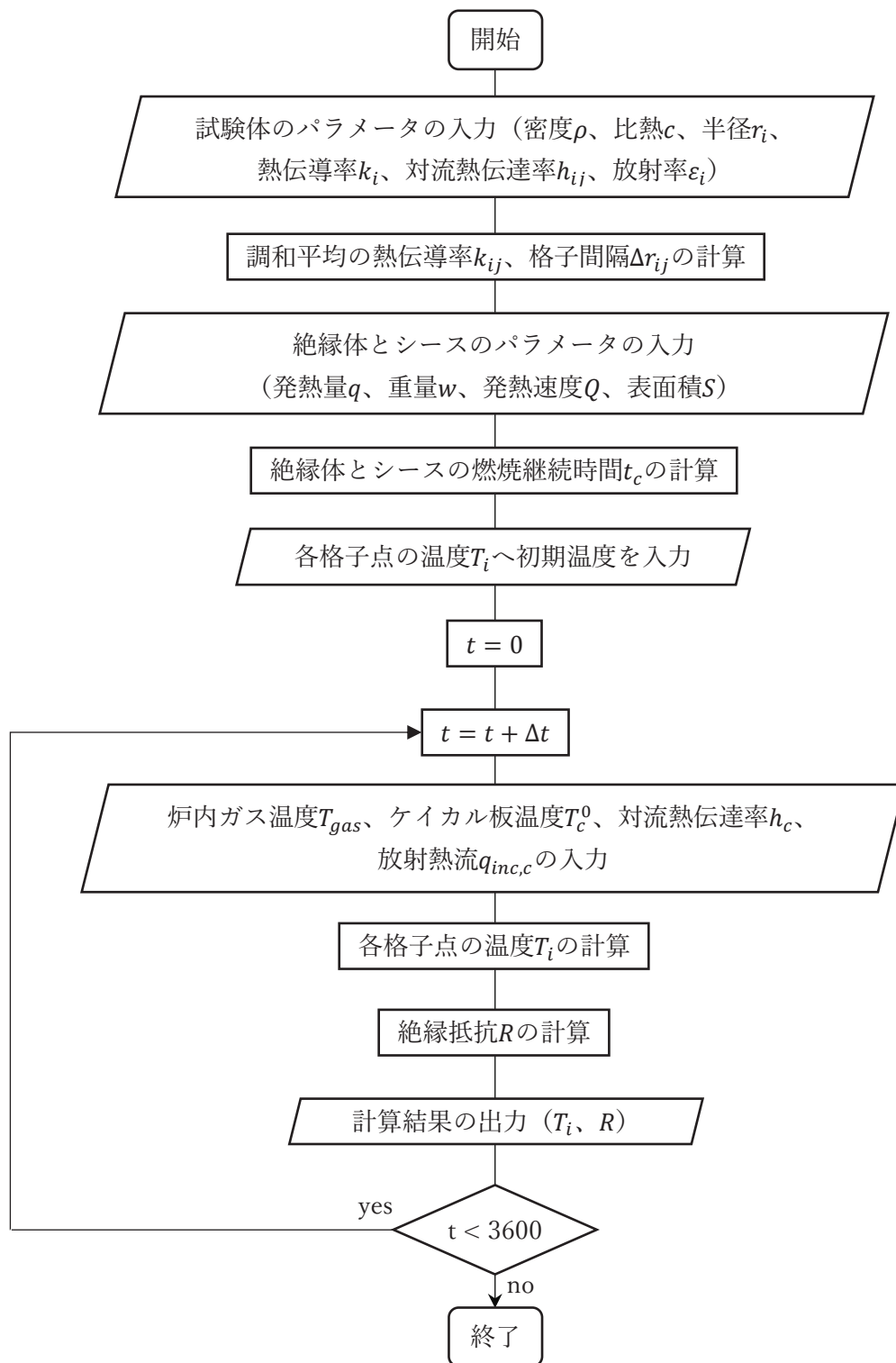


図 8.5 数値解析のフローチャート

8. 2. 3 露出試験における熱伝達の計算

図 8.1 のように構成材料毎に 4 分割した露出試験における円筒座標系の各格子の熱伝導

は、円筒座標系の一次元熱伝導方程式により、以下のように表される。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8.1)$$

ここで、 ρ は密度[kg/m³]
 c は比熱[J/kg・K]
 k は熱伝導率[W/m・K]
 r は構成材料の半径[m]
 T は構成材料の温度[K]

である。

式(8.1)を陽解法により差分方程式にすると、以下の式となる。

$$\frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{2} \rho c \left(\frac{T_i - T_i^0}{\Delta t} \right) = r_i k_{i,i+1} \left(\frac{T_{i+1}^0 - T_i^0}{\Delta r_{i,i+1}} \right) - r_{i-1} k_{i-1,i} \left(\frac{T_i^0 - T_{i-1}^0}{\Delta r_{i-1,i}} \right) \quad (8.2)$$

ここで、 Δr は格子間距離[m]である。

T_i を求める式に整理すると、

$$T_i = T_i^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \left\{ \frac{r_i k_{i,i+1}}{\Delta r_{i,i+1}} (T_{i+1}^0 - T_i^0) - \frac{r_{i-1} k_{i-1,i}}{\Delta r_{i-1,i}} (T_i^0 - T_{i-1}^0) \right\} \quad (8.3)$$

と表せる。シースと絶縁体が着火するまでは、式(8.3)を用いて絶縁体温度 T_2 とシース温度 T_3 を計算する。

1) 節点1(銅)の熱伝達

銅 ($i=1$) の熱の出入りは、マイカ ($i=2$) からの熱伝導による流入のみなので、銅温度 T_1 は式 (8.3) より、次式で表される。

$$T_1 = T_1^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c r_1^2} \left\{ \frac{r_1 k_{12}}{\Delta r_{12}} (T_2^0 - T_1^0) \right\} \quad (8.4)$$

2) 節点2(マイカ)の熱伝達

①絶縁体が燃え尽きるまで

加熱開始から絶縁体が燃え尽きるまでの間は、マイカ ($i=2$) の熱の出入りは、絶縁体

からの熱伝導による流入と、銅（ $i=1$ ）への熱伝導による流出であり、式（8.3）と同様に次式で表される。

$$T_2 = T_2^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ \frac{r_2 k_{23}}{\Delta r_{23}} (T_3^0 - T_2^0) - \frac{r_1 k_{12}}{\Delta r_{12}} (T_2^0 - T_1^0) \right\} \quad (8.5)$$

②絶縁体燃え尽き後

絶縁体が燃え尽きた後は、加熱炉内からの放射と対流により、マイカ（ $i=2$ ）へ熱エネルギーが与えられるため、マイカが吸収する放射熱流を $q_{rad,2}$ [W/m²]、対流熱流を $q_{cnv,2}$ [W/m²] とすると次式となる。

$$T_2 = T_2^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_2^2 - r_1^2)} \left\{ r_2 (q_{rad,2} + q_{cnv,2}) - \frac{r_1 k_{12}}{\Delta r_{12}} (T_2^0 - T_1^0) \right\} \quad (8.6)$$

マイカへの放射熱流は、図 8.6 の模式図に示すように、バーナ側からの放射熱流とケイカル板側からの放射熱流（射出と反射）があるが、一次元の熱伝導であることを考慮し、バーナ側とケイカル板側の放射熱流の平均値をマイカへの放射熱流とすると、以下の式で計算できる。

$$q_{rad,2} = \frac{1}{2} \left[\varepsilon_2 q_{inc,c} + (1 - \varepsilon_{gas}) F_{c-m} \left\{ (1 - \varepsilon_c) q_{inc,c} + \varepsilon_c \sigma T_c^{04} \right\} \right] - \varepsilon_2 \sigma T_2^{04} \quad (8.7)$$

ここで、 ε_2 はマイカテープの放射率[-]

$q_{inc,c}$ は試験体保持面（ケイカル板）に炉内側から入射する放射熱流[W/m²]

ε_{gas} はケイカル板とマイカの間にある炉内ガスの放射率[-]

F_{c-m} はマイカからケイカル板の面への形態係数[-]

ε_c はケイカル板の放射率[-]

σ はステファンボルツマン定数(=5.67×10⁻⁸) [W/(m²K⁴)]

T_c^0 はケイカル板温度[K]

であり、 $q_{inc,c}$ 、 ε_{gas} 及び T_c^0 は、第 5 章の数値解析で得られる値を使用する。また、対流熱流 $q_{cnv,2}$ は、以下の式で計算できる。

$$q_{cnv,2} = h_c (T_{gas} - T_2^0) \quad (8.8)$$

ここで、 h_c は試験体保持面（ケイカル板）の対流熱伝達率[W/(m²·K)]

T_{gas} は炉内ガス温度[K]

であり、 h_c と T_{gas} は、第5章の数値解析で得られる値を使用する。

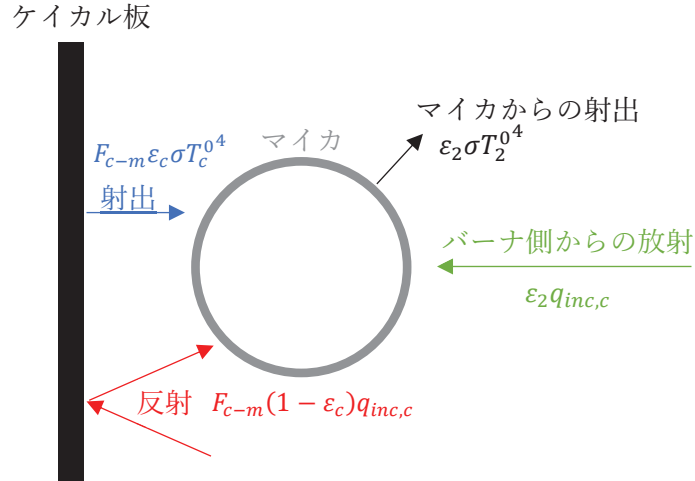


図 8.6 マイカへの放射熱流の模式図

3) 節点 3（絶縁体）の熱伝達

①絶縁体着火前

加熱開始から絶縁体が着火温度に達するまでの間は、絶縁体（ $i=3$ ）の熱の出入りは、シース（ $i=4$ ）からの熱伝導による流入と、マイカ（ $i=2$ ）への熱伝導による流出であり、式（8.3）と同様に、 $i=3$ として、次式で表される。

$$T_3 = T_3^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_3^2 - r_2^2)} \left\{ \frac{r_3 k_{34}}{\Delta r_{34}} (T_4^0 - T_3^0) - \frac{r_2 k_{23}}{\Delta r_{23}} (T_3^0 - T_2^0) \right\} \quad (8.9)$$

②絶縁体着火後

絶縁体が着火温度に到達後、燃え尽きるまでの間は、 T_3 は火炎温度と等しく設定する。火炎温度は式(8.10)に示すように、告示又はISOの加熱曲線 T_{std} に、一定値 T_α を加えた温度とし、実測値を基に本章では $T_\alpha = 100K$ を用いた。絶縁体の燃え尽き以降は、絶縁体温度 T_3 の算出は不要なので、 T_3 の算出は絶縁体が燃え尽きるまでとする。ただし、シースが厚くて絶縁体の燃え尽き時点で、シースがまだ燃えているような条件では、その間は、式(8.10)の温度に維持することとする。

$$T_3 = T_{std} + T_\alpha \quad (8.10)$$

4) 節点 4 (シース) の熱伝達

①シース着火前

加熱開始からシースが着火温度に達するまでの間は、シース ($i=4$) の熱の出入りは、加熱炉からの放射と対流による流入と、絶縁体 ($i=3$) への熱伝導による流出であることから、式 (8.2) の熱の流入をシースが吸収する放射熱流 $q_{rad,4}$ と対流熱流 $q_{cnv,4}$ で表すと、次式で表される。

$$\frac{r_4^2 - r_3^2}{2} \rho c \left(\frac{T_4 - T_4^0}{\Delta t} \right) = r_4 (q_{rad,4} + q_{cnv,4}) - r_3 k_{34} \frac{(T_4^0 - T_3^0)}{\Delta r_{34}} \quad (8.11)$$

T_4 を求める式に整理すると

$$T_4 = T_4^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_4^2 - r_3^2)} \left[r_4 (q_{rad,4} + q_{cnv,4}) - r_3 k_{34} \frac{(T_4^0 - T_3^0)}{\Delta r_{34}} \right] \quad (8.12)$$

放射熱流 $q_{rad,4}$ と対流熱流 $q_{cnv,4}$ は、それぞれ式(8.7)と式(8.8)のマイカをシースへ置き換えることで計算できる。

②シース着火後

シースが着火温度に到達後、燃え尽きるまでの間は、 T_4 は火炎温度に設定する。 T_4 の計算法は上記 3) ②節と同様であり、式(8.10)の左辺 T_3 を T_4 へ置き換える。シースの燃え尽き以降は、シース温度 T_4 の算出は不要なので、 T_4 の算出はシースが燃え尽きるまでとする。

8. 2. 4 電線管試験における熱伝達の計算

1) 節点 1 (銅) の熱伝達

図 8.3 の電線管試験における銅 ($i=1$) の熱の出入りは、露出試験と同様に、式 (8.4) で表される。

2) 節点 2 (マイカ) の熱伝達

①絶縁体完全融解前

加熱開始から絶縁体が完全融解温度 (433K) に達するまでは、マイカ ($i=2$) の熱の出入りは、絶縁体からの熱伝導による流入と、銅 ($i=1$) への熱伝導による流出であり、

8.2.3 節の露出試験の絶縁体が燃え尽きるまでの間と同様に式 (8.5) で表される。

②絶縁体完全融解後

絶縁体完全融解後は、マイカと空気層間の対流と電線管からの放射により、マイカ ($i=2$) へ熱エネルギーが与えられるため、熱収支は次式で表される。

$$\frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \rho c \left(\frac{T_2 - T_2^0}{\Delta t} \right) = r_2 h_{2,5} (T_5 - T_2) + \frac{r_2}{1/\varepsilon_2 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_2/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_2^4) - \frac{r_1 k_{12}}{\Delta r_{12}} (T_2^0 - T_1^0) \quad (8.13)$$

ここで、 $h_{2,5}$ は空気層とマイカ間の対流熱伝達率 [$W/(m^2 \cdot K)$]

ε_2 はマイカの放射率 [—]

ε_6 は電線管の放射率 [—]

T_2 を求める式に整理すると

$$T_2 = T_2^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c (r_2^2 - r_1^2)} \left\{ r_2 h_{2,5} (T_5 - T_2) + \frac{r_2}{1/\varepsilon_2 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_2/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_2^4) - \frac{r_1 k_{12}}{\Delta r_{12}} (T_2^0 - T_1^0) \right\} \quad (8.14)$$

となる。

3) 節点 3 (絶縁体) の熱伝達

①シース完全融解前

加熱開始からシースが完全融解温度 (433K) に達するまでの間は、絶縁体 ($i=3$) の熱の出入りは、シース ($i=4$) からの熱伝導による流入と、マイカ ($i=2$) への熱伝導による流出であり、8.2.3 節の露出試験の絶縁体が着火するまでの間と同様に式 (8.9) で表される。ここで、絶縁体の融解熱を考慮するため、絶縁体は融解開始温度 (413 K) から完全融解温度 (433 K) に達する 20 K の間に一定の割合で融解すると仮定し、この間は、ポリエチレンの比熱に融解熱相当のみかけの比熱を加算することとする。この間の比熱 c_m は、ポリエチレンの比熱を c_p [J/kg]、融解熱を L_f [J/kg] (文献値より 286.7 J/g¹) とすると、以下の式で表される。

$$c_m = c_p + \frac{L_f}{20} \quad (8.15)$$

以下、同様に、絶縁体とシースの温度が融解開始温度 (413 K) から完全融解温度 (433 K) の間の温度の時は、式 (8.15) で求める比熱 c_m を用いることとする。なお、電線管内

での絶縁体とシースの気化熱は無視した。

②絶縁体完全融解前

シース完全融解後かつ絶縁体完全融解前は、絶縁体と空気層間の対流と電線管からの放射により、絶縁体（ $i=3$ ）へ熱エネルギーが与えられるため、熱収支は次式で表される。

$$\frac{r_3^2 - r_2^2}{2} \rho c \left(\frac{T_3 - T_3^0}{\Delta t} \right) = r_3 h_{3,5} (T_5 - T_3) + \frac{r_3}{1/\varepsilon_3 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_3/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_3^4) - \frac{r_2 k_{23}}{\Delta r_{23}} (T_3^0 - T_2^0) \quad (8.16)$$

ここで、 $h_{3,5}$ は空気層と絶縁体間の対流熱伝達率[W/(m²·K)]

ε_3 は絶縁体の放射率[－]

T_3 を求める式に整理すると

$$T_3 = T_3^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_3^2 - r_2^2)} \left\{ r_3 h_{3,5} (T_5 - T_3) + \frac{r_3}{1/\varepsilon_3 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_3/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_3^4) - \frac{r_2 k_{23}}{\Delta r_{23}} (T_3^0 - T_2^0) \right\} \quad (8.17)$$

③絶縁体完全融解後

絶縁体完全融解後は、絶縁体のあった空間は空気層になると仮定し、絶縁体温度 T_3 は、空気層温度 T_5 と同一温度とする。

4) 節点4（シース）の熱伝達

①シース完全融解前

加熱開始からシースが完全融解するまでの間は、シースと空気層間の対流と電線管からの放射により、シース（ $i=4$ ）へ熱エネルギーが与えられるため、熱収支は次式で表される。

$$\frac{r_4^2 - r_3^2}{2} \rho c \left(\frac{T_4 - T_4^0}{\Delta t} \right) = r_4 h_{4,5} (T_5 - T_4) + \frac{r_4}{1/\varepsilon_4 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_4/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_4^4) - \frac{r_3 k_{34}}{\Delta r_{34}} (T_4^0 - T_3^0) \quad (8.18)$$

ここで、 $h_{4,5}$ は空気層とシース間の対流熱伝達率[W/(m²·K)]

ε_4 はシースの放射率[－]

T_4 を求める式に整理すると

$$T_4 = T_4^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_4^2 - r_3^2)} \left\{ r_4 h_{4,5} (T_5 - T_4) + \frac{r_4}{1/\varepsilon_4 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_4/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_4^4) - \frac{r_3 k_{34}}{\Delta r_{34}} (T_4^0 - T_3^0) \right\} \quad (8.19)$$

②シース完全融解後

シース完全融解後は、シースのあった空間は空気層になると仮定し、シース温度 T_4 は、空気層温度 T_5 と同一温度とする。

5) 節点 5（空気層）の熱伝達

①シース完全融解前

シース完全融解前は、電線管と空気間の対流熱流と空気層とシース間の対流熱流は等しいので、

$$2\pi r_5 h_{5,6} (T_6 - T_5) = 2\pi r_4 h_{4,5} (T_5 - T_4) \quad (8.20)$$

T_5 を求める式に整理すると

$$T_5 = \frac{r_4 h_{4,5} T_4 + r_5 h_{5,6} T_6}{r_4 h_{4,5} + r_5 h_{5,6}} \quad (8.21)$$

を得る。

②シース完全融解後

シース完全融解後かつ絶縁体完全融解前は、節点 4（シース）も空気層になるので、同様に

$$T_5 = \frac{r_3 h_{3,5} T_3 + r_5 h_{5,6} T_6}{r_3 h_{3,5} + r_5 h_{5,6}} \quad (8.22)$$

となる。

③絶縁体完全融解後

絶縁体完全融解後は、節点 3（絶縁体）も空気層になるので、同様に

$$T_5 = \frac{r_2 h_{2,5} T_2 + r_5 h_{5,6} T_6}{r_2 h_{2,5} + r_5 h_{5,6}} \quad (8.23)$$

として計算できる。

6) 節点 6（電線管）の熱伝達

① シース完全融解前

シース完全融解前は、電線管の熱の出入りは、加熱炉からの放射と対流による流入と、内側への放射と対流による流出であり、電線管が吸収する放射熱流を $q_{rad,6}$ [W/m²]、対流熱流を $q_{cnv,6}$ [W/m²]とすると熱収支は次式で表される。

$$\begin{aligned} \frac{r_6^2 - r_5^2}{2} \rho c \left(\frac{T_6 - T_6^0}{\Delta t} \right) &= r_6 (q_{rad,6} + q_{cnv,6}) \\ &- \left\{ r_5 h_{5,6} (T_6 - T_5) + \frac{r_4}{1/\varepsilon_4 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_4/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_4^4) \right\} \end{aligned} \quad (8.24)$$

T_6 を求める式に整理すると

$$\begin{aligned} T_6 &= T_6^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c (r_6^2 - r_5^2)} \times \\ &\left[r_6 (q_{rad,6} + q_{cnv,6}) - \left\{ r_5 h_{5,6} (T_6 - T_5) + \frac{r_4}{1/\varepsilon_4 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_4/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_4^4) \right\} \right] \end{aligned} \quad (8.25)$$

放射熱流 $q_{rad,6}$ と対流熱流 $q_{cnv,6}$ は、それぞれ式(8.7)と式(8.8)のマイカを電線管へ読み替えることで計算できる。

② シース完全融解後

シース完全融解後かつ絶縁体完全融解前は、シースのあった空間が空気層になるので、式(8.24)から内側への放射先を絶縁体へ変更すると、次式となる。

$$\begin{aligned} T_6 &= T_6^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c (r_6^2 - r_5^2)} \times \\ &\left[r_6 (q_{rad,6} + q_{cnv,6}) - \left\{ r_5 h_{5,6} (T_6 - T_5) + \frac{r_3}{1/\varepsilon_3 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_3/r_5)} \sigma (T_6^4 - T_3^4) \right\} \right] \end{aligned} \quad (8.26)$$

③ 絶縁体完全融解後

②と同様に、絶縁体完全融解後は、絶縁体のあった空間が空気層になるので、式(8.25)における内側への放射先をマイカへ変更すると、次式となる。

$$T_6 = T_6^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c(r_6^2 - r_5^2)} \times \left[r_6(q_{rad,6} + q_{cnv,6}) - \left\{ r_5 h_{5,6}(T_6 - T_5) + \frac{r_2}{1/\varepsilon_2 + (1/\varepsilon_6 - 1)(r_2/r_5)} \sigma(T_6^4 - T_2^4) \right\} \right] \quad (8.27)$$

8. 2. 5 露出試験時の被覆樹脂の燃焼時間

シースと絶縁体の主材料であるポリエチレンが着火してから燃え尽きるまでの時間（燃焼継続時間 $t_c[s]$ ）は以下の式により、計算する。

$$t_c = \frac{qw}{QS} \quad (8.28)$$

ここで、 q はポリエチレンの発熱量(=43,300kJ/kg)²⁾

w はシース又は絶縁体中のポリエチレンの重量[kg]

Q はポリエチレンの単位面積あたりの発熱速度[kW/m²]

S はシース又は絶縁体中のポリエチレンの表面積[m²]

図 8.7 の耐火電線中のシースの模式図に示すように、シースの内径を $r_3[m]$ 、外径を $r_4[m]$ 、長さを $L[m]$ とし、ポリエチレンの密度を $\rho [kg/m^3]$ とすれば、シース中のポリエチレンの重量 $w[kg]$ は、

$$w = \rho L(\pi r_4^2 - \pi r_3^2) \quad (8.29)$$

である。また、シースの表面積 S は、 $2\pi r_4 L$ であるので、式(8.28)へ代入すると、

$$t_c = \frac{q \times \rho L(\pi r_4^2 - \pi r_3^2)}{Q \times 2\pi r_4 L} \quad (8.30)$$

であり、ポリエチレンの単位面積あたりの発熱速度 Q が分かれば燃焼継続時間を計算できる。

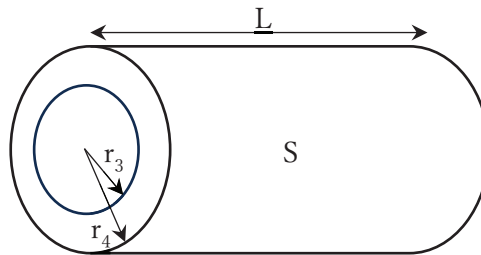


図 8.7 耐火電線中のシースの模式図

単位面積あたりの発熱速度 Q は、ISO 5660-1³⁾ で規定されるコーンカロリメータ発熱性試験装置を用いて 50kW/m^2 の加熱強度で、2mm 厚のポリエチレンシートを燃焼させることで求めた。測定結果を図 8.8 に示す。測定は 3 回実施し、ポリエチレンシートの着火から消炎するまでの発熱速度の平均値を発熱速度 Q とした。着火時間は 1 回目が 59 秒、2 回目が 57 秒、3 回目が 56 秒であり、消炎時間は試験開始から 1 回目が 615 秒、2 回目が 608 秒、3 回目が 524 秒である。着火から消炎までの発熱速度の平均値から、発熱速度 Q は 155kW/m^2 とした。

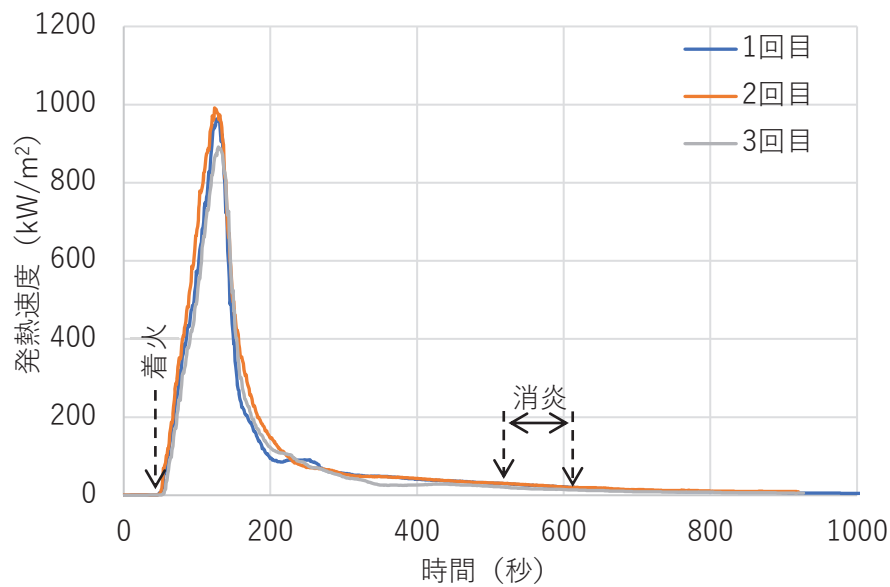


図 8.8 コーンカロリメータ発熱性試験結果

8. 2. 6 絶縁抵抗の計算

マイカ温度 T_2 から、加熱中の耐火電線の絶縁抵抗を試算するため、マイカの電気抵抗と温度の関係に関して、楯ら⁴⁾ により示された体積固有抵抗（体積抵抗率） $\rho_c[\Omega\text{cm}]$ と温度 $T[\text{K}]$ についての関係式を用いる。楯らは 2 種類のマイカに対して測定値に基づく以下の実験式を提案しており、本研究では便宜上、式 (8.31) を実験式 1、式 (8.32) を実験式 2 と呼ぶこととする。これらの式より、マイカテープの温度が分かれば、体積固有抵抗を計算できる。

$$\rho_c^{-1} = 3.2 \times 10^{-14} e^{-1210/T} + 2.5 \times 10^{-5} e^{-12800/T} \quad (8.31)$$

$$\rho_c^{-1} = 2.6 \times 10^{-15} e^{-625/T} + 3.6 \times 10^{-6} e^{-12100/T} \quad (8.32)$$

式 (8.31)、式 (8.32) より、体積固有抵抗と温度の関係は図 8.9 に示す通りであり、温度が高くなるほど、体積固有抵抗は指数関数的に低下する。

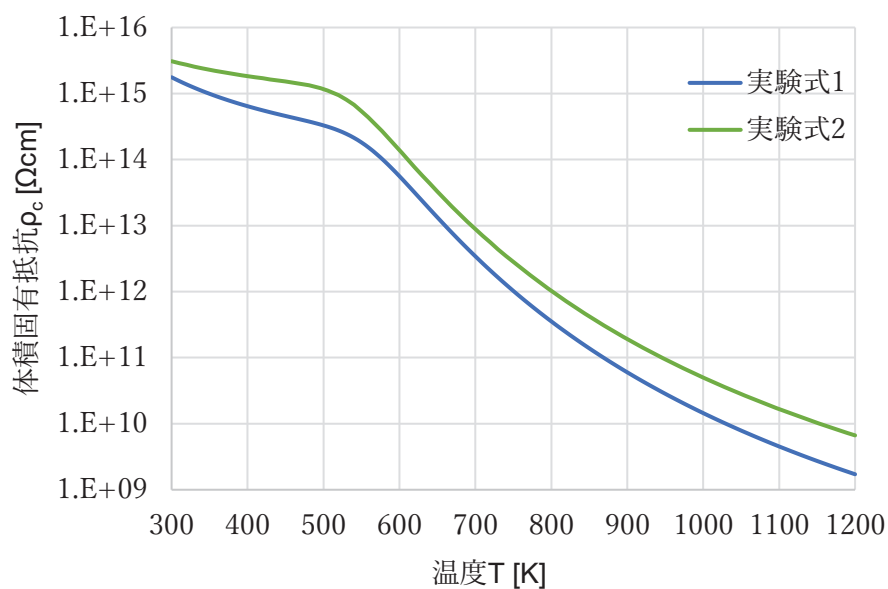


図 8.9 体積固有抵抗と温度の関係

体積固有抵抗は、単位体積当たりの電気抵抗値を表すものであり、各物質に固有の値である。図 8.10 に示すように、断面積 $A[\text{cm}^2]$ 、長さ $L[\text{cm}]$ の直方体の物質の絶縁抵抗値を $R[\text{M}\Omega]$ とすると、絶縁抵抗と体積固有抵抗の関係は、

$$R = \rho_c \times 10^{-6} \times \frac{L}{A} \quad (8.33)$$

であり、絶縁抵抗は絶縁物（マイカ）が長い（厚い）ほど、断面積が小さいほど大きくなる。

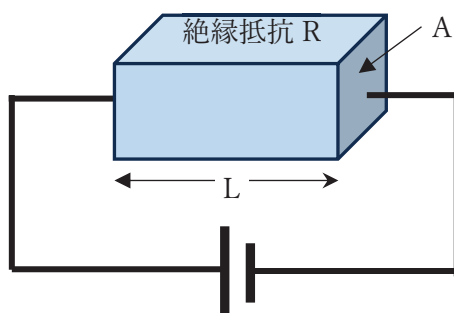


図 8.10 体積固有抵抗の導出の模式図

式(8.33)を用いて、 ρ_c には式(8.31)または式(8.32)で得られるマイカテープの体積固有抵抗を、 L にはマイカテープの厚さを、 A にはマイカテープの表面積を代入すれば、耐火電線の加熱中の絶縁抵抗を計算できる。なお、マイカテープの表面積は、シース及び絶縁体が焼失する部分の面積を想定し、露出試験ではマイカの円周の長さに加熱炉の横幅（46cm）を乗じて求め、電線管試験ではマイカの円周の長さ電線管の長さ（40cm）を乗じて求める。

ρ_c には式(8.31)と式(8.32)の二つの実験式があるので、本研究ではそれぞれの場合の絶縁抵抗を計算し、その平均を算出した。

8. 2. 7 設定条件

本章の数値解析の計算で使用した試験体の構成材料及び試験体保持面の物性値を表 8.1 に示す。

表 8.1 材料の物性値^{5), 6)}

部位	材質	放射率 [-]	熱伝導率 [W/m K]	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/kg K]
導体	銅	—	383	8780	425
絶縁層	マイカ	0.75	0.5	2900	880
絶縁体、シース	ポリエチレン	0.95	0.41	950	2100*
電線管	鋼鉄	0.79	—	7770	566
試験体保持面	ケイカル板	0.8	—	—	—

* 融解開始から完全融解するまでの間は、式（8.15）より、ポリエチレンの比熱を 16,435 J/kg K とする。

表 8.2 耐火電線の寸法

格子 i	項目	半径 r_i [m]	格子間隔 $\Delta r_{i,i+1}$ [m]
1	導体	0.001 38	0.001 53
2	マイカ	0.001 68	0.000 55
3	絶縁体	0.002 48	0.001 15
4	シース	0.003 98	—
5	空気層	0.011 1	—
6	電線管	0.012 7	—

8. 3 モデルの精度検証

8. 3. 1 計算条件

作成した熱伝達モデルの精度を検証するため、表 8.3 に示す 8 つの実験結果と数値解析

結果を比較する。表中の計算条件①、③、⑤、⑦は露出試験、計算条件②、④、⑥、⑧は電線管試験である。計算条件①と②は、すべて告示の条件であり、それぞれ第 7 章の実験 1a と 2a の測定結果との比較である。計算条件③と④は、加熱曲線のみを ISO 曲線に変更した条件であり、それぞれ第 7 章の実験 3a と 4a の測定結果との比較である。計算条件⑤と⑥は、加熱曲線を ISO 曲線に、制御用熱電対とケイカル板との距離を ISO の 100mm に変更した条件であり、それぞれ第 7 章の実験 5a と 6a の測定結果との比較である。計算条件⑦と⑧は、加熱曲線を ISO 曲線に、制御用熱電対をプレート熱電対に、制御用熱電対とケイカル板との距離を ISO の 100mm に変更した条件であり、それぞれ第 7 章の実験 7a と 8a の測定結果との比較である。

表 8.3 計算条件の組み合わせ

計算条件	試験の種類	比較する実験データ	加熱曲線	制御用熱電対と試料距離	制御用熱電対
計算条件①	露出試験	第 7 章 1a	告示曲線	10mm	露出型熱電対
計算条件②	電線管試験	第 7 章 2a			
計算条件③	露出試験	第 7 章 3a	ISO 曲線	10mm	露出型熱電対
計算条件④	電線管試験	第 7 章 4a			
計算条件⑤	露出試験	第 7 章 5a	ISO 曲線	100mm	露出型熱電対
計算条件⑥	電線管試験	第 7 章 6a			
計算条件⑦	露出試験	第 7 章 7a	ISO 曲線	100mm	プレート熱電対
計算条件⑧	電線管試験	第 7 章 8a			

8. 3. 2 計算結果

(1) 計算条件①（露出試験）

計算条件①（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 10mm）は、すべて告示の条件である。各格子点の温度の計算結果を図 8.11 に、図 8.11 の 6 分までの拡大図を図 8.12 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.13 に示す。

図 8.11 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_4 は、加熱開始直後は加熱曲線よりもやや遅く昇温していくが、4 分 6 秒にシースと絶縁体が着火温度に達し、シース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は 599°C に急上昇した。絶縁体とシースは 5 分 23 秒間燃焼した後、燃え尽きた。絶縁体とシースが燃え尽きた後は、銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は一旦、加熱曲線と同程度まで温度が低下し、その後は加熱曲線よりもやや高くなった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。図 8.12 に示す 6 分までの拡大図より、絶縁体とシースが着火温度に達するまでは、マイカ温度 T_2 よりも絶縁体温度 T_3 の方がわずかに温度は高く、また、 T_3 のよりもシース温度 T_4 の方がわずかに温度は高い。

図 8.13 に示すように絶縁抵抗の計算値は、シースと絶縁体着火直後の 4 分 6 秒から燃え尽きる 9 分 29 秒にかけて急速に低下し、実験式 1 と実験式 2 の平均値の極小値は $9.6\text{M}\Omega$ であった。その後は、シースと絶縁体の燃え尽きに伴い、一旦、絶縁抵抗が回復した後、10 分頃からなだらかに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、実測値はおおむね実験式 1 と実験式 2 の範囲内にあり、比較的近い値が得られた。

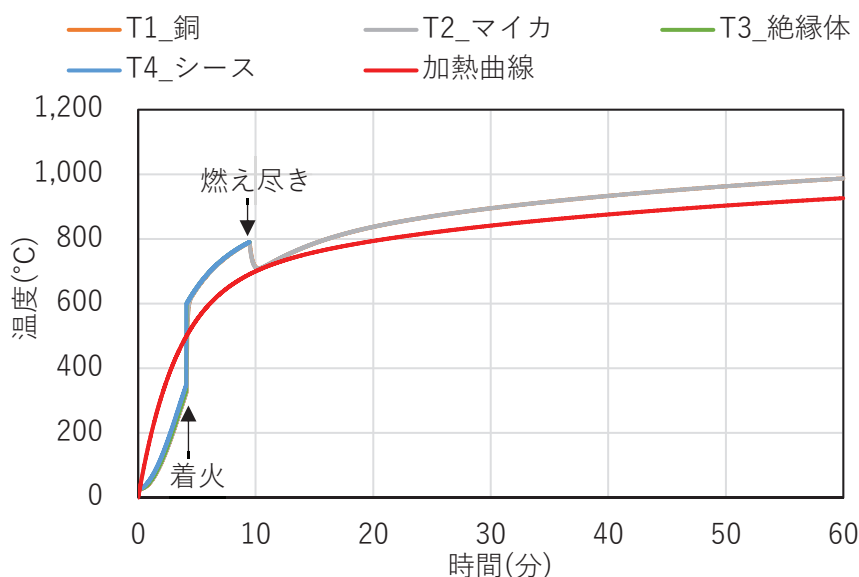


図 8.11 試験体温度の計算値

（計算条件①：露出試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御）

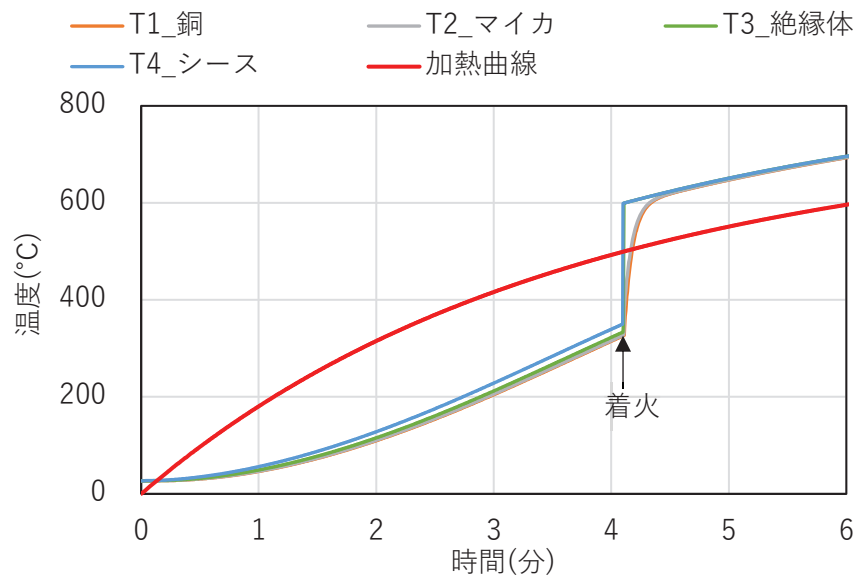


図 8.12 試験体温度の 6 分までの計算値

(計算条件①：露出試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

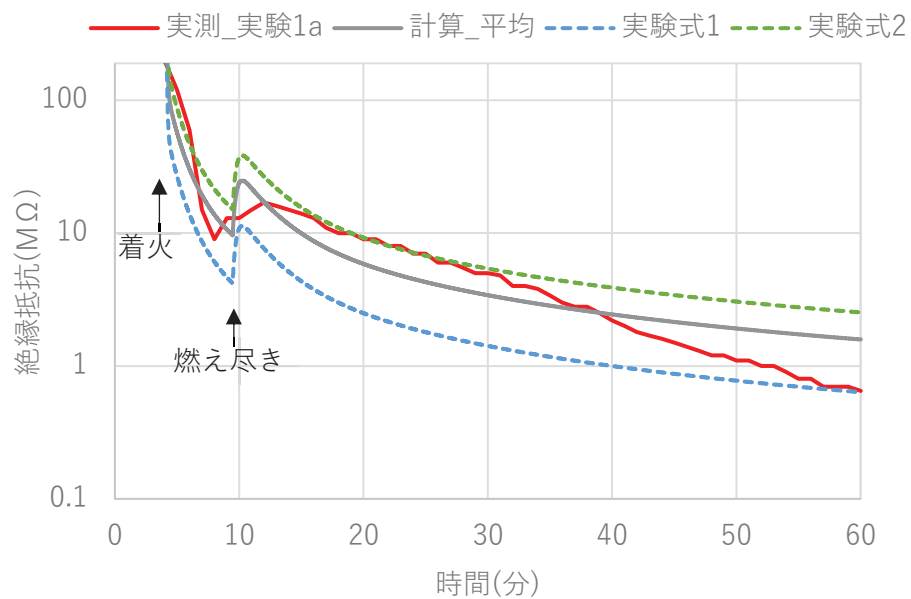


図 8.13 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件①：露出試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

(2) 計算条件③ (露出試験)

計算条件③ (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 10mm) における各格子点の温度の計算結果を図 8.14 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.15 に示す。

図 8.14 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_4 は、加熱開始直後は加熱曲線よりもやや低く昇温していくが、3 分 4 秒にシースが、3 分 5 秒に絶縁体が着火温度に達するとシース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は急上昇して 606°C となった。その後、絶縁体とシースは 5 分 23 秒間燃焼した後、燃え尽きた。絶縁体とシースが燃え尽きた後は、銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は一旦、加熱曲線と同程度まで温度が低下し、その後は加熱曲線よりもやや高くなった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.15 に示すように絶縁抵抗の計算値は、シースと絶縁体着火直後の 3 分 4 秒から燃え尽きる 8 分 27 秒にかけて急速に低下して、実験式 1 と実験式 2 の平均値の極小値は $15\text{M}\Omega$ であった。その後は、シースと絶縁体の燃え尽きに伴い、一旦、絶縁抵抗が回復した後、9 分頃からなだらかに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、実測値はおおむね実験式 1 と実験式 2 の範囲内にあり、比較的近い値が得られた。

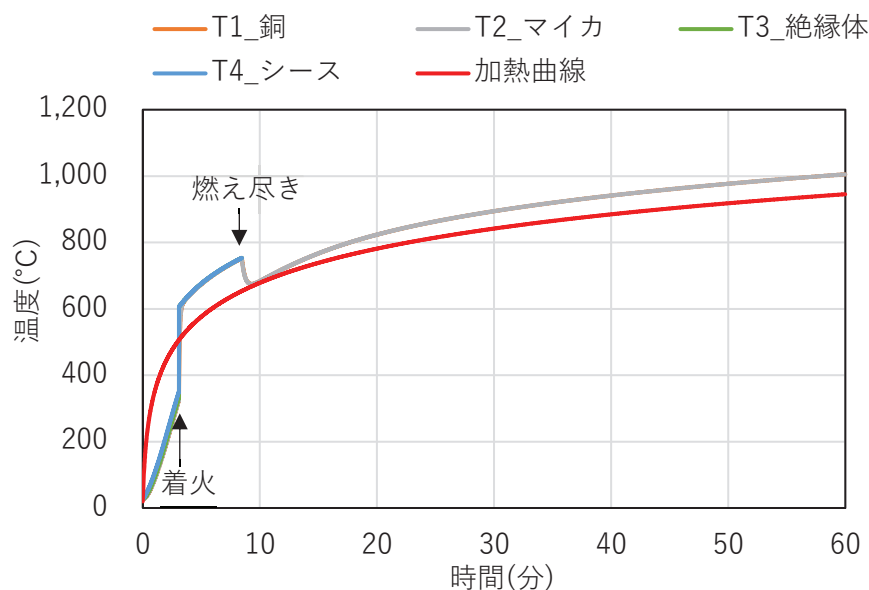


図 8.14 試験体温度の計算値

(計算条件③：露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

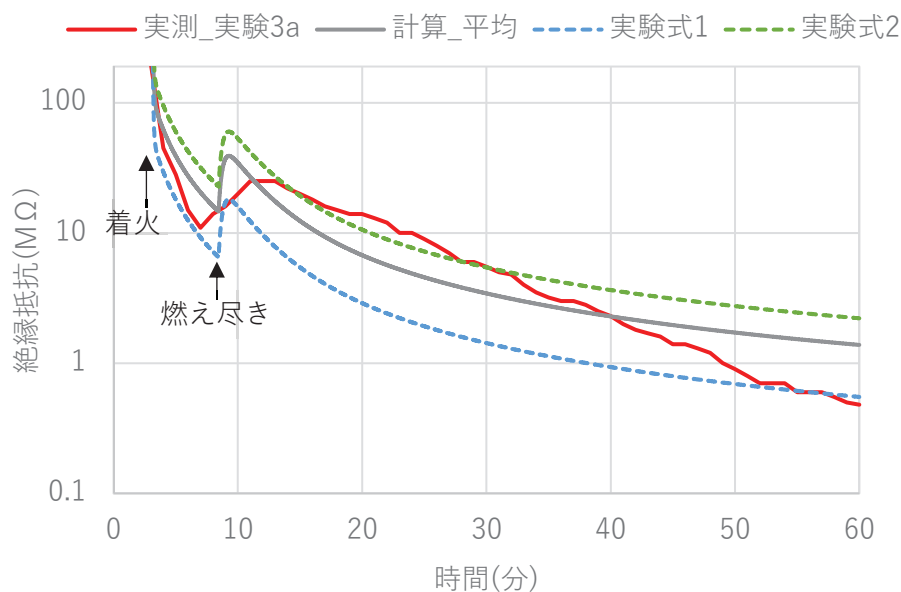


図 8.15 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件③：露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

(3) 計算条件⑤ (露出試験)

計算条件⑤ (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 100mm) における各格子点の温度の計算結果を図 8.16 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.17 に示す。

図 8.16 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_4 は、加熱開始直後は加熱曲線よりもやや低く昇温していくが、4 分 20 秒にシースと絶縁体が着火温度に達するとシース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は急上昇して 656°C となった。その後、絶縁体とシースは 5 分 23 秒間燃焼した後、燃え尽きた。絶縁体とシースが燃え尽きた後は、銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱曲線よりもやや低くなった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.17 に示すように絶縁抵抗の計算値は、シースと絶縁体着火直後の 4 分 20 秒から燃え尽きる 9 分 43 秒にかけて急速に低下して、実験式 1 と実験式 2 の平均値の極小値は $12\text{M}\Omega$ であった。その後は、シースと絶縁体の燃え尽きに伴い、一旦、絶縁抵抗が回復した後、11 分頃からなだらかに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、実測値はおおむね実験式 1 と実験式 2 の範囲内にあり、比較的近い値が得られた。

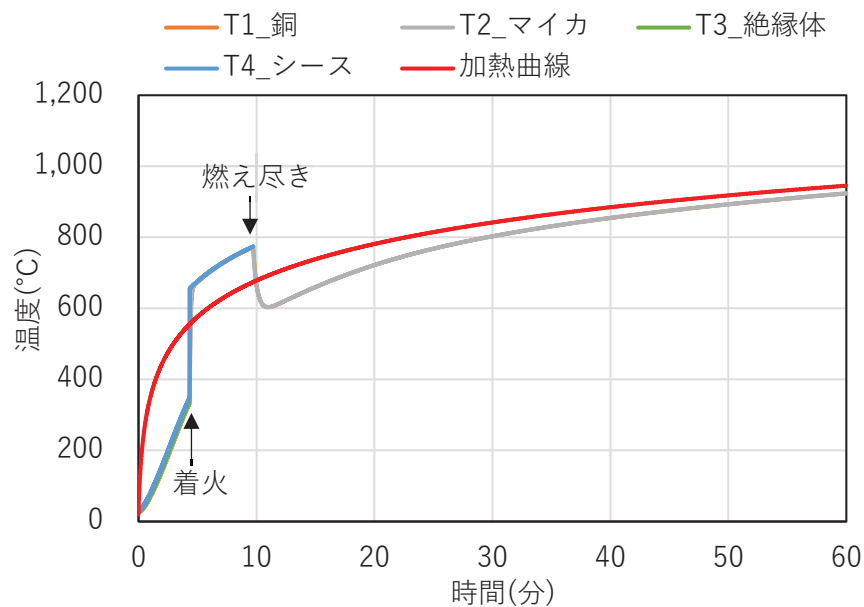


図 8.16 試験体温度の計算値

(計算条件⑤：露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、露出型熱電対制御)

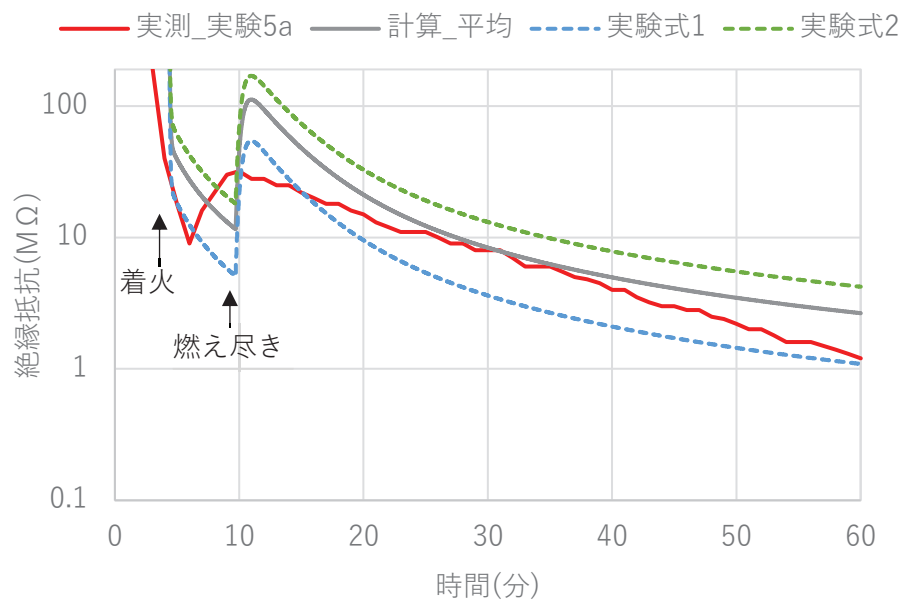


図 8.17 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件⑤：露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、露出型熱電対制御)

(4) 計算条件⑦(露出試験)

計算条件⑦(加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対と試料距離は 100mm)における各格子点の温度の計算結果を図 8.18 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.19 に示す。

図 8.18 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_4 は、加熱開始後、シースと絶縁体が着火するまでは加熱曲線に近い温度で昇温していき、1 分 21 秒にシースが、1 分 23 秒に絶縁体が着火温度に達するとシース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は急上昇して 493°C となった。その後、絶縁体とシースは 5 分 23 秒間燃焼した後、燃え尽きた。絶縁体とシースが燃え尽きた後は、銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱曲線よりもやや低くなった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.19 に示すように絶縁抵抗の計算値は、シースと絶縁体着火直後の 1 分 21 秒から燃え尽きる 6 分 44 秒にかけて急速に低下して、実験式 1 と実験式 2 の平均値の極小値は $22\text{M}\Omega$ であった。その後は、シースと絶縁体の燃え尽きに伴い、一旦、絶縁抵抗が回復した後、8 分頃からなだらかに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、全般的に実測値の方が絶縁抵抗は高かった。これは、7.4.3.1(1)④節で示した通り、プレート熱電対を用いた実験では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの放射熱の一部を遮るため、露出型熱電対制御よりも試験体温度が低くなり、結果として絶縁抵抗の低下も小さくなるためである。

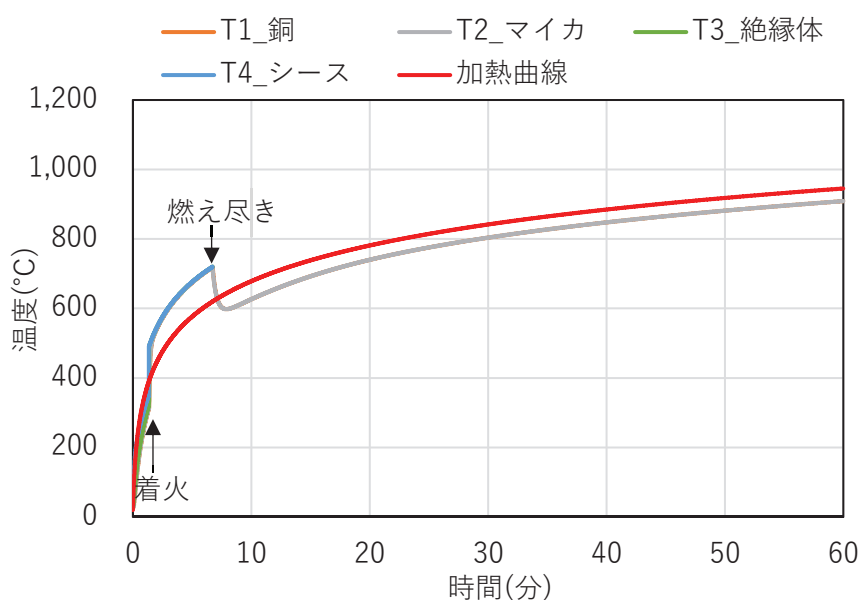


図 8.18 試験体温度の計算値

(計算条件⑦: 露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、プレート熱電対制御)

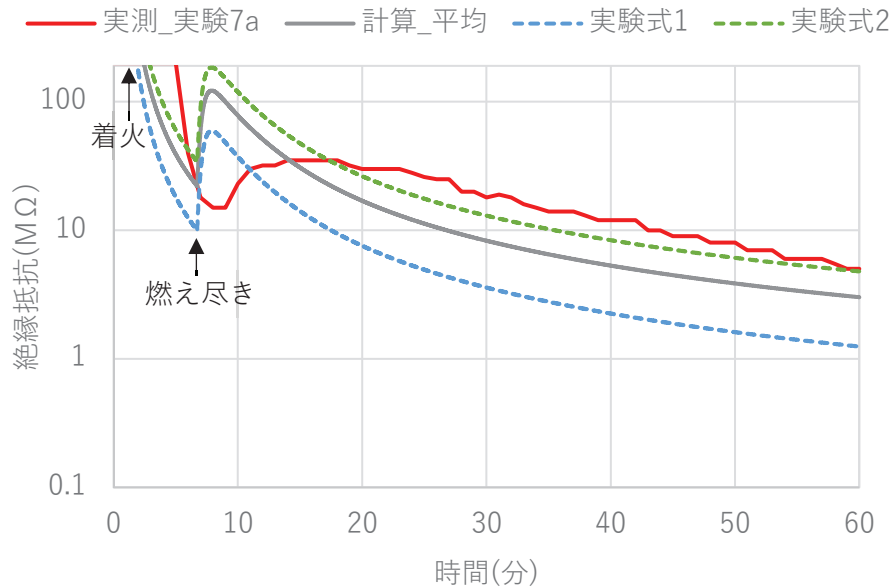


図 8.19 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件⑦：露出試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、プレート熱電対制御)

(5) 計算条件② (電線管試験)

計算条件② (加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 10mm) は、すべて告示の条件である。各格子点の温度の計算結果を図 8.20 に、図 8.20 の 10 分までの拡大図を図 8.21 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.22 に示す。

図 8.20 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_6 は、60 分間にわたり加熱曲線よりも低い。銅温度 T_1 からシース温度 T_4 は、シースが完全融解温度に達する 5 分 50 秒まではほぼ同じ温度である。シース及び絶縁体は完全融解温度に達すると空気層温度と同一温度になると設定しているため、シース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は瞬間的に空気層温度まで上昇している。空気層温度 T_5 は、加熱 8 分頃までは電線管温度 T_6 よりもやや低いですが、それ以降は T_6 とほぼ同じ温度となった。銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱開始からしばらくは電線管温度よりも低いですが、10 分以降は電線管温度とほぼ同じ温度となった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.21 に示す 10 分までの拡大図より、絶縁体とシースが完全融解温度に達するまでは、マイカ温度 T_2 よりも絶縁体温度 T_3 の方がわずかに温度は高く、また、 T_3 のよりもシース温度 T_4 の方がわずかに温度は高いがその差は小さい。シースは 4 分 51 秒に融解開始温度に達し、5 分 50 秒に完全融解温度に達した。絶縁体は 5 分 7 秒に融解開始温度に達し、6 分 1 秒に完全融解温度に達した。シースと絶縁体が完全融解温度に達した際にそれぞれ空気層の温度が微増しているが、これはシースあるいは絶縁体が完全融解温度 (160℃) に達したときに、シースや絶縁体を、より温度の高い約 380℃の空気層の温度と同一温度に

変更しているためである。本来であれば、160°Cのシースあるいは絶縁体と約 380°Cの空気層の温度が混ざるので、空気層の温度はやや下がるはずであるが、本解析プログラムではこれを考慮していない。ただし、空気層の熱容量は小さいので、最終的な影響は小さいと考えられる。

図 8.22 に示すように絶縁抵抗の計算値は、時間とともに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、実測値はおおむね実験式 1 と実験式 2 の範囲内にあり、近い値が得られた。

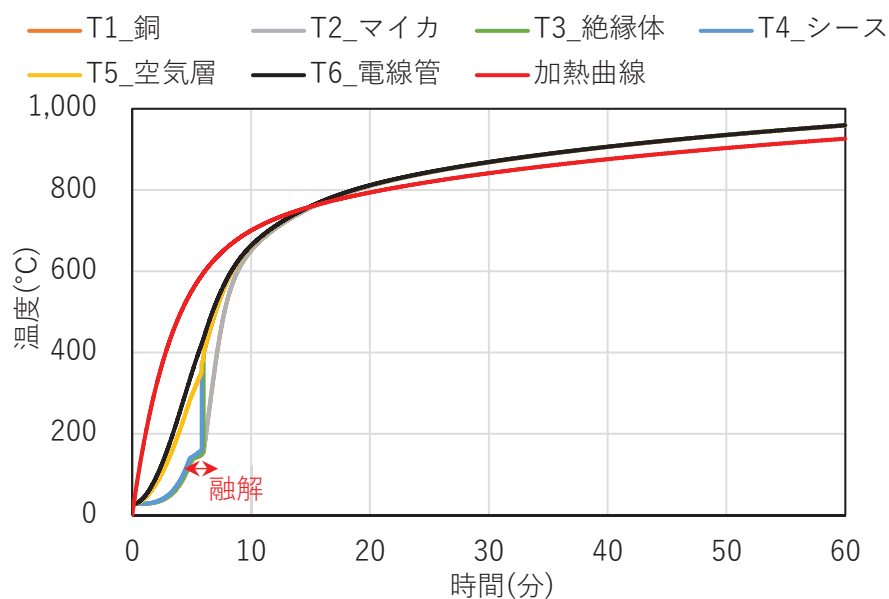


図 8.20 試験体温度の計算値

(計算条件②：電線管試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

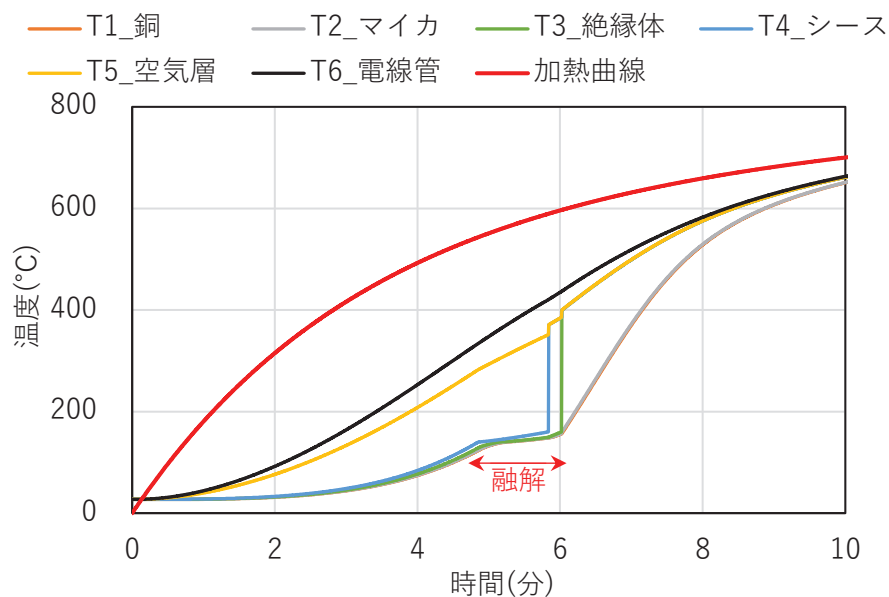


図 8.21 試験体温度の 10 分までの計算値

(計算条件②：電線管試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

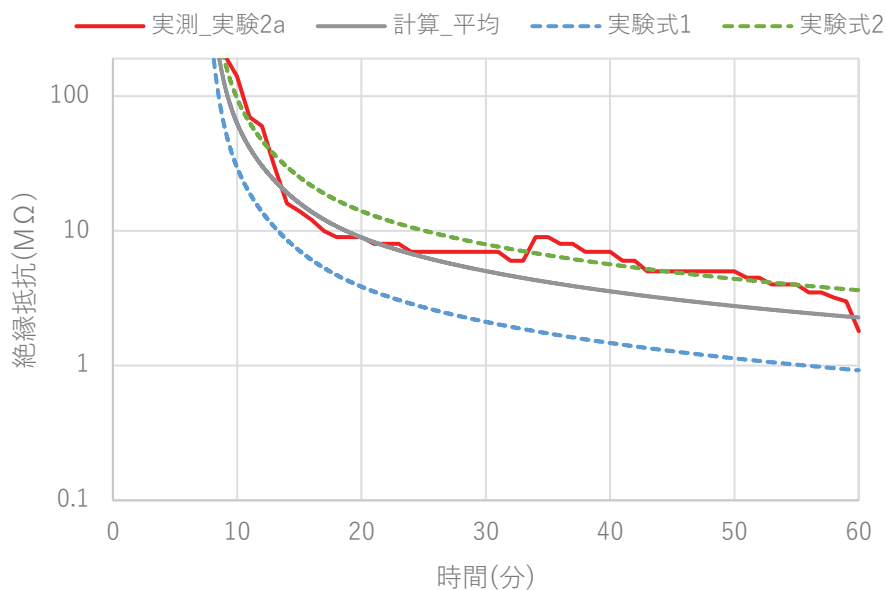


図 8.22 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件②：電線管試験、告示曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

(6) 計算条件④ (電線管試験)

計算条件④ (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 10mm) における各格子点の温度の計算結果を図 8.23 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.24 に示す。

図 8.23 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_6 は、60 分間にわたり加熱曲線よりも低い。銅温度 T_1 からシース温度 T_4 は、シースが完全融解温度に達する 5 分 4 秒まではほぼ同じ温度である。シース及び絶縁体は完全融解温度に達すると空気層温度と同一温度になると設定しているため、シース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は瞬間的に空気層温度まで上昇している。空気層温度 T_5 は、加熱 8 分頃までは電線管温度 T_6 よりもやや低いが、それ以降は T_6 とほぼ同じ温度となった。銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱開始からしばらくは電線管温度よりも低いですが、10 分以降は電線管温度とほぼ同じ温度となった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.24 に示すように絶縁抵抗の計算値は、時間とともに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、加熱 27 分までは傾向が一致しており、近い値が得られた。それ以降は絶縁抵抗の実測値が増加したため、計算値とは一致しなかった。

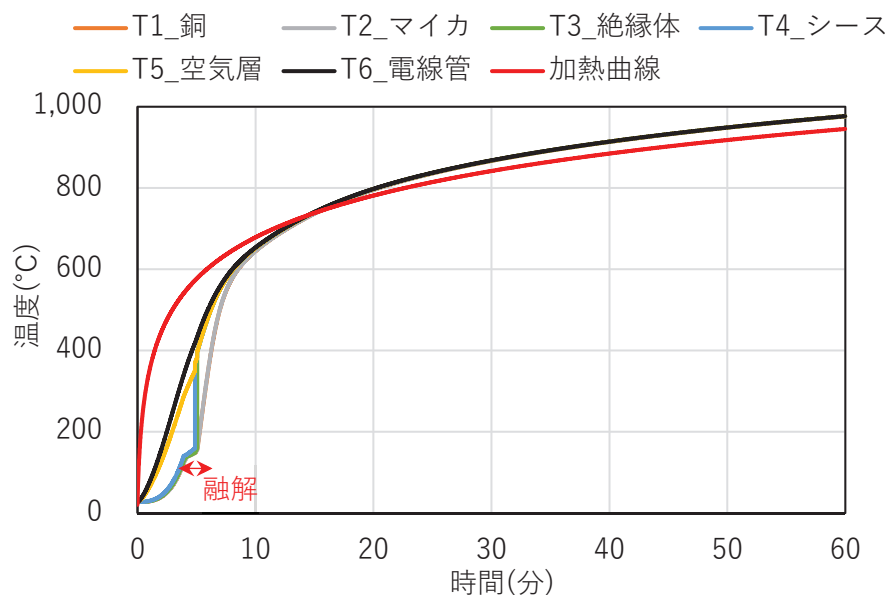


図 8.23 試験体温度の計算値

(計算条件④：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

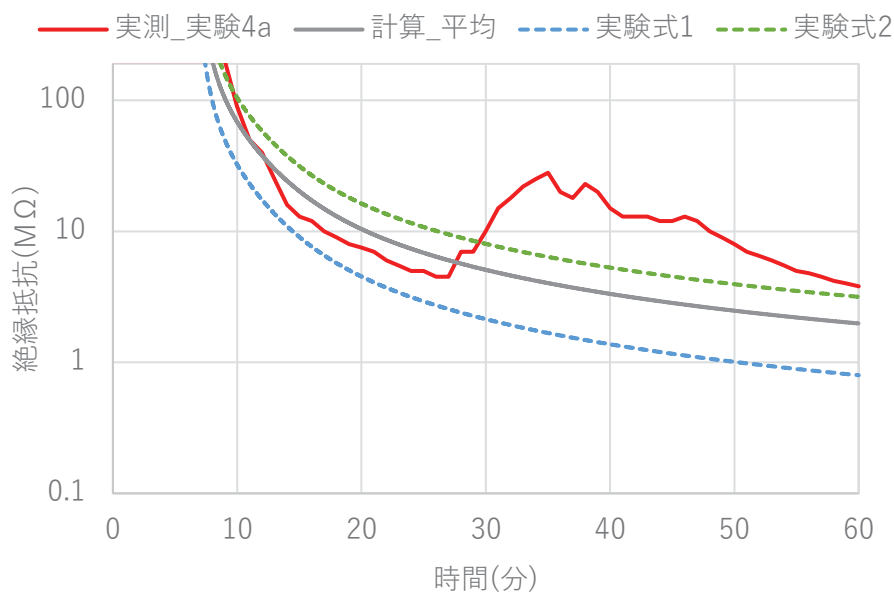


図 8.24 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件④：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 10mm、露出型熱電対制御)

(7) 計算条件⑥ (電線管試験)

計算条件⑥ (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 100mm) における各格子点の温度の計算結果を図 8.25 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.26 に示す。

図 8.25 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_6 は、60 分間にわたり加熱曲線よりも低い。銅温度 T_1 からシース温度 T_4 は、シースが完全融解温度に達する 6 分 11 秒まではほぼ同じ温度である。シース及び絶縁体は完全融解温度に達すると空気層温度と同一温度になると設定しているので、シース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は瞬間的に空気層温度まで上昇している。空気層温度 T_5 は、加熱 9 分頃までは電線管温度 T_6 よりもやや低い、それ以降は T_6 とほぼ同じ温度となった。銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱開始からしばらくは電線管温度よりも低い、15 分以降は電線管温度とほぼ同じ温度となった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.26 に示すように絶縁抵抗の計算値は、時間とともに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、実測値はおおむね実験式 1 と実験式 2 の範囲内にあり、比較的近い値が得られた。

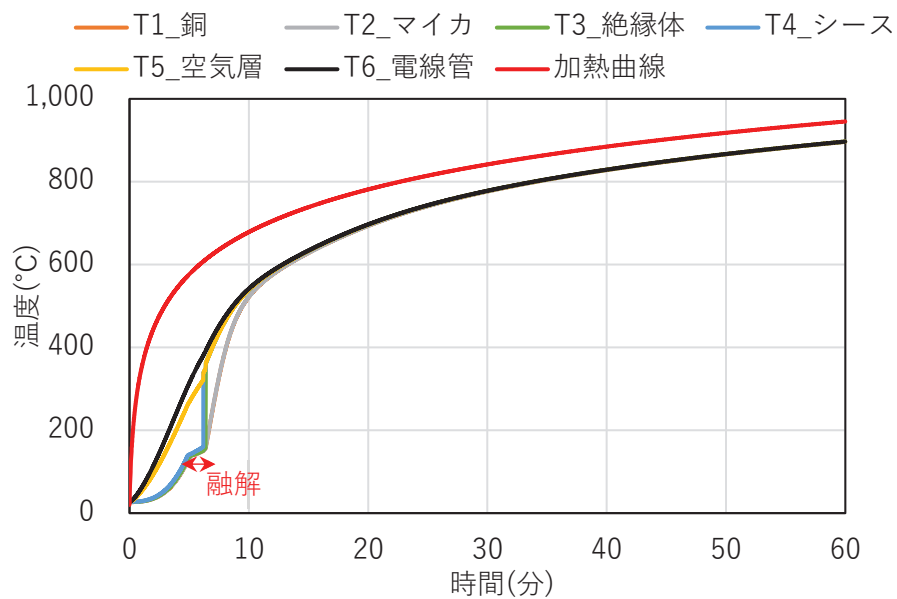


図 8.25 試験体温度の計算値

(計算条件⑥：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、露出型熱電対制御)

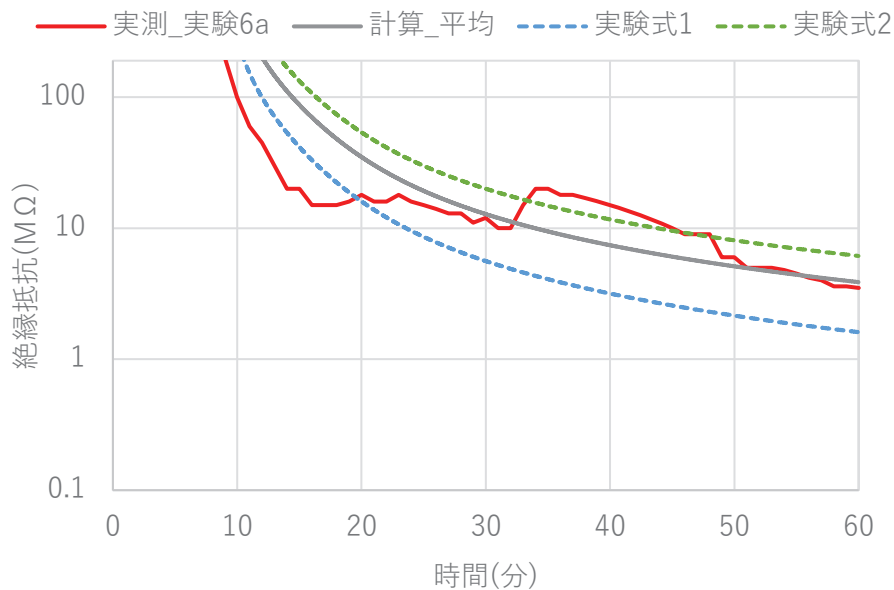


図 8.26 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件⑥：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、露出型熱電対制御)

(8) 計算条件⑧ (電線管試験)

計算条件⑧ (加熱曲線は ISO 曲線、制御用熱電対はプレート熱電対、制御用熱電対と試

料距離は 100mm) における各格子点の温度の計算結果を図 8.27 に、絶縁抵抗の計算値と実測値を図 8.28 に示す。

図 8.27 に示すように各格子点の温度 T_1 から T_6 は、60 分間にわたり加熱曲線よりも低い。銅温度 T_1 からシース温度 T_4 は、シースが完全融解温度に達する 3 分 37 秒まではほぼ同じ温度である。シース及び絶縁体は完全融解温度に達すると空気層温度と同一温度になると設定しているので、シース温度 T_4 と絶縁体温度 T_3 は瞬間的に空気層温度まで上昇している。空気層温度 T_5 は、加熱 8 分頃までは電線管温度 T_6 よりもやや低いが、それ以降は T_6 とほぼ同じ温度となった。銅温度 T_1 とマイカ温度 T_2 は加熱開始からしばらくは電線管温度よりも低いが、12 分以降は電線管温度とほぼ同じ温度となった。 T_1 と T_2 は 60 分間にわたりほぼ同じ温度であり、グラフは重なっている。

図 8.28 に示すように絶縁抵抗の計算値は、時間とともに低下した。1 分毎に測定した実測値と比較すると、傾向は一致しているが、全般的に実測値の方が絶縁抵抗は高かった。これは、8.3.2(4)節で述べた通り、プレート熱電対を用いた実験では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの放射熱の一部を遮るため、露出型熱電対制御よりも試験体温度が低くなり、結果として絶縁抵抗の低下も小さくなるためである。

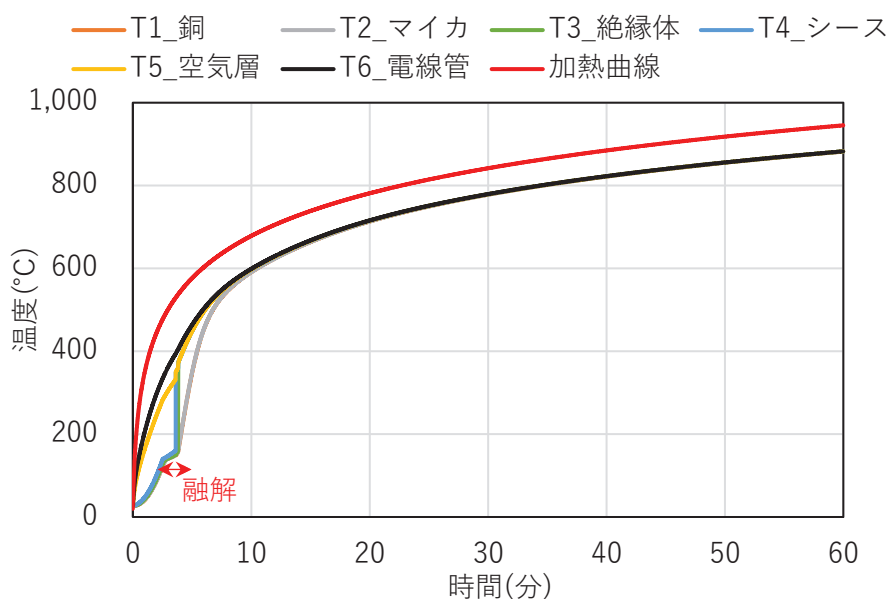


図 8.27 試験体温度の計算値

(計算条件⑧：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、プレート熱電対制御)

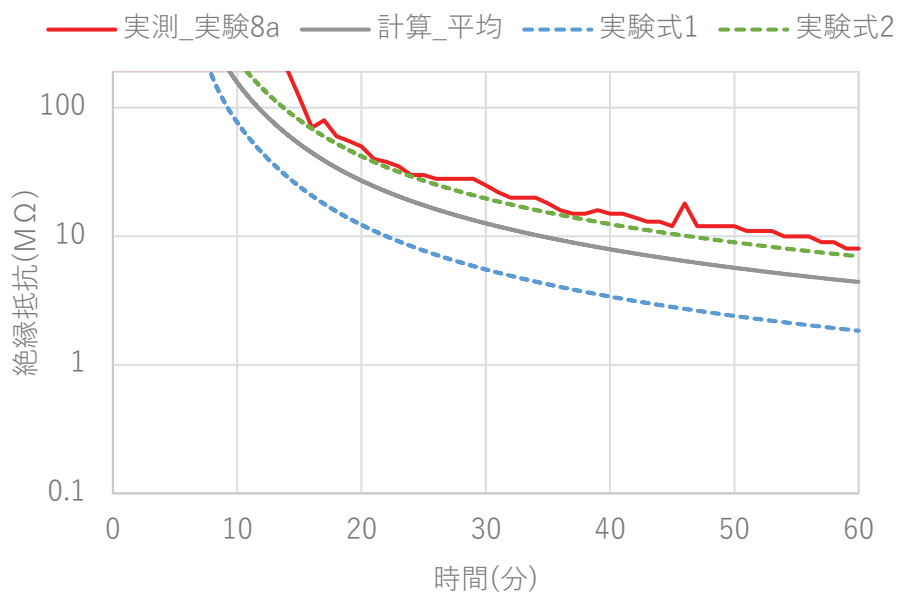


図 8.28 絶縁抵抗の計算値と実測値

(計算条件⑧：電線管試験、ISO 曲線、熱電対と試料の距離 100mm、プレート熱電対制御)

(9) モデルの精度検証結果のまとめ

作成したモデルの精度を把握するため、計算条件①から⑧までの各条件における 30 分時点と 60 分時点の絶縁抵抗の計算値と実測値を比較する。絶縁抵抗の計算値は、実験式 1 と実験式 2 で算出した絶縁抵抗の平均値とする。露出試験の比較を図 8.29 に、電線管試験の比較を図 8.30 に示す。エラーバーのマイナス側は実験式 1 の計算値、プラス側は実験式 2 の計算値である。図 8.29 より、露出試験では、プレート熱電対制御の実験 7a を除いては、絶縁抵抗の計算値はいずれも実測値と近い値が得られた。実験 7a では、絶縁抵抗の実測値は計算値よりもかなり高くなっているが、その理由は前述した通り、実験においてはプレート熱電対がケーブルへの放射熱を遮ったためである。実験 7a を除くと 30 分時は計算値の方がやや低く、60 分時は計算値の方がやや高い傾向である。

図 8.30 より、電線管試験でも、露出試験と同様、プレート熱電対制御の実験 8a を除いては、絶縁抵抗の計算値はいずれも実測値と比較的近い値が得られた。

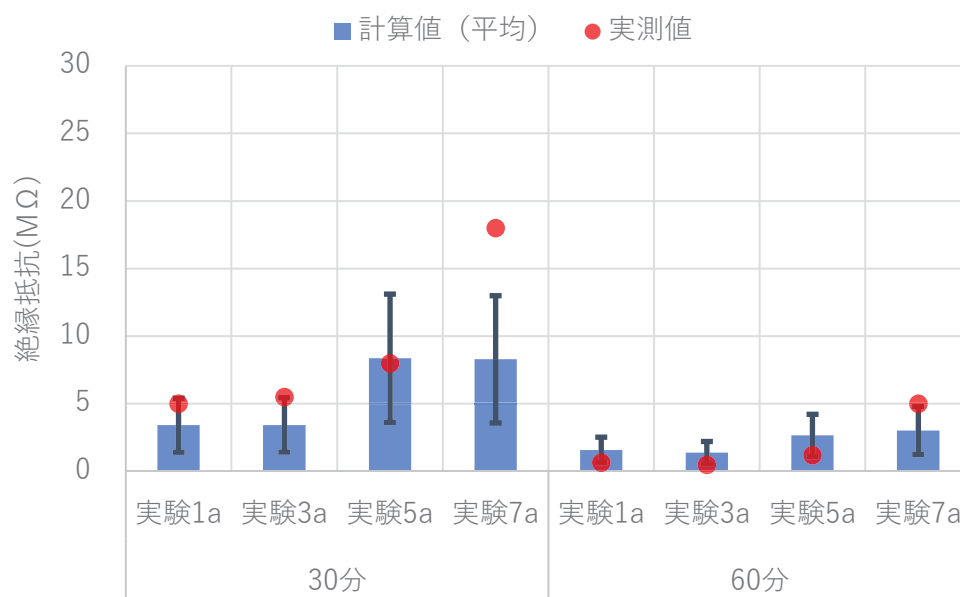


図 8.29 露出試験の 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗の実測値と計算値の比較

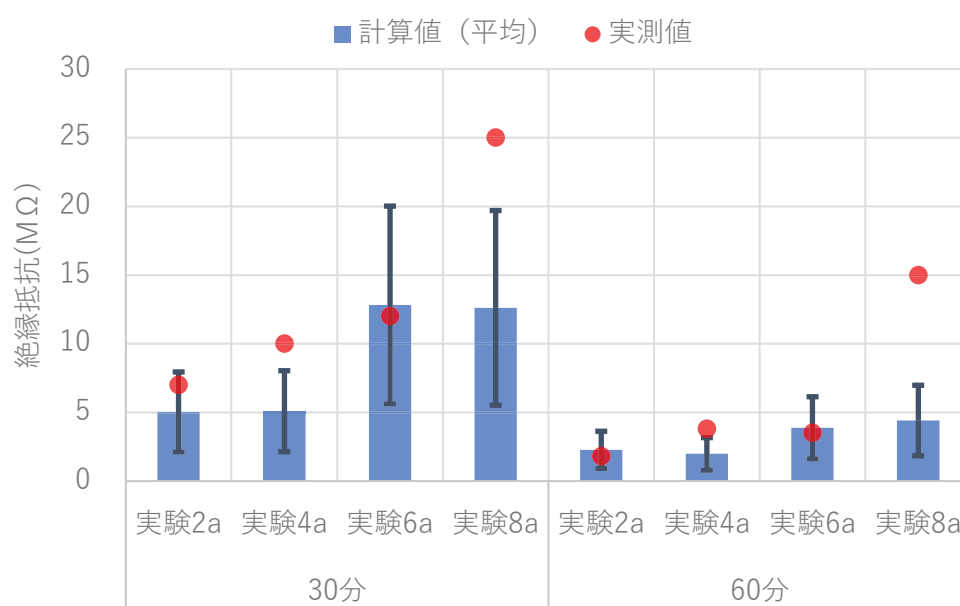


図 8.30 電線管試験の 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗の実測値と計算値の比較

図 8.31 に示すように 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗の計算値（実験式 1 と 2 の平均）を横軸に、実測値を縦軸にプロットし、最小二乗法により、回帰直線の傾きと決定係数を算出すると、露出試験の傾きは 1.4887、決定係数は 0.8612、電線管試験の傾きは 1.5459、決定係数は 0.8523 である。いずれも決定係数は 0.8 以上であり絶縁抵抗の計算値と実測値の相関性は良好であるものの、いずれも傾きは 1 よりもかなり大きい。

ここで、プレート熱電対制御の条件である実験 7a と 8a の絶縁抵抗の実測値は、過剰に

高くなっているため除外すると、図 8.32 に示すように、露出試験の傾きは 1.0271、決定係数は 0.9123、電線管試験の傾きは 1.1059、決定係数は 0.9082 である。いずれも決定係数が 0.9 以上であることから絶縁抵抗の計算値と実測値の相関性は非常に良好であるといえる。露出試験では、回帰直線の傾きは 1 に非常に近く、本章で作成したモデルの精度は良好である。また、電線管試験では回帰直線の傾きが 1 よりもやや大きいため、絶縁抵抗の計算値は実測値よりもやや小さくなることから、耐火電線の製品開発時には、絶縁抵抗は安全側に計算されることを考慮した上で、絶縁抵抗の予測に活用できると考えられる。

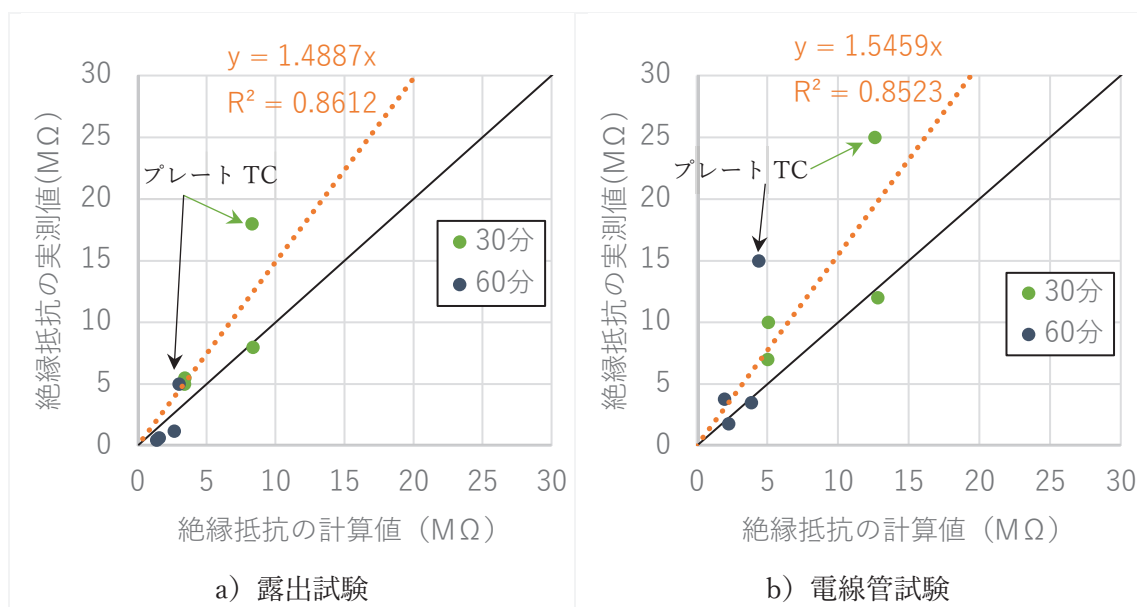


図 8.31 絶縁抵抗の実測値と計算値の比較
(30 分時と 60 分時の全条件のデータ)

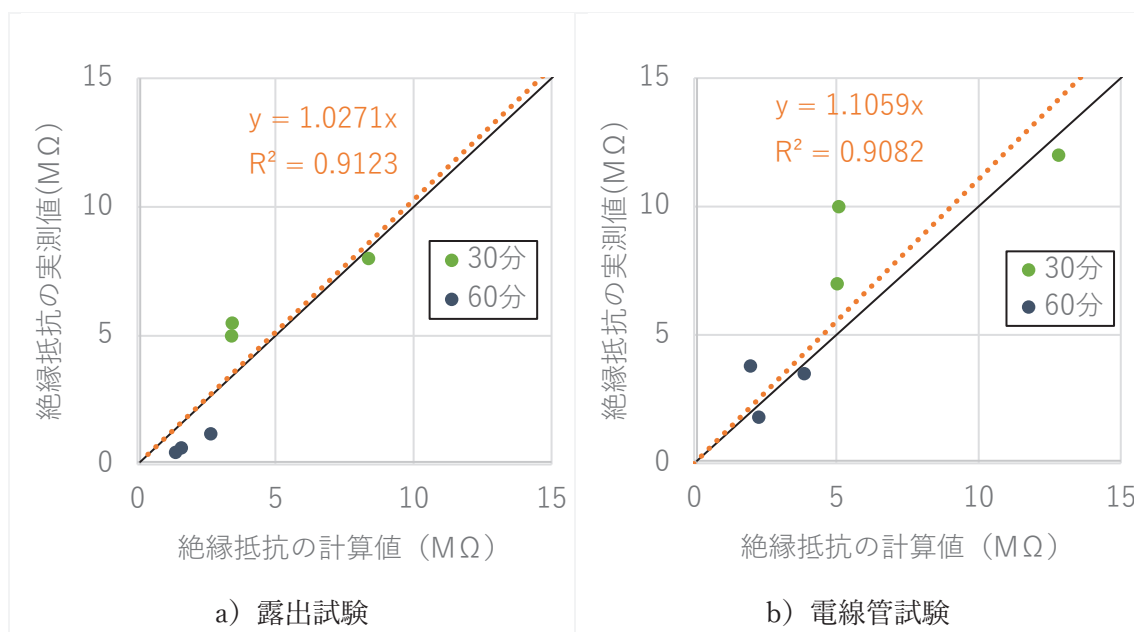


図 8.32 絶縁抵抗の実測値と計算値の比較

(プレート熱電対の条件 (計算条件⑦と⑧) を除外した 30 分時と 60 分時のデータ)

(10) 試験方法による影響の考察

1) 露出試験

露出試験における試験条件毎のマイカ温度の計算値を図 8.33 に、絶縁抵抗の計算値を図 8.34 に示す。絶縁抵抗の計算値は、実験式 1 と実験式 2 で算出した絶縁抵抗の平均値である。図 8.33 に示すように、シースの着火時間は実験 7a (ISO 曲線、プレート熱電対制御、制御用熱電対と試料距離 100mm) の条件が 1 分 21 秒と最も早く、次いで加熱曲線のみを ISO 曲線とした実験 3a の条件が 3 分 4 秒、すべて告示の条件である実験 1a の条件が 4 分 6 秒、実験 5a (ISO 曲線、露出型熱電対制御、制御用熱電対と試料距離 100mm) の条件が 4 分 20 秒である。マイカ温度が急上昇する時間には着火時間の差が現れている。シースと絶縁体の燃焼時間はいずれの条件でも 5 分 23 秒間としたため、早く着火した条件ほど早い時間に燃え尽きている。実験 1a (告示曲線) の条件と実験 3a (ISO 曲線) の条件の計算値は、傾向は類似しているが、シースと絶縁体の燃え尽き後から 30 分頃までは実験 1a の条件の方がやや高く、30 分以降は実験 3a の条件の方がやや高い。これは実線で示した告示曲線と ISO 曲線も同様に 30 分で温度が逆転しており、加熱曲線の関係を反映した結果だといえる。制御用熱電対と試料距離が 100mm の実験 5a と実験 7a の条件は、制御用熱電対と試料距離が 10mm の条件にくらべてシースと絶縁体燃え尽き後の温度が低く、30 分時点で約 90°C 低い。

図 8.34 より、加熱条件で絶縁抵抗の計算値を比較すると、加熱曲線だけが異なる実験 1a (告示曲線) と実験 3a (ISO 曲線) は、全体的に絶縁抵抗の差は小さい。制御用熱電対の種類だけが異なる実験 5a (露出型熱電対) と実験 7a (プレート熱電対) は、プレート熱電

対制御の方が消火後の絶縁抵抗の回復が早い、20 分以降の差は小さい。一方、制御用熱電対と試料との距離だけが異なる実験 3a (10mm) と実験 5a (100mm) では差が大きく、60 分時点では実験 5a は実験 3a の 1.9 倍の絶縁抵抗である。以上より、3 つの加熱条件のうち、制御用熱電対と試料との距離が、絶縁抵抗に与える影響として最も大きく、次いで制御用熱電対の種類、加熱曲線の順である。

マイカ温度が高いほど絶縁抵抗は低下するので、図 8.34 に示す絶縁抵抗の計算値は、図 8.33 の縦軸を反転させたような関係となっている。図 8.34 に示すように実験 1a と実験 3a の絶縁抵抗の計算値は、30 分時点ではほぼ同じで、60 分時点では実験 1a の方がやや高いが、図 8.35 に示す実測値も同様の傾向であり、30 分時点ではほぼ同じで、60 分時点では実験 1a の方がやや高い。また、図 8.34 に示すように 30 分時点、60 分時点のいずれも実験 5a の計算値は、実験 1a と実験 3a の計算値よりも高いが、図 8.35 に示す実測値でも同様の傾向である。図 8.34 に示すように実験 5a と実験 7a の絶縁抵抗の計算値は、30 分時点ではほぼ同じで、60 分時点では実験 7a の方がやや高いが、図 8.35 に示す実測値では、実験 7a の方が大きい。これは、8.3.2(4)で述べた通り、プレート熱電対を用いた実験 7a の実験では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの放射熱の一部を遮るため、露出型熱電対制御よりも試験体温度が低くなり、結果として絶縁抵抗の低下も小さくなるためである。

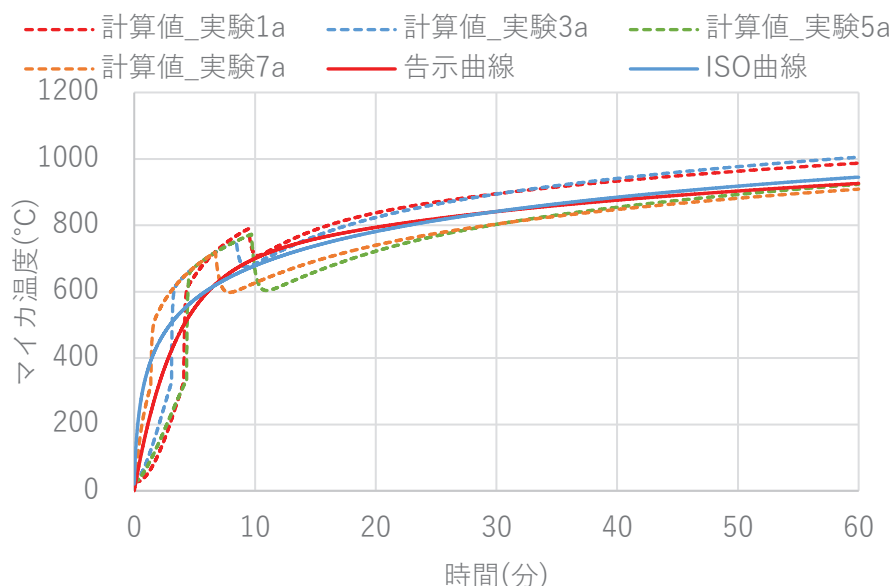


図 8.33 露出試験におけるマイカ温度の試験方法による変動（計算値）

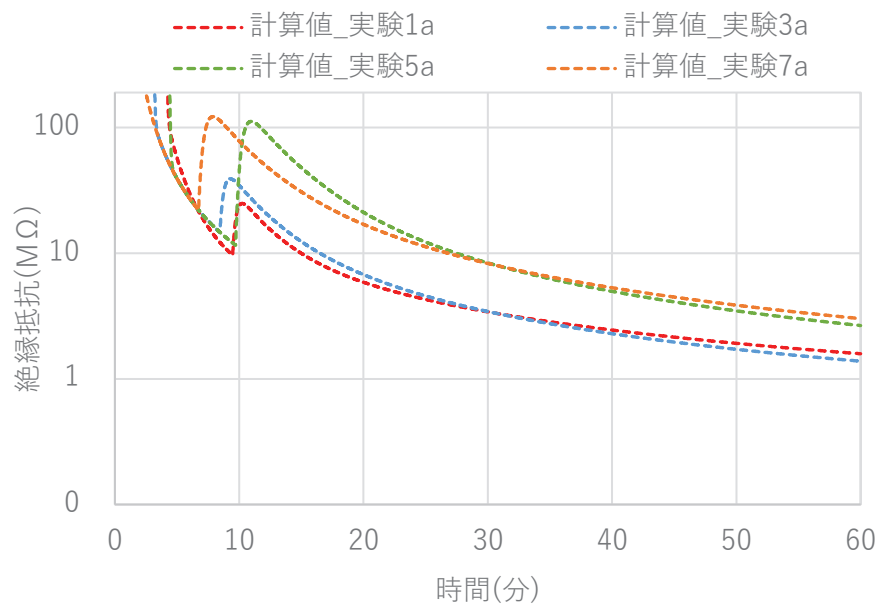


図 8.34 露出試験における絶縁抵抗の試験方法による変動（計算値）

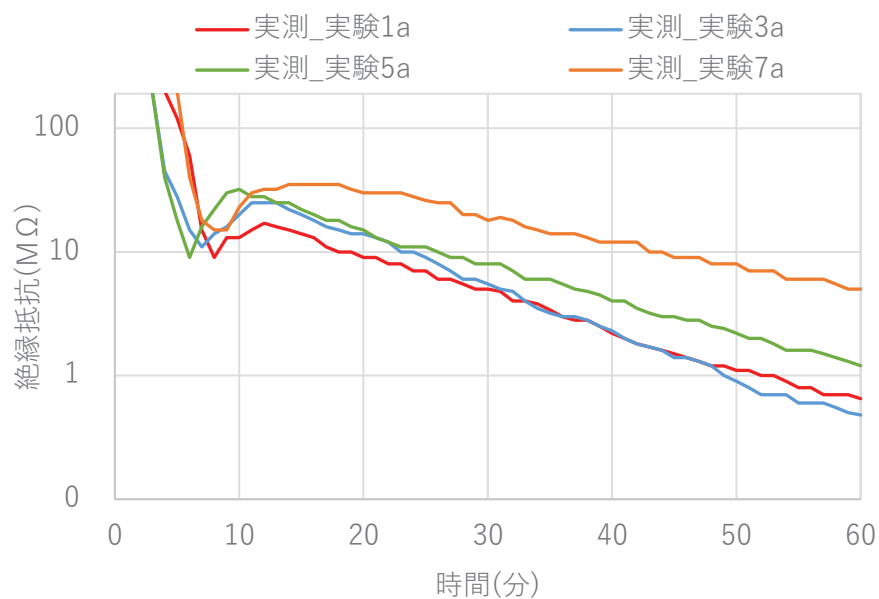


図 8.35 露出試験における絶縁抵抗の実測値の比較

2) 電線管試験

電線管試験における試験条件毎のマイカ温度の計算値を図 8.36 に、絶縁抵抗の計算値を図 8.37 に示す。絶縁抵抗の計算値は、実験式 1 と実験式 2 で算出した絶縁抵抗の平均値である。図 8.36 に示すように、いずれの条件も加熱曲線よりも遅れてマイカ温度が上昇している。実験 2a（告示曲線）の条件と実験 4a（ISO 曲線）の条件の計算値は、傾向は類似しているが、加熱開始から 9 分までと 30 分以降は実験 4a の条件の方がマイカ温度はやや高

く、実線で示した告示曲線と ISO 曲線の関係を反映した結果だといえる。制御用熱電対と試料距離が 100mm の実験 6a と実験 8a の条件は、制御用熱電対と試料距離が 10mm の条件にくらべてマイカ温度が低く、30 分時点で約 90℃低い。

図 8.37 より、加熱条件で絶縁抵抗の計算値を比較すると、加熱曲線だけが異なる実験 2a（告示曲線）と実験 4a（ISO 曲線）は、全体的に絶縁抵抗の差は小さい。また、制御用熱電対の種類だけが異なる実験 6a（露出型熱電対）と実験 8a（プレート熱電対）は、絶縁抵抗が低下し始める時間がプレート熱電対制御の方が早い、20 分以降の差は小さい。一方、制御用熱電対との試料距離だけが異なる実験 4a（10mm）と実験 6a（100mm）では差が大きく、60 分時点では実験 6a は実験 4a の 2.0 倍の絶縁抵抗である。以上より、3 つの加熱条件のうち、制御用熱電対と試料の距離が、絶縁抵抗に与える影響として最も大きく、次いで制御用熱電対の種類、加熱曲線の順である。

マイカ温度が高いほど絶縁抵抗は低下するので、図 8.37 に示すように、制御用熱電対と試料距離が 10mm である実験 2a と実験 4a の条件の絶縁抵抗の計算値は、制御用熱電対と試料距離が 100mm である実験 6a と実験 8a の条件よりも小さい。図 8.38 に示す絶縁抵抗の実測値でも加熱開始から 27 分までは同様の傾向がみられ、実験 2a と実験 4a の方が実験 6a と実験 8a よりも絶縁抵抗は低い。実験 8a の絶縁抵抗の実測値が実験 6a よりも高いのは、8.3.2(8)で述べた通り、プレート熱電対を用いた実験 7a の実験では、100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの熱エネルギーの一部をさえぎるため、露出型熱電対制御よりも試験体温度が低くなり、結果として絶縁抵抗の低下も小さくなるためである。図 8.38 に示す絶縁抵抗の実測値は、実験 4a は 28 分以降に、6a は 33 分以降に絶縁抵抗が一旦増加しており、図 8.37 の絶縁抵抗の計算値とは傾向が異なる。作成したモデルでは、絶縁抵抗は単純にマイカの温度に依存するとしているが、電線管試験ではマイカ温度以外にも絶縁抵抗に影響を与える要因があることが示唆される。電線管試験では、加熱中に電線管内で樹脂が融解することで、3 本の線心がそれぞれ細くなり、電線管内で線心の移動が起こりえる。これにより、3 本の線心の位置関係は加熱中に変化するため、30 分前後に絶縁抵抗が一旦増加するといった現象が起きたのではないかと推測される。

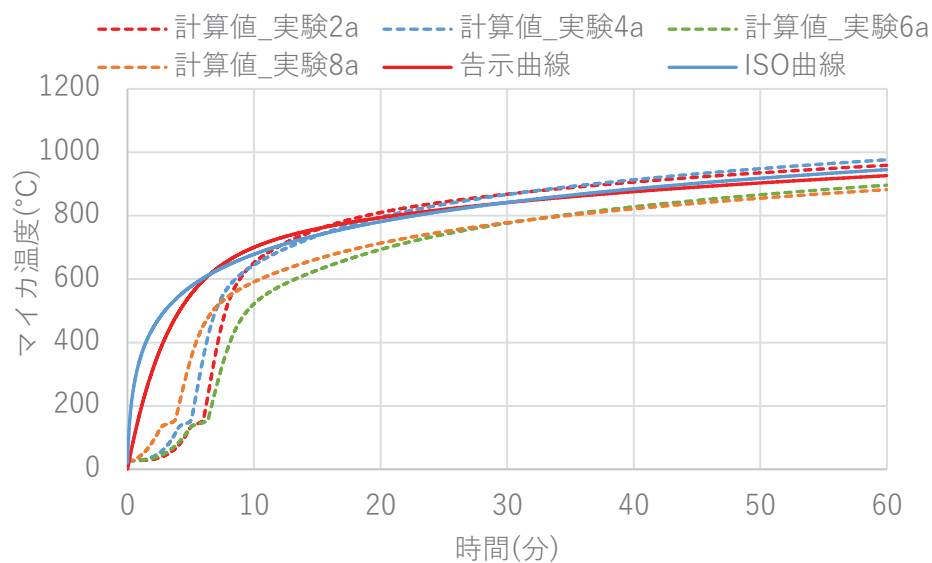


図 8.36 電線管試験におけるマイカ温度の計算値の比較

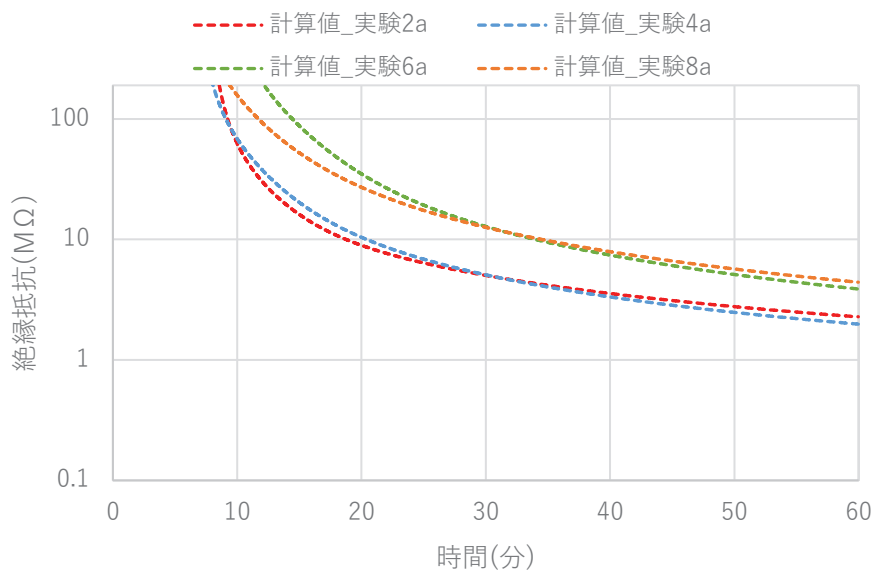


図 8.37 電線管試験における絶縁抵抗の計算値の比較

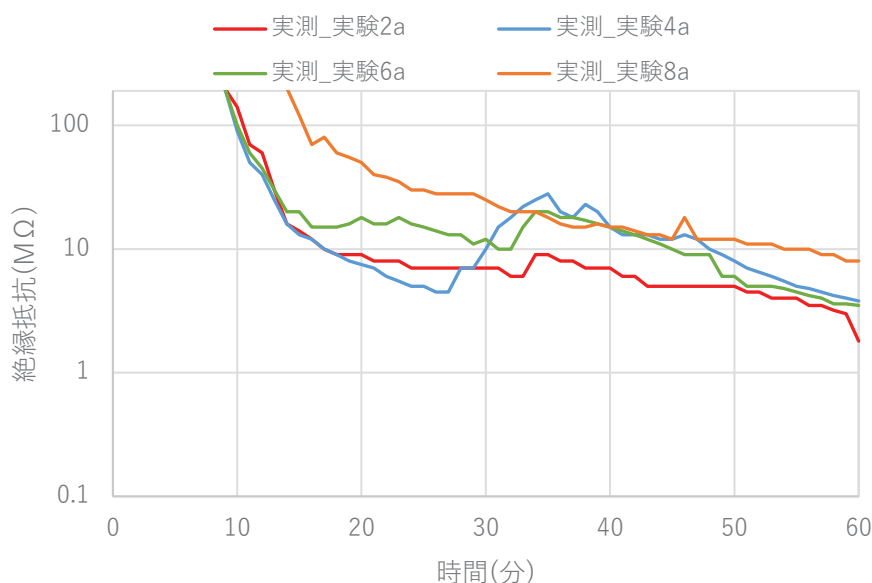


図 8.38 電線管試験における絶縁抵抗の実測値の比較

8. 4 パラメータによる影響の定量化

8. 4. 1 計算条件

本章で作成したモデルを用いれば、実際に実験しなければ評価できない項目を計算により定量的に予測できると考えられる。そこで、電線の導体サイズとマイカテープの厚さを変更すると、絶縁抵抗がどのように変化するかを調べる。

加熱条件は、すべて告示の条件（加熱曲線は告示曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対と試料距離は 10mm）とする。8.3.2 節の計算では、1 心あたりの導体サイズが 2mm^2 （3 心分を合算して 6mm^2 相当）で、マイカテープの厚さが 0.3mm として計算しているが、表 8.4 の①に示すように、電線の導体サイズを 2mm^2 、 38mm^2 、 100mm^2 の 3 パターンで計算し、絶縁抵抗の比較を行う。この際、マイカテープの厚さは 0.3mm とする。また、表 8.4 の②に示すように、マイカテープの厚さを 0.15mm 、 0.3mm 、 0.6mm の 3 パターンで計算し、絶縁抵抗の比較を行う。この際、電線の導体サイズは 2mm^2 とする。試験体の寸法は表 8.5 に示す値を用いた。なお、マイカテープの厚さが 0.15mm の場合のみ、計算時間刻み Δt が 0.2 秒では数値計算が発散するため、計算時間刻み Δt を 0.05 秒とした。

表 8.4 変更する項目の一覧

項目	パラメータ
①電線の導体サイズ（1 心あたり）	2mm^2 、 38mm^2 、 100mm^2
②マイカテープの厚さ	0.15mm 、 0.3mm 、 0.6mm

表 8.5 試験体の寸法

導体サイズ (1 心あたり)	2mm ²	38mm ²	100mm ²
導体半径 (mm)	1.38	6.02	9.77
絶縁体の厚さ (mm)	0.8	1.2	2.0
シースの厚さ (mm)	1.5	1.7	2.2
空気層の厚さ (mm)	7.12	5.07	9.53
電線管の厚さ (mm)	1.6	1.6	1.6

8. 4. 2 計算結果

1) 導体サイズの影響

①露出試験

露出試験における導体サイズ毎のマイカ温度を図 8.39 に、絶縁抵抗を図 8.40 に示す。図 8.39 に示すようにマイカ温度は導体サイズの小さい 2mm² が最も短時間で着火温度に達し、温度が急上昇している。これは 2mm² がシース、絶縁体、導体ともに最も薄く、熱伝達が容易なためである。着火から燃え尽きるまでの燃焼時間は、2mm² が 5 分 23 秒と最も短く、38mm² が 6 分 49 秒、100mm² が 8 分 58 秒である。これは導体サイズが大きいほどシースと絶縁体の体積が大きくなり、燃焼時間が長くなるためである。シースと絶縁体燃焼後は、マイカ温度はいずれもほぼ同じ温度となった。

図 8.40 に示すように絶縁抵抗は導体サイズの小さい 2mm² では、シースと絶縁体の着火にともない、最も短時間で絶縁抵抗が低下するが、9 分 29 秒にシースと絶縁体が燃え尽きると絶縁抵抗は一旦上昇し、その後、なだらかに低下する。100mm² では、シースの着火時間が 15 分 15 秒と遅いので、絶縁抵抗が低下し始める時間も遅い。絶縁抵抗の値は、導体サイズが大きくなるほど小さくなるが、これは、導体サイズが大きいとマイカの表面積が大きくなり、式 (8.33) で示したように絶縁抵抗が小さくなるためである。

露出試験における加熱前、30 分時及び 60 分時の絶縁抵抗と導体サイズの関係を図 8.41 に示す。導体サイズが大きいほど絶縁抵抗は小さくなる。絶縁抵抗と導体サイズを両対数グラフでプロットすると加熱前、30 分時及び 60 分時のいずれもほぼ直線の関係であり、それぞれ絶縁抵抗は導体サイズの約 0.4 乗に反比例することがわかった。導体サイズを 2mm² から 100mm² に変更すると絶縁抵抗は、加熱開始前では 0.17 倍、30 分時では 0.21 倍、60 分時では 0.20 倍であった。

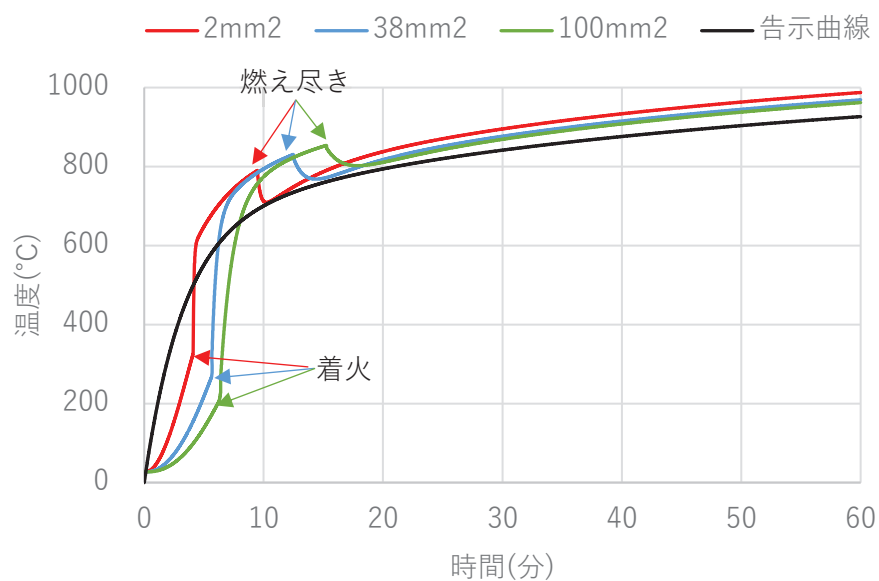


図 8.39 露出試験における導体サイズによるマイカ温度の違い

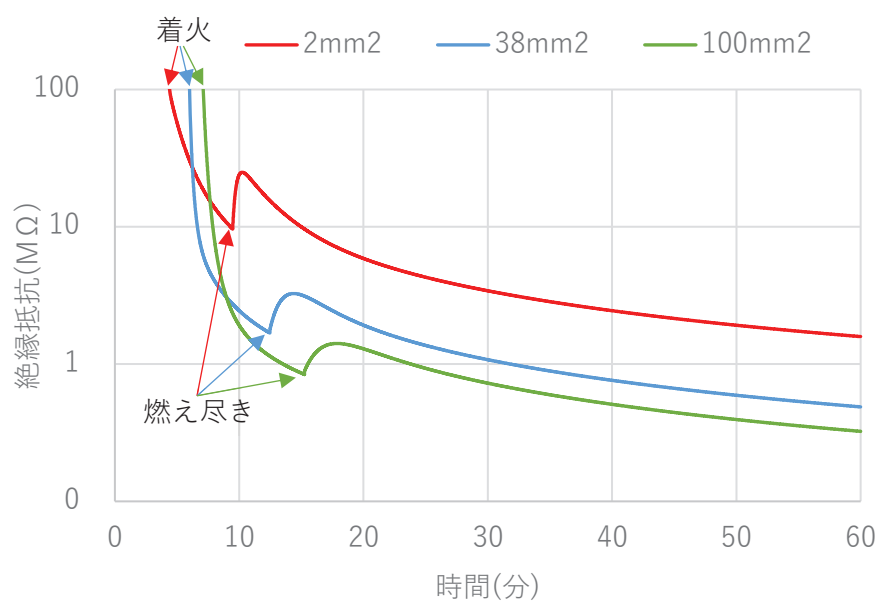


図 8.40 露出試験における導体サイズによる絶縁抵抗の違い

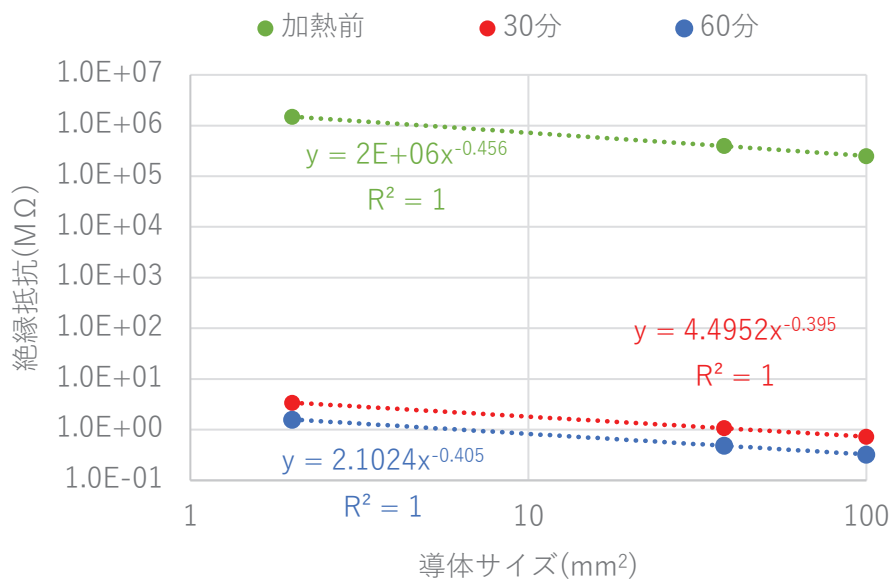


図 8.41 露出試験における絶縁抵抗と導体サイズの関係

②電線管試験

電線管試験における導体サイズ毎のマイカ温度を図 8.42 に、絶縁抵抗を図 8.43 に示す。図 8.42 に示すようにマイカ温度は導体サイズの小さい 2mm² が最も短時間で温度上昇しているが、これは 2mm² が空気層、シース、絶縁体、導体ともに薄く、熱伝達が容易なためである。100mm² は最も温度上昇が遅いが、30 分以降は 2mm² とほぼ同じ温度となった。38mm² は 2mm² と 100mm² の中間的な温度であり、25 分以降は 2mm² とほぼ同じ温度となった。

図 8.43 に示すように絶縁抵抗は導体サイズの小さい 2mm² では、最も早く絶縁抵抗が低下し始めた。これは図 8.42 で示したように 2mm² が最も早くマイカ温度が上昇したためである。100mm² は絶縁抵抗の低下が遅いが、20 分に 38mm² と逆転し、最も絶縁抵抗は小さくなった。

加熱前、30 分時及び 60 分時の絶縁抵抗と導体サイズを図 8.44 に示す。露出試験と同様、導体サイズが大きいほど絶縁抵抗は小さくなる。絶縁抵抗と導体サイズは両対数グラフでプロットすると、加熱前、30 分及び 60 分時のいずれもほぼ直線関係であり、それぞれ絶縁抵抗は導体サイズの約 0.4 乗に反比例することがわかった。導体サイズを 2mm² から 100mm² に変更すると絶縁抵抗は、加熱開始前では 0.17 倍、30 分時では 0.19 倍、60 分時では 0.18 倍であった。

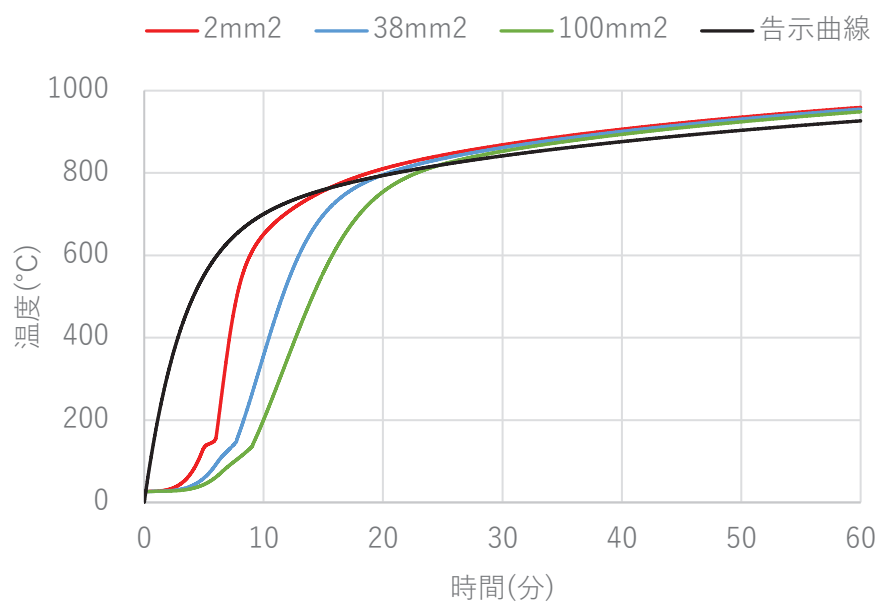


図 8.42 電線管試験における導体サイズによるマイカ温度の違い

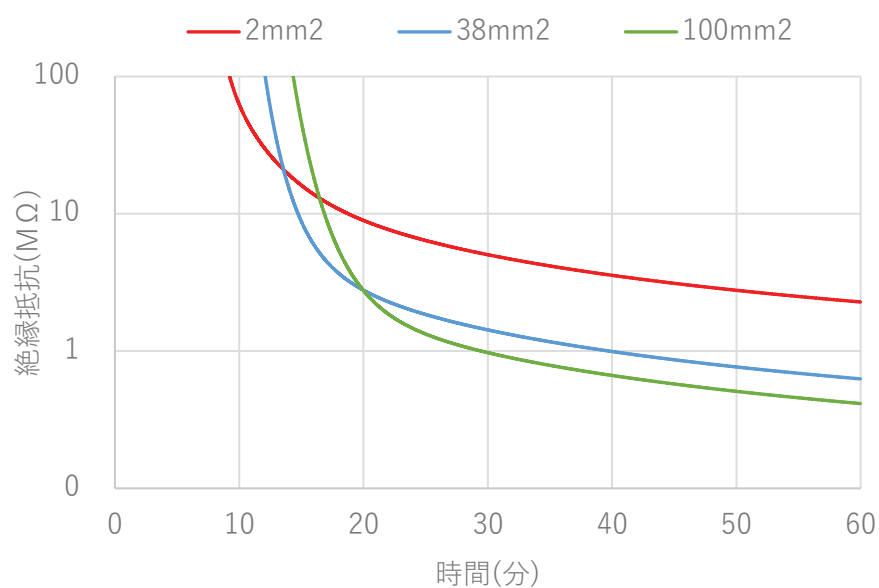


図 8.43 電線管試験における導体サイズによる絶縁抵抗の違い

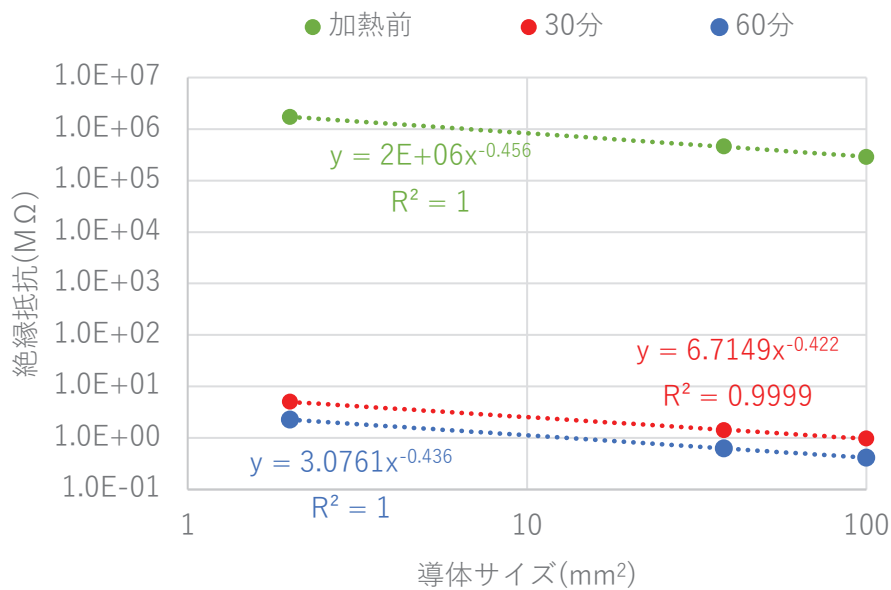


図 8.44 電線管試験における絶縁抵抗と導体サイズの関係

2) マイカ厚さの影響

①露出試験

露出試験におけるマイカ厚さ毎のマイカ温度を図 8.45 に、絶縁抵抗を図 8.46 に示す。図 8.45 に示すようにマイカ温度はいずれもほとんど差はなく、グラフはほぼ重なっている。マイカは導体や絶縁体等に比べて薄いので、マイカ厚さによるマイカ温度への影響は小さい。

図 8.46 に示すように絶縁抵抗はマイカ厚さの小さい 0.15mm が最も絶縁抵抗が小さく、0.3mm、0.6mm と厚くなるほど高くなった。ここで、露出試験における 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗とマイカ厚さの関係を図 8.47 に示す。図で示すように絶縁抵抗とマイカ厚さをプロットすると、30 分時と 60 分時のいずれもほぼ直線の関係であった。原点を通る回帰直線は、30 分時では傾きが 10.242、60 分時では傾きが 4.748 であり、決定係数はいずれも 0.99 であった。マイカ厚さを 0.15mm から 0.6mm に変更すると、絶縁抵抗は 30 分時と 60 分時のいずれも 3.2 倍であった。

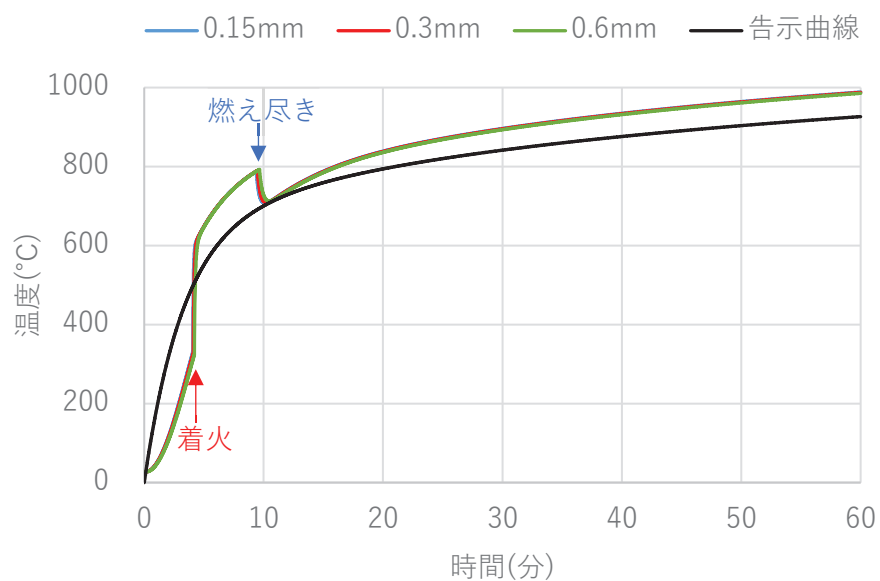


図 8.45 露出試験におけるマイカ厚さによるマイカ温度の違い

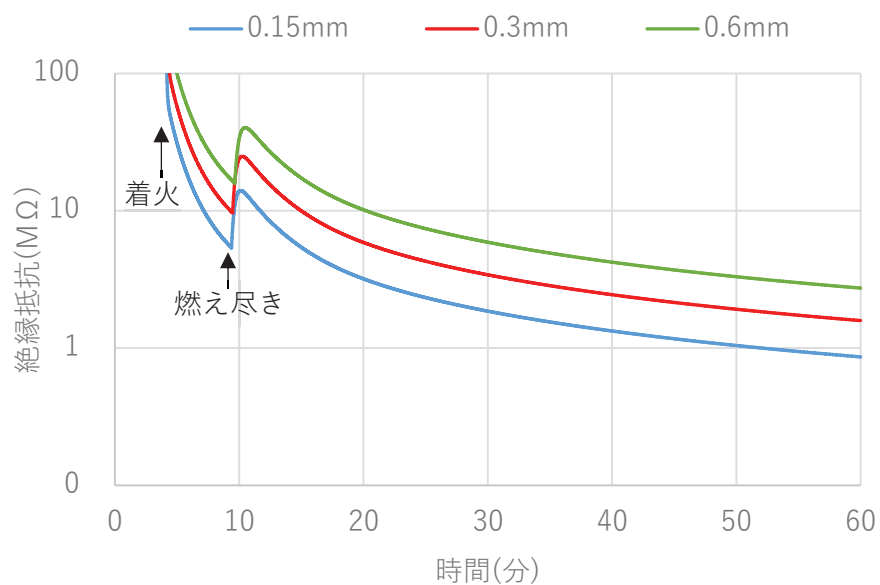


図 8.46 露出試験におけるマイカ厚さによる絶縁抵抗の違い

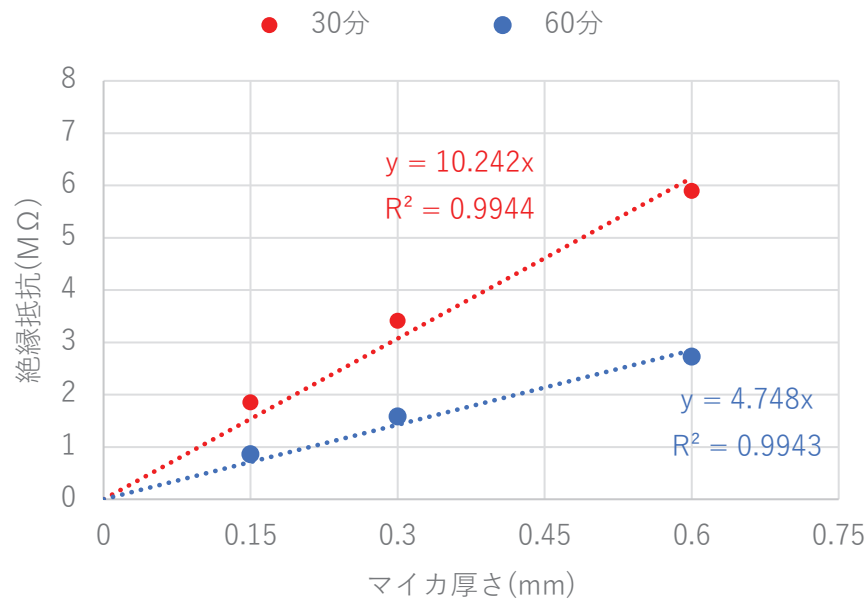


図 8.47 露出試験における絶縁抵抗とマイカ厚さの関係

②電線管試験

電線管試験におけるマイカ厚さ毎のマイカ温度を図 8.48 に、絶縁抵抗を図 8.49 に示す。図 8.48 に示すようにマイカ温度はいずれもほとんど差はなく、グラフはほぼ重なっている。マイカは導体や絶縁体等に比べて薄いので、マイカ厚さによるマイカ温度への影響は小さい。

図 8.49 に示すように絶縁抵抗はマイカ厚さの小さい 0.15mm が最も絶縁抵抗が小さく、0.3mm、0.6mm と厚くなるほど高くなった。ここで、電線管試験における 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗とマイカ厚さの関係を図 8.47 に示す。図で示すように絶縁抵抗とマイカ厚さをプロットすると、30 分時と 60 分時のいずれもほぼ直線の関係であった。原点を通る回帰直線は、30 分時では傾きが 14.928、60 分時では傾きが 6.7504 であり、決定係数はいずれも 0.99 であった。マイカ厚さを 0.15mm から 0.6mm に変更すると、絶縁抵抗は 30 分時と 60 分時のいずれも 3.1 倍であった。

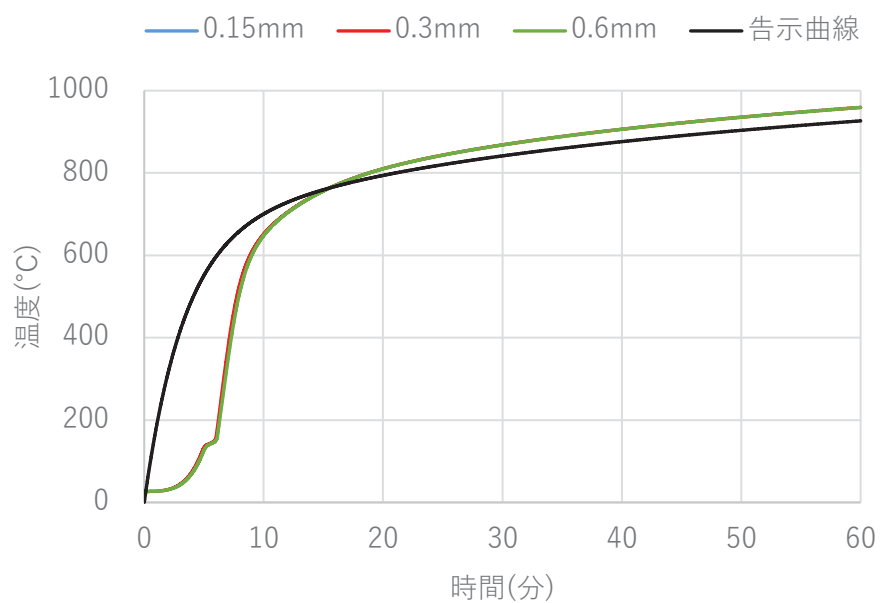


図 8.48 電線管試験におけるマイカ厚さによるマイカ温度の違い

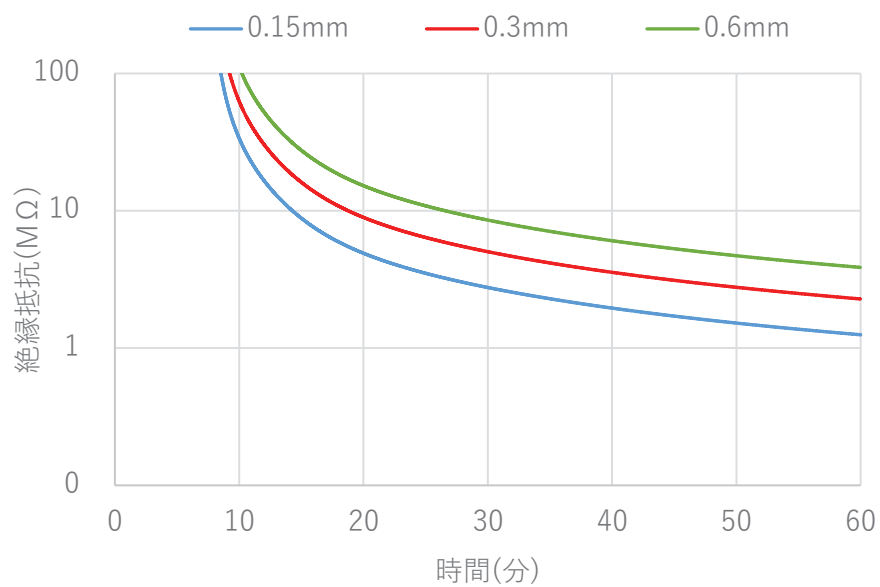


図 8.49 電線管試験におけるマイカ厚さによる絶縁抵抗の違い

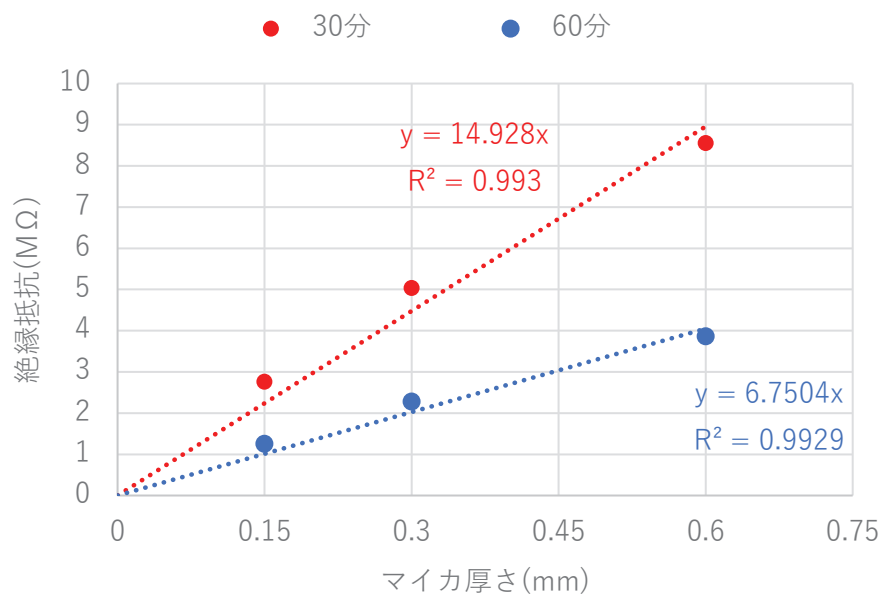


図 8.50 電線管試験における絶縁抵抗とマイカ厚さの関係

8. 5 結論

本章では、耐火電線の熱伝達を円筒座標系の一次元熱伝導方程式を用いて計算した。露出試験では、樹脂は着火温度に達すると着火し、一定時間燃焼後、燃え尽きるモデルとした。電線管試験では、樹脂は完全融解温度に達すると速やかに消失して空気層になるモデルとした。それらのモデルからマイカテープの温度を計算し、耐火電線の絶縁抵抗を予測する手法を提案した。

第7章の実験結果と比較してモデルの精度検証を行うとともに、導体寸法およびマイカテープ厚さを変更する場合の影響を計算によって定量化し、以下の知見を得た。

- 1) 露出試験では、絶縁抵抗の計算値の精度は非常に良好であった。
- 2) 電線管試験では、絶縁抵抗の計算値の精度は良好なもの、計算値は実測値よりもやや小さくなった。
- 3) 電線の導体サイズが大きくなると絶縁抵抗は約0.4乗に反比例して低下し、2mm²から100mm²に変更すると30分時と60分時の絶縁抵抗は、露出試験ではそれぞれ0.21倍、0.20倍、電線管試験ではそれぞれ0.19倍、0.18倍になった。
- 4) マイカが厚くなると絶縁抵抗は直線的に増加し、0.15mmから0.6mmに変更すると30分時と60分時の絶縁抵抗は、露出試験では3.2倍、電線管試験では3.1倍になった。

引用・参考文献

- 1) 佐藤嘉洋、示差走査熱量分析（DSC）について、愛産研ニュース、No.115、p.5、2011年
- 2) 総務省消防庁、ごみ固形化燃料等関係施設の安全対策調査検討報告書 参考資料 7、2003年
- 3) 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)
- 4) 楯功、ルツボ降下法によるフッ素金雲母の結晶育成条件と電気絶縁抵抗の温度依存性、工業科学雑誌 71 巻 7 号、pp.976-980、1968 年
- 5) 日本機械学会編、伝熱ハンドブック、1993 年、丸善
- 6) 日本機械学会、機械工学便覧（新版）、1987 年、丸善

第9章 結論

本研究では、消防庁告示に規定される耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性の解明と、試験条件を ISO 834-1 に整合化すると仮定した場合の影響を明らかにすることを目的に、研究を実施した。本研究により、消防庁告示による小型加熱炉での試験条件を ISO 834-1 に整合化すると試験体への加熱力が弱くなることが分かった。その主な理由は、制御用熱電対と試験体との距離により、炉内温度分布が変わるためである。また、耐火電線の絶縁抵抗は、被覆樹脂が燃えているときに大きく低下し、その後回復することを実験的に明らかにした。さらに、炉内及び試験体の熱伝達をモデル化することで、加熱中の耐火電線の絶縁抵抗が予測できるようになった。試験法の電氣的側面としては、告示法の絶縁抵抗測定と、IEC の回路機能保持を組み合わせる方法が適切であることを示唆した。

各章で得られた知見を、以下に結論としてまとめる。

第2章 消防用耐火電線の耐火試験法

第2章では、我が国の耐火電線の耐火試験法の変遷をまとめるとともに諸外国の耐火試験法との比較を行い、国際整合化すると仮定した場合の告示の耐火試験法の検討すべき事項を抽出した。その結果を以下に記す。

- 1) 加熱炉は UL 2196 や ISO 834-1 に規定されるような大型の炉へ変更する場合の影響を検討する必要がある。ISO 834-1 は世界的に普及しており、国内の建築分野で長年の実績がある上、建築分野と整合化されれば、建材の耐火試験との比較も可能になり、利便性が高い。
- 2) 加熱曲線は、2.2.1 節で示したように、告示の加熱曲線である JIS A 1304 標準加熱曲線 B は将来的に ISO 834-1 の加熱曲線（JIS A 1304 標準加熱曲線 A）に変更される可能性があることが JIS A 1304 の解説に記されているため、ISO 834-1 の加熱曲線へ変更する場合の影響を検討する必要がある。
- 3) 制御用熱電対の形状は、炉内の加熱に影響を与える可能性があるため、告示の加熱炉で使用されている露出型熱電対から ISO 834-1 で規定されているプレート熱電対へ変更する場合の影響を検討する必要がある。
- 4) 制御用熱電対と試験体の距離は、2.3.2 節で示したように、試験体である電線の被覆樹脂が燃焼した場合に制御用熱電対へ影響を与える可能性があるため、制御用熱電対と試験体の距離が 100mm の場合で検討する必要がある。
- 5) 耐火電線の加熱時間は、30 分の耐火性能では不十分になりつつあり、2.2.2 (5) 項で示したように 1 時間の耐火試験に対応した試験法が業界規格として制定され、自主的な運用が始まっている。IEC 60331、UL 2196、ISO 834-1 を参考に、加熱時間は 1 時間以上にも対応できることが望ましい。

- 6) 絶縁性評価方法は、告示では加熱中のケーブルの線間短絡と断線は検知できず、十分な測定法ではないため、IEC 60331 と UL 2196 のような加熱中のケーブルの線間短絡、地絡、断線が検知可能な測定法を検討する必要がある。

第3章 小型加熱炉の炉内温度の測定

第3章では、消防庁告示に規定の耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体を設置せずに加熱を行い、炉内温度特性を実験的に調べた。その際、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体保持面（ケイカル板）の距離を ISO 834-1 の条件に変更し、炉内温度等を比較することで、ISO 834-1 に整合化すると仮定した場合の影響を考察した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 告示の小型加熱炉で、金属シース外径 3.2mm のシース熱電対を用いれば、金属シース外径 6.4mm、素線径 1mm の露出型熱電対とほぼ同等の応答性が得られる。
- 2) 告示の小型加熱炉の装置構成でも、プレート熱電対で炉内温度制御が可能である。ただし、加熱 15 分頃までは、従来の露出型熱電対制御よりも炉内ガス温度は高くなる。
- 3) 加熱曲線のみを ISO 法に整合させた実験の比較（実験 1 と実験 6、実験 2 と実験 5、実験 3 と実験 4）より、加熱開始直後は ISO 曲線の方が試験体保持面表面温度は高いが、6～7 分頃に逆転し、告示曲線の方が高くなる。30 分間の総熱量はいずれも告示曲線の方が高いが、その差は最大でも 4.4%であり影響は小さい。
- 4) 制御用熱電対のみを ISO 法に整合させた実験の比較（実験 2 と実験 3、実験 4 と実験 5）より、加熱初期は一時的にプレート熱電対制御の方が試験体保持面表面温度は高いが、その後は露出型熱電対制御とほぼ同等である。30 分間の総熱量はいずれも露出型熱電対制御の方が低く、その差は最大でも 3.0%と小さい。
- 5) 制御用熱電対と試験体保持面までの距離を ISO 法に整合させた実験の比較（実験 1 と実験 2、実験 5 と実験 6）より、制御用熱電対と試験体保持面までの距離を 100mm にすると試験体保持面表面温度及び熱流は大幅に低下し、30 分時点では約 300℃低い。30 分間の総熱量はいずれも告示法の方が約 2.1 倍大きい。
- 6) 加熱曲線、制御用熱電対の種類、制御用熱電対と試験体保持面までの距離 3 つの試験条件のうち、制御用熱電対と試験体保持面までの距離が、加熱力に与える影響として支配的である。また、告示の小型加熱炉の試験条件を ISO 法に整合させると、現行の告示と比べて試験体保持面への加熱力が大幅に低下する。

第4章 小型加熱炉の炉内温度および風速分布の測定

第4章では、耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体を設置せずに加熱を行い、炉内温度分布と炉内風速分布を測定した。その際、制御用熱電対と試験体保持面との距離の違い等による影響を比較した。また、炉内温度と風速の測定結果を用いて、対流熱流と対流熱伝達率

を求めた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 炉内温度分布には、告示と ISO 834-1 の加熱曲線の違いによる影響は小さいが、制御用熱電対と試験体保持面との距離の違いによる影響は大きい。炉内のバーナ火炎の状況が異なるためである。
- 2) 試験体保持面付近の上下方向の温度分布は、測定した範囲（試験体保持面中央から 135mm 下方まで）では小さい。
- 3) 炉内温度分布は、時間と共に相似的に高温側にシフトし、水平方向の温度分布の傾向は変化しない。
- 4) 炉内の水平方向には温度分布があり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は、バーナ面からの距離が 200mm 付近まではバーナ火炎に覆われて高温であるが、250mm の位置からは大きく低下する。また、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合は、バーナ面からの距離が 50mm から 100mm の位置の温度が最も高く、バーナ面からの距離に従って温度は直線的に低下する。
- 5) 炉内風速は、加熱開始後 10 分以降はほぼ一定であり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は、バーナ面からの距離が 250mm では約 1.8m/s、110mm では約 2.8m/s である。また、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合は、バーナ面からの距離が 340mm では約 1.3m/s、200mm では約 2.0m/s であり、制御用熱電対と試験体保持面との距離が近い方が風速は大きくなる。
- 6) 炉内風速分布は、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm と 100mm のいずれの条件も、バーナに近いほど（試験体保持面から遠ざかるほど）風速は大きくなる。
- 7) 炉内風速から対流熱伝達率を推算すると、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 10mm の場合は $16.5\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ 、100mm の場合は $13.3\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ と見積られる。

第 5 章 数値解析による炉内温度と熱流の予測

第 5 章では、試験体未設置の場合の耐火電線用小型加熱炉内の熱伝達をモデル化し、作成した熱伝達モデルの精度検証を行った。

- 1) 熱伝達モデルは、炉内を炉内制御用熱電対側の炉内ガス空間とバーナ側の火炎空間の二つの空間に分割することで、異なる温度として扱った。
- 2) 炉内の熱伝達は、①炉壁表面間の放射及び反射、②炉内ガス又は火炎と炉壁間の放射及び対流熱伝達、③炉壁内の熱伝導、④制御用熱電対と炉壁間の放射及び反射、⑤炉内ガス又は火炎と制御用熱電対間の放射及び対流熱伝達を考慮した。
- 3) 加熱曲線の種類、制御用熱電対と試験体の距離、制御用熱電対の形状をモデルに組み込むことで、これらの条件の違いによる影響を評価できるようにした。
- 4) 3 章及び 4 章の実測値を用いてモデルの精度検証を行った。いずれの条件も炉内ガス温

度と火炎温度の計算値は、実測値と良好に一致した。試験体保持面の表面温度の計算値は、計算条件①と②では実測値と良好に一致したが、プレート熱電対制御の計算条件⑤と⑥では実測値の方が低かった。これは、実測では 100mm 角のプレート熱電対がバーナ火炎からの熱の一部を遮ったためである。

第 6 章 数値解析を用いた比較

第 6 章では、第 5 章で作成したモデルを用いて、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体の距離を ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を明らかにした。また、①加熱炉の大きさ、②炉の内張材料、③加熱開始時のガス温度の違いといった、実験での確認が困難な項目についても変更による影響を調べた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 加熱曲線を ISO 曲線に変更しても試験体保持面表面温度と熱流への影響は小さい。
- 2) 制御用熱電対が異なると加熱開始直後のガス温度上昇が変わり、特にプレート熱電対制御では試験体保持面表面温度、炉内ガス温度、熱流が大きくなる。
- 3) 制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合と炉の内張材料が耐火レンガの場合は、試験体保持面表面温度や表面の熱流が大幅に小さくなる。
- 4) 炉の寸法を大きくすると炉内ガスと火炎の放射率が大きくなり、試験体保持面表面温度が 30 分時点で 35℃高く、試験体保持面表面への積算熱量が 5%ほど大きくなる。
- 5) 制御用熱電対の形状、炉の内張材料、炉の寸法は告示に明確な規定はないので、試験炉間による差を低減するためには、詳細を規定することが望ましく、条件を規定する重要性は、炉の内張材料、制御用熱電対の形状、炉の寸法の順である。
- 6) 加熱条件について、①加熱曲線、②制御用熱電対と試験体保持面との距離、③制御用熱電対の種類のすべてを ISO の加熱条件にすると、加熱開始直後に試験体保持面の表面温度は急上昇するが、30 分間の積算熱量では ISO の方が 10%小さい。

第 7 章 国際的に整合する合理的な試験法の検討

第 7 章では、耐火電線用小型加熱炉を用いて、試験体である耐火電線を炉内に設置して加熱を行い、①加熱曲線の種類、②制御用熱電対の形状、③制御用熱電対と試験体の距離を ISO 834-1 の試験条件に変更する場合の影響を考察した。その際、加熱中の試験体の電気的な絶縁性を連続的に測定する方法を検討した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 告示の加熱条件について、加熱曲線、制御用熱電対と試験体の距離、制御用熱電対の種類を ISO の加熱条件に整合化する場合、加熱曲線を ISO 曲線へ変更しても試験体保持面の表面温度や加熱中の絶縁抵抗へ与える影響は小さいが、制御用熱電対と試験体の距離を 100mm へ変更又は制御用熱電対をプレート熱電対へ変更すると試験体保持面

の表面温度が低下するとともに加熱中の絶縁抵抗は増加し、耐火電線へ与える損傷度は小さくなる。

- 2) 告示の加熱条件では、露出試験も電線管試験も導体サイズが大きいほど加熱 60 分時点の試験体保持面の表面温度は低くなった。絶縁抵抗は、耐火層の構成が同じ試料 b (導体サイズ 8mm²) と試料 c (導体サイズ 38mm²) を比較すると、導体サイズの大きい試料 c の方が絶縁抵抗は大きくなった。
- 3) 消防庁告示による絶縁抵抗測定を 1 分毎に行うことで、加熱中の絶縁抵抗の時間的推移を測定することが可能であった。また、線心毎に接地を切り替えて測定することで、各線心の絶縁性を個別に評価可能であった。
- 4) 告示の方法で加熱しながら、IEC 60331 の測定方法により、電気回路としての機能を加熱中を通じて測定することができ、告示の耐火電線用の加熱試験炉と組み合わせて測定可能なことを世界で初めて示した。

第 8 章 数値解析による試験体温度と絶縁抵抗の予測

第 8 章では、耐火電線の熱伝達を円筒座標系の一次元熱伝導方程式を用いて計算した。露出試験では、樹脂は着火温度に達すると着火し、一定時間燃焼後、燃え尽きるモデルとした。電線管試験では、樹脂は完全融解温度に達すると速やかに消失して空気層になるモデルとした。それらのモデルからマイカテープの温度を計算し、耐火電線の絶縁抵抗を予測する手法を提案した。

第 7 章の実験結果と比較してモデルの精度検証を行うとともに、導体寸法およびマイカテープ厚さを変更する場合の影響を計算によって定量化し、以下の知見を得た。

- 1) 露出試験では、絶縁抵抗の計算値の精度は非常に良好であった。
- 2) 電線管試験では、絶縁抵抗の計算値の精度は良好なものの、計算値は実測値よりもやや小さくなった。
- 3) 電線の導体サイズが大きくなると絶縁抵抗は約 0.4 乗に反比例して低下し、2mm² から 100mm² に変更すると 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗は、露出試験ではそれぞれ 0.21 倍、0.20 倍、電線管試験ではそれぞれ 0.19 倍、0.18 倍になった。
- 4) マイカが厚くなると絶縁抵抗は直線的に増加し、0.15mm から 0.6mm に変更すると 30 分時と 60 分時の絶縁抵抗は、露出試験では 3.2 倍、電線管試験では 3.1 倍になった。

本研究に関する発表論文等

1. 査読付き論文（予定を含む）

- 1) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性に関する実験的研究、日本火災学会論文集へ投稿済（審査中）
- 2) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度分布及び風速分布、日本火災学会論文集へ投稿済（審査中）
- 3) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度と熱流の予測、日本火災学会論文集へ投稿済（審査中）
- 4) 新屋一馬、原田和典、(仮題)耐火試験時の耐火電線の絶縁抵抗の変化とその予測、日本火災学会論文集へ投稿準備中

2. 口頭発表

- 1) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性に関する研究、2021 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.212-213、2021.5
- 2) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度解析、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、防火、pp. 215-216、2021.9
- 3) 原田和典、新屋一馬、耐火電線の試験法の変遷に関する文献調査、2022 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.161-162、2022.5
- 4) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉による電力ケーブルの機能保持時間測定方法に関する研究、2022 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp.163-164、2022.5
- 5) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉による電力ケーブルの機能保持時間測定方法に関する研究 第2報、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、防火、pp.293-294、2022.9
- 6) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性に関する研究（第2報）炉内温度分布、2023 年度日本火災学会研究発表会概要集、pp. 195-196、弘前市、2023.5
- 7) 新屋一馬、原田和典、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度解析 第2報、日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）、防火、pp.33-34、2023.9
- 8) 新屋一馬、原田和典、消防用耐火電線の耐火試験中の絶縁抵抗の予測、日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）、防火、pp.29-30、2024.8

3. 技術解説

新屋一馬、低圧耐火ケーブルの耐火試験法の変遷に関する調査、JECTEC NEWS、No.97、pp.19-21、2023

謝辞

本研究を遂行し、学位論文を取りまとめるにあたり、多くの方々のご支援とご指導を賜りました。

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、大変ご多忙にもかかわらず火災安全の基礎から全般にわたり、幅広くご指導とご鞭撻を賜りました。在学中はコロナ禍により研究を進めることが難しい時期もあり、また、研究の壁にぶつかることも多々ありましたが、その都度、原田先生からの的確なご助言をいただき、乗り越えることができました。ここに心からお礼申し上げます。

同専攻 石田泰一郎教授、小椋大輔教授には、ドクターセミナーと学位論文審査において、貴重なご指導をいただくとともに、本論文の細部にわたり多くの有益なご助言をいただきました。ここに心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり、国内の建築構造用耐火試験法についてご教授いただいた国立研究開発法人建築研究所 鈴木淳一博士、一般財団法人日本建築総合試験所 豊田康二博士に深く感謝申し上げます。

博士後期課程入学を熱心に勧めていただき、力強く後押ししていただいた株式会社東京システムバック 代表取締役 早川哲哉様に心より感謝申し上げます。

社会人博士後期課程への入学を後押ししていただきました一般社団法人電線総合技術センター 長谷部新一元専務理事、田辺信夫元センター長、山崎庸介元部長に深く感謝申し上げます。また、在学中の研究に対するご理解とご支援をいただきました同センター 長野寿一元専務理事、近藤裕之元専務理事、佐藤公一専務理事、大西正哉元センター長、小田勇一郎元センター長、加藤武志センター長、北里敬輔元部長、大関泰之元部長、深谷司部長に感謝申し上げます。

第7章の実験に関しては、公益財団法人戸田育英財団から2021年度研究助成「火災時における電力ケーブルの機能保持時間測定方法に関する研究」の補助を受けました。関係各位に感謝申し上げます。

最後に、博士後期課程入学への理解を示し、励ましてくれた両親、妻、子供たちに心から感謝します。