

京都大学	博士（工学）	氏名	新 屋 一 馬
論文題目	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		
（論文内容の要旨） 本研究は、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、試験条件を国際規格 ISO 834-1 に整合させると想定した場合の影響を明らかにすることを目的として、実験および解析を行ったものである。各章で得られた知見は、以下の通りである。 第 1 章は序論であり、研究の背景と目的を整理した。消防庁告示の方法も将来的には ISO 等の国際規格への整合化が進められると考えられ、告示法の炉内温度特性の解明と国際整合化に向けた技術的な検討が必要なことを指摘した。 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、諸外国の耐火試験法との比較を行い、国際整合化する場合の検討課題を抽出した。加熱炉を大型の炉へ変更する影響を検討する必要があること、加熱曲線は ISO 834-1 に整合させる必要があること、制御用熱電対の形状は、プレート熱電対を採用する可能性を検討する必要があること、加熱時間は 30 分に固定することなく 1 時間以上にも対応できること、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が必要なことを指摘した。 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、試験体を設置しない空炉状態で加熱実験を行い、炉内温度特性を調べた。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）との距離を変化させて炉内温度等を比較した。シース熱電対を用いれば露出型熱電対とほぼ同等の応答性が得られること、プレート熱電対で炉内温度制御すると加熱開始後 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が高くなること、加熱曲線のみを ISO 834-1 に変更してもその影響は小さいこと、制御用熱電対をプレート熱電対にすると加熱初期には試験体保持面の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となること、制御用熱電対と試験体保持面までの距離を ISO 834-1 に整合させて 100mm とすると試験体保持面の温度及び表面熱流束は大幅に低下することを示した。すなわち、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ことを明らかにした。 第 4 章では、耐火電線用小型加熱炉に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詳細に測定した。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。その結果、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設置面までの距離による影響が大きいこと、試験体保持面付近の上下方向の温度分布は小さく、時間と共に高温側にシフトするが、水平方向の温度分布の傾向は変化しないこと、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に応じて分布が大きく異なること、炉内風速は制御用熱電対と試験体保持面との距離に近いほど大きくなるため、対流熱伝達率も大きくなることを明らかにした。 第 5 章では、加熱炉内の熱移動をモデル化し、実験と比較して精度検証を行った。熱移動モデルでは、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して異なる温度として扱った。炉内の熱移動は、①炉壁表面間での			

放射の射出、吸収及び反射、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の射出、吸収及び反射、⑤炉内ガス又は火炎と制御用熱電対との間の放射及び対流熱伝達を考慮した。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を考慮した。第3章及び第4章の実測値を用いてモデルの精度検証を行ない、いずれの条件でも計算値と実測値は良好に一致することを確認した。

第6章では、第5章で作成した解析モデルを用いて、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、4) 加熱炉の大きさ、5) 炉の内張材料、6) 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その影響を予測した。その結果、加熱曲線を ISO 834-1 に変更しても加熱力への影響は小さいこと、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の表面温度、炉内ガス温度、熱流が大きくなること、制御用熱電対と試験体保持面との距離が 100mm の場合や炉の内張材料が耐火レンガの場合には、試験体保持面の表面温度や熱流束が大幅に小さくなること、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、試験体保持面への流入熱量が大きくなること、制御用熱電対の形状、炉の内張材料、炉の寸法は現状の告示では明確な規定はないが、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、その重要度は炉の内張材料、制御用熱電対の形状、炉の寸法の順であること、加熱条件のすべてを ISO 834-1 の加熱条件にすると、加熱開始直後に試験体保持面表面温度は急上昇するが、流入する熱量の積算値では逆に 10%小さくなることを明らかにした。

第7章では、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測定した。その際、加熱中を通じて試験体の電気的な絶縁性を連続的に測定する方法を考案した。消防庁告示の方法による絶縁抵抗測定を試験終了時だけでなく、加熱中も1分毎に行うことで、絶縁抵抗の時間的推移を測定可能であること、このとき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測定可能であることを示した。また、消防庁告示の方法で加熱しながら、電気回路としての機能保持時間を測定する IEC 60331 の方法を適用可能なことも初めて示した。

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予測した。露出試験（ケーブルが直接火炎に包まれる場合）では、樹脂は着火温度に達すると燃焼し、一定時間後に燃え尽きるモデルとした。電線管試験（不燃性の管の中にケーブルを敷設する場合）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絶縁層（マイカテープ）の温度を計算し、耐火電線の絶縁抵抗の低下を予測した。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た。その結果、絶縁抵抗の計算精度は非常に良好であり、計算による絶縁抵抗の予測が可能なことを示した。

第9章では、実験および解析により得られた知見をもとに、ISO 834-1 をベースとして国際整合化する場合の影響をまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、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した上で、試験方法を建築分野で広く用いられている国際規格 ISO 834-1 に整合させると想定した場合の影響を明らかにすることを目的として、実験および解析を行ったものである。消防庁告示に規定される耐火試験方法は、制定されてから相当の年月が経過し、その根拠や妥当性が必ずしも明らかでなくなっている。このようなものに対して、現在の工学的知見から分析を行うことにより、その問題点を明らかにし、国際整合化に資する知見を集積したものである。

はじめに、消防庁告示に規定される小型耐火試験炉を用いて加熱実験を行い、その伝熱性状を実験により解明した。試験体保持面（ケイカル板）の温度および熱流束のみならず、炉内温度分布も丹念に測定されており、得られたデータは今後の試験品質の向上と、試験方法の改良の2つの側面から重要な意味がある。目視観察では、炉内に火炎が充満する火炎空間と、燃焼後の高温ガスが存在するガス空間に明確に区分された。丹念な温度測定の結果、火炎空間と炉内ガス空間で明確な温度差があること、その温度分布は炉内温度（制御点の温度）と相似的に変化することを明らかにした。

炉内熱伝達の解析モデルにおいては、実測した炉内温度分布に基づいて炉内を火炎空間と炉内ガス空間の2つに分けた上で、火炎とガスおよび炉壁間の放射および対流熱伝達を計算している。その結果、実験結果を定量的に再現することができ、炉内熱伝達の解明に寄与した。

測定結果およびそれをモデル化した解析により、消防庁告示と ISO 834-1 による試験方法によるその加熱力の相違を求めたところ、ISO 834-1 では消防庁告示よりも試験体への加熱力が弱くなることを示した。その主な理由として、制御用熱電対と試験体との距離が、消防庁告示よりも ISO 834-1 の方が大きいため、炉内温度分布が大きく変わるためであることを明らかにした。

ケーブル試験体を用いた実験では、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、その後いったん回復した後に徐々に低下することを実験的に明らかにした。これに基づいて、ケーブルの燃焼とその後の絶縁層（マイカ層）の熱劣化をモデル化し、ケーブルの絶縁抵抗の時間変化を予測する方法を構築した。このことにより、ケーブルの耐火性を計算で予測できる可能性を示した。

本論文は、耐火電線用小型加熱炉の炉内温度特性を伝熱学的に解明した上で、国際整合化に関する知見をまとめたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年7月31日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。