

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

新屋 一馬^{*1}, 原田 和典^{*2}

(令和6年5月20日受付, 令和6年10月22日受理)

An Experimental Study on Temperature Behaviors of a Small-type Furnace for Fire-resistant Cable

Kazuma ARAYA^{*1}, Kazunori HARADA^{*2}

^{*1} Japan Electric Cable Technology Center, 1-4-4, Shinmiyakoda, Hamana-ku, Hamamatsu-Shi, Shizuoka, 431-2103 Japan

^{*2} Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto University,
Kyoto University, Katsura Campus, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540, Japan

Abstract

In recent years, product testing methods have been harmonized with international standards such as ISO and IEC. In this study, as to the fire resistance test of cables, the influence of the heating temperature curve, the shape of the control thermocouple, and the horizontal distance between the control thermocouple and the specimen were experimentally investigated by measuring the furnace temperature and heat flux to wall surface. Comparisons were made on the test conditions of a small furnace as specified by Fire and Disaster Management Agency with that of the international standard ISO 834-1. The results showed that among the three parameters, the horizontal distance between the control thermocouple and the specimen dominates the heating intensity. The heating intensity to the specimen was significantly reduced when harmonized with ISO 834-1.

1. はじめに

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（炉内幅0.46 m、高さ1.24 m）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。

海外ではケーブルの耐火試験として、欧州を中心にIEC 60331シリーズ³⁻⁵⁾が用いられている。試験体の加熱は、火炎温度が830℃となるように調整したプロパ

ンガス流量が一定のリボンバーナを用いて、バーナ火炎をケーブルに直接当てることにより行う。告示法のように時間と共に炉内温度が上昇するような加熱方法ではなく、バーナの温度は一定である。北米では、UL 2196⁶⁾のケーブルの耐火試験が用いられている。試験体の加熱は、縦3.66 m、横3.66 m以上の大型の壁炉を用いて、ケーブルを炉内壁面に取り付けて行う。炉内の加熱は、告示法の加熱曲線と類似の温度曲線である。一方、耐火試験方法としては、壁や床等の建築構造部材を対象としたISO 834-1⁷⁾が国際的に普及しており、国内でも採用されている。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3 m、横3 m以上であり、告示の小型加熱炉に比べて大型である。

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)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⁸⁾。そのため、告示法の加熱曲線を規定するJIS A 1304は、2017年の改正時に、対応国際規格であるISO 834シリーズとの整合化が図られ、

^{*1} 電線総合技術センター

(〒431-2103 静岡県浜松市浜名区新都田1-4-4)

^{*2} 京都大学 工学研究科

(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)



この記事はクリエイティブ・コモンズ [表示-非営利-改変禁止4.0国際] ライセンスの下に提供されています。
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>)

https://doi.org/10.11196/kasai.74.3_37

©2024 Japan Association for Fire Science and Engineering

新たにISO 834-1に基づく加熱曲線が標準加熱曲線Aとして追加された。これにより、ISOに整合した標準加熱曲線Aと従来の加熱曲線である標準加熱曲線Bが併記されることになった。しかしながら、JIS A 1304の解説欄には懸念事項として、「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。」と記されていることから、将来的な加熱曲線の一本化を前に、加熱曲線の違いによる影響を調べておくことが望まれる。また、加熱曲線以外にも告示法と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⁹⁾が指定されている。松山ら¹⁰⁾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¹¹⁾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^{12,13)}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。

しかし、消防庁告示の小型加熱炉を用いて、試験方法をISO 834-1へ整合させた場合の影響を調査した事例はなく、その性状は明らかになっていない。そこで本研究では、消防庁告示の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加熱実験を行い、試験条件をISO 834-1に整合させた場合の炉内温度と熱流束を測定した。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した。なお、整合化の方法には、告示法から海外の耐火試験法であるIEC 60331や建築構造部材を対象としたISO 834-1の試験方法へ移行する方法と、告示法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2つの方法が考えられるが、本研究では後者のアプローチで国際的にも整合する試験方法の可能性を探ることとし、前者については別途検討することとした。

2. 実験方法

2.1 実験概要

消防庁の登録認定機関である（一社）電線総合技術センターの耐火電線用小型加熱炉（以下、認定炉）を用いて、2.2節に示す実験条件で、試験体を設置せずに30分の加熱を行った。認定炉の模式をFig. 1に示

す。認定炉の炉内寸法は、幅0.46 m、高さ1.24 m、奥行きはバーナ壁面から制御用熱電対までの距離が0.25 mである。けい酸カルシウム板側の炉壁はスライド式であり、上下左右の両端に約10 mmの隙間がある。バーナの燃料にはプロパンガスを使用した。認定炉では、Fig. 1で示すように、試験体である耐火電線を炉内に設置するための高さ0.115 mのスリット状の開口部が設けられており、炉が密閉されていないため、密閉型のISO 834-1の建築構造用の耐火炉に比べて、炉内温度は不均一になりやすい。告示法とISO 834-1の試験条件（以下、ISO法）の主要な相違点である加熱曲線、制御用熱電対の形状、制御用熱電対と炉壁材のけい酸カルシウム板（以下、ケイカル板）との距離をパラメータとして、炉内温度とケイカル板表面位置での熱流束を測定した。パラメータの詳細は2.3節に示す。

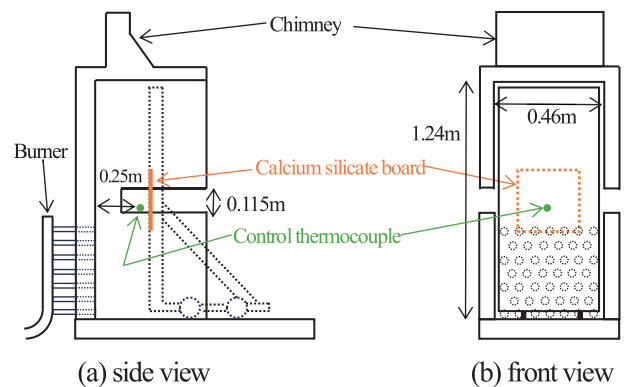


Fig. 1 Schematic diagram of the heating furnace.

2.2 実験条件一覧

実験を行った条件をTable 1に示す。FDMA curveは、告示法の加熱曲線であり、JIS A 1304の標準加熱曲線Bである。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10 mmが2回、ISO法の規定である100 mm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、告示法の条件から制御用熱電対とケイカル板の距離のみを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

Table 1 List of test conditions

No.	Temperature curve	Control thermocouple	Distance between the control thermocouple and the calcium silicate board
No.1	FDMA curve	Bare tip	10 mm
No.2	FDMA curve	Bare tip	100 mm
No.3	FDMA curve	Plate	100 mm
No.4	ISO curve	Plate	100 mm
No.5	ISO curve	Bare tip	100 mm
No.6	ISO curve	Bare tip	10 mm

をISO法に変更した条件である。実験4は、3条件全てをISO法にした条件である。

2.3 実験条件

(1) 加熱曲線の種類

加熱曲線は、告示法の加熱曲線（以下、告示曲線）とISO法の加熱曲線（以下、ISO曲線）の2条件とした。告示曲線は、JIS A 1304では5分毎の温度のみが規定されているが、実務的には滑らかな温度上昇となるように補間した。ISO曲線は、ISO 834-1において、式(1)に示す加熱曲線が規定されている。

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

T : 加熱温度[°C]

t : 時間[min]

加熱曲線は、**Fig. 2**に示すように、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く、7分頃まではISO曲線の方が温度は高い。それ以降は逆転し、告示曲線の方が温度はやや高くなるが、30分頃にはほぼ同等の温度となる。

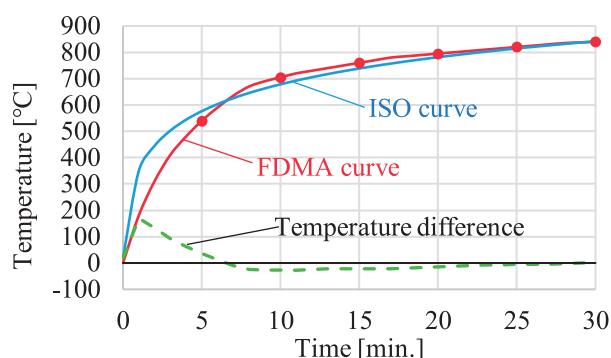


Fig. 2 Comparison of FDMA and ISO curves.

(2) 制御用熱電対の形状

制御用熱電対の形状の違いによる影響を調べるため、露出型シース熱電対（以下、露出型熱電対）、非接地形シース熱電対（以下、シース熱電対）、プレート熱電対の3種類を用いた。告示法では、炉内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可能性のある熱電対の太さや形状は規定していないが、認定炉では金属シース外径6.4 mm、素線径1 mmの露出型熱電対が慣用的に使用されていることから、実験においても同仕様の露出型熱電対を用いた（**Fig. 3 (a)**）。

シース熱電対は、JIS A 1304に規定される国内の建築構造物の耐火試験で使用されている。実験には金属シース外径3.2 mm、素線径0.5 mmのシース熱電対を用いた（**Fig. 3 (b)**）。露出型熱電対との素線の違いによる差を調べるため保護管は用いなかった。

プレート熱電対は、ISO 834-1に規定されており、炉内の輝炎ガスからの放射や、炉の内張材料の熱慣性

などの炉によって異なる特性が耐火試験結果に及ぼす影響を抑制するため、入射熱流を標準化する目的で使用されている。実験に使用したプレート熱電対は、金属シース外径1 mmのシース熱電対を、0.7 mm厚のニッケル合金板と10 mm厚の無機断熱材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した（**Fig. 3 (c)**）。

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10 mm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、**Table 1**の制御用熱電対とケイカル板の距離が100 mmの条件でのみ実施した。

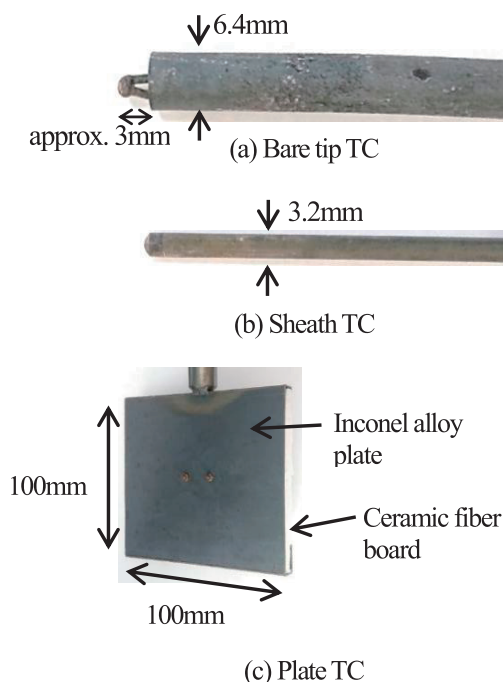


Fig. 3 Types of Thermocouples

(3) 制御用熱電対とケイカル板の距離

制御用熱電対と試験体の水平距離は、告示法では10 mm、ISO法では100 mmと異なる。本実験では試験体を設置せずに加熱するため、**Fig. 4**に示すように、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告示法の10 mm又はISO法の100 mmとした。制御用熱電対の高さは告示の規定に従い、ケイカル板中央高さから75 mm下方とした。バーナ壁面から制御用熱電対までの距離は、告示法の規定に従い、250 mmとした。露出型熱電対とシース熱電対は、ケイカル板を貫通させて所定の位置へ合わせ、ケイカル板の非加熱面側で固定した。プレー

ト熱電対は、炉の側面の開口部から、棒状の固定具を用いて炉内に設置した。

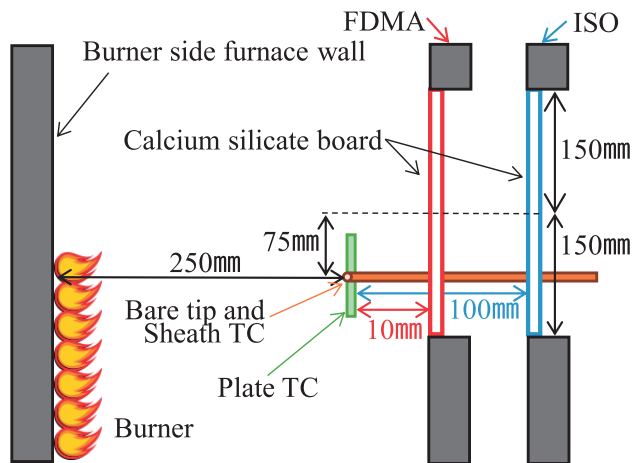


Fig. 4 Schematic of location of the control thermocouple and the calcium silicate board (Side view of furnace interior)

2.4 測定方法

ケイカル板表面温度とケイカル板表面への熱流束及び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 Fig. 5 に示す。図中のHFMは、熱流束計である。ケイカル板表面温度とケイカル板表面の熱流束は、300 mm角のケイカル板の中央位置で測定した。ケイカル板の厚さは10 mmである。ケイカル板表面温度の測定には、シース外径1.6 mmのシース熱電対を使用し、ケイカル板に穴を開けて非加熱面から差し込み、ケイカル板の加熱面側の表面に熱電対の先端を接触させて測定した。また、ケイカル板表面の熱流束の測定には、感熱部直径が25.4 mmの水冷式全熱流型熱流束計を使用し、ケイカル板中央付近に熱流束計の直径相当の穴を開けて熱流束計の受熱面がケイカル板表面と同一面となる位置で固定した。

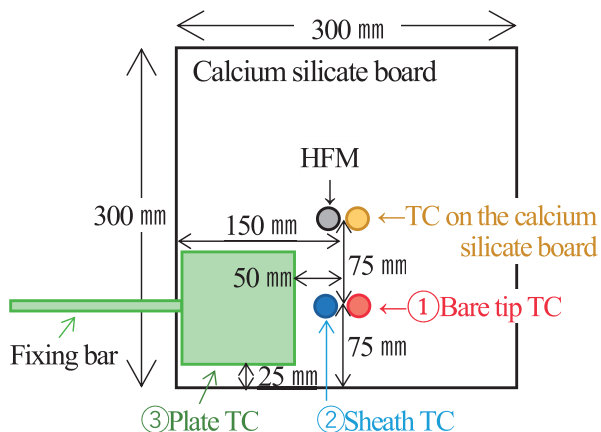


Fig. 5 Arrangement of thermocouples and HFM

3. 実験結果

各実験の炉内温度とケイカル板への熱流束の測定結果を Fig. 6 に示す。いずれも左縦軸が温度、右縦軸が熱流束である。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10 mm）では、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℃高かった。これは、高温の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 kW/m²であった。30分時点での炉内温度(840℃)に対応する黒体放射は87 kW/m²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、ケイカル板表面にバーナからの高温の火炎が接近している状況と考えられる。

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100 mm）では、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℃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70 kW/m²であった。

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100 mm）では、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

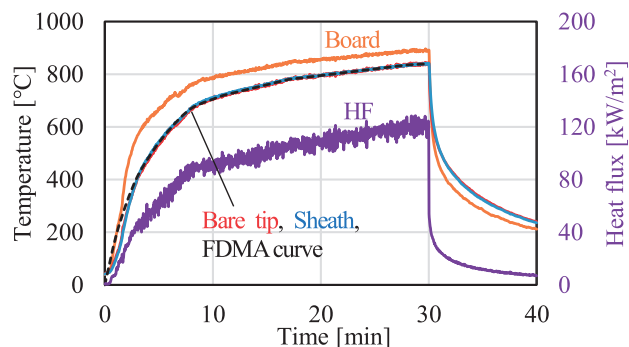
もかなり高かった。露出型熱電対とシース熱電対を比較すると、加熱開始から15分頃まではシース熱電対の方が温度は高い。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30分時点では、約240℃低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、加熱開始直後に急増し、小さなピークが見られるが、その後は時間と共に増加し、30分時点で約70 kW/m²であった。

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100 mm）では、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、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、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℃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℃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68 kW/m²であった。

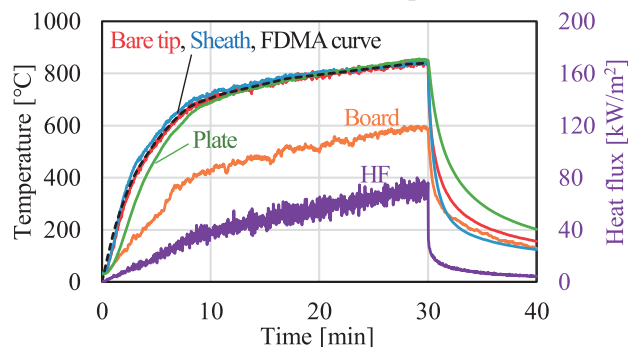
実験5（加熱曲線はISO曲線、制御用熱電対は露出型熱電対、制御用熱電対とケイカル板距離は100 mm）では、炉内制御用熱電対である露出型熱電対の温度は、加熱2分頃まではISOの加熱曲線よりも低い、それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、加熱開始から15分頃までは露出型熱電対よりもやや高かった。プレート熱電対の温度は、加熱開始から15分頃までは露出型熱電対よりも低かった。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも大幅に低く、30分時点では、約240℃低かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30分時点で約70 kW/m²であった。

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10 mm）では、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、

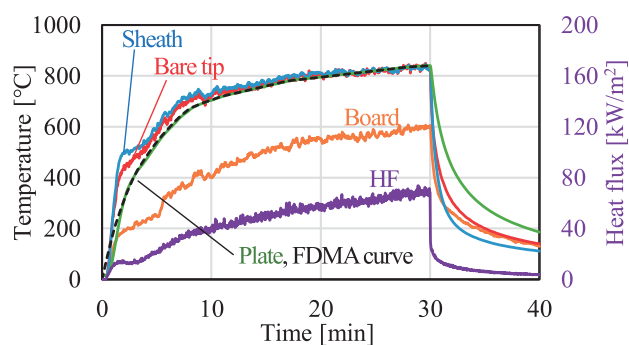
それ以降は加熱曲線と良好に一致した。露出型熱電対と並列設置したシース熱電対の温度は、加熱開始から加熱終了まで露出型熱電対とほぼ一致した。ケイカル板表面温度は、加熱開始直後から加熱終了時まで、制御用熱電対よりも常に高く、30分時点では、約50℃高かった。ケイカル板表面位置での熱流束は、時間と共に増加し、30分時点で約125 kW/m²であった。



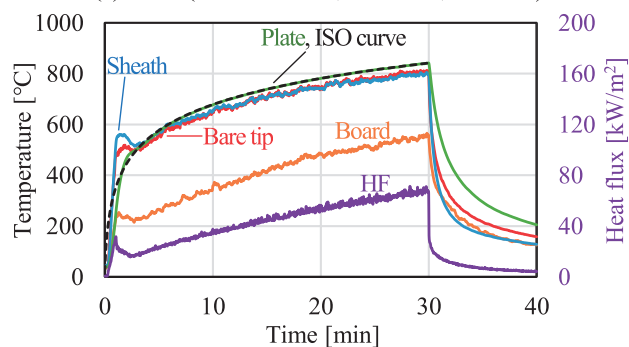
(a) No.1 (FDMA curve, Bare tip TC, 10mm)



(b) No.2 (FDMA curve, Bare tip TC, 100mm)



(c) No.3 (FDMA curve, Plate TC, 100mm)



(d) No.4 (ISO curve, Plate TC, 100mm)

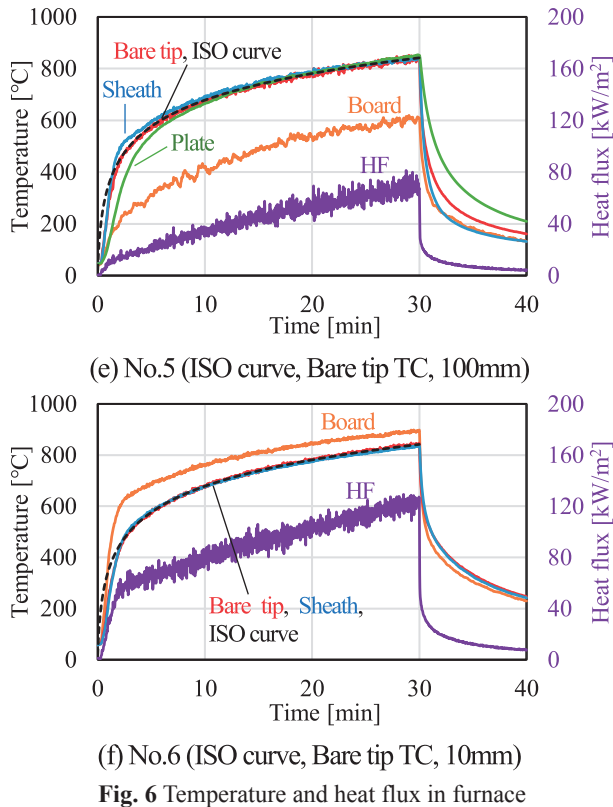


Fig. 6 Temperature and heat flux in furnace

4. 考察

4.1 加熱曲線の比較

告示法とISO法の加熱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及び実験3と実験4を比較すればよい。一例として、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10 mm）のケイカル板表面温度を Fig. 7(a)に、ケイカル板表面位置での熱流束を Fig. 7(b)に示す。ケイカル板表面温度は、Fig. 7(a)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分以降は逆転して告示曲線（実験1）の方が高くなり、加熱曲線を反映した結果となった。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、4.3節で後述するように、高温のバーナ火炎からの放射が炉内のガス空間を通過して固体のケイカル板に到達するとき、放射熱は気体（制御用熱電対が測定する炉内ガス）よりも固体（ケイカル板）の方が吸収されやすいためである。

ケイカル板表面位置での熱流束は、Fig. 7(b)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した。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、告示曲線（実験1）の方が高くなった。30分間の総熱量は、告示曲線（実験1）は163.7 MJ/m²、ISO曲

線（実験6）は159.2 MJ/m²であり、告示曲線（実験1）の方が2.7%多くなった。

実験2と実験5及び実験3と実験4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、7分頃に逆転し、30分間の総熱量では告示曲線の方が若干多くなった。

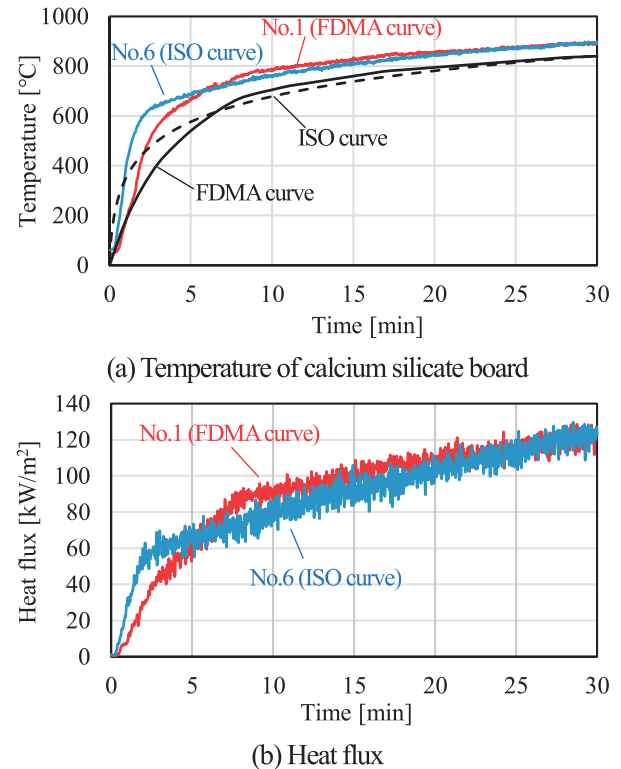


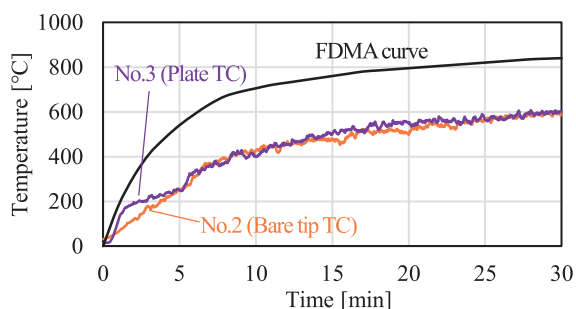
Fig. 7 Comparison of different heating curves (No.1 and No.6)

4.2 制御用熱電対の比較

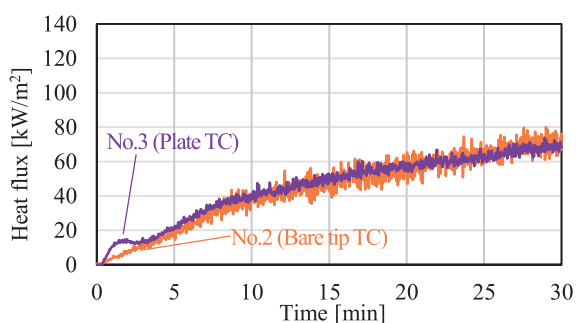
(1) 露出型熱電対制御とプレート熱電対制御の比較

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は、実験2と実験3及び実験4と実験5を比較すればよい。一例として、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100 mm）のケイカル板表面温度を Fig. 8(a)に、ケイカル板表面位置での熱流束を Fig. 8(b)に示す。ケイカル板表面温度は、Fig. 8(a)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った。加熱曲線と比べてケイカル板表面温度は大幅に低い。4.3節で後述するように、制御用熱電対とケイカル板の距離が100 mm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、Fig. 8(b)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分頃には落ち着いた。その後、加熱10分頃まではプレート熱電対制御の方がわずかに高いが、それ以降はほぼ同等の

熱流束であった。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いが、これは露出型熱電対に比べてプレート熱電対の応答性が低いためだといえる。なお、両者のケイカル板表面温度の変動幅に大きな差異が見られないのは、熱流束は瞬間的なバーナ出力の変動を捉えるので変動幅が大きくなりやすいのに対し、ケイカル板表面温度は一定の熱慣性がある固体の温度を測定しているため、両者の変動幅がもともと小さいためと考えられる。30分間の総熱量は、露出型熱電対制御では 78.9 MJ/m^2 、プレート熱電対制御では 81.3 MJ/m^2 であり、露出型熱電対の方が3.0%低くなった。



(a) Temperature of calcium silicate board



(b) Heat flux

Fig. 8 Comparison of different control thermocouples (No.2 and No.3)

(2) 露出型、シース及びプレート熱電対の比較

3種類の熱電対の温度を同時に測定した **Fig. 6(b)~(e)** の結果より、いずれも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わずかに高いものの、10分以降はシース熱電対と露出型熱電対はほぼ同等の温度であった。露出型熱電対とシース熱電対の温度差は小さいので、金属シース外径が3.2 mm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6.4 mmの露出型熱電対と応答性はほぼ同じといえる。

プレート熱電対と露出型熱電対を比較すると、いずれも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いためである。そのため、**Fig. 6(c)**と**(d)**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

の温度に一致さ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った。

4.3 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の距離の違いによる影響は、実験1と実験2及び実験5と実験6を比較すればよい。一例として、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 **Fig. 9(a)**に、ケイカル板表面位置での熱流束の測定結果を **Fig. 9(b)**に示す。ケイカル板表面温度は、**Fig. 9(a)**に示すように制御用熱電対とケイカル板の距離が10 mm（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、100 mm（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℃の差があった。ケイカル板表面位置での熱流束は、**Fig. 9(b)**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の距離が10 mm（実験1）の方が全体的に熱流束は高くなった。30分間の総熱量は、10 mm（実験1）が 163.7 MJ/m^2 、100 mm（実験2）が 78.9 MJ/m^2 であり、約2.1倍の大きな差がある。

4.1節の加熱温度曲線の違いや4.2節の制御用熱電対の違いによる差に比べると、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が最も大きい。**Fig. 10**に加熱中の炉内を側面スリット開口から撮影した加熱30分時点の写真を示す。**Fig. 10**に示すように炉内はガス空間と火炎空間に分かれている。ケイカル板と制御用熱電対はいずれもガス空間側にある。制御用熱電対は火炎からの放射も直接受けるが、基本的にはガス空間の気体の温度を測定している。高温のバーナ火炎からの放射により、炉内ガスとケイカル板は放射熱を受け取るが、気体である炉内ガスよりも固体であるケイカル板の方が放射熱を吸収しやすい。したがって、**Fig. 10(a)**の制御用熱電対とケイカル板の距離が10 mmのように、バーナ火炎がケイカル板に近い場合には、ケイカル板への放射が強くなり、ケイカル板温度は制御用熱電対の温度（≒加熱曲線）よりも高くなったといえる。一方、**Fig. 10(b)**の制御用熱電対とケイカル板の距離が100 mm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、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10 mmの場合に比べて低くなったと考えられる。

4.4 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の距離について、

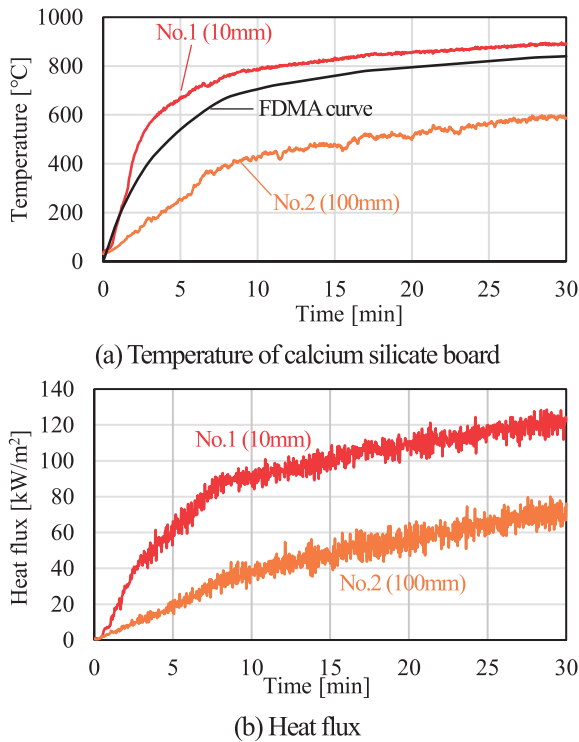
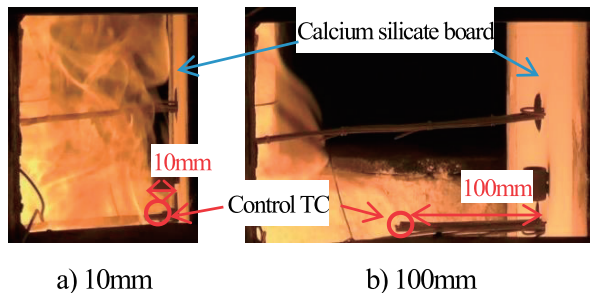


Fig. 9 Comparison of different distances between control thermocouple and calcium silicate board (No.1 and No.2)



Distance between the control thermocouple and the calcium silicate board

Fig. 10 Inside the furnace during another experiment conducted under the same conditions as this experiment. (At 30 minutes of heating, left side is burner side, right side is the calcium silicate board side.)

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Fig. 11(a)に、ケイカル板表面位置での熱流束の測定結果をFig. 11(b)に示す。ケイカル板表面温度は、Fig. 11(a)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の差であった。ケイカル板表面位置での熱流束は、Fig. 11(b)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）の方が大幅に大きくなった。30分間の総熱量は、すべて告示の条件（実験1）が163.7 MJ/m²、すべてISOの条件（実験4）が77.7 MJ/m²であり、約2.1倍の大きな差があった。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わかった。

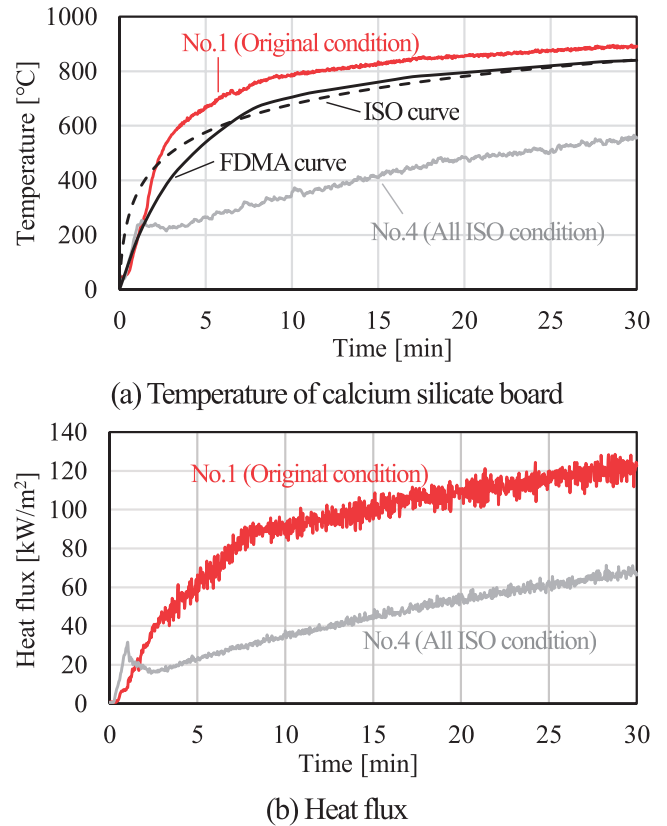


Fig. 11 Comparison of the difference between FDMA test condition and ISO test condition (No.1 and No.4)

4.5 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Fig. 12にケイカル板表面位置での熱流束をFig. 13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との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、Fig. 12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、Fig. 13に示すように Δq_{curve} 、 Δq_{TC} 、 Δq_{dist} の和で表せる。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、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、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。それぞれの比較から温度差を求めた結果を**Table 2**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、

$$\Delta T_{all,cal} = \Delta T_{curve} + \Delta T_{TC} + \Delta T_{dist} \quad (2)$$

である。式(2)及び**Table 2**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。炉内の熱伝達は非線形現象であり、厳密な意味では重ね合わせは成り立たないが、対象を認定炉に限定し、実用的な変動範囲に限れば近似的に重ね合わせができる。

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**Table 3**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、

$$\Delta q_{all,cal} = \Delta q_{curve} + \Delta q_{TC} + \Delta q_{dist} \quad (3)$$

である。式(3)及び**Table 3**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 -53.8 kW/m^2 であり、実験値の -52.8 kW/m^2 とほぼ一致し、熱流束についても近似的に重ね合わせができる。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、各パラメータのうち、制御用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。

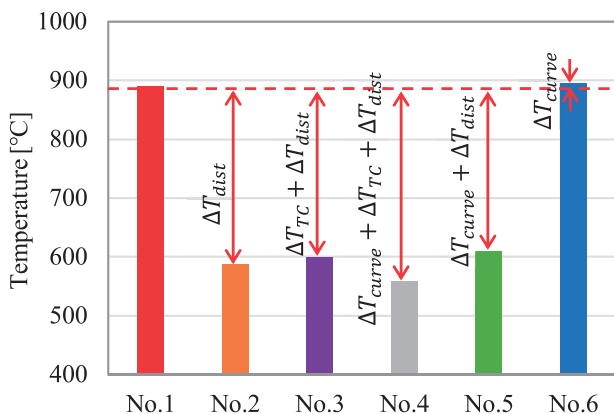


Fig. 12 Comparison of surface temperatures of calcium silicate boards at 30 minutes

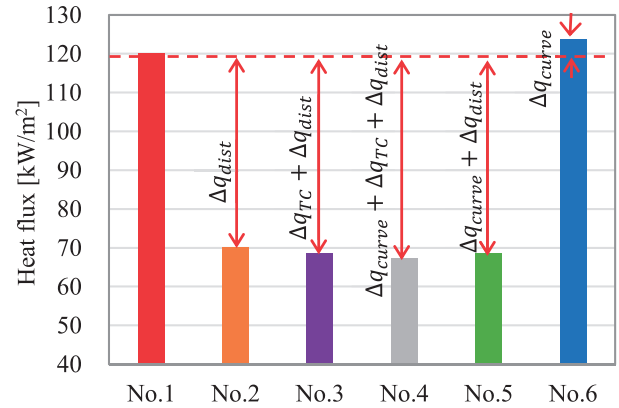


Fig. 13 Comparison of heat fluxes at the surface location of calcium silicate plates at 30 minutes

Table 2 Temperature difference obtained from experimental values

Symbol	Calc.	Temperature difference ($^{\circ}\text{C}$)	Average ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT_{curve}	No.6 - No.1	5	-5
	No.5 - No.2	21	
	No.4 - No.3	-42	
ΔT_{TC}	No.3 - No.2	12	-20
	No.4 - No.5	-51	
ΔT_{dist}	No.2 - No.1	-301	-293
	No.5 - No.6	-286	
ΔT_{all}	No.4 - No.1	-332	-

Table 3 Heat flux difference obtained from experimental values

Symbol	Calc.	Heat flux difference (kW/m^2)	Average (kW/m^2)
Δq_{curve}	No.6 - No.1	3.6	0.2
	No.5 - No.2	-1.7	
	No.4 - No.3	-1.1	
Δq_{TC}	No.3 - No.2	-1.7	-1.4
	No.4 - No.5	-1.1	
Δq_{dist}	No.2 - No.1	-50.0	-52.6
	No.5 - No.6	-55.2	
Δq_{all}	No.4 - No.1	-52.8	-

5. 結論

本研究では、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。その結果、以下の知見を得た。将来的にISO 834-1のどの試験条件を告示法に取り入れるかを検討する時に、本研究で得られた成果が役立つものと考えられる。

1) 告示の小型加熱炉で、金属シース外径3.2 mmのシース熱電対を用いれば、金属シース外径6.4 mm、素線径1 mmの露出型熱電対とほぼ同等の応答性が得られる。

- 2) 制御用熱電対とケイカル板の距離を100 mmとすれば、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ので、ISO整合化のためにプレート熱電対を採用する場合にはこの影響に留意する必要がある。
- 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%と小さいため、ISO整合化のために加熱曲線のみをISO曲線へ変更しても影響は小さいといえる。
- 4) 制御用熱電対とケイカル板の距離を100 mmとして、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ケイカル板表面温度は高いが、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。なお、プレート熱電対を設置することにより、バーナ火炎からの放射熱を遮蔽する障害物となる可能性があるため、告示法にプレート熱電対を採用する場合には、設置位置も検討する必要がある。
- 5) 制御用熱電対とケイカル板までの距離を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、制御用熱電対とケイカル板までの距離を100 mmにするとケイカル板の温度及びケイカル板表面の熱流束は大幅に低下し、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倍大きく、一部解放された密閉されていない炉内で、制御用熱電対とケイカル板までの距離を変化させるとケイカル板の温度上昇と入射熱流が変化する。
- 6) 加熱曲線、制御用熱電対の種類、制御用熱電対とケイカル板までの距離の3つの試験条件のうち、制御用熱電対とケイカル板までの距離が、ケイカル板の温度及び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。また、告示の小型加熱炉の試験条件を本研究で検討した3条件ともISO法に整合させると、現行の告示と比べてケイカル板の温度及びケイカル板表面の熱流束が大幅に低下する。

参考文献

- 1) 平成9年12月18日付 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) IEC 60331-1, 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, 2018.
- 4) IEC 60331-2, 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, 2018.
- 5) IEC 60331-3, 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, 2018.
- 6) UL 2196, Fire Test for Circuit Integrity of Fire-Resistive Power, Instrumentation, Control and Data Cables, 2017.
- 7) ISO 834-1, Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, 1999.
- 8) 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12日閲覧。
- 9) Wickstrom, U., A proposal regarding temperature measurements in fire test furnaces, Nordtest project 335-82, SP-RAPP 1986:17, Swedish National Testing Institute, 1986.
- 10) 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.
- 11) 原田和典, 耐火試験炉内の熱伝達 — 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 —, 日本火災学会論文集, Vol. 48, No. 2, pp. 53-61, 1998.
- 12) 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.
- 13) Sultan, M. A., Fire resistance furnace temperature measurements: plate thermometers vs shielded thermocouples, Fire Technology, 42, July 3, pp. 253-267, 2006.