

電気ケーブルの火災危険性評価に関する新規評価手法の提案
(Study on Evaluation Methodology of Fire Hazard of Electric Cables)

2022 年 1 月

博士(工学)

深谷 司

豊橋技術科学大学

別紙4-2 (課程博士 (和文))

2022 年 1 月 6 日

機械工学専攻	学籍番号	第 169103 号	指導 教員	中村 祐二 飯田 明由 柳田 秀記
氏名	深谷 司			

論文内容の要旨 (博士)

博士学位論文名	電気ケーブルの火災危険性評価に関する新規評価手法の提案
---------	-----------------------------

(要旨 1,200 字程度)

ケーブルは、現代社会における必要不可欠なインフラを構成する重要な製品であるが、火災危険性の観点からは、非常に大きな熱を放出しながら燃焼する高分子材料を被覆材料にもつため、一旦燃焼した場合、電線布設路に沿った火災の大規模化等により大きな人的及び物的損害等を引き起こす非常に火災危険性の高い製品のひとつとして認識されている。このため、ケーブルの火災危険性を予見し、防止するための様々な評価方法が開発されており、これらの評価方法を用いたケーブルに対する数多くの指針、規制等が存在する。しかし、ケーブルの燃焼挙動は、その種類、布設量、布設環等によって大きく影響を受けるため、様々な環境に布設された多くの種類のケーブルに関して火災時の燃焼挙動を現状一般的に用いられている高コストの実規模試験により逐一調べることは困難であり、布設されている全てのケーブルに対して火災安全性が担保されているとは言い難い。

本研究では、ケーブルの火災危険性評価を簡便に低コストで実施することができる試験方法開発のために、将来的な規格化、規制への適用を視野に入れた、実規模試験の結果を定量的に推定するためのベンチスケール試験を用いた新たなケーブル火災危険性評価手法を提案することを目的に実規模試験とベンチスケール試験によって得られる試験結果を比較検証した。

対象とした試験方法は、ケーブルの火災危険性試験として最も認知されている垂直トレイ燃焼試験であり、この試験の結果をベンチスケール試験であるコーンカロリメータ試験で取得できる各種指標を用いた推定式を検討した。

12種類のケーブルについて両試験方法に基づいた燃焼試験を実施し、推定式の妥当性を検証したところ、コーンカロリメータ試験で取得したデータから、殆どのケーブルについて垂直トレイ試験の試験結果であるケーブルの燃焼長を比較的良く推定することができた。

更に、垂直トレイ試験におけるケーブルの燃焼挙動をより詳細に検証し、ケーブル製品そのものの燃焼によらずケーブルを構成する可燃材料のみの評価でケーブル製品の火災危険性を評価することの可能性を検討するために、ケーブル等の複合素材で構成された製品の燃焼においては時間の経過とともに異なる素材の燃焼が「独立且つ段階的」に生じているとの仮定のもと、コーンカロリメータで得られたケーブル被覆材料及びケーブル製品の燃焼並びに垂直トレイ試験におけるケーブルの燃焼による発熱速度曲線を、誤差分散関数を用いてピーク分解することを試みた。クロマトグラフィー等の他の分析手法で活用される分布関数によるピーク分解を行い分離ピークの物理的な意味(1ピークが単一現象を表す)を考慮しつつ、他の分析結果も活用して分離ピークを検証した結果、物理現象を考慮した分離ピークを合成することによって、オリジナルの発熱速度曲線を精度よく再現できたことから、各分離ピークがある程度物理的に正しい意味を持ち、この方法論を用いて説明することができることが示唆された。

別紙 4 - 1 (課程博士 (英文))

Date of Submission (month day, year) : January 6, 2022

Department of Mechanical Engineering	Student ID Number	D169103	Supervisors	NAKAMURA Yuji
Applicant's name	FUKAYA Tsukasa			IIDA Akiyoshi YANADA Hideki

Abstract (Doctor)

Title of Thesis	Proposition of new approach for fire hazard assessment of electric cables
-----------------	---

Approx. 800 words

Electric cables used for power transmission, signal transmission, etc. are indispensable products that configure the infrastructure in modern society. However, from the viewpoint of the fire hazard, cables with a polymer material that burn while releasing extremely large heat as covering materials, recognized as one of the products with a very high fire risk that causes great human and property damage in the event of fire due to the high combustibility, smoke production toxic gas production, etc. For this reason, various fire hazard test methods have been developed to predict and prevent the risk of fire due to the combustion of cables, and there are many guidelines and regulations regarding combustion behaviors of cables based on evaluations using these test methods.

However, since the combustion behavior of cables is greatly affected by the type of cable, the amount to be installed, the installation condition, etc., It is difficult to investigate one by one by the commonly used high-cost, full-scale experiments, and it is hard to say that fire safety is guaranteed for all the cables installed in various places.

In this study, to develop the low-cost and easy to perform cable fire test, a new cable fire hazard assessment method using a laboratory level bench-scale fire test are proposed for quantitatively estimating the results of full-scale cable fire test with a view to future standardization and application to regulations.

The vertical tray flame test specified in IEEE 1202, which is one of the most well-known real scale cable fire hazard testing method and is used for assessing communication cables installed in nuclear power plants in Japan, was selected as a target of this study and the prediction model using various indicators that can be obtained from the cone calorimeter test specified in ISO 5660-1, which is widely used test method for the assessing combustion behaviors of various products and materials in the world, was proposed to predict the combustion length of the tested cable samples in the vertical tray flame test, which is the most important test result of this test.

The proposed model was designed to express successive burning property of cables in the vertical tray flame test by introducing the dimensionless parameter of ratio of burnout time and ignition time via cone calorimeter test. To verify the prediction model, vertical tray flame test and cone calorimeter test were performed for 12 types of cable samples and comparing combustion length obtained from the vertical tray flame test and the value derived by the prediction model using obtained data from the cone calorimeter test.

It was found that the combustion length of the cable can be well predicted using proposed prediction model for most of tested cables. With some cases which being hardly predictable based on this methodology, the limitation of the model was discussed and the future work is suggested.

Furthermore, to verify the combustion behavior of the cable in the vertical tray test in more detail, and examine the possibility of evaluating the fire hazard of the cable products by assessing of only the samples of the combustible material contained in the cables, regardless of the fire test for the sample of cable product itself, peak decomposition of the heat release rate curve obtained from the cone calorimeter test and the vertical tray flame test for cables and cable covering materials using the error distribution function was attempted, under the assumption that the combustion of different materials occurs "independently and stepwise over time".

The peak decomposition procedure of the heat release rate curve from the vertical tray flame test and the cone calorimeter test were performed by using two types of distribution error functions (Gaussian function and Exponentially modified gaussian function) used in other analysis methods such as chromatography, Fourier transform infrared spectroscopy, thermal analysis, etc. and decomposed peaks were verified while considering the physical meaning of the decomposed peaks (one peak represents a single phenomenon), physical properties of each material contained in cable materials and also results from other analysis method (MCC: Microscale combustion calorimeter).

As a result of verifying the decomposed peaks, it was found that since the original heat release rate curve can be accurately reproduced by synthesizing the decomposed peaks in consideration of the physical phenomenon, each decomposed peak has a physically correct meaning to some extent and it was suggested that the combustion behavior of the composite material and the product such as electric cables will be described using this methodology.

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 関連する研究報告	2
1.2.1 先行研究の概要	2
1.2.2 先行研究のレビュー結果のまとめ	8
1.3 本研究の目的	8
第2章 既存のケーブル火炎伝播特性試験のレビュー	10
2.1 評価対象のケーブル火災危険性	10
2.1.1 火災時の反応特性	10
2.2 既存のケーブル火炎伝播試験とその変遷	11
2.2.1 ケーブル一条の燃焼試験	11
2.2.2 垂直トレイ燃焼試験	13
2.2.2 米国におけるその他の多条布設ケーブル燃焼試験	17
2.2.3 欧州における垂直トレイ燃焼試験	20
2.3 各種炎伝播特性評価試験の比較	27
2.4 ケーブル燃焼試験の今後	28
第3章 火災安全に係るケーブルに対する規制	30
3.1 各国のケーブル防火性能に係る基準文書	30
3.2 日本国内の規制	31
3.3 米国の規制	32
3.3.1 NFPA70 の概要	32
3.3.2 NFPA70 における規制	32
3.4 欧州諸国の状況	34
3.4.1 英国におけるケーブル防火性能を規定する文書	34
3.4.2 建築資材規制(CPR: Construction products regulation)の導入	37
3.5 各国のケーブル防火基準のまとめ(第3章まとめ)	43
第4章 コーンカロリメータ試験取得データによる垂直トレイ燃焼試験結果の推定方法 の提案	46
4.1 背景及び目的	46
4.1.1 ケーブルの火災安全評価の現状と課題	46
4.1.2 現在の課題に対する取り組み例と問題点	46
4.1.3 本研究の狙いと目標	47
4.2 本研究の対象とした試験方法	47
4.2.1 IEEE 1202 垂直トレイ燃焼試験	47

4.2.2 ベンチスケール試験	48
4.3 本試験で用いた試料	50
4.4 試験結果	51
4.4.1 IEEE 1202 試験結果	51
4.4.2 コーンカロリメータ試験結果	61
4.4.3 IEEE 1202 による試験結果との比較	68
4.5 IEEE1202 延焼距離の簡易推定方法の検討	70
4.5.1 延焼距離の簡易推定式の検討	70
4.5.2 次元解析による簡易推定式の検証	72
4.6 実験データによる簡易推定式の検証	72
4.7 まとめ	78
第5章 発熱速度カーブのピーク分離によるケーブル燃焼挙動の解析手法の提案	80
5.1 はじめに	80
5.2 ケーブル被覆材料の燃焼挙動解析	81
5.2.1 材料燃焼実験	81
5.2.2 発熱速度曲線の近似結果	82
5.2.3 分離ピークに関する考察	89
5.3 ケーブル製品試験への適用	94
5.3.1 試験試料	94
5.3.2 コーンカロリメータ試験結果	95
5.3.3 発熱速度曲線のピーク分離結果	97
5.3.4 分離結果の検証	97
5.3.5 発熱速度曲線のピーク分離結果(6 ピークの場合)	100
5.3.6 分離結果の検証(6 ピークの場合)	100
5.4 第4章の推定結果における外れ値の検証	102
5.5 まとめ	104
第6章 総論	106
6.1 成果のまとめ	106
6.2 今後の課題	107
6.2.1 ケーブル製品試験のコーンカロリメータ試験による垂直トレイ試験結果の推定	107
6.2.2 発熱速度曲線のピーク分離によるケーブル燃焼挙動の推定	108
6.2.3 その他の評価指標への適用	108
参考文献	109
付録1 火炎伝播特性評価試験以外のケーブル火災危険性評価試験	113
A1.1 発煙性評価試験	113
A1.1.1 静的方法	113

A1.1.2 動的方法	116
A1.2 燃焼時発生ガス評価試験	116
A1.2.1 燃焼生成物の腐食性に関する試験	116
A1.3 燃焼放出ガスの毒性に関する試験	117
A1.4 ケーブルの耐火性評価試験	118
A1.4.1 火災時の耐火特性	118
A1.4.2 消防庁告示試験	119
A1.4.3 IEC60331	119
A1.4.4 UL2196	119
A1.4.5 各国のケーブル耐火試験の比較	120
付録 2 非常用回路の耐火性に関する各国の規制	122
A2.1 日本の規制	122
A2.2 米国の規制	123
A2.3 英国の規制	124
A2.3.1 The Approved Document B におけるケーブルの防火性能要求事項	124
A2.3.2 BS7671 におけるケーブルの耐火性に関する規制	124
A2.4 欧州建築資材規制におけるケーブル製品の耐火性に係る区分	125
A2.5 各国の規制の比較	125
付録 3 燃焼長推定におけるケーブル外径の依存性	127
A3.1 はじめに	127
A3.2 用いた推定式	127
A3.3 推定結果	127
A3.4 まとめ	127
謝辞	

第1章 序論

1.1 研究の背景

送電、信号伝達等に用いられる電線・ケーブル（以下、「ケーブル」と記載する）は、エネルギー及び情報を伝達する現代社会における必要不可欠なインフラを構成する重要な製品である。また、都市機能の高度化による電気需要の増大や高度情報化による伝達情報の飛躍的増大等によって、ケーブルが社会生活に及ぼす影響は増大しており、またその建造物内への布設量も増加している。しかしながら、火災危険性の観点からは、非常に大きな熱を放出しながら燃焼する高分子材料を被覆材料にもつケーブルは、一旦着火し、燃焼した場合、電線布設路に沿った火災の大規模化、被覆材料の燃焼によって、発生する熱、煙及び燃焼ガス等の燃焼放出物による、大きな人的及び物的損害等を引き起こす非常に火災危険性の高い製品のひとつとして認識されている。このため、ケーブルの火災危険性を予見し、また予防するための様々な評価方法が開発されており、これらの評価方法を用いた評価に基づくケーブルの火災危険性を評価するための数多くの指針、規制等が存在する。

火災危険性評価を行うための最良の手段は、できるだけ製品の実際の使用状況を模擬した実大規模の実験を実施することであることから、現状各国の規制等で用いられているケーブル火災危険性評価手法は、できるだけケーブルの実布設状況を模擬できるよう比較的大規模な試験方法が多い。中でも長尺に渡って布設されるケーブルがその長手方向に燃焼した際の炎伝播特性は、ケーブルの火災危険性のうち最も重要な特性であり、この特性を評価するための試験方法は、一般的にできるだけ実布設状態を模擬できるよう試験体に長尺のケーブルを用いた実規模の燃焼試験となる。

しかしながら、ケーブルの燃焼挙動は、ケーブルの種類、布設される量、布設環等によって大きく影響を受けることから、様々な環境に布設された多くの種類のケーブルに関して火災時の燃焼挙動を高コストの実規模の実験により逐一調べることは困難であり、ケーブルの構成材料、布設状況等による影響が明確にされていない現状においては、各国の規制に従って評価を行ったとしても、布設されている全てのケーブルに対して火災安全性が担保されているとは言い難い。また、それぞれの国、地域によって、ケーブルの火災危険性を評価するための試験方法が異なっていることから、各国の規制に対応するためには、複数の大規模な試験を実施する必要がある、ケーブルの製造者にとって大きな負担となっている。

このような事情から、実際のケーブル又はケーブルを構成する部材、材料等に対して研究室レベルで実施可能なベンチスケールの燃焼試験を通じて得られるデータを活用して実際のケーブル製品の燃焼挙動を予測するための手法を開発するための取組みが多方面で試みられている。しかしながら、現状においては、ベンチスケール試験によって得られるデータを元にした、ケーブル製品に対する火災危険性評価手法が規格化されたり、規制に用いられったりしているケースはない。

1.2 関連する研究報告

1.2.1 先行研究の概要

実際のケーブル又はケーブルを構成する部材，材料等に対して「ベンチスケールの燃焼試験」を通じて得られる発熱データ等を活用して燃焼挙動を予測する方法論が幅広く検討されている．用いられているベンチスケール試験としては，酸素指数測定法，熱重量示差熱分析装置(Thermogravimeter-Differential Thermal Analyzer 以後，TG/DTA という)といった熱分析手法，マイクロスケール熱量計(Microscale combustion calorimeter：以後，MCC という)，コーンカロリメータ(Cone Calorimeter)といった燃焼発熱評価試験方法等があるが，中でもコーンカロリメータ試験にて測定することができる発熱特性を用いた研究結果が多く報告されている．これは，MCC，TG/DTA 等の試験では，単一材料の燃焼特性は詳細に把握することができるが，多数の材料の複合体であるケーブルの燃焼挙動を，これらの材料試験によって再現することが困難であることが一因であると考えられる．コーンカロリメータ試験に関してはケーブルを構成する各材料の燃焼挙動も把握することもできるが，ケーブル製品そのものを試験体として用いることが可能であることから，多数の材料の複合体であるケーブル製品の燃焼挙動全体を把握する上では，有効な手段であると考えられる．また，コーンカロリメータ試験は，国際規格である ISO5660-1 として規定されており，各方面で，多くの製品の燃焼挙動解析等に幅広く用いられており，多くの研究者と知見を共有する上においても非常に有効なものである．

そこで，ここでは，主に欧米においてケーブルの火災危険性評価の検討にコーンカロリメータ試験を活用した事例について調査した．

米国においては，1990 年代より，コーンカロリメータ試験をケーブルの火災危険性評価に適用するための研究が各方面で報告されている．

Gandhi¹⁾らは，米国において規制に用いられている UL1581 に規定されたケーブルの炎伝播特性評価試験にてケーブル燃焼時の発熱速度データを取得し，最大発熱速度と UL1581 試験の判定基準となる試験終了時のケーブル燃焼長の間に相関性があり(図 1-1)，またコーンカロリメータ試験において UL1581 試験で使用した内の 3 種類のケーブルを燃焼した際の最大発熱速度とこれらのケーブルの UL1581 燃焼試験における最大発熱速度との間にも相関が見られる(図 1-2)ことから，UL1581 試験の合否判定がコーンカロリメータ試験を用いて可能であることが示唆されている．但し，この結果は，3 種類のケーブルのみの燃焼結果によって得られたものであり，様々な構造のケーブルに対する検証が必要であるとも報告している．

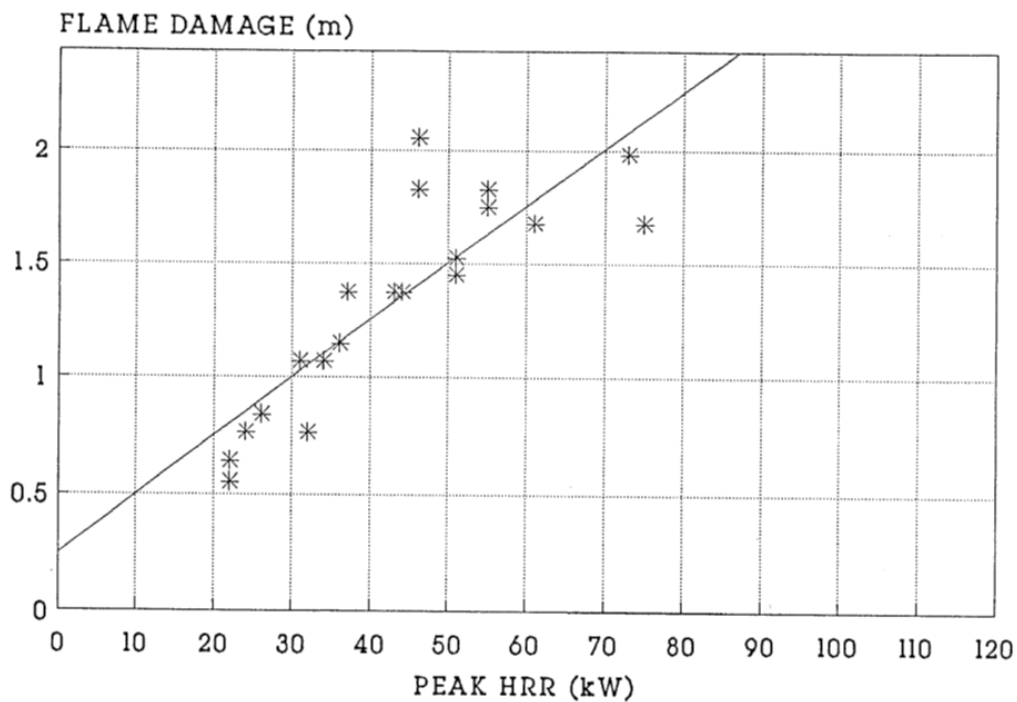


図 1-1 UL1581 燃焼試験における最大発熱速度と燃焼長の関係

An investigation into use of heat release rate calorimetry for electric cables より引用

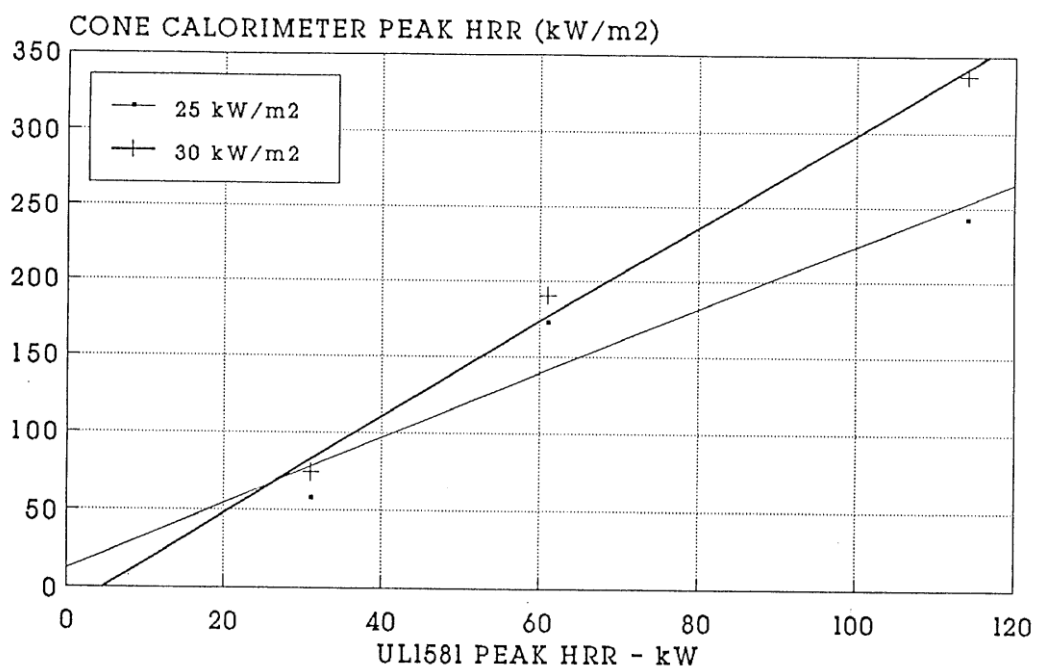


図 1-2 UL1581 試験及びコーンカロリメータ試験における最大発熱速度の関係

An investigation into use of heat release rate calorimetry for electric cables より引用

Coaker²⁾らは、新たに開発した低発煙の PVC コンパウンドを用いたケーブルの難燃性評価を行うために UL1581 試験と同様のケーブル燃焼試験である CSA C22.2.03³⁾ FT4(図 1-3 以

下 CSA FT4 試験)及びコーンカロリメータ試験にてその性能評価を実施している。また、異なる試験所の試験装置間の結果の差異についても検証している。実験において PVC を被覆材料に持つ 16 種類のケーブルを CSA FT4 試験及びコーンカロリメータ試験により燃焼し、CSA FT4 試験で得られる最大発熱速度をコーンカロリメータ試験で得られた発熱速度から予測可能であり(図 1-4)、コーンカロリメータ試験の最大発熱速度から、CSA FT4 試験の燃焼長を判定基準としたおおよその合否判定が可能であると報告している。

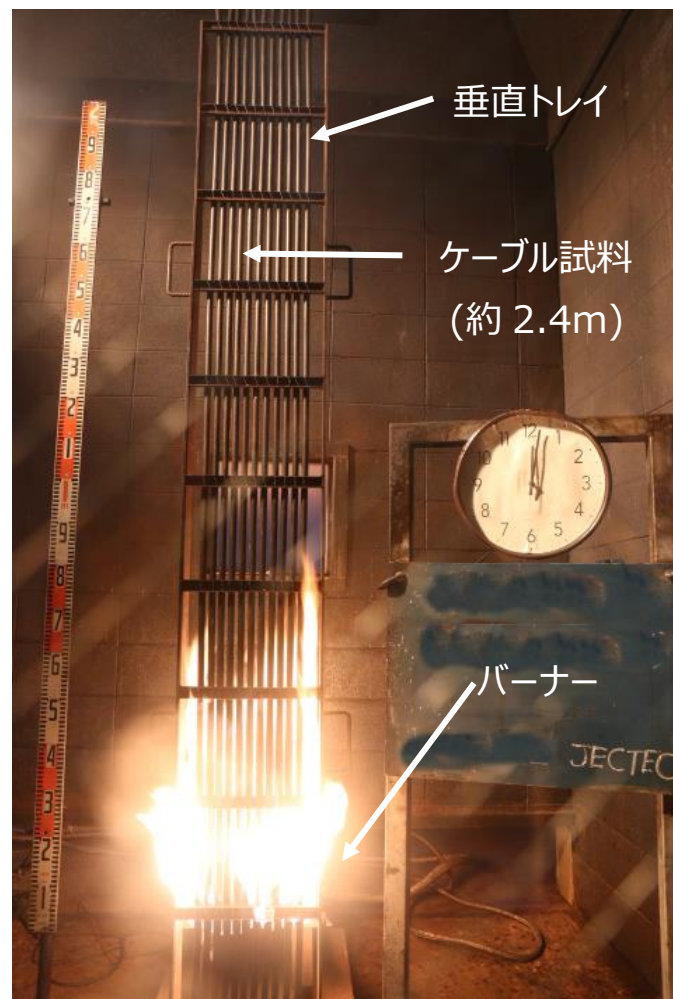


図 1-3 CSA FT4 試験

しかしながら、この研究の実験で使用された全てのケーブルの被覆材料は、ポリ塩化ビニル(PVC)であり、単位重量当たりの発熱量(燃焼熱)は、ケーブル間でそれほど大きな違いはないものと考えられ、燃焼熱の異なる材料について、本報告同様の相関性が得られるかどうかは議論されていない。

その他米国においては、原子力規制委員会が、発電所におけるケーブルの実布設状態を模擬した実規模燃焼試験で得られた発熱挙動を、予測するためのモデルにコーンカロリメータ試験で得られた発熱特性データを活用するための検討がなされている^{4),5)}。

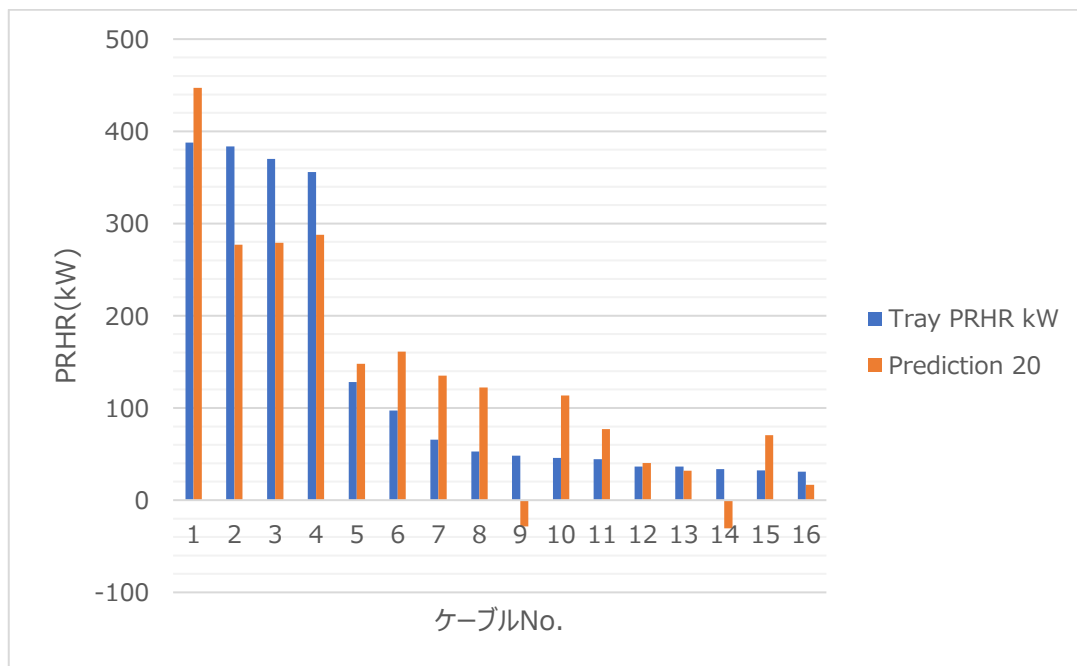


図 1-4 CSA FT4 試験の最大発熱速度とコーンカロリーメータ試験結果からの推定最大発熱速度

A.W. Coaker, M.M.Hirschler, S. Shakir, C.L. Shoemale” Flammability testing of new vinyl compounds with low flammability and low smoke release cables”のデータを元に作成

欧州においては、コーンカロリーメータ試験を 2017 年に施行された建築資材規制 (Construction products regulation:CPR)に基づくケーブルの難燃特性クラスを決定するための実規模試験方法 (EN 50399⁶⁾ 図 1-5 参照) の代替試験方法として用いるための報告が近年多く見られる。

これは、CPR の要求事項によって、欧州域で流通する難燃性の高い建築用のケーブルに関しては、実規模ケーブル燃焼試験である EN50399 試験結果等を元にした第三者機関による認証によって、CPR に規定された難燃クラスのどのクラスに該当するかの性能宣言をする必要性が生じたためである。このためケーブル製造者は、認証取得のために、高コストである EN50399 試験を数多く実施することを強いられることとなり、これがケーブル製造者にとって大きな負担となっている。これに伴い欧州では、コーンカロリーメータ試験と EN50399 試験との関連性に関する検討が盛んに行われることとなった。

Magalie ら⁷⁾は、同一材料を用いた 5 種類のケーブルを、コーンカロリーメータ試験において複数のサンプルセッティング(通常コーンカロリーメータ試験においては、サンプルホルダ内にケーブルを敷き詰めて試験を実施するが、この報告では、通常のセッティングに加えケーブルを一定の間隔をもってサンプルホルダ内にセットした場合の影響についても検討されている。)にて燃焼し、コーンカロリーメータ試験の加熱強度、サンプルホルダに設置するケーブルの本数、サンプルホルダ内のケーブルの密度、シース厚さ及び 1 本のケーブルの絶縁体重量といったパラメータで構成されるべき乗則を用いた推定式によって、コーンカロリーメータ試験における最大発熱速度(図 1-6)、着火時間(図 1-7)及び最大発熱速度時

間が予測可能であると報告している。

但し、この報告において検討されたケーブルは、同一の材料を被覆材料に持つものでありまた推定式には、材料の特性が考慮されていないことから、ケーブルに使用される材料毎に、べき乗則を用いた推定式が必要となるものと考えられる。また、ケーブル開発時に EN50399 等の実模試験の実施数を低減することを目的とした研究であるが、報告の段階では、実規模試験結果との相関性については、議論されていない。

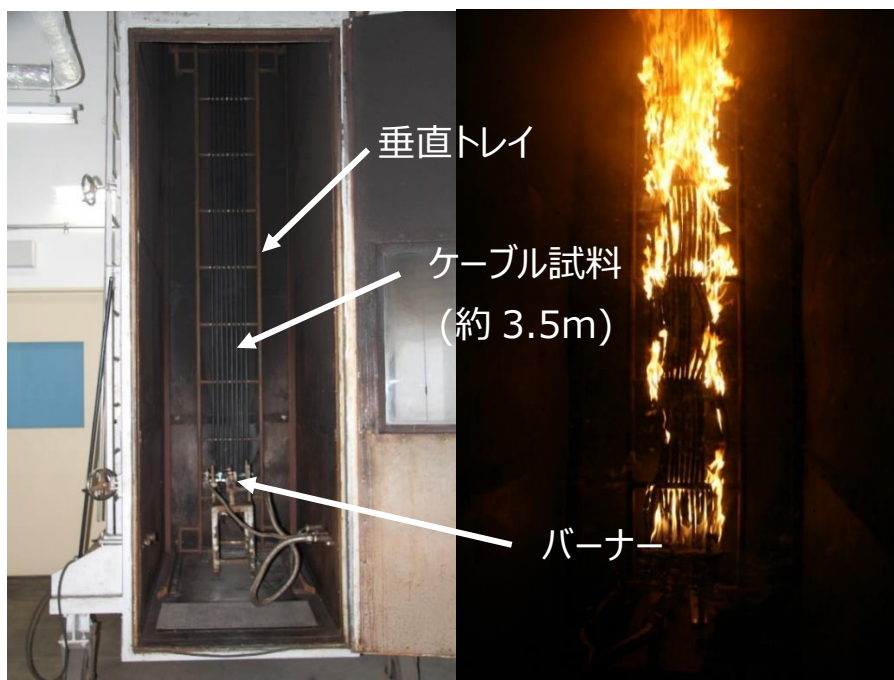


図 1-5 EN50399 試験 ケーブル設置状況(左)及び燃焼状況(右)

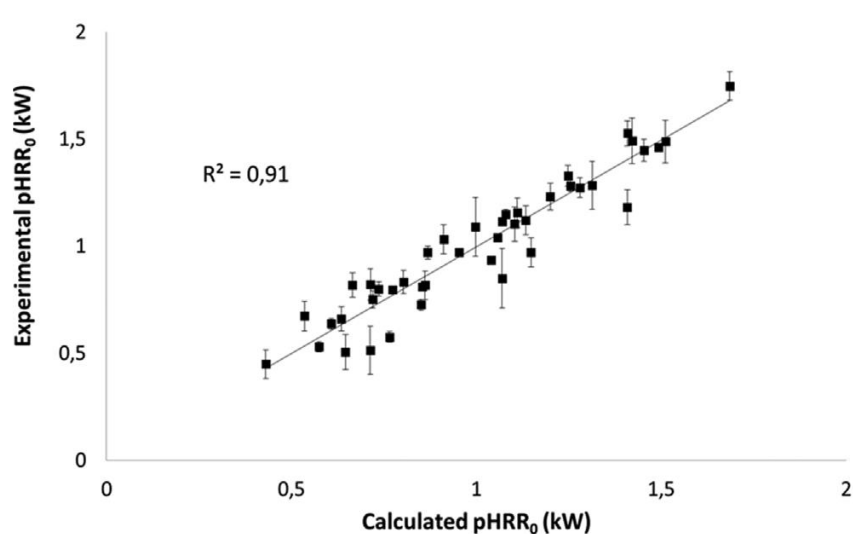


図 1-6 最大発熱速度推定値とコーンカロリーメータ試験の最大発熱速度との関係

Fire behaviour of electrical cables in cone calorimeter: Influence of cables structure and layout より引用

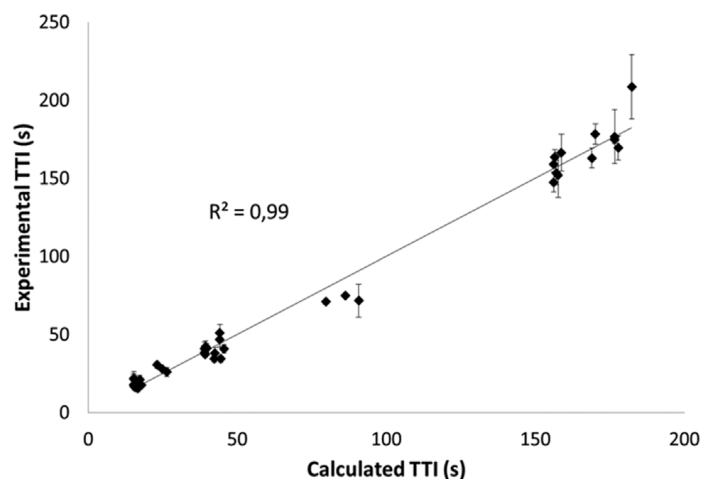


図 1-7 着火時間推定値とコーンカロリーメータ試験の着火時間との関係

Fire behaviour of electrical cables in cone calorimeter: Influence of cables structure and layout より引用

Katarzyna⁸⁾らは、PVC 被覆ケーブルをコーンカロリーメータ試験において燃焼し、その結果から火災の数値解析モデルに用いられる Quintiere の法則⁹⁾で用いられる燃焼性の指標を導出した結果は、他の建築部材から得られた結果と整合しており、ケーブルの実規模試験で得られるデータの代替としてコーンカロリーメータ試験によるケーブル燃焼で得られるデータを火災の数値解析モデルに適用可能であると報告している。また、4 種類のケーブルを EN 50399 試験及びコーンカロリーメータ試験にて燃焼し、実規模試験において、ケーブルサンプル全てが燃焼するケースにおいて得られる総発熱量は、コーンカロリーメータ試験において得られた総発熱量にコーンカロリーメータ試験における試験ケーブルの重量減少量を乗じた値(MTHR)から推定可能であると報告している(図 1-8)。

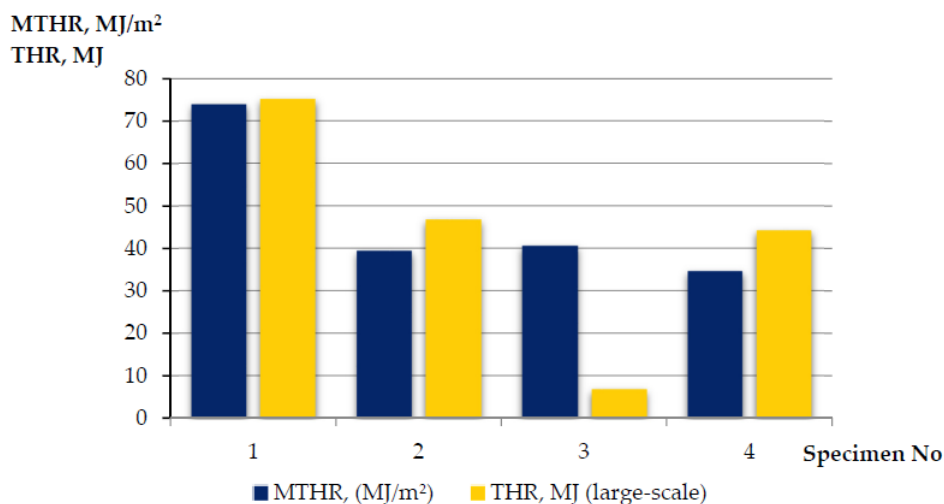


図 1-8 EN50399 試験の総発熱量とコーンカロリーメータ試験から推定した総発熱量 (MTHR) との比較

Calorimetric Behaviour of Electric Cables より引用

1.2.2 先行研究のレビュー結果のまとめ

コーンカロリメータ試験を使用した代表的なケーブル燃焼性に関する先行研究をレビューしたところ、コーンカロリメータ試験で得られる発熱データを用いて、ケーブルの燃焼性を差別化することができ、ケーブル開発段階における、コーンカロリメータ試験で得られる発熱データを数値解析モデルへのインプットデータとして用いることができることが可能であることが示唆される。また、幾つかの報告では、コーンカロリメータ試験で取得したデータからある程度実規模試験を予測できることが示唆されており、逆にいえばこれは、ベンチスケール試験の結果さえ予測できれば実規模試験が無縁となることを意味するものである。このベンチスケール試験で得られるデータとしては、最大発熱速度（PHRR: Peak heat release rate）、総発熱量（THR: Total heat release）、燃焼熱（HOC: Heat of combustion）等の発熱性を表すものであり、これらの予測精度が実規模試験の燃焼挙動の予測を与えたとはいえ、規制目的で実施される実規模のケーブル燃焼試験の代替として用いることができることが推察される。

しかしながら現時点において、規制等でケーブルの火災危険性の指標として最も一般的に用いられているケーブルの火災伝播特性を表す実規模試験における試験ケーブルの燃焼長を定量的に推定する手法は確立されていない。

この理由としては、上記報告においては、コーンカロリメータで取得する発熱データと実規模試験で得られる発熱データを比較することによって、実規模試験との整合性を評価しているが実際に規制等で要求されているものは、実規模試験においてケーブルがどの程度延焼するかである。従ってコーンカロリメータで取得した発熱データをケーブルの燃焼長に変換する必要があるが、現状発熱データを燃焼長に変換するためのモデルは、報告されていない。また、実規模試験においては、着火源の加熱範囲を超えてケーブルが延焼するケースがあるが、この延焼をコーンカロリメータの限られた大きさのサンプルでは、表現することが困難であるといった2つの大きな課題があるためであると考えられる。

1.3 本研究の目的

上記のとおりベンチスケール試験結果と実規模試験結果に関する定量的な比較ができるような予測手法は未確立である。そのため、我が国の規制等での難燃性指標として用いられている「垂直トレイ試験における燃焼長」という定量値は、既存の提案方法では（ベンチスケール試験の結果から）推定できない。このような問題点があるため、結果として、現状ではベンチスケール試験の結果を実規模の試験結果の代替として公的試験規格や規制に用いるには至っていない。

火災危険性評価は、実火災を想定した火災シナリオに基づき、できる限り想定される火災空間の状態を模擬した試験方法によって得られた定量的データに基づき実施されるべきであるが、現状ケーブルの火災危険性評価は、単一の燃焼条件による実規模試験によってその試験への可否を判定することで行っているのが現実であり、実規模試験の結果をより精度の高いベンチスケール試験で推定することには大きな価値がある。

このような背景のもと、本研究では、世界各国で用いられている既存のケーブル火災危険性評価試験及びケーブルの耐火性能に関する規制の状況を調査し、ケーブルの火災危険性評価に関する現状の問題点について整理するとともに、ケーブル開発段階で実施される実規模試験に係るコストの削減だけでなく将来的な規格化、規制への適用を視野に入れた、実規模試験の結果を定量的に推定するためのベンチスケール試験を用いた、新たなケーブル火災危険性評価手法を提案することを目的に実規模試験とベンチスケール試験によって得られる試験結果の比較検討を実施した。

第2章 既存のケーブル火炎伝播特性試験のレビュー

2.1 評価対象のケーブル火災危険性

ケーブルの火災危険性は、過電流等によるケーブル自身の発火及び火災等による外部着火源によるケーブルの着火に大別することができるが、現在各国の規制等においては、主に後者の外部着火源によるケーブル燃焼による危険性が考慮されている。各国においてケーブル火災危険性の要素として着目されている代表的な特性としては、ケーブル燃焼時の①炎伝播特性②発煙性③燃焼ガスの腐食性④燃焼ガスの有害性及び⑤燃焼時の回路維持性能がある。これらは、ケーブルが外部熱源により着火、燃焼した際にケーブルを構成する可燃材料が示す反応を評価する指標である火災時の反応特性 (Reaction to fire)、とケーブルが火災に曝された場合にどの程度その機能を維持できるかを評価する指標である火災時の耐火特性(Resistance to fire)に分類することができ、上記①~④は、火災時の反応特性(図 2-1 参照)に、⑤は火災時の耐火特性に分類される。このうち、本研究の調査対象である火災時の反応特性について概説する。

2.1.1 火災時の反応特性

①炎伝播特性

ケーブルが燃焼した際に生成する炎がケーブルの長手方向に延焼する度合いを評価するものであり、現在建築、車両、電気・電子機器等に用いられる殆どのケーブルがこの評価を要求されている。

②発煙性

ケーブルを構成する可燃材料が燃焼した際にどの程度煙が生成するかを示すものであり、主に建築物中の在館者、車両中の乗員乗客等の避難に影響する部分に用いるケーブルに対して要求される特性である。

③燃焼ガスの腐食性

ケーブルを構成する可燃材料が、燃焼した際に生成する、ハロゲンガス等の腐食性ガスが火災空間近傍に存在する電子機器の故障、誤動作等に影響する度合いを示すものとして、導入されたものであるが、現状は、ケーブル構成材料にハロゲン等の有害物質が含まれる度合いを示す指標として用いられるケースが多い。

④燃焼ガスの毒性

ケーブルを構成する可燃材料が燃焼した際に生成する燃焼ガスに在館者、乗客等の避難に影響する毒性ガスの生成量を示す指標であり、現在は、毒性ガスが乗員、乗客の避難に大きく影響する、鉄道車両等に用いられるケーブルに主に要求される特性である。

上記のとおり、ケーブル火災時の反応特性は、概ね4種類に分類されるが、燃焼による煙及びガスの生成量は、ケーブルの燃焼量に応じて増加することから、上記特性のうち発

煙性、燃焼ガスの酸性度及び燃焼ガスの毒性による火災危険性は、ケーブルの火災伝播特性に大きく支配されることとなる。従って、ケーブルの火災危険性のうち最も重要な特性は、ケーブルの耐延焼性を評価するための指標である火災伝播特性であると言える。すなわち火災空間におけるケーブルの火災伝播を抑制することにより、ケーブルの火災危険性を大幅に低減することができる。

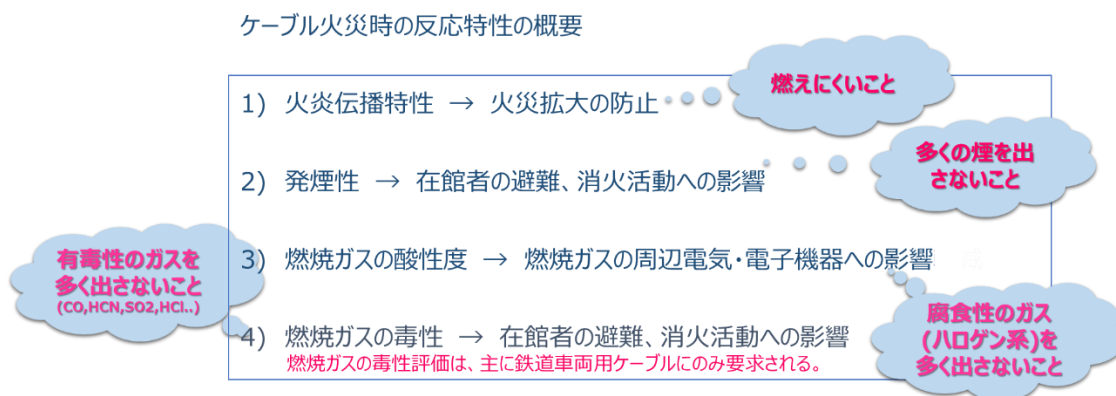


図 2-1 ケーブル火災時の反応特性の概要

2.2 既存のケーブル火災伝播試験とその変遷

ケーブルが火災等により燃焼した場合、その延焼により電線路に沿って火災が拡大し、大規模火災に発展する可能性が非常に高く、また、延焼が進むことによって、生成する煙、有害ガスも増加することから炎伝播特性の評価はケーブルの火災リスクを評価する上で最も重要な要素の一つであると言える。このため使用目的、使用場所に応じた評価方法が数多く開発され、規制等に用いられている。ここでは、主に日本工業規格(以下 JIS という)、国際電気標準会議規格(以下 IEC という)、欧州規格(以下 EN という)及び米国における代表的な安全規格である UL (アンダーライタズラボラトリー) 規格 (以下 UL という) といった、主要な規格中に存在するケーブルの火災危険性評価方法の概要を火災危険性の種類毎に紹介する。なお、参考として火災伝播特性以外のケーブル火災危険性評価試験に関して付属書 2 に記載する。

2.2.1 ケーブル一条の燃焼試験

1960 年代までは、ケーブルの燃焼性は、1 本のケーブルを小型のバーナーで燃焼させその自己消火性を確認する試験(ケーブル一条の燃焼試験)によって評価されていた¹⁰⁾。これらの方法は、現在でも電気機器内の配線材や、その他のケーブルの最低限必要とされる難燃性能を評価する手法として用いられている。

国家、地域ごとに様々な試験方法が存在するが、基本的には、製品から切り出した 1 本の規定長さのケーブルにブンゼンバーナー等の小型のバーナーで点火し、その自己消火性を評価する試験方法である。

着火源として使用するバーナーの出力、試験時の試料の設置方法(60°、垂直、水平等)、接炎時間は、規格によって様々である。表 2-1 に代表的なケーブル一条の燃焼試験の概要を示す。

表 2-1 代表的なケーブル 1 条の燃焼試験の比較

試験規格	JIS C 3005 ¹⁾	UL2556 ¹²⁾ (VW-1)	IEC60332-1-2 ¹³⁾ IEC60332-1-3 ¹⁴⁾
試料長	300mm	610mm 以上	600mm
試料設置方法	60°又は水平	垂直	垂直
燃料ガス	37 MJ/m ³ の工業用 メタンガス又はこ れと同等以上の発 熱量をもつもの	純度 98%以上のメタ ンガス	純度 95%以上のプロパン ガス
バーナー公称出 力 ^{注 1)}	規定無し	500W	1 kW
接炎方法	30 秒以内で試料が 燃焼を開始するま で接炎	15 秒の接炎を 15 秒間 の間隔を空けて 5 回.	ケーブル外径によって規 定 (外径 25mm までは、1 分 間)
判定基準	接炎終了後 60 秒以 上燃焼が継続しな いこと	各接炎終了後の最大 の残炎時間が 60 秒を 超えないこと バーナー火炎接炎位 置から 254mm 上方に 取付けたフラッグが 25%以上燃焼しないこ と 試験片下方に敷いた 脱脂綿が着火しない こと	試料の炭化長さがバーナ ー火炎接炎位置より上方 に 425mm 以内及び下方 に 65mm 以内であること (IEC60332-1-2) 試験片下方に敷いたフィ ルタ紙に着火しないこと (IEC60332-1-3)

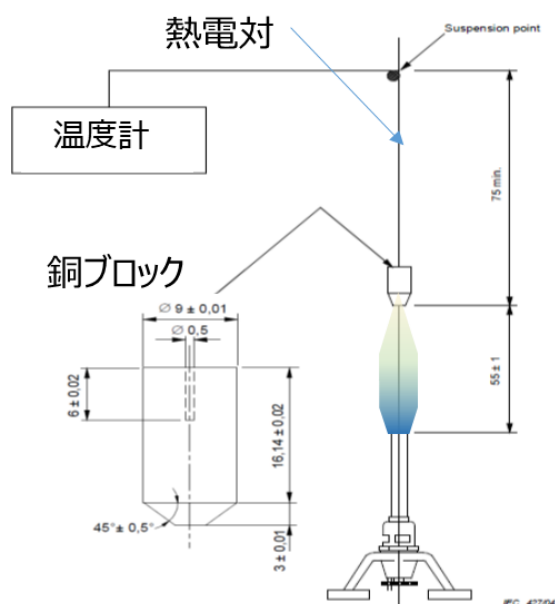
注1) 国内で用いられている JIS C 3005 以外の方法では、着火源であるバーナーに供給する燃料ガスの流量を規定しており、規定したガス流量から算出した理論的な出力を公称出力と呼ぶ。

表 2-1 に示すとおり接炎終了後の残炎時間、及び/又は炎の伝播による損傷を基にケーブルの自己消火性を評価する試験方法となっている。また、国内で用いられている JIS C 3005 以外の方法では、燃焼による滴下物による周囲の可燃物への影響を評価するための手法が規定されている(但し、IEC 60332-1(図 2-2)では、自己消火性の評価と滴下

物の評価が別規格となっており、現在のところ燃焼滴下物の評価方法である IEC60332-1-3 は、欧州各国においても規制等に用いられている事例はない)。JIS C3005 試験は、バーナーに供給する燃料及び、燃料ガスの流量が厳密に規定されておらず、試験結果に大きく影響するバーナー火炎の接炎時間も試験者の判断に委ねられている。また、UL 及び IEC における試験方法は、バーナー火炎の出力が適切に得られていることを図 2-3 に示すよう、形状及び重量が規定された銅ブロックを試験用にセッティングされたバーナーで加熱し、銅ブロックの温度上昇時間を測定することによって確認することが要求されている。こういったことから現在国内で用いられている試験方法は、UL 及び IEC に規定されている試験方法と比較して、試験結果にバラツキの生じやすい試験となっている。



図 2-2 ケーブル一条の燃焼試験(IEC60332-1)



銅ブロックの温度上昇時間から規定
の出力が得られるかを確認

図 2-3 バーナー出力確認試験配置図

2.2.2 垂直トレイ燃焼試験

ケーブルはケーブルラック、ダクト、ケーブルシャフト等にまとめて布設される場合が多い。また、建築物内においてケーブルを交換する際に古いケーブルは撤去されず古いケーブルと共に新設のケーブルが布設される場合が多い。1960 年代後半から 1970 年代前半にかけて、発電所や変電所において、ケーブルトレイに多量に布設されたケーブルの火災

によってプラント等に大きな損害を与える事故が頻発したが、このように多くのケーブルが存在する状態において、ケーブルに着火した場合、ケーブル一条の燃焼試験においては延焼しないケーブルであっても、互いの放出する熱の相互作用により延焼し、非常に高い熱量を発することがこれらの事故の教訓として得られた。このため、この様な布設状態のもとでのケーブルの延焼性を評価するために、実布設状態に近い状態を模擬した様々な試験方法が開発されている。

上記背景を基に開発されたのが垂直トレイ燃焼試験と呼ばれ、難燃性ケーブルの評価に現在最も幅広く用いられている試験方法である。最も代表的な垂直トレイ燃焼試験は、アメリカ電気電子学会(IEEE)により原子力発電所用のケーブル等を規定した IEEE383¹⁵⁾中に 1974 年に規格化されている試験方法である。この試験では、垂直に設置した、はしご状のケーブルトレイに試験ケーブルをその外径の 1/2 間隔で取付けトレイ下方に設置した出力約 20kW のリボンバーナーと呼ばれるバーナー(図 2-4)でケーブルを燃焼させトレイ上方へのケーブルの延焼を評価するものである。その後 UL が試験の再現性等を考慮し改良した試験方法を UL1581¹⁶⁾として規格化している。また、カナダにおいては、Canadian Standards Association (CSA)がケーブルの試験方法を規定した CSA C22.2 No.0.3 中に FT-4 という名称で規格化している。国内においてもこの試験方法をベースに開発された試験方法が、JIS C 3521¹⁷⁾(図 2-5)として規格化されており通信ケーブル、耐火・耐熱電線等の炎伝播特性評価に用いられている。これらの当初開発された試験方法は、原子力発電所用ケーブルはもとより、船舶用ケーブル、車両用ケーブルといった幅広い分野において、ケーブルの難燃性能評価試験として用いられてきたが、現在では、これらの規格を改良した垂直トレイ試験が用いられるようになってきている。代表的なものとしては、CSA FT-4 をベースとした IEEE1202¹⁸⁾、UL1581 1160 の改良型である UL1685¹⁹⁾等があげられる。これらの新たに開発された試験方法においては、IEEE383 1974 では詳細に規定されていなかった、試験室(UL,CSA,IEEE 共通、図 2-6)、着火源となるバーナーに使用する燃料の仕様及び供給量、ケーブルのトレイへの取付け方法等をより詳細に規定することにより、試験精度の向上を図る改良が施されている。但し、着火源となるバーナーの形状及び公称出力は、殆どの試験において原型となる IEEE383 1974 と同一のものである。

表 2-2 に代表的な垂直トレイ燃焼試験の比較を示す。各国で用いられている試験方法は、着火源であるバーナーの公称出力から、同レベルの火災危険性を評価する試験方法と言えるが、ケーブルのトレイへの取付方法、試験室のサイズ等試験結果に重大に影響する試験条件が異なっており、試験方法間の試験結果に明確な整合性は見られない。一例として、IEEE1202(CSA FT4)については、バーナー出力は、原型である IEEE383 1974 と同等となっているが、バーナーを 20°上方に傾けて試験を実施することから、バーナー火炎に曝されるケーブルの表面積が増加し、また、許容されるケーブル損傷長が 1.5m と IEEE383 1974 と比較して短くなっていることから、この試験は、IEEE383 1974 よりも厳しい試験となると認識されている。



図 2-4 垂直トレイ試験用リボンバーナー
ほぼ全ての試験方法で同型のバーナーが用いられている.

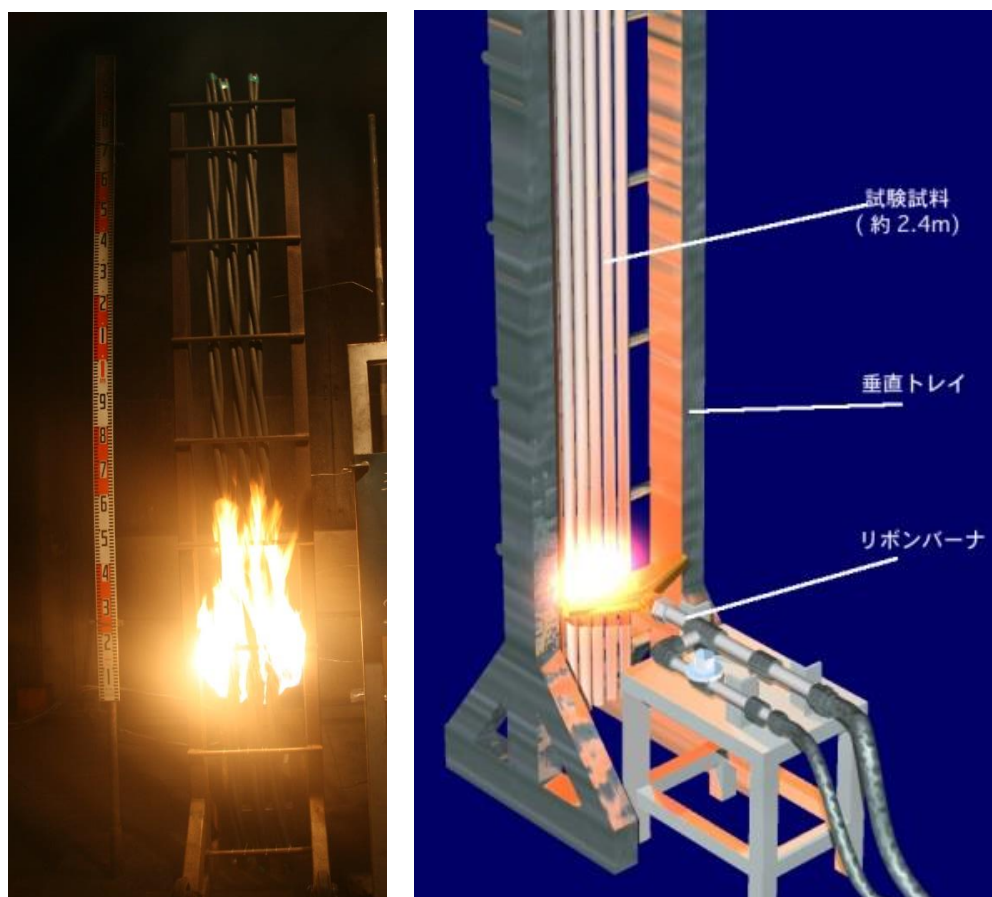


図 2-5 垂直トレイ燃焼試験(JIS C 3521)

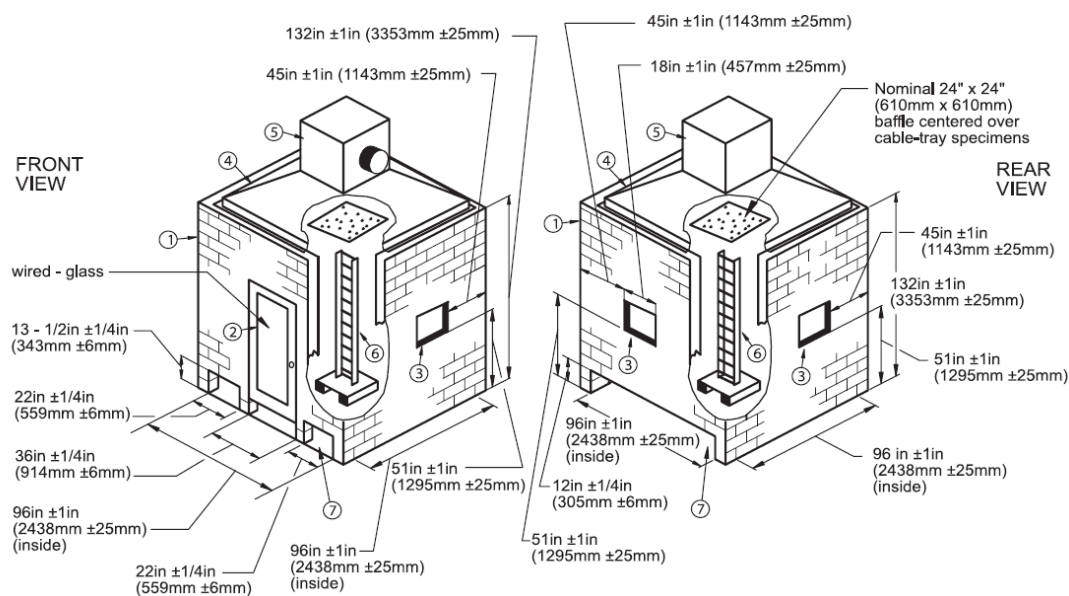


図 2-6 北米規格の垂直トレイ試験に用いる試験室
UL1685 より引用

表 2-2 代表的な垂直トレイ燃焼試験

試験規格	IEEE383 1974	JIS C 3521	UL1685	CSA FT4 IEEE1202	IEC60332-3 (Category C)
試験室長(m)	2.44	2.4	2.44	2.44	3.5
バーナー公称出力(kW)	約 20	規定無し	約 20	約 20	約 20
バーナー設定項目	火炎長, 火炎温度, 配管圧力	火炎長, 火炎温度	ガス, 空気流量	ガス, 空気流量	ガス, 空気流量
バーナー角度	水平	水平	水平	20°上方	水平
トレイ幅(mm)	300	300	300	300	500
ケーブル取付幅(mm)	150	150	150	150	300
ケーブル取付方法	外径の 1/2 間隔	外径の 1/2 間隔	外径の 1/2 間隔	外径 13mm 以上は 外径の 1/2 間隔 外径 6mm 以上 13mm 未満の場合は, 3 本を束にして 取付け(図 2-7)	外径の 1/2 間隔 但し 導体サイズ 35mm ² 以下は密着
試験室サイズ(m)	規定無	規定無	2.4W×2.4L×3.4H	2.4W×2.4L×3.4H	1W×2L×4H
試験室への流入 空気量(l/min)	規定無	規定無	規定無	規定無	5,000
試験室排気流速 (l/min)	規定無	規定無	39,000	39,000	規定無
試験時間(min)	20	20	20	20	20 又は 40
判定基準		トレイ上端(バー ナー から 1.8m)まで延焼 しないこと	トレイ上端(バー ナー から 1.8m) まで延焼しない こと	燃焼長がバーナ ーから 1.5m を超 えないこと	燃焼長がバーナ ーから 2.5m を超 えないこと

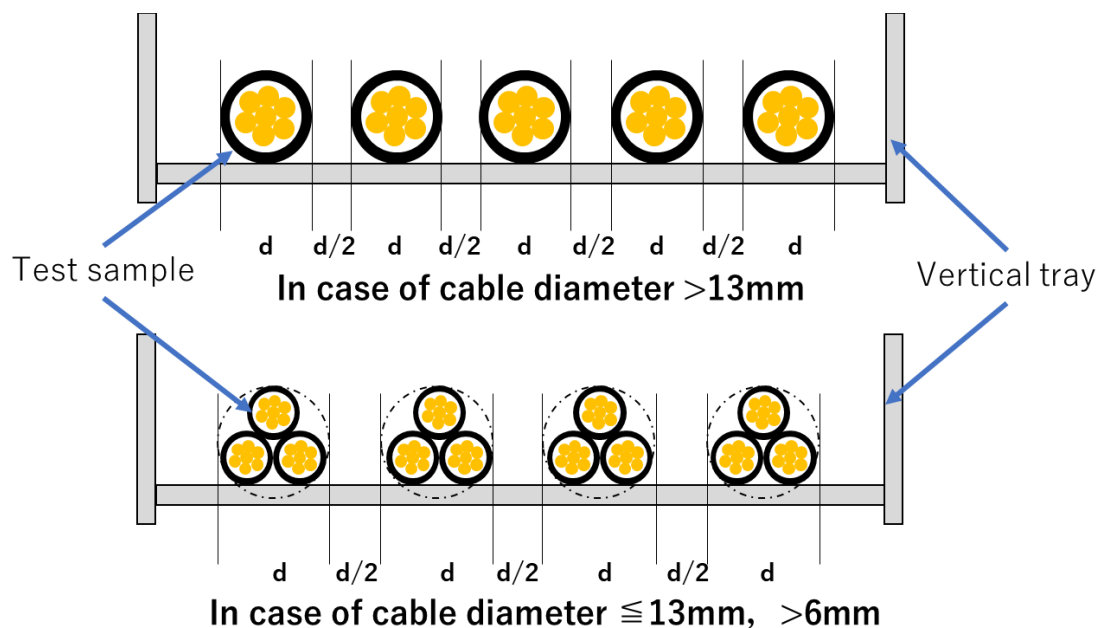


図 2-7 CSA FT4/IEEE 1202 試験のケーブル取付方法(トレイ上の配列)

2.2.2 米国におけるその他の多条布設ケーブル燃焼試験

米国においては、上記垂直トレイ試験の他、建築中においてケーブルの火災リスクが大きいと考えられる特定の箇所に布設するケーブル(主に通信・計装ケーブルが対象)を評価するための試験方法が開発されている。

2.2.2.1 スタイナートンネル燃焼試験(図 2-8)

米国では、1975 年、同年ニューヨーク電話交換局で発生した大規模火災に起因し、垂直トレイ試験クラス以上の難燃性を持つケーブルが米国の電気設備設置基準に当る NFPA70²¹⁾に規定されることとなった。

この火災では、ビル一階で発生した漏電火災により、ケーブルが着火し、天井裏、床下といった隠蔽空間(プレナム)に布設されたケーブルに沿って火災が急激に拡大し、甚大な損害が生じた。この試験は、ビル内の天井裏、床下等の隠れた空間で空調の一部として使用される空間(プレナム)に布設されるケーブルを対象としたものであるが、これらの空間は常に空調された空気が循環しているため、このような空間に存在するケーブル等の可燃物質に着火した場合、この空気の流れに沿って目に見えない場所で急激に延焼し、大規模火災となる可能性が非常に高い。このためそういった状況を模擬するために新たなケーブル燃焼試験が開発された。この試験方法は試験の開発者の名前を取ってスタイナートンネル燃焼試験と呼ばれている。この試験は当初 UL が UL910²²⁾として規格化したのが、その後 NFPA による本試験の世界展開を意図した日本、英国を含めたプロジェクトにより、UL910 及び ASTM, NFPA にそれぞれ規定されていた同様の装置を用いた試験方法の整合化が図られ NFPA262²³⁾として統一規格が発行されている。

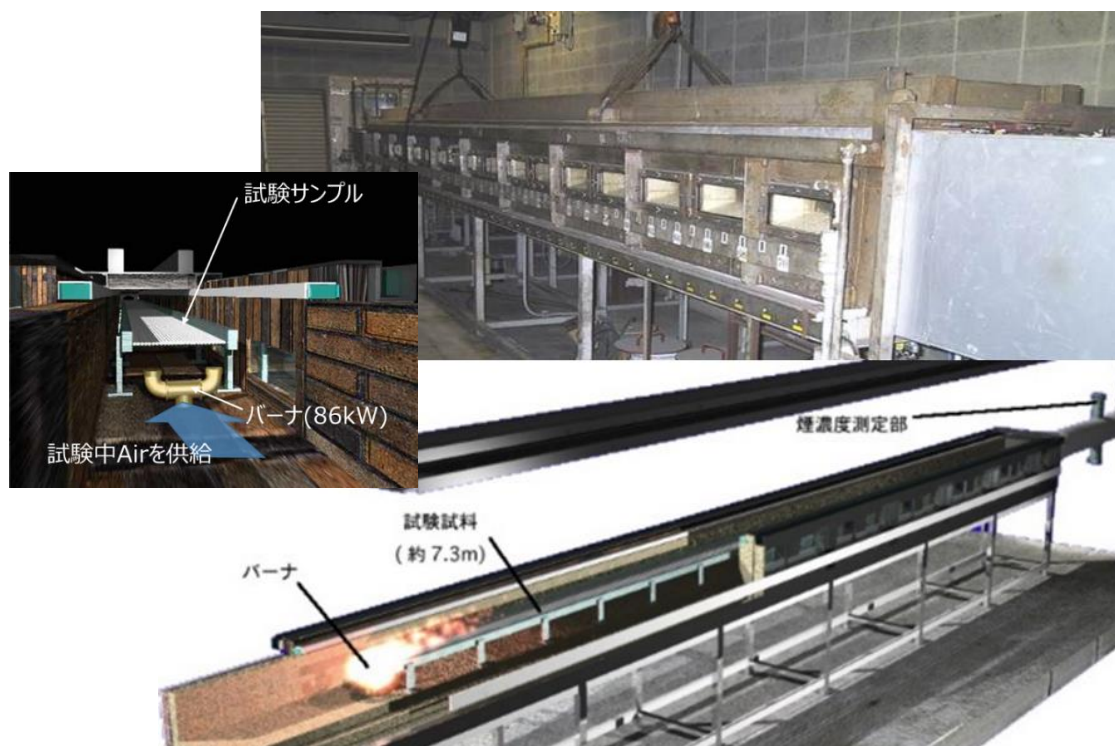


図 2-8 スタイナートンネル燃焼試験

試験は温度及び湿度がコントロールされた試験室内に設置された全長約 8m の試験炉内に長さ約 7m 幅約 0.3m のケーブルトレイを設置し、そのトレイ全長に渡ってケーブル試料を敷き詰め、メタンガスバーナーを用いて試料に点火し、ケーブルの水平方向への延焼性を評価するものである。試験中は炉内圧力を常に一定に保つよう換気が行われる。また、試験装置に接続した排気ダクトに煙濃度測定系が設置されており、ケーブル燃焼時の発煙性の評価も実施することから、この試験に適合するためには、発煙濃度の規定にも適合する必要がある。その他、燃焼ガス中の酸素濃度の減少量を測定することによってケーブル燃焼による発熱性の測定が可能となっている。

なおこの試験方法は、前述の整合化プロジェクトを受け欧州規格(EN)にも EN50289-4-11²⁴⁾として取り入れられているが、欧州では、後述する新たな試験方法が開発されたことから、この試験方法は現状では、使用されていない。

2.2.2.2 ライザーケーブル燃焼試験(図 2-9)

更に米国では、1980 年、高度情報化社会の到来とともにビル内に多量に設置された通信ケーブルを対象に新たな試験方法が導入されている。この試験方法は、ビル内の垂直シャフト(EPS)内に布設されるケーブルを評価対象とした試験方法でありライザーケーブル燃焼試験と呼ばれている。

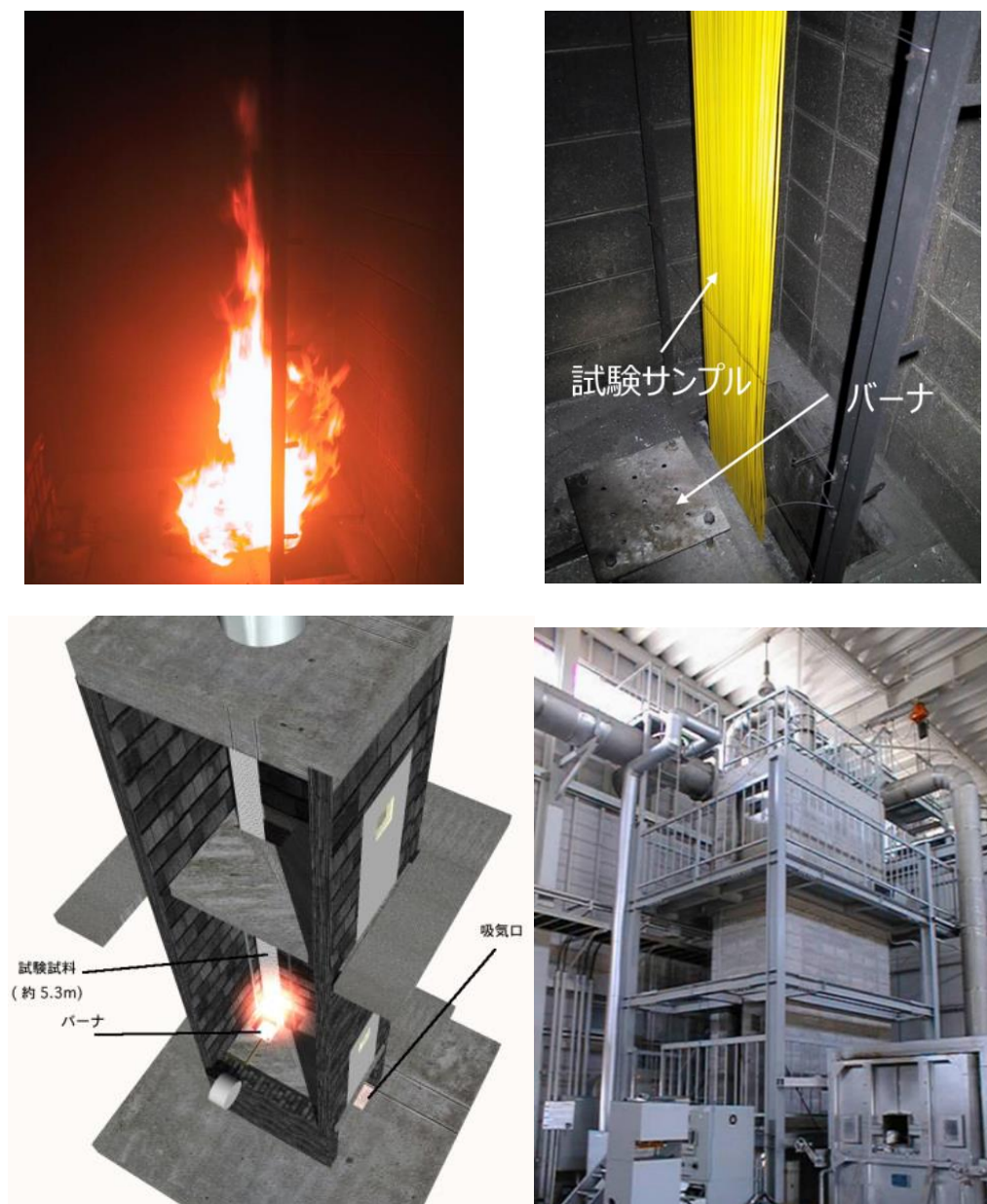


図 2-9 ライザーケーブル燃焼試験

試験ケーブル取付状況(左上), 試験状況(右上), 試験装置内部イメージ(左下), 装置外観(右下)

試験方法は、UL によって UL1666²⁵⁾として規格化されており現在に至るまで、ビル内の垂直ダクトに布設される通信ケーブルの難燃性評価試験として用いられている。

試験装置は、垂直シャフトを模擬したコンクリート造のシャフト状のもので試験室内は、3層構造となっており、2階部分の床及び天井には約 300mm×600mm の貫通部分が設けられている。試験は、試験装置 1 階部分から 3 階天井部分に渡って幅約 300mm で設置した試験試料にプロパンガスバーナーで着火し、炎の伝播高さおよび 2 階天井のケーブル貫通部分の温度を測定する。バーナーの公称出力は、155kW であり、一般的な垂直トレイ燃焼試験の 7 倍以上となる。試験中は試験装置上方に向かって一定の風速(3.5m/s)で

空気を供給する。

2.2.3 欧州における垂直トレイ燃焼試験

2.2.3.1 IEC 60332 試験の開発

欧州においては、1967年イタリアの変電所における大規模ケーブル火災を契機に、垂直トレイ試験をイタリアのCESI(Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano)が開発している。この試験は、 $0.75\text{m} \times 0.75\text{m} \times 4.5\text{m}$ のダクト状の試験室に垂直トレイを設置し、長さ約3.5mのケーブルを取付け輻射パネルを用いてケーブルを燃焼させる試験であった(図2-10)。試験に使用するケーブルの本数は、トレイに設置するケーブル1m当たりの可燃物材料が10kgとなる本数としている。なお、ケーブルの着火に用いる輻射パネルの出力、温度等の仕様は、詳細に規定されておらず、ケーブルが15分間以内に着火する出力とされていた。後にこの試験を英国CEGB(British Central Electricity Generating Board)が改良を加えGDCD standard 21として、ケーブルの耐延焼性評価に採用している。その後IECにおいて1982年に規格化されたIEC332-3(現在のIEC 60332-3)との試験結果の整合性の確認が行われ、IEC332-3がこの試験に代えて用いられるようになる²⁶⁾。

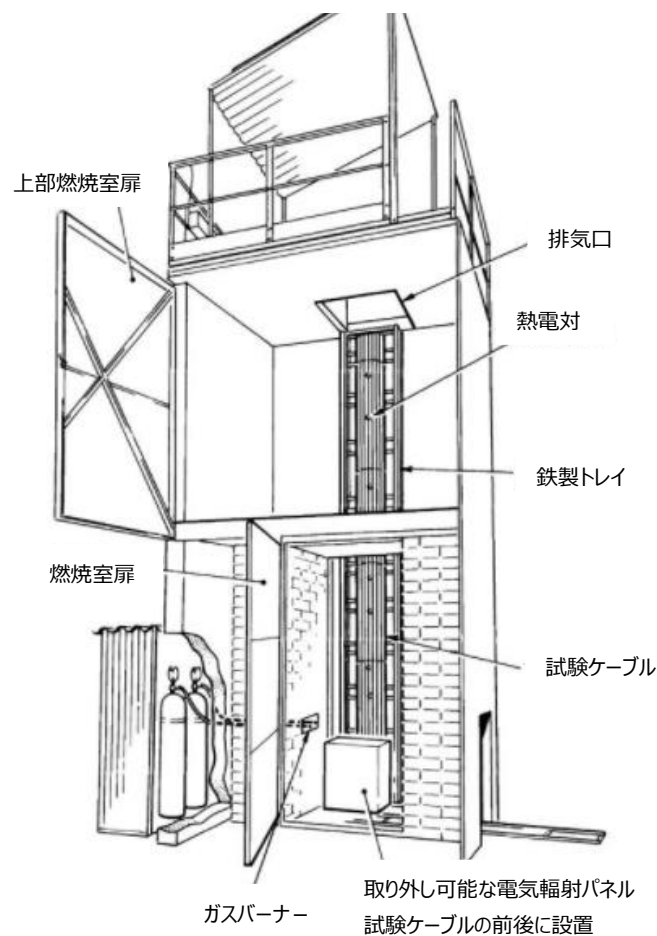


図 2-10 GDCD standard 21 試験装置

Electrical Systems and Equipment: Incorporating Modern Power System Practice²⁶⁾より引用し翻訳

IEC332-3 試験は、スウェーデンで SS424 14 75 として規格化され用いられていた垂直トレイ試験をベースに開発されたものである。SS424 14 75 試験は、 $1\text{m} \times 2\text{m} \times 4.5\text{m}$ の試験チャンバ中にケーブル試料を取り付けた長さ 3.6m 幅 0.6m の垂直トレイを設置し、6L のアルコール燃料を用いてケーブルを燃焼させ、その延焼を評価する試験であった。IEC332-3 試験では、この着火源に代え IEEE 383 74 試験で用いるガスバーナーが導入された。試験に用いるケーブルの本数は、GDCD standard 21 同様に、ケーブルの可燃物量を用いて決定し、現在の版では、7L/m(カテゴリ A)、3.5L/m(カテゴリ B)、1.5L/m(カテゴリ C)及び、0.5L/m(カテゴリ D)となる本数とされている。試験時間もカテゴリによって異なり、カテゴリ A 及び B が 40 分間、カテゴリ C 及び D が、20 分間とされている。試験状況及び試験のイメージ図を図 2-11 に、試験室の図面を図 2-12 に示す。トレイ上の試験ケーブルの配置は、導体サイズによって変化し、導体サイズが 35mm^2 を超えるケーブルについては、1 層でケーブル外径の 1/2 間隔で取り付けるが、 35mm^2 以下のケーブルについては、ケーブルの間隔を開けず、必要に応じて複数層で取り付ける (図 2-13 参照)。このケーブル配列のため、後者のケースでは、全てのケーブル試料が着火用バーナーの火炎に曝されないことから、燃焼が進みにくくなるケースも見られる。従ってケーブルの種類によっては、より多くのケーブル試料を用いるクラスよりもよりケーブル試料の少ないクラスの試験が厳しくなる場合もある。

IEC 60332-3 は、IEC/TC20/WG18(Burning characteristics of electric cables)において試験の再現性向上を主な目的に現在も継続的に改良が進められており、試験室への流入空気量 (5000L/min) の規定、バーナーへの供給ガス及び空気の流量制御用マスフローメータの規定等が導入されてきている。

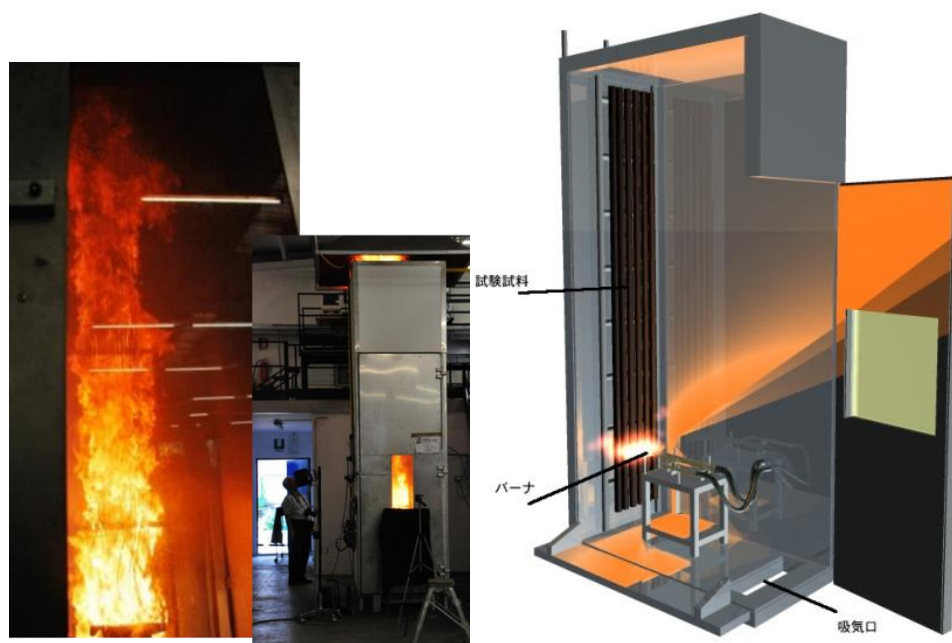
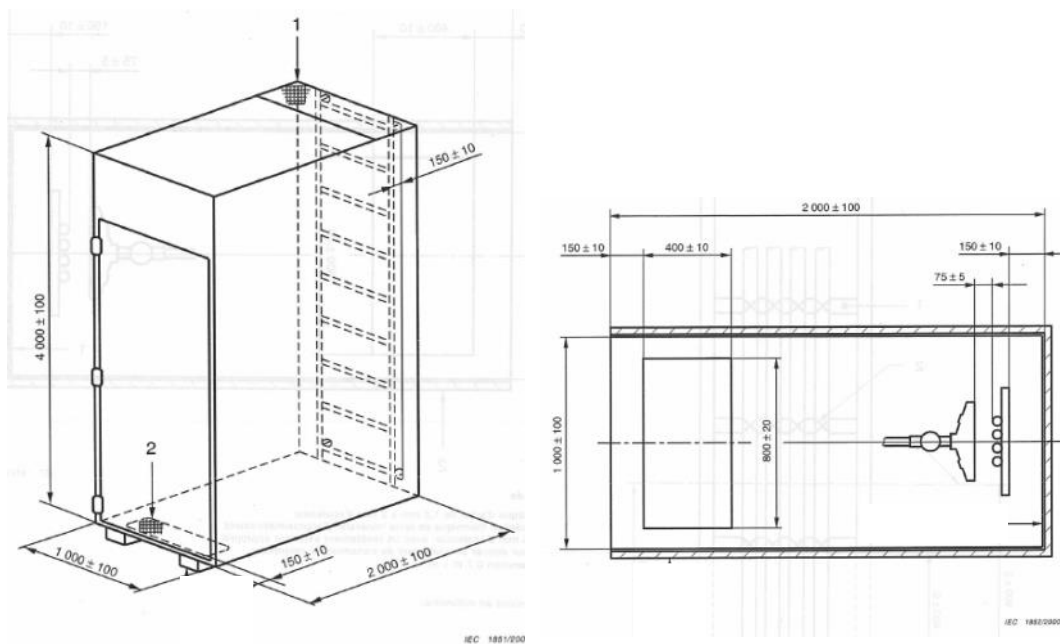


図 2-11 IEC60332-3 燃焼試験



1.排気口 2.給気口

図 2-12 IEC60332-3 試験室

IEC 60332-3-10 から引用

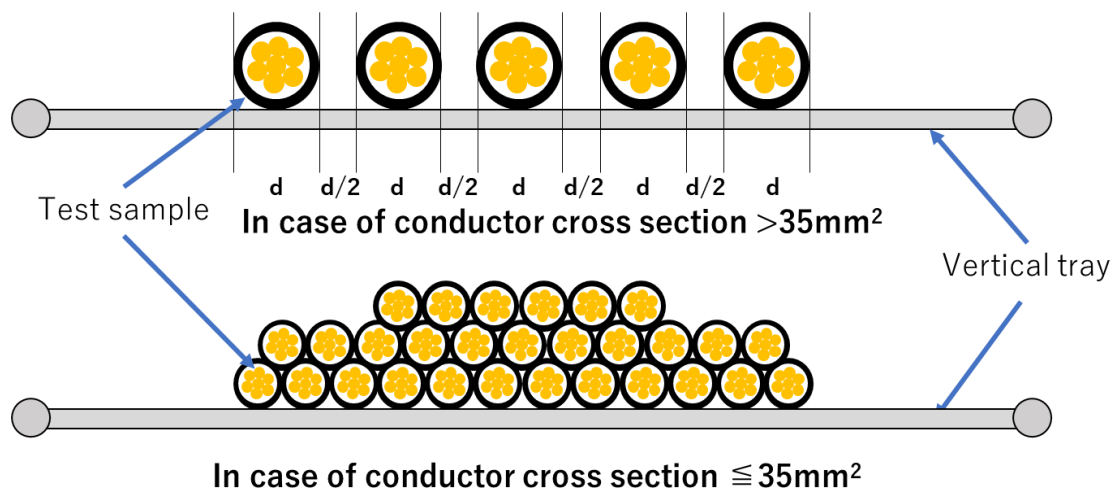


図 2-13 IEC 60332-3 試験のケーブル取付方法(トレイ上の配列)

2.2.3.2 CPD 施行にともなう新たな試験方法の開発

1989 年欧州では、域内の建築資材流通の円滑化を目的とした、建築資材指令 (CPD: Construction products directive) が施行された。ケーブルもこの指令の対象となっており、ケーブル製品については、各国で行われる様々な火災危険性評価を域内で統一した方法で実施することが求められていた。これに伴い、欧州では、CPD に対応するための新

たな試験方法の開発が必要になった。新たな試験方法は、CPD の要求事項に基づき、火災への反応(火炎伝播、発熱性、発煙性等)をクラス分することのできるものである必要があり、CPD 発行当時欧州では、建築資材の火災への反応特性の評価には、製品によらず一律同一の試験を用いることが考慮されていた。

この試験方法は、SBI(Single Burning Item)試験と呼ばれる試験(図 2-14)であり、現在 EN13823²⁷⁾として規格化されている。この試験は、3m×3m×高さ 2.4m の燃焼室に建築物室内のコーナを模擬した試験片設置台を挿入し、設置台のコーナに高さ 1.5m の試験片を取付け、床面に設置したバーナーにより試験片に着火し、燃焼時の発熱速度、発煙量等を測定する試験である。当初は、ケーブル製品についてもこの試験を用いて CPD における区分を実施することが計画されていたが、この試験では、試験片の高さ方向の長さが限られていることから、火災危険性に対して炎の拡がり特性が最も重要なケーブル製品については、炎の拡がりに関する差別化が十分にできないといった欠点があった。このためケーブル製品については、他の試験方法を用いて性能区分を実施することとなった。

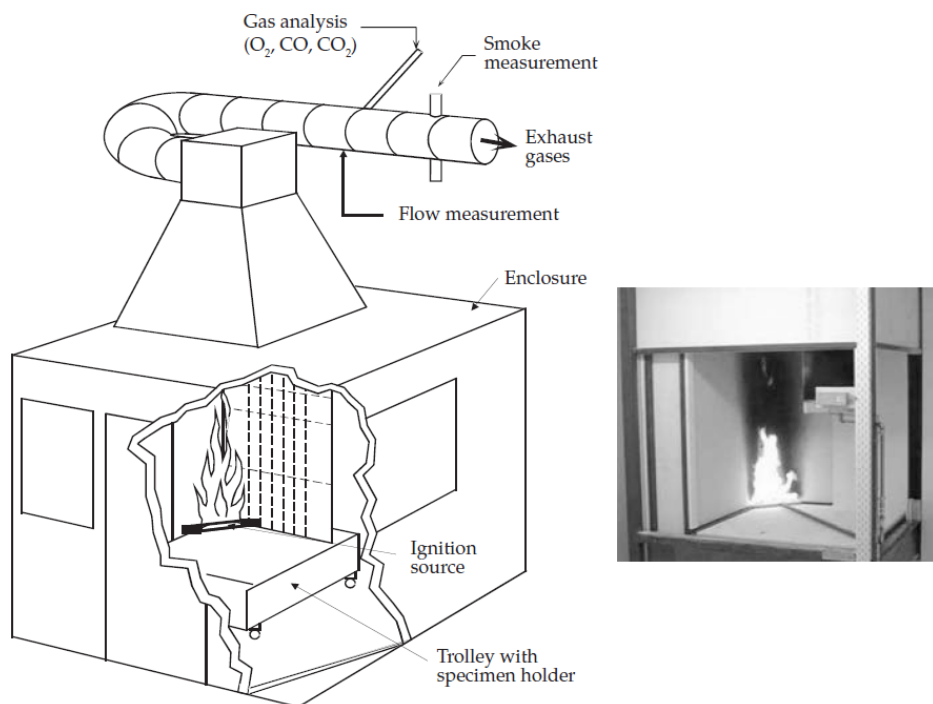


図 2-14 SBI 試験

Assessing the fire performance of electric cables (FIPEC)より引用

この試験方法として着目された試験が、欧州委員会出資のもと実施された FIPEC²⁸⁾(Fire Performance of Electric Cables)プロジェクトにて検討された試験方法である。当時、欧州においては、米国においてスタイナートンネル試験に適合する、非常に難燃性の高いケーブルの導入の必要性が考慮されていたが、通常欧州においてケーブルの難燃性評価に用いている IEC60332-3 試験では、このような高い難燃性を持つケーブルと従来欧州で流通し

ている難燃性ケーブルを十分に差別化することができないとの問題点があったことから、欧州委員会は、ケーブルの難燃性能をよりよく差別化する試験方法を検討するために FIPEC を組織して試験方法の検討を実施した。

FIPEC においては、欧州における発電所、車両、船舶、トンネル及び建築物における実際のケーブル布設状況が調査され、その布設状況を模擬した実規模のケーブル燃焼試験が水平布設及び垂直布設にて実施され(図 2-15)、この実規模試験の結果と新たな試験方法の結果との相関性が検証された。FIPEC において検討された試験方法における試験装置は IEC60332-3-10²⁹⁾をベースに用い CPD において、火災への反応特性の評価項目とされていた発熱性及び発煙性を測定するためにその排気系に酸素濃度測定系及び煙濃度測定系を付加したものであったが、この試験方法を用いた試験結果は、実規模試験の試験結果と良い相関が得られている。なお、試験方法開発段階において FIPEC では、IEC60332-3 試験におけるケーブルの布設量及び布設方法が火災への反応区分に対して適切かどうかの検討も実施され、より良くケーブルの難燃性を区分するのに適したケーブルの布設方法が提案されている。更に、プレナムケーブル等の高い難燃性を持つケーブルの差別化を意図したバーナー火力を上げる等の変更を施したより厳しい試験も提案されている。

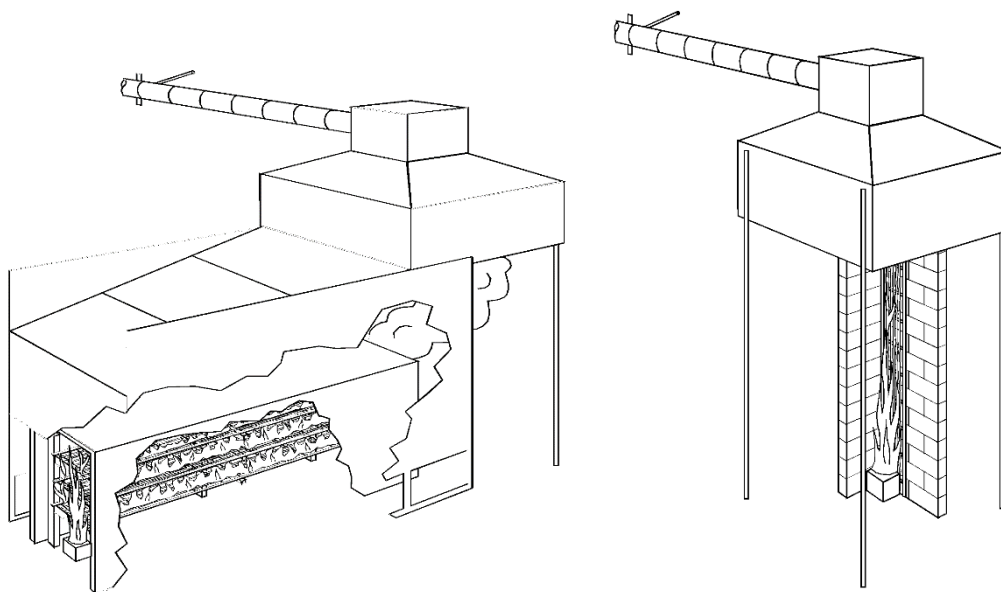


図 2-15 FIPEC 実規模試験

Assessing the fire performance of electric cables (FIPEC) より引用

このような FIPEC の検討結果から、欧州委員会は、この FIPEC にて検討された試験方法を CPD におけるケーブルの火災への反応区分の評価方法として採用することを決定し、この試験方法は、FIPEC の検討内容を元に欧州統一規格である EN50399 として発行されることとなった。余談ではあるが、ECBL(EUROPACABEL：欧州電線工業会)は当初米国のスタイナートンネル試験をベースとした試験及び IEC60332-3 試験を用いてケーブルの火災への反応に対する区分を実施することを提案していたが、この案は欧州委員会にお

いて、防火に関する検討を行っていた FRG(Fire Regulation Group)に却下されている。ECBL 内の通信ケーブル分野においては、スタイナートンネルクラスのケーブルを評価するためには FIPEC の試験方法では不十分との意見もあったようである。

2.2.3.4 EN50399 概要

前述のとおり EN50399 試験は、FIPEC にて検討された試験方法がベースとなっている。

1) 試験装置

EN50399 試験に用いる試験室、試験片を取付けるラダー及びバーナーは、基本的に IEC60332-3 に規定されたものを使用する。その他この規格では、発熱速度測定系及び発煙濃度測定系が付加されており、発熱速度は、排気ダクトからサンプリングした燃焼ガスを酸素分析計に導入し、酸素消費法によって算出される。また発煙量は、排気ダクト中を流れる燃焼ガス中の煙による光透過率の減少によって算出する。なお、発熱速度及び発煙量は、排気ダクト中のガス流量、ガスの温度等を考慮して算出することから、ダクト流量測定器及びガス温度測定のための熱電対が排気ガスサンプリングプローブ付近に設置されており、試験中これらの値を監視できるシステムを有している。排気ダクトにおける燃焼ガスのサンプリング口及び煙濃度測定部分を含む試験装置の配置を図 2-16 に示す。

2) 試験ケーブルの取付方法

ケーブルは試験室内に垂直に設置した幅約 0.5m、高さ約 4m のラダーに 3.5m に切断し、ケーブル外径を基に算出した本数取付ける。試験に必要なケーブル本数及びラダーへの取付け方法は次の通りであり、IEC 60332-3 とは異なり、ケーブル外径を元に決定する。

① 外径 20 mm 以上のケーブル

外径 20mm 以上のケーブルは、次の式に基づき算出した本数を 20mm の間隔を空けて取付ける。

$$\text{ケーブル本数 } N = \text{int}((300+20)/(dc+20))$$

ここに

dc : ケーブル外径 (mm).

int : 結果の整数部分 (切り捨て)

② 外径 5mm 超, 20mm 未満のケーブル

外径 5mm 超, 20mm 未満のケーブルは、次の式に基づき算出した本数をケーブル外径分の間隔を空けて取付ける。

$$\text{ケーブル本数 } N = \text{int}((300+dc)/2dc)$$

③ 外径 5mm 以下のケーブル

外径 5mm 以下のケーブルについては、外径 10mm の束とし、15 束を 10mm の間隔を空けて取付ける。各束に含まれるケーブルの本数は次の式により算出する。

$$\text{束に含まれる本数 } n = \text{int}(100/dc2)$$

3) 試験方法

EN50399 試験と IEC60332-3 試験との方法上の主な違いは、前述した試験体の本数及び

取付け方法の他、試験中試験装置床面の吸気口から導入する空気量が、IEC60332-3 が毎分 5000ℓ であるのに対し、毎分 8000ℓ としている。これは主に酸素分析を実施するために十分な空気流量を確保するためとしているが、この空気流量の増加により EN50399 は IEC60332-3 と比較して厳しい試験となっている。

その他バーナーの出力に関しては、公称出力 30kW の試験及び公称出力 20.5kW の試験が規定されている。なお、公称出力 30kW 試験については、ケーブルを取付けるラダーの背面に不燃板を取付けて試験を実施することとしている。この不燃板を取付けることにより、試験中バーナーの火炎がラダー背面に抜けず上方に広がるため、試験体のより広範囲がバーナー火炎に曝されることとなる。

なお EN50399 試験では、発熱速度及び発煙量を測定することから、試験開始前にこれらの測定系の校正を厳密に実施する必要がある。EN50399 試験と IEC60332-3 試験の主な相違点を表 2-3 に示す。また、他の試験規格と比較した場合のこの試験の評価するおおよその難燃性のレベルを表 2-4 に示す。

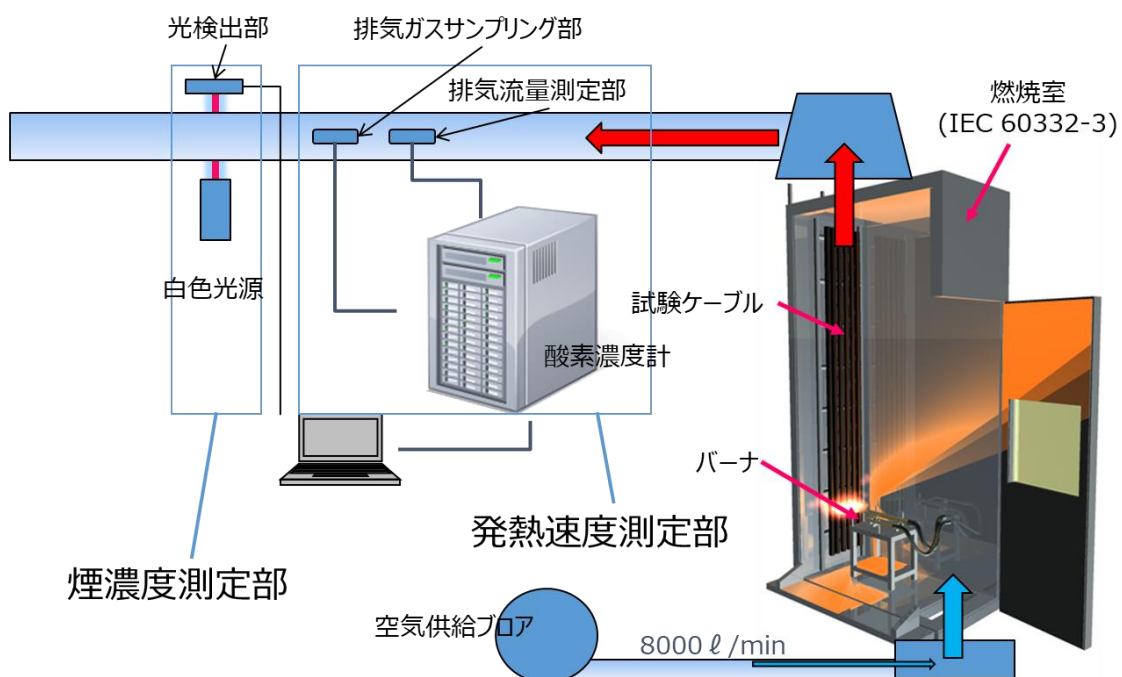


図 2-16 EN50399 試験装置配置図

表 2-3 EN50399 試験と IEC60332-3 試験の主な相違点

	IEC60332-3	EN50399
バーナー出力	20.5kW	20.5kW 又は 30kW
導入空気量	5000L/min	8000L/min
サンプル必要量	可燃物体積から算出	外径及び取り付け幅から算出
サンプル設置	導体サイズ 35mm ² 以上は間隔を空ける	間隔を空けて取付 (外径 5mm 以下のケーブルは、規定本数束ねる)
発熱量測定系	無	酸素濃度計による発熱量測定
発煙性測定系	無	光減衰量測定による発煙性測定
測定項目	燃焼長	燃焼長，最大発熱速度，総発熱量，煙生成速度，総煙生成量火災成長速度，燃焼滴下物

表 2-4 EN50399 試験によって評価するケーブルの難燃レベル

難燃性レベル	国内規格	米国規格	国際規格	欧州規格
高		NFPA262 スタイナートンネル		EN50399 30kW
中		UL1666 ライザー		EN50399 20kW
低	JIS C 3521 垂直トレイ燃焼試験	UL1685, IEEE1202 等 垂直トレイ燃焼試験	IEC60332-3 垂直トレイ燃焼試験	EN50399 20kW

2.3 各種炎伝播特性評価試験の比較

表 2-5 に IEEE 383 1974 垂直トレイ試験に適合する難燃性 CV ケーブル(架橋ポリエチレン絶縁ビニルシースケーブル)に対して，国際規格に規定された垂直トレイ試験である IEC60332-3，UL1666 及び NFPA262 の試験を実施した際の例を示す．IEC60332-3 は，ほぼ IEEE383 1974 試験と同等であると考えられているが，IEC60332-3 の結果と比較した場合ケーブルのシース炭化長から，UL1666 及び NFPA262 に適合するためには，より難燃性の高いケーブルである必要があることが分かる．また，NFPA262 においては，ケーブル全長に渡って燃焼していることから，NFPA262 が非常に厳しい試験であることが分かる．

表 2-5 IEC 及び UL 難燃試験における難燃性 CV ケーブルの試験結果例

試験規格	IEC60332-3 Cat.C	UL1666	NFPA262(UL910)
公称バーナー出力(kW)	20	155	86
ケーブル長(m)	3.5	5.5	7.32
ケーブル本数	22	29	25
試験時間(分)	20	30	20
最高火炎長(m)	—	2.1	7.32 以上
シース損傷長(m)	1.33	2.03	7.32 (全焼)
最高温度(°C)	—	249.8	—
判定基準	シース損傷長 <2.5m	2F 天井部最高温 度 <454.4 最高火炎長 <3.66m	最高火炎長 <1.5m
基準への適合性	適合	適合	不適合

出典：需要家設備(主として電線路)の難燃・防火技術，電気学会技術報告第 640 号

2.4 ケーブル燃焼試験の今後

これまで紹介した各種試験方法の大多数は，一つの測定パラメータに関して，決められた規制値や要求値に対する合否を判定するために用いられているものであるが，これらの評価方法が各国の規制においてケーブルの火災危険性を評価するために用いられている。

しかしながら火災における危険性は，火元，火災空間において燃焼する物質，火災空間に収容される人員といったものに大きく影響されることから，ある一定の規制値や要求値をもって，全ての火災空間の安全性を担保することは困難である。

このような観点から，近年こういった火災危険性に寄与する全ての要素を考慮した火災のシナリオを個々の火災空間毎に作成し，そのシナリオに合致した試験方法によって得られたデータを基にした個々の火災空間における火災危険性の評価が行われるようになってきた。

この火災危険性評価において考慮すべきデータとしては，火災の拡大の指標となる炎の広がり，燃焼による発熱，人員の避難の妨げとなる煙及び毒性ガスの発生，電子機器の機能不全を起こす腐食性生成物の発生等があるが，その燃焼によって，火災危険性に重大に影響すると考えられるケーブルに関しても，実際の火災によく関連したデータを火災危険性評価において定量的に提供し得る試験方法が将来的に重要視されてくるものと考えられる。

しかしながら現実の世界においては，依然ケーブルの火災危険性評価は，前述のとおり単一の燃焼条件のもとケーブル又はケーブルの被覆材料を燃焼し，ある一定の評価基準への適合性を評価する方法が一般的にとられている。中でも特に重要なケーブルの火災危険性要素である，炎伝播特性に関しては，高コストな実規模試験が要求される。また，各国に複数存在する実規模試験法方については，試験条件，試験実施環境等によって試験方法毎の試

験結果の整合性が乏しく、一種類の試験に合格したとしても、他の試験に合格するかどうか担保することが困難な状況である。

このため、現在この高コストの実規模試験の代替試験となり得、一般的に認知された定量的な指標を用いて、ケーブルの耐火災性能を評価し得るベンチスケール試験を用いた評価手法の開発が求められており、これに関連した検討が多方面で行われている。

第3章 火災安全に係るケーブルに対する規制

現在世界各国において、建造物に布設するケーブルについて、何等かの防火に係る規制・基準等が設けられている。

日本国内において、電力及び通信ケーブルは、火災危険性を考慮し、電気設備の技術上の基準、電気用品の技術上の基準を定める省令、建築基準法、消防法等の法規等に規定された、難燃特性を持つケーブルが選定され、布設されている。

しかしながら、国内における規制は、主に 1980 年代に整備されたものであり、現状の建造物における火災危険性を考慮した場合、これらの規制が十分なものであるかの検討はされていないのが現状である。

米国においては、4 種類の燃焼試験による 4 等級の難燃クラスが存在し、布設場所の火災リスクに応じ異なる難燃特性を持つケーブルを選定布設している。また、欧州諸国においては、IEC の電気接部設置基準である IEC60364³⁰⁾シリーズを各国の国内事情を考慮したデビエーションを設け適用している。また 2017 年からは、域内に流通する建築資材の標準化を規制する建築資材規制 (CPR: Construction products regulation)に基づき域内に流通するケーブルの難燃特性の標準化がなされ、加盟国は、この規制の要求事項を各国の規制に導入している。

欧米諸国においては、火災時におけるケーブル燃焼による火災危険性が重要視され、ケーブルの難燃性評価手法の研究が進んでいる。しかしながら現状では、国際的に整合された規制・基準等は存在せず、それぞれの国家又は地域の状況を考慮して、独自の規制・基準が設けられている。本調査では、代表的な地域として北米及び欧州のケーブル防火に係る規制・基準を調査し、現状の国内の規制・基準等と比較した。

3.1 各国のケーブル防火性能に係る基準文書

ケーブルの防火性能に関しては、各国ともに電気設備の設置基準中に含まれており、各国における電気設備の設置基準は次のとおりである。

1) 日本

日本国内においては、建築内の電気設備設置基準は、主に次の法律等に規定されている。

- ・ 建築基準法
- ・ 消防法
- ・ 電気事業法
- ・ 電気用品安全法

2) 米国

米国における電気設備設置基準は、NFPA(米国防火協会)の発行する NFPA70(NEC)による。NEC は全米 50 州で適用されている他、メキシコ、コスタリカ、コロンビアで正式に採用されている。また南米の多くの国においても適用されている。

3) 欧州諸国

EU 諸国においては、電気設備の設置基準に関する国際規格である IEC60364 をベースに各国が自国の状況を考慮した規定を策定し適用している。

3.2 日本国内の規制

日本国内法では、建築内の配線の防火性能について建築基準法、電気事業法、消防法及びこれらの関係法規が規定している。これらの配線に関する規定は、一般配線及び非常用配線に大別できる。

一般配線(ここでは、防災設備等の用いられる配線以外の配線を一般配線という)におけるケーブル防火性能要求については、主に電気事業法及びこれに係る関連法規中に規定されており、要求事項は概ね次のようなものとなっている。

- 1) 電気用品安全法の適用されるケーブルに関しては、概ね電気用品の技術基準を定める省令別表第1付表第二十一(耐燃性試験: JIS C 3005 に規定される耐燃性試験とほぼ同じもの)が要求される。
- 2) 電気用品安全法の適用範囲外のケーブルについては、難燃性は要求されない
- 3) 低圧地中電線と高圧地中電線とが接近又は交差する場合、又は低圧若しくは高圧の地中電線と特別高圧地中電線とが接近又は交差する場合は、IEEE 383-1974 に規定された難燃性試験(垂直トレイ燃焼試験)適合品であれば、露出配線ができる。
- 4) 地中電線が地中弱電流線等と接近又は交差する場合の特定のケースで、光ファイバケーブル及び電力保安通信線を露出施設する場合は、電気用品の技術基準を定める省令別表第1付表第二十一(耐燃性試験)が要求される。
- 5) 電力保安通信線を暗きょ内に露出施設する場合は、電気用品の技術基準を定める省令別表第1付表第二十一(耐燃性試験)が要求される。

なお、上記電気用品安全法の適用されるケーブルは定格電圧が 100V 以上 600V 以下のものであって、次に掲げるものとなっている。

- 1) 絶縁電線であって、導体の公称断面積が 100mm² 以下及び外装がゴム(合成ゴムを含む)又は合成樹脂のもの
- 2) ケーブルであって、導体の公称断面積が 100mm² 以下、線心が7本以下及び外装がゴム(合成ゴムを含む)又は合成樹脂のもの
- 3) コード
- 4) キャブタイヤケーブルであって、導体の公称断面積が 100mm² 以下、線心が7本以下のもの

その他の公的基準としては、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準」において、トンネル内の配線について一部 IEEE383 1974 に適合するケーブルを要求している。また、総務省の情報通信ネットワークのうち社会的に重要なもの又はそれに準ずるものを対象とし、その安全・信頼性対策の指標を示したガイドラインである「情報通信ネ

ットワーク安全・信頼性基準」において重要設備等の火災対策として難燃性被覆ケーブルの使用を求めている。しかしながらこの基準においては、難燃性被覆ケーブルの評価基準は示されていない。

公的基準以外では、通信事業者、電力事業者等が、業界基準において特定の布設環境において、垂直トレイ試験クラスの難燃性ケーブルの使用を義務付けている。各業界における難燃性ケーブルの評価方法は、電力事業者については、IEEE383 1974、通信事業者においては、IEEE383 1974 を参考に制定された JIS C 3521 垂直トレイ試験が用いられている。また、通信事業者においては、難燃性の他、発煙性及び燃焼生成ガスの酸性度についても特定のケーブルについて、要求している。

3.3 米国の規制

3.3.1 NFPA70 の概要

米国においては、電気設備の設置基準として、NFPA の発行する NFPA70 (NEC) が適用されている。NEC の構成を図 3-1 に示す。図のとおり NEC では、第 4 章までで全ての電気設備設置に関する一般要求事項を示し、5 章～7 章において特定のケースに係る一般要求事項への追加事項及び一般要求事項の修正に関して規定している。なお通信システムに関しては、第 8 章としてこれに特化した要求事項を定めている。以降に NFPA70 におけるケーブルの防火性能に係る要求事項の概要を示す。

3.3.2 NFPA70 における規制

3.3.2.1 一般要求事項において規定されている金属被覆を持たないケーブル類の要求防火性能

低圧回路に用いられる金属被覆を持たないケーブルに対しては、全般的に耐燃性 (Flame-retardant) が要求される。耐燃性を評価する方法としては、UL2556 に規定される VW-1 試験を引用している。また、空調の一部として使用される天井裏、床下等の隠された空間(プレナム)に関しては、これらの空間で火災が発生した場合、火災の発見が困難であり、また空調による空気の流れの影響で急激に火災が拡大する恐れがあることから、火災安全上非常に危険な空間として認識されており、露出配線するケーブルは、非常に難燃性の高い NFPA262 燃焼試験(スタイナートンネル試験)に合格したプレナムクラスとして登録されているケーブルを使用する必要がある。しかしながら、ダクト状のケーブルラック(Solid bottom metal cable trays systems with solid metal covers)に配線する場合はこの限りではない。なお、NEC において、発電所については適用外となっているが、このプレナム空間に関する規定については、性能規定化された軽水炉型原子力発電所の防火基準である NFPA805³¹⁾においても NEC 同様の要求が見られる。

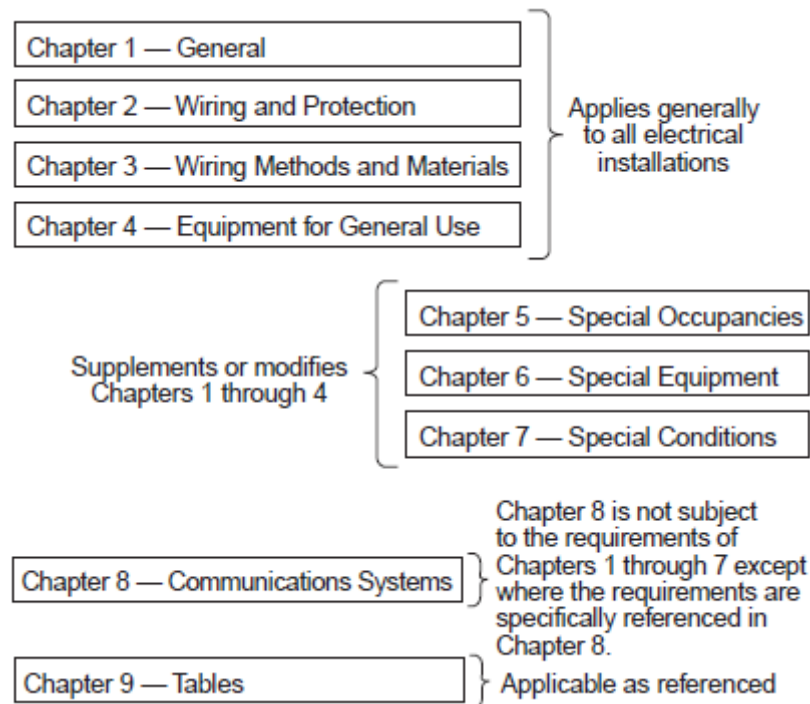


図 3-1 NEC の構成
NFPA70 より引用

3.3.2.2 IT 室内床下配線

IT 室内の床下配線については、金属管内配線等の防火措置無しでケーブルを布設する場合、特定の耐火災性能(fire-resistant)を持つケーブル(type DP)を使用する必要があるとしている。耐火災性能の評価方法としては、UL1685 又は CSA FT-4 に規定される垂直トレイ燃焼試験を要求している。

3.3.2.3 制御・計装・通信ケーブル等

NFPA70 では、制御・計装通信ケーブル等の低圧、弱電回路用配線については、建築内の布設箇所によって異なる難燃特性を持つケーブルを布設するよう要求している。これらの回路用配線として定義されているものは、小勢力回路 (Class 2 及び Class3 回路用配線)、光ファイバケーブル、通信用ケーブル、火災報知器用回路用ケーブル、テレビジョン用同軸ケーブル及び広帯域通信用ケーブルといったものが定義されており、これらのケーブルを露出配線する場合の布設指針は、一部の例外を除き概ね次のようなものとなっている。

- プレナム空間→NFPA262 スタイナートンネル試験に適合するケーブル
- ライザーシャフト→UL1666 ライザー試験に適合するケーブル
- 一般配線、ケーブルトレイ配線→UL1685 又は CSA FT4 垂直トレイ試験に適合するケーブル
- 一世帯又は二世帯住宅→UL1581 VW-1 に適合するケーブル

参考までにこれらのケーブルに対する識別記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 NEC に規定されるケーブルの識別

布設場所 ケーブル種類	プレナム	ライザー	一般, トレ イ配線	一世帯又は 二世帯住宅
CL2 回路用(Max 150VA)	CL2 P	CL2 R	CL2	CL2 X
CL3 回路用(Max. 100VA)	CL3 P	CL3 R	CL3	CL3 X
火災報知システム ($\leq 600V$)	NPLF P	NPLF R	NPLF	—
火災報知システム ($\leq 100VA$)	PFL P	PFL R	PFL	—
光ファイバケーブル (電気用導体を含まないもの)	OFN P	OFN R	OFN OFN G	—
光ファイバケーブル (電気用導体を含むもの)	OFC P	OFC R	OFC OFC G	—
通信ケーブル	CM P	CM R	CM CM G	CM X
TV 用同軸ケーブル	CATV P	CATV R	CATV CATV G	CATV X
広帯域通信用ケーブル ($\leq 100V$)	BL P	BL R	BL	BL X
広帯域通信用ケーブル ($\leq 150V$)		BM R	BM	—
注 1) 各ケーブル記号の最後の文字(赤字)が難燃クラスを示す。各クラスの難燃性能は次のとおり P: NFPA262 スタイナートンネル試験に適合するケーブル R: UL1666 ライザー試験に適合するケーブル 記号無し: UL1685 垂直トレイ試験に適合するケーブル。但し発煙性については評価対象外 G: CSA FT-4 垂直トレイ試験に適合するケーブル X: UL1581(UL2556) VW-I 試験に適合するケーブル。 注 2) 難燃クラスのオーダは、難燃性が高い順に P>R>記号無し又は G>X となっており、高いクラスのケーブルは、低いクラスのケーブルを代替できる。				

3.4 欧州諸国の状況

現状欧州諸国では、一般建築のケーブル防火要求については、IEC60364 をベースに自国の規制を設け運用している。また 2017 年に施行(ケーブル製品以外の製品は、2013 年施行)された建築資材規制(CPR: Construction products regulation)の要求事項も自国の規制に導入し、運用している。ここでは、英国における規制内容を交えて IEC60364 におけるケーブル防火に係る規定の概要を示す。

3.4.1 英国におけるケーブル防火性能を規定する文書

英国において、ケーブルの防災性能を規定した文書には次のようなものがある。

- The Building Regulations
- The Approved Documents Part B - Fire Safety
- The Approved Documents Part P - Electrical Safety
- BS 7671 - Requirements for electrical installations
- BS 8492 - Telecommunications equipment and telecommunications cabling – Code of practice for fire performance and protection

これらの文書のうち、The Building Regulations は、日本における建築基準法のようなものであり、この文書の要求事項を実現するためのガイドとして、The Approved Documents が存在する。しかしながら The Approved Documents は、あくまでもガイドであり、必ずしも従わなくてはならないものではない。BS 7671³²⁾は、日本における電気設備技術基準や米国における NFPA 70 に相当する電気設備の設置基準を規定したものであり、IEC60364 の規定内容を包含する文書である。また、BS8492³³⁾は、通信ケーブルを含むビル内の通信設備の防火に対するガイダンス文書である。

3.4.1.1 The Approved Document B におけるケーブルの防火性能要求事項

この文書では、火災時の機器作動用保護回路等、ケーブルの耐火性能に関して規定している。規定の概要は、付録 2 を参照されたい。

3.4.1.2 The Approved Document P におけるケーブルの防災性能要求事項

この文書においては、ケーブルの防火性能に関する記述は、特にないが、配線に関しては、BS7671 の要求事項に準拠するよう要求していることから、ケーブルの防火性能については、BS7671 を参照する必要がある。

3.4.1.3 BS7671 におけるケーブル防災性能要求事項

BS7671 は、英国における電気設備の設置基準を規定した規格である。IEC では、IEC60364 が相当するが、両規格におけるケーブル防火性能の要求事項は、詳細部分を除きほぼ同様の内容となっている。ここでは、BS7671 の要求事項についてまとめた。

a) 避難経路における配線

BS7671(IEC60364-4-42³⁴⁾)では、在館者の避難を考慮した建築の区分が規定されており、在館者の避難が困難な建築の区分として次の 3 区分を定義している。

非常時の避難条件を考慮した場合下記の区分の箇所が対象となる。

- BD2；困難 ；低在館者密度/避難困難
- BD3；混雑 ；高在館者密度/避難容易
- BD4；困難，混雑；高在館者密度/避難困難

そしてこれらの区分に該当する建築における避難経路中の配線システムに使用するケーブルは火災が伝播しないものであることとし、この要件を満足するためのケーブルは BS EN 60332-1-2(IEC60332-1-2)垂直一条燃焼試験及び BS EN60332-3(IEC60332-3)に規定された垂直トレイ燃焼試験の要件を満たすものであることとしている。

また、BD2，BD3，BD4 では、防災設備等の安全回路に給電している配線システムは、建物部材が要求される時間の耐火性能(規制が存在しない場合は 1 時間の耐火性能)を有す

る必要があるとしている。

その他避難経路内の配線には、BS EN61034-2(IEC61034-2)3m キューブ発煙性試験に従い、60%の最小光透過率を満たすケーブルを使用することとしている。

b) 製造又は保管された材料による火災リスクの存在する場所

BS7671(IEC60364-4-42)では、製造又は保管された材料による火災リスクの存在する場所の区分として次の区分が規定されているおり、このような場所として製材所、製紙工場、繊維工場等を例示している。

BE2： 製造、生成又は保管された可燃性物質（埃を含む）による火災のリスクが存在する場所

このような場所に使用するケーブル石膏、コンクリート、その他の火災保護の非可燃性材料に完全に埋め込まれていないケーブルは最低でも BS EN60332-1-2 で指定された火炎伝播特性を満たす必要があり、更に火炎伝播の危険性が高いケーブルは BS EN60332-3 試験による火炎伝播特性を満たさなければならないとしている。なお火炎伝播の危険線が高いケーブルとしては、束ねたり、長尺で垂直布設したケーブルを例示している。

3.4.1.4通信ケーブルに対する要求事項

現状では、英国(及び IEC)において、通信ケーブルに対する防災性能の要求事項は存在しないが、近年の高度情報化に伴い建築内での通信ケーブル布設量が増大しており、この影響で建築内の火災荷重が大幅に増大していることから、BS 規格及び IEC において、火災危険性を考慮した通信ケーブルの選定及び布設方法に関するガイダンス文書として、BS8492 が発行されている。

これらの文書においては、IEC において電気電子機器の火災安全性評価に関する横断的な指針を作成している IEC/TC89(Fire hazard testing)が発行している IEC60695 シリーズのガイドラインに従い、建築の場所、種類毎に要求されるべき通信ケーブルの防災性能、布設方法に関するガイドが提供されている。要求されるべき防災性能としては、着火及び炎の拡がり、及び燃焼放出物(煙、腐食性、毒性)が考慮されている。

BS8492 においては、火災危険性に考慮すべき前述の特性に関して、建築の用途別にその重要性を表 3-2 のとおりランク付けしている。

表 3-2 BS8429 における建築による防災特性の重要性ランク(BS 8429 から引用して翻訳)

ランク	一般配線	在監者の避難に影響する場所の配線	機器の保護が必要である場所の配線
最も重要 ↑	着火性	着火性	着火性
	火炎伝播	発煙性	燃焼ガスの腐食性
	発煙性	火炎伝播	火炎伝播
	燃焼ガスの腐食性	燃焼ガスの毒性	発煙性
	燃焼ガスの毒性	燃焼ガスの腐食性	燃焼ガスの毒性

なお、BS8492 においては、これらの火災危険性を低減するために、設置コストを考慮

して、製品自体の防災性能だけでなく、防火処置、消火装置等を組み合わせて総合的な対策を考慮するのがよいと推奨している(バランスアプローチ)。しかしながらこういった対策が困難である場合は、防災性能の高い材料の使用を考慮すべきであるとしている。

BS8492 において、火災危険性の要素を低減するために用いることを推奨する材料として次のようなものを例示している。

- 着火しにくく炎が伝播しない材料
- 不燃材料。例えば無機材料又は金属
- 着火しにくく炎が伝播しにくく発熱量が低い材料
- フッ素樹脂又は他の特殊な高分子材料。例えば、PTFE(ポリテトラフルオロエチレン)、PVDF(ポリフッ化ビニリデン)、ETFE(エチレンテトラフルオロエチレン)、unplasticized PVC(無可塑ポリ塩化ビニル) 及び通常フッ素樹脂若しくは、特別な処置を施した PVC で被覆した EN50289-4-11(スタイナートンネル試験)に適合する通信ケーブル。
- 着火しにくく炎がそれほど伝播せず比較的発熱量の低い材料
- 難燃材料(ハロゲン系及び無機材料をベースとしたノンハロゲン系)を添加した材料。

ハロゲン系の難燃剤は、比較的少量の添加(約 15wt%)で着火に対する効果があることから、ベース材料の物性に与える影響が少ない。そのシナジー効果からハロゲン系難燃剤とともに 3 酸化アンチモンが用いられる場合が多い

ノンハロゲン系の添加剤として最もよく使用されるものは水酸化アルミニウムである。ノンハロゲン系の難燃剤は、ハロゲン系と比較して効果が低いことから、効果を得るためには、60wt%程の添加が必要である。

3.4.2 建築資材規制(CPR: Construction products regulation)の導入

欧州においては、(EU) No. 305/2011³⁵⁾として 2011 年に発行された CPR が 2013 年 7 月に施行され、域内に流通する建築資材に対する要求性能の標準化が図られている。ケーブルに関しても恒久的に建築物内に布設されるもののについては、今後 CPR の適用を受けることとなる。

3.4.2.1 建築資材指令(CPD : Construction Products Directive)

現在の CPR は、その前身である CPD を基にしたものである。CPD は、欧州域内における建築資材の流通の障壁となっていた加盟国における建築資材に対する要求特性、評価基準等を標準化することを目的に 1989 年に(EU) No. 89/106/EEC³⁶⁾として発行したものである。

CPD においては、各建築資材について次の 6 分野の要求事項の該当するものについて各特性を基に性能区分を標準化することを要求しており、各建築資材についてこれらの項目に対する要求特性、評価基準が欧州統一規格として発行されている。

- 機械的耐久性及び安定性

- 火災時の安全性
- 衛生、健康及び環境
- 使用時の安全性
- 騒音に対する保護
- 省エネ及び断熱性

そして、欧州加盟国は、この CPD の要求事項を自国の法律に導入し適用することを要求されていた。但し CPD においては、性能区分した建築資材のうちどの性能区分の建築資材をどういった場所に使用すべきといった規定はしておらず、性能区分の適用指針は、加盟各国が自国の状況を考慮して決定することとなっていた。

CPD においては、ケーブル製品について恒久的に建築内に布設するものを建築資材として位置付け、上記の‘火災時の安全性’について標準化することを要求しており、欧州内で、ケーブル製品に対する耐火性能に係る基準が検討されていたが、最終的に CPD においては、ケーブルに対する評価基準、評価方法は確立されなかった。

3.4.2.2 CPR への移行

CPR は、CPD を置き換えるものとして、2011 年に(EU) No. 305/2011 として発行されている。CPR における技術的要求事項は、CPD と同様のものであるが、Directive(指令)から Regulation(規制)に移行することによって、CPR は CPD と比較してより強制力の強いものとなった。なお、欧州における Directive 及び Regulation のおおよその定義は、次のようなものとなる。

- Directive：加盟国は、目的を達成する義務を負うが、達成の方法や形式については各国が自由に決定することができる。
- Regulation：各国における立法手続き無に加盟国は、直接自国の法規に適用することを要求される。

CPR 発行時にはその施行に約 2 年間の移行期間が設けられており欧州において CPR が施行されたのは、2013 年 7 月 1 日である。従ってこの日をもって CPD は、廃止されたこととなる。CPR が施行されたことにより、欧州域に流通する CPR の適用範囲となる建築資材については、CPR の要求事項にしたがって CE マークを付す必要性が生じた。しかしながらこの時点においては、ケーブル製品については、CPR に基づく評価基準等の欧州統一規格が未発行であったことから、CPR 適用範囲の製品についても CPR に基づく CE マーキングは要求されていなかった。

3.4.2.3 CPR におけるケーブル製品の取り扱い

CPR においては、ケーブル製品について、CPD 同様火災時の安全性について火災への反応(Reaction to fire)及び耐火性(Resistance to fire)の 2 項目についての標準化が要求されている。CPD では、建築資材の火災時における重要な要求事項として、次の 5 項目を定義している。

- 1) 建築の火災時における耐荷重能力(Load bearing capacity)は、具体的な時間で仮定

できること

- 2) 建築内の火災及び煙の発生及び拡散が制限されること
- 3) 近隣の建築への火災の拡散が制限されること
- 4) 在館者が避難できること又は在館者を救助できること
- 5) レスキューチームの安全が考慮されること

また、CPD におけるこれらの要求事項を実現するための指針は、CPD における火災時の安全性に係る考え方を示した解釈文書に示されており、この文書では、上記要求事項の解釈、上記要求事項を実現するための評価方法の基礎及び対象となる建築資材が、建築における火災安全設計の考え方とともに示されている。この指針を基に欧州委員会が、各建築資材の火災安全性に係る評価手法及び性能区分を設定し火災への反応については、(EU) No. 00/147/EC³⁷⁾として、耐火性については、(EU) No. 00/367/EC³⁸⁾として発行した。

3.4.2.5 ケーブル製品の火災への反応に係る区分

火災に対する反応とは、試験体が規定された試験による特定の炎に曝された際の反応を示し、欧州委員会は、試験体が燃焼した際の発熱性、発煙性、燃焼滴下物による影響の度合いを基に、各建築資材の性能区分を行った。欧州委員会が当初発行した火災への反応区分を示した、(EU) No. 00/147/EC においては、床材以外の建築資材については、全て同一の評価方法を用いることとなっているが、ケーブル等の長尺製品については、この試験方法が適していないとの意見があったことから更なる検討が必要との記述があった。その後欧州委員会における長期間の議論の後、2006 年ケーブル製品に対する区分として新たに(EU) No. 06/751/EC³⁹⁾が発行された。この文書において特徴的なのは、ケーブル製品にとって最も火災危険性に影響する要因である炎の拡がり及びケーブルが燃焼した際に放出する燃焼生成物が火災空間以外の電気・電子機器に与える影響を評価する燃焼ガスの酸性度に係る区分が他の建築資材に対する要求事項に加えて設けられていることである。欧州委員会は、この文書を基に規格作成団体である CEN(欧州標準化委員会)及び CENELEC(欧州電気標準化委員会)にケーブル製品の火災への反応性能区分及び評価試験方法に係る欧州統一規格の作成を要請した。その後主となる評価手法であり、既存の試験方法として規定されていなかった試験方法は 2011 年に EN50399 として発行され、

ケーブル製品の火災への反応区分に係る統一規格である EN13501-6⁴⁰⁾は、2014 年に発行されている。

EN13501-6 におけるケーブル製品の火災への反応に係る区分は、表 3-3 のようなものである。この表のとおりケーブル製品の火災への反応については、特に要求特性のないクラスも含めて、7 クラスに標準化されることとなり、このうちクラス B1ca～クラス Dca の 4 クラスについては、主なクラス分けの指標となる炎の拡がり及び発熱性について、欧州にて新たに開発したケーブル燃焼試験方法である EN50399 により評価することとしている。

表 3-3 ケーブルの火災への反応区分 (EN50575 より引用して一部翻訳)

区分	試験方法	要求特性	追加区分
Aca	EN ISO 1716 ⁴¹⁾	PCS ≤ 2,0 MJ/kg (1)	
B1ca	EN 50399 (30 kW flame source)	FS ≤ 1.75 m and 総発熱量 1200s ≤ 10 MJ and Peak HRR ≤ 20 kW and FIGRA ≤ 120 Ws-1	発煙性 (2,5) , 燃焼滴下物 (3) 及び 燃焼ガスの酸性度 (4)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
B2ca	EN 50399 (20,5 kW flame source)	FS ≤ 1.5 m; and 総発熱量 1200s ≤ 15 MJ; and Peak HRR ≤ 30 kW; and FIGRA ≤ 150 Ws-1	発煙性 (2,5) , 燃焼滴下物 (3) 及び 燃焼ガスの酸性度 (4)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
Cca	EN 50399 (20,5 kW flame source) and	FS ≤ 2.0 m; and 総発熱量 1200s ≤ 30 MJ; and Peak HRR ≤ 60 kW; and FIGRA ≤ 300 Ws-1	発煙性 (2,5) , 燃焼滴下物 (3) 及び 燃焼ガスの酸性度 (4)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
Dca	EN 50399 (20,5 kW flame source)	総発熱量 1200s ≤ 70 MJ; and Peak HRR ≤ 400 kW; and FIGRA ≤ 1300 Ws-1	発煙性 (2,5) , 燃焼滴下物 (3) 及び 燃焼ガスの酸性度 (4)
	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
Eca	EN 60332-1-2	H ≤ 425 mm	
Fca	要特性無し		
<div>(1) 金属材料を除くシース等の外部構成物を含む製品全体に対する値</div> <div>(2) s1 = TSP1200 ≤ 50 m2 及び最大 SPR ≤ 0.25 m2/s s1a = s1 の特性に加え EN 61034-2 試験における透過率が 80%以下 s1b = s1 の特性に加え EN 61034-2 試験における透過率が 60% 以上 80%以下 s2 = TSP1200 ≤ 400 m2 及び最大 SPR ≤ 1.5 m2/s s3 = s1 及び s2 以外</div> <div>(3) d0 = 1200 秒間の燃焼滴下物無し d1 = 1200 秒間における燃焼滴下物の燃焼が 10 秒未満 d2 = d0 及び d1 以外</div> <div>(4) EN 50267-2-3:試験において a1 = 導電率 2.5 μS/mm 未満 及び pH 4.3 超 a2 = 導電率 10 μS/mm 未満及び pH4.3 超 a3 = a1 or a2 以外(性能宣言無し)</div> <div>(5) B1ca クラスのケーブルの発煙性クラスは、EN 50399 (30 kW flame source)試験に基づく</div> <div>(6) The smoke class declared for class B2ca, Cca, Dca クラスのケーブルの発煙性クラスは、EN 50399 (20,5 kW flame source)試験に基づく</div>			
<div>評価指標の略称</div> <div>PCS: gross calorific potential (総保有熱)</div> <div>FS: Flame Spread(炎の拡がり)</div> <div>総発熱量 1200: Total Heat Release 1200(1200 秒間の総発熱量)</div> <div>Peak HRR: Peak Heat Release Rate(最大発熱速度)</div> <div>FIGRA: Fire Grow 総発熱量 ate(火災成長速度)</div> <div>TSP1200: Total Smoke Production 1200(総煙生成量)</div> <div>Peak SPR: Peak Smoke Production Rate(最大煙生成速度)</div>			

これらのクラスの難燃性能は、米国におけるケーブルの難燃クラスと比較した場合、およそ B1ca クラスが NFPA262 スタイナートンネル試験クラス, B2ca 及び Cca が UL1666 ライザー試験クラス, Dca クラスが UL1685 垂直トレイ試験クラスに相当すると考えられ、欧州においても垂直トレイ試験クラスの難燃性ケーブルが規定されることとなる。

なお、CPR においては、その適用範囲に含まれるケーブル製品を市場に流通する際に、火災への反応区分について、CE マーキングとともに宣言することを要求している。但し CPD 同様に CPR には、どの区分のケーブルをどういった布設環境に使用する必要があるといった規制はなく、CPR 区分を用いたケーブルの布設指針は、加盟国がそれぞれ自国の状況を考慮して決定することとなる。

3.4.2.6 CPR に基づく CE マーキング

CPR では、対象となる建築資材に対して、規定された性能評価結果を基に CE マーキングを施すことを要求している。CPR に基づくケーブル製品に対する CE マーキングの概要を以下に示す。

1) ケーブル製品の CE マーキングに係る欧州統一規格

CPR に基づく CE マーキングに係る規格体系は次の通りである。

① 性能区分に係る規格

EN13501-6：ケーブルの火災への反応区分を規定する規格

EN13501-3：ケーブルの耐火性区分を規定する規格

② 製品規格

EN50575⁴²⁾：CPR 適用範囲のケーブルに対する製品規格。火災への反応に対する要求事項のみを規定。

③ 試験方法規格

EN50399：欧州にて新たに開発されたケーブル燃焼試験。CPR では、炎の拡がり、発熱性、発煙性及び燃焼滴下物の評価に用いる。

EN60332-1-2：小型のバーナーを用いたケーブル 1 条の燃焼試験。IEC60332-1 と同様の試験。CPR では、ケーブル 1 条での炎の拡がりの評価に用いる

EN61034-2：3m キューブ発煙性試験。IEC61034 と同様の試験。CPR では発煙性区分の細分化に用いる。

EN60754-2：燃焼時発生ガスの酸性度評価試験。IEC60754-2 と同等の試験方法。CPR では、燃焼ガスの酸性度区分に用いる

EN50200：ケーブル耐火試験方法

④ 製品試験の運用に係る規格

CENELEC - CLC/TS 50576⁴³⁾：ケーブル製品の場合、1 種類のケーブルにおいて同一材料を使用した複数のサイズの製品が存在するが、一定のサイズ範囲の製品の難燃性能区分を決定するために同一被覆材料を用いた同種のケーブルについては全てのサイズの試験を実施せず、規定したルールに基づき一定のサイズ範囲の製品の難燃区分を

一括で決定するためのルールを示した規格。このルールを欧州では Extended application (EXAP)と呼んでいる。

一般的には、より外径の小さいケーブルが最も燃焼しやすいと認識されているが、欧州において CPR 導入のために実施した実験において、EN50399 試験においては、ケーブルの線心数、導体サイズによって、必ずしも外径が小さいケーブルが燃焼しやすいとは言えないことが明らかとなったことから、ケーブル構造を基にした式(3-1)を使用し、製品の燃焼しやすさを示すファクター χ を算出し、例えば χ の異なる2種類のケーブルを評価すれば評価した2種類のケーブルの間の χ を持つケーブルの難燃クラスを一括で決定できるといったルールがEXAPとして策定された。

$$\chi = \frac{c}{d^2} V_c \dots\dots\dots (3-1)$$

where

d [m] Outer diameter.
 $V_{combust}$ [m³] Non-metallic volume per meter ladder.
 c [] Number of conductors in one cable.

2) ケーブル製品に対する CE マーキングに係る要求事項

CPR に基づき製品に CE マークを付す場合、製造者は、CE マークの根拠として、一定の基準に基づき製品に対する評価を実施した後にその評価結果に基づき、性能宣言書(Declaration of performance)を作成する必要がある。CPR は、性能宣言書を発行するための評価システム(EU 適合宣言システム)についても規定しており、ケーブル製品のうち CPR 区分 Aca, B1ca, B2ca, Cca の製品については、第三者認証を含む'1+'と呼ばれるシステムをまた、Dca, Eca については、'3'と呼ばれるシステムを、Fca については'4'と呼ばれるシステムを適用している。それぞれのシステム要求事項の概要を表 3-4 に示す。

表 3-4 性能宣言書発行のために実施する事項(EN50575 より引用して翻訳)

区分	EU 適合宣言システム	製造者の実施内容	第三者機関 (Notified body)の実施内容
Aca, B1ca, B2ca, Cca	1+	製品試験 工場生産管理	適合性試験 初回工場審査 定期工場審査 定期製品試験
Dca, Eca	3	工場生産管理	適合性試験
Fca	4	製品試験 工場生産管理	特になし

この表のとおり、1+のシステムが要求される区分 Aca, B1ca, B2ca, Cca について性能宣言書を作成するためには、欧州加盟国が認定した、第三者機関(Notified body)による製品の適

合性試験，工場審査等が必須となっている。

ケーブル製品に対する CE マークの表示方法については，EN 50575 に規定されており，CPR に関する性能宣言は，ケーブル本体ではなくラベル等に表示することとなるものと思われる。現在検討中となっているラベル例を図 3-2 に示す。


 XXXX	CE マーク 認証機関の識別
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050, Brussels, Belgium 14 (To be given by the manufacturer)	製造者名及び住所 マーキングを最初に付した年号の下二桁 性能宣言書の参照番号
EN 50575:2014 (To be given by the manufacturer) Supply of electricity in buildings and other civil engineering works with the objective of limiting the generation and spread of fire and smoke Reaction to Fire: B2 _{ca} -s1,d1,a1 Dangerous substances: none	参照した EN 規格番号 製品タイプの識別コード 製品の使用用途 火災性能クラス

図 3-2 CPR に基づく CE マーク例

EN 50575 から引用し翻訳

3.5 各国のケーブル防火基準のまとめ(第 3 章まとめ)

米国，日本及び欧州における建築のケーブル防火に係る規制の比較を表 3-5 に示す。

この表から，現状日本及び欧州については，ケーブルの難燃性能は，概ね 2 区分となっており，火災リスクが高い場所を特定し，こういった場所に難燃性の高いケーブルを使用することを要求している。但し日本においては，IEEE383 1974 クラスの難燃性の高い区分のケーブルが要求される箇所は，非常に限定的である。一方米国では，建築内において火災リス

クが存在すると思われる箇所について、比較的詳細に区分されており、リスクに応じた難燃性能を持つケーブルの使用が要求されていることが分かる。ケーブルの難燃性能も 4 区分が存在し、日本及び欧州における難燃クラスを超える難燃レベルを持つケーブルが要求されている。その他、欧州においては、火災時のケーブルの燃焼による在館者の避難が考慮されており、在館者の避難に影響する箇所においては、低発煙性ケーブルの使用が要求されている。また米国においては、火災区画から他の居室への煙の拡散を制限するために、プレナム空間に布設するケーブルには、低発煙性が要求されている。

米国、及び欧州においては、ケーブルの耐火性能に関しては、認証制度が確立されており、ケーブル製造者は、自身の製品の性能を宣言する場合は、第三者機関による適合性評価を受審し、認証を取得する必要がある。また、規制等によって認証を要求される場合は、認証を取得していない製品を使用することができない。我が国においても、ケーブルの火災安全性を担保する上において、このような認証制度を導入してゆく必要があるものとする。

以上、日本、米国及び欧州におけるケーブルの火災安全に係る規制についてまとめたが、各国の規制で要求されるケーブルに対する火災危険性に関しては、近年発煙性、発熱性等に関する規制も導入されてきてはいるものの、依然最も重要視されているケーブル耐火性能は、燃焼時の炎伝播特性であり、この特性は、垂直トレイ試験をはじめとした複数の火炎伝播性試験を用いて評価しており、各国の規制において、垂直トレイ試験を始めとした火炎伝播特性評価試験が重要な位置付けにあることが分かる。しかしながら第 2 章で述べたとおり炎伝播特性を評価する上で用いられている試験方法は、いずれも、再現性が乏しい実規模試験であり、また、地域によって、試験規格が異なっていることから、複数の地域で使用する製品については、それぞれの地域の規制で要求される試験を実施する必要がある。また、たとえ同一の試験規格が要求されていたとしても、現状は、他国で実施した試験結果を当事国が受け入れないケースもあり、再度同様の試験を当事国内で実施する必要性が生じる場合も多い。この場合、再現性の確保されていない実規模試験においては、異なる試験所での試験結果が整合しないケースも珍しくなく、ケーブルの製造者が再度新たなケーブルを開発するための大きな負担を強いられることとなる。

こういったことから、ある程度精度の確保された、単一の評価手法が国際規格として開発され、各国の規制で適用されることが望まれる。

表 3-5 各国のケーブル防災性能に係る規制の比較

難燃 レベ ル	米国 NFPA 70		日本 電気設備技術基準の解説		欧州(英国) IEC60364(BS7671)	
	試験方法	適用指針	試験方法	適用指針	試験方法	適用指針
耐延焼性						
高 ↑	NFPA 262	・ 空調に使用する 空間(プレナム)	対応する規制 無し	対応する規制無 し	対応する規制無 し	対応する規制無し
	UL1666	・ ライザーシャフ トに布設する通 信, 信号線	対応する規制 無し	対応する規制無 し	対応する規制無 し	対応する規制無し
	UL1685 CSA FT4	・ IT室地下の低圧 配線 ・ 特定危険箇所* の低圧配線 ・ 信号・通信線の 一般配線	IEEE 383 1974	・ 低圧地中電線 と高圧地中電 線が接近又は 交差する場合 ・ 低圧若しくは 高圧の地中電 線と特別高圧 地中電線とが 接近又は交差 する場合	IEC60332-3	・ 在館者の密度が 高い及び／又は 避難が困難であ る場所 ・ 特定危険箇所* で炎が伝播しや すい配線 ・ その他特定の危 険性が認識され る場合
低	UL1581 VW- 1	・その他全般	電気用品の技 術基準を定め る省令別表第 1 付表第二十 一 (JIS C3005)	・ 電気用品安全 法の適用を受 けるケーブル ・ 特定のケース における光ファイ バケーブル及び通 信保安線	IEC60332-1-2	・その他全般

第4章 コーンカロリーメータ試験取得データによる垂直 トレイ燃焼試験結果の推定方法の提案

4.1 背景及び目的

4.1.1 ケーブルの火災安全評価の現状と課題

可燃性の高分子材料をその被覆材として有する電線・ケーブル(以下、ケーブル)は、火災等の外部火源によって、一部が着火、燃焼した場合に長手方向に延焼し、火災拡大の一因となり得る。実際に米国ブラウンズフェリー原子力発電所での火災は、作業員が手にした蠟燭の炎によるケーブルへの着火・延焼が原因であったことは有名な話である⁴⁴⁾。このように火災危険性の高いケーブルの火災被害の程度を知り、規制などの活用することを目的として、世界各国でケーブルの火災伝播特性試験が開発されており、中には、国内の消防法等にもみられるよう、規制等に用いられているものも少なくない。

第3章で述べたとおり、現在、日本国内では、IEEE383 1974, JIS C 3521, IEEE1202 といった、いわゆる「垂直トレイ試験（垂直に設置した梯子状のトレイにケーブルを敷設し、トレイ下方にてガスバーナー等で着火した後の上方に向かう延焼性を評価するもの）」(2.2.2 項参照)によって、ケーブルの耐延焼性の評価が行われている。そして、その結果は難燃性のグレードを定めるなどに活用されている。しかしながら、本試験は規定の大規模な試験空間を必要とするだけでなく、試験結果のばらつきが比較的大きい。また、試験規格によって着火用バーナーの設定、トレイへのケーブルの取付方法等が異なり、同一のケーブルを用いた場合でも試験結果が整合しない場合がある。そのため、複数の規制要求に適合させるためには、一種類のケーブルに対して、複数の試験を実施する必要性があり、手軽ではない。

4.1.2 現在の課題に対する取り組み例と問題点

1.2 項でレビューしたとおり実際のケーブル又はケーブルを構成する部材、材料等に対して「ベンチスケールの燃焼試験」を通じて得られる発熱データを活用して燃焼挙動を予測する方法論が幅広く検討されている。米国の原子力規制委員会では、発電所におけるケーブルの実布設状態を模擬した実規模燃焼試験で得られた発熱挙動を、ベンチスケール試験装置であるコーンカロリーメータ試験で得られた発熱特性から予測する手法が、また、欧州においては、2017年に施行された建築資材規制(3.4.2 項参照)に基づくケーブルの難燃特性クラスを決定するための実規模試験方法(EN 50399)の判定結果を、コーンカロリーメータ試験の試験結果から予測する試みがなされている。これらの報告では、ある程度実規模試験を予測できる可能性が示唆されているものの、ベンチスケール試験結果と実規模試験結果に関する定量的な比較ができるような予測手法は未確立である。そのため、我が国の規制等での難燃性指標として用いられている「垂直トレイ試験における燃焼長」という定量値は、既存

の提案方法では（ベンチスケール試験の結果から）推定できない。このような問題点があるため、結果として、現状ではベンチスケール試験の結果を垂直トレイ試験のような実大規模の試験結果の代替として公的試験規格や規制に用いるには至っていない。

4.1.3 本研究の狙いと目標

そこで本研究では、現状ケーブルの炎伝播特性評価手法として一般的に用いられている垂直トレイ試験の代替試験として、将来の公的試験規格の確立や規制への導入を視野に入れ、ベンチスケール試験から実試験の定量値を予測できる手法の検討を行った。具体的には既存のベンチスケール試験であり、測定精度がある程度確保されている ISO5660-1⁴⁵⁾に規定されるコーンカロリメータ試験及び IEEE1202 に規定された垂直トレイ試験にて任意に選定した 12 種類のケーブルを燃焼し、コーンカロリメータ試験によって得られた、各種燃焼特性データを用いた、IEEE 1202 試験におけるケーブルの耐延焼性指標である試験終了後のケーブル燃焼長を定量的に推定するための推定式を検討した。

4.2 本研究の対象とした試験方法

4.2.1 IEEE 1202 垂直トレイ燃焼試験

本研究では、垂直トレイ燃焼試験として、実績のある IEEE1202 試験を選定した。この試験の試験状況を図 4-1 に示す。本試験方法は、わが国では原子力発電所内のケーブル等の耐延焼性試験として用いられており、試験結果に重大に影響を与えるとされる、着火源であるバーナー、バーナーに供給する燃料ガス及び空気の流量といった火炎を形成するための条件、試験ケーブルを設置する垂直トレイの形状、試験ケーブルを取り付ける際のバインド方法等が明確に規定されている。なお、この試験方法に関して、A.W. Coaker らは、良好な再現性の得られる試験方法と結論²⁾している。

試験では、規定本数の 2.4m に切断したケーブルを外径の 1/2 の間隔で垂直トレイに取り付け、トレイ下端に設置したガスバーナー(図 4-1)で形成する予混炎にてケーブルを燃焼させ、トレイ上方への炎の広がりを試験後のケーブル表面が上方に延焼した距離を測定することで評価する。試験時間は 20 分間で、20 分経過し着火用のバーナーを消火しても燃焼が終了しない場合は、燃焼が終了した時点で、燃焼長の測定を行う。

なお、試験は、以下の二点を除き、試験規格に基づき実施した。

- (1) 試験規格では、細径のケーブル(外径 13mm 未満)については、複数本数のケーブルを束にして試験することと定められているが、束ねることによって、束ねないケースとの燃焼挙動に不整合が生じることが懸念されたこと、また、国内で最も一般的に用いられている垂直トレイ試験は IEEE1202 試験と同様の加熱源を用いる IEEE 383 1974 及び JIS C 3521 試験であるが、これらの試験では、細径ケーブルについても束ねることなく試験を実施することから、国内における成果の活用を考慮し、本研究では細径のケーブルも束にすることなくトレイに取り付けて試験を実施した。
- (2) 試験片の燃焼ガス中の酸素濃度を測定することにより、ケーブルの燃焼時の発熱特

性データを取得した..

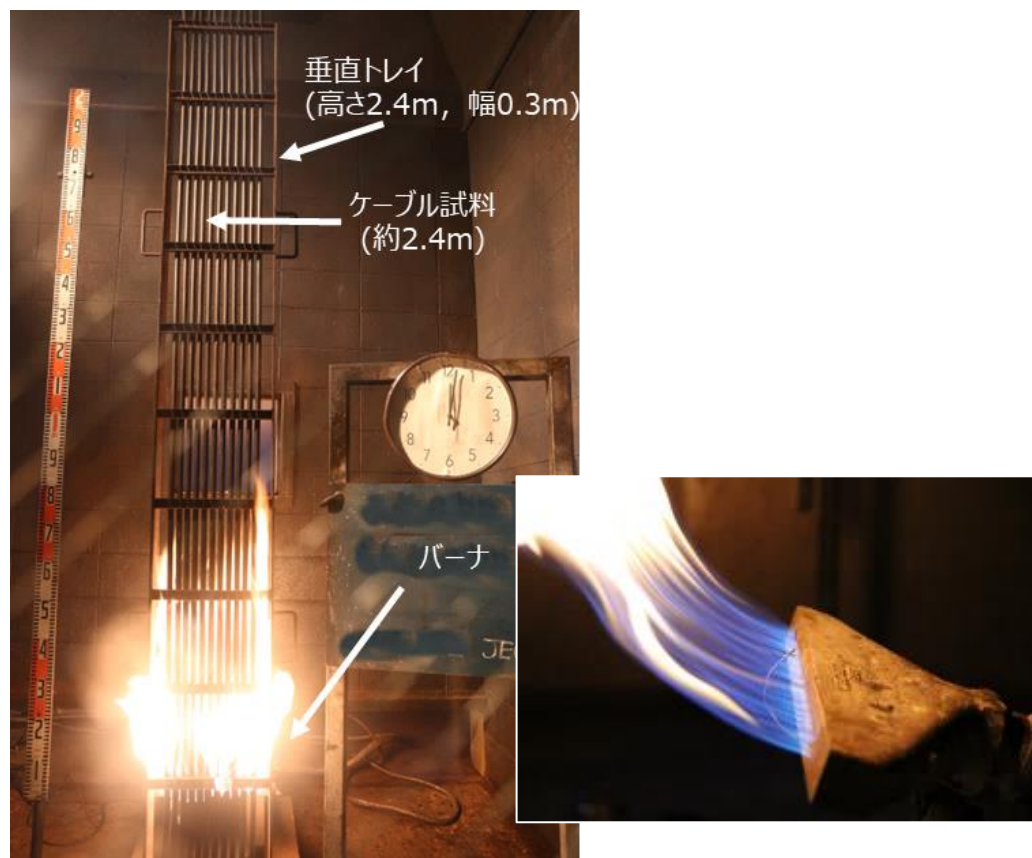


図 4-1 IEEE 1202 試験状況(左)及び試験用予混バーナー(右)

4.2.2 ベンチスケール試験

構成材料の燃焼性を詳細にデータとして得るため、コーンカロリメータ試験をベンチスケール試験として実施した。本試験では、規定の熱流束に設定した電熱ヒータによって、試験片を加熱し、生成した熱分解ガスをスパークプラグを用いて着火し、試験片を燃焼させる。燃焼によって生成する燃焼ガスの一部をガス分析計に取り込み、測定された燃焼ガス中の酸素濃度から試験片の燃焼による発熱速度(Heat release rate)を酸素消費法(燃焼による発熱量は材料、組成によらず燃焼により消費された酸素量にほぼ比例するという原理)を用いて測定する(図 4-2 参照)。

通常コーンカロリメータ試験には、シート状の試験片を用いるが、本研究の実験においては、コーンカロリメータ試験を用いたケーブル製品の評価方法を規定した、ASTM D 6113⁴⁶⁾に従い 0.1m に切断したケーブル製品をそのまま試験片ホルダに入れて試験を実施した。試験片の代表例及び試験状況を図 4-2 に示す。

コーンカロリメータ試験では、発熱速度だけでなく多くの燃焼特性指標を得ることができる。図中に示した通り、当該実験結果より本研究で用いた指標は、次のとおりである。

- ・ 最大発熱速度(PHRR : Peak heat release rate)

- ・総発熱量(THR：Total heat release)
- ・着火時間(Ignition time)
- ・最大燃焼速度(PMLR：Peak mass loss rate)

コーンカロリーメータ試験結果の一例を図 4-3 に示す。

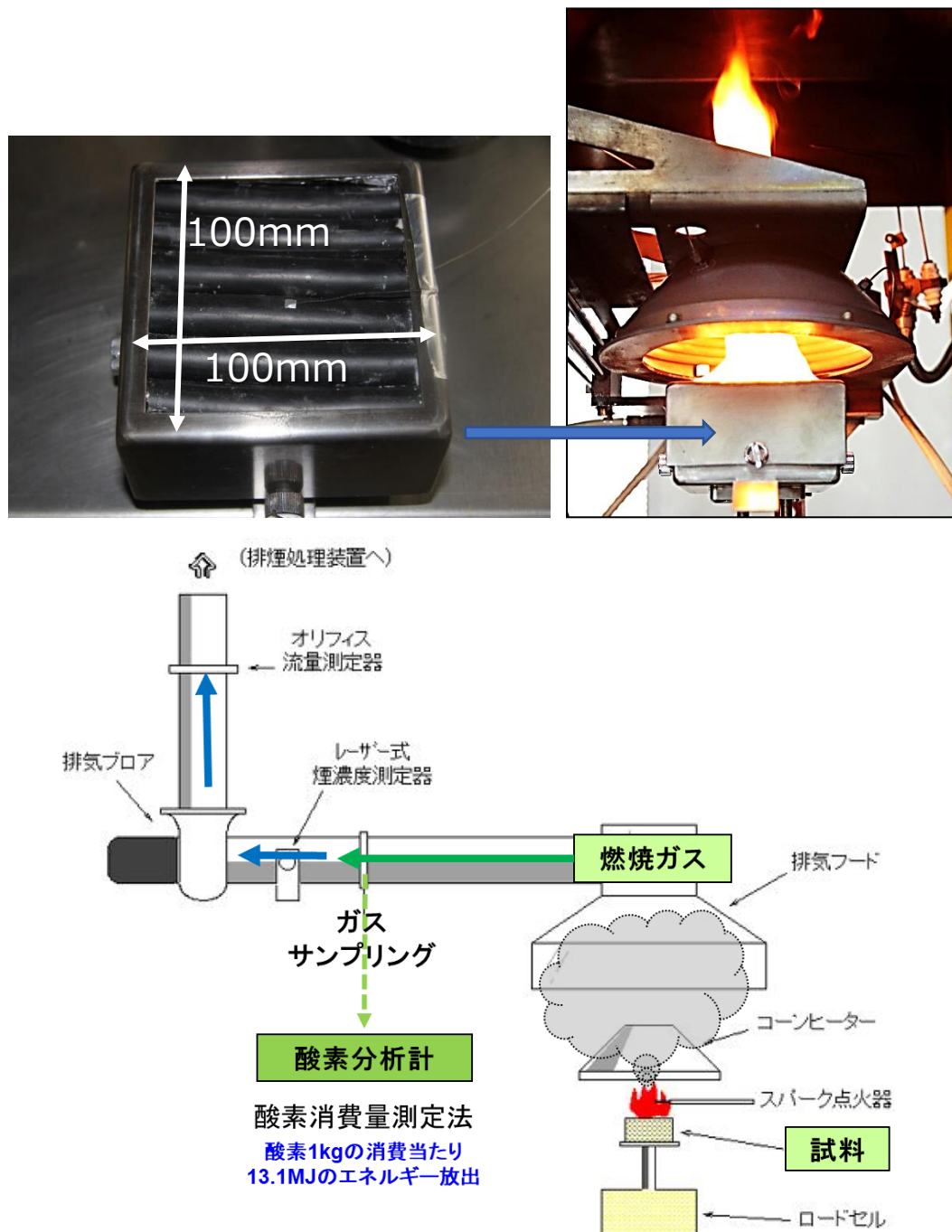


図 4-2 コーンカロリーメータ試験用試験片(左上), 試験状況(右下) 及び装置概略図 (下)

コーンカロリメータ試験における試験片の加熱源となる電熱ヒータの熱流束は、ISO/TS 5660-3⁴⁷⁾において、一般的なケーブル燃焼試験に用いるバーナー火炎の熱流束と同等とされる 50 kW/m^2 に設定し、試験時間は、ISO 5660-1 に従い、最大 30 分間とした。なお、各データは、データロガーにて 1 秒間隔で取得した。

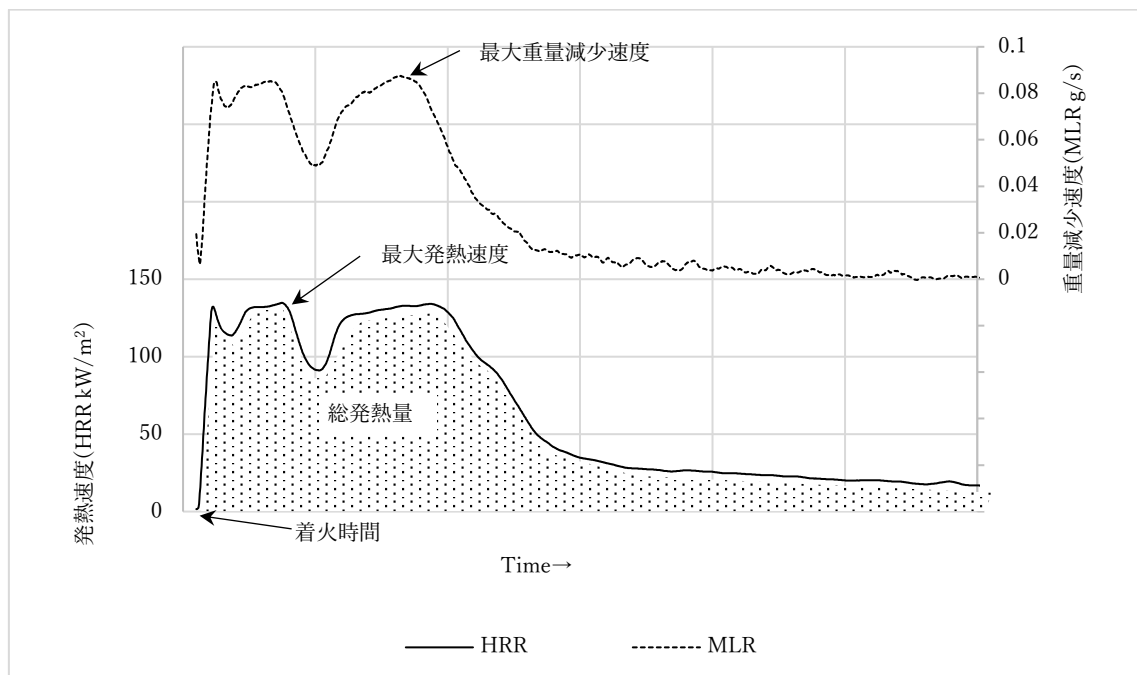


図 4-3 コーンカロリメータ試験で取得した発熱速度曲線及び MLR 曲線(ケーブル No.8)

4.3 本試験で用いた試料

本研究の実験に用いた 12 種類の試験試料の概要を表 4-1 に示す。本検討においては、ケーブルの種類、使用材料、サイズに関わらず、一定の指標を用いてコーンカロリメータ試験結果から、IEEE1202 試験における垂直方向の燃焼によるケーブル被覆の損傷長さ(燃焼長)を推定することが目的であることから、各ケーブルの詳細な構造については、本報告では言及しない。なお、試験片可燃物材料の密度は、複数の可燃物材料を持つ試験体の場合、各材料の密度を試験体を構成する各材料の体積比を考慮して合算した値とした。

表 4-1 試験に用いたケーブルの仕様

No.	用途	シースの主材料	絶縁体の主材料	外径 (mm)	可燃物の密度 (g/m ³)
1	制御用	PVC	PVC	9.5	1360000
2	制御用	PVC	PVC	13	1410000
3	制御用	PVC	PVC	14.4	1410000
4	配電用	EVA	XLPE	12.7	1040000
5	配電用	EVA	XLPE	16.5	1020000
6	制御用	EVA	XLPE	21.6	1110000
7	制御用	PVC	PVC	9.9	1390000
8	配電用	—	PVC	11.3	1520000
9	信号用	不明	不明	14.3	1220000
10	通信用	不明	不明	14.6	1330000
11	制御用	エラストマー	エラストマー	21.6	1830000
12	配電用	PVC	XLPE	9.9	1040000

注) PVC(ポリ塩化ビニル), EVA(エチレン酢酸ビニルコポリマー), XLPE(架橋ポリエチレン)

4.4 試験結果

4.4.1 IEEE 1202 試験結果

試験の結果得られた試験後の燃焼長測定結果及び試験中の発熱特性データを表 4-2 に示す。なお、今回用いたケーブルのうち No.2 及び No.3 については、この試験において、試験中に延焼が留まることなく、試験片全長に渡って燃焼した。従ってこれらのケーブルの最終的な燃焼長を測定することができなかった。従って表中では、これらのケーブルについては、試験用バーナーから垂直トレイ上端までの距離である 2.2m 以上と表示している。また、各ケーブルの発熱速度及びバーナー上端から火炎先端までの距離(火炎高さ)の経時変化を図 4-4 から図 4-15 に示す。これらの図において火炎の伸長とともに発熱速度の増加する様子が見られる。

今回用いたケーブルについては、IEEE 1202 試験の結果は、おおよそ次の 3 種類に分類することができる。

- ① 延焼が収束せず試験片全体が燃焼 (No.2, 3)
- ② 延焼するが、試験片全長に渡って燃焼することなく消火(No.1,4,9,12)

③ 殆ど延焼しない(No.5,6,7,8,10,11)

各ケースの事例をそれぞれ図 4-16 から図 4-18 に連続写真で示す。IEEE 1202 試験の結果を推定する上においては、少なくともこれらの状況がおおよそ再現できることが望ましい。

表 4-2 IEEE 1202 試験の試験結果

Cable No.	最大発熱速度	総発熱量	燃焼長
	kW	MJ	m
No.1	35.8	11.5	2.11
No.2	52.1	25.0	2.20<(全焼)
No.3	55.6	28.2	2.20<(全焼)
No.4	34.5	16.3	1.02
No.5	12.2	8.5	0.71
No.6	28.6	11.0	0.83
No.7	17.3	7.2	0.75
No.8	15.4	4.3	0.59
No.9	31.5	15.4	1.25
No.10	42.1	10.9	0.89
No.11	17.8	9.4	0.63
No.12	49.2	20.5	1.60

注 1) No.1~No.7 は、n=2 の平均値、No.8~No.12 は、n=1 の値。

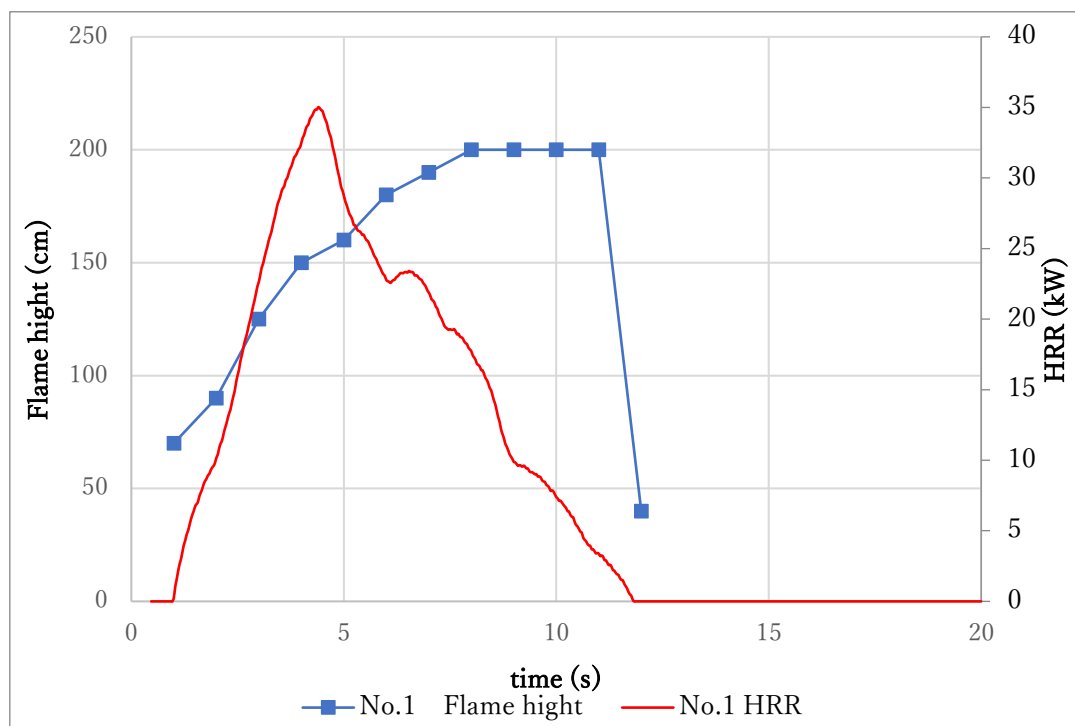


図 4-4 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.1)

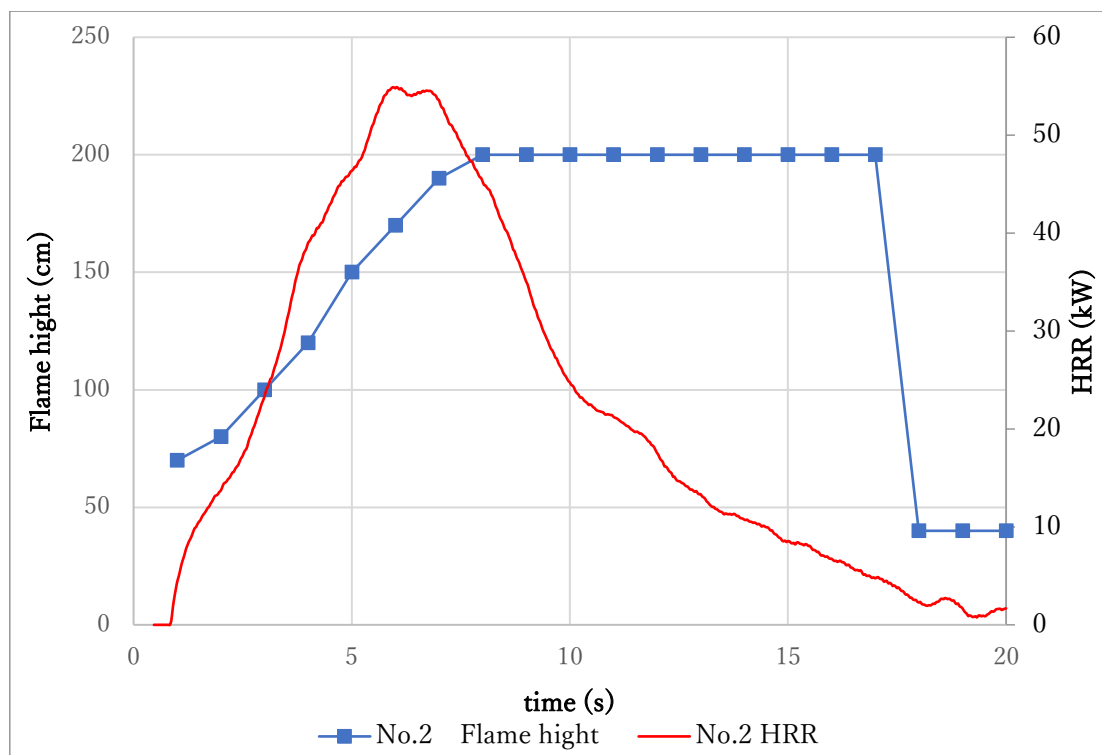


図 4-5 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.2)

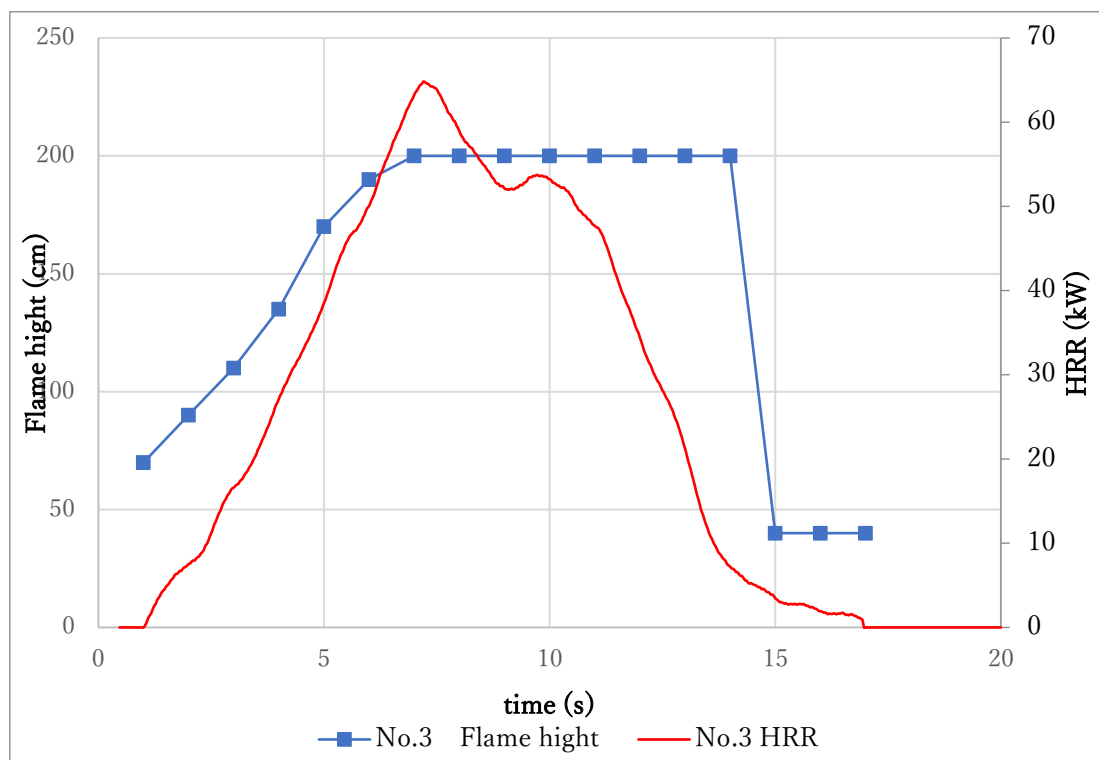


図 4-6 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.3)

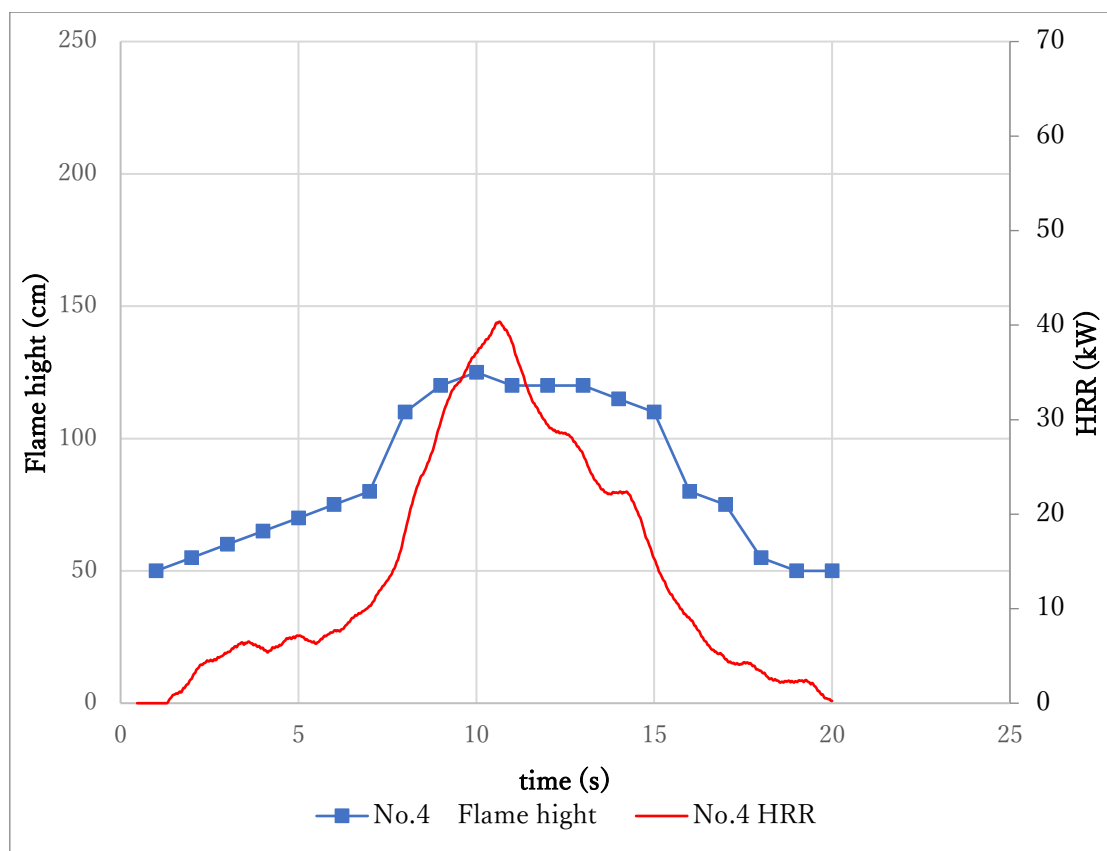


図 4-7 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.4)

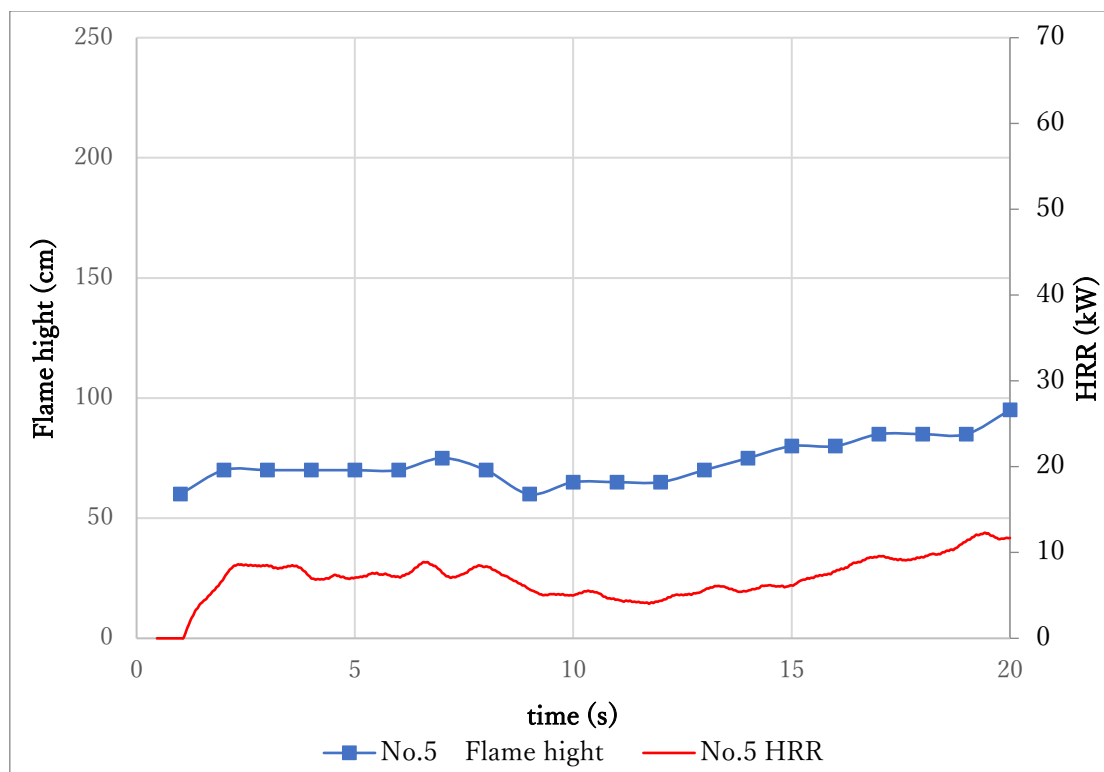


図 4-8 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.5)

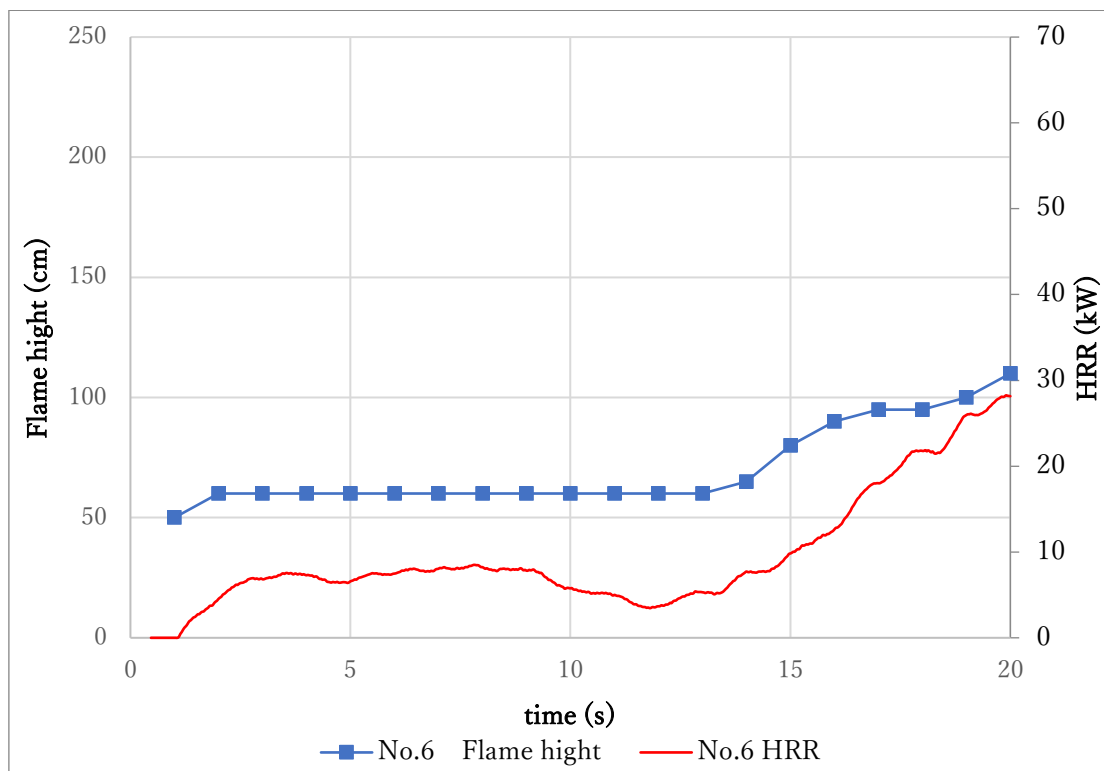


図 4-9 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.6)

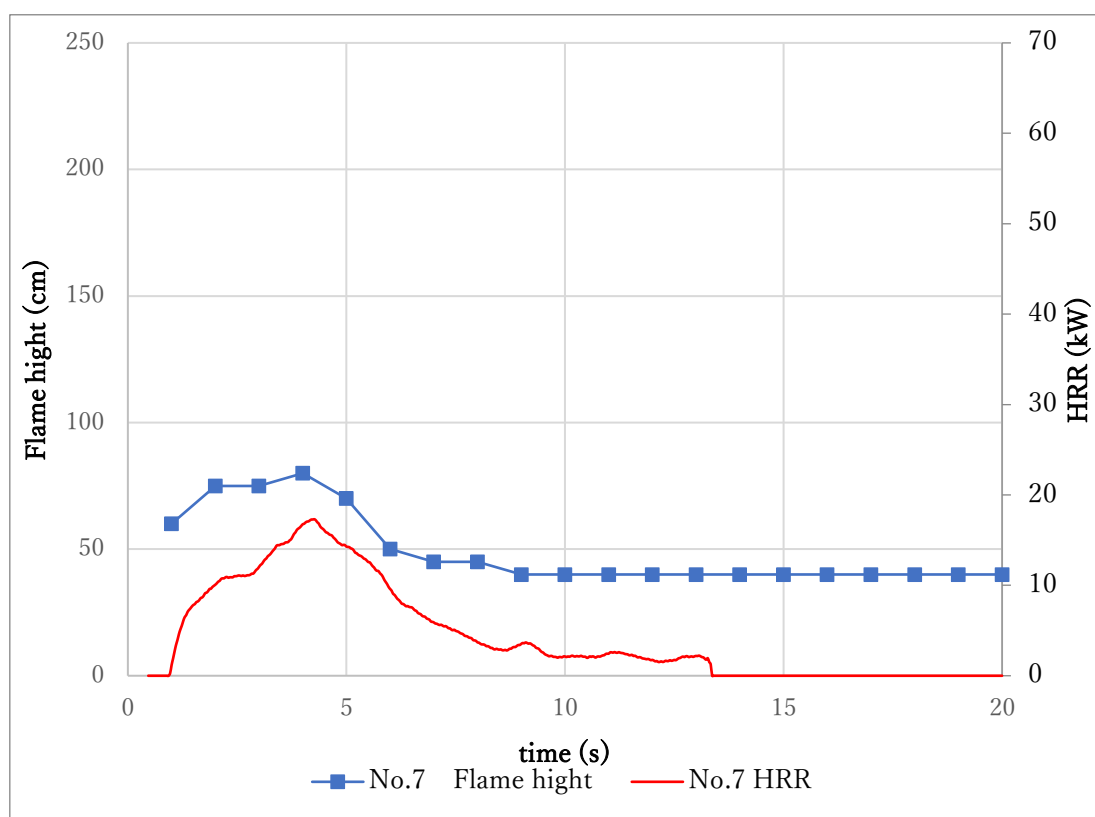


図 4-10 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.7)

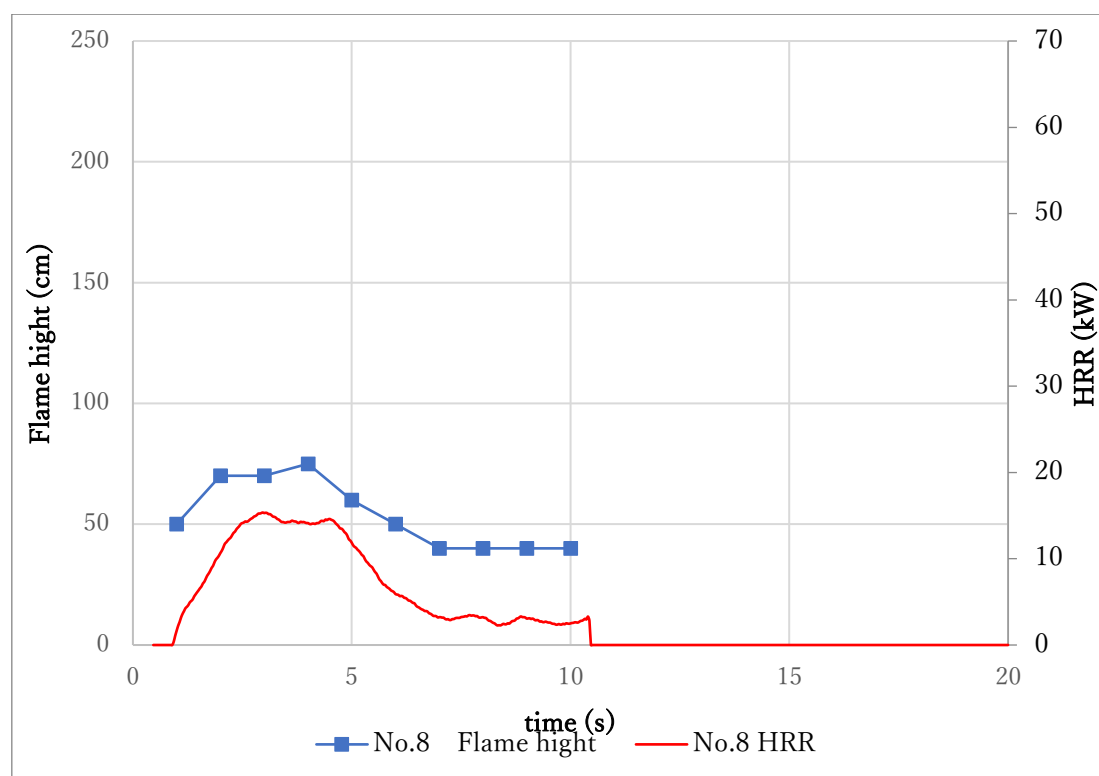


図 4-11 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.8)

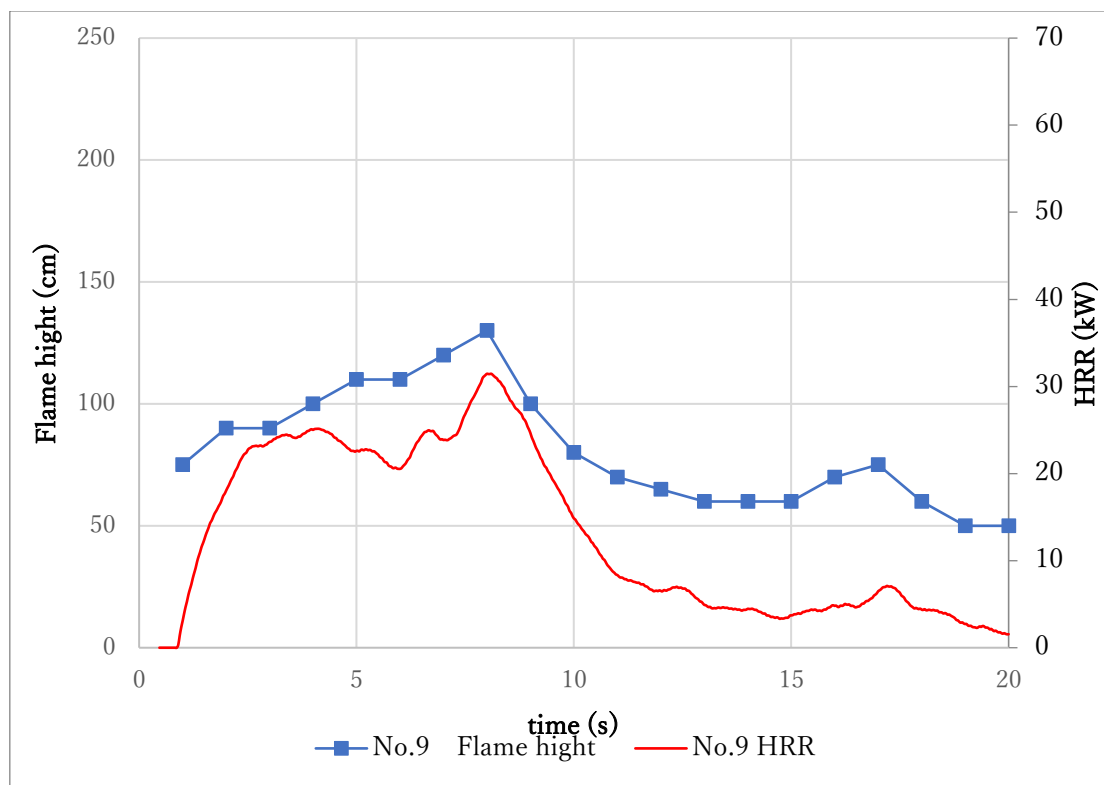


図 4-12 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.9)

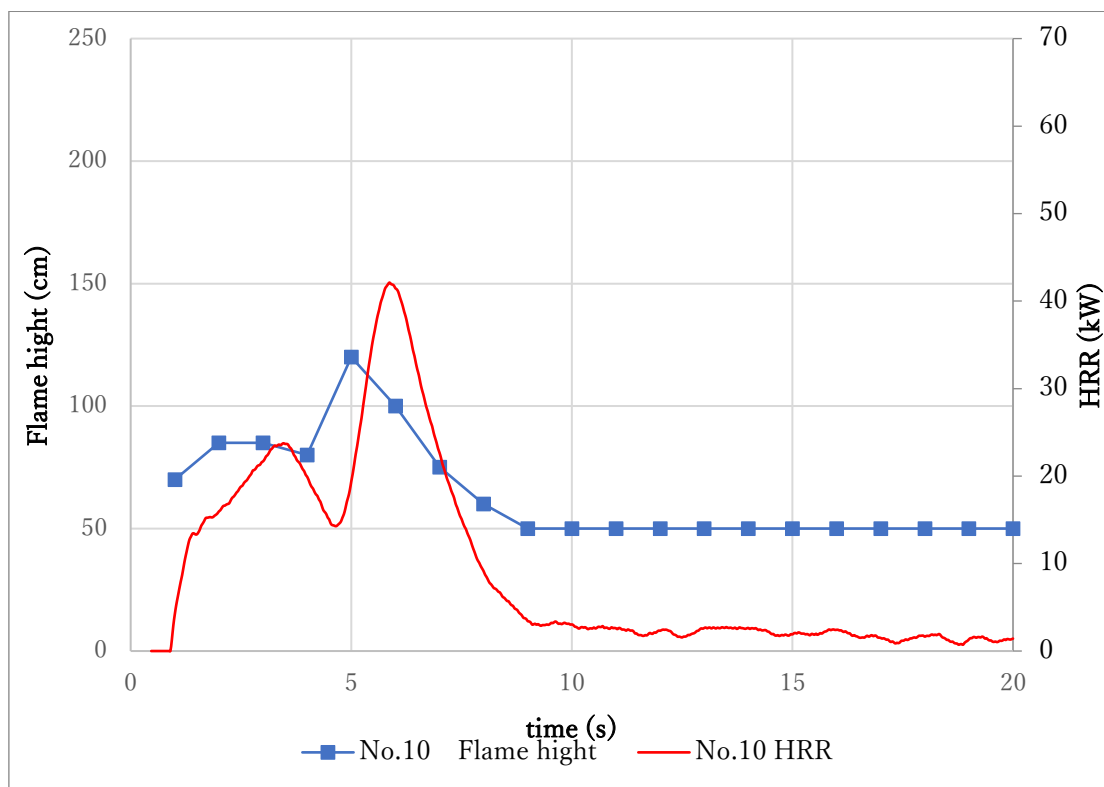


図 4-13 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.10)

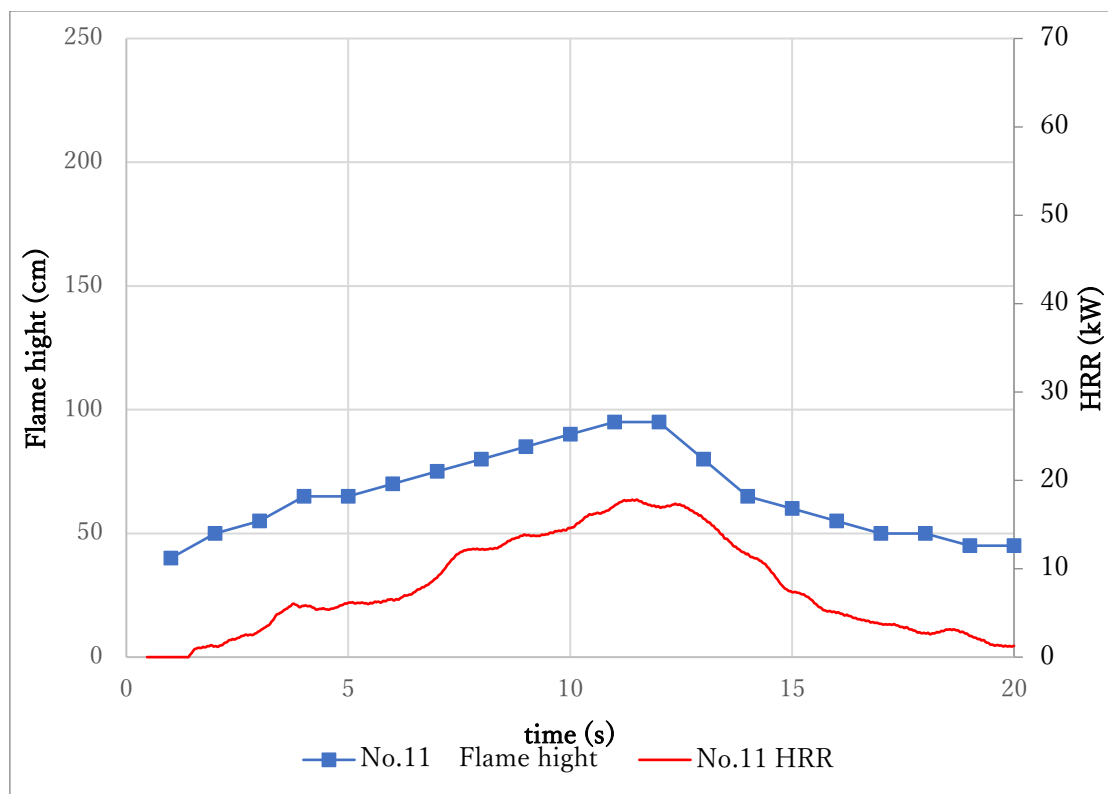


図 4-14 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.11)

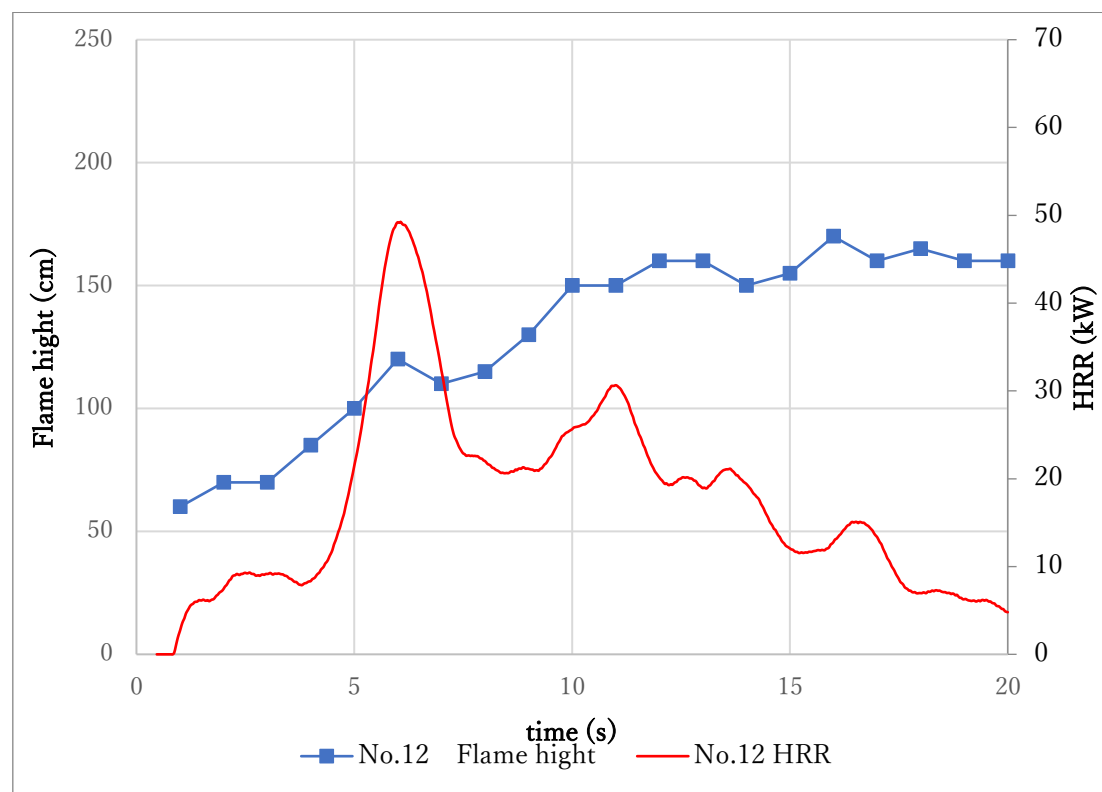


図 4-15 発熱速度及び火炎高さの経時変化(ケーブル No.12)

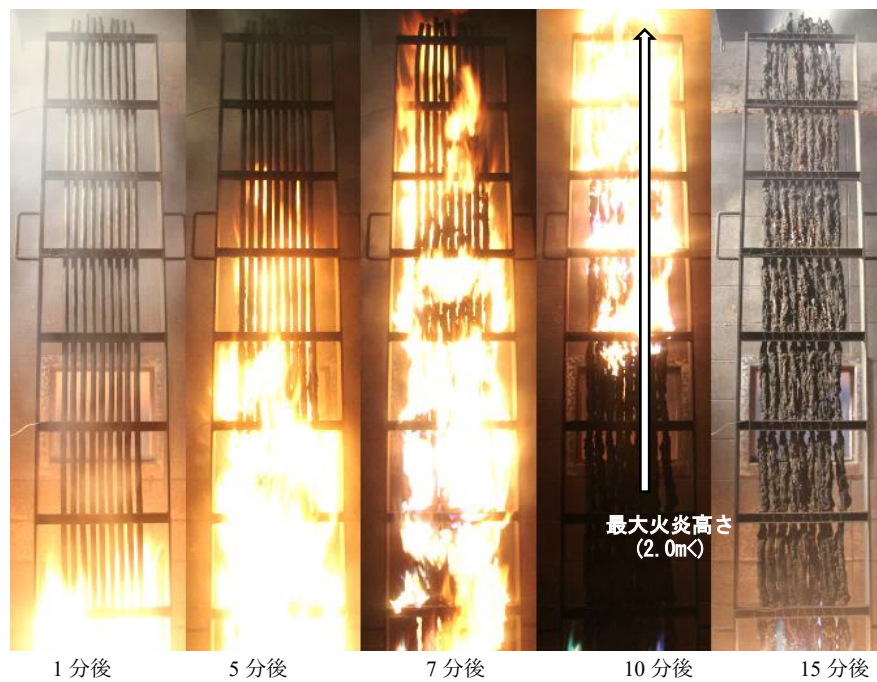


図 4-16 ケース(1)の燃焼挙動(ケーブル No.3)

バーナー火炎によらない自己燃焼により延焼が継続し、7 分後に炎がトレイ上端に達し、15 分程度でケーブルが全焼し消火

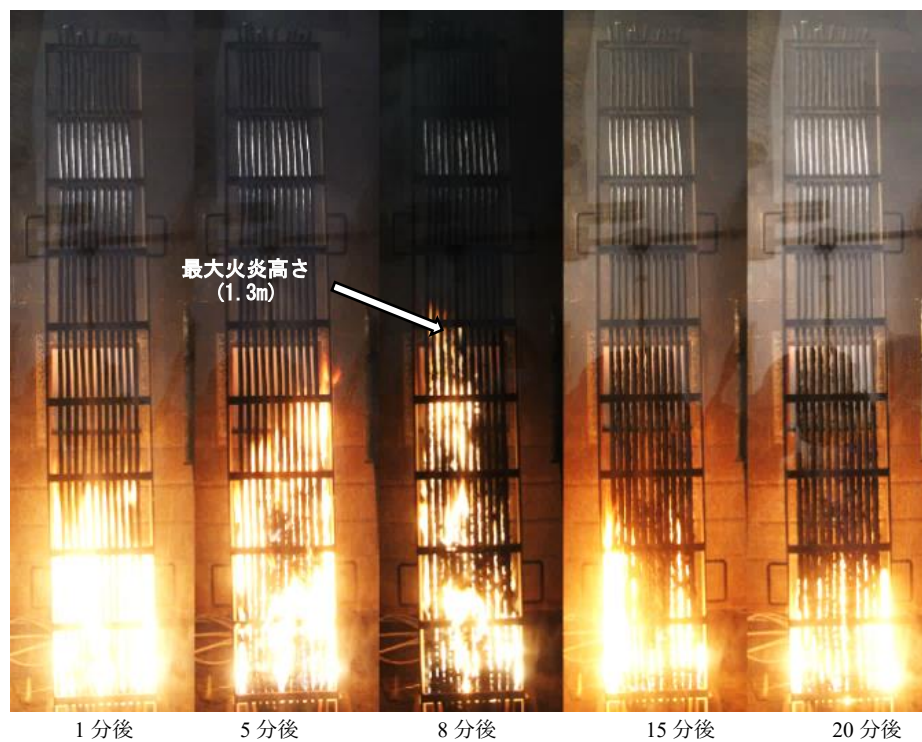


図 4-17 ケース(2)の燃焼挙動(ケーブル No.9)

バーナー火炎によらない自己燃焼で 8 分後に最大火炎高さを記録するが、その後火炎は衰退し、15 分程度でケーブルの燃焼は終了

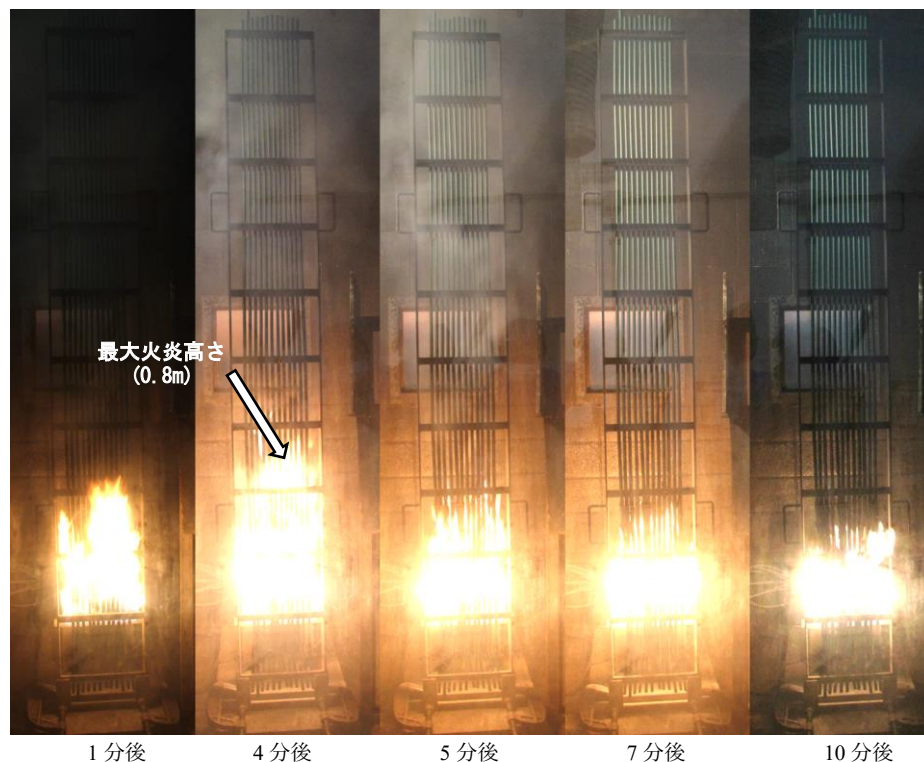


図 4-18 ケース(3)の燃焼挙動(ケーブル No.8)

バーナー火炎によりケーブルが燃焼し、4分後に最大火炎高さを観測したが、自己燃焼により延焼することなく7分程度で、ケーブルの燃焼は終了

各ケーブルのケーブル燃焼長を最大発熱速度に対してプロットしたものを図 4-19 に示す。この図のとおり、ケーブル No.1 及び N.10 を除いて燃焼長と最大発熱速度の間にある比較的良好な相関が見られた。No.1 に関しては、燃焼速度が早く、可燃物材料の少ないケーブルであることから、燃焼に影響する火炎高さは、上昇するものの、試験片下方の燃焼が時間とともに終了してゆくことから、試験片の最大発熱速度に寄与する燃焼範囲がそれほど広がることがなかったため、最大発熱速度がそれほど上昇しなかったものと考えられる。また、No.10 に関しては、短時間で急激に発熱速度が増加しているが、燃焼時間が非常に短かったことから、試験片未燃焼部分が着火温度に達せず、試験片上方への延焼が生じなかったものと推察される。

基本的に火炎の高さは、発熱速度と比例するものと考えられるため、火炎が到達した部分の試験片は燃焼するものと仮定した場合、最大発熱速度と試験片の燃焼長は相関すると考えることは合理的であるが、今回の結果のとおり、ケーブルの燃焼状況によっては、必ずしも相関しない場合があることは、明らかである。

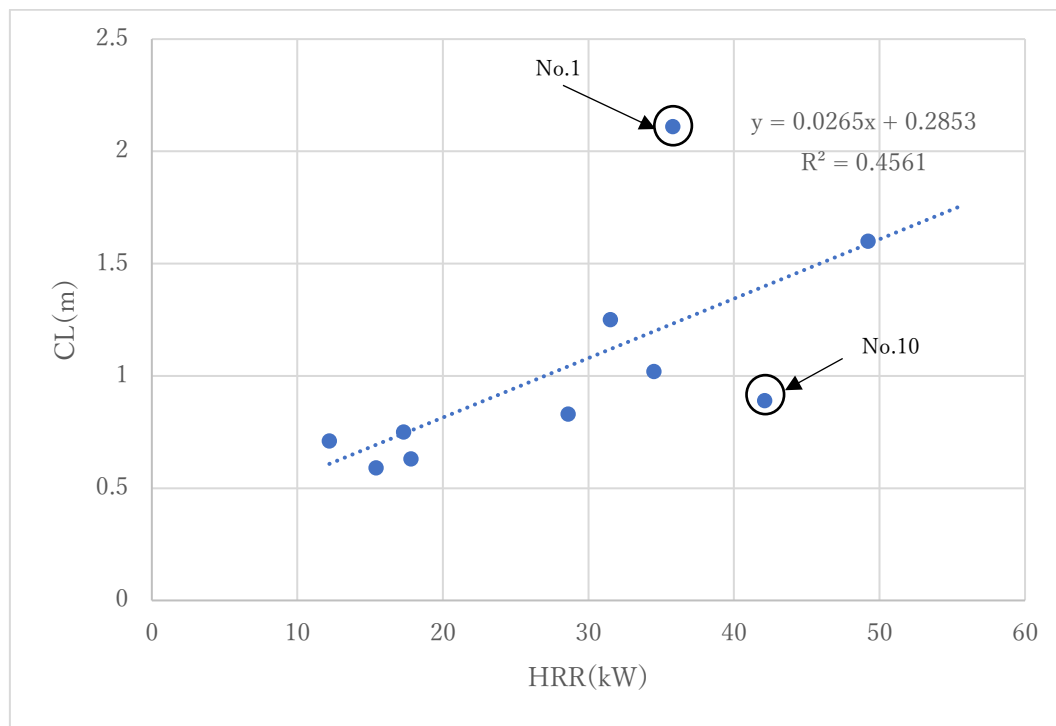


図 4-19 IEEE1202 試験における最大発熱速度と燃焼長の関係(No.2,3 を除く)

4.4.2 コーンカロリメータ試験結果

各ケーブルの発熱速度及び重量減少速度の経時変化の事例を図 4-20 から図 4-31 に示す。コーンカロリメータでは各データを 1 秒間隔で取得したが、これらの図は、各データの 30 秒間の移動平均を算出しプロットしている。

発熱速度曲線と重量減少速度曲線は、概ね同様の形状であるが、No.10 のケーブルについては、他のケーブルと異なる傾向が見られた(図 4-29)。この図における各データの曲線における第 2 ピークがシースの燃焼ピーク、第 3 ピークが絶縁体の燃焼ピークと考えられるが、発熱速度曲線と重量減少速度曲線とでは、これらのピーク高さが逆転している。この結果から、絶縁体材料の単位重量当たりの発熱量がシース材料のものと比較してかなり高いことが分かる。また、ケーブル No.7、No.11 及び No.12 については、一旦着火燃焼するものの、数分後一旦燃焼が終了する現象が見られた。これは、これらのケーブルのシース材料又はシース材料に添加された難燃剤の高い難燃効果によるものと考えれる。

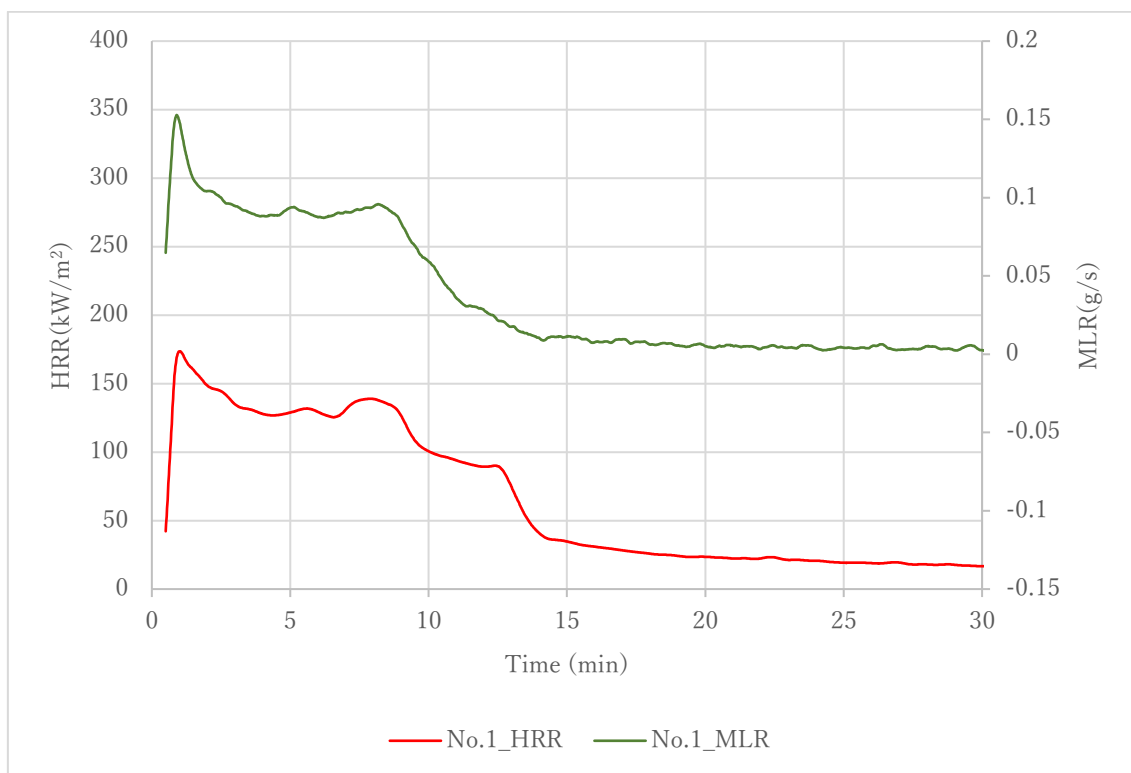


図 4-20 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.1)

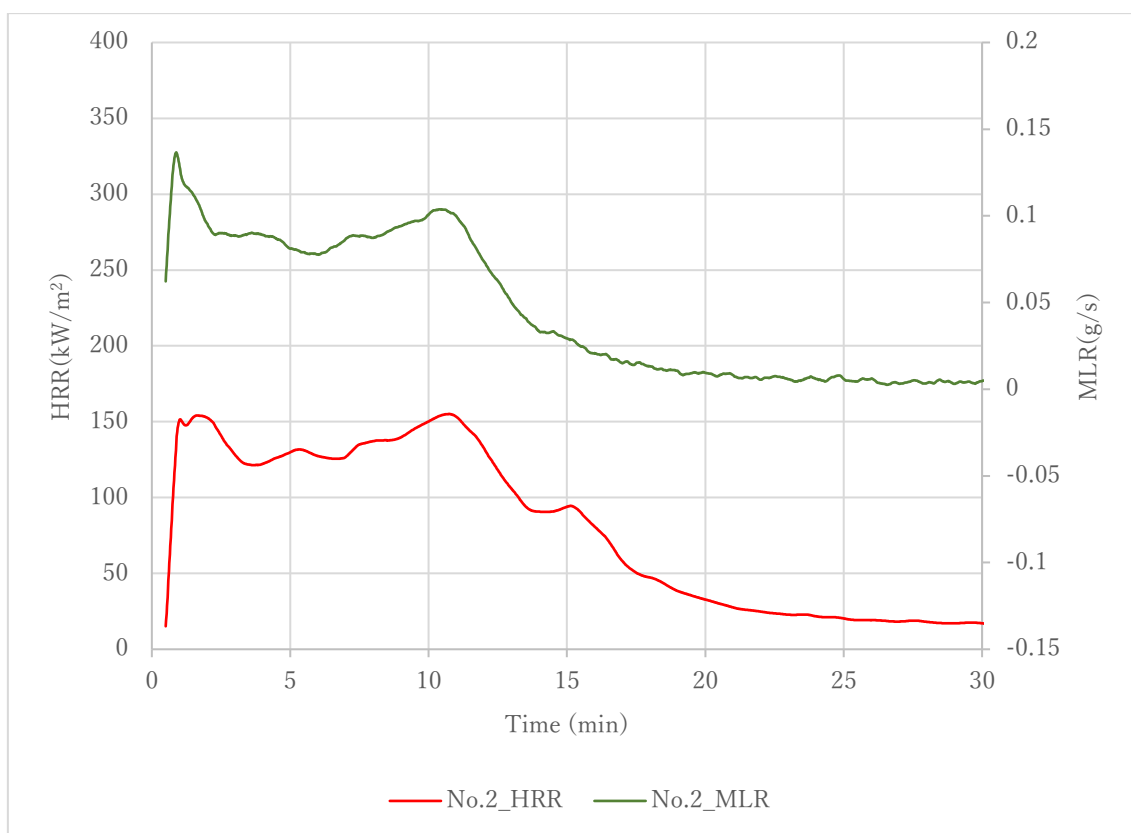


図 4-21 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.2)

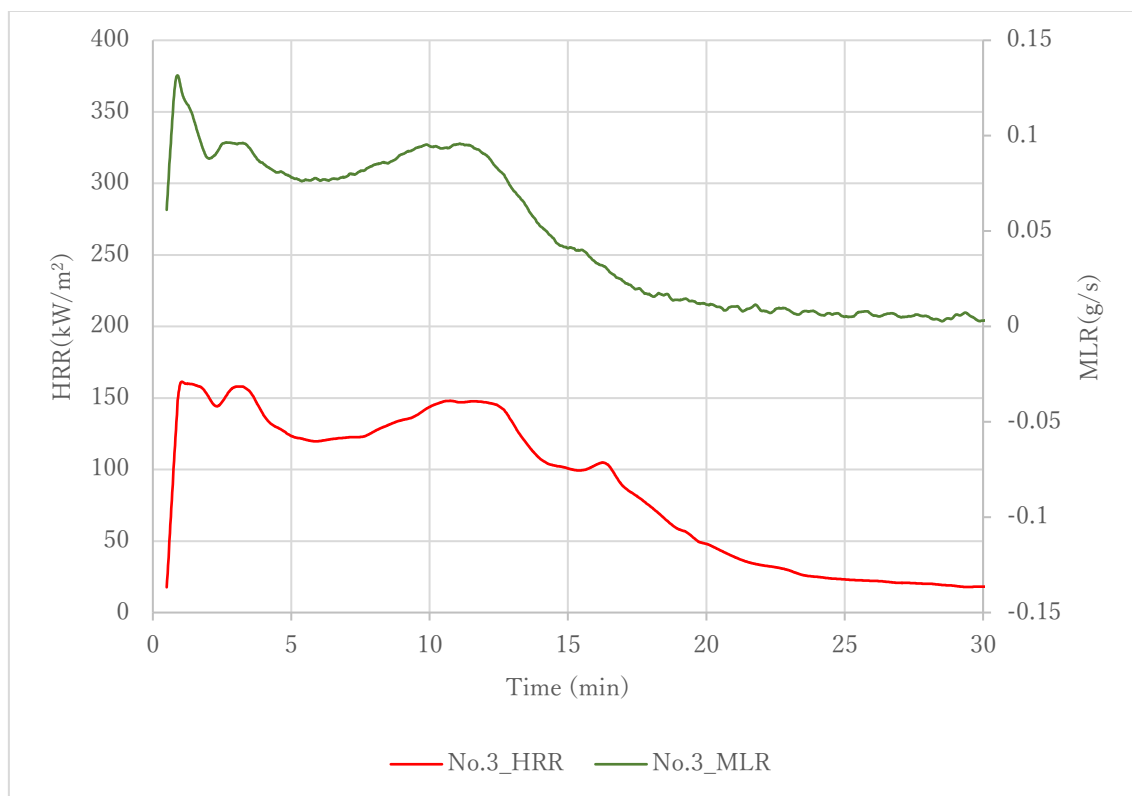


図 4-22 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.3)

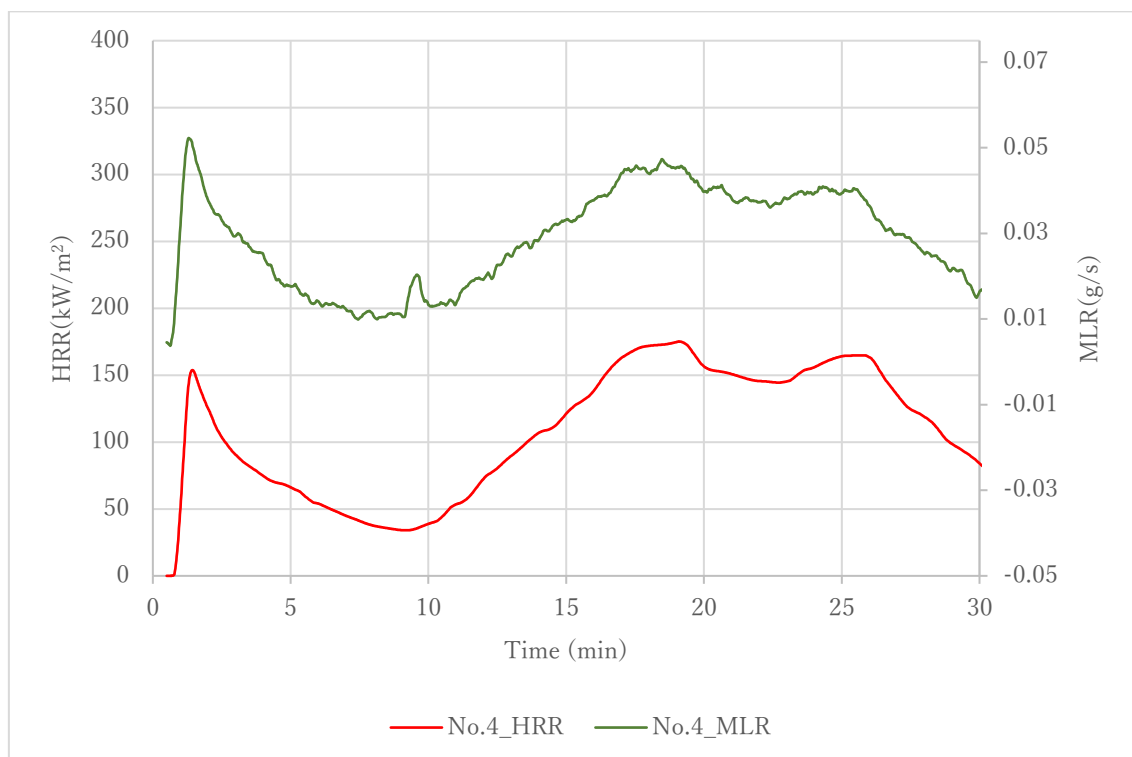


図 4-23 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.4)

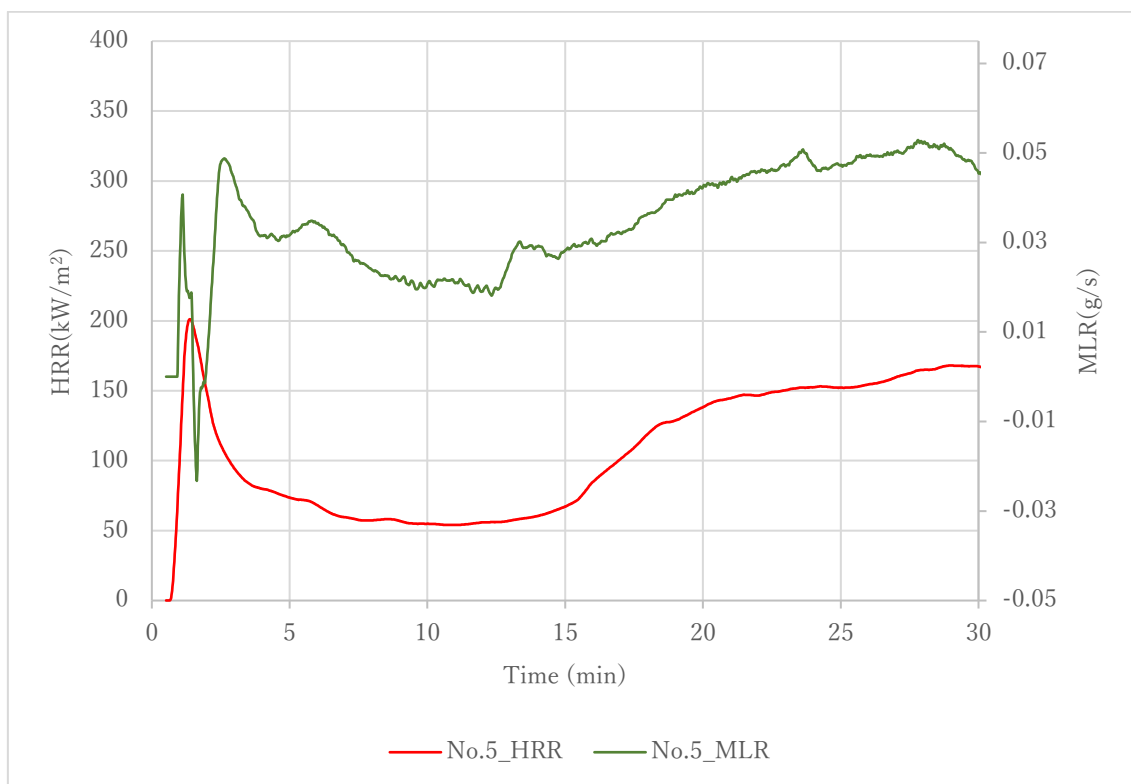


図 4-24 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.5)

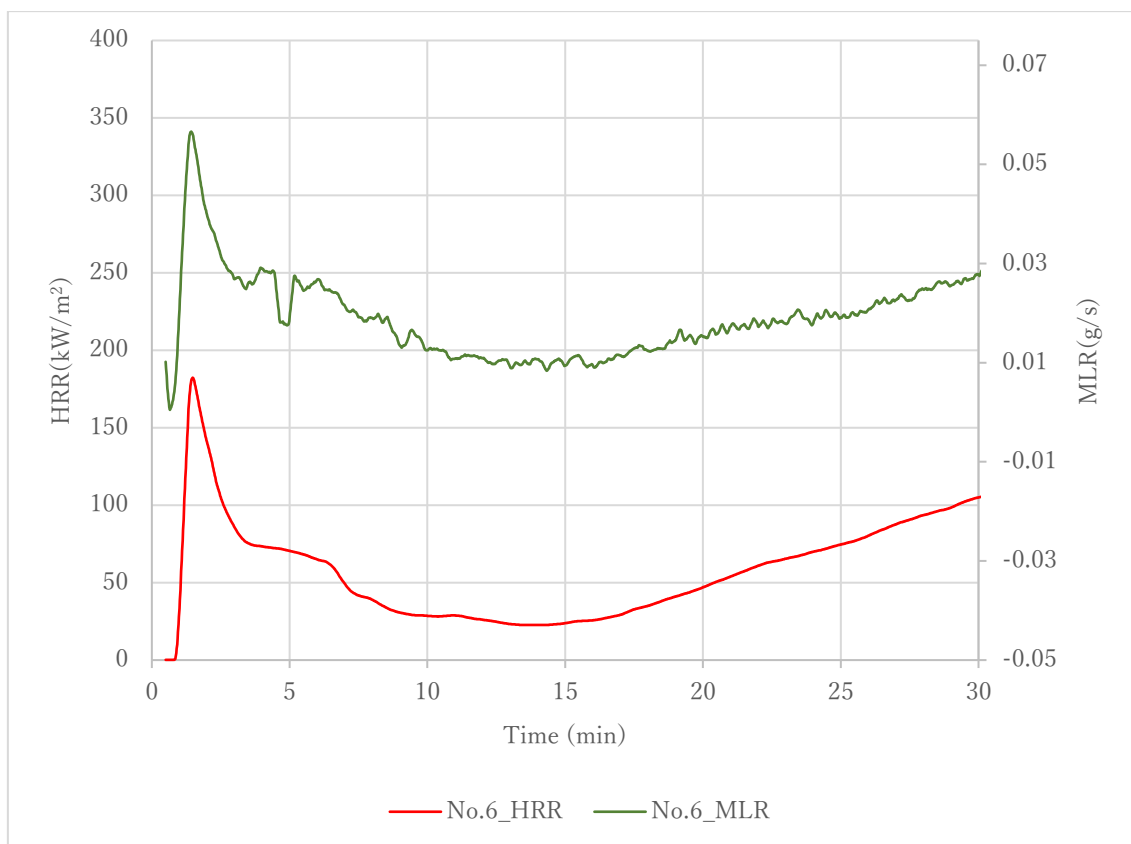


図 4-25 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.6)

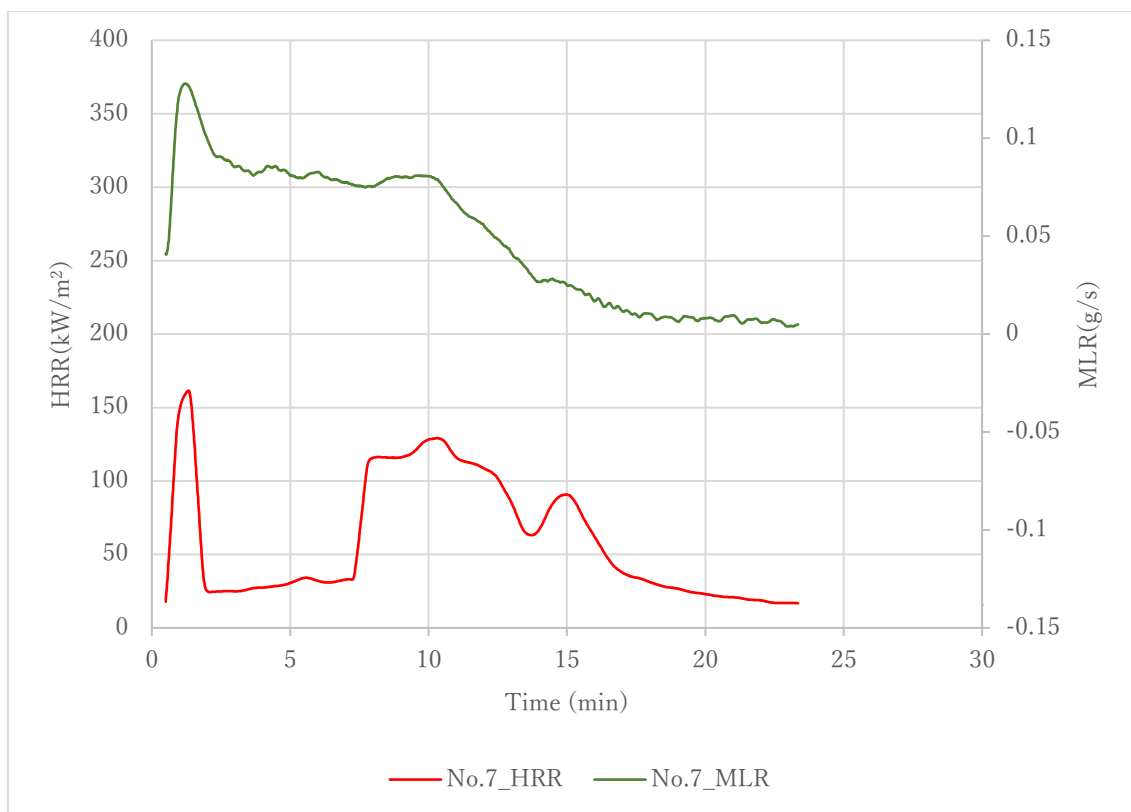


図 4-26 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.7)

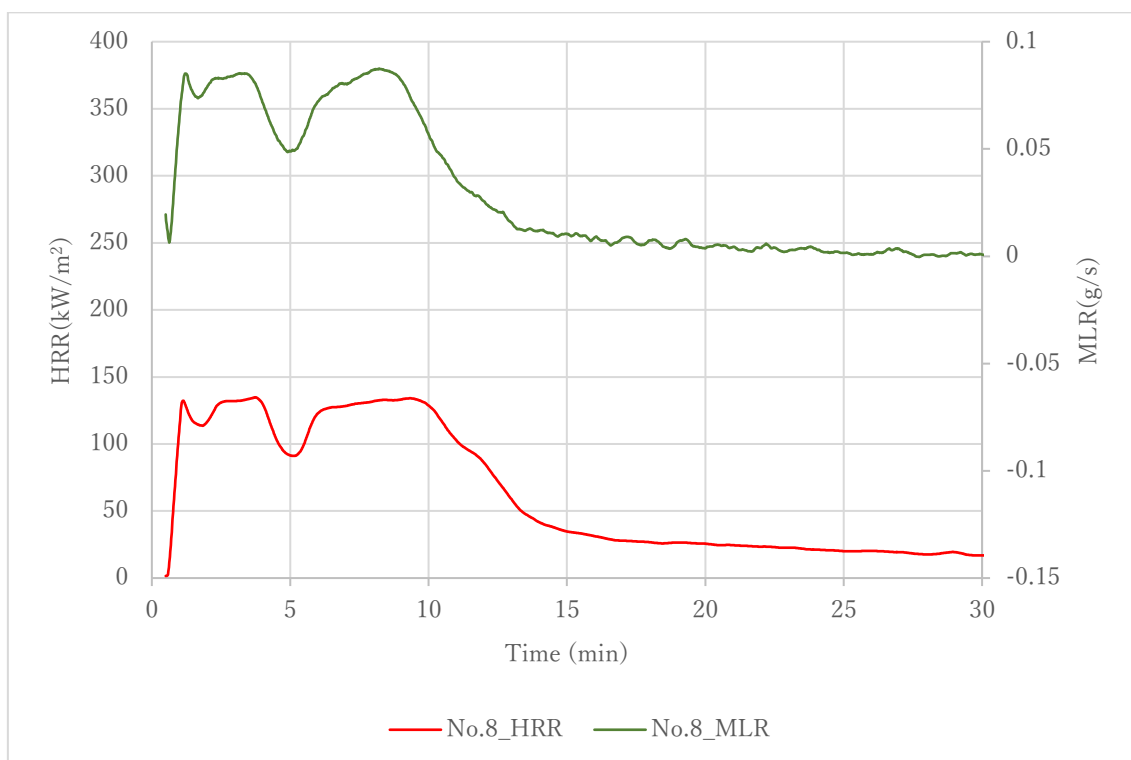


図 4-27 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.8)

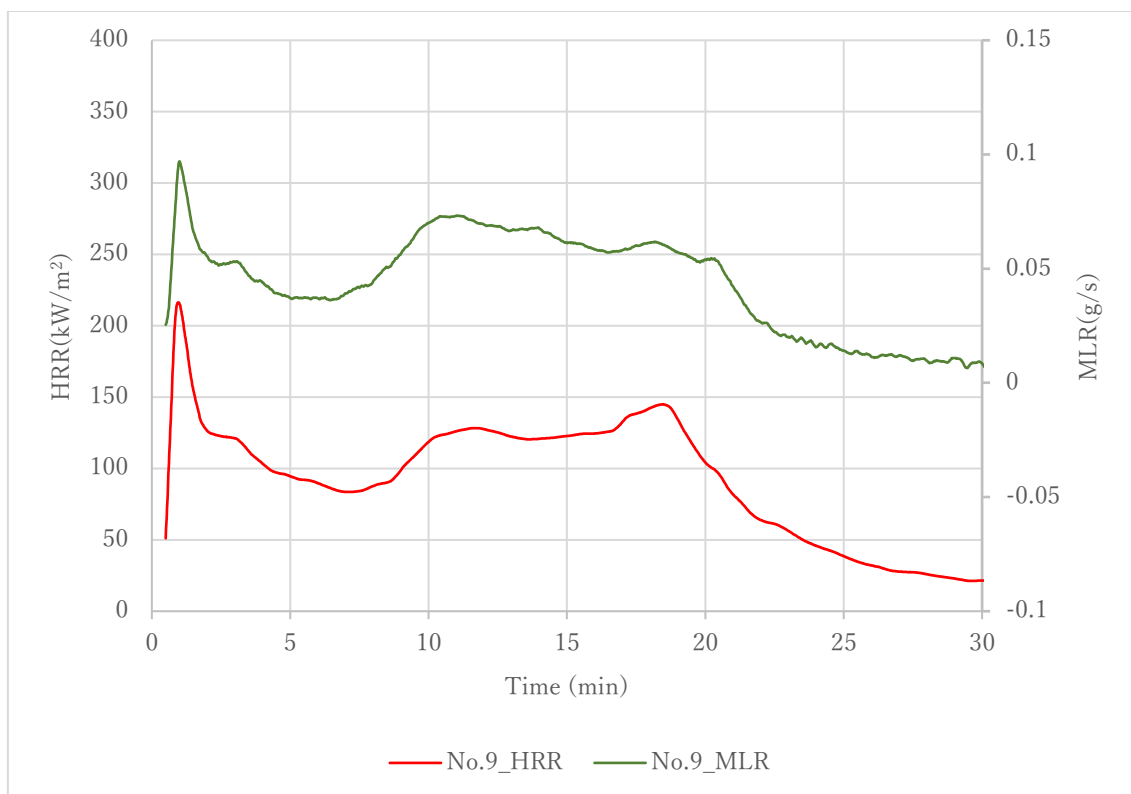


図 4-28 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.9)

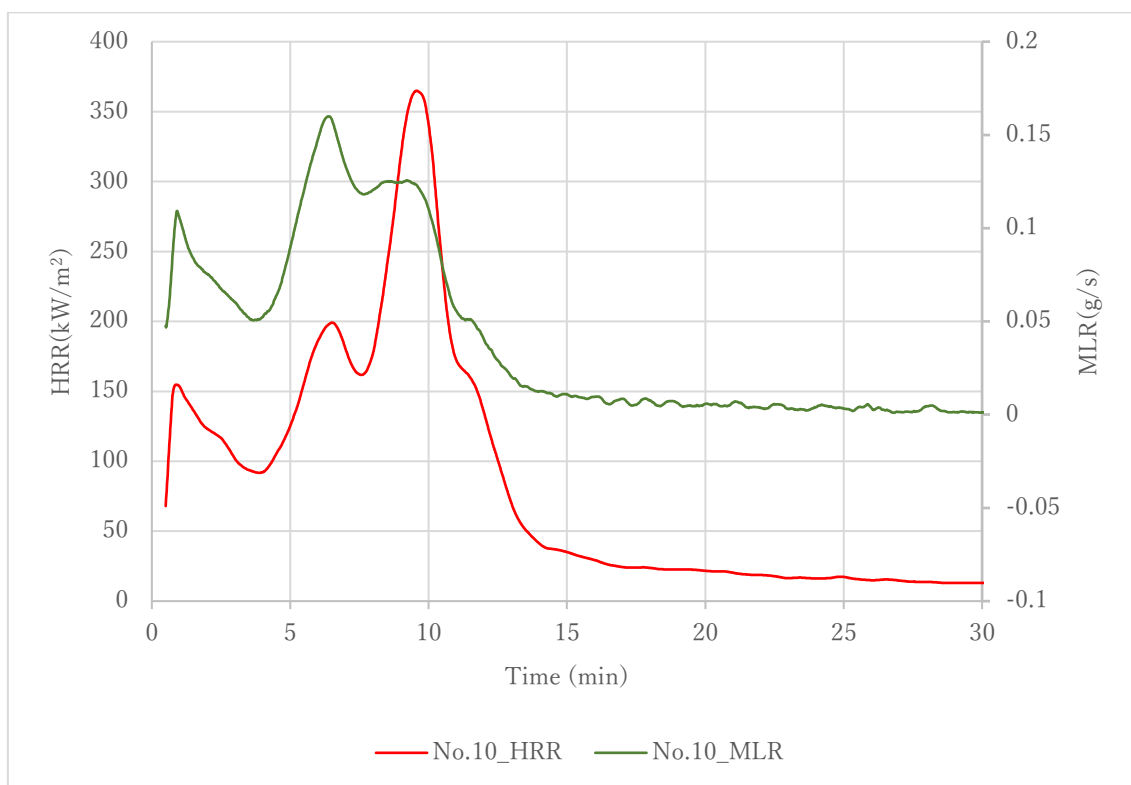


図 4-29 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.10)

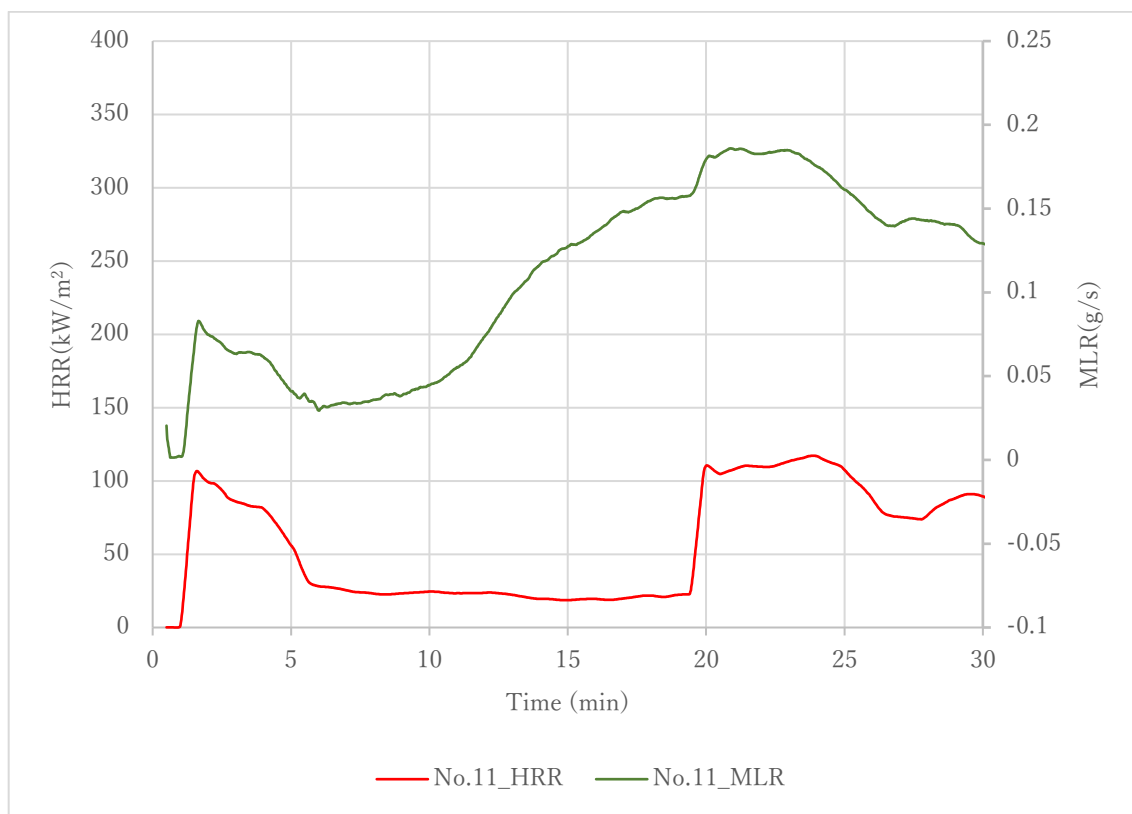


図 4-30 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.11)

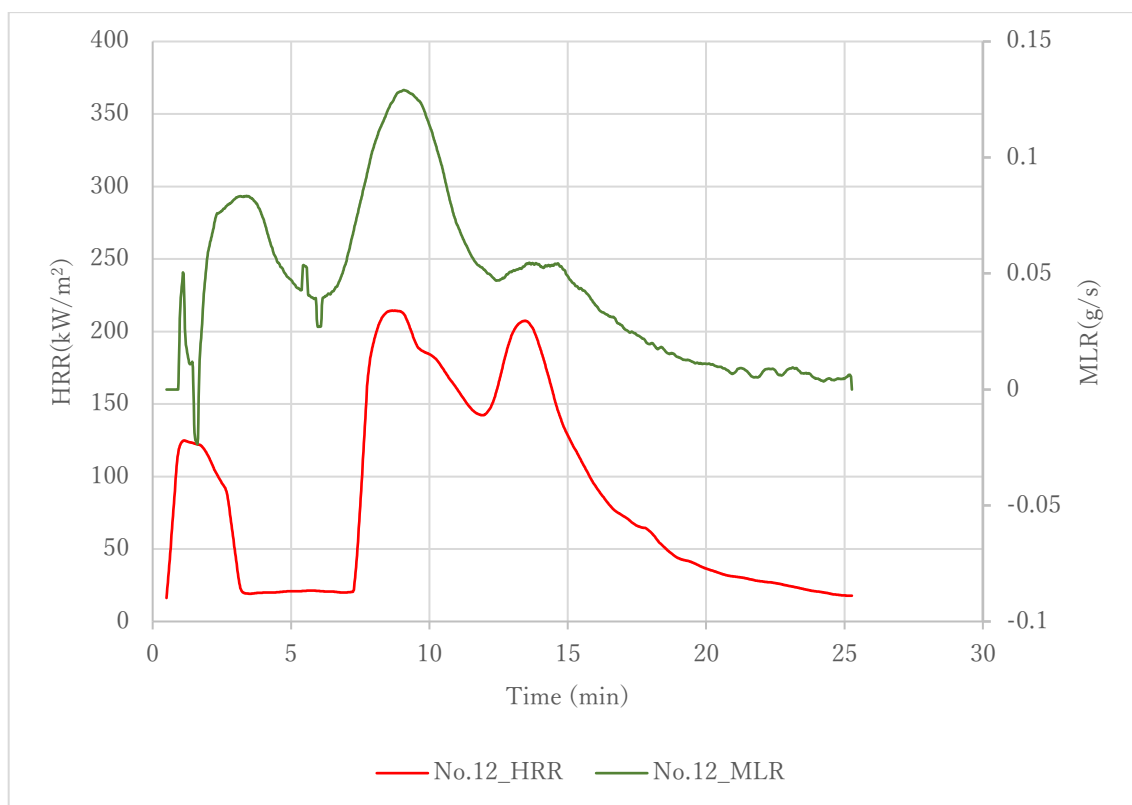


図 4-31 発熱速度及び重量減少速度経時変化(ケーブル No.12)

4.4.3 IEEE 1202 による試験結果との比較

一例として特徴的な発熱速度曲線を持つケーブル No.10 の IEEE1202 及びコーンカロリメータ試験の両者における発熱速度曲線を図 4-32 に示す。この図に示す通り、コーンカロリメータ試験では、試験片の燃焼による発熱速度を時間に対してプロットしたものが得られ、発熱速度曲線の形状、ピークの高さ等から、試験片の燃焼挙動が把握できるのだが、両者の発熱速度曲線の形状が比較的近いものとなっていることが確認できる。この事実は、コーンカロリメータ試験における試験片の燃焼状況から、IEEE 1202 試験における個々の試験片の燃焼状況がある程度推定できることを示唆するものである。

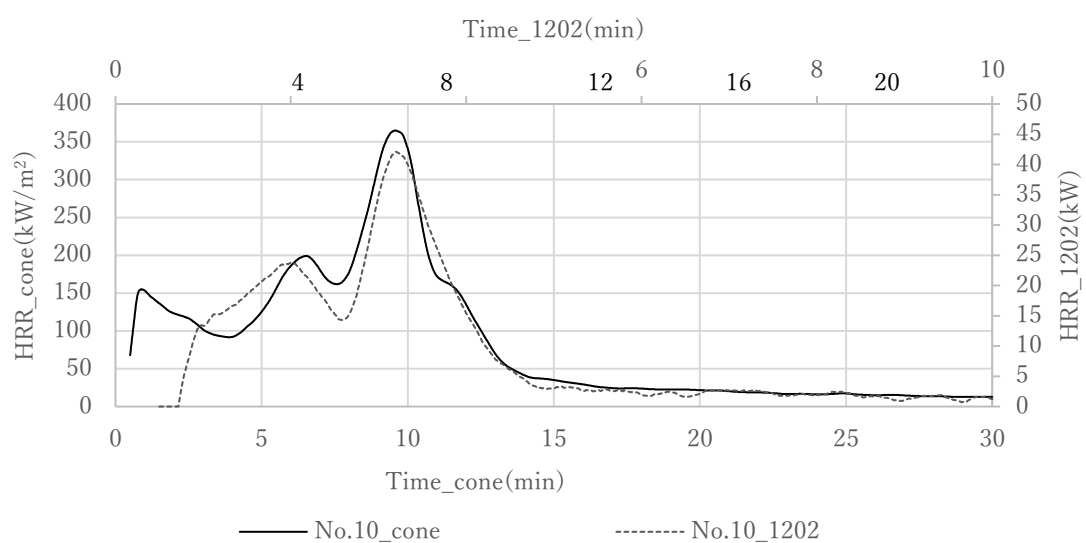


図 4-32 IEEE1202 試験及びコーンカロリメータ試験の発熱速度曲線比較
(cable No. 10)

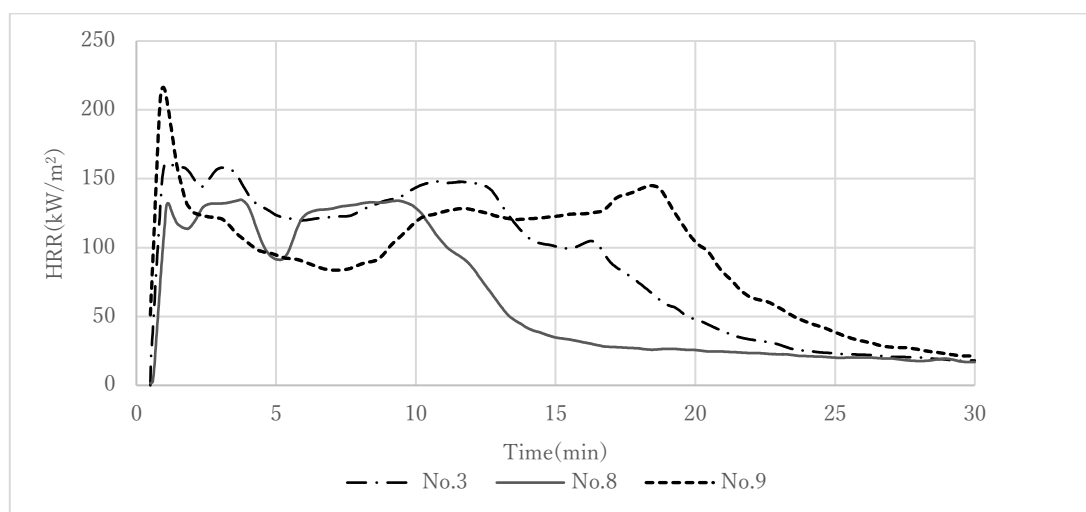


図 4-33 コーンカロリメータ試験における発熱速度曲線の比較
(ケーブル No. 3, 9 及び 8)

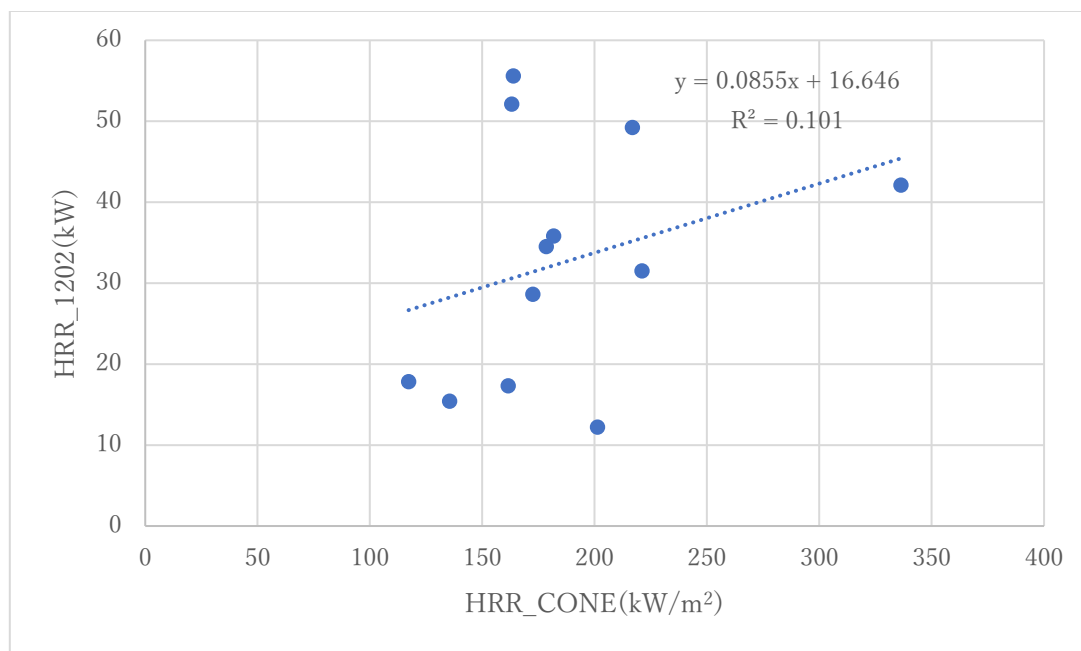


図 4-34 IEEE1202 試験とコーンカロリメータ試験における最大発熱速度の比較

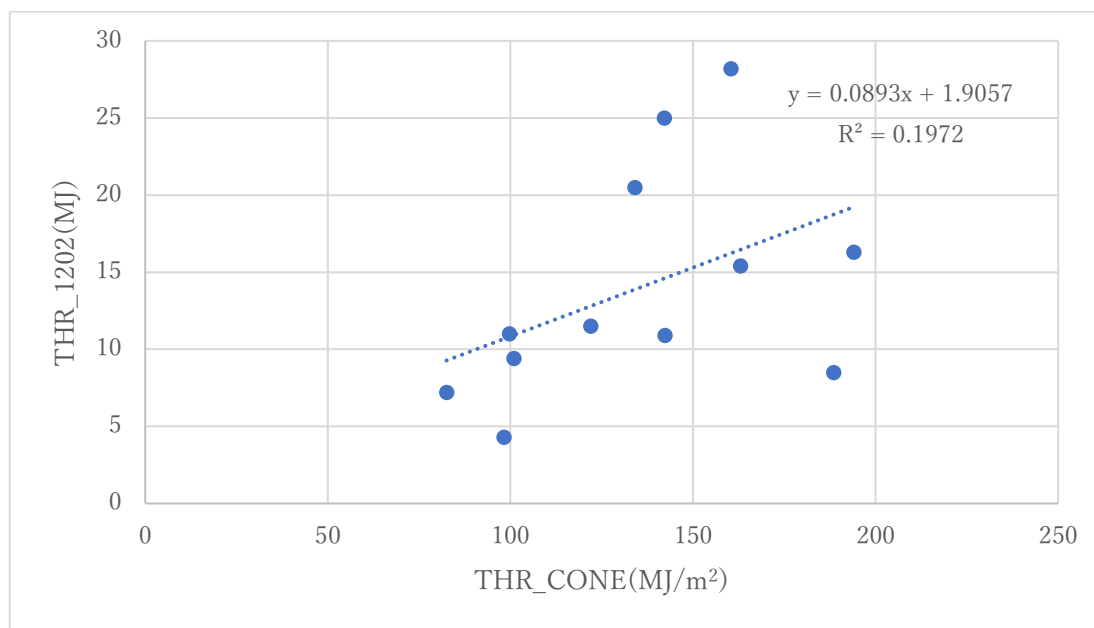


図 4-35 IEEE1202 試験とコーンカロリメータ試験における総発熱量の比較

一方、4.4.1 項で言及した、IEEE 1202 試験における 3 種類の燃焼状況を代表するケーブル No.3, No.9 及び No.8 のコーンカロリメータ試験による燃焼試験で得られた発熱速度曲線を図 4-33 に示すが、この図から今回得られたコーンカロリメータ試験の発熱速度測定データから、IEEE 1202 試験による 3 種類の燃焼状況を明確に区分することは困難であることが分かる。また、最大発熱速度及び総発熱量について、IEEE 1202 試験及びコーンカロリ

一メータ試験の両者間で明確な相関関係は得られなかった(図 4-34 及び図 4-35 参照)。これらの事実は、コーンカロリーメータ試験で得られる最大発熱速度、総発熱量といった発熱特性の情報を何らかの処理を施すことなく直接用いても、用途も被覆材料もサイズも様々なケーブルについて IEEE 1202 試験における燃焼挙動を相対的に比較することは困難であることを表すものである。

4.5 IEEE1202 延焼距離の簡易推定方法の検討

4.5.1 延焼距離の簡易推定式の検討

上記のとおり、コーンカロリーメータ試験で得られる結果を直接用いることによって、IEEE 1202 試験の評価基準である、ケーブルの燃焼長を推定することは困難であることが示唆された。そこで本研究では、コーンカロリーメータ試験で得られる複数の結果をパラメータとした推定式の検討を行った。推定式の概念図を図 4-36 に示す。なお、推定式の検討においては、主に次の 2 点を考慮した。

- 1) コーンカロリーメータで得られた、発熱データ等を IEEE1202 の燃焼長と同次元の長さ(m)の単位に変換する
- 2) IEEE1202 試験におけるバーナーの加熱範囲外への延焼を表現する

IEEE 1202 試験の試験結果として得られる燃焼長は、単位時間当たりの試験片の燃焼長(m/s)に試験片の燃焼継続時間(s)を乗じたものと考えることができる。

ここで、コーンカロリーメータ試験で得られるパラメータの適用を考慮する。

単位時間当たりの燃焼長については、式(4-1)に示すとおり、コーンカロリーメータ試験で取得できる、単位面積当たりの重量減少速度(g/s m²)を試験体可燃物材料の密度(g/m³)で除したもので相対的に比較することができるものと仮定した。このようにすることによってコーンカロリーメータで得られる単位面積当たりの重量減少速度を、単位時間当たりの試験片燃焼長に変換することができる。

$$\dot{h} = \dot{m}'' / \rho \quad (4-1)$$

ここに

\dot{h} : 単位時間当たりの燃焼長 (m/s)

\dot{m}'' : コーンカロリーメータ試験における各試験片の最大重量減少速度(g/m²s)

ρ : 各試験片の可燃物材料の密度(g/m³)

従って試験終了時の燃焼長は、上記式(4-1)によって得られた単位時間当たりの燃焼長に試験片の燃焼継続時間乗じたものとすることができる。

次に燃焼継続時間へのコーンカロリーメータ試験結果の適用を考慮する。

まず IEEE1202 試験において、バーナー火炎に曝されている部分の燃焼継続時間については、コーンカロリーメータ試験にて取得できる総発熱量と最大発熱速度の比(t_d)を適用す

ることとした。コーンカロリメータ試験では、着火から燃焼終了までの時間(燃焼継続時間)を記録していることから、この時間を適用することもできるが、試験における燃焼終了時間は試験者が、目視にて決定すること、また、燃焼継続に寄与しないと考えられる極小の有炎燃焼も観測対象としていることから、実際に燃焼継続に寄与する燃焼継続時間を相対的に比較する客観的な指標として総発熱量と最大発熱速度の比を用いることとした。

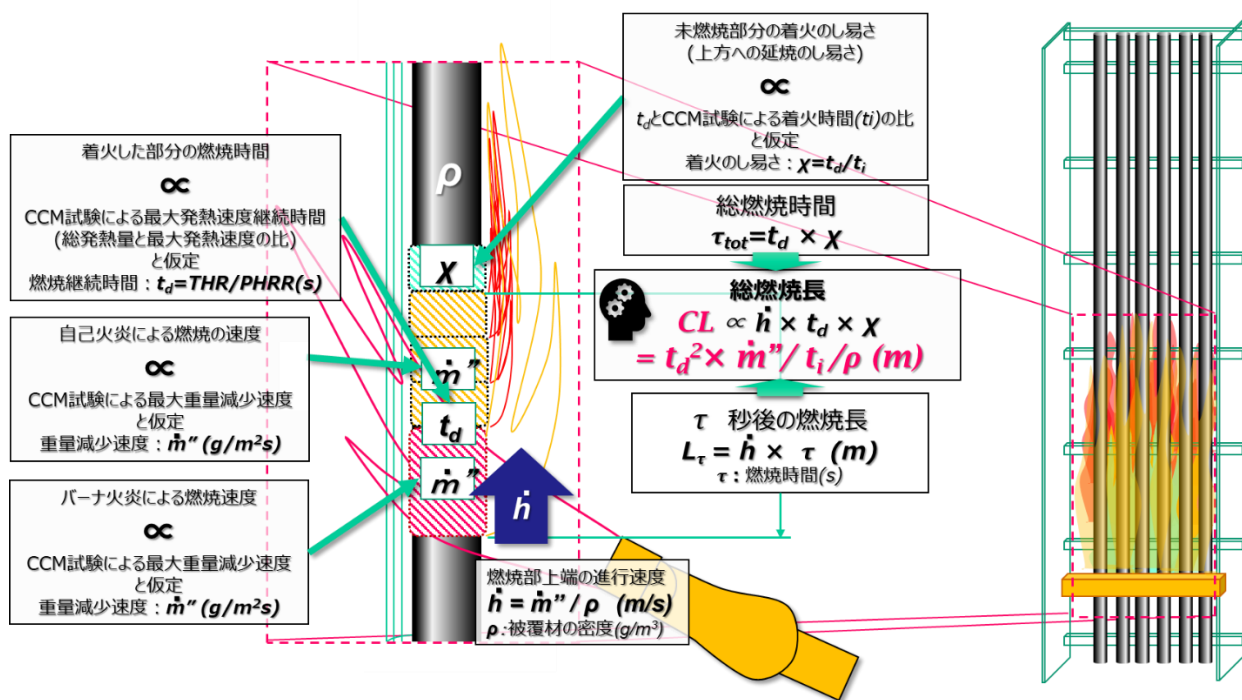


図 4-36 IEEE1202 試験におけるケーブル燃焼長推定のための概念図

次に、IEEE1202 試験において、バーナー火炎に曝されていない部分への延焼について考慮する。上記で考慮した相対的に燃焼継続時間を表す値は、あくまでも加熱源に曝された部分の試験片の燃焼継続時間であり、IEEE 1202 試験のように、加熱範囲を超えて延焼が継続する場合は、延焼継続時間に加熱範囲を超えた部分の延焼時間を考慮する必要がある。未燃焼部分については、既に燃焼している部分の炎によって加熱される時間が長い程、又ケーブルの着火時間が短い程燃焼が開始し易いと考えられる。そこで、ここでは各試験片の加熱範囲を超えた部分の延焼時間は、試験片の未燃部分の着火の発生し易さ(コーンカロリメータ試験における試験片の着火時間と既に燃焼している部分の燃焼継続時間(t_d)の比)で相対的な比較ができるものと仮定し、これを延焼継続パラメータ χ として定義した。これらの仮定のもと IEEE 1202 試験における試験片の燃焼時間(t_{d_tot})は、(4-2)式を用いて推定できるものとした。

$$t_{d_tot} = t_d \times \chi = t_d^2 / t_i \quad (4-2)$$

ここに

t_{d_tot} : IEEE 1202 試験での試験片の延焼継続時間(s)

t_d : コーンカロリメータ試験における試験片の燃焼継続時間(s)

(コーンカロリメータ試験における総発熱量を最大発熱速度で除した値)

χ : 延焼継続パラメータ

t_i : コーンカロリメータ試験における試験片の着火時間(s)

従って、IEEE 1202 試験における最終的な燃焼長 CL は、式(4-1)及び式(4-2)を合成した次の式を用いて相対的に比較できるものと考えた。

$$CL = t_d^2 \times \dot{m}'' / \rho / t_i \quad (4-3)$$

4.5.2 次元解析による簡易推定式の検証

次に式 (4-3) の妥当性を検証するために抽出した要素に関して次元解析を実施した。

燃焼長 CL 及び CL を推定するために抽出したそれぞれのパラメータの次元は、次のとおりである。

$$CL[L], t_d[T], \dot{m}'' [MT^{-1}L^{-2}], \rho[ML^{-3}], t_i[T]$$

これらの組合せを CL の次元 $[L]$ に合わせるための式としては、次式が考え得る。

$$CL = t_d^n \times \dot{m}'' / \rho / t_i^{n-1} \quad (4-4)$$

$$CL = t_i^n \times \dot{m}'' / \rho / t_d^{n-1} \quad (4-5)$$

しかしながら、 t_d が長い又は、 t_i が短いほど炭化長が長くなるものと推定されることから、推定式は、上記のうち式(4-4)が適切であると考えられ、またこの式が、式(4-3)に相当することが分かる。

なおこの系における物理量の数は、5、次元の数は3でありバッキンガムの π 定理から、式(4-4)は、次の2つの無次元パラメータで表現できることとなるが、 π_1 は、式(4-4)において $n=2$ でなければ無次元量となりえないことから、式(4-4)は、式(4-3)と同一の式となる。また、 π_2 として、先ほど定義した、延焼継続パラメータ(χ)が確認できる。

$$\pi_1 = t_d \times \dot{m}'' / \rho / CL \quad (4-6)$$

$$\pi_2 = t_d / t_i \quad (4-7)$$

4.6 実験データによる簡易推定式の検証

表 4-3 にコーンカロリメータ試験で得られた、最大発熱速度、総発熱量、最大重量減少速度、着火時間及び総発熱量及び最大発熱速度の比である相対燃焼継続時間 t_d の算出結果を示す。

コーンカロリメータ試験は基本的に着火時間及び最大重量減少速度を除き 2 回の試験

結果の平均値としているが、No.5、No.7 及び No.11 については、1 回の試験で得られた値である。着火時間については、継続燃焼が生じた時間を試験者が目視で判断しているが、着火時間付近で、断続的な燃焼(フラッシング)が生じる場合が多く継続燃焼の判断が明確にできないケースが多いことから、複数回実施した試験については、より安全側の(厳しい)値である最短の着火時間を用いた。また、重量減少速度については、重量減少速度を測定するためのロードセルの出力データが、試験片の燃焼挙動に影響され、大きく乱れる場合がありその影響が最大重量減少速度に影響するケースがあったことから、このような状況が生じていないケースの値を用いている。

表 4-3 コーンカロリメータ試験結果

Items	最大発熱速度 (\dot{q}''_{max})	総発熱量 (q''_{tot})	最大重量減少速度 (\dot{m}''_{max})	着火時間 (t_i)	相対燃焼継続時間 (t_d)
	kW/m ²	MJ/m ²	g/m ² s	s	s
No.1	181.7	122.0	17.29	16.3	671.4
No.2	163.1	142.1	15.46	17.3	871.6
No.3	163.7	160.4	14.89	18.9	980.0
No.4	178.4	194.0	5.91	39.5	1087.2
No.5	201.2	188.5	5.98	36.7	936.7
No.6	172.4	99.7	6.40	43.8	578.0
No.7	161.5	82.5	14.47	19.3	510.6
No.8	135.4	98.2	9.90	38.1	725.2
No.9	221.0	163.0	10.97	22.2	737.8
No.10	336.2	142.3	18.09	16.1	423.3
No.11	117.2	100.9	21.04	59.9	861.2
No.12	216.8	134.1	14.60	21.4	618.4

IEEE1202 試験で得られた各ケーブルの燃焼長を式(4-3)を用いて算出した燃焼長の推定値(CL)に対してプロットしたものを図 4-37 に示す。なお、No.2 及び No.3 のケーブルに関しては、IEEE 1202 試験における最終的な燃焼長が測定できなかったため、評価対象から除外している。なお、図中の誤差範囲は、試験を実施した電線総合技術センターにおける IEEE1202 試験における延焼距離の測定不確かさ $\pm 0.27\text{m}$ (包含係数 $k=2$)の範囲であるが、この値は、あ

くまでも単一ラボにおける測定の不確かさであり、ラボ間のばらつきも含めた不確かさの値は、この値を大きく上回るものと推定される。

この図に示すとおり、式(4-3)を用いて推定した値と IEEE 1202 試験によって得られた燃焼長は、No.6 の結果を除き、非常に良い相関が得られることが確認できた。次に、図 4-37 で得られた回帰直線の傾きを IEEE1202 試験に固有な比例定数 K とし、この値を CL に乗じた値(CL_{corr})を式(4-8)を用いて算出し、IEEE 1202 の試験結果(CL_{1202})と比較したものを図 4-38 に示す。なお、IEEE 1202 試験で測定することのできる最大燃焼長は、バーナー上端から、垂直トレイ上端までの距離である 2.2m である。この図から推定式を用いてケーブル No.2 及び No.3 の全焼した状況もよく推定できることが分かる。

$$CL_{corr} = \min(2.2, K \times CL) \quad (4-8)$$

ここに

K : 試験方法固有の比例定数=5.91

また、この図から、次の様にした場合、IEEE 1202 試験における 3 種類の燃焼状況が比較的よく推定できていることが分かる。

燃焼パターン①： $CL_{corr} > 2.2$

燃焼パターン②： $CL_{corr} > 1.0, \leq 2.2$

燃焼パターン③： $CL_{corr} \leq 1.0$

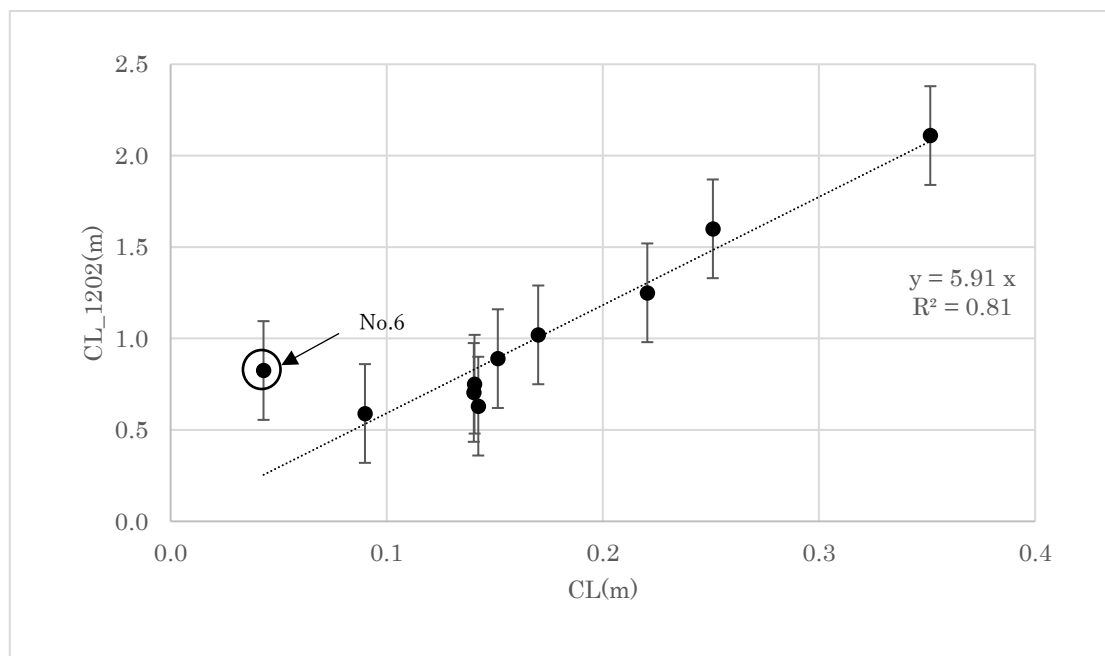


図 4-37 IEEE 1202 における実際の燃焼長(CL_{1202}) と推定燃焼長(CL)の比較
(ケーブル No.2 及び No.3 を除く)

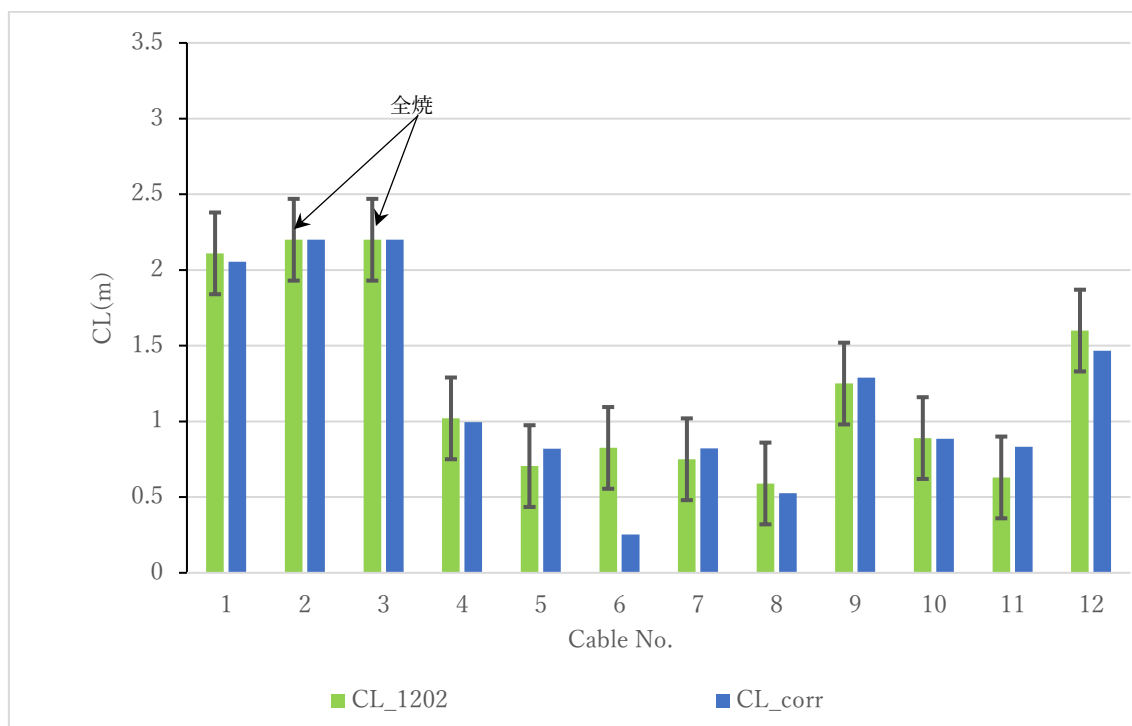


図 4-38 IEEE 1202 における実際の燃焼長(CL₁₂₀₂) と補正後の推定燃焼長(CL_{corr})の比較

これらの結果から、4.5 節で検討した推定式がある程度妥当であることが確認できた。しかしながら、1 種類のケーブル(No.6)については、満足な推定結果が得られたとは言い難い。この点に関して考察する。

No.6 について、コーンカロリメータ試験及び垂直トレイ試験において得られた発熱速度曲線をサイズは異なるが同一の被覆材料を有する No.5 の試験結果とともにプロットしたものをそれぞれ図 4-39 及び図 4-40 に示す。これらの図に示すとおり、IEEE 1202 試験においては、No.6 の発熱速度曲線の立ち上がりは、No.5 と同等以上であり、最大発熱速度については、No.5 と比較して大幅に高い値となっている。しかしながら、コーンカロリメータ試験においては、発熱速度曲線の立ち上がり、最大発熱速度ともに No.5 が No.6 を上回っている。今回用いたケーブルのうち No.4、No.5 及び No.6 は同一の難燃性の高いシース材料及び易燃性の XLPE を絶縁材料に持っており、これらのケーブルの場合、絶縁材料が燃焼することによって発熱速度が急激に上昇するものと推定されるが、No.6 は、No.4 及び No.5 と比較して外径が大きいこともありコーンカロリメータ試験において設定した加熱強度 (50kW/m²) 及び試験時間においては、シース材料の熱容量及び多量に添加された難燃材の効果により、IEEE 1202 試験における絶縁体の燃焼状況を再現し得るまでに達しなかったものと推察される。

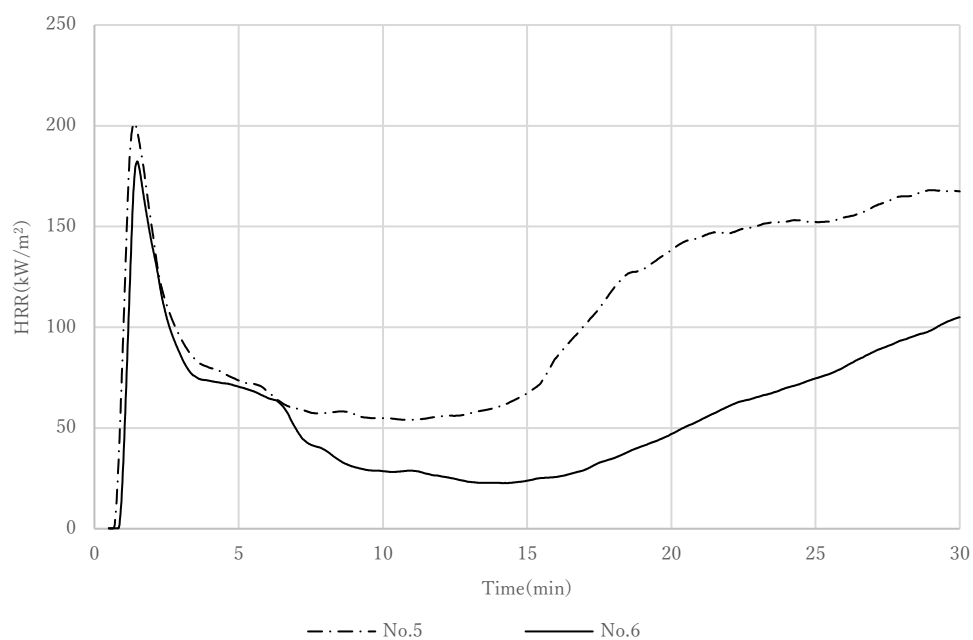


図 4-39 コーンカロリメータ試験における発熱速度曲線の比較
(ケーブル No.5 及びケーブル No.6)

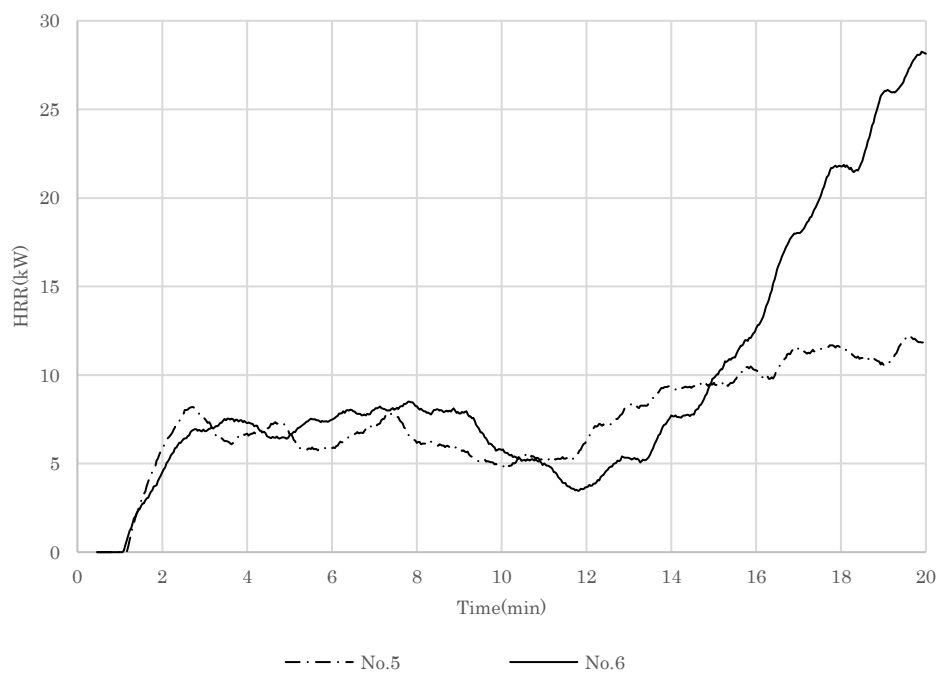


図 4-40 IEEE 1202 試験における発熱速度曲線の比較
(ケーブル No.5 及びケーブル No.6)

No.6 の両試験の結果を重ね合わせたものを図 4-41 に示すが、この図に示すとおり、両試験とも試験終了時において、発熱速度曲線は上昇傾向にあり、IEEE1202 で検出した最大発熱速度がコーンカロリメータ試験で得られた最大発熱速度に必ずしも相当するとは言えない。なお、No.6 と同一の外径である No.11 に関しては、図 4-42 に示すとおり、両試験において燃焼のピークを検出しており、両試験で得られた最大発熱速度はケーブルの最燃焼時点のものと推察されることから、No.11 においては、コーンカロリメータで十分な燃焼状況が得られたものと推察される。

今後、垂直トレイ試験の加熱強度に該当する最適な加熱強度、加熱時間を探ることによって本推定法の精度向上を検討していきたい。

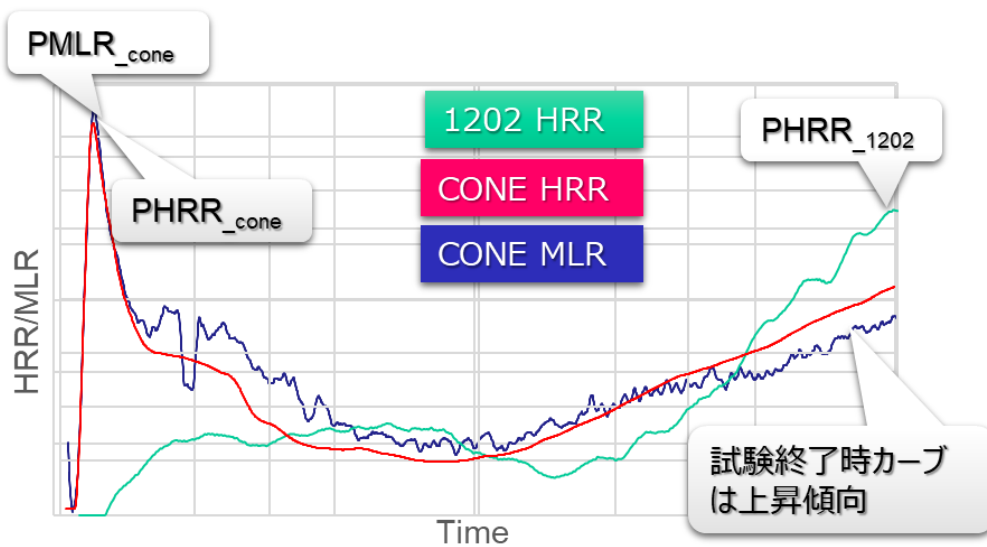


図 4-41 IEEE 1202 試験の発熱速度曲線及びコーンカロリメータ試験の発熱速度曲線並びに重量減少速度曲線の比較(No.6)

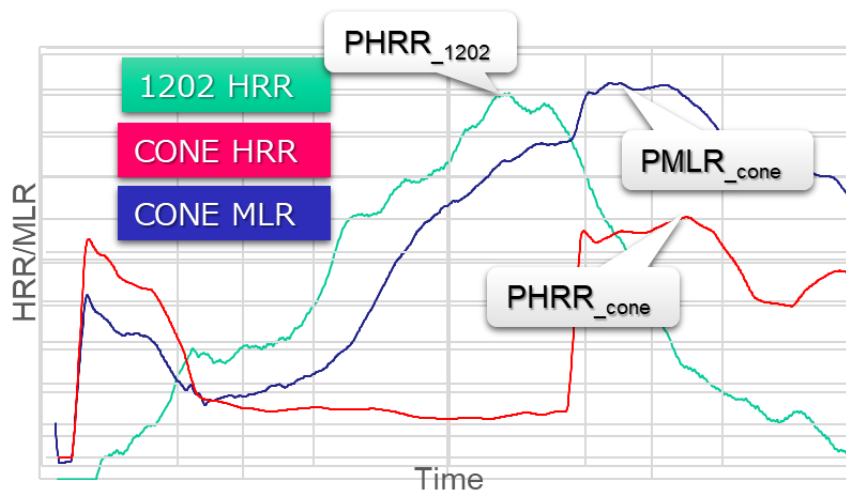


図 4-42 IEEE 1202 試験の発熱速度曲線及びコーンカロリメータ試験の発熱速度曲線並びに重量減少速度曲線の比較(No.11)

4.7 まとめ

異なる12種類のケーブルを用いることでIEEE 1202試験におけるケーブル延焼距離を、研究で提案した推定法を用いてコーンカロリメータ試験で得られたデータから予測することが可能となることを示すことができた。現時点において後述する課題は残されているものの、少なくともモデル概念の妥当性は確認できたものとする。

この手法を用いることにより、製品認証機関、規制当局においては、製品認証等における試験の省力化、定期サーベイランスにおける製品の継続的な基準への適合を低コストかつ効率的に実施できる効果がまた、ケーブル製造者においては、製品認証等の低コスト化、迅速化等の効果が期待される。

提案した推定式を用いる上における課題としては少なくとも次のものがある。

1) IEEE1202 試験以外の試験への適用

推定式は、ケーブルの難燃性を相対比較することを意図しているが、垂直トレイ試験にも様々な方法があり、それぞれ、試験室、試験条件等が異なることから、ケーブルの燃焼挙動がIEEE 1202試験とは異なる可能性があり、他の試験に適用可能かどうかは、検証が必要となる。

2) IEEE1202 試験における細径ケーブルのケーブル設置方法を用いた場合の適用

IEEE1202試験では、外径13mm未満のケーブルについては、ケーブルを束ねて取り付けるよう規定している(図4-43参照)が、本研究では、この取付方法の違いによる影響を排除するためにケーブル外径が13mm未満のケーブルについてもケーブルを束ねることなく取付を行った場合について検証を行った。

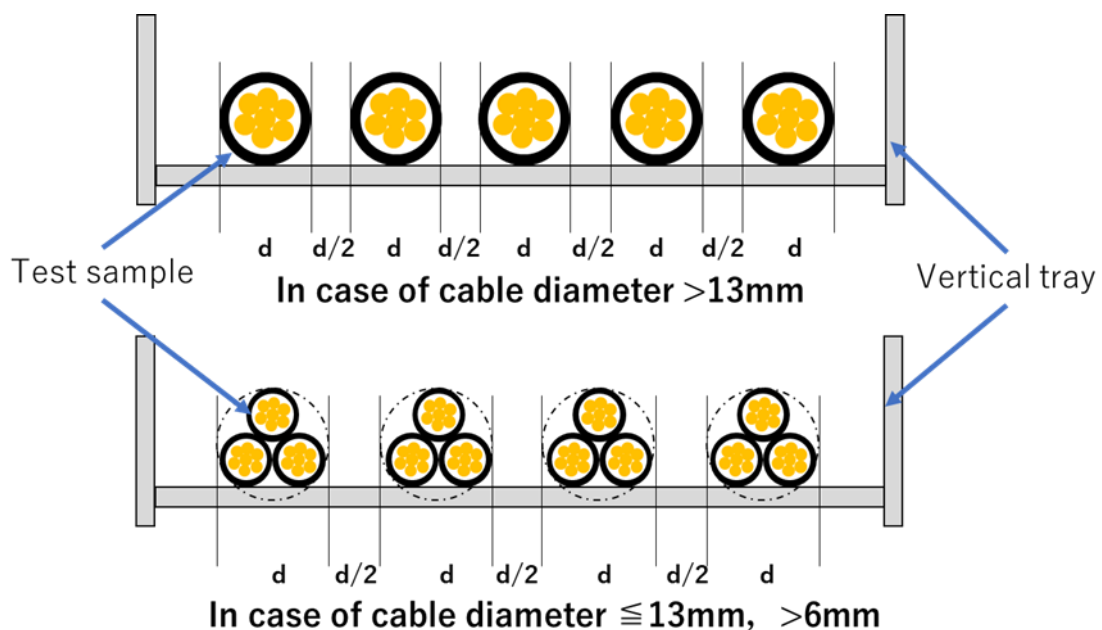


図 4-43 IEEE 1202 試験のケーブル配置

実際に今回用いたケーブルのうち外径 13mm 以下のケーブルについてケーブルを束ねて取り付けた場合の燃焼長は、表 4-4 のとおりとなっており、試験結果の順位は変わらず、いずれも電線総合技術センターにおける測定の不確かさ $\pm 0.27\text{m}$ 以内といるものの、今回束ねて試験を実施したケーブルは、これらの 4 種類のもののみであることから、ケーブルを束ねて取り付けた場合の試験結果に適用するためには、更に多くのケーブルについて検証を実施する必要があるものと考える。

表 4-4 異なるケーブルの取付方法を用いた場合の IEEE 1202 試験結果の比較

ケーブル No.	燃焼長(m)	
	束ねず試験	束ねて試験を実施した場合
No.1	2.11	1.85
No.4	1.02	0.91
No.7	0.75	0.76
No.8	0.59	0.70

- 3) 今回用いたケーブルの外径範囲を超えるケーブル及び外径の範囲内であっても No.6 ケーブルのように難燃性が高く、用いたコーンカロリメータ試験にて垂直トレイ試験の燃焼状況が再現できないケーブルへの適用

今回の実験においても、外径が大きく難燃性の高い試験片については、コーンカロリメータ試験において、前述のとおり十分な燃焼状況が得られていなかったことが懸念されることから、今回用いたケーブルの外径範囲を超える、又は、難燃性の高いケーブルに適用する場合は、コーンカロリメータの加熱条件及び外径への依存性の更なる検証が必要となるものと考える。

- 4) 形状が丸形以外のケーブルへの適用

丸形以外のケーブルは、今回の検証の対象となっておらず、丸形ケーブルとの燃焼挙動の違いが検証されていないことから、更なる検証が必要になるものと考える。

第5章 発熱速度カーブのピーク分離によるケーブル燃焼挙動の解析手法の提案

5.1 はじめに

第4章では、第1章でレビューした、関連報告を参考にコーンカロリメータ試験でケーブル製品を燃焼し、その試験結果から垂直トレイ試験の結果を予測する手法を提案したが、第4章の評価手法を用いてケーブルの火炎伝播特性を評価する場合、例えば製品の開発段階においても、一旦試験片としてケーブルを製造する必要性が生じ、評価のためのケーブルの製造に多くのコストが必要となる。従って、3章で課題として述べた、各国規制におけるケーブルの火災危険性に関する適合性評価コストの低減効果は限定的である。

ここでさらに一つ上の予測技術に関する課題を提起したい。ケーブルの安全性評価をする目的で、そのケーブルの構成素材情報「のみ」が与えられていたとき、それらの発熱データを「最終製品のベンチスケール試験(以下、ベンチマーク試験という)すらせずに」予測することは可能であろうか。この問いは、燃焼試験を最小限に留めた上で、実規模試験における火災安全性評価が可能であるかどうかに関わるものである。よく知られている通り、ケーブルは複数の素材を含む典型的な複合(コンポジット)可燃物であり、その発熱データが素材に含まれる可燃材料とどのような関係にあるのかを直ちに知ることは難しい。もし発熱データという一つの代表的な情報から、それを構成する素材の燃焼特性を抽出することが可能であれば、その逆として、素材の組み合わせによりどのような発熱データを得るのかを予測できるはずである。ここでの課題は、この発熱データからケーブルを構成するシース材、絶縁材といった個々の材料の燃焼履歴を逆算することが可能か、というところにある。もし何等かの方法でケーブルを構成する素材の発熱特性の合成であることを見出すことができるのであれば、どの組み合わせのときにどのような発熱データを得られるのかをベンチマーク試験をせずに予測できるため、ケーブルの設計あるいは火災安全性評価に有益となる。

本章では、この組み合わせによる発熱データの予測を実現するため、複合素材の燃焼においては時間の経過とともに異なる素材の燃焼が「独立且つ段階的」に生じていると仮定し、発熱曲線を各素材の燃焼特性から得られる曲線の合成として得られる可能性に関して言及するものである。データ分離については、クロマトグラフやフーリエ変換赤外分光光度計(FTIR)等の化学分析で一般的に用いられている誤差関数を用いた分離解法を適用する。この際、基礎関数として用いる誤差関数の種類により発熱曲線の再現性に与える影響についても評価した。得られた結果について以下に報告する。

5.2 ケーブル被覆材料の燃焼挙動解析

5.2.1 材料燃焼実験

今回の検討では、ケーブルのシース材料として一般的に用いられる、架橋ポリエチレン絶縁塩化ビニルシースケーブル（以後、CV）、架橋ポリエチレン絶縁ノンハロゲンシースケーブル（以後、EM）及び、架橋ポリエチレン絶縁高難燃ノンハロゲンシースケーブル（以後、NH）のシース材料並びに絶縁材料として用いられる架橋ポリエチレン（以後、XLPE）を試験材料とし、これらを寸法 100mm×100mm×1mm のシート状に加工したものを試験片として用いた。これらの試験片を ISO5660-1 に規定されたコーンカロリメータ試験を用いて燃焼させた際に得られる単位面積当たりの発熱速度曲線を取得し、これを「参照発熱データ」として用いる。



図 5-1 コーンカロリメータ試験用試験片(XLPE)

今回の試験に用いた試験片の代表例を図 5-1 に示す（燃焼用ホルダ内に設置）。また、各材料の一般的な素材配合割合（概算値）を表 5-1 にまとめる。

表 5-1 各材料のおおよその配合比(単位：質量%)

CV シース材		EM シース材	
PVC 樹脂	51	EVA 樹脂	53
可塑剤(DOP)	26	難燃剤(Mg(OH) ₂)	42
充填剤(CaCO ₃)	18	その他(顔料等)	5
その他(顔料, 安定材等)	5		
NH シース材		XLPE 絶縁材	
EVA 樹脂	38	PE 樹脂	95
難燃剤(Mg(OH) ₂)	58	その他(架橋剤等)	5
その他(顔料等)	4		

なお、コーンカロリメータ試験における試験片の加熱源となる電熱ヒータの熱流束は、4

章の報告と同様に ISO/TS 5660-3 において、一般的なケーブル燃焼試験に用いるバーナー火炎の熱流束と同等とされる 50 kW/m^2 に設定し、試験時間は 30 分間とした。

5.2.2 発熱速度曲線の近似結果

5.2.2.1 誤差関数を用いた発熱速度曲線の近似

5.2.1 で得られた各試験片燃焼時の発熱速度曲線に対してピーク分離操作を施し、抽出されたピーク曲線を合成することにより近似発熱速度曲線を再構成した。分離には市販ソフトウェア（PEAKFIT 4.12；Systat Software Inc.）を利用した。PEAKFIT では、複数のピークが重なった合成曲線に対して「組込みピーク関数」を用いて非線形最小自乗法により分離することが可能であり、個々のピークの位置、面積、幅等を算出することができる。主な用途としてクロマトグラムのピーク分離等に活用されている。

5.2.2.2 近似発熱速度曲線の再構成

PEAKFIT を用いた近似発熱速度曲線の再構成手順のフローを図 5-2 に示す。

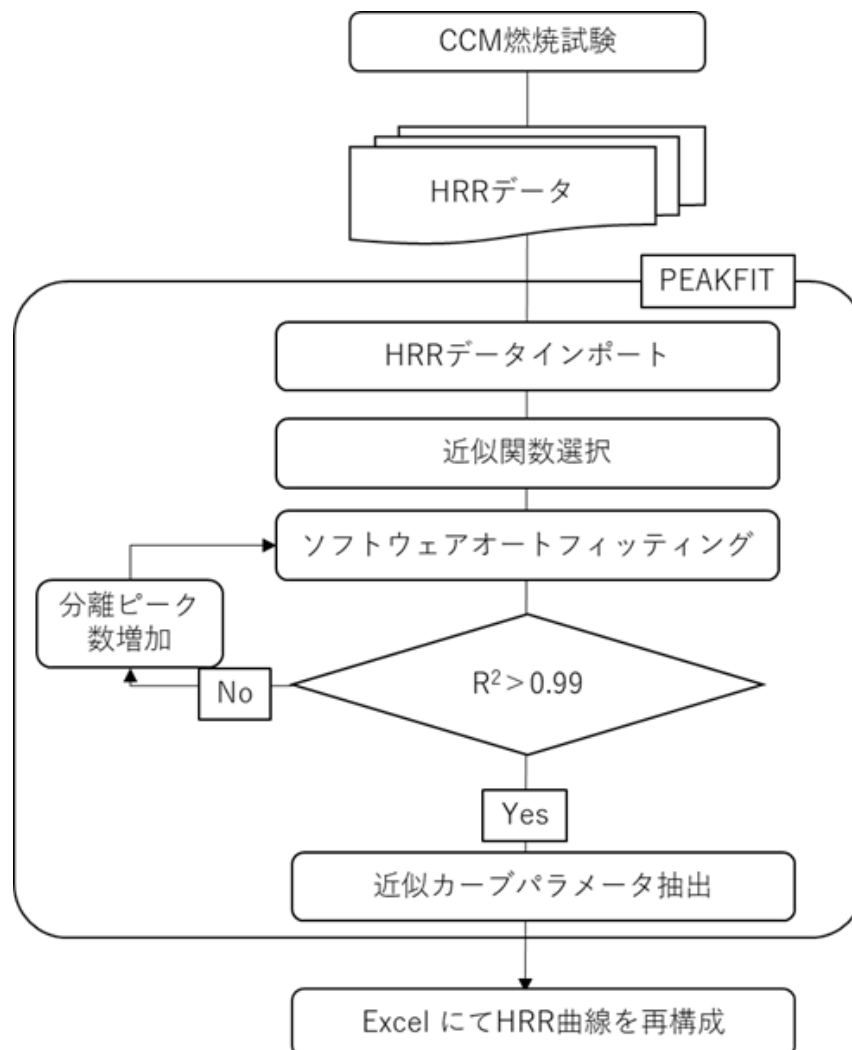


図 5-2 近似発熱速度曲線再構成手順

近似発熱速度曲線の再構成は、ピーク分離において用いる基礎曲線として正規分布関数と指数正規（Exponentially Modified Gaussian 以後、EMG）分布関数の2種類を用いた。前者は、主にクロマトグラム等の化学分析の分野において最も一般的に適用されるものであり、後者は、Jeansonne らの報告⁴⁸⁾において、クロマトグラムにおいてより近似精度が高いと指摘されている関数である。これら2種類の具体的な関数式をそれぞれ式(5-1)及び式(5-2)に示す。また、それぞれの関数式に用いられるパラメータを図5-3及び図5-4の模式図に示した。これらの関数によるピーク分離を、それぞれの試験片で得られた発熱曲線に適用して求められた近似発熱速度曲線を図5-5から図5-8に示す。なお、これらのグラフにはコーンカロリーメータ試験で取得した元データの発熱速度曲線(図中では、cone と示す)も合わせて表示してあり、近似発熱速度曲線(図中では、sum と示す)との一致度が確認できるようになっている。

ピーク分離する際の分離数については、任意に選ぶことが可能である。ここでは、元データである発熱曲線と近似発熱速度曲線との相関係数が0.99以上となる最小のものとすることとした。

(正規分布関関数)

$$y = a_0 \exp \left[-\frac{1}{\sqrt{2\pi}a_2} \left(\frac{x-a_1}{a_2} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(5-1)$$

ここに

y : 発熱速度 (kW/m²)

a_0 : ピーク面積 (MJ/m²)

a_1 : ピークセンター (s)

a_2 : ピーク幅 (s)

x : 経過時間 (s)

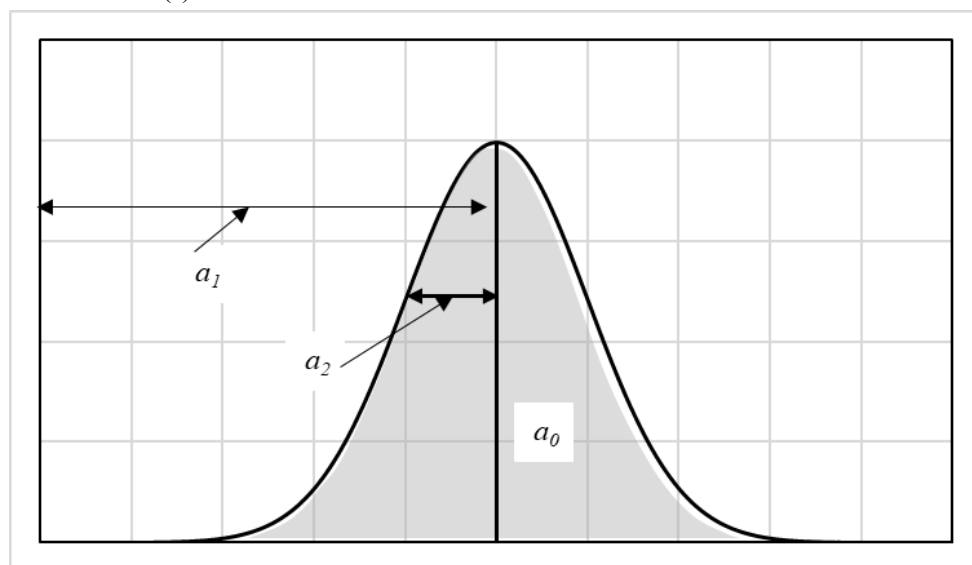


図 5-3 正規分布模式図

(EMG 分布関数)

$$y = \frac{a_0}{2a_3} \exp\left(\frac{a_2^2}{2a_3^2} + \frac{a_1 - x}{a_3}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{x - a_1}{\sqrt{2}a_2} - \frac{a_2}{\sqrt{2}a_3}\right) + \frac{a_3}{|a_3|} \right] \cdots \cdots (5-2)$$

ここに

y : 発熱速度 (kW/m²)

a_0 : ピーク面積 (MJ/m²)

a_1 : 正規分布成分のピークセンター(s)

a_2 : 正規分布成分のピーク幅 (s)

a_3 : 指数分布成分の母数 (kW/m²)

x : 経過時間 (s)

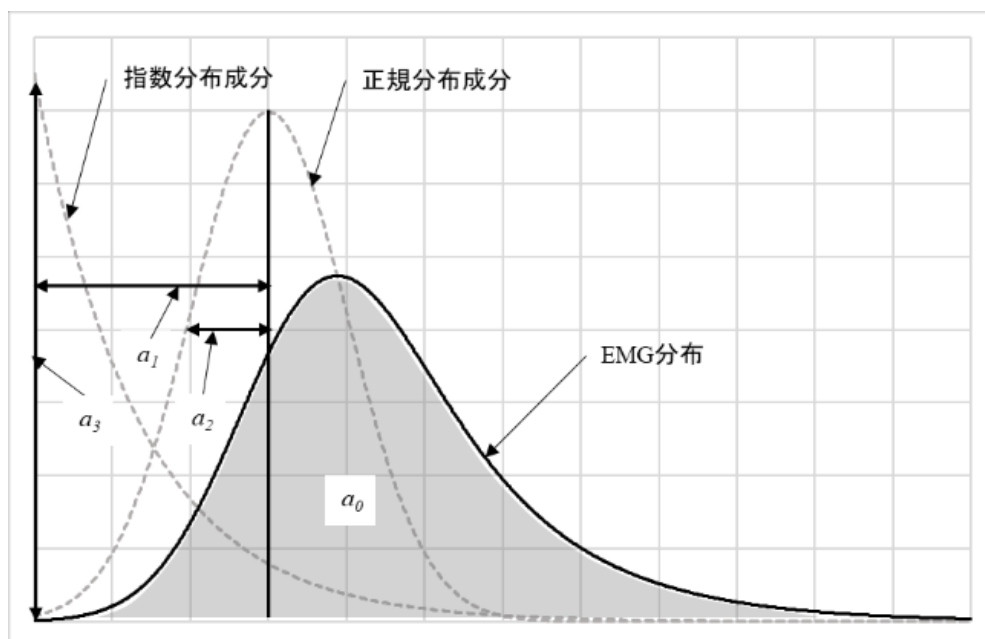


図 5-4 EMG 分布模式図

近似結果について比較したものを表 5-2 にまとめた。この比較で明らかなように、正規分布関数を用いた場合、CV シース材は 4 ピーク、EM シース材は 2 ピーク、NH シース材は 4 ピーク、XLPE は 3 ピークに分離して近似することにより、相関係数 0.99 を超える近似曲線を得ることができる。一方で、EMG 分布関数を用いると、CV シース材は 4 ピーク、EM シース材は 1 ピーク、NH シース材は 2 ピーク、XLPE は 2 ピークに分離して近似することにより、相関係数 0.99 を超える近似曲線を得ることができる。この結果から、いずれの基礎関数を用いても「分離数を適切に設定すれば」元の発熱曲線をよく近似できるため、近似の妥当性を判断するには、その分離された信号が適切な物理的な意味を有するかどうかで判断することが望ましい。

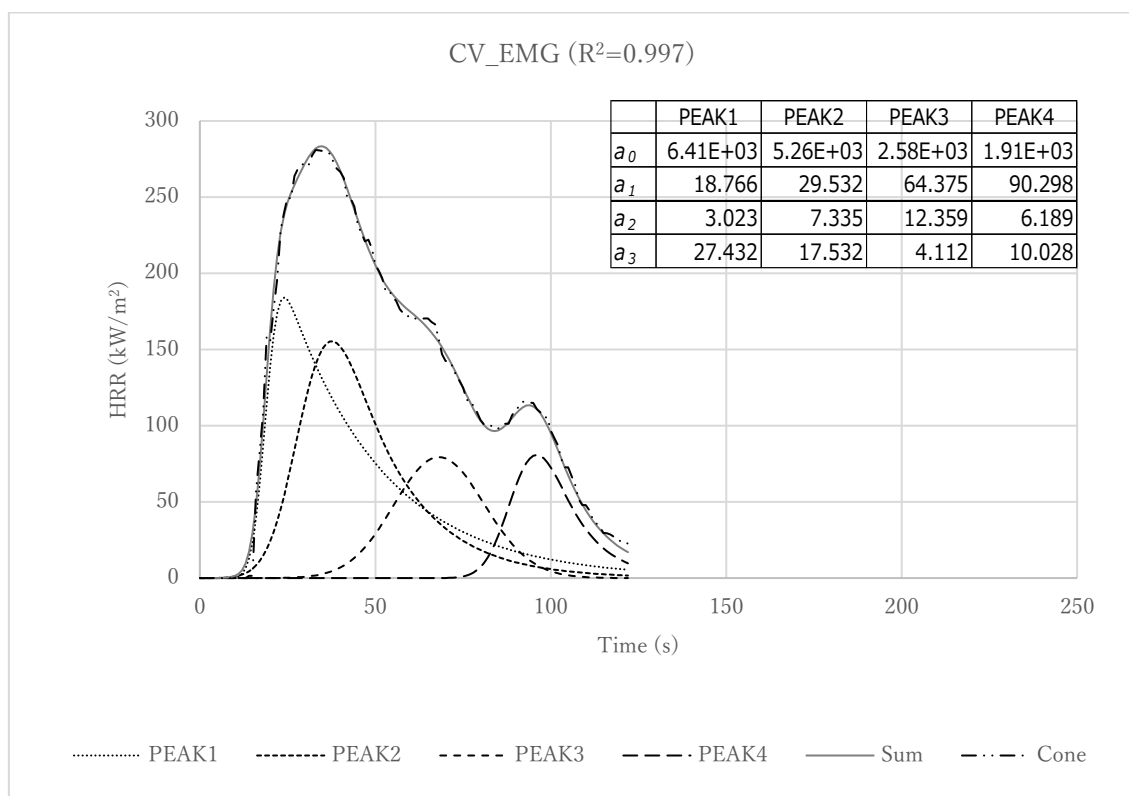
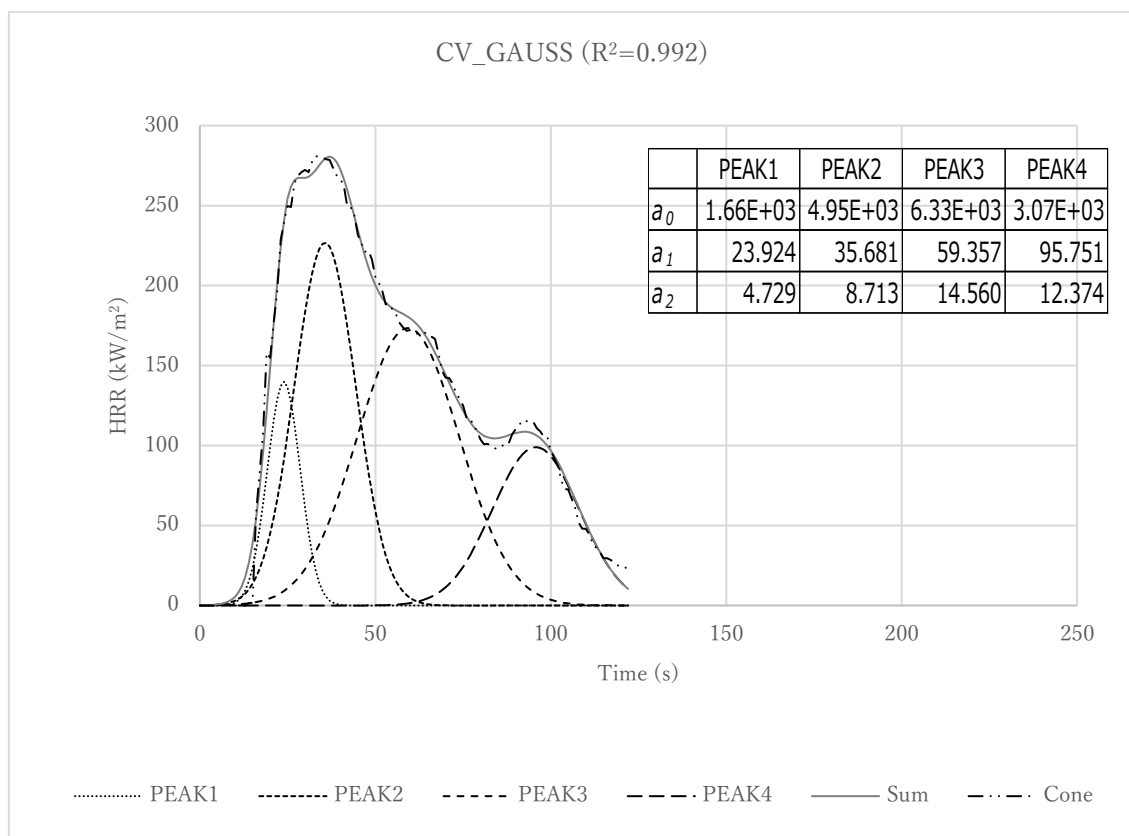


図 5-5 CV シース材の発熱速度曲線近似結果(上：正規分布，下：EMG 分布)

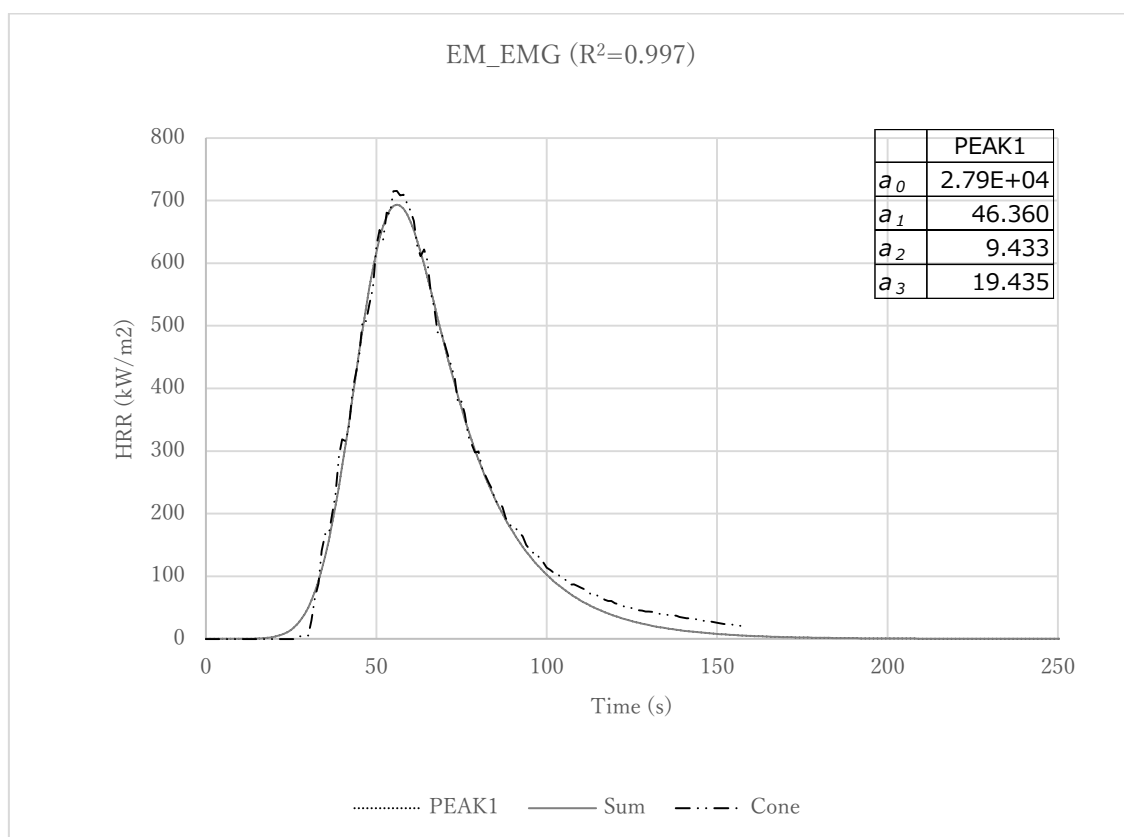
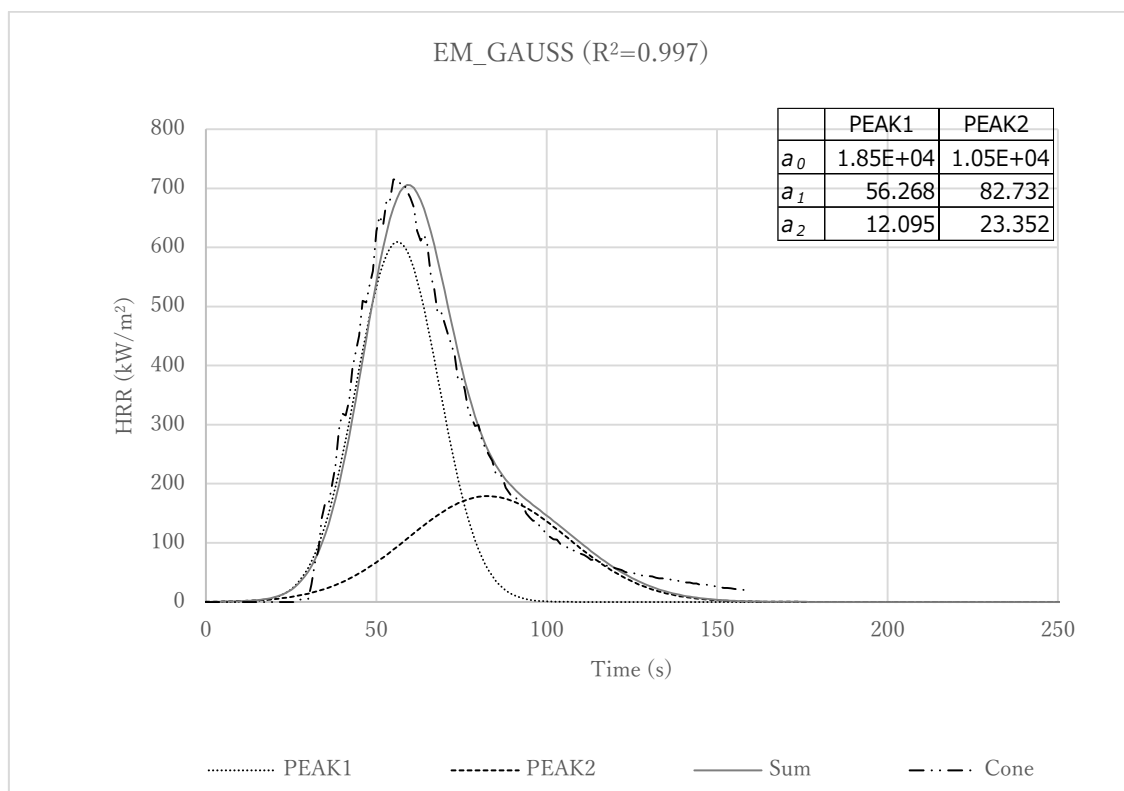


図 5-6 EM シース材の発熱速度曲線近似結果(上：正規分布，下：EMG 分布)

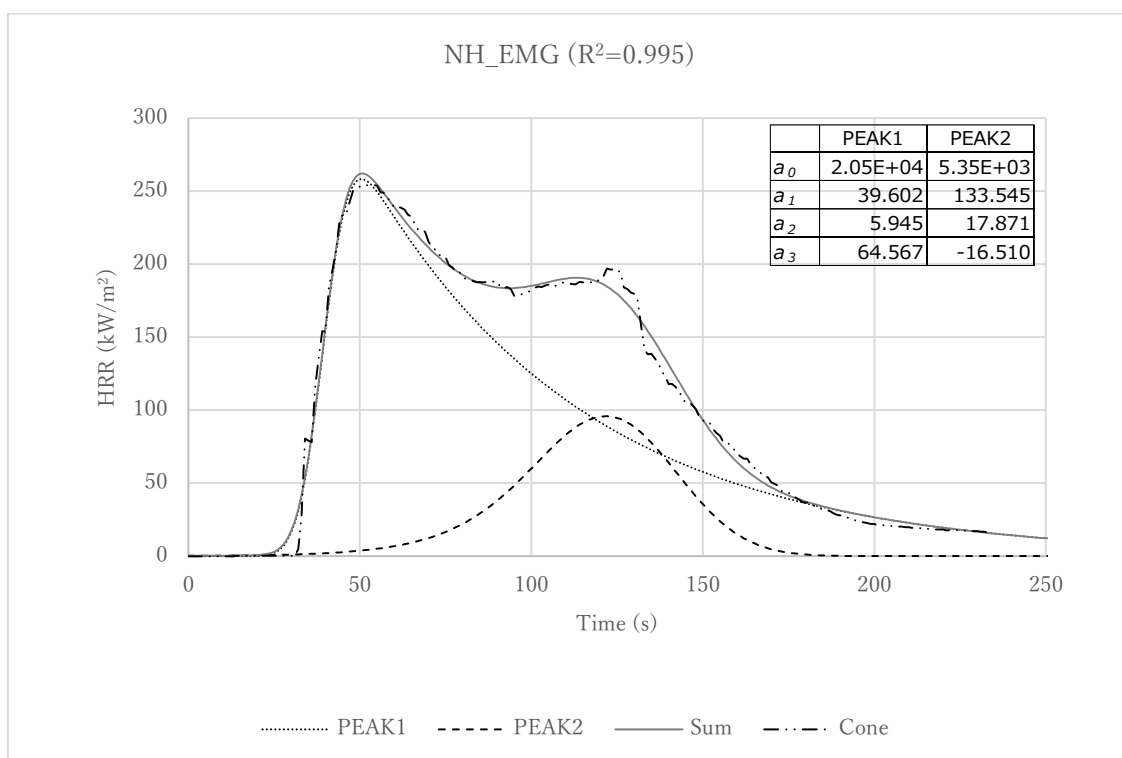
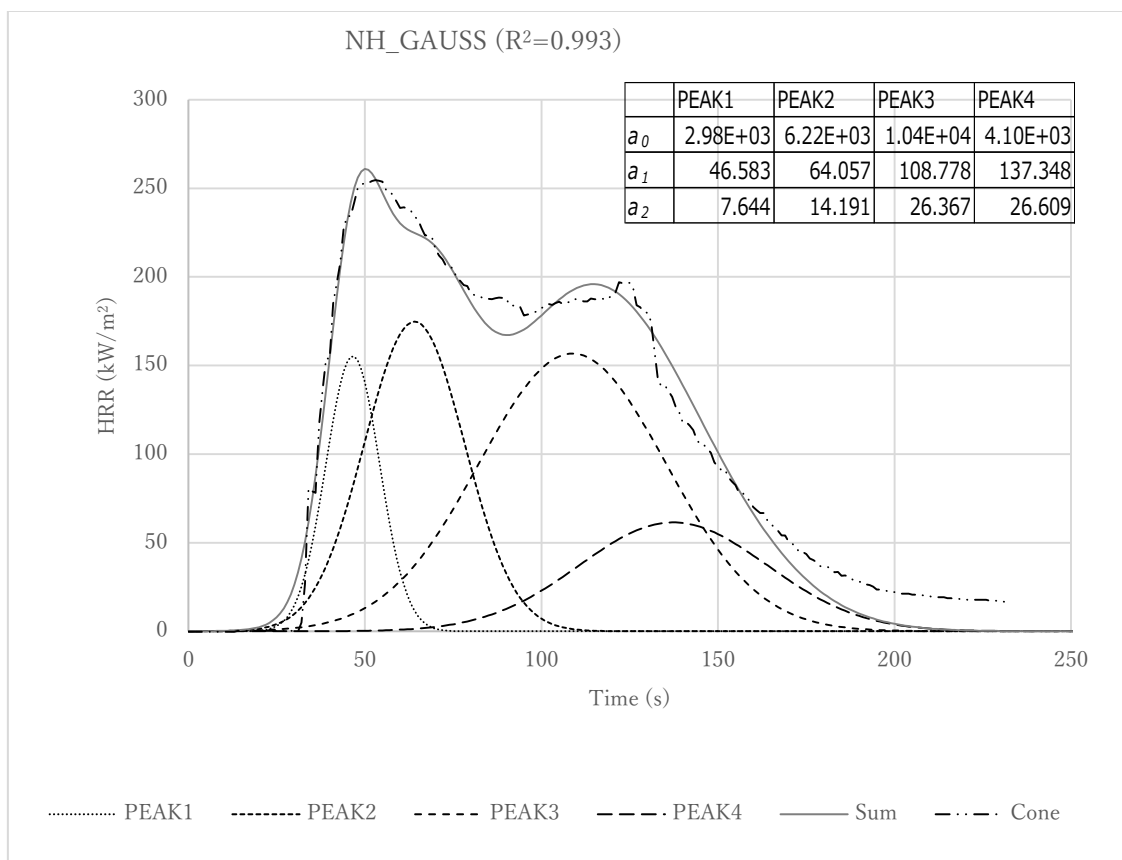


図 5-7 NH シース材の発熱速度曲線近似結果(上：正規分布，下：EMG 分布)

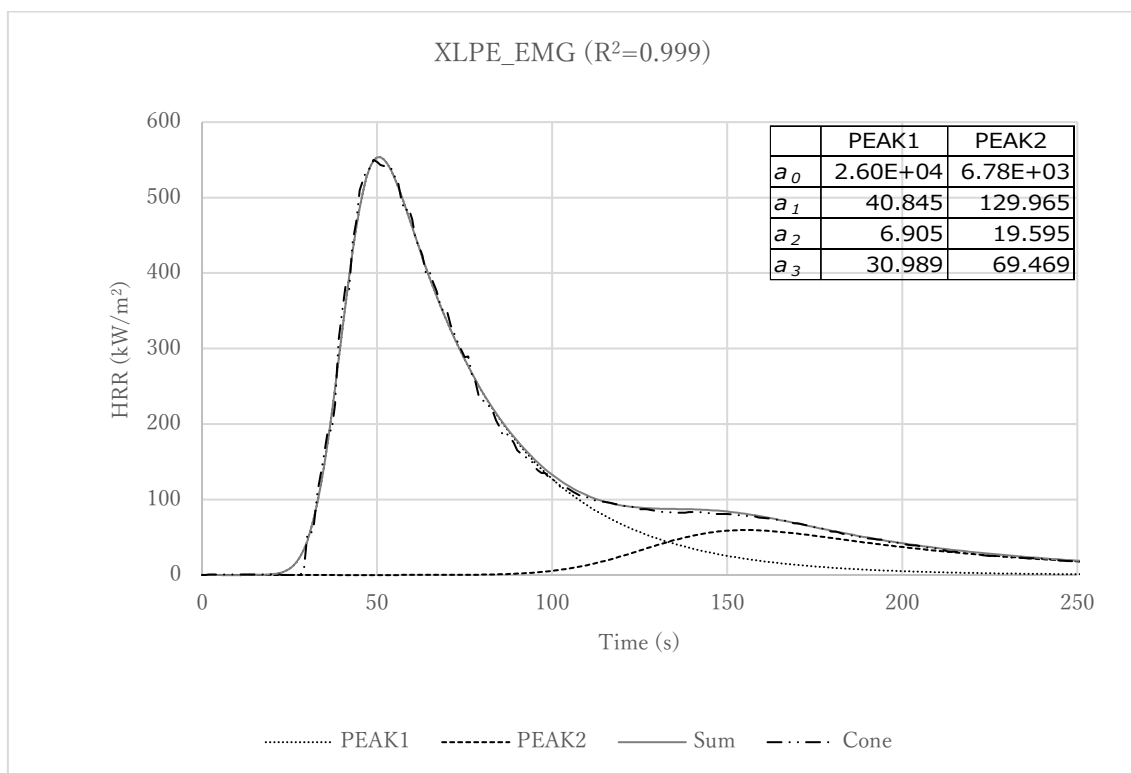
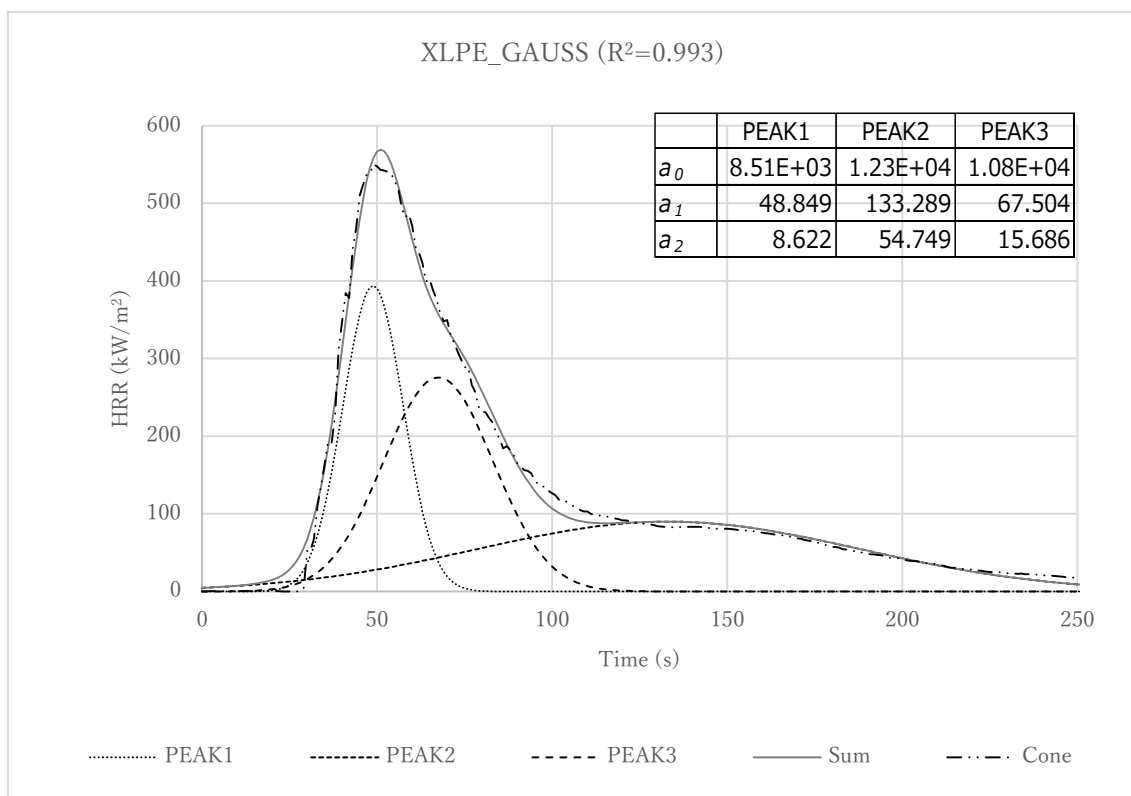


図 5-8 XLPE 絶縁材の発熱速度曲線近似結果(上：正規分布，下：EMG 分布)

表 5-2 用いた関数の違いによる近似結果の比較

材料		CV	EM	NH	XLPE
相関係数	正規分布	0.992	0.997	0.993	0.993
	EMG	0.997	0.997	0.995	0.999
ピーク数	Gaussian	4	2	4	3
	EMG	4	1	2	2
最大発熱速度 (kW/m ²)	実験	281.0	715.5	254.7	550.0
	正規分布	280.7	705.7	260.9	569.1
	誤差	0.1%	1.4%	2.4%	3.5%
	EMG	283.4	693.6	259	553.6
	誤差	0.9%	3.1%	1.7%	0.7%
総発熱量 (MJ/m ²)	実験	15.9	29.2	24.7	31.1
	正規分布	16.0	28.9	23.7	31.4
	誤差	0.6%	0.8%	4.3%	0.9%
	EMG	15.9	27.9	25.0	31.5
	誤差	0.0%	4.3%	1.1%	1.2%

ところで、CV シース材には塩化ビニル(PVC) が用いられているが、ケーブル被覆材料に用いる PVC には柔軟性を持たせるため、可燃性の可塑剤が添加されている。この可塑剤の燃焼によるピークと PVC 樹脂の燃焼ピークが分解されているものと考えられるが、他の材料にはベースとなる樹脂の他に可燃物は含まれていない。それにも関わらず、複数の発熱ピークの分離がなされることは興味深い。

なお、XLPE の近似結果に見られる 150 秒付近のピークに関しては、燃焼状態の観測結果を合わせて判断すると、試験片ホルダに隠れた（ヒータ熱に直接曝されていない）位置にある試験片残差の燃焼残炎より与えられたと考えられる。これは、XLPE は溶融することがないこと、他の材料と比較して熱分解温度が高い(PVC: 200~300°C, EVA: 180~220°C に対して XLPE: 450~500°C)⁴⁹⁾ことに起因する。

5.2.3 分離ピークに関する考察

5.2.3.1 CV シース材

CV シース材は 4 つのピークに分解される。このピークが何に相当するのかを検討する。

同様の配合を持つものと考えられるケーブル用 PVC 材料を MCC(Microscale combustion calorimeter)で分析した結果を図 5-9 に示す。MCC は、試験片の加熱温度を経時的に上昇し、試験片の熱分解ガスを燃焼させ、その際の酸素消費量及び試験片の質量から、試験片単位質量当たりの発熱速度(W/g)を算出する。従って、熱分解温度の異なる素材の複合材料の場合は、各材料の発熱速度を分離して測定することが可能である。この結果からわかるように、PVC 材料の燃焼においては、まず着火温度の低い可塑剤の揮発成分の着火が起り、その後 PVC 樹脂の燃焼が開始し、より高温になった段階で残留炭素の無炎燃焼（くん焼）へと

順に遷移する。これらの現象を特徴付けるように、PVC の燃焼による発熱ピークは3つ現れる。つまり、ピークとは「特定の成分が燃焼する現象を代表した信号」とも言える。なお、2つ目のピーク（樹脂の燃焼）は厳密に言えばその後半にもう一つの弱いピークがあり、樹脂の燃焼が複雑であることを示唆する。

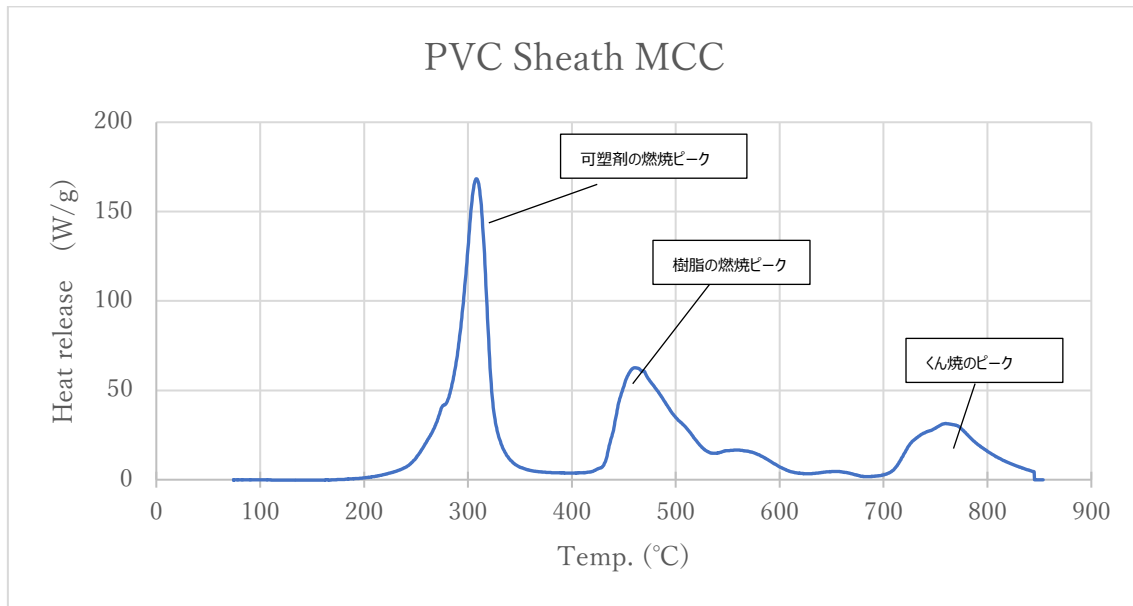


図 5-9 ケーブル用 PVC の MCC 分析結果

表 5-3 に次の①から③を用いて式(5-3)から算出した各燃焼段階における推定発熱量(HR)と分離した各ピークの積分値(HR 相当)を比較してまとめた。

- ①表 5-1 に示す CV シース材に含まれる各可燃物の配合比率
- ②コーンカロリメータ試験における CV シース材燃焼試験によって得られた重量減少量
- ③MCC データから推定した PVC 材料に含まれる各可燃物の推定燃焼熱

$$THR_{pre} = \frac{\Delta m (\Delta Hc_{DOP} m_{r_DOP} + \Delta Hc_{PVC} m_{r_PVC})}{A_s} \dots (5-3)$$

ここに

THR_{pre} : 推定総発熱量 (MJ/m²)

ΔHc_{DOP} : 可塑剤の燃焼熱 (19.1kJ/g)

ΔHc_{PVC} : PVC 樹脂の燃焼熱 (12.1kJ/g)

m_{r_DOP} : 可塑剤重量比

m_{r_PVC} : PVC 樹脂重量比

Δm : コーンカロリメータ試験時試験片重量減少量 (10.3g)

A_s : コーンカロリメータ試験試験片加熱面積 (0.00884m²)

この結果から、可塑剤のピークが2つあることは考えにくいだけでなく、図 5-9 から可塑剤のピークは強い信号が比較的初期に現れる。一方、図 5-9 において指摘したように、樹脂の燃焼はピークが1ないし2つで構成されることを合わせて考えると、EMG 分布関数はピーク構成が CV 燃焼の素過程をよく表現できるといえる。

表 5-3 MCC の結果を用いた CV シース材各燃焼モード HR 及び分離ピーク HR との比較

燃焼段階	推定 HR (MJ/m ²)	各ピーク HR (MJ/m ²)	
		正規分布	EMG 分布
可塑剤燃焼	7.4	6.7 (Peak1+Peak2)	6.3 (Peak1)
PVC 樹脂燃焼	6.3	6.3 (Peak3)	7.8 (Peak2+Peak3)
残留炭素無炎燃焼	3.0	3.0 (Peak4)	1.8 (Peak4)
合計 (THR_{pre})	16.7	16.0	15.9

5.2.2.2 EM シース材, NH シース材及び XLPE 絶縁材

先に述べた通り、CV シース材以外(EM シース材, NH シース材及び XLPE)は、可燃性の添加材は殆ど含まれていない。それにも関わらず、発熱曲線は複数のピークにより構成されることが示唆された。以下、この要因可能性について検討する。

まず、最も特徴的な理由として、EM シース材及び XLPE 絶縁体の発熱曲線に見られる「左右非対称のピーク形状」を単一の近似関数で表現することが困難であることが考えられる。コーンカロリメータ試験においては、試験片表面から入射する熱によって、試験片の厚み方向に熱分布が生じることから、燃焼速度についても厚み方向に分布が生じ、着火直後の発熱速度上昇速度と、ピークを迎えた後の発熱速度下降速度が均等とならず、発熱速度曲線の勾配が、ピーク前後で異なるものと考えた方が自然である。そのため、ピーク形状が左右対象となる正規分布関数を用いた場合は一つのピークで表現できず、結果として複数の関数を必要とすることになると予想される。左右非対称形状が近似可能な EMG 分布関数を用いた場合は、上記の一次元的な分布影響を適切に表現することができる。素材の構成を考えた場合、単一素材に起因する発熱状態が複数のピークで現れると物理現象の解釈が難しくなるため、EMG 分布関数を用いることが望ましいと考えられる。

NH シース材に関しては、難燃性を高めるために難燃剤が多量に添加されており、この影響でベース樹脂である EVA の燃焼における不完全燃焼の割合が高くなることから、着火後、試料表面に炭化層が形成される。炭化層下の材料がコーンヒータから加熱を直接受けにくくなるため、ある程度時間経過した後になって炭化層下の材料が燃焼し始めるものと推察される。このことから、2つのピークで近似できることが現実的であると考えられ、その傾向を明確に表現できる EMG 分布関数を用いる方が近似として優れることになる。

EMG 分布関数を用いて得られた発熱ピークの物理的意味を検証するため、コーンカロリーメータ試験で得られた各材料の総発熱量(総発熱量)とコーンカロリーメータ試験時の各材料の重量減少及び燃焼熱の文献値⁵⁰⁾から推定した各材料の総発熱量を比較した。その結果を表 5-4 にまとめる。表 5-4 より、推定される各材料の総発熱量と燃焼試験で得られた総発熱量の値は比較的近くなることが確認できる。この事実は、発熱特性が単一材料の燃焼によると考えることを支持しており、EM および XLPE が単一ピークで表現されるべきであることを担保する (=EMG 分布関数によるピーク分離が妥当と言える)。

表 5-4 EM シース材, NH シース材及び XLPE 絶縁材の推定総 HR と実験値との比較

材料	EM シース材	NH シース材	XLPE 絶縁材
ベース樹脂	EVA	EVA	PE
難燃剤	Mg(OH) ₂	Mg(OH) ₂	—
実験時重量減少 (g)	8.26	7.79	6.59
難燃剤重量減少(計算値)(g)	1.66	2.49	—
可燃物重量減少量(g)	6.60	5.30	6.59
燃焼熱文献値 (kJ/g)	39.1	39.1	42.0
推定 総発熱量 (MJ/m ²)	29.20	23.42	31.3
実験時 総発熱量 (MJ/m ²)	29.2	24.7	31.1

なお、表 5-4 において、EM シース材及び NH シース材の推定総発熱量については、コーンカロリーメータ試験時の重量減少量には難燃剤の重量減少も含まれるため、(5-4)式を用いて見積もった。

$$THR_{pre} = \frac{\Delta Hc_{EVA} (m_{s0} (m_{r,EVA} - m_{r,FR} \Delta m_{FR}))}{1000 A_s} \dots (5-4)$$

ここに

THR_{pre} : 推定総発熱量 (MJ/m²)

ΔHc_{EVA} : EVA の燃焼熱 (kJ/g)

m_{s0} : 試験片初期重量 (g)

$m_{r,EVA}$: EVA 重量比

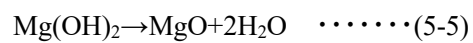
$m_{r,FR}$: 難燃剤重量比

Δm_{FR} : 難燃剤重量減少量 (g)

A_s : コーンカロリーメータ試験試験片加熱面積 (0.00884m²)

一方、難燃剤の重量減少率は、酸化マグネシウムが、(5-5)式に示す通り燃焼残差として

残る ⁵¹⁾ものとして見積もった.



上記より、これらの材料に関しての分離ピークと各燃焼段階の関係は、表 5-5 のように解釈できる.

ここからも、EMG 分布関数による近似で与えられる各ピークが単一現象を表現することを示しており、本分離解法が現象の理解を支援する有効な手法になり得ることを示唆している.

表 5-5 燃焼段階と分離ピークとの関係

材料	燃焼段階	正規分布	EMG 分布
EM シース材	樹脂燃焼	Peak1 Peak2	Peak1
NH シース材	炭化層形成前樹脂燃焼	Peak1 Peak2 Peak3	Peak1
	炭化層下の樹脂燃焼	Peak4	Peak2
XLPE 絶縁材	樹脂燃焼	Peak1 Peak3	Peak1
	試験片ホルダ抑え部分裏側の ベース樹脂燃焼残差の燃焼	Peak2	Peak2

5.3 ケーブル製品試験への適用

5.2 節においては、ケーブルを構成する材料に対して、実施したコーンカロリーメータ試験の結果をピーク分離することにより、ケーブル素材そのものの燃焼特性を把握することを試みた。本節では、前節で用いた一部の材料をその構成材料として持つケーブルをコーンカロリーメータ試験にて燃焼した場合の発熱速度曲線をピーク分離することにより、各構成材料の燃焼がケーブル全体の燃焼挙動に与える影響を評価することができるかどうか試みた。なお、コーンカロリーメータ試験の発熱速度曲線は、第4章の実験で用いた、NH シース材及び XLPE 絶縁材をその被覆材料としてもつケーブル No.4 のデータを用いた。

5.3.1 試験試料

試験試料としては、5.2 節で用いた材料のうち、NH シース材及び XLPE 絶縁材をその構成材料として持つケーブルとして、第4章で用いたケーブルのうちケーブル No.4 を選定した。同種の材料を持つケーブルとしては、No.5 及び No.6 があるが、これらのケーブルは、線心数が多く、構造が複雑であることから、最も単純な構造を持つ No.4 のケーブルについて検証することとした。試験片として用いたケーブルの大まかな構造を図 5-10 及び表 5-6 に示す。また表 5-7 にピーク分離結果の検証に用いるために試験体の構造及び算出したそれぞれの構成材料の理論発熱量を示す。

ケーブルサイズ： $1c \times 38mm^2$

絶縁体：架橋ポリエチレン(XLPE)

シース：高難燃ポリオレフィン(ベース樹脂：EVA，難燃剤：水酸化マグネシウム($Mg(OH)_2$))

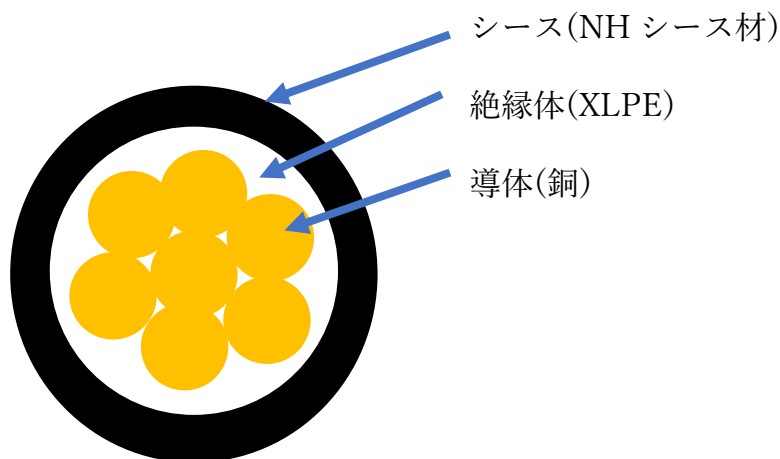


図 5-10 ケーブル構造

表 5-6 各部寸法(JIS C 3605)

外径(mm)	シース厚さ(mm)	絶縁体厚さ(mm)	導体外径(mm)
12.7	1.5	1.2	7

表 5-7 各構成材料の理論発熱量

	シース	絶縁
断面積(m ²)	0.05278	0.03204
体積(m ³)	0.03695	0.02243
MgOH 配合比*(重量%)	54%	—
EVA 配合比*(重量%)	46%	—
MgOH 比重(g/cm ³)	2360	—
EVA 比重(g/cm ³)	940	—
推定 MgOH 重量(kg)	0.02778	—
推定 EVA 重量(kg)	0.02366	—
推定総重量(kg)	0.05144	0.0211
総重量実測値(kg)	0.05138	0.0212
XLPE 燃焼熱(kJ/g)	—	42.0
EVA 燃焼熱(kJ/g)	39.1	—
推定総発熱量(MJ/m ²)	104.67	100.18
合計推定総発熱量(MJ/m ²)	204.85	

* 配合比は、実測重量と配合材料の比重から推定した。

5.3.2 コーンカロリメータ試験結果

コーンカロリメータ試験に使用した試験片の数は長さ 100mm のケーブル 7 本で、加熱強度は、5.2 節同様 50kW/m² である。第 4 章の検討では、試験時間を 30 分と決定し、分析を行ったことから、試験開始から 30 分までのデータにて種々の解析を実施しているが、本実験においては、各材料の重量を元にした発熱量の理論値との比較を実施する必要があることから、試験時間は、30 分間とせず、試験片の燃焼が完全に終了するまでのデータを解析に用いた。

表 5-8 に、コーンカロリメータ試験における、最大発熱速度、総発熱量及び重量減少量を示す。また、図 5-11 にコーンカロリメータ試験で得られた、発熱速度曲線を示す。

表 5-8 コーンカロリメータ試験結果試験結果

最大発熱速度 (kW/m ²)	総発熱量 (MJ/m ²)	試験片重量減少 (g)
183.11	232.02	58.61

なお、コーンカロリメータ試験における試験ケーブルの燃焼挙動は、目視による観測から、表 5-9 に示すとおり大きく 6 段階に分離できるものと考えられた。

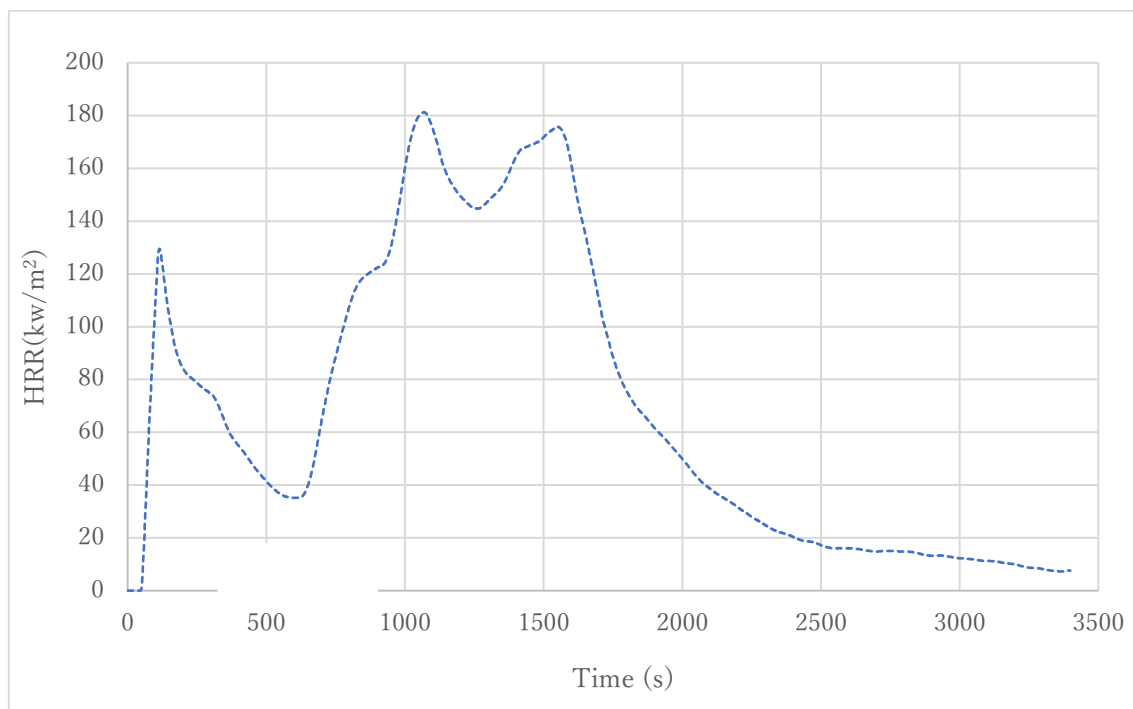


図 5-11 コーンカロリメータ試験における発熱速度経時変化(ケーブル No.4)

表 5-9 コーンカロリメータ試験における試験片の燃焼挙動

燃焼段階	試験片の燃焼等挙動
①	シース材料から多量の分解ガスが生成
②	分解ガスがスパークにより着火し、激しく燃焼
③	シース表面に炭化層が形成、炎が衰退し、比較的小さな炎で燃焼が継続
④	500 秒付近から炎の成長が見られ激しく燃焼
⑤	可燃物の焼失とともに炎が衰退し、消火
⑥	有炎燃焼終了後は、残じん(無炎燃焼)が残る

5.3.3 発熱速度曲線のピーク分離結果

発熱速度曲線のピーク分離は、EMG 関数を用いて、5.2.2 項と同様の手順で実施した。ピーク分離の結果、発熱速度曲線を 5 ピークに分離することによって、相関係数 R^2 が 0.99 以上の合成曲線が得られた。分離結果を図 5-12 に、また、各ピークの面積から算出した総発熱量を表 5-10 に示す。

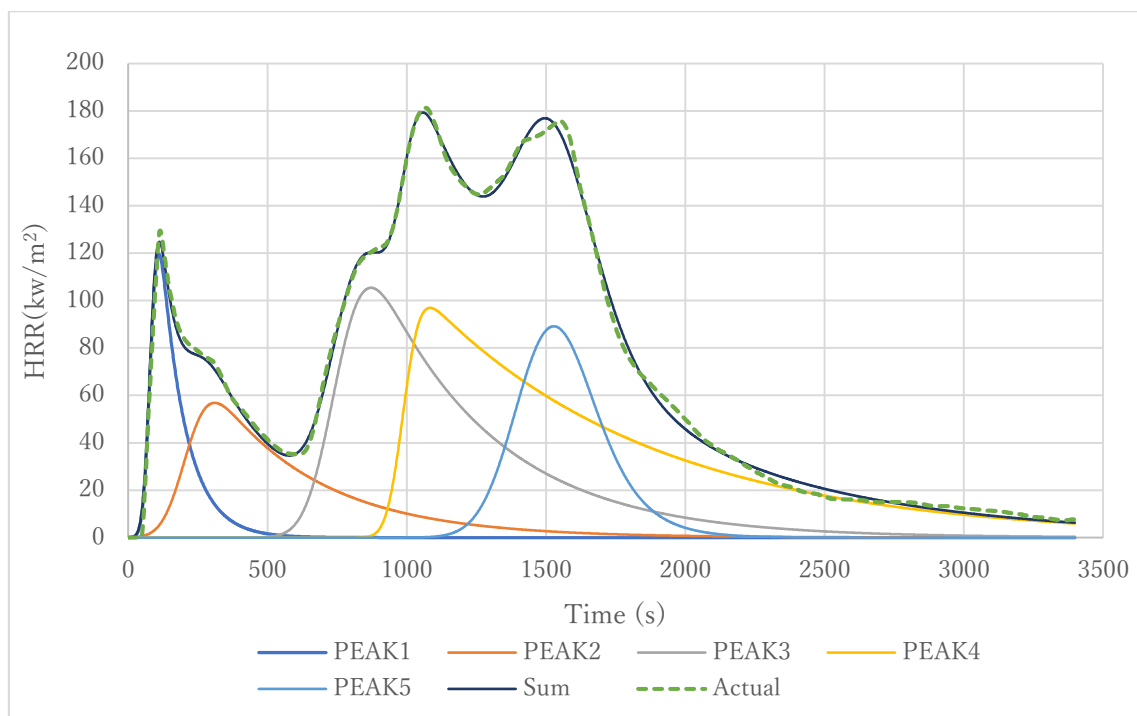


図 5-12 ピーク分離結果(5peaks)

表 5-10 5 ピーク時の各ピーク総発熱量(MJ/m²)

Peak1	Peak2	Peak3	Peak4	Peak5	Total
16.3	30.4	65.6	86.6	33.6	232.5

5.3.4 分離結果の検証

この結果から各ピークの表す試験片の燃焼状況を表 5-11 に示す通り推定した。なお、図 5-13 に示す通り、燃焼開始当初は、試験片の裏側は、ヒータ及び自己燃焼による熱に曝されないため、燃焼は、上から下に段階的に進むものと考えられることから、各材料の燃焼ピークは、表側、裏側の 2 ピーク以上に分離されるものと推定した。

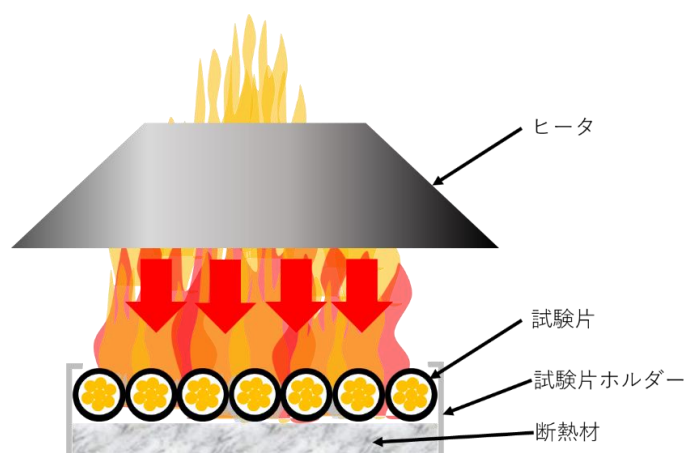


図 5-13 コーンカロリーメータ試験の試験状況模式図

またこの推定においては、5.2 節におけるシース材料(NH シース材)及び絶縁材料(XLPE 絶縁材)のピーク分離結果における分離ピークの形状及びケーブル製品の発熱速度曲線のピーク分離結果における各ピークの形状の類似性(図 5-14)についても考慮した。

この結果から、各材料の総発熱量を推定した結果とその値を理論値と比較した結果を表 5-12 に示す。

この表に示すように、絶縁材料についての推定総発熱量は、理論値と非常に近い値となっているものの、シース材料については、30%ほどの誤差が生じる結果となった。また、総発熱量の構成比についても、両者とも 10%の誤差が見られた。加えて、この分離結果においては、表 5-9 における残じんの状況が表されておらず、この分離結果及び表 5-12 の推定結果の妥当性が疑われた。

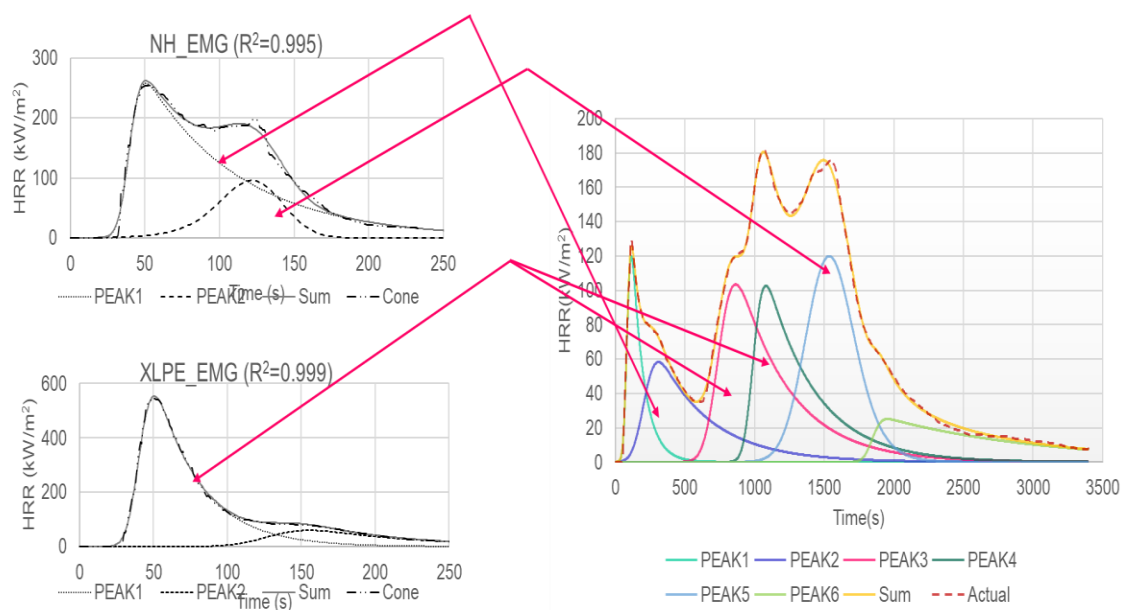


図 5-14 材料試験と製品試験のピーク分離結果におけるピーク形状の類似性

表 5-11 各ピークの表す試験片の燃焼状況の推定

Peak No.	表 5-9 に おける燃 焼段階	推定燃焼物	各ピークに表す試験片の燃焼状況
Peak1	②	シース	シース表面の燃焼
Peak2	③	シース	炭化層形成中のシース表面の燃焼
Peak3	④ ⑤	絶縁体	試験片表面の絶縁体燃焼。(最後まで燃焼継続するのはシース材料であると推定されることから、消火前に消失する peak3 は、絶縁材料のピークと推定)
Peak4	④ ⑤	シース	炭化層下に残ったシース材料の燃焼
Peak5	④ ⑤	絶縁体	試験片裏面の絶縁材料の燃焼(Peak3 同様最後まで燃焼継続するのはシース材料であると推定されることから、消火前に消失する peak5 は、絶縁材料のピークと推定)

表 5-12 分離ピークから推定した、各材料の総発熱量及び理論値との比較

材料	推定結果		理論値		理論値との誤差	
	推定総発熱 量 (MJ/m ²)	構成比 (%)	理論総発熱 量 (MJ/m ²)	構成比 (%)	総発熱量 (%)	構成比 (%)
シース	133.3	57	104.7	51	27	11
絶縁体	99.3	43	100.2	49	-1	12
Total	232.6	—	204.9	—	14	—

ここで 5.2 節におけるシース材料単体での EMG 関数を用いた分離結果(図 5-7)及び XLPE 絶縁体材料単体での分離結果(図 5-8)とケーブル試験片との分離結果を比較する。図 5-12 におけるいくつかのピークの形状が、材料単体で実施した場合のピーク形状と類似していることが分かる。具体的には、図 5-12 における第 5 ピークの形状と図 5-7 の下図における第 2 ピークの形状及び図 5-12 における第 3、第 4 ピークの形状と図 5-8 における第 1 ピークの形状とよく一致していることが分かる。これらから、これらのピークの形状は、表 5-11 で推定したもののうち、第 4 ピークに関しては、シース材料の燃焼であり、第 5 ピークについては、絶縁材料であることを示唆しているものと言える。しかしながら、コーンカロリーメータ試験において、最後まで燃焼する材料は、試験片の配置(図 5-12)、材料の難燃性等から、シース材料と考えるのが妥当であり、図 5-12 において、最後まで燃焼が継続していること

を示第4ピークの分離結果が適切でないことが疑われた。

そこで、試験時に観察された残じんのピークが表現できるよう6ピークによる分離を試みた。

5.3.5 発熱速度曲線のピーク分離結果(6ピークの場合)

分離結果を図5-15に、また、各ピーク面積の総発熱量を表5-13に示す。なお6ピークにおける分離結果においても、コーンカロリーメータ試験における発熱速度曲線と分離ピークの合成曲線との相関係数 R^2 は、0.99を超えている。

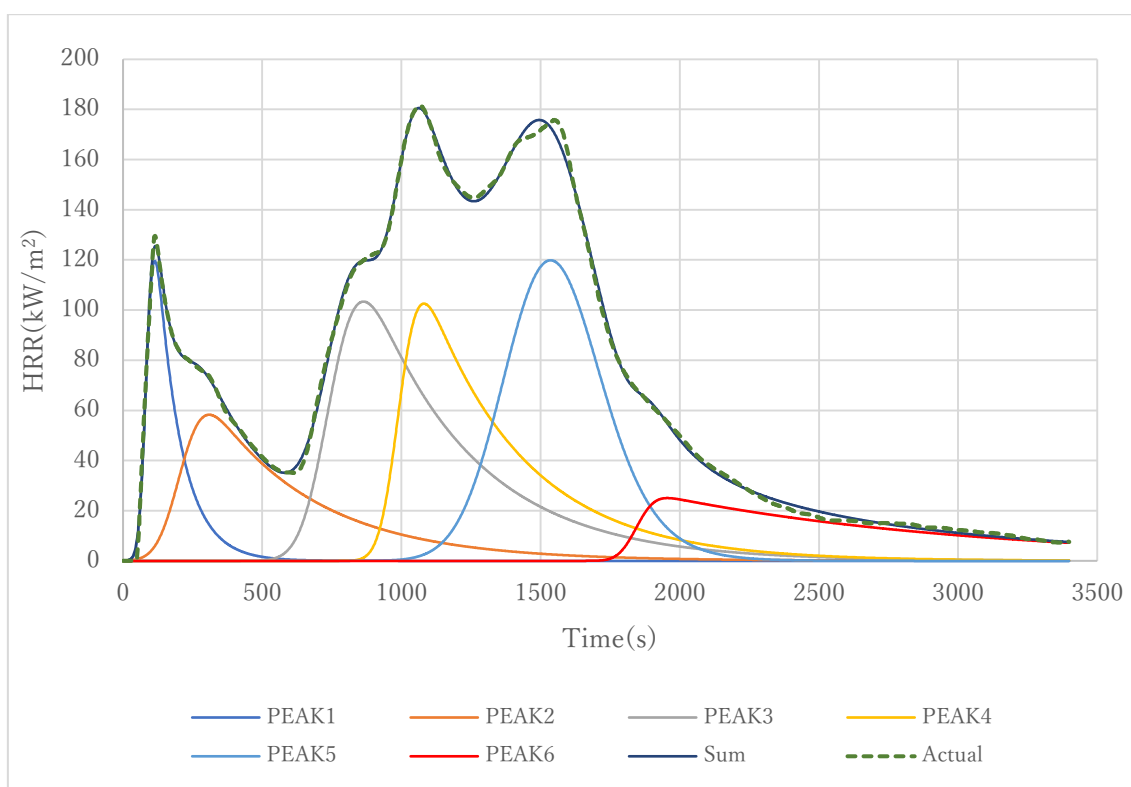


図 5-15 ピーク分離結果(6peaks)

表 5-13 6 ピーク時の各ピーク総発熱量(MJ/m²)

Peak1	Peak2	Peak3	Peak4	Peak5	Peak6	Total
16.11	31.31	58.48	49.76	53.85	23.76	233.3

5.3.6 分離結果の検証(6ピークの場合)

この結果を5.3.4項同様に検証した。各ピークの表す試験片の燃焼状況の推定を表5-14に示す。この結果から、各材料の総発熱量を推定した結果とその値を理論値と比較した結果を表5-15に示す。

この表に示すとおり、絶縁材料の総発熱量の誤差は、5ピークと比較して大きくなっている

が、各材料の総発熱量のトータルの総発熱量に占める割合(構成比)は、5 ピークの場合と比較して、1/2 程度になっていることから、6 ピークによる分離結果が、この試験片の燃焼挙動を表すうえにおいてより適切であるものと考える。

表 5-14 各ピークの表す試験片の燃焼状況の推定(6 ピークの場合)

Peak No.	表 5-9 における燃焼段階	推定燃焼物	各ピークに表す試験片の燃焼状況
Peak1	②	シース	シース表面の燃焼
Peak2	③	シース	炭化層形成中のシース表面の燃焼
Peak3	④ ⑤	絶縁体	試験片表面の絶縁体の燃焼(最後まで燃焼継続するのはシース材料であると推定されることから、消火前に消失する peak3 は、絶縁材料のピークと推定)
Peak4	④ ⑤	絶縁体	試験片裏面の絶縁体の燃焼(Peak3 同様最後まで燃焼継続するのはシース材料であると推定されることから、消火前に消失する peak4 は、絶縁材料のピークと推定)
Peak5	④ ⑤	シース	試験片裏面のシース材料の燃焼
Peak6	⑥		シース材料の残じん

表 5-15 分離ピークから推定した、各材料の総発熱量及び理論値との比較(6 ピークの場合)

材料	推定結果		理論値		理論値との誤差	
	推定総発熱量 (MJ/m ²)	構成比 (%)	理論総発熱量 (MJ/m ²)	構成比 (%)	総発熱量 (%)	構成比 (%)
シース	125.0	54	104.7	51	19	<u>5</u>
絶縁体	108.2	46	100.2	49	8	<u>6</u>
Total	233.2	—	204.9	—	14	—

次に、分離ピークのうちシースの燃焼によるものと推定されるもの(Peak1,2,5,6)及び絶縁体の燃焼によるものと推定されるもの(Peak3,4)をそれぞれ合成して全ピークの合成曲線とともにプロットしたものを図 5-16 に示す。このようにプロットすることによって、各材料の燃焼挙動のケーブル全体の燃焼挙動に与える影響がより明確に把握することができる。

この試験片のケースでは、最大発熱速度に関連するものは、ほぼ絶縁体の燃焼によるものであることから、最大発熱速度を低減するためには、絶縁体の燃焼を抑制する必要があること、またシース材の本格的な燃焼は、絶縁体の燃焼によって起こっている様子が見られることから、シース材料の形成する炭化層を強固にする等の方法で絶縁体の燃焼を制御するこ

とによってシース材の本格的な燃焼を抑制することができる等の推察が可能となる。

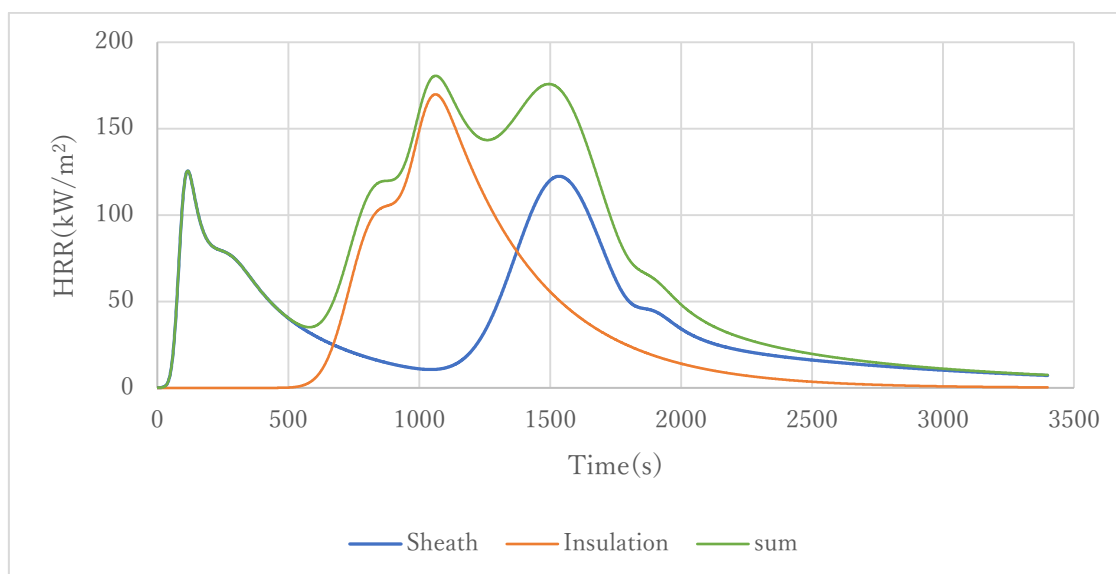


図 5-16 シース燃焼及び絶縁体燃焼が全体の燃焼に与える影響

5.4 第 4 章の推定結果における外れ値の検証

次に、本手法を 4 章において、推定式を用いた予測値が他のケースと調和しなかったケーブル No.6 のコーンカロリメータ試験及び IEEE 1202 試験における発熱速度曲線に適用しその原因を検証した。ケーブル No.6 の IEEE 1202 試験における発熱速度曲線及びコーンカロリメータ試験のピーク分離結果をそれぞれ図 5-17 及び図 5-18 に示す。

なお、ピーク分離は、EMG 関数を用いて実施した。

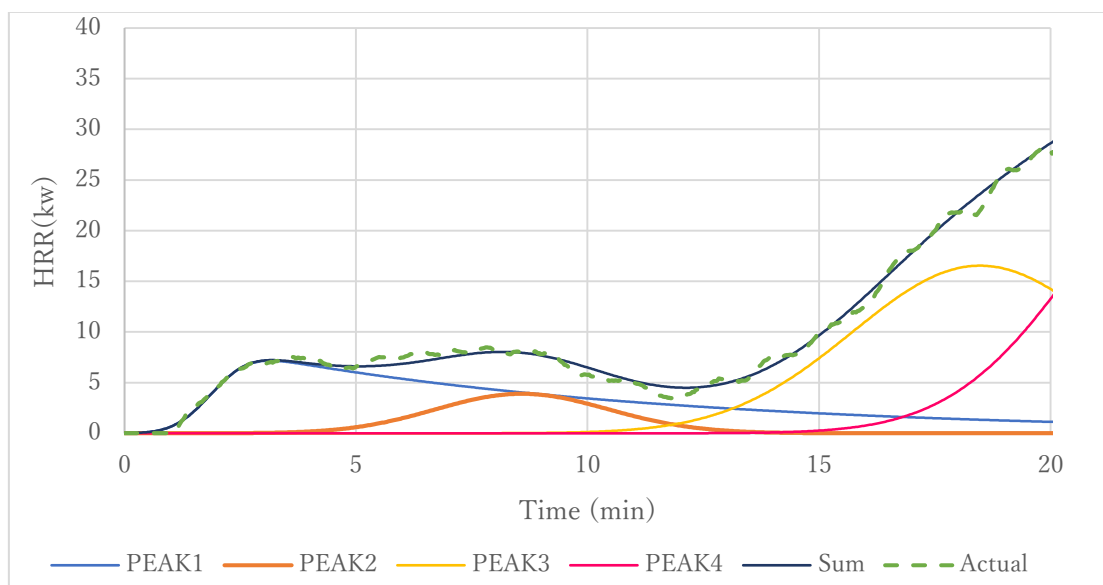


図 5-17 IEEE1202 試験の発熱速度曲線ピーク分離結果
(ケーブル No.6)

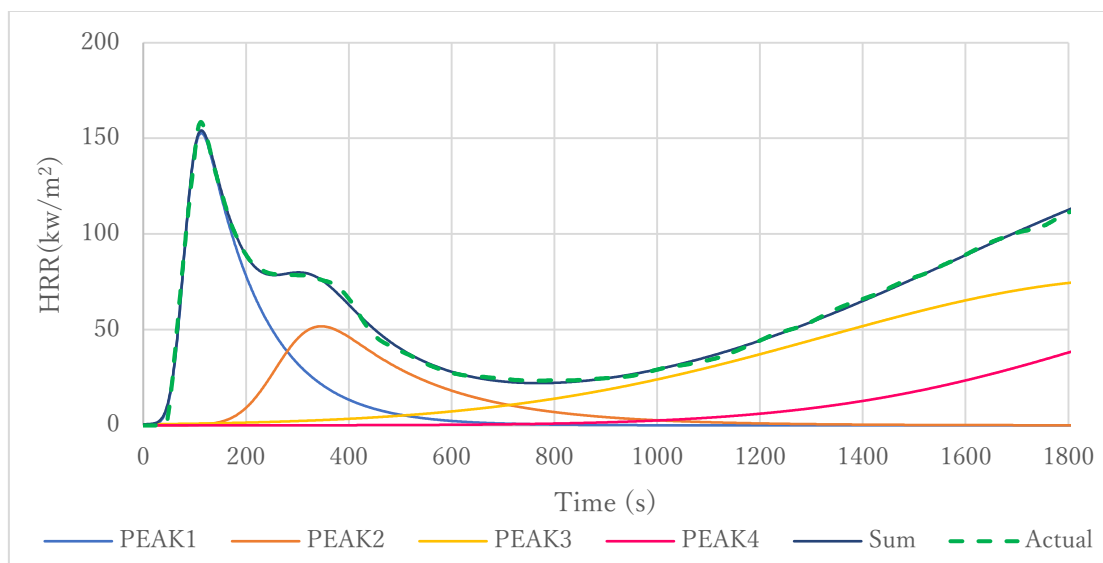


図 5-18 コーンカロリメータ試験の発熱速度曲線ピーク分離結果
(ケーブル No.6 1800 秒)

これらの図を比較したところ、IEEE 1202 試験の発熱速度曲線のピーク分離結果においては、試験終了時の 20 分後に、第 3 ピークと第 4 ピークが交差しているのが分かる。しかしながら、コーンカロリメータ試験におけるピーク分離結果においては、試験終了時間とした 30 分において、第 3 ピークと第 4 ピークは交差していない。そこで、コーンカロリメータ試験のデータを 30 分間を超えて解析したところ、図 5-19 で示す通り約 2200 秒(37 分)後に第 3 ピークと第 4 ピークの交差が見られた。そこで、ケーブル No.6 についてのみ、2200 秒後のデータを用い推定式(式 4-3)から得られた値に対して、IEEE 1202 試験の結果をプロットしたところ、図 5-20 に示すとおり、No.6 についてもよい推定結果が得られている。

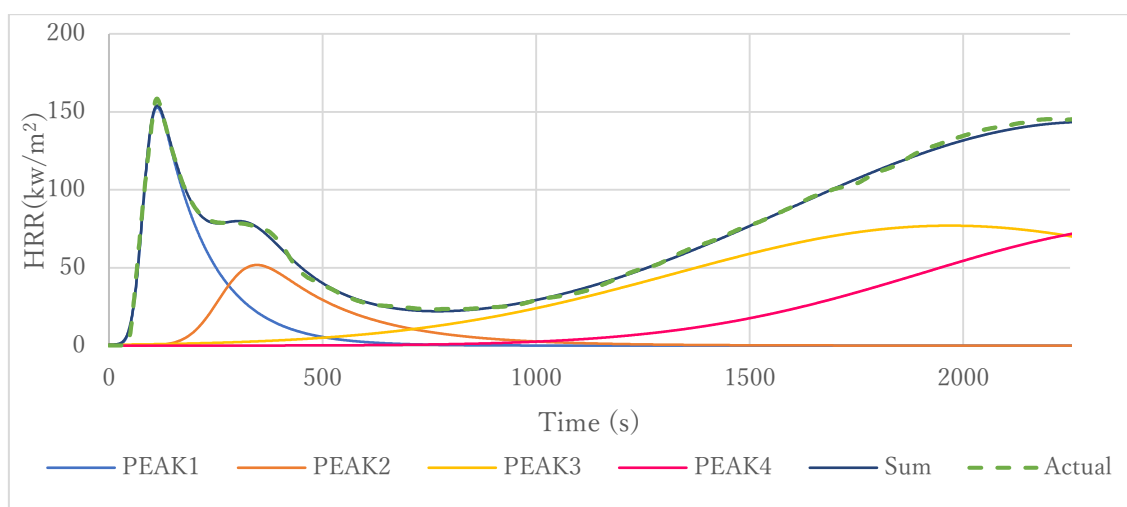


図 5-19 コーンカロリメータ試験の発熱速度曲線ピーク分離結果
(ケーブル No.6 2200 秒)

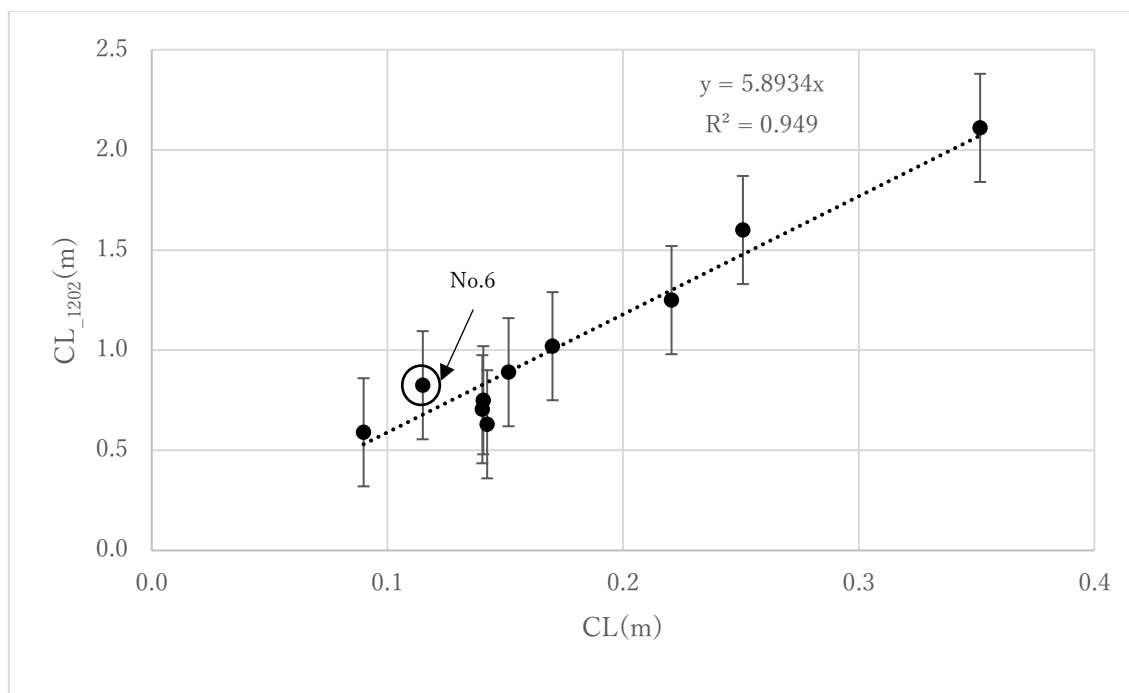


図 5-20 IEEE 1202 における実際の燃焼長(CL₁₂₀₂)と推定燃焼長(CL)の比較
(ケーブル No.2 及び No.3 を除く.)

5.5 まとめ

本研究では、複合素材の燃焼においては時間の経過とともに異なる素材の燃焼が「独立且つ段階的」に生じているとの仮定のもと、コーンヒータによって加熱されたケーブル被覆材料燃焼時の発熱曲線を、2種類の誤差関数を用いてピーク分解することを試みた。他分析手法で活用される正規分布関数ならびに指数正規分布関数によるピーク分解を行ったところ、ピーク数を限定しなければ両者を用いて実発熱曲線をよく近似できることがわかった。また、ケーブルを構成する個々の材料のピーク分離結果及びコーンカロリメータ試験におけるケーブル燃焼挙動の観測結果を考慮し、コーンカロリメータ試験における個々のケーブル構成材料の燃焼がケーブル全体の燃焼挙動にどのような影響を与えていることが把握することができることがわかった。

ピーク数の物理的な意味（1ピークが単一現象を表す）を考慮しつつ、多数の分析結果を複合して評価した結果、指数正規分布関数を適用した方がより物理的に正しい結果を与えることがわかった。この手法を導入することにより、ケーブル燃焼時の発熱曲線を構造から再現することが可能となり、多層構造であるケーブル被覆の燃焼特性を予測することが可能となることが期待でき、これが可能となった場合第4章で論じた炎伝播特性を予測するための着火時間、最大発熱速度、総発熱量、最大重量減少速度が推定できるものと考えられることから、材料単体のコーンカロリメータ試験結果によって、ケーブルの炎伝播特性の評価が可能となるものと考えられる。

もちろん，現状の検討では代表的な4つの被覆材及び1種類のケーブルサンプルに対して検討したのみであり，材料試験とケーブル試験との関連も明確にはなっていない．また指数正規分布関数以外にも非対称性を持つ基本関数は存在するため，引き続き材料試験とケーブル試験との関連及びどの基本関数を用いることが最良なのかは検討していく必要がある．しかしながら，ピーク分解による検討が物理的に妥当な解を与える可能性を指摘したことは有益な結果であると考える．

第6章 総論

6.1 成果のまとめ

以下に各章で得た知見を述べる。

第1章では、非常に大きな熱を放出しながら燃焼する高分子材料を被覆材料にもつケーブルが発火又は着火した場合、電線布設路に沿った火災の大規模化、被覆材料の燃焼によって、発生する熱及び煙並びに燃焼ガス等の燃焼放出物による、人的並びに物的損害等を引き起こす非常に火災危険性の高い製品の一つであり、この危険性を予見、防止するために多くの評価手法及び規制があるが、主として用いられている評価手法は、高コストな実規模試験であり、より簡易的なベンチスケール試験を用いた評価手法が求められていることを概説するとともに、同様の背景のもと各国で検討されたベンチスケール試験を用いたケーブル火災危険性評価手法に関する研究をレビューし、現状においては、公的試験規格、規制等に用いることが可能である手法は確立されていないことを指摘した上で、本研究の目的が、公的試験規格、規制等に用いることのできるベンチスケール試験を用いた、ケーブル火災危険性評価手法の開発であることを示した。

第2章では、現状ケーブル火災危険性の要素として着目されている代表的な特性である、ケーブル燃焼時の炎伝播特性、発煙性、燃焼ガスの腐食性、燃焼ガスの有害性及び燃焼時の回路維持性能並びに各国で開発されているこれらの特性に対する評価方法を概説するとともに、特に最も重要なケーブルの火災危険性要素であり、炎伝播特性に関しては、高コストな実規模試験が求められていること、また、各国に複数存在する実規模試験方法については、試験条件、試験実施環境等によって試験方法毎の試験結果の整合性が乏しく、一種類の試験に合格したとしても他の試験に合格するかどうか担保することが困難な状況であり、現状においては、この高コストの実規模試験の代替試験となり得え、一般的に認知された定量的な指標を用いて、ケーブルの耐火災性能を評価し得るベンチスケール試験を用いた評価手法の開発が求められていることを述べた。

第3章では、日本、米国及び欧州(英国)におけるケーブルの火災危険性に係る規制を比較し、第2章で概説した試験方法がそれぞれどのような形で規制に適用されているかを解説した。それぞれの規制の内容は、大きく異なっているが、各国規制において、最も重要視されているケーブル耐火災性能である炎伝播特性は、地域によって、試験規格が異なっていることから、複数の地域で使用する製品については、それぞれの地域の規制で要求される試験を実施する必要があること、また、たとえ同一の試験規格が要求されていたとしても、現状は、他国で実施した試験結果を当事国が受け入れないケースもあり、再度同様の試験を当事国内で実施する必要性が生じる場合も多いこと等の問題点があることから、国際的に合意のとられたある程度試験精度の確保された、単一の評価手法が開発され、各

国の規制で適用されることが望まれることに言及した。

第4章では、異なる12種類のケーブルを用いることで垂直トレイ試験の一つであるIEEE 1202試験におけるケーブル燃焼長を、ベンチスケール試験であるコーンカロリメータ試験で得られたデータのうち総発熱量、最大発熱速度、MLR及び着火時間を用いた推定式から予測することが可能となることを示した。この結果は、IEEE 1202試験規格に規定された試験室、着火源、垂直トレイ等の試験条件に基づき実施したものであり、試験条件の異なる他の垂直トレイ試験の結果には適用できるかは定かではないが、少なくともモデル概念の妥当性は評価できると考えられる。

第5章では、複合素材の燃焼においては時間の経過とともに異なる素材の燃焼が「独立且つ段階的」に生じているとの仮定のもと、コーンカロリメータ試験において加熱されたケーブル被覆材料燃焼時の発熱曲線を、2種類の誤差分散関数を用いてピーク分解することを試みた。他分析手法で活用される正規分布関数ならびに指数正規分布関数によるピーク分解を行ったところ、ピーク数を限定しなければ両者を用いて実発熱曲線をよく近似できることがわかった。また、ケーブルを構成する個々の材料のピーク分離結果及びコーンカロリメータ試験におけるケーブル燃焼挙動の観測経過を考慮し、コーンカロリメータ試験における個々のケーブル構成材料の燃焼がケーブル全体の燃焼挙動にどのような影響を与えていることが把握することができるとわかった。

ピーク数の物理的な意味（1ピークが単一現象を表す）を考慮しつつ、多数の分析結果を複合して評価した結果、指数正規分布関数を適用した方がより物理的に正しい結果を与えることがわかった。この手法を導入することにより、ケーブル燃焼時の発熱曲線を構造から再現することが可能となり、多層構造であるケーブル被覆の燃焼特性を予測することが可能になると期待でき、これが可能となった場合第4章で論じた炎伝播特性を予測するための総発熱量、最大発熱速度、MLR及び着火時間の推定も可能となり、材料単体のコーンカロリメータ試験結果によって、ケーブルの炎伝播特性の評価が可能となるものと考えられる。

以上本研究では、現状実規模試験で評価が行われているケーブルの最も重要な火災危険性要素である炎伝播特性をベンチスケール試験で代替できる可能性があることを示した。

次節に示す課題は残されているものの、公的試験規格、規制等に適用し得るベンチスケール試験を用いた、ケーブルの炎伝播特性評価試験開発の一助となる成果が得られたものとする。

6.2 今後の課題

以下に今後の検討課題を述べる。

6.2.1 ケーブル製品試験のコーンカロリメータ試験による垂直トレイ試験結果の推定

第4章で提案した手法については、本研究では、単一のラボで単一の垂直トレイ試験の

結果についてのみを検討している。各国に様々な垂直トレイ試験を規定した規格が存在するが、着火源であるバーナー、試験ケーブルの取付方法は、類似したものが多いことから、本研究で提案した推定式が適用できるものと考えられる。今後他の試験規格に規定された試験方法による試験結果との相関性を検証することにより、今回提案した推定式がより一般的に認知されたものとなるものと考ええる。

6.2.2 発熱速度曲線のピーク分離によるケーブル燃焼挙動の推定

ピーク分解による検討が物理的に妥当な解を与える可能性を指摘したことは有益な結果であると考ええるが、現状の検討では代表的な4つの被覆材及び1種類のケーブルサンプルに対して検討したのみであり、材料試験とケーブル試験との関連性は明らかにされていない。また、指数正規分布関数以外でも非対称性を持つ基本関数は存在するため、今後より多くのケーブル被覆材料に対して検証を進め、材料試験とケーブル試験との関連及びどの基本関数を用いることが最良なのかを検討していくことにより、ケーブル燃焼挙動を評価する新たな評価手法として認知されてゆくものと考ええる。

6.2.3 その他の評価指標への適用

現状一般的にケーブルの火災危険性を示す最も重要な指標は、火炎伝播特性であるが、各国の規制、特定の産業分野においては、炎伝播特性だけでなく、発煙性、燃焼ガスの腐食性、毒性等の評価が要求される場合がある。コーンカロリメータ試験においては、発煙性、CO、CO₂生成量が、発熱速度同様にリアルタイムで観測が可能である。また、FTIR等の機器を用いることによって、燃焼ガス成分のリアルタイムでの取得が可能となる。煙及び燃焼ガスの生成速度は、ケーブル被覆材料の燃焼速度にリンクするものと推定できることから、今後本研究で提案した手法を用いて垂直トレイ試験における煙及び燃焼ガスの生成挙動と、コーンカロリメータ試験における生成挙動を比較検証することにより、ケーブルの火災危険性評価指標を総合的に評価することを可能とするベンチスケール試験を用いた評価手法の開発が可能となるものと考ええる。

参考文献

- 1) Dr. P.D.Gandhi, L.J.Przybyla “An investigation into use of heat release rate calorimetry for electric cables” , Heat release in fires, 1990, pp. 545-565
- 2) A.W. Coaker, M.M.Hirschler, S. Shakir, C.L. Shoemale” Flammability testing of new vinyl compounds with low flammability and low smoke release cables”, in Proc. Of 39th Intl. Wire & Cable Symp. US Army Communication-Electronics Command, Cherry Hill NJ, Nov. 13-15, 1990, pp. 643-654
- 3) CSA C22.2 No.03: Test methods for electrical wires and cables
- 4) Kevin McGrattan, Andrew Lock, Nathan Marsh, Marc Nyden, Scott Bareham, Michael Pric: “Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE), Phase 1: Horizontal Trays” , NUREG/CR-7010, Vol.1, 2012
- 5) Kevin McGrattan, Scott Bareham: “Cable Heat Release, Ignition, and Spread in Tray Installations During Fire (CHRISTIFIRE), Phase 2: Vertical Shafts and Corridors , NUREG/CR-7010, Vol.2, 2013
- 6) EN 50399: Common test methods for cables under fire conditions - Heat release and smoke production measurement on cables during flame spread test - Test apparatus, procedures, results
- 7) Carcillo Magalie, Caro Anne-Sophie, Sonnier Rodolphe, Laurent Ferry, Gesta Emmanuelle, et al., “Fire behavior of electrical cables in cone calorimeter: Influence of cables structure and layout”. Fire Safety Journal, Elsevier, 2018, pp.12-21.
- 8) Kaczorek-Chrobak, K.; Fangrat, J.; Papis, B.K. “Calorimetric Behaviour of Electric Cables.”, Energies 2021, 14, 1007. <https://doi.org/10.3390/en14041007>
- 9) Quintiere, J.G. , “A theoretical basis for flammability properties.”, Fire and Materials. 2006, 30, pp175–214
- 10) Vyto Babrauskas, Richard Peacock, E Braun, Richard W. Bukowski, Walter W. Jones,” Fire Performance of Wire and Cable: Reaction-to-Fire Tests--A Critical Review of the Existing Methods and of New Concepts (NIST TN 1219)”,1991
- 11) JIS C 3005 : ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法
- 12) UL2556 : Wire and Cable Test Methods
- 13) IEC60332-1-2 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions - Part 1-2: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cable - Procedure for 1kW pre-mixed flame
- 14) IEC60332-1-3 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions - Part 1-3: Test for vertical flame propagation for a single insulated wire or cables - Procedure for determination of flaming droplets/particles
- 15) IEEE383 : IEEE Standard for Qualifying Class 1E Electric Cables and Field Splices for Nuclear Power Generating Stations
- 16) UL1581 : Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords
- 17) JIS C 3521 : 通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法
- 18) IEEE1202 : IEEE Standard for Flame-Propagation Testing of Wire and Cable
- 19) UL1685 : Standard for Vertical-Tray Fire-Propagation and Smoke-Release Test for Electrical and Optical-Fiber Cables
- 20) IEC60332-3 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions, Test for vertical flame spread of vertically-mounted bunched wires or cables
- 21) NFPA70 : National Electrical Code:(NEC)
- 22) UL910 : UL Standard for Safety Test for Flame-Propagation and Smoke-Density Values for Electrical and Optical-Fiber Cables Used in Spaces Transporting Environmental Air

- 23) NFPA262 : Standard Method of Test for Flame Travel and Smoke of Wires and Cables for Use in Air-Handling Spaces
- 24) EN50289-4-11 : Communication cables. Specifications for test methods. Environmental test methods. A horizontal integrated fire test method
- 25) UL1666 : Standard for Test for Flame Propagation Height of Electrical and Optical-Fiber Cables Installed Vertically in Shafts
- 26) F. Beach, “Electrical Systems and Equipment: Incorporating Modern Power System Practice”, 3rd Edition - December 31, 1991, pp524-525
- 27) EN13823 : Reaction to fire tests for building products. Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item
- 28) Grayson, S.J., Van Hees Patrick, Green, A.M., Breulet Hervé, Vercellotti, Ubelt: “Assessing the fire performance of electric cables (FIPEC)”, Fire and Materials Vol.25, Issue 2, 2001, pp.49-60
- 29) IEC60332-3-10 : Tests on electric and optical fibre cables under fire conditions - Part 3-10: Test for vertical flame spread of vertically-mounted bunched wires or cables – Apparatus
- 30) IEC 60364 : Low-voltage electrical installations
- 31) NFPA 805 : Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants
- 32) BS 7671 : Requirements for Electrical Installations. IET Wiring Regulations
- 33) BS 8492 : Telecommunications equipment and telecommunications cabling. Code of practice for fire performance and protection - Code of practice for fire performance and protection
- 34) IEC 60364-4-42 : Low-voltage electrical installations – Part 4-42: Protection for safety – Protection against thermal effects
- 35) (EU) No. 305/2011 (laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC)
- 36) (EU) No. 89/106/EEC(on the approximation of laws, regulations and administrative provisions of the Member States relating to construction products)
- 37) (EU) No. 00/147/EC (implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the reaction to fire performance of construction products)
- 38) (EU) No. 06/367/EC (implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the resistance to fire) performance of construction products, construction works and parts thereof
- 39) (EU) No. 06/751/EC (amending Decision 2000/147/EC implementing Council Directive 89/106/EEC as regards the classification of the reaction-to-fire performance of construction products)
- 40) EN 13501-6 : Fire classification of construction products and building elements - Part 6: Classification using data from reaction to fire tests on power, control and communication cables
- 41) EN ISO 1716 : Reaction to fire tests for products — Determination of the gross heat of combustion (calorific value)
- 42) EN 50575 : Power, control and communication cables - Cables for general applications in construction works subject to reaction to fire requirements
- 43) CENELEC - CLC/TS 50576 : Electric cables - Extended application of test results for reaction to fire
- 44) John G. Davis ,“Cable Fire at Browns Ferry Nuclear Power Station” ,United State Nuclear Regulatory Commission Bulletin 75-04A, 1975
- 45) ISO 5660-1: 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], Third edition, 2015
- 46) ASTM D6113: Standard Test Method for Using Cone Calorimeter to Determine Fire-Test-

- Response Characteristics of Insulating Materials Contained in Electrical or Optical Fiber Cables
- 47) ISO/TS 5660-3: Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate — Part 3: Guidance on measurement, First edition, 2012, p. 10
 - 48) Mark Jeanson and Joe P. Foley: “Review of the Exponentially Modified Gaussian (EMG) Function Since 1983”, Journal of chromatographic science Vol. 29, Issue 6, 1991, pp258-266
 - 49) MO Shan-juna, ZHANG Juna, LIANG Donga, CHEN Hong-yina: “Study on Pyrolysis Characteristics of Cross-linked Polyethylene Material Cable”, Procedia Engineering, Vol. 52, 2013pp., 588-592
 - 50) 大江 秀雄, 松浦 貢一: 「高分子材料の燃焼熱と酸素指数について」, 福井大学工学部研究報告, 第 23 巻, 第 2 号, 1980, pp. 161-169
 - 51) 宮地 保好: 「新しい天然水酸化マグネシウム難燃剤の開発」, マテリアルライフ学会誌, 16 巻, 3 号, 2004, pp. 82-85
-
- A1) IEC60695-6-1 : Fire hazard testing - Part 6-1: Smoke obscuration - General guidance
 - A2) ASTM E662 : Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials
 - A3) IEC TS60695-6-31 : Fire hazard testing - Part 6-31: Smoke obscuration - Small-scale static test – Materials
 - A4) JIS C60695-6-31 : 環境試験方法－電気・電子－耐火性試験－煙による光の不透過度の測定－小規模静的試験方法－材料
 - A5) JIS C3612 : 600V 耐燃性ポリエチレン絶縁電線
 - A6) IEC 61034 : Measurement of smoke density of cables burning under defined conditions
 - A7) IEC 60754-1 : Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 1: Determination of the halogen acid gas content
 - A8) IEC 60754-2 : Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 2: Determination of acidity (by pH measurement) and conductivity
 - A9) JIS C 3666-2 : 電気ケーブルの燃焼時発生ガス測定試験方法－第 2 部：電気ケーブル材料の燃焼時における pH 及び導電率による発生ガスの酸性度測定
 - A10) IEC 60754-3 Test on gases evolved during combustion of materials from cables - Part 3: Measurement of low level of halogen content by ion chromatography
 - A11) BS 6853 : Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains
 - A12) EN 50305 : Railway applications. Railway rolling stock cables having special fire performance. Test methods
 - A13) 平成 9 年消防庁告示第 10 号 耐火電線の基準, 第 11 号耐熱電線の基準
 - A14) JIS A1304 : 建築構造部分の耐火試験方法
 - A15) IEC60331 : Tests for electric cables under fire conditions - Circuit integrity
 - A16) UL2196 : Tests for Fire Resistive Cables
 - A17) BS EN50200 : Method of test for resistance to fire of unprotected small cables for use in emergency circuits
 - A18) BS 5839-1 : Fire detection and fire alarm systems for buildings - Code of practice for design, installation, commissioning and maintenance of systems in non-domestic premises

- A19) BS 6387 : Test method for resistance to fire of cables required to maintain circuit integrity under fire conditions
- A20) BS 5266-1 : Emergency lighting - Code of practice for the emergency lighting of premises
- A21) BS 7346-6 : Components for smoke and heat control systems - Specifications for cable systems
- A22) EN 13501-3 : Fire classification of construction products and building elements - Classification using data from fire resistance tests on products and elements used in building service installations: fire resisting ducts and fire dampers
- A23) DIN 4102-12 : Fire behaviour of building materials and elements - Fire resistance of electric cable systems required to maintain circuit integrity - Requirements and testing

付録 1 火炎伝播特性評価試験以外のケーブル火災危険性 評価試験

A1.1 発煙性評価試験

火災時において、燃焼物から生成する煙は、収容人員の避難及び消火活動を大きく阻害することから、ケーブルについても様々な発煙性試験が開発されている。現状における発煙性評価試験は、試料の燃焼によって発生した煙による光の減衰量を測定する方法が一般的となっている。発煙性評価試験には、試料の燃焼により発生した、煙を一定容積の試験室内に蓄積させ、トータルの発煙量を評価する静的方法及び燃焼試験設備の排気ダクト中を一定流速で通過する煙量を一定間隔で測定し、瞬間的な発煙量(煙生成速度)及び積算の発煙量(総発煙量)の両者を評価する動的方法に分類できる^{A1)}。静的方法は、比較的簡易に測定することができるものの試験器壁面への煙の付着、煙性状の径時変化等の影響を受けるといふ欠点が存在する。一方動的方法は、ダクト流速の測定系が必要となることから、機構が複雑となるが、付着や経時変化等の影響を受けず、また、大規模な試験に対しても適用することが可能である。

A1.1.1 静的方法

現状国内及び欧州においては、下記の静的煙濃度測定法がケーブル燃焼時の発煙性評価に用いられている。これらの試験方法で得られる結果は、材料又は製品からの発煙量の相对比较に過ぎず実火災における発煙による火災危険性とリンクすることは困難であることに注意する必要がある。

A1.1.1.1 ASTM E662 NBS スモークチャンバ、

ASTM E662^{A2)}は、NBS(National Bureau of Standard/アメリカ連邦標準局、1988年にNIST: National Institute of Standards and Technology と改称されている。)が開発した試験方法であり、現在でも世界各国で製品や材料燃焼時の発煙性評価手法として幅広く用いられている。76mm角のシート状の試料を規定のチャンバ内で電熱ヒータにより加熱し、発生した煙による光透過率の減衰量を測定することによって発煙量を評価する(図 A1-1 参照)。試験には、ヒータの加熱のみで試験片の熱分解状態での発煙性を評価するノンフレミングモードとパイロットバーナーで試験片に強制着火し、燃焼状態での発煙性を評価するフレミングモードがある。国内ではこの規格の IEC 版である IEC TS60695-6-31^{A3)}の翻訳 JIS である、JIS C 60695-6-31^{A4)}に基づきノンフレミングモードで、被覆材料の発煙性評価を実施している。但し、IEC において、TS 60695-6-31 が既に廃止されていることから、2021 年現在 JIS C 60695-6-31 も廃止の予定となっており、発煙濃度評価試験方法は、今後この試験が要求されるケーブル製品の規格である JIS C 3612^{A5)}に規定されることとなる。

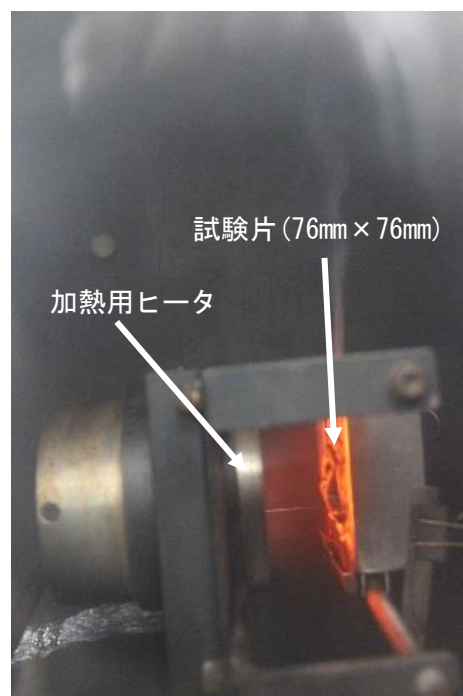
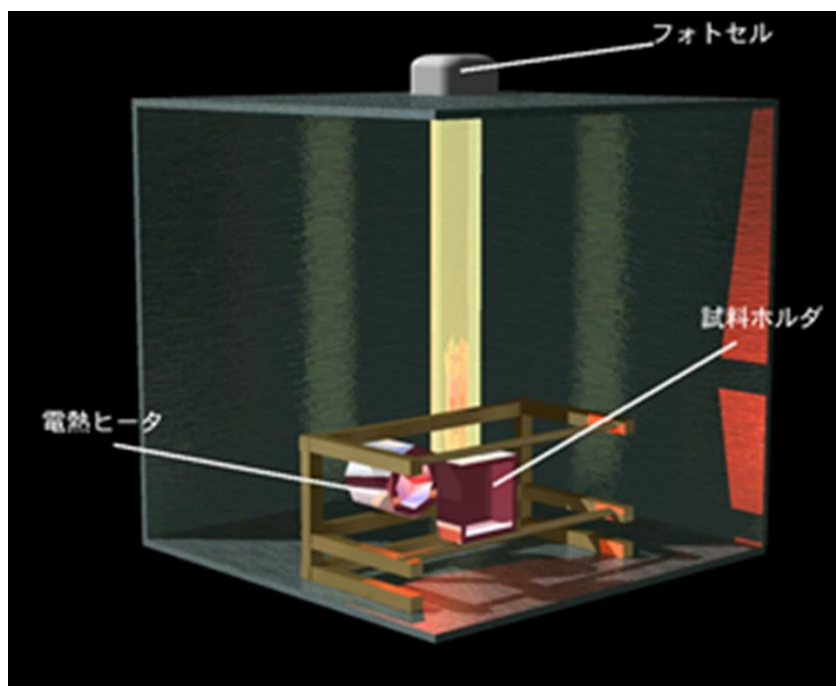


図 A1-1 NBS スモークチャンバ

試験装置内部イメージ(上), 装置外観(左下), 試験片加熱部(右下)

発煙性の指標としては、光透過率及び煙の中を通過する光の長さ(光路長)から算出できる光学密度を試験片の加熱面積及び試験室の容積で標準化した、特定光学密度(Ds)という値が用いられる。従って算出されるDsの値は、この試験方法で得られる特有の値であり、

他の発煙性試験の結果と直接比較することはできない。また、試験は、構成材料毎に実施することから、ケーブルの構造の違いによる発煙性への影響は、評価することができない。

A1.1.1.2 3m キューブ発煙性評価試験

1981 年のロンドン地下鉄の火災事故後に開発された試験方法である。現在は、IEC/TC20/WG18 において、IEC 61034^{A6)}として継続的に改良が進められている。試験は、3m×3m×3m の試験室内で、アルコール燃料を用い長さ 1m のケーブル試料を燃焼させ、試験室内に封入された煙による光透過率の減衰量により発煙量を評価する(図 A1-2 参照)。また英国では、ケーブルだけでなく、鉄道車両用の部材に対する発煙性評価にもこの試験方法を用いていた。

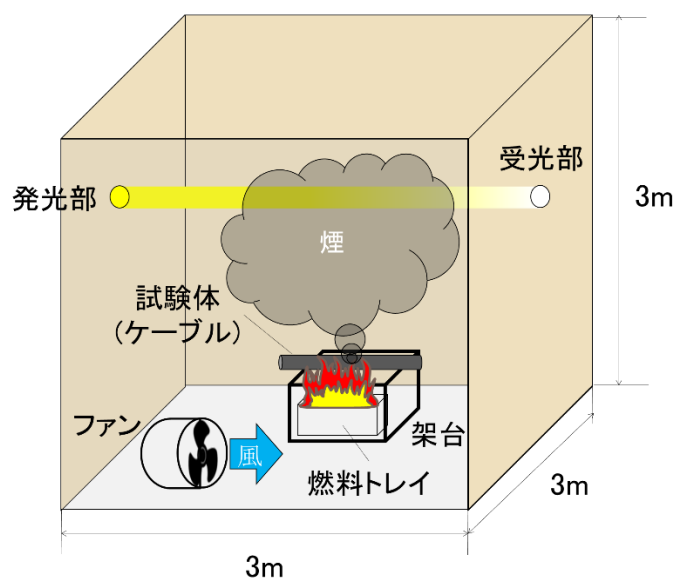


図 A1-2 3m キューブ燃焼試験

試験装置内部イメージ(上), 試験装置外観(左下), 試験体燃焼状況(右下)

ケーブルに対する一般的な判定基準は、煙による光減衰量が 60%を下回らないことである。欧州諸国においては、一般的にこの試験方法が発煙性評価に用いられている。この

試験は、実ケーブルを試験体として用いるため、ケーブルの構造の違いによる発煙性への影響も評価することができるが、試験ケーブル長が短尺でまた水平設置となることから、ケーブルの延焼による発煙性への影響を評価することはできない。

A1.1.2 動的方法

この他ケーブル製品の燃焼試験において発煙性を評価するものに、前述の UL1685(図 A1-3)、NFPA262 及び EN50399 がある。これらの試験における発煙性の評価は、両者ともケーブルの耐延焼性試験と同時に実施するもので、試験機の排気ダクト内を通過する煙による光の減衰量及び光路長から算出する光学密度を用いて発煙性を評価する。これらの試験は、ケーブルの構造の違い及びケーブルの延焼による発煙性への影響も評価することができ、また経時的に発煙性を測定するため、火災の各段階における発煙性が把握できることから、実火災における火災危険性を評価するうえでも有効な試験方法と言える。

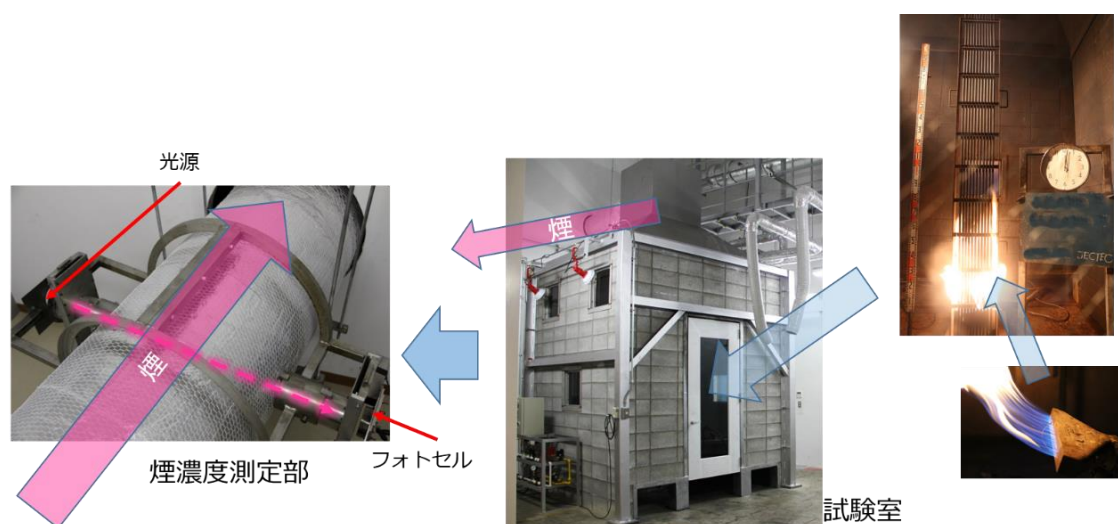


図 A1-3 UL 1685 試験における煙濃度測定系

A1.2 燃焼時発生ガス評価試験

A1.2.1 燃焼生成物の腐食性に関する試験

ケーブル被覆材料の燃焼によって発生する燃焼生成物は、避難、消火活動を阻害するだけでなく、コンピュータ等の電子機器内の金属腐食を引き起こす可能性がある。近年の情報機器の普及により、これら電子機器内に格納された情報の保護等の観点から燃焼生成ガスが電子機器に与える影響の評価が重要視されてきており、ケーブルについても燃焼生成物の腐食性の評価が求められる場合がある。現在ケーブル被覆材料の燃焼生成物の腐食性の評価には材料の燃焼によって発生するガスの酸性度及び燃焼生成物中のハロゲン化水素ガスを測定する方法が主に採用されている。しかしながら、これらの方法を基に得られる酸性度、ハロゲン化水素量の値と電子機器等の誤動作等の関係は明確ではなく、これらの方法は、単にケーブル被覆に規定量以上の有害物質であるハロゲンが含まれないことを評価するこ

とのみに使用されているのが現状である。

評価方法の代表的なものは、IEC60754-1^{A7)}及び IEC60754-2^{A8)}(図 A1-4)である。

これらの試験方法では、電熱ヒータで規定温度に加熱されたガラスチューブ内でケーブル被覆材料を燃焼させ、その際に発生するガスの水溶液を IEC60754-1 では、滴定によるハロゲン化水素の定量で、IEC60754-2 では、導電率及び pH を測定することにより腐食性を評価する。IEC では、これらの試験に適合する材料を用いたケーブルをハロゲンフリーケーブルと呼んでおり、適合性評価のための判定基準は、IEC60754-1 試験における、HCl 及び HBr の含有量が 5mg/g であること及び IEC60754-2 試験における pH が 4.3 以上、導電率が 10 μ s/mm 以下となっている。国内では IEC60754-2 の翻訳 JIS である、JIS C 3666-2^{A9)}が EM(エコマテリアル)ケーブル被覆材料の燃焼時発生ガスの評価に用いられており、判定基準は、IEC で用いられている pH 値及び導電率値が用いられる。

なお、IEC では、IEC 60754-2 と同様の加熱方法を用い、材料の燃焼により生成したガスの水溶液中のハロゲン物質をイオンクロマトグラフィーを用いて定量する試験方法を IEC60754-3^{A10)}として制定した。現状用いられている、IEC60754-1 では、塩素及び臭素以外のハロゲン物質の定量ができないが、この方法を用いた場合、塩素、臭素に加え、フッ素、ヨウ素の定量が可能となる。IEC におけるハロゲンフリーの定義に将来的にフッ素、ヨウ素の含有量も考慮されることとなっており、今後この試験方法が、ハロゲンフリーを決定するための方法として、ケーブルの製品規格や規制に用いられることとなるものと考えられる。

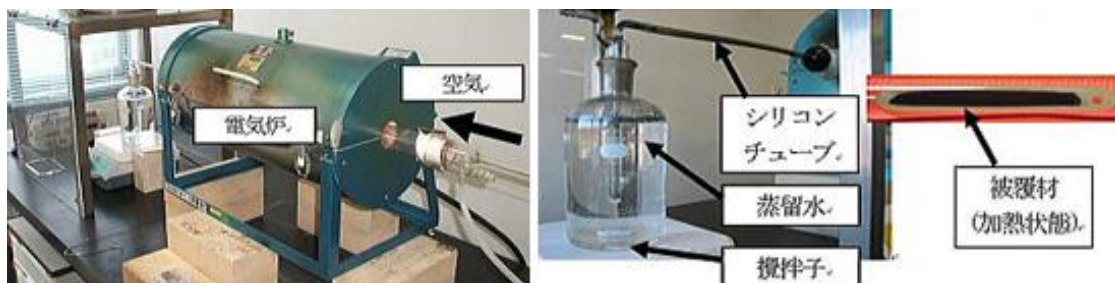


図 A1-4 IEC60754 試験

A1.3 燃焼放出ガスの毒性に関する試験

火災時の死亡原因の大きなものに一酸化炭素中毒などの毒性ガスによるものがある。鉄道車両のような狭い空間で一旦火災が起こった場合、燃焼放出ガスが比較的早く車内に充満し、人員の避難が大きく阻害され、またトンネル内の車両火災においては、車両外に避難することが困難となる場合も想定されることから、欧州を中心に鉄道車両に使用されるケーブルも含めた部材に対しては、燃焼放出ガスの毒性評価が要求される場合がある。但し、現状では、建築部材としてのケーブルに対して燃焼ガスの毒性評価が要求されるケースはまれである。

ケーブルに対する燃焼ガスの毒性評価試験の代表的なものとしては、次のものがある。

A1.3.1 BS6853 Annex B1

英国の鉄道車両防火規格である BS6853^{A11)}中に規定される毒性ガス評価試験である。試験片は、前述の IEC60754 シリーズ同様にガラスチューブ内で燃焼し、燃焼ガスをバブリング、ガスバッグ等の方法で採取し、種々の分析方法を用いて、規格に規定された成分を定量する。毒性成分として定量することが要求されるものは、CO₂、CO、HF、HCl、HBr、HCN、NO_x、SO₂ の 8 成分である。

A1.3.2 EN 50305

EN 50305^{A12)}は欧州統一規格である EN における車両用ケーブルの燃焼ガス毒性評価試験である。燃焼方法は、BS6853 とほぼ同様であるが、この試験では、定量試験を実施する前に、窒素及び硫黄の存在をあらかじめ化学分析で確認した後、定量分析方法を選定するのが特徴である。この試験において、毒性ガス成分として定量することが要求されるものは、CO₂、CO、HCN、NO_x、SO₂ の 5 成分である。この試験は、ノンハロゲンケーブルにのみが対象とされていることから、ハロゲン系のガスは、評価対象に含まれていない。試験の配置図を図 A1-5 に示す。

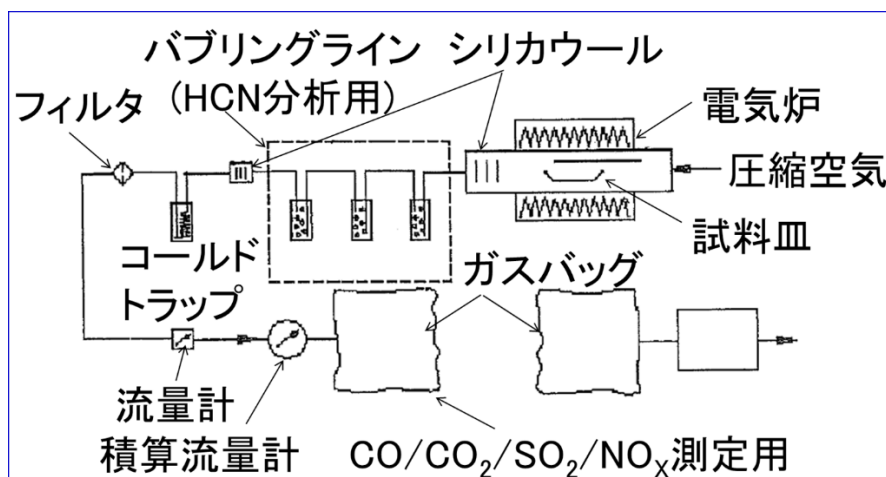


図 A1-5 EN 50305 毒性試験配置図

A1.4 ケーブルの耐火性評価試験

A1.4.1 火災時の耐火特性

ケーブルが火災に曝され、燃焼した場合にどの程度その機能を維持できるかを評価する指標であり、我が国では主に在監者の避難、消防活動のために建築物中に配置される、様々な消防・防火設備の駆動用電源、操作回路等に用いられるケーブルに要求されている。一方海外においては、消防・防火設備だけでなく、国家運営のために必要不可欠な施設、重要文化財等の配線に要求される場合もある。

A1.4.2 消防庁告示試験

消防庁告示^{A13)}においては、非常用回線に使用できるケーブルとして、主に電力線として使用する耐火電線及び主に通信・計装線として使用する耐熱電線が規定されておりそれぞれ異なる試験方法が使用されている。

両者の試験には、同一構造の耐火炉(図 A1-6)が用いられるが、耐火電線に関しては、炉内に設置した 1.3m の試験試料を JIS A 1304^{A14)}に規定された標準加熱曲線に基づき 30 分間で 840°C まで加熱し、試験試料の回路保持能力を、耐電圧試験及び絶縁抵抗の測定から評価する。一方耐熱試験においては、標準加熱曲線の 1/2 の曲線に従って 15 分間の加熱を行い耐火試験同様に耐電圧試験及び絶縁抵抗の測定から、回路保持能力を評価する。

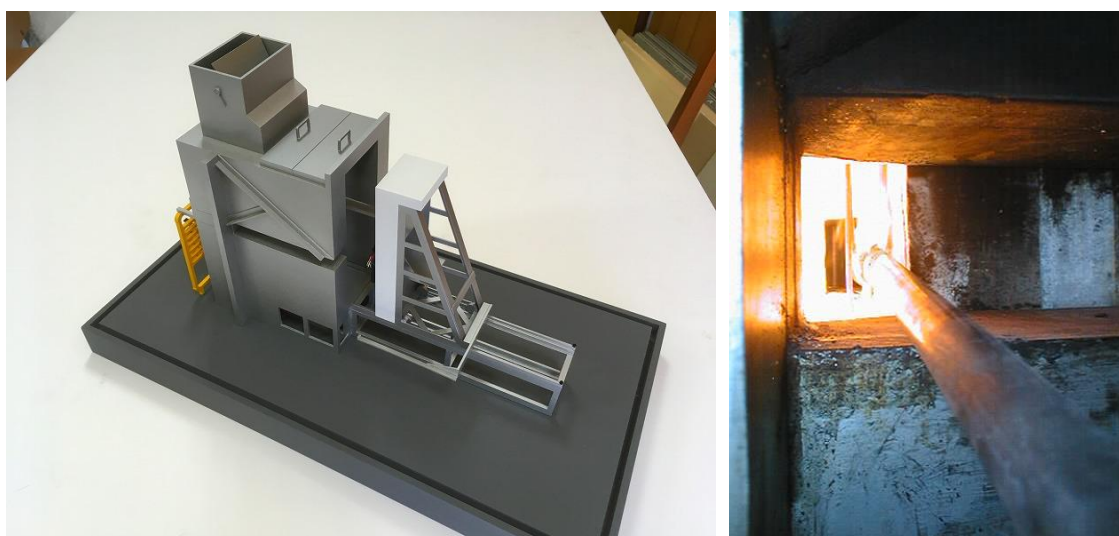


図 A1-6 消防庁告示小型加熱炉の模型(左)及び試験状況(右)

A1.4.3 IEC60331

IEC においては、IEC60331 シリーズ^{A15)}として、ケーブル耐火試験が規定されている。IEC60331 は、規定長さのケーブルを火炎温度約 750°C 又は 830°C のバーナー火炎(図 A1-7)に直接曝す方法となっている。試験中は、試験試料に規定の電圧を負荷し、試験回路中に取付けられたヒューズの破壊により、ケーブルの絶縁破壊を検出し、また、同様に試験回路中に取付けられたランプの消灯により導体の破断を検出する。また、試験方法の中には、試験中に一定時間間隔で試料に衝撃を加えながら実施する試験もある。なお試験時間は、最大 120 分までが規定されている。欧州各国では、非常用回路用配線用ケーブル等にこの試験が用いられている。また、船舶用の耐火電線の評価方法として国際的に用いられている。

A1.4.4 UL2196

米国においては防災設備用配線等の耐火試験に用いられている評価方法が UL2196^{A16)}として規定されている。消防庁告示法同様に試験ケーブルを規定の加熱曲線に従って加熱し、ケーブルの回路保持能力を、耐電圧試験及び導体の破断検出により評価する。消防庁告示法

と大きく異なる点は、試験ケーブル中央部にケーブルの接続部を設け、接続部の評価も同時に実施することが挙げられる。また、試験中ケーブルに対して放水を行い、放水に対する性能も評価する。

試験時間は、最大 4 時間までが規定されており、5 分間で 1093℃まで昇温する急速加熱曲線での試験も規定されている。

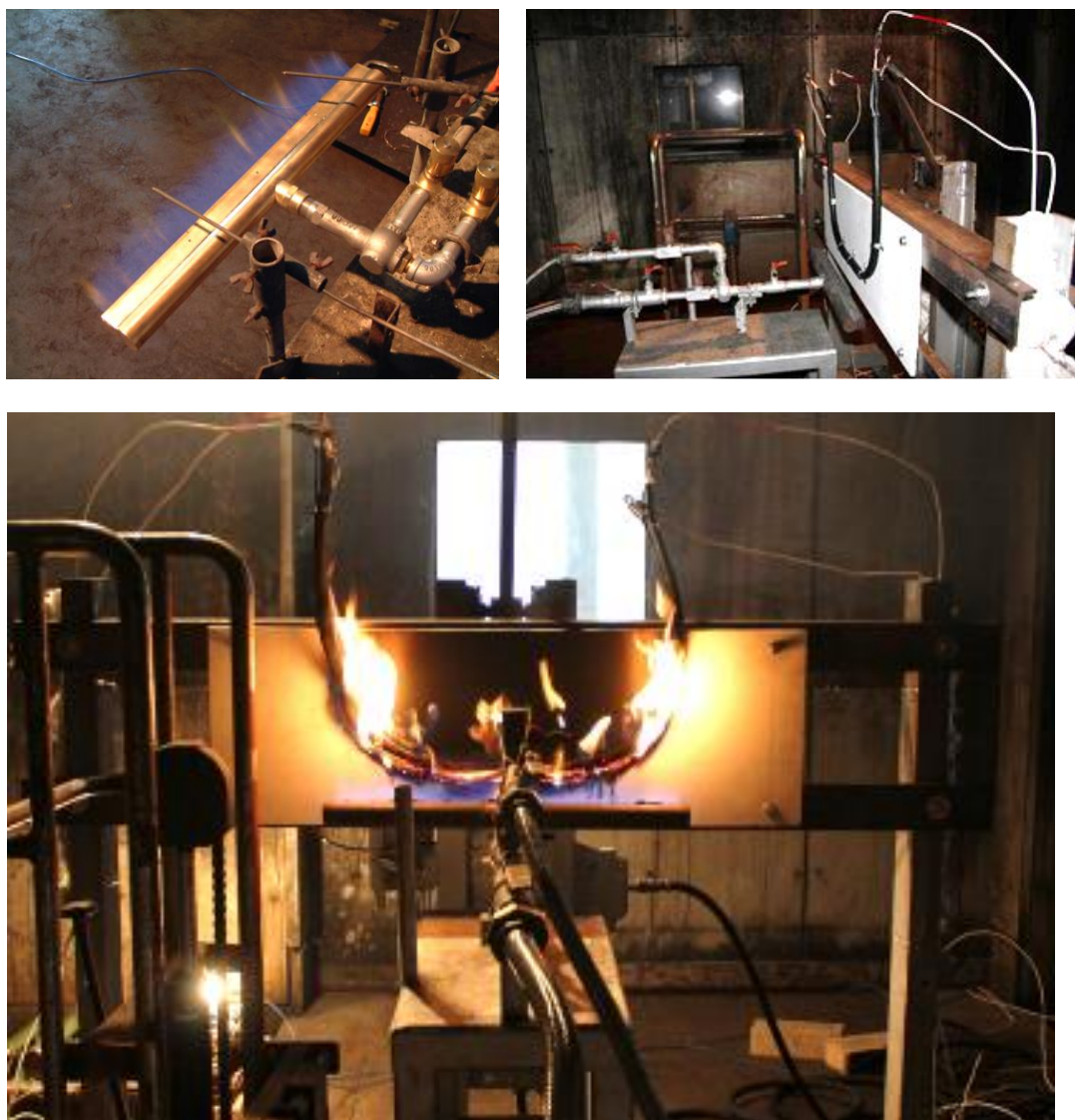


図 A1-7 IEC60331 試験

使用する予混バーナー（左上）、試験体接地状況(右上)、試験状況(下)

A1.4.5 各国のケーブル耐火試験の比較

表 A1-1 に各国のケーブル耐火試験の比較を示す。この通り各国で評価方法が異なることが分かる。耐火ケーブルの耐火性能は、耐火試験における耐火時間で表されるのが一般的であるが、このように試験方法が異なるため、各国の耐火ケーブルの耐火性能をその耐火時間で比較することは困難である。

表 A1-1 各国のケーブル耐火試験の比較

試験規格	消防庁告示第 10 号	IEC60331-1	UL2196
加熱条件	JIS A 1304 標準曲線	バーナー火炎	UL2196 加熱曲線
加熱時間	30 分	最大 120 分	最大 240 分
到達温度	840°C(30 分)	830°C(バーナー火炎温度)	標準曲線 843°C(30 分) 927°C(60 分) 1010°C(120 分) 1093°C(240 分) 急速加熱 1093°C(5 分~240 分)
試験中耐電圧	600V(低圧ケーブル) 4.4kV(高圧ケーブル)	評価ケーブルの定格電圧	評価ケーブルの定格電圧
試験中回路電流	電流は流さない	0.25A	0.25~0.5A
試験後耐電圧	1.5kV 1 分間	—	—
評価基準	試験電圧に耐えること 試験後の絶縁抵抗 0.4MΩ 以上	試験電圧に耐えること 導体が断線しないこと	試験電圧に耐えること 導体が断線しないこと
その他	ケーブル単体での試験(露出試験)とケーブルを電線管に挿入しての試験(電線管試験)を規定 露出試験の試験体には自重の 2 倍の荷重をかける.	試験中試験体を保持するフレームに一定時間おきに衝撃を加える.	試験ケーブルの中央部に接続部を設ける 試験中の放水試験を規定

付録 2 非常用回路の耐火性に関する各国の規制

A2.1 日本の規制

国内においては、建築基準法、消防法及びこれらの関連法規において、火災時に規定された時間稼働することを要求される設備（防災設備）に電力及び信号を送るケーブルについては、耐火防護措置等をしない場合、一定の耐熱性能を有するものを使用することが要求されている。耐熱配線については、耐熱 A 種配線（FA）、耐熱 B 種配線（FB）及び耐熱 C 種配線（FC）の 3 種類(図 A2-1)が規定されており、接続する防災設備によって使い分ける。代表的な防災設備に要求される耐熱配線を表 A2-1 に示す。

これらの配線の耐熱要求は、次の通りである。

FA：JIS A 1304 に規定された加熱曲線の 1/8 に基づき加熱した際 30 分間その機能を維持するもの(30 分後の到達温度：110℃)

FB：JIS A 1304 に規定された加熱曲線の 1/3 に基づき加熱した際 30 分間その機能を維持するもの(30 分後の到達温度：280℃)又は JIS A 1304 に規定された加熱曲線の 1/2 に基づき加熱した際 15 分間その機能を維持するもの(15 分後の到達温度：380℃)

FC：JIS A 1304 に規定された加熱曲線に基づき加熱した際 30 分間その機能を維持するもの(30 分後の到達温度：840℃)

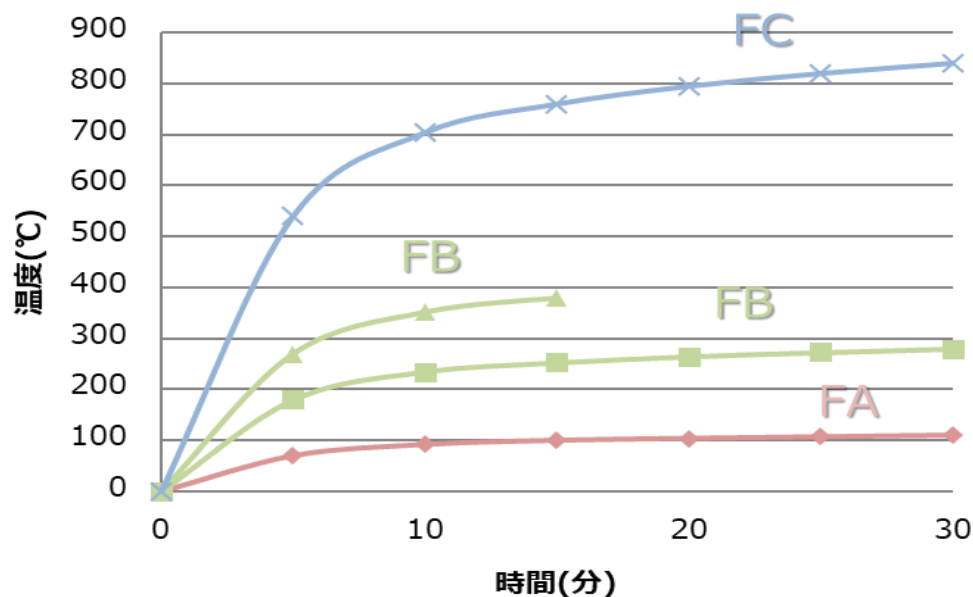


図 A2-1 耐熱配線の加熱曲線

これらの配線のうち FB については、平成 9 年消防庁告示第 11 号耐熱電線の基準に規定された耐熱電線が、FC については、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耐火電線が該当する。その他、耐熱電線及び耐火電線においては、JIS C 3521 に適合する

難燃性並びに消防庁告示に規定された発煙濃度試験及び発生ガスの酸性度試験に適合する高難燃ノンハロゲンタイプのケーブルが規定されており、東京消防庁等の予防事務・審査基準等において、耐火電線など（耐火電線と一般電線の混在したものを含む）をケーブルラック等により露出して敷設する場合に他の防火処置なしで使用できることとしている。

なお、消防庁告示に規定されている耐火・耐熱電線は、消防法施行規則に基づき登録された認定機関(登録認定機関)が告示要求事項への適合性を認定している。

表 A2-1 各防災設備に要求される耐熱配線の種類

防災設備	要求動作時間	回路種別	防災配線耐熱性能
自動火災報知機	10 分	電源	FC
		操作	FB
誘導灯	20 分又は 60 分	電源	FC
		操作	FB
屋内消火栓	30 分	電源	FC
		操作	FB
連結送水管の加圧送水装置	120 分	電源	FC
		操作	FB
屋外消火栓	30 分	電源	FC
		操作	FA

A2.2 米国の規制

NEC では、火災等の非常時に一定時間動作することを要求される設備に対する配線に使用する非常回路用ケーブルには、UL2196 試験による 2 時間耐火クラスの耐火性能をもつものとして登録されたもの又は布設工法を使用する必要があるとしている。

火災報知システム用配線は布設場所によって異なる難燃性能が要求され、ケーブルは、要求される難燃性能をもつものとして登録されたものを使用する必要がある。露出配線に関する難燃区分は、通信用ケーブル等と同様である。非常用回路用ケーブルの識別記号は、CI(Circuit Integrity)となっており、例えば、火災報知器システム用ケーブルでプレナムクラスのケーブルの場合は、NFPLP-CI と言ったように、難燃クラスの記号の後にこの CI(Circuit Integrity)が付されている。

NEC においては、非常用回路の規定のいくつかを次に示す。

a) 非常用システム

非常用システムの電力供給回路用配線及び発電機制御用配線は、次のいずれかの方法により布設することとしている。

- 承認された自動消火システムに完全に保護されたスペースに布設

- 登録された、2 時間耐火クラス以上の電気回路保護システムを使用
- 登録された、2 時間耐火クラス以上の電気システム用耐熱バリアによって保護
- 非常用回路のみを含む登録された、2 時間耐火クラス以上の組み立て部品を使用
- 50mm 以上の深さでコンクリート中に埋設

b) 重要な操作電源システム(COPS: Critical Operation Power System)^{注)}

注) COPS: 公共の安全, 非常事態管理, 国家安全保障又は, ビジネスの継続性において継続的な動作を要求される設備又は設備の一部に電力を供給するシステム (Power systems for facilities or parts of facilities that require continuous operation for the reasons of public safety, emergency management, national security, or business continuity.)

COPS の電力供給回路用配線は, 次の通り布設することとしている。

- 登録された、2 時間耐火クラス以上の電気回路保護システムを使用
- 非常用回路のみを含む登録された、2 時間耐火クラス以上の組み立て部品を使用
- 50mm 以上の深さでコンクリート中に埋設
- 火災報知器, 安全保障信号システム及び緊急時情報用のケーブルは, UL1666 燃焼試験(ライザー試験)に合格するライザークラスのものであり且つ 2 時間耐火クラスの電気回路保護システムとして登録されていること。

A2.3 英国の規制

A2.3.1 The Approved Document B におけるケーブルの防火性能要求事項

この文書では, 火災時の機器作動用保護回路について, 最低でも BS EN50200^{A17)}の PH30 クラス(842°C, 30 分耐火), または同等の規格に適合したケーブルで構成する必要がある, この配線は, 火災の危険性がごく僅かな建物部分のみを通過するようルート選択し, 他の目的に供される回路から分離するべきであるとしている。また大規模又は複雑な建築では, 火災時により長時間動作する防火システムが必要であろうとしている。

なお, 防火システムのケーブル選択の詳細な指針は BS5839-1, BS5266-1, BS7346-6 に記載されている。としており, これらの規格におけるケーブルに対する要求事項は次のとおりとなっている。

- BS5839-1^{A18)}(火災検知・報知システム)では, 配線に使用するケーブルは, BS6387^{A19)}における Category CWZ クラス(950°C, 3 時間耐火)のケーブルを要求
- BS5266-1^{A20)}(非常灯)→BS6387 Category B クラス(750°C, 3 時間耐火)以上のケーブルを要求
- BS7346-6^{A21)}(煙・熱感知システム)→2 時間耐火ケーブルを要

A2.3.2 BS7671 におけるケーブルの耐火性に関する規制

重要な価値資産を持つ建物や部屋を含む場所

BS7671(IEC60364-4-42)では, 火災リスクが高い場所として重要な価値資産を持つ建物や部屋を含む場所を規定しており, このような場所として, 国定史跡, 美術館, 鉄道駅, 空港, 研究所, コンピュータセンター, 特定の商業的, 工業的に重要な産業施設, 貯蔵施設

などの建築を例示しており、このような場所に布設するケーブルに対する防火対策については下記対策が考えられるとしている。

- 無機絶縁ケーブル(MI ケーブル)の使用
- 火災状況に改善された耐火特性を持つケーブルの使用(IEC60364 では、ケーブル耐火性能評価試験方法として IEC60331-1 及び IEC60331-21 を引用している。)
- 非可燃性固体の壁、天井、床内にケーブルの使用
- 構造区画では 30 分間の耐火性能、または緊急避難に必要な住宅の階段では 90 分間の耐火性能を有するケーブルの使用

A2.4 欧州建築資材規制におけるケーブル製品の耐火性に係る区分

現状欧州各国では、非常灯、消火ポンプ、非常用エレベータ、各種警報器等の防災設備よりの配線として用いられるケーブルについては、IEC または各国独自の評価方法を用いてその耐火性能を評価・区分しているが、CPR の導入によりこういった防災設備用配線の耐火性能についても評価手法及び性能区分が標準化されることとなる。ケーブルの耐火性能区分については、他の建築資材の性能区分とともに(EU) No. 00/367/EC として欧州委員会より発行されており、この規定は、CEN によって欧州統一規格 EN13501-3^{A22)}として発行されており、ケーブル製品については、15 分、30 分、60 分、90 分及び 120 分の耐火性能区分が設けられている。

評価方法については、ケーブル外径 20mm 未満かつ導体サイズ 2.5mm² 以下のケーブルについては、EN 50200 に基づく試験により評価することとしているが、これ以外のケーブルについての評価方法は現在ドイツの DIN 4102-12^{A23)}をベースに開発が進められており、欧州統一規格発行が予定されていたが、従来各加盟国で用いていたケーブル耐火試験方法が様々なものであり、これらの試験方法に代え統一した試験方法を用いることに対して、少なからず抵抗があるようである。

A2.5 各国の規制の比較

回路の耐火性に関する各国規制の比較を表 A2-2 に示す。防災設備等の非常用回路については、米国は一律 2 時間の耐火性能を要求しているのに対して、国内及び欧州においては、使用場所に応じて耐火性能を選定している。しかしながら欧州では、最大 2 時間までの耐火ケーブルが用意されているが、国内の耐火ケーブルは、最大 30 分の耐火性能となっており、現状、欧米と比較して国内の耐火ケーブルの回路維持能力に対する要求は、低いものとなっている。また、欧米においては、火災時の回路保持能力をもつケーブル(耐火ケーブル)を防火設備だけでなく、火災リスクの高い建築物の配線に用いるよう要求しており、我が国においてもこのように耐火ケーブルの適用範囲を拡大することにより、火災による国家的リスクの低減が可能になるものとする。

表 A2-2 回路の耐火性に関する各国規制の比較

	日本	米国	欧州諸国 (国際規格)
設置基準	各消防局の予防事務 審査・検査基準	NFPA 70	IEC 60364-4-42をベース にした各国の基準
耐熱配線の種類	最大30分耐火 現在では, 1時間耐火 ケーブルが実用化さ れている.	1時間及び2時間 耐火(試験方法で は, 4時間までを 規定)	規定のない場合1時間 耐火 試験法では最大2時間 まで規定
耐火試験方法	消防庁告示	UL2196	IEC60331シリーズ
耐熱電線が必要とさ れる配線	非常用配線	非常用配線 重要施設の配線	非常用配線 重要施設の配線

付録 3 燃焼長推定におけるケーブル外径の依存性

A3.1 はじめに

第 4 章で論じた IEEE 1202 試験燃焼長の推定式は、単位面積当たりのケーブル燃焼長を相対的に比較するものである。そして第 4 章では、推定式を用いた推定結果が IEEE 1202 試験における実際の燃焼距離と相関することを確認した。しかしながら、実際の IEEE 1202 試験においては、試験を実施するケーブルの外径は、様々であることから、ケーブルの外径を考慮した場合、より良い相関が得られることが期待される。そこで、ケーブル外径を考慮した推定式を用い、相関性を再検証した。

A3.2 用いた推定式

外径を考慮した推定式は、次のとおりである。IEEE 1202 試験とコーンカロリメータ試験では、使用するケーブルの本数が異なることから、この推定式では、外径に加えケーブルの使用本数の違いを考慮した。なお、この式を用いた場合の CL は無次元となる。

$$CL = t_d^2 \times \dot{m}'' / \rho / t_i / D \times (n_{1202} / n_{cone}) \cdots \cdots (A3-1)$$

ここに

D : ケーブル外径(m)

n_{1202} : IEEE 1202 試験におけるケーブルの使用本数

n_{cone} : コーンカロリメータ試験におけるケーブルの使用本数

A3.3 推定結果

式(A3-1)を用いた推定結果に対して IEEE 1202 試験での各ケーブルの燃焼長をプロットしたものを図 A3-1 に示す。また、比較用として 4 章における式(4-3)における推定値に IEEE 1202 試験での各ケーブルの燃焼長をプロットしたものを図 A3-2 として再掲する。なお、これらの図においては、IEEE 1202 試験で全焼したケーブル No.2 及び No.3 のデータ及び 4 章において相関が取れなかったケーブル No.6 のデータは、含まれていない。

これらの図に示すとおり、ケーブル外径を考慮した、式(A3-1)を用いることにより、推定精度が僅かに向上していることが分かる。

A3.4 まとめ

4 章で提案した、推定式である式(4-3)に外径を考慮した推定式である式(A3-1)を用いてコーンカロリメータ試験で得られたデータから IEEE 1202 試験における燃焼長推定精度を検証したところ、僅かに推定精度の向上が見られた。式(4-3)を用いた場合においても良好な推定結果が得られているが、今後の検証において、外径を考慮する場合及びしない場合の影響を詳細に検討してゆきたい。

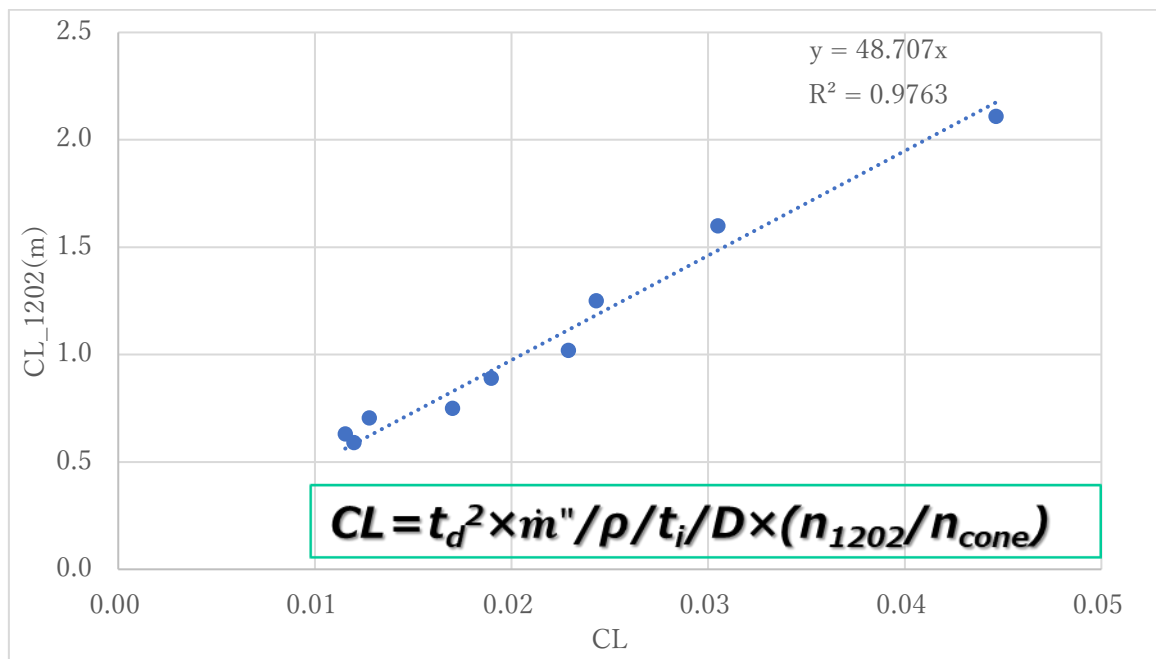


図 A3-1 式(A3-1)を用いた場合のプロット(ケーブル No.2,3,6 を除く)

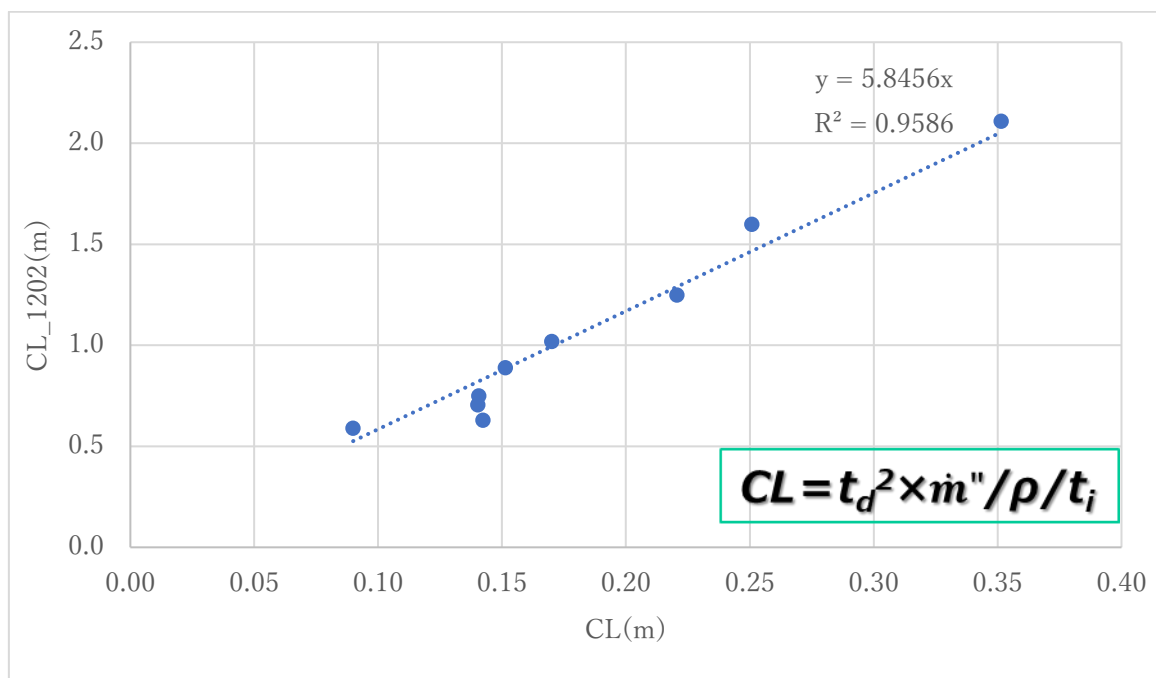


図 A3-2 式(4-3)を用いた場合のプロット(ケーブル No.2,3,6 を除く)

謝辞

本論文をまとめるにあたり、火災安全の専門家の視点からの数多くの適格なアドバイス、論文のあるべき姿、執筆にあたっての心構えなど終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を頂きました豊橋技術科学大学 教授 中村祐二先生に心より感謝申し上げます。

学位論文審査において、貴重なご指導とご助言を頂きました豊橋技術科学大学 教授 柳田秀記先生、同教授 土井謙太郎先生、東京理科大学 教授 松山賢先生に心より感謝申し上げます。

IEC の国際会議等を通じて、火災危険性評価試験に関して多くの知見をご教授頂き、また海外の研究者の方々との接点を作って頂きました横浜国立大学客員教授 吉田公一先生に心より感謝申し上げます。

在職しつつ博士後期課程進学の道筋を示して頂き、支援頂きました、一般社団法人電線総合技術センター 元専務理事長谷部新一様、同現専務理事 近藤裕之様、同元センター長 田辺信夫様、同元センター長 大西正哉様、現センター長 小田勇一朗様に深く感謝申し上げます。また本研究の実験、データ解析にご協力頂きました、同副主席研究員 堀畑豊和君をはじめ、在職中の研究活動にご理解を頂き、サポート頂きました電線総合技術センター職員の方々に深く感謝いたします。

最後に、博士後期課程への進学に理解を示し、心から支援して頂きました父、今は亡き母及び妻美佐子に心から感謝いたします。