

# 大火源下における鉄道車両用材料の燃焼性の検討

山中 翔\* 豊原 匡志\* 伊藤 幹彌\*

Combustion Performance of Materials for Railway Rolling Stock under Large Radiation

Sho YAMANAKA Tadashi TOYOHARA Mikiya ITO

In Japan, based on the results of combustion examinations, the division of combustibility of the materials of the railway rolling stock is prescribed according to the environment in which they are used, which contributes to ensuring the safety from fire. However, in recent years, fire accidents severer than the assumptions on which conventional combustion examinations are based have occurred. Therefore, such combustion examinations do not sufficiently cope with the situation because they are based on low radiation and qualitative. Therefore, the quantitative grasp of combustive characteristics under large radiation is necessary because the combustion examinations conducted in Japan is based on low radiation and qualitative compared with those conducted in foreign countries. Therefore, assuming large radiation, corn calorimeter combustion examinations were carried out for railway carriages used in Japan.

キーワード：列車火災，燃焼試験，国際規格，鉄道車両用材料，コーンカロリメータ燃焼試験

## 1. はじめに

日本の鉄道車両材料は「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」および同省令等の解釈基準により安全基準が規定され、燃焼性に関する基準も同省令等で定められている<sup>1)</sup>。燃焼性の試験法としてタバコの火等の小火源を想定したアルコールランプによる燃焼試験（以下、アルコール燃焼試験）が規定されている。同試験の結果から燃焼しやすい順に可燃性、難燃性、極難燃性、不燃性と区分され、難燃性に満たない可燃性の材料は鉄道車両材料としては使用できない<sup>1)</sup>。一方、難燃性の材料は座席、床敷物などに、不燃性の材料は壁面、天井用部材などに適用される<sup>2)</sup>。

しかし、従来から実施されるアルコール燃焼試験は負荷する熱量が低く、評価項目によっては定性的な面がある。こうした背景から、大火源を想定した条件下での鉄道車両材料の定量的な燃焼特性の把握が課題であった<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、大火源を想定した試験としてコーンカロリメータ燃焼試験（以下、CCM 試験）を選定し、国内で使用実績のある鉄道車両用材料を試験品として、CCM 試験を実施し、大火源を想定した条件下での鉄道車両材料の定量的な燃焼特性について検討した。また、CCM 試験は試験品に負荷する放射熱量を変化させた複数の条件で実施し、燃焼性の予測や燃焼区分の定量的分類についても検討した。

## 2. 大火源下における鉄道車両用材料の燃焼性

### 2.1 CCM 試験の特徴

CCM 試験は円錐型ヒーターで放射熱を加えて、試験体を燃焼させ、燃焼時の熱発生量や煙の生成量などを定量的に評価できる試験である（図1）。ISO5660にも規定され、海外の鉄道車両材料燃焼試験において主要な評価項目の一つとして実施されている。また、2003年に発生したテグ市営地下鉄放火事件（韓国）を受けて、2004年に解釈基準が改正された国内省令においても、地下鉄・新幹線等旅客車の天井材に対して大火源を想定したCCM試験が導入されている<sup>1)</sup>。

CCM試験の特徴として以下の項目が挙げられる。

- ・ヒーター出力の変更により、試験品に負荷する放射熱量を調整可能であること。
- ・燃焼時に試験品が放出する発熱量や煙量、一部発生ガスの同時測定が可能であること。
- ・ロードセルにより燃焼に伴う試験品の質量の変化を測定することが可能であること。

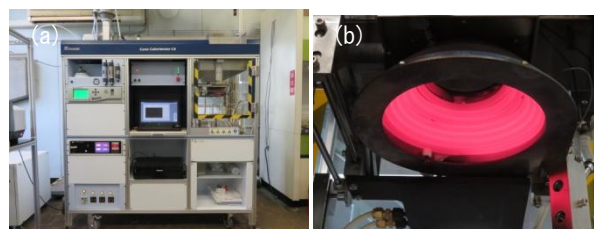


図1 CCM試験（a：装置全体，b：材料燃焼部）

\* 材料技術研究部 防振材料研究室

特集：材料技術

・ 定量的な試験結果が得られ、試験実施者等による結果のばらつきが少ないと考えられること。

このような特徴を有するため、本検討では CCM 試験によって、大火源下における燃焼性を検討した。

2.2 試験品

日本国内の鉄道車両用材料は先に述べた通り、座席、床敷物などは難燃性材料、壁面、天井用部材などは不燃性材料と使用部位によって必要とされる燃焼性能が異なっている。そのため、試験品は現行の鉄道車両に一般的に使用されている材料から選定した。内訳は表 1 に示すように、難燃性材料としては塩化ビニル系床敷物（以下、塩ビ系床敷物）・ゴム系床敷物・カーペット系材料・座席モケットの 4 種類、不燃性材料としては化粧板・アルミ樹脂積層板・アルミ発泡樹脂積層板の 3 種類である。このうち、化粧板とアルミ樹脂積層板は 2004 年の解釈基準改正に基づき、地下鉄・新幹線等旅客車の天井材として使用できる性能を有している。また、アルミ樹脂積層板とアルミ発泡樹脂積層板の差異は、アルミ板同士に積層した樹脂の違いであり、アルミ樹脂積層板は発泡させてない固形の樹脂（以下、固形樹脂）を、アルミ発泡樹脂積層板は発泡させた樹脂を積層したものである。

表 1 試験品一覧

区分	試験品名	使用箇所	厚さ (mm)	質量 (g)	構成 (燃焼面より)
難燃性	塩ビ系床敷物	床材	2.5	31	塩ビ樹脂 ガラス繊維布地
	ゴム系床敷物		2.0	47	難燃性ゴム単板
	カーペット		6.0	48	ポリエステル ゴム裏地
	座席モケット	腰掛	3.0	6.0	ポリエステル
不燃性	化粧板	壁材	1.9	33	印刷シール アルミ板
	アルミ樹脂積層板	天井	3.0	58	塗装アルミ板 固形樹脂 アルミ板
	アルミ発泡樹脂積層板	壁材	7.9	55	印刷シール アルミ板 発泡樹脂 アルミ板

2.3 試験方法

試験体の大きさは縦 100mm × 横 100mm とし、厚さは表 1 に示した通りである。この試験体をステンレス製ホルダーに固定し、図 2 のように円錐型ヒーター直下 25mm の位置に設置する。試験開始とともにヒーターの熱を遮断するセパレーターが移動し、試験体の加熱が始まる。

同時に試験体上方 10mm の位置で電気火花を発生させ、加熱により生じる可燃ガスに引火させる。試験時間は加熱開始後 10 分としたが、10 分を超えて燃焼したものは、試験品の消火まで試験を継続した。

試験品に負荷する輻射熱量の条件は、地下鉄等旅客車、新幹線車両の天井材の試験時と同様の 50kW/m<sup>2</sup> に加えて、さらなる大火源を想定した 70kW/m<sup>2</sup> の他、燃焼特性との相関を評価するため、15, 35kW/m<sup>2</sup> でも試験を実施した。

難燃性材料に対する CCM 試験は省令では求められていないため、50kW/m<sup>2</sup> の輻射熱量は難燃性材料に対しては、非常に大きな火源であるほか、不燃性材料に対しては 70kW/m<sup>2</sup> は実施されることのない大火源条件である。

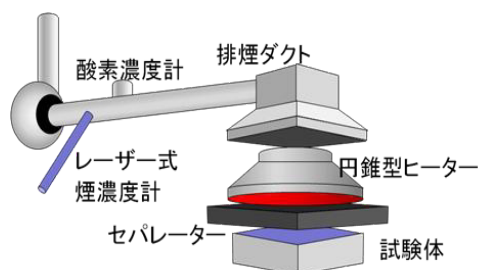


図 2 CCM 試験概要<sup>2)</sup>

2.4 評価項目

2.4.1 燃焼成分比

燃焼した成分の割合を把握するために、燃焼成分比を測定した。燃焼成分比は、燃焼前の試験品の重さを m<sub>0</sub>、燃焼後の重さを m とし (m<sub>0</sub>-m)/ m<sub>0</sub> で表した。

2.4.2 発熱速度

CCM 試験では、発熱速度を「酸素消費法」により求めている<sup>3)</sup>。これは、燃焼により生ずる発熱量は、燃焼する物質の重量当たりで考えると物質毎に大きく異なるが、燃焼により消費される酸素量を基準とすると、物質の種類に依存せず、酸素 1kg 当たり 13.1MJ とほぼ一定値を示すことを利用したものである<sup>4)</sup>。

評価項目は図 3(a) に示す測定結果から着火時間、最大発熱速度（以下、HRR<sub>max</sub>）、総発熱量（以下、THR）とし、3 回実施した結果の平均値を測定結果とした。また、試験品から炎が確認されて 10 秒以上炎が継続した場合を着火と判定し、評価時間は地下鉄等旅客車、新幹線車両の天井材に使用される不燃性材料の耐燃焼性評価試験に準拠して、試験開始後 10 分間とした。なお、10

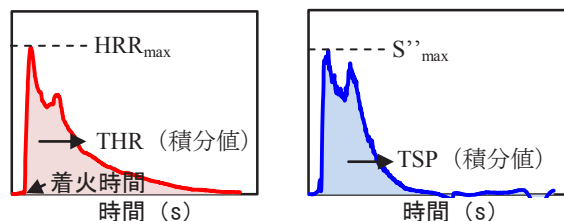


図 3 CCM 試験の試験結果のイメージ

分を超えて燃焼したものは、試験開始後 10 分までの測定結果により、その燃焼特性を評価した。

2.4.3 煙生成速度

本測定は前項の発熱速度と同時測定が可能である。これは試験品の燃焼に伴う煙（微粒子）が排気ダクト内を通過する際に生じるレーザー光の透過度変化から煙の発生量を評価するものである。測定項目は図 3(b) に示したように、最大煙生成速度 ( $S''_{max}$ )、総発煙量 (TSP) とし 3 回実施した平均値を測定結果とした。試験における評価時間の扱いは発熱速度と同様とした。

2.5 大火源下を想定した燃焼試験結果

2.5.1 難燃性材料の燃焼特性

表 2 に各難燃性材料の燃焼前後の外観写真を、表 3 に燃焼成分比, 着火時間 (秒),  $HRR_{max}$  ( $kW/m^2$ ), THR (MJ),  $S''_{max}$  ( $m^2/m^2 \cdot s$ ), TSP ( $m^2/m^2$ ) の結果を示す。また、図 4 から図 7 に各試験結果を示す。

表 2 難燃性材料の燃焼前後の外観

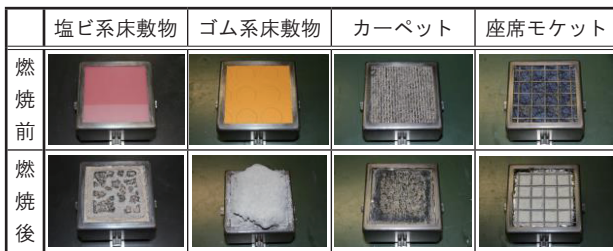


表 3 難燃性材料の燃焼性

輻射熱量	燃焼成分比	着火時間	$HRR_{max}$	THR	$S''_{max}$	TSP
$kW/m^2$	—	s	$kW/m^2$	MJ	$m^2/m^2 \cdot s$	$m^2/m^2$
塩ビ系床敷物						
50	0.85	17	322	39	41	3925
70	0.91	11	429	45	51	3116
ゴム系床敷物						
50	0.48	37	330	48	4.9	1594
70	0.51	26	405	49	5.9	1784
カーペット						
50	0.42	26	471	53	15	1319
70	0.50	14	525	55	21	1557
座席モケット						
50	0.99	22	295	7.3	17	251
70	0.99	13	314	6.9	24	261

発熱速度に関して、輻射熱量  $50kW/m^2$  の条件は、アルコール燃焼試験よりも大火源である。このため、各試験品の結果から着火時間の短縮が確認された。これは、輻射熱量が大きくなることで試験品から可燃ガスがより早期に発生し、燃焼範囲の濃度に達したためと思われる。

輻射熱量  $70kW/m^2$  では、 $50kW/m^2$  と比較して、着火時間のさらなる短縮と  $HRR_{max}$  の増加が確認された。

$HRR_{max}$  の増加は、輻射熱量が大きくなることで、試験品から発生する可燃ガスの発生速度が大きくなり、燃焼拡大が急激に発生するためと考えられる。また、塩ビ系床敷物は、輻射熱量が高くなることで THR の増加が確認された。これは、輻射熱量が高くなることで発生する燃焼成分比が増加したためと考えられる。

煙生成速度に関して、輻射熱量  $70kW/m^2$  では、

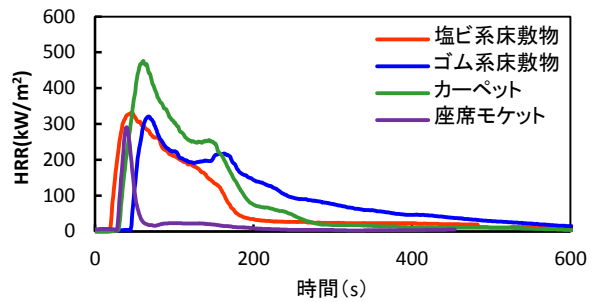


図 4 難燃性材料の CCM 試験結果 (発熱速度・輻射熱量  $50kW/m^2$ )

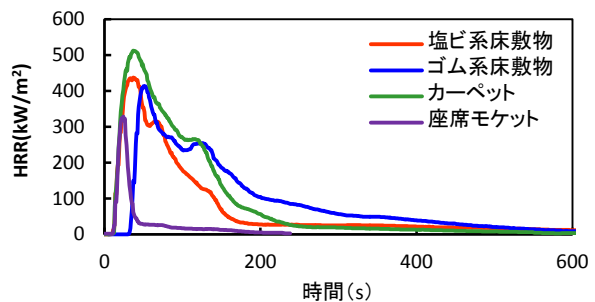


図 5 難燃性材料の CCM 試験結果 (発熱速度・輻射熱量  $70kW/m^2$ )

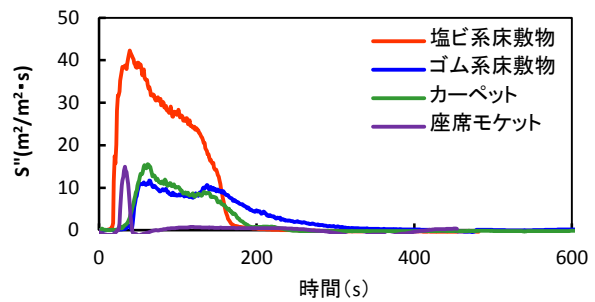


図 6 難燃性材料の CCM 試験結果 (煙生成速度・輻射熱量  $50kW/m^2$ )

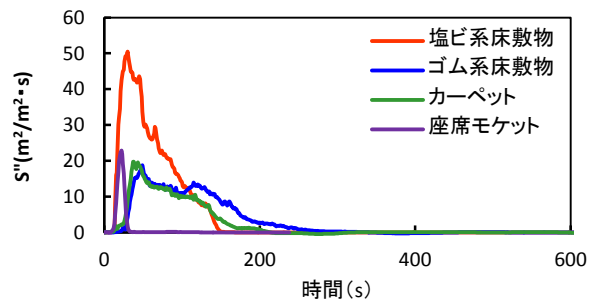


図 7 難燃性材料の CCM 試験結果 (煙生成速度・輻射熱量  $70kW/m^2$ )

特集：材料技術

50kW/m<sup>2</sup>と比較して、全ての試験品で、放射熱量の増加に伴う S''<sub>max</sub> の増加が確認された。これは、放射熱量の増加に伴って、急速な熱分解が進み、燃焼初期に不完全燃焼の割合が増加した結果と考えられる。一方、TSP は放射熱量 70kW/m<sup>2</sup> では、50kW/m<sup>2</sup> と比較して、塩ビ系床敷物以外は僅かな増加が見られたものの、塩ビ系床敷物では放射熱量の増加に伴い、TSP は減少した。これは、燃焼初期の急速な熱分解により S''<sub>max</sub> の増加が見られる一方で、急速な熱分解により燃焼ガスの発生時間が短縮される傾向が見られ、TSP としては減少する結果となったと考えられる。

2.5.2 不燃性材料の燃焼特性

表4に各不燃性材料の燃焼前後の外観写真を、表5に燃焼成分比、着火時間(秒)、HRR<sub>max</sub>(kW/m<sup>2</sup>)、THR(MJ)、S''<sub>max</sub>(m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>・s)、TSP(m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)を示す。また、図8から図11に各試験結果を示す。

表4 不燃性材料の燃焼前後の外観

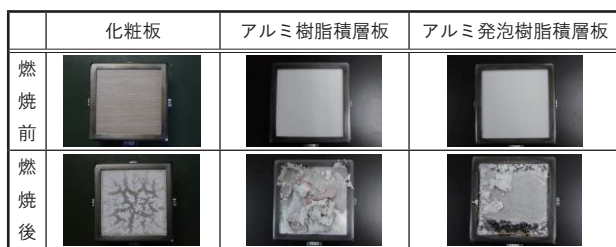


表5 不燃性材料の燃焼性

放射熱量	燃焼成分比	着火時間	HRR <sub>max</sub>	THR	S'' <sub>max</sub>	TSP
kW/m <sup>2</sup>	—	s	kW/m <sup>2</sup>	MJ	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ・s	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
化粧板						
50	0.08	28	103	4.6	24	386
70	0.08	16	129	4.9	29	200
アルミ樹脂積層板						
50	0.19	480	279	18	6.1	1611
70	0.17	320	213	30	3.4	915
アルミ発泡樹脂積層板						
50	0.22	35	274	26	12	784
70	0.24	21	384	29	13	588

表6 鉄道車両用材料の耐燃焼性評価基準

THR (MJ/m <sup>2</sup> )	着火時間 (秒)	HRR <sub>max</sub> (kW/m <sup>2</sup> )
8 以下	—	300 以下
8 を超え 30 以下	60 以上	

不燃性材料はアルコールランプ燃焼試験では着火・着火炎が確認されないとされる材料<sup>2)</sup>であるが、放射熱量 50kW/m<sup>2</sup> の CCM 試験においては、着火・着火炎が確認された。一方、CCM 試験は耐燃焼性評価に適用される試験であり<sup>2)</sup>、化粧板とアルミ樹脂積層板は、本検討においても表6の耐燃焼性評価基準を満たした。また、アルミ発泡樹脂積層板はアルミ樹脂積層板と同様の構造を

しているにもかかわらず、着火時間は大幅に短かった。これは、発泡樹脂は熱で溶融した際の体積収縮が大きいから、アルミ板を保持できず、アルミ板が早期に変形して、内部の樹脂層への着火に発展したためと考えられる。

また、化粧板とアルミ発泡樹脂積層板では、燃焼成分比に変化がほとんどないことから、放射熱量の増加に伴う THR の変化は小さかった。一方、放射熱量の増加に

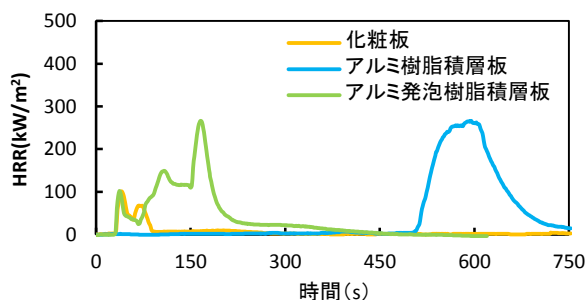


図8 不燃性材料の CCM 試験結果 (発熱速度・放射熱量 50kW/m<sup>2</sup>)

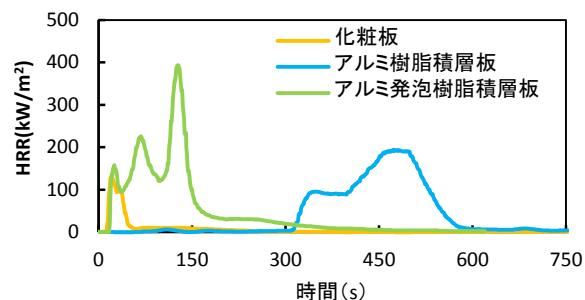


図9 不燃性材料の CCM 試験結果 (発熱速度・放射熱量 70kW/m<sup>2</sup>)

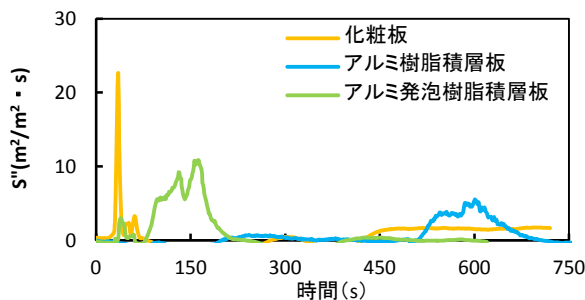


図10 不燃性材料の CCM 試験結果 (煙生成速度・放射熱量 50kW/m<sup>2</sup>)

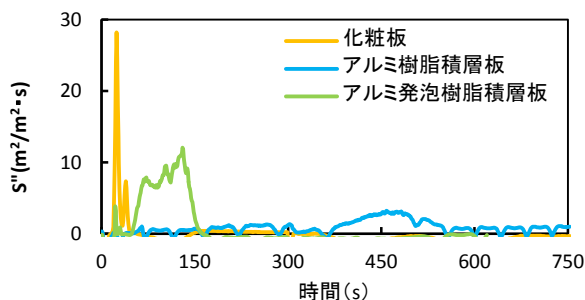


図11 不燃性材料の CCM 試験結果 (煙生成速度・放射熱量 70kW/m<sup>2</sup>)

より  $HRR_{max}$  は増加した。これは、放射熱量が大きくなることで、試験品から発生する可燃ガスの発生速度が大きくなり、燃焼拡大が急激に発生するためと考えられる。一方、表 5 に示す通り、アルミ樹脂積層板では燃焼成分比にほとんど変化がないにもかかわらず、THR は増加し、 $HRR_{max}$  は減少した。これは THR に関して、放射熱量  $50kW/m^2$  では着火時間が遅く、評価対象外の 10 分を超えて燃焼したためである。また、 $HRR_{max}$  が減少した理由は、放射熱量  $50kW/m^2$  ではアルミ板が変形して亀裂が発生し着火するまでに時間を要したことから、樹脂が完全に溶解してから激しく燃焼したが、 $70kW/m^2$  では着火が早かったことから、樹脂が十分に溶解していない状態で燃焼が始まったためであると推測される。

$S''_{max}$  は、化粧板とアルミ発泡樹脂積層板では放射熱量が増大したことに伴う顕著な変化はなかった。これは、難燃性材料よりも燃焼成分比が小さく、不完全燃焼が生じにくかったためと考えられる。一方、アルミ樹脂積層板では放射熱量の増加に伴う  $S''_{max}$  の減少が確認された。これは、放射熱量  $50kW/m^2$  で先述の通り、完全に溶解した樹脂が激しく燃焼したため、放射熱量  $70kW/m^2$  下と比較して燃焼初期に不完全燃焼の割合が増加した結果と考えられる。また、全ての試験品で TSP は減少した。これも、試験品の可燃成分比が小さいため、試験品が急激に熱分解して、一定程度燃焼した後は不完全燃焼の割合が低下したためと考えられる。

### 3. 放射熱量と燃焼特性との相関評価

#### 3.1 評価方法

放射熱量と燃焼特性との関係把握を目的として CCM 試験の条件を変化させて試験を実施した。試験品に負荷する放射熱量は  $10, 35, 50, 70kW/m^2$  の 4 水準とし、 $HRR_{max}$  を対象として評価した。試験品は表 1 と同様のものとした。

#### 3.2 評価結果

図 12 に難燃性材料における放射熱量と  $HRR_{max}$  との関係を示す。放射熱量  $10kW/m^2$  下では塩ビ系床敷物では着火の有無にバラつきが見られた。一方、塩ビ系床敷物以外の難燃性材料では一部の試験片に着火が確認されたものの、10 秒以内に消火したため、着火なしとした。また、放射熱量  $35kW/m^2$  下では全ての試験品に着火した。

座席モケット以外は、放射熱量  $70kW/m^2$  まで  $HRR_{max}$  は単調に増加することから、これらの試験品の  $HRR_{max}$  と負荷する放射熱量との間には一定の相関があることが確認された。一方、座席モケットは早期に燃焼が収束するため放射熱量が  $35kW/m^2$  以上で  $HRR_{max}$  がほぼ一定となることが確認された。

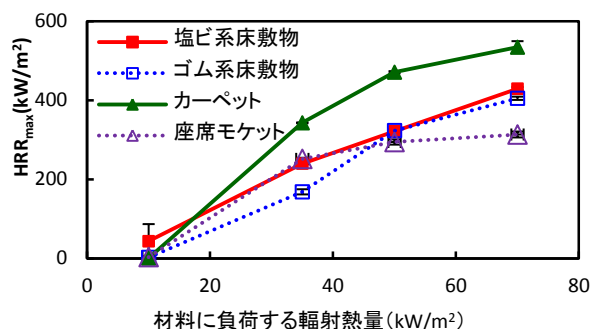


図 12 放射熱量と燃焼特性との関係性 (難燃性材料・ $HRR_{max}$ )

図 13 に不燃性材料における放射熱量と  $HRR_{max}$  との関係を示す。放射熱量  $10kW/m^2$  下では全ての試験品において着火は確認されなかった。一方、放射熱量  $35kW/m^2$  下では、化粧板とアルミ発泡樹脂積層板は着火したが、アルミ樹脂積層板では着火しなかった。これは化粧板とアルミ発泡樹脂積層板の表面にある印刷シールが非常に薄く燃焼しやすいためである。一方、同様の構造を持つアルミ樹脂積層板は表面が塗膜のため、着火は確認されなかった。また、アルミ発泡樹脂積層板は表面だけでなく、内部の樹脂層にも着火したため、化粧板よりも大きい値を示した。これは、印刷シールに着火したことによりアルミ板の変形が促進され、内部の樹脂層に着火しやすくなったためと考えられる。

化粧板とアルミ発泡樹脂積層板の 2 種類の  $HRR_{max}$  は放射熱量の増加に伴い、単調に増加することから、これらの試験品と負荷する放射熱量との間には一定の相関があることが確認され、異なる放射熱量での燃焼においても、その挙動が予測できる可能性が見出せた。

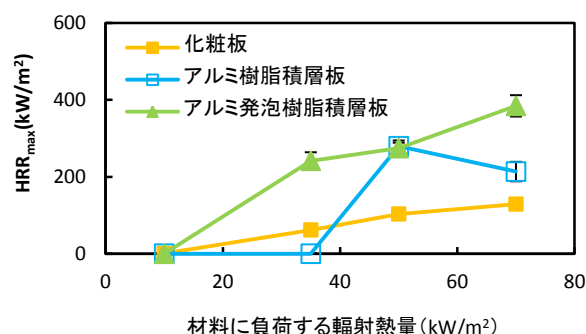


図 13 放射熱量と燃焼特性との関係性 (不燃性材料・ $HRR_{max}$ )

### 4. 燃焼区分の定量的な評価に向けた検討

燃焼区分の定量的な評価を目的として、国内の鉄道車両で使用実績のある代表的な車両内装材料に対して、放射熱量  $50kW/m^2$  における CCM 試験を実施した。試験品は表 1 の試験品を含めた 15 種類の不燃性材料、12 種

特集：材料技術

類の難燃性材料とともに鉄道車両では使用されないポリプロピレン板を可燃性材料として選定した。得られた結果を元に燃焼区分の分類を検討した。アルコール燃焼試験では試験品の燃焼状態を判定基準として用いているため、評価指標は式(1)で表わされる平均発熱速度 (ARHE) の最大値である最大平均発熱速度 (MARHE) とした。ARHE は図 14 に示すように、試験開始からの時間  $t$  までの総発熱量の時間平均であり、MARHE は、海外の鉄道車両燃焼性試験において燃焼区分の定量評価指標として前例があり、燃焼性能を総合的に判断できるという特徴を有するため評価指標として選定した<sup>5)</sup>。また、表 6 に示した通り、不燃性材料の耐燃焼性評価項目に着火時間が設定されていることから組み合わせて評価を行った。

$$ARHE(t_n) = \frac{\sum_{m=2}^n (t_m - t_{m-1}) \times \frac{q_m + q_{m-1}}{2}}{t_n - t_1} \quad (1)$$

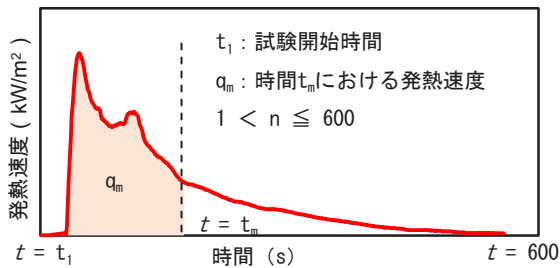


図 14 ARHE の概要

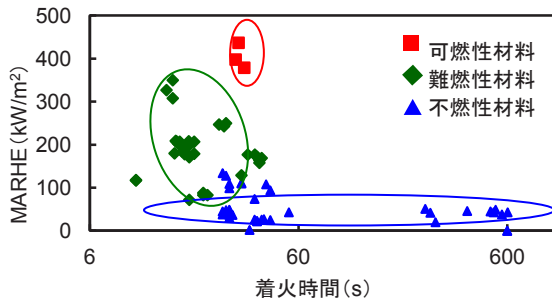


図 15 燃焼区分と平均最大発熱速度

図 15 に着火時間と MARHE との関係を示す。

この分布で整理すると、車両用材料は燃焼区分ごとに一定の分布に集まることが明らかとなり、従来の燃焼試験よりも大きな火源下においても、燃焼区分に一定の関係性が存在することが示唆された。一部の不燃性材料が難燃性材料と近い領域にあるが、これらは負荷する輻射熱量を変化させることで差異を明確化できる可能性が考えられる。

5. まとめ

従来の燃焼試験よりも大きな火源下における燃焼特性を定量的に評価することを目的として、国内で使用実績のある鉄道車両用材料に対して CCM 試験を実施した。試験は様々な条件を用い、また、評価項目も変化させて輻射熱量と燃焼特性との相関や鉄道車両用材料の国内省令による燃焼区分の定量的な分類についても検討した。以下得られた知見を述べる。

- (1) 難燃性材料では、輻射熱量の増大によって着火時間の短縮と熱発生量の増大が確認された。これは材料表面温度の上昇により、材料の熱分解が促進され、可燃ガスがより早期に発生したためと考えられる。また、床敷物を中心として不完全燃焼が生じやすい材料では、高い輻射熱量下では煙生成速度が増大することが確認された。
- (2) 不燃性材料では、測定された着火時間は難燃性材料よりも長かったものの、輻射熱量の大きい条件下では、大幅に短縮する試験品が確認され、熱発生量の増大が確認された。一方、可燃成分比が小さいため、輻射熱量の増加に伴う THR や  $S''_{max}$  の変化は小さかった。また、積層構造を有する材料はアルミ板の変形時期により燃焼特性が大きく変わりうる事が確認された。
- (3) 輻射熱量と燃焼特性の相関を評価した結果、一部の試験品を除いて  $HRR_{max}$  が単調に増加することから、これらの試験品の  $HRR_{max}$  と負荷する輻射熱量との間には一定の相関があることが確認された。
- (4) MARHE と着火時間との間には、車両用材料の燃焼区分ごとに一定の関係性が存在することが確認された。このことから、従来の燃焼試験よりも大きな火源下においても、燃焼区分を分類できる可能性が示唆された。

文献

- 1) 国土交通省「鉄道に関する技術上の基準を定める省令等の解釈基準」第 8 章第 5 節第 83 条
- 2) 伊藤幹彌：複合材料学会誌, vol. 34, pp 153-161, 2008
- 3) Babrauskas, V.: NBSIR No. 82-2611, US National Bureau of Standards, 1982.
- 4) Huggett, C. : Fire and Materials, No.4, 61-65, 1980.
- 5) EN45545-2 : Railway applications - Fire protection on railway vehicles, 2013.