

イントメッセント系難燃剤を用いた 鉄道車両用腰掛材料の難燃性向上

豊原 匡志* 山中 翔* 伊藤 幹彌**

Improvement of Flame Retardancy of Seat Cushion Materials for Railway Vehicles Using Intumescent Flame Retardant

Tadashi TOYOHARA Sho YAMANAKA Mikiya ITO

In order to further improve the flame retardancy of seat materials in railway vehicle, the authors investigated to apply new flame-retardant to it. During the selection stage of flame retardants, their attention was focused on intumescent flame-retardants. The intumescent flame-retardant expands and produces char foam during burning state, and the produced char foam plays a role of protect shield against rapid flame spread. Various test pieces using the flame-retardants were prepared to confirm their characteristics. As a result of the cone calorimeter fire tests, it was found that insertion of a resin containing intumescent flame-retardants into the existing seat cushions can improve the flame retardancy.

キーワード：列車火災，燃焼試験，車両用材料，コーンカロリメータ燃焼試験，イントメッセント系難燃剤

1. はじめに

日本の鉄道車両は、「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¹⁾。燃焼性を評価する試験法としては、タバコの火などの小火源を想定したアルコールランプによる鉄道車両用材料燃焼性試験（以下、車材燃試）が規定され、試験結果から、不燃性、極難燃性、難燃性、緩燃性、可燃性と燃焼区分が決定される。そのうえで、壁面、天井用部材等是不燃性、腰掛表地や床材は難燃性というように、使用部位により適用される燃焼区分が規定されている。車材燃試はこれまで、鉄道車両の火災に対する安全確保に貢献してきた。

しかし、近年では、ガソリン等に基づいた従来の想定を超える大きな熱量を有する火源（以下、大火源）が材料に負荷される事例が発生している。こうした動向に対し、鉄道総研では、国内で使用実績のある鉄道車両用材料に対して、大火源下を想定したコーンカロリメータ燃焼試験（以下、CCM試験）²⁾、実物大の特急車両用腰掛の燃焼試験³⁾などの各種評価を行ってきた。その結果、鉄道車両に使用される材料のうち腰掛材料が激しく燃焼していることを確認した³⁾。また、腰掛に使用されるクッションなどの高分子系の腰掛材料は1脚あたり約6kg⁴⁾使用されており、比較的質量が大きいことから、燃焼時の寄与も大きいと考えられる。

そこで、本研究では、鉄道車両用の腰掛材料の更なる難燃性の向上のため、近年開発されてきた、従来の難燃剤よりも難燃性が高い、イントメッセント系難燃剤⁵⁾（以下、IFR系難燃剤）の適用を検討した。本検討では、まず、IFR系難燃剤を配合した樹脂（以下、IFR配合樹脂）の燃焼特性をCCM試験によって確認した。次に、腰掛材料へのIFR配合樹脂の適用方法として、IFR配合樹脂を腰掛材料に挿入した際の燃焼挙動を把握した。

2. 試験条件および試験内容

2.1 CCM試験の概要

CCM試験は大火源を想定した燃焼試験であり、ISO5660-1に規定された試験方法である。試験の特徴として、円錐形ヒータで輻射熱を加えて試験体を燃焼させ



図1 CCM試験装置の外観

* 材料技術研究部 防振材料研究室

** 事業推進部 事業企画課

実際の燃焼時の熱発生量や煙の生成量等を定量的に評価できるものである（図1）。CCM試験は、国内の建築材料や海外の鉄道車両等でも評価試験の一つとして実施されている。また、2003年に韓国で発生したテグ市地下鉄放火事件を受けて、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CCM試験が導入されている。

2.2 試験片

CCM試験の試験片寸法は、縦100mm×横100mmで、厚さは50mm以下の実厚を用いることが規定されている⁶⁾。そこで、試験片寸法はこの値とした。

2.2.1 樹脂の試験片

各種難燃剤による燃焼特性の比較のため、IFR配合樹脂の試験片を作製するとともに、従来の汎用的な難燃剤であるマグネシウム系難燃剤（以下、Mg系難燃剤）および臭素系難燃剤（以下、Br系難燃剤）を配合した樹脂でも試験片を作製した。配合する基材となる樹脂はポリプロピレンを用いた。また、比較のために難燃剤を配合しない試験片（以下、0%）も作製した。

Mg系難燃剤は、難燃剤由来の有毒ガスが発生しないが、難燃剤を多量に添加する必要があるため樹脂としての物性低下や比重が増加する。Br系難燃剤は、発熱を抑制できるが、燃焼時に煙や有毒ガスが多量に発生する。一方、IFR系難燃剤は、樹脂の燃焼時に難燃剤が発泡することで、断熱効果およびガスの拡散防止により、燃焼を抑制する特徴がある⁵⁾。

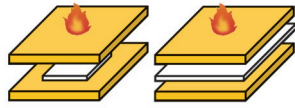
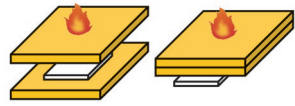

各種難燃剤を配合した樹脂の試験片は厚さ2mmの板状とした。試験片における難燃剤の配合は、Mg系難燃剤が60%（以下、Mg60%）、Br系難燃剤が20%（以下、Br20%）、IFRが8~60%（以下、IFR8%~60%）とした。なお、IFR30%、IFR40%およびIFR60%は、別途、車材燃試を実施し、難燃性判定であることを確認している。

2.2.2 樹脂と腰掛材料を組み合わせた試験片

IFR配合樹脂の腰掛材料への適用に向け、腰掛のクッション材料として使用される詰め物を対象に、前述した樹脂と詰め物を組み合わせた試験片を作製し、燃焼特性を評価した。作製した試験片条件の概要を表1に示し、試験片の外観のイメージを図2に示す。

表1に示すように、条件A~Cの3条件で樹脂に詰め物を挿入した。試験に用いた詰め物は、汎用的に使用されている製品であり、車材燃試で難燃性を取得済みのウレタン系クッション材である。製品としての詰め物の厚さは10mmであり、実際の車両の腰掛では、本製品を複数枚積層して使用する。積層した詰め物の厚さは車種ごとに異なるが、数十mm程度である。今回の試験では、前述したように、CCM試験の試験片厚さが規格において50mm以下と規定されているため、表1に示すよう

表1 試験片条件の概要

条件A		樹脂の大きさによる違いを評価
条件B		樹脂の挿入位置による違いを評価
条件C		難燃剤の種類・配合量による違いを評価

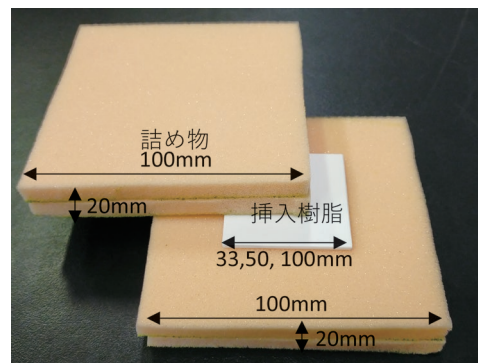


図2 試験片のイメージ

に、厚さ2mmの樹脂を挿入した場合でも全体の厚さを50mm以下とする必要がある。このため、CCM試験では、詰め物を4枚積層させて厚さ40mmの試験片とした。以下、試験条件の詳細を記述する。

・条件A（樹脂の大きさ）

条件Aに挿入する樹脂は、前項で示す樹脂のうち、車材燃試などの結果から、最も難燃性が高いと想定されるIFR60%とした。挿入するIFR60%の寸法について、厚さは2mmとし、大きさは100mm角に加え、50mm角、33mm角でも実施した。異なる大きさで試験を実施した理由として、CCM試験では100mm角で同じように設計することとされているが、同材料を実際に詰め物に適用する際には全面への配置だけでなく、一部場所への重点的な配置も考えている。そのため、挿入量による影響も評価した。

・条件B（樹脂の挿入位置）

条件Bでは、樹脂の挿入位置による影響を評価するため、厚さ40mmの詰め物の中間（厚さ20mm部分）に挿入する条件と底面に挿入する場合の2条件で燃焼挙動を比較した。挿入する樹脂は、IFR60%とし、樹脂の大きさは100mm角と50mm角とした。

・条件C（樹脂の難燃剤の種類・配合）

条件Cでは、2.2.1項で述べた樹脂に配合する難燃剤の種類および配合量による影響を評価した。

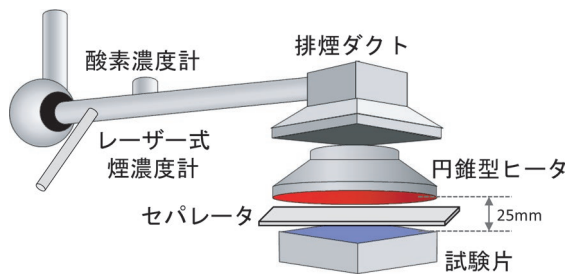


図3 CCM試験概要

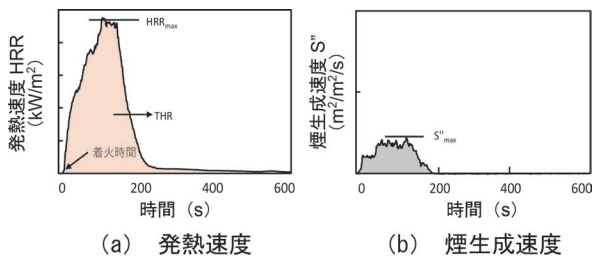


図4 CCM試験の試験結果のイメージ

(本図は説明用のため各グラフ縦軸の数値は省略した)

2.3 試験方法

CCM試験では、前述した試験片をステンレスホルダーに固定し、図3に示すように、円錐型ヒーター直下25mmの位置に設置した。試験開始とともに、ヒーターと試験片の間に設置されたヒーターの熱を遮断するセパレータが移動し、試験片への加熱が始まる。

同時に、試験片上方10mmの位置で電気火花を発生させ、加熱によって試験片から生じる可燃ガスに引火させた。試験時間は加熱開始後10分以上とし、試験片の消火まで試験を継続した。試験は3回以上実施し、その結果の平均値を測定結果とした。

試験の際、試験片に負荷させる輻射熱量は50kW/m²とした。ここで、欧州における鉄道車両の火災防護規格における詰め物の燃焼試験では、試験片に負荷させる輻射熱量を25kW/m²としている⁷⁾が、本検討では大火源を想定し、詰め物が激しく燃焼している際の燃焼性を把握するため、50kW/m²とした。なお、輻射熱量25kW/m²でも試験を実施したが、同一条件でも着火時間のばらつきが数十秒～数百秒と大きく、正確な評価が困難であった。

CCM試験における評価項目は、測定結果から着火時間、最大発熱速度（以下、 HRR_{max} ）、総発熱量（以下、 THR ）および最大煙生成速度（以下、 S''_{max} ）とした。試験結果から得られる評価項目のイメージを図4に示す。図4(a)に示すように、発熱速度の測定結果から、着火時間、 HRR_{max} および THR を求めた。なお、省令¹⁾におけるCCM試験の評価時間を参考に、600秒までの値で評価した。また、本試験において、発熱速度は酸素消

費法により求めた。これは、燃焼によって物質の単位質量当たりの発熱量が物質ごとに大きく異なるのに対して、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あたり13.1MJとほぼ一定の値を示すことを利用したものである⁸⁾。煙生成速度は、前述の発熱速度と同時測定が可能であり、試験片の燃焼に伴って生じる煙（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。評価項目は、図4(b)に示す S''_{max} とした。

3. 試験結果

3.1 樹脂の試験片の試験結果

樹脂の試験片の試験結果の概要を表2に示す。また、例として、IFR60%の試験状況を図5に示す。

着火時間に着目すると、0%では15秒程度で着火するのに対して、Mg60%は42秒、Br20%は34秒であり、0%よりも遅くなる傾向が見られた。一方、IFR配合樹脂の着火時間は15～22秒であり、0%と同程度または汎用的な難燃剤を配合した樹脂よりも早く着火した。これは、難燃剤の特徴として、IFR系難燃剤が着火を早める代わりに難燃剤を発泡させて試験片を覆うことで、樹脂に負荷される輻射熱量を低減させ、燃焼拡大を抑制する設計としているためである。そのため、IFR配合樹脂は汎用的な難燃剤に比べて着火時間が早まるものの、後述するようにその他の評価項目の結果から総合的に判断すると十分な難燃性を有するものと考えられる。

HRR_{max} に着目すると、0%が最も高く935kW/m²となり、激しく燃焼した。次に、IFR8%、Br20%、IFR15%の順となった。それに対して、 HRR_{max} が大きく低減されたのは、Mg60%およびIFR30%～IFR60%であった。IFR配合樹脂の場合は、前述のように燃焼拡大を抑制する設計とした効果が発揮されたものと考えられる。特に、IFR30%はMg60%より難燃剤の添加量が少ないにもか

表2 樹脂の試験片の試験結果

樹脂の種類	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
0%	15	935	11.8	60
Mg60%	42	246	3.4	57
Br20%	34	490	30.3	36
IFR8%	21	498	8.0	66
IFR15%	15	349	6.3	57
IFR30%	22	129	1.8	42
IFR40%	18	103	1.1	37
IFR60%	19	61	1.2	10



図5 IFR60%の試験状況

かわらず、 HRR_{max} を低減できることが確認され、効果が高い難燃剤であると考えられる。

S''_{max} に着目すると、Br20%が最も高く、0%、IFR8%およびIFR15%が同程度で続いた。Br20%の S''_{max} が最も高かった要因として、これは同難燃剤の特徴であるが、 HRR_{max} を低減できる一方で、燃焼時に臭素が酸素の取り込みを阻害し、不完全燃焼させるため、その結果として煙の生成が増加したと考えられる。一方、 S''_{max} が大きく低減されたのは、Mg60%、IFR30%、IFR40%およびIFR60%であった。Mg60%とIFRを多く含むIFR配合樹脂で S''_{max} が大きく低減した理由は、 HRR_{max} と同様に燃焼拡大が抑制された効果と考えられる。

THR に着目すると、0%、Mg60%、IFR8~15%で高く、IFR60%が最も低くなった。これは、評価時間の600秒の範囲で、0%やMg60%はほとんど燃焼した一方、Br20%やIFR30%~IFR60%では600秒を超えても燃焼が継続したためと考えられる。

樹脂の試験片に対するCCM試験の結果、IFR60%の着火時間への効果は小さいものの、IFR系難燃剤の発泡により自己消火性が発揮され、 HRR_{max} だけでなく、発熱速度の経時変化も他の試験片よりも大きく抑制できた。このように、IFRを30%以上配合した樹脂は、他の難燃剤を配合した樹脂よりも優れた難燃性を示した。特にIFRを60%配合した場合、着火後、速やかに自己消火するとともに、発熱速度の経時変化も他の試験片と比較して抑制できたことから、優れた難燃性を示すと考えられる。

3.2 樹脂と腰掛材料を組み合わせた試験片の試験結果 ・条件A（樹脂の大きさ）

条件Aにおける試験前後の試験片の外観を図6に、試験結果の概要を表3に示す。なお、以下、樹脂を挿入しない条件を条件Xとする。

図6下段の燃焼後の外観が示すように、樹脂を挿入した場合の燃焼後の外観は、黒色固体の残渣が見られた。また、樹脂が大きいほど、同残渣が大きいことがわかった。これは、樹脂の面積が大きいほど燃焼時に発泡するIFRが多量に存在するためと考えられる。

表3に示す着火時間に着目すると、いずれの試験片においても、着火時間は5~6秒と同程度であった。これは、円錐型ヒーター近くの詰め物が最初に着火したためであり、挿入した樹脂の影響ではなく、燃焼がほぼ同じ

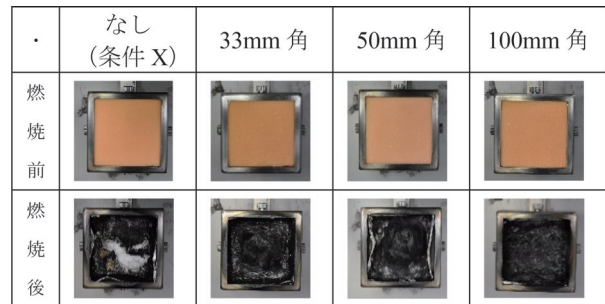


図6 条件AのCCM試験前後の試験片の外観

表3 条件Aにおける試験結果

樹脂寸法	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
mm	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件X	6	490	4.4	61
33	5	483	5.4	66
50	5	288	4.3	72
100	6	208	4.0	24

タイミングで始まったことを意味している。

HRR_{max} に着目すると、樹脂を挿入しない条件Xが490kW/m²であるのに対して、33mm角の試験片を挿入した場合は483kW/m²とほぼ同程度であった。一方、50mm角および100mm角の試験片を挿入した場合は、それぞれ288kW/m²、208kW/m²となり、条件Xよりも大幅に低減した。

S''_{max} はいずれも、同程度であった。これは、 S''_{max} は詰め物の燃焼時に一定の煙が発生し、IFR配合樹脂により燃焼を抑制させても、最大値としては低減できなかったためと考えられる。

THR に着目すると、33mm角、50mm角の樹脂を挿入した場合には、樹脂が大きくなるほど大きくなった。これは、IFR60%が40%の樹脂と60%のIFR系難燃剤で構成されていることから、可燃物である樹脂の量が増加したためと考えられる。なお、100mm角では大幅に低減しているが、評価時間の600秒以内では燃焼が抑制されたためと考えられる。

・条件B（挿入位置の違いによる試験結果）

樹脂の挿入位置による燃焼特性の影響を評価するため、同一条件の樹脂を中間および底面に挿入した場合の試験結果を表4に示す。

着火時間はいずれの樹脂条件、挿入位置でも5~6秒とほぼ同程度であった。これは、条件Aにおける理由と同様と考えられる。

HRR_{max} に着目すると、基準となる条件Xでは490kW/m²であり、条件Bの中で最も高かった。一方、IFR60%の寸法を50mm角とし、中間に挿入した場合の HRR_{max} は条件Xより40%程度低減し、底面に挿入

表 4 条件 B における試験結果

樹脂条件	挿入位置	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
		s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件 X		6	490	4.4	61
50mm 角 IFR 60%	中間	5	288	4.3	72
	底面	6	377	4.3	71
100mm 角 IFR 60%	中間	6	208	2.4	24
	底面	5	267	2.4	35

した場合の HRR_{max} は条件 X より 20% 程度低減した。さらに、IFR60% の寸法を 100mm 角とし、中間に挿入した場合の HRR_{max} は条件 X よりも 60% 程度低減し、底面に挿入した場合の HRR_{max} は条件 X に対して 45% 程度の低減であった。

S''_{max} に着目すると、中間と底面の場合で同程度と考えられた。こちら、 S''_{max} は詰め物の燃焼時に一定の煙が発生し、IFR 配合樹脂により燃焼を抑制させても、最大値としては低減できなかったためと考えられる。

THR に着目すると、IFR60% の寸法が 50mm 角の場合は、挿入箇所が中間と底面の場合で値は同程度であった一方、100mm 角の場合は、中間の方が小さかった。50mm 角では、可燃物である詰め物および挿入した樹脂の重量が同程度であり、すべての可燃物が燃焼した結果、同程度の値となったと考えられる。一方で、100mm 角では、評価対象の 600 秒以内に消火せず、燃焼が継続したため、より燃焼が遅延した中間の条件の方が、低減したと考えられる。

以上、本試験結果において HRR_{max} に着目すると、IFR 配合樹脂を底面よりも中間に挿入する方が難燃性の効果が高いと考えられる。

・条件 C (難燃剤の違いによる試験結果)

前述の条件 A 及び条件 B の結果から挿入する樹脂の大きさを 50mm 角、挿入位置を中間とし、樹脂に配合する難燃剤の違い及び添加量による影響を評価した。

条件 C の試験前後の試験片の外観状況を図 7 に、試験結果を表 5 に示す。

図 7 下段の燃焼後の外観が示すように、Mg60% を挿入した条件では、燃焼後の残渣である白色固体が残っていたが、その他の条件では黒色固体の残渣またはすべて燃焼していた。表 5 に示すように、着火時間は、条件 A などと同様、中間に挿入した樹脂に関係なく、上層の詰め物が着火時間に影響したためすべて同程度であった。

HRR_{max} で比較すると、条件 X が 490kW/m² であり、Mg60% を挿入した場合と同程度であった。一方、0% や Br20% の場合は条件 X よりも高い値を示した。IFR 配合樹脂を挿入した場合、IFR8% では条件 X と同程度であったが、IFR15%~60% の場合は、IFR の配合量の

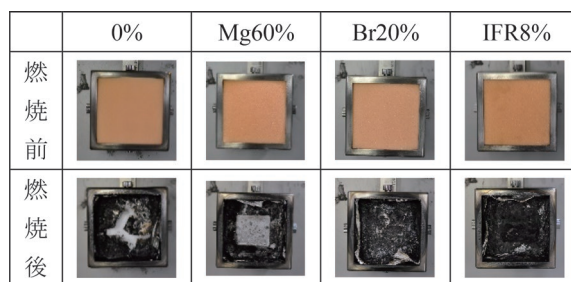
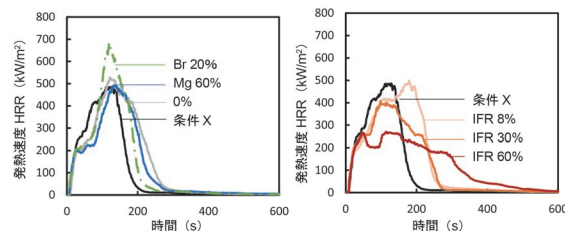


図 7 挿入する難燃剤の種類による試験前後の外観

表 5 条件 C における試験結果

樹脂の種類	着火時間	HRR_{max}	S''_{max}	THR
	s	kW/m ²	m ² /m ² /s	MJ/m ²
条件 X	6	490	4.4	61
0%	5	552	6.2	82
Mg 60%	5	496	4.6	75
Br 20%	5	675	12.9	75
IFR 8%	5	489	6.7	81
IFR 15%	5	439	6.0	80
IFR 30%	5	416	6.1	76
IFR 40%	5	333	5.0	74
IFR 60%	5	288	4.3	72



(a) 比較試験結果 (b) IFR の配合割合

図 8 条件 C における発熱速度の経時変化

増加に伴って HRR_{max} が低減した。特に、IFR60% を挿入した場合は、条件 X と比較して HRR_{max} が 40% 程度低減した。

S''_{max} で比較すると、条件 X では 4.4m²/m²/s であったのに対して、Br20% を挿入した場合は 12.9m²/m²/s と増加した。これは難燃剤の特性によるものと考えられる。また、その他についても IFR60% を除き、若干の増加が見られた。

THR で比較すると、条件 X では 61MJ/m² であったのに対し、樹脂の試験片を挿入した場合はいずれの条件でも 72~82MJ/m² となり、増加した。これは、挿入する樹脂が難燃剤と樹脂により構成されており、樹脂部分が燃焼したこと、また評価時間の 600 秒以内に燃焼したために THR が大きくなったと考えられる。

最後に、条件 C における発熱速度の経時変化を図 8

に示す。図8(a)に示すように、Mg60%の挿入によって燃焼をわずかに遅延できる効果があったものの、全体的な燃焼挙動としてはほとんど変化が見られなかった。また、Br20%を挿入した場合、初期の燃焼を若干遅延できる効果があるものの、後半の燃焼では条件Xより激しく燃焼した。これは、Br20%の難燃剤が消費された後、詰め物とともに挿入した残りの樹脂が激しく燃焼したためと考えられる。

次に、図8(b)に示すように、IFR配合樹脂を挿入した場合、IFR8%を挿入した場合に条件Xと比較して燃焼を遅延できる効果があったものの、その後の燃焼挙動は同程度であった。その一方で、IFRの配合量を増やすにつれて、 HRR_{max} は減少し、全体的な燃焼を抑制することがわかった。これは、挿入した樹脂のIFRが発熱によって発泡し、樹脂および燃焼中の詰め物を覆うことで、酸素や輻射熱を遮断し、燃焼を抑制できたものと考えられる。また、条件Xと比較して、詰め物が急激に燃焼せず、徐々に燃焼していることから、IFR配合樹脂を挿入することにより、構成した詰め物の全体の燃焼拡大を抑制できる可能性があると考えられる。

以上、条件Cの結果より、詰め物の燃焼抑制に対して、樹脂を遮蔽板のように詰め物に挿入することや挿入する樹脂板材に難燃剤が含まれることが有効ではなく、IFR配合樹脂が燃焼時に発泡することで詰め物全体に負荷される輻射熱量が抑制されることが有効であることがわかった。ただし、着火時間については、いずれの場合においても試験開始から30秒程度までに着火した。これは、40mmの詰め物のうち、いずれの条件においても上層の20mmは同じ構成の詰め物であり、同部分が最初に燃焼するために、いずれの試験条件においても同様の結果が得られたものと考えられる。

3.3 試験結果のまとめ

CCM試験の結果より、着火時間は試験条件によらず同程度である一方、 HRR_{max} で評価すると、IFR配合樹脂を挿入することで、腰掛材料に使用される詰め物の燃焼を抑制することがわかった。また、挿入するIFR配合樹脂の寸法は大きく、挿入する位置は中間とし、IFRの配合量を増やすことにより燃焼抑制の効果が高まることがわかった。

4. まとめ

鉄道車両用の腰掛材料の更なる難燃性の向上のため、難燃性の高いIFR系難燃剤に着目し、同難燃剤を配合したIFR配合樹脂を適用する手法を検討した。手法として、腰掛材料である詰め物に挿入した条件でCCM試験により燃焼特性を評価した。CCM試験では、比較の

ため各種難燃剤を配合した樹脂を詰め物に挿入したものを試験片とし、樹脂の大きさ、詰め物への挿入位置、配合量をパラメータとして試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) IFR系難燃剤を含む各種難燃剤の燃焼性能を比較評価するため、各種難燃剤を配合した樹脂でCCM試験を実施した。その結果、IFR配合樹脂は、汎用的な臭素系難燃剤やマグネシウム系難燃剤よりも優れた難燃性を示すことを確認した。
- (2) 詰め物に挿入するIFR配合樹脂の大きさによる影響では、50mm角程度でも燃焼を抑制できるものの、100mm角など寸法が大きい方が抑制効果も大きいことがわかった。また、挿入位置は、詰め物の底面よりも中間に配置する方が燃焼を抑制する効果が高いことがわかった。
- (3) 難燃剤の種類による影響では、IFR配合樹脂を用いた場合、樹脂を挿入しない条件や汎用的な難燃剤の配合した条件と比較して燃焼抑制の効果が大きいことがわかった。これは、IFRの特徴である着火時に難燃剤が発泡することで、周囲の燃焼挙動が抑制されたものと考えられる。

以上、IFR配合樹脂を詰め物に挿入することにより、腰掛材料としての燃焼を抑制することがわかった。今後は、同構造を活かして、実物大の評価を検討する予定である。

謝辞

本研究における樹脂の検討の実施にあたり、株式会社ADEKAには共同研究により多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。

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) 山中翔, 豊原匡志, 伊藤幹彌: 大火源下における鉄道車両用材料の燃焼性の検討, 鉄道総研報告, Vol.32, No.10 pp.5-10, 2018
- 3) 高野純一, 石突光隆, 山内雄記, 山中翔, 豊原匡志: 鉄道用腰掛燃焼試験とFDSによる再現解析の実施, 第26回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2019)講演論文集, No.S-6-4-4, pp.538-541, 2019
- 4) 経済産業省製造産業局繊維課・帝人ファイバー株式会社「軽量クッション材の開発」評価用資料: https://www.meti.go.jp/policy/tech_evaluation/c00/C0000000H20/081110_fiber/fiber08-6-4.pdf (参照日: 2023年1月24日)
- 5) 米沢豊, イントメッセント系難燃剤の進歩, 難燃剤・難燃

- 化材料の最前線, CMC 出版, pp.90-96, 2015
- 6) ISO 5660-1:2015/Amd 1:2019 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) — Amendment 1.
- 7) EN45545-2:2020 Railway applications—Fire protection on railway vehicles part 2 : Requirements for fire behavior of materials and components.
- 8) Hugget, C.: Fire and Materials, No.4, pp.61-65,1980.