

鉄道車両用材料の燃焼ガス成分・発熱量の 経時変化評価手法

山中 翔* 伊藤 幹彌* 豊原 匡志*

Evaluation Method for Time-Dependent Changes in Combustion Gas of Materials for Railway Rolling Stock

Sho YAMANAKA Mikiya ITO Tadashi TOYOHARA

The fire on a railway vehicle can damage not only the passengers and the crew but also the vehicle equipment. It is important to realize the performance against fire of the materials. Heretofore, the real time production of the smoke and toxic gas that related to the combustion state of materials is not considered. It is important to grasp the combustion behavior, for example heat release rate, smoke production and gas generation, quantitatively. For this reason, the authors design and manufacture a new combustion test device that can simultaneously measure the generated amounts and the changes over time through the combustion of railway vehicle materials. The combustion performances of railway vehicle materials are evaluated based on the resulted parameters.

キーワード：列車火災，燃焼試験，国際規格，鉄道車両用材料，ガス分析，経時変化評価

1. はじめに

鉄道車両火災による被害を減じるためには、火災発生時における旅客や乗務員の円滑な避難と車両の安全な場所への退避が重要である。火災安全性の高い車両の設計には、旅客や乗務員の避難を妨げる煙や有毒ガスの発生抑制と車両構体が受ける放射熱の抑制が必要であり、前者は火災発生初期、後者は火災が拡大する中期から後期における評価が必要である。このため、これらの評価では材料が消火するまでに発生する熱量やガスの総量に加えて、これらの経時変化を同時に評価することが重要である。しかし、現状では上記を満たす評価手法はみられない。そこで、鉄道車両材料の燃焼時に発生する発熱量、煙量、有毒ガス発生量の経時変化を同時に測定できる新規燃焼試験装置を設計・製作し、同装置を用いて、日本国内の代表的な鉄道車両材料の燃焼特性を評価した。

2. 新規燃焼試験装置の仕様の検討

鉄道車両用材料の燃焼特性と燃焼ガスの経時変化を同時に評価可能な新規燃焼試験装置には表1に示す項目の性能が必要と考え、それぞれ検討した。

表1 新規燃焼試験装置に求められる項目と性能

項目	要求性能
材料の燃焼方法	発熱速度と煙発生量の経時変化評価・清掃のしやすさ
燃焼ガスの評価方法	短い測定間隔・高感度・耐腐食性
燃焼ガスの測定装置への導入方法	均一な捕集・煙中の煤の除去・耐腐食性・清掃のしやすさ

* 材料技術研究部 防振材料研究室

2.1 材料の燃焼方法

材料を燃焼させる方法は、燃焼させる空間の状態に応じて、閉鎖系と開放系に大別できる。一般的に実施される燃焼試験に限定すると、前者の代表例としては欧州規格で実施されるスモークチャンバ試験装置が¹⁾、後者の例としてはコーンカロリメータ燃焼試験装置（以下、CCM 試験装置）があげられる。このうち、閉鎖系の燃焼試験における燃焼は外部から酸素が供給されず、空間内の酸素が逐次減少することから、酸素消費法による発熱速度や総発熱量の評価が困難と考えられる。また燃焼後は閉鎖空間内が煤で汚れるため、正確な測定のためには試験毎にチャンバー内に付着した煤の完全な除去が必要になり、作業性が悪い。一方、開放系の燃焼方法である CCM 試験では酸素消費法による発熱速度と総発熱量の測定が実施でき、同時に煙の発生量も評価できる。また、煤で汚れる箇所も配管や煙突のみであるため、容易に清掃可能である。このため、新規燃焼試験の材料の燃焼方法として、CCM 試験装置を選定した。

2.2 燃焼ガスの評価方法

材料の分解により発生するガスの一般的な評価方法として、図1に示すガスクロマトグラフィー法（以下GC法）と図2に示すフーリエ変換赤外分光法（以下、FT-IR法）があげられる。



図1 GC測定装置

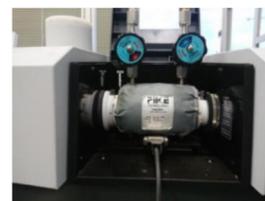


図2 FT-IR測定装置

表2 ガス分析試験方法の特徴

特徴	試験方法	
	GC法	FT-IR法
高頻度での測定	×	○
幅広い濃度での測定	○	△
高感度	○	△
耐腐食性	△	△
不純物の混入	×	△

(○：適，△：要検討，×：不適)

表2に示した通り、GC法では高頻度での測定が難しく、即時に結果を得ることは困難である。また、カラムは非常に細いため、煤等が混入するとカラムが詰まり、測定できなくなる。一方、FT-IR法はガスセル内を通過するガスに赤外線を照射して定性定量評価を行う測定法であり、即時に結果を得ることができるものの、幅広い濃度での測定性能や高感度での測定はGC法よりも劣る。しかし、これらの課題はガスセルや検出器の仕様を最適化することで解決できると考え、燃焼ガスの分析方法としてFT-IR測定装置を選定した。

2.3 燃焼ガスの導入方法

FT-IR測定装置への燃焼ガスの導入箇所はCCM装置の排煙ダクトとし、図3に示すステンレス製のプローブにより排煙ダクトの中心部から真空ポンプにより燃焼ガスを採取した。プローブの先端は45°に加工しており、図4に示すように排煙ダクト側壁から45°の角度で挿入することで、排煙の流れに対して垂直方向にダクト側壁から燃焼ガスを採取可能とした。また、プローブとFT-IR測定装置を繋ぐ配管はテフロン製として耐腐食性を高めるとともに、配管の途中にフィルタを2か所設置しFT-IR装置内に煤が侵入しない構成とした。

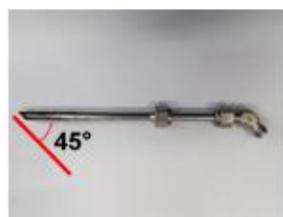


図3 プローブ外観



図4 プローブの挿入状態

2.4 新規燃焼測定装置の概略

2.1節から2.3節までの検討結果をもとに、図5に示す新規燃焼試験装置を製作した。本試験装置はCCM試験装置にFT-IR測定装置を併設させていることから、以後はCCM-IR試験装置と呼称する。CCM-IR試験装置の概略を図6に示す。CCM部で材料の燃焼、発熱速度および煙生成速度を評価し、FT-IR部で燃焼ガスの成分を評価する構成となっている。

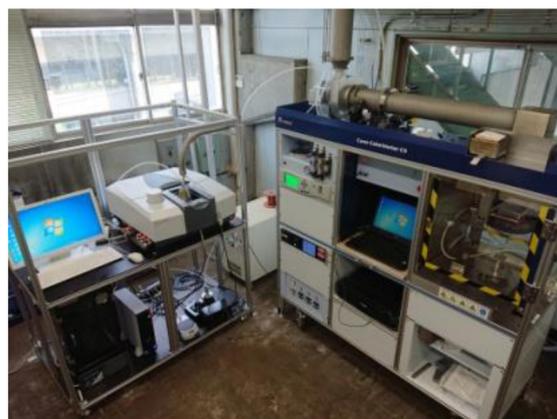


図5 CCM-IR試験装置の外観

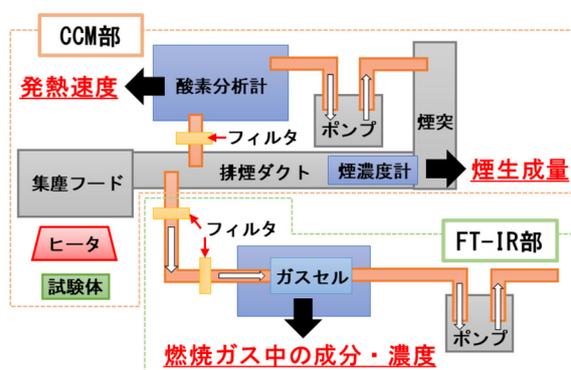


図6 CCM-IR試験装置の概略図

3. CCM-IR試験装置による試験方法

3.1 試験方法

図7(a)のように試験体をホルダに固定し、CCM試験装置のヒータの直下に設置する。CCM試験を開始すると、試験体の加熱が始まる。同時に試験体上方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。燃焼で発生する発熱速度は図7(b)に示した酸素濃度計で測定した酸素の消費量により、煙生成量はレーザ式煙濃度計により評価する。

また、CCM試験装置の試験開始信号をトリガとしてFT-IR装置を同期させることにより、CCM試験の開始と同時にFT-IR装置による燃焼ガスの測定を開始する。表3にCCM-IR試験装置の仕様を示す。



(a) 着火用スパーク

(b) 酸素濃度計

図7 CCM試験装置の測定部外観

表3 CCM-IR 試験装置の仕様

試験品に負荷する 輻射熱量	10kW/m ² から100kW/m ² (実用最大70 kW/m ²)
試験品の大きさ	縦100mm×横100mm 厚さ50mm以下
測定頻度	1秒間隔 (CCM試験装置) 1.08秒間隔 (FT-IR装置)
測定対象ガス	一酸化炭素, 二酸化炭素, 塩 化水素, シアン化水素, 一酸 化窒素, 二酸化窒素, 二酸化 硫黄, 臭化水素, フッ化水素 計9種類 (欧州規格準拠)

3.2 CCM-IR 試験装置による測定結果

鉄道車両の壁材として使用されるアルミ発泡樹脂積層板を試験体として、CCM-IR 試験装置により約10分間燃焼させたときの測定結果を例として以下に示す。

3.2.1 CCM 試験装置からの試験結果

CCM 試験装置から図8のような測定結果が得られた。ここから着火時間、最大発熱速度、総発熱量、最大煙生成速度、総発煙量等のデータが得られる。

同試験では、発熱速度を「酸素消費法」と呼ばれる方法によって求めている。これは、燃焼によって消費される酸素の量を基準として用いると、物質の種類に依存せず、ほぼ一定の発熱量、酸素1kg当たり13.1MJを示すことを利用したものである²⁾。また、煙の発生量は燃焼ガスに対し、レーザー光を照射し、その際のレーザー光の吸光度から算出される。

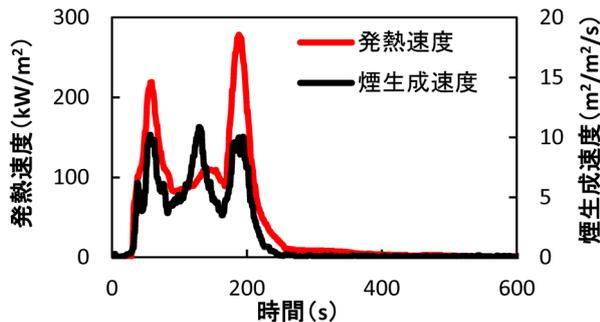


図8 熱発生量・煙生成速度

3.2.2 FT-IR 法による発生ガスの試験結果

FT-IR 法によるガス測定では、ガスセル内を通過する測定対象ガスに赤外光を照射する。これにより、ガス中の分子がエネルギーを吸収して赤外線吸収スペクトルが得られる。例として着火直後の赤外線吸収スペクトルを図9に示す。得られた赤外線吸収スペクトルのピーク位置からガスの種類を同定し、ピークの高さからガスの濃度を1.08秒ごとに定量評価する。連続的にこの測定を行うことで、図10に示すような赤外線吸収スペクトル

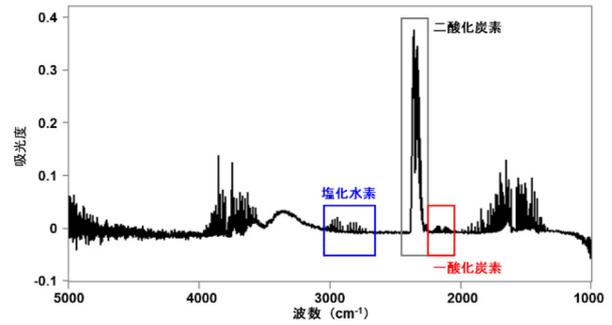


図9 着火直後の赤外線吸収スペクトル

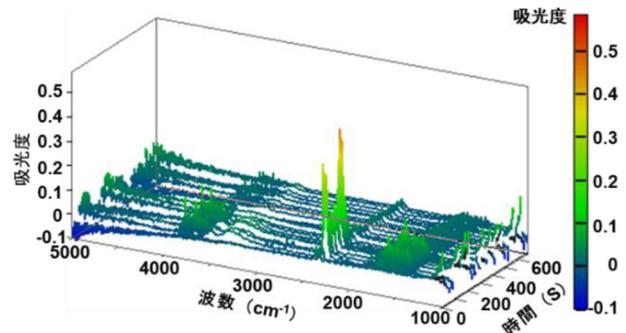


図10 赤外線吸収スペクトルの経時変化

の経時変化が得られる。

このスペクトルを各ガス種の濃度に換算すると図11に示すグラフが得られる。また前項までの結果を合わせることで、材料の燃焼時に発生する熱発生量と煙発生量、燃焼ガスに含まれるガス成分の経時変化を同時評価することが可能となり、以上の方法を各種試験品に適用して比較することとした。

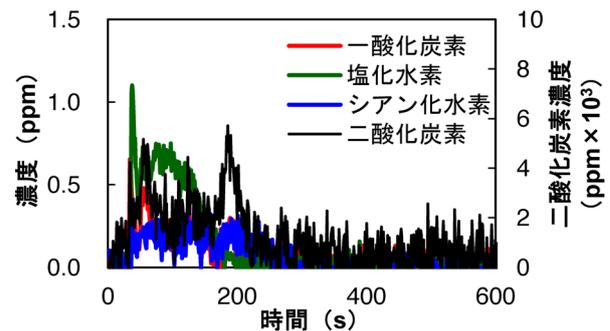


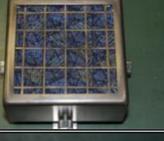
図11 燃焼ガス成分の測定結果

4. 鉄道車両用材料の燃焼ガスの測定

4.1 試験対象

対象とした試験品は、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。内訳を表4に示す。難燃性材料として、塩化ビニル系床敷物(塩ビ系床敷物)、ゴム系床敷物、座席モケットの3種類、不燃性材料とし

表4 試験品一覧

区分	試験品名	使用箇所	構成	写真
難燃性	塩ビ系床敷物	床材	塩ビ樹脂 ガラス繊維布	
	ゴム系床敷物		難燃性ゴム	
	座席モケット	腰掛	ポリエステル	
不燃性	化粧板	壁材	印刷シール アルミ板	
	アルミ発泡樹脂積層板	壁材	印刷シール アルミ板 発泡樹脂 アルミ板	

て、化粧板、アルミ発泡樹脂積層板の2種類である。このうち、化粧板は2004年の解釈基準改正³⁾に適合し、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たものである。また、アルミ発泡樹脂積層板は3.2節で示したものと同様の試験品である。

4.2 試験条件

CCM-IR 試験により鉄道車両用材料の燃焼ガスの測定を実施した。試験体の大きさは約100mm×100mmで厚さは製品の寸法とした。試験体に負荷する輻射熱量は地下鉄等旅客車、新幹線車両の天井材の試験時や建材の防火性能試験⁴⁾と同様の50kW/m²とし、試験時間を10分として、3.1節と同じ条件で実施した。

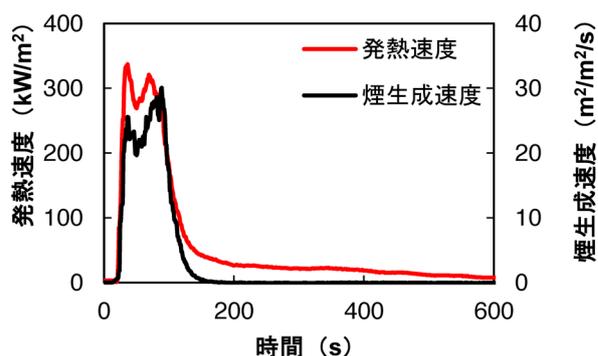
5. CCM-IR 試験装置による鉄道車両用材料の測定結果

5.1 難燃性材料の測定結果

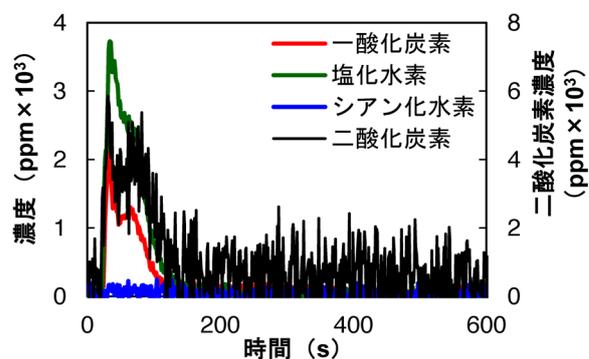
5.1.1 塩ビ系床敷物

塩ビ系床敷物の燃焼試験結果を図12(a), (b)に示す。塩ビ系床敷物では加熱を開始すると表面の溶融が観察され、熱分解ガスが激しく発生した後、試験開始後20秒程度で着火し、材料全体が燃焼した。

また、煙の発生量は後述する他の材料よりも多いことが確認された。煙の発生量は燃焼時に発生する煤の量が



(a) 発熱速度と煙生成速度



(b) ガス測定結果

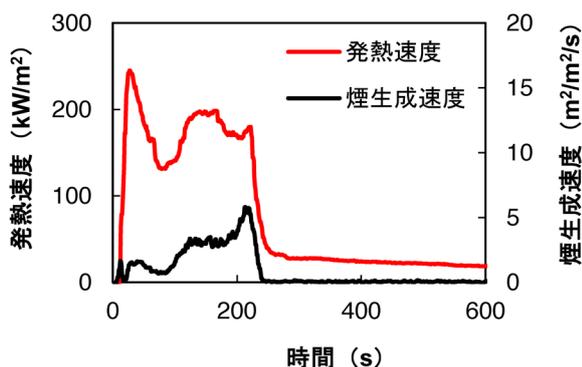
図12 塩ビ系床敷物の燃焼試験結果

多いほど、大きな値を示す。そして、煤は酸素の供給が十分ではない不完全燃焼下で多く発生する。このため、塩ビ系床敷物の燃焼では、不完全燃焼の割合が大きかったと考えられる。塩ビ系床敷物が不完全燃焼を生じやすい理由としては、塩ビ床敷物の主な構成材料である塩化ビニル樹脂は難燃性が高く、燃焼に必要な酸素の割合を示す酸素指数が他の樹脂よりも高いためと考えられる⁵⁾。

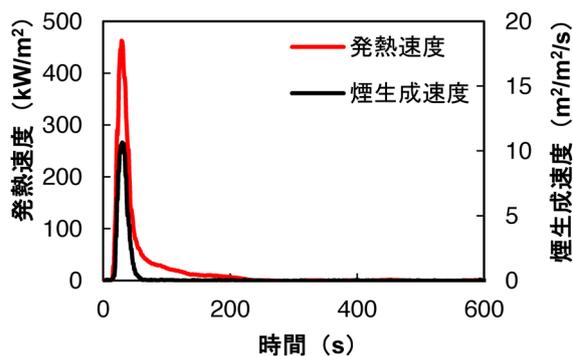
ガス測定の結果、着火直後から塩化水素の発生が確認され、その発生量は他の材料と比較しても多いことが分かった。これは、塩ビ系床敷物の大部分の重量を占める塩化ビニル樹脂の熱分解により塩化水素を発生させるためと考えられる。また、一酸化炭素も他の材料よりも多く発生することが分かった。これも、煙の発生と同様に不完全燃焼の割合が大きいためと考えられる。

5.1.2 ゴム系床敷物

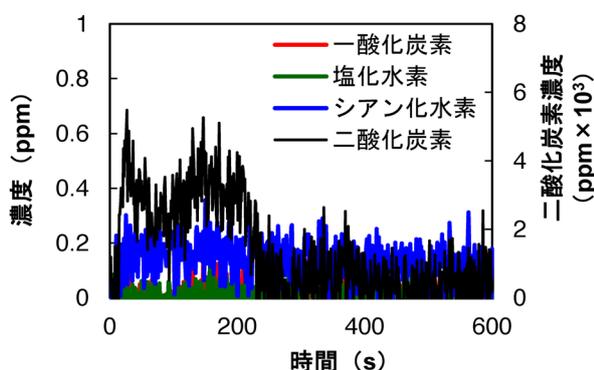
ゴム系床敷物の燃焼試験結果を図13(a), (b)に示す。ゴム系床敷物は、熱が加わると表面が溶融して燃焼した。今回測定したゴム床敷物の着火時間は45秒程度であり、塩ビ系床敷物よりも着火時間が遅く、最大発熱速度が小さいことが確認された。これは塩化ビニル樹脂に可塑剤として含まれるオイル分がゴムには含まれていないことや、ゴムに含まれている難燃剤の影響と考えられる。また、図13(a)の経時変化から明らかなように、ゴム系床



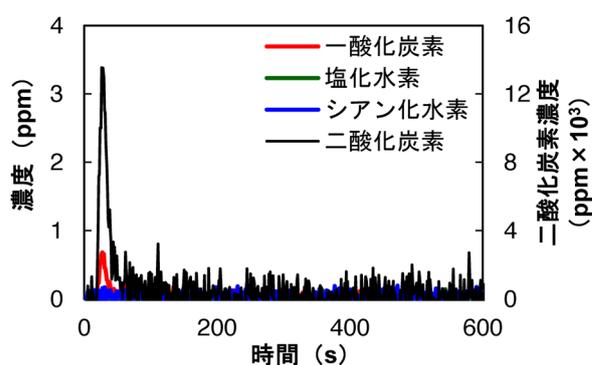
(a) 発熱速度と煙生成速度



(a) 発熱速度と煙生成速度



(b) ガス測定結果



(b) ガス測定結果

図 13 ゴム系床敷物の燃焼試験結果

図 14 座席モケットの燃焼試験結果

敷物は長時間かけて燃焼するため、最大煙生成速度も塩ビ系床敷物よりも小さく、不完全燃焼の割合も少なくなつたと考えられる。

また、ガス測定の結果、ゴム系床敷物の燃焼時に発生するガスの大部分は二酸化炭素と一酸化炭素であった。これは、ゴム系床敷物が塩ビ系床敷物等と異なり、二酸化炭素や一酸化炭素以外のガスを発生させる元素を材料中に含有しないためと考えられる。

5.1.3 座席モケット

座席モケットの燃焼試験結果を図 14(a), (b) に示す。

座席モケットは他の材料と比較して非常に薄く軽いいため、着火直後に材料全体が短時間に燃焼し、すぐに消火した。このため、最大発熱速度は今回測定した材料の中で最も大きい値を示した。一方、発熱速度の大きさと比較して最大煙生成速度は小さかった。これは、座席モケットは非常に薄く、酸素に接する表面積が材料の体積と比べて大きいため、不完全燃焼を生じにくかったためと考えられる。

また、ガス分析の結果、座席モケットの燃焼では二酸化炭素や一酸化炭素以外の有毒ガスが発生しないことが確認された。これは、座席モケットの大部分がハロゲンや窒素等を含まないポリエステル繊維で構成されるためと考えられる。

5.2 不燃性材料の測定結果

5.2.1 化粧板

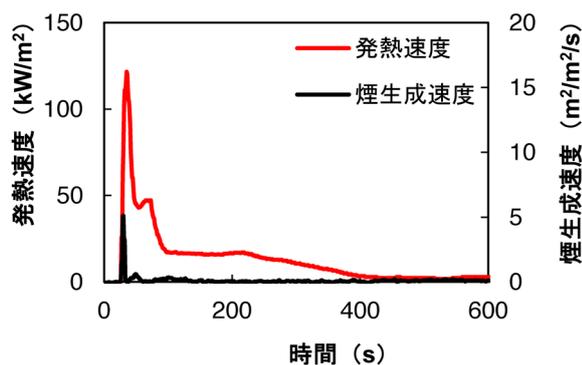
化粧板の燃焼試験結果を図 15(a), (b) に示す。

化粧板は他の材料と比較して、最大発熱速度、最大煙生成速度ともに最も小さいことが確認された。これは、化粧板の可燃成分が表面の薄い装飾シートのみであるためと考えられる。

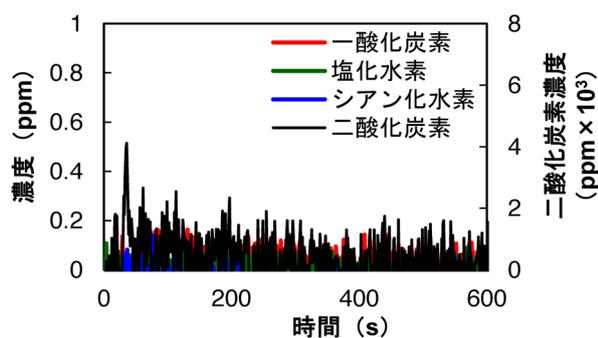
また、ガス分析の結果、化粧板の燃焼時に発生するガスの大部分は二酸化炭素であり、その他のガス成分はほとんど検出されなかった。これは化粧板の可燃成分が表面の薄い装飾シートのみであり、これにはハロゲンや窒素等を含んでおらず、また、可燃物に対して酸素が十分な量存在し、不完全燃焼を生じにくく、このような燃焼特性を示したものと考えられる。

5.2.2 アルミ発泡樹脂積層板

アルミ発泡樹脂積層板の燃焼試験結果は図 8 および図 11 に示したものと同様である。図 8 からアルミ発泡樹脂積層板では表面の化粧シールが着火・燃焼する燃焼初期、化粧シールが燃え尽き、熔融した内部の発泡樹脂が燃焼し始める燃焼中期、表面のアルミ板が大きく変形し内部の発泡樹脂が激しく燃焼し始める燃焼後期、発泡樹脂の燃焼も終了し炎が収まった消火後の 4 つの段階が確認された。この結果と図 11 を比較すると、燃焼初期に



(a) 発熱速度と煙生成速度



(b) ガス測定結果

図 15 化粧板の燃焼試験結果

は装飾シートの燃焼に由来する塩化水素のピークが確認され、激しい燃焼に起因する酸素不足から、不完全燃焼となったことによる一酸化炭素の発生も確認された。

また、燃焼後期には発泡樹脂の燃焼に起因する二酸化炭素の大きなピークが確認されたが、一酸化炭素の発生量は燃焼初期よりも小さいことが確認された。これは、緩やかに燃焼が拡大した結果、不完全燃焼が抑制されたためと推測される。そして、燃焼中の全段階においてシアン化水素の断続的な発生が確認された。これは、内部の発泡ウレタンから熱分解を通じて発生したものと推測される。

以上に示したように、新規に設計・製作した CCM-IR 試験装置を用いることにより、材料燃焼中のガス発生等を含む各種挙動をリアルタイムに把握することが可能となった。

6. まとめ

鉄道車両材料の燃焼時に発生する発熱量、煙量、有毒ガス発生量の経時変化を同時に測定できる新規燃焼試験装置を設計・製作し、この装置を用いて、日本国内の代表的な鉄道車両材料の燃焼特性を評価した。以下に得られた知見を述べる。

- (1) コーンカロリーメータ燃焼試験装置に FT-IR 式ガス分析装置を併設させ、鉄道車両用材料の評価に適した仕様で設計・製作することにより、発熱量、煙量、有毒ガス発生量の経時変化の同時測定を可能にした。
- (2) 代表的な鉄道車両材料に対して CCM-IR 試験を実施した結果、塩化ビニル系床敷物やアルミ発泡樹脂積層板のような有毒ガスの発生原因となりうる元素を含む材料では燃焼初期から塩化水素やシアン化水素等の発生が確認された。
- (3) 座席モケットや化粧板のような可燃成分が少ない材料では不完全燃焼が生じにくいいため、煙や一酸化炭素の発生量が少ないことが分かった。
- (4) アルミ発泡樹脂積層板のような積層材料においては、材料の積層状態に合わせて燃焼挙動と燃焼ガスに含まれる成分が段階ごとに変化することを定量的に示すことができる等、CCM-IR 試験による経時変化に伴う評価の有効性が示された。

今後は、本装置により、燃焼ガスの発生を抑制する材料の開発や、車両火災シミュレーションに資するデータを蓄積し、火災安全性を向上させた車両用材料の提案に活用する予定である。

文 献

- 1) EN45545-2 : Railway applications - Fire protection on railway vehicles, 2013.
- 2) Huggett, C. : Fire and Materials, No.4, 61-65, 1980.
- 3) 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
- 4) 建設省住宅局建築指導課「平成 12 年 6 月 1 日 施行改正建築基準法（2 年目施行）の解説」, 2000
- 5) M. M. Hirschler.: Makromol. Chem. Macromol. Symp. Vol.29, p133-153, 1989.