

鉄道車両向け不燃性 GFRP 材の開発

Development of Nonflammable GFRP Material for Railway Vehicles

北川 武* 大條正人*

Takeshi Kitagawa Masato Daijo

日本国内の鉄道車両においては、国土交通省の鉄道に関する技術基準を定める省令にて「旅客車の車体は、予想される火災の発生および延焼を防ぐことができる構造および材質でなければならない。」と定められており、鉄道車両を構成する材料は、鉄道車両用材料燃焼性試験において「不燃性、極難燃性、難燃性」の認定を取得したものに限定される。また、2004 年 12 月の改正により、客室天井材に関しては「不燃性」であることに加え、耐溶融滴下性およびコーンカロリメータ発熱性試験による耐燃焼性規格の評価項目が追加された。ここでは、熱硬化性樹脂を用いたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) に不燃性を付加し、引抜連続成形にて、客室天井材にも適用可能となる「鉄道車両向け不燃性 GFRP 材」の開発について報告する。

Japanese railroad vehicles must be equipped with structures and materials that prevent fires and the spread of fire in the vehicle, based on the ministerial ordinance that establishes the railway technical standards of the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. The materials that make up a railroad vehicle are limited to those that have obtained nonflammable or higher certification in the material flammability test of railroad vehicles. However, railcar ceiling materials require additional testing. In addition to being nonflammable, they must pass the combustion resistance criteria of melt dripping and cone calorimeter testing. Therefore, we have developed a nonflammable GFRP material for railroad vehicles that can be applied to ceiling materials by adding nonflammable glass fiber reinforced plastic (GFRP) that uses thermosetting resin. This report provides the performance evaluation results of nonflammable GFRP materials for railway vehicles manufactured by the pultrusion method.

1 はじめに

鉄道は、古くからその名前のおり、多くの部材に「鉄」をはじめとする金属が使用されてきたが、近年の車両を確認すると、多くの箇所に金属以外の材料が使用されている。かつては、天井などに木材が使用されていたこともあるが、技術基準の改正により、高分子材料へと代替されてきた。高分子材料は、金属と比較し、重量当たりの強度（比強度）が高く、軽量化を目的にさまざまな部材の代替が進められた。ただし、鉄道において安全性と信頼性は不可欠であり、軽量だけでなく、強度や耐久性、難燃性を確保するとともに、コストも含めバランスの取れた製品でなければ、鉄道車両に適用できない。そのため、一般的に「燃えるもの」に分類される高分子材料は、難燃性能が重要な課題といえる¹⁾。

高分子材料は、大きく分類すると、熱硬化性材料と熱可塑性材料に分かれる。熱硬化性材料は、熱可塑性材料よりも高い難燃性能を有し、熱硬化性樹脂を用いたガラス繊維強化プラスチック (GFRP) は、強度面においても金属の代替材料となることから、軽量化の効果も大きく、1970 年代後半より本格的に鉄道車両に採用された。主な採用例としては、洗面ユニット、汚物タンク、壁材、天井材、車両先頭部などが挙げられる¹⁾。

その後、2003 年 2 月に韓国大邱市の 1 号線中央路駅

にて、地下鉄放火事件が発生した。この放火事件は、これまでの鉄道火災では類を見ない大惨事となった。そのことを受けて、日本国内では 2004 年 12 月に、鉄道局長から改正概要が通知された。鉄道車両の主な変更点は、客室天井材の耐燃焼性および耐溶融滴下性を確保するため、コーンカロリメータ発熱性試験の導入と耐溶融滴下性の判定が追加された。また、燃焼性能も難燃性から不燃性を求められるようになった。そのため、以前は壁材や天井材に GFRP を使用されていたが、その使用量は大幅に減少し、代替としてアルミ板の表面に装飾を施した化粧板の使用が増えた²⁾。

こうした背景を踏まえ、熱硬化性樹脂を用いた GFRP に不燃性を付加し、客室天井材として適用可能となる「鉄道車両向け不燃性 GFRP 材」の開発を行ったので、ここに報告する。

2 鉄道車両用材料の燃焼性規格について

日本国内の鉄道車両においては、国土交通省の鉄道に関する技術基準を定める省令にて第 83 条 第 3 項に「旅客車の車体は、予想される火災の発生および延焼を防ぐことができる構造および材質でなければならない。」と定められている。そのため、鉄道車両を構成する材料は、部位ごとに燃焼性規格が定められており、一般社団法人

日本鉄道車両機械技術協会が実施する鉄道車両用材料燃焼性試験において、表1に示す「不燃性」「極難燃性」「難燃性」の区分に認定されたものに限られる。また、天井材に関しては、不燃性の認定を取得した材料であることに加え、耐溶融滴下性およびコーンカロリメータ発熱性試験による耐燃焼性の判定が規定されている。

2.1 鉄道車両用材料燃焼性試験

試験方法を図1に示す。B5判(182 mm × 257 mm)の供試体を45°傾斜に保持し、アルコール容器底の中心が、供試体下面中心より垂直下方25.4 mmの位置にくるよう設置する。アルコール容器に純エチルアルコール0.5 ccを入れて着火し、燃料が燃え尽きるまで放置する。燃焼判定は、表1に示すとおり、アルコールの燃焼中と燃焼後に分け、燃焼中は供試体への着火、着炎、発煙状態、炎の状態等を観察し、燃焼後は、残炎、残じん、炭化、変形状態を調査し判定する³⁾。

2.2 コーンカロリメータ発熱性試験

試験方法を図2に示す。供試体は、100 mm × 100 mmの正方形で厚さ50 mmまでの表面が平坦なものとし、コーン型ヒータの下25 mmの位置に、上面に94 mm × 94 mmの穴の開いたホルダに入れて、放射熱50 kW/m²の輻射熱を10分間与える。評価方法は、供試体3枚の最大発熱速度の平均値と、各供試体の最大発熱速度の差が10%未満であれば試験を終了し、この供



図1 鉄道車両用材料燃焼性試験方法

試体3枚のデータを採用する。10%以上となる場合には、さらに供試体3枚の試験を行い、これらの供試体6枚のうち、最大発熱速度の最大値と最小値を除く供試体4枚のデータを採用する。燃焼判定は、表2に示すとおり、試験時間中に計測された総発熱量(MJ/m²)および最大発熱速度(kW/m²)ならびに着火時間(秒)で行う。着火時間は、試験片から炎が確認されてから、10秒以上炎が存在した場合を着火とみなし、試験開始から最初に着火が確認されるまでの時間とする³⁾。

3 不燃性GFRP材の成形方法

鉄道車両の天井部材としては、空調ダクトや天井パネル、鉄道沿線では、第三軌条用保護板や溝蓋など、同一断面による長尺製品のニーズが多いことから、熱硬化性樹脂を用いた不燃性GFRP材の成形方法として、引抜連続成形を採用した。

引抜連続成形は、図3に示すとおり、ガラス基材に熱硬化性樹脂を含浸させ、中間にある金型内にて加熱硬化する。硬化した成形品を2台の引取り装置にて互い違いに引っ張ることで、連続的に成形する方法である。成形の特徴としては、さまざまな同一断面の連続成形が可能

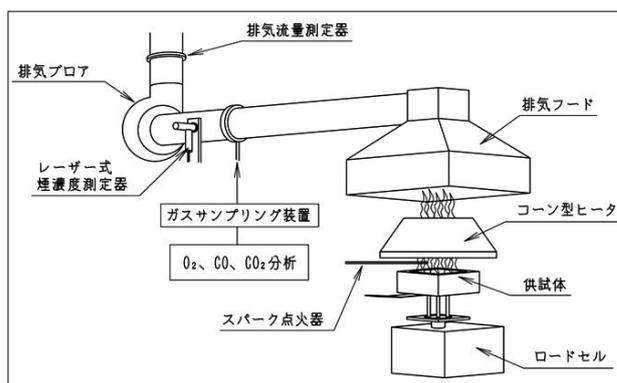


図2 コーンカロリメータ発熱性試験方法

表2 耐燃焼性規格

| 総発熱量 (MJ/m ²) | 着火時間 (秒) | 最大発熱速度 (kW/m ²) |
|---------------------------|----------|-----------------------------|
| 8 以下 | - | 300 以下 |
| 8 を超え 30 以下 | 60 以上 | |

表1 鉄道車両用材料の燃焼性規格

| 区分 | アルコール燃焼中 | | | | アルコール燃焼後 | | | | 鉄道車両材料としての判定 |
|------|----------|----|-----|---------------|----------|--------|--------------|-------------------|------------------|
| | 着火 | 着炎 | 煙 | 火勢 | 残炎 | 残じん | 炭化 | 変形 | |
| 不燃性 | なし | なし | 僅少 | - | - | - | 100 mm 以下の变色 | 100 mm 以下の表面的変形 | 合格 (部位により使用可) |
| 極難燃性 | なし | なし | 少ない | - | - | - | 試験片の上端に達しない | 150 mm 以下の変形 | |
| | あり | あり | 少ない | 弱い | なし | なし | 30 mm 以下 | | |
| 難燃性 | あり | あり | 普通 | 炎が試験片の上端を超えない | なし | なし | 試験片の上端に達する | 縁に達する変形 局部的貫通孔 | 不合格 (使用不可) |
| 緩燃性 | あり | あり | 多い | 炎が試験片の上端を超える | 30 秒未満 | 60 秒未満 | 試験片の1/2を超す面積 | 試験片の1/2を超す面積の変形焼失 | |
| 可燃性 | あり | あり | 多い | 炎が試験片の上端を超える | 30 秒以上 | 60 秒以上 | 放置すれば殆ど消失 | | |

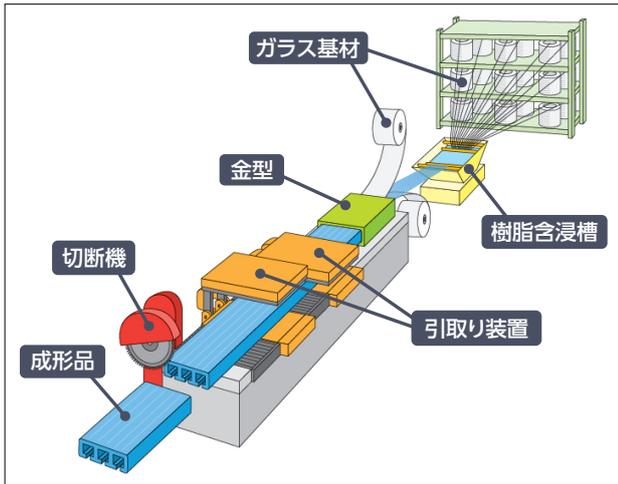


図3 熱硬化性樹脂を用いた引抜連続成形

で、長手方向に真っ直ぐ繊維を投入できるため、長手方向の強度に優れ、金型も安価で、連続的に成形することにより材料ロスも少なく、生産性の高い成形方法といえる。

4 燃焼メカニズムと難燃化の方法

GFRP などの高分子材料の燃焼メカニズムを図4に示す。接炎や加熱源により、材料が熱分解し可燃性ガスが発生する。その可燃性ガスが、空気中の酸素と反応し燃焼する。その燃焼により、さらに材料の熱分解が促進され、延焼が進む。そのため、高分子材料を難燃化するには、「熱による分解」、「分解による可燃性ガス発生」、「酸素供給による燃焼」これらの過程で進行を防止する必要があり、使用する樹脂に難燃剤を加えることで、その作用を阻害する方法が一般的である⁴⁾。

難燃剤にはさまざまな種類があり、ハロゲン、リンおよび窒素系は、燃焼する際に不燃性ガスを発生させ、可燃ガスの希釈や酸素を遮断するほか、表面に炭化膜を生成し、酸素や熱を遮断する。また、水酸化アルミニウムなどの水和金属系は、燃焼する際に水和金属が脱水分解し、その吸熱反応による冷却効果で、可燃ガスの発生を抑制する。

5 難燃剤の選定について

GFRP の難燃性能を高めるには、樹脂にハロゲン基を導入した難燃性樹脂を使用する、或いはハロゲン、アン

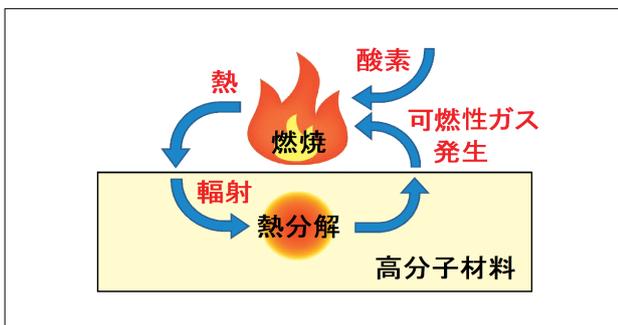


図4 高分子材料の燃焼メカニズム

チモン、リン化合物などの難燃剤を樹脂に添加する方法が一般的である。なお、難燃化のメカニズムが異なるハロゲン系とリン系や、リン系と窒素系などの難燃剤は、合わせて使用することで相乗効果を発揮する。また、単体ではあまり効果はないが、三酸化アンチモンなど、他の難燃剤と組合せることで、難燃効果を高める難燃助剤もある。ただし、難燃剤によっては環境や人体に有害とされるものもあり、近年、環境や人体に対する安全性を求めるニーズも高まっていることから、使用する難燃剤は腐食性ガスや有毒ガスを発生させるもの、人体に有害とされるものは選定から排除し、無毒で難燃効果の高い水酸化アルミニウムを選定した⁴⁾。

水酸化アルミニウムの特徴は、そのもの自体が燃焼しない上に、200～350℃で激しく脱水分解し、その際の吸熱反応による冷却効果によって、材料の温度上昇を抑え、発煙を抑制する。また、発生した水蒸気が可燃ガスや酸素を希釈し、人体に有害なガスも出さないことから、鉄道車両に使用する難燃剤として優れた機能を有するとともに、環境安全性にも優れていると考える。

6 不燃化に向けた課題と対策

水酸化アルミニウムは、ゴム、プラスチックなどの難燃化に優れた性質を持っているが、不燃性を付加するまで添加するとなると、大きな課題が二つある。一つ目が、水酸化アルミニウムを大量投入することによる樹脂粘度上昇の抑制、二つ目が、引抜連続成形での硬化条件の確立である。

6.1 樹脂粘度上昇の抑制

水酸化アルミニウムは、ボーキサイトを原料とした粉末体の結晶であり、図5に示すとおり、樹脂に水酸化アルミニウムを大量に添加すると、樹脂の粘度が急上昇し、ガラス繊維の樹脂含浸性が低下するなど、引抜連続成形では生産が困難となる問題が発生する。そのための対策として、以下の取組みを実施した。

6.1.1 水酸化アルミニウムの仕様選定

水酸化アルミニウムは、さまざまな粒径や、高充填仕様など特殊な表面処理を施されたものが販売されており、水酸化アルミニウムの仕様によって、樹脂の粘度特性に違いが生じる。図6は、例として種類や粒径の違う

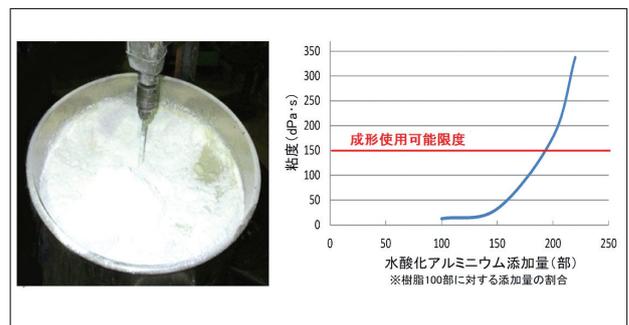


図5 水酸化アルミニウム添加状況および樹脂粘度特性

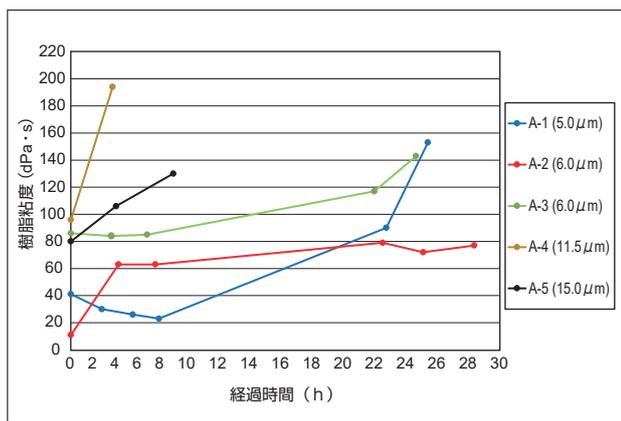


図6 水酸化アルミニウムの樹脂粘度特性

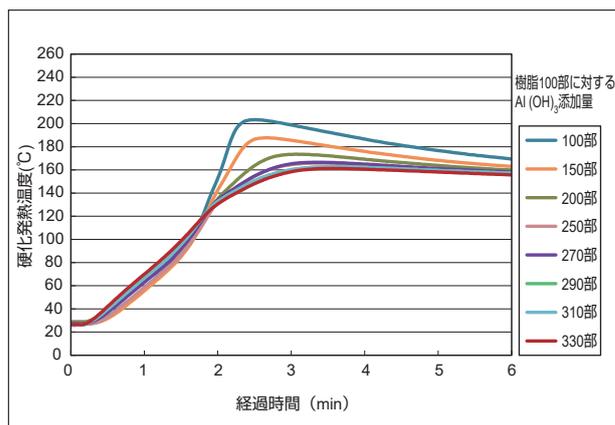


図8 添加量別の熱硬化特性

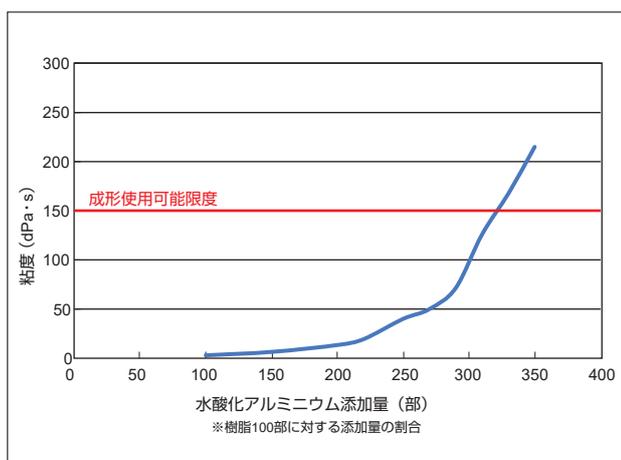


図7 樹脂改善後の添加量および粘度特性

水酸化アルミニウムを、重量比で樹脂量の2倍添加し、経過時間とともに樹脂の粘度特性を表したものである。同じ樹脂であっても、使用する水酸化アルミニウムにより全く異なる粘度特性を示すことが見て取れる。そのため、水酸化アルミニウムの仕様選定は、樹脂粘度の上昇が低く、時間経過による粘度変化の少ないものを選定した。

6.1.2 低粘度樹脂の開発

樹脂メーカーとタイアップし、水酸化アルミニウムを添加することで上昇する樹脂粘度を抑えるため、通常使用する樹脂と比較し、大幅に粘度を下げた低粘度樹脂を開発した。また、引抜連続成形で使用する樹脂には、水酸化アルミニウム以外に硬化剤や内部離型剤など、さまざまな原料を配合するが、水酸化アルミニウムと組み合わせることで、粘度上昇がさらに高まるものもあることから、樹脂以外の原料についても配合を見直した。その結果、図7に示すとおり、重量比で樹脂量の3倍まで水酸化アルミニウムを添加できる配合を見出した。

6.2 硬化条件の確立

図8は、樹脂100部に対する水酸化アルミニウム添加量100部から330部の試験体を、150℃にて加熱し、硬化発熱温度および経過時間をまとめたものである。図8に示すとおり、水酸化アルミニウムの添加量を増やすと、樹脂の硬化反応による発熱が水酸化アルミニウムの吸熱

反応に阻害され、最大発熱温度の低下や、硬化時間に悪影響を及ぼすことがわかった。そのため、水酸化アルミニウムの添加量に応じて、加熱条件などを細かく設定することで、通常成形品と同様の生産性を確保した。

7 鉄道車両用材料燃焼性試験の認定結果

鉄道車両における GFRP 製品の顧客ニーズは、軽量化を目的としたものが多く、製品厚さが規定されている。当然のことながら、同じ材料であっても厚さが変われば、燃焼性能も変わることから、鉄道車両用材料としての認定についても、製品の厚さごとに取得する必要がある。そのため、製品ラインナップとして、厚さ3.0 mmから6.5 mmまでの試験体を製作し、鉄道車両用材料燃焼性試験を受験した。その結果、厚さ3.0 mmは「極難燃性」、厚さ3.5 mmから6.5 mmまでは「不燃性」の認定を取得した。図9は、縦軸を樹脂100部に対する水酸化アルミニウム添加量、横軸を製品厚さとし、鉄道車両用材料燃焼性試験における認定結果をまとめたものである。

試験体の厚さ3.0 mmは、水酸化アルミニウム添加量300部にて「極難燃性」、また、厚さ3.5 mmは、水酸化アルミニウム250部にて「極難燃性」、270部にて「不燃性」であったことから、赤線が示すとおり、不燃性の認定を取得する基準として、製品厚さに対する水酸化アルミニウムの添加量については、ある程度の予測が可能となった。

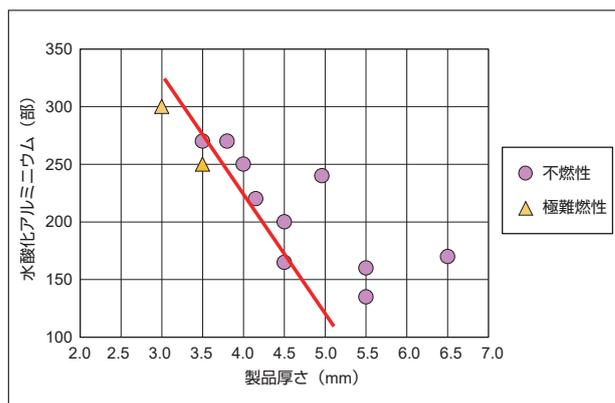


図9 鉄道車両用材料燃焼性試験の認定結果

8 耐燃焼性および耐溶融滴下性の判定結果

厚さ 3.5 mm の試作品においては、耐溶融滴下性の評価およびコーンカロリメータ発熱性試験を受験し、耐溶融滴下性および耐燃焼性規格に合格した。これにより客室天井材にも適用可能となり、鉄道車両の内装材として全面的に使用可能な「鉄道車両向け不燃性 GFRP 材」の成形技術を確立した。

図 10 は、厚さ 3.5 mm の試作品に、1,300℃バーナを用いて燃焼実験を行った状況であるが、接炎状態で 3 分間保持し、着火・着炎が無いことを確認した。

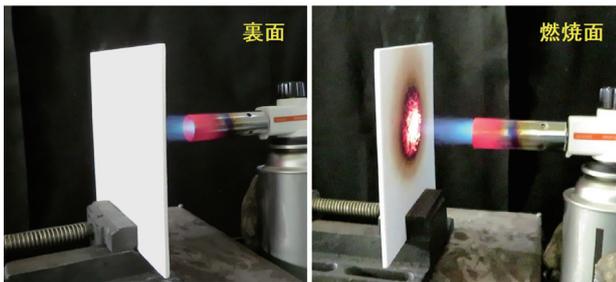


図 10 1300℃バーナによる燃焼試験（3分経過状況）

9 まとめ

GFRP が持つ、軽量、高強度、耐食性、絶縁性といった優れた特性に、不燃性を付加し、鉄道車両向け材料として認定取得に取組んだ結果、引抜連続成形による厚さ 3.5 mm から 6.5 mm までの試作品にて、不燃性の認定を取得した。また、厚さ 3.5 mm の試作品においては、鉄道車両の客室天井材として適用可能となる耐溶融滴下性および耐燃焼性規格にも合格した。

今後は、本技術を用い、鉄道車両における「不燃性」および「軽量化」の両立を実現するとともに、環境面にも配慮した製品開発を目指し、取組んでいきたい。

参考文献：

- 1) 公益財団法人鉄道総合研究所：鉄道車両における高分子材料の利用、Railway Research Review、Vol77、No.12 (2020)、pp.29-31
- 2) (株) 消防科学研究所：地下鉄車両各部材における燃焼特性に関する研究、消防科学研究所報、41 号 (2004)、pp.61-66
- 3) (一社) 日本鉄道車両機械技術協会：鉄道車両用材料の燃焼試験の手引、pp.1-2、p.16
- 4) (社) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧 (1994)、pp.52-54

執筆者：

北川 武

1995 年入社

FRP 関連の開発に従事



大條正人

2020 年入社

FRP 関連の開発に従事

