

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 低コスト化をめざして 車両用樹脂ガラスを長寿命化する

近年、鉄道車両の軽量化や破損防止を目的として樹脂ガラスの採用が拡大しています。しかし、樹脂ガラスはコストが高く、また、使用環境において劣化する傾向が認められるため、軽量化や破損防止だけを目的に適用拡大することは困難です。在来線への適用拡大には低廉化が重要な課題です。そこで、樹脂ガラスの長寿命化によるメンテナンスコスト削減の可能性を検討するため、各種の新たな材料を用いた樹脂ガラスの長期の耐候性を評価しました。ここでは従来品や試験品の耐候性試験の結果と劣化評価手法として期待される黄変度測定法について紹介します。



伊藤 幹彌  
Mikiya Ito

材料技術研究部  
防振材料研究室  
室長

【専門分野】高分子材料  
の特性評価, 高分子材  
料の燃焼



山中 翔  
Sho Yamanaka

材料技術研究部  
防振材料研究室  
研究員

【専門分野】高分子材料  
の特性評価, 高分子材  
料の燃焼



栞田 吉弘  
Yoshihiro Masuda

材料技術研究部  
防振材料研究室  
副主任研究員

【専門分野】高分子材料  
の特性評価

## はじめに

近年、鉄道車両の軽量化、破損防止などを目的として鉄道車両用側窓ガラスへの樹脂ガラスの適用が広がっています。こうした動向は新幹線や特急車両などの高速車両において顕著です。

一方、在来線車両においても車両の軽量化、破損防止のニーズは同様です。車両数の多い在来線で樹脂ガラスの適用が拡大されれば、軽量化により運行エネルギーの使用削減が期待されます。試算では、一般的なケイ酸塩を主原料とする「無機ガラス」から有機高分子材料を主原料とする「樹脂ガラス」に変更した場合、車両一両あたり200kg程度の重量削減が可能です。しかし、通常の無機ガラスに比べて樹脂ガラスは高価であり、積極的に在来線車両への適用はされません。在来線車両の窓ガラスは高速車両に比較して破損防止への要求が低いいため、軽量化の利点だけで樹脂ガラスの利用を拡大することは難しいのが現状です。樹脂ガラスの在来線への適用拡大において樹脂ガラスの低廉化は重要な課題です。

また、樹脂ガラスは通常の無機ガラスと異なって、使用環境中で劣化する

傾向があります。これは有機高分子材料として避けられない特徴です。また、こうした特徴があるために樹脂ガラスは所定の周期で交換されます。しかし、寿命が伸びて交換周期が長くなれば、取り替えに要するコストの削減が期待されます。そこで、樹脂ガラスの長寿命化によるメンテナンスコスト削減を目的として、樹脂ガラスの長寿命化の可能性を検討しました。

具体的には、樹脂ガラスとして代表的な材料で、新幹線車両の側窓ガラスとしても使用実績のあるポリカーボネート樹脂(PC)を主な対象とし、開発品やポリメタクリル酸メチル樹脂(PMMA)などを積層した製品を試験品として促進耐候性条件下における特性変化を測定しました。車両用の窓ガラスは視認性が求められる中で、樹脂ガラスは長期使用により黄変する特性を有します。このことから樹脂ガラスに対して黄変度測定を実施し、劣化評価手法としての適用性についても検討しました。

## 樹脂ガラスの特性

樹脂ガラスにはPCやPMMAが広



(a) 新品



(b) 1000h劣化後



(c) 10000h劣化後

図1 PCの黄変(促進耐候性試験による)

表1 PCとPMMAの特性

特性	PC	PMMA
耐黄変性	△	○
耐加水分解性	△	○
耐傷性	△	○
難燃性	△～○	×
耐衝撃性	○	×～△

○：良好 △：影響あり ×：不適

く使用されています。樹脂ガラスは無機ガラスよりも低密度であり、製品重量を軽くできる利点があります。また、無機ガラスと比較して、耐衝撃性が高く、飛来物が衝突しても割れにくい特長があります。一方、短所として耐候性が低い材料があるほか、酸・アルカリといった薬品や有機溶媒によって影響を受ける材料もみられます。

PCは新幹線のみならず航空機でも窓ガラスとして使用実績があります。しかし、図1に示すように屋外使用にもなって黄変し、視認性が低下する特性を有するほか、ブラシによる清掃で傷がつきやすいといった事例もみら

れ、長寿命化のためにはこうした点の改良が課題です。

一方、PMMAは樹脂ガラスの中で最も優れた透明性を有する材料であり、屋外使用による黄変なども少なく、長期使用に適した材料です。また表面硬度が高く、傷がつきにくいといった利点も有しています。しかし、難燃性が低く、比較的燃焼しやすいほか、PCと比べると耐衝撃性が低い特性を有します。よって、PMMA単体では車両用の窓ガラスとして用いることは困難です。PCとPMMAのこれらの特性を表1にまとめます。



図2 促進耐候性試験機の外観

### 耐候性の評価方法

鉄道車両への樹脂ガラスの適用を考えた場合、主な劣化要因は屋外環境における紫外線(☞参照)などの耐候性条件と考えられます。実際の屋外環境でこうした評価を行うには使用期間と同等の試験期間を必要とし、材料開発に要する期間としては現実的ではありません。そのため、劣化促進の方法として図2に示す人工的に屋外環境を再現できる促進耐候性試験を選択しました。また、鉄道車両用のガラスとし

#### ☞ 紫外線

太陽光には目に見える光(可視光線)と目に見えない光(不可視光線)があり、不可視光線には波長の長い赤外線、波長の短い紫外線があります。紫外線の一部はオゾン層によって吸収されますが、地表まで届く紫外線もあります。紫外線は光のエネルギーが強く、高分子材料の一種であるたんぱく質で構成される人体に対しては日焼けを引き起こす原因になります。こうした影響は紫外線の照射を受ける一般の高分子材料でも同様であり、日焼けに代わる化学構造の変化をもたらす、樹脂ガラスでは黄変などの変色や強度などの物性の変化を引き起こします。

#### ☞ 黄色度の測定

JIS K 7105(プラスチックの光学的特性試験方法)に準じて測定を行いました。測定光源は標準光C(色温度:6774K)とし、色差計によって得られる3刺激値X, Y, Z[RGB(Red/Green/Blue)を基に変換された値]から(1)式によって黄色度YIを算出し、(2)式に示すように初期値(YI<sub>0</sub>)との比較から黄変度ΔYIを求めました。

$$YI = \frac{100(1.28X - 1.06Z)}{Y} \quad (1)$$

$$\Delta YI = YI - YI_0 \quad (2)$$

表2 試験品

試験品名称	略称	製造プロセスおよび試験品詳細
ポリカーボネート単体	PC	押出成形品（積層なし）
ポリメタクリル酸メチル樹脂積層ポリカーボネート	PMMA 積層 PC	基材が PC で片面の表層に厚さ数十μmのPMMA層を設けた二層押出成形品
耐候性ポリカーボネート	耐候性 PC	基材が通常の PC で両面の表層に劣化防止の配合剤を重点的に配合し、耐候性を向上させた PC 層（厚さ数十μm）を設けた多層押出成形品

表3 促進耐候性試験の条件

光源	キセノンランプ
照度	60W/m <sup>2</sup>
波長範囲	300～400nm
蒸留水噴霧サイクル	120分照射中18分
蒸留水圧力	0.8～1.2kg/cm <sup>2</sup>
ブラックパネル温度	63±3℃
試験時間	最大10000時間

て透明性は重要な特性ですが、前項でも述べたように樹脂ガラスは劣化にともなって黄変を生じ、こうした変化にともなって強度物性が低下する可能性も考えられます。そこで、黄色度を測定（☞参照）して視認性の低下について検討を行いました。

### (1) 試験品

樹脂ガラスとして代表的な材料であり新幹線用の窓ガラスとしても使用実績のあるPCを主な対象とし、試験品はPC単体、PCの耐候性を向上させるためにPC表面にPMMAを積層したものの、さらにPC表面に耐候性層を設けたものの3種類としました。これら試験品の各種初期特性、促進耐候性試験にともなう特性変化を測定し、車両用窓ガラス材料としての利用可能性を検討しました。試験品の詳細を表2に示します。

### (2) 促進耐候性試験の方法

JIS K7350-2（プラスチックー実験

室光源による暴露試験方法－第2部：キセノンアークランプ）に基づいて、表3の条件で試験品を劣化促進環境下に設置しました。

所定時間の促進耐候性試験後に黄色度の測定をはじめとした評価試験を行い、促進耐候性条件における特性変化を測定しました。

車両用樹脂ガラスは通常5年程度の使用で黄変などの劣化の傾向が見られ始め、交換される製品もみられます。よって車両用樹脂ガラスの長寿命化を考慮すると、少なくとも10年程度の寿命が望まれます。高分子材料の劣化要因には温度や水分、空気中の酸素、紫外線、力学的な疲労や微生物の影響など各種があげられますが<sup>1)</sup>、樹脂ガラスの使用環境を考慮するとその寿命に大きな影響を与えるのが紫外線です。

今回の試験では、東京付近での日射による紫外線の年間積算照射量を参考にしてその10年分の積算照射量に相当す



図3 色差計の外観

る1万時間を促進耐候性試験の時間に設定しました。

### (3) 黄色度の評価方法

黄色度は図3に示す色差計を用いて測定します。色差計は白色ホーロー板などの標準となる色からの差異を定量的に測定できる装置であり、得られた数値から初期からの黄色度の変化（黄変度）を評価しました。

### 黄変度による劣化評価

試験品の劣化評価として強度物性についても各種評価を実施しましたが、ここでは黄変度に焦点を絞って説明します。

#### (1) 評価結果

試験品の黄変度ΔYIの測定結果を図4に示します。

全ての試験品で黄変度は促進耐候性時間にもなって増加傾向を示しました。とくにPCの黄変度増加は大きく、紫外線による各種反応によって黄変が発生することが明らかとなり、その変化の傾向から段階的に進行することが推定されました。

一方、PCと比較するとPMMA積層PCや耐候性PCでは黄変度の増加がかなり抑制されました。これらの結果はそれぞれのPC表面に施した耐候性向上対策によるものと考えられます。また、PMMA積層PCと耐候性PCの黄変度に差異は見られず、本試験の範囲

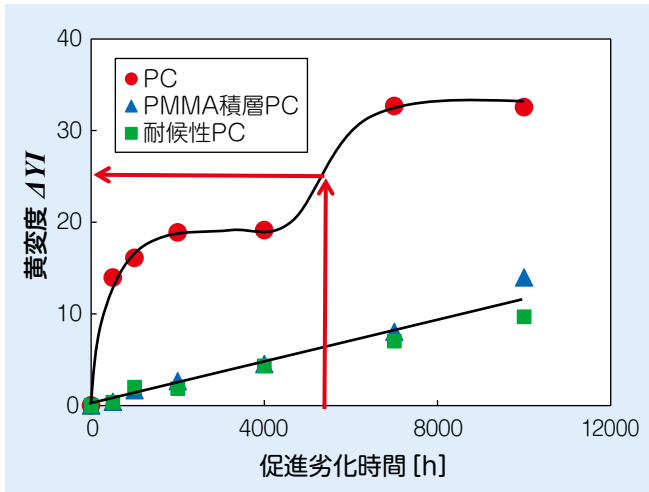


図4 試験品の黄変度変化

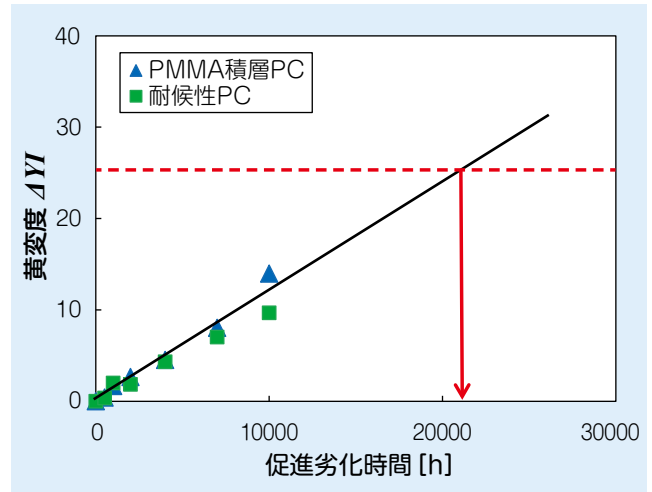


図5 試験品の長寿命化の可能性

においては同程度の黄変抑制の効果を有すると考えられました<sup>2,3)</sup>。

## (2) 長寿命化の可能性

前述のように樹脂製窓ガラスは軽量化に効果があり、高い耐衝撃特性を有しています。各種物性試験の結果においてもPCをベースとした試験品は実用水準を満足することを確認しました。一方で、黄変の進行による視認性の低下は課題です。実用において黄変の進行や傷の発生による視認性の低下が実質的な取り替えの目安となっており、鉄道車両の検査修繕現場では経験的に設定された目安によって5年程度の使用期間で交換される製品もみられます。そこで、PMMA積層PCおよび耐候性PCが5年程度の紫外線照射を受けたPCの黄変度に達するまでの期間を推定しました。

紫外線の積算照射量を考えた場合、東京付近で5年間の積算照射量は約1,200MJ/m<sup>2</sup>と考えられます。この積算照射量を今回の促進耐候性試験の条件に当てはめると、5,555時間の試験時間に相当します。この時のPCの黄変度ΔYIは図4からおよそ25となります。

仮に、この程度の黄変度を取り替

え基準として考えると、PMMA積層PCおよび耐候性PCの黄変度が1万時間をこえてもそれまでと同様に増加すると仮定した場合、黄変度が25に達するまでの時間は図5に示すように約22,000時間と算出されます。これは東京付近でおよそ20年間の使用期間に相当し、現状と比較して大幅な長寿命化が期待されます。

これは本試験結果からの推定であり、こうした性能が実用上得られるかどうかは不明な点があります。たとえば、実用条件では表面に傷が発生することにより、黄変度の変化が加速するようなケースも考えられるためです。しかし、PMMA積層PCや耐候性PCの適用により、PCをベースとした樹脂製窓ガラスに長寿命化の見込みが明らかになりました。

## おわりに

低コスト化に向けたアプローチとして、材料の長寿命化はもちろんですが、適正な劣化評価の実施も重要な課題です。黄変度の測定は樹脂ガラスの劣化の特徴を反映しながら、非破壊かつ在姿での測定が可能な手法です。そこで、測定における外光の遮光方法など

測定条件を整理し、複数回の現地試験を行って良好に測定できる条件を見いだしました<sup>4)</sup>。実際に現車で在姿試験を行った例もあり、適正に測定評価が可能であることが確認されています<sup>5)</sup>。今後は材料開発と合わせて、こうした評価手法の普及にも努力したいと考えています。[RRR]

## 文献

- 1) Mikiya Ito, Kazukiyo Nagai : Degradation issues of polymer materials used in railway field, Polymer Degradation and Stability, Vol.93, Issue 10, pp.1723-1735, 2008
- 2) Mikiya Ito, Yoshihiro Masuda, Kazukiyo Nagai : Evaluation of long-term stability and degradation on polycarbonate based plastic glass, Journal of Polymer Engineering, Vol.35, Issue 1, pp.31-40, 2015
- 3) 伊藤幹彌, 柘田吉弘, 山中翔 : 車両用樹脂製窓ガラスの黄変度測定による劣化評価, 鉄道総研報告, Vol.30, No.6, pp.37-42, 2016
- 4) 伊藤幹彌, 石田陽士 : 黄変測定による樹脂ガラスの劣化評価, JREA, Vol.58, No.5, pp.20-24, 2015
- 5) 佐野秀知, 石田陽士, 一木剛, 杉浦芳光, 山中翔, 柘田吉弘, 伊藤幹彌 : 新幹線用窓ガラスの劣化評価に関する基礎研究, R&m, Vol.24, No.2, pp.66-70, 2016