透明樹脂の高剛性・高タフネス化技術 ―自動車の軽量化を目指して―

住友化学株式会社
石油化学品研究所
角谷英則
安富陽一
高木康行*
山崎和広
笠原達也
先端材料開発研究所
板東晃徳

はじめに

自動車から排出される二酸化炭素を削減するためには、自動車の軽量化が重要である。世界各国は自動車から排出される温室効果ガスの規制を強化している。例えば、欧州連合（EU）は域内で2021年に新たに登録される自動車に対して、二酸化炭素の平均排出量を走行1 kmあたり95 gにすることをメーカー各社に求めている。また、2030年にはこの排出量を約60 gまで削減することも決定された。これらの規制に準じていくには、二酸化炭素の排出量が少ない新エネルギー車を加速的に普及させる必要がある。しかし、現時点において新エネルギー車の航続距離は短く、その普及を妨げている。自動車の軽量化はこの航続距離の延長に貢献する。

自動車窓に使用されている無機ガラスを透明樹脂に置き換える技術への関心は高い。自動車窓は車両重量の約8％を占め、ボディを除く車両部品の約六割を占めている[1)]。これを透明樹脂に置き換えることで、車両重量を大幅に軽減できる。また、透明樹脂は成形加工性に優れ、デザインの自由度が広がるため、新たな価値を追求できる。**Fig. 1**に自動車窓を高剛性・高タフネスな透明樹脂に置き換えることで実現できる車内空間の例を示す。窓の面積を広くしたデザインとすることで、運転席からの視界を広く確保し、視認性の向上や開放感のある車内空間を実現できる。

Fig. 1 A cabin space realized by highly stiff and tough transparent resin

透明樹脂メーカーは自動車窓の樹脂化に向けて検討しているが、実用化は未だ限定的である。ポリカーボネート系樹脂は透明樹脂の中で優れた耐衝撃性を有しているが、剛性が低く、たわみやすい。また、屋外での耐久性や耐傷付き性も不足しているために、それらを補う表面ハードコートの技術が欠かせない。現在もこのハードコートの技術を中心に開発が進められている。一方、ポリメタクリル酸メチル（PMMA）系樹脂は透明樹脂の中で優れた屋外耐久性と高い剛性を有している。しかしながら、衝撃に対しては弱く、割れやすいため、現時点では自動車窓への適用例は無い。

自動車窓を樹脂化するにあたっては、透明樹脂の高剛性化と高タフネス化の両立が課題である。これまでの透明樹脂は、無機ガラスや金属と比べるとたわみやすく、部材として要求される強度を確保する

＊ 現所属：住化プラステック株式会社 兼 石油化学品研究所

Copyright © 2020 Sumitomo Chemical Co., Ltd.

ためには、部材を厚く設計する必要があった。そのため、単に意匠性が損なわれるだけでなく、本来の目的である軽量化効果を十分に発揮できなかった。また、自動車窓には乗員保護のために、硬い飛来物が衝突しても簡単には割れないタフネスも求められる。安全でかつ軽い自動車窓を実現するためには、たわみにくく割れにくい透明樹脂の技術が必要である。

高剛性・高タフネス透明樹脂

当社は、高い透明性を維持したまま、従来はトレードオフの関係にあった剛性とタフネスを高い水準で両立させる技術を見いだした。内閣府の総合科学技術・イノベーション会議が推進した革新的研究開発プログラム（ImPACT）「超薄膜化・強靱化『しなやかなタフポリマー』の実現」（伊藤 耕三 プログラム・マネージャー）に当社は参画し、当社の持つ透明樹脂に関する基盤技術とアカデミアの先導的な研究とを連携することにより、この非連続なイノベーションを成し遂げた。**Fig. 2**に高剛性・高タフネス化技術を適用した透明樹脂の剛性とタフネスの関係を示す。この高剛性・高タフネス化技術を適用することで、延性破壊を示す従来の透明材料比でたわみにくさ（剛性）が約1.6倍、脆性破壊を示す従来の透明樹脂比でタフネス（耐衝撃強度）が10倍以上という高剛性・高タフネスな透明樹脂を実現した。

高剛性・高タフネス透明樹脂は自動車窓に求められる技術水準に大きく近づいた。**Fig. 3**に自動車窓に求められる技術水準を点線で示す。この技術水準は自動車のルーフ全体を透明樹脂に置き換えた大面積

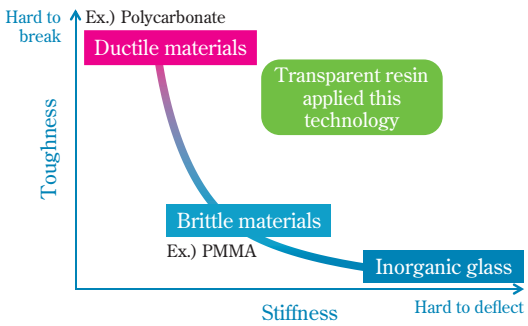

Fig. 2 Highly stiff and tough transparent resin

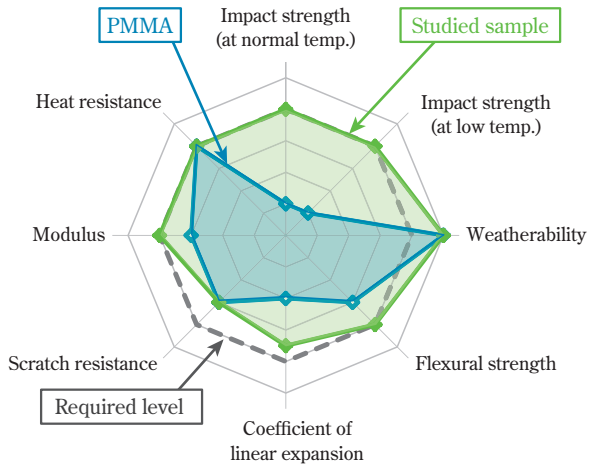

Fig. 3 Technical level required for automotive windows

の窓を想定している。一般のPMMAは、常温および低温での耐衝撃性に求められる技術水準に到達していない。また、大面積の窓を想定した場合には、剛性や曲げ強度、線膨張係数についても不足する。本技術を適用した透明樹脂は、PMMAの持つ透明性を維持したまま、常温および低温での耐衝撃性が向上し、自動車窓に求められる技術水準を満足した。また、剛性や曲げ強度、線膨張係数も改善し、大面積の透明樹脂窓の実現に向けて技術が大きく前進した。

高剛性・高タフネス透明樹脂へのアプローチ

高剛性・高タフネスな透明樹脂の実現に向けて、PMMAを出発点に検討を進めた。PMMAは自動車窓に適した良好な光学性能と高い屋外耐久性を有している。また、たわみにくさ（剛性）や傷つきにくさ（表面硬度）といった性質にも優れる。一方、PMMAは自動車窓として想定される使用条件では割れやすく、そのままでは使用できない。そのため、自動車窓に適するように、PMMA本来の特長を生かしつつ高タフネス化する技術が必要であった。

PMMAを高タフネス化するにあたり、まずは原点に立ち戻り、高分子材料の破壊挙動を理解することから始めた。高分子材料は破壊挙動によって脆性破壊材料と延性破壊材料の二種類に分類される。高分子材料の引張試験における応力 - ひずみ曲線を**Fig. 4**に示した。PMMAは脆性破壊材料に分類され、一方、ポリカーボネートは延性破壊材料に分類される。こ

 Copyright © 2020 Sumitomo Chemical Co., Ltd.

れらのように同じ透明樹脂であってもPMMAとポリカーボネートとは全く異なる破壊挙動を示す。

高分子材料の破壊挙動における脆性－延性転移は、PMMAの高タフネス化にヒントを与える興味深い現象である。**Fig. 5**に外部環境による高分子材料の破壊挙動の変化の概念図を示す。通常の環境において脆性破壊挙動を示すPMMAも、温度や圧力といった環境因子によって延性破壊挙動を示すことが知られている[2]。この現象は、脆性－延性転移という概念で説明されており、すべての高分子材料に共通する概念である。つまり、高分子材料の破壊挙動は必ずしも物質固有の特性ではなく、環境因子による高分子材料の高次構造の変化が破壊挙動を左右することを示している。

当社は高分子鎖の高次構造を意図的に制御し、一般的な自動車窓の使用環境においてPMMAに延性破壊挙動を発現させることを目指した。具体的には、

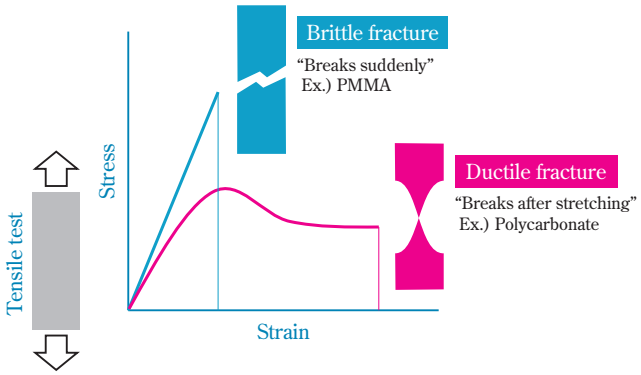

Fig. 4 Fracture behavior in polymer materials

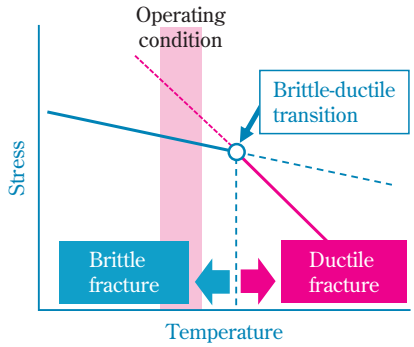

Fig. 5 Illustration for brittle-ductile transition

脆性－延性転移点をより低温側にシフトさせることを考えた。高分子鎖の高次構造の設計にあたってはImPACTに参画したアカデミアによる高分子破壊機構の本質理解の進展[3]が大きな推進力となった。高分子の一次構造と分子レベルでの高次構造の設計を組み合わせることで、PMMAの脆性－延性転移を制御することに成功し、高剛性・高タフネス透明樹脂を実現した。

高タフネス化の検証

本技術を適用した透明樹脂は、外部応力に対してクラックやクレイズの発生が抑制されていた。放射光X線を用いて透明樹脂の破壊挙動を観察した。**Fig. 6**に示した三点曲げの装置を放射光施設に設置し、小角X線散乱パターンをその場観察した。試験片に曲げ変形を与えると、その凸面側に引張応力が働く。脆性破壊材料であるPMMAではこの曲げ変形に伴い、引張応力に平行な方向に鋭く強い散乱が現れ、また、垂直な方向にも散乱光の増加が確認された。これらの散乱は、それぞれ、PMMAが破断する前に試験片の内部で発生する微小クラックと、クラックの先端に形成されるクレイズの構造に起因すると考えられる。この微小クラックが大きく成長すると試験片は破壊する。一方、本技術を適用した透明樹脂においては、曲げ変形において微小クラックやクレイズに起因する散乱光の増加は確認されなかった。

自動車窓ガラスとしての実用評価

本技術を適用した透明樹脂は、自動車窓ガラスとして必要な耐衝撃性を有している。JIS R 3211（自動車用安全ガラス）、JIS R 3212（自動車用安全ガラス試験方法）には自動車安全ガラスの基準とその試験方法が定められている。その中で、JIS R 3212 5.4項には「安全ガラスが小さな硬い飛来物の衝撃に対して最低限必要な粘着性又は強度をもっているかを調べるために行う」試験方法として、耐衝撃性試験が示されている。**Fig. 7**にJIS R 3212耐衝撃性試験の概略を示す。試験の落下高さと試験温度は、安全ガラスの種類、使用される部位および呼び厚さによって規定されている。現在の規格では、透明樹脂からなる有機ガラスを一般車両の前面窓に使用する基準は示されていないため、合わせガラスを自動車前面窓に使用するときの試験条件ならびに基準を用いて評価した。

Copyright © 2020 Sumitomo Chemical Co., Ltd.

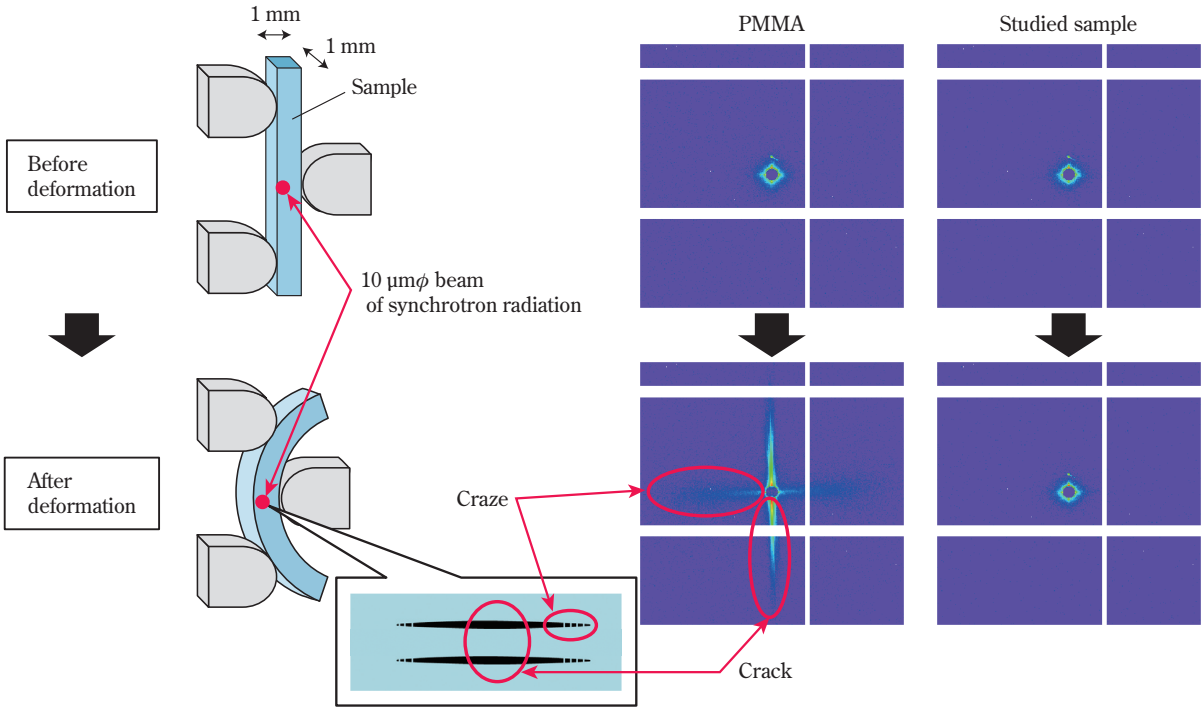

Fig. 6 *In-situ* observation of small-angle X-ray scattering pattern by a three-point bending apparatus

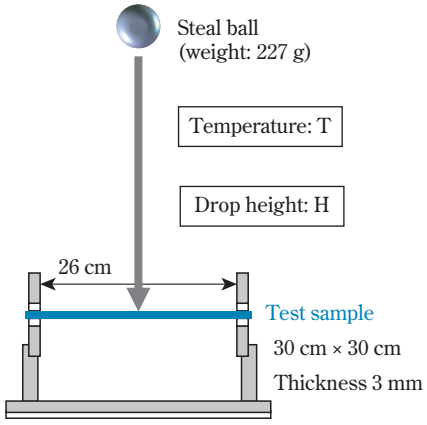

Fig. 7 Test methods of safety glazing materials for road vehicles (JIS R 3212) impact resistance test

Table 1 Conformity to impact resistance requirement described in JIS R 3211

	Test condition (thickness = 3 mm)		
Applicable part	Front windows		Except for front windows
Temperature (T)	–20 °C	40 °C	23 °C
Drop height (H)	8.5 m	9 m	2 m
Test result	Passed	N = 3 No break	N = 3 No break

試験の結果、高剛性・高タフネス透明樹脂（厚み3 mm）の試験サンプルは–20 ℃の試験温度において本基準をクリアした。**Table 1**に示した他の試験条件においても割れは発生しなかった。

本技術を適用した透明樹脂は開放感のある車内空間と軽量化を同時に実現できる。**Fig. 8**には単位面積当たりの重量を試算し、鋼板と合わせガラスに対して比較した結果を示した。自動車用鋼板（厚み0.8 mm）の重量を基準とし、高剛性・高タフネス透明樹脂の厚みはこの鋼板と同じたわみとなるよう3 mmに設定した。高剛性・高タフネス透明樹脂が車両部品として実用化されると、合わせガラスに対して六割超、さらに鋼板に対しても約四割の重量削減が見込める。これまで不透明であった鋼板の部分を、本技術を適用した透明樹脂に置き換えることで、軽量化しながら、大面積の窓を実現できる。

 Copyright © 2020 Sumitomo Chemical Co., Ltd.

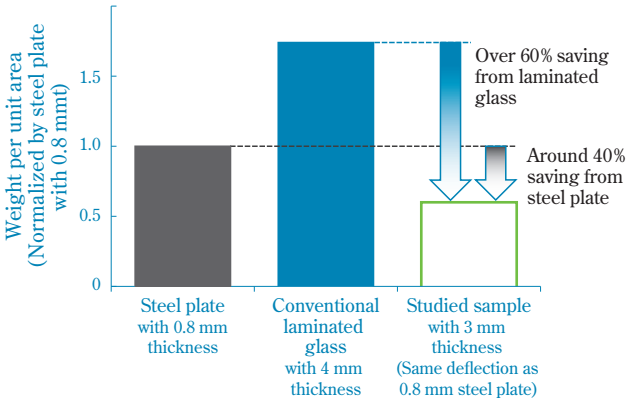

Fig. 8 Estimated weight saving effect replaced by the studied sample

本技術を適用した透明樹脂を用いて、コンセプトカーに搭載するリアウィンドウを製作した。コンセプトカー「ItoP」の製作は「しなやかなタフポリマー」の価値を検証するために企画された。**Fig. 9**がコンセプトカーに搭載されたリアウィンドウ部材である。リアウィンドウ向けにスケールアップした検討材は対角約800 mm×約950 mmのサイズで、三次元曲面形状を有し、実車スケールの部品として完成させた。作製した部品の一部を切り取り、剛性とタフネスを確認した。透明材料の物性は期待通りの値を示しており、本技術の中スケールでの再現性を確認した。

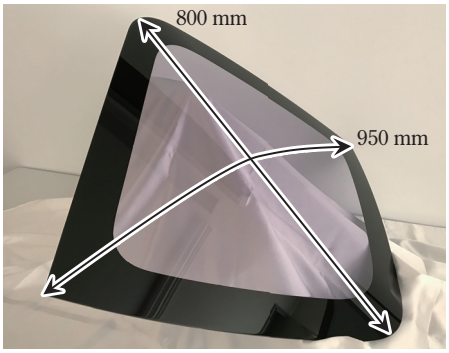

Fig. 9 The rear window mounted on the concept car “ItoP”

おわりに

高分子の一次構造と分子レベルでの高次構造制御の高度化により高剛性・高タフネスな透明樹脂を実現した。本技術を適用した透明樹脂は自動車用安全ガラス（JIS R 3211）が定める前面窓用安全ガラスの耐衝撃性の基準をクリアしている。この技術を自動車のキャビンを構成する前面窓やルーフ部材に適用することで、環境に配慮しながら、視界確保による安全性の向上や解放感のある空間の実現による快適性や移動の楽しさといった新たな付加価値が期待できる。

今後は、自動車用部材などの大型成形品の作製に向けスケールアップ検討を進めるとともに、本樹脂の特長を生かした幅広い分野への応用・展開を進める。そして、自動車の軽量化などによる省エネルギー化の実現を通じて、持続可能な社会に貢献したい。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ImPACT伊藤プログラム伊藤 耕三先生、加藤 尚樹様、石原 正司様、山形大学 井上 隆先生、伊藤 浩志先生、九州大学 高原 淳先生、小椎尾 謙先生、名古屋大学 岡崎 進先生、大阪大学 原田 明先生、特定国立研究開発法人 理化学研究所 高田 昌樹先生、星野 大樹先生、藤波 想先生、仲谷 友孝先生、東京工業大学 中嶋 健先生、北海道大学 グン 剣萍先生、神戸大学 佐藤 春実先生をはじめ、伊藤プログラムに参画された多くの方々にご協力、ご助言、ご指導いただきました。また、日産自動車株式会社、東レ・カーボンマジック株式会社の皆さまからも多くのご指導をいただきました。心から御礼申し上げます。

引用文献

1) “2016 次世代自動車関連マテリアル総調査”, 19, 富士キメラ総研 (2016).
2) K. Matsushige *et al.*, J. Appl. Polym. Sci., 20, 1853 (1976).
3) K. Fujimoto *et al.*, Polymer, 178, 121570 (2019).

Copyright © 2020 Sumitomo Chemical Co., Ltd.