自動車産業におけるプラスチック成形加工の現状と展望

栃岡 孝 宏*

1. はじめに

自動車を取り巻く環境は急激に変化している。地球温暖化、化石資源の枯渇、材料価格の高騰などの、地球規模の資源と環境の問題に加え、バイオ燃料によるエネルギーと食糧の競合問題も自動車産業の新たな課題となっている。地球温暖化防止のための二酸化炭素排出低減、省資源・省エネルギーというグローバルな環境保全に対する社会的要請が益々高くなっており、自動車産業においても燃費向上に大きく貢献する軽量化技術の開発、資源を有効に活用するためのリサイクル技術の開発、再生可能資源である植物由来材料の開発、などが活発に行われている。プラスチック成形加工学会の創立 20 周年を迎える今日、自動車産業におけるプラスチック材料と成形加工技術の 20 年の進化について代表的な事例を紹介しながら、自動車産業を取り巻く環境変化を踏まえ、今後を展望したい。

2. 自動車用プラスチック材料と成形加工技術の現状

2.1 バンパー材料とその成形法の変遷

図 1 は、プラスチック成形加工学会創立とほぼ同時期の 1989 年に発売された小型オープンスポーツカーの写真である。ボンネットとフェンダーの一部までバンパーに取り込み、ターンランプも内蔵したデザイン性に富んだ大型バンパーである。材料は硬質のガラス繊維強化ポリウレタンであり、成形工法は RIM (Reaction Injection Molding) 法である。当時、このような大型バンパーの成形には液状原料の優れた流動性とウレタンの持つ高い衝撃強度、ガラス繊維強化による高い剛性と寸法精度が必要であり、現在のバンパー材料の主流である PP の射出成形では実現できなかった。図 2 は、同じ小型オープンスポーツカーの 3 代目である。初代と同様の大型バンパーの造形でありながら、材料、PP、エラストマー、タルクから構成される PP 複合材料であり、成形工法は射出成形である。1990 年代前半から、PP の高結晶化、高流動化が図られ、バンパーの大型化に対応していくと共に、衝撃強度を向上させるエラストマーの添加が図られ、弾性率との両立や塗装密着性の改善を目的に、緻密な分散構造の制御が成されていった。よ

図 1 ウレタンバンパー (1989 年)

図 2 PP バンパー (2005 年)

図 3 ラジエータグリルを統合した大型 PP バンパー

り微細かつ分散性の高いタルクの複合による剛性向上も相俟って、薄肉軽量化が進展した。エラストマー成分も後添加から重合工程で取り込むことが可能になり、コスト低減も大幅に進んだ。こうした PP 材料の技術的な進化により、ウレタンバンパーを代替していった。

現在では、バンパは外装部品というより、ボディー外板の一部と言える。従来、耐熱性やメッキ加飾性から ABS 樹脂が主流であったラジエータグリルも、PP 材料の進化によりバンパーに統合されてきている (図 3)。

低圧で長い流動長を充填できる流動性と、薄肉で高い面剛性を確保できる高結晶性、寸法安定性と剛性を両立する

* Tochioka, Takahiro
マツダ(株) 技術研究所
広島県安芸郡府中町新地 3-1 (〒730-8670)
2008.7.13 受理

図4 射出成形のガラス長繊維強化PPが、鉄板に代わって車体前部とドアの構造部材に適用された事例

フィラー添加技術，これら特性とバンパーの主たる機能である耐衝撃性を兼ね備えるという要求は今後も継続していくと思われる．同時に，ウエルド，ヒケ，バリという不良を極限まで低減する技術開発と成形サイクルの短縮は，高効率な生産を追求する自動車産業において，今後も重要な開発テーマである．

2.2 モジュール化と車体構造部材への適用

モジュール化とは，レイアウト上，近くにある部品群を一つの単位としてとらえ，部品間の機能統合や部品廃止などのVE (Value Engineering) によって大幅なコスト低減と付加価値の向上を目指すものである．最近の10年間に，機能統合のための重要な要素である，高い成形自由度と生産性，高度な部品の一体化・部品機能の集約化が可能な特性を有する材料とプロセスの開発が成された．これにより，この20年間における自動車の樹脂化の大きな変化点とも言える，モジュール化に伴う車体構造部材への樹脂の適用が進展した．

図4は，車体前部とドアの機能部品を搭載するモジュール基材に，世界で初めて射出成形のガラス長繊維強化PPが適用された事例である．左右の黒い部品単体がガラス長繊維強化PPの射出成形で製造された基材を示し，図下方がそれぞれの車体への搭載状態を示している．この技術が採用できたポイントは，射出成形過程においてガラス繊維が短く折損し，材料が本来持つ強度を維持できないという課題に対して，ガラス長繊維強化PPの材料改良と，ガラス繊維折損を防止する射出成形スクリーンの開発を組み合わせ，強度向上を実現したことによる．また，強度等の材料特性が向上したことで，それを使いこなす様々なアイデアが創出されたことが重要なポイントである．

2.2.1 フロントエンドモジュールの事例

このフロントエンドモジュールキャリアでは，既存の鉄板の6部品からなる従来のスチール製の部材の代替に加え

図5 射出成形の形状自由度を活かした設計

て，ワイヤーハーネスクリップ，バンパー&ランプブラケット，ラジエータ締結ブラケットおよびシールプレートなどの樹脂部品を一体化し，部品点数を20点以上削減している．鉄板に代替できる強度と射出成形の形状自由度が両立したからこそ，部品単品で25%のコスト低減および18%の重量低減を達成した．さらに，車両性能の実現のため，変形量と発生応力が許容値以下になるように製品構造を決定している．例えば，アイドリング時のステアリング振動を抑制するためには，ラジエータを共振させることが必要となる．そのためラジエータ取付け部周辺では，応力を分散させながら剛性を確保できるリブ形状と肉厚を，射出成形の形状自由度を活かし設定した(図5)．加えて，この部品のデザインを工夫して，初期変形領域におけるエネルギー吸収特性を向上させ，衝突時にラジエータおよびコンデンサーなどの機能部品を保護する構造を実現した．これまでの車両構造では，15 km/hでの衝突時に機能部品を保護するためにはフロントフレームの補強が必要となるが，この車両のフロントエンドモジュールキャリアでは，衝突

図6 衝突時のエネルギー吸収に使える有効スペースの拡大

図7 樹脂リフトゲートモジュールの実用化例

時に車体フロントフレームとの締結部が破断し、後方へ移動することで機能部品を保護できる。そのため衝突エネルギーを吸収する有効スペースが確保できた(図6)。この結果、フロントフレームの補強部品を廃止するなど、車両構造全体に対する部品点数削減と約10kgの重量低減に貢献できている。

2.2.2 樹脂リフトゲートモジュールの事例

図7に示す樹脂リフトゲートモジュールは、インナーが射出成形のガラス繊維強化PP、アウターがPC/ABS樹脂で構成されている。鉄板と同等レベルの温湿環境下での寸法安定性と、後部からの衝突にも耐えられる高い衝撃強度を実現している。さらに、インナーパネルは、ガラス繊維を40%以上含有しているにも関わらず、ガラス繊維の表面への浮きがなく、無塗装で高品質な外観を達成し、内装トリムの機能をリフトゲートの骨格であるインナーパネルに兼備させることができています。この技術は、オープナーの樹脂製ルーフ(屋根)にも応用されている。これらのことが大幅な軽量化に繋がっている。つまり、プラスチック成形加工の進化と自動車の設計技術の革新が両輪となって、モジュール化によるコスト・質量の低減と機能向上を実現させている。今後も、こうしたプラスチック成形加工の技術の進化と共に、モジュール化や機能統合の取り組み

表1 自動車のリサイクル法規制動向

	CY	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2015	2016
新車領域	日本	リサイクル可能率90%										
	欧州	リサイクル可能率95%(認可要件)										
	中国	リサイクル可能率85%										
市場領域(ELV)	日本	フロン回収破壊法 自動車リサイクル法										
	欧州	ELVリサイクル法										

は益々高度化していくと考えられる。

3. リサイクル技術の進展

表1にリサイクル法規制の動向を示す。循環型社会の構築に向けて、新車領域、つまりリサイクル可能な設計を求めると共に、市場領域、つまり廃車のリサイクル実行も義務付ける方向にある。中国なども日本や欧州に追従する動きを見せている。

日本国内において2005年に施行開始された自動車リサイクル法は、エアバック、フロン、ASR(Automobile Shredder Residue: 一般にシュレッダダストと呼ばれる廃車くず)の適正処理が義務化されている。その内、ASRは主に埋立てにより処理されているが、ASRに占めるプラスチックくずの比率は高い。そのため、プラスチック類のリサイクル性を高め、ASRを減容化することが求められている。また、2015年に廃車質量の95%をリサイクル(実行)することを義務付ける法規制が日欧で施行される予定であり、そのための施策として、新車部品へのリサイクル材料の利用拡大や、新車のリサイクル性向上(解体容易な構造/リサイクル容易な材料の開発・採用)などの課題に、自動車各社とも積極的に取り組んでいる。

3.1 バンパーからバンパーへのリサイクル技術

ASRの減容化には、その約30%を占めている樹脂部品、とりわけ大型部品であるバンパーについて、各社とも市場損傷バンパーの回収・再利用を実施している。再生材は、その適用先によって要求される品質レベルが異なる。特に、表面にシボが無いバンパー(以下鏡面バンパー)へ適用するためには、塗装外観を確保するため、99.85%の塗膜除去レベルを達成する必要がある。この鏡面バンパーへ適用可能なレベルに塗膜を除去する技術の概要と新型車のバンパーへの適用例について示す。

3.1.1 熱剥離式塗膜除去プロセスとその課題

バンパーの粉碎品同士を機械的にこすり合わせることでより生じる摩擦熱によって、塗膜を除去する熱剥離式塗膜除去プロセスは98.5%もの塗膜除去率を実現する非常に優れた方法である。しかし、この再生材を鏡面バンパーへ適用した場合、その塗装表面には、図8(a)に示すような微細な凹みが生じる。図8(b)に、その断面を光学顕微鏡で観察した結果を示す。これを見ると、基材表面付近には残存塗膜が認められ、これが微細な凹みを生じる原因となっている。バンパー再生材を鏡面バンパーへ適用するためには、このような凹みが生じないように、塗膜除去率を現行の98.50%から99.85%以上に向上させる必要がある。

図 8 残存塗膜による表面欠陥

図 9 光学選別機の仕組み

3.1.2 新しい塗膜除去プロセス

熱剥離式塗膜除去プロセスの後に、精米機の業界で穀物の選別に用いられている光学選別機を組み合わせ、塗膜剥離プロセスで剥離しきれなかった塗膜の付着した粉碎品を選別除去し、塗膜除去率の向上が図られた。

図 9 に光学選別機の概要を示す。バンパー粉碎後に塗膜剥離処理した粉碎品を、選別機のホッパーに投入し、シューターを通過後、所定の位置で光と CCD センサー (A) により、粉碎品を認識する。この時、粉碎品に塗膜が付いていると、その色は粉碎品 (黒色) よりも強い反射強度を放出するため、これを検知し、その直後にエアーエジェクター (B) により、選別・除去するものである。

バンパーの塗膜には様々な色がある。選別が容易な色に比べて、選別が難しい赤や青などの色は、反射強度が弱い。そこで、さまざまな光源を検討し、選別できている色の反射強度を維持しつつ、赤、青の反射高度を上げることができ、ハロゲンランプが見出された。これにより、赤、青などの選別率は格段に向上し、塗膜付再生材の選別が可能になった。

光学選別機を組み合わせた塗膜除去プロセスで処理した粉碎品の塗膜除去率 (サンプル数 20 の平均値) は、従来の 98.50% から 99.97% へと大幅に向上し、目標の塗膜除去率 99.85% をクリアした。2005 年から新型車のバンパーに使用され、順次適用車種が拡大されている。この 20 年、アンダーカバーなど要求機能の低い部品から要求機能の高

図 10 バンパー再生材を使用した新型車バンパー

表 2 ポリ乳酸と自動車用 PP の物性比較

	Current PLA	Typical PP for automobile interior
Izod impact strength (kJ/m ²)	3	5
DTUL* (°C) 0.45 MPa	53	110
Tensile Strength (MPa)	70	25
Flexural modulus (GPa)	3.7	1.0
Plant-derived content (%)	100	0

*Deformation temperature under load

い新型車バンパーまで、塗膜除去などのリサイクル技術の進歩により適用可能部品が拡大した。一方、工程内廃材から市場回収バンパーまで、リサイクルの対象も高度化した。今後は、廃車のリサイクルへと進んでいく。リサイクル技術の更なる進歩が期待される。

4. 脱石油、再生可能資源由来のプラスチックの将来性

バイオマスプラスチックは、材料製造における石油依存度低減や二酸化炭素排出に関しカーボンニュートラルであるといった理由から、将来の自動車用樹脂材料として有望である。既存のバイオマスプラスチックは、自動車用樹脂材料としては耐衝撃性と耐熱性が十分でなく、また結晶化が遅いため射出成形に適していなかった。しかしながら、結晶化促進核剤や相容化剤の配合、および成形条件の最適化によって、材料物性の向上と成形性の改善が試みられ、その結果、自動車内装部品に使用できる外観品質や物性を持ち、かつ射出成形が可能な材料が近年になり開発された。この新開発のバイオマスプラスチックは、ポリ乳酸を主原料とし、結晶化促進核剤等の添加剤も植物由来のものを原料としているため、88% と高い植物度を実現している。

4.1 ポリ乳酸の課題

ポリ乳酸は代表的なバイオマスプラスチックであり、トウモロコシなどの植物から得られるデンプン、グルコースなどの発酵によって得られた乳酸を重合することによって現在は製造されている。ガラス転移点は PA 6 に近い約 60℃、融点は PP に近い約 170℃、比重は PET 並みに約 1.3 と高く、機械的性質は PS のように硬くて脆く、30~40℃程度の金型温度で成形した場合は透明となる熱可塑性プラスチックである。つまり、ポリ乳酸は、耐衝撃性と耐熱性が低く、自動車用には材料物性が不十分であることが分かる。これまでに、種々の改良が検討されているが、いずれ

も一長一短である。例えば、ケナフ等の天然繊維による強化では、長繊維強化により耐衝撃性を向上できるが、成形方法が圧縮成形法に限定されている。また、PC等の石油系樹脂とアロイ化した材料が電化製品に応用されているが、耐熱性等が向上するものの、高い植物度（植物由来成分の含有量）を維持するのが難しい。

ポリ乳酸は、射出成形時に金型温度が30℃程度であれば、成形サイクルタイムは1分程度と短い、結晶化度が低くなるため、成形品は耐熱性が低い。一方、金型温度が100～120℃程度であれば、結晶化度は高くできるものの、結晶化速度が極めて遅いため、成形サイクルタイムが10分以上と長く、生産効率が悪い。また、成形機内での滞留時間が長くなり、ポリ乳酸が劣化するという問題もある。つまり、高い結晶化度の成形品を短い成形サイクルタイムで成形することが難しい。この改良のため、結晶化を促進させる核剤としてタルク等の無機フィラーを添加している例があるが、成形サイクルタイムは短くなるものの、材料の比重が更に高くなり、焼却後に無機フィラーが残渣として残る。

4.2 自動車用ポリ乳酸開発材

耐熱性と生産性を同時に向上させる方法として、ポリ乳酸そのものの結晶化を高めるため、結晶化促進核剤を添加する方法が取られた。耐熱性向上には、結晶化速度を速くして、結晶化度を高めることが有効であることが知られている。従来の方法は、核剤として無機フィラーを添加する、分散が悪く数 μm サイズが限界であるため、結晶が余りできず、効果が不十分であった。そこで、高融点プラスチック成分を核剤として活用することが考えられた。これには、植物度を高く維持するため、石油系プラスチックではなく、核剤の効果を持つ乳酸共重合体を新規に開発した結果、3～6 wt%の添加で高い結晶化促進効果を示すものが得られた。具体的には、ステレオコンプレックス構造により融点を高くした乳酸共重合体である。成形時に、融けた状態から冷えていくと、ステレオコンプレックスが先に固まる。これを起点として母材のポリ乳酸の結晶を成長させる。溶けた状態がスタートであるため分散もよく、この方法により結晶化速度と結晶化度を向上させることができた。その結果、耐熱性を60℃から100℃以上に向上させることができた。

また、脆性破壊を防いで耐衝撃性を改善するには、一般に大きく2つの方法、すなわち、クレイズ強度（分子鎖そのものの強度）を高くする方法とひずみの拘束を解放する方法がある。本開発材では市販ポリ乳酸をベースとするため、分子量分布の制御や分子構造そのものの改良が必要なクレイズ強度を高くする方法ではなく、ひずみの拘束を解放する方法が試みられた。通常この方法には、柔らかい成分（耐衝撃性改良剤）を微分散させて、応力集中を減少させる方法が用いられる。しかし、PPに対するエチレンプロピレンゴム（EPM）や、PSに対するスチレンブタジエンゴムのように、ポリ乳酸に対して微分散する耐衝撃性改良剤は知られていない。そこで、ポリ乳酸と他の樹脂の分子同士を結合させる共重合技術を活用して、ポリ乳酸と脂肪族ポリエステル共重合体を耐衝撃性改良剤として微分散させる相溶化剤を新規開発し、これを添加することで耐

図11 ポリ乳酸開発材に物性

図12 ポリ乳酸開発材の適用部品

衝撃性を向上させた。

開発材の物性を図11に市販のポリ乳酸、石油系樹脂とアロイ化した改良ポリ乳酸および開発材の耐衝撃性と耐熱性を示す。改良ポリ乳酸と比べても、耐衝撃性が約3倍、耐熱性も大幅に向上している。

4.3 適用部品

ポリ乳酸開発材を適用したインパネ周辺の内装パネルを図12に示す。

4.4 繊維としてのバイオマスプラスチックの可能性

自動車内装表皮に使用できる品質と耐久性を持つ、植物由来100%の繊維を使用した自動車内装用バイオフィブリックも開発された（図13）。このバイオフィブリックは、原料樹脂全体にステレオコンプレックス構造を導入して、繊維の強度を高め、シート表皮に適用可能な耐摩耗性、耐光性を確保した。160℃以上の染色条件にも耐えられる。これにより、自動車用途に耐えうるポリ乳酸100%の繊維の製造が可能となった。

4.5 食糧や環境との共生

高い植物度でありながら、耐衝撃性と耐熱性を向上させ、自動車内装樹脂材料として使える物性の材料が開発されるようになってきた。開発材で製作した内装部品は各種信頼性試験の管理基準をクリアしている。

図14は、これらバイオプラスチック、バイオフィブリックが内装部品に採用され、2008年度に実用化される予定の車種である。

図 13 植物由来 100% の繊維からなるバイオファブリックとシート

今後は、更なるポリ乳酸の改良や、ポリ乳酸以外の植物由来のバイオプラスチックが開発されてくると思われる。また、食糧と競合しない非可食性の植物を原料とする技術が進展してくると考えられる。今後の 20 年間にプラスチック原料は食糧や環境との共生を図りながら、多様化していくと思われる。

5. おわりに

本稿では、自動車プラスチック部品の代表格であるバンパーを題材に、材料と成形技術の進化を述べた。また、プラスチックが構造部材へ適用範囲を広げた事例の代表格であるモジュール化の進展について述べた。更に、材料を作り、使うだけでなく、再生・再利用するためのリサイクル技術について、新車バンパーへの再利用という高付加価値化を達成した事例を代表として述べた。そして脱石油・再生可能資源からのプラスチックが自動車用途へ使用できるまでになった事例を述べた。その他にも、燃料タンクの樹脂化、エンジン吸気部品に代表されるエンジンルーム内の耐熱性を要求される部品の樹脂化、CFRP 製プロペラシャフトの実用化など、自動車用途のプラスチックが、加飾目的から、デザイン、機能、構造部品へと劇的に用途拡大をした 20 年であったと言える。更に、今後の 20 年は環境との共生の 20 年になると思われる。自動車のリサイクル法規制はリサイクルする質量の規制であり、バイオプラスチックのカーボンニュートラルな特性は現在のところ反映することはできない。しかし今後、安全性・環境保全性、二酸化炭素排出量や省エネ性、LCA (Life Cycle Assessment) を総合的に評価する環境適合型設計が基本となることが、自動車業界でも予測される。その際には、環境対

図 14 採用車種

応材料の要件とは何か、その定義を定めて共有化し、こうした定義に基づいた材料が次々に開発され、自動車の実質的な環境負荷低減に貢献していく時代も近いと思われる。ハイブリッド車・電気自動車・水素自動車・燃料電池車等のクリーンな次世代エネルギー車が注目を集めている。今後の 20 年に、水素/電気の 2 次エネルギー社会が訪れ、1 次エネルギーは多様化すると思われる。今後、例えば、電気を効率よく利用するための材料特性の制御技術が必要になり、また、発熱がエネルギー効率を下げることに繋がるため、冷却性能が鍵を握ると思われる。プラスチック成形加工技術を駆使して、導電性、絶縁性、熱伝導、遮熱・断熱、更には電磁波シールド性などを付与できる、優れた技術が生まれることが期待される。環境をキーワードに、劇的に自動車用材料への要求が変化する可能性を、現在は秘めている。これまで以上にチャレンジングな 20 年になると思われる。プラスチック成形加工技術の発展が、持続可能な地球環境と交通環境の実現に貢献するものと信じている。