自動車に期待される高分子材料

大庭 敏之

Polymeric Materials for the Future Automobiles

Toshiyuki OHBA (Ohba-juku, 1-28-F-1106, Deiki, Kanazawa, Yokohama-city, Kanagawa, 236-0021, JAPAN)
s39h5u@bma.biglobe.ne.jp

The most important challenge in automotive industries is to reduce global warming CO₂ generation substantially to Zero. Electrification is the main trend to achieve this objective, such as EV, FCEV and PHEV. Polymer materials are expected to contribute to this aspect as functional materials e.g. high thermal conductive electrical insulator. Vehicle weight reduction is the big factor to reduce vehicle running energy consumption. Module construction and component integration are quite effective for this purpose. CFRP is expected to contribute weight reduction for the future automotive application. Rubber components are also required weight reduction and demands for low running resistance tire is increasing. New application of polymer materials will be widely expected for the next generation automotive.

(Received on May 30, 2017)

Key Words : Global Warming, Next Generation Automotive, Electrification, Weight Reduction, CFRP

1. はじめに

2016年度の自動車販売台数は508万台と消費税引き上げ、軽自動車税の引き上げなどで一時低迷していた状況から回復したように見える。この数年顕著に増加しているのがハイブリッド車と軽自動車であり売り上げ台数のベスト10をすべて占めている。またハイブリッド車としてプリウスに代表されるシリーズ・パラレルハイブリッドとは違うシリーズハイブリッドとして初めてのノートeパワーが勢いを与えている。また、近年は自動運転車が話題となり、日米欧でも従来のカーメーカーではないグーグルなどIT企業も参入しており実用化に向けてしのぎを削っている状態にある。日本における自動運転は急激な高齢化への対応としても必要な技術になっており完全な自動化にはまだ課題があるとしてもコスト対効果の優れるアイテムから車載が進むものと考えられる。

自動車産業もこれまでのガソリンを焚いたクルマで運転マニアが中心に自動車技術を引っ張っていた時代から環境、安全な車ということが中心に求められる大きな変革期

に入っていると考えられるだろう。その中で自動車に使われる高分子材料はどのように変化していくであろうか。

2. 地球温暖化防止への取り組み

このところで自動車にとって最大の課題は地球環境問題、温暖化防止への対応である。従来の自動車はガソリン、軽油など化石燃料を燃やしてそのエネルギーで走っていた。それによって排出するCO₂の量は20%ほどを占めてきた。この排出量を可能な限り少なくしていくことが求められている。

2.1 2050年の目標

洞爺湖サミットのころから2050年の目標は地球全体の

大庭 敏之：大庭塾 代表（〒236-0021 神奈川県横浜市金沢区泥亀1-28-F-1106）。昭和44年、東北大学工学部応用化学科。同年、日本合成ゴム（現JSR）㈱入社、昭和51年、日産自動車㈱入社、平成24年 日産自動車㈱退社。専門は、自動車用高分子材料。

図1 先進国のGDP当たり温室効果ガス排出量推移

CO₂排出量を半減しなければならない、先進国の責任の重さから80%削減しなければならないと言われてきた。この目標に対して日本はどのように対応するのか環境省、経産省の間では立場の違いもあって調整しきれていない。日本は先進国の中でどの程度CO₂削減が進んでいるのであろうか。CO₂排出量を減らすのは経済を悪化させるという説もあるのでここでは1990年以降のGDP当たりのCO₂排出量を図1に示した（経済産業省の資料：温室効果ガス排出量の現状について（2015年1月23日）より筆者が抽出整理）。京都議定書の基準年とされた1990年では日本のGDP当たりのCO₂排出量は少なかったがその後日本はほとんど変化していないのに対して欧米各国は下げてきており、日本はすでに欧州各国に比べてCO₂排出量は多くなっておりあまり自慢できる立場ではない。一人当たりの排出量を見ても同様のことがいえる。アメリカは政権交代で温暖化防止に対しての政府のスタンスは変化したがこの図で見れば一貫して削減に向けた努力は続いているとみるべきだろう。

いずれにしても世界はその目標に向かって動き始めているわけであり、自動車も厳しい側での目標を立てなければならないことからトヨタ、日産自動車などでは90%削減しなければならないと公表している。

2.2 電動化と軽量化

図2には車両重量と1 km走行当たりのCO₂排出量の関係を示した。この図は筆者が各社のカタログ燃費（JC08）からガソリン1L当たりの排出CO₂を2.322 kgとして計算したものをプロットしている。図には通常のガソリンエンジン車とハイブリッド車を分けてプロットしているがCO₂排出量削減（燃費向上）には2つの方向が見えてくる。ひとつはできるだけ車両重量を軽量化することで走行に必要なエネルギーを少なくすること、もう一つはハイブリッド車のように電動化することでエネルギー効率を上げていこうという方向になる。ハイブリッド車はガソリン車が最も燃費が悪くなる領域ではモーターで駆動し、通常走行ではガソリン車として走り、制動時にはそのエネルギーを電気

図2 乗用車車両重量別CO₂排出量

として回収するというものであり、基本的にはエネルギーを有効に使える。

3. 次世代自動車におけるプラスチック材料

3.1 電動化への動きと共通課題

次世代自動車はハイブリッド車（HEV）、プラグインハイブリッド車（P-HEV）、電気自動車（EV）、燃料電池車（FCV）となるが（一般的な定義では次世代車にクリーンディーゼル車も入っているがここでは含めない）、いずれも一部、あるいは全部を電気によるモーター駆動になることから次世代車＝電動化であるといえる。これらに共通する重要な部品としては電気を貯蔵する二次電池、駆動と発電するための高性能モーター、そして電気を制御するためのインバータが3種の神器とでもなろうか。これらは今までの内燃機関にはなかった部品である。また、電気自動車の特性として積載できるエネルギーが少ないため航続距離が短いという問題から車両の軽量化はこれまでのガソリン車以上に要求されてくる。

はじめに電動化に対しての課題を高分子中心に表1にまとめた。各電動部品は大電流が流ればジュール熱が発生

表1 電動化の共通技術課題

キーになる部品	高分子の技術課題
バッテリー	リチウムイオン電池（高エネルギー貯蔵） 正極、負極の活物質のバインダー（膨潤の制御、接着力の保持） 耐熱セパレーター（電解質の透過と極間ショート防止） 有機溶剤のガス化を防ぐ（温度上昇を防ぐ放熱性向上）
モーター	ネオジウム系高性能モーター 耐熱性向上のディスプロシウムの削減 →熱を系外に逃がす →高熱伝導絶縁材
インバーター	チップの小型化、耐熱化（小型にするほど高熱になる） →高熱伝導絶縁材

する。そのジュール熱を外部に逃がさなければ熱は暴走してしまう。そうするとバッテリーは電解質に有機溶剤を使うことから蒸気圧の上昇、溶媒の分解、電極上の反応などから火災等の心配が出てくる。モータでは高温になりすぎると高性能のネオジウム磁石は減磁してしまう。磁石の耐熱性（保持力）を上げるためにはディスプロシウムなどを増やさなければならないが磁束密度と逆相関になりがちなこと¹⁾、さらにはディスプロシウムを100%中国に頼らざるを得ない日本とすれば資源セキュリティ上のリスクも考えなければならない。また、インバータでは熱を逃がすことができないとコンパクトな素子にしにくいということもあり、いずれのケースでも発熱を系外に逃がすための高熱伝導絶縁材料が地味に見えるが高性能化の命運を握っているといっても過言ではない。

3.2 リチウムイオン電池に使われる高分子材料

図3には日産リーフに搭載されているリチウムイオン電池の構成を示した。日産自動車の電池の特徴はラミネート構造になっていることであり薄くできることから熱の制御はしやすい²⁾。この中で高分子が重要な機能を担っているのはセパレータと正極、負極のバインダーである。セパレータは主にPPの微多孔膜が使用されている。微多孔膜はPPのラメラ構造の特性を利用して製造される³⁾。セパレータの役目は正極、負極のショートを実際に防ぐこととイオンの移動を抵抗小さく早く行うことであり、そのために薄い膜が必要とされる。バインダーは正極、負極の活物質を極板上に結着することであるが電解液に膨潤しにくいこと、充放電時のリチウムイオンの出入りによる体積変化にも耐えられるような柔軟性、電気化学的な安定性などが求められる⁴⁾。膨潤が大きくなり活物質間の距離が大きくなってしまうと充放電が阻害されてしまうため大変重要な役目を担っている。現在は正極側にはPVDFが、負極側ではSBRが主として使われている。

3.3 高熱伝導絶縁材料

高分子材料は電気に対しては絶縁材料であるが熱伝導率は小さい。絶縁でありながら熱伝導率の高い材料はセラミ

図4 樹脂にフィラーを充填させた時の熱伝導率の上昇

ックスにみられるがセラミックスだけでは必要な形に成形できない。そこで成形性の良い高分子材料に熱伝導の良いセラミック粉体を多量に混ぜた高熱伝導絶縁材料が開発されている。図4には金成の経験式に基づいた予測式⁵⁾でフィラー充填による熱伝導率改善効果を示した。熱伝導率の高いフィラーを充填しても熱伝導率には大きな改善は見られないが、マトリックス樹脂の熱伝導率が改善できるならばその効果が大きいことが分かる⁶⁾。そのために分子内にビフェニル基のようなメソゲン骨格を有するエポキシ樹脂の開発が進んでいるなど熱伝導率が小さな高分子素材の熱伝導率をどれだけ向上させられるかという検討も進められており⁶⁾、これにはおおいに期待している。

4. 高分子材料による軽量化

4.1 プラスチックによる軽量化効果

これまで軽量化に対してプラスチックが果たした割合はそれほど大きくない。図5には鉄からの材料置換にあたって剛性を一定にして成立させたときにどれだけの軽量化になるかを計算値で比較した。プラスチックはほとんど強度部品として使われることはないからこの等剛性設計の比較は妥当であろう。その結果では鉄をアルミニウムに替えると重量は1/2、マグネシウムに替えると1/3になる。プラスチックは軽いが柔らかいので等剛性にするには厚くしなければならず、大まかに見て3～4割の軽量化に過ぎなく

図3 リチウムイオンラミネートバッテリーのセル構造

図5 等剛性設計での軽量化能力比較（スチール比）

なる。これは常温での弾性率を用いているので実用温度ということではさらに目減りしてくる。しかし、その中でCFRPは7～8割の軽量化につながるので著しい効果といえる。これが航空機でCFRPの適用が進んでいる理由である。それでは実際の樹脂化がどの程度軽量化につながり、どれだけのCO₂削減になっているかLCA（Life Cycle Assessment）的な観点からみてみよう。

4.2 モジュール化へのプラスチック

図6にはフロントエンドモジュールの主要な部品、ラジコアサポートの樹脂化の例を示す。素材としてはスチールからガラス繊維（GF）充填PP射出成形品となり、さらに軽量化のため炭素繊維（CF）充填PP射出成形品が適用されてきた。これにより重量はスチールで5.8 kgがPP-GFでは4.1 kgに、PP-CFでは3.1 kgへと軽量化でき、生涯排出CO₂量は図7に示すようにそれぞれ20%減、24%減となる。CFを使うと軽量化の割にCO₂排出量が減らないのはCF原料製造時のCO₂排出量が多いからである。そのため現在は、PP-CFラジコアサポートの適用は重量バランスが特に要求される高性能車に限られている。プラスチックは複雑な形状でも成形しやすいという特長があるので、部品の統合化、一体化をすることで軽量化だけではなく、原材料のコスト高を成形工程の簡略化によって補うことができるという利点が得られ、このことも樹脂化が進んでいる

図6 フロントエンドモジュール（ラジコアサポート）の材料変遷

図7 PP製ラジコアサポートのLCA検討結果

理由に挙げられる。

モジュール構造ではベースを樹脂化することによる軽量化は大きなねらい目である。ベース部品は多くの部品が取り付けられるので形状が複雑になりがちであり、射出成形により複雑な形状を1工程で作ることができるプラスチックにとっては好都合なシステムであるといえる。

4.3 CFRPによる軽量化

もうひとつの樹脂化の例として図8にプロペラシャフトのCFRP化の例を紹介する。プロペラシャフトは高速で回転するが共振は絶対に避けなければならない。そのためには、軽くすること、剛性を上げることが必要である。スチールでは1本のシャフトにすると剛性が落ち、重量が大きいため共振点が下がり成立しないために中間にセンターベアリングを介在させている。CFRPは軽く剛性も大きくできるために共振周波数を上げることができ、結果的にセンターベアリングが省略できる。さらに衝突時のエンジン損傷を避けるために、シャフトのどこで破壊を生じさせるかを設計することが重要な観点となる。スチールではこれをセンターベアリングに頼っているが、CFRPシャフトは回転方向には剛であっても圧縮方向の強度を繊維の編み角で調整ができるために、シャフト本体と結合部の構造で任意に破壊させることが可能である。このためセンターベアリングを不要とすることができ大幅な軽量化が達成された。生涯CO₂排出量の削減効果を図9に示した。CO₂排出量で30%以上の削減という非常に大きな効果が発揮できたが、コスト的な問題で限定的な採用にとどまっている。

図8 CFRP製プロペラシャフトによる軽量化

図9 CFRP製プロペラシャフトのLCA検討結果

最近、CFRPについては軽量化効果が著しいため車体本体への検討もされて採用が進みだした。もちろんCFRPは異方性材料であるための設計の難しさを持っている。受ける応力は繊維に対して引っ張りになるか、圧縮になるか、あるいはせん断になるかでは補強効果も違ってくる。まだまだ高価であり一般車への適用は難しいが工程の革新も含めてコストの圧縮の検討もされており次世代の軽量化の切り札として期待されている。また、BMWは電気自動車「i3」の車体構造をCFRP化するにあたってCF製造時のエネルギーを水力発電の電気を使うことでCO₂発生量を抑えることが行われていることは興味深い⁷⁾。

4.4 ゴム部品の軽量化

ゴムの比重は小さいがほとんどの場合カーボンブラックが配合される。そのため比重はやや上がる。一般には熱可塑性エラストマーはほとんど充填剤を含まないので比重は小さい。ゴム部品の中では大きな部品になるグラスランでは1台当たり1kg前後のEPDM材料が使用されていたが現在ではほとんどTPOにかわって15～20%の軽量化が達成されている。

また、熱可塑性エラストマーは硬い材料が多く、フレキシビリティを持たせるために肉薄にして使われることも多い。その分で比重以上に軽量化に寄与することになる。硬いことによる欠点はシール性でありそこには設計的な工夫がされている。一例として等速ジョイントブーツのポリエステル系エラストマー(TPEE)による例を図10に示しておく。この製品はCRであったが、オゾンクラックの問題など耐久性の問題があって今ではほとんどTPEE製に代わっている。TPEEはCRに比較して柔軟性に欠ける。そのために肉薄にすること、山の数を増やすことで柔軟性を補っている。また口径部もインジェクションブローにすることで精度を上げ、かつシール部は設計的な工夫がされている。それによってCR製から54%も軽量化されたという⁸⁾。

またホースの樹脂化(熱可塑性エラストマー)が進んでいる。燃料ホースでは単体部では従来のFKM/ECO/ポリ

図11 樹脂燃料ホースの例

エステル繊維/ECOから導電性ETFE/PA12タイプにすることで90%近い軽量化が達成されている。接続部にはクイックコネクターが使われ、そのシール性を確保するためのOリングはフッ素ゴム、フロロシリコンを併用されることもある。樹脂燃料ホース例として図11に示す。ゴムから樹脂化することで燃料透過性は抑えられるし、剛性が高くなるので薄くする必要からも軽量化効果は大きくなる。

ゴムからTPEにすることで軽量化につながるケースは多いがTPEは温度によって永久ひずみが残りがやすく部品としては設計的な工夫が必要になることが多い。

4.5 軽量化への考え方

以上、樹脂化による軽量化には3つの考え方ができる。

- ①成形性の自由度を生かした形状の工夫。必要などころに必要な厚さに、あるいは局部的にリブ構造を作ることによって剛性は確保することである。ゴム部品からTPE化することはフレキシブル性を持たせるために肉薄化しなければならないことが軽量化を後押ししている。
- ②成形性の良さを生かしたパーツの統合化。一番の効果はそのままの形で軽量化することではなく、統合化で部品が無くなることである。重量ゼロが最も軽くなることである。ボルト1本なくすだけでもその分は軽量化になるのである。プラスチック本体とシール部にTPEを使い一体化することもこの技術に含まれる。
- ③高剛性材料との複合化。各素材にはそれぞれの特徴がある。また部品は形状を持っており応力の受け方が均一ではない。従って複数の素材を使いどのように荷重を分担させるかということで効果的に軽量化できるという考え方である。CFRPも高剛性、高強度のCFとの組み合わせと見ることが出来る。

5. その他温暖化防止への方策

5.1 省燃費タイヤ

自動車の走行エネルギー損失のうちタイヤによる損失は15%ほど占める。電動化になったとしてもタイヤはなくなることにはできないためにタイヤのエネルギー損失の寄与が上がる。そのために省燃費タイヤの重要性は上がってくる。タイヤの走行時のエネルギー損失の多くはトレッドの変形により熱として放出されることによる。そのために

図10 TPEE製CVJブーツ

図12 $\tan\delta$ と温度及び周波数の関係（シリカ配合とカーボン配合の比較）

ゴムの $\tan\delta$ を小さくすればいいがウェットスキッド特性と相反する傾向になる。走行時の周波数は数10Hzの特性であるが制動時では路面の凹凸により発生する周波数は1万Hzぐらいの特性に相当する。この周波数の違いを温度時間換算則を使って換算すれば省燃費性は50℃付近の $\tan\delta$ を小さく、制動特性から0℃付近の $\tan\delta$ を大きくすればいいということになる。そのためにはゴム材料はマイクロ構造を制御した溶液重合SBRを使い、補強材としてもカーボンブラックからシリカに置換した材料が使われるのが最近の傾向である。図12にはシリカに変えたときの効果を示している⁹⁾。

5.2 温暖化を防ぐエアコン用冷媒

1990年前後にオゾン層破壊の問題からそれまで自動車用冷媒として使われていたCFC-12からHFC-134aに代わった。しかしながらHFC-134aはオゾン層破壊はしないものの温暖化係数が1410ぐらいになる（CO₂は1）ので温暖化係数の低い冷媒の開発が期待されていた。CO₂も冷媒として使うことも考えられたが効率の関係でシステムが大型になってしまうことで現在はHFO-1234yfが次期冷媒として考えられているようである。エアコンの中では潤滑性もかねてオイルと冷媒が混合された状態になることからこの状態でも十分ライフがある材料のホースの開発も進んでいる。

6. おわりに（今後の自動車）

ここまで次世代車に対しての高分子の動向について話を進めてきた。今後の大きな目標としては2050年には少なくとも先進国は温暖化ガスの排出は少なくとも80%削減しなければならないということになる。そうするとガソリンは使わない電動車とならざるを得ない（一部はバイオ燃料を使う可能性もあるが）。そのため主動力源は電気になるにしても、水素になるにしても二次エネルギーであるので何からどのようにして作り、どのような経路で車に充填

されるかでトータルでのエネルギー効率が変わることになる。走行中にCO₂を出さないからいいというものではない。福島原発事故を経験した我々は原子力には安易に頼ることができないだろうし、最終的には再生可能エネルギーに頼らざるを得なくなる。もちろん今後技術が進むにしても有り余るほどの電力がある社会はそう簡単には来ないかもしれない。となれば大切なエネルギーをできる限り効率よく使っていくかを考えなければならない。

世の中の動きは激しい。早速2018年車からはアメリカカリフォルニア州のZEV規制が大きく見直され、これまではハイブリッド車は環境先進技術車との扱いであったもののから今後は普通の車になってしまう。そのためZEV対応車としてはEVかFCVしかカウントされないことになる。ということでは時間的にもEVでの対応が迫られている。

さらに欧州における燃費規制も95 g-CO₂/km以下と厳しくなってくる。欧州各社はそれに対しては電気自動車、ハイブリッド車、プラグインハイブリッド車で対応しようといろいろな車が投入されようとしている。いずれにしてもその時代時代でエネルギーソースが変わってくるかもしれないが効率よくエネルギーは使っていかなければならない時代になってきている。

そのような状況の中で高分子材料は構造物としても、機能材料としても重要な役目を持っている。言い換えるならば転換期にあるこの時期には工夫次第で大きなビジネスチャンスなる可能性をもっているといえるであろう。

References

- 1) Souma, K.; Tanigawa, S.; Moue, I.; Kikuchi, H.; Iwasaki, T.: *Hita-chi Hyoron*, **92**, 58 (2010)
- 2) Yoshioka, N.: *Nikkei Automotive Technology*, 2012-5, 110 (2012)
- 3) Wakisaka, Y.: *Kogyozairyo*, **62**, 29 (2014)
- 4) Mashita, K., Suzuki, K.; Fukuchi, I.; Ito, T.; Nishimura, S.: *Hitachikasei Technical Report*, **45**, 7 (2005)
- 5) Kanari, K.: *Kobunshi*, **26**, 557 (1977)
- 6) Takezawa, Y.: *Hitachikasei Technical Report*, **53**, 5 (2009)
- 7) Fukuda, Y.: *Keiei sensor*, **168**, 10 (2014)
- 8) Furuta, Y.; Mase, Y.: *Toyota Gosei Giho*, **52**, 31 (2010)
- 9) Shirai, H.; Matsuda, T.: *Network Polymer*, **33**, 250 (2012)

日本語表記参考文献

- 1) 相馬憲一，谷川茂穂，馬上伊三雄，菊池英行，岩崎富生，日立評論，**92**，(12)，58，(2010)
- 2) 吉岡伸晃，日経Automotive Technology，2012.5，110 (2012)
- 3) 脇坂康尋，工業材料，**62** (11)，29 (2014)
- 4) 真下清孝，鈴木健司，福地巖，伊藤敏彦，西村伸，日立化成テクニカルレポート，**45**，7 (2005-7)
- 5) 金成克彦，高分子，**26**，557 (1977)
- 6) 竹澤由高，日立化成テクニカルレポート，**53**，5 (2009)
- 7) 福田佳之，経営センサー，2014.12，10，株式会社東レ経営研究所
- 8) 古田裕二，間瀬佳昭：豊田合成技報，**52**，31，(2010)
- 9) 白井博史，松田孝昭：ネットワークポリマー，**33** (5)，250 (2012)