

炭素繊維複合材料“ハイサイクル一体成形技術”の研究開発

釜江俊也、田中剛、山崎真明、岩澤茂郎、武田一郎、
山口晃司、和田原英輔、関戸俊英、北野彰彦
東レ株式会社

1. 緒言

地球環境問題への意識の高まりの中、運輸部門においては自動車の燃費向上による温室効果ガス削減が強く求められている。自動車の燃費向上には軽量化が1つの重要技術であり(図1)、軽量化のためにアルミニウムなどの様々な材料の適用が検討されている。このような材料の中で、先進複合材料である炭素繊維強化プラスチック(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)(図2)は、アルミニウムに比べ2/3軽量(アルミニウムの比重2.7に対し1.6)、5倍高強度(アルミニウムの500MPaに対し2700MPa)であり、最も高い軽量化効果が期待されている。実際に航空機分野においては軽量化効果が高く評価され、多くの実績を挙げている。

しかしながら、CFRPはその成形工程が複雑で金属材料に比べて生産性が低いため、自動車分野への適用はごく一部の高級車に限られていた。そこで、我々は、一般的な自動車の構造部材へのCFRP適用を促進するため、成形時間10分(1つの成形型あたり3000台/月を想定)を目標に、CFRPの大量生産を実現する“ハイサイクル一体成形技術”の創出を目指した。

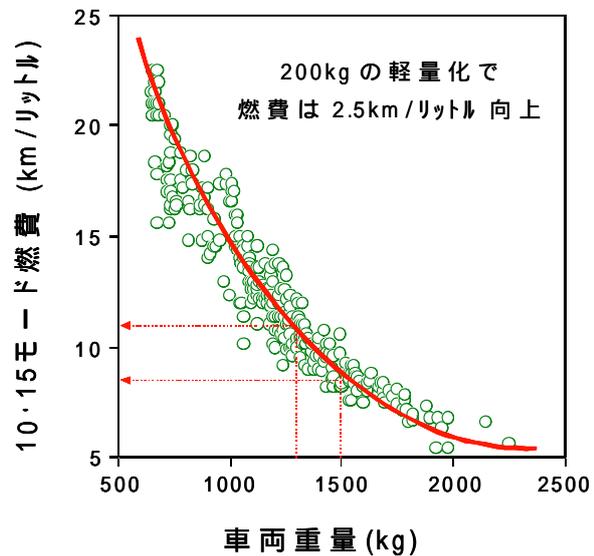


図1 車両重量と燃費との関係
軽量化により燃費向上が可能

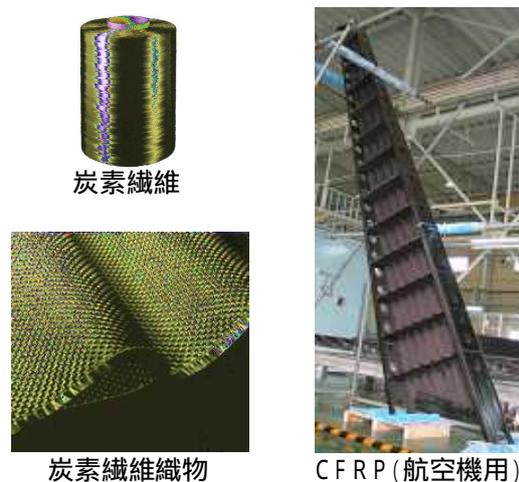


図2 炭素繊維、炭素繊維織物
と炭素繊維強化複合材料(CFRP)

2. 目標、課題

CFRPの成形法は種々選択可能であるが、複雑形状の部材を一体成形でき、軽量効果の高い高強度、高弾性率の部材が得られるRTM成形(Resin Transfer Molding)を選択した。RTM成形とは、図3に示すように炭素繊維基材(通常、炭素繊維織物を使用)を裁断、積層、賦形してプリフォ

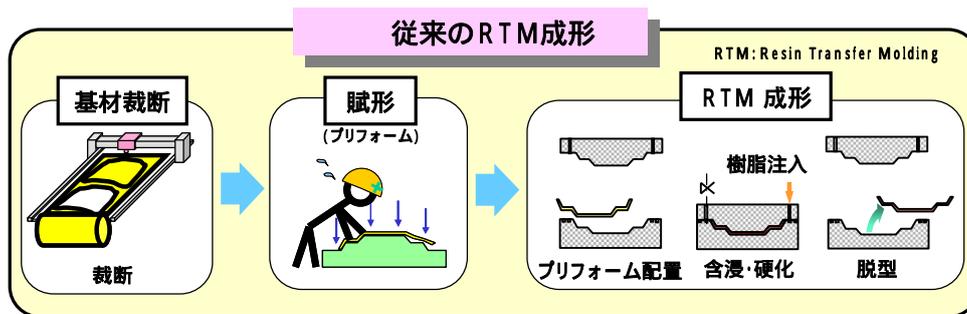


図3 従来のRTM 成形の手順

ーム(樹脂を含浸する前の予備成形体)を作製、プリフォームを成形型内に配置して型を閉じ、樹脂を注入してプリフォームに含浸、硬化させた後、型を開いて成形品を取り出すという方法である。RTM成形は量産性の高い方法であるが、それでも従来、成形時間は図4に示すように160分かかっていた。160分のうち125分は樹脂含浸、硬化に要する時間であり、成形時間10分を達成するためには、含浸時間を3分、硬化時間を5分に短縮する必要があった。このため、含浸に必要な流動性を3分保持しつつ、5分で硬化を完了する「超高速硬化樹脂」、樹脂が流動性を保持する3分の間に含浸を完了する「高速樹脂含浸技術」の創出を目指した。さらに、プリフォーム配置工程を短縮するため、プリフォームをあらかじめ精度良く成形品形状に賦形し、成形型内への配置を容易にする「立体賦形技術」、プリフォームの型への搬送、成形品の取り出しを自動化する「自動成形システム」の創出を目指し研究開発を行った。

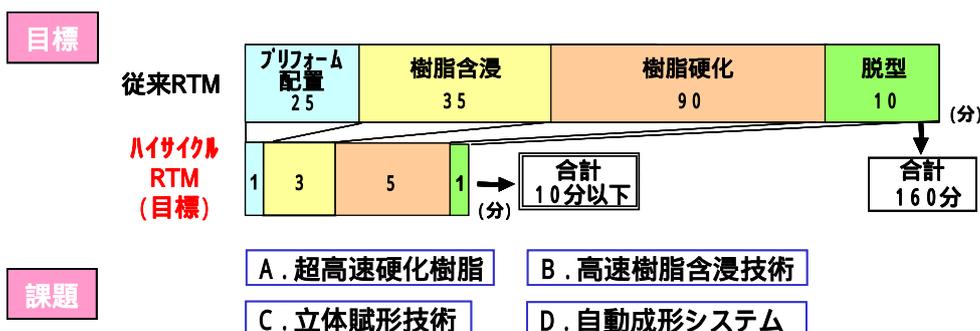


図4 従来RTM 成形(成形時間160分)とハイサイクルRTM成形(目標成形時間10分)
ハイサイクルRTM 成形実現のための技術課題

3. 超高速硬化樹脂

CFRPの含浸樹脂としては、耐熱性、力学特性のバランスに優れ、炭素繊維との接着性が高いことからエポキシ樹脂が多く用いられている。CFRP用のエポキシ樹脂は、通常、100～180 で60～120分の条件で硬化される。速硬化型のエポキシ樹脂も存在するが、プリフォームに含浸させるための流動可能時間が確保できないため、C

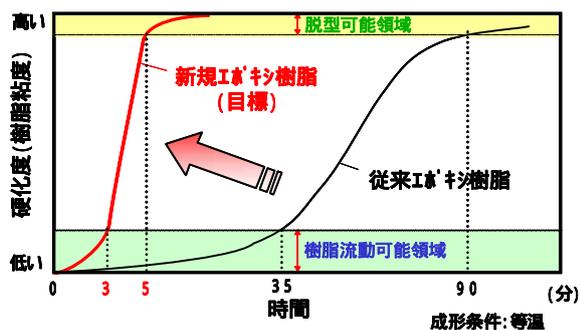


図5 従来樹脂と新規樹脂(目標)の硬化プロファイル

FRP用として用いることは困難であった。そこで、我々は、流動性を3分保持しつつ、5分で硬化を完了する新規エポキシ樹脂の開発を目指した(図5)。

新規エポキシ樹脂開発のコンセプトとして、硬化後半の収束を速めつつ、硬化初期に誘導期(粘度上昇が抑えられている期間)を設けることを考えた。具体的には、硬化後半の収束が速いエポキシ樹脂のアニオン重合をもとに、連鎖移動反応を併用することにより誘導期を設けることを着想した。従来のアニオン重合系エポキシ樹脂では、成長反応(図6(a))が速やかに起こり硬化初期にも高分子量成分が生成するため(図7(a))、粘度上昇が速い。これに対し、連鎖移動反応(図6(b)、(c))を併用すると、図7(b)に示す様に、硬化初期には低分子量成分が多く生成するため粘度上昇が遅く、誘導期を設けることができると考えた。

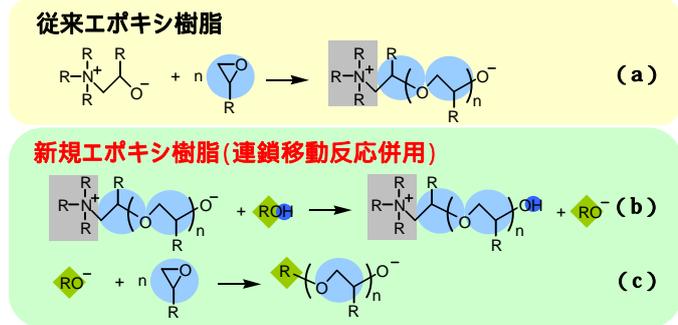
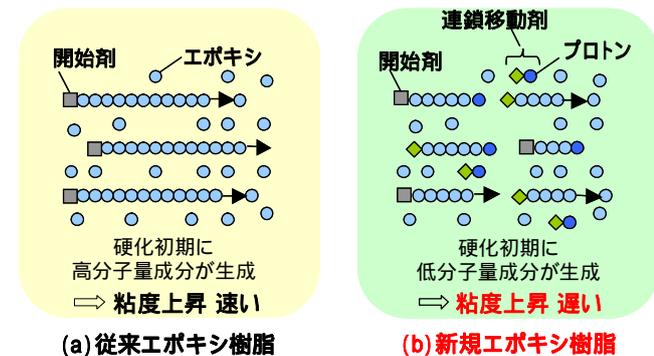


図6 従来樹脂と新規樹脂の反応スキーム
新規樹脂では連鎖移動反応を併用



(a) 従来エポキシ樹脂 (b) 新規エポキシ樹脂

図7 従来樹脂と新規樹脂の分子成長モデル

流動可能時間3分、硬化時間5分を達成

このコンセプトに基づき、エポキシ樹脂、アニオン重合開始剤、連鎖移動剤を含む新規エポキシ樹脂を設計した。連鎖移動剤としてアルコール系の化合物を配合すると、硬化初期の誘導期が延長され、流動可能時間3分、硬化時間5分という理想的な硬化プロファイルを有する新規エポキシ樹脂が得られた。

4. 高速樹脂含浸技術

次に、「超高速硬化樹脂」が流動性を保持する3分という短時間で樹脂をプリフォームに含浸させるための「高速樹脂含浸技術」を検討した。従来のRTM成形では、図8の左図に示すようにプリフォームの端から端まで面方向(横方向)に樹脂を含浸させていた。この方法では樹脂をプリフォームに含浸させるための流動距離が長く、含浸に長時間を要する。また、成形品が大きくなるにしたがい含浸時間が長くなるため、大型品の成形が困難であった。そこで、図8の右図に示す樹脂流動用中間プレートを用いた多点注入法を着想した。具体的には、中間プレートに設けた流動溝により樹脂を面方向に速やかに広げた上で、注入孔を通してプリフォームの厚み方向に含浸させる方法を検討した。この方法では、流動距離を短くでき、高速樹脂含浸が可能となる。さらには、中間プレートの注入孔の位置を適切に設計することで、成形品の大きさに関係なく短時間含浸ができるという利点を有する。

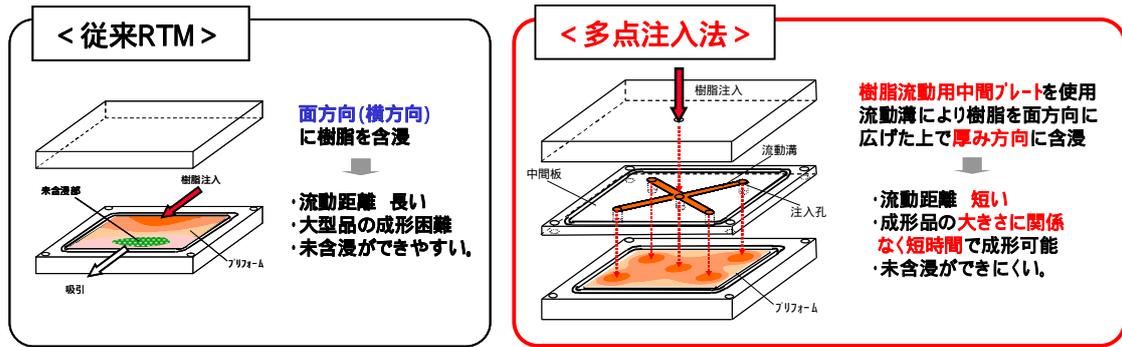


図8 従来RTM成形と高速含浸のための中間プレートを用いた多点注入法

注入孔の位置を適切に設計する上で、各注入孔からの樹脂含浸挙動を予測することが重要である。樹脂のプリフォームへの含浸は(1)式で示すDarcy則によって表現できる。

$$u = \frac{K}{\mu} \nabla P \quad (1)$$

ここで、Pは樹脂注入圧力、 μ は粘性係数、Kは含浸係数である。Kはプリフォームに特有のパラメーターであり、実験により取得することができる。当社ではDarcy則をもとに樹脂含浸をシミュレーションするソフト(VaRTIMON)を開発しており、本検討ではこのソフトを用いて樹脂含浸挙動を予測した。まず、実験により取得したKを用いて平板での含浸シミュレーションを実施し、実験結果を再現できることを確認した。そこで、比較的大面積(1.45m×1.7m)を有する自動車のフロントフロアでの含浸シミュレーションを実施した。この結果、図9の左図に示すように従来RTM成形では樹脂含浸に133分を要するのに対して、図8の右図に示すように注入孔を約150mm間隔で配置した多点注入法では2.5分で含浸を完了することがわかった。

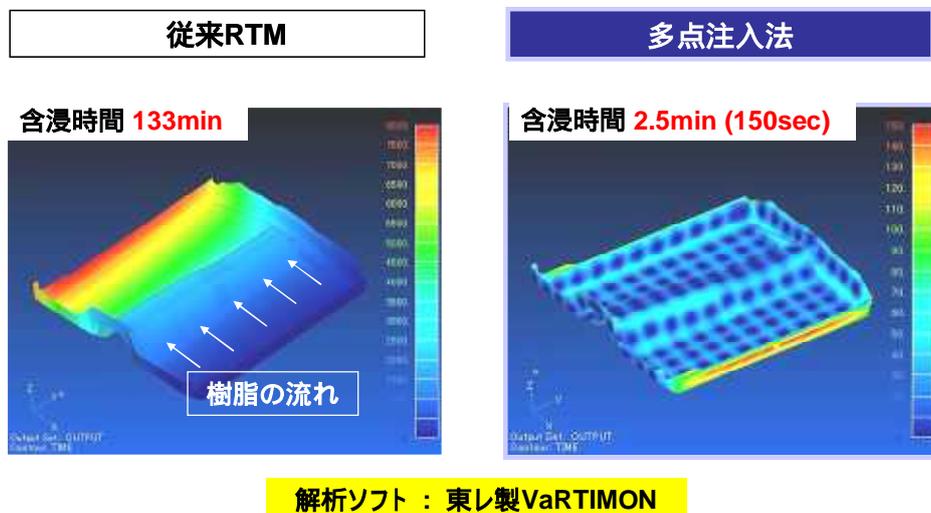


図8 フロントフロア(1.45m×1.7m)での含浸シミュレーション結果
多点注入法により短時間(2.5min)での含浸が可能

5. 立体賦形技術

成形時間10分という目標を達成するためには、樹脂注入、硬化時間を短縮するだけでなく、図3に示すプリフォーム配置工程、樹脂硬化後の脱型工程も短縮する必要がある。プリフォーム配置工程においては、プリフォームをあらかじめ精度良く成形品形状に賦形し、成形型内への配置を容易にする「立体賦形技術」を検討した。従来法では、図9に示すように成形品形状から型紙を作成し、型紙にあわせて炭素繊維基材をカット、賦形用の型で手作業によりプリフォーム作製を行っていた。ところが、この一連の作業では時間、手間を要する上、作業者によるバラツキが大きいという問題があった。このため、成形型上でプリフォームを修正したり、修正が困難な場合には別のプリフォームに取り替える必要があり、プリフォーム配置工程を短縮するのが困難であった。そこで、我々は、賦形シミュレーションを導入し、図9に示すように成形品形状から最適カットパターンを作成し、このパターンを自動裁断機によりカットし、さらに賦形装置により自動賦形する新規「立体賦形技術」を検討した。



図9 従来のプリフォーム作製方法と新規立体賦形技術

賦形シミュレーションを行うためには炭素繊維織物の変形しやすさに関わるパラメーターの取得が必要である。炭素繊維基材(織物)の変形は斜め方向($\pm 45^\circ$)が主体であるので、炭素繊維基材の $\pm 45^\circ$ 方向の引張試験を行い、精度良くパラメーターが取得できることを見出した。この結果、図10に示すように従来法では成形型への追従が困難である場所が発生するのに対して、賦形シミュレーションを用いた場合には精度の高いプリフォーム作製が可能であることがわかった。また、図11に示すような自動賦形装置を作製し、これまで手作業で行っていた賦形作業を自動化することにより、短時間で精度の高いプリフォーム作製を可能とした。

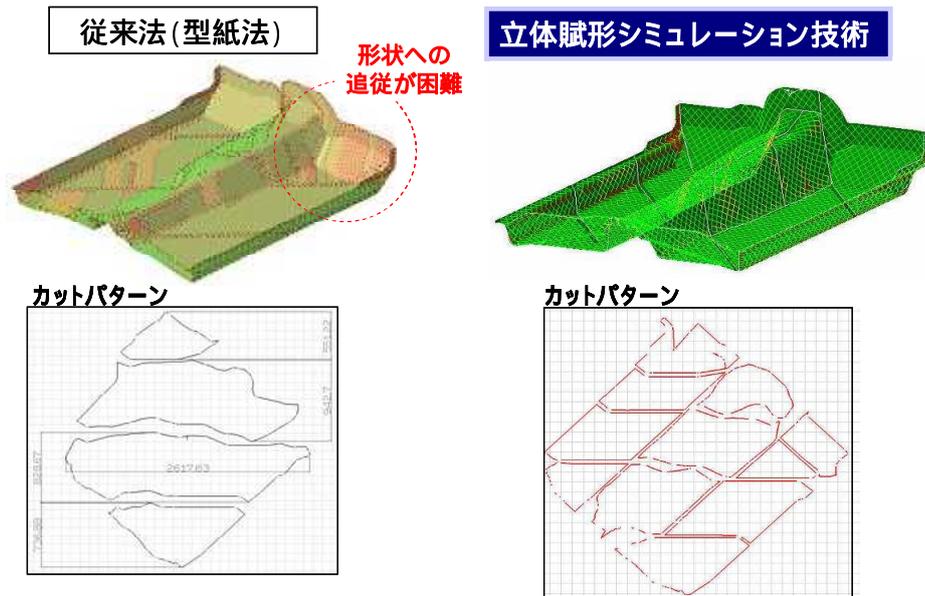


図10 従来法と賦形シミュレーションを用いたカットパターン作成
 賦形シミュレーションにより精度の高いプリフォーム作製が可能

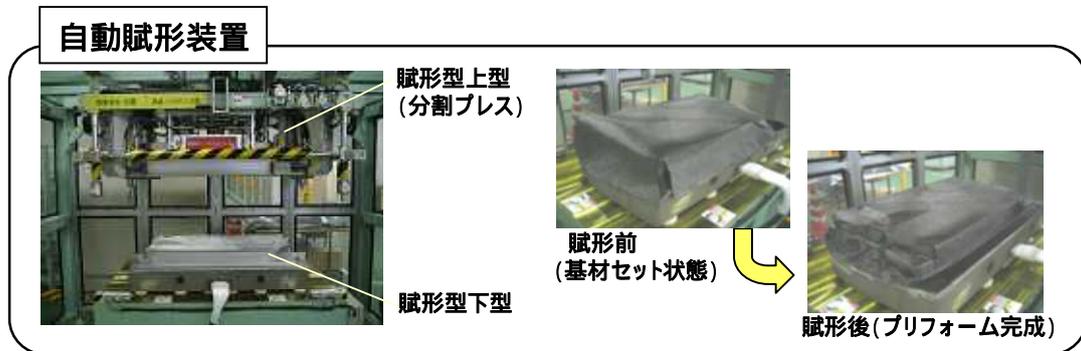


図11 自動賦形装置(左)とフロントフロア用プリフォームの賦形(右)
 自動賦形装置により短時間で精度の高いプリフォーム作製が可能

6. 自動成形システム

これまで示した「超高速硬化樹脂」、「高速樹脂含浸技術」、「立体賦形技術」により大幅に短時間成形できる目処を得たが、さらに短時間での成形を可能にするため「自動成形システム」の構築を目指した。具体的には、プリフォーム配置工程の短縮のためにプリフォームを成形型に搬送、自動配置し、さらに脱型工程の短縮のために成形品取り出しの自動化を検討した。

開発した「自動成形システム」を図12に示す。外段取りで作製されたプリフォームを搬送装置に投入すると、搬送装置によって自動的に成形型まで運ばれて成形される。樹脂硬化終了後、脱型された成形品は再び搬送装置によって取り出し口まで運ばれる。本システムを用いることでプリフォーム配置工程、脱型工程を短縮できることを確認した。

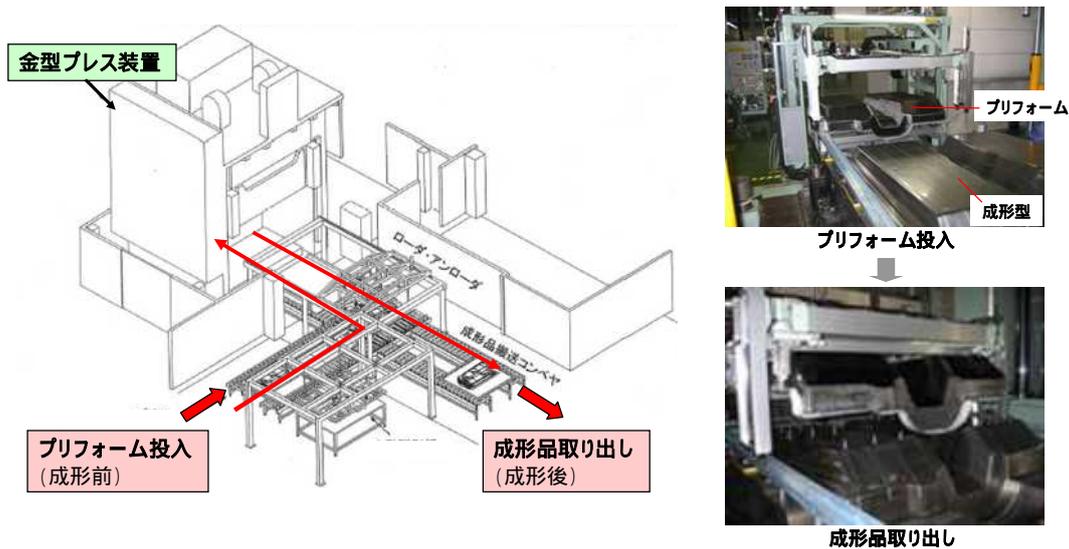


図12 自動成形システム

7. 自動車部材の成形

本技術の自動車部材への適用可能性を実証するため、ドアインナーパネル、フロントフロア(図13)の成形を実施した。ドアインナーパネルは自動車ドアの内側に位置する部材で700mm×1200mmの大きさである。また、フロントフロアは自動車のフロア部分に位置する部材で1450mm×1700mmの大きさである。いずれも、複雑な三次元形状を有する部材であるため、成形難度が高く、この部材が成形できれば他の大部分の自動車部材が成形可能と考えられる。

まず、4項に示すように、樹脂含浸シミュレーションにより3分以内で含浸を完了できるように中間プレートの注入孔位置を決定した。また、5項に示すように、賦形シミュレーションによりカットパターンを作成、自動裁断機によりカットし、自動賦形装置によりプリフォームを作製した。このプリフォームを「自動成形システム」にセットし、成形型に自動配置して型を閉じ、「超高速硬化樹脂」を注入してプリフォームに含浸、硬化させた後、型を開いて脱型された成形品を再び搬送装置によって取り出した。いずれの部材の成形においても、含浸時間が2.5分、硬化時間が5分であり、プリフォーム配置工程、脱型工程を含めて10分以内に成形できることを確認した。また、得られた

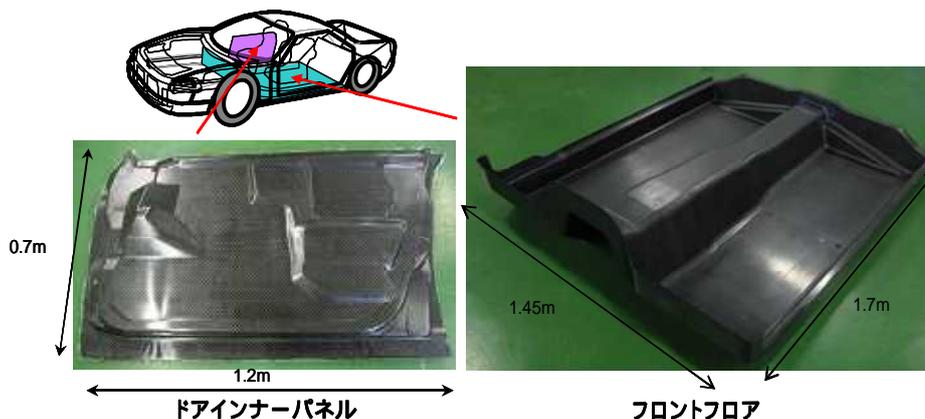


図13 “ハイサイクル一体成形”による自動車部材成形
(左)ドアインナーパネル、(右)フロントフロア

成形品には未含浸部が無く、品位の良いものであった(図13)。フロントパネルでは従来品に対して約1/2に軽量化(スチール品の約34kgに対してCFRPでは約17kg)、さらには、約1/30に部品点数を削減(スチール品の約30に対してCFRPでは1)でき、軽量化効果に加えて組み立て加工を省略できるメリットがあることを実証した。

8. 結言

自動車部材への適用を目標とした炭素繊維複合材料“ハイサイクル一体成形技術”として、「超高速硬化樹脂」、「高速樹脂含浸技術」、「立体賦形技術」、「自動成形システム」を開発した。これらの技術によりRTM成形によるCFRPの成形時間を大幅に短縮することが可能となり、CFRPの量産技術確立へ大きく前進した。自動車ドアインナーパネル、フロントフロアの成形では10分以内に品位の良い成形品が成形できることを実証し、自動車部材への適用可能性を示した。また、本論文では触れなかったが、CFRPを自動車部材に本格適用する際に必要な「リサイクル技術」についても検討を行っており、粉碎したCFRPを熱可塑性樹脂とともに射出成形してあらたな部材を成形する方法などを実証している。

本技術の適用などによりCFRPを自動車部材に適用することで、図14に示すように自動車を大幅に軽量化でき、燃費向上による温室効果ガス削減に貢献できると考えている。当社では、“ハイサイクル一体成形技術”をCFRPの本格普及に向けたキーテクノロジーの一つと位置づけ、早期の実用化を目指して日々検討を行っている。今後、自動車、航空機向け総合技術開発拠点「A & Aセンター(Automotive & Aircraft Center)」(愛知県名古屋市)に開設した自動車向け総合開発拠点「オートモーティブセンター(AMC)」及び本年4月に開設予定のCFRP成形品技術開発施設「アドバンスコンポジットセンター(ACC)」において、本技術の実用化開発を推進していく予定である。

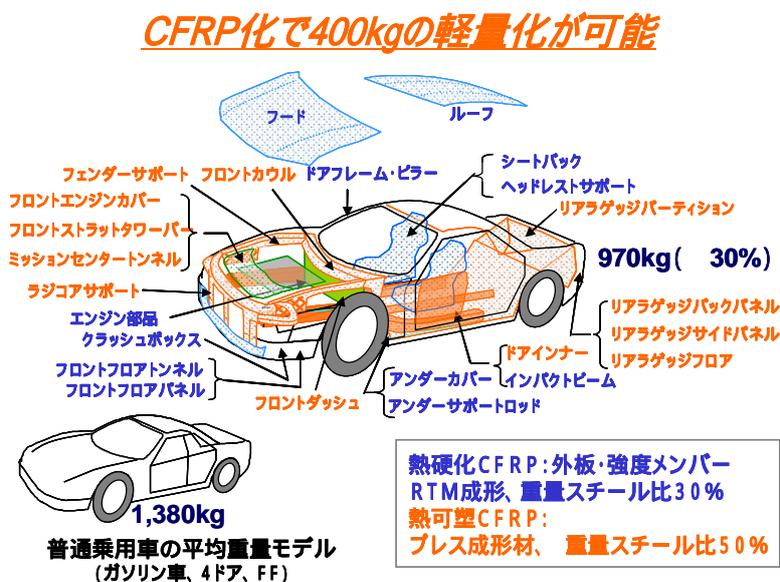


図14 CFRPの自動車部材適用による軽量化

謝辞

本研究開発は、地球温暖化防止新技術プログラム「自動車軽量化炭素繊維強化複合材料の研究開発」において、NEDOから委託を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) T. Kamae, G. Tanaka and H. Oosedo, Proceeding of 2nd JSME/ASME international Conference of Materials and Processing 2005, PMC-12 (2005)
- 2) 釜江俊也, 田中剛, 大背戸浩樹、第30回複合材料シンポジウム講演要旨集(2005)
- 3) M. Yamasaki, S. Iwasawa, T. Sekido & A. Kitano, Proceeding of the twelfth U.S.-Japan Conference on Composite Materials, (2006), 475-484
- 4) I. Taketa, M. Yamasaki & A. Kitano, Proceeding of 9th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-9)
- 5) 山口晃司、第32号6巻「日本複合材料学会誌」(2006)、231-236
- 6) 山崎真明、武田一朗、山口晃司、第14回秋季大会成形加工シンポジア'06、F-214(2006)