

Cost Evaluation of Fiber Reinforced Thermoplastics for Mass Produced Cars

Kazuto TANAKA*, Toshiki UEMURA** and Tsutao KATAYAMA***

(Received October 19, 2009)

The utilization of plastic materials in automotive products is increasing because of environmental requirement on the automotive industry to produce light weight fuel efficient cars. Fiber Reinforced Plastics (FRP) have superior advantages of high-specific strength and high-specific modulus. For automotive products, however, FRP are not really used for mass-produced cars well due to its high cost. The utilization of FRP in automotive applications requires specific focus on manufacturing and cost constraints. High speed continuous Fiber Reinforced Thermoplastics (FRTP) process using electromagnetic induction heating system in combination with Non-woven Stitched Multi-axial Cloth (NSMC) was developed. This system can reduce production cycle times and the cost of manufacturing composite applications. This study presents the cost evaluation of FRTP manufactured by the high speed compression molding process. The evaluation takes into a count the material cost and the production cost. The cost of FRTP was compared with the costs of FRP made from prepreg and GMT.

Key words : fiber reinforced plastics, cost evaluation, thermoplastic resin, non-woven stitched multi-axial cloth (NSMC), electromagnetic induction heating

キーワード : 繊維強化樹脂基複合材料, コスト評価, 熱可塑性樹脂, 不織布付多層多軸クロス(NSMC), 電磁誘導加熱

量産自動車向け繊維強化熱可塑性樹脂基複合材料のコスト評価

田中 和人, 植村 俊基, 片山 傳生

1. はじめに

自動車産業において、化石燃料の枯渇問題や CO₂ による地球温暖化問題等を解決するためには、量産車両の車体軽量化が必要不可欠と考えられており、部品の樹脂化が広がっている¹⁾。特に繊維強化樹脂基複合材料(Fiber Reinforced Plastics: FRP)は高比強度、高比剛性という優れた機械的特性を持ち金属材料をFRPに置き換えることによる車体の軽量化が期待されている。FRPは繊維とマトリックス樹脂で構成されており、繊維の種類や量、樹脂の種類によって様々な成形方法があり、非常に広範囲な機械的

性、製造特性を持つ。また、成形方法の違いにより機械的特性とコストが大きく異なり、繊維、樹脂、成形方法を適切に選定し効果的に活用することが求められる。

これまで自動車に用いられてきたFRP材料としては炭素繊維強化樹脂基複合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics: CFRP)とガラス繊維強化樹脂基複合材料(Glass Fiber Reinforced Plastics: GFRP)がある。CFRPは炭素繊維の高比強度、高比剛性という特性に起因して、FRPの中でも、最も比強度、比剛性が高く、航空機などの輸送機器に多く用いられる。

* Department of Biomedical Engineering, Doshisha University, Kyoto
TEL&FAX: +81-774-65-6408, E-mail: ktanaka@mail.doshisha.ac.jp

** E-mail: dmi0124@mail4.doshisha.ac.jp

*** E-mail: tkatayam@mail.doshisha.ac.jp

しかし、自動車分野ではコストが高いという問題から一部の高級車の外板材やドライブシャフトへの使用にとどまっている。CFRPの成形方法としてはプリプレグを用いてオートクレーブにより成形する手法が主流であり、マトリックス樹脂にはプリプレグ製造性、成形性などの理由から主にエポキシ樹脂などの熱硬化性樹脂が使用されている。しかし量産車には、高じん性、リサイクル性、量産性に優れた熱可塑性樹脂を用いることが適していると考えられる。

GFRPは、CFRPに比べてコストが低く量産自動車でも多く用いられている。その中間基材としては優れた生産性を持つGMT(Glass Mat reinforced Thermoplastics)が多く用いられている。しかし、GMTより成形したガラス繊維強化熱可塑性樹脂基複合材料(Glass Fiber Reinforced Thermoplastics: GFRTP)はガラス繊維が不連続繊維となっているために、比強度、比剛性が比較的 low、より優れた機械的特性を持つGFRTPを製造するには、ガラス連続繊維を用いることが望ましいと考えられる。

連続繊維を用いた熱可塑性樹脂基複合材料は高剛性、高じん性、リサイクル性の点で自動車用材料として優れると考えられる。しかし、熱可塑性樹脂は熱硬化性樹脂と比べて熔融粘度が高く樹脂の繊維へ

の含浸が困難であったことから量産性に問題があった。近年、我々はFRTP製造技術として中間基材のNSMC(Non-woven Stitched Multi-axial Cloth)と高速加熱冷却システムを組み合わせたFRTP高速プレス成形法を開発してきた²⁾。この新成形方法では連続繊維強化樹脂基複合材料の高速成形が可能であり、成形サイクル時間を短縮化することが可能である。本報ではこの新成形法により製造したFRTPのコスト評価を行い、プリプレグ、GMTと比較、検討することから新成形法による量産自動車用FRP成形の有用性を検証する。

2. 生産工程および材料

2.1 生産工程

今回のコスト評価では、強化繊維とマトリックス樹脂を中間基材に加工をする工程(中間基材加工工程)と、その中間基材を加熱圧縮成形し、FRP成形品を製造する工程(成形工程)に分けて考える。その工程をFig. 1に示す。強化繊維の機械的性質³⁾および材料コストをTable 1に、マトリックス樹脂の機械的性質⁴⁾およびコストをTable 2に示す。Table 3に各中間基材の価格を示す。中間基材の価格から繊維と樹脂の価格を引いたものを中間基材加工費とする。ま

Table 1. Properties of reinforcement fibers³⁾.

		Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Specific gravity	Material cost (yen/kg)
Carbon fiber (CF)	(3K35t)	6.2	310	1.8	9000
	(12K24t)	4.2	240	1.8	3500
Glass fiber (GF)		3.4	75.5	2.5	200

Table 2. Properties of matrix resins⁴⁾.

	Bending strength (MPa)	Bending modulus (MPa)	Specific gravity	Material cost (yen/kg)
Epoxy (EP)	125	2840	1.15	1000
Polyamide 6 (PA6)	123	2500	1.14	500
Polypropylene (PP)	36	1300	0.9	100

たFRP成形費は人件費に設備費を加えたものとする。人件費は時給 1250 円の作業員が二名で作業を行うものとし、それぞれのFRP成形品一品あたりの作業時間分の人件費を計算する。また、FRP高速プレス成形金型とプレス設備に関して、それぞれの価格と使用年数から成形品1つあたりのFRP高速プレス金型費および、プレス設備費を計算し、金型費にプレス設備費を加えたものを設備費とする。Table 4に中間基材加工費とFRP成形費の計算に用いた値を示す。なお、中間基材の種類により成形に必要な設備は異なるが本報では簡単のため、すべてのFRPについて高速プレス成形に準ずる設備で成形するものとし、Table 4から計算した82円を成形品1つあたりの設備費とした。

2.2 中間基材

2.2.1 不織布付多層多軸クロス (Non-woven Stitched Multi-axial Cloth (NSMC))

不織布付多層多軸クロス (Non-woven Stitched Multi-axial Cloth: NSMC, ベニートヤマ 製) は、Fig. 2 に示すようにマトリックスを不織布として供給し、この不織布と強化繊維のノンクリンプファブリック (Non-crimp stitched fabric: NCF,

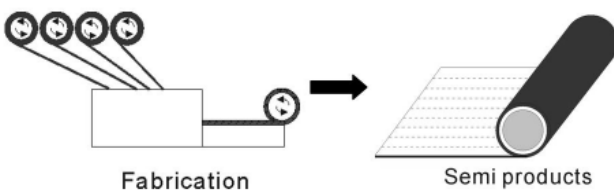
Multi-axial multi-ply fabric: MMF) を一体としてステッチしたものであり、素材の容易なハンドリングを実現した材料である。本報では、フィラメント数 12k、弾性率 24t グレードの炭素繊維を用いた CF(Carbon Fiber)/PA6(Polyamide 6) , GF(Glass Fiber)/PA6 , GF/PP(polypropylene)の三種類についてコスト比較を行った。また、高速加熱冷却システムを用いた高速プレス成形により FRTP を成形し、三点曲げ試験により強度を測定した。ただし、GF(Glass Fiber)/PA6, GF/PP(polypropylene)の二種類については NSMC ではなく、NCF と樹脂不織布を積層し成形に用いた。

2.2.2 プリプレグ

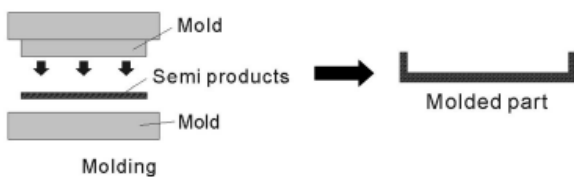
プリプレグは航空機用材料などの高性能FRPの部品に用いられる中間基材である。マトリックス樹脂

Table 3. Cost of semi product.

Cost of semi-product (yen/m ²)	Prepreg (GF/EP)	5000
	NSMC (CF/PA6)	1840
	NSMC (GF/PA6)	590
	NSMC (GF/PP)	200
Cost of semi-product (yen/kg)	GMT (GF/PP)	500



(a) Fabrication of semi products.



(b) Molding process.

Fig.1. Manufacturing process of FRP.

Table 4. Condition values of cost evaluation.

Working times (s)	Prepreg	7200
	NSMC(CF/PA6)	320
	NSMC(GF/PA6)	320
	NSMC(GF/PP)	280
	GMT	60
Employment cost (yen/h)		1250
Mold cost (yen)		6000000
Number of molding times of one mold (times)		230000
Molding system cost (yen)		50000000
Number of molding capacity of one system (times)		900000

には熱可塑性樹脂，熱硬化性樹脂の両方が用いられているが，最も多く用いられているのは熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂を用いたものである⁵⁾。その加工工程を Fig. 3 に示す。配列した，あるいは織りあげた基材繊維に，マトリックス樹脂を含浸させ，一部樹脂の硬化反応を進めて，取り扱いやすいシート状にしている。本報ではフィラメント数 3k 弾性率 35t グレードの炭素繊維と 130℃硬化エポキシ樹脂から構成される CF/EP(Epoxy)プリプレグについてコスト評価を行った。

2.2.3 GMT⁶⁾

GMT(Glass Mat reinforced Thermoplastics)は，安価な FRP に用いられている中間基材であり，自動車の

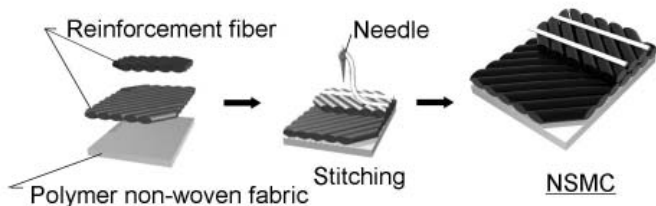


Fig. 2. Fabricating process of NSMC.

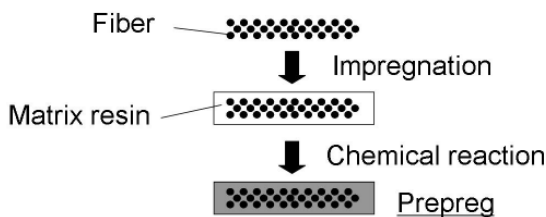


Fig. 3. Fabricating process of prepreg.

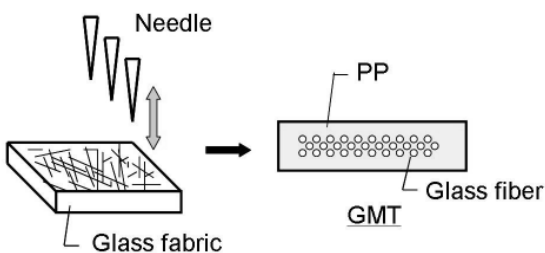


Fig. 4. Fabricating process of GMT.

バックドインナーやバッテリートレーなどに適用事例がある⁷⁾。GMTの加工工程を Fig. 4 に示す。ガラス繊維ファブリックにニードルで繊維分散処理を行い，ポリプロピレン(PP)をガラスファブリックに完全に含浸させ板状の FRP としたものが GMT である。加熱プレス成形により二次加工を行うことで目的の形状にすることができる。

2.3 成形方法（電磁誘導急速加熱・冷却システム）

成形工程には Fig. 5 に示す電磁誘導加熱を用いた急速加熱・冷却システム Cage System[®] (Roctool 製)を用いた。以下，本システムを IH system と称する。これは，コイルに流した交流電流により磁界を発生させ，コイルの中の被加熱物に渦電流を誘起し，ジュール熱により発熱する原理を応用した技術である。上下の金型に組み込まれたコイルにより電磁誘導を起こし，金型表面のみを加熱するため，短時間での加熱が可能である。また，冷却は，金型表面直下を通るパイプに冷却水を通すことによって行い，加熱部の体積が小さいため，短時間での冷却が可能となる。

成形中の IH system 金型表面における温度履歴を Fig.7 に示す。室温から，約 60 秒間で 250℃まで上昇させることができ，約 120 秒間で冷却することが可能である。

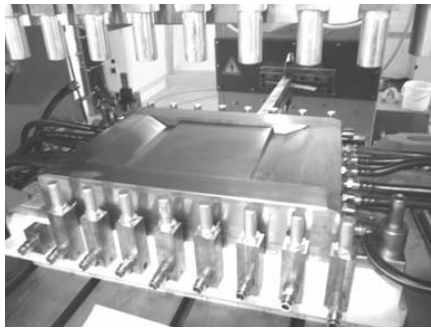
2.4 成形条件

成形品は 250mm×400mm，厚さ 2mm の薄板とした。成形時間については Table 4 に示したようにプリプレグでは一般的な硬化時間である 2 時間を成形時間とし，NSMC についてはそれぞれの樹脂の融点から成形温度を設定し，成形温度までの加熱冷却時間を Fig. 6 に示す金型温度履歴より求めそれに保持時間を加えた時間を成形時間とした。NSMC(CF/PA6)と NSMC(GF/PA6)については成形温度を 250℃，保持時間を 90s と設定し，NSMC(GF/PP)については成形温度を 230℃，保持時間を 90s と設定した。GMT についてはスタンピング成形時間 60s を設定した

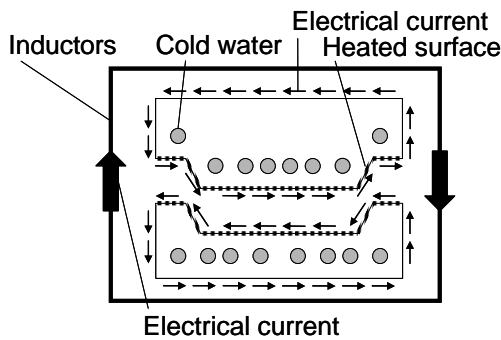
2.5 FRP の強度

Table 5 に示す強度，体積繊維含有量と Table 1,2 に示す材料の密度より比強度を求めた。NSMC につ

いては IH system を用いて FRP の成形を行い、JIS-K7017 に基づいた曲げ試験から得られた曲げ強度を強度とした。プリプレグと GMT の強度には文献値^{8,9)}を用いた。



(a) Mould with IH system.



(b) Schematic drawing of IH system.

Fig. 5. Mould and schematic drawing of IH system.

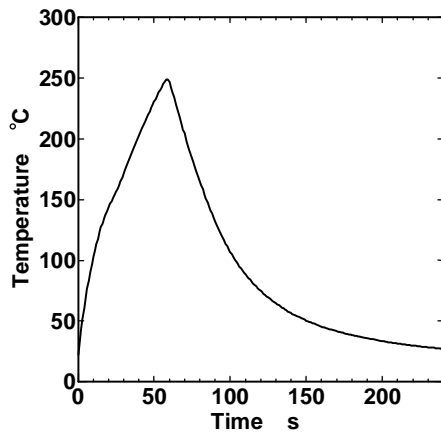


Fig. 6. Temperature history of mould surface.

3. 結果および考察

3.1 中間基材のコスト

Fig. 7 に炭素繊維を強化繊維としたプリプレグと NSMC の材料 1kg あたりのコストを示す。NSMC のコストはプリプレグのコストの約 40% となった。プリプレグのコストの中で最も大きな割合を示したのは中間基材加工費であった。一方 NSMC で最も大きな割合を示したのは繊維であり、NSMC の中間基材加工費がプリプレグの中間基材加工費に比べて大幅に削減できることから低コストな中間基材となっていることが明らかである。

Fig. 8 にガラス繊維を強化繊維に用いた NSMC と GMT の材料 1kg あたりのコストを示す。どちらの中間基材においても全体のコストの大部分を中間基材加工費が占めていることがわかる。また NSMC で PA6 を用いた物と PP を用いたものには中間基材全体のコストには大きな差はなく、樹脂の価格が中間基材のコストに及ぼす影響は少ない。また GMT に比べて NSMC は倍程度のコストとなっており、中間基材加工費の差が大きく影響している。

3.2 成形品あたりのコスト

Fig. 9 に炭素繊維を強化繊維としたプリプレグと NSMC の成形品のコストを示す。NSMC のコストはプリプレグのコストの約 30% となった。どちらの場合も中間基材加工費と繊維の材料費が大きな割合を占めている。一方、プリプレグでは成形費が全体の 35% 程度を占めているのに対し、NSMC では 10% 程度しかない。熱可塑性樹脂をマトリックスにするこ

Table 5. Strength of FRP.

	Strength (MPa)	Fiber volume fraction (%)	Fiber orientation
Prepreg(CF/EP)	1414 ⁽⁵⁾	50	0/90
NSMC(CF/PA6)	802	50	0/90
NSMC(GF/PA6)	435	50	0/90
GMT(GF/PP)	63 ⁽⁶⁾	35(40wt%)	Random

とで成形時間を大幅に短縮でき、成形品全体のコストを大きく削減できることがわかる。

Fig. 10に強化繊維にガラス繊維を用いたNSMCとGMTの成形品のコストを示す。どちらの中間基材においても全体のコストの大部分を中間基材加工費と成形費が占めている。炭素繊維を強化繊維とするCFRPではプリプレグ、NSMC共に繊維とマトリックスを含めた材料費は全体の約40%であったのに対し、ガラスを強化繊維としたFRPでは22%以下であった。ガラス繊維は、炭素繊維に対して材料費の点で優位であることがわかる。またPPを用いたNSMCのコストは、PA6を用いたものに比べて、成形温度の違いによる成形時間の短縮化と、PP樹脂を用いることによる材料費の削減によって5%程度削

減された。しかし、GMTと比較するとNSMCではどちらの樹脂を用いた場合にも倍以上のコストとなっており、NSMCの中間基材加工費の削減が望まれる。

3.3 FRPの比強度あたりのコスト

Fig. 11に各成形品の比強度を示す。Fig. 12に示す単位比強度あたりのコストは、成形品のコストを比強度で除した値である。Fig. 10に示したよう、NSMCはGMTに比べて高い成形品コストとなっているが、単位比強度あたりのコストではNSMC(GF/PA6)はGMTより低くなり、NSMC(CF/PA6)でもGMTと同等となった。このことよりNSMCは比強度あたりで考えるとガラス繊維を強化材としたGMTに匹敵す

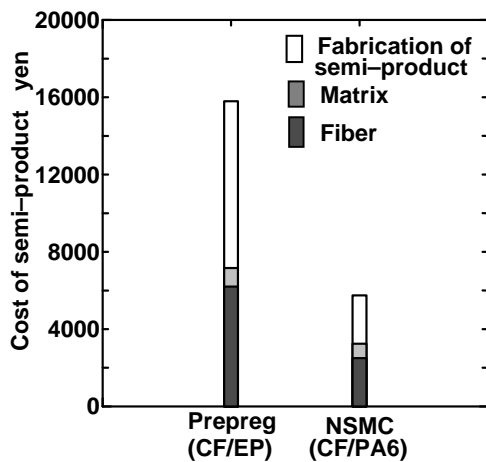


Fig. 7. Cost of semi-product using carbon fiber.

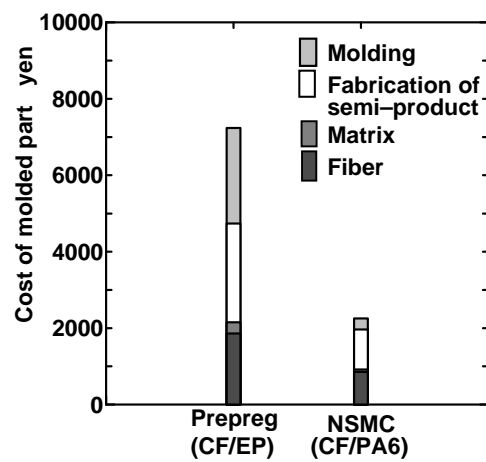


Fig. 9. Cost of the molded part using carbon fiber.

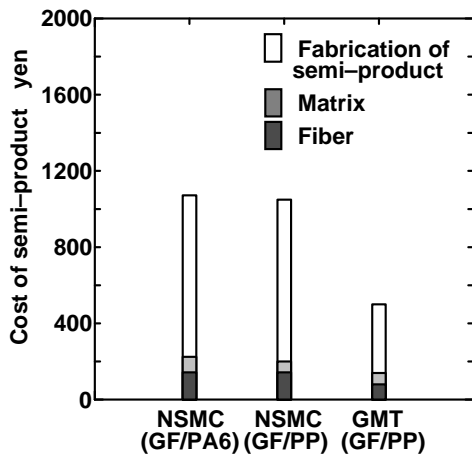


Fig. 8. Cost of semi-product using glass fiber.

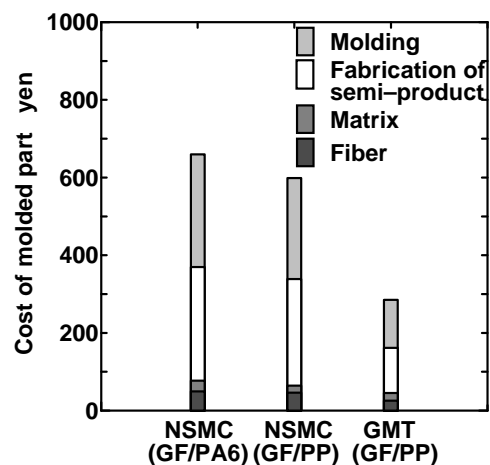


Fig. 10. Cost of the molded part using glass fiber.

るほど、低コストを実現した優れた中間基材であることがわかる。

4. 結言

不織布付多軸多層クロス (NSMC) を中間基材として、IH system により成形した FRTP のコスト評価を行い、プリプレグと GMT を中間基材として成形した FRP との比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) プリプレグに比べて NSMC は低コストで CFRP 製品を得ることが可能である。
- (2) NSMC は比強度あたりで考えるとガラス繊維を強化材とした GMT に匹敵するほど、低コストを実現した優れた中間基材である。

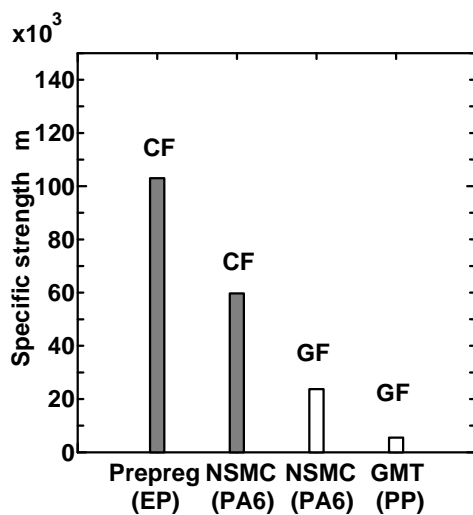


Fig. 11. Specific strength.

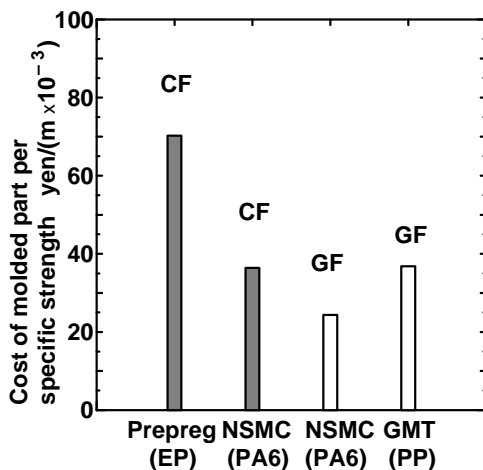


Fig. 12. Cost of molded part per specific strength.

本研究の一部は、文部科学省私立大学研究高度化推進事業「先進複合材料の開発とその応用 —先端複合材料技術による自動車開発— (同志社大学)」の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 保谷敬夫, “車両用樹脂材料の現状と今後の動向”, 自動車技術, **63**, No.1, 82-87, (2009).
- 2) 田中和人, 小橋則夫, 木下陽平, 片山傳生, 宇野和孝, “樹脂不織布付多軸多層クロスを用いた CFRTP の電磁誘導加熱プレス成形”, 材料, **58**, No.7, 642-648 (2009).
- 3) 平野陽三, プラスチック機能性高分子材料事典, (産業調査会 事典出版センター, 東京, 2004), p.556-571.
- 4) 平野陽三, プラスチック機能性高分子材料事典, (産業調査会 事典出版センター, 東京, 2004), p.34,220,486.
- 5) 栗原貞夫, 石丸禎男, プラスチック系先端複合材料—素材から応用まで—, (社団法人強化プラスチック協会, 東京, 1989), p.70-78.
- 6) Quadrant Plastic Composites Japan Ltd ホームページ, http://www.jgmt.net/pro_gmt.html.
- 7) 岩田輝彦, 入口剛典, 渡辺健二, 鈴木繁生, “自動車用樹脂バックドアモジュール”, 日立化成テクニカルレポート, No.44, 21-24 (2005).
- 8) M. Kawai, N. Maki, “Fatigue strengths of cross-ply CFRP laminates at room and high temperatures and its phenomenological modeling”, International Journal of Fatigue, **28**, 1297-1306, (2006).
- 9) F. Henning, H. Ernst and R. Brussel. ” LFTs for automotive applications”, REINFORCEDplastics, **2**, 24-33, (2005).