不連続炭素繊維強化プラスチックによる新規な軽量フォーム材の作製[†]

武部 佳樹* 平野 啓之* 本間 雅登*

篠原 光太郎* 藤岡 聖*

A New Foam Material Made from Discontinuous Carbon Fiber Reinforced Plastics

by

Yoshiki TAKEBE*, Noriyuki HIRANO*, Masato HONMA*,

Kotaro SHINOHARA* and Takashi FUJIOKA*

Sandwich panels are widely used in building construction, housing and transportation equipment. The core is normally used low density material such as honeycomb structure or cell-structured thermoplastic foams. However, they have difficulties molding complex shaped structures and being weak in shear. A new stiff and lightweight carbon fiber reinforced foam (CFRF) was manufactured by focusing on spring back effect of monofilament dispersed discontinuous CFRT (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic). Specific bending modulus of polypropylene matrix CFRF was changed from 2.20 to 5.30 depending on spring back ratio. Press molding for complex shaped CFRF including curved surface and deep drawing structures was successfully obtained by one-step procedure. Furthermore, sandwich structure having solid polyamide skin was also obtained in the same method.

Key words:

CFRT, CFRF, Sandwich structures, Lightweight, Specific bending modulus, Foam core

1 緒 言

サンドイッチ構造による構造体の軽量化技術は、ダンボールやコンテナなどの梱包資材から建材、航空機などの輸送機器に至るまで幅広く活用されている。一般にサンドイッチ構造では、スキンが曲げ荷重と面内負荷を支え、コアがせん断荷重を受け持つ。軽量のコアで重量増加を抑えつつ十分な厚さを確保でき、全体の面外変形が抑えられることから、特に比曲げ剛性に優れる。

しかし、サンドイッチ構造体を得るためには、スキン材を配置した型内にコアを充填するか、先にコアを加工して、スキンを貼り付ける工程が必要となる。これらは、複雑形状への賦形時に量産性を損なうため問題となる。

さらに、サンドイッチ構造体の更なる性能向上を考えると、フォームコア自体の弾性率向上も必要となる¹⁾。そこで、強化繊維を活用した樹脂フォームの研究^{2,3)}など、フォームと強化繊維の組合せが検討されている。しかし、型内充填で作製するため量産性に劣り、弾性率向上については僅かである。さらに、アルミフォームのスキンとの一体化を含めた研究^{4,6)}など、金属フォームの活用も注目されている。しかし、金属フォームは加工温度などの問題から、樹脂フォームのような汎用性はない。そこで筆者らは、軽量・高弾性率である炭素繊維強化複合材料(CFRP)の、フォームとしての活用を考えた。

不連続の炭素繊維で強化された熱可塑性樹脂(CFRT)材料では、成形時の樹脂の加熱溶融時に伴い、屈曲していた繊維が弾性力により元に戻ろうとするスプリングバックと呼ばれる膨張が起きる。スプリングバックは、通常の成形時は成形品の均質性低下を引き起こす問題点として解釈されるが⁷⁾、フォームを設計するという視点では発泡力に相当する。すなわち、このCFRTのスプリングバックを積極活用してフォーム材が創出できると考えた。

加えて、CFRTの膨張力(スプリングバック力)は炭素繊維の変形が原動力となるため、通常の発泡フォームよりもはるかに大きいと考えられる。これは、低比重のコアが得られることに加え、一般に高圧が要求される複雑形状の賦形にも有利に働く可能性が高い。

これらの狙いを実現するには、均質かつ強力なスプリングバックを起こさせることが重要となる。そこで、不連続の炭素繊維を、面内方向に単繊維レベルで等方・均質に分散させたマットに、熱可塑性樹脂を含浸させたシート状の材料である、等方性CFRT⁸⁾⁻¹⁰⁾の活用を着想した。本材料のスプリングバック挙動は実験および理論的に検証されており¹¹⁾、スプリングバックの前後の厚さ比(スプリングバック比)Sは、次式が提案されている。

$$S \propto aIC \quad (1)$$

[†] 原稿受理 平成28年1月13日 Received Jan.13,2016 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 東レ(株)複合材料研究所 〒791-3193 愛媛県伊予郡 Toray Industries, Inc. Composite Material Research Laboratories. Iyo-gun, Ehime 791-3193.

ここで, S はスプリングバック比, a は面内方向での単繊維の配向係数, I は単繊維のスプリングバック前後の傾斜比, C は単繊維の接点数を表す. 配向係数 a は, 面外方向を向く繊維の割合であり, 繊維が Vf100% で, すべて面外方向に向いた場合に 1 となる. 傾斜比 I は, スプリングバック前後の繊維の面外方向の傾斜角度の比を表す. 繊維の接点数 C は, Kallmes によれば, 次式で表される¹²⁾.

$$C = \frac{8\lambda}{\pi^2 D} Vf \quad (2)$$

(λ は繊維長(mm), D は繊維直径(mm), Vf は繊維体積含有率(%)を表す)

λ/D は繊維のアスペクト比であるから, 式(1) および (2) より, 繊維のアスペクト比が大きいくほど, S が大きくなる. 等方性 CFRTP は単繊維レベルで分散したマットにより構成されており, 繊維束で構成される通常のマット材料よりもアスペクト比が大きく, S が大きくなる.

本論文では, 等方性 CFRTP を炭素繊維強化フォーム (CFRF: Carbon Fiber Reinforced Foam) ととらえ, そのスプリングバック時の膨張力 (スプリングバック力), フォーム材としての機械特性, および複雑構造を有するサンドイッチ構造体への応用について検討した.

2 CFRF試験試料の作製および評価方法

2.1 炭素繊維マット

ポリアクリロニトリル (PAN) 系炭素繊維 (東レ (株) 製 T700SC-12K (引張強度 4900MPa, 引張弾性率 230GPa, 比重 1.8g/cm³)) を繊維長 7mm に切断し, チョップド繊維とした. 得られたチョップド繊維を文献記載の方法¹³⁾により単繊維レベルで等方に分散し, 100g/m², 厚さ 2.2mm の炭素繊維マットを作製した.

2.2 マトリックス樹脂フィルム

2.2.1 ポリプロピレンフィルム ホモポリプロピレン (プライムポリマー (株) 製, 引張強度 41MPa, 引張弾性率 2GPa) と酸変性ポリプロピレン (三井化学 (株) 製 アドマー-QF500, 酸変性度はメーカー非開示) ペレットを二軸押出機 (日本製鋼所 (株) 製 TEX30 α , $\phi=30$, L/D=31.5) を用いて 210°C, 150rpm, 吐出量 8kg/hr で混練し, 樹脂ペレットを作製した. 得られたペレットを 50°C で 3 時間乾燥した後 20g 秤量し, 厚さ 1mm のテフロン (登録商標) シート 2 枚の間に挟んだ. このシートを, 油圧式プレス機の熱盤間に配置し, 200°C, 0.8MPa で 120 秒間プレスしたのち, 30°C に制御された油圧式プレス機の冷却盤間に移し, 面圧 0.8MPa で 60 秒間プレスした. その後テフロン (登録商標) シートを除き, 厚さ 0.22mm (200g/m²) の樹脂フィルムを得た.

2.2.2 ポリアミドフィルム ポリアミド 6 樹脂 (東レ (株) 製, アミラン (登録商標) CM1010) ペレット 20g を 80°C で 3 時間乾燥させ, ポリプロピレンフィルムの作製と同様の手順で, 厚さ 0.22mm (250g/m²) の樹脂フィルムを得た. このとき, ポリアミドの融点 (225°C) を考慮し, 油圧式プレス機の加熱温度を 240°C に調整した.

2.3 等方性 CFRTP シート

300mm 角に切断した炭素繊維マットと樹脂フィルムを 2 枚ずつ交互積層し, 厚さ 1mm のテフロン (登録商標) で挟み, 油圧式プレス機の熱盤間に配置した. 熱盤の温度は, ポリプロピレンの場合は 200°C, ポリアミドの場合は 260°C に設定した. 面圧 4MPa で 2 分間プレスして樹脂を含浸させた後, 30°C に制御された油圧式プレス機の冷却盤間に移し, シート温度が 50°C となるまで 4MPa の面圧で冷却プレスした. テフロン (登録商標) シートを除き, 厚さ 0.55mm の等方性 CFRTP シートを得た. 得られた等方性 CFRTP シートの繊維体積含有率 (Vf) は, 20% であった. なお, 油圧プレス機の温度は, 使用する樹脂の融点, 熱分解温度や成形品の厚さを考慮して設定される. 通常, ポリプロピレン (融点 160~165°C) では 180~220°C, ポリアミド 6 (融点 225°C) の場合は 240~270°C の範囲で設定する.

2.4 CFRF フォーム材 (CFRF)

以下に, 厚さ 2mm, スプリングバック比 2.0 の CFRF の作製例を示す. これ以外のスプリングバック比および厚さについても, 材料の投入量とプレス盤面の高さで, 所望の範囲に調節できる.

2.3 節で作製した厚さ 0.55mm の等方性 CFRP シート 2 枚をテフロン (登録商標) シートで挟み, 200°C に設定した油圧プレス機を用い, 面圧 3MPa となるように加圧力を調整し, 2 分間加圧した. 次に, プレス盤面を 2.1mm の高さまで上昇させた (このとき, シートはスプリングバックにより, プレス機の天面に接触するまで膨張する). その後, プレス盤面の温度が 50°C になるまで冷却し, テフロン (登録商標) シートを除き, 厚さ 2.1mm の CFRF を得た. なお, スプリングバック比 1.0 の材料は, プレス盤面を上昇させず, そのまま冷却することで得た.

スプリングバック比 3.0 の CFRF の外観を Fig. 1 に示す.

Fig. 1 CFRF (Spring Back Ratio 3.0).

2.5 スプリングバック力の測定

幅 100mm, 長さ 300mm, 厚さ 0.55mm の等方性 CFRTP シートを 5 枚積層し (合計厚さ 2.75mm), 遠赤外線ヒーター (NGK キルンテック (株) 製) で, シートの実温が 210℃ となる条件 (設定温度 270℃) で 1 分間加熱してマトリックス樹脂を熔融させた. このシートを, 樹脂が熔融した状態を維持して圧力センサー付きの金型 (設定温度 120℃) 内にすばやく投入し, 面圧 10MPa にて 1 秒間プレスしたのち, 2.4 節に記載した方法と同様にして, 所望のスプリングバック比になるように金型を上昇させた. スプリングバック力は, プレス盤面に配置した圧力センサー (短手方向 1 箇所, 長手方向 6 箇所 (均等配置)) の最大値とした (試験数は各 1 回). ここで, 金型温度は脱型のため樹脂の融点より低くする必要があり, CFRF は冷却固化に伴い構造が固定されるため, スプリングバック力は時間とともに低下し, 最終的にはゼロになる.

なお, 金型温度は成形速度と外観品位のバランスから選択され, 成形品の厚さや形状に応じて調節される.

2.6 機械特性の測定

2.6.1 曲げ特性 ISO/FDIS 14125 に準じて, 長さ 80 mm, 幅 10 mm, 厚さ 4 mm の試験片を用い, 室温下, 支点間距離 64 mm, 変位速度 5 mm/min の条件で 3 点曲げ試験を行った (試験数 5 回). 支持点の半径は 2 mm, 圧子の半径は 5 mm とした. 弾性率は応力-ひずみ線図の初期の直線部からひずみ 0.2% 区間を抽出し, 勾配を用いて算出した.

2.6.2 引張特性 ISO 527-4 に準じて, 長さ 250 mm, 幅 25 mm, 厚さ 2 mm の試験片を用い, 室温下, つかみ具間長さ 150 mm, 変位速度 2 mm/min の条件で試験を行った (試験数 5 回). なお, 変位はクリップゲージにてひずみを測定し, 弾性率は, ひずみ 0.05~0.25% の範囲の勾配より算出した.

2.6.3 圧縮特性 JIS K7076-A 法に準じて, 長さ 78 mm, 幅 12.5 mm, 厚さ 2 mm の試験片を用い, 室温下, 変位速度 1 mm/min の条件で試験を行った (試験数 5 回). なお, タブは同材を用い長さ 35 mm, 幅 12.5 mm, 厚さ 2 mm のものを使用し, 接着剤で貼付した. 弾性率は応力-ひずみ線図の初期の直線部からひずみ 0.2% 区間を抽出し, 勾配より算出した.

3 CFRFのスプリングバック力

厚さ 2.75mm の等方性 CFRP シートから作製した CFRF のスプリングバック比とスプリングバック力の関係を, Table 1 および Fig. 2 に示す. スプリングバック力はスプリングバック比の上昇に伴いわずかに低下したが, 2MPa 以上という, 非常に高い値が保持された. これは, 屈曲していた炭素繊維の復元力を反映しており, 通常のフォームコア (~0.3MPa) よりも圧倒的に大きい.

また, スプリングバック比の増加に対してスプリングバック力の低下が小さい. これは屈曲した炭素繊維がバネのような挙動を示すことで, 繊維が復元するまでの間は安定したスプリングバック力を示していると考えている. Table 1 に示される範囲内であれば, 任意のスプリングバック比を設定しても, 安定した品位の CFRF が得られると考えられる.

この均質で強いスプリングバック力は, 炭素繊維が単繊維レベルで分散し, 多くの接点を持つ (式 (2) の C が大きい) ことに由来すると考えている.

Table 1 Spring Back Pressure of CFRF.

Spring Back Ratio	Spring Back Pressure(MPa)
1.8	2.5
2.6	2.4
4.8	2.3
6.1	2.3

Fig. 2 Relationship between Spring Back Ratio and Spring Back Pressure.

4 CFRFの機械特性

4.1 曲げ特性

CFRF のスプリングバック比と曲げ特性の関係を Table 2 に示す. 比較材として, 軽量性に優れた無架橋低発泡ポリプロピレンシート (Efsel (登録商標)) を用いた. CFRF は, 発泡ポリプロピレンと同等の比重下で, 10 倍以上の弾性率を保持し, 軽量化の指標となる比曲げ剛性に優れることがわかった.

また, スプリングバック比と比曲げ弾性率の関係を Fig. 3 に示す. CFRF の比曲げ弾性率はスプリングバックによる厚さの増加を受け, 線形に近い形で増加した.

Table 2 Bending properties of CFRF.

	Spring Back Ratio	Density (g/cm ³)	Modulus (GPa)	Specific Modulus ($\sqrt[3]{\text{GPa}}/(\text{g/cm}^3)$)
CFRF	1.0	1.05	12.4	2.20
	1.9	0.58	6.8	3.29
	2.9	0.38	3.6	4.07
	4.6	0.24	2.0	5.30
Efsel ®	2.0	0.48	0.4	1.54
	3.0	0.33	0.2	1.77

Fig. 3 Relationship between Spring Back Ratio and Specific Modulus.

スプリングバック比2.9のCFRFの表面および断面画像をFig. 4に示す。平面図から、面内では炭素繊維が直線を維持しているのがわかる。これは、炭素繊維が外部から力を受けない状態では直線形状を取り、自然には屈曲しないことを意味する。図中の黒い部分は空隙であり、CFRFが樹脂で被覆された炭素繊維で構成されたフォームコアという特殊な形態を有することがわかる。なお、断面写真では切断加工時に樹脂が溶融するため、繊維の屈曲有無は確認できなかった。

Fig. 4 Microstructures of CFRF (Spring Back Ratio 2.9).

4.2 引張および圧縮特性

CFRFのスプリングバック比と引張および圧縮弾性率との関係を、Table 3, 4およびFig. 5に示す。引張弾性率と曲げ弾性率は、スプリングバック比に対してほぼ同様の挙動を示した。一方、圧縮弾性率はスプリングバック比の増加に伴う低下幅が小さかった (Fig. 5)。これは、CFRF中の炭素繊維が単糸状であるため、圧縮荷重により屈曲が可能となり、面内方向においてもスプリングバック力が発現し、圧縮荷重を緩和したためと考えている (Fig. 6) が、試験方法が影響している可能性もあり、詳細の理解には精査が必要である。

なお、CFRFの圧縮における応力-ひずみ曲線は、線形に近くなる。これは、圧縮荷重を弾性率の高い炭素繊維が負担していることを示唆している。

Table 3 Tensile properties of CFRF.

Spring Back Ratio	Density (g/cm ³)	Modulus (GPa)	CV (%)
1.1	1.06	13	4.0
1.6	0.67	8.8	7.4
2.1	0.51	7.2	2.2
3.0	0.36	4.5	7.0

Table 4 Compression properties of CFRF.

Spring Back Ratio	Density (g/cm ³)	Modulus (GPa)	CV (%)
1.0	1.01	15	7.0
1.6	0.69	14	4.6
2.1	0.53	11	2.2
3.1	0.35	6.6	12.9

Fig. 5 Relationship between Spring Back Ratio and modulus.

Fig. 6 Transformation of the CFRF fiber (compression) .

5 CFRFの形状賦形

5.1 CFRFの単独賦形

前節では平板状の試験片の評価から、CFRFが低比重で優れた弾性率を有することを示した。本項では、もう一つの狙いである、スプリングバック力を活かした複雑形状の賦型について検討した。

通常の炭素繊維は伸度が2%以下と低く、プリプレグなどの連続繊維で構成される材料を用いると、繊維が凹凸やリブ、絞りなどの形状に追従できない。一方でCFRFを構成する炭素繊維は不連続であり、狭い空間にも充填できる。加えて均質で強いスプリングバック力を持つため、プレス成形で高圧を付与して形状を賦形した後に金型を上昇させれば、形状を維持しながら膨張すると考えられる。そこで、凹凸面および絞り形状を含むモデル金型を用い、平板と同様のプロセスでCFRFの形状賦型を試みた。金型のキャビティ形状をFig. 7に示す。サイズは長さ600mm、幅300mmであり、左下に直径80mm、高さ20mmの円形の絞り形状を有する。右下の矩形凸部は高さ

20mm で、各部の角は R17 に設計してある。なお、Fig. 7 に示す破線は、後述する断面観察用の加工ラインである。

Fig. 7 Detail Drawing of complex shape model part.

本金型を用い、2・4 節に記載のプロセスに従って CFRF の成形を行った。厚さ 0.55mm の等方性 CFRTP（ポリプロピレンマトリックス）3 枚を用い、スプリングバック比 3.0 で成形した CFRF 成形品の外観を Fig. 8 に示す。得られた成形品は、凹凸面および絞り形状をよく追従した。本手法では、原料に板状の等方性 CFRTP のみを用い、特別なカットパターン形成やプリフォームなど、工程増加の要因となる作業は行っていない。

Fig. 8 Molded Product (CFRF).

Fig.9 に示す 37 点のポイントで測定した成形品の厚さを Table 5 に示す。変動係数（CV 値）は、1.95% と非常に小さく、品位は安定していた。これは等方性 CFRF 中の炭素繊維が均一に分散されているため、面外方向に均質なスプリングバックが生じていることを示している。

Fig.9 Measurement point of thickness.

Table 5 Thickness of the molding (CFRF).

Average thickness (mm)	Standard Deviation (mm)	CV (%)
5.24	0.10	1.95

Fig.10 Molded Product of the cross-section (CFRF).

Fig.8 左下の円型絞り形状部分から見た断面図を Fig.10 に示す。絞り形状の部分も、材料が引きちぎれることなく追従していることがわかる。なお、絞り形状では原料

となる板材よりも表面積が増加するが、これに伴う外表面の破れやボイドも見られなかった。これは、単繊維が網面状に存在されていることより（Fig. 4）変形が網の目が広がるように連続的に起こり、外表面の破れが生じにくいことによる。

5.2 サンドイッチ構造のワンステップ賦形

サンドイッチ成形において、スキン層とコア層の接着・賦型を単一工程で達成できれば大きなメリットとなる。前項で、フォーム材は単一工程で製造できることが分かったので、続いて単一工程で複雑形状を有するサンドイッチ構造体を賦形する検討を行った。サンドイッチ構造では、スキン材は剛性に寄与するため空隙を持たないソリッド構造が求められる。そこで、スキンに融点の高いポリアミド 6（融点 225℃）を用い、融点差でスキンのみを先に固化させ、コアのみをスプリングバックさせることを考えた。具体的には厚さ 0.55mm のポリプロピレンをマトリックスとした等方性 CFRTP2 枚（合計厚さ 1.1mm）を、厚さ 0.55mm のポリアミドをマトリックスとした等方性 CFRTP で挟み、これを 2・5 節の手順に従い成形した。その際、ポリアミド 6 を溶融させるために、材料の実温が 260℃ となるようにヒーターを調節した。金型の温度は 120℃ を維持した。

その結果、表面にポリアミドマトリックスのスキン層を有し、中心にポリプロピレンマトリックスのコア層を有した目的の成形品を 1 工程のプレス成形のみで得ることに成功した（Fig. 11）。

Fig. 11 Molded Product (Sandwich structure).

フォーム成形品と同様に、Fig.9 に示すポイントで測定したサンドイッチ成形品の厚さを Table 6 に示す。変動係数は 3.87% とフォーム成形品よりもやや高くなったが、通常の FRP 成形品で見られるバラツキの範囲内であった。この優れた厚み精度は、CFRF の非常に高いスプリングバック力が、スキン層を伴った場合でも形状賦形に有効に作用したことを示唆している。

Table 6 Thickness of the molding (Sandwich structure).

Average thickness (mm)	Standard Deviation (mm)	coefficient of variation (%)
4.61	0.18	3.87

Fig.10 と同じ視点から観察した成形品の断面を Fig.12 に示す。ポリアミドのスキン材部分とポリプロピレンのコア材部分でコントラストが確認された。また、スキン材とコア材がはく離することなく、絞り形状部分にも

よく追従した。スキン材の破れやボイドなどは目視では確認されず、等方性 CFRTP の変形能力が効果的に働いたものと考えている。

Fig.12 Molded Product of the cross-section (Sandwich).

Fig.13 にスキン層近傍の顕微鏡写真を示す。スキン層に目立った空隙はなく、コア層は CFRF 平板の構造 (Fig. 4) とよく類似した空隙構造を有していた。スキン層の厚さを画像から等間隔に 10 点計測した平均値とばらつきを Table7 に示す。スキン層の厚さは原料厚と同等だが、変動係数は 7.07% と高くなった。これはスキン層とコア層の境界面で、溶融したマトリックス樹脂が入り組んだ嵌合構造 (アンカリング構造) を形成したためである。このアンカリング構造は炭素繊維を巻き込んで形成されるため、強固な接合界面を形成する。その結果、本材料ではスキンのはく離が起こりにくい。これは、従来のサンドイッチ材で必要であった接着工程を不要とし、従来材料でしばしば問題となっていたスキン材のはく離を根本的に解決できる可能性がある。今後、接着力の定量化を進める予定である。

Table7 Thickness of the skin layer.

Average thickness (mm)	Standard Deviation (mm)	CV(%)
0.554	0.039	7.07

Fig.13 Molded Product (Sandwich structure).

6 結 言

炭素繊維が単繊維レベルで分散されたマットと熱可塑性樹脂を使用し、該マットの高いスプリングバック力を利用することで、軽量性と機械特性に優れたコア材を創出した。また、本材料は強力なスプリングバック力を持つため、金型への追従も良好であり、複雑形状の賦形が可能であった。さらに、融点の異なる熱可塑性樹脂を利用することで、凹凸形状を有するサンドイッチ構造体が、プレス成形のみで得られることを明らかにした。今後、繊維の分散状態とスプリングバック力の関係や、材料の面外特性などのデータや、試験手法による特性への影響についてデータを揃え、フォーム材としてのポテンシャルを定量化する予定である。

本材料は、スキンおよびコアに用いる素材の選択で

様々な特性が発現できると予想され、輸送機器、建材、筐体などの剛性が要求される部位に幅広く応用可能と考えている。

本報告の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託事業 (「革新的新構造材料等研究開発」) により得られたものです。

参 考 文 献

- 1) C.A. Steeves and N.A. Fleck, "Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending", Part I: analytical models and minimum weight design, *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol.46, No.4, pp.561-583 (2004).
- 2) Vaikhanski, Lev, and Steven R.Nutt, "Fiber-reinforced composite foam from expandable PVC microspheres.", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol.34, No.12, pp.1245-1253 (2003).
- 3) A.Desai, M.L.Awad, H.Shen and S.R.Nutt, "Mechanical behavior of hybrid composite phenolic foam." *Journal of cellular plastics*. Vol.44, No.1, pp.15-36 (2008).
- 4) Hao Qingxian, Qiu Sawei and Hu Yuebo, "Development on Preparation Technology of Aluminum Foam Sandwich Panels", *Rare Metal Materials and Engineering*, vol. 44, No.3, pp.548-552(2015).
- 5) Ning-zhen Wang, Xiang Chen, Ao Li, Yan-xiang Li, Hua-wei Zhang and Yuan Liu, "Three-point bending performance of a new aluminum foam composite structure", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, No.2, pp.359-368 (2016).
- 6) M.Y.Omara, C.Xianga, N.Gupta, O.M.Strbik III, K. Cho, "Syntactic foam core metal matrix sandwich composite under bending conditions", *Materials & Design*, Vol.86, pp.536-544(2015).
- 7) K. Mizuta, H. Urayama, "Molding method of the FRP molded article" JP.2014-98093(2014).
- 8) New Energy and Industrial Development Organization, "Development of sustainable hyper composite technology" pp.9-36 (2013).
- 9) M. Hashimoto, T. Okabe, M. Nishikawa, "Development of Thermoplastic Press Sheet with In-Plane Randomly Oriented and Dispersed Carbon Mono-Fibers and Evaluation of the Mechanical Property", *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol. 37, No.4, pp.138-146 (2011).
- 10) N.Hirano, A.Tsuchiya, M.Hashimoto, M.Honma and T.Okabe, "Research and Development of the Thermoplastic Stampabullsheets", *Journal of the Japan Society for Composite Materials*, Vol. 40, No.2, pp.81-86 (2013).
- 11) Y.Wan, J.Takahashi and I.Ohsawa, "Investigation about the springback effect on short fiber reinforced thermoplastics", 13th Japan International SMAPE Symposium & Exhibition, (2013).
- 12) O.Kallmes and H.Corte, "Structure of paper, I. the statistical geometry of and ideal two dimensional fiber network", *TAPPI*, Vol. 43, pp. 737-752 (1960).
- 13) M.Honma and A.Tsuchiya, "Prepreg and the Preform" JP.2010-235779 (2010).