

長繊維または織物状繊維で強化した複合プラスチック材による六角錐台形コアパネルの製造に関する研究

埼玉工業大学 工学部機械工学科
教授 趙 希禄
(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014006)

キーワード：繊維強化プラスチック，複合材料成形，トラスコアパネル，ハニカムコアパネル，固有振動特性

1. 研究の目的と背景

省資源による軽量化構造の設計開発は、産業界のあらゆる分野の重要課題であり、ハニカムコアパネルは航空機用途を中心に開発されてきたが、飛行機以外にも利用が増しており、現在はレーシングカー、新幹線の高速鉄道や高層ビルなどで利用範囲が限られているが、今後利用の増加が予測される¹⁾。しかし、ハニカムコアパネルは表面平板と垂直方向に配置する芯材の間に固着しているため、せん断変形に弱く、せん断荷重が存在する場合に適用しにくい欠点が指摘されている。そこで折紙工学から得た知見を活かし、ハニカムコアパネルの代わる軽量化パネルとして、トラスコアパネルの研究開発に着手し、数多くの研究成果が発表されている。

野島が提案されたトラスコアパネルのセル形状は三角錐の稜と頂点を削った形状とも考えられ、平面的にその台形セルが千鳥状に配置されているパネルである²⁾。齊藤らがトラスコアパネルの構成パターンとその機械的特性の関係について研究し、トラスコアパネルのせん断剛性や単位質量にあたる曲げ剛性など力学特性はハニカム構造より優れることが判った³⁻⁵⁾。戸倉らはトラスコアパネルの衝突エネルギー吸収特性を研究し、その衝突エネルギー吸収量の最も多いトラスコアの形状構成を求められた⁶⁾。田中らはトラスコアパネルの形状構成から振動特性への影響について検討した結果が発表された⁷⁾。楊らは実際にトラスコアパネルを補強メンバーと表面平板に組み立て構成したフロー構造に対して、幾何学的形状と寸法の最適設計を行い、最適なフロー構造が得られた⁸⁾。

ただし、トラスコアパネル構造の優れた比剛性や振動特性などが確認されつつあり、さらに構成コアの高さが高くすればするほどトラスコアパネルの力学特性がもっと良くなることが明らかになっているにもかかわらず、3次元に複雑な形状をもつことに起因したトラスコアパネルの加工問題は十分に解決されていなく、実製品への実用化を大きく遅らせているのが現状である。

そこで、戸倉らは、半球型中間モデルによるトラスコアパネルの多段階プレス成形法を提案し、その成形法を用いて実際にトラスコアパネルが加工できることを発表している⁹⁻¹¹⁾。しかし、得られたトラスコアパネルの板厚分布は不均一であり、その板厚の最も薄い値は深絞り成形鋼板のき裂発生基準値に接近しており、安定的な大量生産に適用するレベルには達していない。

本論文では、通常のプレス成形法の代わりに、繊維強化プラスチック (Fiber Reinforced Plastic, 以下 FRP と称する) の加工性能を活かして、新たにガラス繊維と熱硬化性ポリエステル樹脂を使用した複合材料によるトラスコアパネルの成形法を提案し、試作実験により本研究の提案する加工方法の妥当性および成形した FRP トラスコアパネルの加工性能について検証する。さらに、有限要素法解析と振動台による加振実験を用い、本加工法で成形した FRP トラスコアパネルと FRP ハニカムコアパネルの振動特性を検討して、本研究の提案する FRP トラスコアパネルの振動特性および実用性に関する検討を行う。

2. トラスコアパネルとその製造法

トラスコアパネルとは図 1 に示すように平面に稜と頂点を削った三角錐状のセルを千鳥状に配置されるパネルである。このようなコアパネルを 2 枚表と裏に逆にして重ね合わせ接合することによって、図 2 に示すトラスコアパネルが製作される。

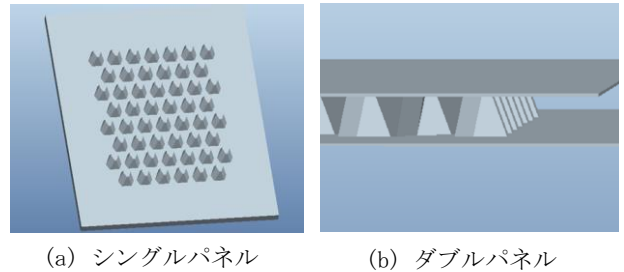


図 1 トラスコアパネルの構造

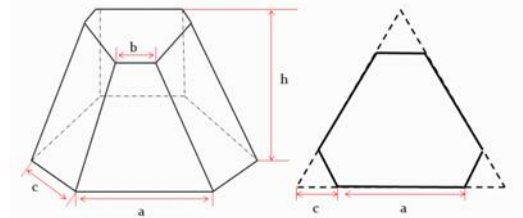


図 2 トラスコアと形状パラメータ

トラスコアパネルのコア構造と形状パラメータを図 2 に示す。図中より、トラスコアは頂面と底面に正三角形の角部をカットして得られた六角形を、側面に 3 つの台形と 3 つの長方形を交互貼り付けて構成される。a は側面の台

形の底辺長さ、 b は側面の台形の頂辺の長さ、 c は側面の長方形の底辺長さ、 h はコアの高さである。これらの形状パラメータを変えることによってコアの形状を調整することができる。

本研究で取扱うトラスコアの形状パラメータを用い、汎用 CAD システム PRO/Engineering で作成した 3 次元コア形状と寸法を図 3 に示す。

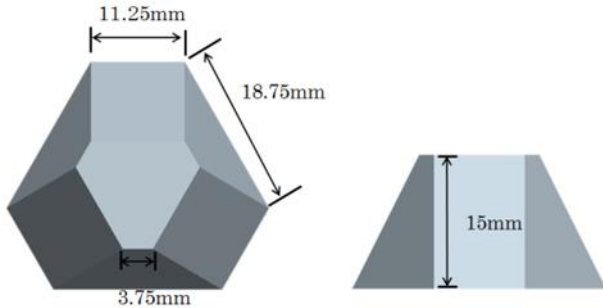


図 3 トラスコアパネルの CAD 形状と寸法

金属材料のアルミニウムやスチールでコアパネルを作る場合、プレス機の深絞り加工で製造できる。しかし張出し変形モードがメインになっているため、台形のところで破断が生じる可能性が高く、あるいはローカルの肉厚が激しく薄くなる欠点がある。

本研究では、熱硬化性ポリエステル樹脂と補強材のガラス繊維を使用した FRP を用いてトラスコアパネルを成形することを考案する。成形用金型の材質にはアルミニウムを使用し、マシンニングセンターを利用し製作した成形金型を図 4 に示す。図中より、1 回の成形工程では 4 個のコアが成形される。

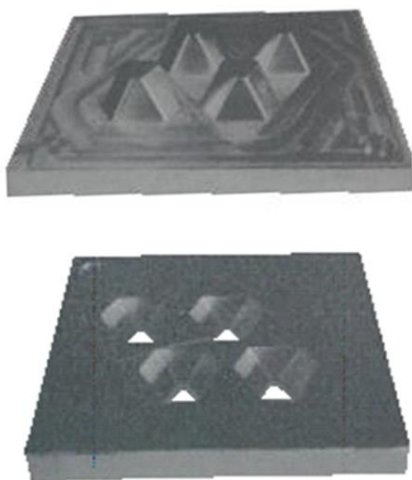
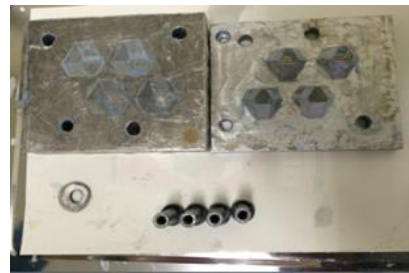


図 4 トラスコアパネルの成形用金型

図 4 に示す成形金型を用いて、凹凸の金型の上に厚さ 1.0mm のスペーサを入れて、パネルの板厚をコントロールする。具体的なトラスコア成形過程は図 5 に示すように次

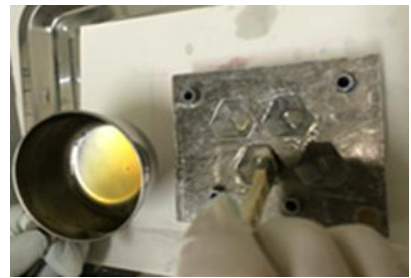
の通りである。



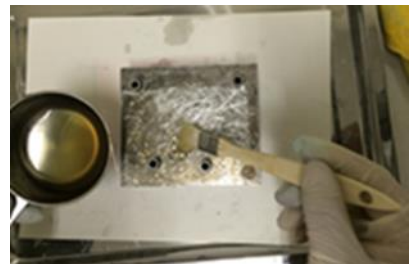
(a) 金型を洗浄し、離型剤を刷り込む



(b) 樹脂に硬化剤を添加する



(c) 樹脂を凹型表面に塗る



(d) ガラス繊維を貼り付け、更に樹脂を塗る



(e) 金型をプレスし硬化させる

図 5 FRP によるトラスコアパネルの成形過程

- (1) アセトンで金型を洗浄して、離型剤を2回凹型表面に塗り込む。(図5(a))
- (2) 熱硬化性ポリエステル樹脂に硬化剤を3%添加して、完全にかき混ぜる。(図5(b))
- (3) 樹脂を凹型表面に塗り、ガラス繊維を張り付け、さらに樹脂を塗る。(図5(c), 図5(d))
- (4) 最後に凸型を上からプレスして、4時間加圧状態で硬化させる。(図5(e))

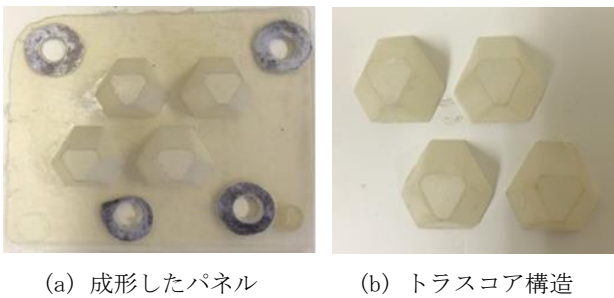


図6 成形したパネルとコア構造

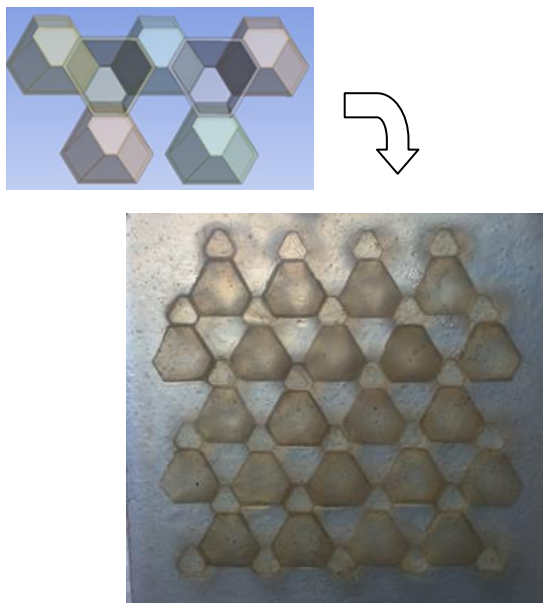


図7 嵌合加工法で成形したトラスコアパネル

実際に成形したパネルとコア構造を図6に示す。図6(a)の中央にトラスコアが4個成形されており、周辺の4つの穴は金型の位置決め及びスペーサ用のピン跡である。図6(b)に示すのは余分な材料をカットして得られたトラスコアである。トラスコアの肉厚は1mmである。

図6(b)に示すトラスコアを利用して、図7に示すように、交互に逆方向に沿って側面長方形同士を接着剤で接合させて、さらに両面から図5示す同様な方法で作成したFRP平板を接着剤で接合して、FRPトラスコアパネルが得られる。本研究の振動実験測定に使用するFRPトラスコアパネルのコア数は49個である。

3. FRPトラスコアパネルの性能検証

3.1 FRP材料特性の測定

本研究の提案する加工方法で作成したFRPトラスコアパネルの振動特性を数値解析および振動台による加振実験で検証するために、前節の加工方法で得られたFRPトラスコアパネル材料の力学特性を調べる必要がある。

ここで、前節と同様な加工方法でFRP平板を作成して、それから引張試験片を切り出し、引張試験片の長さは150mm、中央引張変形部の幅は20mmである。作成したFRP平板と引張試験片を図8に示す。



図8 FRP材料の力学特性を測定する引張試験片

島津製作所製のAG-300kNG材料試験機を使用して2回引張試験を行い、得られた測定結果を表1に示す。

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
1回目試験	3.82	0.38
2回目試験	3.74	0.38
平均値	3.78	0.38

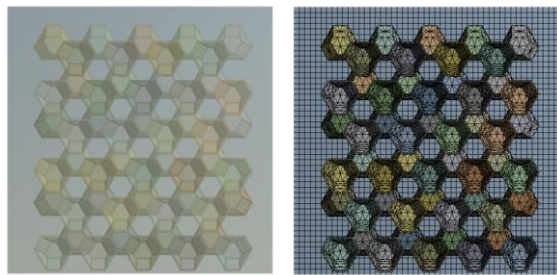
また、前節の加工方法で得られたトラスコアの質量をそれぞれ測り、得られた1個の平均質量は15gで、CADシステムで計算した体積は1146.7mm³であるので、FRP材料の密度は次式で計算される。

$$\rho = \frac{1.5 \times 10^{-3}}{1146.7 \times 10^{-9}} = 1308 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

これらの材料特性値を用い、FRPトラスコアパネルの振動特性の数値解析を行うことができる。

3.2 FRPトラスコアパネルの振動特性

検証のため、同じ条件の下で、FRPトラスコアパネルの固有振動特性について、汎用解析ソフトANSYSを用い有限要素法解析と振動台による加振実験をそれぞれ行い、詳細な検討を行う。



(a) 解析モデル (b) 解析メッシュ

図9 有限要素法解析モデルと解析メッシュ

有限要素法解析モデルと解析メッシュを図9に示し、解析には2次ソリッド要素を使い、節点数は156645、要素数は47638である。材料特性値には表1と式(1)のデータを用い、ヤング率は3.78GPa、ポアソン比は0.38、密度は1308kg/m³である。

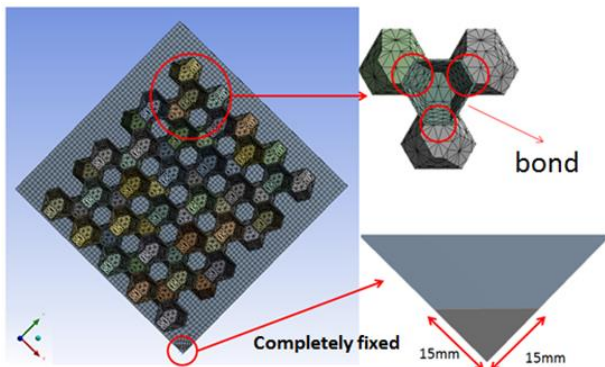
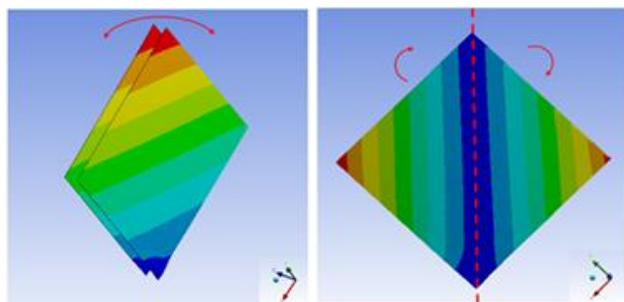


図10 有限要素法解析に用いる拘束条件

図10に示すように、コアとコア、コアと平板の間に強制に同じ変位成分を用いるバンド拘束条件を与えて、実際に振動台による加振実験と同様にパネルの1つの角部を完全に固定する拘束条件を与える。解析した結果を図11に示し、図11(a)と(b)に示すのは、それぞれ1次横振動モードと2次捩じり振動モードであり、それらに対応する固有振動数はそれぞれ51.1Hzと79.5Hzである。



(a) 1次固有モード (b) 2次固有モード

図11 有限要素法で解析した固有モード結果

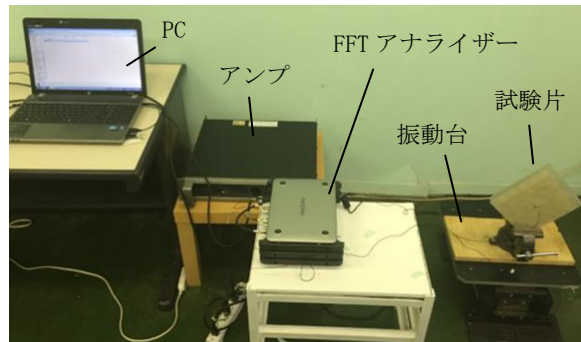


図12 振動台の加振による振動特性測定システム

一方、図12に示す振動台の加振による振動特性測定システムを利用して、測定したFRPトラスコアパネルの固有振動モードは図11の固有振動モード結果と一致していることが確認できた。さらに測定した固有振動数の値を有限要素法の解析値に比較した結果を表2にまとめる。

表2 固有振動数の解析値と実測値の比較 (Hz)

	解析値	実測値	誤差
1次振動数	51.1	48.5	5.3%
2次振動数	79.5	80.8	-1.6%

表2の結果より、有限要素法の解析結果は振動台加振による測定結果に近いことが判り、図11と表2の固有振動結果が正しいことを示している。

4. ハニカムコアパネルとの比較

比較のため、図13に示す3Dプリンターを使いハニカムコアを作るためのABS製の金型を作成する。

それから、第2節と同様な方法でABS製の金型の隙間にガラス繊維と硬化剤を添加したポリエステル樹脂を入れて硬化させて、さらにABS製の金型を壊し外すことによってハニカムコアが得られ、最後に2枚の平板を両面から接着剤で接合して、図14に示すFRPハニカムコアパネルが得られる。

3Dプリンター (MF-2200D)

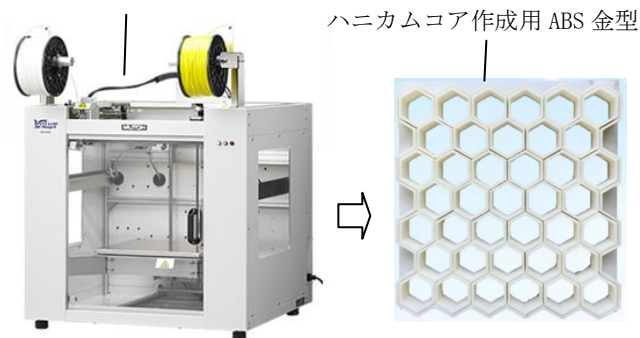


図13 3Dプリンターとハニカムコア作成用ABS金型

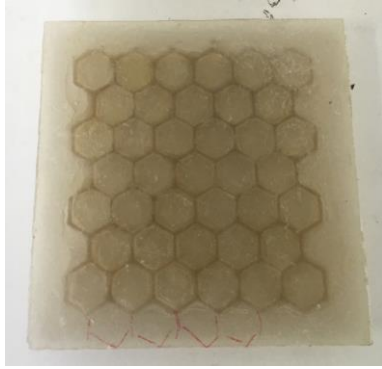


図 14 FRP ハニカムコアパネル

図 15 に示すのは、FRP ハニカムコアパネルの振動解析モデルと解析メッシュであり、解析には 2 次ソリッド要素を使い、節点数は 14224、要素数は 15100 である。材料特性値にはトラスコアパネルと同じデータを用いる。

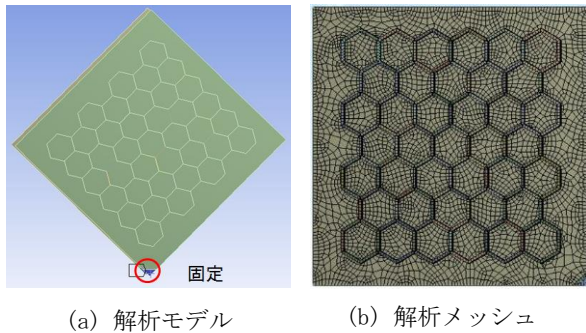


図 15 ハニカムコアパネルの解析モデルと解析メッシュ

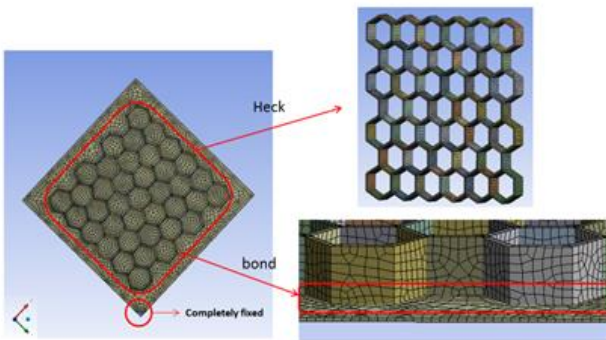


図 16 ハニカムコアと平板の結合条件

拘束条件については、図 15(a) に示すように、パネルの 1 つの角部を完全に固定する拘束条件を与える。また、ハニカムコアと平板の結合条件には、図 16 に示すように強制に同じ変位成分を与える拘束条件を適用する。

解析して得られた固有振動モードは図 11 の固有振動モードと一致しており、さらに FRP ハニカムコアパネル固有振動数を、前節の FRP トラスコアパネル固有振動数の解析値に比較した結果を表 3 にまとめる。

表 3 2 種類パネルの解析結果の比較 (Hz)

	1 次振動数	2 次振動数
トラスコアパネル	51.1	79.5
ハニカムコアパネル	42.5	70.8
比較	20.2%	12.3%

表 4 2 種類パネルの実測結果の比較 (Hz)

	1 次振動数	2 次振動数
トラスコアパネル	48.5	80.8
ハニカムコアパネル	44.0	75.8
比較	10.2%	6.6%

表 3 と表 4 の結果により、解析値での 1 次振動数と 2 次振動数は、それぞれ 20.2% と 12.3% 高く、実測値での 1 次振動数と 2 次振動数は、それぞれ 10.2% と 6.6% 高いことを示している。

さらに、実物を計測して得られたトラスコアパネルの質量 294g とハニカムコアパネルの質量 292g のことを考慮し、単位質量あたりの固有振動特性を比較しても、解析値での 1 次振動数と 2 次振動数は、それぞれ 20.0% と 11.6% 高く、実測値での 1 次振動数と 2 次振動数は、それぞれ 10.0% と 6.2% 高いことを示している。

よって、同じ FRP 材料で作成したトラスコアパネルの固有振動特性は、明らかにハニカムコアパネルより改善されたことを示している。

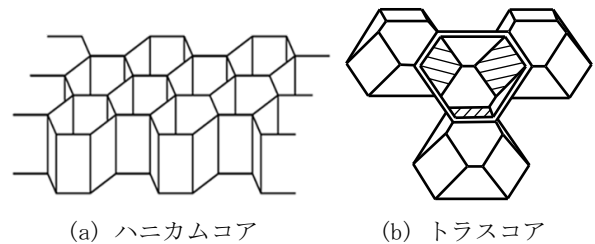


図 17 ハニカムコアとトラスコアの比較

その理由を分析すると、図 17(a) に示すようにハニカムコアの六角柱側面が上下端面に直角で互いに平行面になっていることに対して、図 17(b) に示すトラスコアの斜線で表す長方形側面が上下の平面に対して交互に異なる斜め方向に接合されているため、この傾いた側面板がせん断変更を抑制する効果を果たしていると思われる。

さらに、ハニカムコアの上下端面に直角で表面平板と接合することに対して、トラスコアの上下端面に六角形の端面で表面平板に接合することとなる。この違いによりパネルの曲げ剛性を高めることが考えられる。

5. 結論

本研究では、ハニカムコアパネルの代わりに開発されているトラスコアパネルの加工困難な問題を解決するために、通常のプレス加工法に対してガラス繊維と熱硬化性ポリエステル樹脂を用いる FRP トラスコアパネルとその加工方法を提案して、有限要素法解析と試作実験を利用して詳細な検討を行い、以下の結論が得られた。

(1) 本研究の提案する加工法で成形した FRP トラスコアパネルの形状精度が高く、板厚も均一であり、通常のプレス加工法で成形する際に、トラスコアパネルの台形のところで破断が生じるまたはローカルの肉厚が激しく薄くなる問題が解決できた。

(2) 本研究の提案する加工法で成形した FRP トラスコアパネルに対して、有限要素法解析と振動台による加振実験を用い固有振動特性を検討して、精度の良い結果が得られて、FRP トラスコアパネルの固有振動特性を正確に評価することができた。

(3) 本研究の提案する加工法で成形した FRP トラスコアパネルと FRP ハニカムコアパネルを比較するため、数値解析と実験測定の方法を用い、それぞれ固有振動特性を評価し比較した結果、FRP トラスコアパネルの固有振動特性は、FRP ハニカムコアパネルより平均的に 10%以上改善されていることが確認できた。よって、FRP ハニカムコアパネルの代わりに本研究の考案する FRP トラスコアパネルを適用することは妥当であることを示している。

今後の課題としては、樹脂の硬化時間が長いことを含め、本加工法の生産効率を向上し、大量生産を目指す目標へ展開する検討を行う予定である。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団の平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014006 の支援を受けて遂行された研究であり、ここに記して、心より深く感謝の意を表します。

また、本研究の実施に当たって、多大な助言と御協力をいただいた元埼玉工業大学工学部機械工学科教授の栗山慎峰先生に深く感謝します。

参考文献

- 1) 佐藤孝：ハニカム構造材料の応用，シーエムシ出版，(2002)。
- 2) 野島武敏：折紙の数理化とその学術的応用：主に折紙の工学化について，応用数理，Vol. 18, No. 4, (2008)，pp. 271-284。
- 3) 斉藤一哉・野島武敏・萩原一郎：新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンと機械的特性の関係，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 74, No. 748 (2008)，pp. 1580-1586
- 4) 斉藤一哉・野島武敏・森村浩明・萩原一郎：新しく開発した軽量コアパネルの曲げ剛性の評価，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 75, No. 750 (2009)，pp. 259-265。
- 5) 斉藤一哉・武田晃太・戸倉直・萩原一郎：新しく開発した軽量コアパネルの幾何学的パターンとプレス成形性の関係，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 75, No. 751 (2009)，pp. 381-387。
- 6) 戸倉直・萩原一郎：トラスコアパネルの衝撃エネルギー吸収性能向上のための形状最適化，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 76, No. 765 (2010)，pp. 564-572。
- 7) 田中聡・森村浩明・斉藤一哉・萩原一郎：トラスコアパネルの振動特性に関する研究，日本機械学会論文集 C 編，Vol. 76, No. 765 (2010)，pp. 1050-1055。
- 8) 楊陽・趙希祿・戸倉直・萩原一郎：トラスコアパネルからなる軽量化構造の衝突エネルギー吸収性能向上，日本機械学会論文集 80(815)，SMM0191-SMM0191，2014。
- 9) 戸倉直・萩原一郎：トラスコアパネルの製造シミュレーション，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 74, No. 746 (2008)，pp. 5-10。
- 10) 戸倉直・萩原一郎：成形シミュレーションで得られる加工硬化を考慮したトラスコアパネルの曲げ剛性の検討，日本機械学会論文集 A 編，Vol. 75, No. 753, (2009)，pp. 588-594。
- 11) 戸倉直・萩原一郎：トラスコアパネルの製造法と強度特性(〈小特集〉折紙工学の現状と課題)，日本シミュレーション学会論文集，Vol. 29, No. 3, (2010)，pp. 90-95。