

# 熱硬化成形プロセスを考慮した複合材料製造設計技術の開発\*

## 第2報 製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響評価

関根一史\*\* 尾崎毅志\*\*\*

### Process Simulation of Fiber Reinforced Plastics Part II Formulation of Mechanical Properties in Various Molding Methods by

Kazushi SEKINE

(Advanced Technology Research & Development Center, Mitsubishi Electric Corporation, Amagasaki)

and Tsuyoshi OZAKI

(Composites Research and Development Co.Ltd.

and Synthesized Engineering, Graduate School, Kanazawa Institute of Technology, Tokyo)

Mechanical properties and dimensional accuracy of FRP parts depend on molding process. In this study, a simulation method considering molding process to predict those of FRP parts has been developed. In this paper, new parameters of the simulation method to predict the stiffness and the strength of a co-cured honeycomb sandwich structure were proposed. The new parameters were acquired experimentally by evaluating the proportions of the strength and stiffness of a CFRP faceskin/aluminum honeycomb sandwich panels molded by co-cure to those of them molded by pre-cure. In addition, the relationships between the dimple depths of the CFRP faceskins and the strength of the aluminum honeycomb sandwich panels were investigated experimentally to prepare the parameters more efficiently.

(Received May 20, 2011)

キー・ワード：繊維強化プラスチック，製造法，コキュア成形，ディンプル

**Key Words** : FRP, Molding Method, Co-cure Molding, Dimple

### 1 緒 言

CFRP等の先進複合材料は、優れた力学的特性や熱特性を有し、また材料の異方性を活用した限界設計が可能であることから、航空宇宙分野を中心に活用されている。

しかしながら一方で、複合材料の力学的特性や成形寸法精度等の成形品の性能は、製造プロセスに大きく依存する。そのため、高精度な成形が困難であり、大型の複雑な構造体にはこれまであまり積極的に活用されてこなかった。

そこで本研究では、複合材料の熱硬化成形プロセスにおいて、成形品の性能に影響を及ぼす因子と成形品の性能との相関関係について、成形品の挙動をフィードバックして実験的に求めた特性データを用いて解析することで、機械設計に加えて成形プロセス上の因子による影響を考慮して、成形品の性能を高精度に予測できる製造設計ツールの開発を目的としている。

前報では、成形プロセス中の成形型の熱抵抗や熱変形、とくに大型の成形品では成形品の中での硬化温度分布が成形品自体の性能に対して及ぼす影響について考慮するため、成形型を含めた伝熱解析と樹脂の硬化温度分布解析および熱変形解析とを組み合わせた成形品の熱変形や残留熱歪みを算出することが出来るFRPの熱硬化成形シミュレーションツールを開発した<sup>1)</sup>。

一方、本研究が主要な対象としているCFRP表皮アルミハニカムサンドイッチパネルの実製品においては、締結金具点数や組立工数、成形サイクルの削減によるコスト低減や、締結金具の削減による重量低減を目的として、CFRP製の表皮材とアルミハニカムコアから構成される大型の円筒及び円錐状のサンドイッチ構造を一体成形で製造する試みが行われている<sup>2)~4)</sup>。具体的には、予め成形した表皮材を後からハニカムコアに接着するプリキュア成形法(従来法)と異なって、表皮材の成形とハニカムコアへの接着を同時に行うコキュア成形法を用いてハニカムサンドイッチ構造を一体成形しており、本製造設計ツールにおいても、この

\* 原稿受付 2011年5月20日

\*\* 三菱電機株式会社 尾崎市塚口本町

\*\*\* コンポジット技研株式会社 東京都港区南麻布

製造法の違いを考慮できる実用的なものにする必要がある。

サンドイッチ構造のコキユア成形に関わる性能予測についてはいくつかの先行研究が行われている。例えば Fornari ら<sup>3)</sup>は、コキユア成形法でハニカムサンドイッチ構造を製造し、その圧縮弾性率を評価している。その結果、実測した値が古典積層理論で求めた値よりも低くなることを示しており、この弾性率の低下はハニカムサンドイッチ構造の表皮に発生した凹凸に起因していると考えられている。

CFRP 表皮とアルミハニカムコアから構成されるサンドイッチ構造では、その成形時において、構成要素間の熱膨張係数の差に起因するコアセル内での表皮座屈が発生し、表皮に凹凸（ディンプル）が残留することがある。表皮に凹凸が残留すると、ハニカムサンドイッチ構造の強度や剛性が低下することが報告されている<sup>5)~9)</sup>。

本池ら<sup>6)</sup>は、表皮に凹凸を発生させたハニカムサンドイッチ板と、表皮に凹凸が発生するのを抑制したハニカムサンドイッチ板を製作して曲げ試験を行い、表皮に凹凸を発生させた場合の方が強度と剛性が低下することを実証している。また、渡辺ら<sup>7)~9)</sup>は、ABAQUS による解析を行い、ディンプル深さが大きくなるにつれて、表皮の弾性率が低下することを示している。

これら先行研究ではいずれもサンドイッチ構造の性能と表皮に発生する凹凸の程度との相関について指摘している。表皮に発生する凹凸の程度は製造法に依存すると考えられることから、従来のプリキユア成形からコキユア成形に製造法を変更して、ハニカムサンドイッチ構造の製品を製造する場合には、成形法の違いによる成形品の力学的特性の違いを把握しておくことで、相当のレベルでその性能を予測することが可能で

あると考えられる。

以上により本報では、ハニカムサンドイッチ構造の製造法の違いによる成形品の力学的特性への影響をマクロ的に評価することにより、プリキユア、コキユアのそれぞれの成形法で製造されたサンドイッチ構造の性能を予測する実用的な手法を開発することとした。

## 2 製造法の違いによる性能予測の手法と複合材料製造設計ツールにおける位置づけ

本研究で開発している複合材料製造設計ツールのフローを Fig. 1 に示す。本ツールでは成形品および成形型を数学モデル化し、成形温度プロファイルを与えることによって成形品の硬化温度と使用温度との関係において熱歪みや残留応力を算出することがメインフローとなっている。

ハニカムサンドイッチ構造をコキユア成形することによる性能低下は、表皮材とコア材との熱膨張差に起因する部分も大きいことから、これらをモデル化し、メインフローに乗せることによって熱応力を数値的に算出することも可能ではあるが、製造設計ツールが対象とする成形品のスケールとハニカムコアのセルのスケールとでは桁が違うため、ハニカムコアを一つ一つモデル化することは現実的ではない。加えて、表皮の硬化温度の分布についても、コア間のディンプル深さの僅かな差に反映されるにすぎず、これが更に表皮の強度・剛性に及ぼす影響まで考慮すると、温度分布との相関は無視できるレベルにあると言える。

従って、コキユア成形を選択することによるハニカムサンドイッチ構造の性能予測は、ハニカムコアをミクロ的に数学モデルとしてメインフローに乗せる手法ではなく、サンドイッチ構造全体のマクロ的な強度低下、ないし剛性低下として取り扱う方がより実用的で

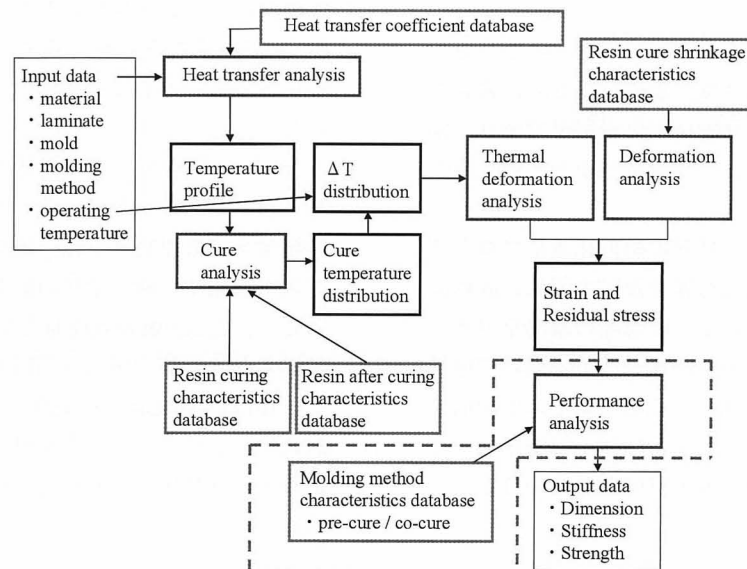


Fig.1 Process simulation of fiber reinforced plastics.

ある。従って、Fig. 1の図中に点線で囲われた部分に示したように、製造法の違いによる成形品の性能への影響を「製造法の特性データベース」を参照して全体的に修正をかけていく方式とした。

具体的には、プリキュア成形及びコキュア成形で製作したハニカムサンドイッチ構造の面内圧縮強度と曲げ剛性を取得し、コキュア成形品の値をプリキュア成形品の値で除したデータベースを構築する。さらに、離散的なデータベースを補完するために、プリキュア成形品及びコキュア成形品の面内圧縮強度を、表皮のディンプル深さで整理する方法に関して検討した。以降の章に、その詳細を示す。

### 3 製造法の特性データベースによる性能予測手法

各製造法で製作した成形品の力学的特性を実験的に取得し、基準となる成形品の力学的特性に対する比(リダクションファクタ)として構築した製造法の特性データベースを参照して、製造法の違いによる影響を考慮した成形品の性能を予測する解析に関して検討を行った。具体的には、異なる製造法で作成した試験片に関して力学的特性の評価を行い、結果を比較して係数を規定し、製造法の異なる成形品の性能を予測する場合に、その係数を使用する。例えば、コキュア成形で作成した試験片の強度をプリキュア成形で作成した試験片の強度を除した係数を規定しておけば、プリキュア成形で作成した成形品の強度が既知であったとき、その成形品の強度に規定した係数を掛けることで、コキュア成形で作成した場合の成形品の強度を予測することができる。

#### 3・1 リダクションファクタの規定法

基準となる成形品の力学的特性に対する、ある成形品の力学的特性の比をリダクションファクタとして規定する。各製造法で製作した製品の力学的特性を予測するために、各製造法で試験片を製作し、機械試験を行い、リダクションファクタのデータベースを構築する。このとき、基準となる製品の力学的特性が既知であれば、ある製品の力学的特性は、以下の式(1)で与えられる。

$$M = M_{\text{base}} \times RF \quad (1)$$

$M$ ,  $M_{\text{base}}$  はそれぞれ製品の力学的特性、基準となる製品の力学的特性、 $RF$  はリダクションファクタであり、式(2)で表される。

$$RF = Ms / Ms_{\text{base}} \quad (2)$$

$Ms$ ,  $Ms_{\text{base}}$  はそれぞれ試験片の力学的特性、基準となる試験片の力学的特性である。このように、リダクションファクタからなる製造法の特性データベースを構築することで、従来の方法から製造法を変更する場

合に、新規の製造法で製作した場合の製品の力学的特性を予測することができる。

本研究では、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルを対象とした、従来法であるプリキュア成形と、コキュア成形との間の面内圧縮強度と曲げ剛性に関するリダクションファクタを導出した。

#### 3・2 ハニカムサンドイッチパネルの面内圧縮強度の評価

プリキュア成形法及びコキュア成形法にて、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し、各試験片の面内圧縮試験を行い、その強度を評価した。サンドイッチパネルの面内圧縮試験は、ASTM C364-99 (Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions)に準拠して行った。Fig. 2に試験片の形状を示す。試験片寸法は縦80mm、横80mm、コアの厚さ12mmであり、R85mmの括れ形状である。試験片の構成をTable Iに示す。表皮材には、炭素繊維M55J(東レ製)と120℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ、若しくは炭素繊維M60J(東レ製)と170℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し、擬似等方性を有するように積層して、中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは、M55J/エポキシの場合0.60mm、M60J

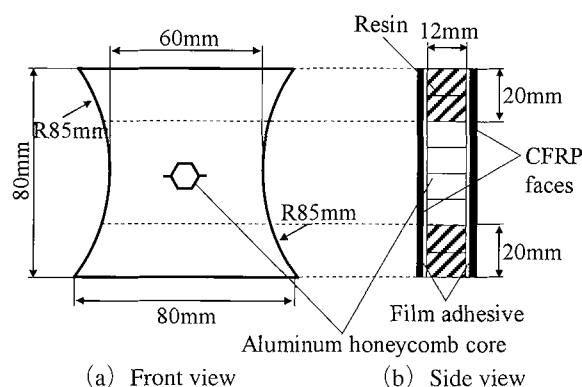


Fig.2 Specimen geometry for edgewise compression test.

Table I Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
A-2				1/4
A-3				3/16
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
B-2				1/4
B-3				3/16
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
C-2				1/4
C-3				3/16
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/45°)	3/8
D-2				1/4
D-3				3/16

/エポキシの場合0.35mmであった。また、アルミハニカムコアには、セルサイズがそれぞれ3/8inch, 1/4 inch, 3/16inchの三種類を用いて、プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく、コキュア成形の場合も、CFRP表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの面内圧縮試験は、1185型万能試験機(INSTRON製)を用いて行った。このとき、0.5 mm/minの試験速度で試験を行って最大圧縮荷重を測定し、面内圧縮強度を式(3)から算出した。

$$\sigma = P/A \quad (3)$$

$\sigma$ ,  $P$ ,  $A$  はそれぞれ表皮の面内圧縮強度, 最大圧縮荷重, 試験片の中央部の表皮断面積である。

Table IIに面内圧縮試験の結果を示す。試験結果は、試験片数6個の平均値である。この結果から、コキュア成形で製作した試験片の方が、プリキュア成形で製作した試験片よりも、CFRP表皮の面内圧縮強度が低くなることが確認された。さらに、プリキュア成形で製作した試験片とコキュア成形で製作した試験片の両者において、ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、CFRP表皮の面内圧縮強度が低くなる傾向が見られた。ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、成形後にCFRP表皮に発生する凹凸の深さが大きくなると考えられることから、この面内圧縮強度の低下には、CFRP表皮の凹凸が関係していると考えられる。

Table II The results of edgewise compression test.

Type	Facing compressive strength (MPa)
A-1	141.1
A-2	173.6
A-3	214.2
B-1	123.8
B-2	148.3
B-3	179.2
C-1	100.2
C-2	120.4
C-3	143.2
D-1	72.0
D-2	89.4
D-3	100.9

### 3・3 ハニカムサンドイッチパネルの曲げ剛性の評価

プリキュア成形法及びコキュア成形法にて、CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し、各試験片の曲げ試験を行い、その剛性を評価した。サンドイッチパネルの曲げ試験は、ASTM C393-00 (Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions)に準拠して行った。Fig. 3に試験片の形状を示す。試験片寸法は縦70mm, 横400mm, コアの厚さ12mmである。試験片の構成を

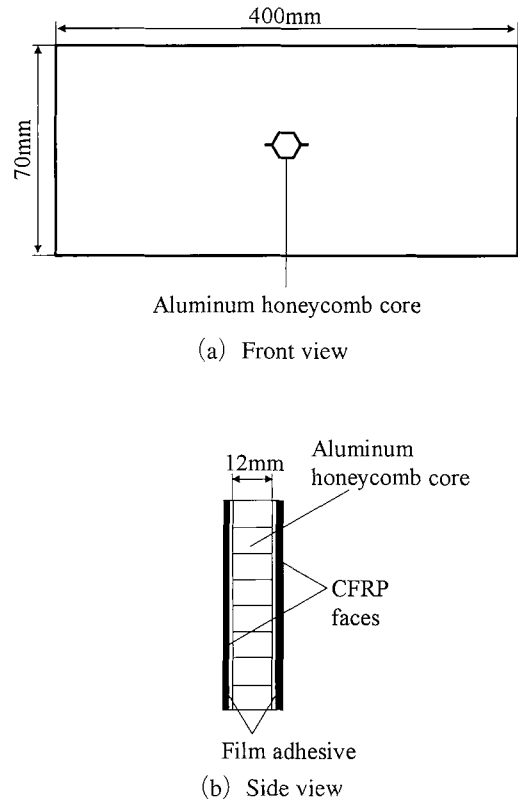


Fig.3 Specimen geometry for flexure test.

Table III Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8

Table IIIに示す。表皮材には、炭素繊維 M55J (東レ製)と120℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ、若しくは炭素繊維 M60J (東レ製)と170℃硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し、擬似等方性を有するように積層して、中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは、M55J/エポキシの場合0.60mm, M60J/エポキシの場合0.35mmであった。また、アルミハニカムコアには、セルサイズが3/8inchのコアを用いて、プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく、コキュア成形の場合も、CFRP表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの曲げ試験は、1185型万能試験機 (INSTRON製)を用いて行った。このとき、曲げ剛性を計算するために、各試験片に対して三点曲げ試験と四点曲げ試験の二つの試験を行った。曲げ試験治具の試験片との接触部は、全て圧子半径を5mmとし、支点間距離は、両試験共に350mmとした。両試験と

もに0.5mm/minの試験速度で試験を行い、荷重と試験片の中心部のたわみ量を測定した。試験片の中心部のたわみ量はダイヤルゲージを用いて計測した。曲げ剛性は式(4)を用いて算出した。

$$D = P_1 L_1^3 [1 - (11L_2^2/8L_1^2)] / (48\Delta_1 [1 - (2P_1 L_1 \Delta_2 / P_2 L_2 \Delta_1)]) \quad (4)$$

$D$ ,  $P$ ,  $\Delta$ ,  $L$  はそれぞれ曲げ剛性, 曲げ荷重, 中心部のたわみ量, 支点間距離である。また, 添字1は三点曲げ試験の場合を示しており, 添字2は四点曲げ試験の場合を示している。

Table IV に曲げ試験の結果を示す。試験結果は, 試験片数6個の平均値である。この結果から, コキユア成形で製作した試験片の方が, プリキユア成形で製作した試験片よりも, サンドイッチパネルの曲げ剛性が低くなることが確認された。

Table IV The results of flexure test.

Type	Flexural stiffness (N・mm <sup>2</sup> )
A-1	1.31E+08
B-1	1.25E+08
C-1	6.07E+07
D-1	5.40E+07

### 3・4 リダクションファクタの規定結果

プリキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度に対する, コキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度の比を式(2)で計算し, 面内圧縮強度のリダクションファクタとして規定した。規定した面内圧縮強度のリダクションファクタをTable Vに示す。表より, アルミハニカムコアのセルサイズが変化しても, 面内圧縮強度のリダクションファクタはほとんど変化しないことが分かった。これは, セルサイズが大きくなると, CFRP表皮に発生する凹凸は大きくなり面内圧縮強度が低下するが, その強度低下の割合がプリキユア成形品でもコキユア成形品でもほぼ同じであることを示している。この結果から, 製造法をプリキユア成形からコキユア成形に変更すると, 表皮材がM55J/Epoxyの場合は約16%の面内圧縮強度の低下が起こり, 表皮材がM60J/Epoxyの場合は約28%の面内圧縮強度の低下が起こると言える。

また, プリキユア成形で製作した成形品の曲げ剛性に対する, コキユア成形で製作した成形品の曲げ剛性の比を式(2)で計算し, 曲げ剛性のリダクションファクタとして規定した。規定した曲げ剛性のリダクションファクタをTable VIに示す。この結果から, 製造法をプリキユア成形からコキユア成形に変更すると, 表皮材がM55J/Epoxyの場合は4%程度の曲げ剛性の

低下が起こり, 表皮材がM60J/Epoxyの場合は11%程度の曲げ剛性の低下が起こると言える。

Table V Reduction factor of facing compressive strength.

Type	Reduction factor (-)
B-1/A-1	0.88
B-2/A-2	0.85
B-3/A-3	0.84
D-1/C-1	0.72
D-2/C-2	0.74
D-3/C-3	0.70

Table VI Reduction factor of flexural stiffness.

Type	Reduction factor (-)
B-1/A-1	0.96
D-1/C-1	0.89

## 4 ディンプル深さをパラメータとした製造法の特長データベース構築の検討

前章では, プリキユア成形で製作した成形品及びコキユア成形で製作した成形品の面内圧縮試験と曲げ試験を行い, 各製造法での成形品の面内圧縮強度と曲げ剛性を評価し, リダクションファクタを規定した。この方法は, 製造法の異なる場合の成形品の力学的特性を予測する上で, 実用的で有効な方法であると考えられるが, 成形品の構成が変わる毎に機械試験を行う必要があるため, 手間が掛かる。そこで, 本手法で必要な機械試験の手間を最小限に抑えるために, 成形品の力学的特性をパラメータで整理することを試みた。具体的には, ハニカムサンドイッチパネルのCFRP表皮のディンプル深さを測定し, プリキユア成形で製作した成形品とコキユア成形で製作した成形品の面内圧縮強度との相関関係を調査した。各成形品の面内圧縮強度とディンプル深さの相関関係を導出することで, 面内圧縮試験を行わずとも, 表面形状を測定してディンプル深さを求めることで, 面内圧縮強度のリダクションファクタを規定することができると思われる。以下に, 検討結果の詳細を示す。

### 4・1 ハニカムサンドイッチパネルのディンプル深さの評価

プリキユア成形法及びコキユア成形法にて, CFRP表皮とアルミハニカムコアからなるサンドイッチパネルの試験片を製作し, 各試験片の表面形状測定を行い, ディンプル深さを評価した。Fig. 4に試験片の形状を示す。

試験片寸法は縦60mm, 横60mm, コアの厚さ12mm

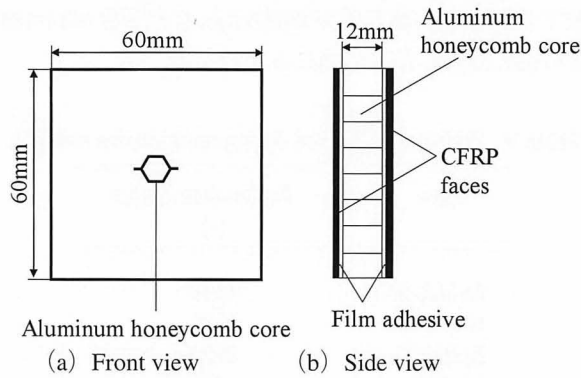


Fig.4 Specimen geometry for 3-dimensional coordinate measurement.

Table VII Several types of specimen.

Type	Molding method	CFRP face	Laminate layup	Honeycomb core cell size (inch)
A-1	Pre-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
A-2				1/4
A-3				3/16
B-1	Co-cure	M55J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
B-2				1/4
B-3				3/16
C-1	Pre-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
C-2				1/4
C-3				3/16
D-1	Co-cure	M60J/Epoxy	(0°/45°/90°/-45°)	3/8
D-2				1/4
D-3				3/16

である。試験片の構成を Table VII に示す。表皮材には、炭素繊維 M55J (東レ製) と 120℃ 硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグ, 若しくは炭素繊維 M60J (東レ製) と 170℃ 硬化のエポキシ樹脂からなるプリプレグを使用し, 擬似等方性を有するように積層して, 中立面に対して対称なサンドイッチパネルを製作した。成形後の表皮二枚分の厚さは, M55J/エポキシの場合 0.60mm, M60J/エポキシの場合 0.35mm であった。また, アルミハニカムコアには, セルサイズがそれぞれ 3/8inch, 1/4inch, 3/16inch の三種類を用いて, プリキュア成形法若しくはコキュア成形法で試験片を成形した。プリキュア成形の場合だけでなく, コキュア成形の場合も, CFRP 表皮材とコアとの間にエポキシ樹脂のフィルム接着剤を入れた。

サンドイッチパネルの表面形状測定は, 非接触式の三次元形状測定装置 NH-3N (三鷹光器製) を用いて行った。装置のステージ上に試験片を配置し, 幅 5mm の試験片端部を測定範囲外とし, 縦 50mm, 横 50mm の領域において測定を行った。測定は常温で行った。

Fig. 5 に測定結果の一例として, 表皮材が M55J/Epoxy の場合の表面形状の測定結果を示す。各測定結果において, ハニカムコアのセル形状の凹凸が発生していることが分かる。また, 表面形状の測定結果からディンプル深さを算出した結果を Table VIII に示す。ディンプル深さは, コアセル上の高さともコアセル中央

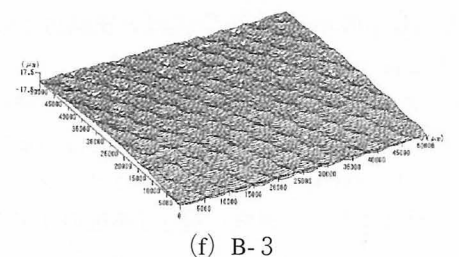
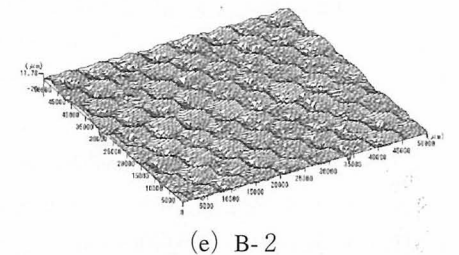
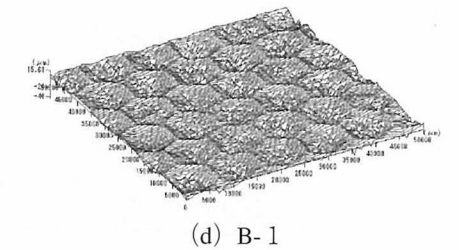
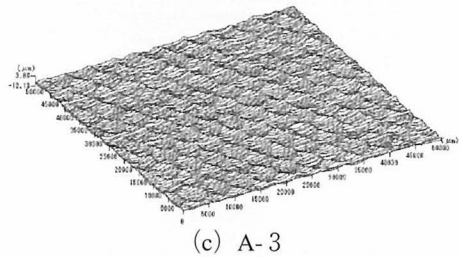
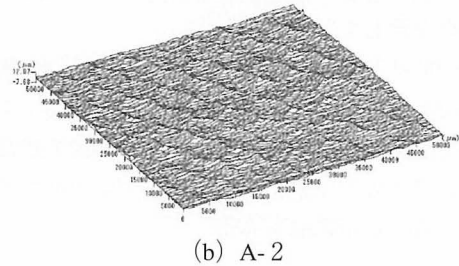
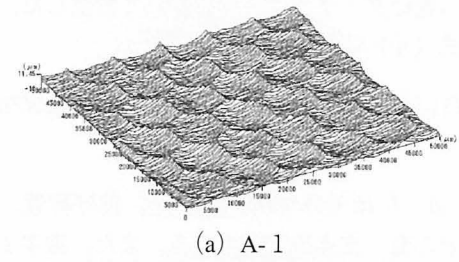


Fig.5 The results of 3-dimensional coordinate measurement in A and B.

Table VIII The results of dimple depth.

Type	Dimple depth ( $\mu\text{m}$ )
A-1	26
A-2	15
A-3	12
B-1	58
B-2	41
B-3	24
C-1	43
C-2	21
C-3	15
D-1	79
D-2	58
D-3	51

の最深部の高さとの差で定義した。試験結果は、6箇所のディンプルの平均値である。この結果から、コキュア成形で製作した試験片の方が、プリキュア成形で製作した試験片よりも、CFRP表皮に発生するディンプルの深さが大きくなることが確認された。さらに、プリキュア成形で製作した試験片とコキュア成形で製作した試験片の両者において、ハニカムコアのセルサイズが大きくなるほど、CFRP表皮に発生するディンプルの深さが大きくなる傾向が見られた。

#### 4・2 ディンプル深さによるハニカムサンドイッチパネルの力学的特性データの整理

プリキュア成形で製作した成形品とコキュア成形で

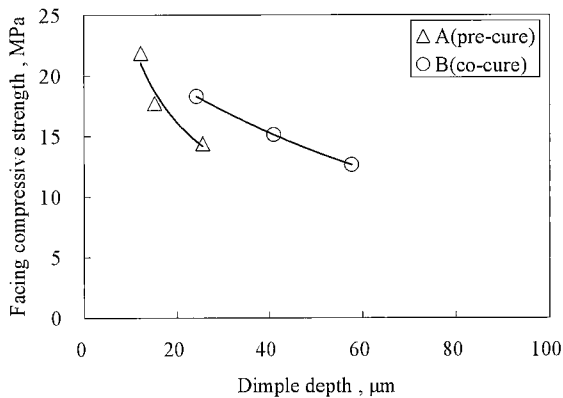


Fig.6 The relationship between dimple depth and facing compressive strength in A and B.

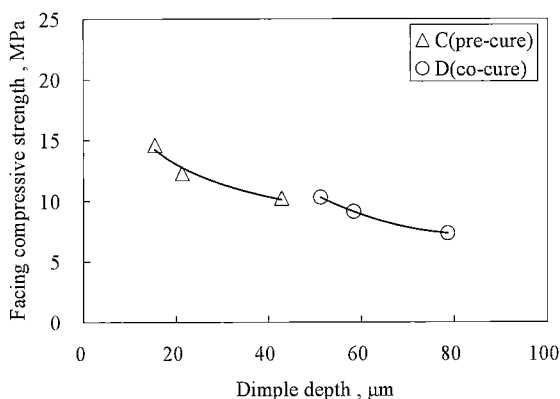


Fig.7 The relationship between dimple depth and facing compressive strength in C and D.

製作した成形品の面内圧縮強度のデータを、ハニカムサンドイッチパネルのCFRP表皮のディンプル深さで整理した。表皮材がM55J/Epoxyの場合及び表皮材がM60J/Epoxyの場合のハニカムサンドイッチパネルにおける、ディンプル深さと面内圧縮強度の関係をそれぞれFig. 6及びFig. 7に示す。これらの図より、製造法がプリキュア成形法の場合でもコキュア成形の場合でも、CFRP表皮に発生するディンプル深さが大きくなるにつれて、成形品の圧縮強度が低下することが分かる。この結果は、初期たわみを有する板の座屈応力の観点から、妥当であると考えられる。Fig. 6とFig. 7から明らかなように、プリキュアで製作した成形品とコキュアで製作した成形品の面内圧縮強度を、ディンプル深さを用いて整理することが出来た。これにより、力学的特性をディンプル深さに置き換えることができるため、リダクションファクタを規定する際の機械試験の回数を大幅に減らせると考えられる。

## 5 結 言

CFRP等の先進複合材料の大型精密構造を含む用途拡大のため、従来の機械設計に加えて製造プロセス上の因子による影響を考慮して、成形品の性能を高精度に予測できる製造設計ツールの開発を行っている。

本報では、とくにハニカムサンドイッチ構造の製造法の違いを考慮した複合材料の製造設計技術を確立するため、各製造法で製作した成形品の力学的特性を実験的に取得し、基準となる成形品の力学的特性に対する比として構築したデータベースを参照することで、製造法の違いによる影響を考慮した成形品の性能を予測する手法を開発した。また、プリキュア成形及びコキュア成形で製作したハニカムサンドイッチ構造の面内圧縮強度と曲げ剛性を取得し、コキュア成形品の値をプリキュア成形品の値で除したデータベースを構築した。

さらに、離散的なデータベースを補完するために、プリキュア成形品及びコキュア成形品の面内圧縮強度を、表皮のディンプル深さで整理する方法についても開発した。

## 謝 辞

本研究は、「異種材料を含む大型構造体用複合材料製造設計技術開発」を経済産業省から委託を受けて(財)無人宇宙実験システム研究開発機構(USEF)が開発を進めているものである。当社は、USEF殿のご指導の下、本製造設計技術のツール化に係るアルゴリズムの設計及び検証、解析プログラムの製作を担当させて頂いた。関係者の皆様からの多くのご指導・助言を賜りここに、深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 関根一史, 尾崎毅志, 材料システム, **29**, (2011), 11.
- 2) Jimenez, A., 41th International SAMPE Symposium, (1996), 829.
- 3) Fornari, B., Zavadlay, R. and Del Frate, R., 40th International SAMPE Symposium, (1995), 1603.
- 4) 正井卓馬, 村瀬三朗, 大塚正人, 日本複合材料学会 2005年度研究発表講演会予稿集, (2005), 17.
- 5) 井上登志夫, 小島 浩, 第34回構造強度に関する講演会講演集, (1992), 86.
- 6) 本池 誠, 岩堀 豊, 田中隆吉, 第40回構造強度に関する講演会講演集, (1998), 105.
- 7) 西 泰史, 渡辺直行, 第39回構造強度に関する講演会講演集, (1997), 37.
- 8) Watanabe, N., Sato, H. and Nishi, Y., AIAA Paper 97-1249, (1997), 2492.
- 9) Watanabe, N. and Kimura, S., AIAA Paper 98-1994, (1998), 2413.