

FRP サンドイッチ材の成形技術に関する研究（第1報）

仙石 倫章、西垣 康広、山田 孝弘

Study of the forming technique of Fiber Reinforced Plastic sandwich panels (I)

Tomoaki Sengoku, Yasuhiro Nishigaki and Takahiro Yamada

CFRP は軽量化部材として、航空宇宙・自動車・スポーツ用途等において、製品に多用されるようになってきた。しかしながら CFRP の製品化においては、材料コストの高さが普及の大きな壁となっており、CFRP が採用されている製品は、高付加価値が求められる一部のものに限られている。そこで本研究では、CFRP の一部をコア材と呼ばれる中間材料に置き換えるサンドイッチ材に着目した。材料コストの安いポリエチレンテレフタレート発泡体と CFRP を用いたサンドイッチ材の成形条件を検討し、乾燥機を使用した手曲げ成形、サーボプレス成形、ダイヤフラム成形、オートクレーブ成形において、良好に成形できることを確認した。

1. はじめに

軽量、高強度、高剛性等の特長をもつ炭素繊維複合材料（以下、「CFRP」と表記）は、金属材料の代替材料として様々な分野で開発が行われている。県内のプラスチック製造業からは安く CFRP 製品を作りたいという要望が多いが、実際の製品に応用するためには生産性の低さや材料コストが高い等の課題がある。そのため、製品すべてを CFRP で作るのではなく、CFRP の一部をコア材と呼ばれる中間材料に置き換えるサンドイッチ材に着目した。サンドイッチ材は引張りや圧縮に強いスキン材で、せん断性のある軽量のコア材をはさんで一体構造としたもので、大きな曲げ剛性も得られる。アルミやアラミド繊維のハニカム構造、ポリメタクリルイミド（以下、「PMI」と表記）硬質発泡体等を用いたサンドイッチ材は航空機、自動車、船舶、一般産業等の様々な分野で多用されている。

本研究ではサンドイッチ材の材料コスト削減のため、コア材にポリエチレンテレフタレート（以下、「PET」と表記）発泡体を採用した。PET 発泡体は、航空機や輸送機器に使用されている PMI 発泡体と比較して材料コストが約半分にできる可能性を持つ材料である。

本年度は、FRP サンドイッチ材の成形加工基礎技術の確立とデータの蓄積を目的とし、研究所保有の成形機を用いて FRP サンドイッチ材の成形条件を検討し、成形性評価をしたので報告する。

2. 実験

2.1 材料

今回の研究で使用了材料を図1に示す。FRP サンドイッチ材のスキン材として、炭素繊維クロスとサーマルポリウレタンの複合材料である熱可塑性 CFRP（Bond-Laminates 製 TEPEX 208）と炭素繊維クロスとエポキシ樹脂の複合材料である熱硬化性 CFRP プリプレグ（三菱ケミカル製 TR3523 381GMX）を用いた。熱可塑性

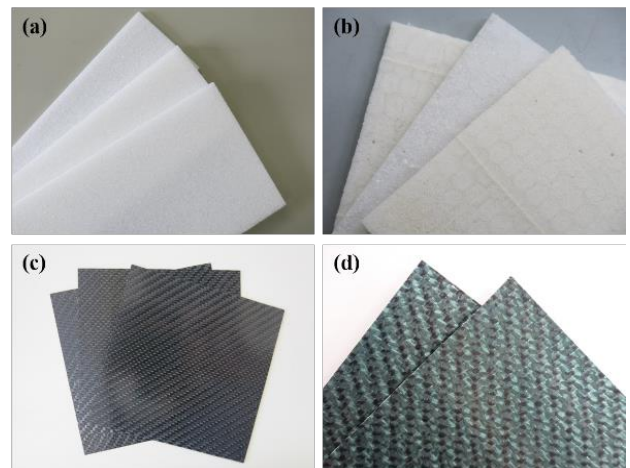


図1 材料：(a) PMI 発泡体、(b) PET 発泡体、(c) 熱可塑性 CFRP、(d) CFRP プリプレグ

CFRP は手曲げ成形、サーボプレス成形、ダイヤフラム成形に使用した。熱硬化性 CFRP はオートクレーブ成形に使用した。コア材として PET 発泡体（3A Composites 製 Airex T92.60, Airex T92.130）と、従来品と比較するため PMI 硬質プラスチック独立気泡発泡体（Evonik Industries 製 Rohacell 51-IG）を用いた。PET 発泡体はすべての成形法で使用し、PMI 発泡体はオートクレーブ成形で使用した。

材料について示差走査熱量測定で熱分析を行ったところ、熱可塑性 CFRP についてマトリックス樹脂が非晶性の特性を持つため融点は判明しなかったが、PET 発泡体の融点は 230℃ 付近であった。カタログ値より PMI 発泡体の耐熱変形温度は 180℃ である。

2.2 手曲げ成形

図2(a) のとおり、100mm 角に切り出した 0.5mm 厚の CFRTP と 5mm 厚の PET 発泡体（Airex T92.60）を 0.5mm 厚のシリコンゴムに挟み乾燥機（アドバンテック東洋製 DRLA23WA（特））にて加熱した。加熱後は図2(b) に

示す手曲げ型にて成形した。なお、予備加熱温度は 150℃、190℃、210℃、230℃の4水準とした。

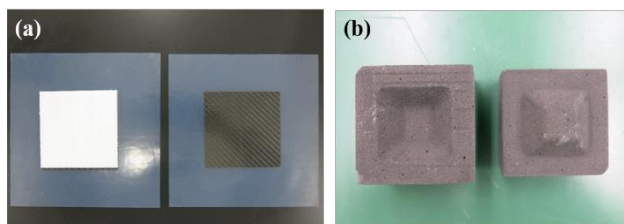


図2 (a)：材料とシリコンゴム, (b)：手曲げ型

2. 3 サーボプレス成形

図3(a)のとおりに、100mm角に切り出した0.5mm厚のCFRTPと5mm厚のPET発泡体(Airex T92.60)を成形治具に挟みIRオーブン(ヤマト科学(株)製 DIR631)にて加熱した。加熱後は図3(b)に示す半球金型を設置したサーボプレス機((株)放電精密加工研究所 ZENFormer MPS675DS)を使用してプレス成形した。予備加熱温度は190℃、210℃、230℃の3水準とし、金型温度は80℃とした。

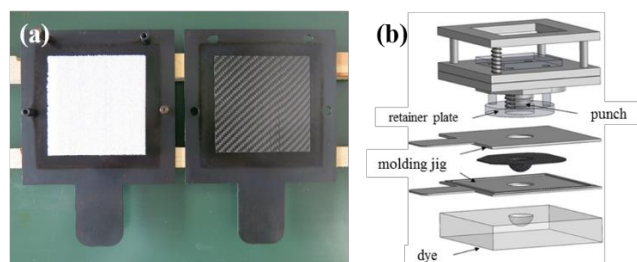


図3 (a)：材料と成形治具, (b)：ダイとパンチ

2. 4 ダイヤフラム成形

図4(a)のとおりに、200×300mmに切り出した0.5mm厚のCFRTPと10mm厚のPET発泡体(Airex T92.130)を0.5mm厚のシリコンゴムに挟みIRオーブン(ヤマト科学(株)製 DIR631)にて加熱した。加熱後は図4(b)で示す曲面金型とダイヤフラム成形機(Ring社製 Membra 6)にて成形した。予備加熱温度は190℃、230℃の2水準とし、金型温度は80℃とした。成形圧力は予備加熱温度が190℃の 때가0.3MPa、230℃のときは0.25MPaと0.3MPaの2水準とした。

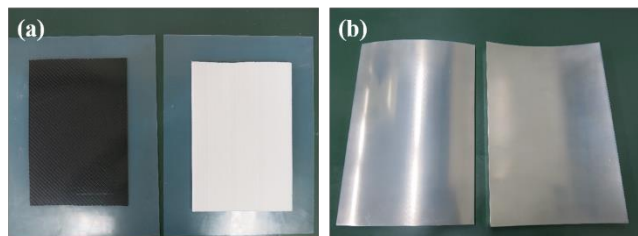


図4 (a)：材料とシリコンゴム, (b)：曲面金型

2. 5 オートクレープ成形

2. 5. 1 平板成形

400×300mmに切り出した0.22mm厚のCFRPプリプレ

グと5mm厚のPET発泡体、PMI発泡体を、リリースフィルムに挟み平板金型とオートクレープ((株)芦田製作所製 AC-900×1000L)にて成形した。最大温度は130℃、最大温度の保持時間は120分、加圧力はコア材にAirex T92.130、Rohacel 51-IGを用いたものが0.1MPa、Airex T92.60を用いたものは0.01MPaとした。

2. 5. 2 曲面成形

200×300mmに切り出した0.22mm厚のCFRPプリプレグ1層と5mm厚のPET発泡体、PMI発泡体を、リリースフィルムに挟み図4(b)に示す曲面金型でオートクレープ成形した。各材料の成形条件は2.5.1と同じ条件とした。

PET発泡体、PMI発泡体についてはあらかじめIRオーブンにて加熱し曲面金型にて曲面形状に成形したものを使用した。PET発泡体の予備加熱温度は160℃、PMI発泡体の予備加熱温度は180℃とした。

2. 6 成形品の評価

成形品の外観は目視により評価した。成形品の切断面はマイクロスコープ((株)キーエンス製 VHX-1000)により観察し、内部構造はマイクロフォーカスX線CT(東芝ITコントロールシステム(株)製 TOSCANER-32300μFD)により非破壊検査をした。

3. 結果及び考察

3. 1 手曲げ成形

手曲げ型で成形した成形品の外観写真を図5に示す。これまでCFRP単体の立体成形には、マトリックス樹脂の融点に加え、材料運搬時の熱損失も考慮し予備加熱温度を設定すれば立体成形が可能であると報告されている⁽¹⁾。予備加熱温度が150℃では成形時の材料温度が低く樹脂が十分に軟化しておらず、成形ができなかった。予備加熱温度が190℃以上では成形ができたが、予備加熱温度を210℃、230℃と高くすると表面の光沢、凹凸は増し、外観が良好な成形体となった。しかしながら230

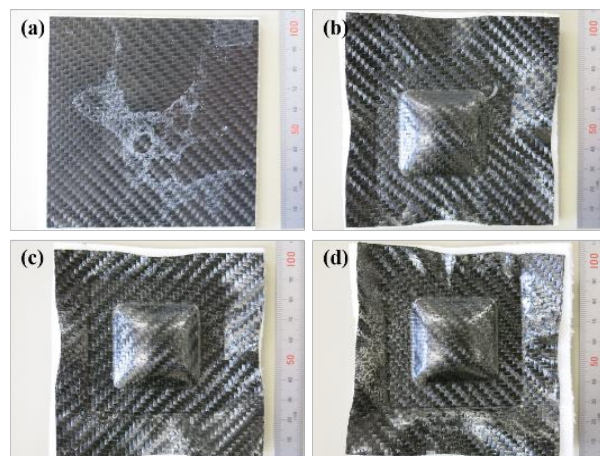


図5 手曲げ成形品 予備加熱温度：(a) 150℃, (b) 190℃, (c) 210℃, (d) 230℃

℃では表面が茶色くなっている部分も存在した。これは予備加熱温度が高く樹脂が酸化している事が原因と考えられる。サンドイッチ材においてもスキン材、コア材の融点やガラス転移点を考慮し、マトリックス樹脂が劣化しない予備加熱温度を設定する必要があることがわかった。

3. 2 サーボプレス成形

プレス速度を200mm/s、金型温度を80℃一定とし、予備加熱温度を変化させ半球金型で成形した成形品の外観写真を図6に示す。これまでCFRP単体の立体成形については材料の温度低下を防ぐため、プレス速度は速く、金型温度は高い方が成形に有利である⁽²⁾ことが報告されており、材料の予備加熱温度は手曲げ成形の結果より190℃以上に加熱した。その結果、予備加熱温度が190℃以上において成形することができたが、予備加熱温度が190℃では成形品半球部の先端が光沢不良であった。これはプレス成形によりスキン材の樹脂が塑性変形し金型底面の樹脂が不足したことが原因と考えられる。210℃、230℃においては半球部先端の光沢は改善しているが、やはり手曲げ成形の時と同じように230℃ではマトリックス樹脂の一部が茶色く酸化していた。

金型の隙間厚は2mmであるが、成形前のサンドイッチ材の厚みは6mmであるので、今回のサーボプレス成形では、コア材の発泡材がつぶれていると考えられる。コア材がつぶれると材料の物性が低下すると考えられ、コア材をつぶさずに成形する為に、金型の隙間厚を調整する等、設備条件や成形条件の再検討が必要である。

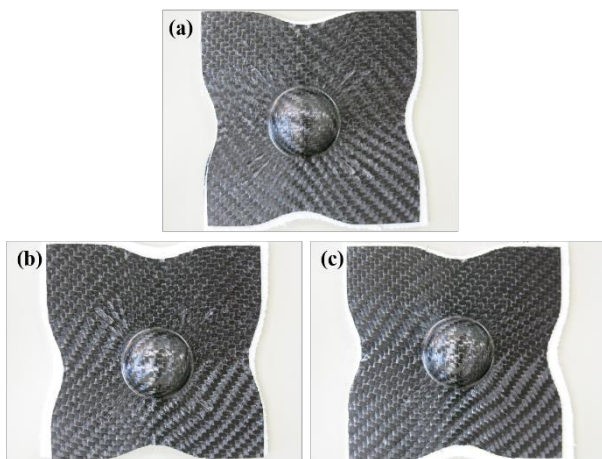


図6 サーボプレス成形品
プレス速度：200mm/s、金型温度：80℃、
予備加熱温度：(a) 190℃, (b) 210℃, (c) 230℃

3. 3 ダイヤフラム成形

金型温度を80℃一定とし、曲面金型で、予備加熱温度190℃・成形圧力0.3MPa、予備加熱温度190℃・成形圧力0.25MPa、予備加熱温度230℃・成形圧力0.3MPaの成形条件で成形したサンドイッチ材の外観写真をそれぞれ

図7(a)、(b)、(c)に示す。これらの成形条件において成形した成形品の外観は良好であり、CFRPと発泡体の界面についても剥離等は観察されなかった。成形品の厚みを測定したところ、図7(a)は7.65mm、図7(b)は8.12mm、図7(c)は5.23mmであった。厚み測定の結果から予備加熱温度が高いとPET発泡体がつぶれやすくなることがわかった。発泡体を用いた熱可塑性FRPのサンドイッチ構造の成形加工には、サンドイッチ材の予備加熱温度と成形圧力の設定が重要であると考えられるので、今後はこれらの条件と成形体の厚みの関係について明らかにしていきたい。

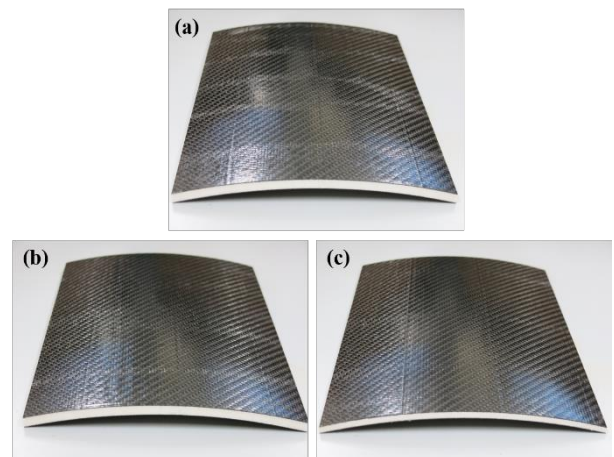


図7 ダイヤフラム成形品
予備加熱温度：(a)(b) 190℃, (c) 230℃
成形圧力：(a)(c) 0.3MPa, (b) 0.25MPa

3. 4 オートクレープ成形

3. 4. 1 平板成形品

コア材にAirex T92.60、Airex T92.130を用い、平板型を用いたオートクレープ成形での成形品を図8(a)、(b)に示す。それぞれの成形条件において成形した成形品の外観は良好であった。また、それぞれの成形体の厚みはコア材がAirex T92.60では4.65mm、Airex T92.130では5.48mmであった。従来品との比較のために成形したRohacel 51-IGを使用した成形体の厚みは4.88mmとなった。コア材にAirex T92.130を使用すると同じ成形条件にもかかわらず、従来品よりも1割程度成形体の厚みが改善できた。

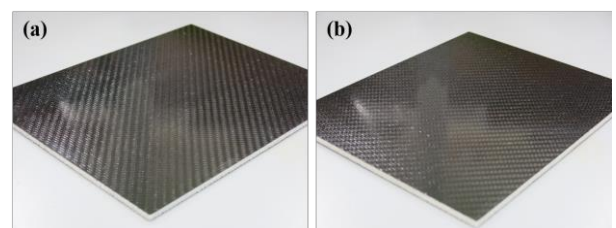


図8 オートクレープ平板型成形品
コア材：(a) Airex T92.60, (b) Airex T92.130

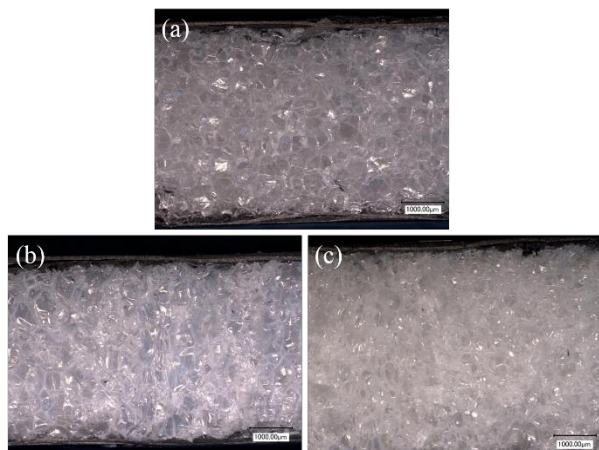


図9 顕微鏡断面観察像 コア材：(a) Rohacel 51-IG, (b) Airex T92.60, (c) Airex T92.130

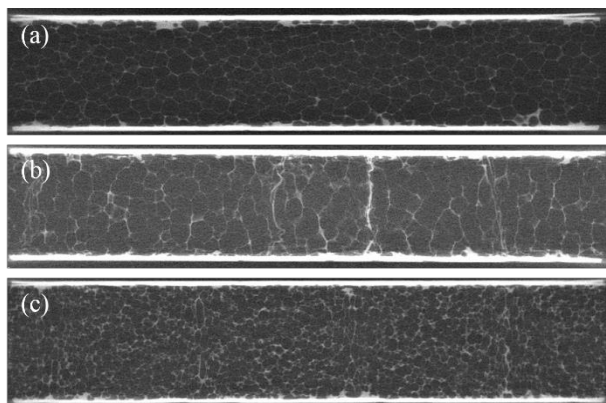


図10 X線CT観察像 コア材：(a) Rohacel 51-IG, (b) Airex T92.60, (c) Airex T92.130

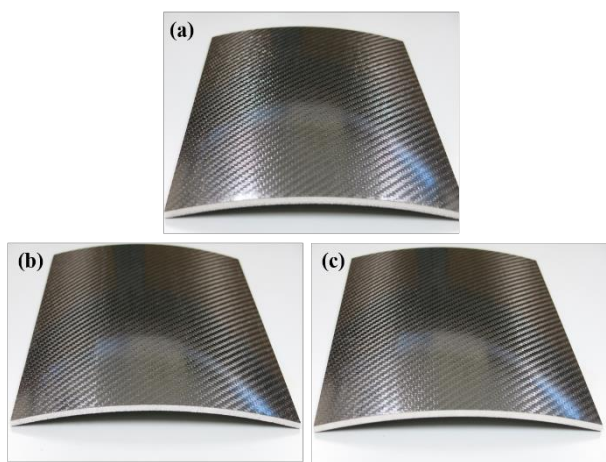


図11 曲面型成形品 コア材：(a) Rohacel 51-IG, (b) Airex T92.60, (c) Airex T92.130

3.4.2 平板成形品内部構造観察

成形品の断面を顕微鏡で観察した結果を図9に、X線CTで非破壊検査した結果を図10に示す。図9よりオートクレーブ成形した成形体において、成形後もコア材は発泡層が崩壊せず残存していることがわかった。また図10より、いずれの成形品もスキン材であるCFRPのマトリックス樹脂がコア材である発泡体の内部に入り込んでいることがわかった。

3.4.3 曲面成形

オートクレーブ成形において曲面型を用いた成形品を図11に示す。いずれのコア材を用いた成形品においても外観は良好であった。またCFRPと発泡体との界面での剥離等は観察されなかった。今後は具体的な製品形状を想定し、必要な強度に応じた材料選定、形状設計を実施し、成形品の評価を実施していく予定である。

4. まとめ

PET発泡体をコア材としたFRPサンドイッチ材の成形技術について、次の結果を得た。

- 1) 熱可塑性CFRPとPET発泡体によるサンドイッチ構造を、乾燥機による手曲げ、サーボプレス機、ダイヤフラム成形機を用いて成形し、良好に成形できることを確認した。
- 2) CFRPとPET発泡体、PMI発泡体によるサンドイッチ構造を、オートクレーブを用いて成形し、良好に成形できることを確認した。

FRPサンドイッチ構造を実際の製品に採用することを踏まえ、今後は材料、成形条件、成形品形状等の更なる探求をしていく予定である。

【謝 辞】

本研究の遂行にあたり、岐阜大学工学部仲井教授に、ご指導・ご助言をいただきましたことに深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.2, pp35-38, 2013
- 2) 道家ら, 岐阜県工業技術研究所研究報告 No.3, pp39-42, 2014