## 平成29年度

## 戦略的基盤技術高度化·連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「高効率成形システムを有する複合材向けオートクレーブの研究開発」

## 研究開発成果等報告書

## 平成30年3月

## 担当局 関東経済産業局

補助事業者
公益財団法人
長野県テクノ財団

目 次

- 第1章 研究開発の概要
  - 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
  - 1-2 研究体制
  - 1-3 成果概要
  - 1-4 当該研究開発の連絡窓口

## 第2章 本論

- 2-1. ハイサイクルオートクレーブの開発
- 2-2. 成形品品質の評価と各種材料成形プロセスの最適化
- 2-3. 立体的な成形型への対応

### 第3章 全体総括

- 3-1. 補助事業の成果
- 3-2. 事業化展開

#### 第1章 研究開発の概要

1-1.研究開発の背景・研究目的及び目標

オートクレーブ成形法は、複合材(Fiber Reinforced Plastics: FRP)の複雑・任意の立体形状を同時に多数個造形できる基本的・代表的な成形技法で、産業分野としては、環境・エネルギー、医療機器をはじめ、航空宇宙、自動車、電子機器など幅広く存在し、それらの成長分野を切り拓いてきた長い歴史がある.その一方、成形サイクルタイムが長いこと、消費エネルギーが大きいことが短所とされる.

特に. 炭素繊維複合材を大量生産品に用いたい自動車を始めとする民生の新市場は必然的に成形 時間の短縮 (ハイサイクル化) が必要であり, 量産採用適用されていない要因となっている. また, 一般民生品や航空機分野においても, 生産効率向上と低コスト化のためには, 製品製造期間の短縮 が強く求められている.

- 【1】ハイサイクルオートクレーブの開発
- 直接加熱冷却方式の開発
   直接加熱冷却可能なAL 金型及び各種材質の金型を作成し、制御方式の検討や制御装置の試作を行い、制御最適化の開発を目指す.
- ② 小型ハイサイクルオートクレーブの試作
   試験・評価機関での使用を想定した大きさの小型ハイサイクルオートクレーブを試作し、動作確認・成形評価試験を行う.
- ③ 直接加熱冷却システムを利用した成形実験 既存の中型オートクレーブをハイサイクル仕様に改造し、試作した金型やヒータを使用して ハイサイクル成形の可能性、消費電力低減の可能性の確認を行う。
- 【2】成形品品質の評価と各種材料成形プロセスの最適化
- 成形品質の評価

CFRP 供試体の成形評価試験,高速加熱と硬化度の検証を行うと共に直接加熱冷却システム による成形後の材料強度への影響評価試験を行う.

② シミュレーション技術 ハイサイクル成形時に懸念される残留応力の見極めを進めると共に、高温・高圧なオートクレーブ内の情報不足を補償して合理的な成形プロセスを調査する.

また、オートクレーブで成形した成形品の残留応力を測定する技術の検証を行う.

- 【3】立体的な成形型への対応
- 型の試作期間を短縮する技術開発 効率的な加熱冷却構造の検討とシステムの試作開発を行い、また、成形型の自作可能環境の 構築を目指す.
- ② 立体成形型で簡単に設置可能な成形用熱源の開発 面発熱ヒータ内蔵のシリコンラバーバッグ及び立体的な形状に沿って賦形し均等加熱が可

能なフレキシブル発熱体の開発を行う.

1-2 研究体制(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)



- 1-3 成果概要
  - 【1】ハイサイクルオートクレーブ開発
  - 直接加熱冷却方式の開発 ハイサイクルオートクレーブ用直接加熱冷却成形型と冷却テーブルの設計仕様を確立する ことができた。
  - ② 小型ハイサイクルオートクレーブの試作 ハイサイクルオートクレーブの試作品が完成し、缶内温度 220℃で製品温度 400℃を達成で きることが分かった.また、専用の制御装置、ソフトウェアも完成することができた.
  - ③ 直接加熱冷却システムを利用した成形実験

成形評価試験においては、成形時間および消費電力の半減を達成することができた.

- 【2】成形品品質の評価と各種材料成形プロセスの最適化
- 成形品質の評価

ハイサイクル成形を行った成形品の曲げ試験の結果は、従来法と比べ殆んど強度の劣化はないことが分かった.

② シミュレーション技術 冷却工程において急速に冷却しても残留応力は増加しないポイントがあることが判明し、ハ イサイクル成形による製品への悪影響を与えない成形条件を導き出すことができた.

また、従来オートクレーブ環境下での情報不足を補うため、板厚計測のみから体積含有率を 推定する手法を確立し、更に、残留応力の測定方法を確立しその有効性を確認することができ た.

- 【3】立体的な成形型への対応)の成果
- 型の試作期間を短縮する技術開発 効率的な加熱冷局構造の検討とシステムの試作開発により型の製作方法を確立できた.また, 成形型の自作可能環境の構築により型作成ノウハウの蓄積を行うことができた.
- ② 立体成形型で簡単に設置可能な成形用熱源の開発

面発熱ヒータ内蔵のシリコンラバーバッグ及び立体的な形状に沿って賦形し均等加熱が可 能なフレキシブル発熱体の開発を行うことで立体物の高温成形方法を確立することができた.

1-4 当該研究開発の連絡窓口

長野県テクノ財団 荒井 健 電話:026-225-6650 FAX:026-225-6711 E-mail:tsu-arai@tech.or.jp 第2章 本論

2-1. ハイサイクルオートクレーブ開発

2-1-1. ハイサイクルオートクレーブ制御の開発(羽生田鉄工所)

図 2-1-1 の様な型を、アルミ・SS400・インバー合金・ニッケル電鋳・炭素繊維複合材・黒鉛など6種類の材料を用いて図 2-1-1 の様な型を試作した.



図 2-1-1 6 種類の材料による試作金型

図 2-1-2の様な加熱ヒーターと冷却パイプを鋳込む構造のA1鋳物金型各種の5種類の金型を試作した.



図 2-1-2 A 1 鋳物金型各種

試作型を用いて制御方式の検討や、制御装置の試作、制御最適化の開発を行った.

図 2-1-3 のような概念の構造になるように熱源と冷却パイプを配置し、試作した制御装置で制御を試 みた.



図 2-1-3 試作金型の概念図

結果,図 2-1-4 の様に、制御の最適化を行わない状態では温度の波形に大きな乱れが見られるが P I D制御技術や制御構造の工夫などで温度を安定して制御できるようになった.この方法を今回試作した 全ての成形型に適合すると、図 2-1-5 の様に同じ制御方式でも様々な挙動をする事が確認できた.

これらの挙動から、一概に材料の熱伝導率が決め手では無く、型の厚み、ヒーターの位置やヒーター の能力、冷却パイプのサイズや、水の流量、真空バッグの場合とそうでない場合で温度に乱れが生じる ことが解った.現時点で一番安定しているのがニッケル電鋳だが一番コストが高い.又、150℃ぐら いの場合ラバーヒータで問題ないが、今後200℃を超え、熱可塑樹脂の350℃程度の加熱はラバー ヒータでなくてシーズヒーターになりヒーターの取り付け方法が課題になる.又、冷却配管の位置と温 度の変化に関係があることが解っており、冷却媒体の通しかたも今後の課題となる.

ニッケル電鋳型

インバー合金型(真空バッグ入)

CFRP型



図 2-1-5 成形型による挙動の相違

2-1-2. 小型ハイサイクルオートクレーブの試作(羽生田鉄工所)



ハイサイクル成形用小型オートクレーブの試作を行った.(図

2-1-6).

雰囲気 300℃, 直接加熱冷却システムを導入した. 大学公設試への販売を視野に,エレベーターで建物上階へ運 搬できる形状を実現した.



図 2-1-6. 試作オートクレーブ(RAC-3010) 図 2-1-7. 改造済みの小型ハイブリッド成形装置 オートクレーブの試作に並行して、小型角形ハイブリッド成形装置を改造し、制御プログラムの開発・ 検証を実施した. (図 2-1-7). 従来のオートクレーブの缶内温度,圧力制御に加え,それぞれ同期及び独立に制御可能な新規システムの構築を達成した(図 2-1-8,図 2-1-9).

全16ステップを有し、より細かい成形サイクルプログラムを構築し、従来の成形ノウハウから加熱冷 却システムの細かな動作設定を可能にした.



図 2-1-8. 新規開発した制御プログラムの外観(実測値)と UI



図 2-1-9. 別パターンの制御プログラム

4)上記成形プログラムを用いて実際にCF/PA12の成形を実施し有用なことを確認した(図2-1-10,図2-1-11).



図 2-1-10. 小型試作 AC による成形の様子



図 2-1-11. 成形後の CF/PA12 板

以上の成形試験より缶内温度 220℃で製品温度 400℃, 缶内有効体積の拡張, 冷却方式を缶体断熱材 内に埋め込む新たな冷却方式を実現するため小型オートクレーブを試作した.



RAC-2210
【仕様】
缶内雰囲気最高使用温度:220℃
最高成形温度:400℃
(直接加熱ヒーター仕様による)
最高使用圧力: 0.98MPa
温度測定点 :8点

図 2-1-12. 検証用試作オートクレーブ【RAC-2210】

それに伴い, 改めてハイサイクルオートクレーブ成形が実現可能なプログラムおよび, それに適応する PC 側のアプリケーションの開発を実施した(図 2-1-13, 図 2-1-14).



図 2-1-13. キュアサイクル設定アプリケーション



図 2-1-14. 運転モニタリングアプリケーション

2-1-3. 直接加熱冷却システムを利用した成形実験(羽生田鉄工所)

試作したヒーター及び冷却配管鋳込みアルミ型(1次 試作形状)とラバーヒーターを合わせた直接加熱水冷却 試験を実施した(図 2-1-15).

結果,従来成形法に対し通常速度硬化プリプレグで 50%,速硬化プリプレグにおいては,約83%の成形時間短 縮を実現した(図 2-1-16).



図 2-1-15 直接加熱水冷却試験

同じ昇温・冷却条件で CF/PA6 及び CF/PEEK を成形した場合, それぞれ 1 バッチ 48 分及び 75 分で成形が完了する計算となる (図 2-1-17).



水冷制御の場合, CFRTP 成形帯温度における瞬間 気化のための危険性,温度制御不全が懸念されるこ とから,コンプレッサー圧から冷気を取り出すジェ ットクーラーを用いた直接空冷冷却を実施.する.

冷却水ほどの劇的な冷却速度の改善は見込めないが,従来の雰囲気冷却よりは速いことを確認した(図 2-1-18).



図 2-1-18. 冷却速度比較

CF/Epoxy 成形時において,直接加熱冷却方式は従来成形法に比べ 57%の消費電力削減を実現した(図 2-1-19).内約は昇温時 63%,保持時 35%となった.



図 2-1-19. 消費電力比較

Iビーム(長尺1300mm, 航空機ストリンガー想定)の直接加熱成形を実施した(図2-1-20,図2-1-21).



図2-1-20. Iビーム成形型と追従型ヒーター

図2-1-21. 成形時の様子

CF/エポキシ成形:通常成形用プリプレグ及び速硬化プリプレグ共に正常に成形を達成(図2-1-22) CF/PA12 成形:正常に成形を達成(図 2-1-23)

成形時間および消費電力の削減効果は、昇温時間5分、消費電力30%を削減することができた.



図 2-1-22. CF/エポキシ二次供試体

図 2-1-23. CF/PA12 二次供試体

CF/PA12のUD材料を入手し、CF/Epoxyと同様に2次供試体を成形しこれを実現した(図 2-1-24). これにより CFRTP においても、直接加熱冷却成形により熱硬化性 CFRP 成形と同じ概念・システムで 成形が可能であることを証明した.



図 2-1-24. 直接加熱冷却成形品 (左: CF/PA12, 右: CF/Epoxy)

#### 2-1-5. 速硬化プリプレグを用いた CFRP の快速成形実験(羽生田鉄工所)

実験に使用した速硬化プリプレグでは、従来のプリプレグ成形に比べ成形保持時間を約1/3程度短縮することができたが、1種類しか試せておらず、またスペック上のプレス成形における硬化時間に比べまだ短縮の余地があるため別の樹脂開発メーカーより新たに速硬化プリプレグを入手し小型検証用オートクレーブにて直接加熱冷却成形を実施した(図2-1-25,図2-1-26).





図 2-1-25 180℃保持, 25℃/min 昇温の場合



以上から,各種材料の調合により自己発熱度合の差が如実に表れることがわかり,速硬化プリプレ グに関しては材料の自己発熱を加味した温度制御を行う必要があることがわかった.

# 2-1-6.カーボンフェルトプラズマとマイクロ波を用いた熱プラズマの直接加熱方式の開発(埼玉工業大学)

マイクロ波等高周波電磁波による電気的な影響を受けることなく,カーボンフェルト間の狭い空間で 発生する大気圧プラズマ温度を連続的に測定するには、従来用いられてきた熱伝対、パイロメータ、熱 画像(サーモグラフィー)、赤外線放射、発光スペクトルなどの方法では対応できず、今回の目的に特化 した測定技術が必要である.そこで、石英製の光ファイバープローブ放射温度計による測定法の可能性 を探求した.



図 2-1-27 光ファイバー放射温度計システム構成と CAMP 温度測定の様子(右端)



図 2-1-28 流通式 CAMP 反応装置(a) と CAMP の発生(b) 光ファイバー放射温度計による温度測定(c)



図 2-1-29 CAMP 温度の測定結果の例

典型的な温度測定結果の例を図 2-1-29 に示す.石英製光ファイバー放射温度計を用いることによって, マイクロ波照射下で発生する CAMP 温度を連続的に測定することを可能にした.

CAMP 温度を決定する重要なパラメータはマイクロ波出力 (P) であり, Pを制御することにより CAMP 温度をコントロールすることができ, CAMP 温度をコントロールするためのフィードバック制御システム を開発するための基礎を得ることができた. 具体化なマイクロ波フィードバックシステムの原理を図 2-1-30 に示す.



図 2-1-30 マイクロ波フィードバック回路ユニット (EX-FBU) 原理

図 2-1-30 に示すように、マイクロ波フィードバックシステムは、次の4つの部分で構成される.

- (A) マイクロ波装置(発振器,アイソレータ,パワーモニタ,自動整合器,終端調整器など)
- (B) 加熱部キャビティ(試料加熱部)
- (C) 光ファイバー放射温度計(マイクロ波電磁場温度計測装置 HTM-1、300~2000 °C)
- (D) フィードバック回路ユニット

B に配置したカーボンフェルトにマイクロ波を照射することで、カーボンフェルトが発熱し、または、 カーボンフェルト間にプラズマが発生し、その熱を B に取り付けた C のセンサ部(石英製光ファイバー プローブ)で赤外線計測し、それを C の本体部で温度情報 c 値として換算する. さらに、C はこの c 値を 電流信号として出力する. C より出力された電流信号を抵抗を介して D へ入力すると、D は抵抗の両端に 発生する電位差をモニタして、この電圧を再び c 値に換算する. D は、この c 値と設定温度(SV 値)を比 較することで差分を計算し、差分の値に応じて範囲で電圧信号を外部出力する. この電圧信号は、A の外 部コントロールインターフェイスに入力され、常に c 値と SV 値の差分を補うようにリアルタイムで MV 出 力を変化させる.

マイクロ波フィードバック回路 EX-FBU により,450 ℃ で 30 分間一定とするワンス テッププログラムで,アルゴン気流(1192 cm<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> SATP)中一対のカーボンフェルト 間に 500 W(進行波 500 W,反射波 0 W)の マイクロ波(2.45 GHz)を印加して得られる 温度変化の再現性を確認するため,同条件の 試行を 3 回繰り返した.その結果を図 2-7-15 に示す.図 2-1-31 の(1)から(3)に示すよ うに,同様の PID 動作応答が得られ,再現性 を確認することができた.図中の点線は,設 定したワンステッププログラムを示してい る.

以上の様に, 光ファイバー放射温度計測シ ステムにより観測した CAMP 温度をマイクロ 波発生装置にフィードバックし, マイクロ波 発信出力をオートチューニングして CAMP 温 度を一定に保つ温度制御回路を作製し, ハイ サイクルオートクレーブの直接加熱熱源と して必要な温度領域(~500℃)について, その動作特性を調べ良好な結果を得た.



図 2-1-31 EX-FBU によるワンステップ PID 動作の再現性

- 2-2. 成形品品質の評価と各種材料成形プロセスの最適化
  - 2-2-1. 改造オートクレーブによる CFRP 供試体の成形評価試験(羽生田鉄工所) (缶内観測装置を用いた CFRP 模擬部材成形モニタリング) 温度や硬化度の測定や試験データの収集を実施した.



却斜太东TC 位置

皇太后花住著

図 2-2-1 実験に使用した改造オートクレーブ

ハイサイクル成形ではないが従来法での成形も全ての試作型で実施した.



図 2-2-2 実験に使用した6種類の金型

このとき材料や加工上の肉厚でそれぞれの型の昇温速度が違う事や目標温度の到達時間に差があることを検証した. それぞれ特徴があり一概にこの材料が良いとは言えないが傾向と,熱媒を取り付ける際の参考になるデータが得られた.

AC 成形で成形した結果,成形材料表面温度と型表面温度どち らかが先行して昇温するかが,型材質によって多様であること が分かった.また,型材質によって材料表面温度と型表面温度 の昇温特性に大きな差が見られるものもあり,型の直接加熱方 式での成形時の重要な制御パラメータとなることが予想される.



図 2-2-4 Ni 電鋳型



図 2-2-3 昇温速度,到達時間の差



図 2-2-5 SS400 型



図 2-2-6 CFRP 型

図 2-2-7 アルミ鋳物型

2-2-2. 高速加熱と硬化度(羽生田鉄工所)

レオメータ,イオン粘度測定器(硬化度モニタ)による測定結果から明らかになったキュア時間短縮 の可能性及び,課題を示す.



1)連続動的粘弾性測定

レオメータを用いて昇温に伴う材料の粘弾性変化を連続的に記録し、温度上昇に伴う硬化度変化をいく つかの昇温率で測定したところ、昇温率に関わらず同一温度における粘弾性は類似し、昇温速度の差に よって生じる硬化具合の差は比較的小さいという結果が得られた(図2-2-8).

#### 2)イオン粘度測定

ホットボンダー,硬化度モニタを用い,真空圧(大気圧)・急速加熱条件下において材料の硬化度測定 を実施したところ,昇温速度を大きくすることによって高速硬化が可能であることが示された. (図2-2-9:イオン粘度を硬化具合とし,その最大値を100%とした相対値で表示した)

2-2-3. 直接加熱冷却システムによる成形後材料強度への影響評価(羽生田鉄工所)

ハイサイクルオートクレーブ成形が成形品強度に及ぼす影響を評価するために、万能試験機を用いて JIS K7074 に基づく曲げ試験を実施した(図 2-2-10). 使用した材料は東レ製プリプレグ P3252S [0/90]<sub>28</sub>である.

1)成形後平均厚みは、従来成形品が1.94mm、ハイサイクル成形品(加圧)が1.95mm、ハイサイクル成 形品(無加圧)が1.99mm と無加圧試験片が最も厚かった.

表 2-2-1 各試驗片成形条件

	従来	ハイサイクル成形							
	AC 成形	加圧	無加圧						
昇温速度(缶内)	8.6°C/min	6.48°C/min	5.8°C/min						
		(80°C讫)	(80°C讫)						
昇温速度(材料)	3.5°C/min	7.4°C/min	8.1°C/min						
冷却速度(缶内)	4.9°C/min	3.9°C/min	2.11°C/min						
冷却速度(材料)	2.8°C/min	32.3°C/min	19.8°C/min						
共通項目	保持 90min, 加圧力 0.3MPa								



図 2-2-10 曲げ試験 (JIS K 7074)

2)曲げ試験の結果,ハイサイクルオートクレーブ成形は従来成形法に比べ,僅かに強度の低下が見られ るが誤差程度の範囲内であった.また,無加圧時のハイサイクル成形は強度が低下した(図 2-2-11,図 2-2-12).



図 2-2-11 各試験片の最大荷重-たわみ線図

図 2-2-12 各試験片の曲げ強さ

これら結果より、ハイサイクルオートクレーブ成形では、少なくとも強度面では従来のオートクレー ブ成形法の強度を保証できることを証明するとともに、本成形法におけるオートクレーブによる加圧の 重要性が示された.

2-2-4. 汎用有限要素法コード ABAQUS を用いた数値シミュレーション(名古屋大学)

CFRP 積層板の一軸圧縮クリープ試験データーより, Maxwell モデルにおける CFRP 積層板の粘弾性 パラメータを算出した.得られた粘弾性データーを用い,実際にハイサイクルオートクレーブ成形にて用 いられている圧力条件,温度条件を与えることにより,ハイサイクル成形を模擬する数値シミュレーショ ンを実施し,CFRP 成形時に発生する残留応力の解析を行った.

図 2-2-13 は有限要素解析に用いた CFRP 積層板の解析モデルある. 100mm×100mm×1.2mm の直交 積層板を解析対象とし、成形圧力は 98kPa、常温に温度を降下させた後、圧力を取り除くものとした. 温 度降下シーケンスは 35℃/分とし、130℃から室温の 20℃まで冷却するものとした. CFRP のヤング率と ポアソン比を表に示しておく. CFRP のプリプレグ各層は 0.24mm 厚さとし、10plyの積層板を模擬した. 有限要素法を用いた粘弾性解析によりプリプレグ第1層と第2層の境界部,積層板の端部付近において 最大の残留応力が発生することが確かめられた. なお,その大きさは70MPa 前後と,比較的大きいもの であり,今後は発生する残留応力を可能な限り小さくする成形シーケンスの最適化を見出すことが課題と して重要であることが示唆された.



図 2-2-13 CFRP 積層板の解析モデル



図 2-2-14 CFRP 積層板に発生する残留応力分布

導出された CFRP 積層板の一軸圧縮クリープ試験データを 3 要素 Maxwell モデルより近似し、CFRP 積層板の異方性粘弾性特性について、そのパラメータを算出した.

また,直交配向の積層板について3次元モデルを構築し,汎用有限要素法コード ABAQUS を用いた 数値シミュレーションを実施して,実際にハイサイクルオートクレーブ成形にて用いられている圧力 条件,温度条件を与えることにより,ハイサイクル成形を模擬する数値 シミュレーションを実施し,CFRP 成形時に発生する残留応力と成形時に 生じるそり変形の解析を行った.

なお、そり変形の解析においては、ハイサイクルオートクレーブ成形 において計測された温度データをもとに、冷却硬化反応時における試験 片内の温度分布を反映させることにより、非定常熱伝導解析と構造解析 を連成させることによって数値計算を行った.なお、弾性領域における ヤング率、ポアソン比等のデータについては、試験検査機関に測定を依 頼した.試験検査機関から提供された測定データを表 2-2-2 に示す.

ヤング率(0°) E <sub>L</sub> = 129GPa
ヤング率(90°) E <sub>T</sub> = 8.0GPa
せん断弾性率 G <sub>LT</sub> = 4.5GPa
せん断弾性率 G <sub>π</sub> = 3.0GPa
ポアソン比 y <sub>LT</sub> = 0.28
ポアソン比 y <sub>III</sub> = 0.46

解析に先立って、粘弾性特性が影響を及ぼす粘弾性限界温度の算出を行った. その結果, 温度 115℃ までの範囲を徐冷し、それ以降の室温までの範囲を急冷する2段階冷却を行えば、残留応力はそれ以 上増加することなく、冷却プロセスの効率化が図られることが分かった. 本研究ではこの 115℃をハ イサイクルオートクレーブ成形における「粘弾性限界温度」として定義した.

図 2-2-16 は、成形温度から粘弾性限界温度 115℃までを徐冷し、粘弾性限界温度から室温までを急冷した場合の積層板に発生する残留応力値の解析結果である.最大応力は板の端部で 70.8MPa に達していることが確かめられた.





図 2-2-15 ハイサイクル成形のシーケンス

図 2-2-16 残留応力分布(T' = 115℃)

図 2-2-17 は、ハイサイクルオートクレーブ成形における積層板のそり変形を解析した結果である. 積層板端部と中央部のたわみ量の差は12.2µmと算出された. このそり変形についても先の残留応力 値と同様に、粘弾性限界温度 115℃までの温度域を徐冷することによって熱残留応力による積層板の 変形を最小化できることが確かめられた.

なお、積層板の残留応力値が 70.8MPa となり、これは一般的な CFRP 積層板の層間せん断強度をや や上回る値であった.そのため、ハイサイクルオートクレーブ成形によって作製された CFRP 試験片 の断面観察を行い、残留応力の影響による試験片プリプレグ層間の損傷やボイドの発生の状況を観察 したが、今回の成形品においてはそのような損傷発生は観察されなかった.



図 2-2-17 CFRP 積層板のそり変形解析結果

#### 2-2-5. データ同化シミュレーション(東京理科大学)

最適な成形プロセスの設計,および成形品質の解析評価には、部材の様々なデータ取得を必要とする が、オートクレーブ内は高温・高圧で、構造内部へセンサを埋め込むことは難しく、実測で入手できる データは限られる.そこで、東京理科大学では、羽生田鉄工所において取得する CFRP 模擬部材成形時の 各種測定データを元に、数値モデルを用いた3次元硬化成形シミュレーションをデータ同化手法を用い て実測データの情報不足を補償し、合理的な3次元 CFRP 成形プロセスを調査する.

【1】オートクレーブ成形条件

構築した Particle Filter によるデータ同化を用いて、オートクレーブ成形中の複合材料状態推定を 行うにあたって、数値実験による検証を実施した.数値実験では、実験を模擬したシミュレーショ ンを実施し、これを真値とする.そのため、従来実験ではそもそも繊維体積含有率の計測が困難で あるが、数値実験を行うことで、真の繊維体積含有率分布の取得が可能であり、正しく推定できて いるか検証ができる.

数値実験のオートクレーブシミュレーションの条件を表 2-2-3 に示す.オートクレーブ中の樹脂 流動シミュレーションでは、オートクレーブの加圧を一定  $P_T$ =10000 Pa/s として、時間刻み幅を 0.0001 としてシミュレーションを行った.初期の圧力は 10000 Pa であり、樹脂の粘度は 0.4 Pa・s とする.要素数は、厚さ方向に6つである.

Pressure gradient	0 Pa/s
Initial volume fraction of fiber	0.30
Initial pressure	10000 Pa
Initial thickness	0.02 mm
Kozeny-Carman coefficient	5.0×10 <sup>-10</sup>
Initial viscosity	0.4 Pa · s
Activation energy	9.08×10 <sup>4</sup>

表 2-2-3 オートクレーブ成形シミュレーションに用いる材料定数

また、シミュレーションで用いる境界条件および初期条件は、成形品の上部では樹脂流出を許容 するので繊維の圧力が0Paである.

#### 【2】データ同化条件

データ同化は、数値シミュレーションによる推定値と実験や測定による観測値を統合して、誤差 を含む時間発展モデルの状態推定を行う手法である.特にParticle Filter による状態推定法は線 形性、ガウス性などの仮定をおかずに、フィルタ分布の形状を、粒子を用いて近似することにより、 非線形、非ガウス性の問題も容易に扱うことができる.Particle Filter では、複数のアンサンブ ルメンバーの予測値に対して観測値を同化させ、複製、廃棄を繰り返し行う手法である(概念図を 図 2-2-18 に示す).復元抽出によって、観測の当てはまりが悪い粒子、つまり尤度の小さい粒子を 破棄し、その代わりに観測への当てはまりの良い粒子、尤度の大きい粒子を複製して増やす.この 操作によって観測データの情報を取り込んだ事後確率密度分布が表現され、それがさらに次のステ ップの一期先の予測に反映されることになる. 本研究では、オートクレーブ成形の状態推定のため、板厚の計測から、任意の位置における繊維 体積含有率の推定を目的とする.したがって、状態ベクトルは、

$$x_{t} = (V_{f1}, V_{f2}, \dots, V_{fn})$$
<sup>(1)</sup>

と表される. ここで V<sub>fi</sub>は底面からの要素順列 i 番目の繊維体積含有率を表す.

一方,観測値は板厚であるから,本研究の場合,板厚方向の位の次元を扱うため一つのスカラー 変数であり

$$y_t = h \tag{2}$$

と表される.板厚 h はシミュレーションからも計算できるため、シミュレーションにより計算される板厚 h と観測値の板厚を元に各粒子の尤度を計算し、粒子の複製や廃棄を行い、推定を行う.

したがって、本研究で推定する問題は、一つのスカラー変数である板厚から、多数(要素数分) の変数である Vr分布を推定する逆問題であり、物理シミュレーションを併用しない従来の逆問題解 析手法では推定困難な問題である.本研究では物理シミュレーションとのデータ同化を用いること で、情報の不足を補うことを期待することになる.

データ同化の粒子数を200, ステップ数を30000 としてデータ同化を行った.





図 2-2-18 オートクレーブ成形中における Particle Filter によるデータ同化

【3】結果と考察

構築したオートクレーブシミュレーションに Particle Filter を適用した. 今回のシミュレーションでは,厚さを 観測値として推定を行った.図2-2-19に観測値とParticle Filter による観測値のフィルタリングの結果を示す.



図 2-2-20 に PF による厚さの状態推定と Particle filter に おける各粒子(200 個)の軌跡を示す.図 2-2-21a, b, c に PF による繊維体積含有率の状態推定と Particle path を示す.図 2-2-21a は底面の繊維体積含有率,図 2-2-21b は真中の面の繊 維体積含有率,図 2-2-21c は上面の繊維体積含有率の状態推定を 示している.



図 2-2-20 Particle Filter による板厚の推定

図 2-2-19 より,青い線が厚さの観測値を示しており,赤線がParticle Filter により推定され た V<sub>f</sub>を元に算出された板厚値(フィルタ観測値)を表している.観測値とフィルタ観測値したも のを比較すると,観測値とフィルタ観測値は時刻とともに減少する同様の傾向を示しており,そ の平均値はほぼ一致する.したがって,Particle Filter では観測とシミュレーションの板厚の 差を元に,各粒子の複製や廃棄を行ったが,Particle Filter で計算された板厚平均値は,観測 値によく一致しており,板厚を元にしたフィルタリングが正しく機能していることがわかる.

図 2-2-20 の黄色の線は、各粒子 200 個の繊維体積含有率の時間経過、赤い線は各粒子の平均、 青い線は真値を示している.それぞれの位置において、各粒子の軌跡はばらつきが見られるが、 平均値は真値によく一致しており、板厚を推定できていることを示した.



図 2-2-21 Particle Filter により推定された Vfの時刻歴変化

図 2-2-21a, b, c は繊維体積含有率の推定を表している. 黄色の線は,各粒子 200 個の繊維体 積含有率の時間経過,赤い線は各粒子の平均,青い線は真値を示している.それぞれの位置にお いて,各粒子の軌跡はばらつきが見られるが,平均値は真値によく一致しており,従来板厚のみ の計測から推定することが困難な任意の位置における繊維体積含有率を推定できていることを示 した.また,各位置における比較を行うと底面から表面になるに従って,繊維体積含有率の変化 の立ち上がりが早くなっていることがわかる.これは上の面から順に樹脂流動が行われているた めであり,シミュレーション内容とも一致している.さらにParticle Filter によって精度よく 推定ができていることがわかる.

以上より,数値実験で設定した真値の繊維体積含有率の分布を,板厚の計測と成形シミュレーションをデータ同化させることによって,推定できることを示した.

2-2-6. ホール・ドリリング法による CFRP 残留応力の測定・評価(信州大学)

高効率成形システムでは、高速冷却過程において CFRP 内部に残留応力が発生してしまう.残留応 力が時間の経過とともに緩和されることで成形品が反ってしまう恐れがあり、CFRP の寸法・形状の 安定性が損なわれるという問題がある。これを解決するために、成形条件とプロセスごとの残留応力 の発生状況を把握する必要がある.

連続繊維強化プラスチックにおける残留応力の測定方法は見当たらないため、等方性材料で用いら れているホール・ドリリング法を発展させ測定を試みる.

残留応力を有する物体に穴をあけると、その位置で応力が解放されて穴近傍の応力分布が変化する. 測定手順は、はじめに3軸方向のひずみ変化を計測できる特殊なロゼットひずみゲージを測定対象位 置に貼り付け、ドリルを用いてロゼットひずみゲージの中心を通るように小さな穴をあける.

次にひずみ計を用いて穿孔により解放されたひずみを測定することで、内部残留応力を解析するこ とができる. 今回使用したロゼットひずみゲージを図 2-2-22 に示す. 試験条件は、ドリルの回転速度 を1200 rpm, 穿孔する穴径を1.6 mm とする.





Method for producing a tensile stress

等方性材料の薄肉板で、幅広い板を貫通する穴周りの座標系における応力分布は、 Kirsch 解析解 より、ホール・ドリリング法により得られた3軸方向のひずみの値(ε1, ε2, ε3)を式(1)に代入する ことで残留応力を導出する. ν (ポアソン  $\sigma_{max} = \tfrac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{{}_{\scriptscriptstyle AA}} - \tfrac{1}{{}_{\scriptscriptstyle AB}} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}$ 比), E (ヤング率) は引張試験により求め  $\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{44} + \frac{1}{48} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \qquad \overrightarrow{IC} (1)$ る. またロゼットひずみゲージのゲージ円 半径をR,穿孔によりできた穴半径を $R_0$ と  $A = -\frac{1+\nu}{2E} \left( \frac{1}{r^2} \right) \qquad B = -\frac{1+\nu}{2E} \left[ \left( \frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \right]$ して,  $r = R_0/R$ とする.

測定法の有効性を確認するために, 図 2-2-23 のような試験用フレームを作製した. 両端のネジポールに貼ったひずみゲージで、ネジポール にかかっている荷重を換算できる. ネジ調整により上部フレームを挟んだサンプルを引張り、サンプ ルに既定の応力を与える.その後、サンプルに貼ったロゼットひずみゲージの中心に小さな穴あけ、 解放されたひずみを測定する.

7.4MPa の引張応力を試験片に与えて、穿孔により解放されたひずみの測定結果を表 2-2-3 に示す. ここで得られた開放ひずみの値を式(1)に代入して試験片の残留応力を求めた. 計算結果を表 2-2-4 に 示す. この結果から残留応力のmax は引張応力に8.1%の誤差で、ほぼ一致していることが分かる.

Direction	Strain	Releasing straine								
of strain gauge+?	before drilling $(\mu\epsilon)$	(με) 🖉								
1.0	291~	440								
2+7	-540	1614								
3₽	2314	-295*2								

表 2-2-3 Releasing strain of polyvinyl chloride+

表 2-2-4 Results of hole-drilling test+

¢	Polyvinyl chloride.
$\sigma_{max}~({\rm MPa})$ 40	8.00
$\sigma_{min}~({\rm MPa})$	0.140

次に、新型オートクレーブ成形法により作製されたCFRPを使用し、残留ひずみの測定を試みた.1 3.8MPaの引張応力を試験片に与えた.ホール・ドリリング法により得られた結果を表2-2-5に示す測定 結果からひずみゲージの各方向において、開放されたひずみが測定されていることが分かる.また穿

孔後の穴を観察すると、摩擦熱による熱 ダレの影響はあまり見られなかった.以 上の点から、ホール・ドリリング法を応 用することで、連続繊維強化プラスチッ クにおける残留応力測定の可能性がある と考える.

表2-2-5 Releasing strain of CFRP+

Direction	Strain 🗸	Releasing strain+
of strain gauge+2	before drilling $(\mu\epsilon)$	(με) 🕫
14	1540	94₽
242	142	-240
3₽	206₽	88+2

応力分布の逆解析式を導いて残留応力の予測を行った.測定法の有効性を確認するために、サンプ ルに事前に応力を与える試験用フレームを作製し、ホール・ドリリング法でその応力を測定した.測 定の結果、ほぼ一致の結果が得られて方法の有効性が確認された.誤差を低減するために穴をあける 速度やドリルの形状などを検討し、測定の最適条件を探った.新型オートクレーブ成形法により作製 されたCFRPを使用し、残留ひずみの測定を試みた.

ここで、異方性材料残留応力の逆解析法を提案し、異方性材料にも使用できるホール・ドリリング

法を開発する. 図 2-2-24 は提案した解 析法の概要である. JIS 規格を準じた CFRP 材料の引張り試験で測定した材 料の力学特性と設定したある応力状態 で,有限要素法を用いて穿孔板の解放 ひずみ(3 軸)を計算する(順解析). 求 めた解放ひずみと実測した解放ひずみ と比較し(残差法 Er),残留応力状態 ( $\sigma_L, \sigma_T, \sigma_{LT}$ ) を 求 め る . Box-Behnken 2 次計画法を用いてある 応力状態を再設定し,最適法で解放ひ ずみを求める.



図 2-2-24 異方性材料残留応力の逆解析法の概要



図 2-2-25 異方性材料残留応力の逆解析法の計算一例



図 2-2-26 新残留応力測定法の解析精度の向上

新残留応力測定法の測定精度向上するために図 2-2-26 のような循環計算法を提案する. 異方性 材料残留応力の逆解析法で求めた解析値に沿って,残留応力の選定範囲を半減して再計算し,それ を繰り返して異方性材料残留応力を求める. 循環計算により誤差が大幅に低減されて,高解析精度 できることが分かった.

提案した測定法の有効性を確認するために,作成した試験用フレームを用いてサンプルに貼った ロゼットひずみゲージの中心に小さな穴あけ,解放されたひずみを測定して異方性材料残留応力の 逆解析法で,残留応力を求めてみて設定した残留応力との比較を行った.

等方性材料のアクリル板に 2.48MPa 応力をかけて測定した結果は 2.45MPa であり, 誤差は 1.2% であった.新型オートクレーブ成形法により作製された CFRP に 10MPa 応力をかけて測定した結果は 12.6MPa であり誤差は 26%であった.これにより新残留応力測定法の有効性が確認された.新残留応 力測定法にある影響要素の解明と感度解析はこれからの課題である.

- 2-3. 立体的な成形型への対応
  - 2-3-1. 型の試作期間を短縮する技術開発(羽生田鉄工所/吉田工業) 【1】冷却テーブルと成形型の試作

直接加熱冷却テーブルを試作したが、試作に時間がかかることや冷却 水路と加熱ヒーターを同時に配置するとテーブルの厚みが増し、冷却・ 加熱両者の効率が落ちる問題があった.そこで、冷却経路のみを保有し た薄型アルミ鋳物冷却テーブルを試作し(図2-3-1)、テーブル直下に



オートクレーブ缶内加熱用ヒーターを設置することで短納期かつ効率的な 製品の加熱・冷却アシストを実現した.

図 2-3-1 冷却テーブル

鋳造用砂型 3D プリント技術や,配管鋳包み技術を用いて短期間に製造する技術を確立し,熱可塑性 CFRP 用試作型の試作を行った.型や冷却テーブルの冷却回路にパイプを使用する場合,パイプ曲げの リードタイムが非常に長いこと,パイプの熱膨張により鋳造時固定が難しいという問題を克服するた め,上下型と冷却回路を一緒に3D 砂型積層造形装置で作成する手法を用い試作し,検証用ハイサイ クルオートクレーブに組み込みその有効性を確認した.これにより今後冷却テーブルを制作する時の 方式が決定できた.まだオートクレーブ成形に対して最適化された形状ではないため,今後冷却経路 配置位置や入出口位置を改善する必要がある.



図 2-3-2 冷却テーブルの検証用小型オートクレーブへの組込み

【2】型の複雑形状化

冷却水路と複雑な形状の型を一体成形したものを試作し、複雑形状成形に対応した. ロ付近の巣の 発生や巣の修正剤が常用耐熱 250℃など, CF/PA66 成形が限度であり, 改善する必要があるが, CF/Epoxy や CF/PA12 成形が可能なスペックを実現した.

アルミ型の冷却配管取り付けの際に割れが発生したため、加圧に用いるオートクレーブ成形では用いることが出来なかった. CFRTSの型の作成の目途は立ったが、CFRTPの成形温度に耐えうる複雑形状型の成形型の製作は実現していない.



図 2-3-3 冷却型の複雑化



図 2-3-4 巣の発生

#### 【3】加熱テーブルの改善

加熱能力最適化目的に冷却テーブルとは逆に,加熱機能のみを有した CFRP 直接加熱用の加熱テーブルを試作した.これにより,試験板などの単純形状成形品の成形時間を短縮するとともに,将来的には複雑形状への適応も行う.

現状はヒーター配置パターンが適切ではないことによる温度分布のバラツキ(現状 10℃程度)や, ヒーター性能による最高温度限界(大気中で 210℃)の問題,加熱テーブルそのものの熱変形の問題 が挙げられる.



図 2-3-5 加熱テーブル実験の様子



図 2-3-7 130℃-140℃近傍温度分布



図 2-3-6 加熱ヒーター配置パターン例



図 2-3-8 200℃-210℃近傍温度分布



図 2-3-9 Brisk 社ヒーターによる急速加熱(40℃/min)

現状は単純な平板形状での実施にとどまっており、線状フレキシブルヒーター適用による配置パタ ーンの自由化による温度分布の改善、使用温度高温化、適切な材料選択によるテーブルの変形の問題 (図 2-3-10)を解決する必要がある.



図 2-3-10 加熱による平板の変形 (湾曲)

2-3-2. 立体成形型で簡単に設置可能な成形用熱源の開発(羽生田鉄工所)

【1】立体的な形状に沿って賦形し、均等加熱が可能なフレキシブル発熱体の開発

柔軟なヒーター線を蛇行させて配置し、ヒーター線を縦方向と したとき、横方向に対して動き代のある固定方法をとることによ って、立体形状に対しても無理なく賦形が可能なヒーターを開発 した (図 2-3-12, 図 2-3-13). この方式によりヒーター線の折れ 目や重なりによる温度分布のムラや短絡の発生を避け、 均等加熱 が可能となった.



ヒーター線とガラス基材の組み合わせで 0~420℃まで加熱 図 2-3-11 試作ヒータのフレキシブル性 成形が可能・特許出願申請済み





図 2-3-12 複雑な立体形状型への賦形の様子



図 2-3-13 勾配のきついマスター型 (モデル) への賦形 (左:ガラス織物ヒーター,右:ニット織物ヒーター)

【2】フレキシブルヒーターを用いた高温成形方法の開発

直接加熱の最も大きな課題は、加熱以上のスピードでおきる放熱現象であり、解決のためには以下 の2つの方式を検討し実験してその有効性を確認した.

①缶内空気加熱方式

缶内の空気を電気ヒーターによって加熱することで被加熱部のヒーターをターゲット温度まで 上げる.低温(~200℃)程度で問題なく加熱可能.

②二重ヒーター方式(~本年度実績)

加熱用ヒーターの外側に断熱材をのせ、その上から別のヒーターを乗せて内部から加熱のサポートを行いながら被加熱部をターゲット温度まで上げる.図2-3-14、図2-3-15



- 最3章 全体総括
  - 3-1. 補助事業の成果

すべての研究開発と試作が98%以上完了し一応のデータを取り終え、今後は商品化・事業化を検討 してゆく.

- 検証用小型オートクレーブの試作を実施し、より効率的な直接加熱冷却成形の実験が可能な環境が整い、製品化へ向けた基礎技術の確立がほぼ完了した.
- ② 直接加熱冷却成形をオートクレーブ成形に導入することにより,一般的なエポキシ樹脂含浸 CF プリプレグ成形において,57%の消費電力削減を達成した.
- ③ CFRP のマトリクス樹脂や繊維配向に関わらず,成形条件を変えることで直接加熱冷却成形法での快速成形が有効であることを確認した.
- ④ 展示会への出展を通じ、様々な川下企業に認知してもらい、購入の検討をしたいとの反応も得た.オートクレーブによる直接加熱冷却に興味を示す CFRP 成形業者も少しずつ現れている.

3-2. 事業化展開

展開する市場は、CFRP 成形業界(羽生田鉄工所のユーザー15社),大学等の複合材研究機関(25か所), 公設試験場(全国77機関)などを想定している。

更に、複合材市場への波及が期待される.ハイサイクル成形技術が市場に定着すれば、オートクレー ブを用いた炭素繊維複合材成形研究や複合材製品設計開発の速度は数倍になり複合材の利用を促進す るだろうと考えている.特にオートクレーブ成形は品質の良さや再現性が数ある成形法の中でも最も高 く、それら成形方法へ発展させるための基礎データを確立するには非常に優れており、オートクレーブ 以外の成形方法への波及効果も高いと予想される.

次に、オートクレーブ成形のハイサイクル化を証明できたのでオートクレーブ成形を見直す動きが作 れた. 更に、小型ではあるが成形温度400℃までを20分で成形できる試作品を完成させる事で、販 売促進やPRが容易になった.大型や中型のハイサイクル成形装置の販売提案は実績がないため羽生田 鉄工所としては難しいと言う判断があるが、今後は小型の RAC2210 や小型従来機ダンデライオンのハイ サイクル改造対応や、ハイサイクル制御可能な制御盤とヒーターのセット販売を検討している.

事業化スケジュール													
		2018年		2019年		2020年			2021年				
スケジュール	小型ハイサイクルオートクレーブ												
	受注生産開始												
	制御装置のみ販売												
	標準仕様制御盤販売												$\Rightarrow$
	カスタマイズ仕様 +機器改造受注												$\Rightarrow$
	ヒータ販売												
	ヒータと型セット販売												
	従来機種小型ダンデライオン のハイサイクル改造												$\Rightarrow$
	ハイサイクルオプション対応 小型ダンデライオン販売												$\Rightarrow$
	ハイサイクル成形のコンサルと データーサービス												$\Rightarrow$
売上見込	売上高(千円)	5,000		10,000		20,000			30,000				

以上