

## 論文内容の要旨

### 論文題目

# 厚板熱可塑複合材のその場ひずみ計測に基づく 成形時残留応力分布の同定と力学特性に及ぼす効果

氏名

東田 拓平

### 1. 緒言

比強度・比剛性に優れる炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)は、航空宇宙分野の構造部材として適しており、B-787(The Boeing Company)や、A350 XWB(Airbus S.A.S.)では、機体重量の約 50%が CFRP や GFRP といった複合材で占められている。航空及び宇宙輸送機器に適用されている CFRP には、母材にエポキシ樹脂のような熱硬化性樹脂が多く用いられてきた。CFRP の成形法は幾つか存在するが、航空宇宙用途といった高品質な構造部材にはオートクレーブ成形が用いられるため、大型の設備が必要となる。また、硬化反応を伴うため成形時間が長くなる。これに対して、母材に熱可塑樹脂を用いる熱可塑 CFRP (CFRThermoPlastics) が近年注目を集め、欧州を中心に盛んな研究開発が実施されている。熱硬化 CFRP と比較して、生産性に優れる事や破壊靱性・衝撃特性に優れる事から、航空機構造部材への適用も進みつつある。現在は、翼・胴体・エンジン等の主構造構成部品にまで適応範囲が拡大しており、製品の大型・厚肉化の傾向が見受けられる。このような背景から、高靱性かつ生産性に優れる熱可塑複合材の大型・厚肉化を見据えた基礎研究の重要性は高まっている。

大型厚肉部材成形時には、成形中特に冷却過程において、部材内に不均一な温度分布や冷却速度分布が発生する。これらの現象は、製品の板厚方向に品質分布を発生させる可能性があり、詳細な評価が必要である。これまでに、結晶化度(Degree of Crystallinity, DOC)と力学特性の分布の関係性について、実験を通して評価されてきた一方で、品質分布を発生させる成形中の内部状態やメカニズムについては、明らかとなっていない。

本研究では、CFRTP 成形中の不均一温度/冷却速度分布に起因して残留応力/ひずみ分布を発生させる[Thermal/Morphological Skin-Core 効果](Fig. 1 に概略図を示す)に着目し、光ファイバセンサの一例である Fiber Bragg Grating(FBG)センサを用いたその場ひずみ計測及び計測結果に基づく成形解析を通して、残留応力/ひずみ分布発生メカニズムの解明及び分布量の同定を論文の主目的とし、残留応力分布が曲げ/衝撃といった力学特性に及ぼす効果についても検証した。

## 2. 本論文の流れ

本論文は8章から構成されている。研究対象は一貫して、結晶性CFRTPの代表例のCF/PPSである。まず初めに第2章ではCFRTPの品質に大きな影響を与える結晶化挙動と冷却速度の関係性を、示差走査熱量測定(DSC)と偏光顕微鏡観察に基づき調査した。第3章では、FBGセンサを用いた成形中その場内部ひずみ計測を、一方向強化薄板材を対象に異なる冷却条件で実施した。第4章では、成形解析に必要となる物性値[弾性率],[収縮ひずみ]を、せん断遅れに伴うFBGセンサ応答の違いを利用して推定した。加えて、Incrementally Linear Elasticity (ILE) モデルを仮定した成形解析を実施し、推定物性値や解析手法の妥当性を検証した。第5章では、一方向強化厚板材を対象にその場内部ひずみ計測実験、成形解析そして3点曲げ試験を実施し、Thermal Skin-Core 効果について詳細に評価した。第6章では、実用上重要となる多軸方向積層の厚板を対象に成形解析を実施し、Thermal Skin-Core 効果の影響を調査し、擬似等方積層材では衝撃特性に及ぼす影響も明らかにした。第7章では、成形後の熱処理であるアニール処理中にその場内部ひずみ計測を実施し、Morphological Skin-Core 効果による残留応力/残留ひずみ分布の変化を明らかにした。第8章では結論をまとめた。以下より、第2~7章で得られた結論をそれぞれ述べる。

## 3. 各章の結論

### 3.1 第2章 [CF/PPSの結晶化挙動に及ぼす冷却速度の影響]

- ・ DSC で得られた結晶化温度( $T_c$ )と冷却後試料が有する結晶化度 DOC は、冷却速度の上昇に伴い低下した。- 500 K/min と- 10 K/min の条件間では、 $T_c$ で約 64°C,DOC では約 15.8%の差異が発生したことから、CF/PPS の結晶化挙動は冷却速度に大きく依存している事が確認された。
- ・ 偏光顕微鏡観察結果から、PPS 樹脂の結晶形態は球晶であることが分かった。また、冷却速度が速いと結晶成長が遅れ、球晶サイズが大きくなる事が確認された。結晶成長が観察された温度領域は DSC の発熱反応発生領域と概ね一致しており、結晶化挙動の様子が、熱的・形態的に明らかとなった。

### 3.2 第3章 [薄板CF/PPS成形中のその場ひずみ計測]

- ・ FBG センサを用いた成形モニタリングによる内部ひずみ計測の結果から、DSC で確認された熱転移温度付近で特有のひずみ変化が発生する事が確認された。特に、冷却中の  $T_c$  付近からひずみが急激に減少する事から、熱残留ひずみの発生が推測された。
- ・ 冷却速度の上昇に伴い、残留圧縮ひずみが低下しており、冷却条件間で最大約 2200  $\mu\epsilon$  の差異であった。このため、冷却速度に依存する  $T_c$  や DOC が、CF/PPS の残留圧縮ひずみの発生時期と発生量に大きな影響を与えていることが分かった。

### 3.3 第4章 [薄板材のその場ひずみ計測に基づく成形解析]

- ・ 異なるセンサ端部長さ(Tail length)を有するFBGセンサ間のせん断遅れに伴うひずみ応答差を利用する事で、ガラス転移温度付近までの温度領域で PPS 樹脂弾性率  $E_{PPS}$  と、

CF/PPS 複合材としての繊維直交方向熱膨張率  $CTE_{CFPPS\_22}$  が推定できることを示した。推定物性値は、冷却速度の影響を受ける DOC と関係性がある事が分かった。

- ・ ガラス転移温度付近の高弾性領域では、FBG センサを用いた物性値推定手法が適用できず、DMA 計測に基づく物性値計測・推定結果と併用した上で、粘弾性を考慮しない ILE モデルに基づく成形解析を実施した。妥当性検証用実験で得られたひずみ履歴と解析から得られたひずみ履歴を比較した結果、両結果が良く一致し、誤差も 5% 以内に収まることが分かり、推定物性値と解析手法の妥当性が示された。
- ・ DMA の計測条件である加振周波数の大小が、解析結果に与える影響を検討した結果、0.01~1Hz の領域では誤差が  $\pm 10\mu\epsilon$  に収まることが示され、高弾性領域における DMA 計測の加振周波数が解析精度に与える影響が限定的であることが明らかとなった。

### 3.4 第 5 章 [厚板材成形時の残留応力/残留ひずみ分布同定]

- ・ 顕著な不均一温度分布が発生する Middle Cooling(MC)条件では、Thermal Skin-Core 効果によって、冷却中の内部ひずみ履歴が板厚方向で異なる事を示した。材料表層部が比較的高弾性となった際に、比較的低弾性である中心部の収縮ひずみを拘束する事が主要因であることが明らかとなった。
- ・ 第 4 章で示した物性値並びに成形解析手法を厚板材にも応用した結果、MC 条件で確認された内部ひずみ分布を高精度に同定できる事を示した。内部応力分布についても同様に形成過程と分布が明らかとなった。(Fig. 2 に解析結果と実験結果の比較を示す。)
- ・ Thermal Skin-Core 効果由来の残留応力分布について 3 点曲げ試験を通して評価した結果、冷却中に温度分布が発生しない Slow Cooling(SC)条件では曲げ強度  $\sigma_B$  が板厚によらず概ね一定である一方、MC 条件では板厚増加(Thermal Skin-Core 効果の影響増加)に従って、 $\sigma_B$  が増加する事が明らかとなった。残留応力分布が大きすぎる場合、材料裏面の最表層部で破壊が発生せず、中心部で材料の早期破壊が発生する事を示した。
- ・ 3 点曲げ試験の試験結果と、解析により導出された MC 条件の残留応力を比較する事で、ひずみだけでなく応力に関しても解析結果の妥当性が示された。

### 3.5 第 6 章 [直交積層及び擬似等方清掃厚板材成形時に発生する残留応力分布]

- ・  $0^\circ$  層が含まれる場合、熱の異方性によって熱残留応力が発生するが、 $[0_2/90_{22}]$  や  $[0_2/90_2]_{6s}$  といった直交積層板の  $90^\circ$  層内に発生する Thermal Skin-Core 効果由来の残留応力分布量は熱残留応力と比較してそれぞれ約 10%、約 4% と非常に小さいことを示した。
- ・ 直交積層板で  $0^\circ$  層の割合が増えた場合や擬似等方積層板では、Thermal Skin-Core 効果の影響が無視可能である事を示し、材料の早期破壊を引き起こさない事から、急速冷却手法が有用である事を述べた。

### 3.6 第 7 章 [アニール処理中のその場ひずみ計測による残留応力分布同定]

- ・ DOC の増加を引き起こす CF/PPS の冷結晶化は、アニール処理前の DOC やアニール処理中の加熱速度に依存することが DSC 計測から明らかとなった。

- 成形時の冷却条件によって、アニール処理中に発生する残留ひずみ変化が異なり、Thermal Skin-Core 効果のみが発生する場合には残留ひずみ分布量が変化しないことから、残留応力の低減に直結しないことが示唆された。一方、DOC 分布に由来する Morphological Skin-Core 効果が発生する場合、冷結晶化による収縮ひずみ量が板厚方向で異なるため、収縮ひずみの拘束による残留応力緩和が発生する事が確認された。

#### 4. 結論

第 2 章から第 7 章までの実施内容と結論から、本研究では結晶性 CFRTP である CF/PPS の厚板成形時に発生する残留応力/残留ひずみ分布を、FBG センサを用いたその場ひずみ計測に基づく成形解析を通して高精度に同定することが可能であり、力学特性への影響についても曲げ/衝撃の観点から検証した。CF/PPS 以外にも、成形条件の自由度が高い CFRTP の場合、このような成形解析やモニタリング技術を応用していく事で、生産性と品質を両立可能な成形条件の最適化にもつなげられ、本研究の成果はその一翼を担うといえる。

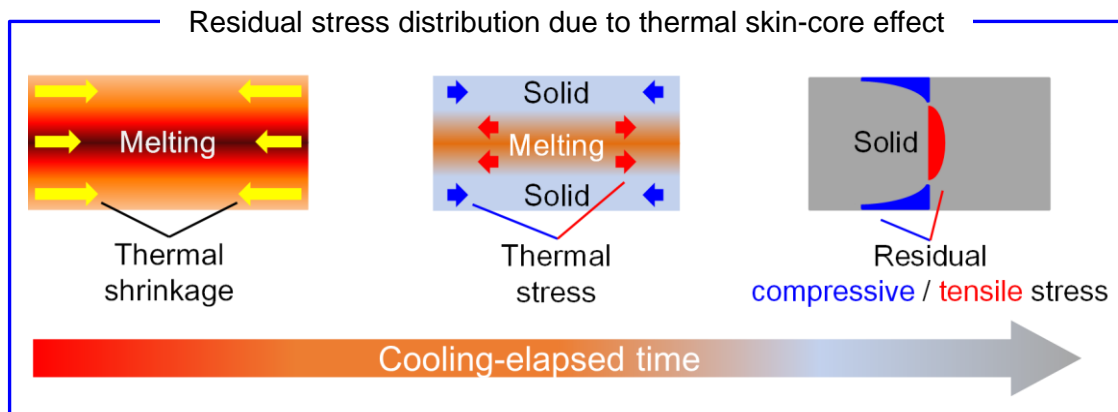


Fig. 1 Schematic of Thermal Skin-Core effect based on non-uniform temperature distribution.

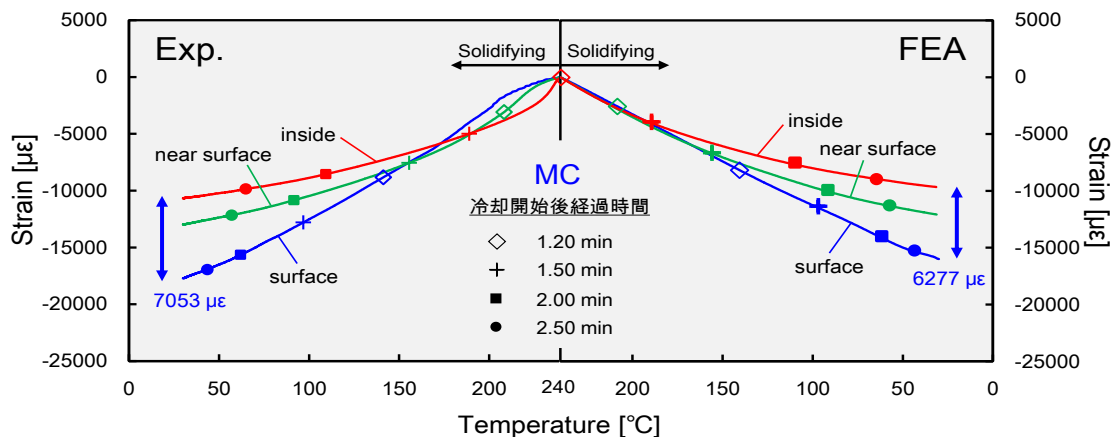


Fig. 2 In-plane transverse strain histories at each FBG point during MC condition (experiment & simulation).