

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H02345

研究課題名（和文）複合材構造の高精度成形のための樹脂固化前変形その場計測とモデル化

研究課題名（英文）In-situ measurement and modeling of pre-gelation deformation for high-precision manufacturing of composite structures

研究代表者

水口 周（Minakuchi, Shu）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70512359

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：複合材成形において樹脂ゲル化前に発生する圧密化変形は、厚みの不均一化や繊維配向の乱れなどを発生させ、成形品の品質を低下させる。しかし、これまでこの圧密化変形過程を評価する手段がなく、詳細なメカニズムに対する理解が不足していた。本研究では、複合材に埋め込み可能な独自の光ファイバ形状センサを開発し、精密複合材構造の様々な成形不良メカニズムの解明に取り組むとともに、圧密化変形を予測できるモデリング手法の構築を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、圧密化過程において、複合材構造内で生じる層スケールでの変形現象をその場計測することが可能になった。計測結果を高精度に再現可能なモデリング手法と組み合わせることで、様々な圧密化変形メカニズムを明らかにすることが出来る。従来はトライアンドエラーを繰り返すことで最適な成形プロセスが決定されてきたが、今後は詳細な変形メカニズムに立脚して効率的にプロセスの最適化を進めることが出来る。

研究成果の概要（英文）：In composite curing, consolidation deformation that occurs before resin gelation causes uneven thickness and disturbance of fiber orientation, reducing the quality of the cured product. However, there has been no means to evaluate this consolidation deformation process, and detailed understanding of the mechanism has been lacking. This study developed a unique fiber-optic-based shape sensor that can be embedded in composite materials, and elucidated various cure-induced defect mechanisms in composite structures, while also building a modeling method that can predict the consolidation deformation.

研究分野：航空宇宙複合材構造

キーワード：複合材料 成形 プロセスモニタリング 光ファイバ 圧密化 モデリング

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

航空機軽量構造にとって不可欠となった繊維強化複合材料であるが、加熱硬化過程において樹脂がゲル化(固化)するまでに、構造内部の不均一圧力により繊維と樹脂が流動する。これを『圧密化変形(Consolidation 変形)』と呼ぶ(図1)。結果として、構造厚みの不均一化や繊維配向の乱れを引き起こし、製造の高コスト化や成形品の力学特性低下の要因となる。

しかしながら、これまでに複合材構造を製造する高温・高圧環境下で圧密化変形過程を観測する手段がなく、製造プロセスを効率的に最適化するための変形メカニズムに対する理解が不足していた。

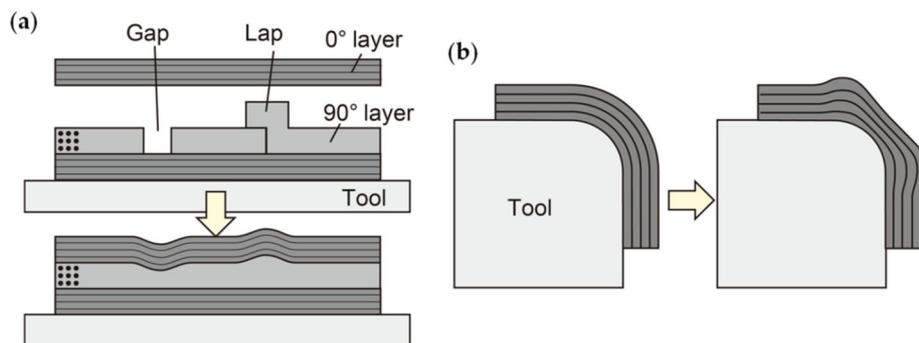


図1 圧密化変形の例(左:自動積層で生じる Gap/Lap 部、右:コーナ部)

2. 研究の目的

本研究では、この圧密化変形をその場計測することが可能な光ファイバ計測手法を開発し、精密複合材構造に発生する典型的な圧密化変形のメカニズムを明らかにすることを目的とした。また、圧密化変形の計測結果を再現できる高精度なシミュレーションモデルの構築にも取り組んだ。

3. 研究の方法

圧密化過程で発生する変形は、面外方向の層のうねりが主であることから、複合材の層内に面外方向の曲げ変形を計測可能なセンサを埋め込むことが有効である。ただし、通常の光ファイバセンサは光ファイバの中立軸上にあるコア部のひずみを計測するため、光ファイバに曲げ変形が発生してもひずみの変化が計測されない。そこで新たに、複合材一層分の厚みを有する柔軟なシートの上下面に2本の光ファイバを接着した Strip 型光ファイバ形状センサを開発した(図2)。このセンサに曲げ変形が生じると、曲率に比例したひずみ差が2本の光ファイバセンサに生じる。高分解能ひずみ計測装置でこのひずみ差の分布を計測することでセンサ軸方向に沿った曲率分布を評価することが可能であり、幾何学に基づく数値処理によりセンサ形状を計算することが出来る。形状センサのシートには硬化させた複合材一層を用いており、事前検証の結果、より柔軟な 90-sensor (図2右下:繊維方向とセンサ軸方向が直交)が圧密化変形計測に望ましいことを確認した。

図3にこの形状センサを用いた圧密化変形計測の原理を示す。光ファイバ形状センサは複合材一層を部分的に切り取った場所に挿入される。センサ厚みと複合材一層の厚みが同じであることから、センサが圧密化変形に与える影響を最小限に抑えることが出来る。圧密化変形が生じると、柔軟な Strip 型形状センサは層内でねじれることなく周辺の層と一体化して変形する。すなわち、センサ形状と周辺の層の変形が同一なので、センサ形状を連続計測することで、圧密化変形を層のスケールで追跡することができる。

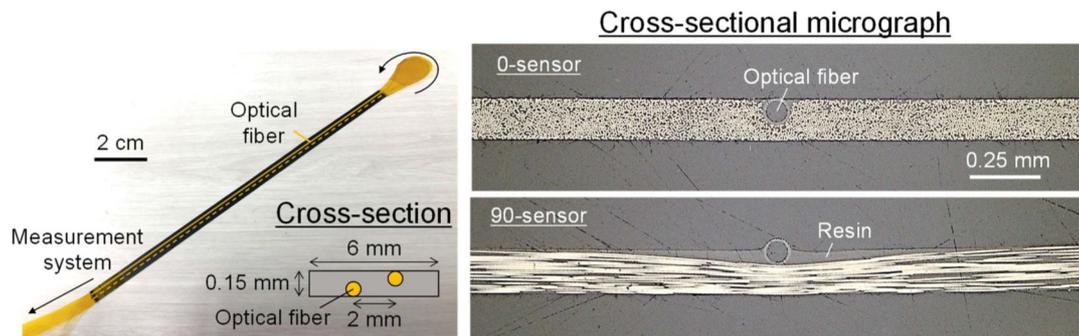


図2 開発した Strip 型光ファイバ形状センサ(右:曲げ剛性の異なる 0-sensor と 90-sensor)

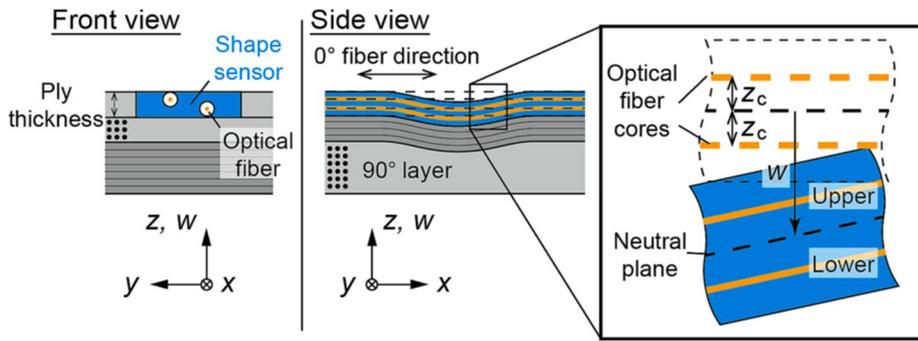


図3 Strip型光ファイバ形状センサを用いた圧密化変形の計測の概要

4. 研究成果

開発した光ファイバ形状センサを Gap 部とコーナ部（図1）に適用し、圧密化変形メカニズムの解明に取り組んだ。いずれも世界初の計測であり、硬化後の試験片断面との比較により、高い精度で変形計測が行われたことを確認している。

まず Gap 部に発生する圧密化変形は、Gap 幅に依存して変化することが分かった（図4）。圧密化過程で Gap 上部の層が Gap に沈み込むが、Gap 幅が広い場合には（図4右）上部の層が下部の層に接触することで Gap が閉じ、以降の圧密化変形が停止する。一方で Gap 幅が狭い場合には（図4左）Gap が閉じないため、空洞部分に周辺の層から繊維と樹脂が流入する。結果として、沈み込んだ上部の層が上へと押し上げられることで、Gap 部の変形が部分的に緩和することが明らかになった。この計測結果をもとに、複合材製造シミュレーションで著名な米国 Delaware 大学のグループと共同研究を開始し、変形計測結果を再現するシミュレーションモデルの構築に取り組んだ（図5）。Gap 上部の層を梁要素、中央層を粘性流体としてモデル化する最新のシミュレーション手法を拡張し、新たに梁の粘弾性特性と Gap 上部と下部の層の接触を考慮することで、変形計測を再現できるモデルの構築に成功した。

次にコーナ部の圧密化変形は、用いられる金型の形状に依存して変化することが分かった（図6）。複合材構造製造の現場では、部材上下面のどちらを平滑面とするかに応じて、凸型あるいは凹型の金型が用いられる。凸型の金型を用いた場合には、コーナ内周と外周の弧長差のためコーナ部が高圧になり、樹脂の流出と層間のすべりが起こることでコーナ部が薄くなることが分かった。一方で凹型の金型を用いた場合には、コーナ部は繊維架橋が生じるために低圧になる。結果的にコーナ部に向かって樹脂が流動することになり、コーナ部が厚くなることが明らかになった。この計測結果をもとに、複合材製造研究で著名な英国 Bristol 大学のグループと共同研究を開始した。Bristol 大学のグループは金型/複合材部材間の圧力分布を計測する技術を保有し

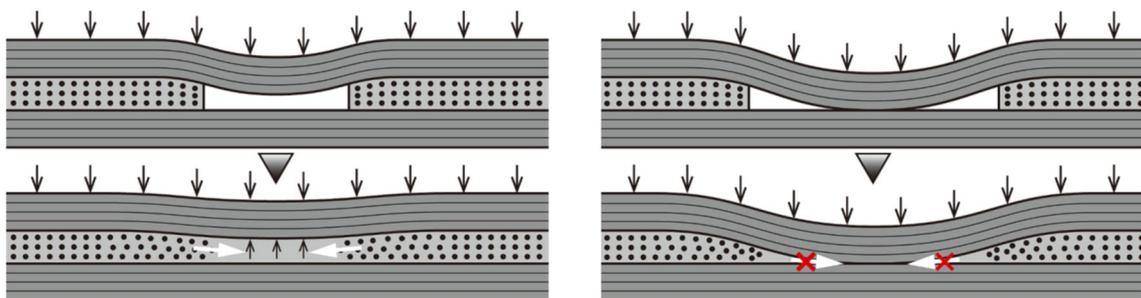


図4 Gap幅に依存した圧密化変形の概要

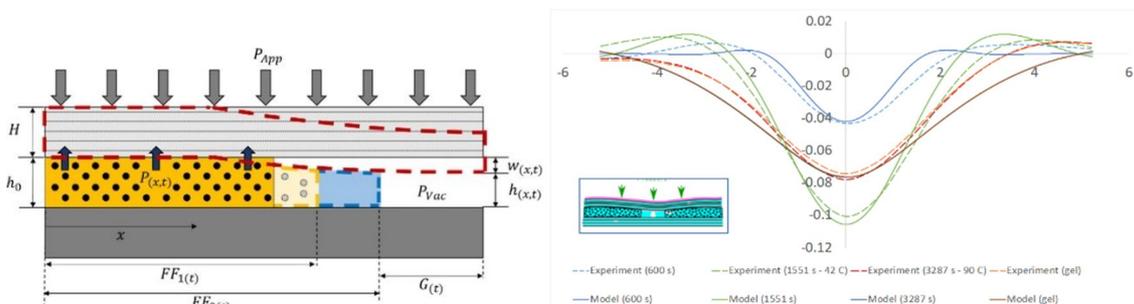


図5 Gap部圧密化変形解析モデル（左）と、計算（実線）と実験（点線）の比較（右）

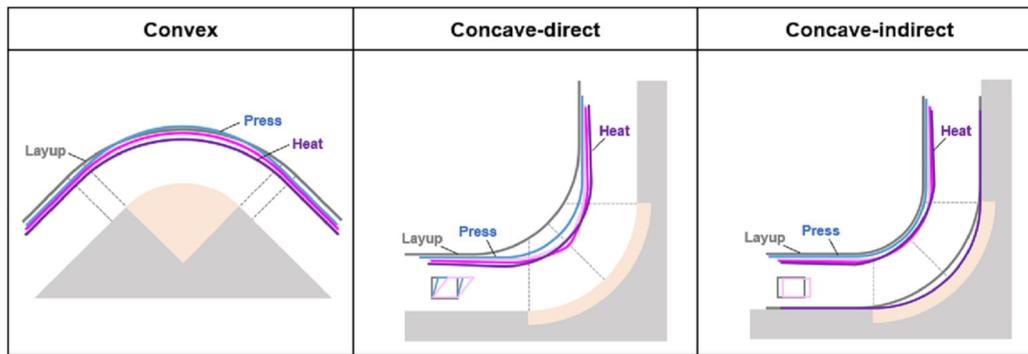


図5 治具形状に依存したコーナ部の圧密化変形の違い

ており、形状と圧力の同時計測を行うことで、変形と圧力変動の相関に基づいたより詳細な圧密化メカニズムの理解が可能と考えた。この計画は Bristol 'Next Generation' Visiting Researcher Programme に採択され、2024年3月に研究代表者が Bristol 大学に滞在し、複合材コーナ部の計測実験を行った。現在、変形と圧力の計測データを分析しているところである。

以上より、精密複合材構造の製造不良メカニズムを解明できる技術基盤が構築された。今後は、詳細な変形メカニズムに立脚することで、最適な製造プロセスを効率的に設定することが可能になる。なお、新たな計測技術によって初めて計測された圧密化変形は、温度上昇とともに単調に増大するものではなく、温度変化にともなってダイナミックに増減する現象であったことは大きな驚きであった。特に、部材形状に関わらず、圧密化過程において一時的に大きくなった変形が、樹脂粘度の低下にともなう流動現象によって部分的に緩和していく一般性のある現象が観測された。この興味深い現象は、流動を積極的に制御することによって、製造不良の要因になる圧密化変形を抑制できる可能性を示唆する。今後の取り組みの課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Minakuchi Shu, Simacek Pavel, Advani Suresh G.	4. 巻 180
2. 論文標題 In-situ consolidation deformation of composite laminate with gaps of various widths	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 108054 ~ 108054
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2024.108054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tamagawa Toshiyuki, Minakuchi Shu, Niwa Shoma, Takeda Nobuo	4. 巻 165
2. 論文標題 Consolidation deformation of composite corner depending on compression force during layup: In situ monitoring using fiber-optic-based embeddable shape sensor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 107371 ~ 107371
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2022.107371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tamagawa Toshiyuki, Mori Yuichiro, Minakuchi Shu	4. 巻 169
2. 論文標題 Consolidation mechanism of composite corners cured on convex and concave tools	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 107500 ~ 107500
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compositesa.2023.107500	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Minakuchi Shu, Niwa Shoma, Takeda Nobuo	4. 巻 22
2. 論文標題 Strip-Type Embeddable Shape Sensor Based on Fiber Optics for In Situ Composite Consolidation Monitoring	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6604 ~ 6604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s22176604	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 S. Minakuchi, S. Niwa, N. Takeda
2. 発表標題 Embedded Fibre-optic-based Shape Sensor for In-situ Consolidation Monitoring
3. 学会等名 23rd International Conference on Composite Materials (ICCM-23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Toshiyuki Tamagawa, Shu, Minakuchi, Shoma, Niwa, Nobuo Takeda
2. 発表標題 In-Situ Measurement Of L-Shaped CFRP Deformation Before Gelation By A Fiber-Optic-Based Shape Sensor
3. 学会等名 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 玉川 俊幸, 水口 周, 丹羽 翔麻, 武田 展雄
2. 発表標題 光ファイバ形状センサによるL型CFRP積層板の硬化前変形の計測
3. 学会等名 第13回日本複合材料合同会議 (JCCM-13)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水口 周, 丹羽 翔麻, 武田 展雄
2. 発表標題 自動積層機と光ファイバセンサを用いた複合材製造モニタリング
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丹羽 翔麻, 水口 周, 武田 展雄
2. 発表標題 埋め込み光ファイバ形状センサによるL型CFRP積層板の固化前変形モニタリング
3. 学会等名 第12回日本複合材料会議
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Minakuchi
2. 発表標題 Developing automated layup machine with tow strain sensing and ply curving termination function
3. 学会等名 First French-Japanese workshop on additive manufacturing (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	北本 和也 (Kitamoto Kazuya) (80869834)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	University of Delaware			
英国	University of Bristol			