

令和元年6月27日現在

機関番号：26402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05985

研究課題名(和文) その場測定技術を基盤としたFRP積層板の成形誘起残留応力分布の予測手法

研究課題名(英文) Prediction method of process-induced stress distribution of FRP laminates based on in-situ measurement technology

研究代表者

高坂 達郎 (Kosaka, Tatsuro)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：80315978

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：繊維強化プラスチックの強化繊維に成形ひずみが生じるメカニズムを明らかにするため、ひずみのその場測定とそれを予測するための有限要素法による解析手法の構築を行った。本研究では、光ファイバをセンサおよび強化繊維としたGFRPについて、成形条件を変えて繊維に生じるひずみを取得した。得られた結果から、強化繊維には熱膨張、硬化収縮、熱収縮によって成形残留ひずみが生じ、加える温度が熱膨張と硬化収縮、樹脂剛性に大きく影響を与えて残留ひずみの大きさが変化することが明らかになった。さらに、解析結果は実験結果とよく一致し、提案した解析モデルによって成形残留ひずみの予測が可能であることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、繊維強化プラスチックの強化繊維に成形ひずみが生じるメカニズムを明らかとなり、さらにその予測が可能となった。また、モデル材によるその場測定を行うことにより、シミュレーションモデルの検証を行うことが出来ることが示された。以上が学術的な意義となる。社会的な意義としては、本研究の成果により、新たな樹脂を繊維強化プラスチックに用いる場合に、成形条件によって繊維に生じる成形残留応力を実験結果に裏付けされたモデルで予測することが可能になる。また、同じ温度で成形する場合でも、温度履歴を適切に選択することで成形残留ひずみを制御することが出来て、FRPの強度向上に役立てることが出来る。

研究成果の概要(英文)：Process-induced strain of reinforcement fibers of GFRP was measured by embedded FBG optical fiber sensors. The model specimens were manufactured using optical fibers and epoxy resin. From the experimental results, the strain was generated by thermal expansion, curing shrinkage and thermal shrinkage. It was found that the applied temperature condition affected thermal expansion, curing shrinkage and stiffness of resin. As a result, process-induced residual strain of reinforcement fibers was influenced by temperature profile during molding process. The FE analysis method to evaluate process-induced strain of reinforcements has been developed using a viscoelastic resin model and a kinetic model of cure reaction. Since the FEM results agreed well with the experimental results, it appeared that the analysis method was useful to estimate process-induced strain. In addition, the results showed that residual strain could be reduced by an appropriate temperature profile.

研究分野：複合材料工学

キーワード：複合材料 成形ひずみ 有限要素解析 光ファイバセンサ 強化繊維 硬化度 その場測定 FBGセンサ

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

樹脂をガラス繊維やカーボン繊維で強化した繊維強化プラスチック (FRP, Fiber Reinforced Plastics) は、軽量性、剛性、強度そして耐環境性に優れており、航空機をはじめとする様々な分野で構造材料として活用されている。FRP には、樹脂マトリクスの割れ、繊維/樹脂界面の剥離、積層層間の剥離など様々な破壊形態が内部で生じるため、運用中の破壊形態を明らかにすることが材料の信頼性を確保することに必要である。そのため、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 構造の破壊モードを明らかにし、また破壊進展と寿命を予測するための研究が数多く行われている。

熱硬化性 FRP 積層板の破壊の発生・進展においては、成形時に生じる成形誘起残留応力が重要なファクターの一つとなる。成形誘起残留応力は、繊維と樹脂の熱膨張係数のミスマッチと樹脂の硬化収縮によって生じ、成形時に材料に加える温度・圧力の影響を受けると考えられる。よって、適切な成形条件の選択により FRP の破壊特性を向上させることができると予想されるが、そのためには成形誘起残留応力を詳細に見積もる必要がある。FRP 積層板に生じる成形誘起残留応力に関しては、これまで成形後に生じた各層の残留応力が破壊進展に与える影響に着目した研究が多くなされてきたが、成形中に残留応力が生じるメカニズムを詳細に調べた研究は少ない。さらに、特に成形誘起残留応力が強く影響を与えるミクロな破壊挙動に着目するためには、各層の平均的な残留応力ではなく、繊維と樹脂を別々に見るミクロ領域での残留応力分布に注目すべきである。しかしながら、成形中に積層板に生じる成形誘起残留応力分布をミクロ領域で調べた例はほとんどない。

筆者はこれまで、FBG (Fiber Bragg Grating) 光ファイバひずみセンサ (図 1) を用いて樹脂の成形誘起ひずみをその場測定で観測する手法を構築してきた。FBG センサは周期的に屈折率が微小に変化するセンサ部を持ち、直径が $125\mu\text{m}$ と非常に細いために材料内部のひずみ測定に向いている。また、樹脂の成形誘起ひずみを予測するための有限要素解析モデルの提案を行ってきた。そこで、これをさらに発展させることにより、FRP 積層板に生じる成形誘起残留応力分布をミクロ領域で正確に予測する技術が開発できるのではないかという着想に至った。

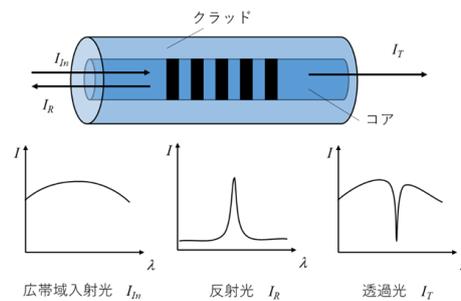


図 1 FBG センサ

2. 研究の目的

本研究では、FBG センサによるその場測定技術を基盤とした FRP 積層板の成形誘起残留応力分布の予測技術の確立を目的とする。そのために、まずは光ファイバを強化繊維とする GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) 材料の強化繊維に生じる成形誘起ひずみの測定手法を確立することを目的とする。次に、成形温度や圧力条件などの成形に関わる重要ファクターが強化繊維の成形誘起残留応力分布に与える影響をその場測定によって調べることで、ミクロ領域中の FRP 積層板の成形誘起残留応力発生メカニズムの解明とその有限要素法 (FEM, Finite Element Method) モデル化の手法を確立することを目的とする。最終的には、ミクロスケール解析からマルチスケール解析への拡張を目指す。

3. 研究の方法

(1) ミクロ領域中の積層板の成形誘起残留応力測定

本研究では、図 2 に示すように光ファイバの被覆を剥ぎ、3cm の長さに切断して、外枠 $4.5\text{cm} \times 3\text{cm}$ で内枠 $2.5\text{cm} \times 1\text{cm}$ に切った紙の上に光ファイバを 21 本一方向に並べてテープで固定した。それを 6 枚と、21 本中 1 本を FBG センサにしたものを 1 枚作り、シリコンゴム型の上に積層した。また、FBG センサと熱電対を埋め込んだ層は積層の 4 枚目とした。その後、並べた光ファイバにエポキシ樹脂 (主剤 jER 801N, 硬化剤 jER キュア 3080, 配合比は 100:45) を塗り付けて含浸させた。積層した GFRP に隙間などができないようにシリコンシートと錘を上から載せて固定した。最後に樹脂の硬化促進のためマルチオーブンの中で加熱処理を行った。様々な条件下で成形実験を行い、ひずみを取得した。

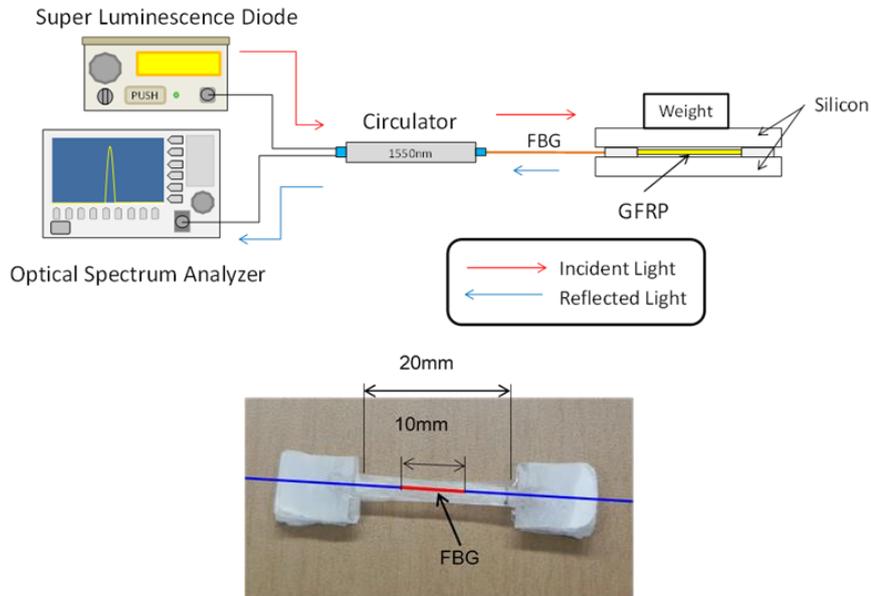


図2 成形試験片

(2)成形プロセス中のFRPの有限要素解析

GFRPを構成する樹脂を硬化度によって物性の変化する線形等方性粘弾性体として扱い、熱成形におけるによる熱変形および硬化収縮と硬化度分布を同時に計算する熱・構造・硬化度の連成有限要素解析コードの開発を行った。そして、図3に示すようなマイクロ構造のFEMモデルを作成し、成形中の有限要素解析を行った。

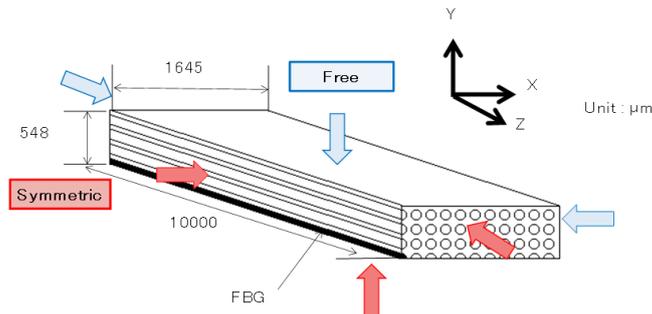


図3 FEMモデルの例

4. 研究成果

(1) ミクロ領域中の積層板の成形誘起残留応力測定

室温から100℃まで2.5℃/分、1℃/分の2通りの昇温速度を与えて成形時にひずみ測定実験を行った。100℃に達した後は3時間の間温度を維持し、その後室温まで自然冷却を行った。測定された結果を図4に示す。図より、温度が100℃に達するまでは熱膨張ひずみが現れ、温度が100℃に達した後は収縮ひずみが生じることが分かった。さらに自然冷却において熱収縮ひずみが生じた。加熱区間における熱ひずみは、昇温速度1℃/分の方がやや大きいとほぼ同等であった。一方で、収縮ひずみについては昇温速度1℃/分の方が小さくなることが分かった。この理由は、昇温速度が速いほど温度が100℃に到達したときの硬化度が小さく、定温区間で生じる硬化収縮量が大きくなるためである。冷却区間で生じる熱収縮ひずみについては、昇温速度の影響は表れないことが分かった。以上から、強化繊維に生じる最終的な硬化残留ひずみは、100℃に達したときの硬化度の影響により、昇温速度が速いほど大きくなることが明らかとなった。FRPに生じるマクロな成形ひずみを測定した研究は多く行われているが、このように強化繊維に生じるひずみを測定した例はほとんどない。

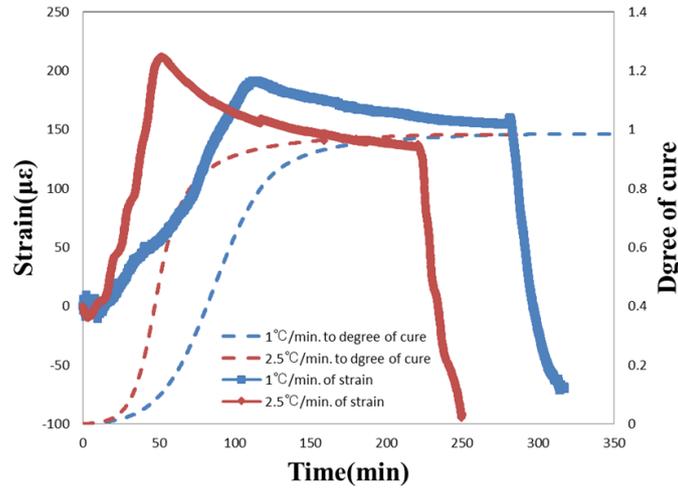


図4 GFRPの強化繊維に生じる成形ひずみ測定結果

(2) 成形プロセス中のFRPの有限要素解析

本研究では、GFRPを構成する樹脂を硬化によって物性の変化する線形等方性粘弾性体として扱い、構成方程式中のせん断剛性をプロニー級数で以下のように表した。

$$G(\alpha, t) = G_0 A_\alpha(\alpha) \left\{ 1 - \sum_{i=1}^N g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right\} \quad (1)$$

ここで G_0 は定常時のせん断剛性、 g_i はプロニー級数の係数、 τ_i は緩和時間であり、DMA (Dynamic Mechanical Analyzer) を用いた実験により求めた。また、 α は硬化度、 $A_\alpha(\alpha)$ は正規化長期弾性率の硬化度依存性を表す係数であり、本研究では剛性シフトファクタと呼び、剛性シフトファクタのみが硬化度に依存すると仮定した。剛性シフトファクタはレオメータにより測定した。温度時間換算則についてはアレニウスの式を用いた。また、本研究では Kamal モデルを用いて以下の式で硬化度を計算した。

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (2)$$

$$k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right)$$

硬化度計算に用いたパラメータ A_i, E_i, m, n は、樹脂の DSC (Differential Scanning Calorimetry) 測定による熱分析によって求めた。また、硬化反応で生じる収縮ひずみと、樹脂の熱膨張係数はディラトメータを用いて得た。以上の式を差分化し、汎用有限要素法ソフトウェア ABAQUS にユーザーサブルーチンとして組み込むことにより、応力およびひずみ分布、温度分布と硬化度分布を同時に計算することが可能となった。

実験と同じサイズの FEM モデルを作成し、熱—構造—硬化度の連成解析を行った。その結果を図5に示す。図では、実際に繊維が硬化によって拘束された後からのひずみを示している。図より、シミュレーション結果では1°C/分の熱ひずみがやや過小評価となっているものの、解析結果と実験結果が良く一致していることが分かる。また、加熱区間では温度が変化しているのも関わらずひずみがほぼ一定となることが、解析から分かる。この理由は2つあり、1つは樹脂の熱膨張が硬化収縮によりキャンセルされるため、もう1つは85%以下の硬化度では樹脂剛性が低く、樹脂から繊維へのひずみの伝達が低いためである。以上から、解析で用いたモデルの妥当性を実験により確認することができた。また、強化繊維に生じる成形誘起ひずみには、樹脂の熱膨張・収縮と硬化収縮、硬化度と温度で変化する樹脂弾性率が大きな役割を果たしていることが明らかとなった。以上のような強化繊維に生じる成形ひずみに関して、マイクロ領域でのシミュレーション結果と実際に測定された結果を比較議論した研究は、これまではほとんど見られなかった。

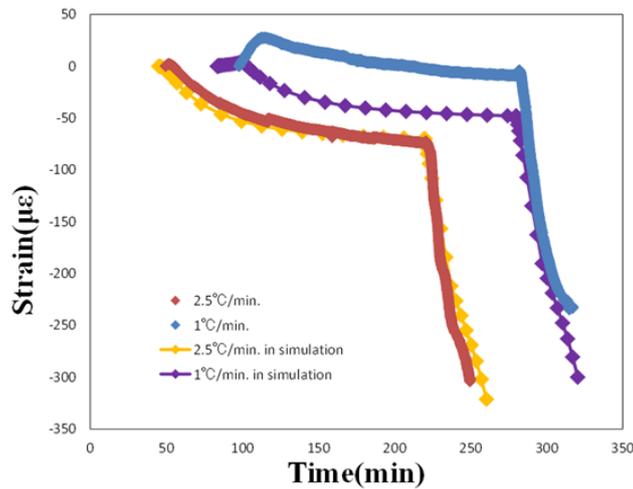


図5 GFRPの強化繊維に生じる成形ひずみ解析および測定結果

(3)成形温度条件が与える影響

2段階昇温パターンにおけるGFRPの強化繊維に生じる硬化収縮ひずみ履歴の解析結果を図6(左)に示す。なお、図6(右)が温度パターンであり、Case AとBは共に60°Cの定温区間を、Case Cは80°Cの定温区間を持つ。Case AとCの結果から、保持温度が成形ひずみ履歴に影響を与えるが、残留ひずみには影響を与えないことが分かる。この理由は、硬化の早いCase CはCase Aよりも100°Cの定温区間で生じる硬化収縮は小さいが、第1定温区間でも硬化収縮が生じ、また第1定温区間から第2定温区間で生じる熱膨張がCase Aよりも小さいためである。その結果として、冷却開始までに、生じた成形ひずみはCase AとCではほぼ同じものとなった。一方で、Case AとBの結果からは、第1定温区間の時間が増加すると残留ひずみが小さくなることが分かった。この理由は、第1定温区間終了時の硬化度が大きいと第1定温区間から第2定温区間で生じる熱膨張が大きくなり、最終的な残留ひずみを減らすためである。

以上の結果は、成形温度パターンによって強化繊維に生じる残留応力の制御が可能であることを示唆しており、工業的にも有意義な結果と思われる。

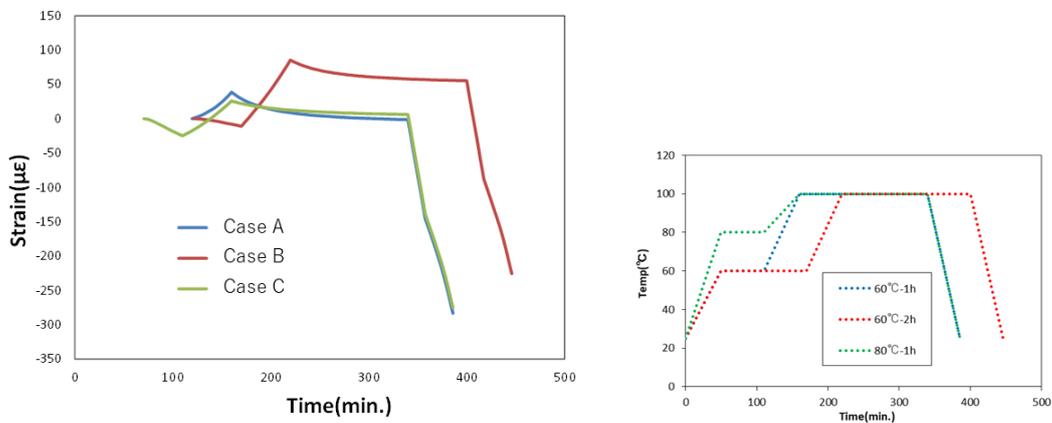


図6 GFRPの強化繊維に生じる成形ひずみ解析結果(2段階昇温)

(4)成形圧力条件が与える影響

硬化度が0.69を超えると同時に繊維と垂直方向に1MPa, 3MPa, 5MPaの圧力を加えたのち、自然冷却開始時に圧力を取り除く条件を与えてシミュレーションを行った。このときの解析結果を図7に示す。図より、圧力を加えている区間では圧力に比例したひずみが生じるが、圧力を取り除くそのひずみはほとんど取り除かれることが分かる。これは、圧力を加え続けても、脱型後の繊維の残留ひずみへの影響はほとんどないことを示しており、工業的にも有意義な結果と思われる。

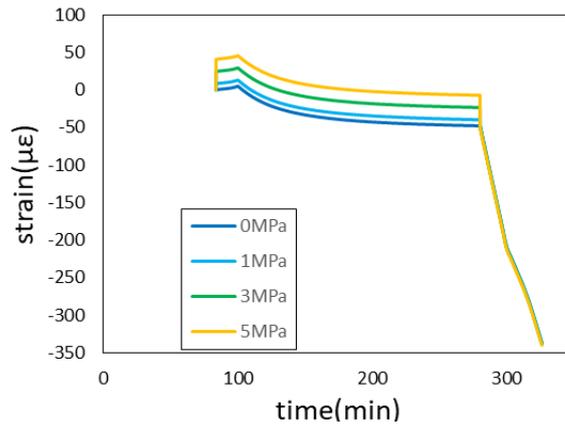


図 7 加圧成形時の GFRP の強化繊維に生じる成形ひずみ解析結果

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 5 件）

- ① Akihiro Kawakami, Heiya Yamasaki Tatsuro Kosaka, Kazuhiro Kusukawa, Evaluation of Influence of Molding Conditions on Process-Induced Strain of Reinforcements of GFRP by FEM, 12th Canada-Japan Workshop on Composites, Takayama, 2018
- ② 川上明哲, 山崎平弥, 高坂達郎, 楠川量啓, 成形条件が FRP 強化繊維の成形ひずみに与える影響, 日本材料学会 第 67 期通常総会・学術講演会, 高知, 2018
- ③ 川上明哲, 山崎平弥, 高坂達郎, 楠川量啓, GFRP 強化繊維の成形誘起ひずみのその場測定, 日本機械学会 中国四国学生会 第 48 回学生員卒業研究発表講演会, 徳島, 2018
- ④ 山崎平弥, 高坂達郎, 楠川量啓, 成形条件が FRP の成形誘起ひずみに与える影響, 日本機械学会 中国四国支部 第 56 期総会・講演会, 徳島, 2018
- ⑤ Heiya Yamasaki, Tatsuro Kosaka, Kazuhiro Kusukawa, FEM SIMULATION AND EXPERIMENTAL EVALUATIONS USING AN FBG SENSOR OF PROCESS-INDUCED STRAIN OF REINFORCEMENTS OF FRP, JSME/ASME 2017 International Conference on Materials and Processing, ICMP2017, Los Angeles, USA, 2017

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：山崎 平弥

ローマ字氏名：YAMASAKI, heiya

研究協力者氏名：川上 明哲

ローマ字氏名：KAWAKAMI, akihiro

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。