

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22560781

研究課題名（和文）

刺しゅう技術を応用した多機能複合材に関する研究

研究課題名（英文）

Study on Multifunctional Composites Applying Embroidery Technique

研究代表者

池田 忠繁（IKEDA TADASHIGE）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40273271

研究成果の概要（和文）：

繊維強化プラスチック複合材の対象とするいくつかの性能または機能が最適となるように、有限要素法を最適化法に組み込んだプログラムにより最適設計を行い、刺しゅう技術を応用して曲線状に繊維を配置し、真空樹脂含浸法により多機能複合材を製作する手法の確立を行った。刺しゅう糸の影響や刺しゅう角度の変化による繊維密度や板厚の変化などを考慮した材料定数取得法を提案し、解析精度を向上した。また、繊維または基材にスマート材を用いたより多機能な複合材の製作法の検討および性能評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

A method to process multifunctional fiber reinforced plastic composites was established, in which objective properties or functions of the composites were optimized. Fiber paths were calculated by using an optimization method with finite element analysis, fibers were stitched to a substrate along the fiber paths with an embroidery machine, and that was impregnated with resin by the vacuum assisted resin transfer molding method. Analysis accuracy could be improved by evaluating change in material properties due to embroidery effects such as eyes of an embroidery needle and variation of fiber fraction and thickness due to variation of the fiber orientation. Moreover, fabrication methods of more multifunctional composites by using smart fibers or smart substrates were discussed, and performances of examples of such composites were evaluated.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：構造・材料、スマート構造物、複合材料・物性、解析・評価、構造・機能材料、航空宇宙工学、機械力学・制御

1. 研究開始当初の背景

繊維強化プラスチック複合材は、図1に示すように、繊維の配向角が10度程度変化するとその剛性や強度が大きく変化する。従って、複合材構造要素の使用環境における応力

場に最適な配向角となるように繊維配置ができれば、複合材の性能を最大限に利用できる。応力場は、解析的計算または有限要素法などにより、定性的または定量的に予測することができるので、それに従って、一方向織

維材や平織などの織物材を様々な角度で何層か積層することにより、剛性、強度の性質を向上することは可能である。

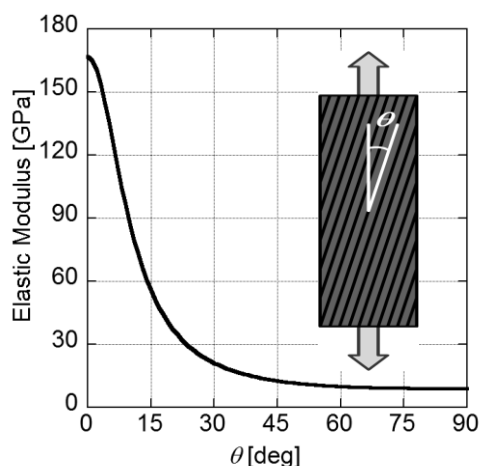


図1. 繊維方向と荷重方向の剛性の関係



図2. 刺しゅう機によるプリフォームの製作

できるだけ少ない積層で、さらなる剛性、強度性能を向上するために、図2に示すような刺しゅう機を使って繊維束を自由に配置する方法が10年程前から研究されている[1]。この方法は刺しゅうにおけるコーディングと呼ばれる手法（ミシンによりひも（コード）を基材の布に留め付けていく手法）を応用している。

複合材においては、ひもを強化繊維束、基材を樹脂フィルムや一方向繊維材または織物材とし、強化繊維束を指定された角度で基材全面または一部に留め付けていく。その後、基材の樹脂フィルムを溶かしたり、樹脂を繊維に含浸させたりして固めることで、複合材を製作する。

従来の研究では、座屈強度の向上、穴あき板の強度向上、切り欠き板の強度向上など静強度性能向上に関する研究が主に行われている[1, 2]。また、スティッチングと呼ばれる、単に糸で繊維層間を縫い付ける方法により、層間剥離を抑制する研究も行われている

[3]。

当該研究者らはこれまでに、スマート材料・構造システムに関する研究を行っており、形状記憶合金や圧電材料などの構成モデル、それらを応用した形状制御、振動制御に関する研究を行ってきた[4-6]。また、構造最適化やシステム同定に関する研究も行っている[7, 8]。複合材に関しては、真空樹脂含浸法 (VaRTM: Vacuum assisted Resin Transfer Molding) による複合材の製作と基礎材料試験などを行ってきた[9]。VaRTMは型の上に強化繊維を積層し、その上から真空カバーを掛け真空に引き、その後、樹脂を含浸させ、複合材を製作する方法で、予め繊維に樹脂を含浸させて半硬化状態にしたプリプレグやプリプレグを高温高压で硬化させるオートクレーブなど高価な材料や設備を用いないため、低コストな複合材製造法として注目されている。

2. 研究の目的

刺しゅう技術を繊維強化プラスチック複合材製作に応用することで、使用環境下での振動制御機能等の性能を向上することを目的とする。有限要素法による設計手法と複合材製作技術を確立し、計算と試験により、提案する手法の有効性を実証する。

これまでの刺しゅう技術の応用に関する研究では、静的強度の向上が主であった。これに対し、動的（振動）性能向上、および、スマート材料を用いたより多機能な複合材による制御性能向上も目指す。

3. 研究の方法

繊維強化プラスチック複合材の繊維最適配置に関し、最適化法と有限要素法を組み合わせ設計、刺しゅう技術による繊維の最適配置、VaRTMによる複合材製作手法を確立する。また、数値計算と実験により、提案手法の有効性を実証するとともに、解析モデルと実際の試験片の違いにより生ずる誤差評価を行い、課題の抽出、その解決を行う。

炭素繊維平織材を基材とし、その上に炭素繊維束を留め付けることを考える。最適化の対象として、静的性能最適化例として片持ち板の曲げねじり剛性の最大化設計を、動的性能最適化例として曲げと振りの固有振動数の差の最大化設計をすることを考える。

まず、有限要素法解析などにより最適な繊維の配置角度を見つける。有限要素内は一定角度に繊維束を配置し、各種最適化法を用いて、繊維束の最適な角度分布を見つける。それら複合材の性能を計算し、一方向に繊維を配置した複合材の性能と比較し、最適配置の有効性を実証する。

次に、炭素繊維平織材の基材に炭素繊維束を所定の曲線状に留め付け、VaRTMにより、

試験片を製作する。計算と同様、最適配置した複合材と一方向に繊維を配置した複合材の性能を比較し、最適配置の有効性を実証する。また、計算結果との違いを評価し、計算モデル、手法の改良等により精度を向上する。

また、刺しゅうした試験片の引張試験等の基礎試験により、刺しゅうが材料の性質に与える影響を明らかにする。

形状記憶ポリマー、形状記憶合金などスマート材料を用いた振動、形状制御機能等のさらなる多機能化について検討し、その可能性と課題を抽出する。

4. 研究成果

(1) 平成 22 年度 有限要素法プログラムを最適化プログラムに組み込んだ最適設計プログラムの作成、複合材への刺しゅう、および、VaRTM による複合材製作の基礎技術の確立を行った。また、その方法を用いて、静的な問題を対象として、最適繊維配置の有効性を評価した。

まず、最適繊維配置方向を見つけるために汎用有限要素法プログラムを組み込んだ 1 次導関数法などの最適化法プログラムを作成した。ここで、対象とする構造を仮想的にいくつかに分割した要素内の繊維の方向を決定した。次に、この最適繊維方向から、繊維束を縫い付ける連続的な曲線を計算するプログラムを作成した。その曲線を刺しゅう機に入力し、炭素繊維束を炭素繊維平織材に縫い付けたプリフォームを製作し、VaRTM によりプリフォームに樹脂を含浸させ複合材を製作した。

提案した構造最適化法の効果を実証するため、その最適化手法を集中荷重を受ける片持ち長方形板の曲げねじり剛性を最大にする問題に適用した。最適繊維配置の片持ち板の曲げねじり剛性は、長手方向に繊維束を配置した片持ち板、長手方向と 45 度方向に繊維束を配置した片持ち板の曲げねじり剛性と比較した。

数値解析により、1 次導関数法、粒子群最適化法、および、主応力方向への繊維配置の 3 種類の最適化法を比較した。繊維の最適配置と長手方向、45 度方向配置との比較では、最適配置の板の剛性が最大となった。どの最適化法もほぼ同じ結果が得られたが、初期値依存性や計算時間を考慮すると、この問題の場合は、主応力方向への繊維配置が、より利用しやすいことが分かった。

前述の方法により、試験片を製作し、実験による実証を行った。その結果、計算と実験で、定性的には同様な結果が得られたが、剛性の値が大きく異なった。この違いは、刺しゅうにより繊維束内、繊維束間に糸が通ることによる材料定数の変化や刺しゅうする繊維方向により板厚が変化することなどが考

えられた。

(2) 平成 23 年度 刺しゅうにより複合材の剛性や強度が低下することは、刺しゅう針が繊維束を貫通することで、繊維間に隙間が生じることや繊維自体が傷つくことが原因と考えられるので、針や糸の種類、縫い間隔の違いに対する、剛性、強度の変化を調べた。また、前年度提案した最適化手法を動的な問題に応用した。

炭素繊維平織材にチドリステッチで糸を刺しゅうし、それにエポキシ樹脂を含浸させることで試験材料を製作した。直径 0.80mm の針でポリエステル糸をチドリステッチ長さ 3mm、ステッチ間隔 4mm で刺しゅうした試験片を基準とし、刺しゅう針の直径を 0.66mm から 1.05mm、糸の種類をポリエステル、細いポリエステル、綿、ナイロン、ケブラー、チドリステッチ長さを 3、6、12mm、ステッチ間隔を 2、4、8mm に変化させた試験片も製作し、圧縮、引張強度を調べた。その結果、試験したパラメータの範囲では、直径 0.9mm 以下の針では繊維に与える損傷は少なく複合材強度の低下は小さいこと、糸の種類の影響よりも直径の影響が大きく、細い糸を用いた方が複合材強度が高いこと、チドリステッチ長さは 12mm、ステッチ間隔は 8mm で強度が最大値となることなどが分かった。これらの結果は、今後の繊維束最適配置設計や層間はく離を防ぐためのステッチに応用できると考える。

また、前年度構築した最適設計手法を、固有振動数が目的に対して最適になるように繊維束を配置する動的な問題へ応用した。ここでは、片持ち長方形板に対し、1 次と 2 次の固有振動数の差が最大となるように目的関数を設定し、繊維の最適配置を求め、数値計算と実験によりその効果を実証した。

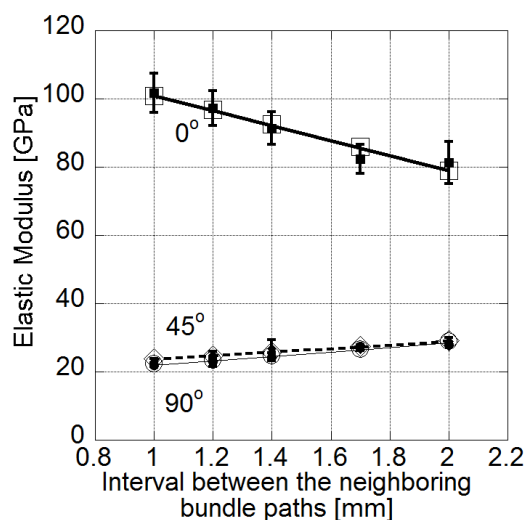


図 3. 繊維間隔に対する剛性変化

(3) 平成 24 年度 刺しゅう針や糸、繊維配置方向により変化した材料定数を取得する方法を提案した。その材料定数を動的最適化問題へ応用し、変化する材料定数を導入する効果を実証した。また、スマート材料に刺しゅう技術を応用した、より多機能な複合材の製法を検討した。

刺しゅうにより繊維束を最適配置する場合、繊維の配向角により繊維間隔が変化し、刺しゅう層の材料定数が変化する。また、刺しゅう糸も材料定数に影響を及ぼす。従って、繊維束の最適配置を決定するためには、繊維束間隔の関数となる刺しゅう層の材料定数、刺しゅう糸を考慮した基材の材料定数などを取得する必要がある。そこで、いくつかの間隔で繊維束を基材に刺しゅうし成形した複合材、繊維束を配置しない複合材を製作し、引張試験により取得したそれらの材料定数と古典積層理論を用いて、刺しゅう層、基材各層の材料定数を計算した。得られた各層の材料定数を用いて、再び積層板の材料定数を予測したところ、実験値と良く一致した。図 3 に繊維間隔による弾性定数の変化の様子を示す。黒塗り記号は計測値の平均値、エラーバーはその標準偏差、直線は計測値の平均値の近似直線であり、弾性定数が繊維間隔の 1 次関数で近似できることが分かる。白抜き記号は、古典積層板理論により推定した各層の弾性定数から再構築した積層板の弾性定数であり、推定した弾性定数が妥当であることが分かる。

表 1. 繊維配向角に対する各材料定数による計算値と実験値の 1 次と 2 次の固有振動数の比較 [Hz]

配向角		1mm	2mm	VAR	EXP
0°	1st	164	110	110	101
	2nd	256	204	204	184
45°	1st	62	51	58	52
	2nd	267	227	252	224
60°	1st	49	42	49	54
	2nd	226	198	226	236
OPT	1st	95	73	80	72
	2nd	297	242	260	230

また、繊維最適配置による片持板の 1 次、2 次の固有振動数制御を行い、この方法の有効性を示した。ここでは、1 次の固有振動数を 80Hz 以上、2 次の固有振動数を 1 次の固有振動数から出来るだけ離す問題を設定した。表 1 に計算結果と実験結果を示す。列の「1mm」、「2mm」はそれぞれ繊維間隔が「1mm」、「2mm」の場合の材料定数を用いた計算結果、「VAR」は繊維間隔に依存し変化する材料定数を用いた計算結果、「EXP」は実験結果を表し、行の「0°」、「45°」、「60°」、「OPT」は、刺しゅう層でそれぞれ 0 度一定、45 度一定、60 度一

定、最適配置となるように繊維を縫い付けた場合の結果である。この表から、材料定数が繊維間隔により変化する事で計算結果が大きく変化する事や最適配置により目的に最適な結果が得られることが分かる。

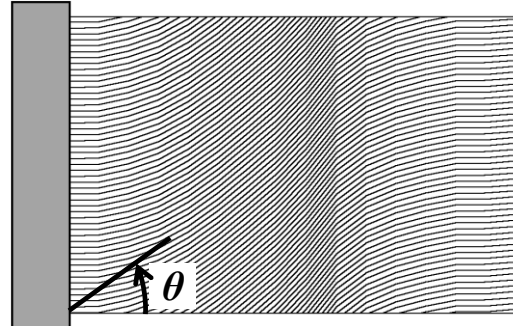


図 4. 固有振動数制御に対する最適繊維経路

図 4 に最適化計算により求めた繊維経路図を示す。繊維方向が、固定端付近で約 0 度、中央付近で約 50 度となっておりそれらが主に、1 次の曲げの固有振動数と 2 次のねじりの固有振動数を目的に合うよう最適化していると考えられる。また、「VAR」と「EXP」の比較から、積層板の製作誤差等により計算値と実験値の固有振動数に 10%程度の差が生じることが分かった。従って、最適設計の際は、誤差余裕を考慮すべきである。

形状記憶ポリマーの機能をある程度維持したままで剛性を向上するため、形状記憶ポリマーフィルムに炭素繊維束を縫い付け、熱プレス機で一体化した板を製作した。引張加熱試験により、7%程度の変形が回復可能であることが分かった。また、炭素繊維平織材上にチューブを縫い付け、その後樹脂を含浸させた板を製作し、それらのチューブに予歪みを与えた形状記憶合金ワイヤーを挿入し固定することで、加熱により変形する複合材を試作した。ここで用いた樹脂のガラス転移温度と形状記憶合金の相変態温度が比較的近かったため、加熱後冷却しても、変形形状を保持したままであった。ガラス転移温度の高い樹脂を用いることで、冷却により形状が回復すると考える。

参考文献

- [1] P. Mattheij et al., J. Reinforced Plastics and Composites, 17(9) (1998), 774-786.
- [2] K. Hazra et al., Proc. of 17th Int. Conf. Composite Mater., (2009), D11.5.
- [3] A. Yoshimura et al., Adv. Composite Mater., 16(3) (2007), 223-244.
- [4] T. Ikeda, R. Samikkannu, T. Ueda, J. Intel. Mater. Syst. Struct., 21 (2010), 453-468.

[5] 池田, 吉田, 上田, 機論 A, 75(749) (2009), 41-48.

[6] T. Ikeda, J. Intel. Mater. Syst. Struct., 19 (2008), 533-540.

[7] A. Senba, H. Furuya, Mech. Syst. Signal Processing, 22 (2008), 1-14.

[8] A. Senba, K. Ohashi, H. Furuya, AIAA J., 46(7) (2008), 1791-1802.

[9] 上田, 尾崎, 池田, 青木, 第 51 回構造強度に関する講演会講演集, (2009), 184-186.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

- ① T. Nishida, T. Ikeda, A. Senba, Optimal Fiber Placement Including Effects of Embroidery, 19th International Conference on Composite Materials 2013. 7. 28-8. 2, Montreal, Canada, 発表確定.
- ② 西田竜也, 池田忠繁, 仙場淳彦, 上田哲彦, 刺繍技術を用いた繊維配置による CFRP の固有振動数制御, 第 54 回構造強度に関する講演会, 2012. 8. 1-3, 熊本市, 講演集 pp. 140-142 (JSASS-2012-3050).
- ③ 田中健介, 池田忠繁, 上田哲彦, 仙場淳彦, CFRP の刺繍による繊維最適配置において刺繍針と糸が強度に与える影響, 第 48 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, 2011. 11. 25, 神戸市, 講演集 A45(3p).
- ④ K. Oka, T. Ikeda, A. Senba, T. Ueda, Design of CFRP with Fibers Placed by Using an Embroidery Machine, 18th International Conference on Composite Materials, 2011. 8. 21-26, Jeju Island, Korea, 講演集 IF1069(5p).
- ⑤ 岡功介, 池田忠繁, 仙場淳彦, 上田哲彦, “刺繍機を用いたプリフォーム製作時における CFRP の繊維配置最適化”, 第 47 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会, 2010. 11. 27, 名古屋市, 講演集 B2(4p).
- ⑥ 池田忠繁, 勝間田剛, 上田哲彦, 刺繍による CFRP の最適配置に関する基礎的研究, 第 52 回構造強度に関する講演会, 2010. 7. 21-23, 鳥取市, 講演集 pp. 233-235 (JSASS-2010-3082).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池田 忠繁 (IKEDA TADASHIGE)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40273271

(2) 研究分担者

上田 哲彦 (UEDA TETSUHIKO)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10358682

(H22~H23)

仙場 淳彦 (SENBA ATSUHIKO)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60432019

(3) 連携研究者なし