

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420811

研究課題名(和文) 刺しゅう技術を用いた構造繊維・機能繊維同時最適配置に関する研究

研究課題名(英文) Study on simultaneous optimal placement of structural fibers and functional fibers using embroidery technology

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：設定した目的に対して炭素繊維等の構造要素となる繊維と形状記憶合金(SMA)や圧電材料等の機能要素となる繊維を最適に配置したスマート複合材を提案し、刺しゅう技術を用いてその実現を行った。構造繊維の最適配置計算に際し、古典積層理論を用いて、構造繊維層の材料定数を繊維間隔の関数として取得した。SMA繊維により複合材構造の形状を自在に変化させる場合、SMA繊維は樹脂チューブに挿入して構造繊維層に縫い付け、真空樹脂含浸法でスマート複合材を製作した。SMA繊維に通電することによりスマート複合材が動作することを確認した。また、振動、形状制御に対して機能要素として圧電素子を用いる場合の最適配置も検討した。

研究成果の概要(英文)：Smart composites with functional fibers and structural fibers optimally placed were created. If the structural fibers can be placed along a desired curved path, fiber reinforced plastic (FRP) structures can be designed more sophisticatedly. To this end a tailored fiber placement method using embroidery machines has been studied. To add functions to the FRP structures, shape memory alloy fibers or piezo-ceramic fibers were placed as the functional fibers. These functional fibers were placed locally. For shape or vibration control of the smart composites, paths of the structural fibers and the functional fibers were simultaneously optimized. Fundamental properties of these smart composites were examined analytically and experimentally, and the feasibility of the proposed creation method was shown.

研究分野：航空宇宙工学

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

1. 研究開始当初の背景

繊維強化プラスチック(FRP)は、図1に示すように繊維方向の変化に対して剛性や強度が大きく変化する。そのため、目的(通常、剛性や強度に対する要求)に応じて、繊維方向を層毎に変えながら積層した積層板が使用される。もし、層内で繊維方向を局所的に変化させながら繊維を配置できれば、複合材のさらなる高性能化が可能となる。そこで、目的に対して最適な曲線形状にプリプレグテープを押し付けていく方法[1]や刺しゅう機により基材に繊維束を縫い付けていく方法[2]が研究されている。前者は、基本的に樹脂を繊維に含浸させて半ば硬化した状態のプリプレグを用いており、材料自体やその保管設備、硬化用のオートクレーブに大きな費用がかかる。一方、後者の材料は繊維束と液体状の樹脂なので、材料は比較的安価で保管も容易であり、成形も真空樹脂含浸法(VaRTM法)等を用いて安価に行うことができる。また、繊維束を基材に縫い付けるので、積層間を横断する糸が入ることになり、層間剥離を抑えることも期待される。

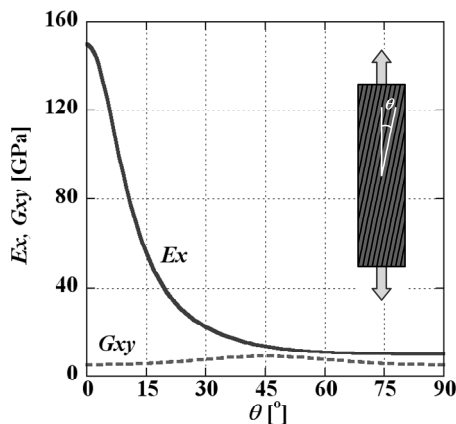


図1. 繊維方向 θ に対する縦剛性 E_x と剪断剛性 G_{xy} の変化の例

研究代表者の池田は、スマート材料の構成モデルの提案[3]やスマート構造の応用[4]、分担者の仙場は、構造や制御法の最適化[5]やシステム同定[6]を行ってきた。これらの成果や経験を生かして、平成 22~24 年度基盤研究(C)「刺しゅう技術を応用した多機能複合材に関する研究」において、有限要素法と最適化法を組み合わせた最適繊維配置の設計と VaRTM 法による複合材製作手法を確立し、曲げねじり剛性制御や振動数制御(図2)を行い、その有効性を示した[7-9]。また、針の貫通孔や積層間を横断する糸の影響を含んだ材料定数の取得法の提案[9]、成形した複合材の強度と剛性に対する針の貫通孔や縫い付け間隔の影響も調べている[10]。

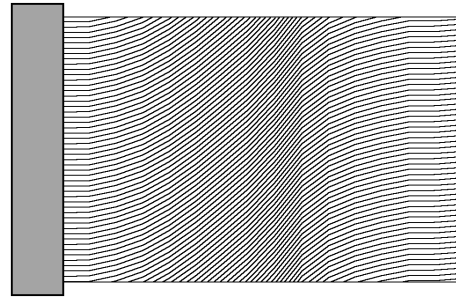


図2. 片持ち板で曲げ剛性を維持しながら1次と2次の固有振動数の差が最大になるような繊維束経路[9]

2. 研究の目的

これまでの研究をさらに発展させ、炭素繊維やガラス繊維等の構造要素となる繊維だけでなく、形状記憶合金(SMA)や圧電材料等の機能要素となる繊維や素子を組み合わせたスマート複合材の創製を提案する。このことにより、複合材のさらなる多機能化、軽量化が期待でき、複合材の用途拡大、構造の軽量化によるエネルギー効率の向上が期待できる。

そこで、本研究課題では、構造繊維と機能繊維(素子)の同時最適配置手法の提案およびその実証を行う。また、これまで、平板(開断面)構造を対象にしてきたが、実構造では閉断面構造であることも多いので、閉断面構造を対象とする繊維最適配置設計法の検討も行う。

3. 研究の方法

まず、FRPと機能素子から構成される複合材において、全体の剛性を維持しつつ、ある形状に変形する、または、ある振動の減衰性能を高くするというような目的を設定し、その目的に対して、構造繊維と機能素子の最適配置を計算する方法を提案する。SMA繊維を形状制御に利用する場合は、一般的には予ひずみが必要となるが、縫い付けた後に樹脂で硬化させると、樹脂硬化のための加熱や硬化中の発熱でSMA繊維が形状を回復しようとし、SMA繊維の位置がずれるかSMA繊維が塑性変形し、形状回復機能を十分に発揮できなくなる可能性があるため、その配置法を検討する。圧電材料(圧電セラミック)繊維に関しては、圧電セラミック繊維単体は脆いので、長さ数十mmの直線状の圧電セラミック繊維と櫛形電極を樹脂フィルムでパックした素子(MFC [11])を最適配向となるように成形後の板に接着することとする。

提案する計算手法で求めた最適繊維経路に沿って、織物材等の基材の上に構造繊維束やSMA繊維を刺しゅう機を用いて縫い付け、VaRTM法等により樹脂を含浸させ、複合材を製作する。

ここで、適切な材料定数の取得が重要であるが、先行研究で提案した方法[9]に基づき、構造繊維層の厚さや材料定数を古典積層理

論を用いて、繊維束間隔の関数で表す。

また、閉断面構造を対象とする繊維最適配置設計法に関しては、継ぎ目の位置、形状等について、剛性の観点から検討する。

4. 研究成果

機能繊維として SMA を構造繊維として炭素繊維を選択し、例題として、片持ち板の特定の変位を最大化するような構造繊維と機能繊維の最適配置法について検討を行った。

まず、SMA 繊維配置の実現方法として、図 3 に示すように、炭素繊維層の上に柔軟な樹脂チューブを縫い付け、VaRTM 法でエポキシ樹脂を炭素繊維に含浸させ、複合材板の製作後に予歪みを与えた SMA 繊維をチューブに通す方法を試みた。製作したスマート複合材において、SMA 繊維に通電することで SMA 繊維が収縮し、スマート複合材板が曲げ変形することを確認した。

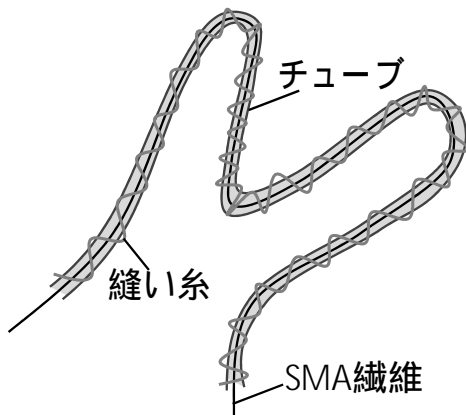
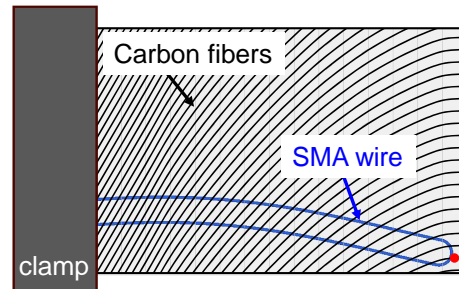


図 3. チューブを用いた SMA 繊維の配置法

予歪みを与えた SMA 繊維を用いると、複合材板に初期変形が生ずるので、SMA 繊維は二方向 SMA (TWSMA) 繊維に変更し、炭素繊維平織材上に炭素繊維束とチューブに入れた TWSMA 繊維を最適配置する積層構成とした。有限要素法に基づき、TWSMA 繊維は梁要素と仮定し、TWSMA 繊維の駆動は熱収縮によって模擬した。炭素繊維束の配置は位置により変化する繊維角度で、局所的な TWSMA 繊維の配置は三角関数で表現し、遺伝的アルゴリズムを用いて、同時に最適となる配置を計算した。得られた結果に基づき炭素繊維束とチューブに入れた TWSMA 繊維を刺しゅう機で配置し、VaRTM 法でエポキシ樹脂を含浸させ、スマート複合材板を製作した。TWSMA への電流を切り切ることで、スマート複合材板が繰り返し変形することを確認した。図 4(a)、(b)にそれぞれ、SMA 繊維に通電している時に、図 4(a)に示した赤点の位置の変位が最大となるような炭素繊維束の配向角と SMA 繊維の経路の最適計算結果と、計算結果に基づくスマート複合材板の試作例を示す[12]。



(a) 最適計算により求めた炭素繊維束の配向角と SMA 繊維の経路



(b) スマート複合材板の試作例

図 4. SMA 繊維駆動時に、(a)に示した赤点の位置の変位を最大とするような炭素繊維束と SMA 繊維の最適配置の計算結果と計算結果に基づくスマート複合材板の試作例 [12]

TWSMA 繊維の最適局所配置方法を応用し、構造繊維により部分補強する際の最適配置法の検討も行った。ガラスクロス材上に炭素繊維束を局所配置し、ナイロンフィルムで挟み、被補強材へ熱プレス機で融着する手法を提案した。最適化の結果、最適な部分補強位置は、最大応力を通る主応力方向となることを解析と実験により示した。

構造繊維として炭素繊維、機能素子として異方特性を有する MFC を用い、振動制御および形状制御に対する最適配置問題も検討した。母構造は炭素繊維束を最適配置した FRP の片持ち板とし、その表面に複数枚の MFC を接着することを想定した。MFC の配置に関しては、位置と角度を変数とし、複数枚接着する場合はそれらの重なりも許容すると仮定した。振動制御に関しては、直接速度フィードバック制御法を用いることで、異方特性を持つ速度比例型の減衰要素として扱い、剛性を維持しつつ特定次数の減衰を増大させる場合について、構造繊維束および MFC の最適配置の計算を行った。この場合、解析と実験との間に大きな誤差が生じたが、フィルタ等の周辺システムの特性も考慮することで、改善されると考える。

閉断面部材に対する繊維最適配置を実現するために、継ぎ目の位置に対する検討も行った。箱形梁の捩り問題に対する最適な繊維配向角は軸方向に対して約 45 度方向となる。そこで、その方向へ繊維束を配置するとともに、0 度方向に継ぎ目を配置する場合と、織

縦方向に沿って継ぎ目を配置する場合とで
張り剛性を比較した。数値解析では、継ぎ目
で隙間ができ、樹脂の割合が多くなり剛性が
低下すると仮定した。その結果、0度方向に
継ぎ目を配置する方法で性能がより良くなる
結果が得られた。継ぎ目の長さが張り剛性
に影響を与えたためと考えられる。

<引用文献>

B. F. Tatting, Design and manufacture of
elastically tailored tow place plates、
NASA/CR-2002-211919

K. Hazra, M. Saverymuthapulle, M.
Hawthorne, D. L. Stewart, P. Weaver, K.
Potter、Investigation of mechanical
properties of tow steered CFRP panels、
Proceedings of the 17th International
Conference on Composite Materials
(ICCM17)、2009、D11.5 (11p)

池田忠繁、スマート材料の構成方程式、
日本航空宇宙学会誌、58(678)、2010、207
- 213

池田忠繁、スマートポルテックスジェネ
レーター - 飛行機の渦を自ら制御する
-、日本機械学会誌、114(1111)、2011、
430 - 431

A. Senba and H. Furuya、Optimal
configuration for the self-identification of a
two-dimensional variable geometry truss、
Structural and Multidisciplinary
Optimization、40、2010、453 - 465

A. Senba and H. Furuya、Recursive
self-identification and its transient response
analysis with extended Kalman filter、
Journal of Aerospace Computing、
Information, and Communication、9(2)、
2012、45 - 57

K. Oka, T. Ikeda, A. Senba, and T. Ueda、
Design of CFRP with fibers placed by using
an embroidery machine、Proceedings of the
18th International Conference on Composite
Materials (ICCM18)、2011、Paper ID:
IF1069 (5p)

岡功介、池田忠繁、仙場淳彦、刺繍機に
よる CFRP ドライプリフォームの最適
繊維配置、日本複合材料学会誌、40(1)、
2014、10 - 16

T. Nishida, T. Ikeda, A. Senba, Optimal
fiber placement including effects of
embroidery、Proceedings of the 19th
International Conference on Composite
Materials (ICCM19)、2013、3865 - 3872

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
部合同秋期大会講演論文集、2011、
A45(3p)

Smart Material,
[http://www.smart-material.com/MFC-produ
ct-main.html](http://www.smart-material.com/MFC-product-main.html)

N. Torii, K. Oka, T. Ikeda, Creation of smart
composites using an embroidery machine、
Proceedings of SPIE's the 23rd Annual
International Symposium on Smart
Structures and Materials + Nondestructive
Evaluation and Health Monitoring、9800、
2016、98001C (8p)

5 . 主な発表論文等

[学会発表](計9件)

池田忠繁、鳥居伸洋、岡功介、西原寅史、
浜崎隼、石上卓、刺しゅう技術を応用し
た多機能材の開発、日本機械学会 2016
年度年次大会、2016.9.11-14、九州大学伊
都キャンパス(福岡市)

石上卓、鳥居伸洋、岡功介、池田忠繁、
補強繊維と機能素子が最適配置された
スマート構造材、第 58 回構造強度に関
する講演会、2016.8.3-5、北海道大学(札
幌市)

M. Ishigami, N. Torii, K. Oka, T. Ikeda、
Multifunctional composite with
reinforcement fibers and functional fibers
optimally placed、The 13th International
Conference on Flow Processes in
Composite Materials、2016.7.6-9、Kyoto
Institute of Technology(京都市)

T. Ikeda、K. Oka、T. Nishida、
Eigen-frequency control design of CFRP
structures using an embroidery machine、
First International Symposium on Flutter
and its Application (ISFA2016)、
2016.5.15-17、Hotel Mielparque Tokyo(東
京都)

N. Torii, K. Oka, T. Ikeda, Creation of smart
composites using an embroidery machine、
SPIE's 23rd Annual International
Symposium on Smart Structures and
Materials + Nondestructive Evaluation and
Health Monitoring、2016.3.20-24、Las
Vegas (USA)

鳥居伸洋、岡功介、池田忠繁、形状記憶

合金を縫い付けた多機能複合材に関する研究、日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会、2016.3.17-18、愛知工業大学（豊田市）

西原寅史、池田忠繁、刺繍機を用いて連続繊維で部分補強を行った CFRTP に関する研究、日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会、2016.3.17-18、愛知工業大学（豊田市）

西原寅史、池田忠繁、刺繍機を用いた CFRTP の部分補強、第 52 回関西中部支部合同秋期大会論文集、2015.11.7、大阪府立大学 I-site なんば（大阪市）

鳥居伸洋、池田忠繁、仙場淳彦、SMA ワイヤを縫い付けた複合材に関する基礎研究、2014.11.21、第 51 回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋期大会、名城大学タワー75（名古屋市）

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： 4 0 2 7 3 2 7 1

(2)研究分担者

仙場 淳彦（SENBA, Atsuhiko）
名城大学・理工学部・准教授
研究者番号： 6 0 4 3 2 0 1 9