

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 23 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289052

研究課題名(和文)形状双安定性を有する新機能複合材シェルの開発

研究課題名(英文)Development of new functional bi-stable composite shells

研究代表者

本田 真也 (Honda, Shinya)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90548190

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：非対称積層された積層複合材は各層の強い異方性により熱硬化後に歪んだ(シェル)形状となる。なかでも特定の寸法および積層構成を有する積層材は二つの安定した形状を有する双安定複合材となる。本研究では双安定形状間の変形量と双安定性を示す臨界温度の二つの相反する目的関数に関して遺伝的アルゴリズムに基づく多目的最適化を行った。熱硬化後のシェル形状予測には、レイリー・リッツ法に基づく独自の数値計算手法を開発した。数値計算結果は実験結果とよく一致しており、多目的最適化結果は広範囲に渡った非劣解(パレート解)を算出することができた。

研究成果の概要(英文)：During fabrication process of laminated fibrous composites, asymmetric laminates result in skewed surfaces after curing due to strong anisotropy of each layer, and composites with specific lay-ups and dimensions show bi-stable states. The present study performs a multi-objective optimization for the composite shell with bi-stable shapes. Objective functions are amount of averaged deformation between two stable shapes of shell and critical temperature of surroundings which is the maximum temperature to keep the bi-stable characteristics. These properties indicate a trade-off relation each other and are maximized simultaneously by using an effective multi-objective genetic algorithm method. Shell shapes after curing are predicted by the thermal deformation analysis based on the Rayleigh-Ritz method. Calculated results agree well with those from experiments with respect to shell shapes, and the present multi-objective optimization reveals wide-ranging Pareto optimum solutions.

研究分野：機械力学, 複合材料工学, 最適設計

キーワード：積層複合材 形状双安定性 シェル形状 多目的最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

繊維強化複合 (Fiber reinforced plastics; FRP) 材料は、各層を積層する角度を変化させるによって板全厚に対して異方性構造を設計可能であり、これまでに多くの効果的な最適化手法が提案されてきた[1]。しかしながら、これまでの主な研究・開発対象は、面内-面外変形の連成を避けるため、図 1(a)に示すように板の中央面に関して対称に積層した板に限られていた。

一方、図 1(b)に示すような非対称積層板は、剛性の連成問題に加えて、作成中の熱硬化過程において、各層の線膨張係数の異方性により成型後は面外方向に歪んだシェル形状となる等の問題から、構造物としての応用からは敬遠されてきた。しかしながら、これらの非対称シェルの中で特定の積層構成や板厚比条件を満たしたものは、図 2 に示すように、二つの安定した形状を有する。この形状双安定性を有する複合材シェルは比較的小さな面内力やモーメントにより、他方の安定形状へ遷移 (スナップスルー変形) することが可能であり、その入力エネルギーを加え続けることなく、安定状態を維持することができるため、航空機などのモーフィング翼や、開閉インテークの部品点数削減と軽量化などの目的で応用が期待されている[2]。

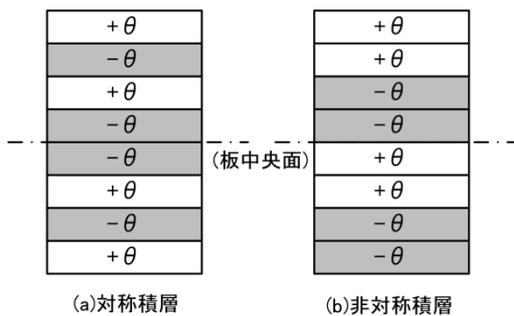


図 1 対称 8 積層と非対称 8 積層の例

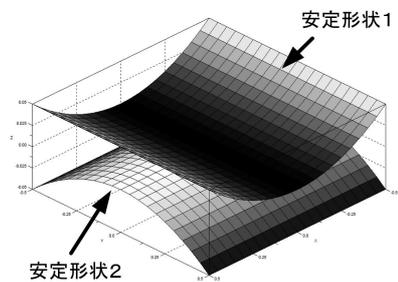


図 2 クロス材[0/90/0/90]Tの双安定形状例

近年では、図 3 に示すように、主に曲面状のモールドに繊維束を直接積層する目的で、様々な自動繊維束牽引機が開発されおり、自由度の高いマシンヘッド内で、繊維束に樹脂を含浸しながらモールドに積層することが可能である。これらの製造機器を

応用することで、図 4, 5 に示すように面内で繊維配向角度を連続的に変化すること(図 4)や曲線状の強化繊維を用いた複合材の作成が可能(図 5)である。繊維を同一層内で連続的に変化させることで、プリプレグを隣合わせることにより生じる繊維の不連続性や、そこに生じる応力集中を緩和した高機能な複合材シェルの製造が可能となる。



図 3 自動繊維束牽引機 (CORIOLIS COMPOSITES 社 HP より引用)

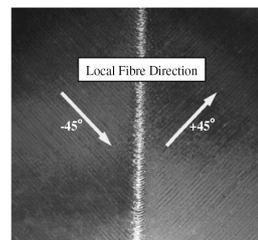


図 4 局所的な繊維配向角[4]

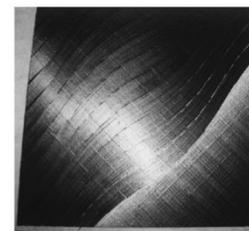


図 5 曲線状繊維強化[4]

2. 研究の目的

本研究では形状双安定性を有する新機能複合材シェルの開発を行う。熱硬化過程の残留ひずみに由来する双安定複合材シェルは、インテリジェント構造物として産業応用が期待されているが、その力学的メカニズムの解明や作成方法が十分に確立していると言えない。そのため、本研究では局所的な形状可変複合材シェルに関して実験および数値解析の両アプローチにより、熱残留応力やひずみが成型後のシェル形状の機械的特性に与える影響を明らかにする。また、最適化技術の適用により、新機能複合材シェルの機能最大化を図る。

3. 研究の方法

(1) 数値解析手法

局所的な形状可変複合材シェルの熱変形解析手法には Mattioni らによる手法[5]を拡張した手法を用いる。図 6 に本研究で用いる積層板の解析モデルを示す。混合積層板の解析モデルは、対称積層部 A1 と非対称積層部 A2 の 2 つの部分からなり、冷却前の形状が長方形板であるとし、長手方向にそれぞれ異なる x_1, x_2 軸を有するものとする。Mattioni らの解析モデルは図 6 の軸に関して対称な形状を仮定しており、非対称積層部がクロスプライ(0度, 90度層のみ)積層を対象としたモデルであった。そのため、Mattioni らの用いた関数では、本研究で扱う任意の積層構成を有する混合積層板に対しては、自由度が不足する。そこで本研究では、 z 方向変位関数に複数の項を追加した 4 次多項式を z 方向変位関数として用い、A1, A2 においてそれぞれ独立に定義した。ここでは計算の過程は省略する(詳細は[発表論文 2]を参照)が、Rayleigh-Ritz の方法に基づき各領域の総ポテンシャルエネルギーを最小化する未定係数を算出することで、二つの安定な形状を有する複合材シェル形状および双安定性になる臨界温度が決定できる。

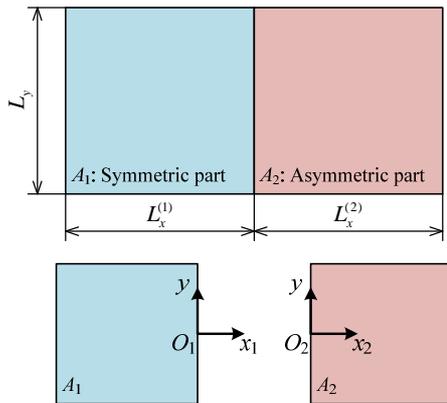


図 6 局所的な形状可変複合材シェルモデル

(2) 最適化手法

数値実験の結果、単一領域のみを有する積層板は安定形状間面外変位量の増加に伴い、臨界温度も上昇する傾向にあった。しかし、対称積層部と非対称積層部の 2 領域からなる混合積層板は、面外変位量を最大化することを目的とした最適化を行った場合、面外変位量は増加したが対称積層部の影響により臨界温度の低下が生じ、これらはトレードオフの関係にあることがわかった。そこで、混合積層板を扱う本報では、安定形状間面外変位量と臨界温度の 2 つの目的関数に対して多目的最適化を行った。

多目的最適化に関する多くの研究やその適用事例が盛んに報告されているが、中でも Deb らの NSGA-II[6]と Zitzler らの SPEA2[7]は他の手法と比較して良好な結果を示している。これらのアルゴリズムでは、探索途中で発見した優良解の保存や非劣解候補の削減などの重要なメカニズムが提案されている。しかし、探索において重要なオペレータである交叉方法に関する議論や、設計変数空間の多様性を保持するためのメカニズムは考慮されていない。SPEA2+はこれらのメカニズムを考慮しつつ、SPEA2 のアルゴリズムを拡張した多目的 GA であり、良好な探索性能が報告されている[8]。SPEA2+の詳細はここでは割愛するが、本研究ではアーカイブ内の個体数の削減を行う環境選択と新しい探索母集団を生成する Mating 選択で、探索後半で探索母集団内に多くの同一個体が存在することを抑制する機構を新たに用いた。

4. 研究成果

(1) 数値計算結果と実験結果

例示する供試体の寸法は、 $\{50(\text{領域 A1}) + 150(\text{領域 A2})\} \times 150 \text{ mm}$ とし、板厚は $h = 1.1 \text{ mm}$ であった。材料定数は予備試験により得た $E_1 = 117 \text{ GPa}$, $E_2 = 8.07 \text{ GPa}$, $\nu_{12} = 0.336$, $G_{12} = 3.44 \text{ GPa}$, $\alpha_1 = 0.296 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_2 = 38.9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ であり、温度変化は $\Delta T = -110 \text{ }^\circ\text{C}$ である。ここでは積層構成は、 $[15/75]_s | [-75/75/60/15]$ の結果を示す。縦線記号「|」より前は領域 A1 の対称積層部、後は領域 A2 の非対称積層部の積層構成を表している。ここでは簡易的に混合層を作製するため UD プリプレグを用いた例を示す。作製の際は、2 層目と 4 層目は対称積層部と非対称積層部で共通の繊維配向角とし、1 層目と 3 層目ではそれらは異なる繊維配向角を有し、1 層目と 3 層目の境界部においては繊維が連続しておらず、両者が重ならないように異なる UD プリプレグを並べた。なお、供試体は真空バッグ成形法により、恒温炉内で真空圧縮しながら 90°C で 60 分、 130°C で 90 分保持した後、自然冷却することで作製した。変位量の計測には定盤に固定したレーザー変位計により、平板上に載せた試験片をスライドしながら、図 7 中の赤丸点の変位量を計測した。臨界温度は、安定状態 1 から恒温炉内の温度を徐々に増加させ、領域 A2 の中央表面(x_2, y) = $(75, 0) \text{ mm}$ のひずみを x, y 方向それぞれ計測し、恒温炉内の温度-ひずみ履歴により双安定性を生じなくなる直前の温度を臨界温度とした。また図 8 には実際に作成した供試体の写真を示す。

臨界温度に関しては実験(71°C)と数値計算(91°C)であり、他の供試体に関しても 20%前後の差があった。積層時の繊維配

向角のずれや硬化時に表面に樹脂層が形成されたと考えられること、実験では異なる繊維配向角を有する領域間で繊維が破断していること、実験では試験片の温度を直接計測しておらず恒温炉内の雰囲気温度を計測していることなどが主な要因であると考えられる。シェル形状に関しては、図7より実験により得られたシェル形状と数値計算により予測した形状はよく一致していることがわかった。変位量の平均値を比較すると他の供試体においても概ね10%前後の差異となっていた。

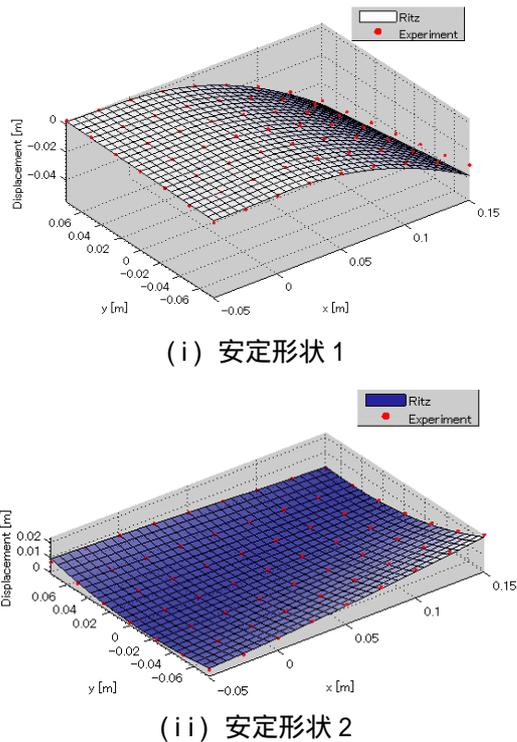


図7 双安定性形状を有する複合材シェルの数値計算と実験結果の比較



(i) 安定形状 1



(ii) 安定形状 2

図8 双安定性形状を有する複合材シェル (作成した供試体)

(2) 多目的最適化結果

最適化により得られた非劣解(パレート解)および1万回の乱数探索により得られた個体群の目的関数空間における分布を図9に示す。ただし、1万回の乱数探索のうち、双安定性を示し変位量がある程度大きい個体は220個体のみであった。

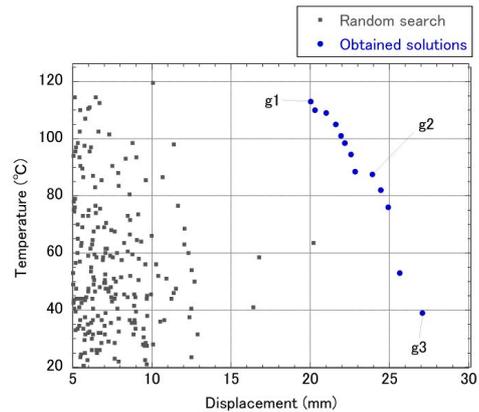


図9 多目的最適化結果

領域A1およびA2が正方形とした今回の条件で得られたパレート解は13種類であった。これらすべての個体がらせん状の積層構成を有しており、強い双安定性を示すために有効ならせん状の積層構成が実現可能であることがわかった。また、非劣個体群の多くは対称積層部の外層に -45° 、非対称積層部の外層に -75° 、 -30° および -15° の繊維配向角を有していた。非劣個体群の積層構成に明確な違いは存在しなかったが、臨界温度が高い個体ほど対称積層部の内層の繊維配向角に 30° の繊維配向角を有する傾向があった。

(3) 成果のまとめ

双安定性を有する対称積層部と非対称積層部が混在した混合積層板に対して、安定形状間外面変位量および臨界温度を目的関数とする積層構成最適化を行った。熱変形解析手法にはMattioniらのモデルを拡張した手法を用いた。また、多目的最適化手法にはSPEA2+を用いた。

本研究で用いた混合積層板の熱変形解析手法と実験を比較した結果から、本手法は良い精度で解析可能であるということがわかった。多目的最適化の結果、変位量が小さく臨界温度が高い領域では本手法の探索性能がやや劣るものの、変位量が大きな領域では様々な面外変位量および臨界温度を有する非劣解を含んでおり、設計者の要求

を満たすための有用な設計案を獲得できた。得られた非劣個体群の内の多くの個体がらせん状の積層構成を有していた。このことから、強い双安定性を有する積層板を得るためにはらせん状の積層構成が有効であるということがわかった。

<引用文献>

- [1]例えば H. Fukunaga, et. al. Journal of sound and vibration, Vol. 171 (1995), pp. 219-229
- [2] C. G. Diaconu et. al., Thin-walled structures, Vol. 46 (2008), pp. 689-701.
- [3] A. S. Paneasari, et. al., Composites: Part A, Vol. 43 (2012), pp. 926-934.
- [4] C. S. Lopes, et. al., Composite Structures, Vol. 86 (2007), pp. 897-907.
- [5] F. Mattioni, et. al., International Journal of Solids and Structures, Vol. 46 (2009), pp. 151-164.
- [6] K. Deb, K. et. al., KanGAL report 200001, Indian Institute of Technology, Kanpur, India (2000).
- [7] E. Zitzler, et. al., Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TLK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich (2001).
- [8] Hiroyasu, T., et. al., IEEE congress on evolutionary computation, Edinburgh, Scotland, Vol. 1 (2005), pp. 236-242.

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2件)

1. S. Honda, Y. Narita, Vibration analysis and optimization of sandwich composite with curvilinear fibers, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 744, No. 1, 2016. [DOI: 10.1088/1742-6596/744/1/012020], 査読有
2. 本田 真也, 高橋 圭佑, 成田 吉弘, 双安定性を有する複合材シェルのスナップスルー変形に関する多目的最適化, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 824 (2015), <http://doi.org/10.1299/transjsme.14-00531>, 査読有

〔学会発表〕(計16件)

1. 本田真也, 成田吉弘, 自由な強化繊維形状を有する先端複合材料の最適設計, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2016), 2016.12.15, 札幌コンベンションセンター, 札幌市, USB 論文集, 講演番号 102-1, Keynote Lecture.
2. 宮島渉, 村上大地, 本田真也, 成田吉弘, 柔軟な繊維形状を有する熱可塑性複合

材の振動特性, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2016), 2016.12.15, 札幌コンベンションセンター, 札幌市, USB 論文集, 講演番号 102-3.

3. 林 隼也, 玉井 一年, 本田 真也, 成田 吉弘, ファイバー縫付機により作成した曲線状複合材の振動特性, Dynamics & Design Conference 2016, 2016.8.26, 山口大学宇部キャンパス, 宇部市, USB (No. 157, 8.26).
4. 村上大地, 本田真也, 成田吉弘, ファイバー縫付機による熱可塑性複合材料の作製, 第58回構造強度に関する講演会, 北海道大学, 札幌市, 2016.8.3, No. 1A03.
5. Kazutoshi Tamai, Shinya Honda, Yoshihiro Narita, "Vibration characteristics of laminated composites with curvilinear reinforcing fibers by using tailored fiber placement machine", Proceedings of 17th US-Japan Conference on Composite Material (US-Japan 2016), Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, August 2, 2016, USB No. 62.
6. Shinya HONDA, "Multi-objective optimization of laminated composite fabricated by tailored fiber placement machine", Proceedings of 17th US-Japan Conference on Composite Material (US-Japan 2016), Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, August 2, 2016, USB No. K3, **Keynote lecture**.
7. S. Honda, T. Kumagai, Y. Narita, Vibration optimization of composite sandwich plate with soft core by using refined zigzag theory, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
8. F. Nishioka, S. Honda, Y. Narita, Vibration analysis and stacking sequence optimization of laminated rectangular plate with blended layers, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
9. 玉井一年, 本田真也, 成田吉弘, ファイバー縫付機を用いた曲線状繊維強化複合材の振動特性, 日本複合材料学会, 第40回複合材料シンポジウム, 金沢工業大学, 野々市市, 講演番号 C1-12, 2015.9.18.
10. 林隼也, 本田真也, 成田吉弘, 曲線状強化繊維を有する複合材の生産性と力学強度に関する多目的最適設計, 日本機械学会 2015年度年次大会, 北海道大学, 札幌市, 講演番号 J1010202, 2015.9.16.
11. 西岡文弥, 本田真也, 成田吉弘, Ritz 法を

- 用いた Blended layer を有する積層板の振動最適化, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 北海道大学, 札幌市, 講演番号 J1010304, 2015.9.16.
- 12 熊谷 貴仁, 本田 真也, 成田 吉弘, 改良型ジグザグ理論に基づく有限要素の提案とサンドイッチ複合材の振動最適化, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2015, 2015.8.28, 弘前大学, 弘前市, USB (No. 107, 8.25).
 - 13 Kumagai, T., Honda, S. and Narita, Y., Vibration Analysis of the Passive Constrained Layer Damping Plate by using Zigzag Theory, Proceedings of the 9th Asian-Asutralasian Conference on Composite Materials (ACCM9), Suzhou, China, October 15, 2014, CD-ROM, ACCM9-T-003.
 - 14 熊谷貴仁(北大院),本田真也(北大),成田吉弘(北大), CFRP を用いた拘束型制振板の基本振動数最大化, 日本複合材料学会, 第 39 回複合材料シンポジウム, 2014.9.18, 秋田大学手形キャンパス, 秋田市, A1-13, pp. 31-32.
 - 15 西岡 文弥, 本田 真也, 成田 吉弘, Blended layer を持つ積層偏平シェルの振動と設計, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2014, 2014.8.29, 上智大学, 東京特別区, USB (No. 338, 8.27).
 - 16 高橋 圭佑, 本田 真也, 成田 吉弘, 双安定性を有する複合材シェルのスナック スルー変形に関する多目的最適化, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2014, 2014.8.29, 上智大学, 東京特別区, USB (No. 341, 8.27).

〔その他〕

ホームページ等

研究代表者所属研究室 HP

http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/intelligent_design/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

本田 真也 (HONDA Shinya)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90548190

(2)研究協力者

成田 吉弘 (NARITA Yoshihiro) ・北海道

大学・大学院工学研究院・名誉教授