

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24246040

研究課題名(和文)大曲率3Dコンポジットの動的設計と航空・自動車構造への機能創出

研究課題名(英文)Creation of new function for the large-curvature 3D composites in aeronautical and automobile structures

研究代表者

成田 吉弘(Narita, Yoshihiro)

北海道大学・工学研究院・特任教授

研究者番号：00137407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：地球全体のエネルギー消費の高まりに対して、石油資源の有限性は人類の大きな課題である。このため石油を燃料とする自動車、航空機の交通機械において、構造軽量化により省資源を実現することは急務である。本研究は、自動車と航空機になお一層の構造軽量化による燃費向上を導入するため、形状を大きく変化させる複合材料構造の力学問題の解決と最適構造設計の研究を主な目的とする。具体的には、大曲率構造に問題となる振動環境下での動特性、熱変形、座屈や強度などの工学的諸問題を研究して、必要な場所に曲線状繊維を的確に導入する三次元的な最適複合材料構造を提案する。

研究成果の概要(英文)：The limitation of petroleum resource is a serious issue to mankind, although the demand is rapidly increasing toward more consumption of energy in the world. It is therefore quite urgent to consider the lighter weight in aeronautical and automobile structures. The objectives of the present research are to solve the mechanics problems and to develop effective optimum design methods for the composite material structures mainly with large curvature. The detailed problems such as vibration, thermal related deformation, buckling and strength issues of the large and small curvature panels are considered, and new ideas of such structures as reinforced with curvilinear fibers are investigated and proposed.

研究分野：工学

キーワード：複合材料 動的設計 航空機構造 自動車構造 最適設計

### 1. 研究開始当初の背景

我国に 2011 年に起きた東日本大震災の後、世界的に原子力発電からの撤退が続く中、限りある石油資源への過度依存からの脱却は、議論の余地のない人類の大きな課題である。このため石油資源をエネルギー源とする自動車、航空機などの交通機械において、構造軽量化により燃費効率化を実現することが急がれてきた。例えば、自動車は車体を全て鉄から炭素繊維強化プラスチック(CFRP)複合材料に置き換えると総重量を半分以上にでき、世界の自動車メーカーは先端素材による車体の軽量化を競っていた。本研究開始 3 年前に発表されたトヨタの環境コンセプト車「1/X」では、ボディ全体に CFRP を採用して重量を軽量化して燃料効率を 2 倍に高めた。その後、フォルクスワーゲンが独企業 SGL カーボンに出資、独ダイムラーも車用の炭素繊維開発で東と提携して、今後は複合材料を大幅に自動車構造に導入することを明確化した(日本経済新聞 2011 年 3 月 2 日)。航空機では、米ボーイングが新型機 B787 に CFRP を本格採用して、機体重量の 5 割に使用して燃費を従来機よりも 2 割程度向上させていた。このように自動車と航空機の構造に比剛性・比強度に優れた CFRP を可能な限り使用して軽量化を推進することは、世界的に明確な方針となっていたが、金属構造に比較して複合材構造の力学解析と構造最適化の研究開発は遅れていた。

### 2. 研究の目的

2000 年代における CFRP 複合材構造の研究はルーフやドアなど自動車の表面パネルや、航空機翼スキンなど、偏平なパネルに限定されていた。しかし偏平な構造だけでなく、大きな曲率を持ち構造形状を大きく変化させるフレームなどの CFRP 部材の製造方法が開発されてきた。例えば、炭素繊維をリボン状素材にして構造形状に合わせて並べ加熱して固める方法や、深い曲面や凹凸がある形状を小さな繊維を不織布にして固める方法であり、先端複合材料の適用が大きな曲率を持つパネルや円筒や球、凹凸のある形状など広範囲に拡張されていた。本研究では、これらの利用ために解決すべき応力、振動特性、熱変形、座屈強度、耐衝撃性などの解法を提案するとともに、それに適した最適化法の開発を目的とした。

### 3. 研究の方法

研究の初期段階(平成 24-25 年度)では、三次元空間内の任意曲線に沿って長繊維により強化されたコンジットについて、その力学的な理論と解析の基礎を固めた。このためマイクロメカニクス的なアプローチから三次元内に曲線的に配置される繊維と母材の構成則と繊維の変形を考察した。マクロメカニクス的な問題は、とくに曲線繊維やランダム配向を持つ場合の局所異方性構造の解析について理論を整備した。また曲線状の強化繊維が積層により複雑に交差する問題について積層理論を検討した。任意の繊維分布形状を表現していくため、従来の簡単な

べき多項式から、スプライン関数、ベジエ関数など、CAD、CAM への導入を考慮した数式表現を考察した。これらのソフト開発と実験には、本研究室の院生・卒論生 20 名の指導と協力が不可欠であった。

計画中期(平成 25-27 年度)は、航空機では主翼リブ、フラットラックパネル、エンジンカウル、胴体尾部などの構造を分析して、静的、動的外力から応答解析を試みた。単純な形状へのリダクションにより解析的な方法を適用する場合と、原型に近い解析モデルを作成して FEM 解析を行う場合に分けた。とくに曲線繊維による局所異方性の利用について検討した。自動車構造については、ルーフ、ボンネット、サイドパネルなど、自動車用の曲面パネルでは、外圧座屈に対する強度が重要であり、耐座屈性向上に適した二段階解析法を見出した。応用を意識した実験では、大曲率や穴など複雑な形状を持つ自動車・航空部品をモデル化した部品試験片を作成して、直線強化繊維だけでなく目的に応じて曲線状に繊維を配置する新しい機能創出のための構造設計を考えた。

計画の終盤(平成 27-28 年度)では、複合材料構造の強度解析、振動解析、座屈解析、衝撃解析などの成果に加えて、従来から本研究室で蓄積してきた最適化手法(層別最適化法、数理計画法、遺伝的アルゴリズム、粒子群最適化法)を適用して、それらの特性を最適化した。最終の平成 28 年度は総合化のステージとして、複数の目的関数を同時に最適化する統合的設計手法の確立と実験検証全体の取りまとめを行った。

### 4. 研究成果

新興工業国の追上げを受ける日本において、依然として国際的に優位にあるのが自動車と大型機主翼などを製造する複合材料産業である。これら技術集約性の高い開発分野における優位性を保つため、複合材料を自動車や航空機の軽量化に一層活用することが必要である。また、より快適で上質な生活を求める時代では、複合材料ならではの曲面を活かした高いデザイン性が期待される。それらの解決に向けた本研究の成果として以下の点が上げられる。

(1) 繊維強化複合材料を用いた構造軽量化の可能性を高めるため、曲線繊維の導入を考察して、そのための解析理論を確立した。

(2) ピエゾ素子を用いて複合材料構造の制御を行う手法を追及して、その可能性を確立した。

(3) 複合材料シェル構造における双安定性とスナップスルー(二つの状態の移り変わり)について研究して新知見を得た(2017 年 4 月に日本機械学会論文賞を受賞)。

(4) 開発した曲率構造の力学解析ソフトウェアを利用して、本問題に効率的利用が可能な最適化手法を開発した。とくに多目的最適化への適用性を確立した。

(5) 曲率を持つ構造物に対して、力学と最適設計的な視点の研究だけでなく、感性工学の観点からも研究成果を得た。

## 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 17 件, 全て査読あり)

1. Shinya Honda, Yoshihiro Narita, Itsuro Kajiwara, Multi-objective optimization for vibration suppression of smart laminated composites, *Mechanical Engineering Journal (MEJ:DR)*, Vol. 3, No. 1 (2016).
2. Jinqiang Li, Zhuorui Ma, Zhihua Wang, Yoshihiro Narita, Random vibration control of laminated composite plates with piezoelectric fiber reinforced composites, *Acta Mechanica Sinica*, Vol.29, No.3, (2016), pp.316-327.
3. Jinqiang Li, Xinpeng Tian, Zhijun Han, Yoshihiro Narita, Stochastic thermal buckling analysis of laminated plates using perturbation technique, *Composite Structures*, Vol.139, (2016), pp.1-12.
4. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Zhihua Wang, The effects of non-uniform temperature distribution and locally distributed anisotropic properties on thermal buckling of laminated panels, *Composite Structures*, Vol.119, (2015), pp.610-619.
5. 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), pp.1-15.
6. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, The effect of aspect ratios and edge conditions on the optimal damping design of thin soft core sandwich plates and beams, *Journal of Vibration and Control*, Vol.20, No.2, (2014), pp.266-279.
7. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Reduction of wind-induced vibration of a laminated plate with an active constrained layer, *Journal of Vibration and Control*, Vol.20, No.6, (2014), pp. 901-912.
8. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Multi-objective design for aeroelastic flutter of laminated shallow shells under variable flow angles, *Composite Structures*, Vol.111, (2014), pp.530-539.
9. Miyong Lee, Koya Tanaka, Yoshihiro Narita, Perceived Simplicity of three-dimensional objects- quantitative approach for effective visual communication in the design process-, *International Journal of Affective Engineering*, Vol.13, No.1, (2014), pp.101-108.
10. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Analysis and optimal design for supersonic composite laminated plate, *Composite Structures*, Vol.101, (2013), pp.35-46.
11. Jinqiang. Li, Yoshihiro Narita, Vibration

suppression for laminated composite plates with arbitrary boundary conditions, *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 49, No. 5, (2013), pp.519-530.

12. 田中恒也, 李美龍, 成田吉弘, ラフ集合理論を用いたイメージ画像の「シンプルさ」の構成要素に関する分析, *日本感性工学会論文誌*, 第 12 巻, 1 号, (2013), pp. 97-108.
13. Sinya Honda, Takahito Kumagai, Kazuya Tomihashi, Yoshihiro Narita, Frequency maximization of laminated sandwich plates under general boundary conditions using layerwise optimization method with refined zigzag theory, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.332, No.24, (2013), pp.6451-6462.
14. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Analysis and active control for wind induced vibration of beam with ACLD patch, *Wind and Structures*, Vol.17, No.4, (2013), pp.399-417.
15. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Analysis and optimal design for the damping property of laminated viscoelastic plates under general edge conditions, *Composites Part B: Engineering*, Vol.45, No.1, (2013), pp.972-980.
16. Jinqiang Li, Yoshihiro Narita, Vibration suppression for laminated cylindrical panels with arbitrary edge conditions, *Journal of Vibration and Control*, Vol.19, No.4, pp.626-640.
17. Shinya Honda, Teruki Igarashi, Yoshihiro Narita, Multi-Objective Optimization of Curvilinear Fiber Shapes for Laminated Composite Plates by Using NSGA-II, *Composites Part B: Engineering*, (2013), Vol.45, pp.1071-1078.

(学会発表) (国際学会発表は計 35 件, 全て査読あり)

1. S. Honda, Y. Narita, Vibration analysis and optimization of sandwich composite with curvilinear fibers, *Proceedings of 13th International Conference on Motion and Vibration control (MoViC 2016) and 12th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics (RASD 2016)*, 3-6 July, 2016, Univ. of Southampton, Southampton, UK, No. 2289.
2. Y. Kaito, S. Honda, Y. Narita, Vibration characteristics and optimization for panel elastically supported in mobile phone, *Proceedings of 13th International Conference on Motion and Vibration control (MoViC 2016) and 12th International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics (RASD 2016)*, 3-6 July, 2016, Univ. of Southampton, Southampton,

- UK, No. 2341.
3. G. Yokoyama, S. Honda, Y. Narita, Optimal design with response surface method for aeroelastic behavior of wing shaped composite plates, Proceedings of 17th US-Japan Conference on Composite Material (US-Japan 2016), Hokkaido Univ., Sapporo, Japan, August 1-2, 2016, USB No. 34.
  4. K. Tamai, S. Honda, Y. 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 1-2, 2016, USB No. 62.
  5. Y. Narita, Extended Layerwise optimization for vibration and buckling design of laminated composite plates, Pan American Congresses on Computational Mechanics-PANACM, Buenos Aeres, Argentine, April 27-29, 2015.
  6. Y. Kaitou, S. Honda, Y. Narita, Free vibration of glass rectangular plates, Proceedings of 4-th Korea-Japan Joint Symposium on Dynamics and Control, Bexco, Busan, Korea, May 21-22, 2015, pp.119-120.
  7. Y. Narita, N. Inami, Extension of layerwise optimization concept in the lay-up design of laminated composite plates, Keynote speech, Proceedings of East Asia Mechanical and Aerospace Engineering Workshop, May 28-30, 2015, Seoul, Korea, p.14.
  8. S. Honda, N. Kida, Y. Narita, Adaptive control for vibration suppression by using self-organization map, IEEE Conference Publications, Proceedings of 10th Asian Control Conference 2015 (ASCC2015), 31st May - 3rd June, Sutera Harbour Resort, Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia, USB ID 1570075227, DOI : 10.1109/ASCC.2015.7244696
  9. Y. Narita, Extension of layerwise optimization (LO) approach for optimum lay-up design of vibrating laminated plates, Proceedings of 10-th International Symposium on Vibrations of Continuous Systems, July 26-31, 2015, Estes Park, Colorado, USA, pp.46-48.
  10. T. Tampo, S. Honda, Y. Narita, Buckling analysis of laminated shallow shells under general form pressure and boundary condition, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  11. T. Hayashi, S. Honda, Y. Narita, Benchmark test function for assessing the lay-up optimization methods in plate vibration, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  12. 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 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  13. Y. Kaito, S. Honda, Y. Narita, Vibration of glass panel fixed by adhesive tape of mobile phone, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  14. S. Tanaka, S. Honda, Y. Narita, Robust design of a composite antenna structure by using multi-objective Taguchi method, Proceedings of the 16th Asian Pacific Vibration Conference (APVC2015), November 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  15. S. 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 24-26, 2015, Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam (USB).
  16. M. Lee, K. Nishida, Y. Narita, Experimental verification for subjective sense of object weight -proposed user category based on the individual Kansei by subjective weight, KEER2014 , 11-13 JUNE 2014 , SWEDEN(Paper No. 148)
  17. N. Kida, S. Honda, Y. Narita, Adaptive vibration control using self-organizing map, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2014), Sapporo Convention Center, Sapporo, 3B11, USB.
  18. S. Honda, K. Watanabe, Y. Narita, I. Kajiwara, Multi-objective optimization for vibration suppression of smart laminated composites, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2014), Sapporo Convention Center, Sapporo, 3B31, USB
  19. Y. Narita, S. Honda, T. Funamizu, Vibration analysis of laminated composite plates having rigid body attachments, Proceedings

- of the American Society for Composites: Twenty-Ninth Technical Conference, La Jolla, California, September 8-10, 2014. American Society for Composites, CD-ROM—11 pp.426-433.
20. T. Tsukada, S. Takeda, Y. Iwahori, S. Honda, Y. Narita, S. Minakuchi, N. Takeda, Evaluation of residual strain in press molding of CF/PPS laminates using FBG sensors, Proceedings of the American Society for Composites: Twenty-Ninth Technical Conference, La Jolla, California, September 8-10, 2014. American Society for Composites, CD-ROM—11 pp.722-734.
  21. T. Funamizu, S. Honda, Y. Narita, Maximization of natural frequencies for composite laminated plate with rigid body, Proceedings of the 9th Asian-Australian Conference on Composite Materials (ACCM9), Suzhou, China, October 15-17, 2014, CD-ROM, ACCM9-C-001.
  22. T. Kumagai, S. Honda, Y. Narita, Vibration analysis of the passive constrained layer damping plate by using zigzag theory, Proceedings of the 9th Asian-Australian Conference on Composite Materials (ACCM9), Suzhou, China, October 15-17, 2014, CD-ROM, ACCM9-T-003.
  23. K. Takeno, S. Honda, Y. Narita, Effect of bias, hoop and straight layers on vibration characteristics of CFRP circular shafts, Proceedings of the 9th Asian-Australian Conference on Composite Materials (ACCM9), Suzhou, China, October 15-17, 2014, CD-ROM, ACCM9-H-005.
  24. Y. Kaitou, S. Honda, Y. Narita, Dynamic response of panel models in mobile phone, Proc. The Second Intl. Conf. on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering (CSM2014), 16-17 November 2014, Birmingham, UK, CD-rom, pp.214-217.
  25. Y. Kaitou, S. Honda, Y. Narita, Simulation and experiment on effective excitation of mobile phone panels, 5th TSME Int. Conf. on Mech. Eng., 17-19 December 2014, Chiang Mai, CD CST170.
  26. Y. Narita, D. Narita, S. Honda, Vibration suppression of automobile composite panels, Proceedings of the 15th Asia Pacific Vibration Conference 2 - 6 June 2013, ICC JEJU, Jeju Island, Korea, W2\_302\_1, USB.
  27. K. Takahashi, S. Honda, Y. Narita, Vibration analysis for thermally induced bi-stable composite shallow shell, Proceedings of the 15th Asia Pacific Vibration Conference 2 - 6 June 2013, ICC JEJU, Jeju Island, Korea, T1\_301A\_1, USB.
  28. R. Tsubata, S. Honda, Y. Narita, Vibration optimization of fibrous composite reinforced by curvilinear fibers, Proceedings of 15th Asia Pacific Vibration Conference (APVC-15) 2 - 6 June 2013, ICC JEJU, Jeju, Korea, M3\_303B\_2, USB.
  29. K. Watanabe, S. Honda, Y. Narita, I. Kajiwara, Maximization of vibration control performance for micro smart composites with the laser excitation technique, Proceedings of the 15th Asia Pacific Vibration Conference 2 - 6 June 2013, ICC JEJU, Jeju Island, Korea, M1\_303B\_1, USB.
  30. Y. Narita, S. Honda, T. Funamizu, Analysis and lay-up optimization for vibration of laminated composite plate with rigid body attachments, Proceedings of the 9th International Symposium on Vibrations of Continuous Systems (ISVCS9), Courmayeur, Italy, 21-26 July 2013, pp. 55-57.
  31. S. Honda, K. Watanabe, Y. Narita, I. Kajiwara, Optimum design and experimental evaluation for smart micro-composites by using laser excitation technique, Proceedings of the 9th International Symposium on Vibrations of Continuous Systems (ISVCS9), Courmayeur, Italy, 21-26 July 2013, pp.28-30.
  32. T. Veratat, Y. Narita, Optimization for vibration of laminated composite rectangular plates with general elastic edges, Proceedings of the Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics & Control, 2013.8.27-26, Kyusyu Sangyo University, Fukuoka, (No. J4, 8.27).
  33. Y. Narita, S. Honda, Is lay-up optimization possible for buckling of quasi-isotropic composite plates?, Proceedings of ICCS2013, 20 June, 2013, Porto, Portugal.
  34. Y. Narita, Frequency design of quasi-isotropic composite rectangular plates, J-K Symposium, September, 2013, Kagoshima, Japan
  35. R. Shimada, M. Lee, Y. Narita, Analysis of the formation of products “OSHARE” using the image KJ method, 5th International Association of Societies of Design Research 2013 Tokyo, 26-30 August 2013, Japan (Paper No. 1856-1)
- (その他, 国内学会で 75 件の日本語講演).
- [図書] (計 2 件)
1. (分担執筆)「機械力学ハンドブック: 動力学・振動・制御・解析」, 4 章 非線形振動系のモデル化と挙動, pp.106-119, (2015), 朝倉書店.
  2. (分担執筆)日本機械学会・JSME テキストシリーズ,「演習・振動学」, 成田吉弘, 第 5 章 連続体の振動, pp.45-54, (2012),丸善.

〔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

[http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/intelligent\\_de  
sign/](http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/intelligent_design/)

6. 研究組織

(1)研究代表者

成田 吉弘(NARITA, Yoshihiro)  
北海道大学・工学研究院・特任教授  
研究者番号：00137407

(2)研究分担者

李 美龍(LEE, Miyong)  
北海道大学・工学研究院・助教  
研究者番号：50581758

本田 真也(HONDA, Shinya)  
北海道大学・工学研究院・准教授  
研究者番号：90548190