

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760179

研究課題名(和文) 広帯域安定駆動を目的としたマイクロ・スマート複合材の開発

研究課題名(英文) Development of micro-sized smart composite driving under large bandwidth

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) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：近年の機械システムや家電製品の小型・高性能化に伴い、使用される小型精密デバイスの更なる高速化・高精度化が求められており、これらを達成するためには、小型デバイスの効果的な振動制御手法の開発が必要である。本研究課題では、先端複合材料である炭素繊維強化材料と圧電アクチュエータからなるスマート複合材に関して、統合的な振動制御性能の最大化を目的とした最適設計手法、効果的な数値計算モデル、実験計測による振動特性の詳細な評価技術開発を行った。

研究成果の概要(英文)：Due to recent sophistication and downsizing of the mechanical systems and electric appliances, a technology to improve speed and accuracy of micro-sized devices is required. To archive this, it is important to develop an effective vibration suppression approach for micro devices. The present research proposes a multidisciplinary optimization method to maximize the vibration control performance, an effective numerical vibration model with a new lamination theory, and an experimental measurement technique to evaluate precise vibration characteristics for micro-sized smart composites with carbon fiber reinforced composite and piezoelectric materials.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械力学・制御

キーワード：スマート構造 複合材料 最適設計 積層理論 振動制御

### 1. 研究開始当初の背景

近年の機械システムや家電製品の小型・高性能化に伴い、それらに使用される個々の機械部品の制振性能向上も求められている。例えば、HDD ヘッドや一眼レフカメラの反射ミラーなどの小型部材は、高周波帯域での振動がデバイス全体の性能向上の妨げになっている。

これらの小型精密デバイスの更なる高速化・高精度化を行うためには、高周波帯域(およそ 10kHz 以上)での実験計測による振動特性の詳細な評価技術および効率的な振動抑制デバイスの開発が必要であり、金属材料より軽量高剛性な炭素繊維強化複合材料(CFRP)を応用したスマート複合材の実用が有望な解決手段の一つである。

### 2. 研究の目的

本研究では、ハードディスクドライブ(HDD)ヘッドを、CFRP および圧電アクチュエータを用いたスマート複合材により作成し、高周波帯域での制振性能向上を図る。具体的には、台形状のスマート複合材(厚さ 1.0 mm)が面内方向から加振された際の振動制御性能の向上を目的とする。研究を遂行する過程において得られた結果より、最終的な研究目的は以下とした。

(1) スマート複合材の能動的および受動的な振動制御性能を向上させるため、アクチュエータによる能動的制振性能および構造物自体の固有振動数調整(最大化)の両者を目的関数とした多目的統合最適化手法を開発する。設計変数としては、アクチュエータの配置および積層板の積層構成(繊維配向角度)とする。

(2) 数値計算結果の精度向上のため、効果的な積層理論(Zigzag 理論)を用いた積層複合材の振動数値モデルを開発し、実験結果との整合性を高める。

### 3. 研究の方法

(1) スマート複合材の多目的統合最適化

本研究で制御対象としたスマート複合材および模擬した市販の HDD ヘッドを図 1 に示す。初年度の研究成果(学会発表、)より、申請時に提案した、(単目的)統合最適化手法をスマート複合材に適用した結果、アクチュエータによる能動的な振動制御性能の向上は得られたが、構造物自体の固有振動数が他の代表的な設計案よりも低い値を示すという結果が得られた。

固有振動数を調整することで、外乱による

共振を避けることは受動的な振動制御手法として一般的であり、能動的な振動制御性能のみを向上する提案手法では統合的な振動制御性能を向上したとは言えない。

そのため、本研究では相反する二つ以上の目的関数に対して、他のどの解(設計案)に関しても劣っていない解集合(パレート解)を効率的に算出する手法である、修正非優越ソート遺伝的アルゴリズム(NSGA2 ; Non-dominated Sorting Genetic Algorithm 2)を適用し、能動的および受動的な振動制御性能に関するパレート解の算出を行った。

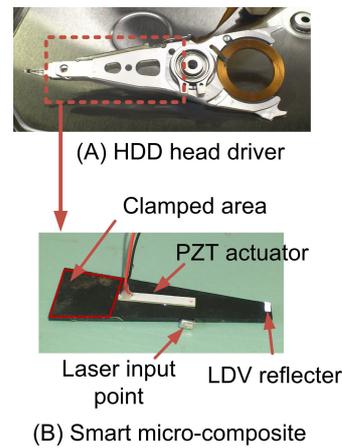


図 1 マイクロ・スマート複合材の一例 (HDD ヘッドモデル)

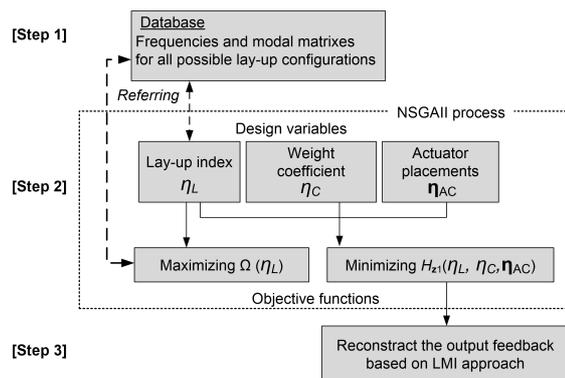


図 2 本研究で提案するスマート複合材の多目的最適設計プロセス

本研究で提案する最適化過程を図 2 に示す。計算過程の効率化のため、第一ステップとして、設計案となり得るすべて積層構成を有する積層複合材の振動パラメータを有限要素法(FEM)により算出する。続いて、第二ステップでは基本振動数の最大化と能動的制御性能の指標となる、アクチュエータによる制御応答の  $H_{\infty}$  ノルムの最小化を目的とした多目的統合最適化を実行する。ただし、ここでは構造物の状態をすべて観測可能であると仮定している。第三ステップでは、構造物の振動応答を実際に用いるセンサによつての

み観測するため制御コントローラを再設計している。

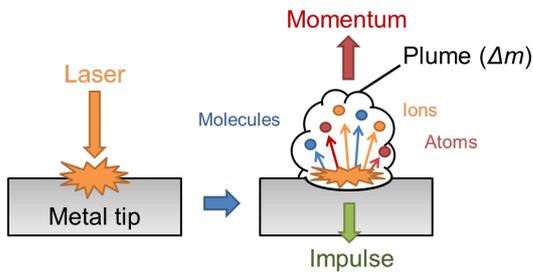


図3 レーザーアブレーション現象の概念図

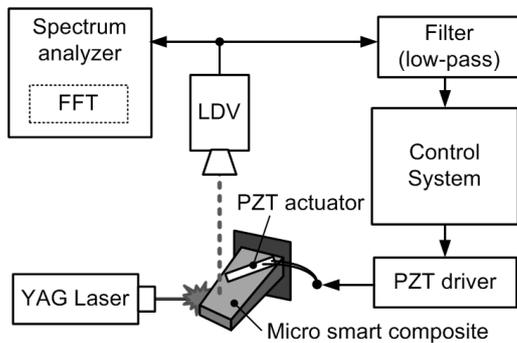


図4 レーザー加振実験の概略図

また、本研究では小型のスマート複合材の開発を目的としている。しかしながら、振動制御実験において小型構造物を精度よく加振することは困難である。そのため、レーザーアブレーション現象(図3)を利用したレーザー加振技術を応用する。高出力のパルスレーザーが加振対象に照射された際、ブルームと呼ばれる粒子群が発生し、その反作用として構造物へのインパルス加振が可能となる。また、レーザーは極めて短いパルス幅で照射されるため、物理的な接触を有する加振方法よりも理想的なインパルス加振が実現可能である。

上記レーザー加振技術を用いて構築した振動制御実験システムの概略図を図4に示す。複合材試験片はプリプレグよりホットプレス法により作成し、角棒状のセラミクス系の圧電材を表面に接着する。作成した小型構造物に対して加速度計などのセンサ機器は設置は困難なため、レーザードップラー振動計(LDV)を用いて速度応答を計測し、加振・計測共に非接触とする。これにより、狭小空間や極限空間(真空中や水中など)においても、振動計測・評価が可能となる。

(2) Zigzag 理論を用いた高精度な積層材数値モデルの開発

Zigzag 理論は、ティモシェンコはりの仮定

に基づく、一次せん断変形理論(FSDT; First-order Shear Deformation Theory)に Zigzag 関数を導入したものである。これまでに広く用いられてきた Euler はりの仮定に基づく古典積層理論(CPT; Classical Plate Theory) ,FSDT, 高次せん断変形理論では解析が困難な、剛性の大きく異なる層を有する複雑な積層板でも精度よく解析できるように修正されている。他の高精度な積層理論としては、層別理論や三次元理論などが広く知られているが、これらは層数や厚さの増加に伴って自由度が増大し、計算負荷が大きくなるという欠点がある。

Zigzag 関数の概念図を図5に示す。各層内で線形な変位分布を仮定しており、厚さ方向の区分線形関数を FSDT で仮定する変位場に加えることでその精度を修正する。

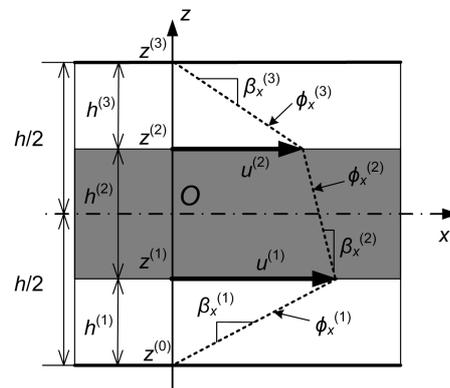


図5 Zigzag 関数の概念図

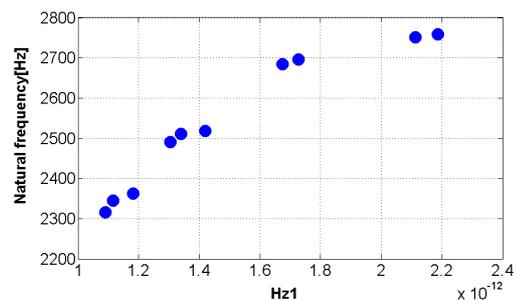


図6 多目的統合最適化によって得られたパレート解(縦軸:基本振動数,横軸:制御応答の  $H_{\infty}$  ノルム  $= H_{z1}$ )

#### 4. 研究成果

##### (1) 多目的統合最適化結果

本手法により得られたパレート解を図6に示す。想定する HDD ヘッドと厚さを揃えるため、対称 6 積層の積層複合材に対して、各層の繊維配向角度およびアクチュエータ配置を最適化した。

図6 右上の能動的制御性能が最も低い( $H_{z1}$ の値が大きいが)、受動的制御性能(基本振動

数)が高かった解の積層構成は,全層が台形状はりの長手方向に配向 $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]_s$ しており,片持ちはりの基本振動数を高めるための物理的に適した繊維配向角度であった.また,能動的な振動制御性能が最も高かった解(図6左下)は長手方向から時計回りに $15^\circ$ 傾いた一方向強化材 $[-15^\circ/-15^\circ/-15^\circ]_s$ であった.他の解は両者の中間的な性能を有しており,これらを基に設計者自身が必要な能動的・受動的制振性能を有する設計案を選択することが可能である.

図7には能動的な制振性能が高かった解 $[-15^\circ/-15^\circ/-15^\circ]_s$ の最適なアクチュエータ配置(黒太線部)を示す.反時計回りに約 $15^\circ$ 傾いた配置となっており, $[-15^\circ/-15^\circ/-15^\circ]_s$ の繊維配向角度を有する積層材の振動モードを効率よく抑制するための配置となっていることがわかる.

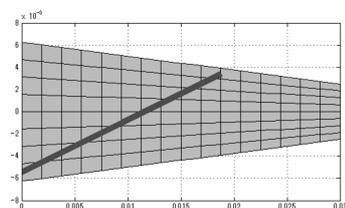


図7 多目的統合最適化によって得られた最適なアクチュエータ配置例

図8および図9には最も能動的制振性能が高かった最適解 $[-15^\circ/-15^\circ/-15^\circ]_s$ に関して,それぞれ数値計算によって得られた速度周波数応答関数(図8)および実験によって得られた速度パワースペクトル(図9)を示す.いずれも太線が制御有,細線が制御無の結果である.図8,9からわかる通り,数値計算および実験結果には一致していない部分が見られ,より精度の高い数値計算モデルが必要であることがわかる.しかしながら,いずれの結果も第一次のピークが制御の有無によって大きく減少している.また,この減少量は,他の代表的な積層構成と比較しても大きいことがわかったため,提案している多目的統合最適化手法の有用性は確認できた.

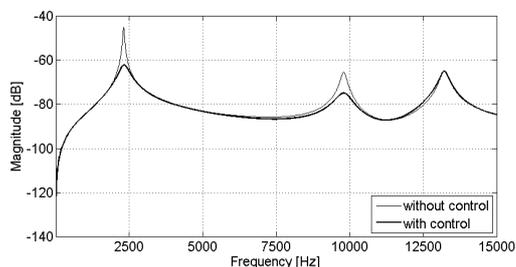


図8 数値計算によって得られた最適解の周波数応答関数(速度)

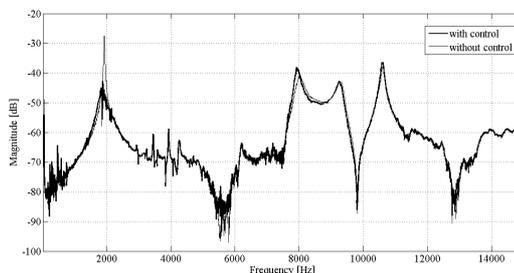


図9 実験によって得られた最適解の速度応答パワースペクトル

## (2) Zigzag 理論の精度検証

上記の結果より,スマート複合材をより効率的に設計するためには,高精度な数値解析モデルが必要であることがわかった.そのため,本研究では Zigzag 理論を用いた数値解析モデルの開発を行った.

開発初期段階の解析対象としては粘弾性層を有するサンドイッチ板(拘束型制振板)を採用した.拘束型制振板は各層において機械的特性が大きく異なるため,従来の積層理論では精度よく解析することが困難であり,Zigzag 理論の適用可能範囲を検証するためには好都合である.

数値解析モデルとして,Ritz 法に基づく振動解析プログラムを開発し,粘弾性層を有する積層板に関して実験結果および他の理論による数値計算結果との振動数比較(図10)を行った.

図10より,一般的な積層理論(CPT, FSDT)では実験結果と比較して,大きな振動数を与えていることがわかる.一方,Zigzag 理論による結果は実験結果とよく一致していることが分かり,Zigzag 理論の優位性が確認できた.また,本理論による数値モデルは三次元 FEM と同程度の精度を有していることも確認できた(雑誌論文).

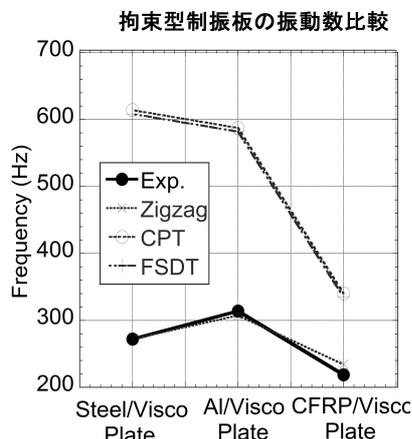


図10 Zigzag 理論と実験および他の理論(CPT, FSDT) との比較

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3件)

Shinya HONDA, Takahito KUMAGAI, Kazuya TOMIHASHI and 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. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.07.010. (査読有)

Shinya HONDA, Teruki IGARASHI, Yoshihiro NARITA, “Multi-objective optimization of curvilinear fiber shapes for laminated composite plates by using NSGA-II”, Composite Part B: Engineering, Vol. 45, 2013, 1071 - 1078. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.07.056. (査読有)

和田 将明, 本田 真也, 成田 吉弘, 遠心力を受ける複合材積層板の振動解析, 日本機械学会論文集(C編), 78巻, 789号(2012) pp. 1586-1595. (査読有)

[学会発表](計15件)

熊谷 貴仁, Zigzag理論を用いた拘束型制振板の振動解析, 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2013, 2013.8.26-30, 九州産業大学, 福岡市, CD-ROM (No. 107, 8.26).

Shinya HONDA, Optimum Design and Experimental Evaluation for Smart Micro-composites by Using Laser Excitation Technique, The 9th International Symposium on Vibrations of Continuous Systems (ISVCS9), Courmayeur, Italy, 21-26 July 2013, pp.28-30.

本田 真也, 「曲線状繊維複合材およびスマート複合材の最適設計に関する研究」, 日本機械学会, 計算力学部門, 設計情報学研究会, Design Informatics (DI) Lecture Series 4, 北海道工業大学 芦原二セコ山荘, 2013. 6.7.

Kazuki WATANABE, Maximization of Vibration Control Performance for Micro Smart Composites with the Laser Excitation Technique, The 15th Asia Pacific Vibration Conference 2 - 6 June 2013, ICC JEJU, Jeju Island, Korea, M1\_303B\_1, USB.

Shinya Honda, Multi-objective optimization of curvilinear fiber shapes for laminated composite plates, UK-Japan Workshop on

Composites, University of Bristol, 25 March, 2013.

本田 真也, 小型スマート複合材の振動制御性能に関する統合最適化とレーザー加振技術による実験的検証, 日本機械学会, 第10回最適化シンポジウム (OPTIS2012), 2012.12.6-7, 神戸市産業振興センター, 神戸市, No.12-37, CD-ROM, 講演番号 1106.

Teruki IGARASHI, Multi - objective Optimization of Fibrous Composites with Curvilinear Fibers for Mechanical Properties and Fiber Geometries, The 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8) 6 - 8 November 2012, KLCC, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kazuya TOMIHASHI, Experimental Modal Analysis of Passive Constrained Layer Damping Plate Using CFRP Material, The 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8) 6 - 8 November 2012, KLCC, Kuala Lumpur, Malaysia.

Kou KOSAKA, Multidisciplinary Design Optimization of Smart Composite Shell for Vibration Suppression, The 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8) 6 - 8 November 2012, KLCC, Kuala Lumpur, Malaysia.

Yuta ISHIBASHI, Static and Vibration Optimization of Composite Structures with 3-D Local Anisotropy, The 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8) 6 - 8 November 2012, KLCC, Kuala Lumpur, Malaysia.

Shinya HONDA, Vibration Characteristics of Bi-stable Asymmetrically Laminated Composite Shell, The 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-8) 6 - 8 November 2012, KLCC, Kuala Lumpur, Malaysia.

Shinya HONDA, Multidisciplinary Design Optimization for Smart Micro-Composite and Experimental Validation by Using Laser Excitation Technique, The 11th Motion & Vibration Conference (MOVIC), Oct. 17-19, 2012, Hilton Fort Lauderdale Marina, Ft. Lauderdale, FL, USA.

Yoshihiro NARITA, Vibration Optimization of Laminated Composite Rectangular Plates with General Elastic Edge Restraints, The

US-Japan conference of Composite Materials ASTM-D30 Meeting, Oct 1-3, 2012, Arlington, TX, US.

渡邊 一希, マイクロスマート複合材の統合最適化とレーザー加振技術による振動制御性能評価, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2012 (D&D2012), 2012. 9.18-21, 慶応大学日吉キャンパス, 横浜市, No. 12-12, USB, 講演番号 440.

Yoshihiro NARITA, Vibration analysis of laminated VGCF / aluminum circular plates with experimental verification, The International Conference on Mechanics of Nano, Micro and Macro Composite Structures, June 18-20, 2012, Politecnico di Torino, Italy.

〔その他〕

所属研究室ホームページ

[http://labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/intelligent\\_design/](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・教授  
研究者番号：00137407

梶原 逸朗 (KAJIWARA, Itsuro)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：60224416