

| | |
|-----------|--|
| 機関番号： | 13601 |
| 研究種目： | 若手研究(B) |
| 研究期間： | 2009 年度 ～ 2010 年度 |
| 課題番号： | 21760167 |
| 研究課題名（和文） | スマート複合材構造の効率的モード別振動計測・制御法の構築と航空宇宙構造への応用 |
| 研究課題名（英文） | Development of Efficient Independent Modal Vibration Measurement/Control Method for Smart Composite Structures and Its Application to Aerospace Structures |
| 研究代表者 | |
| | 亀山 正樹 (KAMEYAMA MASAKI) |
| | 信州大学・工学部・准教授 |
| | 研究者番号： 30302178 |

研究成果の概要（和文）：本研究では、圧電アクチュエータ・センサを用いたスマートストラクチャとしての航空宇宙用複合材構造を対象とし、特定の振動モードの効率的計測・制御を行うための簡易かつ高精度なシステムの構築を行うことを目的とした。数値シミュレーション結果や実験結果を通じて、本研究で提案する計測・制御系設計方法の有効性を示した。

研究成果の概要（英文）： The objective of the present research is to develop a simple, highly precise and efficient vibration measurement/control system for a specific vibration mode, which is for aerospace composite structures with piezoelectric actuators and sensors as smart structures. The validity of the proposed method to design the vibration measurement/control system has been shown through some numerical and experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2009 年度 | 1,800,000 | 540,000 | 2,340,000 |
| 2010 年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |

研究分野： 空力弾性学

科研費の分科・細目： 機械力学・制御

キーワード： モード別振動計測，モード別振動制御，スマート構造，複合材料，
圧電繊維アクチュエータ，圧電センサ，最適化，実験モード解析

1. 研究開始当初の背景

人工衛星の太陽電池パドル等の宇宙構造物は、今後より一層の大型化が予想されるが、構造の大規模化に伴い柔軟かつ軽量の構造特性を有することになる。そのため、大規模宇宙構造物には熱荷重や衛星本体の姿勢制御の影響により、振動が生じやすくなる。宇宙構造物に生じる振動は高真空・微小重力環境下においてほとんど減衰しないため、構造物の安全性・信頼性の観点から受動的あるいは能動的に構造振動を抑制することが重要となる。また、宇宙構造物のみならず、例え

ば航空機翼構造におけるフラッタや突風応答に代表される動的空力弾性応答の制御（空力弾性コントロール）、ヘリコプタやタービンのロータ（回転翼）における振動の抑制についても同様に重要となる。近年では構造にセンサ・アクチュエータを組み込むことで知的構造物を構成し、振動を抑制するための研究が活発に行われている。

構造物の振動は一般に複雑な挙動を示すため、モード座標空間に運動を射影して振動の特性を明確にして扱われることが多い。モード座標空間を利用するセンサ・アクチュエ

ータ系として、モードセンサ・モードアクチュエータが提案されており、考慮した計測・制御モード以外の残余モードの影響による閉ループ系の不安定現象（スピルオーバー不安定）を起しにくい特徴を有することから、国内外においてこれまでに数多くの検討が行われている。

大型・複雑な構造への適用を考慮したモードセンサ・モードアクチュエータの構築方法として、小型のセンサ・アクチュエータを複数個用い、大きさ・配置箇所を最適化する方法がある。一方モード計測・制御とは、計測・制御において特定の振動モードのみをフィルタリングすることを意味しており、対象とする構造物に設置したセンサ・アクチュエータのグループが各々帯域通過フィルタの機能を有していることに他ならない。そこで、従来の構築方法において、外部機器として帯域通過フィルタを併用し積極的に利用することで、必要とされるセンサ・アクチュエータの個数を減らすことができれば、計測・制御系の簡素化が可能となる。また、回転翼の高調波振動を想定した高次振動モードの計測・制御においては、その精度が特に重要となるが、帯域通過フィルタの適切な設定に加えセンサ・アクチュエータの最適配置を行うことで、計測・制御系の高精度化が可能となる。なお、特定の高次振動モードを考慮した複合材構造の高精度振動計測・制御系の構築方法に関する研究は国内外を通じて数少なく、さらにこのような計測・制御系の構築において、センサ・アクチュエータ個数の削減によるシステムの簡素化を実現した例は皆無である。本研究により、圧電アクチュエータ・センサを用いた複合材構造の効率的モード別振動計測・制御システムの構築方法が確立されれば、将来の宇宙太陽発電衛星等の大規模宇宙構造物・航空機・回転翼機・タービン等における複合材構造のアクティブ振動制御技術ならびに構造ヘルスマニタリング技術として、その安全性・信頼性の向上に大きく貢献でき実用的意義も大きい。

2. 研究の目的

本研究では、圧電アクチュエータ・センサを用いたスマートストラクチャとしての航空宇宙用複合材構造を対象とし、特定の振動モードの効率的計測・制御を行うための簡易かつ高精度なシステムの構築を行うことを目的とする。すなわち、(1) 圧電センサ・圧電アクチュエータを用いたモードセンサ・モードアクチュエータ構築方法の開発・検証、(2) 多モード制振のためのモードセンサ・モードアクチュエータ構築方法の開発・検証、(3) フラッタ抑制のためのモードセンサ・モードアクチュエータ構築方法の開発・検証、を行う。

なお、数種類の異なる積層構成・形状・境界条件を有する積層複合材構造を対象として、本研究で提案するモードセンサ・モードアクチュエータの構築方法の有効性を数値シミュレーション、および、実験を通じて多角的に検証することにより、対象とする構造の有する振動特性がモードセンサ・モードアクチュエータの計測精度・制御効果におよぼす影響を詳細に検討し、本提案方法の有効性を実証する。

3. 研究の方法

本研究では、センサ・アクチュエータを貼付した炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics; CFRP）積層板を対象として、センサとして加速度ピックアップ、ないしは、圧電センサを用いる場合に特定の振動モードの計測・制御を行うための簡易かつ高精度なシステムの構築を行うとともに、種々の応用例を通じて、提案するシステムの有効性を検証する。

初めに、最適配置された1個の加速度センサ、ないしは、圧電センサと帯域通過フィルタを併用した機械的に簡便なモード別振動計測系と、最適配置された1個のPZT（チタン酸ジルコン酸鉛）圧電アクチュエータ、ないしは、圧電繊維アクチュエータによって構築される振動制御系を用いた単一モード振動制御の有効性に関して、数値シミュレーションおよび実験による検討を行う。センサ最適配置箇所は観測スピルオーバー最小化規準に基づいて決定し、アクチュエータ最適配置箇所はモード制御力最大化規準に基づいて決定する。また、振動制御のための制御則として線形二次レギュレータ（Linear Quadratic Regulator; LQR）制御則を適用し、モード別状態フィードバック制御に基づく能動的振動制御を行う。また、センサ・アクチュエータ最適配置箇所、ならびにモード別状態フィードバック制御則を、実験モード解析に基づき実験的に決定して構築した単一モード振動計測・制御系の有効性についても併せて検討を行う。

次に、振動制御対象となる構造体とは別に制御対象ではない振動源となる構造体が存在する場合を考え、準能動的振動制御の制振効果を向上する方法として提案されている同調スイッチングダンピング（Synchronized Switch Damping; SSD）に定電圧源を組み合わせさせたSSDV（SSD on Voltage Source）に基づく構造物の制振方法を基礎に、SSDにおける外部電源の代替として圧電エネルギー回収機を用い、構造物の駆動部等の振動源における微小な定常振動エネルギーから変換された電気エネルギーを振動制御に即時利用することにより、外部電源を別途用いることなく準能動的振動制御の制振効果を向上させる方法の

有効性に関して、数値シミュレーションおよび実験による検討を行う。また、圧電素子で圧電効果と逆圧電効果を同時に利用することによりセンシングとアクチュエーションを同時に実現するセルフセンシング・アクチュエーション (Self Sensing Actuation; SSA) を適用し、別途センサを必要としない準能動的振動制御方法の有効性に関して、実験による検討を行う。

なお、航空機翼構造の曲げ・ねじりフラッタにおいては、ねじり振動モードが支配的であることから、ねじり振動モードのみに着目した振動計測・制御系を構築することによってフラッタ抑制が可能となる。最後に、本研究で提案する効率的モード別振動計測・振動制御系のフラッタ抑制における有効性について検討を行う。

4. 研究成果

(1) 研究代表者らが提案したモード別振動計測系の設計方法 (雑誌論文③) に関して、計測対象となる構造物の固有振動数が重複、もしくは近接する場合や、異なる二つの計測対象モードの振動を計測する場合を対象とし、構築したモードセンサの計測精度について検討を行い、数値計算例を通じて提案方法の有効性を明らかにした (学会発表⑥)。

(2) 片持 CFRP 積層板を対象として、1 組の最適配置された加速度ピックアップと帯域通過フィルタ、および最適配置された圧電繊維 (Macro-fiber Composite; MFC) アクチュエータを用いた単一モード振動制御の有効性が明らかとなり、効果的な振動制御系の構築が可能であることを確認した (学会発表④⑤, 雑誌論文②)。

MFC は圧電定数の異方性に加え柔軟性を有することから、これらの特徴を生かし、例えば、曲面を有する構造物や柔軟な構造物を対象とした場合、本提案方法の適用を可能とする。本成果は本研究で提案する振動計測・制御系の構築にあたって MFC アクチュエータを用いる際の効果的な適用方法を示したものである。

(3) 片持 CFRP 積層板を対象として、1 組の圧電センサと帯域通過フィルタ、および PZT 圧電アクチュエータを用いた単一モード振動制御の有効性が明らかとなり、1 組の加速度ピックアップと帯域通過フィルタによって構成されるモード別振動計測系を用いた場合と同様の制御効果が得られることを確認した (学会発表②)。

圧電センサは積層複合材構造への埋め

込みが可能であることから、将来的なスマート構造への適用を考えた場合、構造物の表面に貼付する加速度センサと比較して優位な点が多い。本成果は振動計測の際のノイズ処理において課題が残されているものの、本研究で提案する振動計測・制御系の構築にあたり、圧電センサを用いる際の効果的な適用方法を示したものである。

(4) 片持アルミニウム合金平板を対象として、加速度ピックアップ最適配置箇所、および加速度応答最適印加電圧関係式を実験的に決定して構築した単一モード振動計測・制御系の有効性を明らかにした (学会発表③)。また、圧電センサ最適配置箇所、ならびに圧電 (繊維) アクチュエータ最適配置箇所の実験的決定方法の有効性、さらに片持 CFRP 積層板を対象とした場合の本構築方法の有効性を確認した。

複雑な形状を有する構造物の振動制御を考える場合、その振動減衰特性は複雑であり、また、対象とする構造物が有限要素解析では予測することが困難な境界や結合部を多数有している場合、有限要素モデルでは実際の構造物を完全に再現することが難しく、構造物の振動計測・制御系を実験的に構築する方法が重要であるといえる。本成果はより現実的な構造物を対象として、効果的なモード別振動計測・制御系の構築を可能とする。

(5) 片持 CFRP はりを対象として、定電圧源による同調スイッチダンピング (SSDV) に基づく準能動的制振における定電圧源の代替として圧電素子によるエネルギー回収を導入する方法を提案し、その有効性を確認した (雑誌論文①)。

準能動的制振には多くの利点があり、その発展型である SSDV は制振効果のさらなる向上を可能とするものの、定電圧源を必要とすることは、例えば、限られた電力しか得られない宇宙空間における適用を検討する場合には大きな問題となる。本成果はこの問題を解消するとともに、構築する振動計測・制御系の効率化を図ることができる。

(6) 片持アルミニウム合金平板を対象として、別途センサを必要としない新たなセルフセンシング準能動的制振方法を提案し、単一モード振動制御、および多モード振動制御における有効性を確認した。また、片持 CFRP 積層板を対象とした場合の本提案方法の有効性を確認し

た(学会発表①).

本提案方法は、準能動的制振方法の制振過程において、用いる圧電素子に蓄積される電荷量が一定値を保つ時間が長いことを利用する点に独創性がある。

- (7) 航空機翼構造の曲げ・ねじりフラッタにおいて支配的なねじり振動モードのみに着目した振動計測・制御系を用いたフラッタ抑制方法では、計測・制御における精度(つまり、観測・制御スปีルオーバー)、ならびにアクチュエータ性能が特に重要となる。前述した研究成果を通じて、帯域通過フィルタのフィルタリング性能や圧電素子のアクチュエーション機能の向上が実現されれば、本研究で提案する効率的モード別振動計測・振動制御系のフラッタ抑制への適用可能性は格段に向上することが予想できる。

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)

- ① 亀山正樹、高柳宜孝、福永久雄、圧電素子によるエネルギー回収を利用した CFRP はり構造の準能動的制振、日本航空宇宙学会論文集、査読有、第 58 巻、2010、340-348。
- ② 亀山正樹、宮本裕二、福永久雄、圧電繊維アクチュエータを用いた CFRP 積層板の単一モード振動制御、日本複合材料学会誌、査読有、第 36 巻、2010、222-229。
- ③ 亀山正樹、圧電材料を用いた CFRP 構造の振動制御、強化プラスチック、査読無、第 55 巻、2009、222-229。

[学会発表](計 6 件)

- ① 山田貴之、菅野充俊、亀山正樹、福永久雄、圧電素子を用いた CFRP 積層平板のセミアクティブ振動制御、第 23 回計算力学講演会、2010 年 9 月 25 日、北見。
- ② Masaki KAMEYAMA, Hisao FUKUNAGA, Single Modal Vibration Control of Laminates Plates based on the Optimal Placement of a Sensor and an Actuator, 18th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, 2010 年 9 月 6 日、奈良。
- ③ 亀山正樹、吉田匡志、福永久雄、実験モード解析に基づく平板の単一モード振動制御、第 52 回構造強度に関する講演会、2010 年 7 月 22 日、鳥取。
- ④ 宮本裕二、亀山正樹、福永久雄、圧電繊維アクチュエータの最適配置に基づく平板の振動制御、日本機械学会東北支部第 45 期総会・講演会、2010 年 3 月 12 日、

仙台。

- ⑤ 亀山正樹、宮本裕二、福永久雄、圧電素子を用いた CFRP 積層板の振動制御、第 1 回日本複合材料合同会議、2010 年 3 月 11 日、京都。
- ⑥ 亀山正樹、福永久雄、加速度センサの最適配置に基づくモードセンサ設計に関する一検討、第 51 回構造強度に関する講演会、2009 年 7 月 22 日、田辺。

6. 研究組織

(1)研究代表者

亀山 正樹 (KAMEYAMA MASAKI)

信州大学・工学部・准教授

研究者番号： 30302178

(2)研究分担者

該当なし

(3)連携研究者

該当なし