

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560273

研究課題名(和文)波動吸収原理によるスマート柔軟アームの試作と設計法に関する研究

研究課題名(英文) Design and prototype manufacturing of a smart flexible arm based on the wave absorbing principle

研究代表者

西垣 勉 (NISHIGAKI, Tsutomu)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：80251643

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、薄肉構造物の境界からの反射波を吸収する波動吸収制御法を圧電フィルムの利用によって実現することを目的とした。制御対象モデルとして、柔軟回転アームなどにも適用可能な片持ばりを取りあげ、適切に形状を設計された圧電フィルムセンサとアクチュエータがその表面に貼付されて一体化されたスマート片持ばりを作製し、理論解析および実験によって複数の振動モードに跨る広い周波数範囲にわたって制御効果が期待できることを示した。また、実験では1次モードを中心とする低周波数ほど理論解析結果に相当する効果が得られ、回転アームに適用した場合には、回転に伴う慣性力の影響が本圧電素子系では対応困難であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a wave absorbing technique, i.e. the technique which cancels the reflection wave at the end point of the flexible thin structure, was investigated using piezoelectric films. At first, a cantilever beam, which can be applied to the flexible rotating arm, was introduced as the controlled structural model. Then, a smart cantilever beam, on which appropriately shaped piezoelectric film sensors and actuators were bonded, was manufactured. Theoretical analysis and experiments were performed and it was shown that vibration control effects will be expected for broad band frequency range including several vibrational modes. Furthermore, vibration control effects in the laboratory experiment showed good agreement with those in the theoretical analysis when the excitation frequencies were low enough. It was also confirmed that it is difficult to apply the proposed method to the flexible rotation arms, since the influence of the inertial force cannot be neglected in the experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械力学・制御

キーワード：圧電フィルム 波動吸収制御 柔軟アーム スマート構造 振動制御

1. 研究開始当初の背景

- (1) 振動入力が構造物に作用すると、入力位置から構造物の境界に向かって進行波が伝播し、その境界で反射した後退波が入力位置に向かって伝播してくる。構造物に振動が励起されるメカニズムは、この進行波と後退波が重畳されて強め合うことで大きな振幅の振動となると説明される。そこで、もしこの2つの波動のどちらかを制御により消去することができれば、構造物には定在波としての振動は一切励起されない。この波動吸収原理は1980年代から研究され、おもに宇宙構造物など大型構造物への応用を対象として進められてきた。
- (2) 波動吸収制御が実現すれば、柔軟な構造物であっても無振動状態に近づけることができる。また、正弦波(定常)入力だけでなく、衝撃入力など突発的な外力に対しても、素早く振動のエネルギーを吸収し、残留的振動を発生させない構造システムの実現が期待できる。片持ばり型の柔軟アームを例として考えれば、アームの高速化、高精度化、軽量化等多くの性能向上を図れると考えられる。
- (3) しかし、大型構造物よりもはるかに薄肉・軽量の構造物にこの波動吸収原理を適用する方法は確立されていない。薄肉軽量の構造物に適用するセンサやアクチュエータは、少なくとも制振対象構造物よりもはるかに小型軽量でなければならず、当該制御法の適用できるハードウェアの構成自体が難しいからである。
- (4) 研究代表者(西垣)はこれまでに、PVDF(高分子圧電フィルム)を用い、その形状を適切に設計すれば、片持ばりの先端において、波動吸収制御が実現可能であることを理論解析によって示唆し、実際に片持ばりに三角形と長方形のセンサ/アクチュエータを用いた強制振動応答実験において、1次と2次の振動モードの共振周波数近傍では、定在波がほとんど立たない状態が実現できる可能性を示した。
- (5) 波動吸収制御法では一般に、制御に必要な検出・操作量として、構造物の境界における複数の物理量が取り扱われる。制御対象を柔軟はりとした場合、波動吸収制御の理想的状態のひとつであり反射波を励起させない、Matched Termination条件は、はりの境界において曲げ変位、たわみ角からせん断力、曲げモーメントへの2入力2出力フィードバック制御則として表現される。
- (6) しかし、極限まで薄肉・軽量化された非常に柔軟なはりの場合、現実にはこのような同時検出、同時操作は困難なため、波動吸収制御はシミュレーションはできても実現は難しいとされてきた。

2. 研究の目的

- (1) 本研究では、適切に形状を設計された圧電フィルムセンサとアクチュエータがその表面に貼付されて一体化され、波動吸収制御機能を実装したスマート片持ばりを開発し、当該構造物の制振効果を実験によって定量的に明らかにし、広帯域にわたって波動吸収原理が作用できる構造物システムの設計基準について示すことを目的とした。
- (2) 研究代表者らはこれまでに、圧電フィルムを用いれば、境界において曲げ変位、たわみ角を同時検出し、せん断力、曲げモーメントを操作することが原理的に可能であり、さらに、センサからアクチュエータへの直接速度フィードバック制御によっても波動吸収制御に極めて近い状態が実現できることを理論解析によって示した。また片持ばりの強制振動制御実験によって、低次モードの共振周波数近傍で、ほとんど定在波が励起されないことを実証した。過去に、圧電フィルムのみによっては構造物に波動吸収制御を実現した例はなく、この成果が研究代表者の業績の特色のひとつであるといえる。
- (3) 波動吸収制御では、構造物の振動応答を振動モードで離散化せず、本質的に分布定数系としてとり扱うため、広い周波数範囲にわたって大きな制振効果が期待できるとされている。片持ばりで実現されている場合、基礎部への励振入力エネルギーは先端へと向かう進行波のエネルギーとなり、先端において反射波がほとんど励起されないことから根元に向かうエネルギーは極めて小さくなる。したがって、周波数によらず、根元から先端に向けてエネルギーが一方通行で伝播する状態となる。
- (4) 本研究課題では、以上の経緯によってきわめて実現が近くなった、外力によって励振されてもほとんど振動しない柔軟ばり、すなわち無振動はりの実現およびそのスマート柔軟アームとしての設計手法の確立を目指す。
- (5) 本研究は、薄肉構造物に適用するために採用した圧電フィルムセンサ/アクチュエータの形状設計を積極的に行うことによって、波動吸収原理の周波数領域での適用範囲を最大限に拡張することで、軽量・シンプルなスマート構造システムの開発に取り組むものであり、過去のどの研究にも見られない手法である。その理想的状態が構成できたならば、衝撃入力等、過渡的現象を伴う振動問題に対しても、構造物にほとんど残留振動を残さないことができ、その応用範囲は広いと考えられる。

### 3. 研究の方法

本研究では、圧電フィルムをセンサおよびアクチュエータとして一体化したスマート片持ばりを作製し、波動吸収原理を適用した制御システムを構築する。また、その基本動作特性を定量的に検証した。試作したスマート片持ばりの構成法を種々のサイズ・材質のほりに適用し、波動吸収制御の周波数領域での効果を検証する。また、柔軟回転アームとしての特性の評価も試みる。以上により、広周波数帯域にわたって波動吸収制御が作用する構造システム構成法を明らかにした。

- (1) 厚さ 0.5mm、長さ 30cm 程度のアルミニウム製の片持ばりを作製し、その表裏に圧電フィルムをセンサ/アクチュエータをそれぞれ長形状/三角形として貼付する。センサからの出力電圧をアクチュエータに直接速度フィードバックすることで、はり先端において波動吸収制御が実現できる。このフィードバック系の構成にデジタル・シグナル・プロセッサおよび精密電力増幅器を用いた。
- (2) はりの固定端をジグを介して動電型加振器のヘッドに取り付け、5~200Hz 程度の周波数範囲で調和加振し、はり先端相対変位の周波数応答を測定する。ここで、非制御時と制御時の測定結果を比較することで、波動吸収制御系が構築できたことを検証する。振動モードのピーク位置において、最大 20~30dB 程度の振幅低減効果が期待される。
- (3) (2)の実験で、最も大きな制御効果が観測できるのは、センサ/アクチュエータが長方形/三角形の場合とは限らない。速度フィードバックによるアクティブ振動制御系においては、実際には制御不安定化を回避するため、ローパスフィルタ効果を導入しなければ、安定して制振効果を得ることが困難だからである。
- (4) (3)の考察から、他の形状のセンサおよびアクチュエータも考案し、それらを実装した片持ばりを試作して、実験を繰り返す。なお、このセンサ/アクチュエータの形状設計手法には、研究代表者が過去に導出した方法が使用できる。
- (5) 以上により、考慮する周波数範囲内のどの周波数で基礎部を励振されても全く振動が起こらない、無振動はりを完成させる。無振動はりは、研究内容を社会に広く発信し、アピールするためのデモ装置としても利用できる。
- (6) 次に、無振動はりを利用した柔軟アームの振動減衰特性の解明およびその設計手法の確立に取り組む。
- (7) まず、厚さ 1mm、長さ 0.5~4m 程度のアルミニウム製のほりに圧電フィルムセンサとアクチュエータを貼付し一体化させたスマート片持ばりを作製する。構造物の 1 点を動電型加振器で励振し、波動吸収制御しない状態（非制御）での周

波数応答を計測する。計測にははりの 1 点における変位振幅を対象とし、レーザー式変位センサを用いる。同様に、波動吸収制御を作動させた状態（制御時）のほりの周波数変位応答を計測する。両者を比較し制振効果を検証する。

- (8) 次に、システムの設計手法の確立を志向して、当該スマートはり構造物の、振動応答解析を行う。基礎励振を受ける片持ばりの波動吸収制御シミュレーションは既報で一部実行しているが、実験において試行した 1 ケースの解析しか行っていない。(7)の実験で用いた種々のパラメータをもつスマートはりを対象として、数値解析によって周波数応答を計算し、(7)の実験結果と比較することで、理論解析の妥当性を検証する。
- (9) スマートはりの制振効果は、センサ/アクチュエータ形状とコントローラの伝達関数のマッチングにも大きく左右されると予想される。この影響を調べるために、センサ/アクチュエータ形状とコントローラの伝達特性を変化させ、理論解析および実験的に制振効果が大きくなる場合の設計条件を明らかにする。
- (10) 次に、提案するスマートはりを柔軟回転アームに適用した場合の、振動減衰特性および回転アームの動作特性の検証を行う。スマートはりの基礎部を AC サーボモータの出力軸に固定し、アームに一定の回転角を与えて素早く静止させるという運動を考え、回転動作停止後からの残留振動応答を非制御時および制御時で検出し、両者を比較する。
- (11) 最後に、はりに衝撃入力作用する場合の過渡振動応答の減衰特性について検証する。インパクトハンマではりに衝撃入力を与えた場合の制振実験を試みる。波動吸収制御が理想的に実現していれば、この過渡応答の減衰特性は極めて急峻なものとなる筈であるが、実験的に実現され得るかを検証する。
- (12) 本スマート柔軟アームの実現性について、実際にはセンサとアクチュエータの電磁氣的干渉等、種々の影響から制御システムの理想的動作が難しくなることも考えられる。その場合、圧電フィルムを積層させシールド構造とし、またセンサとアクチュエータの厚さを変化させる等の対策をとる。また理論においても上述の干渉の影響を取り入れた解析も試行し、理論解析結果が実験結果を精度よく予測できるように修正する。
- (13) 最後に、スマート化され波動吸収原理が適用された柔軟アームの実際の制振効果、および広周波数帯域にわたって制振効果を得るための構造システムの設計方法について、本研究で得られた知見を総括し纏める。

#### 4. 研究成果

- (1) 平成 23 年度はまず、適切に形状を設計された圧電フィルムセンサとアクチュエータがその表面に貼付されて一体化されたスマート片持ばりを作製し、センサおよびアクチュエータの形状は、長方形形状および三角形形状として、これらの基本特性の測定を実施し、第一段階として、アナログ制御回路系コントローラを構築して、自由振動制御実験を試みた。センサに混入する電磁ノイズが制御効果およびシステムの安定性に大きく影響し、波動吸収制御の実現には至らなかった。また並行して、理論解析モデルの構築と、数値解析の実施により、圧電フィルムを貼付したはりの自由振動応答を評価した。以上の理論および数値解析結果は、再度検証の後、今後学会発表等により公表する。
- (2) 平成 24 年度はまず、はりの周波数応答を数値解析によって求め、長方形フィルムと三角形フィルムとの組合せにより、複数の振動モードに跨る広い周波数範囲で制御効果が期待できることを確認した。次いで、電磁ノイズ対策の意味から積層化された圧電フィルムセンサおよびアクチュエータの貼付された片持ばりを用いて制御実験を実施し、はりの基礎部に強制調和変位励振入力がかかる場合について、はり先端変位振幅で制御効果を評価した結果、1 次振動モード(4.6Hz)を中心とする低周波ほど理論解析結果に相当する-10dB 以上の効果が得られた。
- (3) 平成 25 年度は、さらなる制御効果の向上および回転アームへの適用について検討した。コントローラをデジタル信号処理系で組み直して高精度化し、さらにはりの相対変位応答を基礎と先端の 2 点のレーザー変位センサで評価した。その結果、低周波側(1 次モード(4.6Hz)、2 次モード(28.8Hz)を含む)では波動吸収に近い状態が実現できることが確認された。さらに回転アームに適用した場合の実験を試みた。スマート片持ばりの基礎部を AC サーボモータに取り付けて回転アームとし、はりが約 90° 回転したのち静止した場合について実験した。その結果、回転アームに適用した場合には、残留振動の抑制に一定の効果は見られるものの、回転に伴う慣性力が本圧電素子系では準静的観測信号となつて対応困難であることがわかった。
- (4) スマート構造の振動制御分野として位置づけられる本研究は、現製品の性能向上等に直接的にフィードバックできる

段階にはないが、その構造システム設計手法は将来にわたって普遍的に有効であり、学会発表時にも反響の大きい研究テーマである。研究代表者は 2000 年以前から研究に着手してきたが、構造振動工学の学术界全体として明らかに”spatial approach”と呼ばれる一分野が形成されつつある。その創成期において、最も基本的な原理を押さえておくことは重要であり、圧電素子応用という観点からも将来有望であると考えられる。

- (5) 今後の課題として、回転アームの回転後残留振動に対応させるため、振動応答以外の準静的観測信号の影響を排除する新たな観測/制御手法の開発、本実験系よりさらに柔軟かつ大規模な回転アームの微振動制御問題への適用と波動吸収制御効果の定量的検証、の 2 点が挙げられる。

#### 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 0 件)

[学会発表](計 3 件)

Tsutomu Nishigaki, Active vibration control using noncollocated piezoelectric film sensor/actuator, Proceedings of SPIE vol.7977, paper No. 7977-97, 2011 年 3 月 8 日, サンディエゴ市(米国)

西垣勉, 奥村洋平, 圧電フィルムの最適シェーピングを志向した柔軟ばりの振動制御について, 日本機械学会第 10 回最適化シンポジウム, No.12-37, p.24, 2012 年 12 月 6 日, 神戸市

[図書](計 0 件)

[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 なし

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西垣 勉 (NISHIGAKI Tsutomu)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号: 80251643

(2) 研究分担者 該当なし

(3) 連携研究者 該当なし