

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007-2008

課題番号：19360387

研究課題名（和文） 音響エネルギー回生手法に基づくフェアリング音響低減システムの研究

研究課題名（英文） A Study of Acoustic Damping System of Nose Fairing Based on Acoustic Energy Recycling Method

研究代表者

峯杉 賢治 (MINESUGI KENJI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・准教授

研究者番号：90239327

研究成果の概要：本研究は、衛星を覆うノーズフェアリングと呼ばれる殻状のロケットの構造物に振動エネルギーを電気エネルギーに変換する圧電素子を貼り付けて、ロケットの飛行中に衛星に加わる音響を小さくすること目的としている。そのために、音によって発生した振動エネルギーを電気エネルギーに変えるだけでなく、その電気エネルギーを適切なタイミングで圧電素子に戻すことでノーズフェアリングの動きを制御し、それを透過する音を小さくする実験を実際のノーズフェアリングを模擬した構造物で実施した。その結果、この手法が有効であること、及び、多数の圧電素子を用いる場合の制御系設計方法について知見が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：構造工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：準能動的制御、エネルギー回生、音響低減

## 1. 研究開始当初の背景

ロケットの打ち上げ時に、フェアリング内の人工衛星等の宇宙機は厳しい音響環境に曝される。特に、観測用薄膜センサーなどに大きな損害を与える可能性がある。この音響環境が衛星搭載機器の重要な設計ファクタのひとつとなっており、損傷防止の対策に多大な時間・重量・コストを要している。したがって、音響の低減は非常に有用である。以下に従来の音響低減対策を示す。

## (1) 従来音響低減手法1

フェアリングの内壁面にグラスウール等を敷き詰める受動的な低減法である。本手法は、ロケットの厳しい重量制限や搭載空間の制約の為、効果的な音響低減は難しい。グラスウールは、高周波領域においてはある程度の効果が認められるが、おおよそ500Hz以下の低周波音響の低減に殆ど効果がない重大な欠点を有している。

## (2) 従来音響低減手法2

音響外乱と逆位相の音響を意図的に発生させ打ち消し合うアクティブ手法も提案さ

れている。第一の欠点として、アクティブ制御の不具合で同位相になる最悪の場合が起こり得る。この最悪の事態を懸念して設計をすれば、無制御のフェアリングよりも強固かつ重い設計となり、本末転倒な結果となる。第二の欠点として、アクティブ制御は外部エネルギーを多大に用いるので重量増に繋がるバッテリー等のエネルギー供給源が必要であり、重量・エネルギー制限のあるロケットへの適用は難しい。

そこで、①重量を殆ど増加させず、②制御システムに不具合が起きて安定で、③外部エネルギーを極力用いず、④衛星設計の厳しい周波数帯の音響を効果的に低減できる、音響低減手法が切望されてきた。

## 2. 研究の目的

申請者らは、長年にわたり、エネルギー回生型準能動的制振手法の研究を行ってきた。本手法は、構造物に貼り付けられた圧電素子によって、構造物に励起された振動エネルギーを電気エネルギーに変換し、且つ、その電気エネルギーを適切なタイミングで圧電素子に戻すことで制振に有効な制御力を圧電素子に生じさせることにより、従来の準能動的制振手法の制御効率を向上させるというものである。これまで、本手法の妥当性を理論的及び実験的に検証してきた。

この手法を応用し、音響低減のために、音響が透過する構体に音響加振で生じた振動エネルギーを圧電素子によって電気エネルギーに変換し、その電気エネルギーを適切なタイミングで圧電素子に戻すことで構体の振動を抑制し、その結果として、透過する音響を低減する革新的な手法を提唱し、薄いアルミ平板でその音響低減効果を実証してきた。この音響低減手法は、重量を殆ど増加させず、外部エネルギーを制御に用いないので、制御間違いがあっても常に安定で、効果的な音響低減が達成できる等多数の長所がある。

本研究の最終的な目標は、上記の音響低減手法を実際のノーズフェアリングに適用し、500Hz以下の帯域での外部から内部へ透過する音を低減することである。そのための基礎研究として、本研究では、ノーズフェアリング構体に一般的に用いられるハニカムサンドイッチ板で製作された三次元構体に本音響低減手法を適用するためのシステムを構築し、その効果を実験的に検証することである。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず、ハニカムサンドイッチの平板による音響低減実験を行ってその効果の確認を行った後に、ハニカムサンドイッチ板で構成された円筒殻による音響低減実験を行った。以下にその方法を示す。

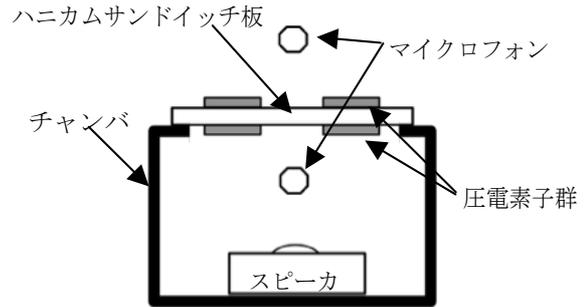


図1. 試験コンフィギュレーション

### (1) ハニカムサンドイッチ板音響低減実験

ノーズフェアリングには一般的にハニカムサンドイッチ構体が採用されているが、その最も単純な平板の透過音響低減に提案した制御手法が有効であることを検証するため、以下のような手順で実験を行った。

- ① 実験で用いる圧電素子の特性を取得し、その周波数依存性等を確認する。
- ② 表面板が厚さ 0.75mm の GFRP 積層板、コアがコア高さ 10mm でセルサイズが 3/16 インチのノーメックスハニカムで構成された 400mm×500mm のハニカムサンドイッチ板を製作し、図1に示すように、音響チャンバ、スピーカからなる実験系に組み込む。
- ③ ハニカムサンドイッチ板の有限要素法によるモード解析を行うと共に、その動特性をスピーカによる音響加振によって確認し、圧電素子の張り付け位置を決定する。
- ④ 音響低減手法に必要なインダクタンス、スイッチ、ダイオードからなるアナログ電気回路を自作する。これらの部品の個々の性能が制御性能に与える影響を評価し、これを電気回路の設計に反映する。
- ⑤ ハニカムサンドイッチ板に貼り付けられた圧電素子群とアナログ電気回路を結合し、PC にインストールした自作の制御用ソフトでアナログ電気回路のスイッチを切り替えることで、圧電素子群の電荷の移動の制御を行う。
- ⑥ ハニカムサンドイッチ板を透過する音の大きさの変化を音響チャンバの内外に設置されたマイクロフォンを用いて計測し、本制御手法の音響低減効果を検証する。また、圧電素子のつなぎ方に対する制御効果についても確認する。

### (2) サンドイッチ円筒殻音響低減実験

実際のフェアリングに近い円筒殻に対して、本制御手法の透過音響低減効果の検証を行うことと共に、実際に近い円筒殻と平板との低減効果の差異に関する知見を得る目的で、以下に示す手順で音響低減実験を行った。

- ① ハニカムサンドイッチ平板と同じ材料、

構成のハニカムサンドイッチ板を用いて、直径 1550mm、高さ 1000mm、厚さ 11.5mm のサンドイッチ円筒殻を製作する。図 2 にその円筒殻を示す。

- ② 円筒殻の有限要素法による数学モデルを作成し、その弾性振動モードを導出する。
- ③ ハンマリング及びスピーカによる音響加振によって、有限要素法で導出された弾性振動モードを同定する。
- ④ 同定された振動モードから制御モードを選出し、そのモード形状に基づいて、圧電素子を貼る位置を決定する。本実験では、図 2 に示すように円筒殻の一部に表裏 1 対とした圧電素子計 36 対を菱形形状に貼り付けた。
- ⑤ 圧電素子の各対の接続方法を簡便に切り替えること出来るボードを考案・製作し、圧電素子群をこのボードを介して、ハニカムサンドイッチ板音響低減実験に用いた自作のアナログ電気回路に接続する。
- ⑥ 円筒殻内部に加音用のスピーカを設置し、円筒殻内外部に設置されたマイクロフォンで円筒殻を透過する音圧の低減、円筒殻表面に貼られた加速度センサ及び制御用以外の圧電素子で円筒殻の振動の低減を測定する実験系を構成する。
- ⑦ アナログ電気回路のスイッチを切り替えることで圧電素子群の電荷の移動を制御して、本手法の音響低減効果を確認すると共に、圧電素子のつなぎ方の効果も確認する。

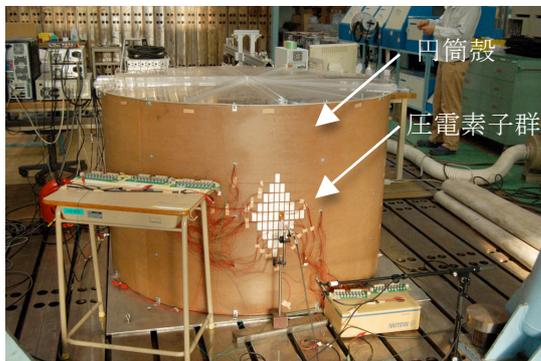


図 2. 円筒殻音響低減実験

#### 4. 研究成果

2 つの実験の結果から得られた成果を以下に記載する。

- (1) ハニカムサンドイッチ板音響低減実験  
サンドイッチ板の有限要素法によるモード解析と実物のモード同定に基づいて、透過音響が大きくなる固有振動数 280Hz の曲げ振動モードをターゲットとして、音響低減実験を行った。図 3 に本実験の代表的な結果を示す。立体棒グラフの手前側は図 1 に示すチャンバ内部のマイクロフォンからチャンバ外部のマイクロフォンへの音圧の伝達率を示している。縦軸は、図中の「No Control」

で示された制御を行わない場合の伝達率を 1 とし、それに対する比率になっている。奥側はチャンバ内部のマイクロフォンの音圧からハニカムサンドイッチ板中央部に取り付けられた加速度センサで計測された応答加速度への伝達率を示している。縦軸は、手前側と同様に「No Control」で示された制御を行わない場合の伝達率を 1 とし、それに対する比率になっている。

圧電素子のつなぎ方については、20 対の圧電素子群を同じ対の数のグループに分けて、各グループ内の対同士は並列につなぎ、グループ間は直列につなぐという手法となっている。図中の「5 Series」は 20 対の圧電素子を各 4 対の 5 グループに分けて、各グループの 4 対同士は並列につなぎ、5 グループ間は直列につないでいることを示している。同様に、「10 Series」は各 2 対の 10 グループに分けた場合であり、「20 Series」は 20 対すべてを直列につないだ場合になる。本実験の結果より、得られた主な成果を以下に示す。

- ① 音圧伝達率が制御無しの場合と比較して制御有りの場合に有意に減少していることより、エネルギー回生型準能動的手法がハニカムサンドイッチ平板を透過する音響の低減に効果があることが実証された。
- ② 圧電素子の内部抵抗が無視できる程度であるという仮定の下での解析で予測されていた、圧電素子群の直列度を高くすると音響低減効果が向上することが、本実験で用いた圧電素子数の範囲内において確認された。
- ③ 音響の減少率は透過する平板の加速度応答の減少率とほぼ同じであることが確認された。

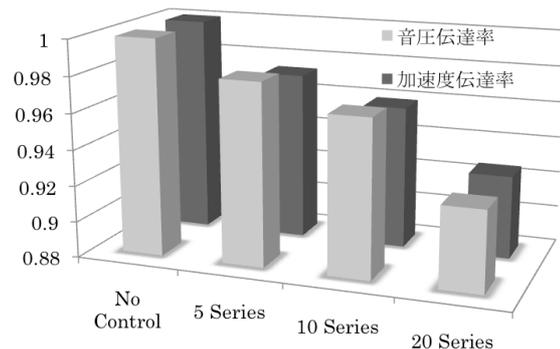


図 3. ハニカムサンドイッチ板音響低減実験結果

- (2) サンドイッチ円筒殻音響低減実験  
円筒殻の有限要素法によるモード解析と実物のモード同定に基づいて、透過音響が大きくなる固有振動数 117Hz の振動モードをターゲットとして、音響低減実験を行った。図 4 ~ 6 に本実験の主な結果を示す。立体棒

グラフの棒の高さは、制御していない場合に対して制御を行っている場合の内部音響から各部パラメタへの伝達率の減少率を百分率で示している。

圧電素子のつなぎ方については、ハニカムサンドイッチ板の実験と同様に、36 対の圧電素子群を対の数と同じグループに分けて、各グループ内の対同士は並列につなぎ、グループ間は直列につなぎという手法となっている。図中の「4 Series」は各 9 対の 4 グループに分けて、各グループの 9 対同士は並列につなぎ、4 グループ間は直列につないだつなぎ方を示している。同様に、「6 Series」は各 6 対の 6 グループに分けた場合であり、「36 Series」は 36 対すべてを直列につないだ場合になる

① 図 4 には、円筒殻内部の設置されたマイクロフォンで計測された音圧に対する圧電素子群を菱形状に貼り付けた部位から 100mm の位置に配置した円筒殻外部マイクロフォンで計測された音圧の伝達率の低減率を示している。棒グラフの各行はアナログ回路で使用したコイルのインダクタンス毎に並べられている。この結果より、エネルギー回生型準能動的な手法が、ノーズフェアリングを模したハニカムサンドイッチ板の円筒殻を透過する音響を低減することに有効であることを実証した。

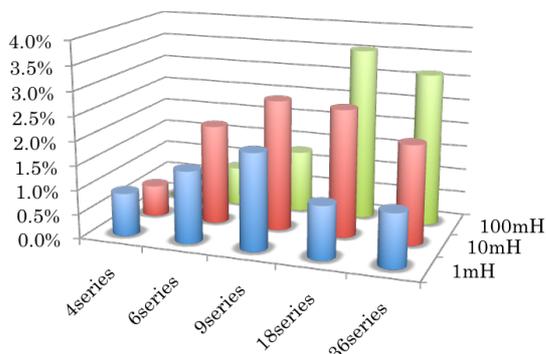


図 4. 透過音響伝達率の低減率

② 図 5 に 10mH のコイルを使用した場合の圧電素子群を菱形状に貼り付けた部位から 100mm の位置に配置した円筒殻外部のマイクロフォン AM2 で計測された音圧、その位置から円筒殻に沿って 180 度回った位置に配置したマイクロフォン AM4 で計測された音圧、及び、圧電素子群のほぼ中央の円筒殻外表面に貼り付けられた加速度センサ AC1 で計測された加速度それぞれについて円筒殻内部マイクロフォンで計測された音圧に対する伝達率の低減率を示す。これより、圧電素子貼り付け位置を透過する音響だけでなく、貼り付けていない部位から透過する音響に対しても、本手法によって音響が低減することが実証された。しかしながら、圧電素子貼り付け

位置近傍に比較してその他の部位の音響低減率が低下しており、その低減率は一様ではないことが確認された。

また、前述のハニカムサンドイッチ板音響低減実験において図 3 に示したように、音響低減効果と加速度低減効果はほぼ同じであった。しかし、本実験の円筒殻の場合では、図 5 の AM2 と AC1 を比較すると明らかなように、振動加速度低減率と音響低減率の変化の傾向は似ているが、その絶対値については振動加速度低減率に比べて音響低減率がかなり小さいことが認められた。これは、音響低減効果が低い部位からの透過音響の影響と想定される。

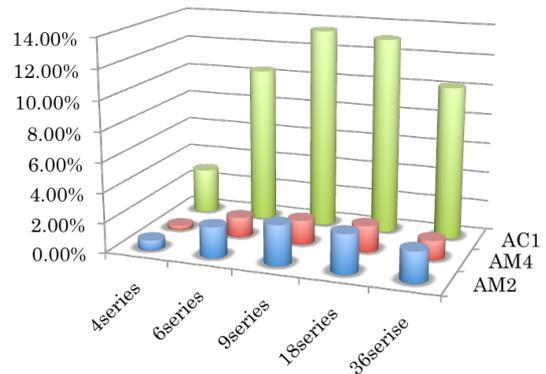


図 5. 伝達率の低減率比較

③ 図 6 に加速度センサ AC1 で計測された振動加速度伝達率の低減率を圧電素子のつなぎ方とアナログ回路に使用したコイルのインダクタンスをパラメタとして示す。図 4 のマイクロフォン AM1 の透過音響伝達率の低減率と同様に、圧電素子群の接続の直列度の増加に対して減少率が極値を示している。これは、ハニカムサンドイッチ板音響低減実験において図 3 に示したように、直列度の増加に対して低減率が向上することと異なる結果となっている。

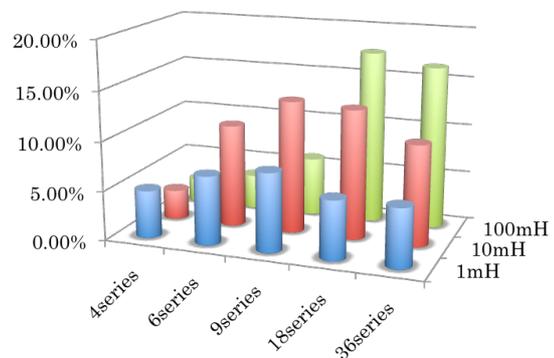


図 6. 振動加速度伝達率の低減率

これについて、各接続方法において圧電素子群全体のインピーダンスの計測を行った結果、電気容量は圧電素子群に負荷される電圧の周波数に対してほぼ一定であるが、抵抗値はその周波数が高くなると小さくなることが計測された。エネルギー回生型準能動的手法のアナログ回路はこの圧電素子群と共にLCR回路を構成しており、その特性周波数は圧電素子群の接続方法に依存して変わる。アナログ回路の特性周波数とその周波数で計測された圧電素子群の抵抗値を用いて制御効率を求めると、実験結果とほぼ符合する結果が得られた。ハニカムサンドイッチ板音響低減実験結果で述べたように、従来、圧電素子の直列度を増加させると制御効率が向上すると考えられてきた。しかしながら、この実験結果により、ハニカムサンドイッチ板の場合は比較的圧電素子の枚数が少なかったために直列度の増加に対して制御効率が向上するような範囲で実験していたと判断される。したがって、実際の宇宙機に適用させるような大量の枚数の圧電素子を用いる場合においては、制御効率を向上させるために圧電素子の接続方法はその抵抗値の周波数依存性を考慮して決める必要があることを示した。

### (3)まとめ

圧電素子を用いた音響エネルギー回生手法を実際のノーズフェアリングを模した構造物に適用した実験を行った。その結果、以下の成果が得られた。

- ① 本手法がハニカムサンドイッチ構造の円筒殻の音響低減に有効であることを実証した。
- ② 円筒殻の局所に圧電素子を貼り付けた場合でも、円筒殻全体の音響低減に本手法は有効であるが、その低減効果は場所に依存し一様ではないことを確認した。
- ③ 本手法で多数の圧電素子を貼り付けた場合は、圧電素子のつなぎ方と制御用のアナログ回路の周波数特性の関係により、制御効率が極値を持つことを示し、制御系設計の指針を与えた。

この研究により、外部エネルギーの投入が少なく、且つ、単純なアナログ回路で音響低減が可能なが示され、今後、実際のロケットの搭載機器や衛星への音響環境緩和に本手法が寄与すると想定される。さらに、一般生活においても、騒音が問題になるような場所で本研究成果を活用できると思われる。

## 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2件)

- ① 峯杉賢治、下瀬滋、小野田淳次郎、Peters, P.、エネルギー回生型準能動的制御法を用いた音響低減手法、第51回構造強度に関する講演会、1A09、和歌山県田辺市、2009年7月22日、pp.25-27.
- ② Shimose, S.、Minesugi, K.、Onoda, J.、Performance evaluation of energy recycling semi-active vibration suppression method with multiple piezoelectric transducers, SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, 7643-57, San Diego, USA, March 10<sup>th</sup>, 2010.

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

峯杉 賢治 (MINESUGI KENJI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究本部・准教授  
研究者番号：90239327

### (2)研究分担者

無し

### (3)連携研究者

小野田 淳次郎 (JUNJIRO ONODA)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究本部・教授  
研究者番号：20013740

竹内 伸介 (SHINSUKE TAKEUCHI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究本部・助教  
研究者番号：20353419

下瀬 滋 (SHIGERU SHIMOSE)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究本部・主任開発員  
研究者番号：80443282

