

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360386

研究課題名(和文) エネルギー回生型準能動的制振の実用性の飛躍的向上に向けた無電力化の研究

研究課題名(英文) Establishment and demonstration of self-powered digital vibration suppression technique

研究代表者

小野田 淳次郎 (JUNJIRO ONODA)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・所長

研究者番号：20013740

研究成果の概要(和文)：

圧電素子により振動エネルギーから変換した電気エネルギーを用いて多モード制御ロジックを組み込んだマイクロプロセッサを駆動し、これに同圧電素子に接続した準能動的制振回路の制御を行わせることにより、外部からの電力供給が全く不要で、制振効率が高く、かつ絶対安定性をもつエネルギー回生型準能動的制振手法を確立し、その有効性を実験で実証した。これによりエネルギー回生型準能動的制振の実用性を大きく向上させた。

研究成果の概要(英文)：

A self-powered digital vibration suppression technique has been established and demonstrated.

A piezoelectric actuator attached to a vibrating structure is shunted on a switchable inductive circuit. To suppress the vibration semi-actively, the circuit is controlled by a micro-processor based on a multiple-mode control logic. The micro-processor is driven by a fraction of electric energy converted from mechanical one by the piezoelectric actuator.

Several experiments have demonstrated that this self-powered vibration suppression technique works nicely. It has various advantages in performance, especially for multiple-mode vibration, and in the flexibility of application over the conventional self-powered analogue technique.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2009年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

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：振動制御、エネルギー回生、準能動的制振、無電力

## 1. 研究開始当初の背景

宇宙機の振動は様々な意味で有害であり、その抑制即ち制振は宇宙構造工学における重要課題の一つである。しかし、粘弾

性体の利用などの受動的制振によりこれを達成することは極限までの軽量化を追求する宇宙機構造では容易ではなく、また、能動的制振はシステムを複雑化し、必ずしも

小回りの利く現実的な手段とはなり難い場合も多いのが実状である。革新的な手段の出現が望まれている。

準能動的制振手法は基本的には受動的制振が効率良く機能するよう系の特性を振動の状態に応じて制御するものであり、受動的制振の持つ絶対安定性を保持しつつ能動制御に迫る制振性能を実現できる可能性を秘めている。また、準能動的制振の場合には、センサや制御ロジック回路の駆動などを除き、制振動作そのものの為のエネルギー供給を必要としない。

我々は2000年に発表された素朴な準能動的制振法を、柔軟に適用できる制振手法に育てて来た。本手法は原理的には図1に示すように振動する構造物に組み込んだ圧電素子にシャント回路を接続し、回路内のスイッチを、振動の位相に応じて同図のpoint 1と2の間で巧みに切り替えることにより効率的な制振を行おうものである。我々はこの制振法について、圧電素子により構造物の振動エネルギーを電気エネルギーとして取り出すことにより制振を行うのみならず、この取り出したエネルギーを効果的に用いてさらに効率的に電気エネルギーへの変換と制振を行うエネルギー回生型準能動的制振であることを示し、(1)多モード振動系において特定のモードを選択的に制振出来る、(2)アクチュエイタとしての圧電素子をセンサとしても用いつつエネルギー回生型準能動的制振が行える、等の点で世界をリードする適用性の高い制振手法を考案し、正弦波、ランダム、過渡振動など多様な振動に対して高い制振効果とロバスト性等を解析的、実験的に確認してきた。

この手法では制振のためには外部からのエネルギーを一切必要としないものの、制御ロジック駆動のためのプロセッサやセンサの電力だけは必要とされる。この電力をも不要とすることが出来れば、受動的制振の様に基本的にはメンテナンス不要で柔軟な適用性に富み、かつ能動制御に迫る高性能の夢の制振手法が実現できる。そこで、圧電素子が発生する電力で動作する受動的素子のみからなる簡単なアナログ回路で制振制御ロジックを実現することにより、全く電力を必要としない準能動的制振装置を実現しようとした(H17-H18年度科学研究費補助金、萌芽研究、「準能動制振の完全無電力化」、課題番号：17656276)。この試みはほぼ成功し、完全無電力のエネルギー回生型準能動制振が可能であることを実証出来たものの、覚悟の上ではあったが多モード振

動に対する適応性を喪失し、更に市販電子部品の性能から、例えば大きな振幅変動には対応できないなど、作動範囲が限られることとなった。

更にこの間に我々は(3)このエネルギー回生型制振手法はほぼそのまま効率の良いエネルギーハーベスト手法(振動のエネルギーを電気エネルギーとして蓄える手法)でもあることを示した。

以上(1),(2),(3)を踏まえ、此処で述べたエネルギー回生型準能動制振を、完全に電力供給不要なシステムにすることにより、適用性が極めて高く、高性能な制振技術として仕上げるためには、振動エネルギーから変換した電気エネルギーでマイクロプロセッサを駆動することにより、我々が導入した柔軟な制御則やセルフセンシングを実現し、柔軟で高性能な完全無電力制御を実現することが正道であり、かつそれが可能であるとの確信に至った。

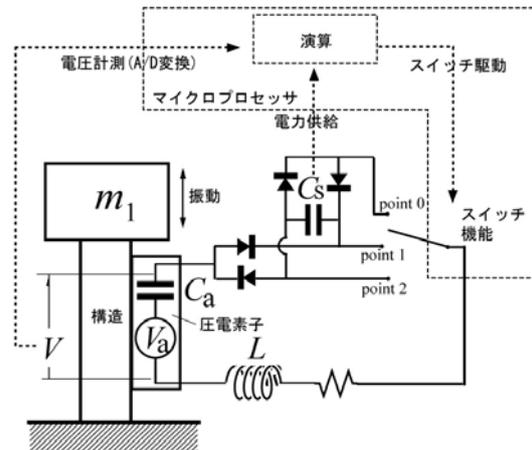


図1 無電力デジタル準能動的制振の概念図

## 2. 研究の目的

本研究は、前項で述べた背景を踏まえ、高効率、絶対安定で、多モード振動にもモード選択的に対応でき、制振対象のある程度の特性変化にハードウェアの変更を必要とせず、かつ、外部からの電力供給を全く必要としない、夢の制振系を実現しその動作を実証することを目的としたものである。

具体的には、図1のように、振動する構造物に取り付けたアクチュエイタとしての圧電素子に接続した準能動的な制振回路を多モード制御ロジックを搭載したマイクロプロセッサにより制御することにより高度な準能動制振を実現するとともに、圧電アクチュエイタが振動エネルギーから変換した電

気エネルギーの一部を用いてマイクロプロセッサを駆動するという画期的手法を確立し、実験的に実証することにより、外部からの電力供給を全く不要とし、我々も高性能化に大きく貢献してきたエネルギー再生型準能動的制振技術の運用性を大きく高め、適用範囲を格段に広げることを目的とする。

世界に先駆けてこれを実現し、実用に適用できる段階に進めることはこの分野の学術研究にとって重要な意義を持つ。これが実現すれば宇宙機のみならず地上のシステムを含む幅広い分野の制振に大きな貢献をなすと期待される。

### 3. 研究の方法

研究計画の立案、装置設計、再設計などはシミュレーションを含む解析的検討も含めて慎重に行ったが、基本的には実験的、実証的方法により研究を進めた。

制振用アクチュエータとしての圧電素子を組み込んだ2自由度振動系(2つの錘をバネで結合した構造体)を設計、作成した。そして、従来から研究代表者等が準能動的制振のために用いているエネルギー再生型の高効率な制振回路を設計・作成してこの圧電アクチュエータに接続した。それらの動特性を同定し、その結果を用いて、研究代表者らが以前から提案していた多自由度系に適用できる準能動的制振ロジックを設計し、低消費電力マイクロプロセッサに実装した。同時に、圧電アクチュエータに接続され、圧電アクチュエータから電力を整流して取り出すブリッジ整流回路と、整流後の直流電圧を2Vに変換してマイクロプロセッサに電力を供給する高効率のDC/DC変換器を製作した。更に、2つの錘の一方の変位に比例する電圧をマイクロプロセッサのA/D変換器に供給する圧電センサ1個を別途に供試体に取り付けた。

次に、これらを組み合わせた系の構造体の錘の一方を加振器で加振し、上記電力でマイクロプロセッサを駆動し、センサ用圧電素子からの信号に基づきマイクロプロセッサで制振回路を駆動することにより、初の無電力デジタル制振装置を実現した。系の固有振動数にあたる単一周波数の加振による制振系の挙動の確認のみならず、1次及び2次固有振動数が様々に混合した加振力による加振、更には衝撃による非定常加振などを行い、各種挙動や制振性能を測定した。その結果を、外部から電力を供給した理想的な場合の準能動的制振制振の性能や、従来技術であるアナログ回路による無電力制振の性能と比較

した。

### 4. 研究成果

前項で述べたようにして、本研究の目的である、外部から全く電力供給を必要とせず、高度な制御則を導入できる、エネルギー再生型準能動的制振を初めて実現し、実証した。

#### (1) 定常加振を受ける場合の性能の比較

3. で述べた2つの錘の一方を、動電型加振器を用いて、系の一次固有振動数(20.3Hz)と二次固有振動数(36.6Hz)の正弦波で加振した。これに対して、(a)外部電力を用いた理想状態での準能動的制振、(b)本研究で実現した無電力デジタル準能動的制振、(c)従来技術である無電力アナログ準能動的制振、及び(d)何らの制振措置をも施さない場合の制振性能、振動特性を測定した。

図2はその結果の概要を示している。横軸 $\alpha$ は加振器への入力信号に於ける一次固有振動数成分の割合(つまり $\alpha=1$ では一次固有振動のみでの加振、 $\alpha=0$ では2次固有振動のみでの加振に相当)である。縦軸は、本供試体の2つの錘の変位の自乗和を加振器が本試験装置の振動系にした仕事率で除した値を無次元化したものである。無次元化には上記(a)の外部電力使用の理想状態での制振性能を用いてある。この値が小さいほど高い制震性能が示されたこととなる。ここで図示の都合上、(d)の何らの制振措置をも施さない場合のプロットは凡例に示すとおり1/10倍の値を示していることに注意が必要である。

同図の値を見ると、いずれの制振法の場合にも、制振を行わない場合に比べて1桁~1.5桁低い値となり、よく制振機能を果たしていることが分かる。(b)の本研究で実現した無電力デジタル準能動的制振では、外部電力を利用する(a)に比べて制震性能が数十%劣っている。これはこの実験装置・環境下では払わざるを得ない無電力化に対する代償である。後述のようにこの代償は小さくできるが、個々の実用に当たっては、無電力化のメリットとのトレードオフとなる。従来技術である(c)の無電力アナログ制振と比較すると、全般にわたり本手法が有利であることが分かるが、特に $\alpha=0.5$ 付近で大きな差が生じている。これは(c)の無電力アナログ制振では多モード振動を選択的に制振できないのに対し、本手法では高度な制御則を用いることができ、多モード振動に適切に対処できている為である。

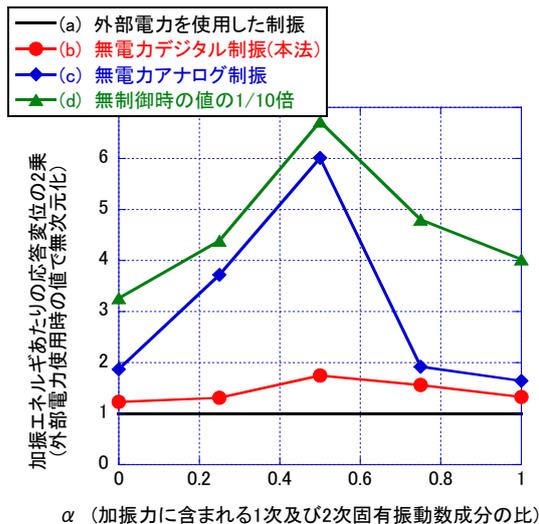


図 2 実現した本手法と他の従来手法との性能の比較

## (2) エネルギー的考察と性能改善

本手法の要の一つは、圧電アクチュエータが振動エネルギーから変換した電気エネルギーでマイクロプロセッサを駆動する点である。従ってマイクロプロセッサ駆動用電力が、振動エネルギーから変換される電気エネルギーより小さいことが前提である。さらに、本手法の基礎となっているエネルギー回生型準能動的制振は、振動エネルギーから圧電素子が変換した電気エネルギーを即座には散逸させず温存し、振動エネルギーを更に効率的に電気エネルギーに変換する為にこれを利用するものである。従って高い性能を維持するためにはプロセッサ駆動用に取り出すエネルギーは可能な限り小さく押さえる必要がある。

例として図 2 に示した  $\alpha=1$  の場合について、諸測定結果からエネルギー収支を求めると、加振器が振動系に与えたエネルギーは約 50mW、このうち図 1 の整流回路に流入したエネルギーは約 18mW、数十 V から 2V へ電圧を落とす DC/DC 変換器への入力エネルギーが 14mW、そしてマイクロプロセッサ(図 1 のスイッチ駆動を含む)が消費したエネルギーは 3mW 以下である。単一周波数での定常加振の場合には、このような制振性能の低下量を解析的に求めることができるが、それに従えば、図 2 の  $\alpha=1$  に於ける (a) と (b) の値の差は上記エネルギー量とほぼ整合している。

本研究では上記の観点から入手できる範囲でエネルギー効率の高い DC/DC 変換器と省電力型プロセッサを用いたが、それでもプロセッサが消費する電力の 6 倍のエネルギーをとり

だすこととなっている。微小電力用 DC/DC 変換器の今後の効率向上等により本手法の性能は図 2 の (a) の理想状態のそれに近づけることができると考えられる。

## (3) 今後に向けて

本研究により、無電力デジタル重能動的制振を実証できた。今後は現実の宇宙機などへの適用に向けた研究へと広げてゆきたい。

(2) で述べたように、本手法の性能は電子デバイスの性能向上とともに向上し、外部電力使用時の性能に近づくと考えられる。今後の電子デバイスの性能向上を期待する。

なお、現在、本研究成果の取りまとめ、原著論文の執筆であり、複数論文を投稿中である。

## 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 2 件)

- ① Shimose S., Makihara K., Minesugi K., and Onoda J., Assessment of Electrical Influence of Multiple Piezoelectric Transducers Connection on Actual Satellite Vibration Suppression, *Smart Materials Research*, Volume 2011 (2011), Article ID 686289, 8 pages, 査読：有
- ② Makihara, K., Miyakawa, T., Onoda, J., and Minesugi, K., Fuselage Panel Noise Attenuation by Piezoelectric Switching Control, *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, 2010, pp.1-10. 査読：有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., Onoda, J., Autonomous Power Scavenging from Structural Vibration Using Self-Powered Device, 28th International Symposium on Space Technology and Science, June 10, 2011, Okinawa, Japan.
- ② Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., Onoda, J., Minesugi, K., New Invention: Digital Self-powered Autonomous System for Sophisticated Semi-Active Vibration Suppression, 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 4, 2011, Denver, USA
- ③ Shimose S., Minesugi K., Makihara K., and Onoda J., Investigation of

Vibration Suppression Capability of Switching Techniques by Multiple Piezoelectric Actuators, 61st International Astronautical Congress, October 1, 2010, Prague, Czech Republic.

- ④ Makihara, K., Takeuchi, S., Shimose, S., Onoda, J., and Minesugi, K., Digital Self-powered Semi-active Unit for Advanced Energy-recycling Vibration Suppression, 61st International Astronautical Congress, September 29, 2010, Prague, Czech Republic.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計◇件)

・ 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

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

竹内 伸介 (SHINSUKE TAKEUCHI)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究所・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・  
宇宙科学研究所・副グループ長  
研究者番号：80443282