

平成 30 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420818

研究課題名(和文) エネルギー再生型準能動的制振システムの性能予測と最適化手法の確立

研究課題名(英文) Optimization of an energy recycling semiactive vibration suppression technique

研究代表者

小野田 淳次郎 (Onoda, Junjiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・名誉教授

研究者番号：20013740

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：構造物の振動を効率よく減衰させるSSDIと呼ばれる手法の最適化の研究を行った。この手法は振動する圧電素子に取り付けた圧電素子の電極に、スイッチとインダクタ(コイル)から成る回路を取り付け、このスイッチを振動に同期してON、OFFすることにより極めて高い効率で振動を減衰させる。しかし、圧電素子とインダクタの最適な組み合わせの研究等は皆無に近い状態であった。本研究では様々な圧電素子とコイルの特性の測定と実験から、本制振手法の性能を算出できるモデルを作成し、制振性能の最大化に向けた最適化手法を確立した。制振性能が4倍以上となるケースを含めて、具体的な数例について最適化の効果を数値計算で示した。

研究成果の概要(英文)：A method to optimize the configuration and combination of piezoelectric transducers and inductors for the synchronized-switch-damping-on-an-inductor (SSDI) technique was established and demonstrated. The technique suppresses structural vibrations by inverting the polarity of the voltage in a piezoelectric transducer by using a switched inductive shunt circuit at each displacement extremum. The performance of SSDI depends on the impedances of the transducer and the inductor. For this study, mathematical models of the impedances of transducers and inductors for this inversion phenomenon were formulated based on experiments with various transducers and inductors. Using these models, the optimal configuration of piezoelectric transducers and that of the inductors were analytically obtained. The optimal mass budget allocation for the transducers and inductors was also formulated. Examples of optimization, involving an increase in performance by a factor of 4, were presented.

研究分野：宇宙航空工学

キーワード：制振 圧電素子 準能動的制振 最適化

1. 研究開始当初の背景

振動は宇宙機の搭載機器の破壊や姿勢制御系の不安定化、観測精度の低下等を招くので、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。

解決の手段として圧電素子により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振動を減衰させ、更にその電気エネルギーを効率的に振動制御に用いる、所謂エネルギー回生型準能動的制振手法に着目した。高効率でロバスト性も高く、基本的には駆動にエネルギーを消費しないからである。この手法は近年 Synchronized-Switching-Damping-on-an-Inductor (SSDI) と呼ばれることが多い。

この制振手法は、我々を含む世界の各研究グループによる様々な研究により適用性の高い手法に成長してきた。また、その性能向上のための様々な工夫や検討も行われてきた。しかし、その制振性能を、例えば構成部品の通常のカタログデータから推定することは困難であり、まして、圧電素子ともう一つの主要構成部品であるインダクタとの相性の最適化については手つかずの状態であった。

2. 研究の目的

図1に本制振手法の概要を示す。振動している構造物に固定された圧電素子と、圧電素子に接続されたシャント回路を模式的に示している。図中の V_a は、圧電素子に作用した外力、もしくは圧電素子に生じた歪に従い圧電効果で発生する電圧を模した電圧発生器である。抵抗 R は圧電素子、インダクタ、スイッチ等に存在する等価直列抵抗の和を表したものである。構造物の振動に伴い圧電効果により圧電素子端子間に電圧 V が発生するが、電圧 V が最大になった瞬間、つまり、構造振動の変移が最大となった瞬間に、回路中のスイッチを、電気的振動の1/2周期だけ閉とする。これにより圧電素子の電圧を反転させ、逆圧電効果が発生する力を制振に有効な向きに変える。同時に、その後の半周期の間に振動エネルギーから変換された電気エネルギーが、圧電素子に蓄えられた電気エネルギーに追加されることとなる。反転後の電圧と反転前の電圧の比の絶対値を電圧反転係数と呼び、 γ と表記すると、振幅一定の定常状態では本制振法により構造の振動の一周期あたり、(圧電素子の体積) \times (圧電材の物性値のみにより定まる値) \times (歪振幅の二乗) $\times (1 + \gamma)/(1 - \gamma)$ のエネルギーが散逸されることとなる。 $\gamma < 1$ であるので、 γ が大きいほど散逸エネルギーは大きくなり、制振性能が上昇する。

本研究の目的は、上記手法の制振性能を容易に入手できるデータから予測可能とし、これを最大化するシステム的设计指針を初めて明確にすることにより、本制振手法の宇宙機等への適用性を更に高めることである。

具体的には、上記 γ を最大化する圧電素子とインダクタの組み合わせ条件を明らかにし、それを達成するための圧電素子やインダク

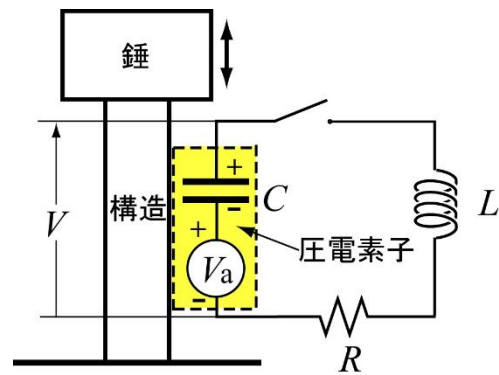


図1 構造物に取り付けた圧電素子と SSDI 手法の為の回路

タの設計、更には、制振性能を最大化する圧電素子とインダクタ間の最適重量配分をも求められるようにする。更に、具体例を挙げて最適化の効果を確認するとともに、本最適化手法導出時には想定していなかった自由振動の制振性能についても本手法の効果を吟味する。

3. 研究の方法

(1) 本最適化には、圧電素材の選定や、振動により大きな歪が圧電素子に生じるようにするための圧電素子の取り付け位置の選定は含めない。これらの最適化と本研究で扱う最適化は、基本的には独立して併用できるからである。

まずは圧電素子とインダクタそれぞれの質量を不変としながら、2. 項で述べたエネルギー散逸率の内の $(1 + \gamma)/(1 - \gamma)$ の項の最大化を目指す。続いて、圧電素子とインダクタを合わせた総質量を不変としながら、(圧電素子の体積) $\times (1 + \gamma)/(1 - \gamma)$ の最大化を図って圧電素子とインダクタへの質量配分をも含めて最適化することを図る。

(2) 図1の等価抵抗 R を求めることができれば、 γ は $\gamma = \exp(-\zeta)$, $\zeta = (R/2)\sqrt{C/L}$ の様求められる。従ってまず、この等価抵抗値を簡単に求められる数学モデルを構築する。具体的には、まず、様々な圧電素子、インダクタについて、正弦波入力に対する応答からそれぞれの等価直列抵抗を周波数の関数として求め、数学モデル化する。但し本制振手法の電圧反転は正弦波的現象ではないので、このようにして得た等価抵抗値が、上式により正しい γ の値を与えることを様々な圧電素子とインダクタとを組み合わせた実験により確認する。

(3) 次に、板状の圧電素子の形状(面積/板厚比)やインダクタの巻き線の断面積/長さの比を変えることにより、圧電素子やインダクタの等価直列抵抗、静電容量、インダクタンスがどのように変化するかを理論的、実験的に確認する。更に、圧電素子やインダクタの寸法を相似的に変化させたときのこれらの

特性の変化も同様に整理する。

(4) 以上を組み合わせ、 γ を最大化する圧電素子とインダクタの最適仕様を求める最適化問題を定式化し、解法を示す。更に、 γ の最大化にとどまらず、振動の一周周期当たり散逸されるエネルギーが最大となるよう、圧電素子とインダクタの質量の和を一定に保ちつつ、(圧電素子の体積) $\times (1 + \gamma) / (1 - \gamma)$ を最大化する最適化問題を定式化して解法を示す。これにより圧電素子とインダクタ間の最適質量配分を含めて最適仕様が求められるようになる。

(5) 実在の圧電素子とインダクタを例にとり、上記の最適化を行い、その効果を数値シミュレーションにより確認する。上記の最適化は、一定振幅歪の定常状態でのエネルギー散逸率を最大化するものであるが、この条件を厳密には満たさない実際的な場面、例えば自由減衰振動の場合などに、この最適化がどの程度有効であるかも数値シミュレーションで明らかにする。

4. 研究成果

(1) 圧電素子とインダクタの特性把握

多種の市販の平板状の圧電素子の静電容量と等価直列抵抗を LCR メータで測定し、2 桁以上の周波数帯で、静電容量 C は周波数非依存、等価直列抵抗 R_p は $R_p = R_{p0} + \frac{\delta_p}{C\omega}$ と表せることを確認した。

同様に多種の市販のインダクタの特性を LCR メータで測定し、2 桁以上の周波数帯で、インダクタンスは周波数非依存、等価直列抵抗は $R_l = R_{l0} + \delta_l L\omega$ で表せることを確認した。

ここに、 R_{p0} 、 R_{l0} 、 δ_p 、 δ_l は定数である。これは圧電素子、インダクタ共に、2 つの異なる周波数で LCR メータでの測定を行うことでモデルが確定できることを示している。

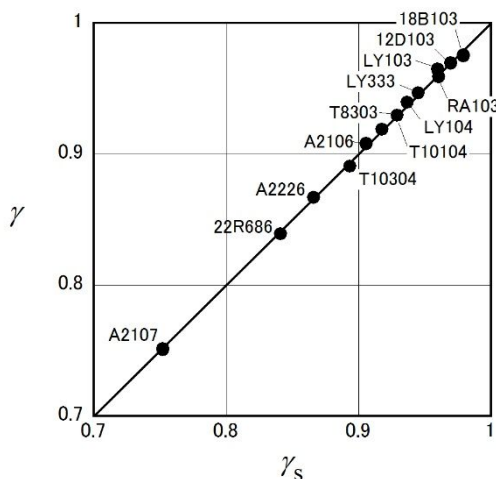


図2 数学モデルから算出した γ の値 γ_s と、実測した γ との比較例。(圧電材は富士セラミック C204。図中の記号はインダクタの型式を示す)

(2) これらの圧電素子とインダクタを組み合わせ、電圧反転係数 γ を実測し、(1)で得た数学モデルを用いて算出した γ の値と実用上十分な精度で一致すること、つまり、実用上(1)で得たモデルを用いて γ を算出できることを確認した。一例を図2に示す。

(3) 同一の圧電材で様々な板厚、面積の圧電素子(平板状圧電素子の表裏面全体が電極)を作成し、その特性を測定した。その結果から、圧電素子の総体積を不変としつつ板厚を α 倍すると、静電容量 C は α^{-2} 倍、 δ_p は不変、 R_{p0} は α^2 倍となることを確認した。

(4) 以上の結論と、インダクタの巻き線の総体積を不変としつつ巻き線の長さを β 倍するとインダクタンス L は β^2 倍、 δ_l は不変、 R_{l0} は β^2 倍となると考えられることから、散逸エネルギーの増減を α 、 β の関数として定式化し、散逸エネルギーを最大化する α 、 β の値を解析的に求めた。 α 、 β の厳密な意味での最適値はともに無限大であった。

(5) そこで、 α/β の値を最適値に保ちつつ、 α 及び β の値を現実に許容できる範囲の大きな値とする設計法を提案した。数値計算により検討の結果、この設計法の導入による真の最適値からの制振性能の低下は数%以下であった。勿論(4)までの準備を踏まえて数値探索法を適用すれば、 α 、 β に実用上の上下限を設けた上での最適化も可能であるが、上記の解析解は簡便な設計指針を与えたものと位置づけられる。

(6) インダクタの寸法を φ 倍とし、インダクタと圧電素子の質量の和が不変となるように圧電素子の寸法を変更する場合に、圧電素子とインダクタの特性はどのように変化するかを整理した。これを用いて、エネルギー散逸率を α 、 β 及び φ の関数として求め、 α 、 β 及び φ についての最適化問題を定式化した。これにより圧電素子とインダクタの最適設計に加え、圧電素子とインダクタへの最適重量配分をも一変数数値探索により求めることを可能とした。

(7) 2 つの具体例について検討した結果、上記(6)の最適化により制振効率(エネルギー散逸率)が夫々4.3倍、4.1倍となることを示した。

(8) 上記の最適化には、圧電素子の寸法の変更(最適化)に伴う振動モードの変化を考慮していない。そこでその影響を大きく受ける例として、片持ち梁を想定し、最適化による制振効率の増加の程度を吟味した。2 ケースについての検討結果は、このような場合にも制振効率が3.3倍、3.9倍に向上した。

(9) 自由振動、励振振動の場合には、 γ の値が一定値以上となると SSDI に伴い振動に脈動が発生し、SSDI 手法の制振効率が低下する、即ち制振性能には「上限」があることが知られている。これは振動エネルギーから変換されて圧電素子に蓄えられた電気エネルギーが過大となって振動エネルギーに逆流する為である。そこで逆流が生じる条件を定式化し、逆流が生じる条件が整った場合には圧電素子に蓄えられた電気エネルギーを放出するようスイッチ制御則と回路を微修正した。これにより SSDI 手法と本最適化のメリットをより広範に享受することを可能にした。

(10) 本最適化は、一定振幅の定常状態でのエネルギー散逸率を最大化したものであるにも関わらず、本最適化と上記(9)の手法とを組み合わせることにより、図3に一例を示すように、自由振動の制振性能をも大幅に改善し、従来「上限」とされていた制振性能を超える制振性能も得ることができていることを数値シミュレーションで示した。

(11) 上記の研究の中で、圧電素子内の電界強度が 100kV/m 程度になると、 γ の値が上述のモデルと乖離することに気づき、圧電素子の非線型性(振幅依存性)を測定し SSDI 制振手法の立場からモデル化した。圧電素子への電圧入力に対する電荷の位相遅れと、圧電素子の静電容量の、入力電圧振幅の上昇に伴う増加が、制振性能に有意な影響を与える主要因であることを示し、圧電素子の非線型性をも含めた最適化に向けた道筋をつけた。これは当初予想していなかった成果である。

(12) 本研究では簡便な最適化を目指したが、数値探索を適用すれば、上記(4)までと(11)の知見を用いて、より精密な様々な最適化を行うことができる。

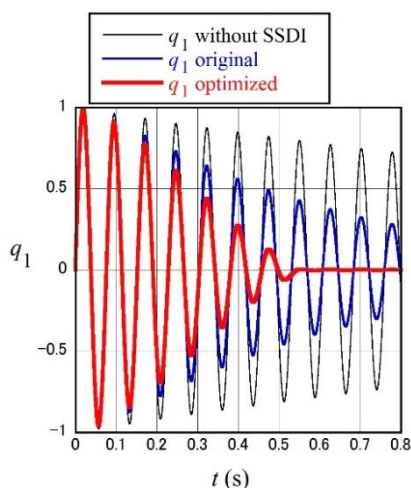


図 3 自由振動の制振に及ぼす最適化の効果の例

(13) ここでは圧電素子とインダクタの設計及び組み合わせについての最適化を検討した。その他に、高い制振性能を得るための様々な工夫、例えば電氣的・機械的カップリングを強める、或は圧電素子に生じる歪を大きくするための圧電素子の貼付位置の最適化などの工夫も有効である。ここで議論した最適化はそれらの最適化を行った上にさらに適用できるものである。

(14) 本最適化は同様な手法を用いた振動エネルギーハーベストの効率化にも有効であると考えられる。

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1件)

Onoda Junjiro, Shimose Shigeru, Minesugi Kenji, Optimal configuration and combination of piezoelectric transducer and inductor for synchronized-switch-damping-on-an-inductor technique, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 査読有, Vol.28, 2017, 888-906, DOI: 10.1177/1045389X16666173

〔学会発表〕(計6件)

小野田淳次郎, 峯杉賢治, 下瀬滋, 圧電素子の非線型性が SSDI 制振手法の性能に及ぼす影響、第 60 回構造強度に関する講演会、2018.8.1、あわぎんホール(徳島県)

Shigeru Shimose, Junjiro Onoda, Kenji Minesugi, An optimization of SSDI system for a beam structure, 67th International Astronautical Congress, 2016.9.28, Guadalajara (Mexico)

小野田淳次郎, 下瀬滋, 峯杉賢治, SSDI 制振システムの圧電素子とインダクタの最適化 その 3 - 片持ち梁制振の場合 -、第 58 回構造強度に関する講演会、2016.8.4、北海道大学 (北海道)

Shigeru Shimose, Junjiro Onoda, Kenji Minesugi, Optimal Parallel/Series Connection of Multiple Piezoelectric Patches and Inductors for SSDI Vibration Suppression, 66th International Astronautical Congress, 2015.10.14, Jerusalem (Israel)

小野田淳次郎, 下瀬滋, 峯杉賢治, SSDI 制振システムの圧電素子とインダクタの最適化 その 2 - 最適化 -、第 57 回構造強度に関する講演会、2015.8.5、岡山理科大 (岡山県)

下瀬滋, 小野田淳次郎, 峯杉賢治, SSDI 制振

システムの圧電素子とインダクタの最適化
その 1 - 圧電素子とインダクタのモデル化
-、第 57 回構造強度に関する講演会、
2015.8.5、岡山理科大 (岡山県)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小野田 淳次郎 (ONODA Junjiro)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機
構・宇宙科学研究所・名誉教授
研究者番号：20013740

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

峯杉 賢治 (MINESUGI Kenji)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機
構・宇宙科学研究所・教授
研究者番号：90239327

下瀬 滋 (SHIMOSE Shigeru)
国立研究開発法人宇宙航空研究開発機
構・宇宙科学研究所・主任研究開発員
研究者番号：80443282

楨原 幹十郎 (MAKIHARA Kanjuro)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60392817

(4)研究協力者

()