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^{*1} Semi-Active Vibration Control of CFRP Beam Structures Using Piezoelectric Energy Harvesting

亀 山 正 樹^{*2}・高 柳 宜 孝^{*2}・福 永 久 雄^{*2}
Masaki KAMEYAMA, Nobutaka TAKAYANAGI and Hisao FUKUNAGA

Key Words: Vibration Control, Semi-Active Control, Energy Harvesting, Piezoelectric Transducer, Composite Materials

Abstract: The present paper treats a semi-active vibration control based on a synchronized switch damping (SSD) technique. To enhance the performance of semi-active vibration control method, the piezoelectric energy harvesting techniques are adopted instead of constant voltage sources in SSD on voltage sources (SSDV). This harvesting technique exploits the property of piezoelectric vibration to electricity converters, and requires no external voltage source. An experimental verification of the present vibration suppression method named as a synchronized switch damping on piezoelectric energy harvesters (SSDP) for CFRP cantilevered beams is carried out. The experimental results show that the proposed vibration control method is effective for vibration suppression of composite structures as well as SSDV technique. It is also shown that there exist threshold values of generated voltage of the piezoelectric element and excitation frequency of the cantilevered beam in energy harvesting device for achieving stable control effect based on the present method.

1. 緒 言

近年、圧電素子を用いた構造物の能動的、あるいは受動的な振動制御に関する研究・開発が活発に行われている¹⁾。能動制御に基づく制振²⁾は、制振能力が高いものの構造物に外部から電気エネルギーを注入して制振を行うことからそのエネルギーが発散振動に繋がる可能性があり、安定性の面において問題がある。また、太陽エネルギー以外に電力の供給が困難な宇宙空間での利用を想定した場合、複雑な制御則や大きな外部電力が必要であることは大きな欠点となる。一方、受動制御に基づく制振^{3, 4)}では、抵抗・コイル等により構成される簡単な電気回路（シャント回路）を圧電素子に接続することにより、外部電力を全く用いることなく減衰付加を達成できるが、高い制振効果を得るためには広大な圧電素子の貼付面積や非常に大きなインダクタンス値を有するコイルが必要となること、等の問題がある。また、依然としてモデル化誤差等に伴う制振能力の低下が著しく、実用性の面において問題がある。

そこで近年提案されている制振方法が、能動制御、受動制御、各々が有する欠点を軽減、もしくは解消する中間的な方法としての準能動制御に基づく制振である。準能動制御に基づく制振は、系のパラメータを積極的に制御することによって系固有の受動的制振能力が最大限に発揮できるようにするものであり、Clark⁵⁾によって圧電素子の開放時と短

絡時の剛性の違いを利用して制振を行えることが指摘されて以来、非常に注目されている。本研究で取り扱う Richard^{6, 7)}が提案した同調スイッチダンピング（Synchronized Switch Damping; SSD）と呼ばれる制振方法は、R 回路（SSD on Short circuit; SSDS）や LR 回路（SSD on Inductor; SSDI）にスイッチを組み込み、回路の開放・短絡を瞬間的に切り替えることによって構造物から振動エネルギーを回収・散逸し、制振を行うものである。構造物に外部エネルギーを注入しないことから系は絶対安定であり、能動制御に基づく制振に比べて必要とされる外部電力を大幅に削減できる。また、積極的なエネルギーの散逸によって受動制御に基づく制振よりも優れた制振効果を得ることができる。等多くの利点を有するため、SSD に基づく制振に関する研究は数多く行われている^{8, 9)}。近年では、準能動制御に基づく制振の制振効果を向上する方法として、SSD に定電圧源を組み合わせた SSDV（SSD on Voltage sources）^{10~12)}と呼ばれる方法が提案されている。SSDV では、外部エネルギーの注入による系の不安定化に関する問題が生じるものの、制御方法自体は準能動制御に基づいているため、能動制御に基づく制振と比較してより効率的に制振効果が得られることが報告されている。

以上のように、準能動制御に基づいた振動エネルギーの積極的な散逸による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、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。

^{*1} © 2010 日本航空宇宙学会

平成 22 年 4 月 7 日原稿受付

^{*2} 東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

そこで、本研究では、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、SSDV に基づく構造物の制振方法を基礎に、SSDV における外部電源の代替として圧電エネルギー回収機（Piezoelectric Energy Harvester）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制御に基づく制振の制振効果を向上させる方法を提案する。

本論文の構成は次の通りである。初めに、圧電素子によるエネルギー回収に関して概説するとともに、振動する構造物から回収される電圧とその蓄電速度について定式化を行う。また、本研究で提案する制振方法の基礎となる SSDV に関して概説するとともに、圧電素子を含む構造物の等価モデルにおける制振効果に関して定式化を行う。次に、本研究で提案する圧電エネルギー回収機による同調スイッチダンピング（Synchronized Switch Damping on Piezoelectric energy harvesters; SSDP）に基づく制振方法の概要を述べるとともに、定常振動する CFRP 片持りを対象とした振動制御実験を行う。実験により得られた結果を通して、圧電素子によるエネルギー回収特性を踏まえ本提案方法の特性について考察を行うとともに、本方法の有効性を検証する。

2. 定 式 化

本研究では、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、SSDV に基づく構造物の制振方法を基礎に、SSDV における外部電源の代替として圧電素子によるエネルギー回収技術を適用した準能動的制振方法に関する検討を行う。本章では、圧電素子によるエネルギー回収、および SSDV に基づく制振に関する定式化を行う。

2.1 エネルギー回収 本提案方法ではエネルギー回収によって得られる電荷を振動制御に即時利用するため、その電荷量を定量的に評価することが必要となる。本節では、初めに圧電素子によるエネルギー回収の概要を述べ、定常振動する構造物に貼付した圧電素子によって蓄えられる電圧、およびその蓄電速度に関して定式化を行う。

2.1.1 収束蓄電圧に関する定式化 共振点付近で線形振動する構造物は、圧電素子を含め、第 1 図に示すような 1 自由度系の等価モデルとして表される。図中、 M 、 C 、 K はそれぞれ、質量、減衰、剛性係数であり、 F は外力である。また、本研究で適用される圧電エネルギー回収機は、第 2 図に示すように、振動する構造物に貼付した圧電素子、ダイオードブリッジ、蓄電コンデンサ（静電容量 C_r ）、および抵抗（抵抗値 R_r ）から構成され、外部エネルギーを一切必要とせずに振動エネルギーから電気エネルギーを取り出すことができる。ここで、第 2 図において、圧電素子はコンデンサ（静電容量 C_p^S ）、および圧電効果により生じる電圧の発生器 V_a によってモデル化されている。圧電素子に生じる力 F_P 、変位 u 、電圧 V_P 、および電流 I ($=dQ_P/dt$) の関係を表す圧電方程式は次式で与えられる¹³⁾。

第1図 圧電素子を有する 1 自由度系モデル

第2図 圧電素子を用いたエネルギー回収

$$\begin{Bmatrix} F_P \\ I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{PE} & \theta \\ \theta \frac{d}{dt} & -C_P^S \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ V_P \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 K_{PE} 、 C_P^S 、および θ はそれぞれ、回路短絡時の圧電素子の剛性、圧電素子の拘束静電容量、および圧電力係数を表し、分極方向を 3 軸方向とし、1 軸方向の応力 T_1 、ひずみ S_1 のみを考慮する場合に次式で定義される。

$$\begin{pmatrix} K_{PE} & C_P^S & \theta \end{pmatrix} = \left(\frac{1}{s_{11}^E} \frac{w_P t_P}{l_P} \quad \varepsilon_{33}^S \frac{l_P w_P}{t_P} \quad \frac{d_{31}}{s_{11}^E} w_P \right) \quad (2)$$

なお、 s_{11}^E は圧電素子（寸法 $l_P \times w_P \times t_P$ ）の回路短絡時における弾性コンプライアンス、 ε_{33}^S は拘束誘電率、 d_{31} は圧電ひずみ定数を表す。

本研究では、圧電素子を貼付した片持りに対して外部から周期加振力を加えることで圧電素子を振動させる。このとき、圧電素子に生じる変位 u は加振角振動数 ω_P と最大振幅 u_0 、位相差 θ を用いて次式で表される。

$$u = u_0 \sin(\omega_P t + \theta) \quad (3)$$

蓄電を開始して十分に時間が経過した定常状態における圧電素子の変位 u と電圧 V_P との関係を第 3 図に示す。ここで、 V_{C0} は定常状態における蓄電コンデンサの電圧を表す。 $|V_P| < V_{C0}$ であるとき、電流はダイオードブリッジの効果により蓄電コンデンサ側に流れないため、(1) 式からわかるように、この間 V_P は u に比例して増加する。 $|V_P| = V_{C0}$ となった瞬間からダイオードブリッジを通じて電流が流れ始め、 u が増加を続ける間は $|V_P| = V_{C0}$ となる。このとき、第 2 図より、流れる電流は次式で表される。

$$I = C_r \dot{V}_C + \frac{V_{C0}}{R_r} \quad (4)$$

その後、 u の減少に伴ってダイオードの効果により再び電流が阻害され、 V_P は第 3 図に示すような変化を繰り返す。

第 3 図 圧電素子の変位と発生電圧の関係

こととなる。

(4) 式を $t = t_i$ から $t = t_f$ まで積分する。

$$\int_{t_i}^{t_f} I(t)dt = \int_{t_i}^{t_f} C_r \dot{V}_C dt + \int_{t_i}^{t_f} \frac{V_{C0}}{R_r} dt = \frac{T}{2} \frac{V_{C0}}{R_r} \quad (5)$$

ここで、 $T (= 2\pi/\omega_P)$ は加振力の周期を表す。(5) 式を用いて (1) 式の 2 行目を $t = t_i$ から $t = t_f$ まで積分すると、収束蓄電圧 V_{C0} は次式のように表される¹⁴⁾。

$$V_{C0} = \frac{\omega_P \Theta R_r}{\omega_P C_P^S R_r + \frac{\pi}{2}} u_0 \quad (6)$$

また、圧電素子の回路が開放されている状態において、 u_0 に対する圧電素子の電圧を V_{P0} とすると、(1) 式の 2 行目を用いることにより、 V_{C0} と V_{P0} との関係式が次式で与えられる。

$$V_{C0} = \frac{\omega_P C_P^S R_r}{\omega_P C_P^S R_r + \frac{\pi}{2}} V_{P0} \quad (7)$$

2.1.2 蓄電速度に関する定式化 本研究で提案する振動制御方法では、エネルギー回収によって得られる電荷を振動制御に即時利用するため、蓄電速度が重要となる。コンデンサの蓄電過程における蓄電圧 V_C の変化を表す式は、一般的に次式で与えられる。

$$V_C(t) = V_{C0} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_e C_r}\right) \right\} \quad (8)$$

ここで、 R_e は回路抵抗を表す。圧電素子によるエネルギー回収において、上式における R_e は次式で近似することができる¹⁵⁾。

$$R_e = \frac{1}{\omega_P C_P^S} + R_P \quad (9)$$

ここで、 R_P は圧電素子の内部抵抗を表す。蓄電速度は (8) 式を時間微分することにより得られる。また、時定数 τ は次式で与えられる。

$$\tau = R_e C_r = \left(\frac{1}{\omega_P C_P^S} + R_P \right) C_r \quad (10)$$

2.2 定電圧源による同調スイッチダンピング¹¹⁾ つづいて本節では、本研究で提案する制振方法の基礎となる、定電圧源による同調スイッチダンピング (SSDV) の概要を述べる。SSDV は外部電源を用いることによって圧電素子の電極間電圧を増加させ、より大きな減衰効果が得られるようスイッチを制御して制振を行う方法であり、能動制御に基づく制振のような複雑な計測・制御系や大きな外部電源を必要とせず、受動制御に基づく制振と比較してより効果的な制振が可能となる。初めに、1 自由度系の等価モデルを対象として SSDV の概要を説明し、その制振効果を定式化する。

2.2.1 等価モデルの振動特性 前述した通り、共振点付近で線形振動する構造物は、圧電素子を含め、第 1 図に示すような 1 自由度系の等価モデルとして表される。このとき、(1) 式の 1 行目を用いて系の運動方程式は次式で与えられる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + (K + K_{PE})u + \Theta V_P = F \quad (11)$$

回路開放時は圧電素子に電流が流れないため、変位 u と外力 F との関係を表す伝達関数は、回路短絡時の圧電素子を含めた構造物全体の剛性を $K_E (= K + K_{PE})$ とした場合、次式で与えられる。

$$\frac{\tilde{u}}{\tilde{F}} = \frac{1}{K_E + \frac{\Theta^2}{C_P^S} - \omega^2 M + j\omega C} \quad (12)$$

よって、回路開放時の共振角振動数 ω_D 、およびそのときの加振力の最大値 F_M に対する変位の最大値 u_M は、それぞれ次式で与えられる。

$$\omega_D = \sqrt{\frac{K_E + \frac{\Theta^2}{C_P^S}}{M}}, \quad u_M = \frac{F_M}{\omega_D C} \quad (13)$$

2.2.2 制振効果に関する定式化 SSDV において圧電素子に接続される電気回路は、第 4 図に示すように、コイル (インダクタンス値 L)、抵抗 (抵抗値 R)、正負の定電圧源 (電圧 V_S)、およびスイッチから構成される。(1) 式の 2 行目の圧電方程式を電荷 Q_P に関して書き換えると次式が得られる。

$$V_P = \frac{\Theta}{C_P^S} u - \frac{1}{C_P^S} Q_P \quad (14)$$

ここで、(11) 式において比例・微分 (Proportional-Derivative; PD) 制御に基づく制振の適用を考えた場合、上式の Q_P に対する外部からの制御入力電荷 Q_T は、微分ゲイン $\alpha_T (> 0)$ を用いて次式で与えられる。

$$Q_T = -\alpha_T \dot{u} \quad (15)$$

SSD では、 Q_T の値に追従するよう Q_P の値を制御することによって圧電素子に制振力を発生させ、構造振動の抑制を図る。すなわち、 $Q_T > 0$ ならば Q_P ができるだけ大きく、 $Q_T < 0$ ならば Q_P ができるだけ小さくなるようス

第4図 定電圧源による同調スイッチダンピング

スイッチの切替え操作を行う。

第1図に示す1自由度系の等価モデルが外力によって定常振動している場合を考える。外力 F 、および変位 u を、位相差 φ を用いて次式で定義する。

$$F = F_M \sin \omega t, \quad u = u_M \sin(\omega t + \varphi) \quad (16)$$

第4図より、 Q_P の変化は次式で表される。

$$\text{回路開放時: } \dot{Q}_P = 0 \quad (17)$$

$$\text{回路短絡時: } L\ddot{Q}_P + R\dot{Q}_P = -V_P \pm V_S \quad (18)$$

なお、(18)式における V_S の符号は、 $\dot{u} \times V_S$ が常に負となるように決定される。(18)式より、回路を閉じたときに $V_P > 0$ ならば Q_P は減少し、 $V_P < 0$ ならば Q_P は増加することがわかる。よって、 Q_P の値が Q_T の値に追従するよう $Q_T V_P > 0$ である間は回路を開放して電荷の放出を防ぐ。この間電荷 Q_P の値は変化しないが、圧電素子の電圧 V_P は(14)式により変位 u に比例した増加を続ける。 $Q_T V_P < 0$ となった瞬間に回路を閉じると、(18)式の微分方程式を解くことにより電荷 Q_P は次式に従い振動を始めることがわかる。

$$Q_P = e^{-\omega_c \zeta_c t} (C_1 \cos At + C_2 \sin At) + Q_a \pm C_P^S V_S \quad (19)$$

$$A = \omega_c \sqrt{1 - \zeta_c^2}, \quad Q_a = \theta u_M,$$

$$\omega_c = \sqrt{\frac{1}{LC_P^S}}, \quad \zeta_c = \frac{R}{2\omega_c L} \quad (20)$$

(19)式において $\zeta_c \ll 1$ とすると、圧電素子の電荷 Q_P は回路を閉じてから t が π/ω_c 経過した後に極値に達し、その大きさ Q_m は回路を閉じる直前の初期電荷 Q_M を用いて次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} Q_m - Q_a \mp C_P^S V_S &= -(Q_M - Q_a \mp C_P^S V_S) \cdot e^{-\zeta_c \pi} \\ &= -(Q_M - Q_a \mp C_P^S V_S) \cdot e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 Q_i は電氣的品質係数を表す。回路を閉じる直前の圧電素子の電圧を $-V_M$ 、直後の電圧を V_m として符号を揃えると次式が得られる。

$$(V_m - V_S) = e^{-\frac{\pi}{2Q_i}} (V_M + V_S) = \gamma (V_M + V_S) \quad (22)$$

(a) 変位と発生電圧の時間履歴

(b) エネルギー・サイクル

第5図 スwitching操作による制振用圧電素子の発生電圧の変化

ここで、 γ は電圧反転係数を表す。その後回路を開放することにより、再び電圧 V_P は変位 u に比例して増加する。(14)式より、 V_M と V_m との関係は次式のように得られる。

$$V_M = V_m + \frac{2\theta}{C_P^S} u_M \quad (23)$$

以上の繰り返しにより、第5図に示すような電圧が圧電素子に印加され、構造物に対して制振力を作用させることができる。

(22)式、および(23)式より、SSDVにおいての電圧は不連続関数 h を用いて次のように表される。

$$V_P = \frac{\theta}{C_P^S} (u + h) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} h &= \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \left(u_M + \frac{C_P^S V_S}{\theta} \right) \text{sign}(\dot{u}) \\ &= \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \left(u_M + \frac{C_P^S V_S}{\theta} \right) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{\pi(2n+1)} \\ &\quad \times \cos\{(2n+1)\omega t + \varphi\} \end{aligned} \quad (25)$$

ここで、 $\text{sign}(\dot{u})$ は $\dot{u}$ の符号を表す。よって、(25)式において1次固有振動数のみを考慮する場合、(11)式に(16)式、および(24)式を代入することにより、運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
& u_M \left(K_E + \frac{\Theta^2}{C_P^S} - \omega^2 M \right) \sin(\omega t + \varphi) \\
& + \left[u_M \left(\omega C + \frac{4\Theta^2}{\pi C_P^S} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) + \frac{4\Theta}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} V_S \right] \\
& \times \cos(\omega t + \varphi) \\
& = F_M \sin \omega t
\end{aligned} \quad (26)$$

なお, $t = \pi/2\omega$ の場合,

$$\begin{aligned}
& u_M \left(K_E + \frac{\Theta^2}{C_P^S} - \omega^2 M \right) \cos \varphi \\
& - \left[u_M \left(\omega C + \frac{4\Theta^2}{\pi C_P^S} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \right) + \frac{4\Theta}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} V_S \right] \sin \varphi \\
& = F_M
\end{aligned} \quad (27)$$

ここで, 構造物が周期加振力によって共振しているとき, (16) 式において変位 u と外力 F との位相差 φ は $-\pi/2$ であることから, SSDV における加振力の振幅 F_M に対する変位の振幅 u_M は, 次式で与えられる.

$$u_M^{\text{SSDV}} = \frac{F_M - \frac{4\Theta}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} V_S}{\omega_D C + \frac{4\Theta^2}{\pi C_P^S} \frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \quad (28)$$

本研究においては, SSDV の制振効果の評価基準として SSDI における変位 u_M^{SSDI} を用いる. SSDI は SSDV の中で定電圧源 V_S が存在しない特殊な場合であると考えられ, 上式において $V_S = 0$ とすることで u_M^{SSDI} を定義することができる. よって, SSDI に対する SSDV の制振効果 I_e は次式で与えられる.

$$I_e = \frac{u_M^{\text{SSDI}} - u_M^{\text{SSDV}}}{u_M^{\text{SSDI}}} = \frac{4\Theta}{\pi} \frac{1+\gamma}{1-\gamma} \frac{V_S}{F_M} \quad (29)$$

上式より, SSDV の制振効果は回路上の定電圧源 V_S の大きさに比例することがわかる.

3. 実験による検証

本章では, 本研究において提案する, 圧電エネルギー回収機による同調スイッチダンピング (SSDP) に基づく振動制御方法の有効性に関して, 実験による検証を行う. また, 実験結果を通じて, 圧電素子のエネルギー回収特性を踏まえ本提案方法が有する特性に関して検討を行う.

3.1 実験装置 本研究で用いる実験装置の概要を第 6 図に示す. はりは $[90/-45/45/0]_s$ の積層構成を有する CFRP 対称積層板によって構成され, CFRP 一方向材の材料定数, および積層板の板厚を第 1 表に示す. ここで, 第 6 図において, 積層板の繊維配向角を θ を用いて表している. 制振対象となる CFRP 片持り (第 6 図左) の固定端近傍に 2 個の同一の PZT 圧電素子を貼付し, 一方は加振用 (図中 ①) として, 他方は制振用 (図中 ②) として用いる. 回路開放時の自由端変位が 4 mm の定常振動となるよう, 加振用 PZT に対して PC から D/A 変換器とピエゾドライバを介して片持りの 1 次固有振動数 f_1 (≈ 19.0 Hz) と等しい周波数の正弦波電圧を印加する. また, エネルギー回収に用いる CFRP 片持り (第 6 図右) の自由端は加振器に固定されている. SSDV においては, 回路に正負 2 個の定電圧源が必要となるため, 本実験ではエネルギー回収に用いる片持りの固定端近傍の表裏にそれぞれ同一のエネルギー回収用 PZT 圧電素子 (図中 ③) を対称に貼付して用いる. PZT 圧電素子の材料定数, および寸法を第 2 表に示す. ここで, ε_{33}^T , および ε_0 はそれぞれ, 自由誘電率, および真空誘電率を表し, k_{31} は電気機械結合係数を表す. また, 第 6 図において, 回路に用いるコイルのインダクタンス値 L は, 予備実験において最も高い制振効果を示した 20 mH とした.

第 1 表 CFRP 積層板の材料定数

E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	G_{12} [GPa]	ν_{12}	ρ [kg/m ³]	Thickness [mm]
127.0	11.0	4.9	0.30	1,541	1.0

第 6 図 実験装置の概要

第2表 PZT の材料定数

E_{11} [GPa]	ν	ρ [kg/m ³]	Thickness [mm]	C_P^S [nF]	d_{31} [pm/V]	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$	k_{31}
63.0	0.30	7,800	0.25	65.0	-240	2,400	0.41

第3表 等価モデルの物性値

f_E [Hz]	f_D [Hz]	ξ	λ [kV/m]	Θ [mN/V]	K_E [N/m]	M [g]	C [N·s/m]	γ
18.995	19.046	5.6×10^{-3}	3.2	0.202	120.0	84.2	1.12×10^{-2}	0.50

第7図 圧電エネルギー回収機による同調スイッチダンピング

本研究では、第7図に示すように、回路内にダイオードを用いることにより回路切替え装置の簡略化を図る⁸⁾とともに、2個の蓄電コンデンサ C_r に対してもそれぞれダイオードを並列に接続している。これは第6図の回路をそのまま用いた予備実験において、SSDの方法による回路のスイッチング操作が繰り返される過程で蓄電コンデンサに電荷が蓄積され、その結果逆符号の電圧が生じ、徐々に制振効果が低下する現象が見られたためである。ダイオードの接続に伴い抵抗の増加に起因する制振効果の低下が若干見られるものの、電荷の蓄積が解消され制振効果の大幅な低下を防ぐことが可能となる。

一方、圧電素子を含めた等価モデルの運動方程式（(11)式）における各定数は、次式によって実験的に求められる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \Theta &= \lambda C_P^S, & K_E &= \lambda \Theta \frac{f_E^2}{f_D^2 - f_E^2}, \\ M &= \frac{K_E}{4\pi^2 f_E^2}, & C &= 4\pi \xi M f_D \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 λ は回路開放時の自由端変位量と圧電素子出力電圧の比を表し、 f_E 、および f_D はそれぞれ、回路短絡時、および回路開放時の固有振動数、 ξ は回路開放時の減衰係数を表す。上式を用いて決定した各定数の値を第3表に示す。また、(7)式における R_r の値は、(7)式から得られる計算値と実験値との比較に基づいて $770 \text{ k}\Omega$ とし、同様に(10)式における R_P の値は、(9)式に基づいて $39.5 \text{ k}\Omega$ とした。

3.2 振動制御実験結果 本研究では、SSDPに基づく制振方法においてエネルギー回収に用いる CFRP 片持はりを加振器によって定常振動させる際、その加振周波数、エネルギー回収用圧電素子の発生電圧の振幅、および蓄電コンデンサの静電容量が準能動的制振の制振効果におよぼす影響に関して検討を行う。

蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C 、および制振効果 I_e と、エネルギー回収用圧電素子の発生電圧の振幅 V_{P0} 、および蓄電コンデンサの静電容量 C_r ($\gg C_P^S$) の関係を第8図、および第9図に示す。第8図はエネルギー回収に用いる片持はりの加振周波数を $f_P = 20 \text{ Hz}$ とした場合、第9図はエネルギー回収に用いる片持はりの加振周波数を $f_P = 100 \text{ Hz}$ とした場合について、それぞれ示している。ここで、第8図(a)、および第9図(a)は、エネルギー回収用圧電素子の発生電圧の振幅 V_{P0} 、および蓄電コンデンサの静電容量 C_r が蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C におよぼす影響を示しており、第8図(b)、および第9図(b)は、エネルギー回収用圧電素子の発生電圧の振幅 V_{P0} 、および蓄電コンデンサの静電容量 C_r が制振効果 I_e におよぼす影響を示している。なお、本研究で提案する SSDP に基づく制振方法の制振効果 I_e は、(29)式と同様に次式で定義している。

$$I_e = \frac{u_M^{\text{SSDI}} - u_M^{\text{SSDP}}}{u_M^{\text{SSDI}}} \quad (31)$$

これらの図より、提案した SSDP に基づく制振方法は SSDI に基づく制振と比較して制振効果が高く、SSDV に基づく制振¹⁰⁾と同様にコンデンサの蓄電圧 V_C の増加に比例して制振効果が向上することがわかる。なお、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} の増加に伴い蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C が増加し、SSDP に基づく制振の制振効果 I_e も向上する一方、 V_{P0} の値があるしきい値以上でなければ I_e は向上しないことがわかる。また、第8図と第9図の比較により、加振周波数 f_P の増加に伴い、制振効果が現れるエネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} のしきい値は小さくなるとともに、同じ V_{P0} に対してより大きな制振効果が得られることがわかる。また、本検討の範囲内では、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} に対する制振効果 I_e の増加量は蓄電コンデンサの静電容量 C_r に依存しないことがわかる。

SSDP に基づく準能動的制振、および従来の SSDV に基づく準能動的制振の制振効果 I_e の比較を第10図に示す。この図において、横軸は、SSDP に基づく制振の場合には蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C を、SSDV に基づく制振の場合には定電圧源の電圧 V_S を示す。この図より、SSDP に基づく制振の結果（図中■、●、および▲）が第7図に示すように蓄電コンデンサに直列接続されているダイオードによって順方向降下電圧分シフトしていることを考慮すれば、両方法を比較したときに同じ電圧値に対して同程度の制振効果が得られていることから、圧電エネルギー回収機は

(a) 蓄電圧の変動

(b) 制振効果の変動

第 8 図 SSDP に基づく制振方法による振動制御結果 ($f_P = 20$ Hz)

(a) 蓄電圧の変動

(b) 制振効果の変動

第 9 図 SSDP に基づく制振方法による振動制御結果 ($f_P = 100$ Hz)

SSDV に基づく制振において用いられる定電圧源の代替として十分適用可能であることが確認できる。

3.3 制振効果が現れるしきい値に関する考察 前節において述べた通り、本研究で提案する SSDP に基づく制振方法の制振効果は、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} の値があるしきい値以上でなければ現れない。これは、蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C が、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} の値がしきい値以上でなければ増加しないことに起因する。蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C が増加し始めるエネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅値のしきい値 V_{P0}^{th} とエネルギー回収に用いる片持りの加振周波数 f_P の関係を第 11 図に示す。この図より、しきい値と加振周波数の積 ($V_{P0}^{th} \times f_P$) と加振周波数 f_P はおよそ線形関係にあることがわかる。

蓄電コンデンサの蓄電圧が増加し始めるためには、単位時間あたりに蓄電コンデンサに流入する電荷量 Q_I が流出する電荷量 Q_O より大きくなければならない。単位時間あたりの電荷の流入による蓄電圧の増加速度 $\dot{V}_I$ は (8) 式より求められ、 $t = 0$ において最大値 $\dot{V}_{IM}$ となる。一方、単位時間あたりの電荷の流出による蓄電圧の減少速度 $\dot{V}_O$ は制振対象の片持りの 1 次固有振動数 f_1 およびコンデンサの静電容量 C_r を用いることにより与えられ、 $Q_O = Q_{Om}$ において最小値 $\dot{V}_{Om}$ となる。ここで、 Q_{Om} はスイッチン

第 10 図 SSDP に基づく制振の制振効果

グ操作によって制振用圧電素子の電圧が反転する際に蓄電コンデンサから流出する電荷量 Q_O の最小値を表す。よって、蓄電コンデンサに電圧が蓄積される条件は次式で与えられる。

$$\dot{V}_{IM} = V_C(0) = \frac{V_{C0}}{R_e C_r} > \frac{Q_{Om} f_1}{C_r} = \dot{V}_{Om} \quad (32)$$

(9) 式を代入すると、

$$(V_{C0} - R_P Q_{Om} f_1) \cdot f_P > \frac{Q_{Om} f_1}{2\pi C_P^S} \quad (33)$$

第 11 図 加振周波数が蓄電圧増加のしきい値におよぼす影響

$V_{C0} \approx V_{P0}$ とすれば、上式は、

$$(V_{P0} - R_P Q_{Om} f_1) \cdot f_P > \frac{Q_{Om} f_1}{2\pi C_P^S} \quad (34)$$

と表される。

本実験条件における各パラメータの値を (34) 式に代入することにより、本考察に基づいてしきい値を表す関係式が得られる。ここで、式中のスイッチング操作時の流出電荷量 Q_O の最小値 Q_{Om} は、スイッチング操作時の流出電荷量 Q_O と蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C の関係から実験的に求められ、本研究では $1.26 \mu\text{C}$ とした。また、第 11 図より、実験結果に基づいてしきい値を表す関係式が近似的に得られる。得られた関係式を第 11 図に併せて示す。この図より、両者は概ね一致しており、本考察が妥当であることがわかる。

よって、本研究で提案する SSDP に基づく制振方法には、制振効果が現れるエネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅値のしきい値が存在し、そのしきい値は本検討の範囲内では蓄電コンデンサの静電容量 C_r の値に依存しないことが確認できた。

一方、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} 、およびエネルギー回収に用いる片持はりの加振周波数 f_P の値がしきい値未満の場合、蓄電コンデンサの蓄電圧 V_C の減少に伴い SSDP に基づく制振方法による制振効果が徐々に低下し、定常的な制振効果は得られない。エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅を $V_{P0} = 6 \text{ V}$ 、エネルギー回収用片持はりの加振周波数を $f_P = 10 \text{ Hz}$ 、蓄電コンデンサの静電容量を $C_r = 10 \mu\text{F}$ とした場合について、制振対象の片持はりの自由端変位、および蓄電コンデンサの蓄電圧の時間履歴を第 12 図に示す。この図より、SSDP に基づく制振方法による制振効果が時間経過に伴い低下していることがわかる。単位時間あたりに減少する蓄電コンデンサの蓄電圧 $\dot{V}_O$ と増加する蓄電圧 $\dot{V}_I$ の差は次式で与えられ、制振効果がなくなるまでの時間（持続時間とする）は蓄電コンデンサの静電容量に比例することがわかる。

$$\dot{V}_O - \dot{V}_I = \frac{1}{C_r} \left\{ Q_O f_1 - \frac{1}{R_e} (V_{C0} - V_C) \right\} \quad (35)$$

 第 12 図 SSDP に基づく制振方法による振動制御結果 ($V_{P0} = 6 \text{ V}$, $f_P = 100 \text{ Hz}$, $C_r = 10 \mu\text{F}$)

 第 13 図 SSDP に基づく制振方法による制振効果の持続性 ($f_P = 10 \text{ Hz}$)

エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} 、および加振周波数 f_P の値がしきい値未満の場合について、持続時間を第 13 図に示す。この図より、持続時間は蓄電コンデンサの静電容量 C_r に比例することがわかる。つまり、本研究で提案する SSDP に基づく制振方法は、エネルギー回収用 PZT の発生電圧の振幅 V_{P0} 、および加振周波数 f_P の値がしきい値未満の場合においても一定の時間は制振効果を期待できること、また、制振効果が現れる時間は蓄電コンデンサの静電容量 C_r が大きいほど長いことがわかる。

4. 結 言

本研究では、SSDV に基づく振動制御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した、圧電エネルギー回収機による同調スイッチダンピング (SSDP) に基づく振動制御方法を提案した。エネルギー回収、および従来の SSDV に関する定式化に基づき、定常振動する CFRP 片持はりを対象とした振動制御実験を行い、提案する制振方法の制振効果、およびその特性に関して検討を行った。実験結果を通じて、SSDP に基づく制振方法の有効性を確認し、外部の振動エネルギーを制振に即時利用できることを明らかにした。また、蓄電コンデンサの蓄電圧に比例して制

振効果も向上し、SSDV における同電圧の外部電源を設置したときと同等の効果が得られることが示された。

なお、本研究で提案する SSDP に基づく制振方法において、エネルギー回収に用いる圧電素子の発生電圧の振幅値と片持りの加振振動数には制振効果が生じるためのしきい値が存在し、それらのしきい値を超えなければ定常的な制振効果の向上が得られないことが明らかとなった。また、それらのしきい値は、蓄電コンデンサに流入する電荷量によって決定され、蓄電コンデンサの静電容量に依存しないことを明らかにした。一方、エネルギー回収に用いる圧電素子の発生電圧の振幅値やエネルギー回収に用いる片持りの加振振動数の値がしきい値未満の場合、制振効果は時間経過に伴い徐々に低下し、その持続時間は蓄電コンデンサの静電容量に比例することが確認された。よって、例えば減衰振動を対象とする場合には、大きな静電容量を有するコンデンサを用いることによる制振効果の向上が期待できる。

参 考 文 献

- 1) Ahmadian, M. and DeGuilio, A. P.: Recent Advances in the Use of Piezoceramics for Vibration Suppression, *Shock Vib. Digest*, **33** (2001), pp. 15–22.
- 2) Bailey, T. and Hubbard, J. E., Jr.: Distributed Piezoelectric-Polymer Active Vibration Control of a Cantilever Beam, *J. Guid. Control Dynam.*, **8** (1985), pp. 605–611.
- 3) Forward, R. L.: Electronic Damping of Vibrations in Optical Structures, *Appl. Opt.*, **18** (1979), pp. 690–697.
- 4) Hagood, N. W. and von Flotow, A.: Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, *J. Sound Vib.*, **146** (1991), pp. 243–268.
- 5) Clark, W. W.: Vibration Control with State-Switched Piezoelectric Materials, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **11** (2000), pp. 263–271.
- 6) Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D. and Ching, G.: Semi-Passive Damping Using Continuous Switching of a Piezoelectric Device, *Proc. SPIE*, **3672** (1998), pp. 104–111.
- 7) Richard, C., Guyomar, D., Audigier, D. and Bassaler, H.: Enhanced Semi-Passive Damping Using Continuous Switching of a Piezoelectric Device on an Inductor, *Proc. SPIE*, **3989** (2000), pp. 288–299.
- 8) Onoda, J., Makihara, K. and Minesugi, K.: Energy-Recycling Semi-Active Method for Vibration Suppression with Piezoelectric Transducers, *AIAA J.*, **41** (2003), pp. 711–719.
- 9) Lin, Q. and Ermanni, P.: Semi-Active Damping of a Clamped Plate Using PZT, *Int. J. Solids Struct.*, **41** (2004), pp. 1741–1752.
- 10) Lefevre, E., Badel, A., Petit, L., Richard, C. and Guyomar, D.: Semi-Passive Piezoelectric Structural Damping by Synchronized Switching on Voltage Sources, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **17** (2006), pp. 653–660.
- 11) Badel, A., Sebald, D., Guyomar, D., Lallart, M., Lefevre, E., Richard, C. and Qiu, J.: Piezoelectric Vibration Control by Synchronized Switching on Adaptive Voltage Sources: Towards Wideband Semi-Active Damping, *J. Acoust. Soc. Am.*, **119** (2006), pp. 2815–2825.
- 12) Ji, H., Qiu, J., Badel, A. and Zhu, K.: Semi-Active Vibration Control of a Composite Beam Using an Adaptive SSDV Approach, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **20** (2009), pp. 401–412.
- 13) Badel, A., Guyomar, D., Lefevre, E. and Richard, C.: Efficiency Enhancement of a Piezoelectric Energy Harvesting Device in Pulsed Operation by Synchronous Charge Inversion, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16** (2005), pp. 889–901.
- 14) Shu, Y. C. and Lien, I. C.: Efficiency of Energy Conversion for a Piezoelectric Power Harvesting System, *J. Micromech. Microeng.*, **16** (2006), pp. 2429–2438.
- 15) Ng, T. H. and Liao, W. H.: Sensitivity Analysis and Energy Harvesting for a Self-Powered Piezoelectric Sensor, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, **16** (2005), pp. 785–797.