セルフパワード・アクティブ振動制御のエネルギー収支*

中野公彦^{*1}, 須田義大^{*2}, 中代重幸^{*3}

Energy Balance of Self-Powered Active Controllers

Kimihiro NAKANO^{*4}, Yoshihiro SUDA and Shigeyuki NAKADAI^{*4} Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi University,
2-16-1 Tokiwadai, Ube-shi, Yamaguchi, 755-8611 Japan

The authors have been proposed self-powered active vibration control systems, which achieve active vibration control using regenerated vibration energy. They do not require external energy to produce control force. To realize the proposed system, the system must regenerate more energy than it consumes. It is important to estimate the balance between regenerated and consumed energy. This paper proposes the method to derive the energy balance from dynamical property of systems, feedback gain of active controllers, specifications of actuators and power spectral density of disturbance. Then the condition under which the proposed system operates effectively is obtained. Experimental results validated our claims.

Key Words: Vibration Control, Vibration Control Device, Actuator, Damper, Active Control, Energy Regeneration, Energy Balance

1. 緒言

振動からエネルギーを回生してアクティブ振動制御に利用するシステム⁽¹⁾⁽²⁾が著者らによって提案され、セルフパワード・アクティブ制御と名づけられている⁽³⁾。アクティブ制御を行う場合、その消費エネルギーが実用化の際に問題になることが多かったが⁽⁴⁾、本システムにより、その解決を行うことができる。セルフパワード・アクティブ制御には、1つのアクチュエータがエネルギー回生とアクティブ制御を同時に行う方式と、回生と制御を別々のアクチュエータによって行う方式があり、前者を単一型、後者を複合型と名づける。単一型は船用減用装置⁽⁵⁾へ、複合型は大型トラックのキャブサスペンションへの応用が検討されている⁽³⁾。提案するシステムが成立するた

めには、回生エネルギーが消費エネルギーよりも多いことが必要条件となる。制御器を設計する段階で、回生可能な平均電力と消費する平均電力を計算し、エネルギー収支を議論することは重要なことである。文献⁽⁵⁾ではその手法の一部が述べられているが、船用減用装置という系のみを対象にしたものである。原田ら⁽⁶⁾、則次ら⁽⁷⁾および Jolly ら⁽⁸⁾の研究にも回生した振動エネルギーをアクティブ制御に使用することが提案されているが、エネルギー収支の推定法は明確に議論されていない。本研究では、2自由度系のスカイフック制御系という基礎的なモデルを例にして、単一型および複合型の両方に関してエネルギー収支を計算し、実験を通じてその妥当性を検証する。セルフパワード・アクティブ制御成立の必要条件を求めることを目的とする。

2. 単一型システムのエネルギー収支計算モデル

2.1 力学モデル 図1に示すような2自由度振動系においてアクチュエータが消費する電力を議論することにする。この下部の系を1次系と呼び、上部の系を2次系と呼ぶことにする。力外乱 f_0 が1次

* 原稿受付 2000年7月19日。

^{*1} 正員, 山口大学工学部(☎755-8611 宇部市常盤台2-16-1)。^{*2} 正員, 東京大学生産技術研究所(☎153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)。^{*3} 正員, 千葉工業大学(☎275-0016 習志野市津田沼2-17-1)。

E-mail: knakano@po.cc.yamaguchi-u.ac.jp

質量 m_1 に加わることを想定した。1 次系, 2 次系のばね定数を k_1, k_2 , 1 次系の減衰係数を c_1 で表す。2 次系には減衰は存在しないものとした。この減衰は, 内部減衰や摩擦などによるものと仮定し, エネルギー回生はできない。2 次の系にアクティブ制御を行うリニア直流モータを配置する。これはアクチュエータとして機能する。アクティブ制御は 2 次質量 m_2 の制振を目的し, モータ出力が制御入力となる。直流モータに電圧 e_a を加えることによって, モータ出力 f_a の制御を行う。回路抵抗を r_a , モータ係数を φ_a とおき, 回路電流を i_a で表す。

Fig.1 Dynamics Model of the Singular Type System

1 次質量の上下絶対変位を x_1 , 2 次質量の上下絶対変位を x_2 とすると, システムの運動方程式は以下のようなになる。

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 \cdot (x_2 - x_1) = \frac{f_a}{m_2} \quad (1)$$

$$\ddot{x}_1 + 2 \cdot \omega_1 \cdot \zeta_1 \cdot \dot{x}_1 + \omega_1^2 \cdot x_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \omega_2^2 \cdot (x_2 - x_1) + \frac{f_0}{m_1} - \frac{f_a}{m_1} \quad (2)$$

ただし,

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \quad (3)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \quad (4)$$

$$\zeta_1 = \frac{c_1}{2 \cdot \sqrt{k_1 \cdot m_1}} \quad (5)$$

2.2 アクティブ制御 スカイフック制御⁽⁹⁾をアクティブ制御則として採用することにした。スカイフック制御則の下では, モータの出力目標値 f_a^* は以下のように決定される。ただし, c_{sky} は正の定数。

$$f_a^* = -c_{sky} \cdot \dot{x}_2 \quad (6)$$

この値がアクチュエータの出力目標値 f_a^* となる。スカイフック制御のフィードバックゲインと臨界減衰係数との比を γ によって表す。これをフィードバックゲイン比 (もしくは, ゲイン比) と呼ぶ。

$$\zeta_{sky} = \frac{c_{sky}}{2 \cdot \sqrt{m_2 \cdot k_2}} \quad (7)$$

通常のダンパは, 相対速度に比例した減衰力を発生するが, スカイフック制御では, 制振対象の絶対速度に比例した減衰力を発生するため, 制振性能の向上を図ることが可能になる。

2.3 直流モータのモデル化 リニア直流モータのストローク速度を $\dot{z}$, 誘導電圧を e_i , コイル電流を i , 出力を f とすると, 以下の式が成立する。

$$e_i = -\varphi \cdot \dot{z} \quad (8)$$

$$f = \varphi \cdot i \quad (9)$$

この比例定数 φ はモータ固有の値であり, モータ係数と呼ぶ。両端を短絡した閉回路でコイルを動かすことを考える。コイルの抵抗 (内部抵抗) が r の時, 以下の関係式が成り立つ。なお, 回路のインダクタンスは考慮していない。

$$f = -\frac{\varphi^2}{r} \cdot \dot{z} \quad (10)$$

粘性減衰器として機能することがわかる。この時の減衰係数は等価減衰係数 c_{eq} と呼ばれており, 以下のように定義される。

$$c_{eq} = \frac{\varphi^2}{r} \quad (11)$$

2.4 消費電力 エネルギー収支を考える前に, モータに外部電圧 e_a を付加して制御を行う時の消費電力を計算する。付加電圧と出力の関係式は以下のようなになる。

$$f_a = \varphi_a \cdot \frac{e_a - \varphi_a \cdot \dot{z}_a}{r_a} \quad (12)$$

これより, 目標値 f_a^* を実現するためには, 付加電圧を以下のように設定する。

$$e_a = \frac{r_a}{\varphi_a} f_a^* + \varphi_a \cdot \dot{z}_a \quad (13)$$

この時, 回路電流は以下のようなになる。

$$i_a = \frac{f_a^*}{\varphi_a} \quad (14)$$

アクチュエータ出力が目標値と一致する時, 消費電力 E_c は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} E_c &= e_a \cdot i_a \\ &= \frac{1}{c_{eqa}} \cdot f_a^2 + f_a \cdot \dot{z}_a \end{aligned} \quad (15)$$

ここで, モード係数と呼ぶ以下の係数 γ を定義する。

$$\gamma = \frac{f_a}{-c_{eqa} \cdot \dot{z}_a} \quad (16)$$

この係数を使用して消費電力を表すと, 以下のようなになる。

$$E_c = c_{eqa} \cdot \dot{z}_a^2 \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma) \quad (17)$$

消費電力は式(18)の条件の時、負になる。

$$0 < \gamma < 1 \quad (18)$$

2.5 負の消費電力の意味 $0 < \gamma < 1$ の時は、以下の時と同値である。

$$e_a \cdot (-\varphi_a \cdot \dot{z}_a) < 0 \quad (19)$$

$$|e_a| < \varphi_a \cdot |\dot{z}_a| \quad (20)$$

誘導電圧と反対方向に電圧を付加しているが、その値が誘導電圧よりも小さい。誘導電圧により発生した電流が電源に流れ込んでいる時である。エネルギーを回生しながら、制御入力を実現することができるため、回生モードと呼ぶ。

2.6 正の消費電力

2.6.1 力行モード 消費電力が正の時は、 $\gamma \leq 0$ もしくは、 $\gamma \geq 1$ の時である。しかし、2つの場合において、アクチュエータの消費電力の意味は異なる。

$\gamma \leq 0$ の時は、アクチュエータ出力の方向とストロークの速度が一致する、すなわち、以下の式が成り立つ。

$$f_a \cdot \dot{z}_a \geq 0 \quad (21)$$

この時、アクチュエータが外部に行う仕事は正となる。この時を力行モードと呼ぶ。

2.6.2 ブレーキモード $\gamma \geq 1$ の時は、以下の時と同値である。

$$f_a \cdot (-c_{eqa} \cdot \dot{z}_a) > 0 \quad (22)$$

$$|-c_{eqa} \cdot \dot{z}_a| \leq |f_a| \quad (23)$$

この時は、アクチュエータ出力がアクチュエータをダンパとして機能させた時に出す減衰力と同じ符号であり、かつその値よりも大きい。誘導電圧と順方向に電圧を付加することによって、アクチュエータをダンパとして機能させた時に出す減衰力以上の減衰力を出していることがわかる。この時をブレーキモードと呼ぶ。

2.7 単一型システムの成立条件 回生モードで得られた負の消費電力を蓄え、力行モードやブレーキモードに必要な正の消費電力として使用すれば、セルフパワード・アクティブ制御を実現することができる。このようなシステムを単一型システムと呼ぶ。式(15)より、アクチュエータの平均消費電力は以下の式によって求められる。

$$\bar{E}_c = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left(\frac{1}{c_{eqa}} f_a^2 + f_a \cdot \dot{z}_a \right) dt \quad (24)$$

この時、回生量が消費量を上回る条件は以下のようになる。

$$\bar{E}_c < 0 \quad (25)$$

ここで、角周波数 ω の外乱のパワースペクトル密度を $P_0(\omega)$ 、外乱からアクチュエータ出力までと、ストローク速度までの応答ゲインおよび位相差をそれぞれ、 G_{f_a} 、 $G_{\dot{z}_a}$ 、 Φ_{f_a} 、 $\Phi_{\dot{z}_a}$ とすると、平均消費電力は以下のようになる。

$$\bar{E}_c = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \varepsilon_c(\omega) \cdot P_0(\omega) d\omega \quad (26)$$

ただし、

$$\varepsilon_c(\omega) = G_{f_a}^2(\omega) + G_{\dot{z}_a}(\omega) \cdot G_{\dot{z}_a}(\omega) \cdot \cos(\Phi_{f_a}(\omega) - \Phi_{\dot{z}_a}(\omega)) \quad (27)$$

2.8 外乱からの入力仕事 単位時間あたりに外乱から系に入力されるエネルギー $\bar{E}_i$ は以下の式によって求まる。

$$\bar{E}_i = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f_0 \cdot \dot{x}_1 d\tau \quad (28)$$

外乱から1次質量速度までの応答ゲインと位相差を、 $G_{\dot{x}_1}$ 、 $\Phi_{\dot{x}_1}$ とおくと、以下のように表すことができる。

$$\bar{E}_i = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty G_{\dot{x}_1}(\omega) \cdot \cos(\Phi_{\dot{x}_1}(\omega)) \cdot P_0(\omega) \cdot d\omega \quad (29)$$

2.9 消費電力比 消費電力を無次元化するために、消費電力比 λ_1 を定義する。これは単位時間あたりに外乱から系に入力される仕事量に対する平均消費電力の比であり、以下のように表される。

$$\lambda_1 = \frac{\bar{E}_c}{\bar{E}_i} \quad (30)$$

3. 複合型システムのエネルギー収支計算モデル

3.1 複合型システムの提案 エネルギー収支の向上のため、アクチュエータの他に発電機を取り付けることを考える。リニア直流モータを発電機として使用し、エネルギー回生ダンパと名づける。アクチュエータとエネルギー回生ダンパという2つのモータで成立するシステムであることから、複合型セルフパワード・アクティブ制御と名づける。その力学モデルを図2に示す。

Fig.2 Dynamics Model of the Combined Type System

エネルギー回生ダンパは1次系に取り付けられている。その出力を f_{ed} とおくと、運動方程式は以下のよ

うになる.

$$\ddot{x}_2 + \omega_2^2 \cdot (x_2 - x_1) = \frac{f_a}{m_2} \quad (31)$$

$$\ddot{x}_1 + 2 \cdot \omega_1 \cdot \zeta_1 \cdot \dot{x}_1 + \omega_1^2 \cdot x_1 = \frac{m_2}{m_1} \cdot \omega_2^2 \cdot (x_2 - x_1) + \frac{f_0}{m_1} + \frac{f_{ed}}{m_1} - \frac{f_a}{m_1} \quad (32)$$

3.2 エネルギー回生ダンパの回生電力 モータ係数と内部抵抗がそれぞれ φ_{ed} と r_{ed} であるエネルギー回生ダンパをストローク速度で動かした時の電流 i_{ed} は以下ようになる. ただし, 電源電圧を e_{ed} とする.

$$i_{ed} = \frac{e_{ed} - \varphi_{ed} \cdot \dot{z}_{ed}}{r_{ed}} \quad (33)$$

電源に回生される電力 E_r は以下ようになる.

$$E_r = -i_{ed} \cdot e_{ed} = -e_{ed} \cdot \left(\frac{e_{ed} - \varphi_{ed} \cdot \dot{z}_{ed}}{r_{ed}} \right) \quad (34)$$

抵抗で消費される電力 E_d は以下ようになる.

$$E_d = i_{ed}^2 \cdot r_{ed} = \left(\frac{e_{ed} - \varphi_{ed} \cdot \dot{z}_{ed}}{r_{ed}} \right)^2 \cdot r_{ed} \quad (35)$$

回生効率 α を以下のように定義する.

$$\alpha = \frac{E_r}{E_d + E_r} = \frac{e_{ed}}{\varphi_{ed} \cdot \dot{z}_{ed}} \quad (36)$$

エネルギー回生ダンパの等価減衰係数を c_{eqed} とすると, E_r および出力 f_{ed} は以下ようになる.

$$E_r = \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot c_{eqed} \cdot \dot{z}_{ed}^2 \quad (37)$$

$$f_{ed} = -(1 - \alpha) \cdot c_{eqed} \cdot \dot{z}_{ed} \quad (38)$$

3.3 平均回生電力 エネルギー回生ダンパが一定の効率で回生を行ったとする. $G_{z_{ed}}(\omega)$, $P_0(\omega)$ および c_{eqed} が角周波数 ω の外乱からエネルギー回生ダンパのストローク速度までの周波数応答, 外乱のパワースペクトル密度, そして等価減衰係数を表す時, 平均回生電力は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \bar{E}_r &= \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot c_{eqed} \cdot \dot{z}_{ed}^2 dt \\ &= \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^\infty \varepsilon_r(\omega) \cdot P_0(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (39)$$

ただし,

$$\varepsilon_r(\omega) = \alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot c_{eqed} \cdot G_{z_{ed}}^2(\omega) \quad (40)$$

ここで, 効率が 50% の時に回生量が最大になることがわかる. 本研究の収支解析においては, 回生効率が常に 50% であると仮定する.

3.4 複合型システムのエネルギー比 複合型システムにおいては, 式(41)の条件の時に, 回生電力が

消費電力を上回ることになる. 式(25)と比較すると, エネルギー回生ダンパが回生する電力の量だけ, エネルギー収支が向上していることがわかる.

$$\bar{E}_c - \bar{E}_r < 0 \quad (41)$$

消費電力比 λ_2 は以下のように表される.

$$\lambda_2 = \frac{\bar{E}_c - \bar{E}_r}{\bar{E}_c} \quad (42)$$

4. エネルギー収支測定実験

4.1 実験装置概略 エネルギー収支を解析するために, 実験を行った. 実験装置の概略を図3に示す. 実験装置は図2に示した力学モデルと同様の2自由度振動系となっている. リニア直流モータがエネルギー回生ダンパ, およびアクチュエータとして機能する. ベースの下に配置されたリニア直流モータから外乱を加える. アクチュエータには電源が接続されており, 電圧を制御することによって出力を制御する. 回路電流と付加電圧を測定し, その積を消費電力とする. エネルギー回生ダンパには外部抵抗が接続されており, ここで消費される電力を回生電力と計算した. 内部抵抗と外部抵抗の値を等しくすることにより, 回生効率 50% を模擬している. なお, 単一型システムのエネルギー収支を測定する際には, エネルギー回生ダンパの端子を開放し, モータが出力を持たないようにした. 2つのレーザー変位計が, 1次, 2次質量の上下絶対変位を測定する. 加振器の回路電流を測定し, 力外乱の値を推定する. 2次質量の絶対速度は, レーザー変位計の値をもとに, コンピュータによって微分演算を行い推定した. 2次系の減衰は減衰比にして, 0.05 よりも小さかったため, 減衰が存在しないという仮定のもと, システムを同定した. 表1に実験装置の諸数値を示す. 質量, バネ定数および直流モータの諸数値は1次と2次で同じ値を持つ. モータ係数と内部抵抗の値から, 等価減衰比は 0.23 とわかる. なお, 等価減衰係数を臨界減衰係数で除したものを等価減衰比と呼ぶ.

Fig.3 Schematic View of the Experimental Setup

Table. 1 Specifications of the Model

Description	Symbol	Value
Mass	m_1, m_2	1.6 kg
Angular Natural Frequency	ω_1, ω_2	27.6 rad/s
Damping Ratio	ζ_1	0.3
Motor Constant	ϕ_a, ϕ_{ed}	9.8 N/A
Resistance	r_a, r_{ed}	4.7 Ω

4.2 単一型システムのエネルギー収支

4.2.1 スカイフック制御の性能 単一型システムにおいて、スカイフック制御の性能を検証する。エネルギー回生ダンパの両端を開放し、アクチュエータに電圧を付加することによって制御を行った。ゲイン比を等価減衰比の 0.5 倍, 1 倍, 2 倍に設定した時の力外乱から 2 次質量変位までの周波数応答 (計算値) を図 4 に示す。なお, 今後, ゲイン比とアクチュエータの等価減衰比の比を n で表すことにする。

$$n = \frac{\zeta_{sky}}{\zeta_{eqa}} \quad (43)$$

参考にアクチュエータの出力が 0 であった時の応答 (Without Control) も示す。横軸は 2 次系の角固有振動数 ω_2 に対する外乱角周波数 ω の比を表している。ゲイン比が高くなると制振性能が向上することがわかる。

Fig.4 Frequency Response of the Singular Type System

4.2.2 正弦波外乱によるエネルギー収支解析 正弦波外乱を加えた時の平均消費電力を計測した。ゲイン比が等価減衰比の 0.5 倍, 1 倍, 2 倍であるスカイフック制御を行った時の消費電力を図 5 に示す。縦軸はその周波数の正弦波外乱に対する消費電力を入力した外乱のパワースペクトル密度で除したものを記載した。 $\varepsilon_c(\omega)$ を表していることになる。記号付き実線は実験値を, 記号なし実線は計算値を表している。角周波数によって消費電力が正になる時と, 負になる時がある。外乱を白色雑音と仮定した時, この消費電力を角周波数で積分した値が, 平均消費電

力となる。計算値を ω_2 の 0.1 倍から 10 倍の範囲で積分を行ったところ, $n=0.5$ の時は -38.1 mW, $n=1.0$ の時は 0.0 mW, $n=2.0$ の時は 122.2 mW となった。ゲイン比が高くなると消費電力が大きくなる。

Fig. 5 Power Consumption in Controlling Sinusoidal Vibration (Singular Type)

4.2.3 白色雑音に対する消費電力 一般的な外乱に対する消費電力を求めため, ランダム波加振を行った。入力した力外乱のパワースペクトル密度を図 6 に示す。 $0.3 \omega_2$ から $3.0 \omega_2$ の領域で, 白色雑音に近い性質をもっている。ゲイン比がアクチュエータの等価減衰比と等しい時 ($n = 1.0$) の消費電力の時系列データを図 7 に示す。消費電力が正と負の値をとることがわかる。平均消費電力は -0.5 mW, 外乱からの入力 68.0 mW , 入力エネルギーに対する消費電力の比 λ_1 は, -0.01 であった。

Fig.6 Power Spectral Density of the Disturbance

Fig.7 Power Consumed by the Actuator (Singular Type)

4.2.4 エネルギー収支線図 より広範囲の条件の消費電力比を得るために、エネルギー収支線図を作成する。これは、横軸にアクチュエータの等価減衰比を、縦軸に制御のフィードバックゲイン比をとり、消費電力比 λ_1 の値を等高線で表したものである。図6で示される外乱を入力した時のエネルギー収支線図を図8に表す。

$$\zeta_{sky} < \zeta_{eqa} \quad (44)$$

の領域で消費電力が負になっていることがわかる。負の領域では、回生電力が消費電力を上まわる。図中の + マークが実験を行った条件であり、その場所に記載されている数字が消費電力比 λ_1 である。

Fig.8 The Chart of Power Consumption (Singular Type)

4.3 複合型システムのエネルギー収支

4.3.1 スカイフック制御 複合型システムにおいて、スカイフック制御の性能を検証する。エネルギー回生ダンパを内部抵抗と等しい抵抗値をもつ外部抵抗器に接続し、回生効率 50%のダンパと同等の減衰力を出すようにした。ゲイン比を等価減衰比の 0.5 倍, 1 倍, 2 倍に設定した時の力外乱から 2 次質量変位までの周波数応答 (計算値) を図 9 に示す。ゲイン比が高くなると制振性能が向上する。

Fig. 9 Frequency Response of the System

4.3.2 正弦波外乱によるエネルギー収支解析 正弦波外乱を加えた時の平均消費電力を計測した。ゲイン比が等価減衰比の 1 倍である時のアクチュエータ消費電力と回生電力を図 10 に示した。縦軸はその周波数の外乱に対する消費電力もしくはダンパの回生電力を入力外乱のパワースペクトル密度で除したものを記載した。これにより縦軸は $\varepsilon_r(\omega)$ と $\varepsilon_c(\omega)$ を表していることになる。記号付き実線は実験値を、記号なし実線は計算値を表している。外乱を白色雑音と仮定した時、この消費電力を角周波数で積分した値が、平均消費もしくは回生電力となる。計算値を ω_2 の 0.1 倍から 10 倍の範囲で積分を行ったところ、消費電力は 0.0 mW, 回生電力は 31.9 mW であった。式(28)で述べた入力エネルギーに対するシステム全体の消費電力の比 λ_2 は、-0.1 となる。

Fig. 10 Power Consumption in Controlling Sinusoidal Vibration (Singular Type)

4.3.3 白色雑音に対する消費電力 図 6 に示す白色雑音を加振器から 15 秒間加えた。図 11 にアクチュエータの消費電力, 図 12 に回生電力の時系列データを示す。アクチュエータの平均消費電力は -1.9 mW, エネルギー回生ダンパの平均回生電力は 7.2 mW, 外乱からの入力エネルギーは 73.4 mW, エネルギー比 λ_2 は、-0.12 であった。

Fig.11 Power Consumed by the Actuator (Combined Type)

Fig.12 Power Regenerated by the Energy Regenerative Damper

4.3.4 エネルギー収支線図 図 13 にエネルギー収支線図を示す。これは横軸にアクチュエータの等価減衰比を、縦軸にゲイン比をとり、 λ_2 の値を等高線図で表したものである。負の値の範囲が、回生量が消費量を上回る領域である。図中の等高線が計算値であり、+ マークが実験を行った数値である。複合型では、-0.15 を表す 2 つの等高線の間で最小値が存在する。計算結果と比較して妥当な実験結果が得られている。

Fig.13 The Chart of Energy Balance (Combined Type)

5. 考 察

図 8 に示した単一型のエネルギー収支と図 13 に示す複合型のものを比較すると、複合型の方が負の領域が大きく、収支が向上していることがわかる。複合型の方が、セルフパワード・アクティブ制御の実現には有利である。しかし、アクチュエータの他にエネルギー回生ダンパを配置する必要があるため、製作コストやメンテナンス費用の増大を招く。また応用

先は多自由度系に限られるという欠点を持つ。セルフパワード・アクティブ制御を実用化する際は、必要な制御力、製作コスト、応用先の系などを考慮して、両者のうち適切な方を利用していく必要がある。

6. 結 論

- ・ 単一型および複合型セルフパワード・アクティブ制御のエネルギー収支計算を行う方法を提案した。
- ・ 実験を行うことにより、提案したエネルギー収支計算法の妥当性を示した。
- ・ エネルギー収支解析において回生量が消費量を上回る条件があることを示した。
- ・ 求めたエネルギー収支線図から、複合型システムは、単一型システムよりもエネルギー収支が向上することを示した。

謝 辞

本研究は、文部省科学研究費補助金（平成 10, 11 年度特別研究員奨励費、DC2-4535）の助成の下、行われた。関係各位に感謝致します。

文 献

- (1) 須田義大・椎葉太一, 機講論, 940-26 (1994), 483-488.
- (2) 須田義大・中代重幸・中野公彦, 機論 C, 63-613 (1997), 3038-3044.
- (3) 須田義大・中代重幸・中野公彦・網島均・鷺津豪, 機論 C, 64-628 (1998), 4770-4776.
- (4) 米川隆・大沼敏男・森淑伯・後藤武志・武馬修一, 自動車技術会論文集, 22-3 (1991), 63-68.
- (5) 中野公彦・須田義大・中代重幸・小池裕二, 機論 C, 65-640 (1999), 4685-4691.
- (6) 原田秀行・岡田養二・鈴木浩平, 機論 C, 62-604 (1995), 4513-4519.
- (7) Jolly, M. R. and Margolis, D. L., Trans. ASME, J. of Vibration and Acoustics, 119 (1997), 208-215.
- (8) 則次俊郎・藤田統・竹原伸, 機講論, 96-5 (I) (1996), 227-230.
- (9) Karnopp, D., Crosby, M. J., and Harwood, R.: Trans. ASME, J. of Engineering for Industry, Vol. 96, ser. B, 1974, 619-626.