S1-3-5.　省エネルギを考慮した鉄道車両動揺防止アクティブ制御の研究

［機］　○ 林　隆三　(東大院)　　［機］佐々木　浩一　(JR 東日本)

［機］　須田　義大　(東大)　　［機］道辻　洋平　(農工大)

［機］　小峰　久直　(東大)

Study on Active Lateral Oscillation Control for Railway Vehicle Considering Energy Saving

Ryuzo HAYASHI (The University of Tokyo), Koichi SASAKI (JR EAST)
Yoshihiro SUDA (The University of Tokyo), Yohei MICHITSUJI (Tokyo University of Agriculture and Technology)
Hisanao KOMINE (The University of Tokyo)

The self-powered active control, which uses energy regenerated by a damper to produce control force and requires no external energy, has been proposed by the authors. Aiming for applying the self-powered active control to railway vehicles, DC motor type electro-magnetic actuators were manufactured and full-scale running experiment was executed by the bogie-testing bench with a bogie for Shinkansen. The results indicate that the proposed system has feasibility.

キーワード：鉄道車両，振動制御，アクティブ制御，アクチュエータ，エネルギ回生
Keywords: Railway Rolling Stock, Vibration Control, Active Control, Actuator, Energy Regeneration

1．緒言

新幹線の左右振動系の乗り心地改善を目的に，E2，E3 系電車には，いわゆる「空気圧式フルアクティブ制御」と「セミアクティブ制御」が導入されている．

フルアクティブ制御は，外部からのエネルギ供給により振動の抑制を行うもので，制振効果が優れている．また，セミアクティブ制御は，外部エネルギは利用しないが，振動抑制の効果はフルアクティブ制御のほうがより優れている．新たなアクティブ制御としては，エネルギ消費を極力抑制し，最大限の振動抑制効果を得ることが望まれる．

そこで，本研究では，系に作用する外乱の加振エネルギを回生してアクティブ制御を行う「セルフパワード・アクティブ制御[(1)(2)]」に着目する．セルフパワード・アクティブ制御は，著者らの一部により，船舶の横揺れを低減するアクティブ動吸振器（舶用減揺装置）への適用[(3)(4)]が試みられたことがあるが，本研究では，それを高速鉄道車両の動揺制御に適用することを提案し，アクティブ制御のエネルギ消費低減と振動抑制効果の増大を目標として，数値計算や新幹線用台車を用いた実規模大の台車試験装置で実験を行った結果などについて述べる．

2．数値解析シミュレーション

2.1　セルフパワード・アクティブ制御　　単一型セルフパワード・アクティブ制御は，1 台のモータをアクチュエータであると同時に，発電機として作用させることにより成立する．負の減衰力を要する時にはモータとして駆動し，正の減衰力の場合には発電抵抗（回生抵抗）により減衰力を発生させる．

回生時には電力を備蓄し，駆動時は電力を消費して制振を行う．回生量が消費量を上回れば，電力の供給が不要となる．

2.2　電磁アクチュエータ　　セルフパワード・アクティブ制御で使用するアクチュエータは，振動から発電することが可能な構造にする必要がある．回転式の直流モータにボールねじを取り付けた[(5)]，電磁アクチュエータをアクチュエータとして用いることを前提とした．図 1 にその構造を示す．モータに電圧が加えられた場合にはアクチュエータとして機能する一方，振動が入力された場合には，ボールねじを通じて振動が回転運動に変換され，モータにて発電が行われる．

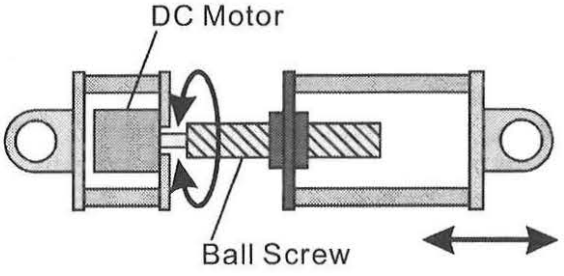

Fig.1 Electro-magnetic Actuator

2.3　数値解析モデルとアクティブ制御則　数値解析には，図 2 に示すような半車体モデルを用いた．アクティブ制御時は，左右動ダンパを電磁アクチュエータに取り替えて制御を行うことを想定する．アクティブ制御の制御則にはスカイフック制御を用いた．図 3 に軌道変位から車体加速度までの周波数応答の比較を示す．

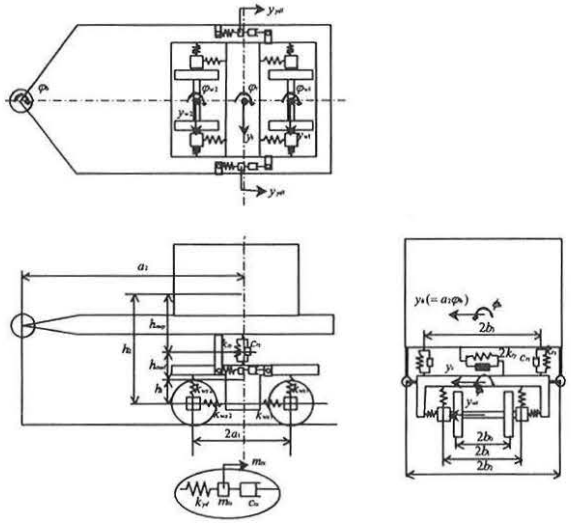

Fig.2 Simulation Model

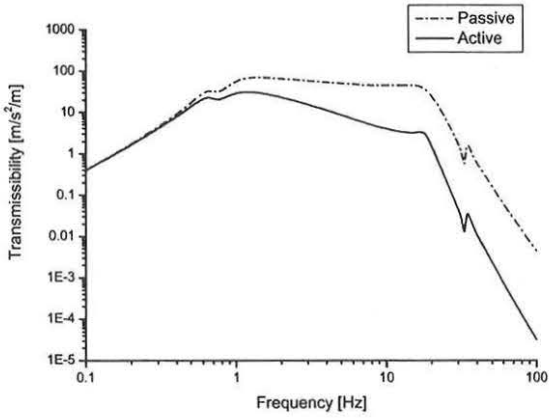

Fig.3 Frequency Response

2.4　アクチュエータのモデル　アクチュエータには直流モータを用いる．アクチュエータのストローク速度を $\dot{z}$，誘導電圧 e_i，回路電流を i，モータ出力を f と表すと，以下の関係が成り立つ．ただし，φはモータやギヤ比などによって決定される，アクチュエータ固有の定数で，モータ係数と呼ぶ．なお，回路内のインダクタンスは考慮していない．

$$e_i = -\varphi \cdot \dot{z} \tag{1}$$

$$f = \varphi \cdot i \tag{2}$$

2.5　電源の消費電力　電源電圧 e とモータ出力 f の関係は以下のようになる．ただし，回路抵抗を r とする．

$$f = \frac{\varphi \cdot (e - \varphi \cdot \dot{z})}{r} \tag{3}$$

モータ出力の目標値を f^*とすると，電源電圧を以下のように制御することにより，目標値を達成することができる．

$$e = \frac{f^* \cdot r}{\varphi} + \varphi \cdot \dot{z} \tag{4}$$

モータ出力が目標値と一致する時，電源における消費電力 E_c は以下のようになる．

$$\begin{aligned} E_c &= i \cdot e \\ &= \left(\frac{f^2}{c_{eq}} + f \cdot \dot{z} \right) \end{aligned} \tag{5}$$

ただし，c_{eq} は以下のように定義されており，等価減衰係数と呼ばれる．外部エネルギを使用せずにアクチュエータが発生できる最大の減衰係数となる．

$$c_{eq} = \frac{\varphi^2}{r} \tag{6}$$

式(7)のように γ を定義すると，消費電力は式(8)のようになる．

$$\gamma = \frac{f}{-c_{eq} \cdot \dot{z}} \tag{7}$$

$$E_c = c_{eq} \cdot \dot{z}^2 \cdot \gamma \cdot (\gamma - 1) \tag{8}$$

式(8)より，以下の条件の時に消費電力が負になる，すなわちエネルギ回生をすることにより制御入力を実現することが可能になることがわかる．

$$0 < \gamma \leq 1 \tag{9}$$

2.6　周波数領域での消費電力　パワースペクトル密度 $P_0(\omega)$ のランダム波外乱を受けた時の平均消費電力 $\overline{E}_c$ は以下のようになる．$G_f(\omega)$, $G_{\dot{z}_d}(\omega)$ はそれぞれアクチュエータ出力とストローク速度の応答ゲインを，$\Phi_f(\omega)$，$\Phi_{\dot{z}}(\omega)$ はアクチュエータ出力とストローク速度の応答の位相差を表す．

$$\overline{E}_c = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \varepsilon(\omega)\, d\omega \tag{10}$$

$$\varepsilon(\omega) = \left(\frac{G_f(\omega)^2}{c_{eq}} + G_f(\omega) \cdot G_{\dot{z}_d}(\omega) \cdot \cos\left(\Phi_f(\omega) - \Phi_{\dot{z}_d}(\omega)\right) \right) \cdot P_0(\omega) \tag{11}$$

式(11)から，外乱に対する電源の消費電力を求めると，図 5 のようになる．

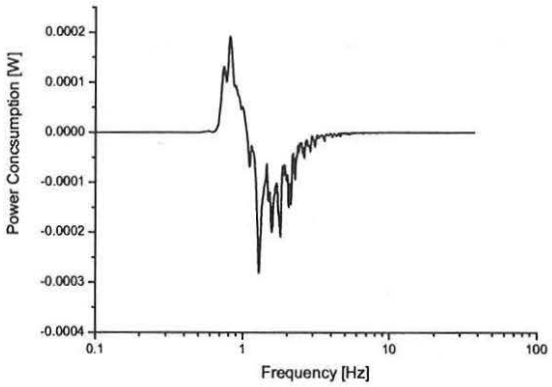

Fig.5 Power Consumption in Frequency Domain

3．電磁アクチュエータの試作

実物大の台車試験装置試験を行うために、左右動ダンパとの寸法および台車への取り付け空間の互換性を考慮して，直流電動機駆動の電磁アクチュエータを試作した．ボールねじを介して直線のストローク運動を回転運動に変換し，ギヤで増速して電動機に直結する構造とした．図 6 にその概観図を，図 7 に製作したアクチュエータと左右動ダンパの比較を示す．

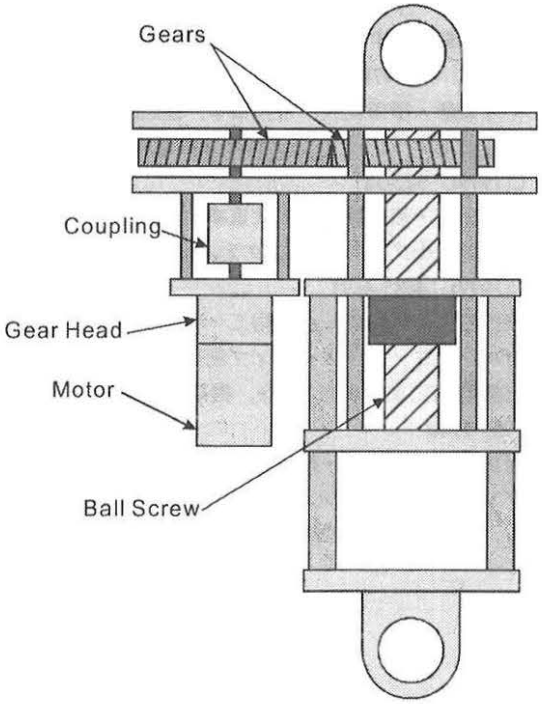

Fig.6 Electro-magnetic Actuator

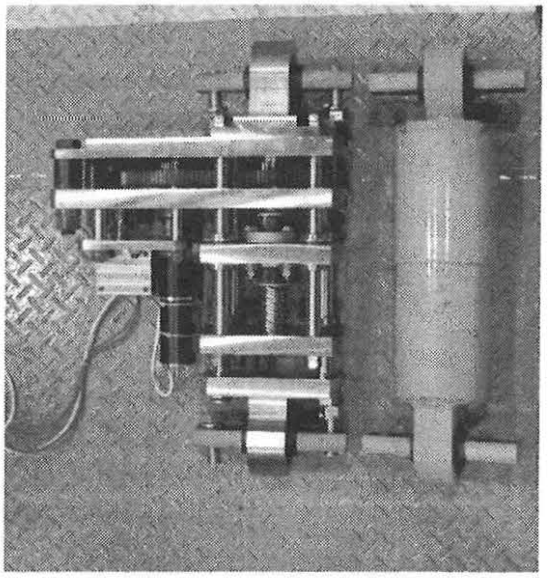

Fig.7 Electro-magnetic Actuator (Left) and Lateral Damper (Right)

4．エネルギ収支測定実験

JR 東日本研究開発センターの台車試験棟において，試作した電磁アクチュエータを新幹線用台車に取り付け，制振性能およびエネルギ収支の測定実験を行った．図 8 に試験台車を，図 9 には試験台車に取り付けられた電磁アクチュエータを示す．

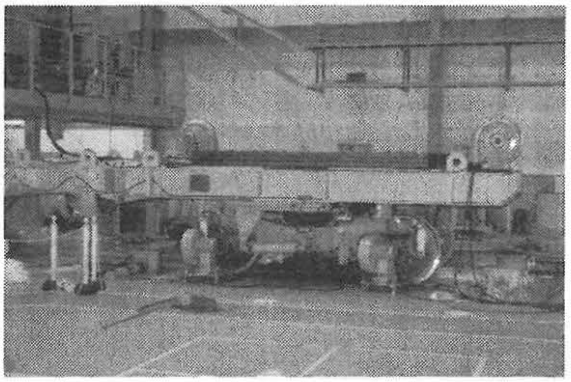

Fig.8 Testing Bogie

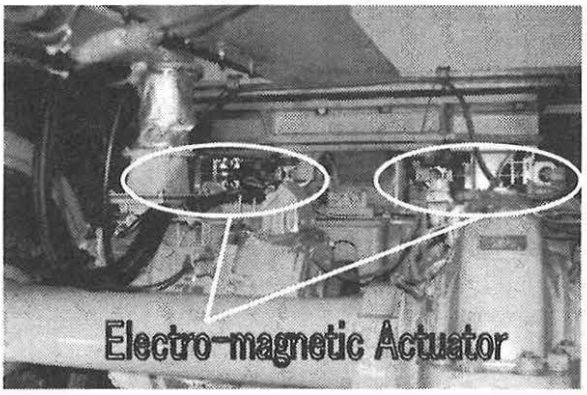

Fig.9 Electro-magnetic Actuators Attached to the Testing Bogie

図 10 に，軌条輪の正弦波加振に対する電磁アクチュエータの消費電力を示す．走行速度は 360km/h である．1Hz 以下の低周波領域では，外部エネルギを必要とする状態であったが，2Hz 以上の高周波領域で消費電力が負となり，エネルギ回生を行いうることが確認できた．

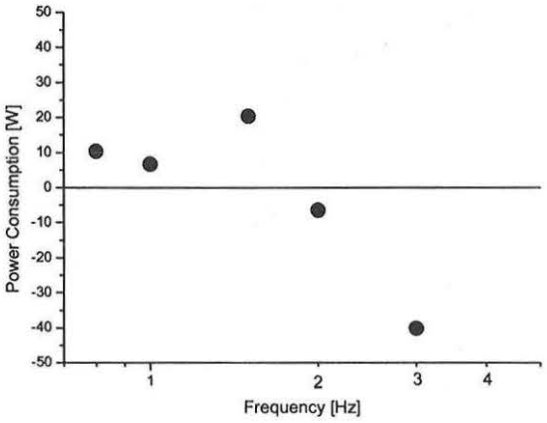

Fig.10 Power Consumption (360km/h)

図 11 に実軌道変位データを用いた台車加振走行実験における車体左右変位のパワースペクトルの測定結果を示す．1～8Hz の領域に関して，左右振動が大きく低減できていることがわかる．

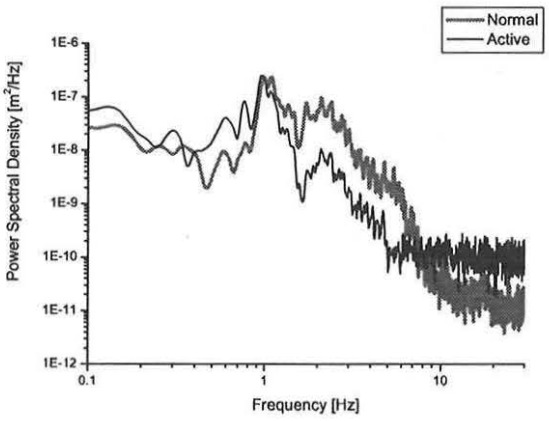

Fig.11 Power Spectral Density of Body Lateral Displacement

表 1 に，平均消費電力の値を速度ごとに示す．

Table.1 Mean Power Consumption

走行速度	平均消費電力
180km/h	4.9 W
270km/h	2.7 W
360km/h	2.7 W

アクティブ制御の平均消費電力は数 W 程度であり，また，2Hz 以上の振動に対しては消費電力が負，すなわち，外部エネルギをほとんど用いずにアクティブ制御を行うことが可能であることが確認できた．

5．結言

鉄道車両の左右振動に対するセルフパワード・アクティブ制御の適用をはかるため，数値シミュレーションおよび実車規模の走行実験の両面からアクティブ制御のエネルギ収支の計算・測定を行った．

数値シミュレーションおよび実験から，アクティブ制御による制振効果が確認でき，また，平均消費電力も数 W であることを確認した．この値は現状のフルアクティブ制御で消費される電力量に比較するとかなり小さな値である．

なお，今回の実験では，実験上の都合により，電磁アクチュエータの等価減衰係数を大きくできなかった．今後，電磁アクチュエータの等価減衰係数を向上させることにより，消費エネルギを全周波数領域で負として，セルフパワード・アクティブ制御を実現させることは可能であると考えられる．

今後の課題としては，1 車体モデルでの数値シミュレーション検討や，また，セルフパワード・アクティブ制御として，実際にエネルギを効率よく回生・貯蓄する方法の検討などが挙げられる．

参考文献

(1) 須田義大・中代重幸・中野公彦，回生された振動エネルギーを利用するアクティブ制御に関する研究，機論，63-613，C(1997)，72-78.

(2) 中野公彦・須田義大・中代重幸，連続的な制御入力によるセルフパワード･アクティブ振動制御，機論，65-630，C(1999)，522-527

(3) 中野公彦・須田義大・中代重幸・小池裕二，舶用減揺装置のセルフパワード･アクティブ制御，機論，65-640，C(1999)，4685-4691

(4) 須田義大・林隆三・小池裕二・中野公彦・中代重幸，セルフパワード・アクティブ制御による舶用減揺装置（模型船による実証実験），機論，68-670，C(2002)，1753-1740

(5) 岩田義明・長尾豊・砂子田勝昭・鈴木浩平，メカトロダンパによる免震システムのハイブリッドコントロール，機論，63-613, C(1997), 2991-2995