

## 技術論文

## 鉄道車両向け電動機械式動揺防止制御装置の開発

## Development of an Active Suspension System with EMA for Railway Vehicles

後藤 修\*  
Osamu GOTO

## 抄 録

鉄道車両の左右の乗り心地を改善するために、2001年に世界で初めて東日本旅客鉄道(株)の新幹線電  
車に空圧式アクチュエータを用いた動揺防止制御装置が搭載されて10年以上が経過した。その後も乗り  
心地改善への市場の要求は高く、かつ高速化を狙った鉄道事業者の開発が行われている。しかし、最初に  
実用化された空圧式は、全号車へ搭載した場合の空気消費量と、高速走行時の車体振動に対する応答性が  
課題であった。そこで、新日鉄住金(株)は空圧式に代わる電動機械式アクチュエータを開発し、アクチュ  
エータ単体試験、一両モデル試験機、回転試験機を通して評価を重ねた。その結果、最高速度320km/h  
を目指す東日本旅客鉄道(株)の2011年開業のE5系新幹線電車、2013年開業のE6系新幹線電車の全  
号車へ当システムが採用されたので報告した。

## Abstract

The active suspension system with pneumatic actuator to improve lateral riding comfort was carried in Shinkansen train of East Japan Railway Company for the first time in the world in 2001, and over ten years passed. After that the demand of the market to an improvement for riding comfort has been high. Also the railroad enterprise companies have been developed targeting improvement in the speed. The pneumatic equipment put in practical use by the beginning has two subjects. One is the air consumption for carrying to all the numbered passenger cars. Another is the response to the car-body vibration at the time of high speed. Then we have developed the electro mechanical actuator, EMA which replaces the pneumatic and evaluated through the simple examination for the actuator, our full-scale equipment modeling one car, and our roller rig. As the result our active suspension system with EMA has been adopted to all the passenger cars of the E5 series Shinkansen train commencing in 2011 and E6 series Shinkansen train commencing in 2013 by which East Japan Railway Company aim at 320 km/h of maximum speed.

## 1. 緒 言

鉄道車両の動揺防止制御装置は、車体の左右方向の乗り心地を改善する目的で、図1に示すように車体と台車間にアクチュエータ、車体に加速度センサ、入力を前記加速度とし出力を前記アクチュエータへの指令とする制御器から構成されている。

このような装置は1990年代から研究・開発されていたが、2001年11月に空圧アクチュエータを用いた動揺防止制御装置が世界で初めて東日本旅客鉄道(株)E2系新幹線電車はやてで実用化された<sup>1)</sup>。その後、東日本旅客鉄道(株)で2002年12月E3系新幹線電車こまち、2009年10月E259系成田エクスプレス、2012年3月E657系スーパーひたち、小田急電鉄(株)で2005年3月50000形ロマンスカー<sup>2)</sup>、京

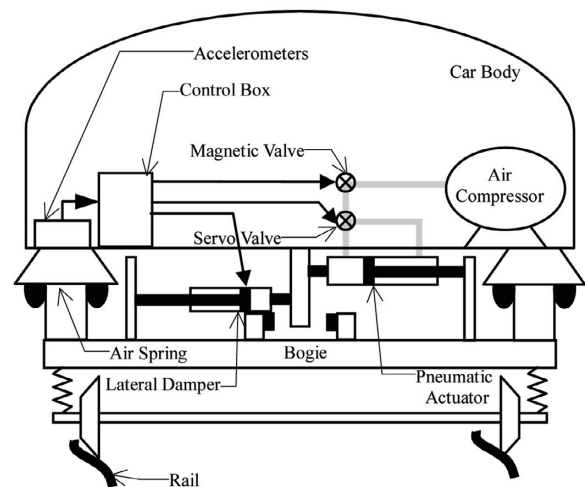


図1 空圧式動揺防止制御装置の構成  
Construction of an active suspension system with pneumatic actuator

\* 交通産機品事業部 製鋼所 鉄道台車製造部 第一台車設計室 主幹 大阪府大阪市此花区島屋 5-1-109 〒554-8555

成電鉄(株)で2010年7月新型特急車AE形スカイライナー<sup>3)</sup>と、合計312両に導入されている。いずれも新日鐵住金(株)のシステムであり、振動制御に適したH $\infty$ 制御理論を用いて制御演算部を設計し、人体に感じやすい周波数に対して振動を半分以下に抑えて、狙い通りの乗り心地改善を実現している。しかしながら、空圧システムゆえに課題があり、それを克服するために、新たに電動機械式システムの開発を行い、この度量産化に成功した。本稿にてその内容を報告する。

## 2. 空圧式動揺防止制御の課題

### 2.1 空気消費量

第一の課題は、空圧式アクチュエータのエネルギー源である圧縮空気の消費量である。鉄道車両は、空気ばね高さ調整装置、ブレーキ、戸締め、トイレなどに圧縮空気を使用しているが、レシプロ式コンプレッサの許容熱負荷容量から、その使用には制限がある。また、空気消費量と振動低減性能の間にはトレードオフの問題があった。したがって、編成の全号車に空圧式動揺防止制御装置を搭載し、乗り心地を改善することは困難であると考えられていた。

そこで、2003年から従来比半減から3割減の空気消費量低減型のアクチュエータ(図2)を開発し、2003年12月に台上回転試験と同時に実車走行試験を実施し、相応の結果を得た。さらに2008年6月、ドイツ鉄道試験車両ICE-Sにて同アクチュエータとセンタリング用アクチュエータを仮設し(図3)、速度300km/hにて走行試験を実施し、車体左右振動加速度のRMS(Root Mean Square)値を半減させる効果も得ている。しかし、この空気消費低減型アクチュエータは、2009年4月東日本旅客鉄道(株)MUE-Trainで実施した走行試験でも明らかなように、アクチュエータのストロークが大きくなる曲線では乗り心地改善が小さくなる<sup>4)</sup>。

一方、スクロール式コンプレッサを用いて高稼働率を許容することで、全号車に新日鐵住金(株)の空圧式動揺防止制御装置を搭載した近畿日本鉄道(株)の新観光特急しまかぜが2013年3月に営業を迎える。

### 2.2 周波数応答性

第二の課題は、空圧式アクチュエータの周波数応答性で

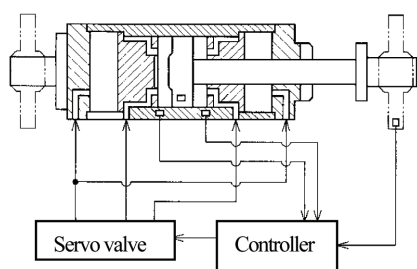


図2 空気消費低減型アクチュエータ  
Pneumatic actuator for reducing air assumption

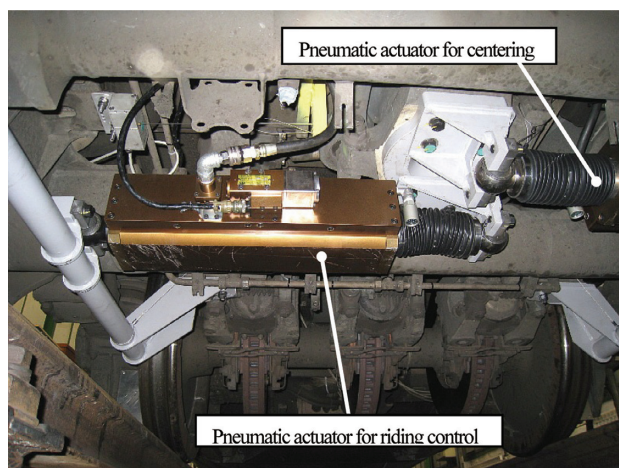


図3 ICE3用T台車への空圧式アクチュエータ搭載  
Fitting pneumatic actuators on bogie for ICE-S

ある。鉄道車両の最近の高速化に伴い、車両の振動周波数も上昇の傾向にあるため、より高応答なアクチュエータが要求される。しかし、空気はその圧縮性により、応答性には限界がある。また、高速化のために曲線通過中の定常左右加速度を抑えるために車体傾斜制御装置を搭載する車両においては、車体と台車間に左右に設置されたアクチュエータに必要なストロークが長くなり、シリンダ容積も大きくなる。

これは、必然と空圧式アクチュエータの応答性を下げる要因となり、上記要求に合わない。例えば、ストロークが2倍になれば、応答性は1/2に低下する。この応答性の打開策として、最大推力は落ちるものの、シリンダ断面積を小さくして応答性を上げる手段が挙げられる。具体的には従来100mmのシリンダ内径を80mmに小型化し、応答性を1.6倍、最大推力36%低下としたものを、新幹線を除く在来線としては最速の160km/hで走行する前記京成AE形に適用している。この結果、応答性向上により空気消費量低減も得られる。

### 2.3 電気式への動機付け

上述の課題を克服するために、2004年1月に東日本旅客鉄道(株)は次世代を狙ったE954/E955形式新幹線高速試験電車へ電磁直動式アクチュエータの採用を決定した<sup>5,6)</sup>。新日鐵住金(株)としても、空気消費を伴わず、高応答な電気式アクチュエータの開発に着手し、完成を急いだ<sup>7)</sup>。

## 3. 電気式アクチュエータの調査

### 3.1 電気式アクチュエータの要求仕様

現行の空圧式アクチュエータの仕様を以下に示す。

- (1) 最大かつ連続推力：6kN
- (2) 制御周波数帯域：3Hz以下
- (3) 質量：約20kg

2.2にも述べたように、鉄道車両の高速化に伴い、車体

の左右振動加速度が空力外乱により増大する<sup>8)</sup>。例えば、東日本旅客鉄道(株)のE2系新幹線電車とE3系新幹線電車が併結して走行する場合、併結面後方の車両において顕著である。したがって、更なる高速化の場合、前述の空圧式アクチュエータよりも大きな推力が必要であり、広い制御周波数帯域をもつアクチュエータが必要となる。同じ外形条件で比較すると、一般的に電気式アクチュエータは高応答である一方、連続推力は劣る。言い換えると、空圧式アクチュエータと同じ連続推力をもつ電気式アクチュエータは、非常に重く大きくなり、鉄道車両に搭載するには不適切となる。そこで、求める電気式アクチュエータの仕様を以下とした。

- (1) 最大推力：8kN 以上
- (2) 連続推力：3kN 以上
- (3) 制御周波数帯域：5Hz 以上
- (4) 質量：ヨーダンパ並みの36kg 以下
- (5) 台車枠を大きく変更をしないで、取付可能な大きさ

### 3.2 電気式アクチュエータの比較

3.1に示した電気式アクチュエータを探すため、国内外のアクチュエータメーカ、大学などから情報を収集した。調査結果を表1に示す。

各電気式アクチュエータの簡単な説明を以下に述べる。

EMA (Electro Mechanical Actuator)は電動機械式アクチュエータを意味する。アクチュエータに搭載されたモータの回転運動を、機械的駆動部を介して直線運動に変換するものである。駆動部の例としては、ボールスクリュやローラスクリュなど挙げられが、点接触であるボールスクリュよりも、線接触であるローラスクリュの耐久性が優れている。したがって、ドイツ、イギリス、スペインにてすでに実用化されている車体傾斜制御用アクチュエータは、ローラスクリュである。ただし、このような機械的駆動部を持つアクチュエータの最大の懸念は、その駆動部の固渋である。調査した範囲内では、実際にローラスクリュが固渋したという情報は無かった。

EHA (Electro Hydraulic Actuator)は電動油圧式アクチュエータを意味し、アクチュエータ自体にモータと油圧ポンプが搭載されたものである。それゆえ、車両自体には油圧源、油圧配管などは不要となる。ヨーロッパでは次世代車体傾斜用として期待され、公益財団法人鉄道総合技術研究

所でも開発が進んでいる<sup>9)</sup>。

VCM (Voice Coil Motor)は、スピーカの coils を駆動するような直動型アクチュエータである。永久磁石の磁界中におかれた可動コイルに電流を流すことで発生するローレンツ力により推力を得る。ただし、小変位に限られる。

LSM (Linear Synchronous Motor)は直動式同期モータを意味し、永久磁石と、長手方向に配置された電磁石で生成される移動磁界との吸引力によって推力を発生させる。モータの制御が容易で、高効率、高コストが特徴であり、ストロークに如何様にも対応できる。しかし、VCM同様に永久磁石材料の高性能化などによる磁束密度の増大が、小型大推力化の鍵を握っていて、当時の技術レベルでは、要求値に合うものは存在しなかった。

### 3.3 EMA の採用

3.2の比較から、定義の通りEHAは油圧部品が必要であるため保守に手間がかかり、現状の鉄道車両の保守現場には受け入れ難いのではないかと考えた。

次に直動式の最大の特徴は、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する部分で、不具合が生じやすい機械部が無いことである。そこで、VCMの検討をまず行った。しかし、ある検討結果では、最大推力を要求値から4.5kNに落としても質量は200kgを越えるものとなった。さらに別の検討結果では、質量を53kgに落とすと最大推力1.5kNとなり、制御可能範囲は±10mmとなった。

したがって、VCMの検討は諦め、競合他社との差別化を目指し、相対的に軽く十分な推力を持つEMAを採用することとした。

## 4. 性能試験

まず、EMAによる振動低減の基本性能を評価する。

### 4.1 電動アクチュエータの試作

図4に示す試作品を製作した。この試作品の仕様は以下であり、もちろん要求仕様を満たすものである。

- (1) 最大推力：8.5kN
- (2) 連続推力：4kN
- (3) 制御周波数帯域：10Hz 以上
- (4) 質量：約29kg



図4 EMAの試作品  
Trial product of EMA

表1 アクチュエータの得失  
Comparison of actuators

Type	Response	Weight	Gear	Heat	Oil
Pneumatic		Light		None	
EMA	High		Need	Low	Need
EHA	High			Hot	Need
LSM	High	Heavy		Hot	

特に仕様を決める上で重要であったのは、ローラスクリューのリードであり、反力（バックドライブフォース）に大きく影響する。従来の空圧式アクチュエータの最低動作圧力は 50kPa 以下であるので、シリンダ断面積を乗じると反力は 345N 以下となる。このことから、人力でもストロークを伸縮できるように反力を 560N 以下と設定し、それを実現するためにリードを 20mm とした。リードを短くすれば、モータの回転数が上がり、エネルギー変換効率も上がり、モータが小型化できる。しかし、その一方で反力が上がってしまい、非制御時の乗り心地の悪化が懸念される。後に、リードを 10mm にした EMA も製作したが、やはり反力が大きく、制御時の推力自体も邪魔するものであった。

#### 4.2 性能試験方法

EMA の性能が十分満足のいくものかを評価するために、図 5 に示す台車間距離 13.8m ある実物大の試験機（以降一両モデル試験機と称す）を使用する。1 両の車体相当部分、2 つの実際の台車枠、鉄道車両の実際の動きを再現するために台車枠を前位と後位独立して左右方向に加振できる油圧式アクチュエータから構成される。

この一両モデル試験機を用いて、実車の振動を再現するための概念図が図 6 である。ここで  $u$  が実車で計測された車体左右振動加速度であり、B.P.F. は再現したい周波数帯域を決めるバンドパスフィルターであり、 $G(s)$  は一両モデル試験機における油圧式アクチュエータへの加振指令値から車体相当部分の車体左右振動加速度までの伝達関数であり、 $y$  は油圧式アクチュエータへの加振指令値である。

例えば、車体ヨーイング  $L\varphi$  の運動方程式は、前台区の加振指令値を  $y$ 、後台区の加振指令値の位相を 180 度遅らせると、(1) 式となる。なお、油圧式アクチュエータの伝達特性は、車両の伝達特性に比べて高応答であるので、無視できる。

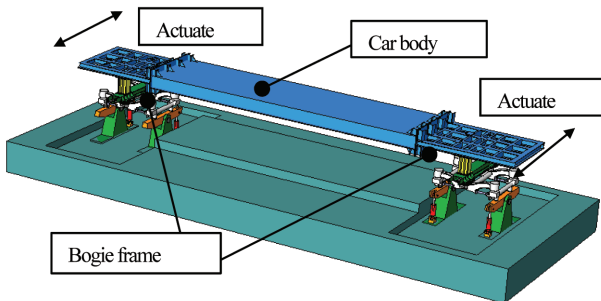


図 5 一両モデル試験機  
Examination machine



図 6 油圧式アクチュエータへの制御指令値  
Control command to hydraulic actuator

$$mi^2 L\ddot{\varphi}(t) = -2c(L\dot{\varphi}(t) - \dot{u}(t - \Delta t))L - 4k(L\varphi(t) - u(t - \Delta t))L \quad (1)$$

(1) 式をラプラス変換し整理すると、ヨーイング加振指令値  $y$  からヨーイング振動加速度までの伝達関数  $G(s)$  は、(2) 式となる。

$$G(s) = \frac{s^2 L \hat{\varphi}}{\hat{y}} = \frac{s^2 (2cL^2 s + 4kL^2)}{mi^2 s^2 + 2cL^2 s + 4kL^2} e^{-\Delta t s} \quad (2)$$

この伝達関数で使用する諸元は、図 7 に示すように周波数ごとの加振試験結果と合わせ込むことで、表 2 の値を得る。

そこで、(3) 式に示す逆関数  $G^{-1}(s)$  に実測したヨーイング振動加速度  $u$  を入力すれば、ヨーイング加振指令値  $y$  が計算できる。計算例を図 8 に示す。さらに一両モデル試験機での再現性を図 9 と図 10 に示す。動揺周波数領域で精

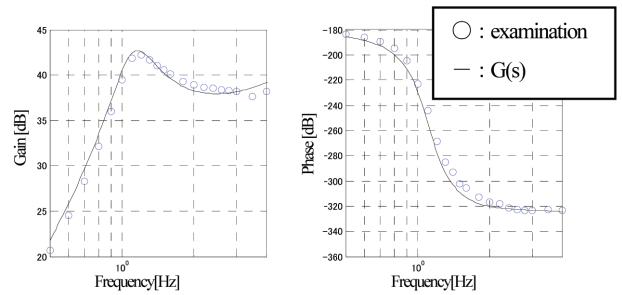


図 7 ヨーイング加振試験結果の諸元同定結果  
Result of identification for yawing vibration

表 2 諸元同定結果  
Result of identification for parameters

Parameter	Value	Sign
Car body	30 t	$m$
Inertia radius of yawing	4.53 m	$i$
Span for bogies	13.8 m	$2L$
Air spring	160 kN/m	$k$
Lateral damper	18 kNs/m	$c$
Delay time	18 ms	$\Delta t$

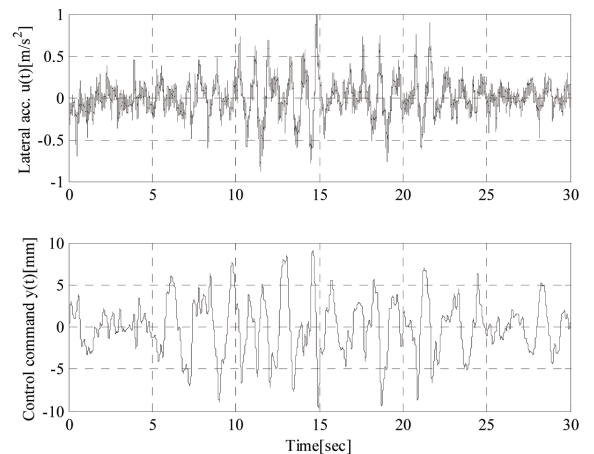


図 8 左右振動加速度再現のための加振指令波形  
Control command for simulating a real lateral acceleration

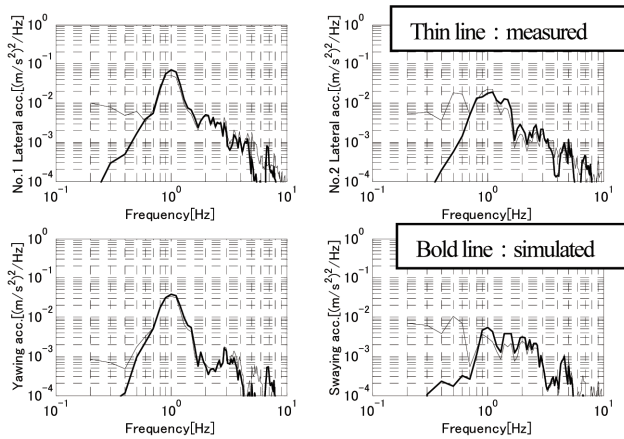


図9 振動加速度実測値（細線）と再現値（太線）  
Power sector density for measured or simulated

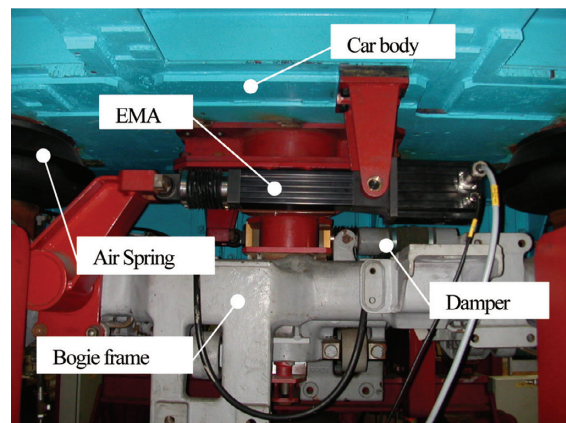


図11 一両モデル試験機へのEMA 艤装  
Fitting EMA on our examination machine

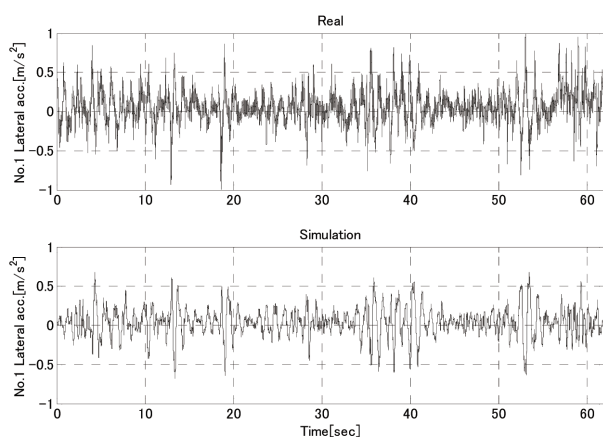


図10 実測値（上）と再現値（下）の振動波形  
Lateral acceleration wave for measured or simulated

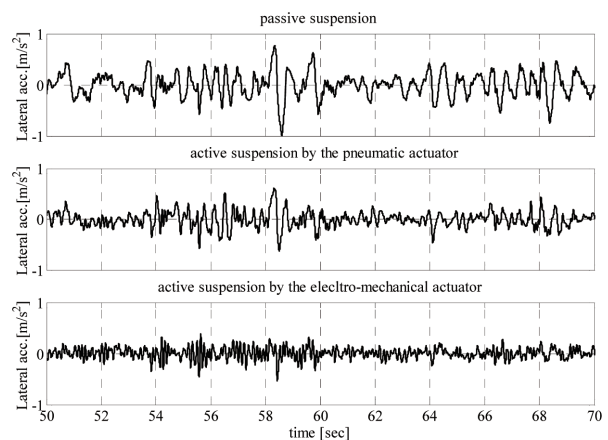


図12 各制御効果の車体振動波形  
Lateral acceleration under some control type

度良く一致しており、実車に搭載する前に十分な性能確認を行うことができる。

$$G^{-1}(s) = \frac{mi^2 s^2 + 2cL^2 s + 4kL^2}{s^2(2cL^2 s + 4kL^2)} e^{\Delta t s} \quad (3)$$

### 4.3 性能試験結果

乗り心地を改善する基本性能を比較するために、一両モデル試験機にEMAの試作品を中心ピンの手前へ、現状の空圧式アクチュエータを中心ピンの背面に取り付けた。図11に艤装状態を示す。

試験結果として図12に、制御しない場合、空圧式アクチュエータによる制御、EMAによる制御の車体左右振動加速度波形を示す。車体左右振動加速度は、ISO 2631-1(1997)で規定されたRMS値と乗り心地レベル $L_T$ にて評価し、表3に比較した数値を示す。空圧式アクチュエータによってRMS値は、制御しない場合の半分に低減され、乗り心地レベル $L_T$ は約6dB低下する。一方、EMAによってRMS値は1/3に低減され、乗り心地レベル $L_T$ は約10dB低下する。明らかに、EMAによる乗り心地改善は、空圧式アクチュエータよりも優れている。しかし、振動波形が

表3 RMSと $L_T$ の評価  
Evaluations of RMS

Control type	RMS	$L_T$
Passive	0.172 m/s <sup>2</sup>	88.5 dB
Pneumatic	0.083 m/s <sup>2</sup>	81.9 dB
EMA	0.051 m/s <sup>2</sup>	77.6 dB

ら明らかなようにEMAは応答性が良いため、かえって動揺周波数域以上の高周波での振動が大きくなりやすい。この点は、 $H_\infty$ 制御理論によるコントローラ的设计において、振動加速度あるいは制御指令値に対する重み関数を整形することで回避することが可能である。

## 5. 耐久試験

基本的な乗り心地改善に対する性能は十分であることを確認できたため、次に実用化にむけて各種の耐久性試験を実施した。

### 5.1 アクチュエータの発熱

電気式は電気エネルギーを運動エネルギーに変換する際に

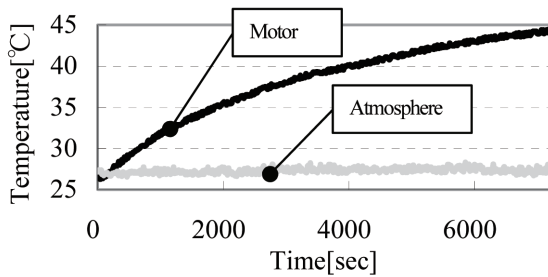


図 13 EMA 内部のモータの温度上昇  
Heat generation on motor in EMA



図 15 ローラスクリュの損傷  
Failure of roller screw

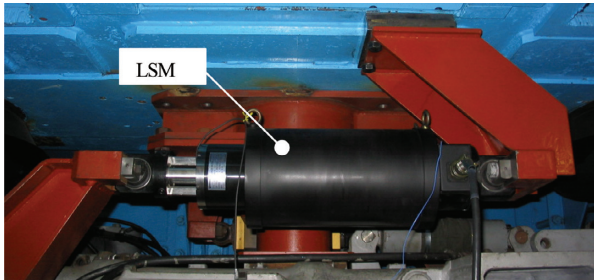


図 14 一両モデル試験機へのLSM 艤装  
Fitting LSM on examination machine

必ず熱として損失が生じるため、走行風を当てない厳しい条件の下、アクチュエータの連続動作試験を実施した。図 13 に温度上昇の結果を示す。2 時間の動作試験を行っても、最高温度部であるモータのケーシング部表面の温度上昇量は 14 度に過ぎなかった。よって、EMA の発熱量は、実車への適用への障害にはならないと考えた。

また、競合他社の LSM の実力を探るべく、下記仕様の LSM を試作し、同じく一両モデル試験機に艤装して試験を行った。結果、数分で 100 度を超え、LSM はやはり重量とともに発熱が弱点になると考えた (図 14)。

- (1) 最大推力：3.6kN
- (2) 連続推力：1.3kN
- (3) 制御周波数帯域：10Hz 以上
- (4) 質量：68kg
- (5) 形状：178mm φ

## 5.2 横荷重試験

これまでの空圧式アクチュエータの耐久試験同様に、緩衝ゴムのごじり負荷による連続動作試験を下記条件で実施した。しかし、試験開始後まもなく各軸受部が異常摩耗し、図 15 に示すローラスクリュにも損傷が確認された。

- (1) 緩衝ゴムによる反力 140Nm
- (2) 振幅 ±5mm
- (3) 周波数 5Hz
- (4) 台車検査周期 60 万 km 走行 = 1068h

このことから、EMA は横荷重に非常に弱いことがわかったため、従来の緩衝ゴムで担っていた車体と台車間の偏倚

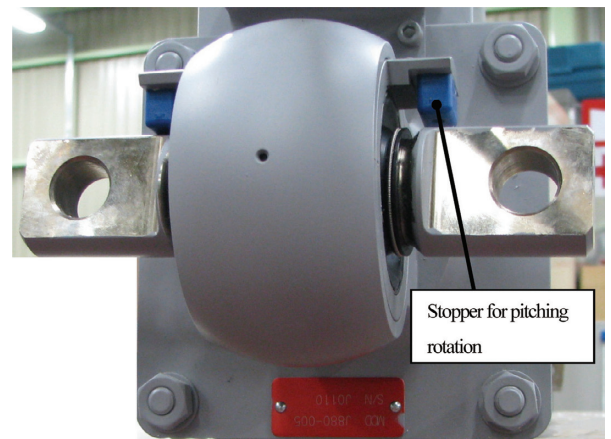


図 16 2 自由度のみ回転自在な球面軸受  
Universal joint without pitching rotation

許容の役目として、図 16 に示すような 2 自由度のみ回転可能な特殊な球面軸受を採用した。1 自由度は、円筒面と平面から形成される線接触により拘束している。球面軸受側で拘束している理由は、EMA 内部で拘束した場合反力が増大してしまうためであり、拘束しているそもその理由は、EMA を転倒させないためである。また、台車側からの振動絶縁と、車体と台車間の電氣的絶縁のため、モータの発熱に影響しない台車側のみに簡易な円環状の緩衝ゴムを用いた。

さらにこの試験はローラスクリュを損傷させたまま、内部の潤滑油をすべて抜き取り、予定通り台車検査周期まで継続して行った。しかし、固渋することも無く、図 17 に示すとおり動揺周波数域での加振性能にほとんど影響がなかった。そして、最終的に全般検査周期までこの試験を継続したが、固渋には至らなかった。

## 5.3 鉄粉入り試験

次に意図的にアクチュエータの潤滑油の中に鉄粉 (長さ 0.5mm, 幅 0.1mm 程度 分量 0.8g) を混入させ、単体試験による正常品との加振性能の比較、一両モデル試験機の制御効果確認を行った。いずれの場合も固渋することはなかったが、左右乗り心地レベルが 2dB 程度悪化した。固

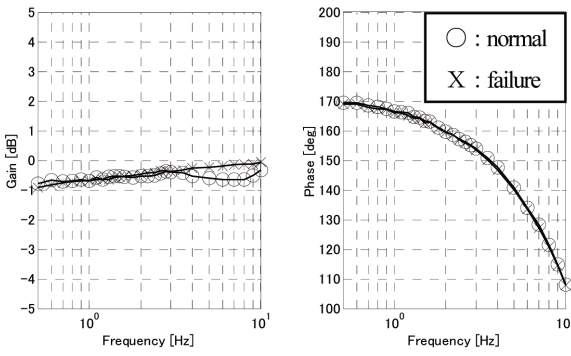


図 17 推力に関する周波数特性  
Frequency characteristic for control force

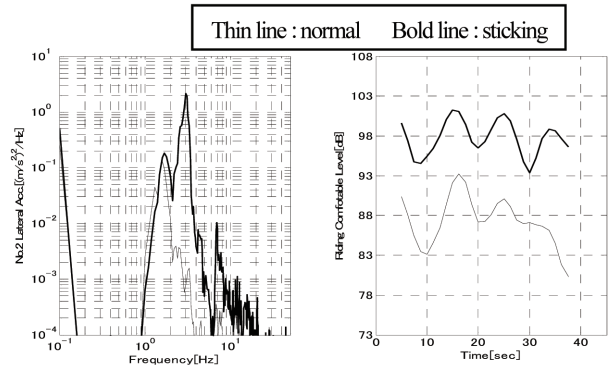


図 19 正常時（細線）と固渋時（太線）の乗り心地  
Result of riding comfort on examination machine

渋に至らないのは、ローラスクリュの隙間を鉄粉が通過しながら押し潰されていると考えられる。

なお、鉄粉などの異物が混入した潤滑油は各部の寿命に悪影響を及ぼすため、保全対策として量産時には磁気栓を設置することとした。

#### 5.4 固渋模擬試験

以上から EMA は容易には固渋しないことが確認できたが、実際に固渋した場合、車両運動にどのように影響するか確認する。そこで、図 18 に示す完全な剛体の棒で固渋を模擬する治具を製作した。

まず、一両モデル試験機の No.2 台車の上に固渋治具を取付け、実軌道狂いの加振試験を行った結果を図 19 に示す。台車振動が直接車体に伝達されるため、2 Hz 以降の振動が大幅に増加し、乗り心地レベルも約 10 dB 増加することが確認できた。

次に台上回転試験機で台車に固渋治具を取り付けた状態を図 20 に示す。この試験機で自励振動によるだ行動限界速度を測定した結果を表 4 に示す。まず、単なる固渋だけでは正常時と同様にだ行動限界速度は 400 km/h 以上となる。次に、ヨーダンパフェールかつ固渋した場合は 340 km/h で不安定なモードが生じるが、次期高速新幹線電車の営業最高速度 320 km/h 以上の走行安全性を確認した。しかし、制御動作時の減衰力切替式左右動ダンパが低減衰の場合に、ヨーダンパフェールかつ固渋すると 310 km/h で不安定となるので、目標とする営業最高速度を割ってしまう。そこで、定置で実施する車上検査試験では



図 18 固渋治具（上：一両モデル試験用，下：台上試験用）  
Bar for simulating sticking

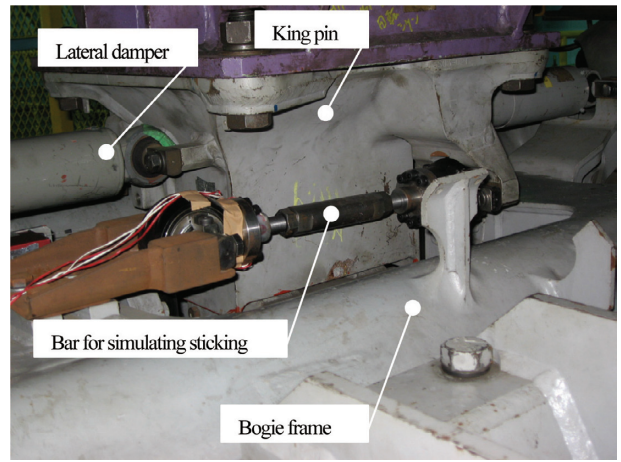


図 20 固渋治具による台上回転試験  
Examination on roller rig for simulating sticking

表 4 回転試験によるだ行動限界速度（自励）  
Critical speed of hunting on roller rig

Sticking	Lateral damper (kNs/mm)	Yaw damper	Speed (km/h)
No	80	All OK	> 400
No	80	One failure	> 400
Yes	80	All OK	> 400
Yes	80	One failure	340
Yes	20	One failure	310

もちろんのこと、走行中も、アクチュエータのモータの回転数出力値を用いて、規定時間毎の総ストローク量と車体左右振動加速度の RMS 値をしきい値と比較しながら固渋のフェール判定をする。フェール検知をすれば、制御を停止して、減衰力切替式左右動ダンパは高減衰側となり、走行安全性を確保する。

#### 5.5 連続動作試験

最後に正常な使用条件での耐久性を確認するために、下記条件で、全般検査周期ごとに分解検査しながら、定置にて全般周期 5 回分の連続動作試験を行った。その結果、ゴ

ム、樹脂以外のいずれの部品も交換に値する摩耗は発生せず、定置における十分な耐久性を確認した。

- (1) 振幅±5mm
- (2) 周波数 5Hz
- (3) 慣性負荷 4kN
- (4) 全般検査周期 120 万 km 走行 = 2136h

## 6. ソフト面による乗り心地改善

以上はハードウェア面の改善であったが、ソフトウェア面での改善として、高速化に伴う曲線通過時の乗り心地も改善する。手法として、車体傾斜制御装置と同様に曲線マップ情報を動揺防止制御装置に事前に記録させて、曲線で生じる超過遠心加速度  $\alpha$  を (4) 式を用いて精度良く推定する。そうすれば、加速度センサで測定する車体左右振動加速度から低周波である定常成分を相殺することで、スェイング+ローリング振動制御用のコントローラの動揺域におけるゲインを高め設計でき、振動低減性能を向上させることができる。

$$\alpha = \eta_{on} (V^2/R - gC/G) \quad \text{あるいは} \quad \eta_{off} (V^2/R - gC/G) \quad (4)$$

ここで、 $\eta_{on/off}$  は車体傾斜動作/非動作時の補正係数、 $V$  は走行速度、 $R$  は曲線半径、 $g$  は重力加速度、 $C$  はカント、 $G$  は軌間を示す。

## 7. 結 言

鉄道車両の高速化に伴い空圧式動揺防止制御の弱点が顕在化し、市場の要求にも合わせて、電動機械式アクチュエータを開発して以下の結果を得た。今後も、鉄道業界の動向を注視しながら空圧と電動の両方の開発を進めていく。

- (1) 電気式アクチュエータを市場調査した結果、競合他社との差別化を優先し、EMA(電動機械方式)を開発した。
- (2) EMA は、非常に耐久性の優れたアクチュエータであることを、各種耐久試験により確認した。
- (3) 東日本旅客鉄道(株)にてEMAを評価し、E5/E6系高速新幹線電車向け動揺防止制御装置として、全号車に採用された(図21、図22)<sup>10)</sup>。

### 参考文献

- 1) Tahara, M. et al.: Practical Use of An Active Suspension System for Railway Vehicles. International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems. 2003, p. 225-228
- 2) Kijima, H.: The Advent of Odakyu's Type 50000 Romance Cars. Japanese Railway Engineering. (156), 22-25 (2006)
- 3) 澤田 ほか: 京成電鉄 新型特急 AE 形用台車の開発とアクティブサスペンション. 鉄道車両と技術. (157), 10-13 (2009)

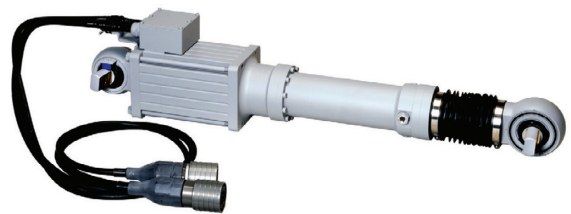


図 21 E5系新幹線電車向けのEMA  
EMA for E5 series Shinkansen train

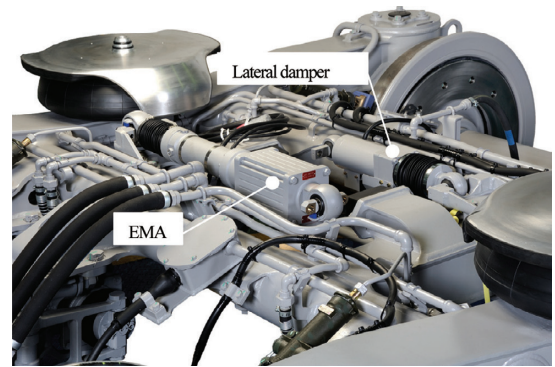
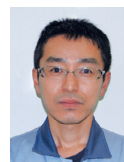


図 22 E6系新幹線電車へのEMA搭載図  
Fitting EMA on bogie for E6 series Shinkansen train

- 4) 上倉 ほか: 空気消費量低減型アクチュエータによる動揺防止制御システムの開発. 日本機械学会第17回鉄道技術連合シンポジウム, S5-1-1, 305-308 (2010)
- 5) 牧野 ほか: 電動リニアアクチュエータを用いた鉄道車両用動揺防止制御装置の開発. 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム, No06-52, 519-522 (2006)
- 6) 岩波 ほか: 電磁アクチュエータを用いた鉄道車両用アクティブサスペンションの開発. 日本機械学会第13回鉄道技術連合シンポジウム, No06-52, 523-524 (2006)
- 7) Goto, O. et al.: The Development of an Active Suspension System with EMA for Railway Vehicles. International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems. 2009
- 8) 藤本 ほか: 新幹線電車の左右振動とその振動対策. 鉄道総研報告. 9 (1), 19-24 (1995)
- 9) 鴨下 ほか: 新しい振り子車両用の電動油圧アクチュエータ. RRR. 62 (5), 24-27 (2005)
- 10) 田島: E5系新幹線電台車. 鉄道車両と技術. (157), 7-9 (2009)



後藤 修 Osamu GOTO  
交通産機品事業部 製鋼所 鉄道台車製造部  
第一台車設計室 主幹  
大阪府大阪市此花区島屋5-1-109 〒554-8555