

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

上倉 彰義* 加藤 博之 浅野 浩二 (JR東日本)
後藤 修 川西 慶祐 (住友金属)

Development of active suspension control system by actuator decreases air consumption
Akiyoshi Uekura*, Hiroyuki Kato, Koji Asano, (East Japan Railway Company)
Osamu Goto, Keisuke Kawanishi, (Sumitomo Metal Industries)

It is necessary to decrease the lateral vibration in the railway vehicle for the riding comfort improvement when high-speed running. In E2 and E3 series Shinkansen train, and E259 series limited express type train, the active suspension control system by the pneumatic actuator was adopted. However, the air consumption increases because it uses the pneumatic actuator. In this development, the actuator that decreased the air consumption was installed in 209 series examination train, and the performance of riding comfort and the air consumption was confirmed by test run.

キーワード：振動制御，アクチュエータ，切替ダンパ，乗り心地，空気流量制御
(Keywords, vibration control, actuator, switch absorber, riding comfort, air flow control)

1. はじめに

鉄道は他の交通機関との競争が激しくなり、マーケットの拡大・創出を行うためには、在来線の価値を向上させる必要がある。そのなかのひとつに乗り心地があり、お客さまの乗り心地に関する要求が高まっている。鉄道車両の乗り心地を向上させるためには、特に左右振動を低減する必要があり、東北新幹線「はやて」のE2系や秋田新幹線「こまち」のE3系では、空気圧式アクチュエータによる動揺防止制御システムを既に導入している⁽¹⁾⁽²⁾。在来線でも新幹線に比べて走行速度は低いですが、車両の揺れを抑えることは必要であり、2009年秋にデビューした成田エクスプレスE259系には、E2系・E3系に導入した同タイプの動揺防止制御システムが採用された⁽³⁾。この動揺防止制御システムを採用することにより、乗り心地は向上したが、空気圧式アクチュエータを使用するために空気消費量は増大する。そこで、現行の動揺防止制御システムでの乗り心地性能を確保しつつ、空気消費量を低減したアクチュエータによる動揺防止制御システムを開発した。

本報では、空気消費量を低減したアクチュエータによる動揺防止制御システムを209系試験電車 (MUE-Train) に搭載して実施した走行試験結果について報告する。

2. アクティブ動揺防止制御

動揺防止制御は、車内に設置したセンサで車体の振動を検知し、制御装置で車体の振動を抑えるためのアクチュエータに必要な力と向きを計算する。アクチュエータがその力を車体側に加えることによって振動を抑える。アクティブ動揺防止の概要を図1に示す。

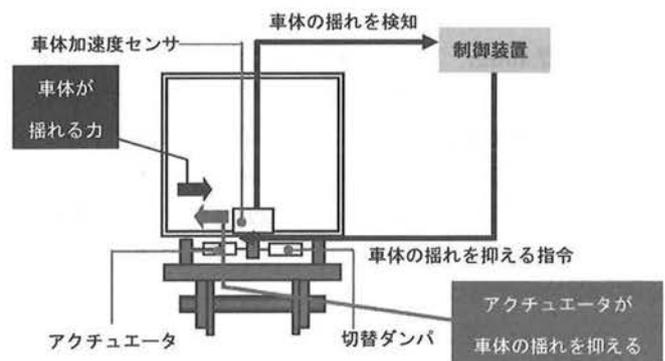


図1 アクティブ動揺防止の概要

空気消費量低減型アクチュエータ（以下、開発アクチュエータ）の構造を図2に示す。現行のアクチュエータに対し、シリンダ内に仕切りピストンを設け、ピストンの前後の各内側圧力室には横方向の動揺の大きさに応じた気体圧が供給される。ピストンが過度に移動したときには、仕切りピストンも移動する。制御動作中は短いストローク（小さなシリンダ容積）で、制御待機時は大きなストロークを許容する機構となる。

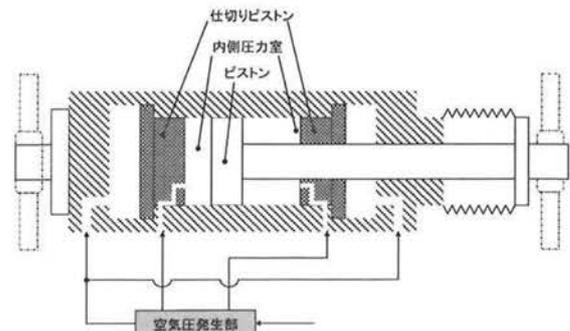


図2 空気消費量低減型アクチュエータ

開発アクチュエータは、現行アクチュエータより可動範囲が±20mmと小さい。車体・台車間左右相対変位が20mmのときの超過遠心加速度を式(1)より求める。

$$\alpha = \frac{4 \cdot z \cdot k_{AS}}{W_b} \quad \dots(1)$$

- z : 車体・台車間左右相対変位[mm]
- α : 超過遠心加速度[m/s²]
- W_b : 車体質量[kg]
- k_{AS} : 空気ばね左右剛性[N/mm]

209系試験電車7号車(車体質量:21.7t)の場合、超過遠心加速度は0.50m/s²となり、そのときの走行速度を式(2)より求める。

$$V = \sqrt{R(\alpha + C/G \cdot g)} \times 3.6 \quad \dots(2)$$

- V : 速度[km/h]
- R : 曲線半径[m]
- C : カント[mm]
- G : 軌間[mm]
- g : 重力加速度[m/s²]

曲線半径400m、カント105mmの時、曲線通過速度が87km/hとなる。この速度を超えると、車体・台車間左右相対変位が20mmを超えることになる。同時にアクチュエータ内部の制御用ストローク範囲を超過して、内部の隔壁にピストンが当たり、隔壁の背圧の元空気ダメ圧(MR圧)によるばね要素によって振動的な波形が生じる。片側の制御用空気室内の圧力は制御力として期待できず、性能が低下することが予想される(図3参照)。そのため、高速走行での曲線区間の評価も実施する必要がある。

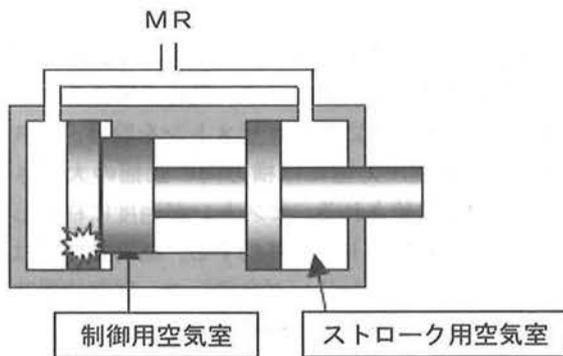


図3 曲線通過時のアクチュエータ

動揺防止制御システムに使用する装置を表1に、システム構成図を図4に示す。また、開発アクチュエータと2段切替ダンパを図5に示す。なお、本システムは50km/h以上で制御を行う。

表1 動揺防止制御装置

品名	用途
VMEラック	アクチュエータを制御
左右加速度センサ	車体左右振動加速度を計測
上下加速度センサ	車体上下振動加速度を計測
2ポート電磁弁	アクチュエータへの圧縮空気を遮断/供給
現行アクチュエータ	車体振動を低減
開発アクチュエータ	制御範囲を±20mmにし、車体振動を低減
2段切替ダンパ	高減衰と低減衰に切替

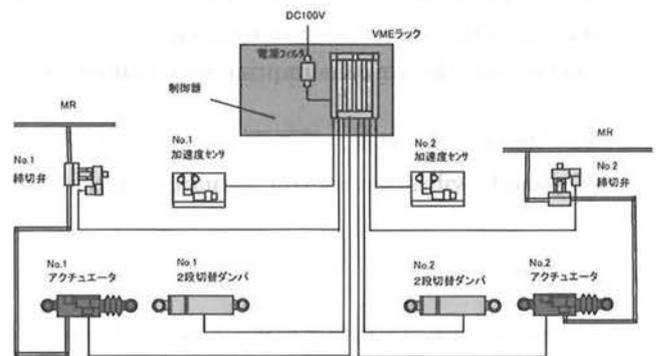


図4 動揺防止制御システムの構成図



図5 開発アクチュエータと2段切替ダンパ

3. 走行試験による性能確認(直線区間)

〈3・1〉 試験区間 209系試験電車が走行できる区間のうち、直線区間が多く存在する東北本線大宮・宇都宮間を試験区間とした。このうち、4km以上の直線で最高速度110km/hで運転できる直線区間(半径が大きな曲線も含む)を3区間選定し、評価区間とした。表2に評価区間を示す。

表2 評価区間 (直線)

No.	方向	区間	線形	走行速度
S1	下り	93K~97K	直線	110km/h
S2	上り	86K~82K	直線	110km/h
S3	上り	97K~93K	直線 (R2000, R2400×2, R2300×2 含む)	110km/h

R: 曲線半径

〈3・2〉 供試車両 供試車両は209系試験電車 (MUE-Train), 6両編成 (4M2T) で7号車にアクティブ動揺防止制御システムを装備した。図6に車両編成を示す。

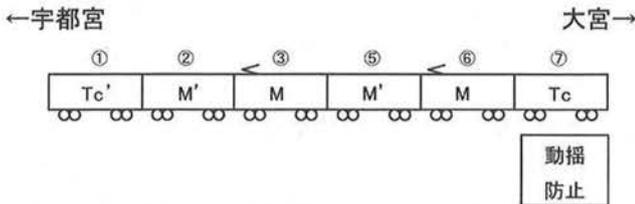


図6 車両編成

〈3・3〉 測定結果

(1) 乗り心地 直線区間の左右乗り心地レベルを図7に示す。現行アクチュエータによる制御では、制御なしに対し約7~9dBの左右乗り心地レベルの改善を得た。開発アクチュエータで現行と同じ制御を行い、同等の左右乗り心地レベルであった。開発アクチュエータによる制御で左右乗り心地レベル向上を追求するため、ヨーイング周波数の1.1Hz中心を強めに制御 (図中の最適制御) したところ、約9~12dBの左右乗り心地レベルの改善を得た。

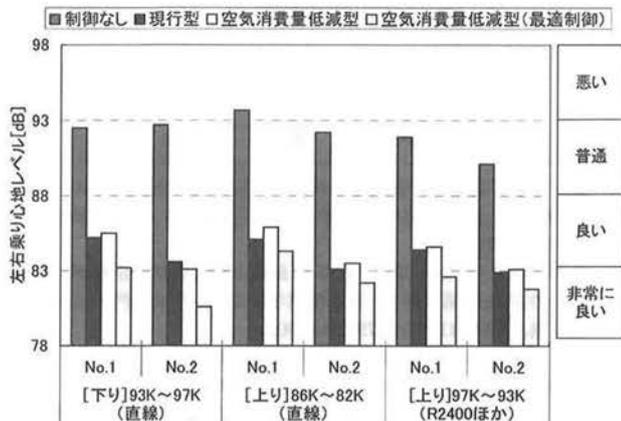


図7 左右乗り心地レベル(直線区間)

(2) 空気消費量 直線区間の空気消費量を図8に示す。現行アクチュエータによる制御での空気消費量は280~350NL/minである。開発アクチュエータで現行と同じ制御では、空気消費量は現行比35%減となった。開発アクチュエータによる左右乗り心地レベルを追求した制御では、空気消費量は現行比30%減となった。

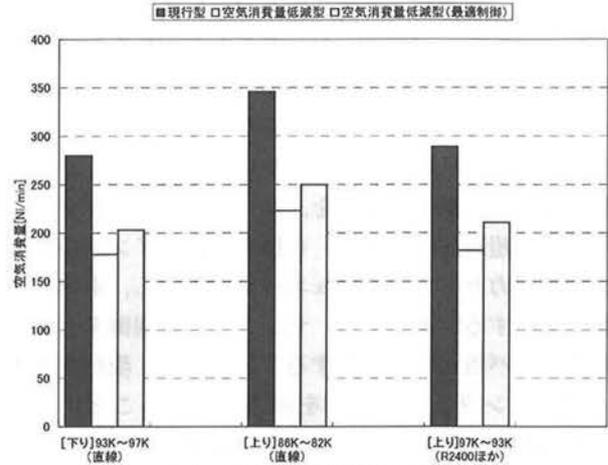


図8 空気消費量(直線区間)

4. 走行試験による性能確認 (曲線区間)

〈4・1〉 試験区間 曲線区間で評価を行うためには前述したように、半径400mの曲線を87km/h以上で走行する必要がある。曲線通過速度を90km/hで走行できる区間で、曲線が連続している成田線佐倉・成田間を試験区間とした。このうち曲線3区間を評価区間とし、表3に示す。

表3 評価区間 (曲線)

No.	方向	開始地点	線形	走行速度
C1	下り	6K~7K	R400 C101	90km/h
C2	下り	8K~9K	R400 C101	90km/h
C3	下り	10K~11K	R400 C101	90km/h

R: 曲線半径 C:カント

〈4・2〉 供試車両 供試車両は209系試験電車 (MUE-Train), 7両編成 (4M3T) で7号車にアクティブ動揺防止制御システムを装備した。図9に車両編成を示す。

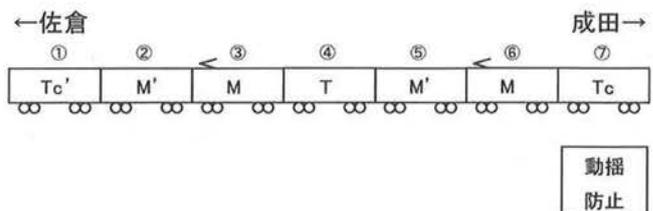


図9 車両編成

〈4・3〉 測定結果

(1) 乗り心地 曲線区間の左右乗り心地レベルを図10に示す。制御なし89～94dBに対して、現行アクチュエータは約1～5dB低減であり、直線区間で得られたほどの改善効果は表れなかった。曲線では制御指令値が飽和していた。その原因として、緩和曲線中の左右振動加速度の変化する周波数が、制御データの低域のゲインに相当し、その感度に応じて飽和していること、もともとの左右振動加速度が大きくアクチュエータの制御力5kNでは抑えきれないことが考えられる。これを解決するための方策として、センタリング制御⁽⁴⁾がある。センタリング制御とは、車体に作用している左右振動加速度を、ローパスフィルタを用いて定常成分(超過遠心加速度)を抽出し、ゲインを掛けたものを制御出力としてアクチュエータに出力し、車体の中立位置を保持する制御である。センタリング制御を行えば左右動ストッパ当たりを抑制することができ、現行アクチュエータにセンタリング制御を組み合わせることによって、約2～6dB低減することができた。開発アクチュエータは、超過遠心力により制御ストローク可動範囲(±20mm)を超えたため、左右乗り心地レベルは、制御なしに対して約1～3dBのみの低減であった。開発アクチュエータ単体のみでは、改善効果があまりないため、曲線通過時は一定の推力でセンタリング制御を行うとともに、減衰力切替ダンパ制御⁽⁵⁾を用いた。減衰力切替ダンパ制御は、曲線通過を検知するセンサの検知信号により、直線走行時はダンパを低減衰状態に保持し、曲線通過時はダンパを高減衰状態に切り替えて制御することにより、ストッパ当たりを防止する制御である。開発アクチュエータとセンタリング制御および減衰力切替ダンパ制御により、制御なしに対して約2～4dB低減した。

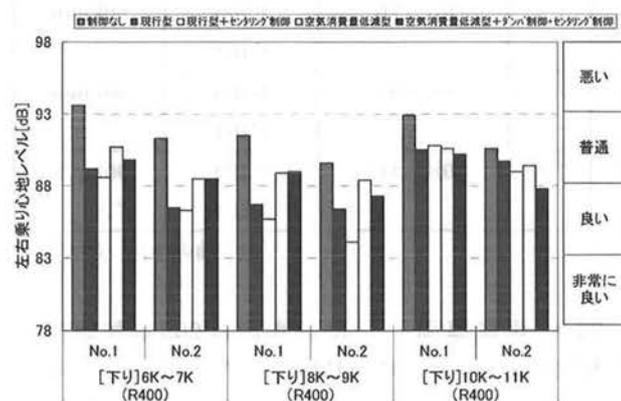


図10 左右乗り心地レベル(曲線区間)

(2) 空気消費量 曲線区間の空気消費量を図11に示す。現行アクチュエータが307～360NL/minに対して、現行アクチュエータとセンタリング制御で269～347NL/min(3区間の平均で現行比12%減)、開発アクチュエータは187～233NL/min(現行比35%減)、開発アクチュエータとセンタリング制御および減衰力切替ダンパ制御で134～190NL/min(現行比54%減)であった。センタリング制御

と減衰力切替ダンパ制御を組み合わせることにより、開発アクチュエータ単体よりも、空気消費量低減に効果がある。

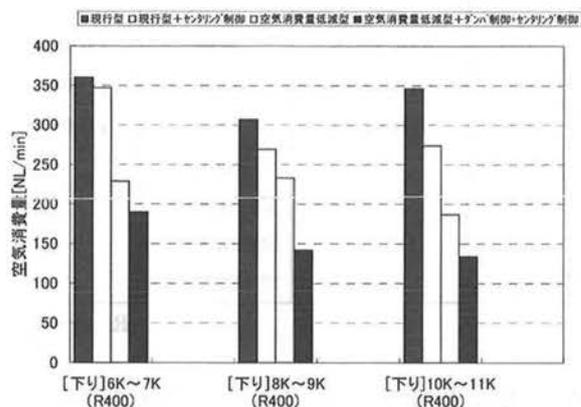


図11 空気消費量(曲線区間)

5. おわりに

在来線用アクティブ動揺防止制御システムの開発を行い、現行のアクチュエータと今回開発した空気消費量低減型アクチュエータを比較し、以下の結果を得た。

(1) 直線区間では、空気消費量低減型アクチュエータによる制御によって、現行アクチュエータと同等の約9～12dBの左右乗り心地レベルの改善を得て、空気消費量が現行型アクチュエータ比30%減(最適制御の場合)となることを確認した。

(2) 曲線区間では、空気消費量低減型アクチュエータによる制御によって、現行比35%(3区間平均)の空気消費量削減を再確認できたが、超過遠心力により制御ストローク可動範囲(±20mm)を超えたため、左右乗り心地レベル改善は現行比2dB劣化した。

(3) 空気消費量低減型アクチュエータで、曲線通過時にセンタリング制御および減衰力切替ダンパ制御により、制御なしに比べ約2～4dB程度改善、空気消費量は現行比54%減(3区間平均)が可能である。

営業車両搭載にあたり、1編成あたりのアクチュエータの搭載台数によるが、空気圧縮機の削減または吐出量が小さい空気圧縮機の実装が可能になる。

文 献

- (1) 藤野:「新幹線車両の新技术—鉄道車両用動揺防止制御システムの開発—」, 日本機械学会誌, Vol.105, No.1003, pp.396-397(2002)
- (2) 後藤・根来・小泉・渡辺・遠藤:「鉄道車両用動揺防止制御システムの実用化(第二報)」, 日本機械学会交通・物流部門大会講演論文集, 2002.11, pp.279-280(2002)
- (3) 引間:「JR東日本 E259系特急形直流電車(成田エクスプレス)の概要」, R&M, Vol.17, No.9 pp.4-9(2009)
- (4) 住友金属工業株式会社・東日本旅客鉄道株式会社, 鉄道車両の中立位置制御装置及び制御方法, 特許第3541967号, 2004-07-14
- (5) 住友金属工業株式会社・東日本旅客鉄道株式会社, 鉄道車両の振動制御方法, 特許第4048391号, 2008-02-20