

乗り心地向上の取組み



梶谷 泰史*



加藤 博之*



浅野 浩二*

新幹線高速化の課題である左右動揺、車体弾性振動（上下振動）、曲線通過性能などの乗り心地性能の向上に関し、動揺防止制御システム、車体傾斜制御システムなどの新技術の適用によりその解決に取り組んだ。新方式の動揺防止制御や、空気ばねストローク式車体傾斜制御により、左右乗り心地の向上、新幹線専用車と新在直通車の併結時の左右動揺低減および曲線通過時の左右定常加速度低減を実現した。

●キーワード：乗り心地、新幹線、乗り心地レベル、左右動揺、車体弾性振動、動揺防止制御、車体傾斜制御

1. はじめに

新幹線の高速化においては、走行速度の向上とお客さまの快適性を損なわないこと（快適性向上）を両立することが求められる。

そこで、次世代新幹線車両の高速走行時の乗り心地向上を目的として、新幹線高速試験電車「FASTECH360」（E954形式、E955形式）において新方式の動揺防止制御システムと車体傾斜制御システムを適用し、走行試験などを通じてその効果の検証を行った。

本報告では、「FASTECH360」における左右乗り心地、上下乗り心地、曲線通過時の乗り心地について取組んだ概要を述べる。

2. 乗り心地の課題

新幹線高速化においては、車両の高速走行安定性のもとより、車両に作用する振動、加速度に起因する乗り心地レベルの確保が重要な課題である。

解決すべき乗り心地改善テーマおよびその開発目標レベルとしては以下があげられる。

(1) 左右乗り心地

- ・高速走行時の左右動揺抑制
- ・トンネル内走行時の左右動揺抑制

⇒ 目標：左右乗り心地レベル 80dB 以下

(2) 上下乗り心地

- ・高速走行時の上下動揺抑制
- ・車体弾性振動抑制

⇒ 目標：上下乗り心地レベル 80dB 以下

(3) 曲線通過性能（曲線通過時の乗り心地）

- ・曲線高速通過時の左右定常加速度抑制
- ・曲線通過時の車両ロール振動抑制

⇒ 目標：左右定常加速度 0.9m/s^2 以下

3. 左右乗り心地

新幹線の左右乗り心地向上のためには、台車の諸元を適切に設定することにより車体の左右振動を低減することが重要である。台車諸元は、軌道変位に起因する加振に対する振動特性、トンネル走行時の車体周辺を流れる空気流の乱れによって車体に働く力での加振に対する振動特性、高速走行安定性など種々の条件を勘案して決める必要がある。

特に軌道変位に起因する加振に対する車体・台車間のダンパ特性と、空気流の乱れによって車体に働く力での加振に対するダンパ特性は異なっており、ばね・ダンパ特性の最適化と併せて動揺防止制御システムを検討する必要がある。

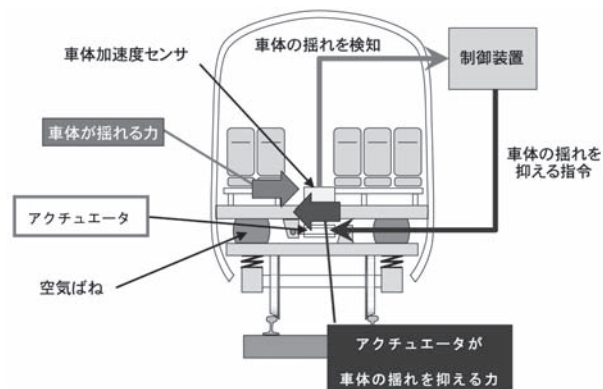


図1 動揺防止制御システム概念図

3.1 動揺防止制御システム

300km/h 超の高速走行において十分な左右乗り心地を確保するためには、台車諸元の適正化によるパッシブ性能の改善のみでは限界があり、左右動揺を抑制するアクティブ動揺防止制御システムが必要である。

E2 系、E3 系で実用化している新幹線用動揺防止制御システムは、空気圧アクチュエータ方式である。この動揺防止制御システムにより左右乗り心地は改善したものの、空気圧方式に起因する動揺防止制御の遅れや、空気消費量の増大が課題となっている。高速化によりこの問題が顕在化するため、空気圧式に替わる新方式のアクチュエータを利用した動揺防止制御システムを開発した。

アクチュエータの方式は、空気圧式以外にも油圧式、電磁式などさまざまな方式があり、それらの特性、長所、短所を十分に比較評価し、定置試験による性能確認後、最終的に電磁直動式（図 2）および、ローラーねじ式（図 3）の 2 方式のアクチュエータを採用した。



図2 電磁直動式アクチュエータ



図3 ローラーねじ式アクチュエータ

E954 形式高速走行（365km/h）時の動揺防止制御ありの編成各車両の左右乗り心地レベルを図 4 に示す。

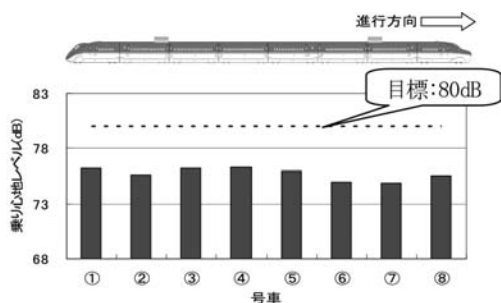


図4 E954左右乗り心地レベル（動揺防止制御あり）

どの号車においても乗り心地レベルは 80dB 以下となっており、左右乗り心地の目標を十分達成することができた。

3.2 併結走行時の左右振動対策

JR 東日本の新幹線ネットワークは、新幹線専用車両（E2 系タイプ）と新在直通車両（E3 系タイプ）の併結走行が特徴である。新幹線専用車両が前方で新在直通車両が後方に併結して走行する場合、長大トンネル内において、新在直通車両の最前部車両に著大な左右動揺が発生する。この動揺は、トンネル内走行で発生する空気圧変動により励起されるものであり、乗り心地を大きく損なうことになる。

左右動揺の周波数ピークは、明かり区間（2Hz）に比べて少々高い周波域（2.5Hz）であり、対策として動揺防止制御の出力アップおよび制御方法の適正化を行い、320km/h 走行時に乗り心地レベルで現行性能を上回り、乗り心地評価で「良い」から「非常に良い」のレベルとなり、トンネル内左右動揺を抑制する目処を得ることができた。ただし、360km/h 走行に向けてはさらなる対策の強化が必要である。

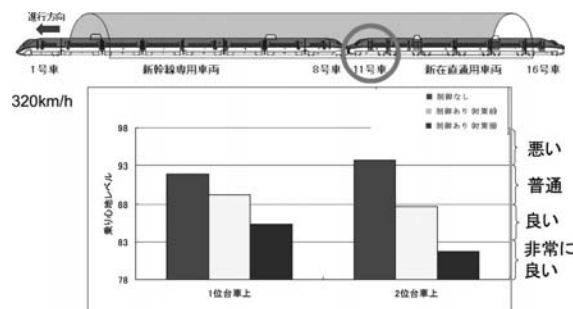


図5 併結時左右乗り心地レベル（新在直通車両11号車）

4. 上下乗り心地

新幹線車両に発生している上下振動は、1～2Hz 付近の上下動揺と、8～10Hz 付近の車体弾性振動である。特に近年の新幹線車両では、車体弾性振動の発生が乗り心地に影響を与えている。車体弾性振動は人体の上下振動感度が高い 4～8Hz に近い振動数で出現する。したがって上下乗り心地を向上するためには、上下動揺とともに車体弾性振動の低減が不可欠な要素となる。一般に、車体弾性振動の場合、上下乗り心地レベルは車体中央が両台車上より 2～3dB 程度悪くなる傾向がある。

車体弾性振動の発生周波数は車体の固有振動数によるが、その大きさは振動伝達系が影響するとともに、台車枠振動（上下動、ピッチング）との関連もある。車体の固有振動数や一本リンク・ヨーダンパの牽引高さ、台車間距離と走行速度との影響もある。

4.1 ヨーダンパ取付け、牽引高さの影響

車体弾性振動の発生要因のひとつとして、台車枠振動（特に前後およびピッチング振動）が、台車-車体結合部（ヨーダンパ、牽引装置など）を通して伝達することがあげられる（図6）。そこで、台車と車体を結合するヨーダンパおよび牽引装置の取付け高さの変更による台車枠振動・車体弾性振動への影響評価試験を実施した。

ヨーダンパ取り付け高さの違いによる車体上下振動 PSD（パワースペクトル密度、Power Spectral Density）の比較を図7に示す。

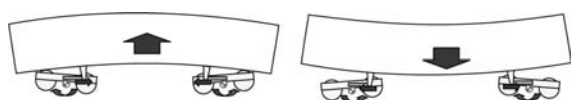


図6 台車枠振動による車体弾性振動発生イメージ

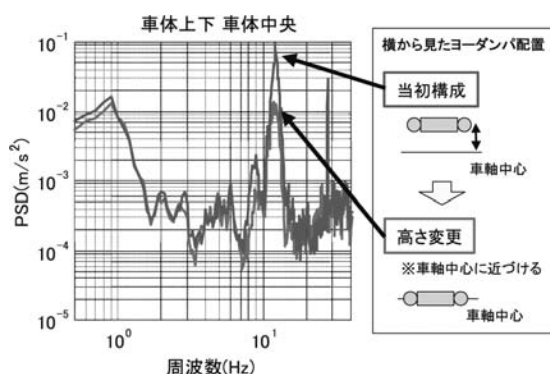


図7 ヨーダンパ取付け高さによる車体上下振動PSD比較

取付け高さが車軸中心より高い位置にある場合は、11Hz付近に大きな振動ピークがある。取付け高さを車軸中心位置にすると、その振動ピークが低減する。

ただし、沿線騒音対策として台車側カバーがあり、特に車体幅が小さい新在直通車両の場合、ヨーダンパと台車カバーが干渉するので、ヨーダンパ取付け高さを車軸中心位置に近づけるには、台車側カバーを一部切り欠く必要がある。そのため、上下振動低減のための最適な取付け位置と、台車側カバーを切り欠くことによる環境騒音への影響とのバランスを十分に考慮して台車側カバー形状、ヨーダンパの取付け高さを決定した。

4.2 上下乗り心地レベルの達成状況

E954 形式高速走行（365km/h）時の編成各車両の上下乗り心地レベルを図8に示す。

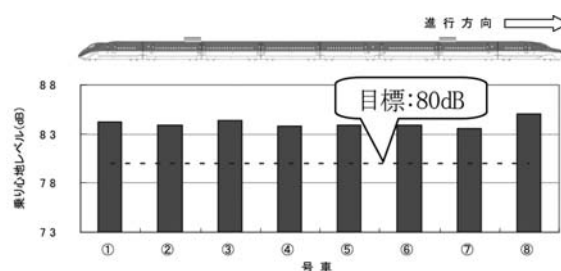


図8 E954上下乗り心地レベル

各号車の上下乗り心地レベルは84dB前後の「良い」評価であり、目標の80dBには及ばなかったがE2系の275km/h走行時の乗り心地（82～84dB）に比べても遜色ないレベルとなった。

前節で説明したように、さまざまな対策により左右乗り心地レベルが大幅に改善された結果、相対的に上下振動を敏感に感じるようになったという面もあり、全体としての乗り心地をさらにレベルアップするためには、上下振動に対する改善策を引き続き開発していくことが必要である。

5. 曲線通過時の乗り心地

5.1 車両諸元と曲線通過性能

列車が曲線通過するときには、車体に曲線外軌側へ遠心加速度が働いて、乗り心地が悪化するとともに、外軌側の輪重・横圧増による軌道の劣化の問題がある。これらを抑制するために軌道にカントを設けているが、曲線通過速度が高速になると、カントによる補償範囲を超えた超過遠心加速度が働き、車体が外軌側に傾いて乗り心地が悪化する。

車内のお客さまは、この乗り心地を車体床面に水平な方向の加速度（左右定常加速度）として感じる。曲線通過時にお客さまに作用する加速度の関係を図9⁹⁾に示す。左右定常加速度は次式（1）により表され、円曲線走行中は定常値となる。

$$\alpha_s = (1 + C_\phi W_B) (V^2/R - gC/G) \quad \dots\dots (1)$$

ここで、

C：カント(mm) R：曲線半径(m)
G：軌間(mm) V：走行速度(m/s)
g：重力加速度(m/s²) α_s ：左右定常加速度(m/s²)
 $1 + C_\phi W_B$ ：車体傾斜係数(台車のばねたわみによる車体の傾きで生じる加速度の増加係数=E2系で1.25程度)

上下乗り心地の向上のために、FASTECH360 で採用した台車は上下ばね系を可能な限りやわらかく設計した。そのため、車両のロール剛性が現行車両より小さくなり、車体傾斜係数が大きくなったため、曲線通過中の左右定常加速度やロール振動が増大することが懸念された。そこで、アンチローリング装置を採用し、車両のロール剛性を向上することとした。

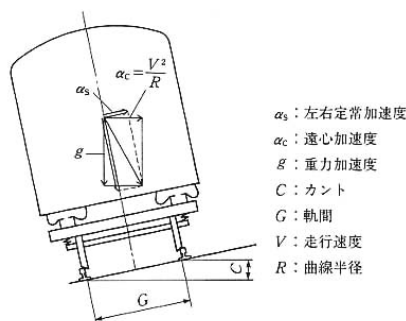


図9 曲線通過時にお客さまに作用する加速度

5.2 車体傾斜制御システム

乗り心地上許容できる左右定常加速度は、従来から 0.8m/s^2 を目安としてきたが、近年新幹線の高速化とともに着席を前提に許容値の見直しが行われている。他社新幹線車両においては 0.95m/s^2 程度を許容している。

FASTECH360 では、許容左右定常加速度を 0.9m/s^2 と設定した。

E2系新幹線は、曲線半径 4000m 、カント 155mm の曲線を最高速度 275km/h で走行するので、曲線通過中に発生する左右定常加速度は 0.6m/s^2 程度である。FASTECH360 では同曲線の通過速度が 320km/h であるので、車体傾斜係数が同等であれば曲線通過時の左右定常加速度は 1.2m/s^2 となり、許容値を超過してしまう。

この左右定常加速度を低減する一つの方法として、曲線走行中に車体を曲線内軌側に傾斜させて走行させる車体傾斜制御システムを採用することとした。



図10 空気ばねストローク式車体傾斜制御概念図

車体を傾斜させる方式として、在来線車両では振り子制御方式などを採用しているが、FASTECH360 では大きな曲線を高速で走行するので、車体傾斜制御の最大傾斜角度を2度とし、最小限の設備追加ですむ空気ばねストローク片上げ方式を採用した。空気ばねストローク式車体傾斜システムの概念図を図10に示す。

車体傾斜制御システムを搭載した車両が曲線通過時の左右定常加速度 0.9m/s^2 以下を満たすために必要な車体傾斜角度については、以下の式(2)より導出される。

$$0.9\text{m/s}^2 = (1 + C_\phi W_B) (V^2/R - g C/G - g \theta) \quad \cdots (2)$$

ここで、

C : カント(mm) R : 曲線半径(m)
G : 軌間(mm) V : 走行速度(m/s)
g : 重力加速度(m/s^2) θ : 車体傾斜角度(rad)
 $1 + C_\phi W_B$: 車体傾斜係数

上式より、車体傾斜角度2度条件で曲線半径 4000m 、カント 155mm の曲線を左右定常加速度許容値以下で通過可能な速度は、最大で 330km/h となる。(傾斜角度 1.5 度で 320km/h)

FASTECH360 では乗り心地を考慮して上下ばね系を柔らかく設定したため、アンチローリング装置を装備しても、曲線を高速で通過する際に大きな車体ロール振動が発生し、乗り心地を阻害する要因となった。このロール振動対策として、アンチローリング装置の剛性アップによる車体傾斜係数確保と車体傾斜制御とのバランスのチューニングを行い、乗り心地の向上を図った。ただし、更なる速度向上に向けては、引き続きロール振動抑制策の検討が必要である。

6. おわりに

次世代高速新幹線の乗り心地向上をめざして、新方式の動揺防止制御システムや車体傾斜制御システムの採用およびダンパ配置の見直しなどにより、上下・左右乗り心地、曲線乗り心地の改善を実施し、次期新幹線の営業最高速度 320km/h 走行速度域での快適な乗り心地の確保ができる見通しが立ち、その成果は次期新幹線 E5系新幹線電車で採用された。

今後は、更なる営業最高速度の向上に対する乗り心地性能確保のため、特に車体上下振動抑制、曲線通過時の乗り心地性能向上、トンネル内左右動揺低減などに関する開発を進めていく。

参考文献

- 1) 西岡康志ほか：鉄道車両用空気ばね車体傾斜制御の開発、住友金属、Vol.46, No.4, pp.51～56, 1994.