

# 車両技術に関する最近の話題

佐々木 君章\*

## Recent Topics on Railway Vehicle Technology

Kimiaki SASAKI

This paper introduces recent topics on the railway vehicle technology about a new tilt control system and a steering control system which have been developed in RTRI. Motion sickness on trains increases by low-frequency lateral accelerations. The tilt control system decreases the motion sickness by optimizing tilting pattern, which decreases low frequency lateral accelerations. The steering control system works as a fail-safe system, which does not increase the lateral force even if it is in any failure situations. Further, a hybrid emulation system to test vehicle characteristics in actual train running conditions based on HILS technology is introduced.

キーワード：振子制御，乗り物酔い，操舵制御，フェールセーフ，HILS，仮想走行試験環境

### 1. はじめに

安全性向上，速度向上，乗り心地，省エネルギー性など，近年の鉄道車両に求められている社会的な要請は多岐にわたり，これに応える形で性能の高度化が進んできている。こうした性能の高度化のために多くの技術革新がなされてきたが，本稿においては乗り心地と安全性の向上に焦点をあて，人間工学的な評価を取り入れた車体傾斜制御，操舵制御について，最近の状況を紹介する。

また，車両開発支援の新しい手法として開発を進めている，ハイブリッドシミュレータを応用した車両運動特性評価システムについて紹介する。

### 2. 人間工学的評価指標に基づく車体傾斜制御

曲線中で働く超過遠心力を緩和するため，車体を内傾させる振子車両は，在来線の高速化と乗り心地の両立を図る上で大きな役割を果たしている。しかし，振子車両は普通の列車に比べて「乗り物酔い」が多く発生するといわれており，この対策は重要な課題である。この解決のため，人間工学的なアプローチから求められた乗り物酔いの指標を，与えられた走行条件の中で動的に最小化する車体傾斜制御システムの開発を行った。

#### 2.1 乗り物酔いの評価

乗り物酔いは個人差が非常に大きく，評価が難しい現象の一つである。船舶は鉄道に比べて酔いの発生率が高いため，その評価法に関する研究が進んでおり，ISOにも登録されている。これは上下方向の振動加速度に対して，乗り物酔いを起こしやすい周波数成分を強調する

フィルタをかけ，一定時間の実効値の積算量で評価するもので，MSDV<sub>z</sub>と呼ばれている。

この方法は鉄道車両においても参考になるが，船舶と鉄道では振動状況が全く異なるため，そのまま適用することができない。このため，鉄道総研の人間工学グループは多数の乗客にアンケートを行い，鉄道車両の揺れと乗り物酔い相関を調べた。この結果，鉄道における酔いは船舶と異なり，左右加速度と相関が高く，乗り物酔いを起こしやすい振動周波数も船舶より高いことが判明した。

このため，MSDV<sub>z</sub>と同様の手法で，左右振動加速度に重みづけフィルタをかけ，その実効値の積算で酔いを評価する手法<sup>1)</sup>(MSDV<sub>y</sub>)が提案されている。

この重みづけフィルタを船舶(Wf)と鉄道車両(Wf-y)を，方向の違いはあるが，対比して図1に示す。船舶では酔いやすい周波数のピークが0.16Hz付近であるのに対して，鉄道のピークは0.25～0.32Hz付近にある。

振動に関する乗り心地は0.5Hz～80Hzの周波数範囲で評価するが，酔いに関係する周波数はこれより低く，振動乗り心地の評価対象外である。さらに，酔いの場合には低周波振動の積算値が効き，初期には自覚症状のない場合が多い。このため，振動乗り心地とは全く別の評価

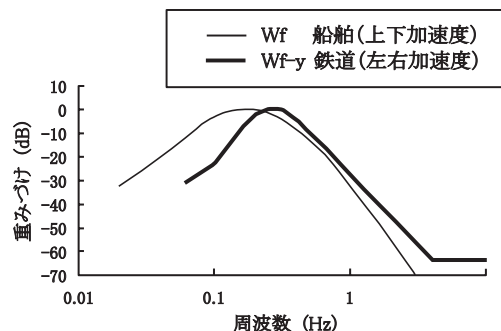


図1 乗り物酔いに関する船舶と鉄道の重みづけフィルタ

\* 車両構造技術研究部 部長

特集：車両技術

指標であり、振動乗り心地と乗り物酔いの間には直接の関係がないことに留意する必要がある。

2.2 振子制御による乗り物酔いの改善

初期の振子車両は遠心力だけで車体を傾斜させる「自然振子」車両として開発が進められたが、前節の観点から、自然振子車両の挙動を見直すと、MSDVyの増加につながりやすい次のような特徴が認められる。

- (1) 車体の慣性による傾斜動作の遅れが大きいため、乗客が感じる遠心加速度に低周波の変動が発生する。
- (2) 遠心力による車体傾斜動作を円滑にするため、傾斜装置の抵抗を小さくしてある。このため、走行時の動揺により、低周波の連続した揺れが車体に起きやすい。

これに対して、傾斜機構に空気圧式のアクチュエータを付加し、制御により傾斜遅れを改善したものが制御付振子車両である。この技術により振子車両の乗り心地は大きく改善され、在来線特急列車の速度向上に欠かせない技術として発展してきた。

この装置が開発された当時、曲線部の乗り心地は定常左右加速度の大きさと傾斜角速度、およびそれらの時間変化率で評価され、乗り物酔いと低周波左右加速度の関係は明確にはわかっていなかった。従って、この制御則は酔いの原因となる低周波左右加速度の低減を意識したものではなかったが、傾斜遅れの改善により結果的に酔いを低減する効果が得られた。

2.3 乗り物酔い指標を最小化する傾斜制御

カントや緩和曲線等、線路諸元の改良なしに曲線通過速度をさらに高めると、緩和曲線における傾斜角速度が増大する。傾斜角速度の増大は乗り心地を損ねると考えられており、制御付振子では傾斜角速度予測値が制限を超えると、実際の曲線位置より傾斜開始を早めて傾斜角速度を抑制する。このとき車体の傾斜と遠心力は釣り合っていないので、加速度のうねりが発生し、MSDVyを増加させる。従って、これまでの振子制御では曲線通過速度が高くなると、左右定常加速度の低減と傾斜角速度の低減は両立が困難となる。

このため、緩和曲線通過時の乗り心地を示す評価指標と、乗り物酔いの評価指標の重みづけ和を評価関数として、これを現在の走行条件で最小化する傾斜パターンを生成する傾斜制御方式を開発した。これを「次世代振子制御システム」<sup>2)</sup>と呼んでいる。

このシステムは1m刻みの線路情報データベースを持っており、現時点から約5秒間先までの左右加速度、傾斜角速度などを予測して、前述の評価関数を最小にする傾斜目標値の時系列を生成する。図2に評価関数の優先度(評価重み)を変えた時の傾斜目標値の変化を示す。傾斜角速度優先の評価関数では、傾斜目標値が曲線の始終

点から前後にはみ出し、なだらかに変化するが、乗り物酔いの指標であるMSDV優先では線路の形に近い傾斜パターンが生成され、傾斜角速度を犠牲にして低周波の加速度変動を防いでいることがわかる。

走行試験の結果では、本システムによるMSDVyの低減効果は確認されているが、一方で傾斜角速度の大きさ(緩和曲線乗り心地)と低周波加速度変動(乗り物酔い)の優先度の比率に関して、最適な関係は現在のところわかっていない。今後、このような点の人間工学的な研究を徹底し、人間の特性に対する理解を深めて、乗り心地の改善を図っていく必要があると考えている。

3. 操舵制御による横圧軽減

操舵台車は横圧低減に大きな効果を持つことが知られている。これまで研究されてきた操舵方式は、自己操舵、連動操舵、アクティブ操舵に大別できる。自己操舵方式は、軸箱の前後支持剛性を軸ごとに変えるなどの手法により、曲線通過性能と蛇行安定性を高いレベルで両立させるものである。構成が簡単であるが、横圧低減効果も限定される。連動操舵方式は曲線走行中に発生する車体-台車間の角度(ボギー角)の変化を機械的に輪軸に伝え、角度を変える方式で円曲線内の横圧低減に高い効果がある。

アクティブ方式はアクチュエータにより、輪軸角度を適切に制御する方式で、3者の中で最も高い横圧低減効果を発揮するが、故障時の安全性担保や、逆操舵の危険性などが指摘され、実用化に至っていない。

このような背景を考慮し、台車構造を複雑にせず、同時にフェールセーフ性に配慮した操舵制御システムの検討を行った。ここでは、輪軸の自己操舵力を補助するように作用し、逆操舵による横圧増加が発生しない操舵制御システム(アシスト操舵)<sup>3)</sup>について紹介する。

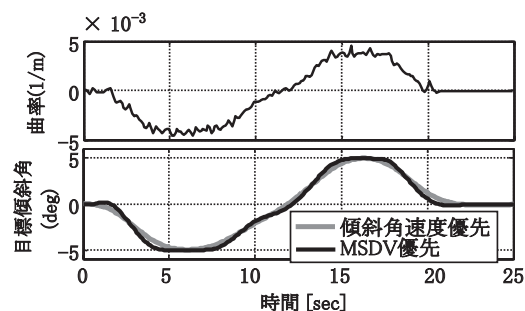


図2 評価重みによる傾斜目標値の違い

3.1 アシスト操舵システムの概要

本システムはボルスタレス台車に力制御のアクチュエータを付加し、輪軸の自己操舵力を補助して曲線通過性能を向上させるシステムである。

本台車の構造を図3に示す。軸箱支持装置のモノリンクを「アシストアクチュエータ」と呼ぶ操舵アクチュ

エータ（図4）で置き換えた構成になっている。

本アクチュエータは内部に予圧縮ばねが設けられており、空気が込められていない状態では、この作用により最縮位置に保たれる。よって非動作時においては、通常のモノリンクと同じく両端のゴムブッシュの剛性による軸ばね前後支持剛性・操舵特性となる。

操舵は、外軌側アクチュエータのペローズに空気圧を込めてアクチュエータを伸ばし、外軌側軸距を広げることにより輪軸の角度を変える。

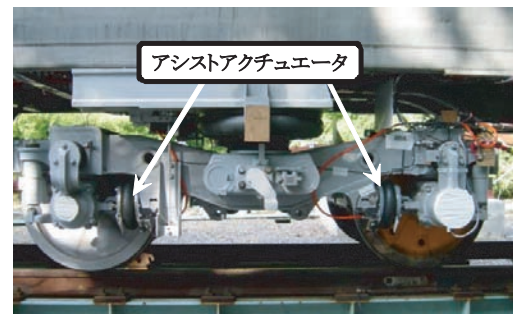


図3 アシスト操舵台車の構造

### 3.2 アシスト操舵システムの特徴

ベンチ試験で求めた操舵力（アクチュエータ内圧）と横圧の関係を図5に示す。この図より、順方向操舵ではアクチュエータ内圧の増加に伴って横圧が減少していくが、逆方向操舵ではある範囲まで横圧が増加しないことがわかる。この理由を以下に示す。

本システムでは外軌側軸距を伸ばすことで操舵を行う。アクチュエータが伸びるためには、車輪に働く前後クリープ力と、アクチュエータ発生力の合力が予圧縮力を上回る必要がある。図6のように車輪に働く前後クリープ力は、外軌側では輪軸を伸ばそうとする方向に作用しているため、順方向操舵の場合はクリープ力とアクチュエータ発生力は同方向で、その合力が予圧縮力に打ち勝ち、輪軸が操舵されて横圧が低下する。

一方、逆操舵においては内軌側を伸ばそうとするので、アクチュエータ発生力とクリープ力の方向が逆となり、予圧縮ばねを伸ばすことができないため、アクチュエータは最縮位置のまま、通常のモノリンクと同じになる。よって、最大操舵力を予圧縮力の範囲に抑えれば、万が一逆操舵を指示しても横圧は上昇しない。この範囲の操舵力でも50～70%程度の横圧低減効果があることが実験で確認されている。

以上より、制御系の電源が切れたときには排気するように空気圧系を構成し、異常検知により制御系の電源を切るシステムとすることでフェールセーフシステムが構成可能となる。本システムは構内試験において上記の特性を確認しており、今後は走行試験による確認を行って実用化を図っていきたい。

## 4. ハイブリッドシミュレータによる車両特性評価システム

鉄道車両の走行試験は長大な試験区間を要し、多くの準備期間や労力・コストを要するため、今後の方向としてはベンチ試験で実施する試験の比率を大きくしていくことが望まれる。これは、時間のかかる調整作業が必須な運動制御系の開発については特に必要性が高い。

自動車の開発においては、評価対象に実物を用い、そ

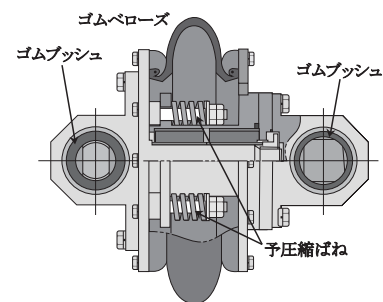


図4 アシストアクチュエータ

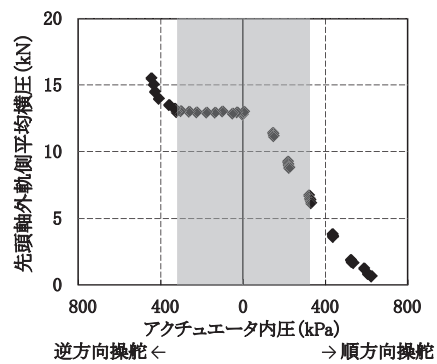


図5 駆動圧力と平均横圧の関係

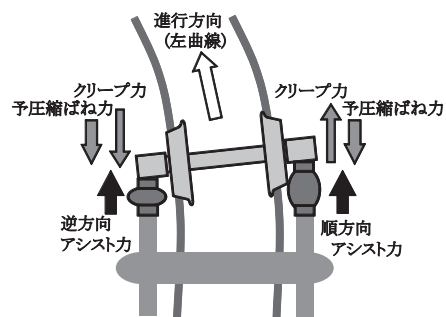


図6 クリープ力とアクチュエータ発生力の関係

れ以外の部分を実時間のコンピュータシミュレーションに置き換え、両者を同期して動作させて、走行状態を模擬する「HILS (Hardware In the Loop Simulation)」と呼ばれる手法が用いられる。この手法は走行試験のかなりの部分を仮想化し、ベンチ試験に置き換えることができると期待され、エンジンや変速機制御、ブレーキ制御等の開発における重要なツールとなっている。鉄道車両においても仮想走行試験は、開発工程の短縮、品質・安全性の向上につながる大きな可能性を持っていると考え

特集：車両技術

られるため、HILS 技術を応用して鉄道車両用仮想走行試験環境を構築する研究<sup>4)</sup>を行った。

HILSは評価対象に実物を用いるため、評価対象のモデル化誤差がないことや、試験環境をソフトウェアで模擬するため、試験項目の自由度が大きいなどの利点がある。一方で、このシステムを実現するためには①大規模な実時間シミュレーションを可能にする高速演算、②汎用性のある実時間シミュレーションモデル、③非線形性を含む機器特性自動同定手法、④実車と同じ多自由度に対応可能な試験装置等、広範な技術開発が必要となる。

鉄道総研が開発した評価システムの構成を図7に示す。実時間シミュレーション用の計算機と、それぞれが計算・判断能力を持つ試験装置を実時間ネットワーク（設定時間内でのデータ伝送が保証されているネットワークシステム）で接続する構成となっている。

シミュレーションにおいてレール車輪間の作用力を計算する部分は0.1ms～0.2ms程度の短い周期で計算しないと精度や安定性が悪化する。HILSシステムは物理現象と同期して運動計算を行うため、計算周期を超える遅延が許されず、非常に高速な計算が必要である。このため、複数のCPUで分担して実行する分散処理システムを構築した。本システムでは1両の計算を3個のCPUコアが協調して処理する構成にしている。現状で4両の実時間シミュレーションを行う能力があり、試験装置と組み合わせることで編成運動の模擬が可能である。

評価対象部品を実車に取り付けた時の走行状態を模擬する試験装置は、多自由度加振機構により、シミュレーションと連動して実車両と同じ3次元運動を再現できるようになっている。

本システムは、評価対象部品の正確な同定モデルをライブラリ化し、シミュレーションモデルに組み込むこと

により精度を向上していく。このため、ニューラルネットワークを用いて、供試対象の入出力関係を表す高精度なモデルを自動的に生成するシステムを開発した。本同定法は強い非線形性特性を持つ部品の特性同定に適用しており、一般的な線形同定法（ARXモデル）に対して、予測値の平均誤差2乗和を70%程度減少する部品モデルが得られた。なお、本システムの一部は国土交通省からの補助金により開発を行った。

5. おわりに

車両技術に関する最近の話題を、車両運動の制御と評価の面から紹介した。近年の車両に対する要求性能の高度化から、運動制御の技術は重要性を増している。重要部位への制御の導入は車両性能の大きな改善につながる反面、安全性の確認については従来以上の慎重さが必要になると考えられる。十分な試験・確認を行いながら開発を進めていきたいと考えている。

文 献

- 1) 鈴木, 白戸, 手塚: 低周波振動が列車酔いに及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.18, No.2, P.9-14, 2004-02
- 2) 佐々木, 風戸: 振り車両の乗り心地を改善する, RRR, Vol.67, No.1, P.11-14, 2010-01
- 3) 鴨下, 梅原, 小島: アシスト操舵システムの逆操舵防止方策の検討, 日本機械学会論文集, Vol.78, No.768, P.1955-1962, 2010-08
- 4) 佐々木: 鉄道車両研究へのHILSシステムの応用, 鉄道総研報告, Vol.20, No.6, P.5-10, 2006-06

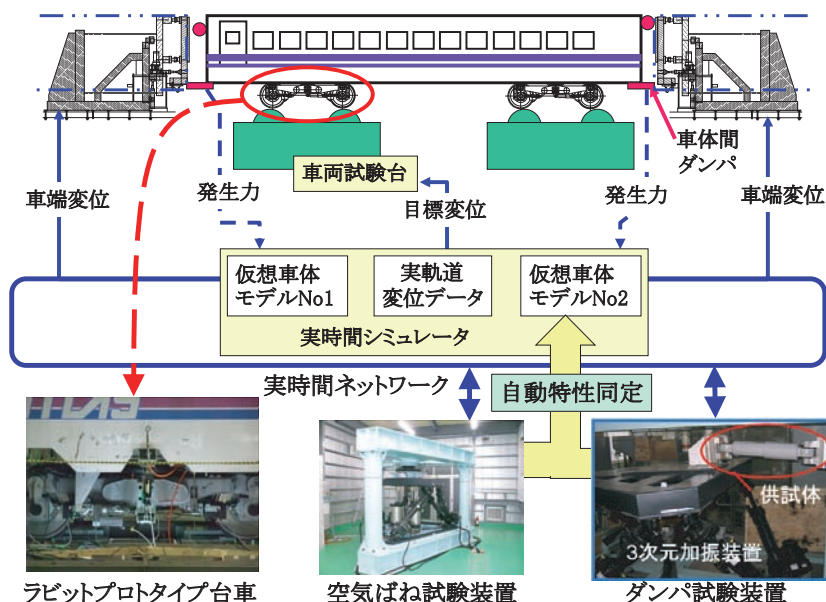


図7 開発したHILS応用車両特性評価システム