

車両技術に関する最近の研究開発

石毛 真*

Recent Activities for Research and Development of Vehicle Technology

Makoto ISHIGE

RTRI is conducting R & D with the aim of improving railway safety, reducing maintenance costs, and improving convenience by speed-up. For safety, approximately half of the total R & D themes in the vehicle field are being conducted, mainly focusing on research on running safety evaluation methods such as flange climb derailment and crashworthiness evaluation. To improve convenience, we are conducting research and development on improving ride comfort by reducing vibration and tilting technology and noise reduction. This paper introduces the current status of the research and development of the Vehicle Structure Technology Division, the status of efforts on crashworthiness evaluation, and the efforts on improving ride comfort.

キーワード：車両，衝突安全性，乗り心地

1. はじめに

鉄道総研では、鉄道の安全性の向上、高速化などによる利便性の向上、メンテナンスの低コスト化を目指して研究開発に取り組んでいる。車両分野においては、安全性の向上に関して、乗り上がり脱線等の走行安全性評価手法、衝突安全性評価に関する研究などを中心に全体の約半数の研究開発テーマを実施している。利便性の向上については、車体弾性振動の低減や車体傾斜技術などの乗り心地の向上や騒音低減に関する研究開発を行っている。

本稿では、車両構造技術に関する最近の研究開発の中から、衝突安全性評価に関する取り組み状況、乗り心地向上に関する取り組みを紹介する。

2. 衝突安全性評価

我が国における、鉄道車両の車体構造の設計基準は衝突事故を想定しておらず、衝突条件や車両の衝突安全性を評価するための指標が明示されていない。一方、欧州や米国では、車両の衝突安全性に関する設計基準があるが、それぞれの国の鉄道システムや過去の事故事例などに基づいて設定されているため、それらの内容は異なる。

車両の衝突安全性に関する我が国の設計基準を検討する際には、これらの実績のある海外の基準を参考とすることは効率的であると考えられるが、我が国の事情を考慮することも必要である。我が国において検討すべき優先度の高い事故状況としては、予測が困難な踏切での自

動車との衝突事故が挙げられる。

そこで、踏切事故時の客室内の安全性を評価するために、衝突解析および衝突安全性評価指標の検討に取り組んでいる。

2.1 衝突解析

踏切衝突事故時に乗客や乗務員の被害を軽減する車体構造は、鉄道の安全対策として重要である。衝突事故時の安全性に優れた車体構造を設計する場合、実車による衝突試験を繰り返し実施することは現実的ではなく、数値解析による衝突安全性評価が有効である。衝突解析の精度を検証、向上させることを目的として、ステンレス鋼製先頭車両の実物大部分車体構造を用いて、剛体壁に衝突させる衝突試験を実施¹⁾し、車体の衝撃変形挙動などの基礎データを取得した(図1)。合わせて、衝突試験を模擬した有限要素法(FEM)解析(図2)を実施し、比較検証した結果、FEM解析は実物大車体構造の衝撃挙動を概ね精度良く再現できることが確認できた。

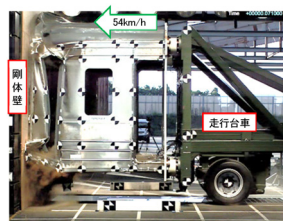


図1 実物車体衝突試験

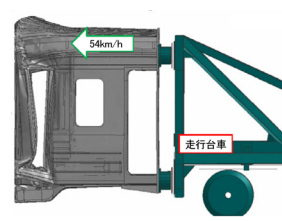


図2 FEM解析

2.2 衝突安全性評価方法

我が国で過去に発生した主要な踏切事故の統計的調査結果を基に、衝突速度や衝突対象物および相互の相

* 車両構造技術研究部長

対位置の各条件を変化させて、踏切衝突事故を模擬した FEM 解析（図 3）を実施し、各条件での客室の衝撃減速度波形を算出し、以下の①～③の衝突安全性評価指標とその限度値で客室内の安全性を評価するとともに、④の人体ダミー人形の傷害値を乗客傷害度解析（図 4）により算出した²⁾。

- ①欧州基準に準拠した平均減速度（限度値 7.5G）
- ②米国基準に準拠した最大減速度（限度値 8G）
- ③米国基準に準拠した乗客の前席への衝突速度（Secondary Impact Velocity, 以後、SIV）（限度値 40km/h）
- ④人体ダミーモデルの大腿部荷重の最大値（以後、ダミー傷害値）（限度値 10kN）

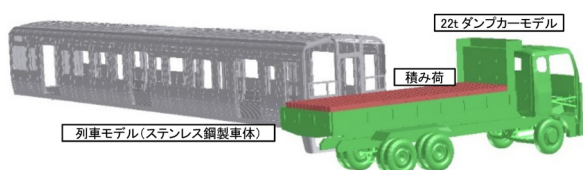


図 3 踏切衝突事故を模擬した衝突解析

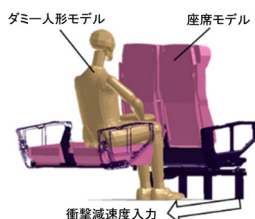


図 4 乗客傷害度解析

①～③の評価指標による評価結果を④のダミー傷害値による評価結果と比較検証したところ、SIV すなわち車体減速度の積分値による安全性評価方法がダミー傷害値による評価と最も相関が高かったことから、最適な方法であることがわかった。

本稿では、ステンレス鋼製車体とダンプカーの衝突時に回転クライニングシートに着座した乗客が前席に衝突する状況の解析例を紹介したが、アルミニウム合金製車体構造や、ロングシートに着座した乗客や立位乗客など、他に多くの状況が考えられるため、今後も様々な状況での研究を進めていく。

3. 乗り心地向上

一般に乗り心地とは、車内環境が旅客に与える心理的・生理的反応をいい、その要因には振動、加速度、騒音、温湿度などあらゆる因子が含まれる。車両の走行に伴って発生する振動や加速度に起因する旅客の反応を狭義の乗り心地と呼ぶ。狭義の乗り心地は、振動乗り心地、曲線通過時の乗り心地、加減速時の乗り心地、振り子車両の乗り心地に分類できる。ここでは、振動乗り心地のう

ち特に車体の弾性振動に関する低減対策と、振り子車両に関する最近の取り組みについて紹介する。

3.1 車体弾性振動低減

近年、新幹線車両を中心に左右系の振動制御システムが採用されるようになり、左右の振動乗り心地の向上に貢献している。その反面、相対的に上下系の振動が顕在化してきており様々な対策の検討が進められている。上下系においては、車体の曲げ振動など車体そのものの変形を伴う振動も含まれる。従来、車体を一本の弾性はりとみなし、その一次曲げ振動を対象として多くの低減手法が提案されてきているが、近年の測定結果からは、車体の三次元的な変形を伴う複数の振動モードが存在することが明らかとなっている。車体の弾性振動は、軌道の高低変位が軸ばね、空気ばねを介して車体に入力されることによって生じるほか、輪軸の質量アンバランスなどに起因するものもある。車体弾性振動の低減策としては、振動の発生源である軌道の高低変位や輪軸質量アンバランスの低減、台車の振動抑制や振動伝達経路での振動抑制による低減、車体そのものの振動を抑制する方法が考えられる。各対策についての近年の取り組みを以下に示す。

3.1.1 上下制振制御手法

台車の振動抑制により車体弾性振動を低減する手法として、可変減衰軸ダンパを軸ばねと並列に組み込む方法がある。これは、軌道からの加振入力に対して台車の上下およびピッチング振動を抑制し、車体弾性振動を低減するもので、走行試験によりすでに効果が確認されている³⁾。現在、可変減衰軸ダンパに加えて、台車～車体間に可変減衰上下動ダンパ、上下アクチュエータを取り付ける制振制御手法（図 5）の開発を進めている。新幹線型試験車体を用いた車両試験装置での回転試験において、制御により 9Hz 付近の車体弾性振動の低減効果に加え、1Hz 付近の車体の上下・ロール方向の剛体振動の低減効果が得られることを確認している⁴⁾。

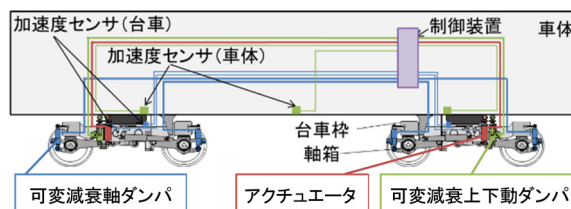


図 5 上下制振制御手法

3.1.2 変位依存性緩衝ゴム

振動伝達経路の工夫で振動絶縁する手法として、牽引装置あるいはヨーダンパの緩衝ゴムの特性を変えることで、輪軸の質量アンバランスによる前後動、ヨーイング

が台車枠から車体に伝達されることを抑制する方法がある。変位依存性緩衝ゴム⁵⁾は、通常の緩衝ゴムの製作工程で行われるゴムとピンの加硫接着および外筒の絞り加工を省略することで、ゴムとピンの間に微小隙間を形成(図6)し、これにより微振幅振動の吸収を図るものである。一本リンク用およびヨーダンパ用の変位依存性緩衝ゴムを試験車両に組み込んで走行試験を行い、通常条件と比較した結果、車体中央の上下乗り心地レベルにおいて3dB以上の改善効果を確認した。引き続き、実用化に向けて効果検証、耐久性確認を行っていく。

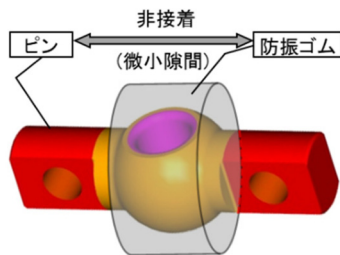
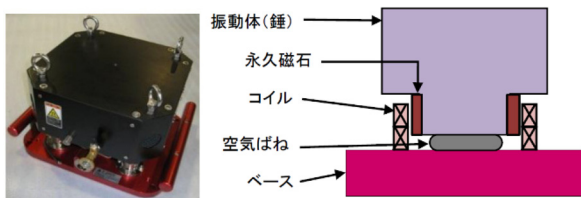


図6 変位依存性緩衝ゴム

3.1.3 アクティブマスダンパ

車体の三次元的な変形を伴う複数の振動モードを制振する手法として、アクティブマスダンパ(AMD)による多モード制振手法の開発を行っている。本AMDは、空気ばねで支持された振動体とリニアアクチュエータで構成され(図7)、振動体を駆動することで、振動体の慣性力により車体の振動を低減する。少ないセンサ数で大きな制振効果を得るため、 H^∞ 制御理論を適用している。車両試験台において本AMDを車体中央部床下に2台設置した新幹線型試験車体の加振試験を行った結果、車体の一次曲げモードと車体断面が菱形に変形するモードに対応した加速度PSDピークを低減できることを確認した⁶⁾。今後は、走行試験において乗り心地向上効果を検証していく。



(a) 外観

(b) 概略構成

図7 アクティブマスダンパ

3.1.4 車体振動解析モデル

車体弾性振動の低減手法を効率的に検討するためには、精度のよい数値解析モデルが必要である。三次元的な変形を伴う弾性振動の簡易な数値解析モデルとして、

車体を三次元弾性体で表現した六面体構造物として扱う拡張箱形モデル(図8)を提案している。このモデルでは、車体の左右方向の弾性振動も考慮することができ、上下・左右方向が連成する振動を扱うことができる。

本モデルの車体を構成する三次元弾性体の剛性や弾性体間の接続ばねのばね定数、輪軸・台車枠間、台車枠・車体間の結合要素のばね定数および減衰係数などのパラメータを粒子群最適化を用いて実験結果から効率的に求める手法を提案した⁷⁾。この手法により得られたパラメータを用いた計算により、加速度PSDにおける1Hz近傍の車体剛体振動モードのピークと、10Hz前後の弾性振動モードのピークを精度よく再現できることを確認した。今後は、このモデルを制振デバイスの開発や効果の予測に活用していく。

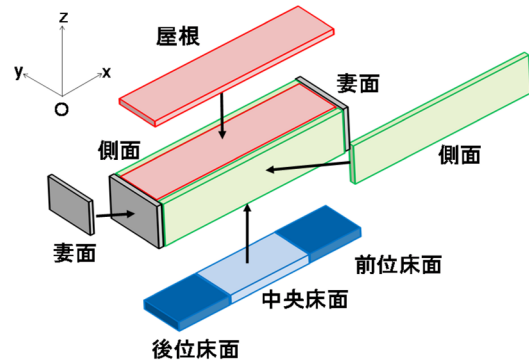


図8 拡張箱形モデルの車体部分

3.2 車体傾斜技術

国内で幅広く運行されている振り式車体傾斜車両は、曲線走行中に車体を傾斜することによって、乗客に作用する遠心力を緩和しながらスピードアップを実現している。一方で、車体傾斜動作に起因する乗り物酔いの指摘を受けることがあり、振り式車両の乗り心地向上のため、振り制御システムの改良に取り組んできた⁸⁾。要素技術としては、車両の走行位置の正確な把握、曲線の形状と人間の感じ方を考慮した傾斜角度の計算、理想的な車体傾斜制御を実現する振りアクチュエータの開発がある。ここでは、自車位置検出システムに関する最近の取り組みと、新しい車体傾斜装置の開発について紹介する。

3.2.1 自車位置検出システム

新しい振り制御システムの実用装置開発に向けて、曲率照合式自車位置検出における車体の振動特性や軌道変位の影響の除去と検出精度の向上、車上データベースの曲率データと異なる線路に列車が進入した場合や、長距離の直線走行時における検出精度低下の防止策について検討を行った⁹⁾。この結果、曲率データに空間フィルタを適用(図9)することで、線路曲率の経年変化や車両の振動特性、走行速度の影響を抑えることが可能となり、煩雑な車上データベースのメンテナンス頻度を大幅に低

減できることがわかった。また、異曲率区間や長い直線区間といった曲率照合に不向きな箇所は従来の速発累積距離に切り換えることで、これらの影響を抑えられることがわかった。今後、現車にこのシステムを搭載し、更なる精度検証と実用化に向けた改良を行う予定である。

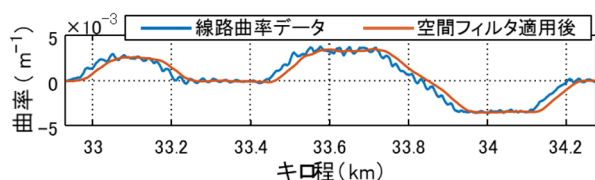


図9 線路曲率データへの空間フィルタ適用

3.2.2 アンチローリング装置を用いた車体傾斜装置

振り子式台車は振りばりやころ装置などを装備し、一般の台車に比べて台車構造が複雑で、保守に時間や費用を要するという課題がある。一方、台車構造が簡素な車体傾斜方式として空気ばね式車体傾斜が新幹線などに採用されているが、振り子式に比べて最大傾斜角が小さく、急曲線が多数存在する在来線では、超過遠心加速度を大幅に低減することが難しい。また、空気ばねを伸ばすために多くの圧縮空気を消費する。そこで、振り子式に比べて構造が簡素で、振り子並の最大傾斜角を実現するアンチローリング装置式車体傾斜機構を開発している¹⁰⁾。一般的なアンチローリング装置のトーションバーに強制的なトルクを与えて、車体に傾斜力を与える構造である。トルクの発生には、応答性とコンパクトさを考慮して電動式のロータリーアクチュエータを用いている。傾斜力は、アームと上下リンクを介して車体に伝達される。最大傾斜角が5°と大きいため、空気ばねの左右間隔を一般的な台車よりも狭めている。本機構は「ばね上振り子」であるため、カント不足量が大きな曲線では左右動ストップ当たりによる乗り心地低下が懸念されるため、車体の横移動を抑制するセンタリングシリンダを備えている。試作台車(図10)の定置傾斜試験において、乗り心地を改善する車体傾斜パターンへの良好な追従性を確認した。今後、アクチュエータのフェールセーフを考慮した要素開発、システム設計を行い、実用化に向けた検討を進めていく。

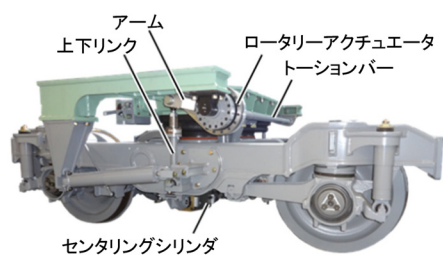


図10 アンチローリング装置式車体傾斜台車

4. まとめ

本稿では、車両構造技術に関する最近の研究開発の中から、衝突安全性評価および乗り心地向上に関する取り組みを紹介した。安全性の向上に関しては、衝突以外にも走行安全性評価や台車部品のき裂進展性評価、探傷技術、火災における燃焼現象推定手法等多岐に渡る研究開発に取り組んでいる。利便性の向上については、車体弾性振動対策や車体傾斜技術以外に編成内前後振動の低減や騒音低減対策等に取り組んでいる。安全性、快適性の更なる向上は鉄道事業者のニーズであり、それに応えられるよう、研究開発をさらに深度化していく所存である。

文献

- 1) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 実物大のステンレス鋼製鉄道車体構造を用いた衝突試験, 日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス講演論文集, OS1530, 2019
- 2) 沖野友洋, 永田恵輔, 堀川敬太郎, 小林秀敏: 乗客の傷害度との相関に基づく鉄道車両の衝突安全性評価方法, 日本機械学会論文集, Vol.86, No.881, 2020
- 3) 菅原能生, 風戸昭人, 富岡隆弘, 三平満司: 鉄道車両の1次ばね系の減衰制御による上下振動低減(新幹線電車による高速走行試験結果), 日本機械学会論文集(C編), Vol.74, No.741, pp. 1222-1230, 2008
- 4) 鉄道総合技術研究所 主要な研究開発成果: 新幹線車両向け上下制振制御手法
<https://www.rtri.or.jp/rd/seika/4-21.html> (参照日: 2020年2月17日)
- 5) 相田健一郎, 富岡隆弘, 秋山裕喜, 瀧上唯夫: 車体上下振動抑制のためのヨーダンパ用変位依存性緩衝ゴムの開発, 鉄道総研報告, Vol.30, No.11, pp.11-16, 2016
- 6) 秋山裕喜, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 車体弾性振動低減のためのアクティブマスダンパの性能向上, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.41-46, 2019
- 7) 秋山裕喜, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 車体の三次元弾性振動解析モデルのパラメータ決定手法, 鉄道総研報告, Vol.34, No.5, pp.29-34, 2020
- 8) 風戸昭人: 乗り心地の良い振り子車両の制御システム, JREA, Vol.62, No.1, pp.25-28, 2019
- 9) 原田康平, 真木康隆, 風戸昭人, 石栗航太郎: 空間フィルタを用いた線路曲率照合による自車位置検出システムの開発, 鉄道総研報告, Vol.33, No.10, pp.5-10, 2019
- 10) 風戸昭人, 小島崇: アンチローリング装置を活用した車体傾斜機構, 鉄道総研報告, Vol.33, No.3, pp.35-40, 2019