

車両に関する最近の研究開発

佐々木 君章*

Recent Topics on Vehicle Technologies

Kimiaki SASAKI

This paper introduces recent three topics on the railway vehicle technology which are expected to be put to practical use. The first one presents a simple way to reduce bending vibration of the carbody which worsens ride comfort. The second one introduces a numerical evaluation method of the damage of driver and carbody by a collision at level crossing, which can evaluate both the deformation of the carbody and the driver's injury quantitatively. The last one proposes a simple analysis method of energy consumption of railway vehicles which can be used as a tool to improve energy efficiency in train operation.

キーワード：弾性振動，乗り心地，衝突，踏切，省エネルギー

1. はじめに

近年の鉄道車両に求められる性能は、社会の意識や環境の変化を反映して多様化が進んでいる。例えば、乗り心地の面では従来は左右振動の改善が最重要課題だったのに対し、それへの対応策が進んだ結果として相対的に上下振動の改善が重要になってきている。また、鉄道車両はエネルギー効率が高いとされているが、CO₂削減や昨今の原子力発電休止による電力不足等の社会的な省エネルギーの要請から、なお一層の省エネルギー性が求められるようになってきている。

本稿では、これらのニーズに対する研究開発のトピックとして、①床下機器の高減衰弾性支持による上下振動低減、②踏切事故時における乗務員挙動の評価、③鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法の話題を紹介する。

2. 床下機器の高減衰弾性支持による上下振動低減

上下方向の乗り心地では、車体の曲げ変形を伴って振動する弾性振動が大きく影響しており、その低減が求められている。従来は車体をはりとみなした一次曲げ振動に車体弾性振動を近似して扱うことが多かったが、実際の車体弾性振動は、立体構造物としての複雑な変形を伴う複数の振動モードから成ること、複数の振動モードが乗り心地に影響する機会が多いことなどがわかってきた。

したがって、効果的に振動乗り心地を向上するには、車体構造や振動モードの特徴に合わせた対策の実施や、複数の弾性振動モードの同時低減が必要である。

このアプローチの一つとして、一部の床下機器を利用する「動吸振器」による制振がある。これは図1のように車体にばねとダンパを介して振動体を取り付け、振動体の共振によって、車体の曲げ振動を打ち消すものである。この方法は、制振対象周波数に応じたばね・ダンパの精密な調整が必要なこと、単一の周波数でしか効果が得られないことが課題であり、走行試験は行われているが現状では実用化例は報告されていない。

これに対し、ここで紹介する手法は車体に比べて高減衰の材料を用い、対象とする車体弾性振動の固有振動数と同程度か若干低い固有振動数となるように床下機器のばね系を構成するものである¹⁾。これにより、煩雑な動吸振器の固有振動数や減衰比の調整なしに、広い周波数範囲で車体の振動を低減し、共振周波数におけるピークを十分に低く抑えられる可能性がある。

図1の動吸振器について、主系と付加系の固有振動数の比と減衰比の比を変化させたときの振動低減効果を計算した結果、以下のことが分かった。

- (1) 固有振動数比が大きいと振動抑制効果の大きい範囲が拡大する傾向がある。
- (2) m_1/m_0 が大きくなるにつれて振動低減効果が大きくなる固有振動数比は小さい方へ移動する。

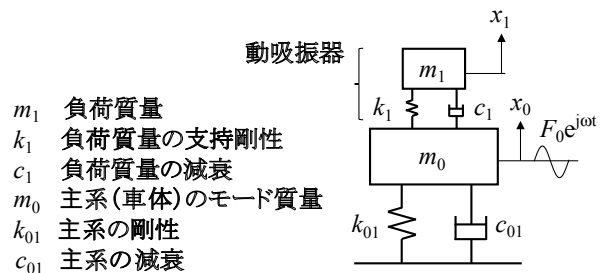


図1 動吸振器による振動低減

* 車両構造技術研究部 部長

特集：車両技術

以上より、動吸振器による制振では、付加系は主系に比べて固有振動数が低めで減衰比が大きい方が有利であると考えられる。

この結果を元に、機器吊り金具（制振機器吊り）を製作し、加振試験で効果を確認した。対象車両は図2に示す鉄道総研保有の試験車両で、車体は広く営業使用されている通勤形車両と同等の構造のステンレス鋼製である。試験では1台あたり可動部質量500kgのダミー機器2台を車体中央付近の横はり左右に設置した（図2右）。

このダミー機器の支持部材は2種類（液封タイプ、防振ゴムタイプ）を製作した。両者のばね定数はほぼ同等であるが、損失係数は液封タイプが0.4、防振ゴムタイプが0.2である。設置時の固有振動数は8Hzである。

図3に制振機器吊りによる車体中央の振動低減効果と、低減された周波数に対応する車体のモード形状を示す。弾性支持により2つのモードに対応するピークが同時に低減する傾向が認められ、本方式の効果が確認された。

床面全測点における5Hz～20Hzの振動加速度実効値（以下BLRMS値）の平均低減量を図4上段に示す。防振ゴムタイプに比べ損失係数が大きい液封タイプの方が平均的な振動低減効果はやや大きかった。同様にダミー機器上におけるBLRMS値の平均値を同図下段に示す。床下機器（可動質量側）の振動加速度も大きく低減しており、弾性支持による床下機器に対する悪影響はないと考えられる。

本手法は固有振動数や減衰比の調整なしに広い周波数範囲の車体振動を低減できるので、従来の方法に対して実用面で有利と考えられ、実用化を進めていきたい。

3. 踏切事故における乗務員挙動の評価²⁾

日本においては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、衝突条件が明示されていない。また、車両の衝突安全性の指標としては、車体衝撃加速度や生存空間確保のための車体変形量が使用される場合が多いが、その限度値を設定することが困難であった。このような状況に鑑み、この研究では衝突シナリオを検討するため、近年の踏切重大事故事例から衝突速度と衝突対象物について統計的な調査をおこなった。

昭和62年度から平成22年度までに発生した踏切重大

事故（死傷者10名以上または脱線車両数10両以上）は34件あった。推定衝突速度と衝突対象の内訳を図5に示す。平均推定衝突速度は54km/hで、最大は109km/h、衝突対象は大型貨物自動車64%を占めていた。

次に、先頭車の詳細なFEM解析モデルを作成し、自

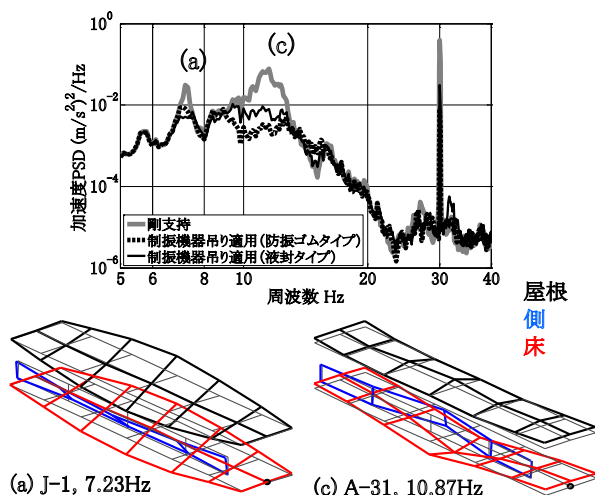


図3 制振機器吊りの振動低減効果と対応モード

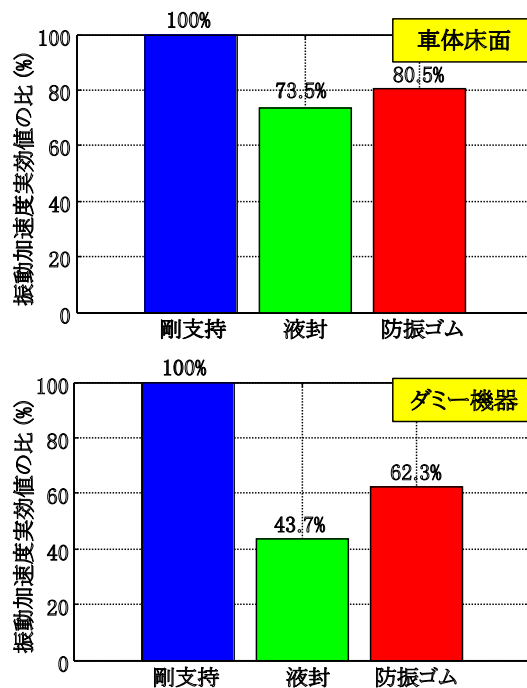


図4 車体床面とダミー機器の振動（平均BLRMS）

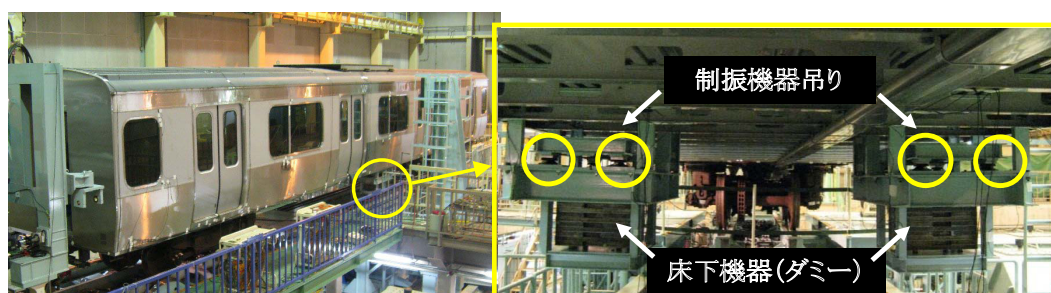


図2 試験車両と制振機器吊り

動車の前面衝突試験用のダミー人形 (Hybrid-MIAM50) の FEM モデルと組み合わせることにより、衝突事故時の車体変形と乗務員の挙動を同時に評価し、乗務員の傷害値を定量評価できる評価手法を構築した。乗務員の傷害評価は自動車分野で用いられている評価指標のうち、死亡・重傷・後遺障害につながる可能性の高い頭部傷害値 (HIC36)、胸部傷害値 (3MS) および下肢傷害値 (大腿部荷重) の3つを使用した。また、乗務員の脱出を考慮し、車体変形により乗務員が挟まれないことを条件とした。

事例調査の結果から、積載荷重 22t の大型トレーラに速度 54km/h で衝突する場合を想定して解析を行った。この変形状況を図6に示す。頭部、胸部の傷害値は基準値以下であったが、左右大腿部荷重は基準値を超えた。衝突により、先頭車前面が圧縮変形して運転台が後方に倒れ始め、衝突後約 10ms 経過時に運転台が膝に衝撃することにより、左大腿部に 32kN の著大な圧縮荷重が発生した。その後も運転台の倒れ込みが継続し、最終的には、運転台の倒れ込みにより、脚部が挟まれた状態となった。

車両のパラメータを様々に変えて上記の改善を検討した結果、①運転台の剛性低下 (頭部・胸部・膝の衝撃緩和) ②車端から運転台の間のクリアランス確保 (挟まれ防止、頭部・胸部の衝突位置コントロール)、③運転台前面から窓まで半身以上の距離の確保 (頭部の衝撃防止) などが乗務員保護に有効であることが分かった。

実際の事故車両の変形状況および乗務員の負傷状況を概ね再現できることを確認している。

これにより、今後の車体設計や衝突シナリオ策定にむけての検討に活用できるものと考えられる。また、本研究の知見をもとに乗客を対象を広げ、乗客の傷害度を評価できる車両の衝突安全性評価手法の構築に進める計画である。

4. 鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法

鉄道車両の消費エネルギーを評価する尺度として、省エネ法ではエネルギー消費原単位という尺度が用いられている。これは走行距離・1両あたりの消費エネルギーを示すものである。

エネルギー消費原単位は実測データや走行シミュレーション等から算出することが可能であるが、これらの方法は多大な労力を要し、さらにエネルギー消費原単位の計算には直接不要なデータも含まれる。このため、様々な車両や路線を保有する鉄道事業者においては、より簡易な計算法の必要性が高いと考えられる。

鉄道総研では車両の消費エネルギー原単位を簡易に計算する方法を開発し、電車とディーゼル車について統一的に適用できるように発展させてきたので紹介する。ただし、紙面の都合から計算の詳細は参考文献³⁾に譲り、

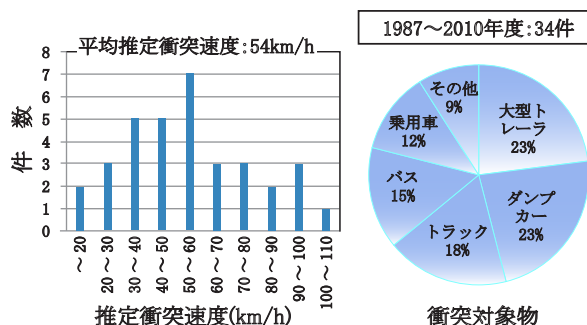


図5 踏切重大事故の統計的調査

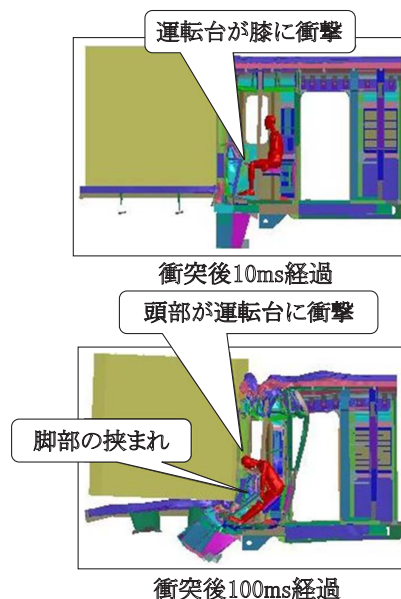


図6 衝突後の挙動

ここでは概念だけを紹介する。

図7は平坦な明かり区間において電車が駅を出発してから次の駅に停車するまでのエネルギー変化を概念的に示したものである。この図から分かるように、刻々の消費エネルギーをシミュレーションで計算しなくとも、機器損失、走行抵抗と曲線抵抗の損失、非回生ブレーキ損失を個別に計算できれば、それらを合計することで消費エネルギーの計算が可能である。この方法では消費エネルギーの内訳も明らかになるため、省エネルギー化を推進するために有用な知見が得られることが期待できる。

本計算法では必要最低限の運用情報として、走行距離、走行時間、駅間の数から、平均駅間距離と平均駅間走行時間を計算する。そして、車両は平均駅間距離の駅間を図7のような運転パターンに従って平均走行時間で走行するものとして、消費エネルギーの計算を行う。

機器損失については、車両の総合的な効率と到達最高速度から力行時の機器損失が計算できる。同様に、ブレーキ初速度や回生性能が分かれば、ブレーキ時の機器損失や非回生ブレーキによる損失を計算できる。本計算法では到達最高速度やブレーキ初速度をシミュレーションに

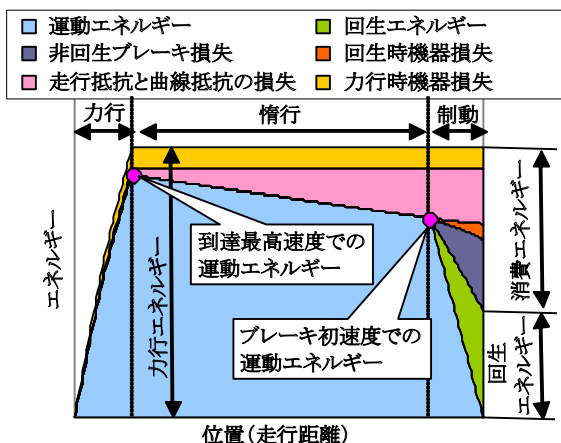


図7 走行時のエネルギーの変化

よらず、後述の回帰式で求めることにより簡略化する。ただし、実際の運転パターンを図7のような単純化された走行に置き換えるために等価ブレーキ初速度という量を定義する。等価ブレーキ初速度とは、ある区間を走行した際にブレーキにより吸収されたエネルギーの合計と等しい運動エネルギーを持つ車両の列車速度である。

以下ではこの等価ブレーキ初速度や到達最高速度を算出する方法について説明する。

時間平均速度と到達最高速度の間には強い相関がある。そこでその関係を表現する回帰式を予め導出しておけば、エネルギー計算に必要な到達最高速度の期待値を時間平均速度から算出することができる。本計算法では実走行データを用いて最小二乗法により回帰式を求めている。

この関係は車種により異なるため、それぞれの車種に対して回帰式を作成し、使い分けている。

次に、等価ブレーキ初速度は、到達最高速度が高いほど高くなることが予想される。そこで、実走行データから両者の関係を調べたところ、これらに比例関係が見られた。このため、等価ブレーキ初速度は到達最高速度から求めることとした。この比例定数は概ねインバータ式通勤電車で96%、同近郊電車で79%であった。

走行抵抗による損失は、距離平均速度を用いて一般的な走行抵抗式で概算可能と考えられる。そこで、到達最高速度と同様に回帰式を用いて距離平均速度を求める。

また、曲線や勾配といった消費エネルギーに影響をあたえる路線データについても、そのまま用いるのではなく、等価曲率半径の曲線や等価平均勾配といった概念を導入し、路線の特徴を単純化して計算に用いる。

本計算法による計算結果と実測の比較について、電車の場合を図8に、ディーゼル車の場合を図9に示す。図9のA～F、図10のG、Hは車種の違いを示す。いずれも簡易計算法としては十分な精度を持ち、概算法として有効であると考えられる。

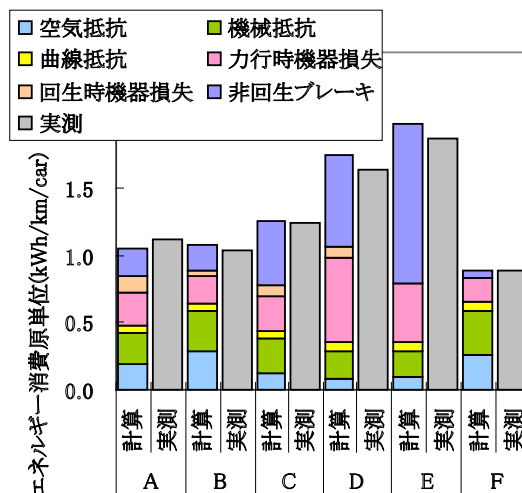


図8 計算と実測の比較（電車）

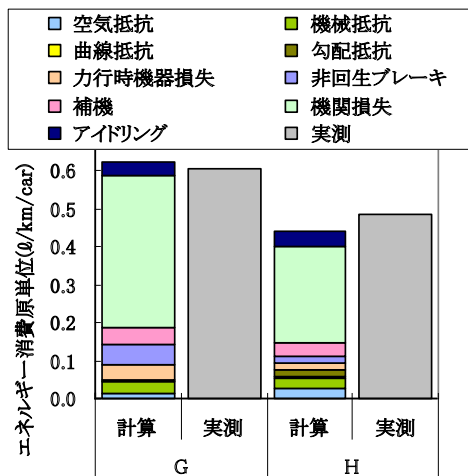


図9 計算と実測の比較（ディーゼル車）

5. おわりに

多岐にわたる最近の車両技術の研究から、直近のニーズが高いと考えられるものを紹介した。今後も狭い視点での最適化に陥らない技術開発を心がけるとともに、対象に適した技術を多角的に検討して開発を進めていきたい。

文献

- 1) 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 相田健一郎: 床下機器の高減衰弾性支持による鉄道車両の車体弾性振動低減, Dynamic and Design Conference, 2011.9.5-9, 日本機械学会 CD-ROM 論文集
- 2) 沖野友洋, 山本勝太, 高野純一, 宇治田寧: 人体ダミーモデルを用いた踏切事故時の列車乗務員挙動評価, 日本機械学会 2012 年年次大会講演論文集, 2012.9.9-12, 日本機械学会
- 3) 近藤稔, 小川智行, 村上浩一: 鉄道車両の消費エネルギー簡易計算法, 鉄道総研報告, 25 巻, 8 号, 2011.8, 鉄道総合技術研究所