

変位依存性緩衝ゴムによる車体振動低減効果（振り子式特急電車走行試験結果）

○ [機] 瀧上 唯夫 [機] 秋山 裕喜 [機] 相田 健一郎（鉄道総研）

Vibration Reduction of a Railway Vehicle Carbody with Displacement-Dependent Rubber Bushes (Experimental Results of the Pendulum Type Express Vehicle)

○Tadao Takigami, Yuki Akiyama, Ken-ichiro Aida (Railway Technical Research Institute)

This paper investigates vibration reduction effects of displacement-dependent rubber bushes installed in the yaw dampers of a pendulum type express railway vehicle. The displacement-dependent rubber bush, which has a small gap between the buffer rubber and the fixture, isolates the excitation force transferred from the bogie to the carbody in the longitudinal direction. We have conducted a series of running tests on a commercial line. As a result of the tests, we have found that the rubber bushes have effectively reduced the vertical bending vibration of the tested vehicle carbody induced by the pitching motion of the bogies. It is therefore confirmed that the developed rubber bushes contribute to improving the ride comfort of passengers.

キーワード：乗り心地，ヨーダンパ，変位依存性緩衝ゴム，振り子車両

Key Words：Ride comfort, Yaw damper, Displacement-dependent rubber bush, Pendulum type vehicle

1. はじめに

鉄道車両が走行する際に発生する車体振動は、乗客の乗り心地に大きな影響を与えるため、その低減が重要な課題となっている。この車体振動の加振源は、主に軌道変位および輪軸がもつ質量アンバランスであり、振動低減の方策としては加振源対策や伝達経路による振動絶縁、車体の振動特性改善、制振装置の付加など、様々なアプローチが考えられるが、ここでは、台車・車体間振動伝達に着目し、特に前後方向の加振力を抑制して車体振動を低減することを目的とする。

筆者らは上記を実現するため、一本リンク、もしくはヨーダンパのゴムブッシュ部に適用する「変位依存性緩衝ゴム」の開発を進めており、これまでに輪軸の質量アンバランスに起因する振動について、複数の車両を対象に走行試験を実施して、振動低減効果を確認している¹⁾²⁾。本報告では、振り子式特急車両を対象に、軌道変位に起因する車体振動に対しても低減効果があることを、走行試験で検証した結果について報告する。

2. 車体振動発生メカニズム

弾性振動を含め、車体の振動を発生させる加振源にはさまざまなものが考えられるが、軌道変位および回転する輪軸の質量分布のアンバランスによる影響が大きい。これらの加振源により、まず輪軸に振動が発生し、加振力が台車枠、車体と伝達することによって車体に振動が発生する。このメカニズムを模式的に表したものを図1に示す。

図1(1)は軌道変位により発生した輪軸の上下方向の振動が軸ばねを介して台車枠に、さらにまくらばねを介して車体に伝達することで車体が上下に振動するもので、加振源、伝達経路ともに上下系のみを考慮したものである。

(2)は輪軸の上下振動が、軸ばねを介して台車枠のピッチング振動を引き起こし、けん引リンクやヨーダンパなどを介して、前後方向の加振力として車体に伝達し、車体に振動を発生させる。

(3)の加振源は輪軸が回転することによるものである。輪軸には微小な質量アンバランスが存在し、回転にともない遠心力が発生する。輪軸の下部はレールと接触しているた

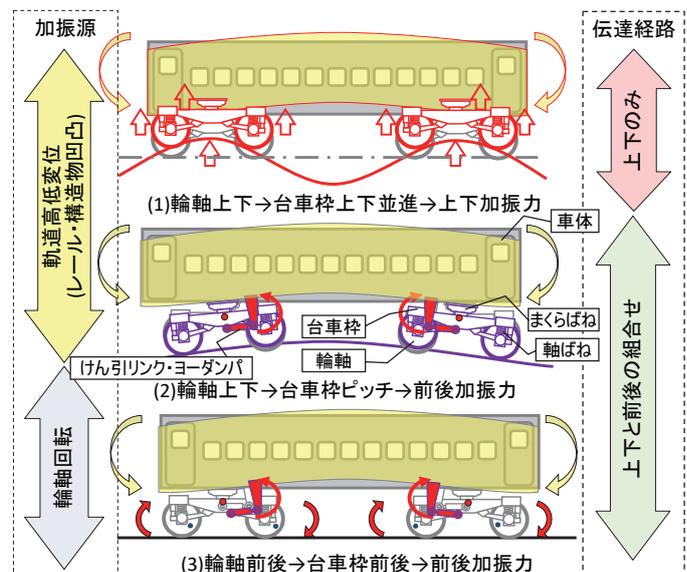


図1 車体振動の発生メカニズム (加振源と伝達経路)

め、上下方向よりも前後方向の振動が顕著となり、これが前後方向の軸箱支持装置を介して、台車枠の前後振動を発生させる。この後の振動伝達は(2)と同様である。

本報告では、台車から車体への前後加振力を抑制することを目的としており、車体振動低減効果が期待できるのは、上記のうち(2)(3)の条件である。これまでに提案されている振動低減対策手法の中には、(1)については効果がある一方で(2)(3)に対しては効果が期待できないものもあるため、これらと組み合わせることで両者が補完関係となり、より振動低減効果を高めることが可能と考えられるが、以下では主に(2)に着目して検証した結果を示す。

3. 変位依存性緩衝ゴム

3.1 開発の目的

前章で示した図 1(2)(3)のメカニズムにより発生する車体振動を低減するためには、台車・車体間の結合剛性をなるべく小さくして振動の伝達を抑制する、すなわち加振力を絶縁することが有効である。具体的な前後結合要素としてはけん引リンク、ヨーダンパが挙げられ、取付部のゴムブッシュ剛性や、後者に関しては減衰係数を低下させることによる対策が考えられる。一方、けん引リンクやヨーダンパの本来の機能を維持する観点からは、剛性や減衰特性をむやみに低下させることは現実的ではない。これらの相反する要求を満たすため、図 2 に示す通り、台車・車体間の相対変位の振幅領域に応じて、剛性特性が変化する結合要素を実現することをめざして開発したのが変位依存性緩衝ゴムである。

3.2 構造の概要

変位依存性緩衝ゴム(以下、開発品)は、けん引リンクとして広く採用されている一本リンク、およびヨーダンパを台車・車体に固定するゴムブッシュ部に適用することを想定して開発したもので、その外観と内部構造を模式的に示したものを図 3 に示す。通常のゴムブッシュでは、固定用金具(ピン)と防振ゴムが加硫接着されるが、本開発品では接着を省略することで両者間に微小隙間を設ける構造となっている。

台車・車体間の相対変位が小さい領域では振動伝達が絶縁されるとともに、大振幅の相対変位に対しては隙間が消

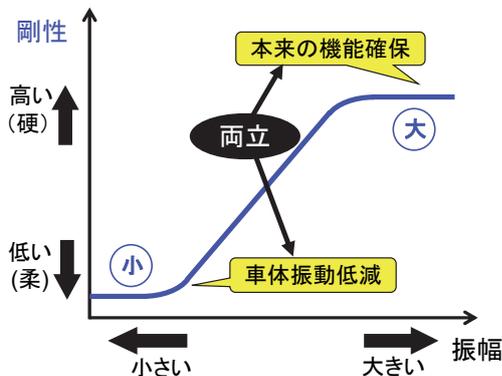


図 2 目標とする前後結合の特性

失することで従来と同等のゴム剛性となり、一本リンク・ヨーダンパが本来の特性を発揮する。また、車両偏倚時等にピンとゴムが分離することを防止するため、ピン中央部に貫通孔を設けてゴムの充填する構造としている。

3.3 事前検証試験

製作した開発品緩衝ゴムの特性が目標通りになっていること、また、走行試験の実施に問題がないことを確認するため、以下の事前検証試験を実施した¹²⁾。なお、別途実施した予備検討により、後述する供試車両については、一本リンクと比較してヨーダンパへの適用効果が高いと予想されたため、以下の検討はヨーダンパ向けの緩衝ゴムを対象に実施した。

(1) 単体の変位・荷重特性調査

開発品緩衝ゴムの軸直角(車両装着時の前後)方向の変位・荷重特性は概略で図 4 に示す通りとなる。グラフの傾きが剛性(ばね定数)に相当し、変位依存性緩衝ゴムは中立位置(変位 0)付近では傾きが小さく、変位が大きくなるにつれて傾きが大きく、すなわち剛性が高くなっている。これらの剛性を単体で実測したところ、変位が大きい領域では通常の緩衝ゴム(以下、通常品)で規定された静剛性と同等となること、中立位置からの振幅が $\pm 0.2\text{mm}$ 、 $\pm 0.5\text{mm}$ の範囲では、個体差があるものの、規定された静剛性のそれぞれ 5~7%程度、20%程度となっており、めざした特性となっていることを確認した。

(2) 走行安定性の確認

開発品緩衝ゴムを鉄道総研が保有する試験車両のヨーダンパ部に装着し、車両試験台における高速回転試験を実施した。その結果、蛇行動限界速度が 250km/h 以上であり、想定される営業最高速度に対して十分に余裕があることを確認した。



図 3 開発品緩衝ゴムと構造模式図

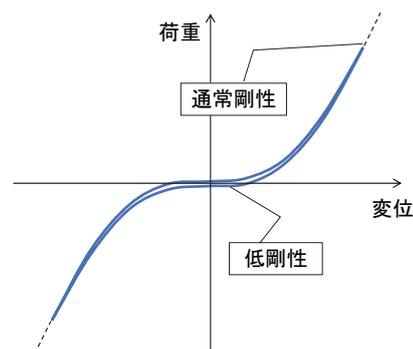


図 4 開発品緩衝ゴムの変位・荷重特性イメージ

(3) 左右偏倚を想定した復元性確認

鉄道総研が保有するダンパ試験装置を用いて、台車・車体間に想定される最大左右変位、ボギー角に相当する条件で、開発品緩衝ゴムのピン・外筒間に相対変位を付加する試験を実施した。その結果、ピンが逸脱しないこと、ゴム部に異常変形や亀裂が発生しないこと、また、相対変位を除荷したあとに中立状態に復元することを確認した。

4. 走行試験

4.1 供試車両と試験概要

前章の事前検討で走行安定性等に問題がないと判断できたことから、実際に営業に供されている車両を対象として走行試験を実施し、開発品緩衝ゴムによる車体振動低減効果を検証した。供試車両は、制御付自然振子機構を持つ特急車両で、車体はステンレス鋼製である。

走行試験では、1日目にヨーダンパの緩衝ゴムとして開発品、2日目に通常品をそれぞれ装着した条件で、約15km離れた駅間を往復し、軸箱、台車枠および床面に設置した加速度センサで振動加速度を計測した。ヨーダンパの設置状況を図5に示す。同図(a)中の破線枠が緩衝ゴムの取付部位である。

表1 振動評価区間

評価区間	走行方向	区間距離	速度条件
1	下り	約0.6km	110~105km/h程度
2	上り	約0.8km	120~130km/h程度

4.2 振動測定結果

(1) 加速度パワースペクトル密度

全測定区間から、両日の走行速度がほぼ一致した表1の2区間を選定して評価対象とし、床面の上下加速度パワースペクトル密度(PSD)を計算した結果を図6に示す。

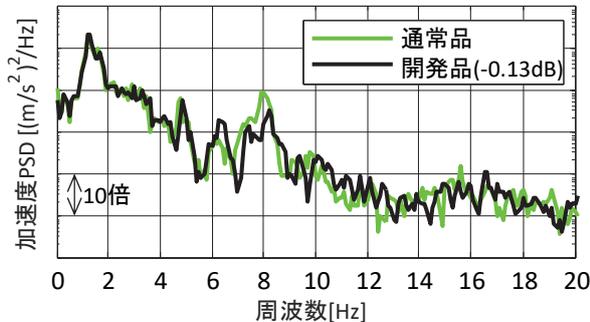


(a) ヨーダンパ全景

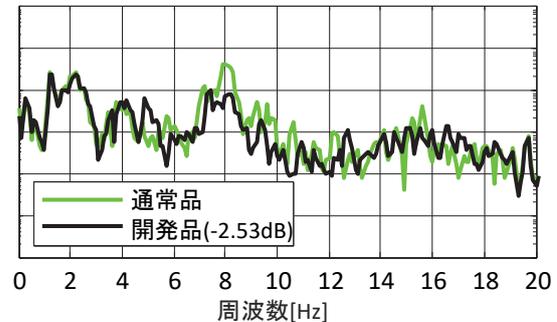


(b) 緩衝ゴム部拡大図

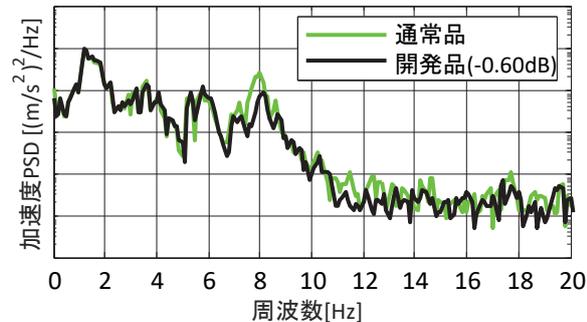
図5 振り式特急車両への緩衝ゴム装着状況



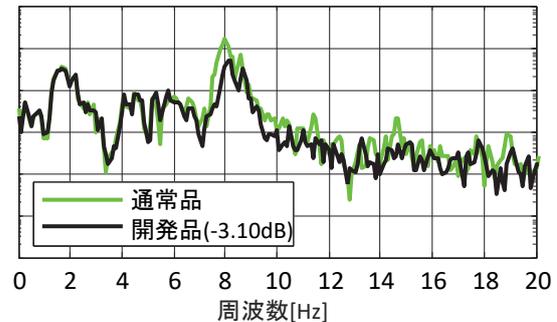
(a) 評価区間1・台車直上



(b) 評価区間1・車体中央



(c) 評価区間2・台車直上



(d) 評価区間2・車体中央

図6 走行時の車体床面上下振動加速度 PSD 比較

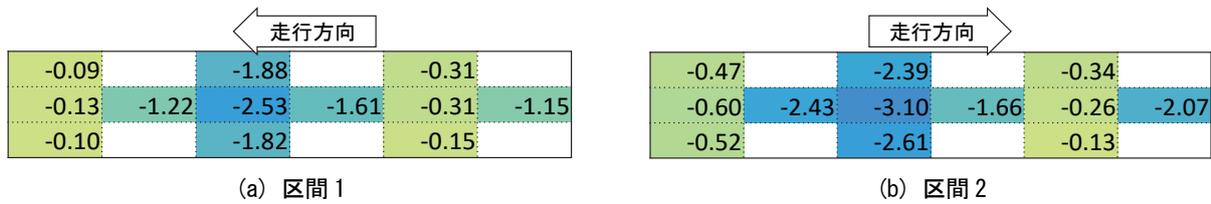


図7 開発品緩衝ゴムによる乗り心地レベル低減効果

図6の上段、下段がそれぞれ評価区間1および2、左列、右列はそれぞれ前位台車直上、車体中央の加速度 PSD である。紙面の都合上割愛するが、このときの軸箱加速度は両日でほぼ一致しており、加振条件が同等であることを確認している。したがって、両条件の PSD の差異は、緩衝ゴム条件の違いによるものと判断できる。

これによると、PSD の1~2Hz 付近と、8Hz 付近に比較的高いピークが認められること、また、緩衝ゴムに開発品を適用することで、8Hz 付近のピーク値が小さくなり、振動が低減されていることが確認できる。

(2) 乗り心地レベル

図6の凡例には、通常品適用時の乗り心地レベル(L_T)を基準とし、開発品適用時の値との差を示しており、値が負の場合に振動が低減したことを表す。また、今回センサを設置した床面の計測箇所全点について、同様に L_T の差を計算したものを、図7に示す。図中の数値の配置は、車体床面の平面図に対する加速度センサの配置に対応しており、値が小さい(負の絶対値が大きい)ほど、乗り心地が向上していることを表す。

低減量は区間や測定点によるが、車体中央付近で乗り心地の向上効果が大きい傾向が認められる。区間1では L_T が最大 2.53dB、区間2では 3.10dB 低減しており、体感上も差異を知覚可能と考えられる程度の振動低減効果が得られた。また、 L_T の評価が悪化する測定点はなかった。

(3) 振動形状

PSD にピークが認められ、乗り心地への影響が大きいと考えられる 8Hz における振動形状を推定した結果を図8に示す。黒色線の端点および交点が加速度センサ設置位置に対応し、赤線が車体上下、青線は台車枠(空気ばね付近)前後方向の変形状態を表す。これによると、車体床面が弾性はりの1次曲げの形状を示していること、また、前後台車に逆位相のピッチングが生じていることが確認できる。

(4) 考察

今回の供試車両は振り機構を有するため、ヨーダンパが一般的な車両より高い位置に取り付けられている。したがって、台車ピッチング中心とヨーダンパ取付高さの差が大きく、台車ピッチングが車体振動に与える影響が大きいと考えられる。特に図8から、8Hz で前後台車逆相ピッチングが顕著に発生していることがわかっており、これによる前後加振力が車体振動に与える寄与が大きい条件であったと推察され、開発品緩衝ゴムを適用することで前後加振力の伝達が抑制されたことが、車体振動の低減につながった

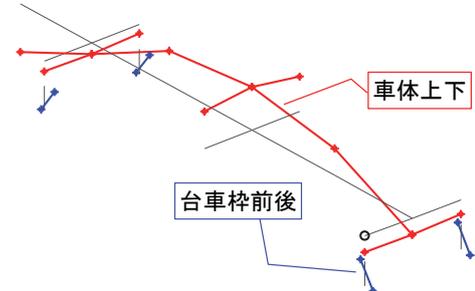


図8 PSD ピーク周波数(8Hz)における振動形状

ものと考えている。図7において L_T 低減量に位置による差異が見られたのは、図8に示したとおり、振動の腹に近い車体中央付近で、振動低減効果が高くなったためである。

なお、試験中は走行安定性を監視することを目的に、台車枠の左右加速度の測定を行っていたが、幾何学的な輪軸および台車蛇行動波長に対応する周波数において、振動が増大する傾向は認められなかったことから、開発品が走行安定性を低下させる影響はなかったと判断している。

5. おわりに

本報告では、台車から車体への前後方向の振動伝達を抑制して、車体振動を低減することを目的として開発した「変位依存性緩衝ゴム」をヨーダンパ部に適用して、振子式特急車両を対象に営業線における走行試験を実施した。その結果、従来効果が確認されていた輪軸の質量アンバランスとは異なるメカニズムで発生する、軌道変位に起因する車体振動についても低減効果があることが確認できた。

今後は、耐久性、耐環境性能の確認など、営業車両への実用化に向けた取り組みを進めてゆく予定である。

謝辞

走行試験実施にあたってご協力いただいた、四国旅客鉄道株式会社の関係各位に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 富岡隆弘他: 台車からの振動伝搬を抑制する牽引リンク緩衝ゴムの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, pp.5-10, 2011.
- 2) 相田健一郎他: 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.