

# 車体弾性振動低減に向けた 新幹線用台車前後加振力伝達抑制デバイスの開発

相田 健一郎\* 瀧上 唯夫\* 秋山 裕喜\*\* 槇田 耕伸\*

Development of Longitudinal Excitation Suppression Devices for Reducing Elastic Vibration of Shinkansen Car-body

Ken-ichiro AIDA Tadao TAKIGAMI Yuki AKIYAMA Yasunobu MAKITA

This paper proposes a method to reduce the elastic vibration of Shinkansen car-body caused by the longitudinal excitation via traction devices and yaw dampers. We developed two types of vibration reduction devices, which are called “displacement-dependent rubber bushes” and “mesh springs”. To examine the running stability and the car-body vibration suppression performance of the developed devices, we conducted excitation tests using a Shinkansen test vehicle in a rolling stock testing plant. As a result of the tests, we confirmed that the developed devices meet the required performance for running stability, and also having the effect of reducing the elastic vibration of car-body.

キーワード：新幹線，車体弾性振動，けん引装置，一本リンク，ヨーダンパ，緩衝ゴム

## 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、乗り心地に影響を与えるため、その低減が必要となる場合がある。振動低減に向けた車両側での対策としては、アクティブ・セミアクティブサスペンション<sup>1)</sup>に代表される制振策や、振動伝達経路における絶縁策などが挙げられる。このうち、振動絶縁策としては、空気ばねによる振動絶縁<sup>2)</sup>に加え、車両の前後方向の結合要素であるけん引装置やヨーダンパに着目した対策も検討されており、これまでに、一本リンクやヨーダンパにおける緩衝ゴムのばね特性変更策（例えば、変位依存性緩衝ゴム<sup>3)4)5)</sup>や、ヨーダンパの減衰特性変更策<sup>6)</sup>などが提案されている。

本研究では新幹線の乗り心地向上を目的とし、振動絶縁による車体弾性振動低減手法として、台車から車体に伝達される前後加振力を抑制するためのデバイスを提案する。具体的には、著者らが提案し、また、複数の在来線車両の走行試験において乗り心地向上効果を確認している変位依存性緩衝ゴムについて、新たに新幹線車両への適用を検討<sup>7)</sup>するとともに、これとは別のデバイスとして、一本リンクおよびヨーダンパの車両取付部に金属系ばねの一種であるメッシュばねを適用することを検討した<sup>8)</sup>。新幹線の本リンクやヨーダンパに適用可能な変位依存性緩衝ゴムおよびメッシュばねを試作し、鉄道総研所有の試験車両にそれらを取付けた条件で加振

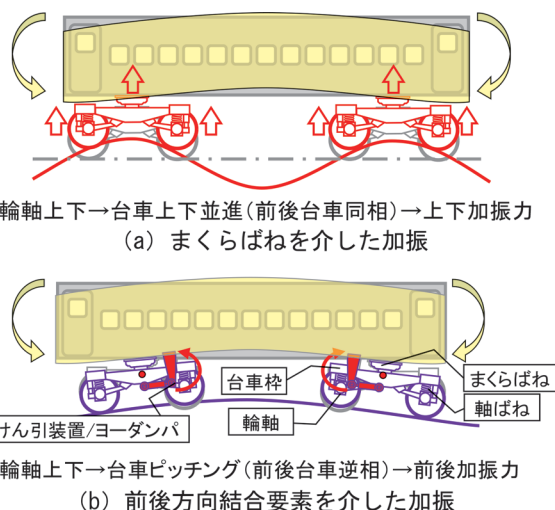


図1 台車振動の伝達による車体弾性振動の励起

試験を行い、走行安定性および車体弾性振動低減効果を検証した結果について報告する。

## 2. 車体弾性振動の励起メカニズム

軌道上下変位に起因する車体弾性振動について、振動伝達経路を模式的に表したものを図1に示す。なお、図1では、便宜上、車体が弾性はりの一次曲げ変形の形状で振動している状況を示しているが、実際にはこれ以外を含む様々な形状で車体は振動している。

図1(a)は、軌道上下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

\* 車両技術研究部 車両振動研究室

\*\* 旧車両構造技術研究部 車両振動研究室

ものであり、伝達経路は上下系のみによるものである。これに対し図1(b)は、軌道上下変位による輪軸の上下振動が、軸ばねを介して台車枠のピッチング振動を引き起こし、けん引装置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ものである。このとき、前後の台車のピッチングが逆位相（逆の方向）であれば車体を強制的に曲げる力が働くため、上下方向の車体弾性振動が発生する。

図1のメカニズムによる車体振動を低減するには、図1(a)については、上下系のサスペンションの改良などによる対策が考えられ、現在、新幹線用の可変減衰ダンパ<sup>9)</sup>などの開発が進められている。これに対し本研究は、図1(b)のメカニズムを対象とするものであり、前後系の加振力の伝達抑制を図ることとした。なお、図1(a)に示す「前後台車の同相上下並進」と、図1(b)に示す「前後台車の逆相ピッチング」では、極大となる周波数が台車中心間距離と走行速度に応じて決まることが知られている<sup>10)</sup>。両者は相反関係にあり、一方の成分が極大の場合は他方が極小となる。例として、一般的な新幹線車両の台車中心間距離である17.5mの場合に、両成分が極大となる周波数を走行速度に対して計算した結果を図2に示す。青色線は前後台車の同相上下並進成分、赤色線は前後台車の逆相ピッチング成分が極大となる周波数を表しており、例えば速度240km/hでは、青色丸印の11.4Hzなどにおいて上下並進成分が極大となること、また、赤色丸印の13.3Hzなどにおいてピッチング成分が極大となることを表している。

本研究で提案するデバイスにより車体振動低減が期待できるのは、図2の赤色線に近い周波数帯域である。図2では、特定の走行速度に着目した場合でも複数の周波数で極大を示すが、このうち車体の固有振動数にこれらの周波数が近接する条件において車体振動が大きくなる傾向があるため、提案するデバイスの適用による車体振動低減効果が大きくなることが期待される。

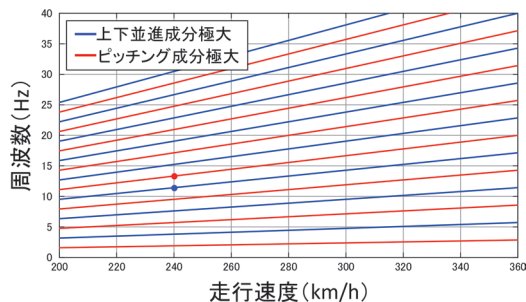


図2 台車中心間距離と走行速度に基づく台車振動の極大条件

### 3. 前後加振力伝達抑制デバイスの製作

新幹線用の台車・車体間の前後加振力伝達抑制デバイスとして、変位依存性緩衝ゴムとメッシュばねを提案する。本章ではその構造や試作品の特性を調査した結果を示す。

#### 3.1 変位依存性緩衝ゴム

変位依存性緩衝ゴムは、在来線の輪軸質量アンバランスに起因した車体弾性振動の低減を目的に開発を始めたものであり、ばね特性（剛性）が営業車両使用品（以下、通常品）とは異なる特性を有する一本リンクおよびヨーダンパ用の緩衝ゴムである<sup>3)4)</sup>。変位依存性緩衝ゴムの構造を図3に示す。通常品は、心棒（車両取付け用金具）とゴムを加硫接着しているが、本開発品では接着を省略することで両者間に微小な隙間を設ける構造としている。これによって、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失することで通常品と同等の剛性となり、一本リンクおよびヨーダンパが本来の特性を発揮する。なお、車両偏い時などにおいて心棒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を充填する構造としている。

図3に示す構造の変位依存性緩衝ゴムでは、製造コストが通常品と同等であることなどを踏まえ、新幹線用の変位依存性緩衝ゴムについても、これと同じ構造を採用することにし、一本リンク用の試作品を製作した。図4に試作品の外観および一本リンクに組み込んだ状態を示す。

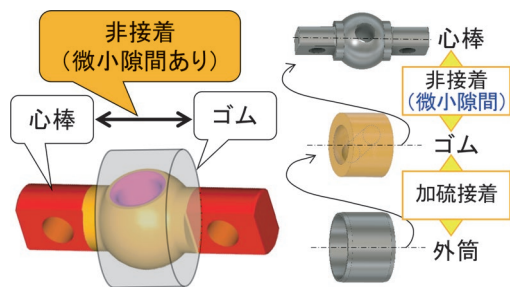


図3 変位依存性緩衝ゴムの構造

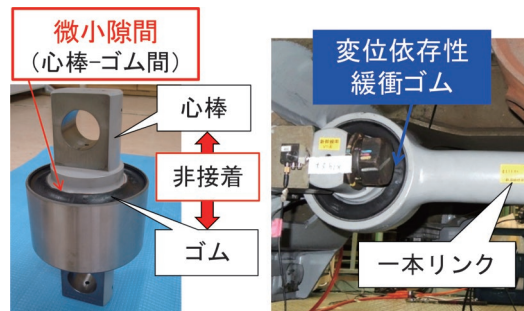


図4 変位依存性緩衝ゴム（新幹線用試作品）

す。一般に新幹線の緩衝ゴムの剛性は、在来線よりも高く設定されている。これに対応するため、試作品では、在来線用の既開発品の設計をベースとした上で、ゴムの配合変更および心棒の形状変更を行い、通常品と同等の静剛性を確保した。なお、試作品の車両取付け寸法は通常品と同じであるため、車両装荷にあたり、車両側の改造は不要であり、既存車両にも適用可能である。

ここで、試作品の剛性を確認するため、緩衝ゴム単体で加振試験を行い、軸直角方向（車両装着時の前後方向）の荷重と変位の関係を求めた。測定結果を図5に示す。図5における傾きが剛性に相当する。試作品では、中立位置（変位0）付近では傾きが小さいのに対し、変位が大きくなるにつれて、傾きが大きくなるのがわかる。なお、図5よりもさらに大きい変位では、通常品と同等の傾きとなることも確認した。この結果から、試作品の剛性が変位依存性を有することが示されたといえる。

次に、車両に取付けて使用する場合の検証項目の一つとして、車両偏い時などにおいて、台車と車体間に相対変位が生じた際、試作品ではゴムと心棒が分離するなどの不具合が懸念されることから、台車・車体間の最大左右変位を想定した条件における復元性を調査した。

試作品を一本リンクに組み込み、鉄道総研のダンパ試験装置により、緩衝ゴムの軸方向（車両装着時の左右方向）に変位を付与する試験を行い、緩衝ゴムの外観状態を観察するとともにゴムの変形量を測定した。付与する変位は、台車設計時の最大左右変位とボギー角の条件をもとに算出した51mmとした。図6に変位付与時の状

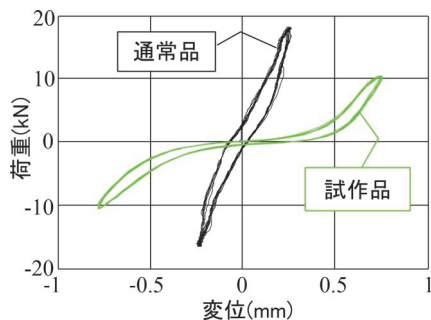


図5 荷重・変位特性（変位依存性緩衝ゴム）

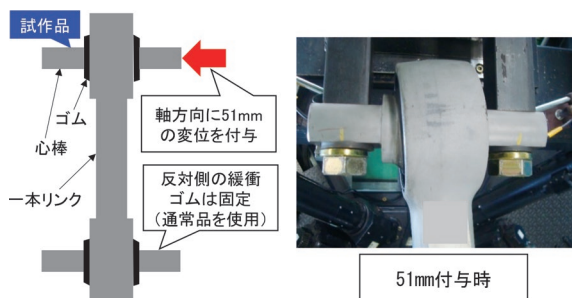


図6 車両偏いに対する復元性の確認

況を示す。試験の結果、ゴムと心棒が分離しないことやゴムの異常変形が認められなかったことから、車両偏いに対する復元性に問題はないと判断した。

### 3.2 メッシュばね

緩衝ゴムの特性変更によらない加振力伝達抑制デバイスとして、一本リンクおよびヨーダンパの車両取付け部に図7に示すメッシュばねを適用することを検討し、車両取付け用ボルトに貫通可能な形状の試作品を製作した。図7にはヨーダンパへの適用状況を示している。なお、試作品は厚さ（自然長）を10mmとし、一本リンク用の外径は49mm、内径は35mm、ヨーダンパ用の外径は45mm、内径は34mmとした。メッシュばねは、繊維状のステンレス鋼のワイヤを編みこみ、圧縮成型加工や波付け加工したものであり、防振ゴムなどにみられる硬化劣化がなく、さびにくいほか、繊維間の摩擦により一定の減衰を持つなど、通常の板状の金属にはない特徴を有する。このメッシュばねを取付け面に垂直に圧縮すると、変位が小さい領域では繊維間に隙間があるため剛性が低く、変位が大きくなるにつれて隙間が減少して徐々に剛性が高くなるため、図5に示す変位依存性緩衝ゴムと同様の特性を示すことが期待される。

ここで、実車両に適用する場合、メッシュばねは予め圧縮した状態で使用することになるが、その時の剛性は圧縮量によって変化すると考えられる。そこで、メッシュばねを一本リンクに適用することを想定した条件で、図5と同様の加振試験を行い、緩衝ゴムの軸直角方向の荷重と変位の関係を求めた。測定結果を図8に示す。なお加振試験では、図8に示す初期寸法を82.8mmから0.5mmずつ変更して測定を行った。試験の結果、初期寸法が大きい（予圧縮量が小さい）場合は、傾きが小さいのに対し、初期変位が小さくなるにつれて徐々に傾きが大きくなっていることなどがわかる。初期寸法が83.3mmや83.8mmでは、変位0付近の傾きは小さいが、変位が大きくなるにつれて傾きが大きくなる変位依存性が確認できる。この結果を踏まえ、後述する実車両による試験での初期寸法は、図8のうち紫色線に近い84.0mmとしてメッシュばねを使用した。



図7 メッシュばね（新幹線用試作品）

#### 4. 半車体条件による性能調査

試作品のうち、変位依存性緩衝ゴムについて、実車による検証試験に先立ち、半車体条件において台車装荷時の走行安定性を検証することにした。新幹線台車に試作品を組み込んだ一本リンクを取付けた状態で鉄道総研の車両試験台において蛇行動試験を行った。図9に試験の実施状況を示す。台車上には、半車体相当の荷重枠を載荷し、荷重枠にデッドウェイトを設けることで、台車を含めた質量を22.9tとした。また、蛇行動試験に加え、車体振動低減の可能性を調査するための加振試験も行い、車体に相当する荷重枠に3軸加速度センサを仮設し、振動加速度を測定した。

##### 4.1 走行安定性

試作品適用時において、400km/hまでの速度域で蛇行動が発生しないことを目標とし、蛇行動試験を行った。蛇行動試験では、車両試験台の軌条輪の回転速度を徐々に上げていき、5km/hまたは10km/hごとに軌条輪を左右方向に振幅±3mm、周波数1Hz、連続3波の正弦波により強制変位させ、その後の台車軸箱の左右変位により、蛇行動限界速度を判定した。

試験の結果、ヨーダンパを2本（台車の左右に1本ずつ）装荷した条件では、試験最高速度400km/hまでの速度域において、左右変位の発散による蛇行動の発生

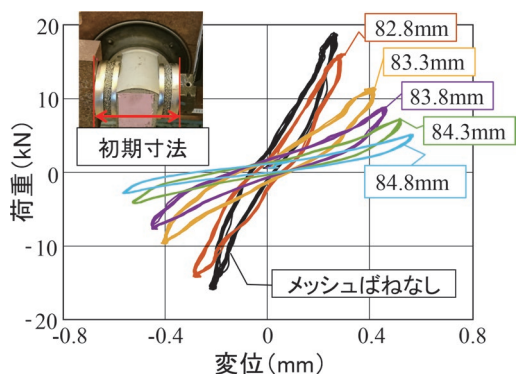


図8 荷重・変位特性（メッシュばね適用時）

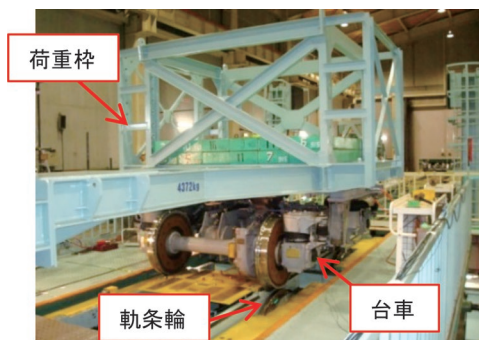


図9 半車体条件による車両試験台試験

がみられないことを確認した。

##### 4.2 振動低減効果

供試台車の一本リンクの緩衝ゴムについて、通常品を使用した場合と試作品を適用した場合を対象とし、実走行時の軸箱加速度を再現した波形による加振試験（以下、実走行模擬加振）を行い、荷重枠における前後、左右、上下方向の加速度を比較した。なお、車両試験台の軌条輪を上下と左右方向に同時変位する加振を行った。

図10に荷重枠における前後、左右、上下方向の加速度パワースペクトル密度（以下、PSD）を示す。通常品と比較すると、試作品では前後方向と上下方向において、5Hz以上の周波数域の加速度PSDが小さいことがわかる。変位依存性緩衝ゴムによって実現を目指す前後および上下方向の弾性振動低減の可能性が示されたといえる。なお、緩衝ゴムの軸方向に相当する左右方向については、通常品との差異はみられず、試作品適用による左右振動の増大は認められなかった。

#### 5. 試験車両による走行安定性の検証

4章の試験結果から、走行安定性の確保と、車体弾性振動低減の可能性が示されたことから、次に図11に示すダブルスキン構体の新幹線型試験車両に試作品を適用した条件で車両試験台試験を行った。

本章では、後位台車の一本リンクを対象とし、台車側と車体側の緩衝ゴムを変位依存性緩衝ゴムにした条件と、メッシュばねを車体側緩衝ゴムに適用した条件を設け、4.1節と同様の試験方法による蛇行動試験を行い、走行安定性を検証した。なお、本章の試験では、ヨーダンパ1本を故障状態とし、試験最高速度は360km/hとした。故障状態としたヨーダンパについては、ダンパ内に故意に空気を混入させ、減衰力が規格値の1/20程度であることを確認した上で蛇行動試験に使用した。

試験の結果、変位依存性緩衝ゴムを適用した条件とメッシュばねを適用した条件ではともに、試験最高速度とした360km/hまでの速度域において、台車軸箱の左右方向変位の発散は認められなかった。以上、実車による検証の結果、試作した変位依存性緩衝ゴムおよびメッシュばねを適用した場合の走行安定性については実用上問題ないものと判断した。

#### 6. 試験車両による振動低減効果の検証

試験車両に変位依存性緩衝ゴム、またはメッシュばねを適用した条件で、車両試験台による加振試験を行い、車体床面の上下振動加速度などを測定し、車体弾性振動低減効果を検証した。なお、変位依存性緩衝ゴムを適用

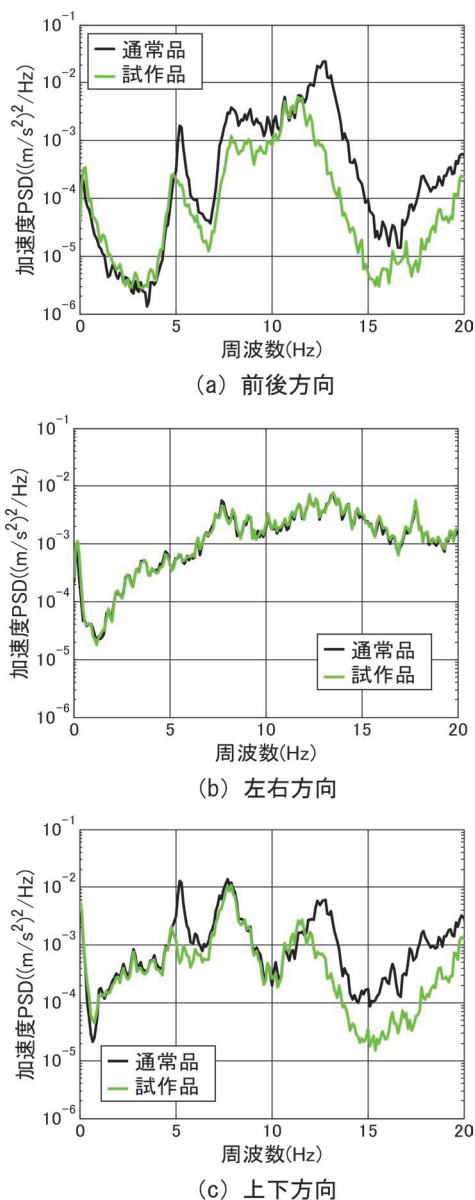


図 10 荷重枠の加速度 PSD (実走行模擬加振, 変位依存性緩衝ゴム適用条件)



図 11 新幹線型試験車両による車両試験台試験

した条件では、前位台車と後位台車の一本リンクの台車側と車体側の両方の緩衝ゴムを試作品にした。また、メッシュばねについては、前位台車と後位台車の一本リンク

の台車側と車体側の両方に試作品を適用した条件と、ヨーダンパの車体側のみに試作品を適用した条件を対象とした。

複数の加振条件で試験を実施したが、本報告では前後台車逆相ピッチング加振と走行速度 240km/h 相当時の実走行模擬加振の結果を示す。なお、前後台車逆相ピッチング加振は、前後方向の加振力による影響が大きく、試作品による車体振動低減効果が大きいと想定される条件であり、ランダム波を用いて 1 位と 4 位、2 位と 3 位の輪軸をそれぞれ同位相、1 位 (4 位) と 2 位 (3 位) は逆位相となるように車両を上下に加振した。

### 6.1 変位依存性緩衝ゴム適用条件

本節では、一本リンクの緩衝ゴムが通常品の場合と、変位依存性緩衝ゴムを適用した条件の比較結果を示す。

#### 6.1.1 前後台車逆相ピッチング加振

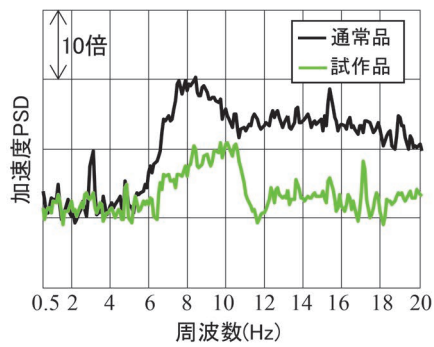
前後台車逆相ピッチング加振における中心ピン (一本リンクの車体側取付け部) の前後加速度の PSD と、前位台車上の車体床面における上下加速度の PSD を図 12 に示す。また、図 12(b) の凡例において dB を付した数字は、通常品と試作品適用時の乗り心地レベルの差を表し、負の値は試作品によって乗り心地が改善 (向上) したことを意味する。

図 12 より、試作品では通常品と比較した場合、中心ピンの前後方向において、広い周波数にわたり加速度 PSD が低減していることがわかる。車体床面の上下振動についても、7Hz 程度以上の周波数において加速度 PSD の低減がみられるとともに、乗り心地レベルについては 3dB 以上の低減を観測した。これより、変位依存性緩衝ゴムによって、台車から車体に伝達する前後加振力を抑制し、車体弾性振動が低減することを実車で確認した。

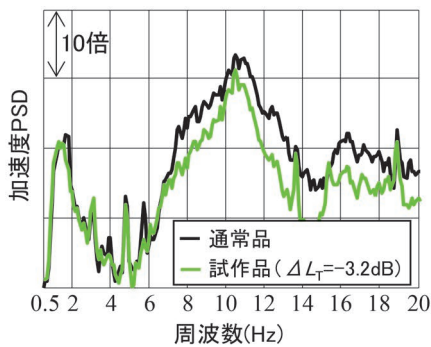
#### 6.1.2 実走行模擬加振

実走行模擬加振の結果として、図 12(b) と同じ、前位台車上における車体床面の上下加速度 PSD を図 13 に示す。また、図 13 の凡例には通常品と試作品の乗り心地レベルの差をあわせて示す。

図 13 では、試作品によって 13.3Hz 付近にみられるピーク値が低減していることがわかる。この周波数は、図 2 において赤色丸印で示した前後台車の逆相ピッチング成分が極大となる周波数に一致することから、試作品がこれに起因する加振伝達の抑制に有効であることが示されたといえる。なお、乗り心地レベルによる評価では、改善効果は限定的であった。これは、10.7Hz 付近のピーク値が、試作品において微増したことによる影響と考えられ、車体上下振動と台車前後振動系の共振点に近い場合に成立する台車枠質量による動吸振器効果<sup>11)</sup>が関係していると推察する。通常品では、両共振点が近



(a) 中心ピン（一本リンク車体側取付け部）前後



(b) 床面上下（前位台車上）

図 12 加速度 PSD（前後台車逆相ピッチング加振，変位依存性緩衝ゴム適用条件）

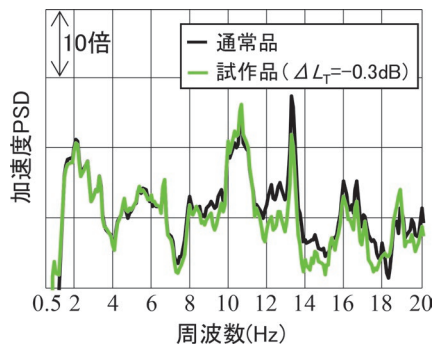


図 13 床面上下加速度 PSD（前位台車上，実走行模擬加振，変位依存性緩衝ゴム適用条件）

接した条件となり，それによって車体上下振動が低減していたと考えられる。それに対し，試作品では，両共振点の差が大きくなり，通常品において構成されていた動吸振器効果による影響が減少し，結果として通常品よりも車体上下振動が大きくなったものと考えている。

## 6.2 メッシュばね適用条件

本節では，一本リンクまたはヨーダンパにメッシュばねを適用した条件と，通常条件（メッシュばね無し）を比較した結果を示す。

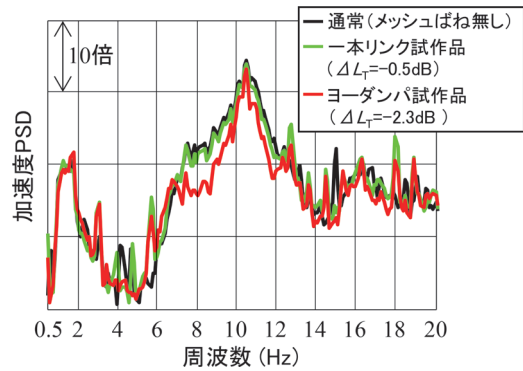


図 14 床面上下加速度 PSD（前位台車上，前後台車逆相ピッチング加振，メッシュばね適用条件）

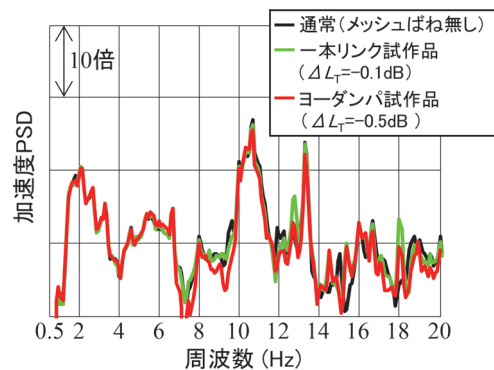


図 15 床面上下加速度 PSD（前位台車上，実走行模擬加振，メッシュばね適用条件）

### 6.2.1 前後台車逆相ピッチング加振

前後台車逆相ピッチング加振の結果として，前位台車上の車体床面における上下加速度 PSD を図 14 に示す。また，図 14 の凡例には通常条件と試作品適用時の乗り心地レベルの差をあわせて示す。

通常条件と比較すると，試作品をヨーダンパに適用した条件では，7～15Hz 付近において加速度 PSD の低減がみられ，乗り心地レベルでは 2dB 以上の低減を観測した。なお，試作品を一本リンクに適用した条件では，乗り心地レベルの低減量も 0.5dB に留まり，ヨーダンパに適用した条件と比べて効果が小さい結果であった。試作品を一本リンクまたはヨーダンパに適用した場合の振動低減効果の大小関係については，車両や加振条件によっても変化するため，この点については，今後引き続き検証を進め，メカニズムの解明を目指す考えである。

### 6.2.2 実走行模擬加振

実走行模擬加振の結果として，前位台車上の車体床面における上下加速度 PSD を図 15 に示す。また，図 15 の凡例には，通常条件と試作品適用時の乗り心地レベルの差をあわせて示す。

図 13 に示した変位依存性緩衝ゴム適用時と同様，試作品適用による広い周波数域にわたる大幅な振動低減効

果はみられないが、前後台車の逆相ピッチング成分が極大となる 13.3Hz 付近のピークに着目すると、通常条件よりもヨーダンパに試作品を適用した条件の方が、ピーク高さが小さいことがわかる。これより、メッシュばねについても変位依存性緩衝ゴムと同様、前後加振力の伝達抑制効果を有することを確認した。なお、広い周波数域にわたって振動低減効果が得られていないのは、2章で説明した通り、一本リンクやヨーダンパ以外にも振動伝達経路が存在し、図 1(a) のメカニズムに起因する振動に対しては試作品適用による低減効果は期待できないことなどによるものと推察する。

## 7. おわりに

車体弾性振動低減を目的とした台車・車体間の前後加振力伝達抑制デバイスとして、在来線用に開発を進めていた変位依存性緩衝ゴムを新たに新幹線に適用することを提案し、一本リンク用の試作品を製作した。また、緩衝ゴムの特性変更によらない手法として、金属系ばねの一種であるメッシュばねを提案し、新幹線の本一リンクとヨーダンパに適用可能な試作品を製作した。走行安定性を検証するため、鉄道総研所有の新幹線型試験車両に試作品を適用し、ヨーダンパの故障を模擬した条件で蛇行動試験を行った結果、試験最高速度とした 360km/h までの速度域において、走行安定性に問題がないことを確認した。また、車体振動低減効果を検証した結果、台車からの前後加振力の影響が大きい加振条件において、車体弾性振動の加速度パワーが低減することを確認した。

以上、実車適用時の測定結果より、提案した前後加振力伝達抑制デバイスの有効性が示されたが、実走行を模擬した加振条件における乗り心地レベルによる評価では改善効果が限定的であったことから、デバイスの剛性などの適値について、今後検討を進める考えである。

## 文献

1) 谷藤克也：鉄道車両とアクティブ制振技術，精密工学会誌，

Vol.73, No.4, pp.426-429, 2007

- 2) Koyanagi, S., "A Design Method for the Vibration Isolation System of an Air Spring Suspended Vehicle," Quarterly Report of RTRI, Vol.32, No.1, pp.2-7, 1991.
- 3) 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 山之口学, 東義之, 鈴木和馬：輪軸の質量アンバランスに起因する鉄道車両の車体振動抑制, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.77, No.780, pp.3078-3093, 2011
- 4) Aida, K., Tomioka, T., Akiyama, Y., Takigami, T., "Development of Displacement-dependent Rubber Bush for Yaw Damper to Prevent Carbody Vertical Vibration," Quarterly Report of RTRI, Vol.58, No.3, pp.182-188, 2017.
- 5) 瀧上唯夫, 秋山裕喜, 相田健一郎：変位依存性緩衝ゴムによる車体振動低減効果（振子式特急電車走行試験結果）, 第 27 回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2020), No.S4-1-2, 2020
- 6) 青野絵里奈, 松岡太一, 富岡隆弘, 瀧上唯夫：高振動数の振動絶縁機能を付与したヨーダンパの開発（ピストンヘッドにプラスチックを用いた場合）, 日本機械学会機械力学・計測制御講演論文集 (D&D2015), No.329, 2015
- 7) 相田健一郎, 瀧上唯夫, 秋山裕喜, 横田耕伸：乗り心地向上に向けた新幹線向け変位依存性緩衝ゴム, 第 28 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2021), No.SS4-1-3, 2021
- 8) 瀧上唯夫, 秋山裕喜, 横田耕伸, 佐藤康頼, 朝比奈峰之：メッシュばねを用いた前後加振力伝達抑制による車体弾性振動低減, 第 26 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019), No.S4-1-4, 2019
- 9) 菅原能生, 三宮大輝, 宮原宏平, 天野歩：1 次および 2 次ばねの可変減衰ダンパを用いた鉄道車両の上下振動低減, 第 28 回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2021), No.SS1-3-3, 2021
- 10) 日本機械学会編：鉄道車両のダイナミクスとモデリング, 日本機械学会, pp.122-126, 2017
- 11) 富岡隆弘, 瀧上唯夫：台車との相互作用を利用した鉄道車両の車体上下曲げ振動低減法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.70, No.696, pp.2419-2426, 2004