

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

輪軸の質量アンバランスによる車体上下振動を低減する

鉄道車両の上下振動の発生要因の一つとして、輪軸（車輪と車軸の組）の質量アンバランスが指摘されており、その影響によって、車両の乗り心地が低下する場合があります。この問題は古くから知られていましたが、近年、より快適な乗り心地をお客さまに提供するために、輪軸の質量アンバランスによる車体の上下振動を増大させない対策が求められています。ここでは、輪軸の質量アンバランスが車体の上下振動に及ぼす影響や、振動低減策として開発に取り組んでいる変位依存性緩衝ゴムについて紹介します。

はじめに

車体の上下方向の振動が、ある特定の走行速度で、大きくなるような事象が確認されています。原因は状況によるため一概にはいえませんが、輪軸

の質量アンバランス（※参照）による影響が関係している場合があります¹⁾。この影響による車体振動は、車輪の回転周波数と車体の上下方向の曲げ振動（※参照）の固有振動数が一致あるいは近接するような条件で大きくなる点を特徴としています。人間が上下振動を感じやすいといわれている周波数（4～8Hz）で発生する事例も確認されており、乗り心地への影響も少なくないことがわかっています。

国内では、1970年代後半から、この問題が取りあげられるようになり²⁾、1980年代には、国鉄において、車輪のアンバランスの規制に関する考え方が示されました。そこでは、図1に示すように、車輪のアンバランス量に



相田 健一郎
Ken-ichiro Aida
車両構造技術研究部
車両振動研究室
副主任研究員
【専門分野】車体構造、
車両振動



瀧上 唯夫
Tadao Takigami
車両構造技術研究部
車両振動研究室
主任研究員（上級）
【専門分野】振動工学、
制御工学、車体弾性振
動、振動解析



秋山 裕喜
Yuki Akiyama
車両構造技術研究部
車両振動研究室
研究員
【専門分野】機械力学、
振動工学、車体弾性振
動、振動解析



富岡 隆弘
Takahiro Tomioka
元 車両構造技術研究部
車両振動研究室
室長
【専門分野】機械力学、
振動工学、車体弾性振
動、車体構造

※ 輪軸の質量アンバランス

形状や質量分布などの影響で回転する物体（回転体）の重心が回転軸からずれていることをアンバランス（不釣り合い）と呼び、その大きさ（アンバランス量）は、回転体の質量と、回転体の重心と回転軸からのずれ（偏心量）の積によって表されます。なお、国内の在来線における車輪の静的アンバランス量は、通常 25kg・cm 以下となるように管理されています¹⁾。車輪単体の状態に加えて、車軸に車輪などを取り付けた輪軸全体でのアンバランス量を管理する必要があります。

※ 車体の曲げ振動

車体自体がたわみ変形することによる振動であり、びりびり細かい振動として知覚されることから、びりびり振動とも呼ばれています。曲げ振動は、その固有振動数によって、さまざまな振動形状を有しますが、そのうち、車体の中央付近で振幅が最大となる形状をもつ上下曲げ振動が乗り心地に与える影響が大きいことが多く、その低減が求められています。

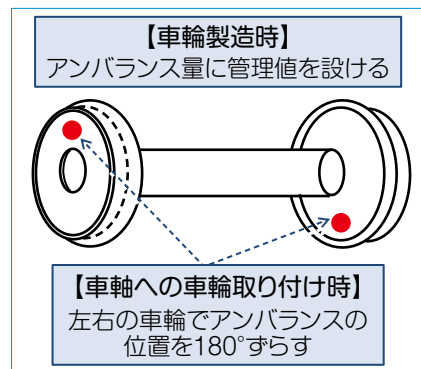


図1 輪軸のバランス管理

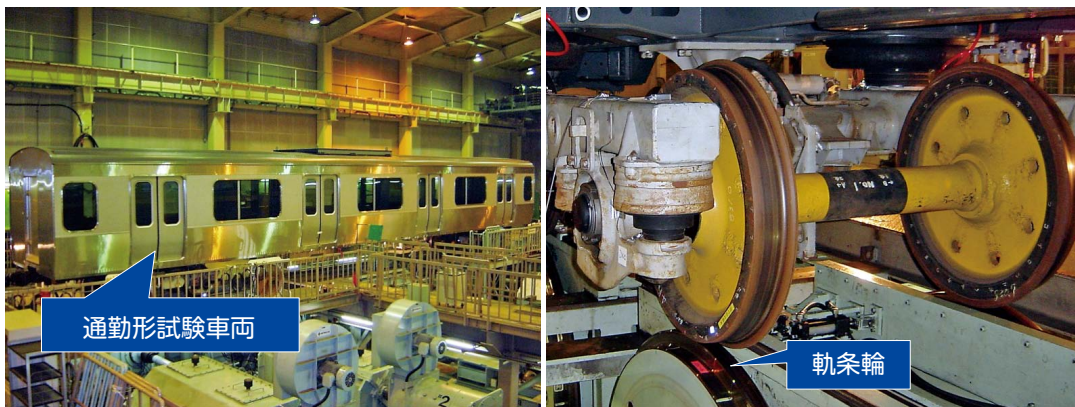


図2 通勤形試験車両による車両試験台試験

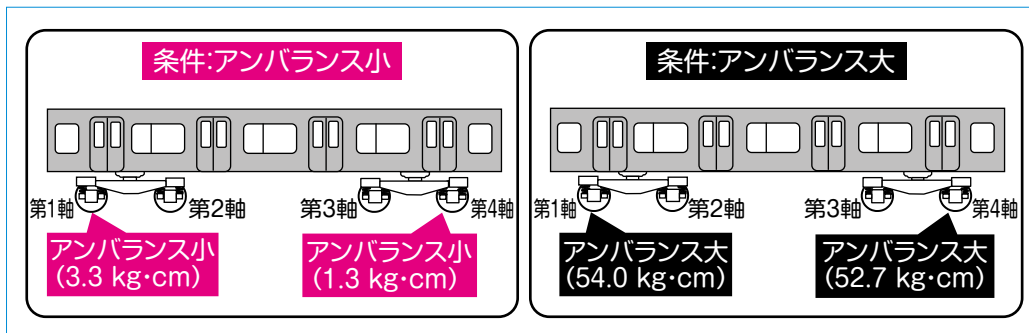


図3 アンバランス量の条件

管理値を設け、製造段階でその測定を行うことや、車軸に車輪を取り付ける時にはアンバランスの位置を180°ずらす(逆位相にする)ことなどが提案され、以降、今日に至るまでこれに沿った管理が行われています。一方で、理由は必ずしも特定できていませんが、車両の運用中にアンバランス量が増える場合があります。乗り心地の低下につながる事例なども確認されています。そのため、輪軸の質量アンバランスによる車体上下振動は、現在でも、乗り心地の観点から、改善が求められる課題となっています。

ここでは、輪軸の質量アンバランスが車体の上下振動に及ぼす影響や、振動低減策として開発に取り組んでいる変位依存性緩衝ゴム³⁾⁴⁾について紹介します。

輪軸の質量アンバランスが車体上下振動に及ぼす影響

最初に、輪軸の質量アンバランスと車体上下振動の関係を調べた試験結果

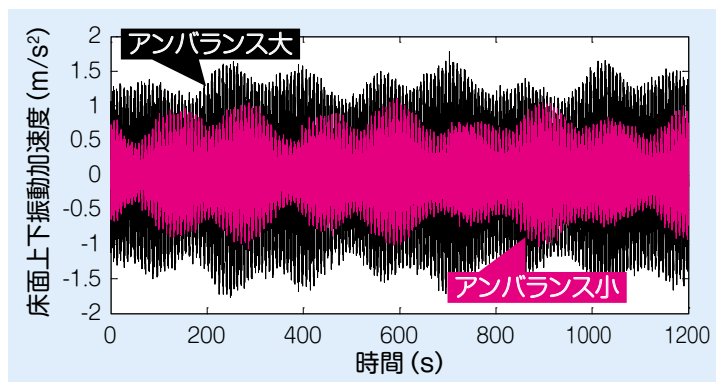


図4 車両試験台試験における車体床面上下振動測定結果

について紹介します。

図2に示す鉄道総研が所有する試験車両(通勤形車両)を使用し、車両試験台の軌条輪の回転による模擬走行試験を行いました。試験車両には、アンバランス量を変えることができる輪軸を2軸装着し、図3に示すように、アンバランス量が小さい条件と大きい条件を設け、両者の車体の上下振動を比較することにしました。なお、車両試験台は、左右や上下方向などに車両を加振することによって軌道変位による影響などを調べることができます。ただ

し、この試験では、車輪の回転による振動に着目するため、左右や上下方向などの加振は行わないことにしました。

ここでは、車輪の回転周波数と、車体の上下方向の曲げ振動の固有振動数がほぼ一致する条件であった速度124km/hにおける試験結果を示します。図4は、床面(車体中央部)上下方向の振動加速度を20分間(1200秒)測定した結果を示しています。この図から、アンバランスが大きい方が、車体上下振動も大きくなるのがわかります。車体上下振動を増大させないた

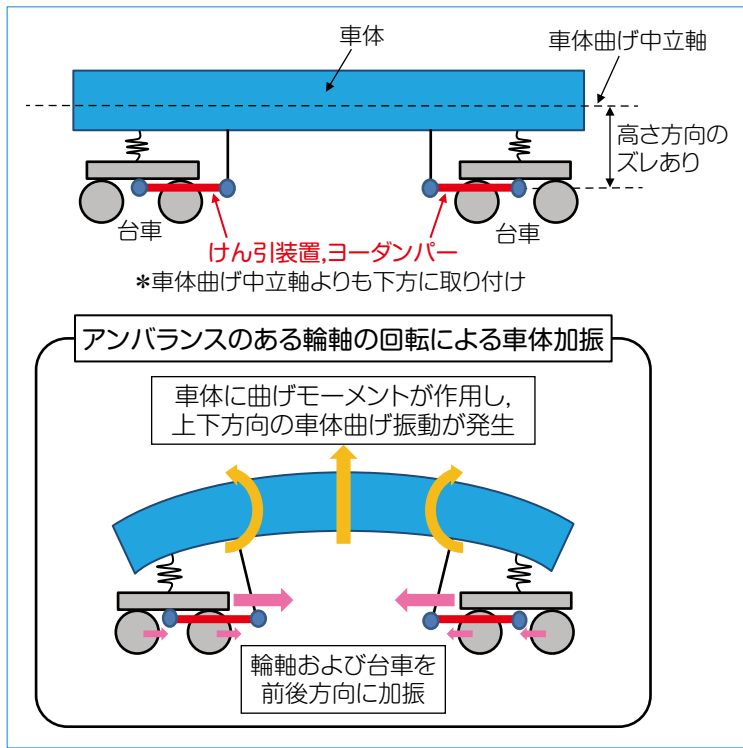


図5 輪軸の質量アンバランスによる車体加振のメカニズム

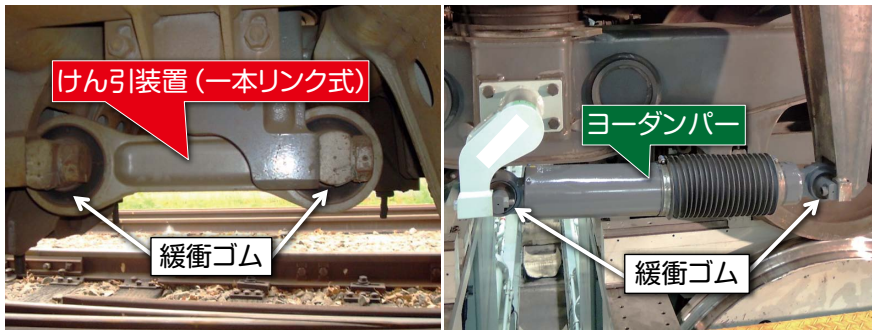


図6 台車・車体間の前後方向結合部材

めには、アンバランス量を小さくすることが重要であること、またその管理の必要性を確かめることができました。

なお、図4では、加速度の振幅が大きくなったり、小さくなったりを繰り返す様子が確認できます。これは、各輪軸間のアンバランスの位置関係が変化することによる影響であり、それぞれの車輪径が完全に同じでないことなどが関係しています。

加振メカニズムに基づく振動低減策の検討

輪軸に一定の質量アンバランスがあっても車体上下振動を増大させない対策が必要と考え、その検討に取り組

みました。対策の検討にあたっては、次に示す車体の加振メカニズムに着目しました(図5)⁵⁾。

アンバランスがある輪軸が回転すると、輪軸に遠心力が発生し、輪軸や台車を前後方向に加振することになります。これにともなう台車の前後振動は、台車と車体の間に前後方向に取り付けられている図6に示すけん引装置やヨーダンパー(参照)を通して車体に伝わり、車体を前後方向に加振



図7 変位依存性緩衝ゴム (ヨーダンパー用)

します。このとき、けん引装置やヨーダンパーは、車体曲げの中心線(中立軸)よりも下側にあるため、台車から車体に伝わる前後方向の力は車体に曲げモーメントとしても作用し、これによって車体の上下方向の曲げ振動が生じると考えられます。

このメカニズムを踏まえた上で、汎用性や製作コストなどの点を考慮した結果、けん引装置やヨーダンパーの両端部に使用されている「緩衝ゴム」を利用する対策を考えることにしました。

変位依存性緩衝ゴムの開発

車体の曲げ振動が問題になる5Hz程度以上の周波数における台車と車体間の相対変位は、きわめて小さいと考えられます。そこで、微小な振幅の振動を車体に伝えにくくする構造をもつ緩衝ゴムを検討した結果、緩衝ゴムのピン(車両取り付け金具)とゴムの間に微小な隙間を設けることにしました。図7には、この構造を取り入れたヨーダンパー用の緩衝ゴム⁴⁾を示しています。これまでに、ヨーダンパー用と、一本リンク式けん引装置用の緩衝ゴムを製作しています³⁾。この緩衝ゴ

ヨーダンパー

高速走行する車両では、台車だ行動を抑制し、走行安定性を向上する目的で、台車と車体間にヨーダンパーと呼ぶオイルダンパーを取り付けています。新幹線車両だけでなく、在来線車両でもヨーダンパーを装備する場合があります。

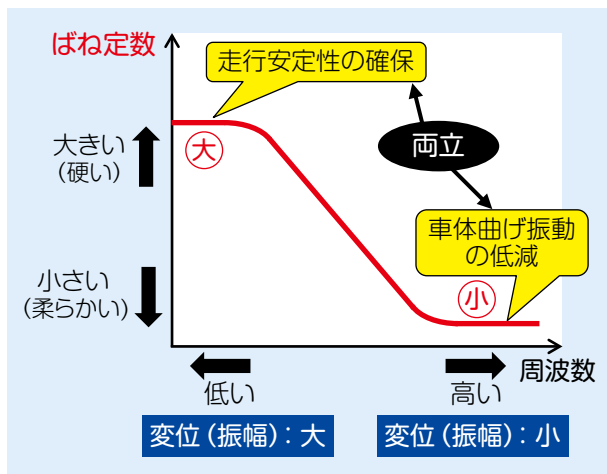


図8 変位依存性緩衝ゴムのばね特性

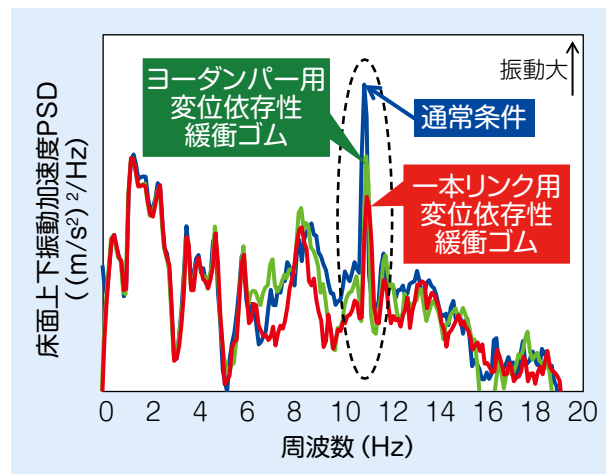


図9 走行試験結果 (走行速度107 km/h)

ムでは、微小な隙間によって、振幅の小さな台車振動を絶縁する効果をもたらします。なお、だ行動発生時や加減速時では、台車と車体間の相対変位が大きく、隙間がつぶれることによって、ヨーダンパーやけん引装置による力の伝達が可能となるため、走行安定性を損なうことはありません。台車と車体間の相対変位によって異なる特性をもつことから、「変位依存性緩衝ゴム」と呼ぶことにしました。

図8には、変位依存性緩衝ゴムの周波数に対するばね定数の変化を示しています。ゴムの剛性(硬さ)は周波数によって異なり、通常の緩衝ゴムは一般に、周波数が高いときには剛性も高くなる(ばね定数が大きくなる)といわれています。それに対して変位依存性緩衝ゴムでは、周波数が低く変位が大きい時には、隙間がつぶれることによって通常の緩衝ゴムと同じような大きなばね定数をもつのに、周波数が高く変位が小さい時にはばね定数が小さいという特徴を有しています。なお、変位依存性緩衝ゴムの製造方法や、製作品のばね定数の測定結果、また、変位依存性緩衝ゴムを装着した台車の走行安定性に関する検証試験結果も報告³⁾⁴⁾していますので、そちらもご覧ください。

走行試験による車体上下振動低減効果の検証

変位依存性緩衝ゴムによる車体上下振動低減効果を検証するため、営業線で特急電車による走行試験を行いました⁴⁾。通常の緩衝ゴムを使用した場合(通常条件)、ヨーダンパー用変位依存性緩衝ゴムを使用した場合および一本リンク用変位依存性緩衝ゴムを使用した場合の3つの条件について、同じ区間を同じ速度で走行した時の車体の上下振動を比較しました。ここでは車輪の回転周波数と、車体の上下方向の曲げ振動の固有振動数がほぼ一致する条件であった走行速度107km/hにおける結果を紹介します。

図9に車体中央部における床面上下振動加速度のパワースペクトル密度(PSD)を示します。なお、加速度PSDは、周波数ごとの振動の強さを表しています。11Hz付近に顕著なピークがみられることがわかります。この周波数は車輪の回転周波数に一致し、またそのピークの高さには、輪軸の質量アンバランスによる影響が表れていることがわかっています。

通常条件とヨーダンパー用変位依存性緩衝ゴム使用時におけるこのピークの高さを比べると、ヨーダンパー用変位依存性緩衝ゴム使用時の方が、低いことがわかります。また、一本リンク

用変位依存性緩衝ゴム使用時でも同様の傾向がみられることがわかります。この結果は、輪軸の質量アンバランスによる車体の上下振動に対して、変位依存性緩衝ゴムが、その増大の抑制に有効であることを表しているため、目標とした効果が得られていることを確認することができました。

おわりに

変位依存性緩衝ゴムは、既存車両にも適用可能であり、低コストな振動低減策の一つになる可能性があると考えています。実用化を目指し、今後は、耐環境性に関する検証などに取り組んでいく予定です。[RRR]

文献

- 1) 高速車両用輪軸研究委員会編:鉄道輪軸, 丸善プラネット, pp.210-213, 2008
- 2) 日本機械学会編:鉄道車両のダイナミクス, 電気車研究会, pp.15-20, 49-51, 1996
- 3) 富岡隆弘, 瀧上唯夫: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
- 4) 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ー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
- 5) 小柳志郎:輪軸不平衡による車体前後及び曲げ振動の防止法, 鉄道技術研究資料, Vol.39, No.2, pp.59-65, 1982