

鉄道車両用台車の軸箱支持装置を中心とした防振技術の動向調査

明星大学 理工学部総合理工学科 機械工学系 教授 石田 弘明

1. 調査研究の目的

現在、世界中で高速鉄道の建設が積極的に進められている。安全・安定輸送を維持し、さらなる速度向上を実現するには、インフラの整備とともに、走行安定性と曲線通過性能の両立を図った鉄道車両の開発が不可欠である。すでに 300 km/h を超える高い速度で営業運転が行われている背景には、運動解析や設計・製造の技術の向上とともに、優れた防振性能を実現する要素の開発が絶え間なく続けられてきたという事実があると考えられる。そこで、高速走行を可能にした鉄道車両の台車、特に軸箱支持装置に着目して、これまでどのような構造や要素が採用されてきているのかを改めて調査、整理し、将来の台車開発と防振性能向上に資する知見を得ることを目的とする。

2. 台車の進化—特に軸箱支持装置の構造について—

1832年にアメリカで蒸気機関車の先輪として実用化された鉄道車両用台車は、すぐに客車にも導入され、瞬く間に世界中へ普及した⁽¹⁾⁽³⁾。当初の軸箱支持装置は、馬車から発展した2軸車・3軸車の軸受装置と重ね板ばねを使用するペDESTAL (pedestal: 軸箱もり) 式のシンプルなものであった。ペDESTAL 式の軸箱支持装置は、軸箱と軸箱もりとの間に遊間を設けた構造で、軸箱が台車枠に対し前後、左右、上下に相対運動可能となっている。

防振ゴムの使用は日本では主に軍事上の目的で戦前から始まり⁽⁴⁾、蛇行動の研究が進んだ戦後の1948年には、ペDESTALの遊間をなくして防振ゴムを使用した軸はり式の軸箱支持装置が川崎車両のOK1形台車や三菱重工のMD1形台車に初めて採用された⁽⁵⁾。そして、我が国の各種産業が復興・発達した1950年代以降、欧州の鉄道車両やアメリカの路面電車に用いられている台車の様々な技術が技術提携という形で導入され、防振ゴムが鉄道車両用台車に広く使用されるようになった⁽⁶⁾。1964年に開業した東海道新幹線の最初の車両である0系新幹線電車が、板ばねの端部にゴムブッシュを挟んだIS式の軸箱支持装置を有する台車を採用したことはよく知られている⁽⁷⁾。

日本および海外の代表的な高速車両の軸箱支持装置と営業最高速度を表1に示す⁽⁷⁾⁽¹⁷⁾。表1より、いずれの車両もゴムを使用した軸箱支持装置を採用し、台車枠に対して軸箱を弾性支持していることがわかる。また、シェブロン (chevron, 積層ゴム) 式のX2 (X2000 / SJ2000) 以外は、すべて上下荷重を支える軸ばねにはコイルばねを用い、軸箱の前後・左右支持にゴムを利用している。

一般に軸箱前後・左右支持剛性 (ばね定数) を大きくするほど、蛇行動限界速度は高くなる⁽¹⁸⁾。しかし、軸箱を剛支持すると輪軸の自己操舵機能が抑えられるため、曲線通過時のアタック角が大きくなり横圧が増大する。特に2軸ボギーでは、曲線を滑らかに走行するために台車内の前後2軸がラジアル位置に近づくよう軸箱前後支持剛性を小さくする必要がある。台車の設計時には、このような相反する条件を考慮したうえで最適な支持剛性を選定するが、新幹線などの高速車両の場合は蛇行動防止を優先して軸箱支持剛性を大きくし、走行する線区の軌道の最小曲線半径を在来線より大きくして対応しているのが

現状である。当然ながら、高速車両においても曲線通過時のアタック角をさらに小さくできれば、脱線に対する安全性が向上し、軌道不整の進展、車輪・レールの摩耗、騒音などを今まで以上に抑制することができる。

表1 日本および海外の代表的な高速車両と台車の軸箱支持装置

国名	車種	軸箱支持装置	営業最高速度 ^{注)} (km/h)	備考
ドイツ	ICE1, ICE2	ゴム併用板ばね式	280	
	ICE3, ICE3M	軸はり式	320	
イギリス	Class395	軸はり式	225	
フランス	TGV-PSE	円筒ゴム式・軸ばね	300	
	TGV-A	軸はり式	300	
	TGV-R, TGV-D	軸はり式	320	
フランス/ベルギー /オランダ/ドイツ	TGV PBA/PBKA (thalys)	軸はり式	300	
イタリア	ETR500	リンク式・軸ばね	300	
	ETR460, ETR600	リンク式・ウイングばね	250	
	ETR575 (italo)	円筒ゴム式・軸ばね	300	AGV タイプ
ポルトガル	Class4000 (Alfa Pendular)	リンク式・ウイングばね	220	ETR460 ベース(車体傾斜あり)
ロシア	Velaro RUS	軸はり式	250	ICE3 タイプ
フィンランド/ロシア	Allegro Sm6	リンク式・ウイングばね	220	ETR600 ベース(車体傾斜あり)
スペイン	AVE S103	軸はり式	300	ICE3 タイプ
	AVE S104	リンク式・ウイングばね	250	ETR460 ベース(車体傾斜なし)
	Alvia S120	リンク式	250	CAF BRAVA (軌間可変電車)
	AVE S102, Alvia S130	(1 軸独立車輪)	300	Talgo タイプ
スウェーデン	X2 (X2000/SJ2000)	積層ゴム式	200	
中国	CRH1	軸はり式	250	Regina C2800 タイプ
	CRH2	ゴム併用板ばね式	300	E2 系 1000 番台タイプ
	GRH3	軸はり式	300	ICE3 タイプ
	CRH5	リンク式・ウイングばね	250	ETR600 ベース(車体傾斜なし)
	CRH380	軸はり式	310	
日本	200 系	IS 式	275	1982 年 -2013 年
	500 系	軸はり式	285 (300)	() は 1997 年 -2010 年
	N700, N700A	円筒ゴム式・ウイングばね	300	
	N700 7000 番台 /800 系	軸はり式	300/260	
	E2 系 -E7 系, W7 系	ゴム併用板ばね式	320	320km/h は E5 系
韓国	KTX 山川	軸はり式	305	TGV タイプ
台湾	700T	軸はり式	300	700 系タイプ

注) 2014 年 10 月現在

※ 表に記載した以外に、オーストリア、チェコ、デンマーク、スイス、トルコ、アメリカ合衆国でも営業最高速度 200 km/h 以上の高速列車を運行している。

3. 台車の軸箱支持装置に関する近年の研究開発

鉄道車両用台車の軸箱支持装置に関する近年の研究開発状況を把握するため、2012年に第1回、2014年に第2回が開催された鉄道技術に関する国際会議 Railways 2012 および、Railways 2014 (International Conference on Railway Technology) で講演発表が行われた論文を調査した。この会議はまだ歴史は浅いが、欧州を中心に世界中から多くの講演論文 (Railways 2012 : 205 件, Railways 2014 : 330 件) を集めており、大学からの参加者も多いため、鉄道に関する研究開発の動向を知るのに適していると考えられる。

高速車両の開発、特に台車の軸箱支持装置に係る研究論文は、次の3件であった。各論文の概要については、報告書の本編に記す。

■ Railways 2014

- (1) Application of Semi-Active Control Strategies in Bogie Primary Suspension System, S. M. Mousavi Bideleh and V. Berbyuk, Chalmers University of Technology, Sweden, Railways 2014, Paper 318

= 台車の1次ばねへのセミアクティブ制御の適用：MRダンパ (Magneto-Rheological damper) を、軸箱を支えるばねと並列に取り付けた場合の鉄道車両の運動性能向上に関する解析的な研究。

■ Railways 2012

- (2) Novel Rail Vehicle Concepts for a High Speed Train: The next Generation Train, J. Winter, German Aerospace Center (DLR), Germany, Railways 2012, Paper 22

= 新しい高速列車のコンセプト：ドイツ航空宇宙センターが2007年から開始したNGT (Next Generation Train) プロジェクトの目標と進捗状況。台車は独立車輪・独立駆動方式の1軸台車。

- (3) Mechanical Semi-Active Control for Radial Steering Curving of Railway Vehicles, H. Wang and G. Shen, Tongji University, China, Railways 2012, Paper 59

= 鉄道車両の曲線におけるパーフェクトステアリングのための機械式セミアクティブ制御：走行速度90 km/hを境に軸箱前後支持剛性を切り替えた場合の解析的な研究。液体封入ゴムブシュと機械式速度センサーでのシステム構成を想定。

上記のほか、InnoTrans 2014に出展していたFreudenberg Schwab Vibration Control GmbH & Co. KGが軸箱支持用液体封入ブシュHALLの開発と耐久走行試験結果を雑誌に掲載している⁽¹⁹⁾⁽²¹⁾。詳細な構造は明らかにされていないが、ゴムブシュ内に液室と流路があり、加振周波数に応じてばね定数が大きく2段階に変化する軸箱支持装置用のブシュである。このコンセプトは、鉄道車両が曲線区間を走行するときの輪軸のヨーイングは0.1 Hz程度の低周波振動に相当し、高速走行時の輪軸蛇行動は3 Hz以上の高い周波数と考えられることから、軸箱前後支持剛性を低周波域で小さく、高周波域で大きくするというものである。

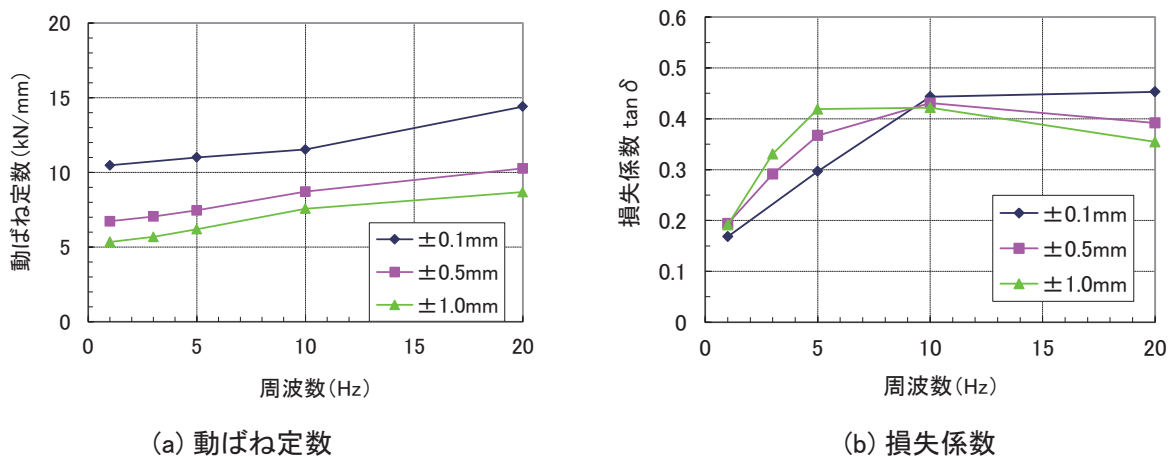
もう一つの方法は、我々が進めている軸箱前後支持への減衰付加である。空間から弾性支持された1輪軸の転走モデルにより、新幹線車両を想定した諸元を用いて安定性解析を行った結果、以下の可能性があることがわかった⁽²²⁾。

・現状の蛇行動限界速度を維持したまま軸箱前後支持剛性を8割から半分にするには、軸箱左右支持

剛性を変えずに、減衰比を 0.5 ～ 1.0 程度の値にする必要がある。

- ・ 軸箱前後支持剛性を下げつつ減衰を付加した場合には、車輪踏面の摩耗等により等価踏面勾配が増大したときの蛇行動限界速度を、現状のばね支持のみの場合より高い値に維持することができる。

2014 年度に株式会社フコク殿の協力を得て試作・評価試験を実施した液体封入防振ゴム⁽²³⁾の動特性の例を図 1 に示す。液体封入防振ゴムは加振周波数の増加とともに動ばね定数も増加する防振ゴムの望ましい特性を維持しながら、損失係数をゴムのみの場合の 4 倍程度まで増やすことが可能である。なお、液体封入による減衰の増加量や加振周波数、振幅に応じた動特性の変化は、流路の断面積と長さ、液体の粘度により変化する。前述の大きな減衰比を実現するには、これらのパラメータの変化と動特性の関係をさらに詳しく調べる必要がある。また、製造コストの低いできるだけ単純な構造とすることが、高減衰ゴムブッシュを実用化するうえで考慮しておかななくてはならない重要な条件である。



※ 凡例は加振振幅を示す。

図 1 液体封入防振ゴムの動ばね定数，損失係数測定結果例

4. まとめ—軸箱支持装置開発の今後の方向—

さらなる速度向上や持続可能な鉄道の実現を目指し、走行安定性と曲線通過性能を両立する高速車両用台車を開発する方法として、以下の三つが考えられる。

- (1) 操舵台車や操舵機構を持つ独立車輪台車を導入する（アクティブ制御を含む）。
- (2) 軸箱支持装置の前後支持剛性を切り替える。
- (3) 軸箱支持装置の前後支持剛性を下げて減衰を付加する。

(1)「操舵台車」は、一般に部品点数が多く構造が複雑で、製造及びメンテナンスのコストが高くなりがちである。したがって、今後の方向として注目されるのは、現状の台車の構造をほとんど変えずに軸箱支持装置の特性を変える(2)、(3)の方法であろう。(2)「軸箱支持剛性の切替え」については、具体的な切替え条件として、

- ・ 走行線区・・・新在直通車両，軌間可変電車など
- ・ 走行速度・・・一般車両全般，新在直通車両，軌間可変電車など
- ・ 加振周波数・・・一般車両全般，新在直通車両，軌間可変電車など

がある。特に加振周波数を利用する方法は、周波数が低く振幅が大きい場合に柔らかくなる防振ゴムの特性を活かした要素開発が期待できる。現在使用しているゴムブシュを置き換えるだけで良い点も有利である。(2) および (3) 「軸箱支持への減衰付加」を実現する防振要素としては、液体封入ゴムブシュが有望であり、流路や流体を工夫することで理想的なばね定数とより大きな減衰を実現できる可能性がある。

文 献

- (1) 小泉智志, 台車技術の系譜 (1), 鉄道車両と技術, No.121 (2006), pp.08-14, レールアンドテック出版.
- (2) 近藤喜代太郎, アメリカの鉄道史 - SL がつくれた国 -, 成山堂書店 (2008), pp.176-240.
- (3) 鉄道の百科事典編集委員会, 鉄道の百科事典, 丸善 (2012).
- (4) 中根之夫編, ばね・緩衝器・ブレーキ, 誠文堂新光社 (1966), pp.99-137.
- (5) 小泉智志, 台車技術の系譜 (2), 鉄道車両と技術, No.122 (2006), pp.17-28, レールアンドテック出版.
- (6) 小泉智志, 台車技術の系譜 (3), 鉄道車両と技術, No.123 (2006), pp.35-44, レールアンドテック出版.
- (7) 高速鉄道研究会編, 新幹線 - 高速鉄道の技術のすべて -, 山海堂 (2003).
- (8) 海外鉄道技術協力協会, 新幹線と世界の高速度鉄道 2014, ダイヤモンド社 (2014).
- (9) 秋山芳弘, 世界の高速度鉄道 - その歩みと将来 -, JREA, Vo.57, No.10 (2014), pp.54-59, 日本鉄道技術協会.
- (10) 佐藤芳彦, 世界の高速度鉄道, グランプリ出版 (1998).
- (11) 佐藤芳彦, 図解 TGV vs. 新幹線, 講談社ブルーバックス (2009).
- (12) Orlova and Boronenko, The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear, Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press (2006), pp.39-83.
- (13) Vincent Lahu, TGV-Mediterranee - PARIS-MARSEILLE en 3 heures, La Vie du Rail (2001).
- (14) Dipl.-Ing. Hans Herrmann, ICE / High-tech on rails, Hestra-Verlag (1996).
- (15) 用田敏彦, 山口剛, 渡邊隆夫, 山越淳, 英国向け CTRL-DS 電車, 車両技術, No.237 (2009), pp.124-138, 日本鉄道車両工業会.
- (16) Xin Dingding, High-speed technology eyes US patents, China Daily (online), available from < http://www.chinadaily.com.cn/china/2011-06/23/content_12755947.htm >, (accessed on 14 March, 2015).
- (17) HIGH-SPEED TRAIN ATPRD S/120 RENFE, CAF, available from < <http://www.caf.net/en/productos-servicios/proyectos/proyecto-alta-velocidad.php> >, (accessed on 14 March, 2015).
- (18) 丸山弘志, 景山允男, 機械技術者のための鉄道工学, 丸善 (1981), pp.128-138.
- (19) Detlef Cordts and Bruno Meier, Hydraulisches Achslenkelager zur Anwendung im Schienenfahrzeug -bereich, Eisenbahningenieur (2012), pp.69-73.
- (20) HYDRULISCHES ACHSLENKERLAGER (HALL), Freudenberg Schwab Vibration Control, available from < <http://www.freudenberg-schwab.net/de/downloads.html> >, (accessed on 20 March, 2015).

- (21) Freudenberg Schwab Vibration Control is presenting its new active hydraulic axle guide bearing, HALL 2.0, at InnoTrans, available from < <http://www.fst.com/Press/2014/Better-on-curves-with-HALL> >, (accessed on 20 March, 2015) .
- (22) 城下勇貴, 石田弘明, 軸箱前後支持への減衰付加による走行安定性向上に関する基礎検討, 土木学会主催, 鉄道技術・政策連合シンポジウム J-Rail2014 講演論文集, S1-2-4 (2014).
- (23) 石田弘明, 中嶋大智, 村上和義, 弾性体ブッシュ及び軸箱支持装置, 特開 2014-194255 (2014).