

第15回

ボギー一台車

はじめに

鉄道車両の走行装置である台車の役割は、車体を支え、牽引力やブレーキ力を伝え、レールに案内されて安定して走ることです。車両の形態としては、二つの台車で一つの車体を支える方式が一般的ですが、車両が曲線や分岐器を滑らかに走行するためには、前後に離れて取り付けられた台車が車体に対して水平面内で回転できなければなりません。この回転角度をボギー角とよび、ボギー角を持てる構造を備えた台車をボギー一台車といいます。日本の鉄道の歴史は140年余りになりますが、当初は欧米からの輸入に頼っていた車両も、やがて国産化され、様々な研究や技術開発を経て現在の姿に発展してきました。ここでは、ボギー一台車の開発の変遷について主に国鉄、JRの流れを中心に振り返ってみます。

鉄道黎明期から昭和初期の台車¹⁾²⁾

1872年に日本で最初の鉄道が開業した時の車両は、一つの車体に二対の輪軸を直接固定した二軸車でした。この

頃すでに欧米ではボギー一台車が使われていましたが、日本でもその後一車体を一台車で支えボギー角を持たない単台車や二つのボギー一台車で車体を支えるボギー車(図1)が徐々に使われるようになりました。台車には二つのばねがあり、一つが輪軸と台車枠の間にある軸ばね、もう一つが台車枠と車体の間にあるまくらばねです。当時の台車は、軸ばねに重ね板ばねを用いる軸ばね式と、コイルばねと釣合いばりを用いる釣合いばり式(図2)があり、前者は主にヨーロッパで、後者はアメリカで用いられていました。釣合いばり式は前後の軸箱間に渡した釣合いばりが輪重を平均化するとともに輪軸の蛇行動を防ぎ、軸ばねに長くて柔らかいばねを用いることができることから乗り心地の面でも有利であり、軌道の状態が悪くなかった日本では専ら釣合いばり式の台車が用いられました。上下方向の緩衝を行うまくらばねには重ね板ばねが用いられ、台車枠に対して4本のリンクで斜めに吊り下げられた揺れまくらが左右方向の緩衝を行いました。

1907年に鉄道が国有化されるとボギー一台車が主流となり、標準台車が設計されるようになりました。軸ばねは釣合いばり式で、台車枠は型钢と鋼板のリベット組立構造で



図1 ボギー車(鉄道博物館にて撮影)

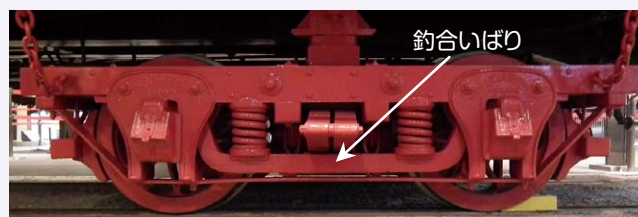


図2 釣合いばり式台車(鉄道博物館にて撮影)

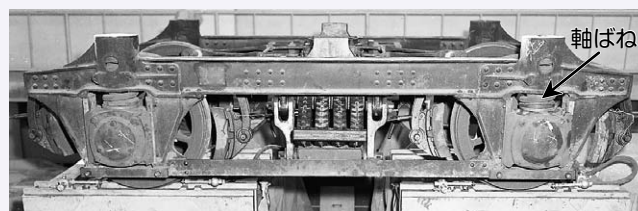


図3 軸ばね式台車



図4 101系DT21形台車(鉄道博物館にて撮影)

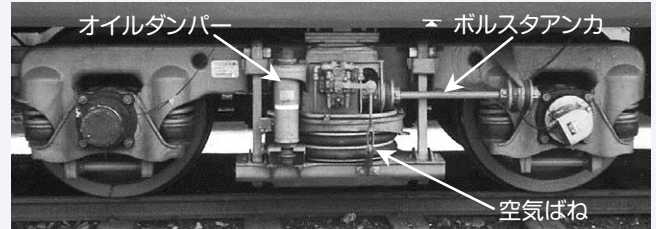


図5 151系TR58形台車

した。この頃、乗り心地の面から台車の軸距は長いほうがよいとされていて、2450～2500mmが一般的でした。車輪径は標準寸法860mm、電動台車は主電動機の大きさの関係から910mmが用いられていました。

昭和に入ると鈎合いばりを廃止して軸ばね式(図3)が標準台車となりました。これは主にばね下質量の軽減、製作費の削減、保守作業の容易化を図るためでした。台車枠はリベットやボルト組立による緩みの問題はありましたが、当時の製造技術では一体枠の製作は難しく、型鋼、鋳鋼の組立式でした。

高速台車振動研究会の成果²⁾³⁾⁴⁾

戦後間もない1946年から1949年にかけて運輸省鉄道総局工作局、鉄道技術研究所が中心となって高速台車振動研究会が開催され、車両動揺に関する理論計算への取り組みが行われました。当時の電車は乗り心地が良くなく、長距離列車は機関車牽引の客車列車が主流でしたが、軌道への影響や車両の運用を考慮すれば将来的には電車列車が主流になるとの想定から、電動台車の性能向上に向けた研究開発が盛んに行われました。振動理論の検討と合わせて、摩擦抵抗を利用した重ね板ばねから理論に載りやすいコイルばねとオイルダンパーに置き換えるなど、構造面での変更も試みられました。研究会の成果としては、ガタの多い組立式の台車枠から鋳鋼一体台車枠を経て溶接組立構造への移行、まくらばねを重ね板ばねから柔らかいコイルばねとオイルダンパーの組み合わせへの置き換え、揺れまくら吊りリンクを長くし、角度の設計と合わせて復元力を小さく振動数も低くし、揺れまくらも側ばり外側で吊る方式としてロール剛性を上げることなどによる左右方向の乗り心地改善などがありました。軸ばねは従来の軸箱直上にコイルばねを配置したいわゆるタコ坊主式から軸箱の両側に一對のコイルばねを配置するウイング式が用いられるようになりました。防振ゴムやすり板の研究も進められ、軸ばねへの防振ゴムの付加、軸箱もりや揺れまくら守りへの耐磨レ

ジンの適用が行われ、乗り心地の改善や保守作業の軽減が図られました。また、輪心にタイヤを焼ばめする構造で割損や緩みの問題があった従来のタイヤ付車輪に代わって一体圧延車輪が、車軸軸受には平軸受に代わって転がり軸受が用いられるようになりました。これらの成果は湘南型電車80系DT16,17,20形台車に順次取り入れられ、その後の高性能電車開発につながっていきました。

高性能電車の開発²⁾⁵⁾

戦後の高速台車振動研究会以降の研究開発成果の集大成として1957年モハ90形(後の101系)DT21形台車(図4)が開発されました。ウイングばね式軸箱支持装置、コイルばねとオイルダンパーを組み合わせたまくらばね、心血と左右の側受三点支持による車体支持のほか、柔らかい軸ばねおよびまくらばね、防振ゴム挿入による上下動の改善、心血位置低下による前後動の改善が図られました。さらに特徴的な構造変更として、従来の鋳鋼製日形台車枠に代わり左右の側ばり端を繋ぐ端ばりをなくしたプレス鋼板溶接組立H形台車枠の採用、従来2450～2500mmが標準であった軸距の2100mmへの短縮化、電動台車の車輪径を付随台車並みの860mmに縮小、主電動機質量の半分が車軸にかかる釣り掛け式駆動方式から主電動機を台車枠に装荷し継手および歯車装置を介して回転力を伝える平行カルダン駆動方式への変更などが行われ、台車質量の低減や基本寸法において今日の電動台車に繋がる技術の多くが実現されました。

乗り心地の向上に向けた技術開発はさらに続けられ、1958年モハ20形(後の151系)DT23、TR58形台車(図5)でまくらばねに三段ベローズ式空気ばねとオイルダンパーが採用されました。空気ばねは金属ばねに比べてばね定数を柔らかくすることができ、高周波振動の絶縁性もよいため乗り心地がよいこと、空気圧を調整することで荷重にかかわらずばねの高さを一定に保てるといった利点があります。一方、ローリング剛性が低下して曲線でローリングしやすくなるためアンチローリング装置が用いられました。

また、台車枠と上揺れまくらの間の前後力伝達機構として従来の揺れまくら守りに代わってボルスタアンカが採用されました。この台車では空気ばねは上下方向の支持のみを行っていましたが、その後左右方向の剛性も持たせた空気ばねが開発され、1962年の451系DT32形台車(図6)より適用されました。左右方向の変位も空気ばねが負担することで従来の下揺れまくらおよび吊りリンクが廃止されてまくらばりのみとなり左右動ダンパーが採用されたこと、空気ばねの上下剛性を極力柔らかくし、軸ばねにオイルダンパーを併用したこと、空気ばねの搭載位置を上げ、左右間隔を広げてローリング剛性を増したこと、心皿+側受の代わりに大径心皿としてピッチングの影響を少なくするとともに旋回抵抗を与えて蛇行動を防止したことなどにより振動性能の向上が図られました。

新幹線用台車の開発

東京～大阪間の新幹線建設が決まると、開業に向けて研究開発が盛んに行われました。台車枠に対する輪軸の位置決めを行う軸箱支持装置については海外の方式も参考としながら様々な方式の開発が行われ、各種試験の結果、支持板とゴムブッシュを併用したIS式(開発した石沢技師の名前に由来)が採用されました。従来の軸箱もり式に代わってしゅう動部やガタがなく、前後左右方向に適切な支持剛性を設定できる方式が実現しました。まくらばねについてはダイヤフラム形空気ばねを車体とまくらばりの間の高い位置に配置してローリング剛性を上げ、台車の旋回はまくらばりと台車枠の間で行う空気ばねダイレクトマウント式となりました。

鉄道車両は比較的低速度で車体が大きく揺れる車体蛇行動と、高速度で台車が激しく振動する台車蛇行動を起こす特性を持っています。これは、曲線を滑らかに走行するため車輪踏面に勾配が設けられていることに起因します。台車蛇行動を起こしにくくするにはこの車輪踏面勾配を小さくすることが有効であり、200km/h以上で走行する新幹線用台車の車輪踏面勾配として従来の1/20に代えて1/40

が選定されました。また、車体の荷重を全て側受で支持する全側受支持としてすり板の摩擦抵抗により台車旋回抵抗を与え、蛇行動の限界速度を高めました。これらの成果が1964年の東海道新幹線開業で0系DT200形台車(図7)として実現しました。

振り子台車の開発⁶⁾

新幹線が開業し、在来線においても速達性が求められるようになりました。しかし、在来線は曲線が多いため、最高速度の向上のみならず、曲線通過速度の向上が必要となりました。曲線を高速で走行するとカントで相殺しきれない遠心力が乗客にかかり乗り心地が悪くなります。そこで、車体と台車の間にころを設け遠心力がかかると車体が曲線内側に傾いて乗客が感じる遠心力を小さくするころ式振り子機構を備えた381系DT42形台車が1973年に実用化されました。

ボルスタレス台車の開発⁷⁾⁸⁾

1980年代になるとさらなる高速化の機運が高まり、台車の走行性能や乗り心地を向上する研究開発が進みました。最も大きな成果はボルスタレス台車(図8)の実現でした。ボルスター(Bolster)とはまくらばりのことで、それをなくした(レス-less)のがボルスタレス台車で、まくらばりの省略により大幅な軽量化が図られました。従来のボルスター付台車はまくらばりに設けた心皿部で台車の旋回動作を行っていましたが、まくらばりのないボルスタレス台車では牽引装置により台車旋回の案内を行い、車体～台車間の回転変位もまくらばねが担うため、低横剛性の空気ばねが開発されました。蛇行動を防止するために必要な旋回抵抗を与える側受もまくらばりとともに省略されたため、120km/h以上で走行する車両にはヨーダンパーが装備されました。軸箱支持装置についても従来の軸箱もり式のようなしゅう動部位を持つ方式から円錐積層ゴム式やロール



図6 DT32形台車(鉄道博物館にて撮影)

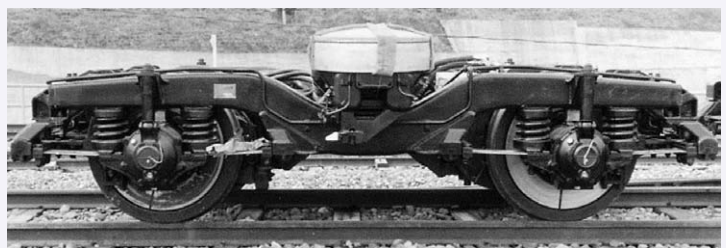


図7 新幹線DT200形台車

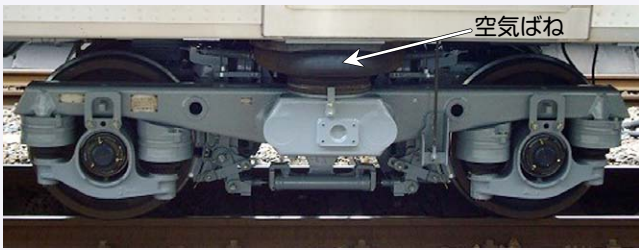


図8 ポルスタレス台車

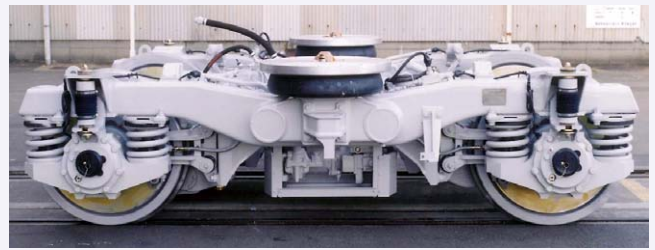


図9 新幹線用ポルスタレス台車

ゴム式などの上下支持および前後・左右の案内をすべてゴムばねで行う方式が採用されました。従来の円錐踏面に代わり、複数の異なる半径の円弧を繋いだ円弧踏面の採用と柔らかい軸箱前後支持剛性の選択により曲線通過性能の向上が図られました。牽引装置は当初積層ゴムで支持された牽引ばりが用いられていましたが、その後Zリンク式、一本リンク式へと代わっていき、ついに軸箱支持装置、車体支持装置から摩擦しゅう動部がなくなりました。

一方、新幹線用台車においても高速化のための開発が進められました。ポルスタレス化とともに端ばりをなくしたH形台車枠、中ぐり車軸、アルミ合金製軸箱および歯車箱、交流誘導電動機などの採用により台車質量およびばね下質量が大幅に低減されました(図9)。また従来のすり板に代わり特性が管理しやすいヨーダンパーにより台車旋回抵抗を与え、軸箱の前後・左右支持剛性の適値を選定して蛇行動限界速度を向上させることで1992年に最高速度が270km/hに向上しました。

制御技術による乗り心地向上³⁾⁸⁾

ころ式振り子台車の導入後、ころの抵抗による振り遅れ、戻り遅れによる急激な振り子動作による乗り物酔いの課題が出てきました。それを解決するため、ころと並列に空気シリンダーを配置し、予め線路形状を記録した制御装置と走行位置検知装置により、曲線入口の手前から車体を傾斜させるポルスタレス方式の制御付自然振り子台車が開発され、1989年に実用化されました。

新幹線ではさらなる高速化を目指して各社で高速試験車の開発および試験が行われました。その中でトンネル内での変動空気力による動揺の課題が出てきました。そこで、積極的に動揺を抑える手法の開発が進められ、左右動揺の状態に応じて適切な減衰力に切り替えるセミアクティブサスペンションが1997年に実用化されるとともに最高速度は300km/hに向上しました。さらに、車体の左右動揺を能動的に打ち消す力を発生させるアクティブサスペンシ

ョンも実用化されました。

一方、曲線通過時の乗り心地の改善策として、ころを用いた振り子機構ではなく、空気ばねの高さを変えることで車体を傾ける空気ばね車体傾斜車両が1997年に実用化されました。傾斜角度は振り子車両より少ないものの、台車の構造は通常の間車とほとんど変わらないことから、適用される例が増えていきます。新幹線においても空気ばね車体傾斜システムが用いられるようになってきており、曲線通過速度の向上に貢献しています。

おわりに

ボギー台車の開発の流れを振り返ってみると、台車質量およびばね下質量の低減、蛇行動抑制や振動低減による乗り心地向上、摩擦しゅう動部位のない構造への変更に向けた研究開発、設計製作の取り組みの蓄積により現在のボギー台車の技術が構築されていることがわかります。機械部品として現在のボギー台車を見ると、軽量化、コスト削減、走行性能の面ではかなり高いレベルに到達しているものと思われます。将来的には上下系も含めた振動抑制制御や、車体傾斜や操舵などのアクティブ制御がますます進展していくのではないのでしょうか。

(石毛真/車両構造技術研究部 走り装置研究室)

文献

- 1) 高田隆雄：台車とわたし①～⑧，鉄道ジャーナル，Vol.31,No.7～Vol.32,No.3，1997.7～1998.3
- 2) 小泉智志：台車技術の系譜(1)～(6)，鉄道車両と技術，Vol.12,No.6～Vol.12,No.11，2006.9～2007.2
- 3) 宮本昌幸：鉄道車両の科学，SoftBankクリエイティブ，2012.8
- 4) 電気車研究会：湘南型電車詳解，1955.7
- 5) 電気車研究会：新性能モハ890形電車詳解，1958.11
- 6) 日本機械学会：鉄道車両のダイナミクス，電気車研究会，1994.12
- 7) 岡本勲他：新幹線電車用ポルスタレス台車(DT9023E/F)の開発，鉄道総研報告，Vol.7,No.3，1993.3
- 8) 岡本勲：在来線高速電車用台車の開発，鉄道総研報告，Vol.8,No.3，1994.3