第49回

軌道に追従し運動性能を向上する車両技術

はじめに

現在に近い形の，きのこ型レールとフランジ付き車輪を使用した鉄道は，1789年にイギリスで土木技術者のWilliam Jessopによって開発されました。以来，今日に至るまで，鉄の車輪を持った車両が鉄のレール上を，変わらず走行しています。そんな中で，時代に合わせ，より安全に，より速く，より快適に，といった要求も生まれてきました。これらの要求の一つに，構造的なものも含めた軌道の変位に追従して走行できるよう，軌道に対する車両の追従性を向上するというものがあります。この要求を実現するため，さまざまな車両技術が開発されてきました。ここでは，車両が軌道の変位，なかでも平面的な変位に追従し，輪重変動，特に輪重減少を抑制することで走行安全性の向上を図る車両技術の発展について，日本での事例を中心に紹介します。

軌道の平面的な変位と走行安全性

走行する車輪とレールの間にはさまざまな力が作用しています。走行安全性の問題を考える上では，車輪とレールの間の力を，力の作用する方向別に，大きく3つに分けて考えます（**図1**）。車輪とレールの接触位置において，鉛直方向の力を輪重，水平（まくらぎ）方向の力を横圧，前後（レール）方向の力を前後接線力と呼んでいます。輪重は車両自体の重さや慣性力が，横圧はレールにガイドされながら曲線を通過する時のレールからの反力が，前後接線力は駆動力や制動力が，主な成分と考えられています。常時は，これらの力がバランスを取りながら安全に走行していますが，特定の条件下で力の関係が変化すると，車輪は回転しながらレールに乗り上がり，脱線に至ってしまう場合があります。このようなプロセスで起きる脱線を，乗り上がり脱線と呼んでいます。この乗り上がり脱線の発生には，輪重と横圧の大きさが深く関係しています。具体的には，輪重が大きい状態であっても，大きな横圧が作用すると，車輪が横に押し出されてしまいますし，逆に輪重が小さい状態では，横圧が僅かな大きさであっても容易に車輪が押し出されてしまい，いずれも脱線に至る恐れがあります。このため，乗り上がり脱線を防止するためには，横圧を大きくさせないだけでなく，輪重を小さくさせないことも重要です。

しかし，鉄道には軌道の構造上，どうしても輪重が小さくなってしまう場所が存在します。その代表例が，曲線出口側緩和曲線部です。緩和曲線は，直線部と円曲線部をつなぐ，いわば緩衝区間です。緩和曲線内ではカントや曲率がてい減またはてい増されます。**図2**は，曲線出口側緩和曲線部を走行する台車のイメージ図です。台車内の進行先頭軸の外軌側車輪では，当該車輪がカントのてい減により生じる軌道の平面的な変位に追従するため，軸ばねが伸びてしまい，その結果として局所的な輪重減少が発生します。もし，台車全体で軌道

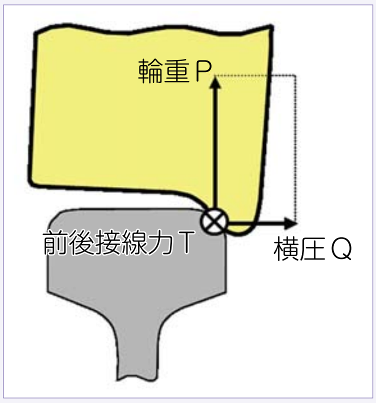

図1　車輪とレールの間に働く力

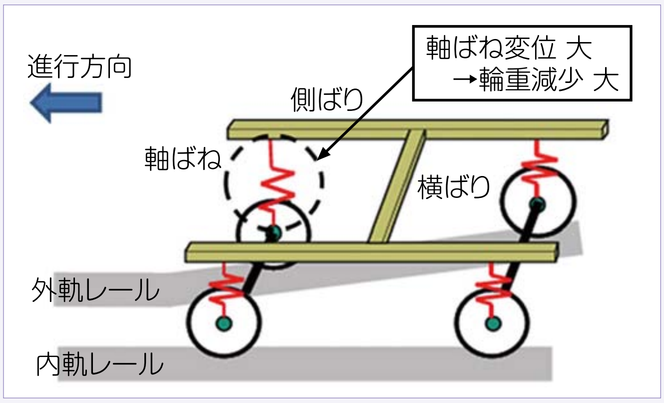

図2　曲線出口側緩和曲線を走行する台車イメージ

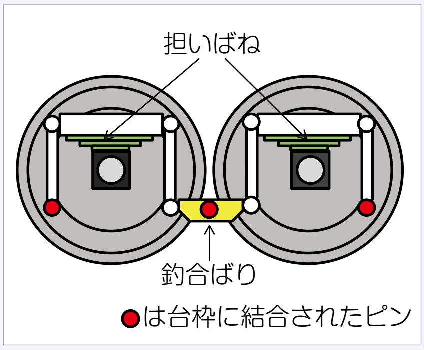

図３　イコライザー機構の概略図

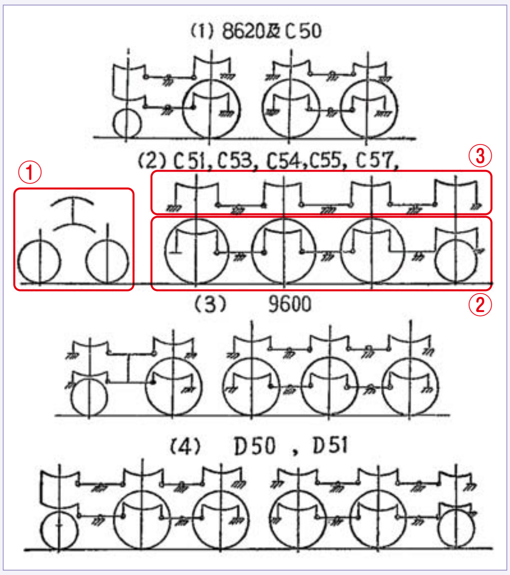

図４　イコライザーによる重量配分例
出典：鉄道運転会，蒸気機関車工学，通文閣，p231，1949
（赤字・赤枠は加筆）

図５　パイオニアⅢ台車のカタログ
出典：東急車輌製造株式会社，東急車輌のパイオニアⅢ台車（カタログ）

の平面的な変位に追従することができれば，局所的な軸ばねの伸びが抑制され，輪重減少の抑制が可能です。つまり，軌道の平面的な変位に追従することは，乗り上がり脱線に対する安全性を向上することを意味します。

鉄道れい明期における軌道の平面的な変位に追従する技術[1),2),3)]

鉄道れい明期に開発された，軌道の平面的な変位に追従するための技術として，イコライザーと呼ばれる走り装置の機構があります。

イコライザーは，1838年にアメリカにおいてエンジニアのJosep Harrisonらによって開発されました。当時のアメリカでは，交通網の整備が急務となっており，鉄道もその例外ではありませんでした。そのため，総延長を伸ばすことに重点を置かれたため，ぜい弱な路盤上や，線形が急勾配や急曲線にならざるを得ない場所に軌道を敷設せざるを得ない状況でした。その結果，軌道の状態は決して良いものではなく，軌道変位の大きな場所も多く存在し，この変位に起因した輪重変動により，機関車が頻繁に脱線していました。そこで，このような脱線を防止するため，軌道変位が大きな場所であっても，機関車の各車輪において輪重の動的なアンバランスが生じないよう，イコライザーが開発されました。イコライザーは**図3**に示すよう，軸ばねに相当する担いばねと台枠を，リンクと釣合ばりと呼ばれる一種のてこにより結合したものです。釣合ばりは天びんの役割をして，その両端のリンクを介し結合された担いばねに作用する荷重を均一化し，釣合ばりの数を増やすことで，多くの担いばねにかかる荷重を均一化することができます。この効果を利用し，例えば，機関車内にイコライザーにより結合された車輪のグループをいくつか作ります。例えば，**図4 (2)**のように，①先台車の車輪，②進行左側車輪，③進行右側車輪のような3グループを形成することで，車両は軌道に対し，安定した3点支持の状態を実現することができます。イコライザーの開発により，輪重の変動に起因した脱線の発生を抑制することができるようになりました。イコライザーは多くの蒸気機関車に採用され，日本では蒸気機関車はもとより，EF58形など，板台枠の電気機関車にも採用されました。また，ボギー台車に釣合ばりを導入したイコライザー台車は，電車や客車用として広く使われました。

安全性と経済性の両立した台車[4)]

イコライザーの開発からしばらく時が過ぎ，1950年代には軌道の平面的な変位に追従するための特徴的な台車枠を具備した，パイオニアⅢ台車（Budd社）やエコノミカル台車（汽車製造株式会社）が開発されました。これらの台車構造は，細かな点では異なりますが，台車の製作時および運用時のコスト削減を目的とした共通の構造を有しています。パイオニアⅢ台車を例に，その構造について紹介します。

パイオニアⅢ台車は，1956年にBudd社が開発した超軽量オールステンレス車両パイオニアⅢ用に開発された台車です。日本国内においては，オールステンレス車両とこの台車は，Budd社と技術提携した東急車輛製造株式会社（現 株式会社総合車両製作所）がライセンス生産しました（**図5**）。1962年には東急電鉄向けオールステンレス車両7000系用台車として運用が開始されました。この台車では，走行時に生じる振動の緩衝を空気ばねが全て担う構造となっており，軸ばねは

省略され，ゴムブッシュを介して軸受を保持しています。これにより，台車構造は簡素となり，製造及びメンテナンス時に係る費用を削減することができます。また，軸ばねや軸ばねを取り付けるための構造がない分，軽量となることからさまざまな効果も期待できます。しかし，軸ばねがないということは良いことばかりではありません。軸ばねのない台車は，軸ばねのある台車にくらべ，軌道への追従性という点で劣ってしまいます。そこでこの台車では，これを補うため，台車枠中心において左右分割されたX形のフレームとまくらばりにより構成された台車枠が採用されています（**図6**）。この構造により，左右のフレームが独立して，上下方向はもとより，まくらぎ方向を軸とした回転（以下，ピッチと記します）方向にも動くことが可能なため，台車枠として軌道の平面的な変位に追従することができ，輪重減少を抑制することができます。また，左右のフレームは中心ピンの位置で突き合わせる構造となっているため，走行安定性の低下を招く台車枠のひし形変形（☞参照）が起こりにくい構造となっています。

パイオニアⅢ台車やエコノミカル台車は民鉄において広く運用されてきましたが，開発当時は良好であった乗り心地や走行安定性も，台車技術の発展に伴い，それを上回る性能を持つ新しい台車が開発され，これと交代をしていくことになります。

なお，現在でも，分割構造の台車枠を採用した台車は，貨車用，リニア地下鉄用として運用されています。製作コストを抑制するためであったり，台車枠につりさげたリニアモーターとリアクションプレートの間隔を保つため硬い軸ばねを使用しなければならないためであったり，と背景は異なりますが，いずれも軌道の平面的な変位への追従性を向上する目的で，分割構造の台車枠が採用されています。

新技術により軌道に追従する台車[5),6)]

近年の材料分野における技術革新などにより，これまでにないさまざまな新しい要素技術が台車部品として導入されるようになりました。これにより従来にはない極めて特徴的な構造を有するefWING（**図7**）と輪重減少抑制台車が開発されました。これらの台車では，その特徴的な台車構造を生かし，これまでにない方法で軌道の変化に追従します。

efWINGは川崎重工業株式会社で開発された台車で，これまで航空機材料などとして使用されていたCFRP（炭素繊維強化プラスチック）を，実用台車としては世界で初めて台車枠の主構造に使用しています。CFRPを使用する主たる目的は台車の軽量化で，鋼製の台車枠を具備した一般的な台車と比べ1台車あたり約450kgの軽量化を実現しています。efWINGの台車枠は主に，1対の弓状のCFRPばねと，側ばりの機能を一部備えた横ばり，まくらばりから構成されます。まくらばりは省略することもでき，ボルスタレス台車としても構成が可能な構造となっています。CFRPばねは，一般的な台車の側ばりと軸ばねを兼ねた役割を果たします（**図8**）。弓状のCFRPばねは，ばねと異なる曲率を持つ中央圧子という部品を介して横ばりを支えており，中央圧子を支点とするシーソーのようなピッチ方向の動作により，軌道の平面的な変位に追従します。CFRPばねによる軌道への良好な追従性能は，アメリカ合衆国公共輸送協会が定

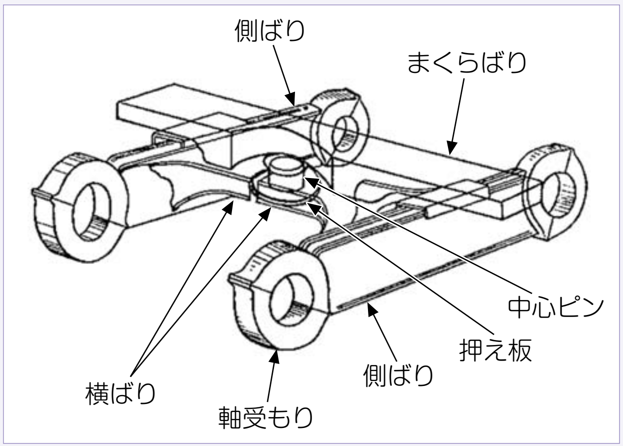

図6　パイオニアⅢ台車の台車構造
出典：東急車輛製造株式会社，東急車輛のパイオニアⅢ台車（カタログ）

図7　efWINGの外観
提供：川崎重工業株式会社

☞ **台車枠のひし形変形**

通常，長方形または正方形である台車枠の四隅を結んで形成される四角形が，外力によりひし形状に変形する現象。この現象により，輪軸の鉛直軸まわりの回転運動が助長されることで，走行安定性が低下する。主に，側ばりと横ばりの結合部の剛性不足によって発生する。

める静的輪重抜け試験によっても証明されています。この試験は，台車内の1輪に上下変位を与えることで，台車に平面的なねじりを加えた際の輪重減少率を調査するものです。試験の結果，efWINGの輪重減少率は基準値の半分以下であり，同協会の定める輪重減少に関する安全性の指標に対して2倍以上の安全性を有することが確認されました。現在，efWINGは，熊本電鉄に導入され運用されており，安全性をはじめとした優れた台車性能から多くの鉄道事業者から注目されています。

一方，輪重減少抑制台車は，鉄道総研が開発した台車で，軌道の平面的な変位がある箇所で生じる輪重減少を抑制することで，乗り上がり脱線の発生リスクを軽減したものです。**図9**に示すように，輪重減少抑制台車の台車枠は左右の側ばりと横ばりが分離した3分割構造となっており，側ばりと横ばりは回転機構により結合されています。この回転機構により，左右の側ばりがピッチ方向に自由に回転することで，軌道の平面的な変位に追従します。回転機構部には，耐摩耗性，耐荷重性に優れたすべり軸受を採用しています。このすべり軸受をすべり面を内側にして円筒状にしたものを側ばりに圧入し，ここに横ばりに設けた回転軸を挿入し回転機構を構成しています。この際，側ばりと横ばりを適度な力で密着させ，側ばりのピッチ方向以外の運動を抑制することで，走行安定性の低下を招く台車枠のひし形変形を防止しています。輪重減少抑制台車の台車構造は，回転機構を除き一般的な構造の台車とほぼ同じ構造となっており，多くの台車部品について従来のものとの互換性を有しています。なお，回転機構による台車重量の増加は，一般的な構造の台車に比べ約7%の増加に留まっています。輪重減少を抑制する効果については，鉄道総研の試験線内の曲線出口側緩和曲線部（半径160m，カント90mm，カントてい減倍率400倍）を対象とした走行試験において，一般的な構造の台車に比べ輪重減少率を平均で3割程度抑制する効果があることが確認されています。また，鉄道総研の車両試験台での転走試験により，ヨーダンパーを装備した場合のだ行動限界速度は300km/h以上で，良好な走行安定性能を有することも確認されています。現在，横圧低減策との組み合わせによる乗り上がり脱線防止効果の確認など，今後の実用化を目指したさまざまな性能調査が行われています。

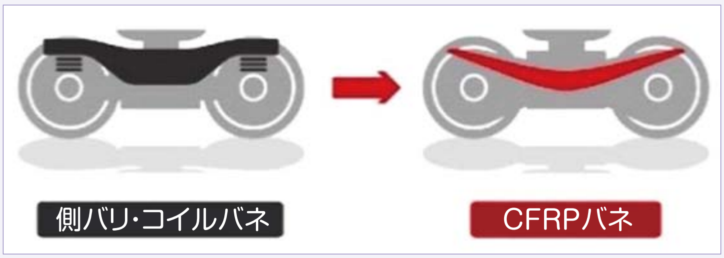

図８　efWINGの台車構造概念図
提供：川崎重工業株式会社

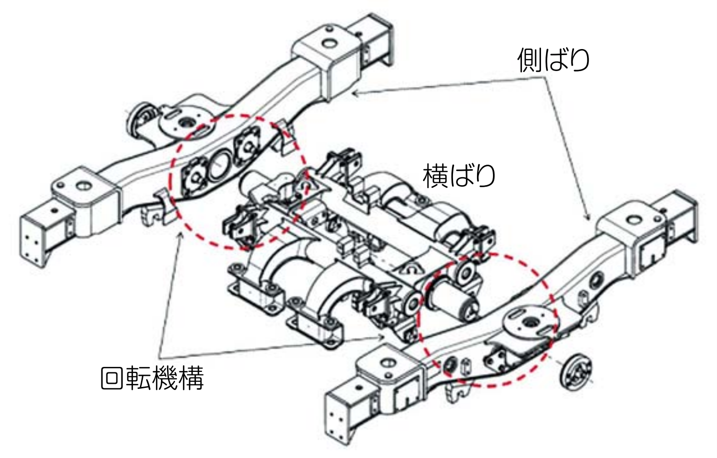

図９　輪重減少抑制台車の台車構造

おわりに

ここでは，軌道の平面的な変位に追従し，輪重の減少を抑制することで，走行安全性の向上を図る車両技術のうち，メカニカルな台車技術を中心に振り返ってきました。今後は，車両や台車に制御技術など新しい技術を導入することにより，軌道への追従性を向上し，さらなる走行安全性の向上を図るさまざまな車両技術の開発が進むものと期待されます。

（鈴木貢／鉄道力学研究部
車両力学研究室）

文　献

1) 齋藤晃：蒸気機関車200年史，NTT出版，2007
2) 鉄道運転会：蒸気機関車工学，通文閣，1943
3) 車両設計事務所：EF58形電気機関車台車明細図，日本国有鉄道，1958
4) 東急車輌のパイオニアⅢ台車（カタログ），東急車輛製造株式会社
5) 西村武宏：新型次世代台車「efWING」の開発，鉄道車両工業，No.470，pp.21-24，2014
6) 鈴木ほか：鉄道総研試験線による輪重減少抑制台車の性能評価，鉄道総研報告，Vol.30，No.2，pp.17-22，2016