

第 85 回

操舵台車

はじめに

曲線の多い線区で運用される在来線鉄道車両では、曲線通過性能を向上させてより高い速度で曲線を通ることが到達時間短縮に非常に効果的な対策となります。ただし、高い速度を維持して問題なく曲線を通するためには、増加する遠心力に対処して乗り心地を維持する技術と、増加する横圧(車輪-レール間の接触部分に働く左右方向の発生力)を抑制する技術が必要になります。曲線走行中の遠心力を重力によって打ち消して乗り心地を確保する技術としては、オートバイのように車体を曲線の内側に傾斜させて遠心力を相殺する機能をもった振り車両/空気ばね車体傾斜車両が実用化されています¹⁾。一方、横圧低減技術の一つとして操舵台車が開発されました。ここでは、鉄道用に用いられる輪軸の特徴や

走行安定性について解説し、操舵台車開発の背景・経緯について紹介します。

蛇行動と自己操舵性

一般的な鉄道車両用台車には、左右の車輪が車軸に固定された一体輪軸が用いられており、車輪の踏面(車輪とレールの接触面)には車両の外側に向かって車輪径が小さくなるような傾斜がつけられています²⁾。各車輪は地上に敷設されたレール上を走行し、通常の走行状態では車輪はレールに案内されてレールの中央付近を走行しています。このとき輪軸をレール中心に案内する力はどのように生み出されているのでしょうか？ 輪軸がレール上を転動するとき、横方向に輪軸が移動した場合、レール中心から外側に移動した車輪は直径の大きい部分でレールと接触し、反対の車輪は直径の

小さい部分でレールと接触します(図1)。ここで、左右の車輪は車軸に一体に取り付けられているため同じ回転数で回転し、直径が大きくなった側の車輪がより多く前方に進むこととなります。すると輪軸はレール中心側に進むように向きを変え、レール中心に戻ろうとする復元力が発生することになります。このようなレール中央に向かって自動的に転動位置を復元させる機能を、輪軸の自己操舵性とよんでいます。ただし、自己操舵性は中心位置を少し行き過ぎてから再び中心位置に戻ろうとする性質があり、走行速度が高くなるとこのような行き過ぎが徐々に大きくなってしまいます。このような運動を上方から観察すると、蛇が左右に身をよじりながら前進する様子に見えるため、この動きを蛇行動とよんでいます。輪軸は軸受を収納した軸箱を介して台車枠に取りつけられていて、軸箱と台車枠の間は、上下・左右・前後方向にある剛性をもったばねで結合されています。これらのばねにより、輪軸は前後、左右に押さえられ、走行中に蛇行動が発生するのを防いでいます。ばねの剛性が硬い台車では、しっかり輪軸が押さえつけられているため、蛇行動が発生する速度域が上昇します。つまり、高速走行安定性の高い台車であると表現できます。

軸箱を支持するばね剛性を高くすると、高速走行時の蛇行動安定性が向上することはわかりました。一方で、曲線区間では、台車枠に対して前後2本の輪軸を上から見て「ハ」の字形に移動させて車輪とレールの向きをそろえる方向に舵を切ると横圧が小さくなります。レールと車輪の間の角度をアタック角とよんでいます、アタック

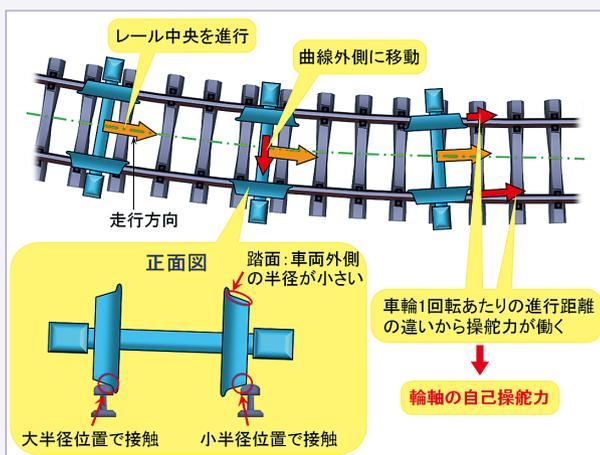


図1 輪軸の自己操舵動作

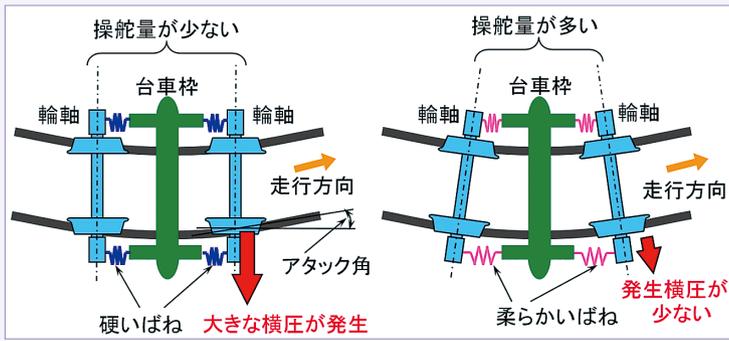


図2 ばね剛性の違いによる横圧発生状況の変化

角が大きい状態では車輪がレールの外側に向かって進むようとするため、フランジ（車輪の内側に設けられたツバ）がレールに強く押し付けられて横圧が上昇しやすくなることが知られています。つまり、軸箱を支持するばね剛性が高い場合には、図2左側のように二つの輪軸は平行位置に近くなるため曲線部のレールに対して大きな角度（アタック角）をもち、大きな横圧が発生します。そこで、軸箱支持剛性を柔らかくすると、輪軸の自己操舵機能の働きで車輪はレール方向を向きやすくなるためアタック角が抑えられ、横圧を低減させることができます（図2右側）。このように、軸箱前後方向の支持剛性は台車の自己操舵性能にとくに影響の大きい要素で、軸箱前後の動きによって輪軸の向きが決まることになります。横圧が増加すると曲線の速度向上が難しくなるだけでなく、車輪のフランジやレール側面の摩耗が増え、それらのメンテナンスにコストが掛かるようになります。また、非常に大きな横圧の発生は脱線につながることもあり、台車の安全性に関わる非常に重要な問題と考えられています。

以上のように、曲線通過性能向上のためには軸箱-台車枠間の前後方向の軸箱支持剛性を低減させて、輪軸の自己操舵性能を積極的に活用することが有効です。ただし、軸箱支持剛性を低下させることは先ほど述べた高速走行にとっては不利な条件となり、安定性の低下を招くことになります。従来、

軸箱支持剛性は車両の使用される状況を考慮して、直進安定性と曲線通過性能の適切なバランスをとる設計をすることが主流でした。操舵台車とは、このように相反する要求を高い次元で両立させるため、曲線走行中に積極的に輪軸の舵を切り、発生する横圧を低下させる機能をもたせた台車です。広い意味では一体輪軸構造の車軸を採用した自己操舵性をもつすべての台車を操舵台車と考えることができますが、ここではとくに曲線通過性能の向上に配慮した機能をもたせた台車を操舵台車と表現することとします。

操舵台車の種別と変遷

操舵台車はこれまでさまざまな方式について研究・開発が進められてきました。操舵台車の構成方式を大まかに分類すると、次の三つの方式に分類することができます。各方式の特徴を紹介します³⁾。

①自己操舵台車

軸箱の前後支持剛性を適正化し、輪軸の自己操舵性をより積極的に活用することを考慮した台車で、最も簡便な構造で操舵台車を構成できます。

②アクティブ操舵台車(強制操舵方式)

アクティブ操舵方式は輪軸をアクチュエーター（外部からの指令に応じた能動的な力を発生させることができ

表1 操舵台車の開発・実用化時期

分類	構造	適用車両	1970	1980	1990	2000	2010
自己操舵	輪軸間結合前後非対称支持剛性	シエッフエル台車 JR東海383系	←			←	
	油圧式 電動アクチュエーター	国鉄DT953台車 ボギー角アクティブ操舵台車		◇			←
連動操舵	リンク式	国鉄DT953台車		◇			
	リンク式	JR北海道283系				←	
	リンク式 1軸操舵	東京地下鉄1000系					←
	リンク式	仙台市交通局2000系					←

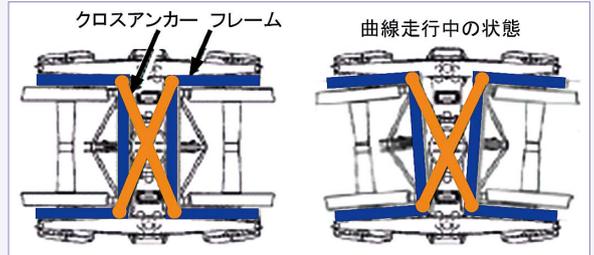


図3 シエッフエル台車の構造

る機器)によって駆動して、アタック角を能動的に制御する方式です。

③連動操舵台車(半強制操舵方式)

連動操舵方式は、曲線走行中に変化する台車-車体間の幾何学的な変位や、曲線通過中の超過遠心加速度などの物理量を利用して、機械的に操舵を行う方式です。

上記方式の操舵台車について、代表的な操舵機器構成と研究開発に取り組まれた時期、実運用が開始された時期を基準にしてまとめると表1のようになります。ここで解説する操舵台車がすべての方式を網羅するわけではありませんが、これまでに実用化された方式、新しい方式として試験を実施した操舵台車を中心に紹介します。

自己操舵台車

1970年代、南アフリカの貨車用台車として量産、実用化された方式が図3のシエッフエル台車です²⁾。シエッフエル台車は、前後二つのコの字形フレームを斜めに交差させたクロスリンクで接続した構造を採っています。リンクの動きによって片側の輪軸が台車

枠に対して舵を切る動作につられ、反対側の輪軸もアタック角を小さくする方向に操舵する動きを補助します。前後の輪軸が左右方向(せん断方向)に相対移動するような動作に対しては、クロスリンクによって抑えられ、蛇行動を抑制する効果があります。

JR東海では中央西線に383系振り子特急形電車(図4)を導入しています⁴⁾。ここで採用されている操舵台車は、台車の進行方向前側と後側で軸箱を支持するばねの硬さを変えた前後非対称台車です。これは、曲線に沿って曲がりにくい前軸の曲げ剛性を柔らかくし、硬く支持した後軸で台車の蛇行動を起こしにくくするものです(図5)。車両の進行方向に応じて前軸・後軸が反転するため、当初は方向転換をする際に空気圧を使って軸箱支持剛性を切り替える機能をもたせていました。しかし、その後の走行試験の結果、横圧が上昇しやすい輪軸は車両先頭の1軸と最後尾軸の4軸であることがわかり、1・4軸のみ軸箱を柔支持し、2・3軸を剛支持する方式に変更しました⁵⁾。このような構成によって台車構造を複雑にすることなく、導入のためのコストや保守費用を抑えて操舵台車を導入することができました。

アクティブ操舵台車

1983年から1986年にかけて、旧国鉄ではDT953高速電動操舵台車(図6)を試作して構内線や営業線での操舵走行試験を実施しました⁶⁾。この台車はさまざまな操舵機構を搭載した試験用台車で、とくに顕著な横圧低減効果が得られた方式は油圧強制操舵方式でした。油圧回路系を試験実施対象に応じて切り替え、①車体-台車間に操舵力を与える方法、②台車枠-軸箱間に操舵力を与える方法、③両者に強制的な

力を与える方法などの検証を行いました(図7)。ただし、試験当時には電子機器類を使った操舵制御系の信頼性が不十分であり、営業線でのアクティブ操舵の走行試験は行われませんでした。何かの制御系トラブルによって曲線区間で逆方向に操舵動作をしてしまった場合に、脱線の危険性があったためです。

交通安全環境研究所では①の車体-台車間に操舵力を与える方式について検討し、アクチュエーターを使ってボギー角を直接制御する、ボギー角アクティブ操舵台車として台上実験を実施しました⁷⁾。

連動操舵台車

DT953台車では、油圧源のような外からのエネルギーを必要としないボギー角(台車と車体の間に生じる旋回方向の回転角度)と操舵動作を連動させる方式の操舵制御に関しても試験を行いました。この方式の操舵制御もたいへん効果的で、大きな横圧低減効果が確認できました。リンクを用いて台車-車体間の角度を輪軸に伝える連動操舵台車は前述のアクティブ操舵台車と異なり、逆操舵動作が発生することが基本的に考えにくいため操舵動作の

信頼性が高く、その後の実用化に向けた研究につながりました⁸⁾。

JR北海道では石勝線、根室本線の振り子特急気動車として283系車両(図8)を導入しました。軟弱地盤で急な曲線が連続する根釧台地を高速で走行するため横圧を低減させるニーズが高く、ボギー角連動操舵方式が採用されました⁹⁾。ボギー角連動操舵方式は、曲線区間を走行する際に生じる車体-台車間のボギー角を機械式のリンク機構で伝達し、操舵リンクを介して曲線外側の軸距(前後の軸箱の間隔)を拡大し、同時に内側の軸距を短縮させる方向に力を与えます(図9)。このような機械的な動作によりアタック角を減少させて横圧の発生を抑制します。円曲線区間での横圧低減に大きな効果があるうえ、ボギー角がつく方向とレールの向きが逆にならなければ逆操舵が原理的に発生せず、安全性を低下させることはありません。

同様の方式は東京メトロ1000系車両(図10)¹⁰⁾や仙台市交通局2000系車両(図11)¹¹⁾に採用されています。地下鉄の路線には、在来線の線路形状と比較して非常に急な曲線が多くあり、通過時の横圧発生の対策に加えて、車輪の摩耗低減やきしり音(キーキーと



図4 JR東海383系振り子特急電車
(提供(協力)JR東海)



図6 DT953台車の外観

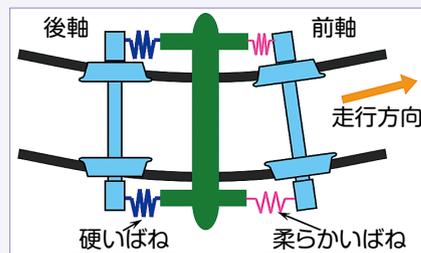


図5 前後非対称台車の構造

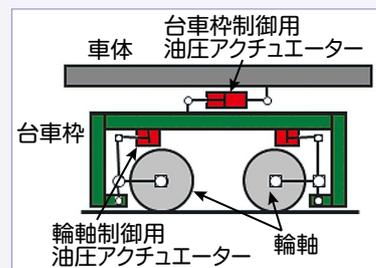


図7 油圧強制操舵方式の構造



図8 JR北海道283系振り子特急気動車
(提供: JR北海道)

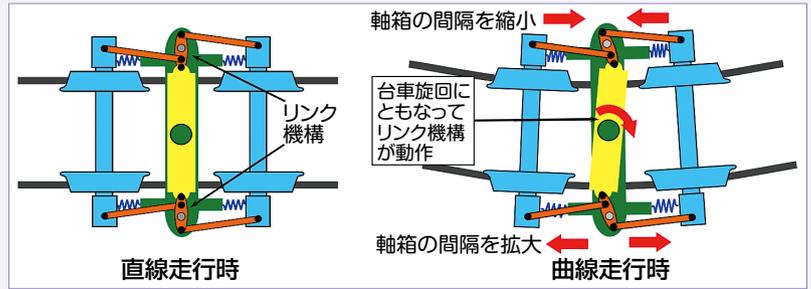


図9 ボギー角連動操舵台車の構造

いった高い耳障りな音)の抑制にたいへん有効です。JR北海道283系車両に搭載された操舵装置は横圧低減効果を優先して構成したため、ボギー角に対して多めの操舵量となるようにテコの比率を設定しました。一方で東京メトロの1000系車両では、なるべく台車構造を複雑にさせずに操舵台車を構成する思想で開発を進めたため、テコ比を低く抑え、操舵制御する軸も台車の片側の軸に限定しています。このような機構設計は、要求される性能と実現のためのコスト、保守作業の手間など非常に多くの事柄を考慮して総合的に最善の方法を決定する必要があるため、必ずしも高性能なシステムがもっとも望ましいわけではありません。



図10 東京メトロ1000系車両
(提供: 東京メトロ)



図11 仙台市交通局2000系車両
(提供: 仙台市交通局)

方法も使われています。操舵台車も車両側で対応する横圧低減手法として考案され、前に述べたようにさまざまな方式の操舵システムが開発・試験されてきました。実用化された操舵制御の方法は、逆操舵動作が発生する危険性が考えにくい自己操舵方式と連動操舵方式です。連動操舵方式は最近の地下鉄車両で採用される事例が増えています。

横圧低減効果が最も期待されるアクティブ操舵方式は走行試験による検証にとどまっておき、これまで思うように実用化に結びついていませんでした。一方、旧国鉄時代に走行試験を実施した当時からすでに30年以上の年月が経過して制御装置に用いられるコンピューターの性能、センサーの信頼性は格段に向上しています。このような進化した電子回路技術が鉄道車両に導入されていくことは容易に想像でき、操舵制御に限らずさまざまな分野で応用されていくことでしょう。また、アクティブ操舵方式と連動操舵方式を組み合わせ、台車の姿勢に連動させてアクチュエーターを動作させるような機能の複合によって信頼性の向上と大きな操舵制御効果を同時に実現するよう

なシステムも開発されていくものと考えています。

(鴨下庄吾/車両構造技術研究部
車両振動研究室)

操舵台車の今後

脱線の危険性を判断する指標として、脱線係数とよばれる横圧と輪重(車輪からレールに向かって掛かる上下方向の力)の比が使われています¹²⁾。横方向に押される力より上下方向に抑えつける力が強ければ、車輪がレール上に浮き上がることはないというイメージになります。厳密には脱線係数が悪化している継続時間や最大値などによって安全性が評価されますが、基本的に輪重が減少することなく、大きな横圧が発生しなければ脱線係数が悪化することはありません。横圧を低減させる技術には、急な曲線区間のレールに塗油を行ってレールの摩耗を防止する地上側の設備や、車両から油を散布する

文献

- 1) 風戸昭人: 振り車両・車体傾斜車両, RRR, Vol. 72, No. 3, pp. 28-31, 2015
- 2) 石田弘明, 鴨下庄吾, 石毛真: 曲線を滑らかに曲がる台車をつくる, RRR, Vol. 65, No. 7, pp. 14-17, 2008
- 3) 佐藤栄作: 操舵台車, RRR, Vol. 61, No. 11, p. 38, 2004
- 4) 須田義大, 目時哲郎: JR東海383系台車の開発と試験, 鉄道車両と技術, Vol. 1, No. 2, pp. 16-20, 1995
- 5) 山田幸一, 目時哲郎: 新型自己操舵台車の開発について, 鉄道車両と技術, Vol. 2, No. 4, pp. 23-27, 1996
- 6) 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, pp. 7-12, 1994
- 7) 松本陽, 佐藤安弘, 大野寛之, 水間毅, 須田義大, 道辻洋平, 谷本益久, 佐藤与志: ボギー角をアクティブに操舵する急曲線向け台車の研究開発(第1報・コンセプトと台上実験), 鉄道技術連合シンポジウム, S1-2-3, pp. 167-170, 2002
- 8) 佐藤栄作: 操舵台車における横圧と最近の操舵台車の技術動向, 鉄道車両と技術, Vol. 3, No. 7, pp. 12-19, 1997
- 9) 玉置俊治: 283系特急気動車の新しい挑戦, RRR, Vol. 53, No. 2, pp. 16-19, 1996
- 10) 下川嘉之, 水野将明: 新しい操舵台車の開発, 新日鉄住金技報, No. 395, pp. 41-47, 2013
- 11) 砥出朋史, 岩戸一典: 仙台市東西線2000系車両用リアメトロ地下鉄向けリンク式操舵台車の開発, 鉄道車両と技術, Vol. 22, No. 1, pp. 2-6, 2016
- 12) 鉄道総合技術研究所編: 在来鉄道運転速度向上試験マニュアル・解説, 研友社, 1993