

### 第35回

# 振り車両・ 車体傾斜車両

#### 日本における振り車両開発の歴史

振り車両・車体傾斜車両の開発は、1940年代にアメリカ、フランスでスタートしました。日本でも、1960年代前半には、小田急電鉄が種々の傾斜機構の走行試験を開始しました。1968年に国鉄も開発に着手し、はじめて行われたのは、北海道の狩勝実験線における、貨車を用いたTR96台車の実験<sup>1)</sup>(図1)です。台車に設けられたT型のリンクで車体を支持することにより、傾斜の回転中心(振り中心)を車体重心よりも高くして、いわゆる振子の原理で車体を傾ける方法を採用していました。振り・車体傾斜の呼称の使い分けには明確な定義がありませんので、本稿では、主に遠心力を使って傾斜する車両を「(自然)振り車両」、遠心力以外の操作力で傾斜する車両を「(強制)車体傾斜車両」と呼ぶことにします。

TR96台車による試験の結果、乗客が感じる遠心加速度の低減効果は認められたものの、リンク部の摩擦抵抗による振り動作の遅れや衝撃などが無視できないとされました。この結果を踏まえ、国鉄は591系試験電車(図2)を製作し、振り性能の向上を目指しました。振り機構には、車体を二個のローラーで支える「ころ」式を採用することで、傾斜抵抗の低減に努めました。最大傾斜角度6°の振りにより、パ

ンタグラフの移動量も大きくなりますので、空気シリンダーでパンタグラフの位置を制御する方式も試験されました。

1970年以降、東北本線、鹿児島本線などで走行試験を繰り返した後、振子の効果が十分に認められ、曲線通過速度の向上が可能であると判断されました。この頃、中央西線と篠ノ井線が電化され、名古屋～長野間に振り式電車を投入することが計画されました。これが381系電車(図3)です。

381系の振り機構には591系で好成績を収めたころ式自然振子が踏襲されました。ころ表面には焼き入れを施し転動面の寿命を延ばしています。また、ころ装置部を覆い、さらに与圧をかけて防塵対策を施しています。振り中心高さはレール面上2300mm(591系は2100mm)とされました。591系の試験結果から、振り中心は高い方が、振り作用が容易になるとの結果が得られたためです。振り中心を高くすると、車体下部の左右はみ出し量が大きくなりますので、最大傾斜角は5°に抑えられました。一方、屋根上のパンタグラフの移動量は小さくなりますので、これは固定式とされました。

1973年7月、381系は特急「しなの」でデビューしました。名古屋～長野間の所要時間は最速3時間20分となり、それまでより30分以上の短縮を実現しました。381系は、その後、紀勢本線、伯備線へと活躍の場を広げ、速達化の恩

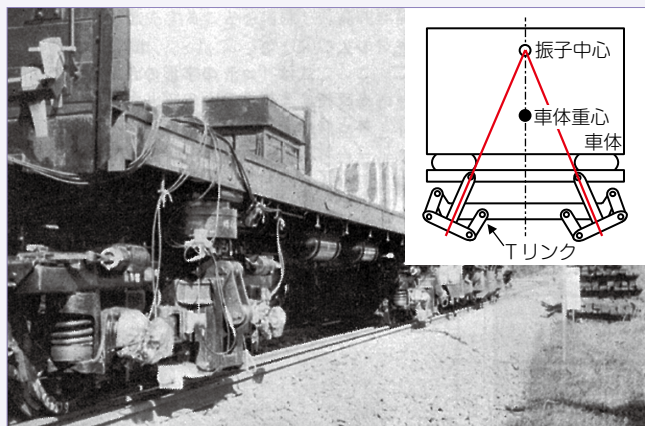


図1 TR96台車の振り機構と実験風景

出典：鉄道ピクトリアル1968年12月号、(株)電気車研究会発行

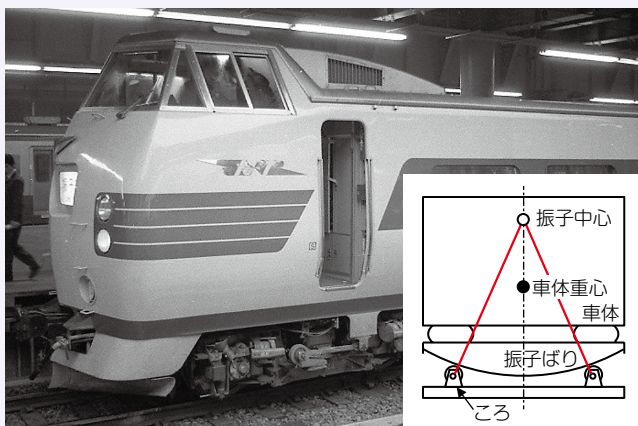


図2 591系振り試験電車と振り機構



図3 旧国鉄(現JR西日本)381系振り電車

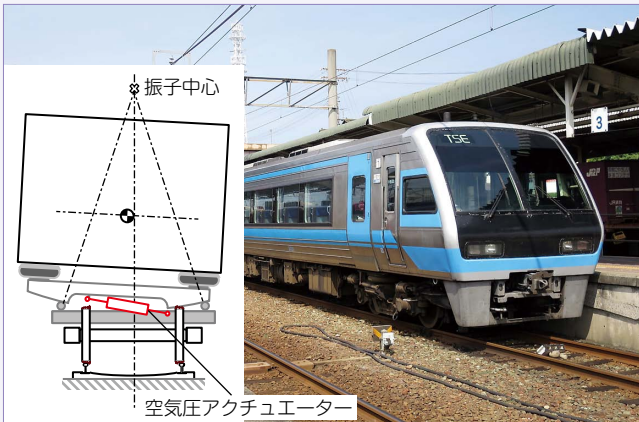


図4 制御付き振り機構とJR四国2000系気動車

恵を広めていったのですが、一方で、乗り物酔いや、適切な緩和曲線長がつけられていない曲線部での振り遅れによる乗り心地の低下が課題となりました<sup>2)</sup>。酔いの原因としては、円曲線入口の低周波の左右動揺などが挙げられました。そこで開発されたのが、「制御付き振りシステム」です。

### 制御付き振りシステムの誕生

制御付き振りシステムは、ころ式振り装置に空気圧シリンダーを付加して(図4)、曲線の入口、出口で振り角を制御して、乗り心地を向上させるものです。具体的には、車上の指令制御装置に事前に曲線情報(半径、カント、基準となるATS地上子から曲線始点までの距離、緩和曲線長、円曲線長)を記録しておき、ATS地上子を検知すると、車輪の累積回転数から走行距離を積算し、車両が曲線始点より一定距離だけ手前に達すると、指令制御装置から振り制御装置へ曲線情報が送られ、あらかじめ定められた制御関数に基づいて振り角の目標値が計算され、空気圧シリンダーにより振り角が制御されるというものです。

381系を改造して行われた一連の試験では、左右定常加速度が目安値(0.08G)以内であること、曲線出入口で車体傾斜の遅れを小さくし、車体ロール角速度や角加速度を小さく抑え(5°/s以下、15°/s<sup>2</sup>以下)、車体ロール角速度の波形が前後対称で、かつ正弦波状で滑らかに車体傾斜させ

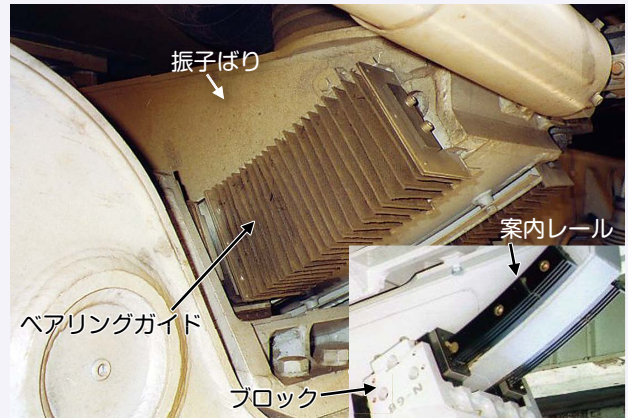


図5 ベアリングガイド式振り装置

ることなどを基準に制御の評価が行われました。その結果、空気圧シリンダーに与える振り角の目標値としては、曲線形状である台形形状に、緩和曲線入口での空気圧シリンダーの動作遅れを補償するステップを付加したものが最適と判断されました。この形状は、試験時の名称をそのまま残し「CAモード」と名付けられました。

制御付き振りシステムが本格的に実用化されたのは、JR四国2000系気動車(1989年～)(図4)が最初になります。実は振りを採用した気動車は、世界的に見ても、それまでありませんでした。それは、車体の振り動作に推進軸が抵抗となることや、エンジン回転力の反作用で車体が推進軸の回転方向と反対側に傾いてしまう、などといった問題があったからです。推進軸の伸縮摩擦を小さくすること、2台のエンジンを搭載し、推進軸の回転方向を逆向きとすることによって、課題は解決されました。

### ベアリングガイド式振り装置

さらなる曲線通過速度向上には、振り中心をいかに下げることが課題となりました。ころ式振り機構で振り中心を下げるには、転動板の曲率を大きくしなければならず、そうすると、ころとの接触面圧が増大して、転動抵抗が大きくなってしまいます。

そこで考案されたのが、ベアリングガイド式振り装置(図5)です。振りばりの側面に取り付けた4組のベアリングガイドレールとベアリングブロックから成り、このベアリングブロックを台車枠のベアリングブロック受けに緩衝ゴムを介して固定し、車体を傾斜動作させながら上下荷重と前後力を伝達します。ガイドレールの曲率を変えることで、振り中心高さを自由に設定できるため、車体傾斜時の重心移動量を小さくして内軌側車輪の輪重抜けを抑えることができます。また、転動抵抗がころ式の半分以下で振り動作が滑らかになります。さらに、本体の構造および防塵装置がシンプルで、装

置全体を小型軽量にでき、台車の高さを低く抑えることができます。ベアリングガイド式振り装置は、JR東海383系電車、JR西日本283系電車などのほか、耐寒耐雪構造が求められるJR北海道281系、283系気動車に採用されました。

以上のように進化してきた振り車両は、今日も全国で活躍しています。また、国内だけでなく、オーストラリア、台湾でも活躍しています。

### 空気ばね車体傾斜車両の実用化

1968年、小田急電鉄と住友金属工業(現:新日鉄住金)らは、空気ばね車体傾斜システムの開発に着手しました<sup>3)</sup>。車体荷重を支える空気ばねの高さを制御して、車体傾斜を実現しようというものです(図6)。1970年には、ORPT車と呼ばれる試験車両を製作し、走行試験を実施しました。その後しばらく、開発は中断されていましたが、制御理論やデジタル制御技術、ハードウェア技術が急速に進歩し、それまで難しいとされていたシステムも実用化が可能になってきました。

1997年、名古屋鉄道は、空港アクセス特急向けに、空気ばね車体傾斜システムの開発に着手しました。空港へつながる常滑線は、曲線割合が高く、曲線通過速度の向上が重要と判断されたためです。2005年まで十数回の実車試験が繰り返され、安全性の確認やシステムフェール時のバックアップ機能の検証については幾度となく改良が加えられました。同車は、空気ばね車体傾斜システムを搭載した最初の電車であったため、パンタグラフの左右移動についても入念な確認が行われ、曲線での架線の左右偏倚管理基準の変更や、すり板の改良が行われました。そして2005年、2000系電車「ミュースカイ」(図7右上)に搭載され営業運転を開始しました。走行地点検出にはデータデポシステムが用いられ、高精度な地点検

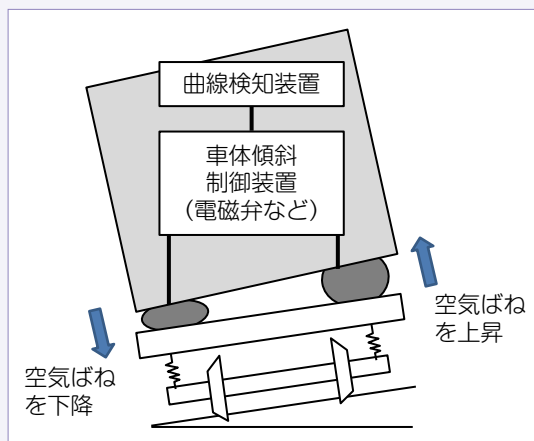


図6 一般的な空気ばね車体傾斜システム

出を可能としています。また、外軌側空気ばねの上昇と同時に、内軌側空気ばねの下降を行うことで、すばやい傾斜を実現しています。最大傾斜角は2°です。

同時期には、川崎重工業も開発に着手していました。同社の開発目標は、簡素で任意の路線に導入できる車体傾斜機構を車両に持たせる、というものでした<sup>4)</sup>。曲線検出には、先頭車の制御装置に内蔵したジャイロセンサーから得られる車体のヨー角速度と走行速度から、曲線の方向と曲率を計算する手法が用いられました。曲線位置のデータベースを用いた方式ではないため、検知に遅れは生じるものの、線区を選ばず走行できる利点があります。傾斜角度は、制御装置内蔵の加速度センサーから得られる左右加速度に基づいて算出されます。この角度を実現するように、高さ調整弁(LV)に内蔵された車高センサーの情報を用いて空気ばねの高さを制御します。このシステムは、2000年にJR北海道261系気動車(図7左上)で実用化されました。同車は、外軌側空気ばねの伸縮で最大2°の傾斜を実現しています。

古くから車体傾斜技術の研究に取り組んでいた小田急電鉄も、種々の技術の進展を受けて、日本車輛製造とともに最大2°の空気ばね車体傾斜システムを開発しました。7000形電車を用いた検証試験の後、2005年に50000形電車に搭載されました。連接車両であることを活かし、空気ばねを通常の車両よりも高い位置に設置して、遠心力による外傾の影響を抑えています。その後、日本車輛製造はこのシステムを発展させ、台湾鐵路管理局TEMU2000形電車(図7下)に搭載しました<sup>5)</sup>。同システムは、高さ調整用のLVロッドの長さを見かけ上伸縮させることで傾斜を実現しています。また、左右の空気ばね内部の空気を強制的に移動させるプースト装置と呼ばれる装置を搭載すること



図7 代表的な空気ばね車体傾斜車両



図8 イタリア国鉄ETR610電車(ペンドリーノ)

で、傾斜速度の向上と空気消費量の削減を実現しています。

在来線車両で実用化された空気ばね車体傾斜システムは、新幹線車両にも搭載されるようになりました。新幹線の曲線通過速度向上には、さほど大きな傾斜角は必要なく、台車構造の大きな変更を伴わない空気ばね式が有利と考えられたためです。2007年には、JR東海・西日本のN700系新幹線電車が、最大傾斜角1°のシステムを搭載して営業運転を開始しました。また、2011年には、JR東日本E5系新幹線電車が最大傾斜角1.5°のシステムを搭載し、その後、同車と並結運転を行うE6系新幹線電車にも搭載されています。

#### 海外の車体傾斜車両

海外の車体傾斜車両の多くは、リンク式の強制車体傾斜システムを採用しており、発生力の大きなアクチュエーターで、例えば8°程度の大きな傾斜角を持つのが特徴です。特にイタリアで開発されたペンドリーノ方式の車両(図8)は、各国に輸出され広く使用されています。スウェーデンのX2000車両も6.5°のリンク式強制車体傾斜システムを持ち、ドイツや中国にも輸出されました。スイスでは、車体幅を抑えるために、空気ばねを台車中央に配置して、振りばり電動アクチュエーターで傾斜させるユニークな台車を持ったICN車両が運行されています。

スペインのTalgoペンデュラルのように、自然振り方式を採用した車両もあります。これは空気ばねを車体重心よりも高い位置に配置し、遠心力で車体傾斜を行うものです。また、スイスでは、輸送力と速達化を両立する総2階建ての車体傾斜車両を製作中です。Bombardier社が開発したWAKOと呼ばれる“車体ロール補償装置”を用いて2度の傾斜を行います。これはリンク式の回転中心を車体重心よりも高い位置に配置して遠心力も活用しつつ、電動油圧アクチュエーターで傾斜を行うシステムです。傾斜角をさらに大きくしたシステムの開発も進められているようです。

#### 今後の展望

近年、新製される車体傾斜車両は、空気ばね式を採用する例が増えています。これは、複雑な構造の台車を必要とする振り車両に比べて、シンプルで低コスト、省メンテナンスであることが最大の利点としてとらえられているためと思われます。

空気ばね式は、曲線が比較的少なく、振り式ほどの高い曲線通過速度を必要としない線区に適したシステムと言えます。しかし、現行の振り車両が走行している線区で、同等の速度での走行を求められる場面も出てきています。その際に最大の課題となるのは空気消費量です。空気ばねは内容積が大きく、曲線の都度、空気を使い捨てにしている、いくら空気があっても足りません。そのために大きなコンプレッサー、タンクを搭載する必要があり、車両のぎ装設計にも影響を与えてしまいます。そこで先述のように、左右空気ばねの空気を強制的に移動させるシステムを実用化した例も出てきています。今後、車体傾斜に使用した空気の回生技術などの発展が求められます。

振り式が必要とされるのは、曲線が比較的多く、大きな傾斜角を必要とする線区になるでしょう。現状の制御付き振り車両の性能改善としては、より高出力、高精度のアクチュエーターで、振りに特有のふらつきを抑え、理想とされる傾斜パターンでの振子を実現することが求められます。鉄道総研でも、電動油圧アクチュエーターの適用や、空気圧アクチュエーターの性能向上に取り組んできました。乗り心地の評価指標を評価関数に用いた傾斜パターンの生成手法と合わせて、乗り物酔いのない快適な振り制御システムの実用化目前のところに来ています。一方で、振り式の弱点である複雑な台車構造については、単純化、省メンテナンス化が必須になるでしょう。

(風戸昭人/車両構造技術研究部 走り装置研究室)

#### 文献

- 1) 副島廣海：曲線を高速で走るための車両、鉄道ピクトリアル、Vol.18, No.12, p.33~26, 1968
- 2) 湯川靖司ほか：振り電車の振り制御システム、鉄道における国際サイバネティクス利用国内シンポジウム論文集, p.346~350, 1983
- 3) 小泉智志：住友金属工業における車体傾斜システムの開発、鉄道車両と技術, Vol.11, No.11, p.34~40
- 4) 平山真明ほか：空気ばね車体傾斜装置の開発、川崎重工技報, p.30~33, 2002
- 5) 日本車輛製造：日本車両の車体傾斜システム, [http://www.n-sharyo.co.jp/business/tetsudo/making/tilting\\_system.html](http://www.n-sharyo.co.jp/business/tetsudo/making/tilting_system.html), 2014