

# 車両のキーテクノロジー



岡本 勲  
Isao Okamoto  
技術顧問  
[専門分野] 台車技術



秦 広  
Hiroshi Hata  
車両制御技術研究部  
主管研究員  
[専門分野] 車両電気

## はじめに

東海道新幹線の開業当時から最近までの新幹線の発展の過程における車両のキーテクノロジーとして、台車技術、動力システム、機械ブレーキなどについて、鉄道技研や鉄道総研がその研究や開発に果たした役割を交えながら解説します。

## 台車技術

### 台車だ行動の防止<sup>1)</sup>

営業速度が200km/hを超える新幹線電車を開発する際の大きな課題の一つが、いかにして台車だ行動の発生を防止するかということでした。もし高速走行時に台車が激しく左右動するだ行動が発生すると、乗り心地を著しく悪くするだけでなく、車両や軌道を壊したり、脱線の可能性が生じるからです。

鉄道技研では、東海道新幹線の計画が発表される以前の1957年ごろから高速走行時におけるだ行動の性状を明らかにするため、台車の1/10模型や1/5模型によるだ行動実験を実施しています。また、模型実験と並行して理論的研究も進め、新幹線用試作車の設計に先立ってだ行動に関与する台車の諸元を決定するための計算を行っています。さらに、1960年から1年をかけて、実物大の試験台車と前年に完成した車両試験台を用いて250km/hまでのだ行動実験を行い、理論的研究結果の確認とだ行動に対する各種因子の影

響を調査しています。

こうした研究の結果、高速走行時に発生する台車だ行動の防止が、高速台車の設計上きわめて重要であり、台車だ行動が発生する限界速度を高めるためには、①車輪踏面勾配を小さくする、②軸箱支持装置に遊間が生じないようにし、軸箱支持剛性の適値を選定する、③台車に適切な回転抵抗を与える、④軸距を大きくするなどの方策が有効であることを明らかにしました。

以上の研究成果を採り入れた6種類の試作台車と6両の試作車両が1962年に完成し、試作台車は、車両試験台でだ行動試験と強制振動試験を行い、だ行動発生の有無と振動特性を調査しています。だ行動試験では、すべての台車において250km/hまで台車だ行動は発生しませんでした。

試作車両は、モデル線での走行試験に供されましたが、その速度向上試験において、DT9003台車とDT9005台車にはげしい台車だ行動が発生しました。DT9003台車のだ行動は、約180km/h以上の速度で、特定の曲線で発生しました。このだ行動の原因と考えられたボルスタアンカーの両端ピン部の遊間を小さくし、台車の回転抵抗を増大することによりだ行動の限界速度を高めることができました。DT9005台車のだ行動は、243km/hの速度で発生し、同じ箇所をほぼ同じ速度で数回走行している間に次第には

げしさを増し、最後にはレールにかなりの通り狂いを発生させました。対策として、軸箱支持装置の支持剛性を前後方向は400kg/mmから2100kg/mmに、左右方向は500kg/mmから800kg/mmに大きくすることにより解決することができました。モデル線では、256km/hまでの高速試験を完遂させ、台車だ行動の性質と防止法についての貴重な多くの資料を得ることができました。

なお、6種類の試作台車は、軸箱支持装置と軸ばね装置が相違している以外は共通に設計され、横剛性を利用した空気ばね、車体重量をすべて側受で支持する全側受支持方式、車輪踏面形状は1/40勾配の円すい踏面を採用していました。その台車形式と軸箱支持方式は、DT9001：SIG式（日車）、DT9002：重ね板バネ式（汽車会社）、DT9003：シュリーレン式（近車）、DT9004：リンク式、ミンデン式、IS式（住金）、DT9005：可とう軸はり式（川車）、DT9006：リンク式（日立）です。  
**走行安全性と振動性能<sup>1)</sup>**

また、鉄道技研では、脱線に対する安全性の判定基準の作成や曲線走行時の車両の転覆に対する限界風速の検討など高速車両の走行安全性を確保するための研究、高速車両の振動性能の理論的、実験的な研究とばね装置の諸元、車体振動加速度の許容限度の検討などを行っています。

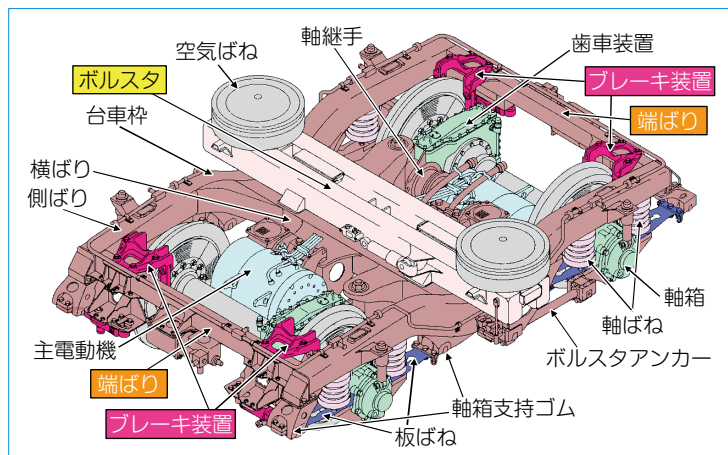


図1 新幹線電車用DT200形台車

1962年～1964年の試作車両や量産車のモデル線における走行試験では、車両の振動や走行安全性を調査し、車両の設計および軌道の整備に関する資料を得ることができました。さらに、1964年10月の営業運転開始後も走行安全性の確保と乗り心地の向上を目的に、走行試験を1～2ヶ月ごとに実施し、軌道および車両の保守や振動性能向上のための資料を得て、1965年10月からの東京～新大阪間3時間10分運転や列車の増発を実現しました。

#### 車端衝撃と緩衝装置<sup>1)</sup>

新幹線車両の連結器と車体をつなぐ緩衝装置については、緩衝器の必要性を検討し、当時、電車で用いていたRD-1形ゴム緩衝器を採用しました。しかし、1965年10月に故障編成を回送する試験で、列車の座屈と連結部の破損が発生したため、列車の座屈に関する理論的な検討を行い、行程はじめのエネルギー吸収の大きいRD-10形ゴム緩衝器を開発し、問題を解決しました。

#### 東海道新幹線0系量産車用DT200形台車の開発<sup>1)</sup>

量産車用DT200形台車の設計は1963年2月に始まり、それまでの研究成果や試作台車の走行試験結果などを採り入れて1964年の初めに完成しました。

本台車は、“まくらばり(ボルスタ)”を有し、まくらばり上面に装架した空気ばねで車体を直接支持する構造を採用しているのが特徴で、台車軸距2500mm、台車質量10100kg、ばね下質量4660kgで、全体構成を図1に示します。

#### ○軸箱支持装置

試作台車で8種類の方式を比較した軸箱支持装置は、モデル線での走行試験結果などから“たわみ板ばねと緩衝ゴムを併用したIS式”を選定し、軸箱支持剛性は、前後方向3000～4000kg/mm/軸箱、左右方向1500～2000kg/mm/軸箱に変更しています。

#### ○車体支持装置

車体支持装置は、まくらばり、空気ばね、左右動ダンパー、側受、車体と台車間のけん引力を伝達するボルスタアンカー、中心ピンなどで構成し、まくらばりの構造を試作台車よりシンプルにしています。

1961年に新幹線車両用台車に空気ばねの横剛性を利用して揺れまくらつりをなくす方式の採用を決め、特殊ダイヤフラム形空気ばねの開発を加速して実用化し、採用しました。

台車に回転抵抗を与えてだ行動を防止するための機構として、側受で全車体荷重を支持する全側受支持方式を採

用しています。

#### ○車輪、車軸

車輪は一体圧延車輪で、直径910mm、1/40勾配の円すい踏面形状を採用しています。材質については、新幹線の一日の走行距離が長いいため車輪踏面の摩耗が心配され、材質や熱処理法の検討をしましたが、結局、実績のあるSTY80リムクエンチ油圧抜き穴付車輪を採用しています。

車軸の材料にはS38Cを用い、これに高周波焼入れの熱処理を施しています。この高周波焼入れにより車軸表面に硬いマルテンサイト組織が形成されて耐摩耗性や耐衝撃性が向上し、同時に、車軸表面に圧縮残留応力層を生じさせ、材料の疲労強度を向上させています。

#### ○駆動装置

駆動装置は、特急電車「こだま」などで実績のある平行カルダン駆動方式を採用することとしました。しかし、車速が速くなった分、歯車の強度や潤滑が問題となる可能性があり、歯車装置を試作して実物試験装置で種々の試験を行い、問題のないことを確認しています。

#### 新幹線電車用ボルスタレス台車の開発<sup>2)</sup>

新幹線は、その開業後間もないころから、スピードアップや乗り心地の向上をめざして、新しい台車の試作や走行試験を行ってきましたが、実用化には至りませんでした。

1980年ごろからは、新幹線の最高速度を270～300km/hへ向上するため、新幹線電車用ボルスタレス台車の開発を始め、国鉄時代の末にDT9022～DT9026の数種類の台車を試作し、車両試験台試験や走行試験を行っています。しかし、国鉄時代には、目標とする性能の台車を完成できなかったため、国鉄の分割民営化後、鉄道総研が中心となり、1987年から前記の試作

台車の中からDT9023台車を基本に、本台車の改良すべき点として

- ・高速走行安定性と曲線走行性能をバランス良く向上する
  - ・車体の上下動揺やロール振動乗り心地を向上する
  - ・従来のボルスタ付台車対応の台車上の剛性の低い車体台枠構造や輪軸の回転質量アンバランスが原因で生じる車体の高周波びり振動を低減する
  - ・台車枠端ばりを省略して台車を小型化し、台車のばね間質量を軽減する
  - ・輪軸、軸箱体、歯車装置など台車のばね下質量を軽減する
- などを目標に開発を進めました。

試作した台車は、鉄道総研の車両試験台で450～500km/hまでの走行安定性や防振性能が良好であることを確認し、その後、JR東海の100系電車に取り付けて、走行試験と約30万キロの耐久試験を2回行いました。1990年ごろには新幹線電車用ボルスタレス台車として実用化できる見通しが得られ、1992年3月に営業を開始したJR東海の300系新幹線電車“のぞみ”の台車として実用化されました。

以後、JR各社の新幹線電車用台車の基本として、従来のDT200形台車に替わって採用されています。

本台車は、従来のDT200形台車の場合の“まくらばり（ボルスタ）”を無く（レス）し、台車枠上面に装架した空気ばねで車体を直接支持する構造を採用しているのが特徴です。

台車質量は6630kg（誘導電動機を採用した場合）、ばね下質量は3500kgで、DT200形台車に比べて7割程度に軽量化しています。こうした台車の大幅な軽量化などにより、台車軸距は、高速化したにもかかわらずDT200形台車と同じ2500mmとしています。

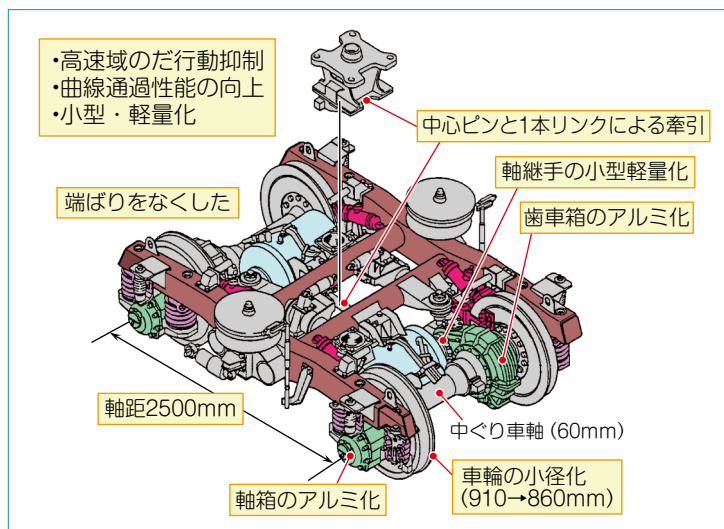


図2 DT9023E/F ボルスタレス台車

図2の台車の全体構成や以下の装置の説明は、鉄道総研で試作したDT9023E/F台車を例としています。

#### ○車体支持装置

車体支持装置は、大きな水平変位を許容するボルスタレス台車用空気ばねで車体を直接支持しており、曲線を走行する際は、空気ばねが水平方向に大きく変形することで台車が車体に対し旋回できるようにしています。

車体～台車間の前後力の伝達は、台車の仮想回転中心に取り付けた一本リンクで行っています。

また、高速走行時のだ行動を防止するため、車体～台車枠間に台車枠側ばり外側に平行してヨーダンパを取り付けています。ヨーダンパは、DT200形台車の側受の摩擦力による場合に比べて、雨水など環境条件に左右されない安定した台車の回転抵抗を付与することができます。

#### ○軸ばね、軸箱支持装置

“円筒積層ゴム併用ウイングばね式”を採用しており、上下荷重はたわみ特性が線形なコイルばねが負担し、前後、左右荷重の負担と軸箱の支持案内は円筒積層ゴムが負担しています。コイルばねと円筒積層ゴムを軸箱の前後に対称（ウイング）に配置しているの

で、軸箱の支持案内に無理がなく、円筒積層ゴムの前後、左右の支持剛性を適切に選定することにより、高速走行安定性と横圧の低減など曲線走行性能をバランス良く向上させることができます。

○輪軸、駆動装置など

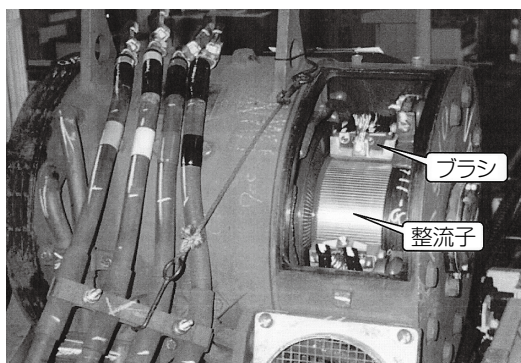
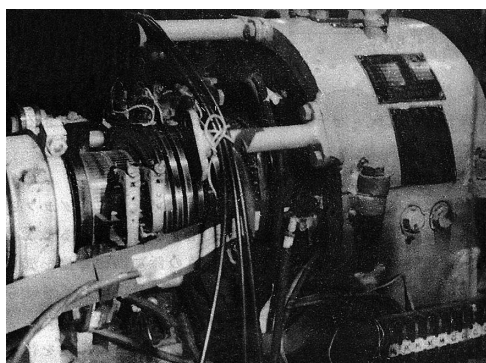
ばね下質量を軽くするため、車輪直径を860mmに小さくし、車軸中心に直径60mmの中ぐり穴を設けています。また、高速車両の場合、輪軸の回転質量アンバランスにより車体に高周波振動が発生して乗り心地を悪くすることがあるため、輪軸組立の動的アンバランス量を5kg・cm以下を目標とするようにしました。

車軸軸受は、DT200形台車では円筒ころ軸受と深みぞ玉軸受を併用していましたが、軸受内の左右遊間を極力小さくした“つば付円筒ころ軸受”を採用し、軸箱を小型、軽量化しました。

さらに、軸箱や歯車装置箱の材料を従来の鋳鋼製からアルミ合金製に替えてばね下質量の軽量化を図っています。

**振動乗り心地の制御<sup>3)</sup>**

鉄道車両の振動乗り心地を向上する方法としては、車体を支持しているばね、ダンパーの諸元の適値を選定するのが一般的です。しかし、新幹線の走行速度が速くなると軌道からの加振に加え、トンネル走行時に車体に作用す

図3 直流電動機の整流子とカーボンブラシ<sup>5)</sup>図4 整流試験機<sup>6)</sup>

る空気力なども大きくなり、こうした方法だけでは限界があります。

そこで、鉄道総研では、車体の左右振動を加速度センサーで測定し、車体に加える制御力を計算し、可変減衰ダンパーによって抵抗力を発生させる“セミアクティブサスペンション”を開発しました。この左右振動制御システムは、JR西日本の500系新幹線で実用化され、その後、多くの新幹線で標準的に採用されるようになっていきます。

### 動力システム、ブレーキ関係 動力システム<sup>4)</sup>

動力システム関係では、東海道新幹線の開発当時は主電動機について重点的に取り組みました。当初は架線の交流60Hzを用い、後述の直流電動機と基本的に同じ構造の交流整流子電動機が研究され、試作機による試験を行いました。その後シリコン整流器が発達してきたため、従来からの実績のある直流機とすることとなりました。開発のキーポイントの一つは数百Aの電流を回転部の導体に供給するカーボンブラシと整流子（回転部ブラシと接触して電流を受ける部分）でした（図3）。

振動などにより瞬間的でも接触が悪くなるなどの要因で接触面に火花（アーク）が発生します。電車の主電動機は4極、つまり固定側に90°間隔でプラス、マイナス、プラス、マイナスのブラシが設けられます。火花が大きくなると隣の極まで達してしまい、

回転部の導体に流れるべき電流が短絡されて大きな事故電流が流れてしまいます。これをフラッシュオーバーと呼びます。これは直流機の故障の中で多くを占めていて、新幹線に必要な大容量化の際も注意が払われました。

鉄道技研では、フラッシュオーバーが発生しやすい電流急変時の火花の発生状況について、試験機（図4）によって定量的に評価しました。また、整流子面には亜酸化銅を主体とする皮膜ができますが、この状態が火花の発生に影響します。これについて試験機によって定量的に評価しました。また、開業後高速走行時にブラシホルダとブラシの間に小さな異物が挟まりブラシが固着して火花発生の原因となることがありました。この異物を成分分析してバラットの碎石の小片であることを明らかにしました。これは冷却風の取り入れ口から入ったものと推定されました。

もう一つのキーポイントは温度上昇で、新幹線では高速化のため主電動機容量を大きくする必要がありました。標準軌の採用で主電動機を収める左右車輪間のスペースは大きくなりましたが、後述のように車輪側面にディスクブレーキを取り付ける必要が出たため、在来線とほぼ同じ大きさで大容量を達成しなければならなくなりました。さらに、シリコン整流器の出力電流は直流に脈動する成分が重畳する脈流で、これにより主電動機の温度上昇の面では条件が厳しくなりました。試作した

主電動機を用いた試験電車での結果を踏まえて、量産車用の主電動機が製作されました。開業直前の1964年8月の全線の試験運転で、温度上昇の状況から限流値（起動電流）を調整する必要性を提言しました。

1980年代に電車の主回路方式にインバーター制御が採り入れられるようになりました。国鉄末期に新幹線電車向けのインバーター制御方式の主回路の研究開発が始まり、鉄道技研では試作機器の試験などが行われました。1987年に鉄道総研に移行した後も引き続き電力変換装置などの試作、試験が行われました。JR東海は300系「のぞみ」の開発でインバーター制御を実用化して、先述のブラシ、整流子の問題からの解放などの成果を得ました。現在は国内外ともに誘導電動機をインバーター制御する方式が主流です。1990年代の永久磁石の高性能化を背景に鉄道総研では永久磁石同期電動機の開発を行い、1998年にフリーゲージトレイン試験電車（一次車）に搭載しました。JR東日本は新幹線の試験電車Fastech360に搭載して試験を行いました。海外ではイタリアのAGVが2012年から300km/hの営業運転を行っています。永久磁石機は本質的に誘導機より高効率で省エネ上は有利ですが、誘導機のように1台のインバーターで複数のモーターを制御することができないなどのデメリットもあり、今後の動向が注目されます。

### 機械ブレーキ<sup>7)</sup>

機械ブレーキでは、電気ブレーキが使えない場合でも最高速から安定的に停止するという大きな課題がありました。そこで新幹線開発当初のブレーキ方式の検討ではディスクブレーキ

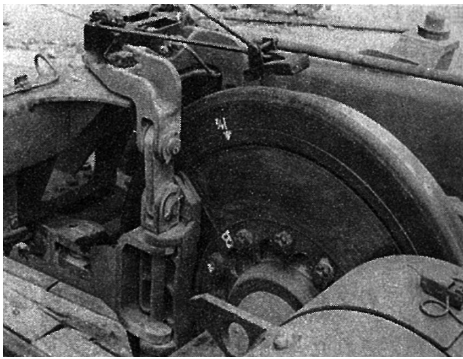


図5 車輪側ディスクブレーキ<sup>7)</sup>

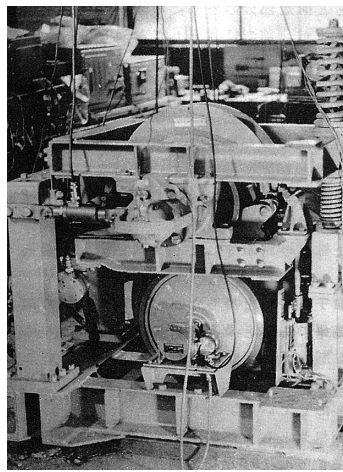


図6 模型粘着力試験装置<sup>9)</sup>

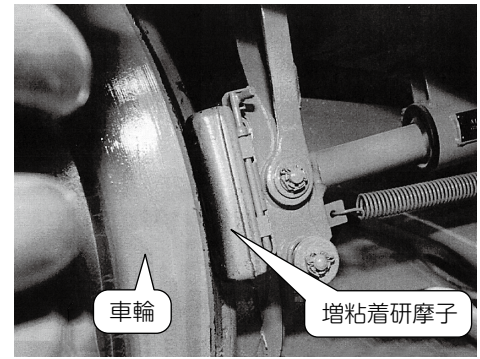


図9 増粘着研摩子<sup>5)</sup>

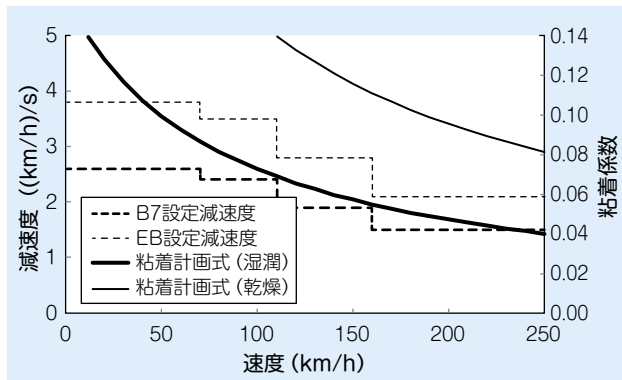


図7 粘着計画式と量産車(0系)の設定減速度<sup>5)</sup>

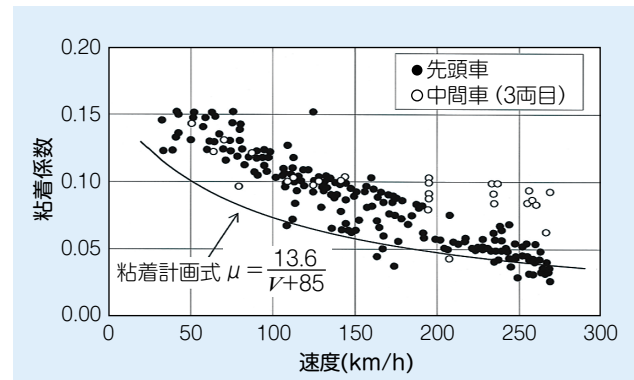


図8 現車での粘着試験結果<sup>5)</sup>

(当時は円板ブレーキと称していました), 車輪路面ブレーキに加えて渦電流レールブレーキ, 空力ブレーキ(風圧ブレーキと称していました)も研究されました。その後ぎ装の制約, 信頼性, 経済性などさまざまな観点からの検討の結果, 最終的には車輪側面のディスクブレーキのみということとなりました(図5)。車輪路面ブレーキは試験台車に設置スペースを設けましたが, 車輪の温度上昇の懸念から使用しませんでした。ディスクブレーキの採用にあたってはディスク, ライニングそれぞれについてさまざまな材料を用いたものを試作, 試験しました。ディスクは鋳鉄, 鋳鋼それぞれに添加物を変えたもの合計6種類の試験を行った結果, ニッケルクロムモリブデン鋳鉄としました。また, ライニングは銅系焼結合金, 鉄系焼結合金, レジン系などの試験の結果, 銅系焼結合金としました。最大の理由は, 高速においても

一定でかつばらつきのない摩擦係数を期待できたことでした。

その後, 高速化への対応でディスクは鍛鋼製が多く使われています。

#### 粘着<sup>8)</sup>

新幹線の開発当時のもうひとつの重要なポイントは未知の高速域での粘着係数の推定でした。これはブレーキ力の設定の際の重要な判断材料になります。そこで鉄道技研の所内に試験装置(図6)を設けて実験を繰り返しました。

その結果, 0~250km/hにおいて得られた粘着係数は速度上昇とともに双曲線的に低下することがわかりました。この実験結果に在来線での現車試験で得られたデータなどを考え合わせた結果, ブレーキ力設定の目安とする「計画式」を,

$$\text{乾燥時 } \mu_D = 27.2 / (V + 85)$$

$$\mu_D: \text{乾燥時の粘着係数}$$

$$V: \text{速度 (km/h)}$$

$$\text{湿潤時 } \mu_W = 13.6 / (V + 85)$$

$$\mu_W: \text{湿潤時の粘着係数}$$

$$V: \text{速度 (km/h)}$$

としました。量産車のブレーキ力(減速度)は, 常用最大ブレーキ(B7)は上記の $\mu_W$ を超えないように, 非常ブレーキ(EB)は $\mu_D$ と $\mu_W$ の中間に設定しました(図7)。

後年に粘着性能試験を行った結果を図8に示します。この式は現在でもブレーキ力設定の際に目安とされています。

それでも滑走をなくすことはできないので, 車輪の回転速度から滑走を検知してブレーキ力を一時的に減らして再粘着したら戻す滑走検知装置(自動車のABSに相当します)や, 車輪の表面に粗さを与えて粘着係数を大きくする増粘着研摩子(図9)を開発しました。滑走検知装置は, 1990年代に滑走を抑制しつつブレーキ力の低減量を減らすなどの改良を提案し実用化されました。

図8から, 編成中で先頭車が粘着係

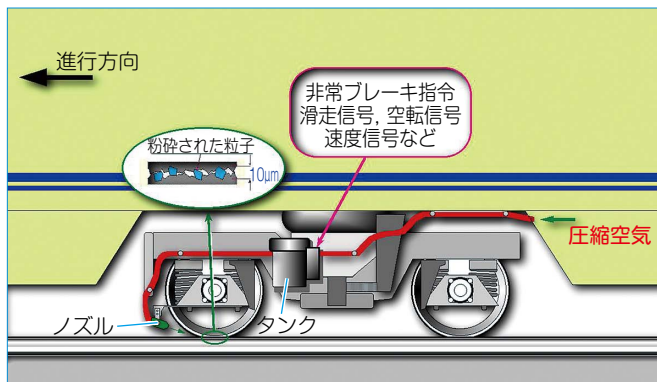
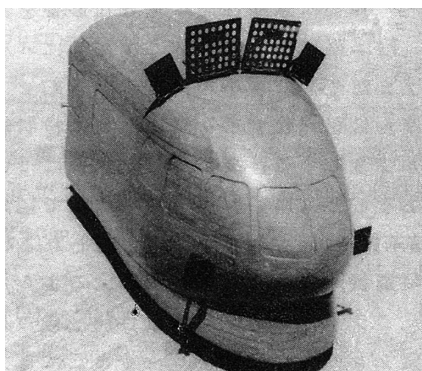


図10 セラジェットのイメージ図



図12 現在開発中の空力ブレーキ

図11 新幹線開業前に研究された風圧ブレーキ<sup>10)</sup>

数が小さく、中間車が大きいことが読みとれます。JR各社の新幹線電車では前方の車両のブレーキ力を弱めに、中間車、後尾車を強めにする方法が現在広く使用されています。

また粘着の改善のために機関車では砂まきを行っています。ヨーロッパの高速車両でも砂まきを行っている例は多く見られます。1990年代に、各種セラミックス粒子による試験の結果、アルミナが少ない使用量で大きな増粘着効果を得ることができることを明らかにしました。「セラジェット」と名付けたこの装置のイメージを図10に示します。圧縮空気ですズルから吹きつけられた直径0.3mm程度のアルミナが車輪とレールで砕かれて10 $\mu$ m程度になり粘着の向上に寄与します。新幹線で広く使われています。

#### 現在の取り組みのトピックス<sup>9)</sup>

最後にトピックスとして、東海道新幹線の開発時に実用に至らなかったも

ので、最近新たな視点から取り組んでいる件を紹介します。風圧ブレーキと称した空力ブレーキが当時研究対象とされたことは先述のとおりで、1960年には図11のような模型を作って風洞試験を行いました。空力ブレーキはその後浮上式鉄道や新幹線の試験電車で試みられました。最近鉄道総研で緊急時のブレーキ力をアシストする新たな空力ブレーキを開発しています(図12)。高さ約20cm、横方向は2分割で合計約100cmの抵抗板を屋根上に複数設けるもので、格納時の厚さが約6cmと薄いことが特徴です。抵抗板の形状や配置は数値計算と風洞試験で大きな空気抵抗を得られるよう最適化しました。また動作させるのに動力や制御が不要なことも大きな特徴です。

#### 今後の展望

これまで新幹線は重大な事故もなく、順調に発展してきました。今後の新幹線も安全性や信頼性を優先しつつ、時代の要請としての最高速度や曲線走行速度の向上、乗り心地の向上、走行騒音の低減、省エネルギー、保守の省力化などのニーズに応えるために

- ・台車諸元を正確に実現するための台車構成や製作方法の研究
- ・台車のばね間質量やばね下質量の徹底した軽量化と小型化
- ・セミアクティブサスペンション、ア

- クティブサスペンション、車体傾斜装置など乗り心地制御の高度化
- ・より低損失で小型・軽量の電気機器の開発
- ・高速化、地震などの緊急時に対応したブレーキ性能の向上
- ・より高速域での粘着現象の解明などの課題に取り組む必要があります。

#### RRR

#### 文献

- 1) 鉄道技術研究所監修「高速鉄道の研究」, pp.253-310, 研友社, 1967
- 2) 岡本勲: 新幹線電车用ボルスタステ台車 (DT9023E/F) の開発, 鉄道総研報告, Vol.7, No.3, pp.9-18, 1993
- 3) 菅原能生, 中川千鶴: 新幹線車両の振動を制御する, RRR, Vol.68, No.3, pp.6-9, 2011
- 4) 鉄道技術研究所監修「高速鉄道の研究」, pp.157-163, 研友社, 1967
- 5) 内田清五: 新幹線のブレーキシステム, レールアンドテック出版, 2001
- 6) 鉄道技術研究所: 東海道新幹線に関する研究(第1冊), p.102, 1960
- 7) 鉄道技術研究所監修「高速鉄道の研究」, pp.311-334, 研友社, 1967
- 8) 鉄道技術研究所監修「高速鉄道の研究」, pp.335-343, 研友社, 1967
- 9) 高見創: 空力ブレーキで高速鉄道の緊急停止距離を短縮する, RRR, Vol.71, No.8, pp.12-15, 2014
- 10) 鉄道技術研究所: 東海道新幹線に関する研究(第1冊), p.56, 1960

なお、「動力システムとブレーキ関係」は文献が多いため、原則として東海道新幹線の開業までの研究開発に関連するものを記載しました。