



夏
2024

- クローズアップ ① ジレンマ（脱線事故調査雑感）
- 研究＆開発 ② 駆動装置の騒音可視化技術（上）
- 研究＆開発 ④ 次世代の振子技術で移動を快適にする
- 解 説 ⑥ 車輪の空転防止装置（下）



ジレンマ （脱線事故調査雑感）

研究開発推進部
主管研究員 (RT) 日比野 有



鉄道にとって、「脱線事故」はあってはならない事象の一つです。私は入社以来 30 年近く、車両の走行安全性に関する研究に携わってきました。その中で、脱線事故調査にも多く関わってきたのですが、未だにその難しさを痛感しています。2 年前に現在の部署に異動になり、脱線事故調査に自ら出向くことはなくなったのですが、鉄道総研内で作成された報告書等をチェックする現在の立場としていろいろと悩むこともあり、雑感ですが書き連ねてみたいと思います。

「知見」か「先入観」か？

脱線事故調査の依頼を受けて現地調査を行う場合、事業者から送られてきた第一報をもとに現地での調査方針を検討します。具体的には、事故概況から想定され得る要因を列挙し、現地調査の内容や優先順位を決定します。これには過去の知見も重要で、これまでの事故調査結果や研究成果を参考に検討するのですが、一步間違えると先入観によって方向を見誤ったり客観性を失ったりする可能性もあります。かといって、すべての項目（可能性）を一つずつ調査していたのでは莫大な時間や労力がかかってしまい、事業者の依頼に迅速に応えることはできません。過去の知見にどこまで頼るか、さじ加減が難しいところです。

「現実」か「仮想現実」か？

上記の「知見」を蓄積するという観点からは、事故調査の経験は多い方が望ましいというジレンマに陥ります。もちろん脱線事故があってもいいはずはありませんので、実験やシミュレーションによって、知見を補完することになります。最近ではシミュレーション技術も進み、様々な現象を解析することができますが、やはり肌感覚や直

感力も大切なのではないかと思います。例えばシミュレーションで、「〇〇が××なら脱線したはずだ」という結果が出たとしても、その前提条件の妥当性や現地調査結果との整合性を判断できる力が必要だからです。そういった意味では、やはり実験等による経験の積み重ねが重要になってくるのだと思います。なお、実験は実物（またはその一部）を用いるのが理想的ですが、脱線や転覆となると危険を伴いますので、模型を用いた実験も有効であると考えられます。私は、車両のばね系を忠実に再現した縮尺 1/10 の車両模型を用いて、様々な実験を行ってきました（写真は一例）。何度も何度も脱線・転覆させられて満身創痍となった模型からは、「もうやめてくれ」という悲鳴が聞こえてくるかのようにでした。

閑話休題。時々、「計算したらこうなりました」といっただけの報告書や論文を見かけることがあります。現象解明の一助として、パラメータを変更した場合の影響度や傾向を把握する目的であれば「仮想的」な条件設定でも有効かと思いますが、脱線事故調査のような場合には、あくまでも「現実」に即した推定であることが必須です（そうでないと、危険な状態を見過ごしたり、逆に、しなくてもよい心配をしたりすることになります）。どこまで「現実」に近づければ事故調査としては合格なのか、また、それをどう判断するのか、非常に難しいところです。

いずれにしても、脱線事故が根絶されれば上記のようなジレンマに悩まされることもなくなります。根絶に向けて少しでも前進できるよう、引き続き取り組んでいく所存です。[NL]

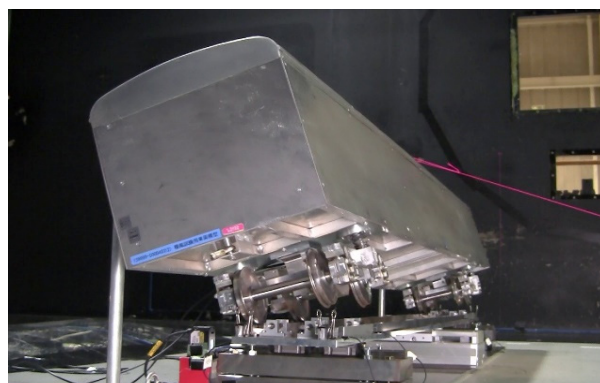


写真 横風による転覆実験（鉄道総研 大型低騒音風洞）



研究&開発

駆動装置の騒音可視化技術（上）

車両技術研究部 駆動システム
主任研究員 笹倉 実

1 はじめに

車両から発生する騒音の低減対策は、沿線住民に及ぼす影響や車内快適性の面で重要です。鉄道車両の場合は、集電系騒音や空力騒音のほかに、モーターや歯車装置などの駆動装置から発生する騒音、さらにはレールや車輪から発生する転動騒音など様々なものがあります。これらの騒音低減対策を進めるには、騒音の発生源や、振動や音の流れを詳しく把握する必要があり、解析技術の向上が求められています。

近年は、視覚によりこれらを直感的に把握することが可能な騒音可視化技術が進んでいます。ここでは、電動車の駆動装置から発生する騒音を対象とした解析に用いられる騒音可視化技術について、2回に分けて解説します。本号（上）では、技術概要について述べます。次号（下）では、実車駆動装置での音源可視化測定事例について紹介する予定です。

2 駆動装置から発生する騒音

図1には主電動機や歯車装置などの駆動装置と、走行時に歯車装置付近で実測した騒音スペクトルを示します。騒音周波数帯域は、主に500Hz～3000Hzであることがわかります。

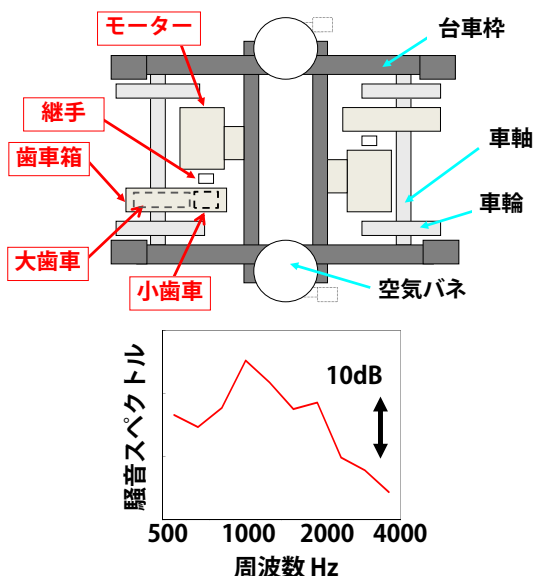


図1 電動車の駆動装置および歯車付近の騒音

床下から発生する騒音の特徴として、

- ① 騒音スペクトルは1000Hz付近で特に大きくなり、駆動装置騒音と、レールや車輪から発生する転動騒音のスペクトルが重なる場合がある。
- ② 床下の狭い空間に機器類や車輪などからの音源が密に存在する。
- ③ 台車カバーなどに囲まれて閉空間に近い状態であり、軌道側からの音の反射も含めて残響性が高い。
- ④ 歯車のトルク依存性など、運転条件により騒音の発生状況が大きく異なる。

などが考えられます。

近年の在来線型駆動装置は、全閉式モーターの採用により低騒音化が進んでいますが、モーターが静かになった分、相対的に歯車騒音が目立ってくる場合があります。普通騒音計による従来の騒音測定では正確な騒音発生位置を把握しにくく、個別の音源分離が難しいことがあります。このため騒音対策を困難にしている面があります。

3 騒音可視化手法の種類と特長

一般に音の流れは、音（または振動）の発生源→伝搬→受音点（評価点）となります。発生源と受音点が離れている場合もあります。騒音可視化技術によって、視覚的に訴えることで直感的かつ、速やかに音の発生部位や流れを特定（位置、周波数など）することで、音の状態を理解し、騒音対策がやり易くなります。さらに騒音対策前と対策後の比較を行うことにより、対策の効果を確認することもできます。次に主な騒音可視化手法について述べます。

(1) サウンドインテンシティ法 (SI 法)

変動の少ない定常音の解析に有効です。音源中心を求めものではなく、音源から周囲に放射される音のエネルギー（インテンシティ）に対し、ある時間の平均値で音の到来方向（流れ）を2次元または3次元空間で可視化（ベクトル表示）する古典的な方法です。

(2) ビームフォーミング法 (BF 法)

騒音可視化技術のうち、音源中心の可視化が可能な手法です。図2に基本原理を示します。マイクロホン音を音の発生源と考えられる方向に向けて並べます。入射する音波に角度が生じると、それに応じてマイクロホン間で到達時間に差が生じます。この特性を利用して演算処理で指向性を強調することにより（遅延時間推定法）、音源の到来方向を探索する原理を用いています。これにより特定方向の音源把握が可能となります。音源中心は2次元の音圧マップにより表示されます。

(3) エンベロープインテンシティ法 (EI 法)

BF 法同様に、音源中心の可視化が可能な手法です(図 2)。音響信号(時間波形)の包絡線(エンベロープ)から、複素数を用いた信号変換処理(ヒルベルト変換)により、瞬時の振幅と瞬時の位相を算出します。この信号情報とカメラより得られた画像情報を空間で合成することにより、瞬時毎の音源中心を図示する仕組みです。表現方法は 2 次元の図でなく、瞬時の音の方向と強さを示す点の移動軌跡で表示されます。そのほかの騒音可視化技術として、騒音発生体の近傍音の流れを把握する音響ホログラフィ法などもあります。

図 3 に、駆動装置の騒音対象となる範囲(赤い点線)と各騒音可視化技術の適用イメージを示します。一定の回転数で稼働する発電機は時間的に変動しない定常音と呼ばれ、モーター、エンジンおよび歯車は、速度により回転数が異なり、騒音レベルが過渡的に大きくなる場合もあります(過渡音)。そのほか、インバーター系から発生する騒音は、周波数スペクトルが基本周波数の整数倍となる離散音となります。BF 法の有効周波数範囲は比較的広く(500Hz ~ 8000Hz)、図 1 に示す駆動装置の騒音周波数帯をほぼ含んでおり、適用性は高いと考えられます。なお、低周波数域(500Hz 以下)では、音源中心の結像が判別しにくくなる欠点があります。

EI 法の利点として、時間分解能が高いため BF 法に比較して瞬時の音の識別性能が非常によく、BF 法では解析の難しい打撃現象のような過渡音も可視化することが可能と言われます。

4 小型テトラホン型 BF 装置の紹介

従来の BF 法では、多数のインテンシティマイクロホン等を等間隔で格子型に配列する方式や、円状に不規則な間隔で配列する方法がありましたが、測定精度を確保するために多数のマイクロホンが必要でした。近年は、図 4 に示す 4 本のインテンシティマイクロホンと呼ばれる音の強さと流れの計測が可能な特殊マイクロホンを正四面体構造に配列し、その中央部にカメラを取り付けて全体を小型化したテトラホンとよばれる装置を用いる方式もあります。従来の BF 処理部に、最小分散法による適応フィルタを加え、特定方向の信号(音以外)を最小化する方法を採用してマイクロホンの数を最小限とすることで装置の小型化を図り、現場測定に適用しやすくなりました。また、従来の BF 法の入射波は図 2 に示す平面波を基本原理としており、音源とマイクロホンは、波長の数倍程度の距離を保つ必要がありました。本装置(図 4)では球面波を前提としたデータ処理(球面補正)を行っており、車両近傍からの測定にも対応可能です。

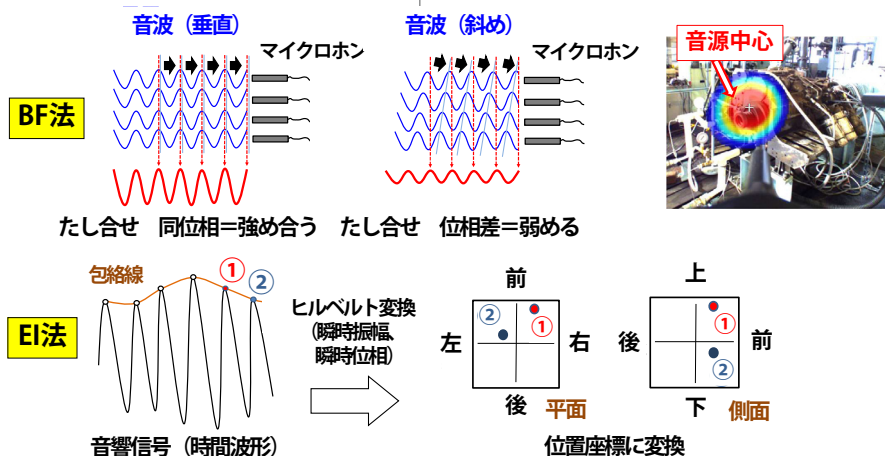


図 2 主要な騒音(音源)可視化手法の原理

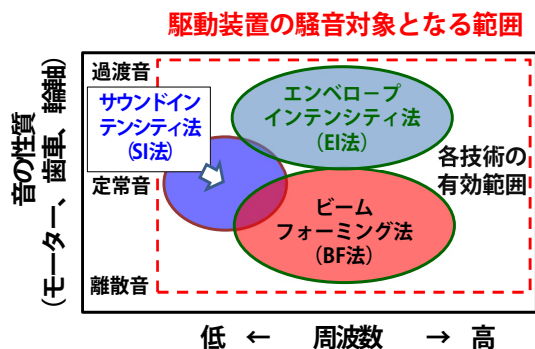


図 3 騒音可視化技術の適用イメージ

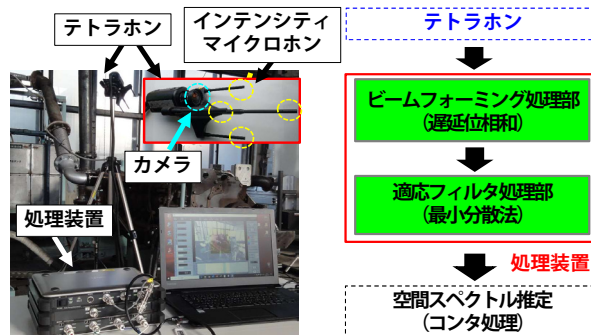


図 4 小型テトラホン型 BF 装置の概要



研究&開発

次世代の振子技術で 移動を快適にする

車両技術研究部 車両運動
上席研究員 風戸 昭人

1 はじめに

1973年に運行を開始した国内初の振子車両は、車体傾斜動作に遠心力のみを利用する「自然振子式」とよばれるものでした。その後、図1に示す空気圧式の振子アクチュエーター（駆動装置）を搭載した制御付き自然振子式車両（以下、制御付振子車両）が開発され、現在まで多くの曲線をもつ路線で運用されています。鉄道総研では、制御付振子車両を構成する要素のうち図2に示す3つの要素をキーとした「次世代振子システム」を開発してきました。3つの要素は密接に関連しており、各要素を高いレベルで実現することで次世代振子システムを構成します。

2 高精度な自車位置検出

曲線でタイミングよく車体を傾斜させるには、自車の位置を正確に継続して把握することが必要です。従来の制御システムでは、軌道に設置されたATS地上子を通過するごとに車両のデータベースに登録された地上子の位置情報を参照することで自車位置を把握しています。この方式

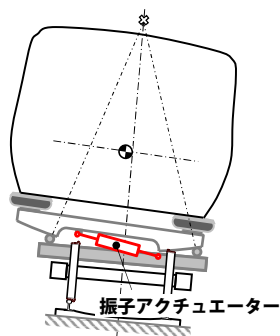


図1 振子車両の断面図

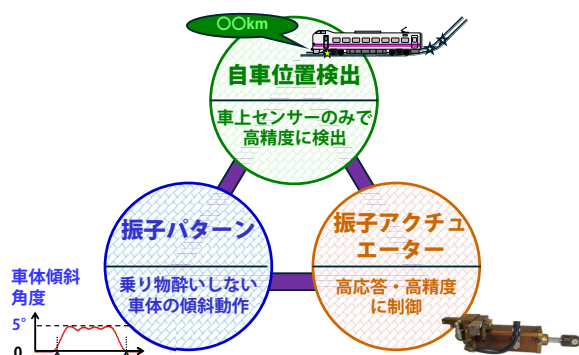


図2 次世代振子システムの3大要素

の場合、データベースを最新の情報に維持する必要があります。また複数ある地上子の中から利用する地上子を選定する作業が煩雑であることが課題となっています。

そこで次世代振子システムでは、車両にジャイロを搭載し、図3に示すような車両の進行方向に対する角度の変化（以下、車体ヨー角速度）を検出し、同時に車両から速度情報を受け取ることで、曲線の曲がり具合を把握します。この曲がり具合は曲線半径の逆数にあたる「曲率」として算出されます。鉄道車両は自動車とは異なり、敷設された線路に沿って走行することから、曲線を通過するときに車上で観測される曲率データは非常に再現性が高いことがわかっています。そこでこの再現性の高さに着目しました。まず運用の対象となる路線を走行して曲率データを取得し、マップデータとして車上に登録します。次に、車両を制御状態で走行するときには、同じく走行しながら曲率データを取得しつつ、マップデータとして登録した曲率データを参照し、両者がもっとも一致するマップデータ上の自車位置を探索することで、自車位置を補正、更新します。従来の制御システムでは選定されたATS地上子ごとに自車位置を補正します。この地上子の間隔は数kmにおよぶ場合もあります。一方、次世代振子システムでは曲線ごとに自車位置が補正されることで、より高い自車位置検出精度を実現しました。

3 乗り物酔いしない振子パターン

遠心力を打ち消す適切な車体の傾斜角度を計算するには、曲線の曲がり具合である曲率と、曲線の内側と外側のレールの高低差であるカントの大きさの情報が必要です。従来の制御システムでは、軌道を管理している保線部門が持つデータを車両に登録して使用しています。一方、次世代振子システムでは、車両自身がジャイロなどのセンサーで測定した曲率とカントの情報をマップデータとして持ち、検出された自車位置情報を元にマップデータを参照することで、これから走行する区間の曲率とカント情報をあらかじめ把握します。これら2つのデータと現在の走行

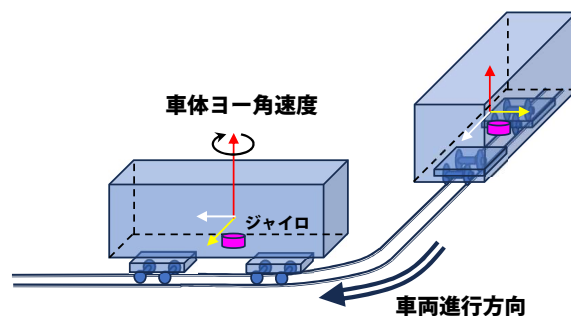


図3 ジャイロによる車両の角度変化の把握

速度を元に、直後に走行する曲線での理想的な車体の傾斜角（以下、振子パターン）を算出します。

図4に従来の制御システムと次世代振子システムの振子パターンを比較した例を示します。次世代振子システムの振子パターンは、軌道のゆがみも含めた曲線の形に忠実に沿うように出力されるのが特徴です。そして後述する空気圧アクチュエーターと組み合わせることで、遠心力だけでなく軌道のゆがみなどで発生しやすい低周波の動揺も打ち消すことができます。低周波の動揺は振子車両に特有の乗り物酔いの原因と言われており、次世代振子システムはその抑制も実現しています。なお振子パターンの算出には人間工学的な知見に基づいた計算方法も採用しており、傾ける速さも適切なものとなるようにしています。

4 車体を傾ける「振子アクチュエーター」

次世代振子システムでは、従来の制御システムと同じく圧縮空気の力を使った「空気圧アクチュエーター」を採用しました。図5にアクチュエーターの概略図を示します。シリンダー内部にはピストンに区切られた空気室があり、サーボ弁と呼ばれる電磁弁が左右の空気室の圧力を調整することで長さを制御しています。次世代振子システムでは、空気の出し入れを細かく精緻に行うことができるサーボ弁を採用するとともに、シリンダーの径を小さくして空気室の容積を減らすことで制御の応答性を高めました。

一方でアクチュエーターの動きを速くするほど、安定した制御を行うことが難しくなります。この課題には制御方法の工夫で対応しました。従来のアクチュエーターは、

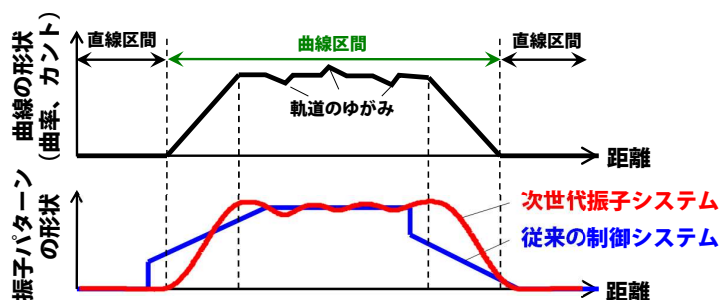


図4 曲線に対する振子パターンの例

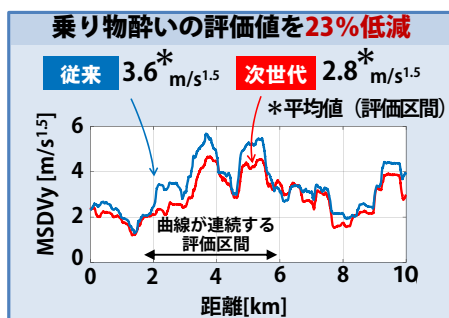


図6 乗り心地改善効果

目標の長さで実際の長さの差だけに比例した力を発生するように制御していましたが、次世代振子システムでは、アクチュエーターが伸縮する速度とその変化の大きさ（加速度）にも着目した制御を行うことで、速く安定した動作を実現しました。

5 走行試験による性能評価

次世代振子システムによる乗り心地の改善効果を確認するため、既存の制御付振子車両にシステム一式を搭載した走行試験を実施しました。同一地点上を通過した際に、車両が認識していた自車位置のばらつきを計算したところ、最大誤差は±2m、標準偏差0.65mとなり、車体の傾斜制御に十分な精度が確保できました。また、図6に乗り物酔いの影響を反映する指標とされているMSDVy(乗り物酔い暴露量値)について、従来の制御システムと次世代振子システムで比較した結果を示します。評価区間での一例では、平均で約23%の低減効果を確認することができました。

6 おわりに

2024年4月、岡山駅と出雲市駅を結ぶ特急やくも381系振子車両の後継として、次世代振子システムが初めて搭載されたJR西日本273系振子車両(図7)の運用が開始されました。今後も都市間輸送を担う移動手段としての振子車両の快適性を向上させることを目標に、既存の制御付振子車両への次世代振子システムの適用方法についても提案していく予定です。[NL]

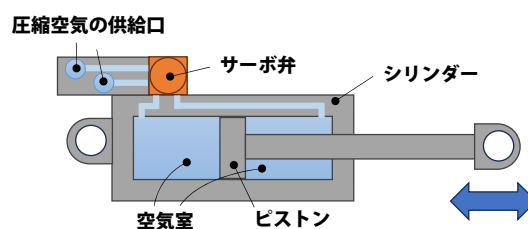


図5 空気圧式振子アクチュエーターの構造



図7 次世代振子システムが搭載された273系振子車両



車輪の空転防止装置(下)

材料技術研究部 摩擦材料
主任研究員 深貝 晋也

1 はじめに

※前号では、砂まき装置の変遷について、鉄道の初期に使われていた重力落下式から空気式に替わっていく最初の段階について述べました。本号では、小径で硬質のセラミックス（アルミナ）粒子を高速で散布するセラジェットが普及に至る経緯について述べ、さらに海外の砂まき技術や特徴について触れます。

2 セラジェットの登場

砂まき装置で使用する砂の大きさは数ミリメートル程度が一般的で、材質に関しては、国内では昔から天然砂、とくに川砂が多く使用されてきました。川砂が選ばれたのは、海砂の場合には塩分が含まれるため軌道部材の腐食を誘発しやすいなどの理由でした。一方、1980年代頃から砂に代わる新たな材料が検討され始めました。ベンチ試験や現車試験が行われたところ、材料の硬さが増すと粘着力が増加する、また、従来の砂よりも粒径が小さくなくても、効果に大きな差が生じないといった結果となりました。これは、供給された砂が車輪・レール間で粉砕され微粒子となった状態で、車輪とレールの両面に食い込むとともに、表面に適度な粗さを付与することで粘着力を高めるためと考えられました。そのため、1990年代中頃から天然砂よりも小粒（粒径0.3~0.4ミリメートル程度）で硬質の

アルミナ粒子（図1）が使用されると同時に、こうした小径のセラミックス粒子を噴射するための専用装置として「セラミック噴射装置（セラジェット）」が搭載されるようになってきました（図2、図3）。この装置は鉄道工場で台車の洗浄などに日常的に使用しているブラストマシンを応用したもので、増粘着材料を車輪・レール間に高速で噴射することができます。タンク容量は0.5~2.5リットル、噴射量は1分間に0.03リットル（60グラム）程度と、古くからの砂まきと比べて桁違いに少ない（電気機関車の砂箱の場合、タンク容量25リットル、噴射量は1分間に0.7リットル程度）ことがわかります。なお、アルミナを従来の砂箱に詰めて使用することは、ランニングコストの面から現実的でなく、また車輪およびレールの摩耗が懸念されることから、実用には至っていません¹⁾。

セラジェットは噴射速度が速く高速走行時にも確実に散布できることが認められ、952形・953形高速試験用新幹線電車（STAR21）での速度向上に寄与するとともに非常ブレーキや地震時の緊急ブレーキに連動させる形で500系以降の新幹線車両に順次導入されました。また、制動時の滑走対策だけでなく、力行時の空転防止にも有効であることから、在来線でも広く導入されました¹⁾。さらに2000年代に入り、低速起動時にも対応するため、噴射速度が低速から高速まで幅広いレンジで調整可能なミュージェットも新たに開発されました。ミュージェットは噴射に必要な空気流量がセラジェットと比較して少なく、ブレーキ用の空気源をもたない、エアレスタイプとよばれる超低床式路面電車にも搭載可能であるという特徴もあります。セラジェットやミュージェットは、古くからの砂まき装置と比較して増粘着材料の使用量が大幅に少な



図1 砂まき器用の天然砂とセラジェット用のアルミナの比較

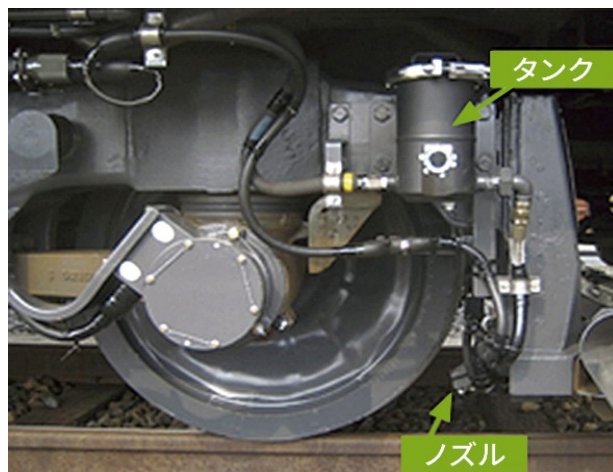


図2 セラジェット外観（提供：テス）

いという特徴から、砂まきにおけるさまざまな懸案事項（先に述べた問題のほか、短絡障害、道床の目詰まり、分岐器の不転換やレール面の損傷など）を抑制できるといった二次的なメリットがあります。また、噴射指令から停止までの応答性が良好であることから、現在では、空転検知と連動した自動噴射システムも実用化されています。

3 海外の砂まき技術

海外では国内以上に低粘着条件における空転やそれにもなう列車遅延が問題となっており、さまざまな対策が講じられてきました²⁾。特徴的な対策の一つとして、旧イギリス国鉄で開発されたゲル状の増粘着材（砂をゲルに分散させたもの）があげられます。1970年代頃の開発当初は、効果の持続性が少なく意図とは反対に粘着状態を悪化させてしまう場合もありましたが、ゲル基材の工夫などにより性能が向上し、結果としてサンダイト（図4）とよばれる増粘着材がヨーロッパやアメリカなどで広く普及しました。サンダイトは空転や滑走の予防措置として、専用列車によりレールに付着した落ち葉などのよごれを除去した後にレール上に散布されています。レール頭頂面には砂を主成分とする絶縁性の皮膜が形成され、短絡性能の障害が懸念されるため、金属粒子が含まれています。そのほか、同様のゲル状増粘着材を地上からレール上に塗布する装置も開発されています。

また近年では、速度に応じて噴射量を増減させる砂まき機構が開発されています。1分間に数キログラム程度など多量の砂を噴射する場合、絶縁材である砂の介在により車輪・レール間の電気抵抗が増大し、信号システムに不具合（不短絡）が生じる場合があります。

不短絡事象は、単位レール長さ当たりの砂の噴射密度が高い低速走行時に発生しやすくなるため、低速走行時には噴射量を少なくし、高速走行時には噴射量を多くできる機構となっています。

4 砂まき装置の行く末

砂まき装置に関する技術は、鉄道黎明期から延々と続く一見目立たない地味な技術です。しかしながら、国内外において日々の定時運行に欠かせない存在であると同時に、新幹線の速度向上に寄与するなど、車輪・レールの伝達力を底上げし、新たな局面を導く技術でもあります。一方で、ここでは車輪とレールの空転を防止するための手法として、砂まきに特化して述べてきましたが、接触部の表面の状態を制御するという点では、ブレーキ用に装備されている踏面制輪子によって車輪踏面の粗さを増大させることで粘着を改善する手法も広く用いられており、増粘着を考慮した制輪子の開発もさかに行われています。また、もっぱら粘着向上のために車輪踏面を清掃し、軽く研磨する増粘着研磨子は1970年代から新幹線の全車両で使用されています。今後は周辺技術の進歩とともにトータルで増粘着をはかる手法として、鉄道システム全体の中での最適化が進んでいくかもしれません。[NL]

注）本稿は「RRR Vol.78 4月号」（2021.04 発行）より「鉄道技術 来し方行く末」の内容を一部編集したものです。

参考文献

- 1) 大野薫：増粘着材噴射装置（セラジェット）—その2—，RRR，Vol. 63，No. 2，pp. 34 - 35，2006
- 2) Rail Delivery Group：Managing Low Adhesion (AWG Manual, Sixth Edition)，<https://www.raildeliverygroup.com/about-us/publications/121-2018-01-managing-low-adhesion-ed6-0/file.html>（入手日：2021 / 03 / 09）

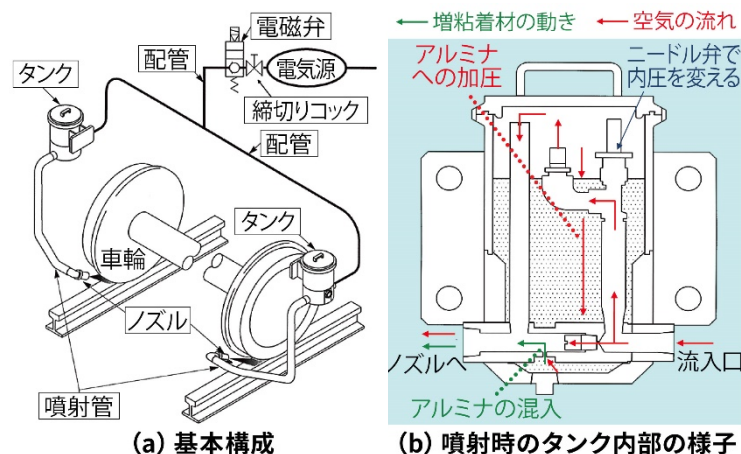


図3 セラジェットの概要



図4 レール上に散布されるサンダイト

出典：Metropolitan Transportation Authority of the State of New York from United States of America, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons

車両ニュースレターは季刊（1，4，7，10月発行）です。
次の2024年秋号は，2024年10月25日に発行します。

鉄道総研 車両**ニュースレター**

車両技術研究部／材料技術研究部／鉄道力学研究部

● 2024年夏号 No.67	● 発行日 2024年（令和6年）7月25日（木）
● 発行所  公益財団法人鉄道総合技術研究所 車両技術研究部	
〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 TEL) 042-573-7269	
鉄道総研 URL) https://www.rtri.or.jp	
● 発行者 瀧上唯夫	鉄道総研 検索
● 編集者 風戸昭人・山下道寛・渡邊有人・小笠原柚	©Railway Technical Research Institute