

沿線環境に適合する新幹線の高速化

環境工学研究部長
長倉 清



1. はじめに

鉄道は他の交通機関に比べてエネルギー効率がよく、地球環境問題が深刻化するこれからの社会において、より一層大きな役割を果たすことが期待されている。鉄道の価値を向上させるうえで、高速化による到達時間の短縮が効果的な方策の一つであることはいうまでもないが、新幹線の高速化に向けては、安全・安定性、利便・快適性、環境適合性などの観点から多くの課題がある(図1)。

鉄道総研では、新幹線の高速化に向けた課題に対して継続的に取り組んでいる。2015～2019年度までの基本計画「RESEARCH 2020 - 革新的な技術の創出を目指して -」においては、鉄道の将来に向けた研究開発(将来指向課題)の一環として、新幹線の高速化においてキー・テクノロジーとなる、沿線環境負荷の低減、およびブレーキシステムと集電システムの性能向上に関する研究開発に取り組んできた。2020～2024年度までの基本計画「RESEARCH 2025 - 鉄道の未来を創る研究開発 -」においては、将来指向課題「沿線環境に適合する新幹線の高速化」を設定し、RESEARCH 2020において課題が残った台車部空力音・圧力変動の低減対策、集電性能と低騒音性能を両立するパンタグラフ、微気圧波対策の低コスト化につ

いて研究の深度化を図るとともに、今後の寒冷・豪雪地域の厳しい環境下における安定輸送に資する課題として、台車部への着雪問題に取り組む予定である。

本稿では、鉄道総研における新幹線の高速化に向けた取り組みの中から、沿線環境負荷の低減と台車部着雪問題に関わる研究について、その成果と今後の展望を紹介する。さらに、鉄道車両やトンネルに関わる空気力学的現象やパンタグラフの集電性能に関する研究の更なる高度化、迅速化を目指して、RESEARCH 2020で整備された大型試験設備について、その特長とそれらを活用するRESEARCH 2025の研究計画について述べる。

2. 沿線環境負荷の低減に関わる研究

鉄道は地球環境に対して優れた交通機関であるが、その一方で、列車の走行にともない、沿線に騒音、明かり区間圧力変動、トンネル微気圧波、地盤振動などの環境問題を引き起こす場合がある。これらの物理現象は速度の増加に伴い急激に増大するため、速度向上や輸送力増強などによる利便性の向上と沿線環境の維持、向上を両立させる上で、環境負荷の低減技術の開発は必須と言える。以下では、騒音、明かり区間圧力変動、トンネル微気圧波、地盤振動の各現象について、最近の研究成果と今後の展望を述べる。

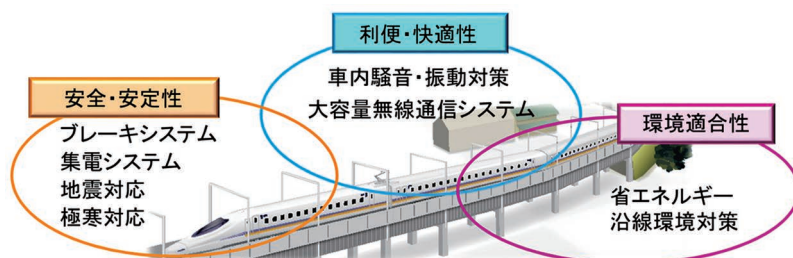


図1 新幹線の高速化における課題

2.1 沿線騒音

新幹線車両が走行するとき沿線で観測される騒音は、転動音や構造物音のように車輪・レールや構造物などの固体振動に起因して発生する音と車両まわりの流れの渦度変動に起因して発生する空力音に分類される。前者の音響パワーは列

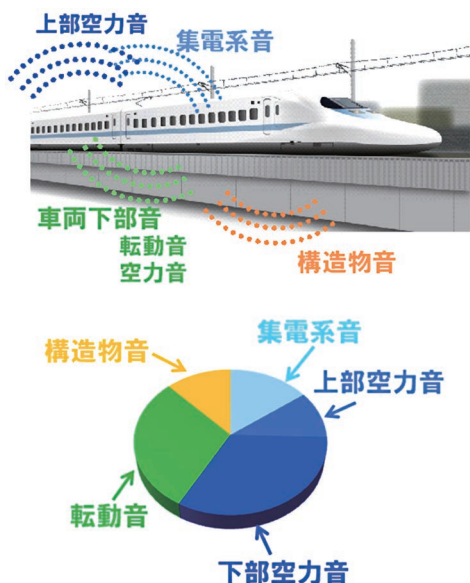


図2 新幹線騒音の音源と地上25m点における音源別寄与度の試算例(コンクリート高架橋, スラブ軌道, R.L.+2mの防音壁, 速度320km/h)

車速度の2~3乗に比例して増加するのに対して、後者の音響パワーは列車速度の6乗程度で増加する性質を持つため、列車速度が増加するほど空力音の寄与が増大する傾向となる。現地試験データを用いた音源解析結果から、最新の新幹線車両が300km/hを超える速度で走行する場合には、空力音の寄与度が転動音の寄与度を大きく上回ることで、空力音源の中では台車部などの車両下部からの寄与度が大きく、集電系からの寄与度がそれに次ぐことが示されている(図2)¹⁾。そこで、新幹線の速度向上時における沿線騒音の増大を抑えるために、台車部及び集電系から発生する空力音の発生メカニズムの解明、低減策の開発に取り組んでいる。

台車部空力音については、風洞試験において台車装置直下の地面を音響透過板(音は透過するが空気の流れは通さない性質の板)に置き換え、その下方に設置したマイクロホンアレイを用いて音源探査を行う風洞試験手法を開発した(図3)²⁾。この測定方法を用いることにより、台車部空力音の詳細な音源分布が明らかになり、車両下面付近の流速を低減させること、あるいは台車装置自体に高速気流が当たらないような流れを作り出すことが台車部空力音の低減対策となりうることを示された。

RESEARCH 2025では、これらの対策指針に基づき、対策効果と実車への適用性を向上させた低減策の開発を進める。

集電系空力音については、主要な音源である舟体・舟支え部を主な対象として低減対策の研究を進めている。過去の研究において、CFD解析と形状最適化手

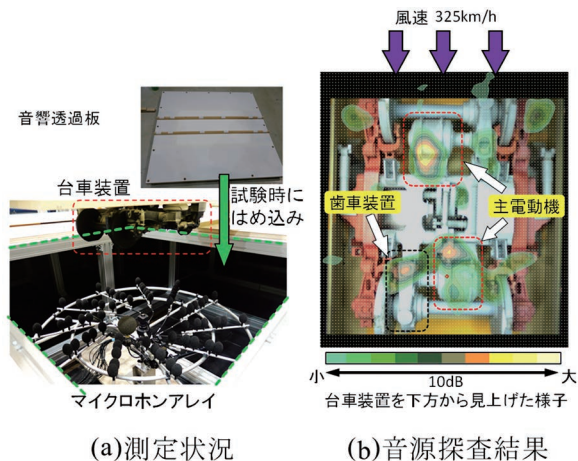


図3 マイクロホンアレイと音響透過板を用いた風洞試験による台車部空力音の音源探査

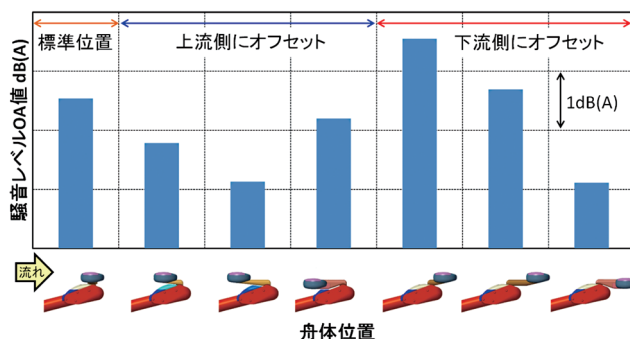


図4 舟体位置変更による空力音の比較(風速400km/h, ホーンなし, OA値)⁵⁾

法を組み合わせた手法により、走行方向を一方に限定することで空力音の低減と揚力特性の安定化を両立する舟体断面形状を提案している³⁾。この平滑化舟体の模型を対象に、風洞試験により舟体・舟支え部の最適な相対位置関係について検討し、舟体位置を適切に選定することで、標準の舟体位置と比べて空力音を低減できることを示した(図4)。さらに、ホーン取り付け部周辺からの空力音を抑制する方法についても検討を行い、舟体端部の形状を平滑化することによりこの部位からの空力音が低減することを示した。

RESEARCH 2025では、開発した舟体について高速域での追随性能の検証や改良を進めるとともに、形状改良が困難な部材への多孔質材貼付などの対策を組み合わせることで、パンタグラフの集電性能と低騒音性能を両立させる技術の開発を進める。

2.2 明かり区間圧力変動

新幹線車両が明かり区間を走行する場合、様々な周波数域の音が発生する。可聴域の周波数(20Hz~)の音に対しては環境基準が定められており、基準達成に向けた

取り組みが進められている。一方、20Hz以下の低周波数域の音については環境基準が対象とする騒音の成分には含まれないが、状況によっては建具などがたつきを引き起こす場合もあり、その低減策が求められている。

低周波数域の音は空気力学的な現象に起因して車両から発生する成分と構造物振動に起因する成分に分けられ、空気力学的な成分は、先頭・後尾部の圧力場が誘起する圧力変動及び先頭・後尾部以外の中間車両から連続的に放射される低周波数域の空力音で構成される(図5)⁵⁾。建具のがたつきに大きく影響する5-20Hzの成分は主に中間車両から発生しており、現車試験におけるリニアマイクロホンによる測定結果から、その発生源は車両の台車部付近に局在し、特に台車を格納する車体下部の空間(以下、台車キャビティ部)に起因することが明らかになっている(図6)⁶⁾。そこで、台車キャビティ部から発生する低周波空力音に着目した風洞試験や模型発射装置を用いた試験を行い、台車キャビティ部の隅部の丸み付けやアンダーカバーの適用などにより、キャビティ部からの低周波空力音が低減されることが示された。

RESEARCH 2025では、これらの方針に基づいて、実車両に適用可能な低減策の開発を進める。また、台車キャビティ部の形状は可聴域の空力音にも影響を及

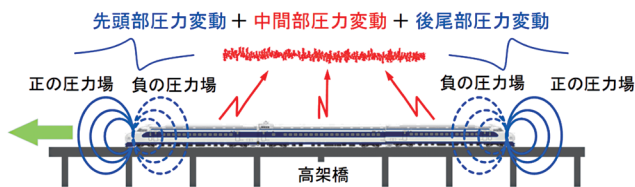


図5 車両から発生する圧力変動の模式図

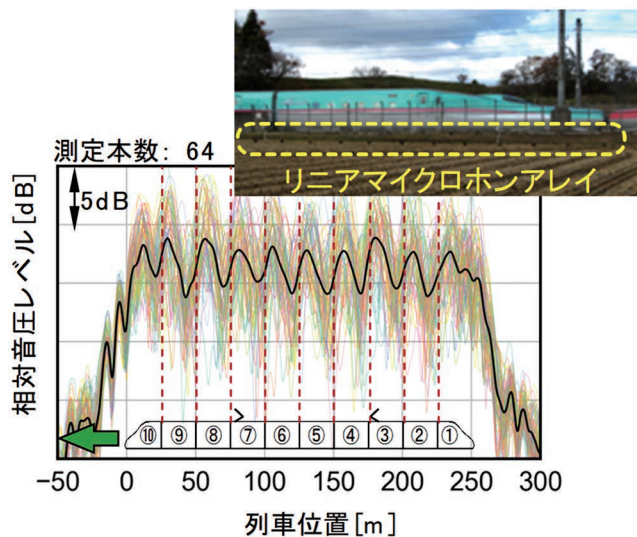


図6 車体から放射される低周波空力音の測定評価(16Hz帯, 現地試験)

ぼすため、低周波数域から可聴域までの幅広い周波数域において低減効果を持つ形状について検討を行う。

2.3 トンネル微気圧波

トンネル微気圧波は、列車が高速でトンネルに突入したときに形成される圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、反対側の出口から外部へ向かってパルス状の圧力波が放射される現象であり、坑口付近で発破音を発生させたり、家屋の建具等をがたつかせるなどの、沿線の環境問題を引き起こすことがある。微気圧波の対策としては、圧縮波の形成段階、トンネル内の圧縮波伝播の段階、坑口からの微気圧波の放射段階の各段階での対策が挙げられる(図7)。これらの中では圧縮波形成段階での対策が基本であり、地上側の代表的な対策としてトンネル緩衝工の設置が広く実施されているが、列車速度が320km/hを超えると、必要となるトンネル緩衝工の長さが現状(30~50m)よりさらに長くなり、コスト増とともに、現地の状況からさらなる延長は不可能なケースも出てくるという課題がある。そこで、現在の仕様(本坑との断面積比が1.4~1.6、側面に離散窓型開口部)にこだわらず、より効果的に微気圧波低減効果を得られる緩衝工構造の開発に取り組んでいる。模型発射装置による実験の結果、列車速度360km/hで側面開口部がない場合では、緩衝工と本坑の断面積比が2.5程度のときに最も大きい低減効果が得られ、緩衝工長が40m未満では従来型の緩衝工よりも性能が向上すること、緩衝工長が40m以上では、緩衝工と本坑の断面積比を段階的に拡大する断面積多段型緩衝工により、さらに大きい効果が得られることがわかった⁷⁾(図8)。

RESEARCH 2025では、緩衝工のさらなる性能向上を図るとともに、実用化に向けて実トンネルを想定

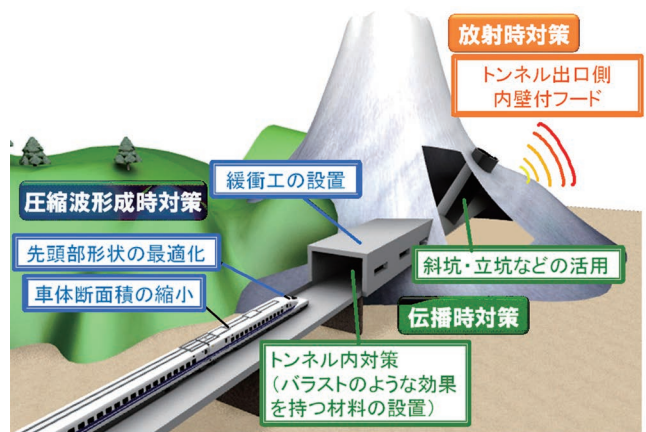


図7 トンネル微気圧波の対策

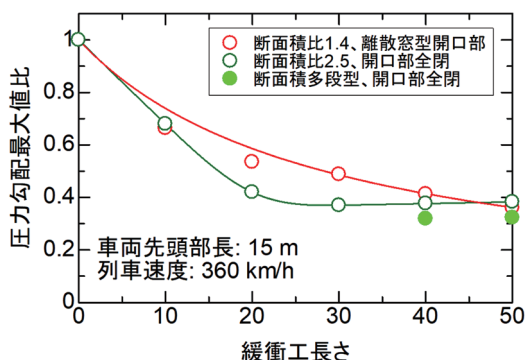


図8 緩衝工の断面積に関する模型試験結果

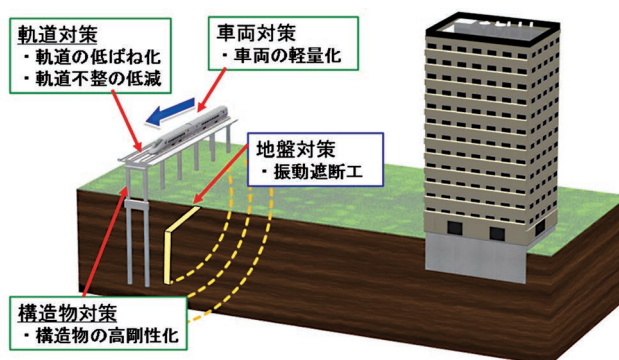


図9 地盤振動の対策

した仕様の検討を進める。また、車両側対策や圧縮波伝播段階、微気圧波放射段階での対策を組み合わせることにより、総合的に低コストな微気圧波低減対策の提案を目指す。

2.4 地盤振動

地盤振動は、車輪・レール間に作用する加振力が軌道、構造物を振動させ、さらに構造物の基礎から地盤に振動が伝わることにより発生する。沿線近傍に建物がある場合は、地盤から建物の基礎へ振動が伝わり、建物全体が振動する。地盤振動の対策としては、車両での対策、軌道・構造物での対策、地盤での対策に大別されるが(図9)、これらの対策の開発には、車両、軌道、構造物、地盤、沿線建物を一体的に評価できるシミュレーションの活用が有効である。

鉄道総研で開発している地盤振動に関する数値シミュレーションは、計算規模や計算速度などの制約のため、構造物に入力する加振力を求める車両・軌道・構造物の連成振動解析モデルと構造物・地盤・建物の3次元振動解析の2つの解析モデルに分割した上で両者を連携させる構成を採用している(図10)⁸⁾。シミュレーション結果を実測値と比較したところ、構造物、地盤、建物のそれぞれの振動についておおむね良好に一致する結果が得られた。本シミュレーションモデルを用いた車両、軌道、構造物に関わる様々なパラメータスタディにより、地盤振動の予測や対策の検討が行われている。

一方、新幹線の速度向上に対応するための具体的な地盤振動対策としては、新設線を対象として、従来よりも地盤振動の低減効果が高い防振スラブ軌道の基本構造について検討を行っている。地盤振動に特に寄与すると考えられる数Hz～30Hz 付近の周波数帯において高い振動低減効果を得る構造としてコイルばね防振装置を用いたフローティング軌道に着目し、実物大供試体を用いた加振試験により、その効果を確認した⁹⁾。

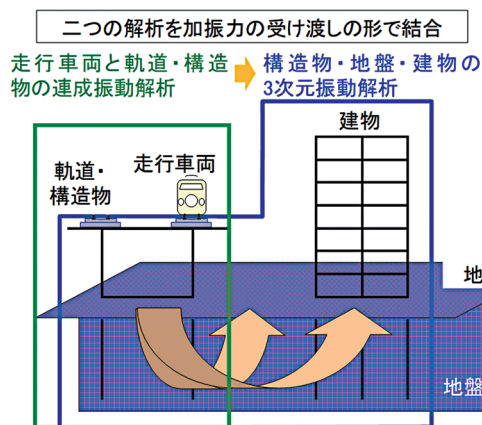


図10 地盤振動シミュレーションの構成

また、防振装置の低廉化、軌道スラブの形状変更および数値解析による走行安定性の評価なども進めている。

3. 台車部着雪抑制に関わる研究

鉄道車両が降雪地帯を走行すると、線路上の雪が舞い上がり、その雪が鉄道車両の床下や台車に雪が付着・成長する。この着雪の塊が温度変化による融雪や走行時の振動により落下すると、地上側の鉄道設備に被害が発生する、あるいは線路のバラストが飛び散り、鉄道車両や沿線家屋に被害が発生する可能性がある。これらの被害防止のため徐行運転や駅における雪落とし作業が実施されており、安定輸送の阻害要因となっている。

着雪問題を解決するために様々な研究が行われているが、車両周りの流れにおける雪の移流と付着は複雑な現象となっており、着雪メカニズムを解明するには至っていない。そこで、着雪しにくい鉄道車両形状の開発を目標に、着雪成長プロセスを再現できるシミュレーション手法の開発に取り組んでいる¹⁰⁾。

開発したシミュレーション手法は、空気流の計算、飛雪の軌跡の計算、着雪の計算から構成され、双方向に連

成させた解析となっている。着雪現象については理論的な原理が確立されていないため、降雪風洞において立方体形状の模型に着雪させる実験を実施し、その着雪形状をもとに飛雪の速度と衝突角度から着雪するかどうかを判定するアルゴリズムを開発した。また、鉄道車両の台車周りの着雪状況を再現できることを確認するために、台車模型を用いた降雪風洞実験を模擬した解析を行い(図11)、台車付近全体の着雪状況が実験と解析で良く一致することを確認した。

実験的な取り組みとしては、着雪現象の検討ツールとして、1/11縮尺の車両模型を最高速度72km/hで走行させることが可能な模型走行装置を開発した。模擬雪を散布した軌道上に車両模型を走行させることにより、雪の舞い上がり、移流、付着の一連の現象をある程度の精度で再現することが可能である。

RESEARCH 2025では、現車での着雪状況との比較によりシミュレーションの精度向上を行うとともに、現車試験、模型試験、シミュレーションを活用することにより、着雪しにくい車両形状の開発を進める。また、台車部の形状は空力音の発生にも密接に関連しているため、空力音への影響についても同時に評価する。

4. 新幹線高速化のための大型試験設備

前節までに述べた通り、鉄道総研では、現車試験、大型低騒音風洞などの設備による試験、シミュレーション技術を組み合わせることにより、新幹線の高速化に向けた研究開発に取り組んできた。鉄道車両やトンネルに関わる空気力学的現象やパンタグラフの集電性能に関する研究の更なる高度化、迅速化を目指して、RESEARCH 2020では、「低騒音列車模型走行試験装置」および「高速パンタグラフ試験装置」を整備し、2020年度から運用を開始する予定である。以下では、これらの試験装置の特長とこれらを活用した研究計画について紹介する。

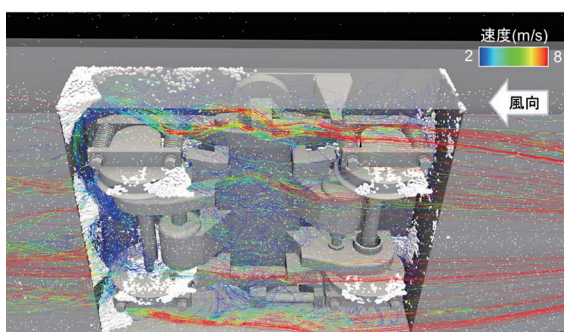


図11 台車周りの空気流解析と着雪解析の結果

4.1 低騒音列車模型走行試験装置

低騒音列車模型走行試験装置は、車両模型を高速で走行させることにより、トンネル微気圧波や空力音(低周波音を含む)など、鉄道の車両やトンネルに関わる空気力学的現象を模擬する実験装置である(図12)。既存の類似試験装置では、模型の縮尺が1/70以下と小さいこと、実形状模型の走行は250km/h以下の速度に限られるなどの制約があった。また、低周波成分を含めた空力音の現象を模擬する装置としては大型低騒音風洞があるが、車両と地面の相対運動や長大編成の影響を模擬できないなどの課題があった。

本装置は、縮尺1/20の実形状車両模型を編成長2.5m条件で400km/h、編成長7.5m条件で360km/hで走行させることが可能であり、車両と地面との相対運動、先頭形状の三次元性、編成長の影響などを評価できる。また、測定区間を半無響室としているため、低周波数域を含めた空力音響特性の評価も可能である。これらの項目については、実車・実設備での実験又は基礎研究段階の数値シミュレーションに頼らざるを得なかったが、本装置の新設により模型実験による検証が可能となり、トンネル微気圧波や空力音の現象解明、低減対策の開発、シミュレーションの精度向上などを効率的に行うことが期待される。

4.2 高速パンタグラフ試験装置

高速パンタグラフ試験装置は、実機パンタグラフの各種評価が可能な試験装置である。実機パンタグラフをパンタグラフ架台に設置し、その上方の回転円盤に実トロリ線を固定して回転円盤を回転及び上下・左右方向に加振することにより、パンタグラフがトロリ線としゅう動走行する状態を模擬することができる(図13)。既存の類似試験装置は最高速度が300km/hであるため更

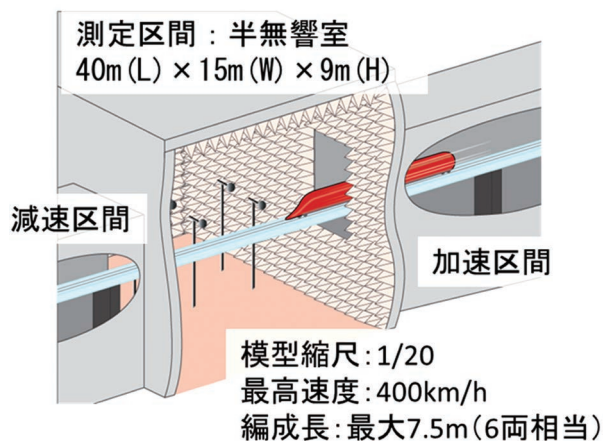


図12 低騒音列車模型走行試験装置

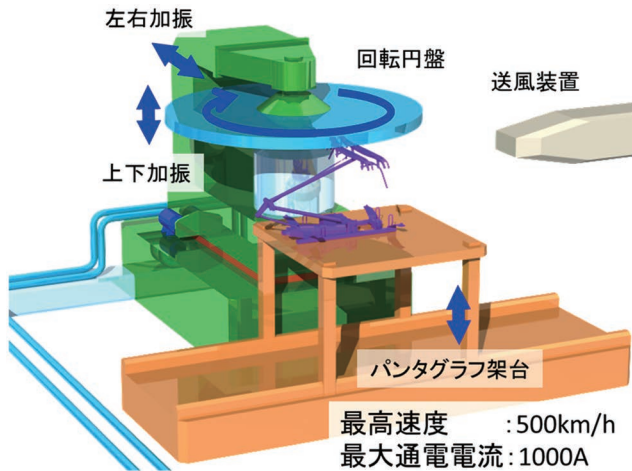


図13 高速パンタグラフ試験装置

なる高速化が求められていること、温度や湿度、走行風など実使用に近い環境条件下での試験や新幹線対応の大電流の通電ができない等の課題があった。

本試験装置は、回転円盤とパンタグラフ架台、環境雰囲気制御装置、及び通電装置などから構成され、回転円盤の最高周速度は500km/h、通電電流は最大1,000A（交流または直流600Vで加圧）である。回転円盤には架線の運動を高精度で模擬する上下加振及び左右加振機構が、パンタグラフ架台には走行時の車体の上下運動を高精度で模擬する上下加振機構を備える。また、実環境の温度・湿度やパンタグラフへの対向風を模擬する装置を備える。

本装置の新設により、高速走行時の架線の運動を模擬してパンタグラフの追従性能や集電性能等を定置で精緻に評価することが可能になり、アクティブ制御パンタグラフ等の高速車両用パンタグラフの開発を効率的に行うことが期待される。また、温度・湿度等の環境条件、架線の運動、大電流の集電条件を再現することで試験の信頼性を向上させ、パンタグラフすり板の性能評価や寿命延伸に向けた材料評価、故障原因の解明等を効率的かつ短期間に行うことが可能になる。

5. おわりに

新幹線の沿線環境に関わる現象の多くは、走行速度が高くなるにつれてその影響が顕著になるため、今後の高速化において、沿線環境に関わる課題の解決はますます重要になってくると考えられる。また、高速化を検討する上では、最高速度の向上だけではなく、様々な環境下において到達時分を安定して短縮するための技術、安全・安定性や利便・快適性など環境性能以外

の要求事項と両立させるための技術などが求められる。

これらの課題解決のためには、高度な実験・数値解析手法に加え、精度の高い現車試験データが不可欠である。また、提案された対策が実行されるまでには、施工性やコスト、あるいは他の物理現象への影響評価など、様々な検討が必要である。今後、鉄道事業者の皆様と議論を重ねながら、現象の解明と対策技術の実用化を進めていきたいと考えているので、関係各位のご支援、ご協力をお願いしたい。

文献

- 1) 北川敏樹, 長倉清, 栗田健: 高速走行時における車両下部音の音源別寄与度, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.23-28, 2013
- 2) 宇田東樹, 村田香, 北川敏樹: 鉄道車両の台車部空力音に関する測定評価手法の開発, 第28回環境工学総合シンポジウム, 2018
- 3) 吉田和重, 鈴木昌弘, 池田充: 揚力特性および低騒音性を考慮した舟体形状最適化の基礎検討, 鉄道総研報告, Vol. 19, No. 9, pp. 23-28, 2005
- 4) 光用剛, 佐藤祐一, 臼田隆之, 山崎展博, 宇田東樹, 若林雄介: 舟体・舟支え部の形状改良によるパンタグラフの空力音低減, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.5-10, 2017
- 5) 高見創, 菊地勝浩: 明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.5-10, 2009
- 6) 宇田東樹, 北川敏樹, 斎藤実俊, 若林雄介: 高速走行する新幹線における低周波空力音の特性, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.29-34, 2017
- 7) 福田傑, 斎藤実俊: 断面積多段型緩衝工の微気圧波低減効果に関する模型実験, 日本機械学会第97期流体工学部門講演会 講演論文集, S5-24, 2019
- 8) 横山秀史, 伊積康彦, 渡辺勉: 3次元振動解析による地盤および建物振動の予測シミュレーション手法, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.41-46, 2015
- 9) 瀧上翔太, 渡辺勉, 横山秀史, 高橋貴蔵, 桃谷尚嗣: 鉄道車両の高速走行に伴う地盤振動の低減効果に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, 2019.3
- 10) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈, 高橋大介, 根本征樹: 降雪風洞と連携した着雪シミュレータの開発, 第24回計算工学講演会, 2019