

沿線環境に関わる最近の研究開発

長倉 清*

Recent Studies on Wayside Environmental Problems

Kiyoshi NAGAKURA

Environmental problems along railway lines caused by the passing trains include the following: the noise, the low-frequency sound, the micro-pressure waves radiating from the tunnel portals, the ground vibration, etc. Aiming at realizing environment-friendly railways, it is necessary to mitigate the impacts of these phenomena. This paper describes the outlines of the recent studies on them performed by the Railway Technical Research Institute, with the focus on those related to the speed up of Shinkansen. In addition, specifications and usage plans of experimental facilities newly constructed by RTRI for research on high-speed railways are introduced.

キーワード：沿線環境，騒音，明かり区間圧力変動，トンネル微気圧波，地盤振動，大型試験設備

1. はじめに

鉄道はエネルギー効率の高い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。これらの物理現象の影響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。本稿では、新幹線における事例を中心に、鉄道沿線で問題となる各現象について、鉄道総研における最近の研究を紹介する。また、沿線環境に関わる研究において重要となる、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研究計画について述べる。

2. 沿線騒音

新幹線車両が走行するときに発生する騒音は、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（転動音や構造物音など）と車両まわりの空気流の変動に起因して発生する空力音に分類される。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、空力音の占める割合が転動音を大きく上回ることで、空力音の中では台車部などの車両下部からの音が大きく、パンタグラフからの音がそれに次ぐことが示されている¹⁾²⁾。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だ。

台車部空力音については、台車装置模型直下の地面板を音響透過板に置き換え、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³⁾により、空力音の音源は主電動機・駆動装置付近に局在すること、台車を格納する車体下部の空間（以下、台車キャビティ部）の前後ふさぎ板端部も音源になっていることを明らかにした。これらの知見をもとに、台車キャビティ部の前後に車両床下流れの方向を変える跳ね上げ材を取り付ける対策、主電動機や駆動装置の設置位置を上方に移す（オフセット）対策、台車カバーの下面を車体内側に折り込む（フラットアンダーカバー）対策などを提案し（図1）、「オフセット+フラットアンダーカバー」対策により250Hz～2kHz帯で台車部空力音が約2dB低減することを確認した。

集電系空力音については、過去の研究において、走行方向を一方向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平滑な舟体断面形状（以下、平滑化舟体）⁴⁾や、舟体と舟支え部を離して設置して流れの干渉を緩和する手法⁵⁾、部材表面に多孔質材を適用する手法⁶⁾などが提案されている。これらの考え方に基づいて空力音のさらなる低減を図るとともに、実機への適用に向けた検討を行った（図2）。平滑化舟体については、追従機構が動作した際の揚力変化を低減する機構として多分割舟体機構⁷⁾を提案するとともに、切り欠きを設けて揚力特性を安定化する対策などを提案した。改良舟支えについては、舟体位置を上流側に移設するタイプのものを選定し、機構・強度や集電性能に問題のないことをしゅう動試験などにより確認した。多孔質材については、空力音低減効果と取り付け強度を考慮し、頂点カバーへの多孔質材の埋込部分適用を提案した。これらの対策の

* 環境工学研究部長

組み合わせにより、現用パンタグラフに対して騒音レベルを2.7dB低減できることを確認した。

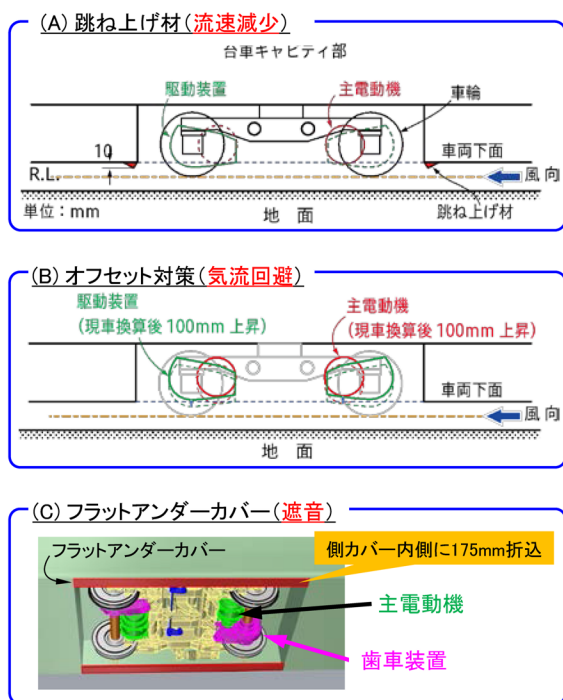


図1 台車部空力音の低減策

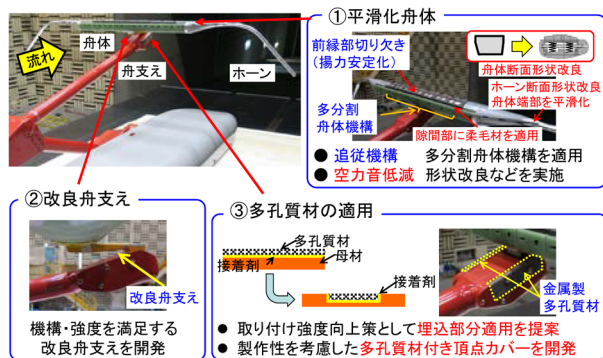


図2 集電系空力音の低減策

3. 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と、列車まわりの空気流および高架橋等の構造物振動に起因した圧力変動が発生し、家屋の建具や窓等のがたつきが生じることがある。前者の空気力学的な成分は、車両の先頭・後尾部の圧力変動と中間車両から連続的に放射される圧力変動で構成され、建具のがたつき等に大きく影響する5Hz～20Hzの成分は主に中間車両から発生することがわかっている⁸⁾。この成分の詳細な発生源を解明するため、構造物音の影響のない平地区間においてマイクロホンを線路方向に約30mの範囲に並べて発生源の分

布を測定した。その結果、圧力変動の発生源は台車部・車間部付近に局在し、特に台車キャビティ部に起因することが明らかになった⁹⁾。この知見をもとに、台車キャビティ部の隅部を丸める対策(図3)を考案し、この対策と前述のフラットアンダーカバーを併用することにより、100Hz帯以下の圧力変動が約1.5dB低減することを確認した。

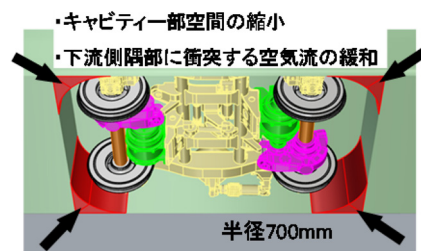


図3 台車キャビティ隅部丸み付け対策

4. トンネル微気圧波

列車が高速でトンネルに突入するとトンネル内に圧縮波が形成され、これが反対側の坑口に到達すると外部へパルス状の圧力波が放射される。このパルス波はトンネル微気圧波と呼ばれ、坑口付近において発破音や家屋の建具のがたつきなど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、トンネル内の圧縮波伝播、坑口からの微気圧波の放射の各段階での対策が考えられるが、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、列車突入側坑口への緩衝工の設置が広く行われている。しかしながら、列車速度が向上するにつれて必要な緩衝工の長さが長くなり、コストが増えるとともに、現地の状況によっては延長が困難なケースが想定される。そこで、現在の仕様(本坑との断面積比が1.5程度、側面・天井などに開口部を設置)にこだわらず、より大きい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だ。

模型発射装置による実験の結果、列車速度360km/hで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、長さ45mまでは開口部のある従来型の緩衝工(図4の実験では断面積比1.4)よりも微気圧波低減効果が大きいこと、段階的に断面積を変化させる断面積多段型緩衝工では、30m以上の長さにおいて、さらに大きい効果が得られることが明らかになった¹⁰⁾。

一方、圧縮波形成段階の車両側対策である列車先頭部形状の改良については、理論解析、数値流体解析(CFD)、模型実験により、新しい最適先頭部形状の設計指針を検討した。従来の先頭部形状設計では、先端部の断面積の変化率を大きくし、中間部以降で断面積の変化率を一定

にする滑らかな形状が推奨されてきたが、線形音響理論解析による検討の結果、トンネル断面の半径程度の長さごとに断面積が変化する多段型先頭部形状にすることで、微気圧波をさらに低減できることが明らかになった¹¹⁾。以上の理論的知見に基づき、CFDによって各段の位置や大きさを決定し、微気圧波がより低減される3段型先頭部形状を提案した(図5)。この効果を模型実験で確認し、従来型先頭部形状に比べて微気圧波のピーク値を5%程度低減できることが示された。

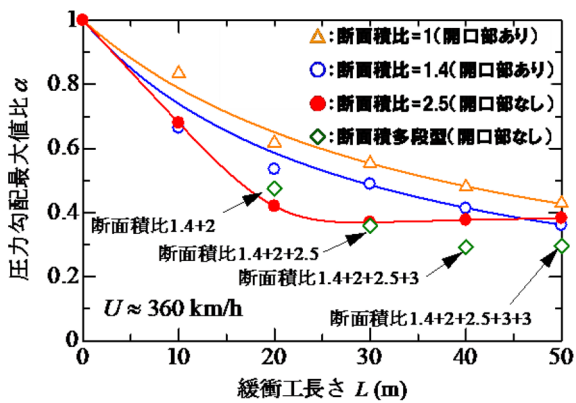


図4 緩衝工の断面積と効果の関係

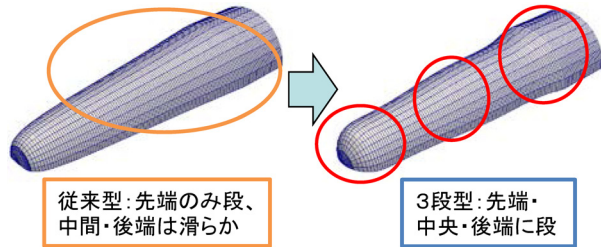


図5 3段型先頭部形状の例

5. 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達されることにより発生する。地盤振動の大きさは列車速度により変化するが、その速度依存性は地盤の性質により異なるほか、構造物の固有振動数やレール凹凸等にも影響を受けることが想定される。新幹線の速度向上を検討する際には、地盤振動の速度依存性に強い影響を及ぼす要因を明らかにし、事前に対策が必要な箇所を抽出することが重要である。

過去の高速走行試験において、営業速度を大きく超えた速度域で低周波数帯域の地盤振動が急増するケースがあったため、低周波数帯域の振動変化について構造物・地盤の多点同時測定と数値シミュレーションに基づく現象解明を行った¹²⁾。その結果、低周波数帯域の振動変

化に影響する主な要因が、速度向上にともなう列車加振力の周波数特性の変化と構造物・地盤系の振動特性の2つの組み合わせであることが明らかになった。この知見に基づいてこれら二つの要因をモデル化し、大規模な数値解析を行わずに速度向上時の地盤振動増加量を評価する方法を開発した。

一方、新幹線の速度向上時における具体的な地盤振動対策としては、地盤振動に影響の大きい数 Hz ~ 30Hz 付近の周波数帯において高い効果を持つコイルばね防振装置を用いたフローティングスラブ軌道に着目し、実物大供試体を用いた加振試験などにより、その効果を確認した¹³⁾。また、上記構造と同等の振動低減効果を持ち、既存の普通スラブ軌道と置き換え可能なプレキャスト鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 製の軌道スラブをウレタン防振材で支持する「高減衰スラブ軌道」(図6)を提案し、モーターカー走行試験により普通スラブ軌道と比較して軌道脇で 6.6dB、12.5m 地点で 3.3dB の低減効果が得られることを確認した。数値シミュレーションによる検討から、高減衰スラブ軌道を 320km/h から 400km/h への速度向上時に適用することにより、軟弱地盤が特に厚い一部の箇所を除いて概ね現状の地盤振動と同程度以下となるという結果が得られた。

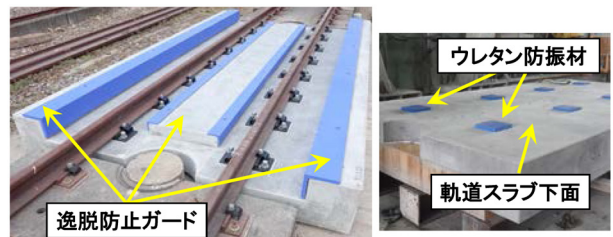


図6 高減衰スラブ軌道

6. 沿線環境に関わる大型試験設備

沿線環境に関わる研究開発において重要となる、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、鉄道総研では「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している。

低騒音列車模型走行試験装置は、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な装置であり(図7)、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が可能である。これらの項目については、実車・実設備での実験や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明かり区間圧力変動・空力音の現象解明、低減策の開発、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。

高速パンタグラフ試験装置は、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装置である(図8)。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、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。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随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。

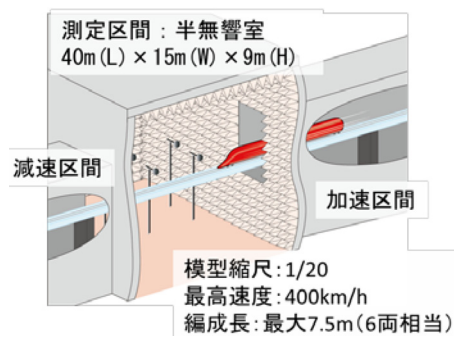


図7 低騒音列車模型走行試験装置

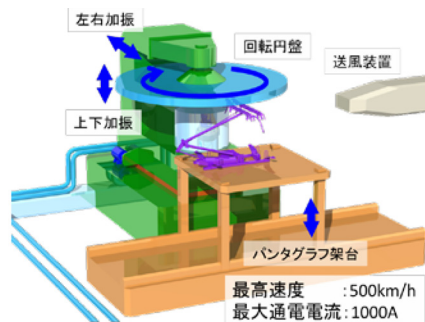


図8 高速パンタグラフ試験装置

7. おわりに

鉄道の利便性向上を目指して、さらなる速度向上、輸送力増強への取り組みが進められており、沿線環境に関わる研究開発の重要性が増している。本稿では新幹線の

速度向上に関わる取り組みを中心に紹介したが、曲線区間でのきしり音や高周波音、トンネル坑口周辺の騒音評価など、新幹線と在来線に共通する課題についても取り組んでいる。鉄道総研では、今後も沿線環境に関する研究開発を鋭意推進していく所存であるので、関係各位のご支援・ご協力をお願いしたい。

文献

- 1) 飯田雅宣：高速化のための沿線環境の評価・対策，RRR，Vol.72，No.7，pp.44-47，2015
- 2) 北川敏樹ほか：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
- 3) 宇田東樹，北川敏樹：音響透過板を用いた台車部空力音の測定および評価手法，鉄道総研報告，Vol.34，No.3，pp.29-34，2020
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 池田充，末木健之，光用剛：部材間干渉緩和と多孔質貼付によるパンタグラフ空力音低減，鉄道総研報告，Vol.24，No.4，pp.43-48，2010
- 7) 臼田隆之，光用剛，長尾恭平，久保田喜雄，若林雄介：多分割舟体による接触性能向上手法，鉄道総研報告，Vol.33，No.6，pp.41-46，2019
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 福田傑，中村真也，斎藤実俊：微気圧波低減に効果的な緩衝工断面積の提案，鉄道総研報告，Vol.35，No.6，pp.11-16，2021
- 11) 宮地徳蔵，菊地勝浩：線形音響理論に基づく列車先頭部形状最適化の試み，日本機械学会2019年度年次大会講演論文集，J09107，2019
- 12) 権藤徹，野寄真徳，横山秀史：列車高速走行時における桁式高架橋区間の地盤振動の現象解明，鉄道総研報告，Vol.35，No.6，pp.47-52，2021
- 13) 淵上翔太，渡辺勉，横山秀史，高橋貴蔵，桃谷尚嗣：高減衰スラブ軌道による高速走行時の地盤振動の低減効果，鉄道総研報告，Vol.34，No.4，pp.47-52，2020