

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 the 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. It is necessary to mitigate the impacts of these phenomena aiming at realizing environment-friendly railways. 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.

キーワード：沿線環境，騒音，低周波音，トンネル微気圧波，地盤振動

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、低周波音、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。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、向上を両立するためには、環境負荷の低減技術の開発は必須と言える。

鉄道総研では、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、鉄道の将来に向けた研究開発の一環として、新幹線速度向上時の沿線環境負荷を低減するための研究開発に取り組んでいる。本稿では、その取り組み内容を中心に、鉄道総研における沿線環境に関わる最近の研究成果を紹介する。

2. 沿線騒音

新幹線車両が走行するときに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、空力音の中では台車部などの車両下部からの寄与が大きく、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でいる。

台車部空力音については、空力音源の位置を詳細に把握するとともに発生メカニズムの現象理解を深めるために、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索を行う風洞試験手法を開発した（図1）³⁾。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。今後は、これらの対策指針に基づき、実車に適用可能な低減策の開発を進める予定である。

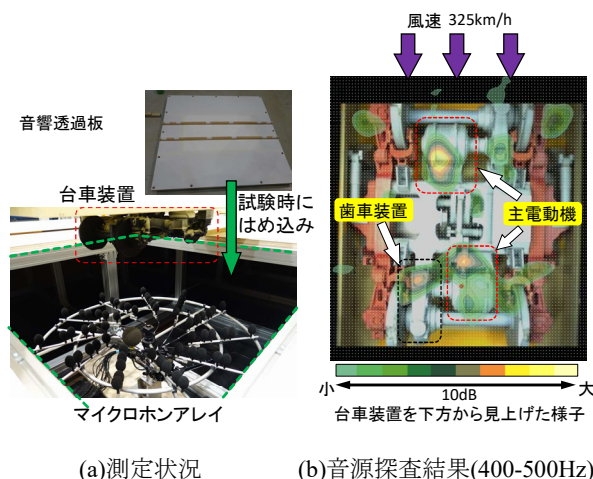


図1 マイクロホンアレイと音響透過板を用いた風洞試験による台車部空力音の音源探索

* 環境工学研究部長

特集：空気力学・騒音

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法を組み合わせた手法により、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舟体断面形状を提案している⁴⁾。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2)。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できることを示した。これらの対策により、現用品と比べて4dB程度の空力音低減効果が得られた⁵⁾。今後は、舟体位置変更による揚力特性への影響把握およびパンタグラフの機構を考慮した構成について検討を進めるとともに、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により、さらなる空力音低減を進める予定である。

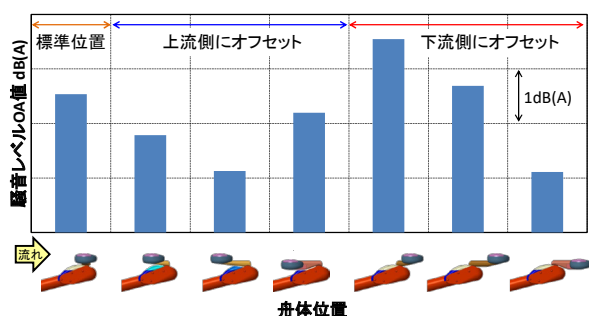


図2 舟体位置変更による空力音の比較 (風速 400km/h, ホーンなし, OA 値)⁵⁾

3. 明かり区間の低周波音

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1波の圧力変動及び先頭・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3)⁶⁾。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、現車試験や模型試験の結果から、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⁷⁾。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、模型発射装置を用いて1/70縮尺の列車模型を高速で走行させ、列車模型走行時の低周波空力音を測定した(図4)。また、台車キャビティ部から発生する低周波空力音の低減対策として、列車模型の台車部形状を変化させ、その低減量を評価した。その結果、台車キャビティ部の端部丸め付けやテーパなどにより、台車キャビティ端部への渦の衝突を緩和することが有効な低減対策の一つとなることが示された⁸⁾。今後は、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予定である。

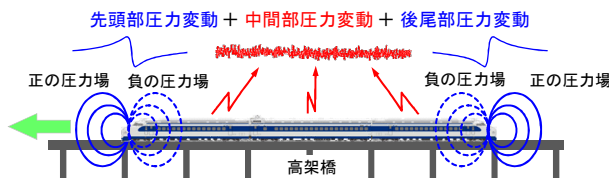


図3 車両から発生する圧力変動の模式図

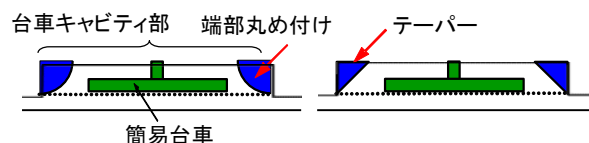
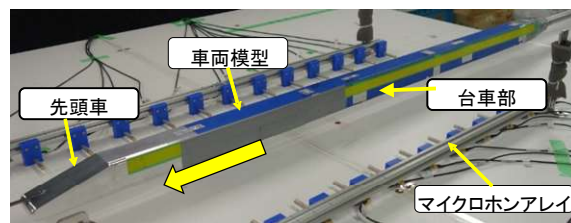


図4 模型発射装置を用いた台車部低周波空力音に関する実験

構造物振動に起因する成分については、構造物への加振力を求める車両/軌道モデルと構造物の部材振動を求める構造物モデルを連携させた解析モデルを構築した(図5)⁹⁾。このモデルにより列車速度、車両重量、構造物部材の剛性などをパラメータとした解析を行い、それぞれのパラメータが低周波数域の構造物音に及ぼす影響を明らかにした。今後は、このモデルを用いた解析をさらに進めるとともに、解析結果に基づいて具体的な低減対策の提案を行う予定である。

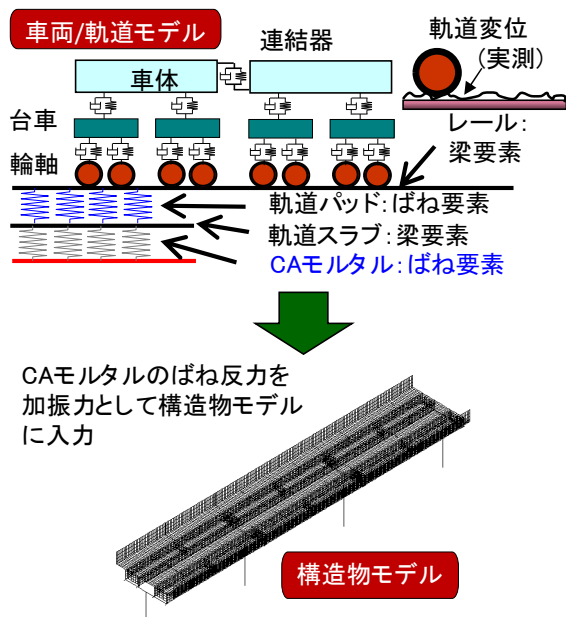


図5 構造物振動解析モデルの構成

4. 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。微気圧波対策としては、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。ただし、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。

緩衝工の断面積と微気圧波の低減効果の関係を調べるため、模型発射装置による実験を実施した¹⁰⁾。その結果、列車速度360km/hで側面開口部がない場合には、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(図6)、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がわかった(図7)。また、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(図7)。今後は、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した仕様の検討を進める予定である。

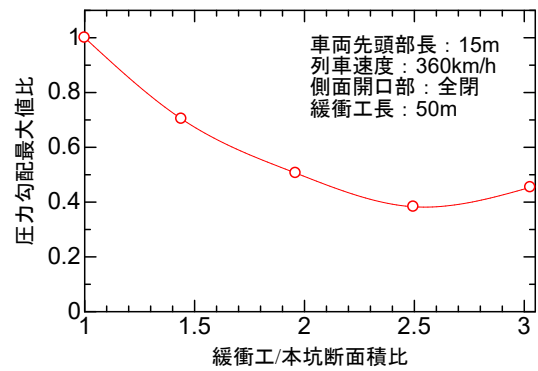


図6 緩衝工の断面積と効果の関係

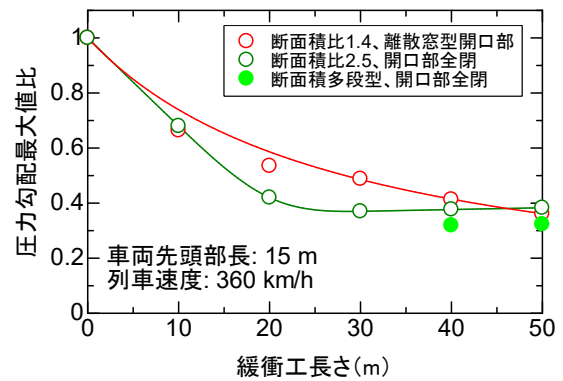


図7 緩衝工の長さとの関係

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。新幹線の色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。これらの目的のためには、数値シミュレーション手法による検討が効率的である。

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振動解析モデルと構造物/地盤の3次元振動解析(図8)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¹¹⁾。加振力を求めるモデルとしては、低周波音の節で示した車両/軌道モデルのほか、車両と土木構造物の間で共振を生じるケースなどでは、構造物の振動特性の影響を考慮可能な車両/軌道/構造物モデルを用いるなど¹²⁾、それぞれの利点を活かしながら、パラメータスタディによる検討を進めている。

一方、新幹線の速度向上に対応するための具体的な地

特集：空気力学・騒音

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。地盤振動低減のためには、軌道の1次固有振動数を可能な限り下げ、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必要がある。この条件を満たす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(図9、以下高減衰スラブ軌道)に着目し、周辺構造物への振動伝播特性に関する解析的・実験的な検討を行っている。高減衰スラブ軌道および現行の普通スラブ軌道の実物大供試体を作製し、大型起振機を用いた加振試験により、実列車荷重相当の加振力作用時における周辺地盤への振動伝播特性を評価し、10Hz以上の加振周波数において下部構造物に対する高い振動低減効果を確認した¹³⁾。また、加振試験の結果をもとに、高減衰スラブ軌道による地盤振動低減効果を数値シミュレーションにより検証した。今後は、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を実施し、実用化に向けた開発を行う予定である。

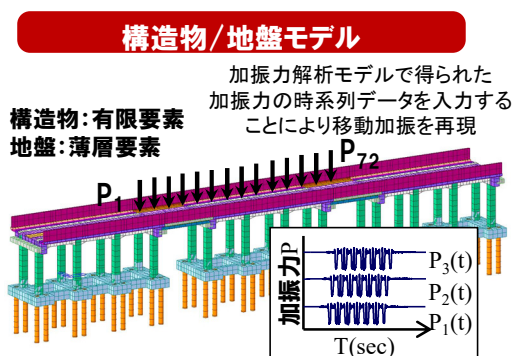


図8 構造物/地盤モデルの概要

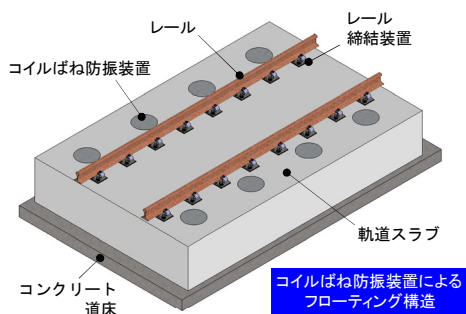


図9 コイルばね防振装置を用いた高減衰スラブ軌道

6. おわりに

新幹線、在来線ともに、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、鉄道周辺構造物の騒音伝播に対する影響評価など、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，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
- 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) 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
- 7) 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
- 8) 井上達哉，宇田東樹，北川敏樹：高速走行する列車の台車部から発生する低周波空力音に関する研究，第28回環境工学総合シンポジウム，2018
- 9) 渡辺勉，曾我部正道，徳永宗正：車両/軌道/構造物の各種パラメータが鉄道RCラーメン高架橋の部材振動特性に及ぼす影響に関する数値解析的検討，土木学会論文集A2(応用力学)，Vol.69，No.2(応用力学論文集Vol.16)，I_821-I_832，2013
- 10) トンネル微気圧波低減のための緩衝工の断面積拡大方法，2017年度主要な研究開発成果，鉄道総合技術研究所，2018
- 11) 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
- 12) 横山秀史，三橋祐太：ラーメン高架橋区間における列車走行時の地盤振動シミュレーション，平成27年度土木学会全国大会第70回年次学術講演会，2015
- 13) 荊上翔太，高橋貴蔵，小滝康陽，桃谷尚嗣，渡辺勉：高減衰スラブ軌道供試体の加振試験による振動特性の評価，土木学会全国大会第73回年次学術講演会，2018