

沿線環境技術に関する最近の研究

前田 達夫*

Recent Studies on Environmental Technology along Waysides of Railways

Tatsuo MAEDA

Environmental problems along waysides of railways include the following: noise, ground vibrations, micro-pressure waves radiating from tunnel portals, low-frequency pressure variations caused by passing trains, complex magnetic fields, weeds on embankments, comfort of stations and others. It is necessary to mitigate the effects of these phenomena to aim at environment-friendly railways. This paper describes the outlines of recent studies on the foregoing issues made by Railway Technical Research Institute (RTRI).

キーワード：環境，騒音，地盤振動，トンネル微気圧波，低周波音，電磁場，雑草，駅環境

1. はじめに

鉄道沿線の環境問題には、騒音、地盤振動、低周波音、駅の衛生環境、電磁環境など、さまざまな課題がある。列車の速度向上、輸送力の増強に際しても、環境に対する負荷を小さくし、環境に優しい快適な鉄道の実現をはかることが重要である。ここでは、現在、鉄道総研が取り組んでいる沿線環境問題に関する最近の研究開発の動向について概説する。

2. 騒音

環境庁（現、環境省）より、昭和50年に新幹線騒音に係る環境基準が告示され、平成7年には在来鉄道の新設又は大規模改良に際しての騒音対策の指針が出されている。近年では、新幹線騒音のみならず、在来線の騒音の低減も社会的に重要な課題となっている。

高速の新幹線では空気の流れから発生する空力騒音の低減が課題であり、在来線では、電動機などの車両機器音の低減に伴って、転動音、構造物音など物体の振動から発生する固体音の低減が課題となっている。

鉄道騒音を低減するためには、空力音、固体音の発生メカニズムを明らかにし、騒音がどこから発生し、測定点ではどの音がどれだけ寄与しているか知ることが重要であり、寄与度の高い騒音源から低減をはかっていく必要がある。

音源解析手法に関する研究では、これまで、風洞試験、現車試験用に多点楕円体型指向性マイクロホン、X配列型および螺旋配列型マイクロホンアレイを開発し、カメ

ラと連動したアレイ式マイクロホンなども整備してきたが、車間部あるいは台車部から発生する空力騒音の音源解析精度を向上させるために、低周波域まで計測可能な螺旋配列型マイクロホンアレイを新たに製作した。

空力騒音に関しては、車体の車間部、台車部から発生する空力音に関する風洞試験を実施し、車端部を丸みづける方法、台車部にカバーなどを設置する方法に対する空力音の低減効果を評価した¹⁾。車端部を丸みづける方法については、更に現車試験を実施し、上記の螺旋配列型マイクロホンアレイを用いた測定により、その低減効果を確認した。現在、詳細なデータ解析を進めているところである。空力騒音の低減に関しては、多孔質材料を物体表面に貼付する方法について、円柱に貼付した場合の基礎的な風洞試験を実施し、その空力騒音低減メカニズムを明らかにした。この多孔質材料をパンタグラフに応用した場合の風洞試験も実施し、低減効果を評価した²⁾。その後、現車試験も実施し、現在、データ解析を進めているところである。空力騒音の数値シミュレーションに関しては、Howeの渦音理論を用いて二重極音を評価する解法の適用範囲を拡張し、高い周波数の音まで予測できる手法を提案し、円柱³⁾、さらにはパンタグラフの部分模型から放射される空力音の数値解析を行った。パンタグラフに関しては、空力騒音の低減とともに揚力変動の低減が重要であり、空力騒音と揚力変動に関する風洞試験が行われてきたが、これまでは揚力をワイヤーの張力を介して測定するため、ワイヤーから音が生じ、揚力変動を空力騒音と同時に測定することは不可能であった。そこで、パンタグラフの主軸周りのモーメントを利用して揚力を評価する方法を考案し、ワイヤーや治具が無い実際の走行条件に近い状態で、空力騒音と揚力変動を同時に測定することが可能となった⁴⁾。

* 環境工学研究部 部長

特集：環境技術

転動音、構造物音に関しては、現在、鉄道総研の鉄道の将来に向けた研究開発課題の一環として研究が行われている。ここでは、車輪とレールの凹凸に起因する転動音と構造物音の現象を解明し、予測手法を構築し、低減対策法を開発することを大きな目的としている。

現車試験により、車輪とレールの凹凸、車輪とレールの振動、レール近傍の騒音、構造物の振動、沿線騒音の測定が継続的に行われている。車輪の振動特性、放射音特性を把握するために、各種車輪（普通車輪、波打車輪）に対する室内試験と数値シミュレーションが行われ、車輪形状（板部厚、リム厚、板部のオフセット量）の影響が明らかとなった。車輪板部が平形状である平板車輪に比べて、車輪板部に径方向の湾曲形状や周方向に波打ち形状を持つ車輪からの放射音、板部の厚みの薄い波打ち車輪からの放射音が大きい傾向にあることがわかり、今後の低騒音車輪の形状に関する指針が得られた^{5) 6)}。現地試験により、車輪と各種軌道構造の振動特性を調査し、測定された車輪とレールの凹凸のデータとこれらの振動特性を基に、ヨーロッパで開発された TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software)⁷⁾ のモデルを基礎とした予測手法を構築し、転動音の予測を行った。そして、実測結果との比較を行い、予測手法の精度の検証を行った。さらに、この予測手法を用いて、車輪とレールの凹凸、軌道構造（軌道パッドのばね剛性、レールの損失係数）の転動音に対するパラメータスタディを行った。その結果、車輪とレールの凹凸に関して、レール削正によりレールの凹凸が5dB程度低減されるため、レール削正区間のレール近傍音は、レール未削正区間のレール近傍音に比べ3～5dB程度小さくなることがわかった。レール削正区間において、車輪の凹凸を良好に管理することによって、レール近傍音は1dB程度低減するが、レール未削正区間において、車輪の凹凸を良好に管理しても、レール近傍音の低減効果は小さいことがわかった。これは、レール未削正区間のレール凹凸が車輪凹凸を大きく上回っているためである。軌道パッドの剛性を大きくすると、レール放射音は小さくなるが、レール支持機構であるまくらぎからの放射音が大きくなり、剛性を小さくすると逆の効果を生じる。また、レールの損失係数を大きくすると、レールが制振され、レール放射音が小さくなることがわかった。レール側面・底面を樹脂・弾性材などで覆うレールダンパーによってレールの損失係数を大きくすることや、軌道パッドのばね剛性を調整するなどにより軌道全体の振動特性を変えることが、今後の低減対策として有効であると考えられる⁸⁾。構造物音に関しては、これまで、鋼橋の振動特性・放射音特性について、現車試験を実施し、橋桁用磁性防振材の開発を進めてきたが⁹⁾、現在、コンクリート高架橋に対する振動特性、放射音特性に関する現車試験を実施

し、予測手法の検討を行っている。

今後の鉄道騒音の研究課題は、音響計測手法の精度の向上と効率化、空力騒音に関しては、予測精度の高い風洞試験法の開発、空力音数値シミュレーション手法の適用範囲の拡大と精度の検証と向上、空力音低減手法の開発である。転動音、構造物音に関しては、現象解明の深度化、転動音・構造物音を総合した予測手法の構築と精度の向上、車輪、レール、軌道構造を含めた総合的な騒音低減対策法の提言及びその実現性の検討である。

3. 地盤振動

地盤振動対策に関して、基礎研究段階から実用化された対策まで様々であるが、車両対策としては、車両軽量化、軌道対策としては軌道のばね剛性を小さくする低ばね係数化（低ばねレール締結装置、防振まくらぎ、防振直結軌道、有道床弾性まくらぎ、バラストマットなど）、軌道の高剛性化、路盤改良、地盤対策としては、地中溝・地中壁による振動遮断、地盤改良などが考えられる¹⁰⁾。速度向上時の地盤振動を検討する上では、地盤条件を考慮した速度依存性の評価が必要であり、高速走行試験の結果とこれまでの知見を組み合わせ、ボーリングデータなどの地盤情報から速度依存性を予測する評価手法の開発を行った¹¹⁾。最近では、トンネルからの地盤振動予測手法と対策工の開発を目指して、トンネル内、地中、地表部の列車通過時の振動測定を行い、実態の把握を行った¹²⁾。また、在来線トンネル上で発生した振動問題の原因調査と対策効果確認により、レール波状摩耗が主要な振動源となる場合があることを確認した¹³⁾。ばね剛性の小さい軌道パッドによる新幹線のスラブ軌道区間における地盤振動低減効果についても、モーターカー試験や現地試験、数値シミュレーションにより基本特性を把握した¹⁴⁾。

4. 低周波音

わが国では、100Hz以下の可聴音と20Hz以下の不可聴音を含めて低周波音と呼んでいる。環境省は、平成16年に低周波音問題対応の手引書を作成しているが、この手引書では、ある時間連続的に、固定された発生源から発生する低周波音を想定しており、交通機関等の移動音源や発破・爆発等の衝撃的な音源には適用しないとしている。したがって、現在のところ、鉄道の低周波音に関する環境基準あるいは指針は存在しないが、鉄道の低周波音として代表的な後述するトンネル微気圧波に対しては、これまでもトンネル入口緩衝工の設置や列車先頭部形状の改良などの対策がとられてきた。以下に、トンネル微気圧波をはじめとする鉄道の低周波音に関する最近

の研究について述べる。

4.1 トンネル微気圧波・突入波・退出波・枝坑通過波、 跨線橋等の構造物通過時圧力波

列車のトンネル突入時に発生する圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、トンネル出口に到達した時に、坑口から外へ放射されるパルス状の圧力波をトンネル微気圧波と呼んでいる。トンネル微気圧波の大きさはトンネル出口に到達した圧縮波の波面の圧力勾配にほぼ比例する。圧縮波の波面の圧力勾配は、トンネル伝播中に軌道構造の影響を受け、バラスト軌道では減衰するが、スラブ軌道でははじめ切り立ち、長大トンネルではその後減衰する。したがって、トンネル微気圧波低減対策の基本的な考え方は、トンネル出口に到達した圧縮波の波面の圧力勾配を小さくすることである。その対策の一つとして、トンネル入口ではじめから圧縮波の圧力勾配を小さくしておく対策が有効であり、トンネル入口緩衝工の設置あるいは列車先頭部形状の改良による対策が行われてきた。これまでは、トンネル入口での圧縮波の圧力勾配が最小になるように、トンネル入口緩衝工の形状や列車先頭部形状を決定してきたが、トンネル内を伝播する圧縮波の特性を考慮することによって、更に入口緩衝工形状（特に側面に設ける開口部の形状）の最適化をはかることが可能となった¹⁵⁾。これは、開口部を持つトンネル入口緩衝工に列車が突入する時の圧縮波の生成と長大トンネルを伝播する圧縮波の伝播特性、すなわち、圧縮波に対する軌道条件（スラブ軌道、バラスト軌道）や斜坑・立坑の影響を数値シミュレーションによって精度良く評価できるようになったことによる成果である。

新幹線の高速化に伴って、トンネル微気圧波のみならず、列車がトンネルに突入する時に突入側坑口から放射される突入波、列車がトンネルを退出する時に退出側坑口から放射される退出波、列車がトンネル内の枝坑を通過する時に発生する圧力波が坑口から外へ放射される枝坑通過波、跨線橋等の構造物通過時の圧力波¹⁶⁾も目立つようになる。今後、これらの現象に対しても低減対策を施す必要がある。突入波および退出波に関しては、トンネル微気圧波と同様、列車先頭部形状による対策とトンネル入口緩衝工による対策が有効である。枝坑通過波については、トンネル内の枝坑と本坑との接続部の不連続をなくすことが対策となる。

4.2 明かり区間の列車通過時の圧力変動と低周波音

明かり区間を列車が走行すると、列車近傍に、先頭部と後尾部が通過する時に圧力変動が生じる。また、車両周りの流れの乱れから、低周波空力音そのものも生じる。先頭部と後尾部が通過する時の圧力変動は、列車走行時に車体表面に生じる圧力分布が列車と共に移動する

ことにより生じる現象で、波動現象ではないが、新幹線の高速化に伴って、その影響が沿線にも及び、沿線の家屋の窓を揺らすことから、低周波音問題に分類されている。現在、現車試験、模型試験、数値シミュレーションにより、これらの現象の解明を進めているが、高架橋を列車が走行する場合には、低周波空力音に加えて構造物の振動による低周波音が含まれるため、今後、その寄与度も明らかにし、低減対策を検討する必要がある。

5. 電磁環境

携帯電話やIH家電の普及に伴って、電磁場の生物学的影響に関する関心が高まっており、国際保健機構（WHO）は健康影響についての知見の見直しを進めている。極低周波域（主に商用周波数 50/60Hz）および高周波域（主に携帯電話使用帯域）に関しては、様々な研究がなされているが、鉄道用車両主変換器、電磁調理器、非接触ICカードなどの中間周波数帯（300Hz～10MHz）に関する実験データは十分に蓄積されていない。そこで、鉄道分野の電磁環境の実態を把握し、人体暴露量の推定と生物学的影響とを総合した安全性評価手法を確立することを目的に、中間周波数帯電磁場の生物への影響評価に関する研究を進めた¹⁷⁾。その結果、2kHzで0.91mT、20kHzで1.1mTの中間周波磁界について、細菌を用いた変異原性試験では変異原性（発がん要因の一種）は認められなかった。さらに、哺乳類培養細胞としてマウス由来細胞を用いた変異原性試験により、2および20kHzで0.8mTまでの生物作用を検討したが、変異原性ならびに急性毒性は認められなかった。われわれが実際に環境中で暴露する磁界は、ここで対象とした磁界よりも大変弱く、暴露時間も短いことから、中間周波磁界による健康リスク、特に遺伝子変異などを起こす可能性は大変小さいと考えられる。今後も、鉄道で発生する種々の周波数帯の電磁界を対象として、生物学的な側面からの研究を進めるとともに、工学的な側面から人体内の誘導電流を定量的に推定する研究を通して、電磁界の安全性に関する総合的な評価手法の構築をはかる予定である。

6. 鉄道施設の衛生環境

近年、鉄道利用者の衛生、清潔、快適性に関する関心は、車両内のみならず、駅構内にも広がりつつある。そこで、駅構内の快適性の向上を目指して、駅構内の衛生に関する利用者の意識調査と衛生に係わる物理的要因の実態調査を行った。その結果、「清潔さ」、「におい」が重要な因子であることが明らかになった。そして、具体的な臭いの例としてカビ臭が挙げられた。そこで、駅構内の空気質に影響を与える要因の一つとして、微生物に着

特集：環境技術

目し、駅の環境調査を実施した。その結果、臭いが気になると回答した主観評価と空中浮遊カビ検出量に高い相関があることがわかった。また、化学分析の結果、駅で採取したカビが臭気物質を発生することが明らかとなった¹⁸⁾。今後、駅シミュレータを利用した試験などを通して、快適な駅環境に対する微生物、臭質、臭気強度、視覚要素などの各要因の影響を追究していく予定である。

7. その他

鉄道沿線に発生する雑草対策として、効果的かつ環境親和性が高い抑草剤による方法を現場で試験し、その有効性を確認した¹⁹⁾。その後、雑草制御機能を持つ植物を利用する方法についても検討を始めている。また、鉄道沿線や関連する土地の土壌環境の劣化を安価・継続的に監視するために生物を利用する技術についても研究を進めている。

冬期の鉄道車両の床下部に成長する着氷雪は、落下時にバラストを飛散するために、車両のみならず鉄道沿線に被害をもたらすことがある。そこで、着氷雪の軽減をはかるために、床下流れに関する風洞試験、数値シミュレーション、更には防災科学研究所の低温風洞による雪粒子を用いた風洞試験により、デフレクターによる車両下部側面形状の改良を検討した²⁰⁾。今後、デフレクターの着氷雪の低減効果を検証するための現車試験を実施する予定である。

8. まとめ

鉄道は、地球環境に対して優れた交通機関であるが、鉄道の速度向上、輸送力の増強に際しても、環境負荷を増大させることなく、更に低減することを目標に、技術開発を進めることが必要である。

文献

- 1) 高石武久, 山崎展博: 風洞試験による車間・台車部空力騒音の抑制技術の検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.3, pp.11-16, 2007
- 2) 末木健之, 池田充, 高石武久: 多孔質材の表面貼付による空力音低減効果と集電装置への応用, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.11-16, 2008
- 3) T.Takaishi, M.Ikeda, C.Kato: A computational method of evaluating noncompact sound based on vortex sound theory, Journal of the Acoustical Society of America Vol.121, No.3, pp.1353-1361, 2007.
- 4) 末木健之, 池田充: 風洞試験におけるパンタグラフ揚力の新しい測定法の開発, 第12回鉄道技術連合シンポジウム

- (J-RAIL2005) 講演論文集, pp.41-44, 2005
- 5) 上妻雄一, 北川敏樹, 長倉清: 在来線鉄道車輪の振動特性に及ぼす形状因子, 鉄道総研報告, Vol.21, No.3, pp.11-16, 2007
- 6) 笹倉実, 佐藤潔: 在来線車輪の形状因子による振動騒音特性評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.17-22, 2008
- 7) D.J.Thompson, C.J.C. Jones: A review of the modeling of wheel/rail noise generation, Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No.3, pp.519-536, 2000.
- 8) 北川敏樹: 転動音の特性と軌道・車両に係るパラメータの影響, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.23-28, 2008
- 9) 半坂征則, 杉本一朗, 長倉清, 間々田祥吾: 鋼構造物騒音の部材ごとの寄与度解析および対策材料の検討, 鉄道総研報告, Vol.21, No.2, pp.21-30, 2007
- 10) 横山秀史, 芦谷公稔, 岩田直泰: 地盤振動対策の現状, RRR, 2006.1
- 11) 横山秀史, 芦谷公稔, 岩田直泰: 新幹線高速走行時の地盤振動特性と速度依存性評価法, 鉄道総研報告, Vol.20, No.1, pp.23-28, 2006
- 12) 津野究, 藤井光治郎, 武居泰, 山崎貴之, 丸山修: 新幹線トンネルにおける列車振動予測に関する研究(その2), 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, III, pp.169-170, 2006
- 13) 岩田直泰・横山秀史・芦谷公稔・斎藤聡, 波状摩耗レールの更替による地盤振動特性の変化, 鉄道力学論文集, No.10, pp.37-42, 2006.7
- 14) 横山秀史, 岩田直泰, 芦谷公稔: 低ばね定数軌道パッドによる地盤振動低減効果, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.29-34, 2008
- 15) 宮地徳蔵, 小澤智: トンネル内を伝播する圧縮波の伝播特性, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集(2007.11.17-18, 東広島), 2007
- 16) 高見創, 菊地勝浩, 飯田雅宣, 前川博: 列車が沿線近傍構造物を通る際に発生する圧力波, 日本機械学会論文集(B編) Vol.72, No.715, 2006-3
- 17) 池畑政輝, 中園聡, 和氣加奈子, 鈴木敬久, 吉江幸子, 早川敏雄: 微生物を用いた中間周波磁界の変異性評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.41-44, 2008
- 18) 川崎たまみ, 京谷 隆, 潮木知良, 藤浪浩平, 早川敏雄: 駅構内の空気質に与える微生物の影響評価, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.35-40, 2008
- 19) 早川敏雄: 抑草剤によるのり面大型雑草の選別的除去による植生変更, 鉄道総研報告, Vol.21, No.3, pp.35-38, 2007
- 20) 中出孝次, 井門敦志, 宍戸真也, 飯倉茂弘, 鎌田慈, 遠藤徹, 根本征樹, 小杉健二, 佐藤威: 空気誘導板を用いた鉄道車両台車部の着氷雪低減対策法の検討, 第14回鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2007) 講演論文集, pp.567-570, 2007