

鉄道沿線の騒音，振動，微気圧波に関する 最近の研究開発

飯田 雅宣*

Recent Studies on Wayside Noise, Ground Vibration and Micro-pressure Wave

Masanobu IIDA

It is necessary to mitigate the impacts of noise, ground vibration and tunnel micro-pressure wave on the wayside area to aim at environment-friendly railways. This review describes recent studies performed on these themes by Railway Technical Research Institute.

キーワード：沿線環境，騒音，地盤振動，トンネル微気圧波

1. はじめに

鉄道は省エネルギー性の高い，地球環境に優しい交通機関であるが，大型の重量物である列車が高速で走行するため，沿線の環境に様々な影響を及ぼす。特に，沿線騒音，地盤振動，トンネル微気圧波は鉄道の代表的な沿線環境問題であり，その低減が重要である。本稿では，これら3つの課題に対する鉄道総研における最近の研究開発の状況について紹介する。

2. 沿線騒音

鉄道騒音の原因は，転動音，構造物音，空力音，車両機器音など様々であるが，新幹線と在来線，高架橋と盛土，防音壁の有無など，条件の違いにより主たる音源が異なってくる。現在，新幹線では，空力音，転動音，構造物音の寄与が大きく，在来線では，転動音，構造物音，車両機器音(ファン騒音など)の寄与が大きい。また，レール継目や車輪踏面フラットによる衝撃音，急曲線でのきしみ音などの特殊条件下で発生する騒音も，一旦発生すると影響が大きいため，その抑制が重要である。

2.1 転動音・構造物音

転動音と構造物音は，車輪／レール間で作用する加振力に起因して，車輪，軌道，構造物が振動し，音が放射される現象である。鉄道総研では，2009年度に終了した前期「将来指向課題(鉄道の将来に向けた研究開発課題)」において，欧州で開発された転動音予測モデルTWINSの理論を元に，転動音・構造物音の予測手法の

開発に取り組んだ¹⁾。この成果を適用した研究事例を以下にあげる。

- ・在来線のバラスト軌道と弾性まくらぎ直結軌道の2区間において，実車走行時に生じる車輪，レールの振動および騒音を測定し，予測法の結果と比較し，予測法の有効性を確認した²⁾。
- ・新幹線車両下部音は転動音と台車部等の空力音からなるが，測定結果から両者を分離することが従来は困難であった。しかし，今回転動音予測法を用いることにより，車輪・レール表面凹凸の測定結果などから転動音の寄与度を別途見積もることで，両者の分離を可能とした。さらに，この結果を元に，新幹線速度向上時の騒音予測と音源別寄与度の評価を行った³⁾。

また，以下のように転動音と構造物音の現象解明の深度化，予測法の精度向上と機能拡張に関する研究も進めている。

- ・車輪の振動に関し，定置での衝撃加振試験と，実際の走行時の振動測定を実施し，車輪振動特性を把握するとともに，車輪踏面にフラットが発生したとき，および分岐区間を通過したときの振動特性を調査した⁴⁾。
- ・新幹線のラーメンコンクリート高架橋に関し，高架橋の衝撃加振試験，車両走行時の振動・騒音測定，境界要素法による放射音解析を行い，振動・音響特性を把握した。また，新幹線の桁式コンクリート高架橋に関し，有限要素法による振動モード解析，車両走行時の振動・騒音測定，境界要素法による放射音解析を行い，振動・音響特性を把握した⁵⁾。
- ・駅構内等の急曲線部を低速で車両が走行する際のきしみ音はよく知られているが，曲率半径の大きな曲線部を比較的高速で車両が走行する場合に，10kHz以上の周波数帯の高周波音が発生することがある。この高周波音の

* 環境工学研究部 部長

特集：環境技術

感じ方には、個人差があり、特に年齢が影響する。この高周波音について、現地測定などを行って、現象解明を進めている⁶⁾。

転動音、構造物音の低減対策については、前述の予測法を用いて、既存の各種対策の効果を評価したほか、以下に述べる新たな対策の開発にも取り組んでいる。

・転動音対策として、レール放射音を低減するためのレール防音材の開発に取り組み、現車走行試験で騒音低減効果を確認したが、現在は、さらにレール継目部に適用可能なレール防音材の開発を進めている⁷⁾。

2.2 空力音

空力音は、車両に相対的な空気の流れに起因して発生する騒音で、速度依存性が高く、新幹線の速度向上とともに、その低減がますます重要となっている。

空力音の研究においては、暗騒音の小さい「低騒音風洞」が必須の研究ツールであり、鉄道総研では大型と小型の2つの低騒音風洞を活用している。新幹線車両の空力音は様々な部位から発生するが、主な空力音源は、屋根上のパンタグラフと床下の台車部などである。これらの音源に関する風洞実験を実施する際に注意すべき点は、実際に列車が走行するときに形成される屋根上や床下の流れと風洞測定部内の気流が一般には異なることである。したがって、風洞測定部内に現車と同様の流れを再現できれば、発生する空力騒音の評価精度を向上できる。現在、現車走行試験で車両の屋根上、床下の流れを測定した結果を元に、風洞測定部内の車両模型の屋根上および床下で、実際の流れを再現する方法について研究を進めている^{8) 9)}。

さらに、空力音の研究においては、近年進展の著しい数値シミュレーションを活用した研究も進めている。空力音の計算では、音源となる非定常乱流場のシミュレーションとそこから発生する広帯域の音響場のシミュレーションを分離して行うことが多いが、どちらの計算も、大規模数値計算を必要とするチャレンジングな課題である。このうち後者の音響シミュレーションについて、複雑形状物体に対応させるとともに、並列化により計算速度を飛躍的に向上させるための研究を行った¹⁰⁾。

空力音対策に関しては、最大の空力音源であるパンタグラフ等の集電系を主な対象として、研究を進めている。これまで、舟体、舟支え等の形状改良や多孔質材貼付などの対策を研究してきたが、さらなる高速化に対応するため、流れ場制御などの新しい対策についても基礎的な研究を進めている。現在までに、流れの制御方法としてプラズマアクチュエーターとシンセティックジェットの2方式について風洞実験あるいは数値シミュレーションを行ない、いずれの方式についても、単純な円柱や舟体

模型まわりの低速流れの条件ではあるが、流れ場制御が可能であることを確認した^{11) 12)}。

2.3 防音壁

防音壁は、従来から騒音対策として多用されているが、近年線路沿線で増加している高層建物等の高所空間に対しては、大きな遮音効果が得られない。このようなケースに対応するため、通常の防音壁よりも低い防音壁をレールに近接して設置する方法について音響模型実験と試験線での現車試験を実施し、騒音低減効果を確認するとともに、その効果を予測する方法を提案した¹³⁾。

新幹線の高速化では空力音の増大により大幅に騒音レベルが上がるため、車両側対策だけでなく地上側での対策も検討する必要がある。直接的な対策としては防音壁の嵩上げがある。しかし、高い防音壁は自然風による大きな風荷重を受けるため、防音壁を設置する高架橋などの構造物の補強が必要になるという問題があり、嵩上げを実施するのは困難な場合が多い。そこで、通常時には高防音壁として機能するが、強風時には、防音板が自動的に開くことにより風荷重を逃がす構造の風圧緩和防音工の開発を進めている¹⁴⁾。

2.4 その他の騒音に関する研究

以上、鉄道騒音の音源の発生メカニズム、予測、対策に関する研究を紹介したが、鉄道騒音を沿線の環境騒音として評価する上で、他にも様々な課題がある。ここでは下記の2例を紹介する。

住宅密集地での騒音評価において次のような問題が生じることがある。発生源の鉄道からの騒音の大きさが同じでも、沿線騒音を測定する場所が、まわりを建物に囲まれたような状況になっていると、建物壁面等での音の反射、遮蔽の影響を受けて、測定値が異なってくる場合がある。これらの測定点の周辺に存在する建物による影響を調べるため、模型実験を行い、その結果を元に、建物の影響を定量的に見積もるための評価式を提案した。これにより、周辺建物の影響を受けにくい騒音測定点の選定が可能となる¹⁵⁾。

現在、新幹線騒音の環境基準ではピーク騒音レベルが指標として用いられているが、新線又は大規模改良の在来線では等価騒音レベルが指標として用いられている。また、国際的には、騒音の評価指標として等価騒音レベルが使用される傾向にある。このような異なる指標による評価値は、相互に直接比較することができない。そこで、鉄道騒音の特性を考慮した上で、ピーク騒音レベルを、単発騒音暴露レベル（等価騒音レベルのベースとなる指標）に換算する方法を提案した¹⁶⁾。

3. 地盤振動

地盤振動は新幹線の沿線環境における重要課題の一つであり、高速化の際にはその影響を事前に見積もる必要がある。しかし、地盤振動には地盤条件が大きく影響し、場所毎に速度依存性が変わるため、速度向上の影響評価は容易ではない。鉄道総研では、既存の地盤情報にもとづいて速度依存性を推定し、速度向上の効果を簡易に見積もるための評価手法を開発したが、近年の速度向上試験等で得られた新たな知見を加えることにより、評価手法の改良を行い、300km/hを越えるような高速域への適用性を向上させた¹⁷⁾。

地盤振動の予測については、動的なシミュレーションに基づく手法の開発も進めている¹⁸⁾。この方法では数Hz以下の静的な軸重移動による振動と十数Hz以上の動的な軸重変動による振動の両方を考慮できる。この方法を用いて軌道不整と地盤振動の関係を検討している。

国の勧告では、沿線の新幹線鉄道振動として、振動の鉛直成分のみが対象となっているが、振動メカニズムを解明し、上記のような振動予測シミュレーションとの比較検証を行うためには、水平動も対象とする必要がある。そこで、既存の起振機試験結果や新幹線高速走行試験等の振動測定結果を分析し、水平動を含めた地盤振動の伝播特性を把握した¹⁹⁾。

地盤振動に対しては、提案段階のものも含め、車両軽量化をはじめとする種々の対策があるが、大規模な工事を伴わない対策として、低ばね定数軌道パッドがある。この対策に関して、モーターカー走行試験、新幹線現地試験、地盤振動モデルによるシミュレーションを実施し、地盤振動低減効果を評価した²⁰⁾。

通常、地盤振動は明かり区間で問題となるが、土かぶりの浅いトンネル区間の上方の地表面で振動が問題となる場合がある。このようなトンネル上の地盤振動の現象について、大規模な数値解析を行い、地中の振動伝播に及ぼす地盤条件の影響を調べた²¹⁾。また、特にレール不整の影響が顕著であったトンネル上地盤振動の事例に対して、軌道側での対策を実施した結果、大きな振動低減効果が得られた²²⁾。

4. トンネル微気圧波

トンネル微気圧波は、列車のトンネル突入時に発生した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のことで、坑口付近で衝撃音が発生したり、民家の建具を揺らすなどの影響を及ぼす。微気圧波は速度依存性が高いため、新幹線の高速化において、重要な研究課題である。

微気圧波の予測評価に関しては、列車のトンネル突入時の圧縮波形成の段階、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の三段階のそれぞれに対して研究を進めている。突入段階については、三次元形状列車模型発射装置を用いた実験的研究²³⁾、突入時圧縮波の波形に関する理論解析²⁴⁾、伝播段階については、斜坑・立坑を有する長大トンネル内の圧縮波伝播過程における波形の変形を高精度かつ効率的に計算できる解析手法の開発²⁵⁾、放射段階については、トンネル坑口付近の地形の影響を考慮した微気圧波の予測手法の研究²⁶⁾などを行った。

微気圧波の低減対策に関しては、既存対策の改良に関する研究と従来とは異なる原理に基づく新規の対策に関する研究を進めている。微気圧波低減の代表的な既存対策は、列車先頭部形状の最適化およびトンネル入口緩衝工の設置・延長である。このうち列車先頭部形状の最適化については、従来のトンネル坑口に緩衝工がない場合を対象とした最適化から、緩衝工がある場合の最適化が行えるように発展させた²⁷⁾。

トンネル入口緩衝工については、側面開口部の開け方を最適化することが必要であるが、従来の最適化ではトンネル内での圧縮波変形の影響を無視していた。しかし上述のように圧縮波の伝播過程を効率的に計算できるようになったため、この圧縮波の変形の影響を考慮して、開口部の最適化をより高い精度で行うことが可能となった²⁸⁾。

新規の対策としては、今後大深度地下鉄の普及に伴い増加すると予想される立坑などのトンネル枝坑から発生する微気圧波の低減方法に関する研究を行った²⁹⁾。さらに、そこで得られた知見を応用し、列車退出側のフード（トンネル出口フード）による微気圧波放射時対策の研究も進めている³⁰⁾。

5. おわりに

新幹線、在来線ともに、さらなる高速化が進められており、沿線環境に関わる研究開発の重要性が増している。鉄道総研では、沿線環境に関わる項目を重要課題として位置づけており、2.1で述べたように、前期の「将来指向課題」では転動音・構造物音を取り上げた。そして、今期の将来指向課題では、地盤振動、空力騒音、材料技術（を活用した騒音・振動対策）の3テーマを取り上げている。本稿では、この現将来指向課題の成果についても多数紹介した。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) 長倉清：転動音の予測手法と対策効果の評価, JREA, Vol.53, No.9, pp.35357-35360, 2010
- 2) 北川敏樹ほか：在来鉄道における転動音の寄与度評価, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.78, No.789, pp.22-26, 2012
- 3) 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
- 4) 村田香ほか：走行する鉄道車両の車輪振動特性, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.35-40, 2013
- 5) 上妻雄一ほか：新幹線コンクリート高架橋の振動・音響特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.17-22, 2011
- 6) 川口二俊ほか：鉄道の曲線区間で発生する高周波音の現象解明, 日本機械学会第22回環境工学総合シンポジウム2012講演論文集, pp.81-84, 2012
- 7) 間々田祥吾ほか：レール継目用防音材の性能評価, 日本機械学会第22回環境工学総合シンポジウム2012講演論文集, pp.69-72, 2012
- 8) 高石武久ほか：高速鉄道車両の屋根上流れを再現した風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.29-34, 2011
- 9) 山崎展博ほか：風洞試験における台車部空力騒音測定手法の精度向上, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.29-34, 2013
- 10) 高石武久：複雑形状物体から発生する空力音の並列計算, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.78, No.790, pp.1206-1219, 2012
- 11) 光用剛ほか：プラズマアクチュエータを用いたパンタグラフ舟体周りの流れ場制御手法のLESによる検討, 日本機械学会第22回環境工学総合シンポジウム2012講演論文集, pp.93-96, 2012
- 12) 佐藤祐一ほか：逆位相差を与えたシンセティックジェットによるパンタグラフ舟体周りの空力音低減について, 日本機械学会第22回環境工学総合シンポジウム2012講演論文集, pp.97-98, 2012
- 13) 小方幸恵ほか：レール近接位置の低防音壁による騒音低減効果, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.11-16, 2011
- 14) 半坂征則ほか：実用サイズの風荷重低減型防音板の実験, 日本機械学会第22回環境工学総合シンポジウム2012講演論文集, pp.109-112, 2012
- 15) 斎藤英俊ほか：建物の立地条件が騒音レベルに与える影響の定量評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.5-10, 2011
- 16) 長倉清：在来鉄道騒音における $L_{A, Smax}$ から L_{AE} への換算方法, 日本騒音制御工学会秋季研究発表会, pp.293-296, 2012
- 17) 横山秀史ほか：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
- 18) 横山秀史ほか：動的連成解析にもとづく軌道狂いと地盤振動の関係の検討, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, 第4部門, pp.71-72, 2008
- 19) 横山秀史ほか：鉄道沿線地盤振動の水平動および鉛直動の伝播特性, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.35-40, 2011
- 20) 横山秀史ほか：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
- 21) 渡辺勉ほか：高速鉄道トンネル上の地盤振動解析, 日本機械学会第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.371-374, 2009
- 22) 田中博文ほか：新幹線沿線における環境振動低減のための軌道側対策と評価, 鉄道総研報告, Vol.24, No.12, pp.53-58, 2010
- 23) 福田傑ほか：列車のトンネル突入時に形成される圧縮波の三次元・軸対称列車模型を用いた実験, 日本機械学会論文集 (B編), Vol.78, No.793, pp.1521-1533, 2012
- 24) 宮地徳蔵ほか：列車のトンネル突入により生じる圧縮波の波形予測に関する理論解析, 日本流体力学誌, Vol.31, pp.45-49, 2012
- 25) Miyachi, T., et al.: A Simple Scheme for Calculating Distortion of Compression Wave Propagating Through a Tunnel with Slab Tracks, 28th Int. Symp. on Shock Waves, 2011.
- 26) 宮地徳蔵：トンネル坑口周りの地形を考慮した微気圧波放射モデル, 鉄道総研報告, Vol.24, No.9, pp.23-28, 2010
- 27) Kikuchi, K., et al.: Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micro-pressure Wave Radiated from Tunnel Exit, J. Low Freq. Noise, Vib. Active Control, Vol.30, No.1, pp.1-19, 2011.
- 28) 宮地徳蔵ほか：長大スラブ軌道トンネルの緩衝工開口部の最適化, 日本流体力学会年会2008拡張要旨集 (CD-ROM), 2008
- 29) 斉藤実俊ほか：トンネル枝坑坑口からの微気圧波の低減方法, 鉄道総研報告, Vol.24, No.1, pp.41-44, 2010
- 30) 斉藤実俊ほか：内壁付きフードによるトンネル微気圧波低減対策, 鉄道総研報告, Vol.27, No.1, pp.17-22, 2013