

鉄道を取り巻く気象や環境に関わる基礎研究

防災技術研究部長
太田 直之



1. はじめに

明治5年に初めて開業した日本の鉄道は、その後急速に全国へと整備の範囲を広げていった。主要な都市間を結ぶように建設された鉄道は、市街地、山間地、海岸沿い、河川沿いなど、さまざまな環境の中に敷設され、都市の拡大や新たな市街地の開発をもたらした。このような鉄道の発展の経緯を背景として、鉄道から環境へ及ぼす影響やあるいは環境から鉄道が受ける影響の両者を重視して、鉄道事業者はこれらへ対処してきた。そこで本発表では、鉄道を取り巻く環境に関わる基礎研究について代表的な取り組みを紹介した上で今後の方向性を展望する。

2. 鉄道と環境

2.1 鉄道と環境との関わり

上述のように、日本の鉄道網は短期間に整備され、地方と中央、あるいは地域と地域とを結ぶ重要な物流の動脈としてその機能を果たしてきた。一方で、日本はその国土の約7割が山間地であるため、地域へ繋が

る鉄道の多くは山間地に敷設された。山間地を走る鉄道は、その沿線に多くの斜面や溪流、河川などがあり、このため降雨による土砂崩れや土石流、河川の氾濫などの災害に度々襲われてきた。

また、1950年代に始まった我が国の高度経済成長は、産業構造と国民生活に大きな変革をもたらした。経済の発展は国民生活における利便性を向上させるという恩恵をもたらし、鉄道によって都市部に流入した人口は、都市を大都市へと発展させるとともに、鉄道沿線に新しい街を広げていった。その過程で、鉄道がもたらす環境への負荷についても深く議論されるようになった。特に、鉄道の高速度に伴う沿線環境負荷の検討は、重要な課題とされてきた。

このように、鉄道を中心に近・現代の日本社会を考えた場合に、鉄道と環境とは強い関係があり、相互に深く影響を及ぼし合っていると捉えることができる。図1はその概念を示している。

鉄道は、環境に対して地盤の振動や騒音といった影響を及ぼす存在と捉えることができる。一方で、自然環境は豪雨や強風、豪雪といった気象を外力とし、沿線の様々な地形条件などの素因の下で災害となって鉄



図1 鉄道と線環との関係性



図2 令和2年7月豪雨による被災事例



図3 令和元年東日本台風による被災事例
(撮影：©アジア航測(株)・朝日航洋(株))

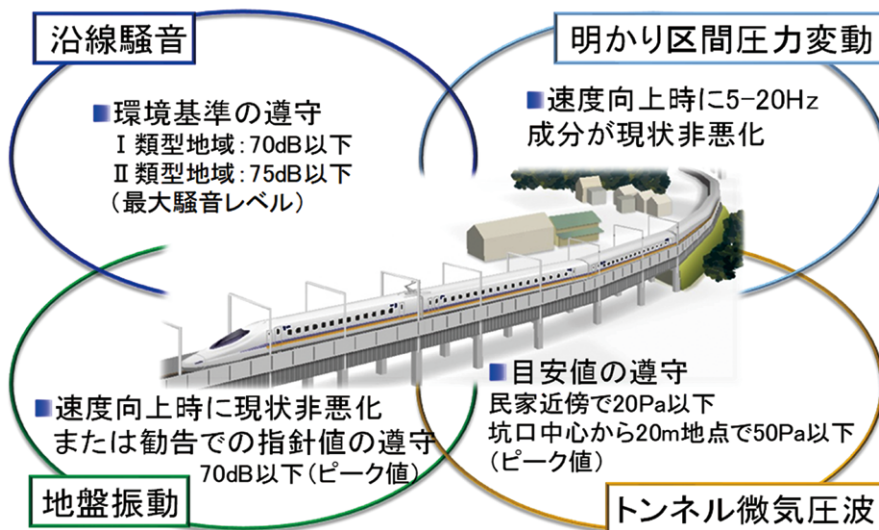


図4 新幹線沿線における環境問題

道に影響を及ぼす。これらの互いに影響を及ぼし合う両者の関係を動力学、流体力学、熱力学などの物理学を駆使して明らかにすることが、鉄道の環境分野および防災分野における基礎研究といえる。

2.2 近年の気象災害事例と防災技術の課題

ここでは近年の気象の変化の代表的な事例として線状降水帯と台風に着目し、これらによって生じた災害事例についてその特徴を述べる。

図2は今年の梅雨時期に発生した令和2年7月豪雨により被災したJR九州肥薩線の球磨川第1橋りょうの被害状況を示している。この災害の要因となった豪

雨は7月3日から14日までの長期間にわたって降り続き、特に3日から8日にかけては、線状降水帯が九州地方で多数発生し、総降水量に対する線状降水帯による降水量の割合が70%を超える地点が出現するなど¹⁾、近年の降雨形態の特徴を顕著に表した豪雨であった。このような気象が発生した背景には、停滞する梅雨前線に沿って西から流れ込んだ水蒸気と日本の南にある太平洋高気圧の縁辺を回り南側から入り込んだ水蒸気の両者が相まって長期間作用し続けたことが挙げられる。このことは、温暖化による海面気温の上昇と豪雨の発生との間に少なからず関連性があることを推察させ得る。

図3は、昨年発生した令和元年東日本台風による千曲川の氾濫状況を示している。写真中央にはJR東日本の長野新幹線車両センターがある。この災害の要因となった台風19号では、東日本を中心に多くの箇所降水量が観測史上1位を更新する値を記録した。特に神奈川県箱根町では総降水量が1000ミリに達し、箱根登山鉄道は甚大な被害を受けた。この台風による大雨の要因として、台風の北側に形成された停滞前線に台風の接近による大量の水蒸気が流れ込み、前線が強化されることで上昇気流が持続して大量の降水があったことと、これに加えて台風本体の発達した雨雲により直接的な大雨がもたらされたことによると気象庁は分析している²⁾。

このように、線状降水帯や大型の台風といった近年の特徴的な気象は、それによる被災規模の激甚化に繋がっており、このような災害への対応が喫緊の課題として求められている。

2.3 沿線環境負荷の課題

鉄道は他の交通機関に比べてエネルギー効率がが高く、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、圧力変動(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。これらの現象に対しては環境基準、指針値、目安値などが定められており、新線建設の際にはこれらの基準等の遵守が、また、既設線での速度向上の際には基準等の遵守あるいは現状非悪化が求められている(図4)。一方、これらの物理現象は速度の増加に伴って増大するため、今後の新線建設や速度向上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、沿線環境負荷の低減技術の開発は必須と言える。

3. 基礎研究の取り組み

ここでは、防災技術と環境負荷低減技術に関する主な基礎研究について取り組みの概要を述べる。

3.1 洗掘メカニズムの解明

上述した近年の災害では、豪雨により河川が増水して橋梁が被災するケースが増加している。そのなかでも橋脚が直接基礎形式の場合、橋脚の基礎地盤が勢いを増した河川水によって浸食されて橋脚に傾斜が生じ、場合によっては倒壊するという洗掘災害が発生することがある。本稿の冒頭に述べたように、明治から大正にかけて急速に建設が進められた日本の鉄道には直接基礎形式の橋梁が多く利用されており、近年の豪雨の増加傾向と併せて考えると、洗掘災害は今後増加する可能性が高い被災形態のひとつといえる。

洗掘災害を防止するためには、洗掘の可能性がある橋梁を選定して、その橋脚に補強対策を施工することが必要になる。また、未対策の橋梁に対しては増水時の運転規制が必要となるが、増水後の橋梁の健全度を精度よく判定して安全な運転規制を実施することが必要となる。洗掘の可能性を判断するためには、個々の橋梁が有する様々な条件をもとに、増水時の洗掘危険度を客観的に評価する手法が必要である。また、洗掘に対応する対策工を施工するためには、洗掘が発生する要因を把握しそれに対処する技術が必要となる。さらに、安全な運転規制のためには、河川水や橋脚の状態と安全性との関係を明らかにする必要がある。これらのためには洗掘発生メカニズムの解明が必要であり、そのための基礎研究に取り組んできた。

図5は洗掘発生時の地盤と橋脚の状況を模擬した模

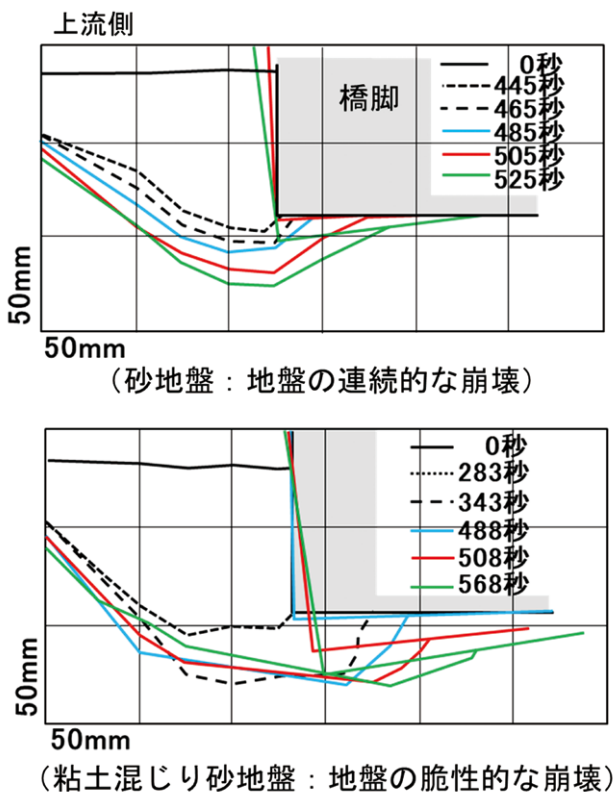


図5 地盤の土質の違いが洗掘挙動に及ぼす影響

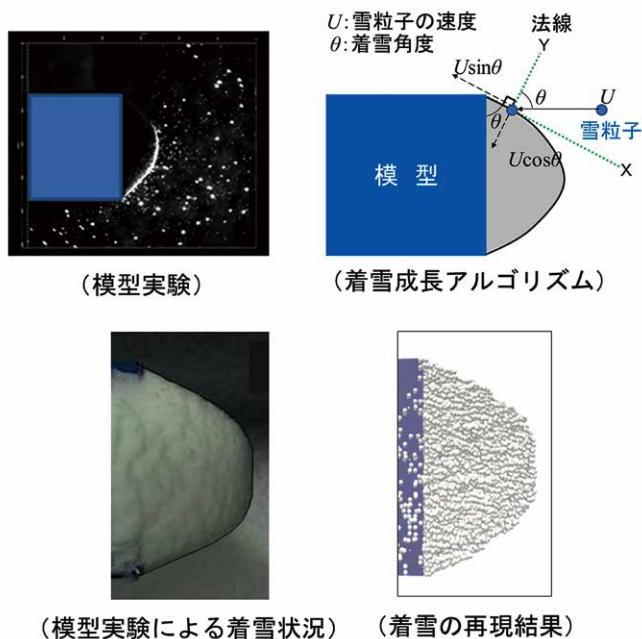


図6 着雪メカニズムの解明と着雪量解析手法の作成

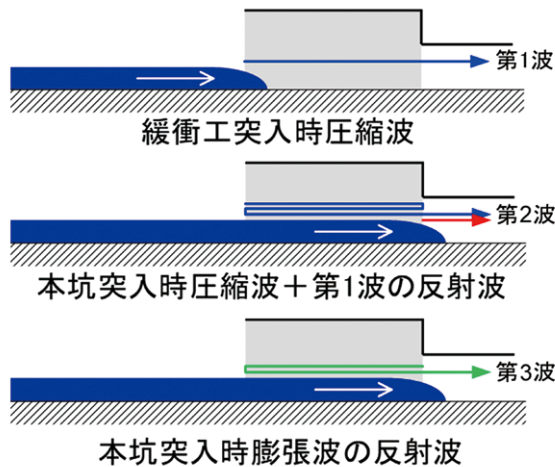


図7 トンネル内に形成される微気圧波

型実験の結果の一例を示している³⁾。この実験ケースでは橋脚の基礎地盤の土質に着目し、一方の地盤は砂分を主体とした粘着力を有さない土質の地盤、他方は細粒分を含み粘着力を有する地盤の二種類の模型地盤で実験を実施した。図は地盤の洗掘の過程を示している。粘着力を持たない土質の地盤の場合、地盤の浸食が徐々に拡大しそれに伴い橋脚の傾斜が増加する。一方、粘着力を有する土質の地盤の場合、侵食の拡大は断続的に発生して橋脚の上流側に深い侵食領域が形成され、その掘削壁面が徐々に橋脚側へと移動していくように地盤の崩壊が進む。このため後者の場合、侵食開始の初期での橋脚の傾斜は少なく、終盤で一気に傾斜する脆性的な変状増加形態が見られた。

このような実験で明らかにした洗掘挙動に及ぼす地盤材料の性質の違いの影響のほか、橋脚の断面形状や河川の横断面形状、梁筋と橋脚との位置関係など、様々な条件下での洗掘発生時の挙動を検討している。

3.2 着雪メカニズムの解明

日本には温暖化の傾向が認められるものの、冬期の雪害に対して対策の手を緩めることには繋がらない。これは、冬期に急激に発達する低気圧がもたらす激しい降雪による列車の立ち往生など、降積雪に関する被害が度々報告されるためである。また、新幹線の札

幌延伸により、過酷な低温環境の中を高速鉄道が走ることになり、着落雪による被害が改めて懸念されるためでもある。ここでは着雪に関する基礎研究の一例について述べる。

着雪の成長過程を再現するシミュレーション手法を作成するために、着雪現象の解明に取り組んできた⁴⁾。着雪は、積雪区間を列車が走行することで雪が舞い上がり、その雪粒子が車両に付着し、これが繰り返されることで着雪量が徐々に増加する。研究では、気象条件と雪粒子の舞い上がり量との関係を現地観測により明らかにすること、また、舞い上げられた雪粒子が着雪する条件を明らかにした上で、これを基にした着雪成長モデルを作成することを目的とした。

実験では、降雪風洞内に置いた立方体模型に雪粒子を吹き付けて、可視化した雪粒子が模型表面に付着し、さらに着雪が成長する過程を観察した(図6)。風速、着雪面に対する風向角、吹き付ける雪粒子の量をパラメータとして、各条件下での着雪の成長速度、着雪面の角度、着雪の密度などを測定した。得られた実験データを用いて、雪粒子が着雪面に衝突する時の速度や角度の条件から着雪の判定条件を求めてモデル化した。そして、気流計算により対象物周りの空気の流れを計算し、その結果を基にして雪粒子の軌道を計算し、雪粒子が対象物に衝突した場合の付着・非付着を判定し、これを

繰り返すことで着雪の成長過程を再現するシミュレーション手法を作成した。図6にはシミュレーション結果と実験結果を示したが、作成したシミュレーション手法は実験結果をよく再現できている。

この基礎研究での成果を基にして、実際の台車などの複雑な形状や走行状態での着雪を再現できるモデルへの拡張、さらには融解や落下による着雪量の減少過程の再現に取り組んでいる。

3.3 トンネル微気圧波の現象解明

(1) 列車の緩衝工突入時に発生する圧縮波の予測

列車が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よばれ、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、車両側の対策として先頭形状の延伸・改良が、それぞれ広く実施されている。これらの対策を適切に実施するため、微気圧波の現象を解明するための基礎研究に取り組んできた。

列車がトンネルに突入するときの圧縮波の波形は、列車速度、車両とトンネルの断面積、車両先頭部の長さや形状(断面積分布)、トンネル緩衝工の有無及びその仕様などによって決定されるため、対策の検討にあたっては、これらの因子を考慮しながらトンネル突入時の圧縮波の波形を予測する必要がある。従来、緩衝工や列車先頭部の設定検討は、主として模型実験や大規模数値シミュレーションの結果をもとに行われてき

たが、これらの検討には多くのリソースが必要であった。そこで、空力音響理論に基づき、列車が緩衝工のないトンネルに突入するとき発生する圧縮波を解析的に求める手法が米国ボストン大学のHowe教授により開発されたこと⁵⁾を受けて、トンネル入口に緩衝工がある場合にもこの手法を適用可能とするための研究を鉄道総研とボストン大学と共同で進めてきた。その結果、圧縮波の発生に関わる様々な因子を考慮しながら、緩衝工突入時の圧縮波の波形を計算量の少ない効率的な方法によって数値的に求めることが可能となった⁶⁾。

(2) 緩衝工の断面積に関する検討

現在の広く施工されている緩衝工は、本坑との断面積比が1.4~1.6、側面に離散窓型開口部を持つ構造となっているが、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、前項で述べた空力音響理論に基づく解析により、現在の緩衝工の仕様にこだわらず、断面積を変更することにより全長を短くする方法について検討を行った。

列車が緩衝工を備えたトンネルに突入すると、緩衝工入口あるいは本坑入口を先頭部が通過する際に、圧縮波あるいは膨張波が発生し、それらの直接波、反射波が重畳した波形がトンネル内に形成される。現在の新幹線における代表的な緩衝工長さ及び列車速度では、主に図7に示す三つの段階における圧縮波に起因する圧力勾配ピークが観測される。微気圧波の大きさは圧力勾配の最大値に比例するため、三つのピークの最大値をできるだけ小さくすることが望ましい。空力音響

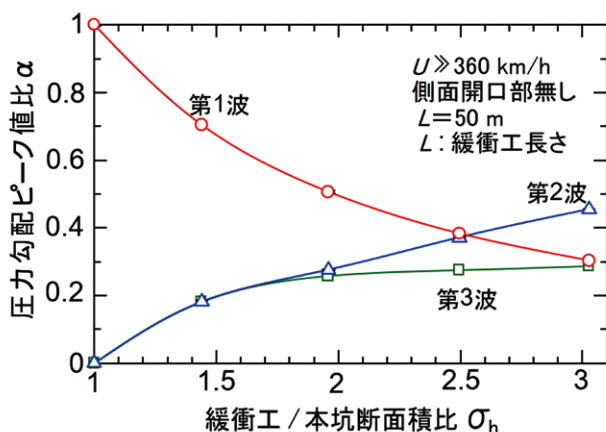


図8 圧力勾配のピーク値比と緩衝工/本坑断面積比の関係

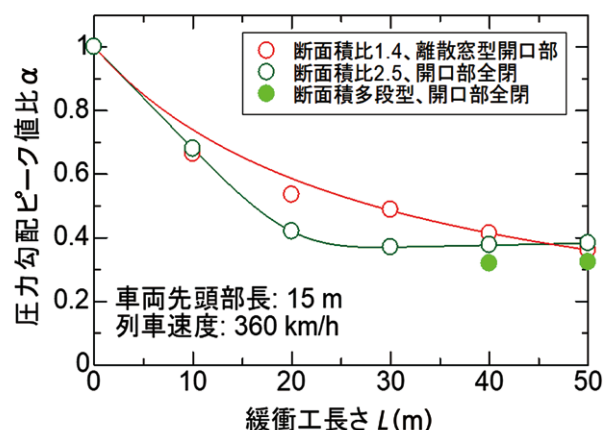


図9 緩衝工の断面積に関する模型実験結果

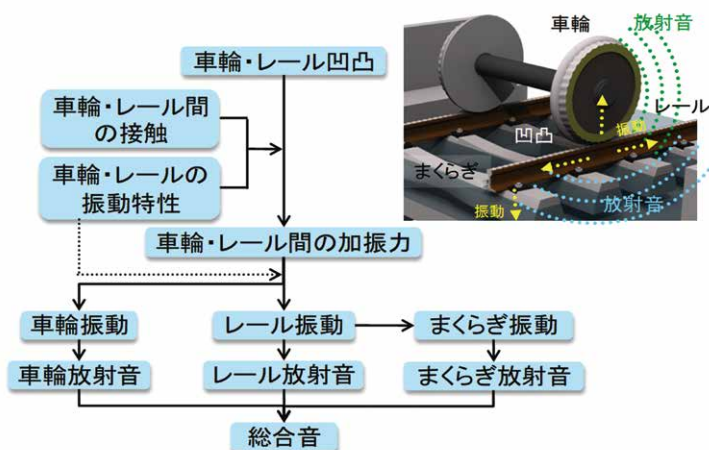


図10 転動音予測手法における計算の流れ

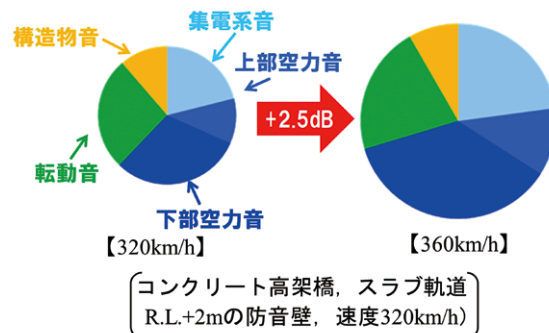


図11 地上25m点における音源別寄与度の試算例

理論に基づく解析により、図8中に示す条件下において緩衝工断面積を変更した場合のそれぞれのピークの大きさを試算した結果、緩衝工と本坑の断面積比が2.5程度のときに圧力勾配の最大値が最も小さくなることが明らかになった⁷⁾。

これらの解析結果に基づき、列車速度が360km/h、先頭部長が15mの条件で緩衝工の断面積をパラメータとした模型放射装置による実験を行った結果、緩衝工長が40m以下では、本坑に対する断面積比を2.5とした側面開口部がない緩衝工が従来型の緩衝工(断面積比1.4、側面開口部あり)に比べて大きい低減効果を持つことがわかった。一方、断面積比2.5の緩衝工では長さが40mを超えると効果が頭打ちになるため、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ついても検討を行った。その結果、断面積多段型緩衝工では、40mを超える長さにおいても大きい効果が得られることがわかった⁸⁾(図9)。

3.4 沿線騒音の現象解明

(1) 音源別寄与度の評価

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。沿線騒音を効率的に低減させるには、それぞれの音源が占める寄与度を明らかにし、寄与度の大きい音源を優先して対策を行うことが重要である。このため、沿線騒音に対する音源別寄与度を評価するための基礎

研究に取り組んできた。

音源位置ごとの騒音レベルを推定する手法として、マイクロホンアレイを用いた音源位置特定技術とレール近傍点や高架橋直下での騒音測定を組み合わせる手法を構築した。一方、台車部については転動音と空力音がほぼ同じ位置から発生しており、この手法だけでは両者を分離して評価することができない。そこで、振動・音響理論に基づいて車輪、レール及びまくらぎの振動と音響放射を計算し、転動音を定量的に評価する手法を構築した(図10)⁹⁾¹⁰⁾。

これらの手法を組み合わせることにより、新幹線騒音の標準的な評価点である25m点における音源別寄与度を評価した結果、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た(図11)¹¹⁾。

(2) 台車部空力音の現象解明

沿線騒音への寄与度が大きい台車部空力音について、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板を音響透過板(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12)¹²⁾。この測定方法を用いることにより、100~125Hz帯では台車下流側端部のキャビティ音が大きいこと、400~500Hz帯では主要な音源が主電動機・歯車装置付近に分布することなどが明らかになり、

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事が示された。

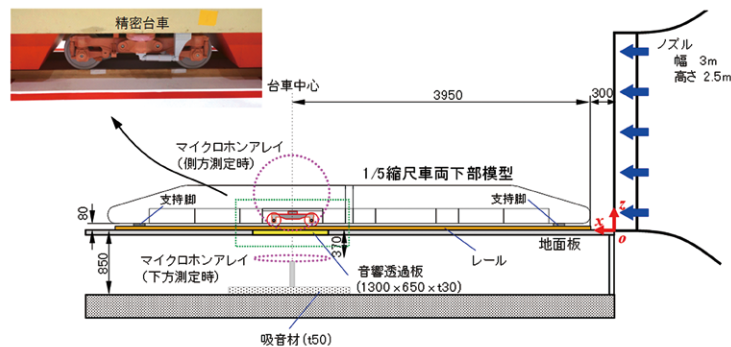
4. 防災技術と沿線環境技術の将来像

本発表では、鉄道と環境の関係性を述べた上で、鉄道と環境相互の課題を自然災害対策と沿線環境負荷の低減というふたつの観点で示し、これらに対する基礎研究の取り組みを紹介した。それぞれの研究分野のロードマップのイメージを図13および図14に示す。

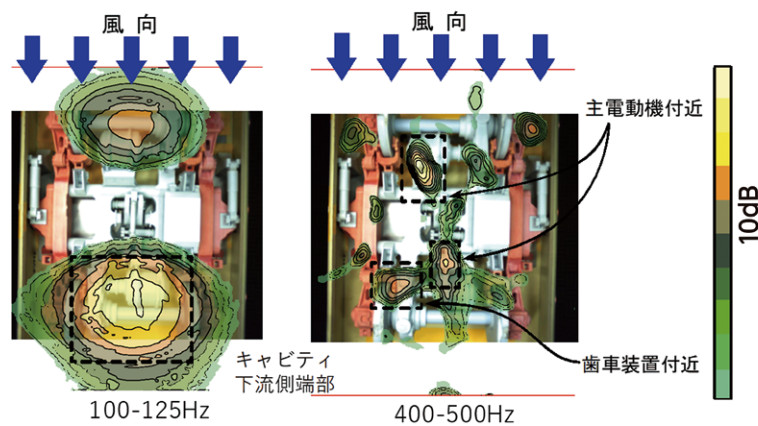
防災技術については、ここで紹介した基礎研究以外に斜面の不安定化機構、斜面の安定性回復機構など土砂災害の発生に関わるメカニズムの解明や、強風などの自然外力をもたらす気象状況を評価する手法に関する研究に取り組んでいる。また、各種の自然災害による鉄道への影響をリスクとして捉え、鉄道の運行や維

持管理に反映する手法に関する研究等を行っている。これらの基礎研究は、互いの成果を融合することで近年激甚化する災害に対する技術開発へとつながると考えている。基礎研究の成果を運行管理の精緻化やダウンタイムの短縮に貢献する技術に応用し、激甚化する気象災害に対応する強靱な鉄道の実現に資する技術に結実することを目標としている。

沿線環境に関しては、問題となる現象の影響は走行速度が高くなるにつれて大きく現れるため、今後の鉄道の速度向上において、これらの現象の低減技術に関する研究はますます重要になってくると考えられる。鉄道総研では、理論解析、大型低騒音風洞などの設備による高度な実験技術、数値解析技術などを活用して、これらの現象の発生機構の解明や、予測、低減技術へとつながる基礎研究に継続的に取り組んできた。さらに、前基本計画RESEARCH 2020では、新幹線の高速化に関わる沿線環境問題で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



(a) 転動音予測手法における計算の流れ



(b) 音源探査結果

図12 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

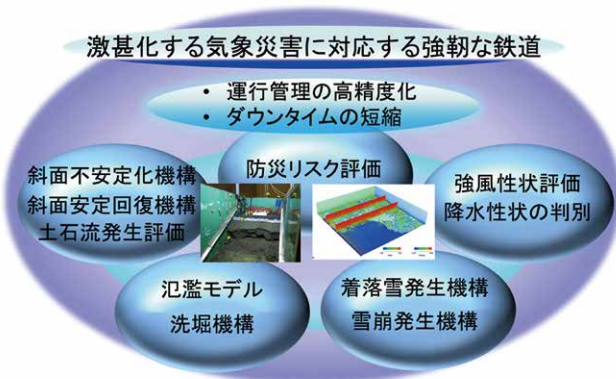


図13 防災技術の基礎研究と方向性

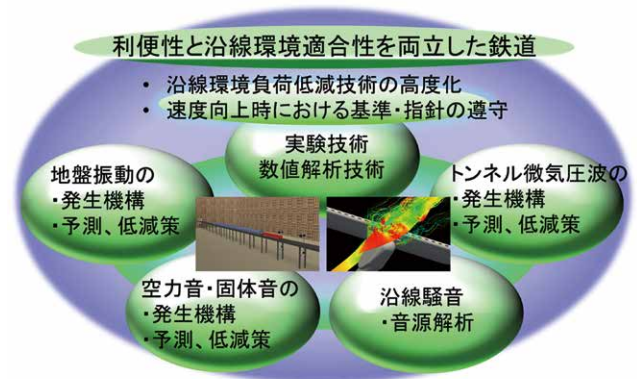


図14 沿線環境負荷低減技術の基礎研究と方向性

性能に関する研究の更なる高度化、迅速化を目指して「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。これらの基礎研究は、利便性（高速性）と沿線環境適合性を両立した鉄道の実現に貢献する技術に結実することを目標としている。

鉄道総研では、今後も防災と沿線環境負荷の低減に関する研究開発を鋭意推進していく所存であり、関係各位のご支援・ご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 気象庁：「令和2年7月豪雨」の特徴と関連する大気の流れについて（速報），報道発表令和2年7月31日，<https://www.jma.go.jp/jma/press/2007/31a/r02gou.pdf>（参照日2020年10月15日）
- 2) 気象庁：令和元年台風19号に伴う大雨の要因について，<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohokaisetu/T1919/mechanism.pdf>，（参照日2020年1月12日）
- 3) 櫻健典，馬目凌，渡邊諭：橋脚底面の状態に着目した洗掘模型実験，土木学会第72回年次学術講演会，Ⅲ-117，2017
- 4) 鎌田慈，室谷浩平，中出孝次，高橋大介，佐藤研吾，根本征樹：鉄道車両に用いる着雪シミュレータの開発（その1）-実験による着雪発達条件の検討-，雪氷，受理済み，2021
- 5) Howe,M.S.：The compression wave produced by a high-speed train entering a tunnel, Proceedings of the Royal Society, London A, Vol.454, 1998.

- 6) Iida,M.and Howe, M.S.：Compression wave generated by a high-speed train entering a tunnel fitted with a hood with a long slit window, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 26 (4), pp.227-247, 2007
- 7) Saito,S.：Optimizing cross-sectional area of tunnel entrance hood for high speed rail. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 184.pp.296-304, 2018.
- 8) 福田傑，齊藤実俊：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期流体力学部門講演会 講演論文集，S5-24, 2019
- 9) D.J.Thompson：On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise, Journal of Sound and Vibration, Vol.193, No.1, pp.149-160, 1996
- 10) 北川敏樹：転動音の特性と軌道・車両に係わるパラメータの影響，鉄道総研報告，Vol.22, No.5, pp.23-28, 2008
- 11) 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
- 12) 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