

新幹線の高速化と空気力学分野における 研究開発のコア技術の高度化

環境工学研究部 主管研究員
齊藤 実俊



1. はじめに

鉄道のさらなる競争力強化のために求められる項目のひとつに新幹線の高速化による利便性の向上がある。新幹線の高速化のためには、車両、電気、構造物、軌道などあらゆる分野の技術開発が必要となる。なかでも騒音などの沿線環境を維持するための技術開発は、新幹線沿線が人口密集地域にあることが多いために、とりわけ重要である。

また、鉄道における空気力学的な現象に伴う課題は多岐にわたり、新幹線に限らずさまざまな問題を引き起こすことがある。鉄道の安全性、快適性の維持・向上のためには、これらの諸課題を解決するための技術開発が重要となる。

本講演では、新幹線の高速化における沿線環境の維持・向上に関する研究開発、および空気力学分野における研究開発のコア技術とそれらの高度化にむけた取り組みについて紹介する。

2. 高速化と空気力学分野における技術的課題

2.1 高速化時の沿線環境維持のための技術的課題

鉄道はエネルギー効率が高く、環境に優しい交通機

関であるが、その一方で列車が走行すると沿線にさまざまな環境問題を引き起こすことがある。これらの問題は列車が高速になると顕在化するため、新幹線の新線建設時や高速化の際には沿線環境を維持するための技術開発が必須となる。沿線環境に関する主な課題としては、沿線騒音、トンネル坑口から放射されるトンネル微気圧波、地盤振動などがあげられる。これらの現象については、それぞれ基準や目安値などが制定されており、それらの遵守が求められているが、そのためには、各現象を正確に予測し、効果的な対策を実施する必要がある。

2.2 空気力学分野における技術的課題

空気力学的な現象に伴う課題は多岐にわたるが、特に重要な課題として、安全性にかかわる強風による車両の転覆の問題があり、そのために防風柵や運転規制などハード、ソフト両面の対策が実施されている。鉄道総研では効果的な防風対策や適正な運転規制を行うために、強風による空気力を正確に評価するための研究開発を行っている。

また、近年、新幹線の寒冷地域への延伸にともない、寒冷条件下での安全・安定輸送の確保が求められている。なかでも、台車部への着雪現象が安全・安定輸送に対して非常に重要な課題となっていることから、低コストで効果的な台車部の着雪抑制策の開発を進めている。

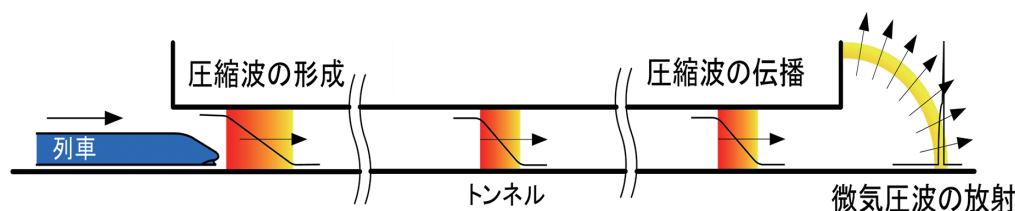


図1 トンネル微気圧波の現象

3. 研究開発のコア技術の活用事例

本章では前章で示した諸課題のうち、トンネル微気圧波の評価と台車部着雪量評価におけるコア技術を紹介する。

3.1 トンネル微気圧波評価に資するコア技術

トンネル微気圧波（以下、単に微気圧波）の現象を図1に示す。列車の突入によってトンネル内に形成された圧縮波がトンネル内を音速で伝播し、列車退出側坑口に到達したとき、その一部がパルス状の圧力波となって外部へ放射される。この圧力波はトンネル微気圧波と呼ばれ、発破音や家屋・建具の振動を発生させる要因となる。この微気圧波を正確に予測し、効果的かつ低コストな低減対策方法を開発するために数値シミュレーションによる予測技術と発射装置による実験技術を活用している。

数値シミュレーションによって微気圧波を正確に予測するためには、図1に示した、(1) 圧縮波の形成、(2) 圧縮波の伝播、(3) 微気圧波の放射の各段階を正確に計算する必要がある。鉄道総研ではそれぞれの段階において音響理論や流体力学にもとづいた数値モデルを構築し、波形レベルで正確に予測できる独自の数値

シミュレーション手法を用いている¹⁾。図2に数値シミュレーションによる計算と現地測定と比較結果を示す。計算結果は現地測定結果と良く一致しており、本シミュレーションは微気圧波予測のための非常に有用なツールである。

微気圧波低減対策の効果を定量的に評価するためには、模型実験による検証が不可欠である。微気圧波の現象を模型実験で評価するためにはトンネルと列車の相対運動を再現することが必要であり、そのための実験装置として列車模型発射装置²⁾がある。現在、軸対称列車模型発射装置2台（縮尺1/90程度、測定区間11m、最高速度450km/hと縮尺1/90程度、測定区間16m、最高速度550km/h）と、実形状列車模型発射装置（縮尺1/20、測定区間40m、最高速度400km/h）（図3）の計3台が稼働しており、トンネル緩衝工や列車先頭部形状の最適化など、微気圧波低減対策に関する実験に活用している。

3.2 台車部着雪量評価に資するコア技術

車両が積雪区間を走行すると線路上の雪が舞い上がり、車両の床下や台車部に付着し、塊となって成長する。この雪の塊が気温の上昇や走行時の振動、分岐器を通過するときの衝撃などで落下すると、線路のバラ

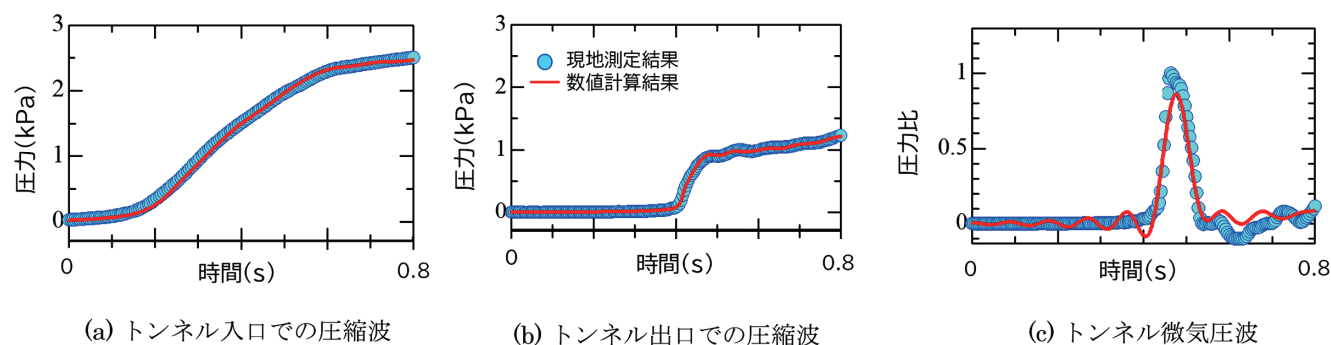


図2 数値シミュレーションによるトンネル微気圧波の予測

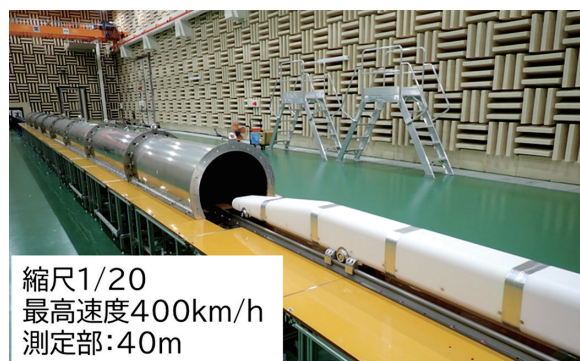


図3 列車模型発射装置

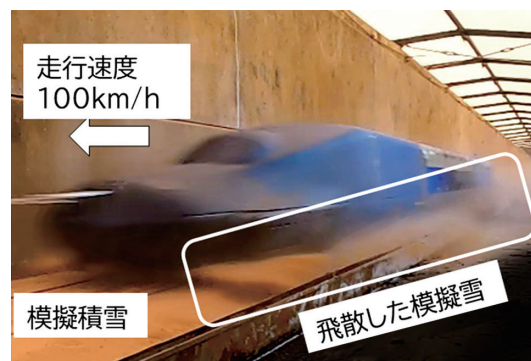
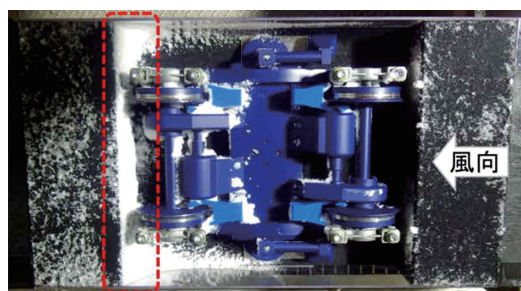
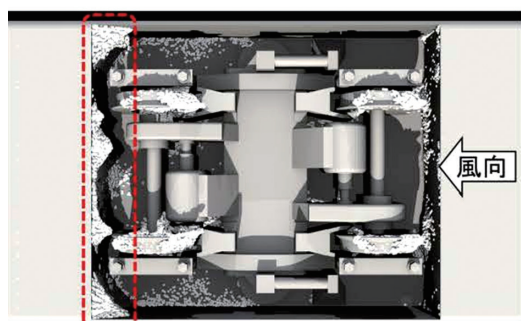


図4 模擬雪を用いた車両模型走行装置による着雪実験



(a) 雪風洞による実験結果



(b) 着雪シミュレータによる計算結果

図5 台車部着雪の計算結果と実験結果

ストが飛び散り、車両や設備、沿線家屋などに被害が発生する可能性がある。そこで、高速で走行する車両周りの空気の流れを台車部に取り込むことで着雪を抑制する対策方法の検討を行っている。効果的な対策方法の開発には、現象を正確に再現し、かつ、対策効果を定量的に評価することが必要である。ここでは、台車部着雪量評価のために活用している車両模型走行装置による着雪実験技術³⁾と着雪現象を正確に再現するための数値シミュレーション技術⁴⁾を紹介する。

車両模型走行装置は縮尺1/11の車両模型(3.5両編成)を最高速度100km/hで走行させる装置で、粒子運動が雪と相似であるクルミ殻を模擬雪として使用し、台車部への着雪状況の把握や走行風を台車内に取り込むための空力デバイスの仕様決定に活用している(図4)。

走行装置による実験では粒子運動が実際の雪と相似になる模擬雪を使用しており、舞い上がりによる飛散運動は実現象を再現できるが、台車部への付着現象は実際の雪と異なる可能性がある。そこで、実際の雪の付着現象も含めて再現するための着雪シミュレータを開発した。本手法は①台車部周辺の空気の流れを計算する気流計算、②気流によって浮遊する雪粒子の軌道を計算する軌道計算、③飛雪粒子の着雪判定を行う着雪計算の三種類の計算を連成させたものである。着雪判定については雪風洞による飛雪粒子の着雪実験を行

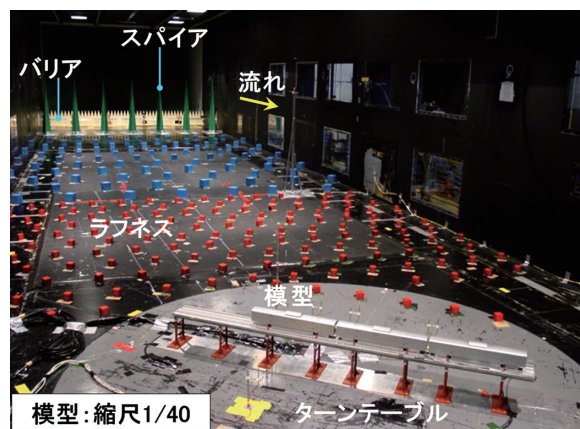


図6 横風空気力評価のための風洞実験

い、着雪判定モデルを構築し、着雪シミュレータに組み込んだ。台車部塞ぎ板への着雪に関する計算結果と雪風洞による着雪実験の結果を図5に示す。両者を比較すると、計算による台車端部(図5の赤枠内)の着雪状況は雪風洞による実験結果と類似していることが確認できる。

4. 研究開発のコア技術の高度化

新幹線の高速化や空気力学分野における技術課題の解決のためには、各コア技術の持続的な高度化が必須である。本章ではコア技術の高度化の取組事例として、横風空気力の評価と沿線騒音評価における取り組みについて紹介する。

4.1 横風空気力評価のコア技術の高度化

強風による列車転覆事故を防ぐための適切な運転規制風速の決定、あるいは、防風柵などのハード対策による効果の定量的評価のためには、横風によって車両に作用する空気力を正確に評価する必要がある。そこで、鉄道総研では風洞実験技術と数値シミュレーション技術を活用することによってこれらの課題解決に取り組んでいる。

風洞実験で横風による空気力を正確に評価するためには、作用している自然風の特徴を再現する必要がある。そこで、鉄道総研では図6に示すように風洞床面にスパイアやバリア、ラフネスと呼ばれる障害物を適切に配置し、自然風の平均風速の鉛直分布と乱れ度を再現した乱流境界層を用いた実験を行っている⁵⁾。また、空気力は車両形状だけでなく高架橋や盛土などの地上構造物の影響も受けるため、両者を組み合わせた縮尺模型を使用している(図6は高架橋の実験例)。ま

た、鉄道総研の大型風洞による実験の場合、模型の縮尺は1/40であるが、実物大模型を用いた現地測定の結果と比較し、精度良く空気力を評価できることを確認しており、風洞実験技術は横風空気力評価のためには不可欠の重要な技術である。

現在、風規制区間においては、沿線に設置された風速計で観測された風速が基準値（規制値）に達すると速度規制や運転中止を行っている。しかし、図7に示すように、列車の走行位置で風速を観測しているわけではなく、さらに、自然風の風向、風速は時々刻々変化している。したがって、車両に作用する空気力をより正確に把握するためには、沿線に設置された風速計ではなく、列車がリアルタイムに風向・風速を推定することが求められる。そこで、車上計測による空気力推定手法の開発を行っている。具体的には車両に圧力センサーを配置し、その圧力分布から作用する空気力を推定する。その際、コスト面やメンテナンス面からできるだけ少数の圧力センサーによって風向・風速を推定するために、推定に対する関連性の高い測定箇所を数値シミュレーションにより求め、その妥当性を風洞実験により検証する。このように数値シミュレーション技術と風洞実験技術を高度化することで、列車による自律的な空気力推定手法の構築を目指す。

風洞実験は縮尺模型を使用している点に加え、車両

模型が地面に固定されている点が実際の現象と異なる。そこで、走行状態を模擬するための風洞実験用の走行装置の開発に取り組んでいる。本件は同様の装置を有するバーミンガム大学との共同研究で実施したものである。鉄道総研の走行装置は大型低騒音風洞に仮設するもので、縮尺1/60の車両模型を最高速度36km/hで走行させることができる（図8（a））。車両模型は小型で低速であるが、大型風洞によって風を発生させるため、均一な一様流や自然風を模擬した乱流境界層による実験が可能である。一方、バーミンガム大学の実験装置は縮尺1/25の車両模型を最高速度270km/hで走行可能な装置である（図8（b））。風発生装置は小型のファンを配列した簡易的なもので、風速分布の均一性が不十分であるが、比較的大きな車両模型を高速で走行させることが可能である。両者による実験結果を比較検討することで課題を抽出し、現象のさらなる再現精度向上のためには、大型の車両模型を高速で走行させ、かつ、良質な風を発生させる装置が有効であることが確認された。そこで、風洞実験技術の高度化として、3.1節で紹介した大型の列車模型発射装置（図3）に設置するための横風用の送風機の開発に取り組んでいる。長い測定区間に均一な風を発生させる必要から、複数台配列した小型ファンと、短距離で整流するためのハニカムやメッシュから成る整流胴とノズルで構成

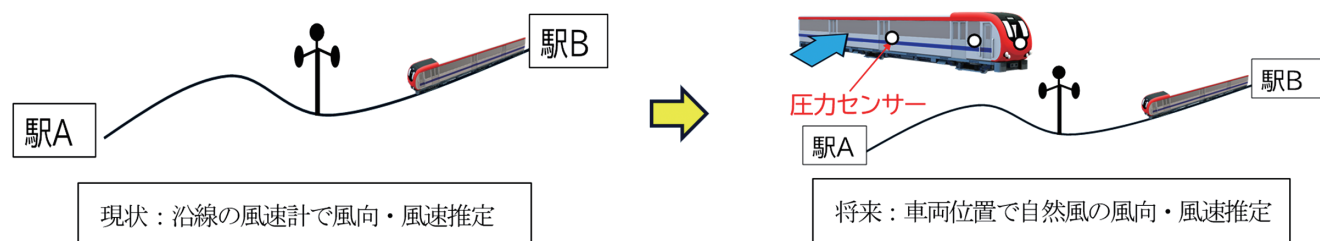


図7 数値シミュレーションによるトンネル微気圧波の予測

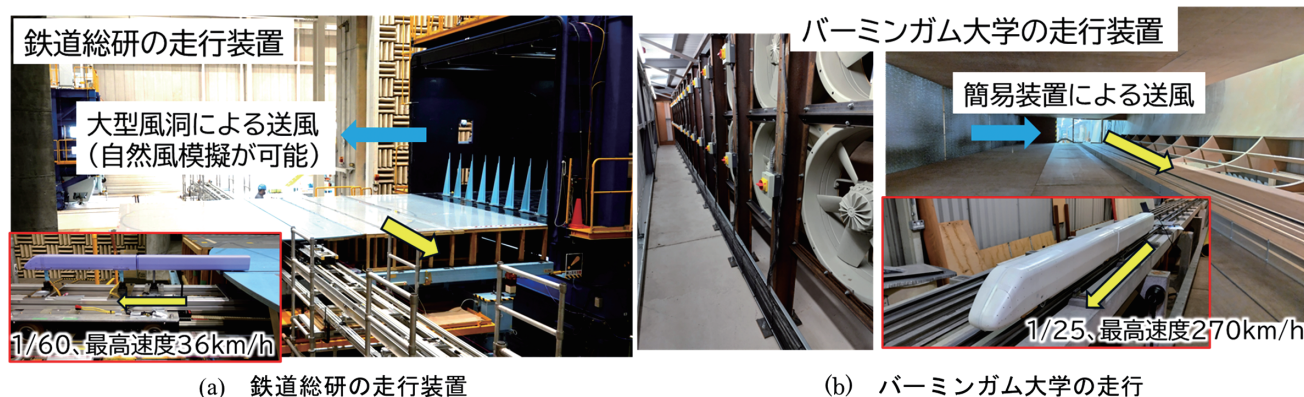


図8 数値シミュレーションによるトンネル微気圧波の予測

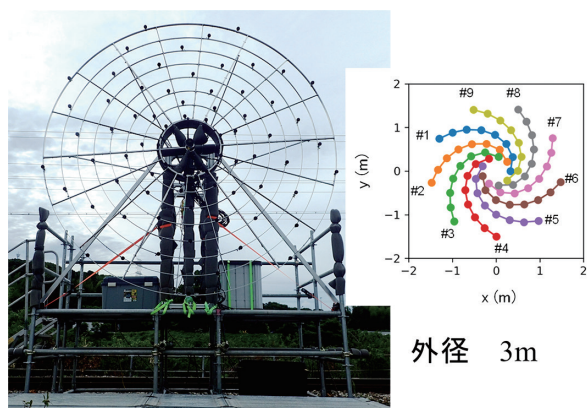


図9 二次元マイクロホンアレイ

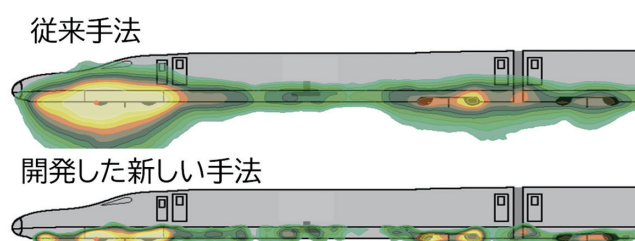


図10 新幹線の音源探査事例

されている。開発した装置を活用することで、車両と地上構造物との相対運動が再現でき、車両周りの風速分布が実際の状況に近づくことで構造物の影響や防風柵などの効果の定量的評価に資することが期待される。

4.2 沿線騒音評価のコア技術の高度化

沿線騒音の環境基準を遵守するためには、車両の音源位置を正しく把握し、沿線における騒音を正確に予測することが求められる。これらの目的のために、音源探査技術と、音の伝播予測を行うための音響模型実験技術、数値シミュレーション技術を用いた研究開発が実施されている。

音源探査技術として、多数のマイクロホンを平面上に配列することにより二次元的な音源分布の探査が可能な二次元マイクロホンアレイ（以下、アレイ）⁶⁾がある（図9）。本アレイは9本のスパイラル曲線にそれぞれ8本のマイクロホンが配置されたもので、外径が3mである。スパイラル曲線の数や曲がり具合等、様々な形状でアレイの性能計算をシミュレーションし、測定周波数250Hz帯～6.3kHz帯において最も良好な性能となる配列を選定した。

アレイの各マイクロホンで得られた信号を処理することで、音源の位置を特定することができるが、従来

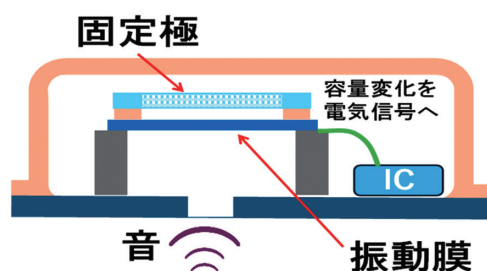


図11 MEMSマイクの構成概要図



図12 地形データ例

の信号処理方法ではアレイの展開領域とマイクロホン数が有限であることに起因し、理想的な点音源であってもアレイ処理後の音源は有限の幅に広がることで音源の位置がばやけてしまい、空間分解能に限界があった。近年、空間分解幅を大きく向上させる信号処理法として、アレイの幾何学的な配置によって決まる音源の広がり除去することで音源の空間分解能を向上させる手法が開発されており、この計算手法を鉄道総研のアレイ配列に適用できるように工夫し、音源探査に用いている⁷⁾。その解析事例を図10に示す。新しい信号処理方法を用いることで台車の車軸間隔程度の空間分解能が得られていることがわかる。

効果的な騒音低減策を検討するためには、音源位置のさらなる詳細把握が必要であり、音源探査技術の高度化が求められる。そのための解決手段のひとつとして、MEMSマイク（Micro Electro Mechanical Systems マイク）の活用を検討している。MEMSマイクは図11に示されるように音響センサーと信号処理用の集積回路が組み合わさった小型（数mm角）で高性能のマイクロホンであり、スマートフォンやヘッドホンなど幅広く使用されている。このMEMSマイクを従来のマイクロホンでは設置不可能な狭小箇所、たとえば風洞実験用の縮尺模型の台車取り付け部などに多数配置するこ

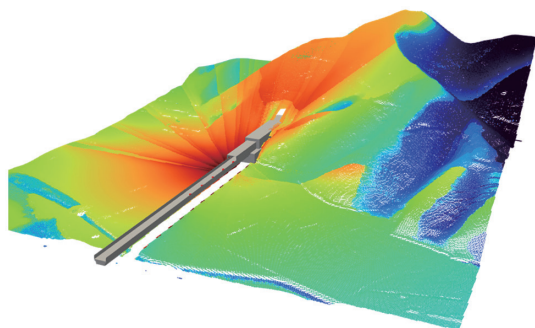


図13 地形の影響を考慮した音圧分布の計算例

とで、台車の音源探査に活用できる可能性がある。

音の伝播予測には音響模型実験技術と数値シミュレーション技術が用いられている。音響模型実験では、鉄道車両の音源を点音源装置や線音源装置で適切に模擬し、防音壁や車両の吸音材などの相似性を考慮しながら、3軸トラバースを用いた音圧分布測定によって音の伝播特性の把握を行っている。一方、数値シミュレーションでは、車両と防音壁間の多重反射などのために音場が複雑になる車両周辺の近傍場と、音場としては単純であるが非常に広い範囲の計算が必要となる騒音評価点(25mm点)付近の遠方場を境界条件で接続することで、それぞれ別の計算手法によって音圧を求めている。音響模型実験では車両と防音壁の間など狭小領域の測定が困難である一方、数値シミュレーションでは高周波数域において騒音評価点である25mm点までの広い範囲について計算を実施することは、計算リソースの観点から困難な状況である。よって、音の伝播予測においては両技術を併用し、それぞれの技術で得られた結果を補完することで実施している。

現在の沿線騒音予測手法では騒音評価点を平地として想定している。今後、より正確に沿線騒音を予測するためには、対象とする騒音評価点周辺の家屋や地形による音の反射、回折の影響を考慮した予測手法の構築が望まれる。そこで、現在、国交省の提供する3D都市モデル(PLATEAUプラトー)を活用した数値モデルの構築を行っている。取得した地形データの例を図12に示す。図12に示した地形データは、地形や家屋配置についてはPLATEAUを元に作成されたものである。また、鉄道構造物(高架橋や緩衝工など)や車両形状については図面を元に作成する。この地形データをもとに、音響計算の数値モデルを構築し、遠方場における音の伝播計算を実施することで、地形や家屋による音の反射、回折の影響を考慮した騒音予測が可能となる(図13)。

5. おわりに

新幹線の高速化や空気力学分野における技術的課題の解決のためには、各課題に対するコア技術の持続的な高度化が必要である。本分野は鉄道特有の現象が多いことから、理論による現象解明を十分に行うことで問題の本質を探究することが重要である。また、共同研究などにより他分野の知見や技術を積極的に取り入れながら、独創的な手法による解決策を探究し、提案する。また、提案した解決策を社会実装するためには現地試験による性能評価が必須であり、鉄道事業者との連携も必要不可欠である。今後とも研究開発のコア技術の高度化について、関係各所と議論を重ねながら進めていく所存である。これまでと同様、ご支援、ご協力をお願いしたい。

※3.1節にはボストン大学への委託研究の、3.2節には防災科学技術研究所、4.1節にはパーミンガム大学との共同研究の成果を含む。

参考文献

- 1) 福田傑, 宮地徳蔵, 中村真也: トンネル微気圧波を予測する, RRR, Vol.72, No.1, pp.16-19, 2015
- 2) 福田傑, 飯田雅宣: 列車・トンネル系の空気力学に関する模型実験, 日本音響学会, Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007
- 3) 高見創, 新木悠斗, 室谷浩平, 石井秀憲, 鎌田慈: 走行風を利用した新幹線台車周りの着雪対策, 鉄道総研報告, Vol.36, No.9, pp.5-10, 2022
- 4) 室谷浩平, 中出孝次, 鎌田慈: 降雪地帯を走行する鉄道車両への着雪を再現する着雪シミュレータの開発, 鉄道総研報告, Vol.36, No.7, pp.59-68, 2022
- 5) 鈴木実, 種本勝二, 斎藤寛之, 今井俊昭: 自然風を模擬した車両に働く空気力に関する風洞試験法, 鉄道総研報告, Vol.17, No.11, pp.47-52, 2003
- 6) 宇田東樹, 山崎展博, 北川敏樹: 空力音に関する試験に活用する, RRR, Vol.73, No.11, pp.16-19, 2016
- 7) 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