

高速で移動する音源から発生する音波の可視化



阿久津 真理子
Mariko Akutsu
環境工学研究部
騒音解析研究室
副主任研究員



宇田 東樹
Toki Uda
環境工学研究部
騒音解析研究室長



及川 靖広
Yasuhiro Oikawa
早稲田大学
教授

はじめに

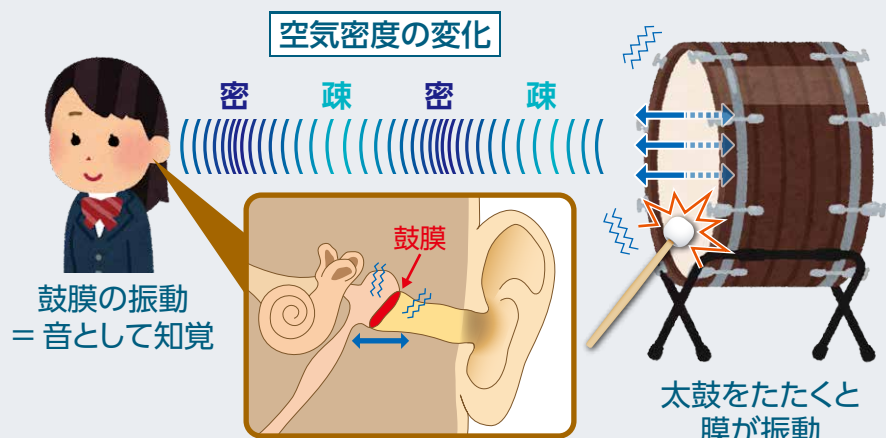
鉄道車両が走行する際には音（鉄道騒音）が発生し、沿線に伝わります。音は空気密度の疎密変化が縦波（疎密波とも言います）として空气中を伝搬することで発生源からヒトの耳まで届きます（図1）。空气中を伝わる音波は目で見ることができないため、鉄道車両から発生した音がどのように伝搬していくかについては沿線に設置したマイクロホンで収録した音や数値シミュレーションにもとづいて予測することが一般的です。しかし、鉄道騒音は複雑な要因が組み合わさって伝搬するため、正確に予測するには多くの課題があります。特に高速で走行する新幹線においては、鉄道車両が音を放射しながら移動する点も考慮する必要があります。そこ

で、このような複雑な音の伝搬を捉えるための基礎的な検討として、移動体から発生する音の伝搬を実験により可視化しました。この実験では音を可視化する新しい技術と鉄道車両の縮尺模型を高速で移動させる装置を活用しました。

音波の可視化手法

音が空気密度変化であることを利用することで、光学的な手法を用いて音波を可視化することができます。空气中を伝わる音が実際にどのように伝搬するかを知るため、本研究では、音波を可視化する偏光高速干渉計を使用しました（図2）。偏光高速干渉計とは、**偏光高速カメラ**®と干渉計を組み合わせた装置です。この偏光高速干渉計は、計測領域を通過する

図1 音波の伝搬



偏光高速カメラ

通常のビデオカメラは1秒間に約30枚の画像を撮影しますが、1秒間に100枚以上の画像を撮影できるビデオカメラを高速カメラといいます。高速カメラを使うことで、スローモーション動画のような、通常のビデオカメラでは記録されない短時間の現象を捉えることができます。偏光高速カメラは、高速カメラで通常使われているイメージセンサーの代わりに、4種類の偏光を検出できる特殊なイメージセンサーを使用した高速カメラを指します。これら4種類の偏光を同時に検出できると、もとの光の位相を推定することができます。

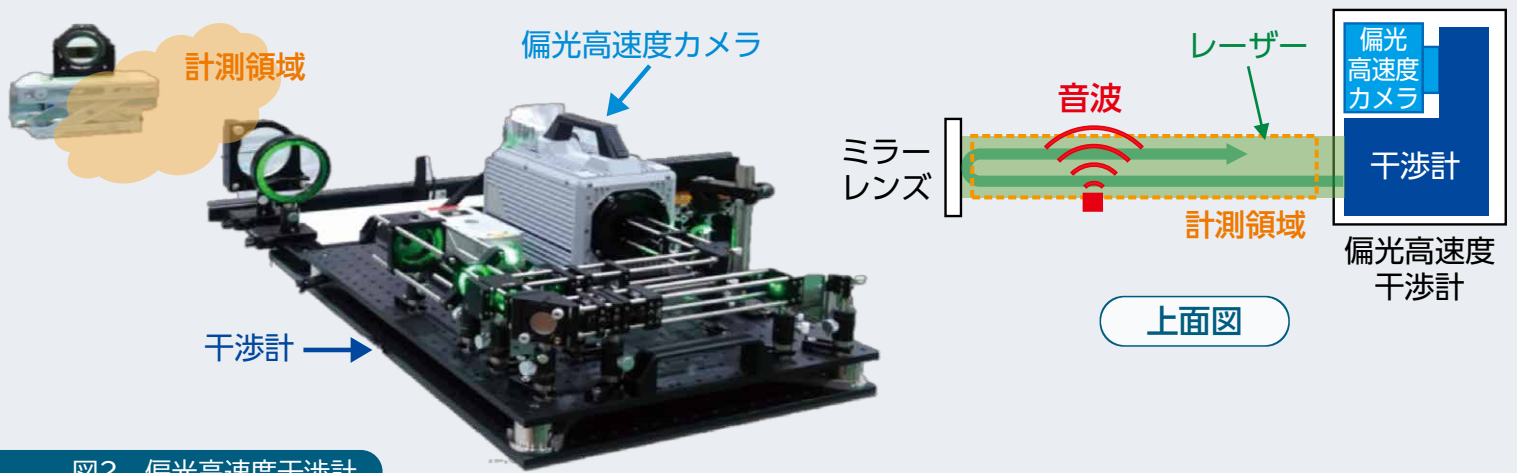


図2 偏光高速度干渉計

レーザー光（物体光）と通過しないレーザー光（参照光）により生成された干渉縞^{しま}を偏光高速度カメラにて2次的に記録します。この干渉縞は4つの異なった偏光で記録されており、記録された情報から物体光の位相変化を算出することができます。空気の密度変化のある場所をレーザー光が通過するとレーザー光の位相が変化することが知られており、これを利用すると偏光高速度干渉計で得られたレーザー光の位相変化から、その場の音圧を求めることが可能です。音計測への偏光高速度干渉計の適用は光学機器の発展にともなって実現し、2014年以降、偏光高速度干渉計を音波の可視化に用いる方法が検討されてきました¹⁾²⁾。

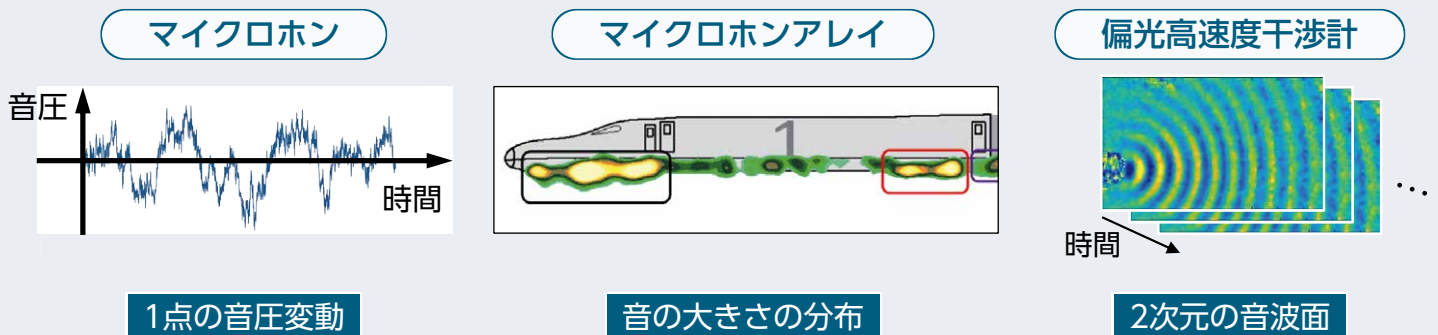
通常、音の計測に用いられるマイクロホンは、マイクロホンを設置した1点の音のみを収録します。これに対し、偏光高速度干渉計は面的に音を計測することができます。さらに、レーザー

光によって音を計測するため計測領域内に機器を置く必要がなく、計測機器が音の伝搬に影響を与えないという利点もあります。このため、今回対象とする移動音源から放射される音の可視化に適しています。なお、[マイクロホンアレイ^{3\)}](#)を用いた音源分布測定が音の可視化と称される場合もあります。マイクロホンアレイでは音の大きさの分布が可視化されるのに対し、偏光高速度干渉計では音波が可視化されるものであり、両者の対象・目的は異なります（[図3](#)）。

④ マイクロホンアレイ

音の収録に用いるマイクロホンを複数並べて、音の到来方向を推定する測定機器です。複数のマイクロホンで同時に音を収録することで、それぞれのマイクロホンに収録される音には位相差が生じます。この位相差から、伝搬方向を求めることができます。例えば、マイクロホンを2次元平面上に配置したマイクロホンアレイの場合、各方向から伝搬する音を逐次計算し、2次元の音源分布を推定することができます。

図3 音の測定



静止音源を対象とした音波の可視化

静止している音源から放射される音波を対象に偏光高速度干渉計で可視化した音波を図4に示します。計測領域の左端に設置した音源から40kHzの音波が空气中に放射されている様子を可視化しました。図中の黄色線と青線が音波の疎密の大小関係を表します。したがって、青線と青線、または黄色線と黄色線の間隔が音波の波長、すなわち音の周波数（音の高さ）の逆数に相当します。また、色の濃さが音波の振幅（音の大きさ）に相当します。音源のみ設置した結果（図4上）より、音波が同心円状に空气中を伝搬する様子が可視化されていることがわかります。また、音源の前に板を置いた結果（図4下）では、板の左側で音の反射、右側で音の遮蔽、板の上端では音の回折が生じていることが視覚的に理解できます。

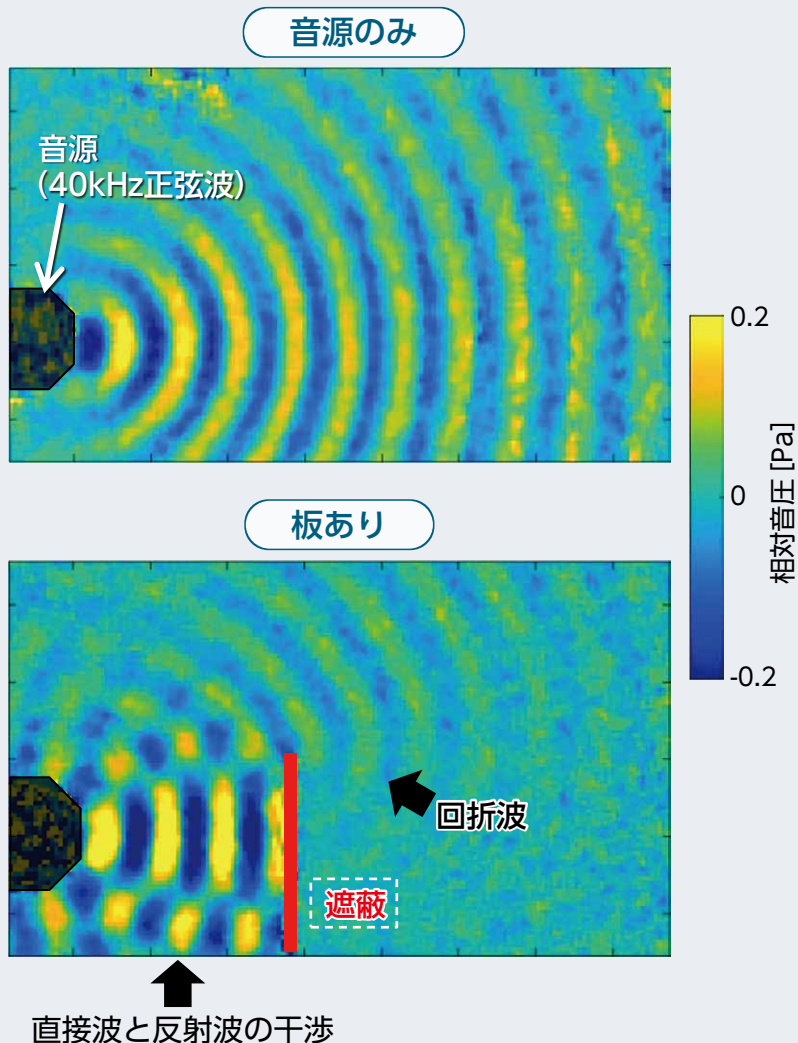


図4 静止音源を対象とした音波の可視化

移動音源を対象とした音波の可視化

移動する音源から放射される音の伝搬を調査するため、移動音源を対象とした音波の可視化実験を実施しました。また、実際に走行する新幹線を対象に可視化実験することは難しいため、音源を搭載した列車模型を高速で走行させて、そこから発生する音波を対象としました。この列車模型の走行には低騒音列車模型走行試験装置を使用しました。

低騒音列車模型走行試験装置

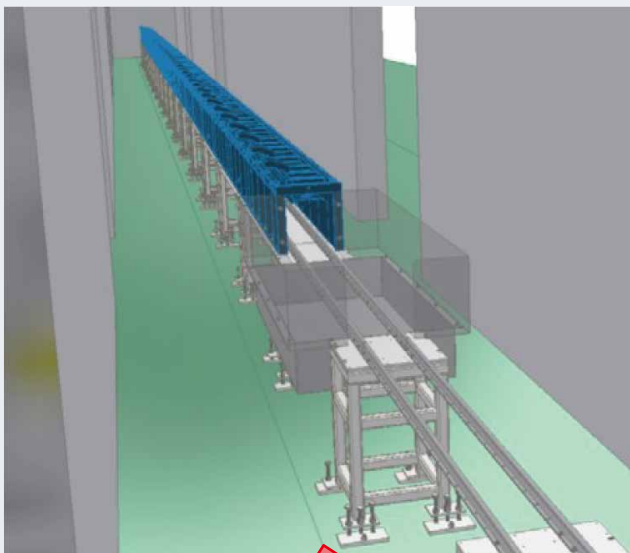
走行する鉄道車両周りの流れを実験的に模擬する装置として、**風洞装置**や模型走行装置があります。風洞装置では車両周りの流れを再現することができますが、車両の移動による、測

定点と車両との相対運動は再現できません。そこで、模型を高速で走行させることができる模型走行試験装置を用いて音波の可視化を行いました。鉄道総研には2種類の模型走行試験装置がありますが、今回は音を測定するため、計測部が**半無響室**となっている、低騒音列車模型走行試験装置（以下、低騒音走行装置）を用い

風洞装置

風洞装置とは、送風機で人工的に作り出した高速の気流を列車の縮尺模型などに当てて、車両に働く空気抵抗などの空気力あるいは空力音を実験的に模擬することのできる装置です。鉄道総研は、鉄道の技術開発に特化した大型低騒音風洞（滋賀県米原市）を有しており、幅3m×高さ2.5mのノズルで最大400km/hの送風試験を実施することが可能です。

制動装置



発射用回転輪装置

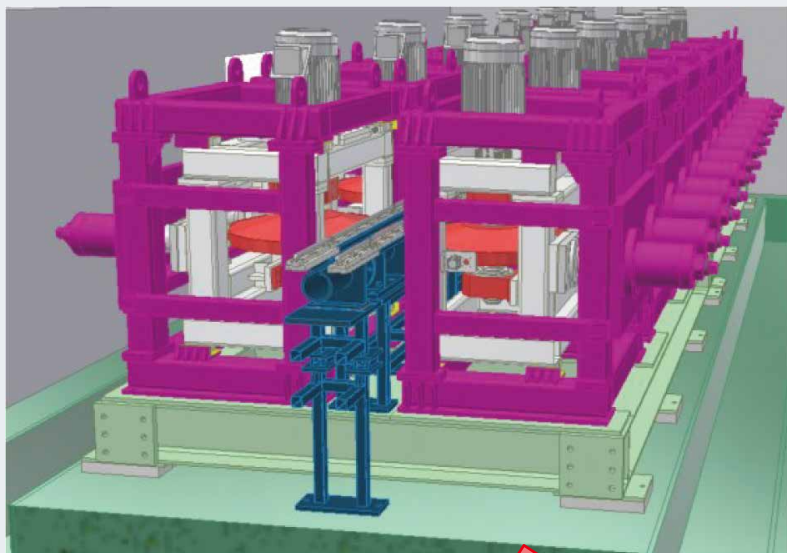


図5 低騒音列車模型走行試験装置（低騒音走行装置）

ました。

低騒音走行装置は、鉄道が沿線環境に及ぼす影響、例えば、トンネル内圧力変動や車両から発生する低周波音を研究する目的で、鉄道総研国立研究所に建設されました。1/20縮尺の

半無響室

音を測定するための実験室の1つに無響室があります。通常の部屋では天井や壁、床で音が反射しますが、無響室ではこれら6面に吸音材が設置されており、反射音が発生しません。このため、対象とする音のみを計測することが可能です。半無響室とは、床には吸音材が設置されていない無響室のことを指します。鉄道沿線の地面を模擬するために、低騒音列車模型走行試験装置では半無響室が採用されています。

列車模型が2本のレール上を走行する仕組みで、列車模型を最高速度400km/hで走行させることができます。

低騒音走行装置は全長125mに及び、発射区間、測定区間、制動区間の3区間を通して列車模型の走行するレールが敷設されています(図5)。列車模型は発射区間で加速され、測定区間において列車模型から発生する音や圧力などを測定します。

音波の可視化実験

偏光高速干渉計と低騒音走行装置を用いて、列車模型に搭載した超音波振動子(以下、音源)から伝搬する音を対象とした音波の可視化実験を行いました(図6)。今回対象とする音は

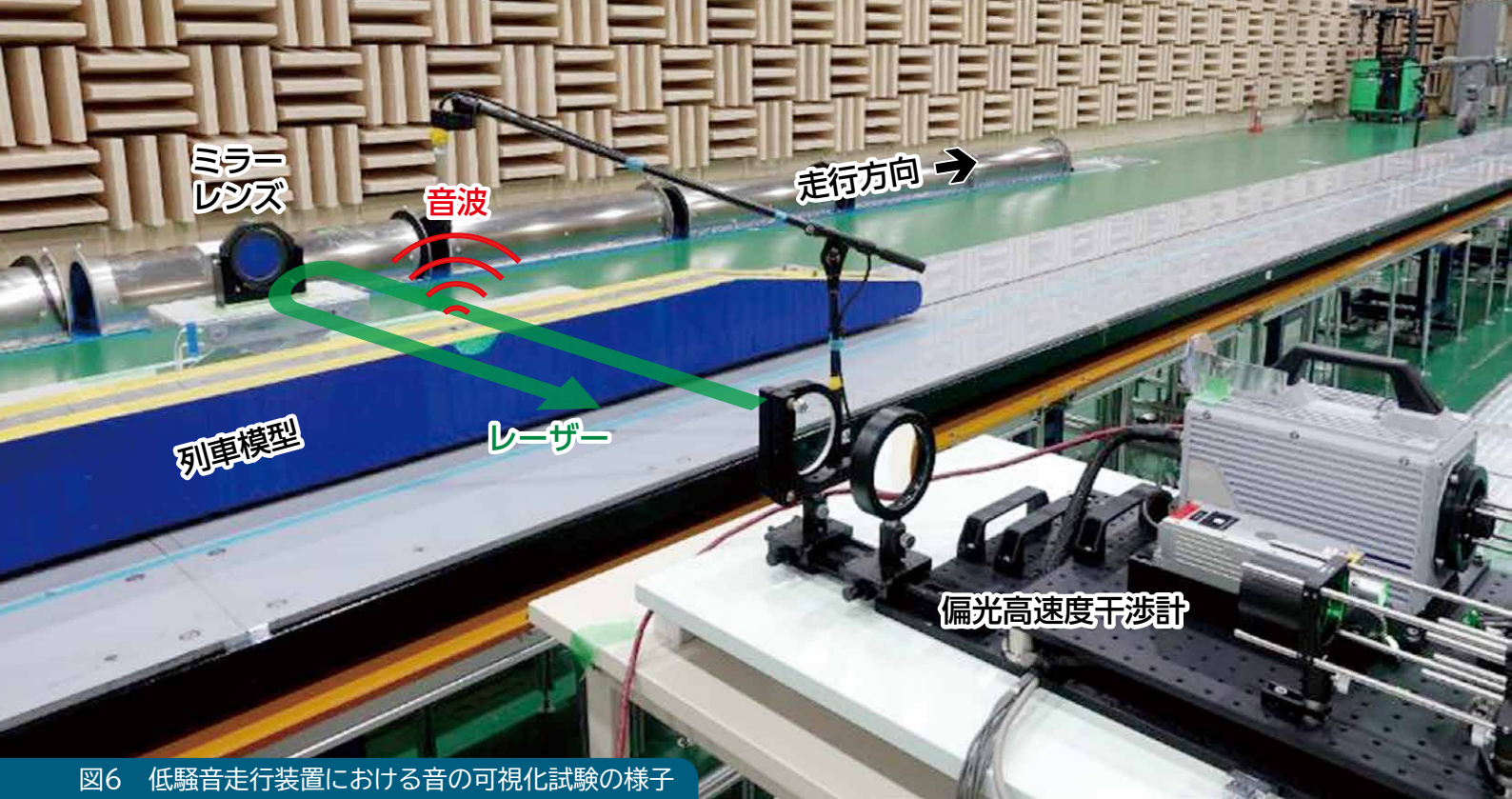


図6 低騒音走行装置における音の可視化試験の様子

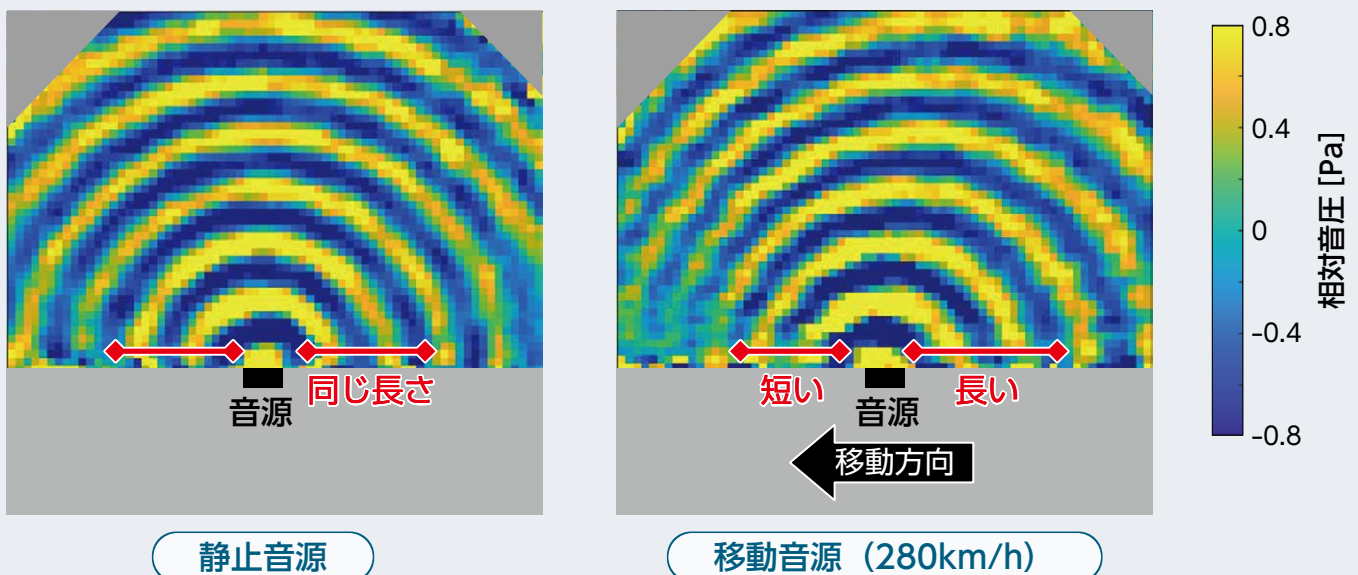
40kHzの超音波[※]ですが、1/20縮尺の列車模型を使用するため、現車の条件に換算すると

超音波

空気粒子の振動のうち、ヒトの耳に聞こえない高い周波数領域の音のことです。ヒトはおおよそ20Hzから20kHzの音を耳で聞くことができると言われています。コウモリやイルカは超音波を使って仲間内でのコミュニケーションを取ることが知られています。

2kHzの音に相当します。音源が静止している場合と280km/hで移動している場合の可視化の結果を図7に示します。280km/hの結果は偏光高速度干渉計の計測領域の中央付近を、列車模型に搭載した音源が通過した時刻の結果です。計測結果には干渉計のレンズによる歪みの影響が含まれますが、ここで示す図には、本研究において提案した歪み補正方法^{※4)}を適用し

図7 移動音源の音波の可視化結果

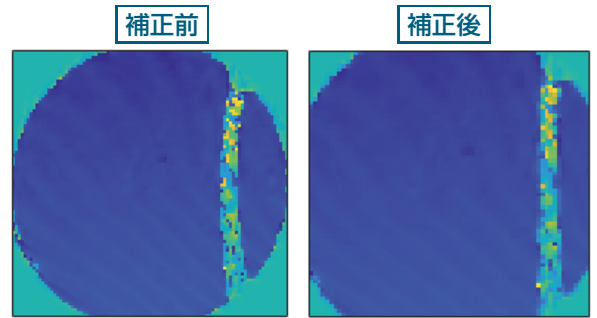
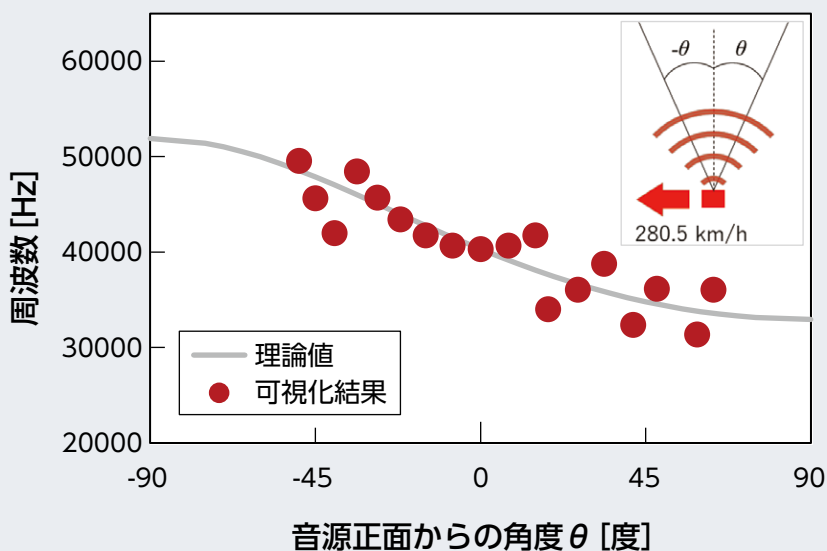


ています。列車模型が静止している場合、音源から放射された音波は同じ間隔で同心円状に伝搬します。一方、列車模型が移動する場合、音源から放射された音波は音源前方で波面の間隔が短く(音が高い)、後方で間隔が長くなる(音が低い)ことが見て取れます。これはドップラー効果として知られる音の周波数の変化が可視化されたものであり、理論値と同じ傾向が実際に観測できることが確認できました(図8)³⁾。空气中を伝搬する音波のドップラー効果を実験的に可視化した例はこれまでにありません。YouTubeの鉄道総研チャンネルでは、実際に音源が移動している様子を動画で公開しています⁵⁾。

おわりに

目に見えない音波の挙動を可視化し、新幹線騒音を想定した移動音源から発生する音波の伝搬の基礎的な研究を紹介しました。移動音源はここで紹介したドップラー効果以外にも車両周りの流れの影響なども受けていると考えられます。これらの影響についても、この可視化技術を活用して検討を深度化させれば、例えば、新幹線のパンタグラフから発生する音が、車両周りの風の影響を受けてどのような伝搬経路を通

図8 ドップラー効果による音の周波数の変化



まっすぐな棒を偏光高速干渉計で撮影した様子。補正前はレンズ歪みにより棒が歪んでいるが、直線状に補正される。

図9 レンズの歪み補正の効果

歪み補正用に製作した補正用プレートを用いた偏光高速干渉計で測定することで、レンズ歪みの影響を算出し、その影響を音波の可視化結果に適用するとレンズ歪みの影響を除去することができます(図9)。

👁️ レンズ歪みの補正方法

るか、どのような放射方向で沿線に伝搬していくか、ということを知ることができます。また、計算では解析が難しい、台車部や防音壁・吸音材などの影響を受ける複雑な音の伝搬についても、可視化により把握することができます。このように、実際の新幹線から伝搬する音の特性を知ることは鉄道騒音の予測精度向上に貢献できるだけでなく、新幹線から放射される音の伝搬を制御し、沿線騒音の低減につなげるのが期待できます。[RRR]

文献

- 1) Kenji Ishikawa, Kohei Yatabe, Chitanont Nachanant, Yusuke Ikeda, Yasuhiro Oikawa, Takashi Onuma, Hayato Niwa, Minoru Yoshii : High-speed imaging of sound using parallel phase-shifting interferometry, "Optics Express, vol. 24, no. 12, pp. 12922-12932, 2016
- 2) 矢田部浩平, 石川憲治, 谷川理佐子, 及川靖広: 光学的音響計測, 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ IEICE Fundamentals Review, vol.12, No.4, pp.259-268, 2019
- 3) 小方幸恵, 宇田東樹: 新幹線の沿線騒音を予測する, RRR, vol.81, No.1, pp.32-37, 2024
- 4) Mariko Akutsu, Toki Uda, Yasuhiro Oikawa: Experimental and quantitative evaluation of frequency modulation caused by a high-speed moving sound source, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.154, No.5, pp.3403-3413, 2023
- 5) YouTube RTRI Channel: Experimental visualization of waves from fast-moving sound source, <https://youtu.be/wefbO3D5VKk?si=e83xePW13dqOFj5f> (入手日: 2024年2月2日)