

- 鉄道一般
- 車両
- 施設
- 電気
- 運転・輸送
- 防災
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

新幹線車両の低周波空力音を解明する

高速走行する列車のまわりでは、先頭・後尾部に形成される準静的な圧力変動に加え、空気力学的な要因により、車両の中間部から低周波数域の圧力変動（低周波空力音）が放射されていることがわかっています。しかし、その発生源などの特性は十分にわかっておらず、鉄道固有の未解明の現象の一つです。ここでは、このような低周波空力音の現象解明に向けた取り組みとして、現地試験における音源探査の結果と模型実験による現象再現の試みについて紹介します。



宇田 東樹
Toki Uda
環境工学研究部
騒音解析研究室
主任研究員
[専門分野] 鉄道騒音



斉藤 実俊
Sanetoshi Saito
環境工学研究部
熱・空気流動研究室
室長
[専門分野] 空気力学,
熱流体力学



北川 敏樹
Toshiki Kitagawa
環境工学研究部
騒音解析研究室
室長
[専門分野] 鉄道騒音

はじめに

高速走行する新幹線のまわりには、高速の空気の流れが形成されています。このような空気流は大小さまざまなスケールの渦を内包しており、これらの渦が車両表面と干渉して変形する際に音（圧力の微小変化）が発生します。この音は空気力学的な要因によって発生するため、空力音あるいは風切り音とよばれています。

新幹線騒音の特徴

新幹線騒音に関する最新の分析によれば300km/h以上で走行するとき、

全体騒音に対する空力音の占める割合は50%を越えると試算されています¹⁾（図1）。その主な発生源は先頭部・パンタグラフ部・台車部（車間間隙部含む）ですが、先頭部は全体騒音に大きな影響を与えないため、現在はパンタグラフ部と台車部を中心に空力音の発生メカニズム解明や低減対策の開発を進めています。

騒音の分析や評価を行う際、発生している音の周波数を把握しておくことが重要です。人間の耳の可聴域は20Hz～20kHzとされ、周波数が大きければ高い音、周波数が小さければ低

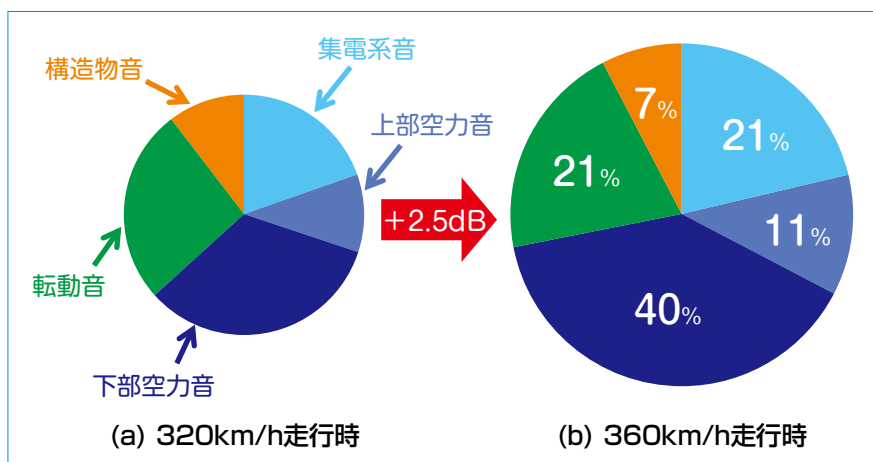


図1 新幹線沿線における騒音の内訳（青系の色が空力音）

い音として知覚されます。とくに、年齢を重ねると高い周波数の音が聞こえにくくなるため、17kHz前後の音（モスキート音）は若い人にしか聞こえない音として広く知られています。

鉄道騒音でおもに対象とされるのは125Hz～4kHz前後の音ですが、この範囲より高い高周波音²⁾、100Hz以下の低周波音とともに継続的に研究が進められています。とくに、周波数5～20Hzの音は、人間の耳には聞こえないものの、家屋の建具や窓のガタツキを生じさせることがあります。しかし、その現象は十分には解明されておらず、発生原因の究明が求められています。

ここでは新幹線が高速走行する際に発生する100Hz以下の低周波空力音に着目した現象解明への取り組みについて、新幹線沿線で測定した現地試験と模型実験の結果を紹介します。

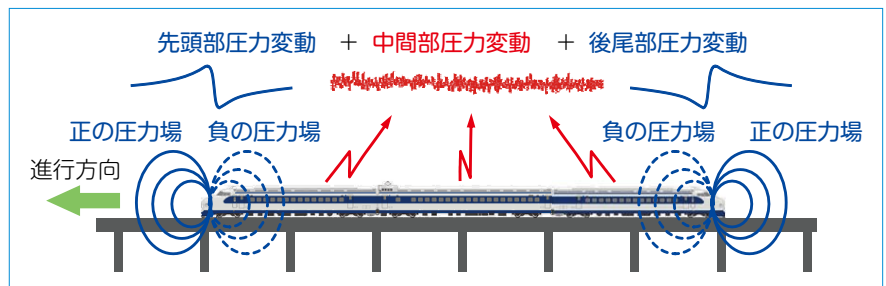


図2 列車が高速走行する際に観測される空気力学的な圧力変動

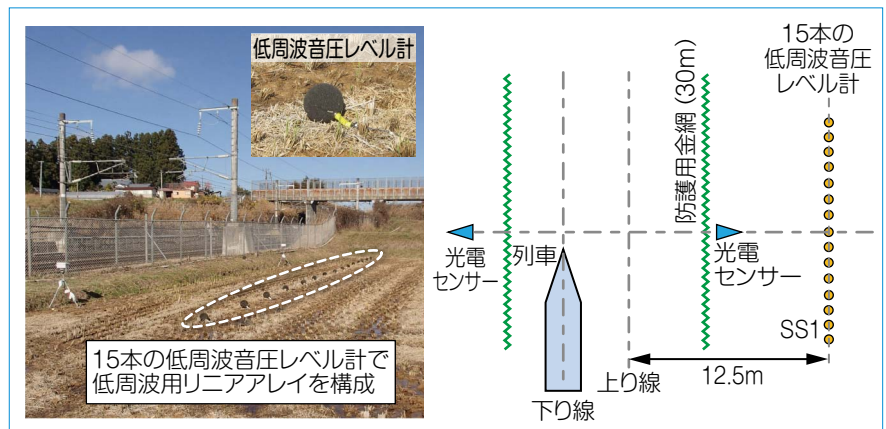


図3 見通しの良好な平地において展開した長さ28mの低周波用リニアアレイ

先頭・後尾部の圧力変動

列車が走行すると、先頭と後尾部には準静的な圧力分布（☞参照）が形成されます。地上に固定された観測者の前を列車が通過すると、先頭部通過のタイミングで正圧から負圧、後尾部通過のタイミングで負圧から正圧へ変化する圧力の時間変動が測定されます（図2の青字・青線部）。このような圧力変動は、先頭部・後尾部通過時にそれぞれ1波ずつのみ観測されるので厳密には音というより圧力変動という方が適切ですが、音として分析すると周波数が数Hz程度の超低周波音となります。

低周波空力音

一方、先頭・後尾部以外の列車の中間部から連続的に低周波数域の空力音が放射されていることがわかっています³⁾（図2の赤字・赤線部）。しかし、その特性は十分にわかっていない

ことが多く、車両側のどの部位に対策を施せばよいのか、方針を立てにくい状況でした。そこで、列車の中間部から発生していると予想される周波数100Hz以下の低周波空力音の発生部位を特定する測定手法の開発に取り組みました⁴⁾。

現地試験における低周波空力音の測定法の開発

一般に音源探索には、マイクロホン多点配列したマイクロホンアレイ（☞参照）が用いられます。低周波空

力音の場合でも同様の考え方が適用できます。しかし、マイクロホンアレイによる測定では、とらえたい音の波長以上の領域にマイクロホンを配列する必要がありますため、波長が3.4m以上に及ぶ周波数100Hz以下の音に対しては既存のマイクロホンアレイでは対応することができません。そこで、このような低周波数域の音の発生部位をとらえることの可能なマイクロホンアレイ（以下、低周波用リニアアレイとよびます）を独自に構築しました（図3）。その特徴はマイクロホン15本をレー

☞ 準静的な圧力分布

先頭部と後尾部に形成される圧力分布は移動する列車から見れば時間的な変化がなく定常です。しかし、地上の観測点からみると、列車が通過する際に圧力の時間変動が観測されます。この両者の意味合いを含めるため、「準静的」としています。

☞ マイクロホンアレイ

多数のマイクロホンを配列して同時測定を行う装置。得られた信号に重み付けを与えながら、音源から各マイクロホンへの音波の到達時間の差を考慮した加算処理を行うことで、正面から到来する音波のみをとらえることができます。

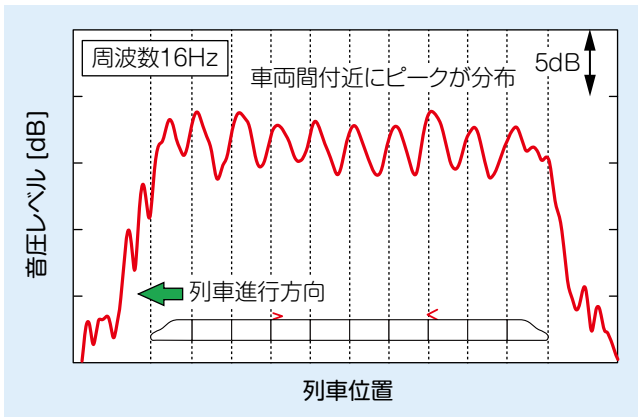


図4 現地試験において測定した低周波空力音
(周波数16Hz, 車両間付近にピークが分布)

ル方向28mにわたる広い領域に展開している点です。

音源探査による発生源の特定

開発した低周波用リニアアレイを用いて新幹線の沿線で音源探査を試みた結果を図4に示します。横軸は列車位置、縦軸は音の強さを表す音圧レベルです。測定した列車本数が少ないため、位置ごとの音圧レベルのばらつきは大きいですが、低周波空力音は車両全体から一様に発生するのではなく、発生源は車両と車両の間付近に局所的に存在していることが明らかになりました。

列車模型発射装置による実験

現地試験による結果とこれまでの知見から、低周波空力音は台車部や車間部付近から発生していることが推定されました。また、低周波数の音波は波長が長いので、台車装置の細かい形状(図5参照)ではなく、台車を収める車体床下の空間(台車キャビティー部)など、比較的大きな構造から放射されていると予想されます。そこで、台車キャビティー部を模擬した列車模型を用いて、低周波空力音の発生を実験的に再現することを試みました。鉄道総研には空気力学的な諸現象の解明に活用で

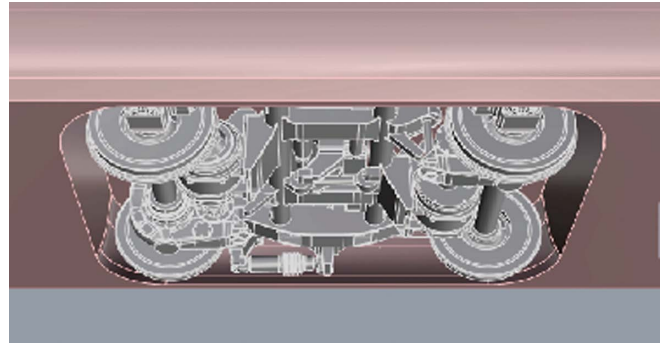


図5 台車装置を斜め下方から見上げた様子

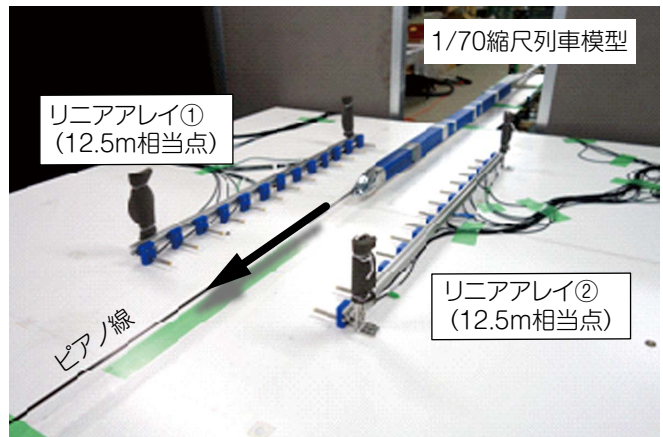


図6 列車模型の発射装置における低周波空力音の測定

きる、大型・小型の風洞⁵⁾や列車模型の発射装置などの実験設備がありますが、今回は現地試験と可能な限り近い条件で実験を行うため、列車模型を高速で発射する「トンネル空気力学模型実験装置」⁶⁾を利用することにしました。

測定・試験方法

列車模型の発射装置はおもにトンネル微気圧波や車両まわりの流れ解析に用いられる試験装置です。本模型実験では、低周波空力音の測定を行えるように、模型の制動方法や走行時の姿勢の維持方法に工夫を加えて低騒音化を図りました。

試験に用いた列車模型の縮尺は図6に示すように実機の1/70スケールです。測定は、現地試験と同様の性能をもたせたりニアアレイで行いました。

車両の左右両側にリニアアレイを2組並べることで、1回の発射で2回分の計測ができるように工夫しています。

試験条件を図7に示します。この試験では台車キャビティー部に着目し、その有無で低周波空力音の発生状況に違いがあるか? どのような形状に改良すれば低減できる可能性があるか? について検証しました。

模型実験による現象再現と低減策の検討

図8は列車模型を200km/hで発射して低周波空力音を測定した結果です。図4の現地試験結果と同様、横軸が列車位置、縦軸が音圧レベルであり、左側が現車換算周波数で16Hz帯、右側が31.5Hz帯となります。

図より、車体床面を完全にフラッ

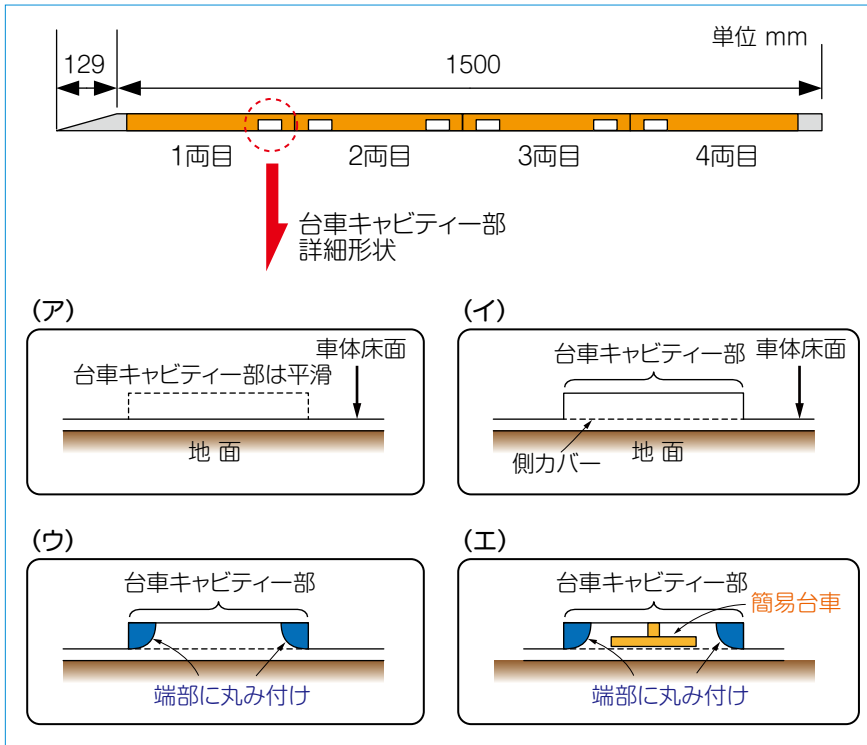


図7 発射試験の実施条件

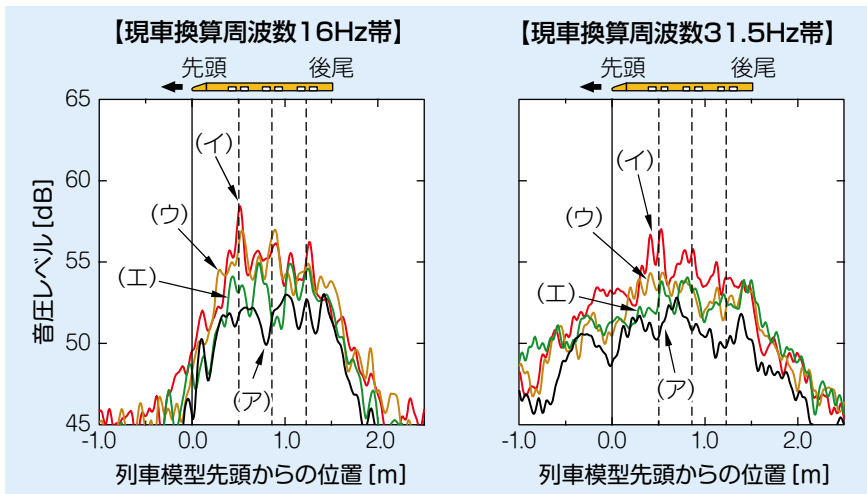


図8 発射装置を用いた低周波空力音の音源探査
(図中のア～エの凡例は図7と対応)

トにした黒線に比べて、台車キャビティー部を設けた赤線ではキャビティー部付近で音圧レベルが増加している様子がわかります。これは、台車キャビティー部から低周波空力音が発生していることを示しており、現地試験における現象を実験的に再現できたものと考えられます。

また、図7の(ウ)と(エ)のように、台車キャビティー部の上流側・下流側端部のエッジを大きく丸めると、これらのピークが低減することがわかりました。実際の新幹線車両の形状をこのように変更することは容易ではありませんが、車体側の対策により低周波空力音を低減できる見込みがあります。

今後はこれらの実験的手法をさらに発展させて大型化、高精度化を図るとともに、数値シミュレーションの活用も進め、低周波空力音の低減対策の検証を進める予定です。

おわりに

新幹線が高速走行する際に発生する100Hz以下の低周波空力音に着目した現象解明への取り組みについて、現地試験における発生源特定の試みと模型実験結果を紹介しました。新幹線に代表される高速鉄道は、地面付近の空气中を高速で走行する巨大な移動体であり、さまざまな空気力学的な現象が生じます。今後も鉄道に関わる空気力学的な諸現象の解明や沿線環境の負荷低減に向け、基礎理論・模型実験・現地試験・数値解析などを上手に活用しながら、境界領域・分野横断的な課題へのチャレンジを推進します。[RRR]

文献

- 1) 飯田雅宣：高速化のための沿線環境の評価・対策, RRR, Vol.72, No.7, pp.44-47, 2015
- 2) 川口二俊, 北川敏樹, 熊倉孝雄：曲線区間で発生する10kHzを超える高周波音の現象解明, 鉄道総研報告, Vol.29, No.5, pp.29-34, 2015
- 3) 高見創, 菊地勝浩：明かり区間走行時に生じる高速列車の低周波音分析, 鉄道総研報告, Vol.23, No.7, pp.5-10, 2009
- 4) 宇田東樹, 北川敏樹, 斉藤実俊, 若林雄介：高速走行する新幹線における低周波空力音の特性, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.29-34, 2017
- 5) 井門敦志：鉄道総研大型低騒音風洞, 可視化情報学会誌, Vol.32, No.124, pp.26-31, 2012
- 6) 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, 日本音響学会誌, Vol.63, No.9, pp.543-548, 2007