

ビームフォーミングアレイによる車外騒音に対する音源探査技術の適用

Locating Source of Vehicle Pass-by Noise Using Beamforming Method

半 沢 幸 彦*
Yukihiko HANZAWA

北 原 純*
Jun KITAHARA

西 村 伸 一*
Shinichi NISHIMURA

要 旨

車外騒音低減のために、高指向性遠距離音源探査技術（ビームフォーミング法）による解析手法に着目した。ビームフォーミング法は多チャンネルセンサー技術と信号処理技術の組み合わせによる計測手法であり、特徴は音源全体を短時間に計測し、その音源分布を視覚的に得ることである。車外騒音解析を目的としたビームフォーミングアレイの形状、配置等の検討を行い、それを用いて模擬音源と車両両方で音源探査試験を実施した。その結果、（１）目標として設定した探査精度、ダイナミックレンジを達成する音源探査装置を実現できた。（２）車外騒音の音源解析に適用した結果、騒音を低減する上で有効な手法であることが確認できた。

ABSTRACT

Aiming at reducing vehicle pass-by noise, attention was focused on an analysis method employing high-directivity remote noise source locating technology (beamforming method). The beamforming method is a measurement method that uses a combination of multi-channel sensor technology and signal processing technology. It features the ability to measure the overall noise source in a short time and also the ability to provide a visual indication of the noise source distribution. A study of the shape, arrangement and other specifications of the beamforming array for analyzing vehicle pass-by noise was carried out. Based on the results a noise source locating test was performed using both a dummy noise source and an actual vehicle. As a result (1) a noise source locating instrument that had the required locating accuracy and dynamic range was realized, and (2) it was confirmed by using this instrument to analyze vehicle pass-by noise that this method was effective for reducing noise.

1. まえがき

近年、道路交通騒音低減への要請は各国において強く、その音源である自動車の車外騒音低減に対する社会的要求も高まっている。自動車の車外騒音を構成する音源としては、エンジン騒音、吸気系騒音、排気系騒音、タイヤ騒音などがあげられ、音源の対象となる部品が多く、また広く分布している特徴がある。さらに、各音源に対する騒音の低減手法は他性能と相反する関係になることが多く、車両開発の早い段階において効率的な低減を実施しておくことが重要であり、そのために必要な様々な解析手法が試みられている。

その代表的な手法として、マスキング法による寄与解析⁽¹⁾、インテンシティ法⁽²⁾、ホログラフィ法⁽³⁾、体積速度音源と相反定理による寄与解析⁽⁴⁾などが知られている。これらの手法は試験及び解析に多くの時間と労力を要するため、

短期開発を要求される開発スピードに応えられる技術としては不向きな場合もある。

一方、航空機⁽⁵⁾及び高速鉄道^{(6), (7)}の分野で高指向性遠距離音源探査技術（ビームフォーミング法）が、多チャンネルセンサー技術と信号処理技術の組み合わせによる直接的な音源探査方法として研究報告がされ始めてきた。この方法は、二次元配列マイクロホンアレイを利用して広い音源対象領域を一度に測定し、短時間で音源同定することが可能である。

本研究では、車外加速騒音の台上解析としてビームフォーミング法による音源探査手法を適用、その中で車外騒音解析に適したマイクロホンアレイを検討し、それを用いた音源探査を試みた。この結果に基づいて音源対策を実施したところ、有効な手法であることが確認できたので報告する。

2. ビームフォーミング技術の理論と特長

2.1. 理論

ビームフォーミング技術は、対象となる音源の音源分布情報を知るために、二次元平面上に幾何的に配置されたセンサー群(マルチマイクロホン)とその幾何配置に対応した信号処理によって、高指向(ビーム)特性を得る技術である。以下にその原理を紹介する。

特定方向から音波が到来する状況において XY 平面上に M 個のマイクロホンを位置 r_m ($m=1, 2, \dots, M$) に配置するものとする (Fig. 1)。この図において各マイクロホンが検出する信号 p_m は信号の到来方向と位置によって決定される遅延時間 Δ_m を想定することができる。Fig. 2 に示すように、個々のマイクロホンの信号についてこの遅延時間を補正して加算することによって、特定方向から到来する信号だけを強調することが可能である。このような時間遅延と加算処理によって高い指向特性を得る技術をビームフォーミング(遅延和ビームフォーミング)と呼ぶ。特定方向 K に注目した時間波形は、次式で表すことができる。

$$b(K, t) = \sum_{m=1}^M p_m(t - \Delta_m(K)) \quad (1)$$

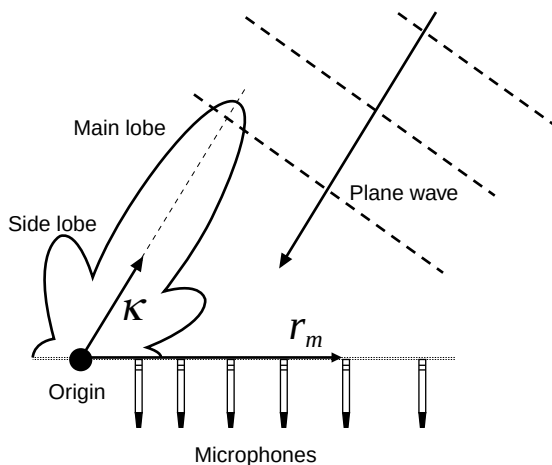


Fig. 1 Beamforming array and directional sensitivity on XY plane

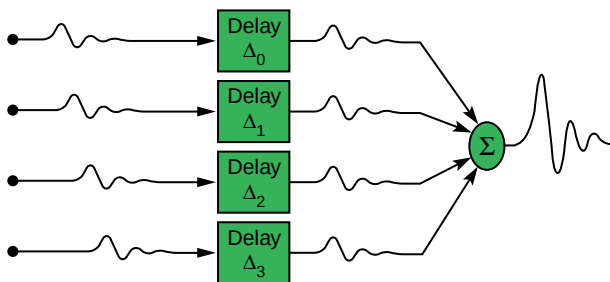


Fig. 2 Principle of beamforming

ただし、各マイクロホンに適用すべき時間遅延 Δ_m は、特定方向に選択的指向性を与えるため、方向に対する単位ベクトル K の関数である。その目的は、方向 K から入射する平面波に対する時間遅延を与えることで、加算する前に時間的に整列させることになる。マイクロホンアレイの位置を考慮すれば、その時間遅延 Δ_m は次式で表現できる。

$$\Delta_m = \kappa \cdot r_m / c \quad (2)$$

ただし、 c は音の伝搬速度である。Fig. 2 に示すように、注目する方向以外から到来する信号は、コヒーレントに加算されずにランダムに加算されるため、互いに打ち消しあうことになる。その結果、注目する方向の信号に対して主要な指向性が得られこれをメインローブと呼び、他の方向に対する感度であるサイドローブと区別する。

2.2. 特長

ビームフォーミング技術では、直径が比較的小さいマイクロホンアレイであっても離れた位置から一回の測定で大型対象物を測定、いわゆるワンショット測定が可能である。例えば、マイクロホンアレイ中心軸から30度の立体角に対して有効な計算結果が期待できる。

また、理想的にはサイドローブ特性は存在しないことが望まれ、それが実際の適用時に音源のない領域に音源があるかのようなゴーストを発生する要因となる。現実的な対応策として、メインローブと相対レベル差が大きくなるように、マイクロホンアレイ設計方針として最大サイドローブレベル(ダイナミックレンジ)が対象周波数範囲において低くなるように設計する技術が知られており⁽⁸⁾、本手法においても適用した。

3. 探査技術開発の目標設定

車外騒音の音源解析手法には前述したように様々なものが試みられているが、試験及び解析に多くの時間と労力を要するものが多く、この課題を解決する実用的な音源探査技術としてビームフォーミングを用いた手法の適用を試みた。

本技術を適用するにあたって実際の車両開発での実用性を考慮して以下の目標を設定した。

- (1) 音源探査の精度として 1 kHz の音源に対して 25cm 以内であること。
- (2) 上記を実現するために、少なくとも 50cm 離れた二つの 1 kHz 音源を分離して探査が可能であること。
- (3) 車両全体をワンショット計測(一回の計測)にて探査が可能であること。
- (4) 計測から探査結果の出力まで 30 分以内であること。
- (5) 探査結果のダイナミックレンジを解析対象周波数の 400Hz から 2.5 kHz まで 10dB 以上確保すること。

以上の目標を設定し検討を実施した。

4. マイクロホンアレイの検討

次に、車両全体に対して音源探査解析を実施するためのマイクロホンアレイについて直径、配置、形状、及びマイクロホン数の検討をおこなった。アレイの直径、及び音源に対する配置については、解析下限周波数(400Hz)、全長 5m の車両全体をカバーするための測定エリア確保、及び空間分解能から決定した。さらに、アレイ形状、及びマイクロホン数については、測定環境での床面完全反射性を利用し、アレイ形状を半円形状(ハーフホイールアレイ形状)とし実質的にマイクロホン数を半分に抑制、その上で空間情報を確保する観点とシステム構成上から 42ch とした。決定したマイクロホンアレイの主要な仕様を以下に、Fig. 3 に上記検討結果によるビームフォーミングアレイの概要図を示す。

- (1)アレイの直径、及び形状:直径 3m の半円形状(ハーフホイール形状)
- (2)マイクロホン数: 42ch
- (3)アレイと音源間の距離: 4m

5. ハーフホイールアレイ特性の検証

前章で示したマイクロホンアレイの性能を確認するため、その主要性能である分解能と最大サイドローブ特性によって決まるダイナミックレンジの二項目について計算をおこなった。

5.1. 音源の分離性能

ハーフホイールアレイの基本性能はその指向特性によって決定される。したがって指向特性によって、2 音源がどの程度までに分離可能であるかをシミュレーションによって検討した。

目標である 0.5m 間隔に配置された 2 個の 1 kHz 音源の分離性能を、このアレイで解析した場合の音源分布計算結果によって検討した。その計算結果をコンター図で Fig. 4 に示す。この結果から微小であるが 2 音源の位置が分離されて表示可能であることがわかる。

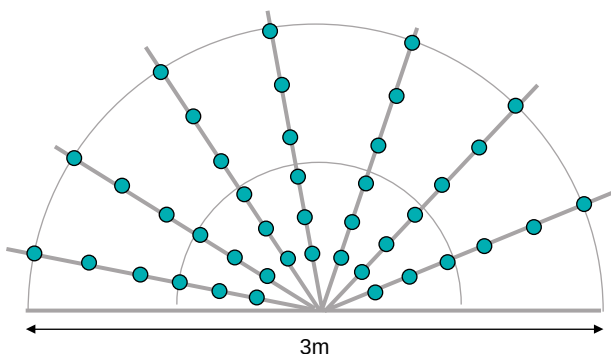


Fig. 3 Typical half-wheel array (42 microphones)

5.2. 最大サイドローブ特性

すでに 2 章で述べたように、マイクロホンアレイの空間配置が指向特性を決定する。指向特性は主軸に対する主ローブが鋭いビームとなり、結果として軸外方向におけるサイドローブの感度が十分に(10dB以上)に抑制されていることが望まれる。サイドローブの抑制が不十分であると音源分布図にゴースト像が発生するため、実用上主要な音源位置を正確に把握することが困難になる。マイクロホンアレイの各マイクロホンの位置は波長に依存して影響を受けるため、メインローブから最大サイドローブまでのレベル差(ダイナミックレンジ)は周波数の関数によって表現されることになる。ハーフホイールアレイのダイナミックレンジを Fig. 5 に示す。この結果から、目標である 400Hz から 2.5 kHz まで 10dB のダイナミックレンジ確保を実現できていることがわかる。

6. スピーカ模擬音源による本手法の測定精度

これまで検討してきた、42chマイクロホンアレイの実際の装置を使ってスピーカ模擬音源による基本性能検証を実施した。

6.1. 1 音源における音源探査精度

実音源位置に対する推定音源位置の誤差を検討するために、スピーカ模擬音源位置に対するビームフォーミングで

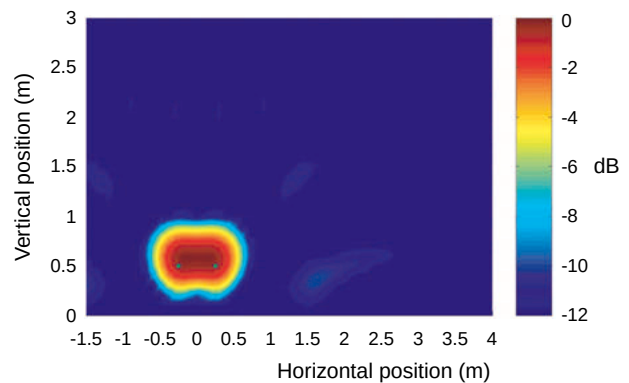


Fig. 4 Result of simulation (42 microphones)

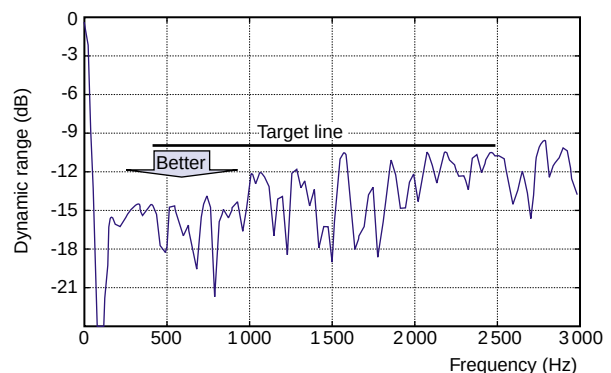


Fig. 5 Maximum side lobe response (42 microphones)

の音源探査による推定位置の誤差を調べる。代表的な結果を Fig. 6 に示す。音源は半無響室の床面から 5 cm の高さに配置し、音源信号は定常 1 kHz ピンクノイズ、音源とマイクロホンアレイ間距離は 4 m で実施している。音源探査結果を 1/3 オクターブバンド、中心周波数 1 kHz での等高線図で示す。計算対象領域は横 5 m × 縦 2.5 m である。この結果から、目標性能である音源位置精度 25 cm を達成できていることが確認できた。また、等高線図は最大値から 10 dB のレンジで表示しているが、音源位置以外のゴースト発生はなく、探査結果のダイナミックレンジが 10 dB 確保されていることが確認できた。

6.2. 2 音源における分離性能

次に、2 音源の分離性能を検証するために、50 cm 間隔で配置された二つのスピーカ模擬音源から放射される音源 (1 kHz 無相関ピンクノイズ信号) をビームフォーミングによって測定した。音源とマイクロホンアレイ間距離は 4 m で実施している。その音源探査結果を 1/3 オクターブバンド、中心周波数 1 kHz での等高線図で Fig. 7 に示す。この結果から目標性能である 50 cm 離れた二つの 1 kHz 音源を分離して探査が可能であることがわかった。

6.3. 過渡現象における性能確認

実際の車両に対する音源探査解析においては、車両が加速運転中の任意エンジン回転数における探査を実施する必要がある。そのため、音源探査解析を過渡現象に対して適用する

必要があり、定常現象の解析結果に対する差異が課題となる。そこで、定常信号と過渡信号の二種の模擬音源スピーカに対する探査結果比較を実施し、その差異を検討した。

定常信号、2 音源に対する探査結果を 1/3 オクターブバンド、中心周波数 1 kHz での等高線図で表したものを Fig. 8 に示す。二個の音源信号は定常 1 kHz 無相関ピンクノイズ、音源とマイクロホンアレイ間距離は 2 m で実施している。

一方、過渡信号、2 音源に対する探査結果を 1/3 オクターブバンド、中心周波数 1 kHz での等高線図で表したものを Fig. 9 に示す。音源信号は、車両の加速運転時における発生騒音周波数の上昇率を上回るように、100 Hz から 5.1 kHz までも 5 秒間で上昇させたものであり、探査解析はその中での 1 kHz 過渡信号に対して実施している。また、音源とマイクロホンアレイ間距離、及びスピーカ模擬音源の配置は定常信号解析の時と同等である。これら Fig. 8, 9 より、過渡現象に対する結果は定常現象における結果と同様の結果が得られ、本解析が過渡現象においても有効であることが確認できた。

7. 台上車両試験における適用

本研究にて提案する探査システムを実際の車両に対して適用した事例を示す。

1.5L 直列 4 気筒エンジンのオートマチックミッションを搭載した車両を用いた。

車両は半無響室内のシャシダイナモ上に配置され実走行

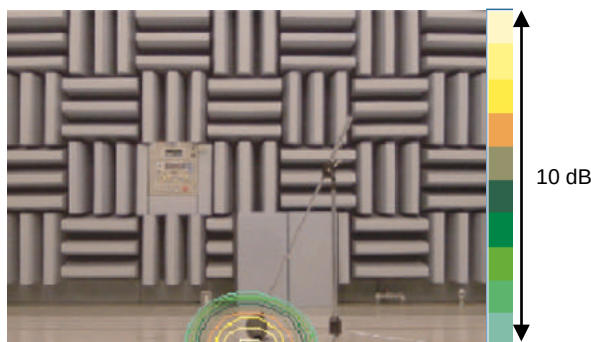


Fig. 6 Result of single source test (loudspeaker, 1 kHz)

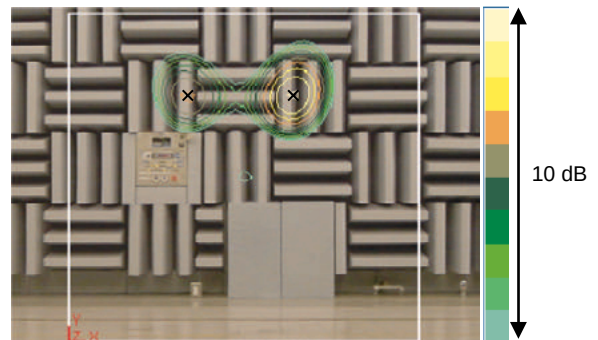


Fig. 8 Result of stationary tone test (x: Noise source)

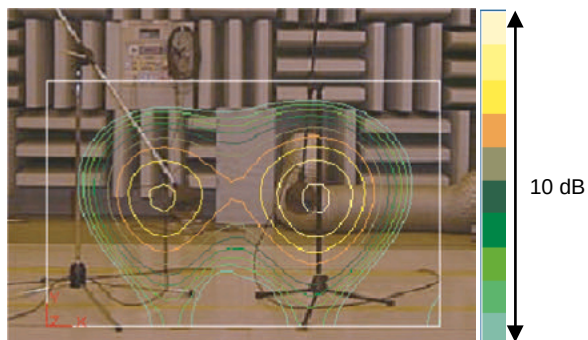


Fig. 7 Result of two-source test (loudspeaker, 1 kHz)

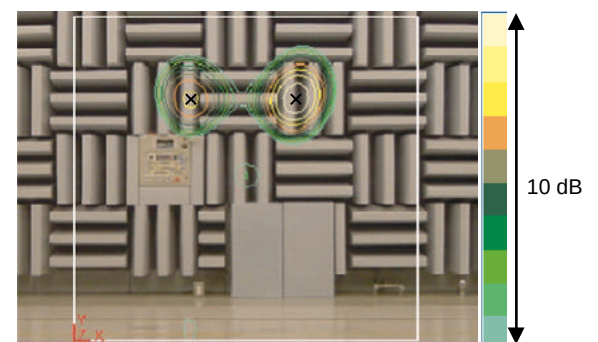


Fig. 9 Result of sweep tone test (x: Noise source)

状態を模擬した走行抵抗制御運転によりダイナモを稼動した。探査用マイクロホンアレイは車両全体を一度で計測するために、車両の外側から4 mの位置に配置し、同時に遠音場を評価点としたマイクロホンを車両の中心から7.5m、高さ1.2mの位置とした(Fig. 10)。エンジン回転数をセンサーにより採集しマイクロホン信号と同時に解析装置に収録した。

車両は、ISO362加速試験のモード走行と同様にドライブレンジにて50km/h一定走行状態から全開加速を実施し、約1.5秒間の計測エリア相当(20m + 全長)を走行している間の時間信号収録をおこなった。

音源探査解析及び評価点の分析は収録された時間信号の中で加速走行騒音の最大値を示すエンジン回転数(3600rpm)において実行した。

Fig. 11にオリジナル車両での評価点における周波数分析結果を示す。各周波数成分の中で特にレベルが高いものは1184 Hzであり、この周波数に着目することとした。同時に計測をおこなったマイクロホンアレイ信号から1184 Hzにおける音源探査解析を実施したものをFig. 12に示す。この結果から、主な音源としてはフロントタイヤの後方から放出されているものであることがわかる。

この探査結果にもとづいて、当該音源に対する対処として遮音板をフロントタイヤ後方に配置した状態で同様の運転をおこない、収録をおこなった。このとき音源探査解析結果を同様の周波数で実施したものをFig. 13に示す。オリジナル状態に対して、主たる音源部位からの放射が弱められていることがわかる。また同時に計測した評価点にお

ける周波数分析結果をオリジナル状態と比較したものをFig. 14に示す。着目した周波数1184 Hzにおいて約12dBの低減が確認できた。

次に車両の状態を変えて排気管後部から排気放射音を発生させた状態において同様の運転を行い騒音の収録を実施した。その時の評価点での周波数分析結果をFig. 15に示すが、1760 Hz及び1880 Hzにおいて周波数成分が突出していることがわかり、これを着目周波数とした。この周波数での音源探査結果をFig. 16に示すが、排気放射音を発生させた部位からの音源放射がよくわかるものといえる。

この排気放射音の発生を除去した状態での音源探査結果と評価点スペクトルを排気放射音発生時と比較したものをそれぞれFig. 17, 18に示すが、探査結果の変化と評価点の変化に相関が得られるものであった。以上、車両に対して探査解析を適用した結果、評価点の音圧レベルを低減する上で探査結果が有効であることがわかった。また、これら計測から音源探査解析まで一連の作業に要する時間は、目標とする30分を下回ることを確認できた。



Fig. 12 Result of beamforming analysis

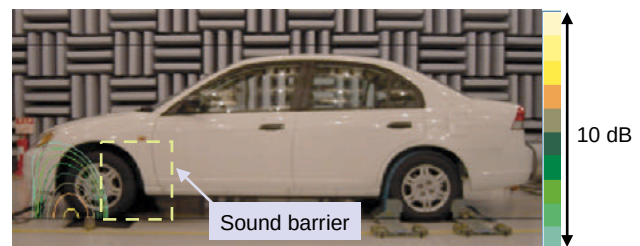


Fig. 13 Result of beamforming analysis (with sound barrier)

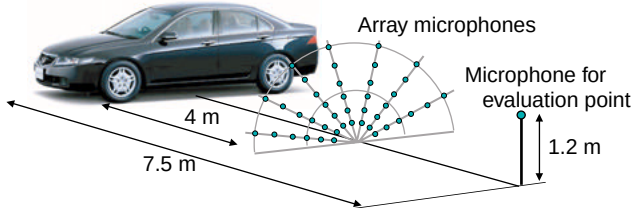


Fig.10 Measurement condition

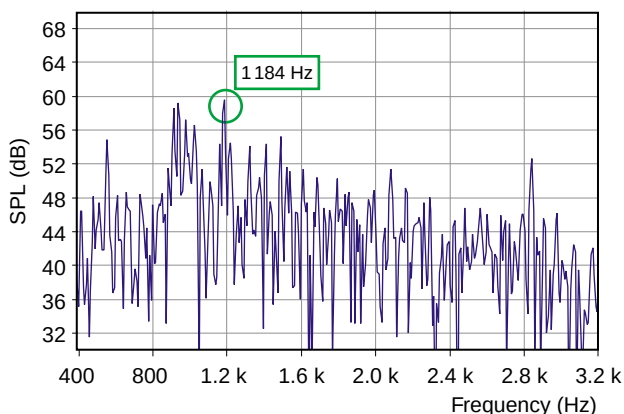


Fig. 11 Sound pressure spectrum at evaluation point

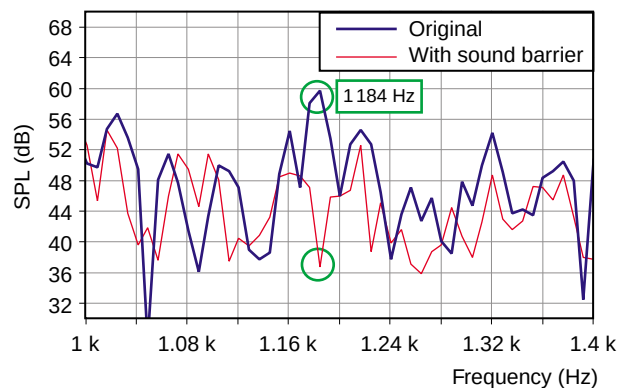


Fig. 14 Sound pressure spectra at evaluation point

8. まとめ

車外加速騒音の台上解析の一手法としてビームフォーミング法音源探査の適用結果を報告した。その中で車外騒音解析に適したマイクロホンアレイを検討し、その手法を用

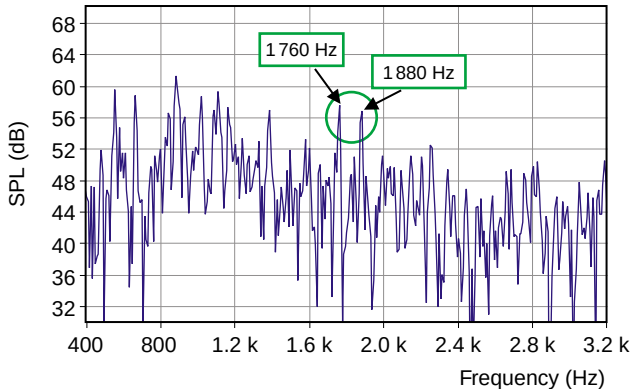


Fig. 15 Sound pressure spectrum at evaluation point

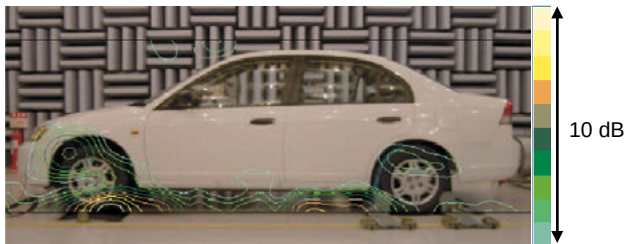


Fig. 16 Result of beamforming analysis (with exhaust noise radiation)



Fig. 17 Result of beamforming (without exhaust noise radiation)

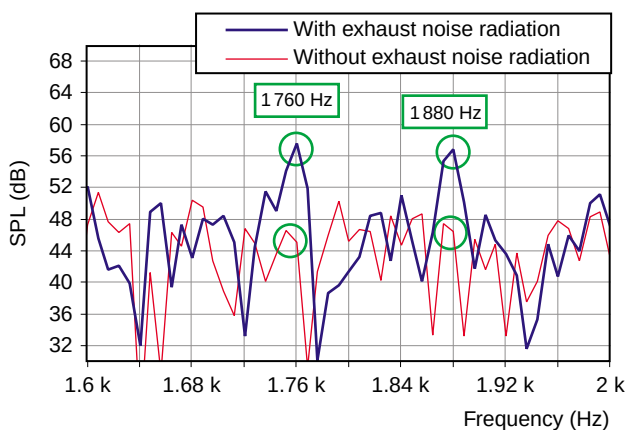


Fig. 18 Sound pressure spectra at evaluation point

いてスピーカ模擬音源と台上車両両方での音源探査を試みた。その結果、

- (1) 目標として設定した探査精度、ワンショット計測、解析時間、及びダイナミックレンジを達成できる、マイクロホンアレイを含めた音源探査装置を実現できた。
- (2) 本装置を車外騒音の音源解析に適用した結果、騒音を低減する上で有効な手法であることが確認できた。

謝 辞

本研究を推進するにあたり、ご協力を頂きました B&K ジャパン(スペクトリス(株)ブリュエル・ケア事業部)、B&K 社の方々に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 沢井ほか：自動車騒音の音源別寄与率の計測法について、自動車技術 Vol.35, No.12, p.1428-1432(1981)
- (2) 柏木ほか：マイクロホンアレイを用いた台上騒音計測システムの開発、自動車技術会学術講演会前刷集 No. 936, p.281-284(1993)
- (3) 坂本ほか：音響ホログラフィを用いた自動車の走行中における騒音源探索について、自動車技術会学術講演会前刷集 No. 953, p.145-148(1995)
- (4) A. R. Fleszar: "Combining Vehicle and Test-Bed Diagnosis Information to Guide Vehicle Development for Pass-By Noise", SAE 2001-01-1565(2001)
- (5) R. W. Stoker, et al.: "Investigations of Airframe Noise in Pressurized Wind Tunnels", AIAA/CEAS 2001- 2107 (2001)
- (6) 高野：高速車両の音源を可視化する、日本機械学会誌 Vol.99, No.931, p.433-436(1996)
- (7) Y. Takano: "Development of Visualization System for High-Speed Noise Source with a Microphon Array and a Visual Sensor", Inter Noise2003 Seogwipo, Korea, August 25-28(2003)
- (8) Hald J: "A class of optimal broadband phased array geometries designed for easy construction", InterNoise2002 Dearborn, MI, USA. August 19-21(2002)

■ 著 者 ■



半沢 幸彦



北原 純



西村 伸一