

気流中における空力騒音測定手法について

A Method of Measuring Automobile Aerodynamic Noise in Wind Flow

小 峰 徳 雄*

Tokuo Komine

土 屋 雅 輝*

Masaki Tsuchiya

山 下 剛*

Tsuyoshi Yamashita

中 村 光 勇*

Mitsuo Nakamura

要 旨

高速走行時の車室内騒音の大半を占める空力騒音の低減が強く求められる中で、その音源探査の一手法である気流中での空力騒音測定については、気流中に配したマイクロホン自身が発生する風切り音や風洞の暗騒音などの影響により精度の高い測定が困難であった。

今回、車体から発生する空力騒音の気流中における音源探査のひとつの試みとして、近距離音場音響ホログラフィを応用した測定方法について検討し、マイクロホン自身の風切り音、風洞の暗騒音を除去した精度の高い測定を可能とした。

本稿では、スピーカを用いた本手法の測定精度検証結果および実車適用例について報告する。

ABSTRACT

A method of accurately measuring automobile aerodynamic noise using a microphone in wind flow has been fairly difficult to date, because of disturbances such as microphone self-generated wind noise and background noise in a wind tunnel.

Taking this into consideration, a method of measuring aerodynamic noise using near-field acoustic holography was investigated to improve measurement accuracy. This report presents the result of checking the validity of this method using speakers and the application of this method for automobile aerodynamic noise measurement.

1. ま え が き

車室内騒音は、一般にエンジン騒音、ロードノイズおよび空力騒音に大別される。近年、エンジン騒音に関しては、乗員の快適性確保の観点から、その音質の改善を含めた騒音低減手法の研究が数多くなされ、大幅に向上されてきた。

一方、空力騒音については、高速走行時の車室内騒音に占める割合がエンジン騒音の低減にともない大きくなり、その改善が強く求められている。また高速道路周辺の環境騒音を含め、車外における空力騒音も決して無視できないものとなってきた。しかし、空力騒音研究において重要な測定技術の一つである気流中での空力騒音測定においては、気流中に配したマイクロホン自身が発生する風切り音の影響や測定に用いる風洞の暗騒音の影響などによって、騒音源の同定を含めた精度の高い測定が

困難であった。

一般に気流が存在しない状況下での騒音源探査には、これまで音響インテンシティ法が用いられ多くの成果をあげてきた。これに対して最近、クロススペクトル測定による近距離音場音響ホログラフィ法が提案され、エンジンの騒音源探査および遠距離音場の音圧予測に用いた例が報告されている。

本稿では、気流中におかれた車両から発生する空力騒音の音源探査のひとつの試みとして、この近距離音場における音響ホログラフィ法を応用し、気流中での騒音源探査に対する可能性について検討したので、その内容を報告する。

* 栃木研究所

2. 本手法の原理

2.1. 基本原理

本手法は、Fig. 1 に示すように、音源近傍に設定された測定平面上の各格子点間の音圧クロススペクトル G_{ij} を測定し、得られたクロススペクトルマトリクスから近距離音場音響ホログラフィを利用して、音源近傍の音場における音圧、音響インテンシティ分布を計算する方法である。

近距離音場音響ホログラフィは、Fig. 2 に示すように、測定平面上 ($z = 0$) で得られる音場の情報、すなわち空間分布をフーリエ変換により空間周波数領域に変換し、 z 軸 (測定平面に対する法線方向) 上を $z = z'$ まで移動したのち、逆フーリエ変換して音源近接の音場を再構成する手法である。

Fig. 3 に、空間領域と空間周波数領域の関係を示す。空間領域上での平面波、エバネセント波は、空間周波数領域上では放射円の内側、外側に位置づけられる。エバネセント波は空間的に周波数が高い、すなわち高分解能の情報を持っているため、近距離音場音響ホログラフィは優れた音源探査分解能を有するという特長がある。さらに、得られたクロススペクトルマトリクスから、ヘルムホルツの積分方程式を用いて遠距離音場における音圧分布を計算することも可能である。

2.2. クロススペクトルの測定方法

測定平面上における各格子点間のクロススペクトルマトリクス G_{ij} を得るためには、通常、2次元アレイマイクロホンを用いた測定が必要であり、その測定に膨大な

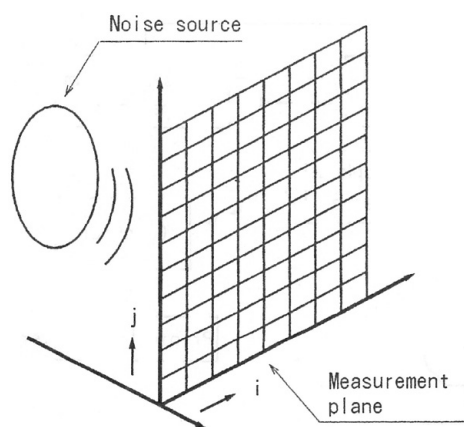


Fig. 1 Noise Source and Measurement Plane

時間を費やすことになる。例えば、アレイマイクロホンの1方向の数を n とすれば n^4 回のクロススペクトル測定が必要になる。

これに対し本手法では、Fig. 4 に示すように、音源の近くに複数設置された基準マイクロホンとマイクロホン移動装置により測定平面 (スキャン平面) 上を移動する1次元のアレイマイクロホン間のクロススペクトルを測定し、それらを合成することによって各格子点間のクロススペクトルマトリクスを計算する方法を用いた。この場合、基準マイクロホンの数を q 、アレイマイクロホンの1方向の数を n とすれば、クロススペクトルの測定回数は $q \cdot n^2$ となり、大幅な測定時間の短縮が図れる。

2.3. マイクロホン風切り音の除去

従来、気流中に設置されたマイクロホンを用いて車体表面から発生する空力騒音を測定する場合、測定に用いられるマイクロホン自身の風切り音がノイズとなり、マイクロホン風防を用いても精度の高い測定が困難であった。

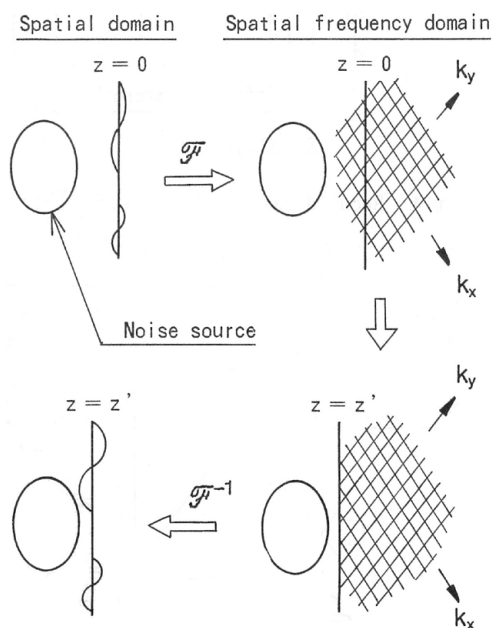


Fig. 2 Principle of Near-field Acoustic Holography

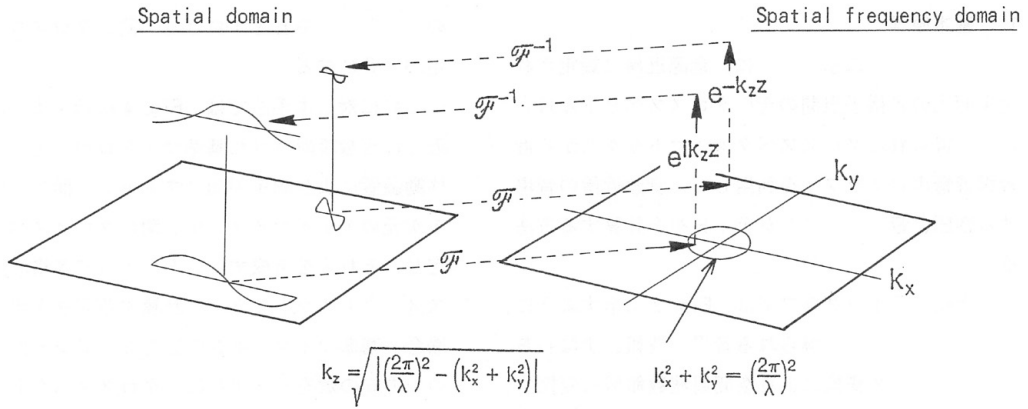


Fig. 3 Relationship of Spatial Domain and Spatial Frequency Domain

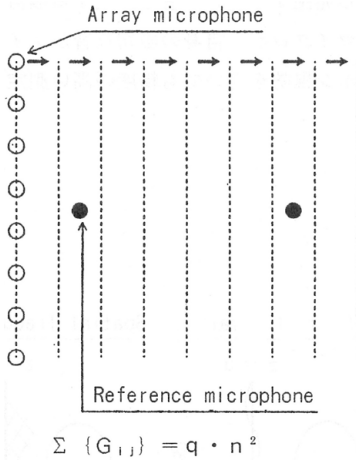


Fig. 4 Reduced Measurement of Cross-spectrum

本手法での近距離音場音響ホログラフィがクロススペクトル測定を用いていることに着目すれば、クロススペクトル測定時の平均化によってマイクロホン自身の風切り音を除去することが可能であると考えられる。以下に、その方法を述べる。

気流中に置かれた基準マイクロホンおよびアレイマイクロホンで測定される騒音 P_R 、 P_A は、車体から発生する空力騒音をそれぞれ P_{RW} 、 P_{AW} 、マイクロホン自身の風切り音を P_{RM} 、 P_{AM} 、風洞の暗騒音を P_{RB} 、 P_{AB} とおけば、

$$P_R = P_{RW} + P_{RM} + P_{RB} \quad (1)$$

$$P_A = P_{AW} + P_{AM} + P_{AB} \quad (2)$$

で表される。

近距離音場音響ホログラフィの計算に用いられるクロ

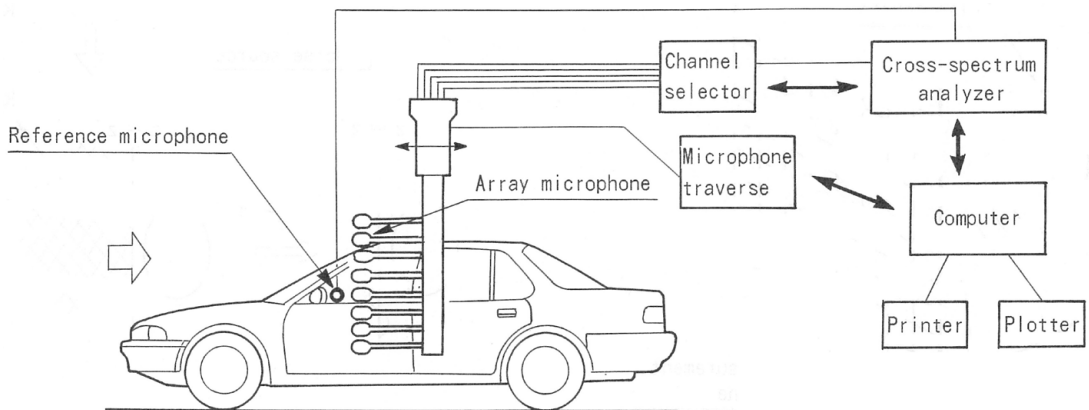


Fig. 5 Configuration of Measurement System

スペクトル G_{RA} は、 P_R と P_A のクロススペクトルであり、式 (1)、(2) より次式で表される。

$$G_{RA} = P_R * P_A$$

$$= P_{RW} * P_{AW} + P_{RW} * P_{AM} + P_{RW} * P_{AB}$$

$$+ P_{RM} * P_{AW} + P_{RM} * P_{AM} + P_{RM} * P_{AB}$$

$$+ P_{RB} * P_{AW} + P_{RB} * P_{AM} + P_{RB} * P_{AB} \quad (3)$$

ここで、* は相互のクロススペクトルを表す。

式 (3) の右辺 9 項のうち、本来測定したい信号は車体から発生する空力騒音すなわち第 1 項のみであり、他はマイクロホン自身の風切り音、風洞の暗騒音を含むノイズ項である。これらノイズ項のうち、式 (3) の下線部で表される各騒音相互のクロススペクトルは、車体から発生する空力騒音、マイクロホン自身の風切り音、風洞の暗騒音が互いに無相関であることから、測定時の平均化により 0 に近づき除去される。第 9 項の P_{RB} 、 P_{AB} は風洞の暗騒音であり、互いに相関がある成分であるが、基準マイクロホンを音源近くに設定する、あるいは十分に騒音レベルが低い風洞内で測定することにより風洞の暗騒音の影響を小さくすることができ、この項を無視できる。

したがって、式 (3) の G_{RA} は、車体から発生する空力騒音のみとなり、最終的に次式で表される。

$$G_{RA} = P_{RW} * P_{AW} \quad (4)$$

また、基準マイクロホンを車室内の乗員耳位置に設置した場合、クロススペクトル測定により基準信号と相関のある成分のみ抽出することができ、乗員に対し寄与の高い音源の分布を容易に測定することが可能となる。同時に、 P_{RM} が 0 となり、さらに測定精度を高めることができる。

3. 測定システム

3.1. システム構成

本手法の測定システムを Fig. 5 に示す。低騒音実車風洞内に置かれた供試車の車室内または車室外に設置された数個の基準マイクロホン、および車両側面をマイクロホン移動装置によって移動される小型風防付きアレイマイクロホンを用いて、音圧を測定する。基準マイクロホン信号は直接、またアレイマイクロホン信号はチャンネルセクタを経由して、クロススペクトル分析器にそれ

ぞれ入力される。

クロススペクトル分析器、マイクロホン移動装置、チャンネルセクタはコンピュータによりコントロールされており、アレイマイクロホンを測定面全体にわたって移動させながら、すべての格子点で基準マイクロホンとアレイマイクロホン間のクロススペクトルを測定する。

測定されたクロススペクトルマトリクスから、近距離音場音響ホログラフィを用いて車体表面近傍の音圧分布、音響インテンシティ分布、放射音響パワー等を計算する。

3.2. 低騒音実車風洞

2 章 3 節で述べたように、本手法の測定精度を高める

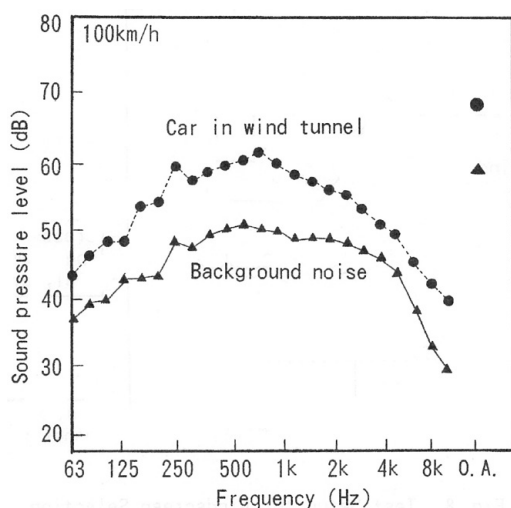


Fig. 6 Background Noise Level in Wind Tunnel

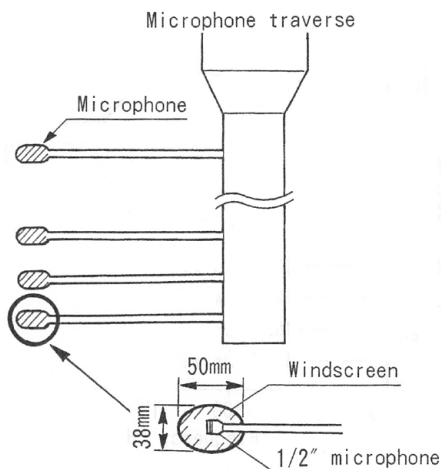


Fig. 7 Microphone Traverse and Windscreen

ためには、基準マイクロホンおよびアレイマイクロホンで測定される信号に対する風洞暗騒音の影響を極力小さくする必要がある。そこで本報告での測定は、当社の低騒音実車風洞を用いて行った。本風洞は、3/4 オープン型の測定部を有する単回流型で、風路の全壁面、コーナーペーン等に吸音材を適用し、さらに計測部の側面、天井にくさび型の吸音材を配することによって、大幅な低騒音化を図っている。

Fig. 6 に、風速 100km/h における風洞の暗騒音および気流内に小型乗用車を設置したときの外郭騒音の周波数分析結果を示す。測定点は、気流の中心から側方

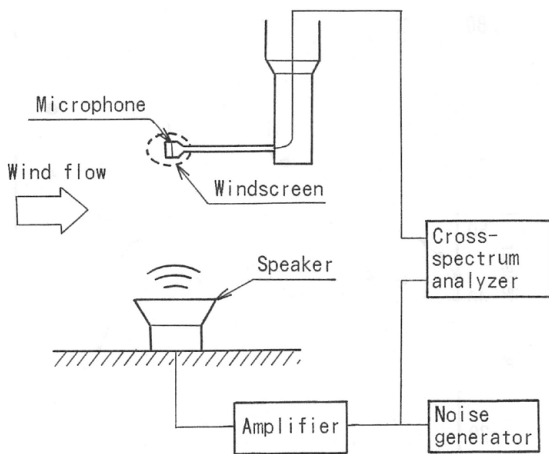
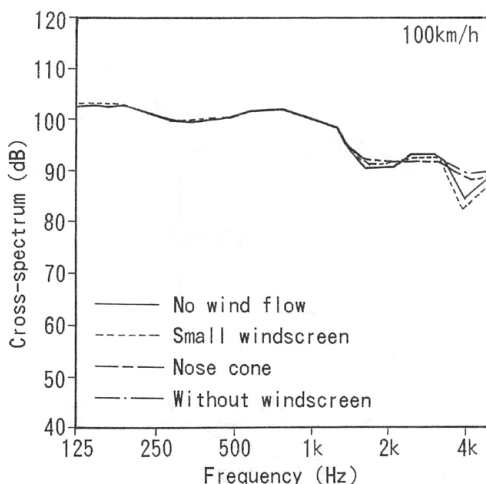


Fig. 8 Test Setup for Windscreen Selection



(a) Steady State Wind Flow

5.5m、高さ 1.2m の気流外である。

この結果より風洞の暗騒音は車体から発生する空力騒音に比べて十分小さく、この風洞内で測定することにより基準マイクロホンおよびアレイマイクロホンで観測される騒音信号におよぼす風洞暗騒音の影響を十分に抑えることができると考えられる。

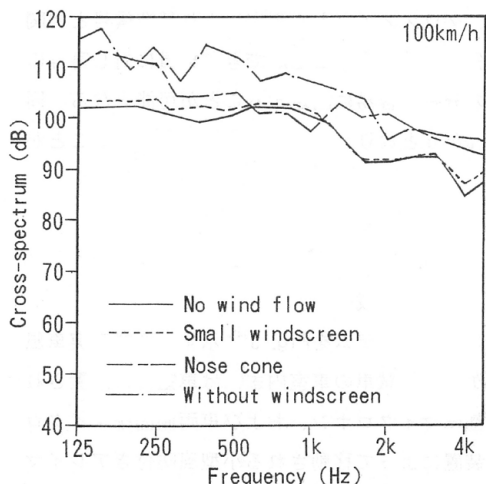
3.3. マイクロホン支持方法と風防

気流中において、マイクロホンを用いて騒音を測定する場合、マイクロホン支持装置からの音の発生をおさえること、およびマイクロホン自身の風切り音を除去できる適切な風防を用いることが重要である。

Fig. 7 に、本手法で用いたアレイマイクロホンの支持方法および風防を示す。マイクロホン移動装置およびマイクロホン固定用の支柱には、測定系による流れの乱れを極力おさえるため翼型支柱を用いた。また、この支柱から長さ 450mm、直径 10mm のパイプを延ばし、その先端に 1/2 インチのコンデンサマイクロホンを取りつけ、支柱から発生する風切り音の影響もおさえた。

また、マイクロホン自身の風切り音を除去するための風防には、流れを乱しにくい楕円形状のウレタン製ウィンドスクリーンを採用した。以下に、この小型ウィンドスクリーンの風防効果について検討した結果を述べる。

Fig. 8 に示すように、車体から発生する空力騒音と同等レベルのピンクノイズを気流中に配したスピーカから



(b) Turbulent Wind Flow

Fig. 9 Test Results of Windscreen Selection

発生し、マイクロホンにより測定される音圧信号とスピーカに入力する電気信号とのクロススペクトルを測定した。測定したクロススペクトルが、気流がない場合に得られたクロススペクトルと一致すれば、マイクロホン風防の効果が十分にあると考えられる。ここでは、小型ウインドスクリーン、ノーズコーン、風防無しの3種類について比較した。

その結果を Fig. 9 に示す。まずマイクロホンの上流にドアミラーなどの障害物がなく流れが乱れていない場合、測定されたクロススペクトルは気流がない場合の結果と良く一致し、風防の有無による差はほとんどない。一方、上流に障害物があり流れが乱れている場合には、風防無しとノーズコーンを用いた測定結果は気流がない場合の結果と一致せず、小型のウインドスクリーンを適用したときのみ気流がない場合の結果と一致する。よって、本実験で採用した小型のウインドスクリーンを用いることにより精度の高いクロススペクトルの測定が可能であることがわかる。

4. スピーカを用いた精度検証

本手法を用いて測定した音源の音響パワー、音源位置の妥当性を検証するにあたって、気流中に置かれた物体から発生する空力騒音を用いることは、その騒音の音源位置、音響パワーが不明確なため困難である。そこで、音源の特性が予め明確になっているスピーカ音源を用い、その音場の様子を気流のある状態とない状態で比較検討することによって、気流中での音源探査の可能性および測定精度を検証した。前述したように、気流中のアレイマイクロホンで測定される信号は、基準信号と相関のあるスピーカからの音とマイクロホン自身の風切り音、風洞の暗騒音を含む外乱ノイズの和である。本手法を用いることにより、これらのノイズ項を除去して音源として設定したスピーカから放射される音の音源探査が可能か否かについて検討するために、気流中に複数の騒音源が存在する下記の条件を想定し騒音源の同定精度を確認した。

- (1) 騒音源が互いに相関のある場合
- (2) 騒音源が互いに無相関の場合
- (3) 騒音源以外の外乱ノイズが存在する場合

4.1. 計測方法

音源としては、Fig. 10 に示すように、気流方向と平行

に配置された2つのスピーカを用い、放射される騒音レベルは車体から発生する空力騒音とほぼ同等に設定した。基準信号には発振器から出力される電気信号を用い、騒音源と十分相関の高い信号とした。56 mm 間隔の8個のマイクロホンから構成されるアレイマイクロホンをマイクロホン移動装置により流れ方向に 56 mm 間隔で移動させ測定した。スキャン平面は、スピーカ表面から 100 mm である。また、床面による音の反射の影響を除くため、スピーカ中心から床面までの距離は十分に確保した。

4.2. 実験結果

(1) 騒音源が互いに相関のある場合 発振器から同一の信号を2つのスピーカに加え、この信号を基準信号として、スピーカまわりの音場を測定した。Fig. 11 に、スピーカ面における音響インテンシティの等高線図および3次元分布図を示す。スピーカから放射されている音響インテンシティ分布は、気流のある場合とない場合で良く一致している。また音源の位置についても精度良く同定しており、気流中においても十分に音源探査が可能であることがわかる。さらに、スピーカ中心部の音響インテンシティレベルは、気流のある場合とない場合で、 ± 1 dB 以内で良く一致しており、気流中でも十分精度の高い測定が可能であることがわかる。

(2) 騒音源が互いに無相関の場合 発振器を1つ追加した構成で、2つのスピーカより放射される互いに無相関な音を用いて、無相関な複数の音源が存在している場合について騒音源の同定が可能か否かを検討した。基準信号には、それぞれのスピーカに入力される2つの電

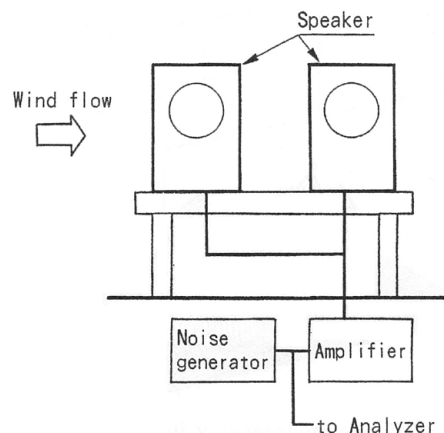


Fig. 10 Speaker Test Setup

気信号を用いた。Fig. 12 に、測定された音響インテンシティの3次元分布図を示す。この結果より基準信号と相関のあるそれぞれのスピーカの音が測定されており、基準信号を適切に選定すれば無相関な複数の音源の同定も可能であることがわかる。

(3) 騒音源以外に外乱ノイズが存在する場合 2つのスピーカに入力される電気信号の1つを基準信号とし、別のスピーカを外乱ノイズと想定した場合、この音源を

同定できるか否かを検討した。Fig. 13 に、測定された音響インテンシティの3次元分布図を示す。この結果より、2つのスピーカから音が放射されている状態にもかかわらず、基準信号と相関のあるスピーカからの音のみが測定されていることがわかる。

以上の結果より気流中においても基準信号として、騒音源と十分相関の高い信号を用いれば、音源が複数存在しても十分その音源探査が可能であることがわかった。

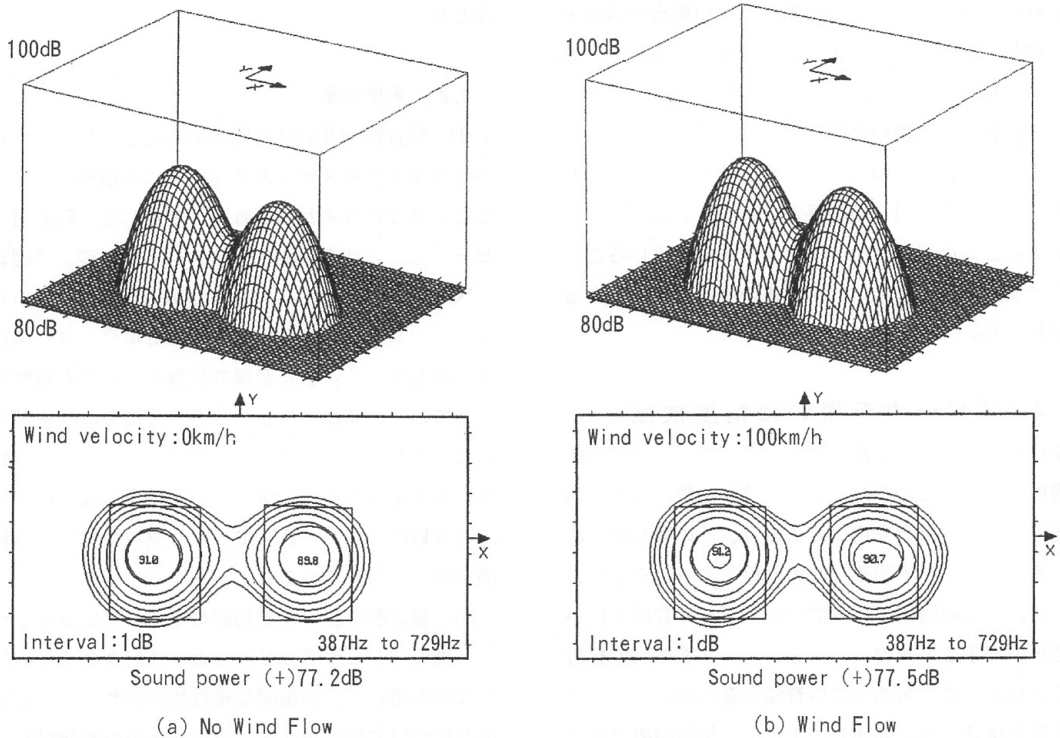


Fig. 11 Sound Intensity Distribution

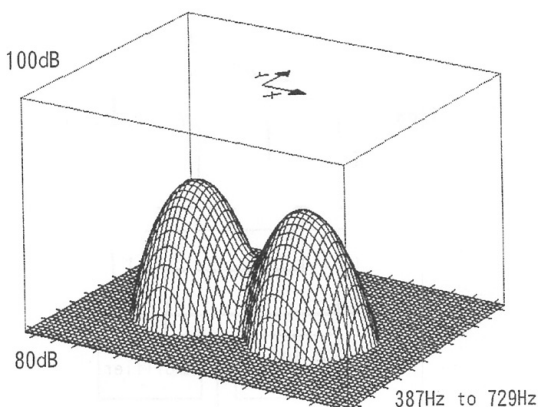


Fig. 12 Sound Intensity Distribution (Two References)

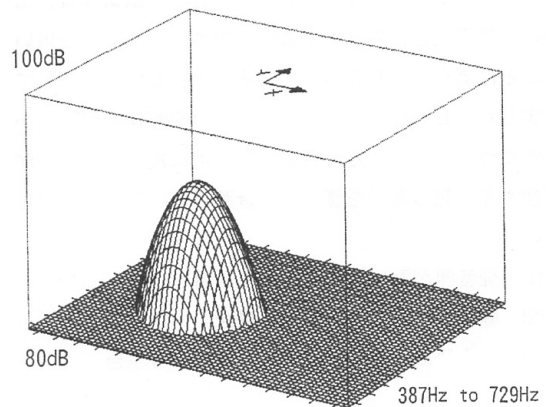


Fig. 13 Sound Intensity Distribution (One Reference)

5. 実車適用結果

以上のように気流中においても騒音源の同定が可能であることから、本手法を車両実験に適用し車体表面の空力騒音分布について検討したので、その結果について述べる。

5.1. 測定方法

車体まわりの音圧レベル分布を明らかにするため、次のような実験を行った。供試車を実車風洞計測エリア中央に配置し、車両側面に沿ってアレイマイクロホンを移動し、クロススペクトルを測定した。サイドウインド中心から測定面までの距離は 250 mm である。この際、112 mm 間隔の 8 個のマイクロホンから構成されるアレイマイクロホンを、車両先端から終端まで流れ方向に 2 段にわたって移動し、車両側面全体を測定した。基準信号には、乗員の窓側の耳位置（ガラス面より 100 mm）に設置したマイクロホンにて測定される音圧信号を用い、乗員窓側耳位置の音圧と相関のある車体まわりの音源探

査を行った。

音響ホログラフィの計算では、測定面と床面の距離が比較的近いため床面からの反射音の影響を考慮した。

5.2. 測定結果

中周波領域（200 Hz～500 Hz）と高周波領域（500 Hz～1 kHz）における車体表面の音圧分布を Fig. 14(a)、(b) に示す。中周波領域においては、ドアミラー後流のサイドウインド中心付近と前輪後方の音圧レベルが比較的高く、他の部位は音圧レベルが低い。高周波領域の音圧分布は中周波領域の音圧分布に比べて、車両表面全体にわたって比較的均一であることがわかる。また高周波領域の音圧レベル分布の最大値と中周波領域での最大値を比べると高周波領域の音圧レベルは約 10 dB 低いことがわかる。

本測定では基準マイクロホンを前席乗員窓側耳位置に設置していることから、乗員に最も影響を及ぼす空力騒音の音源も同様の部位であると判断される。

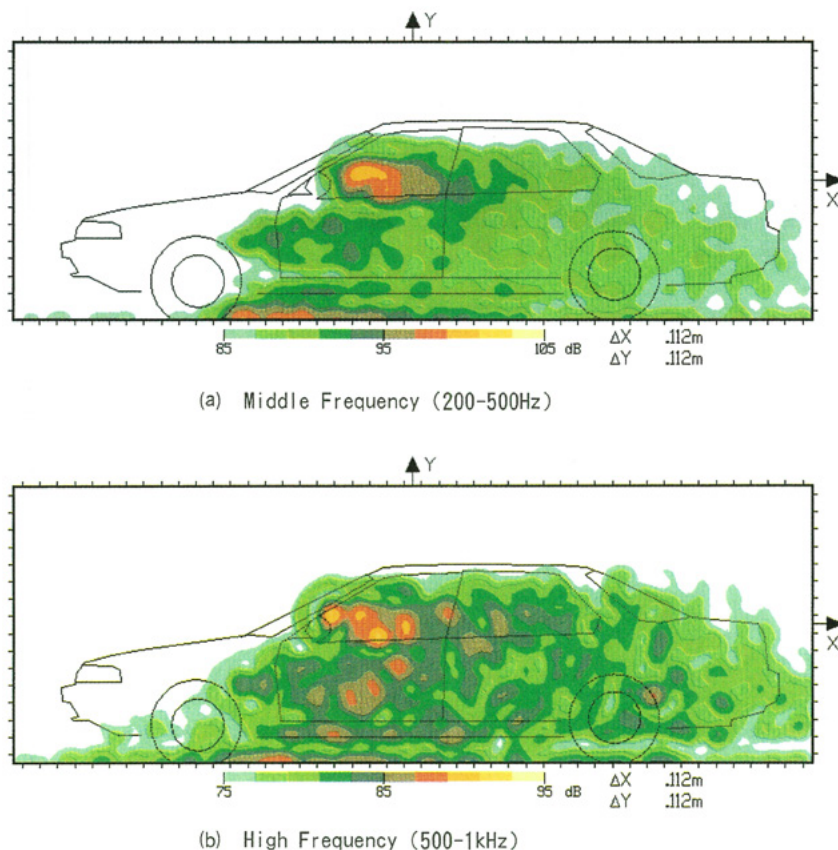


Fig. 14 Outside Sound Pressure Distribution in Wind Tunnel

6. ま と め

車体から発生する空力騒音の気流中における音源探索のひとつの試みとして、近距離音場音響ホログラフィ手法についてスピーカおよび実車を用いて検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 測定したい騒音に対して十分相関の高い信号を基準信号とすることにより、気流中においても、その騒音の発生源を十分に同定することができる。
- (2) また、その騒音源の音響パワーおよび近傍の音場を高い精度で測定できる。
- (3) 本手法を用いることにより、車体から発生する空力騒音の音源探索が十分に可能である。

今後、本手法に関する検討をさらに進め、車体まわりの流れと空力騒音の関係を明らかにするとともに、空力騒音低減技術の開発へと結びつけていきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) J. D. Maynard et al: Nearfield acoustic holography: Theory of generalized holography and the development of NAH, J. Acoust. Soc. Am, 78(4), p.1395-1413 (1985)
- (2) J. Hald et al: Spatial transformation of sound fields principle, instrumentation and applications, Proc. of Symposium on Acoustic Intensity, p.125-138 (1987)
- (3) 佐藤ほか: 音場の空間変換 (STSF), 電子情報通信学会技術研究報告, EA87-3 (1987)

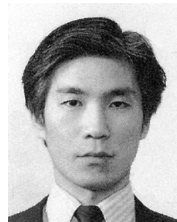
■ 著 者 ■



小 峰 徳 雄



土 屋 雅 輝



山 下 剛



中 村 光 勇