

逆マトリクス法による車外騒音の音源同定手法の研究

Research on Technique for Identification of Sound Source of Pass-by Noise
Using Inverse Matrix Method

西村 伸一*
Shinichi NISHIMURA
中川 博**
Hiroshi NAKAGAWA

半沢 幸彦*
Yukihiko HANZAWA
中島 弘史**
Hirofumi NAKAJIMA

北原 純*
Jyun KITAHARA

要 旨

車外騒音低減のためには、寄与の高い音源を同定することが重要となる。本研究では、逆マトリクス法による音源同定手法について検討した。本手法は、音源の周辺に複数の観測点を配置し、観測点の音圧と音響伝達関数から音源を同定するものである。このとき、音源同定精度は伝達関数逆行列の安定性に大きく影響される。そこで、伝達関数逆行列の安定性を示す指標を適用した。本指標を用いることにより、最適な観測点位置を判別することが可能となった。実車による検証の結果、遠音場音圧を高い精度で予測できることを確認できた。

ABSTRACT

Identifying sound sources which make a significant contribution to pass-by noise is essential in attempts to reduce it. This paper discusses a technique of identification of sound source using the inverse matrix method. In this technique, multiple observation points are established around a sound source, and the sound source is identified using sound pressure and acoustic transfer function. The stability of the inverse matrix of the acoustic transfer function has a significant effect on the accuracy of sound source identification. An index expressing the stability of the inverse matrix of the transfer was therefore devised. The use of this index has made it possible to determine optimum observation points. Actual vehicle tests have confirmed that the method is capable of predicting far-field sound pressure with a high degree of accuracy.

1. はじめに

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岐にわたる。そのため、どこからどのような音が発生しているかを把握するための要因分析が重要となってくる。

騒音源同定のために従来から使われてきた手法は、マスキング法による寄与解析⁽¹⁾がある。しかし、この手法は試験準備に多くの時間を必要とすることに加えて、詳細な部位の特定には不向きである。また、他の解析手法としては、インテンシティ法⁽²⁾、ホログラフィ法、ビームフォーミング法⁽³⁾などの音源探手法がある。これらは音場の状態を

可視化できる点で優れた手法であるが、実車搭載のエンジンのように音源がボデーなどで覆われた場合には適さない。そこで上記の手法に対し、さらに詳細な音源の寄与を解析できることを主眼とした研究がなされている^{(4), (5)}。しかしながら実際の解析適用事例は、多数とは言えない。

本研究では、音響伝達関数の逆マトリクス法による音源強度の算出手法に着目し、実験的解析法として車外騒音の音源の同定に適用できる方法を検討した。

2. 逆マトリクス法による音源同定について

2.1. 概要

車外騒音の解析としては、騒音源の強度自体を把握する

* 栃木研究所

** 日東紡音響エンジニアリング

だけではなく、車外への音響伝搬特性を把握することも重要である。Fig. 1 に示すように、車両から 7.5m 離れた遠音場評価点の音圧 P_F は、式(1)を用いて、音源位置での体積速度 Q_i と音源から遠音場評価点までの音響伝達関数 H_i の積で表すことが可能である。

$$P_F = \sum_i H_i Q_i \quad (1)$$

ここで、

H_i : 音響伝達関数 [Pa/(m³/s)]

Q_i : 体積速度 [m³/s]

i : 音源数

体積速度 Q_i の同定手法には、放射面の振動加速度から算出する方法⁽⁶⁾、音響管を用いた手法⁽⁷⁾などがあるが、今回、我々は相反定理による実験的計測により求めた音響伝達関数を用い⁽⁸⁾、後述する逆マトリクス法により同定した。

逆マトリクス法による音源同定の原理について説明する。 M 個の無指向性点音源があると仮定し、 N 個の近傍観測点にて音源を同定することを考える(Fig. 2)。そのとき、音源の体積速度を Q_{Sm} ($m=1, \dots, M$)、観測点の音圧を P_{Rn} ($n=1, \dots, N$)、点音源 m から観測点 n までの伝達関数を H_{SmRn} ($m=1, \dots, M, n=1, \dots, N$) とすると、これらの関係式は式(2)で表される。

$$\left. \begin{aligned} P_{R1} &= H_{S1R1} Q_{S1} + \dots + H_{SMR1} Q_{SM} \\ P_{R2} &= H_{S1R2} Q_{S1} + \dots + H_{SMR2} Q_{SM} \\ &\vdots \\ P_{RN} &= H_{S1RN} Q_{S1} + \dots + H_{SMRN} Q_{SM} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

またこれらをマトリクス表現すると式(3)で表すことができる。

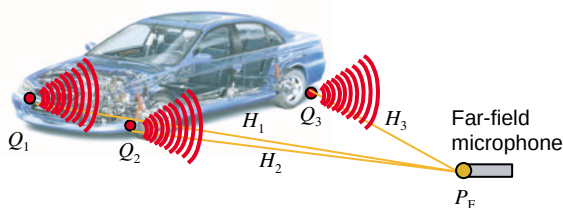


Fig. 1 Far-field sound pressure

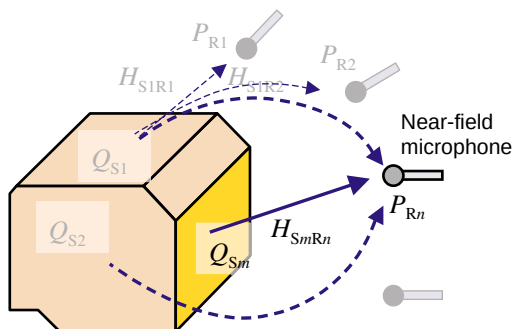


Fig. 2 Inverse matrix method

$$\mathbf{P} = \mathbf{H}\mathbf{Q} \quad (3)$$

したがって M 個の各音源の体積速度を同定するためには、 N 個の観測点の音圧および $M \times N$ の伝達関数行列の逆行列を求めればよいことがわかる。数式で表すと式(4)のようになる。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{H}^+ \mathbf{P} = \mathbf{G}\mathbf{P} \quad (4)$$

ここで、

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} G_{R1S1} & G_{R2S1} & \dots & G_{RNS1} \\ G_{R1S2} & G_{R2S2} & \dots & G_{RNS2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ G_{RNS1} & G_{RNS2} & \dots & G_{RNSM} \end{pmatrix} \quad (5)$$

この式中の+印は、Moore-Penrose一般化逆行列を示しており、実際の行列は式(5)のような行列となる。一般化逆行列は、通常の逆行列を拡張した行列で、 $M=N$ となる正則行列以外にも適用できる。本稿では、この一般化逆行列を以後逆行列と記す。

2.2. 特徴および課題

各音源の体積速度は2.1節で述べたように、伝達関数行列の逆行列を求めることにより得られる。したがって逆行列の安定性は音源の体積速度同定精度に大きく影響する。精度の高い音源同定をおこなうためには、次の条件が必要となる。

- (1) $M \leq N$, つまり音源点数 M より観測点数 N が多くなければならない。
- (2) 伝達関数ベクトルの直交性を高くする。
- (3) 精度の高い伝達関数を測定する。

(1)は、 $M > N$ では伝達関数の逆行列の解が得られないことを意味する。

(2)は、観測点の配置が音源同定精度に大きな影響を与えることを意味する。たとえば、(1)の条件を満たすように観測点を多く設定しても、その観測点同士が非常に近接している場合は、それらの各音源からの伝達関数ベクトルも非常に似たものとなる。よって、「直交」した配置とは程遠くなってしまい、逆行列が発散してしまう可能性がある。また発散することがなくとも音源同定時に誤差を増加させる要因となる。

この点については Fig. 3 に示す2点の音源点と2点の観測点を用いて説明する。

ここで、各伝達関数を以下とする。

$$\begin{aligned} H_{S1R1} &= a, & H_{S2R1} &= b \\ H_{S1R2} &= c, & H_{S2R2} &= d \end{aligned} \quad (6)$$

このとき、伝達関数逆行列の関係はFig. 4のようになる。ここで、

$$D = ad - bc \quad (7)$$

$$\begin{aligned} H_{R1S1} &= d/D, & H_{R2S1} &= -b/D \\ H_{R1S2} &= -c/D, & H_{R2S2} &= a/D \end{aligned} \quad (8)$$

D は伝達関数行列の行列式であり、伝達関数逆行列の分母に共通して入る係数である。したがって D が 0 に近い値の場合は、測定した音圧を拡大することになる。誤差がない場合、体積速度同定値が大きくなるのは、 a, d のストレート経路のプラスと b, c のクロス経路のマイナスが打ち消し合って小さな値となるためである。言い換えれば、クロス経路の伝達係数が大きいと、同定する体積速度を打ち消す成分が増える分、全体の係数が大きくなる。

次に、観測点音圧に誤差が含まれる場合、その誤差が拡大することを理論的に説明する。観測音圧ベクトル $\mathbf{P}$ に誤差 $\mathbf{E}$ が加わり $\mathbf{P}'$ となった状態で、体積速度を同定したとすれば、誤差を含む状態での体積速度の同定値 $\mathbf{Q}'$ は

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}' &= \mathbf{H}^{-1} \mathbf{P}' \\ &= \mathbf{H}^{-1} (\mathbf{P} + \mathbf{E}) \\ &= \mathbf{H}^{-1} \mathbf{P} + \mathbf{H}^{-1} \mathbf{E} \\ &= \mathbf{Q} + \mathbf{H}^{-1} \mathbf{E} \end{aligned} \quad (9)$$

となり、体積速度同定値の誤差は、音圧観測時の誤差 $\mathbf{E}$ に逆行列を左から乗じた結果となる。これは逆伝達関数の大きさが誤差の拡大量を決める事を意味する。2行2列の場合では、逆伝達関数の係数の増大は、行列式 D によって性質が決まり、クロス経路の伝達率がストレート経路の伝達率に近いほど、大きくなる。この様に2行2列の場合は、比較的簡単に誤差の拡大率が分析できる。しかし多点の場合(非正方形行列含む)、逆行列の係数は、行列のサイズのべき乗に比例する項数の煩雑な式となり、元の係数を含む式で評価することは困難である。

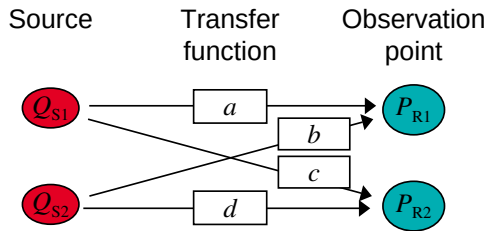


Fig. 3 Transfer function

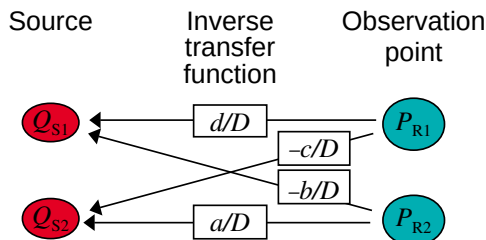


Fig. 4 Inverse transfer function

(3)は、伝達関数もしくは観測点音圧の測定時に含まれる誤差が音源同定値に誤差を生む要因となることを意味する。特に伝達関数については、相反定理を用いて測定をおこなうため、音源側にマイク、観測点側にスピーカを配置するという、実際の伝搬とは逆配置での測定となる。したがって、測定した伝達関数は、スピーカの配置や指向性の違いによって誤差を生じる。これも音源同定精度を悪化させる要因のひとつである。したがって、伝達関数の測定誤差に対してロバストな同定手法が必要となる。

そこで、(2)、(3)を満たす手法として、

- ・1/3オクターブバンド化したエネルギー伝達率を使用。
- ・安定した伝達関数であるか否かを評価する指標の適用について検討した。

2.3. バンド化による測定誤差低減

2.2節の(3)で述べた測定位置のずれによる測定誤差は、一般的に位相の誤差として現れやすい。この位相による誤差の影響を受けにくいロバストな音源同定をおこなうために、1/3 オクターブバンド化したエネルギー伝達率を使用した。計算式は(4)式に対して(10)式ようになる。

$$\begin{pmatrix} Q_{S1}^2 \\ Q_{S2}^2 \\ \vdots \\ Q_{M2}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{H}_{S1R1}^2 & \bar{H}_{S2R1}^2 & \dots & \bar{H}_{SNR1}^2 \\ \bar{H}_{S1R2}^2 & \bar{H}_{S2R2}^2 & \dots & \bar{H}_{SNR2}^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \bar{H}_{S1RM}^2 & \bar{H}_{S2RM}^2 & \dots & \bar{H}_{SNRM}^2 \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} P_{R1}^2 \\ P_{R2}^2 \\ \vdots \\ P_{RN}^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

ここで $\bar{H}_{SnRm}^2$ は、エネルギー伝達率 $|H_{SnRm}|^2$ を1/3オクターブバンドで平均化した伝達率を表す。これにより、伝達関数および音圧の両者において変動や測定条件の差に起因する誤差が低減される。ただし、位相による干渉効果が加味されなくなることによる新たな誤差が発生する可能性がある。しかし、この誤差は測定点数の増加などにより低減され、車外騒音においては位相による干渉の影響は少ないことを考え、バンド化による逆行列の安定性向上の方を重視した。

2.4. 伝達関数行列の安定性指標の適用

安定した伝達関数行列を得るためには、音源点および観測点の「適切な」配置が必要となる。音源としてエンジンを例とした場合、音源点の「適切な」配置とは、面音源であるエンジンを「適切な」音源要素に分割することに相当し、観測点に関しては、エンジンの周りにマイクロホンを設置することに相当する。しかし「適切な」配置は、音源および周辺の形状によって大きく異なる。一般的に観測点は音源を囲うように等距離等間隔で配置することが望ましいが、エンジンルームに設置された実車エンジンを対象とすると、等距離等間隔で配置することが現実的に困難な場合がある。したがって、配置した観測点マイク位置が適切であるか否かを判定することが必要となる。この適切さを得る指標として(11)式のように不安定度 I を定義し検討した。

$$I = \text{Max}\{|\mathbf{g}_n| \cdot \text{Max}\{\mathbf{h}_n\}\} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{g}_n$ は逆伝達関数行列の n 行目のベクトル、 $\mathbf{h}_n$ は伝達関数行列の n 列目のベクトル、 $\text{Max}\{\}$ は $\{\}$ 内の最大値を示している。不安定度は、音源数：1，観測点数：1としたときの体積速度の同定と比較して、どの程度誤差が拡大するかを表すものである。

まず、多点で収録した伝達関数を用いて、従来の1点推定で体積速度 Q_n を同定することを考える。従来の1点推定では、どの観測点を元に同定するかは自由度がある。観測点 m の音圧 P_m を元に同定する場合、その同定値は

$$Q_n = P_m / H_{SnRm} \quad (12)$$

となる。この時、前節で記述した2点推定の場合と同様に、音圧 P_m に含まれる誤差は $1/H_{SnRm}$ 倍される。どのチャンネルでも同じ大きさの測定誤差を含むものと考え、 Q_n からの伝達率が最も大きい観測点、すなわち H_{SnRm} が最大となる測定点 m を元に推定した場合に誤差が最小になる。その時の誤差の拡大率 R_1 は

$$R_1 = 1 / \text{Max}\{H_{S1R1}, H_{S1R2}, \dots, H_{S1RN}\} \\ = 1 / \text{Max}\{\mathbf{h}_n\} \quad (13)$$

として表現できる。

一方、多点で逆伝達関数を用いて体積速度を同定する場合、同定式は次式となる。

$$Q_n = G_{R1Sn} P_1 + G_{R2Sn} P_2 + \dots + G_{RMSn} P_M \quad (14)$$

この時、測定音圧 P_1 から P_M に含まれる誤差をそれぞれ、 E_1 から E_M とすれば、体積速度の推定誤差 E_q は次式となる。

$$E_q = G_{R1Sn} E_1 + G_{R2Sn} E_2 + \dots + G_{RMSn} E_M \quad (15)$$

これより、誤差の拡大率は、チャンネルによって異なり、その値は G_{RmSn} で与えられることがわかる。ここで、 E_1 から E_M の誤差の大きさは等しく、それぞれ無相関であるとするれば、推定誤差の二乗の期待値 $\overline{E_q^2}$ は、

$$\overline{E_q^2} = \overline{G_{R1Sn} E_1 + G_{R2Sn} E_2 + \dots + G_{RMSn} E_M}^2 \\ = \overline{G_{R1Sn} E_1}^2 + \overline{G_{R2Sn} E_2}^2 + \dots + \overline{G_{RMSn} E_M}^2 \quad (16) \\ = (G_{R1Sn}^2 + G_{R2Sn}^2 + \dots + G_{RMSn}^2) \cdot \overline{E_1^2}$$

となる。したがって、期待値で計算した逆マトリクス利用時の推定誤差の大きさの拡大率 R_2 は

$$R_2 = \sqrt{G_{R1Sn}^2 + G_{R2Sn}^2 + \dots + G_{RMSn}^2} = |\mathbf{g}_n| \quad (17)$$

となる。(12)式、(16)式で求めた二つの誤差の拡大率の比 I_n を(18)式で示す。

$$I_n = R_2 / R_1 = |\mathbf{g}_n| \cdot \text{Max}\{\mathbf{h}_n\} \quad (18)$$

この I_n は、体積速度 Q_n を求める際に、1点推定時を基準として逆マトリクス法を用いた場合、どの程度誤差が拡大するかを示しており、計算時の不安定性を表す指標として用いることができる。不安定度 I は、 Q_1 から Q_N までの全ての体積速度を同定した場合に、最も計算が不安定になる値を代表値として用いる。すなわち、

$$I = \text{Max}\{[I_1, I_2, \dots, I_N]\} = \text{Max}\{|\mathbf{g}_n| \cdot \text{Max}\{\mathbf{h}_n\}\} \quad (19)$$

となる。

行列の安定性を示す指標としては、条件数が一般的であるが、物理的な意味との整合性がとりにくだけでなく、行列の次元が異なる場合に直接比較できないという問題がある。不安定度はこの問題を解決するもので、観測点を増やすことによる誤差低減効果などを指標から判断することができる。

3. スピーカ音源による基礎検証

3.1. スピーカ実験

エンジンの形を模擬し6個のスピーカユニットを組み込んだ音源(Fig. 5)を用いて不安定度指標の有効性を確認した。6個(上下、右左、前後)のスピーカから互いに独立な音(ホワイトノイズ)を同時に出力した。その周辺に観測点を24点設置し、各点の音圧を測定した。また、音源と観測点の間の伝達関数 $6 \times 24 = 144$ 点を相反定理を用いて測定した。観測点音圧および伝達関数により、逆マトリクス法を用いてスピーカそれぞれの体積速度を同定した。また配置による不安定度と音源同定精度の関係を確認するために、観測点位置を変えた2種類の配置について実験した(Fig. 6)。

Fig. 7は、それぞれの配置での不安定度を示している。図中の実線は音源と観測点間の距離が20cmの場合(配置2)を、破線は1mの場合(配置1)を表している。500Hzより高い周波数では両者の不安定度はほぼ同等であるが、500Hz以下では距離20cmの方が不安定度が低くなる結果となった。Fig. 8に、同定した6個の音源の体積速度の一つを示す。ここでは、一つの音源のみを駆動させ、1音源 - 1観

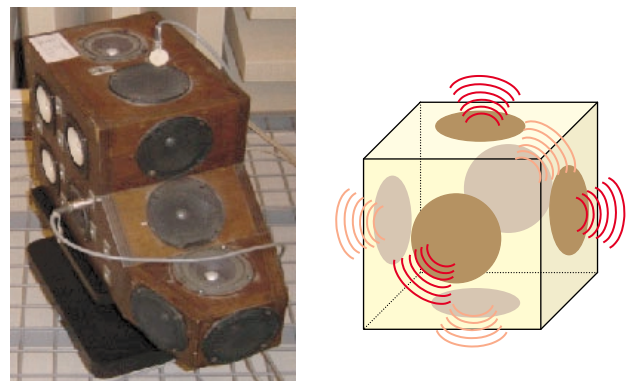


Fig. 5 Dummy noise source with loud speakers

測点にて同定した体積速度を真値とした。そのときの観測点位置は、音源から正面 20cm の位置とした。図中の線種は、破線が真値、1 点鎖線が配置 1 での同定値、実線が配置 2 での同定値であり、500Hz 以上の周波数では、両者の同定値はほぼ真値と一致している。しかし、500Hz 以下では、配置 1 の場合は正しく同定できていないのに対し、配置 2 の場合は約 3 dB 程度の誤差で同定が可能となっている。これは不安定度で示した傾向とほぼ一致した。これにより、高い音源同定精度を得るための観測点配置の良し悪しを定量的に示すことが可能となった。

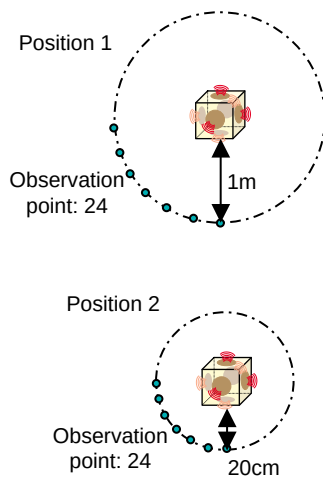


Fig. 6 Measurement conditions

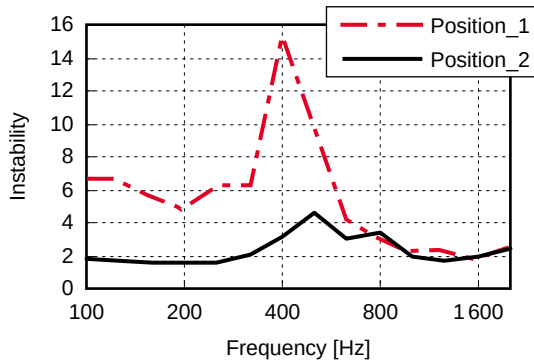


Fig. 7 Instability

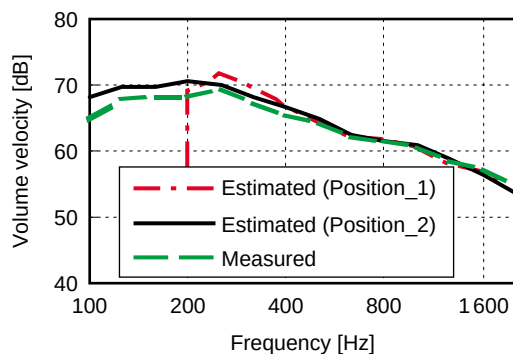


Fig. 8 Volume velocity

4. 実車適用例

4.1. 測定概要

本研究での音源同定手法を実際の車両に適用した事例を示す。2.4L 直列 4 気筒エンジンのマニュアルトランスミッションを搭載した車両を用いた。

車両は、Fig. 9 に示すように、半無響室内のシャーシダイナモ上に配置され、実走行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。

音源近傍の観測点音圧および遠音場音圧を、3 速ギヤにてエンジン回転数 3000rpm 時で測定した。遠音場の位置は、車両先端から側方 7.5m、後方 5m とした。

音源については、エンジン放射音、吸気吐出音、排気放射音、排気吐出音と大きく 4 ヶ所のエリアに分け、それぞれ音源数をエンジン放射音: 6 点、吸気吐出音: 1 点、排気放射音: 5 点、排気吐出音: 2 点とした。なお、タイヤについては、遠音場への寄与をなるべく小さくするためにスリックタイヤを装着した。

観測点については、各エリアにそれぞれ、エンジン放射音: 42 点、吸気吐出音: 6 点、排気放射音: 30 点、排気吐出音: 12 点を設置した。

それぞれのエリアでの音源数、観測点数、伝達関数の数を Table 1 示す。各エリア毎に伝達関数行列を形成し、不安定度を算出した。その結果を Fig. 10 に示す。これより、安定な伝達関数行列が得られた事が確認できた。

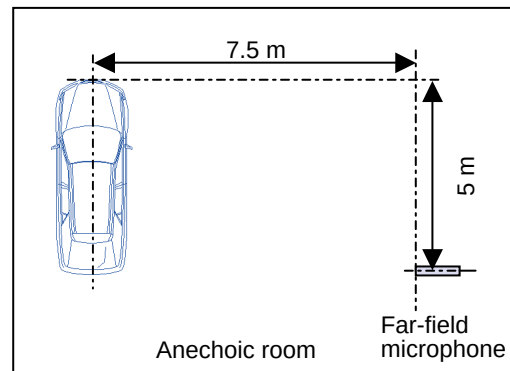


Fig. 9 Measurement conditions

Table 1 Measurement point readings

Area	Source	Observation point	Transfer function
Engine noise	6	42	252
Intake orifice noise	1	6	6
Exhaust radiation noise	5	30	150
Exhaust orifice noise	2	12	24
Total	14	90	432

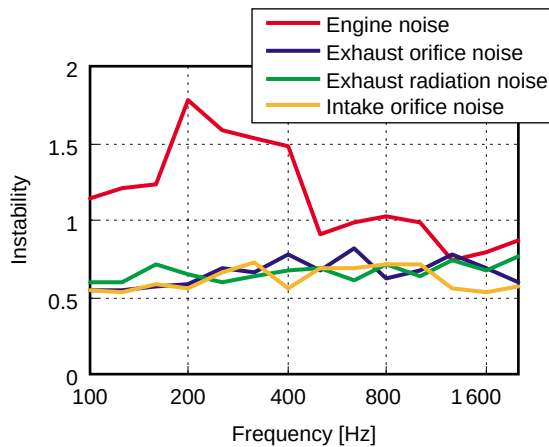


Fig. 10 Result of instability

4.2. 遠音場予測結果

同定した各音源の体積速度と音源から遠音場までの伝達関数により、遠音場音圧の予測をおこなった。その結果を Fig. 11 に示す。

これより、遠音場音圧レベルを精度 ± 3 dB 以内に予測できることが確認された。

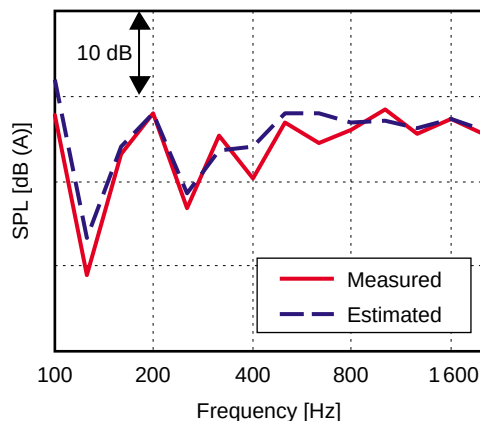


Fig. 11 Result of far-field SPL

5. まとめ

車外騒音における音源寄与解析に対して、逆マトリクス法による音源同定手法を適用した。

そのとき、音源同定精度に影響を与える伝達関数行列の安定性を示す指標(不安定度)を適用し検討した。その結果、不安定度により、音源同定精度に影響を与える観測点位置の良し悪しを定量的に表すことが可能となった。

また、実車検証にて、遠音場音圧予測値が、実測に対し ± 3 dB 以内の精度で予測可能となった。

謝 辞

本研究にあたり、ご協力を頂きました三恵技研工業(株)の方々に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 沢井：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) 柏木均，清水聡，下河辺啓吉，関田雅彦：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) 半沢幸彦，北原純，西村伸一：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索技術の適用，Honda R&D Technical Review, Vol.16, No.1, p.179-184
- (4) Fleszar, A.R., van der Linden, P.J.G., Johnson, J.R., Grimmer, M.J.: Combining Vehicle and Test-Bed Diagnosis Information to Guide Vehicle Development for Pass-by Noise, SAE 2001-10-1565(2001)
- (5) Biermayer, W., Brandl, F., Shirahashi, Y., Nishimaru, H.: Development of a software tool for the analysis and optimization of passenger car pass-by noise, JSAE Annual Congress Proceedings No.40-03, p.13-16(2003)
- (6) 中村政弘：相反定理による遠隔点の振動放射音の予測，日本機械学会論文集(C編)，63巻616号, p.76-8(1997)
- (7) 中村政弘，中野光雄：音響管を用いた体積速度計測法の車外音への適用，日本機械学会論文集(C編)，68巻667号, p.68-73(2002)
- (8) 丸山新一，古山正則，青木順一：相反性を利用した音響伝達関数の車外騒音予測への適用，自動車技術会学術講演会前刷集，No.963, p.185-188(1996)

■ 著 者 ■



西村 伸一



半沢 幸彦



北原 純



中川 博



中島 弘史