

6. 走行中の高騒音車両の自動センシング技術に関する研究

—実周波数帯域に適応する新技術の提案—

環境研究領域 ※田中 丈晴、宝渦 寛之、坂本 一朗、村上 孝行
神奈川工科大学 石濱 正男、小野測器（株） 猿渡 克己

1. まえがき

消音器の不正改造や違法マフラーの装着により高騒音を発生して走行する車両が環境騒音の悪化や沿道住民への騒音被害の原因の一つとなっており、早急な対策の強化が強く要請されている。高騒音車両の取り締まりは、車両検査及び街頭検査において実施されているが、人的な制約等もあり効率的でない状況にある。このような街頭検査を効率的に行うために、また、突出した騒音を発生する車両による環境騒音の悪化の改善対策を明確にしていくためにも、走行中の車両が発する騒音を常時監視し、高騒音車両を交通流のなかから判別することが期待されている。このような車両を路上で特定する遠隔自動センシング手法に関しては、技術的に検討された例は、極めて少ない。¹⁾

走行中の高騒音車両を路上で捕捉可能な、遠隔位置からの自動センシング手法の開発にむけて、前報では、必要なシステムに関する指針を得るため、交換用マフラー装着に伴う車両の走行騒音の特性の変化について基礎的な検討を行った。¹⁾

乗用車と二輪車を対象に、標準マフラー及び交換用マフラー装着時の通過騒音を左側方での騒音レベルと遠隔位置からの自動センシングで想定される計測位置、すなわち、車両走行ラインの垂直上方での騒音レベルを分析し、区間を限定すれば、両者の騒音レベル間に高い相関が得られることが確認できた。本報告では、実際の道路交通における騒音環境と交換用マフラー装着に伴う騒音の周波数的特徴を考慮して、高騒音車両の路上での捕捉に有効な実周波数帯域に適用できるマイクアレイによるハイブリッド型騒音計測システムを提案し、システムの性能を室内基礎実験及び試験路での実車実験により明らかにした。これらの概要を以下に述べる。

2. 自動センシング装置の運用概念と目標性能

2.1 全体システムの運用

自動センシング装置を含む全体システムは、車両の種別、外観及び形状等の情報を得る画像撮影部、音源の定位と音量に関する情報を得る自動センシング部と運転者への警告表示部等で構成される。これらの運用概念を図1に示す。本システムの運用の目的は、住民からの苦情の多い高騒音車の走行などを常時監視し、運転者に「高騒音車として検知された」ことを電光掲示板等の方法で知らせ、改造マフラー等の装着を自粛することを促すとともに、これらの高騒音車のデータの蓄積をはかり、街頭検査等への活用及び環境騒音の有効な低減方策の検討に資することとする。

2.2 自動センシング装置の目標性能

二輪車及び乗用車の場合の交換用マフラー及び標準マフラー装着時の加速走行騒音の周波数分析結果を図2に示す。図から、交換用マフラー装着時の周波数特性は、100Hz 付近を主とする低周波数域と1 kHz を越える高周波域を主とする二種類の傾向が認められるとともに、少なくとも100Hz～2.5kHz をカバーする必要がある。また、対象音源の水平方向の距離分解能は走行方向及び左右方向ともに、4m 離れた位置で1m とした。また定位する音源は、乗用車はエンジン騒音と排気騒音を分離するが、二輪車は、両音源を分離しないことを目標とした。

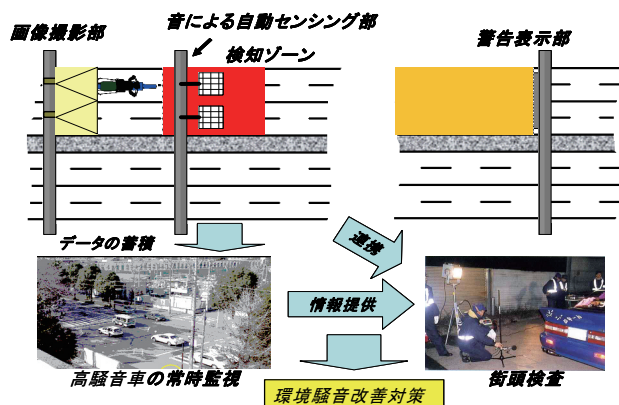


図1 自動センシング装置を含む全体システムの運用概念

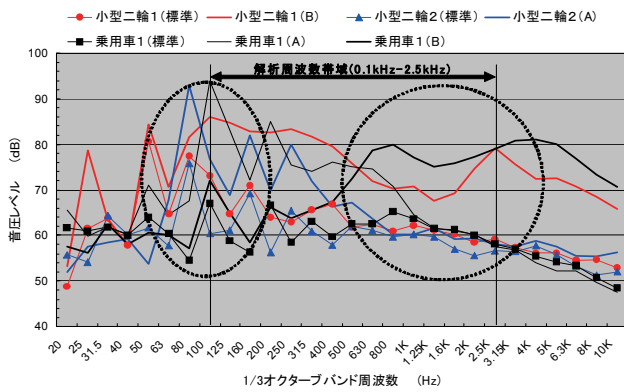


図2 各種標準及び交換用マフラー装着時の加速走行騒音の周波数分析結果（二輪車、乗用車）

3. ハイブリッド型騒音計測法の提案

自動センシング装置の計測システムは、地上 4m 高さの上方位置から道路上を走行する車両の音源を監視することを想定すると、外乱雑音を極力排除し、低周波数域から高周波数域までの車両の音源を定位することが要求される。これらの点から、高周波域においては、波長が短くなるため方位分解能に優れたビームフォーミング法（以下、BF 法）を適用し、低周波域においては、概ねマイク間隔を半波長とする周波数よりも低い帯域で音源定位が可能な音響インテンシティ法（以下、SI 法）を適用するハイブリッド型騒音計測法を検討した。

3. 1 マイクアレイの検討

マイクの配列は、はじめに BF 法により、目標性能を満足するように配列を定めた後、SI 法の適用に必要な測定点を追加することとした。

3. 1. 1 BF 法の方位分解能

BF 法は、遠方にある音源からの到来音波を線上、又は面上に配列されたマイクで測定し、仮想音源位置から球面波が到達した場合の各測定点での遅延量を計測音波に付加して合算し、仮想音源位置からの音波のみを強調する手法である。

線状配列のマイクアレイの場合、解析対象の音源周波数を 1kHz とし、アレイの正面方向に対する指向性が片側 θ (rad) で 3dB 減少する角度を方位分解能とした場合、この方位分解能を 0.125(rad) (4m 離れた 1m 間隔の音源を分離) とすると、マイクアレイ長さは、概ね 1.0m 以上であることが必要である。²⁾ マイクアレイ長さを 1.2m に固定し、マイク間隔とマイク数を変更した場合の方位分解能と周波数との関係を求めた結果を図 3 に示す。図から、どの組み合

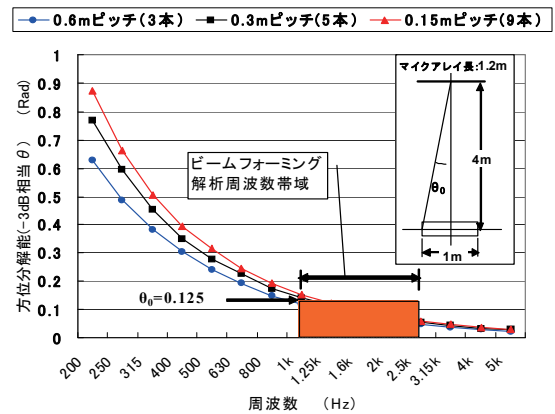


図3 ビームフォーミングによる音源定位の方位分解能（マイクアレイ長：1.2m）

わせも、1kHz から 2.5kHz の帯域では、BF 法による方位分解能は、0.125(rad) 以下である。また、マイク数が多い程、BF 法の SN 比（雑音の混入度）は改善されるため、両者のバランスを考慮し、マイク数 5 本、マイク間隔 0.3m の配列を基本とした。車両の走行方向と左右方向ともに、水平方向の距離分解能と解析時の SN 比を得るため、マイクアレイは、上記の線上の基本配列を 60度の角度で 3本交差させる方式とした。

3. 1. 2 SI 法の適用

SI 法は、可能な限り少ないマイク数で 3次元方向の音響インテンシティを算出する必要があるため、正四面体の頂点に配置されたマイクの計測音圧から重心位置での 3次元音響インテンシティをクロススペクトル法により算出する方法を採用した。³⁾ 解析周波数帯域は、0.1kHz から 0.5kHz とした。このため、3. 1. 1 で得られたマイク配列に、一辺が 0.3m の長さで構成される 12 個の正四面体を得るため、さらに、16 点のマイクを追加することとした。(図中 Z=3.751 (m) の 12 点と Z=4(m) の 4 点) これらのマイク配列の位置座標と走行方向への座標系を図 4 に示す。BF 法の計算には、マイクアレイの全測定点 31 点の計測音圧を用い、SI 法の計算は、全 12 箇所内の、アレイ中心周りの 6 箇所についてのみ行った。

3. 2 室内スピーカ実験による性能検証

無響室 (7m 幅×5.4m 高×7.4m 長) において、二個のスピーカを二音源として、図 4 のマイクアレイによる BF 法及び SI 法の音源定位の精度について検証実験を行った。マイクアレイ中心軸上の 4m 離れた対向する位置にスピーカを固定し、もう一つのスピー

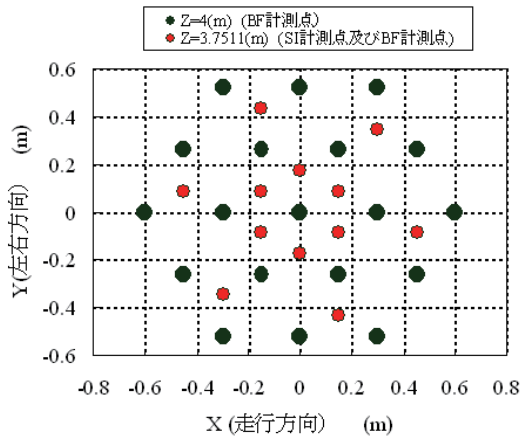


図4 ハイブリッド型騒音計測法のマイク

表2 試験マフラー

記号	標準・交換用の別	備考
A-n	標準マフラー	
A-a	交換用マフラー	JASMA認定品
B-n	標準マフラー	
C-a	交換用マフラー	JMCA認定品

カを側方と垂直方向に、0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、3.0mの位置に逐次移動させて、音源定位精度を調べた。二個のスピーカの間隔が1m以上となる場合には、BF法(1kHz-2.5kHz)では、分離されて、各音源位置がスピーカ位置に定位されることを確認した。図5に、音源間隔が1mとなる場合のBF法の結果(左図)と低周波数域(0.1kHz-0.5kHz)でのBF法とSI法と結果(右図)を示す。高周波数域におけるBF法の結果は、明瞭に二つのスピーカ位置に音源が定位されている。また、低周波数域では、BF法は、波長が長くなるため二音源を分離できていないが、SI法では、二音源のうち正面のスピーカ位置を的確に示しており、低周波数域で目標とする音源の定位が可能であることが確認できる。

4. 実車走行試験による音源定位性能の検討

4.1 実車走行試験の概要

二輪車1台及び乗用車2台の実車両を対象に、ハイブリッド型騒音計測法による音源定位性能について検討を行った。実験は、自動車試験路で実施し、走行条件として、停止からの発進加速走行とTRIAS20準拠の加速走行、定常走行を実施した。

試験車両の主要諸元と各車に装着した交換用マフラーを表1、表2に示す。また、試験路実験の実施状況等を図6に示す。

4.2 実験結果と考察

4.2.1 データ処理

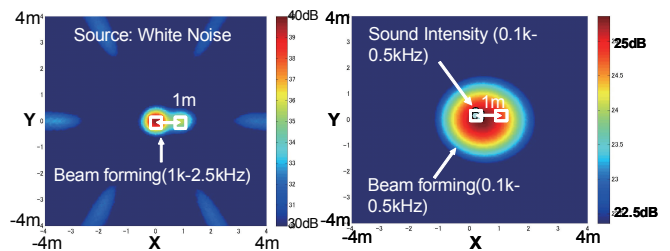


図5 無響室内での音源定位精度の検証

表1 試験車の主要諸元

記号	乗用車		二輪車
	A車	B車	C車
年式(タイプ)	H14(ワゴン)	H17(SUV)	H16(スポーツ)
原動機形式	直列4気筒DOHC	←	←
排気量	2362	1998	399
燃料	ガソリン	←	←
変速機	4速AT	←	6速MT
最高出力(kw/rpm)	118/5600	110/6000	39/11000



図6 試験路実験の実施状況と座標系

マイクアレイの計測音圧波形のサンプリング時間間隔は、 $20 \mu \text{sec}$ としデータ長 20msec(データ数:1024)毎に、BF法の結果を、データ長 40ms(データ数:2048)毎にSI法の結果を算出した。BF法による音源検出範囲は、マイクアレイ中心の直下の点より、走行方向及び左右方向 $\pm 4\text{m}$ の正方形で示される範囲とした。また、この音源検出範囲でBF法により遅延加算された全周波数帯域(20Hz~20kHz)でのA特性音圧レベルの最大値を S_{max} (dB)として算出した。

4.2.2 実験結果

図7(a)に、乗用車A車で標準及び交換用マフラーを装着した場合の発進加速走行時の場合について、 S_{max} の変化を車両先端位置別に示す。エンジン騒音源と排気騒音源を区別する場合、それぞれ $S_{\text{max, en}}$ 、 $S_{\text{max, exh}}$ で表す。また、図7(a)の各車両位置A、B、C、における交換用マフラー装着時のBF法とSI法の音源定位結果を図7(b)に示す。図7(b)から、車両位置Aでは、車両の先端が $X=-4\text{m}$ 付近にあり、BF法とSI法ともに、エンジン騒音源が定位されている。

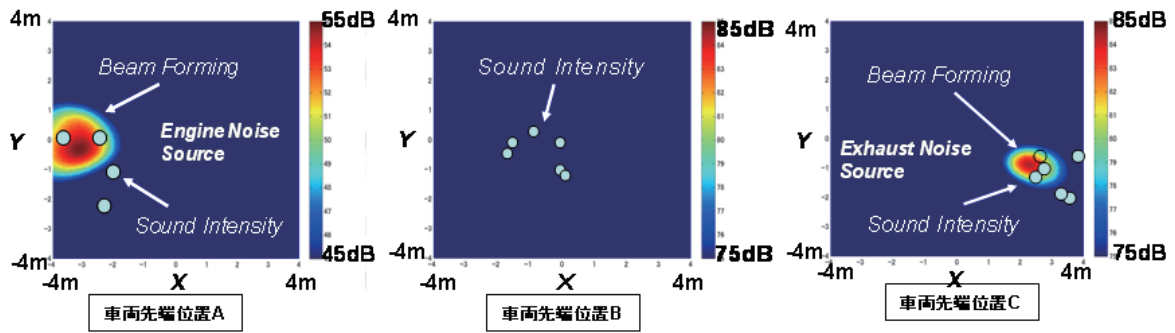


図 7 (b) A 車の発進加速走行における車両先端位置 A,B,C(図 7(a)参照)における BF 法と SI 法による音源定位結果 (交換用マフラー(A-a)装着時)

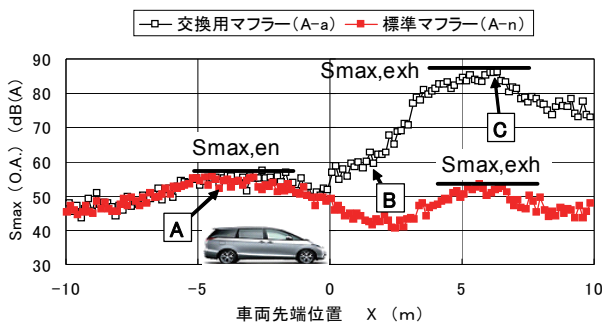


図 7 (a) A 車の発進加速走行における Smax のマフラー別比較 (乗用車)

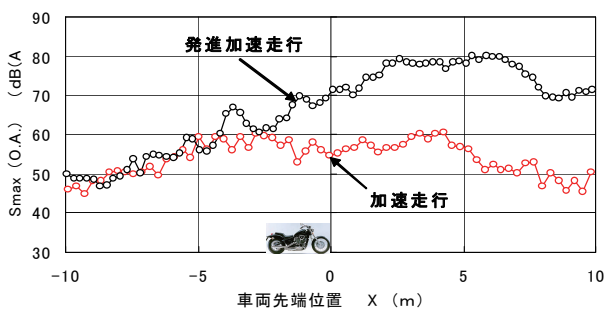


図 8 二輪車 C 車の発進加速及び加速走行における Smax の比較 (交換用マフラー (C-a) 装着時)

また、車両位置 B (X=2m 付近) では、車体による遮蔽効果の影響により、BF 法では、音源が定位されていないが、SI 法では、低周波数域での排気騒音と推定される音源位置を示している。車両位置 C (X=6.5m 付近) では、BF 法、SI 法ともに、排気騒音源が明瞭に定位されている。また、SI 法の音源定位結果が BF 法の結果に比べ、全般に車両進行方向のやや右側(図中の下側)を示すのは、A 車では排気系が右側に位置していることによると思われる。また、図 7 (a) から、乗用車の場合、エンジン騒音と排気騒音の Smax のピークは、それぞれ異なる車両位置で認められ、各ピークレベル Smax, en、Smax, exh は、4m 垂直上方で騒音を計測する場合の各々の音源に起因する

騒音レベルを示すと考えられる。図 7(a) から、A 車の交換用マフラー (A-a) 装着時の Smax, exh は、標準マフラーの場合よりも最大約 30dB 程度高くなっている。

図 8 に、C 車 (二輪車) について、交換用マフラー装着時における発進加速走行と 50km/h からの加速走行の場合の Smax の車両位置別変化を示す。二輪車では、エンジン騒音と排気騒音は一体として音源が定位されるため、Smax は、車両位置に対して、概ね一つのピークを有する変化パターンを示す。

5. まとめ

高騒音車両の路上での捕捉に有効な実周波数帯域に適用できる自動センシング手法として、100Hz から 2.5kHz の帯域での音源定位を可能にするため、低域 (0.1kHz-0.5kHz) では音響インテンシティ法を、高周波数域 (1kHz-2.5kHz) ではビームフォーミング法を適用するハイブリッド型騒音計測法を提案した。スピーカによる無響室実験により、音源定位に関して目標とした性能を有することを確認した。また、本計測法により、乗用車では、エンジン騒音と排気騒音とを分離して、二輪車では、両音源を一体として、音源の定位と各音源に起因する 4m 垂直上方での A 特性音圧レベルを把握可能であることを実車実験により明らかにすることができた。今後、マイクアレイの最適化によるマイク数の低減の検討や車両が前後に接近したり、並走する場合等についても検討を行う予定である。

(参考文献)

- (1) 田中, 坂本, 村上, 石濱, 猿渡, 「走行中の高騒音車両の遠隔センシング手法の検討」, 平成 18 年度交通安全環境研究所研究発表会講演概要, pp. 39-42
- (2) 佐々木, 高野, 「マイクロホンアレイによる音源探査技術」, 騒音制御, Vol. 28, No. 2 (2004), pp. 80-84
- (3) 鈴木, 「多次元インテンシティプロブのマイクロホン配置について」, 音響学会誌, Vol. 51, No. 5 (1995), pp. 411-414