

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

Development of Noise Measurement System using Microphones Array in Anechoic Chamber

柏 木 均* 清 水 聡*
Hitoshi Kashiwagi Satoru Shimizu
下河辺 啓 吉* 関 田 雅 彦*
Keikichi Shimokobe Masahiko Sekita

要 旨

自動二輪車の加速騒音に対する国内法規制値は、この10年間で83dB(A)から75dB(A)へと低減されてきた。今後もさらに法規制の強化が予定されており、これは日本のみにとどまらず世界的傾向である。

このように厳しくなる法規に適合させるには、実際の騒音現象を正確に分析することが重要な課題となる。これを効率的に進める技術として、マイクロホンアレイを用いた台上騒音計測システムを開発した。

本システムは30組の音響インテンシティプローブを有し、加速騒音信号を同時計測することが可能である。従来の1プローブ方式に比べて計測時間が大巾に短縮され、データの質も大きく向上した。

本システムを用いて、実際の二輪車の音響インテンシティおよび音響パワーの計測をした結果、二輪車の加速騒音の解析システムのひとつとして有効であることがわかった。

ABSTRACT

The acceleration running noise limit of motorcycles under the Japanese regulations has been changed in the past decade, from 83dB (A) to 75dB (A). The further stringent limit is scheduled and this is a tendency in all the world.

To conform to this stringent limit, accurate measurement and analysis of acoustic characteristics of such noise is the important requirement. Consequently, a new noise measurement system has been developed by using multiple arrayed microphones to efficiently perform the measurement procedures.

The system has 30 pairs of acoustic intensity probes to measure transient sound signals at once. It can get higher quality data and reduce measurement time as compared with the conventional system having a pair of acoustic intensity probes. It has proved one of efficient methods for analyzing acceleration running noise after being used to measure the acoustic intensity of motorcycles.

1. ま え が き

二輪車の加速騒音の計測は半自由音場とみなせる環境に於いて、マイクロホンの前を加速しながら一定区間を通過する二輪車の音圧レベルの瞬間最大値を計測するものである。この瞬間最大値に対して法規制値が設けられており、国内法規では自動二輪車の場合、75dB(A)以下である。マイクロホンは通過する二輪車から7.5メートルの距離で高さ1.2メートルに設置され、二輪車は

50km/hの定速度状態からこのマイクロホンの前20メートル区間を全開加速して通過する。

この計測法で音圧レベルが75dB(A)を超えた場合、騒音対策を施さなければならない。騒音対策を実施する場合の基本は、どこからどの周波数の音がどれだけ発生しているかを正確に計測することから始まる。しかし二輪車は加速しながら走行しているため、音源が移動しエンジン回転も変化する。時間的にも空間的にも非定常状態

* 朝霞研究所

の騒音現象を計測することになり、解析目的用として正確に計測するにはいくつかの難しさがある。

実走計測については、騒音テストコースに計測室を設け、コンピュータにより自動化、省力化されたシステムは開発済みであり、Fig. 1、Fig. 2 に計測システムの概略と、騒音分析データの例を示す。Fig. 2 の横軸は時間軸及び $\frac{1}{3}$ オクターブバンドの中心周波数軸である。上段の①は全周波数帯域の音圧値を示す。中段②が630Hzの音圧レベルの時間変化を示し、③はエンジン回転数の変化を示す。又④は最大音圧時（*マーク）の $\frac{1}{3}$ オクターブバンド周波数分析結果を示す。このように実走計測では、騒音対策に必要な基本的な情報は得られるようになってきているが、音の発生部位に関する情報は、ほとんど計測されていない。近年、コンピュータ技術の進歩により、多チャンネル同時解析等複雑な信号処理が安価で高速に行なえるようになってきた。そのため音響インテンシティの計測を手軽に行なうことが可能になり、台上に於ける音源解析が、騒音対策を実施するにあたって有効な手法となってきた。

音響インテンシティとは、単位面積を単位時間あたりに通過する音のエネルギーである。本論でいう音源解析とは、二輪車の側面の極近傍に音響インテンシティ計測面を設定し、この面内で多点にわたる音響インテンシティを計測し、この値を等高線で表わすことにより、音源位置を推定しようとするものである。インテンシティは、

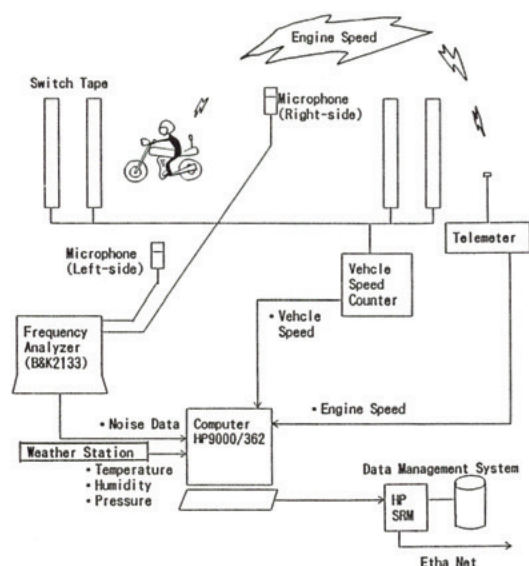


Fig. 1 Pass-by Noise Measurement System (Field Test)

2個のマイクロホンから構成される1プローブ、2チャンネルFFTと、クロススペクトルの虚数部を用いて求めることができる。

従来の1対のインテンシティプローブ、2チャンネルFFTとプローブの移動装置を用いた音響インテンシティ計測法では、インテンシティのマップを得るために100点程度の計測をする場合でも、1日以上かかっていた。しかも1点ずつ計測するためエンジン回転数や油温、負荷条件などを同一に調整するための複雑さも加わっていた。そこで多チャンネル同時計測が可能な音響インテンシティ計測システムを開発し、上記課題が解消できた。

2. システムの概要

本システムは、年間数十機種におよぶ開発機種の騒音テストでを使用することを前提としているため、下記3点を基本要件とし各部の開発を進めた。

- (1)誰でも簡単に使えること
- (2)いつでも正確なデータがとれること
- (3)計測・計算時間が短いこと

2.1. インテンシティプローブ部

二輪車の加速騒音で扱う周波数帯域は100Hzから5kHz程度であるため、プローブに要求される帯域もこれと同程度必要である。従来使用されていたプローブはB&K社製3519型である。しかし非常に高価な為、採用しなかった。本システムではB&K社製4130型マイクロホン、2642型プリアンプ、2810型パワーサプライを選

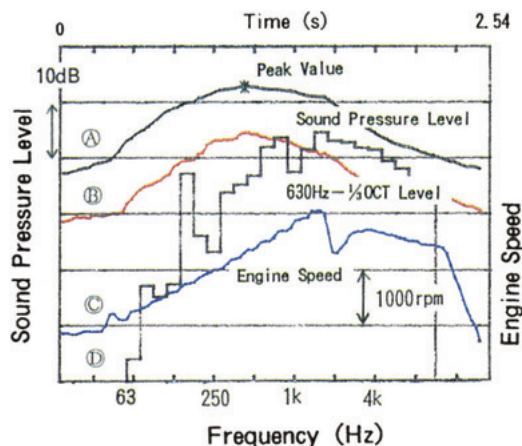


Fig. 2 An Example of Pass-by Noise Analysis Data (Field Test)

定した。プローブの高周波数帯域の精度はマイクロホン間の距離によって決定される。これは音圧勾配を有限圧力差で近似するための誤差である。Fig. 3 に高周波数帯域の近似誤差を示す。マイクロホン間距離が15mmの場合の高周波数帯域での誤差は5kHzで、2dB以下、加速騒音で頻繁に問題になる2.5kHz以下の周波数帯域では1dB以下の誤差であり、実用上問題の無い精度であった。そのため本システムではマイクロホン間距離を15mmに設定した。

プローブの低周波数帯域の精度は2チャンネル間の位相不整合によって決定される。Fig. 4 にマイクロホン間距離15mmに於ける位相不整合による真値インテンシティとの誤差を示す。また、Fig. 5 に4130型マイクロホンの工場出荷時の位相不整合データを示す。マイクロホンの位相不整合を含む真値インテンシティとの誤差は、 $P = 1$ でさえ100Hz時に1dBを大きく上回り(2dB)実用的でない。したがって位相不整合を補正する必要がある。

以下にチャンネル間の位相不整合を補正する方法について述べる。音響較正器はB&K社製4226型(音響カプラは1マイク入力のみ)を改造し音響カプラに入力される電気信号を外部出力できるようにした。この電気信号とマイクロホン出力の位相差を測定し、クロススペクトルを求める時に補正するものである。Fig. 6 にソフトによる補正方法を示す。これにより精度の良い音響インテンシティの計測が可能となった。Fig. 7 にインテンシティプローブの外観を示す。

2.2. インテンシティプローブ支持部

インテンシティプローブの支持台は縦1m、横1.3mの測定平面にプローブを 9×12 個(108個)取り付け、二輪車の発音部位全体をカバーできるように製作した。測定面格子は10cm毎にあり、支持台は上下方向にスライド可能で前後および左右方向にはキャスタにより移動可能である。格子面後背下部にはマイクロホンパワーサプライを取付け転倒を防止している。支持部の音響反射によ

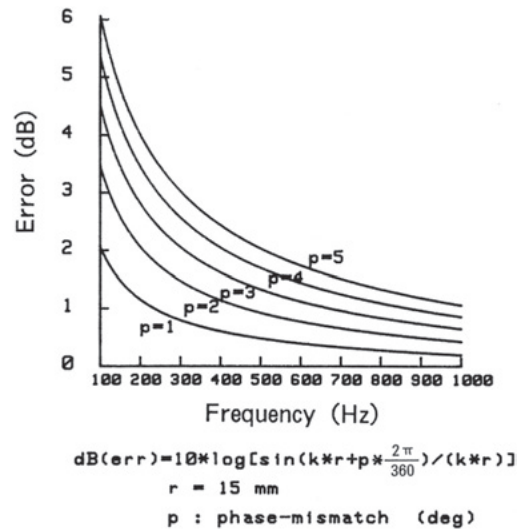


Fig. 4 Error of Low Freq. due to Phase-mismatch

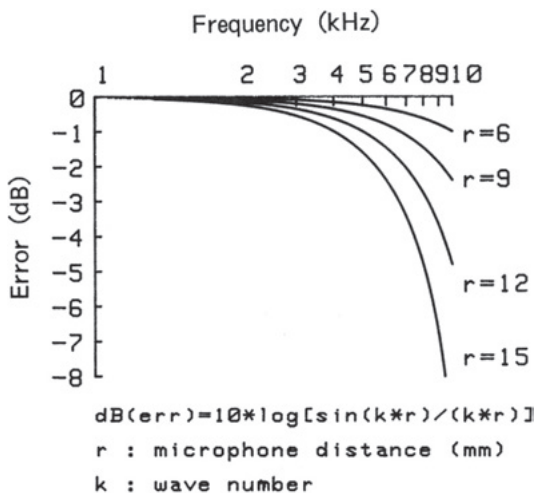


Fig. 3 Approximate Error for High Freq.

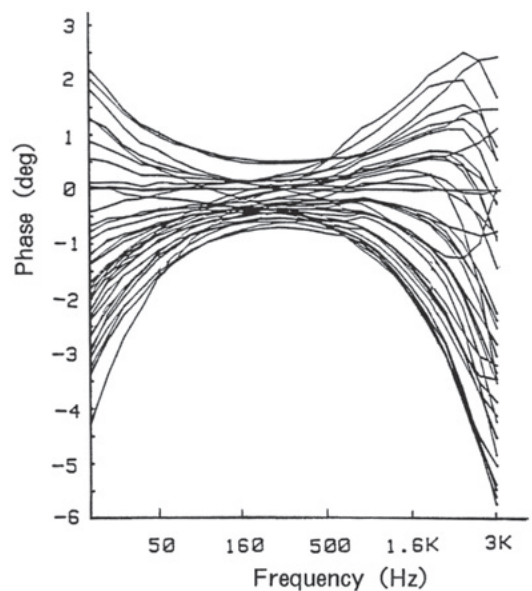


Fig. 5 Phase-mismatch of Used Microphone

る計測誤差を防ぐために全体を薄肉、少面積の設計とした。マイクロホンの出力信号ケーブルは後背下部で束ねられ、信号入力装置に接続されている。Fig. 8 に本装置の外観を示す。

2.3. 信号入力部

信号入力部に要求される重要な仕様は、多チャンネル同時入力機能とチャンネル数に影響されない解析帯域である。また将来チャンネル数を増設したい時に柔軟に対応できる拡張性のあるシステムであることも重視して信号入力部の仕様を検討した。その結果、コンピュータシステムとは独立したコントローラ、データ格納用メモリ、A/D 変換器から構成される信号入力装置を選定した。つまり、信号入力部は多チャンネルの時間領域データを取り込み、計算用のコンピュータシステムにデータを渡す独立したシステムになっている。こうすることにより、従来の多チャンネルデータ入力装置のチャンネル数増加に伴う解析帯域の減少や、リアルタイム性の課題を解決し、32kHz、64 チャンネル同時サンプリング、データ長 1.656 秒を実現、かつ拡張性も確保することができた。信号入力部のベースは HP 社製 3565 S 型のメインフレー

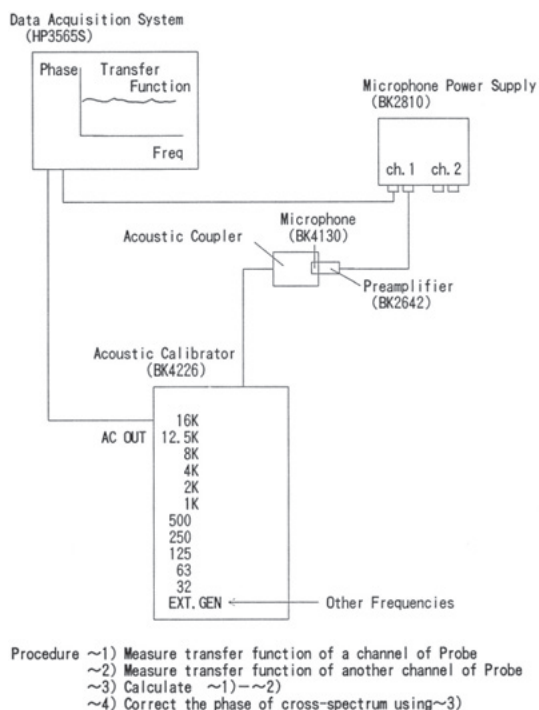


Fig. 6 Correct Method of the Phase-mismatch

ム 2 基を使用し、同期をとるための改造を施こしている。また、通常はコントローラとしてロードモジュールを格納するために使用されているメモリをデータエリアとするため、プログラマーズツールキットを用いてソフトウ

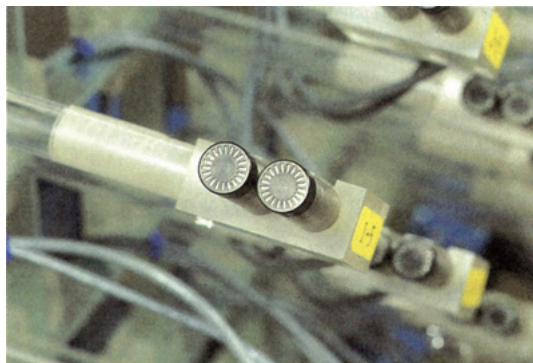


Fig. 7 Intensity Probe

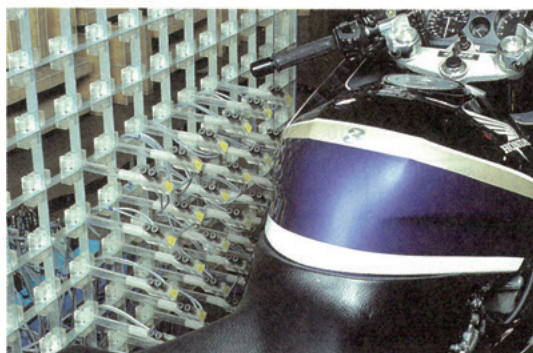
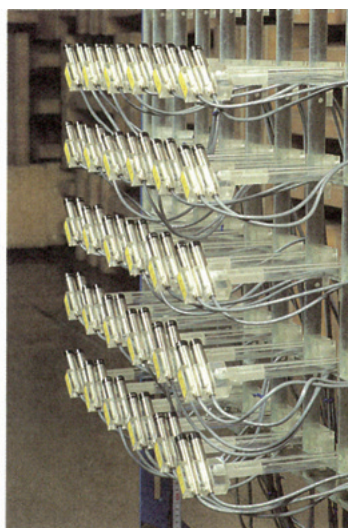


Fig. 8 Arrayed Intensity Probes

エアを作成している。

信号入力部の主仕様は、以下の通りである。

- ・64 チャンネル入力 (256 チャンネルまで拡張可能)
- ・サンプリング周波数最大 32kHz
- ・データ長さ 1.656 秒 (32kHz サンプリング時)
- ・トリガー機能有

本システムの計測時間は 30 点の音響インテンシティ計測が同時に行なうことができ、従来の 1/100 以下の時間でかつデータの質の向上も計られた。

2.4. 計算部

計算部には使い易さと計算の高速化が要求される。使い易さに対しては、ソフトウェアの工夫でなるべくキーボードを押さないで済む、マウスによるボタンクリックを多用するマンマシンインターフェイスを作成した。

計算の高速化に対しては、アレイプロセッサを利用することで演算時間の短縮を計った。音響インテンシティを求めるにはクロススペクトルの計算が必要で、そのためには F F T 演算が必要となる。例として、64 チャンネル分 1.6 秒間のデータを (F F T ブロックサイズ 1024 で 50% オーバーラップで演算) 30 ポイントマッピングのためには 8000 回もの F F T 演算が必要になる。このため計

算機システムにもアレイプロセッサにデータを渡すためのソーティング、マッピングのためのグラフィック描画および信号入力部の制御機能の高速化が求められる。

上記性能を満足する計算機として HP 社製 9000/370 型を選定した。

この結果、データ獲得からマッピング出力までの時間は 2 分以内となった。そのうちわけは信号入力部から計算機へのデータ転送に 40%、クロススペクトル演算に 40%、そしてマッピング演算に 20% である。

2.5. 全体システム

インテンシティプローブ部、信号入力部および計算部から構成される全体システムの略図を Fig. 9 に示す。本システムはシャーシダイナモ付大型 5 面無響室に設置され、商品開発等に利用されている。

3. 性能検証

3.1. プローブの性能検証

テスト方法は 5 面無響室床面にオーディオスピーカを上向きに設置し、上方 1m 位置に供試プローブを設置した。スピーカ出力は種々帯域の純音を用いた。供試プ

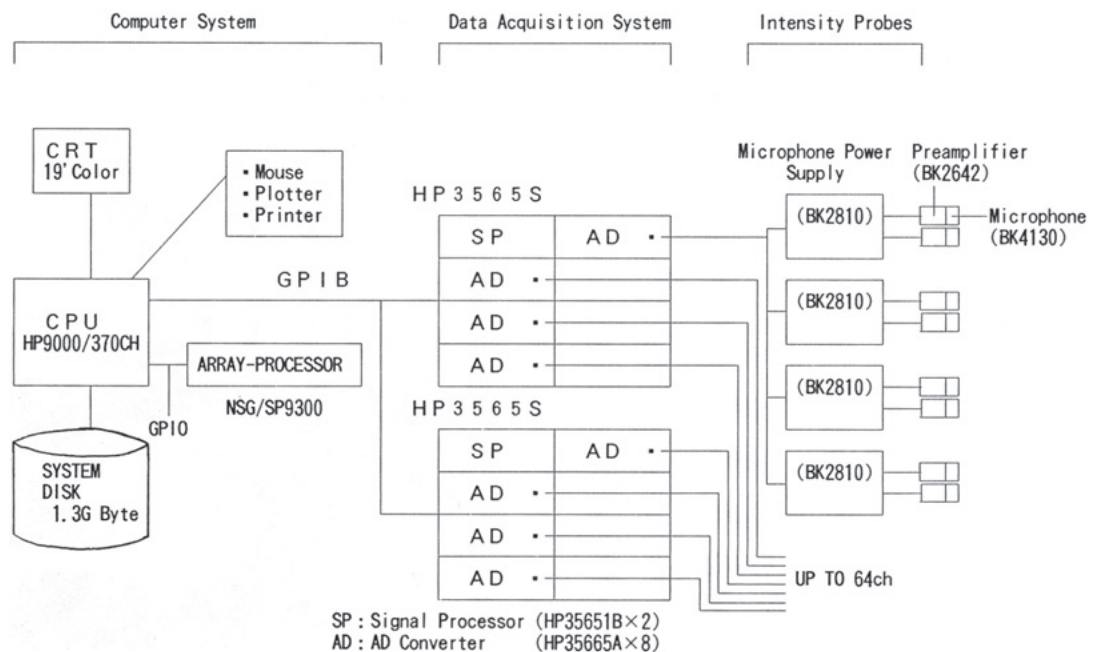


Fig. 9 System Block Diagram

ローブは本システムで開発したプローブおよび比較対象として B&K 社製 3519 型を用いた。プローブの出力信号は B&K 社製 2032 型アナライザを用い、クロススペクトルの演算をした。テスト結果を Fig. 10 に示す。両プローブ間で目標の周波数帯域に於いては誤差が少ないことがわかり、実用精度を満足していると言える。8kHz 帯域で誤差が大きい理由は前述したマイクロホン間の距離によるものである (Fig. 3)。

次に残留インテンシティ指数のテスト結果を Fig. 11 に示す。残留インテンシティは、同一信号を音響インテンシティ計測システムの両マイクロホンに供給した場合に計測されるインテンシティであり、残留インテンシティ指数とは、音圧レベルと残留インテンシティレベルとの差をいうが、この指数が大きいほどシステムの指向特性が優れているといえる。開発プローブの残留インテンシティは低周波数帯域 (125Hz) では 3519 型に比較して多少低いが、他の帯域では全く問題のない特性を示している (Fig. 11)。

3.2. 音響パワー計測によるシステム検証

供試音源は B&K 社製 4205 型サウンドパワーソースで、50Hz~10kHz のホワイトノイズを定常的に出力させ

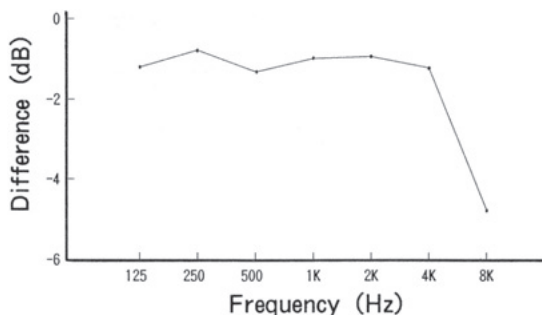


Fig. 10 Difference between Developed Probe and BK3519

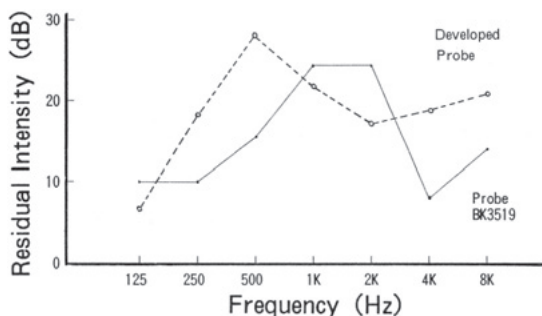


Fig. 11 Residual Intensity Index

た。4205 型の音響パワー出力値は 10mW とした。供試音源を 5 面無響室中央の床面に設置し、これを取り囲む一辺 80cm の立方体閉曲面にプローブ支持部をセットしてインテンシティおよび音圧を計測し音響パワーを求め、以下の結果を得た。

10.00 mW : B&K 社製 4205 型読み値

9.34 mW : インテンシティ法によるパワー

9.21 mW : 音圧法 (周波数領域) によるパワー

9.15 mW : 音圧法 (時間領域) によるパワー

という実用上十分な結果がえられシステム全体の機能が検証できた。

4. 実車計測例

このシステムを用いて加速騒音の音源探査を実施した例を紹介する。

供試車輻は直列 4 気筒排気量 1000cm³ の自動二輪車である。50km/h 定常走行から全開加速した時の実走分析データを Fig. 12 に示す。①は全周波数帯域の音圧レベル、②は 1.6kHz 帯域の音圧レベルの時間的変化、③はエンジン回転数を示し、④は最大音圧時の 1/3 オクターブバンド周波数分析を示し、5 回走行分を重ね書きしてある。

音圧レベルを支配している帯域 1.6kHz について、台上に於いて本システムを用い音源解析を実施した。Fig. 13 に実車外観図の上に全周波数帯域のインテンシティをマッピングした例を示す。このテストの運転条件は、実走時の最大音圧が計測された時のエンジン回転数 5250 rpm を定常運転で全開全負荷吸収で与えている。

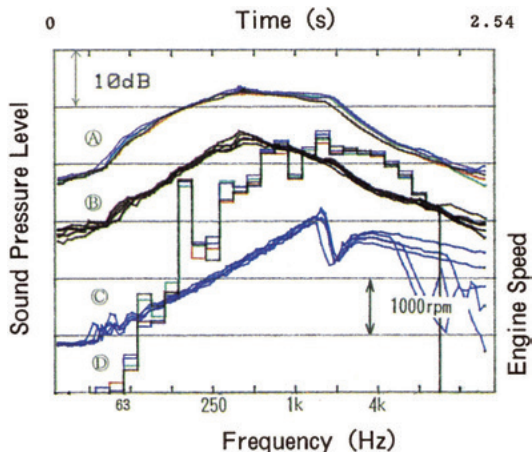


Fig. 12 Field Test Results

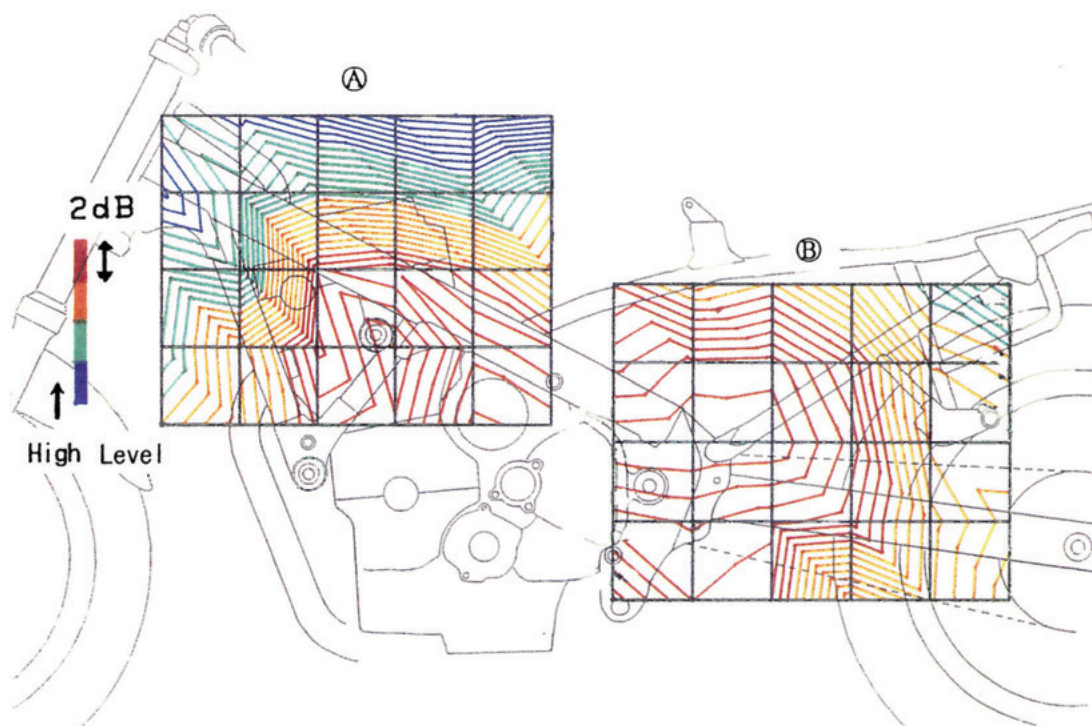


Fig. 13 Intensity Contour (Overall)

次に Fig. 13 の①部について 1.6kHz 帯域の音源解析を試み、インテンシティをマッピングしたものを Fig. 14 に示す。Fig. 15 にこの過渡現象を 1.6kHz の帯域でエンジン回転数を変えてマッピングした例を示す。

エンジン回転数の変化により音源が推移していく様子が観測できる。このように実走では分析不可能な音の発生部位に関する情報を台上で得ることができる。

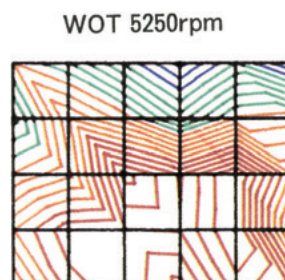


Fig. 14 Intensity Contour (1.6kHz)

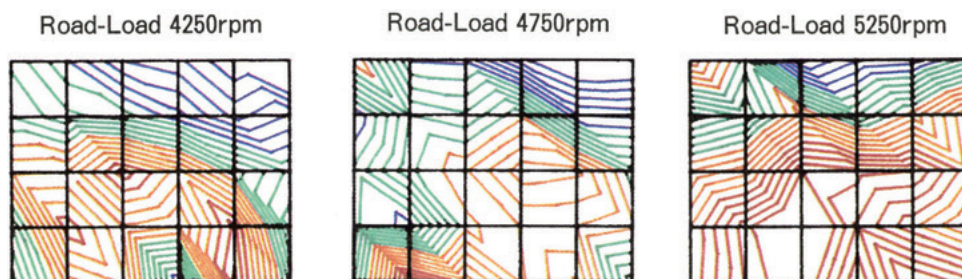


Fig. 15 Intensity Contour (1.6kHz)

5. まとめ

今回開発した台上騒音計測装置の性能検証と実際の二輪車への適用結果から、次のことが明らかになった。

- (1) 誰でも簡単に使える実用的なシステムが実現できた。
- (2) 多チャンネル同時計測が実現できるため、従来手法に比較して、二輪車の運転条件の差異(エンジン回転数、油温、負荷等)に起因する測定値のバラツキをきわめて小さくでき、騒音解析精度の向上が計れた。
- (3) 性能検証テストと実際の二輪車への適用テストを通じて、本システムの計測・解析時間の短縮が確認できた。騒音研究はもちろん、商品開発での使用も十分実用的なものとなった。
- (4) システムの核となる自作ソフトウェアは複雑な騒音に関し、発生メカニズムから伝播特性を解析していく上で重要な位置付けになる。

6. あとがき

本システムを用いて信号処理技術面と計測能力面でのさらなる改善を加えながら、騒音対策技術の向上を図っていきたい。

謝 辞

本システムの開発にあたり、多大なご助言をいただきました日東紡音響株式会社、日本システム技術株式会社、松下インターテクノ株式会社および横河ヒューレットパッカード株式会社の関係各位に謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Microphone configurations used in acoustic intensity probe.
- 2) Phase characteristics of Microphones for intensity probe.
- 3) Sound intensity terminology
- 4) Validity of sound power determination using sound intensity measurement
- 5) Source location using vector intensity measurements
Author : Per rasmussen B&K
Sound and vibration March 1989
- 6) デジタル信号処理(上)、(下)
伊達玄訳 コロナ社 1986
- 1)~4) B&K 2nd international congress on acoustic intensity. September 1985

■ 著 者 ■



柏 木 均



清 水 聡



下河辺 啓吉



関 田 雅 彦