

音響インテンシティ自動計測装置*

(株)小野測器**

1. はじめに

音響インテンシティ計測手法として最も一般的なものは2マイクロホン法である^{1,2)}。この方法の特徴は

- (1) 複雑な形状の音源にも応用できる。
- (2) 実使用の状態で正確な計測ができる。
- (3) 空間におけるエネルギーフローを計算でなく直接求めることができる。
- (4) 二つのマイクロホンの位相校正が必要である。
- (5) 測定周波数範囲に従って、2マイクロホン間の距離を変える必要がある。
- (6) マイクロホンの位置決めが容易でない。

2マイクロホン法が良く用いられる理由は(1)~(3)の利点が(4)~(6)の欠点を補って余りあるからである。しかしながら、この方法が実験室のみならず広く現場で用いられるためには、測定の自動化が必要と思われる。この目的のために、3種類のマイクロホン移動用ロボットを開発した。以下、ロボットとそれを含む自動計測装置、及びその応用例について述べる。

2. 自動音響インテンシティ計測装置

音響インテンシティの計測で、最も時間を要する過程は、測定点の位置決めのために、音源を囲む箱型、又は半球面の枠組みを作り、更に糸を張って測定面を細分化する(あるいは、それと類似した)作業である。また、マイクロホンを手で保持すると、測定中に振れて測定誤差を生じる原因ともなる。放射パワーを測定する場合でも、音場を可視化する場合でも、精度を増すためには測定点数を増す必要があるから、上に述べた作業は大変なものである。このような理由から音響インテンシティ自動計測装置の開発を行った。自動化によって得られる利点としては、

- (1) 測定時間の短縮、
- (2) 測定精度の向上、
- (3) 安全性の向上、
- (4) 検査の自動化、

等が挙げられる。3種のマイクロホン位置決めロボット

は、(1)3軸型平面スキャンロボット、(2)2軸型平面スキャンロボット、及び(3)半球面スキャンロボットである。

2.1 3軸型平面スキャンロボット

図-1に示す3軸型平面スキャンロボットは水平又は垂直面上でマイクロホンをスキャンしたい場合、例えば直方体の形状をした音源の測定や、壁面を通過する音の測定に便利である。直方体の前5面を測定する場合には、反対側の一面を除く4面はロボット又は音源を動かさずに測定できる。更に、傾斜した平面でスキャンすることも可能である。用途としては、一般発音体からの全放射パワーの測定、音源探査、音場解析(音場の可視化)、更に音響材料や窓の透過損失の測定などがある。今回開発したロボットの可動範囲は、横2m、高さ1.5m、奥行き1mであり、マイクロホンの移動速度は、50mm/sである。位置決め精度は原点($x=y=z=0$)から、最遠点まで移動したときに目標位置から2mm以内に入っている。

2.2 2軸型平面スキャンロボット

図-2に示すロボットは飛島建設と共同で開発したもので、垂直面での音響インテンシティ計測を目的としている。用途は壁面からの放射音の測定、音響材料の透過損失の測定などである。横方向は0.8mの長さを持つユニットを順次つなぎ合わせることによって、狭いドアから幅広い壁面まで目的に応じて横方向のスキャン幅を可変できるようにしている。また、高さ方向も、最大高さ2.2m以下と1.8m以下の二つの場合に対応できるように、Y軸高さを可変できる。本ロボットは建築現場に搬入して測定できるように、軽量化並びに組立及び解体が容易にできるような設計になっている。

2.3 半球面スキャンロボット

半球面スキャンロボット(図-3)の使用目的は発音体からの全放射パワーの測定が主なものである。直径1.6mのリング上をアームを有する可動部分が ± 180 度(経度方向)の範囲で動く。更にアーム自身が ± 90 度(緯度方向)の範囲で回転することにより、マイクロホンを仮想半球面の任意の点に設定することができる。図に示すアームでは球面の半径は1mである。アームの形状を変えることにより、異なる半球面上をスキャンすること

* Automated sound intensity measurement system.

** Ono Sokki Co., Ltd.

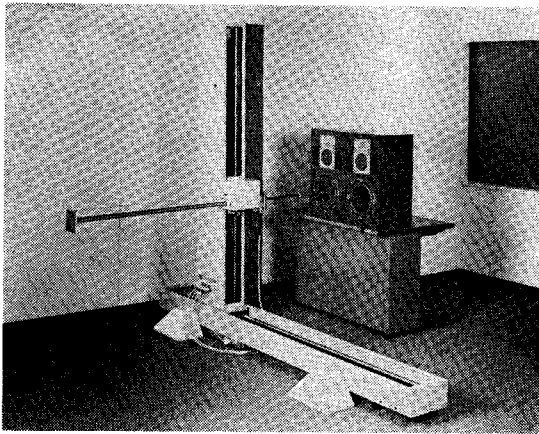


図-1 3軸型平面スキャンロボット

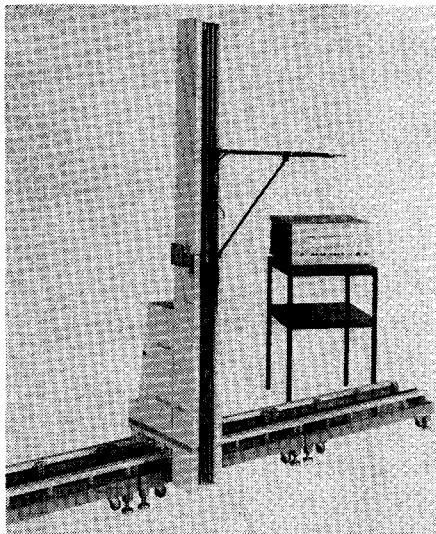


図-2 2軸型平面スキャンロボット

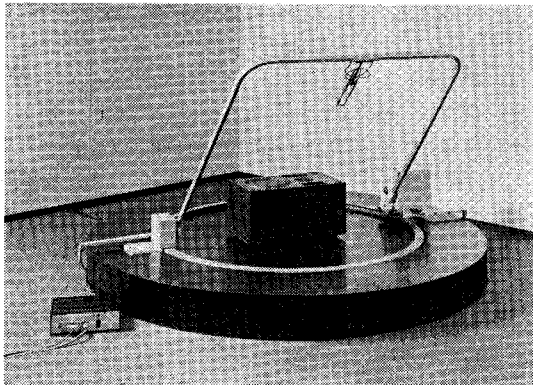


図-3 半球面スキャンロボット

が可能である。

2.4 装置の構成

音響インテンシティ自動計測装置全体の構成を図-4に示す。デスクトップコンピュータ (HP-9000 シリーズ

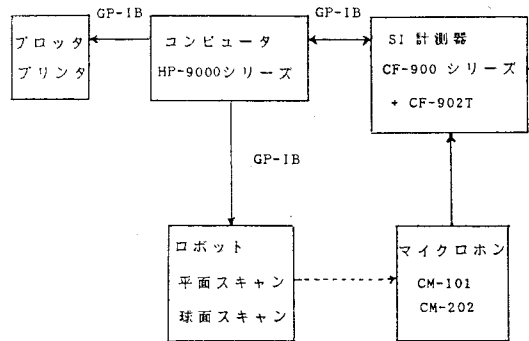


図-4 音響インテンシティ自動計測装置の構成

モデル 310 相当) に測定点数, 座標, 測定周波数範囲などを入力することにより, 音響インテンシティ計測器 (小野測器製 CF-900 シリーズ FFT アナライザ + CF-902 T) の計測条件がセットされ, ロボットのスキャンがスタートする。マイクロホンからの出力はロボットの動きと同期して音響インテンシティ計測器により分析され, FFT アナライザのフロッピーディスク又は外部のディスクに転送される。計測終了後, データは種々の処理を施され, その結果はプリンタ又はプロッタにより出力される。

3. 音響インテンシティ自動計測装置の応用例

3.1 近接する二つの平板スピーカからの音放射

図-1 に示すような二つのスピーカを用いて, それらの位相と振幅を制御することにより, 板の共振による音放射を簡易的にシミュレートすることができる。二つのスピーカを同相で駆動すれば呼吸球, 逆相で駆動すれば, 板の1次の分割振動のような働きをする。逆相の場合の二つのスピーカの振幅比は板の共振の二つの領域の体積速度の比に対応する。ここでは, 音響インテンシティ及び音圧分布を平面スキャンロボットを用いて次の4例について計測した結果について述べる。

- (1) 同相で駆動電圧比 (左:右) 1:1
- (2) 逆相で駆動電圧比 (左:右) 1:1
- (3) 同相で駆動電圧比 (左:右) 1:0.7
- (4) 逆相で駆動電圧比 (左:右) 1:0.5

駆動周波数は 300 Hz である。低音用平板スピーカの直径はエッジ外側で測って 0.2 m, 二つのスピーカの中心間距離は 0.35 m (約 0.3 波長) である。スピーカバツフル面上での音響インテンシティ (垂直方向) と音圧の等高線を図-5 に示す。同相で駆動したときに, 音圧等高線では二つの音源が多少つながっているように見えるが, 音響インテンシティの等高線では明確に分離しており, 後者の方が音源探査の能力において勝っていることが分かる。逆相で 1:1 の振幅比で駆動したときの音響インテンシティ, 音圧ともに明確な分離を示してい

る。しかしながら、現実には二つの音源がこのようにバランスしている例は少ないと思われる。振幅比が1:0.7の場合の音響インテンシティの等高線は非常に興味深い。右側のスピーカの内側では音を吸収し、外側では音を放射している。このときには、音圧等高線の方が音源の状態を良く表している。垂直方向成分が負となる理由は、右側スピーカの内側表面上では左側スピーカの影響が強く、音圧と振動速度との位相差が90度以上になるためである。振幅比が1:0.5の場合には、左側スピーカの影響が更に強まるため右側スピーカ前面が音を吸収している。以上の結果が示すように、近接した二つの領域が逆相で振動する場合には、ある部分において音が吸収されることはごく普通のことであると言える。図-6は二つの平板スピーカの中央を結ぶ線を通る垂直面上のエネルギーの流れを示す。最もスピーカに近い測定点

は、パッフル面から40mm離れている。同相及び逆相で駆動電圧比が1:1のときの音放射は対称でスムーズな音の流れが見られる。逆相で駆動電圧比が1:0.7及び1:0.5のときに右側スピーカが音を吸収している状態が良く分かる。しかしながら、複雑なエネルギーの流れは音源に可成り近い範囲でしか観測されないので、音源の状態を良く知るためには、なるべく近いところで計測する必要があるであろう。

以上の例では、二つのスピーカが逆相で振動したときに一方のスピーカによる音のエネルギーの吸収が見られたが、同相の場合でも音の吸収が見られることを示す。図-7は二つのスピーカを600Hz、駆動電圧比を10:1で駆動した場合の音響インテンシティと音圧の等高線を

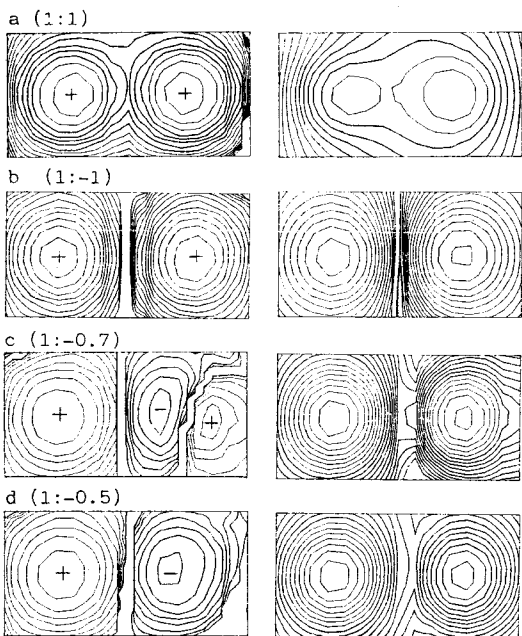


図-5 二つの平板スピーカの300Hzにおける音響インテンシティ(左)と音圧(右)の等高線。図中数字は駆動電圧比、負の符号は逆相であることを示す。

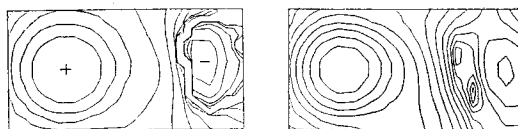


図-7 二つの平板スピーカの600Hzにおける音響インテンシティ(左)と音圧(右)の等高線、駆動電圧は10:1

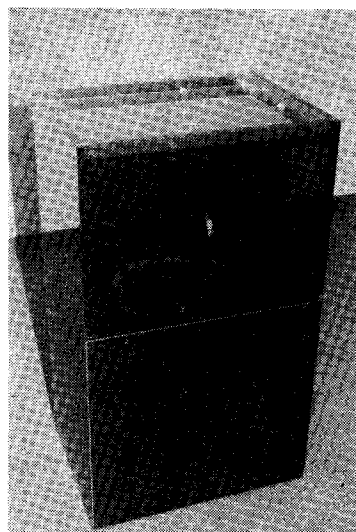


図-8 アクリル箱(下に駆動用のスピーカがある)

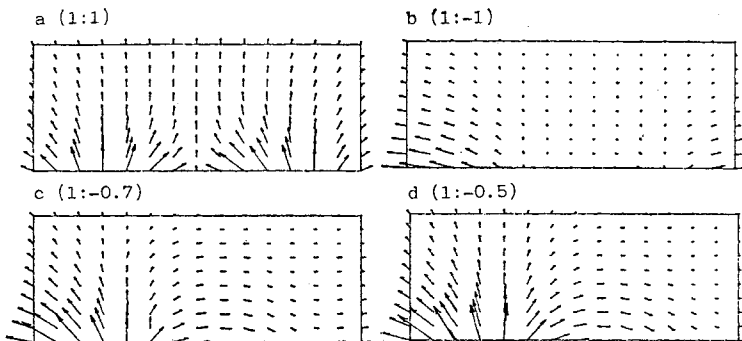


図-6 二つの平板スピーカの中央を結ぶ線を通る垂直面上のエネルギーの流れ図

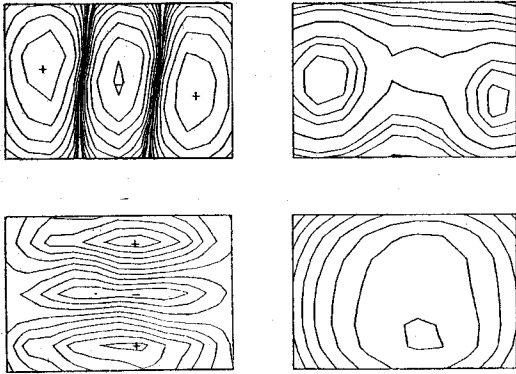


図-9 アクリル板面上の 210 Hz(上)と 370 Hz(下)における音響インテンシティ(左)と音圧(右)の等高線

示したものである。このときも右側のスピーカの一部で音が吸収されている。その理由はスピーカ間距離がほぼ半波長に相当するため、右側のスピーカ面上での音圧が左側スピーカ自身が本来作り出すべき音圧と 90 度以上の位相差を有するからである。

3.2 板の分割振動による音放射

図-8 に示すアクリルで作られた箱の内部に音を発生し、薄い天板を通してどのように音が放射されるかを調べた。天板の寸法は 0.33 m (長さ), 0.23 m (幅), 2 mm (厚み) である。測定は板の共振である 210 Hz と 370 Hz で行った。天板から 40 mm 離れた平面上で測定した音響インテンシティ (垂直成分) と音圧分布の結果を図-9 に示す。音響インテンシティの等高線は二つの周波数において板の共振モードを良く表しているが、音圧の等高線からは振動の状態を予想することが難しい。中央部分で負のインテンシティが見られるが、3.1 節で述べた理由がこの場合にも当てはまる。210 Hz 及び 370 Hz の共振はそれぞれ長さ及び幅方向に 3 分割するモードである。いずれも場合にも同相で動く外側の領域の体積速度が逆相で動く中間の領域の体積速度より大き

い。このために、天板表面上の音圧は外側の二つの領域の動きによって生ずる音圧が支配的になり、中間の領域は音を吸収することになる。もしこれらの共振がもっと高い周波数で起きれば、各々の領域が位相にかかわらず効率よく音を放射することができる。

異なる複数個の部分が任意の位相で振動するときの音放射の問題は、自己及び相互放射インピーダンスが知られれば、理論的に検討することができる^{3),4)}。

4. まとめ

今までに開発した 3 種類のロボット、それらを含む音響インテンシティ自動計測装置の概略について述べた。音響インテンシティの自動計測は測定時間の短縮、測定精度及び安全性の向上などに有効である。この装置を用いて行ったスピーカからの音放射の実験では、お互いの干渉によって音放射がどのように変わるか、特に振動物体の表面上で負のインテンシティがどのようにして発生するかについて検討した。音響インテンシティ計測は特に騒音制御、建築音響、更にはスピーカの評価などにおいて多くの可能性を持っている。音響インテンシティ計測を効率よく行うために、その自動計測装置は今後とも重要な役割を果たすと思われる。

文 献

- 1) F. J. Fahy, "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals," *J. Acoust. Soc. Am.* **62**, 1057-1059 (1977).
- 2) J. Y. Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity without error caused by instrument phase mismatch," *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 1613-1616 (1978).
- 3) H. Suzuki, "Mutual radiation impedance of a double disk source and its effect on the radiated power," *J. Audio Eng. Soc.* **34**, 780-788 (1986).
- 4) 鈴木英男, "音響強度の計測方法とその応用," *内燃機関* **26**, 32-37 (1987. 3).