

Acoustic Intensity 計測法に関する研究 (第4報)

——複素音響インテンシティによる音場解析——

Study on Acoustic Intensity Measuring Method (4)

——Sound Field Analyses by Complex Intensity——

橘 秀 樹*・矢 野 博 夫*・日 高 新 人*

Hideki TACHIBANA, Hiroo YANO and Yoshito HIDAKA

1. ま え が き

音響インテンシティは、音圧と粒子速度の積の時間平均として定義され、音場における音響パワーフローを表すベクトル量(実数)である。これまでの報告では、すべてこの量に着目した音響計測に関する検討結果を述べてきた。一方最近では、音響インテンシティの概念を複素数領域に拡張した量(複素音響インテンシティ)が注目されはじめ、われわれも音響インテンシティに関する一連の研究として、この量に着目した音場の解析および音響測定法について研究を行っている。そこで本報ではこの概念を要約し、その基本的な応用として比較的単純な音源の放射性状および反射性音場の解析に適用した結果を報告する。

2. 複素音響インテンシティの定義と基本的性質

音場内の複素音響インテンシティ $\vec{I}_c(r)$ (r は位置を表す)は、次式で定義される。

$$\begin{aligned} \vec{I}_c(r) &= \frac{1}{2} p(r, t) \cdot \vec{u}^*(r, t) \\ &= \vec{I}(r) + j\vec{Q}(r) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 $p(r, t)$: 音圧 (複素数表示)

$\vec{u}^*(r, t)$: 粒子速度(複素数表示)の複素共役

上式で、交流回路理論とのアナロジーとして音圧を電圧、粒子速度を電流に対応させれば、 \vec{I}_c は複素(ベクトル)電力に相当する。その実数部 \vec{I} (active intensityと呼ばれる)は有効電力に相当し、音場における実際の音響パワーフローの強さを表しており、単に音響インテンシティと言えばこれを指す。数式上では、音圧と粒子速度のうちの音圧との同相成分の積の時間平均である。それに対して虚数部 \vec{Q} (reactive intensityと呼ばれる)は無効電力に相当し、音圧と粒子速度のうちの音圧との直交成分の積の時間平均である。この \vec{Q} は、音源の近傍や定在波音場などで存在し、単一平面波音場では存在し

ない。

(1)式において、音圧を

$$p(r, t) = P(r) e^{j(\omega t - \phi(r))} \quad (2)$$

とすると、Eulerの式

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (3)$$

ただし、 ρ : 空気の密度

にもとづいて粒子速度は次式で表される。

$$\vec{u}(r, t) = \frac{1}{\omega \rho} [P(r) \nabla \phi(r) + j \nabla P(r)] e^{j(\omega t - \phi(r))} \quad (4)$$

これらの式を(1)式に代入すれば、 \vec{I} 、 \vec{Q} は位置のみの関数としてつぎのように表される。

$$\vec{I}(r) = \frac{1}{2\omega\rho} P^2(r) \nabla \phi(r) \quad (5)$$

$$\vec{Q}(r) = -\frac{1}{4\omega\rho} \nabla P^2(r) \quad (6)$$

(5)式において、 \vec{I} は位相の傾きに比例している。すなわち、 \vec{I} は位相一定の面に垂直なベクトルであることがわかる。一方(6)式において、 \vec{Q} は音圧の2乗振幅の傾きに比例している。すなわち、 \vec{Q} は音圧振幅が一定の面に垂直なベクトルであり、音圧の極大点および極小点では0となることがわかる。

つぎに、 \vec{I}_c の性質について調べるために、まずその回転($\text{curl } \vec{I}_c = \nabla \times \vec{I}_c$)についてEulerの式などを考慮して演算すると、音源を含まず損失のない音場に関して次の関係が導かれる。

$$\text{一般に、} \nabla \times \vec{I} \neq 0 \quad (7)$$

$$\text{常に、} \nabla \times \vec{Q} = 0 \quad (8)$$

(7)式から、 \vec{I} はrotationalであり、渦ありベクトル場を形成することがわかる。それに対して、(8)式から \vec{Q} はirrotationalであり、渦なしベクトル場を形成することがわかる。

また、 \vec{I}_c の発散($\text{div } \vec{I}_c = \nabla \cdot \vec{I}_c$)について同様の考察を行うと、

$$\text{常に、} \nabla \cdot \vec{I} = 0 \quad (9)$$

$$\text{一般に、} \nabla \cdot \vec{Q} \neq 0 \quad (10)$$

*東京大学生産技術研究所 第5部

(9)式から、 \vec{I} はsolenoidalであり、湧き出し点も吸い込み点もない管状ベクトル場を形成することがわかる。それに対して、(10)式から \vec{Q} はnonsolenoidalであり、そのベクトル場には湧き出し点および吸い込み点が存在しうること、また(6)式と考え合わせると、 \vec{Q} ベクトルは音圧振幅の極大点から始まり、極小点へ向かうことがわかる。

3. 基本的な応用例

複素音響インテンシティーの有効性を調べるために、以下に述べるような放射音場および反射音場に関する基礎的な検討を行った。

3.1 点音源配列からの音の放射性状

板の分割振動による音の放射などの現象をきわめて単純化した形で調べるために、バップルにスピーカを取り付けて実験を行った。

まず最も単純なモデルとして、バップル上に2つの音源スピーカを40cm離して取り付け、それらに同一周波数の正弦波を入力した場合の放射音場を測定した。その場合、2つのスピーカへの入力電圧の比は2:1とし、互いに逆相としてバップル面に垂直な断面内の active intensity \vec{I} と reactive intensity \vec{Q} を測定した。測定結果として、まず周波数が160Hzの場合の結果を図1に示

す(図中の+,-は逆位相, 2, 1は入力電圧比を示す)。このうち(a)に示す \vec{I} のベクトルマップをみると、相対的に振幅が大きい左側の音源からはパワーが放射されているが、右側の音源にはパワーの流れ込み(sink)がみられる。それに対して(b)に示す \vec{Q} のベクトルマップをみると、右のスピーカからもベクトルの放射が見られる。これは、この位置で音圧が極大になっていることを示しており、2つのスピーカが独立した音源であることがわかる。図2は、周波数を315Hzとしたときの同様の結果である。この場合には、 \vec{I} のベクトルマップでは右側のスピーカの存在が不明瞭であるが、 \vec{Q} のベクトルマップでは160Hzの場合と同様に、音源の位置を明確に同定することができる。

つぎに、平面バップル面に4つのスピーカを取り付け、それらから純音を放射させたときのバップル面に平行な面内(バップルから3cm)の \vec{I} および \vec{Q} の測定を行った。図3は周波数を315Hzとしたときの結果であるが、 \vec{I} ベクトルでは相対的に弱いB,Cのスピーカの存在はわからないが、 \vec{Q} ベクトルでは、4つの音源の存在を明確に把握できる。

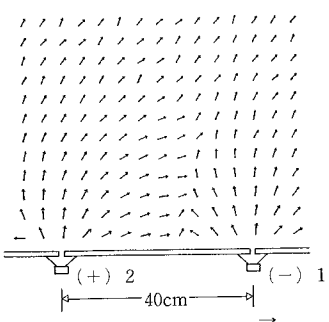
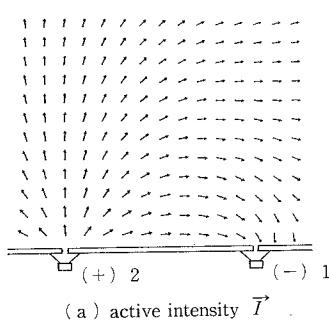


図1 2つの点音源からの放射音場 (160Hzの場合)

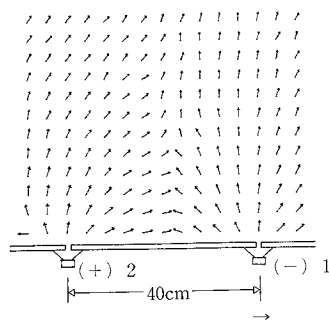
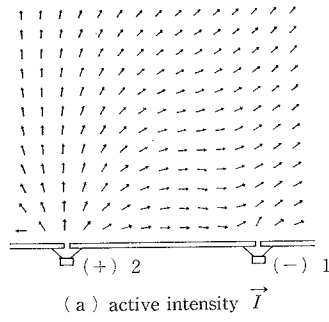


図2 2つの点音源からの放射音場 (315Hzの場合)

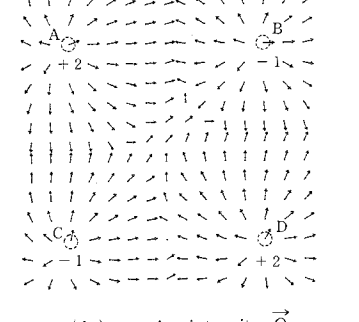
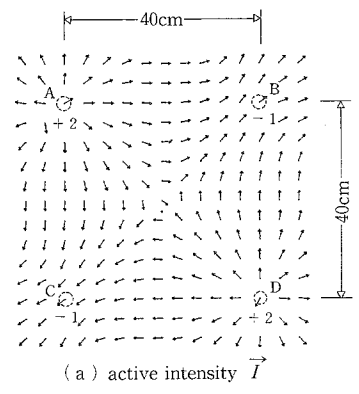


図3 平面バップル上の4つの点音源からの放射音場 (315Hzの場合)

研 究 速 報

3.2 板の振動による音の放射性状

板の振動による音の放射の単純な例として、幅10cm、長さ80cm、厚さ1cmの短冊状の塩ビ板の中央を電磁シェーカーで加振し、板近傍における \vec{I} 、 \vec{Q} および板の振動速度を測定した。それらの結果の一例として、加振周波数250Hzの場合の結果を図4に示す。(c)は板の振動速度レベルの分布で、+、-は位相が逆になっていることを示す。この結果と(a)に示す \vec{I} の測定結果を比較してみると、板の近傍では、音響パワーの放射と吸い込みが振動速度の山の部分で交互に生じている。一方、(b)をみると、それぞれの振動速度の山の部分で \vec{Q} ベクトルが上方向を向いており、これらの部分が音源となっていることを示している。この例からも、板が分割振動している場合、振動速度の極大点はすべて音源であるが、放射パワーの大小および位相関係によって、実際に音響パワーが外向きに放射される部分 (source) と、実効的にはパワーが吸い込まれる部分 (sink) とがありえることがわかる。

つぎに2次元的な板の振動による音の放射に関する基礎的な実験として、40cm角の正方形のアルミ板(厚さ1.2mm)の中心を電磁シェーカーで加振し、それに並行な面内(板より3cm)の \vec{I} および \vec{Q} を測定した。その結果の例として、257Hzでモードが励起されたときの測定結果をクラドゥニ図形と共に図5に示す。この場合にも、 \vec{I} のベクトルマップでは実際のパワーフローのようすはわかるが、主音源位置の同定は難しい。それに対して、 \vec{Q} のベクトルマップでは、振動モードの腹の位置を中心としてベクトルが放射状になっており、これから音源位置が同定できる。

3.3 反射音場の解析

反射面(体)が存在する音場あるいは反射性の境界面

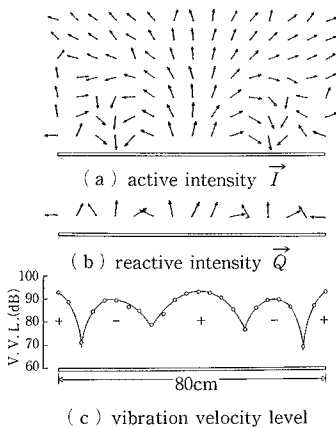
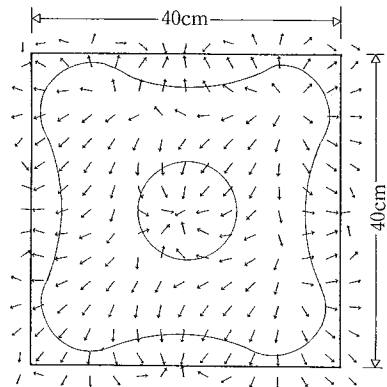


図4 短冊状の板の振動による放射音場(250Hzの場合)

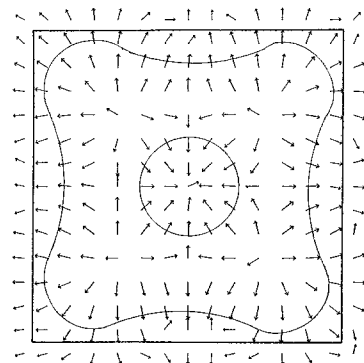
で囲まれている音場は、複数の音波の干渉のためにきわめて複雑である。このような音場について、複素音響インテンシティを測定することにより、その実数成分からパワーフローを、また虚数成分から音場のリアクティビティを観測することができる。

この種の基本的な応用例として、まず図6に示すように、直交した2つの反射面で囲まれた範囲に音波が入射したときの音場について、複素音響インテンシティを測定した結果を図7に示す。(a)に示す \vec{I} のベクトルマップをみると、入射波と反射波の干渉によってパワーフローの渦が生じていることがわかる。また(b)に示す \vec{Q} のベクトルマップでは、ベクトルが放射状になっている部分および向き合う部分がみられる。前述のとおり、これらはそれぞれ、定在波音場における音圧の極大および極小の部分を示している。またこのように、大きな \vec{Q} ベクトルが存在するという事は、音場がリアクティブであることを意味している。

別の例として、音の波長に比べて厚みが無視できる2



(a) active intensity \vec{I}



(b) reactive intensity \vec{Q}

図5 正方形板の振動による放射音場(257Hzの場合)

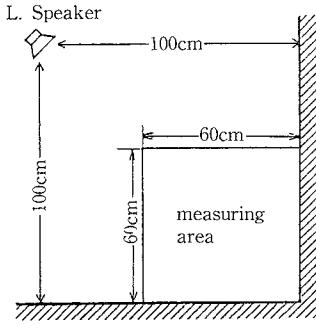
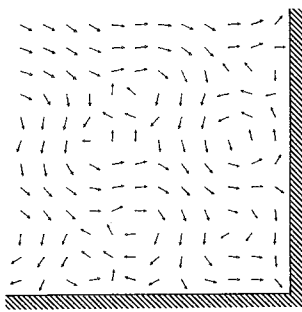
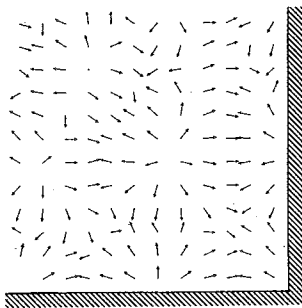


図 6 測定位置関係



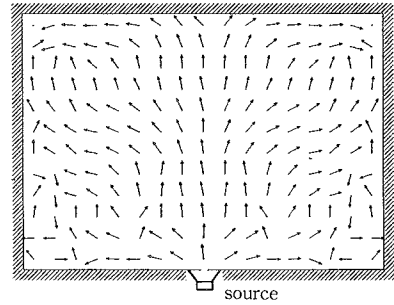
(a) active intensity \vec{I}



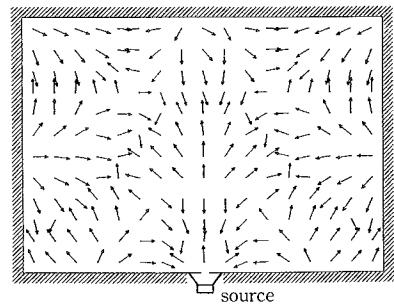
(b) reactive intensity \vec{Q}

図 7 直交部の反射音場における測定結果

次元音場 (塩ビ板で製作した縦65cm, 横85cm, 厚さ 8 cmの箱) の1点を励振したときの \vec{I} および \vec{Q} の測定例として630Hzの場合の結果を図8に示す。境界が完全反射性であれば, 原理的にはパワーフローは生じないはずであるが, 実際にはわずかながら内部が吸音性であるために, (a)に示すように \vec{I} ベクトルが観測されている。一方, (b)に示す \vec{Q} のベクトルマップでは, ベクトルが反対方向を向いている部分が定在波の腹(音圧極大), 逆にベクトルが向かい合っている部分が節(音圧極小)を意味している。このようなベクトルマップから定在波音場のようすを知ることができる。



(a) active intensity \vec{I}



(b) reactive intensity \vec{Q}

図 8 2次元室内の音場における測定結果

4. む す び

以上に述べたように, 音源近傍あるいは反射音場における音響インテンシティー測定では, 実際のパワーフローを示すアクティブインテンシティーだけでなく, リアクティブインテンシティーも同時に測定することにより, 音場についてより多くの情報が得られる。本報では, 複素音響インテンシティーについてその基本的な応用について述べたが, さらに実用的な応用として材料の斜め入射音響透過損失や吸音率の測定への応用などについて, 現在検討を進めている。これらについては別途報告する。なお本研究には, 中央大学大学院学生・安久司郎君も参加した。
(1987年8月10日受理)

参 考 文 献

- 1) 橋, 矢野: Acoustic Intensity計測法に関する研究 (第1報), 生産研究, Vol. 35, No. 12 (1983)
- 2) 橋, 矢野: 同上 (第2報), 生産研究, Vol. 36, No. 3 (1984)
- 3) 橋, 矢野, 日高: 同上 (第3報), 生産研究, Vol. 39, No. 9 (1987)
- 4) J. Tichy, "Use of the complex intensity for sound radiation and sound field studies", Proc. of 2nd International Congress on Acoustic Intensity (Senlis), (1985)