

小特集—可視化技術：音を見る・音で見る—

## 音響・振動インテンシティ法によるエネルギー場の可視化\*

鈴木英男 (オンテックアールアンドデー(株)\*\*)

43.20.Ye; 43.85.Fm

## 1. はじめに

音響・振動計測の分野でエネルギーの流れを可視化する技術がここ十数年急速に進んでいる。音場や振動の状況を可視化する最大の効果は音や振動の発生や伝わり方に関する理解を容易にすることである。波動のエネルギーの流れをベクトル(方向と大きさ)で表示すれば、エネルギーの源や吸収の場所がどこにあり、遠距離ではどのようなエネルギーの分布になるかが一目瞭然になる。振動や騒音の対策を講じるには音源を囲む、経路を遮断する、などの方策がとられるが、このためにもエネルギーの流れの視覚情報は貴重である。ここでは、主に音響インテンシティによる音場の可視化の例を紹介し、振動インテンシティによる振動エネルギーの流れの可視化についても若干触れる。

## 2. 音響インテンシティとは何か

電気計測において電圧だけでは不十分で電流や電力の計測も行われるように、音響計測でも昔から音響強度(インテンシティ)の計測の試みは行われていた<sup>1)</sup>。しかし、当時はセンサや信号処理の技術が不十分で満足できる精度の測定が困難であった。そのため、20年近く前までは音響計測と言えばマイクロホンで音圧を測定しそれを評価することがほとんどであった。耳が知覚するものは(両耳間の位相差を含めた)音圧であり、パワーの量ではないのでこれは頷けることでもある。近年、関連する技術の進歩と共に、Fahy<sup>2)</sup>やChung<sup>3)</sup>が二つのマイクロホンを用いた音響インテンシティの計測法を提案してから、音圧という

スカラ量(大きさ)だけでなく音響インテンシティというベクトルの計測技術とその応用が急速に進んだ<sup>4)</sup>。

電氣的なパワーが[電圧(V)×電流(A)]で、機械的なパワーが[力(N)×速度(m/s)]で求められるように、音響パワーも[音圧×面積(=力)×粒子速度]で求められる。粒子速度とは音波の伝搬に基づく空気粒子のマクロな動きのことである。音響パワーを面積で割ったものが音響インテンシティ(単位面積当たりの音響パワー、W/m<sup>2</sup>)であり、通常は時間平均音響インテンシティ(=PV cos φ, P:実効音圧振幅, V:実効粒子速度振幅, φ:音圧と粒子速度の位相差)が用いられる。電力がEI cos φ(E:実効電圧振幅, I:実効電流振幅)で求められることと同じように理解すればよい。粒子速度は方向性を持っているので、得られる音響インテンシティも方向と大きさを持つベクトル量である。計測の具体的な方法は文献を参照されたい<sup>4),5)</sup>。以下、具体的な可視化の例を挙げながらその有用性について述べる。

## 3. 音源の形状による放射特性の違い

図-1及び図-2はそれぞれ無限大のバツフル板に組み込んだ凸型及び凹型の円形ドームが剛体的に軸方向(上下)に振動するときの音響インテンシティ(左側)と音圧(右側)を計算により求めたものである<sup>6)</sup>。上がkA=1,下がkA=10(k:波数, A:ドーム半径)のときの結果である。凸型ドームの場合はドームの径に対して波長が短い(λ<2A)高周波数領域でもエネルギーが中心軸に集まらずに周囲に拡散してゆく。凹型ドームの場合は波長が長い周波数領域ではドーム内では軸に平行にエネルギーが流れるが、周波数が上がるにつれてエネルギーは最初円弧の焦点に集まりそれから広がってゆく。凹凸どちらのドームもピストンのように動く平板よりも指向性が広いが、エネルギー

\* Visualization of energy fields by use of sound and structural intensity methods.

\*\* Hideo Suzuki (Ontek R&amp;D Co., Ltd., Yokohama, 226)

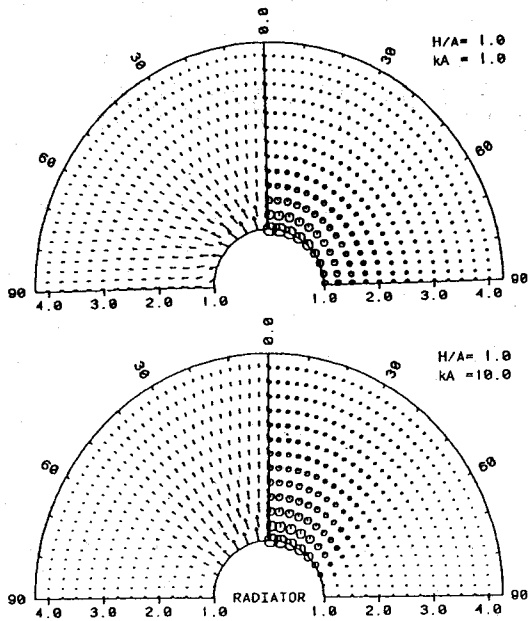


図-1 凸型のドームからの音の放射  
左：音響インテンシティ，右：音圧

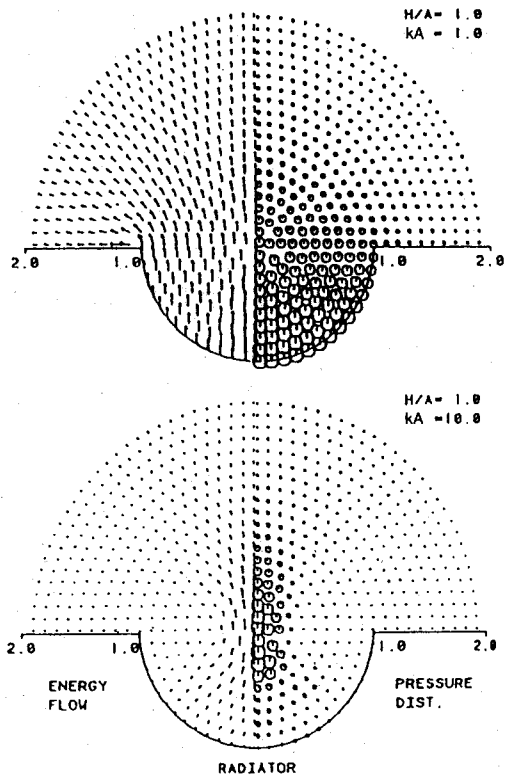


図-2 凹型のドームからの音の放射  
左：音響インテンシティ，右：音圧

ギーの流れを可視化することによりその訳が理解できる。指向性及び正面軸上の音圧特性に関する知見はスピーカの形状による音質の違いを説明する助けになると思われる。

#### 4. 分割振動する板からの音響放射

騒音低減を図る場合に分割振動する平板や曲面を有する板からの音が問題となる場合が多い。

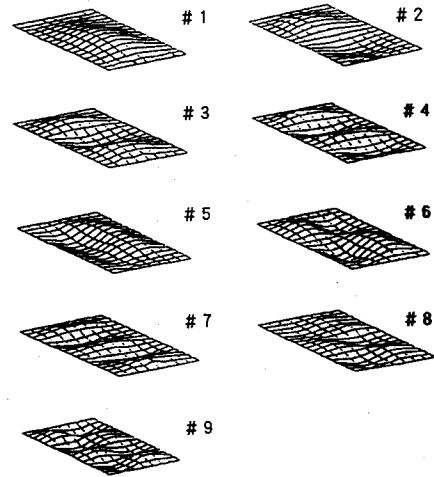


図-3 分割振動する板の振動モード

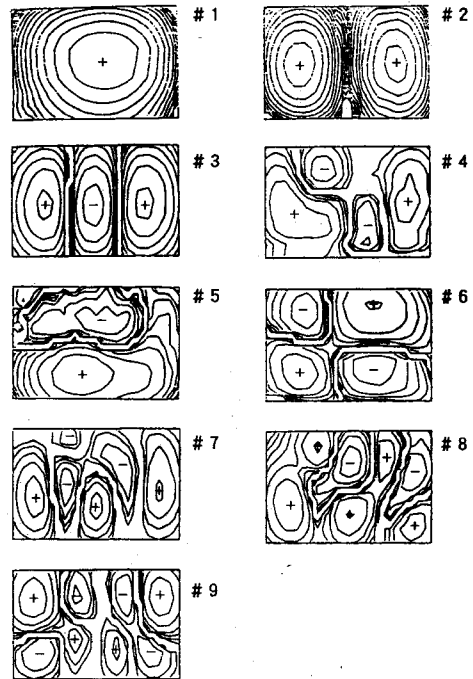


図-4 分割振動する板の上面の音響インテンシティ

図-3は300 mm×600 mm×2 mmのステンレススチールの板の共振周波数における振動モード、図-4はそれぞれの共振周波数において振動板からの高さ60 mmの面上で面に垂直な音響インテンシティを測定した結果である(板の裏側は箱で囲って音が回り込まないようにしている)。共振周波数は1次モードが127 Hz, 9次モードが472 Hzで他のモードはその間に分散している。1, 2次モードに関しては音響インテンシティはすべて正(放射)であるが, 3次モード以上では負(吸収)になるところが現れる。3次モードでは両側で音のエネルギーを放射し, 中央で吸収している。このモードについて言えば, 波長が板の寸法より大きい低周波数の領域では面上の音圧は同相で振動している両側の振動で支配される。そのときに中央部分は逆位相で動いており, その表面では音圧と粒子速度(板の振動速度に等しい)との位相差が180度近く( $\cos \phi = -1$ )になり, インテンシティが負になる。中央部分は実際に両側から音響的に仕事をされている。振動と音響放射を可視化することにより現象の把握が明確になり, 騒音対策に結び付けることができる。

## 5. 楽器からの音響放射

図-5はチェロの第2弦を弓で引いたときの響板のインテンシティの様子を示したものである<sup>7)</sup>。160 Hzでは点音源からの放射のように一様に四方に広がっていくが, 350 Hzでは部分的に音を吸収している様子も見られる。1.25 kHzでは発音の様子や指向性が非常に複雑になっている。このように見ていくと名器と言われる楽器の秘密も科学的な解明が少しずつ可能になるように思われる。

## 6. 吸音材の周りのエネルギーの流れ

図-6及び図-7はそれぞれ半無響室の床に大きさが400 mm×400 mmで厚みが50 mm及び150 mmの発泡ウレタンを置き, その真上1.5 mにスピーカを置いて255 Hzの正弦波の音を発生したときの発泡ウレタンの近傍の音圧と音響インテンシティの分布を示したものである<sup>8)</sup>。図から分かるように, 吸音材が薄い場合は上部から入ったエネルギーの一部は側面から出てくる。厚みが増えると, どの面でも吸音するようになる。この

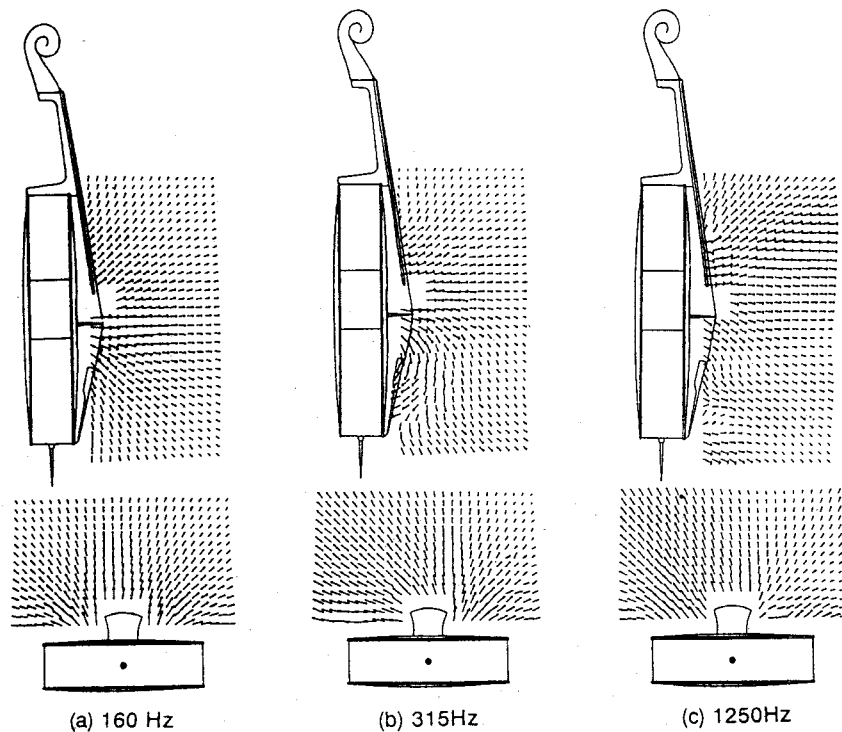


図-5 チェロの響板からの音の放射

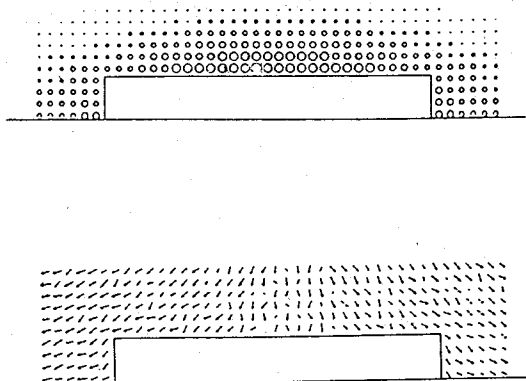


図-6 発泡ウレタン (厚さ 50 mm) の近くのエネルギーの流れ  
上: 音圧, 下: 音響インテンシティ

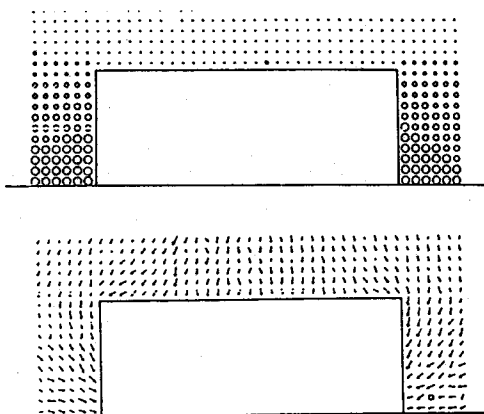


図-7 発泡ウレタン (厚さ 150 mm) の近くのエネルギーの流れ  
上: 音圧, 下: 音響インテンシティ

ように吸音材と言っても面のいたるところで吸音するわけではなく、吸音の仕方は吸音材の置かれる状況や音の入射方向により複雑に変化する。境界要素法を使って閉空間や開空間の音場解析がよく行われるが、吸音性材料表面のインピーダンスを一律に決めて境界条件とするには問題があることを示唆している。

### 1. アクティブ騒音制御による放射パワーの低減

アクティブ騒音制御により騒音源の放射パワーを低減するには波長に対して十分近い距離に置いた付加音源からほぼ逆相の音を放射して低減する。全放射パワーを最少化する最適な条件では付加音源からはエネルギーの放射も吸収もないこと

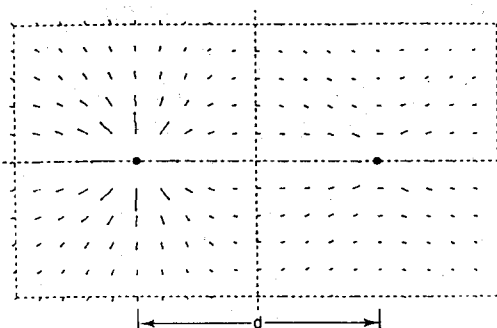


図-8 放射パワーを最少にする条件を満たすときの元音源 (左) と付加音源 (右) の周りのエネルギーの流れ

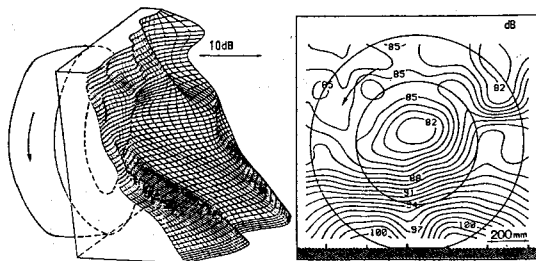
が計算上知られる<sup>9)</sup>。図-8 はその条件での二つの微小音源の周りのエネルギーの流れを示したものである ( $d=0.5\lambda/2\pi$  のとき,  $d$ : 音源間距離,  $\lambda$ : 波長)。左側の元音源から放射されたエネルギーは右側の付加音源を素通りするように流れてゆることが分かる。付加音源はエネルギーを吸収も放射もしないが、元音源からの放射効率を低下させる効果を持っている。アクティブ騒音制御の場合に音のエネルギーがどこへ行ってしまうのかという質問がよくあるが、元音源からのエネルギーの放射量そのものが減少する、と理解すればよい場合が多いようである。

## 8. 路面騒音

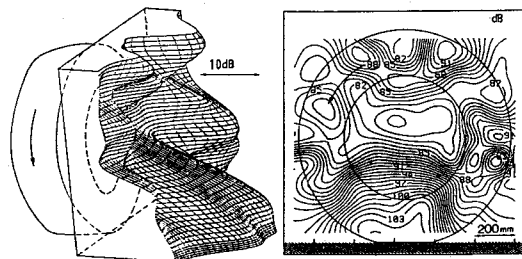
最近では低騒音舗装と言われる方法も実用化され始めている。道路交通騒音を低減するには道路そのものの評価が重要な課題となってきた。そのためには、タイヤと道路表面の組み合わせとしての音響放射を検討する必要がある。図-9 は走行中のタイヤから 100 mm 離れた  $1\text{m} \times 1\text{m}$  の面に垂直な音響インテンシティ成分を測定し等高線で示したものである<sup>10)</sup>。当然のことながら路面との接触部から大きなエネルギーが放射されていることや、タイヤの種類により放射の状況がかなり異なることが分かる。

### 9. 振動インテンシティによる振動場の可視化

振動インテンシティも音響インテンシティと似た性質を持っており、測定法も基本的には同じである<sup>11), 12)</sup>。ただし、この場合は剪断力、曲げモーメ



(a) リブタイヤ



(b) ラグタイヤ

図-9 自動車タイヤの音響放射特性

ント、振じりモーメントとそれらに対応する変形でエネルギーが伝えられるので測定方法も複雑になる。

振動インテンシティは単位幅当たりのパワー(W/m)という単位を持っている。ここでは、図-10に示す平板のモデルについて振動エネルギーの流れを計算により求めた例を示す<sup>13)</sup>。加振をA点で行い、B点には粘性減衰要素がある。図-11は4次までのモードと、有限差分法で求めた振動インテンシティを示している。エネルギーが加振点において板に注入され、減衰要素のところで吸収される様子が明確に示されている。また、モードにより振動エネルギーの伝わり方が異なることが分かる。このような結果はダンピング材をどこに塗布すれば効果的かなど、振動・騒音低減の方策を見出すことに役立つと思われる。

振動を伝える構造体は厚みや材質、形状等が複雑に変化する場合が多いので、音響インテンシティと比較すると計測方法の標準化が困難である。このような問題を打破すべく、シェルへの適用<sup>14)</sup>や非接触の計測法などの研究がなされている<sup>15)</sup>。更に、精度を高めるための新しい計測法なども検討されている<sup>16)</sup>。

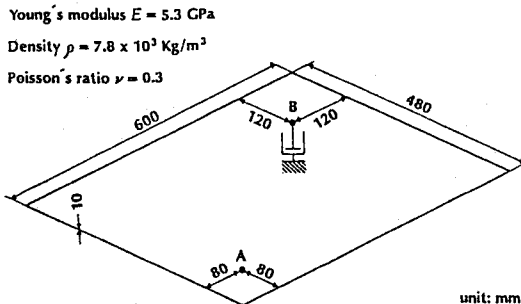


図-10 振動インテンシティを検討するための平板モデル

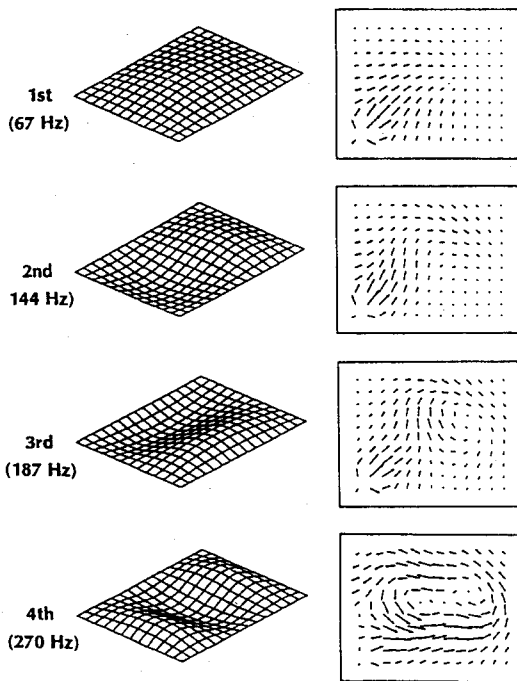


図-11 計算により求めた各モードごとの振動インテンシティベクトル

## 10. ま と め

現象を理解することが問題解決の第一歩である。それには音場や振動の場の可視化が極めて有効である。音響インテンシティと振動インテンシティによる可視化の例のごく一部を紹介した。これらの例から分かるように、エネルギーが加振源や音源からどのように媒体に伝えられ、どのような経路を通して伝搬し、吸収体で消費されるかが、場の可視化によって理解できる。これらの知見は振動・騒音対策の有効な方策を見出す上で役立つと期待される。

## 文 献

- 1) I. Wolff and F. Massa, "Direct measurement of sound energy density and sound energy flux in a complex sound field," *J. Acoust. Soc. Am.* **3**, 317-318 (1932).
- 2) F.J. Fahy, "A technique for measuring sound intensity with a sound level meter," *Noise Control Eng.* **9**, 155-162 (1977).
- 3) J.Y. Chung, "Cross-spectral method of measuring acoustic intensity," Research Publication (General Motors Research Laboratory, BMR-2167, Warren, 1977).
- 4) F.J. Fahy, *Sound Intensity* (Elsevier Applied Science, London, 1989).
- 5) 日本機械学会編, 機械騒音ハンドブック (産業図書, 東京, 1991), pp. 71-90.
- 6) H. Suzuki and J. Tichy, "Sound radiation from convex and concave domes in an infinite baffle," *J. Acoust. Soc. Am.* **69**, 41-49 (1981).
- 7) 橋 秀樹, 日高新人, "チェロの音響放射特性の可視化," *音響学会誌* **46**, 864-866 (1990).
- 8) M. Tohyama, H. Suzuki and Y. Ando, *The Nature and Technology of Acoustic Space* (Academic Press, London, 1995).
- 9) 東京工業大学精密工学研究所編, 静粛工学 (開発社, 東京, 1995), pp. 80-88.
- 10) Y. Oshino and H. Tachibana, "Noise source identification on rolling tires by sound intensity measurement," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)* **12**, 87-92 (1991).
- 11) D.U.Noiseux, "Measurement of power flow in uniform beams and plates," *J. Acoust. Soc. Am.* **47**, 238-247 (1970).
- 12) G. Pavic, "Measurement of structure borne wave intensity, Part I," *J. Sound Vib.* **40**, 221-230 (1976).
- 13) 沖津昭慶, 畔上秀幸, 寺本雅博, 小林秀孝, "振動インテンシティ計測法の基礎的検討," *機械学会論文集 (C編)* **56**(525), 1131-1138 (1990).
- 14) N. Kojima, H. Zhou, M. Endo and M. Saito, "Measurement of vibration intensity in U-shaped shell," *Proc. Inter-Noise 96*, 1379-1382 (1996).
- 15) R. Morikawa, S. Kosaka, K. Nakamura and S. Ueha, "Structural intensity measurement by using ultrasonic transducer array," *Proc. Inter-Noise 96*, 1509-1514 (1996).
- 16) 柴田勝久, 加藤正名, 伊藤 一, "波動合成による二次元振動インテンシティ計測," *機械学会第 74 期全国大会講演会論集 Vol. 1*, 373-374 (1996).

## 鈴木 英男

1967年から79年まで三菱電機でスピーカの研究開発に従事, 81年から85年までCBS研究所で主にピアノの研究に従事, 85年から93年まで小野測器で音響・振動計測法の研究を担当。現在, オンテック R&D 部の代表取締役社長(小野測器理事嘱託兼務)。