

Acoustic Intensity 計測法に関する研究 (第3報)

——楽器の音響放射パワーの可視化——

Study on Acoustic Intensity Measuring Method (3)

——Visualization of Sound Power Radiations from Musical Instruments——

橘 秀 樹*・矢 野 博 夫*・日 高 新 人*

Hideki TACHIBANA, Hiroo YANO and Yoshito HIDAKA

1. ま え が き

現在われわれの研究室では、音響インテンシティー計測法に関する一連の研究を進めている。この計測法によれば、音源から放射される音響パワーをベクトル量として観測することができ、それにもとづいてベクトル・マッピングなどによる音場の可視化が可能であり、各種の音源の音響放射特性を知るうえできわめて有効である。

そこで本稿では、この種の音響測定例として、それぞれ発音のメカニズムが異なる3種類の楽器（チェロ、リコーダ、梵鐘）の音響放射特性を測定した結果を報告する。

2. 測 定 方 法

音響インテンシティーの測定には、これまでに報告した測定と同様に、2マイクロホン法にもとづく直接法（B & K 3360音響インテンシティー測定システムを使用）あるいはクロススペクトル法（岩通 SM2100 FFT分析器を使用）によった。またインテンシティープローブとしては、1/2インチ・コンデンサーマイクロホン（B & K 4165）2個を間隔12mmで使用した。

この種の測定では膨大な数の測定点を設定する必要があり、また各測定点におけるインテンシティーベクトルを正確に測定するためにはプローブの位置決めに高い精度が要求される。そこで以下に述べる測定では、パーソナルコンピュータで制御した3次元マイクロホン移動装置（ロボット）を使用した。なおすべての測定は、生産技術研究所・無響室内で行った。

3. 測 定 結 果

3.1 チェロの音響放射特性

まず擦弦楽器のうち、バイオリン属に入るものとしてチェロを対象として測定を行った。その測定方法としては写真-1に示すように無響室内に組んだ鉄製フレーム

にチェロをネックの部分で固定し、リバーシブルモータを用いて弓を一定速度で往復運動させて音を発生させた。今回は、第2弦の開放弦（ d^0 音：基音147Hz）の音のみを測定対象とした。音響インテンシティーの測定は弓の運動と同期させて行い、down-bowによる発生音のうちの定常部2秒間について1/3オクターブバンドごとの音響インテンシティーを直接法にもとづく測定システムを用いて積分平均して求めた。

なお、予備実験によれば、この種の楽器の再現性を保つことはきわめて難しく、調弦はもちろんのこと、弓を当てる位置およびその圧力によって、放射音の強さ、スペクトルをはじめ音響パワーの放射性状などが著しく変化することがわかった。そこで今回の測定では、一定の条件で一連の測定をなるべく短時間にすませるようにした。

測定としては、まずチェロの前面の響板から約40mm離れ、それに平行な近接測定平面を設定し、その面上の法線方向のインテンシティー分布を測定した。この場合

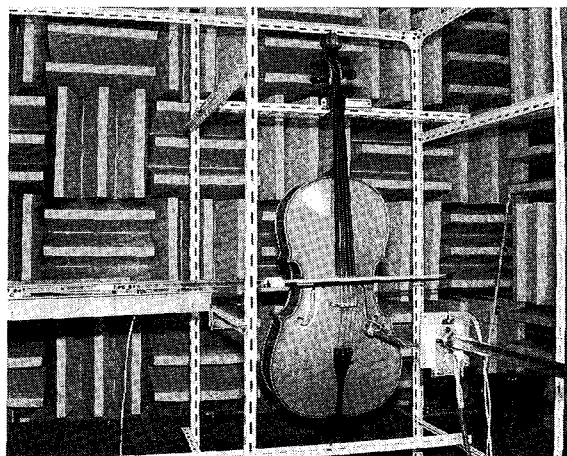


写真-1 測定風景

*東京大学生産技術研究所 第5部

研 究 速 報

の測定メッシュ間隔は25mmとし、合計464点の測定点をとった。この測定には約2時間を要した。

このようにして測定した音響インテンシティの結果から、響板の前面における等インテンシティ線図（リニア表示）を求めた。そのうち、160Hz、315Hzおよび630Hz帯域の結果を図-1 (a), (b), (c)に示す。まず、基音が含まれている160Hzの帯域ではf字孔からの

放射が最も優勢であることがわかる。これは胴内の空気の共振によるものと考えられる。つぎに315Hzの帯域では、右半分からの放射が優勢であり、そのうち放射パワーが最大となっている場所はsound postの位置にあたっている。一方、左側では負のインテンシティ（破線で示す）が観測されており、これはbass barの位置に対応している。さらに630Hzの帯域では、右側中央から上部にか

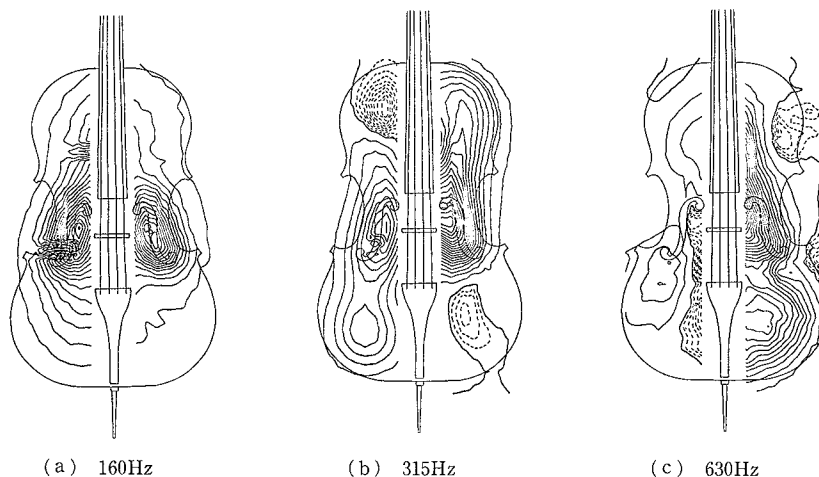


図-1 響板近傍のノーマルインテンシティ分布

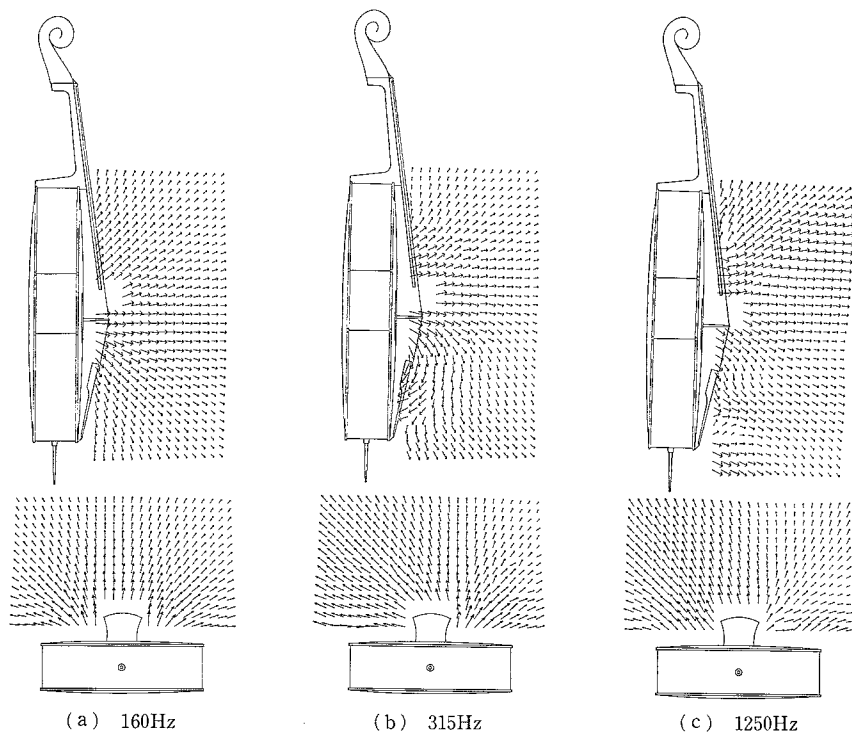


図-2 チェロからのパワーフロー

研究速報

けての部分と左側中央から下部にかけての部分で正、左上と右下の部分で負のインテンシティーとなっている。これら正・負の部分の響板は、互いに逆相で振動していることが推察される。

つぎに、チェロの前方でf字孔を通る垂直および水平断面を設定し、それらの面内におけるインテンシティーベクトルを2次元的に測定した。この場合の測定点は、垂直面で486点、水平面で360点とし、各測定点につき、プローブの向きを90°変えて2回ずつ測定を行い、その結果から面内のインテンシティーベクトルを合成により求めた。これらの測定結果をベクトル・マップ(矢印の長さはdB値)として表示したもののうち、160Hz、315Hzおよび1250Hz帯域の結果を図-2(a),(b),(c)に示す。まず(a)図をみると、垂直・水平断面ともに、この帯域ではf字孔から単純な形で音響パワーが放射されていることがわかる。つぎに(b)図の垂直断面の放射パターンをみると、駒の付近から出たパワーの一部は遠方へ伝搬せず、下部の響板に吸い込まれているようす(sink)がみられる。また水平断面のパターンでは、右側

のf字孔からの放射が大きく、左側の響板近傍では響板とはほぼ平行にパワーが伝搬している。さらに(c)図になると、f字孔以外に響板の上部および下部からもパワーが放射されている。このように高い周波数では、響板全体が複雑な振動をしていることが推察される。

なお、図-1で示した結果と図-2の結果は、必ずしも対応していない。これはこれらの測定を違う日に行ったため、弓の当て方(駒からの位置、圧力など)の条件が異なってしまったためと考えられる。このように、この種の楽器の音響放射特性はきわめて微妙である。

なおチェロは、エンド・ピンによってその荷重を床を受けて演奏する楽器であり、そのため本体の振動が床に伝わるため、その部分からも音が放射される。本来はこの放射パワーも考えなければならないが、今回の測定ではその条件は一応無視している。この点については、別途検討したい。

3.2 リコーダ(縦笛)の音響放射特性

つぎに、管楽器のうち最も単純な発音機構をもつものとしてリコーダ属のうちアルトリコーダを選び、その音響放射特性を測定してみた。今回の測定では、歌孔・指孔からの放射を調べることを主目的とし、それらを含む面内の2次元インテンシティーベクトルの分布を測定した。測定音としては、単純な運指の条件としてc²音(第4~7孔開放)を選んだ。吹鳴方法としては、安定性を保つために小型のコンプレッサーを圧力を適当に調整して用いた。この測定では狭帯域分析を行うために、前記のクロススペクトル法にもとづく測定システムを用いた。

まず測定結果として、楽器の正面50cmの点における

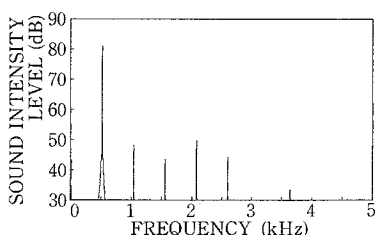


図-3 c²音の音響インテンシティーベクトル

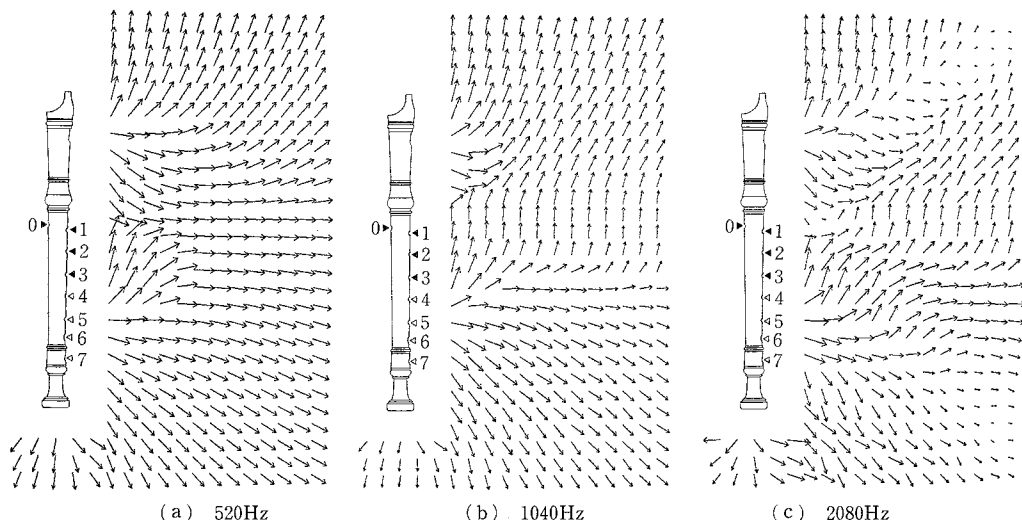


図-4 アルトリコーダからのパワーフロー

研 究 速 報

音響インテンシティー・スペクトルを図-3に示すが、基音および倍音がラインスペクトルとして並んでいる。そこで、ここでは基音(520Hz)とその2倍音(1040Hz)および4倍音(2080Hz)についてのインテンシティー・ベクトルの2次元分布を図-4(a),(b),(c)に示す。これらをみると、520Hzおよび1040Hzでは、歌孔と開孔からの放射が優勢であるのがわかる。一方2080Hzでは、放射パターンはかなり複雑となっているが、これはそれぞれの指孔からの放射音によって干渉が生じているものと思われる。

3.3 梵鐘の測定

最後に、打楽器に属するものとして口径25cm、高さ32cmの小型の梵鐘を対象として測定を行った。打撃方法としては直接30mmの鋼鉄球を糸に結びつけ、一定の高さから弧を描いて自然落下させる方法をとった。

この場合には放射音が衝撃音であるので、測定方法としては打撃の時点から2秒間の間に放射線される音響インテンシティーの時間積分値を直接法にもとづく測定システムを用いて求めた。打撃後のうなりはこれ以上に持続するが、打撃音のほとんどのエネルギーはこの間に放射されると考えられる。

音響インテンシティーの測定に先立って行った打撃音のスペクトログラムを図-5に示すが、500Hz, 1000Hz, 1500Hzに卓越成分がみられる。そこでそのうちの500Hz, 1000Hzを中心周波数とする1/3オクターブバンドについて、梵鐘の中心軸を含む垂直断面内のインテンシティーの分布をベクトル・マップとして表示した結果を図-6(a),(b)に示す。これらをみると、斜め上および水平方向へのエネルギーの放射は、いずれの周波数帯域でもほぼ一様となっているが、500Hz帯域で下方への放射が著しく小さくなっているのが特徴的である。なお、水平断面についても測定を行ったが、いずれの周波数についても、ほぼ半径方向に一般的なインテンシティー・ベクトルの分布が観測された。

4. む す び

本研究は、本格的な楽器の研究に立ち入ったものではなく、各種の音源の音響放射特性の解析に有効と思われる音響インテンシティー測定法の一つの応用として、3種類の楽器を対象として測定を行ったにすぎない。しかしこの試みによって、これまでいろいろな観点から多くの研究が行われてきた各種の楽器の音響放射特性を調べる一つの有力な手法として、音響インテンシティー測定法が利用できることがわかった。

なお本稿では、実際のパワーフローを示すアクティブ

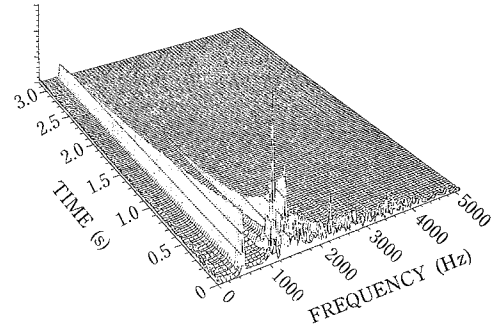
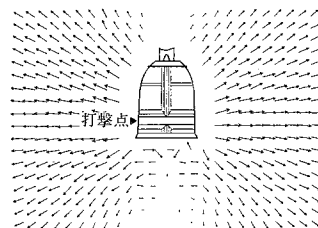
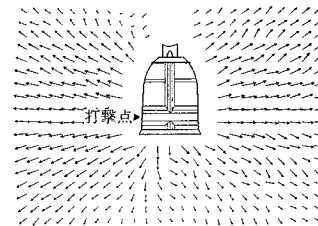


図-5 梵鐘のスペクトログラム



(a) 500Hz



(b) 1000Hz

図-6 梵鐘からのパワーフロー

インテンシティーの測定結果についてのみ述べたが、この種の音響放射特性の解析にはリアクティブインテンシティーの測定もきわめて有効である。これについては別報で報告する予定である。(1987年6月24日受理)

参 考 文 献

- 1) 橋, 矢野: Acoustic Intensity計測法に関する研究(第一報・音響パワーレベル測定への応用—基礎的検討—), 生産研究, 35巻12号(1983)
- 2) 橋, 矢野: Acoustic Intensity計測法に関する研究(第二報・建築音響における遮音測定への応用), 生産研究, 36巻3号(1984)
- 3) 日高, 買手, 橋: 音響インテンシティー計測法による楽器の音響放射特性の測定, 日本音響学会講演論文集, (1986年10月)