

日本音響学会音楽音響研究会資料 MA2006-4

2006年5月

和太鼓の胴、膜の振動 および放射パワーの測定

鈴木英男(千葉工業大学)

和太鼓の胴、膜の振動および放射パワーの測定

Measurement of Body and Diaphragm Vibrations and Sound Radiation of Japanese Drums

鈴木英男 (千葉工大)

Hideo Suzuki (Chiba Institute of Technology)

和太鼓は単純な構造を有する伝統的楽器であるが、その動作は十分解明されているとは言えない。筆者の研究室では数年前から宮本卯之助商店と協力し、動作の解明と改良を目指して研究を進めている。いままでに発表した胴単体の振動モード、製品の膜の振動モード、音響放射パワーの測定結果などを新しい結果を含めて報告する。また、現在進めている硬さを有する膜の理論計算についても簡単に触れる。

1. はじめに

和太鼓は祭りやその他各種の催しに登場することから、伝統的楽器として最も親しみやすい楽器の1つである。太鼓の用途は大きく分けて囃子用と寺院等で用いられる宗教用に分けられ、さらに最近では演奏会の用途が増えている。和太鼓のなかでも最もポピュラーな長胴太鼓は円筒の両側に皮を張りつけた最も簡単な構造をしている(図1参照)。太鼓の大きさは胴の両端の口径(膜が貼られている直径)で表現する。尺5寸といえば、口径が45.5 cm (= 30.3×1.5)の太鼓である。

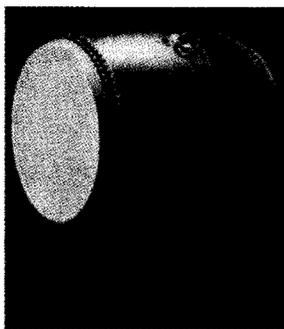


図1 長胴太鼓の例((株)宮本卯之助商店提供)

長胴太鼓は簡単な構造ながら、①皮や胴の材料のばらつきが大きい、②貼り付け時には皮を湿らせるので、乾いた後の張力を予測しながら貼り付け作業を行なう必要がある、③皮は紙で

固定されるので、一度作ってしまうと音高は変えられない、などのため良質で均一な太鼓をつくることは長年の経験を必要とする。宮本卯之助商店と筆者の研究室では、品質の改善ならびに均一化を目標として、長胴太鼓の基礎的な特性の検討を進めている。ここでは、現在までに発表して来ている内容を中心に報告する[1-3]。

2. 胴の振動モード

胴は膜の支持体としての役割とともに共鳴体としての効果をもつ。撥の打撃によるエネルギーを膜に有効に伝達するには、打撃力に耐える大きな質量と構造的な強度が必要である。また、共鳴体としては十分な大きさの内容積を持つべきであろう。今回は、内部の切削法が異なる2種の尺5寸の胴について、皮を張る前の共振周波数と振動モードを調べた。1つは胴の内側がほとんど平坦に近い切削法のもの(平滑彫り)、もう一つは歯形がより明確に見える切削法(波動彫り)によるものである。図2はそれらの大まかな断面形状をしめす。

これらの2つの胴のみの振動特性の例を図3に示す。加振点および応答点はともに胴の端部の外側である。全体的に同じ傾向の特性を有しているが、波動彫りの方は平滑彫りに比べて共振周波数が若干低くなっている。この理由としては、波動彫りの方が実効厚みが小さいことが挙げられる。重量的にも5%ほど波動彫りの方が軽い。

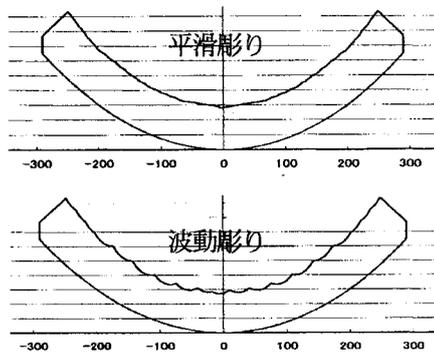


図2 比較に用いた2種類の胴内形状

数値入力による工作機械を用いて胴を製作することにより、正確な形状を有する胴を製作することが可能になった。これらはコンピュータモデル化を行う段階で用いることができる。

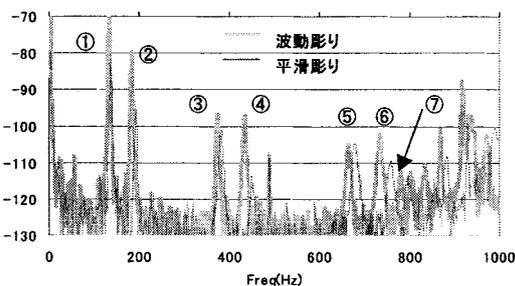


図3 平滑彫りと波動彫りの振動特性の比較

図3の①から⑦までの共振時の振動モードの解析を行なったが、ここではモード④までを振動姿態を図4に示す。それぞれ、上は平面図、下は側面図である。モード①は円筒が単純に両側から押しつぶされるモードであり、モード②では上下が逆位相になっており、上(下)端が押しつぶされるところは下(上)端では広がる。モード③とモード④の関係も、3方向から押しつぶされる以外は同様である。図には示していないが、モード⑦になって初めて軸方向のせん断変形だけのモードが現れる。胴のモードが膜の振動さらには音質にどのように影響するかの説明は今後の検討課題である。

なお、本報告で示している振動モードは ODS (Operational Deflection Shape) と呼ばれるものであり、各モードの分離は行っていない。

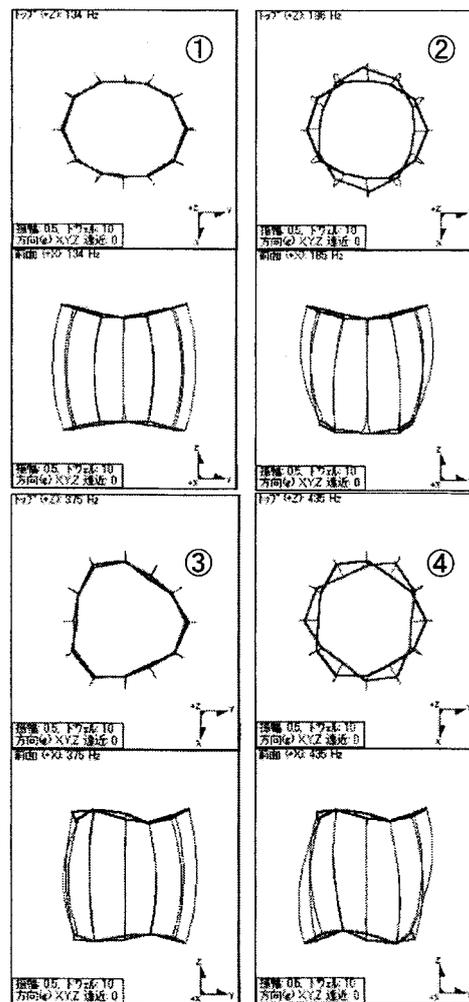


図4 モード番号①から④までの振動モード

3. 膜の振動モード

3.1 インパルスハンマー加振と加速度センサによる振動モードの測定

膜の振動モードの解析は尺4寸の太鼓で行なった。膜の場合は胴と異なり、軽く柔らかいため、取り付けるセンサの影響を考慮しなければならない。この実験では質量0.5gの加速度センサを周辺に近いところに取り付け、インパルスハンマーで多数の点を加振し周波数応答関数を測定した。膜の振動特性(周波数応答関数)の一例を図5に示す。上は「表」と言われる厚い皮を張ったピッチの低い方の皮の振動特性、下は「裏」の皮の振動特性の例である。振動特性には2つの共振がペアのように現れる。2つの膜の共振はほぼ同じであり、相互の干渉が音質に与える影響を知ることは重要である。

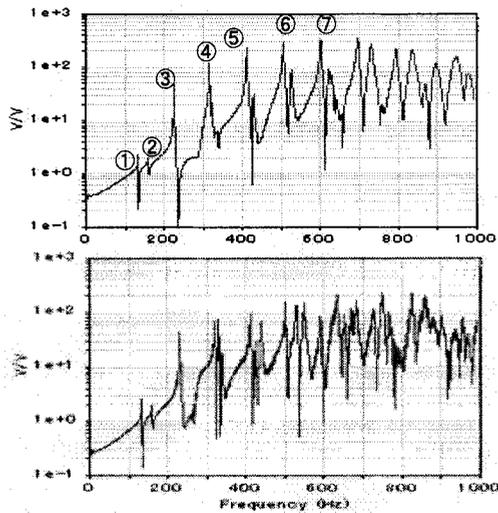


図5 表(上)と裏(下)の膜の振動特性の一例

図6に各共振時の膜の振動姿態を示す。モード①とモード②はトランポリンのようなモードで大きな体積速度を有しているので、前後の膜が強く干渉あっていることが予想される。最低共振周波数のモードとして理論的に知られているモードは①よりも②に近い。静止画では分りにくいですが、モード①は円形の分割モードで、しかも中心部から波動が周辺に広がるような様子が伺える。膜のみの共振であれば振動の伝播に伴う位相遅れは見られないはずであり、膜自身が原因となっているのか、前後の膜の干渉の影響なのかは明らかでない。モード③からは順次径方向の分割が増えてゆく。なお、モード解析では加振点移動法と応答点移動法があるが、加振点を固定し応答点を移動した実験でもほぼ同様の振動姿態が得られた。

3.2 音響加振とレーザドップラによる振動モードの測定

表と裏の膜がどのような位相関係で動いているかを図7に示す加振方法で調べた。スピーカからノイズを発生し、表膜に音圧を加える。音圧は裏膜にも達するが、裏膜上の音圧は表膜のそれよりも20dB以上低いことを確認している。

2つの膜がどのような位相で振動しているかを調べるため、スピーカへの入力電圧と表膜および裏膜の振動速度との周波数応答関数を求めた。最低共振周波数付近での周波数応答関数を図8に示す。107Hzと136Hzに共振があり、

表膜ではそれらの間に零点があるが、裏膜では零点が見られない。

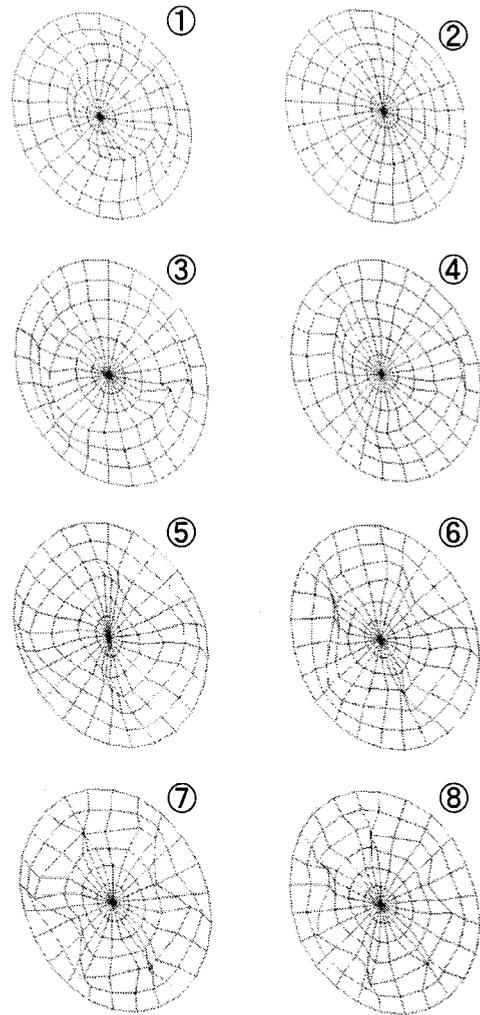


図6 図5に示す各共振における振動姿態

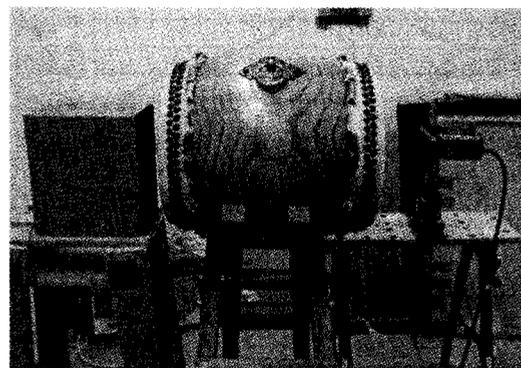


図7 スピーカによる表膜の加振とレーザドップラ速度計による裏膜の測定の様子

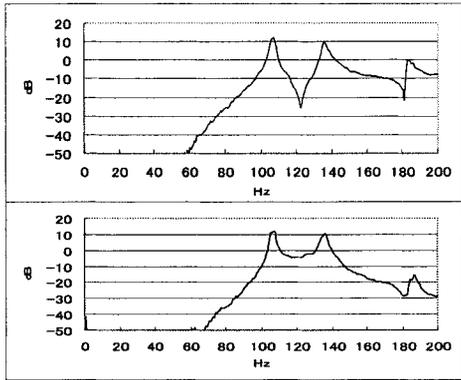


図8 スピーカへの入力電圧と表膜（上）および裏膜（下）の振動速度との周波数応答関数

図9に表膜と裏膜の共振周波数およびそれらより少し高い周波数での振動姿態を示す。静止画では見にくいですが、107Hzでは両膜が同位相で、136Hzでは両膜が逆位相で振動している。興味のある点は共振周波数では中央付近が分割モードを示しているが、それより若干高い周波数では自然な（知られている1次のモードに近い）振動姿態を示していることである。3.1と共通するこの理由の解明は今後の課題である。

1次共振付近での振舞いを理解するために、単純なモデルを用いて検討した。図10は胴内部の空洞によるばね定数を考慮した等価電気回路モデルである。2つの膜を同じ体積速度を有する剛円板で近似し、それが周辺でばねにより支持されていると考える。各定数に適当な値を与えて計算した結果を図11に示す。定数の微調整は行っていないが、実測の特性と類似の特性傾向を示している。最初の共振は膜が並行振動し、2つめの共振では内部の空洞を圧縮・伸張する動きであることが、位相の実測値および計算値から確認することができる。なお、同種の等価回路は降旗らにより木魚のモデルとして用いられている[4]。

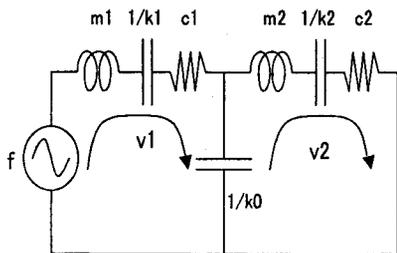
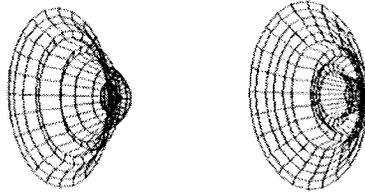
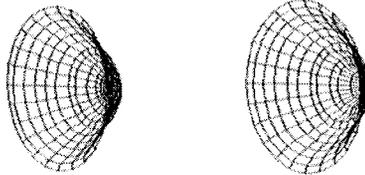


図10 1次共振付近での簡易等価電気回路

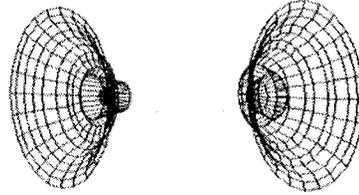
① 107Hz



② 110Hz



③ 136Hz



④ 140Hz

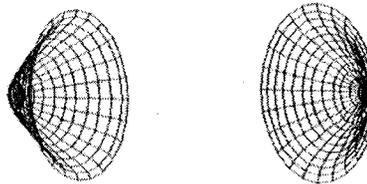


図9 1次モード（低、高）およびそれらより多少高い周波数での振動姿態

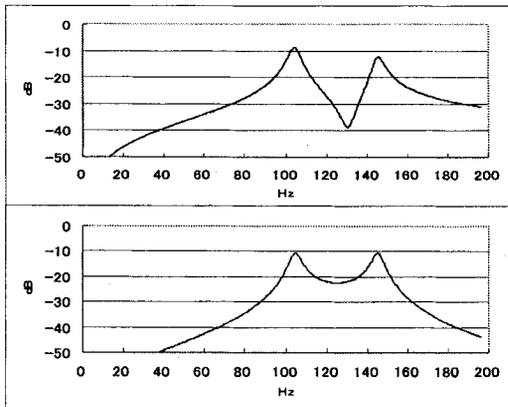


図11 等価電気回路により求めた表膜（上）および裏膜（下）の周波数応答関数

3.3 硬さを有する膜（板）の理論解析

太鼓の皮は1mmから2mm程度の厚みを持ち、かなり硬い。加工後で張る前の皮のヤング率 E を調べたところ、 $6 \times 10^9 \text{Pa}$ ほどあることが分かった。硬さと張力を有する振動体の自由振動の方程式は次のように表される。

$$D\nabla^4 y - T\nabla^2 y + \rho \frac{d^2}{dt^2} y = 0$$

ここで、 ∇^2 はラプラシアン、 D は曲げ剛性、 T は張力、 ρ は綿密度である。 $E=6 \times 10^9 \text{Pa}$, $T=8000 \text{N/m}$, $\rho=2000 \text{kg/m}^3$, $h=0.002 \text{m}$ (厚み), $a=0.2 \text{m}$ (半径) で周辺固定での固有振動数を求めた結果、表 1 のような結果となり、硬さは無視できない効果を有することが分かった。なお、本研究の詳細は別の機会に発表する予定である。

表 1 剛性と張力を有する振動体の固有振動数の例 (基本モード 100.4Hz に対する比)

	n=0	1	2
m = 0	1	1.676	2.381
1	2.610	3.583	4.631
2	4.826	6.152	7.577

4. 音響放射特性

4.1 音響放射の可視化

撥で膜を叩いたときに音がどのように放射されるかを可視化することにより、表・裏の膜の影響を含めた音響放射の現象を具体的に理解できるようになる。また、音響放射モデルを検討する際にどのような近似が可能かを判断する場合にも有用である。図 11 はビリヤードのボール (直径約 55mm, 重量約 160g) を 3m の天井から釣り糸で吊るし、振り子式に床から 1.5m の高さにある太鼓の膜の中央を衝撃加振したときの衝突直前からの音圧の様子を可視化したものである。計測は 1.5m の水平面であり、太鼓の中心を原点としたときの片側 2m×1m の範囲を 5cm×5cm の目目に分割し総数 921 点で音圧波形を測定した。表示は左右対称性を仮定して 2m×2m の領域における音圧の変化の様子をアニメーション表示した。計測条件は、サンプリング周波数が 51.2kHz およびサンプリング点数が 4096 である。モノクロの原稿では見えないが、赤、緑、青がそれぞれ、正の最大、ゼロおよび

負の最大音圧に対応し、音圧に比例して間の色を調整している。衝突の直後に表面から負の音圧が発生し、しばらくしてから正の音圧が裏の膜から放射される。初期段階では表面からの放射が大きいですが、しばらくすると同レベルの音圧の放射が見られる。両方の膜からの放射はある時には同位相、ある時には逆位相となる。

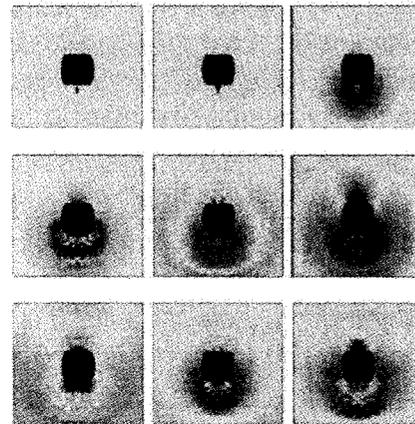


図 11 打撃加振による音場の時間推移

4.2 音響放射パワーおよびエネルギーの測定

電力 (単位時間あたりのエネルギー) は通常、瞬時パワーの時間平均値で評価される。音響の分野においても、音響パワーは定常音源に対して時間平均値で評価することが多い。しかし、打楽器のような音源では放射パワーの時間変化が大きいので、時間変化するパワーとして測定・評価する必要がある。波動は空間的な広がりを持つので、単位面積を通過するパワーとしての音響インテンシティを計測し、それを測定面全体に亘って積分して音響パワーを求める。筆者等は瞬時インテンシティと時間平均インテンシティの中間的性質を持つエンベロープインテンシティを提案している[5,6]。なお、この方法は同時期に Jacobsen によっても提案されている[7]。

瞬時、時間平均、およびエンベロープインテンシティはそれぞれ以下のように定義される。

$$i(t) = p(t)v(t)$$

$$I = \overline{p(t)v(t)}$$

$$i_e(t) = \text{Re}[p_a(t)v_a^*(t)]$$

$p_a(t)$ 、 $v_a(t)$ はそれぞれ瞬時音圧および粒子速度の解析的信号(負の成分がゼロの信号)である。瞬時インテンシティは時間により激しく変化するが、エンベロープインテンシティは包絡線のように緩やかに時間変化するので、時間変化の傾向が見やすくなる。

音響インテンシティの計測には波長より十分小さな距離だけ離れた2つのマイクロホンを用いる。無響室や半無響室でのパワー測定法はISOやJISで規格化されている[8,9]。図12は半無響室において、和太鼓の放射パワーを測定している様子を示したものである。半径2mの半球面上20点において音響インテンシティを測定し、その平均値と面積を掛けることで放射パワーが求められる。

打撃の強さによって放射パワーは変化するので、打撃面の前方1mの距離でのピークレベルが130dB±2dBに納まる場合の測定値のみを用いた。尺6寸と尺4寸の2つの和太鼓の放射パワーの測定結果を図13に示す。放射パワーの時間変化の様子が良く分かる。

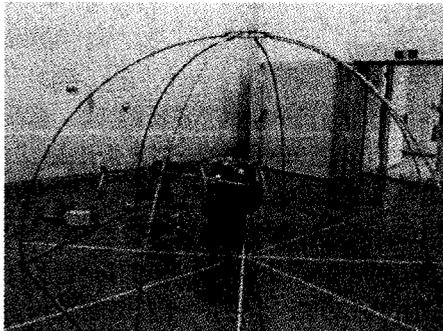


図12 太鼓からの放射パワーの測定の様子

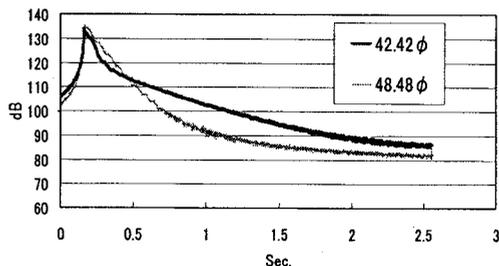


図13 エンベロープインテンシティ法による尺6寸および尺4寸の和太鼓の放射パワー

放射パワーを積分することによって放射エネルギーを求めることができる。一尺四寸の太鼓

は1.174 J (平均ピーク音圧値 131.4dB)、一尺六寸の太鼓は 2.203 J (平均ピーク音圧値 131.7dB)であった。打楽器のような時間変動性音源の音響放射性能を量的に評価する1つの方法として、音響放射エネルギーを用いることも可能であると思われる。

4. まとめ

和太鼓の胴および膜の振動特性および音響放射特性を調べた結果について述べた。音質の改良・改善に結びつけるには製品を用いた評価試験とともに、内・外部の空間を含めたコンピュータモデルによる解析を並行して進める必要がある。モデル化については現在、ペンシルバニア州立大学と共同で進めている。

参考文献

- [1] 鈴木、花形、小島、和太鼓の胴および膜の振動モード解析、音講論集、3-10-11、817-818 (2004.9)
- [2] 仲村、山口、鈴木、時間変動性音源の音響パワー測定—エンベロープインテンシティの応用—、音講論集、3-10-1 (2005.9).
- [3] 山口、仲村、鈴木、和太鼓の音響パワーの測定、音講論集、3-10-2 (2005.9).
- [4] M. Sunohara, K. Furihata, D.K. Asano, T. Yanagisawa, and A. Yuasa, "The Acoustics of Japanese wooden drums called "mokugyo"," J. Acoust. Soc. Am., 117 (4), (2005).
- [5] H. Suzuki, M. Anzai, T. Ono, and N. Suzuki, "Evaluation of transient sounds by the sound intensity method," Proceeding of INCE/J Annual Meeting, pp.325-328, 1990 (in Japanese).
- [6] H. Suzuki, S. Oguro, M. Anzai, and T. Ono, Proceedings of Inter-noise 91, Vol.2, pp.1037-1040 (1991)
- [7] F. Jacobsen, "A note on instantaneous and time-averaged active and reactive sound intensity," J.Sound &Vib., 147 (3), 489-496 (1991).
- [8] ISO 3745-2003, Acoustics -Determination of sound power levels of noise sources- Precision methods for anechoic and hemi-anechoic rooms.
- [9] JIS 8732:2000、音響—音圧法による騒音源の音響パワーレベルの測定方法—無響室及び半無響室における精密測定方法