

容器の断面形状と発生する余韻の関係

横井 雅之[†]

Relationship between Cross-Sectional Shape of Container and Occurrence of Reverberation

YOKOI Masayuki[†]

要旨

断面が円形や正多角形の筒型の容器の側面をたたいたり、こすったりすると、初めは色々な周波数の音が発生するが、やがてある特定の周波数の音が残る。最後まで残る音（余韻）の振動数と振動モードを求めた。実験では、円形断面の容器、正多角形断面のガラス、仏具のお鈴、寺院の梵鐘、漁洗など用いた。多くの容器において最後まで残るのは、(2-0)モードと呼ばれる振動による音である事がわかった。これらのモードの振動は減衰が小さいことが実験ではわかったが、理論的な裏づけは解明されておらず今後の課題である。

キーワード：減衰、振動モード、余韻

1. はじめに

世の中での振動現象を調べていくと、多くの箇所で(2-0)モードによる振動や音が発生していることが分かる。(2-0)モードとは、多くの振動工学や機械力学の教科書に掲載されている円板や円環の振動の様子を示す。一般には(m-n)と表示して節直径がm本、節円がn本の振動形態を表す。図1には、円板などにおいて、左から(2-0)、(3-0)、(2-1)の時の振動モードの形態を示す。⁽¹⁾例えば(2-0)モードは節直径が2本、節円が0本すなわ

[†]大阪産業大学 元短期大学部 自動車工学科 教授

草稿提出日 10月9日

最終原稿提出日 10月9日

ち、振動の節（振動変位がゼロ）となる箇所が4つあることを表している。また、振動の腹（振動変位が最大になる）となる箇所が4つあることも意味している。

図1で直線および内側の円は振動の節と称して、振動変位がゼロの箇所である。

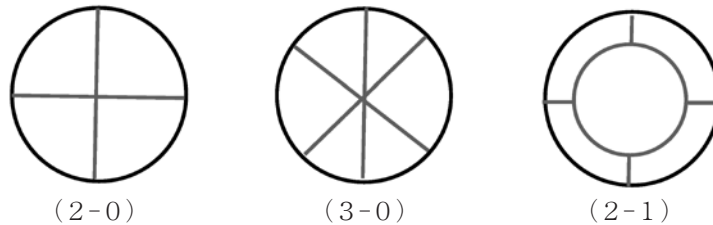


図1 円形板の各種モードの振動形態

1.1 なぜ(2-0)モードなのか？

ワイングラスの縁を濡れた指で円周方向に摩擦すると甲高い持続音が発生する。いわゆる「ワイングラスのリングング」と呼ばれるものである。この時のグラスの振動モードを求めると図2に示すように節線2本で節円0本の(2-0)モードであった。そこで円筒形の容器の材質を様々に変えて同様の実験をした。この結果、ガラスだけでなく、陶器、ステンレスボウルなどでも同様な音が発生し、振動モードを求めると、やはり(2-0)モードであった。さらに断面が正多角形の容器について縁を濡らした指で円周方向に摩擦すると音が発生する。この時の容器の振動モードを調べるとやはり(2-0)モードであった。円形断面の容器として、仏具のお鈴を叩くと、同じように(2-0)モードの振動が発生した。また、お寺の鐘を撞くと、最初はいくつかの音が混在しているが、最後は「余韻」と呼ばれるうなりを伴った(2-0)モードの音に変化することが多い。

ここでは、身の回りに多く使用されている容器を対象に、たたいたりこすったりして「音」が発生する時には、容器は主に(2-0)なる振動モードで振動していることを示す。以下では、主に容器の種類別に行った実験より検討を行った。

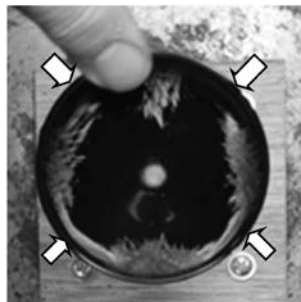


図2 ワイングラスが(2-0)モードで振動している様子
(濡れた指で円周方向に摩擦、グラスは固定。矢印は振動変位ゼロの箇所)

2. 容器の種類別に（2-0）モードの発生を検討

2.1 「ガラス・湯呑・ボウルなどの円形断面の容器」の音

実験にはワイングラスを始め種々の円筒形容器を用いた。実験に使用した容器は次の4つのタイプで大きさの異なる16種類である。(1) ガラス製でワイングラス（シャンパングラス、カクテルグラスなど）のように脚のついたもので、大きさの異なる9種類 (2) ガラス製でコップのようなもの（タンブラーグラス）で大きさの異なる4種類 (3) 白磁製の湯呑茶碗1種類 (4) ステンレス製のボウルで大きさの異なる2種類である。この容器の縁を濡れた指で円周方向に摩擦して、甲高い鳴き音を発生させる。図3はこれら4種類の容器の写真を示す。



(1)-1 (2)-1 (3)-1 (4)-1

(1) ワイングラス；(2) タンブラーグラス；
(3) 白磁製湯呑茶碗；(4) ステンレス製ボウル

図3 実験に使用した4種類の容器

表1 図3で示した容器のモードに対する固有振動数及び減衰比

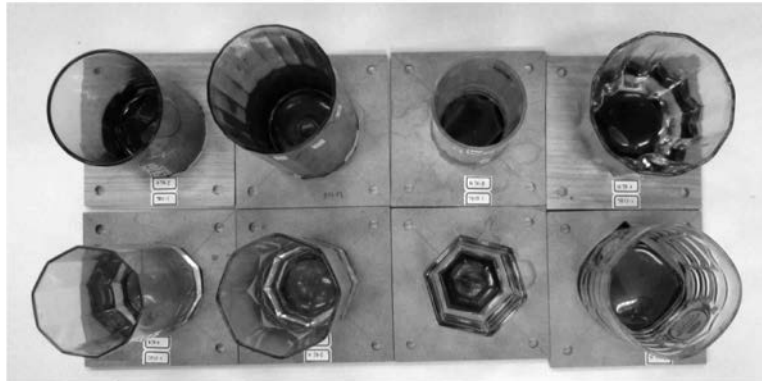
容器の断面形状	モード	(2-0)	(3-0)	(4-0)	(5-0)	(6-0)
(1)-1	周波数 [Hz]	1212	2438	4450	7025	9563
	減衰比	0.00777	0.0304	0.0437	0.0997	0.108
(2)-1	周波数 [Hz]	1425	2950	5062	7925	
	減衰比	0.0803	0.204	0.292	0.401	
(3)-1	周波数 [Hz]	2238	5987			
	減衰比	0.102	0.205			
(4)-1	周波数 [Hz]	750	1762	2468	4137	5225
	減衰比	0.037	0.056	0.182	0.325	0.371

表1からもわかるように、4種類の容器について打音試験を行い、モード、周波数および減衰比を求めた。容器の円周方向にぬれた指で摩擦したが、鳴き音と呼ばれる甲高い音が発生するのはいずれも（2-0）モードの周波数の時である。ここで注目することは、この（2-0）モードの減衰比の値は、いずれもほかのモードに比較して小さいことがわかる。この実験は16種類の容器について行ったが、いずれも（2-0）モードに相当する周波数の鳴き音が発生し、

減衰比もほかのモードに比べて一番小さかった。

2.2 「正多角形断面の容器」の音

すべてガラス容器である。実験に使用したガラスは断面が正多角形であり、4、6、8、10、12、18、20角形である。なお、参考として、2.1で使用した断面が円形のガラスも用いた。図4に使用したガラスの写真を示す。



円形 正二十角形 正十八角形 正十二角形
正十角形 正八角形 正六角形 正四角形

図4 使用したガラス類

表2に、使用したガラスの振動モード、周波数および減衰比を示す。なお、モードは(2-0)から(4-0)まで考慮した。さらに容器を円周方向に濡れた指で摩擦した時に発生した鳴き音の周波数およびその時の容器の振動モードを示した。

この表からわかるように、発生した鳴き音はいずれも(2-0)モードの振動をしており、さらに減衰比も各モードの中で一番小さいことが分かる。

表2 グラスの振動モード、減衰比および発生した鳴き音

容器の断面形状	モード	(2-0)	(3-0)	(4-0)	鳴き音
円形	周波数 [Hz]	1912	3750	6675	1900
	減衰比	0.073	0.081	0.093	
二十角形	周波数 [Hz]	1825	3762	5387	1825
	減衰比	0.046	0.073	0.081	
十八角形	周波数 [Hz]	2712	5675	9826	2715
	減衰比	0.037	0.047	0.049	
十二角形	周波数 [Hz]	2175	3150	5038	2162
	減衰比	0.037	0.058	0.115	
十角形	周波数 [Hz]	1575	3213	5925	1575
	減衰比	0.019	0.074	0.096	
八角形	周波数 [Hz]	2062	4062	6913	2062
	減衰比	0.025	0.132	0.173	
六角形	周波数 [Hz]	5050	12050		5050
	減衰比	0.054	0.353		
四角形	周波数 [Hz]	1900	3400	5321	1900
	減衰比	0.03	0.056	0.11	

2.3 「漁洗」の音

“漁洗鍋”とも呼ばれ、主に中国で使用されている青銅製の鍋がある。この鍋の取手を円周方向に摩擦すると激しいしぶきを発生する。図5にはこの時の鍋の表面の水しぶきの様子を示している。よく見ると水面が4分割されていて、水柱が4箇所に出現している様子がわかる。⁽²⁾すなわち(2-0)モードの振動が発生している。これは2.1で示したステンレスボウルと同じ振動である。



図5 青銅製の水盆の周辺を擦った時に水面に現れた模様
(2本の節直径が見られる)

2.4 「お鈴」の音



図6 お鈴と鈴棒

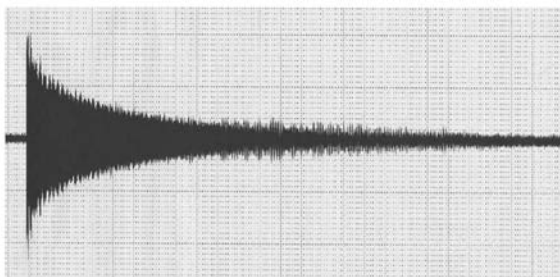


図7 お鈴を叩いた時の音

図6に示すように、仏具のお鈴を鈴棒で叩くと、図7のような減衰波形が現れる。最初はいくつもの振動モードの音が発生するが、最後は(2-0)のみの音に変化する。図8は各モードの振動が時間経過とともにどのように減衰していくかを示したものである。最初はいくつか

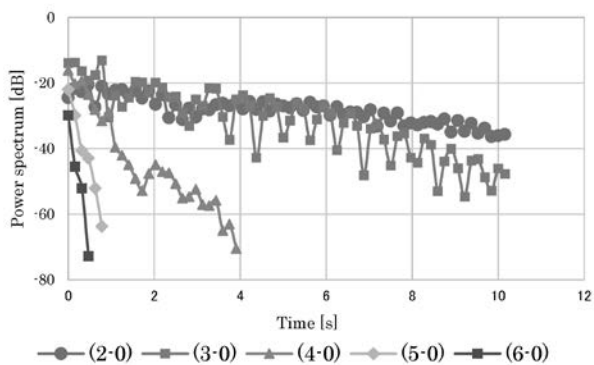


図8 お鈴の各モードの音の減衰割合

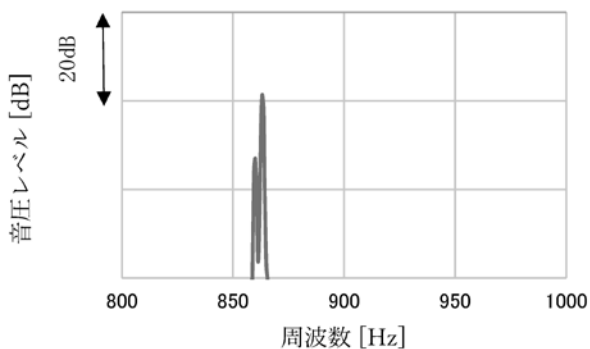


図9 お鈴の余韻部分の周波数分析結果

の振動モードが混在しているが、時間とともに(2-0)および(3-0)モードの振動が残り、最後は(2-0)モードの音になることが分かる。お鈴の音を聞いても、最後は(2-0)の音が余韻とともに残る。

余韻にはうなりが生じている。図9は860Hz付近をズームした結果である。862Hzと863.1Hzの近接した2種類の音が混在している。図10には862Hzと863.1Hzの加振試験によるモードを示す。なお、図は模式的である。モードは基本的には(2-0)で、モードの節直径の位置が少しずれている。⁽⁴⁾ 例えば、862Hzのモードが実線で863.1Hzが破線で表されるような状態である。この場合もいずれも(2-0)モードと呼ばれている。なお、図形の上部の矢印は加振点である。

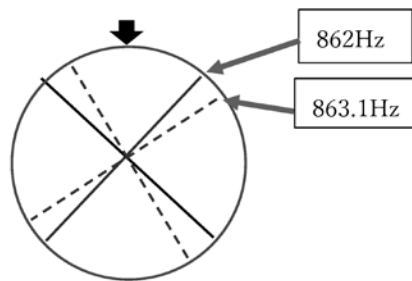


図10 うなりをともなう(2-0)モードの形状

2.5 「梵鐘」の音

著者の家の近くの山崎聖天観音寺では時の鐘と言って、毎朝6時、正午、午後6時にそれぞれ鐘を撞く。図11に鐘を示す。直径は約90cm、肉厚は約10cmで高さは不明、重量も不明である。



図11 山崎聖天観音寺の梵鐘

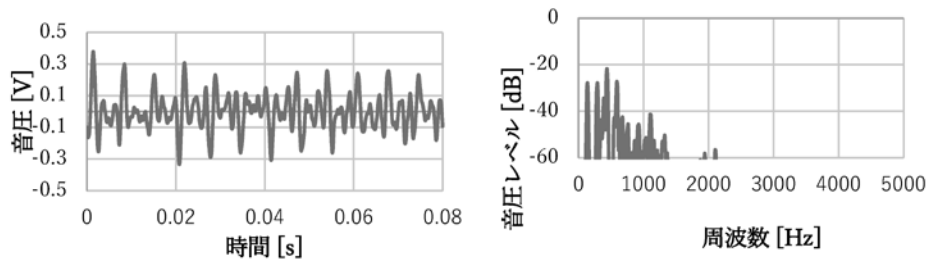


図12 鐘を撞き始めの音圧波形と周波数分析結果

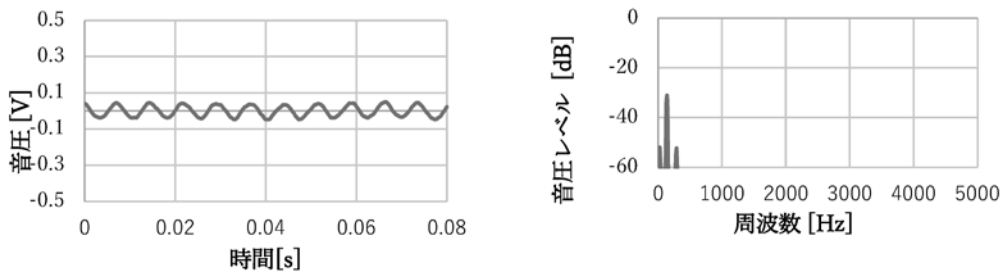


図13 鐘の余韻の音の音圧波形と周波数分析結果

鐘を撞いた時の音及び余韻の音の周波数分析結果を図12、13に示す。撞き始めは137、287、437および587Hzの成分が現れているが、時間が経過して余韻になると、137Hz成分しか存在しないことがわかる。鐘を撞いた後の余韻の時の鐘の振動状態を手で触ってみると、鐘木で鐘を撞く箇所が腹になり、4箇所ずつの振動が大きい腹と振動の小さい節が感じ取れる。概略であるが(2-0)モードの振動をしていると考えられる。図14はモードごとの減衰比を求めたものである。137Hzの振動が最後まで残ることがわかる。すなわち、(2-0)モードの振動と考えられる。

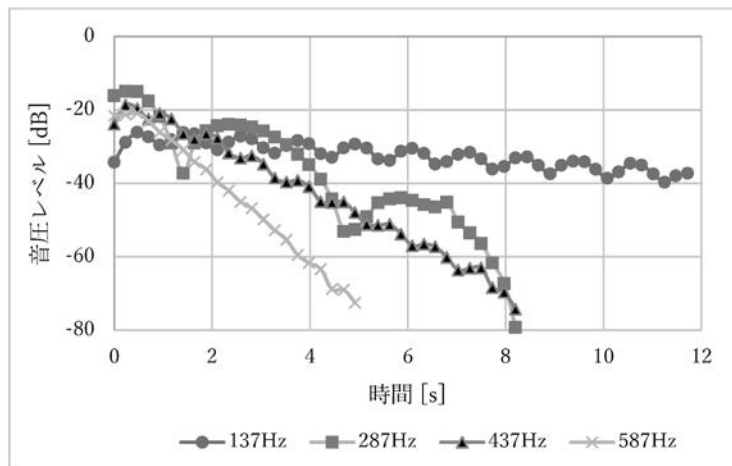


図14 周波数分析結果から読み取った各周波数成分の減衰割合

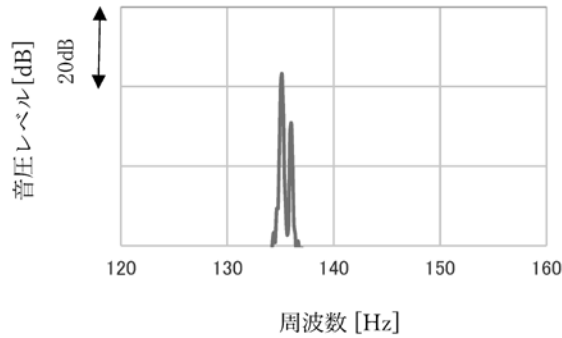


図15 鐘の余韻部分の周波数分析結果

図15はこの鐘の音の130Hz付近のうなりにより生じる余韻部分をズームングした結果である。135.1Hzと136Hzの近接した2つの音がうなりとして発生している。近接した周波数の振動でも節の位置が異なる同じモードが発生していると言われている^{(3)、(4)}。したがって上記の近接した2つの周波数は図10と同じようにいずれも(2-0)モードとみなせると思われる。器をたたいたりした時に発生する振動(音も同じ)は、最初は色々なモードの振動が混在しているが、時間経過とともに、(2-0)モード以外の振動はなくなり、最後は減衰比が小さい(2-0)モードの振動(音)が残っている。図9のうなりでも示したが、近接した2つの周波数が発生する理由の一つとして、鐘や漁洗鍋などを鋳物で作るときに、厚さを同均一にすることが難しいとも言われている。これらに共通するのは、いずれも(2-0)モードの周波数の減衰比が小さいことである。なぜ、小さいのかは不明であるが、現在までの実験結果からは“減衰比が小さい”ことが分かっている。

3. まとめ

円形断面、正多角形断面の容器をこすったり、たたいたりしたときには、容器の(2-0)モードの周波数に一致する音が発生した。この時の振動モードの減衰比はほかのモードの値より、小さいことが実験からわかった。この結果は仏具のお鈴、梵鐘、漁洗などの道具にも共通した。なぜこのような形状をした容器の減衰比が小さいかについては、理論的に解明することが必要であると思われる。

参考文献

- (1) 例えば、岩田佳雄，佐伯暢人，小松崎俊彦，『機械振動学』数理工学社，2011年，p.171.
- (2) 山下充康，『青銅噴水震盆』小林理研ニュース，No.79-3，2003年.
- (3) 鈴木広志，松田修三，許煥幸，曹広益『噴水魚洗の水滴飛び出し現象の実験的研究』，法政大学工学部研究集報，第29号，1993年，pp.129-139.
- (4) 戸井武司，『トコトンやさしい音の本』日刊工業新聞社，2004年，pp.64-65.