

ワイングラスのリングングの解明*

横井 雅之[†], 中井 幹雄^{††}

A Study of Ringing Sound Generated with Wineglasses

YOKOI Masayuki[†], NAKAI Mikio^{††}

Abstract

This paper analyzes the mechanism of frictional sound, “wine glass ringing,” caused by rubbing the rim of a wine glass with a wetted finger. We consider the following two cases. (1) The rim of a fixed glass (glass harp) rubbed at a certain speed with wetted finger, and (2) the rim of a rotating glass (glass harmonica) rubbed with a wetted finger. The sound was caused by the negative slope of frictional coefficient against sliding velocity between a glass and a wetted finger. The sound was caused by a light load, approximately 0.15N. With a larger load, the sound level becomes smaller. Furthermore, the sound frequency was close to the natural frequency of glass at the mode having two nodal meridians and having the minimum damping coefficient. On a simplified view, one might represent the wineglass as a thin-walled cylinder, attached to a rigid circular base. This model was in close agreement with the experiment results. Results were the same for experiments conducted on 16 kinds of vessels.

Key Words: Glass harp, Glass harmonica, Ringing, Wine glass, Frictional sound, Coefficient of friction

キーワード：グラスハープ、グラスハーモニカ、リングング、ワイングラス、摩擦音、
摩擦係数

[†] 大阪産業大学 名誉教授

^{††} 元京都大学大学院 工学研究科 准教授

草稿提出日 10月15日

最終原稿提出日 11月9日

1. 緒 言

摩擦による楽音としては、擦弦楽器のバイオリンによる音がよく知られているが、Rayleigh が“The theory of sound”で述べたワイングラスのリングング（鳴き音）も興味深い楽音である⁽¹⁾。ワイングラスの縁を濡れた指で円周方向に摩擦すると、きれいな持続音が発生する。これを応用した楽器としてグラスハーモニカとグラスハーブがある。図1はこれらを演奏している写真である。図1(a)はBenjamin Franklinが発明したとされている「グラスハーモニカ」である⁽²⁾。この楽器はお椀状のグラスを横にして大きさの順に並べ、下方を水に浸しておき、中心に軸を通しペダルを踏むと軸がゆっくり回転するようになっており、グラスの縁を濡れた



(a) グラスハーモニカの演奏



(b) グラスハーブの演奏

図1 2種類のグラス楽器の演奏状態

指先で円周方向に摩擦して音を発生させる。図1(b)に示す「グラスハーブ」は、水を入れて音階を決めてあるグラスを並べて置き、その縁を濡れた指先で円周方向に摩擦して音を発生させる⁽³⁾。

ワイングラスの鳴き音については、Spurr⁽⁴⁾が実験を行い、以下の(1)～(3)の結論を示した。(1)発生する音はワイングラスのたわみ振動によるもので、グラスの(2-0)モードに相当する周波数とその倍音からなっている。(2)摩擦する速度を増加すると、ある速度(約25cm/s)で突然音が止む。(3)摩擦係数はすべり速度に対して負の勾配であり、勾配がゆるくなると音が発生し、正になる前に音が止む。また、Rossing⁽⁵⁾はワイングラスの端を濡れた指で円周方向に摩擦したり、バイオリンの弓でグラスを半径方向に摩擦するとグラスの(2-0)や(3-0)モードに相当する周波数の音が発生するが、(3-0)モードに相当する周波数の音は発生しにくいと述べている。また、グラスの縁を濡れた指で回しながら摩擦すると節点がグラスの縁を移動するので、うなりが発生することも指摘した。しかし、実験について詳しいことは示されていない。なお、以下ではグラスのたわみ振動によってグラスの(n-0)モードに相当する周波数の音が発生することを(n-0)モードの音と称する。ここに、nは節直径の数、0は節円の数である。

筆者らは、以前に(1)グラスハーブのように固定したワイングラスの縁を濡れた指で円周

方向に摩擦する。(2) グラスハーモニカのようにワイングラスを回転させ、濡れた指をグラスの縁にあてて摩擦させる。(1)、(2) の2種類の実験を行い、音の発生機構は2種類あること、音の周波数はグラスの(2-0)モードの周波数やその倍音も含むものもあること、グラスの(2-0)モードの減衰比が一番小さいことを発表した⁽⁶⁾。しかし、グラスの(2-0)モード以外の振動による音は発生しなかった。

本研究では、(1) グラス固定で濡れた指でグラスの縁をこすって音を出す(グラスハーブに相当) およびグラスを回転させ、濡れた指でグラスの縁をこする(グラスハーモニカに相当)の2種類の楽器の出す摩擦音について周波数、グラスの振動モードおよび減衰比について、比較・検討を行う。(2) 4種類の材質や大きさの異なる容器による発生した音の比較・検討を行う。(3) 摩擦音発生に及ぼすガラスと指の動きの比較・検討を行う。これら(1)～(3)を解明する事によって、新しい知見を求めようとするものである。

2. 実験について

2.1 実験に使用した容器類

実験にはワイングラスを始め種々の円筒形の容器を用いた。実験に使用した容器は次の大きさの異なる16種類である。その内訳は(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。図2には、これら4つのタイプの代表的なものを示す。なお、記号(1)-1はタイプ(1)の1番目の容器を表している。



(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2 実験に用いた4種類の容器の代表例

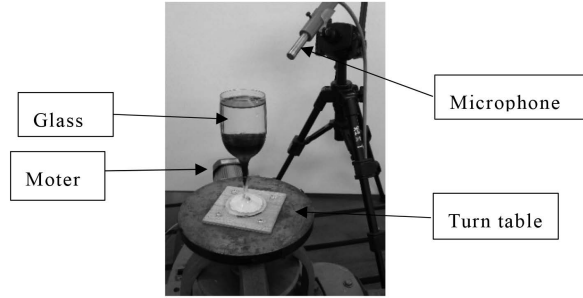
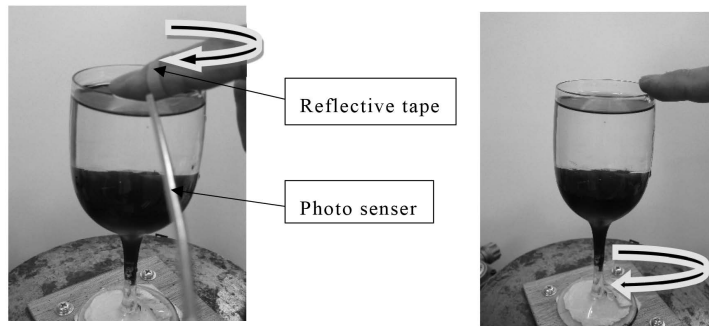


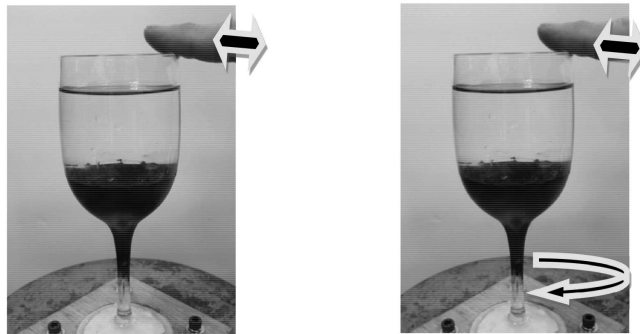
図3 実験装置



(a) グラスを固定、指はグラスの縁を円周方向に回転

(b) グラスは回転、指はグラスの縁に固定

図4 指をグラスの円周方向に摩擦させる（実験（1a）および（1b））



(a) グラスは固定、指を半径方向に摩擦する

(b) グラスを回転、指を半径方向に摩擦する

図5 指をグラスの半径方向に摩擦させる（実験（2a）および（2b））

2.2 実験装置および方法

図3に示す実験装置を用い、上述の16種類の容器について2種類の実験（**実験1**および**実験2**）を行った。以下では、代表的なワイングラス（図2に示した（1）-1の容器）について詳細な結果を示す。実験に使用したグラスの仕様は直径60mm、高さ170mm（stemの部分

含む)、stem高さ80mm、ガラス部分の厚さは1.2mm、容積197cm³、材質はクリスタルガラスである。

実験1は図4(a)、(b)に示すようにガラスの縁を濡れた指先で円周方向に摩擦して音を発生させる。**実験1(a)**は図4(a)に示すようにガラスを固定し、濡れた指先でガラスの縁を円周方向に摩擦し、音を発生させた。指でガラスを摩擦する速度(平均速度)は指先に反射テープを貼り、光学式センサー(SUNX製、FX-A-3e)により計測した。**実験1(b)**は図4(b)に示すようにガラスを回転させ、その縁を濡れた指先で押さえて音を発生させた。ガラスの回転速度は回転円板の周囲に反射テープを貼り付け、**実験1(a)**と同じ光学式センサーにより計測した。

実験2は図5(a)、(b)に示すようにガラスの縁を濡れた指先で半径方向に摩擦させて音を発生させた。**実験2(a)**はガラスを固定し、**実験2(b)**はガラスを回転させながら濡れた指をガラスの半径方向に摩擦させた。回転速度はいずれも**実験1**と同じ光学式センサーにより計測した。

なお、図5のように濡れた指先でガラス上面の縁を斜めに半径方向に摩擦することによって高次モード(ここでは(3-0)モード)の音が発生した。これは、バイオリンの弓でワイングラスの端を斜めに半径方向に摩擦した場合に相当すると思われる⁽⁵⁾。しかし、バイオリンの弓の長さと比較して指の長さは短いので音が発生する時間は短い。ここでは指でガラスを摩擦して音を発生させることに主眼をおいているので、バイオリンの弓は使用しなかった。

発生したガラスの振動モードの形状が明確にわかるように、ガラス底面を艶消し黒の塗料で外側から塗り、水を縁まで入れて指で摩擦させ音を発生した時の水面の状態をガラスの上からカメラで撮影した。ガラスの縁の周速度は約5~40cm/sとなるように円板の回転数を調節した。音圧はガラスの縁から斜め上45度で5cmの距離に設置した1/2"コンデンサマイクロホン(B&K製、4165)および計測アンプ(B&K製、2610)により計測した。なお、周波数分析にはFFTアナライザ(小野測器製、CF5250およびCF7200)を用いた。

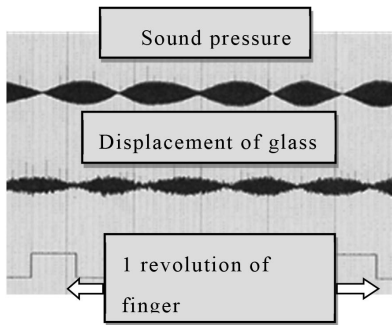
3. ガラスの縁を円周方向に摩擦した実験結果

3.1 実験1(a)(ガラスを固定し、指を円周方向に摩擦した場合：ガラスハーブに相当)

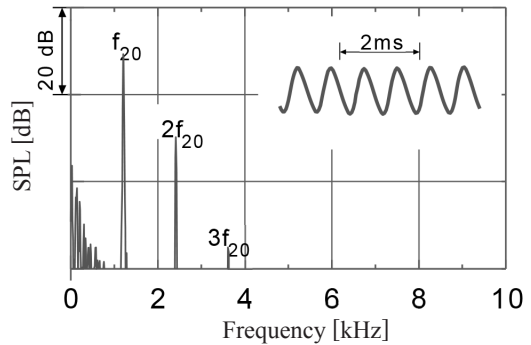
3.1.1 ガラスの(2-0)モードに相当する周波数の音：

図6(a)は指でガラスを一周したときの音圧波形、ガラスの半径方向振動変位波形および回転パルス波形を示す。振動変位はガラスの側面に薄いアルミ箔を貼り、非接触変位計(電子応用製、AEC5505)により測定した。回転パルスの間隔は指がガラスを一周する時間を示す。音圧および変位波形から、指がガラスを一周する間に4つの節をもつ振動が発生し、さらにも発生していることがわかる。図6(b)に速度約15cm/sにおける音圧波形およびその周

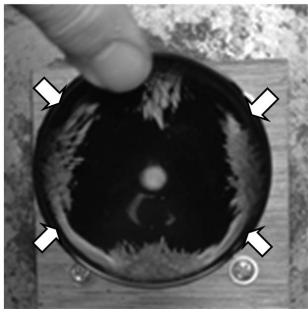
波数分析結果を示す。発生した音は甲高く、うなりを含んでいる。音の基本周波数は1212Hzで、その倍音も発生している。



(a) 指を1回転させる間の音圧およびガラス変位波形の様子



(b) 音圧波形の周波数分析結果
(2-0) モードで周波数は f_{20} で1212Hz.



(c) (2-0) モードで振動中のガラス水面の振動

図6 グラスを固定して、指を円周方向に摩擦した時の音圧波形、振動変位波形、音圧の周波数分析結果およびガラスの振動モード

この1212Hzは後述のようにガラスの(2-0)モードの周波数に一致するので、図には f_{20} と示す。 $2f_{20}$ および $3f_{20}$ はそれぞれ f_{20} の2倍音および3倍音を示す。図6(c)は音発生時のガラス水面の振動を示す。ガラスに発生する振動モードを視覚的に分かりやすくするために、ガラスに水を入れて水面に現れる模様を求めた。図中の矢印はガラスの振動の節を示す。図より節点が4つ、節直径2本の(2-0)モードであることがわかる。ガラスを満たす水量を多くすると発生する音の周波数は低下するが、振動モードは変化しなかった。

このように、変位波形およびガラス水面の写真より、ガラスに発生する音の周波数は指先の位置を節とするガラスの(2-0)モードに相当する周波数に一致し、ガラスの円周上を指先が移動するに従い節の位置も移動するために、振動モードも回転し、うなりが発生することがわかった。

図7は摩擦音発生時の摩擦速度と押し付け力の関係を示す。ガラスを押し付ける力は図8に

示すようにデジタルスケールの上にグラスを固定して、指でグラスの縁を摩擦し、音を発生させた時の荷重増加分から求めた。得られた押し付け力は約0.15Nから0.4Nと非常に小さい。指でグラスの縁を摩擦する速度を上げると、指がグラスから外れないように力が働くために自然に押しつける荷重が増加する傾向がある。次に、指でグラスの縁を摩擦する速度を変化させて、発生音の音圧レベルを測定した結果を図9に示す。なお、暗騒音レベルは75dBである。音はある速度まで発生せず、発生すると音圧レベルは速度と共に徐々に大きくなり、さらに速度を上げると音は止む。すなわち、音が発生する速度域（図では5 cm/sから30cm/s）が存在する。なお、発生した音の周波数は摩擦速度によって変化しなかった。

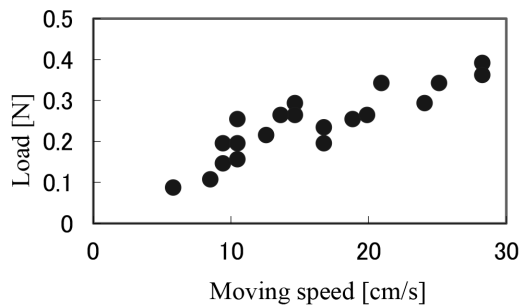


図7 リンギング発生時の指の摩擦速度と荷重の関係



図8 摩擦時の荷重測定

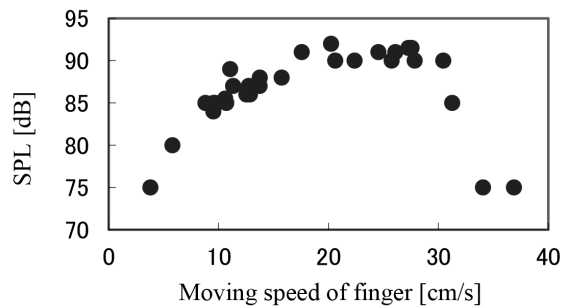


図9 指の摩擦速度と音圧レベルの関係
(暗騒音レベルは75dB)

3. 1. 2 グラスの (0-0) モードに相当する周波数の音：

実験 1 (a) でグラスを押し付ける力を (2-0) モードを発生させる力の7~10倍の1N~2Nに増加すると、グラス全体が振動して約75Hzの“ギー”という音圧レベルの低い低周波の音が発生する。図10は発生時の音圧波形とその周波数分析結果を示す。グラスに水を入れて水面の様をみると、図11に示すようなグラスの (0-0) モードと思われる同心円状の波が発生している。発生した音の周波数を f_{00} とする。この音は後述する実験 1 (b) および実験 2 では発生しなかった。

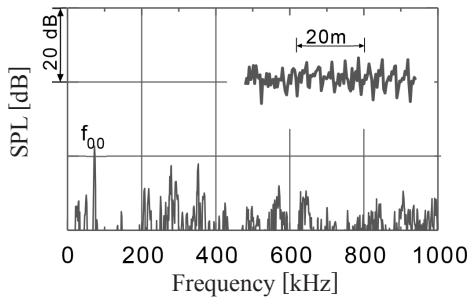


図10 (0-0) モードの音圧波形と周波数分析結果
(f_{00} は (0-0) モードの周波数である)

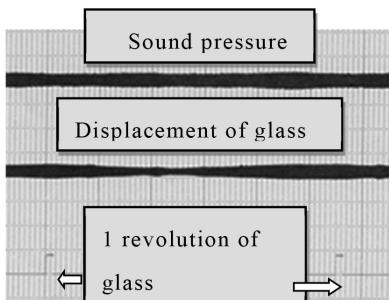


図11 (0-0) モード発生時のグラス
表面の振動

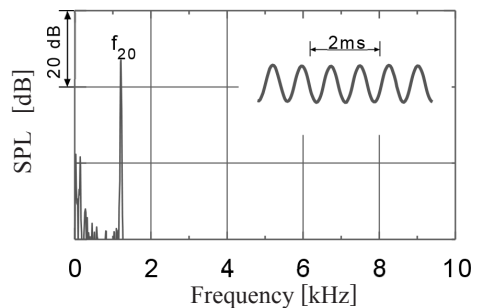
3.2 実験1 (b) (グラスを回転させ、指を固定して円周方向に摩擦した場合； グラスハーモニカに相当)

3.2.1 グラスの (2-0) モードに相当する周波数の音：

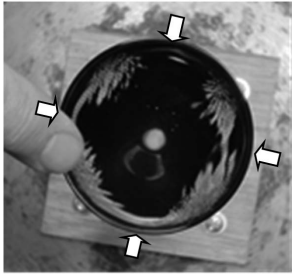
図12(a)はグラス1回転における音圧、グラス振動変位波形および回転パルスを示す。図6 (a)と比較して、うなりは発生せず、波形の変動が少ないことがわかる。これはグラスを固定し、指を摩擦させた実験1 (a) の場合と異なり、グラスの回転がほぼ一定で、速度変動が少ないため、グラスの節はいつも同じ位置にあり、うなりが発生しないと思われる。図12(b) にはグラスの回転速度約15cm/sにおける音圧波形およびその周波数分析結果を示す。グラス水面の振動モードも図12(c) に示すように (2-0) モードであった。また、指の位置は振動の腹であることがわかる。実験1 (a) の場合 (図6) と比較すると、波形の基本周波数は1212Hzであるが、ほぼ正弦波に近く高調波成分が発生せず「うなり」も現れていないことがわかる。図13はグラスの回転速度に対する音圧レベルの変化を示す。実験1 (a) の場合 (図9) と同様に音が発生するグラスの回転速度域が存在する。なお、暗騒音レベルは75dBである。



(a) グラス1回転中の音圧波形と
変位波形



(b) (2-0) モードでの音圧波形と周波数
分析結果 (速度約15cm/s)



(c) (2-0) モード発生中のグラス水面の振動

図12 グラスを回転させ、指先をグラスの円周方向に固定した時の音圧波形、変位波形、音圧の周波数分析結果およびグラスの振動モード

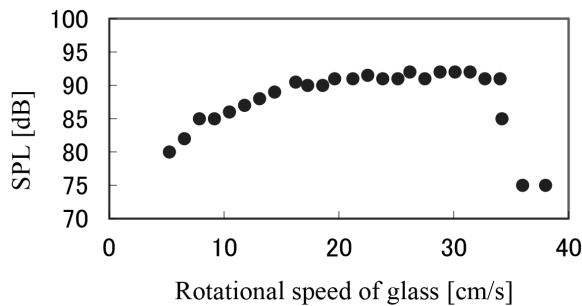


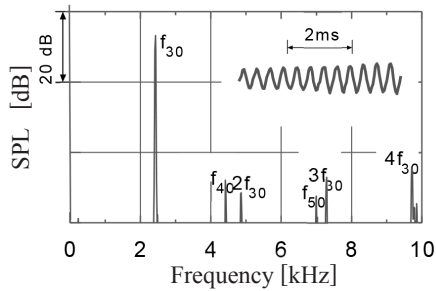
図13 グラスの回転速度と音圧の関係

4. グラスの縁を半径方向に摩擦した場合の実験結果

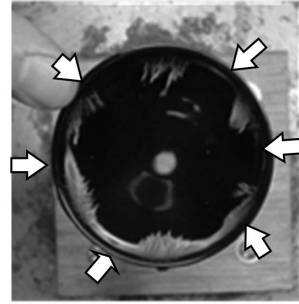
4.1 実験2 (a) (グラスを固定し、指で半径方向に摩擦した場合)

グラスの (3-0) モードに相当する周波数の音が発生：

前章までは濡れた指でグラスの縁を円周方向に摩擦して音を発生させた。発生する音の周波数はグラスの半径方向振動の (2-0) モードに一致した。しかし、図5に示すように濡れた指でグラスを半径方向に摩擦すると (2-0) モード以外の高次モードの音が発生した。図14 (a) はその時に発生した音圧の波形および周波数分析結果である。(3-0) モードの周波数2438Hz (f_{30}) が現れ、その2倍 ($2f_{30}$) および4倍 ($4f_{30}$) の音が発生している。また、(4-0)、(5-0) モードの音 (f_{40}) および (f_{50}) も発生している。グラス水面に発生した振動モードを図14 (b) に示すが、節が6つあり振動モードは (3-0) である。なお、指先の位置は**実験1 (a)** の場合と同じように節になっている。発生する時間は指がグラスの縁を半径方向に摩擦する時間であるために短い。



(a) (3-0) モード発生時の音圧波形と周波数分析結果



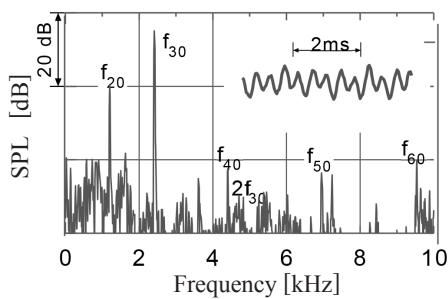
(b) (3-0) モード発生時のガラス水面の振動

図14 グラスを固定して、濡れた指をガラスの半径方向に摩擦した時の音圧波形、周波数分析結果およびガラスの振動モード

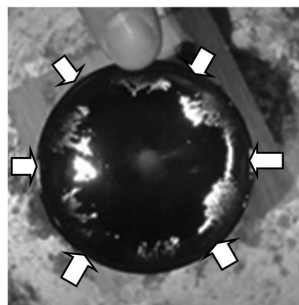
4.2 実験2 (b) (ガラスを回転させ,指で半径方向に摩擦した場合)

ガラスの (3-0) モードに相当する周波数の音が発生 :

図15(a) は回転しているガラスを濡れた指で半径方向に摩擦した時の音圧の波形および周波数分析結果である。(3-0) モードの音2458Hz (f_{30}) およびその倍音 ($2f_{30}$) が大きい、(2-0) モードの音 (f_{20}) も発生している。これは、ガラスが回転しているために、(2-0) 成分が含まれていると思われる。なお、(4-0)、(5-0) および (6-0) モードの音 (f_{40})、(f_{50}) および (f_{60}) も発生している。図15 (b) は (3-0) モード発生時のガラス水面の振動である。**実験 1 (b)** と同様に、指の位置は常に振動の腹である。**実験 2 (a)** の場合と同様に、(3-0) モードの音が発生する時間は短い。



(a) (3-0) モード発生時の音圧波形と周波数分析結果



(b) (3-0) モード発生時のガラス水面の振動

図15 回転しているガラスを濡れた指で半径方向に摩擦した時の音圧波形、周波数分析結果およびガラスの振動モード

5. 検 討

実験結果より、半径方向の振動モードだけでなく、ガラス底面を固定端およびガラス上面を自由端とした片持ちはりの振動モードに相当するモードの両方の音が発生することが解明された。すなわち、図5のように濡れた指先でガラス上面の縁を半径方向にやや斜め上下に摩擦することによって高次モード（ここでは(3-0)モード)の音が発生した。これは、バイオリンの弓でワイングラスの端を半径方向に斜めに摩擦した場合に相当すると思われるが、バイオリンの弓の長さと比較して指の長さは短いので、音が発生する時間は短い。以下では、それぞれの発生条件について検討した結果を示す。

5.1 (2-0) モードが発生する理由

なぜ、ガラスの縁を円周方向に摩擦するとガラスの(2-0)モードの音が他のモードの音より多く発生するか検討するために、ガラスの縁を打振したときに発生する主なピーク周波数の振動モードの減衰比を比較した。振動モードは加振器によりガラスの半径方向に加振し、このときの節点の数をガラスの周囲に貼った薄くて軽量の加速度センサーにより求めた。表1には、図2に示した代表的な4種類のタイプの容器の上端を打撃して発生した音の周波数および減衰比を振動モードごとに一覧表にした。実験に使用し、16種類の容器の上端面を濡れた指で円周方向に摩擦させた結果、いずれも容器の(2-0)モードの周波数に一致する音が発生し、減衰比の値も小さかった。

図16は使用した16種類の容器のモードごとの減衰比を図示したものである。縦軸は高次モードの減衰比と(2-0)モードの減衰比の割合を示す。図からもわかるように、容器の形態にかかわらず(2-0)モードの減衰比が一番小さく、高次モードになるにつれて、減衰比は大きくなる。タイプ(1)から(4)に示す種々の円形容器において、なぜ(2-0)モードに相当する周波数の減衰が小さいのかは不明であるが、実験から減衰比が小さいことは確認できた。

表1 種々の容器のモードごとの固有振動数と減衰係数

Type	Mode	(2-0)	(3-0)	(4-0)	(5-0)	(6-0)
(1)-1	Freq.[Hz]	1212	2438	4450	7025	9563
	Damp.	0.00777	0.0304	0.0437	0.0997	0.108
(2)-1	Freq.[Hz]	1425	2950	5062	7925	
	Damp.	0.0803	0.204	0.292	0.401	
(3)-1	Freq.[Hz]	2238	5987			
	Damp.	0.102	0.205			
(4)-1	Freq.[Hz]	750	1762	2462	4137	5225
	Damp.	0.037	0.056	0.182	0.325	0.371

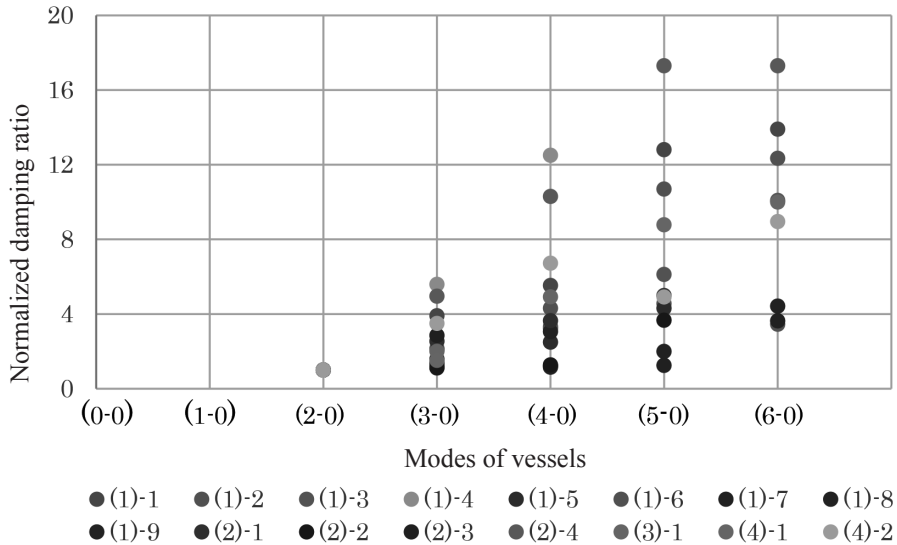


図 16 容器の振動モードと減衰係数の関係

5.2 高次モードの発生と内部共振

図6および図12において、円周方向に摩擦した場合、グラスが固定、回転のいずれの場合も(2-0)モードの音のみ発生した。一方、図14および図15に示すようにグラスを半径方向に摩擦した場合、(2-0)および(3-0)モードの音が発生した。しかし、周波数分析結果から、レベルは(3-0)モードの方が大きいことがわかる。表2には、図2で示した4種類の容器について、(n-0)モードの周波数 f_{n0} 、(n-0)モードの周波数 f_{n0} と(2-0)モードの周波数 f_{20} の比 f_{n0}/f_{20} および容器の円周方向および半径方向を摩擦した時に発生した音の振動モードを示す。◎印は音圧レベルが高かったモードを表している。半径方向振動では、2つのモードが発生するので、レベルが大きいモードに◎、その他には○を付けた。例として、図17はタイプ(2)-1の容器を、図18はタイプ(3)-1の容器をそれぞれ半径方向に摩擦した時の波形と周波数分析結果を示す。表2より、円周方向を摩擦する場合は(2-0)モードが基本的に発生することが分かった。また、半径方向を摩擦すると(2-0)および(3-0)モードが発生するが、モードと固有振動数の関係を見ると、タイプ(1)-1とタイプ(2)-1は(3-0)/(2-0)が2.09、2.07と2に近くなっている。すなわち、1:2の内部共振が発生していると思われる。このために、半径方向を摩擦した場合(2-0)モードの2倍の(3-0)モードの振動振幅が大きくなり、結果的に(3-0)モードの音が発生し、(2-0)モードよりレベルが大きくなると考えられる。一方、タイプ(3)-1とタイプ(4)-1は(3-0)/(2-0)が2.67、2.35と2より大きいので、1:2の内部共振が発生しないために、(3-0)モードが発生してもレベルは(2-0)モードの方が大きいと思われる。

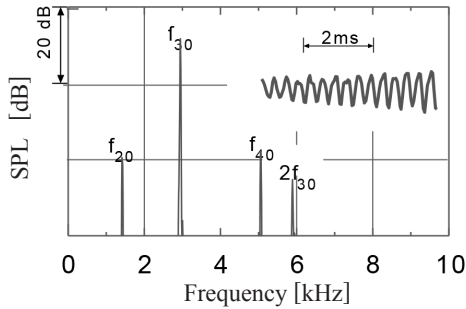


図17 タイプ（2）の容器を摩擦した場合の音圧波形と周波数分析結果

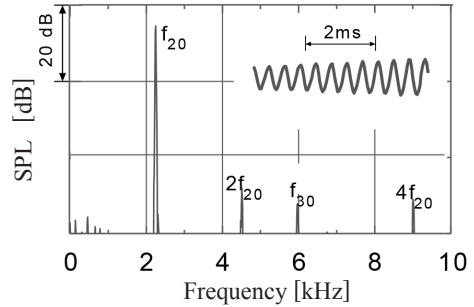


図18 タイプ（3）の容器を摩擦した場合の音圧波形と周波数分析結果

表2 容器の固有振動数と容器を円周方向および半径方向に摩擦した時に発生した主な周波数

Type	Mode	(2-0)	(3-0)	(4-0)	(5-0)	(6-0)
(1)-1	Freq.[Hz]	1212	2438	4450	7025	9563
	Freq. ratio	1	2.09	3.67	5.8	7.89
	Circum.	◎				
	Radial	○	◎			
(2)-1	Freq.[Hz]	1425	2950	5062	7925	
	Freq. ratio	1	2.07	3.55	5.56	
	Circum.	◎				
	Radial	○	◎			
(3)-1	Freq.[Hz]	2238	5987			
	Freq. ratio	1	2.67			
	Circum.	◎				
	Radial	◎	○			
(4)-1	Freq.[Hz]	750	1762	2462	4137	5225
	Freq. ratio	1	2.35	3.28	5.52	6.97
	Circum.	◎				
	Rradial	◎	○			

5.3 固有振動数の計算

発生する周波数は、付録に示すモデルによるガラスの固有振動数の計算によった。Frenchの提唱したモデルによる解析を行う⁽⁷⁾。モデルの詳細は付録に示す。図19には、 $s=1.875$ として、節直径数 m と固有振動数 $f_{m,s}$ の関係について、付式（1）による計算結果と実験結果を合わせて示す。

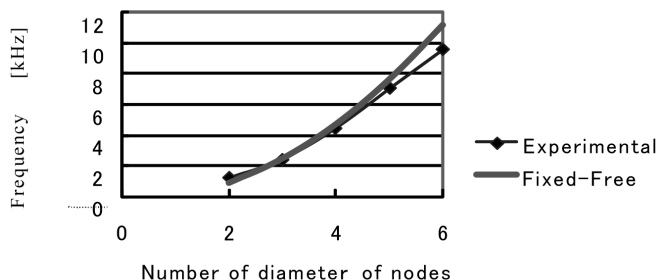


図19 実験結果と境界条件が固定—自由での付式 (1) の計算結果との比較 (モード数 m は2~6)

5.4 指とガラスの間の摩擦係数

濡れた指でガラスの縁を摩擦すると、音が発生するが、乾いた指でガラスの縁を摩擦しても音は発生しなかった。指とガラスの間の摩擦係数を測定することにより、音の発生条件について検討した。図20に示すような実験装置を製作し、水で濡らした指でガラスの上を摩擦した場合の摩擦係数を測定した。実験装置はアルミ板 (長さ90mm、幅25mm、厚さ2mm) の上に長さ76.2mm、幅25.4mm、厚さ1mmの顕微鏡用スライドのガラスを貼り付けてある。このガラスの上を濡らした指で押しつけながら摩擦させた。押し付け荷重および摩擦力はいずれもアルミ板および支持板に貼ったひずみゲージによって求めた。指の移動速度 (平均速度) はガラス板上から光学式センサー (SUNX製、Fx-A-3e) を2箇所取り付けて、この区間 (70mm) を指先に反射テープを貼った指が通過する時間より求めた。

図21は指を水で濡らした場合 (Wet) と濡らさない場合 (Dry) について、指のすべり速度約10cm/s~20cm/sにおける押しつけ荷重と摩擦係数の関係を示す。荷重が小さいと摩擦係数が大きいことおよび指とガラスの間に水分があると摩擦係数が大きいことがわかる。図7より、濡らした指でガラスを摩擦し音が発生した場合、垂直荷重は0.15N~0.4Nと比較的小さいことから摩擦係数が大きいことが推測される。図22には濡らした指でガラスを摩擦させたときの指の摩擦速度と摩擦係数の関係を求めた結果を示す。押しつけ荷重を0.3N~0.5Nと0.5N~0.7Nの2種類に大別した。いずれの場合も速度が大きくなると摩擦係数は小さくなるが、押し付け荷重が大きいほうが摩擦係数は小さくなる傾向がある。また、図7から速度を大きくすると押し付け荷重は大きくなる傾向がある。したがって、ガラスを回転させた場合は、押し付け荷重はほぼ一定のため、すべり速度が増加すると摩擦係数も小さくなり、ある速度で音が鳴き止む。ガラスを固定させた場合は、速度が大きくなると、指がガラスの縁から外れないようにするために、必然的に押しつけ荷重を大きくせざるを得なくなり、図22の結果より摩擦係数が小さくなり、音が鳴き止む。いずれの状態においても、速度が大きくなると摩擦係数が小さくなり、音は鳴き止む。この結果は指とガラスの間に適度な湿気がある場合には、完全に乾燥している

場合（固体摩擦）よりも摩擦係数の値は大きく、垂直荷重が小さいほど摩擦係数は増加するという結果に一致する^{(8)、(9)}。

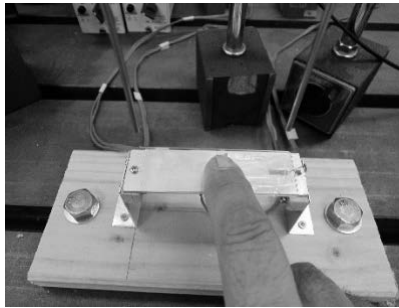


図20 摩擦係数実験装置

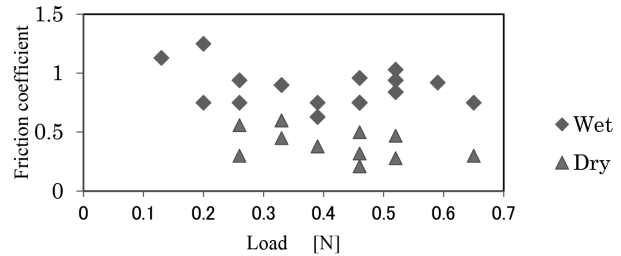


図21 指先を乾燥 (dry) および湿潤 (wet) した状態でのガラスの摩擦係数と荷重の関係

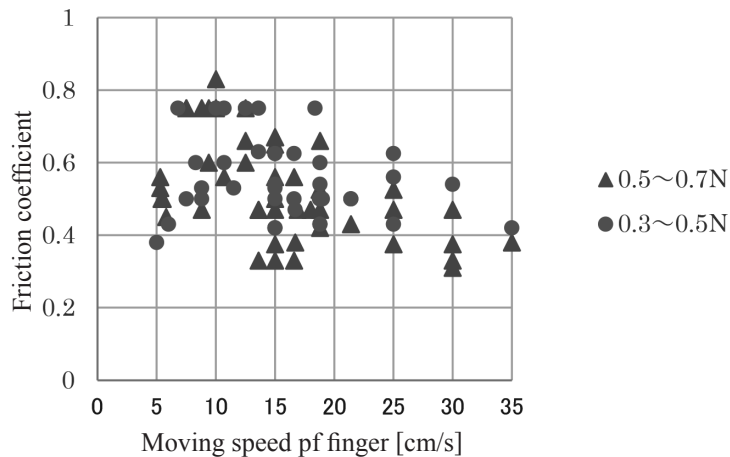


図22 荷重を2種類に分けて摩擦した時のすべり速度と摩擦係数の関係

6. うなりの発生

実験 1 (a) では発生する音はうなりを伴っているが、実験 1 (b) では発生していない。この原因を求めるために、うなりの周波数を求めた。周波数分析のズームによる周波数の一例を図23に示す。図から1202Hzおよび1206Hzのピークが存在し、うなりの周波数は4 Hzであることがわかる。図6よりわかるように、ガラスの節は指とともにガラス円周上を移動する。このように、円周上を節が移動する場合、発生するモードおよび移動速度によって、うなりが発生することはよく知られている。

指でガラスの縁をこする速度を変化させた場合、発生するうなり周波数を求めた実験結果を図24示す。一方、ガラスを回転した場合には、図12でも示したように、発生した音は高調波成分がほとんど存在せず、うなりも発生しなかった。これらの結果より、ぬれた指で固定したグ

ラスを摩擦した場合には、指でグラスを押さえた箇所が節となる振動を発生し、これが指の回転とともに、グラスの縁を移動することによってすべり速度に微妙な変化が生じる。

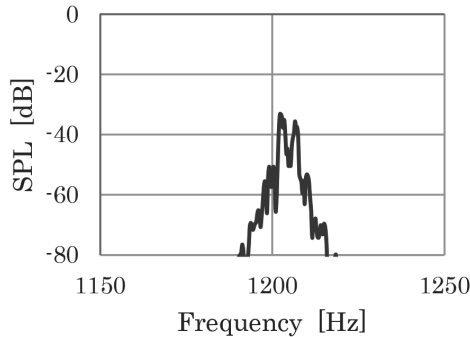


図23 うなりが発生した時の周波数分析結果

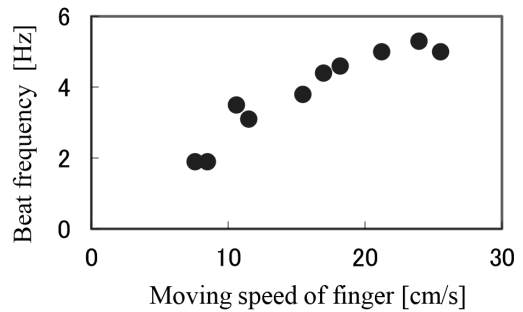


図24 こする速度とうなり周波数の関係

したがって、「うなり」が発生することが分かった。一方、グラスを回転させている場合はグラス回転数が、指を移動させる場合ほど変化しないことから、すべり速度もほとんど変化しないために、うなりが発生しないと考えられる。うなりが発生するのは、「フランジング」と呼ばれる現象である。すなわち、比較的周波数の近い2つの音源を重ねると「うなり」が発生する。アナログ時代に録音テープの端を手でさわることによりテープの送り速度が微妙に変化し、ちょうど「うなり」と同じような現象が発生することである⁽¹⁰⁾。これはちょうど、固定したワイングラスの縁を濡れた指でこすることによりわずかな速度変動が発生することに相当している。

7. 結 論

ワイングラスの縁を濡らした指で摩擦した場合に発生する音について、16種類の種々な材質の円形容器を用いて、実験を行った結果、以下に示す結論が得られた。

- (1) グラスの円周方向に摩擦した場合、発生する半径方向振動モードは(2-0)である。他の振動モードの音は発生しない。これは(2-0)モードの減衰比が他のモードの減衰比より小さいために、最後まで音として残るためである。
- (2) 半径方向に摩擦した場合、振動モードは(2-0)モードのほかに(3-0)モードの高次モードが発生する。しかし、指で縁を半径方向に摩擦する時間が短いので、発生時間も短い。
- (3) 容器によっては、(2-0)モードの周波数の2倍が(3-0)モードにほぼ一致する内部共振が発生することがある。この場合、半径方向に摩擦させると、内部共振の影響により、(3-0)モードが(2-0)モードより大きなレベルで発生する。しかし、内部共振の関係がない場合、(3-0)モードは発生するが、そのレベルは(2-0)モードのものより低い。
- (4) グラスを固定した状態で押しつけ力を大きくすると、(0-0)モードの振動が発生し、低

周波で音圧レベルの低い音が発生する。

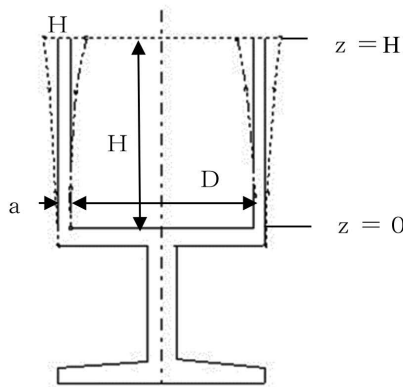
- (5) グラスを固定し、指を円周方向に摩擦させて音を発生させた場合は“うなり”を含んだ音が発生し、指の位置はガラスの振動の節となる。指を固定し、グラスを回転させて音を発生させた場合、指の位置はガラスの振動の腹になり、“うなり”は発生しない。
- (6) グラスを固定または回転させた場合も鳴き音が発生する速度域が存在する。これは指とガラスによる実験結果より、接触面が濡れた場合は、摩擦係数が大きくなることおよび速度が大きくなると、押し付け荷重が大きくなり、結果として、摩擦係数が小さくなるためである。
- (7) 簡略型の数値モデルによる結果は実験結果とよく一致した。

付 録

グラスを付図1に示すような側面の厚さが a 、高さ H 、内径 D の円筒形と仮定した。なお、本論文では節円の数 0 として考えた。グラスの側面の振動は底面を固定端としたはりの振動と仮定し、高次モードまで考慮した。使用した記号を以下に示す。

a :グラスの厚さ [m]、 H :グラスの高さ [m]、 E : Young率 [GPa]、 P_y : グラスの密度 [kg/m³]、 m : 半径方向の振動モードの数 (節直径の数)、 S : グラスの断面において、底を固定、長さ H の先端を自由端の片持ちはりとして仮定したときの固有値、1次で=1.875、2次で=4.694、……、グラスの振動モードが節直径 m 、節円 0 、片持ちはりの振動モードの固有値が S であるグラスの固有振動数は以下の式(付式1)から求められる。

$$f_{m,s} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{3E}{\rho_y} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{a}{D^2} \left[\frac{(m^2 - 1)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{sD}{H} \right)^4}{1 + \frac{1}{m^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{付式 1})$$



付図1 グラスの断面図と数値計算モデルに使用したパラメータ

文 献

- (1) Rayleigh, J. W. S. The theory of sound 2nd ed. Vol.1 (1985) , p.388, John Willy and Sons.
- (2) Thomas Bloch, MUSICFOR GLASS HARMONICA, 8.555295, MAXOS, 2001.
- (3) 高橋美智子 グラスハーブ・モーツァルト, KICC118, キングレコード, 1994.
- (4) Spurr, R. T., “The ringing of wine glasses” , Wear, Vol.4, (1961) , pp.150-153.
- (5) Rossing, T. D., “Acoustics of the harmonica” , J. Acoust. Soc. Am, Vol.95, No.2, (1994) , pp.1106-1111.
- (6) Yokoi, M, Takahagi, T and Nakai, M., “The frictional sound of wineglass caused by rubbing with wetted finger” , Proc. Inter-noise 2006, (2006) , CD-ROM.
- (7) French, A. P., “A study of wineglass acoustics” , Am. J. Phys., Vol.51, No.8, (1983) , pp.688-694.
- (8) 鈴木健太, 渡邊鉄也, 田中喜八郎, “指先の摩擦モデルに関する研究”, 日本機械学会論文集C編, Vol.74, No.746, (2008) , pp.2549-2554.
- (9) 高嶋樹, 中西義孝, 日垣秀彦, “ヒト掌皮膚の摩擦に関する研究 (第1報, 摩擦の発生機構に対する実験的検証”, 日本機械学会講演論文集, No.02-35, (2003) , pp.253-254.
- (10) <http://www.g200kg.com/jp/docs/dic/flanging.html> (参照日2021年5月27日)