

COMSOL Multiphysics を用いたグラスハーブの振動解析

小塚 晃透[†] 畑中 信一[‡][†] 産業技術総合研究所 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98[‡] 電気通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1E-mail: [†] kozuka-t@aist.go.jp

1. 緒言

近年、若者の理科離れが問題視されている。産総研では、科学技術に関する啓蒙活動として、科学館や学校などに職員が出向いて、講義や実験を行うサイエンスコミュニケーション活動を行っている[1]。その中で筆者らは、「グラスハーブで探る音のふしぎ」と題して、グラスハーブを用いて音響振動に関する実験教室を実施している[2]。

ワイングラスの縁を水で濡らした指で擦ると、単一の共振周波数で振動するため、澄んだ音が発生する。共振周波数が異なる複数のグラスを用意すると音階ができ、グラスハーブと呼ばれる楽器になる。グラスハーブは意外と大きな音が発生するが、グラスの振動は微小であり、振動を直接観察することは困難である。そこで、COMSOL Multiphysics を用いて、振動の解析を試みた。その結果、水の量に応じて、共振周波数に変化することを確認できた。また、振動によるグラスの形状の変化を映像化することが可能であった。振動の様子をアニメーション表示することで、グラスの振動を理解することが容易となる。

固有の共振周波数を持ち、力を加えるとその周波数で振動する。また、水を入れると器内の形状が変わり、全体の質量が変化するため、共振周波数に変化する。さて、ワイングラスの縁を水で濡れた指で擦ると、グラスを叩いた時と同じ周波数で振動するため、単一周波数の澄んだ音が発生する。そして、水の量を少しずつ変えたグラスを並べて音階を作ると、グラスハーブと呼ばれる楽器を作ることができる(図1)。



図1. グラスハーブ

2. グラスハーブ

2.1 グラスハーブ

食器等の物体を棒で叩いたり指で弾くと、その器固有の高さの音で鳴らすことができる。物体は



図2. グラスハーモニカ

2.2 グラスハーブの歴史

グラスハーブは、その透き通るような美しい音色から「天使のオルガン」と呼ばれ、18世紀のヨーロッパで流行した。また、日本の佐々木硝子(株)は、1982年に各音階に調律済みのグラス(水を入れない状態で「ド・レ・ミ・・・」の音階となっている)を製作して、グラスハーブを再現した。これは、1985年のつくば科学万博で高橋美智子氏により演奏された。

さて、グラスハーブは、演奏前の調整に時間がかかり、また、手を常に水で濡らしておくことが必要のため、大変手間がかかる。そこで、1761年にベンジャミン・フランクリンは、各音階のガラスの碗を用意して、その中心に穴を開けて1本の棒に固定した。そして、足踏み式の機械で棒を回転させ、ガラスの縁に指を触れて演奏を行うグラスハーモニカ(アルモニカ)を発明した。グラスハーモニカは長い間幻の楽器とされていたが、1984年に G. Finkenbeiner 社により復興され、現在でも入手可能である(図2)[3]。

2.3 音階と周波数

音楽で使われる音階は、1オクターブで周波数が倍となる。1オクターブには、半音を含めると12の音階がある。平均律では、隣り合う音階の周波数の比は均等なので、隣の音階との周波数の比はそれぞれ $2^{1/12} = 1.059\cdots$ となる。また、1939年に440 Hzを”ラ”の音とすることが国際標準と決められた。1オクターブの各音階の周波数は、図3のようになる。

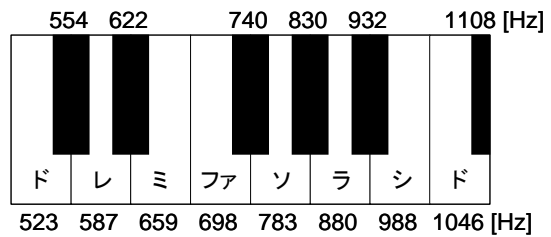
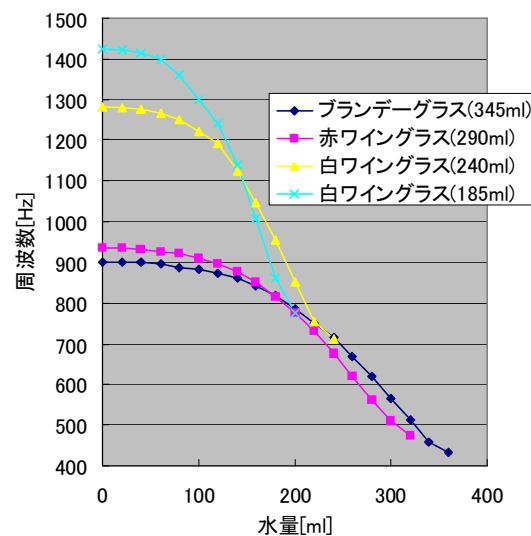


図3. 音階と周波数の関係



(a) 市販のワイングラス



(b) 水量と周波数

図4. 水量と周波数の関係

2.4 水量と周波数

市販の4種類のグラス(図4(a))について、水の量と周波数の関係を調べたところ、図4(b)に示す結果を得た。

一種類のグラスで一オクターブの音を出すことは難しいが、複数種類のグラスを組み合わせることで、一オクターブの音階を実現することが可能

である。また、水を多く入れると音が小さくなる。そのため、グラスハーブを製作する上で、できるだけ少ない水量で目的の音を出すことができるグラスを選択することが望ましい。

3. COMSOL Multiphysics による振動解析

3.1 幾何学モデル

COMSOL Multiphysics を用いて、振動解析を試みた。使用したモジュールは、基本モジュールと音響モジュールである。図5に、作成した幾何学モデルを示す。材質はシリカガラスである。外径 80 mm、内径 77 mm、肉厚 1.5 mm の中空ガラス球を作り、上部 1/4 を削除した。底部に、直径 4 mm、長さ 10 mm のガラス棒を付けた。そして、ガラス棒の下端を固定拘束した。図6に計算結果を示す。図6(a)はメッシュ図形である。同図(b)は周波数 1364 Hz 時の変位であり、扁平に変形する。位相が 180° 毎に、凹部分と凸部分が交代する振動である。また、同図(c)は周波数 3837 Hz 時の変位であり、同様に三角形の凹凸が交代する振動である。さらに高い周波数では、四角形、五角形の振動を見ることが出来る。

このガラス球の内側に水を入れると、これらの周波数に変化が見られた。図7は、水位の位置と扁平変形時の周波数を示す。水が増加することで、周波数が低下することがわかる。また、最初はあまり変化しないが、水位が半分を超えたあたりから、急激に周波数が低下する様子が分かる。この変化は、実験における図4(b)に対応する。

3.2 実際のガラス形状による解析

次に、実際のガラス形状における振動周波数を調べた。実際のガラスを半分に切断し、断面形状をスキャナで読み取り、軸対象の二次元モデルを作成した。図8(a)のブランドーグラスを半分に切断し、コンピュータに取り込んだ断面形状を同図(b)に示す。この形状を基に、図9(a)に示す軸対象の二次元モデルを作成し、振動解析を行ったところ、幾何学モデルと同様に、図9(b)のように変形することが確認できた。さらに、水を加えた際の、共振周波数の変化を図10に示す。図4(b)に示した実験における、ブランドーグラスの周波数範囲に対応することが確認できる。

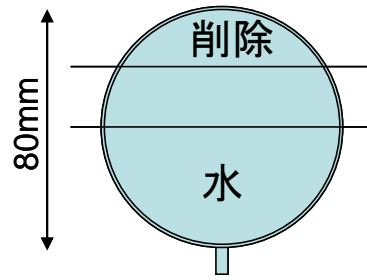
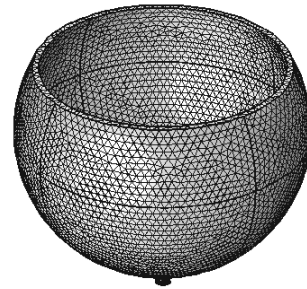
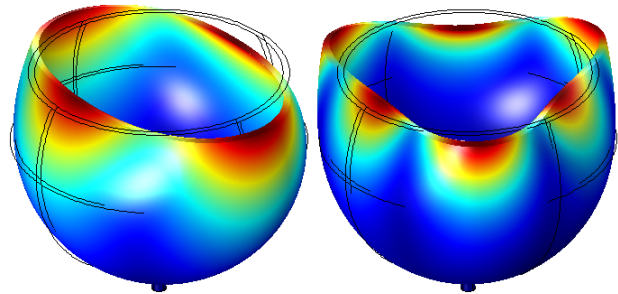


図5. 計算モデル



(a) メッシュモデル



(b) 1364 [Hz]

(c) 3837 [Hz]

図6. COMSOL による変形シミュレーション

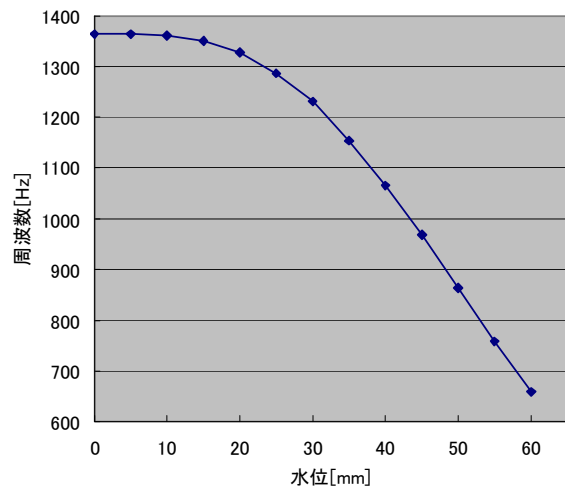


図7. 水位と共振周波数の関係

4. 考察

ワイングラスに水を入れると、発生する音の高さが変化する。音の発生要因が、グラス内の空気の共鳴(気柱共鳴)によるものであるとすると、水を入れることでグラス内の空気の体積が小さくなり、共振周波数は高くなるはずである。また、ガラス製のグラスの共振であるとするならば、水を入れることでグラスの質量が増して動きが鈍くなり、共振周波数は低くなると考えられる。

実験及びシミュレーションのいずれにおいても、グラスに入れる水を増加することで周波数が低くなることが確認された。すなわち、水を入れることでグラス全体の質量が増して、共振周波数が低くなると考えられる。

5. 結言

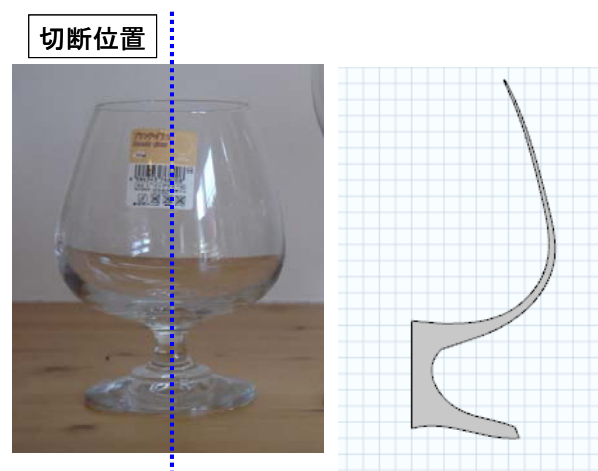
ワイングラスの共振を用いた、グラスハープの振動について検討した。幾何学モデルとして、中空ガラス球を設定してグラスの振動をシミュレートし、振動によるグラスの変形を可視化することができた。また、水量により共振周波数が変化する様子を確認できた。水を入れることで全体の質量が増加し、動きが抑制されることで共振周波数が低下すると考えられる。さらに、実際のグラスの断面形状をデータとして用いることで、実際のグラスの振動を再現できた。

本解析を行うにあたり、計測エンジニアリングシステム(株)の橋口真宜氏に、多大なるご指導を頂いた。感謝致します。

[1]http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/delivery_lectures/index.html

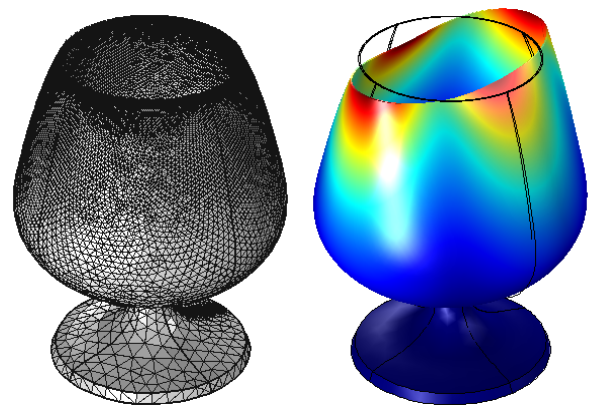
[2]<http://cocokara.shiojiri.com/magazine/2013032400012/>

[3]<http://www.finkenbeiner.com/GLASSHARMONICA.htm>



(a) ブランデーグラス (b) グラス断面図

図8. 実際のグラス形状の取り込み



(a) メッシュモデル (b) グラスの変形

図9. 実際のグラス形状を基にした数値計算

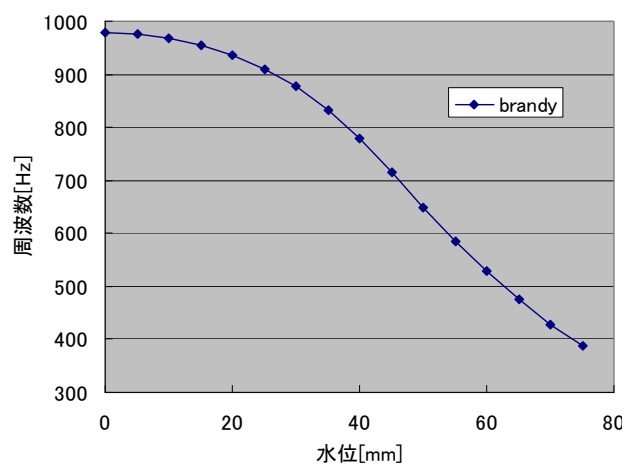


図10. 水位による周波数の変化