

光てこを用いたグラスハープの振動解析

橋本 彩乃 齋藤 哲哉 藤本 奈津美

I 概要

グラスハープとは、水をつけた指で縁をこすって音を出す楽器である。また、水量によって音が変わる性質を持つ。このグラスハープの振動を光てこを用いて視覚化し解析しようと考えた。

指でグラスをこすったときの振動の様子と、スピーカーでグラスに音波を与えたときのグラスの振動の様子を光てこを用いて解析した。それぞれの場合において反射光の振動方向の変化を観察すると、グラスの縁では腹が4つの円形の定常波ができ、指などの振動源とともに定常波が回転することがわかった。

II 研究目的

グラスハープの仕組みに興味を持った私たちは、研究を進めていくとグラスの振動がグラスハープの音を決めていることを知った。そこでグラスの振動に重点をおき、研究することにした。グラスの振動を高度な機器を用いることなく視覚化した先行研究は私たちが調べた限りではなかった。そこで私たちは光てこという高校にもある実験器具を用いた実験方法を考え、グラスハープの振動を視覚化し解析した。

III 研究内容

はじめに、ダイソーで様々な形のグラスを10個購入した。そして、グラスの縁を指でこすり共鳴させたときの周波数を、パソコンのソフト「音知」（東京都立高島高等学校の北村俊樹氏によって開発された）を用いて測った。私たちはすべてのグラスにおいて周波数を10回測り、それぞれの平均の値をそのグラスの固有振動数とした。

次にグラスに入れる水量と周波数の関係調べるため、予備実験を行った。

IV 予備実験：水量と発生する音の周波数の関係

グラスハープは水の量によって音が変わることを知ったので、予備実験では水量と発生する音の周波数との関係を調べた。

○実験器具

グラス ノギス パソコン

○実験方法

買ってきた10個のグラスの内から形の異なるグラス5つを選んだ。左から①、②、③、④、⑤とする。それぞれのグラスに、底から2cmずつ水を加えていった。底から水面までの高さはノギスを用いて測った。その時に指でグラスの縁をこすり共鳴させ発生した音の周波数をパソコンのソフト「音知」を用いて測った。その結果をグラフ化したものが図2である。



図1：予備実験で使った5種類のグラス

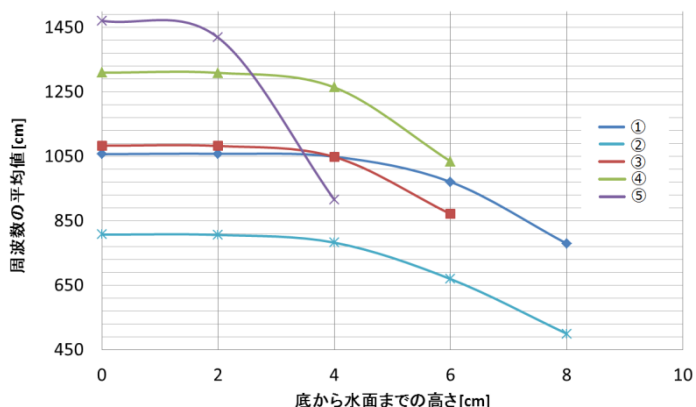


図2：水量による周波数との関係

数値は10回の計測値の平均値を表している。このグラフから、どのグラスも水を多く入れるほど音が低くなることが分かった。これは気柱の共鳴ではなく、グラス自体の振動によって音が発生していることを示している。水量が少ないときは、グラスの振動をあまり妨げないのでグラフがほぼ水平になっていて、水が振動を妨げるようになると、周波数が小さくなっていくと考えた。

グラスハープの振動を解析しようと考え、インターネットで調べた結果、光てこという私たちにも簡単にできる方法があることを知った。

光てこは、図3のように微小な回転角や変位を反射鏡の回転に変換して、光学的に測定する方法であり、非接触で高感度の実験が行える。つまり反射鏡とレーザーを用いることで高度な技術を用いることなく振動を視覚化することのできる方法である。一般的にはこの方法は顕微鏡で使うカバーガラスのような薄い板の厚さや、微小物体の変形などを正確に測定することに利用される。私たちはこの光てこを利用して、グラスハープの振動を視覚化し解析した。

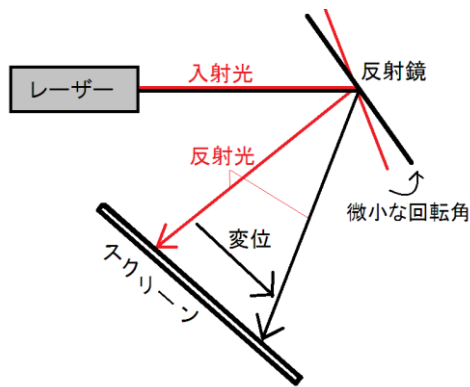


図 3 : 光てこの原理

また、実験 1 以降は図 1 中の②のグラスを用いて実験を進めた。それは、大きくて平らな面が広いからである。

V 実験 1 : 指でグラスの縁をこすって音を発生させたときの振動の観察

実験 1 では、指でグラスの縁をこすった時の、グラスの縁に対し垂直方向と水平方向での振動の様子を観察した。このときグラスの振動が、垂直方向と水平方向とで異なると仮定して実験を行った。

○実験器具

グラス カバーガラス 両面テープ レーザー 物理スタンド スクリーン
 ハイスピードカメラ (CASIO EXILIM EX-F1) パソコン

○実験方法

はじめに小さく切ったカバーガラスを、グラスに対して垂直方向、水平方向の 2 つの場合に分けて両面テープで貼る。垂直方向には図 4 のようにグラスの縁から 0cm、2cm、4cm の位置に貼り付け、水平方向には図 5 のように一か所を基準 0°とし、0°30°60°90°の位置に貼り付けた。この時のカバーガラスが、反射鏡の役割をする。

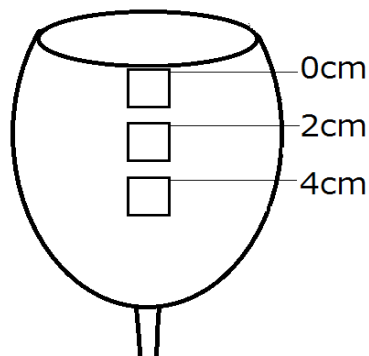


図 4 : カバーガラスの配置 (垂直方向)

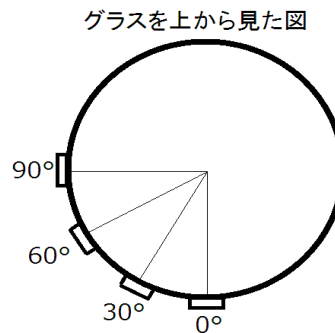


図 5 : カバーガラスの配置 (水平方向)

そして貼ったカバーガラスにそれぞれレーザーを当て、右図 6 のように反射させる。この状態でグラスの縁をこすり共鳴させ、スクリーンに投影した反射光の振動方向の様子をハイスピードカメラを用いて撮影する。その動画を動画編集ソフト (Adobe Premiere Pro CS4) に入れコマ送りにして、反射光の動きを観察する。これを 10 回繰り返した。

ここで、私たちは 2 つの仮説を立てた。

- ・仮説 1 垂直方向ではグラスの縁のほうが大きく振動する。
- ・仮説 2 指が一周する間に反射光の振動も 1 周期分変化する。

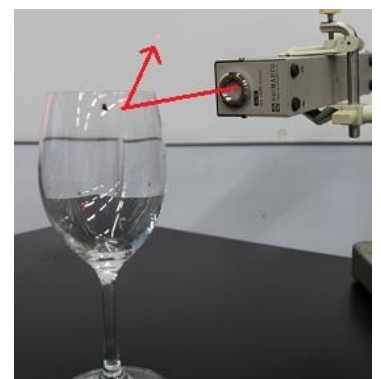


図 6 : 実験 1 のセッティングの様子

○結果

垂直方向の結果から 3 つのことが分かった。まずグラスの縁に近づくにつれ振動が大きくなることが分かった。(図 7) よって仮説 1 は正しかった。次に指でグラスの縁をこすると、反射光の振動方向が回転することが分かった。3 つ目にグラスの垂直方向ではどの部分も同じように振動していることが分かった。

また、水平方向の結果から 2 つのことが分かった。まず指の真下の反射光の振動方向は常に横向きになるということが分かった。(図 8) つまり、レーザーを当てている場所を指でこすった時、反射光が横向きに振動しているということがわかった。次に指がグラスを 1 周する間に、反射光の振動方向が 2 回転することが分かった。(図 9) よって仮説 2 は正しくなかったことが証明された。どの指の回転速度でも反射光の振動方向が 2 回転したので、反射光の振動方向が 2 回転することは指の回転速度に関係ないことが分かった。

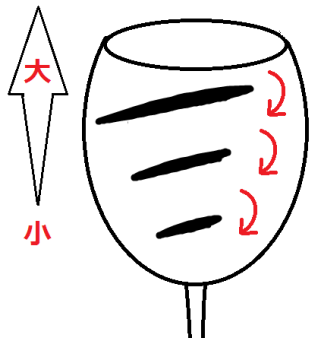


図 7

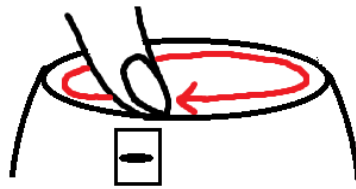


図 8

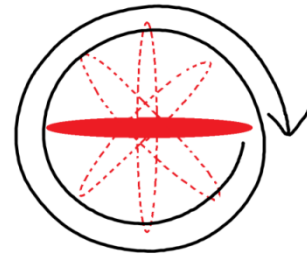


図 9

ここで、水平方向の $0^\circ/30^\circ/60^\circ/90^\circ$ の 4 ヶ所の位置の反射光の振動方向の変化をグラフ化し、値として数値化した。そのために図 10 のように反射光の振動方向が時計回りに回転するとき、水平方向とのなす角を θ とみなすことにした。

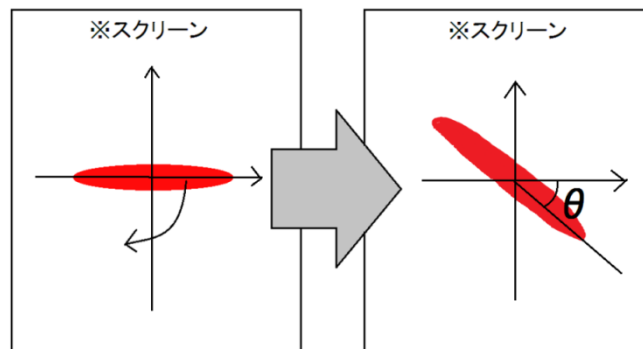


図 10 : 反射光の振動方向の回転角 θ の定義

コマ送りした水平方向の反射光の振動方向の様子の動画で、各 4 ヶ所の各位置において θ が 30° 動くごとに時間を記録した。

そして、各場所における反射光の振動方向の回転角を $\sin\theta$ として表し、時間変化でグラフ化したものが図 11 である。各データは 10 回の値の平均値である。

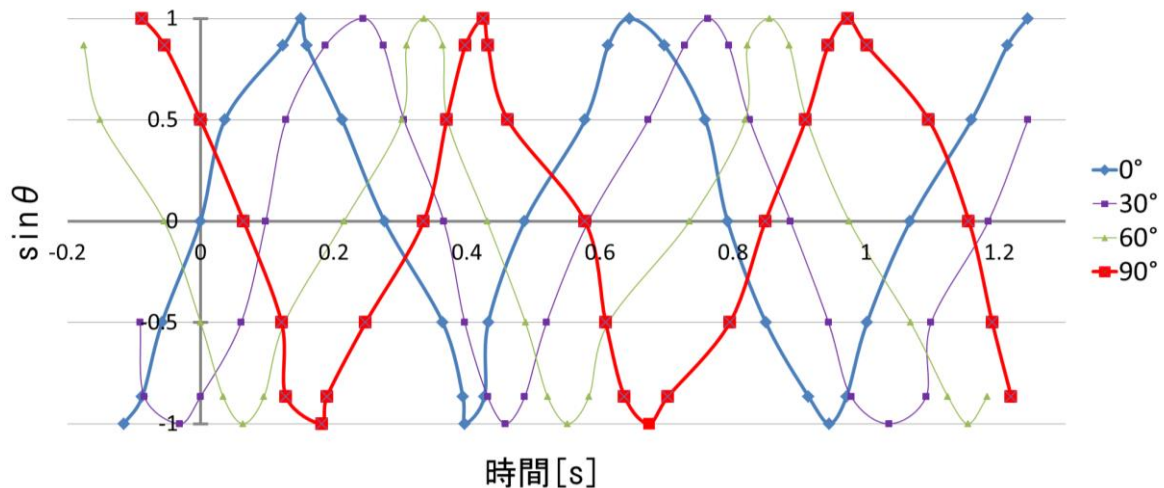


図 11 : 各位置における反射光の振動方向の回転角 θ の時間変化

0° の位置のカバーガラスの反射光の振動方向を表したものが青色のグラフで、 30° は紫色、 60° は緑色、 90° は赤色のグラフで表されている。

このグラフから、 0° の位置と 90° の位置が、逆位相となることがわかった。このことから、 180° と 270° も同様に 90° ごとに逆位相になるのではないかと仮説を立てた。よってこの仮説を検証するために全方位の実験を考える必要が出てきたので、実験 2 を計画した。

なお、実験 1 では、3 つの問題点が出てきた。1 つ目に、カバーガラスでレーザーの光を反射させるときに、反射光が弱く、測定が難しいことである。2 つ目に、指でこする場合には力のかけ具合が異なり、反射光の振幅が変化してしまうことである。そして 3 つ目に、様々な方向からレーザー光を入射させ、実験を行うとき、入射角により反射光の振動方向に差が出てくる可能性があるということである。

そこで、それらの問題を解決するためにまず 1 つ目にカバーガラスを銀鏡反応を利用して鏡にし、より多くの光を反射させるようにして、測定が行いやすいようにした。



図 12：銀鏡反応前の反射光



図 13：銀鏡反応後の反射光

2 つ目にスピーカーで外部からガラスの固有振動数を与え、ガラスに一定の力を与えることのできる実験にした。3 つ目に、ハーフミラーを用いてレーザー光を反射することで入射角を 0° に固定し、入射角による反射光の振動方向の差異をなくした。これらの方法を用いて、実験 2 を行った。

VI 実験 2：スピーカーでガラスに音波を与えたときの振動の観察

実験 2 では、実験 1 の実験方法に先ほど述べた改善点を加えた。

○実験器具

ガラス 鏡 斜面 レーザー トランペットスピーカー (UNI-PEX P-500)

低周波発振機 アンプ 物理スタンド スクリーン スライドガラス

○実験方法

図 14 のようにセッティングした。まず鏡を貼ったガラスを斜面に固定する。このとき、ガラスに貼った鏡が鉛直になるように、斜面の角度を調整する。そして図 15 のようにレーザーからでた光をハーフミラーの役割をするスライドガラスを用いて反射する。この時カバーガラスへの入射角=反射角 $=0^\circ$ とし、入射角を一定にする。

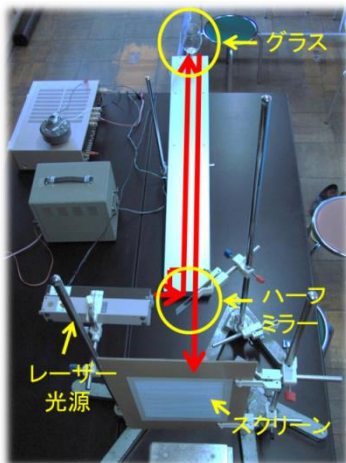


図 14：実験 2 のセッティングの様子

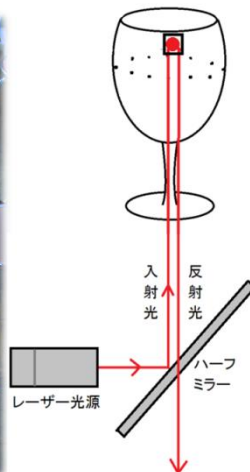


図 15

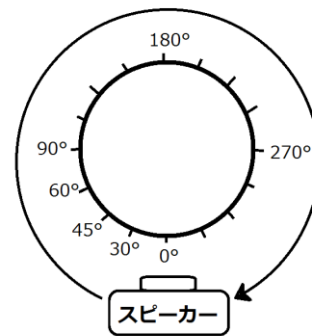


図 16 スピーカーの位置

また光が当たっている所を 0° として、図 16 のようにグラス一周を 30° ごとに 12 分割した点に 45° 、 135° 、 225° 、 315° の 4 か所を加えた計 16 か所にするしをつける。その各場所にトランペットスピーカーでガラスの固有振動数を与える。このときにハーフミラーを通過させスクリーンに投影した反射光の振動方向の様子をビデオで撮影する。そして実験 1 と同様に動画を画像処理ソフトを用いてコマ送りし、反射光の振動方向の回転角を 30° ごとに測定しグラフ化した。また、 0° の位置はスピーカーがレーザーを隠すことになるので、測定できなかった。

○結果

16 分割した各地点における反射光の振動方向の変化を表したグラフが図 17 である。各データは 10 回の平均値である。

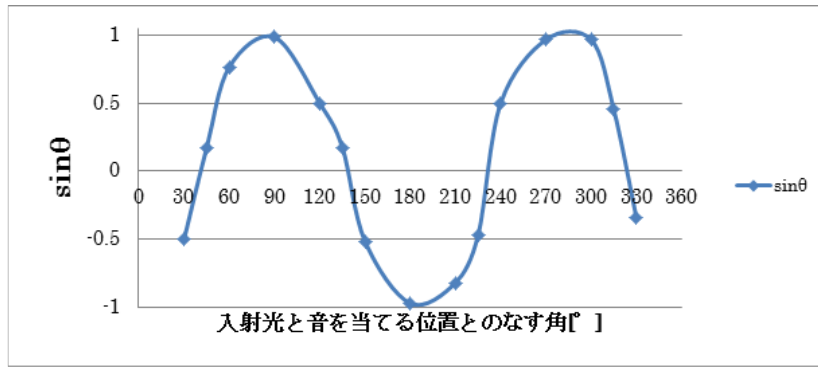


図 17：各位置における反射光の振動方向の変化

このグラフでは、横軸を入射光とスピーカーで音を当てる位置とのなす角 $[\theta]$ 、縦軸を $\sin\theta$ とした。このグラフから、スピーカーがグラスを一周する間に、反射光の振動方向は約 2 回転することがわかった。よって 0° の位置の $\sin\theta$ は 1 であると考えられる。

また、仮説通り 90° ごと約 4 箇所が逆位相になっていることが分かり、 0° の位置の $\sin\theta$ が -1 であることから、スピーカーの音が当たる部分は縦方向に振動していたということがわかった。

Ⅶ 実験 1,2 からの考察

○実験 1,2 の共通点

まず実験 1,2 の共通点を考えてみる。実験 1,2 では、グラスの振動は 90° ごとに逆位相であることが分かった。このときできる定常波を考えると、ワイングラスの縁では図 18 のような定常波が生じることが分かった。つまり、ワイングラスの縁では、腹が 4 つの円形の定常波が発生していることが分かった。

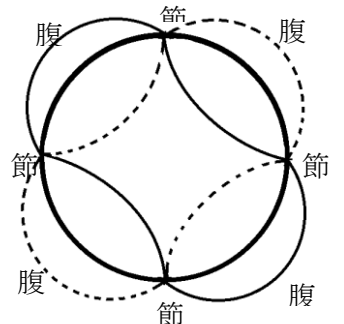


図 18

○実験 1,2 の相違点と仮説

そして、実験 1,2 の相違点を考えてみると、振動源の位置の振動方向が異なるということである。実験 1 から指でこすった場合の反射光の振動方向は横向きだったこと、実験 2 からスピーカーで音波を与えた場合の反射光の振動方向は縦向きだったことがわかった。

この相違点について、私たちは次のような仮説を立てた。

1：指の場合

反射光の振動方向が横向きということは、カバーグラスの中心を軸として左右に振動しているのではないかと

2：スピーカーの場合

反射光の振動方向が縦向きということは、カバーグラスは縦方向に大きく振動しているのではないだろうか

○検証実験

そこで、検証するためにペットボトルでモデルを作った。まず丸い 2L のペットボトルを横半分に切り、注ぎ口のある方を用いる。これをグラスとみなす。この縁にカバーグラスを貼り付け、実験 2 と同様にセッティングする。また、振動は打点式記録タイマーでペットボトルに与えた。

図 19 は記録タイマーでモデルに振動を与えている様子である。4 つの腹を持つ円形の定常波ができていることが分かる。

まず光が横向きに振動する場合を考える。モデルの縁に記録タイマーで振動を与え、記録タイマーを当てる位置を変え光が横向きに振動する場所を観察する。すると光が横向きに振動するときは、下図 20 のように振動していることがわかった。また、スピーカーの場合も同様に考えると、反射光が縦向きに振動するときは、モデルは下図 21 のように振動していることがわかった。よって、私たちの仮説は正しかったことがわかった。

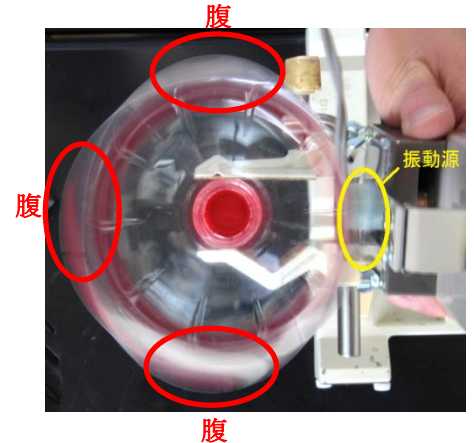


図 19：検証実験の様子

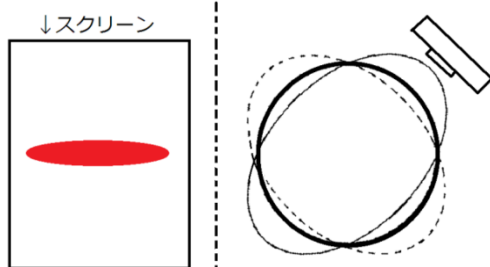


図 20：指の場合＝横向き

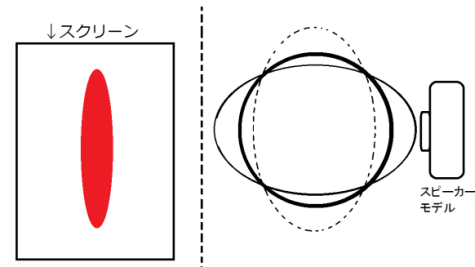


図 21：スピーカーの場合＝縦向き

これらの結果をまとめると次のようになる。

～指で擦り共鳴させるとき振動の場合～

指で擦ったとき、その地点で光が横向きに振動するという事は、図 22 のようにカバーガラスは中心を軸にして左右に振動しているということがわかる。つまり指でこすった位置は振動の節であると判断できる。ここからワイングラスの定常波と指との位置関係を考えると、指で擦った場所が振動の節ということから、図 23 のようになるということが分かった。

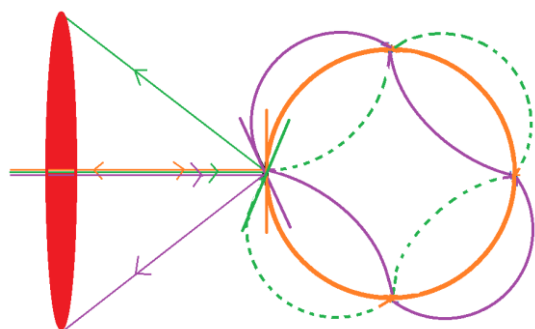


図 22

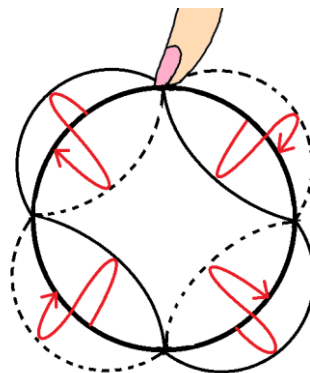


図 23

～スピーカーで音波を与え共鳴させるとき振動の場合～

スピーカーで音波を与えたとき、その地点で光が縦向きに振動するという事は、図 24 のようにカバーガラスは縦方向に大きく振動しているということがわかる。つまりこの場所は振動の腹であると判断できる。ここからワイングラスの定常波とスピーカーとの位置関係を考えると、スピーカーで音波を与えた場所が振動の腹ということから、図 25 のようになるということが分かった。

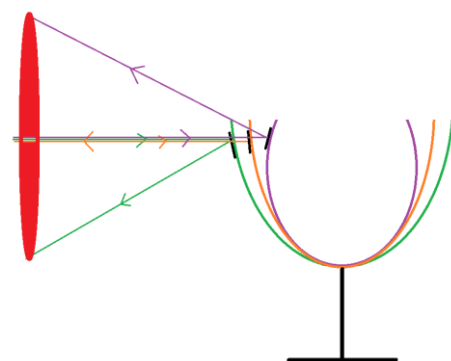


図 24

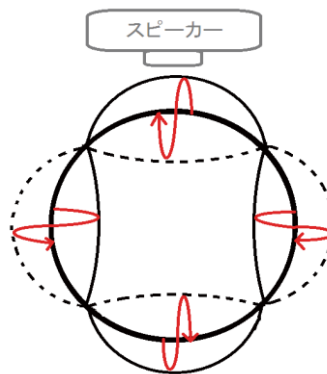


図 25

ここで、指やスピーカーがグラスを 1 周する間に反射光の振動方向が 2 回転したことを考える。私たちは、反射光の振動方向の回転はグラスにできる定常波の移動が関係しているのではないかと仮説を立てた。これも、モデルを用いて検証実験を行った。モデルの縁に記録タイマーで振動を与えた状態で、当てる場所を水平方向にずらしていき、反射光の振動方向を観察した。

その結果、反射光の振動方向が回転するのが観察された。また、記録タイマーがグラスを 1 周する間に反射光の振動方向が 2 回転するという結果が得られた。これは、振動源の移動によって定常波の腹が移動し、カバーガラスの位置での振動が変わるためである。よって仮説は正しかったということが分かった。

VIII 今回の課題

今回はグラスの縁のみの振動解析となったが、今後はグラスの全体的な振動の振幅を数値化し、3D 映像として視覚化したいと思う。

IX 参考文献

http://pesj.k12.osaka-kyoiku.ac.jp/exp/boucho/hikari_teko.htm
物理学辞典 改訂版 培風館