管楽器の音が出る仕組み

中 3-D-38 村山　悠

目次

はじめに

第 1 章　管楽器について
　第 1 節　音について
　第 2 節　管楽器について
　第 3 節　管楽器の歴史について

第 2 章　ストロー笛の作成
　第 1 節　ストロー笛について
　第 2 節　ストロー笛の作成

第 3 章　実験
　第 1 節　実験の準備
　第 2 節　実験の結果
　第 3 節　実験の反省
　第 4 節　再実験

第 4 章　考察

おわりに

参考文献

はじめに

私は、知識としては知っていても、実際に感じたことのない管楽器の音の出る仕組みや、出る音の高さはどのように定まるのだろうかと疑問に思い、課題研究のテーマにした。今回の研究ではリコーダーの代わりにストロー笛と呼ばれる笛を、条件を変えながら実際に吹くことで、音の高さやその定まる要因を調べた。

第１章　管楽器について

第１節　音について

そもそも音とはどのような現象なのか？教科書によると、音波は「空気などの媒質の変位と密度の変化が伝わっていく現象」とある。こう言われてもさっぱりだと思うが、要するに空気の中を伝わる振動の波のことである。媒質の平均密度からの変化をグラフにすると、右図のようになる。

このように、音波は気体中を伝わる縦波である。

一般に、音は高さ、大きさ、音色の３要素によって特徴づけられ、この３つが変化することで音に違いが生まれるのである。

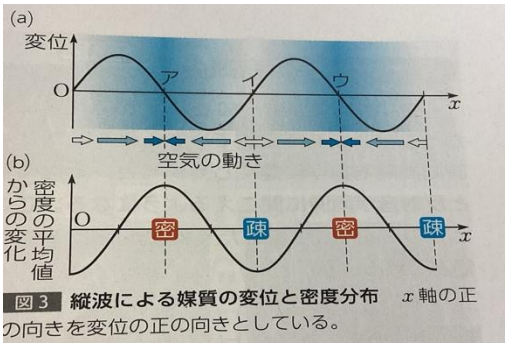
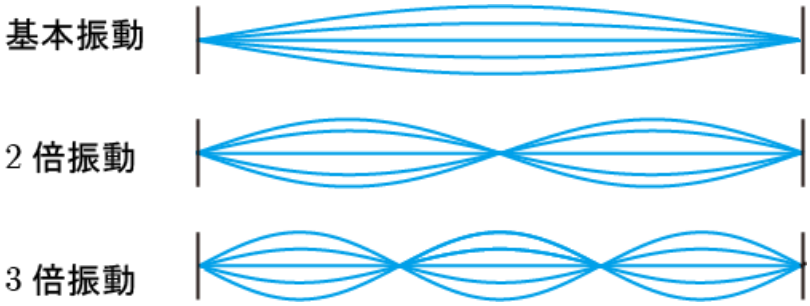


図３　縦波による媒質の変位と密度分布　x 軸の正の向きを変位の正の向きとしている。

物理基礎（啓林館）より

そして、これらのうち、音の高さは音波の振動数によって決まり、振動数が大きくなるほど音は高くなる。同様に音の大きさは音波の振幅で決まり、振幅が大きい（密度の変化が大きい）ほど大きくなる。振動数は音源ごとに決まっており、これを固有振動数という。大抵の音源の場合、固有振動数は，最も音のエネルギーを多く占める基本振動と呼ばれる音の高さを決める基本音の他に、その倍数の振動数をもつ倍音から成る。音色はそれら倍音の混ざり具合によって生じる様々な振動の波形の違いのことである。

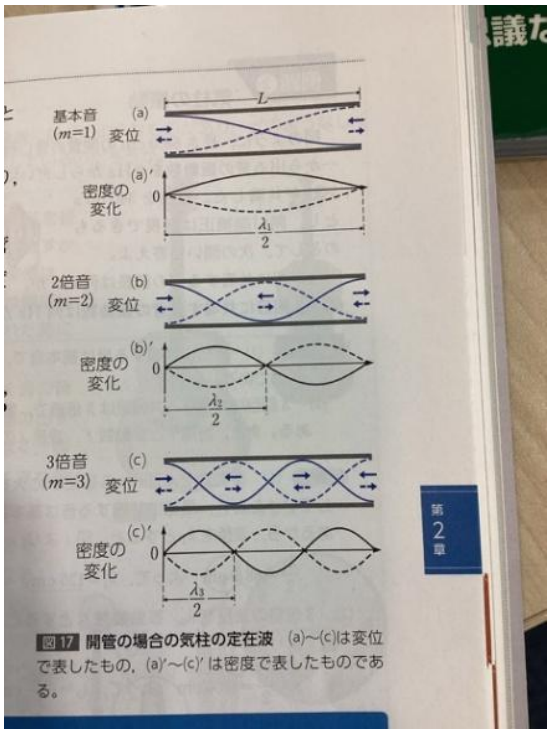
倍音についての図



KIT 金沢工業大学より

第２節　管楽器について

管楽器とは、息を吹きこむことで管の中の空気を振動させて音を出す楽器の総称のことである。管楽器は、閉管と開管の 2 種類に分けられる。閉管は片方の端が閉じた管のことであり、また、両端が開いている管を開管という。開管にはリコーダーなどがある。クラリネットは、マウスピース側が閉じた閉管の性質をもつ。今回の実験で用いるのはストロー笛と呼ばれる自作可能な笛であり、それは開管である。そこで、開管について説明する。開管では、基本音を中心に、2 倍音、3 倍音･･･のように整数倍の倍音が合わさって音が出る。なぜこのようになるのかというと、次図のように開管では管の両端が定在波の腹になるからである。倍音の合わさり方、すなわちブレンドによって楽器の音色に違いが生まれる。



また、第１節で述べたとおり、音は媒質の変位と密度の変化が伝わっていく現象のことであるため、左図では密度の変化も記している。
（m は定在波の腹の個数を示しており、λm は腹が m 個ある時の波の波長である。）

物理基礎（啓林館）より



リコーダー(左)とクラリネット(右)のマウスピース

第３節　管楽器の歴史について

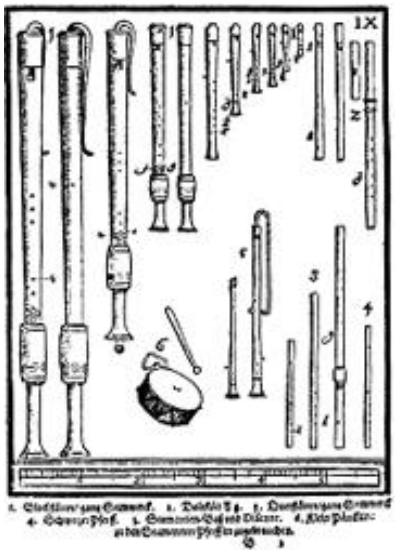
管楽器の歴史は深く、遡ると約 4 万年前にまでになる。約 4 万年前、ヨーロッパでハゲワシの骨で作られたフルートが生まれた。「骨製フルート、人類最古の楽器と判明」という記事によると、楽器の発展には現生人類の戦略的な意義があったという。音楽を用いて彼らは集団としての結びつきを確固たるものとし、ライバルであるネアンデルタール人との差をつけた一因であったと考えられている。また、音色については低く、ゆったりとした音色であるそうだ。



骨製フルート、人類最古の楽器と判明より

ここから人類の楽器作りは発展していくのだが、管楽器といっても多くの種類があり、その全ての発展を調べるというのは難しいことなので、今回の調査ではリコーダーに絞って調べる。

YAMAHA の楽器解体全書によると、リコーダーは縦笛と呼ばれる笛のグループに分類されるそうだ。縦笛の歴史は古く、また世界中で原始的な縦笛が発見されている。日本では尺八などが当てはまる。それらの中でリコーダーが生まれたのは 12 世紀だと考えられている。リコーダーは他の縦笛と異なり、親指の穴を持っていることが特徴である。しかし、この特徴は絵画で描かれることがあまりなく他の縦笛と区別がつかないため、もしかしたらもっと昔にリコーダーが生まれていたかもしれないが、絵画の資料では知るすべがないのである。15 世紀から 16 世紀にかけてヨーロッパでリコーダーの形は完成し、盛んに演奏されるようになった。この頃にプレトリウスによって音楽大全が 3 巻発刊され、その 2 巻にリコーダーについての説明および図がある。



音楽大全より

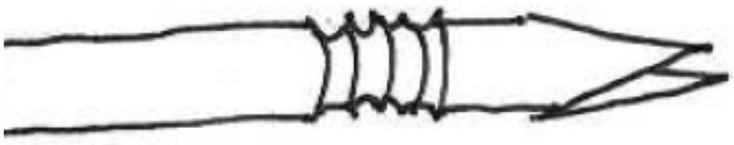
この図を読み取ると、リコーダーにも大きさの大小があることがわかる。穴の位置に注目してみると、それぞれのリコーダーには異なった場所に穴が空いていることがわかる。このことから、リコーダーの音は押さえる穴の位置によって変化し、また、どのような音が出るのか予測して穴が開けられていると考えられる。音というのは計算によって作られていると予想し、次の章では、実際に自分でストロー笛を作成し、実験を行ったことについて述べることにする。

17 世紀から 18 世紀の半ばにかけてリコーダーが全盛の時が訪れた。ほとんどの教会でリコーダーが演奏されるようになり、大きな祭典の時には常にリコーダーで詩を演奏するようにと指示されるほどであった。しかし以降から徐々に廃れ始め、19 世紀にはほとんど演奏されなくなった。20 世紀からは教育楽器として再注目され、現在のように扱われるようになった。

第２章　ストロー笛の作成

第１節　ストロー笛について

ストロー笛とは，ストローの先端にリード（振動する部分）を作り、音を出す手作り楽器である。ストロー笛の歴史は新しく、身近で安価な教材として 20 世紀後半ごろから広く活用されるようになった。また、リードというのは、V 字型をしており、息を吹き込むことで振動する部分のことである。下図の尖っている部分がリードである。



神奈川県　ストロー笛　より

第２節　ストロー笛の作成

ストロー笛の作成において、重要となるのは、リードの作成である。全てのストロー笛のリードの角度を一定にするのは難しいため、紙にリードの形に型を取り、ストローをそれに合わせて切ることで解決した。以下はストロー笛の作成方法である。

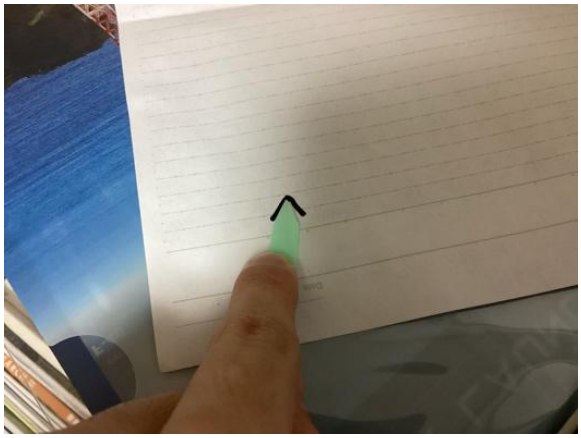
【作成方法】

(1)ストローの蛇腹を完全に伸ばしたのち、蛇腹側から定規を用いて長さを測り、マイネームペンで印をつける。

(2)印に沿って、真っ直ぐに切断する。

(3)紙に書いたリードの形の型にストローを押し付け、カッターで切る。

実際の作成の様子の写真











（実際に使用したストロー）

第３章　実験

第１節　実験の準備

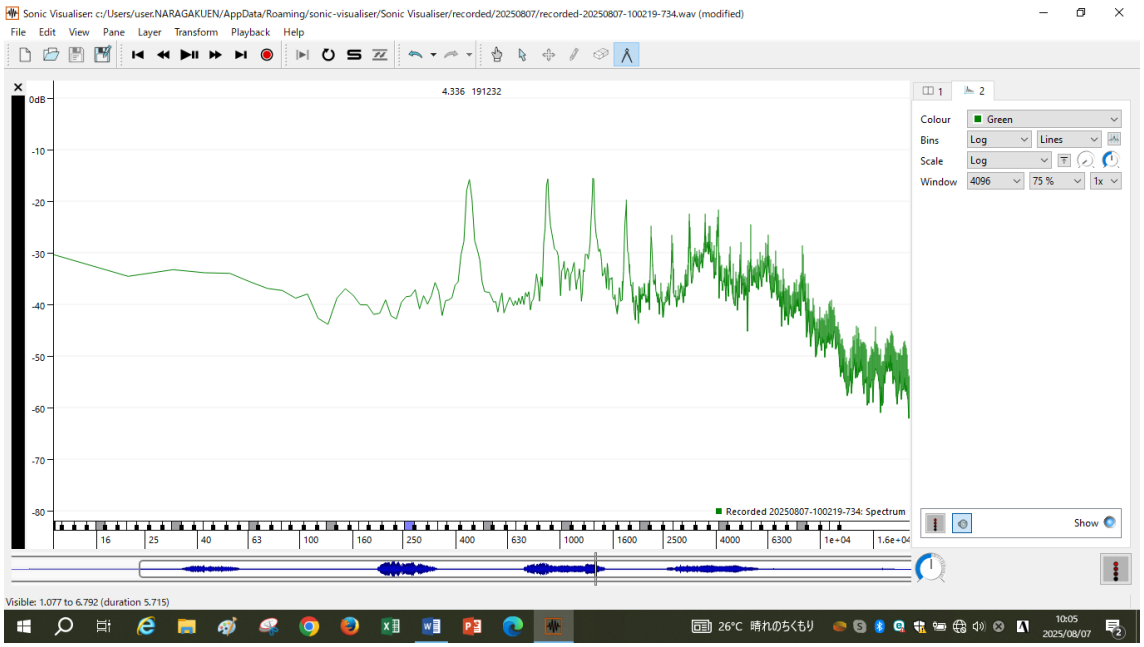
１回目の実験では、第２章で述べたように作成したストロー笛を用いて、ストロー笛から出る音の高さを調べた。基本となる笛の長さを 8cm、太さを６mm、リードの角度を固定し、材質をプラスチックにして、条件を変えて実験を行った。ストロー笛の固有振動数と音の大きさは、Sonic Visualiser という周波数成分を可視化することのできるソフトウェアを用いて、7 倍音まで測定した。なぜ 7 倍音までしか測定しないのかというと、7 倍音以上の倍音、例えば 8 倍音なども測定しようとすると、それらの音の中に占める割合が小さく、測定することが難しいからだ。

以下は実験の結果である。空白のところはうまく音を出すことができず、測定できなかったところである。また、緑というのは、基となるストローと同じリードの角度を持つストロー笛である。赤、黄はそれぞれリードの角度を基となるストロー緑よりも大きく、小さくしたもの。

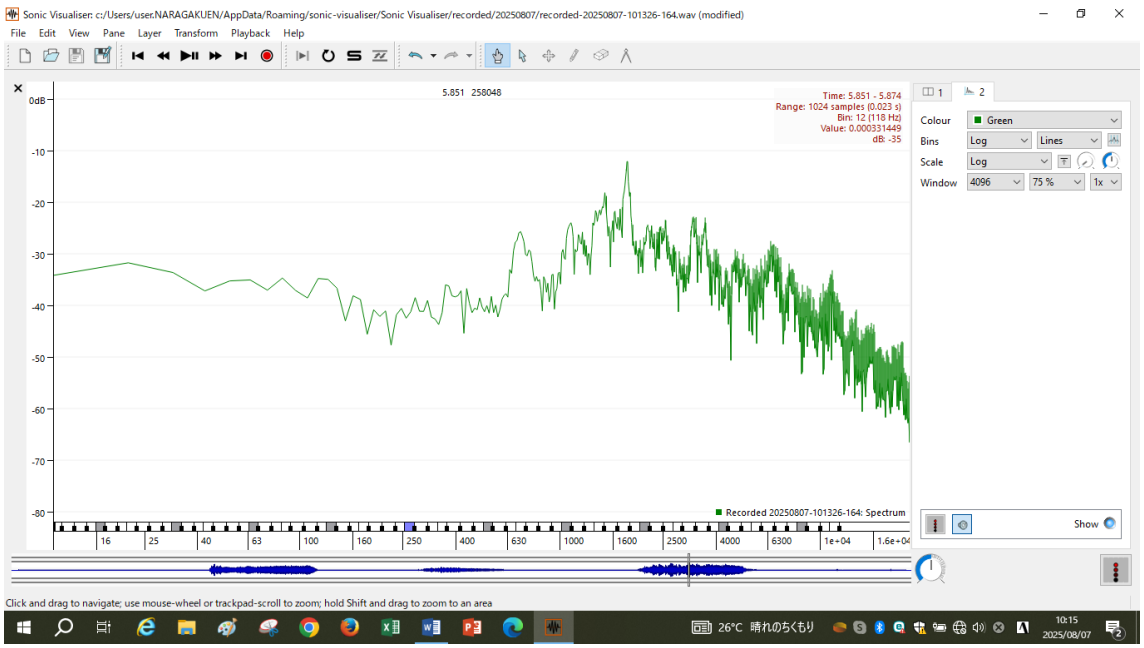
第２節　実験の結果

以下は実験の結果である。

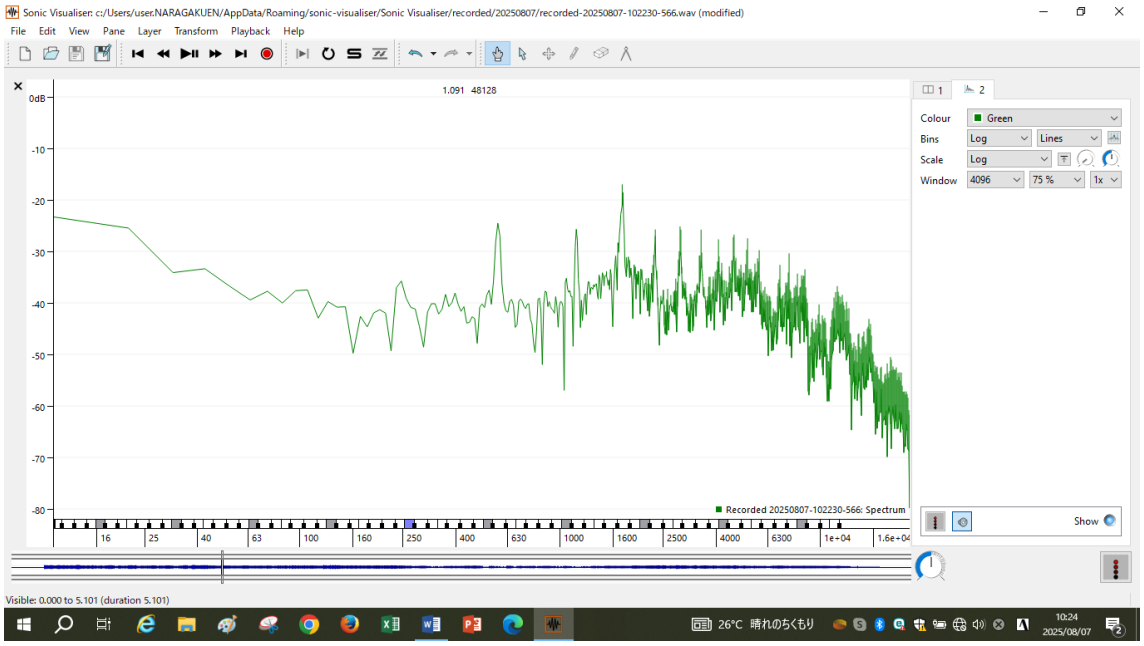
ストロー緑　８ｃｍ



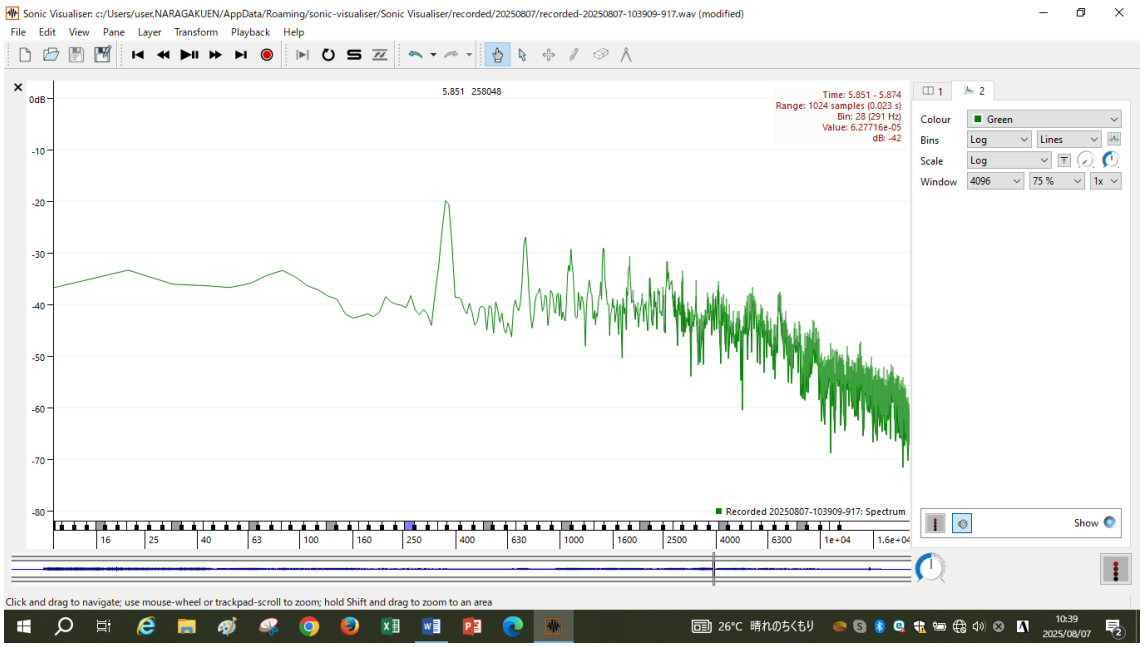
ストロー緑４ｃｍ



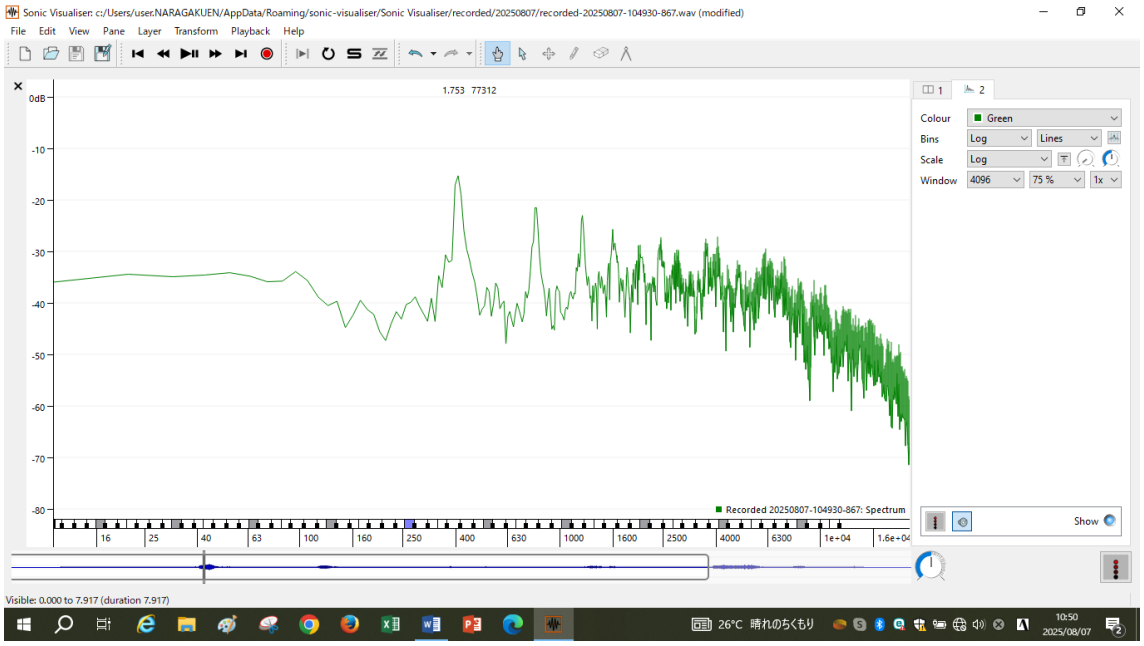
ストロー緑 5.3cm



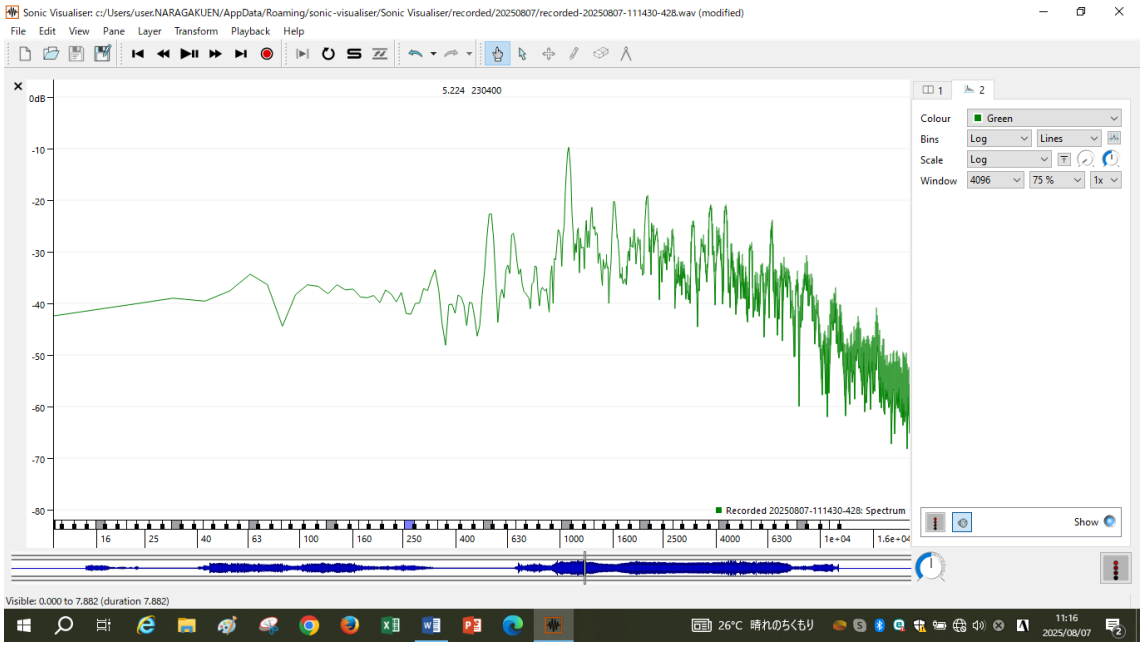
ストロー緑　12cm



ストロー緑 16cm



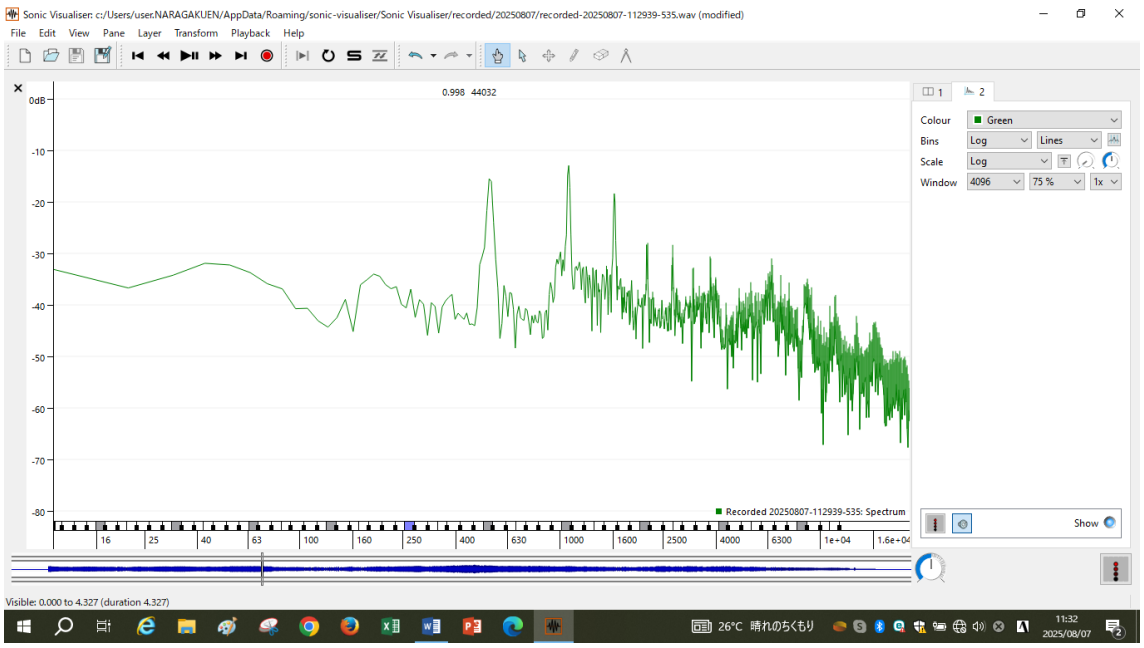
ストロー赤　8cm



ストロー黄　8cm

　測定できなかった。

ストロー（細）8cm



ストロー（太）8cm

　測定できなかった。

ストロー（紙）8cm

　測定できなかった。

　以上が結果である。また、各ストロー笛の固有振動数をまとめたものが次表である。

	基本音波(Hz)	２倍音	３倍音	４倍音	５倍音	６倍音	７倍音
緑８㎝	470.3	898.0	1385.2	1791.2	2184.1	2803.4	3107.0
緑４㎝	736.4	1119.5	1524.0	1884.6			
緑5.3㎝	577.8	1161.3	1752.2	2367.8	2908.3	3494.3	4047.0
緑12㎝	369.0	736.4	1111.2	1479.9	1871.9	2216.4	3082.5
緑16㎝	434.6	863.5	1311.1	1749.3	2198.6	2763.3	3082.5
赤８㎝	563.0	1096.3	1615.5	2198.6	2708.9	3271.9	3835.8
黄８㎝							
細８㎝（太さ４㎜）	548.8	1079.0	1592.7	2184.0	2682.6	3246.9	3760.5
太８㎝（太さ1.2㎝）							
紙８㎝							

（小数点以下第一位まで読み取った。斜線は測定できなかったところ）

第３節　実験の反省

この実験では１つの大きな問題点があった。それは、ストロー笛をうまく鳴らすことができないということである。まず、なぜこのような問題が発生したのか？について考えてみると、1つ目はストロー笛の長さ、リードの角度が適切ではなかったこと、2つ目は吹き手の力量不足が考えられる。この２つのうち、ストロー笛の長さとリードの角度については、基本のストローの長さを16㎝にし、リードの型の角度をより鋭くすることで解決した。

しかし、2つ目の吹き手の力量不足については周りに音楽が得意な人もおらず、代わりに吹いてもらうこともできなかったため、自分自身で吹けるようになるしかなかった。そのために、練習用に作成したストロー笛を毎日１時間吹き続け、確実に吹けるようになるまで練習した。

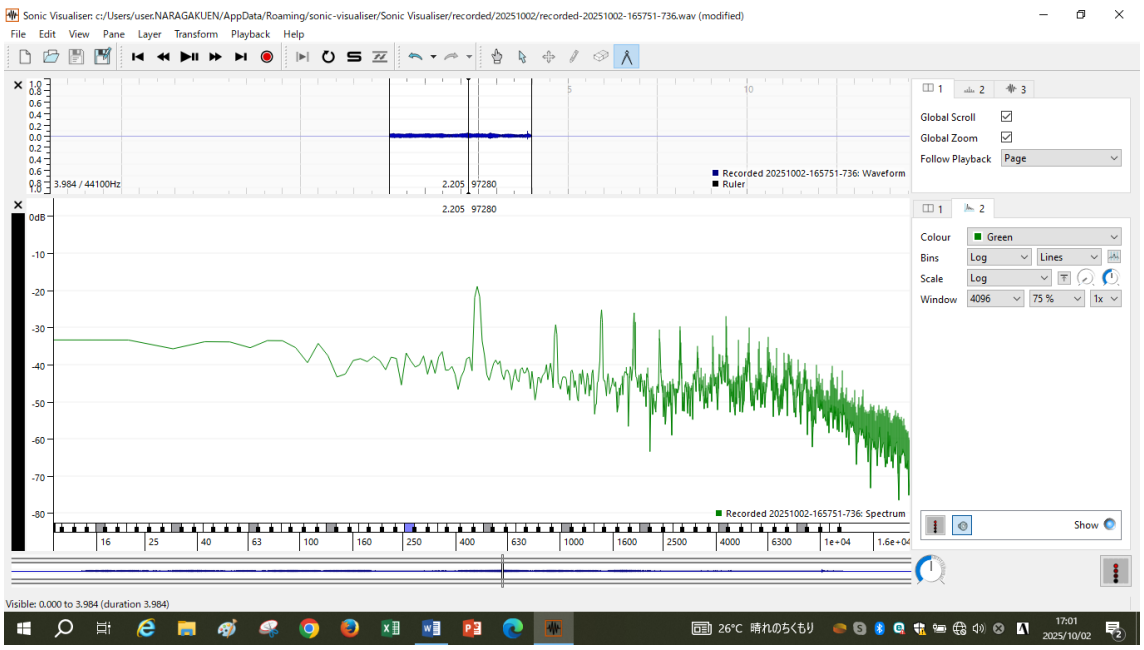
また、ストローの長さによる音の変化を５種類のストローを用いて測定した

が、時間がかかる上に余分に多く測定していると考えて、次の実験では長さを短い、中間、長い、の 3 種類に分けて実験することにした。

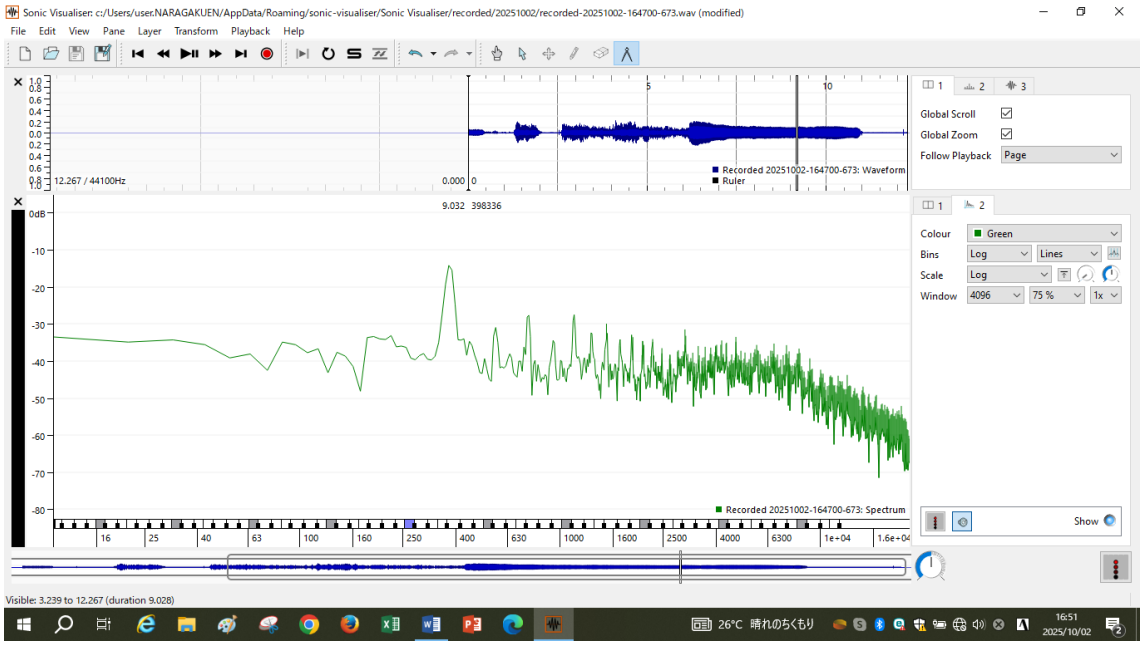
第 4 節　再実験

前回の実験の反省を生かし、次の実験では、基となるストロー笛の長さを 16 cm、太さを 6 ㎜、リードの角度を 60 度にして測定した。調べた条件は長さ(12 cm、16 cm、20 cm)太さ(4 ㎜、6 ㎜、12 ㎜)リードの角度(30 度、60 度、80 度)である。以下は、実験の結果である。

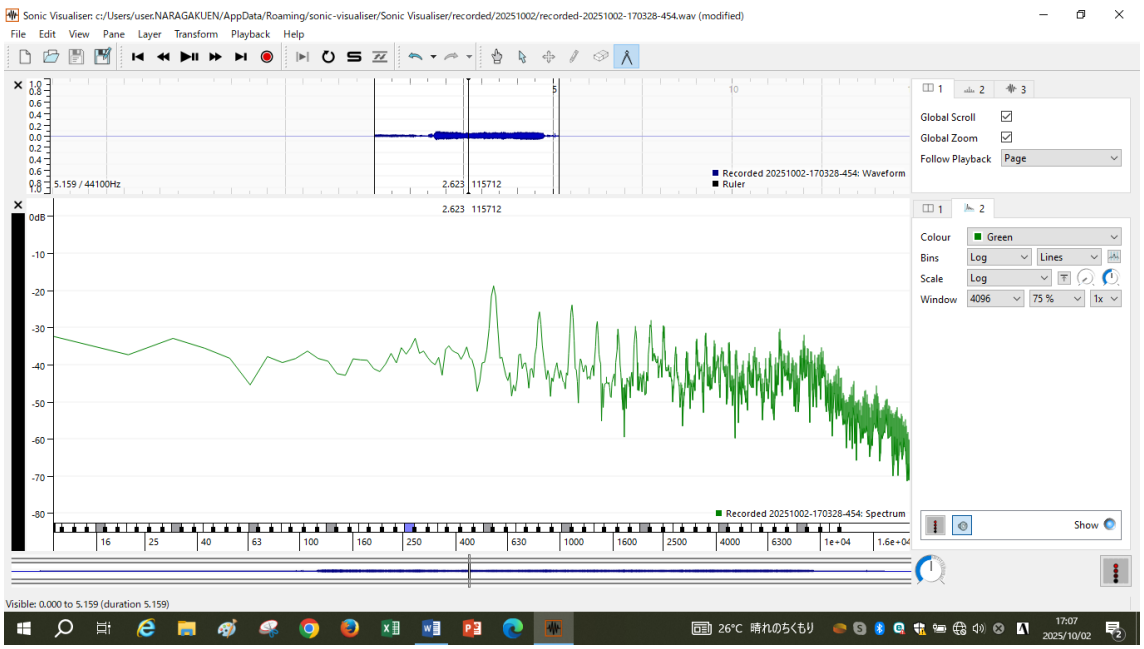
ストロー（緑）16cm



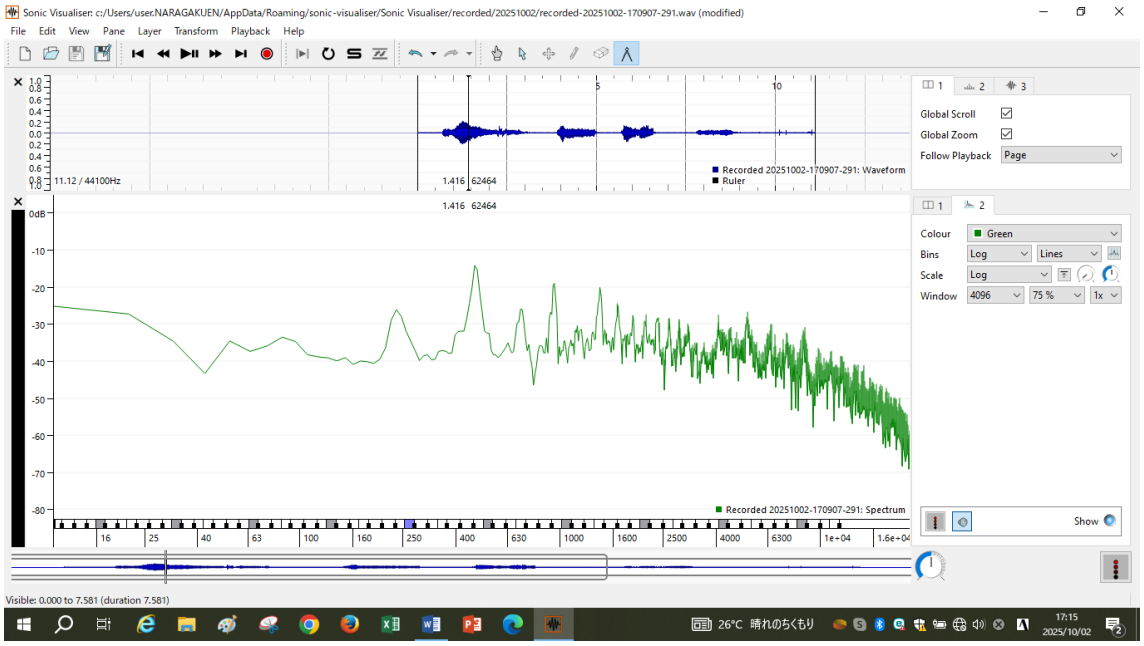
ストロー（緑）20cm



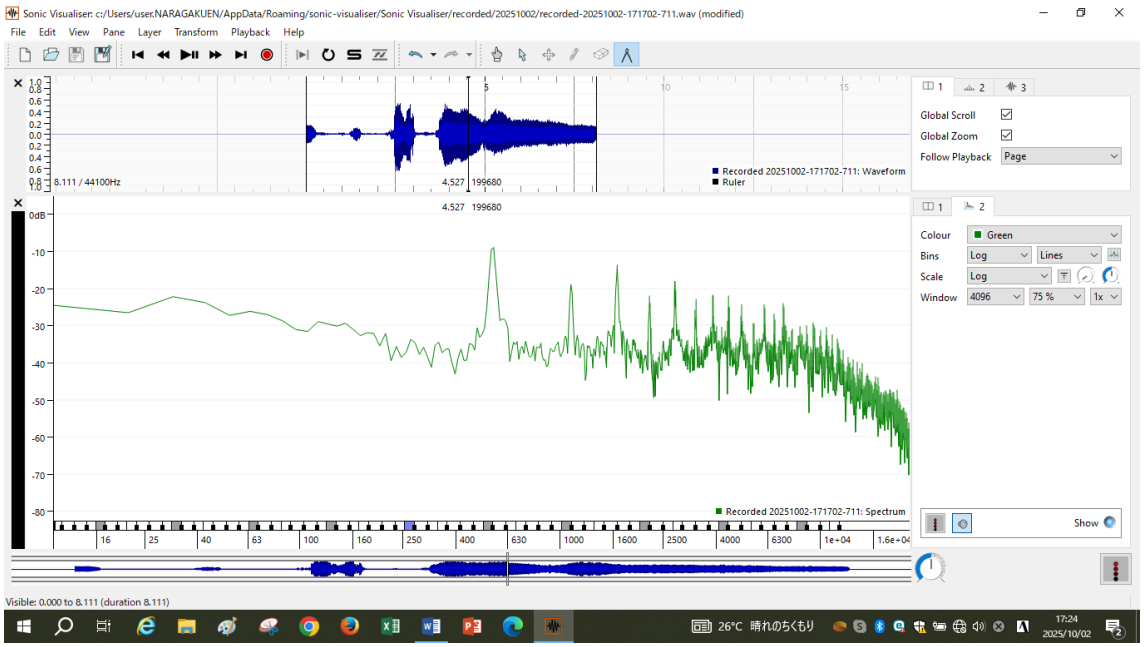
ストロー（緑）12cm



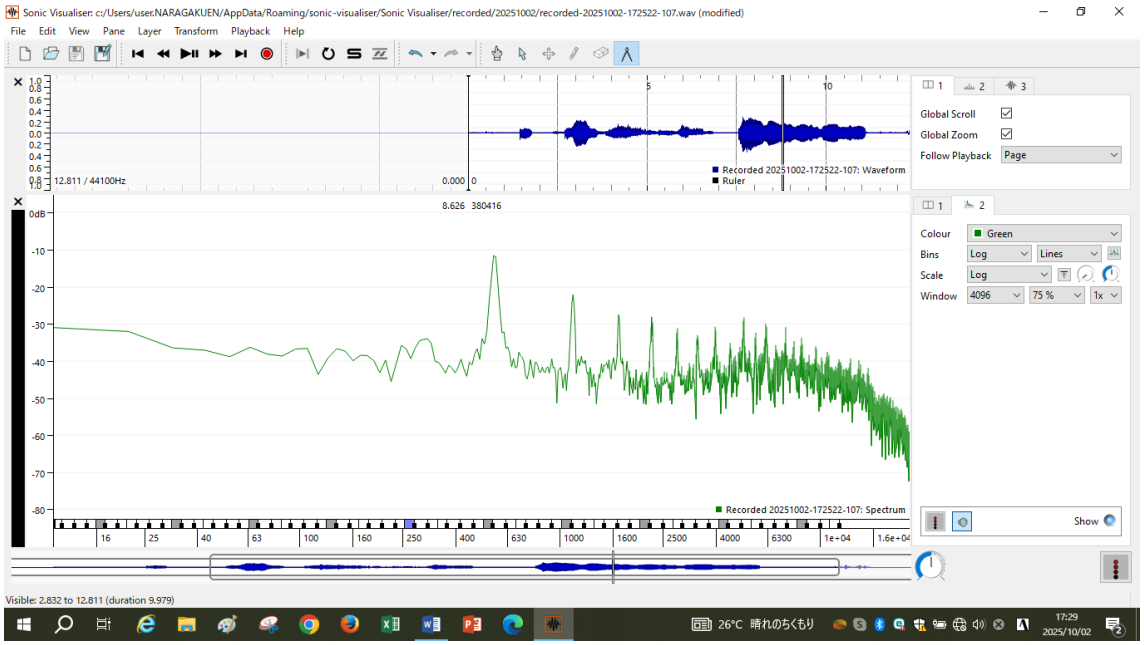
ストロー（赤）16cm



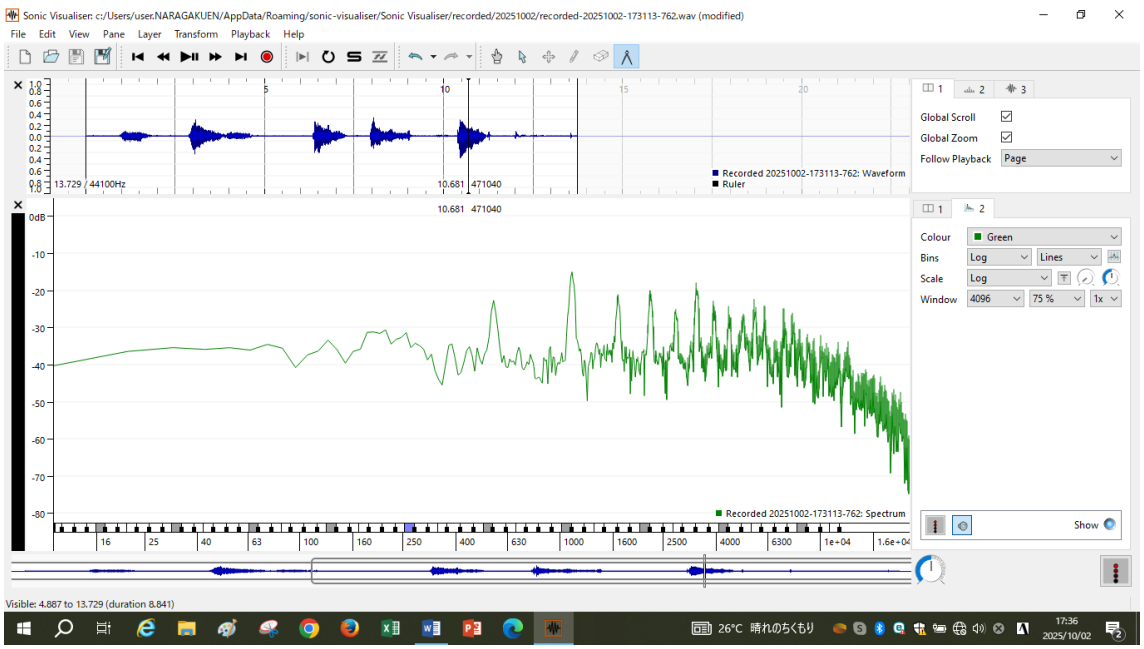
ストロー（黄）16cm



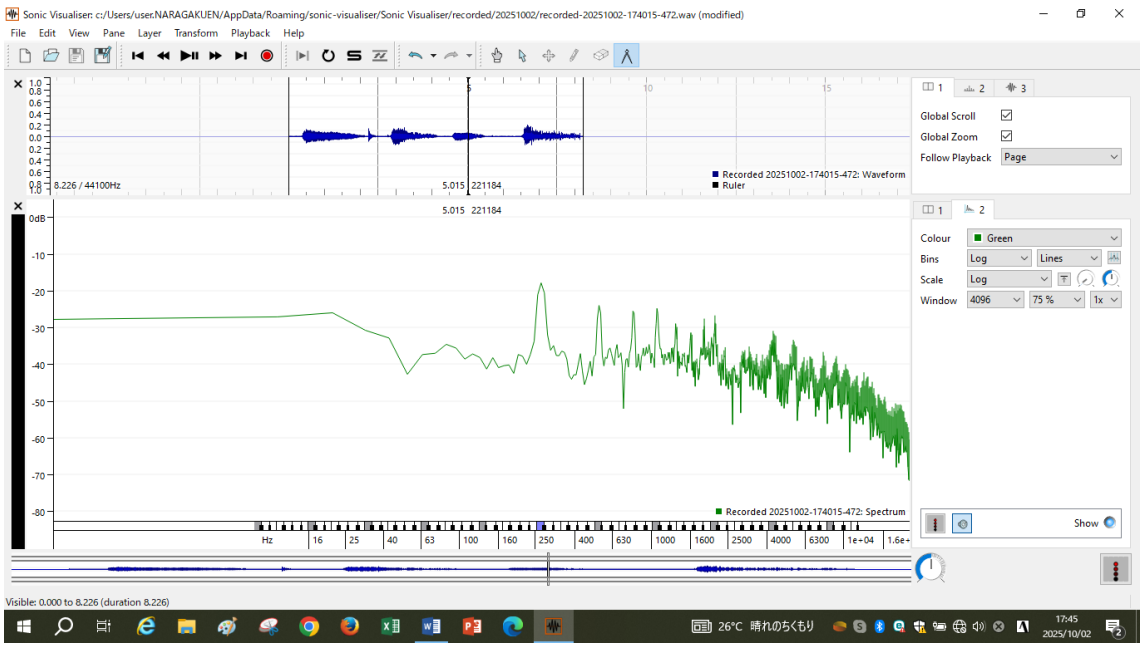
ストロー（紙）16cm



ストロー（細）16cm



ストロー（太）16cm



	基本音 (Hz)	2倍音	3倍音	4倍音	5倍音	6倍音	7倍音
緑 16 cm	480.8	973.6	1447.6	1970.6	2385.3	2908.3	3418.1
緑 20 cm	382.8	569.4	758.4	938.5	1114.4	1315.8	1524.0
緑 12 cm	557.0	834.4	1119.5	1405.7	1664.4	1956.3	2232.7
赤 16 cm	477.3	715.1	959.4	1437.0	1689.0	1927.7	2120.8
黄 16 cm	557.0	1103.1	1664.4	2216.4	2782.9	3319.2	3901.0
細 16 cm (太さ 4 mm)	565.2	1119.5	1676.7	2249.2	2803.4	3368.3	3901.1
太 16 cm (太さ 1.2 cm)	272.2	541.0	805.4	1085.4	1350.8	1615.5	1838.4
紙 16 cm	565.2	1136.0	1676.7	2249.2	2824.1	3393.1	3958.8

（小数点以下第一位まで読み取った。）

第４章　考察

まず、もともと知っていた管楽器の特徴を書き出すと、次の２点になる。

(ｉ)笛の長さを短くすればするほど音は高くなり、笛の長さを長くすればするほど音は低くなる。

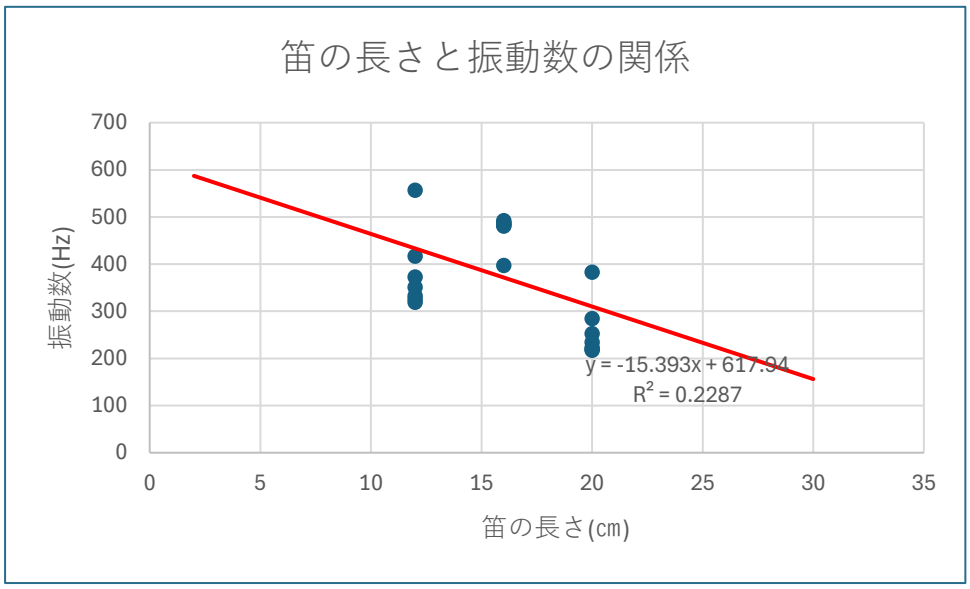
(ⅱ)笛の太さを細くすればするほど音は高くなり、太くすればするほど音は低くなる。

実際にこの２点が正しいのか、実験の結果から考察する。また、ストロー笛の、加工しやすいという利点を生かして、独自にリードの角度の変化と、材質の変化による音の変化も考える。

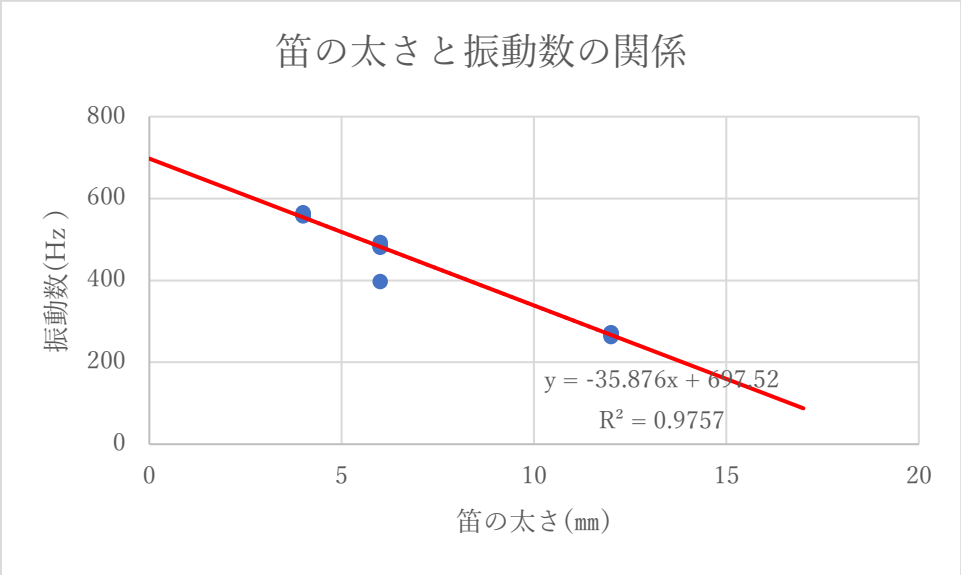
実験から音の高さが変化する要因に目星をつけることができたが、実際に笛をどれくらい、どうしたら、どのような音が鳴るのかについて調べるため、Excelを用いて回帰分析を行う。回帰分析というのは結果と要因となる数値の関係性をグラフに表して調べる統計的手法であり、この実験において結果は振動数、要因となる数値は笛の長さ、太さ、リードの角度、そして材質である。具体的には、単回帰式と呼ばれる式、つまり変数ｘが１つだけ用いられる式(y＝ａ＋ｂｘ)を求めることでｙを予測する。また、1回目の実験では笛をうまく鳴らすことができず、信用度の低いデータしか得られなかったため、2回目の実験のデータをもとに単回帰分析を行った。振動数に関してはｎ倍音をｎで割った商を値としている。(小数点第一位までとする)

以下はそのグラフである。

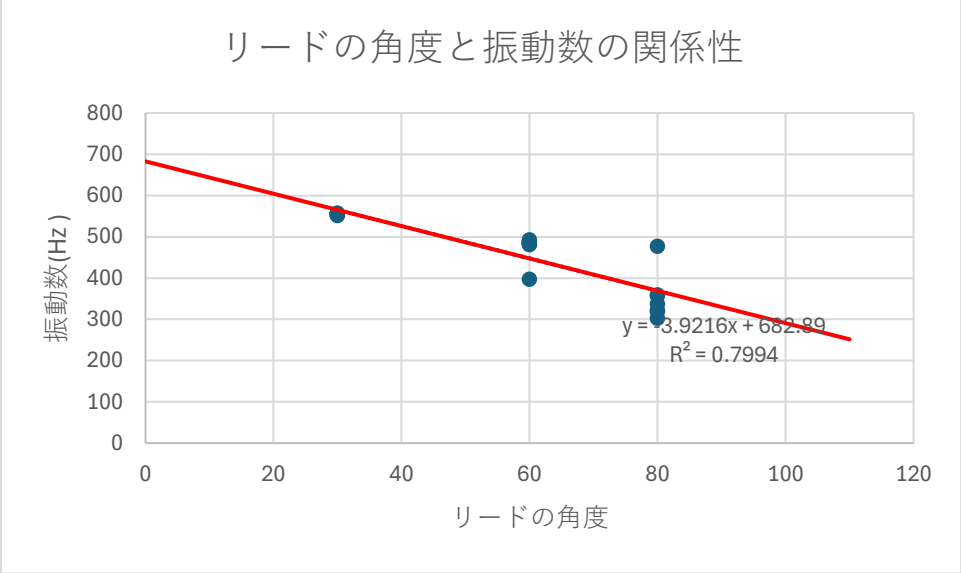
① 笛の長さと振動数の関係



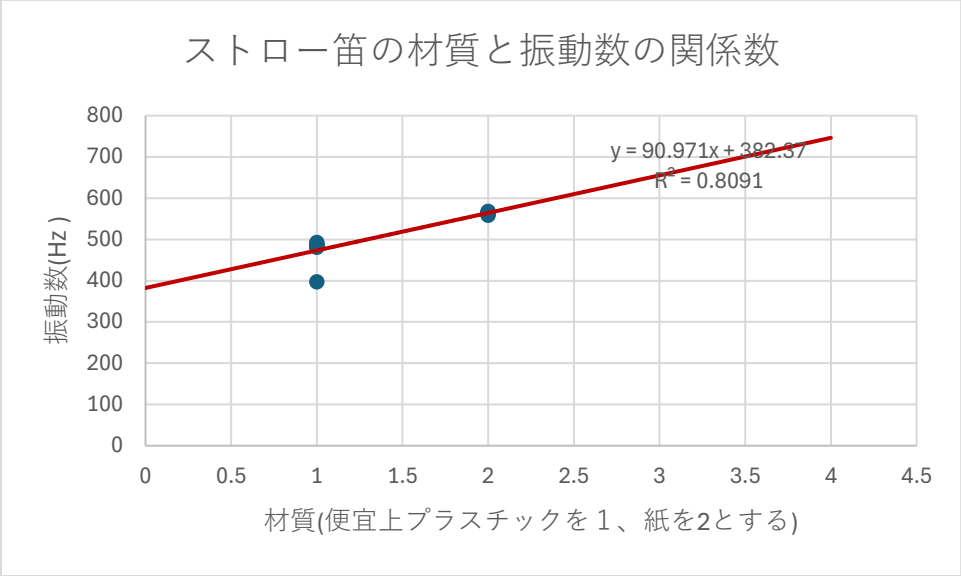
② 笛の太さと振動数の関係性



③ リードの角度と振動数の関係性



④　ストロー笛の材質と振動数の関係性



グラフ上に記されている回帰式をまとめると

① ｙ＝－15.393ｘ＋617.94　（R^2＝0.2287　長さと振動数の関係性）

② ｙ＝－35.876ｘ697.52　（R^2＝0.9757　太さと振動数の関係性）

③ ｙ＝－3.9216ｘ＋682.89　（R^2＝0.7994　リードの角度と振動数の関係性）

④ ｙ＝90.971ｘ＋382.57　（R^2＝0.8091　材質と振動数の関係性）

となる。

R^2は決定係数と呼ばれる係数であり、０から１の間でモデルが実際のデータにどれくらい適合しているかを示す指標である。この値が1 に近づけば近づくほどモデルの信ぴょう性が高まる。例えば、①のモデルではR^2＝0.2287 となっているが、この場合①のモデルの信用が低いことを示している。逆に②ではR^2＝0.9757 となっておりこのモデルを信用できるということがわかる。

グラフの傾きに注目してみると、①、②、③はマイナスになっているため笛が長く、太く、リードの角度が大きいほど音が低くなると予測することができる。④においては回帰式を求めるために便宜上プラスチック、紙にそれぞれ値を当てはめているが、傾きが＋のため材質がプラスチックのときのほうが音は低くなるということがわかる。これらの結果から(ⅰ)、(ⅱ)は正しいと考えられる。

この回帰式から振動数を予測することもできる。回帰式に対応するｘを代入してみると、振動数を予測できる。①の式にｘ=30(笛の長さ)

を代入すると y=156.15 となるだろうと予測できる。また、初めの仮説のように、やはり音の高さにはそれを定める要因があり、計算によって音の高さを予測することができると考えられる。しかし、振動数が 0 になるような値を回帰分析の式に当てはめて、振動数がどうなるのかは謎が残った。

おわりに

今回の課題研究 J では知識としては知っていても、体験したことのなかった音の世界を、実験を通してみることができ、とても貴重な体験になった。管楽器の興味深い歴史や発達、それに付随する人類の発達など、多くのことを学べて、やはり物事は 1 つのものさしでは測れず、たくさんの教科が複雑に絡み合っていることを実感できた。それを踏まえて、これからも毛嫌いせずに多くの教科に触れ、より多くの知識と触れ合っていきたいと思った。

本当は条件を 1 つだけ変えるのではなく、何種類も変えて音の高さの予測を多角的にしてみたかったが、今回はそこまで至らせることができなかったので、いつかまた実力をつけてから挑戦してみたいと思う。また、回帰式からの予測値と、実際の値の乖離も調べてみたいと思っている。同様に、音の振動数を定める他の要因についても調べたいと思っている。

この卒論を作成するにあたって、丁寧に指導してくださった山本先生、本当にありがとうございました。

参考文献

物理基礎(啓林館)

わかりやすい高校物理の部屋
(https://wakariyasui.sakura.ne.jp/p/wave/onnpa/onnpa.html)

茨城詩吹奏楽団
(https://ibarakicwo.org/wordpress/wp-content/uploads/2019/11/Handbook_of_WindBand_public.pdf)

骨製フルート、人類最古の楽器と判明　NATIONAL GEOGRAPHIC
(https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/1358/)

楽器解体全書　YAMAHA
（https://www.yamaha.com/ja/musical_instrument_guide/）

リコーダー　国立音楽大附属図書館
(https://www.lib.kunitachi.ac.jp/wp-content/uploads/2023/11/tenji0511.pdf)

ストロー笛　神奈川県
(https://www.pref.kanagawa.jp/documents/57434/06.pdf)

音に関する“豆知識”講座、開講！　　Push on！　Mycar-life
(https://www.mycar-life.com/article/2020/08/22/21919.html)

【音波】開管内の気柱と閉管内の気柱の振動について　　進研ゼミ高校講座
(https://kou.benesse.co.jp/nigate/science/a13p09bb01.html)

気柱の振動　KIT 金沢工業大学
(https://w3e.kanazawa-it.ac.jp/math/physics/high-school_index/wave/sound/henkan-tex.cgi?target=/math/physics/high-school_index/wave/sound/vibration_of_air_column.html)

回帰分析とは？単回帰分析・重回帰分析を Excel で行う方法を解説！
ウイングアーク 1st
(https://data.wingarc.com/regression-analysis-31489)