物理

左上一箇所でホチキス留め

受付番号: SJ1028
エントリーID: 2317

筑波大学

朝永振一郎記念

第18回「科学の芽」賞　応募用紙

受付番号	：	SJ1028
応募部門	：	中学生部門
応募区分	：	個人応募
題名	：	響け！篠笛　篠笛の吹き方の音響学的考察～呂音・甲音の出し方を可視化する～
学校名	：	東京都 私立東洋英和女学院中学部
学年	：	2年生
代表者名	：	谷口　ゆい

※ 個人情報保護のため、入力された項目から抜粋して出力しています。

響け！篠笛

篠笛の吹き方の音響学的考察
～呂音・甲音の出し方を可視化する～

東洋英和女学院中学部　2年5組19番

谷口　ゆい

響け！篠笛
篠笛の吹き方の音響学的考察～呂音・甲音の出し方を可視化する～

＜研究の背景・目的＞

私の通う中学校の音楽の授業では、キリスト教音楽を理解し親しむことをとても大切にしているが、篠笛などの日本の伝統音楽も積極的に授業に取り入れている。

日本の伝統的な横笛である篠笛は単純に音を出すだけでも難しいが、呂音（低音）・甲音（１オクターブ上）の吹き分けにはとても苦労する。

今回、どのように吹けば低い音と高い音の吹き分けが容易になるかを検討、実際の演奏に役立てるため、本来は目で見ることのできない音の振動や空気の流れを可視化する実験方法を考案した。

＜実験材料／器具＞

SUZUKI スズキ オリジナル篠笛 童子 八本調子 樹脂製 SNO-02
エレコム エアダスター 350ml ECO（フロンガス不使用）ダストブロワー
Fochai 1台3役多機能ミニ掃除機 電動ハンディ掃除機
直径20mmのアクリルパイプ（東急ハンズ）
ストロー(直径4.5mmと6.0mm)
USB給電スピーカー（DAISO）
Kyocera　スマートホン　Gratina　KYV48　（Andoroid OS11）
スティックPC Diginnos Stick DG-STK1B　(Windows　１０)

＜使用ソフトウェア＞

●Windows PC用
Audacity ®　　（https://www.audacityteam.org/）
Wave Gene　1.5　(https://gtkc.net/efu-mirror/soft/wg/wg.html)
●Android 用
Air　Visualizer　（https://github.com/kambara/air-visualizer）

＜原理・知識＞

●篠笛の呂音と甲音●

篠笛には西洋音楽の調に合わせて数種類の笛が存在するが、今回はハ長調に合わせやすい「８本調子」の笛を用いて実験を行った。呂音、甲音をピアノの音域で示すと下記のようになる。
以下、音の高さの表記はこの図をもとに記載する。

	移動ド唱法	数字譜	運指 [⑦⑥⑤¦④③②①]
呂音（低音）	ド	一	[●●●¦●●●○]
	レ	二	[●●●¦●●○○]
	ミ	三	[●●●¦●○○○]
	ファ	四	[●●●¦○○○●]
	ソ	五	[●●○¦○○○●]
	ラ	六	[●○○¦○○○●]
	シ	七	[○○○¦○○○●]

	移動ド唱法	数字譜	運指 [⑦⑥⑤¦④③②①]
甲音（中音）	ド	1	[●●●¦●●●○]
	レ	2	[●●●¦●●○○]
	ミ	3	[●●●¦●○○○]
	ファ	4	[●●●¦○○○●]
	ソ	5	[●●○¦○○○●]
	ラ	6	[●○○¦○○○●]
	シ	7	[○○○¦○○○●]

篠笛にはサクソフォンやクラリネットやような　オクターブキーやレジスターキーは存在しない。同じ横笛のフルートと同じ様に、まったく同じ運指でありながら、息を吹き込む角度や、強さにより音の高さ（オクターブ違い）を吹き分ける。

●今回の研究で記載している
運指表はすべて下記Webサイトからの引用です。

篠笛の吹き方・指の置き方｜和楽器ひろば
https://wagakki-hiroba.com/blowing-how-shinobue/

＜実験方法１＞　＜呂音および甲音を出すのに最も適切な角度、およびストロー径の検証＞

篠笛やフルートなどの横笛では、同じ運指でありながら、息を吹き込む角度や、強さにより音の高さ（オクターブ違い）を吹き分ける。
ただし、教則本などには
●呂音（りょうおん：低い音）は
低め（深め）の角度で、ゆっくりと息を吹き込む、
●甲音（かんおん：呂音よりも１オクターブ高い中音域）は
高め（浅め）の角度で、強く息を吹き込む、
と記載があるのみで、明確に何度の角度の差をつける
などの記載はない。そこで　以下の図のような実験装置を組み立てて、それぞれの音域でもっとも適切な角度の検証を行った。この実験では空気を送り込む動力として

「Fochai 1台3役多機能ミニ掃除機 電動ハンディ掃除機」
を用いた。本来は掃除機としても使えるが、図の装置の右側からは吸引、左側からは強力な送気のための装置としても使用できる。

＜結果１＞＜呂音および甲音を出すのに最も適切な角度、およびストロー径の検証＞

- 当初、唄口にむけて　ストローを種々の方向にむけて呂音・甲音を出すことを試行錯誤したが成功しなかった。そこで、実際の演奏の際には下唇で唄口を塞いでいることを考慮して、セロハンテープで唄口の手前側を塞ぐことで呂音・甲音を実際に発音することが可能になった

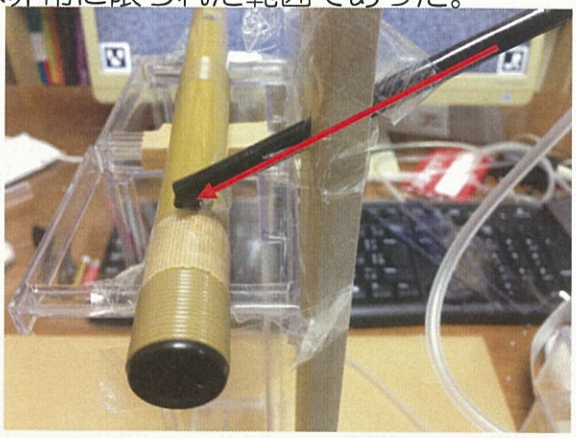
セロハンテープで唄口の手前側を塞ぐ

図は下記Webから引用
篠笛がうまくなるには？【口の当て方の基本について
篠笛楽譜ブログ
https://run-maru.com/shinobue/2018/06/04/

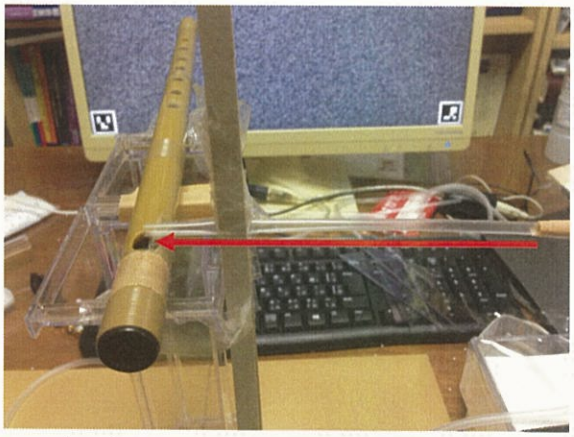
- 呂音についてはC5を、甲音についてはC6を検証し、
- 指で穴を塞ぐかわりにセロハンテープで該当する音孔を塞いだ。

セロハンテープで②から⑦までの指孔を塞ぐ

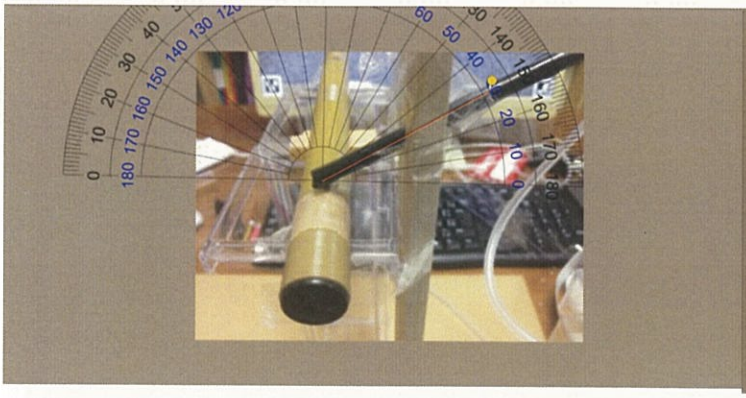
結果、呂音は唄口に対して30度下向きの向きで、直径6mmのストロー（黒）で安定して音が鳴るのに対し、甲音は唄口に対してほぼ0度（水平）にして直径4.5mmのストロー（透明）で送気することで安定して音がなることが判明した。音が安定してなる角度は非常に限られた範囲であった。

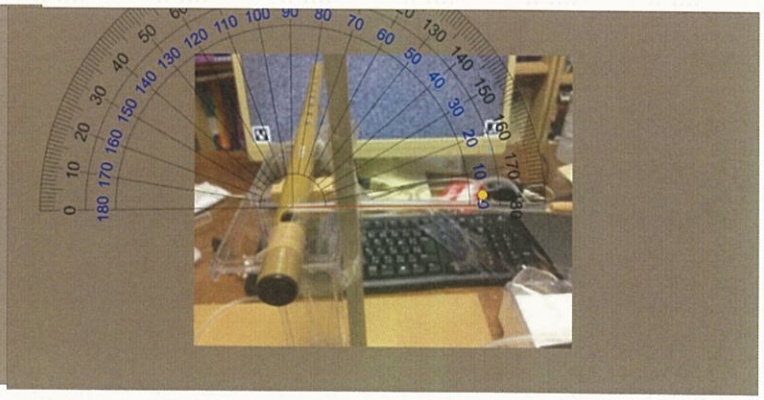


呂音は唄口に対して30度下向きの向きで、直径6mmのストローで安定



甲音は唄口に対してほぼ0度（水平）にして直径4.5mmのストローで安定





＜実験方法２＞＜周波数の変化によるビーズの共振の変化＞

Kundtの共鳴管（音響管）は音の振動を可視化するのに昔から用いられている方法である。もともとの実験手法は１９世紀（１８６６年）にKundtが考案した方法であり、両側が閉じた管内での共鳴を観察するのが実験の原法である。

先行する文献②（リコーダーを模擬したクント管の製作と授業実践、山城 富）を参考に、篠笛内部での空気の振動を検討考察するのにKundtの共鳴管の原理を応用した。過去に同様の手法を篠笛にもちいた研究は調べた限りでは存在しなかった。

呂音・甲音でどのような振動の差が生じるのか検討・可視化するため、次のような実験を考案、実験装置を自作した。

＜透明な篠笛モデルの自作＞

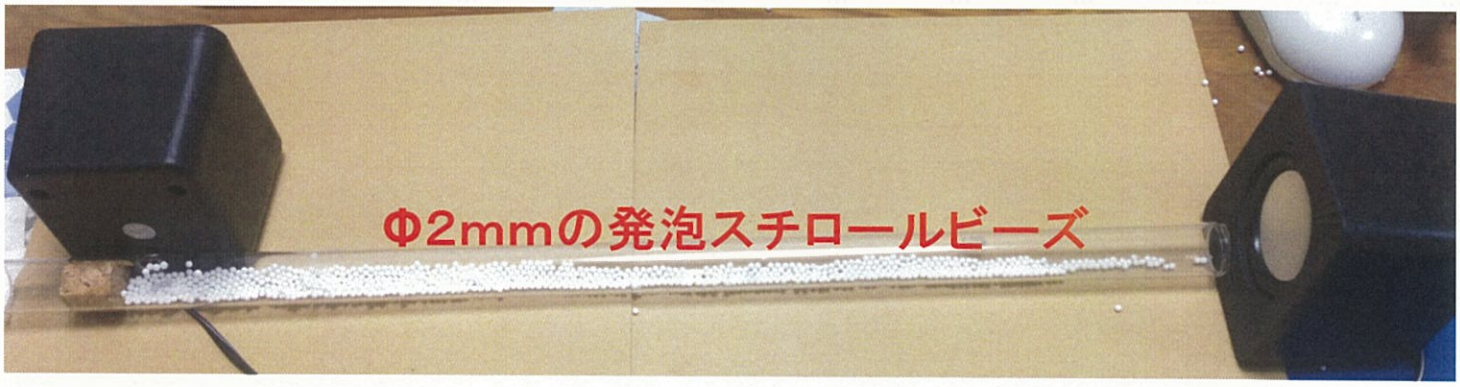
①直径2.0ｃｍ、長さ39ｃｍの透明アクリルパイプを用意する。

②実際の篠笛の唄口、および一番遠い側の指孔①に相当する孔をあけ、一番手前側はコルクで閉塞させる。実際に演奏可能であることを確認する。

③内部に直径２mmの発泡スチロールビーズを適量入れる。

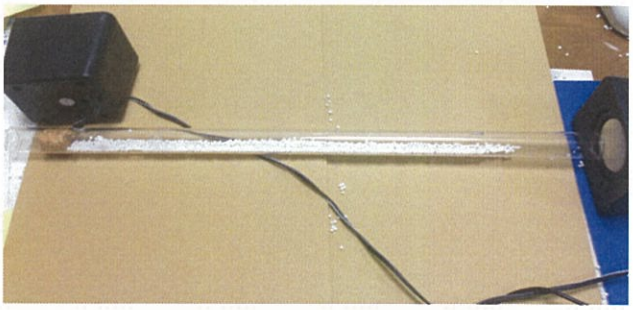
④唄口については径４ｃｍ程度のパワードスピーカー（３W）を反転させて管を密閉させないように離して配置する。

⑤右端には反対側のスピーカーを、管を密閉させないように少し離して配置する



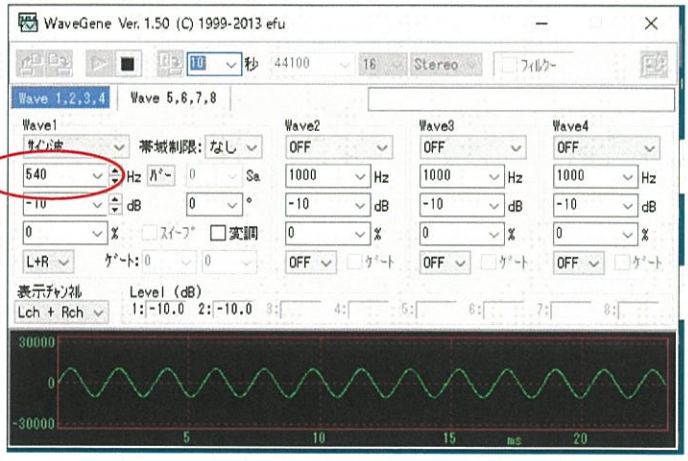
⑥任意の定常波（サイン波）を発生することができるソフトウェア　Wave Gene Ver.1.5で周波数を低い方（１０Hz～）から次第に増加させていき、ビーズ全体が共振した時点で写真を記録する

＜結果２＞　＜周波数の変化によるビーズの共振の変化＞

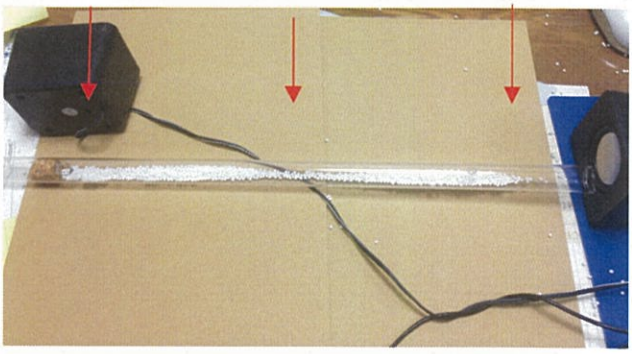


●静音状態では右上の様な状態であり、10Hzから始めて高い方へ周波数を変化させた後も、共鳴がおきるまではほとんどビーズに動きはない。

① 呂音　C5（５４０Hz）

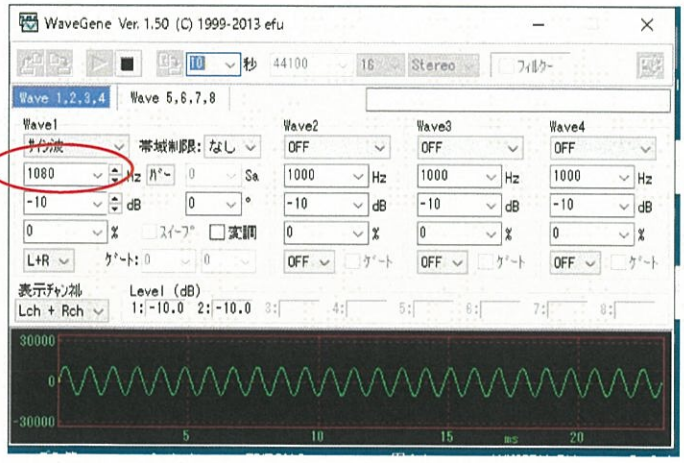


振動の腹　振動の節　振動の腹

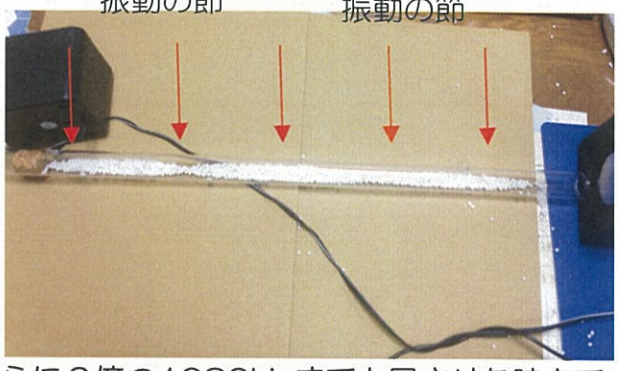


540Hzまで上昇させた時点で、上図のようにビーズ全体が共振して、明確な振動の節と腹が出現した。この音の高さは実際の演奏した呂音の高さと一致した。

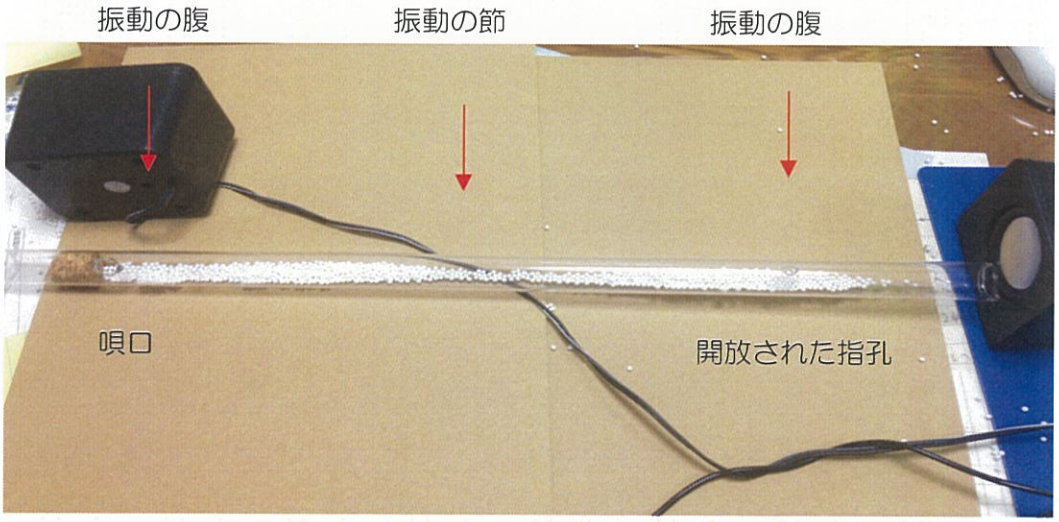
② 甲音　C6（１０８０Hz）

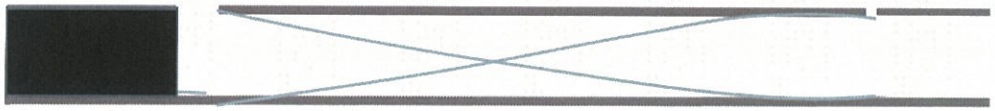


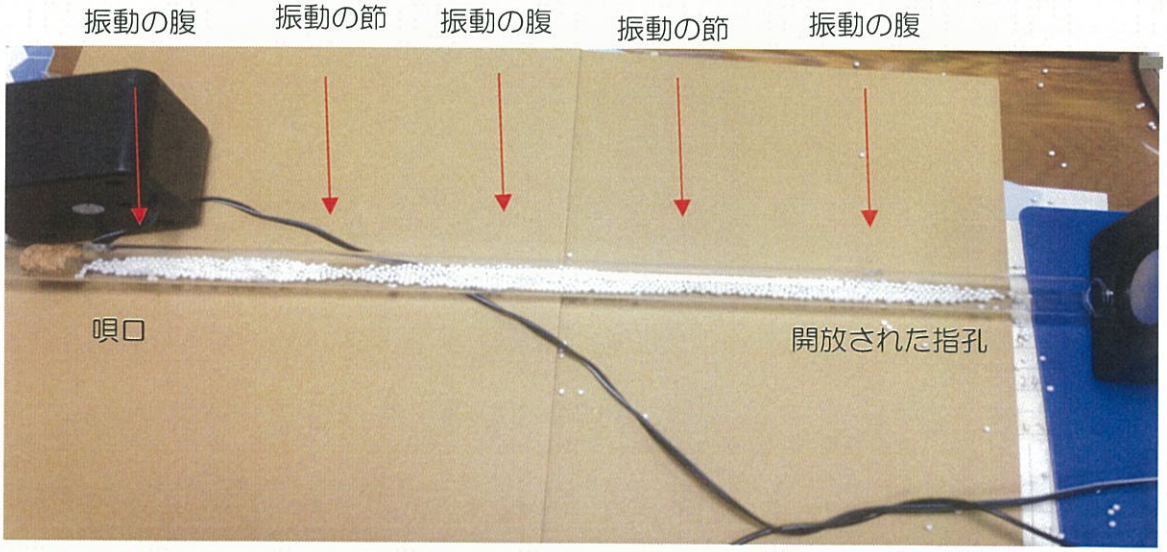
振動の腹　振動の節　振動の腹　振動の節　振動の腹

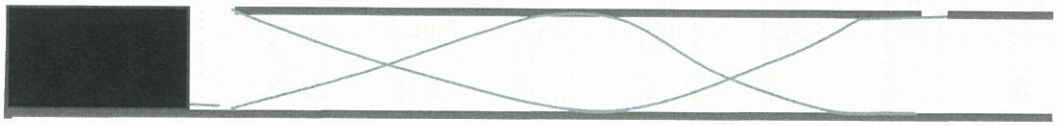


さらに２倍の1080Hzまで上昇させた時点で、上図のようにビーズ全体が共振して、より細かい明確な振動の節と腹が出現した。この音の高さは実際の演奏した甲音の高さと一致した。









想定される管体内部の振動は上記の様になる。数mm程度の小さな唄口や解放された指孔が存在するだけでも、振動の節や腹に明確な変化が生じる。
唄口から開放された指孔までがまるで両側の開管であるかの様な挙動をしめした。

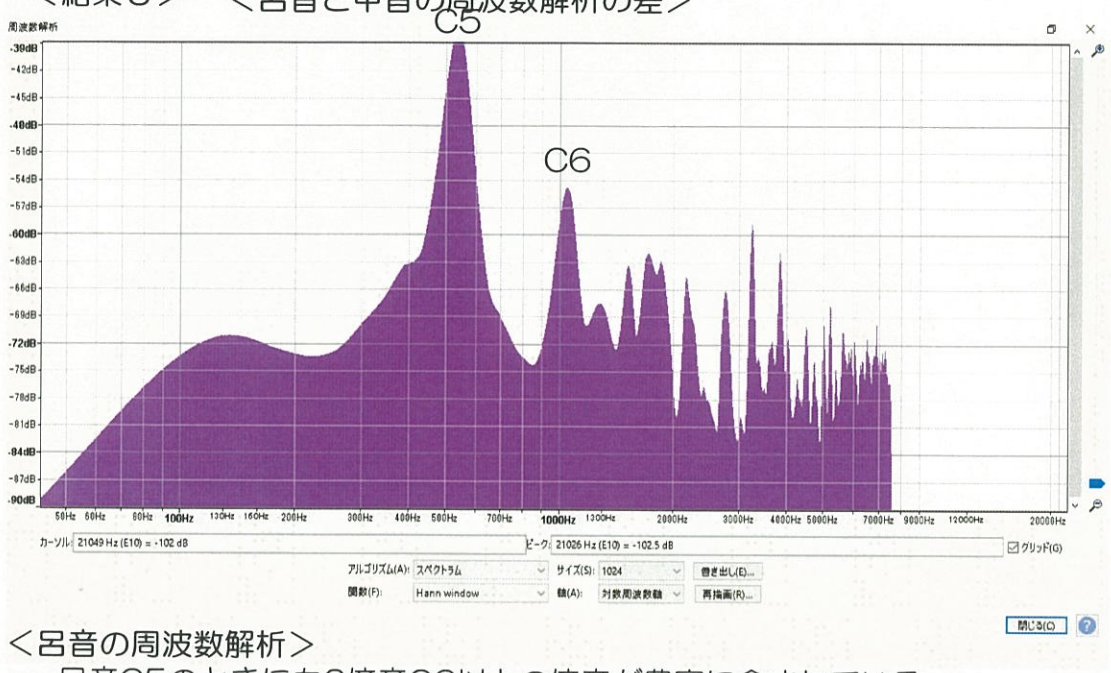
＜実験方法３＞＜呂音と甲音の周波数解析＞

・　同じ指使いで演奏される2つの異なる高さの音＝C5(呂音）とC6（甲音）で周波数の成分がどのように異なるかを検証するため、Audacityで周波数解析をおこなった。

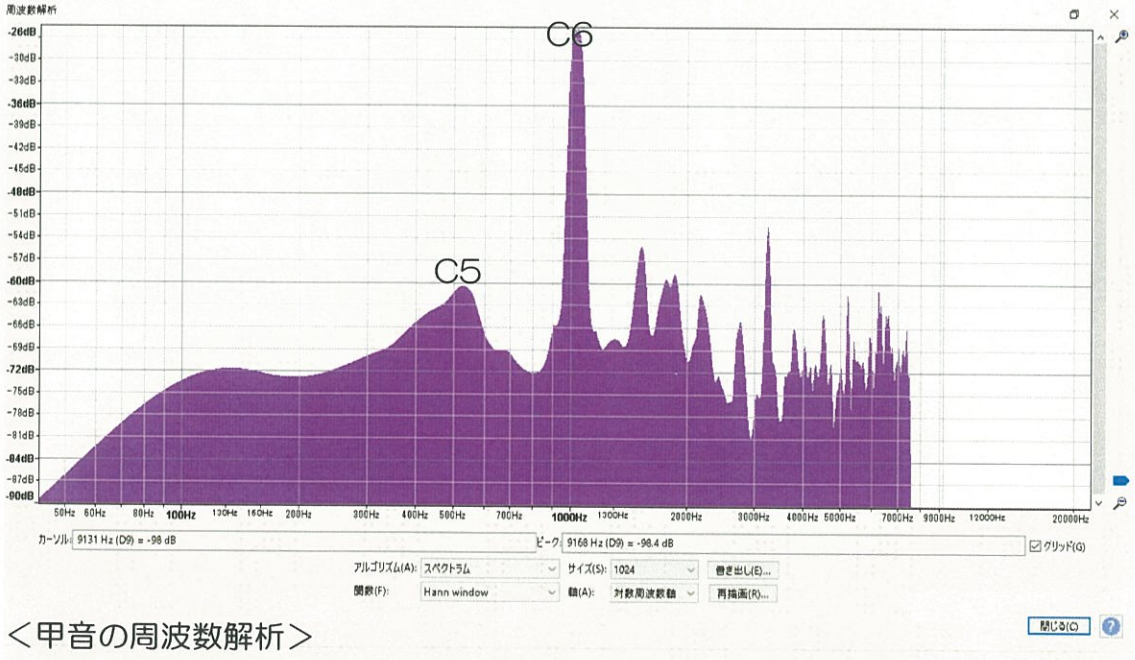
● C5,C6の高さで演奏し、Audacity®で録音。
音色・音程の安定している１秒間につき、周波数解析を行った。

●空調にて室温は２５度に調整した上で施行した。

＜結果３＞　＜呂音と甲音の周波数解析の差＞



＜呂音の周波数解析＞
呂音C5のときにも2倍音C6以上の倍音が豊富に含まれている



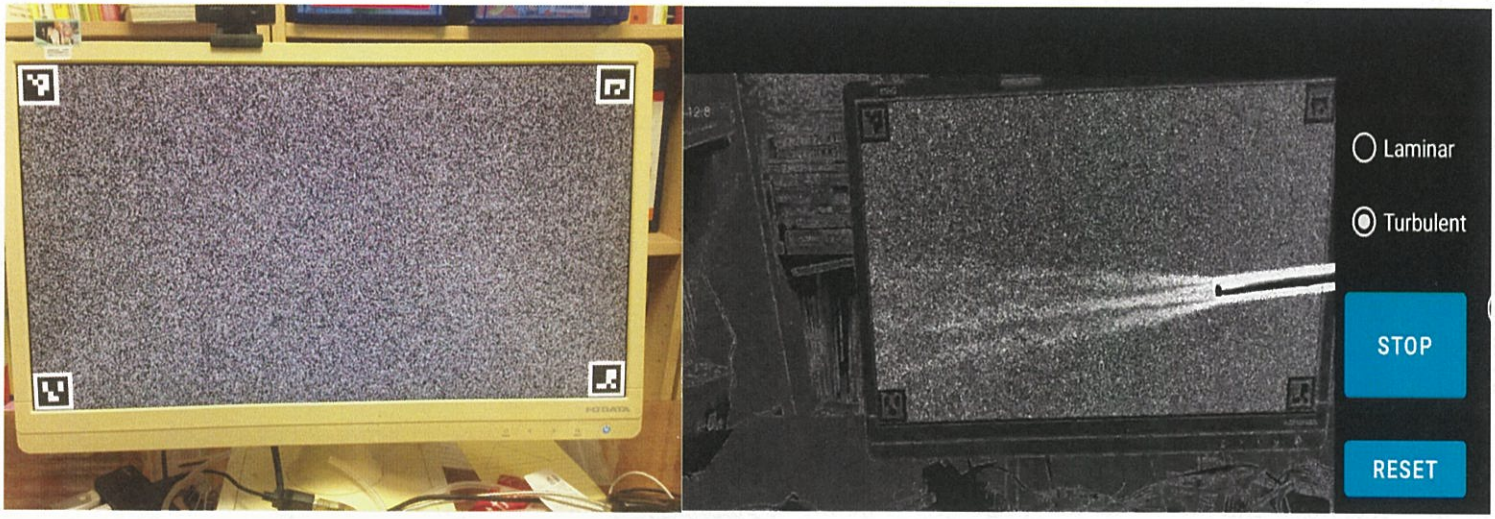
＜甲音の周波数解析＞
甲音C6のときにも少ないながらも低い音C5の成分が実はまじっていることが確認できた。

＜実験方法４＞　　気流の可視化／呂音と甲音の差の検証

背景型シュリーレン法は液体や気体の濃度勾配を可視化するのに用いられる方法である（Background Oriented Schlieren法に基づく密度勾配の可視化法の改良,赤塚ら、2011）。

下図のようなPC画面上の砂嵐画像と、スマートフォンのカメラの間の空間に温度差が生じると、気体の密度に差が生じることで、光が屈折するため、背景（砂嵐画像）からの画像に乱れ（屈折）が生じる。

神原 啓介氏が2022年夏に開発したAir　Visualizer　(https://github.com/kambara/air-visualizer)(Android OS11以降対応）を利用することで高価な機器や複雑な実験装置を使用しなくてもPCとスマートホンで背景型シュリーレン法により気流（実際には温度の変化）を可視化することが可能になった。



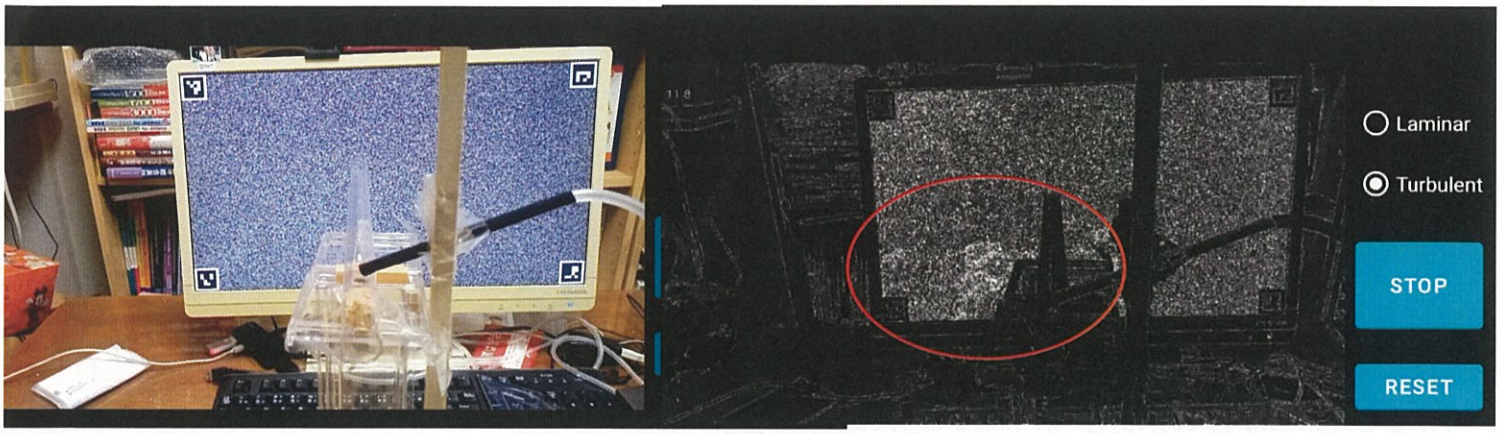
PCなどのホコリをふきとばすのに使用する掃除用のエアースプレーを吹くと缶から空気が放出されて急に膨張する際に温度が下がり、背景型シュリーレン法により温度の低下・気流が検出できる様になる。

この原理を利用して、左図のような実験装置を構成して、
呂音・甲音をスプレーの圧力を用いて発音し、呂音と甲音で生じる気流の差を検証した。

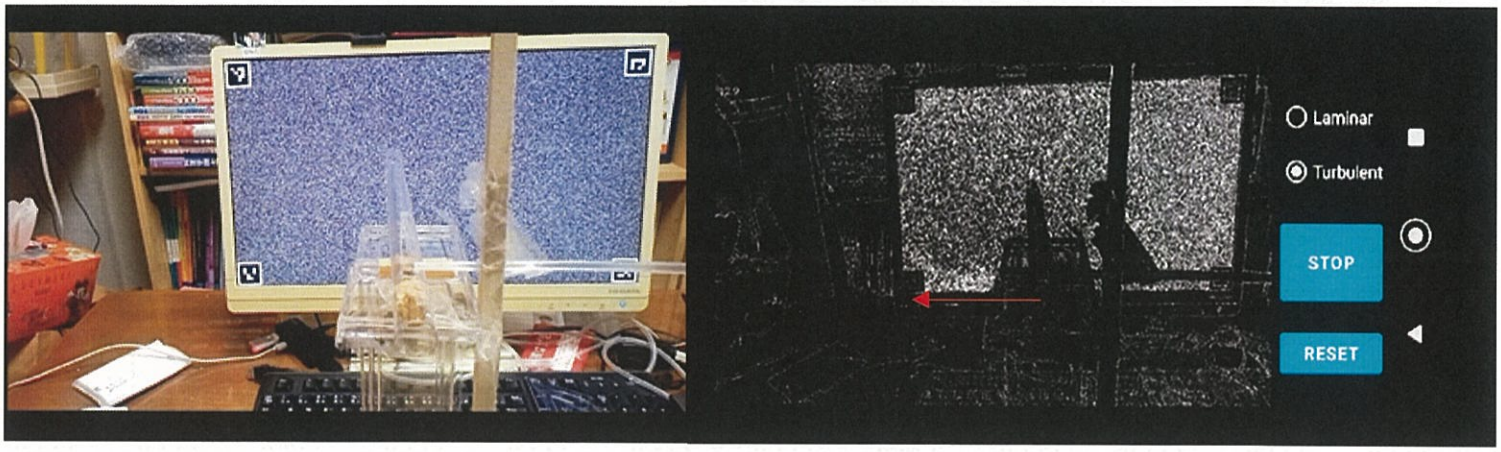
エレコム エアダスター
ダストブロワー

＜結果４＞　気流の可視化・呂音と甲音の差の検証

呂音



甲音



呂音のときは管体のまわりに緩やかに広がる乱流があり、
甲音のときは気流が管体を超えて素早く直線的に移動していることが可視化・確認された。

＜考察＞

●篠笛を吹く時の呂音と甲音の吹き分け方を数値化するために実験を考案した。
ストローの角度や太さは、
低音側では角度を深く、口はやや広く、
高音側では角度を浅く、口は微妙に狭く、
という一般知識とよく合致していた。
●篠笛の中の空気の振動についても、
同じ指使いでも振動数により気体の動きが異なることが確認できた。
●周波数解析では
呂音のときにも2倍以上の倍音が豊富に含まれている一方、
甲音のときにも少ないながらも低い音の成分が実は混在していることが
確認できた。
●背景シュリーレン法が安価な機器でも利用可能になったので,今年度の研究に応用してみた。ただし、温度差がないと気流が描出できないので、スプレー缶から放出された気体が温度が低下することを利用した。背景シュリーレン法を用いることで、呂音のときは管体のまわりに乱流があり、甲音のときは直線的な気流が管体外に存在することが確認できた。
問題点：通常の気温からは下がるため、音の高さが変わってしまう（低くなる）ので厳密には実際の演奏条件とは変わってしまうことに注意が必要である。

＜感想＞

音楽の授業でならった篠笛は単純に音を出すだけでも難しいが、呂音（低音）・甲音（１オクターブ上）の吹き分けにはとても苦労する（低音のほうが実は出しにくい）。

今回、本来は目に見えない音の振動や気流を目に見えるようにする実験方法を考案、得られた結果を意識して演奏することで、どのような角度で息を入れればよいかが理解でき、実際の吹き分けが容易になった。

ただし、考案した実験装置では、気流の角度や、ストローの太さは非常に限定された範囲でしかうまく鳴らず、人間の口がいかに微妙な調整をしているか、あらためて驚く。

2022年夏に気流を可視化するソフトウェアがAndroid　OS11以降で利用可能になり、このソフトをうまく自由研究に利用できないか考えていたが、本年度の研究では当初の目的が達成できたのが嬉しい。

昨年の自由研究ではドライアイスが昇華する圧力を利用して縦笛（リコーダー、およびスライドホイッスル）の気流の可視化を達成したが、今回の篠笛（横笛）の実験系では縦笛と比較してはるかに多くの気流が必要であり、ドライアイスの実験系では音を鳴らすことが困難だった。今回はハンディ掃除機やダストクリーナースプレー、およびAir　Visualizerをもちいることで横笛の実験系をくみたてることが可能となった。

＜謝辞＞
東洋英和中学部で理科・レポート作成を指導頂いた先生方 に感謝します。
今回の研究でわからない点を指導してくれて、音楽の学習をサポートしてくれている家族（祖父母、父、母、姉）に感謝します。
小学校時代から考えていた、いかに音や気流の可視化を行うか？の打開策となった、Air Visualizerの開発者の神原 啓介氏に感謝いたします。

＜参考文献＞

- ①篠笛の吹き方・指の置き方｜和楽器ひろば
- https://wagakki-hiroba.com/blowing-how-shinobue/
- ②篠笛がうまくなるには？【口の当て方の基本について】｜篠笛楽譜ブログ
- https://run-maru.com/shinobue/2018/06/04/
- ③高校物理 リコーダーを模擬したクント管の製作と授業実践
- 沖縄県立美来工科高等学校　　山城 富
- http://www.toray-sf.or.jp/activity/science_edu/pdf/h25_02.pdf
- ④Background Oriented Schlieren法に基づく密度勾配の可視化法の改良
- 赤塚ら、日本機械学会論文集B編
- 2011 年 77 巻 784 号 p. 2391-2400
- ⑤Air Visualizer (https://github.com/kambara/air-visualizer) 神原 啓介

- ＜以下は直接的な引用はありませんが、実験を考案する上で大いに参考にさせていただきました＞
- ●楽器の物理学　N.H.フレッチャー・T.D.ロッシング著
- 岸憲史・久保田秀美・吉川茂　訳
- 丸善書店
- ●音を可視化して音の速さと振動数・波長を測定する 教材の開発
- 著者 浜崎 貢, 山口 光臣, 陳 麗, 小原 益己, 三井 好 古, 小山 佳一
- 鹿児島大学理学部紀要 巻 51 ページ 1-8 発行年 2018-12-31
- http://hdl.handle.net/10232/00030424
- ●平成２３年度　高等学校における教科指導の充実　理科　物理領域
- http://www.tochigi-edu.ed.jp/center/cyosa/cyosakenkyu/kyokasido_h23/pdf/butsuri_04-1.pdf
- ●ペットボトルでクント(Kundt)の音響管
- Tatsuya Kitamura　2018年
- https://www.konan-u.ac.jp/hp/kitlab/kitamura/kundt.html
- ●気柱の固有振動（閉管）高校物理をあきらめる前に読むブログ
- YUKIMURA (id:ph-km86-ma)
- https://www.yukimura-physics.com/entry/2018/08/14/113407
- ●こうして管楽器はつくられる～設計者が語る「楽器学のすすめ」～
- 竹内 明彦
- YAMAHA　MUSIC MEDIA　2019年8月
- ●「響け！クラリネット」 ～閉管楽器についての音響学的検討・ 管楽器の響きを可視化する～　谷口あい
- https://www.tsukuba.ac.jp/community/students-kagakunome/shyo_list/j4.pdf