

筑波大学

朝永振一郎記念

第14回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0277

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : 「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～

学校名 : 慶應義塾中等部

学年 : 3年生

代表者名 : 谷口 あい

※ 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！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～

慶應義塾中等部

3年D組37番

谷口 あい

「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～

<研究の背景>

私は現在器楽部に所属し、ヴァイオリンを担当している。

常日頃練習に出る度に木管楽器・金管楽器の音色・迫力・音の通りの良さに圧倒される。

昨年(2018年)、理科の研究課題として「響け！ニュータイプのオリジナル管楽器！」と題して、各種管楽器の音色を周波数解析ソフトウェア Audacity® (<https://www.audacityteam.org/>)を用いて検討し、既存の管楽器の音色をより改良する方法を検討した。その際、本来の研究目的とは異なるが、

「片側閉管の円柱構造を持つクラリネットでは奇数次倍音のみが発生する」と断言している教科書・参考書・文献・ネット上の情報が大多数であるが、実際にはA4=440Hzの音域では閉管・円柱管のクラリネットでも奇数次倍音も偶数次倍音も同程度発生している

ということを偶然発見した。この発見は私にとってはとても驚きであった。なぜなら、よくオーケストラ関係の人は「この曲のソロはやっぱり温かい偶数次倍音の豊富な開管楽器(円錐管)＝ソプラノサクソとかオーボエとかがいいよね」とか「この曲はやっぱりクールな奇数次倍音の閉管楽器(円柱管)＝クラリネットがいいね」とかおっしゃるのである。クラリネットに偶数次倍音が豊富にあるとすると、こういったウンチクはいったいどうなってしまうのだろうか？

今年度はクラリネットの偶数次倍音につきより深い研究をすることにし、この1年間の準備期間中にさらに文献的考察をすすめていた。

●右図は(文献1)からの抜粋である。閉管構造の楽器の空気振動と開管楽器の楽器の空気振動の違いの図がわかりやすく説明しており、結論としては①(クラリネットの様な)片側閉管の円柱では原音(基音＝一倍の倍音)とその奇数倍の倍音で共鳴する②(フルートの様な)両側開管の円柱では原音とその整数倍の倍音で共鳴する、という理論であった。

●多くの学習参考書・教科書では閉管(円柱管)ではこのような奇数次倍音が生じるという単純化した記載があるのみである。

(文献1):

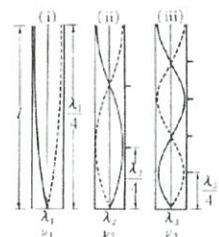
親切的な物理 下巻
渡辺久夫著 正林書院 新課程版
p.33-34より抜粋

■ 気柱の振動

【A】 気柱の振動 一つの管の中の空気の一部に振動が起こると、音波となって伝わり、管の端で反射する。この入射波と反射波が干渉して管内に定常波を生ずる。この定常波を気柱の振動という。管の開端は自由端で空気は動きやすいから定常波の腹となり、閉端は固定端で空気は動きにくいから節となる。

【B】 閉管の気柱の振動 一端が閉じている管を閉管という。閉端が腹、開端は節となるから、閉管内に起こる基本振動は図i、その倍振動は図ii、図iiiのようになる。(i),(ii),(iii)の波長を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$; 振動数を ν_1, ν_2, ν_3 ; 管の長さを l 、空気中の音速を V 、 $n=1, 2, \dots$ とすれば、

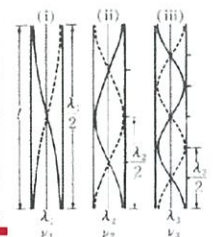
閉管内の波長	$\lambda_1 = \frac{4l}{1}, \lambda_2 = \frac{4l}{3}, \lambda_3 = \frac{4l}{5}$
基本振動の波長は	$4l$ 振動数は $\nu_1 = \frac{V}{4l}$
倍振動の振動数	$\nu_1 : \nu_2 : \nu_3 = 1 : 3 : 5$
よって閉管の固有振動数は	$\nu_n = \frac{V}{4l}(2n-1) (n=1, 2, \dots)$



従ってこの管の出す音は、原音とその3倍、5倍、……の振動数の倍音である。

【C】 開管の気柱の振動 両端が開いている管を開管という。両端は開いているから共に腹となる。ゆえに開管内に起こる基本振動は図i、その倍振動は次頁図ii、図iiiのようになる。(i),(ii),(iii)の波長を $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$; 振動数を ν_1, ν_2, ν_3 ; 管の長さを l 、空気中の音速を V とすれば、

開管内の波長	$\lambda_1 = \frac{2l}{1}, \lambda_2 = \frac{2l}{2}, \lambda_3 = \frac{2l}{3}$
基本振動の波長は	$2l$ 振動数は $\nu_1 = \frac{V}{2l}$
倍振動の振動数	$\nu_1 : \nu_2 : \nu_3 = 1 : 2 : 3$
よって開管の固有振動数は	$\nu_n = \frac{V}{2l} \cdot n (n=1, 2, \dots)$



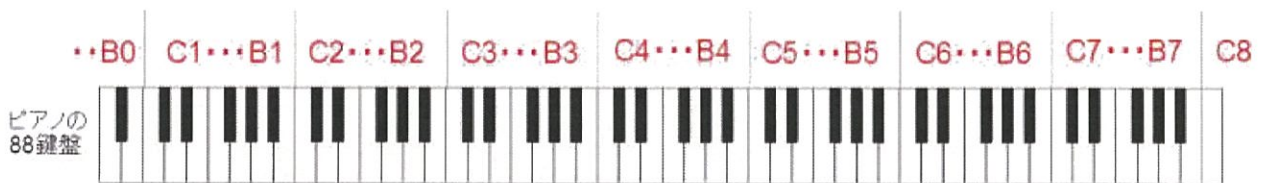
従ってこの管の出す音は原音とその2倍および3倍、……の振動数の倍音である。

●上記のような 多くの文献と違い、「楽器の物理学」 N.H.フレッチャー・T.D.ロッシン
グ著(文献2)では、クラリネットの一部の音域(低音)側では奇数次倍音が生じるが、高
音側では偶数次倍音も生じることが(簡潔ではあるが)記載されている。

● 比較的最近の欧米の論文ではHarmonic Analysis of the Soprano Clarinet
(Kevin M. Kay, 2017)(文献3)ではクラリネットの音程一つ一つにつき解析することで
、同様の結果(高音側では偶数次倍音も生じる)を得たと報告している。

<クラリネットの音域とレジスターキー・レジスターホール>

ここで、クラリネットの音域とレジスターキーについて詳しく説明しておく。
音高の表記については以下の国際表記に則って以後記載する。



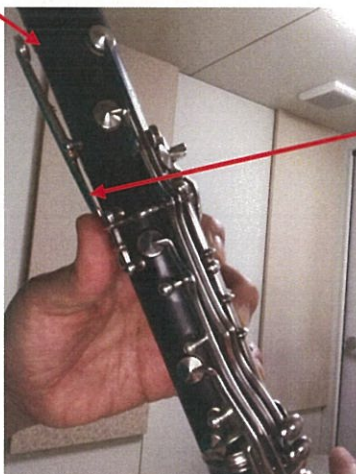
クラリネットにはレジスターキーと呼ばれるキーが存在し、
このキーを押すことでレジスターホールと呼ばれる部分が
開口し、概ね1オクターブ+5度上(12度上)の音が出るようになる。

E3(実音D3)からB \flat 4(実音A \flat 4)までは
レジスターキーは使わない状態=レジスターホールが閉まった状態で演奏する。
(シャリユモー音域+ブリッジ音域)

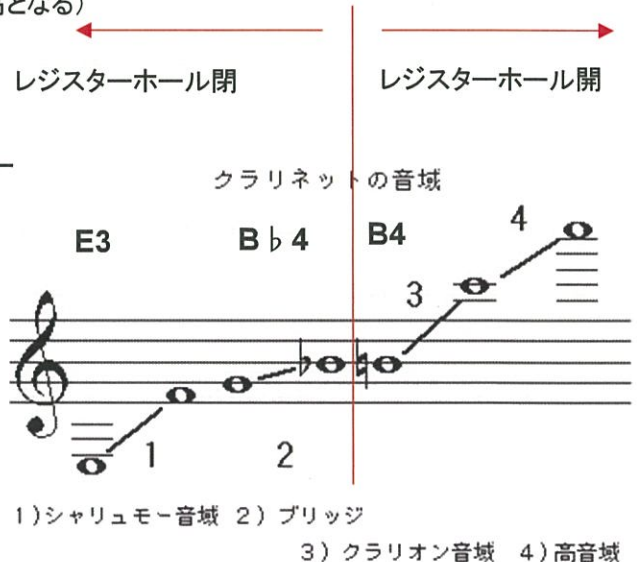
一方、B4(実音のA4=440Hz)から上(クラリオン音域+高音域)
はレジスターキーを押して(レジスターホールが開いた状態で)演奏する。

* (クラリネットは所謂移調楽器のため、
楽譜上の記載よりも全音低い音が実際に演奏される音高となる)

レジスターホール



レジスターキー



図の一部はおもしろ楽器館 クラリネット(文献4)より転載
<http://www.e-digitalpark.com/music/instrument/clarinet.html>

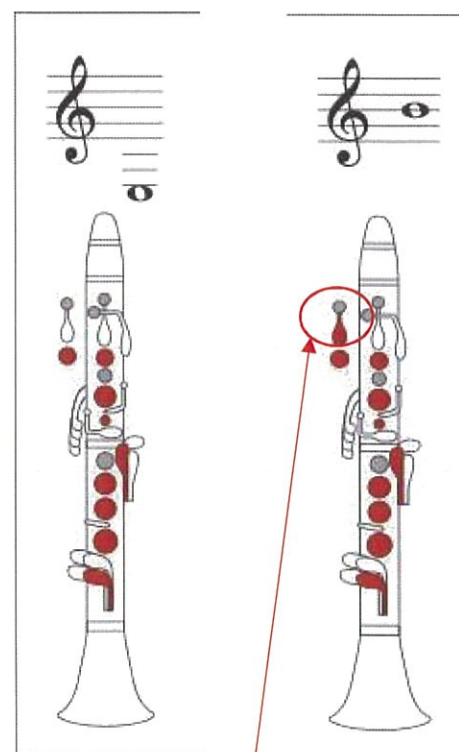
●理科実験で用いられるような、単純な片側開管の円柱管と異なり、クラリネットには前述のようなレジスターキーや、多くの音孔が存在しており、これが理論通りの奇数次倍音のみの音色にならない原因ではないか、と推論した。前述のクラリネットの構造、および文献1, 2の記載を元に、

「レジスターキーをおさない(レジスターホールが閉)低音側では奇数次倍音(1, 3, 5, ……)が、レジスターキーをおす(レジスターホールが開)高音側では整数次倍音(1, 2, 3, 4, 5, ……)が生じている

という仮説1をたてた。仮説の検証のため、次のような実験を考案した。

<実験①・レジスターホールの閉・開による周波数解析の差の検討>

- 使用解析ソフトはAudacity®
(<https://www.audacityteam.org>)
- 使用機器:ASUS X205TA
(冷却ファンなどを持たない
静音仕様のWindows PCである)
- 防音室(YAMAHA AVITECS®)内でクラリネット(YAMAHA YCL-25)を実音D3 および実音A4=440Hz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、周波数解析を行う。
- 空調にて室温は25度に調整した上で施行した。
- 各種音孔の影響を排除するため、
実音D3(すべての音孔をおさえた状態)
および、
実音A4(レジスターホールのみが開く状態)での解析に限定した。



実音D3

実音A4

両者の違いはレジスターホールの開閉のみである

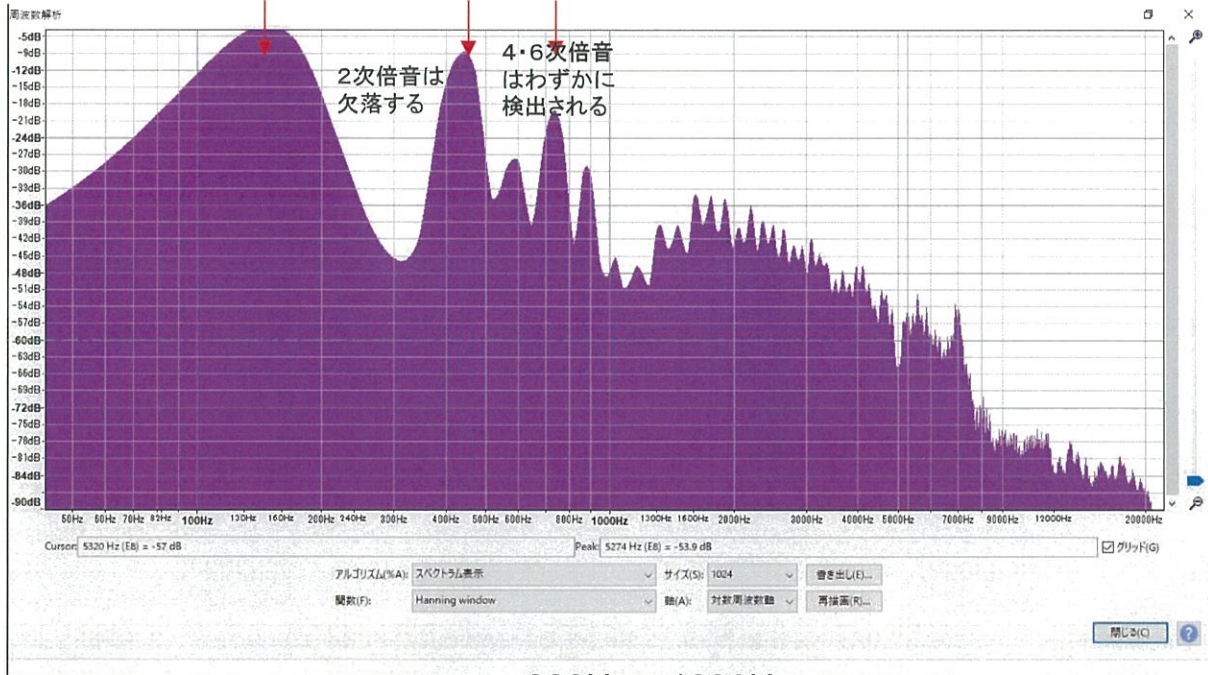
図の一部はYAMAHA楽器解体全書
クラリネット運指表(文献5)より抜粋

<結果① レジスターホールの閉・開による周波数解析の差>

●実音D3

(レジスターホール閉)

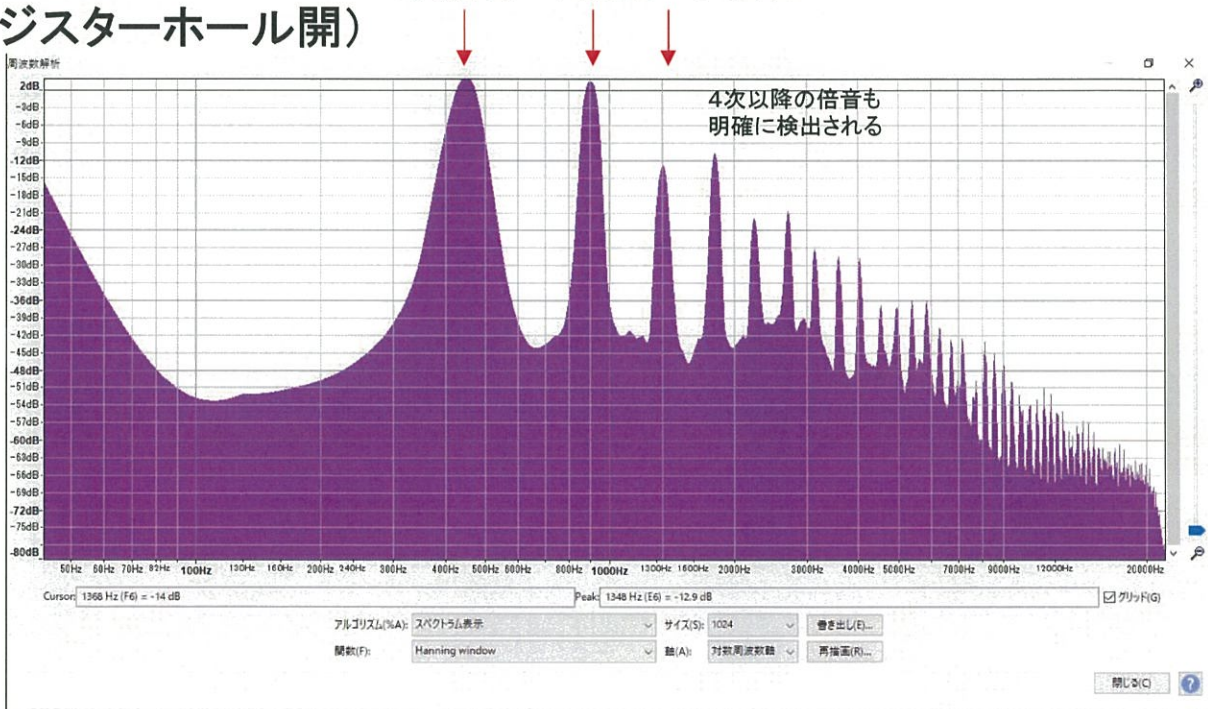
147Hz 440Hz 733Hz
1次倍音 3次倍音 5次倍音



●実音A4

(レジスターホール開)

440Hz 880Hz 1320Hz
1次倍音 2次倍音 3次倍音



上記グラフに示すとおり、レジスターホールが閉じた状態では2次倍音が欠落しているが、開いた状態では2次倍音が明確に発生することが認められた。

前ページのように、レジスターホールが開いた状態では2次倍音が生じることが見いだされたが、なぜこのような現象が生じるのかについての論文は、調べた限り皆無であった。ただし、実験手法を調べているうちに有用なヒントを得ることができた。過去の手法(文献6)を基礎にした上で、上記の課題を検討するのに有効と思われる実験手法を新たに考案した。

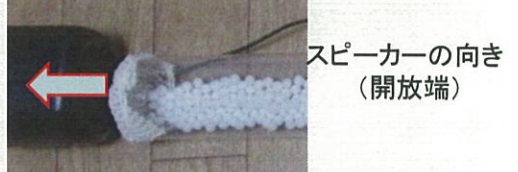
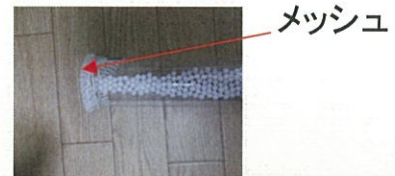
Kundtの共鳴管(音響管)は音の振動を可視化するのに昔から用いられている方法である。もともとの実験手法は19世紀(1866年)にKundtが考案した方法であり、両側閉管内での共鳴を観察するのが実験の原法である。

今回、Kundtの共鳴管をクラリネットの音響学的検討考察するのに応用した。過去に同様の手法をクラリネットにもちいた研究は調べた限りでは存在しなかった。

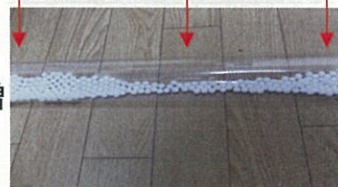
レジスターホールが開くことでどのような影響が生じて2次倍音が生じるのか検討・可視化するため、次のような実験を考案、実験装置を自作した。

<実験②・定常波発生によるビーズの共振>

- ①直径4cm、長さ67cm(一般的なB♭クラリネットの全長は67cmである)の透明アクリルパイプを用意する。
- ②内部に直径5mmの発泡スチロールビーズを適量入れる。
- ③開放端についてはメッシュで覆っておき、空気は自由に出入りするがビーズは出入りしないようにしておく。
- ④閉塞端については径4cm程度のパワードスピーカー(3W)を密着させ、機密性が担保できるように油粘土で隙間をシールする。
- ⑤開放端には逆向きに別のスピーカーを、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
- ⑦同様の実験手順(①~⑥)を、閉塞端から16cmの部分にキリで細かい孔をあけてから行う(YAMAHAのクラリネットYCL-25では16cm部分にレジスターホールが存在する)。



振動の腹 振動の節 振動の腹



この実験②でも空調にて室温は25度に調整した上で施行した。

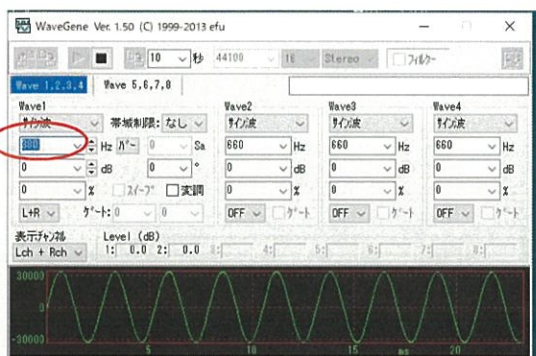
(予備実験にて径4cm長さ1mのアクリル透明パイプを用いて、発泡スチロール以外にもパルプの破片、ガラスビーズなども用いて実験してみたが、発泡スチロールビーズが最も観察が容易であった。なお、一般の電源を持たない廉価なスピーカーでも検討したが音量が圧倒的に不足しており、共振を観察することができなかった。また、パワードスピーカーを用いた場合でも、周波数によっては観察が困難なため、開放端側にもスピーカーを逆向きに置くことで同じ位相の振動が増強されるように工夫し、良好な共振結果が得られた)

<結果②・レジスターホールの追加によるビーズの共振の変化>

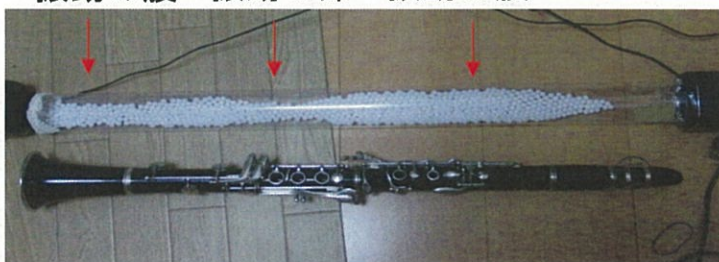
● 静音状態では右の様な状態であり、10Hzから始めて高い方へ周波数を変化させた後も、共鳴がおきるまではほとんどビーズに動きはない。



① レジスターホール 閉



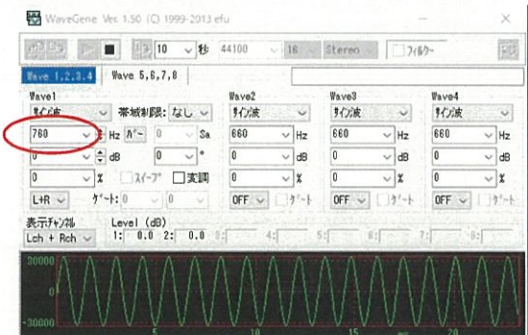
振動の腹 振動の節 振動の腹



レジスターホールを開けない状態だと、教科書的な3倍次の共振が380Hzの時に観察された。その後760Hzまで漸増したが共振は生じなかった。



② レジスターホール 開



振動の腹 振動の腹 振動の腹
振動の節 振動の節



キリで
あけた
孔

レジスター
ホールの
位置

レジスターホールを開けた状態では、周波数を連続的に上げていくと、760Hzの時にはじめて共振が観察された。レジスターホール部分は振動の腹になり、レジスターホールから左では両側開管で見られる様な2倍次の共振が観察された。



数mm程度の小さなレジスターホールが存在するだけでも、振動の節や腹に明確な変化が生じ、レジスターホールから開口端までの間で偶数次の倍音が生じる可能性が示唆された。今回の実験系ではレジスターホールを模した孔から開口端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。



今回の実験系の片側開管の理論上の共鳴周波数は 文献1をもとに計算すると、

$V = \text{室温}25^{\circ}\text{Cのときの音速} = 331.5 + 0.61t = 346.75\text{m/s}$

$L = \text{管の全長}0.67\text{m}$ なので、

3倍次倍音での共鳴周波数は

$f = 3/4 \times V/L = 388.15\text{ Hz}$

実験値の380 Hzとほぼ一致する。

実際のクラリネットの音程(3次倍音)の440 Hzと乖離がある理由は断定はできないが、マウスピース部分、ベル部分は直管(円柱管)ではなく概ね円錐形であるため、直管(円柱管)としてはもっと短い長さで検討すべきなのかもしれない。

<実験③・側管の閉塞による2次倍音の変化の検討>

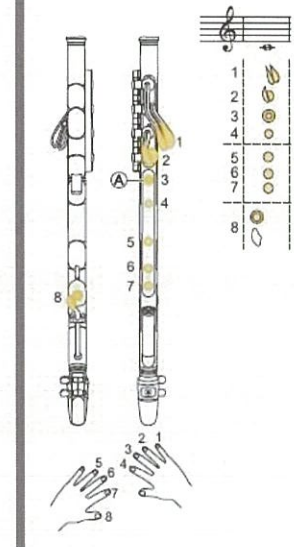
実験2までで円柱管(直管)でもレジスターホールなどがあると偶数次倍音が生じる可能性があることが示唆されたが、考察した理論の実証・検証のため、実験③を考案した。

YAMAHAのVenova®は側管をつけることで偶数次倍音を生じることに成功している楽器である。

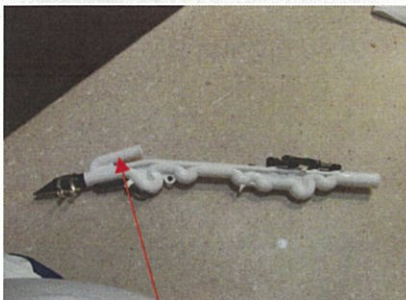
YAMAHAのニュースリリース(2017/7/10)(文献7)によれば、この楽器は「『分岐管構造』によってサクソフォンなどの円錐形管楽器の音響特性を円筒管で実現することができる」とのこと。分岐管構造については実吉純一氏の「円錐ホーンの反共振周波数の球面波理論による解析」(1977)(文献8)を基にしたという。

昨年度の実験でもVenova®を検討したが、確かに偶数次倍音もよく含まれた周波数解析の結果が得られていた。

では、逆に側管をテープで塞ぐと偶数次倍音が消失するのであろうか？手を加えないVenova®でC4(266Hz)を演奏し、テープで側管を塞いだVenova®で最低音を演奏し、Audacity®で周波数分析をおこなった。



Venova®の運指表(文献9)より転載
最低音はすべての音孔を塞ぐが
側管部分と本管の開放端は開いている。



側管(分岐管)



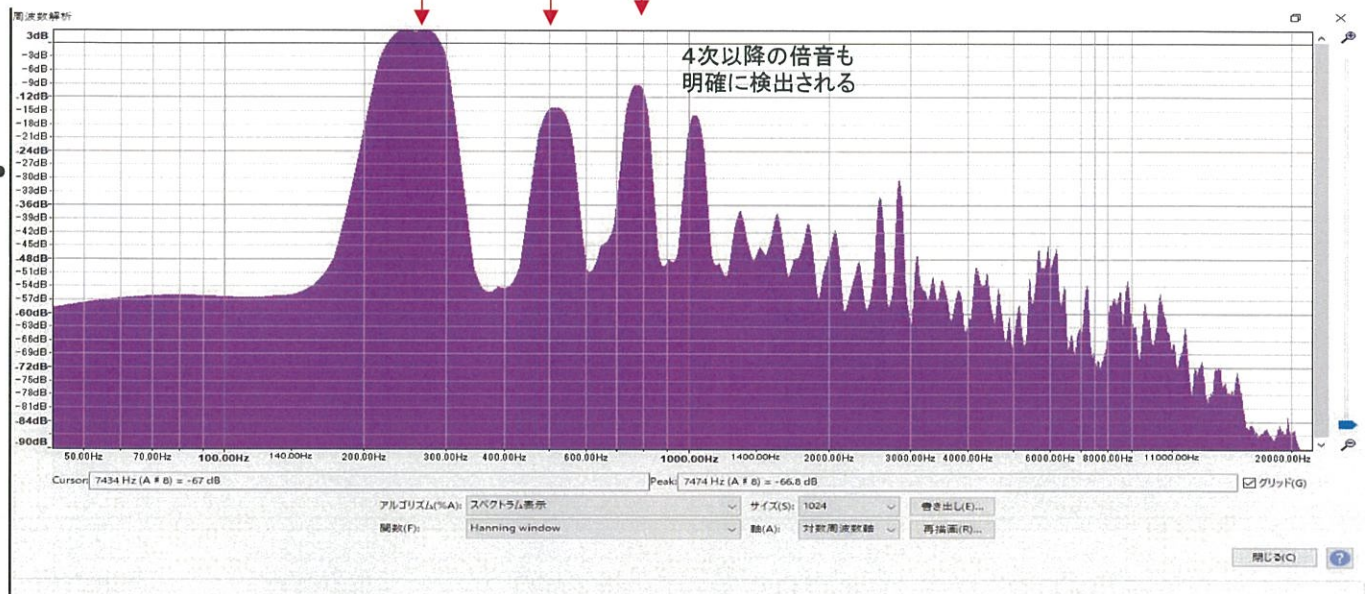
素のVenova®



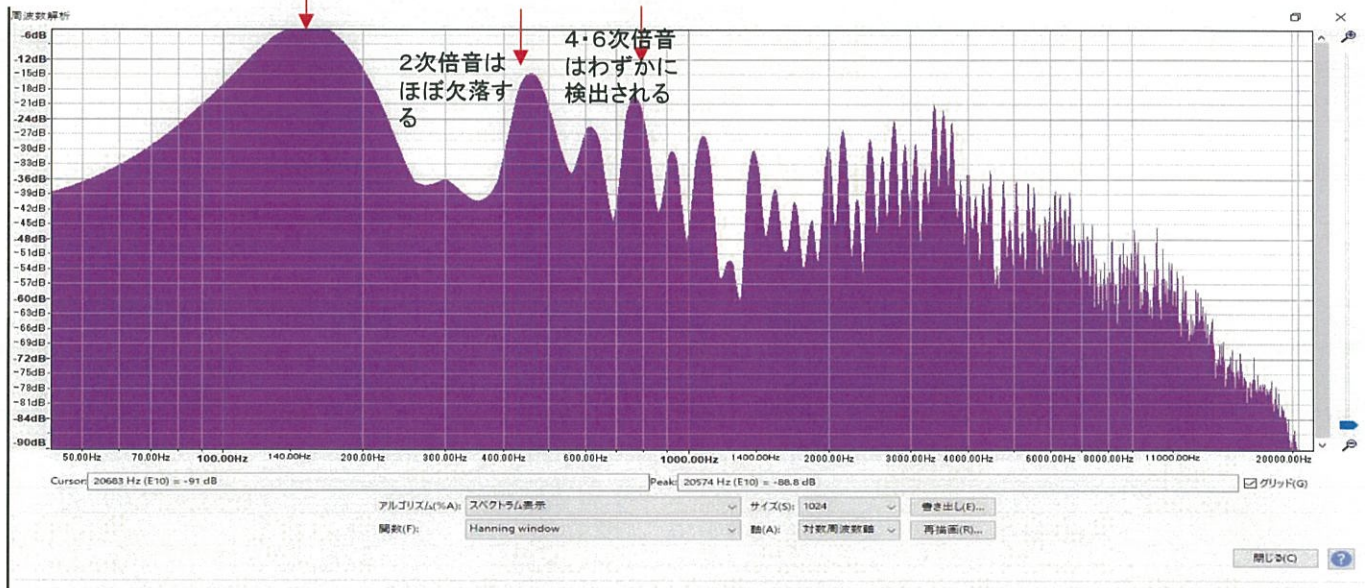
側管部分の開放端をテープで塞いだ状態で演奏・録音

<結果③・側管の閉塞による2次倍音の変化>

●オリジナルの状態の 266Hz 532Hz 798Hz
Venova®
1次倍音 2次倍音 3次倍音



●側管をテープで閉塞した
Venova®
147Hz 440Hz 733Hz
1次倍音 3次倍音 5次倍音



側管を塞ぐことで偶数次倍音、とくに2次倍音が消失・減少していることが判明した。音程もC4からD3(147Hz)まで低下した。偶然だが、音程はクラリネットの最低音と一致しており、音色もよく似ていた。

＜考察・まとめ＞

「クラリネットは円柱管の閉管楽器であり、その構造ゆえに奇数次の倍音しか生じない」、と記載している文献・教科書・参考書が殆どである。しかし、私は昨年度の実験で音域によっては偶数次倍音も豊富に含まれていることを偶然発見した。

今回の実験1では、低音域(レジスターホール閉)では奇数次倍音が、高音域(レジスターホール開)では奇数次倍音+偶数次倍音が含まれていると仮説をたて、周波数解析によって仮説を証明した。

実験2では偶数次倍音が生じる原因を検討するために、Kundtの共鳴管の実験を改変した手法を新たに考案し、自作の装置で検証した。わずか2mmのレジスターホールを模した孔を開けるだけで管内の共振の形態が明確に変化し、レジスターホール～開放端までの間で偶数次の倍音が新たに生じている可能性が示唆された。

実験3では、上記理論・考察の実証のため、実験2とは逆にもともと偶数次倍音が生じる様に側管を付けた構造をしているVenova®を用いて、あえて側管の孔をテープで塞ぐことで偶数次倍音が消失することを確認した。

実験全体を通じて、円柱管の閉管楽器において側孔や側管は偶数次倍音を生じるのに重要な働きを担っていることが確認された。

＜感想＞

一昨年度の秋からこのテーマに関して物理の参考書やインターネット上の物理・楽器の情報などを十分検討・集積、昨年度の研究の反省点をもとに、今年度の実験を再度考案し、施行した。

そもそもの研究の発端は、Venova®の音を聞いた時、「(より温かい)サキソフオンの様な音を円柱管の閉管楽器で実現しました」というメーカーの宣伝文句と異なり、むしろ(ちよとクールな)クラリネットの音(とくに高音側)とよく似ている、と感じたところにあった。今回の実験結果をよく見てみると、クラリネットの低音域(レジスターホール閉)と、Venova®の側孔を塞いだ音の周波数解析は非常によく似ている。また、クラリネットの高音域(レジスターホール開)と素のVenova®の周波数解析も非常によく似ている。最初の音を聞いたときの印象は間違っていなかったと安心した。

「片側閉管の円柱構造を持つクラリネットでは奇数次倍音のみが発生する」と断言している文献・ネット上の情報が大多数であるが、説明を単純化するためにあえて音域(高音域と低音域=レジスターホールの開閉)による事象の違いを省略しているのだろう。

昨年度の実験の段階では、ただ偶数次倍音が生じていることに新鮮な驚きを感じただけであったが、今回その偶数次倍音が生じる原因・機構にまで踏み込めたことで、昨年の実験結果がようやく「腑に落ちた」印象である。

＜今後の実験課題＞

今回は敢えて音孔の影響を排除するため、D3とA4のみ検討したが、一部の音孔のみ開放されている音の解析は検討課題として残る。クラリネットの運指は下から順番に開けていくような単純なものではない(不規則に途中の音孔一つが開放になったりする)。物理的・音響学的には非常に複雑だが今後の機会に検討したい。

通信販売ですべて透明なアクリルで制作されたクラリネットを見かけた。管の中の実際の共振をみるためのKundtの共鳴実験用に丁度良いかと思っただが、残念ながら自分にとってはとても高価で入手できなかった。ただし物理的・音響学的側面を実際の楽器に即して研究するには非常に好都合なものだと思なので、将来機会があればぜひ入手したい。

<謝辞>

- 文献6においてKundtの共鳴管の応用の手法について詳しくかつわかりやすく記載いただき、今回の実験中の新たな実験手法の考案の重要なヒントを教示頂いた沖縄県立美来工科高等学校 山城 富先生に大変感謝致します
- 矯正歯科治療中で管楽器が吹けない私に代わってクラリネットとVenova®を演奏してくれた父に感謝します。
- ヴァイオリン専門の私に木管楽器の面白さを教えてくれて、2年に渡りより深い研究を遂行するきっかけを作ってくれた器楽部の仲間達に感謝します。

<参考文献>

- 1.
親切的な物理 下巻
渡辺久夫著
正林書院 新課程版p33-34
- 2.
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
- 3.
Harmonic Analysis of the Soprano Clarinet
Kevin M. Kay
Physics from the College of William and Mary in Virginia,
https://www.wm.edu/as/physics/documents/seniorstheses/class2017theses/kay_kevin.pdf
- 4.
おもしろ楽器館 クラリネット
<http://www.e-digitalpark.com/music/instrument/clarinet.html>
- 5.
YAMAHA 楽器解体全書 クラリネット 運指表
https://www.yamaha.com/ja/musical_instrument_guide/common/images/clarinet/fingering.pdf
- 6.
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
- 7.
YAMAHAのニュースリリース Venova (2017/07/10)
https://www.yamaha.com/ja/news_release/2017/17071001/
- 8.
円錐ホーンの反共振周波数の球面波理論による解析—円錐型楽器の鳴る周波数
実吉純一
日本音響学会講演論文集 1977年秋季号 p65-66
- 9.
YAMAHA よくあるお問い合わせ Venova 運指を教えてください
http://yamaha.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/9587

<以下の文献は直接引用はありませんが実験方法を考案する際に参考にしました>

- 10.
楽器研究のすすめ—ストロー笛の音響学
足立整治 フラウンホーファー研究所
日本音響学会誌 72巻12号(2016年) pp.770-776
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jasj/72/12/72_770/_pdf-char/ja
- 11.
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>
- 12.
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
- 13.
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>
- 14.
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>
- 15.
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