

## 第15回「科学の芽」賞 応募用紙

受付番号 : SJ0021

応募部門 : 中学生部門

応募区分 : 個人応募

題名 : シングルリード楽器における吹奏音の研究2 ~管端形状による反射する振動の変化を解明する~

学校名 : 埼玉県 坂戸市立城山中学校

学年 : 3年生

代表者名 : 矢野祐奈

※ 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。

# シングルリード楽器における

## 吹奏音の研究 2

—管端形状による反射する振動の変化を解明する—



坂戸市立城山中学校

3年 矢野祐奈

## 1.はじめに

私は吹奏楽部に所属し、アルトサクスを吹いている。アルトサクスはマウスピースに一枚のリードを取り付けて吹く管楽器である。私はアルトサクスがどのような仕組みで音を出すのか知りたく、そして、それを理解することで、上達の手助けとしたいと思い昨年この研究を始めた。

昨年の研究では、ストローを用いて一枚のリードを持つ管楽器を再現し、以下のことが分かった<sup>※1</sup>

- ・リードの開閉速度が吹奏音の周波数を決定している。
- ・リードの開閉速度は管を通る空気の流速に依存する。
- ・リードは管端で反射して戻ってくる振動から影響を受けて、速度が変化する。

ストロー笛の形によって吹奏音の大きさが異なっていたことに疑問を持ち、共鳴について調べたいと思った。共鳴とは、リードで起きた振動が管の中を伝わり、管端で反射して戻り、それがいくつも重なり合い干渉し、大きな振動になることである<sup>※2</sup>。だから、共鳴を考えるうえで、管端で反射して戻ってくる振動を調べることが重要であると考えた。そこで、管の先端の形によって、その笛の周波数がどのように変化するかを調べることで、反射する振動の性質を考察した。

## 2.実験方法

### ストロー笛の作り方 (図 1)

#### ① マウスピースを作る

- ・ストローを斜め 40° に切り、吹き口を作る。ストローの短い部分の長さをマウスピースの長さ(L<sub>0</sub>)とする。
- ・セロハンテープを 2 枚張り合わせたものを吹き口よりも 1 mm 程度大きいサイズに切りリードにする。いつも同じ大きさのリードを作れるように型紙を用意しておく。
- ・リードをセロハンテープでストローに取り付ける。この時、リードの端が吹き口の先端にかぶり、すき間がないように貼る。

#### ② 取り付け管を作る

- ・様々な形の管(長さ L<sub>1</sub>)を作り、上記マウスピースにセロハンテープでつなげる。全体の笛の長さを L とする。

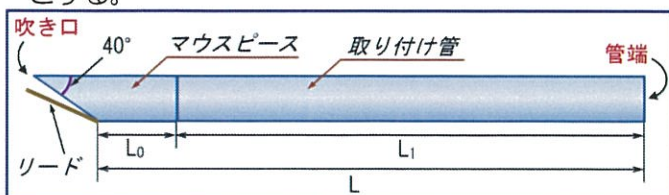


図 1 笛の構造

### ストロー笛の吹奏音の測定手順 (写真 1)

- ①ストローより 2 周り大きいサイズのゴム管に笛を入れ、空気が漏れないように間をゴム管でつなぐ。ゴム管のサイズが合わないときは、セロハンテープを巻いて調節する。リードがゴム管に触れないようにストローの位置を確認する。
- ②ゴム管に風船を取り付け、吹き口の反対側から空気入れを使って空気を入れる。φ180 mmの円をくりぬいた厚紙を風船に当てて、風船をいつも同じ大きさに膨らませられるようにする。
- ③風船がストロー笛に空気を送り込み、それによって鳴る音をオシロスコープのソフトに読み込み、波形と周波数スペクトルを測定する。音が鳴り出してから風船が縮みきるまでの時間(発音の継続時間)を測定し、始めから 2 割経過した時点での基音の周波数を記録する。(図 2)これにより、測定時の風船の大きさをそろえることができる。
- ④3 回音を鳴らして平均を計算する。

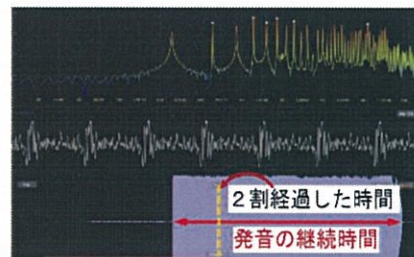


図 2 オシロスコープ画面

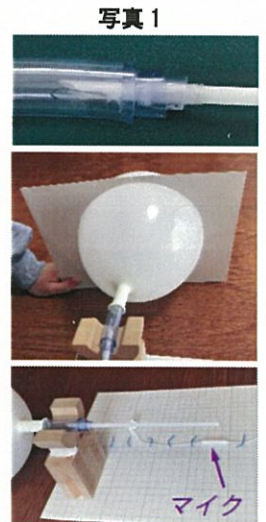


写真 1

## 3.予備実験 一風船の圧力測定一

### 1) 実験方法 (図 3, 写真 2)

#### ① マノメーターを作る

内径 5 mm×3mのゴム管に水を半分入れる。壁にセロハンテープでU字型に張り付ける。

#### ② 圧力差を測る

マノメーターのゴム管に膨らました風船をつなげる。水面の位置を記録し、水面の高さの差を測定する。アルトリコーダーやアルトサクスを吹くときの強さで息を吹き込み、同じように水面の高さの差を測定する。

### 2) 結果 (図 4)

リードにかかる圧力を次式より計算した。

$$P_1 - P_2 = \Delta H (\rho_1 - \rho_2) g^{※3}$$

$\rho_1$ : 水の密度 997kg/m<sup>3</sup>

$\rho_2$ : 空気の密度 1.3kg/m<sup>3</sup>

$g$ : 重力加速度 9.8m/s<sup>2</sup>

風船が送り出す空気の圧力は、アルトサクスを吹くときと同程度だった。



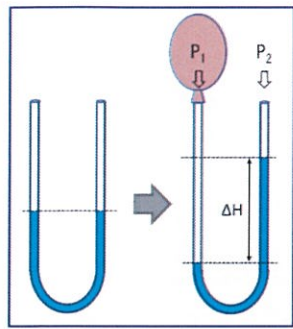


図3  
マンメーター

写真2

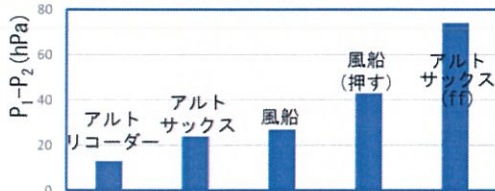


図4 圧力比較

## 4. 管の広がり方と管端で反射する振動の関係

サクスは先端ほど径が太くなるように作られている。振動が反射するための形として、管の広がりには限界があるのではないかと考えた。そこで、管の広がりを徐々に大きくして吹奏音の変化を調べ、限界を探った。先が広がった管は形を作りやすい紙を用いた。

### 4-1 紙筒を付けたストロー笛の吹奏音を測定する

#### 4-1-1 波形と周波数のグラフ

##### 1) ストロー笛の条件

A: マウスピース→ストロー 取り付け管→紙(図5)

B: アルトサクス(B♭4)

##### 2) 結果

作成したストロー笛はアルトサクスの波形と同じように繰り返しの波があり、周波数スペクトルからは多くの倍音が観察できた。(表1)

##### 3) 考察

紙筒を管として用いた笛はその波形、周波数スペクトルにおいて、楽器と似た特徴を示している。このことから、紙筒を用いた笛は楽器とみなすことができ、その結果から管楽器の性質を見出せると考えた。

#### 4-1-2 紙筒の長さで周波数の関係

##### 1) ストロー笛の条件

4-1-1Aの笛を20mmずつ短くして測定した。

##### 2) 結果

笛の長さが短くなるにつれて鳴る音の周波数が大きくなった。この性質は昨年行ったストロー笛での結果と一致していた。(図6)

##### 3) 考察

測定した周波数変化が、理論的な管楽器の長さで周波数の関係<sup>\*4</sup>と類似していたので、紙筒やストローで作成した笛は共鳴管としての役割を果たしていると考えた。

## 4-2 管の広がり方と管端で反射する振動の関係

### 4-2-1 管の広がり方と周波数の関係

#### 1) ストロー笛の条件 (写真3, 図7)

マウスピース→ストロー 取り付け管→円錐型(紙筒)

#### 2) 結果 (表2, 図8)

先端が広がっている笛ほど周波数が大きくなった。管の直径が3倍を超す大きさに広がると、周波数の増加は止まり、同じ高さの音しか鳴らなくなった。

#### 3) 考察

管の広がりが大きい程、管を通る空気の流速が速くなるので、周波数が大きくなることは昨年の研究ですでに分かっている。(リードの開閉速度は管を通る空気の流速に依存する。)

管の広がりがある程度大きくなり、一定の音で鳴るようになるのは、管の内部での振動が管端まで到達せずに途中で戻っているからだと考えられる。また、管端の直径が小さい場合の結果と比べると、ばらつきがなく一定の周波数でのみ鳴っているので、振動の反射が起きやすい場所があると考えられる。

さらに、風船が縮むまでの時間から管を通る空気の流速を予想することができる。同じ周波数(振動数)で鳴っている笛は、風船が縮むまでの時間が短いほど空気の流速は速くなる。管の広がりが限界に達しているφ17とφ19で空気の流速が異なっている。だから、振動の反射が起りやすい位置は流速が変化しても変わらないのではないかと考えられる。これを確かめるために、空気の流速(圧力)を変化させて実験を行った。

### 4-2-2 管を通る空気の流速と管端で反射する振動の関係

#### 1) ストロー笛の条件

4-2-1と同じ形

風船を手で押して空気を送り込む圧力を高くし、管を通る空気の流速を速くする。(写真4)

#### 2) 結果 (表3, 図9)

先端が広がっている笛ほど周波数が大きくなり、管の広がりが限界になると周波数の増加が止まる傾向は、流速が変化しても変わらなかった。流速を速くすると周波数が全体的に大きくなったが、管の広がりが限界になるとどちらも同じ周波数で鳴った。

#### 3) 考察

空気を送り込む圧力を高くし、管を通る空気の流速を速くするとその笛の周波数が大きくなることは昨年の研究と同様である。しかし、この実験により、空気の流速を速くしても、振動の反射が起きやすい場所があ



ることが分かり、その起こりやすい位置は流速に依存しないと考えられる。

### 4-2-3 管の太さと管端で反射する振動の関係

#### 1) ストロー笛の条件

管径φ6mm それ以外は4-2-1と同じ

#### 2) 結果 (表4, 図10)

管が太くなくても、先端が広がっている笛ほど周波数が大きくなり、ある程度管の先端が広がってくると、一定の音で鳴る現象は同じだった。

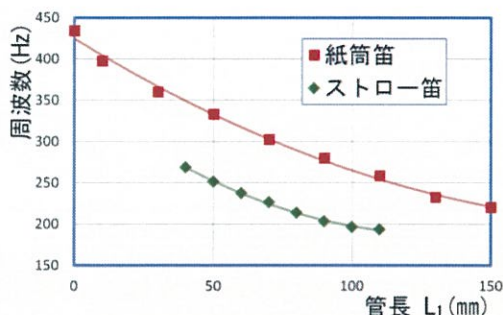


図6 紙筒の長さとの周波数の関係

#### 写真3

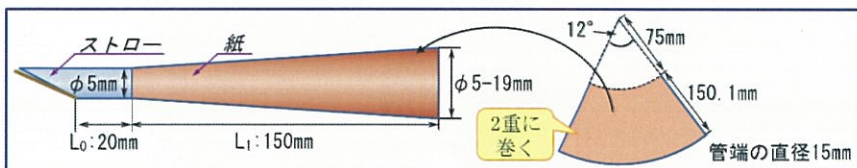


図7 円錐型ストロー笛

表2 管端の直径と周波数の関係

| 管端の直径(mm)     | 5   | 7     | 9     | 11    | 13    | 15    | 17    | 19    |
|---------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 (Hz)      | 1回目 | 220.8 | 246.9 | 263.2 | 275.5 | 289.2 | 302.4 | 312.9 |
|               | 2回目 | 209.9 | 251.0 | 270.5 | 273.2 | 286.2 | 302.4 | 312.9 |
|               | 3回目 | 229.8 | 250.3 | 252.5 | 269.2 | 280.5 | 300.3 | 312.9 |
|               | 平均  | 220.2 | 249.4 | 262.1 | 272.6 | 285.3 | 301.7 | 312.9 |
| 風船が縮むまでの時間(秒) | 1回目 | 32.1  | 33.9  | 24.8  | 18.1  | 16.5  | 11.6  | 10.5  |
|               | 2回目 | 30.3  | 34.8  | 24.2  | 17.4  | 17.0  | 11.4  | 10.5  |
|               | 3回目 | 35.5  | 44.0  | 23.4  | 16.4  | 16.2  | 10.9  | 11.5  |
|               | 平均  | 32.6  | 37.6  | 24.1  | 17.3  | 16.6  | 11.3  | 10.8  |

表3 流速を変えたときの管端の径と周波数の関係

| 管端の直径(mm) | 5   | 7     | 9     | 11    | 13    | 15    | 17    | 19    |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 周波数 (Hz)  | 1回目 | 261.1 | 269.2 | 292.1 | 302.4 | 300.3 | 312.9 | 310.2 |
|           | 2回目 | 258.4 | 280.8 | 281.3 | 300.3 | 300.3 | 312.9 | 317.6 |
|           | 3回目 | 253.3 | 269.0 | 273.5 | 297.5 | 311.0 | 312.9 | 312.9 |
|           | 平均  | 257.6 | 273.0 | 282.3 | 300.1 | 303.9 | 312.9 | 313.5 |

表4 管径を変えたとき(φ6)の管端の径と周波数の関係

| 管端の直径(mm) | 6   | 8     | 10    | 12    | 14    | 16    | 18    | 20    | 22 |
|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 周波数 (Hz)  | 1回目 | 84.4  | 133.2 | 210.2 | 231.3 | 257.9 | 275.9 | 283.6 |    |
|           | 2回目 | 92.8  | 131.6 | 225.3 | 242.5 | 262.6 | 268.0 | 285.3 |    |
|           | 3回目 | 109.4 | 136.9 | 232.2 | 245.0 | 266.3 | 266.4 | 285.5 |    |
|           | 平均  | 95.5  | 133.9 | 222.6 | 239.6 | 262.3 | 270.1 | 284.8 |    |

### 3) 考察

管の太さを変えるとリードの大きさが変わるので、管の長さと同じでも周波数は異なる。(昨年の研究より) そのため、振動の反射が起きやすい位置の比較はできなかったが、管端の広がりは管の直径の3倍程度が限界であることが分かった。

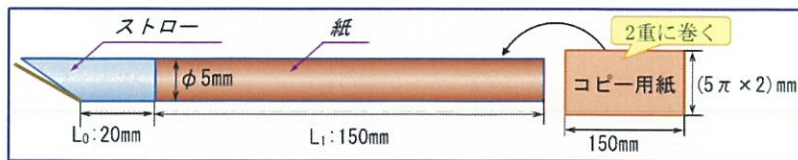


図5 ストロー笛A

表1 波形と周波数スペクトル

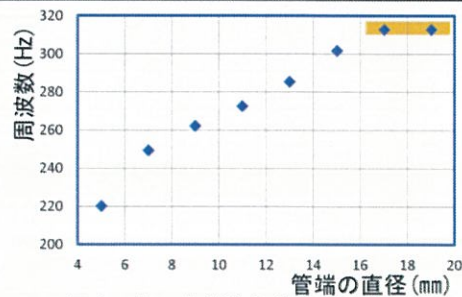
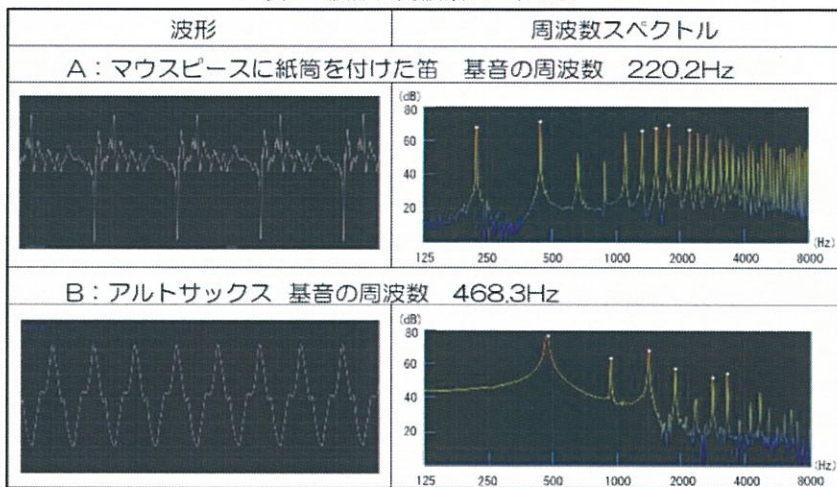


図8 管の広がり具合と周波数の関係

#### 写真4

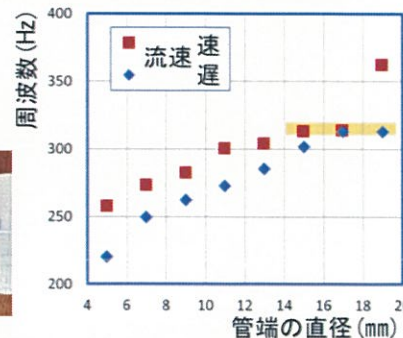


図9 流速差による管の広がり具合と周波数の関係の違い

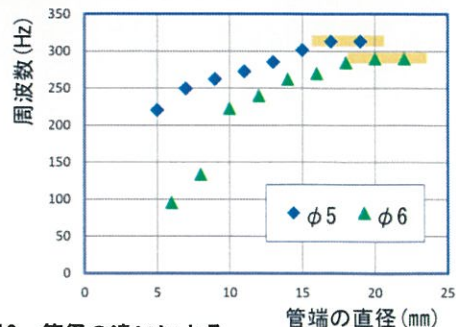


図10 管径の違いによる管の広がり具合と周波数の関係の変化



## 5. トーンホール(音孔)と

### 管端で反射する振動の関係

管楽器は管の途中に穴を開けることで、共鳴する管の長さを変え、発する音の周波数を変化させている。では、どのくらいの大きさの穴を開ければ振動は反射するのだろうか。穴の大きさには法則があると考え、ストロー笛に穴を開けて周波数を調べた。

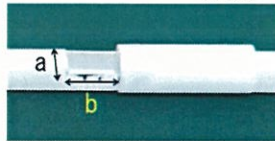
#### 5-1 トーンホールの大きさと周波数の関係

##### 1) ストロー笛の条件 (図 11, 写真 5)

写真 5

A:  $\phi 6\text{ mm}$  B:  $\phi 5\text{ mm}$

ストローに穴を  $4\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  の大きさで開けておき、ストローを切ったものを穴の上からセロハンテープで張りつけることで穴の大きさ  $b$  を調整する。穴の縦の長さ  $a$  を調節するときは、直接セロハンテープを張り付けた。



##### 2) 結果 (表 5)

穴の大きさによって鳴る音の周波数が異なっていた。穴が小さくなると、音を鳴らすことはできなくなり、さらに穴を小さくすると、穴が開いていない笛の周波数に近づいていった。

##### 3) 考察

穴が開いている笛と開いていない笛で音の高さの差が大きくなければ、音階がつけられない。よってトーンホールは、 $\phi 6\text{ mm}$  の笛の場合、 $3\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  ( $12\text{ mm}^2$ ) 程度、 $\phi 5\text{ mm}$  の笛においては  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$  ( $9\text{ mm}^2$ ) 程度は開けなければいけないということが分かった。これにより、管が太い方がトーンホールは大きいものが必要であることが分かる。

#### 5-2 トーンホールの位置と周波数の関係

##### 1) ストロー笛の条件 (図 12)

トーンホールの位置を管端に近づけた。

A:  $\phi 6\text{ mm}$  B:  $\phi 5\text{ mm}$

##### 2) 結果 (図 13)

穴が小さくなるにつれて周波数は小さくなり、穴が開いていない笛と同じ周波数に近づいていった。穴をどんなに小さくしていても、鳴らすことができ、穴が開いていない笛よりも小さい周波数の音になることもなかった。

##### 3) 考察

管端に近い位置にあるトーンホールは特に大きさに制限はないが、穴の位置が重ならないように鳴らしたい音と穴の大きさ、位置を調節する必要があることが分かった。

#### 5-3 トーンホールを持つ笛における発音の機構

トーンホールの大きさや位置を変えると発生する音に違いがあった。この違いがなぜ起こるのかを解明するために、周波数スペクトルをくわしく調べた。すると、鳴りだした直後の周波数スペクトルに違いがあることを発見した。

5-1 のトーンホールがマウスピースに近い笛 ( $\phi 6\text{ mm}$ , 図 11) で得られた音の違いを表 6 にまとめた。この中で、周波数が異なっていた笛 4 つについて、表 7 に示した周波数スペクトルの違いから、それぞれの笛の発音機構を考えた。

##### ① 小さい穴を持つ笛

穴がない笛の周波数と近い音が鳴っている。→穴の位置で振動の反射が起こらずに、管端でのみ反射している。

##### ② 大きい穴を持つ笛

穴の位置で切り落とした長さの笛の周波数に近い音が鳴っている。→穴の位置でのみ振動の反射が起きている。

##### ③ 中くらいの大きさの穴を持つ笛

2 種類の基音が鳴り始め、その後 2 つの中間の音が鳴っている。→振動の反射は、穴、管端の両方で起きている。穴の位置で切り落とした長さの笛の音に近いので穴からの反射のほうが多い。

##### ④ 音が途中で止まってしまった笛

2 種類の基音の差が大きく、高い音が鳴り、リードの動く範囲が狭くなる。(写真 6) → ③ の笛よりも穴が小さいので、管端からの反射が増える。そのことで、2 点からの反射による音がよりはっきりと表れている。さらに、リードの動作範囲が狭くなることで音が全体的に高くなっている。

音を鳴らしている間、穴と管端、両方から空気が出ていた。また、穴が大きいときは穴の所に、穴が小さいときは管端側に指をおくとびりびりとした振動を感じた。これにより、トーンホールの大きさによって管内の振動がどこで反射するのかが決まり、反射する場所が定まらないと、音が安定しなかったり、鳴らしぶりかたりすると考えられる。考察した反射位置の図を表 7 右に付け加えた。

トーンホールを管端に近づけた笛 (図 12) では、音の鳴り始めで 2 種類の基音は発生しなかった。これは、振動が反射する位置が近いことで、両者からの反射がはっきり分かれていないことが理由だと考えられる。



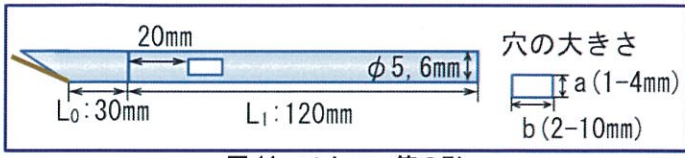


図11 ストロー笛の形

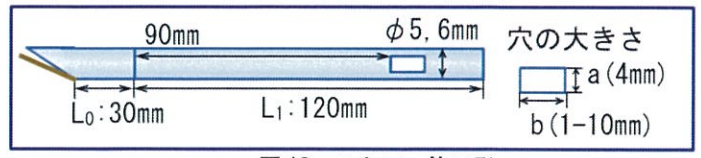


図12 ストロー笛の形

A: φ6mm

表5 穴の大きさと周波数の関係

| 穴の大きさa×b(mm) | なし      | 1×2     | 2×1   | 3×1     | 1×3   | 2×2   | 1×4     | 4×1     | 2×3     | 3×2     |
|--------------|---------|---------|-------|---------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 平均周波数 (Hz)   | 243.6   | 240.4   | 238.3 | 236.3   | 232.9 | 232.7 | 途中で止まった | 途中で止まった | 途中で止まった | 途中で止まった |
| 穴の大きさ(mm)    | 2×4     | 4×2     | 3×3   | 4×3     | 3×4   | 4×4   | 4×6     | 4×8     | 4×10    |         |
| 平均周波数 (Hz)   | 途中で止まった | 途中で止まった | 鳴らない  | 途中で止まった | 302.1 | ※     | 294.5   | 317.7   | 340.5   |         |

B: φ5mm

※安定した音が鳴らなかった

| 穴の大きさa×b(mm) | なし    | 2×3   | 3×2   | 4×2   | 2×4   | 3×3   | 4×3   |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均周波数 (Hz)   | 250.9 | 鳴らない  | 鳴らない  | 鳴らない  | ※     | 327.9 | 326.8 |
| 穴の大きさ(mm)    | 3×4   | 4×4   | 3×6   | 4×6   | 4×8   | 4×10  |       |
| 平均周波数 (Hz)   | 331.3 | 349.9 | 343.7 | 342.8 | 340.5 | 341.2 |       |

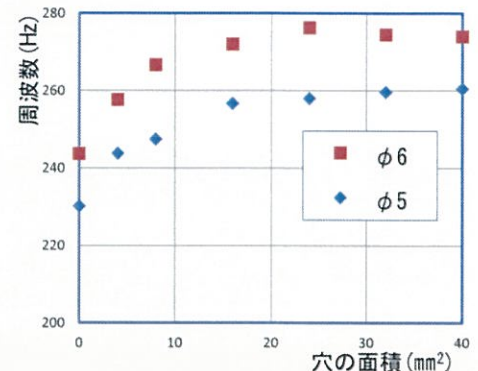


図13 穴の大きさと周波数の関係

写真6 リードの動作範囲

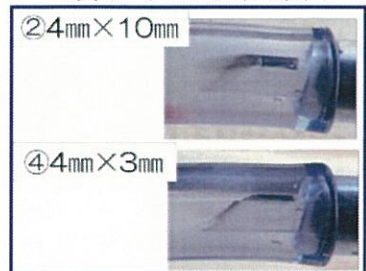
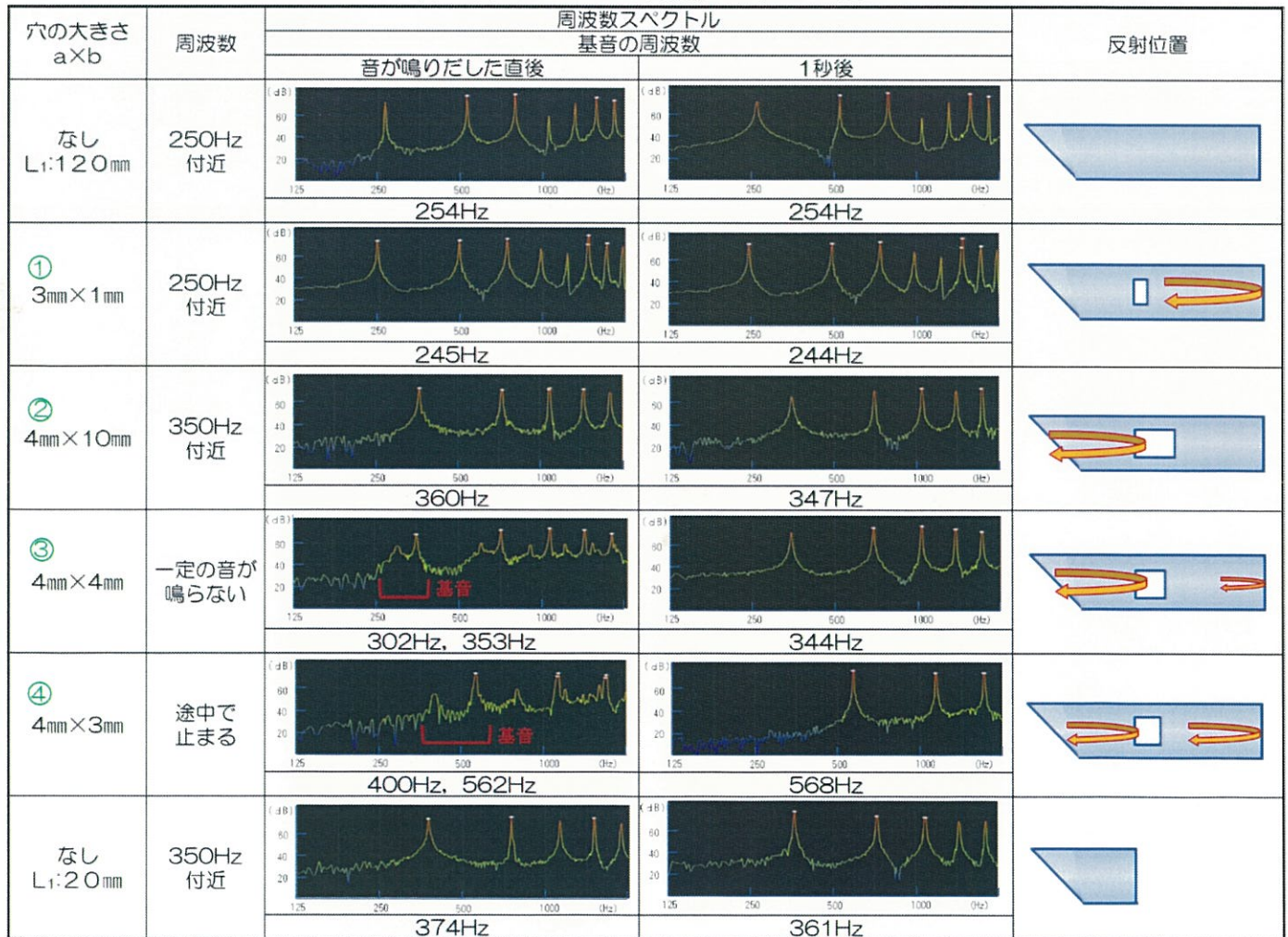


表6 穴の大きさによる音の違い

| 穴の大きさ A \ B (mm) | 1      | 2 | 3 | 4      | 6      | 8 | 10     |
|------------------|--------|---|---|--------|--------|---|--------|
| 1                |        | ▲ | ▲ | ×      |        |   |        |
| 2                | ▲      | ▲ | × | ×      |        |   |        |
| 3                | ▲<br>① | × | × | ●      |        |   |        |
| 4                | ×      | × | × | ●<br>④ | ●<br>③ | ● | ●<br>② |

- ▲ : 250Hz以下で鳴った
- × : 止まった又は鳴らなかった
- : 350Hz付近で鳴った
- : 一定の音が鳴らなかった

表7 穴の大きさによる周波数スペクトルの違い





## 6. 管端で反射する波の観察

ここまで管端の形状による振動の反射位置の変化について調べてきた。では、管端で振動の反射はどのように起きているのだろうか。反射を観察する方法を考えたい。

### 6-1 水面波の観察

#### 1) 実験方法 (図 14)

- ①バットに水を 1 cm 程入れる。積み木を 0.8 cm のすき間を開けならべる。食紅を溶かした液を一滴落とす。
- ②下敷きを揺らして波を発生させる。細い通路を抜けた後の波の様子を観察する。部屋を暗くして、ライトを水面に当てると波が観察しやすい。
- ③積み木のすき間を 2.8 cm に変えて同じように観察する。

#### 2) 結果 (写真 7)

積み木の通路を通った波は、出口で反射して戻って

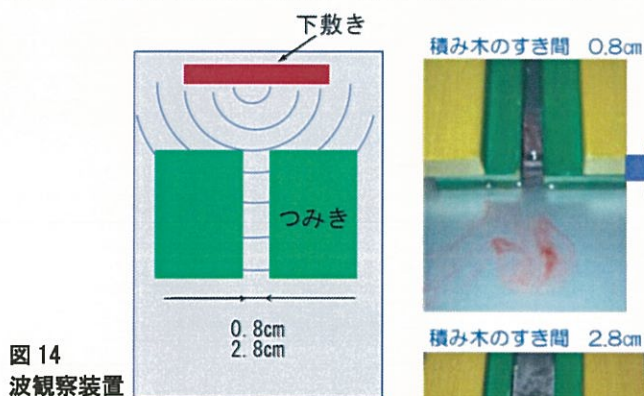


図 14  
波観察装置

写真 8



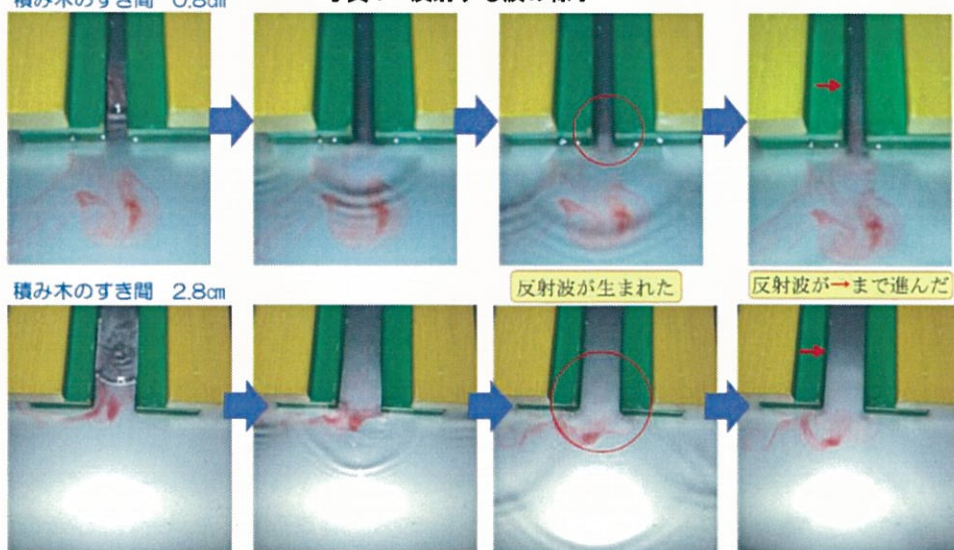
いく波とそのまま前に進む波に分かれるのが見えた。通路のすき間が広がると波が反射するまでの時間が遅くなっていた。

#### 3) 考察

波は細い通路を抜けて広い場所に出ると、そこにあった水にぶつかって衝撃がおき、一部の波は反射して通路を戻っていくことが分かった。また、通路が広がると衝撃が大きくなり、波が戻っていくまでに時間がかかることが分かった。この実験により、笛の管端でも同じことが起こっていると予想される。また、通路が太い方の波が反射するまで時間がかかったことは、管楽器において太い管の開口端補正<sup>※2</sup>が大きくなる原因につながるのではないかと考えられる。

波が反射した後、出口付近の水が渦を巻いていた。(写真 8) 波がぶつかったときに外側の水が押されてこのように動くのかもしれない。

写真 7 反射する波の様子



### 6-2 気柱振動の観察

気柱の共鳴状態を観察する手段としてクントの実験が知られている。<sup>※5</sup>ここでは共鳴条件を確認し、空気の流れを観察した。

#### 6-2-1 クントの実験装置を作る

##### 1) 実験方法 (図 15, 写真 9)

- ①ペットボトルをおわん型に切る。プラスチックの管 ( $\phi 24 \times 380$  mm) をセロテープでつなぐ。さらにスピーカーをつなぎ、すき間を練り消しゴムで埋める。
- ②筒の中に発砲スチロールを崩してビーズにしたものを 1/3 程入れる。出口をガーゼで閉じる。
- ③200~500Hz の間で 5Hz ずつ増加させた純音をスピーカーから流し、筒中の発砲スチロールを観察する。

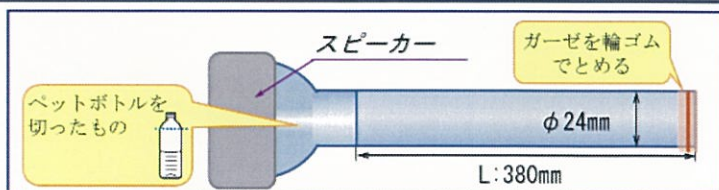


図 15 クントの実験装置

写真 9



##### 2) 結果

音を鳴らすと、中の発砲スチロールのビーズがはねて踊りだした。ビーズが混んでいるところができ、移動していた。425Hz で写真 10 のような状態になって、安定した。

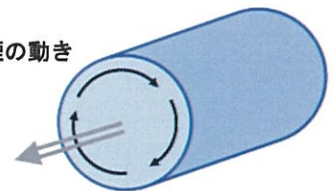


写真 10



開管の固有振動になっている

図 18 管端の煙の動き



3) 考察

図 16 定常波の形状パターン

管内で共鳴が起こっている様子が観察できた。ピースの集まり方から定常波の形状パターンは腹、節、腹(図 16)になっているので、両端が開放されている開管になっていることが分かる。スピーカーと筒の間を練り消しゴムでふさいでいるため、閉口端になるのではないかと思っていた。しかし、プラスチックの管につないだペットボトルの開き具合が 4. で分かった限界円錐管よりも開いていたため、開口端になったと考えられる。また、共鳴振動数を 425Hz として管長を計算すると、403 mm だった。

管長(m)  $L = \frac{V}{2 \times f}$  V: 音速 342.4m/s(18°C) f: 共鳴周波数 425Hz

これにより、プラスチックの管につなげたペットボトルの口部分 23 mm のところまでで、振動が反射していることが分かった。

6-2-2 共鳴端での空気の流れを観察する

1) 実験方法 (図 17)

クントの実験装置の管端にドライアイス置き、それに熱湯をかけ、煙を発生させる。共鳴周波数 425Hz を鳴らしたときの煙の様子から空気の流れを観察する。

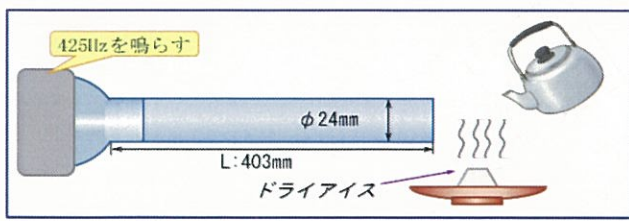
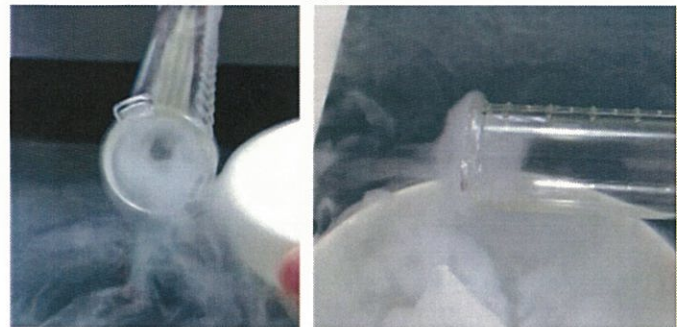


図 17 クントの実験装置

2) 結果

ドライアイスの煙が管端で縁をぐるぐると回っているのが見えた。(写真 11, 図 18) 巻き方はドライアイスを置く位置により変化した。(左回り, 右回りもあり)

写真 11



3) 考察

共鳴が起きている管端では、管内の振動の一部が管の外側の空気に衝突して跳ね返る。また一部の振動はそのまま真っすぐ管を出ていく。このことが管端付近の空気を動かし、渦を巻くように管の周りを回って真っすぐ噴射するように動いていると考えられる。渦を巻いている様子は水面波の結果と類似しているので、水と空気と同じことが起こっていると言える。

6-3 トーンホールの存在と空気の流れの変化

トーンホールを持つ笛では穴の大きさによって音が鳴りづらくなることがあった。このとき、管内で何が起こっていたのかを解明するために、トーンホールを付けた管でクントの実験を行い空気の流れを観察した。

管に開ける穴の大きさを 5. で得られた最適トーンホールサイズを参考にして計算した。(表 8)

表 8 最適トーンホールサイズ

| ストロー笛の管径 | ストロー笛の断面積            | 最適トーンホール面積                    | 管の断面積に対する最適トーンホール面積の割合 |
|----------|----------------------|-------------------------------|------------------------|
| 5mm      | 19.6mm <sup>2</sup>  | 9mm <sup>2</sup>              | 46%                    |
| 6mm      | 28.3mm <sup>2</sup>  | 12mm <sup>2</sup>             | 42%                    |
| 24mm     | 452.2mm <sup>2</sup> | 203.5mm <sup>2</sup> → φ 16mm | 45%                    |

6-3-1 発砲スチロールピースを用いた実験

1) 実験方法 (図 19)

- ① ペットボトルから φ 16mm の穴をあけた板を切り出し、それを丸めて φ 24mm の筒を作る。
- ② 6-2 で使用したプラスチックの筒につなげる。
- ③ スピーカーから 403Hz の音を流し、発砲スチロールピースの動きを観察する。プラスチック板を用いて、穴をふさいでいき、ピースの変化を観察する。

共鳴周波数  $f = \frac{V}{2 \times L}$  L: 管長 0.433m f = 403Hz V: 音速 348.8m/s (29°C)

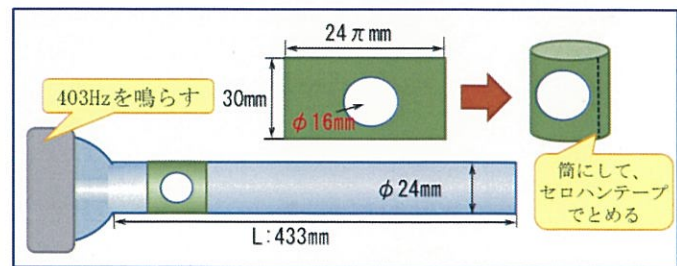


図 19 クントの実験装置

2) 結果

トーンホールを閉め穴が無い状態では、管内で共鳴が起こり節と腹が観察できた。トーンホールを開けてい



くと、共振して震えていた管端付近のビーズがだんだんと動かなくなっていった。(写真 12)

また、トーンホール付近ではビーズが常に速く動いていた。特にトーンホールを少しだけ閉じたときが激しかった。(写真 13)

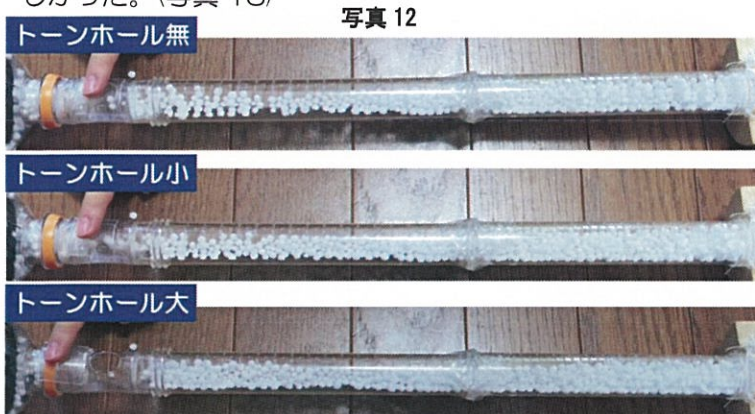


写真 12



写真 13

### 3) 考察

管端付近のビーズの震えの差が、この位置での振動の反射の量を表していると考えられ、トーンホールの大きさが振動の反射位置を決めていると結論付けた 5. とよく一致している。

また、トーンホールを少し閉じた状態でホール付近のビーズが特に激しく動いたことで、この状態の笛は管内の空気の流れが激しくなっているのではないかと考えた。これを確かめるためにドライアイスを用いて観察した。

写真 14



#### 6-3-2 ドライアイスを用いた実験

##### 1) 実験方法

6-3-1 の実験装置を使い、ドライアイスの煙でトーンホールの大きさによる空気の流れの変化を観察する。  
ドライアイスの位置：①管端 ②トーンホールの外側 ③トーンホールの内側 ドライアイスのかけらを入れる(写真 14)

写真 15

煙が管端から ↓ まで吸い込まれている

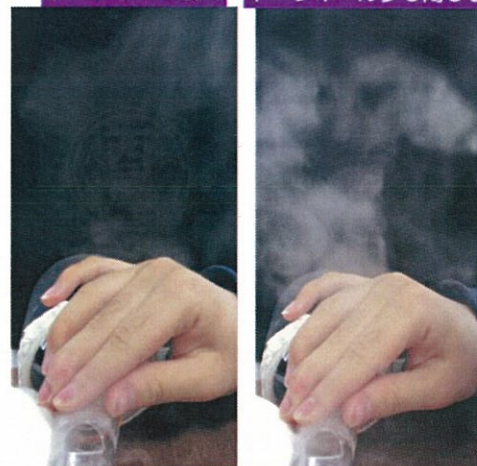


## 2) 結果

- ①穴が小さくなるにつれて、管端から空気がより多く吸い込まれていた。(写真 15)
- ②トーンホールを少しだけ閉じた状態では穴の位置からの空気の出入りが激しくなっていた。(写真 16)
- ③トーンホール付近の管内部では穴を少しだけ閉じたときだけ、空気が速く流れていた。

トーンホール最大 トーンホール少し閉じる

写真 16



## 3) 考察

管端からの空気の流れの差は、ビーズの震えの差と一致していた。このことから振動の反射の量の違いを裏付けることができた。

トーンホールの大きさによって、穴からの激しい空気の出入りが観察でき、さらに管内部でも空気が速く流れていた。この時のトーンホールの大きさが 5. においてうまく鳴らなかった笛に近いとすれば、この激しい空気の流れが鳴らなかった原因であると考えられる。管内を往復するはずの振動が、激しい空気の流れによって、リードに到達せずに管外に出て行ってしまっているのではないかと思われる。

## 7. アルトサクスの形と

### 管端で反射する振動の関係

これまでに分かった管端で反射する振動の性質と実際の楽器には係わりがあるかもしれないと考え、アルトサクスの形と吹奏音を測定した。

#### 7-1 アルトサクスの管径とトーンホールの大きさ

アルトサクスの本体の大きさ(管長と管径)とトーンホールの直径、および位置をメジャーや針金を用いて測った。(測定位置:図 20, 測定結果:表 9, 10, 写真 18) 管の円周から直径を計算し、管の長さに対する直径のグラフ(図 21)を書き近似直線を求めた。

近似式 管の直径:  $y = 0.0447x + 28$   $x$ : 管長  
トーンホール位置の管長を上記近似式に代入し、管の直径を計算した。(表 10 右) 管の太さに対するトーンホ



ールの大きさのグラフ(図 22)を書いたところ、管が太くなるにつれて、トーンホールが大きくなり、ストロー笛での結果と一致することが分かった。

7-2 アルトサックスのトーンホールと吹奏音の関係

アルトサックスは複雑な構造をしている。一つのキーを押すだけで複数のトーンホールを閉じることができる。その中で、一つのトーンホールだけ開け、その他はすべて閉じることができる場所を探した。図 22 中に赤丸で示した 3 点での音をオシロスコープで測定した。

測定した 3 点での基音の周波数に違いがあった。(表 11)基音が 1 つの周波数で構成されている場合と 2 つ以上の周波数で構成されている場合とがあった。後者はきれいな音を鳴らすことができなかった。

この基音に複数の周波数のピークがみられる形は、ストロー笛がうまく鳴らなかった時とよく似ている。ストロー笛の場合はトーンホールの大きさが十分ではなかった。サクスの場合も管径に対するトーンホールの大きさのグラフ(図 22)より同様のことが考えられる。

また、ストロー笛では管端とトーンホールの両方からの反射が起こっていると考えた。サクスの場合も同様のことが起こっていると予想される。反射位置を考えるために、すべてのトーンホールを閉じた音とマウスピースに近い部分だけ閉じた音 2 点の計 3 点の周波数を測定した。(表 12)この表から予想される反射位置を表 11 右につけ加えた。これにより、アルトサクスにおいてもストロー笛のように管端とトーンホール両方からの反射があることが分かった。

写真 17



管の円周を測っているところ

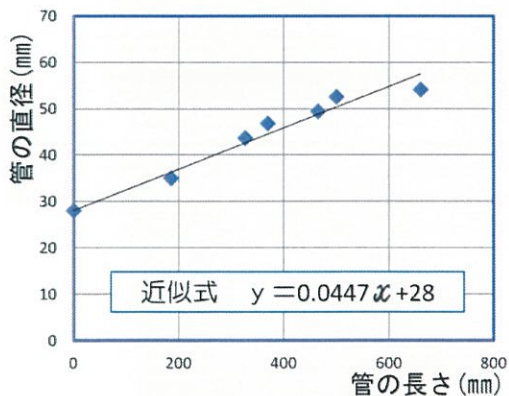


図 21 アルトサックスの形

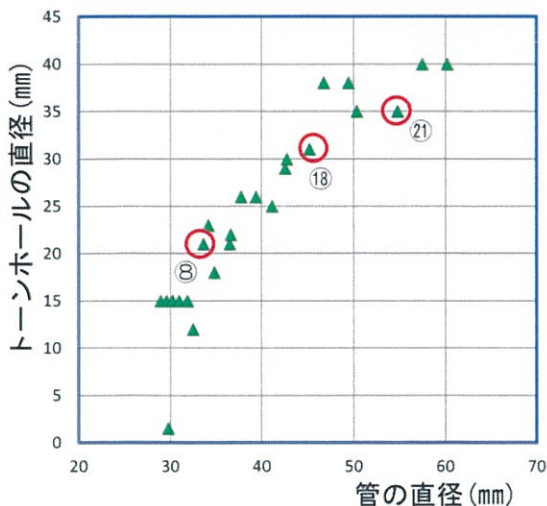


図 22 管径に対するトーンホールの大きさ

表 10 トーンホールサイズ

| トーンホール<br>番号 | 管      |        |
|--------------|--------|--------|
|              | 直径(mm) | 長さ(mm) |
| ①            | 15     | 20     |
| ②            | 15     | 35     |
| ③            | 1.5    | 40     |
| ④            | 15     | 50     |
| ⑤            | 15     | 67     |
| ⑥            | 15     | 87     |
| ⑦            | 12     | 100    |
| ⑧            | 21     | 125    |
| ⑨            | 23     | 138    |
| ⑩            | 18     | 152    |
| ⑪            | 21     | 190    |
| ⑫            | 22     | 193    |
| ⑬            | 26     | 218    |
| ⑭            | 26     | 255    |
| ⑮            | 25     | 293    |
| ⑯            | 29     | 325    |
| ⑰            | 30     | 330    |
| ⑱            | 31     | 385    |
| ⑲            | 38     | 420    |
| ⑳            | 38     | 480    |
| ㉑            | 35     | 500    |
| ㉒            | 35     | 600    |
| ㉓            | 40     | 660    |
| ㉔            | 40     | 720    |

計算値

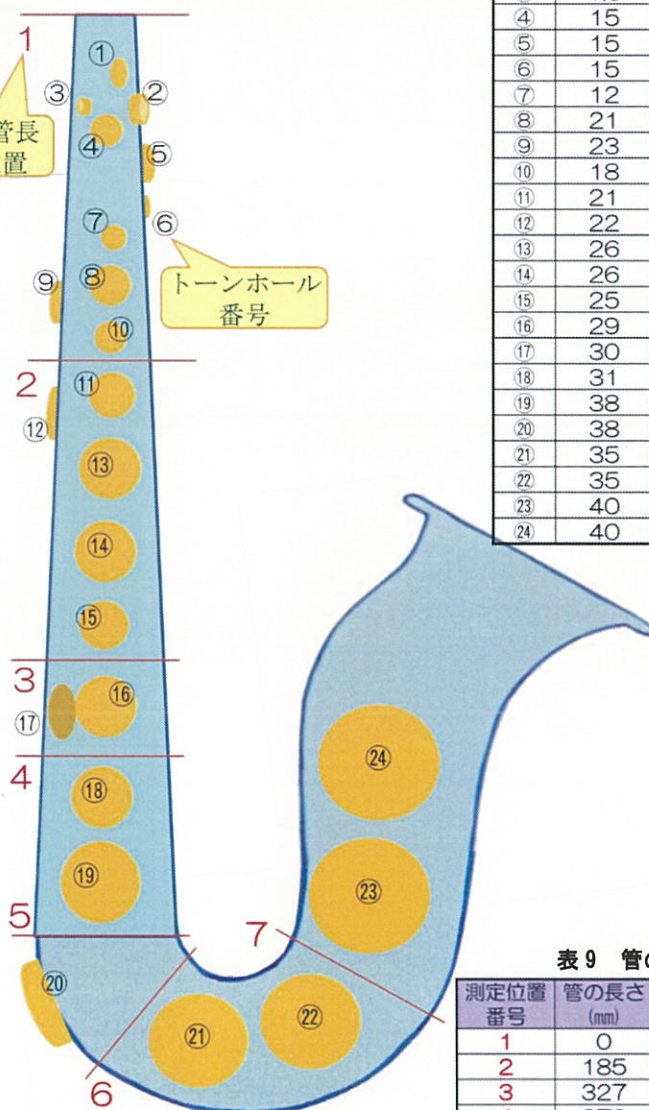


図 20 アルトサックスのサイズ測定位置

表 9 管のサイズ 計算値

| 測定位置<br>番号 | 管の長さ<br>(mm) | 管の円周<br>(mm) | 管の直径<br>(mm) |
|------------|--------------|--------------|--------------|
| 1          | 0            | -            | 28           |
| 2          | 185          | 110          | 35.0         |
| 3          | 327          | 137          | 43.6         |
| 4          | 370          | 147          | 46.8         |
| 5          | 465          | 155          | 49.4         |
| 6          | 500          | 165          | 52.5         |
| 7          | 660          | 170          | 54.1         |



表 11 トーンホールを1つだけ開けたときの吹奏音


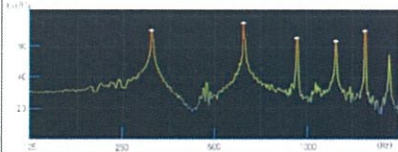


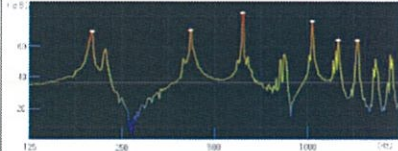
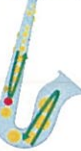

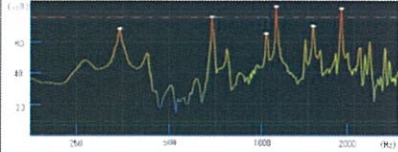




| トーンホール番号                                                                               | 基音の周波数           | 周波数スペクトル                                                                          | 予想される反射位置                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑧<br> | 310 Hz<br>●だけ開ける |  | きれいな音<br> |
| ⑩<br> | 198 Hz<br>221 Hz |  | 汚い音<br>   |
| ⑪<br> | 172 Hz<br>212 Hz |  | 汚い音<br>   |

表 12 アルトサックスの吹奏音

| 音名 | 運指                                                                                  | 基音の周波数        |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| C# |  | 139Hz<br>●開ける |
| G# |  | 208Hz         |
| F  |  | 175Hz         |

## 8. 研究のまとめ

先端の形状が異なる笛を作成し、その吹奏音を測定することで以下のことが分かった。

- ①管が広がり過ぎると、振動の反射は管端ではなく管の中で起こる。反射が起こる位置は、管を通る空気の流速に影響されない。(4章)
- ②トーンホールの大きさが振動の反射位置を決めている。(5章)
- ③反射が起きている場所での、空気の流れが激しくなる大きさの、トーンホールを持つ笛が存在する。(6章)
- ④アルトサックスにもトーンホールの大きさによって不安定な音が存在し、その機構はストロー笛と同様である。(7章)

管楽器の音は管内を往復する振動が共鳴し、大きな振動になって外に放出され、我々の耳に届く。本研究により、管の形状やトーンホールの大きさによって反射する振動の位置が決まり、それが吹奏音に影響を与えることが分かった。

## 9. おわりに

紙で筒を作ったり、笛が鳴るように調整したりすることが大変だった。昨年のリードの重要性に引き続き、今年は管の形も吹奏音に関係することが分かったので、楽器のことについて改めて深く考えるようになった。今まで以上に細かいところまで気を使って楽器の整備をしたいと思う。また、今後、管本体だけでなく、マウスピースやオクターブキーの形について研究したいと思う。

最後に、水面波の観察方法を教えてくれた、科学者の芽育成プログラム グループ A メンターの埼玉大学理学部物理学科 須田亮介さんに感謝します。また、毎日かなりの騒音に耐えてくれた両親に感謝します。

## 10. 参考文献

- ※1 シングルリード楽器における吹奏音の研究  
矢野祐奈  
<https://www.tsukuba.ac.jp/community/kagakunome/pdf/2019/j2.pdf>
- ※2 これだけ高校物理 波・音・光 振動編  
田原真人著 秀和システム
- ※3 U字管マンメーターの原理と計算方法  
<https://kenkou888.com/kagakukougaku/manometer.html>
- ※4 音のすがたを見つけよう 杉本優子著  
ポプラ社
- ※5 クント管で共鳴を目で見る  
<http://toretate.fc2web.com/bgmath/2007/kunt/07090403.html>  
クントの実験について  
「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/kagakunome/pdf/2019/j4.pdf>
- 音速計算  
空気中の音速-高精度計算サイト  
<https://keisan.casio.jp/exec/system/1231998943>
- アルトサックスの構造  
船橋のサックスと木管楽器の店 MUSIC PORTE  
構造と名称  
<https://www.musicporte.com/note/structure/sax.htm>
- オシロスコープソフト iAnalyzer  
音発生ソフト Tone Gen