

# 簡易に演奏可能なリコーダー型ウインドシンセサイザーの開発

3年C組 黒川 陸

指導教員 藤野 智美

## 1. 要約

本研究では、初心者でも早期に完成度の高い演奏を体験できるリコーダー型ウインドシンセサイザー(以下ウインドシンセ)の開発に取り組んだ。既存の技術よりも簡単に音の高さを変えられる「管を回転させるピッチベンド」と、息継ぎの間の無音時間をなくすることができる「息の吸い込みを利用した発音機能」を搭載している。「管を回転させるピッチベンド」では、管の回転角を利用して音の高さを変化させるために、ロータリーエンコーダーを用いて回転角を測定した。また、「息の吸い込みを利用した発音機能」では、音量を操作するために気圧センサを用いて息の吸い込みの強さを測定した。

キーワード：リコーダー、ウインドシンセサイザー、ピッチベンド、息の吸い込み

## 2. 研究の背景と目的

私は小学校の授業でリコーダーを習って以来、発音の容易さに惹かれてリコーダーの演奏を趣味にしている。様々なリコーダーについて学習する中で、リコーダーの操作法で演奏でき、音量や音色の変化が容易なリコーダー型ウインドシンセに興味を持った。

調べていくと、既に開発されている多くのウインドシンセは音の高さを滑らかに変化させる「ピッチベンド」という機能を搭載していることがわかった。ピッチベンドには、マウスピースにかける唇の圧力で音程を変えるものや、平面上のセンサを指でなぞって音程を変えるものがある。実際に私自身が、指でセンサをなぞるピッチベンドを搭載した AKAI professional の EWI USB の演奏を試したところ、ピッチベンドの操作が難しい印象を受けた。これは、「運指を操作するための指の動作」と、「ピッチベンドのための指の動作」を共に行う必要

があり、指に動作と意識が集中してしまうことが原因だと考えた。同様に、唇の圧力を利用したピッチベンドも、「音量を操作するための口の動作」と「ピッチベンドのための口の動作」を共に意識する必要があるため、難しいと考えた。そこで、演奏中に楽器を支えているだけの手首や腕を利用して、管の回転によってピッチベンドを実現することを思いついた。この方法により、演奏中の動作や意識が手首や腕に分散して、演奏が簡易化されると予想した。

また、多くの息を使う楽器は、息が続かなくなると息継ぎをするため演奏を休む必要があり、フレーズが途切れやすい。呼吸の間も絶え間なく息を吐き出し続けることで息継ぎを必要としない「循環呼吸」という演奏法があるが、習得は容易ではない。そこで、循環呼吸よりも簡単に長いフレーズを演奏することを目的とし、息の吸い込みでも息の吐き出しと同様に発音できる機能を考え、実装することにした。

「管を回転させるピッチベンド」と「息の吸い込みを利用した発音機能」を実装すれば、操作が簡単なウインドシンセを作ることができる。また、既に開発されているリコーダー型ウインドシンセの多くはアコースティック・リコーダーの演奏技術を引き継いで演奏できる。そこで、小学校や中学校で身につけた演奏技術を引き継ぐことを目的とし、本研究のウインドシンセの基本的な操作法にはリコーダーの演奏法を採用した。

本研究で開発するウインドシンセによって、楽器初心者でも早期に完成度の高い演奏を体験できることを想定し開発に取り組んだ。図1に本研究で開発したウインドシンセの写真を示す。

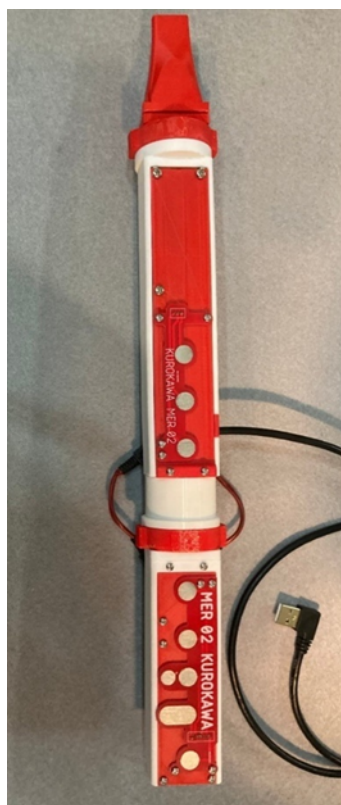


図1 開発したウインドシンセ

### 3. 研究方法

2で述べたように、既に類似のウインドシンセは製品として発売されている。そこ

で、まずは既存の製品と同程度の機能を持ったリコーダー型ウインドシンセを再現し、そのウインドシンセを土台に「管を回転させるピッチベンド」と「息の吸い込みを利用した発音機能」というオリジナルの機能を実装することにした。

#### 3. 1 既存のリコーダー型ウインドシンセの再現

既存のウインドシンセは主に四つの要素で構成されている。

##### (1) 息の測定

マウスピースに吹き込んだ息の強さにより音量を操作するために、吹き込んだ息の強さを測定する。

##### (2) 運指の測定

指のポジションによって音の高さを変えるために、運指を測定する。

##### (3) 音の生成

(1)と(2)で測定したデータをもとに音を生成する。

##### (4) 筐体

電子回路を収める縦笛型の筐体を作る。

各機能の実現過程と試作品、完成品について以下で説明する。

#### (ア) 試作品 1

##### (1) 息の測定

【方法】マウスピースに息を吹き込むと内部の気圧が上がることを利用して、マウスピース内に気圧センサを設置し、内部の気圧を測定した。STMicroelectronics社製のLPS22HBを気圧センサとして使用した。装置の電源が入ったときに、一度大気圧を測定したものを「基準の気圧」として保存

し、演奏中の気圧との差を「息の強さ」として処理した。

【結果】気圧センサを用いた息の測定に成功した。

## (2) 運指の測定

【方法】スマートフォンのタッチパネルに使われている「静電容量センサ」で運指を測定した。静電容量センサには HiLetgo 社製の TTP223 モジュールを使用した。

【結果】静電容量センサを用いた運指の測定に成功した。

## (3) 音の生成

【方法】Digital Audio Workstation(以下 DAW)ソフトから音を鳴らすために必要な「音色」、「音量」、「音の高さ」の三要素の MIDI 信号を作成して出力した。

### ① 音色の MIDI 信号の作成

DAW ソフトの「チャンネル 1」に用意されている音色を選択して鳴らす信号を作った。

### ② 音量の MIDI 信号の作成

息の強さによって音量を操作するために、(1)で測定した「息の強さ」と音量を対応させた。使用した気圧センサは、測定した気圧[hPa]の 4096 倍の値(小数点以下切り捨て)を返す仕様だが、MIDI では 0 から 127 の整数で音量を表現する仕様のため、測定した「息の強さ」を変換する必要がある。できる限り細かく音量を変化させるために、演奏者の息が最も強いときの「息の強さ」が、MIDI 音量の最大値である 127 になるように以下の式で変換した。

$$[\text{音量}] = [\text{息の強さ}] \times \frac{127}{[\text{最大の息の強さ}]}$$

私の場合、「最大の息の強さ」は約 6000 だったので、[息の強さ]×127/6000 を音量に代入した。音量の値が 127 を超えてはい

けないので、「息の強さ」が「最大の息の強さ」を超えた場合は、「最大の息の強さ」を代入している。

### ③ 音の高さの MIDI 信号の作成

(2)で測定した運指を、バロック式ソプラノリコーダーの運指に当てはめて、音の高さを決定した。

### ④ MIDI 信号の出力

①から③で作成した MIDI 信号を、Arduino 用 MIDIUSB ライブラリを使って、Arduino から USB でパソコンに出力した。

【結果】MIDI 信号を出力し、DAW ソフトの GarageBand から音を出すことに成功した。息の操作で音量に抑揚をつけ、バロック式ソプラノリコーダーの運指で演奏することができた。

## (4) 筐体

【方法】木材の板を組み立てた箱の外側に静電容量センサを取り付け、箱の内側に Arduino と配線を収めた。また、気圧センサが入ったマウスピースは 3D プリンターで印刷して、木箱に取り付けた。

【結果】木の箱が大きく持ちにくかったため演奏には向いていなかった。また、静電容量センサが指を置きにくい場所に配置されており不便だった。試作品 1 の写真を図 2 に示す。

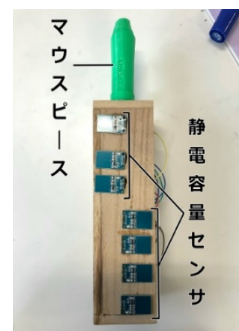


図 2 試作品 1

## (イ) 試作品 2

### (1) 息の測定

【方法】試作品 1 と同様の気圧センサで測定した。

### (2) 運指の測定

【方法】試作品 1 から静電容量センサを変更し、Freescale Semiconductor 社製の MPR121 を使用した。実際に指で触れる部分は銅の基板にべたパターンで作った。

【結果】銅の基板にレジスト処理をせずに電子部品をはんだ付けしてしまい、余分なはんだが回路に付着してショートを起こして動作しなかった。この段階で製作を断念したため、音の生成や筐体は実装していない。試作品 2 の写真を図 3 に示す。

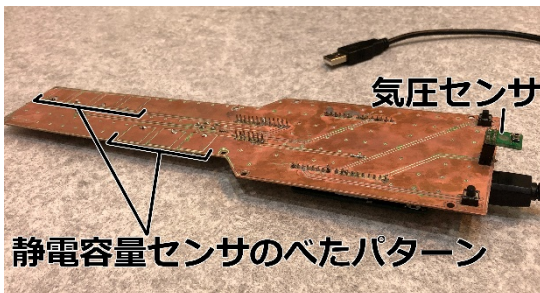


図 3 試作品 2

## (ウ) 試作品 3

### (1) 息の測定

【方法】試作品 1,2 と同様の気圧センサで測定した。

### (2) 運指の測定

【方法】試作品 1,2 と違い、フォトダイオードとレーザーを用いて運指を測定した。音孔の内部からレーザーを発光させ、指で音孔をふさいだときのレーザー光の変化量をフォトダイオードで測定した(図 4)。

【結果】運指を測定することに成功した。さらに、今まで使用していた静電容量センサでは測定できなかった、音孔に当てている指の面積も測定できた。これにより、指を当

てる面積を変えることで音を変化させる機能への発展が期待できた。一方で、フォトダイオードが検知する光の量で運指を判断しているため、演奏会場の明るさの変化によって運指の検出精度も変わってしまう(上と同じ理由)欠点があった。

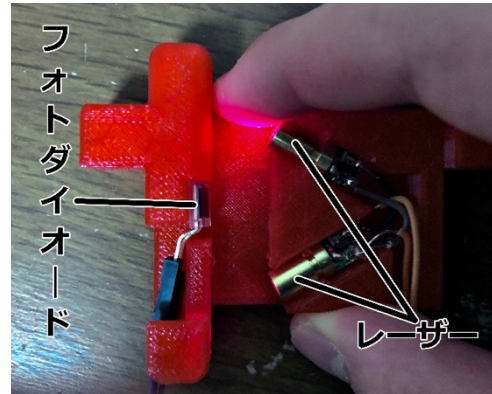


図 4 フォトダイオードとレーザー

### (3) 音の生成

【方法】試作品 1 と同様に Arduino から MIDI 信号を出力した。

### (4) 筐体

【方法】3D プリンターで小さな部品を印刷し、それらを繋げて縦笛の形にした。

【結果】小さな部品同士を接合する場所が大きく、配線が難しかった。試作品 3 の写真を図 5 に示す。



図 5 試作品 3

## (エ) 試作品 4

### (1) 息の測定

【方法】試作品 1~3 で使用していた気圧センサの LPS22HB は防水ではなく、息に含まれている水蒸気でセンサが壊れることがあったので、防水仕様の LPS33HW を使用



して息を測定した。

【結果】息を測定できた。息に含まれる水蒸気によりセンサが壊れることがなかったため今までよりも長く使用できたが、塵や埃がセンサ上に溜まり、ショートすることで壊れた。

## (2) 運指の測定

【方法】試作品 3 ではフォトダイオードとレーザーを使用して運指を測定したが、演奏会場の明るさによって動作が不安定になった。そこで、試作品 2 で使用していた静電容量センサの MPR121 で運指を測定した。手で触れる部分は銅リボンで作った。

【結果】演奏会場の明るさに影響されずに運指を測定できた。一方で、静電容量センサは水濡れには弱いので、演奏者の指が湿っていると誤反応が起きた。

## (3) 音の生成

【方法】試作品 1,3 と同様に Arduino から MIDI 信号を出力した。

## (4) 筐体

3D プリンターで縦笛の形に造形した。試作品 4 の写真を図 6 に示す。

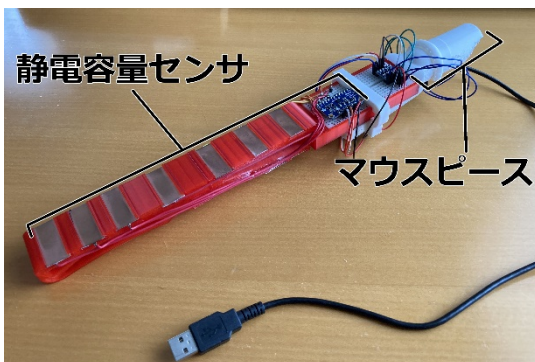


図 6 試作品 4

## (オ) 完成品

### (1) 息の測定

【方法】試作品 4 と同様の気圧センサを組み込んで息を測定した(図 7)。

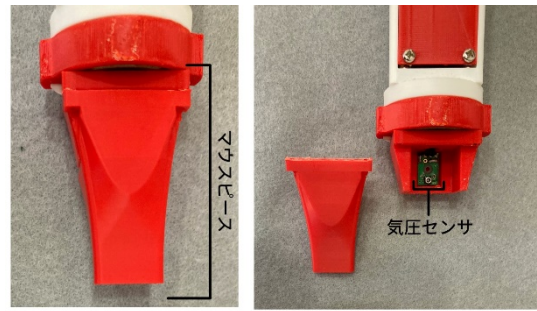


図 7 マウスピースと気圧センサ

### (2) 運指の測定

【方法】試作品 2,4 と同様に静電容量センサの MPR121 を用いて運指を測定した。静電容量センサの指に触れる部分をリコーダーの音孔の形にしたプリント基板で実装した(図 8)。また、演奏者にとって健康的だと考え、ランドの表面処理を Lead Free HASL(無鉛半田レベラー)を利用した。

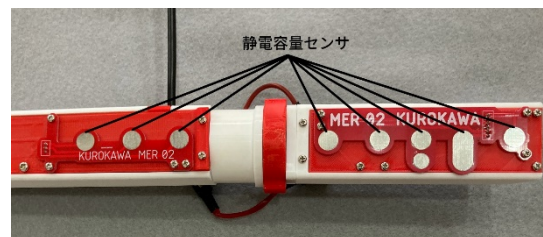


図 8 静電容量センサを実装した様子

【結果】運指の測定に成功した。

### (3) 音の生成

【方法】試作品 1,3,4 と同様に Arduino から MIDI 信号を出力した。

### (4) 筐体

【方法】3D プリンターでリコーダーを模した箱型の本体を印刷し、その中に電子回路を収めた。

【結果】箱の中の広いスペースを利用し、余裕をもって配線できた(図 9)。



図9 筐体内部にある電子回路

### 3. 1 オリジナル機能1：管を回転させるピッチベンドの実装

手首や腕を利用して簡単に操作できるピッチベンドを実現するために、管を回転させるピッチベンドの実装を試みた。ウインドシンセを頭部管、中部管、足部管に三分割し、それらの継ぎ目にベアリングを用いて本体が回転できるようにした。加えて、中部管と足部管の回転角に対応して、音の高さを変化させた。

#### (1) ウインドシンセの三分割

【方法】ウインドシンセのマウスピース部分を頭管部、頭管部に近い音孔三つ分を含む部分を中管部、残りの部分を足管部として分割した(図10)。



図10 ウインドシンセを三分割する図

その後、中管部の両端にベアリングを固定し、ベアリングの穴に頭管部と足管部を差し込んだ(図11)。

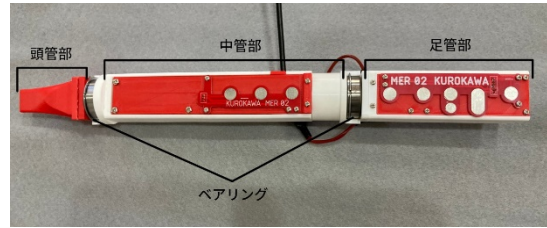


図11 管の継ぎ目のベアリングの写真

【結果】ウインドシンセを三分割し、それぞれが回転できるようになった(図12)。しかし、中管部と足管部の間に電気回路の配線があり、管を $180^\circ$ 以上回転させるとねじれて断線しそうになった。

【考察】新しい装置を作るときは、中管部と足管部の間にスリップリングを入れて、配線が断線しないように工夫したい

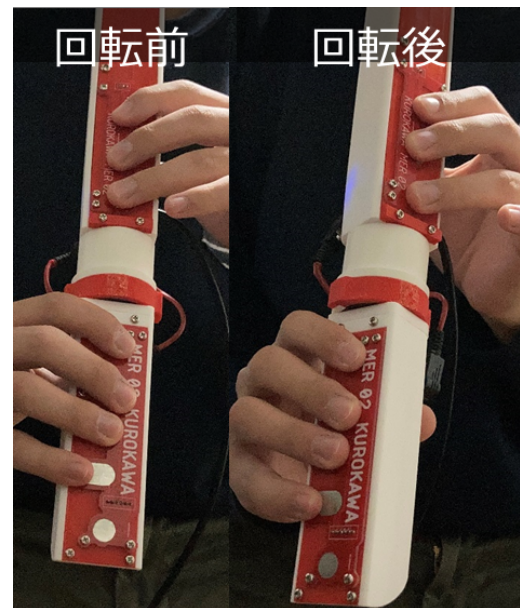


図12 管を回転させる様子

#### (2) 中部管と足部管の回転角の測定

【方法】ロータリーエンコーダーを中管部に、回転軸を足管部に固定し、回転軸の回転角を測定した(図13)。ロータリーエンコーダーは、日本電産コパル電子社製のRES16B50-201(50[P/R])を用いた。

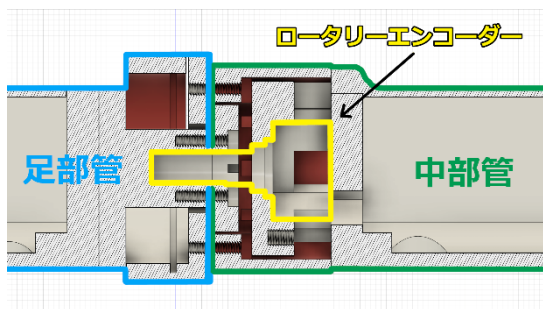


図 13 固定されたロータリーエンコーダー

【結果】中部管と足部管の回転角度を  $7.2^\circ$  ごとに測定することに成功した。

【考察】今回はロータリーエンコーダーの回転軸を直接管に固定したが、回転軸と管の間に歯車を設けて回転を増幅させることで、さらに細かい角度の測定ができると考えた。

### (3) 回転角の大きさに応じて音の高さを変化させる

【方法】管の回転角に応じて、発音中の音の高さを上げ下げさせた。実際に作成したウインドシンセで演奏したところ、回転させられる限界と感じたのが  $\pm 72^\circ$  であった。多くのピッチベンドは上下に半音二分の振れ幅で音を変化させるため、 $+72^\circ$  で半音二分低く、 $-72^\circ$  で半音二分高くなるようにした。

【結果】管を回転させたときの音の高さの変化をオシロスコープで測定した。測定値と理論値(12平均律)の相対誤差を調べたところ、約 0.5% だった。

【考察】測定値と理論値(12平均律)の誤差が約  $\pm 0.5\%$  だったことから、管の回転角に応じて、正確に音の高さを変えることができたと言える。測定値と理論値の散布図を見るとほとんど差がないことがわかりやすい(図 14)。

一方、 $7.2^\circ$  ごとにしか音の高さを変え

られず、ピッチベンドとしては粗い印象を受けた。より滑らかに音の高さを変えるために、回転角を細かく測定する必要があると感じた。

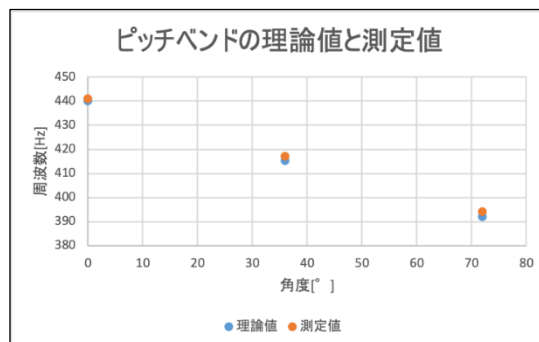


図 14 理論値と測定値の散布図

### 3.2 オリジナル機能 2 : 息の吸い込みを利用した発音機能の実装

【方法】3.1の(1)で述べたように、「息の強さ」の値は大気圧との差から求めている。そのため、息を吐いて気圧が上がると「息の強さ」は正の値となり、息を吸い込んで気圧が下がると「息の強さ」は負の値となる。そこで、息を吸い込んだときにも息を吐き出したときと同様に音が鳴るように、「息の強さ」を絶対値で処理した。

【結果】息を吸い込んだときと吐き出したときの音をオシロスコープで測定したところ、どちらも 386Hz で同様の波形であった(図 15)。

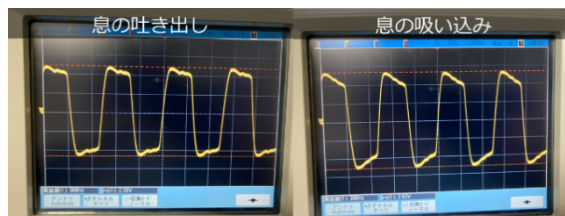


図 15 オシロスコープの画面

【考察】息を吸い込んだときに、息を吐き出したときと同様に音を鳴らすことができた。

#### 4. 結果

・既存のリコーダー型ウインドシンセを再現できた。

・ロータリーエンコーダーを用いた「管を回転させるピッチベンド」の実装により、手首や腕を利用して音の高さを変えることができた。

・気圧センサの利用と得られた値に対する絶対値の処理により、「息の吸い込みを利用した発音機能」を実装し、息の吐き出しと吸い込みを繰り返しながら連続して演奏することができた。

#### 5. 考察

「管を回転させるピッチベンド」と「息の吸い込みを利用した発音機能」の実装により、操作が簡単なウインドシンセを作ることに成功した。

管を回転させるピッチベンドと同じく回転角を利用する「ピッチベンドホイール」という鍵盤型シンセサイザーの機能では、常にバネの力でレバーが中点に戻るようになっている。これを応用して、管を回転させるピッチベンドもバネの力で中点に戻るようにすると便利だと考えた。また、息の吸い込みを利用した発音機能を応用して、ハーモニカのように息を吐いたときと吸い込んだときで異なる音が鳴るようにすれば、音域が2倍になり演奏可能な曲が増えると考えた。今後の課題としたい。

#### 6. 今後の課題

管を回転させるピッチベンドは他の手法のピッチベンドよりも簡単に演奏でき、息の吸い込みを利用した発音機能を利用すれば、長いフレーズを途切れることなく演奏できる。これにより、楽器初心者でも早期

に完成度の高い演奏を体験できると想定している。

今後は、開発したウインドシンセを他人に使用してもらってアンケートを取り、新しく実装した機能の有用性を検証したい。

また、次の四つの機能を開発してウインドシンセの表現力を向上させていきたい。

##### ① 振動フィードバック機能の実装

アコースティック・リコーダーを演奏すると、音の振動が指に伝わって心地よいことがある。それを再現するために、バイブレータを筐体の中に入れて振動させようと考えた。音の大きさに対応させてバイブレータを振動を変化させることで、音を触覚で感じられるようにしたい。この手法により、音のリズムを触覚で感じられると予想している。

##### ② FM音源の実装

現状のままでは音の出力にMIDI信号を使っているため、演奏にMIDI音源が別途必要である。しかし、そうすると屋外で演奏する場面などで荷物が増えてしまうので、楽器単体で演奏できるようにFM音源の実装を検討している。既存のウインドシンセの多くはFM音源を搭載しているため、これは独自の機能ではない。すでに、FM音源をマイコンに接続し、音の出力に成功しているが、他の機能と同時に動かすと、エラーが出るかもしれないので、今後実験したい。

##### ③ 交換可能なマウスピースの実装

現状のままではマウスピースが本体に固定されており、取り外しができない。そこで、マウスピースを簡単に取り外しできるようにしたい。これにより、マウスピースに埃や唾が入ったときに掃除できるように



なり、マウスピースを取り換えることで、複数人で楽器を共有できるようになる。

#### ④ 3D 操作ができる親指孔の実装

現状のままでは左手の親指を前後にスライドさせることでリコーダーのサミングを再現している。しかし、実際のリコーダーは親指を当てる角度を変えることでサミングができる。このサミングに操作感を近づけるために、スポンジの形状変化を測定できるセンサ(触覚ポット)を使い、親指をスポンジに当てる角度で音の高さを変えようと思う。さらに、触覚ポットはスポンジをつまむ動作などの 3D 操作を測定できるので、ビブラートやアルペジオといった機能を割り当てることもできると考えている。

## 7. 参考文献

[1] 「Arduino Micro で MIDIUSB を使う」

<https://canalier.com/arduino-micro%E3%81%A7midiusb%E3%82%92%E4%BD%BF%E3%81%86/>

[2] 「MIDIUSB library」

<https://www.arduino.cc/en/Reference/MIDIUSB>

[3] 「たのしい電子管楽器のつくりかた

<http://naitoku.hatenablog.com/entry/2018/12/08/1157>

04

## 8. 謝辞

本研究は独立行政法人情報処理推進機構が主催する未踏事業の OB・OG が運営する 2020 年度未踏ジュニア事業に採択された。研究費の支援や助言を下された関係者の皆様に深く御礼申し上げます。また、顧問の藤野智美先生や同研究会の諸先輩方にも様々なアドバイスをいただきました。深くお礼申し上げます。