

オルガンのリード管の発音パラメータに関する研究

Voicing Parameter of Reed Pipes of an Organ

○戸村将大*, 熊谷正朗**

○Masahiro Tomura*, Masaaki Kumagai**

*東北学院大学 大学院, **東北学院大学

*Graduate School of Tohoku Gakuin University, **Tohoku Gakuin University

キーワード : オルガン (Organ), リード管 (Reed pipe), 楽器 (Musical instrument),
周波数スペクトル (Frequency spectrum), 3次元プリンタ (3D printer),

連絡先 : 〒 985-8537 多賀城市中央 1-13-1 東北学院大学 工学部 機械知能工学科
熊谷正朗, Tel.: (022)368-7358, Fax.: (022)368-7070, E-mail: kumagai@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

1. はじめに

1.1 研究の背景

本学はキリスト教を建学の精神の基として
いることもあり, 主要3キャンパスにオルガン(パイ
プオルガン)が設置され, 礼拝などで演奏され
ている (Fig. 1). オルガンは楽器であるが, しば
しば建築の文脈で語られることもある. 一方で,
ものとしてのオルガンは大がかりな機構システ
ムであり, 近年ではメカトロニクスが導入され
ている. これらの背景と, 専門家との懇談から,
本物のオルガンと十分に同等の原理からなる説
明用の模型の開発に取り組むこととなった.

この開発での大きな課題は具体的な設計手法
や製法に関する情報が極めて少ないことである.
そもそも量産される楽器ではなく, 限られた専
門家, 製造元によって, これまで蓄積された経
験をもとに製作されていると考えられ, 入手で
きる情報を参考に, 現物の観察などで実現して
いくこととなった. その過程に, 機械工学的手
法や研究的手法を併用してきた.



Fig. 1 泉キャンパスのパイプオルガン. Organ at Izumi Campus, Tohoku Gakuin University.

加えて, 意外なほどに参考となる文献が少ない (1, 2, 3, 4, 5). 作例という観点では個人によるDIYの事例が様々に見られるが, 木製や樹脂製のフルー管にとどまり, 金属管やリード管はほぼなく, 機構の再現性も低い. 研究の観点では, 現在の多数の音色を持つような形式のオルガンには500年以上の歴史があり, 楽器としても一般的であることから, その現代的分析は十分に進んでいると想定して文献探索を行ったが, 2000



Fig. 2 これまでの試作事例. Examples of developed organ elements/models.

年以降の論文でも基礎実験的研究，一例のモデルシミュレーションを扱っており，基礎からすべてを対象とする必要があると結論づけた。

以上のような状況で，当研究室では3次元プリンタ (FDM 式，ABS 樹脂) を併用することで，基礎的な試作・実験を試みてきた (Fig. 2). 竹内⁶⁾ はパイプは2本のみであるがオルガンに特徴的な機構を一通り持つ模型を3Dプリンタを用いて試作した (Fig. 2 (a)). 熊谷と佐々木⁷⁾ はオルガンメタルによるフルー管を試作した (同 (c)). 渡辺⁸⁾ はパイプに供給する気体の種類，および温度の制御で周波数の調整が可能であることを示した。柴田⁹⁾ は木製フルー管を試作した。安藤¹⁰⁾ はソレノイドで電氣的に鍵盤を駆動でき，1オクターブ13本の3Dプリントによ

るフルー管を持つ模型を試作した (同 (b)). あわせて歌口部分の寸法パラメータに対する音の出やすさを調査している。戸村¹¹⁾ はリード管の試作に着手し (同 (d)), 共鳴管の形状による音の変化を調べた。以上のように，フルー管は先行して形となり，次いでリード管に着手したが，その複雑さゆえに望ましい音が容易には得られず，そもそもどのようなパラメータがあるかの探索を始めたことが，本研究の始まりである。

1.2 オルガンの構成と発音選択機構

オルガンは，多数のパイプと，各パイプに空気をオン/オフで供給する機構からなる。各パイプは固有の音色と一つの音高を持つ。管楽器の多くはその1本の楽器で操作によって管の長さを変えるなどで音高を変えるが，オルガンではピアノの弦のように音高ごとにパイプがある。一方，オルガンは多数の音色を持ち，パイプの総数はおよそ鍵盤の数 (60程度) × 音色の数で，ある程度の規模のオルガンでは1000本を超える。

これらのパイプは行列的に配置されており (Fig. 3(a)), 音色ごとに音高に対する列をなし，操作も2系統の組み合わせの積として選択される。一つは鍵盤による操作であり，もう一つはストップと呼ばれる音色の選択である。鍵盤 (Fig. 3(b) に3段，および下部に足操作) の操作は他の鍵盤楽器同様に，鍵に音高が対応し，押した鍵に応じたパイプ群に空気が供給される。ストップは演奏台に並べられたオンオフ操作を行うノブ状の操作部 (Fig. 3(b) の左右サイド) であり，それによって，ある音色のパイプ群を有効・無効に切り替える。すなわち，演奏時にはストップの操作で使用する音色を選択すると，鍵に対する複数のパイプが同時に発音し，音色が重ねられる。また，幅広い音高に対応するため，ある類似の音色のパイプを1オクターブ単位でずらしたパイプ群 (複数のストップ) で配置している (フィート律表記)。この組み合わせはまた，



(a) パイプの配列. Matrix of pipes.



(b) 鍵盤周辺. Console of organ.



(c) 鍵盤から風箱に向かうリンク群. Links connecting console to windchest.

Fig. 3 実際のオルガンの機構. Mechanical structure of an organ.

ストップで倍音成分を合成することも可能にし、音色を作り出すこともできる。

パイプの空気供給部のメカニズムは、風箱と呼ばれる。Fig. 4 に示すように、空気の供給源であるふいごから供給される一定圧力の空気を、鍵からつながるバルブ(青丸)によって、細長い空間(奥行き方向)の列に選択的に通す。この上に同一鍵に対応する異なる音色のパイプが並ぶが、その間にスライダという穴の空いたスライ

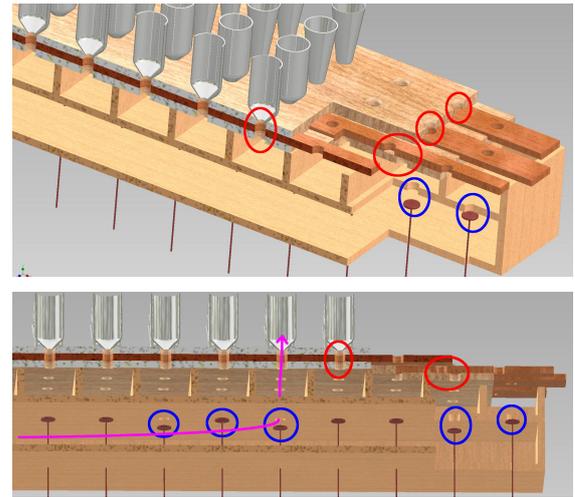


Fig. 4 スライダとバルブによる風箱の構造の模式図. Structure of Windchest controlled by valves and sliders.

ドする板状のバルブ機構がある。ストップの操作によってスライダが移動し、音色ごとに空気が通るかどうか(赤丸)を一括して決める。つまり、ストップ-スライダによる有効化と鍵によるバルブ開放の積で、1本のパイプの発音が決まる(紫線)。

鍵盤から風箱のバルブの開閉に至る経路(トラッカ)は機械的なリンクによるものが多く、演奏台の裏には多数の細長い部材が並んでいる(Fig. 3(b,c))。また、オルガンの意匠としてのパイプ配置(しばしば、長さで左右対称的に配置される)と鍵盤の順序の対応付けは、ローラーボードという機構(同(c)中央奥壁面)によって実装されている。一方、ストップに関しては、伝統的にはストップのノブからスライダまで機械的につながるが、近年の大きな規模のオルガンでは電子制御化されている。ノブはスイッチであり、スライダを駆動する大型のソレノイドを制御する。また、ストップは演奏の進行に伴って組み合わせを変えることがあり、あらかじめ制御部に記憶させ、鍵盤付近のスイッチ(Fig. 3(b)で鍵盤下に並ぶ)で順次呼び出す機能を持たせることで、一人での演奏を可能としている(コンビネーション)。これら観点ではオルガンはメカトロニクス機器である。

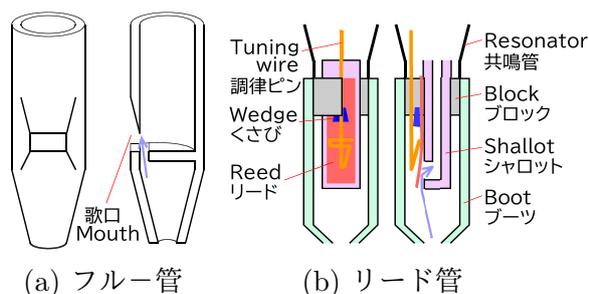


Fig. 5 フルー管とリード管. Flue pipe and reed pipe.

1.3 パイプ

上述のようにオルガンには多様な音色の多数のパイプがあるが、2種類に大別される。

一つは Fig. 5(a) に示すフルー管である。身近な楽器ではリコーダーが同様の原理である。供給された空気を歌口の部分で薄い気流とし、エッジに当たることで空気が振動して音がでる(エアリード)。パイプ部分が気柱共鳴することで音高が概ね定まるが、歌口部分は開口端であり、パイプ上部を開く開管と閉じる閉管がある。開管では管長が基本周波数の $(1/2)$ 波長となり、整数倍の周波数が共鳴する。一方で、閉管では管長が基本周波数の $(1/4)$ 波長であり、同じ音高では長さが半分、同じ長さでは周波数 $1/2$ となるほか、次に共鳴するのが $(3/4)$, $(5/4)$ …波長 = 基本周波数の 3, 5…倍となるため、奇数次が強調される管となる。また、パイプの長さに対する太さの比率や管の材質でも音色が変わる。

もう一つはリード管 (b) である。空気の流れて機械振動する部品であるリードで基本的な音をつくり、パイプ部分 (共鳴管) の共鳴 (音響インピーダンス) で周波数成分を調整する原理である。他の楽器では木管楽器はリードがあり、金管楽器は唇をリードとして音源にしており、これらの楽器を指向した音色を目指したパイプである。リード自体に固有の振動があり、流路の開閉を伴うためか、高い周波数まで高調波成分をもつが、リード部分単独と、共鳴管を取り付けたときに周波数も変化し、複雑な特性を持つ。

1.4 本研究の目的

背景のとおり、オルガンを構成する要素を試作してきた過程でリード管に取り組み始めた。リード管は、各種文献などでも共鳴管の形状に着目した説明が多く、当初は共鳴管の形の違いに対する、音色の変化の分析を試みた¹¹⁾。試作したリードを用いた発音、スピーカで音源となる音を出力しての共鳴管からの音出力の周波数スペクトル分析、および音色としての感性的評価では、想像したほどは調整の効果がなく、また期待するような音色も得られなかった。一方で、一部文献には、共鳴管より下の部分である、シャロットの違いが述べられており、試作するとシャロットやその周囲の空間が音色に影響する様子が確認された。ただし、この部分の解析を行った研究事例はわずかしか確認できていない。そこで、本研究では、この部分の形状パラメータを変えることで、どのように影響が生じるかの基礎データを得ることを目的とした。

2. リード管と実験装置

2.1 リード管の構造

リード管は前述のようにリードと共鳴管からなる (Fig. 5(b))。また、Fig. 6 に本学オルガンのリード管の一例を示す。外見的には、上部の共鳴管 (resonator)、空気を導くカバー的なブーツ (boot)、つなぎ目にあるブロック (block) からなる。ブロックには内的構造として、リード (reed) 本体と、そのリードを受けるシャロット (shallow) が挿入されてくさびで固定されている。またリードはその振動が音高に直接関わるため、その調整をするための調律ピン (tuning wire) があり、リードを押さえ、外部から上下させることができる。その主要部には Fig. 7 に示すように多様な形状パラメータがある。

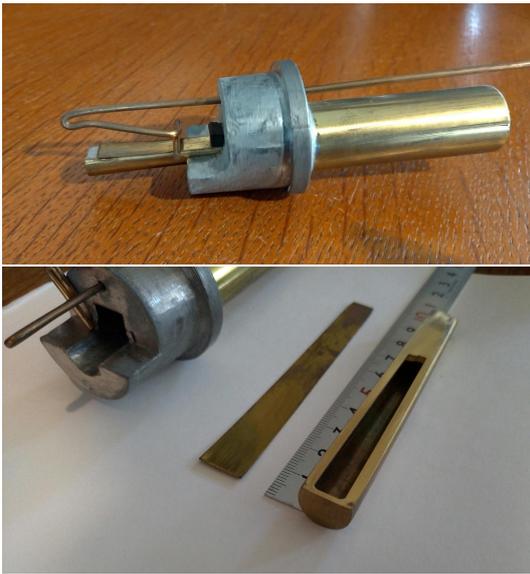
一般的には、わずかに反ったリードとシャロットの隙間から流入する流れで気圧がさがり、リー



(a) リード管とブロック



(b) ブーツと共鳴管



(c) 組み立てたブロックとリード・シャロット

Fig. 6 実際のリード管の構成要素 (本学オルガン). Actual parts of an existing organ.



Fig. 7 リード管のパラメータ. Parameters of reed pipe.

ドが曲がって一度閉じ、リードの弾性で戻ると説明される。実験的にも反りの程度が音の出しやすさに影響することは明白であった。

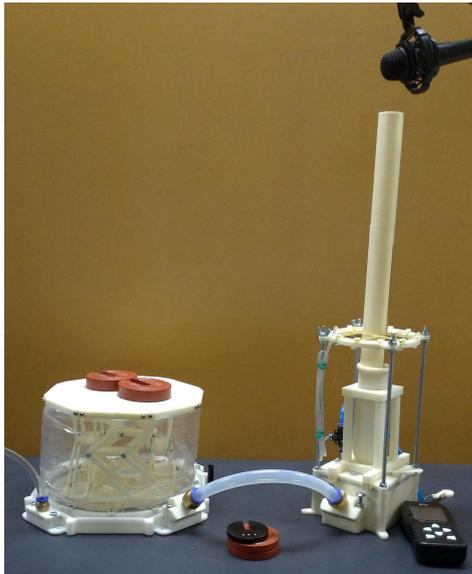
材質は、共鳴管、ブーツ、ブロックはオルガンメタル (鉛とスズの合金、比率も音色に影響があ

る)、リードとシャロット、調律ピンは黄銅である。一部の比較実験で音色に材質の影響が出ることは確認しており、材質まで同一とすることが望ましい。一方で前述のようにフルー管をオルガンメタルで試作してはいるが、市販素材ではないため、素材を電気炉で融かして板材を作り、圧延・裁断して、さらに組成が近く、融点のほぼ同じ半田付けによって組み立てる必要があるため、パラメータを変えての試作を多数行うことは現状では難しく、ABS樹脂によるFDM型3次元プリンタを用いた。リード・調律ピンは市販素材の加工で製作でき、シャロットも黄銅管をフライス加工したうえで、半田付けによって組み立て、研磨仕上げしてある。当初、このシャロットもABSプリントで作成し、一部実験では使用しているが、音色に違いがあるため、主には黄銅製を使用している。

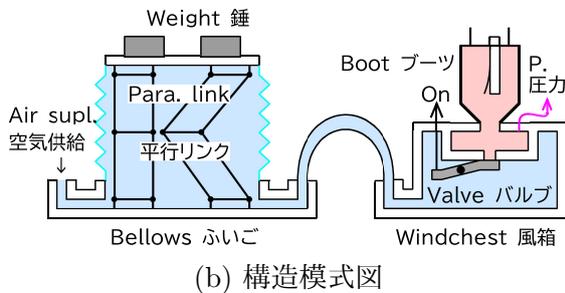
2.2 実験装置

リード管に空気を送り、音を採取する実験系をFig. 8に示す。装置はふいご、風箱、被測定リード管、マイクからなる。

風箱には一定の気圧の空気を供給し、バルブによってパイプへの供給を操作する (スライダは省略)。この圧力は、数百 [Pa] (数 [hPa], 数十 [mmH₂O]; 水柱) 程度であり、エアコンプレッサなどで見られる圧力に比べると極端に小さい。一方で、PC用ファンなどの静圧では不足し、流量によって圧力が低下する。そこで、実際のオルガン同様にふいごを空気源として用いることとした。実際のふいごは上下に可動の天板と伸縮する蛇腹状側面とからなり、天板に錘を乗せることで、重量/面積の静圧をかける。本研究では、図に示すように軽量の平行リンクで天板が平行を保ちながら上下するようにし、ビニール製のバッグによって気密を確保した。また、実オルガンのふいごは天板の上下に応じて外部のファンからの空気の流入を調整する機械的フィードバック機構があって、内部の空気量を保つ仕



(a) 実験装置外観



(b) 構造模式図

Fig. 8 測定に用いた実験装置. Experimental setup used for voicing measurements.

組みがあるが、本装置ではふいごをエアタンクとしても使い、実験前に手動の空気ポンプやエアコンプレッサによってエアを充填する仕組みとした。実験中はファンの音が入らないが、発音時間は限られ、多少の圧力変動(下記パイプ直近で 30 [Pa] 程度)が生じる。天板面積は約 0.04 [m²] であり、リンク類の質量に加えて、載せる錘を 0.5/1.0/1.5 [kg] とした場合に、静圧の実測値は 170/300/430 [Pa] 程度となった。

風箱はふいごからの空気を多少貯める空間とともに、バルブとパイプ(ブーツ)への接続穴からなる。また、発音が始まり、空気が流れると途中のパイプでの圧力損失による圧力低下があることから、実験条件の確認のための圧力計は、デジタル式の微圧計と、水柱によるマンメータを、バルブ後のパイプと並列になる位置に接続して

いる。最初はふいご静圧と同程度の圧力を示すが、流れ始めることで低下してほぼ一定の値をとり(これを発音時の圧力とする)、ふいごの空気残量が低下する末期にはさらに圧力が低下するため、音の評価はその中間部で行った。なお、この圧力低下は流量にも依存し、それはリードの間隙や振動の仕方の影響を受ける。

マイクは SONY 製 ECM-PCV80U 型コンデンサマイクをブロック上部の共鳴管接続部上の約 100 [mm] あたりに置き、PC に接続して録音、分析を行った。なお、マイクを開口部直近に置かない限り、周波数成分に目立つ変化は見られなかった。

3. 実験条件と実験結果

3.1 比較項目

本研究では、リード管の各種形状パラメータの変更に伴う、音の変化を確認した。そのうち本稿では主に以下の結果を報告する。音の分析としては、音高と FFT 解析 (WaveSpectra¹²) による高調波成分の分布を見ることとした。

リードの振動長と音高 調律ピンの上下によって、リードの振動する長さの変化での音高変化を確認した。これはあるリード条件の調律の幅であるとともに、条件を変えたときの音高の比較となる。

リードの寸法・材質による変化 リードの音高の高低が、リードの片持ちはりとしての機械的特性に依存すると予想され、寸法と材質を変えて評価した。

気圧による変化 音高は主にリードの特性によると考えられるが、どの程度の影響があるか(逆にどの程度供給圧の安定性が必要か)を評価した。

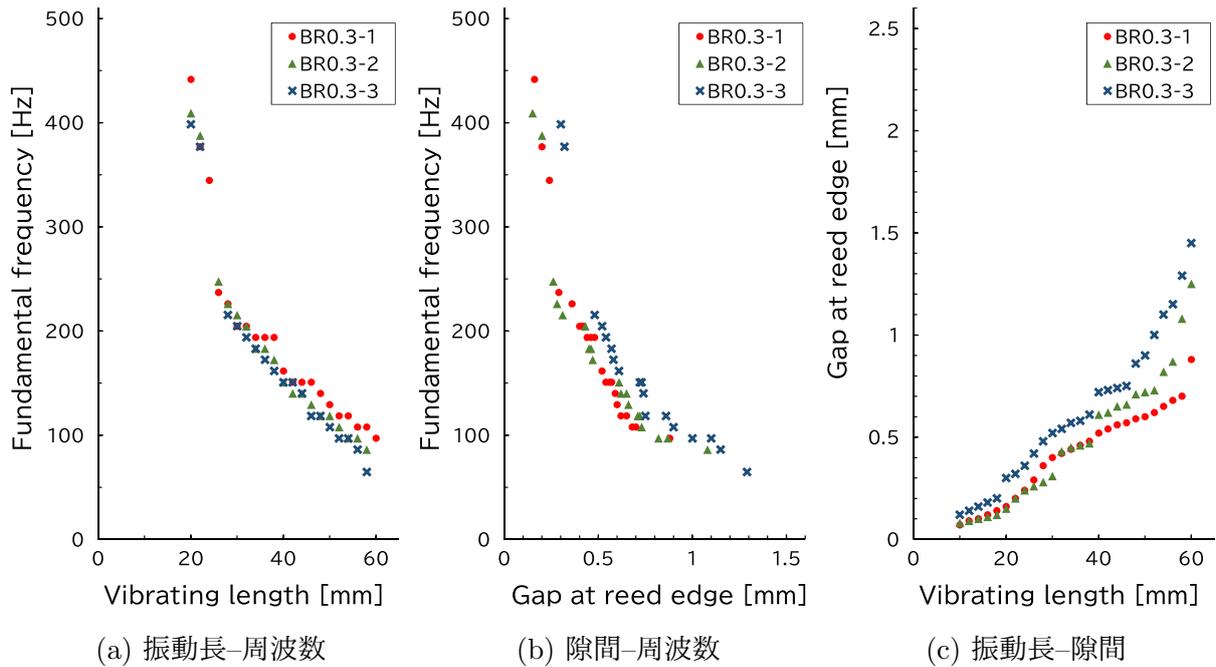


Fig. 9 リードの振動長，リード端隙間と基本周波数． Experimental results on fundamental frequency with variation in reed length and gap.

3.2 リードと調律ピンの位置と音高

リードでの発音の原理から，リードのはりとしての振動が音高には支配的であると想定される．リードは調律ピンによってシャロットに押さえつけられたところが固定端となる片持ちはりの形状となるため，その先の自由に動く部分(以下，振動長とする)が長いほど周波数は低く，短いほど高くなると考えられる．また，リードにはわずかな反りを与え，静止状態で先端をシャロットからわずかに浮かせる(この隙間の大きさをリード端隙間，単に隙間とする)．隙間が小さいほど，気流によってリードが閉じやすくなり，隙間が大きいほど閉じにくくなることから，これも音高に影響があると考えられる．

そこで，同一厚さ，同一寸法のリード3枚で，調律ピンの位置を動かし(振動長を変え)，その際のリード端隙間を隙間ゲージで測定して，基本周波数を測定した．圧力は約200 [Pa]である．リードの反りはリードを曲率の小さな曲面上でこするなどして手作業で付けるため，「鳴るように」反りの程度を調整してあるが，個体差があ

り，おなじ振動長でも隙間には差が生じる．また隙間は簡易的な測定のため，振動長よりは誤差がある．

Fig. 9に測定結果を示す．図(a)は横軸が振動長で縦軸は基本周波数であり，(b)は同，横軸がリード端隙間，(c)は振動長に対する隙間を示す．また，鳴らない，安定した音が出ない条件は(a)(b)ではプロットしていない．3枚のリードでその隙間に差があるが，(a)(b)を比較すると，隙間に差があるにも関わらず，(a)で結果の重なりがあり，(b)の隙間に対しては周波数のばらつきがあることから，「鳴る範囲」においては，周波数に対して振動長が支配的であると言える．ただし，振動長の条件の両端では，どこまで鳴るかという範囲に差があった．

また，このグラフから，振動長が短くなると，明確に周波数の変化傾向が変わる．また，振動長の短いところでは音色が変わり，音が小さくなる．Fig. 10(a)(b)に振動長40 [mm]と22 [mm]の波形と周波数成分を示す．(a)は他の条件も含め，典型的に見られる成分であり，基本波から数次にわたって振幅が増加する．波形はより

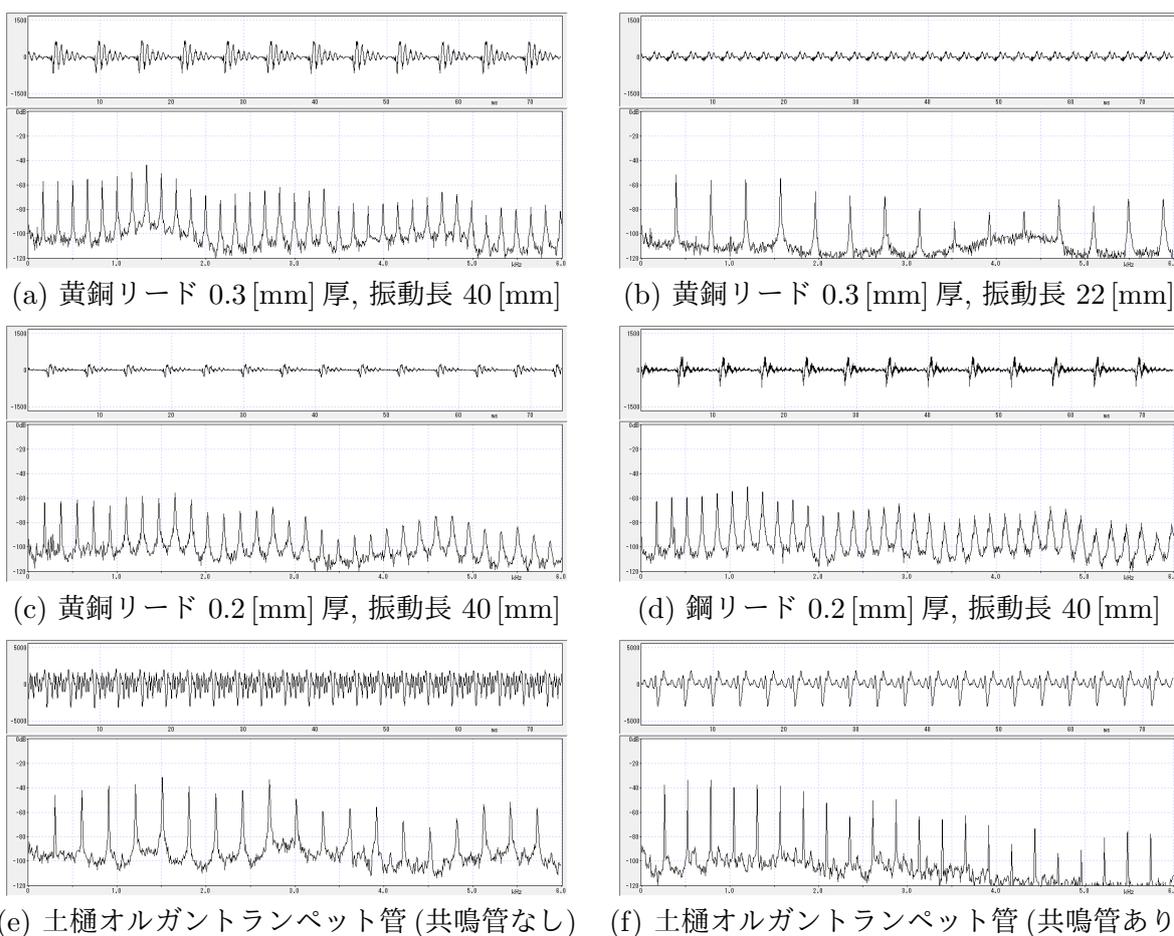


Fig. 10 音の波形と周波数スペクトル (44.1 [kHz], 65536 点 FFT, flat-top 窓). Waveform and frequency spectrum of sounds.

を周期的に叩いたかのような繰り返しが見られる。一方 (b) ではその傾向が低下している。

これは、長い範囲ではリードがシャロットに対して明確に当たる (流路を閉じきる) ように振動し、短い範囲ではリードがあまり当たらずに宙で振動していると推定される (宙で振動するリードはフリーリードと呼ばれ、ハーモニカやアコーディオンがこのリードを持つ)。この検証のため、ブーツ内に光源を用意し、共鳴管接続側から高速度カメラ (CASIO EX-F1, 1200 [fps]) でリードの振動の様子を簡易的に観測し、その隙間の光量変化から定性的に確認している。

3.3 リードの寸法・材質

リードの振動は片持ちはりの固有振動数が大きく影響していると考えられるため、厚さおよ

び材質を変化させた。Fig. 11(a) は黄銅で厚さを 0.2, 0.3 (標準条件), 0.5 [mm] と変更したものである。リードの反りは鳴るように調整しており、そのばらつきの影響もみるため、各条件ごとに 2 枚のリードの結果を同時に示した。この結果には三つの発音モードが存在すると考えられ、単純には比較できない。

まず、0.2 [mm] (BR0.2-1,2) では 0.3 [mm] (BR0.3) では見られなかった、リードが長い領域 (40 [mm] 以上) で周波数がほぼフラットとなる領域がある。この領域は“リードが長くなったことで空気圧によりリードがシャロットに押しつけられて振幅が小さくなって周期が短くなった”と推察される。音色・成分はあまり変わらないが音が小さくなり (Fig. 10(c)), 周波数が下がらなくなる。これを検証するため、ふいごの錘を変更して圧力を変えて測定した結果を Fig. 11(c) に示

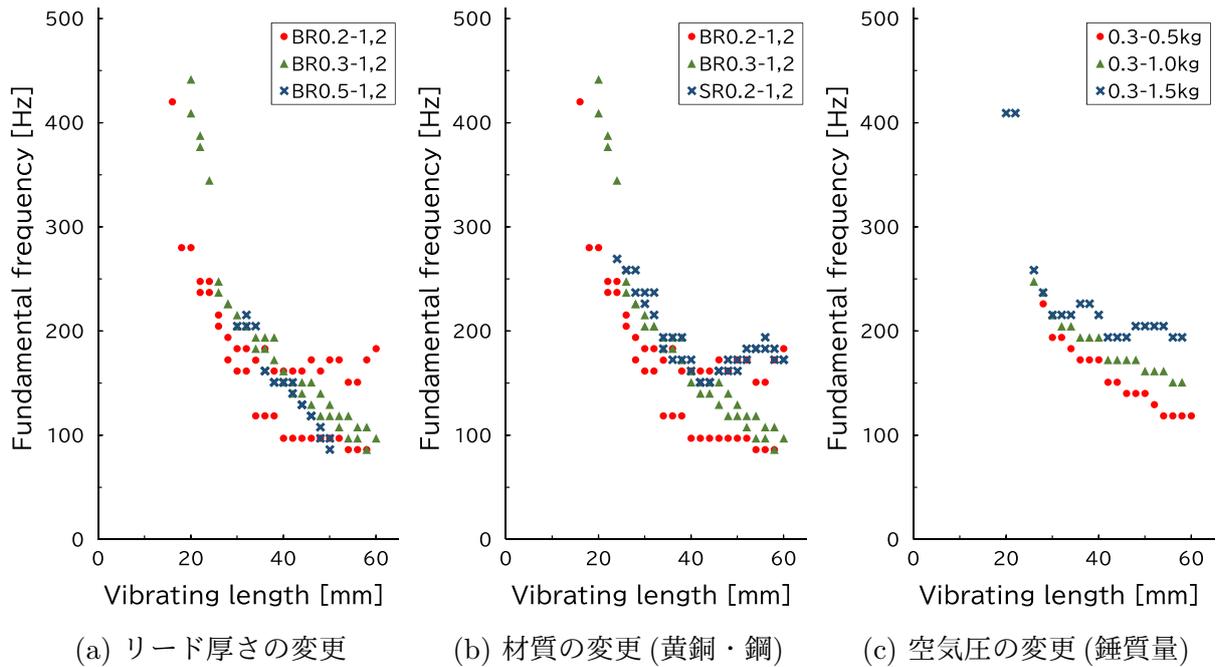


Fig. 11 リード厚さ，材質の変更および空気圧の変更と基本周波数の変化傾向． Experimental results on fundamental frequency with variation in reed thickness, material, and pressure.

す．圧力が高くなるほど，周波数が下がらなくなり，かつ 1.5 [kg] (300 [Pa] 程度) では，0.3 [mm] リードでもフラットな領域が生じた．調律するという観点ではこの領域は周波数の調整ができないことを意味する．

つぎに，上記影響のない振動長 20-30 [mm] を見ると，0.2 [mm] と 0.3 [mm] の周波数の高低比較は利にかなう．すなわち，より剛性の高い 0.3 [mm] で周波数が高い．一方，0.5 [mm] はより高く出ると期待されるが異なる傾向にある．これは 0.5 [mm] 前述のフリーリードとしての振動をしていると見られる (大きさ，音色) ことで説明がつく．フリーリード (単なる片持ちはりの振動) よりも，シャロットに当たる方が振動数が高くなる．当たって跳ね返る挙動があると推測され，リード管の特有の高調波成分につながっているとみられる．さらに，押しつけが強い域ではより周波数が高く出る．それゆえ，この 3 条件の順序となったと考えられる．

Fig. 11(b) では鋼製のリードを用いた (0.2 [mm] 厚のシクネステープを材料とした，SR0.2)．片持ちはりの振動数は，縦弾性係数 E ，

断面二次モーメント I ，密度 ρ ，断面積 A に対して， $\sqrt{EI/\rho A}$ に比例する (また，長さ 2 乗に反比例)．黄銅 0.2, 0.3 [mm] と鋼 0.2 [mm] では，約 2:3:3 となり，黄銅 0.3 [mm] と鋼 0.2 [mm] で近い．鋼 0.2 [mm] ではフラット域が見られるが，振動長 20~40 [mm] ではほぼ重なっている．Fig. 10(d) に示すように音色に波形やスペクトルの特徴は (a) に近いが，サイドローブが広がっている．鋼でもリードを作れるといえるが，錆という点ではかなり不利である．

3.4 実際のオルガンパイプとの比較

Fig. 10(e)(f) は本学土樋キャンパスのトランペット (Trompette) 管から採取したものである．(e) は共鳴管なし (本研究と類似の状態)，(f) は共鳴管のある本来の音である．共鳴管なしで高域まで高調波が続くという特徴，数次先まで上昇するという点に類似性はあるが，耳で聞いて違うほか，周期的な減衰が弱い．かつ，明確に大きな音が出ている．方向性は近いとみられるが，まだ，この差を埋めるには材質の違いを含

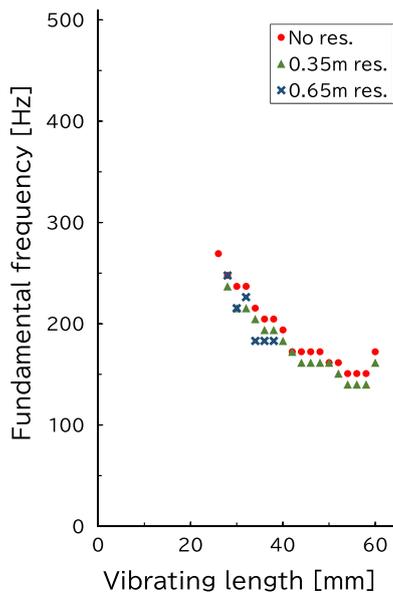


Fig. 12 共鳴管による周波数の変化 (無, 0.35, 0.65 [m]). Effects of resonator on frequency.

めて、検証すべき点は多く残っていると言える。

実オルガンからは他に、クルムホルン (Krummhorn) 管, オーボエ (Hautbois) 管で同様に共鳴管の有無で音を採取したが、いずれも、共鳴管がないときに比べて、共鳴管ありの場合に周波数が低下する。Fig. 12 はこれまでと同条件 (0.3 [mm]) のリード・シャロットに円筒形状の共鳴管を取り付けた際の影響を確認したものである。管の共鳴条件とは無関係に振動長を調整したものであるが、管の存在によって周波数の低下は見られる。冒頭で述べたとおり、シャロットまわりを先行して検討したが、今後は共鳴管部分にも着手する必要がある。

4. おわりに

本研究では、オルガンのリード管を製作するという目的のもと、その各種パラメータがどのように発音に影響するかを基礎的分析を行った。オルガンの歴史により、実践的に多彩な音色のパイプが開発され、定性的な説明はなされているが、定量的・解析的な研究はいまだ多くはなく、実験・評価手法も含めて、結果を報告した。

これらの結果は、従来からある定性的な特性との整合性はある、パイプ製作の基礎的指標の一つとなる。一方で、音色の制御という点ではまだ不十分であるほか、リードの反りのような設計によらず手作業での調整が必要な部分があった。また本研究を通して分析をより深めるべき点が多く見つかっているため、研究の余地は多く残っている。

実オルガンからの音データの採取では、本学教授 今井奈緒子氏, (株) 望月オルガンの望月一郎氏に協力頂いた。この場にて謝意を表す。

参考文献

- 1) G.R. Plitnik: Vibration characteristics of pipe organ reed tongues and the effect of the shallot, resonator, and reed curvature, J. of Acoustical Society of America **107**-6, 3460/3473(2000)
- 2) G.R. Plitnik, J. Angster: The influence of pipe organ reed curvature on tone quality, J. of Acous. Soc. Am. **132**-5, 3502/3511(2012)
- 3) András Miklóš, et.al : Reed vibration in lingual organ pipes without the resonators, J. of Acous. Soc. Am. **113**-2, 1801/1091(2003)
- 4) Péter Rucz, et.al : Examination of the reflection properties of sloping terminations to organ pipes, J. of Acous. Soc. Am. **140**-6, 4213/4224(2016)
- 5) Péter Rucz, et.al : Modeling resonators of reed organ pipes, AIA-DAGA 2013, 283/286(2013)
- 6) 竹内大空: 動的構造を可視化した小型パイプオルガンの製作, 東北学院大学工学部機械知能工学科 卒業研究概要集 (2017)
- 7) 佐々木太一: パイプオルガンに向けたフルー管の研究, 同概要集 (2017)
- 8) 渡辺拓海: パイプオルガンの音の周波数制御, 同概要集 (2017)
- 9) 柴田治樹: パイプオルガンの開発に関する研究, 同概要集 (2018)
- 10) 安藤青空: 自動演奏可能な小型パイプオルガンの製作, 同概要集 (2019)
- 11) 戸村将大: パイプオルガンの音色に関する研究, 同概要集 (2020)
- 12) efu: 高速リアルタイム スペクトラムアナライザ WaveSpectra, <https://efu.jp.net/soft/ws/ws.html>, (2021/11/29 閲覧)