

音色にこだわった吹奏ロボットの開発

矢澤孝哲*・西口暢一**・藪田景士**・扇谷保彦*・小島龍広***

Development of the Brass Instrument Performance Robot

by

Takanori YAZAWA*, Youichi NISHIGUCHI**, Eishi YABUTA**, Yasuhiko OUGIYA* and
Tatsuhiko KOJIMA***

This paper has been written about the development of a robot with an emphasis on tone brass band. First, to analyze and compare the performance of an amateur and a blower, a good sound was defined. Then, an artificial lips equipment to build a model of an artificial lips blowing has been designed and fabricated. Finally, using a prototype artificial lip, playing the trumpet and horn, the validity of the constructing model was confirmed.

Key words: *Tone, Brass instrument Performance Robot, Artificial Lips, Harmonic*

1. 緒言

現在、様々な研究機関・企業で管楽器吹奏ロボットが研究・開発されている¹⁾²⁾。しかし、それらのロボットによる演奏には、音の正確さや勢いはあっても、音楽的な美しさに欠ける印象が否めない。そこで本研究では、音色にこだわった管楽器吹奏ロボットの開発を行うため、

- ①音色と発音メカニズム分析
- ②分析結果に基づく唇振動モデル構築
- ③モデルに基づく人工唇の設計・試作と、トランペットおよびホルンを用いた唇振動モデルの有効性評価について、実験・検討した結果を報告する。

2. 音色と発音のメカニズム

2.1 音色

音色は、音に含まれる倍音と様相から成り立つと考えられている。このうち、本研究ではまず、倍音に注目し、吹奏者と素人による演奏音の比較実験を行った。実験は数人の奏者が1人ずつ220Hz(上のド)の音を

吹き、それぞれFFT解析を行った。また同時にそれぞれの音について聴感による評価も行った。図1に聴感により美しいと評価された音色と美しくないと評価された音色のFFT解析結果を示す。この結果から、美しい音色では、広範囲に渡り、きれいな倍音(高調波)が見られるものの、美しくないと評価された音色には見られない。また、倍音成分以外のノイズが美しくないと評価された音色に見られる。以上より、本研究では美しい音色の定義を「20倍音を確認できること」とした。

2.2 発音のメカニズム

管楽器の発音は管の持つ固有振動数に唇の振動数を一致させることで可能となる。音の調節は管の長さを変えて固有振動数を変化させることで行う。本研究では美しい音色、悪い音色の奏者の唇振動状態を高速度カメラにて観察を行った。図2に唇が最も開いた時の写真を示す。

写真より汚い音色の奏者の唇はほとんど開いていないことが分かる。また、映像より、唇がほぼ左右均一で

平成24年12月17日受理

* システム科学部門 (Division of System Science)

** 工学研究科博士前期課程 (Graduate School of Engineering, Master Degree)

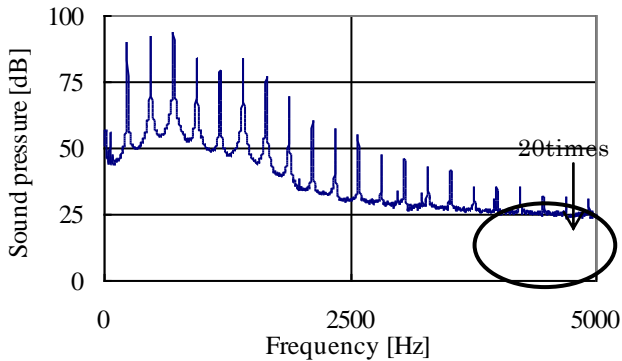
*** 教育研究支援部門(Technical Division)

上下対称に振動していた美しい音色の唇に対し、悪い音色の唇は左右に均一ではなく上下も非対称に振動していた。図1と図2より、唇の複数箇所を中心に振動が発生し、それぞれの振動が干渉し弱めあい、結果としてノイズが発生し、高い周波数の倍音が発生しないと考えられる。以上より、美しい音色実現のためには、唇の振動数を管の共振周波数と一致させ、振動させる必要があり、これを実現するための人工唇の製作が必要であると考え、製作・評価した。

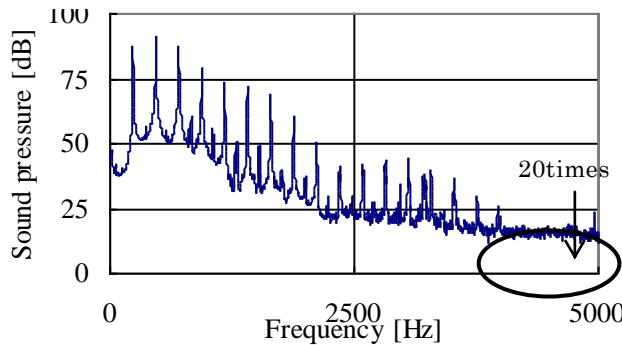
3. 人工唇

3.1 唇振動モデル

実際の唇では、唇の振動数の制御を、唇周辺の筋肉

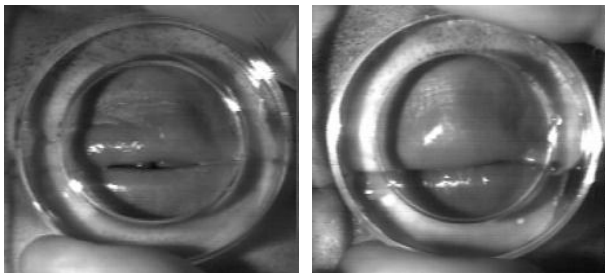


(a) Good sound



(b) Bad sound

Fig.1 FFT analysis



(a) Good lip vibration (b) Bad lip vibration

Fig.2 State of vibration of lip

により、唇の硬さと張力を制御することにより行って

いる。そこで人工唇の振動数の制御を人工唇に張力を与えることで張力において行うこととした。 f を振動数、 l を振動体の長さ、 T を張力、 ρ を振動体の密度、 k を唇弾性係数、 x を唇の変位量とすれば、式(1)、(2)のようになる。これより、より、美しい音色奏者の楽器演奏時の唇弾性係数 k を求めることができれば、人工唇に使用する材料の硬さやゲルに与える張力を求めることができ、唇振動数の制御が可能となること分かる。

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \dots (1)$$

$$T = kx \dots (2)$$

以上より、次のような楽器吹奏時の唇振動モデルを構築し、唇弾性係数を求めることとした。前記の図2より、理想的な唇の上下は対称運動をしていると考え、以下では上唇部だけのモデルとしている。

図3の(a)はリップモデルであり、正面から見たものである。このとき S_2 は唇下面の面積を示している。図の(b)(c)はこのモデルの上半分を側面から見たものであり、唇は流路に対して θ の角度を持って弾性係数 k のバネで固定されている。今、流路に圧力 P_1 が発生すると、唇は押し上げられ(c)の状態となる。すると今度はバネの力で下に押し下げられ(b)の状態に戻る。この運動を反復して行うことにより唇の振動が起こる。ここで、(c)の時の唇下面に働く力は $P_1 S_2 \cos \alpha$ で表され、この時の鉛直方向の力のつりあいより、 k は式3で表される。式の P_1 、 S_2 、 α 、 x_{max} はそれぞれ唇振動状態の観察、口内圧力測定を行い、取得することで各音の吹奏に必要な k の算出を行った。

$$k = \frac{P_1 S_2 \cos \alpha}{x_{max}} \dots (3)$$

3.2 唇振動モデル検証実験

上記のモデルの有効性を確認するため、モデルの実証実験を行った。実験は吹奏機会の多い、110Hz(下のド)から260Hz(上のレ)までの各音を吹いている

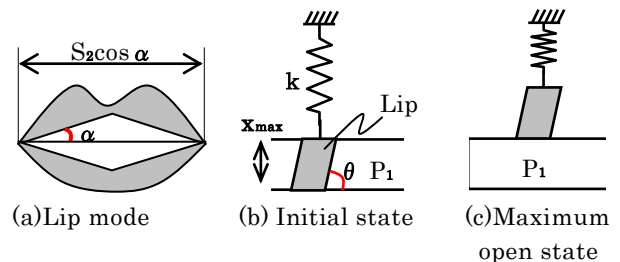


Fig.3 Lip vibration model

ときの唇弾性係数 k を求めるため、唇振動状態の観察、

口内圧力測定の実験を行ったあと、実験で得た弾性係数に近い値のゲルを製作し、これによる吹奏実験を行った(図4)。唇振動状態の観察では図3の S_2 , α , x_{max} を求めるため高速度カメラを用い、口内圧力測定では口内圧力 P_1 を求めるためゲッチングマンメータを用いて測定を行った。また、実験では唇振動の管の共振による影響を省くためマウスピースを使用した。図5に唇振動モデルを用いて求めた、人の楽器吹奏時の唇振動数と唇弾性係数のグラフ、ゲルを用いてマウスピースを鳴らしたときのゲル振動数とゲル弾性係数のグラフを示す。

グラフより、両者は非常に近い値となっており唇振動モデルの有効性を示している。これより、人工唇に人の唇弾性係数に最も値に近い、115N/mのゲルを人工唇に用いることとした。

3.3 人工唇の可奏音

人工唇による可奏音と各音を吹奏するのに必要となる張力を求めるため、製作した人工唇を用いた吹奏実験を行った。実験は図4のゲルに任意の張力をかけながら、その時の吹奏を求めた。図6にゲルを用いてマウスピースを鳴らしたときの演奏音とゲルに与えた張

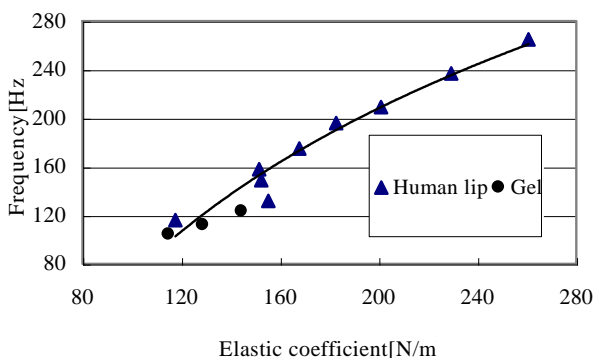
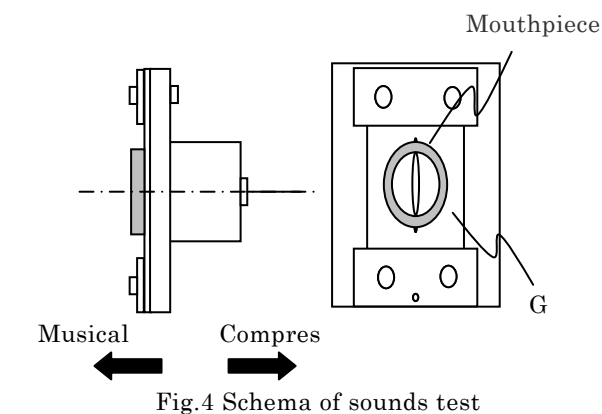


Fig.5 Relationship of elastic coefficient and frequency

力のグラフを示す。グラフより、このゲルは110Hz(下のド)から270Hz(上のミ)程度まで演奏可能であることが分かる。

4. 倍音測定実験

4.1 測定実験方法

前述のように唇振動モデルの一般性を評価するため、今回はホルンとトランペットの音色についてFFT解析を行った。実験装置を図7、人工唇制御装置の模式図を図8、制御装置の仕様を表1、制御装置の写真を図9に示す。本実験では、トロンボーンと同様、図7のように233[Hz](B♭3)の音をチューナを見ながら吹き、楽器のベルから直線約300[mm]の位置に設

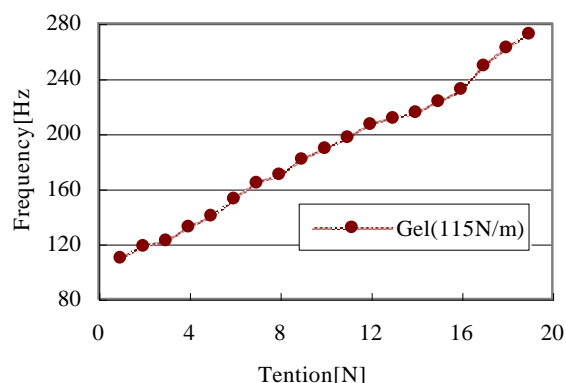


Fig.6 Relationship of tention and frequenc

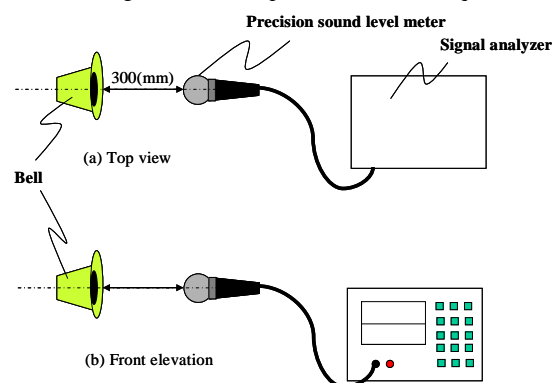


Fig.7 Scheme of sound analyzing experiment

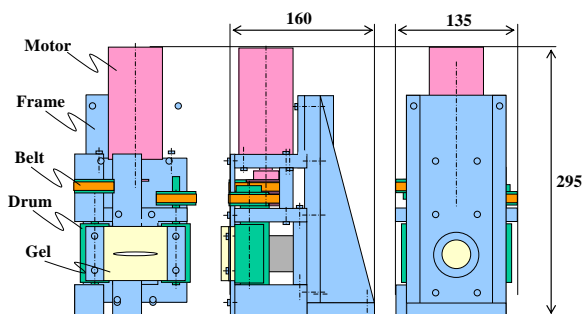


Fig.8 Cartoon of artificial lip unit

置したレベルメータ(小野測器, 精密騒音計 LA-5560)

により音を取得し FFT 解析した. いずれも 8[s]の間の音を吹いてもらい, その間の 5 点を FFT 解析機(Rion, Signal analyzer SA-74)により取得し平均化して算出した. ここでのサンプリング点数は装置の最大値である 4096 点, サンプリング周波数はサンプリング点数との兼ね合いより 5[kHz]としている. ホルンの FFT 解析結果を図 10, トランペットの FFT 解析結果を図 11 に示す.

4.2 測定結果と考察

図 10, 図 11 より,

- 1) ホルンとトランペットいずれにも 5kHz までの範囲すべてにおいて倍音を観測できること
- 2)ホルンでは最大となる周波数が 466Hz であるのに対し, トランペットでは 1165Hz であることがわかる. また聴感評価により, 今回取得したホルンとトランペットの音色は比較的美しい音色であることが分かっている. このため, ホルンとトランペットでも 20 倍音の確認が美しい音色評価の基準として問題ない. すなわち, これらの楽器でも既存の人工唇モデルと算出式を用いての人工唇ユニットでの音色評価が有効であることを示している.

また図 1(a)より, トロンボーンの最大となる周波数は 466Hz または 699Hz であり, ホルンと近い値である. ここで, トランペットの可奏音域は, トロンボーンとホルンの可奏音域よりも 1 オクターブほど高い音域である. 1 オクターブ上がることは, 周波数で 2 倍高いことに相当する. したがって本実験では, トランペットの最大となる周波数が, トロンボーンおよびホルンのおよそ 2 倍の 1165Hz に表れていると考えられる.

5. 結言

音色にこだわった管楽器吹奏ロボット開発を目的として実験検討した結果, 以下の結論を得た.

- 1) 音色と発音メカニズム分析に基づき, 唇振動モデルとその音色評価方法(20 倍音存在評価)を提案した.
- 2)振動モデルに基づく人工唇制御装置を試作, その有効性を確認した.
- 3)トランペットおよびホルンを用いて演奏した場合でも同様の方法で評価できることを示し, 金管楽器吹奏における唇振動モデルを一般化の可能性を見出した.

参考文献

- 1)金子ほか: トロンボーン自動吹鳴装置の開発, 筑波大学修士論文 (2005)

- 2)鈴木ほか: トロンボーン自動演奏ロボットの制御下唇によるピッチ制御機構の検討, 法政大学修士論文 (2005)
- 3)藪田ほか: 音色にこだわった管楽器吹奏ロボットの開発 日本機械学会九州支部講演論文集 (2009), pp.149-150

Table 1 Specifications of artificial lip unit

Performance tone	As-b(101Hz-221Hz)
Air pressure [Pa]	3,000
Dimension [mm]	135(W)x160(D)x295(H)

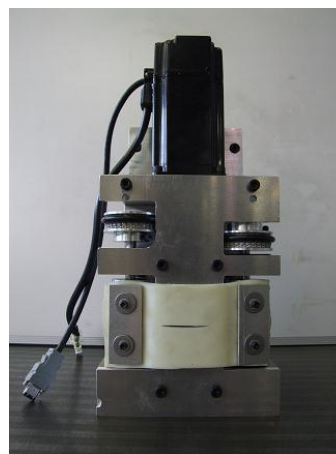


Fig.9 Picture of artificial lip unit

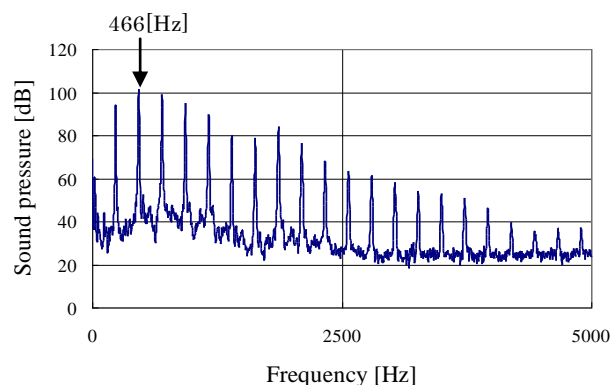


Fig.10 Result of FFT analysis of 233Hz sound by horn

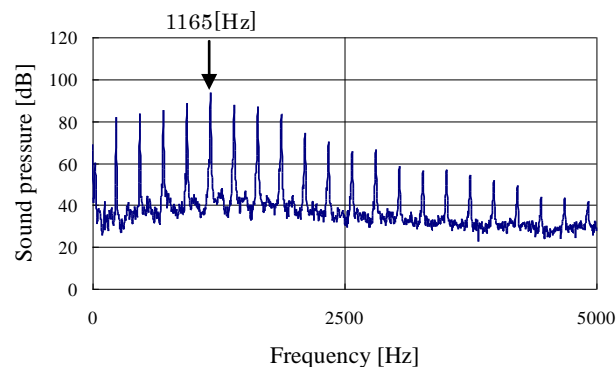


Fig.11 Result of FFT analysis of 233Hz sound by trumpet