

報告日 2019年(令和 1年) 7月 1日
報告者 九州大学大学院工学研究院機械工学部門 准教授
石川 諭

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

笛式人工喉頭を用いた発声システムの開発

(2)研究者氏名

石川 諭 九州大学大学院工学研究院機械工学部門 准教授

(3)研究概要 (日本文)

喉頭がんなどにより喉の声帯の摘出手術を行った場合の代替発声法の1つに、ゴムチューブの端を気管孔にあてて肺からの空気を吐き、チューブ途中のゴム膜を振動させて発生した振動流を口に入れて発声する笛式人工喉頭がある。この発声法は容易に発声を修得でき、使用者の会話満足度は高い。しかし、チューブを気管孔にあてるため片手が塞がれるとともに、健常者の声と比較して音声が単調な問題がある。本研究では、小型送風機を用いて笛式人工喉頭に空気を供給し、手を使わず発声できる代替発声システムを開発する。人工喉頭の解析モデルを作成して発声のメカニズムを解明し、送風機の小さい圧力で振動し、自然な発声可能な人工喉頭を製作する。

(4)キーワード

笛式人工喉頭, 代替発声法, 自励振動, 小型送風機, 集中系モデル

(英文)

(1) Research title

Development of vocal system by using pneumatic artificial larynx

(2) Name of researcher with title of position

Satoshi Ishikawa, Associate Professor, Kyushu University

(3) Summary

One of the alternative vocalization methods when removing the vocal cords of the throat due to laryngeal cancer etc. is pneumatic larynx. This method can be easily learned, and the user's speech satisfaction is high. However, because the tube of the pneumatic larynx is placed in the trachea, one hand is closed, and the voice is monotonous. In this study, we develop an alternative vocalization system that use a small fan to supply air to the pneumatic larynx and make it possible to vocalize without using a hand. The analysis model of the pneumatic larynx is made to clarify the mechanism of the vibration. Furthermore, the pneumatic larynx which vibrates with the small pressure of

the blower and can make natural utterance is developed.

(4) Key Words

Pneumatic larynx, Alternative speech method, Self-excited vibration,
Small blower, Concentrated mass model

2. 本研究の意義・特色

本研究では、代替発声法の 1 つである笛式人工喉頭において、小型送風機を用いて手を使わず、自然な発声できるシステムを開発する。まず、笛式人工喉頭の振動解析モデルを作成して実験結果と比較し、これまで詳細に解明されていない人工喉頭の振動のメカニズムを解明する。そして、低圧力で駆動できる笛式人工喉頭を設計可能にする。さらに、自然な発声を可能にする笛式人工喉頭の振動方法（音源波形）を明確にする。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

3.1 笛式人工喉頭のモデル化

本研究では人間の呼気の代わりに送風機を用いて笛式人工喉頭を用いて振動させ、手を使用せずに発声するシステムを開発（図 2）する。本研究で用いる人工喉頭は、ゴム膜型笛式人工喉頭（図 3）と鳴管型笛式人工喉頭（図 4）である。ゴム膜型笛式人工喉頭は市販（阪喉会）のものを用い、図 3 のゴム膜が振動して振動流が発生する。鳴管型笛式人工喉頭は宮本[1]によって提案されたものを試作し、弁にはステンレス製の金属箔を使用している。これらの人工喉頭の振動発生メカニズムの解明と発声システム設計に用いるための数値計算モデルを作成した。

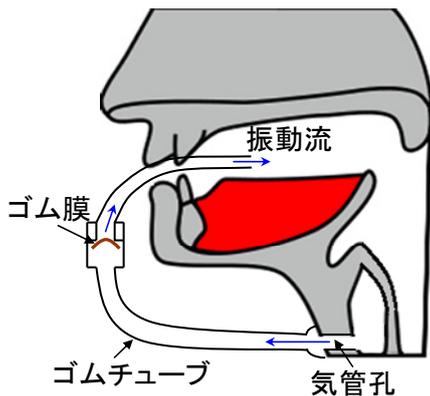


図 1 笛式人工喉頭（通常）

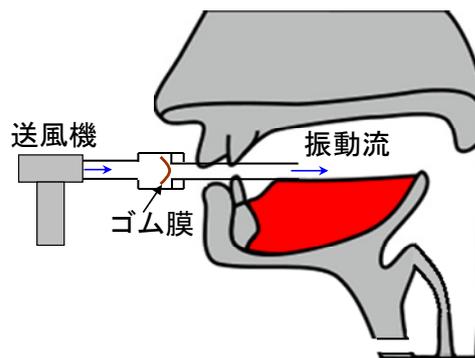


図 2 提案システム

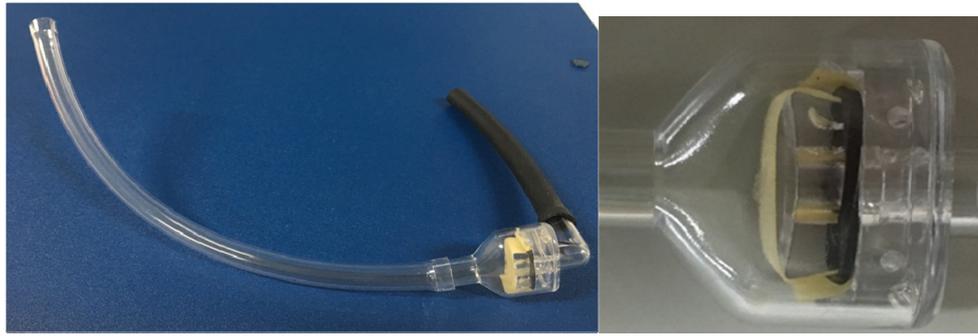


図3 ゴム膜型笛式人工喉頭



図4 鳴管型笛式人工喉頭

笛式人工喉頭の断面図は図5のようになり、笛部、上流チューブ、下流チューブで構成される。モデル化は、上流、下流チューブ内の音響モデルと笛部弁の振動モデルに分け、それら2つのモデルを連成する。ゴム膜型笛式人工喉頭と鳴管型笛式人工喉頭で弁モデルが異なり、管内音響モデルは両人工喉頭で同じものとする。

チューブ内の空間は、図6のような多自由度集中系[2]でモデル化する。チューブ内の空間を要素に分割し、空気を質量、結合ばね、結合減衰でモデル化する。質量は空気の質量を接点に集中させ、

$$m = \rho_0 A l \quad (1)$$

ここで、 ρ_0 は平衡状態の密度、 A はチューブの断面積である。結合ばねは、空気の圧縮性を考えて、ばね定数は、

$$k = \frac{p_0 A \gamma}{l} \quad (2)$$

ここで、 p_0 は平衡状態の圧力、 γ は比熱比、 l は要素長さである。結合減衰は空気を体積変化させたときの法線応力を考えて、減衰係数は、

$$c = \frac{\mu' A}{l} \quad (3)$$

となる。ここで、 μ' は体積粘性係数である。また、要素*i*内の音圧 dp_i は、質点の変位 x_i を用いて次式のように表せる。

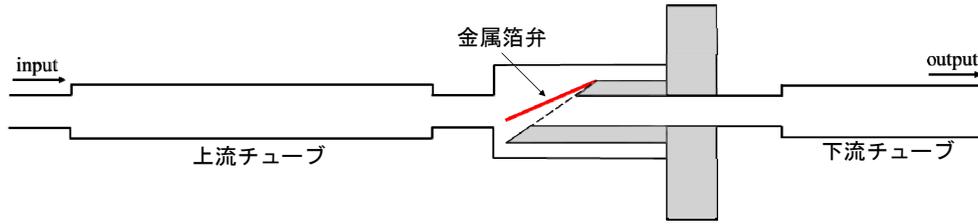


図5 笛式人工喉頭断面図

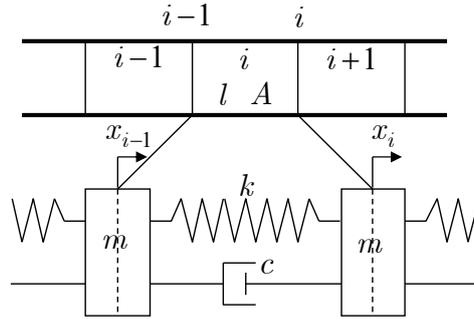


図6 集中系モデル (チューブ内音響モデル)

$$dp_i = k(x_i - x_{i-1}) \quad (4)$$

次に、ゴム膜を図7のような質量・非線形ばね・減衰からなる1自由度系でモデル化する。圧力が加わっていないとき、弁と弁座までの距離を Z_u とし、圧力を加えた平衡状態における弁と弁座までの距離を Z_0 とする。弁の受圧面積を A_v 、弁直前と弁直後の音圧を dp_u 、 dp_d とすると、弁の運動方程式は次式ようになる。

$$m_v \ddot{z} + c_v \dot{z} + f_k = A_v (dp_{u,n} - dp_{d,1}) \quad (5)$$

ここで、 m_v は弁の質量、 c_v は減衰係数、 f_k は非線形復元力、 z は弁の平衡状態からの変位である。

一方、鳴管型人工喉頭の弁は、図8のように剛体板、非線形回転ばね、回転ばねで構成される1自由度の回転系でモデル化する。このときの運動方程式は、

$$I_v \ddot{\theta} + c'_v \dot{\theta} + N_v(\theta) = A_v l_v (dp_u - dp_d) \quad (6)$$

ここで、 N_v は弁の非線形復元トルク、 θ は弁の平衡状態からの回転角である。

図9にチューブ内音響空間と弁振動の連成モデルを示す。図のように弁直後の質点の速度 $\dot{x}_{d,1}$ に弁の隙間を通過する流量変動を与えることで、弁振動と音響空間の連成を行う。弁の隙間を通過する流量変動 q は、ベルヌーイの式を考慮して[3]、

$$q = \alpha(S_0 - s) \sqrt{\frac{2\{P_0 + (dp_{u,n} - dp_{d,1})\}}{\rho_0}} - Q_0 \quad (7)$$

ここで、 Q_0 は平衡状態における流量、 S_0 は平衡状態における弁の隙間面積、 s は隙間面積の変動量である。 S_0 および s は、ゴム膜型と鳴管型のそれぞれの弁で考慮する。

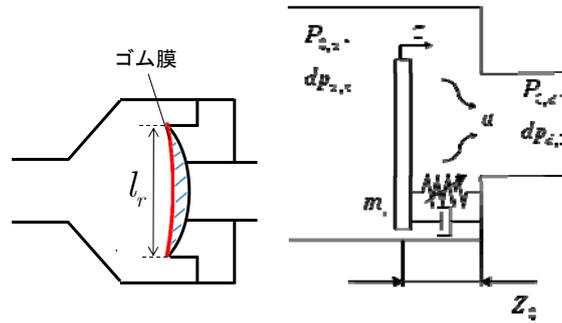


図7 ゴム膜弁モデル

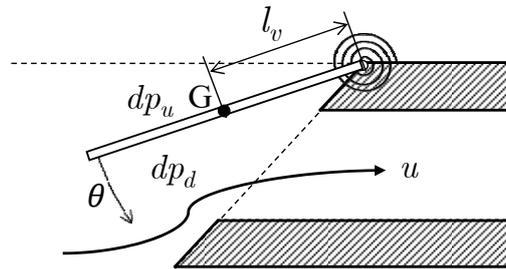


図8 鳴管型弁モデル

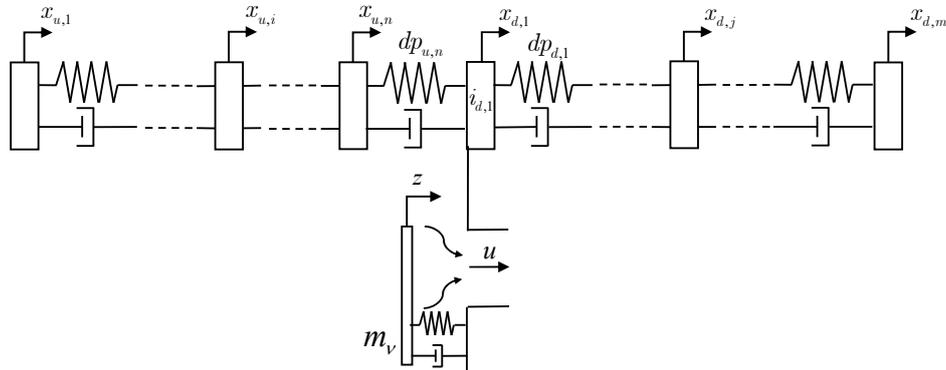


図9 チューブ内音響-弁振動連成モデル

3.2 実験結果と解析結果の比較

本章では、人工喉頭の解析モデルの妥当性を検証するため、エアーコンプレッサを用いて笛式人工喉頭の自励音発生実験を行い、測定結果と解析結果の比較を行う。

実験装置の写真及び模式図を図10、図11に示す。エアーコンプレッサにより空気を供給し、流量計を用いて流量を制御しながら、人工喉頭の上流側のバッファ内の圧力 P_0 を $0 \sim 5000 \text{ Pa}$ の範囲で変化させる。人工喉頭にはゴム膜型、鳴管型の両笛式人工喉頭を用いた。バッファはアクリル製、人工喉頭の上流側と下流側のチューブはビニールチューブである。そして、人工喉頭の下流側チューブの出口に配置したマイクで音圧を計測し、音圧の周波数、波形に関して、実験結果と解析結果の比較を行った。

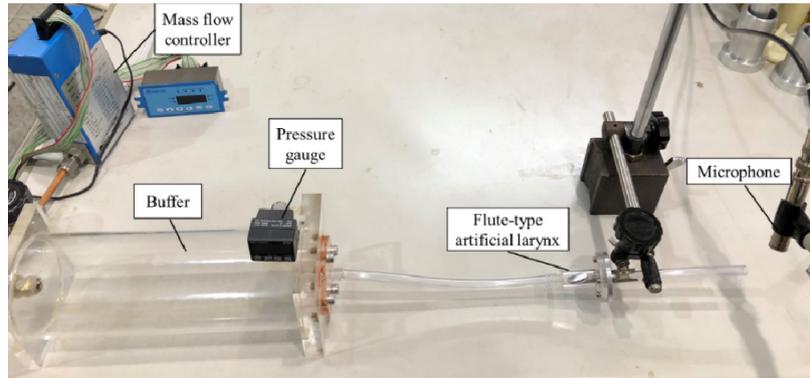


図 10 実験装置

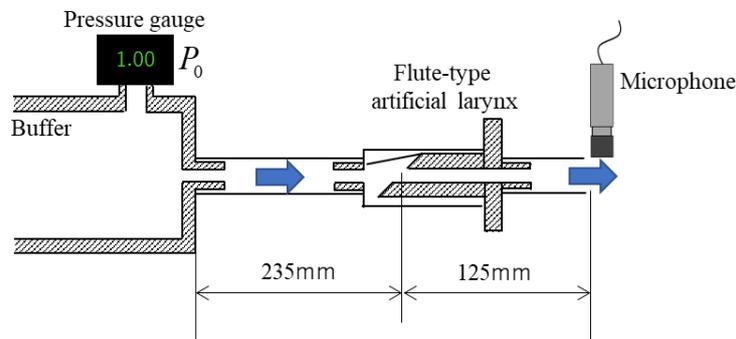


図 11 実験装置 (概略図)

表 1 解析パラメータ

γ	1.4	ρ_0 [kg/m ³]	1.2	μ' [Pa·s]	2.0
m_0 [mg]	26.76	c_v [N·s/m]	0.03	I_v [kg/m ²]	7.044×10^{-10}
c'_v [N·s/m]	1.224×10^{-8}	α	0.5		

数値解析は、集中系モデルを用いて、ルンゲクッタ法による時刻歴解析を行う。時間刻みは 0.25 ns、要素分割数は弁上流部分を 47、弁下流部分を 25 とした。解析範囲はバッファ直後の人工喉頭上流管入口から人工喉頭下流管出口までであり、両端の境界条件は自由端としている。人工喉頭下流の平衡状態圧力は大気圧 (101.3 kPa) とする。解析に用いる他のパラメータを表 1 に示す。弁のパラメータは自由振動実験を行い求めている。

図 12 に鳴管型とゴム膜型の人工喉頭の自励音の発生領域を示す。横軸はバッファ部の圧力 P_0 、縦軸は自励音の 1 次振動数であり、実験結果と解析結果を比較している。ゴム膜型が振動する最低圧力は 1380 Pa であるのに対し、鳴管型は 410 Pa と大幅に必要な圧力が減少していることが分かる。これより、鳴管型人工喉頭の方が低い圧力で振動可能であることが分かる。解析結果は、ゴム膜型で実験結果と若干の違いはあるものの、鳴管型は解析結果と実験結果がよく一致している。また、ゴム膜型が 200 Hz~250 Hz の音であるのに対し、鳴管型は 90 Hz~150 Hz となり、鳴管型人工喉頭の方が周波数は小さい。ゴム膜型が発する

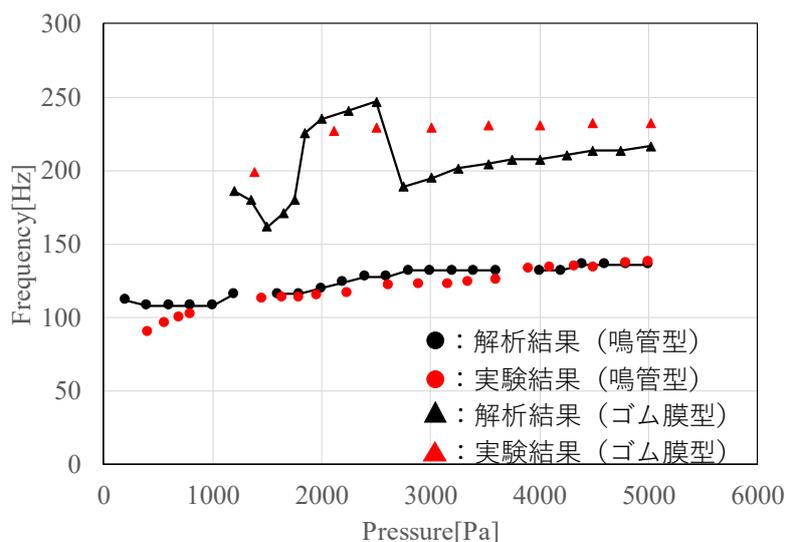


図 12 バッファ圧力を変化させたときの振動数

音は女性の声帯部の音の周波数に近く、鳴管型が発する音は男性声帯部の音の周波数に近い
ため、実用上問題がないと考える。図 12 より、鳴管型の方がゴム膜型よりも低い圧力で
振動し、小型ファンを用いたシステムに適しているため、以下では鳴管型を検討する。

図 13 に鳴管型の実験結果と解析結果の比較を示す。横軸はバッファ部の圧力 P_0 、縦軸は
自励音の 1 次振動数である。解析結果の方が低圧領域で若干振動する圧力の範囲が広いが、
振動範囲、振動数ともに実験結果と解析結果がよく一致していることが分かる。以上より、
提案した集中系モデルが妥当であることを確認した。また、鳴管型で $P_0 = 560 \text{ Pa}$ における
音圧の時刻歴波形と FFT を用いたパワースペクトルの結果を図 14 に示す。図 14 より、実
験結果、解析結果ともに、ある周期の同じ波形が何度も続き、FFT 結果も等間隔のピークが
きれいに並んでいることから、 $P_0 = 560 \text{ Pa}$ における振動は定常周期解であることが分かる。
実験結果と解析結果の時刻歴波形を比較すると、波形はよく一致している。ただし、振幅
が実験と解析で異なっているが、これは実験では管出口より外側での音圧を測定している
一方で、解析では管内の最も出口側の要素における音圧を求めているためである。定常周
期解は図 13 の黒○の領域で発生している。

上記のように、定常周期解が存在する一方、図 13 の紫色の○で示した領域ではカオスが
発生している。図 15 は、実験結果は $P_0 = 1000 \text{ Pa}$ 、解析結果は $P_0 = 1400 \text{ Pa}$ における時刻
歴波形と FFT 結果を示している。波形は周期的ではなく、FFT 結果は明確なピークが無い
ため、カオス振動といえる。また、図 13 の黒○、紫○以外の領域は、定常周期解とカオス
振動の中間の概周期解となる。以上より、鳴管型人工喉頭では、定常周期解とカオス振動
解、概周期解が存在することが実験と解析により分かった。このカオス振動もしくは概周
期解はゆらぎを持つため、これらを用いて人工喉頭による自然な発声が可能になるかもし
れない。

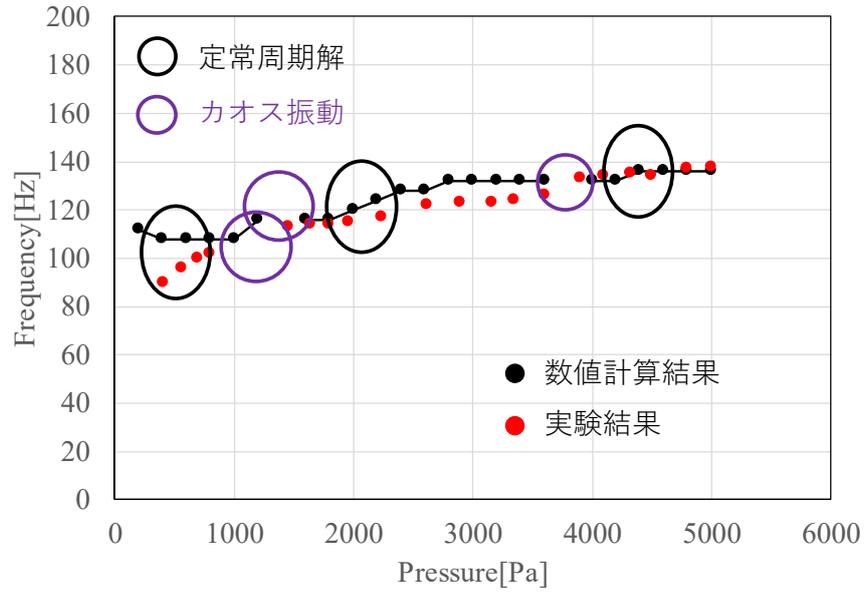


図 13 バッファ圧力を変化させたときの振動数 (鳴管型)

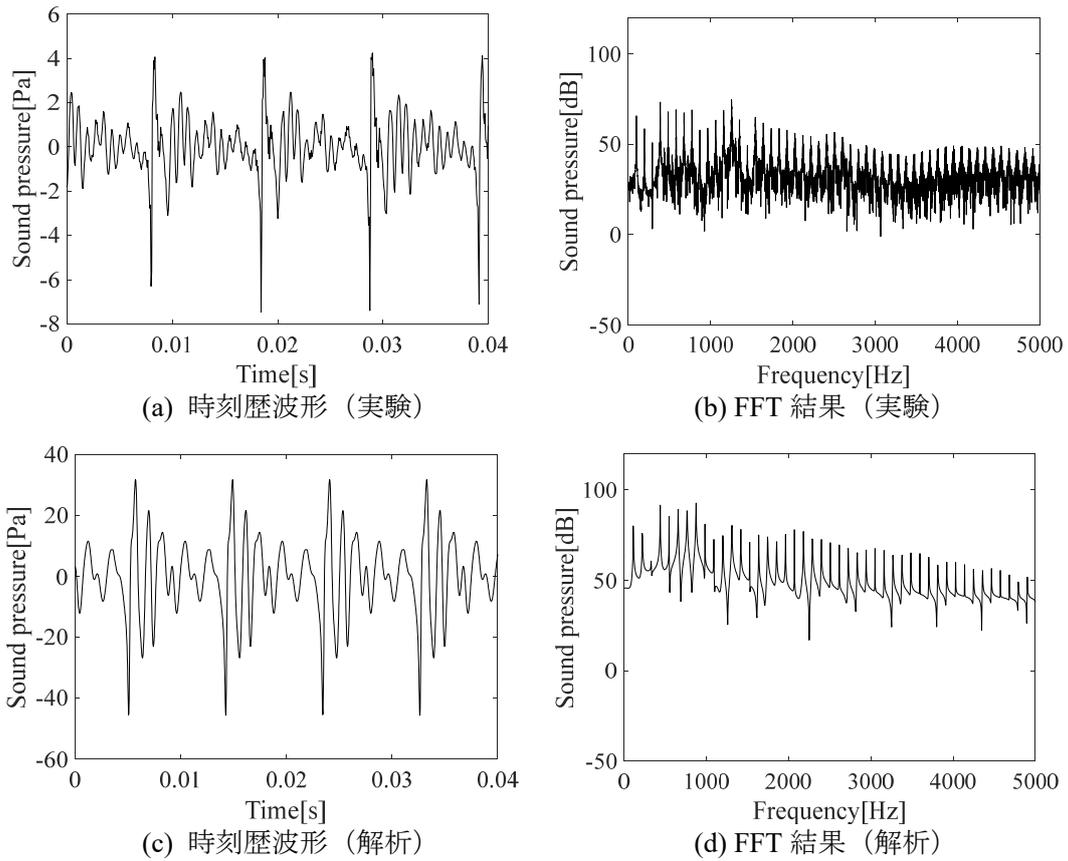


図 14 時刻歴波形と FFT 結果 ($P_0=560\text{Pa}$, 定常周期解, 鳴管型)

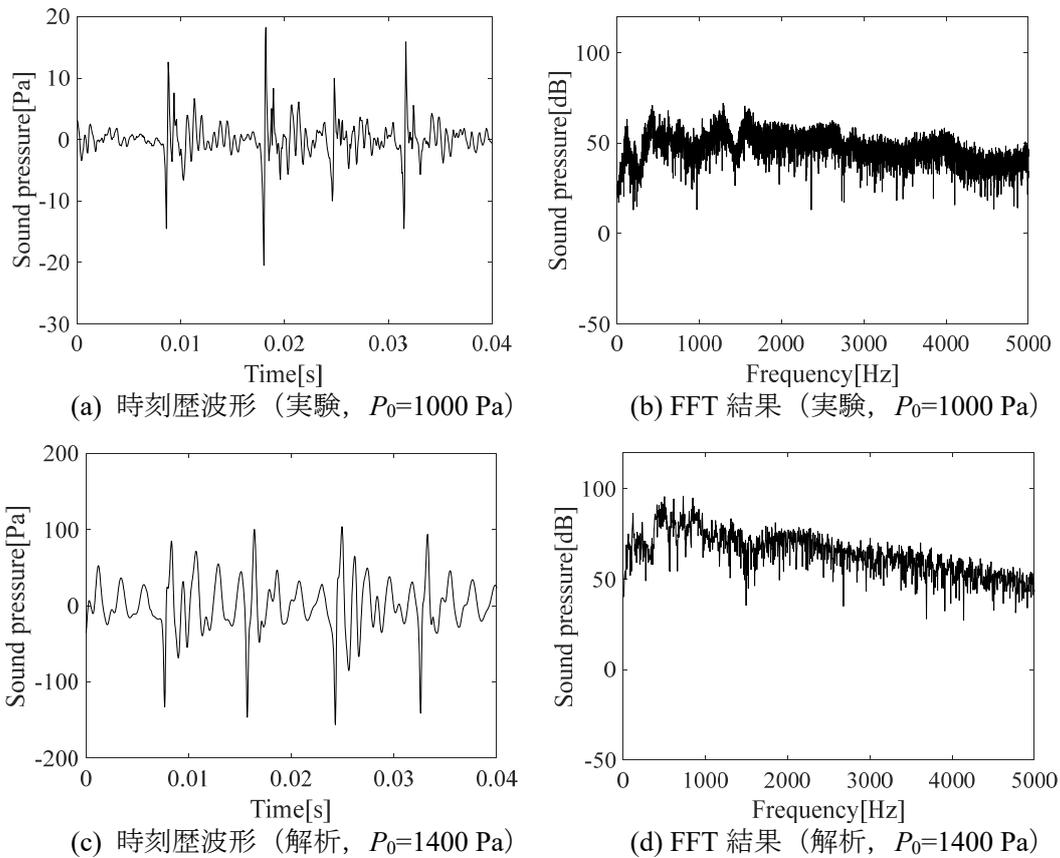


図 15 時刻歴波形と FFT 結果 (カオス振動, 鳴管型)

また, 提案した解析モデルで人工喉頭の自励振動を再現できるため, 自励振動の発生メカニズムとして, 弁振動とチューブ内音響の連成により振動が発生する. これは, 弁振動によって発生した音がチューブの一端で反射し弁に戻ってきたときにさらに弁を振動させる (負減衰作用) メカニズムとなっている.

3.3 小型ファンと声道模型を用いた発声実験

鳴管型笛式人工喉頭と小型ファンを用いて発声実験を行う. 図 16 に装置の写真を示す. 小型ファンには山洋電気製, San Ace B76 (DC ブロアファン) を用い, 小型ファン吐出口にバッファを取り付け, その先にチューブ, 鳴管型笛式人工喉頭を取り付ける. このファンで発生可能なバッファ内の圧力は 350 Pa であり, 図 12 の振動可能最低圧力 (410 Pa) よりも低い圧力しか得られなかったが, チューブを手で握って擾乱を与えることで, 人工喉頭を振動させることができた. そして, 図 17 のように, 人工喉頭の下流チューブを声道模型に入れて, マイクで音を測定する. 図 18 に実験で使用した声道模型 (ATR-Promotions 製, VTm01-Ja01) を示す. この模型は成人男性が「あ」と発話する時の声道形状を MRI で記録し, 立体的に復元したものである.

図 19 に, 小型ファンを用いた実験装置による発声音を示す. 時刻歴波形より各周期の振

幅が変動しており，概周期振動となっている．実際の音を聞いてみるとそれなりに「あ」の音に聞こえるが，若干機械音的である．発声音のさらなる自然性の獲得は今後の課題である．

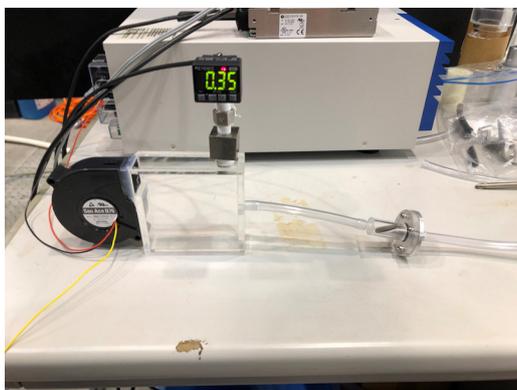


図 16 小型ファンによる発声装置（山洋電気製，San ace b76）

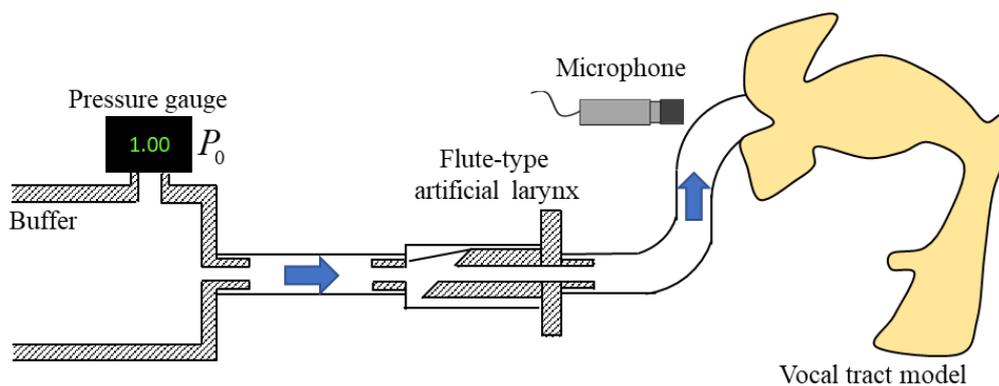


図 17 発声音測定装置



図 18 声道模型（ATR-Promotions 製，VTm01-Ja01）

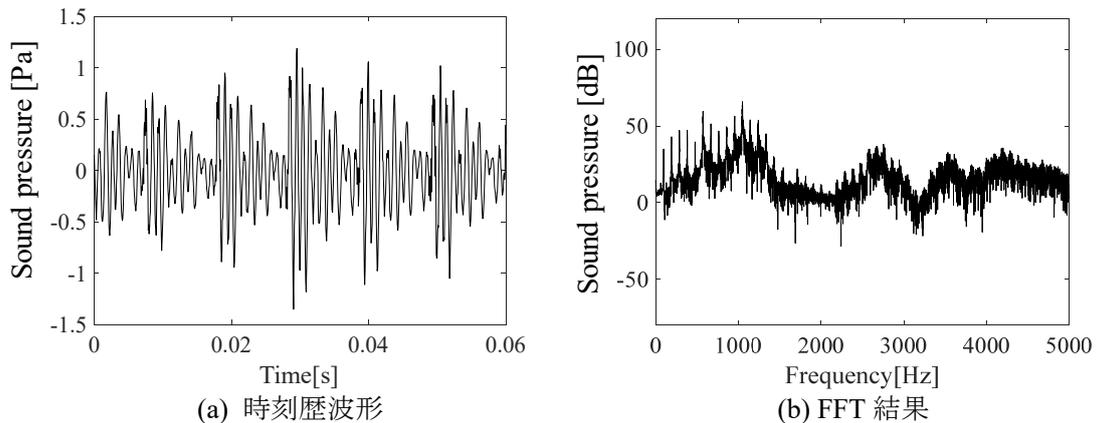


図 19 小型ファンを用いた発声システムによる「あ」の発声音

3.4 まとめ

以上の内容をまとめると、以下のようになる。

- ・ ゴム膜型笛式人工喉頭と鳴管型笛式人工喉頭のそれぞれで、弁部とチューブ内の空気を多自由度集中系によりモデル化し、解析モデルを提案した。
- ・ エアーコンプレッサを用いて、ゴム膜型、鳴管型それぞれの人工喉頭の自励音測定実験を行い、解析モデルの計算結果と比較した。その結果、カオス振動も含めて測定結果と解析結果がよく一致し、解析モデルの妥当性を検証した。
- ・ 振動するために必要な圧力は、鳴管型人工喉頭の方がゴム膜型人工喉頭に比べて小さい。また、鳴管型人工喉頭はカオス振動や概周期振動が発生し、発声がより自然になる可能性がある。よって、鳴管型人工喉頭の方が小型ファンを用いた発声システムに向いていることが分かった。
- ・ 笛式人工喉頭の自励振動発生メカニズムは、弁振動と音響の連成によるものである。
- ・ 小型ファンと鳴管型人工喉頭、「あ」の声道模型を用いてと発声させ、それなりに「あ」と聞こえる音を発声できた。

参考文献

- [1] 宮本健作, 声を作る・声を見る-九官鳥から人へ-, 1995, 森北出版
- [2] 石川諭, 近藤孝広, 松崎健一郎, 集中家モデルによる非線形圧力波の解析 (第1報), 日本機械学会論文集 C 編 75(753), 1436-1443, 2009
- [3] 葉山眞治, 昇圧開型弁が出口に付いた管路系の安定性解析, Dynamics & Design Conference 2006 講演予稿集, 2006

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

石川 諭 九州大学 准教授

雉本 信哉 九州大学 教授

5. 研究実施時期

2017年（平成29年）3月1日から 2019年（平成31年）3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

○小川史晃, 石川諭, 雉本信哉, 木庭洋介, 山浦宏樹, 「笛式人工喉頭を用いた発声システムの開発」日本機械学会九州支部第71期総会・講演会, 2018.03.

○檜枝透, 石川諭, 雉本信哉, 木庭洋介 「笛式人工喉頭を用いた発声システムに関する研究」日本機械学会九州支部九州学生会第50回学生員卒業研究発表講演会, 2019.03.

後日, 論文集に投稿予定

7. 内外における関連研究の状況

人工喉頭の研究に関しては, 圧電振動子を用いた人工喉頭や筋電位の活用に関する研究が見られるが, 笛式人工喉頭に関する研究は近年見当たらない.

8. 今後の発展に対する希望

発声システムの実用化に向けて, 今後の課題は以下のようなになる.

- 音の変調やゆらぎ, 周波数特性など音声の自然性において重要なパラメータを明確にする.
- 唇側からチューブを入れたときの声道（口内）の音響伝達特性を測定, 解析で明らかにし, 人工喉頭を用いて明確な音声を発声するための指針を作成する.
- 小型ファンの選定.
- 鳴管型人工喉頭の寸法・材質, チューブ長さを解析モデルを用いて最適化する.

< 見本 >

報告日 2010年(平成22年) 8月14日

報告者 摂津大学 理工学部 准教授

山田 太郎

1. 研究概要

(和文)

(1)課題名 (日本語)

動圧を利用した砥石摩擦のインプロセス測定法の適用による研削の高度化

(2)研究者氏名

山田 太郎 摂津大学 理工学部 准教授

(3)研究概要 (日本文)

本研究では、インプロセス測定により.....
.....
.....

生産に有効であると考えられる。

(4)キーワード

動圧力, 摩耗, //

(英文)

(1) Research title

In-process measurement of wear of grinding wheel by using hydrodynamic Pressure

(2) Name of researcher with title of position

Taro Yamada, Associate Professor, Settu University

(3)Summary

In this project, we have developed an application to automatic compensation
//
//

This method is useful for the precision production of hydraulic cylinders.

(4)Key Words

Hydrodynamic pressure, wear, in-process measurement, repeatability,
Compensation

2. 本研究の意義・特色

高機能部品を高精度に・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

インプロセス測定が可能となる。

3. 実施した研究の具体的内容、結果（本文）

<省略>

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

山田 太郎 摂津大学 准教授

5. 研究実施時期

2009年（平成21年）4月1日から 2010年（平成22年）5月25日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

Taro Yamada, Hideki Yukawa Automatic Compensation for Wear of Grinding Wheel

//
//

7. 内外における関連研究の状況

<省略>

8. 今後の発展に対する希望

<省略>