

乳児様発話ロボットの口唇機構の開発

○川内 裕史 (大阪大学), 遠藤 信綱 (東京電機大学), 小島 友裕 (大阪大学)
浅田 稔 (大阪大学)

Development of Artificial Lips of Infant-like Vocal Robot

○Hirofumi KAWACHI (Osaka University), Nobutsuna ENDO (Tokyo Denki University),
Tomohiro KOJIMA (Osaka University), and Minoru ASADA (Osaka University)

Abstract: To improve clarity of vowels of an infant-like vocal robot *Lingua*, we developed artificial lips by using soft material and wire-driven mechanism. We evaluated reproduction of opening shapes of Japanese 5 vowels, deformation of pursing and protrusion of the lips, and their acoustic effect.

1. 緒言

音声言語は、他者とのコミュニケーションにおいて重要な役割を持っている。乳児は養育者とのインタラクションを通して音声言語を発達させていくことが示唆されている[1]。従来は実際の乳児を対象に観察的実験が行われてきたが、倫理的な問題や乳児の行動を統制することの難しさが存在し、音声言語の発達過程を解明するには至っていない。そこで、実際の乳児にかわり、統制可能な乳児様のロボットを用いることによって解明することを試みてきた。このプラットフォームには乳児の基本的な発話に加え、リアルタイムなインタラクションが可能な発話ロボットが適切であると考

え、乳児様発話ロボット *Lingua* の開発を行ってきた[2][3]。そして、この発話ロボットとコンピュータシミュレーションの双方を利用し、乳児と養育者の社会的相互作用による音声獲得のメカニズムを探っている[4]。

しかしながら、*Lingua* は口唇部を持たず、母音の発声が不明瞭であり、破裂音などの子音の発声ができなかった。そこで柔軟な口唇を備える乳児様発話ロボット *Lingua-R* を開発した (Fig. 1)。

母音発話の明瞭化と子音の発話の実現を目標に口唇部の開発を行った。日本語 5 母音の開口形状を再現できた。また、母音/u/について、口唇の変形形状による音響的效果を確認した。以下に、*Lingua-R* の口唇機構

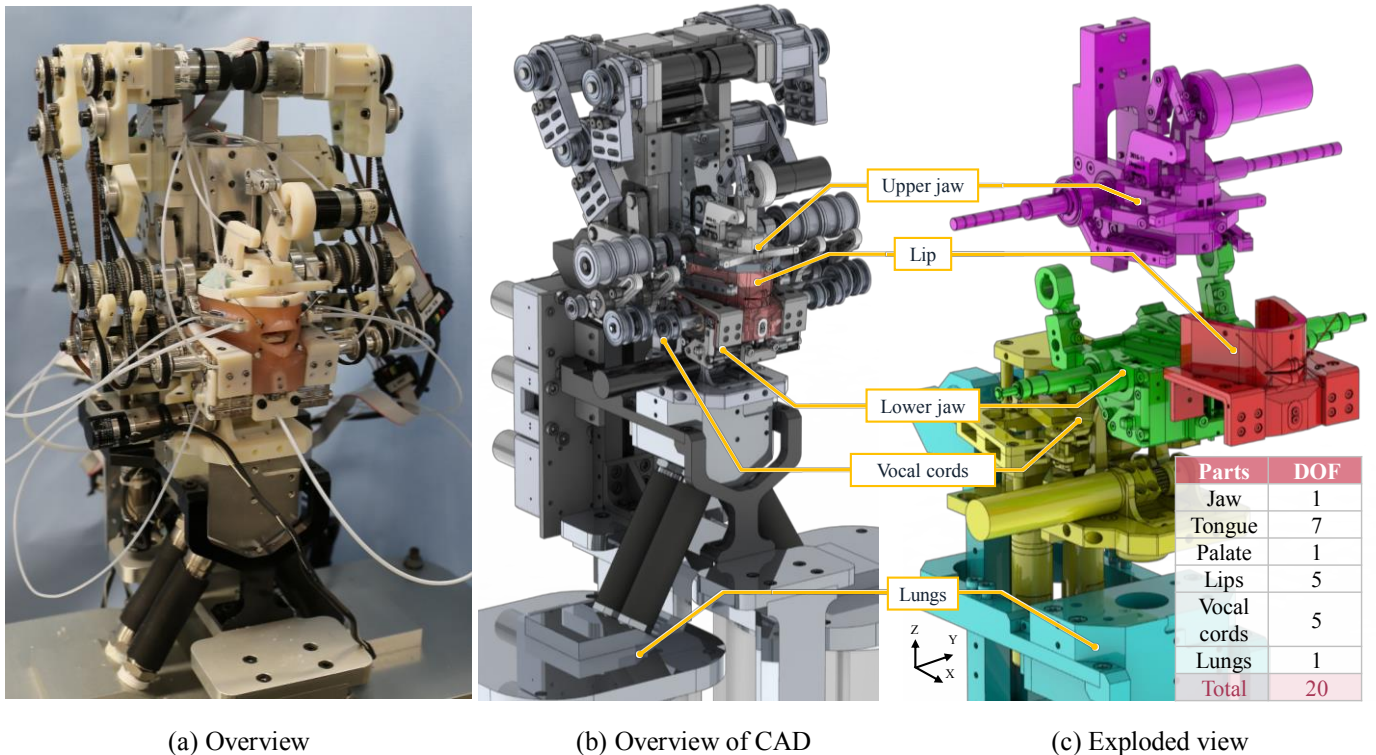


Fig. 1 : Overview of Lingua-R

について述べる.

2. Lingua-R

Lingua-R は, 発声器官として肺 1 自由度, 声帯 5 自由度, および調音器官として顎 1 自由度, 舌 7 自由度, 軟口蓋 1 自由度, 口唇 5 自由度をもつ. また, 声帯から口唇までの長さ(声道長)は実際の乳児と同程度である. 母音発話はヒト同様, 肺から空気を送り出し, 声帯を振動させ, 口腔(顎, 舌, 軟口蓋, 口唇)の形状を変化させて声帯原音を調音することで行う. Fig. 1 に Lingua-R の概観および構造を示す.

3. 口唇の設計

3.1 口唇の寸法

口唇の寸法は, 6 月齢乳児の解剖学的知見に基づき決定した. 口唇横幅は, 犬歯間距離とほぼ等しいと考え, 6 月齢児の乳犬歯間幅径の測定結果[5]から 25.5mm とした. 口唇高さは, 上下前歯の付け根の間隔とほぼ等しいと考え, ヒト乳児の頭蓋骨成長過程についての測定結果[6]を参考に 9.2mm とした. 口唇厚さは, 乳児声道形状の成長を MRI にて測定した結果[7]に基づき, 10.5mm とした.

3.2 口唇の変形量

日本語 5 母音の乳児の開口形状の寸法を推定し (Table1), 口唇の変形量を目標値とした. Table1 は, 成人の日本語 5 母音の口唇形状を縮小することで算出した. また, 口唇先端の突き出し量については, 10mm を目標値とした.

3.3 口唇の製作

乳児の柔軟な口唇の動きを再現するために, 口唇はシリコン樹脂(Dragon Skin FX-Pro)を用いた. ヒト口腔内の気密性を再現するために, 口唇部だけでなく, 頬の部分まで覆うような形状にし, 上下顎機構と連続的に接続されることで, 調音器官全体としてヒト同等の共鳴特性を得ることができる. また, 次章に述べるように, ヒトの筋配置を模擬することによってヒト同等の変形と突き出しの安定化を可能にした. そして, 気密性の向上のために, 駆動部品であるスライダやワイヤの埋め込み成型を行った.

Fig. 2 に口唇部の CAD を示す.

Table 1 : Opening shapes of 6m/o infant

	/a/	/i/	/u/	/e/	/o/
Height [mm]	10.9	8.6	2.9	12.0	5.0
Width [mm]	21.5	19.5	5.7	19.3	7.7
Area [mm ²]	184.4	131.9	13.2	18.1	30.2

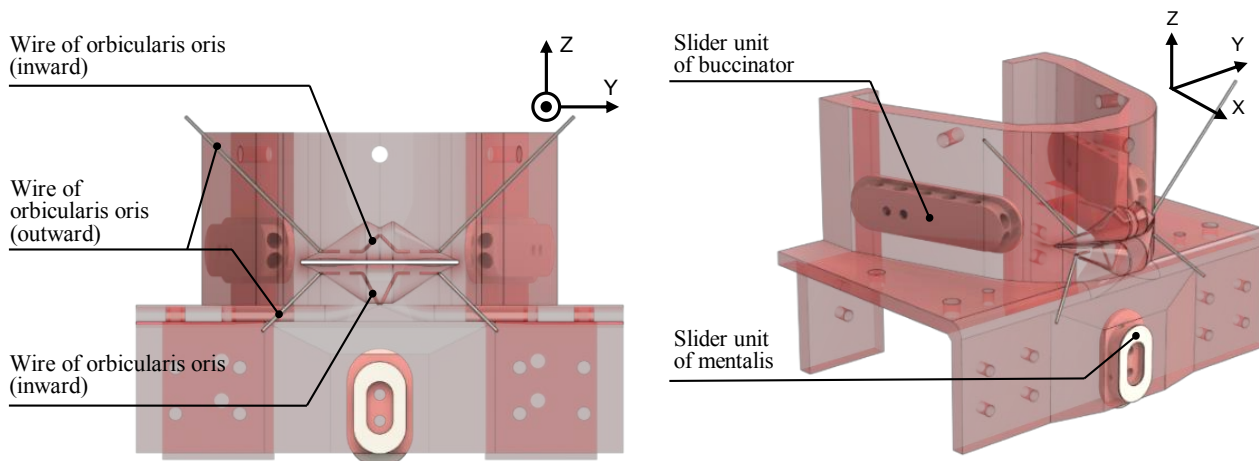


Fig. 2 : Artificial lips

4. 駆動機構の設計

ヒトの口唇周りの筋肉は13個存在している。中でも、発話における口唇部の動きは頬筋、口輪筋、オトガイ筋の3つの筋肉の動きに大別されると考え、ヒトの筋配置を参考に以下の3つに分けて駆動機構を設計した。頬筋に2自由度、口輪筋に2自由度、オトガイ筋に1自由度とした。駆動方式には全てワイヤ駆動を採用した。

4.1 頬筋機構 (Fig. 3 黄色部)

頬筋機構は、/u/や/o/といった声道長を長くする必要のある母音における口唇の突き出しを行う。頬のシリコン樹脂内部に駆動部品を埋め込み、それをスライダによって移動させる。スライダに追従しながら頬が動き、口唇の突き出し・引き戻しを行う。このとき、モータ順方向の回転で突き出し、逆方向の回転で引き戻しとしたことで自由度を1つに削減した。これを左右の頬それぞれに搭載した。また、口腔外部にスライダを設置することによって、下顎の動きに追従しながら突き出しを行うことが可能となっている。

4.2 口輪筋機構 (Fig. 3 緑部)

口輪筋機構は、口唇のすぼめ・開口を行う。口唇の開口とすぼめは同時には行われないことから、モータ順方向の回転で開口、逆方向の回転ですぼめを行うよう、まとめることで自由度を削減した。上下の口唇それぞれに取りつけた。また、シリコン樹脂製の口唇にワイヤを取り付ける際、高強度でありながら高い柔軟性をもつストッキングの布を内部に埋め込み、それにワイヤを取り付けることで強度を高めた。

4.3 オトガイ筋機構 (Fig. 3 青部)

オトガイ筋機構は、顎の開閉とは独立に、口唇の押し上げによる閉鎖、および引き下げによる開口を行う。スライダ下部に圧縮ばねをとりつけ、これがスライダを押し上げる事によって閉鎖を行う。そしてこのスライダにワイヤを固定し、下方に引くことで開口を行う。

5. 評価実験

5.1 開口部の変形実験

Lingua-R の口唇が乳児と同様の変形が可能かを評価した。今回は特に日本語5母音の発話形状について評価した。開口時の面積、および縦横幅について Table 1 と比較しその結果を Fig. 4 に示す。この結果、面積、縦横幅全てにおいて誤差10%以内での再現が可能であった。また、その際の口唇の形状を Fig. 5 に示す。突き出し量に関しては最大10mm変形可能であることを確認した。

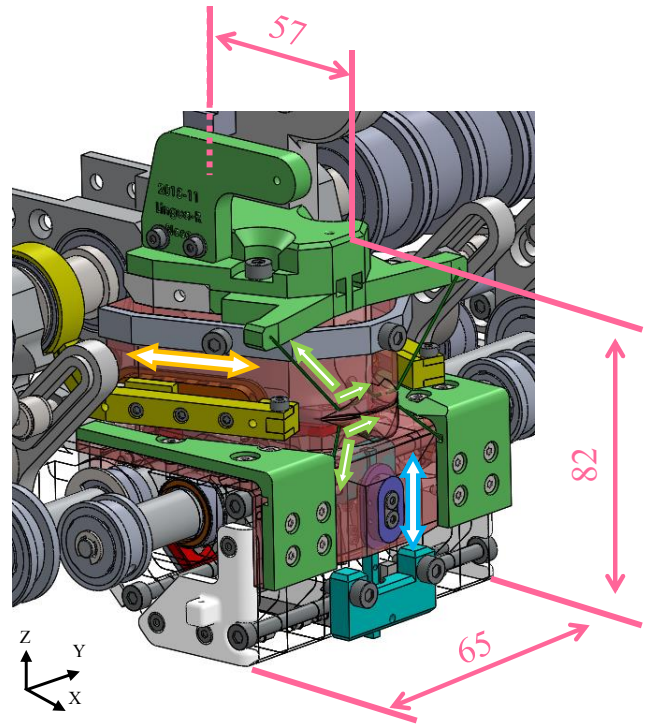
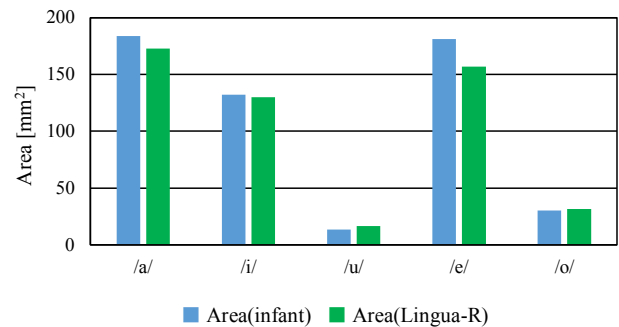
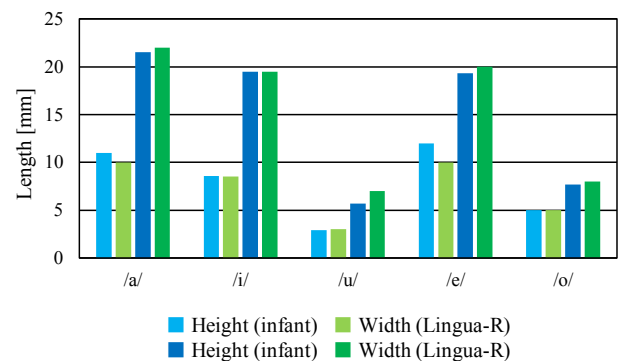


Fig. 3 : Drive mechanism of the lips



(a) Area



(b) Height, width

Fig. 4 : Comparing of opening shape

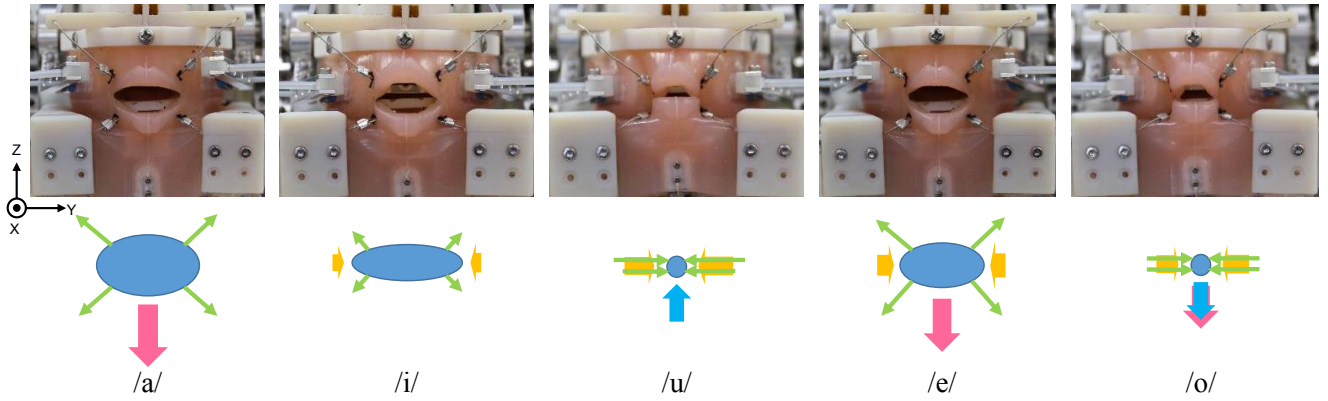


Fig. 5 : Opening shapes of Japanese 5 vowels by Lingua-R

5.2 発声実験

Lingua-R の調音能力を調べるため、発声実験を行った。今回は、主要 3 母音/a/, /i/, /u/の中でも特に口唇による影響が大きいと考えられる/u/に関して評価を行った。

今回、声帯原音には正弦波の合成で人工的に作った声帯原音（基本周波数 200Hz）を利用し、これをスピーカで再生することによって声帯の代わりとした。また、舌の形状および顎の角度を実際の乳児の/u/の調音形状を模擬した形状に合わせた。そこで口唇の形状を/a/の場合と/u/の場合とで比較することによって、口唇の形状の違いによる音声の変化を検証した。口唇形状/a/, /u/それぞれにおいて発声実験を 5 回ずつ行った。

その実験結果をフォルマント図に示したのが Fig. 6 である。図の赤点は中でも、口唇形状/a/で最も F2 が高いデータと口唇形状/u/で最も F2 が低いデータの 2 点である。そして、その各点の声道形状およびそのときのスペクトラムを Fig. 7, 8 に示す。これより、口唇の形状変化によって、F2 が 2054Hz から 1852Hz まで最大 202Hz 下降するという結果を得た。F1 に関しては、口唇形状に関わらず、565Hz±10Hz ほどであり大きな変化はみられなかった。

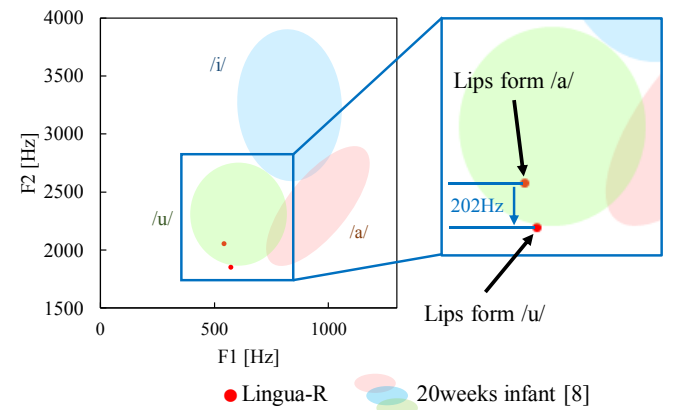


Fig. 6 : Formant transition of /u/

6. 議論

口唇形状の変化によるフォルマントの下降に関する考察を行う。母音/u/における口唇の役割として、突き出しによって声道長を長くすることと、すばめによって開口部を狭窄するという 2 つの役割がある。

まず、口唇の突き出しによるフォルマントの変化を考える。声道を長さ l の断面積が均一な単純な音響管と考えた場合 (Fig. 9), その共鳴周波数 F1, F2 は以下のように表せる。ただし、 V は音速とする。

$$F1 = \frac{1}{4l} V \quad (1)$$

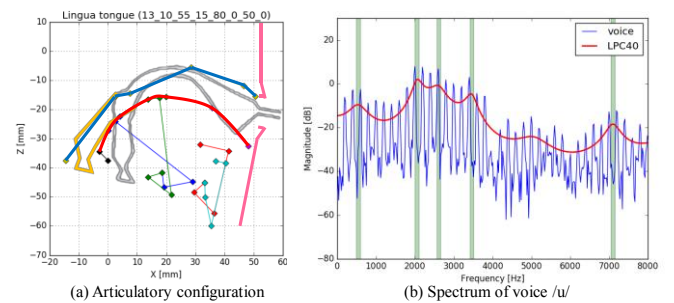


Fig. 7 : Articulatory configuration & spectrum of lips form /a/

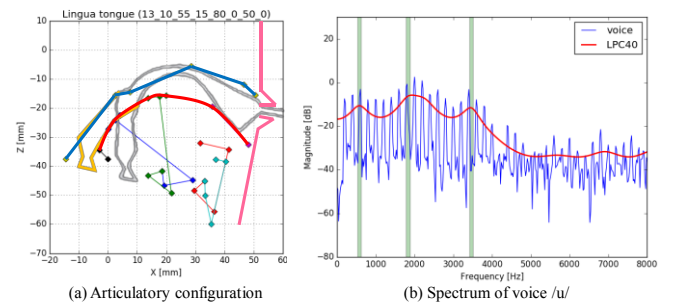


Fig. 8 : Articulatory configuration & spectrum of lips form /u/

$$F2 = \frac{3}{4l} V \quad (2)$$

これより、口唇の突き出しによって声道長 l が大きくなると、共鳴周波数は $F1, F2$ ともに下がることがわかる。

次に、口唇のすぼめによるフォルマントの変化を考える。パートベーション理論によると、音響管の局所的な狭めが最大体積速度（腹）付近にある場合、共鳴周波数は低くなる[9]。口唇部付近の体積速度は音響管における開口端付近となるため、必ず最大となる。これより、口唇のすぼめによる狭窄を行うと共鳴周波数は $F1, F2$ ともに低下すると考えられる。

よって、口唇形状を $u/$ にすることで、 $F1, F2$ ともに下がるはずである。これより、実験結果である $F2$ の下降は妥当な結果であると考えられる。しかし、実験では $F1$ はあまり変化がなかった。この原因として、低周波数になるほど、スピーカの音圧が下がりやすいことが考えられる。これより、口唇によって共鳴特性が変化したとしても、低域のピークである $F1$ としては現れづらくなってしまったのだと考えられる。

また、今回は音響学的に $u/$ のフォルマント周波数の変化を考えたが、発話の明瞭性という点においては評価していない。この明瞭性については、実際に発話された音声を被験者に聞いてもらい、どのくらい明瞭に $u/$ と聞こえるか、などといった主観評価などの必要があると考える。

7. 結言と今後の展望

Lingua-R では前モデルである Lingua を改良し、柔軟な変形が可能な口唇機構を開発した。その結果、開口形状に関しては、日本 5 母音の実際の乳児の推定値と誤差 10%以内で実現した。発声に関しては、基本 3 母音の 1 つである $u/$ に関して音声学の知見と合致する $F2$ の下降を確認した。

今後は、 $F1$ が下降せず、あまり変化がみられないことの原因の追究と、子音に関しての評価を行う必要がある。

謝 辞

本研究は日本学術振興会科学研究費補助金「特別推進研究」(研究課題番号：24000012)の助成を受けた。また、早稲田大学理工学術院高西淳夫研究室・スポーツ科学学術院菅田雅彰研究室より人間形発話ロボット WT-7RII の貸与を受けた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- [1] Bates E., Dale P. S., Thal D., "Individual differences and their implications for theories of language development," The handbook of child language, pp. 96-151, 1995.
- [2] 小島友裕, 遠藤信綱, 笹本勇輝, 石原 尚,

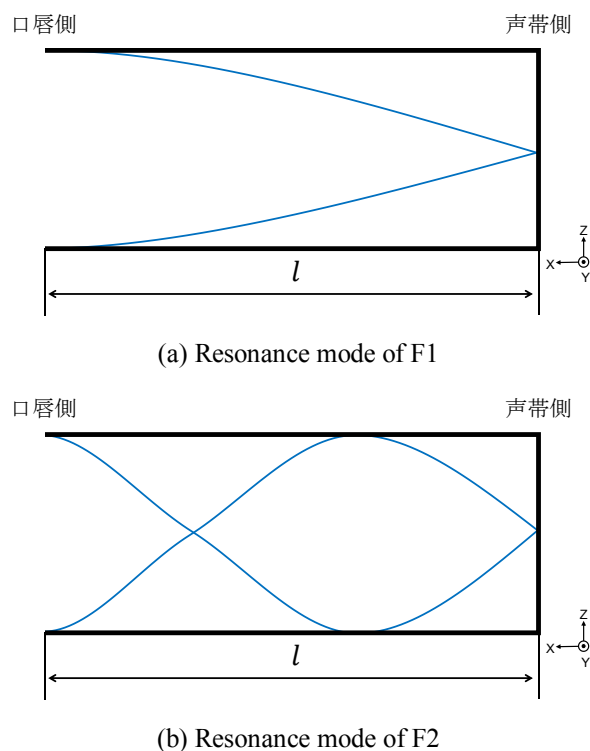


Fig. 9 : Acoustic tube model

堀井隆斗, 浅田稔: “音声発達過程の構成的理解のための乳児様発声プラットフォームの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '14 予稿集, 2A1-X06, 2014.

- [3] 小島朋樹, 遠藤信綱, 小島友裕, 浅田稔. 音声発達研究に向けた乳児様発話ロボットの高ピッチ発話可能な声帯の開発. 第 33 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.DVD, 3I2-07, 2015.
- [4] Minoru Asada. Modeling early vocal development through infant-caregiver interaction: a review. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, Vol.8, No.2, pp.128--138, 2016
- [5] 葉山淑人, 杉村和昭, 楊静: “無歯列から乳歯列完成期に至る歯列弓の成長変化に関する研究”, 小児歯科学雑誌, 37(3): 559-572, 1999.
- [6] Vorperian, et al. : “Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study”, Acoustical Society of America, The Journal of the Acoustical Society of America, 125, 3, 1666-1678, 2009.
- [7] Boë et al.: “Granat_2006_Skull and vocal tract growth from newborn to adult,” 7th International Seminar on Speech Production, ISSP7, 75-82, 2006.
- [8] Kuhl P. K., Meltzoff A. N., "Infant vocalizations in response to speech: Vocal imitation and developmental change," The journal of the Acoustical Society of America, vol.100, no.4, pp.2425-2438.
- [9] 荒井隆行, 菅原勉 (監訳), 音声の音響分析, 海文堂, 1996.