

鼻腔をともなう声道模型の生成音に関する検討

前田 絵理 荒井 隆行 雑賀 紀子[†]

上智大学 理工学部 電気・電子工学科 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

[†]現在、NTT データ勤務

E-mail: {m-eri, arai}@sophia.ac.jp

あらまし これまで Chiba and Kajiyama による日本語 5 母音を中心にいくつかの声道模型を復元・開発してきた。そして、その声道模型から得られる音響出力は音響理論ともよく一致し、それらが音響教育に有効であることを実証してきた。我々はさらに千葉・梶山に基づく声道模型にさらに鼻腔を接続し、鼻音化母音を生成することに成功している。本研究では、新たに鼻腔（ならびに副鼻腔）をともなう声道模型を製作し、その特性を調べた。この新しい声道模型では、口腔および鼻腔周辺に裂が生じる先天性の奇形である口蓋裂の裂閉鎖手術後のように広い鼻咽腔開放を視野に入れ鼻咽腔結合面積を段階的に変えられるようにした。

キーワード 声道・模型・鼻音・鼻腔・口蓋裂・鼻音化母音

Study of mechanical models of the human vocal tract having nasal cavity

Eri MAEDA Takayuki ARAI and Noriko SAIKA[†]

Dept. of Electrical and Electronics Eng., Sophia Univ., 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554 Japan

[†] Currently, NTT DATA Co.

E-mail: {m-eri, arai}@sophia.ac.jp

Abstract Formerly, we proposed several mechanical models of the human vocal tract for education in Acoustics. The characteristics of the models were examined, and their outputs were analyzed and compared with acoustic theory. We used the models during lectures and confirmed their effectiveness for education in Acoustics. Subsequently, we formed a new model for nasalized vowels by attaching a side branch to the oral cavity of one of the former models. In this study, we introduce and examine the characteristics of a new set of models with a nasal cavity (and sinuses) and a large velopharyngeal opening simulating the cleft palate.

Keyword vocal tract, mechanical model, nasal cavity, nasalized vowel, cleft palate

1. はじめに

Chiba and Kajiyama [1]は声道形状を計測し、その測定結果を基に声道形状の近似データから作られた声道の物理模型から日本語 5 母音を機械的に生成し、形状が母音の韻質を支配していることを実証している。

Arai [2]は、その Chiba and Kajiyama による日本語 5 母音に対する声道模型を透明なアクリルの筒で復元した（以下、これをパイプ型声道模型という）。また Arai [2]では、声道形状を音響管の長さ方向に 10mm 間隔で 0 次近似したデータを基に、プレート型の声道模型も製作している。このプレート型は厚さが 10mm のアクリル板で構成されており、それぞれの板の中央には直径の違う穴が開けられている。声道形状に対する 0 次近似データに基づいて、対応する直径を持つ穴の開いたプレ

ートを声道長だけ横一列に並べることによって、任意の声道形状を模擬できる。

声帯振動となる音源に関しては、手軽さといった面から笛式人工喉頭や電気式人工喉頭が用いられているほか[2]、任意の波形が入れられるという利点でホーンスピーカのドライバユニットも広く駆動源として用いられている[3,4]。

我々は、この他にプレート型とパイプ型の違いを調べるため、プレート型と同じ 0 次近似データの形状を持ったパイプ型の声道模型を製作し、その特性を評価した[5,6]。その結果、帯域幅において多少の差異を認めたものの、フォルマント構造が保たれていることを確認している。

これらの模型は、透明な素材でできており内部の形状が見えやすく、また手軽に明瞭な母音を生成できることから、音響教育の教材として有効で

あることが確かめられている[2,5,6,7]。直観的理解につながることから、高校生を対象とした授業から、文系・理系を含めた大学・大学院生を対象した授業までを行ったが、応用としては小学生まで広げて活用することができ、幅の広い対象者の可能性を持っている。

これらの声道模型のほとんどは、口腔部分のみからなっていたが、一部の声道模型[3,5]に関しては、鼻腔をとまっていた。人間の構音動作においては口腔と同様に鼻腔が大きな役割を果たしている。発話動作中に軟口蓋を動かし、鼻咽腔の開放・閉鎖をし、鼻腔への呼気の流入の調整を行っている。また、鼻腔付近には副鼻腔が細い孔で鼻腔に結合して共鳴器として働く。

鼻咽腔結合が生成音に及ぼす影響を見る中で、その広さに関してはこれまでも様々な実験が行われているが(例えば[8])、本研究においても鼻腔及び副鼻腔を伴う声道模型を製作し、その特性について検討する。特に口蓋裂患者をも想定し、健常者よりも鼻咽腔の開放面積が大きくなるケースについても取り扱う。

2. 鼻音の特性について

2.1. 鼻腔が及ぼす影響

軟口蓋およびこれと接する咽頭の筋組織は空気力学的な弁として働き、必要に応じて中咽頭から鼻腔を遮断する。軟口蓋の後上運動と咽頭側壁の内方運動によってこうした働きが担われ、これを鼻咽腔閉鎖機能という。鼻音を生成する際に鼻咽腔閉鎖に関与する筋群は弛緩し、鼻咽腔は開放する[9]。

鼻音化は反共鳴の生起に代表される複雑な音響的特性をもたらす、それについて様々な報告がある。古いものでは、極零対の生起[10,11]や、第1フォルマントの中心周波数の変化及び帯域幅の拡大[12]等があげられる。ある特定の周波数に極零対を付加した音声は鼻音化度が高く評価されること[13,14]や、シミュレーションによって鼻腔形状の曲がり音響特性に大きな影響を与えないとの報告もある[15]。模型を実際に作った例として菰口[8]や副鼻腔共鳴についてもみた小山[16]等があげられる。菰口では鼻咽腔面積の増加と鼻音化度の関係は母音によって異なり、高舌及び前舌母音の方が低舌及び後舌母音よりも結合面積の増加につれて鼻音化度が上昇したという。

ところで口蓋裂では、手術後も鼻咽腔閉鎖不全により呼気の鼻腔への流入が見られ、開鼻声や構音障害が見られる症例も少なくない[17]。言語治

療の現場において開鼻声の程度は多くの場合、言語聴覚士によって判定されるが、それを助ける音響関連量の研究もまた多く進められている[18]。コンピュータシミュレーションによる報告では、有限要素法を用いて広い鼻咽腔結合面積を持つ口蓋裂患者の声道を模擬した結果、結合が大きくなるとフォルマント周波数の変化及び鼻音化による極の生起が認められたとしている[19]。

2.2. 副鼻腔が及ぼす影響

代表的な副鼻腔は鼻の横にある上顎洞、眉の少し奥にある前頭洞、鼻の奥にある蝶形骨洞、両目の間の奥にあるし骨洞の4種類である。いずれも断面積の小さい孔により鼻道と通じている。副鼻腔は鼻腔の温度や湿度の調整をするとともに共鳴器としても作用し、生成音の伝達特性に零の生起もたらす。その中でも上顎洞の共鳴周波数について[20]、またシミュレーション[21]、上顎洞と蝶形骨洞に関する報告[16]、上顎洞と前頭洞と蝶形骨洞に関する報告[22]などがある。し骨洞に関しては数は多いがそれぞれの容積が小さく、通常音声の聞き取りに必要な3kHz以下の周波数領域にあまり影響を及ぼさないと考えられている[22]。

各報告を比較すると、副鼻腔がスペクトルに生じさせる反共鳴の共鳴周波数には傾向が見られる。上顎洞に関しては、400-1000 Hz(小山, 1966)、300-400 Hz(竹内ら, 1977)、450 Hz(Maeda, 1982)というように1000 Hz以下に集中しているようであるが、1000-2000 Hz(益田, 1992)という報告もある。また、前頭洞に関しては1000 Hz以下(竹内ら, 1977)、蝶形骨洞に関しては500-1200 Hz(小山, 1966)や1500 Hz以下(竹内ら, 1977)などの報告がある。本研究では、上顎洞と蝶形骨洞に着目した模型を製作し、その音響的特質を調べた。

3. 製作した模型

我々は以前、Chiba and Kajiyamaによる測定結果を0次近似した形状を持つパイプ型の声道模型を製作し、その特性を評価した[5,6]。本研究ではその口腔のみのモデルに鼻腔を結合させた模型を製作した。口腔部分は全長が160mmの母音/a/と/i/とし、10mm幅で0次近似した形状であった。鼻腔部分に関してはChenによるものを[23]、副鼻腔部分に関してはDangら[24]の値を用いた。口唇から85mmの位置に鼻咽腔結合部を設けた。鼻咽腔部分の結合面積は0, 0.5, 1.0, 2.0, 3.14, 6.0cm²の6種類を用意した。全体の形状を図1に示す。

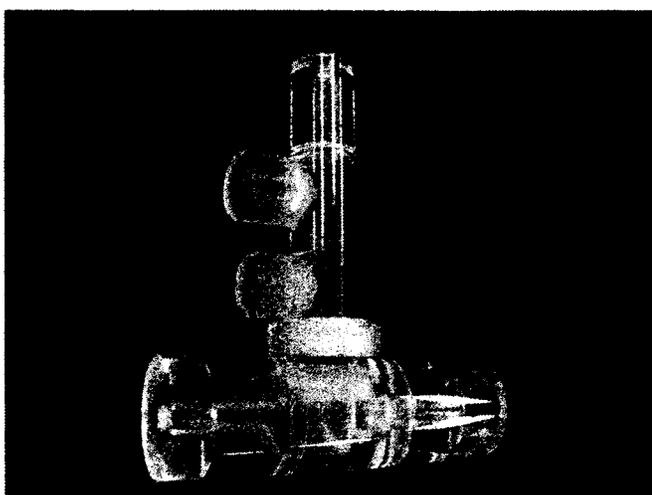
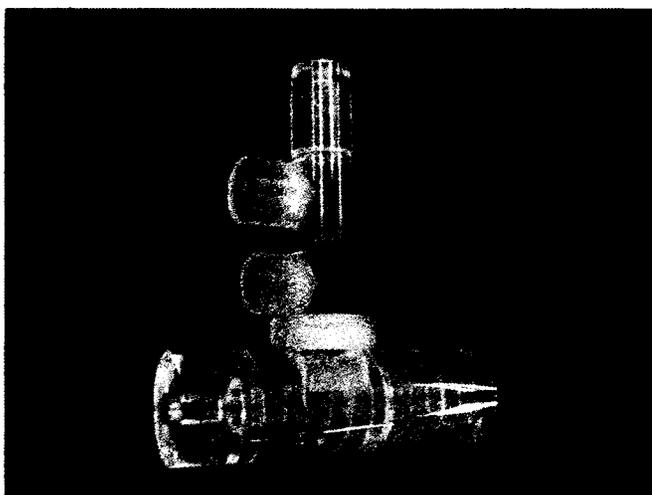


図1 鼻腔をともなう声道模型

上：/a/ 下：/i/（左が喉頭側、右が口唇側）

副鼻腔部上方が蝶形骨洞（内径 27mm の球状空洞）、下部が上顎洞（内径 23mm の球状空洞）とした。

4. 測定方法

測定は、上智大学荒井研究室内の防音室において行った。声帯振動に対する擬似音源として基本周波数が 100 Hz のインパルス列を用い、PC 上から再生、アンプで増幅した後、ホーンスピーカのドライバユニットに入力した。ドライバユニットのネック部分に声道模型を接続し、マイクロフォン（Sony, ECM-23F5）を声道模型から約 20cm 離し、デジタルオーディオテープ（DAT）に生成音を録音した。

鼻咽腔結合面積を 0~6.0cm² の間で 6 段階に変化させ、それぞれの段階ごとに 2 つの副鼻腔（上顎洞、蝶形骨洞）を接続させた。2 つの副鼻腔の接続の仕方に 4 通りあるので、計 21 通りの組み

合わせを各母音に対して測定した。

5. 結果

測定した生成音に関し、ピッチ周期に同期したスペクトル分析を行った。副鼻腔をともなわない場合に、結合面積を 0 から 6.0 cm² に変化させたときのスペクトルを図 2（/a/）と図 3（/i/）に示す。また、結合面積が 3.14 cm² の場合に、副鼻腔を付け替えたときのスペクトルを図 4（/a/）と図 5（/i/）に示す。

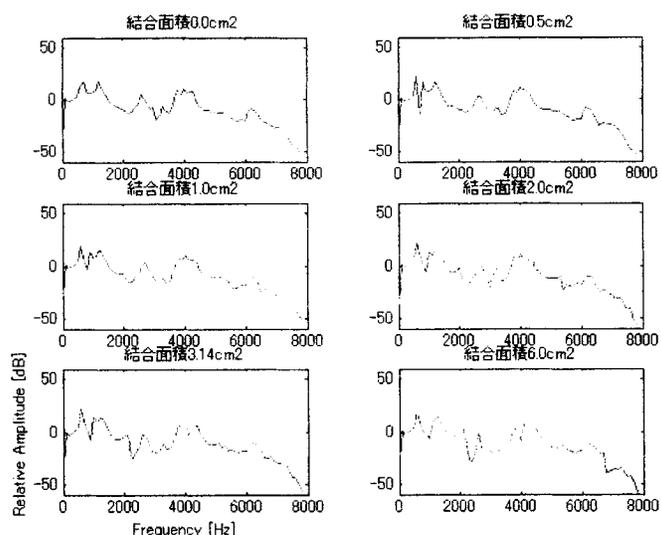


図2 副鼻腔をともなわない場合に、結合面積を 0 から 6.0 cm² に変化させたときのスペクトル（母音/a/）

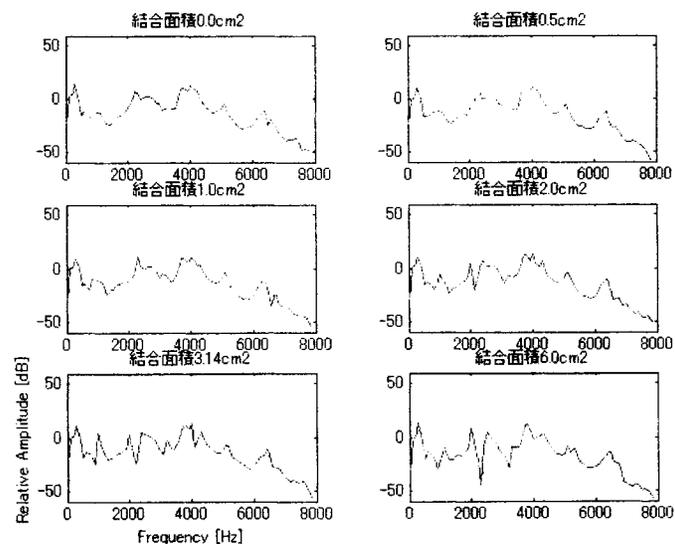


図3 副鼻腔をともなわない場合に、結合面積を 0 から 6.0 cm² に変化させたときのスペクトル（母音/i/）

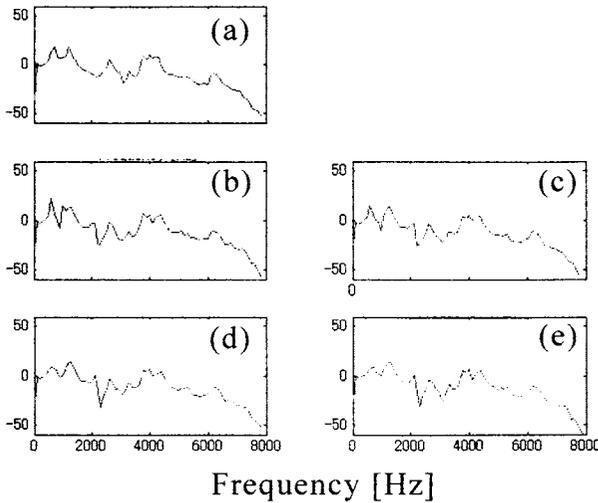


図4 鼻腔をともなう声道模型/a/のスペクトル
 (a) 鼻咽腔結合なし、(b)-(e)は結合面積が
 3.14cm^2 のもの。(b) 副鼻腔なし、(c) 上顎洞のみ、
 (d) 蝶形骨洞のみ、(e) 上顎洞+蝶形骨洞あり

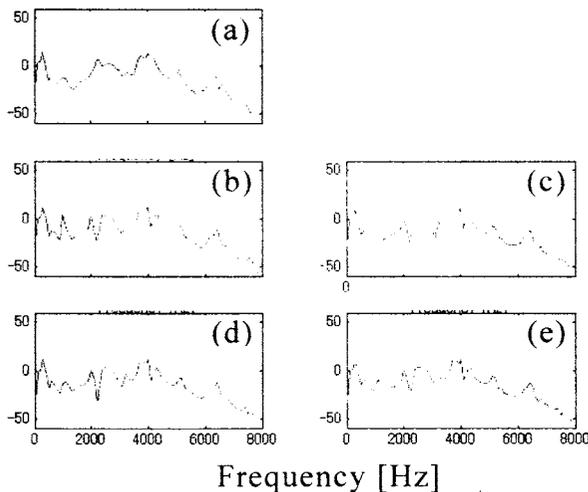


図5 鼻腔をともなう声道模型/i/のスペクトル
 (a) 鼻咽腔結合なし、(b)-(e)は結合面積が
 3.14cm^2 のもの。(b) 副鼻腔なし、(c) 上顎洞のみ、
 (d) 蝶形骨洞のみ、(e) 上顎洞+蝶形骨洞あり

6. 考察

6.1. 聴感上の違い

聴感上では/a/, /i/のどちらの母音に関しても、鼻咽腔結合面積が広がっていくにつれて鼻音化の程度が進んだ。その差は副鼻腔の有無以上に大きかった。しかし、/i/に関しては 6.0cm^2 になると、/u/にも聞こえるような母音になった。これは、第1フォルマントと第2フォルマントの間に出現した極が、/u/の第2フォルマントのように働いたためと考えられる。

6.2. スペクトル上の違い

次に鼻咽腔結合面積の違いが生成音に及ぼす影響について考察する。鼻咽腔結合面積と鼻音性の関係については、音声合成を用いてさまざまな研究がなされている。

House & Stevens [11]は、/i/及び/a/について鼻咽腔結合面積が0から 4cm^2 の間で音を合成し、鼻音性の判別実験を行っているが、/i/では結合面積が小さいうちから鼻音性が上がるのに対し、/a/では面積がある程度大きくなると上昇が見られないという結果を得ている。

Maeda [21]は、フランス語の母音において鼻咽腔結合面積が $0-3\text{cm}^2$ まで6段階の異なる鼻母音を合成して鼻音化による極の生起をみた。その結果、House & Stevensと同様の結果が得られ、/i/では鼻音化の度合は指数関数的に増加したのに対し、/a/では $0-1.0\text{cm}^2$ あたりまでは度合は低下し $1.0-3.0\text{cm}^2$ で度合が増加した。

菰口の模型を用いた研究[8]においても母音によって異なる結果が報告されている。模型の結合面積を 0.2 から 3.53cm^2 の間まで断面積を変化させて鼻音化の影響をみたところ、/a/に関しては鼻音化による零の生起が $800-1200\text{Hz}$ に見られ、鼻咽腔結合面積の増加につれて第1フォルマント近辺に極の生起がみられた。/i/に関しては鼻咽腔結合面積が 0.5cm^2 の時点で $0-1300\text{Hz}$ に共鳴が生起され、結合面積の増加につれて $1500-2000\text{Hz}$ の付近で零が生起したとしている。

本研究では、以上の先行研究よりも広い鼻咽腔結合面積を有する模型を製作した。結合面積は0から 6.0cm^2 であるが、面積が広くなるにつれて 1000Hz 付近および 2000Hz 付近に極零対の生起がはっきりと観測されるようになる。また/a/に関しては、副鼻腔をともなう場合に、F1の振幅低下ならびに帯域幅の増加が見られる。

7. まとめ

本論文では、鼻腔および副鼻腔をともなう声道模型を/a/と/i/について製作し、その特性について述べた。副鼻腔は上顎洞と蝶形骨洞に対応するものを用意し、孔を介して鼻道と接続させた。鼻腔と口腔の結合部である鼻咽腔結合の面積を、口蓋裂患者を視野に入れ、通常よりも広い面積まで網羅するように0から6.0 cm²まで6種類用意し、その違いを考察した。その結果、鼻咽腔結合面積の増加にともない、生成音は鼻音性が徐々に高まり、またスペクトル上では極・零点を観測した。

今後はより詳細を調べるとともに、音源との相互作用を観察する予定である。

文 献

- [1] T. Chiba and M. Kajiyama, *The Vowel: Its Nature and Structure*, Tokyo-Kaiseikan Pub. Co., Ltd., Tokyo, 1941.
- [2] T. Arai, "The replication of Chiba and Kajiyama's mechanical models of the human vocal cavity," *J. Phonetic Soc. Jpn.*, Vol. 5, No. 2, pp.31-38, 2001.
- [3] 梅田規子, 寺西立年, "声の韻質と声質: 音響的声道模型による音声の合成," 日本音響学会誌, Vol. 22, No. 4, pp. 195-203, 1966.
- [4] 前田絵理, 荒井隆行, 雑賀紀子, 村原雄二, "声道模型の音源に関する検討: ホーンスピーカのドライバユニットの応用," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, Vol. 1, pp. 417-418, 2003.
- [5] N. Saika, E. Maeda, N. Usuki, T. Arai, and Y. Murahara, "Developing mechanical models of the human vocal tract for education in speech science," *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*, 2002.
- [6] E. Maeda, N. Usuki, T. Arai, and Y. Murahara, "The importance of physical models of the human vocal tract for education in acoustics in the digital era," *Proc. of China-Japan Joint Conference on Acoustics*, pp. 163-166, Nanjing, 2002.
- [7] E. Maeda, T. Arai, N. Saika, and Y. Murahara, "Lab experiment using physical models of the human vocal tract for high-school students," *Proc. of the First Pan-American/Iberian Meeting on Acoustics*, Cancun, 2002.
- [8] 菰口英夫, "母音の鼻音化に関する実験的研究," 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol.75, pp.809-819, 1972.
- [9] 今泉敏, 鼻声の音響学, *JOHNS*, Vol. 17, No. 8, pp. 1085-1088, 2001.
- [10] S. Hattori, K. Stevens, and O. Fujimura, "Nasalization of vowels in relation of nasals," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 30, No. 4, pp.267-274, 1958.
- [11] A. House, and K. Stevens, "Analog studies of the nasalization of vowels," *J. Speech Hearing Disorders*, Vol. 21, pp. 218-232, 1956.
- [12] 竹内章司, 粕谷英樹, 城戸健一, "鼻音性の音響関連量について," 日本音響学会誌, Vol. 31, No. 5, pp. 298-309, 1975.
- [13] 今井徹, 中村進治, 平原達也, 伊福部達, "合成音声を利用した口蓋裂音声の鼻音性の評価-各種音響パラメータの比較検討-, " 日本音響学会誌, Vol. 42, No. 9, pp. 685-689, 1986.
- [14] 雑賀紀子, 荒井隆行, 今富撰子, 村原雄二, 加藤正子, "スペクトル包絡の操作による開鼻声の合成と嗄声の及ぼす影響," 日本音響学会秋季研究発表会講演論文集, Vol. 1, pp. 361-362, 2001.
- [15] 高橋信之, 中井孝芳, 鈴木久喜, "声道の3次元形状の音響的影響の有限要素法による解析," 日本音響学会講演論文集, pp. 221-222, Mar. 1995.
- [16] 小山高司, "副鼻腔共鳴に関する実験的研究," 日本耳鼻咽喉科学会報, Vol. 66, pp.1177-1191, 1966.
- [17] S. Imatomi, T. Arai, Y. Mimura and M. Kato, "Effects of hoarseness on hypernasality ratings," *Proc. of Eurospeech*, Vol. 3, pp. 1075-1078, 1999.
- [18] 平井沢子, 岡崎恵子, 荒井隆行, "小児の開鼻声の定量的評価," 音声言語医学, Vol. 35, pp. 199-206, 1994.
- [19] H. Jaromir et al., "Simulation of the influence of a cleft on acoustic characteristics of human supraglottal spaces," *Proc. of the Forum Acusticum Sevilla*, 2002.
- [20] 益田慎, "共鳴腔としての情が駆動の役割に関する実験的研究," 日本耳鼻咽喉科学会会報, Vol. 95, pp. 71-80, 1992.
- [21] S. Maeda, "The role of the sinus cavities in the production of nasal vowels," *Proc. of IEEE ICASSP*, Vol. 2, pp. 911-914, 1982.
- [22] 竹内章司, 粕谷英樹, 城戸健一, "鼻音のスペクトルに及ぼす鼻副鼻腔の影響," 日本音響学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 163-172, 1977.
- [23] M. Y. Chen, "Acoustic correlates of English and French nasalized vowels," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 102, No. 4, pp. 2360-2370, 1997.
- [24] J. Dang, and K. Honda, "Morphological and acoustical analysis of the nasal and the paranasal cavities," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, No. 4, pp. 2088-2100, 1994.