

## 軟らかい素材による軟口蓋を伴う声道の物理模型

荒井 隆行<sup>†</sup> 田中 希美<sup>†</sup> 片岡 竜太<sup>‡</sup>

<sup>†</sup>上智大学理工学部 〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1

<sup>‡</sup>昭和大学歯学部 〒142-8555 東京都品川区旗の台 1-5-8

E-mail: <sup>†</sup> arai@sophia.ac.jp

あらまし 軟らかいゲル素材を用いて、軟口蓋が動き鼻咽腔閉鎖をする声道の物理模型を製作した。その模型では、軟口蓋から咽頭壁に渡ってゲル素材を用い、鼻腔を含むその他の部分はアクリル素材を用いた。4つの鼻咽腔閉鎖パターン（Coronal, Circular, Circular with Passavant's ridge, Sagittal）を模擬するため、ゲル素材の軟口蓋部にひもを付けると共に、両脇と後方からアクリル棒を押し込むことで咽頭側壁と咽頭後壁を動かせるようにした。これらの動作によって鼻咽腔閉鎖の度合いを連続的に変化させた結果、鼻咽腔結合部の開存面積に応じて模型から生成される音声信号の開鼻声の程度が変化することを確認すると共に、スペクトル上に極零対などが現れることを確認した。

キーワード ゲル素材、軟口蓋、声道、物理模型、鼻咽腔結合

## Physical Model of the Vocal Tract with Flexible Velum

Takayuki ARAI<sup>†</sup> Kimi TANAKA<sup>†</sup> and Ryuta KATAOKA<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Faculty of Science & Technology, Sophia University 7-1 Kioi-cho, Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8554 Japan

<sup>‡</sup> School of Dentistry, Showa University 1-5-8 Hatanodai, Shinagawa-ku, Tokyo, 142-8555 Japan

E-mail: <sup>†</sup> arai@sophia.ac.jp

**Abstract** We developed a physical model of the human vocal tract with a flexible velum using gel-type material. In this model, while the velum and pharyngeal wall were made of the gel-type material, the rest of the vocal-tract model including the nasal cavity was made of acrylic materials. We simulated four patterns of velopharyngeal closure (the Coronal, Circular, Circular with Passavant's ridge, and Sagittal patterns), by raising the velum by means of a string attached to the velic portion while the posterior and lateral pharyngeal walls were pushed inward from the outside with acrylic bars. By continuously changing the degree of velopharyngeal closure while pulling the string, we confirmed the change of the degree of hypernasality of a speech signal produced from the model, and we confirmed acoustic evidences such as a pole-zero pair on its spectrum.

**Keywords** Gel-type material, Velum, Vocal Tract, Physical Model, Velopharyngeal Coupling

### 1. はじめに

口蓋裂患者にみられる言語障害には、鼻咽腔閉鎖機能不全による開鼻声が認められるが[1]、鼻咽腔閉鎖運動については閉鎖に関与する筋と閉鎖パターンの関連性について未解明のことも多い[2]。口蓋裂患者の鼻咽腔閉鎖運動には4つのパターン（Fig. 1）が存在することが報告されており[3]、成人健常者4名を対象にした4次元MRI撮像を調べた結果でも、そのうちSagittal patternを除く3つのパターンが観測されている[2]。

開鼻声に対する治療は、主に鼻咽腔部に対する外科的手術や補綴的発音補助装置を用いて行われるため、鼻咽腔閉鎖運動パターンに応じた治療法を物理模型による鼻咽腔閉鎖運動のシミュレーションを通して検討できれば、臨床上もその意義が大きい。そこで本研究では、鼻咽腔閉鎖に関する4つのパターンを物理模型を用いて模擬し、さらにその際に発せられる音声の分析も行った。

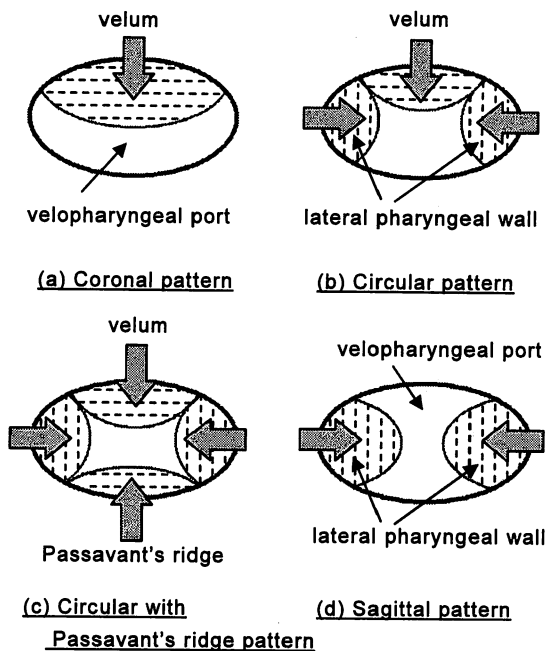


Fig. 1 口蓋裂患者の鼻咽腔閉鎖パターン(Croft *et al.* [3]の分類による). 図の上が前.

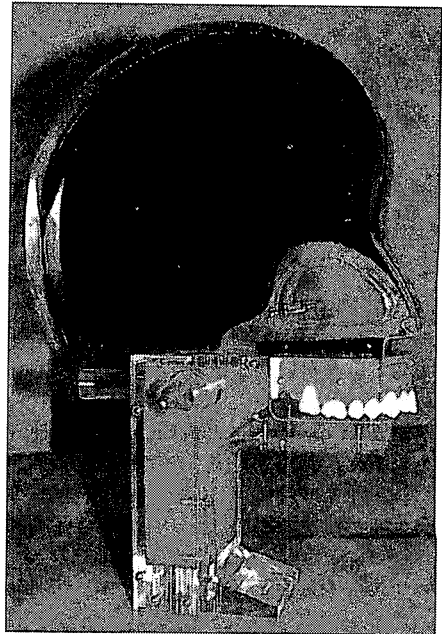


Fig. 2 軟口蓋可動式の声道模型を横から見た様子. 軟口蓋から咽頭壁へ渡ってゲル素材を用い、鼻腔を含むその他の部分についてはアクリル素材を用いた.

## 2. 可動式の軟口蓋を伴う声道模型

### 2.1. 声道模型について

Arai (2007, 2008)では、主に「音声生成に関わる音響教育」の教材開発を目的として様々な声道模型を製作し、その教育的効果について述べた[4,5]. 特に Arai (2008) [5]では、ゲル素材を用いた軟らかい舌を伴う声道模型について検討している. そこでは、舌にゲル素材、軟口蓋部に硬い素材を用いている.

本研究で製作した可動式の軟口蓋を伴う声道模型 (Fig. 2) では、Arai (2008) [5]と同様に軟らかいゲル素材を用いているが、軟口蓋から咽頭壁へ渡る部分にゲル素材を用い、舌側の声道壁には湾曲した透明アクリル素材を用いて軟口蓋の動きが下方から観察できるようにした (Fig. 3). その結果、声道形状は母音/aに近いものになった. ゲル素材はポリエチレン・スチレン共重合体で、ゲルの硬度については、より人間に近く操作し易いという理由から硬度4 (アスカ-C硬度) とした. 鼻腔については、Arai (2006, 2007)の頭部形状模型[4,6]における鼻腔部分 (頭部上半分、アクリル製) を用いた (Fig. 2 参照). 硬口蓋は歯を伴う上顎模型を用い、その他はアクリル素材を用いた.

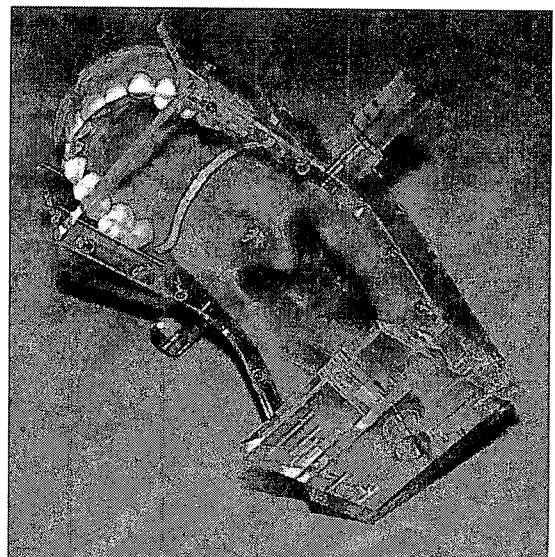


Fig. 3 軟口蓋部を下から覗いた様子. 軟口蓋の動きが観察できるように、舌側は透明アクリル素材で覆われている.

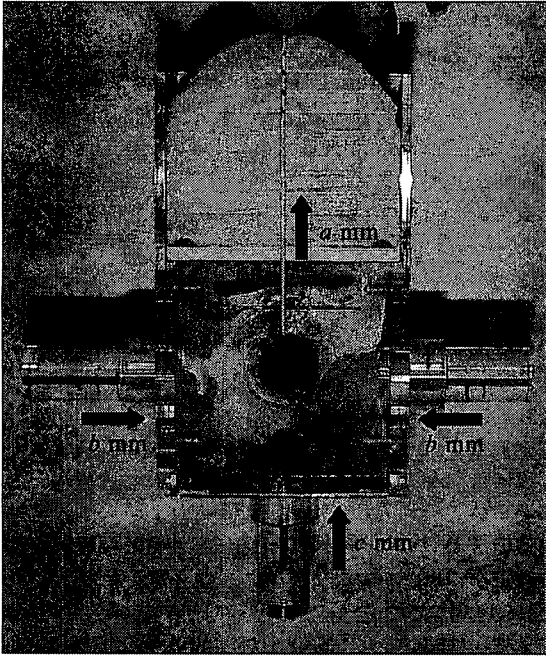


Fig. 4 鼻咽腔結合部の断面を上から見た様子。写真の上が前。

Croft *et al.*による4つの鼻咽腔閉鎖パターン[3]を模擬するために、ゲル素材にひもを付けたり外側から棒で圧力を掛けたり出来るようにした (Fig. 4)。Coronal patternを実現するためには、Fig. 4で軟口蓋に装着されたひもを引き上げることで軟口蓋を挙上させた。Sagittal patternを実現するためには、両脇からアクリル棒を押し込むことで咽頭側壁を動かした。Circular patternを実現するためには、ひもで軟口蓋を引き上げると同時に、両脇から棒を押し込むことで咽頭側壁を動かした。Circular with Passavant's ridge patternを実現するためには、ひもで軟口蓋を引き上げ、両脇から棒を押し込んで咽頭側壁を両側から狭めると同時に、さらに後方からも棒を押し込んで咽頭後壁にパスバント隆起 (Passavant's ridge) を作った。ここで、ひもが動いた距離を  $a$  mm、両脇のアクリル棒が動いた距離をそれぞれ  $b$  mm、後方のアクリル棒が動いた距離を  $c$  mm とすると、各閉鎖パターンは  $(a,b,c)$  の組み合わせによって表現されることになるので、以後、各条件を「条件  $(a,b,c)$ 」と呼ぶことにする。Fig. 5に、それぞれのパターンの代表的な条件の一例を模型で実現した様子を示す。

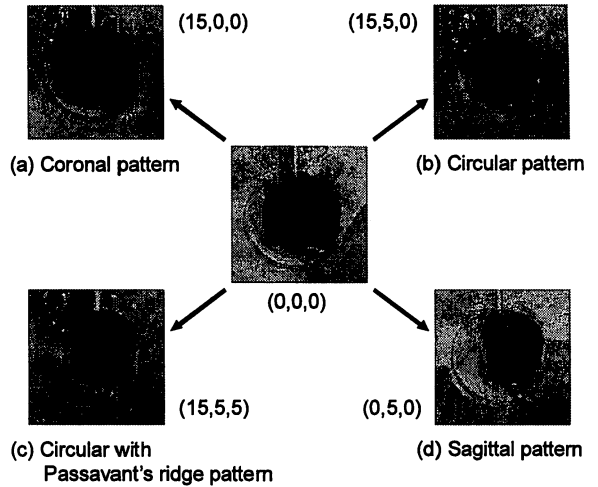


Fig. 5 軟口蓋可動式模型による4つの鼻咽腔閉鎖パターン。それぞれのパターンにおいて、条件の一例を模型で実現した際の鼻咽腔閉鎖部を示す。ひもが動いた距離 (軟口蓋の挙上) を  $a$  mm、両脇のアクリル棒が動いた距離をそれぞれ  $b$  mm、後方のアクリル棒が動いた距離を  $c$  mm とし、各閉鎖パターンを「条件  $(a,b,c)$ 」の組み合わせで示す。

### 3. 測定実験

本節では、今回製作した模型に対する測定実験の結果を示す。測定に際しては、模型の喉頭側から音源を入力した。音源は、PC上に格納されたインパルス列 (基本周波数が 100 Hz) を、USB インタフェースによって接続されたアンプ (MA-500U, Onkyo) を介してホーンスピーカ用ドライバユニット (TU-750, TOA) から提示した。なお、ドライバユニットのネック部の口径は広く開いているため、文献[4,7]にならってそこにアルミニウム製で中央に直径 6 mm の円形の穴の開いた詰め物を入れた。

生成された音は、マイクロフォン (ECM-23F5, Sony) を介し、PCM レコーダ (PMD670, Marantz) を用いて、サンプリング周波数 16 kHz、16 bit 量子化でデジタル録音された。録音は、上智大学音声学研究室の無響室にて行った。スペクトルの分析に際しては、Matlab を用いて、ピッチに同期したスペクトル分析 (定常区間 1s における 100 周期分のフーリエ変換の平均) を行った。

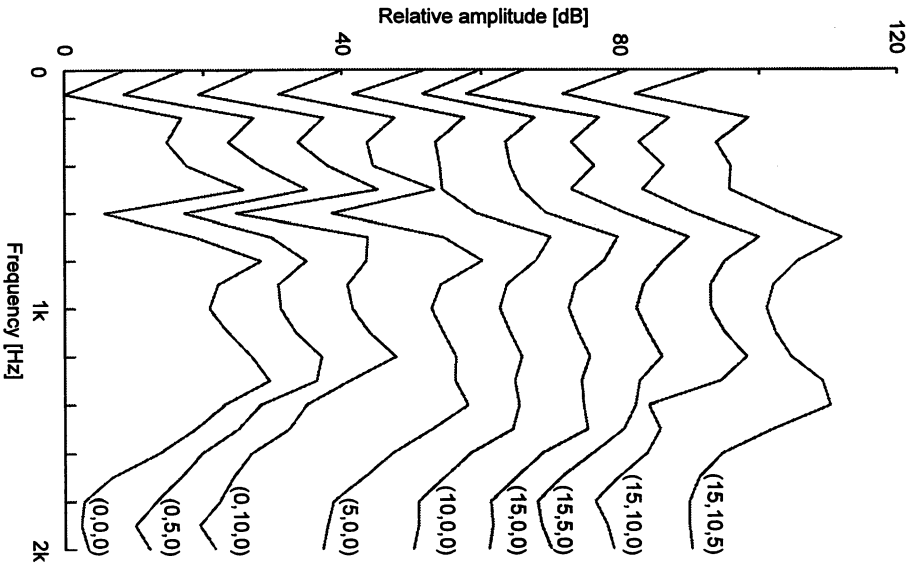


Fig. 6 軟口蓋可動式模型から生成される音声信号のスペクトルを，鼻咽腔閉鎖パターンソンの各条件に対してプロットしたものの（各スペクトルを 10 dB すつすつとしてプロット）.

### 3.1. 鼻咽腔結合が最大の条件

模型において，鼻咽腔閉鎖のための軟口蓋挙上動作や咽頭側壁および咽頭後壁の動きが何もない状態で，生成される音声測定した．このときの鼻咽腔結合部の様子を Fig. 5 中央に，またスペクトルを Fig. 6 の(0,0,0)に示す．

この条件(0,0,0)は最も開鼻声が強いつ条件であり，聴覚印象上もそれが確認された．また，スペクトルを見ても，500-600 Hz付近に極零対が存在するなど，開鼻声の特徴が現れている様子が分かる．このときの鼻咽腔部の開存面積は，100 mm<sup>2</sup>以上であった．

### 3.2. Coronal pattern

軟口蓋に装着されたひもを 5 mm, 10 mm, 15 mm と 3 段階に引くことで，軟口蓋を挙上させた．条件(15,0,0)における鼻咽腔開存部の様子を，Fig. 5 左上に示す．また，Fig. 6の(5,0,0), (10,0,0), (15,0,0)は各条件下でのスペクトルである．

条件が(0,0,0)→(5,0,0)→(10,0,0)→(15,0,0)と変化すると，それに従って鼻咽腔開存部は狭くなり，聴覚印象上も開鼻声の程度が低くなっていった．スペクトル上でも，500-600 Hz 付近の極零対が次第に消失する様子が観測された．

### 3.3. Circular pattern

軟口蓋に装着されたひもを 5 mm, 10 mm, 15 mm と 3 段階に引くことで軟口蓋を挙上させると同時に，両脇から棒をそれぞれ 5 mm, 10 mm 押し込むことで咽頭側壁を動かした．条件(15,5,0)における鼻咽腔開存部の様子を，Fig. 5 右上に示す．また，Fig. 6の(15,5,0)と(15,10,0)は各条件下でのスペクトルである．

条件が(15,0,0)→(15,5,0)→(15,10,0)と変化すると，鼻咽腔開存面積はさらに減少し，聴覚印象上も開鼻声の程度がかなり低くなった．スペクトル上でも，第 2 フォルマント (F2) のピークがはつきりしてくるのが観測された．

### 3.4. Circular pattern with Passavant's ridge

軟口蓋に装着されたひもを 5 mm, 10 mm, 15 mm と 3 段階に引くことで軟口蓋を挙上させ，両脇から棒をそれぞれ 5 mm, 10 mm 押し込むことで咽頭側壁を動かすと同時に，さらに後方から棒を 5 mm, 10 mm と押しして咽頭後壁を前方に押し出した．条件(15,5,5)における鼻咽腔開存部の様子を Fig. 5 左下に，また，Fig. 6 には条件 (15,10,5)のスペクトルを示す．

条件が(15,10,0)→(15,10,5)と変化すると，鼻咽腔結合部が完全に閉鎖され，聴覚印象上も開鼻声の確認されなくなった．スペクトル上でも，はつきりとした F2 のピークが観測されるようになった．

### 3.5. Sagittal pattern

両脇から棒を 5 mm, 10 mm 押し込むことで，咽頭側壁を動かした．条件(0,5,0)における鼻咽腔開存部の様子を，Fig. 5 右下に示す．また，Fig. 6 の(0,5,0)と(0,10,0)は各条件下でのスペクトルである．

条件が(0,0,0)→(0,5,0)→(0,10,0)と変化しても，鼻咽腔結合の開存部は劇的には狭くならず，聴覚印象上も開鼻声の程度があまり変化しなかった．スペクトル上でも，500-600 Hz 付近の極零対がはつきりと残っている一方で，第 2 フォルマント (F2) のピークが多少影

響を受けているのが観測された。

#### 4. 考察

今回、製作した模型から生成される音声信号は、鼻咽腔結合部が完全に閉鎖されている条件(15,10,5)においては、第1フォルマント(F1)が約700 Hz, 第2フォルマント(F2)が約1400 Hzであった。このことから、声道がおおよそ母音/a/の形状をしていることが裏付けられた。生成される音を確認すると、やはり聴感上も母音/a/のように聞こえた。母音/a/のような広母音の場合、鼻咽腔結合によって500 Hz付近に極零対が出現し、F1付近が著しく変化を受けることが知られている[8]。本研究の測定結果からもその様子が確認された。

本研究で用いた模型の鼻腔はアクリル製で実際の組織よりも硬く、ダンピングはあまりないものと考えられる。その形状も厳密には解剖学的なデータに基づいたものではないが、今回用いた鼻腔はシンプルな分岐管として作用するものである[4]。そのような簡素化された鼻腔であっても、接続するだけで声道が途中から二又に分岐することで500-600 Hz付近に極零対が現れる様子がはっきりと観測された。

Ushijima and Sawashima (1972)では、軟口蓋の挙上にしたがって鼻咽腔開存面積が小さくなることを指摘している[9]。さらに、Moll (1962)を始め多くの研究では、/a/などの広母音よりも/i/などの狭母音のほうが軟口蓋の高さが高いと結論付けている[10]。Bell-Berti (1980)は、鼻咽腔開存面積が30 mm<sup>2</sup>を超えると鼻音性が知覚されると述べている[11]。

合成音声を用いた実験[12,13]から、同じ開鼻声の程度を生み出すための鼻咽腔開存面積は狭母音に比べて広母音のほうが広い[14]。本研究でも、いずれのパターンにおいても鼻咽腔開存面積がかなり増大しないと開鼻声の程度が上昇しなかった。もし模型が母音/i/のような狭母音の形状をしていれば、鼻咽腔開存面積が小さくても開鼻声が聴取されることが予想される。

本研究では、鼻咽腔閉鎖の4つのパターンを実現するために、軟口蓋を挙上できるようにしたばかりではなく、咽頭側壁や咽頭後壁も動くように工夫した。その結果、それぞれのパターンにおいて鼻咽腔閉鎖を異なる度合いで実現できることを確認した。その一方、Coronal pattern等では挙上する軟口蓋の部位が実際よりも狭い領域に限られてしまっていた。Sagittal patternにおいては十分に閉鎖が得られず、咽頭側壁からの狭めだけでは開鼻声の程度がほとんど変わらなかった。Circular patternにおいては、軟口蓋の挙上と咽頭側壁による閉鎖の協調の様子に不明な点が残った。今後は、MRI動画等をベースにした詳細なる分析に基づいた設

計を行うことで、より精密な模型が実現されると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、軟らかいゲル素材を用いて、軟口蓋が可動し鼻咽腔閉鎖を実現する声道の物理模型を製作した。さらに、その模型を操作して形状を変化させることにより、鼻咽腔閉鎖運動における4つのパターンを実現した。これにより、鼻咽腔閉鎖の度合いを連続的に変えることができると同時に、それに応じて開鼻声の程度も変化する様子が確認された。生成される母音の音声信号を分析した結果、スペクトル上に開鼻声の程度に応じて極零対が出現する様子が観測された。

本研究で実現した軟口蓋可動式模型は、厳密な意味で生理学的あるいは解剖学的なデータがベースになっていない。筋肉の走行などを考慮した鼻咽腔閉鎖運動の実現は、今後の課題である。さらなる研究を進めることによって、より厳密な物理模型による鼻咽腔閉鎖運動のシミュレーションが可能になれば、閉鎖パターンに応じたより詳細な治療法が検討できるようになり、臨床へのさらなる応用が期待される。

#### 6. 謝辞

内容の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金(17390543, 19500758)、及び文部科学省私立大学学術研究高度化推進事業上智大学オープン・リサーチ・センター「人間情報科学研究プロジェクト」の助成を得た。

#### 文 献

- [1] 岡崎恵子, 相野田紀子, 加藤正子, “口蓋裂の言語臨床,” 医学書院, 1997.
- [2] 岩崎純二, 片岡竜太, 山下洋介, 春日梨恵, 安啓一, 荒井隆行, 新谷悟, “四次元MRIによる発音時の鼻咽腔閉鎖運動の観察: 鼻咽腔閉鎖パターンと口蓋帆挙筋の動きとの関連の検討,” 信学技報, Vol.SP2006-93, pp.49-54, 2006.
- [3] C. B. Croft, R. J. Shiprintzen and S. J. Rakoff, “Patterns of velopharyngeal valving in normal and cleft palate subjects: A multi-view videofluoroscopic and nasoendoscopic study,” The Laryngoscope, vol.91, no.2, pp.265-271, 1981.
- [4] T. Arai, “Education system in acoustics of speech production using physical models of the human vocal tract,” Acoustical Science and Technology, vol.28, no.3, pp.190-201, 2007.
- [5] T. Arai, “Gel-type tongue for a physical model of the human vocal tract as an educational tool in acoustics of speech production,” Acoustical Science and Technology, vol.29, no.2, pp.188-190, 2008.
- [6] T. Arai, “Lung model and head-shaped model with visible vocal tract as educational tools in acoustics,” Acoustical Science and Technology, vol.27, no.2, pp.111-113, 2006.

- [7] 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,” 日本音響学会講演論文集, vol.1, pp.417-418, 2003.
- [8] K. N. Stevens, “Acoustic Phonetics,” MIT Press, Cambridge, MA, 1998.
- [9] T. Ushijima and M. Sawashima, “Fiberscopic observation of velar movements during speech,” Annual Bulletin, Research Institute of Logopedics and Phoniatics, University of Tokyo, vol.6, pp.25-38, 1972.
- [10] K. L. Moll, “Velopharyngeal closure on vowels,” J. Speech Hear. Res., vol.5, pp.30-37, 1962.
- [11] F. Bell-Berti, “Velopharyngeal function: A spatial-temporal model,” in Speech and Language: Advances in Basic Research and Practice 4, edited by N. J. Lass, Academic, New York, pp.291-316, 1980.
- [12] A. S. House and K. N. Stevens, “Analog studies of the nasalization of vowels,” J. Speech Hear. Disord., vol.21, pp.218-232., 1956.
- [13] S. Maeda, “Acoustics of vowel nasalization and articulatory shifts in French nasal vowels,” in Phonetics and Phonology: Nasals, Nasalization, and the Velum 5, edited by M. K. Huffman and R. A. Krakow, Academic Press, San Diego, CA, pp.147-167, 1993.
- [14] S. W. Hawkins and K. N. Stevens, “Acoustic and perceptual correlates of the non-nasal- nasal distinction for vowels,” J. Acoust. Soc. Am., vol.77, pp.1560-1575., 1985.
-