



令和3年度研究助成 【サウンド技術振興部門】より

境界要素法を用いた音響シミュレーションによる口蓋裂言語障害の病態解明

山口大学大学院医学系研究科
歯科口腔外科学講座
教授

三島 克章

1. 背景と目的

口蓋裂術後にみられる構音障害を大別すると、鼻咽腔閉鎖不全（図1）に関連深い声門破裂音や鼻漏出に伴う子音の歪等と、鼻咽腔閉鎖不全に関連が低い構音障害がある。後者には、上顎の発育障害からもたらされる口蓋の浅化、狭窄、短縮などの形態異常と口蓋化構音の出現に関与する可能性が示唆されており¹⁾（図2）、また反対咬合による舌の位置異常が子音の口

蓋化を引き起こすという報告もある²⁾。しかしながら、鼻咽腔閉鎖機能と口蓋形態が産生される音にどの様に、どの程度影響しているのかを解析する方法がなかったため、現在まで不明のままである。

近年、有限要素法や境界要素法などの波動音響解析の進歩により、三次元的な音響伝達空間の解析が可能となり、声道の形態と音響の関係を可視化し、詳細に分析することが可能となってきた。現在までの報告の多くは、解析から得られる第1フォルマント（F1）と第2フォルマント（F2）は、実音声のF1、F2と比較すると、かなり乖離した結果となってい

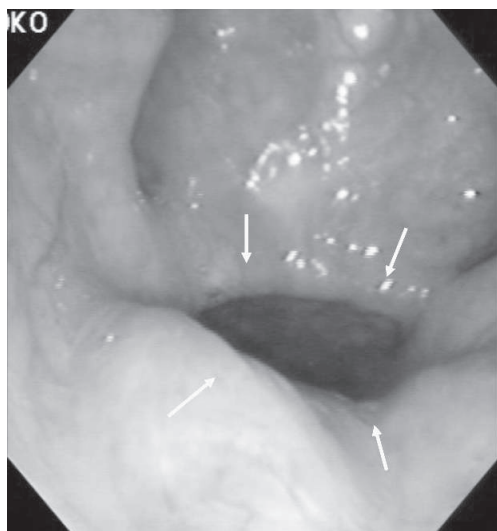


図1 鼻腔からの内視鏡画像
発音時の鼻咽腔閉鎖不全がみられる



図2 口蓋裂術後の口蓋の写真
歯列の狭窄と口蓋の浅化がみられる



図3 健常者の/i/発音時の声道モデル

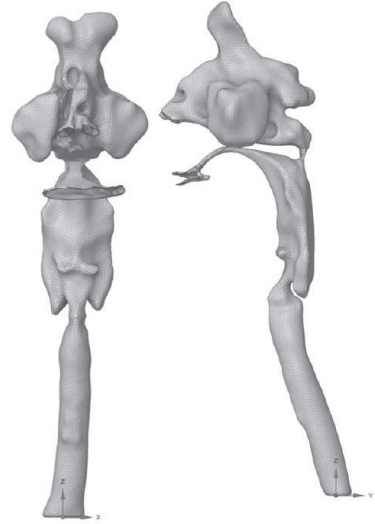


図4 健常者の/i/発音時の解析用モデル

る^{3), 4)}。

そこで、境界要素法による音響解析を構音器官に応用することで、声道とそこで産生される音、すなわち声道の形態と音声との関連性をシミュレーションすることにより、両者の関連性を明らかにし、構音障害の発生機序を解明することをめざした。

2. 研究方法

1) 解析モデルの作成

仰臥位にて、母音の持続発声状態でCT撮影を行い、CT-DICOMデータから3D可視化ソフトAmira[®] (ver 5.6.0)を用いて声道モデルを作成した(図3)。声門下部から気管分岐部相当部までを仮想的に円柱状に12cm延長した声道モデルと、気管分岐部までのCTデータから構築した声道モデルと比較したところ、下記のシミュレーションによって得られるフォルマントに差が無かった⁵⁾ことより、被爆量低減目的にCT撮影範囲は鎖骨までとして、気管相当部は12cmの長さの円柱とした。

声道モデルに対して、ダイレクトモデラー

Space Claim (ver 19.0)を用いてメッシュサイズの調整および均一化や不要なメッシュの削除を行い、さらに鼻孔と口裂のメッシュは除去して開放状態とし、解析モデルとした(図4)。

2) シミュレーション方法

(1) 音響解析法

音響解析ソフトWAON[®] (ver 4.42)を使用し、1~2,000Hzまで1Hz刻みでの解析を行った。音の伝搬を表す波動方程式としてKirchhoff-Helmholtz積分方程式を使用し、離散化手法として境界要素法を用いた⁵⁾。

(2) 音響解析モデルのパラメータの設定

声道モデルの壁面は剛壁とし、吸音率0%、比音響インピーダンス $=\infty$ とし、最下端部を剛壁ではない壁とした。音響媒質は体温を想定した37℃とし、音速は352.85m/s、密度は1.1468kg/m³とした。音源は声帯相当部に点音源を設定した。観測点は口唇から10cm前方の位置とした。

以上のパラメータ、条件設定のもと、音響解析を行い、観測点における音圧を求め、音圧レベルでの周波数応答曲線を作成し、第1フォル

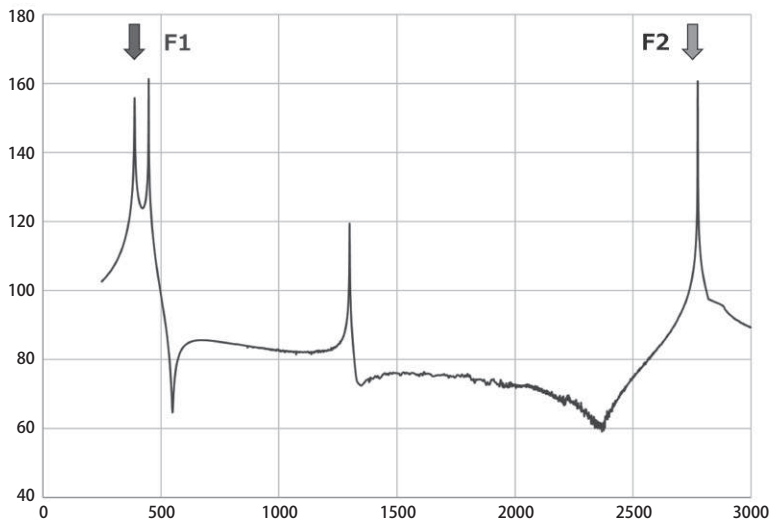


図5 健常者の/i/のシミュレーション結果
周波数応答曲線を示す。

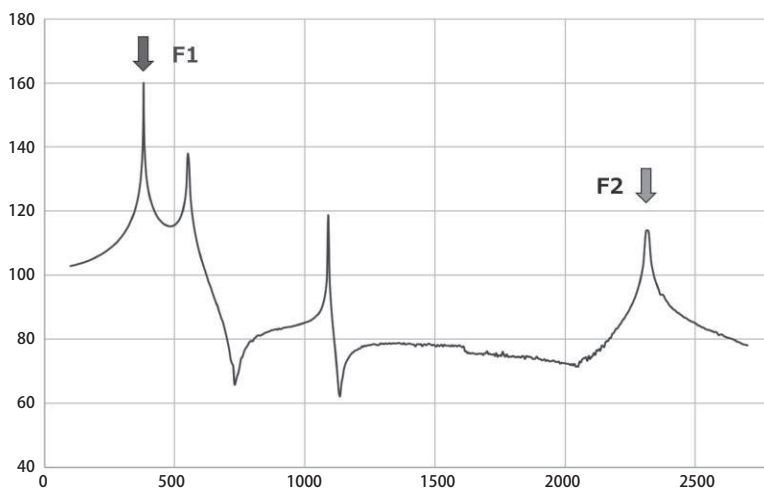


図6 鼻咽腔結合部を拡大したシミュレーション結果
図5のモデルの鼻咽腔結合部を拡大して算出した周波数応答曲線を示す。

マント (F1) と第2フォルマント (F2) を算出した。

(3) 実音声との比較、検証

実音声をマイクロフォン (Shure SM58) を通して、サンプリングレート44kHz、16Bitにて録音し (Marantz PMD661)、マルチスピー

チ3700 (PENTAX Medical) を使用してフォルマントを算出した。

シミュレーションから算出されたフォルマント周波数をFとし、実音声から算出されたフォルマント周波数とFとの差を弁別閾値 ΔF とした。Fで ΔF を割ることにより、相対弁別閾

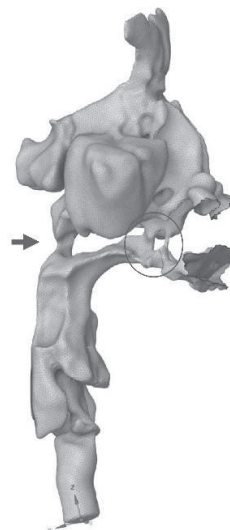


図7 両側性口唇口蓋裂術後患者の/i/発音時の解析モデル

鼻咽腔閉鎖不全があるため鼻咽腔結合部が広がっており（矢印）、また、口蓋に鼻腔への交通が残っている（丸の部分）。

値（%）を求め、日本人の母音フォルマント周波数弁別閾が4.9～9.6%という報告⁶⁾に準じて、9%以内を良好と判断とした。

3. シミュレーション結果

1) 健常者の/i/のシミュレーション

シミュレーションによって得られた周波数応答曲線を図5に示す。F1は401Hz、F2は2,775Hzであり、実音声から算出したF1、F2は442Hz、2,882Hz、F1、F2の周波数弁別閾値は10.2%、3.9%であった。次に、鼻咽腔閉鎖不全状態を模して、声道モデルの鼻咽腔結合部を拡大した解析モデルとしたうえで、シミュレーションを行うと、図6の周波数応答曲線が得られた。F1とF2はそれぞれ381Hz、2351Hzとなり、鼻咽腔結合部を拡大する前と比べて小さくなっていた。

2) 口唇口蓋裂術後患者の/i/のシミュレーション

鼻咽腔閉鎖不全を呈する両側性口唇口蓋裂術後患者に対して、/i/発音時のCTデータから声道モデルを作成し（図7）、上記シミュレーションを行った結果、F1とF2はそれぞれ397Hz、2,572Hzであった。

4. 今後の展望

健常者の/i/のシミュレーションの結果に示すように、鼻咽腔結合部を拡大することにより

F1とF2が小さくなっていたことは、鼻咽腔閉鎖不全を有する患者の/i/のF2が小さい傾向にあるという過去の報告⁷⁾に合致していた。また、上記両側性口唇口蓋裂患者では、鼻咽腔閉鎖不全を呈する点と口蓋に鼻腔への交通（φ7-8mm程度）を認める点（図7）、周波数特性に大きく関連する可能性があると考えられ、今後、さらに解析を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Okazaki K., Kato M., Onizuka T.: Palate morphology in children with cleft palate with palatalized articulation. *Ann Plast Surg* 26; 156-163, 1991.
- 2) Lawrence C.W., Philips B.J.: A telefluoroscopic study of lingual contacts made by persons with palatal defects. *Cleft Palate J* 12; 85-94, 1975.
- 3) Kagawa Y., Shimoyama R., Yamabuchi

- T., et al.: Boundary element models of the vocal tract and radiation field and their response characteristics. *J Sound Vibr* 157; 385-403, 1992.
- 4) Matsuzaki H., Motoki K.: Study of acoustic characteristics of vocal tract with nasal cavity during phonation of Japanese /a/. *Acoust Sci Tech* 28; 124-127, 2007.
- 5) Shiraishi M., Mishima K., Umeda H.: Development of an Acoustic Simulation Method during Phonation of the Japanese Vowel /a/ by the Boundary Element Method. *J Voice* 35; 530-544, 2021.
- 6) Eguchi S.: Difference limens for the formant frequencies: Normal adult values and their development in children. *J Am Audiol Soc* 1; 145-149, 1976.
- 7) 金野吉晃, 八木實, 亀谷哲也, 他: 口蓋裂患者の顎顔面構造と開鼻声の音響特徴の関連について. *岩医大歯誌* 22; 51-60, 1997.