

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

( / )

研究題目	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	報告書作成者	三島克章
研究従事者	三島克章、梅田浩嗣、白石麻美		
研究目的	<p>口蓋裂の術後にみられる構音障害を大別すると、鼻咽腔閉鎖不全に関連深い構音障害には声門破裂音や鼻漏出に伴う子音の歪等があり、一方で鼻咽腔閉鎖不全に関連が低い構音障害には口蓋化構音や側音化構音等がある。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が口蓋化構音の出現に関与する可能性が示唆されており<sup>1)</sup>、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<sup>2)</sup>。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、現在まで詳細は不明のままである。</p> <p>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る<sup>3,4)</sup>。</p> <p>今回われわれは、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。</p> <p>1) Okazaki K., Kato M., Onizuka T.: Palate morphology in children with cleft palate with palatalized articulation. <i>Ann Plast Surg</i> 26; 156-163, 1991.</p> <p>2) Lawrence C.W., Philips B.J.: A telefluoroscopic study of lingual contacts made by persons with palatal defects. <i>Cleft Palate J</i> 12; 85-94, 1975.</p> <p>3) Kagawa Y., Shimoyama R., Yamabuchi T., et al.: Boundary element models of the vocal tract and radiation field and their response characteristics. <i>J Sound Vibr</i> 157; 385-403, 1992.</p> <p>4) Matsuzaki H., Motoki K.: Study of acoustic characteristics of vocal tract with nasal cavity during phonation of Japanese /a/. <i>Acoust Sci Tech</i> 28; 124-127, 2007.</p>		

研究内容	<p>1) 解析モデルの作成</p> <p>母音/i/と/u/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<sup>®</sup> (ver 5.6.0) を用いて声道モデルを作成した(図 1)。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なかった<sup>5)</sup>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 の長さの円柱として作成した。</p> <p>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 2)。</p> <p>2) シミュレーション方法</p> <p>(1) 音響解析法</p> <p>音響解析ソフト WAON<sup>®</sup> (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<sup>5)</sup>。</p> <p>(2) 音響解析モデルのパラメータの設定</p> <p>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=<math>\infty</math>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°Cとし、音速は 352.85m/s、密度は 1.1468kg/m<sup>3</sup>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 フォルマント(F1)と第 2 フォルマント(F2)を算出した。</p> <p>(3) 実音声との比較、検証</p> <p>防音室内で、CT 撮影時と同じ仰臥位にて、同一被検者の/i/と/u/の実音声をマイクロフォン(Shure SM58)から、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 F1 と F2 を算出した。</p> <p>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. <i>J Voice</i> 35; 530-544, 2021.</p>
------	--

研究概要報告書【サウンド技術振興部門】

( / )

<p>研究のポイント</p>	<p>実音声との比較を行うことで、シミュレーションの妥当性を検証することができた。その際、母音の重要な特徴であるフォルマントをもとに妥当性を評価できた。すなわち、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 <math>\Delta F</math> とした。F で <math>\Delta F</math> を割ることにより、相対弁別閾値 (%) を求め、日本人の母音フォルマント周波数弁別閾値が 4.9 ~ 9.6% という報告<sup>6)</sup>に準じて、10%未満を良好と判断とした。</p> <p>6) Eguchi S.: Difference limens for the formant frequencies: Normal adult values and their development in children. <i>J Am Audiol Soc</i> 1; 145-149, 1976.</p>
<p>研究結果</p>	<p>1) 健常者の/i/と/u/のシミュレーション                  健常被験者の/i/のシミュレーションから、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(図 3)。本被験者の声道モデルの鼻咽腔結合部を拡大することで鼻咽腔閉鎖不全状態を模したモデルとしてシミュレーションを行った結果、F1 と F2 はそれぞれ 381Hz、2,351Hz と鼻咽腔結合部を拡大する前と比べて小さくなっていた(図 4)。</p> <p>健常被験者の/u/のシミュレーションから、F1 は 371Hz、F2 は 1,127Hz であり、実音声から算出した F1、F2 は 364Hz、1,198Hz、F1、F2 の周波数弁別閾値は 1.9%、6.3%であった(図 5)。</p> <p>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 6)、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。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>今回の研究により、/i/と/u/のシミュレーション方法の妥当性が証明された。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<sup>7)</sup>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(φ 7-8mm 程度)を認める点が(図 6)、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、口蓋裂患者の構音器官の形状と音響学的特徴の関連性について解析を進めていく予定である。</p> <p>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.</p>

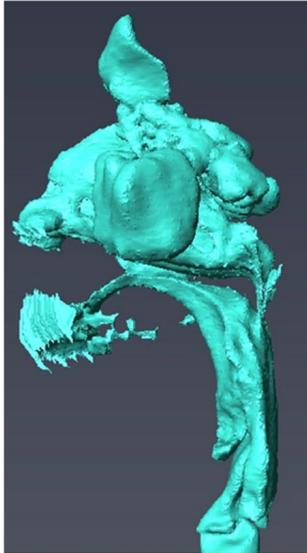


図1. 健常被験者の/i/発音時の声道モデル

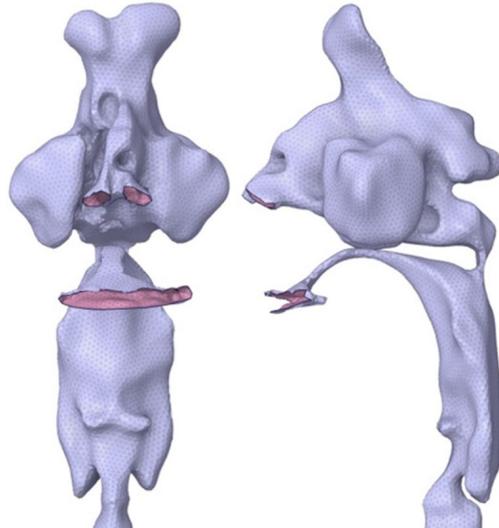


図2. 健常被験者の/i/発音時の解析用モデル

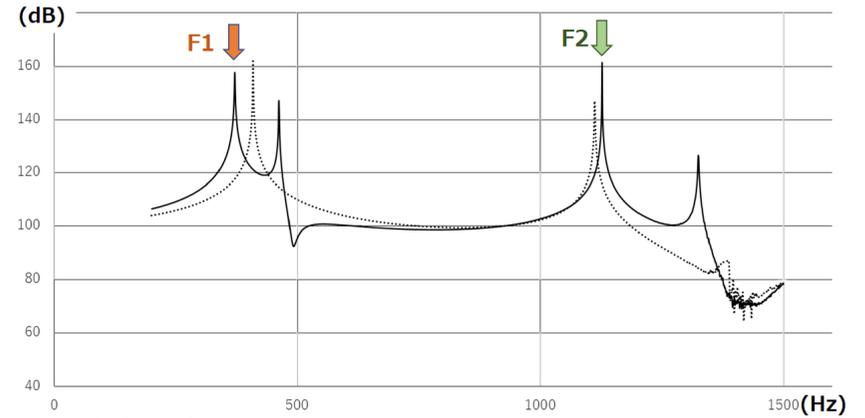


図5. 健常被験者の/u/のシミュレーション結果  
 鼻咽腔結合あり（実線）と鼻咽腔結合なし（点線）の周波数応答曲線を示し、鼻咽腔結合による極零対が観察され、それによりフォルマントに位置が変化している。

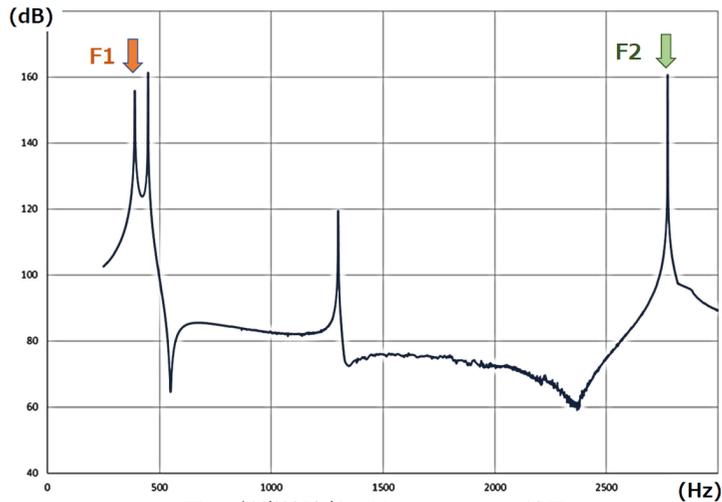


図3. 健常被験者の/i/のシミュレーション結果  
 周波数応答曲線を示す。

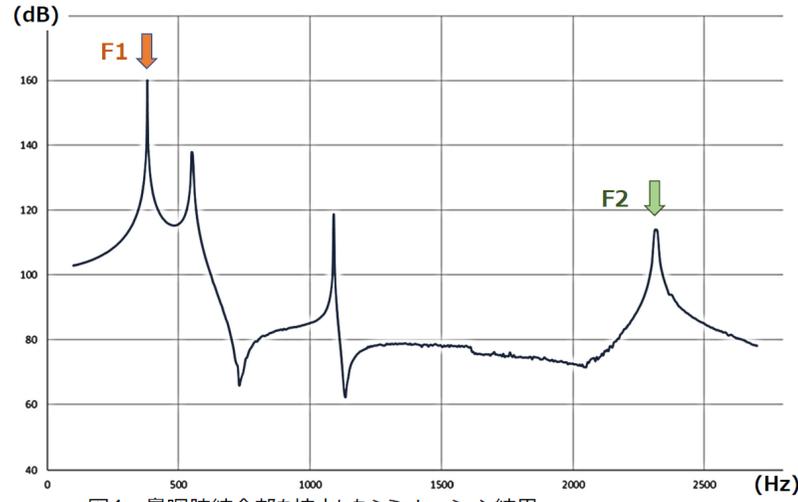


図4. 鼻咽腔結合部を拡大したシミュレーション結果  
 図3のモデルの鼻咽腔結合部を拡大して算出した周波数応答曲線を示す。

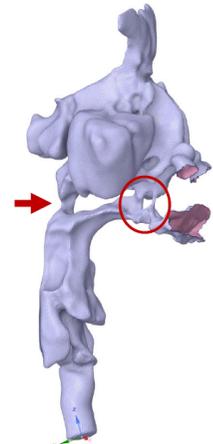


図6. 両側性口唇口蓋裂術後患者の/i/発音時の解析モデル  
 鼻咽腔閉鎖不全があるため鼻咽腔結合部が広がっており（矢印）、さらに口蓋に鼻腔への交通がみられる（丸印）。

(注:フローチャート図,ブロック図,構成図,写真,データ表,グラフ等 研究内容の補足説明にご使用下さい。)