

大規模な変形を伴う声道の流体音響構造連成解析

Fluid-Acoustic Interaction Simulation for Vocal Tract with Large Deformation

研究代表者 岐阜工業高等専門学校機械工学科 准教授 山本高久

Takahisa Yamamoto

Our research introduces a groundbreaking fluid-structure-acoustic coupled analysis model focused on the numerical simulation of articulatory disorders, notably velopharyngeal insufficiency, commonly stemming from congenital anomalies such as cleft lip and palate. These disorders disrupt speech by hindering proper closure of the velopharyngeal mechanism. Conventional diagnostic techniques, heavily reliant on subjective assessments, fall short of capturing the intricate nature of these speech impairments accurately. The cornerstone of our approach is an integrated numerical model designed to emulate the complex dynamics of speech production. In the early phases of our work, we successfully developed and validated a fluid-acoustic-structure interaction model, employing simplified geometries to facilitate the interaction calculations. This initial step has laid the groundwork for extending the model's application to simulate real-case scenarios of articulatory disorders more precisely, thereby holding the potential to transform diagnostic accuracy and treatment methodologies. Our research promises to deliver a quantitatively accurate and reliable tool for assessing articulatory disorders by concentrating on numerical simulations and leveraging simplified geometries for interaction analysis. This innovative blend of theoretical and practical application marks a significant leap forward in speech production analysis, opening new avenues for diagnosing and treating speech disorders and offering substantial benefits to affected individuals.

要旨

本研究は先天性奇形による発声障害を対象に、流体音響構造連成解析モデルの数値シミュレーションに取り組んだ。まず、流体音響解析モデルを構築し、その上で流体音響と構造の相互作用を精密にモデル化した。この相互作用をモデル化するに際しては、連成解析ライブラリを活用した。本研究では、鼻咽腔を簡略化したモデルを作成し、数値解析を実施し、開発した解析モデルの有効性と妥当性を確認した。その成果を基に、実際の発声障害を有する症例を対象とした詳細な流体構造音響解析に取り組んだ。本研究のアプローチにより、発声障害のより精密な定量的評価及びその信頼性の向上が期待される。今後は、引き続き実症例を対象とした大規模変形解析を行い、実症例における構音障害の成因メカニズムを明らかにしていく計画である。

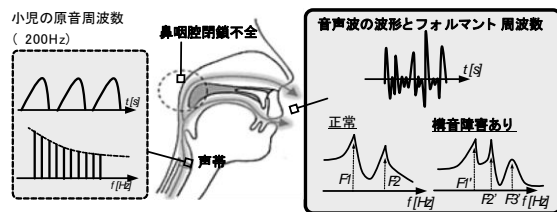


図1 鼻咽腔閉鎖不全と周波数応答の関係

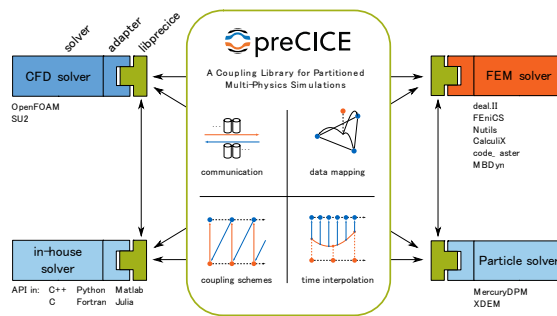


図2 鼻咽腔閉鎖不全と周波数応答の関係[1]

1. まえがき

口唇・口蓋裂は、口腔と上顎に発生する先天性の外表面奇形の一つであり、その殆どの場合、鼻咽腔閉鎖不全を伴う^(1,2)。この鼻咽腔閉鎖不全は開鼻声、鼻雑音などの構音障害(言語障害)を招く。通常、小児の原音周波数(声帯での流体振動)は200Hz程度と言われており、声道の形態変化により所望の音(フ

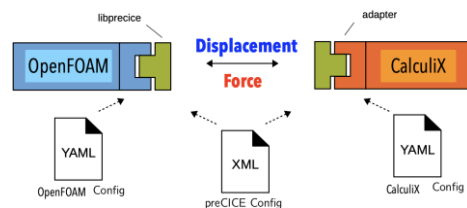


図3 鼻咽腔閉鎖不全と周波数応答の関係[1]

ホルマント周波数という)に変換し、発声に至っている(図1)。しかし、鼻咽腔閉鎖不全がある小児の発声では、正しく声道の形態を変えることができないため、周波数変換が不十分となる⁽³⁾。現在、臨床現場では言語聴覚士による聴覚的判定、ブローイング検査など、(数値化されていない)定性的な手法により鼻咽腔閉鎖不全の重症度を評価している⁽⁴⁾。本研究は流体構造音響連成解析により個々の患児の発声状況をバーチャルに再現し、そのデータを使用し、重症度の評価、治療方針の検討に活用することを提案するものである。

なお、鼻咽腔閉鎖不全・構音障害の重症度の判定に際して、言語聴覚士による聴覚的判定、ブローイング検査など、検査する人間の主観による検査方法が多く、定量的な評価方法が確立されていないという問題がある。また、有効な治療法としては、外科手術によるプッシュバック法等といった鼻咽腔閉鎖手術が行われているものの、閉鎖術を適用したが故に睡眠時無呼吸を引き起こすこともあり、手術適用の是非は慎重に行う必要がある⁽²⁾。医師の経験のみによらない、定量的な診断方法の確立が必要不可欠となっている。

他方、人の構音メカニズムは声帯で200Hz程度の振動流を形成した後、声道を様々な形状に変化させることにより所望の声(フォルマント周波数)に変換している。また、声道壁面には軟口蓋などの気流により振動や大規模に変形する部位もあり、構音は流体、構造、音響の三者が相互干渉する複雑な現象から構成されている。このように複雑な現象を包括した、鼻咽腔閉鎖不全・構音障害を診断・評価する手法の確立が望まれている。

本研究はこれら問題に対処するために、当該研究期間において

- ・流体音響構造連成解析モデルの作成
- ・Perpendicular Flapを対象とした流体音響構造連成解析と流体音響-構造の相互作用の評価
- ・流体音響構造連成解析モデルの大規模変形解析への改修と簡略化鼻咽腔モデルを対象とした解析
- ・実症例データを対象とした流体解析による鼻咽腔閉鎖不全症が流れ場および音場に及ぼす影響
- ・実症例を対象とした大規模変形解析手法の確立

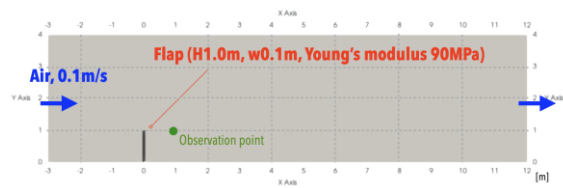


図4 Perpendicular-Flapの概略図

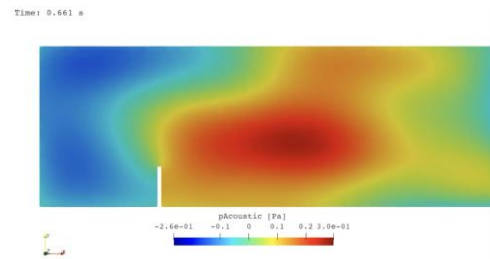


図5 Flap変形を計算しない場合の音圧分布

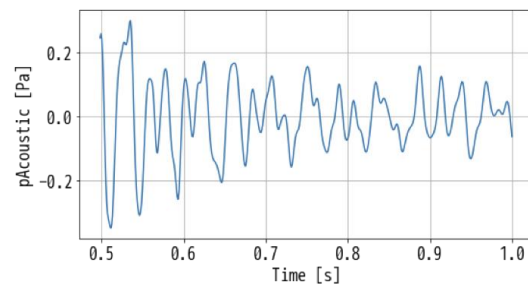


図6 Flap変形を考慮しない計算しない場合の音圧の経時変化

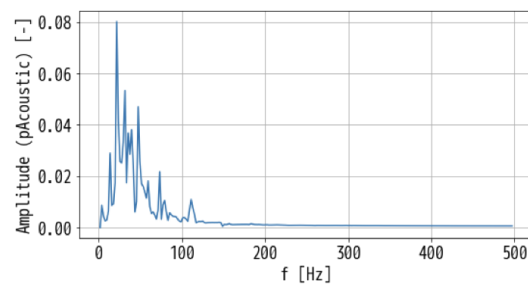


図7 Flap変形を計算しない場合の音圧のFFT解析結果

に取り組んだ。以下にその詳細を述べる。

2. 解析モデル

本研究では構造変形、流動現象、そしてそれに伴う音響現象の相互作用を正確に捉えるために、新たな連成モデルを構築した。構造解析にはCalculiXを、流体解析・音響解析にはOpenFOAMをベースに音響解析ソルバーをカップリングさせた新たなソル

バーを構築した。そしてこれら異なる解析モデルを連成ライブラリである preCICE を用いて連成することとした。

2.1 構造解析

本研究では、非線形構造力学問題を解析するためにオープンソースで開発が行われている有限要素法 CalculiX ver. 2.20 を使用した⁽⁵⁾。同ソフトウェアは機械設計、構造工学、およびその他のエンジニアリング分野での利用を目的に開発されており、複雑な材料の動的変形の挙動や非接触問題を含む幅広いエンジニアリング問題を扱うことができる。構造解析では、物体の平衡状態を記述するために以下の方程式が用いられている。

$$MU'' + CU' + KU = F$$

M 、 C 、 K は質量、ダンピング、剛性マトリクスであり、また、 U 、 F は変位、外力ベクトルを表す。

2.2 流体解析

流体解析には OpenFOAM ver. 2206 を使用した⁽⁶⁾。その中でも弱圧縮性流体ソルバーである”rhoPimpleAdiabaticFoam”をベースに音響解析ソルバーを連成した。同ソルバーは圧力-速度場のカップリングに PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) と SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) のアルゴリズムを組み合わせており、時間依存性のある流れの問題に対して、より安定して数値解を得られることが期待できるという特徴がある。

2.3 音響解析

本研究の音響解析手法は、圧力に基づく波動方程式を利用し、CFD シミュレーションから得られる圧力変動を用いて音響圧力場を計算する手法に基づいている。このアプローチでは、低マッハ数流れでの密度変動が最小限であると仮定して、圧力変動を波動方程式に組み込むことで音響領域の振動を計算している。前述の通り音響解析の実装には、OpenFOAM の弱圧縮性流体ソルバーをベースにした新たな圧力

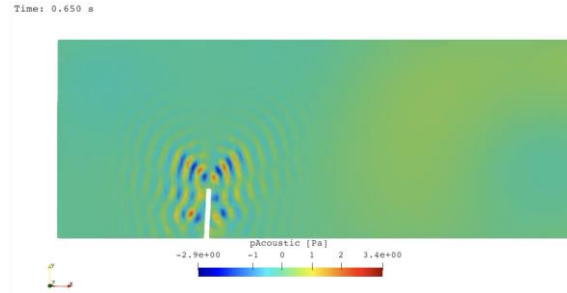


図8 流体音響-構造連成解析により得られた音圧分布

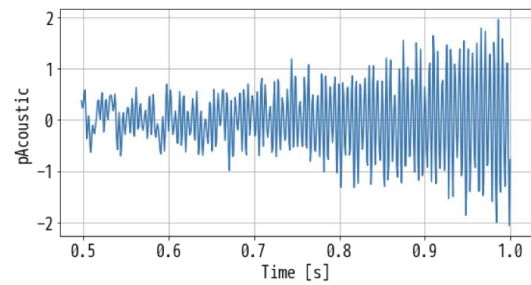


図9 流体音響-構造連成解析により得られた音圧の時間変動

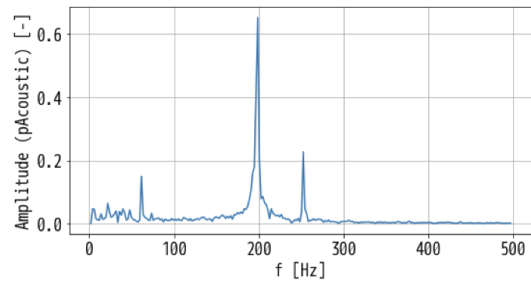


図10 流体音響-構造連成解析により得られた音圧のFFT結果

ベースのソルバーを追加した^(7,8)。

$$\frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} - c_\infty^2 \frac{\partial^2 p_a}{\partial x^2} = -\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2}$$

具体的には、音響圧力フィールド(p_a)の計算に、圧力変動(p')から得られる音響情報と流れ場の圧力平均値を組み合わせることで、音響波の伝播をシミュレートしている。本法は、特に低マッハ数での流れに対して適しており、流れ場からの圧力変動を利用して音響圧力を計算することで、流れによって誘発される音響現象の詳細な分析を可能にするという特徴を有している。

2.4 連成ライブラリー

本研究では上述の構造、流体・音響ソルバーを連

のメッシュ間での滑らかなマッピングを実現することができる。

3. 解析結果および考察

3.1 Perpendicular-Flap 解析

流体構造連成計算のベンチマークとして使用されている Perpendicular-Flap 問題に対し、本研究で構築した流体音響構造連成ソルバーを用いて解析を行なった。図 4 にその概略図を示す。全長 10m の二次元ダクトに、空気(密度 1.23kg/m³)を左方から流入する。中央部分にはゴム板(ヤング率 4.0e6Pa)が設置されている。ゴム板の変形による音圧分布の変化を明らかにした。また、同図中の○印は観測点を表しており、音圧の定点計測ならびに FFT 解析を行なった。図 5-7 はそれぞれ Flap の変形を計算しない場合の音圧分布、音圧の経時変化ならびにその FFT 解析結果を示す。音圧に周波数変動が生じており流体音が発生していることが確認できる。また、その周期は FFT の結果よりおよそ 45Hz 前後にそのピークが現れ得ていることが確認できる。他方、図 8-10 は本研究で構築した音響-流体連成解析の結果を示す。Flap の動的変形により一様であった前述の音圧分布に大きな変化が生じていることが確認できる。また、その変動周波数を確認すると 200Hz にピークがシフトしていることが確認できる。Flap の固有値計算を行なったところ一次振動モードは 170Hz 程度であることを確認している。本解析により得られた音圧の振動周波数はほぼ Flap の振動モードとほぼ重複していることが確認できる。このような音圧の振動数ピークシフトは、本研究で構築した流体音響-構造連成ソルバーを用いて初めて数値的に明らかにしたものであり、本研究成果の一つであると考えられる。

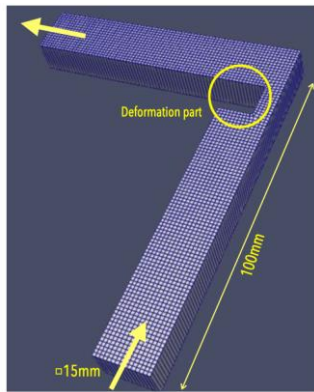


図 11 簡略化した鼻咽腔モデル

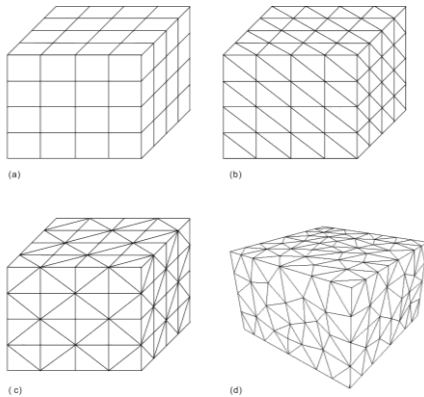


図 12 構造格子と非構造格子: (a)ヘキサ構造格子 (b)テトラ構造格子 (c)テトラヘドラ構造格子 (d)非構造格子⁽¹⁰⁾

成させるのに、連成ライブラリである preCICE を用いた⁽⁹⁾。異なる計算流体力学や計算構造力学ソルバー間でデータを交換し、連成計算を実行するためのオープンソースのライブラリである(図 2)。

CalculiX および OpenFOAM の連成に際しては、構造計算により得られる変位量と流体解析により得られる流体力をコミュニケーションデータとした(図 3)。また、通常異なるソルバーを異なる領域に適用する場合、その境界のメッシュは必ずしも一致していない。そこで一方のソルバーが生成したデータを別のソルバーが使用できる形式に変換するとともに、このメッシュの不一致を加味してデータをプロジェクションする必要がある。そこで本研究ではラジアルベース関数法を用いてデータ交換を行なった。本モデルはラジアルベース関数を用いる事により、計算コストは高くなるものの、送信側と受信側

3.2 簡略化した鼻咽腔モデルを対象とした大規模変形解析

図 11 に示す簡略化した鼻咽腔モデルを対象に、軟口蓋の大規模変形を想定した流体音響-構造連成解析を行なった。同図は流路形状を表したものであり、図中の丸で囲まれた領域が軟口蓋を想定したものである。同領域は構造計算に伴い水平方向に流路が拡

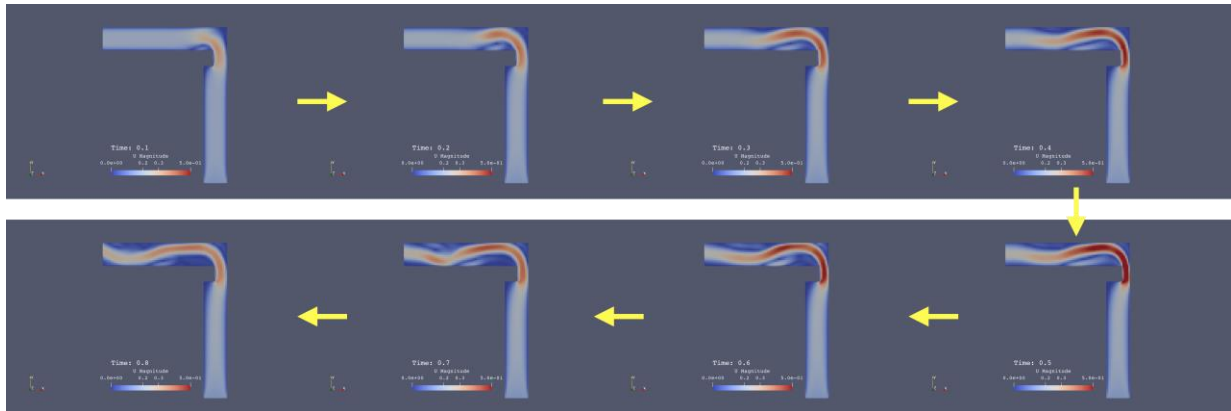


図13 簡易鼻咽腔モデルを対象とした流体音響-構造連成解析結果（速度コンター）

大・縮小を繰り返す条件を与えた。ここで構造側を大規模変形させる場合、流体側の拡大・収縮に合わせたメッシュの変形が必要となる。他方、流体解析の計算メッシュは構造格子と非構造格子とに大別される(図12)。前者はヘキサメッシュやテトラメッシュが原則等間隔で配置されている。計算収束性が比較的高く、また、連成解析においてメッシュ変形が容易であるが、声道などの複雑な形状には適用することができないというデメリットもある。非構造格子は基本的にはテトラメッシュをランダムに配置しているため、複雑な形状でも容易にメッシュを配置することが可能である。その一方、計算収束性の低下を招きやすく、また、変形を行うとメッシュ品質の低下を招きやすい⁽¹⁰⁾。大変形ではメッシュのコンシステンシーが保てない場合もありうる。そこで本研究ではまずは簡略化した鼻咽腔モデルに構造格子を適用し、大変形を行う手法を確立した。その上で非構造格子への転用を試みた(詳細は後節にて)。

図13は簡略化した鼻咽腔モデルの軟口蓋を大規模変形させた際の実験時の速度コンター図を示す。なお、流入速度は0.2m/s(実際の構音時の呼出流速に近い条件)とした。その結果、鼻咽腔部の狭窄が強くなるとその交流で流れが蛇行し出すことが確認できる。また、この流れの蛇行は音圧分布にも影響を与えていることを確認した。なお、メッシュ変形が大きくなった時にOpenFOAM、CalculiXのメッシュ変形機能では対応ができず、計算が発散することが確認された。そこで本研究では任意の時間ステップ毎にリメッシュを行えるよう新たなリメッシュ生成プログラムを構築する

事によりこの問題に対応した。

3.3 実症例データを対象とした流体音響解析

図14は鼻咽腔閉鎖不全症患者が「Si」の構音をしているときに撮影したCTデータから構築した3次元鼻咽腔モデルである。「Si」の構音では軟口蓋が鼻腔と口腔とを隔てる。しかし、図にあるように鼻咽腔閉鎖不全に起因して軟口蓋が鼻咽腔を完全には閉じることができず、鼻腔と口腔とが接続されたままになっていることが確認できる。

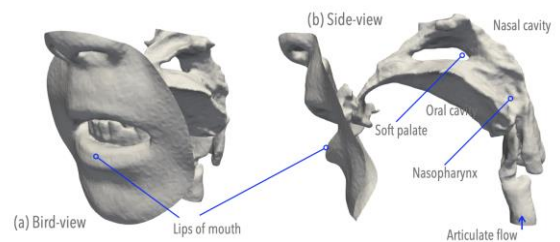


図14 鼻咽腔閉鎖不全症患者のCTデータから作成した3次元鼻咽頭-鼻咽腔-口腔モデル

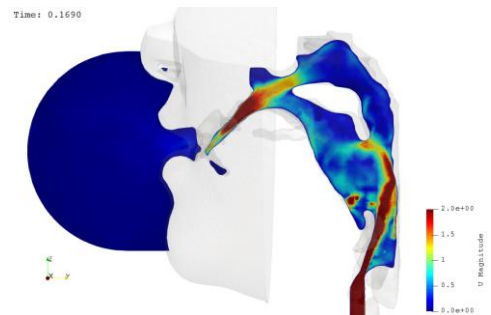


図15 鼻咽腔閉鎖不全症患者の「Si」構音時の速度コンター図

本研究課題の最終目的は同図にある複雑な形状を有する鼻咽腔モデルに対して大規模変形を伴う流体音響構造連成解析を行う事にある。その事前計算として本節では同モデルに対して流体音響解析を行い、鼻咽腔閉鎖不全症が流動場、音場に及ぼす影響を定量的に評価することとした。

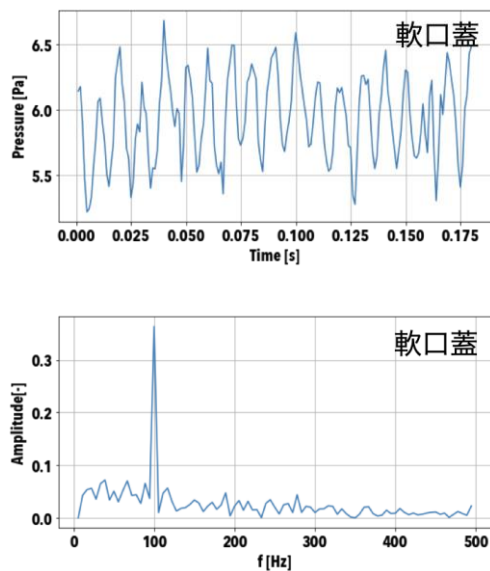


図 16 鼻咽腔閉鎖不全症患児の軟口蓋下方における音圧特性とその DFT 解析結果

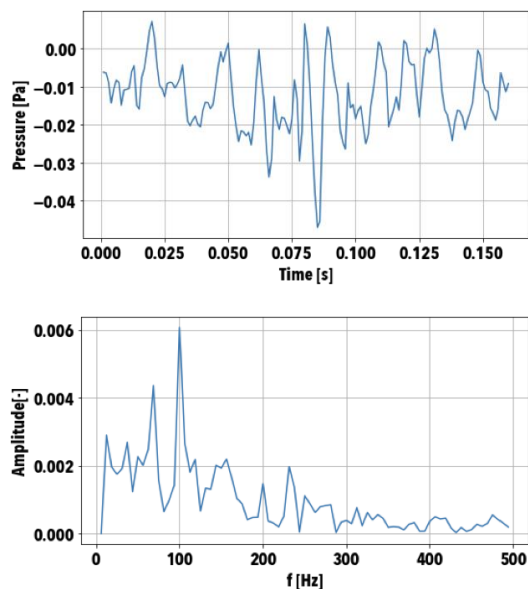


図 17 鼻咽腔閉鎖不全症患児の口唇外側における音圧特性とその DFT 解析結果

解析条件としては、流入流量を 100mL/s (小児の呼出流量に相当)、入力音圧振動を 100Hz とした。

図 15 に「Si」構音時の呼出流動特性 (速度コンター図) を示す。鼻咽腔閉鎖不全により鼻腔にも呼出流が流入していること、ならびに軟口蓋下方において循環流が形成されていることが確認できる。図 16, 17 には軟口蓋下方および口唇外側において音圧を定点観測した結果、その DFT 解析結果を示す。軟口蓋下方においては原音である 100Hz のピークが現れていることが確認できる。他方、口唇外側では音圧に乱雑成分が現れ、DFT 解析結果にも原音周波数である 100Hz の他に、複数のピークが現れていることが確認できる。このような複数のピークは鼻咽腔閉鎖不全により鼻腔と口腔での音圧場が相互干渉したことに起因するものと考えられる。このような相互干渉は開鼻声 (呼出流が鼻に抜ける事により正しい構音ができていない) を定量的な評価手法になりうるものと考えられる。というのも、現在の開鼻声の評価は患児の発声を言語聴覚士が診断するものであり、あくまで定性的な評価に分類される。本研究で明らかにした相互干渉や DFT 解析によるピークシフトはこのような定性的な評価に対し、定量的な評価を提供するものであり、より客観的かつ正確な診断を可能にするものであると期待できる。

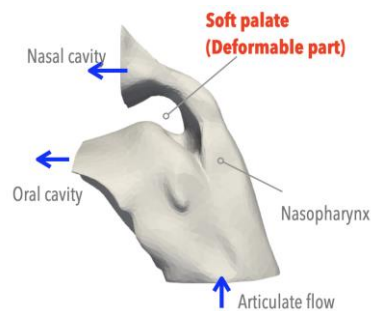


図 18 大規模変形を伴う解析のために作成した鼻咽腔モデル

3.4 実症例データを対象とした大規模変形を伴う流体音響解析

前述の通り、本研究の最終的な目標は図 14, 15 にある実症例データをもとにした鼻咽腔モデルに対して、構音時を想定した大規模変形を伴う流体音響構造連成解析を行う事にある。流体音響構造連成解析モデルの構築ならびに簡略化モデルに対する大規模変形解析については、既に 3.1, 3.2 節で述べた通り

である。本節ではこれら解析モデルおよび解析手法を組み合わせることで実症例モデルに対する大規模変形を伴う流体音響構造解析の進捗について言及する。

図 18 は大規模変形の解析を目的に作成した鼻咽腔モデル（流体側）を示す。図中の Soft palate（軟口蓋）の部分が大規模変形をするよう設定を行なっている。

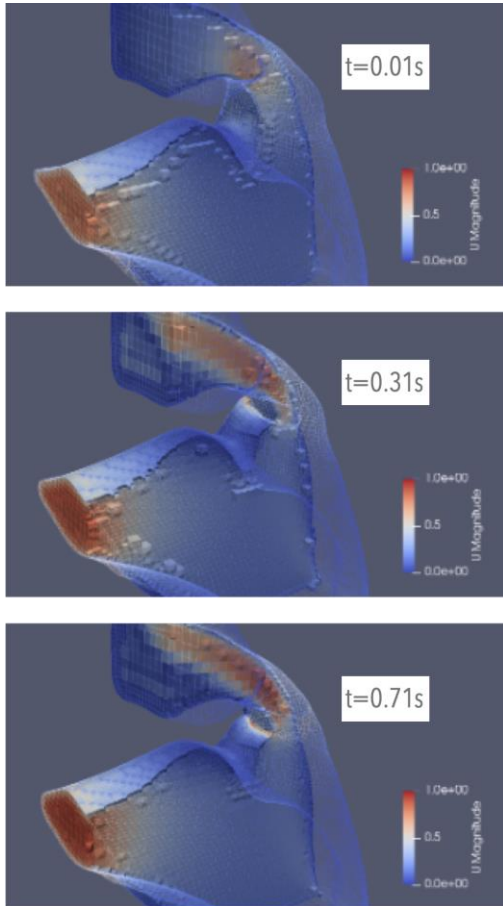


図 19 鼻咽腔の実症例モデルに対する大規模変形を伴う流体音響構造連成解析結果（速度コンター図）

図 19 に大規模変形解析結果を示す。図 13 に示した簡易形状モデルにおける大規模変形解析と同様に、軟口蓋の変形に伴い鼻腔に流入する空気速度が上昇している（空気流量としては減少している）ことが確認できる。他方、口腔への流入流量および流速が上昇していることが確認できる。このような傾向は鼻咽腔閉鎖不全症患者の構音時にも生じていることが臨床研究より確認されており、本結果はそれを反

映したものである。

先に示した簡易形状モデルの大規模変形では 10mm の変形を解析することができたが、本解析では 5mm 以上の解析を行うことができなかった。先の解析では構造、流体それぞれの計算メッシュに構造格子を作成しており、大規模変形をさせた場合でも計算メッシュが破綻することはなかった。しかし、実症例モデルでは複雑な幾何形状を再現するために非構造格子を採用せざるおえず、そのような計算メッシュでは大規模変形をさせた際に、計算メッシュの変形が破綻することが確認された。流体音響、構造、それぞれの計算メッシュの形状更新の精度をあげる必要があるとともに、流体音響解析と構造計算間でのデータ通信の精度を上げる必要があると考えられる。現在は、両解析の境界面で応力と変位データをプロジェクションしているが、初期のメッシュ形状から大きく変形するとこのプロジェクションが破綻することを確認している。放射基底関数法などの他のデータ通信手法を今後検討していく予定である。

4. まとめ

本研究では、鼻咽腔閉鎖不全症患者の構音障害を定量的に評価する手法として、流体音響構造連成解析モデルを新たに構築した。鼻咽腔の簡易形状モデルを用いた解析において構築した解析モデルの妥当性および有効性を確認した。他方、実症例データをもとにした複雑形状を有する鼻咽腔モデルにおいては、流体音響解析、構造解析間でのデータ通信にて、数値誤差が生じ、大きな変形を解析することが困難であった。放射基底関数法などの異なる手法によるデータ通信を適用し、この問題を解決していく計画である。また、実症例データをもとにした複雑形状を有する鼻咽腔モデルの流体音響解析を行なったところ、鼻咽腔閉鎖不全に起因する音圧周波数のシフトを確認することができた。この結果については、今後臨床データと詳細に比較して行くとともに、声道の形状が変形していく場合の音圧場の変化を定量的に評価していく予定である。

更なる流体音響構造連成解析モデルの改良は必要であるものの、鼻咽腔閉鎖不全症患者の構音障害を定量的に評価できる手法を確立することができた。

発表論文

- [1] Matsubara M, Hasegawa H, Yamamoto T, Nomura E., Fluid-Structure-Acoustic Coupling Analysis for Articulate Process, TSME, International Conference on Mechanical Engineering 2023, 820-825, 2023年12月.

口頭発表、受賞等

- [2] 山本高, 野村, 河野, 山本剛, 流路形状の変形が伴う場の流体構造音響連成解析に関する研究, 日本機械学会東海支部第72期総会, 2023年3月.

参考文献

- (1) Babai A, Irving M, Orofacial Clefts: Genetics of Cleft Lips and Palate, *Genes*, 14(8), 2023.
- (2) Aycat M, Catterson J E, Advances in Cleft Lip and Palate Surgery, *Medicine*, 59(11), 2023.
- (3) Cleland J, Lloyd S, Cambell L, et al., The impact of Real-time Articulatory Information on Phonetic Transcription: Ultrasound-Aided Transcription in Cleft Lip and Palate Speech, *Folia Phonitry Logop*, 72(2), 2020.
- (4) Wertzner F H, Francisco T D, Barrozo F T., Evidence for Speech Sound Disorder Assessment, <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.70036>, 2017.
- (5) Dhondt, G., *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Application*, John Wiley & Sons, 2004.
- (6) Weller H, Tabor G, Jassac H, Fureby C, A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, *Computers in Physics*, 12(6), 1998.
- (7) Nusser K, Becker S, Numerical Investigation of the Fluid-Structure-Acoustic Interaction on a Simplified Car Model, *Acta Acustica*, 5(22), 2021.
- (8) Schmalz J, Kowalczyk W, Implementation of Acoustic Analogies in OpenFOAM for Computation of Sound Fields, *Open J Acoustics*, 5, 2015.
- (9) Chourdakis G, Davis K, Rodenberg B, et al., preCICE v2: A Sustainable and User-Friendly Coupling Library, arXiv:2109.14470v, 2019.
- (10) Wang W, Wu X, Spitzer K, Three-dimensional DC anisotropic resistivity modeling using finite elements on unstructured grids, *Int J. Geophysical*,