

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12031

研究課題名(和文) 鼻腔・副鼻腔の音響的および構造的多様性とその音声学的寄与の探究

研究課題名(英文) Exploring the acoustic and structural diversity of the nasal and paranasal sinuses and their phonetic contribution

研究代表者

北村 達也 (Kitamura, Tatsuya)

甲南大学・知能情報学部・教授

研究者番号：60293594

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：鼻腔・副鼻腔の音響特性は音声の個人性(話者の特徴)に大きく貢献するが、これらの形態的、音響的なバリエーションについては理解が進んでいなかった。そこで、本研究では、「鼻腔・副鼻腔の音響的機能と声質の多様性を生み出すメカニズムはいかなるものか?」という問いに取り組んだ。COVID-19の感染拡大に伴い、健常者を対象にしたデータ収集ができなかったため、治療目的にて撮像した数名の患者のCTデータを対象にして、可能な範囲で研究を遂行した。その結果、時間領域差分法(FDTD法)に基づいて鼻腔・副鼻腔の数値音響解析法を確立し、鼻腔・副鼻腔の形状変化が音響的、聴覚的に及ぼす影響について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、音声の個人性(話者の特徴)に大きく寄与する鼻腔・副鼻腔の形態的・音響的バリエーションとその聴覚的な影響を調査した。治療目的にて採取された患者の3次元CTデータを用いて、鼻腔・副鼻腔の手術による変形が音声に及ぼす影響を計算する数値音響解析法を確立するなどの結果を得た。この成果は、今後、術前の3次元CTデータに対して仮想的な手術を施し、それが音声に及ぼす影響を高速に予測する技術へと発展させる。この技術が実現すれば、医師の手術計画立案を支援するとともに患者へのインフォームド・コンセントに活用する「音声アセスメント」が可能となり、患者の音声の個人性を維持する手術の実用化が期待できる。

研究成果の概要(英文)：The acoustic properties of the nasal cavity and paranasal sinuses contribute significantly to the individuality of speech (speaker characteristics), but the morphological and acoustic variations of these properties have not been well understood. The present study addressed the question, "What are the mechanisms underlying the acoustic functions of the nasal and paranasal sinuses and the diversity of voice quality?" Because of the spread of COVID-19 infection, it was not possible to collect data on healthy participants. We thus performed the study to the extent possible, using CT data from several patients who had been imaged for treatment purposes. As a result, we established a numerical acoustic simulation method of the nasal cavity and paranasal sinuses based on the Finite Difference Time Domain method (FDTD method), and clarified the acoustic and perceptual effects of the shape changes of the nasal and paranasal cavities.

研究分野：音声科学

キーワード：鼻腔 副鼻腔 音声 数値音響解析 音響シミュレーション FDTD法 時間領域差分法

1. 研究開始当初の背景

鼻腔・副鼻腔が音声一般に音響的な影響を及ぼすことは周知の事実であるにもかかわらず、音声学においてはこれらの部位は鼻音、鼻母音、鼻濁音の生成にのみ関与するとされてきた。これは、口や喉（主声道）が発話の中心であり、鼻腔・副鼻腔はその付属物である見なす考え方である。この単純化されたモデルは従来の音声学において一定の役割を果たしてきた。しかし、研究計画時においても、すでに声質におけるこれらの器官の寄与の大きさを裏付けるデータが得られていた。例えば、著者らが行った発声時の皮膚振動速度パターン計測により、従来は鼻腔・副鼻腔が関与しないとされてきた母音の発声時であっても鼻側面が振動することが示されており、鼻腔・副鼻腔の音響的貢献が示唆されていた。また、鼻孔から放射される音響成分は話者の特定に寄与する情報を多く含むことも明らかになっていた。このように、音声における鼻腔・副鼻腔の音響的影響は無視できるものではなく、この解剖学的構造および話者によるバリエーションの解明およびその音響的影響の調査が必要なことは明らかであった。

2. 研究の目的

本研究では、従来過小評価されてきた鼻腔・副鼻腔を音声生成にとって不可欠なものとして定義し直し、「鼻腔・副鼻腔の音響的機能と声質の多様性を生み出すメカニズムはいかなるものか?」という問いに取り組んだ。この問いに答えることができれば、音声学において鼻腔・副鼻腔に対する認識の変革を迫るものとなる。工学的には、鼻腔・副鼻腔の音響特性とその個人差が明らかになることによって、高い話者弁別能力をもち、経時変化の小さい音響特徴を開発することができる。また、声質の制御には鼻腔・副鼻腔が積極的に利用されているため、その音響特徴は合成音声の声質制御にも利用できる。加えて、医学分野における鼻咽腔閉鎖不全や口蓋裂の患者の音声の理解にも貢献する。

3. 研究の方法

本研究は、東京慈恵会医科大学の研究者の協力を得て、多数の健常者の CT データを収集し、鼻腔・副鼻腔の形状の分析や音響特性の調査を実施する予定であった。実際、予備実験により CT データ撮像の条件を確定する段階まで進んでいたが、その後、新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の感染拡大があり、研究期間終了時まで健常者を対象にしたデータ収集が一切できなくなった。そこで、治療目的にて撮像した数名の患者の CT データを対象にして、可能な範囲で研究を実施した。

3.1 鼻腔・副鼻腔の変形の影響に関する音響シミュレーション

第 1 に、CT データから鼻腔・副鼻腔形状を正確に抽出する手法を確立し、そのデータに基づいて時間領域差分法（Finite Difference Time Domain method, FDTD 法）にて音響シミュレーションを実施した。この手法は音の波動方程式を差分法により時間および空間を離散化し、音の伝搬を計算するものである。音響シミュレーションの音源としてガウシアンパルスを使用し、基本的に声門の直上に配置した。観測点は外鼻孔から 2 cm の位置である。

実験協力者には、研究の目的等を説明し同意書に署名を得た。CT 装置内にて実験協力者が仰臥位で鼻音 /m/ を発声中に撮像を行った。また、撮像に先立ち、仰臥位における /m/ の音声を外鼻孔から 2 cm の位置にて収録した。この方法は本研究内にて統一したプロトコルであり、東京慈恵会医科大学附属病院の倫理委員会の承認を得ている。

音響シミュレーションにおいては、(1) 手術前後の CT データから手術により鼻腔・副鼻腔形状の変化が音声（伝達関数）に及ぼす影響、(2) CT データに仮想的な「手術」を施した際の音響的影響を中心に調査した。これらは、コロナ禍の下で入手可能な数少ない CT データを最大限活用するために考案した方法論である。

3.2 実体模型の音響計測

声道の音響特性を求める方法には様々なものがあるが、その 1 つに、実際の声道形状を 3D プリンタや光造形などで実体化し、その口唇側から計測信号を入力することによってその音響特性を実測するというものがある。母音発話時に関してはこの手法により高精度に声道音響特性が得られることが知られている。しかし、この手法にて鼻腔・副鼻腔の音響特性を計測することは困難であった。これは、鼻孔の径が狭く、音響的インピーダンスが高いため、計測信号が実体模型内に入力されないこと、その対策として計測信号の音量を増加させると模型の壁が振動してしまうことが原因として考えられた。

そこで、壁厚を増加させた実体模型を製作するとともに、狭い鼻孔から計測信号を入力するためにエクスポネンシャルホーンを用いて計測を行った（図 1 参照）。

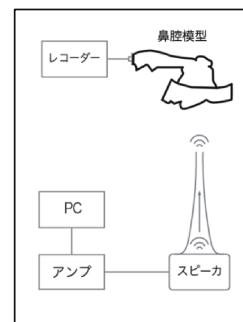


図 1: 実体模型の音響特性の計測法

3.3 鼻腔形状の変化に伴う音響的变化の知覚特性

耳鼻咽喉科の診察，検査，治療では，アドレナリン外用液を鼻腔に噴霧することによって，鼻腔内の血管収縮を生じさせるとともに粘膜を収縮させる手法が用いられる．この実験では，この手法によって一時的に鼻腔形状の変形を生じさせ，それによる音響的变化を調査するとともに，その音響的变化をヒトが聴覚的に検出できるのかを調査した．成人 52 名を実験参加者としてアドレナリン外用液の噴霧前後に音声を収録し，分析するとともに，聴取実験の刺激音を作成した．あわせて，acoustic rhinometry を用いて鼻腔の断面積を測定した．本実験は東京慈恵会医科大学にて実施された．

3.4 GPGPU による音響シミュレーションの高速化

本研究の成果を鼻腔・副鼻腔の手術に伴う音声への影響を術前に予測する技術に応用するため，音響シミュレーションの高速化を検討した．予備的な検討として MATLAB (Parallel Computing Toolbox), Julia, JuliaGPU 等の高水準な言語にて音響シミュレーションのプログラムを作成したが，その速度は不十分であった．また，C+OpenMP によるマルチスレッドプログラムも高速化の効果は小さかった．そこで，NVIDIA 社の CUDA を用いて FDTD 法のプログラムを開発し，種々の GPGPU 上で速度計測を実施した．

シミュレーションモデルは一様管であり，シミュレーション条件は以下の通りである．

- 条件 1: 空間離散幅 2.0 mm, 時間離散幅 3.0×10^{-5} s, 解析空間 $128 \times 128 \times 128$ ボクセル
 - 条件 2: 空間離散幅 1.0 mm, 時間離散幅 6.0×10^{-5} s, 解析空間 $256 \times 256 \times 256$ ボクセル
 - 条件 3: 空間離散幅 0.5 mm, 時間離散幅 12.0×10^{-5} s, 解析空間 $256 \times 256 \times 256$ ボクセル
- 計算機の条件は以下の通りである．
- 計算機 A: macOS Venture, Apple M1 CPU, 8 GB メモリ
 - 計算機 B: Windows 11, Intel i5-12400F CPU, 16 GB メモリ, NVIDIA GeForce RTX3050 8 GB GPU
 - 計算機 C: Ubuntu, AMD EPYC7742 CPU, 115 GB メモリ, NVIDIA A100 40 GB GPU
- 以上の条件で，20 ms 分の計算を実行し，速度を計測した．

4. 研究成果

4.1 鼻腔・副鼻腔の変形の影響に関する音響シミュレーション

FDTD 法の音響シミュレーションシステムを開発し，CT データから解析モデルを構築する方法を確定させた後，種々の音響シミュレーションを実施した．本稿ではその一部の成果を示す．

手術前後の CT データ (図 2a) に関する結果を示す．対象にした手術では，上顎洞自然口が解放され，篩骨洞と上顎洞が連結した上，全ての副鼻腔を開放し，単洞化された．音響シミュレーションの結果を図 2b に示す．副鼻腔は音響特性に「谷」を生じさせるが，手術による変形によってその周波数に変化が生じることが詳細に確認された．

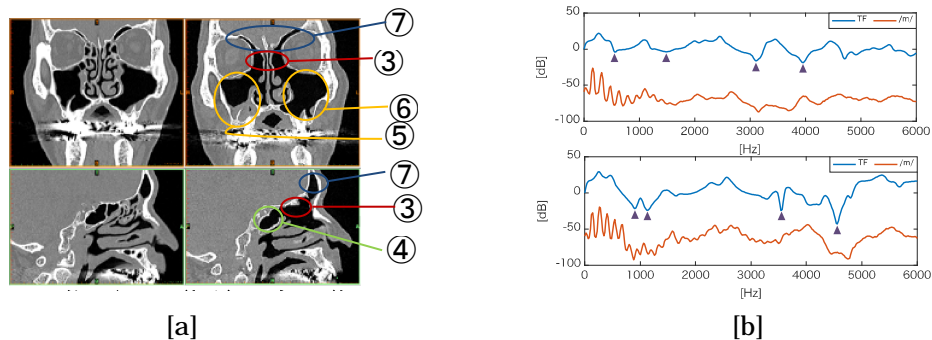


図 2: [a] (左) 手術前，手術後の CT 画像，[b] 音声スペクトル (青)，音響特性 (赤)，(上) 手術前，(下) 手術後．

次に，鼻腔・副鼻腔領域の仮想的な手術に伴う音響的变化について示す．医療用 CAD ソフトを使用し，実験協力者の手術後の CT データを参考にしながら，鼻腔と副鼻腔を接続する自然孔と篩骨洞，鼻中隔の形状を変化させた解析モデルを作成した．音響シミュレーションにより得られた音圧分布パターンを図 3 に示す．この図は，各周波数におけるそれぞれの空間の音圧を示しており，赤が最も音圧が高く，青が最も音圧が低いことを示している．この研究の結果，手術前のデータの副鼻腔と自然孔を開放する仮想的な手術によって，手術後の伝達関数の 1000 Hz 付近に生成される 2 つの大きなディップが生成メカニズムも含めて再現された．また，このディップは，主に上顎洞の自然孔の拡大と篩骨洞の開放によって生じることが明らかになった．

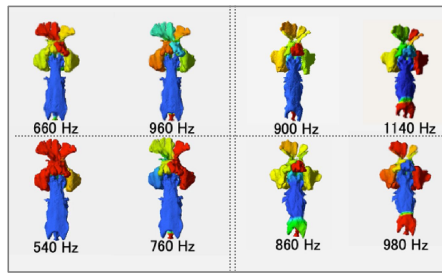


図 3 : (上) 手術前, (下) 手術後の鼻腔・副鼻腔内の音圧分布パターン

4.2 声道模型の音響計測

実体模型を対象にした音響計測および音響シミュレーション (FDTD 法) により求めた音響特性 (伝達関数) および当該の話者の /m/ のスペクトルを図 4 に示す。計測した音響特性には、鼻腔・副鼻腔による共鳴・反共鳴によると考えられるピークとディップ (谷) が観察される。音響計測と音響シミュレーションにより得られた音響特性の全周波数帯域に渡って、これらのピークとディップの周波数や振幅が対応している。また、音声スペクトルとも大まかに対応している。これらのことから、本研究の手法によって従来は正確に計測できなかった実体模型の音響特性が計測できたといえ、FDTD 法による音響シミュレーションの妥当性も確認された。

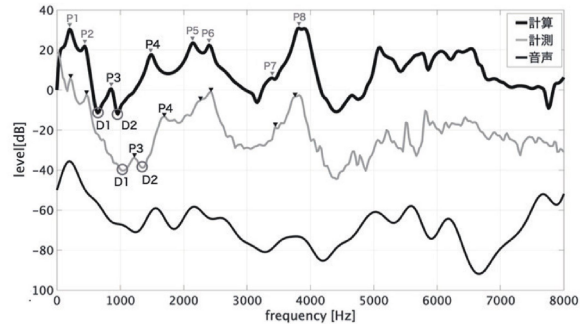


図 4 : 音響計測, 音響シミュレーションにより得られた音響特性および実音声のスペクトル

4.3 鼻腔形状の変化に伴う音響的变化の知覚特性

まず、アドレナリン外用液噴霧による鼻腔体積の変化を確認した。噴霧前と比較して、噴霧 10 分後に鼻腔体積の有意な増加を認めた。

音声スペクトル包絡を 500 Hz ごと 16 の周波数帯域に分割し、アドレナリン外用液噴霧前、噴霧 10 分後のデータを比較した。その結果、すべての周波数帯域にて優位な変動を確認し、特に、4.5 kHz から 6.0 kHz の高周波数帯域における変化が顕著であった。

アドレナリン外用液噴霧前、噴霧 10 分後の音声データから聴取実験用の刺激音を作成し、これらが同一か異なるかを実験参加者 31 名に判定させた。その結果、平均 96.3 % の高精度にて判定できることが明らかとなった。

この実験の結果は、アドレナリン外用液による比較的小さい鼻腔変形でも音響的には大きな影響があり、ヒトは聴覚的にその違いを聞き分けられることができることを示している。鼻腔・副鼻腔の手術では変形の程度ははるかに大きいため、音声への影響は極めて大きくなると推察される。

4.4 GPGPU による音響数値解析の高速化

速度計測実験の結果を表 1 に示す。計算機 A と B の結果を比較すると、計算量が多くなるほど GPGPU 利用の効果が大きいことがわかる。また、計算機 B と C の結果から、計算時間は GPGPU の性能にも大きく影響され、これらの間には 13 倍以上の計算時間短縮効果がある。計算機 A と C の差は歴然で、条件 3 では約 360 倍の高速化が実現されている。実際に鼻腔・副鼻腔の手術に伴う音声への影響をシミュレーションする場合、条件 2 が最も有力である。本研究にて開発したプログラムを計算機 C 上にて利用すれば、シミュレーションが 1 分未満で完了することを意味し、非常に実用性が高いといえる。

表 1 : FDTD シミュレーションに要した時間 (計算機 B では条件 3 の計算不可)

	計算機 A	計算機 B	計算機 C
条件 1	1 分 10 秒	33 秒	2 秒
条件 2	53 分 18 秒	8 分 48 秒	38 秒
条件 3	68 時間 18 分 32 秒	-	11 分 30 秒

5. まとめ

本研究では、新型コロナウイルス感染症の影響によって計画時に予定していたデータが得られない状況の中、東京慈恵会医科大学の協力により得られた少数のデータを可能な限り活用し、鼻腔・副鼻腔の形状およびその変形が音声に及ぼす影響を音響シミュレーション、音響計測などの手法により調査した。本研究の成果は、今後、手術による音声への影響を手術前に予測し、患者と医師の合意の上で手術が行われることを支援する技術（図 5）へと発展させる計画である。



図 5: 手術シミュレータに基づく手術後の音声の予測技術に関するイメージ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 北村達也	4. 巻 76
2. 論文標題 動画で見る音声生成系の観測手法	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本音響学会誌	6. 最初と最後の頁 700-705
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20697/jasj.76.12_700	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 藤本雅子, 北村達也	4. 巻 -
2. 論文標題 南琉球宮古島池間方言の鼻子音の調音	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 音声研究	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉浦唯, 竹本浩典, 北村達也, 内尾紀彦, 鴻信義
2. 発表標題 鼻副鼻腔の模擬手術が伝達関数に及ぼす影響
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伯田亜海, 加地優太, 竹本浩典
2. 発表標題 鼻周期や首の角度が鼻音の音響特性に与える影響
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伯田亜海, 杉浦唯, 竹本浩典, 北村達也, 内尾紀彦, 鴻信義
2. 発表標題 鼻音生成時における副鼻腔の連成振動の検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北村達也, 杉浦唯, 竹本浩典, 鴻信義
2. 発表標題 鼻腔・副鼻腔模型の造形精度の調査
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉浦唯, 竹本浩典, 北村達也, 鴻信義
2. 発表標題 鼻音生成時の伝達関数に生じる零点の生成要因の検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉浦唯, 竹本浩典, 北村達也, 鴻信義
2. 発表標題 内視鏡下鼻副鼻腔手術による術前・術後の形状と音響特性の変化の検討
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉浦唯, 竹本浩典, 北村達也, 内尾紀彦
2. 発表標題 鼻音生成時の声道形状の抽出と音響特性の解析
3. 学会等名 日本音響学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北村達也, 竹本浩典
2. 発表標題 音響計測とシミュレーションによる鼻腔・副鼻腔の音響解析
3. 学会等名 システム制御情報学会研究発表講演会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福島侑希, 田島基陽, 北村達也
2. 発表標題 鼻副鼻腔の音響特性の計算と計測による検証の試み
3. 学会等名 日本音響学会音声研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伯田亜海, 竹本浩典, 北村達也
2. 発表標題 鼻腔・副鼻腔の単純化した形状モデルの音響特性の検討
3. 学会等名 日本音響学会秋季研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

甲南大学知能情報学部 音声科学研究室
<https://www.konan-u.ac.jp/hp/kitlab/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	真栄城 哲也 (Maeshiro Tetsuya) (30361356)	筑波大学・図書館情報メディア系・教授 (12102)	
研究分担者	竹本 浩典 (Takemoto Hironori) (40374102)	千葉工業大学・先進工学部・教授 (32503)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------