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 Acoustic analysis of nasal and paranasal cavities by acoustic measurement and numerical simulation

甲南大学 〇北村達也, 千葉工業大学 竹本浩典 Tatsuya Kitamura¹ and Hironori Takemoto² ¹Konan University and ²Chiba Institute of Technology

Abstract The nasal and paranasal cavities have a complex shape and their acoustic properties affect lower frequencies of speech sounds. This paper gave an outline of authors' researches related to the resonance in the cavities. First, we showed facial surface vibration patterns during speaking and indicated that the sound resonated in the nasal cavity even when a speaker produced a non-nasal vowel. We then demonstrated the transfer functions of the nasal and paranasal cavities obtained by an acoustic measurement and acoustic simulation based on a finite-difference time-domain method as a type of finite difference methods.

1 はじめに

鼻腔の形状は左右非対称かつ複雑であり,個人間の差 異が大きい.鼻腔には上顎洞,前頭洞,蝶形骨洞,篩骨 洞という副鼻腔が接続されており(図1参照),鼻腔と 相互作用して複雑な音響特性を生み出す.鼻腔や副鼻腔 は,鼻音(鼻母音,鼻子音)の生成のみならず,音声の個 人性(話者の特徴)の生成にも寄与する.後者は,鼻腔 や副鼻腔は個人差が大きい上に発話中に変形しないとい う特徴に由来している.実際,Amino & Arai [2] は,音 声に鼻音が含まれると話者識別の精度が向上することを 聴取実験により示している.

このように,鼻腔や副鼻腔は音声生成にとって極めて 重要な器官であるため,その構造や音響特性については 古くから関心が持たれてきた.例えば,小山[3]は,1960 年代にヒトの遺体から鼻腔,副鼻腔を含む声道模型を製 作し,その音響特性を調査している.1990年代になって 音声の研究に MRI (magnetic resonance imaging) が導 入されると,Dangら [4]は鼻腔・副鼻腔の形状やその個 人差を測定し,等価回路モデルにより求めたそれらの音 響特性を報告した.しかし,MRI では副鼻腔の薄い壁 を把握することが困難であることなどが影響し,Dang らの一連の研究以降は鼻腔・副鼻腔の音響特性に関する 研究は少なくなった.

しかし,近年,3D プリンタの進歩と普及および計算 機パワーの増大などを背景に,精巧な声道模型や音響シ ミュレーションなどを用いて再びこの問題にアプローチ する研究が行われるようになってきた [5][6].以下では, 鼻腔・副鼻腔の音響特性に関する我々の2つの取り組み を紹介する.1つ目は,レーザドップラ振動計を用いた 発話中の顔面皮膚振動を計測した研究 [7] で,鼻音以外



図 1: 頭蓋骨と鼻腔・副鼻腔の位置 ([1] を改変)

の発話時にも鼻腔で共鳴が生じていることを示すもので ある.2つ目は、声道模型の音響計測と時間領域差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 法によるシミュ レーションにより鼻腔・副鼻腔の伝達特性を調査した研 究 [8] である.

2 発話時の顔面皮膚振動の計測

2.1 方法

スキャニング型レーザドップラ振動計 (Polytec 社 PSV-400-M4) を用いて発話時の皮膚振動を計測した.レーザ ドップラ振動計は,レーザ光を計測対象に照射し,反射 光の周波数シフト (ドップラ効果) を用いて振動を計測 する装置である.レーザ光を使用するため,計測対象の 振動に影響を及ぼさないという利点がある.そして,ス キャニング型の振動計では,あらかじめ登録した複数の 点を自動的にスキャンし,対象となる面の振動パターン を計測することができる.



図 2: 母音/a/ (左) および鼻音/N/ (右) 発話時の顔面の 振動速度パターン.振動速度の単位は m/s [dB] で 0 dB は 1 m/s に相当する [7].

この研究では、日本語を母語とする成人男性1名を対 象にして、母音/a/と鼻音/N/を発話したときの顔面の 皮膚振動速度を計測した.実験参加者にはレーザー光か ら目を保護するためのゴーグルを装着させ、仰臥位に寝 せた状態で計測を行った.顔の正面方向(計測点:75点) と斜め左方向(計測点:49点)の5kHzまでの振動を計 測した.この実験の手続きに関しては甲南大学の倫理委 員会の承認を受けている.

2.2 結果

斜め左方向から計測した顔面の振動速度パターンを図 2 に示す. 図中の格子点が計測点で,それ以外の色の付 いた部分は補間により求められている. 鼻音/N/発話時 には,予想通り,鼻の側面 (鼻壁) にて振動速度が大き くなることが示された. その一方で,母音/a/発話時に も鼻壁が振動することが明らかになった. 音声発話時の 口腔と鼻腔からの出力を分離して収録した研究でも,鼻 音を含まない文を読み上げた際であっても鼻腔から音が 出力されることが確認されている [9].

この原因として2つの可能性が考えられる.1つは, この実験参加者の鼻咽腔閉鎖が不十分で(軟口蓋が十分 に挙上せず),鼻腔と咽頭腔が連結していた可能性であ り,もう1つは,口腔や咽頭腔の音が軟口蓋を通して伝 搬した[10]可能性である.いずれにせよ,鼻腔の音響的 影響は鼻音に限らず音声中に常に現れることを示唆して いる.これは既存の音声学ではほとんど考慮されてこな かったことである.



図 3: 女性の鼻腔・副鼻腔 CAD モデル

3 鼻腔・副鼻腔の音響解析

3.1 データ

本研究では昭和大学歯科病院にて診療を目的として計 測された3次元X線CTデータを利用した.対象とし たデータは,鼻腔・副鼻腔領域に異常がない患者が鼻呼 吸をしている時のものであり,歯顎顔面用コーンビーム X線CT装置(日立メディコ社 CB MercuRay)を用い て撮像された.ボクセルのサイズは0.377mm×0.377 mm×0.377mmであり,画像のサイズは512×512× 512である.このデータの利用に関しては昭和大学の倫 理委員会の承認を受けている.

3.2 鼻腔・副鼻腔模型の伝達特性の計測

上記のデータのうち女性1名のデータを対象にして, 声道 (声門より上の部分で,喉頭腔,咽頭腔,口腔,鼻 腔,副鼻腔などを含む)の実体模型を製作した.この データから声道および顔面を抽出し,CADソフトウェ ア (Materialise 社 Mimics および 3-matic)にて2 mm の壁を付けた.そして,全体を6個のパーツに分割して STLファイル形式にて保存し,3Dプリンタ(Stratasys 社 uPrint SE)にて造形した後,それらを接着剤で接合 した.CADモデルを図3に示す.

この模型の伝達特性を計測した. 模型の声門部をホー ンドライバーユニット (ユニペックス社 P-300)の出力 部に固定し,そのホーンドライバーユニットからホワイ トノイズを出力した.そして,鼻孔から 20 mm の位置 での出力を計測した. 模型とホーンドライバーユニット をできる限り音響的に切り離すため,これらの間は直径 1.2 mm,長さ 10 mm の細管で接続した.



図 4: 模型の音響計測により得られた伝達特性 (青), FDTD シミュレーションにより得られた伝達特性(赤)[8]

FDTD 法による鼻腔・副鼻腔の伝達特性のシミュ レーション

FDTD 法は有限差分法の一種で,たがい違いの格子 上に離散的に定義された物理量を時間ステップの進行 に沿って交互に計算する leap-frog アルゴリズムである [11][12]. この手法を音響解析に適用する場合には,音の 波動方程式を時間的,空間的に離散化し,格子点上の音 圧と体積速度を交互に計算することになる. Takemoto ら [13] は,この手法を母音発話時の声道内の音響解析 に初めて適用し,別途計測した声道模型の伝達特性とよ く一致することを示した.

この研究でも同様の手法を用いて、上述の鼻腔・副鼻 腔模型の STL ファイルを対象にして伝達特性をシミュ レートした.その際、空気の密度 $\rho = 1.17 \text{ kg/m}^3$,音 速 c = 346.7 m/s,時間ステップ $\Delta t = 5.0 \times 10^{-7}$,格 子の間隔 1 mm,壁の吸収係数 0.008 と設定し、音源と して以下の式で表されるガウシアン・パルスを声門部か ら入力した.

$$g(t) = e^{-\left\{\frac{\Delta t n - T}{0.29T}\right\}^2} \quad (m^3/s) \tag{1}$$

ここで, $T = 0.646/f_0$, $f_0=10$ kHz であり,n は時間の インデックスである [13][8]. そして, 20 ms 間の音響伝 搬のシミュレーションを行い,鼻孔から 20 mm の点の 物理量から伝達特性を計算した.

このシミュレーションの詳細については,文献 [13] や FDTD に関する教科書 [12] を参照されたい.



図 5: 鼻腔・副鼻腔の伝達特性における個々の副鼻腔の影響.(a) オリジナル (TF_{org}) と LMS を除去した結果 (TF_{lms}), (b) TF_{lms} と RMS を除去した結果 (TF_{lms-rms}), (c) TF_{lms-rms} と SS を除去した結果 (TF_{lms-rms-ss}), (d) TF_{lms-rms-ss} と FS を除去した結果 果 (TF_{lms-rms-ss}), [8].

3.4 音響計測およびシミュレーションの結果

鼻腔・副鼻腔模型の音響計測とシミュレーションにより 得られた伝達特性を図4に示す.2つの伝達特性のピー クやディップ(谷)の位置や形状はおおまかに一致してお り、これらの手法が妥当であることを示している.

また,個々の副鼻腔の音響的影響を調査した結果を図 5 に示す.図 5(a) は左の上顎洞 (left maxillary sinus, LMS) を取り除いた結果,図 5(b) はさらに右の上顎洞 (right maxillary sinus, RMS) を取り除いた結果,図 5(c) はさらに蝶形骨洞 (sphenoidal sinus, SS) を取り除いた 結果,図 5(d) は前頭洞 (frontal sinus, FS) を取り除い た結果である.また,図中の白抜きと黒塗りの三角形 はそれぞれ副鼻腔除去後に出現/消失したディップを示 している.シミュレーションを用いることによって,模型実験では難しい個々の副鼻腔の影響を調べることがで きることがわかる.

4 おわりに

本稿では、鼻腔・副鼻腔の音響特性に関する著者らの 取り組みについて紹介した.3節にて紹介した FDTD 法 によるシミュレーションは話者が女性1名のみであった が、その後、複数の男性、女性話者を対象とした研究に 発展し [14]、性差や個人差が検討されている.また、今 後、多数の話者を対象にして X 線 CT データと音声の データベースを構築する計画があり、これが実現すれば 鼻腔・副鼻腔の構造における個人差やそれが音声の個人 性に及ぼす影響などについて詳細に分析できると期待し ている.

本稿が鼻腔・副鼻腔の音響特性に興味を持つ様々な領 域の研究者たちの協力や情報交換の一助となれば望外の 喜びである.

謝辞

本研究の一部は科研費 (Nos. 24650088, 25280066, 17H02339) および 2011 年度兵庫県科学技術振興助成金 の支援を受けた.また,3節にて紹介した内容は,昭和 大学 槇宏太郎先生,山口徹太郎先生,科学警察研究所 蒔苗久則氏との共同研究の成果である.

参考文献

- [1] 切替一郎; 新耳鼻咽喉科学 第6版; 南山堂 (1974)
- [2] K. Amino and T. Arai; Effects of linguistic contents on perceptual speaker identification: Comparison of familiar and unknown speaker identifications; Acoust. Sci. & Tech., Vol. 30, No. 2, pp. 89–99 (2009)
- [3] 小山 高司; 副鼻腔共鳴に関する実験的研究; 日本耳 鼻咽喉科学会会報, Vol. 69, No. 6, pp. 1177–1191 (1966)
- [4] J. Dang, K. Honda, and H. Suzuki; Morphological and acoustical analysis of the nasal and the paranasal cavities; J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96, No. 4, pp. 2088–2100 (1994)
- [5] H. Matsuzaki and K. Motoki; Study of acoustic characteristics of vocal tract with nasal cavity

during phonation of Japanese /a/; Acoust. Sci. & Tech., Vol. 28, No. 2, pp. 124–127 (2007)

- [6] M. Havel, S. Becker, M. Schuster, T. Johnson, A. Maier, and J. Sundberg; Effects of functional endoscopic sinus surgery on the acoustic of the sinonasal tract; Rhinology, Vol. 55, No. 1, pp. 81– 89 (2017)
- T. Kitamura; Measurement of vibration velocity pattern of facial surface during phonation using scanning vibrometer; Acoust. Sci. & Tech., Vol. 33, No. 2, pp. 126–128 (2012)
- [8] T. Kitamura, H. Takemoto, H. Makinae, T. Yamaguchi, and K. Maki; Acoustic analysis of detailed three-dimensional shape of the human nasal cavity and paranasal sinuses; Proc. Interspeech 2017, pp. 3472–3476 (2017)
- K. Amino, H. Makinae, and T. Kitamura; Nasality in speech and its contribution to speaker individuality; Proc. Interspeech 2014, pp. 1688–1692 (2014)
- [10] J. Dnag, W. Jianguo, K. Honda, and T. Nakai; A study on transvelar coupling for non-nasalized sounds; J. Acoust. Soc. Am., Vol. 139, No. 1, pp. 441–454 (2016)
- K. S. Yee; Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media; IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 14, No. 3, pp. 302–307 (1966)
- [12] 豊田政弘編; FDTD 法で視る音の世界; コロナ社 (2015)
- [13] H. Takemoto, P. Mokhtari, and T. Kitamura; Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method; J. Acoust. Soc. Am., Vol. 128, No. 6, pp. 3724–3738 (2010)
- [14] 竹本浩典,北村達也,山口徹太郎,槇宏太郎;鼻腔・ 副鼻腔の音響解析の解析;日本音響学会春季研究発 表会講演論文集, pp. 781-782 (2019)