

鼻腔・副鼻腔の単純化した形状モデルの音響特性の検討*

☆伯田亜海, 竹本浩典 (千葉工大), 北村達也 (甲南大)

1 はじめに

鼻腔・副鼻腔は複雑な形状をしており、音声の個人性の生成要因の一つである[1]。われわれは、鼻副鼻腔手術による術後の音声を予測するための研究を行ってきた[2]。その過程で、副鼻腔間には複雑な相互作用があることが明らかになった[3]。そこで、相互作用を検討するに先立ち、そのベースとなる全ての副鼻腔を除去して単純化した声道形状を作成し、その音響特性を検討する。そして、その形状に基づいて幾何学的なモデルを作成し、単純化した声道内で生起する音響現象を再現できるか検討する。

2 材料・方法

2.1 単純化した声道形状

両側 ESS III 型鼻中隔湾曲矯正術（前頭洞・前篩骨洞・上顎洞の開放，病的粘膜の処置，鼻中隔湾曲の矯正）を受けた成人男性1名の声道形状を CT で撮像し，単純化した。まず，後篩骨洞（篩骨蜂巢）を単洞化した。次に，前頭洞，上顎洞，蝶形骨洞を鼻腔との接合部で切り離した。その形状を Fig. 1 左に示す。なお，CT 撮像に当たっては東京慈恵会医科大学附属病院の倫理委員会の承認を受けた（受付番号：30-471（9492））。

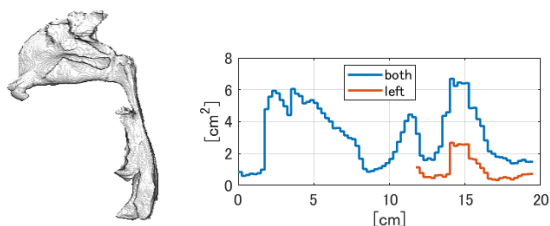


Fig. 1 左：単純化した声道 右：断面積関数

2.2 音響特性の解析

単純化した声道から断面積関数を抽出し（Fig. 1 右），1次元の縦続音響管モデルを用いて伝達関数を計算した[4]。また，単純化した声道やそのモデルの声門直上に置いた音源点から，外鼻孔から約 2 cm の位置に置いた観測点までの伝達関数を 3次元の FDTD 法[5]で

計算した。さらに，伝達関数のピークやディップで生起する音響現象を検討するため，その周波数を持つ正弦波で励振して瞬時音圧分布を可視化した。なお，シミュレーション周波数は 2 MHz とした。

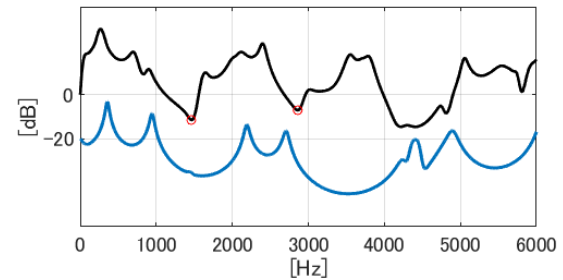


Fig 2 単純化した声道の伝達関数. 黒：3次元 FDTD 法，青：1次元の縦続音響管モデル

3 結果・考察

Fig. 2 は単純化した声道形状の伝達関数である。3次元の FDTD 法と 1次元の縦続音響管モデルで計算した伝達関数はほとんど一致せず，前者では 1460 Hz，2860 Hz に大きなディップがみられた（○）。なお，両者の伝達関数の 4 kHz 付近のディップは，いずれも梨状窩に由来する。

Fig. 3 はこの 2つのディップ周波数で励振した声道内の瞬時音圧分布で，赤と青が音圧の腹である。1460 Hz，2860 Hz はそれぞれ鼻腔上部や後篩骨蜂巢が分岐管となる 2次と 4次のモードである。なぜ 1次と 3次のモードが生起しないのか不明であった。

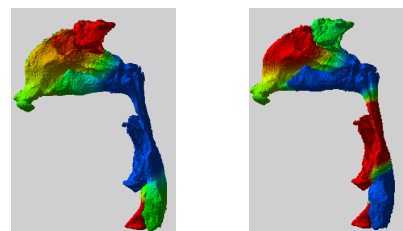


Fig. 3 単純化した声道のディップにおける瞬時音圧分布. 左：1460 Hz，右：2860 Hz

これらのディップは，声門から鼻孔に向かう系では，声門から口唇に向かう系（母音な

* Examination of acoustic characteristics of a simplified model of the nasal cavity and sinuses, by HAKUTA, Ami, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), KITAMURA, Tatsuya (Konan Univ.)

ど)よりも低い周波数で長軸に対して横方向の共鳴(横モード)が発生することを示している。つまり、声門から鼻孔に向かう系は、低い周波数であっても平面波しか伝搬しない縦続音響管では近似できず、横方向の共鳴を考慮したモデルを考案する必要がある。

Fig. 4 は横方向の共鳴を考慮したモデルの模式図である。咽頭下部に喉頭と梨状窩があり、鼻腔から鼻孔までは左右2つに分岐する。各セクションのサイズは、単純化した声道形状の対応する各部の概形に基づいて決定した。その形状は円筒形ではなく直方体である。咽頭では前後に薄く、鼻腔では左右に薄い。そのため、声門から鼻孔に向かう長軸方向に対して直交する方向に横モードが立ちやすくなると考えられる。

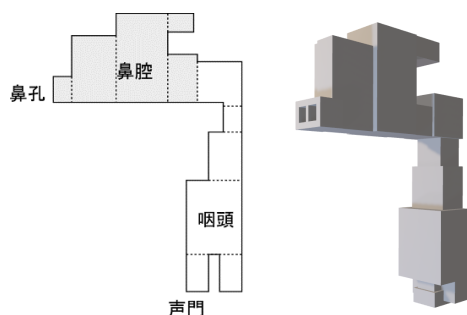


Fig. 4 横方向の共鳴を考慮したモデル
左：構成図，右：外観

Fig. 5 は単純化した声道とモデルの伝達関数である。第1, 第2ピークの周波数はほぼ一致したが、第3ピークはモデルで低く、2000~3000 Hzのピークの概形は一致しなかった。しかし、第1, 第2ディップの周波数はモデルでそれぞれ400 Hz, 460 Hzほど高かったが、ほぼ対応するといえる。

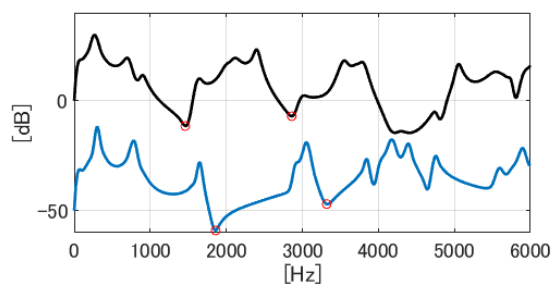


Fig. 5 伝達関数. 黒：単純化した声道，
青：モデル

Fig. 6 はモデルの1860 Hzと3320 Hzにおけるディップ周波数で励振した声道内の瞬時

音圧分布である。単純化した声道の1460 Hz, 2860 Hzのディップは、それぞれ鼻腔上部や後篩骨蜂巣が分岐管となる2次と4次のモードであったが、モデルの1860 Hzと3320 Hzのディップはそれぞれ3次と4次のモードであった。つまり、単純化した声道と同様に低い周波数に2つの横モードが表れたが、そのモードは異なっていた。

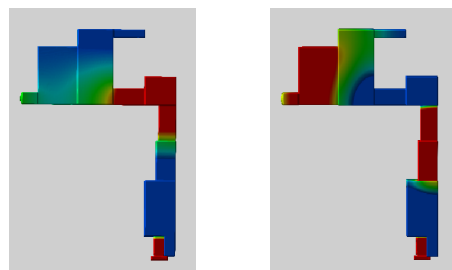


Fig. 6 モデル化した声道のディップにおける瞬時音圧分布. 左：1860 Hz, 右：3320 Hz

4 まとめ

本研究では、まず、全ての副鼻腔を単洞化するか除去して単純化した声道の音響特性を検討した。その結果、低い周波数帯域であっても横モードが生じたことから、声道は縦続音響管では近似できないことが明らかになった。そこで、声道を直方体のセクションでモデル化して音響特性を検討した。すると、第1, 第2ピークと低い周波数帯域に現れる2つの横モードによる大きなディップは再現できた。しかし、第3以上のピークが一致しないこと、低い方のディップでは腹と節の数が一致しないことなどの問題が残った。

本研究では、モデルの各セクションのサイズを単純化した声道形状の対応する各部の概形に基づいて決定したが、その過程などを見直すことで改善できる可能性がある。モデル化した声道を用いれば、副鼻腔と声道、副鼻腔間の相互作用をより詳細に検討できると思われる。

謝辞

本研究では、JSPS 科研費 19K12048, 19K12031 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Dang *et al.*, JASA, 2088-2100, 1994.
- [2] 杉浦ら, 音講論(秋), 799-800, 2021.
- [3] 伯田ら, 音講論(春), 797-798, 2022.
- [4] Takemoto *et al.*, JASA, 1037-1049, 2006.
- [5] Takemoto *et al.*, JASA, 3724-3738, 2010.