

非可聴つぶやき声発声時の声門流の数値シミュレーション*

大谷 真, 平原 達也 (富山県立大学・工学部)

1 はじめに

声帯振動を伴わない微弱な声道共鳴音である非可聴つぶやき声 (NAM: Non-Audible Murmur) を利用した新たな音声コミュニケーション手段の研究開発が行われている。NAM は、生体軟組織に近い音響インピーダンスを持つソフトシリコン等の物質に包埋したコンデンサマイクロホン (NAM マイクロホン) を話者の耳介後下部に接着して使用する事で肉導音として検出する事が可能である [1]。しかし、このようにして検出された NAM は、通常音声の気導音と比較して S/N がかなり低く、また高周波成分が抑圧されており明瞭度が十分でない [2]。この原因を明らかにするために、我々は NAM の伝搬メカニズムの数値シミュレーションを行ってきた [3]。

一方、NAM の生成メカニズムに関しては、ささやき声と同様に声門での乱流雑音源が音源となっていると予想されるものの、その詳細は明らかではない。これまでに声門における乱流の発生に関する数値解析が 2 次元 (例えば [5, 6])、あるいは 3 次元 [7] でも行われているが、ささやき声よりも微弱な NAM 発声を対象にしたものはない。そこで、本稿では、NAM の生成メカニズムを明らかにする事を目的として、磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) よって得た NAM 発声時及びささやき声発声時の 3 次元声道形状 [4] に対する声門流を数値解析した結果について報告する。

2 声道形状モデル

被験者は 3 名とし、口唇及び口腔形状を一定にし易い母音/i/を発声させた。強いささやき声 (Strong Whisper: SW)、弱いささやき声 (Weak Whisper: WW)、NAM の順に発声させ、発声中の声道形状を MRI 装置及び発声同期撮像法 [8] を用いて撮像した。撮像には ATR 脳活動イメージングセンタの MRI 装置 (島津 Marconi MAGNEX ECLIPS 1.5T) を用いた。被験者 3 名のうち、喉頭位置及び声門の開放の程度の違いが顕著であった被験者 1 名の MR 画像から 3 次元声道形状モデル (STL) を作成した。声道形状

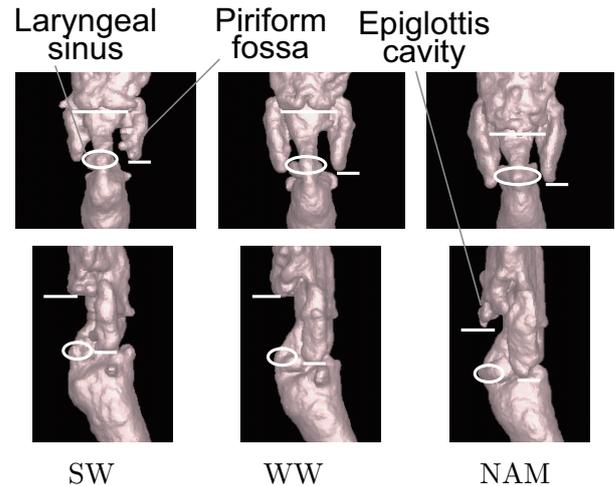


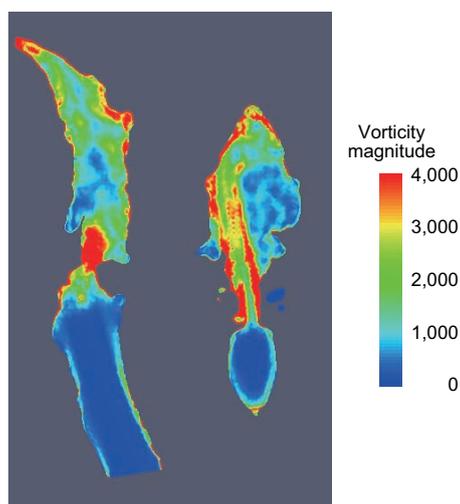
Fig. 1 3D vocal tract shape models for strong and weak whispering, and NAM (upper: coronal view, lower: sagittal view)

モデルは、MR 画像の輪郭抽出、二値化、ボリュームデータからの補間により得た。Fig. 1 に各発声様式での三次元声道形状モデルを示す。SW→WW→NAM の順に、喉頭室近傍の下降・開放、梨状窩の伸張、そして、喉頭蓋の開放による空洞の伸張、が確認できる [4]。

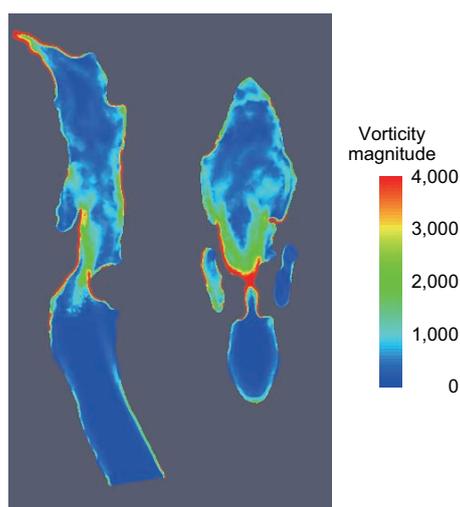
3 解析方法

有限体積法による汎用 3 次元流体解析コード FLUENT (ANSYS, Inc.) [9] を用いて、3 次元非圧縮性解析を行った。乱流モデルとして LES (Large-Eddy Simulation, Smargorinski-Lilly, $C_s = 0.1$) を用い、時間差分は 2 次陰解法 (時間ステップ: $50 [\mu s]$) を用いた。前節で得られた声道形状モデルから ICEM-CFD (ANSYS, Inc.) を用いて 4 面体セルを自動生成した。一辺の長さは $1.0\text{--}1.5 \text{ mm}$ に指定した。声道入口の境界条件として流速ベクトルを設定し、入口流の変動成分はゼロとした。声道出口は圧力指定境界条件 (圧力ゼロ) を設定した。空気の密度を $1.225 [\text{kg}/\text{m}^3]$ 、粘度を $1.79 \times 10^{-5} [\text{Pa}\cdot\text{s}]$ とした。ささやき声発声時の体積流量は文献 [10, 11] を参考に決定した (SW: $500 [\text{ml}/\text{s}]$, WW: $333 [\text{ml}/\text{s}]$)。NAM 発声時の体積流量はそれらより小さい値を設定した (NAM: $100 [\text{ml}/\text{s}]$)。

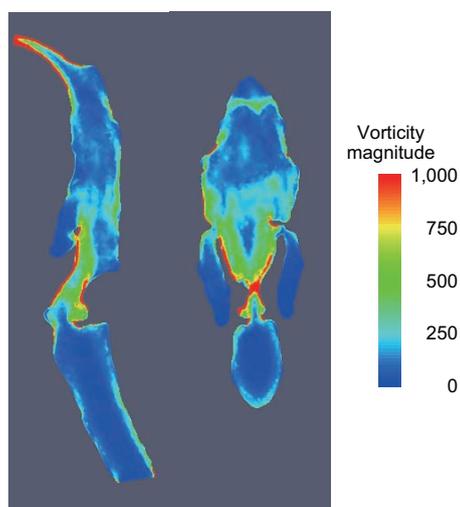
* Numerical simulation of non-audible murmur glottal flow, by OTANI, Makoto, and HIRAHARA, Tatsuya (Toyama Prefectural University)



SW (Strong Whisper)



WW (Weak Whisper)



NAM

Fig. 2 Instantaneous vorticity magnitude distributions on sagittal and coronal sections for strong and weak whispering, and NAM. Note that color bars for SW and WW range from 0 to 4000, whereas that for NAM ranges from 0 to 1000.

4 結果

Powellにより渦度 $\omega (= \text{rot}(\mathbf{u}))$, \mathbf{u} : 流速ベクトル) と音源の関連が示されている [12]。Fig. 2は、解析開始時から 25 ms 経過後の各発声様式に対する矢状面及び冠状面における渦度の絶対値 $|\omega|$ の分布を示したものである。なお、NAMの結果では同じ色が示す $|\omega|$ の値を SW 及び WW の場合の 1/4 として表示している。強いささやき声 (SW) では、声門上部の声道内部及び声道壁近傍で $|\omega|$ の値が大きく、これらの強い渦流れが乱流雑音源となっている。弱いささやき声 (WW) では SW よりも小さいものの、同じく声門上部の声道内部及び声道壁近傍において $|\omega|$ の値が大きい。NAM においても同じく声門上部において $|\omega|$ の値が大きくなっており、ささやき声と同様にこれらの渦が音源となっていると考えられる。しかし、弱いささやき声と比較しても NAM の $|\omega|$ の大きさは約 1/4 であり、渦流れ及び NAM 発声時の乱流雑音源の強さは非常に小さい。

5 まとめ

MRIを用いて得られた NAM および弱い/強いささやき声発声時の 3 次元声道形状モデルに対して、声門流の数値流体解析を行った。その結果、NAM 発声時にも声門上部において微弱な渦流れが発生しており、NAM の音源が通常のささやき声と同様に声門上部での渦流れによる乱流雑音源である事が示唆された。

本研究は総務省 SCOPE-S 『発声障害者の音声コミュニケーション手段の研究開発』により実施した。

参考文献

- [1] 中島 他, 信学論 D, J89-D(8), 1802-1810 (2006).
- [2] Hirahara *et al.*, *Proc. of the JCA 2007*, P-2-30, Sendai (2007.6).
- [3] Otani *et al.*, *Proc. of 19th ICA*, CAS-04-006, Madrid (2007.9).
- [4] 大谷 他, 音講論集, 345-346 (2007.9)
- [5] Nomura *et al.*, **27**(3), *Acoust. Sci. & Tech.*, 154-162 (2006).
- [6] Suh *et al.*, **121**(6), *J. Acoust. Soc. Am.*, 3728-3739 (2007).
- [7] 市川 他, 第 17 回 CFD シンポジウム, F1-3 (2003).
- [8] 高野 他, 音声言語医学, **46**(3), 174-178 (2005).
- [9] <http://www.fluent.com/software/fluent/>
- [10] Holmberg *et al.*, *J. Acoust. Soc. Am.*, **84**(2), 511-529 (1988).
- [11] Rubin *et al.*, *J. Voice*, **20**(1), 121-127 (2006).
- [12] Powell, *J. Acoust. Soc. Am.*, **36**(1), 177-195 (1964).