The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	歯茎摩擦音/s/の空力音響シミュレーションと実験による検証
Author(s)	吉永, 司; 野崎, 一徳; 和田, 成生
Citation	サイバーメディアHPCジャーナル. 2016, 6, p. 33-36
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/70510
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

歯茎摩擦音/s/の空力音響シミュレーションと実験による検証

吉永 司[(1)]　野崎 一徳[(2)]　和田 成生[(1)]
(1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 機能創成専攻
(2) 大阪大学 歯学部附属病院 医療情報室

1. はじめに

歯茎摩擦音/s/とは、日本語のシを除くサ行を発音する際に発生する子音であり、口腔内の空気のジェット流により発生する空力音である。このジェット流は、舌と歯茎の間に形成された狭窄流路から発生し、前歯および唇に当たることにより音になると言われている[1]。この時、発生する音は 4 kHz 以上の高周波数帯のブロードバンドノイズとなる。歯茎摩擦音/s/の発音メカニズムについて、口腔内の空気の流れをモデリングすることにより調べられてきた[2-4]。

また、乱流の数値計算手法の一つであるラージエディーシミュレーション(LES)を用いて、口腔内に発生する流れと音源の関係性について調べられてきた[5-7]。中でも、Nozaki ら[6]は、前歯に衝突した流れの乱れの増加が音源の強度を増幅することを示している。しかし、これらの研究では音源の強度及び分布のみを示しており、その音源からどのような音が発生するのかということは示していない。空力音の数値計算による予測は、低マッハ数の単純な流れであっても格子解像度に大きく影響を受けるため、難しいことが知られている[8]。つまり、空力音の数値計算において、予測した流れ及び音を実験により検証することが必要である。

そこで本研究では、歯茎摩擦音/s/の口腔単純形状モデルにおいて発生する流れ及び音を数値計算により予測し、その結果を実験により検証した。この時、数値計算には 3 種類の格子解像度を持つ計算格子を用い、計算精度に対する格子数及び格子解像度の影響を調べた。この検証により、子音の発音シミュレーションにおいて必要となる格子数及び格子解像度を見積もることができる。

2. 方法

2.1 口腔単純形状モデル

口腔単純形状モデルは咽頭、狭窄流路、上下前歯、口唇を摸擬した矩形流路により構成されている。図１に単純形状モデルの形状を示す。断面積と鉛直方向の長さは歯科用コーンビーム CT により計測した歯茎摩擦音/s/発音時の口腔形状[9]を参考に決定した。

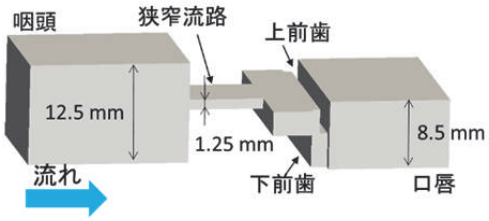

図１：歯茎摩擦音/s/発音時の口腔単純形状モデル

2.2 数値計算手法

予備計算において、呼気流量 400 cm^3/s を上記のモデルに流入すると、最大平均流速は狭窄流路の中央において約 50 m/s となった。この時、流れ場のレイノルズ数($Re = Ud/\nu$)及びマッハ数($M = U/c$)は、狭窄流路の高さ d = 1.25 mm、動粘性係数 ν = 1.5x10^{-5} m^2/s、音速 c = 344 m/s より 4167 及び 0.145 と見積もられた。モデル内の流れのマッハ数は十分低いため($M^2 \ll 1$)、発生する音は流れに影響を与えないと仮定し、本研究では非圧縮流体を仮定した流れ場の計算と音響計算を別々に行った。まず、モデル内の流れ場を LES により計算し、その流れ場の流速変動からライトヒルの音響アナロジーにより音場を周波数領域で計算した[10]。この時、流速変動値は各格子点において離散フーリエ変換により周波数領域に変換した。これらの計算は有限要素法を用いたソフトウェア FrontFlow/blue ver. 8.1[11]により行った。このソフトウェアではベクトル計算機向けの最適化オ

表1:計算条件

全格子数	最小格子幅 (mm)	時間刻み幅(s)	シミュレーション時間 (s)
1千万	2.9×10^{-2}	5×10^{-7}	0.005 - 0.018
3千万	4.9×10^{-2}	5×10^{-7}	0.028 - 0.045
4.5千万	1.7×10^{-2}	1×10^{-7}	0.016 - 0.020

プションがあり、大阪大学サイバーメディアセンターの SX-ACE においてベクトル化率 99.5%で非常に高速に計算を行うことができる。

本研究では全格子数が 1 千万、3 千万、4.5 千万となる 3 つの計算条件を設定した。格子はすべて六面体一次要素である。表 1 に 3 つの格子における計算条件を示す。1 千万格子では隣接する格子幅の変化率が大きく、壁面付近の最小格子幅は 3 千万格子の最小格子幅に比べて小さくなっている。また、3 千万及び 4.5 千万格子では実験でのモデル形状をできるだけ再現するため、狭窄流路入口の角を半径 0.1 mm 丸めた。4.5 千万格子では最小格子幅が他の条件と比べて小さいため、時間刻み幅も小さくなっている。すべての計算において、呼気流量 400 cm^3/s となるように一定流速を入口に与え、壁面はすべりなし境界、出口は圧力一定とした。また、音響計算においては壁面を剛壁、入口出口を Non-reflection 境界条件と設定した。

2.3 実験方法

単純形状モデルは 3D プリンタ(Z printer, 3D systems)により作製し、コンプレッサ(YC-4RS, 山崎)から流量 400 cm^3/s を流入して音を発生させた。この時、上前歯から鉛直下向きに 1.5 mm の位置において水平方向の流速分布を計測した。また、モデルから発生する音をモデル出口から 20 mm の位置において計測した。この時、流速と音はサンプリング周波数 100 kHz と 44.1 kHz で 1 秒間記録した。流速に関しては、平均値と変動値の二乗平均平方根(RMS)を計算し、音は高速フーリエ変換(FFT)によりスペクトルを計算し、シミュレーション結果と比較した。

3. 結果と考察

モデルの狭窄流路から口唇までの、矢状正中面における流速の瞬時値の分布を図 2 に示す。1 千万格子では狭窄流路において流れが大きく乱れ、狭窄から出たジェット流は上下前歯面近傍を流れている様子がわかる。それに対し、3 千万、4.5 千万格子では狭窄流路で流れは乱れず、上前歯付近で旋回流が発生し、1 千万格子と比べて前歯出口のジェット流の向きが変化している様子がわかる。この流れの違いは狭窄流路入口の角の丸めが影響していると考えられる。2.2 節で述べたように、実験でのモデル形状にできるだけ合わせるために 3 千万と 4.5 千万において狭窄の入口に半径 0.1 mm の丸みを持たせており、この丸みが狭窄流路での流れの状態を変化させたと考えられる。

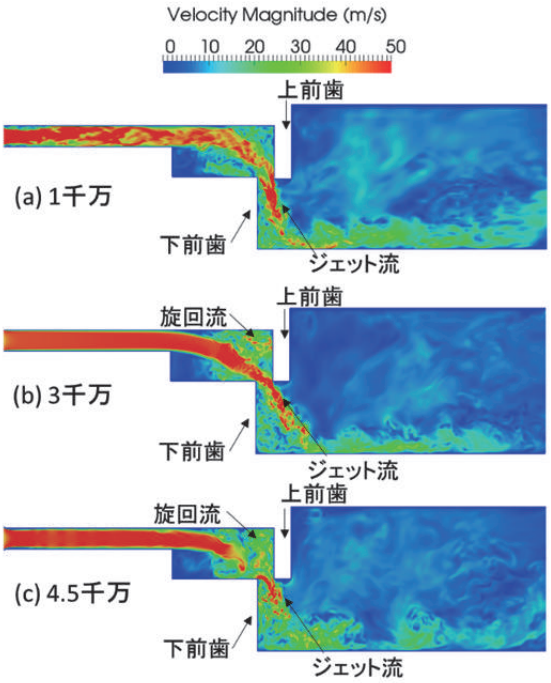

図 2 : モデル矢状正中断面における流速の瞬時値の分布

上前歯下方 1.5 mm における流速分布を図 3 に示す。この時、横軸は下前歯面からの距離を表している。また、実験の記録時間 1 秒間に対してシミュレーション時間が短いため、実験の流速の平均値と RMS 値を 0.004 秒ごとに計算し、1 秒間の標準偏差をエラーバーとして示している。実験における平均

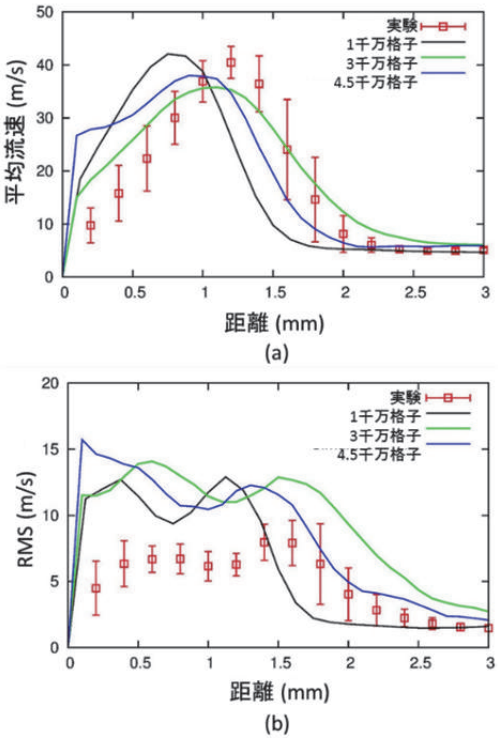

図 3：下前歯 1.5 mm 下方における流速分布

流速の最大値は 1 mm から 1.4 mm まで分布し、3 千万及び 4.5 千万格子の結果はその結果と一致した。それに対し、1 千万格子における最大値は 0.8 mm の位置に現れ、実験に比べて壁面近傍にあることが分る。この最大値の位置の違いは、前歯から出てくるジェット流の向きの違いを表しており、狭窄流路の流れの状態の違いが原因だと考えられる。また、格子数を 3 千万から 4.5 千万まで増やすことにより、1.5 mm から 2.5 mm のジェット流の剥離領域における RMS 値が減少した。この傾向は、同じく剥離領域における格子解像度を増加させた結果と一致している[8]。また、1 千万格子はジェットの主流の位置の影響で、剥離領域の RMS 値は小さく見積もられた。しかし、すべての計算条件において 0 mm から 1.5 mm におけるジェット主流領域においては RMS 値が大きく見積もられており、さらに壁面付近の格子幅を小さくする必要があると考えられる。

モデル遠方 20 mm における音の周波数スペクトルを図 4 に示す。1 千万及び 4.5 千万格子により計算したスペクトルは実験結果と似た傾向を示したのに対し、3 千万格子により計算したスペクトルは 1000 Hz から 2500 Hz にかけて約 10 dB 小さく、3000 Hz にお

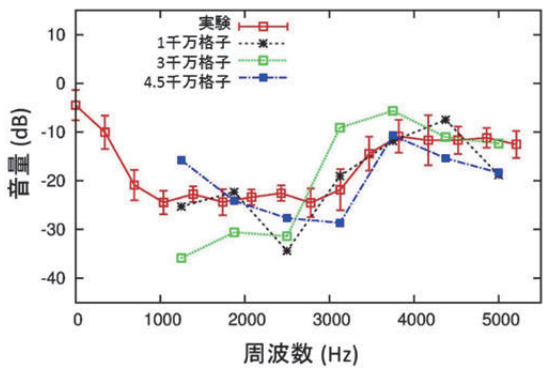

図 4：モデル遠方 20 mm における音圧スペクトル

いて約 10 dB 大きく見積もられている。これまでのシミュレーションにおいて、前歯出口におけるジェット流の流速変動が音源の発生に大きく寄与することが分っており[6-7]、3 千万格子においてジェット流の剥離領域の変動値(図 3b)を上手く見積もれなかったことがこの原因と考えられる。つまり、前歯出口の格子解像度を十分高くして、ジェット流の剥離領域の変動値を上手く見積もることが、歯茎摩擦音/s/のスペクトルを予測する上で重要であると示唆された。ただし、1 千万及び 4.5 千万格子においてもジェット主流の RMS 値は大きく見積もられており、今後これらの値が音の特性に与える影響をさらに調べる必要がある。

謝　辞

本研究は博士課程教育リーディングプログラムのヒューマンウェアイノベーション博士課程プログラム及び特別研究員奨励費(15J00413)の助成を受けたものである。また、東京大学生産技術研究所の加藤千幸教授に有益なアドバイスを頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

(1) N. Stevens, J. Acoust. Soc. Am., 50, 1180-92, (1971).

(2) C. H. Shadle, Ph. D. thesis, MIT, (1985).

(3) M. Howe et al., Proc. Math. Phys. Eng. Sci., 461 1005-1028, (2005).

(4) A. Van Hirtum, et al., J. Acoust. Soc. Am., 130,

2128-2138, (2011).

(5) J. Cissoni, et al., IJIEE, 1, 1-3, (2011).

(6) K. Nozaki, et al., J. Comput. Sci., 3, 298-305, (2012).

(7) T. Yoshinaga, et al., Proc. Inter-noise 2015, (2015).

(8) C. Kato, et al., Comput. Fluid., 36, 53-68, (2007).

(9) K. Nozaki, et al., J. Dent. Res., 93, 207-211, (2014).

(10) A. A. Overai, et al., Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 190, 345-361, (2000).

(11) Y. Guo, et al., 生産研究, 58, 11-15. (2006).