

CUDAを用いた3次元音響シミュレータによる音圧分布の計算*

☆川内萌木登, 竹本浩典 (千葉工大), 北村達也 (甲南大)

1 はじめに

鼻副鼻腔は形状が複雑で個人差が大きく、音声の個人性を生成する要因の一つである[1]。そのため、鼻副鼻腔手術等による音声変化を術前に予測することが望まれる。先行研究にて、患者の術前のCT (Computed Tomography) データに模擬手術を行い、FDTD法 (Finite-Difference Time-Domain method) を用いた3次元音響シミュレータを適用することで術後の音声変化を予測できることが示された[2,3]。ここで、従来法のシミュレータでは、時間的に2次、空間的に4次の差分近似を行うFDTD(2, 4)法を採用しMPI (Message Passing Interface) を用いた高速化を行っていたが、1名の音響特性を計算するために1時間以上要した。そこで、前報[4]にて時間的・空間的に2次の差分近似を行うFDTD(2, 2)法を採用しGPGPU (General-Purpose Graphics Processing Units) で並列計算を行うシミュレータ (提案法) を構築した。提案法では、従来法より差分精度が低いために伝達関数が約1.3%低域にシフトしたが、聴感上の差はなく、1名の音響特性を計算する時間が1分38秒まで短縮できた。本稿では、提案法で音圧分布の計算を行い、従来法との計算時間と精度について比較したので報告する。

2 材料と方法

2.1 解析データ

Fig. 1は解析データの鼻副鼻腔モデルで、空間解像度は $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ mm, サイズは $250 \times 298 \times 384$ であった。音源点は声門直上、観測点は正中面の外鼻孔より下前方2 cmの位置に設置した。

2.2 伝達関数の計算

従来法と提案法で解析データの音源点に20ミリ秒のガウシアンパルス[5]を体積速度源として入力し、観測点における応答を求めて伝達関数を計算した。シミュレーション周波数はいずれも2.0 MHzとした。

2.3 瞬時音圧分布の計算

従来法と提案法で伝達関数の計6つのピークとディップを選び、その周波数の正弦波を体積速度源として音源に入力し、観測点における応答が定常状態に達するまでの時刻を計測した。その後、再び正弦波で励振し、定常状態における2周期分の音圧分布を外部ファイルへ出力し、その時間を計測した。Table 1は励振周波数、ファイル出力開始時刻、終了時刻、ファイル出力間隔である。なお、出力開始時間は定常状態に達した後とし、出力間隔は2周期の1/40とした。

2.4 シミュレーション環境

Table 2は計算速度 (ファイル書き出し時間も含む) を比較したシミュレーション環境である。ローカル環境で従来法と提案法のそれぞれに1種類、クラウド環境で提案法に4種類準備した。なお、コア数について従来法ではCPUの物理コア数、提案法ではGPUのCUDAコア数を示す。

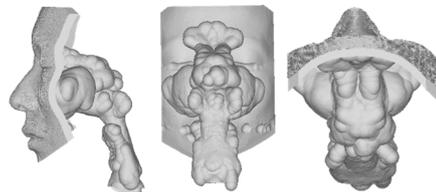


Fig. 1 鼻副鼻腔モデル

(左：左側面観 中央：後方観 右：上面観)

Table 1 励振周波数と出力条件

励振周波数 (Hz)	開始時間 (ms)	終了時間 (ms)	出力間隔 (ms)
300	12.8	19.5	0.1665
550	15.8	19.5	0.0910
1,350	18.0	19.5	0.0370
2,000	18.5	19.5	0.0250
2,250	18.6	19.5	0.0220
3,100	18.8	19.5	0.0160

Table 2 各シミュレーション環境

		計算ユニット	コア数	メモリ (GB)	メモリ帯域幅 (GB/s)
従来法 (MPI)	従来環境	Xeon Gold 6254 × 2基	36	754	281.6
	環境①	RTX 4070Ti SUPER	8,448	16	672.3
提案法 (GPGPU)	環境②	RTX A4500	7,168	20	640.0
	環境③	Tesla V100	5,120	32	897.0
	環境④	H100 NVL	14,592	94	3980.0
	環境⑤	H100 SXM	16,896	80	3360.0

* Calculation of sound pressure distribution using 3D acoustic simulator based on CUDA, by KAWAUCHI, Hokuto, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and KITAMURA, Tatsuya (Konan Univ.).

3 結果と考察

Table 3 は各環境における伝達関数と瞬時音圧分布の計算時間を示す。従来法と比較して提案法では計算時間が短縮した。特に環境⑤での正弦波応答の計算では 11 分 03 秒、書き出し処理を含めると 13 分 43 秒となり、従来法と比較すると、それぞれ約 1/51, 約 1/41 の計算時間となった。これは、採用した FDTD(2, 2)法による計算コストの低下と GPU による並列計算が効果的であったと考えられる。しかし、書き出しについては、従来法では 1 分 49 秒であったが、環境⑤では 2 分 40 秒を要した。これは、音圧分布の書き出し処理を CPU で行うため、GPU で音圧や粒子速度の計算を行っている提案法では、計算結果を記憶している GPU 上のメモリから CPU のメインメモリへの転送時間が発生しているためであると考えられる。

Fig. 2 は第 1 ピークの 300 Hz で鼻副鼻腔モデルを励振したときの応答である。従来法より提案法では振幅が約 1.0%大きかった。Fig. 3 は定常状態に達した後の同じ時刻における瞬時音圧分布を示す。従来法と提案法で同じカラーバーを用いており、赤いほど音圧が高い。従来法と提案法でほとんど差がなかったが、提案法では全体的に赤みが強くなった。これも提案法で音圧の振幅が大きいことを意味している。これは、変数が従来法では double 型だが提案法では float 型であること、従来法の FDTD(2, 4)法と提案法の FDTD(2, 2)法では音波の伝搬の性質が異なること[6]が要因と考えられる。

Table 3 計算時間

シミュレーション環境		伝達関数	正弦波応答	書き出し	瞬時音圧分布出力 (応答+書き出し)
従来法	従来環境	1h08m16s	9h33m28s	1m49s	9h35m17s
提案法	環境①	09m58s	58m37s	53m31s	1h52m08s
	環境②	16m19s	1h34m36s	3m07s	1h37m43s
	環境③	04m58s	38m12s	3m47s	41m59s
	環境④	01m46s	11m40s	3m01s	14m41s
	環境⑤	01m37s	11m03s	2m40s	13m43s

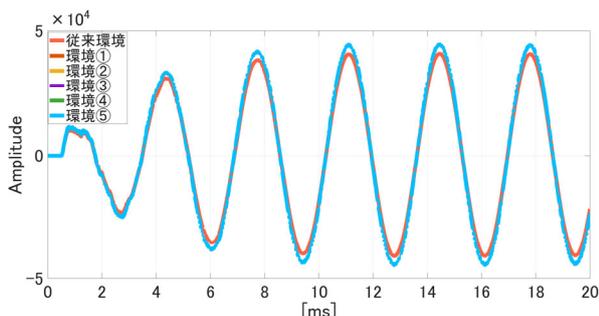


Fig. 2 観測点における正弦波応答

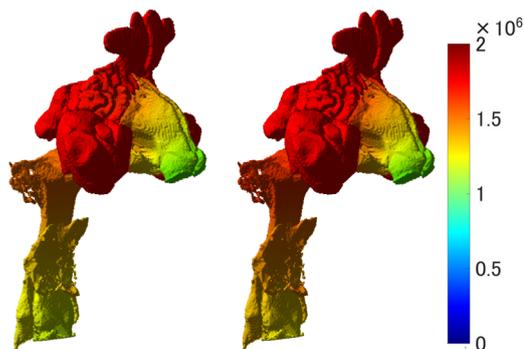


Fig. 3 瞬時音圧分布
(左：従来法 右：提案法)

4 おわりに

本稿では、GPGPU ベースの FDTD(2,2)法シミュレータ (提案法) と、MPI ベースの FDTD(2,4)法シミュレータ (従来法) の音圧分布計算における計算速度と精度を比較した。計算速度では、提案法は計算時間を大幅に短縮したが、GPU から CPU へのデータ転送を伴う音圧分布の書き出しには時間を要した。計算精度に関しては、正弦波応答と鼻副鼻腔内の音圧分布において、提案法は従来法よりも全般的に振幅が大きくなる傾向を示した。これは、変数型の差異と FDTD スキームの違いに起因する音波伝搬特性の差によるものと考えられる。

今後は、提案法にて従来法より時間を要している書き出し処理の改善に取り組む。具体的に GPU によるレンダリングを行い動画ファイルとして出力するなどの CPU による書き出し処理を最小限に抑える方法を検討し、更なる高速化を目指す。

謝辞

本研究は SCAT 研究助成, JSPS 科研費 24K22312 の支援を受けた。

参考文献

- [1] Amino *et al.*, Acoust. Sci. & Tech., 28(2), 128-130, 2007.
- [2] 竹本, 音響誌, 73(3), 166-172, 2017.
- [3] 杉浦他, 音講論 (秋), 799-780, 2021.
- [4] 川内他, 音講論 (春), 799-800, 2025.
- [5] Takemoto *et al.*, JASA, 128(6), 3724-3738, 2010.
- [6] 千藤他, 信学論 (A), J85-A(8), 833-839, 2002.