3次元音響シミュレータの高速化の検討*

☆川内萌木登,△雨宮爽斗,△村中開至,△渡辺遮那,福島侑希, 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 声の個人性の生成要因の一つである[1]。その ため、鼻副鼻腔手術等により個人性が変化す る。そこで術前に音声変化を予測することが 望まれている。先行研究では、患者の術前の CT (Computed Tomography) データに対して模 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[2]によって、術後の音声変化を予 測できることを示した[3,4]。このシミュレー タ(従来法)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 (コア数 36, メモリ 754 GB) を行っている が、1名の鼻副鼻腔の伝達関数の計算に約68 分必要であった。本稿では、より高速な計算 を行うために,計算が単純で高速化が可能な 時間的・空間的に 2 次の近似差分を行う FDTD(2, 2)法を採用し, GPGPU (General-Purpose Graphics Processing Units) を用いて高 速化する(提案法)。そして,従来法と計算の 速度と精度を比較したので報告する。

2 材料と方法

2.1 音響計算

(1),(2)式は減衰項を含む連続式と運動方程 式であり,音響の支配方程式である。

$$-k\frac{\partial p}{\partial t} - ap = \nabla u,\tag{1}$$

$$-\rho \frac{\partial u}{\partial t} - a^* p = \nabla p. \tag{2}$$

ここで, p は圧力, u は粒子速度, α , α *は 減衰係数, $k = 1/\rho c$ は圧縮率, ρ は密度, t は 時間である。(3), (4)式は x 軸方向において(1), (2)式を時間的・空間的に 2 次差分で表現した もので, Δt は離散時間間隔, Δx は離散空間間 隔, n は時間ステップ, i, j, k は空間ステッ プである。

$$p_{x}^{n+1/2}(i,j,k) = \frac{k/\Delta t - a/2}{k/\Delta t + a/2} p_{x}^{n-1}(i,j,k)$$

$$-\frac{1}{(k/\Delta t + a/2)\Delta x} (u_{x}^{n}(i + 1/2,j,k) -u_{x}^{n}(i - 1/2,j,k)),$$

$$u_{x}^{n+1}(i + 1/2,j,k) = \frac{\rho/\Delta t - a^{*}/2}{\rho/\Delta t + a^{*}/2} u_{x}^{n}(i + 1/2,j,k)$$

$$-\frac{1}{(\rho/\Delta t + a^{*}/2)\Delta x} (p^{n+1/2}(i + 1,j,k) -p^{n+1/2}(i,j,k)).$$
(3)

なお,解析領域の周囲に無反射境界を模擬 する PML (Perfectly Matched Layer) [5]と,壁 面における音波の反射を模擬する表面インピ ーダンス[6]を導入した。そして,これらを GPGPU で並列計算するように CUDA (Compute Unified Device Architecture) C++に てシミュレータを構築した。

2.2 シミュレーション環境

シミュレーション環境によって提案法を高 速化できる程度を比較するために、2 台のロ ーカル環境における計算機と、3 台のクラウ ド環境における計算機を用いた。Table 1 は各 シミュレーション環境である。

Table 1 シミュレーション環境

| | GPU | スレッド数 | メモリバス | メモリ帯域幅 |
|----------|------------------|--------|-----------|------------|
| ローカル計算機① | RTX 4080 Laptop | 7,424 | 192 bit | 432 GB/s |
| ローカル計算機② | RTX 4070ti Super | 8,448 | 256 bit | 672.3 GB/s |
| クラウド計算機① | A4500 | 7,168 | 192 bit | 432 GB/s |
| クラウド計算機② | V100 | 5,120 | 4,096 bit | 897 GB/s |
| クラウド計算機③ | H100 | 14,592 | 5,120 bit | 2.04 TB/s |

2.3 解析データ

解析データは丸底ヘルムホルツ共鳴器,鼻 副鼻腔モデルである。Fig. 1 はそれぞれの形 状と,音源点(赤点)・観測点(青点)を示す。 なお,丸底ヘルムホルツ共鳴器の解析領域の グリッド数は 1,030,301,声道形状モデルのグ リッド数は 28,608,000 であり,空間解像度は

^{*} Investigation of accelerating a 3D acoustic simulator, by KAWAUCHI, Hokuto, AMAMIYA, Sayato, MURANAKA, Kaiji, WATANABE, Shana, FUKUSHIMA, Yuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and KITAMURA, Tatsuya (Konan Univ.).

いずれも 0.5 mm とした。



Fig.1 解析データ形状(左:丸底ヘルムホ ルツ共鳴器,右:鼻副鼻腔モデル)

2.4 伝達関数の計算

従来法と、各シミュレーション環境におけ る提案法で2つの解析データの音源点に20 msのガウシアンパルス[7]を印加して観測点 における応答を求めて伝達関数を計算した。

3 結果・考察

Table 2 は従来法と各シミュレーション環 境における提案法の計算時間である。メモリ バスとメモリ帯域幅が大きいほど計算時間は 短縮された。従来法に対してクラウド計算機 ③では,丸底ヘルムホルツ共鳴器では計算時 間は約 1/75 の 7 s に,鼻副鼻腔モデルでは約 1/41 の 1 m 38 s まで短縮された。これは, FDTD(2, 2)法が FDTD(2, 4)法より計算コスト が低いことや,メモリアクセスが頻繁に行わ れる FDTD 法ではメモリバスやメモリ帯域幅 が大きいことが有効なためと考えられる。

Fig.2は丸底ヘルムホルツ共鳴器, Fig.3は 鼻副鼻腔モデルの伝達関数である。いずれの 場合も提案法の伝達関数はシミュレーション 環境によらず完全に一致したが,これらは従 来法の伝達関数より丸底ヘルムホルツ共鳴器 で約 0.9%,鼻副鼻腔モデルで約 1.3%低域に シフトした。このシフトは FDTD(2,2)法にお ける数値的音速が FDTD(2,4)法における音速 より低く,音波がグリッドに対して等方的に 伝搬しないこと[8]が原因と思われる。これに より,グリッド数が大きい鼻副鼻腔モデルで シフトが顕著に表れたと推測される。

4 おわりに

本稿では,鼻副鼻腔手術による音声変化を 高速に計算するために,提案法と従来法で計 算時間と精度を比較した。その結果,鼻副鼻 腔で20msのガウシアンパルス応答を計算す る時間は,従来法に対して提案法では最速で 計算時間が約1/41の98sとなった。その一方 で,伝達関数は約1.3%低域にシフトした。こ れは数値的音速の低下が原因と考えられる。 なお,医療現場では,計算時間はより短い(例 えば1分以内)ことが望ましい。そこで,今 後はアルゴリズムの改良などでさらなる高速 化を試みる。また,ピークやディップなどの 特定の周波数における鼻副鼻腔内の音場を可 視化する必要もある。

Table 2 計算時間

| | 丸底ヘルムホルツ共鳴器 | 鼻副鼻腔モデル | | |
|----------|-------------|---------|--|--|
| 従来法 | 8m46s | 1h8m10s | | |
| ローカル計算機① | 42s | 12m22s | | |
| ローカル計算機② | 30s | 9m46s | | |
| クラウド計算機① | 48s | 15m59s | | |
| クラウド計算機② | 16s | 5m0s | | |
| クラウド計算機③ | 7s | 1m38s | | |



Fig.2 丸底ヘルムホルツ共鳴器の伝達関数



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

- 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(春), 743-744, 2021.
- [4] 福島他, 音講論(春), 689-690, 2024.
- [5] Berenger, J. Comput. Phys., 23(1), 40-46, 2002.
- [6] Yokota *et al.*, Acoust. Sci. & Tech., 23(1), 40-46, 2002.
- [7] Takemoto *et al.*, JASA, 128(6), 3724-3738, 2010.
- [8] 千藤他, 信学論(A), J85-A(8), 833-839, 2002.