

歯茎摩擦音発音シミュレーションにおける口腔内気流と空力音源の in-situ 可視化

In-situ visualization of air flow and sound source for the simulation of sibilant fricative production

- 林賢悟, 神戸大, 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1, 171x219x@stu.kobe-u.ac.jp
- 吉永司, 阪大基工, 大阪府豊中市待兼山町 1-3, t.yoshinaga@me.es.osaka-u.ac.jp
- 野崎一徳, 阪大, 大阪府吹田市山田丘 1-8, knozaki@dent.osaka-u.ac.jp
- 野中丈士, 理研, 兵庫県神戸市中央区都島南町 7-1-26, jorji@riken.jp
- 坂本尚久, 神戸大, 兵庫県灘区六甲台町 1-1, naohisa.sakamoto@people.kobe-u.ac.jp
- Kengo Hayashi, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo
- Tsukasa Yoshinaga, Osaka University, 1-3, Machikaneyama-cho, Toyonaka-shi, Osaka
- Kazunori Nozaki, Osaka University, 1-8, Yamadaoka, Suita-shi, Osaka
- Jorji Nonaka, RIKEN R-CCS, 7-1-26, Miyakojimaminamimachi, Chuo-ku, Kobe-shi, Hyogo
- Naohisa Sakamoto, Kobe University, 1-1, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi, Hyogo

We propose in-situ visualization which performs aeroacoustic simulation and visualization of sibilant /s/ at the same time without outputting large-scale data to the storage. The visualization system enables to visualize the large-scale simulation data by plotting images with pre-registered settings at each processor during the simulation. In the numerical experiment, the cost of large-scale data I/O to HPC storage and the cost of transferring the data from HPC to local PC for in-situ visualization were reduced compared to those for the previous visualization method. The results indicate that it is possible to reduce the time of whole process from acquisition of a medical image of /s/ to the aeroacoustic simulation and visualization of sound source for speech therapy by performing the in-situ visualization.

1. 研究背景

歯茎摩擦音は日本語のサ行を発音する際に用いられる/s/や/sh/等の音である。この摩擦音を発音する際には、口腔の前部で上顎と舌先端により狭窄流路を形成し、狭窄流路から発生したジェット流から音が発生することが知られている⁽¹⁾。また口腔形状の異常やダウン症等による舌機能の障害のため、狭窄流路を上手く形成できずに摩擦音の構音障害となることが報告されている⁽²⁾。そのため、口腔内でどのように狭窄流路を形成し、どのようにジェット流から音が発生するのかを明らかにすることが、言語聴覚士の行う構音障害患者へのリハビリ治療の支援に活かすことができると期待されている。

この摩擦音の発生メカニズムを調べるため、CT画像から取得した口腔形状に対して圧縮性流体のラージエディシミュレーション (Large Eddy Simulation, LES) を行うことで、ジェット流の発生と音の伝播を同時に計算し、気流と音の可視化により発音メカニズムが調べられている⁽⁴⁾。この際、ジェット流による乱流を解像するよう計算格子を小さく設定するため、計算が大規模になると同時に、音伝播の計算のために時間ステップを音速に合わせて小さく設定する必要があり、非常に計算時間がかかる。また、解析手順としては、スーパーコンピュータなどを利用して大規模並列シミュレーションを行い、計算領域の分割結合、可視化や分析処理はユーザーの手元の PC で行っていた。しかし、この従来法ではシミュレーションによって得られる数値データをスーパーコンピュータのストレージに出力するデータ I/O のコスト及び、スーパーコンピュータから手元の PC にデータを転送する通信コストがボトルネックとなり可視化するまでに非常に時間を要していた。また出力するデータサイズが大きくなりすぎるのを防ぐために、シミュレーションによって得られるデータがある一定間隔の時間ステップで出力している。これは時間方向にデータを間引いているため、短い時間で急激な変化が起きている場合には、解析する際に重要なデータを失っている可能性がある。

そこで本研究では、大規模な数値データをストレージに出力することなくシミュレーション実行と同時に可視化処理をする in-

situ 可視化を行うことでこれらの問題を解決し、可視化処理に時間を要することなく効率よく分析することのできるシステムの構築を行う。本研究で構築したシステムを用いてシミュレーションと可視化を行うことにより、従来非常に時間がかかっていた医療画像の取得からリハビリ支援に利用可能な可視化までの時間を短縮し、シミュレーションの医療応用への可能性を広げることができる。

2. 手法

歯茎摩擦音の発音のシミュレーションでは圧縮性流体の 3 次元 Navier-Stokes 方程式と状態方程式を離散的に解いている⁽⁴⁾。それらの式を有限体積法数値計算ソフトウェア OpenFOAM 2.3.1 を用いて口腔流路内の格子点上で計算を行う。

In-situ 可視化では Fig.1 のようにシミュレーションによって得られた大規模な数値データをストレージに出力することなく可視化処理を行う。よってシミュレーション終了時には in-situ 可視化処理によって得られた画像または動画ファイルがストレージには保存されており、この画像データをユーザーは手元の PC に転送することでシミュレーション結果の分析を行うことができる。シミュレーションと同時に可視化処理を行うため、シミュレーションコードに可視化処理のコードを追加する必要がある。今回のシミュレーションは OpenFOAM を利用しているため、この OpenFOAM の流体ソルバから直接 In-situ 可視化の関数を呼び出して可視化処理を行う。Fig.2 に in-situ 可視化の疑似コードを示す。11 行目に挿入した `insitu_vis()` により可視化するタイミングと内容を指定する。可視化内容としては、断面におけるコンター図や変数の等値面だけでなく、ボリュームレンダリングなど様々な可視化手法を指定することができる。

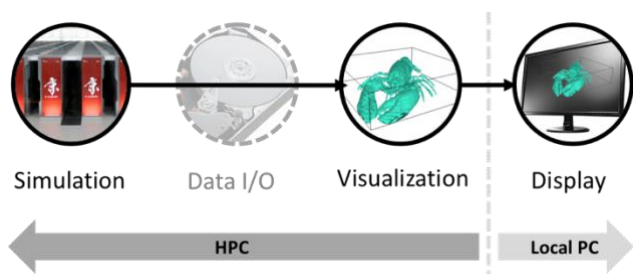


Fig. 1 In-situ visualization processing pipeline.

```

1. //simulation code
2.   float data_array[];
3.   float coords[]; // Mesh coordinate information
4.   int connection[]; // Mesh connection information
5.
6.   init_simulation();
7.
8.   while( now_time == end_time )
9.   {
10.    solver( data_array, coords, connection );
11.    insitu_vis( data_array, data_size, coords,
12.               connection, now_time );
13.  }
14.  end_simulation();

```

Fig. 2 Sample simulation code inserting in-situ visualization function.

可視化ライブラリには KVS (Kyoto Visualization System) ⁶⁾ を利用し、大規模な非構造六面体格子を可視化する必要があるため、今回レンダリング手法としては、大規模な非構造格子データの有効な PBVR (Particle Based Volume Rendering) ⁶⁾ によってボリュームレンダリングを行う。

本研究では、歯茎摩擦音/s/の発音に関して、大規模計算の in-situ 可視化を試みる。まず、歯茎摩擦音/s/発音時の口腔形状を CT 画像より抽出し、計算格子を構築した。そして圧縮性流体のラーゼディエーシミュレーション(LES)を行うことにより、発音時の口腔内のジェット流と空力音の発生を計算する。そして、各時間ステップの計算終了時に解析を行う変数について可視化処理を行い、画像データをプロセスごとに作成し、画像重畳処理を行うことで最終画像を出力する。つまり最終画像の出力までは並列に可視化処理を実行することができる。

数値実験には、CPU が Intel Xeon Platinum 8168, 64Cores, メモリが 128GB の環境上で実行し、非構造六面体格子に対して in-situ 可視化処理を行った。要素数は 3,197,279 であり、48 領域に要素を分割して計算処理を行った。可視化処理によって出力される画像の解像度は 2048×2048 で行った。

3. 結果と考察

In-situ 可視化によって得られた画像を Fig.3 に示す。(a)はタイムステップ 2,000、(b)はタイムステップが 20,000 における口腔の正中矢状面の流速コンター図を可視化した結果である。この時、流速が... m/s 以上の領域のみを表示している。そのため、Fig. 3(a)の 2000 ステップでは狭窄流路のみで気流が可視化されているのに対し、Fig. 3(b)の 20,000 ステップでは咽頭から狭窄流路の流速が上昇し、狭窄流路後流においてジェット流による乱流が発達している様子がわかる。

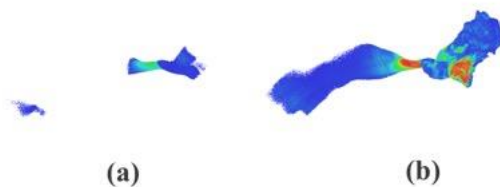


Fig. 3 Visualization of flow velocity magnitude in hexahedral unstructured volume data using in-situ visualization function.

(a) : time step of 2000, (b) : time step of 20000.

また 1 タイムステップあたりにおけるシミュレーション処理にかかる時間と可視化処理にかかる時間をそれぞれ計測した。Conversion はシミュレーションから得られたデータ配列や座標情報などを可視化ライブラリに合わせたデータフォーマットに変換する時間である。Visualization は PBVR 独自の処理であるマッピング処理 (粒子生成処理)、レンダリング処理 (粒子投影処理) と画像重畳処理を合計した値である。Output は最終画像を出力する際にかかる時間である。結果を Table.1 に示す。

Table.1 Execution time in simulation and visualization processing

	Simulation	Conversion	Visualization	Output
Time (sec.)	3.051	0.203	1.782	0.219
Ratio (%)	58.1	3.9	33.9	4.1

Table.1 より可視化処理にかかる時間が 33.9%と 3 割近くの時間を要していることが確認できる。これに関しては、解像度や PBVR 独自の可視化パラメータを変更することで、より高速化することも可能であり、また時間をかけてより高画質の画像を作成することもできる。今後は、音発生メカニズムを分析するのに適した画質と計算時間とのバランスを考慮した可視化処理を行う必要がある。

またシミュレーションによって得られる数値データと可視化処理によって得られる画像データで出力時間、データサイズをそれぞれ計測した。結果を Table.2 に示す。

Table.2 Output time of simulation and visualization

	Simulation Output	Visualization Output
Time (sec.)	2.368	0.219
Data Size(Mb)	66.11	12.0

Table.2 よりシミュレーションで得られたデータを直接出力するよりも可視化処理を行った画像を出力する方が、時間、データサイズともに効率が良いことが確認できる。当然データサイズが小さいほど転送コストも小さくなるため、従来法で問題であったストレージへのデータ I/O のコスト及びスーパーコンピュータから手元の PC へのデータ転送コストを削減することに対して有効であることを示すことができた。

5. まとめ

本研究では、歯茎摩擦音/s/の発音に関する大規模空力音響解析において、シミュレーション実行中に可視化処理を行う in-situ 可視化システムを構築した。実験により従来法で問題であった大規模な数値データをストレージに出力するデータ I/O のコスト及びスーパーコンピュータから手元の PC にデータを転送するコストを削減できることを示した。

今後はより解析を行うのに適した可視化処理を行うために出力する画像を工夫するとともに、単に可視化処理をするだけでなく分析処理まで行うことのできる可視化システムの構築を行う。また in-situ 可視化処理によってシミュレーション時間が増大するのを防ぐために、シミュレーション計算を行うプロセスと可視化処理を行うプロセスを分断する Loosely Coupled In-situ 可視化処理システムの構築を試みる。

参考文献

- (1) G. Fant "Acoustic theory of speech production," Mouton, The Hague, Paris (1960), 328.
- (2) C. Runte, M. Lawerino, D. Dirksen, F. Bollmann, A. Lamprecht-Dinnesen, and E. Seifert "The influence of maxillary central incisor position in complete dentures on /s/ sound production," The Journal of Prosthetic Dentistry (2001) 85, 485-495.
- (3) S. Wood, J. Wishart, W. Hardcastle, J. Cleland, and C. Timmins "The use of electropalatography (EPG) in the assessment and treatment of motor speech disorders in children with Down's syndrome: Evidence from two case studies," Developmental Neurorehabilitation(2009), 12, 66-75.
- (4) 吉永, 野崎, 安福, 木戸, 下條, 和田 "空力音響シミュレーションと大規模可視化システムを用いた摩擦音発音の可視化" NIGOGRAPH (2017), pp56-59.
- (5) Sakamoto, Naohisa, and Koji Koyamada. "KVS: A simple and effective framework for scientific visualization." Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering 2.1 (2015), pp76-95.
- (6) Sakamoto, Naohisa, et al. "Particle-based volume rendering." Visualization, 2007. APVIS'07. 2007 6th International Asia-Pacific Symposium on. IEEE (2007).