

声門波生成過程の直接的かつインタラクティブなシミュレーション*

◎山本和彦, 仲田昌史, 鏑木時彦 (九州大)

1 導入

有声音の音源波である声門波は、弾性体である声帯と流体である呼気流の複雑な相互作用によって生成される。左右の声帯は呼気流によって駆動され大変形を伴った運動をし、またそれによって呼気流の流路が動的に変形する。さらに、声門流は高レイノルズ数の流れであり、また声帯間の衝突も考慮する必要がある。従って、声門波の生成の過程をシミュレーションすることは最も難しいマルチフィジックス問題の一つであると言える。

本研究では、声門波生成の過程を直接的にシミュレーションするために、声帯を粘性抵抗を含む異方性弾性体として、声門流を圧縮性熱流体としてモデル化し、それぞれラグランジュスキームである MPS(Moving Particles Semi-Implicit) 法、オイラースキームである FDLB(Finite Difference Lattice Boltzmann) 法を用いて方程式を離散化したのちに、両者を連成させる。さらにスーパーコンピュータや PC クラスタを用いずに一台の一般的なパソコンでインタラクティブに実行するため、計算のほとんどを Shader(NVIDIA Cg, GLSL, and NVIDIA CUDA) を用いて GPU(Graphics Processing Unit) 上に効果的に実装し、加えて、残りの計算も CPU 側で同時に OS 依存スレッド関数を用いて実行しその計算もまた OpenMP を用いて並列化する。

2 理論

2.1 声帯モデル

MPS(Moving Particles Semi-Implicit) 法は本来非圧縮性流体の解析手法として越塚ら [1] によって提案された粒子ベースの計算手法である。後にこの手法は Song ら [2] によって等方性弾性体のシミュレーションへも拡張された。ここでは異方性弾性体の運動方程式に MPS 法を適用し、声帯組織の運動を表現する。声帯をその長さ方向 (y 軸方向) のみに異方性であるとする、声帯に適用する弾性体の運動方程式は

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial t^2} = \frac{E}{2(1+\nu)} \Delta \vec{\Psi} + \frac{E}{2(1-\nu)} \nabla(\nabla \cdot \vec{\Psi}) + \mu_y \frac{\partial^2 \vec{\Psi}}{\partial y^2} + \eta \Delta \frac{\partial \vec{\Psi}}{\partial t} \quad (1)$$

のように表すことができる [3]。ここで、 $\vec{\Psi}$ は変位、 ρ , E , μ_y , η はそれぞれ密度、ヤング率、 y 軸方向のポアソン比、粘性率である。MPS 法では式 (1) の微分演算子を対応する粒子間相互作用モデルに置き換えることによって離散化を行う。

2.2 声門流モデル

声門流に関しては圧縮性熱流体としてモデル化し、FDLB(Finite Difference Lattice Boltzmann) 法-D2Q21Model を用いて離散化する。FDLB 法は Lattice Boltzmann 法に差分スキームを導入した手法で、ここでは、2段階 Runge-Kutta 法を時間差分に、3次の風上差分を空間差分に用いた。粒子速度の格子点上でのアンサンブル平均である局所速度分布関数 f_i の時間発展式は

$$\frac{\partial f_i(t, r)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r_\alpha} c_{i\alpha} f_i(t, r) - \frac{Ac_{i\alpha}}{\tau} \frac{\partial (f_i - f_i^{(0)})}{\partial r_\alpha} = -\frac{1}{\tau} [f_i(t, r) - f_i^{(0)}(t, r)] \quad (2)$$

のように表される [4]。ここで、 t , r はそれぞれ時間、空間座標、 A は定数で、添字 i , α はそれぞれ粒子の移動番号と方向、 $c_{i\alpha}$ は粒子の速度ベクトルである。また、 τ は緩和時間で $f_i^{(0)}(t, r)$ は局所平衡分布関数と呼ばれ、圧縮性 Navier-Stokes 方程式を満たすように決定される。左辺第三項は数値計算安定化のための負の粘性項 [4]、右辺は衝突項と呼ばれ、粒子同士が衝突することによって平衡状態へと近づいていく過程を表す。

2.3 弾性体一流体相互作用

声門流の流体としての振る舞いは声帯の挙動に影響を受け、また同様に声帯は声門流の流体力によって駆動される。この相互作用問題を解くために、ここでは FDLB 法と MPS 法を連成させる方法を提案する。まず、声帯形状の最も外側に位置する MPS 粒子を表面粒子と定義し、さらに表面粒子を直線で順番に結んでできる線集合を声帯の表面と定義する。この表面は FDLB 法で計算される流体領域における境界となる。流体領域において複雑な移動曲面境界を扱うため、ここでは Mei らの境界の扱い [5] に修正を加えることで FDLB 法の圧縮性熱流体モデルに適用する。この方法では境界が曲面で構造格子の接点からずれていたたり、シミュレーション中に移動する場合でも連続的に扱うことが可能となる。この方法では境界面を挟んだ 2 接点 x_f , x_b の局所速度分布関数を以下のように修正する。

$$f_i(t, x_b) = (1-z)f_i(t, x_f) + zf_i^*(t, x_b) + 2B_q \rho e_i \cdot u_\omega \quad (3)$$

ここで f_i^* は仮想的な境界上での局所平衡分布関数、 u_ω は境界の移動速度、 z は境界面と粒子の速度ベクトルとの交差位置によって決定する変数である。また B_q は FDLB 法の局所平衡分布関数を導出する際に計算される係数、 e_i は粒子速度単位ベクトルであ

*Direct and Interactive Simulation for the Process of Glottal Wave Generation
by Kazuhiko Yamamoto, Masafumi Nakata, Tokihiko Kaburagi (Kyushu University)

る。一方、声帯を駆動する流体力は面に対して働くので、ここでは表面粒子1つ1つに働く力は表面力を線形に分散させたものとする。流体力としては流体の静的な圧力と運動から生じる圧力の2種類の力を考える [6]。結果的に表面を構成する各直線区間からその区間を構成する表面粒子1つに分散される表面への圧力は、2次元の場合、

$$P_T(a, b) = L_g \int_{r_a}^{r_b} \left(1 - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_a|}{|\vec{r}_b - \vec{r}_a|}\right) (p(\vec{r}) - p_0 + \frac{1}{2} \rho(\vec{r})(\vec{v}_{rel}(\vec{r}) \cdot \vec{n})^2) d\vec{r} \quad (4)$$

と表される。ここで \vec{r} は表面上の位置ベクトル、 p は圧力、 ρ は密度、 \vec{n} は表面の法線方向単位ベクトルである。また、 \vec{v}_{rel} は流れの境界に対する相対的な速度、 L_g は垂直軸方向の境界面の長さ (ここでは声帯の長さ) である。表面上の任意の点における物理変数の値は近傍の FDLB 構造格子の格子点における値をラグランジュ補間することによって求める。ある表面粒子1つにかかる力は式 (4) で表されるその粒子の周りの表面からの力を足し合わせ、

$$F_i = -(P_T(i, i-1)\vec{n}_{right} + P_T(i, i+1)\vec{n}_{left}) \quad (5)$$

のように表現する。ここで、添字 i は表面粒子のインデックス、 $right, left$ は i 番目の表面粒子の左右の表面を表す。こうして求めた力を表面粒子に外力として加える。

2.4 実装

本研究では、計算を一般的な PC でインタラクティブに実行可能にするために GPU (Graphics Processing Unit) を用いる。GPU は本来 3D グラフィックスの処理に特化して設計されたハードウェアであるが、近年その優れた並列処理能力を汎用計算にも利用する GPGPU (General Purpose Computation on GPUs) という分野が確立しつつある。GPU を汎用計算にも利用することは低コスト、高性能、将来性、一般性などの利点がある。ここでは MPS 法の計算を NVIDIA CUDA (Computed Unified Device Architecture) を用いて GPU 上に実装した。一方 FDLB 法の計算はボクセル化のテクニックを利用するために NVIDIA Cg を用いて GPU 上に実装した。Cg 計算部分から CUDA 計算部分へのデータの受け渡しには PBO (Pixel Buffer Object) を用いた。これにより、データをメインメモリにダウンロードすることによる転送時間をなくすることができる。FDLB 法において境界のボクセルを生成するために Wei ら [7] によって提案された動的境界生成法を利用する。この方法では深度剥離の考え方を応用し、半ば自動的に境界のボクセル化を行う。これによって僅かな前設定を行うことにより、障害物や壁境界をオフスクリーンレンダリングするだけで任意の境界条件を適用することが可能となる。加えて MPS 粒子同士の衝突検出と衝突力の計算は CPU 側に実装し、OS 依存スレッド関数を用いて GPU 側と同時に実行する。ここではさらに CPU 側の計算を OpenMP を用いて並列化している。

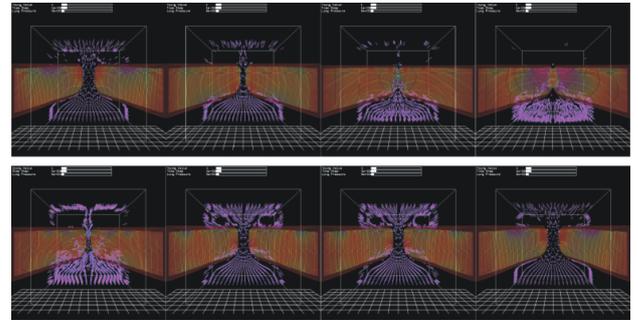


Fig. 1 声門波生成過程のシミュレーション結果。声帯形状の時間変化と声門流のパーティクルトレースを表す。

3 結果

シミュレーションには声帯に約 30000 個の MPS 粒子、声門流に約 25000 構造メッシュから成る FDLB 法を用いた。実行環境はグラフィックボード 1 枚を搭載した 1 台の PC で行い、10 回の計算ループにつき 1 回の画面へのレンダリングを行った結果、約 60FPS の速度を得た。ここで、時間刻みは 10^{-5} [s] とした。正確なベンチマークは行っていないものの、CPU のみでの実装時に比べて 400 倍を超える高速化倍率が得られているものと考えられる。これによりインタラクティブにパラメータを操作しながらのシミュレーションが可能となった。さらにシミュレーションの結果は、三角波状の声門波や声帯上下間の運動の位相差など、過去の研究と良い一致が得られた。計算例を Fig.1 に示す。ここで、呼気流の流入条件は声門下圧 $8000[\text{dyn}/\text{cm}^2]$ を条件として局所平衡分布関数を設定することによって行い、結果的にレイノルズ数は最大 2500 から 3000 程となった。

4 まとめ

本研究では声門波の生成過程を直接的にシミュレートするために FDLB 法と MPS 法を連成する方法を提案した。その結果、大変形をする弾性体と高レイノルズ数の流れからなる複雑な連成物理問題をラグランジュスキームとオイラススキームを併用して計算する柔軟な手法を構築できた。さらに GPU と CPU 双方を用いて効果的な並列実装を行うことによって、従来莫大な計算時間を要したこの計算は、一般的なパソコンでもインタラクティブな速度で動作する。また、今回の手法は、容易に 3 次元へも拡張可能である。

謝辞 本研究の一部は九州大学 ADCDU の援助を受けた。

文献

- [1] Kosizuka et al., Nucl. Sci. Eng. Vol. 123, 421-434, 1996.
- [2] Song et al., 日本機械学会論文集, 16-22, 2005.
- [3] 福富 他, 信学技報, SP2007-72, 2007.
- [4] Tshutahara et al, WIT Press Vol. 46, 3-12, 2007.
- [5] Mei et al., J. Comp. Phys., 680-699, 2000.
- [6] Yngve et al., SIGGRAPH, 26-36, 2000.
- [7] Wei et al., GPU Gem 2 Chapter 47, 2003.