

非圧縮性を考慮した粘弾性体舌モデルの有限要素法によるシミュレーション*

松崎博季 (北海道工大), 高野佐代子 (ATR-CIS, ATR-Promotions), 元木邦俊 (北海学園大)

1 はじめに

慣性項を考慮した有限要素法 (FEM) による Reiner Wilhelms-Tricarico の舌モデル [1] では圧縮性を制御する変数によって得られるシミュレーション結果が異なるという問題が存在した。この問題を避けるために、歪みエネルギー関数を偏差応力と体積変化 (圧力) の二つの部分に分けることで非圧縮性を実現する方法が提案されている [2]。本稿では、この方法を FEM で実装してシミュレーションを行い、従来のモデルとの違いを検討した結果を報告する。

2 歪みエネルギー関数の体積変化と偏差応力への分離

文献 [1] では、節点の圧力を計算するのに以下の常微分方程式を用いている。

$$\ddot{A} + \frac{2}{\tau}\dot{A} + \frac{1}{\tau^2}(A - A_0) = 0 \quad (1)$$

ここで A は要素の体積, A_0 はその要素の初期体積, そして τ は時間を単位に持つ定数である。文献 [1] には τ にどのような値を用いるのかは示されていない。そこで, τ の値によって, シミュレーション結果がどのように変わるのかを調査したところ, τ を大きくすると体積変化が大きくなり, 小さくすると体積変化は小さくなる傾向にあるが完全に零にはならず, 小さくしすぎると計算が終了しない場合もあった [3]。

この変数 τ 使用の問題を避けるため, コーシーテンソル C (あるいは変形勾配 F , $C = F^T F$) を

$$C = \bar{C}C_{vol}, \bar{C} = J^{-2/3}C \text{ and } C_{vol} = J^{2/3}\mathbf{1} \quad (2)$$

として体積変化 (圧力) を表す C_{vol} と体積変化を含まない偏差応力を表す \bar{C} の二つの部分に分け [2], 歪みエネルギー関数 $\Psi(C)$ を,

$$\Psi(C) = W(\bar{C}) + U(J) \quad (3)$$

として圧力に関する項 $U(J)$ と偏差応力に関する項 $W(\bar{C})$ に分離する方法が Reiner Wilhelms-Tricarico によって提案された。ここで, $J = \sqrt{\det C}$ である。

3 実験

提案された手法を FEM で実装して実験を行い, 従来の手法との比較を行った。

3.1 2立方体モデルを用いたシミュレーション

Fig. 1 に示す, 一辺が 1 cm の 2 つの立方体を上下に並べた簡単な形状のモデルを用いて形状変化のシミュレーションを行い, 体積変化の様子を調べた。底面は固定されている。筋繊維はいずれも上下方向のみに存在する。筋活性化関数を Fig. 2 上段に示す。筋張力の最大値を 22 N/cm² とした。従来の手法では, 変数 τ を 10 ms, 1 ms, 0.1ms の三種類で計算した。体積変化の様子を Fig. 2 中段および下段に示す。従

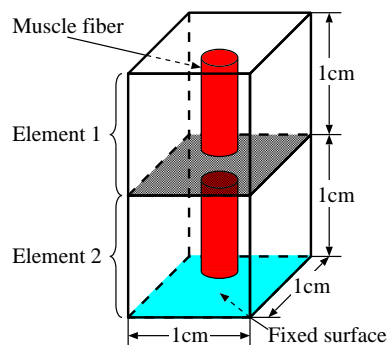


Fig. 1 2-cube model.

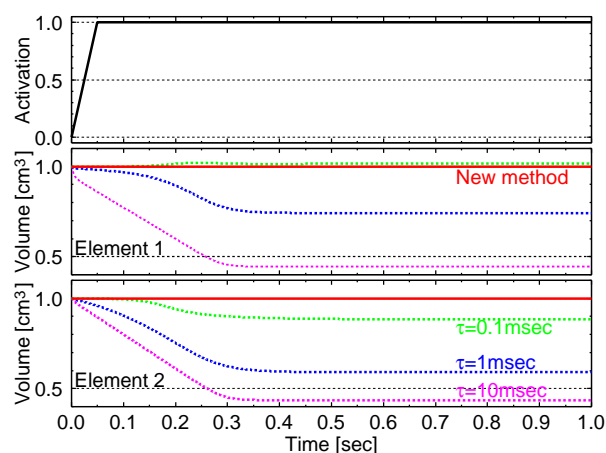


Fig. 2 Activation function (top), and volumes of element 1 (middle) and 2 (bottom).

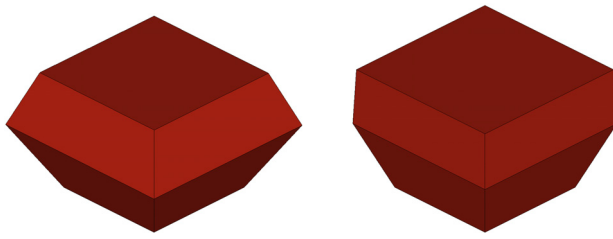
来の手法の結果は点線 ($\tau = 10$ ms がマゼンタ, 1 ms が青, 0.1 ms が緑) で, 新手法の結果は赤い実線で示されている。従来の手法で最も体積変化が少ない $\tau = 0.1$ ms の場合, 要素 1 では体積変化は 0.02 cm² 程度であるが, 要素 2 では 1 割程度圧縮している。一方, 新手法の場合, シミュレーションの全期間にわたっていずれの要素とも体積変化はほぼ零である。従って, 非圧縮性を仮定した問題を扱うには新手法が適していると思われる。

Fig. 3 に新手法と従来手法の $\tau = 0.1$ ms における 1 s 後の変形形状を示す。変形形状に差異が見られ, 特に要素 2 での差異が大きい。従来手法の要素 2 では体積が 1 割程度圧縮しているのに対して, 新手法の要素 2 はほぼ非圧縮性を保っているため, この差異が変形形状の差異の大きな要因ではないと思われる。

3.2 簡易形状舌モデルを用いたシミュレーション

次に, Fig. 4 に示す, 一辺が 4 cm の 4 つの立方体を上下左右に並べた簡易形状舌モデル [4] を用いてシミュレーションを行った。簡易形状舌モデルでは, オトガイ舌筋後部 (GGp), オトガイ舌筋中部 (GGm)

* FEM simulation of visco-elastic tongue model with incompressibility. by MATSUZAKI, Hiroki (Hokkaido Institute of Technology), TAKANO, Sayoko (ATR-CIS, ATR-Promotions) and MOTOKI, Kunitoshi (Hokkai-Gakuen University)



New method $\tau=0.1$ ms
Fig. 3 Deformed configuration after 1 s.

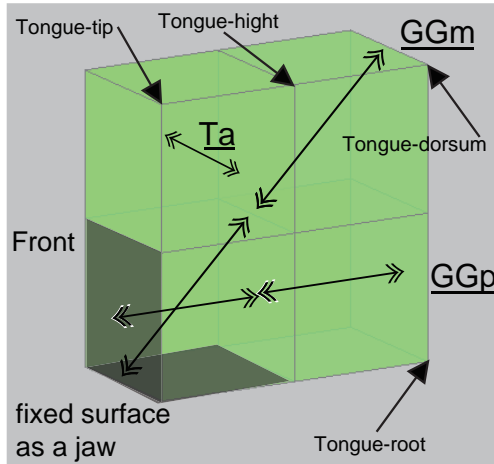


Fig. 4 4-cube tongue model.

と横舌筋前部 (Ta) が Fig. 4 のように配置される。前方下部の一部が下顎として固定されている。全ての舌筋を Fig. 2 上段に示す筋活性化関数で、筋張力の最大値を 0.22 N/cm^2 として活性化した。筋張力の最大値を 2 立方体モデルの場合の $1/100$ としたのは、 22 N/cm^2 では要素形状が崩れてシミュレーションが最後まで終了せず、舌の筋張力としては大きすぎる値ではないかと考えられるためである。舌端 (tongue-tip)、舌高 (tongue-hight)、舌背 (tongue-dorsum)、舌根 (tongue-root) 点の変位の時間変化を Fig. 5 に示す。実線 (赤) が新手法、点線 (青) が従来の手法の $\tau=0.1 \text{ ms}$ に対する結果である。舌端と舌根の結果はほぼ一致している。舌高と舌背の場合には $1 \sim 2 \text{ mm}$ 程度の差異が見られるが、変化の様子はほぼ同じである。

図 6 に新手法と従来手法の $\tau=0.1 \text{ ms}$ における 1 s 後の横方向から見た変形形状を重ねた図を示す。暗い赤は両手法における変形形状が重なっている部分を表す。明るい赤は新手法での、緑は従来手法での変形形状の一部で、両者の差分となる。筋張力の最大値が 2 立方体モデルの場合の $1/100$ であるため、2 立方体モデルの場合に見られたほど両者の形状の差異は大きくない。両手法の結果がほぼ同じであれば、適切な値が不明な圧縮性に関わる変数を使用する必要が無く非圧縮性もほぼ保たれた結果が得られる新手法のほうが優れた手法であると考えられる。

4 おわりに

慣性項を考慮した舌モデル [1] において、圧縮性に関わる変数を用いた従来手法と、用いない新手法で舌調音運動のシミュレーションを行い両者の結果を比較した。新手法では、従来手法の問題点であった圧縮性に関わる変数を使うことなく非圧縮性がほぼ

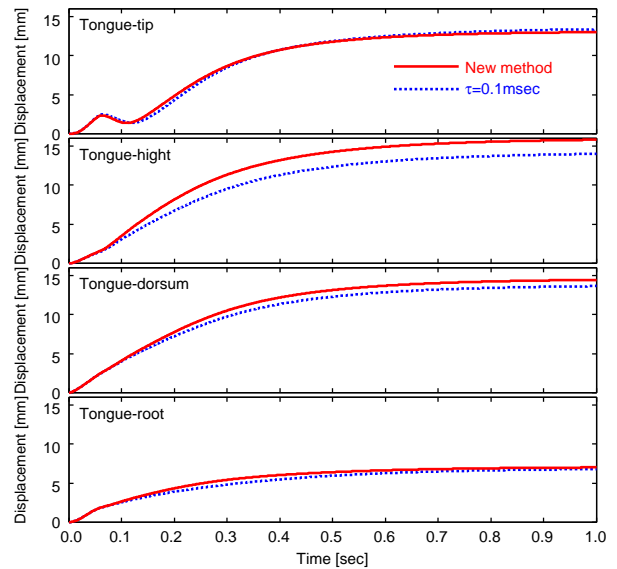


Fig. 5 Temporal changes of displacement.

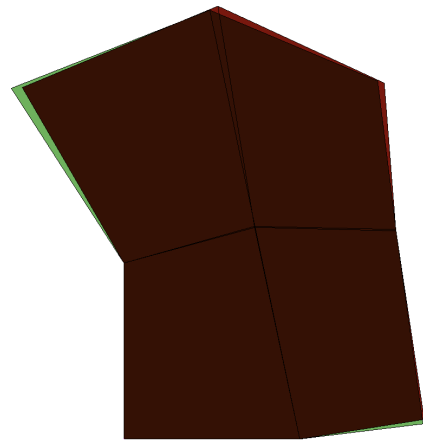


Fig. 6 Overlay of deformed configurations for new method (red colored part) and $\tau=0.1 \text{ ms}$ (green colored part) after 1 s.

保たれた結果が得られた。非圧縮性が仮定される舌組織を対象とする場合には、新手法のほうが扱い易く適した手法であると思われる。今後は新手法を用いて舌調音運動の研究を進める予定である。

謝辞 本研究の一部は平成 19 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (課題番号 18300069)、および北海学園大学ハイテク・リサーチ・センター・プロジェクト "視覚・画像・音声・言語情報処理の高度化と知的計測制御技術への応用" の支援により行われたものである。本研究を進めるにあたり有益なご提案と御討論頂いた Haskins Laboratory の Reiner Wilhelms-Tricarico 博士に感謝致します。

参考文献

- [1] Wilhelms-Tricarico, Acoust. Soc. Am., 97(5), pp.3085-3098, 1995.
- [2] Weiss *et al.* Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 135, pp.107-128, 1996.
- [3] 松崎他, 音講論 (春), 255-256, 2007.
- [4] 高野他, 音講論 (春), 253-254, 2007.