

仮想スピーチ

仮想ツールを利用して、人間の声道および上気道のモデリングとシミュレーションを行っている研究グループ

Sidney Fels (カナダ、ブリティッシュコロンビア大学電子情報工学科、ヒューマンコミュニケーション技術研究所、教授)

人間の口腔・気道組織の障害（脳卒中に起因する嚥下障害、癌手術後の咀嚼障害、閉塞性睡眠時無呼吸症（OSA）、各種言語障害など）の把握、診断、治療に取り組んでいる多くの研究グループが利用しているものに、コンピュータ生成モデルがあります。

これらの解剖学的な構成要素の動的モデルをバイオメディカル用途に使用すれば、研究の効率化を図ることができますが、こうしたモデルを作成することは容易ではありません。複雑なハイブリッドモデルのシミュレーションを高精度かつ確実に行う必要もあります。また、これらの複雑な物理特性は、迅速かつインタラクティブなシミュレーション環境で剛体力学、有限要素法（FEM）、流体シミュレーションなどを利用して解析しなければなりません。それに加え、これらのモデルをモジュールで作成し、各研究グループが複雑なプロジェクトで共用できるようにする必要もあります。

10年近くにわたり ANSYS 社のシミュレーションソフトウェアを利用して発声機構とコンピュータ支援手術の研究に取り組んできたフランスの GIPSA (Grenoble Images Parole Signal Automatique) 研究所と TIMC-IMAG (Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité) 研究所では、人間の舌、顎、顔の有限要素モデルを共同で作成し、発話運動制御や、顔面動作と発声に対する顎顔面手術の影響を調査しています。カナダのブリティッシュコロンビア大学（UBC）は先ごろ、これらのモデルを拡張して、バイオメカニカルシミュレーションツール「ArtiSynth」に組み込みました。ArtiSynth は、UBC のヒューマンコミュニケーション技術（HCT）研究所が人体構造の研究で使用するために開発したものです。

UBC では、ANSYS Academic Research と ArtiSynth を組み合わせて利用し、人間の口腔・気道組織（口腔、咽頭、喉頭 [OPAL] 複合体）の力学特性に関する知識の幅を広げながら、バイオメディカルと発声の研究に取り組んでいます。その一環として、発声機構とコンピュータ支援手術の研究プロジェクトに参加した際には、モデリングした OPAL 複合体を、バイオメカニクスシミュレーションエンジンである ArtiSynth でシミュレーションし、その結果を至適基準と比較しました。また、もう 1 つのプロジェクトでは、OPAL 複合体の空隙を流れる気流、特に破裂音（“pa”）と摩擦音（“sh”）の空力音響シミュレーションを行いました。

構造解析

最初のプロジェクトでは、UBC のエンジニアチームが舌と口腔の 3次元バイオメカニカルモデルを作成してから、筋力を発生させる機能モデルを音響モデルと連成し、この 3次元モデルを制御しまし

た。その一例が、フランス語の母音を発声したときに舌がどのように動くかを示した図 1 のダイアグラムです。この舌のモデルは、5つのパラメータから成る超弾性ムーニーリブリンモデルと六面体要素 ANSYS SOL ID185 を使用して作成しましたが、舌と下顎を変形させて動かす力を発生させる筋肉は、特殊な要素のサブセットで表現しました。

人間の顔の 3次元バイオメカニカルモデルは、肺からの気流によって生成された音響信号に大きな影響を与える唇の変形に注目していた GIPSA 研究所と TIMC-IMAG 研究所が作成しました。一方、UBC のエンジニアチームは、コンピュータ断層撮影（CT）データ

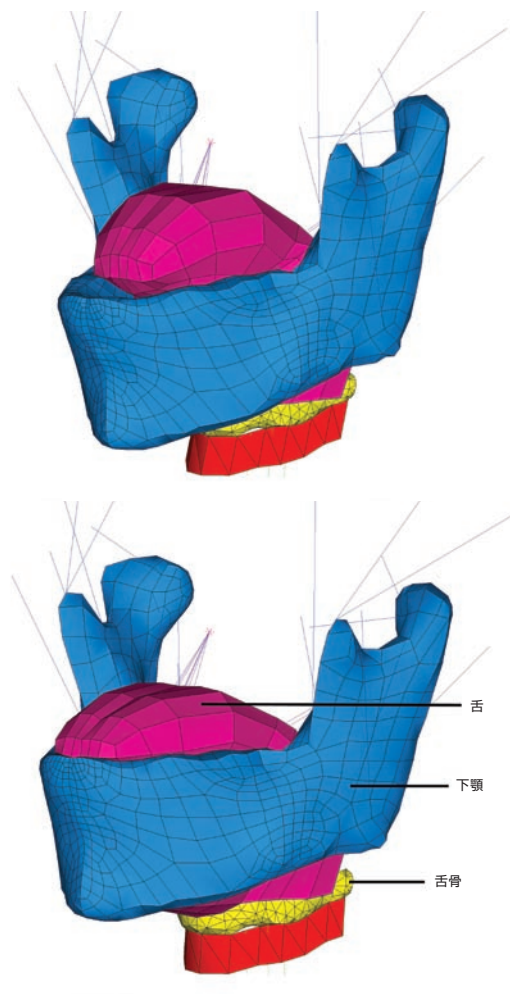


図 1. 上は、機能モデルと音響モデルを連成して、舌と口腔の 3次元バイオメカニカルモデルを制御したもの。下は、舌と下顎を動かす力を発生させる筋肉を特殊な要素のサブセットで表現したもの。

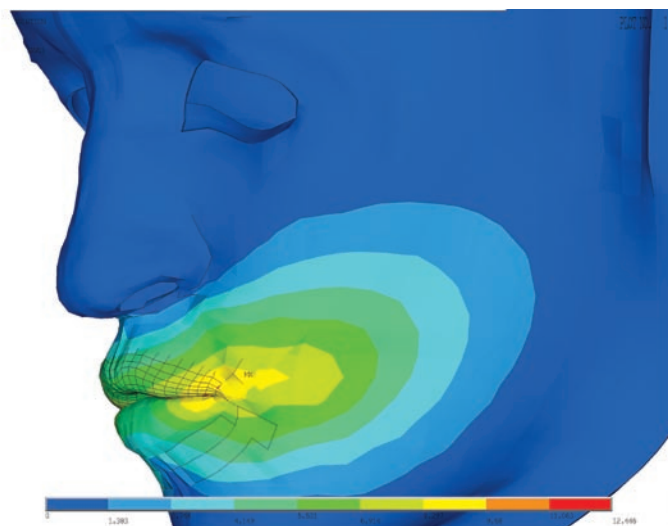
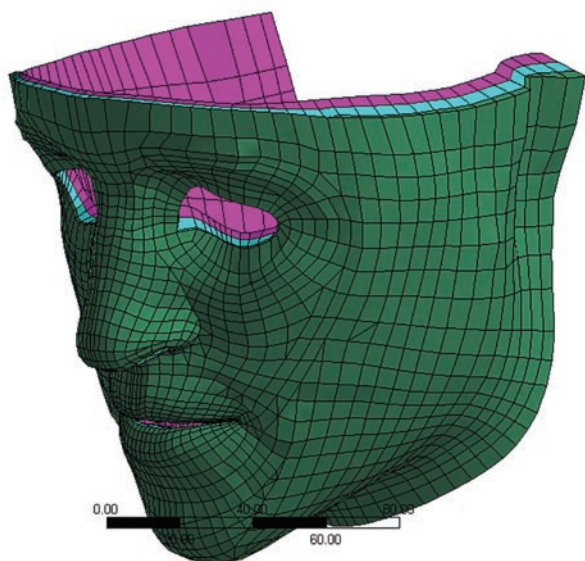


図2. 3層の完全 / 縮退六面体要素 ANSYS SOL ID185 から成る 3次元有限要素メッシュを手動で生成したもの(左) と、唇を丸めて突き出し、“ou” と発音しているところ(右)

を使用して、3層の完全 / 縮退六面体要素 ANSYS SOL ID185 から成る 3次元有限要素メッシュを手動で生成しました。顔面組織の非線形挙動は超弾性ムーニーリブリンモデルの構成則で、筋繊維は区分的単軸引張り要素で表現しました。

その後には、“ou” と発音する際に丸めて突き出す唇など、発声時の様々な顔面運動と顔面動作のシミュレーションを行いました(図2)。

また、GIPSA 研究所と TIMC-IMAG 研究所が、両研究所の作業と UBC の HCT 研究所で行われたモデリング作業を調整する役割も果たしたこのプロジェクトでは、HCT 研究所が顔、顎、舌骨、舌の各モデルを結合する作業を行いました。その際に利用したのが、こうした構造物に対応する様々な機能を搭載した剛体 / FEM フレームワークです。このフレームワークの機能をいくつか挙げると、衝突検出処理、緊密に連携した FEM / 剛体ソルバー、各種の FEM 解析、筋モデル、リッチなグラフィカルユーザーインターフェースのほか、what-if シナリオをテストする際にインタラクティブに調整できるシミュレーションレートなどがあります。

なお、HCT 研究所のチームメンバーが、ANSYS で解析した結果を注意深くチェックしながら、ArtiSynth でインタラクティブにシミュレーションした結果と、ANSYS で得た至適基準を確認したところ、ArtiSynth で求めた応力とひずみが、この基準とよく一致していました。これは、OPAL 複合体の動的特性(咀嚼、嚥下、発声など)の調査に取り組んでいる臨床研究者が信頼して利用できる 1 つのツールを手に入れたことを意味します。

流体解析

もう 1 つのプロジェクトでは、発声に必要なものでありながら、閉塞性睡眠時無呼吸症の一因にもなる気流の流体解析を行いました。この発声を調査する場合には、声を発生させる複雑な運動作用を把握しなければなりません。たとえば、言語運動と音響信号は、コミュニケーション言語の目的、知覚の制約、発声器官の物理特性の影響を受けます。これらの要素がどのように結合し相互作用するかを調べるには、発声システムのリアルな物理モデルを効率的に作成できるツールが

必要になります。UBC では、予備調査時に ANSYS FLUENT を使用して 2 種類の発声の気流をシミュレーションしました。

その 1 つは、肺からの気流が歯に当たる際に生じる乱流によって発生する摩擦音 (“sh”) です。最初に、圧縮性流れをシミュレーションして、この音響(圧力)波を直接測定できるようにしてから、ラージェディシミュレーション (LES) を利用して乱流をモデリングしました。次に、音響波が放出される出口の周りにバッファゾーンを設定して音響波がこの領域に戻らないようにした状態でシミュレーションを行い、音響波のスペクトルを求めました。その結果は、様々なスペクトル特性の実験結果と異なりましたが、スペクトルの振幅と傾向が一致していたため、問題はありません。実際、気道の正中矢状断面から漏れ出る様子を図4に示した音響波は、圧力を測定して直接分解したことで、非常に効率的に測定することができました。

シミュレーションを行ったもう 1 つの発声音は、唇を素早く開いて圧力パルスを放出した際に発生する両唇破裂音 (“pa”) です。この破裂音の直後には、マイナスの影響を持つマイクポップ音を発生させるものの、言語知覚にはプラスの影響を与える乱流が生じます。

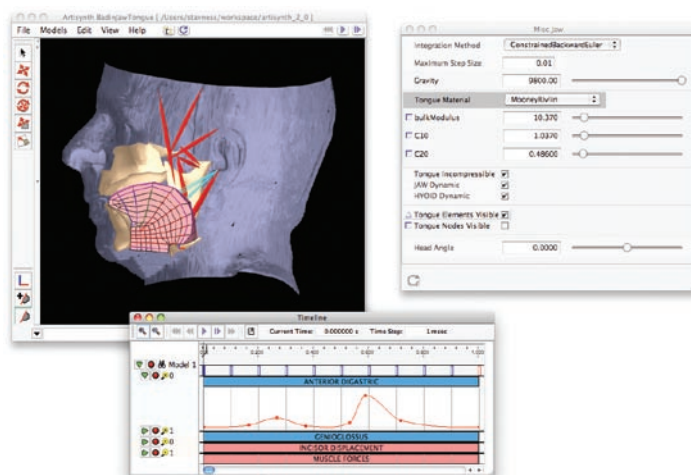


図3. 顔、顎、舌骨、舌の各モデルを解剖モデリングフレームワークで結合したもの

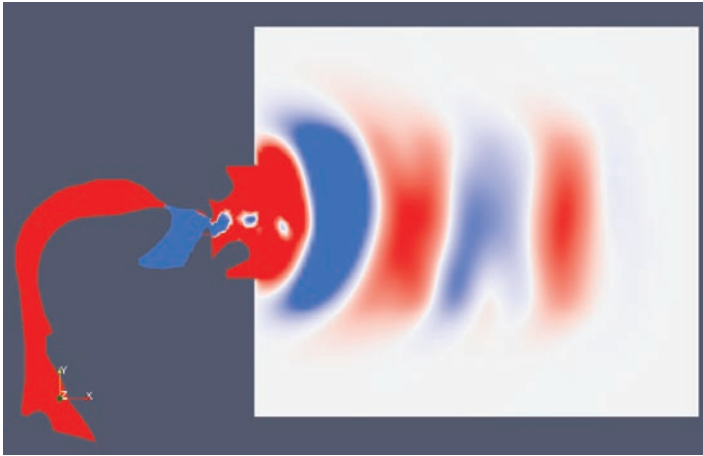


図 4. 気道の正中矢状断面から音響波が漏れ出ているところ

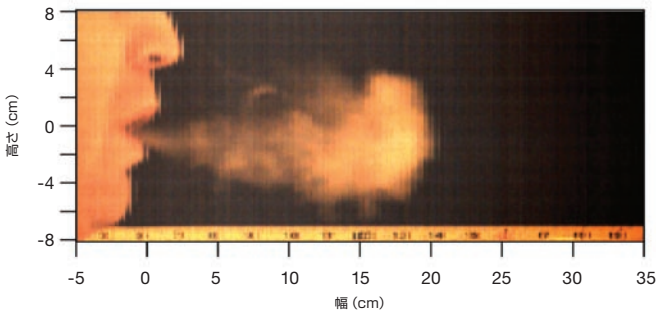


図 5. シミュレーション結果は、実際に発声して行ったマイクの実験や高速ビデオの結果とよく一致した。

UBC のエンジニアチームはこの乱流を調査するため、口を横長の楕円形としてモデリングしてから、LES を利用して、発声を口から勢いよく出る圧力としてシミュレーションしました。

このシミュレーション結果は実験結果とよく一致しました (図 5)。しかし、こうした複雑な乱流をより詳細に把握するには、唇の動きなどの流体-構造連成シミュレーションも行う必要があります。なお、シミュレーション結果と実験結果が一致していることは、高速ビデオ

と粒子面のシミュレーションの結果を比較した図 6 と、マイクの実験と圧力面のシミュレーションの結果を比較した図 7 で確認できます。

ANSYS 社の各種のソフトウェアは、口腔・咽頭・喉頭組織の研究に取り組んでいる UBC にとって欠かせないものとなっており、重要な領域の把握や、誰でも簡単にモデリングの結果にアクセスできる環境を実現する特別な臨床研究ツールの開発に大きく貢献しています。■

資料提供:

ブリティッシュコロンビア大学 (カナダ)

Peter Anderson (機械工学科, HCT 研究所)

Sheldon Green (機械工学科)

John Lloyd (機械工学科, HCT 研究所)

Ian Stavness (電子情報工学科, HCT 研究所)

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) (フランス)

Yohan Payan (TIMC-IMAG)

Mohammad Nazari (GIPSA 研究所)

Pascal Perrier (GIPSA 研究所)

Florian Vogt (GIPSA 研究所)

詳細情報

ブリティッシュコロンビア大学: <http://www.ece.ubc.ca/~hct/research>

GIPSA 研究所: <http://www.gipsa-lab.inpg.fr>

TIMC-IMAG: <http://www.timcimag.fr>

ArtiSynth: <http://www.artisynth.org>

Reference

Stavness, I.; Lloyd, J.; Payan, Y.; Fels, S. Coupled Hard-Soft Tissue Simulation with Contact and Constraints Applied to Jaw-Tongue-Hyoid Dynamics. International Journal of Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2011, vol. 27, pp. 367-390.

Derrick, D.; Anderson, P.; Gick, B.; Green, S. Characteristics of Air Puffs Produced in English "Pa:" Experiments and Simulations. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, vol. 125, pp. 2272-2281.

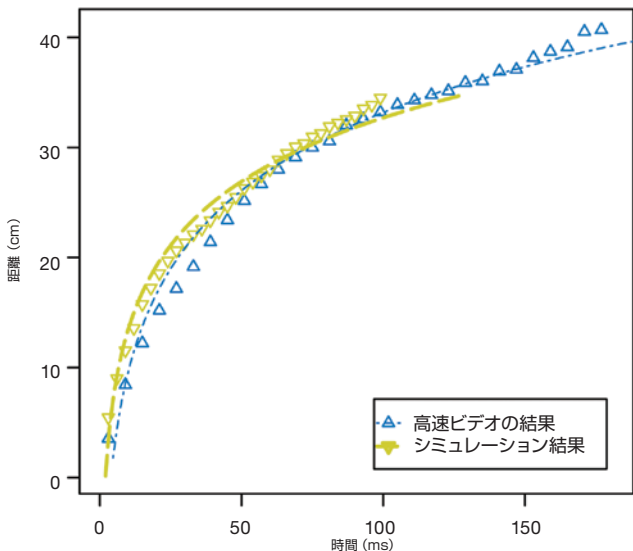


図 6. 高速ビデオと粒子面のシミュレーションの結果を比較したもの

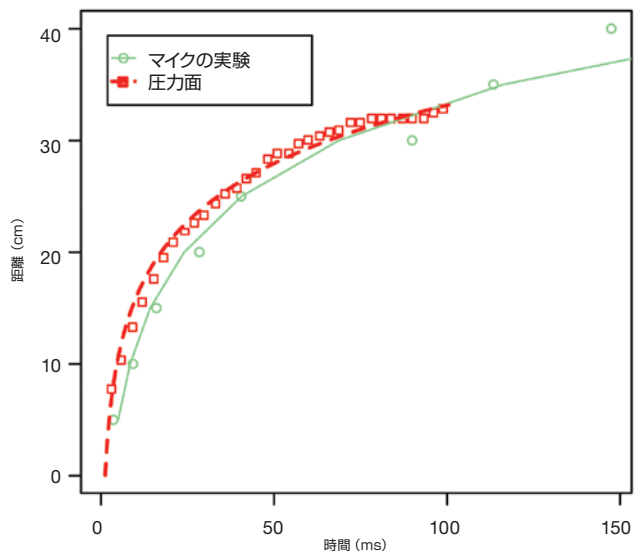


図 7. マイクの実験と圧力面のシミュレーションの結果を比較したもの