

審査の結果の要旨

氏名 菊地 貴博

本論文では、粒子法を用いて嚥下に関係する生体器官のモデル化を行い、生体と食塊の相互作用を考慮した計算機シミュレーションを実施した。さらに、生体機能の低下による嚥下障害をシミュレーションによって再現することに成功した。本論文は6章で構成されている。

第1章は序論である。嚥下とは食物などを口腔から胃へ輸送すること、誤嚥とは食物などが気管へ流入することである。誤嚥性肺炎は高齢者に多く見られ、死亡率が急激に増加しており大きな問題となっている。しかしながら、計測手段が限られていることなどから嚥下や誤嚥のメカニズムは十分解明されておらず、シミュレーションを用いた研究が求められている。粒子法はメッシュを必要としない連続体力学のシミュレーション手法であり、大変形を扱いやすだけでなく医用画像からのモデル生成が容易であり、嚥下時の食品や生体の挙動の解析に適した方法である。そこで、本研究では粒子法を用いた嚥下シミュレーションに関する研究を行うとしている。

第2章ではHamiltonian MPS法における滑らかな粒子壁境界条件の開発について述べられている。粒子で表現された固体同士の接触において、境界でのすべりを表現できるように、メタボールの考え方を取り入れた境界条件を新たに開発した。ゼリー状食品の短軸圧縮試験を実施し、Mooney-Rivlin体として材料定数を決定するとともに、粒子の大きさを変化させてシミュレーションを行った。60%程度の変形までシミュレーション結果は実験をよく再現し、開発した境界条件を用いるHamiltonian MPS法は、生体や食品の解析に有用であることが示された。

第3章では嚥下に関わる器官のモデリングについて述べられている。健常被験者の嚥下におけるVF(Video Fluorography)映像をもとに、粒子を用いて嚥下に関する諸器官を生成した。モデル化した器官は、舌、軟口蓋、喉頭、気管、喉頭蓋、および咽頭である。各器官の一部の粒子群をコントロール領域とし、VF映像に合わせて強制変位を与える。嚥下時に倒れる喉頭蓋の運動を分析するため、喉頭蓋の運動モデルや摩擦係数を変えてシミュレーションを行ったところ、嚥下障害を含む嚥下運動の数例を再現することができた。これにより、嚥下障害における喉頭蓋の回転不良の原因や回転メカニズムに関する多くの知見が得られたとしている。

第4章では嚥下シミュレーションの妥当性確認が示されている。食塊は流体として陽的MPS法による流体解析を行い、生体との相互作用は流体-構造弱連成解析により考慮した。本計算により食塊が口腔から舌によって運ばれ、喉頭蓋が倒れて器官への流路をふさぐことで、食塊が食道に流下する様子を計算することができている。喉頭蓋近くの関心領域に

おける食塊量の時間変化をVF映像とシミュレーション結果で比較したところ、定量的により一致が得られた。シミュレーション結果の可視化方法についても提案および議論されている。

第5章は嚥下障害のシミュレーションである。仮想実験を本研究で開発したシミュレーションにより実施した。まず、喉頭閉鎖の障害を想定し、喉頭蓋の回転および披裂軟骨の動きを抑制した場合について試みた。喉頭蓋が回転しない場合には、披裂軟骨の動きが小さくなるほど誤嚥量が多くなった。これは喉頭蓋による気管への流路の閉塞がなされなかったことと、披裂軟骨による食道の流路の拡張が不十分だったことによると考えられる。次に喉頭の運動の障害を想定した。喉頭の動きを上昇と前進に分けて考えた場合に、喉頭の前進が抑制されると誤嚥しやすいことが示された。さらに、嚥下の治療の効果について考察し、複数の障害が重複して誤嚥が発生する場合において、いくつかの障害が解消されることで誤嚥しなくなる場合があり、有効な治療方法がシミュレーションによって推定できる可能性が述べられている。

第6章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上、本研究では粒子法を用いて嚥下シミュレーション手法の開発を行った。本シミュレーションの妥当性確認を実施し、健常者の嚥下を再現することに成功した。さらに、仮想的に嚥下に関する障害を模擬してシミュレーションを実施し、誤嚥を予測した。本シミュレーション結果を考察し、誤嚥のメカニズムや有効な治療方法について知見を得ることができた。これは、先端的なコンピュータシミュレーション技術を活用することで医療の進歩に大きく貢献することに道を開くものである。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。