

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006 ～ 2008

課題番号：18360092

研究課題名（和文） 咀嚼・嚥下困難者支援への工学解析の応用

研究課題名（英文） Applications of engineering analysis to the support of swallowing and mastication disorder

研究代表者 水沼博（MIZUNUMA HIROSHI）

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20117724

研究成果の概要：

ゼリー状食塊と液状食塊の嚥下連成解析を人の口腔から咽喉に渡って実施した。人体各部の力学特性と嚥下動作をモデル化すると共に食品のレオロジー特性や人体との接触、摩擦、反発についてもモデル化を行った。固形食品の圧縮破断のモデリングと咀嚼シミュレーションも行い、咀嚼の定量化を行うと共に、固形食品の咀嚼・嚥下シミュレーションを行うための道を開いた。また、嚥下検査の高機能・高精度化を達成するため、X線造影撮影とシミュレーション手法を融合した新しい計測手法を提案した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
18年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
19年度	2,800,000	840,000	3,640,000
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	8,800,000	2,640,000	11,440,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体,生物・生体工学,医療・福祉,食品,シミュレーション工学

1. 研究開始当初の背景

多様な嚥下障害の症状のなかで最も多いのは、嚥下時に喉頭から気道への食塊流入を防ぐ喉頭蓋の動作が高齢化により緩慢となる症状です。このような障害は食塊が肺へ進入する原因となり、それによって引き起こされる誤嚥性肺炎は死亡率も高いことが知られています。このような嚥下障害に関する社会的関心は急速に広まりつつあります。一方、介護保健法の改正を受け、施設のお年寄りへの「食」サービスの質を向上させる動きも広がっています。厚生労働省は、施設内での一

律の食事から個々に適応した食事の提供や、摂食状況の把握を促すとともに、チューブで栄養をとる「経管栄養」から、自分の口で食べて栄養を摂取する「経口栄養」への移行を高齢者の生きがいとして支援し始めました。嚥下障害者が口から食べる場合には誤嚥の危険を伴うため、その危険に対する安全の確保が重要となります。そのような安全に配慮された食品として介護食が各主要食品会社により開発・販売されています。そこで問題となっているのが、その安全性です。個人により症状が異なり、介護食に使われる添加剤

も多種多様で、調理方法によっても介護食の咀嚼・嚥下の様子が異なるからです。先進的な施設では介護食の調理について既に多くのノウハウと実績を積み重ねてきていますが、これらの貴重な積み重ねも食品の複雑な力学物性と障害者の多様な病態により外部からも利用できるような一般性のある情報データベースにはなっていません。

2. 研究の目的

(1)咀嚼・嚥下流動の連成解析を、口腔から食道までの範囲に渡り実施します。食品としてゼリーと液状食を対象とします。また、固形食品の場合には、咀嚼のときの圧縮破断に対応するためのモデル化が必要であり、種々の固形食品に対してそのモデルを導きます。

(2)X線造影撮影 (Videofluorography) は咀嚼・嚥下の過程をビデオとして記録し、被爆の欠点はあるものの障害の診断にしばしば用いられています。嚥下は1秒以下の短時間に3次元的に複雑な食塊の変形がおこるため観察は容易ではありません。申請者はこれまでに、複数方向からの造影画像をもとに食塊の変形・流動の非定常3次元データのデジタル化を行い、アニメとして観察しやすくすると共にそれらの情報に基づく流動解析も行い、形態的及び力学的解析を可能とします。

3. 研究の方法

(1)ゼリー状食塊の嚥下連成解析

弾性的に変形可能な咽喉モデルに嚥下動作を与えると共に、食品として嚥下検査にしばしば用いられるバリウムの添加された硬軟2種類のゼリーを選んだ。ゼリーのレオロジー方程式は2個のパネと1個のダッシュポットからなるMaxwellの線形粘弾性三要素モデルを用いた。モデル定数を決定するため、平行円板型の動的粘弾性測定装置と円板型プランジャーによる圧縮試験装置を用いてレオロジー特性の測定を行った。ゼリー状食塊の嚥下を数値モデル化するため、ゼリーと咽喉粘膜との間の接触に伴う摩擦力についても摩擦実験に基づくモデル化を行った。嚥下における器官と食塊の摩擦を考えると、唾液は粘着性の食塊の摩擦を低減する重要な役割を果たしている。ここではそのような唾液の効果も含め、摩擦力 F はクーロンの法則に従うものと仮定し、接触反力に摩擦係数 μ を乗じた力と定義した。摩擦係数 μ は動き始めは静摩擦係数 μ_s に相当する高い値を示し、その後の運動中には動摩擦係数 μ_d に相当する一定値に漸近する。これらの数値モデルに基づく嚥下シミュレーションは有限要素法により行われ、解析ソルバーとして汎用の動的構造解析ソフトLS-Dynaを用いた。

(2)液状食塊の嚥下連成解析

解析ソルバーとして汎用構造解析ソフトLs-Dynaを使用し、有限要素法による解析を行った。器官と液状食品の構成方程式は各々等方弾性体及びニュートン流体と仮定した。器官に対してはLagrange要素を用い、液状食品に対しては空間に固定されたEuler要素に対してALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian)法により流動解析を行った。器官の変形と液状食品の流動は連成して解析されるが、主に器官の運動により食品の流動が支配される。液状食品の内、特に増粘剤を添加されたものは強い非ニュートン粘性を示すが、ここではまず解析の最初の試みとしてニュートン流体の液状食品を対象とした。計算モデルは舌、咽頭、喉頭蓋、喉頭、気道、食道及び液状食塊から構成される。液状食品の流動を解析するEuler要素は図1の舌後方の食塊初期位置から食道と気道下端近くまでの矩形の解析領域に取られ、 $48 \times 44 \times 72$ の要素に分割された。

嚥下運動は口腔から始まるが、ここでは食塊の初期位置を舌後方とし、重力と舌の後方への運動により咽頭へ向かう流れを誘起させた。食塊が喉頭から気道に入る誤嚥が起こらないためには、図1の喉頭蓋が舌の付け根を回転中心として喉頭を覆うように倒れ込むことが必要で、この倒れこみは喉頭の挙上とほぼ同時に生じ、嚥下の終了と共に元の位置に戻る。高齢化により喉頭の位置が下がったり、挙上量が不足したり、タイミングが遅れるようになると、むせやすくなったり誤嚥が生じやすくなる。したがってこれらの再現が重要となる。ここでは一部の節点に対して、矢印で示す運動を強制的に定義した。喉頭の挙上量は22mmとした。

(3)固形食品の圧縮破断のモデリング

柔らかく大きな弾性変形を伴う食品として豆腐、そして比較的小さな変形から破断し始めるバナナとクッキーを試料として選んだ。また、クッキーの上にチーズを乗せた2層の組み合わせ、チーズをクッキーで挟んだ3層の組み合わせ及びチョコレート餅を包んだ団子菓子も対象とした。レオロジーモデルとして線形弾塑性モデルを用い、大変形を伴う破断をシミュレートするために、豆腐に対してALEモデルを、その他の食品に対してTie-breakモデルを適用した。クッキーとチーズの間の摩擦係数はクーロン摩擦に従うものとし、静止摩擦及び動摩擦係数を実験的に決定した。

(4)固形食品の咀嚼シミュレーション

試料としてグミを用い、圧縮試験からレオロジーモデルの定数を決定した。レオロジーモデルには低密度高圧縮体モデルを用いた。

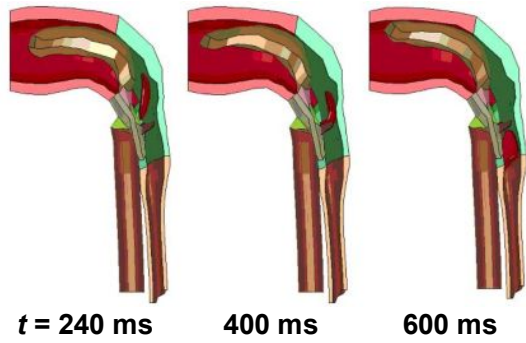


図1 硬いゼリーの嚥下シミュレーション

シミュレーションのための歯形モデルを作成するため、石膏モデルの3次元スキャナーから有限要素モデルを作った。咀嚼運動は下顎に支点周りの回転運動を与えることにより模擬した。またシミュレーション結果を測定結果と比較するため、シミュレーションと測定の各々においてシート状圧力センサーを用い、シートに働く圧力を求めた。歯は食品に比べて十分硬いと見え、全て剛体とし歯や歯茎の変形などによる影響は無視した。

(5) X線造影撮影の定量解析

正面と側面の2方向から撮影された造影ビデオを基に食塊の3次元形状を求める。また、形状を求めるときに誤差として体積変化が生ずる。それらの体積変化がゼロとなるよう各時刻の食塊体積を計算し、補正を行った。得られた形状変化から、有限要素法により食塊に生ずる応力解析を行う。解析ソルバーにはLS-DYNAを利用する。試料は硬、軟2種類のバリウム入りゼリーである。

4. 研究成果

(1)ゼリー状食塊の嚥下連成解析

動的粘弾性のゼリー物性測定結果は硬いゼリーと軟ゼリーの違いによる差異は小さく、それに対し圧縮テストのプランジャー反力の測定結果は硬いゼリーの反力が軟ゼリーの反力より約50%高い結果を示している。

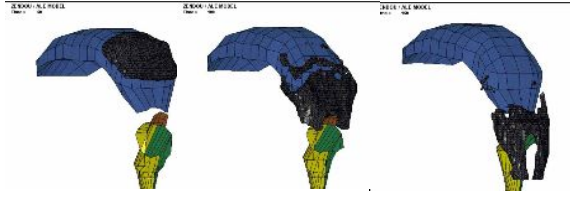


図2 水の嚥下のシミュレーション

く、それに対し圧縮テストのプランジャー反力の測定結果は硬いゼリーの反力が軟ゼリーの反力より約50%高い結果を示している。咽頭部での圧力ピークは60mmHg(8kPa)～100mmHg(13kPa)と報告されており、圧縮試験で生ずる応力レベル3～5kPaに近く、動的粘弾性の100Pa以下の測定と離れている。この点ため、圧縮テストの結果から得られたモデル定数を嚥下シミュレーションで用いた。

硬いゼリーの解析の結果を解析開始時点(0ms)、食塊下端が喉頭蓋に到達した時点(200ms)、それ以降について静止画として取り出し、図1に示す。硬いゼリーは一旦喉頭の挙上と共に喉頭蓋上に乗るようにして上に移動した後に嚥下される。これに対し、軟らかいゼリーは喉頭蓋の横をすり抜けるようにして通り抜けていく。軟らかいゼリーは硬いゼリーに比べ大きく変形するため、喉頭蓋との接触時に抵抗を受けにくい形状に変形することで、下方へのスムーズな移動が達成されている。軟らかいゼリーは硬いゼリーよりも早く嚥下されていることがわかり、これらの挙動の違いが嚥下速度の差をもたらしている。この嚥下シミュレーションによりバリウムゼリーの硬さによる嚥下挙動の差異が表現できていることが確認できた。

(2)液状食塊の嚥下連成解析

水の嚥下に対する解析結果を図2に示した。時刻0msが解析初期状態に対応し、その後の解析結果が経過時間の順に示されている。

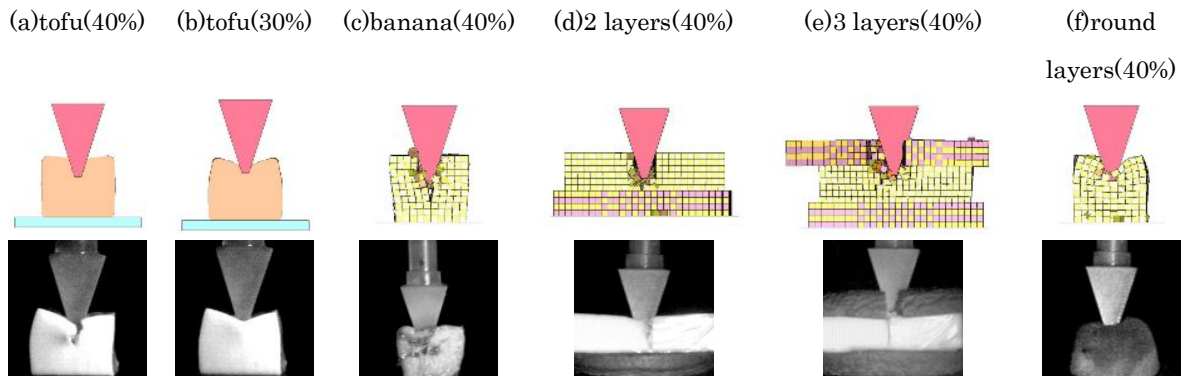
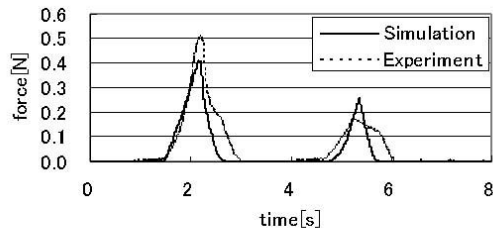
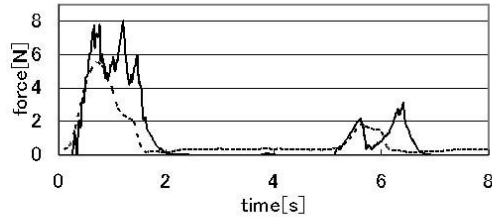


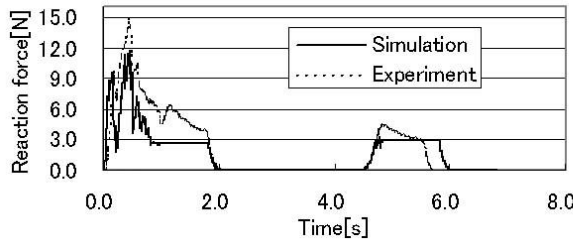
図3 テーパ状プランジャーによる圧縮のシミュレーション(上段)と圧縮試験(下段)の比較



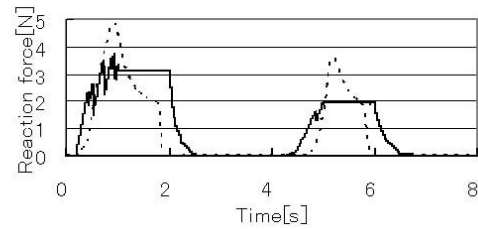
(a) tofu



(b) banana



(c) 3-layer model



(d) round-layer type

図4 プランジャーによる圧縮に対する反力の測定とシミュレーション結果

る。液状食塊の先端は 100ms 後にほぼ喉頭位置に達する。これとほぼ同時に喉頭蓋が倒れ、喉頭の入口を覆う。このため 150ms では、液状食塊は喉頭に浸入せず、喉頭蓋の左右に分かれるようにして下咽頭から食道に向かう。バリウムなどの嚥下造影撮影においても、食塊は通常喉頭の左右の脇 (food channel) を通るよう通過し、喉頭蓋を乗り越えるような嚥下は通常観察されない。図の結果はこのような実際の観察結果を表現している。一方、高粘度の液状食塊は嚥下の速度が遅れ、高齢化などによる喉頭蓋の応答の遅れに対しても誤嚥せずに済むことが検証できた。また、いくつかの誤嚥の症例のシミュレーションも行った。

(3) 固形食品の圧縮破断のモデリング

図3はテーパのついたプランジャーで食品の圧縮試験を行った結果と、各食品に対するシミュレーションの結果を表している。豆腐に用いられた ALE 法は大きな変形の後に破断する場合に適し、バナナやクッキーに用いられた Tie-break モデルは大変形する前に破断する場合に適しているといえる。また、プランジャー反力の測定結果とシミュレーションの結果を図4に示す。用いたシミュレーションモデルは比較的単純なモデルであるが、各食品の破断の特徴を表しており、咀嚼のようなより複雑な解析条件への応用に適しているといえる。

(4) 固形食品の咀嚼シミュレーション

咀嚼過程における食品形状変化のシミュ

レーション結果を図5に示す。この高圧縮モデルを使用することにより、ほぼ完全に圧縮するまでのシミュレーションが可能である。このモデルは本来は発泡スチロールなどに用いられるモデルであり、グミのように柔らかく、弾力のある食品に向けたモデルと考えられる。実験とシミュレーションのシートセンサー上圧力分布の比較を図6に示す。シート上の圧力分布のパターンは測定結果とシミュレーション結果との間でほぼ一致することがわかった。今後、食品の種類を増やし、食感と相関するパラメーターを探し出すなどの課題があるものの、本方法は食感を定量化する一つの方法として有効であると考え

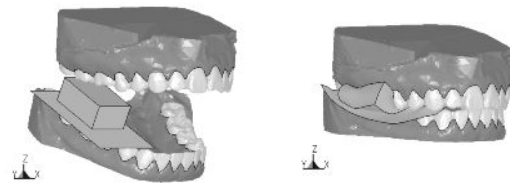
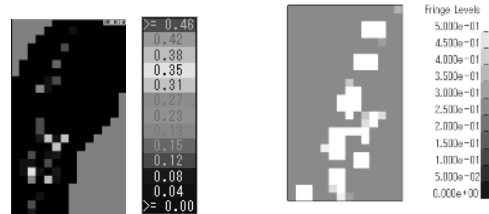


図5 咀嚼シミュレーション



(a) 実験

(b) シミュレーション

図6 センサーシート上の圧力分布

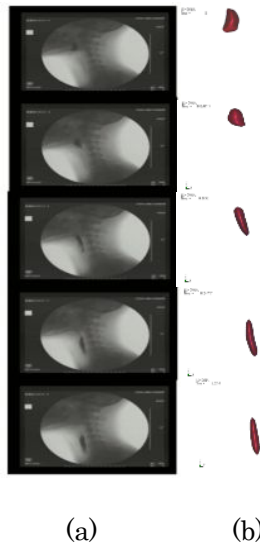


図7 X線造影と3D化された食塊の経時変化
られる。

(5) X線造影撮影の定量解析

図7は柔らかいゼリーに対する結果を示し、(a)は人体左側面から撮影されたX線写真で、(b)は3次元的に求められた食塊形状の経時変化を示している。ゼリーの形状変化から喉頭蓋から先の位置でのバリウムゼリーに生ずる食塊表面の最大法線応力の経時変化を求めた。丘村ら(嚥下のしくみと臨床, 金原出版, P69)は圧力変換器を鼻孔から食道に挿入して測定した水嚥下時の嚥下圧を測定し、軟口蓋部、下咽頭及び頸部食道で3つのピークを示し、最大約120 mmHgと報告している。水が咽頭から下がるにつれ、嚥下圧は低下していく傾向を示している。これに対し、ゼリーは時刻ゼロで応力ゼロと定義され、その直後に大きな応力変化が生ずるが、その後は水の嚥下圧と定性的に同様の変化を示し、下咽頭における応力のピークは柔らかいゼリーで178 mmHg、そして硬いゼリーで233 mmHgとなった。より正確な応力値を求めるには、ゼリーを口に含む時点から解析を進める方法が望ましいが、本測定は嚥下の様子を定量的に評価する新たな方法として有効といえる。

上記基礎研究と並行して、嚥下障害者用の食事用具と介護食用の携帯粘度計について開発研究を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4件)

1. H. Mizunuma, M. Sonomura, K. Shimokasa, H. Ogoshi, S. Nakamura, and N. Tayama, NUMERICAL MODELING AND SIMULATION ON THE

SWALLOWING OF JELLY, Journal of Texture Studies, 40-3(2009)、査読有

2. 下笠賢二、水沼博、トロミ表現の定量化とリンクした飲みやすい吸い飲みのデザイン、日本摂食嚥下リハビリテーション学会雑誌 Vol.12-3, pp.319-320 (2008)、査読無

3. 下笠賢二、水沼博、とろみ粘度計と一口カップに関する試験研究、日本摂食嚥下リハビリテーション学会雑誌 Vol.11-3, pp.365-366 (2007)、査読無

4. 下笠賢二、水沼博、大越ひろ、小寺浩貴、嚥下障害者用液状食品のための携帯粘度計の研究開発、ライフサポート、Vol.19-1 pp.23-30(2007)、査読有

〔学会発表〕(計 4件)

①M. Morimoto, H. Mizunuma, M. Sonomura, K. Kohyama, and H. Ogoshi, Mechanical Modeling of Foods Including Fracture and Simulation of Food Compression, Proc. XV Int. Congr. on Rheology, AIP Vol. 1027, pp.1-3, (2008).

② 高橋豊治、水沼博、X線造影計測による食塊応力解析、日本機械学会年次大会、2007年9月11日

③沼守崇志、水沼博、食塊の嚥下連成シミュレーション、日本機械学会年次大会、2007年9月11日

④高橋豊治、水沼博、嚥下流動に及ぼす液状食品のレオロジー特性の影響と超音波によるその検出、日本流体力学会、2006年9月17日

〔産業財産権〕

○出願状況(計 2件)

名称：手動及び電動の介護用歯ブラシ

発明者：水沼博、他2名

権利者：首都大学

種類：特許

番号：

取得年月日：2008年2月22日

国内・外国の別：国内

名称：流動体分配器

発明者：水沼博、他4名

権利者：首都大学

種類：特許

番号：2008-333545

取得年月日：2008年12月23日

国内・外国の別：国内

○取得状況(計 2件)

名称：携帯粘度計

発明者：水沼博

権利者：首都大学
種類：特許
番号：4277305
取得年月日：2009年3月19日
国内・外国の別：国内

名称：携帯式円錐・平板粘度計
発明者：水沼博
権利者：水沼博
種類：特許
番号：4048491
取得年月日：2007年12月7日
国内・外国の別：国内

〔その他〕

ホームページ

<http://www.eng.metro-u.ac.jp/fluid/home/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

水沼博 (MIZUNUMA HIROSHI)
首都大学東京・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：20117724

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

田川 憲男 (TAGAWA NORIO)
首都大学東京・大学院システムデザイン研究科・教授
研究者番号：00244418
大越 ひろ (OOGOSHI HIRO)
日本女子大学・家政学部・教授
研究者番号：80060698
神山 かおる (KOHYAMA KAORU)
独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構食品総合研究所・食品機能部研究室長
研究者番号：00353938