

機関番号：11301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20700373

研究課題名 (和文) 食塊攪拌の計算力学モデルによる胃の機能論の力学的再構成

研究課題名 (英文) Development of computational biomechanics of gastric mixing

研究代表者

今井 陽介 (IMAI YOHSUKE)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：60431524

研究成果の概要 (和文)：

胃における食塊攪拌過程を、流体力学の移動境界問題として取り扱うための計算力学モデルを構築した。胃壁の蠕動運動および食塊-胃内ガスの自由表面を境界条件として与える。食塊の種類や量、および蠕動運動のパターンなどの生理学的条件をパラメータとした解析を行い、これらが攪拌効率や胃内部の応力場にどのように影響しているのかを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

We developed a computational fluid dynamics model of gastric mixing. Moving wall condition of antral contraction wave and free-surface condition of gastric gas were given as boundary conditions of the numerical model. We investigated the effects of physiological conditions such as the viscosity and volume of food bolus and the antral contraction wave pattern on the mixing efficiency and fluid stress in the stomach.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2009 年度	700,000	210,000	910,000
2010 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：計算バイオメカニクス

科研費の分科・細目：人間医工学・医用生体工学・生体材料学

キーワード：消化器，食塊攪拌，バイオメカニクス，生理流体力学，計算力学

1. 研究開始当初の背景

非潰瘍性消化不良に分類される患者は、潰瘍などの器質的病変が認められないにも関わらず慢性的な嘔吐などの症状に悩まされている。非潰瘍性消化不良の病態生理は解明されておらず、ストレスによる内臓の知覚異常とともに消化管運動障害が原因として注目されている。

生理学において、胃の機能は食塊の攪拌・貯留・排出であると定義される(例えば Meyer et al., *Am. J. Physiol.*, **266**, G525, 1994)。このう

ち攪拌過程は消化機構の出発点であり、消化不良の病理を明らかにする上で第一に理解すべき過程である。

胃内部は胃内ガス(気体)、食塊(固体、液体)、胃液(液体)の多相流体であり、力学的にみれば攪拌過程は、胃壁の蠕動運動を境界条件とした、多相流体の力学的相互作用の問題である。しかしながら、従来の生理学は力学的理解の欠如から、正常な攪拌でさえ、どのような力学場(運動場)において達成されているのか説明できていない。

2006年に発表された Schulze の Review 論文 (*Neurogastroenterol. Motil.*, **18**, 172, 2006)にあるように, 近年, 超音波画像や MRI などによって少しずつ運動論的な研究がされつつあるが, 画像からの力学場の抽出には限界がある. 同論文に展望として述べられているように, 計算力学を用いてこれをモデル化し, 特に高粘度の食塊や固形成分を含む食塊運動をより正確に解明することが求められている.

Pal ら (*Proc. R. Soc. Lond. B*, **271**, 2587, 2004; *J. Biomech.*, **40**, 1202, 2007) は世界で唯一, 胃内部の食塊運動を計算力学モデル化している. しかしながら胃内部を単一の液体で満たす近似を用いており, 食塊の固形成分はもとより, 胃内ガスの影響さえも考慮されていない. したがって胃の機能の詳細を力学的観点から再構成するためには, 多相流問題として取り扱う新しい計算力学モデルが必要である.

2. 研究の目的

本研究では, 第一に, 胃における食塊攪拌過程を, 胃壁の蠕動運動-食塊-胃内ガス-胃液の多相流移動境界問題として取り扱うための計算力学モデルを構築する. 第二に, 構築した計算力学モデルを用いて様々な生理学的条件における解析を行い, 胃の機能論を力学的見地から再構成する. 食塊の種類や量などの条件, および蠕動運動のパターンなどの生理学的条件の違いによって, 攪拌効率がどのように変化するのか定量的に明らかにし, 正常な胃の攪拌機能がどのような力学場において達成されているのかを明らかにするとともに, 胃の蠕動運動障害を一因とする消化不良の病理に対して基礎的な知見を得ることを目的とする.

3. 研究の方法

(1) 計算手法

食塊をある流体とし, 胃内ガスから食塊が受ける粘性応力を無視すれば, 食塊攪拌は自由表面と胃壁の移動境界問題とできる. したがって食塊の運動は流体の保存則を用いて記述できる. ここでは計算手法として, 非圧縮性流体のための粒子法である Moving particle semi-implicit (MPS) 法 (Koshizuka and Oka, *Nucl. Sci. Eng.*, **123**, 421, 1996) を採用した.

(2) 蠕動運動モデル

胃形状として三次元の実形状データ (Spitzer et al., *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, **3**, 118, 1996) から抽出した 2 次元モデルを用いる. 蠕動運動は過去の研究で報告されているデータを基に与えるものとし, ガウス関数形状のものを一定の周期で胃体部から発生さ

せ幽門へと伝播させる. 蠕動運動による胃の収縮率は幽門に近づくにつれ次第に小さくなるものとする. 蠕動運動のパラメータは, 発生周期, 伝播速度, 収縮率とする.

(3) 食塊モデル

食塊は主に非圧縮性の Newton 流体とし, 粘度および量をパラメータとする. また発見的に固形成分を取り扱うための手法を開発し, 計算モデルに導入する.

(4) 評価パラメータ

これらのパラメータが胃内部の攪拌機能に与える影響を調べるため, Pal ら (*Proc. R. Soc. Lond. B*, **271**, 2587, 2004) によって導入された攪拌パラメータ, およびせん断速度を評価する.

4. 研究成果

(1) 計算モデルの構築

食塊は粘性が大きいため, 計算力学的には拡散数による時間刻み幅の制限が非常に厳しくなる. このため, 粘性項のみに陰解法を取り入れた部分段階時間積分法を適用し, 大きな時間刻みに対する解析を可能とした. さらに固形成分を取り扱うための手法を開発し, 多数の固体が相互作用するような問題においても安定に計算が実行できることが示された (Kondo et al., *Ann. Biomed. Eng.*, **37**, 702, 2009; Imai et al., *J. Biomech.*, **43**, 1386, 2010). このような問題を解くことのできる手法はあまり確立されておらず, 生理流体問題の多くについて応用可能な手法を構築することに成功した (Imai et al., *J. Biomech.*, **44**, 1553, 2011).

(2) 食塊量の影響

図 1 のように, 食塊の量を胃容量の約 20%, 60%, 80% の三種類に設定し, これが胃内部の流れ場にどのように影響するのか検討した. 食塊を密度 1000kg/m^3 , 粘度 1Pas の Newton 流体とし, 蠕動運動のパラメータは過去の文献より, 幅約 18mm , 発生周期 20 秒, 伝播速度 2.5mm/s と設定した. 図 1 のように, 食塊量 20% では食塊全体に広がる大きな循環流を形成した. 食塊量 60% では, 前庭部の中心から速い流れが発生し, 大湾との間に二つの循環流が形成される一方で, 胃体部上方ではほとんど流れが生じないことが明らかとなった. さらに食塊量の増えた 80% のケースでは, 流れ場は 60% のものとほとんど同じであり, 胃体部上方の流れの生じない領域が増えるのみであった. また, せん断速度は食塊量 20% では大湾に沿って比較的高い値となり, 60% や 80% ではこれに加えて, 前庭部において高いせん断速度となることがわかった.

図 2 は 1 周期後, 5 周期後の攪拌パラメー

タを示したものである。1 周期後の結果を比較すると、食塊量 20% に比べて食塊量 60% および 80% では比較的高い攪拌パラメータとなっている。ただし図 1 で示した循環流の外側（胃体部上方）に存在する食塊はほとんど攪拌されない。5 周期後では食塊量 20% の場合には全体的に攪拌パラメータが高くなるが、食塊量 80% の場合には、依然として胃体部上方の攪拌パラメータが低いことが明らかとなった。

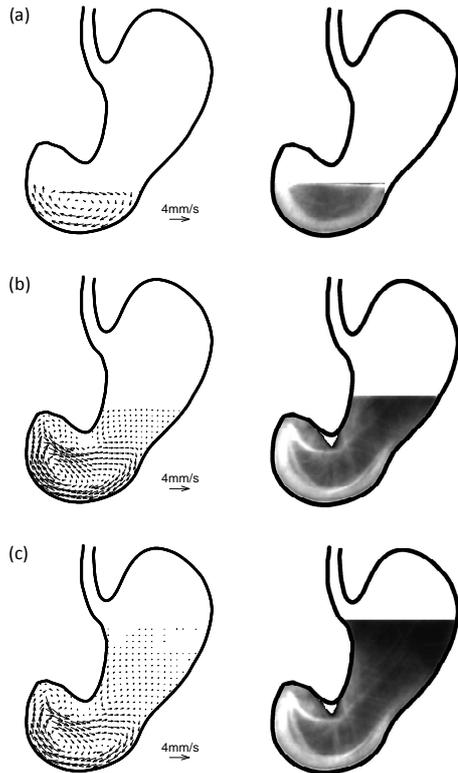


図 1. 速度ベクトルおよびせん断速度分布。(a)食塊量 20%, (b)60%, (c) 80%.

(3) 胃内部の流れと攪拌・消化機能

これらの結果をまとめると、蠕動運動の収縮波が前庭部から幽門へと伝播するとき、幽門付近の食塊は前庭部に押し戻される。前庭部中心からの流れは、蠕動が幽門に近づくにつれ、その速度は上昇する。また幽門付近の食塊はこの噴流によって高いせん断応力を受ける。したがって食塊の機械的消化は、食塊中の粒子が幽門付近に輸送されたときに生じているものと考えられる。一方、食塊量が少ない場合には、小湾部の収縮波が食塊運動に影響しないため、循環流のみが生じる。このため高いせん断応力は発生しない。これは胃の容積に比して少ない食塊量の場合には、機械的に消化されにくいことを示唆している。食塊の攪拌現象はこのような流動場によって生じる。せん断速度は見方を変えれば瞬間的な攪拌を記述するものであり、したがって食塊量がある程度多い場合には、食塊の

攪拌は前庭部にて促進される。大湾における平均速度は噴流のそれと同程度であり、大湾部に沿った領域に位置する食塊から順に前庭部に輸送される。結果として、胃体部下方の食塊は時間が経つにつれ、ほぼ均一に攪拌される。対して胃体部上方と下方では循環流による明確な境界があり、上方の食塊は流速が非常に小さいため、例えば食塊量 80% の自由表面付近の食塊は、攪拌の生じる領域に到達するのに長い時間を要する。これは密度の異なる脂肪などの成分を考える場合に重要な現象であるものと考えられる。

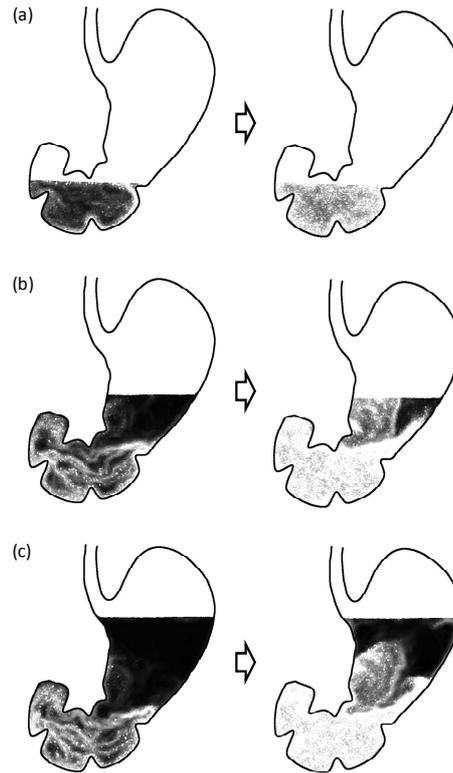


図 2. 攪拌パラメータ。(a)食塊量 20%, (b)60%, (c) 80%.左は 1 周期後、右は 5 周期後。

(4) 食塊粘度の影響

次に食塊の粘度を変化させ同様に解析を行った。既に示したように、胃内部の特徴的な流れは、蠕動が幽門に達する際に幽門付近の食物が噴門方向へと押し出される噴流のような流れであり、これにより幽門前庭部から胃体部下方に循環流が生じ、この領域で攪拌が生じる。したがってこの噴流の慣性が重要であるが、食塊の粘度が 100Pas 程度以上になると、レイノルズ数が 1 より十分小さくなり、この噴流の慣性の影響を受けないため、攪拌速度、攪拌される領域ともに著しく減少することを明らかにした。

(5) 蠕動運動パターンの影響

またこれら全てのケースに対して、蠕動運

動パターンを変化させた解析を行った。基本的な流れ場は蠕動運動のパラメータ依存しないことがわかった。蠕動のパラメータのうち胃の狭窄率は噴流の速度を決定する主要因であるため、攪拌効率に大きく影響していることが明らかとなった。

(6) 展望と今後の課題

さらにこれまでのモデルを拡張し、医用画像ベースの任意の胃形状データを用いて計算するための基礎を構築した。しかしながら、粒子法は従来の格子法に比べると粒子を多く必要とし、また計算時間も長くなることから、Adaptive Mesh Refinement (AMR) 法のような可変解像度の手法 (Miki et al., *Int. J. Numer. Meth. Biomed. Eng.*, **27**, 424, 2011) の統合や、並列計算の必要性が示唆された。ここでは次世代の計算環境として注目されている GPU 計算に着目し、格子ボルツマン法に基づく高速生体内流体計算コードを構築した (Miki et al., *Comput. Meth. Biomech. Biomed. Eng.*, in press)。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1. Miki, T., Wang, X., Aoki, T., Imai, Y., Ishikawa, T., Takase, K., Yamaguchi, T., Patient-specific modelling of pulmonary airflow using GPU cluster for the application in medical practice, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 査読有. in press, (2011)
2. Miki, T., Imai, Y., Ishikawa, T., Wada, S., Aoki, T., Yamaguchi, T., A fourth-order Cartesian local mesh refinement method for the computational fluid dynamics of physiological flow in multi-generation branched vessels, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, Vol.27, pp.424-435 (2011), 査読有.
3. Imai, Y., Nakaaki, K., Kondo, H., Ishikawa, T., Lim, C.T., and Yamaguchi, T., Margination of red blood cells infected by *Plasmodium falciparum* in a microvessel, *Journal of Biomechanics*, Vol. 44, pp.1553-1558 (2011), 査読有.
4. Imai, Y., Kondo, H., Ishikawa, T., Lim, C.T., and Yamaguchi, T., Modeling of hemodynamics arising from malaria infection, *Journal of Biomechanics*, Vol.43, pp.1386-1393 (2010), 査読有.
5. Yamaguchi, T., Ishikawa, T., Imai, Y., Matsuki, N., Xenos, M., Dengand, Y.,

Bluestein, D., Particle-based methods for multiscale modeling of blood flow in the circulation and in devices: challenges and future directions, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.38, pp.1225-1235 (2010), 査読有.

6. Imai, Y., Sato, K., Ishikawa, T., Comerford, A., David, T., and Yamaguchi, T., ATP transport in saccular cerebral aneurysms at arterial bends, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol.38, pp.927-934 (2010), 査読有.
7. Kondo, H., Imai, Y., Ishikawa, T., Lim, C.T., and Yamaguchi, T., Hemodynamic analysis of microcirculation in malaria infection, *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 37, pp.702-709 (2009), 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

1. 今井陽介, 小林生馬, 石田駿一, 石川拓司, 山口隆美, 胃内容物攪拌の数値流体力学モデルの開発, 日本機械学会第 23 回バイオエンジニアリング講演会, 2011 年 1 月 9 日, 熊本市.
2. 小林生馬, 今井陽介, 石田駿一, 石川拓司, 山口隆美, 胃内容物流れの数値シミュレーション: 内容物量の影響, 日本機械学会第 21 回バイオフロンティア講演会, 2010 年 11 月 12 日, 金沢市.
3. Kobayashi, I., Imai, Y., Ishida, S., Ishikawa, and Yamaguchi, T., A numerical study on fluid motion in the stomach, 6th World Congress on Biomechanics, 2010 年 8 月 6 日, Singapore. シンガポール
4. 小林生馬, 今井陽介, 石田駿一, 石川拓司, 山口隆美, 粒子法を用いた胃内容物攪拌の数値シミュレーション, 日本機械学会東北支部第 45 期講演会, 2010 年 3 月 12 日, 仙台市.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 陽介 (IMAI YOHOSUKE)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 60431524

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 研究連携者

()

研究者番号: