

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26600151

研究課題名(和文) 計算力学による機能性ディスペプシアのメカニズムの解明

研究課題名(英文) A numerical study of functional dyspepsia

研究代表者

今井 陽介 (Imai, Yohsuke)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・特任准教授

研究者番号：60431524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：胃壁の蠕動運動と胃内部の食物流動の関係を理解するため、胃内容物流動の計算力学モデルを開発した。計算力学モデルは、医用画像データから再構築した実形状モデル、蠕動運動のパラメトリックモデル、多相流モデルからなる。胃内部では時間平均的に幽門前庭部を中心とした再循環流れが生じており、蠕動の伝播速度が高くなると再循環流れが強くなるため食物はより効率よく攪拌される。また蠕動の発生周期が短くなると、一つの蠕動によって生じる攪拌の効率が低下することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To understand the relationship between the peristaltic contraction and the flow in the stomach, we have developed a numerical model of gastric flow. This model is based on a multi-phase flow modeling, an anatomically realistic geometry of the stomach, and a parametric model of peristaltic contractions. Antral recirculation is generated in the stomach. Our result shows that when peristaltic wave velocity increases, the strength of antral recirculation increases, resulting in enhancement of gastric mixing. We also show that mixing strength per one contraction becomes lower when the initiation period of peristaltic contractions is shorter.

研究分野：計算バイオメカニクス

キーワード：胃 食物流動 数値流体力学 消化器系 バイオメカニクス 攪拌 計算力学 蠕動運動

1. 研究開始当初の背景

潰瘍や癌がないにも関わらず胃痛や胸やけを訴える疾患を「機能性ディスぺプシア」と呼び、消化管運動障害がその原因と考えられている。しかしながら胃内部の食物流動を可視化する術はなく、この運動障害が胃の貯留・攪拌・排出機能にどのように影響するのか不明である。我々は世界で初めて医用画像に基づく胃の食物流動の計算力学モデルを開発し、液体食物の基本的な攪拌過程を明らかにした (Imai et al, *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol*, 2013). 本研究課題はこの計算力学モデルを応用し、機能性ディスぺプシアのメカニズムの解明に挑戦するものである。

2. 研究の目的

本研究では、医用画像に基づく胃の食物流動の計算力学モデルを用いて、消化管運動と食物流動の力学的関係を明らかにし、機能性ディスぺプシアのメカニズムを解明する。特に、食物の流動異常・胃壁の応力異常を引き起こす消化管運動のパラメータ空間を特定することを目的とする。

3. 研究の方法

計算力学モデルは、医用画像データから再構築した実形状モデル、蠕動運動のパラメトリックモデル、固体-多相流連成問題に対する離散化モデルからなり、Graphics Processing Unit (GPU) 計算に完全実装されている。蠕動運動の基本パラメータ (振幅や伝播速度など) は医用画像解析によって健全な範囲がある程度明らかにされている。この範囲を中心とした大規模パラメトリック計算を実施し、蠕動運動のパラメータと胃内部の流動の関係を明らかにする。

なお、研究開始当初は粒子法に基づく計算手法を用いていたが、胃の食物流動は高粘性の流れであり、この計算手法では数値振動が生じるため、微小な攪拌の評価が困難であった。有限体積法、Volume-of-Fluid (VOF)法、Immersed boundary 法に基づく計算力学モデルを新たに開発し、これを GPU 計算に実装することで、高精度かつ高速な食物流動計算を可能にした。

4. 研究成果

(1) 胃内部の速度場

図1に、本研究で開発した胃内容物流動の計算力学モデルと計算結果の例を示す。胃内容物の流動は蠕動運動と呼ばれる収縮波によって駆動される。攪拌の過程では1分間に約3回、胃体部中央に蠕動が発生し、幽門へと伝播する。伝播速度は約2.5 mm/s であり、およそ1分で幽門に到達する。収縮率は次第に増加し、幽門近傍で最も高い収縮率となる。図1bに示すように、蠕動によって収縮した胃の内腔では幽門前庭部から胃体部へと向かう逆流が生じる。収縮率が幽門に近づくにつれて増加するため、幽門近傍にて最大速度

が生じる。蠕動の後方ではレイノルズ数に応じた剥離が生じ、食物の攪拌を促進する。

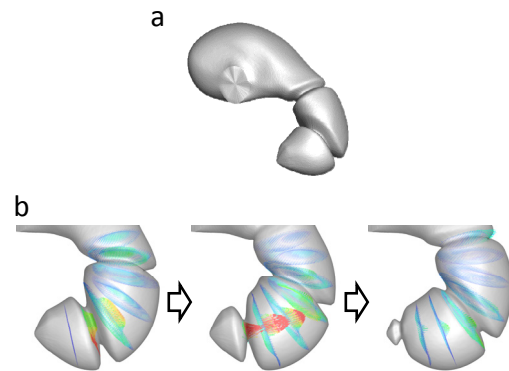


図1. 胃内容物流動の計算力学モデル. (a) 医用画像データから構築した実形状モデル. (b) 胃内部の流体の速度ベクトル. 蠕動運動の収縮波が幽門に近づいたときに高い流速の逆流が生じる.

(2) Antral recirculation

過去の研究 (Imai et al, *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol*, 2013) において我々は時間平均速度を解析することにより、幽門前庭部を中心とした時間平均的な再循環流れ (antral recirculation) が生じていることを明らかにした。また、胃体部の内容物はこの再循環によって幽門前庭部へと絶えず輸送され、幽門近傍にて生じる逆流によって攪拌されること、その結果として、再循環の内部に存在する内容物は等しく攪拌されることを明らかにした。

図2は時間平均速度場の例であり、胃体部の中央部に強い逆流が生じ、大彎側を中心とした胃壁近傍に幽門へと向かう順流が生じていることが確認できる。平均流速の大きさはレイノルズ数によって大きく異なり、剥離が生じない低レイノルズ数では平均流速は小さくなっている。

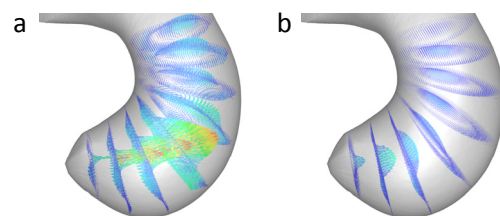


図2. 時間平均速度場. (a) $Re = 12.5$. (b) $Re = 0.125$. 胃体部中央部に逆流が生じ、大彎側を中心とした胃壁近傍に幽門へと向かう順流が生じる。この再循環流れに存在する食物はおおよそ等しく攪拌される。

発生周期 T の蠕動運動によって空間内のあ

る微小領域に与えられたひずみテンソル $\boldsymbol{\varepsilon}$ は変形速度テンソル \mathbf{E} を積分して次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \int_T \mathbf{E} dt, \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{u} \otimes \nabla + \nabla \otimes \mathbf{u}), \quad (2)$$

ここで \mathbf{u} は流速ベクトルである。胃内部の3つの断面(図3)におけるひずみテンソルの第二不変量を図4,5に示す。

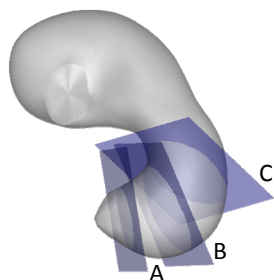


図3. この図以降、ひずみテンソルの第二不変量の空間分布を断面A, B, Cについて示す。

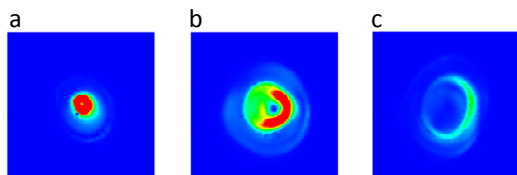


図4. ひずみ速度テンソルの第二不変量(Re = 12.5). (a) 断面A, (b) 断面B, (c) 断面C.

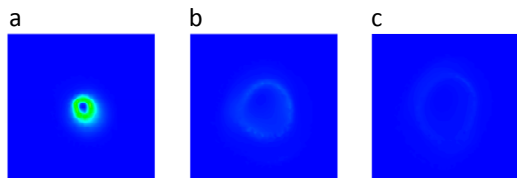


図5. ひずみ速度テンソルの第二不変量(Re = 0.125). (a) 断面A, (b) 断面B, (c) 断面C.

この空間平均を算出し、レイノルズ数を横軸にしてプロットしたものが図6である。この量は蠕動運動が一周の間に与える平均ひずみの大きさに相当しており、また時間平均速度場の平均ひずみ速度に比例する。一様流や振動流では0となるこの量を攪拌強度(Mixing strength)として攪拌機能を評価する。図6に示すように、慣性の影響が小さい低レイノルズ数の領域(Re < 1)において攪拌強

度ほとんど変化せず、一定値に収束していく。一方 Re > 1 では、慣性の影響によって攪拌強度はおおよそレイノルズ数に比例して増加する。ここでレイノルズ数(Re = UD/v)は流体の動粘度 v, 蠕動の伝播速度 U, 胃の代表径 D で定義している。すなわち、何らかの症状で蠕動の伝播速度が 1/X 倍になることは粘度が X 倍の内容物を攪拌することに等しい。また水分を摂取すればより高い攪拌強度が得られることを示唆している。

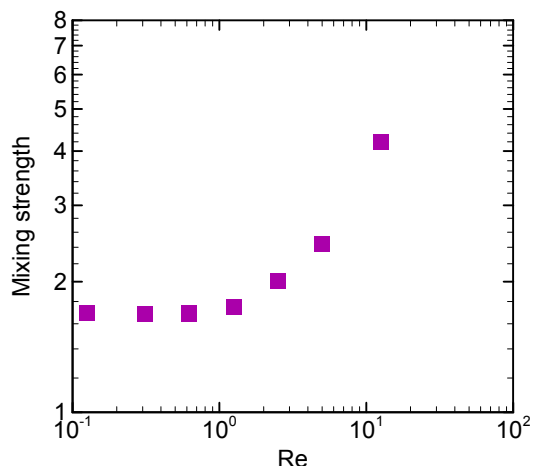


図6. レイノルズ数と攪拌強度の関係。1 < Re < 20 ではレイノルズ数にほぼ比例して増加するが、Re < 1 ではほぼ一定値となる。

(3) 蠕動の発生周期の影響

項目(2)では UT/D = 1 として解析した。これは蠕動の無次元発生周期を表しており、胃の代表直径を D = 50 mm とし、蠕動の伝播速度を U = 2.5 mm/s, 発生周期を T = 20 s として設定したものである。これらの値は過去に MRI などでも得られた健常者のものである(例えば Pal et al, Proc Roy Soc Lond B, 2004)。図7のように、UT/D = 0.5 と UT/D = 2 のケースを合わせて計算し、発生周期が胃内部の流動および攪拌強度に与える影響を検討した。

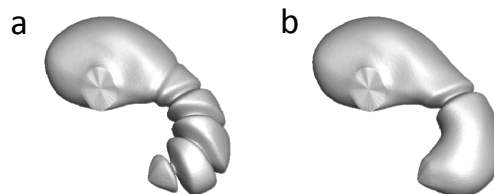


図7. 発生周期の異なる形状モデル。(a) UT/D = 0.5, (b) UT/D = 2.

図8はこれらの時間平均速度場を示したものであり、図2aと同じレイノルズ数の結果で

ある。発生周期が短いケースでは多くの蠕動が同時に伝播するため、時間平均速度は大きくなり、一定時間の攪拌量も大きくなる。

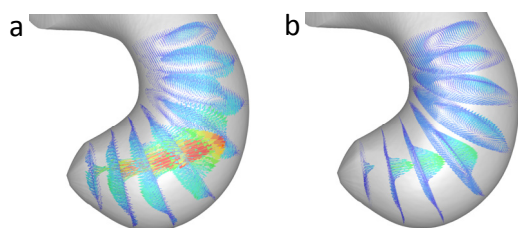


図 9. 時間平均速度場. (a) $UT/D = 0.5$, (b) $UT/D = 2$.

発生周期と攪拌強度の関係を図 10 に示す。ここで攪拌強度は一周期（発生周期）の平均ひずみであり、それぞれの蠕動によって生じるひずみ量である。レイノルズ数に対する応答はほぼ同じであるが、発生周期が短くなるほど攪拌強度が低下することがわかる。発生周期が短いケースでは同時に複数の蠕動が存在し、それぞれの蠕動によって駆動される流れが干渉する。これによって一周期あたりの攪拌強度は低下するものと考えられる。

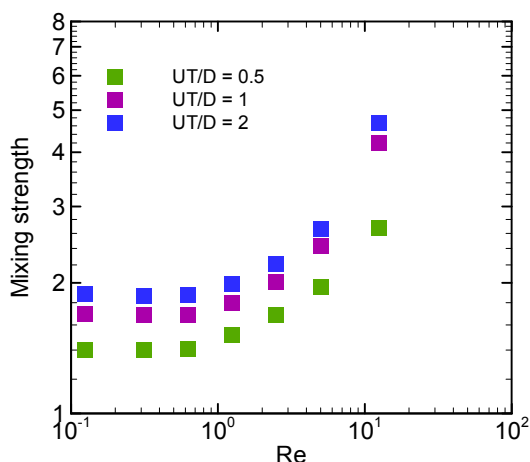


図 10. 蠕動の発生周期と攪拌強度の関係。発生周期が短くなると、一定時間の攪拌量は増加するが、複数の蠕動が干渉することにより、一周期あたり（蠕動一つあたり）の攪拌強度は低下する。

(4) 今後の展開

ここでは液体食物の攪拌過程について報告したが、固体成分の挙動や排出過程についても解析を進めている。また、オークランド大学（ニュージーランド）の研究者と共同で電気生理学と計算力学の統合的解析を実施している。健常者と機能性ディスペプシア患

者の蠕動の違いを明らかにし、これが胃の貯留・攪拌・排出機能に与える影響を定量的に評価する予定である。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

① 宮川泰明, 今井陽介, 石田駿一, 山口隆美, 石川拓司, 蠕動運動と胃内容物攪拌の関係, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 2016 年 1 月 9 日, 東京工業大学 (東京) .

② T. Miyagawa, Y. Imai, S. Ishida, T. Yamaguchi, and T. Ishikawa, Clarification of relationship between gastric mixing and movement of wall, 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics, 2015 年 9 月 17 日, Hokkaido University (Sapporo).

③ 宮川泰明, 今井陽介, 石田駿一, 山口隆美, 石川拓司, 胃内容物攪拌の数値計算: 胃壁の運動の影響, 第 20 回計算工学講演会, 2015 年 6 月 8 日, つくば国際会議場 (つくば市).

④ 宮川泰明, 今井陽介, 石田駿一, 山口隆美, 石川拓司, 胃内のせん断応力の数値解析, 日本機械学会第 27 回バイオエンジニアリング講演会, 2015 年 1 月 9 日, 朱鷺メッセ (新潟市).

⑤ Y. Imai, I. Kobayashi, T. Miyagawa, S. Ishida, T. Ishikawa, and T. Yamaguchi, Modeling of flow in the stomach, 4th Japan-Switzerland Workshop on Biomechanics, 2014 年 9 月 2 日, Shima Kanko Hotel (Mie).

⑥ T. Miyagawa, Y. Imai, T. Yamaguchi, and T. Ishikawa, A numerical method for simulating gastric flow, 11th World Congress on Computational Mechanics, 2014 年 7 月 25 日, Barcelona (Spain).

[その他]

ホームページ等

<http://www.pfsl.mech.tohoku.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 陽介 (IMAI, Yohsuke)

東北大学・大学院工学研究科・特任准教授
研究者番号: 60431524

(2) 研究協力者

宮川 泰明 (MIYAGAWA, Taimei)

東北大学・大学院医工学研究科・
博士後期課程学生