

PRESS RELEASE (2025/08/20)

食道の動き、“数式”でわかる！？

—不思議な動きの仕組みに迫るシンプルなモデルを開発—

ポイント

- ① 嚥下障害の原因となる食道の動きの異常は原因がよくわかっていない
- ② 食道の動きを再現する数理モデルの開発に成功
- ③ 食道の病気の原因説明や治療法開発への貢献に期待

概要

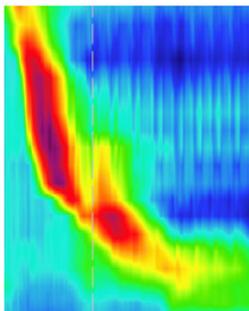
ものを食べるときに、飲み込みにくいと感じる経験をしたことがある人は多いと思います。このような嚥下障害は食道の動きの異常が原因で、誤嚥性肺炎などのさまざまな病気の元になるため医学的にも重要です。近年、このような食道の動きの計測手法が発達して、食道特有の不思議な挙動が数多く明らかになってきましたが、これらがどのように生じるかは理解されていませんでした。

本研究では、高精度の蠕動運動(※1)の計測手法と数理モデル(※2)とを組み合わせ、食道に特有の蠕動運動のメカニズムを解明する枠組みを開発することに成功しました。

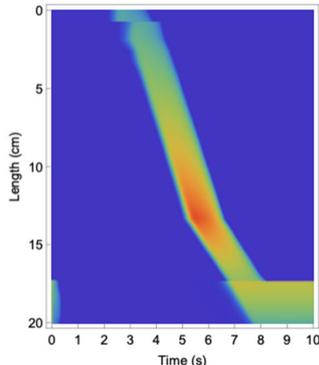
九州大学大学院医学研究院系統解剖学分野の三浦岳教授と病態制御内科学分野の小川佳宏教授、伊原栄吉准教授、城西大学理学部の栄伸一郎教授、北海道大学電子科学研究所の石井宙志助教らの研究グループは、食道の動きをシンプルな数式で再現する新しい数理モデルを開発しました。このモデルは、「脳からの指令」→「腸の中の神経ネットワーク」→「筋肉の動き」という流れを再現したもので、特に、下部食道括約筋 (LES, ※3) と呼ばれる部分では“オン・オフ”の切り替えスイッチのような仕組みを取り入れています。実際にこのモデルで、正常な食道がどのように食べ物を運ぶかを再現できたほか、シカゴ分類(※4)と呼ばれる国際的な診断基準にある、さまざまな病的な食道の動きも、パラメーターを調整することで再現できました。

この研究は、食道の病気の原因説明や、新しい治療法の開発にもつながる可能性があります。本研究成果は英国の雑誌「Royal Society Open Science」に2025年8月20日(水)午前8時5分(日本時間)に掲載されました。

計測



数理モデル



研究者からひとこと：

私たちは毎日、食事の時に食道にお世話になるのですが、その際、古典的な蠕動運動とは異なる不思議な動きをすることがわかってきました。この挙動を理解することそのものが科学的に興味深いと同時に、嚥下障害に関わる疾患の予防にも関係し、医学的にも重要です。この現象をできるだけシンプルな数式で表すことで、臨床医学と数学の橋渡しができました。(三浦岳)

【研究の背景と経緯】

食べ物を口から胃へとスムーズに送るには、食道の“蠕動運動”という動きが必要です。最近では、高解像度内圧検査（HRM）（※5）などの観察技術の進歩によって、この食道の動きが思った以上に複雑でユニークであることがわかってきました。例えば、下部食道括約筋（LES）が「オン・オフ」のように切り替わる仕組みや、何度も連続して飲み込んだときには最後の動きだけが伝わる“嚥下抑制”（※6）、動きが必ず一方向に伝わる性質、さらには“腸の法則”（※7）と呼ばれる上下で異なる反応など、さまざまな現象が確認されています。これらは、胸の痛みや飲み込みづらさ、誤嚥による肺炎といった症状と関わっていて、医療現場でも重要です。ところが、こうした多様な動きをまとめて説明できる理論的なモデルは、まだありませんでした。これは、人間特有の動きであるため、実験的に調べるのが難しいためです。

【研究の内容と成果】

本研究では、人間の食道における正常な蠕動運動の特徴を再現できる数理モデルを構築しました。具体的には、嚥下前に下部食道括約筋（LES）が収縮したままで、他の部分が弛緩している定常状態、嚥下による収縮パルスの一方向伝播、食道下部

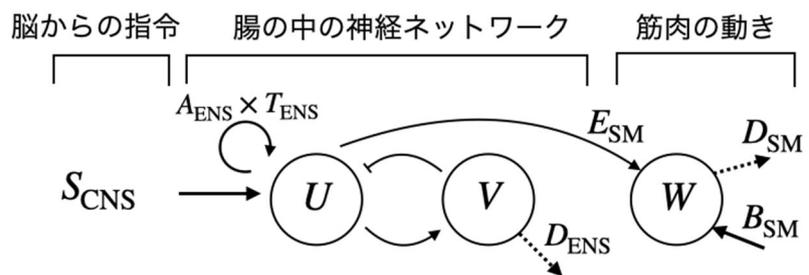


図1：数理モデルの構成

での拡張（いわゆる「腸の法則」）、食道中部の刺激による前方伝播のみの現象（単方向性）、さらに連続嚥下時に最後のパルスのみが伝播するという現象まで、複数の生理的運動を再現することに成功しました。また、モデルの数理解析によって、LES領域におけるトグルスイッチ型（双安定的）ダイナミクス（※8）や、興奮伝播速度が中枢・末梢神経系のパラメータによって制御されることを理論的に示しました。これにより、蠕動運動の速度や方向性の異常がどのようなパラメータ変化で生じるかを予測する枠組みが得られました。

さらに、パラメータの組み合わせを変えることで、シカゴ分類に基づく多様な食道運動異常（例えば、食道胃接合部通過障害（※9）、アカラシア（※10）の各タイプ、遠位食道痙攣（※11）、ジャックハンマー食道（※12）、無蠕動など）を再現することにも成功しました。それぞれの異常は、神経信号の強さ、閾値、筋収縮特性、伝導経路の長さや偏りなど、具体的な生理的要因の変化として数理的に表現されました。特に、異常収縮や伝播の欠如、過剰な筋収縮などを引き起こす条件を明示することで、これらの疾患の発症メカニズムに対する理解を深めるとともに、将来的には診断や治療への応用も期待されます。

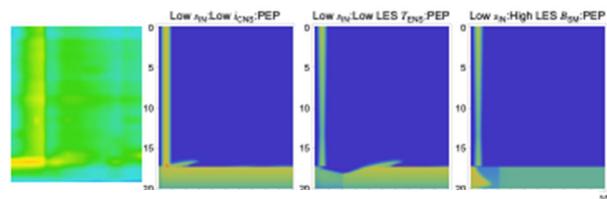


図2：異常な蠕動パターンの再現

【今後の展開】

今回の数理モデルは、ヒトの食道蠕動運動の仕組みを理論的に解明するための第一歩であり、今後さまざまな応用が期待されます。まず、異常な食道運動がどのように起こるのか、その原因をパラメータの組み合わせから推測できるため、疾患の発症メカニズムの理解に役立つ可能性があります。

さらに、将来的には、より複雑な「ジャックハンマー食道」などのねじれた形状を持つ状態を再現するために、モデルを二次元化することも計画しています。神経の種類ごとに別々の動きを取り入れ

ることで、薬の効果をシミュレーションするような応用も期待できます。

また、発生段階における食道運動の変化を理論的に捉えることで、胎児期から成人に至るまでの機能発達の研究にもつながると考えています。今後は、適切な実験系の整備とともに、ヒト特有の運動パターンに対する検証手法の確立が求められます。

【用語解説】

(※1) 蠕動運動（ぜんどううんどう）

説明：管状の臓器において、筋肉の収縮と弛緩が波のように連続して進むことによって、内容物を一定方向に送り出す運動。食道では、嚥下に伴いこの運動で食塊を胃へ運ぶ。

(※2) 数理モデル

説明：生理的・物理的現象を数式や構造で表現した理論モデル。現象の再現や予測、介入の効果検証などに活用される。

(※3) 下部食道括約筋（LES: Lower Esophageal Sphincter）

説明：食道と胃の境界に位置する輪状筋で、通常は収縮して胃酸の逆流を防ぎ、嚥下時に一時的に弛緩して食物を通す。

(※4) シカゴ分類（Chicago Classification）

説明：高解像度内圧検査（HRM）に基づき、食道運動の異常を定量的に評価・分類する国際的な診断指針。アカラシアなどの定義もこの分類に基づく。

(※5) 高解像度内圧検査（HRM: High-Resolution Manometry）

説明：食道内の圧力分布を高い空間分解能で測定する装置。食道運動異常の診断に用いられ、従来より詳細な圧力マッピングが可能。

(※6) 嚥下抑制（deglutitive inhibition）

説明：嚥下によって一時的に食道筋の自発的な収縮が抑えられる神経制御現象。食塊の通過をスムーズにするために重要な役割を果たす。

(※7) 腸の法則（law of the intestine）

説明：消化管における刺激に対して、口側は収縮、肛門側は弛緩するという反射的な運動の法則。食道でも同様の反応が観察される。

(※8) トグルスイッチ型（双安定的）ダイナミクス

説明：2つの安定状態（例：収縮と弛緩）を持ち、ある刺激によって一方から他方に切り替わる非線形システムの特徴。バイスタブルとも呼ばれる。

(※9) 食道胃接合部通過障害

説明：食道胃接合部（EGJ: Esophagogastric Junction）が適切に開かず、食塊の胃への通過が妨げられる病態。食道運動機能障害の1つ。

(※10) アカラシア

説明：食道蠕動が消失し、LES が適切に弛緩しないことで、食塊が胃へ送れなくなる疾患。つかえ感や胸痛を伴う。食道運動機能障害の1つ。

(※11) 遠位食道痙攣 (DES: Distal Esophageal Spasm)

説明：食道下部が通常より早く収縮する状態。嚥下困難や胸部不快感を引き起こす。食道運動機能障害の1つ。

(※12) ジャックハンマー食道 (Jackhammer esophagus)

説明：非常に強く持続的な収縮が食道に生じる疾患。HRM で診断され、蠕動が過剰になることが特徴。食道運動機能障害の1つ。

【謝辞】

本研究は JSPS 科研費 (JP20K08334, JP22K19530, JP23K07440)、JST CREST (JPMJCR14D3, JPMJCR14W4)、AMED (JP21lk0201144)の助成を受けたものです。

【論文情報】

掲載誌：Royal Society Open Science

タイトル：A mathematical model of human oesophageal motility function

著者名：Takashi Miura, Hiroshi Ishii, Yoshitaka Hata, Hisako Takigawa-Imamura, Kei Sugihara, Shin-ichiro Ei, Xiaopeng Bai, Eikichi Ihara, Yoshihiro Ogawa

D O I : 10.1098/rsos.250491

【お問合せ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院医学研究院 教授 三浦 岳 (ミウラ タカシ)

TEL : 092-642-6048 FAX : 092-642-6923

Mail : miura.takashi.869@m.kyushu-u.ac.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

TEL : 092-802-2130 FAX : 092-802-2139

Mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

城西大学 学長室 広報課

TEL : 049-271-7543 FAX : 049-271-8028

MAIL : koho@josai.ac.jp

北海道大学 社会共創部 広報課

TEL : 011-706-2610 FAX : 011-706-2092

Mail : jp-press@general.hokudai.ac.jp