

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 30 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700739

研究課題名（和文） 食片の粒度解析及び数理モデルを用いた咀嚼・嚥下過程の解明

研究課題名（英文） Elucidation of mastication and swallowing process based on experimental and numerical studies of fragment-size distribution

研究代表者

小林 奈央樹 (Naoki Kobayashi)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：30453674

研究成果の概要（和文）：

食品の物性や調理法などが咀嚼・嚥下過程にどのように影響を与えるのか、摂食過程の解析を行った。

まず粒度解析の方法を用いて、ゲル状食品の典型的な例である魚肉ソーセージについて解析を行った。その結果、魚肉ソーセージは脆性的物性を持つ食品とは異なる破壊様式を持つことが確認され、その咀嚼過程を表現する数理モデルを提案した。

さらに本研究では典型的に摂食困難者に提供される調理法の一つとして知られる刻み食に着目して、食塊形成における刻み方及び添加物の影響を粒度解析および力学測定等で解析を行った。

これらの研究成果は論文等にまとめられ社会に公表されている。

研究成果の概要（英文）：

This study investigates experimentally and numerically how mastication and swallowing processes are affected by food rheology, cookery and so on.

First, fragment-size distributions have been studied experimentally in masticated fish sausage. The result indicates that the fragmentation pattern by human mastication for fish sausage is different from the fragmentation pattern for wet crisp food, and we propose a mathematical model for the ingestion process by human.

Second, to investigate the mastication and swallowing efforts for finely cut foods, food bolus generated from masticated foods were analyzed by fragment-size, rheological and physiological tests.

The results of this study were published in academic journals

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,900,000	570,000	2,470,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：生活科学・食生活学

キーワード：食品物理学，食品テクスチャー，咀嚼と嚥下，確率モデル

1. 研究開始当初の背景

咀嚼とは、食物を口腔内へ取り込んでから嚥下されるまでに口腔内で起こるすべての過程と定義され、単純に歯で食物を噛み砕くことだけではなく、舌や頬、顔面の筋肉や唾液の働きによりその過程が形成されている。固体状食品の咀嚼過程は、Hiimae のモデルによると、捕食・口腔の前方から奥歯への移送・嚥下可能な形態(食塊)の形成・嚥下、という段階を経る。これらの咀嚼過程を決めているのは、食品の物性・口腔内の知覚および形状・咀嚼された食片の粒子特性(サイズや形状)が挙げられる。口腔内へ取り込む食品の物性については、食品レオロジーという一大分野が形成されており活発に研究が行われているが、口腔内環境や咀嚼食片の特性の研究はその難しさからそれほど研究が行われていない。難しさとは何か。具体的に述べるならば、咀嚼される食品が時間や過程を経るごとに刻々とその状態を変化させている現象、またその可視化にその難しさがあると考えられる。咀嚼や嚥下過程の可視化は、videofluorography というレントゲンビデオを用いた測定や超音波を用いた測定が知られている。これらの方法は液体や半固体状物質の解析などに非常に有用であるが、たとえば粒度解析などにはあまり向かない。直接観察が困難な現象に対して有効な方法の一つとして、数理モデルによる現象論的アプローチが知られており、本研究でもそのような視点から咀嚼現象を解析したい。数理モデルによる咀嚼・嚥下現象の研究は、1997 年のPrinz-Lucas による研究が知られている。このモデルは食品の破壊過程と表面張力や唾液の粘性力を考慮した食塊形成過程の二つのステージに分けられ、ピーナッツやニンジンなど脆性固体として近似できる食品については、実験との対応など良い結果が得られている。しかしながら、たとえばゲルに近い物質などについては考慮されておらず、また食片間の表面張力に影響を与えるであろう食片形状などについても同様に考慮されていない。したがって脆性的な固体食品だけでなく、より一般的な物性を示す食品へのモデルの改良を行うことが重要な課題である。ヒトの咀嚼を物理的に解釈すれば、第ゼロ近似として、食品と歯との繰り返し衝突による連続的な破壊現象とみなすことができる。提案者らは、咀嚼を非線形・非平衡系の現象とみなし、破壊された後の食片の粒度分布から、

咀嚼による破壊現象を解析した。この研究では、一口大の生ニンジンを試料として、若年被験者に指定回数咀嚼させた後に、口腔内から食片を回収し、食片の表面積サイズを画像解析した。咀嚼回数が増えると、食片の平均サイズは小さくなるが、咀嚼回数や個人に依らず、咀嚼された食片の表面積の累積サイズ分布は、9 割以上が対数正規分布にフィットすることが確認された。過去の研究では、食片サイズ分布はワイブル分布などいわゆる伸張型指数分布で表されるとされてきた。対数正規分布とワイブル分布ではそこに至るまでの破壊過程が異なるが、物理学的な解釈から考えると、対数正規分布による表現がより妥当だと考えられる。研究代表者は以上のような物理学的研究の咀嚼現象への有用性を明らかにしたことにより、第7 回日本食品工学会優秀発表賞を受賞した。複雑系の物理分野においても、研究代表者の研究は最近日本物理学会における破壊現象のシンポジウムや雑誌「科学」内の論文で紹介され、注目を集めている。咀嚼や嚥下では食片の形状も凝集性などに重要な影響を及ぼすと予想される。研究代表者は食片の大まかな形状を定量化するために、回転半径と各食片の表面積サイズを両対数プロットし、その傾向を調べた。その結果、咀嚼回数に応じた閾値より小さい領域で傾き 2 を示した。咀嚼によって得られる食片の形状はサイズに関係なくほぼ等方的であり、食片形状に関してフラクタル構造が存在することが示唆された。

2. 研究の目的

本研究は、ヒトの歯による咀嚼により生じた食物片の大きさ、および形状分布の解析から、咀嚼による破壊がどのような様式で起こるのか、さらに嚥下がどのような条件から誘発されるかを、食片の粒度解析および咀嚼・嚥下過程の数理モデルを用いて明らかにする研究である。食品の物性、量、被験者属性の違いによる影響が粒度分布にどのような影響を与えるのか解明するとともに、それらにより得られた知見を直接観察が困難な咀嚼・嚥下現象の数理モデルに取り入れて解析を行うことで、総合的な摂食過程のダイナミクスの解明を目指す。

3. 研究の方法

上で述べた咀嚼・嚥下過程の総合的な理解のために、

- (1) 物性の異なる食品試料での咀嚼実験、
- (2) 咀嚼・嚥下過程の数理モデルの数値的・理論的解析、

の2つの研究方法を軸に、平成22年度から平成23年度まで2年間の研究計画を以下に作成した。咀嚼・嚥下過程は未だ第一原理となる理論や方法論があるわけではないため、研究方法(1)、(2)によって得られた知見や過去の実験結果を踏まえて、それぞれをフィードバックさせながら、現象論形成を目指す。その現象論を多角的に検証することにより、咀嚼・嚥下過程の総合的な理解・基礎研究から応用研究への提案を最終的な目標とする。

研究計画のイメージ

研究終了後の波及効果

誤嚥や窒息事故を防ぐ食品開発への応用

咀嚼能力の指標の提案

個人差のない食品のデザイン

平成23年度

咀嚼・嚥下様式因子の抽出

平成22年度

咀嚼・嚥下過程の数理モデル

咀嚼中の食片特性の理解

- (1) 平成22年度:

1) 咀嚼中の食片特性の理解:

咀嚼実験と食片の解析若年被験者を募り、「研究の目的」で述べたような生ニンジンでの方法に準じて食品試料を一定回数咀嚼した後、口腔内から食片を回収する。その回収された食片をデータ解析用ワークステーションでのソフトウェアによる画像解析により、粒度分布や形状評価を実行する。食品試料については、様々な物性の食品を選定することで、食品物性と食片特性との関係を考察できるように配慮する。

2) 咀嚼・嚥下過程の数理モデル

破壊過程をより精密に記述し、食品の凝集性などに大きく影響を与えると推測される食品形状などの情報を取り込むことにより、モデルをより現実に即したモデルへ改良する。次にこの構築されたモデルに対して食品物性やヒトの属性など様々な要因によりパラメータを適当に設定し、ワークステーションを用いたモンテカルロシミュレーションを行う。数値シミュレーションにより得られた

結果とこれまでの研究成果および1)の実験により得られた成果を比較することで咀嚼・嚥下過程のダイナミクスの理解を目指す。

- (2) 平成23年度:

1) 咀嚼・嚥下様式因子の抽出:

平成22年度に行われた実験および数理モデルによる結果から、咀嚼および嚥下様式を変える因子として、食品の持っている属性、食べるヒトの持つ属性について考察することで、その候補を見出す。その結果について総合することで、本研究の総括を行う。

4. 研究成果

以下に助成期間に得られた研究成果を述べる。これらの成果の大部分は論文誌への出版及び学会発表によって社会に還元された。特に、本研究期間を通じて得られた数理モデルなど様々な知見について、日本物理学会誌及びJournal of the Physical Society of Japanにおいて非専門家向けの招待記事を執筆した。このような招待論文を通じて、これまであまり知られてこなかった咀嚼・嚥下過程等、複雑系への数理的アプローチを広く周知出来たと考えている。

- (1) 食品物性の咀嚼・嚥下過程への影響及び弾性的食品の数理モデルによるダイナミクスの理解:

研究代表者らの先行研究で用いられた粒度解析の方法を使って、ゲル状食品の典型的な例である魚肉ソーセージについて解析を行った。その結果、魚肉ソーセージは生ニンジンなど脆性的物性を持つ食品とは異なる破壊様式を持つことが食片サイズ分布を評価することにより確認された。具体的には、生ニンジンの食片サイズ分布が全体に渡って対数正規分布で評価できたのに対し、魚肉ソーセージの場合、大きい食片群は指数分布で、それ以外は対数正規分布で評価された。これは食品物性により咀嚼過程が影響を受けたことを示唆している。また食片サイズによってサイズ減少のダイナミクスが異なることが初めて定量的に確認された。

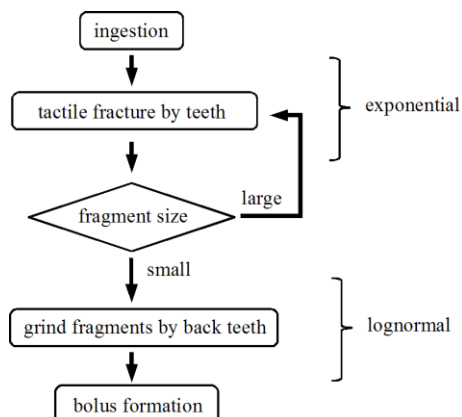
- (2) 調理法による咀嚼・嚥下過程への影響

現在日本は未だ人類が体験したことがない高齢社会を迎えている。そのような社会において、安全においしく食を楽しむという誰もが思うことを研究することには大きなニーズがあると考えられる。高齢により、また病気等で咀嚼・嚥下機能が低下している人でも安全でかつ楽しく食事をするためには、食

物の大きさ、量、物性を考慮する必要がある。医療や介護の現場では、咀嚼困難者および嚥下困難者に応じた食事が提供され、誤嚥を防止するため、トロミ調整剤の添加、ゼラチンや寒天といったゲル化剤の使用、刻み食にするといった工夫が行われている。しかし、このような食形態は、食物がもつ本来の特性を損ねてしまう。特に、刻み食に関しては、食材によって一律に刻むことで口腔内でまとまりにくく、誤嚥のリスクが高まったり、義歯の隙間に食片が入り込み咀嚼困難となる、など種々の問題が生じる場合がある。これらトロミ剤や刻み食に関しての研究を行った。

1) 刻んだ魚肉ソーセージにグアーガム・キサンタンガム・デンプン・水を添加し、それを被験者に咀嚼・嚥下させることでトロミ剤の影響を調べた。5回咀嚼後の粒度分布についてはトロミ剤の粘着性に依存し、粘着性が大きいトロミ剤を添加した刻み食はバルクが対数正規分布でテイルが指数分布の形に、水やデンプンなどを添加した場合は対数正規分布で全体が表現できることが分かった。また力学測定、生体計測及び官能評価の結果から刻み食にはグアーガムやキサンタンガムを添加することが、嚥下補助により適切な調理法であることが分かった。これら二つの結果は粒度分布と嚥下のしやすさに関係があることを示唆している。

2) 刻み方による咀嚼・嚥下過程への影響について寒天ゲルを例に研究を行った。本研究で用いた試料は、均一の大きさに刻んだゲル2種類とミートグラインダーによって不均一に刻まれたゲルである。その結果、ミートグラインダーで刻んだゲルが最も嚥下しやすいのに対し、等しい大きさに切った刻み食は嚥下しにくいことが分かった。経験的にサイズに不均一性があると嚥下しにくいと思ってしまうが、この研究の結果、むしろ嚥下しやすさに影響を与えていることが分かった。



図：魚肉ソーセージの咀嚼様式モデル

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6件)

(1) 北出品美, 榎木宏美, 小林奈央樹, 森高初恵, "サイズの異なる寒天ゲルの咀嚼および嚥下特性", 日本食品科学工学会誌, 査読有, 掲載決定.

(2) Atsuko Sagawa, Naoki Kobayashi, and Hatsue Moritaka, "Influence of Thickeners on the Fragmentation of Fish Meat Sausage by Mastication", Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 査読有, **75** (2011) 2105-2111.

(3) Naoki Kobayashi, Hiroto Kuninaka, Jun-ichi Wakita, and Mitsugu Matsushita, "Statistical Features of Complex Systems - Toward Establishing Sociological Physics-", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, **80** (2011) 072001/1-13.

(4) Naoki Kobayashi, Kaoru Kohyama, and Kouichi Shiozawa, "Fragmentation of a Viscoelastic Food by Human Mastication", Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, **79** (2010) 044801/1-4.

[学会発表] (計6件)

(1) 小林奈央樹, "咀嚼破壊により形成された食塊の凝集性評価", 日本物理学会第67回年次大会, 2012年3月26日, 関西学院大(兵庫県西宮市).

(2) 小林奈央樹, "ヒトの咀嚼による食品破壊現象", 第21回日本MRS学術シンポジウム, 2011年12月20日, 横浜情報文化センター(神奈川県横浜市).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 奈央樹 (KOBAYASHI NAOKI)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号: 30453674