

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24700589

研究課題名(和文) 3軸触覚センサによる咀嚼、嚥下メカニズムの解明および食感の定量化

研究課題名(英文) Tongue motion measurement using a triaxial force sensor on palate

研究代表者

竹井 裕介 (Takei, Yusuke)

東京大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：00513011

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：口蓋に貼付し、液体を咀嚼嚥下時に舌が口蓋に及ぼす圧力・せん断力を計測可能な3軸力センサを製作した。粘度1 mPa・sの通常の水と、増粘剤で粘度を800 mPa・sに調整した水の2種類の液体試料を用いて、嚥下時の舌が口蓋に及ぼす力を計測した。その結果、液体の粘性が低いほうが、液体の前後に送り込む力は小さく、左右に動いて液体をまとめる力は大きいことが分かった。また、粘度が大きくなると嚥下回数が増えることから、粘度が大きくなると至適嚥下量が少なくなることが分かった。本センサで計測した舌と口蓋の相互作用は、液体の粘度や体積などで変わる「飲み込みやすさ」の指標として有用であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：We fabricated triaxial force sensor applicable to non-invasive human lingual motion measurement. The sensor contains two cantilevers for shear force sensing and one beam for pressure sensing. These cantilevers and the beam were buried in the silicone rubber. Their hinges are consisting of piezo-resistive layers in order to detect the force applied on the silicone rubber surface. Water swallowing experiment was conducted and we measured the pressure and shear forces acting on palate. From the experiment, we quantified the ease of consumption of the viscosity-increased water compared to the normal water.

研究分野：MEMS、生体計測

キーワード：咀嚼 嚥下 カセンサ

1. 研究開始当初の背景

我々は、食品や飲料を飲み込む際に、舌を口蓋に押し付けながら喉へ送り込む。我々は飲み込む対象によって、これらの咀嚼嚥下動作を無意識に変えている。こういった咀嚼嚥下動作のメカニズムの解明には、これらの一連の動作の定量化が必須である。

従来の代表的な咀嚼嚥下動作の定量化手法として、筋電位測定、X線CTスキャン、パロトグラフィが挙げられる。筋電位測定法は、口蓋帆挙筋に電極を刺入し、咀嚼嚥下時の口蓋帆挙筋などの筋活動電位を計測する方法であるが、被験者に対しての侵襲性が高く、また電極刺入時や計測時に痛みが伴うため本来の咀嚼嚥下動作を妨げてしまうという問題があった。またX線CTスキャン法は、X線を使用するため、体への負荷から長時間の計測が困難であり、また舌や関連する筋肉の動きが鮮明には撮影できないという問題があった。パロトグラフィは、ワセリンと粉末を口蓋に塗布し、舌と口蓋の接触部分を観察する手法である。しかしこの手法では口蓋と舌の接触時の力の大きさや、時系列のデータ取得が不可能であった。

近年、舌圧を計測可能なセンサの研究が行われている。しかし、これらのセンサでは飲み込むときに重要だと考えられる、舌が食品などを口蓋に押し付けながら咽頭に送り込む力、つまり口蓋に対してせん断方向の力の計測ができないという問題があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、舌の運動を計測することにより、飲み込みやすさを定量的に評価することである。本研究では、非侵襲的に口蓋に設置でき、自然な咀嚼嚥下動作で舌が口蓋に及ぼす力が計測可能な3軸力センサを提案する。本センサは、厚さ0.8 mmと非常に薄いため、口蓋に貼付しても本来の咀嚼嚥下動作を妨げず、舌が口蓋に及ぼす圧力および、2軸のせん断方向の力を計測可能である。図1に本研究の概要を示す。

3. 研究の方法

本センサは、圧力のみならず、それに加えて力の作用面に対して前後左右のせん断方向の力の計測が可能である。本センサは、シリコン片持ち梁と両持ち梁がシリコンゴムに埋め込まれた構造である。片持ち梁はセンサ面に対して垂直に屹立した状態でシリコ

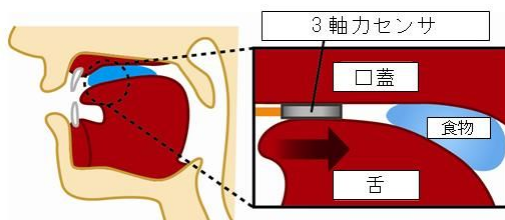


図1：本研究概要

ンゴムに埋め込まれており、せん断力を検出する。両持ち梁はセンサ面に対して水平な方向でシリコンゴムに埋め込まれており、圧力を検出する。片持ち梁および両持ち梁のヒンジ部表面には熱拡散により製作したピエゾ抵抗層が形成されており、センサに圧力、せん断力が作用し、シリコンゴムが変形した際に、その変形に倣って変形した片持ち梁および両持ち梁のヒンジ部の歪みを抵抗値の変化として検出する。片持ち梁のサイズは、長さ100 μm、幅100 μm、厚さ300 nmである。また両持ち梁のサイズは長さ100 μm、幅50 μm、厚さ300 nmである。

圧力センサおよびせん断力センサは、金配線がパターンされたポリイミド製のフレキシブル配線基板(厚さ80 μm)にエポキシ接着剤で接着され、センサと配線基板間は直径30 μmのアルミニウムワイヤで結線されている。センサ素子を接着、配線した配線基板をシャーレの底に固定し、主剤と硬化剤を10:1の混合比で混合したシリコンゴム(PDMS、Polydimethylsiloxane)を厚さが0.8 mmになるようシャーレに注ぎ込み、その後オーブンで60 °C、1時間、熱硬化を行った。シリコンゴム硬化後、メスでセンサを切り出す。その後、全体にパリレンを1 μm成膜した。これはシリコンゴム部が配線基板から剥がれるのを防ぐのと同時に、口蓋など人間の粘膜や皮膚に触れる可能性のある箇所を生体親和性の高いパリレンでコーティングするためである。図2に製作したセンサを示す。

4. 研究成果

製作したセンサが、咀嚼嚥下動作の際の舌が口蓋に及ぼす力を計測できるかを確認するために、センサを口蓋に固定した状態で水の嚥下実験を行った。

本研究で行った実験は東京大学ライフサイエンス研究倫理支援室、倫理審査専門委員会の監督、指導に基づいている。また、センサの被験者の口蓋への固定および脱着、シリンジを用いての口内への液体の注入作業は、安全のために歯科医師が行った。

水の嚥下実験の手順は以下の通りである。まず被験者の口腔内に異常がないことを確認し、水でうがいをしてもらう。その後、粘着型義歯床安定用糊材(タッチコレクトII、シオノギ製薬)を用いて、センサを口蓋の左右小臼歯を結ぶ正中部に固定する。図3は、センサが口蓋に固定されている様子である。前述の口蓋に圧力センサシートを添付した従来研究では、センサ配線を奥歯の後ろから口の外に出していた。しかし実際にこの方法で実験を行ったところ、被験者の多くが吐き気を催すなど本来の咀嚼嚥下動作ができないと判断し、上前歯と下前歯の隙間から配線を取り出すこととした。本研究で使用した配線基板が厚さ80 μmであり、成人男性が歯を噛み合わせた時の上前歯と下前歯の隙間(約1 mm)よりも十分に薄いため、液体試料の咀

嚥下に影響は無いと判断した。

センサを被験者の口蓋に固定し 5 分後に、あらためて水でうがいをしてもらい、その後、歯科医師が口内を観察し、配線部を引っ張ってもセンサがずれないかなど、センサの固定を確認する。固定を確認した後、歯科医師がシリンジで規定量の液体試料を被験者の舌の下に注入する。本センサの歪み検出部であるシリコン表面に形成したピエゾ抵抗層は、温度によっても抵抗値が変わるため、液体試料を口内に注入した後、液体試料の温度が口内温度と等しくなりセンサ出力値が安定するまで被験者に液体試料を嚥下しないよう指示をした。センサ出力安定後、被験者に合図をし、口内の液体試料をすべて嚥下してもらった。

本研究では、2 種類の液体試料を用意した。一つ目は、粘度 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の通常の水、そして二つ目は粘度 $800 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ に調整された水である。二つ目の液体試料は増粘剤（トロメイク SP、株式会社 明治）を水に規定量混ぜることで粘度の調整を行った。

舌圧に関して着目すると、嚥下中の舌圧の最大値はいずれも 30 kPa 程度となることが分かった。この値は、過去の舌圧計測に関する研究や医学的知見に合致するものである。また、通常の水を嚥下したときと増粘した水を嚥下したときの舌圧を比較すると、増粘した水を嚥下する際の舌圧のほうが大きいことが分かった。これは通常の水を嚥下する際には、水が舌の上を滑るように移動するため能動的に舌を使って液体を喉に送り込む必要がないのに対して、粘度が高い水を嚥下する際には、舌の上を液体が滑らないために、能動的に舌で送り込む必要があるためであると推察される。

左右方向のせん断力に着目すると、通常の水を嚥下するときのほうが、増粘した水を嚥下するときと比べて大きなせん断力が必要ことが分かった。これは、通常の水を嚥下する際に、舌の上で水が左右に拡散してしまうために、舌の面積を大きくするために舌を口蓋に押し付けて広げているためだと考えられる。

前後方向のせん断力に着目すると、通常の水での至適嚥下量が約 18 ml の被験者が、至適嚥下量よりも少ない量である 5 ml 、 10 ml 、 15 ml の通常の水を嚥下する際には、出力波形に 5 kPa 程度のピークが一つあることから一回で嚥下していることが分かる。至適嚥下量とは、被験者が一回の嚥下で飲み込むことができる液体の体積であり、被験者の骨格や嗜好などに依存する量である。そのため、実験の前に被験者ごとに実際に実験で使う液体試料で至適嚥下量計測を行った。至適嚥下量よりも大きな量である 20 ml の水を嚥下する際には、2 回に分けて嚥下していることが前後方向のせん断力センサの出力波形から分かった。それに対して、増粘した水を嚥下した場合は、 15 ml では 2 回

の嚥下、 20 ml では 3 回の嚥下で飲み込んでいることが分かった。また、前後方向のせん断力のピークはいずれも 2 kPa 程度であった。これらの結果は、液体の粘度によって至適嚥下量が変わることを示唆している。医学的知見では、嚥下回数が増えても増粘した液体のほうが飲みやすいとされている。我々の実験でも増粘した水では嚥下回数は増えているが、各嚥下での前後方向のせん断力が小さくなっている。こういった前後方向のせん断力が飲み込みやすさに関連する重要なパラメータではないかと考えられる。

結論

口蓋に貼付し、液体を咀嚼嚥下時に舌が口蓋に及ぼす圧力、せん断力を計測可能な 3 軸力センサを製作した。粘度 $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ の通常の水と、増粘剤で粘度を $800 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ に調整した水の 2 種類の液体試料を用いて、嚥下時の舌が口蓋に及ぼす力を計測した。その結果、液体の粘性が低いほうが、液体の前後に送り込む力は小さく、左右に動いて液体をまとめる力は大きいことが分かった。また、粘度が大きくなると嚥下回数が増えることから、粘度が大きくなると至適嚥下量が少なくなることが分かった。

本センサで計測した舌と口蓋の相互作用は、液体の粘度や体積などで変わる「飲み込みやすさ」の指標として有用であると考えられる。

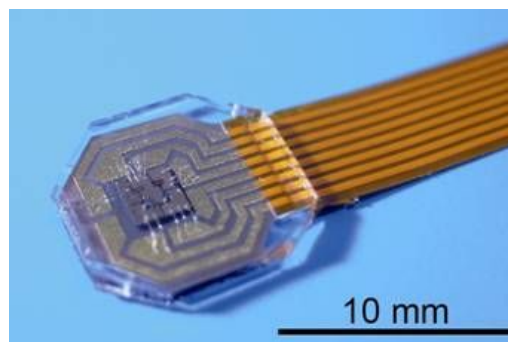


図 2：本研究で製作した口蓋に貼付し、嚥下時の舌の動きを 3 次的に計測するセンサ



図 3：本研究で製作したセンサを被験者

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)

[学会発表](計 6 件)

[1] Yusuke Takei, Tomonori Kaneko, Kentaro Noda, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "Measuring flow velocity of swallowed liquid in the human pharynx by tongue pressure sensor and swallowing sound sensor," The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2014), San Francisco, USA, pp. 849-852, 26-30 January, 2014.

[2] Yusuke Takei, Kentaro Noda, T. Kawai, T. Tachimura, Y. Toyama, M. Takai, Kiyoshi Matsumoto, and Isao Shimoyama, "Anterior And Posterior Tongue Activity Sensor Based On Triaxial Force Sensor," The 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '13), pp. 1093-1096, Taipei, Taiwan, 20-24 January, 2013.

[3] 竹井裕介、野田堅太郎、河合利彦、舘村卓、外山義雄、大森敏弘、松本潔、下山勲、"口蓋に設置した3軸力センサによる嚥下時の舌の動きの計測," 日本機械学会シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2012, 愛知大学豊橋キャンパス, 愛知, Nov. 15-17, 2012.

[4] 河合利彦、竹井裕介、野田堅太郎、松本潔、外山義雄、高井めぐみ、神野暢子、舘村卓、"半固形状栄養食品の物性および一口量が嚥下時の舌3次元運動におよぼす影響", 第19回日本摂食・嚥下リハビリテーション学会学術大会, 川崎医療福祉大学(岡山県倉敷市)2013年9月22日(土)~2013年9月23日(月)

[5] 河合利彦、竹井裕介、野田堅太郎、舘村卓、外山義雄、大森敏弘、松本潔、下山勲、"咀嚼嚥下時の舌運動様相の3次元・時系列解析が可能な超小型口蓋センサの開発~液状食品を用いた試行~, " 第17回第18回共催日本摂食・嚥下リハビリテーション学会学術大会, 札幌プリンスホテル国際館パミール, 北海道, Aug. 31-Sep.1, 2012.

[6] 河合利彦、竹井裕介、野田堅太郎、舘村卓、外山義雄、大森敏弘、松本潔、下山勲、"咀嚼嚥下時の舌運動様相の3次元・時系列解析が可能な超小型口蓋センサの開発," 第27回日本静脈経腸栄養学会, 神戸ポートピアホテル, 兵庫, Feb. 23-24, 2012.

[産業財産権]

出願状況(計 1 件)

下山勲, 松本潔, 竹井裕介(12%), 野田堅太郎, 外山義雄, 大森敏弘, 舘村卓, "口腔センサ," 特願 2013-548314(2012.12.7) (再公

表特許)

取得状況(計 1 件)

下山勲, 松本潔, 竹井裕介(12%), 野田堅太郎, 外山義雄, 大森敏弘, 舘村卓, "口腔センサ," 国際出願番号 PCT/JP2012/081805 (2012.12.7) 国際公開番号 W02013/085038 (2015.4.27)

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹井 裕介 (TAKEI, Yusuke)

東京大学 情報理工学系研究科、知能機械

情報学専攻 特任助教

研究者番号: 00513011