

舌圧センサーの開発と応用



研究ノート

小野 高裕*

Development and application of the sensor sheet
for measuring tongue pressure

Key Words : tongue, pressure sensor, swallowing, articulation

はじめに (開発前夜)

我が国の人口の急激な超高齢化に伴ってクローズアップされた問題の一つに「口からものが食べられない」という「摂食・嚥下障害」がある。これは、顎や口腔、咽頭、食道の構造に問題が生じた場合の「器質的障害」と、構造には異常がないのにうまく機能しない「機能的障害」の二つに大別されるが、場合によってはこれらが重複して生じることもある。ものを飲み込む機能(嚥下機能)は加齢にともなって少しずつ低下するが、高齢期に起こりやすい脳卒中や神経疾患によって大きなダメージを受ける。米国での推計では60歳以上の15-40%が嚥下障害を持っており、その数はおよそ620万人にのぼるとされている。嚥下障害は、食事の楽しみを奪い、栄養摂取を制限し、体力の低下とリハビリテーションの遅延により入院期間の延長を招き、医療・介護のコストを増大させるとともに、最も危惧される結果として、高齢者の死因の上位を占める誤嚥性肺炎を引き起こす。

筆者は、歯科医師として、大阪大学歯学部附属病院において歯や顎を失って咀嚼が不自由になった人を対象に、義歯(入れ歯)を用いたリハビリテーション(歯科補綴治療)を担当してきた経験から、客観的な咀嚼・嚥下機能評価法の重要性を認識するようになった。特に、臨床経験10年を過ぎた頃から

舌がんの患者さんを治療する機会が多くなり、歯を作りしっかり噛めるようにしても舌が機能しなければ飲み込むことすらできないという問題に直面し、悪戦苦闘を強いられることしばしばであった。ちょうどその頃(1990年代半ば)北米を中心に発展してきた摂食・嚥下リハビリテーション学が日本に紹介され、筆者もエックス線透視画像をもとに記述されたヒトの嚥下過程のモデルを学ぶことからこの新しい臨床医学の門戸をくぐった。嚥下は、口腔に取り込まれた食品が、咀嚼され咽頭から食道を通じて胃に送り込まれるまでの過程である。この間に非常に多くの器官と神経・筋機構が関与すること、しかも最初(口腔にとりこみ咀嚼する部分)は随意的に開始され途中(咽頭に入って)からは不随意的・反射的に進行すること、口腔・咽頭のさまざまな感覚入力に関与すること、嚥下の経路である中咽頭から下咽頭は呼吸の経路と共通であること、等の特徴から、ヒトの身体運動の中でも最も複雑なものと言われている。この嚥下の全過程が観察でき誤嚥の有無を検査できるビデオ嚥下透視法は、臨床においても嚥下検査法のGold Standardであり現在もその地位は不動である(図1)。しかし、嚥下障害の診断は、食塊が嚥下と呼吸の交差点である咽頭をいかにスムーズに通過するか、残留や誤嚥が生じないかということに焦点を当てられることが多く、嚥下の最も「上流」にある口腔の部分は見過ごされがちであることが歯科医師として物足りなく感じていた。



*Takahiro ONO

1957年4月生
大阪大学大学院歯学研究科(1987年)
現在、大阪大学大学院歯学研究科 統合機能口腔科学専攻 顎口腔機能再建学講座 准教授 歯学博士 歯科補綴学、高齢者歯科学、顎顔面補綴学、摂食・嚥下リハビリテーション学
TEL : 06-6879-2954
FAX : 06-6879-2957
E-mail : ono@dent.osaka-u.ac.jp

舌圧を測ることの意味

その頃大学院生として入ってきた堀 一浩君(現新潟大学大学院医歯学研究所摂食・嚥下リハビリテーション学分野准教授)は、筆者の臨床での悪戦苦闘を見て「先生、嚥下時の舌の接触圧を測ってみませんか」と提案し、持ち前の器用さで薄いアクリル

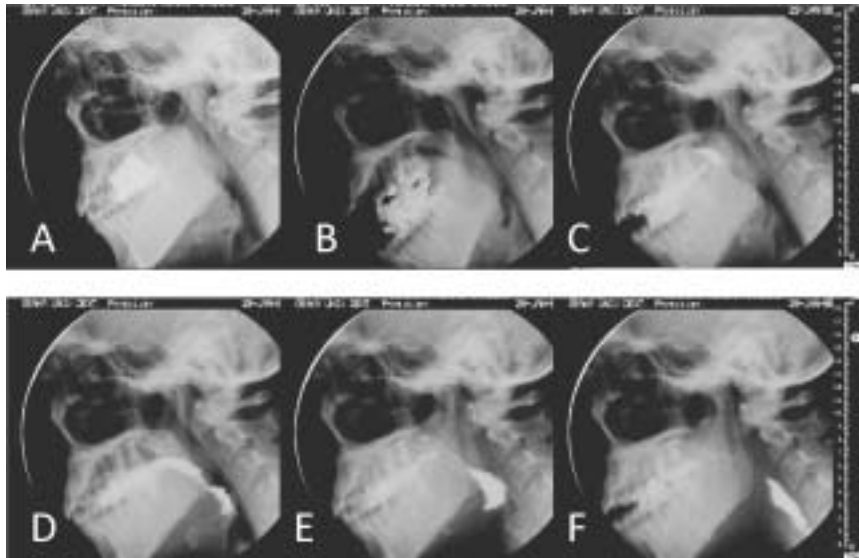


図1 . ビデオ嚥下造影検査 (VF) によるグミゼリーの咀嚼・嚥下過程
 A: 咀嚼開始前, B: 咀嚼による細分化, C: 食塊の形成と咽頭への送り込み,
 D: 喉頭蓋谷への貯留, E: 嚥下反射開始直後, F: 食塊の咽頭通過 .

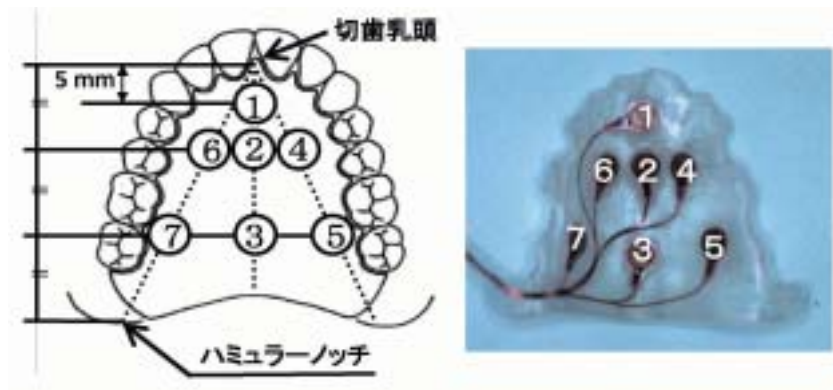


図2 . 舌圧測定用の実験用口蓋床の設計 (左) と完成品 (右) .

板の中に7個の圧力センサを埋め込んだ「実験用口蓋床」(図2)を作って舌圧を測りはじめた。すでにそのような研究はいくつか行われていたが、感覚的に超デリケートな口腔内に装置を装着して微妙な圧を測定することは容易ではない。しかし、彼の装置は一人ひとりの被験者に対して解剖学的ランドマークを基準に非常に精密に設計・製作され、十分な馴化期間を経て測定したため、従来にはないきれいな舌と口蓋との接触圧波形(図3)が得られた。そして、「接触順序」、「接触時間」、「接触圧」などの分析から、ヒトがひと口量(30cc)の水を嚥下する際の舌運動には一定のパターンが存在することが明らかになった。この結果を嚥下障害専門の国際ジャーナル(Dysphagia)に投稿したところ、新しい手法ということで非常に厳しく査読され、数回の修正

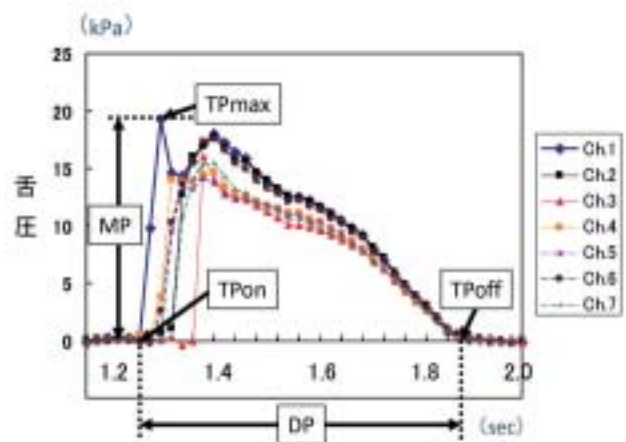


図3 . 実験用口蓋床で記録された水嚥下時の舌圧波形
 (MP: 最大値, DP: 持続時間, TPon: 舌圧発現時, TPmax: 舌圧最大時, TPOff: 舌圧消失時) .

の末にやっとのことで掲載されたが、米国の神経内科医から「将来臨床的に有望な方法」という Editorial comment をもらったのがはげみとなった。その後、咀嚼時の舌圧パターン、舌圧と嚥下関連筋群との協調性などについても生理学的に妥当と思われる一定のパターンを見出すことができ、舌圧が嚥下運動のバイオメカニカルな指標の一つとして有望であるという確信が得られ、この手法を臨床に応用したいという夢が徐々に育ってきた。

舌圧センサシートの開発

カスタムメイドの実験用口蓋床の問題点は一人の被験者にしか使用できず、また製作に高額のコストと特別なスキル、使用までに2週間の馴化期間を要することである。臨床の場においてすぐに使用するためには、少なくともまず口腔内に装着した際の違和感を最小限にするための「薄さ」が要求される。そこで、筆者らは米国の TekScan 社で開発され日本ではニッタ株式会社がライセンス生産しているタクトイルセンサシステムに着目した。このセンサは、汎用型の面圧分布測定システム (I-scan) に接続して用いられるもので、厚さ 0.1mm の極薄シート内に封入された通電性のインクが圧を電気信号に変換し、データはリアルタイムにパーソナルコンピュータ上に表示・記録される。筆者らは、舌圧の発現パターンを評価するのに最低限必要な5か所の感圧点をT字型に配置した基本デザインを作成し、成人の口蓋形態を分析して3種類のサイズを設定した。この舌圧センサシートの開発により、多人数の被験者を対象とした測定が可能となり、嚥下障害を有する各種疾患の臨床データの収集が実現した。

舌圧センサシートを使用する際は、被験者の口蓋の大きさに応じて適当なサイズを選択し、シート状の義歯安定剤を用いて口蓋粘膜あるいは義歯表面に貼付する(図4)。また、ケーブルは上顎臼歯の後方から口腔前庭(歯列と頬粘膜の間)を通して口腔外に導出するので、嚥下時の歯の接触を妨げることがない。それまでに開発されていた口腔内設置型の舌圧測定装置は一定の体積を有するプローブ型であったため、最大押しつけ圧やきわめて不自然な状態での嚥下圧の測定しか行うことができなかったが、筆者らの「舌圧センサシート」はその薄さとデザインの工夫によってきわめて自然に近い嚥下圧の多点

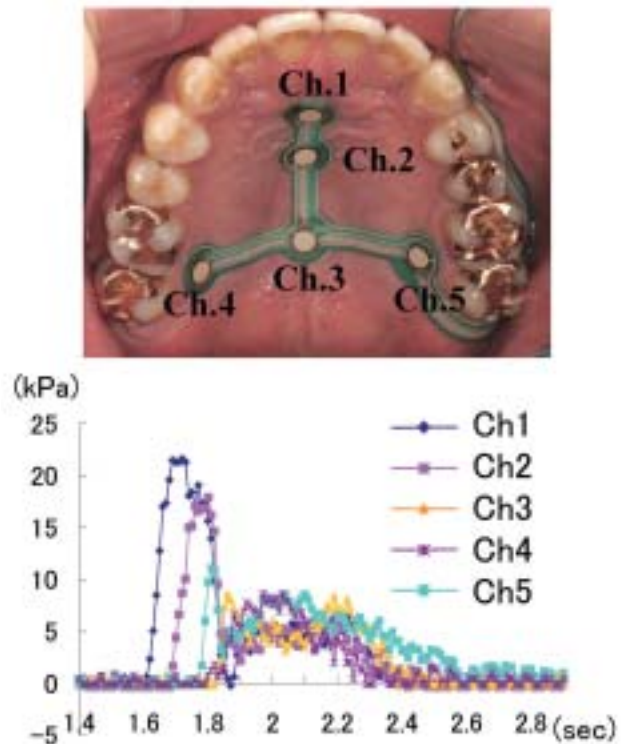


図4. 舌圧センサシートを硬口蓋に貼り付けたところ(上)と得られた健常者の水嚥下時舌圧波形(下)。

測定を実現した。

「医・歯・工」の連携を通して

舌圧センサシートの試用を開始した直後の2005年、大阪大学医学系研究科(神経内科)、情報科学研究科(人間情報工学)、基礎工学研究科(生体工学)、国立循環器病センター(脳血管内科)などをメンバーとした研究グループに参加させていただき、研究プロジェクト「高齢社会で増加する神経疾患の運動障害計測・診断支援機器の開発」がスタートした。本プロジェクトは、脳卒中や神経疾患による身体運動障害を客観的・定量的に評価する指標と検査機器の開発を目的としたものであり、筆者のグループは嚥下運動を担当した。この5年間は研究資金にめぐまれたことだけでなく、はじめて医工連携の現場に加わり、その意義に始まって手法、結果の解釈など、すべてにおいて学ぶことの多い貴重な5年間であった。これを機縁に、本学の臨床医工学連携研究教育(MEI)センターの兼任教員として「臨床医工学スキルアップ講座」(図5)を担当し、2007年からのグローバルCOEプログラム「医・工・情報学融合による予測医学基盤創生を指向したオープンプラッ



図5 . MEIセンターの臨床医工学スキルアップ講座における舌圧測定実習 .

トフォームの構築」にも参加させていただくこととなった。

これらの研究プロジェクトの中で、舌圧センサシートを用いた研究は、健常者若年者、高齢者、慢性期ならびに急性期脳卒中患者、神経・筋疾患患者、口腔がん患者などその対象を広げ、嚥下機能におけるいくつかの新しい知見を報告することができた。例えば、加齢によって嚥下時舌圧は変化しないと言われていたが、舌の部位によって舌圧の大きさが変化し、接触時間が延長することによって、高齢者は若年者より大きな力を発揮して嚥下していることがわかった(図6)。また、国立循環器病研究センター脳血管内科との共同研究により、脳卒中急性期における舌圧波形の異常や麻痺側における舌圧の低下が臨床的嚥下障害の症状と密接に関連していること

が明らかとなった。さらに、大阪大学医学部神経内科や国立病院機構刀根山病院との共同研究により、パーキンソン病患者、ALS患者、筋ジストロフィー患者における嚥下時舌運動の低下についても定量的な分析が進んでいる。今後の研究成果により、これまである程度重症化しなければ評価できなかった各疾患の嚥下時舌運動障害の特徴的な病態の検出が早期から可能になれば、嚥下障害への対応が後手に回ることなく、新たな治療法の開発へと繋がるのではないかと期待される。

検査機器としての実用化を目指して

冒頭で述べたように、舌は嚥下の最上流において食塊を送り出す重要なはたらきを担っており、その運動不全は嚥下の口腔相のみならず咽頭相にも影響を及ぼす。したがって、舌が食塊を送り出す際の力を客観的・定量的に評価することができれば、嚥下障害の診断・治療・リハビリテーションにおいては、大いに有用な情報となるに違いない、という思いは「医・歯・工連携」の中でさまざまな知見が得られるとともに確信へと変わり、ニッタ社との共同により、舌圧測定に特化したセンシング・システム「スワロースキャン」のプロトタイプを開発した(図7)。本プロトタイプは舌圧センサシートを接続するUSBハンドルのコネクターと専用ソフトウェアからなり、パーソナルコンピュータに接続すれば、任意の測定区間における嚥下時舌圧の「順序性」、「持

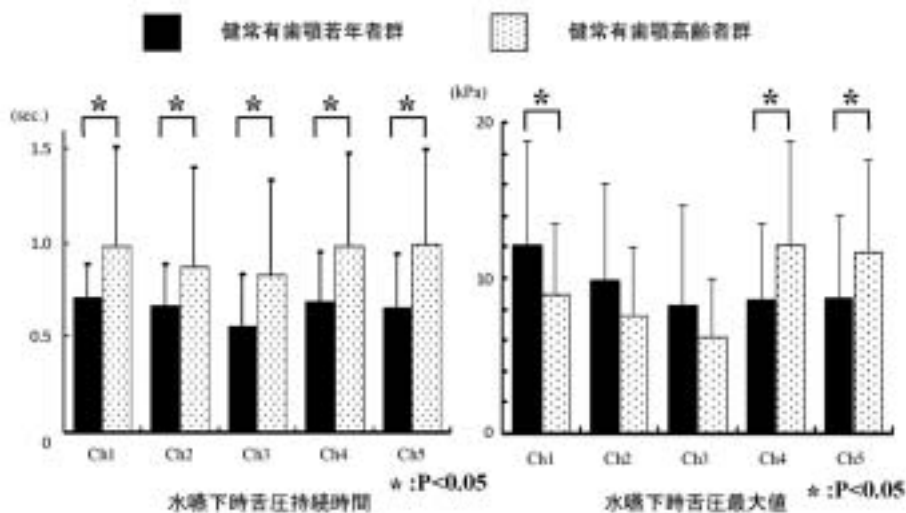


図6 . 若年健常有歯顎者と高齢健常有歯顎者の水嚥下時舌圧持続時間(左)と最大値(右)の比較 . 加齢による嚥下時舌運動の差異をバイオメカニカルな観点から初めて明らかにしたデータ .

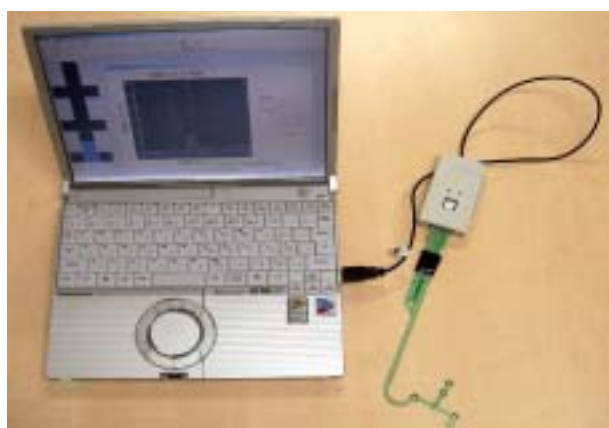


図7. 臨床検査機器として開発中のスワロースキャン (プロトタイプ).

続時間」、「最大値」、「力積」などを自動レポートする機能を備えたもので、個々のデータはCSVファイルとして保存されさらに詳細な分析に付すこともできる。

現在筆者らは本スワロースキャンを用いて内外の多施設と共同研究を行いながら、近い将来の市販化を目指して検査機器としてのブラッシュアップを進めている。共同研究の課題は、単に嚥下機能の定量解析に留まらず、言語聴覚学の分野におけるリハビリテーション手技の検証や、食品工学の分野における嚥下困難者用食品の開発など、各方面への広がりを見せている。筆者らの研究は、既存のセンシング技術を「嚥下時の舌のはたらきをはかる」という目的に応用したものであるが、「口腔内のバイオメカニカルな物差し」として今後もさまざまな分野で役立つて行くものと期待している。

謝辞

一連の研究に参加してくれてくれた堀 一浩 (新潟大学大学院医歯学研究科)、岩田久之、田峰謙一、近藤重悟、濱中 里、横山須美子、藤原茂弘 (以上大阪大学大学院歯学研究科) の皆さんに感謝いたします。

参考文献 (舌圧測定研究について知りたい方へ)

1) Ono, T., Hori, K., Nokubi, T. (2004) : Pattern of tongue pressure on hard palate during swallowing. *Dysphagia*, 19:259-264.

- 2) Hori, K., Ono, T., Nokubi, T. (2006) : Coordination of tongue pressure and jaw movement in mastication. *Journal of Dental Research*, 85: 187-191.
- 3) Ono, T., Hori, K., Tamine, K., et al. (2008): Application of tongue pressure measurement to rehabilitation of dysphagic patients with prosthesis. *Prosthodontic Research and Practice*, 7: 240-242.
- 4) Hori, K., Ono, T., Tamine, K., et al. (2009): A newly developed sensor sheet for measuring tongue pressure in swallowing. *Journal of Prosthodontic Research*, 53: 28-32.
- 5) Ono, T., Iwata, H., Hori, K., et al. (2009) : Evaluation of tongue-jaw-swallow related muscle coordination during voluntarily triggered swallow. *International Journal of Prosthodontics*, 22: 151-156.
- 6) Ono, T., Hori, K., Tamine, K., et al. (2009) : Evaluation of tongue motor biomechanics during swallowing / from oral feeding models to quantitative sensing methods. *Japanese Dental Science Review*, 45: 65-74.
- 7) Ono, T., Hori, K., Masuda, Y., et al. (2010) : Recent advancement in sensing oropharyngeal swallowing function in Japan. *Sensors*, 10, 176-202.
- 8) Tamine, K., Ono, T., Hori, K., et al. (2010): Age-related Changes in Tongue Pressure during Swallowing. *Journal of Dental Research*, 89:1097-1101.
- 9) Konaka, K., Kondo, J., Hirota, N., et al. (2010): Relationship between tongue pressure production and dysphagia in stroke patients. *European Neurology*, 64: 101-107.
- 10) Hori, K., Tamine, K., Barbezat, C., et al. (2010) : Influence of chin-down posture on tongue pressure during dry swallow and bolus swallows with 5 and 15 ml water in healthy subjects. *Dysphagia*, e-pub ahead of print.
- 11) Hirota, N., Konaka, K., Ono, T., et al. (2010) : Reduced tongue pressure against the hard palate on the paralyzed side during swallowing predicts dysphagia in acute stroke patients.

Stroke, in press.

- 12) 小野高裕, 堀 一浩, 田峰謙一, 他(2010): 舌圧センサシートを用いたパーキンソン病患者の嚥下機能定量評価. バイオメカニズム学会誌, 34: 105-110.
- 13) 小野高裕, 堀 一浩, 田峰謙一(2010): 舌圧センサーによる嚥下解析. 『臨床医工学スキルアップ講座』, 大阪大学出版会, 吹田, 150-164.

