

高速度カメラを用いた嚥下の計測とモデル化

Measurement and Modeling of Human Swallowing using a High-speed Camera

○ 三輪 洋靖（産業技術総合研究所 人間情報研究部門）

Hiroyasu MIWA, Human Informatics Research Institute, AIST

Abstract: Consumption of food and beverage is essential for not only energy intake but also joy of daily life. Thus, assessment and maintenance of the swallowing function in daily life is important. In this study, we considered that we could improve our quality of life by provision of food and beverage according to our swallowing condition. In this paper, we developed a non-invasive measurement system using a high-speed camera, an electromyograph and a body-sound sensor to measure human swallowing. Then, we analyzed the relation among the swallowing motion, muscle activity and swallowing sound.

Key Words: Swallowing, High speed camera, EMG, Sound, Measurement

1. はじめに

私たちの生活において「摂食」すなわち飲食物の摂取はエネルギーや水分を体内に取り込み、生命維持の観点から欠かすことのできない行動の一つである。一方で、飲食物の摂取は単純なエネルギー摂取としてだけでなく、日常生活における楽しみの一つである「食事」としても機能しており、質の高い食事は生活の質を高めてくれる。この両者の機能を維持、向上させることは、私たちの生活を維持するために重要なこととなる。

一般に、健康状態では機能維持が問題になることは少ないが、加齢や脳卒中の後遺症等によって摂食に必要な能力が低下すると、飲食物が肺に入ってしまう誤嚥のリスクが高まってくる。誤嚥は窒息や肺炎の原因ともなり、70歳以上の高齢者の70%、90歳以上では95%の肺炎が誤嚥によるものだと言われている。誤嚥リスクを下げるためには、運動やリハビリテーションによる機能改善のほか、食材を細切れにする刻み食やペースト状にするペースト食に代替する場合がある。しかし、後者は、咀嚼、嚥下がしやすくなり安全性が向上する反面、食感や食事の楽しみが損なわれる場合もあった。

このような社会的背景に対し、本研究では、適切に嚥下状態を計測することで、その人の嚥下状態に合わせた食事を提供できると考えた。これにより、食事の安全性と楽しみを同時に向上させ、生活の質の向上が期待できる。そこで、本稿では研究の第一歩として、非侵襲的な方法でヒトの嚥下状態を計測するシステムを構築し、ヒトの嚥下状態の計測、モデル化することを目的とした。

2. ヒトの嚥下機能

ヒトの口腔、咽頭および喉頭の解剖学的構造は Fig. 1 のようになっている¹⁾。ヒトが飲食物を摂取すると、それらは口、口腔、中咽頭、下咽頭、食道、胃の順番で送られ、この一連の送り込み動作を嚥下と呼ぶ。嚥下の代表的なモデルとしては、4期モデル²⁾やプロセスモデル³⁾がある。4期モデルの場合、食品や水分を口に含み咀嚼して食塊を作る準備期、舌で口腔から咽頭へ食塊を送る口腔期、咽頭から食道の入口へ食塊を送る咽頭期、蠕動運動で食塊を胃へ送る食道期の4期で構成される。また、準備期、咀嚼期は随意運動だが、咽頭期、食道期は反射運動が支配的となり、周辺筋肉の協調動作プログラムによって行われると言われている^{4),5)}。

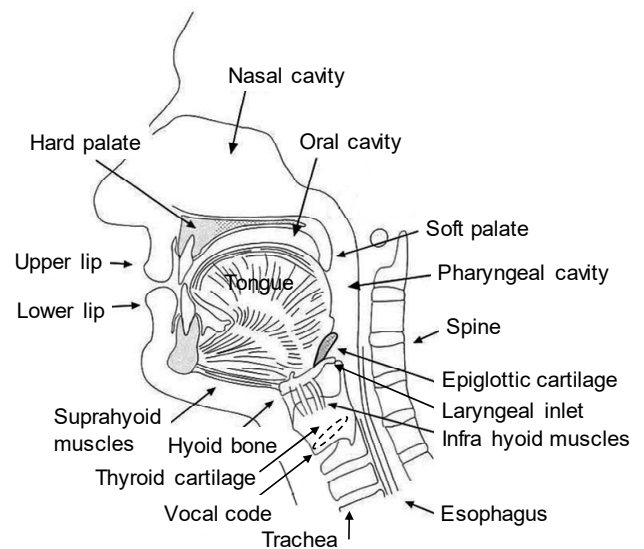


Fig. 1 Human anatomical structure relating to swallowing¹⁾

3. 嚥下状態の計測・モデル化

3.1. 嚥下のモデル化

嚥下の4期モデルにおいて、喉ごしを感じたり、誤嚥を生じたりするのは咽頭期にあたることから、本研究では咽頭期の運動に着目した。咽頭期では軟口蓋を閉鎖し鼻腔への逆流を防ぐと同時に、声帯を閉じることで気管への流入を防いでいる。さらに、下顎を閉じた状態で、顎舌骨筋やオトガイ舌骨筋等の舌骨上筋群を収縮させることで舌骨が上方に引き上げられ、甲状舌骨筋を収縮させることで甲状軟骨が上前方へ移動する。これにより、喉頭蓋軟骨が喉頭口に倒れて気管に蓋がされ、喉頭蓋軟骨と声帯による気道防御がなされる。このとき呼吸は一時的に停止する。甲状軟骨が前方に移動したことで、喉頭と脊柱の間にスペースが生まれ食道が拡張し、食塊は前後の圧力差で食道へと送り出されていく。その後、胸骨甲状筋の収縮によって甲状軟骨が、胸骨舌骨筋、甲状舌骨筋等の舌骨下筋群の収縮によって舌骨が元の位置に戻る^{4),5)}。

以上の構造を簡略的にモデル化したものとして、筆者は Fig. 2 の筋骨格モデルを提案している¹⁾。この筋骨格モデルでは、下顎骨と舌骨をオトガイ舌骨筋、顎舌骨筋、舌骨二腹筋で構成される舌骨上筋群で接続し、舌骨と甲状軟骨、

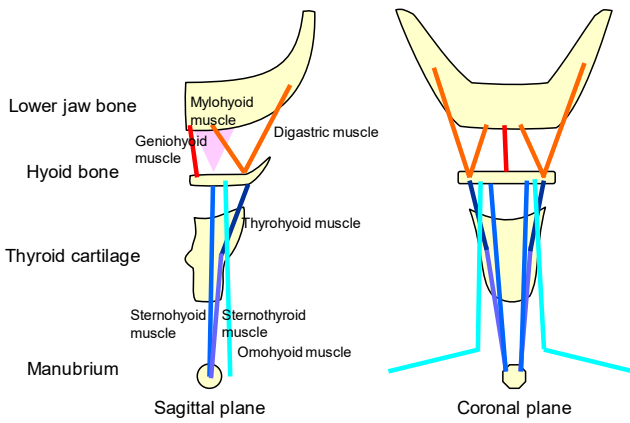


Fig. 2 Musculo-skeletal model for human swallowing¹⁾

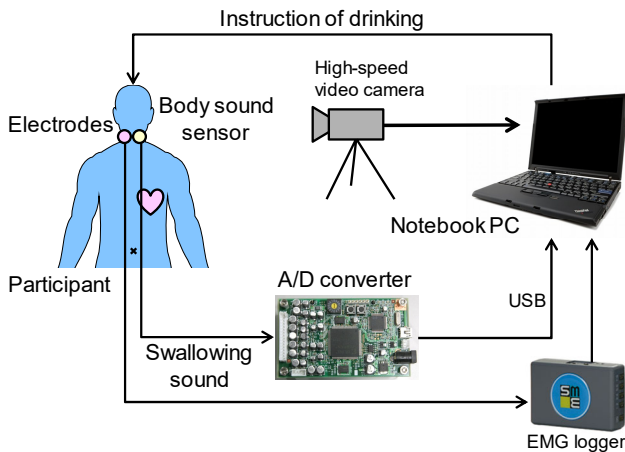


Fig. 3 Measurement system for human swallowing

胸骨柄を胸骨舌骨筋，甲状舌骨筋，胸骨甲状筋で構成される舌骨下筋群で接続している。これらの筋群が活動することで，咽頭期の特徴である甲状軟骨を上下に動かす。

3.2. 嚥下状態の計測システム

嚥下状態を計測する方法として，医学分野では CT スキャン，嚥下造影検査(VF)，嚥下内視鏡検査(VE)によって診断が行われている⁶⁾。しかし，これらの機器は，取り扱いが難しく，CT スキャンや VF では放射線被曝もあることから，日常生活での使用は適していない。本研究では，計測対象を咽頭期の活動に絞り，筋活動を筋電計(Biolog 2000+DL-140，エスアンドエムイー)で，試料が通過する嚥下音を聴診器(Littmann Classic II Infant, 3M)とマイク(AT9903，オーディオテクニカ)を用いた体内音センサーで，運動を高速度カメラ(DSC-RX10M2，ソニー)で計測することとし，Fig. 3 に示した計測システムを構築した。

4. 評価実験

構築した筋骨格モデルおよび計測システムに基づいて嚥下状態を計測するため，試料嚥下時の咽頭部の計測を行った。実験には前節で構築したシステムを用いた。筋活動は舌骨上筋群を計測対象とし，サンプリング周波数 1.0 [kHz] で，嚥下音はサンプリング周波数 44.1 [kHz]，サンプリングビット数 16 [bit] で，高速度カメラは 960 [fps] で計測した。実験試料には，ミネラルウォーターを用い，20 [g] の試料を単一嚥下で摂取することを 1 試行として 5 試行繰り返した。また，実験には成人男性 1 名(年齢 28 歳)が参加した。なお，

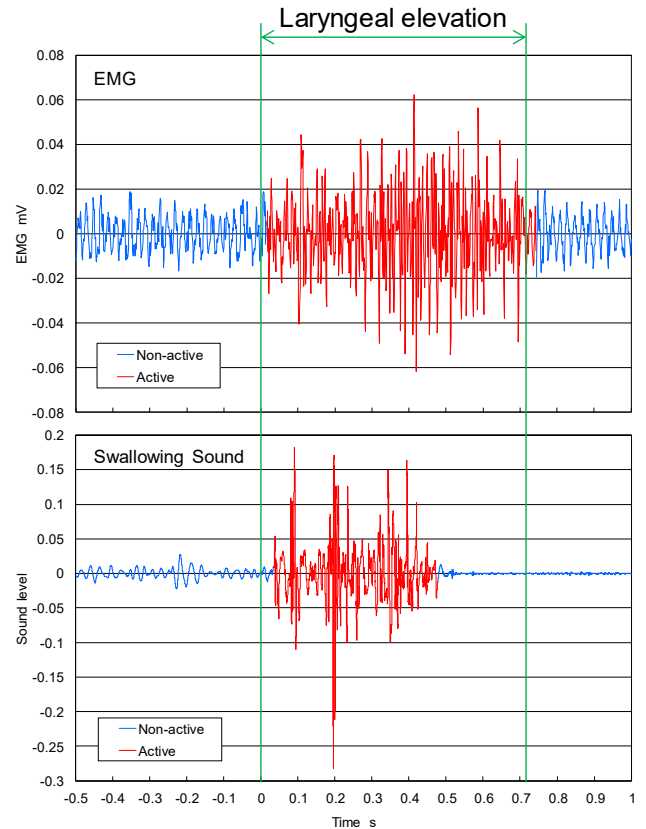


Fig. 4 Experimental results of EMG, swallowing sound and laryngeal elevation

本実験は産業技術総合研究所人間工学実験委員会で審査・承認(人 2015-593)のもと実施した。

そして，実験によって得られた筋電図より筋活動時間を，嚥下音より嚥下音発生時間を連続 Wavelet 変換を用いた抽出アルゴリズム⁷⁾を用いて算出した。また，高速度撮影された映像より喉頭部が挙上している時間を目視で算出した。実験結果の一部を Fig. 4 に示す。

その結果，喉頭挙上の開始に対して，平均 6.4×10^{-2} [s] 後に筋活動が開始され，平均 7.5×10^{-2} [s] 後に嚥下音が生じ始めた。その後，喉頭挙上は 6.8×10^{-1} [s]，筋活動は 6.41×10^{-1} [s]，嚥下音は 3.93×10^{-1} [s] 継続していたことが確認された。

筋骨格モデルと合わせて考えると，喉頭挙上のタイミング，継続時間と舌骨上筋群の活動がほぼ一致しており，本計測システムによって，舌骨上筋群の活動とそれによる運動が計測できたと考えられる。本来，運動に対して筋活動は先行するが，本計測ではほぼ同じタイミング，もしくは，運動に対して筋活動が遅れていたことについては，舌骨上筋群の計測位置がオトガイ部であったことより，舌骨上筋群の活動の一部しか計測できていなかった可能性が考えられる。

また，嚥下音は喉頭挙上中に起こっていることが確認できたが，喉頭挙上の前半から嚥下音が計測されていた。これは，同一のセンサを用いた従来研究⁸⁾では 0.1~0.3[s]であったのに対し，本計測では嚥下音が長かったためである。試行間でばらつきが小さいことより，実験参加者における嚥下の特性が現れた可能性が考えられる。

以上より，嚥下時の運動，筋活動，嚥下音を同時計測することが，咽頭期の活動やその特性の理解に貢献することが示唆された。

5. 結論・今後の展望

本稿では、筋電計、体内音センサ、高速度カメラを用い、非侵襲的にヒトの嚥下状態を計測するシステムを構築し、筋骨格構造、4期モデルをベースとした嚥下モデルを提案した。そして、構築したシステムを用いて試料摂取時の嚥下を計測したところ、嚥下状態やその特性の一部を計測できた。

本稿では喉頭挙上のみを検証したが、今後は咽頭部の試料通過後に生じる喉頭の降下についても、計測とモデル化を行う。さらに、より多くの実験参加者による試行を繰り返すことで、嚥下状態をより明らかにできるモデルを構築する。

謝辞

本研究の一部は平成28年度科学研究費補助金(課題番号: 16H02893)の支援のもと行われました。

参考文献

- (1) 三輪洋靖, 持丸正明, 野場重都, 舩田晋, 嚥下音による炭酸刺激強度と嚥下活動のモデル化, バイオメカニズム, Vol. 22, pp.49-58, 2014.
- (2) Logemann, J. A., Evaluation and treatment of swallowing disorders, NSSLHA Journal, pp.38-50, 1984.
- (3) Hiimae, K. M., Palmer, J. B, Food transport and bolus formation during complete feeding sequences on foods of different initial consistency, Dysphagia Vol.14, No.1 pp.31-42, 1999.
- (4) 山田好秋, よくわかる摂食・嚥下のしくみ, pp.80-88, 医歯薬出版, 1999.
- (5) Corbin-Lewis, K., Liss, J. M., Scirotno K. L., 金子芳洋(訳): 摂食・嚥下メカニズム, 医歯薬出版, pp.2-65, pp.99-106, 2010.
- (6) 才藤ら, プロセスモデルで考える摂食・嚥下リハビリテーションの臨床 咀嚼嚥下と食機能, 医歯薬出版, pp.89-123, 2013.
- (7) Miwa, H. Swallowing Time Measurement System using Swallowing Sound, Proceedings of the 6th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015), pp.306-307, 2015.