

空気圧力センサを応用した嚥下運動分析装置の開発

山森徹雄¹ 小林康二² 山本裕之³ 中山公人¹
阿部剛一¹ 服部典子⁴ 清野和夫¹

Development of Swallowing Movement Analyzer with Pneumatic Sensor

Tetsuo YAMAMORI¹, Koji KOBAYASHI², Hiroyuki YAMAMOTO³, Kimihito NAKAYAMA¹,
Goichi ABE¹, Noriko HATTORI⁴ and Kazuo SEINO¹

A new, portable device, called the swallowing movement analyzer, which is capable of detecting spontaneous swallowing, was developed. This analyzer was composed of a pneumatic sensor and a differential pressure transducer (TSD110 : BIOPAC systems Inc.). The sensor of the device was placed and fixed on the thyroid cartilage. In this way, it was capable of sensing each upward and downward movement of the thyroid cartilage during deglutition. The electric potential by the transformation of the sensor at the time of pressure was analyzed and a wave pattern was displayed on the monitor.

This paper reported the characteristics of the sensor and the clinical application of the swallowing movement analyzer. The electric potential became higher toward the central part of the sensor under pressure. The values were affected by the temperature in the laboratory. The most appropriate temperature was between 24 °C and 28 °C. A smooth wave pattern was displayed with an easily swallowable food, but a distorted wave pattern was obtained with a food which was difficult to swallow. This device made it possible to analyze the swallowing movement in the pharyngeal phase qualitatively and quantitatively.

Key words : swallowing dysfunction, swallowing movement, pneumatic sensor

緒言

腫瘍により下顎骨や舌を切除した場合は、口腔の諸機能に障害が生じ、患者の日常生活に多大な影響を与える¹⁻⁴⁾。下顎骨欠損症例では、たとえ再建されたとしても下顎運動に制限が生じることが多く、患者は咀嚼が不十分なまま嚥下しようとする。また、下顎の腫瘍摘出術に伴い、舌の可動

範囲が狭くなった場合は、食塊の形成と咽頭への搬送が困難になり嚥下障害が生じる。

このような嚥下障害を経時的に評価する方法として、嚥下造影検査⁵⁾、舌圧測定⁶⁾や嚥下圧測定⁷⁾などが行われている。しかし、これらの方法を日常臨床に応用するには、エックス線の被爆や機器使用の煩雑さなどが難点となり、頻回の検査には向いていない。一方、日常の臨床で簡易的に嚥下

受付：平成20年6月30日，受理：平成20年8月5日
奥羽大学歯学部歯科補綴学講座¹，小林歯科医院²，
岡本歯科医院³，服部歯科医院⁴

Department of Prosthetic Dentistry, Ohu University
School of Dentistry¹, Kobayashi Dental Office²,
Okamoto Dental Office³, Hattori Dental Office⁴

運動を捉える方法として、嚥下時の甲状軟骨の動態を評価することが試みられている。甲状軟骨は嚥下の咽頭相において喉頭腔の遮断に関わり、甲状舌骨筋によって舌骨と繋がっていることから、甲状軟骨の挙動を口腔外から捉えることにより、嚥下運動を評価することが可能である。甲状軟骨の動態観察に用いるセンサとして、Pehlivanら⁸⁾はpiezoelectric sensorを、福島⁹⁾はひずみトランスデューサを、Afkari¹⁰⁾は加速度計を用いている。また、最近では反射型フォトセンサを用いた嚥下機能評価システムも試作されている¹¹⁾。

著者らは、日常の臨床で嚥下機能を簡便に検査することを目的に、甲状軟骨の上下的運動のみならず、前後の運動をも捉えることのできる空気圧力センサを設置した口腔外装置を試作したので、その概要を報告する。

材料と方法

1. 嚥下運動測定装置

試作した装置は、甲状軟骨の動態を検出する空気圧力センサ（ニューモグラムトランスデューサTSD110：ニューモグラム社）と空気圧力の測定・解析装置（高速データ取込解析システムMP150：BIOPAC Systems社）から構成されている。空気圧力センサは、直径20mm、厚さ4mmのスポンジ状で、透明シートによって密閉されている（図1）。本センサのスポンジ状パッドに圧力が加わると、パッドの形態がくずれ、その時に発生した空気圧がチューブを伝わり高感度差動圧力トランスデューサTSD160Bで電位に変換される。これを汎用トランスデューサアンプDA100Cにて増幅し、AD変換させてモニタ上に圧力波形を表示するものである。

空気圧力センサは固定用シーネの前方部で、甲状軟骨の動態を捉えることのできる部位に両面テープで固定した。その際に、被験者の個体差に合わせて空気圧力センサと甲状軟骨との位置関係を調節できるように可変機構を設けた（図2）。

2. 空気圧力センサの特性

空気圧力センサの測定精度を検証するために繰り返し荷重を行い、発生する圧力を測定した。加圧部位はセンサの表面中央部を通り、直交する2

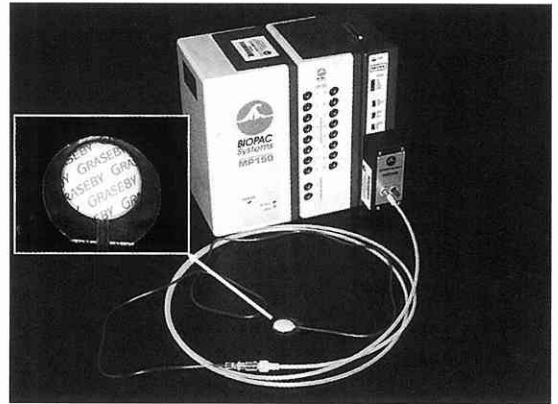


図1 嚥下運動分析装置
矢印は空気圧力センサ



図2 シーネに固定した装置

本の直線上の17か所とした（図3）。4脚の金属フレームの中心に加圧距離が調節可能な固定ネジと、その先端に直径4mmの加圧子を付着した装置を製作した（図4）。これをミリングマシンスピンドル部に装着し、ステンレス板に両面テープで固定した。センサの加圧部位に対して垂直方向から静荷重を加えた。加圧距離は、甲状軟骨がセンサ表面を滑走することを想定して基準面から1mm、2mm、3mmとし（図5）、各10回測定した。得られたデータの解析には、高速データ取込解析システムMP150に添付の解析ソフト、Acqknowledgeソフトウェアを用いた。

3. 空気圧力センサに対する室温の影響

空気圧力センサは測定する環境、特に室温に影響を受けることが予想される。そこで、センサに

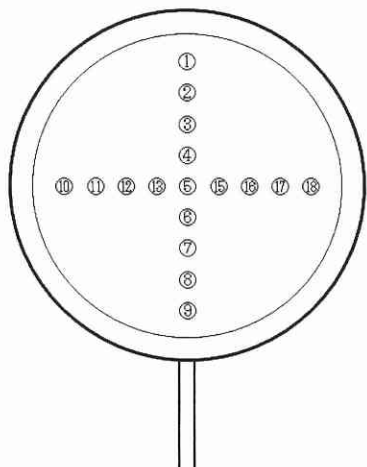


図3 センサの加圧部位

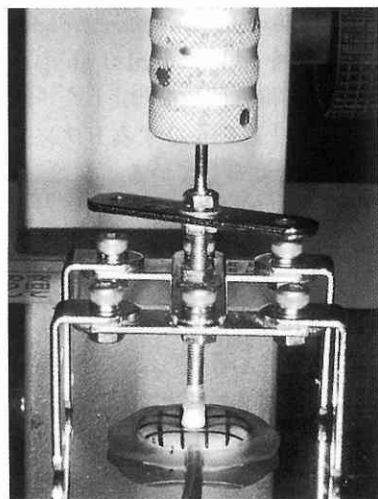


図4 加圧装置

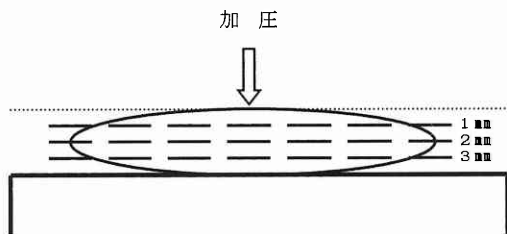


図5 加圧距離

対する測定時室温の影響を検討するため、室温を変化させて繰り返し加圧したときに発生する圧力を測定した。測定時の室温は、20℃、22℃、24℃、

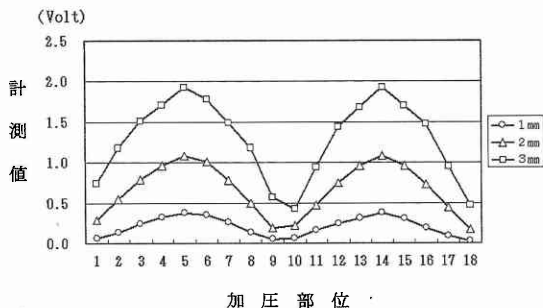


図6 空気圧力センサを加圧して得られた電位
加圧部位：1～18（14は5と同一の値）
加圧距離：1 mm, 2 mm, 3 mm

26℃、28℃の5条件とし、前述の測定装置にて、センサ中央部を加圧距離2 mmで10回ずつ加圧した。

平均値の差の比較には一元配置分散分析（ANOVA）とSheffeの多重比較を用いた。

4. 試験食品の嚥下運動測定

本装置の臨床应用到に先立ち、健常成人5名（平均29.6歳）の被験者を用いて、食品嚥下時の甲状軟骨の動態を観察した。試験食品には、嚥下が容易な食品として杏仁豆腐を、嚥下が困難な食品としてシフォンケーキを用いた。各試験食品を咀嚼することなく嚥下させるため、杏仁豆腐は20×30×15mm、シフォンケーキは20×20×15mmの大きさに調整した。各試験食品を咀嚼しないで嚥下させ、試作した嚥下運動測定装置を用いて、甲状軟骨の動態と運動時間を記録した。実験は各条件とも3回ずつ行い、平均値の差の検定にはStudent t-testを用いた。

結果

1. 空気圧力センサの特性

加圧距離が1 mmから2 mm, 3 mmと増加するに伴い計測値は増加した（図6）。また同一の加圧距離の場合、加圧部位がセンサの周辺部から中央部に移動するにつれて計測値は大きくなる傾向が認められた。

2. 空気圧力センサに対する室温の影響

室温が上昇するに伴い、計測値は増加する傾向を示した。室温が20℃と22℃の場合は、繰り返し加圧により計測値の減少が認められた（図7）。

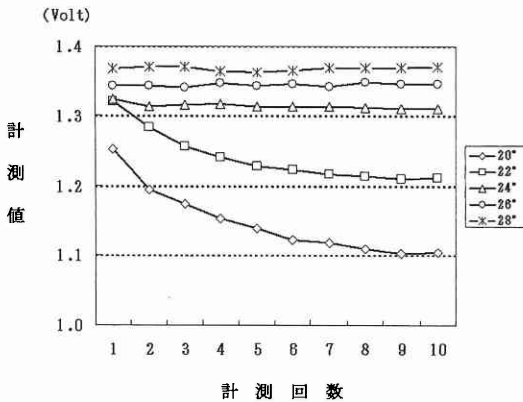


図7 室温による影響
24°C～28°Cでは安定している

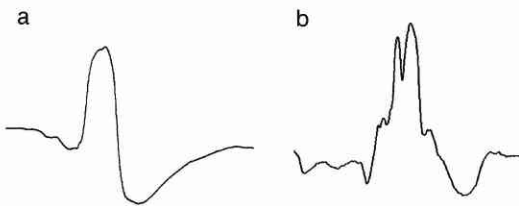


図8 試験食品を嚥下したときの波形
a : 飲み込みやすい食品 (杏仁豆腐)
b : 飲み込みにくい食品 (シフォンケーキ)

3. 臨床応用への検討

杏仁豆腐では、甲状軟骨の運動開始から運動終了まで比較的円滑な波形が得られた。一方、シフォンケーキでは上下的な波形は杏仁豆腐と類似しているものの、甲状軟骨の運動開始直後から波形の乱れ、嚥下が困難な様相が観察できた(図8)。

考 察

嚥下障害の程度は、舌の可動性と舌の容積とともに、食塊を口蓋から咽頭へ搬送する際の舌圧の程度に影響を受ける。Conley¹²⁾は、切除範囲が舌の1/2以下で、舌に限局し、残存した舌の創縁を縫縮した場合は、嚥下障害が生じたとしても比較的短期間で回復すると報告している。しかし、Logemann and Bytell¹³⁾は、舌を口腔底や口唇と縫合した場合は、残存する舌の運動が障害されるため、再建した場合よりも嚥下動作が著しく障害を受けると述べている。また、下顎区域切除や口

腔底切除後に口腔前方部の欠損を舌で閉鎖した場合は、舌運動が妨げられるため、舌の切除量に関係なく重度の嚥下障害が生じるといわれている。

このような障害をもつ嚥下運動を検査するためには、一般的に嚥下造影検査が用いられている。嚥下造影検査は、腫瘍などの診断に行われる咽頭・食道造影の意義のほか、運動学的見地から機能的診断としての意義があり、日本摂食・嚥下リハビリテーション学会では標準的検査法を推奨している⁹⁾。

しかし、本法を嚥下機能の評価法として日常の診療で頻回に応用するには、設備・機器が高額である点とエックス線の被爆防護の点から困難といえる。そこで、診療室で簡便に嚥下検査を行うことのできる装置が試作されてきた。Pehlivanら⁹⁾は脈波測定用のpiezoelectric sensorとdigital event counter/recorderを用いたdigital phagometerを開発し、嚥下の時間と回数を測定した。同様に、福島⁹⁾は喉頭の挙上運動をひずみトランスデューサを用いた装置で測定している。また、Afkari¹⁰⁾は加速度計とともに、筋電図とマイクロフォンの情報をも加味して測定している。最近では、反射型フォトセンサーを用いて前頸部の皮膚面形状変化を捉えることにより、喉頭運動を測定する方法が試みられている¹¹⁾。著者らは、日常の臨床で頻回に嚥下運動を測定することを目的に、甲状軟骨の運動を捉えるセンサとして空気圧力センサに着目した。今回使用した空気圧力センサは、脈波や表情等の皮膚動態観察に利用されている。

この空気圧力センサを応用するにあたり、センサの特性を調べる必要がある。そこで、加圧部位と加圧距離を変えた場合の電位を調査した。その結果、加圧距離が1 mmから2 mm, 3 mmと増加するにつれ、計測値が増加した。また、加圧距離が同じ場合には、センサの中央部に向かって計測値が大きくなった。このことは、甲状軟骨がセンサを圧迫する部位によって電位が異なることを意味している。したがって、本装置は嚥下の全相を検査できるものではなく、嚥下に対して甲状軟骨が運動する咽頭相における運動測定装置といえる。そのため、センサをシーネに位置づける際には、甲状軟骨の移動範囲を考慮する必要がある。

また、空気圧力センサは測定する環境、特に室温に影響を受けることが予想される。そこで、センサに対する測定時室温の影響を検討するため、室温を変化させて繰り返し加圧したときに発生する圧力を測定した。その結果、室温が上昇するにつれ、計測値が増加した。これは、センサを覆っている透明シートの弾力が、室温の高低により変化したためと考えられた。また、室温が20℃と22℃の場合は、繰り返し加圧により計測値の減少が認められた。したがって、本装置を臨床応用する際には室温の影響を考慮する必要があり、本実験の設定室温の中では24℃～28℃の範囲が適切であることが示唆された。

本装置の臨床応用に先立ち、食品嚥下時の甲状軟骨の動態を観察した。その結果、杏仁豆腐では、甲状軟骨の運動開始から運動終了まで比較的円滑な波形が得られた。一方、シフォンケーキでは上下的な波形は杏仁豆腐と類似しているものの、甲状軟骨の運動開始直後から波形が乱れ、嚥下が困難な様相を観察できた。これらの波形から嚥下時における甲状軟骨の運動を定性的に評価できる可能性が示唆された。

以上のことより、本装置は嚥下の咽頭相を捉えることができ、得られた波形から定性的、定量的に嚥下運動を測定することが可能である。また、センサと甲状軟骨との位置関係および室温を一定に保つことが必要であるが、装置が軽量でコンパクトであることから持ち運びが容易であり、チェアサイドで、患者への肉体的、精神的な負担も少なく、繰り返し測定が可能であるため、日常臨床で簡便に応用できることが示された。

結 論

日常の臨床で嚥下運動を簡便に測定することを目的に、空気圧力センサを応用して、甲状軟骨の動態を捉えることのできる測定装置を試作した。本装置の臨床応用に先立ち、空気圧力センサの特性と試験食品を嚥下したときの嚥下運動を測定した。

その結果、次の結論を得た。

1. 空気圧力センサは加圧部位が中央部に向かうほど電位が大きくなることが示された。

2. 空気圧力センサは室温の影響を受けるが、24℃～28℃の範囲が適切であることが示された。

3. 本装置は嚥下の咽頭相を捉えることができ、得られた波形から定性的、定量的に嚥下運動を測定することが可能であることが示された。

文 献

- 1) 清野和夫：顎義歯による機能改善とその限界。顎顔面補綴 25；42-43 2002.
- 2) 清野和夫，長谷剛史，田中久敏：下顎骨連続離断患者の補綴的治療法に対する検討。顎顔面補綴 3；65-68 1980.
- 3) 青木 一，橋爪正一，柴田由香里，阿部 桂ほか：下顎骨即時再建後の顎義歯の1症例。岩医大歯誌 15；44-50 1990.
- 4) 阿部 桂，青木 一，藤澤政紀，及川美香子ほか：下顎骨再建後における補綴的機能回復の評価。顎顔面補綴 14；116-121 1991.
- 5) 日本摂食・嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会：嚥下造影の標準的検査法。日摂食嚥下リハ会誌 8；71-86 2004.
- 6) 小野高裕，堀 一浩，田峰謙一，近藤重悟ほか：舌切除患者の術前，術後における嚥下時舌圧の変化。日本顎口腔機能学会第40回記念学術大会抄録集；30-31 2008.
- 7) Yokoyama, M., Mitomi, N., Tetsuka, K., Taya, N. *et al.* : Role of larungeal movement and effect of aging on swallowing pressure in pharynx and upper esophageal sphincter. *Larungoscope* 110；434-439 2000.
- 8) Pehlivan, M., Yuceyar, N., Ertekin, C., Celebi, G. *et al.* : An electronic device measuring the frequency of spontaneous swallowing : digital phagometer. *Dysphagia* 11；259-164 1996.
- 9) Fukushima, S., Shingai, T., Kitagawa, J., Takahashi, Y. *et al.* : Role of the pharyngeal branch of the vagus nerve in laryngeal elevation and UES pressure during swallowing in rabbits. *Dysphagia* 18；58-63 2003.
- 10) Afkari, S. : Measuring frequency of spontaneous swallowing. *Australas Phy Eng Sci Med* 30；313-317 2007.
- 11) 村山 愛，林 豊彦，中村康雄ほか：嚥下時における前頸部の皮膚面形状変化を利用した喉頭挙上運動の分析。信学技法 111；61-64 2005.
- 12) Conley, J.J. : Swallowing dysfunctions associated with radical surgery of the head and neck. *Arch Surg* 80；602-612 1960.
- 13) Logemann, J.A. and Bytell, D.E. : Swallowing disorders in three types of head and neck surgical patients. *Canser* 44；1095-1105 1979.

著者への連絡先：山森徹雄，(〒963-8611)郡山市富田町
字三角堂31-1 奥羽大学歯学部歯科補綴学講座

Reprint requests : Tetsuo YAMAMORI, Department of
Prosthetic Dentistry, Ohu University School of Dentistry
31-1 Misumido, Tomita, Koriyama 963-8611, Japan