

頸部インピーダンス波形の測定による嚥下機能評価

関 八州彦

嚥下機能の評価法としては、誤嚥の評価が出来る点で嚥下ビデオレントゲン検査(Videofluoroscopy 以下 VF 検査と略す)が現在最も有効な方法だが、欠点として放射線被曝が挙げられる。著者は嚥下評価の方法として危険性が少なく簡便な頸部インピーダンス検査に着目した。その実用性を調査するために、本研究では VF 検査を同時に測定して嚥下機能の評価を試みた。

舌、喉頭の動きなど随意運動が及ぼす影響、食塊の量、性状の影響、また嚥下障害のない60歳以上の高齢者と健康若年者を対象とした加齢による影響を検討した。VF 検査は座位で行い、液体及び半固形物としてゼリーを嚥下させた。インピーダンス測定器は独自に製作したものを使用し、嚥下前にインピーダンスレベルを測定した。嚥下時のインピーダンス波形と VF 画像を 8 mmビデオで同時に記録し、後に咽頭期の波形を中心に解析した。

咽頭期のインピーダンス波形は、舌運動に影響されないのに対して、喉頭の動きを反映していた。VF 検査での咽頭通過時間は高齢者群で有意に延長していた。若年者で咽頭期のインピーダンス波形の相は 1~2 相だが、高齢者では多相性となる傾向にあった。

頸部電気インピーダンス測定法は、嚥下時の咽頭領域の運動を大まかに把握できる点で意味があり、また測定が容易で非侵襲的である。これらの特性を活かし、嚥下の臨床評価の実用性をさらに検討したい。

(平成 9 年10月28日受理)

A Videofluorographic and Impedance Curve Study of Swallowing

Yasuhiko SEKI

Videofluoroscopy is considered to be the most accurate method for assessing oropharyngeal functions, swallowing physiology, or food as it is being swallowed, but it is an invasive radiographic technique. A number of non-imaging instrumentation procedures have been used to investigate various aspects of swallowing physiology including surface electromyography, electroglottography, and oropharyngeal manometry. The use of electroglottography, an impedance analysis of swallowing difficulty around the thyroid cartilage area, has been reported sporadically. I considered more information for impedance analysis must be available around the angles of the mandible. Using an electrical impedance technique and videofluoroscopy, the effects of voluntary movements, bolus, and aging were studied. Forty-seven normal volunteers were divided into two groups, a young adult group (23.0±

2.0years) and an elderly group (71.4±6.5years). For impedance measurements, I used an electric impedance meter that was made for this study. Simultaneously, videofluoroscopy was carried out and impedance waves were recorded. The waveforms of the pharyngeal phase were unaffected by tongue movements but were influenced by laryngeal movements. The young age group had simple impedance waveforms, whereas the old group showed the presence of early flowing into the pharynx or separated swallowing on videofluoroscopy, and delayed pharyngeal transit times. Polyphasic impedance waves appeared in most of the old individuals. Since pharyngeal transit times show a tendency to elongate, further wave analysis of the neck impedance technique may reveal details of latent dysphagic patients at the bedside. As a therapeutic tool, this procedure could prove useful in providing biofeedback for improving swallowing parameters. (Accepted on October 28, 1997)

Kawasaki Igakkaishi 23(3): 165-173, 1997

Key Words ① Neck electrical impedance ② Swallowing
③ Evaluation

はじめに

嚥下障害は、口腔や咽頭、食道の炎症や腫瘍など器質的な原因による通過障害、神経・筋疾患などの疾患による嚥下筋の機能的障害によっておこるとされる¹⁾。その中でも多発性脳梗塞の仮性球麻痺による嚥下障害は、リハビリテーション（以下リハと略す）科で遭遇する機会が多い。近年、嚥下に関するリハ医学の進歩により、嚥下障害の評価とその対処方法が確立されつつある。この進歩に大きく貢献したのがVF検査である。VF検査には、

①口腔相、咽頭相、食道相の運動を可視化でき、各相別の障害部、重症度の判定等が可能である。

②むせと誤嚥の関係を把握でき、危機管理が容易となる。

③嚥下しやすい食物形態を知ることができ、安全で段階的な訓練ができる。

④嚥下しやすい体位の選択ができる。

⑤治療効果を適切に評価できる。

等の多くの利点はあるが、

①放射線被曝が避けられない。

②検査中の造影剤の誤嚥の危険性がある。

③検査が大がかりで人手が必要である。

等の不利な点もある。嚥下障害の評価法としてはVF検査の他に、内視鏡検査、超音波検査、頸部の筋電図検査²⁾、食道内圧測定³⁾、電気声門図⁴⁾、核医学検査⁵⁾などが研究されてきた。いずれにせよ非侵襲的で簡便な検査法が求められるが、著者はこれらのうち生体電気インピーダンス検査の一つである電気声門図に着目した。これは元来発声障害の評価と訓練の目的で耳鼻科領域で行われている検査で、交流電流を声門をはさんで通電し、発声時の声帯の動きに伴う組織電気抵抗変化を、喉頭軟骨上縁に配置した電極から導出、計測する⁴⁾。筋電図が生体から発せられる電気信号を計測するのに対して、インピーダンス法は、外部から生体に交流電流を与え、それに対する出力から入出力（出力/入力）の比を計測するものである⁶⁾。インピーダンスはこれまで血流や呼吸の計測、嚙発見器といった精神神経活動の検出など、さまざまな生体計測に応用されている。生体に無侵襲で長時間の計測が可能な点から、電気声門図の電極配置を独自の配置に変更し、嚥下評価へ応用の可能性について調査・研究することを試みた。すなわち嚥下時の頸部のインピーダンス値を経時的にインピーダンス波形として記録、VF検査を同時に

記録して嚥下機能の評価を行った。この研究に関して、著者ら⁷⁾はこれまでVF検査との同時記録で高齢者の嚥下機能評価を行っている。対象を嚥下状態に問題のない60歳以上の高齢者群とし、20歳前後の若年者群と比較し、次の結果を得た。

- ①咽頭通過時間は液体、ゼリーとの間に両群とも有意差は見られなかった。
- ②ゼリーでは有意差が見られなかったが、液体の咽頭通過時間では若年者に対して高齢者群で有意に延長していた。
- ③高齢者群では咽頭期異常所見が多く確認された。
- ④インピーダンス波形では高齢者群で多相性となるものが多かった。

本研究ではまず研究1として、インピーダンス波形の各部位と嚥下の各相との対応の確認、随意運動、食塊が波形にどう影響するか、など基本的な点を健康若年者を対象に調査した。また研究2では研究1をさらに進め、頸部インピーダンス波形の記録から加齢が嚥下機能に与える影響を検討した。

方 法

A. 頸部インピーダンスの測定

頸部インピーダンスの測定は、岡山大学工学部電気電子工学教室で山本らにより独自に製作されたインピーダンス測定器を使用した。Figure 1に示すように測定器は、発振器、電圧電流変換器、差動増幅回路、同期整流回路、ローパスフィルター、レベルシフト回路などからなる。インピーダンス法は通常、通電電極（電流電極）と電位の検出電極が使われ、外側2個の電極間

- に周波数50~100kHz, 0.1~1 mAの強さの電流を通電し、内側2個の電極から電位を検出する四電極法が用いられる。低い周波数では電極インピーダンスが無視できず、電極やその配置に注意が必要である。逆に周波数が高すぎると入力インピーダンスの低下などの問題も生じる⁸⁾。そのため Yamamoto ら⁹⁾の条件を参考に、周波数を50kHz, 電流を500 μ Aに設定した。頸部インピーダンスはFigure 2のように下顎角を挟んで上後方に電流電極、前下方に電位電極を配置して測定した。これは予備実験から、
- ①電極の設置位置が体表面からわかりやすく、再現性がよい。
 - ②頭部の運動や頸動脈拍動の影響を受けにくい。
 - ③インピーダンス変化量が大きい。

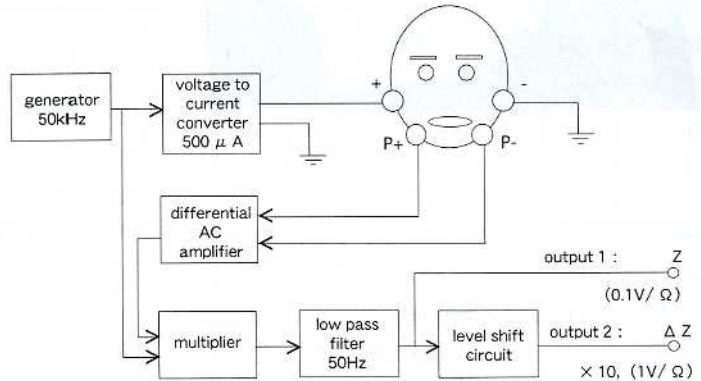


Fig. 1. Block diagram of measuring system.

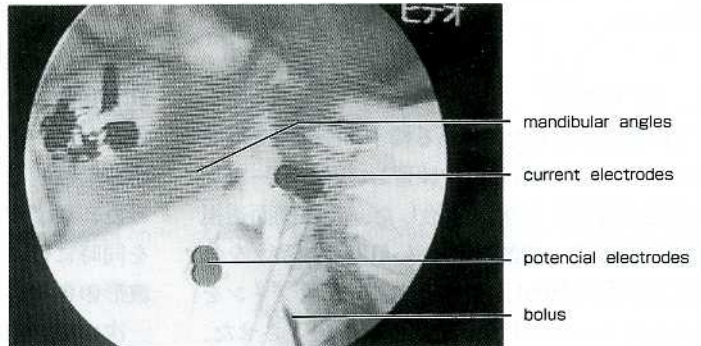


Fig. 2. Location of four electrodes.

The electrodes were placed on each side of the mandibular angles.



Fig. 3. Cervical orthosis used to stabilize head.

④嚥下運動によって、わかりやすい波形が得られる。

との理由で選択した。Yamamotoら⁹⁾は、頭部の運動がインピーダンスの平均値であるインピーダンスレベル、および変化量に影響を与えることを報告しているので、頸椎固定用装具（商品名アドバンフィット；Fig. 3）で安定を図った。また嚥下開始前にインピーダンスレベルを測定した。

B. VF 検査

VF 検査は背もたれのある椅子に座位をとらせて行い、10mlの水のみで練習し、インピーダンス変化を確認した後に開始した。X線側面透視画像の観察で、硫酸バリウム(120w/v%)を2倍に希釈した10ml、またガストログラフィンを混入したコーヒーゼリー小匙1杯を嚥下させた。次にX線正面透視画像の観察を行い、同様の嚥下を行った。これまでVF検査で一般に使用さ

れていたバリウム、ガストログラフィンの肺毒性¹⁰⁾が研究会・学会で問題になってきたため、研究半ばからは主に非イオン性造影剤のイオパミドールに変更し、使用した。なお、研究を通じてバリウム、ガストログラフィン服用による肺炎、肺水腫などの合併症は認められなかった。また変更前後で検査用食品の物質的性状に影響はなく、味に多少の変化がみられた程度で、研究に支障はなかった。

検査の実施にはインピーダンス波形の記録機とX線透視画像を2台の8mmビデオカメラで同時記録をした。記録に際しては、テープを同期させるため嚥下開始時に、透視画像のモニターとインピーダンス波形記録用紙に向けてフラッシュを発光させて目印にした。インピーダンス波形を画像記録したビデオから、発光時にあったペン先の位置を、記録用紙の目盛りを見て確認した。その後2台の8mmビデオデッキで咽頭通過時間、咽頭期異常所見、インピーダンス波形を1/30秒単位で検討した。咽頭通過時間は、食塊の先端が口蓋垂に達した時から、食塊の後端が第6頸椎下端高位を通過するまでの時間とした。

結果はt検定を用いて統計処理を行った。

研究1

(正常インピーダンス波形の各波形成分の確認と随意運動、食塊の影響)

対象と方法

男性は20歳、20歳、29歳の3名、女性はいずれも19歳の女性3名、計6名の健康な男女を対象とした。すべて嚥下機能に関して問題はなく、十分な説明をし、同意が得られた上で研究を行った。まずVF検査と頸部インピーダンス測定を同時に行って、摂食嚥下時のインピーダンス波形の各波形成分を調査した。

次に随意運動の影響を調べるために、舌を左右に振る、後方へ引く、舌尖を硬口蓋に強くあてる、喉頭を挙上したまま保持する、という運

動を指示し、インピーダンス波形を記録した。

食塊の影響は量、性状、温度について調査した。すなわち、嚥下する量については1, 3, 5, 10, 20, 40mlの水で比較。性状については約10mlで同量の水、液状高栄養食、ゼリー、クッキーを嚥下。温度の影響については、8°Cと40°Cの水10mlを嚥下し、比較した。

結 果

Figure 4で小匙一杯のゼリーを摂食嚥下した時のインピーダンス波形例を示す。VF検査との同時記録で

- ①安静時
- ②開口
- ③咀嚼
- ④嚥下反射出現(咽頭への食塊流入)
- ⑤喉頭挙上(食塊の食道への送り込み)
- ⑥食塊の食道通過後

の時期が確認された。舌を左右に振る(Fig. 5b)、後方に引く、舌尖を硬口蓋に強く押し当てるように(Fig. 5c)、と指示した舌運動では、波形の変化量は咽頭通過時(④~⑥; Figs. 4b, 5a)の変化量に比べて小さいものだった。嚥下した後そのまま喉頭挙上位で保持させる(Fig. 5d)と、波形は⑥まで戻らず⑤の位置のインピーダンスとなった。温度、性状については目立った波形の相違はみられなかった。クッキーとゼリーとは咀嚼後の嚥下時を比較しているので、差がみられなかった。また一回に嚥下する量が増えるほど多相性となる傾向があった。Figure 6の被験者では、一回で嚥下することが困難となった20mlの嚥下で咽頭期が延長し、3相性となっていた。また40mlの嚥下では5相性となった。

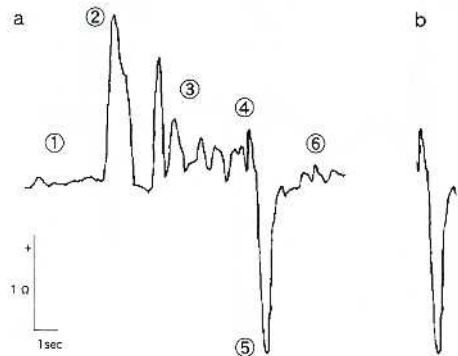


Fig. 4. Waveforms of normal swallowing(a) and pharyngeal phase(b).
 ① at rest
 ② opening mouth
 ③ mastication
 ④ beginning of pharyngeal phase
 ⑤ elevation of larynx
 ⑥ bolus passing through upper esophagus

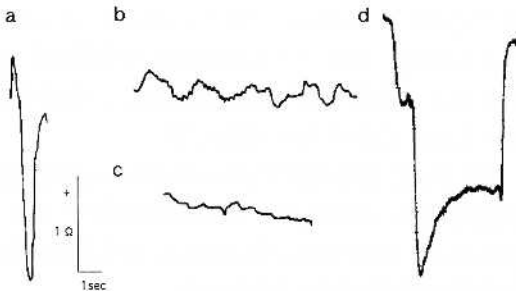


Fig. 5. Effects of various voluntary movements on waveforms.
 a : normal pharyngeal phase (same as Fig. 4b)
 b : waveform during swinging tongue
 c : pressing tongue to hard palate
 d : holding elevated larynx

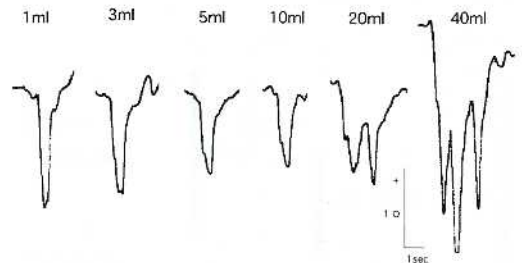


Fig. 6. Effects of volume of water on waveforms. When more than 20ml was swallowed, the pharyngeal phase was delayed and the waveform became polyphasic.

研究2

(加齢の影響)

対象と方法

10mlの液体あるいは小匙1杯のゼリーを嚥下したときのインピーダンス波形記録とVF検査を同時に行い、高齢者群と若年者群の嚥下機能をインピーダンス波形や咽頭通過時間で比較検討した。

被験者は、若年者群が19歳から28歳までの30名(男性18名,女性12名,平均年齢 23.0 ± 2.0 歳),高齢者群は61歳から82歳までの17名(男性10名,女性7名,平均年齢 71.4 ± 6.5 歳)であった。なお以前に行った研究⁷⁾では若年者の被験者数が12名と少なかったため,この研究ではあらためて別の30名で検査を行った。47名の被験者は全て過去の既往歴,現在治療中の疾患,また通常の嚥下状態について問われ,神経学的に問題がなく,嚥下に関する訴えのないことが確認された。全ての検査は,その説明を行い,同意を得た後に施行した。

結 果

インピーダンスの平均値であるインピーダンスレベルは,若年者群の平均値 28.0Ω ,高齢者群では 29.2Ω と,年齢によって有意差はみられ

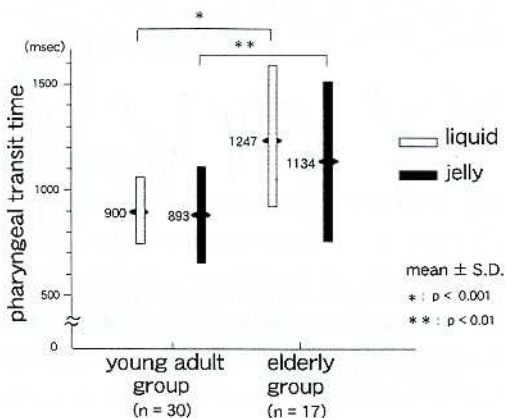


Fig. 7. Pharyngeal transit time

Table 1. Mean phases of impedance waveforms. young adult group elderly group n=30 n=17

	young adult group n=30	elderly group n=17
liquid	1.7 ± 1.0	4.1 ± 1.4 $p < 0.0001$
jelly	1.5 ± 0.8	3.4 ± 1.8 $p < 0.001$

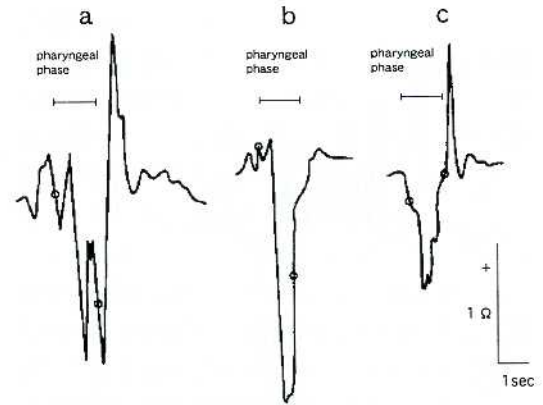


Fig. 8. Impedance waveforms of elderly subjects. The waveforms tended to become polyphasic.

なかった ($p=0.673$).

VF検査による咽頭通過時間は,液体とゼリーとの間には若年者群,高齢者群とも有意差はみられなかった。液体の咽頭通過時間は,若年者群で 900 ± 158 msecであったのに対して,高齢者群では 1247 ± 327 msecと有意に延長していた ($p < 0.001$)。ゼリーでも同様に若年者群 893 ± 216 msec,高齢者群 1134 ± 369 msecと有意差 ($p < 0.01$) がみられた (Fig. 7)。

VF検査で若年者群ではみられなかった咽頭期異常所見は,高齢者群では食塊が咽頭へ早期に流入する,喉頭蓋谷に残留するなど何らかの異常所見が17例中13例でみられた。

咽頭期のインピーダンス波形は液体で若年者群が 1.7 ± 1.0 相であるのに対して,高齢者群は 4.1 ± 1.4 相で有意 ($p < 0.0001$) に多相性となっていた。ゼリーでも同様に若年者群 1.5 ± 0.8 相,高齢者群 3.4 ± 1.8 相と有意差 ($p < 0.001$) がみ

られた (Table 1). すなわち電極の位置によってインピーダンスの変化量は異なるものの、健康若年者の嚥下時咽頭期のインピーダンス波形は1~2相になるのに対して、高齢者では多相化した波形となるものが多かった。Figure 8に、高齢者の波形例を示す。咽頭期にaは4相性、cは3相性の波形をとっている。咽頭通過時間は、「食塊の先端が口蓋垂に達した時から、食塊の後端が第6頸椎下端高位を通過するまでの時間」と定義したが、bの波形と咽頭期の関係は、喉頭挙上開始前に咽頭早期流入があることを反映している。

考 察

嚥下障害は、脳血管障害に限らず様々な疾患で問題となる。しかしながら見過ごされたり客観的な評価がなされないまま必要以上に経管栄養を続けている例も多い。誤嚥性肺炎を繰り返すためにやむなく経鼻栄養をとることもあろうが、非生理的であり、「食べる楽しみという人間としての喜び」¹¹⁾を奪っていることも事実である。しかしながら嚥下障害に対する問題意識は高まってきており、研究会を経て1996年に発足した日本摂食・嚥下リハ学会には多くの医師、歯科医師、看護婦、栄養士、言語療法士、理学療法士、作業療法士、歯科衛生士、保健婦などが入会しており、学会場ではその学際的な研究報告を聞くことができる。

川崎医科大学リハ科においても評価から嚥下訓練を中心とした治療までチームアプローチがなされている。VF検査に関してみれば1995年11月から1996年10月までに、94例120回施行されている。脳血管障害による嚥下障害が94例中43例と半数近くを占めるが、口腔・咽喉部の腫瘍摘出後の嚥下障害が多いのが当科の特徴であろう。

嚥下、特に短時間に多数の神経・筋が複雑な協調運動を行う咽頭期については、これまで筋電図、食道内圧測定、超音波検査法など様々な手法で研究されてきた¹²⁾。針筋電図では侵襲的で疼痛を伴う。表面筋電図では個々の筋の測

定ができない欠点があるものの、喉頭挙上の際の記録をバイオフィードバック法に利用できる有用性がある。食道内圧測定法はトランスデューサーを用いて正常の嚥下生理において研究されてきたが、輪状咽頭筋の弛緩不全の際、手術適応を判断するのに有用である。ただ比較的侵襲的な検査であり、圧変化の理由を確認するためにはVF検査と併用する必要がある。超音波検査法はオトガイ下部に探索子を当てて嚥下中の舌や舌骨の運動を見るものだが、手軽で非侵襲的である反面、誤嚥の確認はできない。電気声門図はこれまでの研究で、誤嚥の確認はできない、再現性に問題があるなどの欠点はあるものの、その非侵襲性に著者は着目した。電極配置を独自の位置に変更し、嚥下のインピーダンス検査法を目的として研究を行った。

まず得られたインピーダンス波形の意味をVF検査を利用して検討、そしてその波形に影響を与える因子について研究した。

著者が選択した電極位置では、舌の運動、すなわち舌筋群の収縮は波形にあまり影響を与えないようであった。しかし嚥下時に喉頭挙上位で保持させた場合は、咽頭期の波形が大きく変化した。このことはFigure 4で⑤のピークが喉頭挙上を反映していると考えられ、咽頭期のインピーダンス波形は随意運動の影響を受けうる、という事にもなる。食塊の影響については、温度、性状ともはっきりした傾向はつかめなかった。ただ嚥下する量が増えれば、多相性の波形パターンになるようであり、個々人で適切な一回嚥下量というものがあると推測される。

次に頸部インピーダンス測定とVF検査を同時記録し、高齢者群と若年者群の嚥下機能を、インピーダンス波形や咽頭通過時間で比較検討した。咽頭通過時間は液体とゼリー間で有意差がなかったが、高齢者群の方が若年者群に比べて液体とゼリーいずれも有意に延長していた。なお文献7の研究では液体についてのみ有意差がみられた。高齢者のVF画像では咽頭早期流入や喉頭蓋谷残留など咽頭期異常所見が目立ったが、加齢によって神経系の機能低下、筋や靭帯

の弛緩を来たし、結果嚥下の予備力が低下したと考えられる¹³⁾。咽頭通過時間の延長はその結果を反映しているのではない。

インピーダンス波形は高齢者群で多相化がみられたが、これは食塊通過において予備力低下を代償しようと、単純な喉頭挙上以外に本人にとって都合のよい舌骨筋群や咽頭筋群の収縮パターンを確立しており、それが波形に反映されたのではないかと推察できる。もしそれが正しければ、多相性となった波形のみを見て異常と捉え、若年者のような単相波形となるよう嚥下訓練を行う、といったことは無意味であろう。

著者¹⁴⁾は老人保健施設入所中の高齢者31名(平均年齢78.5±6.3歳)を対象に、十分な説明を行い、同意を得た上で、頸部電気インピーダンス検査下に水のみテストを実施している。10mlで58%、30mlで74%に多相性のインピーダンス波形がみられ、高齢者で嚥下予備力が低下しているという当論文の結果を支持するものとなった。さらに水のみテストでむせがあった6例についてはVF検査と嚥下インピーダンス検査法の同時記録を行い、2例で誤嚥を確認した。

このように臨床で嚥下障害の補助診断としての、頸部電気インピーダンス検査法の可能性が示唆される。

頸部電気インピーダンス法の現在の問題点は、測定機器の再現性は十分あるにも関わらず、被験者側の緊張や慣れ、食塊を咽頭に送り込み嚥下するという随意運動などの要素が波形の再現性に影響するという点である。この被験者側の再現性を高める工夫は今後にも必要である。

いわゆるインピーダンス法は、定量的には限界があるが、定性的に無侵襲で長時間の連続測定が可能、という特徴をもっており、今後もVF検査から情報を得つつ、嚥下時の頸部電気インピーダンス法の可能性を探っていく考えである。

稿を終えるにあたり、川崎医科大学リハビリテーション科 明石 謙教授の御指導と御校閲に深甚なる謝意を表します。またインピーダンス測定器の作成と終始有益な御助言を下された岡山大学工学部 山本尚武助教授に深謝致します。

本研究は厚生省長寿科学総合研究事業の援助によって行われ、本論文の一部はその報告会において発表した。

文 献

- 1) 藤島一郎：脳卒中の摂食・嚥下障害とリハビリテーション。脳卒中の摂食・嚥下障害。医歯薬出版。1993、pp 1-16
- 2) Schults JL, Perlman AL, VanDaele DJ: Laryngeal movement, oropharyngeal pressure, and submental muscle contraction during swallowing. Arch Phys Med Rehabil 75: 183-188, 1994
- 3) Robbins J, Hamilton JW, Lof GL, Kempster GB: Oropharyngeal swallowing in normal adults of different ages. Gastroenterology 103: 823-829, 1992
- 4) Perlman AL, Grayhack JP: Use of the electrogoniograph for measurement of temporal aspects of the swallow. Dysphagia 6: 88-93, 1991
- 5) Silver KH, Van Nostrand D, Kuhlemeier KV, Siebens AA: Sintiography for the detection and quantification of subglottic aspiration. Arch Phys Med Rehabil 72: 902-910, 1991
- 6) 金井 寛：インピーダンス計測の基礎と臨床への応用。臨床検査 26: 421-429, 1982
- 7) 関八州彦, 山本尚武, 水野雅康, 明石 謙：高齢者のインピーダンス波形と嚥下ビデオレントゲン検査に関する研究。長寿科学総合研究 6: 118-122, 1995
- 8) 金井 寛：生体電気インピーダンスとその臨床応用。医用電子と生体工学 20: 140-146, 1982
- 9) Yamamoto Y, Nakamura T, Seki Y, Akashi K: Measuring system of impedance pharyngography for diagnosis of swallowing disorders. Med Biol Eng Comput 34: 179-180, 1996

- 10) Gray C, Sivaloganathan S, Simpkins KC: Aspiration of high-density barium contrast medium causing acute pulmonary inflammation. *Clinical Radiology* 40: 397-400, 1989
- 11) 椿原彰夫, 千野直一: リハビリテーションにおける嚥下障害の評価. *総合リハ* 17: 435-441, 1989
- 12) Logemann JA: Non-imaging techniques for the study of swallowing. *Acta Oto-rhino-laryngologica Belg* 48: 139-142, 1994
- 13) Heeneman H, Brown DH: Senescent changes in and about the oral cavity and pharynx. *J Otolaryngol* 15: 214-216, 1986
- 14) 関八州彦, 水野雅康, 椿原彰夫, 明石 謙: 嚥下インピーダンス検査法の診断への応用. *長寿科学総合研究* 7: (印刷中), 1996