

インピーダンス咽頭図(IPG)を用いた加齢による 嚥下機能減退の定量的評価法

楠原俊昌, 中村隆夫, 森恵子¹⁾, 山本尚武, 白川靖博²⁾, 猶本良夫²⁾

要 約

インピーダンス咽頭図(Impedance Pharyngography, 以下IPG)は嚥下活動中の頸部電気インピーダンスを測定するもので, 嚥下機能評価を簡便かつ無侵襲に行うことができる手法である。IPG波形は嚥下機能を反映するものであるが嚥下機能の減退による波形への影響はその原因により様々である。すなわち嚥下機能の状態が異なる被験者のIPG波形を直接比較・診断することは測定者の主観に依存することになり客観性に欠ける。本研究では, まず青年健常者のNormal IPGをもとに嚥下機能が反映される波形の特徴を評価するパラメータとして, 咽頭通過時間, インピーダンス変化率, 類似度, 嚥下音タイミングの4つを採用し, IPGを定量的に評価する手法を提案した。また, この評価法を高齢者のIPGに適用し, 青年健常者に比べて嚥下活動に関与する器官が円滑に活動を履行する能力に減退が生じる様子を定量的に示した。

キーワード: 嚥下活動, 嚥下障害, 生体電気インピーダンス, インピーダンス咽頭図(IPG), 嚥下機能評価

はじめに

脳血管障害, 神経・筋変性疾患などにより発生する嚥下障害は人から食の楽しみを奪い, QOL (Quality of Life) を著しく低下させる¹⁾。高齢化社会を迎えた今日, 嚥下障害患者は増加する傾向にあることから, 嚥下障害は社会福祉的課題といえる²⁾。また, 医療技術の進歩により食道癌などの頭頸部術後患者の余命は長期化し, 術後に発生する嚥下障害をリハビリテーションによって克服して経口摂取を再獲得するケースも増加している。したがって, 診断・治療のみならずリハビリテーション領域でもトレーニングの評価ツールとして工学技術を応用する研究が注目されつつある²⁻⁴⁾。しかしながら現在は嚥下障害を診断する機器として, 超音波検査, 内視鏡検査, X線透視検査などが広く用いられ, 解剖学的構造や嚥下動態の異常を観察するに留まっている⁵⁻⁸⁾。すなわち, 嚥下障害の有無, 程度あるいはリハビリテーションの達成度などは, その検査に立ち会う医師と患者(被験者)の主観的な判断に強く依存している。

これに対し我々はスクリーニングやリハビリテー

ションなどにも応用できる簡便な嚥下機能の定量評価法の確立を目的として, 嚥下活動中の頸部電気インピーダンスを無侵襲に計測するインピーダンス咽頭図(Impedance Pharyngography, 以下IPG)を提案し, 各種検討を行ってきた⁹⁻¹³⁾。IPG波形は嚥下機能を反映するものであるが嚥下機能の減退による波形への影響はその原因により様々であり, 嚥下機能の状態が異なる被験者のIPG波形を直接比較・診断することは測定者の主観に依存することになり客観性に欠ける。

そこで本研究では, IPGと共に食塊が咽頭を通過した際に発生する嚥下音を取得する測定システムを用いて青年健常者に対する測定を行い, このNormal IPGをもとに嚥下機能が反映される波形の特徴を評価するパラメータとして, 咽頭通過時間, インピーダンス変化率, 類似度, 嚥下音タイミングの4つを採用し, IPGを定量的に評価する手法を提案する。さらに, 高齢者に対しても同様の測定を行いこの評価法を適用し, 青年健常者に比べて嚥下活動に関与する器官が円滑に活動を履行する能力に減退が生じる様子を定量的に示す。

岡山大学医学部保健学科放射線技術科学専攻

1) 岡山大学医学部保健学科看護学専攻

2) 岡山大学大学院医歯学総合研究科病態制御科学専攻

方 法

1. Impedance Pharyngography (IPG)

測定システムを図1に示す。IPGを測定するインピーダンスメータ^{9,10,13}の他、加速度検出型の心音センサ(TA-701T, 日本光電)を用いて、咽頭を食塊が通過する際に発生する嚥下音も測定する¹⁴。これにより嚥下活動に関与する器官の動きと実際の食塊の移動のタイミングが適正であるか否かを検出する。IPGと嚥下音のデータはサンプリング周波数2 kHzでA/D変換されてノートパソコンで両波形の表示と記録が行われる。被験者は、測定の趣旨と測定方法を説明して測定に同意を得た嚥下障害のない人に限定している。被験者には背もたれの角度を75 degに設定したシートに腰掛けてもらい、測定開始までに食塊(水10 cc)を口に含んでもらう。そして指示ランプの合図に従い嚥下活動を開始する。測定時間は嚥下活動前後の安静時間も含め、1回につき10 sとした。

図2は青年健常者(21歳男性)のIPG測定結果である。嚥下開始の合図は0 sの時点である。VF検査との照合により、同図の区間Ⅰが食塊が口腔の中を移動する口腔期、区間Ⅱが嚥下反射が起こって食塊が咽頭を通過する咽頭期、区間Ⅲが嚥下反射が終了して嚥下活動に関与する器官が元へ戻る食道期に対応していることが確認されている¹⁵。また、嚥下音とIPGとの対応に注目してみると、食塊が咽頭を通過する咽頭期に嚥下音が活発に発生していることがわかる。このように嚥下機能が健常な青年において高い再現性で観測されるIPGを「Normal IPG」と定義する。

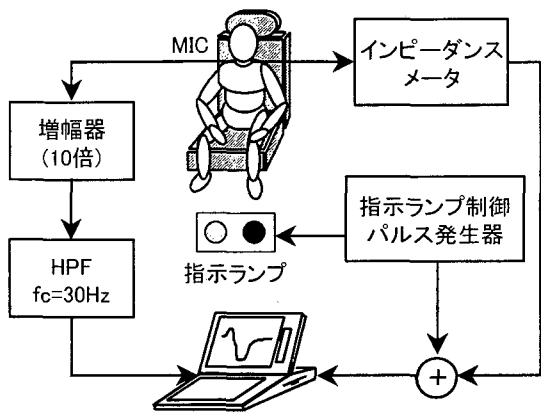


図1 IPG測定システム

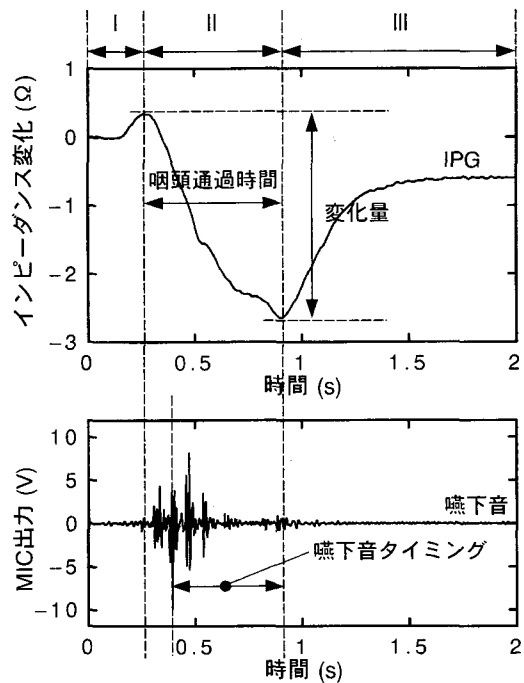


図2 Normal IPGと嚥下音(21歳, 男性)

2. 評価パラメータ

高齢者のIPG波形については後述するが、多くの場合高齢者のIPGは加齢に伴う嚥下機能の減退により青年のNormal IPGとは異なる波形となる。また、高齢者のIPGは再現性が低下し、個体差も大きいいため、波形を他の高齢者あるいは青年健常者のそれと単純に比較することができない。そこで、Normal IPGの特徴を評価するパラメータを定義してIPGを解析する。これにより嚥下機能を定量的に表現して年齢層の異なる被験者間の比較が可能になる。我々はNormal IPGの特徴から以下の4つの評価パラメータを採用している。

1) 咽頭通過時間: T_p

同一被験者に対するIPG測定回数を n , m 回目の測定で取得されたIPG波形の咽頭通過時間(図2参照)を T_m とするとき、咽頭通過時間 T_p を次式で定義する。

$$T_p = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n T_m \quad (1)$$

T_p の値は被験者が嚥下活動を行なったときの咽頭期の平均時間を示すものであり、嚥下活動に関与する器官の嚥下プログラムの遂行速度を評価するパラメータといえる。咽頭期の平均時間を求めているため、 n をある程度大きい値にしなければ信頼性の高い T_p が得られないことになるが、高齢な被験者

への時間的・体力的負担を考慮して今回は $n=5$ とした。また、食塊を一度に飲み込めずに複数回に分けて飲み込んだ被験者のIPGはその回数分多相化するが、パラメータ値の算出には、嚥下音の発生が確認できる、インピーダンス変化量が最も大きい相の波形を採用した。

2) インピーダンス変化率： Z_C

同一被験者に対してIPG測定を n 回行ない、その波形から求めた安静時のインピーダンスレベルの平均値を Z_A 、IPGの変化量の平均値を dZ_A とするとき、インピーダンス変化率 Z_C を次式で定義する。

$$Z_C = \frac{dZ_A}{Z_A} \quad (2)$$

Z_C の値は被験者のIPGの平均的な変化率を示すものであり、嚥下活動に関与する器官の運動の大きさを評価するパラメータといえる。また、 T_p のところで述べたように、 Z_A 、 dZ_A を求めるための測定回数 ($=n$) は5回である。図2ではインピーダンス「変化」で表現しているため、インピーダンスレベルを読み取ることができないが、通常は 20Ω 後半から 60Ω 程度である。また、このパラメータについても多相化したIPGに対する値の算出には、嚥下音の発生が確認できる、インピーダンス変化量が最も大きい相の波形を採用した。

3) 類似度： S

類似度は被験者のIPG波形が、嚥下機能が健全な場合に観測されるIPG波形にどの程度似ているかを示すものである。この評価の基準波形となる「基準IPG」(図3)は青年健全者35人のNormal IPGから以下の手順によって生成したものである。

1人の青年健全者につき5回IPG測定を行ない、正規化平均波形を作成しインピーダンスレベルが 0Ω になるようにレベルシフトする。さらにピーク・ピーク値が 2Ω となるように正規化した波形を Z_{2pp}

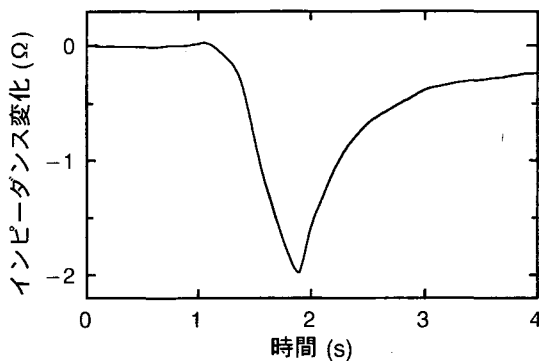


図3 基準IPG

とする。35人の Z_{2pp} を平均化した波形を求め、さらに、このピーク・ピーク値が 2Ω となるように正規化した波形を基準IPGと定義し、これを F とする。次に、比較する被験者についても Z_{2pp} を求め、この波形を G とする。このとき、類似度 S を次式により定義する。

$$S = \frac{\sum_{i=1}^j F_i \cdot G_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^j F_i^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^j G_i^2}} \quad (3)$$

ただし、 F_i および G_i ($1 \leq i \leq j$) は、それぞれ j 個の時系列データから成る F および G の第 i 番目の値である。本研究では図3に示したように4s分の基準IPGを用意したので $j=8000$ である。比較する被験者のIPGについては咽頭期が終了してインピーダンスが最小値になる時刻の前後2sを計算の対象とした。また、このパラメータについても多相化したIPGに対する値の算出には、嚥下音の発生が確認できる、インピーダンス変化量が最も大きい相の波形を採用した。式から分かるように、評価されるIPGが基準IPGの波形に似かよるほど S の値は大きくなる。2つの波形が完全に一致するときに S は最大値の1になり、逆相であれば最小値の-1になる。これは嚥下活動に関与する器官の動態の健全性を評価するパラメータといえる。

4) 嚥下音タイミング： T_T

同一被験者に対するIPG測定回数を n 、 m 回目の測定で取得されたIPG波形が最小値をとる時刻(咽頭期終了時刻)を T_{Zm} 、嚥下音の振幅が最も大きい時刻を T_{Sm} とするとき、嚥下音タイミングを次式により定義する。

$$T_T = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (T_{Zm} - T_{Sm}) \quad (4)$$

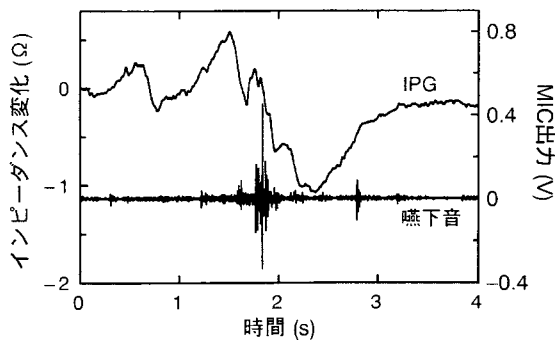
図2のNormal IPGのように、食塊は咽頭期に咽頭を通過することが正しいタイミングであることから、Normal IPGを評価した場合には T_T は咽頭通過時間 T_p よりも小さい正の値になる。すなわち T_T は嚥下活動に関与する器官の動作と実際の食塊の搬送のタイミングを評価するパラメータといえる。また、他のパラメータと同様、 T_T を求めるための測定回数 n は5回である。また、このパラメータについても多相化したIPGに対する値の算出には、嚥下音の発生が確認できる、インピーダンス変化量が最も大きい相の波形を採用した。

結 果

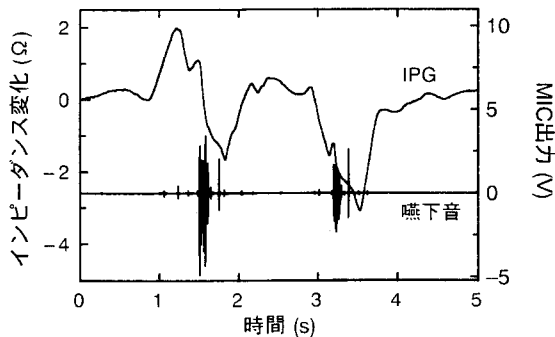
図4にパラメータ解析の対象となる高齢者のIPG測定結果を3例示す。高齢者のIPGはこの3波形のいずれかに分類できることが多い。まず、3波形に共通する特徴は、被験者が嚥下障害者ではないために誤嚥がなく、嚥下音が活発に発生するタイミングは常に咽頭期と同期していることである。一方、3波形それぞれに特徴的な点としては、下記が挙げられる。

図4(a)：嚥下活動に関与する器官の運動能力が低下することによってIPGの変化量が少なくなったり、嚥下活動に違和感を感じてIPGが不安定に変動する。

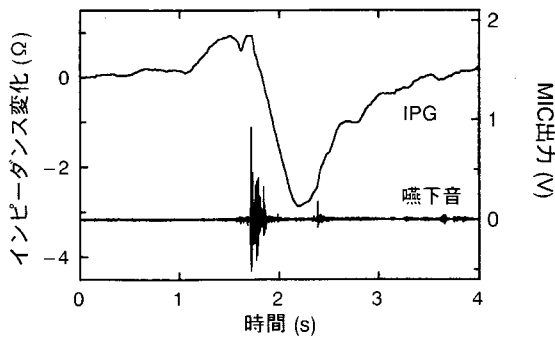
図4(b)：食塊を一度に飲み込めないために嚥下動作を繰り返すことが原因となってIPGが多相化する。



(a) 77歳、女性



(b) 75歳、男性



(c) 82歳、女性

図4 高齢者のIPGと嚥下音

図4(c)：(a), (b)に比べて該当する被験者数は少ないが、高齢となっても嚥下活動が健常で、青年健常者のNormal IPGに近い波形が高い再現性をもって得られる。

しかしながら、嚥下機能が減退する原因には複数の要素があり、それらが複合的に作用する場合もあるため、(a), (b)の現象が同時に観察される場合もある。さらに、(a), (b)に分類される同一被験者のIPGは再現性が低く、同年代の他の被験者のIPGと比較しても類似性が乏しいことも特徴的であり、嚥下機能の状態が異なる被験者間で1回分のIPG波形を単純に比較することは難しいといえる。

次に図4の被験者を含む嚥下障害のない高齢者30人(76.2±5.4歳)のIPGについてパラメータ解析を行なった結果を表1に示す。コントロールとして青年健常者20人(24.1±2.5歳)のIPGに対する解析結果も併記した。また、両グループのパラメータ値の有意差を確認するためにt検定を行なった。各パラメータの値の解釈と有効性の検討については後述するが、咽頭通過時間 T_p は高齢者0.801±0.186 s、青年健常者0.644±0.145 sで高齢者の方が大きく、インピーダンス変化率 Z_C は高齢者4.73±2.26%、青年健常者7.66±4.21%、類似度 S は高齢者0.809±0.233、青年健常者0.908±0.089で高齢者の方が小さい値となった。また、嚥下音タイミング T_T は高齢者0.461±0.233 s、青年健常者0.384±0.154 sであったが、t検定によって両グループ間で有意差が認められない($P>0.05$)ことが判明した。

表1 パラメータ解析結果

	高齢者(30人)	青年健常者(20人)	P (t 検定)
年齢(歳)	76.2±5.4	24.1±2.5	—
咽頭通過時間 T_p (s)	0.801±0.186	0.644±0.145	0.0084 **
インピーダンス変化率 Z_C (%)	4.73±2.26	7.66±4.21	0.025 *
類似度 S	0.809±0.233	0.908±0.089	0.0075 **
嚥下音タイミング T_T (s)	0.461±0.233	0.384±0.154	0.332 n.s.

** : $P<0.01$ * : $P<0.05$ n.s. : non significant

考 察

咽頭通過時間 T_p の結果より、高齢者の咽頭期は青年健常者に対して長期化する傾向があることが示された。これは加齢によって舌骨、甲状軟骨、輪状軟骨からなる喉頭の挙上動作が緩慢になっていることや、食塊が円滑に咽頭を通過することができなくなりつつあることが原因と考えられる。高齢者の T_p のばらつきがやや大きいのは加齢により個体差

が大きくなる傾向があることを反映している。また、高齢となっても青年健常者と同程度に嚥下活動に関与する器官の動作速度を維持している被験者がいたことも要因のひとつである。例えば図4(c)の被験者がこれに該当するが、この被験者の T_p は0.688であり、高齢者よりも青年健常者のグループの平均値に近い。またt検定の結果、両グループの値には有意差があり($P < 0.01$)、このパラメータは加齢による嚥下機能の減退の評価に有効といえる。

インピーダンス変化率 Z_C の結果より、高齢者のインピーダンス変化率は青年健常者に対して小さくなる傾向があることが示された。すなわち、加齢により嚥下活動に関与する器官の運動量が低下し、喉頭の挙上量が青年健常者よりも小さくなる⁹⁾ことが反映されていると考えられる。これは前述の T_p の結果も考慮すると、青年健常者に比べて高齢者の嚥下活動では嚥下反射による喉頭挙上⁹⁾が、短い距離をより長い時間をかけて行われているといえる。また、 Z_C については青年健常者の方がばらつきが大きい結果となっているが、これは高齢者の被験者の大半が痩せていて頸部の周囲長が短かったのに対し、青年健常者では頸部の周囲長が被験者により様々であったことが原因と考えられる。すなわち頸部の脂肪量によってインピーダンスレベルが変化するため、この Z_C のパラメータ算出法では青年健常者のほうに大きなばらつきが発生したと考えられる。しかしながらt検定の結果、両グループの値には有意差があり($P < 0.05$)、このパラメータは加齢による嚥下機能の減退の評価に有効といえる。

類似度 S の結果より、高齢者のIPG波形は青年健常者に対して基準IPGから崩れた波形となる傾向があることが示された。基準IPGと相似なIPG波形が得られないのは、加齢によって口腔期後半の嚥下反射の誘発、口腔-鼻腔間の閉鎖、咽頭期の喉頭挙上、喉頭蓋による気道閉鎖、食道期前半の食道入口部の開大といった、嚥下活動に関与する器官が円滑に活動を履行する能力が低下していることが原因と考えられる。嚥下障害は、嚥下活動に関与する器官の形状異常だけでなく、内視鏡検査などでは検出できない嚥下動態の異常が原因である動的嚥下障害も多いため、 S はこのことが評価できるパラメータとして興味深い。また、青年健常者の S のばらつきは平均値の1/10と非常に小さく、このパラメータが嚥下動態の異常に対して感度の高い検出能力があることを示している。t検定を行なった結果においてもP値は0.0075と4つのパラメータのうちで最小値をと

り、最も有意差がある($P < 0.01$)パラメータであったことが確認できる。以上のことから、 S も加齢による嚥下機能の減退の評価に有効といえる。高齢者の S のばらつきは青年健常者より大きく、加齢により個体差が大きくなる傾向があることを示している。また、 T_p と同様に高齢となっても青年健常者に近いIPG波形が得られる被験者がいたため被験者によっては青年健常者よりも S が高くなる場合があった。再度図4(c)の被験者を例に挙げると S は0.927であり、青年健常者のグループの平均値を上回っていた。

嚥下音タイミング T_T の結果より、高齢者の咽頭期終了時刻からの嚥下音の発生タイミングが長くなる傾向があることが示された。しかしながらt検定の結果、両グループの値には有意差が認められなかった($P > 0.05$)。両グループの値の差は T_p の結果を参照すると分かり易いが、高齢者のIPGにおける咽頭通過時間の増加が主な原因であり、加齢による嚥下機能の変化が原因となって生じた差ではないといえる。 T_T は嚥下活動に関与する器官の活動と食塊の搬送の同期、すなわち咽頭期に食塊が咽頭を通過することを確認するパラメータであるため、値が正で咽頭通過時間(T_p)より短ければ健常と判断される。この観点からは本研究の被験者は全て健常であり、嚥下機能が減退しているとはいえ、誤嚥のない被験者を対象としたことが有効なパラメータにならなかった理由といえる。このパラメータの有効性は実際に嚥下障害者のIPGを取得した段階で再度検討する必要があるが、誤嚥(特に、むせ、呼吸苦など多覚的に兆候がみられない無症候性誤嚥(silent aspiration))の有無もしくは発生の危険性を示す能力を有するため、今後の研究においては評価パラメータとして重要度が増してくると期待する。

まとめ

本研究ではNormal IPGの特徴をもとに、咽頭通過時間、インピーダンス変化率、類似度、嚥下音タイミングの4つの評価パラメータを採用し、青年健常者のIPGと直接比較することが困難な嚥下機能の減退者のIPGを評価・比較した。その結果、以下の4点について青年健常者と高齢者の嚥下動態の違いを定量的に示すことができた。

- (1)咽頭通過時間 T_p は高齢者平均0.801 s、青年健常者平均0.644 sであり、加齢に伴い24.4%増加した。これは加齢により喉頭の挙上動作が緩慢になり、食塊が円滑に咽頭を通過しにくくな

ることが数値化されたと考えられる。

- (2)インピーダンス変化率 Z_C は高齢者平均4.73%、青年健常者平均7.66%であり、加齢に伴い38.3%減少した。これは加齢により嚥下反射に伴う喉頭挙上量が減少していることが数値化されたと考えられる。また、(1)の内容も考慮すると、高齢者の喉頭挙上動作は、短い距離をより長い時間をかけて行われているといえる。
- (3)類似度 S は高齢者平均0.809、青年健常者平均0.908であり、加齢に伴い10.9%減少した。これは加齢により嚥下活動に関与する器官が円滑に活動を履行する能力が低下し、IPG波形が乱れたことが数値化されたと考えられる。
- (4)嚥下音タイミング T_T は高齢者平均0.461 s、青年健常者平均0.384 sであったが、有意差が得られなかった。これは本研究の高齢被験者は嚥下機能の減退のみで誤嚥がなく、食塊の搬送には問題がないことが反映されたといえる。

今後の課題は、様々な嚥下機能の状態の被験者に対してIPG測定を行ない、判別分析などの統計処理による嚥下機能評価が可能となるように解析結果を蓄積することである。これにより、例えばスクリーニングにおいては、病院でのさらなる精査の必要性について測定者・被験者に定量的な情報をフィードバックすることが期待できる。また、リハビリテーションにおいても、指導員と患者の主観的な判断で構築・履行されていたリハビリテーションプランが、目標とトレーニングによる達成度を定量的に確認できるものとなるため、指導員の適切なプラン構築あるいは患者の目標意識向上の一助となることが期待できる。

文 献

1) 丘村熙：嚥下のしくみと臨床。金原出版：東京，1993。

- 2) 峯尾喜好，木村彰男，出江紳一，江端広樹，道免和久，千野直一：脳血管障害の嚥下障害に対するElectroglottography(EGG)の応用。リハ医学，27，No.2：103-106，1990。
- 3) 金子裕史，林豊彦，道見登：嚥下機能評価を目的とした喉頭の上下運動の計測法。信学技報，MBE2000-11：71-78，2000。
- 4) 石田智子，林豊彦，中村康雄，道見登：喉頭挙上力の定量評価を目的とした喉頭運動の計測 -前頸部圧迫による喉頭運動の時間パラメータの変化-。信学技報，MBE2002-11：41-44，2002。
- 5) Logemann, J. A. : Evaluation and treatment of swallowing disorders, 2nd edn. PRO-ED : Texas, 1983.
- 6) Logemann, J. A. : Manual for the videofluorographic study of swallowing, 2nd edn. PRO-ED : Texas, 1993.
- 7) 小椋脩：嚥下障害の臨床。医歯薬出版，2000。
- 8) 藤島一郎：よくわかる嚥下障害。永井書店，2001。
- 9) 山本尚武，中村隆夫：嚥下動作におけるインピーダンス波形の生成機序とその解釈。長寿科学総合研究，6：1-7，1996。
- 10) 山本尚武，中村隆夫，関八州彦，宇都山欣也，明石謙，軸屋和明：嚥下活動の計測のための頸部電気インピーダンス。電気学会論文誌A，118-A，No.3：210-217，1998。
- 11) Yamamoto, Y., Nakamura, T., Kusuhara, T. and Mori, K. : Impedance Pharyngography for Diagnosis of Swallowing Disorders. Biocybernetics and Biological Engineering, 22, No.4 : 97-103, 2002.
- 12) Kusuhara, T., Nakamura, T., Mori, K. and Yamamoto, Y. : The adapting method of Impedance Pharyngography (IPG) to nodding swallowing. Proceedings of IEEE EMBS Asian-Pacific Conference on Biomedical Engineering 2003, 6.4.4 : 1-2, 2003.
- 13) Kusuhara, T., Nakamura, T., Shirakawa, Y., Mori, K., Naomoto, Y. and Yamamoto, Y. : Proposal of Impedance Pharyngography (IPG) for the assessment of swallowing function. The Journal of International Medical Research, 2004. (in press)
- 14) 山本尚武，中村隆夫，楠原俊昌，津川英範：嚥下機能評価のための嚥下音の計測法に関する研究。厚生省長寿科学総合研究平成10年度研究報告リハビリテーション，看護・介護，No.083-2：101-107，1999。
- 15) 水野雅康，山本尚武，明石謙，関八州彦：嚥下ビデオレントゲン検査とインピーダンス波形に関する研究。長寿科学総合研究，6：100-103，1994。

Quantitative evaluation method of swallowing hypofunction by aging using Impedance Pharyngography (IPG)

Toshimasa KUSUHARA, Takao NAKAMURA, Keiko MORI¹⁾, Yoshitake YAMAMOTO,
Yasuhiro SHIRAKAWA²⁾ and Yoshio NAOMOTO²⁾

Abstract

Impedance Pharyngography (IPG) measures neck electrical impedance during swallowing. IPG method is simple procedures and the technique which can perform non-invasive evaluation of swallowing function. IPG waveform reflects swallowing function. However, the influence on IPG waveform by swallowing hypofunction is various by the causes. That is, it will be dependent on a measurement person's subjectivity to compare directly IPG waveforms of subjects whose states of swallowing function differs, and objectivity is missing.

Keywords : swallowing, dysphagia, bio-electrical impedance, Impedance Pharyngography (IPG), assessment of swallowing function

Department of Radiological Technology, Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School

1) Department of Nursing, Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School

2) Department of Gastroenterological Surgery, Transplant and Surgical Oncology, Okayama University Graduate School of Medicine and Dentistry