解　説

飲み込みを科学する

林　豊彦[1†]
[1]新潟大学工学部福祉人間工学科

要旨：日本社会の高齢化の進展にともない，高齢者の嚥下機能の低下が問題となり，その予防やリハビリテーションが医歯学において大きな課題となっている．その解決には，嚥下機能の客観的な測定・評価が必要であり，現在，嚥下造影や嚥下内視鏡などが臨床で用いられている．この課題に対して著者らは，喉頭運動を無侵襲に測定できる喉頭運動測定器を独自に開発し，嚥下音・筋電図と同時測定してきた．本来の目的は嚥下機能評価と嚥下リハビリテーションへの応用であったが，企業から食品の飲みこみの評価の依頼が来るようになり，お粥，ビールなどの食品の性状・形状と嚥下動作との関係について明らかにした．本解説では，嚥下困難者用のお粥の有効性評価，ビールの喉ごしの分析，および嚥下リハビリテーションのための喉頭挙上訓練への応用について述べる．

キーワード：嚥下，喉頭運動，嚥下音，舌骨上筋群，嚥下リハビリテーション

1. はじめに

日本社会は，1970 年（S45）に高齢化率（65 歳以上の人口割合）が 7% を超え，高齢化社会に突入した．その後，1994 年に 14% を，2010 年に 21% を超え，2017 年現在 26% にも達している[1]．老化は心身機能を徐々に低下させるが，食物の摂取（摂食），かみ砕き（咀嚼），飲み込み（嚥下）の機能低下は，食事の機能が栄養摂取，コミュニケーション，嗜好，食文化など多様であることから，生活の質（QOL）を著しく低下させてしまう．そのため，その予防，治療，リハビリテーションが現在，深刻な課題となっている．

本解説では，摂食嚥下機能の中の「嚥下機能」の測定・評価について述べる．ベッドサイドでの検査には，食事の観察，反復唾液嚥下テスト，水飲みテストなどが，機器を用いた検査には，嚥下造影検査（videofluorography：VF）[2]（図 1），嚥下内視鏡検査（videoendoscopic examination：VE 検査）[3]，超音波エコー検査，筋電図・嚥下圧検査などがある[4]．VF は造影剤を入れた食品の摂食・嚥下を透視 X 線装置でビデオ撮影する方法であり，食塊と嚥下諸器官の運動を観察できるが，X 線被曝による侵襲がある．一方，VE 検査と超音波エコー検査は，咽頭・喉頭運動や舌運動を非侵襲で繰り返し評価できるという利点がある．

ベッドサイドでの評価を拡張するために，古くは頸部電気インピーダンス計測[5]やピエゾセンサによる甲状軟骨の運動測定[5]などが用いられてきた．近年では，ビデオ撮影による頸部輪郭抽出[6]や屈曲センサ[7]を用いた喉頭運動の測定が行なわれている．著者らは，嚥下機能の総合的な評価には生体信号の多チャンネル同時計測が必要かつ不可欠と考え，喉頭運動，舌骨上筋群筋電図，嚥下音を同時計測する装置を開発してきた[9-11),13, 14]．本来の目的は嚥下機能の評価とリハビリテーションへの応用であったが，意外にも食品の飲み込みの定量評価の依頼が相次ぎ[9-11]，それも目的のひとつとなってしまった．

次の 2 節では嚥下のメカニズムについて簡単に説明する．3 節と 4 節では，それぞれ嚥下困難者のためのお粥の飲み込みやすさの評価およびビールの喉ごしの分析について述べる．最後の 5 節では，当初の目的であった嚥下リハビリテーションへの応用について述べる．

2016 年 1 月 18 日受付
† 〒 950-2181　新潟県新潟市西区五十嵐 2-8050
新潟大学工学部福祉人間工学科
林 豊彦
Tel: 025-262-7339　Fax: 025-262-7778
E-mail: hayashi@eng.niigata-u.ac.jp

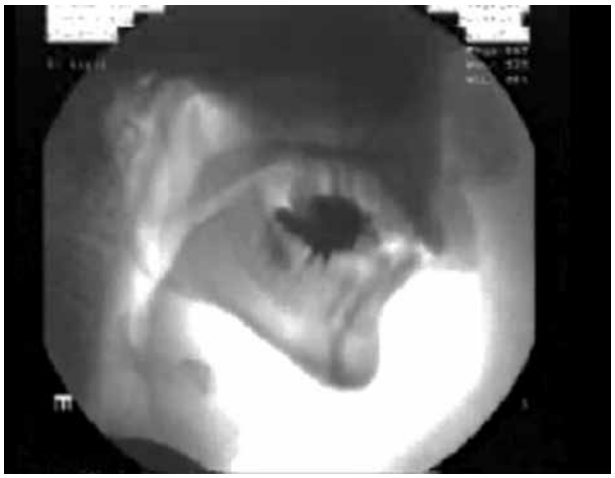


図 1　咀嚼・嚥下運動の嚥下造影（VF）画像

2. 嚥下のメカニズム

嚥下とは，咀嚼された食片を口腔から咽頭を経て食道まで移送するプロセスである（図 2）[5]．食物は咀嚼によって粉砕され，唾液と混ぜられて食塊をつくる．咀嚼末期になると食塊は舌で口腔後方部に送られる（口腔相）．食塊はさらに咽頭部にも流れ込み，気道を塞ぐ喉頭蓋で堰き止められる（口腔相と咽頭相の混在）．嚥下反射が起こると，喉頭蓋が喉頭入口部を閉鎖し，食塊は口腔後部・中咽頭部から下咽頭部を経て，開大した食道入口部まで 1 秒未満で移動する（咽頭相）．最後に，食塊は蠕動により食道入口から胃の入口（噴門）まで移動する（食道相）．以上が嚥下における食塊の移送プロセスである．この間に，舌，咽頭，喉頭は次のように運動する：1）軟口蓋が咽頭に押し付けられて鼻腔・咽頭間の交通を断つ：2）舌が挙上して口腔・咽頭間の交通を断つ（図 2(a)），舌が下前方に移動して咽頭の下半分を拡げる：3）喉頭が前上方に移動して，喉頭蓋が喉頭入口部を閉じる（図 2(b)）．

誤嚥とは食塊が誤って気道に流入する現象である．上記のプロセスの中で，食塊が喉頭蓋で堰き止められているとき，中咽頭・下咽頭を通過するとき，一部が咽頭に残留するとき，などに起こりやすい．

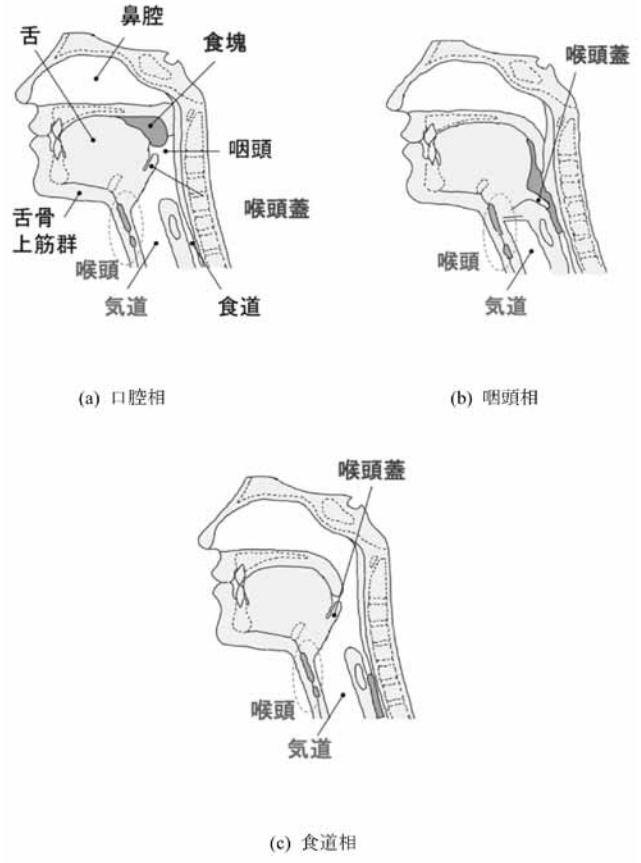


図 2　喉の解剖と嚥下運動の相分類：咀嚼後の食塊は，咽頭部に送り出され（口腔相），喉頭蓋により気道が閉鎖された咽頭部を通過して食道入口部に至り（咽頭相），最終的に蠕動で食道の胃の入口（噴門）まで移送される（食道相）．

3. お粥の飲みこみやすさ

著者らは，嚥下動作を評価するために，外部から測定可能な喉頭運動，舌骨上筋群の活動，嚥下音を同時測定することを考えた．ここで舌骨上筋群とは，舌骨につながる筋の中で上方に位置する筋群であり，表面筋電図で活動を記録しやすいのは，顎二腹筋，顎舌骨筋，オトガイ舌骨筋の 3 筋である．装置を試作して学会発表したところ（図 3），嚥下困難者用に開発したお粥（ふっくらおかゆ ®，亀田製菓）の飲み込みやすさを評価して欲しい，という依頼が来た．検証すべき仮説は「ふっくらおかゆ ® は一般の全粥よりも飲み込みやすい」である．食品の飲み込みやすさの評価には，官能検査，物性測定，生理的データの計測の 3 つが考えられる．そのすべての観点からこの仮説を検証した．

ふっくらおかゆ ® は，精白米 10%，ゼラチン，増粘多糖類，乳化剤を含んでいるレトルト食品である．一方，対照とした全粥は，電気炊飯器で炊飯し，精白米 20%，水 80% を含んだものとした．先行研究（高橋，1999）[8] で物性を硬さ，付着性，凝集性の 3 項目について調べた結果，温度 20 deg では全項目で，55 deg では硬さと付着性の 2 項目で有意差



図 3　喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の同時計測器

がみられ，ふっくらおかゆ ® の方が「柔らかい」「べたつきにくい」ことがわかった [8]．官能検査からは，ふっくらおかゆ ® の方が「舌ざわりがよい」「のど越しがよい」「口に残りにくい」ことがわかった [8]．つまり，物性検査・官能検査ともに，ふっくらおかゆ ® の方が全粥よりも飲み込みやすいことを示唆していた．

図 3 に試作した喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の同時計測器を示す [9]．喉頭運動は，前頸部に軽く圧着した小型圧力センサ（MEG-6100，共和電業）を縦に 3 つ並べて，甲状軟骨の上下動を検出する．安静時，最下部圧力センサに甲状軟骨（のど仏）の突出部が位置するように検出器を装着すれば，その挙上を上 2 つの圧力センサで検出できる．嚥下音はマイクロフォンで，舌骨上筋群活動は表面筋電図で計測した．粥の温度は 60 deg，量は一口で飲み込みやすい 5 g とした．

図 4 にお粥嚥下時における喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の計測結果の一例を示す．圧力センサ出力は，甲状軟骨がその上を通過したときに最大となっている．これらの時系列波形の分析パラメータを図 5 に示す．活動の開始・終了および波形のピークを用いて時間を区分し，いくつかの時間パラメータと区間内の筋活動量を定義した [9]．これらパラメータの測定値を，ふくらおかゆ ®･全粥間で比較した．被験者は成人健常男性 7 名とした．

図 6 と図 7 に測定結果を示す [9]．舌骨上筋群の活動開始から喉頭が挙上するまでの時間（$t_{1,2}$）は全粥の方が有意に短かったが，挙上が始まると初期の移動時間（$t_{2,3}$）はふっくらおかゆ ® の方が有意に短かった（図 6）．喉頭挙上開始から嚥下音発生までの時間もふっくらおかゆ ® の方が短かった．さらに，総筋活動時間も平均活動量もふっくらおかゆ ® の方が小さかった（図 7）．以上の結果は，ふっくらおかゆ ® の方が全粥よりも咽頭部への送り込みが速く，かつ筋活動も少ないことを示している．このように，生体計測の結果も，ふっくらおかゆ ® の方が全粥よりも飲み込みやすいことを示唆していた．

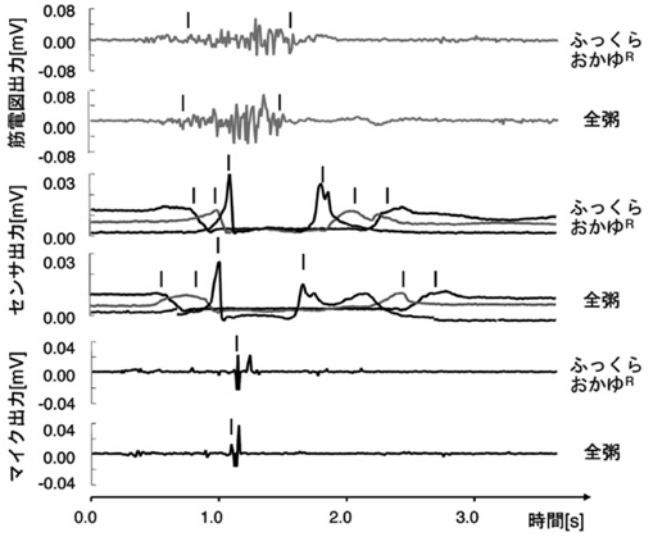


図 4　お粥嚥下時における喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の同時計測結果の一例

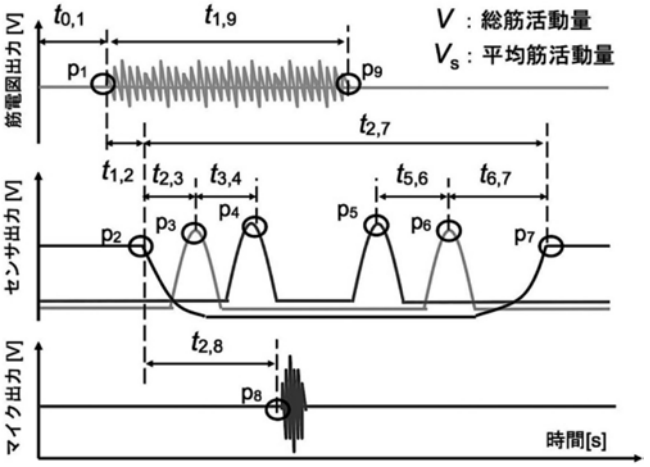


図 5　喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の分析パラメータ

4. ビールの飲み心地

次に来た依頼はビールの飲み心地の評価であった．お粥は水分が多いとはいえ固体であるが，ビールは完全な液体

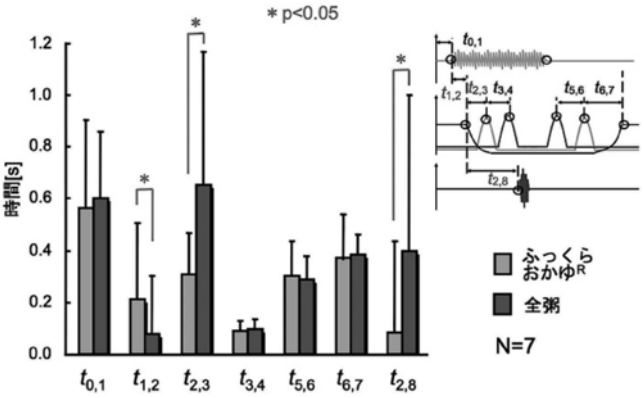


図 6　全粥とふっくらおかゆ ® における時間パラメータの測定結果（*N*=7）

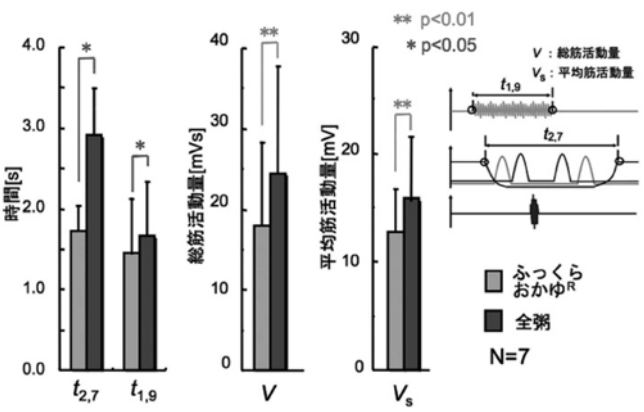


図 7　全粥とふっくらおかゆ ® における時間・筋電図パラメータの測定結果（*N*=7）

である．飲み方もまったく違う．当初，成分の違いによる嚥下の違いを検出できるかどうか，私は懐疑的であった．が，とりあえずビールらしい連続嚥下を測定してみることにした．そのために全頸部に装着する検出部を小形化し，喉頭運動をできるだけ阻害しないようにした（図 8）[10]．ただし，圧力センサは 3 個から 4 個に増やした．

図 9 に連続嚥下，すなわちビールをごくごく飲んだときの測定データを示す．喉頭は上下動を周期的に繰り返すが，飲み始めると安静位には戻らないことがわかる．筋電図も嚥下音も周期的に活動する．最初の研究では，被検飲料としてサンプル A（全モルト），B（モルト＋添加物），C（モルトなし）の 3 種類を用いた[10]．官能検査から，A は最もコクがあり，苦味が強く，飲みにく，C は最もコクが少なく，苦味が少なく，飲みやすかった（B は両者の中間）．繰り返し飲みたいかどうか（drinkability）は，A，B，C の順に高くなった．成人健常男性 10 名の測定結果から，上記の違いは喉頭運動の周期に影響を与え，周期は A，B，C の順に有意に短かかった[10]．筋活動も同じ順で低下する傾向がみられた．この変化は「嚥下反射が口腔・咽頭部への刺激による求心性信号により変調されている」[5] という生理学的メカニズムに起因すると考えられる．

より詳しく調べるために，次の実験では被検飲料のサンプルを 8 種類（A ～ H）に増やした[11]．各サンプルは，原麦汁エキス %，アルコール %，pH，色度，苦み成分含量，窒素成分含量 mg/100ml，ガス圧 kg/cm^2 が異なっており，官能検査でコクのあり・なし（full/light）を調べた結果，図 10 に示す結果が得られた[11]．つまり，A に近いほどコクがあり，H に近いほどコクが少なく軽かった．成人

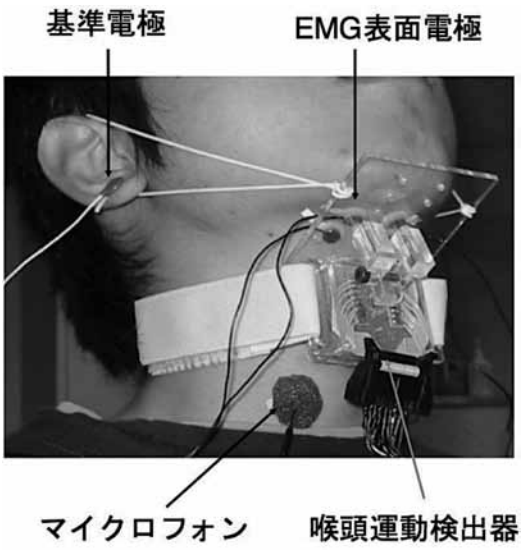


図 8　喉ごしセンサ：喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の同時計測器

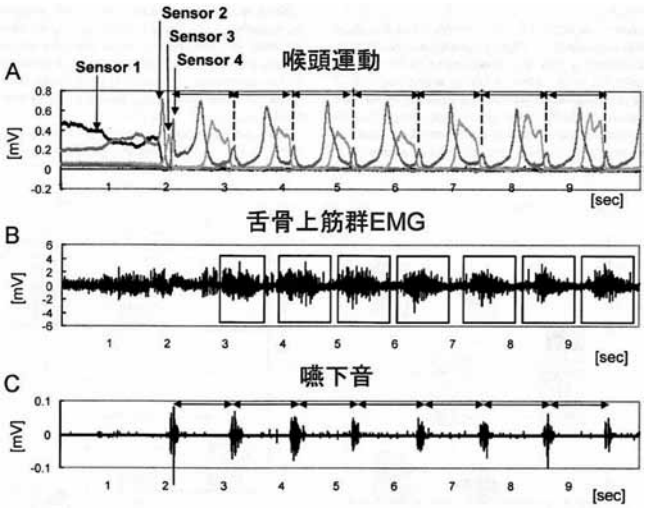


図 9　ビール飲みこみ時における喉頭運動・嚥下音・舌骨上筋群活動の同時計測結果の一例（文献 10 の Fig.4 を改変）

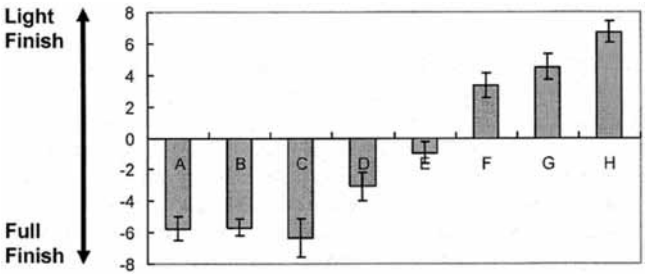


図 10　8 種類のビールサンプル A ～ H の官能検査結果（文献 11 の Fig.1 を改変）：官能検査は，Full finish（コクのある味）から Light finish（スッキリした味）までの 9 段階評価

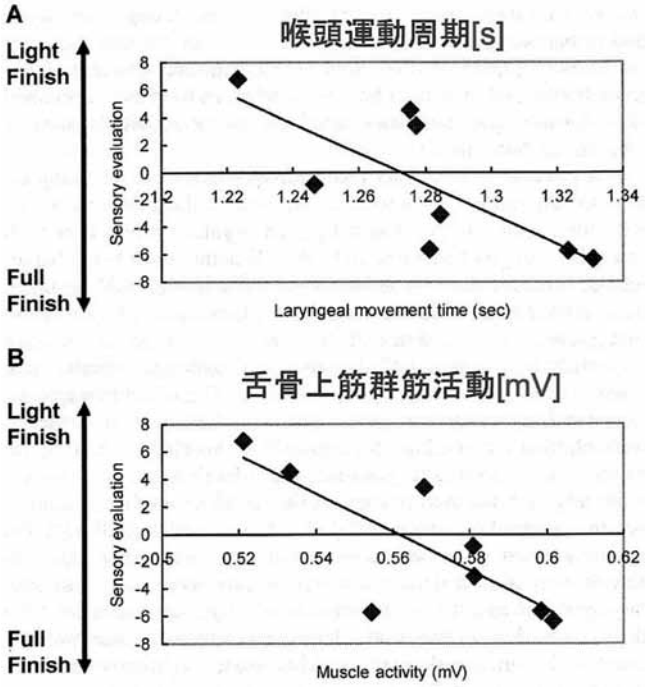


図 11　8 種類のビールサンプル A ～ H の官能検査結果と喉頭運動周期との相関（文献 11 の Fig.3 を改変）：A. 喉頭運動周期（R=-0.757, p<0.05），B. 舌骨上筋群活動（R=-0.793, p<0.05）

健常男性 10 名の測定結果から，コクの強さと喉頭運動周期ないし舌骨上筋群活動との間には有意な相関がみられた（図 11）[11]．コクがあるほど周期は短くなり，筋活動は増える傾向がみられた．同じような有意な相関は，窒素成分含量と苦み成分含量でもみられた．前者はコクに関係する量であること，後者はネガティブな味であることから，両者の増加が周期を長くすることは合目的的と考えられる．

当初は懐疑的な共同研究であったが，最終的には上記の成果（Kojima，2010）[11] がアメリカ醸造化学者学会からエリック・ニーン記念賞（2010 年最優秀論文賞）を受賞した．研究とは，やってみないとわからないものである．

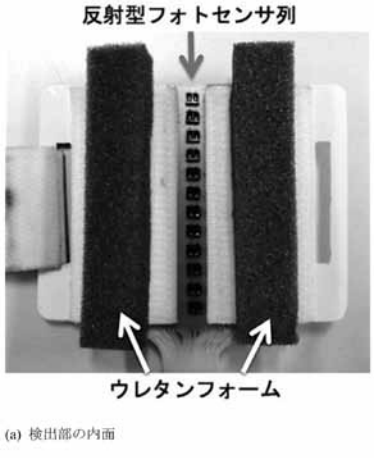


図 12　反射型フォトセンサ列を用いた喉頭運動測定装置

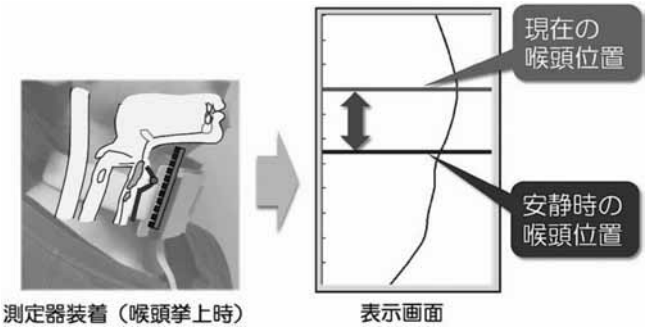


図 13　喉頭位置の視覚バイオフィードバック：前頸部の正中矢状面の皮膚面形状と喉頭位置（淡横線）をリアルタイム表示し，その上に安静時の喉頭位置（濃横線）を表示する．

5. 嚥下リハビリテーション

嚥下機能の評価とリハビリテーションを目的として始めた研究であったが，予想外に食品の飲み心地の評価に発展した．本道に戻るために，喉頭運動測定器を嚥下訓練に応用することにした．

加齢による嚥下機能の低下の原因として，喉頭位置の低下がある [4]．それにより，嚥下時に喉頭挙上が遅れてしまい，食道入口部の開大不全，喉頭閉鎖の減弱の原因となりうるとされている [4]．日本摂食・嚥下リハビリテーション学会は，嚥下訓練を I．基礎訓練（間接訓練），II．基礎訓練および摂食訓練，III．摂食訓練（直接訓練）に分類しており，II．の中の喉頭挙上の訓練のひとつにメンデルソン手技（Mendelsohn maneuver）がある [12]．目的は「舌骨喉頭挙上の運動範囲の拡大と，挙上持続時間の延長」である．訓練では，嚥下障害者に対して「嚥下時に喉頭挙上および咽頭収縮が最大になったとき嚥下を中止し，のど仏を最も高い位置を保つ」ように指示する．しかし，やり方の指導が困難という問題がある [12]．そこで著者らは，のど仏の位置を嚥下障害者に視覚バイオフィードバック（visual feedback）することにより，指導しやすくすることを考えた．

喉頭運動測定器は，全面的に改訂されて第 3 世代に進化した（図 12）．センサを圧力センサから反射型フォトセンサ（NJL5165，新日本無線）に変え，縦に並べてセンサ列とし，皮膚面までの距離を測ることにした．それにより，頸部正中矢状面の皮膚面形状を計測できる．男性ではのど仏が突き出しているので，皮膚面の突出部頂点をトラッキングすれば，喉頭運動を測定できる．バイオフィードバックに応用するために，リアルタイム表示するシステムを構築した [13]．皮膚面形状を曲線で表し，安静位での位置を青い横線で，今の位置を赤い横線で表示する（図 13）．この表示を見せれば（視覚バイオフィードバック），安静位に対して現在，喉頭がどの程度上がっているか把握できる．

はじめに成人健常男性 10 名（23.0 ± 1.3 歳）と高齢男性 4 名（89.8 ± 5.5 歳）で視覚バイオフィードバックによる効果に関する予備的な研究を行った [13]．実験手順は，被験者に 5 秒間，意識的に喉頭をできるだけ高く挙上してもらい，それを Step 1：画面を見ない，Step 2：画面を見る，Step 3：画面を見ないの順で行った（図 14）．目的は「視覚バイオフィードバック効果」と「短時間の訓練効果」を検証するためである．健常者群の 5 名は上記の手順で行い，残りの 5 名は全ステップで「見ない」とし対照群とした．評価パラメータは，喉頭挙上量および喉頭挙上時間（それぞれ喉頭挙上量が最大挙上量の 50% 以上となる時間区間の平均挙上量および区間長），挙上維持時間（喉頭挙上量が最大挙上量の 90% 以上となる時間区間の総和）とした．健常者群では，ステップが進むにつれて，喉頭挙上量と挙上維持時間が増加する傾向がみられた．一方，対照群では，喉頭挙上量は

増加せず，挙上維持時間だけが増加する傾向がみられた[13]．つまり，視覚バイオフィードバックは喉頭挙上量の増加に有効であった．それに対して高齢者群では，すべてのパラメータがStep 1よりもStep 2で増加し，Step 3で再び減少する傾向がみられた[13]．すなわち，視覚バイオフィードバックは，喉頭挙上量および挙上時間の増加に有効であったが，その効果は視覚バイオフィードバックがあるときに限られていた．以上の結果から，高齢者では長期的な訓練が必要であることが示唆された．そこで次に継続した訓練効果を検証する実験を行った[14]．

被験者は高齢男性10名（70.3 ± 4.6歳）とした．実験プロトコルは先行研究[13]と同じとしたが，「継続的な訓練効果」を検証するために同じ実験を5日間連続して行った．評価パラメータは再定義し，喉頭挙上量および喉頭挙上時間（それぞれ安静位より高く挙上した時間区間の平均挙上量および区間長）とした．ここで安静位とは，喉頭挙上前の安静位（2秒間）における平均喉頭位置とした．図15に1日目と最終の5日目における喉頭挙上量の結果を示す．前者は3Step間で変化しなかったが，後者ではStep 1よりもStep 2とStep 3で挙上量が有意に増加した．さらに，1日目と比べても有意に増加していた．図16に喉頭挙上時間の結果を示す．1日目では，Step 1よりもStep 2とStep 3で挙上時間が有意に延長した．一方，5日目では，Step 1からほぼ5秒間挙上し，Step 2とStep 3でも変わらなかった．つまり，喉頭挙上量は5日間連続した訓練で視覚フィードバックがあれば増加するようになり，喉頭挙上時間は1日目では視覚フィードバックがなければ延長できなかったが，5日目では視覚フィードバックがなくても5秒近く挙げ続けられるようになった．このように，視覚フィードバックを用いた喉頭挙上訓練は，挙上量と挙上時間の両方において継続的訓練の効果が認められた．ただし，視覚フィードバックがなくても喉頭を高く挙上できるようになるためには，さらなる訓練が必要と考えられる．



図14　視覚バイオフィードバックを用いた喉頭挙上訓練

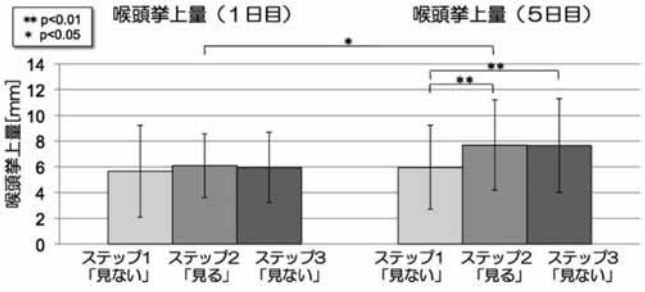


図15　喉頭挙上量：安静位より高く挙上した時間区間の平均挙上量（*N*=10）

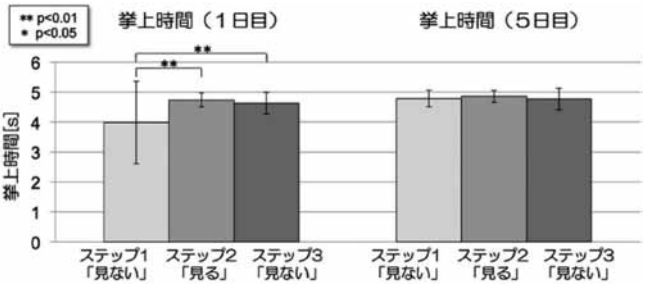


図16　喉頭挙上時間：喉頭を安静位より高く挙上した時間（*N*=10）

6. おわりに

嚥下困難者用お粥の飲み込みやすさ，ビールの喉ごしの分析，嚥下リハビリテーションを例にして，喉頭運動，舌骨上筋群の筋電図，嚥下音を用いた飲み込み動作の科学的分析について述べた．ゼロからスタートした研究だったが，10年間で予想以上の成果をあげることができた．一連の研究を通して，「すぐに成果をもとめないで，一歩一歩進むこと」のたいせつさを再認識させられた．

参考文献

1) 内閣府編：平成27年版高齢社会白書（全体版），2-13，(2017).
2) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会編：嚥下造影の検査法（詳細版）日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会2011年度版案，日摂食嚥下リハビリテーション学会誌，15(1)，76-95，(2011).
3) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会編：嚥下内視鏡検査の手順2012改訂（修正版），日摂食嚥下リハビリテーション学会誌，17(1)，87-99，(2013).
4) 日本顎口腔機能学会（編）：よくわかる顎口腔機能　咀嚼・嚥下・発音を診査・診断する，155-172，(2005).
5) 林豊彦：咀嚼・嚥下運動の生体計測，日本顎口腔機能学会（編）：咀嚼・嚥下機能の検査法，23-36，日本顎口腔機能学会，(2007).

6) 高橋明子，清水良昭，北邦宏，仲筋宣子，小野大地，滝田裕美，安井利一：頸部輪郭抽出法による喉頭運動の検出：食物物性の違いによる差の検出，明海歯科医学，44(1)，92-97，(2015).
7) 李強，皆木祥伴，堀一浩，小野高裕，近藤重悟，藤原茂弘，田峰謙一，林宏和，井上誠，前田芳信：屈曲センサを用いた喉頭運動記録法の開発，日本顎口腔機能学会雑誌，19(1)，56-57，(2014).
8) 高橋肇, 宮岡洋三, 新井映子, 山田好秋:嚥下困難者用「粥」の評価，日本摂食嚥下リハビリテーション学会誌，3(2)，36-46，(1999).
9) 林豊彦, 金子裕史, 中村康雄, 石田智子, 高橋肇, 山田好秋, 道見登，野村修一：お粥の性状と嚥下動態の関係―喉頭運動・筋電図・嚥下音の同時計測による評価―，日本摂食嚥下リハビリテーション学会誌，6(2)，73-81，(2002).
10) Kojima, H., Kaneda H., Watari, J., Nakamura, Y. and Hayashi, T.: Development of a biometric system for the measurement of swallowing motion while drinking beer, The Journal of the American Society of Brewing Chemists, 67(1), 1-7, (2009).
11) Kojima, H., Kaneda H., Watari, J., Nakamura, Y. and Hayashi, T.: Relationships among throat sensation, beer flavor, and swallowing motion while drinking beer, The Journal of the American Society of Brewing Chemists, 67(4), 217-221, (2010).
12) 日本摂食嚥下リハビリテーション学会医療検討委員会編：訓練法のまとめ(改訂2010)，日摂食嚥下リハビリテーション学会誌，14(3)，644-663，(2010).
13) 佐藤将大, 覚嶋慶子, 林豊彦, 前田義信, 渡辺哲也, 道見登, 谷口裕重，井上誠：喉頭運動の視覚バイオフィードバックを用いた喉頭挙上訓練, 日本摂食嚥下リハビリテーション学会誌，16(3)，235-242，(2012).
14) 覚嶋慶子，林豊彦，道見登，谷口裕重，井上誠：高齢者における喉頭運動の視覚フィードバックを用いた喉頭挙上訓練の効果，日本摂食嚥下リハビリテーション学会誌，18(1)，22-29，(2014).



林 豊彦（はやし とよひこ）

1979 年新潟大学大学院工学研究科電子工学専攻修士課程修了．同年同大歯学部助手．1991 年新潟大学工学部情報工学科助教授，1998 年新潟大学工学部福祉人間工学科教授．工学博士，歯学博士．主として医用生体工学，支援技術の研究に従事．IEEE, ISBM，電子情報通信学会，日本 ME 学会，生活支援工学会，顎口腔機能学会などの正会員．（バイオメカニズム学会正会員）