

X線透視と面検出器CTによる嚥下運動解析と被曝線量に関する研究

藤田保健衛生大学大学院
医学研究科・リハビリテーション医学I (指導教授:才藤栄一)

金森大輔

緒言

わが国は長寿社会に突入し、高齢者の増加とともに、高齢障害者も増加している。日本全体でみると、2000年に100万人の死亡人口が、団塊の世代が寿命を迎える2040年には1.7倍の170万人に達すると予想されており、多死・障害への対処が、今世紀前半の医療課題である。高齢障害者の最後の楽しみが食事であることは広く知られており、生活の質を考える上で「食べる」ことへの配慮は不可欠である。

嚥下は複数の器官や筋が協調して起こる複雑な運動であり近年の研究によれば、ヒトの飲食活動における嚥下は一様でなく、複数の嚥下様式が存在する。1つは液体を丸飲みする際に認められる4期連続モデルで説明される命令嚥下様式である³。もう1つは固形物を咀嚼して、嚥下する際のプロセスモデルによって説明される咀嚼嚥下様式である⁴⁻⁹。さらに、咽頭感覚刺激に対する気道防御的な咽頭期嚥下運動の存在も指摘されている¹⁰。

嚥下機能評価、検査には、嚥下障害の有無を明らかにする「診断のための検査」と食物・体位・摂食方法を調整して治療に反映させる「治療のための検査」の2つが存在する。診断のための検査としてはこれまで反復唾液嚥下テスト¹¹、水飲みテスト^{12,13}、フードテスト¹³、嚥下前後レントゲン撮影¹⁴、簡易嚥下誘発試験、咳テストなど多くの検査法が考案されてきたが、治療のための検査として実用化されているものは、現在のところ嚥下造影検査 (videofluoroscopic examination of swallowing; VF) と嚥下内視鏡検査 (videoendoscopic evaluation of swallowing; VE) の2つである。これらは同時に診断のための検査としても使用できるため、実際の臨床の場でも広く使用されている。VFは舌骨の動き、喉頭挙上、喉頭蓋の動き、喉頭閉鎖、食道入口部開大などが観察可能で、最も信頼性の高い検査法といわれている。VEは咽頭や喉頭の様子を直視下に観察でき、被曝せずに実際の食品を用いて嚥下機能評価が可能であるが、口腔や食道の嚥下運動を観察

できない。また軟口蓋挙上または咽頭収縮によるホワイトアウトにより嚥下反射時の観察が不可能である。さらにレンズによる歪みも生じるため定量的な観察には適さない。またVF、VEの両者ともに3次元の動作である嚥下運動を2次元で評価するため、情報の損失が生じてしまう。3次元的な評価には磁気共鳴映像法 (magnetic resonance imaging; MRI) や螺旋スキャン型CT (computed tomography) などがこれまで用いられてきた。しかし、MRIは最新の機器であっても空間分解能が1mm以上で、時間分解能もVFには及ばない¹⁷⁻¹⁹。さらに硬組織の評価にも適さないため定量的な検討をするのが難しい。近年普及したマルチスライスCTでは、高空間分解能ボリュームデータが得られ、3次元的に評価可能であり普通の臨床でも使用されている。螺旋スキャン型CTや歯科用コンビームCTを使用した嚥下に関する研究も近年増えつつある²⁰⁻²²。これまでの螺旋スキャン型CTは体軸方向のデータ収集に一定時間を必要とするため、画像データの上端と下端の時相が異なり、嚥下のような早い運動をとらえることができない。また、歯科用コンビームCTでは撮影範囲が限られ、さらに最新の機械であっても撮影に10秒近くかかる。2007年第93回北米放射線学会RSNA2007 (the Radiological Society of North America)において面検出器CT (area-detector computed tomography; ADCT) の報告が行われた。ADCTでは等時相性 (全ての断面が同時刻の同撮影位相である)、等方向性 (XYZ軸位断も空間分解能が等しい) の3次元データを得ることができ、連続撮影をすることで嚥下運動の観察を可能にする。ADCTで取得できる高分解能・連続的多時相ボリュームデータは、記述したこれまでの様々な検査手法の問題点を克服できる可能性を秘めている。そのためADCTは摂食・嚥下運動の評価にも有効に活用できると期待される²³。

本論文は、以下の3章より構成される。

第1章：VFおよびADCTにおける計測誤差

全ての計測機器には計測誤差が存在する。この章では2次元評価法であるVFと3次元評価法であるADCTの誤差の計測を行った。研究1では2点間の距離を実測値とVF、ADCTを用いて計測した値を比較した。研究2では3次元のボリュームを持つ食塊量が2次元のVF側面像でどのように表現されるかを検討した。研究3ではADCTによる体積計測法の検討を行った。

第2章：VFを用いた動作解析

第1章での計測誤差を踏まえて、VFを用いた動作解析を行った。研究1では孤発的咽頭嚥下における舌骨運動、研究2では命令嚥下において食塊が嚥下される速度の検討を行った。

第3章：被曝線量の検討

VF、ADCTとも検査における最大の問題は被曝である。VF検査並びにADCT検査における被曝線量を計測した。

なお、これらの研究は藤田保健衛生大学医学部倫理委員会にて審査され承認を受けた。(平成14年6月19日、平成21年3月30日)各研究に先立ち、被験者に対して研究の趣旨を口頭並びに文章で十分に説明し、書面にて同意を得た上で試行した。

第1章 VFおよびADCTにおける計測誤差

研究1：2点間の距離の計測誤差

(はじめに)

VFを用いた動作解析では、頸部やオトガイにつけた補正用マーカを拡大率の補正に用いて移動距離や速度の検討をすることが一般的である。大塚はVFにおいて40mmの距離で3mm程度の誤差があったと報告している。また、螺旋スキャン型CTにおいてもいくつかの精度に関する報告がある。古内らはXY軸方向に2~5%、Z軸方向に4~7%拡大され計測されたと報告している。しかし、ADCTを使用した距離の計測誤差に関する報告はない。本研究で使用するADCTは、データ収集の最小単位であるボクセルが等方性で、さらに高空間分解能であるため精度も向上していると考えられる。本研究の目的は2点間の距離を実測値とVF、ADCTを用いて計測した値とで比較し、その誤差を確認することである。

(方法)

1. 撮影装置

VF装置はデジタルX線TVシステム(ZEXIRA DREX-ZX80, 東芝メディカルシステムズ社)、デジ

タルビデオレコーダ(WV-D9000, SONY)、VF検査用椅子(VF-MT-1, 東名ブレース)。CT装置はADCT(Aquilion ONE, 東芝メディカルシステムズ社)を使用した。

2. 撮影材料

成人頭蓋骨標本(成人頭蓋骨標本, 京都科学標本)を使用し、オトガイ部、左右下顎角、下顎中切歯間切縁部、関節突起上縁、前鼻棘、後鼻棘にそれぞれマーカを設置した。マーカは歯科用根管充填材(デンツプライ ガッタパーチャポイント, デンツプライ三金)を使用した。マーカは1mm程度の大きさに加工し使用した。

3. 測定方法

a. 実測

成人頭蓋骨標本の実測値はマーカ間をキャリパス(デンタルキャリパス, YDM)にて測定した。

b. VF

成人頭蓋骨標本をVF椅子のヘッドレストに設置しオトガイ前方部に直径10mm径の補正用マーカをつけた状態の側面像を撮影した。管球から寝台の距離は140cm、撮影条件は管電圧75kV、管電流1.2mA。撮影後はパーソナルコンピュータ(VAIO VGN-SZ95 Windows Vista Ultimate SP2, SONY)および動画編集ソフト(Adobe Premier Elements 4, Adobe)を使用し画像作成した。補正用マーカから距離の補正を行い画像処理ソフトウェア(ImageJ, アメリカ国立衛生研究所)を使用し、マーカ間の距離計測をした。

c. ADCT

撮影後、得られたデータから東芝 Aquilion One に付属のワークステーションおよびZiosoft M900 Quadraを使用し多断面再構成画像(multiple planner reconstruction; MPR)とVR(volume rendering)法を用いて作成した3次元像を使用し画像を作成計測した。距離計測については付属の距離計測ツールを使用した。

4. 計測ポイント

オトガイ-左右下顎角中点、下顎切歯切縁-オトガイ、下顎角-関節突起上縁、前鼻棘-後鼻棘、ADCTおよび実測値はオトガイ-左右下顎角、左右下顎角間も計測した。計測値よりVF、ADCTの相対誤差(相対誤差=|誤差|/実測値×100)を算出し比較検討した。

(結果)

図1, 2に計測部位およびその結果を示す。実測値に対する相対誤差は、オトガイ-左右下顎角中点にお

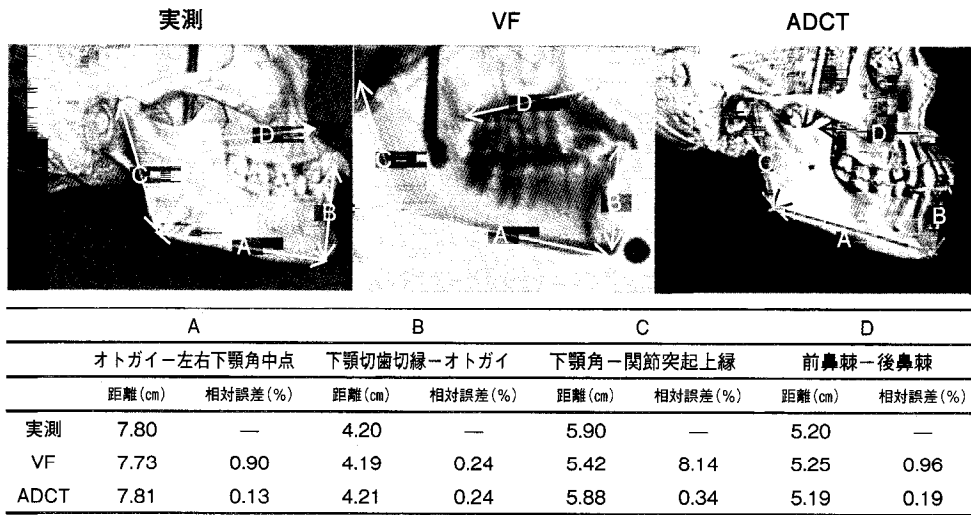


図1 距離の比較 (実測, VF, ADCT)
各マーカ間の距離と相対誤差を示す。

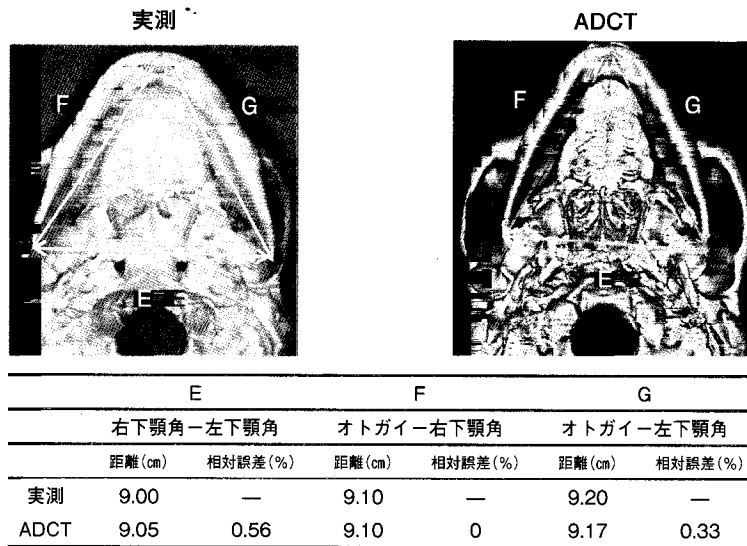


図2 距離の比較 (実測, ADCT)
各マーカ間の距離と相対誤差を示す。

いて VF 0.90%, ADCT 0.13%, 下顎切歯切縁-オトガイにおいて, VF 0.24%, ADCT 0.24%, 下顎角-関節突起上縁において VF 8.14%, ADCT 0.34%, 前鼻棘-後鼻棘において VF 0.96%, ADCT 0.19%であった。左右下顎角間において 0.56%, オトガイ-右下顎角 0%, オトガイ-左下顎角 0.33%であった。

〈考察〉

今回の結果で相対誤差は VF における下顎角-関節突起上縁間以外, 1%以内で VF, ADCT とともに良好といえた。VF は透視台に映る影絵であり, その拡大率は X線発生装置から透視台間のどの位置に被写体があるかにより変化する。下顎角-関節突起上縁間の相対誤差が 8.14% と大きかった要因は, 計測位置が補正用マーカの位置と異なっている事, 画像中心から周辺部に向かって拡大率が大きくなる事が考えられた。

また VF は, 3次元の構造を 2次元的に観察しており傾きがある構造物であっても, 平面的にしか見ることができないこともその原因の 1つと考えられた。VF 側面像を用いて, 嚥下時に正中を通る食塊や舌骨, 喉頭の位置関係を検討することは精度的に問題ないと考えられる。ADCT では過去の報告よりも良好な結果になったと考えられた。これは ADCT のデータ収集の最小単位であるボクセルが等方性であり, さらに高空間分解能であることも結果に反映されていたと考える。ADCT では 3次元のデータから距離を測ることが可能なため DICOM 画像のビューアやワークステーションから容易に精度の高い距離計測が可能である。嚥下に関しては VF で検討されてきた距離計測のみならず, 関連筋を想定した骨間距離計測が可能と考えられる。

〈まとめ〉

1) VF では正中を通る食塊や舌骨、喉頭の位置については精度が比較的良いが周辺部に向かって計測するものでは誤差が大きくなる。

2) ADCT では正中を通る食塊や舌骨、喉頭についても VF と同様以上の精度であり、周辺部に向かって計測するものでは VF より明らかに精度がよく、これまで確認できなかった方向からも観察可能であり、また自由度も高い。

研究 2 : VF における食塊量の検討

〈はじめに〉

これまで VF を用いた食塊の面積計測についていくつかの報告がある。²⁸⁻³⁰ 平山らは頸部回旋後の咽頭の残留量について検討しており、咽頭残留は回旋空嚥下により、非回旋側の残留が統計学的に有意に減少したと報告している。Cook らは 2 ~ 30ml の食塊量を変化させたとき食道入口部周辺での面積が食塊の量に相関し面積も増えたと報告している。また Honma³⁰ は 5 人の咀嚼嚥下時の食塊量について面積で検討し咀嚼嚥下時の 1 回嚥下量は同じであると報告している。これらの研究では主に咽頭での食塊面積測定であり口腔については検討されていない。また食塊は 3 次元のボリュームを持つが、VF では 2 次元で表される。本研究の目的は VF 側面像で表現される食塊の面積と実際の食塊量の関係を検討することである。

〈対象と方法〉

当院リハビリテーション科にて 2007 年 4 月 1 日 ~ 2009 年 4 月 1 日までの間に VF を試行した患者の中で、バリウム 2ml, 4ml, 10ml の食塊を使用した者、および 10ml の食塊を 2 試行以上行った者のなかで、口腔内に金属が入っていないか、入っていても面積計測に邪魔にならない程度の患者を対象とした。



図 3 VF 側面像における口腔内の食塊
VF 側面像の食塊 10ml の領域を示す。

A 群を食塊 2ml, 4ml, 10ml を試行した 10 人 (年齢 60 ± 16 歳, 男性 7 人, 女性 3 人), B 群を 10ml の食塊を 2 試行した 11 人 (年齢 63 ± 17 歳, 男性 8 名, 女性 3 名) とした。VF 側面像から食塊を口腔内に入れている画像を作成した。作成した画像を画像処理ソフト (Adobe Photoshop Creative Suite4, Adobe) の自動選択ツールを使用し口腔内の食塊のピクセル計測を行った (図 3)。ピクセルから面積へ変換するためオトガイの補正用マーカーを使用した。A 群では、各容量の面積および変動係数 (標準偏差 / 平均), 相関係数を算出した。B 群は、1 試行目と 2 試行目の面積変動係数および相関係数から再現性を検討した。数値は平均値 \pm 標準偏差で表した。

〈結果〉

A 群の食塊面積の結果を図 4 に示す。面積の平均は 2ml において $1.82 \pm 0.26\text{cm}^2$, 4ml $3.13 \pm 0.41\text{cm}^2$, 10ml $6.76 \pm 1.39\text{cm}^2$ であった。食塊量と VF 側面像の面積の相関係数は 0.99 であり高い相関を示した。変

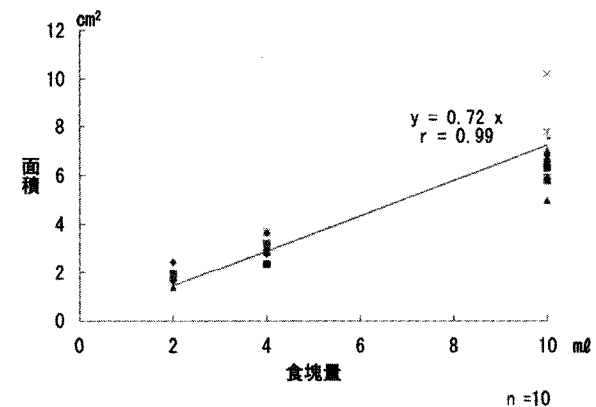


図 4 各食塊量の面積比較
軸に食塊量, Y 軸に食塊面積を示す。
相関係数も高く良好な結果であった。

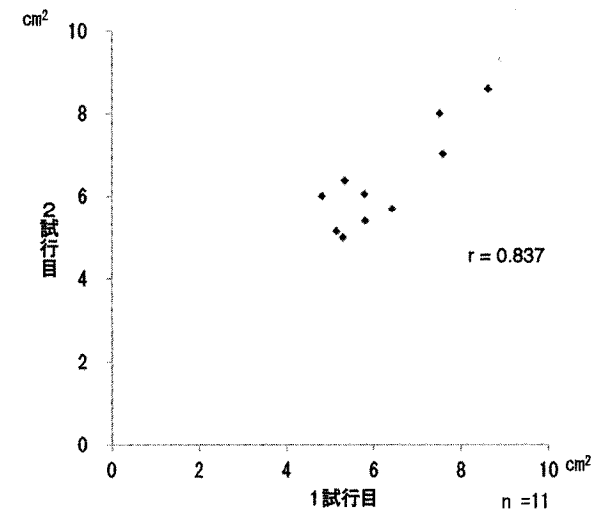


図 5 口腔内の食塊面積 (10ml)
X 軸を 1 試行目, Y 軸を 2 試行目の面積とした。

動係数は2ml 0.142, 4ml 0.131, 10ml 0.21であった。B群の結果を図5に示す。1試行目の $6.23 \pm 1.27\text{cm}^3$, 変動係数は0.20であった。2試行目の $6.34 \pm 1.21\text{cm}^3$, 変動係数は0.19であった。B群の1試行目と2試行目の相関係数は0.837と高かった。

〈考察〉

A群の食塊面積が口腔内の食塊量が増えるにしたがって増加した。変動係数も小さく安定している結果といえた。またB群の結果から、同一験者内で同量の食塊であれば面積は、比較的一致している事も分かった。以上からVFを使用した面積評価は経時的变化や手技の効果判定にも使用可能と考える。今回の結果から、VFの面積測定を使用し口腔内の残留の定量的評価、嚥下手技の評価、訓練や治療の効果を定量化することがある程度可能と考える。

〈まとめ〉

VF側面像を用いて食塊量の評価を行う事は精度的に問題ないと考えられた。同一人物の口腔内残留の定量的評価、嚥下手技の評価、訓練や治療の効果を定量化することが可能と思われる。

研究3：ADCTを用いた体積計測

〈はじめに〉

3D画像よりボリュームデータを利用して体積を得るには様々な方法があるが、CT値の閾値設定を行う必要がある。これまでに螺旋スキャン型CTなどによる体積評価を行っている報告は認めるもののADCTによる評価の報告はみられない³¹。CT値を利用して体積計測するには閾値設定が必要となる。固定閾値の設定は主に3つの方法すなわち、モード法、Pタイル法、および微分ヒストグラム法³¹⁻³³があげられる。モード法はヒストグラムが双峰形であるときその谷を閾値とする方法であり、隣り合うピーク値の中間点を閾値とし使用する。つまりターゲットとその周囲の濃度値の差が大きく、ヒストグラムにはっきりと谷が出来るときに有効な方法である。Pタイル法は画像内の対象物の占める割合が分かっている場合に使用できる、つまりはじめから体積が分かっているときに使用する方法である(主に新聞等の文字認識に多く使われる画像処理法である)。微分ヒストグラム法は全画素について微分値の絶対値の和を求め、その微分ヒストグラムの最大点を示す濃度値を閾値とする方法である。これら固定閾値処理では判別不能な場合は可変閾値も適応されるが一定の条件ではなくなるためこのような場合には適さない。本研究の目的はADCTを使用した体積の計測誤差の検討および実際に嚥下のADCT撮

影に使用する被験食の体積計測方法を検討することである。

〈方法〉

1. 被験物について

CTにおいて実験的に体積計測を検討する場合その物性は、CT値が均一、メタルアーチファクトを生じない物質、また球体がよいとされている。本項で使用したのは、直径30mmおよび40mmの亚克力球、1辺が20mmの亚克力立方体である。

2. 被験食について

VFでは粘性や付着性、誤嚥等の問題から40~50%W/Vの硫酸バリウム^{25, 35}の使用が推奨されている。しかしながら、VFと同じ被験食でCT撮影を行うと高いCT値により金属アーチファクトが生じてしまう。CT値が低過ぎると臓器と比較しにくくなり解析が困難となる。液体では、口腔内で拡散してしまう可能性がある。また市販のCT用経口消化管造影剤では粘度等の問題もあったため、次の5つの条件を満たすように被験食を作製した。CT値700HU程度、VF撮影時に使用する粘度と同等、誤嚥しても危険性が低い、入手が容易、他の嚥下検査とも比較可能。上記内容から検討した結果5%W/Vのバリウムを用い5%の増粘剤を付加し被験食とした。生理食塩水(大塚生食注、大塚製薬工場)95mlおよびバリウム(バリトゲンゾル、伏見製薬所)5ml、増粘剤5g(ネオハイトロミールⅢ、フードケア)により作製した。

3. ADCTによる撮影

ADCTにて被験物を撮影した。体積計測はVR像作成後CTワークステーションに付属の体積ツールを使用した。データの採取はCT値を2値化し閾値を-880~320HUまで順に20HUずつ変化させ、被験物の体積計測を行った(図6)。モード法にて閾値設定を行うため、バックグラウンド含めたターゲットを選択し関心領域(region of interest; ROI)とした。ROIよりCT値のヒストグラムを確認し、被験物と空気の最頻値を確認した(図7)。最頻値の中央値を下限閾値とし体積変化グラフよりADCTで得られた体積を算出した。実測値はメスシリンダー(メスシリンダー(高精度)、アズワン)にて測定した(誤差範囲2ml, 精度は $\pm 0.8\text{ml}$)。

被験食は10mlをビニールに入れ、本章研究1と同じ頭蓋骨模型に装着し撮影した。撮影後Pタイル法と同様の原理で、体積からCT値の範囲を算出した。

〈結果〉

結果を図8に示す。相対誤差はアクリル直径30mm球で1.43%，40mm球で0.29%，20mm立方体で0%であった。

被験食10mlの体積を得るCT値は380～1,020HUであった(図9)。

〈考察〉

ADCTは螺旋スキャン型CTと異なり16cm幅を1回転で撮影可能であり，データの収集単位であるボクセルは立法体で，高分解能である。さらに付属のワークステーションを使用すれば0.3mmの分解能で再構成可能である。今回アクリルの球や立体の体積をメスシリンダーにより計測，ADCTにて撮影後モード法にてアクリルの体積を算出したところ，両者がほぼ同等の体積となった。CTを使用した過去の報告では，野田ら³⁴がPMMA球を用いて検討したところ実測値14.1ml，33.5mlがCTでは15.4ml，35.5mlであったとしている。今回の結果は過去の報告より良いと考えられ

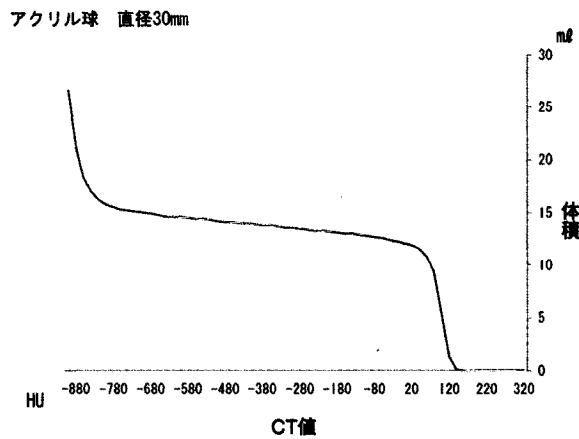


図6 被験物のCT値による体積変化
X軸はCT値の下限閾値とし，Y軸は直径30mmのアクリル球の体積を示す。

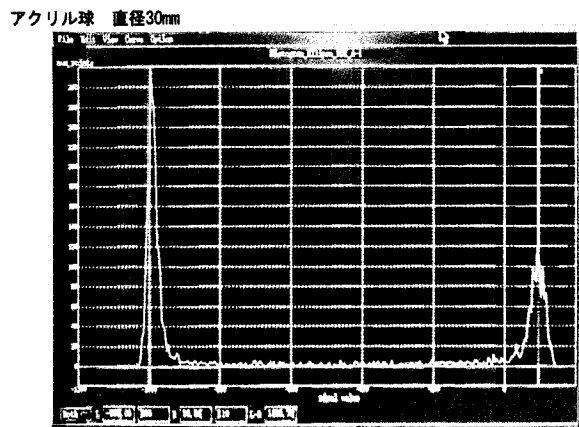


図7 被験物のCT値ヒストグラム
ROIにより選択した，被験物とバックグラウンドのCT値ヒストグラムを示す。

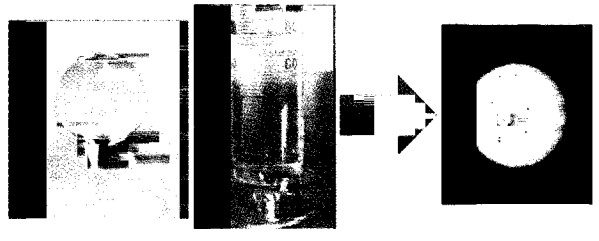
る。また30mm球で相対誤差が大きくなった原因としては，計測した被験物の大きさが小さかったことがあげられる。これらのことから，ADCTによる体積の計測は嚥下にも応用させることができ，嚥下時の食塊や腔の体積などの計測が可能であると考えられた。また，被験食の基準CT値は380～1,020HUであった。この値を基準にすればADCTを用いて咽頭残留等の計測が可能と考えられる。

〈まとめ〉

ADCTを利用した体積計測も相対誤差2%以内と高い精度で行うことができた。被験食の基準CT値380～1,020HUであった。

第1章 小 括

- 1) VFでは正中を通る食塊や舌骨，喉頭の位置についての精度はVF，ADCTともに比較的良いが，周辺部に向かって計測するものではADCTの精度はよいが，VFの精度は劣る。
- 2) VF側面像を用いて食塊量を評価することは実用的であり，口腔，咽頭内残留量の定量的評価などに使用可能である。
- 3) 被験物の体積測定では，ADCTを用いて相対誤



	実測	ADCT
アクリル球 直径40mm	34.0	34.1
アクリル球 直径30mm	14.0	14.2
アクリル立方体 1辺20mm	8.0	8.0

(ml)

図8 体積比較(実測，ADCT)
メスシリンダーにより測定した実測値とCTにより算出された体積を示す。

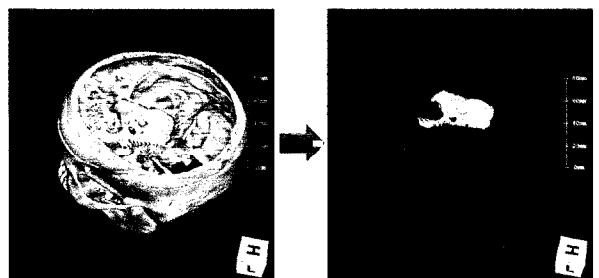


図9 被験食のCT値算出
被験食を袋に入れ骨模型内に装着し撮影，被験食が10mlになるCT値を算出した。

差2%以内と高い精度で体積計算を行うことができた。被験食の基準CT値380~1,020HUであった。

第2章 VFを用いた動作解析

第1章の結果から、VFを用いた場合に正中を通る食塊や舌骨、喉頭の位置についての精度は高く、VFを用いた食塊量の評価も可能であることがわかった。本章ではVFを用いて詳細な動作解析を行った。

研究1：孤発的咽頭嚥下における舌骨運動の検討

〈はじめに〉

咽頭期嚥下運動は系列的な舌の食塊移送運動を伴うとされるが、実験的な環境下では系列的な舌の移送運動を伴わない孤発的な咽頭期嚥下運動も存在することが知られている。Shakerはカテーテルを用いて液体を咽頭に注入したときに生じるこの運動を、侵害刺激に対する気道防御反応と報告した。また、Pouderouxらはカテーテルから注入した液体が梨状陥凹に達すると防御的な嚥下反射が起きると報告している。最近われわれは、実験的な環境のみならず通常的环境下でも系列的な舌の移送運動を伴わない孤発的な咽頭期嚥下運動が生じていることをVFによる画像の検討から明らかにし、この運動をIPS(isolated pharyngeal swallow)と名付けた。IPSは液体と固形物の混合物の咀嚼嚥下時に高率に発生するが、IPSが系列的な舌の食塊移送運動を伴った咽頭期嚥下運動(consecutive pharyngeal swallow; CPS)と同一の咽頭期嚥下運動であるかどうかは明らかでない。本研究の目的はIPSとCPSの舌骨運動軌跡から、両者を比較検討することである。

〈対象と方法〉

摂食・嚥下障害を引き起こすような神経疾患、咽頭・喉頭疾患の既往や摂食・嚥下障害に関する自覚症状がなく、通常の食事形態を摂取し、日常生活活動が自立している健康成人53人(平均年齢54歳、25~89歳)を対象とした。X線透視撮影台(PBW-30A, 東芝)、ビデオタイマ(VTG-33, 朋栄)、デジタルビデオレコーダ(WV-D9000, SONY)、カラービデオモニター(OEV-143, OLYMPUS)、マイクロホンミキサ(MX-50, SONY)、マイクロホン(ECM-R100, SONY)、VF検査用椅子(VF-MT-1, 東名ブレース)を用いて、安楽座位にてVFを試行した。50% w/v バリウム液5mlとバリウム含有コンビーフ4gの混合物の咀嚼嚥下を嚥下課題とし、自由に食させた。VF側面像を、被験者が食物を口腔に取り込んでから口腔内の食塊を嚥下し終えるまで録画(毎秒30フレーム)

した。1人につき上記嚥下課題を2試行し、それぞれ1嚥下目とその後に続く2嚥下目の舌骨軌跡を計測した。

VF画像から舌表面に食塊が存在しつつ舌背による食塊の送り込み運動を伴わないIPSと、送り込み運動を伴うCPSに分けた。判定は嚥下を専門としているリハビリテーション科医師1人と2年以上VFの経験がある歯科医師2人が合議して行った。次に、VF動画をパーソナルコンピュータ(VGN-F73, SONY)と動作解析ソフトウェア(Move-tr/2D, ライブラリ)を使用し、1フレームごとに測定点のプロットを行って舌骨運動を解析した。図10に示すように前鼻棘、後鼻棘、舌骨前下縁を測定の基本とした。原点を後鼻棘、原点と前鼻棘を結ぶ直線をX軸、X軸に垂直で原点を通る直線をY軸とした。嚥下反射開始からの舌骨運動の軌跡を作成し、X軸での最大移動距離x、Y軸での最大移動距離y、嚥下反射後舌骨が上前方へ移動し停止する位置までの距離dと時間tを計測した(図11)。体格による影響を補正するため、x、y、d

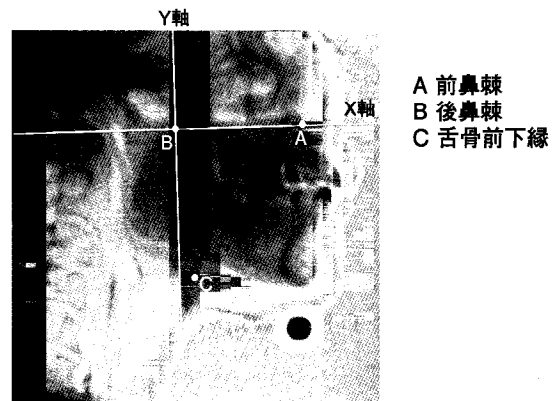


図10 測定点
ABを通る直線をX軸、Bを通りX軸に垂直な直線をY軸とした。

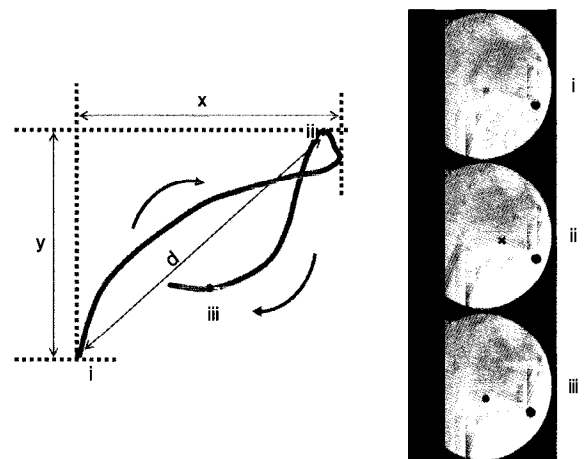


図11 舌骨軌跡
ABを通る直線をX軸、Bを通りX軸に垂直な直線をY軸とした。

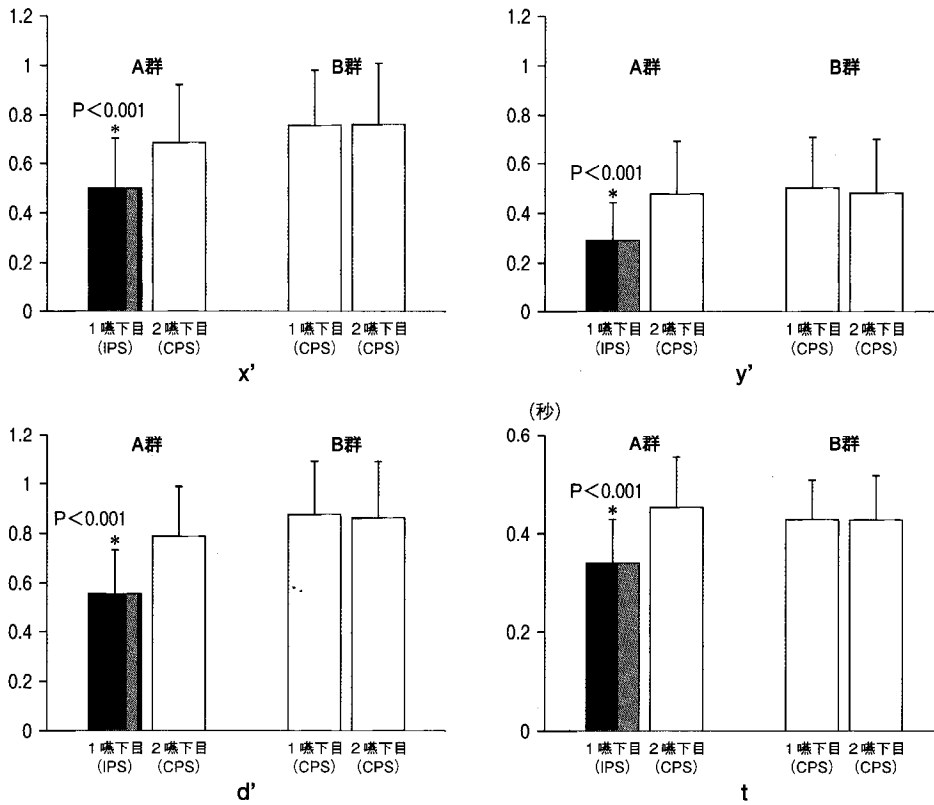


図12 IPSとCPSの比較

いずれもIPSが有意に小さかった。x' : X軸での最大移動距離(x)をC3椎体前縁の長さで除した値。y' : Y軸での最大移動距離(y)をC3椎体前縁の長さで除した値。d' : 嚥下反射後舌骨が上前方へ移動し停止する位置までの距離(d)をC3椎体前縁の長さで除した値。t : 嚥下反射後舌骨が上前方へ移動し停止するまでに要した時間。

をC3椎体前縁の長さで除して、それぞれx', y', d'とした。数値は平均値±標準偏差で表し、統計には対応のないt検定とTukey-Kramer testを用い、有意水準を5%とした。

〈結果〉

53人106試行中、1嚥下目ではIPSが26試行、CPSが80試行、2嚥下目ではIPSが0試行、CPSが106試行で生じていた。IPSは1回目の嚥下運動のみで起きており、2回目以降の嚥下運動はすべてCPSであった。2試行とも1嚥下目でIPSが生じたのは8人、IPSとCPSが1試行ずつ生じたのは10人、2試行ともCPSであったのは35人であった。1嚥下目にIPSを認めた18人26試行をA群、1嚥下目にCPSを認めた症例から年齢を合致させて選んだ20人30試行をB群として両群の舌骨軌跡を比較した。A群の年齢は61±17歳、B群は61±18歳であり、両群間に有意差はなかった(対応のないt検定)。A群では3.6±0.9回で食塊すべてを嚥下していたが、B群では2.6±0.9回であり、A群で嚥下回数が有意に多かった(対応のないt検定, P < 0.001)。x', y', d', tはいずれもIPSで有意に小さく、CPSはx', y',

d', tのいずれもA群の2嚥下目、B群の1嚥下目、B群の2嚥下目の3者間で有意差がなかった(Tukey-Kramer test) (図12)。

〈考察〉

嚥下反射開始からの舌骨運動のX軸、Y軸での最大移動距離、舌骨が上前方で停止した位置までの距離と時間のいずれもIPSで有意に小さかった。また、CPSはどのタイミングで生じてても舌骨の最大移動距離と要する時間に違いがなかった。舌骨のX軸方向への動きは食塊が少量のときに小さいと報告されている⁴⁰⁻⁴²。この舌骨運動はCPSのものと思われるので一概に比較できないが、IPSが生じたA群では食塊を嚥下し終えるまでの嚥下回数が有意に多いことから、舌による随意的な送り込みがないIPSでは1回の嚥下で通過する食塊量は少なかったと思われる。また、舌骨のY軸方向への動きは液体で小さいと報告されており、今回IPSでY軸方向の動きも小さかったことから、IPSで嚥下した食塊はより液体成分に近いものであったと考えると合理的である。さらに舌骨の動きは舌の動きおよび他の嚥下関連筋と関連している⁴⁴ため、舌による食塊の送り込みがないこともIPSの運

表1 摂食・嚥下障害を対象とした臨床重症度分類⁴⁶

分類	定義	解説	
7 正常範囲	臨床的に問題なし	治療の必要なし	
誤嚥なし	6 軽度問題	主観的問題を含め何らかの軽度の問題がある	主訴を含め臨床的な何らかの原因により摂食・嚥下が困難である
	5 口腔問題	誤嚥はないが、主として口腔期障害により摂食に問題がある	先行期、準備期も含め、口腔期中心に問題があり、脱水や低栄養の危険を有する
誤嚥あり	4 機会誤嚥	時々誤嚥する、もしくは咽頭残留が著名で臨床上誤嚥が疑われる	通常のVFにおいて咽頭残留著名、もしくは、時に誤嚥を認める。また、食事場面で誤嚥が疑われる
	3 水分誤嚥	水分は誤嚥するが、工夫した食物は誤嚥しない	水分で誤嚥を認め、誤嚥・咽頭残留防止手段の効果は不十分だが、調整食など食物形態効果を十分認める
	2 食物誤嚥	あらゆるものを誤嚥し嚥下できないが、呼吸状態は安定	水分、半固形、固形食で誤嚥を認め、食物形態効果が不十分である
	1 唾液誤嚥	唾液を含めてすべてを誤嚥し、呼吸状態が不良、あるいは、嚥下反射がまったく惹起されず、呼吸状態が不良	常に唾液も誤嚥していると考えられる状態で、医学的な安定が保てない

表2 被験食の物性

	硬さ(N/m ²)	付着性(J/m ²)	凝集性
液体	159	12	0.95
とろみ	743	61	0.75

動が小さい要因の1つと考えられる。

IPSは小さく、速く行われる咽頭期嚥下運動であった。IPSはCPSよりも嚥下反射開始時の食塊深達度が有意に深く喉頭侵入の発生率が高率であることも合わせて、実験的環境と同様に通常の嚥下でも生じている気道防御的な嚥下運動と推測してよいだろう。ただし、今回はIPSとCPSをVF画像から視覚的に判別したため、舌による送り込みの有無を定量的に評価していない。今後は、舌圧センサなどを用いてIPSとCPSにおける舌による送り込みの違いも検討していく必要がある。

〈まとめ〉

IPSとCPSについて舌骨の動作解析を行ったところ、IPSではCPSに比べX軸、Y軸での最大移動距離、および上前方へ移動し停止した位置までの距離と時間が有意に小さかった。IPSは小さく、速く行われる気道防御的な咽頭期嚥下運動と考えられた。

研究2：命令嚥下における食塊速度の検討

〈はじめに〉

命令嚥下とは口腔内に保持した食塊を指示により一口で呑み込む嚥下様式のことである。これまで口腔咽頭機能に関する検査はVFがゴールドスタンダードとされ臨床においては命令嚥下や咀嚼嚥下による摂食・嚥下機能の評価が行われている。KernらはVFと咽

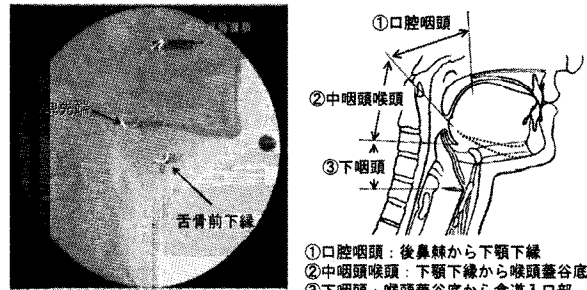


図13 計測点と口腔咽頭領域区分

頭圧センサを使用し液体と固体の嚥下時の速度を比較し、両食塊とも咽頭圧と食塊先端の動きが同一であると報告している。しかしVFにおいて物性の異なる液体を食塊と舌骨の速度から検討している論文は見られない。本研究の目的は命令嚥下時の食塊と舌骨の速度の定量化を行うことである。

〈対象と方法〉

2007年1月1日～2009年5月31日までの期間に藤田保健衛生大学病院リハビリテーション科にてVFを試行したのは867人であった。そのうち摂食・嚥下障害を対象とした臨床的重症度分類⁴⁶(表1)で正常範囲内であり、かつ50% w/vバリウム液に2%増粘剤(トロメリンHi, 三和化学研究所)を加えたとろみ4ml(以下とろみ)、50% w/vバリウム液4ml(以下液体)(表2)を90°安楽座位にて命令嚥下をさせた40人(男性24人、女性16人)、平均年齢64歳(範囲は39～86歳)を対象とした。臨床的重症度分類は毎週行われる嚥下カンファレンスにおいてリハビリ科医師2名以上、歯科医師2名以上、言語聴覚士4名以上により討議決定された。使用した機材は本章研究1で使

用した透視装置、および第1章研究1で使用したデジタルX線TVシステムを使用した。対象者のデジタルビデオ画像はパーソナルコンピュータ (Mac mini, Apple) および動画編集ソフト (iMove HD, Apple) を用いて処理した。画像は動作解析ソフト (Move-tr/2D, ライブラリ) を用いて解析した。距離の補正はオトガイ部につけたマーカーを使用した。計測点は食塊先端および舌骨前下縁 (以下舌骨) とした (図13)。速度計測は食塊先端が後鼻棘を通過してから食道入口部を超えた次のフレームまでを1フレームごとにプロットし算出した。計測した速度より食塊先端および舌骨の最大速度と、最大速度に達した時の食塊先端の位置 (図13領域①~③) を判定した。次に食塊先端の位置を基準とし各領域における食塊先端と舌骨の平均速度を算出した。また各領域を通過するのに要した時間を記録した。数値は平均値±標準偏差で表し、統計には対応のあるt検定と、Wilcoxonの順位検定を用い、有意水準5%とした。

〈結果〉

経時的な速度変化の1例を図14に示す。食塊速度は口腔咽頭領域から中咽頭喉頭領域に入ったところで

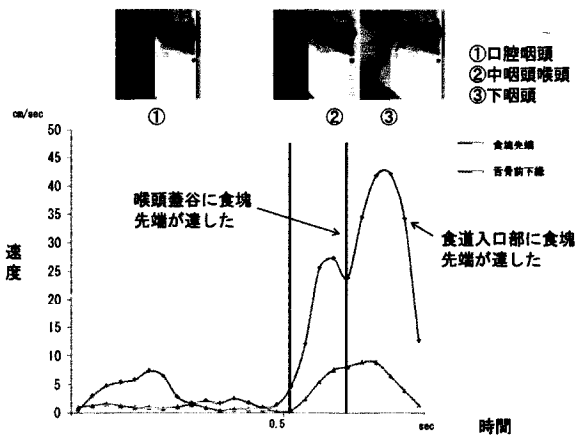


図14 液体の経時的な速度変化
X軸に時間、Y軸を速度とし液体の速度変化をグラフに示す。

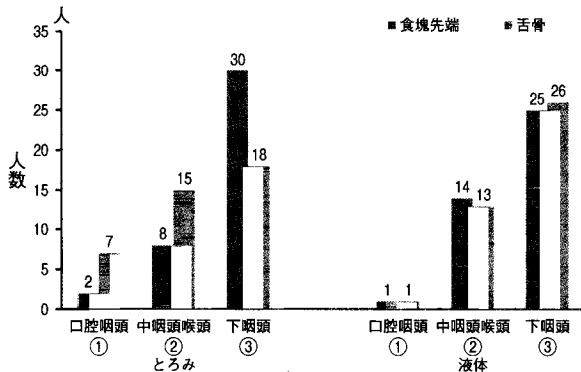


図15 最大速度に達する食塊先端位置
各測定点が最大速度に達した時の食塊先端位置を示す。

増加し喉頭蓋谷底部に達したときには減速している。その後、下咽頭領域に入ったところで速度は増加し下咽頭底部にさしかかったところで減速し始める。舌骨速度は食塊先端が中咽頭喉頭領域に入ったところで増加し下咽頭領域で食塊先端と連動し減速する。

1) 最大速度

最大速度の平均を表3に示す。食塊先端の最大速度はとろみと液体において有意な差はなかった。舌骨の最大速度はとろみが液体より有意に速かった (P = 0.047)。図15に食塊先端と舌骨が最大速度に達した時点の食塊先端の領域を示す。各測定点が最大速度に達した領域はとろみ、液体ともに下咽頭で最も頻度が高かった。またとろみと液体を比較すると舌骨は液体においてより深い部位で最大速度を呈していた (P = 0.030)。

2) 平均速度

各食塊の平均速度を表4に示す。食塊先端の平均速度は下咽頭において、とろみが液体よりも有意に速かった (P = 0.020)。舌骨の平均速度は、中咽頭喉頭において、とろみが液体と比較すると有意に速かった (P = 0.047)。

3) 通過時間

各領域を通過するのに要した時間を表5に示す。食塊通過時間の平均は口腔咽頭において液体がとろみより短時間で通過した (P = 0.049), 下咽頭においてはとろみが液体より短時間で通過した (P = 0.004)。

表3 各測定点での最大速度

		n = 40	
	食塊先端	舌骨	
とろみ	44.98 ± 11.68	7.53 ± 2.24	*
液体	43.84 ± 12.94	6.96 ± 1.84	
cm/s			
対応のあるt検定 * : P < 0.05			

表4 各領域における平均速度

		n = 40		
		口腔咽頭	中咽頭喉頭	下咽頭
食塊先端	とろみ	9.99 ± 6.35	20.59 ± 13.25	28.61 ± 12.22
	液体	11.51 ± 8.64	22.13 ± 10.73	23.47 ± 12.94
舌骨	とろみ	1.87 ± 1.28	4.18 ± 2.54	4.02 ± 1.85
	液体	1.50 ± 0.90	3.21 ± 2.41	3.61 ± 1.82
cm/s				
対応のあるt検定 * : P < 0.05				

表5 通過時間

		口腔咽頭	中咽頭喉頭	下咽頭
とろみ		0.34 ± 0.24	0.21 ± 0.11	0.12 ± 0.05
液体		0.27 ± 0.18	0.19 ± 0.08	0.16 ± 0.06
sec				
対応のあるt検定 * : P < 0.05				

〈考察〉

1. 被験食について

一般に嚥下障害の患者への対応法としてとろみがついた食品が推奨されてきた。2009年度には、嚥下困難者用食品の基準として硬さ、付着性、凝集性などの項目が厚生労働省により示された。液体はその物性からとろみより早期に咽頭に流入し嚥下反射惹起遅延がある場合などでは誤嚥のリスクとなる事が知られている。⁴⁷

2. 測定結果について

これまでに食塊速度に関し様々な報告がある。^{45, 48-53}経時的な速度変化についてはこれまでにBardanらが検討しており液体の嚥下において舌根部と下咽頭領域で速度の増加が認められたと報告している。この報告は本研究の速度変化と類似しており同一の結果であると考えられた。

Jacobらは⁵¹咽頭圧センサとVFにおいて液体5mlの最大速度が 45 ± 7 cm/sと報告しており本研究の結果と類似していた。一方、飯田らはVFを使用し患者の舌背部から不随意滑落する食塊の最大速度を検討し、液体において15.5cm/s、粘性試料4.2cm/sと報告している。これは食塊の自然落下の速度であり今回の結果より遅かったこと、とろみと液体において最大速度に差がなかったことから命令嚥下における食塊先端の最大速度は咽頭収縮などの能動的な動きに影響を受けると考えられる。

舌骨の最大速度はとろみで有意に速かった。Paikらは⁵⁴舌骨の最大速度が健常人において 7.0 ± 1.2 cm/s、脳卒中群 7.7 ± 1.0 cm/s、筋疾患群 0.7 ± 0.2 cm/sと報告している。Chi-FishmanとSoniesは⁵⁵5mlの液体嚥下を超音波で観察したところ舌骨の最大速度は 6.90 ± 1.96 cm/sと報告している。今回の研究結果はこれらの結果と近似していると考えられる。とろみで舌骨の最大速度が速くなった理由としては、液体と比較すると、とろみの物性は付着性 61 J/m²、凝集性0.75であり、よりまとまって下咽頭に食塊が流入することが考えられ、喉頭挙上を目的とした舌骨挙上運動と食道入口部を開大させる目的の舌骨前方運動のタイミングがほぼ同時に起き速度が速くなったと考えられる。また舌骨の最大速度は液体においてより深い部位で起きていた。このことは通過時間からわかるように液体が食塊としてまとまっておらず食塊の咽頭への流入がとろみに比べ早期に起きることが大きな要因と考える。

食塊の平均速度に関し様々な報告がありDavidらは⁵³咽頭において21cm/sと報告している。食塊先端の平均速度は、下咽頭において、とろみ 28.61 ± 12.22 cm/s、液体 23.47 ± 12.94 cm/sでとろみが有意に速か

った。食塊先端の最大速度同様、平均速度も咽頭収縮などの能動的な動きに影響を受けると考えられる。しかし液体の場合、食塊は能動的な動きに先駆け下咽頭深部に到達するため、とろみに比べ下咽頭での咽頭収縮の影響を受けにくいと考えられる。

今回の研究では当院の嚥下造影検査で一般的に使用しているとろみ濃度と液体の比較のみであったが、物性による変化を検討するにあたり濃度の高いとろみなどの比較も必要と考える。また本研究では嚥下に関する何らかの主訴があった者を対象としているため健常人とはいえない。平均年齢も64歳であり加齢等の影響もあるため、⁵⁶今後は前向き研究として健常人を対象とし年齢等も考慮し検討すべきであると考えられる。

〈まとめ〉

今回とろみと液体における食塊と舌骨の最大速度と平均速度を検討した。最大速度はとろみ 44.98 ± 11.68 cm/s、液体 43.84 ± 12.94 cm/sであり有意な差はなかった。舌骨の最大速度は液体よりとろみが速かった。舌骨最大速度に関して液体ととろみを比較すると、液体がより深い位置で最大速度に達していた。食塊先端の平均速度は、下咽頭において速く、とろみ 28.61 ± 12.22 cm/s、液体 23.47 ± 12.94 cm/sであった。

第2章 小 括

- 1) VFを用いた舌骨の動作解析から、IPSは小さく、速く行われる気道防御的な咽頭期嚥下運動と考えられた。
- 2) とろみと液体を4ml命令嚥下させたときに、食塊先端の最大速度に有意な差はなかった。
- 3) 舌骨の最大速度はとろみの方が速かった。またとろみと比較すると、液体がより深い位置で最大速度に達していた。

第3章 被曝線量の検討

〈はじめに〉

これまでの螺旋スキャン型CTは体軸方向のデータ収集に一定時間を必要とするため生体の動きが速い場合にモーションアーチファクトの原因になり、さらに等時相の広範囲データが得られなかった。ADCTでは等時相撮影が可能となり、同一部位を連続的または間欠的に複数回撮影することで3次元データを動的解析し表示することが可能である。^{23, 37-59}3次元の嚥下運動を時間軸上に視覚化することで摂食・嚥下運動の動態をより明らかにすることができる可能性がある。しかしながら、X線を使用し嚥下運動の評価をするには被

曝のリスクを伴う。本研究の目的はVF検査並びにADCT検査における被曝線量を計測することである。

〈方法〉

VFとADCTの線量計測は人体ファントム (Alderson; ランド社製)を用いたTLD(thermoluminescence dosimeter)法で行った (TLD素子MSO-S, TLDリーダTmodel 3000; 極光社製)。TLD法は放射線を受けた結晶性物質を加熱したときに発する蛍光を利用した線量測定法のことであり、放射線作業従事者の職業被曝や環境放射線モニタリング、医療用放射線照射の被曝線量の評価として、多く用いられている。

1. VF撮影時の線量計測

TLD素子を人体ファントムの頭部から生殖腺部(図16, 赤枠内に相当)まで計186本挿入した。皮膚線量計測のためのTLD素子は左右2本を1セットとし計39セットを表面に装着した。配置箇所は両眼下, 両耳下, 前後左右の頸部(図17断面4, 6, 8~11), 前後左右の胸部(図18断面15~18), 前後左右の生殖腺とした(図19断面31)。ファントムを45°リクライニングにしVF検査用椅子にのせ側面および正面撮影を行った。本研究ではVFの基準である5分を目処とし, 合計5分間撮影を行った。撮影条件および撮影位置を示す(表6, 図16)。側面撮影は管電圧75kV管電流1.2mAを使用し, X線は左側から照射した。X線照射後TLDリーダでTLD素子の蛍光量を読み取った。

2. ADCT撮影時の線量計測

TLD素子はVFと同じ位置に配置した。ADCT撮影にあたり, より普段の摂食状況に近い状態で検討する必要があったため, 嚥下研究のためのリクライニング椅子(東名ブレース(株), アスカ(株)共同制作)を作製した。リクライニング椅子は背面の角度調整と座面全体の前後方向の位置調整が可能でありスキャン面まで顔面部を挿入できるように設計されている。背面のサポートは放射線の吸収が少ない素材(カーボンなど)を使っている。同椅子をADCT装置の寝台の反対側に設置し, 人体ファントムを配置し, 45°に仰角を調整した。またADCTのガントリを22°頭側に傾け水晶体への被曝低減に心がけ撮影を行った。撮影条件および撮影位置を示す(表7, 図20)。本スキャンでは管電圧120kV, 管電流60mAを使用し3.15秒間のdynamic volume スキャンを行った。X線照射後TLDリーダでTLD素子の蛍光量を読み取った。

表6 VF撮影条件

	管電圧(kV)	管電流(mA)	撮影時間(分)
側面	75	1.2	4.2
正面	120	1.2	0.8

表7 ADCT撮影条件

	位置決めスキャン	本スキャン
スキャンモード	Volume	Dynamic Volume
管電圧(kV)	120	120
管電流(mA)	10	60
回転時間(sec/rot)	0.35	0.35(3.15)
撮影範囲(mm)	160	160
ヘリカルピッチ	1	1
FOV(mm)	240(S)	240(S)
CTDI vol(mGy)	0.4	21.7
CTDI vol.e(mGy)	0.6	34.7
DLP.e(mGy·cm)	10.3	554.9

表8 VFの皮膚吸収線量

断面	部位	右	左	正面	背面
4	眼下	3.32	23.71	—	—
6	耳下	3.91	25.30	—	—
8	頸部上	5.13	24.77	19.85	10.51
9	頸部中	4.06	21.25	19.52	10.28
10	頸部下	1.55	18.79	18.33	1.37
11	甲状腺	14.22	21.15	—	0.57
15	胸部1	0.22	0.45	3.10	0.18
16	胸部2	0.22	0.30	4.12	0.18
17	胸部3	0.24	0.25	5.79	0.13
18	胸部4	0.18	0.30	5.72	0.13
31	生殖腺	0.01	0.02	0.03	0.01

mGy

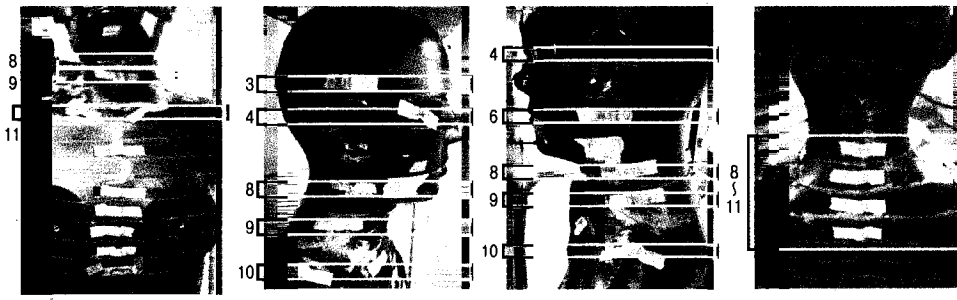
表9 VFの実効線量

部位	組織荷重係数	吸収線量(mGy)	等価線量×組織荷重係数(mSv)
骨髄		—	—
結腸		0.006	0.0007
肺	0.12	0.92	0.1104
胃		1.66	0.1992
乳房		—	—
その他		1.60	0.192
生殖腺	0.08	0.01	0.0008
膀胱		0.02	0.0008
食道	0.04	2.13	0.0852
肝臓		1.67	0.0668
甲状腺		4.38	0.1752
骨表面		—	—
頭部	0.01	4.94	0.0494
唾液腺		13.79	0.1379
顔面・頸部		2.606	0.0261
皮膚	胸部	0.01	0.0054
	生殖腺部		0.00004
実効線量			1.0499



ランドファントム

図16 VF撮影時のポジション
ランドファントムの断面2～31を赤枠内に示す。



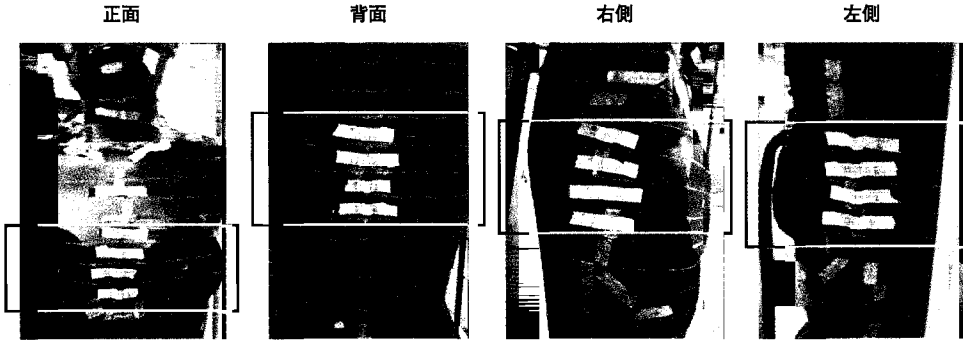
頸部・甲状腺
断面8, 9, 11

眼下・頸部
断面3, 4, 8~10

眼下・耳下・頸部
断面4, 6, 8~10

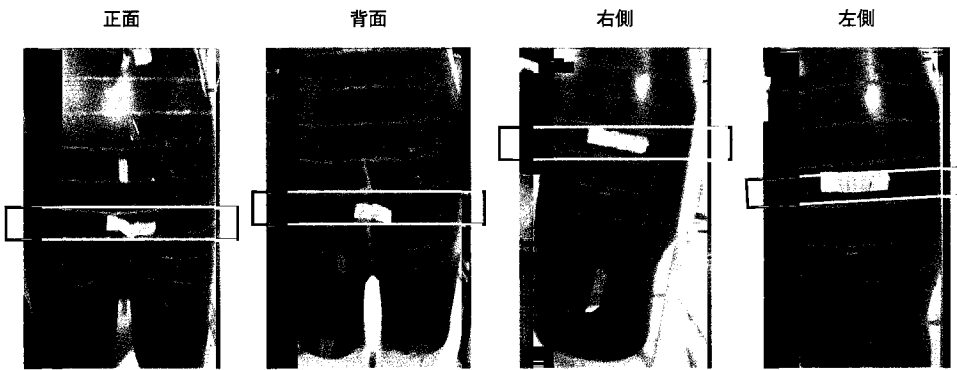
頸部・甲状腺
断面8~11

図17 皮膚表面のTLD配置箇所(顔面・頸部)
赤枠内に顔面, 頸部のTLD配置箇所を示す。



胸部：断面15~18

図18 皮膚表面のTLD配置箇所(胸部)
赤枠内に胸部のTLD配置箇所を示す。



生殖腺：断面31

図19 皮膚表面のTLD配置箇所(生殖腺部)
赤枠内に生殖腺のTLD配置箇所を示す。

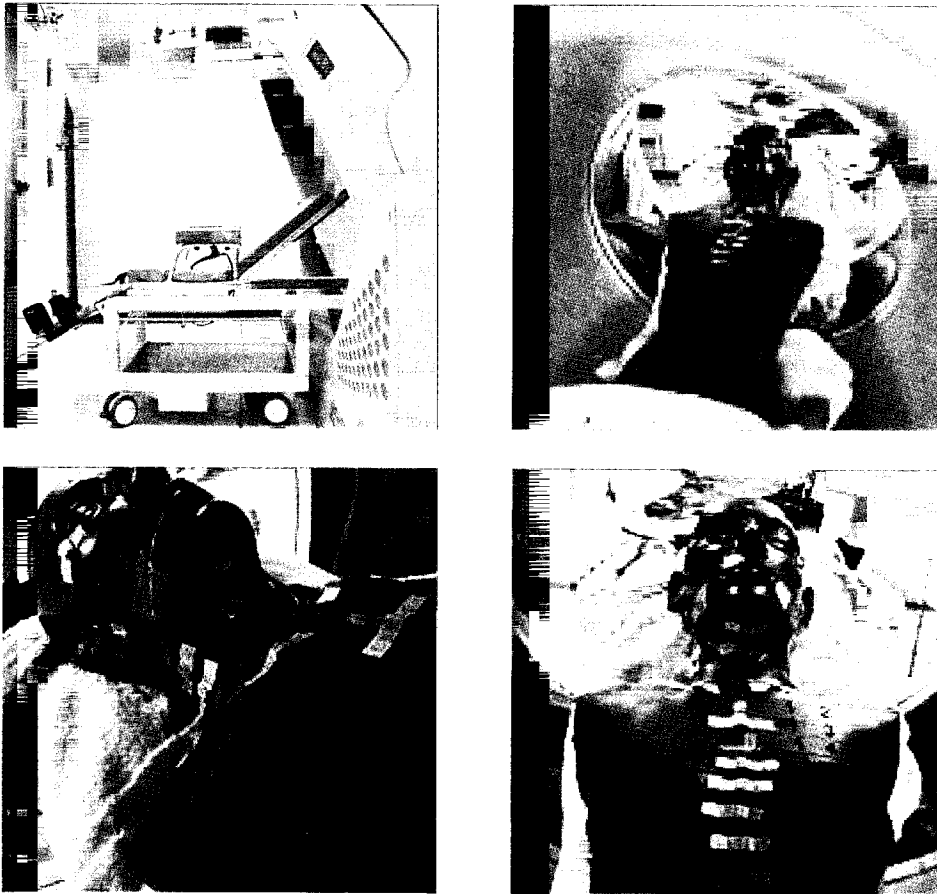


図20 ADCT撮影時のポジション
撮影時はリクライニング45°、ガント리를頭側22°傾けた。

3. 計測結果の算出方法

a. 吸収線量の算出方法⁶²

吸収線量 = TLD 読み取り値 × TLD 校正定数 × 軟部組織の補正係数 (すなわち軟部組織の質量減弱係数 / 空気の質量減弱係数)。

皮膚の TLD 読み取り値は左右 2 本の平均値とした。TLD 校正定数は国家基準と校正のとれた電離箱を使用し交換校正法により算出し、1 本ずつ校正された値を使用した。軟部組織への補正係数は、肺の部分 (断面 12 ~ 28) までを 1.074 とし、その他は軟部組織として考え 1.07 とした。

b. 実効線量の算出方法

実効線量 = Σ (吸収線量 × 放射線荷重係数 × 組織荷重係数)。

放射線荷重係数は 1.0 とした。組織荷重係数は国際放射線防護委員会 (ICRP) 2007 年勧告を引用し骨表面、脳、唾液腺、皮膚 : 0.01, 膀胱、肝臓、食道、甲状腺 : 0.04, 生殖腺 : 0.08, 骨盤、大腸、肺、胃、乳房、残りの臓器 : 0.12 とした。皮膚については検査領域の中心となる顔面・頸部および胸部、生殖腺の 3 領域に分け算出した。

算出された値より VF と ADCT における吸収線量および実効線量の比較を行った。

〈結果〉

VF 撮影時の吸収線量および実効線量の結果を表 8, 9 に示す。VF での最大吸収線量は入射側である左耳下腺部 (断面 6) にあたる皮膚の部位において 25.30mGy, 反対側 3.91mGy であった。また入射側の水晶体部皮膚 (断面 4) において 23.71mGy, 反対側 3.32mGy であった。甲状腺部皮膚 (断面 11) においては、入射側 21.15mGy, 反対側 14.22mGy であった。正面では頸部上皮膚 (断面 8) で最も高く 19.85mGy であった。VF の実効線量は 1.05mSv であった。

ADCT 撮影時の吸収線量および実効線量の結果を表 10, 11 に示す。ADCT での最大吸収線量は頸部中 (断面 9) にあたる皮膚の部位で 47.07mGy であった。同断面右 34.66mGy, 左 35.16mGy。水晶体 (断面 4) においては右 26.74mGy, 左 32.78mGy となった。甲状腺部皮膚 (断面 11) において右 8.02mGy, 左側 9.00mGy, ADCT の実効線量は 1.65mSv であった。

〈考察〉

VF の計測結果から左耳下腺部皮膚において吸収線量が最大であった。同部位右側と比較すると 6.5 倍であった。また照射野 (断面 4 ~ 10) の左右の比較で最も差が少なかったのは頸部上の部位で 4.8 倍であっ

た。頸部下の部位で12.1倍であった。照射野内で左右の比較をしたとき、吸収線量の比率が最も小さかったのは頸部上の部位であり、その部位は左右の組織の厚みが薄い部分であった。逆に左右の組織の厚みが最も厚い頸部下では左右の線量の比率が最も高かった。これはVFの照射方向である左側面と撮影時中心を考えると矛盾のない結果であった。皮膚吸収線量は最大でも25.30mGyであり確定的影響の早期一過性皮膚紅斑の閾値より少ない被曝であった。VFの被曝につい

表10 ADCTの皮膚吸収線量

断面	部位	右	左	正面	背面
4	眼下	26.74	32.78	—	—
6	耳下	—	39.83	—	—
8	頸部上	41.65	41.16	44.77	30.66
9	頸部中	34.66	35.16	47.07	26.44
10	頸部下	21.11	26.70	—	24.96
11	甲状腺	8.02	9.00	—	15.18
15	胸部1	0.62	0.72	0.93	1.05
16	胸部2	0.52	0.62	0.80	0.66
17	胸部3	0.46	0.48	0.62	0.38
18	胸部4	0.31	0.44	0.43	0.31
31	生殖腺	0.03	0.04	0.03	0.03

mGy

表11 ADCTの実効線量

部位	組織荷重係数	吸収線量 (mGy)	等価線量 × 組織荷重係数 (mSv)
骨髓		—	—
結腸		0.01	0.0012
肺	0.12	1.54	0.1848
胃		0.11	0.0132
乳房		—	—
その他		2.43	0.2916
生殖腺	0.08	0.01	0.0008
膀胱		0.02	0.0008
食道	0.04	5.55	0.222
肝臓		0.12	0.0048
甲状腺		8.95	0.358
骨表面		—	—
頭部	0.01	18.4	0.184
唾液腺		32.78	0.3278
顔面・頸部		6.002	0.06
皮膚	胸部	0.01	0.272
	生殖腺部		0.0001
実効線量			1.6519

表12 成人患者のCT検査に対する初期診断参考レベル⁶⁸

	CTDI(mGy)	DLP(mGy・cm)
頭部ルーチン	60	1050
胸部ルーチン	30	650
腹部ルーチン	35	780

ては数多くの報告がある。Richardらは^{24,64-67}23人の平均検査時間286秒で平均0.4mSvであったとしており、胸部単純X線(1回の被曝0.04mSv)約10枚分であるとしている。今回の結果は、これまでの実効線量の報告より高い結果となった。これは海外の論文で使用している計測法が面積線量(dose area product: DAP)による算出であるため被検者をさまざまな体位で撮影し、その時々X線照射野の大きさも観察部位によって異なるVFでは正確な線量の計測ができていない可能性が考えられる⁶⁸。また他の論文では正面での検査が頸部のみの撮影になっており、食塊通過診断のための食道の撮影がされていない。食道の診断の透視撮影はより高い透視条件を使用する必要があり、そのために今回の線量は過去の線量の報告より高い結果となった。

ADCTの計測結果から最も皮膚吸収線量が高かったのは正面において頸部中で47.07mGyであったが右、左、背面は頸部上で最大となった。これは、リクライニングにより角度がついたことによる影響と考える。またVFと異なり左右の差は小さかった。今回の結果は確定的影響である、早期一過性皮膚紅斑の閾値2Gy以下であった。また水晶体部皮膚において右26.74mGy、左32.78mGyであり軽度の混濁の閾値1~2Gy、白内障の閾値5Gy以下であった。ADCTの実効線量は1.65mSvであった。これは胃上部消化管の直接撮影1回分1.67mSvと同程度である⁶⁹。また、当院における頸部CTを用いた脳血流検査の64列MDCT 4.2mSv、320列ADCT 6.6mSvの両者よりも低いレベルであった。

CTの照射線量の基準にはCTDI、DLPがありCTDIは照射線量の目安を示しDLPはCTDIに長さの概念を加えた照射線量を示す。頭部CTに関する基準はICRP Publ. 87⁷⁰“CTにおける患者線量の管理”に記載されている。成人患者のCT検査に対する初期診断参考レベル(表12)で今回の結果は連続照射を含めてもCTDIは腹部ルーチン撮影と同程度でDLPは胸部ルーチンより低かった。今後、被曝を考慮した撮影条件の最適化により有用性ある嚥下のADCT撮影を検討する必要がある。

〈まとめ〉

VFは入射側の吸収線量が高く、反対側に比べ4.8~12.1倍の吸収線量であった。皮膚吸収線量は最大でも25.30mGyであった。VFの実効線量は1.05mSvであった。ADCTの最大皮膚吸収線量は47.07mGyであった。ADCTの実効線量は1回の嚥下撮影で1.65mSvであり、VFより多いため、被曝に対する配慮が必要である。

結 語

何らかの原因により摂食・嚥下障害を持つ患者にとって口からおいしく安全に食事をとるということは大きな課題である。これまで嚥下評価のゴールドスタンダードとされてきたVFも科学の進歩とともにフィルムからデジタルになり、また新たにCTを使用した検査法が登場した。本研究の結果から、ADCTでは1回の被曝線量がVFより多いものの、許容範囲内であり、3次元的な解析が必要なもの、また中心部から周辺に向かって計測するものについては非常に有用な検査法であることがわかった。VFは、ADCTと比較すると被曝線量が少ないため正中を通る食塊や舌骨、喉頭の計測については精度もよく今後も引き続き用いられるべき検査と思われる。また、VFでの動作解析により、IPSが小さく、速く行われる気道防御的な咽頭期嚥下運動であること、命令嚥下では嚥下反射中の舌骨の最大速度はとろみの方が速いことが新たに明らかとなった。今後はVFとADCTを併用することにより、嚥下動態の解析や摂食・嚥下障害の病態解明がさらに発展することが期待される。

謝 辞

稿を終えるに臨み、終始御懇篤なる指導と御校閲を賜りました藤田保健衛生大学医学部リハビリテーション医学I講座才藤栄一教授に深甚なる謝意を捧げます。本研究を直接御指導して頂いた藤田保健衛生大学医学部リハビリテーション医学I講座加賀谷准教授に心から感謝申し上げます。研究実施にあたり暖かい御助言御尽力を頂きました藤田保健衛生大学放射線科片田和広教授、藤田保健衛生大学坂文種報徳会病院放射線科藤井直子准教授、藤田保健衛生大学医療科学部放射線学科鈴木昇一教授に深く感謝致します。また本研究にご協力いただきました藤田保健衛生大学病院放射線部、リハビリテーション医学講座医局員各位に厚くお礼申し上げます。

文 献

- 1) 厚生労働省(2007)平成19年度版 厚生労働白書. 東京
- 2) 才藤栄一(編集)(2007)摂食・嚥下リハビリテーション. pp.13-16. 医歯薬出版社, 東京
- 3) Leopold, N. A. and Kagel, M. C. (1983) Swallowing, ingestion and dysphagia: a reappraisal. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 64. 371-373.
- 4) Palmer, J. B. (1998) Bolus aggregation in the oropharynx does not depend on gravity. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 79. 691-696.

- 5) Hiiemae, K. M. and Palmer, J. B. (1999) Food transport and bolus formation during complete feeding sequences on foods of different initial consistency. *Dysphagia* 14. 31-42.
- 6) 武田斉子, 才藤栄一, 松尾浩一郎, 馬場 尊, 藤井 航, Palmer, J. B. (2002) 咀嚼が食塊の咽頭進入に及ぼす影響. *リハ医* 39. 322-330.
- 7) 柴田斉子, 馬場 尊, 才藤栄一, 藤井 航, 横山通夫 (2006) 意志による嚥下抑制および咀嚼が嚥下反射惹起に与える影響. *日摂食嚥下リハ会誌* 10. 52-61.
- 8) 松尾浩一郎, 才藤栄一, 武田斉子, 馬場 尊, 藤井 航, 小野木啓子, 奥井美枝, 植松 宏, Palmer, J. B. (2002) 咀嚼及び重力が嚥下反射開始時の食塊の位置に及ぼす影響. *日摂食嚥下リハ会誌* 6. 179-186.
- 9) 藤井 航 (2006) 摂食・嚥下障害リハビリテーション: 高齢者の咀嚼嚥下. *Mod. Physician* 26. 15-18.
- 10) 横山通夫 (2007) 脳卒中による片側大脳半球損傷者の咀嚼嚥下に関する研究—健常者との比較—. 藤田学園医会誌学位論文集 2007. 293-317.
- 11) 小口和代, 才藤栄一, 馬場 尊, 楠戸正子, 田中ともみ, 小野木啓子 (2000) 機能的嚥下障害スクリーニングテスト「反復唾液嚥下テスト」(the Repetitive Saliva Swallowing Test: RSST) の検討(2) 妥当性の検討. *リハ医学* 37. 383-388.
- 12) 窪田俊夫, 三島博信, 花田 実, 南波 勇, 小島義次 (1982) 脳血管障害における麻痺性嚥下障害—スクリーニングテストとその臨床応用について—. *総合リハ* 10. 271-276.
- 13) 才藤栄一 (1999) 平成11年度厚生科学研究費補助金(長寿科学総合研究事業)「摂食・嚥下障害の治療・対応に関する統合的研究」総括研究報告書. 摂食・嚥下障害の治療・対応に関する統合的研究. 平成11年度厚生科学研究費補助金研究報告書. p.1-18.
- 14) 水野雅康, 才藤栄一 (2000) 単純レントゲン検査による嚥下障害のスクリーニング—造影剤嚥下前・後レントゲン像とvideofluorography所見との比較. *リハ医学* 37. 669-675.
- 15) Teramoto, S., Matsuse, T., Fukuchi, Y., and Ouchi, Y. (1999) Simple two-step swallowing provocation test for elderly patients with aspiration pneumonia. *Lancet* 353. 1243.
- 16) 若杉葉子, 戸原 玄, 中根綾子, 後藤志乃, 大内ゆかり, 三串伸哉, 竹内周平, 高島真穂, 都島千

- 明, 千葉由美, 植松 宏 (2008) 不顕性誤嚥のスクリーニング検査における咳テストの有用性に関する検討. 日摂食嚥下リハ会誌 12. 109-117.
- 17) Kitano, H., Asada, Y., Hayashi, K., Inoue, H., and Kitajima, K. (2002) The evaluation of dysphagia following radical surgery for oral and pharyngeal carcinomas by cine-magnetic resonance imaging (Cine-MRI). *Dysphagia* 17. 187-191.
- 18) Hartl, D. M., Kolb, F., Bretagne, E., Marandas, P., and Sigal, R. (2006) Cine magnetic resonance imaging with single-shot fast spin echo for evaluation of dysphagia and aspiration. *Dysphagia* 21. 156-162.
- 19) Breyer, T., Echternach, M., Arndt, S., Richter, B., Speck, O., Schumacher, M., and Markl, M. (2009) Dynamic magnetic resonance imaging of swallowing and laryngeal motion using parallel imaging at 3 T. *Magn. Reson. Imaging* 27. 48-54.
- 20) 武原 格, 杉本 淳, 上久保毅, 藤谷順子, 宮野佐年, 猪飼哲夫, 西 将則 (2002) ヘリカルCTを用いた嚥下動態評価の試み. 日摂食嚥下リハ会誌 6. 242-246.
- 21) Sutthiprapaporn, P., Tanimoto, K., Ohtsuka, M., Nagasaki, T., Konishi, M., Iida, Y., and Katsumata, A. (2008) Improved inspection of the lateral pharyngeal recess using cone-beam computed tomography in the upright position. *Oral Radiol.* 24. 71-75.
- 22) Yamashina, A., Tanimoto, K., Ohtsuka, M., Nagasaki, T., Sutthiprapaporn, P., Iida, Y., and Katsumata, A. (2008) A morphological comparison of the piriform sinuses in head-on and head-rotated views of seated subjects using cone-beam computed tomography. *Oral Radiol.* 24. 64-70.
- 23) 稲本陽子, 藤井直子, 才藤栄一, 馬場 尊, 岡田澄子, 吉岡哲志, 井田義宏, 中井敏昭, 片田和広 (2009) 摂食・嚥下領域における320列Area Detector CTの初期経験. 映像情報Med. 41. 70-76.
- 24) 大塚昌彦 (2004) 嚥下造影検査における患者被曝線量の低減と画像の計測精度向上に関する研究. 歯放線 44. 1-15.
- 25) 谷本啓二 (1999) 摂食・嚥下障害における嚥下造影検査の役割—歯科放射線科の立場から—. 歯放線 39. 94-105.
- 26) 古内 壽, 小野寺大, 犬飼 健, 駒井伸也, 笹野高嗣 (1999) X線CT多断面再構成画像に関する研究. 東北歯誌 18. 180-186.
- 27) 後藤多津子, 徳森謙二, 吉田 豊, 加美由紀子, 吉浦一紀 (2006) 三次元MRおよびCT画像の乾燥下顎骨における計測精度解析. 歯放線 46. 71.
- 28) 平山友恵, 藤島一郎, 大野友久, 松田紫緒, 高橋博達, 稲生 綾, 黒田百合 (2004) 咽頭残留除去における頸部回旋法の効果 嚥下後頸部回旋・空嚥下の有効性について. 日摂食嚥下リハ会誌 8. 201.
- 29) Cook, I. J., Dodds, W. J., Dantas, R. O., Massey, B., Kern, M. K., Lang, I. M., Bresseur, J. G., and Hogan, W. J. (1989) Opening mechanisms of the human upper esophageal sphincter. *Am. J. Physiol.* 257. G748-G759.
- 30) Honma, M., Okada, A., Nomura, S., Inoue, M., and Yamada, Y. (2007) Relation between bolus size and hyoid movement during normal ingestion. *J. Oral Biosci.* 49. 180-189.
- 31) 酒井幸市 (2002) Visual Basic Visual C++によるデジタル画像処理入門. pp.64-100, CQ出版, 東京
- 32) 酒井幸市 (1999) デジタル画像処理入門. pp.136-159, コロナ社, 東京
- 33) Inspector (2002) User Guide Version 4. pp.1-602. Matrox Electronics Systems Ltd., Quebec, Canada
- 34) 野田主税, 高橋俊行, 岡部圭吾, 齊藤 肇, 加藤京一, 中澤靖夫 (2008) MRIによる前立腺の体積測定について TRUS, CT, MRIの比較. 日放線技会誌 64. 1369-1374.
- 35) 馬場 尊, 岡田澄子 (2005) 摂食・嚥下障害リハビリテーション実践マニュアル 評価 嚥下造影. *Med. Rehabil.* 57. 11-19.
- 36) Shaker, R. (1995) Airway protective mechanisms: current concepts. *Dysphagia* 10. 216-227.
- 37) Poudoux, P., Logemann, J. A., and Kahrilas, P. J. (1996) Pharyngeal swallowing elicited by fluid infusion: role of volition and vallecular containment. *Am. J. Physiol.* 270. G347-G354.
- 38) 横山通夫, 馬場 尊, 加賀谷斉, 才藤栄一, 都島千明, 遠藤幸男, 米田千賀子 (2007) 口腔による食塊移送を伴わない孤発的な咽頭期嚥下運動 3種の嚥下様式における検討. 日摂食嚥下リハ会誌 11. 348-349.
- 39) 横山通夫, 加賀谷斉, 才藤栄一, 尾関保則, 水野志保, 米田千賀子, 藤野宏紀, 馬場 尊 (2008) 健常者と脳卒中患者における孤発的な咽頭期嚥下運動の検討. *Jpn. J. Rehabil. Med.* 45. 121.

- 40) Dantas, R. O. and Dodds, W. J. (1990) Effect of bolus volume and consistency on swallow-induced submental and infrahyoid electromyographic activity. *Braz. J. Med. Biol. Res.* 23. 37 - 44.
- 41) Cook, I. J., Dodds, W. J., Dantas, R. O., Massey, B., Kern, M. K., Lang, I. M., Brousseau, J. G., and Hogan, W. J. (1989) Opening mechanisms of the human upper esophageal sphincter. *Am. J. Physiol.* 257. G748 - G759.
- 42) Logemann, J. A., Pauloski, B. R., Rademaker, A. W., and Kahrilas, P. J. (2002) Oropharyngeal swallow in younger and older women : videofluoroscopic analysis. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 45. 434 - 445.
- 43) Ishida, R., Palmer, J. B., and Hiemae, K. M. (2002) Hyoid motion during swallowing : factors affecting forward and upward displacement. *Dysphagia* 17. 262 - 272.
- 44) Hiemae, K. M., Palmer, J. B., Medicis, S. W., Hegener, J., Jackson, B. S., and Lieberman, D. E. (2002) Hyoid and tongue surface movements in speaking and eating. *Arch. Oral Biol.* 47. 11 - 27.
- 45) Kern, M. K., Ren, J., Arndorfer, R. C., Hofmann, C. L., and Shaker, R. (1996) Kinematic and dynamic characteristics of solid pellet movement during the pharyngeal phase of swallowing. *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.* 105. 716 - 723.
- 46) 才藤栄一 (2005) 摂食・嚥下機能障害. pp.122 - 132. 石神重信, 宮野佐年, 米本恭三編「最新リハビリテーション医学第2版」医歯薬出版, 東京
- 47) 才藤栄一 (編集) (2007) 摂食・嚥下リハビリテーション. pp.98 - 100. 医歯薬出版社, 東京
- 48) 原 明美, 大塚義顕, 向井美恵 (2002) 超音波ドプラ規格化検査法を用いた嚥下口腔相における食塊移送の評価に関する検討. 日摂食嚥下リハ会誌 6. 9 - 18.
- 49) 長谷川温子, 乙黒明子, 熊谷 仁, 中沢文子 (2005) 嚥下したゲル状食品の咽頭部での超音波による流速比較. 日食科工会誌 52. 441 - 447.
- 50) Bardan, E., Kern, M., Arndorfer, R. C., Hofmann, C., and Shaker, R. (2006) Effect of aging on bolus kinematics during the pharyngeal phase of swallowing. *Am. J. Physiol. Gastrointest. Liver Physiol.* 290. G458 - G465.
- 51) Jacob, P., Kahrilas, P. J., Logemann, J. A., Shah, V., and Ha, T. (1989) Upper esophageal sphincter opening and modulation during swallowing. *Gastroenterology* 97. 1469 - 1478.
- 52) 飯田幸弘, 勝又明敏, 藤下昌巳 (2005) 舌背斜面を不随意滑落する食塊の動態に関するVF画像的検討. 日摂食嚥下リハ会誌 9. 255 - 264.
- 53) Ku, D. N., Ma, P. P., McConnel, F. M., and Cerenko, D. (1990) A kinematic study of the oropharyngeal swallowing of a liquid. *Ann. Biomed. Eng.* 18. 655 - 669.
- 54) Paik, N. J., Kim, S. J., Lee, H. J., Jeon, J. Y., Lim, J. Y., and Han, T. R. (2008) Movement of the hyoid bone and the epiglottis during swallowing in patients with dysphagia from different etiologies. *J. Electromyogr. Kinesiol.* 18. 329 - 335.
- 55) Chi-Fishman, G. and Sonies, B. C. (2002) Kinematic strategies for hyoid movement in rapid sequential swallowing. *J. Speech Lang. Hear. Res.* 45. 457 - 468.
- 56) 横山通夫, 加賀谷斉, 才藤栄一, 藤井 航 (2008) 高齢者の嚥下障害. 総合臨 57. 138 - 139.
- 57) 片田和広 (2008) 320列面検出器CTの臨床. 環境と健康 21. 288 - 296.
- 58) 安野泰史, 三田祥寛, 成田 浩, 加藤良一, 片田和広 (2008) 320列面検出器CTの使用経験 : 心臓領域. 映像情報 Med. 40. 50 - 57.
- 59) 村山和宏, 中根正人, 早川基治, 外山 宏, 片田和広 (2008) 頭部領域における320列Area Detector CTの初期経験. 映像情報 Med. 40. 61 - 68.
- 60) 鈴木昇一, 小林正尚 (2009) 320列面検出器CTのボリュームスキャンによる頭部CT検査の線量評価. 日放線技会誌 65. 1127 - 1134.
- 61) 長谷川純, 砂屋敷忠, 武内和弘 (2007) 嚥下造影検査 (VF) における検査者の放射線被曝線量の推定. 日摂食嚥下リハ会誌 11. 33 - 41.
- 62) Seltzer, S. M. and Hubbell, J. (1995) 光子減弱係数データブック. 放射線医療技術学叢書 11. 日本放射線技術学会出版委員会, 京都
- 63) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. (2007) *Ann. ICRP* 37. 1 - 332.
- 64) Wright, R. E., Boyd, C. S., and Workman, A. (1998) Radiation doses to patients during pharyngeal videofluoroscopy. *Dysphagia* 13. 113 - 115.
- 65) Beck, T. J. and Gayler, B. W. (1990) Image quality and radiation levels in videofluoroscopy for swallowing studies : a review. *Dysphagia* 5. 118

- 128.

- 66) Crawley, M. T., Savage, P., and Oakley, F. (2004) Patient and operator dose during fluoroscopic examination of swallow mechanism. *Br. J. Radiol.* 77. 654 - 656.
- 67) Zammit-Maempel, I., Chapple, C. L., and Leslie, P. (2007) Radiation dose in videofluoroscopic swallow studies. *Dysphagia* 22. 13 - 15.
- 68) 坂本 肇 (2006) 面積線量計の基礎から臨床応用. 日放線技会誌 62. 467 - 476.
- 69) 古本啓一, 山本 昭, 岡野友宏, 荒木和之 (2000) 歯科放射線学. pp.363 - 382. 医歯薬出版, 東京
- 70) International Commission on Radiological Protection (2000) Managing patient dose in computed tomography. *Ann. ICRP* 30. 7 - 45.