《特別講演》

嚥下 CT の登場：嚥下研究の新しい地平線*1

才藤 栄一*2 稲本 陽子*2 柴田 斉子*2

はじめに

診断・評価のインパクトは、「発見性」「確認性」「記録・伝達性」の3要素で決定される。「発見性」は、今まで見るができなかったものが見えるようになること、「確認性」は、今まで分かっていたことを定量化、確認すること、「記録・伝達性」は事象を正確に記録・伝達することである。嚥下障害の臨床では、嚥下造影（VF）や嚥下内視鏡（VE）の登場は、この3点において大きなインパクトを与え、臨床・研究のゴールデンスタンダードとして広く用いられている。両者の有用性は明確であるが、定量化、部位識別性などの限界も明らかであり、嚥下中の喉頭動態など、未解決の課題が存在した。

320 列面検出器型 CT（320-ADCT）はきわめて優れた空間分解能（辺 0.5 mm boxel）と満足すべき時間分解能（再構成 10 frs/sec）を有する世界最新の CT 装置であり、2007 年 10 月に開発された。この 320-ADCT の登場は、嚥下動態の立体的動態表示を可能とした。立体的動態表示により、1) 諸器官の動態を任意方向から観察可能、2) 諸事象を同時に観察可能、3) 動態の正確な定量化が可能となり、嚥下運動のメカニズムに新たな知見をもたらしつつある。そして「発見性」「確認

性」「記録・伝達性」を併せもつ新たな評価法としてその有用性が認識され始めている。

本稿では、320-ADCT がもたらした新たな嚥下評価の可能性について紹介する。

320 列 ADCT の嚥下評価について

東芝製 320-ADCT「Aquilion ONE vision edition」はスライス厚 0.5 mm×320 列の検出器を装備し、嚥下に関わる頭蓋底から頸部食道までの 160 mm 範囲を 1 回転 0.275 秒ノンヘリカルで撮影できる。ノンヘリカルスキャンにより得られる画像は等時相である。管球 1 回転（0.275 秒×1 回転）では、3 次元静止画像を得ることができ、連続撮影（連続回転 0.275 秒× x 回転）では、頭蓋底から頸部食道までの時系列画像を収集でき、3 次元嚥下動態描出を可能とする。収集されたデータは、画像再構成によって 10 フレーム/秒で描出できる。

1. 撮影方法

嚥下 CT 用に作製した嚥下 CT 検査用リクライニング椅子（図 1）（東名ブレース（株）・アスカ（株）作製）を用いて撮影を行い、リクライニング位での撮影である。背面の角度調節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

*1 本稿は第 49 回日本リハビリテーション医学会学術集会特別講演をまとめたものである。（2012 年 6 月 1 日，福岡サンパレスにて）

*2 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/〒 470-1192 豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1-98

図 1 撮影風景

a: 寝台側から, bc: 寝台の反対側に椅子を設置し仰角 45° に調整して撮影 (管球 22° 傾斜)

図 2 画像表示方法

で頭蓋底から頸部食道まで挿入できるようになっている。撮影時は、椅子を CT 装置の寝台の反対側に設置し、仰角 45 度に調整し撮影している。

造影剤は、硫酸バリウムを用いている。軟部組織、骨、空気と区別して食塊を適切に描出するためには、CT 値 700 程度が適切であり、希釈濃度は 5% w/v に設定した。

撮影条件は、管電圧 120 kV、管電流 40 mA である。撮影時間は、被験者や患者の嚥下時間によって調整しているが、12 回転 3.3 秒を基本としている。2011 年 9 月に画像再構成における低線量画像再構成法 AIDR 3D が開発され、低線量でもノイズやアーチファクトを低減させ、良質な画像が得られるようになり被曝低減につながった。管電流を 60 mA から 40 mA に下げることができ、線量は CT dose index (CTDI) が 34.7 mGy から 12.1 mGy に、dose length product (DLP) が

554.98 mGy から 193.9 mGy となり、約 1/3 の低減となった (CTDI: ある点における平均線量, DLP: CTDI に全スキャン長を積算した値)。通常の頭部、腹部、胸部 CT の線量と比較すると、頭部より小さく、腹部、胸部と同程度の線量である。VF と比較すると、1 試行 3.3 秒間の CT 撮影 (実効線量 1.08 mSV) は、5 分間の VF 撮影 (1.05 mSV) とほぼ同程度の線量である。線量は低減しているが、複数回撮影すると高くなることは明らかであり、臨床では撮影条件や回数を慎重に検討して実施する必要がある。

2. 画像表示方法

収集されたデータは、3 D-CT 像、Multiplanar Reconstruction (MPR) 画像、仮想内視鏡モードの 3 方法にて表示可能である (図 2)。3 D-CT 像は、体内組織の X 線透過性の差を算出した CT 値

を画像に再構成して描出することができ、骨、air column surface（腔表面）、食塊を描出できる。任意方向から嚥下動態全体を観察でき、嚥下動態の総合的な把握がしやすい。MPR 画像は、スライス厚 0.5 mm で任意の断面を制限なく描出できる。決められた断面による制約がなく、観察したい諸器官を断面上に正確に描出できるため、正確な時間や距離計測が可能である。

臨床応用

1. 咽頭・喉頭の *in vivo* 形態計測

1 時相で撮影することで咽頭・喉頭の 3 次元静止画像を得ることができ、正確な形態計測が可能である。健常成人の咽頭・喉頭の形態計測を目的に、健常成人 51 名（男性 31 名、女性 20 名、23～74 歳）を対象として、吸気時の咽頭・喉頭を撮影した。咽頭体積、梨状窩体積、梨状窩上断面積、梨状窩上下径、喉頭上下径、声門前後径、咽頭横径を計測し、身長、体重、年齢、性別で比較した^{1,2)}（図 3）。咽頭・喉頭の形態は身長、年齢、性別による影響を受けることが示された。身長が高くなるにつれて、また高齢になるにつれて、咽頭体積の増加を認めた。男性は女性に比し声門前後径、喉頭上下径が有意に長かった。従来、咽頭や喉頭の形態計測は主として死体によるもので、

保存のための薬剤による組織の萎縮により、計測値をそのまま生体の動態の参考値とすることはできなかった。本 CT を用いることで実測値を計測でき、形態が嚥下機能に及ぼす影響を検討することができる。

2. 喉頭閉鎖の 3 事象の動的メカニズム

嚥下中の喉頭閉鎖は、①喉頭前庭閉鎖、②声帯閉鎖、③喉頭蓋反転の 3 事象で成り立つ、嚥下中の気道防御に欠かせない要素である。従来法では②の声帯閉鎖は観察することができず、①から③の時間的關係やその他の嚥下諸器官との時間的關係が明らかになっていなかった。

健常成人のとりみ水嚥下時の諸器官の動態の時間的關係を明らかにした。健常成人 6 名を対象として、とりみ水（1984 mP・S）10 ml を口腔内に保持させ、検者の合図で嚥下を開始させた。0.1 秒ごとに再構成された画像を 3 D-CT 像、MPR 像で描出し、軟口蓋、舌骨、喉頭蓋、喉頭前庭、声帯、食道入口部（UES）の動態および食塊先端の位置を計測した（図 4）。とりみ水の嚥下動態は、食塊先端が喉頭蓋谷に到達する頃、舌骨が前上方挙上を開始、その後 UES 開大、喉頭閉鎖 3 事象がおこる。喉頭閉鎖は喉頭前庭と声帯閉鎖が同時におこり、その後喉頭蓋が反転するという関係であった³⁾。

図 3 健常被験者の咽頭・喉頭 3 D-CT 像
側方 (a, c)、前方 (b, d) 表示（文献 1 より図 4 抜粋）

図 4 とろみ水嚥下の MPR 像

矢状断像（上段），咽頭腔にあわせた冠状断像（中段），声帯に合わせた軸位断像（下段）．造影剤（高吸収域）の輸送と舌，軟口蓋，咽頭，喉頭など嚥下諸器官の動態が観察できる．0.6 秒目で舌骨前上方挙上開始，0.9 秒目で鼻咽腔閉鎖，1.0 秒目で食道入口部開大と声帯閉鎖開始，1.4 秒目で声帯開大が確認できる．

図 5 とろみ水と液体嚥下の 3D-CT 像（文献 4 より引用）

側方表示（上段），下方表示（下段）．a：撮影後最初のフレーム，b：舌と軟口蓋の接触解除，c：舌骨前上方挙上開始，食道入口部開大開始（d：とろみ水，e：液体），声帯閉鎖開始（d：とろみ水，b：液体），f：声帯閉鎖終了

嚥下諸器官の動態は，様々な変数によって変化する．2 種類の異なる物性の液体とろみ水（1984 mP・S）と液体で同様に撮影し，嚥下動態

を比較した．液体はとろみ水に比べて食塊先端が早期に咽頭に輸送された．また諸器官の動きは，とろみ水では①舌骨挙上開始，②UES 開大，③

Onset of rapid hyoid anterosuperior movement was set as time zero.

Ant Mov: rapid anterosuperior movement, TVC: true vocal cords, PES: pharyngoesophageal segment, LV: laryngeal vestibule

図6 ころみ水と液体の嚥下動態模式図 (文献4より引用)

舌骨前上方挙上開始時を0秒としている。

喉頭前庭閉鎖と声帯閉鎖，④喉頭蓋最大反転という順で生起，液体では①声帯閉鎖，②舌骨挙上開始，③UES開大，④喉頭前庭閉鎖，⑤喉頭蓋最大反転という順で生起した⁴⁾ (図5, 6)。液体では，声帯閉鎖が舌骨挙上に先行して生起することが明らかとなり，物性による食塊輸送の変化に声帯が反応的に開閉を調整したことが示された。

また食塊量や年齢による嚥下動態の違いについても，すでに検討している。これら様々な変数間での喉頭閉鎖および嚥下諸器官の時間的關係を明らかにすることで，喉頭閉鎖のメカニズムが解明されるであろう。

3. 機能診断

320-ADCTを用いることで，嚥下障害の症状を3次元的に描出できること，また従来の手法では定量化が困難であった嚥下中の咽頭腔ボリューム

変化や舌骨・喉頭の運動距離などを定量化できることで，病態をより正確に究明することが可能である。

嚥下造影にて多量の咽頭残留を認めた，右延髄梗塞にともなう球麻痺患者 (62歳，女性) のころみ水 (537 mP・S) 4 ml の嚥下をCT撮影した。3 D-CT像 (図7右) にて咽頭残留を明瞭に描出できた。咽頭残留の病態は図7左の3 D-CT像にて明瞭に示されている。麻痺側の咽頭収縮不全 (咽頭腔が消失せずに残存) と食道入口部開大不全が，左梨状窩と右喉頭蓋谷の咽頭残留を引き起こしたことが明らかである。さらに0.1秒ごとに嚥下中の咽頭腔と食塊の体積を計測することで，咽頭腔が食塊の輸送に対し縮小する様子を定量化できる。本症例の咽頭腔の最小咽頭腔体積 (咽頭腔の最大縮小時) は13.0 mlであり，健常例の平均最小咽頭腔体積に比し大きく，収縮が不十分で

図 7 咽頭残留の病態把握

後方からの表示。舌骨前上方挙上開始後 0.3 秒目 (a), 2.0 秒目 (b) の画像。嚥下障害の症状として咽頭残留が描出され (b), この病態として麻痺側の咽頭収縮不全と食道入口部開大不全を確認できる (a)。

あった。咽頭残留量は 1.2 ml であった。このように視覚的に病態を描出でき、さらに定量的に計測できることは、機能診断として本 CT を有効に用いていくことができることを示している。現在、当大学では、症例を選択して臨床評価の一貫として嚥下 CT を行っており、試行件数、頻度の着実な増加を認めている。

臨床的展望

320-ADCT は、嚥下運動の動的・生体計測（定量）を実現し、嚥下運動の理解を促進させ、嚥下研究に大きな飛躍をもたらしている。今後も放射線量や時間分解能など考慮すべき問題は残るが、これらを考慮しながら基礎的・臨床的データを集

積していき、それを土台にした嚥下メカニズム解明や病態の定量的評価を進めていく必要がある。

文 献

- 1) 稲本陽子, 加賀谷 齊, 柴田 斉子 : 320 列面検出器型 CT による嚥下の形態・動態評価. 医学のあゆみ 2011 ; 239 : 502-509
- 2) 稲本陽子, 才藤栄一 : CT を用いた嚥下動態の評価と臨床応用. MB Med Reha 2011 ; 136 : 13-20
- 3) Inamoto Y, Fujii N, Saitoh E, Baba M, Okada S, Katada K, Ozeki Y, Kanamori D, Palmer JB : Evaluation of swallowing using 320-detector-row multislice CT. Part II : kinematic analysis of laryngeal closure during normal swallowing. Dyphagia 2011 ; 26 : 209-217
- 4) Inamoto Y, Saitoh E, Okada S, Kagaya H, Shibata S, Ota K, Baba M, Fujii N, Katada K, Wattanapan P, Palmer JB : The effect of bolus viscosity on laryngeal closure in swallowing : kinematic analysis using 320-row area detector CT. Dyphagia 2012 : Epub ahead of print