

## Original Article

## 320-row area detector CT (320-ADCT) を用いた嚥下手技解析の予備的検討

柴田斉子,<sup>1</sup> 加賀谷 斉,<sup>1</sup> 稲本陽子,<sup>2</sup> 才藤栄一,<sup>1</sup> 岡田澄子,<sup>2</sup> 太田喜久夫,<sup>2</sup> 金森大輔<sup>3</sup><sup>1</sup>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<sup>2</sup>藤田保健衛生大学医療科学部リハビリテーション学科<sup>3</sup>藤田保健衛生大学医学部歯科口腔外科学講座

## 要旨

Shibata S, Kagaya H, Inamoto Y, Saitoh E, Okada S, Ota K, Kanamori D. Swallowing maneuver analysis using 320-row area detector computed tomography (320-ADCT). Jpn J Compr Rehabil Sci 2011; 2: 54-62

【目的】代表的な嚥下手技である Mendelsohn maneuver (MM) と super-supraglottic swallow (SSGS) について、320-row area detector CT (320-ADCT) を用いて3次元的な運動学的解析が可能かどうかを検討すること。

【方法】45度リクライニングシートにもたれた被験者に4mlの5%とろみ付きバリウム溶液を口腔保持させ、通常嚥下、MM、SSGSを指示した。320-ADCTにて3.15秒間撮影し、half reconstruction法を用いて再構成し、それぞれにおける嚥下事象のタイミングを比較した。

【結果】通常嚥下、MM、SSGSのいずれにおいても声帯閉鎖や食道入口部開大のタイミングを把握することが可能であった。

【結論】320-ADCTを用いて嚥下手技の3次元的な運動学的解析が可能である。

**キーワード:** 320-ADCT, 嚥下手技, Mendelsohn maneuver, super-supraglottic swallow

## はじめに

嚥下手技は、嚥下障害者の摂食の安全性を高める代償手段として非常に重要である。1972年にLarsenら[1]が初めて、嚥下機能を改善させる手段として頸部屈曲位と息止めを用いたことを報告し、1980年代に新たな手技の開発が行われた。しかし、これまで嚥下手技を含む嚥下運動の解析には嚥下造影検査(VF)

や嚥下内視鏡検査などが用いられ、3次元的な解析手法は存在しなかった。2010年に新しい嚥下運動の評価方法として、Fujiiら[2]が320-row area detector CT (320-ADCT)による撮影法を発表した。320-ADCTは16cmの範囲のボリュームデータから、0.5mm厚、0.5mm間隔の軸位断像が得られる。この軸位断を再構築することによりあらゆる方向からの3次元画像が観察可能である。しかし、時間解像能は10フレーム/秒とVFよりも劣るため、320-ADCTを用いて嚥下手技の運動学的解析が十分可能かどうかについては未だ明らかでない。本研究の目的は、代表的な嚥下手技であるMendelsohn maneuver (MM) と super-supraglottic swallow (SSGS) について、320-ADCTによる運動学的解析がどの程度可能であるかを検討することである。

## 方法

本研究は藤田保健衛生大学医学部の倫理委員会の承認を得て実施した。嚥下手技に精通した健常成人女性1名(32歳)を被験者とし、研究実施について書面で同意を得た。撮影は320-ADCT装置(Aquilion ONE, Toshiba Medical systems, 大田原, 日本)と撮影用に作られた45度リクライニングシート(東名ブレース, 瀬戸, 日本, アスカ株式会社, 刈谷, 日本)を用いて行われた。22度傾斜させた管球内に通常とは反対側からリクライニング椅子をスライドさせて挿入した。被験者はリクライニングシートにもたれ、4mlの5%バリウム溶液(5%とろみ付き)を口腔保持し、指示に応じて嚥下した。通常嚥下、MM、SSGSを各1試行ずつ実施した。撮影はそれぞれの手技につき管球9回転、3.15秒の間行われ、half reconstruction法を用いて再構成することにより、0.1秒間隔のmultiplanar reconstruction (MPR)像、と3次元画像が得られた。得られた画像を、解剖学的構造と320-ADCTの画像診断に精通した2名の研究者が解析した。

## 計測項目

我々は、MPR正中矢状断像、軸位断像を用いて嚥下時の軟口蓋、舌骨、喉頭蓋、声帯、披裂軟骨、食道

著者連絡先: 柴田斉子  
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 愛知県豊明市沓掛町田楽ヶ窪1-98  
E-mail: sshibata@fujita-hu.ac.jp  
2011年9月12日受理

本研究において一切の利益相反や研究資金の提供はありません。

入口部開大の動きを観察した。表1に計測項目とその定義を示した。喉頭口閉鎖、声帯閉鎖、食道入口部開大の開始についてはInamotoら[3]の報告に従った。軟口蓋完全閉鎖については、軟口蓋が挙上し軟口蓋基部から口蓋垂先端までが咽頭壁と接することにより鼻咽腔を閉鎖してから再び鼻咽腔が開くまでと定義した。嚥下反射惹起時の舌骨の前方移動開始を0としてそれぞれの開始と終了のタイミングを計測した。また、3次元画像はvolume-rendering法を用いて、CT値の調整により気道表面、食塊、骨を描出し、区別しやすいようにそれぞれ青、黄色、白で表し、気道閉鎖の程度や食塊位置の判断に用いた。食塊先端位置を示すために、口腔咽頭領域をUpper oropharyngeal area (UOP)、Valleculae area (VAL)、Hypopharyngeal area (HYP)、Esophagus area (Eso)にわけて示し、その定義を表1に示した。食塊移送にかかる時間をLofとRobbins[4]が提唱するstage transition duration (STD)を用いて、食塊先端が下顎下縁で作られる平面、すなわちVALに達してから、食塊後端が食道入口部を通過するまでの時間を計測した。

また舌骨運動の軌跡の計測には、Image J 1.44o (NIH, MD, USA)を用いた。MPR矢状断像において第2頸椎前下縁と第4頸椎前下縁を結ぶ線をY軸として、このY軸が垂直となるように画像を回転し、第2頸椎前下縁でこれに直行する線をX軸とした。軸の交点を原点として、Y軸は上方向が正、X軸は前

方向が正とした。計測点は舌骨前縁上端として軌跡を計測した。

## 結果

### 1) 320-ADCTによる嚥下運動の可視化

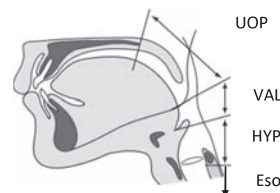
通常嚥下(図1)では、嚥下反射惹起時の舌骨の前方移動にともない披裂軟骨が前方傾斜を開始し、舌骨の前方移動開始から0.3秒後に軟口蓋挙上による鼻咽腔閉鎖と喉頭口閉鎖が生じた。声門閉鎖は舌骨前方移動開始0.4秒後に認められ、0.6秒後に喉頭蓋の完全な反転とともに咽頭収縮により下咽頭の空気層が認められなくなった。

MM(図2)では、嚥下反射惹起時の舌骨前方移動開始より0.2秒前から軟口蓋挙上による鼻咽腔閉鎖が生じ、同時に披裂軟骨が前方傾斜を開始する様子が観察された。喉頭口閉鎖と声門閉鎖はそれぞれ舌骨前方移動開始の0.2秒後と0.3秒後に生じた。喉頭蓋の完全な反転と咽頭収縮による下咽頭の空気層の消失は舌骨前方移動開始の0.5秒後に認めた。

SSGS(図3)では、嚥下反射惹起時の舌骨の前方移動開始の0.9秒前に披裂軟骨の前方傾斜が始まり、0.7秒前に声門閉鎖が生じた。この声門閉鎖は嚥下運動終了まで持続した。喉頭蓋の完全な反転と咽頭収縮による下咽頭の空気層の消失は舌骨前方移動開始の0.5秒後に認めた。

表1. 計測項目と口腔咽頭領域の定義

計測項目	定 義
軟口蓋完全閉鎖	開始 軟口蓋の挙上により、鼻咽腔が完全に閉鎖した時点 終了 再び鼻咽腔が開いたとき
喉頭口閉鎖	開始 披裂軟骨と喉頭蓋の接触により喉頭口が閉鎖した時点 終了 再び喉頭口が開いたとき
声帯閉鎖	開始 声帯が内転し、気道を完全に閉鎖した時点 終了 再び声帯レベルで気道が開いたとき
食道入口部開大	開始 食道入口部に初めて空気が確認された時点 終了 食塊が通過し、食道入口部の空気あるいは食塊が消失した時点
Stage transition duration (STD)	食塊先端が下顎下縁で作られる平面に達してから、食塊後端が食道入口部を通過するまでの時間
口腔咽頭領域	定 義
Upper oropharyngeal area (UOP)	硬口蓋と軟口蓋の境界で硬口蓋上面に垂直な平面から下顎下縁で作られる平面まで
Valleculae area (VAL)	下顎下縁で作られる平面から喉頭蓋谷まで
Hypopharyngeal area (HYP)	喉頭蓋谷を越え甲状軟骨下縁で声帯面に平行な平面まで
Esophageal area (Eso)	甲状軟骨下縁で声帯面に平行な平面から下



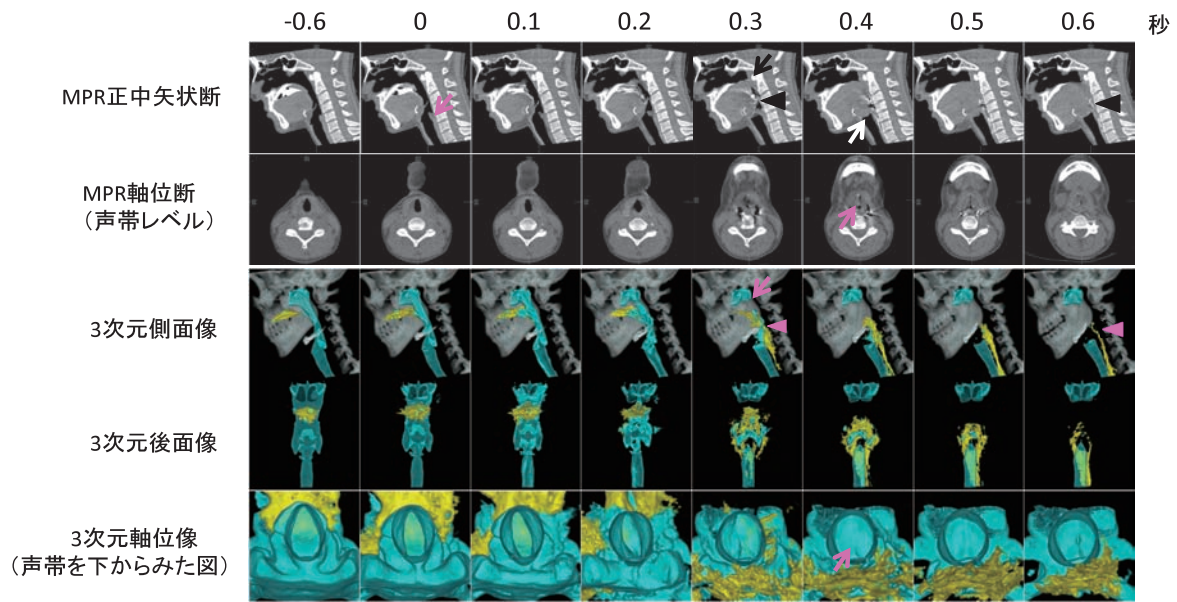


図1. 通常嚥下

嚥下反射惹起に伴い舌骨が前方移動を開始した時点として時系列で表示した。

0秒：披裂軟骨の前方傾斜開始 (←)

0.3秒：軟口蓋挙上による鼻咽腔の完全閉鎖開始 (←), 喉頭口閉鎖開始 (▽)

0.4秒：声門閉鎖開始 (←). 声門閉鎖はその後0.4秒間持続。

0.6秒：喉頭蓋の完全な反転と咽頭収縮による下咽頭の空気層の消失 (▽)

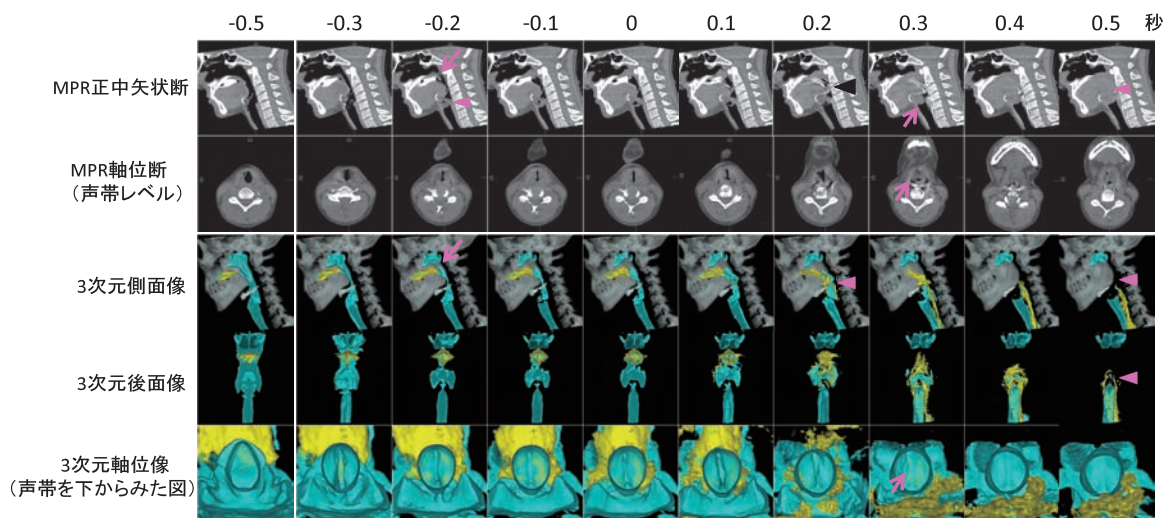


図2. Mendelsohn maneuver

嚥下反射惹起に伴い舌骨が前方移動を開始した時点として時系列で表示した。

-0.2秒：軟口蓋挙上による鼻咽腔の完全閉鎖 (←), 披裂軟骨の前方傾斜開始 (▽)

0.2秒：喉頭口閉鎖開始 (▽)

0.3秒：声門閉鎖開始 (←). 声門閉鎖はその後2.0秒間持続。

0.5秒：喉頭蓋の完全な反転と咽頭収縮による下咽頭の空気層の消失 (▽)

嚥下手技ごとに各事象の位相をグラフ (図4) に示した。通常嚥下とMMでは、各事象の運動開始の順序、タイミングは似ており、舌骨の前方移動とほぼ同じか、それ以降に各事象が始まっていた。一方、SSGSでは舌骨の前方移動開始より先に各事象が始まっており、特に喉頭口閉鎖、声門閉鎖は軟口蓋完全閉鎖より先に生じた。

## 2) 各嚥下事象開始のタイミング (図5)

嚥下反射惹起に伴う舌骨前方移動開始時点を目安として、各嚥下事象のタイミングを調べた。軟口蓋完全閉鎖開始は、通常嚥下、MM、SSGSの順にそれぞれ0.3秒、-0.2秒-0.3秒でありMMとSSGSでは舌骨前方移動開始よりも早かった。喉頭口閉鎖開始は、それぞれ0.3秒、0.2秒、-0.7秒でありSSGSで舌骨前方移動開始よりも著しく早かった。声門閉鎖の開始

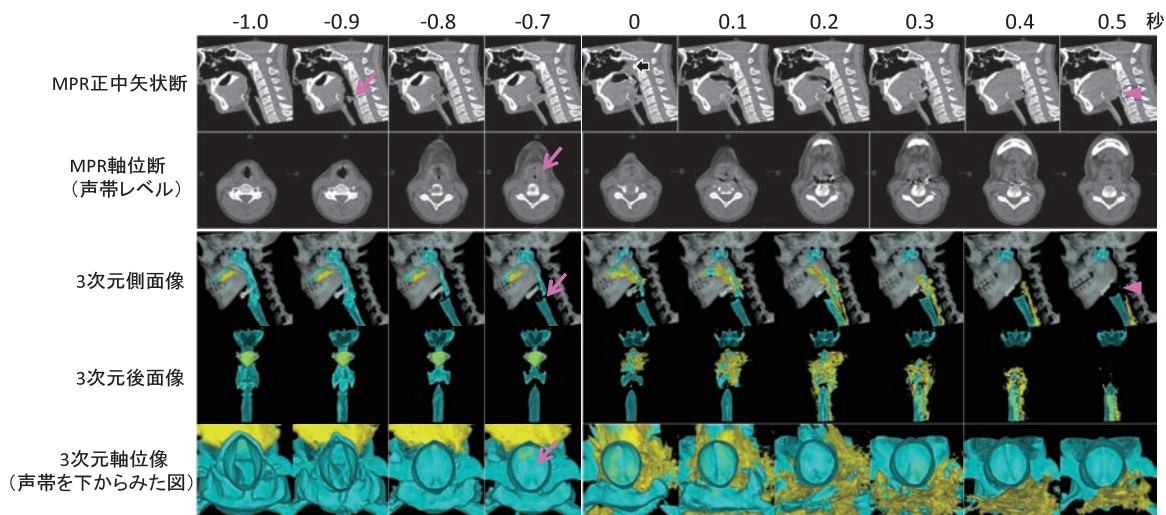


図3. Super-supraglottic swallow

嚥下反射惹起に伴い舌骨が前方移動を開始した時点として時系列で表示した。

- 0.9 秒：披裂軟骨の前方傾斜開始 (←)
- 0.7 秒：声門閉鎖開始 (←). 声門閉鎖は嚥下終了まで持続。
- 0.5 秒：喉頭蓋の完全な反転と咽頭収縮による下咽頭の空気層の消失 (▽)

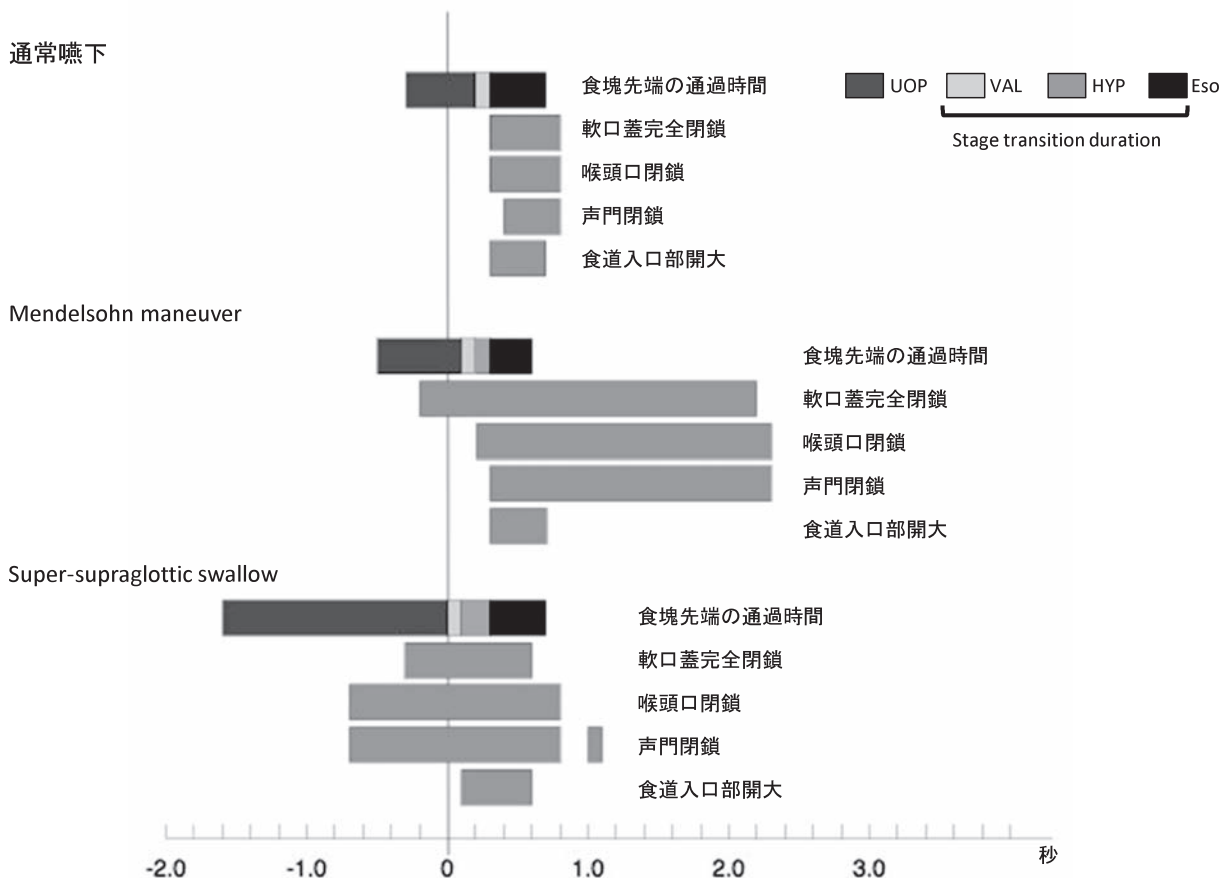


図4. 位相のグラフ

嚥下反射惹起に伴い舌骨が前方移動を開始した時点として横軸に時間経過を示した。各口腔咽頭領域における食塊先端の通過時間（最上段）と嚥下運動にかかわる4つの事象の開始から終了までをグラフに表示した。食塊先端の通過時間はUOP、VAL、HYPは食塊先端が初めてその領域に達してから、次の領域との境界に達するまで、EsoはHYPとEsoの境界を食塊先端が通過してから食塊後端が通過するまでをグラフに示した。

は通常嚥下, MM, SSGS の順に 0.4 秒, 0.3 秒, -0.7 秒であり通常嚥下と MM では喉頭口閉鎖の 0.1 秒後に始まり, SSGS では喉頭口閉鎖と同時に生じていた. 食道入口部開大開始は, 通常嚥下, MM, SSGS の順にそれぞれ 0.3 秒, 0.3 秒, 0.1 秒であり SSGS で他の 2 つの嚥下よりも早いタイミングで生じていた. 舌骨前方移動開始時の食塊先端の位置は, 通常嚥下と MM では口腔咽頭領域 (UOP) であるが, SSGS ではすでに喉頭蓋谷領域 (VAL) に達していた.

### 3) 各運動の持続時間

軟口蓋閉鎖は, 通常嚥下, MM, SSGS の順にそれぞれ 0.5 秒, 2.4 秒, 0.9 秒であり, MM で著しく長かった. 喉頭口閉鎖は, それぞれ 0.5 秒, 2.1 秒 1.4 秒であり, MM, SSGS で長かった. 声帯閉鎖は, それぞれ 0.4 秒, 2.0 秒, 1.5 秒で MM, SSGS で長く, SSGS では喉頭口閉鎖と同時間および, 嚥下後の咳嗽時に閉鎖を認めた. 食道入口部開大は, それぞれ 0.4 秒, 0.4 秒, 0.5 秒であり, SSGS で他の 2 つの嚥下より 0.1 秒長かった. STD は, それぞれ 0.5 秒, 0.5 秒, 0.7 秒であり, 通常嚥下, MM よりも SSGS で 0.2 秒長かった.

### 4) 舌骨運動 (図 6)

通常嚥下と MM では嚥下反射開始時の舌骨前方移動開始の前に舌骨の上方移動が始まっていた. この時期に通常嚥下では舌骨がいったん後方へ動いていたが, MM では舌骨は後方に動くことなく, 直上に動いた. SSGS では強く息を止め, 力む際に舌骨が一旦前

方, 上方の順に移動した. その後徐々に元の位置に戻るが完全には復位せず, 嚥下反射惹起の際に再び前上方に動いた. 舌骨の移動距離は, 嚥下手技開始時から, 舌骨の最大移動時を比較すると, 前方移動は通常嚥下, MM, SSGS の順にそれぞれ, 7.2, 7.2, 6.5mm であり, SSGS で小さかった. 上方移動はそれぞれ 6.1, 7.6, 5.4mm とで MM で移動距離が大きく, SSGS で小さかった.

### 考察

本研究では 320-ADCT を用いた嚥下手技の 3 次元解析が可能であり, 手技による嚥下動態の違いを把握することができた. 今回の被験者は MM では Logemann の定義 [5] 通り 2 秒以上の喉頭挙上ができていた. また嚥下手技の中でも, SSGS は獲得が難しいといわれているが, 息止めの開始から嚥下終了まで声門閉鎖の持続が得られており, 手技は正確に実施できているものと考えた.

320-ADCT で得られる画像は, 10frame/秒と嚥下造影検査のビデオ画像と比べて時間的解像度は低いが, 嚥下事象のタイミングの比較は VF と同様に可能であった. MPR 像により任意の断面による嚥下器官の構造の観察, 特に軸位断により声帯閉鎖の観察ができることが VF にはない利点であった. また矢状断により披裂軟骨の前傾や喉頭蓋基部への接近, 喉頭蓋の反転の様子が明瞭に観察できた. CT 値を変えて空気を青で, 造影剤を黄色で表示した 3 次元画像は, 食塊の動きや咽頭収縮の様子を可視化でき, 嚥下運動全体

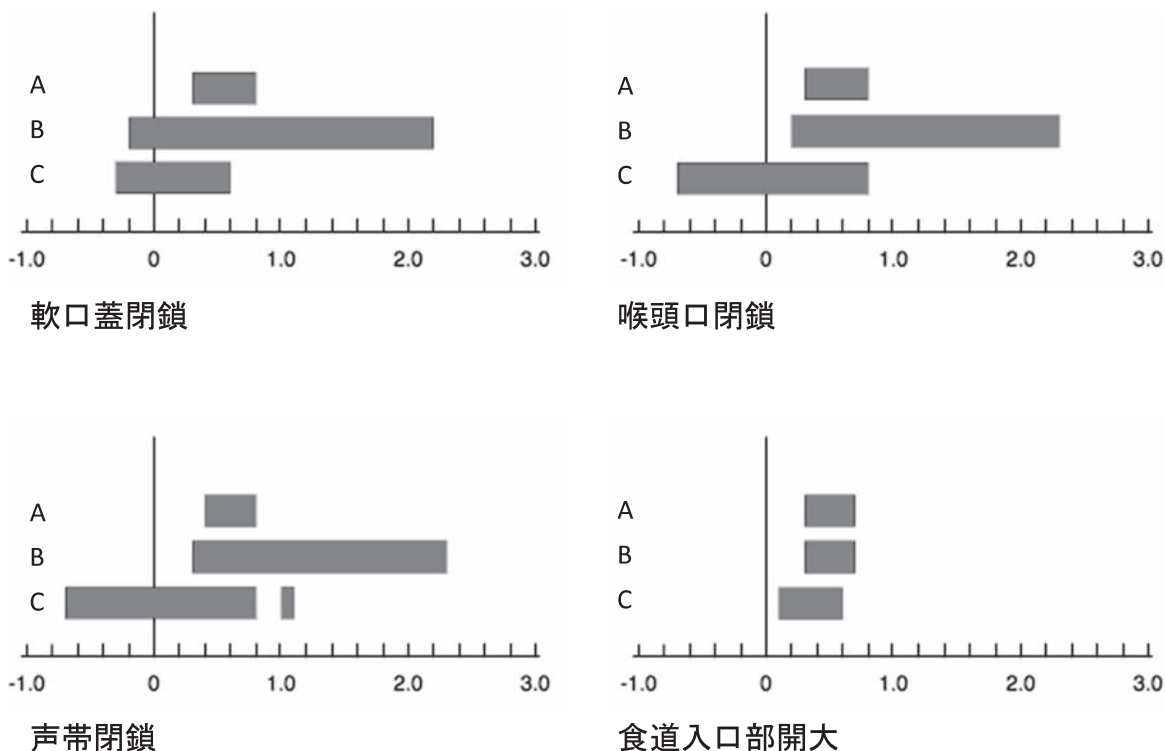


図 5. 嚥下手技間における各事象の位相の比較

嚥下反射惹起に伴い舌骨が前方移動を開始した時点をもととして横軸に時間経過を示した. 嚥下運動にかかわる 4 つの事象の開始から終了までをグラフに示し, 嚥下手技による違いを比較した.

A: 通常嚥下, B: Mendelsohn maneuver, C: Super-supraglottic swallow

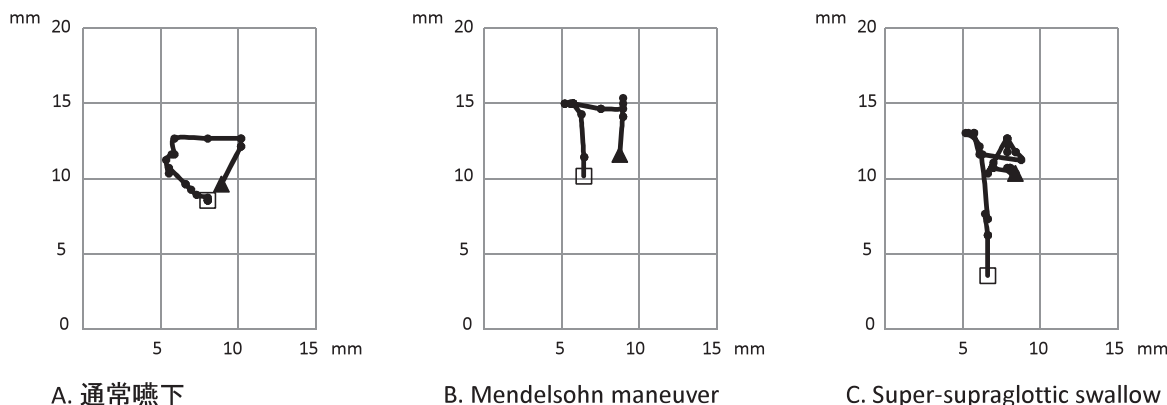


図6. 舌骨の軌跡

▲：始点 □：終点

通常嚥下：舌骨は一旦後ろに下がりながら最大挙上位に到達し、嚥下反射惹起時には水平に前方に移動した。

Mendelsohn maneuver：舌骨が最大挙上したのち、嚥下反射惹起に伴って、水平に前方に移動し、前方で挙上位を保った後、下降した。

Super-supraglottic swallow：息こらえにともない舌骨が前方、上方の順に移動した。その後、舌骨は徐々に復位するが完全に下降はせず、嚥下反射開始に伴い再び前上方に最大移動した。

の観察に適していた。また MPR 像のみでは判断が難しい気道の開閉が明瞭にわかるため、声帯閉鎖のタイミングを正確に判断することができた。

Mendelsohn maneuver は、嚥下時の喉頭挙上低下例に対して、食道入口部の開大を改善することを目的に考えられた手技である。その効果は、喉頭挙上の量と時間が延長すること、食道入口部の開大時間と開大幅が増大すること、嚥下運動の協調性を改善することが報告されている [5-7]。また、上記に加えて食塊が口腔から食道へ移送される時間が延長するとも述べられている [8]。本研究の結果では、舌骨上方移動量、舌骨移動時間は延長していたが、食道入口部の開大時間は通常嚥下と同じであった。これは CT の方が空間的解像度にすぐれているため、正確に食道入口部の開きを計測できた可能性と、時間解像度が低いために差を描出できなかった可能性が考えられた。また stage transition duration は通常嚥下と同じ長さであった。これは食塊量が 4 ml と少ないこと、リクライニング 45 度の姿勢で撮影しているため、送り込みが早く行われた可能性が考えられた。嚥下事象のタイミングは通常嚥下と MM で共通しており、舌骨が上方、前方の順に移動し、舌骨の前方移動開始後に食塊が口腔咽頭から下咽頭に送り込まれた。一方、軟口蓋挙上が MM では舌骨前方移動より早く生じていた。また、声門閉鎖は通常嚥下では食道入口部開大より 0.1 秒遅れて生じていたが、MM では同時に生じていた。これは今後症例を重ねる中で、舌骨上筋群の筋電図や咽頭内圧測定と組み合わせることにより、MM の効果として嚥下運動の強調性を高めるとする根拠を解明するためのヒントになると考えられた。

SSGS は気道閉鎖減弱による嚥下障害に対して考えられた手技である。強く息を止め力むことにより、声帯より上で披裂軟骨が喉頭蓋基部に接近することにより、気道を閉鎖すると定義 [5] されている。我々の結果でも、MPR 側面像にて息こらえ時に披裂軟骨が前方に移動し、喉頭蓋谷基部に接近の様子が確認できた。また、その時点で 3 次元画像において喉頭部分

の air を示す青色の範囲が消失し、気道閉鎖していることが確認できた。

Ohmae ら [9] は、健常者において通常嚥下と SGS, SSGS を観察し、SSGS では舌骨の位置は他の嚥下と変わらないが、甲状舌骨筋の作用で嚥下運動の早い段階に舌骨と喉頭の距離が短縮し、これが嚥下反射時の舌骨の前方移動を助け、食道入口部の開大のタイミングを早めていると述べた。食道入口部の開大は喉頭挙上と舌骨が輪状咽頭筋の前壁を前方へ牽引することによって生じると述べられている [10, 11]。輪状咽頭筋の弛緩は、食道入口部開大に先立って喉頭挙上に同期して生じることが報告されている [12]。我々の結果では、まず息こらえの際に舌骨は前方に移動し、それに引きつづき舌骨の上方移動が生じた。その後声門閉鎖を維持しながら舌骨は少しずつもとの位置にもどってくるが、嚥下反射惹起の際に再び前方、上方へ移動した。SSGS で食道入口部開大は、嚥下反射惹起の際の舌骨前方移動開始から 1 コマ後に生じており、他の 2 つの嚥下と比べて早かった。食塊を口腔保持した状態からの舌骨の最大移動距離は、前方移動は SSGS で通常嚥下、MM と変わらないが、上方への移動距離は SSGS で通常嚥下、MM に比べて少なかった。これは、SSGS では強く息を止め力む動作が、甲状披裂筋や甲状舌骨筋の筋活動を高め、早期に喉頭を引き上げ、舌骨と喉頭をひとつのユニットとして構成し、嚥下反射惹起時の舌骨前方移動による食道入口部開大を早めているのではないかと推測した。SSGS で嚥下反射惹起時の食塊先端位置はすでに VAL にあったが、これは、嚥下反射開始後に食道入口部開大が早く起こることに順応して、食塊移送の効率を高めているのではないかと推測した。今後症例数を増やしてこの事象を検討する必要がある。また、食塊を送り込むための舌の動きが障害された嚥下障害者でも同様の食塊移送が生じているかを、今後確認する必要がある。

320-ADCT は空間解像能に優れ、舌骨の動きや咽頭腔における食塊の位置の観察が容易である。また任意の断面での観察が可能であり、VF では観察が困難

な、声帯や食道入口部の動きの観察が可能である。放射線被曝に関しては、320-ADCTを用いて3.15秒間のdynamic volume スキャンを行った際の実効線量は1.65mSvであり、VFで5分間照射した場合の1.6倍程度であるが、比較的低い線量とされる頸部CT撮影1回分2.8mSvよりは小さいことが報告されている[13]。従って、320-ADCTは咀嚼や長時間の嚥下動態の評価には向かないが、評価内容を十分に検討の上実施することで、VFでは得られない重要な情報を得ることができ、臨床上でも有益と考える。今回は1例のみの計測であるため、それぞれの嚥下手技における各器官の動きについて確定的なことは断言できないが、320-ADCTを用いることにより健常者さらには摂食・嚥下障害患者においても嚥下手技の効果を評価できる可能性が示された。

### 謝辞

稿を終えるに臨み、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部各位に厚くお礼申し上げます。

### 文献

1. Larsen GL. Rehabilitation for dysphagia paralytica. *J Speech Hear Disord* 1972; 37: 187-94.
2. Fujii N, Inamoto Y, Saitoh E, Baba M, Okada S, Yoshioka S, Nakai T, Ida Y, Katada K, Palmer JB. Evaluation of swallowing using 320-detector-row multislice CT. Part I: Single- and multiphase volume scanning for three-dimensional morphological and kinematic analysis. *Dysphagia* 2011; 26: 99-107.
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. *Dysphagia* 2010; 26: 209-17.
4. Lof GL, Robbins J. Test-retest variability in normal swallowing. *Dysphagia* 1990; 4: 236-42.
5. Logemann JA. The role of the speech language pathologist in the management of dysphagia. *Otolaryngol Clin North Am* 1988; 21: 783-8.
6. Boden K, Hallgren A, Witt Hedstrom H. Effects of three different swallow maneuvers analyzed by videomanometry. *Acta Radiol* 2006; 47: 628-33.
7. Ding R, Larson CR, Logemann JA, Readmaker AW. Surface electromyographic and electroglottographic studies in normal subjects under two swallow conditions: Normal and during the Mendelsohn maneuver. *Dysphagia* 2002; 17: 1-12.
8. Kahrilas PJ, Logemann JA, Krugler C, Flanagan E. Volitional augmentation of upper esophageal sphincter opening during swallowing. *Am J Physiol* 1991; 260: G450-6.
9. Ohmae Y, Logemann JA, Kaiser P, Hanson DG, Kahrilas PJ. Effects of two breath-holding maneuvers on oropharyngeal swallow. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1998; 107: 344-8.
10. Cook IJ, Dodds WJ, Dantas RO, Massey B, Kern MK, Lang IM, et al. Opening mechanism of the human upper esophageal sphincter. *Am J Physiol* 1989; 257: G748-59.
11. Kahrilas PJ, Dodds WJ, Dent J, Logemann JA, Shaker R. Upper esophageal sphincter function during deglutition. *Gastroenterology* 1988; 95: 52-62.
12. Jacob P, Kahrilas PJ, Logemann JA, Shan V, Ha T. Upper esophageal sphincter opening and modulation during swallowing. *Gastroenterology* 1989; 97: 1469-78.
13. Kanamori D, Kagaya H, Fujii N, Inamoto Y, Nakayama E, Suzuki S, et al. Examination of the distance measurement error and exposed dose when using a 320-detector row multislice CT: A comparison with videofluoroscopic examination of swallowing. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2011; 2: 18-23.