 原 著

口腔咽頭領域の高精細 MRI ——舌筋の MRI-RGB 合成画像の作成——

高野佐代子¹⁾ 本多 清志²⁾ 正木 信夫¹⁾

要 約：本研究では口腔咽頭領域の運動機能の解明を目指し、磁気共鳴画像装置（Magnetic Resonance Imaging: MRI）を用いて生体の舌筋構造がわかる解剖図を作成する。4 種の撮像条件（Field Echo 法の in-phase, opposed-phase, Spin Echo 法の T1 強調, プロトン密度強調画像）を用いて異なる組織コントラストをもつ MRI データを赤 (red: R), 緑 (green: G), 青 (blue: B) の各チャンネルに配置して舌筋の MRI-RGB 合成画像を作成し、矢状・冠状・水平面における複数断面の筋組織分布を評価した。これらの合成画像において外舌筋と一部の顎筋は筋束の走行を識別できた。内舌筋のうち垂直舌筋は特定困難であったが、上縦舌筋, 下縦舌筋および横舌筋の筋束方向（脂肪を含む）を一部観察できた。複数の撮像条件を組み合わせた組織構造の可視化法は、発話, 嚥下, 呼吸等にかかわる口腔機能を推定するうえで有用と考えられる。

索引用語：MRI, 舌筋, 舌, 歯列, 解剖図

High-Resolution MRI of the Oropharyngeal Region ——MRI-RGB Representation of Tongue Muscles——

Sayoko Takano¹⁾, Kiyoshi Honda²⁾ and Shinobu Masaki¹⁾

Abstract: This study employs magnetic resonance imaging (MRI) techniques to construct anatomical images to facilitate understanding of motor function of the oropharyngeal region. MRI data were acquired in the sagittal, coronal and transverse planes under four imaging conditions (in-phase and opposed-phase conditions in field echo sequence, T1-weighted and proton-density-weighted conditions in spin echo sequence). MRI-RGB representations of the oropharyngeal region are established by the composition of red, blue and green channels using three types of images with different tissue contrasts. In those images, the extrinsic tongue muscles and part of the jaw muscles were recognizable. One of the intrinsic muscles, the vertical muscle, was not confirmed. Other intrinsic tongue muscles (superior longitudinal, inferior longitudinal, and transverse muscle) were partly observed including the surrounding adipose tissue. Anatomical visualization of the oropharyngeal region and its morphological construction in vivo will be useful for studies of speech, deglutition and respiration.

Key words: MRI, tongue muscles, tongue, teeth, anatomical images

日本音声言語医学会平成 21 年度（第 3 回）音声言語医学に関する研究助成成果報告論文
ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタ（ATR-BAIC）¹⁾：〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台二丁目 2 番地 2
パリ第三大学音声学研究所²⁾：19, rue des Bernardins 75005 Paris, France

¹⁾Brain Activity Imaging Center (BAIC), ATR-Promotions Inc.: 2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288, Japan

²⁾Laboratories of Phonetics and Phonology, UMR7018, CNRS-University of Paris III: 19, rue des Bernardins 75005 Paris, France
2010 年 6 月 16 日受稿 2010 年 9 月 13 日受理

はじめに

口腔咽頭領域の解剖学的知識は、病理学的な所見を読み取る際の基礎であり、画像診断における嚥下や呼吸、発話などの運動機能の評価に欠かせない。医療およびリハビリの現場では運動機能の治療および回復トレーニングが重要であるが¹⁾、口腔領域の運動器官は四肢に比較して筋の配置とその作用との関係が複雑であり、運動の観察や筋活動の計測が困難である^{cf. 2)}。生体における口腔領域の運動機能の評価するためには、筋や骨の運動の観測を可能とする可視化技術の確立と、生体構造の基礎的な資料が必要不可欠である。

本研究では平成 21 年度音声言語医学の研究助成を受け、図 1 に示すような課題目標に基づき、3 テスラ (Tesla: T) の静磁場を有する MRI 装置 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) を用いて嚥下や呼吸、発声などの運動機能の解明に役立つ口腔咽頭領域の MRI 解剖の資料を作成する。本報告ではその第一報として、一目でわかる資料の作成を目的とし、種々の MRI 撮像データを用いて歯列および組織のカラー化 (MRI-RGB 合成画像) を行い、各種の舌筋および顎筋の走行を評価する。

舌は下顎、上顎、舌骨および咽頭に囲まれた領域に位置しており、骨部と舌をつなぐ外舌筋、舌内で生じ骨組織に付着しない内舌筋、また間接的に舌を動かす筋としてその周囲の顎筋、咽頭筋、口蓋筋などからなる^{3,4)}。外舌筋は図 2a に示すように、下顎骨オトガイ部から生じ舌内に終わるオトガイ舌筋 (一部舌骨に付着)、舌骨体および大角から生じ舌内に終わる舌骨舌筋、側頭骨下面にある茎状突起から生じ舌に進入し舌端にいたる茎突舌筋の計 3 種が存在する。内舌筋は図 2c~e に示すように、上縦舌筋、下縦舌筋、横舌筋、垂直舌筋であり、これらの筋が折り重なって舌全体を

形作る。さらに下顎や喉頭の運動にもかかわる顎筋としては図 2b に示すように、下顎骨オトガイ部と舌骨をつなぐオトガイ舌骨筋、下顎と舌骨をつなぐ膜状の顎舌骨筋、下顎骨乳様突起内側の二腹筋窩に生じ舌骨小角をつないで側頭骨乳突切痕に終る顎二腹筋がある。これらのさまざまな筋が協調し合い活動することによって、口腔咽頭領域の巧みな運動を作り出している。

このような運動機能にかかわる筋肉や軟組織などの可視化に際しては、脂肪や水をさまざまなコントラストで撮像することが可能な MRI⁵⁾ が適している。MRI による形態撮像は主に二つの方法に分けられ、強い静磁場内で水素原子の原子核である陽子 (プロトン) を励起させた後、収束パルスを用いて磁場の不均一性の影響を抑えるスピンエコー法 (Spin Echo 法: 以下 SE 法) と、傾斜磁場を変動させることにより画像を効率的に得るフィールドエコー法 (Field Echo 法: 以下 FE 法) がある。いずれも電磁波を照射する時間間隔 (Repetition Time: 以下 TR) とそのエコー信号収集のタイミング (Echo Time: 以下 TE) などが再構成画像の違いに反映する重要なパラメータとなる。SE 法では主に TR と TE の組み合わせにより、T1 強調画像 (T1-weighted: 以下 SE (T1w)), T2 強調画像 (T2-weighted: 以下 SE (T2w)), プロトン強調画像 (Proton-Density weighted: 以下 SE (PDw)) などがあり、それぞれ異なるコントラストをもつ画像を撮像できる。また FE 法では脂肪と水の共鳴周波数のわずかな違いが画質に影響を与え、TE の選択により脂肪と水の分布の違いを可視化できる。プロトンの回転が同位相となる TE を選択すると in-phase 画像 (以下 FE (in)) や、逆位相となる TE を選択すると opposed-phase 画像 (以下 FE (op)) を撮像できる。このようなさまざまな撮像条件を用いることにより、SE (T1w) では水が黒く (低輝度)、脂肪が白く (高

図1 平成 21 年度音声言語医学研究助成「運動機能の解明を目指した口腔咽頭領域の高精細 MRI と web によるわかりやすい資料公開」の全体像と本報告で取り組んだ課題 (太線枠)

図2 舌運動にかかわる主要な外舌筋、顎筋、および内舌筋^{3,4)}。内舌筋は他の筋と折り重なって走行するので、擬似的に筋線維の存在方向を一方の矢印で示した。a：オトガイ舌筋 (genioglossus muscle：GG)，舌骨舌筋 (hioglossus muscle：HG)，茎突舌筋 (styloglossus muscle：SG)，オトガイ舌骨筋 (geniohyoid muscle：GH)，b：顎二腹筋前腹 (anterior belly of digastric muscle：ABD)，顎二腹筋後腹 (posterior belly of digastric muscle：PBD)，顎舌骨筋 (mylohyoid muscle：MH)，c：横舌筋 (transverse muscle：T)，d：上縦舌筋 (superior longitudinal muscle：SL)，下縦舌筋 (inferior longitudinal muscle：IL)，e：垂直舌筋 (vertical muscle：V)

輝度) 撮像され、SE (T2w) では水が白および脂肪が黒く、また SE (PDw) では水も脂肪も白く撮像される。FE 法では主に T1w の傾向をもつが、特に FE (op) では脂肪と水が同ボクセル (直方体画素) に存在する箇所では低輝度に撮像されることが知られている。また撮像時間および画像の S/N に影響するパラメータとして、echo 数および加算回数 (Number of EXcitation: NEX) がある。echo 数は 1 回の RF の励起に対するデータ収集回数を意味し撮像時間の短縮に貢献する。NEX は同撮像を繰り返すことによる平均化により S/N を向上させる。

このように MRI はさまざまな撮像が可能であり、脳機能評価などの必要性から詳細な MRI 解剖が行われている。先行研究において、撮像法やパラメータを工夫することにより上記の脂肪と水の存在を利用した脳画像の擬似的なカラー画像の作成や^{6,7)}、MRI 拡散テンソル画像法 (Diffusion Tensor Imaging: DTI) による脳神経の線維方向の抽出⁸⁾ が報告された。一方、口腔領域では、脳に比べると MRI を利用した解剖学的な研究は非常に少ない⁹⁾。水分子の拡散現象を利用した線維方向を可視化する DTI を利用した舌筋の抽出の試みがなされているが¹⁰⁾、これには高度な撮像技術の知識が要求され、被験者は舌を固定するための補助具を用いる必要があった。口腔領域の運動を研究す

る者にとっては、このような MRI に基づく筋線維の走行を正確に読み取ることは非常に難しい。このわかりにくさを解消するためにも、各種撮像条件により組織を比較できるデータ集を作成する必要がある。

本報告では代表的な撮像条件のうち、舌筋組織のコントラストを最大化できる 4 種類の撮像条件により口腔部位の MRI を収集し、元画像および画像処理を加えた基礎資料を作成し、図 2 に示した口腔部位の運動機能にかかわる各筋の走行を複数断面にわたって検証する。

方 法

舌の筋構造を可視化するために、4 種類の撮像条件を用いて、安静時の口腔部位を矢状面、冠状面、水平面について複数断面を撮像する。得られた画像についてしきい値処理、および重ね合わせにより MRI-RGB 合成画像を作成し、生体における安静時の舌筋の走行を明らかにする。

1. MRI 撮像

成人健常者 1 名 (59 歳) を被験者として MAGNETOM Trio, A Tim System (3 T) (Siemens 社製) を用いて仰臥位の安静状態で撮像を行った。撮像には 16ch ヘッドネックコイルを利用した。撮像に際しては、国際電気通信基礎技術研究所倫理委員会および

図3 本研究で用いた各撮像条件により得られた画像

a : Field Echo 法 (in-phase), b : Field Echo 法 (opposed phase), c : Spin Echo 法 (proton-density weighted), d : Spin Echo 法 (T1-weighted)

表1 実験で用いた各種撮像パラメータ

	TR/TE/FA	echo	NEX	撮像時間
FE (in)	320/2.53/60	1	2	2分51秒
FE (op)	320/3.69/20	1	2	2分51秒
SE (T1w)	787/14/120	2	2	3分21秒
SE (PDw)	3200/11/160	7	1	1分54秒

TR: Repetition Time [ms], TE: Echo Time [ms], FA: Flip Angle [degree], NEX: Number of Excitation, FE (in): Field Echo 法 in-phase, FE (op): Field Echo 法 opposed-phase, SE (T1w): Spin Echo 法 T1-weighted, SE (PDw): Spin Echo 法 Proton-Density weighted

ATR-Promotions fMRI・MEG 研究安全委員会の承認を得た。MRI の撮像は舌領域の骨、筋、結合組織、脂肪等を考慮し、それぞれを最大限に区別できる撮像条件のセットとして表1に示す4種類 (FE (in), FE (op), SE (T1w) および SE (PDw)) を用いて口腔咽頭領域の撮像範囲 (Field of View: FOV) で高解像度のMRI撮像 (FOV 256×256 mm, 画像マトリックス 512×512 pixel, 厚さ4 mm) を行った。これにより得られた画像のうち矢状正中面について図3に示す。

FE法のパラメータではTR=320 msを固定とし、FE (in)に相当するTE=2.53 msおよび、FE (op)に相当するTE=3.69 msを選択した。SE法においては、SE (T1w)ではTR=787 ms, TE=14 ms, またSE (PDw)ではTR=3200 ms, TE=11 msを選択した。撮像時間をおおよそ同等にする関係で、SE (T1w)ではecho=2, NEX=2, SE (PDw)条件ではecho=7, NEX=1とした。なお本実験で利用したecho数を増やした撮像法をSiemens社の装置ではTurbo Spin Echo法と呼ぶが、ここではSE法で統一する。

2. 画像処理

画像処理にはMATLAB本体とオプションの

Image Processing ToolBox (MathWorks 社) を利用した。得られた画像は512×512 pixel 16 bit データなので8 bit データに変換したうえで、脳等も含めた全体画像 (FOV 256×256 mm, 512×512 pixel) および口腔部のみの画像 (FOV 128×128 mm, 256×256 pixel) としてコンピュータ上にTIFファイルとして保存した。

1) 画像の2値化と輪郭抽出

図3aに示すようにFE (in)では空気や骨などでは輝度値が低く、水および脂肪とも輝度値が高い。すなわち組織の内部構造の違いにかかわらず、組織の輝度値がほぼ同程度に高い傾向があるので、他の撮像条件に比較して空気および歯列の抽出が容易である。そこでFE (in)で得られた画像を基に領域の区別に適したしきい値で二値化を行い¹¹⁾、図4b-1の歯列を含む下顎の抽出、および図4b-2の皮膚表面¹²⁾をそれぞれ抽出した。鼻腔の抽出は行わなかった。細かい粒子状ノイズをメディアンフィルタにより除去したうえで、図4c-1, c-2に示すように手動で歯列もしくは組織の不要な部位を消去した (画像上では黒)。さらに皮膚表面に対しエッジ抽出に有効とされるcannyフィルタを用いて図4dの輪郭抽出画像を得た。

2) 画像のカラー化

一般にコンピュータ上のカラー画像は図5aに示すように赤 (red: R), 緑 (green: G), 青 (blue: B) の各チャンネルのデータを重ね合わせるにより実現されている。MRI-RGB合成画像の作成に際して、Rには図5bのFE (op), Gには図5cのSE (PDw), Bには図5dのSE (T1w)を配置した。

RGBの配置は筋=赤系, 脂肪=青系, 水=緑系となるように選択した。実際には口腔周辺には水の含有量の多い組織は少ないので、青系と緑系はほぼ同色となる。Rには、主に筋組織で輝度値が高いFE (op)

図4 画像処理の手順

a: FE (in) オリジナル, b-1: 歯列抽出のための二値化, b-2: 組織抽出のための二値化, c-1: 手作業による歯列抽出, c-2: 手作業による組織抽出, d: 組織と空気の境界線描画のためのエッジ抽出.

を選択した. これにより, 口腔部位の筋組織が赤系で表示される. さらにスライスを横切る血管は赤系となる. G には, 主に脂肪および水の存在により輝度値が高い SE (PDw) を選択した. これにより脂肪および水組織が緑系となる. B には, 主に脂肪の輝度値が高い SE (T1w) を選択した. これにより脂肪組織は主に青系となる.

さらに観察を容易にするために, 図6に示す手順で歯列と顎骨は8bit中50%の輝度値を付加し, 組織の境界線はBチャンネルに加算することにより, 舌筋のMRI-RGB合成画像としてTIFファイル形式で保存した.

結 果

本研究では4種類のMRI撮像により同部位においてコントラストの異なる画像を記録し, 低コントラスト画像のFE (in) より歯列および組織を抽出し, その他の高コントラストの画像 (FE (op), SE (T1w), SE (PD)) より舌筋のMRI-RGB合成画像を作成した. 図7にその一部を示す.

1. 種々の撮像結果

本報告では表1に示す各撮像条件を用いて口腔部位のMRIデータを得た. 図3に矢状正中面のデータを示した. FE法では脂肪と水のコントラストの有無をつけることができ, SE法では特に脂肪部位の輝度値

を高めることができる. MRIでは水素原子のプロトン信号源とするために, 空気や骨部はともに同程度に輝度値が低い. 下顎骨などの骨部に関しては, 骨組織全体が筋肉やその他の組織に覆われているために抽出が容易であるが, 鼻腔付近では骨およびその周囲の粘膜が薄いので空気と骨との違いが不明瞭であった. そこで, 空気と骨との違いは目視により境界を設定した.

FE (in) では水および脂肪ともにほぼ一様の高輝度値となり, プロトン含有量が低い空気および歯列や骨部では低輝度値となった. 一般にMRIでは骨部と空気の違いは画像上には現れないので, 骨部の抽出はしきい値決定による二値化の後, 目視により実施した. 一方, FE (op) の画像では, 脂肪と水が同ピクセル内に存在するボクセルで信号が打ち消し合うことにより低輝度値となる. たとえば舌内の中央層や口唇の歯列面に近い層や舌の側面部に低輝度の部位が見られる. これは筋組織内で水分子と脂肪分子が同程度に存在する部位であり, 筋組織のみに固有ではないが, 筋肉の走行方向を知る有力な手掛かりになりうる. さらに, FE (op) では各スライスへの血液流入により, 血管の輝度値が高くなる場合がある. これはtime of flight (TOF) 効果と呼ばれ, 流入方向および流入速度に関係し, 血管造影に近い画像が得られる.

SE (T1w) では脂肪は高輝度であるが水が低輝度

図5 RGB画像作成

a : RGB チャンネルによるカラー画像作成の原理. b : red = FE (op), c : green=SE (PDw), d : blue=SE (T1w) とし, 各チャンネルを重ね合わせることで, 舌筋の MRI-RGB 合成画像を作成.

図6 歯列および組織抽出を含めた舌筋の MRI-RGB 合成画像の作成

a : MRI-RGB 合成画像, b : 歯列抽出画像 (図4 c-1 より), c : 空気と組織の境界線, d : a, b, c の加算により得られた MRI-RGB 合成画像. ただし b の歯列と顎骨は 8 bit 中 50 % の輝度値を付加し, c の組織境界は blue チャンネルに配置した.

図7 舌筋の MRI-RGB 合成画像. a : 矢状面, b : 冠状面, c : 水平面

になる傾向があり（図3の脳内参照）、SE（PDw）では脂肪および水の輝度値がともに高くなる。口腔領域では唾液線管内を除き水のみを含む領域がほとんどないので得られるコントラストは類似しており、SE（T1w）とSE（PDw）の決定的な差は見出しにくい。

2. 歯列および皮膚表面の抽出

FE（in）の画像を基に画像処理で2値化した後、歯列および皮膚表面を抽出した画像を図4に示した。下顎の骨部の輝度値は低く、骨内部は骨髄のために輝度値は高い。したがって下顎の中央部は骨として抽出できなかった。またコイルの感度ムラのために、皮膚表面の抽出の際に喉頭付近等の輝度値が低下しているため、二値化処理による組織抽出ではノイズ成分が悪影響を及ぼしている部位があった（図4b-2の喉頭部分など）。

3. MRI-RGB 合成画像

RGBの各チャンネルにそれぞれFE（op）、SE（PDw）、SE（T1w）を配置し、さらに歯列、境界線を付加することによって得たMRI-RGB画像について、矢状面、冠状面、水平面の各断面から抜粋したものをそれぞれ図7に示した。

これらの画像では、各撮像条件の特徴に従い推測するならば、緑～青は脂肪が多い部位、赤は脂肪と水の割合がほぼ同程度の部位である。また明るい赤は血管内の血液の流れに対応し、特に水平面の各種頸動脈や静脈およびその分岐より生じる各種血管が観察できる。その他、赤の一部については、鼻腔などにおける空気のための輝度値低下の場合もあるので注意が必要である。

4. 筋組織の識別

MRI-RGB合成画像の色表示は必ずしも各組織を正確に識別するものではないが、各種撮像条件の重ね合わせより得られた赤の領域は脂肪と水の割合がほぼ同程度の部位であり、舌内では筋肉に相当すると考えられる。以下に各筋の分布について検討する。

1) 外舌筋

起始部の少なくとも一方は骨に付着し、舌内組織に終端する筋は外舌筋と呼ばれる。一端は骨部にあるために筋の見分けが容易で、筋の長さ計測などにも適している⁹⁾。以下に代表的な外舌筋の分布を説明する。

(1) オトガイ舌筋（genioglossus muscle）

下顎骨オトガイ棘から生じ舌表面に向かい放射する最大の外舌筋である。矢状面、冠状面、水平面、いずれにおいても比較的良好に筋線維の走行方向を観測できた。矢状面において、舌の中間層では筋の走行方向

が観察できたが、外層部では同じ部位に各種内舌筋が混在するために筋束の観察が困難であった。冠状面および水平面では舌中隔を境とした左右のオトガイ舌筋の走行が確認できたが、隣接するオトガイ舌骨筋と解剖学的にも混在しており区別はできなかった。

従来、オトガイ舌筋の前部と後部は機能的に区別されるといわれてきたが、解剖学的にも矢状面におけるオトガイ舌筋の中心腱であるshort tendonを指標として、後部オトガイ舌筋の境界が確認できた¹³⁾。さらにオトガイ舌筋の筋束はオトガイ棘からだけでなく、このshort tendonから発しており、SE（PDw）、SE（T1w）においてその筋束の方向が確認できた。

(2) 舌骨舌筋（hyoglossus muscle）

舌骨の体部および大角の上面から生じ、舌の側面を走行し、舌の外側面上部付近で終止する膜状の筋である。一部の線維は小角から生じており、小角舌筋と呼ばれることもあるが、ここでは区別しない。冠状面、水平面において比較的良好に筋束を観測できたが、矢状面は膜状の筋と平行に断面が選択されるため他の面に比べると観察は困難であった。舌骨舌筋は垂直～やや前方に向かって走行するので、冠状面では膜状に垂直に走る筋束を観測できた。ただし、内舌筋の下縦舌筋および外舌筋の茎突舌筋などとも同じ部位を走行しており、これらの区別は困難であった。水平面では舌骨上部からの筋束は比較的追跡しやすいが、上面では下縦舌筋および茎突舌筋との交絡があり舌上面部での終端は判別できなかった。

(3) 茎突舌筋（styloglossus muscle）

側頭骨茎状突起から生じ、下前方に進み、舌背で舌骨舌筋と交わりながら舌前方に進み、舌端で終端する筋である。今回撮像した画像における舌内領域では矢状面、冠状面、水平面の各断面において筋束の追跡は非常に困難で、わずかに上部冠状面および側部矢状面など舌外での筋線維の方向を確認できるにすぎなかった。いずれも舌背では舌骨舌筋、舌前方では下縦舌筋と交わっているためであり、これは解剖学的な知見とも一致する。

2) 内舌筋

舌の内部に生じ、舌内部もしくは上皮に向かって走行する筋である。上下の縦舌筋（前後）、垂直舌筋（上下）、横舌筋（左右）および外舌筋の一部が層をなして編み合うように線維が走行するために、筋束としての観察が困難である。各筋線維は他の骨格筋と異なった様相を見せ、縦舌筋は短い筋線維が重なり合いながら長い筋束を形成し、垂直舌筋と横舌筋は筋線維層が

規則的に重なりあって舌根から舌端にいたる筋集合を作っている⁴⁾。MRI では内舌筋の線維の走行もしくははその方向は、舌の内部に存在する脂肪の分布により間接的に推定できる。

(1) 上縦舌筋 (superior longitudinal muscle)

舌を前後に走行する筋のうち、舌根に生じ舌の表面を走行し、舌端にいたる筋である。さまざまな筋が混ざり合うために分布領域の判定は難しいが、矢状面および冠状面において上縦舌筋の走行は観測可能である。冠状面では舌端付近では観測しやすいが、舌根部付近においてはスライス断面と平行になるため観察が困難になる。

(2) 下縦舌筋 (inferior longitudinal muscle)

舌を前後に走行する筋のうち、舌根に生じ舌下面を走行し舌端にいたる筋である。位置的にはオトガイ筋と舌骨舌筋の間に存在する。前方では茎突舌筋と交錯しており、後方では舌骨舌筋と交わるために特定が困難であるが、矢状面および冠状面で筋束の一部は観察できた。冠状面では舌端部では茎突舌筋と混在しており区別は困難で、舌中央～舌背付近では下縦舌筋を確認できるが、舌根に近づくとはほとんど確認できなかった。水平面では茎突舌筋に加えて、オトガイ舌筋との区別が困難であり、全体的に追跡が困難な筋である。

(3) 横舌筋 (vertical muscle)

舌の外層部において、舌中隔から舌側面に向かって舌の左右方向よりやや上方に向かって走行する筋である。冠状面および水平面では垂直舌筋に比較して横舌筋のほうが筋線維の観測が容易であった。ただし横舌筋の場合、筋線維が可視化されたものではなく、実際は周囲脂肪層の分布が可視化されたものと考えられ、標本解剖と対比した評価が必要であろう。

(4) 垂直舌筋 (transverse muscle)

舌の外層部において、舌の上表面から下方外側に向かって垂直よりわずかに傾斜した方向に斜走する筋である。冠状面で横舌筋とほぼ同じ部位にはほぼ直交して観察できるはずであるが、垂直舌筋の筋束は確認できなかった。同部位に重なるように存在する横舌筋およびオトガイ舌筋の筋線維の方向は観察しやすいが、垂直舌筋の線維方向を確認することはできなかった。

3) 舌運動にかかわる顎筋

(1) オトガイ舌骨筋 (geniohyoid muscle)

オトガイ舌骨筋は下顎骨オトガイ部 (下方) と舌骨をつなぐ筋であり、解剖学的にも一部オトガイ舌筋の線維と交わっている。矢状面、冠状面、水平面のいずれでもオトガイ舌骨筋の存在は確認できるが、隣接す

るオトガイ舌筋、顎舌骨筋、顎二腹筋、などとも画像コントラストが等しく、これらを識別することはできなかった。

(2) 顎舌骨筋 (mylohyoid muscle)

顎舌骨筋は下顎骨下内側にある顎舌骨筋線より生じ、顎舌骨筋縫線もしくは舌骨体の顎舌骨筋窩に終わり、口腔底を作る膜状の筋である。矢状面および冠状面では下顎骨から生じ、顎二腹筋やオトガイ舌骨筋などと同スライス面に現れる部位では境界はほとんど識別できないが、一部舌骨に付着する部位ではある程度の識別は可能であった。

(3) 顎二腹筋 (digastric muscle)

顎二腹筋は下顎骨オトガイ下方の二腹筋窩に生じ舌骨小角をつないで側頭骨乳突切痕に終る。下顎骨から舌骨までの筋束は顎二腹筋前腹、舌骨から側頭骨までは顎二腹筋後腹と呼ばれる。前腹については矢状面では下顎骨付近の起始部において容易に識別可能であるが、顎舌骨筋と重なる部位で分離が困難であった。舌骨より後方の後腹では周囲が脂肪組織のため再び観察できる部位があった。

考 察

本実験で得たデータ取得およびデータ処理について、これまでの研究で使われてきた方法、さらに今後の課題について検討する。

1. MRI による各部位の撮像

1) 空気と組織の境界線

発声時の舌形状もしくは声道を抽出する際には、空気と組織の差分が画像化されること、短時間で高 S/N のデータを得ることが望まれる。従来の研究では主に 2D もしくは 3D の FE 系のシーケンスが使われている¹²⁾。本研究における空気と組織の境界線の抽出にも FE (in) を用いており、輪郭抽出に適した画質が得られている。さらにノイズなどに対して頑健な輪郭抽出には膨張収縮法などのアルゴリズムの利用も考えられる¹²⁾。また撮像範囲内において高 S/N を保つには受信コイルの選択が重要である¹⁴⁾。

2) 歯列および顎骨部

歯列および顎骨部は水がほとんど存在せず、MRI の信号源となるプロトンに乏しいために空気と同程度の輝度値に撮像される。本研究では、脂肪と水の輝度値の差が小さい FE (in) を用いて歯列抽出を行い、特殊な位置合わせや特定の装置を行わずに MRI 原画像および MRI-RGB に対して歯列挿入を行った。先行研究では脂肪を強調し、また形状を安定に抽出するた

め SE 系のシーケンスが使われている^{15, 16)}。

Takemoto¹⁵⁾ は MRI 撮像による歯列の位置合わせを自動で行う際、大臼歯内の歯髄を目標点とする位置合わせを提案している。歯髄は脂肪および水成分を多く含むと考えられ、おおよそ SE 系の SE (PD) に近い撮像を行うことにより目視による位置合わせが容易になるように工夫されている。また北村ら¹⁶⁾ は熱可塑性エラストマー (弾力性に富む高分子化合物) にパラフィン (炭化水素化合物, ここでは油脂成分を含む) を加えることによって形成したマウスピースを用いて、仰臥位での歯列撮像を可能にした。北村らは油脂成分の信号値の高輝度化を狙う目的で SE 系シーケンスを選択しており、鮮明な歯列撮像を実現している。このような歯列抽出は声道の抽出や筋肉の走行やその他の組織を評価するうえでも役立つ指標となる。

2. 未検討の口腔領域の組織の撮像

口腔領域には上記に示した部位以外に、舌骨や頸椎、血管、唾液腺などの各種組織が存在し、MRI の評価の際に重要な手掛かりとなる。本研究では未検討の今後考慮すべき組織について述べる。

1) MRI 撮像による問題点

MRI 撮像における問題の一つとして、輝度値の低下および上昇は脂肪と水の含有量によるパラメータ調整によるものだけでなく、空気存在による輝度値の低下がある。また FE (out) の問題点として、脂肪と水のプロトンの存在量が同等のところでは輝度値が低下するが、脂肪がわずかに多い場合も水がわずかに多い場合でも同程度の信号値になることが挙げられる。

顕著な例では舌の内部の筋組織と鼻腔付近で赤系の色をもつが、これは FE (out) による信号低下が影響している。具体的には舌内部において脂肪と水の存在量のバランスにより輝度値が低下し、一方で鼻腔部における空気存在により輝度値が低下する。したがって、MRI 像において舌の筋組織などに比べると、舌内の脂肪組織と鼻腔組織が同程度の輝度値となる。MRI-RGB 合成画像の鼻腔部分の赤と舌内の赤は見掛け上は同質であるが、物質の組成は異なることもある。

さらに今回 R チャンネルに用いた FE (out) は脂肪と水のプロトンの量が等しいとき、信号が打ち消し合うことにより輝度値が低下するという特徴がある。すなわち、プロトン数が脂肪より水で一定量上回る場合とその逆に水より脂肪で同量上回る場合とで等しい輝度値となる。したがって MRI-RGB において同色に見えても、上記と同様、物質の組成が異なる場合があ

る。これは後の唾液腺の項でも述べるが、水を強調できる SE (T2w) の撮像により改善できる可能性がある。

2) 舌骨および喉頭軟骨 (hyoid bone and laryngeal cartilages)

舌骨は口腔底に位置し各種の筋肉が付着しているが、他の骨と接続部をもたず、舌などの運動時の支持部位として重要なマーカー点となる。もし舌骨全体が骨化しているならば、FE (in) の撮像の際に下顎および歯列と同様に抽出は可能であるが、水平面で形状の一部が確認できる程度で、矢状面および冠状面ではほとんど識別できなかった。舌骨は下顎に比べて小さいので本実験で用いた MRI 撮像コイルやスライス厚および解像度などの各種パラメータによって決められる分解能が不十分であった可能性がある。また被験者によっては骨化が十分ではなく他の撮像条件が適している場合もある。舌骨の形状および位置が確認できれば筋の付着点としての指標になるので、特定の撮像により抽出した形状を基に各人の形状モデルを作成し、各断面でわずかに見られる指標を基にモデルを配置することも考えられる。

各種の喉頭軟骨も同様に多くの筋肉が付着し、特に声帯の制御に直接関与しているため喉頭軟骨の同定は重要である。喉頭軟骨の MRI 撮像については高野らが試みているが、喉頭専用の MRI 撮像コイルや、呼吸運動によるブレを防ぐための同期撮像法などを用いることにより成功している¹⁴⁾。今後、3 T の MRI による高画質の喉頭軟骨の撮像が望まれる。

3) 血管 (blood vessels)

FE (out) において TOF 効果によって血流の一部が高い輝度値で撮像される。特に頸動脈および頸静脈は水平面スライスにほぼ垂直に流入するので可視化されやすい。冠状面、矢状面でも観察できる部位がある。今後、歯列と同様に血管抽出をすることにより、舌筋の MRI-RGB 合成画像に血管データを加えることができる。また、血管造影に用いられる撮像法を追加すれば、明瞭な血管像を表示することができる。

4) 唾液腺 (salivary glands)

水の含有量が比較的多いと考えられる唾液腺 (舌下腺、顎下腺、耳下腺) および線管については、水の輝度値を高く撮像できる SE (T2w) (本報告では未撮像) のほうが、SE (PDw) よりも適していると推測される。筋肉や唾液腺内部の水の含有量には個人差があるので、被験者ごとにテスト撮像を行い、ターゲットとなる撮像部位や、個々の被験者の脂肪や水の含有量、その他、撮像枚数および撮像時間との兼ね合いから適し

たパラメータを選択することになるであろう。

5) 筋の線維方向 (muscle fiber tracking)

脳内の神経線維の可視化に用いられる処理法である DTI を用いて、器具を用いて舌を固定した状態における舌筋線維の方向を可視化した報告がある¹⁰⁾。この方法を用いることにより、通常の撮像では同コントラストで撮像される筋に対しても、計算により線維方向を求めることができると考えられる。ただし現在は実験が困難であり、また S/N および分解能が低いという問題がある。

結 論

本研究では舌の筋構造を可視化するために、4 種類の撮像条件を用いて、安静時の口腔部位を対象として矢状面、冠状面、水平面について 3T-MRI を用いて撮像を行った。得られた画像の重ね合わせによって擬似的にカラー表示することにより、筋の走行を可視化できる MRI-RGB 合成画像を提案した。本報告で利用した撮像条件やパラメータ内では各断面による外舌筋および一部の顎筋の評価は可能であった。また内舌筋のうち、垂直舌筋の筋走行はほとんど確認できなかったが、その他の上縦舌筋、下縦舌筋、横舌筋についてはその筋線維の走行 (脂肪分布を含む) が一部確認できた。生体における各種の筋の配置関係やその方向が確認できるデータは発話、嚥下、呼吸等にかかわる研究者にとって有用であると考えられる。今後、得られたデータを web 公開することにより、口腔の運動機能にかかわる研究者の MRI の利用が促進されることが期待される。

謝辞 本報告は平成 21 年度音声言語医学の研究助成「運動機能の解明を目指した口腔咽頭領域の高精細 MRI と web によるわかりやすい資料公開」のプロジェクトの前編としてまとめたものです。温かい支援に心より御礼申し上げます。MRI 撮像にあたっては ATR-Promotions BAIC (脳活動イメージングセンタ) の島田育廣氏、藤本一郎氏の多大なる技術提供および実験協力により本研究は実施されました。心より感謝申し上げます。

文 献

- 1) 荻安 誠：嚥下・音声機能の改善のための相互乗り入れリハビリテーション訓練変法。音声言語医学, 50 : 201-210, 2009.
- 2) Baer T, Alfonso P and Honda K: Electromyography of the tongue muscles during vowels in /əpVp/ environment. Annual Bulletin Research Institute of Logopedics and Phoniatrics, 22: 7-19, 1988.
- 3) Gray's Anatomy, 38 th Ed (edited by Gray H), Churchill Livingstone, Edinburgh, 1995 (original work published 1858).
- 4) Takemoto H: Morphological analyses of the human tongue musculature for three-dimensional modeling. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 44: 95-107, 2001.
- 5) レイハシェミ：MRI の基礎パワーテキスト (荒木 力監訳), メディカルサイエンスインターナショナル社, 東京, 2004.
- 6) Brown HK, Hazelton TR and Silbiger ML: Generation of color composites for enhanced tissue differentiation in magnetic resonance imaging of the brain. American Journal of Anatomy, 192: 23-24, 1991.
- 7) Muraki S, Nakai T and Kita Y: Basic Research for Coloring Multichannel MRI Data, ETL Technical Report TR-2000-11, 2000.
- 8) Mori S, Wakana S, Nagae-Poetscher LM, et al : 拡散テンソル法によるヒト脳白質の MRI アトラス (森 進監訳), 講談社, 東京, 2007.
- 9) Takano S and Honda K: An MRI analysis of the extrinsic tongue muscles during vowel production. Speech Communication, 49: 49-58, 2007.
- 10) Shinagawa H, Murano EZ, Zhuo J, et al: Tongue muscle fiber tracking during rest and tongue protrusion with oral appliances: A preliminary study with diffusion tensor imaging. Journal of Acoustical Science and Technology, 29(4): 291-294, 2008.
- 11) 竹本浩典, 北村達也, 西本博則, 他：声道形状の MRI 計測における歯列補填法。日本音響学会講演論文集, 1 : 293-294, 2003.
- 12) 竹本浩典, 本多清志, 正木信夫, 他：3D MRI movie による声道断面積関数の時間パタンの抽出。信学技報, SP-5 : 67-74, 2001.
- 13) Honda K, Takano S, Takemoto H, et al: The genioglossus as a triangular muscle: fiber arrangement and its articulatory effects. In Proc. 2nd Int. Symp. Biomechanics, Healthcare and Information Science II: 55-59, 2008.
- 14) 高野佐代子, 本多清志：高分解能 MRI による輪状甲状関節の観測。音声言語医学, 46 : 174-178, 2005.
- 15) Takemoto H, Kitamura T, Nishimoto T, et al: A method of tooth superimposition on MRI data for accurate measurement of vocal tract shape and dimensions. Acoustical Science and Technology, 25(6) : 468-474, 2004.
- 16) 北村達也, 平田宏之, 本多清志, 他：MRI による歯列計測法—熱可塑性エラストマー製マウスピースを用いて—。信学技報, MI2007-28 : 7-10, 2007.

別刷請求先：〒 619-0288 京都府相楽郡精華町光台二丁目
2 番地 2
ATR-Promotions 脳活動イメージングセンタ
(ATR-BAIC)
高野佐代子