

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：14301  
 研究種目：研究活動スタート支援  
 研究期間：2010～2011  
 課題番号：22890098  
 研究課題名（和文）MRIを用いた顎関節疾患の要因分析と顎運動シミュレーションソフトウェアの開発  
 研究課題名（英文）The factor analysis of the temporomandibular joint disease and development of mandibular movement simulation software using MRI  
 研究代表者  
 中井 隆介（NAKAI RYUSUKE）  
 京都大学・再生医科学研究所・研究員  
 研究者番号：10576234

研究成果の概要（和文）：正常被験者および顎関節に異常が認められる被験者を対象に、MRI (Magnetic Resonance Imaging) を用いて咀嚼筋の働きと開閉口運動時の下顎骨および関節円板の3次元的な動きの解析・評価を行った結果、下顎の開閉口運動の軌跡および関節円板の状態と咀嚼筋の機能に相関があることが明らかとなった。さらに下顎骨の運動状態がコンピュータ上で3次元的に表示されるソフトウェアを開発した。このソフトウェアにより、MRIの多種の情報をを用いて、視覚的に現在の顎運動の状況を把握することが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The function of masticatory muscles and the three-dimensional movement of mandibular bone and temporomandibular articular disc during mouth opening and shutting were analyzed using MRI. As a result, it became clear that the locus of mandibular movement and the condition of temporomandibular articular disc and the function of masticatory muscles have correlation. In addition, the software that was able to display the movement of the mandible by 3D on the computer was developed. By this software, we became able to grasp a condition of the mandibular movement visually.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,090,000	327,000	1,417,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,290,000	687,000	2,977,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：歯科医用工学・再生歯学

キーワード：MRI、画像処理、シミュレーション、顎関節、顎運動、生体工学

1. 研究開始当初の背景

近年、顎関節疾患の患者数は増加傾向にあり、歯科口腔領域における治療課題の1つとされているが、その確定的な治療法の確立に至っていないのが現状である。これは顎関節疾患が関節異常や筋緊張などの複合的な要

因によって発症するためだと考えられる。このような複合的な要因は顎関節の複雑な構造や動きと関係がある。下顎骨と上顎骨の間には左右1つずつ顎関節、関節円板があり、左右それぞれ3次元的に動く関節円板と多くの筋肉が関係し、下顎の動きは非常に複雑な

ものとなる。さらに関節円板はズレやすく、円板の転位で多くの障害が現れる。また、これらの異常運動は個人個人によって異なっているように見えるため問題を複雑化させている。このような問題に対応するためには、個々の問題点の切り分けや判別が重要であり、問題に対応した評価法の確立が必要となる。そして、その評価法の確立のためには、その問題点の要素である顎運動、関節円板および咀嚼筋について分析することが必要である。

従来の下顎運動の計測では、下顎運動測定器等を用いて、頭蓋の体表に指標をおき、その動きを計測して間接的に顎関節の運動を推測する方法が用いられてきた。この方法では切歯部の軌跡は直接計測できるが、下顎頭の運動は直接計測できず、さらに、運動中での関節円板等の内部組織の変化も観察することができなかった。また近年、X線投影やCTを用いた下顎運動の撮像および解析の研究はなされているが、X線被爆の問題が存在する。またCTでは関節円板を画像化することができない。MRIはX線被爆の無い生体情報画像化装置であり、MRIを用いることで下顎運動の解析だけではなく、関節円板や筋肉などの評価も行うことが可能となる。

## 2. 研究の目的

近年、MRIを用いて顎運動を直接的に撮像する研究がなされてきているが、顎関節の片側のみでの撮像の研究である。顎関節は人体の中で唯一、左右一対の連続性をもつ両側性の関節である。片側における顎関節の機能障害が、反対側の顎関節に影響を与えることもあり、両側を同時に計測する必要がある。そこで筆者らは、高速撮像シーケンスを最適化し、左右両側の顎関節矢状断面に加えて、左右両側の顎関節下顎頭を含む水平断面、さらに、一般的な顎運動計測の計測点である下顎の正中の矢状断面の運動も含めて同時に4断面を撮像する multi-section 動的撮像手法を開発した。また近年、筋肉の特性評価の研究も行われており、筋肉の質的な評価を多面的に検討することが可能となった。咬筋は顎運動に関係する筋肉で、運動に密接な関係があると言われており、咬筋を調査し、顎運動との関連性を評価することが、顎関節疾患の状態を解明していく上で重要な点である。また臨床治療を考えていく上では、顎運動状態を視覚的に簡便に捉えることが重要であると考え

る。そこで本研究の目的は、MRIを用いて咀嚼筋の働きと開閉口運動時の顎顔面骨および関節円板の3次元的な動きの解析・評価を行い、顎運動軌跡や関節円板、筋肉の状態と顎関節疾患との関係性を明らかにすることと、

下顎運動を3次元で視覚的に呈示するソフトウェアを開発することである。

## 3. 研究の方法

### (1) MRI 装置

京都大学再生医科学研究所のMRI装置 (Siemens 社製 MAGNETOM Sonata 1.5T (maximum amplitude 40mT/m, slew rate 200 T/m/second)) を使用し、信号受信用コイルはヘッドコイルおよびダブルループコイルを用いた。

### (2) 下顎運動計測

下顎運動撮像では、完全な SSFP (Steady-State Free Precession) を作り出す True FISP (Fast Imaging with Steady State Precession) シーケンスによって多断面動的撮像を行う。撮像は、関節円板並びに下顎頭の運動軌跡を得るための左右側下顎頭顎路面、下顎運動を計測するときの最も一般的な計測点である下顎中切歯の運動軌跡を得るための正中部矢状断面、開閉口時に左右下顎頭を含む顎関節部の水平方向の動きを得るための顎関節部水平断面を対象とした。撮像した画像から、自作のソフトウェアを用い下顎運動の軌跡を計測した。また、各画像から運動時における関節円板の転位状態を分析した。

### (3) 咬筋体積計測

体積計測のために、3D-MPRAGE (Magnetization-Prepared Rapid Gradient Echo Imaging) シーケンスを用いて MRI 撮像を行った。撮像した画像は、画像解析ソフトウェア VGStudio MAX 1.2 を用いてスライスごとに左右それぞれの咬筋の ROI を抽出し、左右咬筋の体積を計測した。

### (4) 咬筋の DTI (Diffusion Tensor Imaging) 解析

撮像シーケンスは、DWI (Diffusion Weighted Imaging) の MPG (Motion Probing Gradient) により生じる渦電流による画像歪みを低減させるために、twice refocused spin echo EPI (Echo Planar Imaging) diffusion シーケンスを使用した。咬筋全体が入る領域を Axial 面で撮像した。撮像した画像に対しては、DTI 解析処理を行うための画像処理ソフトウェアを自作し、処理を行った。使用した DTI 解析手法を以下に示した。

まず、b 値が 0 の時の画像および 6 枚の拡散強調画像から、6 方向の ADC (Apparent Diffusion Coefficient) を求め、この ADC を使用し、拡散テンソルを求めた。次に、拡散テンソルに対して、Householder 変換

によって3重対角化を行い、直行列と下三角行列を用い固有値を求める方法であるQL法によって固有値を求め、さらにそれぞれの固有ベクトルも求めた。固有値は、拡散の強度に対応しており、固有値 $\lambda_1$ に対応する固有ベクトル $e_1$ は拡散係数が最大の方向へのベクトルを表す。つまり、この $e_1$ ベクトルは計算したピクセルにおいて最も拡散しやすい方向を表す( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ の方向はそれぞれ直交する)。これらの固有値を用い、MD (Mean Diffucivity) を求め画像化した。最後に、この固有値を用いて水の拡散の異方性の度合いを表すFA (Fractional Anisotropy) を求めた。FAを求める計算式を(1)式に表した。(1)式で表されるFAは、ピクセルごとの水の拡散の異方性度を表し、等方性であれば0.0、1方向のみしか拡散しなければ1.0となる。これらの手法を用い、撮像した画像から、咬筋部のMDおよびFA値の平均値を求めた。

$$FA = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^3 (\lambda_i - (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)/3)^2}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i^2}} \quad (1)$$

#### (5) 咬筋の特性値解析

MRIにおける画像のコントラストは、T1緩和時間そしてT2緩和時間によって変化する。MRIにおける信号強度は、(2)式で表される。

$$SI \propto N(H) \left[ 1 - \exp\left(\frac{-TR}{T_1}\right) \right] \exp\left(\frac{-TE}{T_2}\right) \quad (2)$$

MRIで画像診断が可能となるのは、体内の各組織においてT1緩和時間とT2緩和時間が異なるためである。これらは組織の状態を識別するときに非常に重要な指標となる。

T1値撮像シーケンスおよびT2値撮像シーケンスを使用し、咬筋全体をAxial面で撮像した。取得した画像から、自作したデータ処理・計測ソフトウェアを用いて、咬筋のT1値、T2値を計測した。

#### (6) 関連性解析

個々の絶対値に関しては、体格的影響が大きいと考えられるので、今回は左右差に着目し解析を行った。下顎運動計測において計測した軌跡の左右方向の変動と、咬筋撮像から計測した各数値の左右差についてstatistical analysisを行った。

#### (7) 顎運動シミュレーションソフトウェアの開発

ソフトウェアの構築に使用した開発ツールはVisual C++ 2010およびOpenGLで、高速化のために並列プログラミングを用いた。本ソフトウェアの使用OS環境はWindows XPより上のバージョンとした。入力画像フォーマットはDICOM3.0形式。MRIから出力した画像から得られる3次元サーフェースデータを元に下顎運動を3次元的に表示するシステムを構築した。また、運動分析時に求められる関節円板の情報や、その他の情報についても表示を行うことが可能とする。

### 4. 研究成果

#### (1) 下顎運動計測

下顎運動計測で撮像した画像から、下顎頭の軌跡計測を行った結果の1例を図1に示す。それぞれの面での下顎軌跡を捉えることができた。次に、運動軌跡から下顎頭の左右方向の変位を計測した結果を図2に示す。このデータと関節円板の異常がある被験者を対比させたところ、左右方向への変動と関節円板異常との間に関係性があることが示唆された。

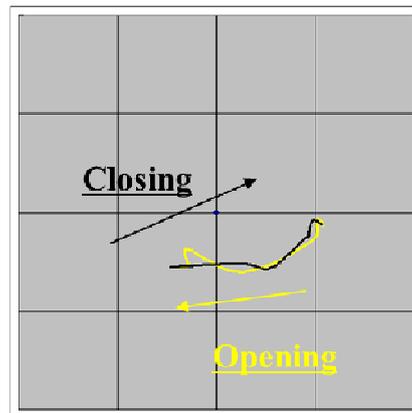


図1. 下顎頭の軌跡の計測

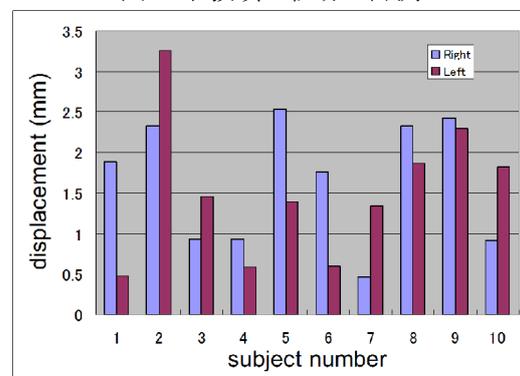


図2. 下顎骨の左右方向への変位

(2) 咬筋体積計測

咬筋を撮像した画像上に ROI を設定した画像の一例を図 2 に示す。

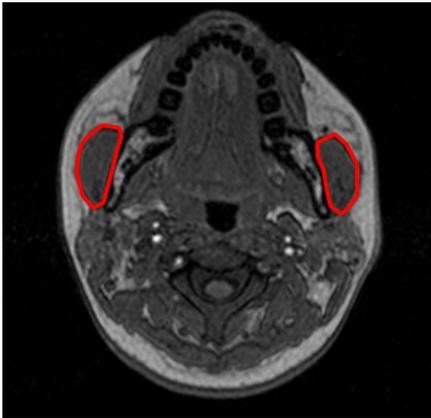


図 3. 咬筋に ROI を設定した MR 画像

次に左右それぞれの咬筋の体積を計測した結果を図 4 に示す。個人個人で咬筋の大きさには左右差があることが判明した。

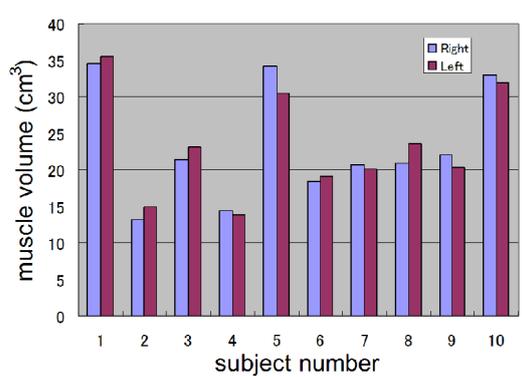


図 4. 左右の咬筋の体積

(3) 咬筋の DTI 解析

FAmap から計測した FA を図 5 に、MDmap から計測した MD を図 6 に示す。被験者の関節円板の転位状態がある場合は、FA、MD それぞれ左右でバラツキがあった。

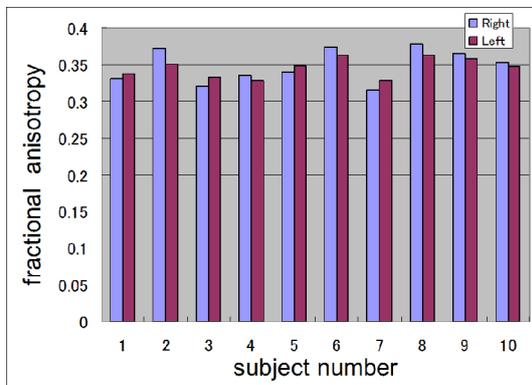


図 5. 左右の咬筋の FA

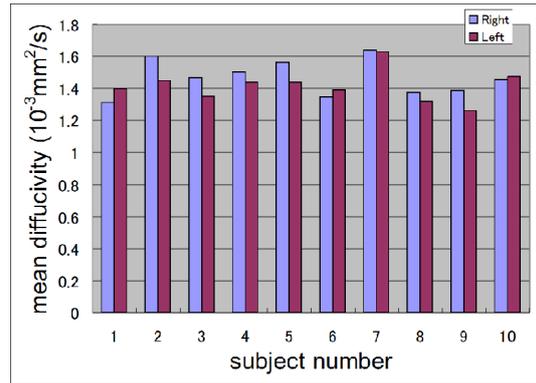


図 6. 左右の咬筋の MD

(4) 咬筋の特性値解析

撮像した画像から自作のソフトウェアを用いて T1 値、T2 値を計算処理し、得られた咬筋の T1 値計測結果を図 7、T2 値の計測結果を図 8 に示した。

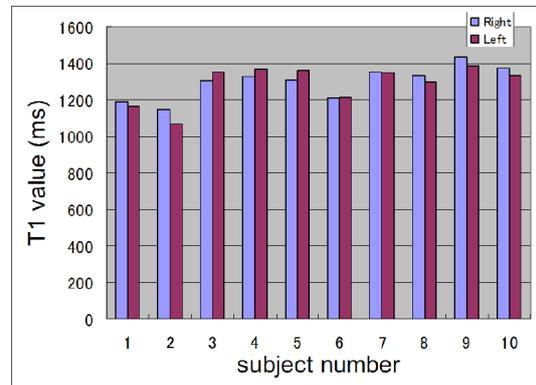


図 7. 左右の咬筋の T1 値

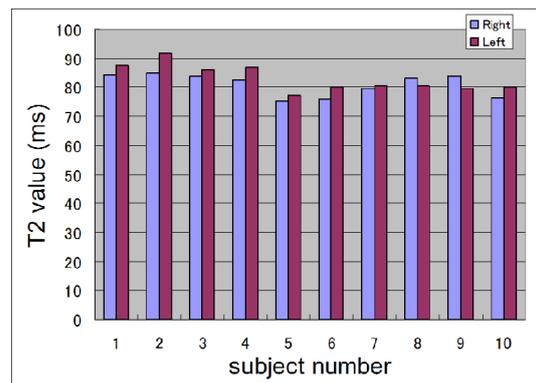


図 8. 左右の咬筋の T2 値

(5) 関連性の解析

個々の絶対値に関しては、体格的影響が大きいと考えられるので、今回は左右差に着目し解析を行った。下顎運動計測における下顎頭の左右方向の変動と、咬筋撮像から計測した数値の左右差について statistical analysis を行った。

結果、それぞれの相関係数は、咬筋体積：0.8016、MD：0.6836、FA：0.4327、T1 値：0.7664、T2 値：0.4823 であった。これらから、運動の左右方向の変動と咬筋の左右差とは関連があることが明らかとなった。また、関節円板状態によって、2 グループに分類した左右差の平均値を検討した結果、関節円板の転位が大きい被験者群は、咬筋の計測値の左右差が大きいこともわかった。

#### (6) 顎運動シミュレーションソフトウェアの開発

開発したソフトウェアの画面を図 9 に示す。本ソフトウェアにより、3 次元で視覚的に現在の顎運動の状況を把握することが可能となった。

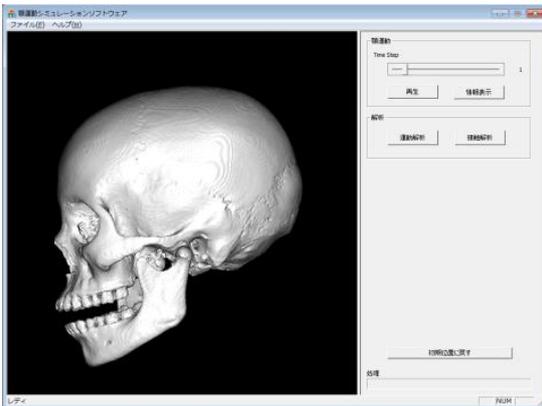


図 9. 顎運動シミュレーションソフトウェア

#### (7) まとめ

MRI を使って下顎運動および関節円板、咬筋を詳細に調査した本研究によって、顎運動軌跡と関節円板異常および咀嚼筋の状態の関係が明らかとなった。今後、今回検討した各情報を利用し、力学的シミュレーションを構築することで、開閉口運動時における力学的情報を事前に推測し、顎関節疾患の障害となっている最も主要な要素を判別し、顎関節疾患における診断や治療の指針を見つけることができると期待できる。そのような中で本研究において使用した手法は、顎関節疾患の原因を特定するために不可欠な手法になると考えられる。

また今回開発したソフトウェアを使用することによって、臨床の歯科医師がより簡便に顎関節疾患の情報を把握するために有用であると考えている。今後、MRI を用いた下顎運動の解析は一般的になっていくと考えられ、本ソフトウェアはその中で非常に重要な役割を果たすと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 東 高志、中井隆介、渡邊 誠、茂野啓示、多次元 MRI を用いた顎機能診断への期待、歯界展望、査読無、117 巻、2011、795-816  
<http://www.ishiyaku.co.jp/search/details.aspx?bookcode=021175>

[学会発表] (計 2 件)

- ① 中井隆介、Multi-section 動的撮像と高解像度 3 次元撮像を用いた下顎運動と咬筋の解析、日本歯科理工学会 近畿・中四国支部夏期セミナー、2011 年 8 月 29 日、南淡路休暇村(兵庫県)
- ② 中井隆介、多断面動的撮像・高解像度 3 次元撮像を用いた下顎の開閉口運動と咬筋の解析、日本磁気共鳴医学会大会、2011 年 9 月 29 日、リーガロイヤルホテル(福岡県)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

中井 隆介 (NAKAI RYUSUKE)

京都大学・再生医学科学研究所・研究員

研究者番号：10576234