

日本語母音発音時の舌関連筋の機能

—特にオトガイ舌筋と内舌筋について—

熊田政信

①

日本語母音発音時の舌関連筋の機能
—特にオトガイ舌筋と内舌筋について—

指導教官 新美 成二教授

東京大学大学院医学系研究科

平成2年4月入学

第3種博士課程

第一基礎医学専攻

熊田 政信

I	はじめに	1
II	本研究の目的	4
III	方法	5
	1. 実験1 Tagging Snapshot MRI	6
	1) Tagging Snapshot MRIについて	6
	2) 撮影法	7
	3) 解析法	8
	a. 定性的解析	8
	b. 定量的解析	8
	2. 実験2 筋電図	10
	3. Tagging Snapshot MRIと筋電図との対応	11
IV	結果	12
	1. 実験1 Tagging Snapshot MRI	12
	1) 定性的解析	12
	a. 矢状断正中面および1 cm外側面	12
	b. 冠状断像	13
	c. 水平面像	13
	2) 定量的解析	14
	a. 矢状断正中面において	14
	a-1 オトガイ舌筋に沿って引かれた線	14
	a-2 上縦舌筋に沿って引かれた線	15
	b. 矢状断1 cm外側面において	15
	2. 筋電図	16
	3. Tagging Snapshot MRIと筋電図との対応	17
V	考察	17
	1. 研究方法に関する考察	17
	2. 結果の考察	21
	1) オトガイ舌筋の機能単位について。	22
	2) 内舌筋群の収縮と機能	23
VI	結語	25

I はじめに

舌は、口腔底に位置する卵形の器官で、その実質のほとんどが横紋筋からなる。舌の実質を形成する横紋筋群すなわち舌筋に、外舌筋と内舌筋を区別する。外舌筋は、舌外部に起始をもち、舌内部に停止する筋群で、主に舌の位置を決定すると言われる。これには、オトガイ舌筋、茎突舌筋、舌骨舌筋等がある。内舌筋は、舌内部に起始をもち、舌内部に停止する筋群で、主に舌の形態を決定すると言われる。これには、上縦舌筋、下縦舌筋、垂直舌筋、横舌筋がある。

これらの舌筋群の働きによって、舌はその形態を自在に変えうるが、そういう舌形態の変化は、口腔および咽頭腔の形態の変化をもたらす。これら口腔および咽頭腔には、1. 声道として、2. 消化管の起始部として、3. 気道として、の3つの機能があるから、それら3つの機能に対応させて、運動器官としての舌の機能を整理することができよう。

1. 声道における構音器官としての舌の機能

母音の音色は、声道の共鳴特性によって決定される。声道の共鳴特性は声道の形態によって決定される。したがって、声道内において舌がどこに狭めをつくるかは、声道の共鳴特性が決定され母音の音色が決定される上で重要である。

また、子音の構音に際しても、舌は、閉鎖音における閉鎖の形成や摩擦音における狭めの形成等に関与する。

2. 消化管の起始部における舌の機能

これには、咀嚼と嚥下が含まれる。咀嚼においては舌は、歯牙によって噛み砕かれた食物を口腔内にて唾液と混合し、絶えず咬合面に押し戻しながら食物塊を形成する機能を持つ。嚥下においては舌は、まず嚥下第1相においては、食物塊を口峡へと送り込む際に活躍する。次に、嚥下第2相においては、舌背は、口蓋との間で閉鎖を形成し、口腔内圧を高めて、食物塊が口腔へと逆流するのを防ぐ。同じく嚥下第2相において、舌根は、喉頭蓋を下方に押しつけ、喉頭への食物の流入を防ぐ。

3. 気道における舌の機能

咀嚼・嚥下・構音とは対照的に、呼吸においては、舌は負の存在であると言えよう。すなわち、舌根の沈下は気道の閉塞を招く。したがって、舌は常に気道を確保すべくその形態をたもたなければならない。そのことは特に、睡眠時等の仰臥位において、舌が重力に抗して舌根沈下を防がねばならないときに重要となる。

これら3つの機能を、生命維持に重要という観点から並べると、まったく逆に3→2→1の順になるうが、生理学的な研究の豊富さを基準にすれば上記の順になると思われる。話はやや脱線するが、そういった生理学的な研究の豊富さは、舌機能に対する、歴史的にみられる人間の意識のかたよりを反映しているかもしれない。すなわち、洋の東西を問わず、「言語」に関する多くの単語が「舌」という単語から造られたが、このことは、舌機能のうち特に構音機能に対する意識が歴史的に強かったことの反映であろう。あるいは、言語という概念と構音という概念があまり分化していなかったといえるかも知れない。例えば、言語を意味するlanguage(英)が、ラテン語で舌を意味するlinguaにその語源を持つこと等はあえて言及するまでもないであろう。また、漢語においても、筆舌・饒舌・舌人(通訳)等、枚挙にいとまがない。

なお、舌を意味する単語自体にはもともとは、構音機能との関連はあまりなかったようである。例えば、ラテン語のlinguaは、その語源を、なめる時の舌の音を模したものとされるlingere(=なめる)に持っており、linguaという単語自体は、構音機能ではなく、消化管の起始部としての機能あるいは味覚器官としての機能に意識の重点があったようである。また、漢字の「舌」は、「干」(出入りする棒)＋「口」の会意文字で、「口の中から自由に入出入りする棒」の意味であり、舌の形態とその運動器官としての一般的特性を表している。ギリシャ語のγλίσσα(glossa)は印欧語のglosh-(=いばら)を語源とし、「とがったもの」といったほどの意味であり、舌の形態を示す単語といえよう。

さて、運動器官としての舌機能を、1 構音、2 咀嚼・嚥下、3 気道確保、の3つにまとめてみたわけであるが、これらの舌機能がたもたれているのは、舌が、適切にその外部形態を変え得るからである。そういった舌の外部形態の変化は、複雑な走行をみせる舌筋群の収縮の組み合わせによる。したがって、舌の機能を考える際には、舌の「部品」としての各舌筋の機能を知ることが必要になるが、現在のところ、各舌筋の機能に関しては不明な点が多い。

また、各舌筋の収縮をつかさどっているのは勿論神経指令である。したがって、これらの舌機能についての研究では、この、神経指令→筋収縮→外部形態の変化、という流れを常に考慮にいれなければならない。

ところが、従来の研究においては、この流れのすべての段階を考慮にいれているとはいいがたい。たとえば、舌機能の研究に用いられる手法の一つに舌モデルがある。Stone(1990)45)は、超音波断層法やX線マイクロビームといった各種の画像的情報をもとに、舌を、前後方向に4つ、左右方向に3つ

の、計12個の「機能単位」に分割し、それらの単位で構音時の舌形態が記述できるとした。そして、構音における舌運動の高次中枢においては、舌が12個の単位の総体として運動するようにプログラミングされていることを示唆した。このStone(1990)にみる如く、これまでに提出された舌モデルは主に外部形態の変位から想定されており、そこで用いられている機能単位には、生理学的な裏付けが欠けているといえよう。つまり、神経指令と筋収縮の段階の生理学的な裏付けなしにいきなり高次中枢と外部形態の変化を短絡しているといえよう。「機能単位」の想定以前に、「部品」としての各舌筋の機能を検討することが必要である。

舌が運動器官として機能する際の「部品」としての各舌筋の機能を検討することは、生理学的興味のみならず、臨床的にも、嚥下・構音・気道確保等の機能障害を考える際に重要である。Niimi et al.(1986)³¹⁾は、神経疾患による構音障害の患者の構音動態を、超音波断層法によって観察したが、構音障害の程度の評価が聴覚的にはほぼ等しい2人の筋萎縮性側索硬化症の患者の、日本語5母音発音時の舌の形態を比較したところ、1人の患者は主に舌背の高さを変えることによって5母音を出し分けているが、他の1人の患者は主に舌根の前後での位置を変えることによってそれを行っているという相違が見いだされた。このことは、構音障害の評価が同程度の患者間でも、構音障害の病態が必ずしも一致しないことを示している。この2人の患者においては機能の残存する舌筋が明らかに違うと思われる。

つまり、このような構音障害の患者のリハビリテーションを考えるときには、結果としての聴覚的印象だけでなく、その患者の構音障害の病態をしっかりと把握する必要がある。すなわち、どの筋の機能に障害がありどの筋の機能が残存しているのか、を知る必要がある。しかし現在のところ、各舌筋の機能に関しては不明な点が多く、どのようなリハビリテーションの手法を考えればよいのかが分かりにくいのが現状である。

したがって、構音時の各舌筋の機能を検討することは、構音運動の生理音声学的な解明に寄与すると同時に、構音障害の病態生理の解明にも寄与し、構音障害のリハビリテーションの効果的なプログラムに情報を提供することとなる。また、構音における舌関連筋群の機能の検討は、さきほどまとめた様な構音以外の舌機能、すなわち、嚥下や気道確保といった機能の検討にも重要な情報を提供することにもなる。

II 本研究の目的

本研究の目的は、舌が構音器官として機能する際の各舌筋の機能を検討することである。このことは、構音運動の生理音声学的な解明に寄与すると同時に、構音障害の病態生理の解明にも寄与し、構音障害のリハビリテーションの効果的なプログラムに情報を提供することとなろう。また、構音における舌関連筋群の機能の検討は、さきほどまとめた様な構音以外の舌機能、すなわち、嚥下や気道確保といった機能の検討にも重要な情報を提供することにもなる。

本研究では、筋電図とTagging Snapshot MRI という2つの方法を併用することにより、これまで少なかった、神経指令→筋収縮→外部形態の変化、の流れに関する情報を多く得ることにより、舌関連筋群の機能の解明に関与することができると思われる。

本研究においては、舌関連筋群の機能のうち特に次の2点について検討する。すなわち、

- 1 オトガイ舌筋の機能単位
- 2 内舌筋群の収縮と機能

について形態、生理両面から検討する。

1のオトガイ舌筋に関しては、矢状断正中面において下顎骨付着部より扇状に広がるというこの筋の走行の方向の多岐さゆえに、いくつかの機能単位に分かれるであろうことは考え得ることである。つまり、機能単位ごとに異なった収縮の程度を示すことが考え得る。この点に関しては、従来諸説があり、オトガイ舌筋を機能的に1つの単位とするものから、2-3の機能単位に分割するものなどがあり、解剖学的にも生理学的にも見解の一致をみていない(2)9)23)25)27)48)。本実験においては、互いにはっきりと収縮の様子が違ういくつかの機能単位に分割することが可能であるとの仮説のもとに、筋電図とTagging Snapshot MRI という2つの方法を使って検討する。

2の内舌筋群に関しては従来、検討が困難であった。つまり、内舌筋は、舌内で他の舌筋と必ず交差しており、ある内舌筋の筋電図を得ようとしても、他の舌筋の筋活動が必ず混じってしまうため、内舌筋の活動に関して

は筋電図のみでは検討しにくい。そこで、本研究においては、舌内部形態の変位を画像化するTagging Snapshot MRIを用い、内舌筋群の収縮の観測をはじめて詳細に行い、その機能に関し検討を加える。

III 方法

本研究においては、舌機能のうち、特に構音機能について検討する。その発話資料としては持続発声母音を選んだ。その理由として、まず、母音の構音動作が、再現性の高い動作であることがあげられる。このことにより、Tagging Snapshot MRIと筋電図という異なった方法間の関連の評価が、ある程度量的な対応をつけて可能になる。また、母音間での形態の変化が豊富であり、各舌筋の機能を検討するのに適していることも、発話資料として持続発声母音を選んだ理由である。

本論文の実験は、Tagging Snapshot MRIを用いた実験1と、筋電図を用いた実験2からなる。実験1と実験2の関連も評価する。

実験1においては、Tagging Snapshot MRIにより得られた画像から、まず、外部形態および内部形態の定性的解析を行なう。Tagging Snapshot MRIとは、あらかじめ筋内部組織の一部を磁氣的に標識しておき、筋を変位させた後の内部組織の変位をその標識とともに画像化する手法である。舌の輪郭線をもとに母音発音時の外部形態変化に関する定性的解析を行なう。また、磁氣的に標識された組織の変位を観察し、母音発音時の内部形態変化の定性的解析を行なう。ここでは、内部形態変化を筋収縮としてとらえ、定性的な解析を行なう。

次に、筋収縮の定量的解析を行なう。ここでは、解剖学的に筋の走行に沿っていると想定される線の、母音発音時における相対的な長さの変化を算出した。

実験2においては、オトガイ舌筋に関して筋電図を測定する。この筋の機能単位を想定して、4つの部位から筋電図を測定する。

実験2においてオトガイ舌筋が選ばれた理由は、一つにはこの筋が、矢状断正面において他の筋とあまり混じらずに走行するため、他の筋の活動

電位のあまり混じらない筋電図が得られるという条件を満たすこと、そして、もう一つには、現在のところ見解の一致をみていないこの筋の機能単位についての詳細な検討のためである。

1. 実験1 Tagging Snapshot MRI

1) Tagging Snapshot MRIについて

Tagging Snapshot MRI とは、あらかじめ筋内部組織の一部を磁氣的に標識しておき、筋を変位させた後の内部組織の変位をその標識とともに画像化する手法である。この方法を用いることにより、発話時の舌の外部形態のみならず内部形態の変化をも画像として3次元的に知ることができる。

Tagging Snapshot MRI に関する技術的詳細については、Niitsu, Campeau et al³⁴⁾あるいは、Niitsu, Kumada et al. など³⁵⁾³⁶⁾に詳しい。磁気標識機能を付加したスキャン時間2秒以下の超高速MRIであるが、この手法の基礎となっている技術はmagnetization-prepared gradient echo imagingである。このgradient echo法においては、従来のspin echo法における90度パルスのかわりに小さなflip angleによる励起RF波を与え、180度パルスの代わりに傾斜磁場の反転を用いることにより、高速スキャンが可能になった。これに磁気標識機能を付加させたのがTagging Snapshot MRI である。

Tagging Snapshot MRI の pulse sequence は、(1)contrast preparation pulse (2)subsequent tagging pulses および(3)data acquisition phase の3相より成る(図1)。一つの像を得るための所要時間は2秒弱である。

相(1)および(2)においては、舌は reference position(r.p.) と呼ぶところの構えをとる。すなわち、被験者は意図的に、舌尖を上顎の切歯に、舌背を口蓋に、それぞれ当てるのだが、これは、異なった母音に対する舌の構音動作を比較するに必要な、再現性の高い一定の構えを得るためである(図2のr.p.の像参照)。相(2)において舌の一部分を帯状に磁氣的に標識することができる。帯の方向、幅、および帯と帯との間隔は任意に選ぶことが可能である。本実験ではおもに、4mm幅、6mm間隔の、格子状の帯とした。相(2)終了0.8秒後、相(3)が開始される。相(3)(約1秒)において磁氣的なデータが取り込まれ、画像化されるが、磁氣的にラベルされた部分はここで帯状に高輝度に画像化される。相(2)と相(3)で舌の外部形態が変われば、帯にも変

位が生じるが、その変位は組織の変位、すなわち、内部形態の変位を示すことになる。相(2)終了後相(3)開始までの約0.8秒の空時間は、舌の外部形態を変えるための猶予時間である。

2) 撮影法

使用したMR imager はGE社製SIGMA (1.5T)である。

被験者の体位はmagnet bore内にて仰臥位とし、スポンジを用い被験者の頭部を固定する。半径12.5cmのcoilを被験者の顔面上に固定する。

図1の相(1)および(2)においては、舌は reference position(r.p.)と呼ぶところの構えをとる。すなわち、被験者は意図的に、舌尖を上顎の切歯に、舌背を口蓋に、それぞれ当てるのだが、これは、異なった母音に対する舌の構音動作を比較するに必要な、再現性の高い一定の構えを得るためである(図2のreference positionの像)

相(2)と(3)の間隙の時間帯約0.8秒に被験者は、日本語の5母音のうちの1つの発声を開始する。tagging pulse によるsound burst が相(2)終了時途切れることを合図に被験者は発声を開始することになる。

相(3)においては、安定した持続発声とする。相(3)は約1秒であるから、約2秒たらずの持続発声で充分である。

相(2)において磁氣的にラベルされた部分は、他の部分よりも高い輝度を持った帯として画像化される。もし舌がすべての相を通してr.p.をたもてば、帯に変位は生じない(図2のreference positionの像)。もし母音が発音されれば、帯に変位が生じるが、その変位は組織の変位を示すことになる。(図2の母音発音時の像)

本実験において、発話資料として持続発声母音を選んだ理由は、さきほども述べたごとく、母音の構音動作が再現性の高い動作であり、次の筋電図実験との量的な対応づけが可能になることと、母音間での形態の変化が豊富であり、各舌筋の機能を検討するのに適していることである。また、Tagging Snapshot MRI の技術的制限、すなわち、その撮影には約2秒間の安定した構えが必要であるという条件をこの持続発声母音は満たしている。

日本語を母国語とする4名の男性 (Sub.1-4) と1名の女性 (Sub.5) が被験者となった。被験者の年齢その他を表1にまとめる。全員が東京方言話者である。日本語5母音とr.p.の、矢状断正中面 (Sub.1-5) および正中面から1cm外側の面 (Sub.1-3)、冠状断 (Sub.1-5) および水平断 (Sub.1,2,4,5) の画像を得た。

3) 解析法

a. 定性的解析

実験1においてはまず、Tagging Snapshot MRIにより得られた画像から、外部形態および内部形態の定性的解析を行なう。

まず、舌の輪郭線をもとに外部形態に関して定性的解析を行なう。

次に、磁気的に標識された組織の変位を観察し、母音発音時の内部形態変化の定性的解析を行なう。

b. 定量的解析

同じく実験1においては次に、Tagging Snapshot MRIにより得られた画像から、定量的解析を行なう。これは、筋収縮に関する解析を目的とするものである。

ここでは、解剖学的に筋の走行に沿っていると想定される線の、母音発音時における相対的な長さの変化を算出する。これらの線の長さの変化はある程度筋の収縮を反映すると考えたからである。正中面においてオトガイ舌筋と上縦舌筋、1cm外側面において垂直舌筋と下縦舌筋の、それぞれの走行に沿っていると想定される線の定量的解析を行なう。

まず、解剖学的に筋の走行に沿っていると想定される線をr.p.像の上に書き込む。次に、母音発音時の像の上に、それらの線に相当する線を再現する。その際、標識された帯を座標の如くに用いる。r.p.像での線の長さを100とし、母音発音時の像における線の長さを相対的に算出する。

解剖学的に筋の走行に沿っていると想定される線をr.p.像の上に書き込む際、解剖学的情報として利用したのは、高解像度のMRIによる「生体舌」

の画像である。ここにおいては、筋走行に沿った脂肪組織がはっきりと画像化されるため、各舌筋の筋走行をかなり正確に推測できる。その際、Miyawaki²⁷⁾による標本舌の解剖学的知見をもとに筋の同定を行った。

Sub.1の、r.p.の構えでの矢状断正中面と5mm、1cm外側面における高解像度のMRIを撮影した(図3、4、5)。精密な内部構造を得るために、約20分の時間をかけてこれらの像は得られた。正中面(図3)にてはオトガイ舌筋および上縦舌筋の、5mm(図4)および1cm外側面(図5)にては上縦舌筋と垂直舌筋の、それぞれの走行にそった脂肪組織がみえる。この像をもとに、筋走行に沿っているであろうと思われる線を、Sub.1の矢状断正中面でのTagging Snapshot MRIのr.p.の像に書き込む。次に、Tagging Snapshot MRIの母音発音時の像の上に、それらの線に相当する線を再現する。その際、標識された帯を座標の如くに用いた。

正中面(図2)においては、オトガイ舌筋(GG1、2、3および4)、上縦舌筋の走行にそって線を引く(図7)。Sub.1-5について同様のことを行なう。

オトガイ舌筋に関しては、下顎骨表面から舌表面まで、つまり、起始から停止までに沿った線を引く。高解像度の像にて確認されたオトガイ舌筋の走行範囲から、GG1をオトガイ舌筋の最前部、GG4をオトガイ舌筋の最後部に沿った線と考えた(図7)。

上縦舌筋に関してはまず、高解像度の像にて確認される範囲でr.p.の像に線を引いた。そして、起始・停止の位置を常に同定できる様な構造物がないため、標識された帯との交点を線の先端とした。すなわち、舌尖付近においては、標識された水平な帯の一本を選び、それとの交点を線の端点とした。舌根付近においても、標識された水平な帯の一本を選び、それとの交点を線の端点とした(図7)。

1cm外側面(図8)においては垂直舌筋と下縦舌筋の走行にそって線を引く(図9)。Sub.1-3について同様のことを行う。

下縦舌筋に関しても、上縦舌筋の場合と同様、まず、高解像度の像にて確認される範囲で線を引いた。そして、起始・停止の位置を常に同定できる様な構造物がないため、標識された帯との交点を線の先端とした。すなわち、前方後方においてそれぞれ標識された垂直な帯を一本ずつ選び、それら

との交点を線の端点とした(図9)。

垂直舌筋に関しては、舌表面を上端に、下縦舌筋に沿って引かれた線との交点を下端にして線を引いた。この場合も、この筋の下端を常に同定できる様な構造物がないため、下縦舌筋に沿って引かれた線との交点を線の先端としたのである(図9)。

2. 実験2 筋電図

Sub.1一例について、bipolar hooked wire electrodeの手法⁴⁾¹⁴⁾¹⁵⁾を用いて、持続母音発声中のオトガイの筋電図を導出した。この筋の機能単位を想定して、4つの異なる部位から筋電図を導出した。

電極は、白金イリジウム合金の太さ 50μ のwireを用いたbipolar hooked wire electrodeである(図10)。絶縁の目的でwireの表面はポリエステルで被われている。電極の先端約1mmのみ、ポリエステルを剥がし、通電可能な状態に加工してある。また、筋内に挿入された際抜けにくくするために、電極の先端は鉤状に曲げられているが、2本の電極の先端同士の短絡を防ぐため、鉤状に曲げられた部分の長さを、それぞれ2.5mm、1mmにしてある。2本の電極は27ゲージの注射針に通され、鉤状に曲げられた部分のみが注射針の先端からのぞいている(図10a)。電極は、注射針とともに経皮的に目的の筋に挿入される。電極挿入後、注射針は抜かれ、電極のみが筋に挿入された状態で残り、筋電図導出に供される(図10b)。電極が 50μ と非常に細く、被験者はほとんど違和感を感じずに発話できる。また、皮膚をキシロカインで麻酔するため、電極挿入の際も、ほとんど痛みはない。

オトガイ舌筋の異なる部分からの筋電図を導出するために、以下の様な方法をとった。Sub.1の下顎骨と舌骨の中間ほぼ正中の同じ点から頭頂にむけ同じ方向に4本の電極を経皮的に深さを変えて挿入した。その深さは、それぞれ実験1におけるGG1-4に到達すべく、5cm,4cm,3cm,2cmとした(図11)。これらの深さは、Sub.1の高解像度のMRIの画像上(図3)にて測定された値をもとに決定された。舌突き出し、えんげ、下顎の上下運動等を行い、オトガイ舌筋であることを確認した。特に、浅いGG4に関しては、口腔底を形成する舌骨上筋群との鑑別に慎重を要した。すなわち、開口時に筋活動がみられないことなどから鑑別された。

発声時の被験者の体位は、MRIと同じ仰臥位、および座位とした。これは、頭位による筋活動の違いを比較するためである。

発話はMRIの条件とあわせるべく、r.p.後約2秒の持続母音発声とした。仰臥位にては各母音10回ずつ、座位にては5回ずつおこなった。

デジタルデータレコーダに取り込まれた筋電図および音声データを、当研究室にて開発した波形解析ソフトを用いて解析した(閾群)。音声波形を参照し、発声開始0.3秒後から0.5秒間の筋電図データを用いた。その区間にて、各発声の筋電図を全波整流した後、その1秒間を積分し加算平均し、筋活動の指標とした。各GGチャンネルの電極の抵抗が異なるため、上記の方法で得られた値では直接各GGチャンネル間の筋活動の程度を比較できない。そこで、各GGチャンネルごとにそのチャンネルの*i/i*の値を100とした相対値を算出し、GGチャンネル間の筋活動の程度を比較した。ここで*i/i*を基準にしたのは、各GGチャンネルとも*i/i*において筋電図が最高値を示し、母音発音時の上限の筋活動と思われたからである。

3. Tagging Snapshot MRIと筋電図との対応

記録されたTagging Snapshot MRIとオトガイ舌筋の筋電図を比べ、両者の関連を量的に評価した。対象はSub.1である。この際、Tagging Snapshot MRIにおける定量的な値を、筋電図の場合と同じく、*i/i*の値を100とした相対値に算出しておいた上で、両者を比較し、その関連について検討した。

IV 結果

1. 実験1 Tagging Snapshot MRI

1) 定性的解析

ここでは、Tagging Snapshot MRIによる像をもとに、外部形態および内部形態の定性的解析を行った。外部形態に関しては舌の輪郭線を、内部形態に関しては磁氣的に標識された帯の変位を観察し、母音発音時の形態変化の定性的解析を行った。

a. 矢状断正中面および1 cm外側面

Sub.1-5の矢状断正中面およびSub.1-3の矢状断1 cm外側面のTagging Snapshot MRIによる像に定性的解析を行った(図2、8)。

母音発声時の像の舌背の輪郭線がこれらの面で二重に見えるのは、冠状断像にて後述するように、矢状断正中にて舌背前後方向に溝が形成されるためと思われる。MRの像が厚さ1 cmで撮影され、その厚さのなかで部位により舌背の高さが異なるために、二重に写ったと思われる。そこで、冠状断像を参照した上で、輪郭線としては、矢状断正中面像にては下方の線(すなわち、溝の底)を、1 cm外側面像にては上方の線(冠状断像によると、矢状断1 cm外側面近傍で、舌が最も高い)をそれぞれ採用した。

/i/,/u/それに/e/においては、被験者間で形態変化の著しい違いは見られず、Sub.1(図2)と同様の傾向をしめした。

/i/発音時には舌は最も高い位置をとり、舌の前後方向の長さが小さくなる。下方の水平方向の標識された帯は非常に短くなり、垂直方向の帯の間隔が特に下方で狭まるが、これらはオトガイ舌筋の収縮を示していると思われる。上方の水平方向の帯は上に凸の形を示すが、これはオトガイ舌筋の収縮による受動的な変化と思われる(図2)。

/u/発音時には舌は上下前後両方向とも長さが短くなる。水平・垂直両方向の帯ともr.p.にくらべ短くなっており、オトガイ舌筋の収縮を示していると思われる。垂直方向の帯が口腔底の高さで前後方向にずれを見せる。これは、1 cm外側の面においてもみられる(図2)。

/e/発音時の舌の形態と位置は/i/発音時に似ており、やはりオトガイ舌筋の収縮が強く示唆されるが、/i/発音時よりも舌の位置はやや後方である(図2)。

/a/,/o/発音時には丁度口腔底の高さで舌の上半分と下半分とでずれをおこし断層を形成しているが、その程度は被験者間で異なり、被験者間での形態の違いがみとめられた。図14に各被験者の/a/,/o/発音時の像をまとめて示す。

/a/発音時には全被験者にて舌は5母音内で最も低い位置をとる。また、

丁度口腔底のあたりで舌の上半分と下半分とで断層をおこしているが、その程度はSub. 1とSub. 2で小さく、他の被験者にてはそれが目立った。垂直方向の帯はr.p.に比べ短くなる。Sub. 1で水平方向の帯が下方向に凸の形を示している（図14）。

/o/発音時にも/a/と同様、丁度口腔底のあたりで一種の断層がみられる。その程度をみると、Sub. 2においてのみ断層は小さく、他の被験者においては断層が大きかった（図14）。

すなわち、/a/,/o/発音時には、丁度口腔底の高さにみられる断層の大きい構えと小さい構えの2つのパターンがあり、どちらのパターンが選ばれるかは、被験者間で異なっていた。

すなわちSub. 1においては、/a/で断層小、/o/で断層大であり、/a/,/o/両母音で別パターンをしめした。他の被験者においては両母音で似た傾向をしめし、Sub. 2では両母音で断層小、Sub. 3、Sub. 4、Sub. 5においては両母音で断層大であった（図14）。

b. 冠状断像

Sub.1-5の冠状断面で撮られた像について定性的解析を行った（図12）
冠状断像においては、正中において溝が形成され、それは全母音全被験者にて観測された。

c. 水平面像

Sub.1,2,4,5,の水平面で撮られた像について定性的解析を行った（図13）。

この水平面はほぼGG4の線に相当し、オトガイ舌筋の最後部、水平に走る繊維の収縮をみることができる。この部分のオトガイ舌筋は、下顎骨付着部に近いほぼ3分の1に関しては、ほとんど短縮しない。それは、帯の変形が前3分の1でみられないことからわかる。対照的に、それより後方においては、帯が前方に弧状に偏位し、オトガイ舌筋の短縮を示している。それらのことは全母音全被験者にて観測された。

2) 定量的解析

次に、筋収縮の定量的解析を行なった。ここでは、解剖学的に筋の走行に沿っていると想定される線の、母音発音時における相対的な長さの変化を算出した。これらの線の長さの変化はある程度筋の収縮を反映すると考えたからである。

a. 矢状断正中面において

a-1 オトガイ舌筋に沿って引かれた線

Sub.1-5の矢状断面で撮られた像に、前述した方法にて、オトガイ舌筋(GG1-4)に沿っていると思われる線を引いた(図7)。

GG1-4の長さを測定し、それぞれのr.p.での長さを100として相対値を算出した(表2)。結果を、各母音ごとにグラフ化した(図15)。

/i//u//e/発音時には、全被験者にてGG1-4すべてr.p.よりも短縮した。/i//u/におけるGG4の短縮がややめだち、各GGはほぼ一様の短縮を示している(図7、表2、図15)。

/a//o/発音時には、GG1-3の短縮のパターンに、被験者間の相違がみられた。すなわち、Sub.3・Sub.5における/a/と、Sub.1・Sub.3・Sub.5における/o/では、GG1-3の伸長がみられるが、それ以外の/a//o/においてはGG1-3がむしろ短縮している。定量的解析にてみられた/a//o/発音時のパターンの違い、すなわち断層の大小と、GG1-3の伸縮とを比較すると、断層が目立つ例ではGG1-3の伸長がみられ、断層が目立たない例はGG1-3がむしろ短縮するという傾向がみられた。

a-2 上縦舌筋に沿って引かれた線

Sub.1-5の矢状断面で撮られた像に、前述した方法にて、上縦舌筋に沿っていると思われる線(SL)を引いた(図7)。

上縦舌筋に沿っていると思われる線(SL)の長さを測定し、r.p.での長さを100として相対値を算出した(表3、図16)。

上縦舌筋にそって引かれた線（SL）は、全母音全被験者にてr.p.よりも短縮しており、この内舌筋の母音発音時の盛んな活動が示唆される。オトガイ舌筋とともに、この筋も冠状断像にて各母音で見られた溝（図12）に関与していると思われる。そのことは、オトガイ舌筋の収縮があまりみられない/a/o/（表2）についても溝がみられることから示唆される。冠状断像にて正中に溝をつくる機能は、他の筋では考えにくい。

b. 矢状断1cm外側面において

Sub.1-3の矢状断1cm外側面で撮られた像に、下縦舌筋（IL）および垂直舌筋（V）に沿っていると思われる線を引いた。

下縦舌筋に沿って引かれた線（IL）の長さを測定し、r.p.を100とした相対値を算出した（表4、図17）。

下縦舌筋に沿って引かれた線は全母音にて短縮する傾向がある。/o/においては、口腔底の高さにての断層が目立つSub.1,Sub.3の方が、目立たないSub.2よりも短縮しており、口腔底の高さにての断層形成にこの筋が何らかの関与をしているものと思われる。

垂直舌筋に沿っていると思われる線（V）の長さを測定し、r.p.を100とした相対値を算出した（表、図18）。

垂直舌筋に沿って引かれた線は/a/において短縮しており、/a/において舌が低い位置をとる際にこの筋が収縮すると思われる。他の被験者に比べ舌の位置が低いSub.2の/o/においても垂直舌筋の短縮が目立ったが、これらのことは、垂直舌筋に舌の位置を低くする機能があることを示唆していると思われる。

2. 筋電図

仰臥位および座位の、各持続母音発声およびr.p.の筋電図を測定した。両体位それぞれにおいて、各GGチャンネルの/j/の平均値を100とし、各発話における平均値と標準偏差をもとめた。（表6、7、図19、20）。

仰臥位および座位とも、以下に示す如く、多くの発話間に有意差が検出

され、これらの舌の構えの再現性の高さが裏付けされた。

両体位とも、全GGチャンネルにて/i/で筋活動が最大値をしめし、以下、/e/,/u/,r.p.の順であった。/i/,/e/,/u/,r.p.間においては、座位GG4における/e/,/u/間と/e/,r.p.間の2つにおいて有意差がみられなかったのをのぞき、他のすべての組み合わせにおいて有意水準99%にてその差が有意であった。/o/と/a/はr.p.よりも小さく、両体位すべてのチャンネルにおいてともに有意水準99%にてr.p.との差が有意であった。/o/と/a/を比べると、仰臥位のGG1-3において、有意水準99%にて有意に/o/のほうが大きかったが、仰臥位のGG4および座位の全GGチャンネルにおいては、有意差は検出できなかった。

この様に、仰臥位および座位とも、多くの発話間に有意差が検出され、したがって、ここで得られた筋活動は、各母音に固有の筋活動と考えることができる。したがって、これらの筋活動パターンは、再現性のあるデータと考えることができる。

次に、座位と仰臥位とを比較すべく、両体位での値を、仰臥位における各GGチャンネルの/i/の平均値を100とした相対値として算出した(表8、図21)。

座位と仰臥位とで比較すると、後者の活動が大きい傾向があり、多くの場合においてその差が、有意水準95-99%にて有意であった。特に、仰臥位において鉛直方向に走るGG4においてその差が顕著であった。これらの結果は、オトガイ舌筋の重力に抗する働きを示したと思われ、この点に関しては、後に考察する。

3. Tagging Snapshot MRIと筋電図との対応

各GGごとに、筋電図とTagging Snapshot MRIの値を比較した。筋電図とTagging Snapshot MRIの値はともに、/i/の値を100とした相対値を用いた(図22)。

筋電図とTagging Snapshot MRIの結果はよく一致した。すなわち、全GGチャンネルとも、筋電図の値が大きいほどMRIにおける相当する線が短縮するという関係がみられた。相関係数は、GG1にて-0.75、GG2にて-0.75、

GG 3にて-0.89、GG 4にて-0.77と、いずれのチャンネルにおいても高い相関が得られた。

この比較より、実験1にて用いたTagging Snapshot MRIの定量的解析すなわち筋走行に一致した線の短縮の程度と、実験2における筋電図の値とがほぼ同様の増減の傾向を示すことが確かめられた。したがって、筋走行に一致した線の短縮は、筋の収縮を強く示唆するものと考えられる。

V 考察

1. 研究方法に関する考察

構音における舌機能についての研究を行う際には、神経指令→筋収縮→外部形態の変化、という流れを考慮し、いくつかの方法を組み合わせる必要がある。舌の様な複雑な器官において筋活動と形態の関連を論じるためには、解剖学的に正確に同定された位置からの筋活動情報が必要である。ところが、従来、電極の位置を正確に同定することが困難であった。今回、それが、Tagging Snapshot MRIおよび高解像度のMRIを用いることによって可能になった。

ここで、構音における舌機能の研究に供されてきた主な手法を5つの範疇に分類し、それらを先行研究とともに紹介しながら、本研究において用いた手法について考察を加えよう。

(1)舌標本の解剖学的研究¹⁾³⁾⁷⁾⁹⁾²⁷⁾⁴²⁾⁴⁸⁾

生理学の基礎は、解剖学にある。したがって、舌の機能の研究の基礎も舌の解剖学に置かれる。

舌の解剖学においては固定された舌標本が主に研究に供されるが、ここで注意すべきことは、固定標本における舌の筋走行から、発話時の舌における筋走行を推測するのは容易ではないことである。つまり、両者の外部形態の違い、舌外部組織の有無による偏位（固定標本と生体とでは、舌組織にか

かる張力が違う)、舌固定時の組織の偏位等を考慮に入れなければならない。そこで、本研究においては、高解像度のMRI(これは、Tagging Snapshot MRIではなく、通常のMRIである)による「生体舌」の画像を解剖学的情報として利用した。高解像度のMRIにおいては、筋走行に沿った脂肪組織がはっきりと画像化されるため、標本舌の解剖学的知見をもとに筋走行をかなり正確に推測できる。この様な高解像度の画像の撮影のためには、舌を約20分間静止させる必要があり、本研究においては、reference position(r.p.)と呼ぶところの構えについての画像を得、研究に供した。

さて、標本舌の解剖学的知見においては、諸家の間でしばしば筋走行に関する意見の相違がみられることがある。たとえば、オトガイ舌筋は、矢状断正中面のやや外側において下顎骨付着部より扇状に広がるという筋走行を示すが、その最も前方の線維が舌尖部にも達しているか否かについては意見の一致をみていない(9)(23)(27)。ここで一つ忘れてならないのは、舌内部においては、各舌筋が複雑にからみあって走行しているため、標本における筋線維がどの筋に属するか同定することは非常に難しいということである。本研究においては、標本舌の解剖学的知見としては主にMiyawaki et al.(27)の記載を参考にした。その理由として、このMiyawaki et al.においては、本研究で用いたTagging Snapshot MRIの撮影断面と同じ矢状断・冠状断・水平断の3断面の連続切片を用いてかなり詳細に筋走行を調べていること、そして、その記載が、本研究において用いた高解像度のMRIによる舌の画像と矛盾がみられなかったこと、などがあげられる。

- (2)外部形態を静的に観察する画像的手法(通常のMRI 49)(50)、CTその他)
- (3)外部形態を動的に観察する画像的手法(超音波断層法18)(26)(30)(31)(32)(33)、X線マイクロビーム19)(45)、Magnetogram(41)、動的口蓋図(47)その他)

外部形態の変化のみから筋収縮の様子を推測するのは困難である。すなわち、舌筋の場合、起始かつ/または停止が粘膜下組織や舌中隔、場合によっては他の筋であったりするため、起始・停止部位を同定しにくく、また、他の筋とからんで走行するため、筋がまっすぐに走行せず、筋走行が推測しにくいのである。その推測には内部形態の変位に関する情報が必要となる。そこで、外部形態の変化のみならず、内部形態の変位をも画像化できるTagging Snapshot MRIを本研究では用いた。これは、あらかじめ筋内部組織の一部を磁気的に標識しておき、筋を変位させた後の内部組織の変位をその標識とともに画像化する手法であり、発話時の内部形態の変位をみることもできる。そのため、発話時の舌の筋走行をかなり正確に推測できる。

外部形態を動的に観察する際、かつては、発話時の舌のX線映画(38)(39)が撮影されたが、X線被爆による好ましくない副作用を考慮して、現在では行われていない。X線マイクロビームは、構音器官に置かれたペレットを、コンピュータ制御によりX線マイクロビームを使って追いかけて、ペレットの軌跡を画像化する手法で、X線の被爆量を最小限におさえることができる。超音波断層法は、X線を使わず、超音波の組織での反射を画像化する手法で、安全であるが、プローブを下顎三角の皮膚に常に接触させていなければならないためにプローブ自体が下顎とともに上下動するため、また、舌表面にて超音波を反射させてしまうと口蓋が写らないため、リファレンス・ポイントがとれないという欠点がある。このため外部ビデオを併用する³⁰⁾等様々な工夫がなされている。動的口蓋図は、口蓋に電極を置き、口蓋と舌との接触の様子を動的に記録するものである。したがって、舌の形態そのものは画像化できない。

本研究で用いた Tagging Snapshot MRIの撮影においては、舌を約2秒間静止する必要がある、X線マイクロビームや超音波断層法のように発話時の舌を動的に観察することはできないが、本研究で用いたような持続母音発声の観察には適していると思われる。

(4)筋電図(2)(5)(8)(24)(28)(43)(44)

使われる電極には、挿入電極と表面電極とがある。前者は、経皮的あるいは経粘膜的に、当該筋に直接電極を挿入するもので、当該筋の直接的な筋電図を得ることができる。一方、後者の表面電極は、被験者の皮膚または粘膜に電極を置くもので、前者にくらべ簡便で、被験者に対する侵襲もすくなく、また、医師でなくても行えるという利点はあるものの、目的とする筋からの距離が大きいことと、目的以外の筋の活動電位がどうしても混じることから、舌のように多くの筋が複雑に走行するような器官には不適當と思われる²⁴⁾。本研究においては、挿入電極の一種である bipolar hooked wire electrode⁴⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾を用いた。事前に皮膚麻酔を行うため、挿入時の苦痛はほとんどなく、電極が非常に細いため、構音動作を制限することもない。

筋電図において常に問題になるのは、得られた筋電図がはたしてどの筋から得られたものか、ということである。挿入電極の場合電極の先端が舌内のどこにあるか直接みえないこと、また、舌においては筋走行に関する知見がそもそも一致していないことが、事態を複雑にする。本研究においてはオ

トガイ舌筋の筋電図実験を行ったが、この筋は矢状断正中面において下顎骨付着部より扇状に広がるという筋走行の方向の多岐さゆえに、部位による機能分化の可能性が示唆され、いくつかの研究が報告されているが、それらの文献においては、得られた筋電図がこの筋のどのあたりの部分から得られたものかについてあいまいな記述がなされている。これは、挿入電極の場合電極の先端が舌内のどこにあるか直接みえないこと、また、前述した如く、オトガイ舌筋においては筋走行に関する知見が解剖学的文献においてそもそも一致していないことによる(2)9)23)25)27)48)。本研究においては、オトガイ舌筋の異なる部分からの筋電図を導出するために、以下の様な方法をとった。

Sub.1の下顎骨と舌骨の間ほぼ正中の同じ点から頭頂にむけ同じ方向に4本の電極を経皮的に深さを変えて挿入した。その深さは、それぞれ実験1におけるGG1-4に到達すべく、5cm,4cm,3cm,2cmとした(図1-1)。これらの深さは、Sub.1の高解像度のMRIの画像上(図3)にて測定された値をもとに決定された。電極の位置は直接的には確認できなかったが、位置のずれをもたらす諸条件を考慮に入れても、目的の位置の数mm近傍にあると思われる。すなわち、皮膚における針挿入の部位は、下顎骨と舌骨の位置を触診にて確認し、矢状断正中面におけるそれらの中間点を十分確認して挿入した。針挿入角度のずれは高々2-3度であり、一番誤差が大きいと考えられる5cmの深さにおいても、2-3mmのずれしかもたらさない。針挿入の深さも、あらかじめ針に印をつけてその印がちょうど皮膚面にくるまで挿入している。これらの諸条件によって考えうる誤差は数mmであり、我々の用いた4本のGGの線の間隔が1cmであったことを考えると十分な許容範囲内にあるといえよう。

筋電図における活動電位がどの程度次の段階である筋収縮の程度を示すかを舌筋において調べた先行研究はない。本研究で用いたTagging Snapshot MRIの画像においては発話時の舌の筋走行をかなり正確に推測できるため、発話時の各舌筋の筋長をかなり正確に測定できる。筋長を推測した筋に関して筋電図を測定すれば、筋収縮の程度と活動電位との量的関係を調べることができる。本研究は、筋収縮の程度と活動電位との量的関係を舌筋において調べたその最初のものとなる。

なお、複数の筋の線維が交差している場合、筋電図上の活動電位がどの筋から得られたものか特定しにくい。したがって、特に内舌筋に関しては、神経指令に関する情報は得にくい。

(5)舌形態をシミュレートする舌モデル6)12)13)16)17)25)40)45)46)47)

これまでに提出された舌モデルは主に外部形態の変位から想定されており、そこで用いられている機能単位には、生理学的な裏付けが欠けているといえよう。つまり、神経指令→筋収縮→外部形態の変化、という流れのうちの、神経指令と筋収縮の段階の生理学的な裏付けなしにいきなり高次中枢と外部形態の変化を短絡しているといえよう。本研究においては、このような生理学的な裏付けのない「機能単位」の想定以前に、「部品」としての各舌筋の機能を検討した。

舌が運動器官として機能する際の各舌筋の機能を検討することがこの研究の大きな目的であった。その際、この研究で用いた、Tagging Snapshot MRI と筋電図の併用、という手法が、有効であることが確認された。つまり、Tagging Snapshot MRI を用いることにより、これまで得にくかった内部形態の観察が得られ、そこに筋電図の情報をあわせることにより、筋収縮に関する情報が増えた。したがって、神経指令→筋収縮→外部形態の変化、の流れにそった検討が可能になった。

2. 結果の考察

この研究においては、まず、Tagging Snapshot MRIによって舌内部形態の定性的な観察を行ったが、そこでの新しい知見の一つに、/a//u//o/でみられた口腔底の高さでの舌の上半分と下半分との断層形成がある(図2)。これは、これらの母音の筋電図にて報告されている茎突舌筋の活動を画像的にとらえたものと思われるが、従来の外部形態の観察のみでは、この断層形成は予測され得なかった。

また、/a//o/においては、そういった断層の大きさが2つのパターンが存在し、被験者によって選択されるパターンが違うことが見いだされた(図14)。これは、構音における戦略が、複数存在することを示している。このことは、失われた機能を残存機能でいかに補うかというリハビリテーションを考える際の有力な手がかりといえよう。

1) オトガイ舌筋の機能単位について。

オトガイ舌筋に関しては、矢状断正中面において下顎骨付着部より扇状

に広がるというその走行の多岐さゆえに、いくつかの機能単位に分かれるであろうことは考え得ることであり、このことに関しては現在までにいくつかの報告がある。解剖学的にこの筋を大きく3つの部分に分けて記述したものもあるが、生理学的にも、機能単位が存在するか否か、また、存在するとしていくつの単位に分割可能かについて、結論を得ていない。2ないし3個の機能単位を想定しているものが多いようである(228)。たとえば、Baer et al は、オトガイ舌筋のより前方とより後方の2カ所から筋電図を導出し、両者の母音発音時の筋活動のパターンが違うことから、この筋を、前後の2つの機能単位からなるとした。

本研究では、オトガイ舌筋にはいくつかのはっきりした機能単位があるという仮説のもとに、筋電図およびTagging Snapshot MRIによる定量的解析を、解剖学的に同定された部位にて連続的に行った。結果は、各被験者各母音にてGG1からGG4まで値は連続的に増減する傾向があり、特に機能単位の存在を強く示唆するような非連続性はみられなかった。したがって、最も考えることは、オトガイ舌筋にははっきりした機能単位はないが、部位により筋活動や収縮の程度を連続的に変えうるということであろう。数個の単位で成り立つよりもその場合多彩な舌形態が期待できると思われる。

また、本論文にて報告した、仰臥位と座位の筋電図の比較で明らかになったことであるが、オトガイ舌筋に関しては仰臥位における筋活動が座位のそれよりも大きい傾向がみられた。それは特に仰臥位において鉛直方向に近く走る繊維(GG3とGG4)ほど顕著であり、まさしく鉛直方向に走るGG4において仰臥位と座位の筋電図の差は最大となった。つまりこれらの繊維は仰臥位において抗重力筋的な働きを示したことになる。このことも、オトガイ舌筋が部位により筋活動や収縮の程度を連続的に変えうることをしめしているといえよう。

しかし、この仰臥位と座位の筋電図の比較の結果はまた、次に述べる様なことをも示唆している。すなわち、母音構音の最終目標は、日本語におけるその母音のフォルマントの範疇にあり聴取者にその母音として判断されるような音声の生成である。そのためには、母音固有の声道形態を形成することが必須である。体位による重力の影響の違いによって筋活動の大きさを適切に変化させ結果的に目的とする母音に特有の声道形態を形成する舌の構えをおこなっていることがあきらかになった。この遂行のための運動プログラムの存在が示唆される。この実験は、持続母音という、比較的静的な構音動作についての解析であったが、実際の発話のように動的な構音動作が

求められる状況においても、頭位等の条件が常に一定とは限らないわけで、そのようなプログラムの存在は合目的と思われる¹¹⁾。

なお、仰臥位における舌根沈下の防止は気道確保しいては生命維持上重要であり、GG 4 に相当する部位は、睡眠時等に長時間の連続した活動を強いられると思われる。したがって、この部位の筋線維が持続的な活動に適した機能を持っている可能性はあり、組織化学的な研究の必要があろう。

2) 内舌筋群の収縮と機能

本実験では、外舌筋だけでなく内舌筋も母音発音時にさかんに活動することが確認された。

上縦舌筋は各母音で収縮の傾向をしめした(表3、図16)。前述したごとく、この筋は、オトガイ舌筋とともに矢状断正中面舌背において前後方向にみられる溝(冠状断像にて正中にみられる溝で、矢状断にては舌背の線が二重に見えることから確認される。図4参照)の形成にオトガイ舌筋とともに関与していると思われる。そのことは、オトガイ舌筋の収縮があまりみられないSub.3、Sub.5の/a/、Sub.1、Sub.3、Sub.5の/o/ (図7、表2、図15)についても、冠状断像にて正中に溝が確認されたことから示唆される。矢状断正中面舌背において前後方向にみられる溝を形成する機能は、矢状断正中面を走行するオトガイ舌筋と上縦舌筋以外の筋では考えにくい。

下縦舌筋においても各母音で収縮の傾向がみられた(表4、図17)。注目すべきは、/o/においてSub.1Sub.3とSub.2の間で乖離がみられることである。/o/において口腔底の高さにての断層が目立つSub.1Sub.3においてはこの筋はr.p.との相対値でそれぞれ62%、60%と目立った短縮をみせたが、口腔底の高さにての断層が目立たないSub.2では86%であり、この筋は口腔底の高さにての断層形成に何らかの関与をしているものとおもわれる。舌上半分を後上方に引く茎突舌筋の活動に比例しているかもしれない。

垂直舌筋(表5、図18)は特に/a/において短縮(75-83%)しており、/a/において舌が低い位置をとる際にこの筋が活躍すると思われる。SUB.2の/o/においても他の被験者(97-104%)にくらべ、垂直舌筋の短縮が目立った(80%)が、このことは、この被験者における/o/が、断層の小さい/a/的なもので、舌が他の被験者よりも低い位置をとったことに合致し、舌が低い位置をとる際にこの筋が活躍することの裏付けとなろう。逆

に、舌が高い位置をとる/i/、/u/、/e/においては、この筋の短縮はみられず、舌が最も高い位置をとるにおいてはむしろr.p.よりも伸長している。

この様に、本研究においては舌筋群の機能を検討したが、このことは、構音運動の生理音声学的な解明に寄与すると同時に、構音障害の病態生理の解明にも寄与し、構音障害のリハビリテーションの効果的なプログラムに情報を提供することとなる。すなわち、どの筋の機能に障害がありどの筋の機能が残存しているのか、筋機能の障害は高次中枢→神経指令→筋収縮→外部形態の変化のどの段階の障害か、などを知る上で有用であり、代償構音等のリハビリテーションの検討に寄与することが期待される。構音障害のリハビリテーションにおいては、最終的な出力のみを手がかりにしているのは効率が悪く、また、不適切なリハビリテーションを行ってしまう可能性もある。

また、構音における舌関連筋群の機能の検討は、構音以外の舌機能、すなわち、嚥下や気道確保といった機能の検討にも重要な情報を提供することにもなる。

VI 結語

1 従来困難であった、舌を構成する筋肉の筋活動を解剖学的に正確に同定された位置から導出することが、高解像度のMRIを用いることによって可能になった。また、Tagging Snapshot MRIによる定量的解析すなわち筋走行に一致した線の短縮の程度を調べる方法を見だし、それを筋電図を導出した部位において用いることによって、従来明らかでなかった、筋活動と舌形態の関連をあきらかにした。

2 Tagging Snapshot MRIの定量的解析すなわち筋走行に一致した線の短縮の程度と、筋電図の値とが高い相関を示すことが確かめられた。したがって、筋走行に一致した線の短縮は、筋の収縮を強く示唆するものと考えられる。

3 /a//o/においては、口腔底の高さにて断層が形成されることが見いだされた。また、断層の大きさには大小2つのパターンが存在し、被験者によって選択されるパターンが違うことが見いだされた。これは、構音における戦略が、複数存在することを示している。

4 オトガイ舌筋にははっきりとした機能単位はないが、部位により筋活動を連続的に変え得ることが明らかになった。そこには、発話時のこの筋の制御をおこなうかなり高次のプログラムの存在が示唆される。

5 これまであまり注目されていなかった構音の際の筋活動の体位による違いを検討したところ、一定の舌外部形態を得るためにオトガイ舌筋の筋活動は体位によって異なることが示された。特にオトガイ舌筋後部においてそのことが顕著であった。また、オトガイ舌筋の後部は、気道確保のため、睡眠時等に長時間の抗重力筋的な活動を強いられることが示唆され、組織化学的な検討も必要と思われる。

6 これまで困難であった内舌筋の活動の検討を行った。これまで推測の域を出なかった内舌筋の母音構音への関与がはじめて確認された。垂直舌筋は舌の位置を低くし、上縦舌筋は舌背表面の矢状断正中面に前後方向に形成される溝の形成に関与していることが確認された。

謝辞

Tagging Snapshot MRIについて御指導を頂いた筑波大学付属病院放射線科板井悠二教授ならびに新津守先生、本研究全般にわたり御指導頂いた新美成二教授ならびに北里大学広瀬肇教授に、深く感謝いたします。また、本研究にて使用したところの筋電図解析システムを開発した閻群氏（東京大学音声研）に、深く感謝いたします。

References

1. Abd-El-Malek S: Observations on the morphology of the human tongue. *J Anat* 73:201, 1939
2. Baer T, Alfonso PJ, Honda K: Electromyography of the tongue muscles during vowels in /pp/ environment. *Ann Bull RILP* 22:7-19, 1988
3. Barnwell YM, Klueber K, Langdon HL: The anatomy of the intrinsic musculature of the tongue in the early human fetus. *Int J Oral Myol* 4:5, 1978
4. Basmajian JV: Electrodes and electrode connectors. *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*, S. Karger, 1:502-509, 1973
5. Bole CT, Lessler MA: Electromyography of the genioglossus muscles in man. *J Appl Physiol* 21:1695, 1966
6. Coker CH: Model for specification of the vocal-tract area function. 72nd meeting of JASA, 1966
7. Cooper S: Muscle spindles in the intrinsic muscles of the human tongue. *J Physiol* 122: 193, 1953
8. Cunningham DP, Basmajian JV: Electromyography of genioglossus and geniohyoid muscles during deglutition. *Anat Rec* 165:401, 1969
9. Dickson, Dickson: *Human Vocal Anatomy*
10. Doran GA, Baggett H: The genioglossus muscle: A reassessment of its anatomy in some mammals including man. *Acta Anat* 83:403, 1972
11. Gracco VL, Abbs JH: Variant and invariant characteristics of speech movements. SMCL preprint spring-summer, 1986
12. Harshman R, Ladefoged P, Goldstein L: Factor analysis of tongue shapes. *J Acoust Soc Am* 62:693-707, 1977
13. Hashimoto K, Sasaki K: On the relationship between the shape and position of the tongue for vowels. *Journal of Phonetics* 10:291-299, 1982
14. Hirose H: Electromyography of the articulatory muscles: Current instrumentation and technique. Status Report on Speech Research (Haskins Laboratories) SR 25/26:77-86, 1971
15. Honda K, Miyata H, Kiritani S: Electrical characteristics and preparation technique of hooked-wire electrodes for EMG recording. *Ann Bull RILP* 17:13-22, 1983
16. Kakita Y, Fujiyama O: Computational model of the tongue: A revised version. A modified version of a paper to be presented at the 94th ASA meeting, 1977

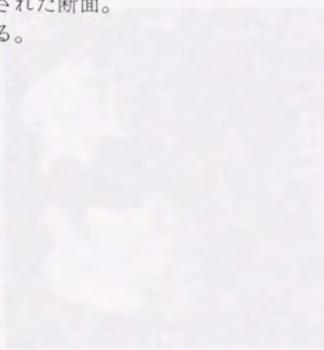
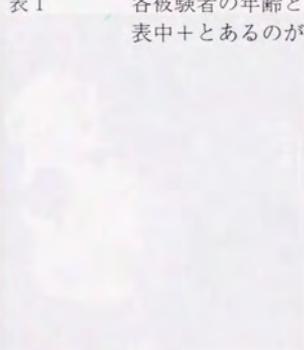
17. Kakita Y, Fujiyama O: Computation of mapping from muscular contraction patterns to formant patterns in vowel space. The 106th ASA meeting, 1983
18. Keller E, Ostry DJ: Computerized measurement of tongue dorsum movements with pulsed-echo ultrasound. *J. Acoust. Soc. Am.* 73:1309-1315, 1983
19. Kiritani S, Itoh K, Fujimura O: Tongue-pellet tracking by a computer-controlled x-ray microbeam system. *J. Acoust. Soc. Am.* 57:1516-1520, 1975
20. 熊田政信、新美成二、新津守: Tagging Snapshot MRIの臨床応用。神経研究の進歩 38:319-326、1994
21. Kumada M, Niitsu M, Niimi S, Hirose H: A study on the inner structure of the tongue in the production of the 5 Japanese vowels by tagging snapshot MRI. *Ann Bull RILP* 26:1-11, 1992
22. Kumada M, Niitsu M, Niimi S, Hirose H, Itai Y: A study on the inner structure of the tongue in the production of the 5 Japanese vowels by tagging snapshot MRI: A second report. *Ann Bull RILP* 27:1-12, 1993
23. Ladefoged P: Some possibilities in speech synthesis: *Language and Speech* 7:205-214, 1964
24. MacNeilage PF, Sholes GN: An electromyographic study of the tongue during vowel production. *J. Speech Hear Res* 7:209, 1964
25. Mermelstein P: Articulatory model for the study of speech production. *J. Acoust. Soc. Am.* 53:1070-1082, 1973
26. Minifie FD, Kelsey CA, Zagzebski JA: Ultrasonic scan of the dorsal surface of the tongue. *J. Acoust. Soc. Am.* 49:1857-1860, 1971
27. Miyawaki K: A study on the musculature of the human tongue. *Ann Bull RILP* 8:23-50, 1974
28. Miyawaki K, Hirose H, Ushijima T, Sawashima M: A preliminary report on the electromyographic study of the activity of lingual muscles. *Ann Bull RILP* 9:91-106, 1975
29. Munhall KG, Ostry DJ, Parush A: Characteristics of velocity profiles of speech movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 11:457-474, 1985
30. Niimi S, Kiritani S, Hirose H: Ultrasonic observation of the tongue with reference to palatal configuration. *Ann Bull RILP* 19:21-27, 1985
31. Niimi S, Nakayama H, Masaki N, Hirose H, Kiritani S: A preliminary report on the tongue dynamics of dysarthric patients. *Ann Bull RILP* 20:205-210, 1986
32. Niimi S, Shimada Z: Ultrasonic investigation of tongue shape. *Jpn. J. Logop. Phoniater.* 21:121-125, 1980

33. Niimi S, Shimada Z: Ultrasonic observation of tongue dynamics. *Ann Bull RILP* 18:13-17, 1984
34. Niitsu M, Campeau NG, Holsinger-Banton AE, Riederer SJ, Ehman RL: Tracking motion with tagged rapid gradient-echo magnetization-prepared MR imaging. *JMRI* 2:155-163, 1992
35. Niitsu M, Kumada M, Campeau NG, Niimi S, Riederer SJ, Itai Y: Tongue displacement: Visualization with rapid tagged magnetization-prepared MR imaging. *Radiology* 191:578-580, 1994
36. Niitsu M, Kumada M, Niimi S, Itai Y: Tongue movement during phonation: A rapid quantitative visualization using tagging snapshot MRI. *Ann Bull RILP* 26:149-155, 1992
37. Ostry DJ, Munhall KG: Control of rate and duration of speech movements. *J. Acoust. Soc. Am.* 77:640-648, 1985
38. Perkell J: Cineradiographic studies of speech: Implications of a detailed analysis of certain articulatory movements. *5e Congres International d'Acoustique*, Liege, 1965
39. Perkell J: *Physiology of Speech Production: Results and Implications of a Quantitative Cineradiographic Study*. (MIT, Cambridge, MA), Res. Monogr. 53, 1969
40. Perkell J: Articulatory modeling, phonetic features and speech production strategies. *Articulatory Modeling Symposium*, Grenoble, 1977
41. Perkell JS, Cohen MH, Svirsky MA, Matthies ML, Garabieta I, Jackson MTT: Electromagnetic midsagittal articulometer systems for transducing speech articulatory movements. *J. Acoust. Soc. Am.* 92:3078-3096, 1992
42. Salter HH: *Todd Cyclopedia of Anatomy and Physiology*. Vol 4. London, Brown, Green, and Longmans. 1852, p1120
43. Sauerland EK, Mitchel SP: Electromyographic activity of the human genioglossus muscle in response to respiration and to positional changes of the head. *Bull Los Angeles Neurol soc* 35:69, 1970
44. Smith T: A phonetic study of the function of the extrinsic tongue muscles. *Working Papers in Phonetics (UCLA)* 18, 1971
45. Stone M: A three-dimensional model of tongue movement based on ultrasound and X-ray microbeam data. *J Acoust Soc Am* 87:2207-2217, 1990
46. Stone M: Imaging the tongue and vocal tract. *British Journal of Disorders of Communication* 26:11-23, 1991
47. Stone M: Toward a model of three-dimensional tongue movement. *Journal of Phonetics* 19:309-320, 1991

48. Strong LH:Muscle fibers of the tongue functional in consonant production. *Anat Rec* 126: 61,1956
49. Wein von B,Drobnitzky M,Klajman:Magnetresonanztomographie und Sonographie bei der Lautbildung. *Fortschr Rontgenstr* 153:408-412,1990
50. Wein von B,Drobnitzky M,Klajman S,Angerstein,W:Evaluation of functional positions of tongue and soft palate with MR imaging :Initial clinical results. *JMRI* 1:381-383,1991

Subject	Sex	Age	Mid-Sag.	Lat. Sag.	Coronal	horizontal
Sub.1	M	36	+	+	+	+
Sub.2	M	30	+	+	+	+
Sub.3	M	22	+	+	+	+
Sub.4	M	22	+		+	+
Sub.5	F	31	+		+	+

表1 各被験者の年齢と性別、および、撮影された断面。
表中+とあるのが撮影された断面である。



prep. pulse tagging pulses

data acquisition phase

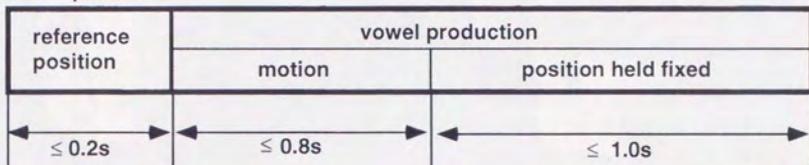


図1 Tagging Snapshot MRI の撮影のタイミング。相(1)prep.pulseおよび相(2)tagging pulses においては舌は reference position の構えをとる。相(3)data acquisition phaseが始まるまでの 0.8秒において発声を開始し(Motion)、相(3)においては安定した持続母音とする。

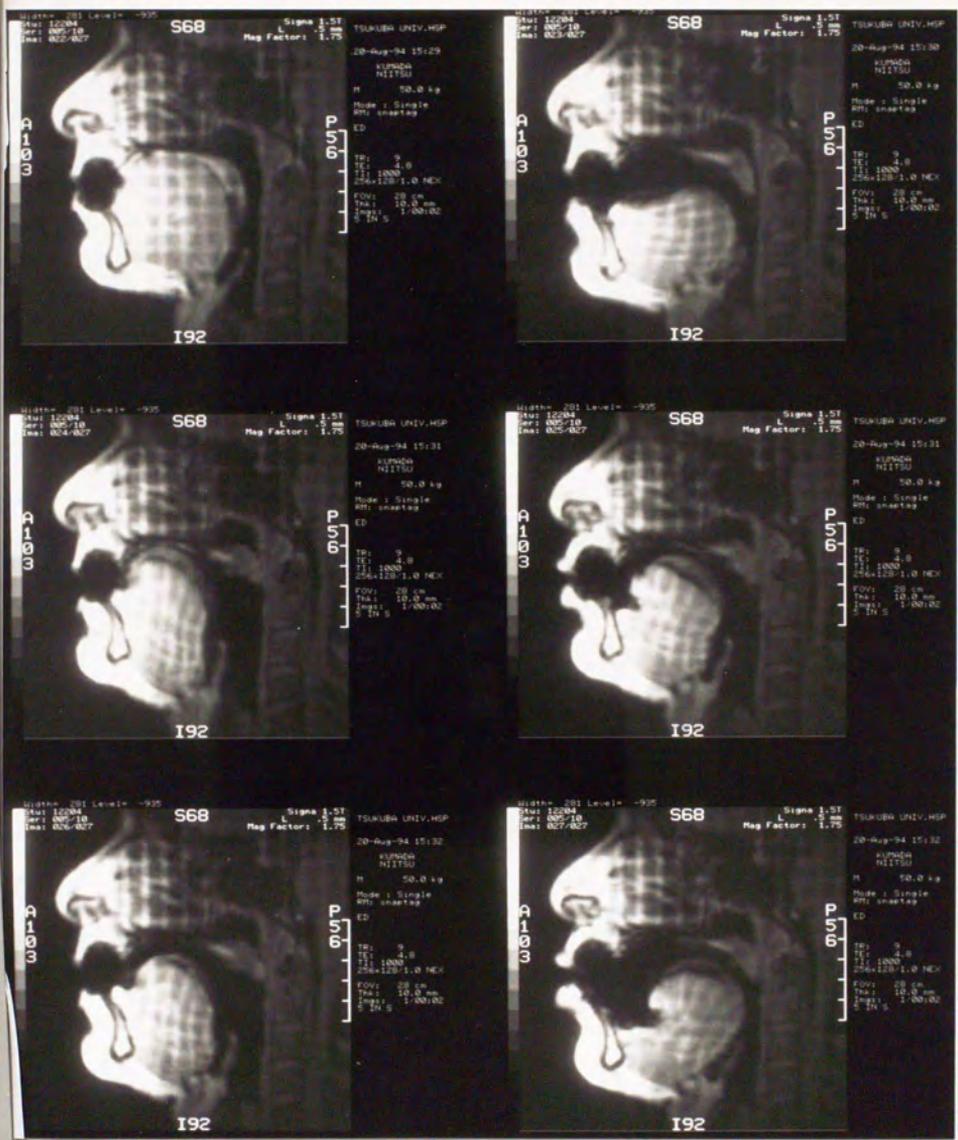


図2 Sub.1の矢状断正中面像 (Tagging snapshot MRI)

Reference Position	a
	i u
	c o



図3 Sub.1の、reference position の構えにおける、矢状断正中面像（高解像度のMRI）



図4 Sub.1の、reference positionの構えにおける、矢状断正中面より5 mm外側面の像(高解像度のMRI)



図5 Sub.1の、reference positionの構えにおける、矢状断正中面より1 cm外側面の像(高解像度のMRI)

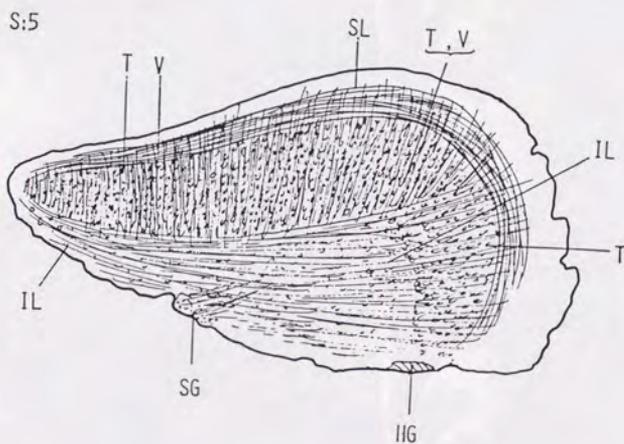
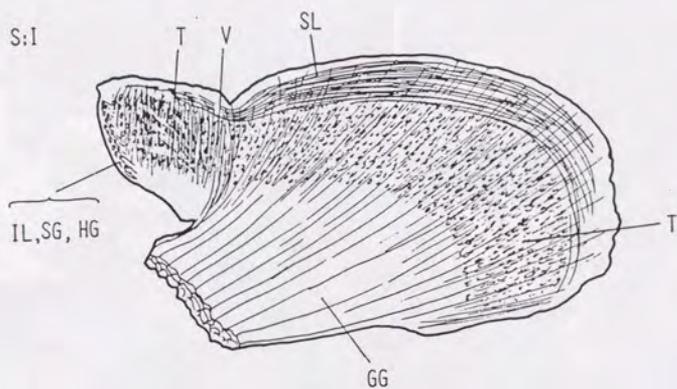


図6 成人標本舌矢状断切片における筋走行 (Miyawaki (1974)より)

S : 1 矢状断ほぼ正中面切片 S : 5 矢状断ほぼ1cm外側面切片

GG : オトガイ舌筋、SL : 上縦舌筋、IL : 下縦舌筋、V : 垂直舌筋
T : 横舌筋、SG : 茎突舌筋、HG : 舌骨舌筋

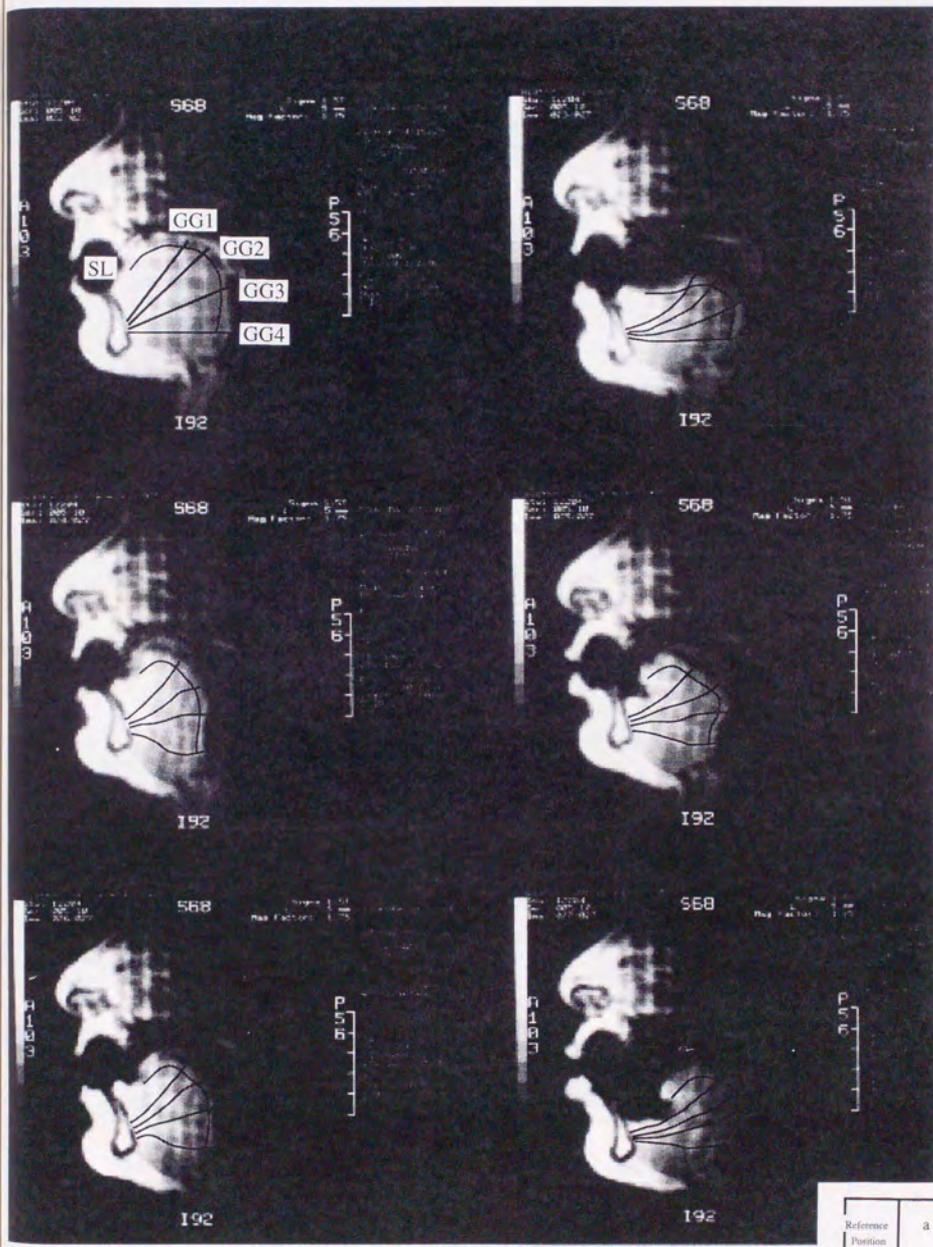


図7 Sub.1の矢状断正中面像 (Tagging snapshot MRI) に、オトガイ舌筋 (GG 1-4) と上縦舌筋 (SL) に沿った線を書き込んだもの。

Reference Position	a
i	u
e	o

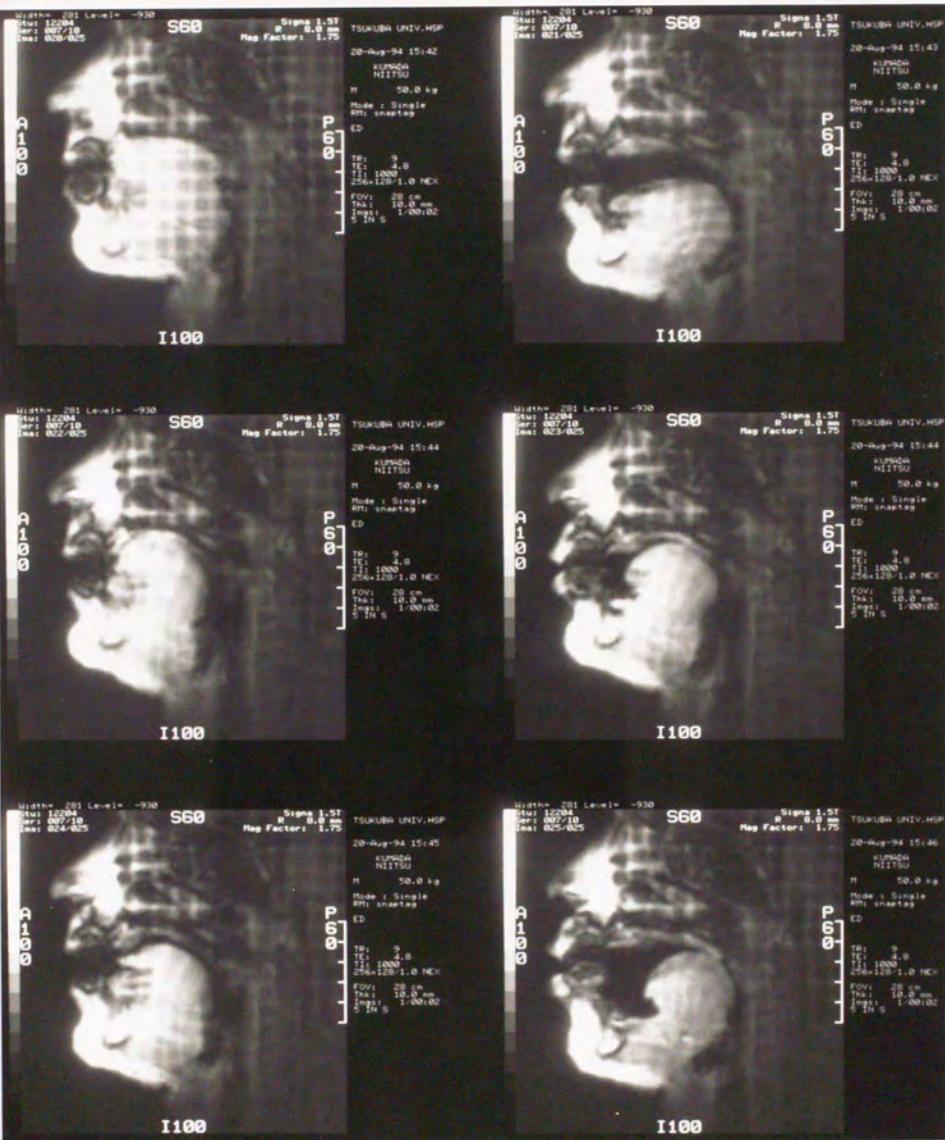
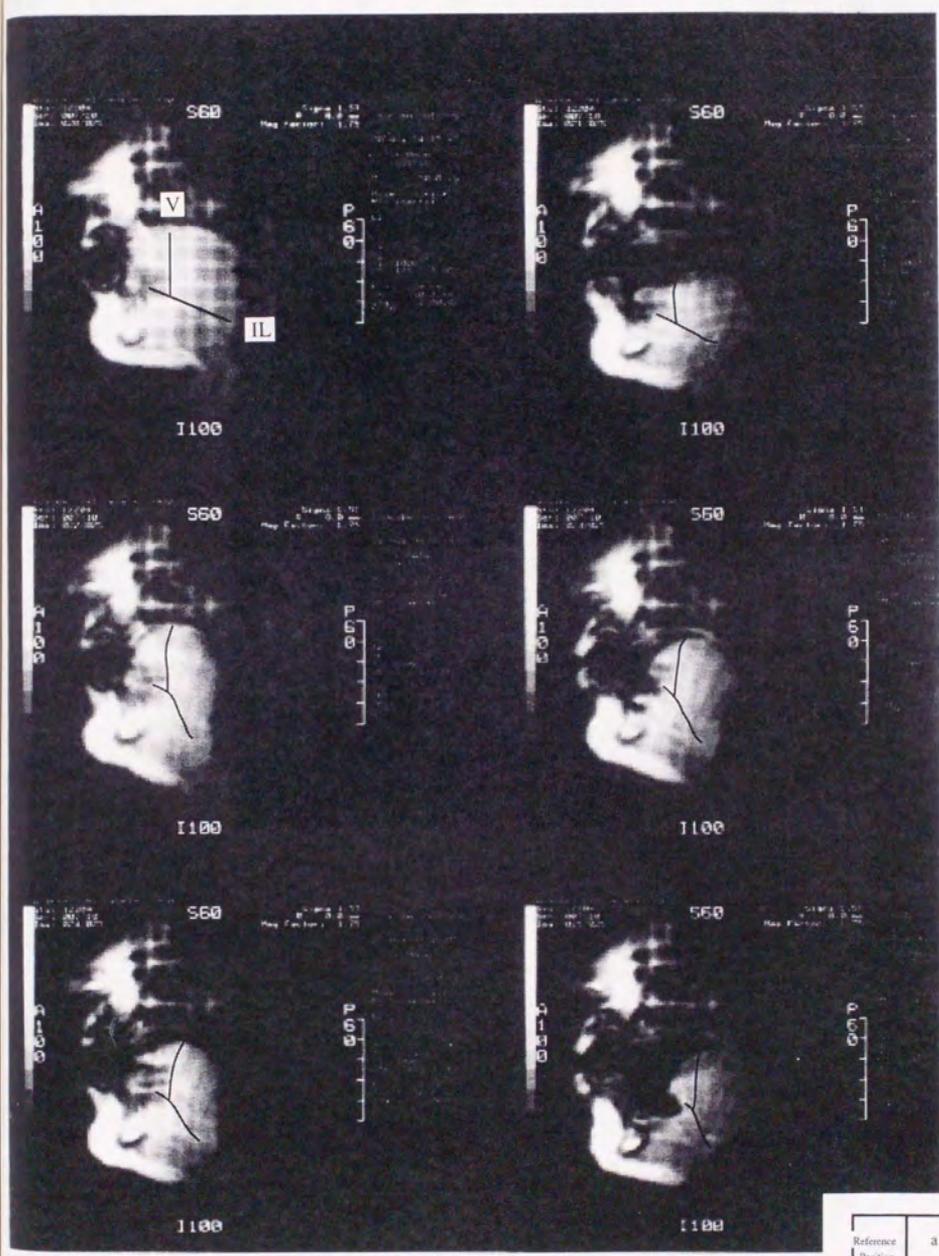


図8 Sub.1の矢状断正中面より1cm外側面の像 (Tagging snapshot MRI)

Reference Position	a
i	u
c	o



9 Sub.1の矢状断正中面より1cm外側面の像(Tagging snapshot MRI)に、下縦舌(IL)と垂直舌筋(V)に沿った線を書き込んだもの。

Reference Position	a
i	u
e	o

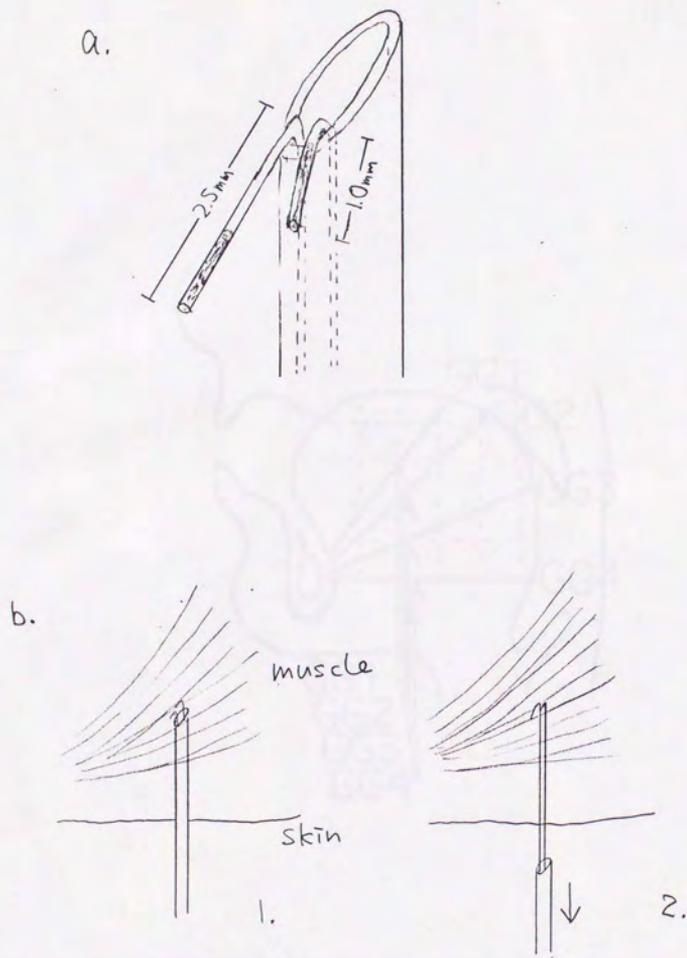


図10 bipolar hooked wire electrode

a. 電極先端の拡大図

b. 電極挿入 1. 経皮的に電極を挿入し、電極の先端が目的の筋に達したら、
2. 注射針を抜く。電極は筋内に残る。

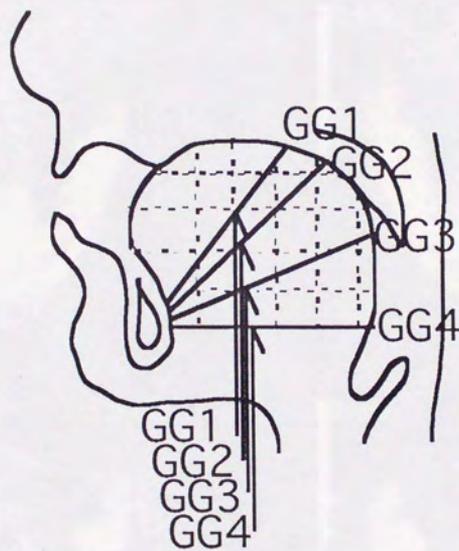


図11 Sub.1の矢状断正中面やや右側において、オトガイ舌筋に沿った線（GG1-4）に相当する深さに筋電図の電極を挿入。

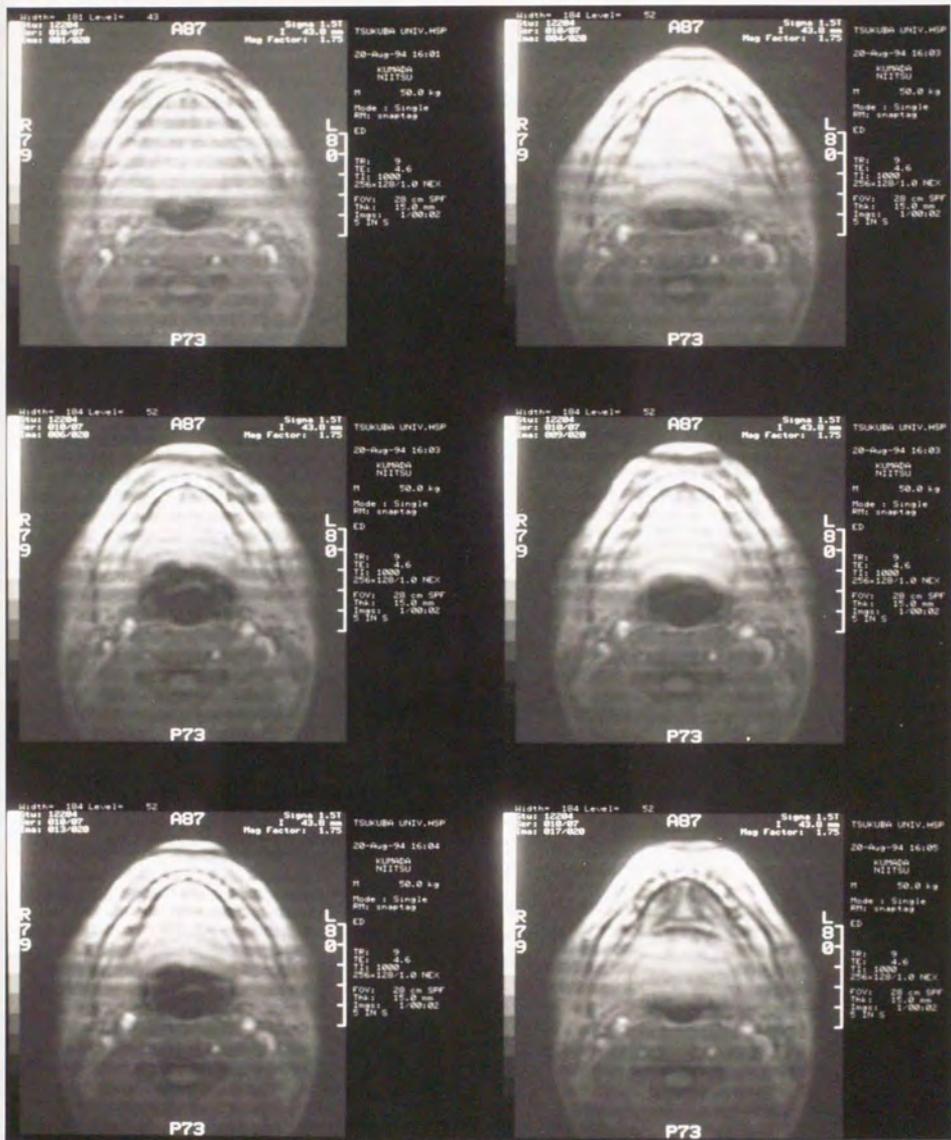


図 13 Sub.1の水平断像 (Tagging snapshot MRI)

Reference Position	a
	i u
	c o

/a/

/o/

Sub.1



Sub.2



Sub.3



Sub.4



Sub.5



図14 各被験者の/a/o/発音時の矢状断正中面像 (Tagging snapshot MRI)

Sub.1 36M

GG No.	r.p.	i	e	a	o	u
1	100	81	79	91	115	86
2	100	76	77	97	113	86
3	100	73	79	106	112	92
4	100	76	80	104	91	84

Sub.2 30M

GG No.	r.p.	i	e	a	o	u
1	100	92	86	80	85	91
2	100	82	85	91	98	92
3	100	72	82	95	98	83
4	100	68	85	98	97	75

Sub.3 22M

GG No.	r.p.	i	e	a	o	u
1	100	95	88	105	124	93
2	100	90	92	113	129	92
3	100	74	86	105	116	81
4	100	61	80	100	104	67

Sub.4 22M

GG No.	r.p.	i	e	a	o	u
1	100	87	87	85	97	95
2	100	77	76	96	91	85
3	100	72	72	106	101	87
4	100	79	78	101	101	81

Sub.5 30F

GG No.	r.p.	i	e	a	o	u
1	100	78	77	112	109	83
2	100	77	72	124	113	80
3	100	79	82	114	107	79
4	100	84	93	97	95	83

表2 オトガイ舌筋各部(GG1-4)に沿って引かれた線の長さの変化
r.p.を100とした相対値にて示す。

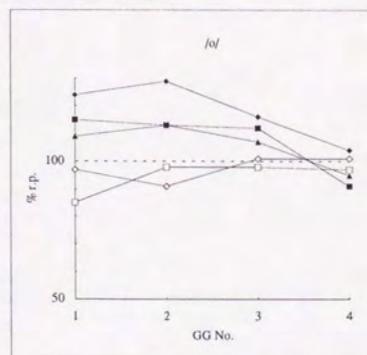
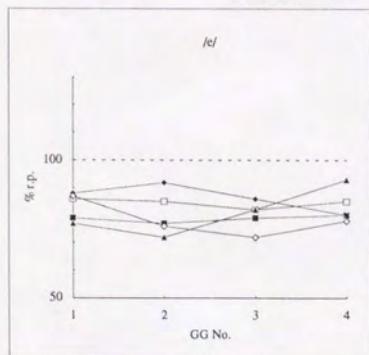
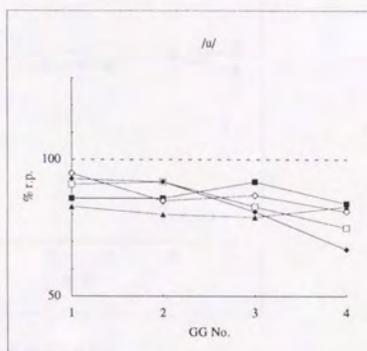
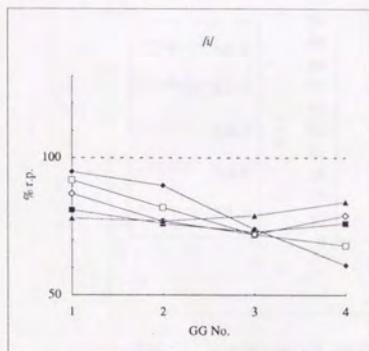
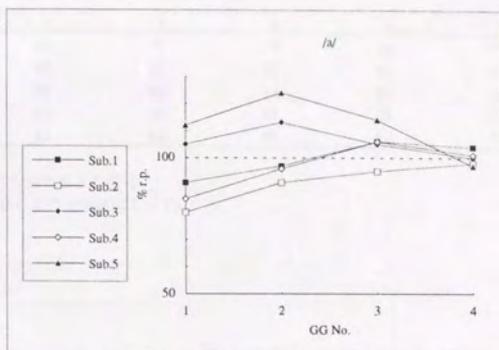


図15 オトガイ舌筋各部(GG1-4)に沿って引かれた線の長さの変化 r.p.を100とした相対値にて示す。各母音ごとにグラフ化した。

Subject No.	r.p.	i	e	a	o	u
Sub.1	100	80	79	79	84	79
Sub.2	100	95	89	83	91	85
Sub.3	100	98	80	82	87	86
Sub.4	100	86	80	84	78	90
Sub.5	100	82	84	91	84	77

表3 上縦舌筋に沿って引かれた線の長さの変化
各被験者r.p.の値を100とした相対値にて示す。

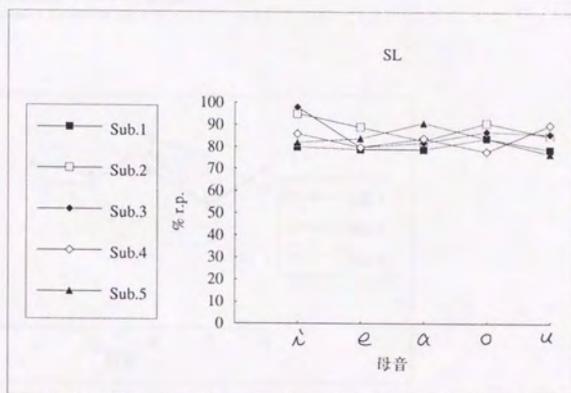


図16 上縦舌筋に沿って引かれた線の長さの変化
各被験者r.p.の値を100とした相対値にて示す。

	r.p.	i	e	a	o	u
Sub.1	100	81	76	78	62	79
Sub.2	100	73	71	94	86	69
Sub.3	100	83	77	87	60	79

表4 下縦舌筋に沿って引かれた線の変化
r.p.=100とした相対値で示す。

	r.p.	i	e	a	o	u
Sub.1	100	108	98	83	104	94
Sub.2	100	105	102	75	80	100
Sub.3	100	122	111	78	97	103

表5 垂直舌筋に沿って引かれた線の変化
r.p.=100とした相対値で示す。

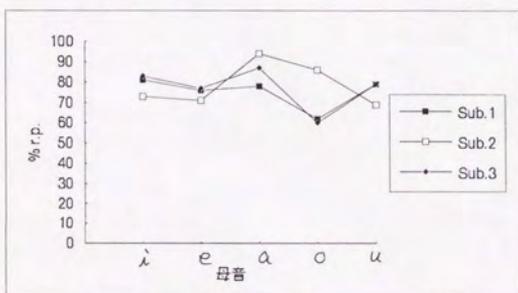


図17 下縦舌筋に沿って引かれた線の変化
r.p.=100とした相対値で示す。

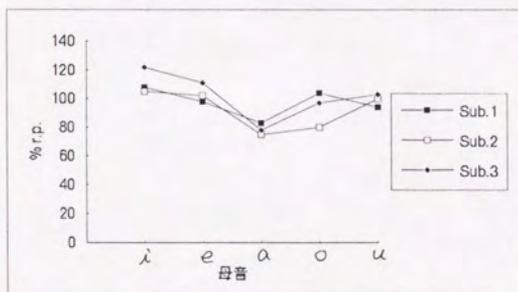


図18 垂直舌筋に沿って引かれた線の変化
r.p.=100とした相対値で示す。

	r.p	i	e	a	o	u
GG1	11.7±0.7	100±5.8	60.2±7.1	6.9±1.1	9.8±2.8	41.5±6.0
GG2	13.4±0.6	100±10.7	51.3±4.9	10.5±0.7	12.3±1.2	35.2±4.8
GG3	20.8±1.7	100±12.4	62.9±9.3	7.3±0.7	9.5±2.1	43.2±8.7
GG4	61.2±4.7	100±9.8	74.9±7.4	27.9±3.6	31.4±5.0	70.9±9.4

表6 Sub.1 オトガイ舌筋における仰臥位の筋電図の平均値±標準偏差
仰臥位における各GGの*M*の平均値を100とする。

	r.p	i	e	a	o	u
GG1	10.7±1.6	100±9.9	63.3±10.6	6.5±0.9	6.5±1.2	38.8±2.4
GG2	18.4±1.2	100±6.3	58.8±9.3	14.7±0.3	15.2±0.7	38.9±1.1
GG3	18.5±1.9	100±7.8	63.6±7.7	9.0±0.4	7.9±1.4	40.6±1.4
GG4	70.2±6.4	100±5.0	79.8±10.6	39.8±7.8	39.6±4.8	78.4±3.4

表7 Sub.1 オトガイ舌筋における座位の筋電図の平均値±標準偏差
座位における各GGの*M*の平均値を100とする。

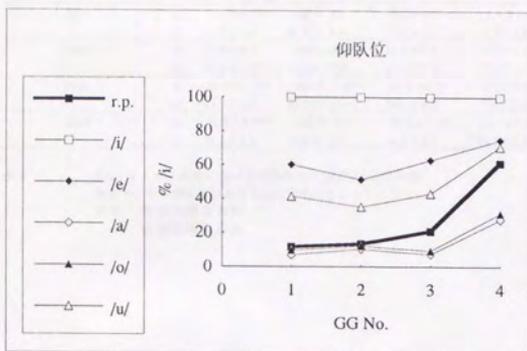


図19 Sub.1 オトガイ舌筋における仰臥位の筋電図
仰臥位における*i*を100とする。

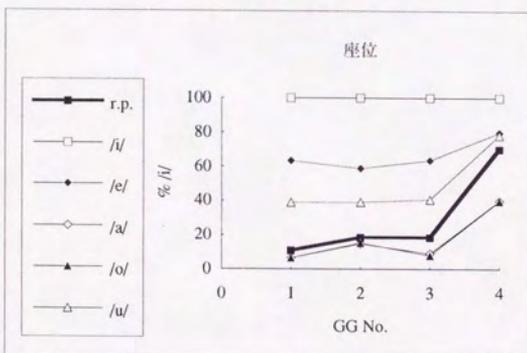


図20 Sub.1 オトガイ舌筋における座位の筋電図
座位における*i*を100とする。

		r	p	i	e	a	o	u
GG1	S	11.7±0.7**	100±5.8	60.2±7.1	6.9±1.1*	9.8±2.8**	41.5±6.0**	
	U	9.7±1.4	89.8±8.9	56.9±9.5	5.8±0.8	5.9±1.1	34.9±2.2	
GG2	S	13.4±0.6	100±10.7**	51.3±4.9	10.5±0.7	12.3±1.2	35.2±4.8**	
	U	14.4±0.9*	78.2±5.0	46.0±7.3	11.5±0.3**	11.9±0.5	30.5±0.8	
GG3	S	20.8±1.7**	100±12.4**	62.9±9.3*	7.3±0.7	9.5±2.1	43.2±8.7**	
	U	15.7±1.6	85.0±6.6	54.0±6.5	7.6±0.3	7.9±1.1*	34.5±1.2	
GG4	S	61.2±4.7**	100±9.8**	74.9±7.4**	27.9±3.6*	31.4±5.0**	70.9±9.4**	
	U	38.9±3.6	55.5±2.7	44.3±5.9	22.1±4.3	21.9±2.7	43.5±1.9	

表8 Sub.1 オトガイ舌筋における仰臥位(S)と座位(U)の筋電図
各チャンネル仰臥位における*N*の平均値を100とする。
** 有意水準0.0%
* 有意水準0.5%



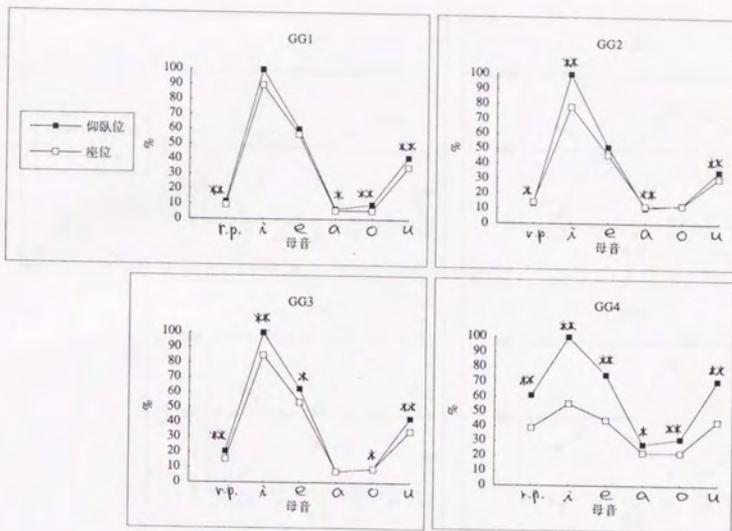


図2 1

Sub.1 オトガイ舌筋における仰臥位と座位の筋電図の比較
 オトガイ舌筋各チャンネルごと(GG1-4)に示す。
 各チャンネルの仰臥位における*h*の平均値を100とする。
 ** 有意水準9.9%
 * 有意水準9.5%

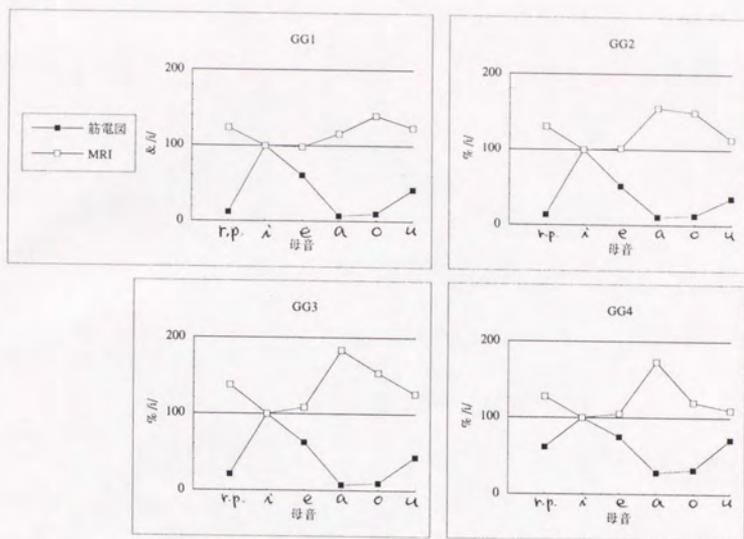
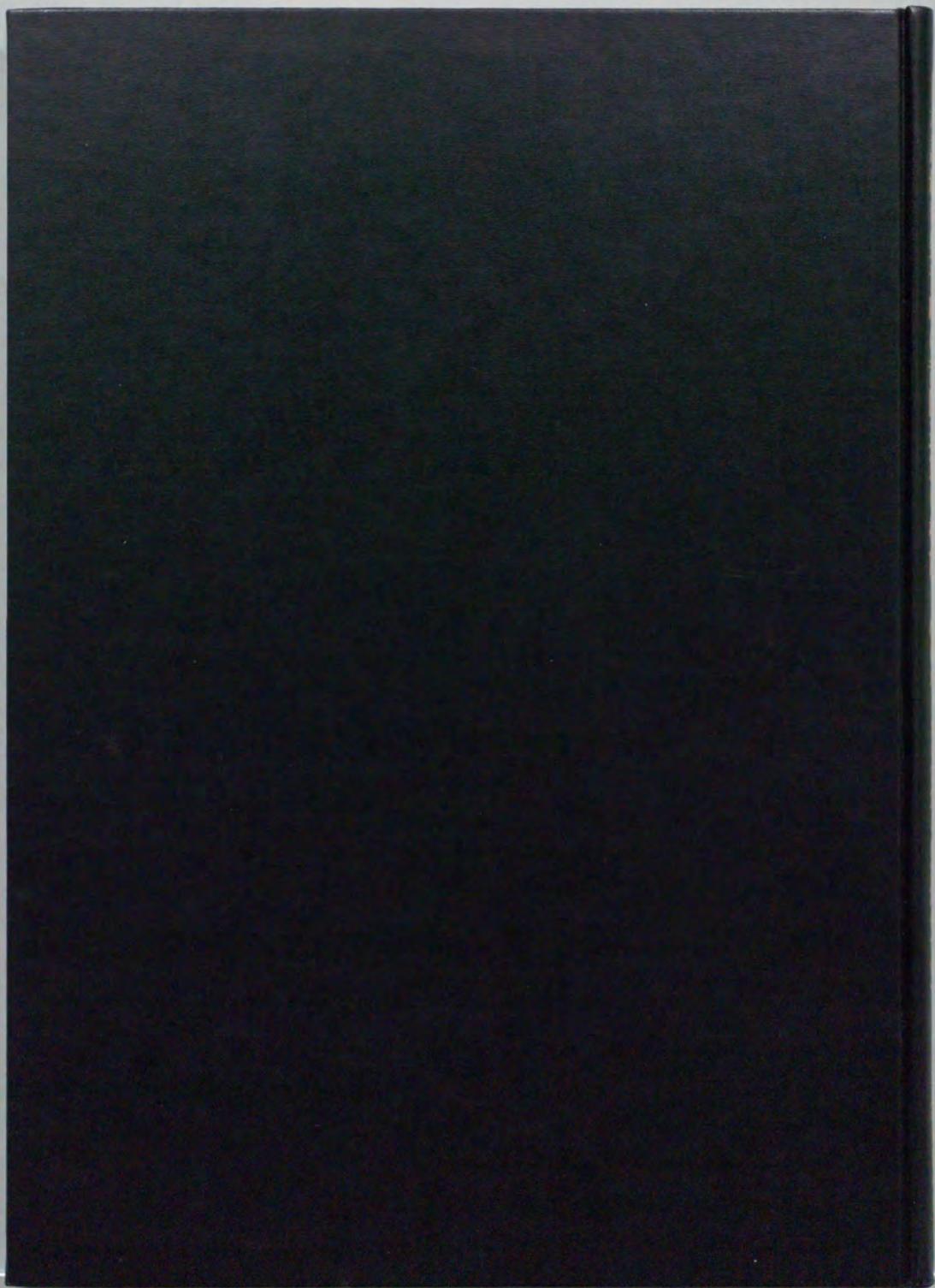


図22

Sub.1 オトガイ舌筋における筋電図とMRIの比較
 オトガイ舌筋のチャンネル(GG1-4)ごとに示す。
 筋電図、MRIともに*/l/*における値を100とする。





Kodak Color Control Patches

Blue Cyan Green Yellow Red Magenta White 3/Color Black

Kodak Gray Scale

A 1 2 3 4 5 6 M 8 9 10 11 12 13 14 15 B 17 18 19

C **Y** **M**

© Kodak, 2007 TM: Kodak