

## 磁気共鳴画像法に基づく母音発声時の舌筋の筋長計測

高野佐代子<sup>1), 2)</sup>, 本多清志<sup>2)</sup>

1) 科学技術振興事業団

2) ATR人間情報通信研究所第4研究室  
〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2-2  
TEL: 0774-95-1111 FAX: 0774-95-1008

Email: tsayoko@isd.atr.co.jp

あらまし

日本人男性話者4名の磁気共鳴画像 (MRI) に基づいて母音発声時における6つの舌筋の筋長を計測し、母音調音との関係を検討した。各筋の筋長変化には母音毎の共通性と個人性が見られた。とくに茎突舌筋 (SG) では、部位ごとに異なる筋長変化が観察された。すなわち後部 (SGp) は筋長変化が小さく、中部 (SGm) は筋長変化が最も大きく、前部 (SGa) は個人差が大きかった。筋長変化の大きいSGm部が後舌母音の生成に関与すると思われ、後舌母音がSGm部の収縮による舌体後部の隆起により生成される可能性が示唆された。舌筋の筋長計測は、音声生成における生理的指標の計測法のひとつとして利用できる。

キーワード 母音生成, 筋長計測, 舌, 磁気共鳴画像

## Muscle length measurement during vowel production based on Magnetic Resonance Images

Sayoko Takano, Kiyoshi Honda

1) JST/CREST

2) ATR Human Information Laboratories, Department 4.  
2-2 Hikari-dai, Seika-cho, Souraku-gun, Kyoto-hu 619-0288  
TEL: 0774-95-1111 FAX: 0774-95-1008

**Abstract** The length of the tongue muscles was measured based on the Magnetic Resonance images (MRI) during the production of Japanese five vowels of Japanese four male speakers. The results were discussed in relation to vowel articulation. The muscle length for vowels showed both common tendencies and individual differences. It was observed that muscle length changes in the styloglossus varied depending on its parts: the SGp showed little change in length across vowels, the SGm has the greatest changes, and the SGa demonstrated the largest variability among the speakers. This suggests that among the three parts of this muscle the SGm exerts a main contractile effect for producing back vowels, i.e., the contraction of the SGm possibly produces bunching of the back tongue. Thus the muscle length can be used as a physiological index for measuring speech articulation.

**Key words** vowel production, muscle length measurement, tongue, MRI

## 1. はじめに

本研究では、発話運動制御の研究や調音モデルの研究に基礎データを提供することを目的とし、発話に関する舌筋の長さを計測し、母音生成における舌筋の機能を考察した。

発話においては、多くの筋が活動を行うことにより声道形状を調節し、声帯を音源として音声を生成する。発話器官の運動は骨格の運動とは異なる性質を持っている。人間の舌は柔らかい筋肉の集まりでできた特殊な運動器官であり、咀嚼や嚥下だけでなく、発話運動を行い音声によるコミュニケーションを可能にしている。

このような人間の発話機構を模擬し、なめらかな合成音声生成をめざした生理学的調音モデルが提案されている(Dang and Honda, 2000)。このモデルを駆動する際、発話時に記録された筋電信号を参照することが望ましいが、必要な全ての筋の筋電信号を同時に記録することは技術的に非常に困難であり、限られたデータしか得られていない(Bear, et. al., 1988)。従って、現在では、この生理学的調音モデルでは発話運動の目標に従って筋の収縮パターンを推定し、モデルに組み込まれた各筋を駆動して音声を合成している。このような発話運動の目標点を示すものとして、X線マイクロビームやMRI動画画像などによって正中矢状面での舌運動が記録された資料が用いられている。(Hashi et. al., 1998; Masaki et. al., 1999)。

この生理学的調音モデル駆動において、実際の筋の収縮状態を反映するものとして、筋の長さを利用できる可能性がある。この筋長は筋収縮力の直接的指標ではないが、複数の筋が活動した結果としてもたらされる筋同士の釣り合いを反映している。従って、調音運動状態を推定するためには、発話に関する筋肉の筋長を測定し、過去の筋活動のデータを参照しながら各筋の舌変形への関与を詳細に調べる必要がある。

本研究では、MRIを用いて母音発声時の発話筋の長さを計測しており、今回は舌筋の筋長計測法とその結果を報告する。舌は、舌内部で生じ舌内部で終わる筋(内舌筋)、舌外部から舌内部へ進入する筋(外舌筋)、および舌周辺の骨および筋を介して間接的に舌の形状に影響を与える筋が複数存在する。本研究では、このうち主要な外舌筋(オトガイ舌筋、莖突舌筋、舌骨舌筋)、内舌筋(上縦舌筋、下縦舌筋)および、オトガイ舌骨筋の筋長を計測し

た。そして、この結果を基に、筋長変化の程度と舌変形との関係を検討した。

## 2. 方法

### [被験者]

日本人健康成人男性4名を採用とした。このうち2名は関東(東京)出身者、2名は関西(大阪および奈良)出身者である。

### [タスク]

日本語5母音(イ, エ, ア, オ, ウ)の持続発声および安静呼吸を実験タスクとした。母音持続発声時の息つきは口を動かさずに行うように指示した。またなるべく嚥下運動を避けるように指示した。

なお、以後この日本語5母音は、/i/, /e/, /a/, /o/, /u/で統一して記述する。

### [撮像方法]

磁気共鳴画像装置(Magnex Eclipse1.5 T, 島津Marconi社)を用いて矢状方向の断面画像を記録した。この撮像に際して、舌上面の2ヶ所(舌端と舌背)に直径3mmの油脂マーカー(森下仁丹社製)を装着した。高速スピネコー(4エコー)撮像法(TE=15 ms, TR=2764 ms)を用い、FOV 256 X 256 mm, スライス厚2.5 mm, スライス間隔2.5 mmとして35スライスの画像を収録した。

### [データ処理]

各被験者の各母音発声時および安静呼吸時のMRIデータについて、主な硬組織、舌筋、顎筋、外喉頭筋を視察によりトレースした。硬組織すなわち下顎骨(mandible)および舌骨(hyoid bone)については調音に伴う変形がないので、安静呼吸時のMRIにおいて骨輪郭をトレースし、これを平行移動と回転により各母音発声時のMRIにあてはめた。筋の輪郭は必ずしも明瞭ではないため、各スライス面上のトレース図を5母音間で比較し、さらに個々の母音データについて3次元的に再構築して輪郭の修正と標識点の設定を行った。

### [発話筋の解剖学的説明]

本報告では発話筋のうち舌筋の計測結果を対象とする。主要な外舌筋(オトガイ舌筋、莖突舌筋、舌骨舌筋、)内舌筋(上縦舌筋、下縦舌筋)およびオトガイ舌骨筋についてこれまでに知られている機能を簡単に説明する。

オトガイ舌筋(genioglossus muscle : GG)は下顎骨オトガイ部オトガイ棘(mental spine)より扇状に広がる三角状筋であり、部位によって舌変形に対する

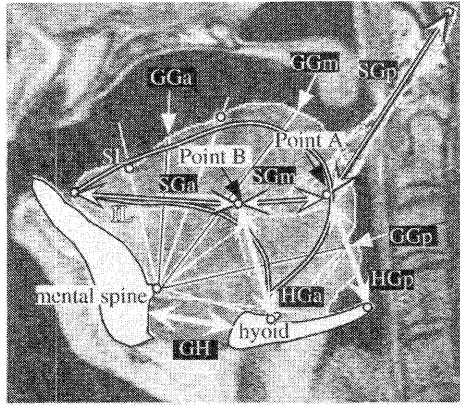


Fig. 1. Method for measuring muscle length based on the MRI Data. "GG", "SG" and "HG" stands for genioglossus muscle, styloglossus muscle and hyoglossus muscle, respectively. Small letter "a", "m" and "p" means anterior, middle, and posterior, respectively. "SL" and "IL" stands for superior longitudinal muscle and inferior longitudinal muscle. Two landmarks are defined, i. e. point A (bending point of SG) and point C(crossing point of SG and HG).

収縮効果が異なる。茎突舌骨筋(styloglossus muscle: SG)は頭蓋底に位置する茎状突起を始点とし、舌背面付近で前方に屈曲し舌の側面を通り舌尖に至る細長い筋肉であり、舌を後方に引く作用がある。舌骨舌筋(hyoglossus muscle: HG)は舌骨より舌側面に沿い上向する膜状の筋であり、上部でSGと交差する。この筋は始点終点ともに可動性を持ち、舌を後下方にひき、舌骨を上方に持ち上げる。

上縦舌筋(superior longitudinal muscle: SL)と下縦舌筋(inferior longitudinal muscle: IL)は、舌骨付近より舌尖に至る細長い筋であり、SLは舌上面の表面に沿い、ILは舌端下部を通り、舌尖に向かう。ILには舌尖から舌後方に向かう筋繊維もあるが、ここでは舌骨に向かう筋を計測した(Takemoto, 2001)。なお、内舌筋にはその他、垂直舌筋(vertical lingual muscle)と横舌筋(transverse lingual muscle)があるが、矢状断面スライスでは観察できなかった。

オトガイ舌骨筋(geniohyoid muscle: GH)は下顎骨オトガイ部より舌骨で止まる棒状の筋であり、舌骨を前方にひくもしくは下顎骨を後方に引く作用がある。

#### [筋長計測]

筋長計測はFig.1に示すようにトレース図を矢状

面上に投影して、標識点間の距離を2次的に計測した。舌は3次元変形を行うので3次的に筋長を計測することが望まれる。しかし、本実験ではスライス厚2.5mmの撮像であるために、画像間の補間による3次元再構成を行うと誤差を無視できなくなるため、矢状方向の2次元投影図上で計測・比較することとした。以下に各筋の計測法を示す。

GGは前部(anterior: GGa), 中部(middle: GGm), 後部(posterior: GGp)に分けて計測した。GGa, GGm, GGpの区分はオトガイ棘を中心とする3つの扇形により定義し、それぞれの筋長は各扇形の中心角を二分しオトガイ棘より舌表面にいたる線分の長さとした。GGa前方境界はオトガイ棘と舌端マーカを結んだ線, GGaとGGmの境界はオトガイ棘と舌背マーカを結んだ線とした。またGGmとGGpの境界はオトガイ棘からでる腱(tendon)の延長線とした。

SGは後部(SGp), 中部(SGm), 前部(SGa), に分けて計測した。Fig.1.に示すように、SGpとSGmの境界は、SGが舌に進入する際に屈曲する点として、A点と名付けた。またSGmとSGpの境界は、SGとHGとが交差する点としてB点と名付けた。SGpは茎状突起よりA点までの長さ、SGmはA点からB点までの長さ、SGaはB点から舌尖までの長さとした。

今回、A点は個人内において一定のスライスにおいて観察することとし、この位置を決定する際は、個人内および個人間を比較しながら、偏りのないように決定した。ただし、話者KSの/a/では、MRI上のA点を用いたところ、SGmおよびSGpの長さが他の母音に比べて明らかな異常値となった。そこで、この被験者の/a/のSGaについては、異常値にならないように意図的に調整した。

またB点とは、HGaとSGaが80度~120度の角度で交わる点であり、同様に個人内において一定のスライスにおいて観察できる。A点と同様に、母音間で偏りのないように決定した。

HGは後部(HGp)と前部(HGa)に分けて計測した。HGpは舌骨の大角後端の標識点からA点までの距離、HGaは舌骨の小角下の標識点からB点までの距離とした。

SL及びILは舌骨体の5mm上方の点を便宜的に始点とし、GGp, GGpとGGmの境界, GGm, GGmとGGaの境界, GGaの各点を通る舌尖までの曲線の長さとした。

GHは下顎骨オトガイ棘下方の標識点から舌骨までの距離とした。

なおMRI上での各筋の識別には難易があった。A点およびILは解剖学的にも識別が困難であり、MRI上での識別も容易ではなかった。

### 3. 結果

Fig. 2.に話者4名の正中断面における/a/, /i/, /u/のトレース図を示す。またFig.3に各話者の安静時と5母音発話時の舌筋の計測結果を示す。

まず共通点についてのべる。正中面での舌の形状は、これまでによく知られているように、/i/, /e/, および/u/では舌が前方に移動し、/a/および/o/では舌が後方に移動している。今回採用した日本人男性話者の中で狭口後舌母音の[u]を発声した話者はおらず、中舌の[ɯ]とみなされるが表記上/u/と記す。

次に舌の形状について相違点を考える。話者IF, MWでは舌尖の移動が小さく、話者KHとKSでは舌尖の移動が大きかった。また、話者KSおよびIFでは下顎の下降は/a/および/o/で大きく、話者KHでは下顎の下降は/a/と/e/で大きかった。話者MWの下顎の下降は小さかった。

舌の形状・位置等の個人差が大きいため、関西出身話者と関東出身話者の違いは特に考慮には入れない。

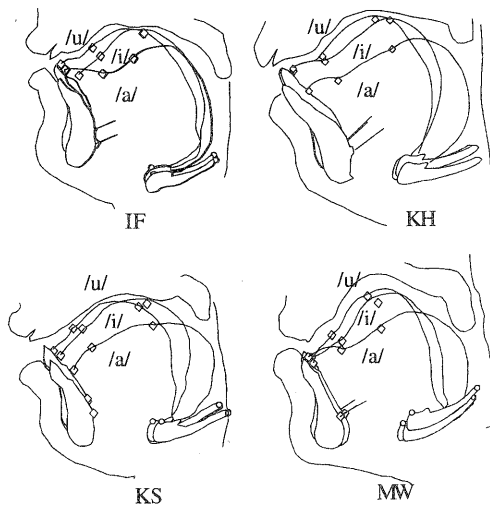


Fig. 2. The trace of the tongue body of the mid sagittal plane at the utterance of /a/, /i/ and /u/.

### [オトガイ舌筋(GG)]

GGはすべての筋の中で、最も筋長の変化が大きい。またGGaが短縮するときGGpは伸張し、GGpが短縮するときGGaが伸張する。

GGaは/a/と/o/で短く、/u/, /e/および/i/で長い傾向が見られた。GGaの筋長変化は6mm~14mmであり、最短の/a/および/o/と最長の/i/を比較した場合、最長の値を基準として70%~87%の短縮率であった。

特に話者KSでは/e/におけるGGaが短かく、/a/と/o/での筋長と同等であった。話者KSは、/a/と/o/の発声の際に下顎を下降させており、この母音発声ではGGaを大きく短縮させずに口腔前方の共鳴腔を作ったためであると考えられる。

GGmlは/i/と/e/で短く、/a/と/o/で長かった。/u/はその中間であった。GGmの筋長変化は6mm~11mmであり、最短の/i/と最長の/o/を比較すると84%~90%の短縮率であった。

GGpは/i/と/e/および/u/で短く、/a/と/o/で長かった。GGpの筋長変化は17mm~5mmであり、最短の/i/と最長の/a/もしくは/o/を比較すると、74%~90%の短縮率であった。

話者IFと話者KSのGGaとGGpでは、各母音における短縮と伸張の傾向は同様であったが、その筋長変化の大きさは、話者IFではGGaが大きく、話者KSではGGpが大きかった。筋長の変化が大きく表れる部位に個人差が見られたので、個人毎に比較検討を行う。話者IFにおいて、母音ごとの筋長変化は、GGaが非常に大きく、GGpの変化は小さかった。一般に母音/i/ではGGpの短縮が大きく、/o/と/a/でGGpが長くなるが、この話者のGGpの筋長は、最短の/i/と最長の/a/を比較しても90%の短縮率にすぎなかった。母音/i/ではGGpではなくGGmの収縮させていた。また母音/a/もしくは/o/ではGGaの短縮に加えて下顎を下降させていた。逆に話者KSにおいては、逆に母音毎の筋長変化はGGaでは小さく、GGpでは大きかった。一般に/a/の発声のときの方が/e/の発声よりもGGaを短縮させるが、この話者は下顎を下降させることにより口腔前部の音響管を主に作っており、GGaの筋長変化は小さかった。このように、話者によって筋を短縮させる部位には個人差がある。

### [莖突舌筋(SG)]

SGpは最も変化が小さく、SGmで最も変化量が大きかった。SGaでは個人差がみられた。

SGpの筋長変化はすべての話者において、母音間の差が非常に小さい。SGpの筋長変化は2mm~8mmであり、最長の/e/と最短の/o/を比較すると86~95%の短縮率にとどまった。SGpの筋長変化は小さいので、話者KSの/a/においてA点の位置を調整したことに対する影響は小さい。

SGmはSGの中で最も筋長変化が大きい。SGmは/a/と/o/で短く、/u/, /i/および/e/で長かった。SGmの筋長変化は5mm~10mmであり、最短の/a/もしくは/o/と最長の/u/, /i/もしくは/e/を比較すると、69~85%の短縮率であった。

SGaは、話者によって大きく傾向が異なった。話者IF, MWにおいて、SGaの筋長は/i/, /e/および/u/で短く、/a/と/o/で長い傾向があった。逆に、話者KHおよびKSにおいて、SGaの筋長変化は小さく、さらに話者KSでは特に/o/でSGaが短い傾向があった。このようなSGaの筋長変化の個人差は、舌尖の位置に依存している。SGaの筋長とはB点から舌尖までの距離なので、舌尖の位置がSGaの筋長に関係する。話者IFとMWの/a/と/o/では舌尖が前方に位置するので、話者KHとKSに比較して、この母音でのSGaが長い。すべての話者において最長の母音と最短の母音を比較するとSGaの筋長変化は12~4

mmであり、筋長変化の割合では75~94%の短縮率であった。

### 【舌骨舌筋(HG)】

HGaの筋長変化には個人ごとの傾向は似ており、また筋長変化も比較的大きい。HGpの筋長変化には個人差が見られた。

HGaは/a/と/o/で短く/i/, /e/および/u/で長い。HGaの筋長変化は6mm~10mmであり、最短の/a/もしくは/o/と最長の/i/もしくは/e/を比較すると77~80%の短縮率であった。

HGpは、話者MWのみHGaと同じ傾向を示し、他の話者においてHGpと相反する傾向が見られた。すなわち、話者MWのHGpは/a/と/o/で長く/i/, /e/および/u/で短い。また話者KS, KH, MWのHGaは/i/, /e/および/u/で短く/a/と/o/で長い。話者MWの場合、HGpの筋長変化は7mmであり、最短の/a/と最長の/i/を比較すると76%の短縮率であった。また話者KS, KH, MWのHGaの筋長変化は5mm~11mmであり、最短の/i/と最長の/u/を比較すると76~85%の短縮率であった。

HGaとHGpのようにひとつの筋内で筋長変化のパターンが異なることは筋の機能差も窺われるが、HGpは他の筋から力を受けて伸張されている可能性がある。

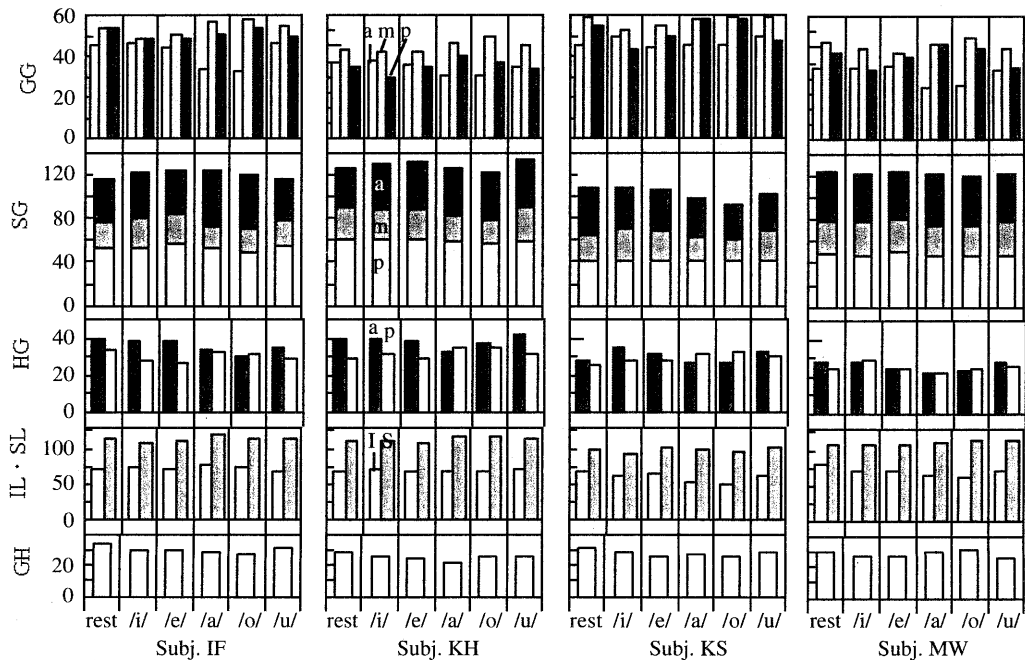


Fig. 3. The muscle length of each vowel of each subject (mm)

### [上縦舌筋(SL)と下縦舌筋(IL)]

SLとILの筋長の変化量は全体的に小さく、また話者によって傾向が異なった。

話者KHとMWのSLは/e/と/i/とで短く、/o/、/a/および/u/で長い傾向があった。この話者のILは/a/と/o/で短く/i/、/e/および/u/で長い傾向であった。また話者KSとIFのILとSLの筋長は、/i/で傾向は似ていたが、それ以外の母音ではほぼ反対の傾向を示した。話者KSと話者IFの/i/では、SLが長くILが短い傾向があった。話者KSの場合、ILとSLは/a/と/o/で短く、/e/と/u/で長かった。話者IFの場合、/e/と/u/で短く、/a/と/o/で長かった。

SLの筋長変化は最長の母音と最短の母音を比較すると11~6mmであり、筋長変化の割合では90~95%程度の短縮率にすぎなかった。ILは話者によって筋長の変化量が異なっていた。話者KSの変化量は大きく、話者KHとIFおよびMWは変化量が小さかった。話者KSのILでは、最短の母音と最長の母音を比較すると、77%の短縮率であった。一方、話者KH、IFおよびKWのILでは、最短と最長の母音を比較すると、それぞれ86~94%の短縮率であった。このように話者KSでILが短い結果は、ILを測定した面での舌の断面積が小さいことに関係する。

### [オトガイ舌骨筋(GH)]

GHはどの話者にも共通して、安静時のGHが最も長い。母音発声時のGHの筋長は、すべての被験者で母音/e/のときに比較的長く、また舌顎の下降とGGpの短縮に連動して、筋長が変化する傾向が見られた。

話者IFとKSは下顎の下降が/a/と/o/で比較的大きく、このときにGHが短い傾向があった。また話者KHは下顎の下降が/e/と/a/で大きく、このときにGHが短い傾向があった。話者MWは下顎をあまり移動させずに発声しており、このときには/u/、/i/および/e/でGHの筋長が短かった。GHの筋長の変化は、最短の母音での筋長と最長の母音での筋長変化は4~6mmであり、80~87%の短縮率であった。

## 4. 考察

舌筋の筋長は母音ごとに大きく変化している。この筋長は母音生成における調音状態を表現しており、複数の筋活動の総和を反映している。筋長の変化を理解するためには、解剖学的知識、形状変化、

および過去の筋電図学的知見を考慮する必要がある。

以下にGG、SG、HGについて考察し、後舌母音をつくる筋活動について検討を加える。

### [GG]

GGaとGGpとの間に拮抗的關係が筋長計測の結果からも確認された。すなわちGGpが短縮するときにはGGaが長く、GGaが短縮するときにはGGpが長い。これは舌全体がほぼ一定の体積を保ち、一つの筋が活動することにより、その筋の作用点以外の部位が膨張すると考えられる(Smith and Kier, 1989)。

しかし筋活動と筋長の関係はそれほど単純ではない。母音/i/ではGGpが短縮し、GGa部が長くなるが、筋電信号から/i/ではGGpとGGaが同時に活動することが知られている(Bear, et. al., 1988)。これはGGpの活動により舌が前方へ移動し、GGaの活動により/i/の音響管の特徴となる口蓋部の狭めと舌の正中溝を形成することを意味する。//ではGGa部の筋長は長い、筋活動は行われており、必ずしも筋長は筋活動に相当するとは言えない。

### [SG]

従来、SG全体の活動により舌を後方へ引き上げる機能を持つと考えられてきたが、MRIによる筋長変化の観察より、新たな機構が推測された。すなわち、SGpでは筋長変化が小さく、SGmはSG全体で最も変化率が大きい。後舌母音でSGm部の短縮の傾向が顕著なので、この活動が舌を上方向に押し出す機構が考えられる。

SGpの筋長変化が小さいことについては、2つの理由が考えられる。ひとつは、茎状突起から舌に筋が進入する部分までのSGp部の筋はほとんど収縮しない可能性がある。ひとつは、SGp周囲の頬脂肪体(corpus adiposum buccae)や筋組織により角度変化が制限され、SGpに筋収縮が生じてSGの屈曲および点Aの移動が観察されにくい可能性がある。

### [HG]

HGaの筋長は後舌母音で短く、HGが後舌母音で収縮するという報告と一致する(Bear et al, 1989)。一方、HGpの筋長変化の傾向はHGaとは異なり、筋収縮を反映するものではないと考えられる。話者MW以外では、HGpとHGaは相反する筋長変化の傾向を示した。これは、後舌母音で後部舌背が高くなることによりA点を持ち上げられたり、舌骨が下方に引

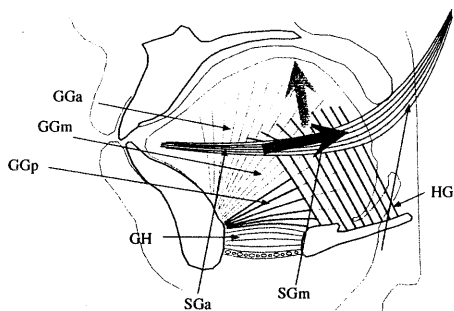


Fig. 4. A mechanism for producing back vowels using *SG* muscle, sagittal section of the tongue.

き下げられ結果としてHGpが長く観測されたためではないかと推測される。話者MWでは他の話者とは異なりHGaとHGpの筋長変化パターンが類似しており、HGa部の短縮効果がA点およびB点の両方に表れたためではないかと思われる。

#### [後舌母音をつくる筋活動]

これまではSGが舌を後上方に引き上げる機能をもつと考えられてきたが、これ以外に後舌母音を作る舌筋の機構を考える。

##### 1) SGmの働き

Fig. 4に示すように、SGmの短縮すなわち舌側の筋を前後方向に短縮させることにより、舌を後上方に隆起させるという推測が成り立つ。このように力の働く方向と舌運動の方向が直交することは、GGpの場合と同様である。

##### 2) HGの働き

HGの収縮により一般に広口母音を作ると考えられてきたが、SGm部とともに働くことにより後舌母音の生成を補助的に助ける可能性がある。Fig. 5.に示すように、HGが活動することにより直接的には舌側面が上下方向に縮められるが、舌の体積がある程度一定ならば舌内部の筋収縮の力学的均衡により2次効果として組織が上方に隆起する可能性がある。

##### 3) 内舌筋の関与(横舌筋, transverse muscle: T)

後舌母音の生成においては、外舌筋だけでなく内舌筋を考慮に入れる必要がある。内舌筋のうち横舌筋は舌の側面から舌の中央に向かって横走り、舌中心部の多くの部分を占める(Miyawaki, 1973;

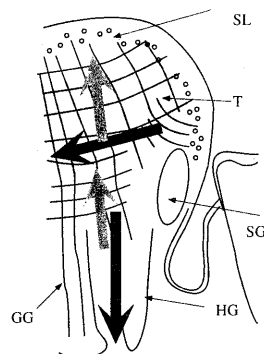


Fig. 5. A mechanisms for producing back vowels using *HG* and *T* muscles, coronal section of the tongue.

Takemoto, 2000). したがってFig.5.に示すように、横舌筋の活動により、左右の広がりを小さくし、舌上面を上方に膨隆させる可能性を指摘できる。

## 5. まとめ

本研究では発話運動制御の研究や調音モデルの研究に基礎データをを提供することを目的とし、発話に関する舌筋の長さを計測した。矢状面方向において、主要な外舌筋(オトガイ舌筋, 茎突舌筋, 舌骨舌筋), 内舌筋(上縦舌筋, 下縦舌筋)および、オトガイ舌骨筋の筋長を計測した。そして、この結果を基に、筋長変化の程度と舌変形との関係を検討した。

この結果、筋電信号やX線マイクロビームでは得られなかった舌内部および舌後方の変化が確認された。特に後舌母音をつくる筋活動に対し、新しい舌変形のメカニズムを提案した。

[謝辞] MRIデータの収集にご協力頂きましたATR脳活動イメージングセンタと森下仁丹株式会社に感謝申し上げます。

#### [参考文献]

- Dang, J. and Honda, K. (2000). "Estimation of vocal tract shape from speech sounds via a physiological articulatory model," Proc. International Workshop of Speech Production, 233-236. (Munich, Germany).
- Baer, T., Alfonso, P. J., and Honda, K. (1988). "Electromyography of the tongue muscles during vowels in /əpv/ environment," Ann. Bull. RILP. 22. 7-19.

- Hashi, M., Westburny, J. and K. Honda. (1998). "Vowel posture normalization," *J. Acoust. Soc. Am.* **104** 2426-2437.
- Masaki, S. Tiede, M., et al. (1999). "MRI-based speech production study using a synchronized sampling method," *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*. **20**. 375-379.
- Miyawaki, K. (1973). "A study on the musculature of the human tongue," *Ann. Bull. RILP*. **8**. 23-49.
- Smith, K. and Kier W. M. (1989). "Trunks, tongues, and tentacles: moving with skeletons of muscle," *Am. Sci.*
- Takemoto, H., (2001). "Morphological analyses of the human tongue musculature for three-dimensional modeling," *J. Speech Lang. Hear. Res.* **44**. 95-107.