

音声生成の生理機構と発話障害

○本多 清志¹(ほんだ きよし)

¹ATR人間情報科学研究所

(要旨) 人間がことばを話すときに使う体の仕組みは、音を出力する段階における音響的過程、音の変化を作るための生理学的過程、そしてその変化を指令するための神経的過程に分けることができる。音響的過程の研究は歴史的には先行しているがスペクトルから声道形状を解釈できる段階にはいたっていない。生理的過程の研究は可観測性の壁のために困難な領域で、運動計測は進みつつあるが筋レベル・末梢神経レベルの研究が停滞している。神経的過程の研究は臨床例と最近の脳機能画像法により大きく飛躍し新しい問題を生み出している。それぞれの過程について、発話障害に関連する現象を取り上げて解説する。

Key words: 音声生成, 音響モデル, 生理機構, 筋電計測, fMRI,

1. はじめに

音声生成の生理的過程についての最近の研究をまとめてみた場合に、発話障害をどのようにとらえ直すことができるのか、という設問が私に課せられた宿題である。そこで、まず音声生成の最終段階にあたる声道でどのような音響現象が生じているかをこれまでの研究成果に基づき解説し、つぎに発話障害にみられる運動の破綻と生理的機構との対応を考え、最後に発話生成の責任領域を対象として行った脳機能観測の例を紹介する。

2. 音声生成の最終段階

音声生成の最終段階は、発話に関わる筋肉が発話器官の運動を生じて、声道と呼ばれる音の通り道の形を変更し、話ことばとして耳に聞こえる音をつくる過程である。この過程は、磁気共鳴画像(MRI)のような観測データにより実証することができ、最近では音から計算によって推定することも可能になりつつある。

2.1 声道の音響現象

音声の生成過程は古くから音源・フィルタモデルで説明されてきた[1]。すなわち、母音型音声の生成要因は喉頭でつくられる音源と声道における共鳴であり、共鳴周波数(フォルマント:F1~F4)は1:3:5:7の周波数比を基本として母音ごとに変動する。このモデルに基づいて低次フォルマント(F1, F2)の推移から発話運動の概要を推測することができるが、高次フォルマントには大きな意義を見出すことがなかった。著者らが行ったMRI形態計測に基づく声道音響特性の研究では、声道の下端にみられる複雑な構造が高い周波数帯域

のスペクトルをほぼ決定する。声道の下端にある下咽頭腔を除いた声道部分(主声道)の共鳴は低次のフォルマント(F1~F3)を形成するが、高次のスペクトルの特徴は下咽頭腔(喉頭腔と梨状窩)の独立した共鳴によりつくられる。図1はその様相をモデル化したものである[2]。この新しいモデルによれば、母音の性質は主声道の共鳴により決まり、声の音色は音源と下咽頭共鳴により決まり、個人性はほぼ全ての要因により形成されると考えることができる。このモデルを用いると音声から発声発話器官の状態を推定することができるので、発話障害や発声障害の評価と回復過程の記録に役にたつであろう。

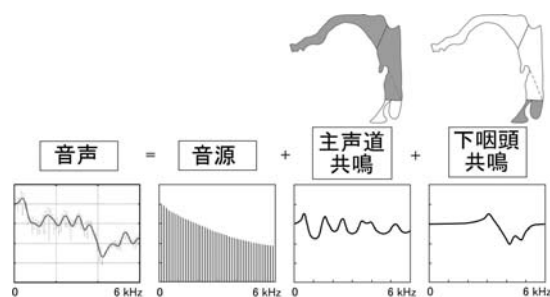


図1 下咽頭腔結合をもつ母音生成の音響モデル

2.2 声道変形の成分

四肢の運動と対比した場合の発話運動の特徴として変位がわずかであることをあげることができる。発話における舌や顎の変位は高々2cm程度であり、これで音の対比を十分につくりだすことができる。これは、声道という空間を最大限に利

用した効率のよいシステムが出来上がっていることを意味している。発話運動に伴う声道変形は統計的にみると次の主成分から構成されるといわれる。

- ・第1主成分: 声道前室と後室の交代性運動
- ・第2主成分: 声道を2分割する運動
- ・第3主成分: 舌先の運動

3. 発話運動の生理的特性

発話運動の生理的要因は驚くほどわずかしか調べられていない。たとえば、どの筋肉がどのようにして顎を動かすのかは筋の配置から推測されているにすぎない。あるいは唇を突き出すメカニズムはいまだに何も分かっていない。比較的よく調べられている運動器官は舌と喉頭であるが、それでも生理機能と病態との対応づけは難しいといわなければならない。発話障害にみられる病態として、筋活動の協調の障害、発話運動パタンの異常、プロソディー障害の随伴などがしばしば議論される。以下に、これらの背景を正常者の観測データに基づいて考察する。

3.1 母音調音における舌筋の活動

声道変形の主成分のうち、第1および第2主成分は外舌筋の活動と対応づけることができる。母音の生成に重要な役割を果たす外舌筋群はオトガイ舌筋(GG)、舌骨舌筋(HG)、茎突舌筋(SG)の3筋であるが、オトガイ舌筋は3角状筋の特性として部位により異なる収縮効果をもつので前部(GGA)と後部(GGP)に分けることができる。したがって図2(左)に示すように、外舌筋群は機能的には4筋からなり、それぞれの収縮効果が図2(右)のように互いに直交する[3]。

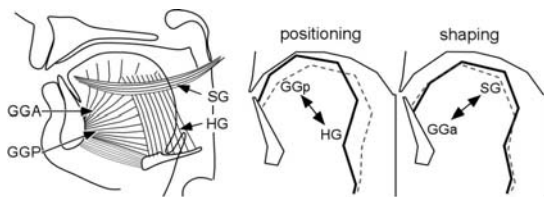


図2 主要外舌筋4筋(左)とその拮抗関係(右)

図3(左)は英語の4つの極端母音を含む無意味単語を発話したときの外舌筋の活動を記録したデータで、上述の拮抗関係がよく現れている。それぞれの母音は4つの外舌筋のうちから2つの筋を選択して用いているとみなすことができる。図3(右)は、そのような筋選択パターンを示したものである。

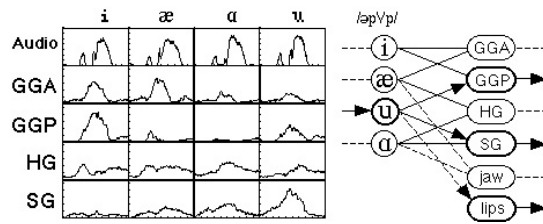


図3 英語母音を含む単語発話時の筋電図

3.2 筋活動の協調

単音節や単語などの単純な発話の実行にも複数の筋の活動が伴い、それらの筋活動の間には中枢レベルで調節が行われていると考えられる。この過程を示す実例として、英語の"eel"と"seal"を含む文章発話10回における筋電図分析の結果を図4に示す。この図は母音/i/とともに高い活動を示すオトガイ舌筋の前部(GGA)と後部(GGP)の筋電強度を示している。GGPは舌根部を前方に引くことにより、GGAは舌上面に溝を形成することによりそれぞれ母音/i/の調音に貢献する。"eel"に対し"seal"では/s/の調音を実現するために精度の高い調節が求められる。図においても"seal"で筋電信号のばらつきが小さく、/s/の狭めを実現するため精密な制御が行われている。また"seal"の発話では、これら二つの筋活動の間に負の相関があり、狭めを維持するために同時には過大な活動を生じないように調節されると考えられる。この調節が乱れると例えば/s/が/t/に置き換わる状況が生じる。つまり、発話障害にみられる音節の置換は、筋活動調節のレベルでも生じる可能性がある。一方、語頭に単語境界をもつ"eel"では、2つの筋が同時に過大に収縮したとしても母音/i/における狭めが自動的に維持されるため弾道的な調節でも問題を生じない。

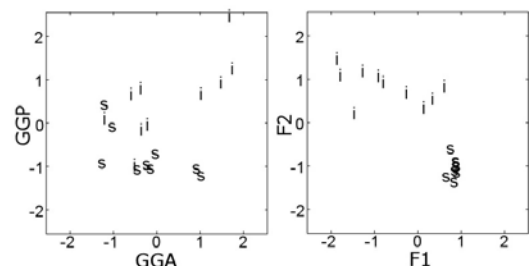


図4 オトガイ舌筋の前部と後部の協調的關係

3.3 母音調音に声の高低を伴う場合

調音に声の高さの変化を伴う場合には、調音筋にも大きな活動の変化が見られる。図5は、母音連鎖/ai/において、声の高低変化を組み合わせた際の主要舌筋(GGA, GGP, HG, SG)の活

動変化を示したものである。母音連鎖/ai/を高低のパターンで発声する場合には舌筋活動の変化が乏しいのに対し、低高のパターンで発声する場合には筋活動に大きな落差を生じる。この事実は、アクセントやイントネーションの実現には喉頭筋だけでなく調音筋の活動も変化すること、つまり自然な発話において純粋な意味での発声の制御と調音の制御はそれぞれ別個には存在せず、並列的な相互調節がなされていることを意味する。

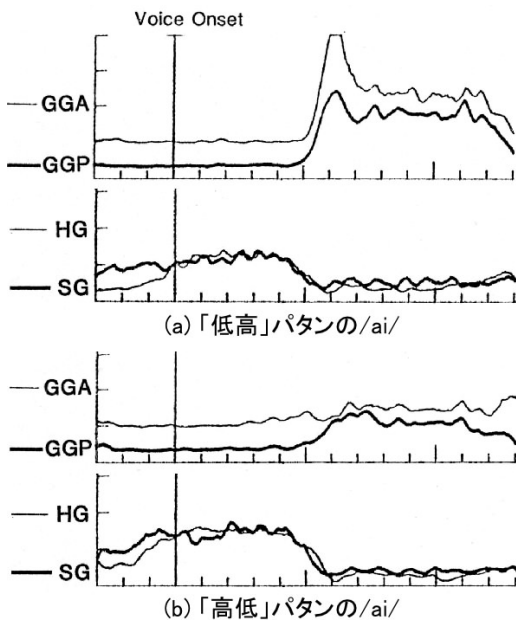


図5 母音変化と声の高低における舌筋活動

3.4 声の高低の調節

声の高低は声帯の張力と呼気圧に依存し、声帯が引き伸ばされて張力が増大すると同時に声帯の単位長あたりの質量が減少して振動数が増加する。この変化をもたらす機構として、輪状甲狀関節の運動が知られている。この関節には輪状甲狀筋という小さな筋が付着し、前部と後部がそれぞれ回転を滑走もたらして声帯長を増大させ声を高くすると考えられている(図6)。声を低くするには、これらの筋肉の弛緩、声帯筋の活動上昇、呼気圧の低下が要因とされる。

一方、声の高低という発話の要因がただ一つの喉頭筋により制御されるという見方は古くから疑問視されていた。輪状甲狀関節の運動を引き起こすその他の要因として、外喉頭筋の作用が知られている。図7はこれまでに分かっている機構を示したものである。声を高くする場合には、舌骨を前方に移動させるための筋が収縮する。お

そらく甲狀軟骨を回転あるいは支持することにより輪状甲狀関節の運動を補助するためと考えられる。声を低くするには、喉頭を引き下げる筋の作用により、喉頭を下降させ、頸椎の前湾を利用して輪状軟骨を逆回転させる。また、頸椎も前湾の程度を変化させて、声の高低調節の範囲を拡大する。図5にみられた声の高低における舌筋の変化はこのような補助的な仕組みを駆動するための活動と考えられる。

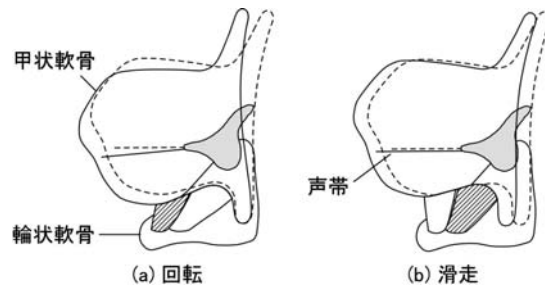


図6 輪状甲狀関節運動による声の高低の調節

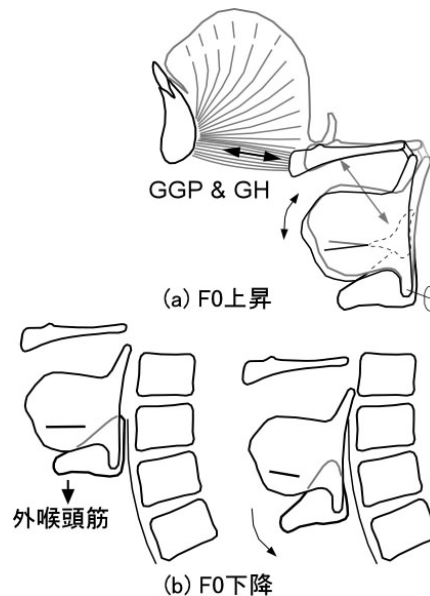


図7 外喉頭筋による声の高低の補助的調節

4. 発語失行の責任病巣

発話障害に関する最近の研究で注目されるものは Dronkers による失語症例の分析であり[5]、発語失行をもとに全症例で左島皮質前部の梗塞が認められたため、この部位が発話運動プログラムの中核と位置づけられた。その後に行われた正常者を対象にした脳イメージング研究では発話に伴う島皮質の活動は必ずしも認められず、現在でも議論が続いている。著者らは、島皮質の活動性

がタスクに依存すると考え、無意味単語を繰り返し返し発話するタスクと異なる単語をランダムに発話するタスクにおいて脳活動を比較した[6]。その結果を以下にまとめ、発話生成モデルにしたがって島皮質の機能を推測した。

4.1 fMRI による発話時脳活動の観測

右利き正常話者25名が条件S(有声発話)、I(内的言語)、R(静止)において無意味語「かたた」「たかた」「たか」を発話するfMRI実験を行った。いずれかの1語を繰り返すセッション(Rep)とランダムの発話するセッション(Ran)において脳活動を記録した。

4.2 分析結果

各被験者の画像につき、RanS - RepS, RanI - RepI, RanS - RanI, RepS - RepIのコントラストを求め、全被験者のデータについて活動部位の検定を行った。島皮質を含む断面上の活動部位を図7示す。図のように、RanS - RepS, RanI - RepI, RanS - RanIのコントラストにおいては左島皮質の前部に活動が検出され、RepS - RepIのコントラストでは島皮質に活動は検出されなかった。以上より、有声発話、内言語の条件ともに、同じ音節を反復するときには島皮質は活動せず、発話ごとに音節を変更する場合には島皮質が活動することが認められた。

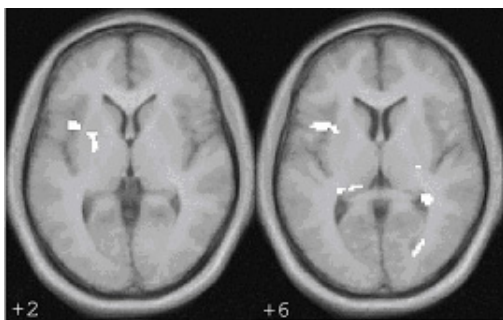


図8 RanI-RepI(左)とRanS-RepS(右)における左島皮質前部の脳活動

4.3 発話生成モデルとの対応

Levelt [7]によると図8のように音韻符号化以降の調音運動は①音声符号化とバッファリング②音声プランの調音バッファからの読み出し③音声プランの解釈④運動指令の実行という段階を経て発話の実現される。本実験における繰り返しセッションのように、同じ音韻連鎖を何度も繰り返して発話する場合は、最初の発話時にのみ音声符号化が行われるが、ランダムセッションのように、毎回音韻連鎖が変化する発話を実行する場合には、

この符号化が発話ごとに行われると考えられる。したがって、左島皮質前部は、調音運動の実現において、音声符号化と調音バッファからの読み出し・解釈に関与していると考えられた。

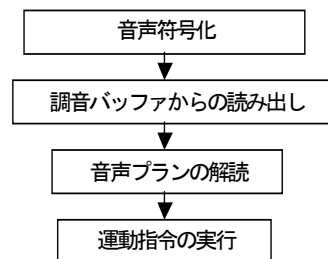


図9 発話生成の階層モデル(Levelt,1989)

5. おわりに

発話の脳機能において、左半球が調音を、右半球が韻律を司るという考え方は、最近の発話失行に関する議論にもみられる。そのような大脳皮質の側性化が事実として、末梢で観測される調音制御と喉頭における韻律制御との混合現象はどのように考えればよいのだろうか？大脳皮質から末梢運動神経細胞に至る経路の観測は技術的にはきわめて困難であり、将来においてこの経路を観測できる技術がつけられ、発話過程と障害機序の理解に貢献することを期待している。

<文献>

- [1] Fant, G. (1960) *Acoustic Theory of Speech Production*. The Hague: Mouton.
- [2] Honda, K., et al. (2004) Exploring human speech production mechanisms by MRI. *IEICE Info. & Syst.*, E87-D, 1050-1058.
- [3] Maeda, S. & Honda, K. (1994) From EMG to formant patterns of vowels: the implication of vowel spaces. *Phonetica*, 51, 17-19.
- [4] Honda, K. (1995) Laryngeal and extra-laryngeal mechanisms of F0 control. In F. Bell-Berti & L.J. Raphael (eds.), *Producing Speech: Contemporary Issues* (pp.215-232), New York: AIP Press.
- [5] Dronkers, N. F. (1996) A new brain region for coordinating speech articulation. *Nature*, 384, 159-161.
- [6] 能田, 本多. (2004) fMRIによる発話中枢機構の観測. *音声研究*, 8, 28-34.
- [7] Levelt, W. J. M. (1989) *Speaking: From Intention to Articulation*, Cambridge: MIT Press.

<謝辞>

本研究の一部は情報通信研究機構の研究委託「人間情報コミュニケーションの研究開発」および総務省SCOPE-S「発声障害者の音声コミュニケーション手段の研究開発」により実施したものである。