

TR - A - 0171

外舌筋収縮力空間における調音軌道の作成

草川 直樹 本多 清志 垣田 有紀

1993. 3.23

ATR 視聴覚機構研究所

〒 619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2 ☎ 07749-5-1411

ATR Auditory and Visual Perception Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1411

Facsimile: +81-7749-5-1408

外舌筋収縮力空間における調音軌道の作成

草川 直樹

(金沢工業大学、ATR視聴覚機構研究所)

本多 清志

(ATR視聴覚機構研究所)

垣田 有紀

(金沢工業大学)

概要：

舌運動において主要な役割を果たす4つの外舌筋は、2組の拮抗筋に分けられることが知られている。この性質に基づいて外舌筋の収縮力空間を定義し、外舌筋の協調運動を母音調音時の筋電信号を用いて調音軌道として調べた。その結果調音軌道の長さは基本母音と弛緩・短母音の違いである調音の持続時間の長短と非常に良く一致し、軌道の移動する方向や形状も舌の口腔内での位置や移動を良く表した。さらに、中枢での運動目標が調音器官の物理的な運動として実現されるとする仮定に基づいて、調音軌道を中枢での運動目標とみなして検討した。その結果、母音の分布が聴覚空間、運動目標空間、運動座標、音響空間の全てにおいて共通のあるいは相似のパターンとして見なすことができ、運動制御系にとって非常に合理的、かつ、都合がよい状況を実現できる可能性を得た。

1. はじめに

母音調音の生理学的過程について外舌筋間にみられる収縮力の拮抗関係の観点から分析を行ない、発話動作の生成について考察した結果を報告する。

発話時の調音筋に与えられる運動指令は、フィードフォワード制御によって協調運動を自律制御するプログラム化されたサブシステムから最適な強さとタイミングで出力され、これに従って収縮する調音筋の活動により音声が生産される。このとき各調音器官は協調して調音運動を実現しており、その中心的役割を果たす舌を例にとると、運動指令に従って母音の調音点や口蓋との接触などの様々な変形をして最適な声道形状を作成し、また、破裂音生成時における口腔内圧の上昇に対抗して舌を支持し声道形状の保持をするなど、調音動作に欠かせない幾つかの重要な役割を重複して演じている。それゆえ、舌筋などの個々の調音筋の役割を筋電信号などから解析的に調べることは、その重複した役割のために困難である反面、運動中枢が意図した運動を再現でき、音声生成機構の解明に大きく役立つ。従来、その解析方法としては採取した筋電信号の電位やその変化等を個別に比較したものが多かったが、複数の調音筋による協調運動が舌全体に与える変化を解析するのが難しく、同時に多くの調音筋より筋電信号を採取することが困難であるのも手伝って、調音筋の協調と拮抗の関係に基づいて筋電信号と調音器官の運動との関係を調べた研究は多くない。

我々は母音発話時の調音筋の制御規則を明らかにすることを目標に研究を行なっている。本論文では、筋電信号を用いた協調運動の解析により、中枢の意図した舌の運動と各調音筋の活動との関係の解析を目的として行なった研究について述べる。

研究データは、米国ハスキンス研究所で記録された主要な調音筋の筋電信号の一部であり、母音調音の分析を行なうため /əpVp/ 単語発話時のデータを用いた。個々の筋電信号の観察では、複数の筋の収縮で生成される合成力やその時間変化が舌をどのように変形しているかが分かりにくいいため、4つの主要外舌筋に仮想的な運動軸を与えて外舌筋収縮力空間を定義し、筋電信号の時間変化からこの収縮力空間上での4つの外舌筋の協調関係を示して、調音時の舌の運動を調音軌道として観察した。

2. 語音生成時の運動制御機構の特徴

一般に、筋組織の中には、筋の長さを検知する筋紡錘と呼ばれる受容器があり、筋と脊髄あるいは脳幹の間に局所的なフィードバックループを形成して、筋の収縮を調整し、中枢の介在無しで筋の長さの自動調節が行われている。さらに、筋と骨との接合部である腱には、筋の張力を検知する腱受容器があり、筋の収縮により発生した張力の信号を脊髄や脳幹に送って防御反射が行われている。このような末梢のフィードバック機構は乏しいながらも一応発話器官には備わっている。しかし、語音生成のようなプログラムに基づく学習運動では、これらの受容器から送られるフィードバック信号もあらかじめ予測できるため、正常の動作が行われる限り末梢からの感覚情報によって運動が逐次修正されているとは考えにくい。

従って、語音生成時の運動制御機構は、要求される運動の速さと正確さ、滑らかさなどから、学習に基づいたフィードフォワード制御に従うと考えられ、協調運動を自律制御するプログラムを包含するサブシステムが想定される。このサブシステムには発話動作の目標が入力され、調音筋への運動指令が出力されていると推測する。学習された運動では、過去の学習・経験に基づいてエネルギーを最小化する制御を行うと考えられる

ので、拮抗する筋を同時に収縮させて不必要なエネルギーを消費するような無駄な運動は避けていると推定される。

3. 使用した筋電信号データについて

本研究で使用した筋電信号データは、アメリカのハスキンス研究所において採集されたものである¹⁾。被験者はアメリカ人男性1名であり、米語の11母音を含む無意味単語/əpVp/ (Vは母音/i i e ε æ α ɔ ʊ u ʌ/) を、1単語につき10回反復発話したときの8つの調音筋から採取された筋電信号である。筋電信号とともに音声と顎の動きが同時に記録された。全ての筋電信号は金属線電極によって導出され、データレコーダに記録した。実際には、上述の11単語の刺激音テープを前もって作成し、実験中被験者はテープの再生音に従い発話する方法をとった。データレコーダに記録された信号は全波整流後、5ms毎に積分され、200Hzのサンプリング周波数でA/D変換され、計算機に取り込まれた。解析のための処理は、はじめに各々の母音について測定項目毎に10回の反復発話のデータを母音開始時刻を基準点としてアンサンブル平均し、さらに35msの移動平均を施した。

Fig.1に本研究で使用した4つの外舌筋（オトガイ舌筋前部：（略記、以下同じ）GGa、オトガイ舌筋後部：GGp、舌骨舌筋：HG、茎突舌筋：SG）と口唇の活動を示す筋（口輪筋上部：OOS）の位置と形状を示し、Fig.2に本研究で使用した筋電信号波形を示す。

外舌筋は舌の外から起こり舌に着く筋の総称である。4つの外舌筋（GGa、GGp、HG、SG）は、舌を上下前後に動かす役割をもっていることが解剖学的に知られており、母音の調音点の生成に重要な役割を持っていると考えられる。

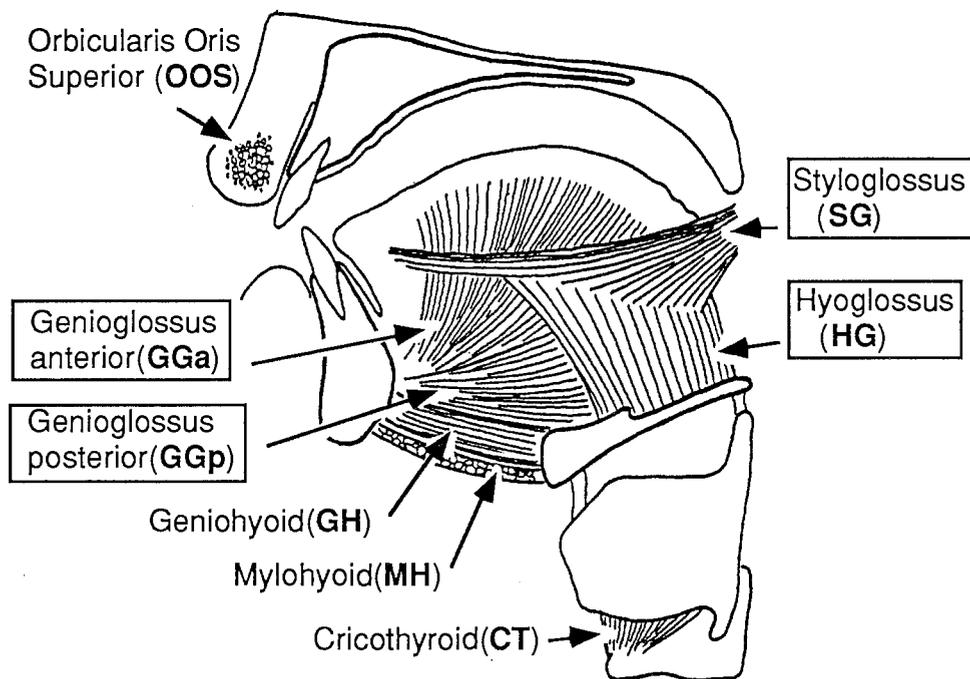


Fig.1 Muscles used for the experiment .

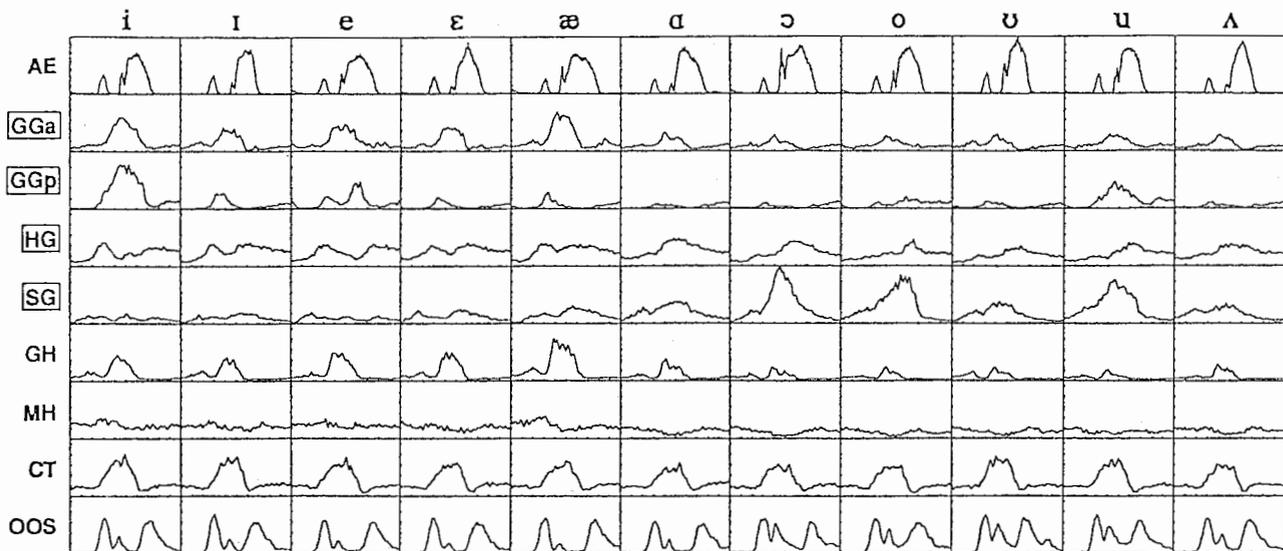


Fig.2 Tongue EMG data of English 11 vowels in /əpVp/ utterance .

以下に4つの外舌筋の解剖学的特徴とそれから推定される収縮時の作用を示す。

GGaは、舌正中部を後上方に向かって広がり、舌の先を除く舌上面に分布する。単独に収縮すれば筋の走行方向に従い舌背を前下方に引き、舌を左右に広げ、さらに正中線に添って溝を形成する。他の部分、つまり、口腔底や舌根部を圧排するように作用すると考えられる。

GGpは、舌根部に向かって左右に広がりながら走行し、一部は舌骨に付着し、また咽頭方向へ向かう線維もある。単独収縮により舌の前後方向が収縮し舌上面を押し上げる一方、口腔底に対して押し下げる力が働く。また間接的に舌骨を前方に引く。

HGは、舌骨より始まり前上方に向かいSGの内側部に終わる。起始（筋の始まる所）、停止（筋の終る所）共に可動性であるため、力の作用方向は舌の位置によって変化するが、ほぼGGaと拮抗し、舌を後下方に引き、舌骨を上方に引くと考えられる。

SGは、舌外側部を前下方に走行し、舌の先に至る。途中下方向に向かいHGに線維を分岐する。作用はほぼGGpに拮抗し、舌全体を後上方に引く。HGを介して間接的に舌骨に対して後上方への力を加えると推定される。

また、OOSは口唇周囲を取り囲む様に走行する口輪筋のうち口唇の上部に位置するものであり、口唇の縮小、収縮、突出を行なう筋である。本研究では、OOSの筋電信号の2つの大きいピークが子音/p/の発話に対応するため、2つの子音/p/の間にある母音の発話区間を特定する目的で使用した。

4. 外舌筋収縮力空間における調音軌道の作成方法

外舌筋の解剖学的配置から推定される機能的特徴は、すでに[文献1]によって調べられている。これらは、Fig.2に示した外舌筋の筋電信号のうち、4つの基本母音発話時のデータからも確認できる。すなわち、GGaは前舌母音/i/、/æ/で活動が大きく、GGpは狭母音/i/、/u/で活動が大きい。HGは狭母音/i/、/u/に比べると広母音/æ/、/a/で活動が大きく、SGは後舌母音/a/、/u/で活動が大きい。つまりGGaとSGは舌をそれぞれ前と後に移動するときに、GGpとHGは舌を上と下に動かすときにそれぞれ活動している。

上述のように、4つの外舌筋が母音生成時の舌運動において主要な役割を果たし、かつ、解剖学的知見と筋電信号の観察結果から2組の拮抗筋に分けられると考えられるため、この4つの筋の筋電信号を用いて外舌筋収縮力空間を定義し、外舌筋の拮抗と協働の関係を調音軌道として調べた。

外舌筋収縮力空間における調音軌道の作成方法を Fig.3 に示す。まず、4つの外舌筋から採集された筋電信号について、11母音を通して最も振幅の大きい値を基準に正規化した。次に、これらの4つの外舌筋の特徴に従って、GGaとSG、GGpとHGをそれぞれ拮抗する筋の対と考え、各対をそれぞれ横軸、縦軸に割り当てた。上方向にはGGpを、下方向にはHGを、左方向にはGGaを、右方向にはSGを、それぞれ正規化された各筋の筋電信号の振幅の値でプロットし、各点を結んだ四角形の重心の時間変化を調音軌道として描いた。軌道をなめらかに描くために、11点、55msの移動平均を軌道データに施した。なお、調音軌道と各軸は、解剖学的に知られている4外舌筋の走行方向に近付ける目的で、反時計回りに30°回転させてある。

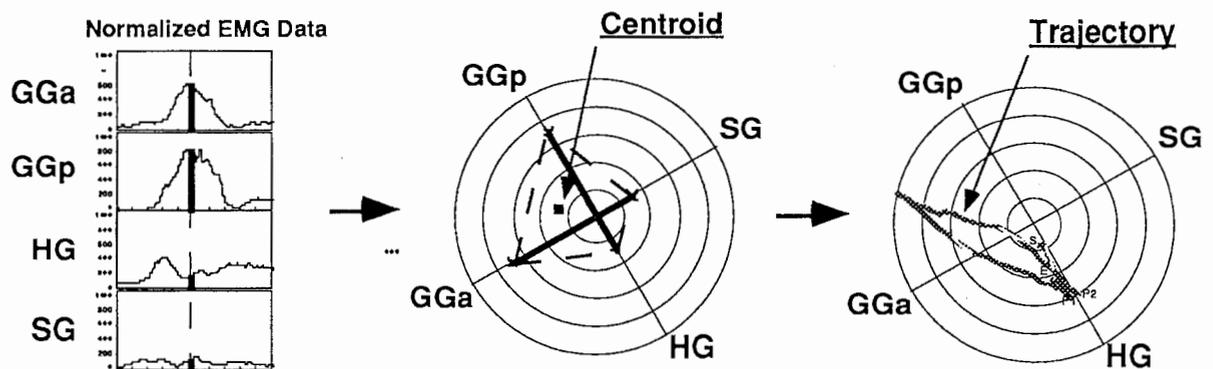


Fig.3 Method for drawing articulatory trajectory of combined muscle tension .

5. 調音軌道の作成結果

作成した調音軌道を、基本母音、二重母音、その他の母音の3つに分けて、Fig.4(a)、(b)、(c)に示す。図中の文字SとEは発話の起始点と終了点を、また、p1、p2はそれぞれ第一、第二子音/p/発話時のOOSの筋電信号のピーク時刻を示している。以下の説明では、全発話区間をS点、p1点、p2点、E点の4点で区切り、各点の間を第1区間、第2区間、第3区間と呼ぶ。

基本母音の調音軌道の作成結果

まず4つの基本母音/i/、/æ/、/a/、/u/発話時の調音軌道を比較する。被験語に含まれる子音は口唇音なので、舌調音は子音の影響をこうむらず、基本的には母音から母音への滑らかな動作の生成を行なうと推定される。しかし、遊離単語発話であるためかもしれないが、これらの軌道に共通して子音/p/の生成に際して舌筋に相当の関与が認められる。

第1区間では、語頭母音の開始点Eと第1子音点p1はどの単語においても座標中心より後下方の領域に集中する。前舌母音では右下方に長い調音軌道が、後舌母音では右下方に前舌母音より浅い角度で短い軌道が描かれた。軌道の違いは前舌母音でのHGの強い活動と後舌母音でのHGとSGの弱い活動に起因しており、母音/ə/と第1子音/p/の前半の調音に対応する同一の語音を生成している区間と考えられるにもかかわらず、後続

する母音の違いによって外舌筋に与えられる運動指令が異なる可能性を示唆している。つまり、調音結合の生成は運動指令の段階においてもある程度は指定されていることを示している。

第2区間では各母音の調音軌道でさらに大きな差異が認められる。前舌母音/i/と/æ/では左上方と左下方に向けて長く直線的な軌道ができ、ある点で鋭角的に折れ曲がっているため、GGa、GGp、HGに対して同時刻に強い運動指令が少数与えられており、調音点に対応するような母音調音のための目標点の存在を想定できる。これに対し、後舌母音/a/と/u/では途中何箇所かの比較的鈍い角度の折れ曲がりがあり、直線部分も前舌母音に比べると短いため、複雑なタイミングで構成された、複数の運動指令が4つの外舌筋に与えられていることがわかる。

第3区間での調音軌道は、繰り返し発話の発話時間長の違いに起因するアンサンブル平均による時間情報の劣化を考慮すると断定は難しいが、/i/、/a/、/u/の3つの軌道が直線的ではほぼ平行して走っていることに共通点を見だせるのに対し、/æ/発話時の軌道は途中大きく折れ曲がり、かつ、長い点に違いを見いだせるかも知れない。

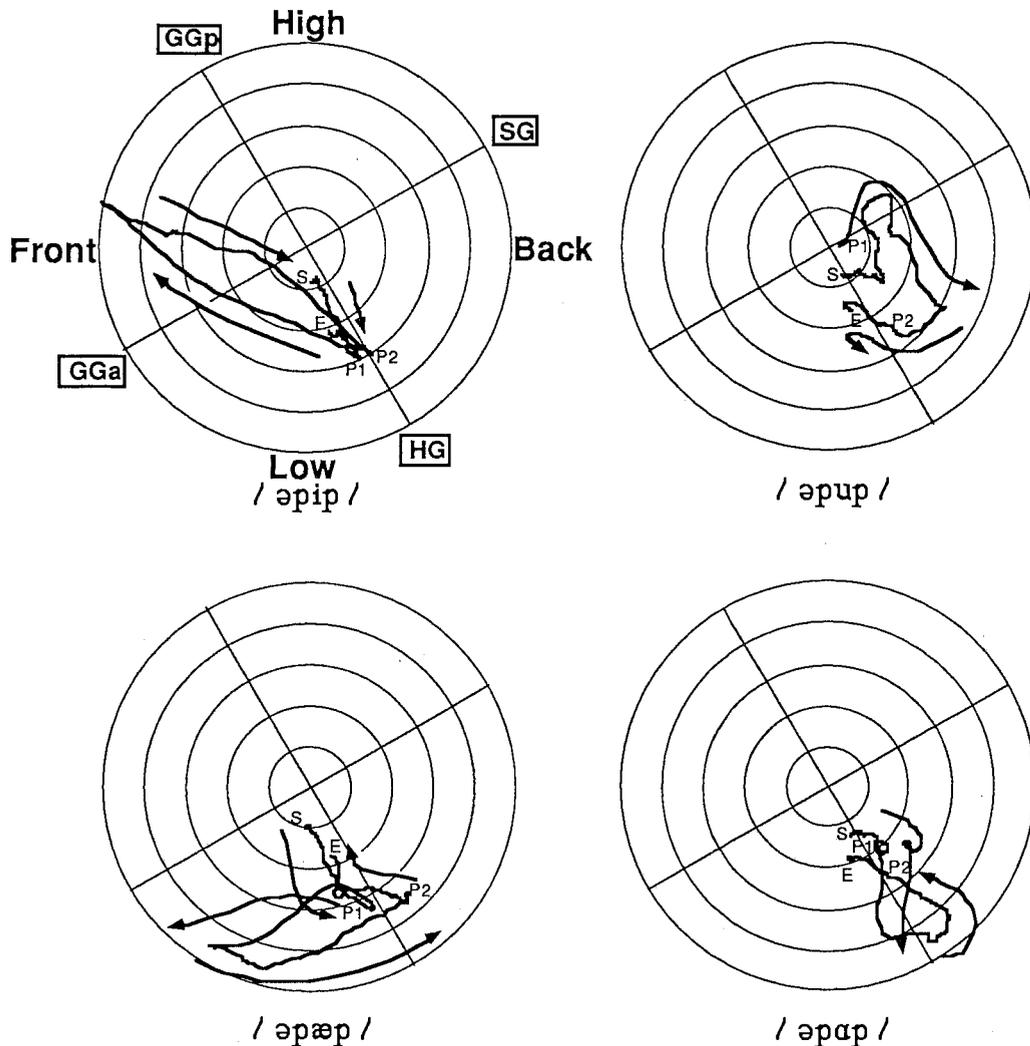


Fig.4(a) Articulatory trajectories for four cardinal vowels.

二重母音の調音軌道の作成結果

二重母音/eɪ、/oɪ/の調音軌道は2つの目標点をもつことが特徴である。

第1区間で母音/e/の軌道はGGaの活動の変化によって曲がりながら右下に向かって長い軌道を描くのに対し、母音/o/はほぼ水平に短くのびておりp1点近傍で細かく曲がっている。これらの特徴は先に述べた基本母音の前舌・後舌の違いに似ている。

第2区間では、両母音とも軌道が途中数箇所の曲がりを持つため、母音/e/で左方に、母音/o/で右方にそれぞれ開く扇型の軌道を得た。特に母音/e/では、明確な2つの曲がりを持つ軌道を描いたことから、二重母音を生成する目的で2箇所の目標点を持っていることがうかがい知れる。これから推定すると、母音/o/の軌道も途中2箇所の目標点があると見ることもでき、二重母音の調音軌道の特徴と考えられそうである。

第3区間では、両母音とも曲がりくねった短い軌道を描いた。母音/o/の軌道は基本後舌母音のそれに比較的近い性質を持つように見える。

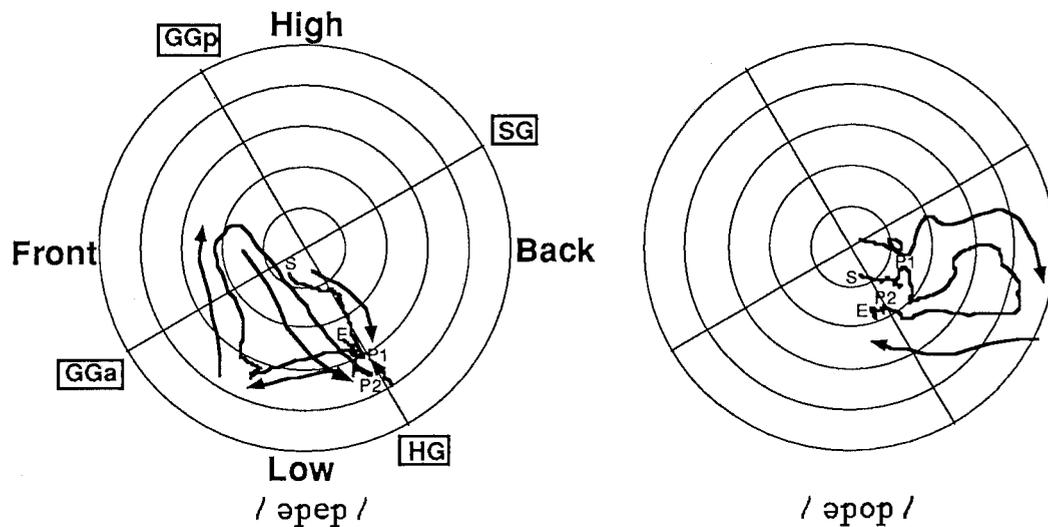


Fig.4(b) Articulatory trajectories for diphthongized vowels.

弛緩母音と短母音の調音軌道の作成結果

弛緩母音/i/、/ɪ/と短母音/ε/、/ɔ/、/ʌ/の調音軌道は他の母音と比べると軌道の長さが短い傾向がみられる。

第1区間は、前舌母音/i/、/ε/で、右下方に比較的長くのびており、母音/ε/で細かく曲がっている以外は他の前舌母音と類似の軌道を描いていることから、基本前舌母音等とはほぼ相同的運動指令が与えられていると考えられる。一方、母音/ɪ/、/ɔ/、/ʌ/では、複雑な軌道を描き、特に/ɪ/では他の母音では見られなかった様な三角形の軌道を描き一部の軌道はほぼ同じ場所を2度通っている等、複雑な神経指令が与えられたことも考えられる。

第2区間を見ると、前舌母音/i/、/ε/では、/i/、/æ/の軌道を縮小した様な形の軌道が描かれ、鋭角の曲がりと比較的長い直線部を持っており、さらに鋭角の曲がりの位置も/i/と/æ/の鋭角の曲がりの位置の間をほぼ3等分する所にあることから、性質的に基本母音/i/、/æ/の間の性質を持ち、基本母音のパターンと相似する弱い運動指令が与えられていることが観察される。また、母音/ʌ/の軌道も、後舌基本母音/ɑ/の軌道をそのまま縮小したものと考えられるので、/ɑ/発話時に与える運動指令と調音筋間のタイミングは同じで、振幅を小さくしたものが与えられていると推定される。これに対して/ɪ/

の軌道は後舌母音の中では唯一明確な目標点の存在を推定させる鋭角の曲がりを持っているが、同様の鋭角の曲がりを持つ前舌短母音と比べると軌道の長さは短い等、他の後舌母音と共通の特徴も見られる。そして、母音/ɔ/では、前舌二重母音/e/の軌道をそのまま右に線対称に写したような軌道が描かれている。これから、短母音/ɔ/では二重母音に相当する運動指令が与えられ、2箇所の目標点があると推定する。

第3区間では、中舌母音/ʌ/と後舌母音/ɔ/, /ɒ/の軌道が比較的良く一致し、これらをさらに細かく分けると、基本母音/u/の軌道の長さや位置がほぼ一致する/ɔ/, /ɒ/の組と、点E付近を除いて基本母音/ɑ/の軌道とほぼ同じ位置を通る/ʌ/に分けられる。また、前舌母音/i/, /ε/の軌道は細かい曲がりを除いては点p2、点Eともほぼ一致していると思われようである。これらのことから、弛緩母音や短母音では第3区間の運動信号として調音点の近い基本母音発話時などの運動指令と同じものが与えられている可能性がある。

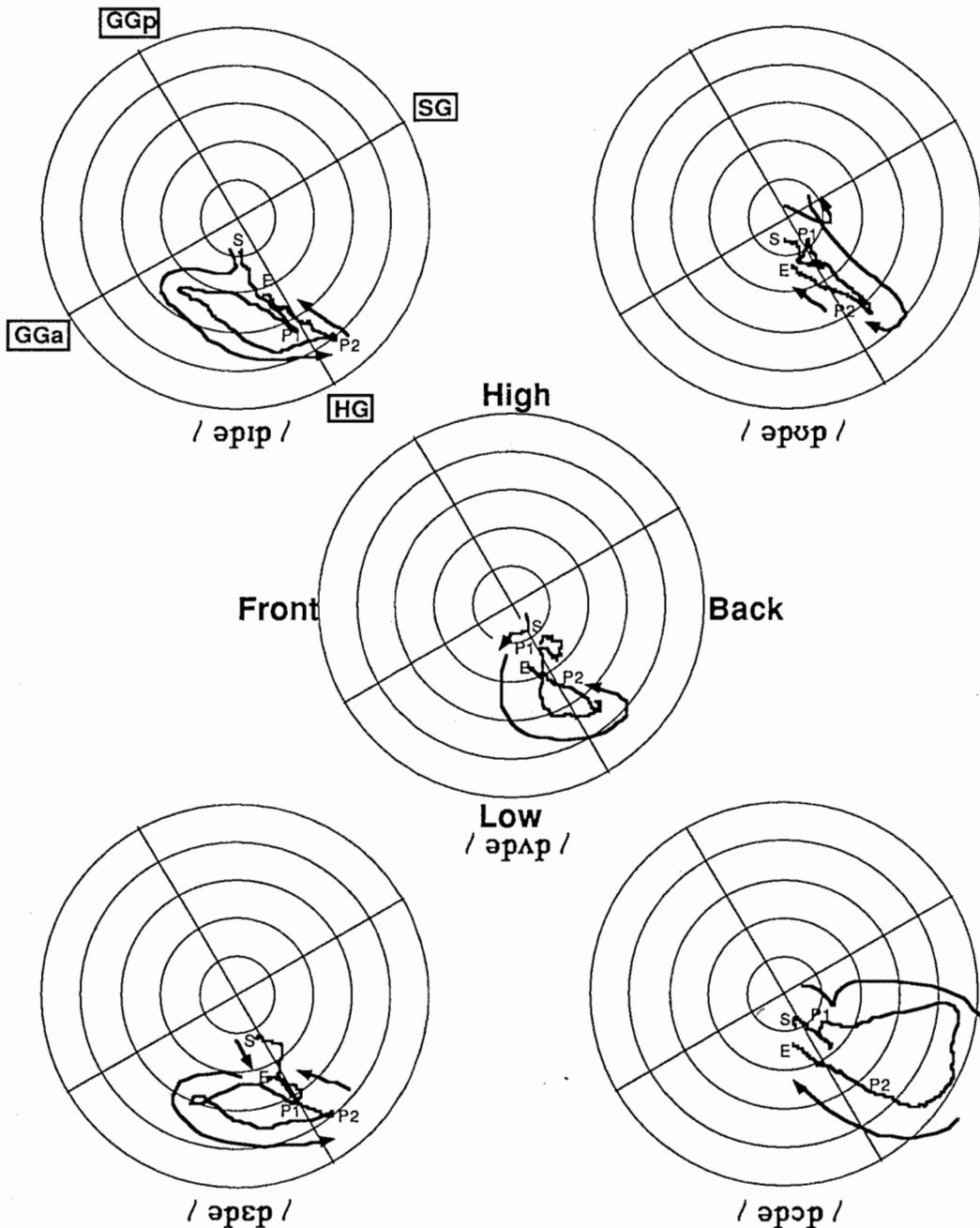


Fig.4(c) Articulatory trajectories for lax and short vowels.

全ての母音を通してみると、ここまで述べてきたように基本母音発話時の軌道は4方向に向かって大きくのびており、その軌道の間には短母音や弛緩母音がその母音の特徴の似た基本母音の近くで短い軌道を描いている。軌道の方向を時計回りの順に並べると10時の方向から/i/、/ɪ/、/ɛ/、/æ/、/ʌ/、/ɑ/、/ɒ/、/u/の順に1時の方向まで並べることができる。また、二重母音/e/、/o/、及び、実質的に二重母音として発話されていると考えられる短母音/ɔ/では軌道は扇型をしており、発話の目標点が2つ程度あると推定される。各軌道の移動の大きさを見ると、二重母音化していると考えられるものを除くと後舌母音で短く、前舌母音で長い傾向がある。

6. 考察

4つの基本母音の軌道を重ねてみるとFig.5のようになり、横に描いた母音の調音図と比較すると、調音軌道全体が外舌筋張力空間の下方に集まっていることを除いては、軌道上の遠位点での曲がり（あるいは目標点）の分布が調音点の分布と非常に良く一致するのが分かる。これは、二重母音を除く他の母音発話時の調音軌道と母音の調音図との比較でも同様である。また、単母音生成時の軌道が1箇所の目標点を持つのに対し、二重母音の軌道では2つの目標点を持ち、特に前舌二重母音では、まず母音/ɛ/と同様の軌道を描いた後、母音/i/の軌道の方向に調音軌道が向かっている。これらの結果から、各母音発話時に見られる調音軌道の目標点は母音の調音点に対応すると考える。

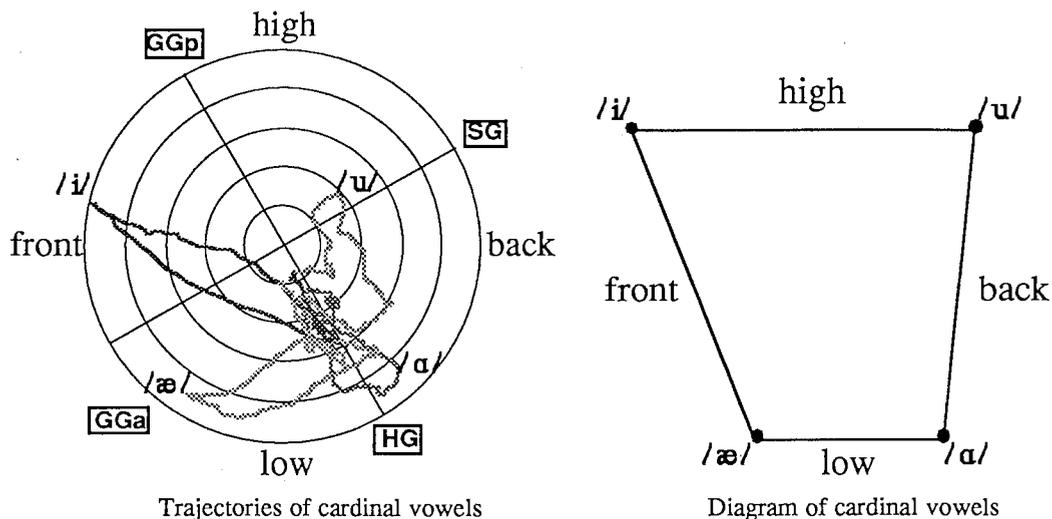


Fig.5 Trajectories and vowel diagram for the four cardinal vowels .

AlfonsoとBearの研究²⁾では、本研究と同じ単語発話を用いてX線映画により舌背上のペレットの動きを観察している。ペレットの動きの垂直成分は第1子音の開始点から始まるのに対し、水平成分は垂直成分より早く単語発話開始時点からすでに始まり、この傾向は前舌母音で顕著である。本研究の調音軌道においては、子音の影響が大きく見られる点異なるが、前舌母音では「調音点」に向かうほぼ直線的な軌道が描かれ、調音軌道と舌運動との非直線的な関係が示唆される。

また、RaphaelとBell-BertiによるとTense、Laxの母音発話時の筋電信号の比較では母音の強弱と筋電信号の強弱の間には関係は必ずしも見いだせなかった³⁾としているが、本研究においては中性母音/a/発話時の調音軌道通過点と各母音発話時の軌道通過点の間の距離が発話している母音のテンス、ラックスとほぼ一致した。これはRaphaelとBell-Berti

では個々の筋電信号を比較したのに対し、本研究では外舌筋張力空間を定義し筋電信号を用いて調音軌道を描いた違いによると考える。

本研究で得られた調音軌道は、軌道の方向と長さが各母音の調音動作の特徴を非常によく表しており、軌道上の目標点は母音の調音点にはほぼ対応している。しかし、これらの調音軌道と実際の調音運動との単純ではなく、例えば、母音/i/では舌を前上方へ押し上げる力は口蓋との接触によってさえぎられて舌の動作は停止する。今後、このような拘束要因を含めて、調音軌道と舌運動との対応づけを行なう必要がある。

7. 中枢における調音運動の動作目標の推定

これまで述べてきた調音軌道を、中枢において生成される信号に対応させると、次に示すように幾つかのことが合理的に説明できる。

学習運動に関する神経生理学や言語活動に関する神経心理学の知見をもとに、調音運動の生成機構を推定するとFig.6のような模式図で表わすことができる。まず、発話の企図は言語学的処理により語音の聴覚像に変換され、更に運動の軌道として組み立てられて調音運動の動作目標が出力される。この運動の目標は、各調音筋の拮抗関係等を考慮して各調音筋への運動指令に変換される。運動指令は調音器官に送られて調音運動として実現され、その結果語音が生成される。それぞれの過程で生成される信号の変化に注目すると、発話の企図→語音の聴覚像→発話動作目標→運動指令→運動→音声の順で変換されている。この信号のうち「語音の聴覚像」と「発話動作目標」の2つの内部表現は、それぞれ「語音」と「運動」として実現されており、それぞれ強い対応関係があると考えられる。この関係に基づいて、我々は舌「運動」の推定に用いた調音軌道を、中枢における舌の「発話動作目標」を代表するパラメータと考えている。

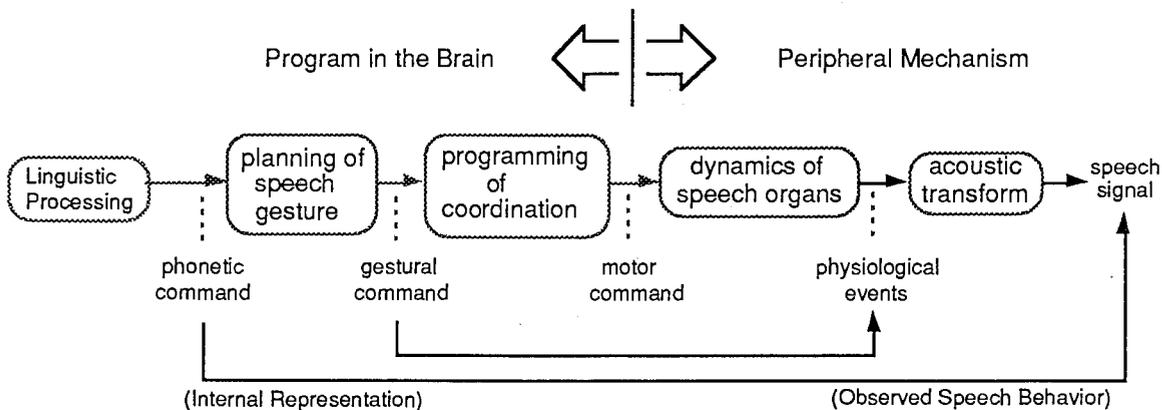


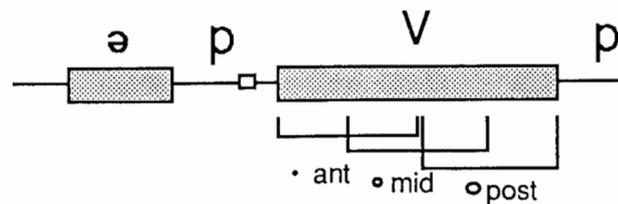
Fig.6 A functional model of the speech production system showing component subsystems and the signals flowing among them .

また、AlfonsoとBearは先に述べた研究²⁾で舌背の調音位置とホルマント周波数 (F1-F2平面) での母音の位置とがよく対応することも示している。本研究の調音軌道においても同様であり、調音軌道上において各母音はホルマント周波数よりよく分離している。これは、本研究で使用した筋電信号と同時に採取した音響データを使用して解析した本多のフォルマント周波数による解析結果⁴⁾ (Fig.7: 次頁) との比較においても、同様である。

これらのフォルマント周波数上の分布は下顎の影響を含むものであり、調音軌道は下

顎の運動を含んでいないにも関わらず、母音の分布傾向は等しく、各母音の分離は調音軌道の方がむしろよい。この傾向は、広口母音においてより顕著である。この結果から調音軌道はホルマント周波数 (F1-F2平面) での母音の位置ともよく対応しているといえる。更に、先に示したような「語音の聴覚像」と「語音」の対応関係が存在すれば、調音軌道は中枢における「語音の聴覚像」とも対応関係にあることが導き出される。

このように、調音軌道を調音運動の動作目標と見なすことや、あるいは、調音軌道をホルマント周波数 (F1-F2) 平面での母音の位置や「語音の聴覚像」との比較により、母音の分布が聴覚空間、調音目標空間、運動座標、音響空間 (F1-F2平面) の全てにおいて共通のあるいは相似のパターンであることが推定された。これは運動制御系の行なうパターン生成にとっては非常に都合のよい状況であり、また、語音の生成機構をモデル化するうえでもその過程を比較的単純なマッピングで表すことが可能となる。人間の脳が発達に伴って咽頭腔が拡大して声道が湾曲した結果、舌筋が外舌筋収縮力空間で定義したような拮抗筋対を形成する形態変化が生じたわけであり、その結果、聴覚空間と運動座標において各母音が偶然に相似の分布をもつようになったと仮定すると、人間における母音形成の起源に関するひとつの生物学的解釈と考えることも不可能ではない。



F1-F2 Diagram of Four Vowels
in ant., mid, & post. locations

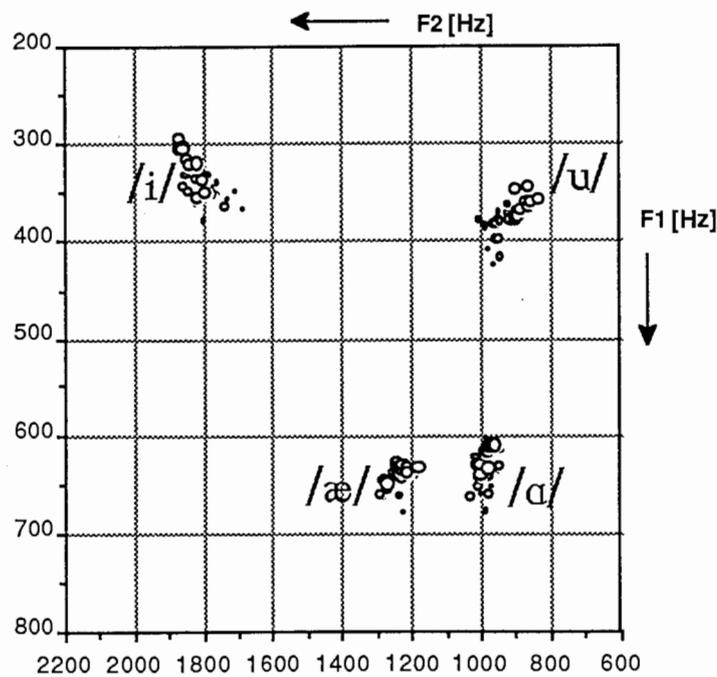


Fig.7 Formants pattern for four cardinal vowels. ⁴⁾

8. まとめ

母音調音時の舌の運動の様子を調べる目的から、外舌筋の特徴に基づいて外舌筋収縮力空間を定義し、舌筋から採取した筋電信号を用いて舌運動に対応する調音軌道を作成

した。その結果、調音軌道は母音の強弱、単母音と二重母音、あるいは、母音の調音点の違いなど、発話した母音調音時の舌運動の特徴をよく表現できることを確かめた。

また、この調音軌道を中枢において生成される調音のための制御信号と比較した結果、母音の分布が聴覚空間、調音目標空間、運動座標、音響空間（F1-F2平面）の全てにおいて共通のあるいは相似のパターンであることが推定された。

参考・引用文献

- 1) Baer, T., Alfonso, P.J. and Honda, K. : " Electromyography of the tongue muscles during vowels in /əpvɪp/ environment. ", Ann. Bull. RILP, Univ. Tokyo, 7, pp.7-18. (1988)
- 2) Alfonso, P.J., and Baer, T. : " Dynamics of vowel articulation . " , Language and speech , Vol. 32, pp.151-173 . (1982)
- 3) Raphael, L.J., and Bell-Berti, F. : " Tongue musculature and the feature of tension in English vowels . " , Phonetica, 32, pp.61-73 . (1975)
- 4) Honda, K. : " A statistical analysis of tongue muscle EMG and vowel formant frequencies." J. Acoust. Soc. Am., Vol. 90, No.4, Pt.2, 5SP1, pp.2310. (October 1991)