

特集 発声発語器官の最新の知見

舌変形が生み出す音声の共通性と個人性

総説▶

竹本浩典

Hironori Takemoto

要旨 舌は内部に骨格をもたないほぼ筋肉のみからなる器官であり、筋静水圧系の一つである。ある筋が活動すると、その筋線維の長軸方向には短縮するが、体積は一定であるため、その横断方向には膨張する。舌はこの原理で変形する。舌変形によって口腔と咽頭の容積比が変化すると、低次のフォルマント周波数は規則的に変動し、音声の共通性である音韻の違いを生み出す。一方、舌根より下の喉頭腔や梨状窩の形状は個人差が大きい³⁾が、舌変形の影響が小さいため、中心周波数が安定した1つのフォルマントと2つの大きなディップを生成し、音声の個人性の要因となる高い周波数領域の音声スペクトルを特徴づける。

キーワード▶ 舌筋、筋静水圧系、音声生成、母音、個人性

I. はじめに

音声には共通性と個人性に関する情報が含まれている。母音を例にとると、共通性に関する情報は母音の弁別に用いられ、個人性に関する情報は話者の特定に用いられる。このような共通性と個人性は、声帯振動と声道の音響特性の両方に含まれているが、本稿では声道の音響特性に焦点を当てる。

声道の音響特性に由来する音声の共通性は、比較的低い周波数領域に含まれている。これは、低次フォルマントが母音を特徴づけているからである。一方、音声の個人性は、約2.5 kHz以上の周波数領域に含まれていることが知られている¹⁾。それぞれの周波数領域は重複しており、相互作用もあって厳密には不可分であるが、声道形状とその音響特性の詳細な分析に基づいて、音声の共通性と個人性を分離したモデルが提案されている²⁾。本稿では、このモデルについて、その基盤となった声道形状とその音響特性の分析の概略を含めて解説する。まず、声道形状を変形させる最大の要因である舌の筋系と変形メカニズムについて概説し、発話中の声道形状の可視化とその運動の分析結果を示す。次に、舌変形による声道形状の変化と低次フォルマントの変動パターンについて取り上げて、音声の共通性について解説する。そして、発話中の変形が比較的小さく、音声スペクトルに定常的な影響を与える喉頭腔や梨状窩の音響的な性質について概説し、これらを踏まえて音声の個人性と共通性について論じる。

II. 舌の筋系と変形メカニズム

舌筋は、舌の外部に起始して内部に停止する4つの外舌筋と、舌の内部に起始して停止する4つの内舌筋に大別される。外舌筋は、オトガイ舌筋 (genioglossus muscle : GG)、舌骨舌筋 (hyoglossus muscle : HG)、茎突舌筋 (styloglossus muscle : SG)、口蓋舌筋 (palatoglossus muscle : PG) である。内舌筋は、上縦舌筋 (superior longitudinal muscle : SL)、下縦舌筋 (inferior longitudinal muscle : IL)、横舌筋 (transverse muscle : T)、垂直舌筋 (vertical muscle : V) である。舌筋の解剖の歴史や、各筋の起始・停止・走行などの詳細な記述については Barnwell の一連の研究³⁻⁹⁾ に詳しい。

舌は内部に骨格をもたず、ほとんど筋肉のみからなる器官であり、ゾウの鼻やイカの触手などとともに筋静水圧系の一つである¹⁰⁾。これらの器官では、長軸に垂直に走る筋群 (perpendicular muscles)、平行に走る筋群 (parallel muscles)、螺旋状に走る筋群 (helical muscles) の3種類の筋肉がある¹⁰⁾。舌の正中矢状面における舌根から舌尖までの舌背に沿った曲線を舌の長軸として、舌筋をこれら3つの筋群に再分類すれば、GG, T, V は perpendicular muscles, IL, SL は parallel muscles, HG, SG, PG は helical muscles となる^{11, 12)}。図1aで示すように、GG, V, T はそれぞれが薄い板状の筋線維束をなしており、図1bで示すように、GGが内側、Vが外側に位置し、その前後をTが挟むようにして舌根から舌尖付近まで重なり並んで舌の深層の筋系をなしている¹¹⁾。この繰り返しの最小単位である1組のGG, V, Tを structural unit と呼び、1つの舌の片側には約100個が存在する¹¹⁾。なお、図1a

千葉工業大学先進工学部知能メディア工学科

[連絡先] 竹本浩典 : 千葉工業大学先進工学部知能メディア工学科 (〒275-0016 千葉県習志野市津田沼2-17-1)

TEL : 047-478-0390 E-mail : hironori.takemoto@p.chibakoudai.jp

受稿日 : 2016年9月1日 受理日 : 2016年9月1日

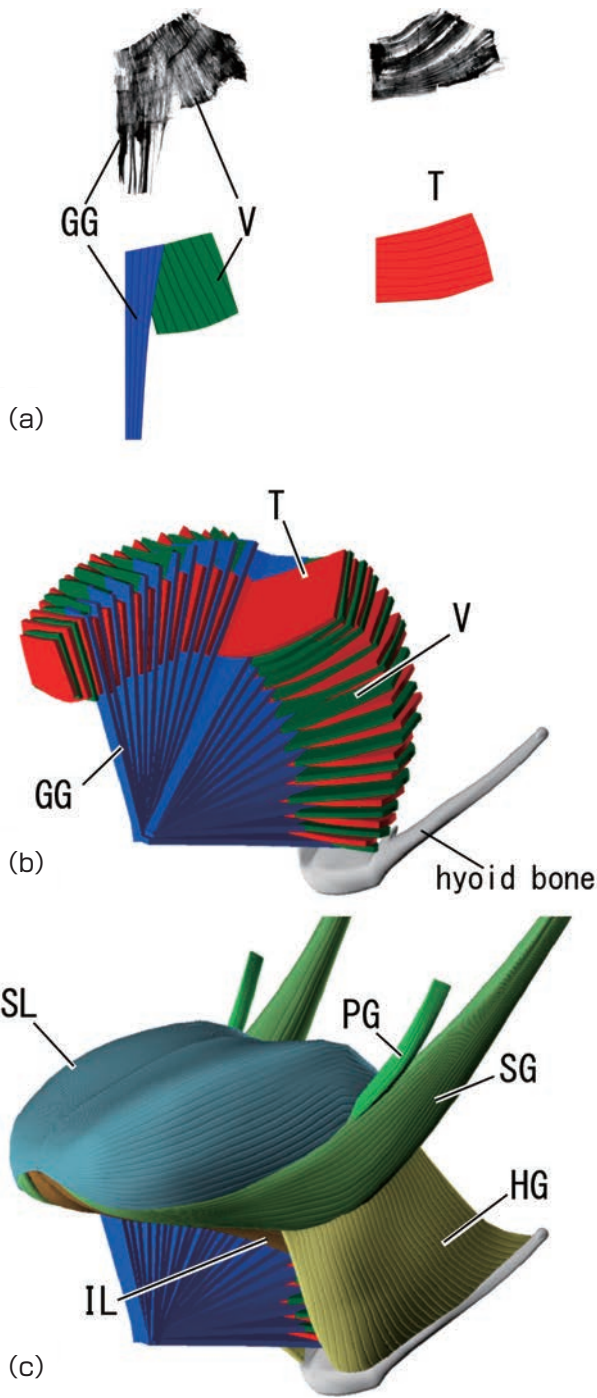


図1 舌筋の3次元モデル。(a) 舌の深層の筋系 (structural unit), (b) 舌の深層の筋系の配列を左前方より見た図, (c) 舌の浅層の筋系を左前方より見た図

上部の写真は、実際に舌から取り出した structural unit をヘマトキシリン・エオジン染色して撮影したものである。また、図1cで示すように、parallel muscles (SL, IL) と helical muscles (HG, SG, PG) は perpendicular muscles (GG, V, T) の浅層にある。このような構造はヒトだけでなくチンパンジーでも確認でき¹²⁾、おそらく哺乳類に共通していると思われる。

筋線維は収縮しても体積は一定だから、筋線維が長軸方

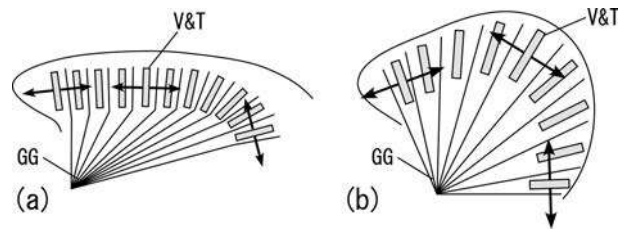


図2 舌の外形と変形の模式図。矢印は perpendicular muscles の収縮によって舌が伸長する方向。(a) 前後に長い舌の場合, (b) 丸い舌の場合

向に短縮すると横断方向に膨張する。そのため、perpendicular muscles が収縮すると、舌の長軸に沿って舌を伸長させる。一方、parallel muscles が収縮すると、舌の長軸に沿って舌を短縮させる。いったん収縮した筋線維は外力によってしか復元しないので、perpendicular muscles と parallel muscles は拮抗関係にある。helical muscles が収縮すると、舌の長軸の回りに舌を回旋させる。これらの筋では、右回りの筋と左回りの筋（たとえば HG と SG）が拮抗している。なお、咀嚼においては、舌の長軸回りの回旋は食塊を上下の歯列の間に送り込む重要な働きをもつが、発話においては、舌は基本的に左右対称に運動し、長軸回りの回旋はみられない。

ヒト以外の舌は前後に長いので、大部分の perpendicular muscles は前後方向に重なり並ぶ。そのため、どの部分で perpendicular muscles が収縮しても舌を前後方向に伸長させる（図2a）。すなわち、長い舌では、舌を口外に突出させる機能が高い。ところが、ヒトの舌は丸いため、どの部分で perpendicular muscles が収縮するかによって舌が伸長する方向が異なる（図2b）。すなわち、丸い舌では、口腔内で多様な変形をする機能が高い。これがヒトだけが話し言葉をもつ形態的な要因の一つであると考えられる¹²⁾。

Ⅲ. 発話中の舌変形の可視化と声道形状の計測

発話運動は体内で行われるため、直接観測することができない。しかし、磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging : MRI) によって、発話運動を動画として可視化することができる。動画の撮像法は、1回の発話を実時間で撮像する実時間動画撮像法と、繰り返し発話の間にデータを収集して動画を再構成する発話同期撮像法¹³⁾の2通りがある。前者は近年飛躍的に技術が向上したが、現在、国内で比較的簡単に利用できる装置の時間分解能は最大で10フレーム/秒でしかない¹⁴⁾。後者は聴覚刺激に合わせて規則正しく発話を繰り返す必要があるが、時間分解能は最大で約120フレーム/秒である¹⁵⁾。また、後者の撮像法を複数のスライス位置で繰り返すことにより、声道立体形状の変化を観測することもできる¹⁶⁾。これらの動画を用いると、連続発話時の舌の形状や運動、発話器官各部の運動タイミングを解析することができる。

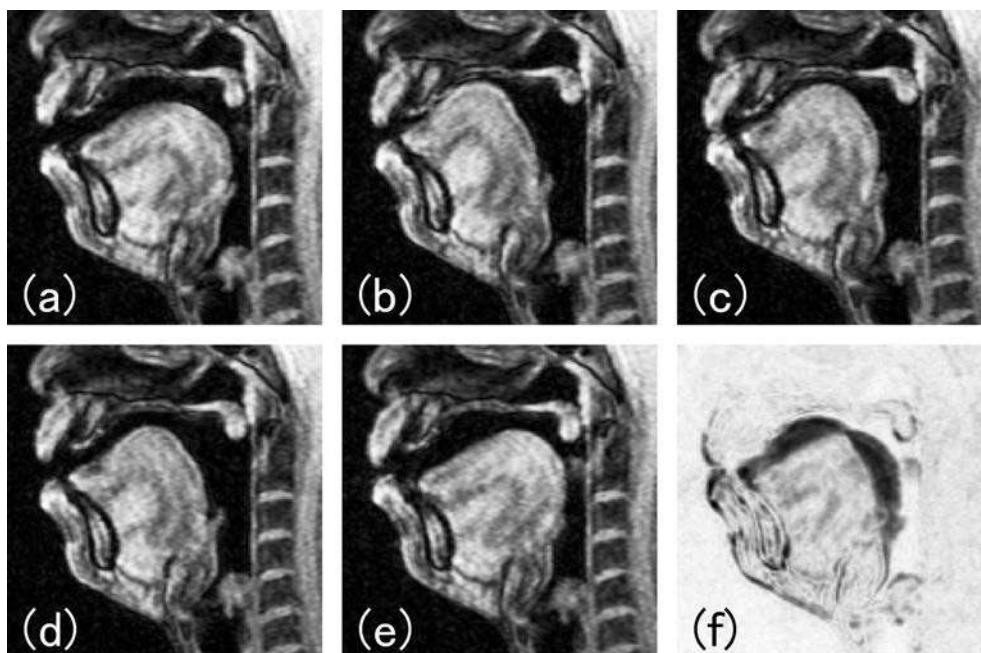


図3 連続発話中の日本語5母音の発話器官の形状 (a : /a/, b : /i/, c : /u/, d : /e/, e : /o/) と発話器官の運動が大きな部分 (f)

図3a-eは日本語5母音 /aiueo/ を連続発話したときの発声同期撮像法による動画から母音中心のフレームを抽出したものであり、それぞれ /a/, /i/, /u/, /e/, /o/ である¹⁶⁾。舌は各母音に特徴的な形状をとる。そして、その特徴は個人によらず共通している。それぞれの舌形状を形成するために、どのような筋が活動しているかについては、筋電信号やシミュレーションで詳細に分析されている¹⁷⁾。大まかにいえば、舌が後下方に引かれるときはHGが、後上方に引かれるときはSGが、前上方に隆起するときはGGの後部が、それぞれ主として活動している。特に、/i/ 発声時には、GG後部の活動により舌が全体として前方に引かれることに加えて、筋線維の体積が一定であるために上方に膨張するという筋静水圧系に特有の変形がみられる。

図3fは、この連続発話において発話器官の運動が大きい部分（動画像では輝度値の変動が大きな部分）が黒くなるように動画を処理したものである。舌、唇、下顎で運動が大きい。これは、これらの部分が発話器官の主要な可動部分であることを示している。一方、舌根より下では運動が小さい。これは、舌変形の影響がこれらの部分に与える影響が小さいこと、喉頭の上下動が小さいことを示している。すなわち、声道は喉頭から口腔にかけての部分で大きく変形し、喉頭の下部から喉頭にかけての部分ではほとんど変形しない。言い換えれば、声道は口唇に近づくほど変形が大きく、声門に近づくほど変形は小さい。

IV. 音声の共通性

まず、声道形状の変化が大きな部分に着目する。図3f

で示した舌の後下方の黒い部分は母音 /a/、前上方の黒い部分は母音 /i/ に対応する。つまり、これら2つの母音で、舌は両極端な位置をとる。この舌の後下方から前上方、あるいはその逆の運動は、発話運動における舌変形の第1主成分である¹⁸⁾。そこで、この2つの母音を取り上げて、舌変形と低次フォルマントの変動の関係を概説する。

図4a,bは図3a,bの母音 /a/ と /i/ の発話器官の輪郭をトレースしたものである。母音 /a/ では口が開き、舌が後下方へ移動しているため、口腔は広く、咽頭は狭くなる。これを断面積が異なる2つの管で模式的に表したものが図4cである。一方、母音 /i/ では口が狭くなり、舌が前上方へ移動しているため、口腔は狭まり、咽頭は広がる。これを2つの管で表したものが図4dである。すなわち、母音 /a/ と /i/ では、口腔と咽頭の広さが逆になっている。なお、図4aは正中矢状断面における発話器官のトレースであるため、それほど咽頭より口腔が広がっているようにみえないが、口腔は咽頭に比べて横方向に広がりがあるので、実際には口腔の容積は咽頭よりかなり大きくなる。

図4efは、図4cdで示した2つの管で単純化した声道の伝達関数を縦続音響管モデル¹⁹⁾で計算したものである。狭い管の断面積を2.0 cm²、長さを8.0 cmとし、広い管の断面積を4.0 cm²、長さを8.0 cmとしている。図中のR1, R2は第1・第2共鳴を示しており、音声スペクトルにおける第1・第2フォルマントと対応する。これらの図は、咽頭が狭く、口腔が広がると第1・第2フォルマントが近づき、咽頭が広く、口腔が狭くなると第1・第2フォルマントが遠ざかることを意味している。ヒトの声道は咽頭から口腔で90度屈曲しているため、だれであっても口を開いて舌を後下方へ引いて発声すると、口腔が広く咽頭

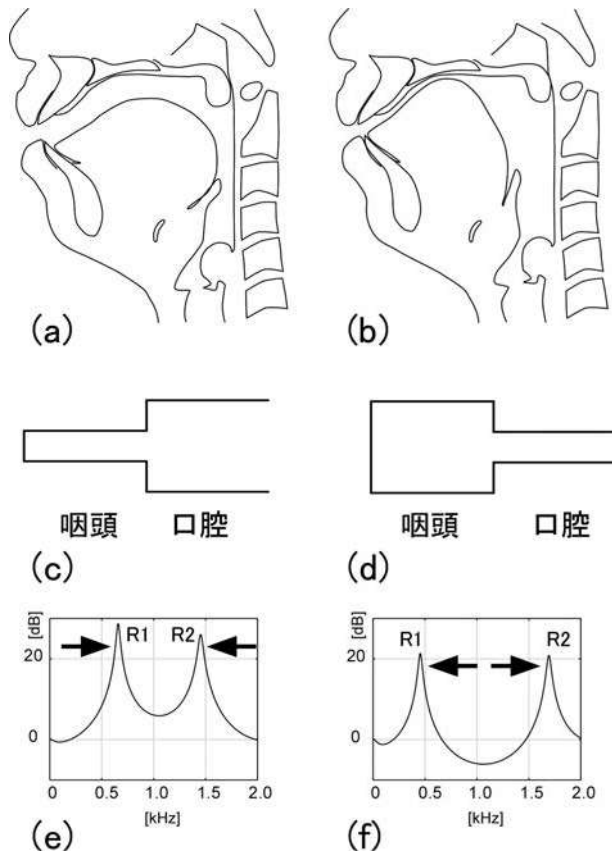
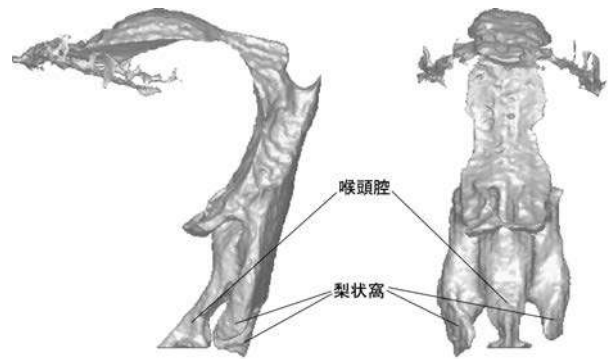


図4 舌変形による声道変形が低次フォルマントに与える変動。(a) 母音 /a/ の発話器官の形状, (b) 母音 /i/ の発話器官の形状, (c) 2つの管でモデル化した母音 /a/ の声道, (d) 2つの管でモデル化した母音 /i/ の声道, (e) モデル化した母音 /a/ の伝達関数, (f) モデル化した母音 /i/ の伝達関数

が狭くなり、第1・第2フォルマントが近づいて母音 /a/ となる。逆に、口を狭めて舌を前上方へもち上げて発声すれば、口腔が狭く咽頭が広くなり、第1・第2フォルマントが離れて母音 /i/ となる。つまり、これらの発話運動と低次フォルマントの遷移パターンは個人によらず共通している。これが声道共鳴に由来する音声の共通性であり、だれでも同じ口の構えをとれば同じ母音を生成することを可能にする。なお、口唇を狭めるなどその他の調音運動が低次フォルマントの遷移パターンに与える影響も個人によらず共通しているが、ここでは省略する。

V. 音声の個人性

次に、声道形状の変化が小さな部分に着目する。図5は、母音 /u/ を発声しているときの声道立体形状である。声道の変形が小さい声門の近辺には、喉頭腔と左右の梨状窩がある。これらの部分を本稿では先行研究にならって下咽頭腔 (hypopharyngeal cavities) と呼ぶ^{1, 2)}。喉頭腔は、解剖学的には前庭ヒダと声帯ヒダで上・中・下の3つの部分に分けられるが²⁰⁾、本稿では声門より上部の咽頭への開口部までを喉頭腔と呼ぶことにする。梨状窩は喉頭腔

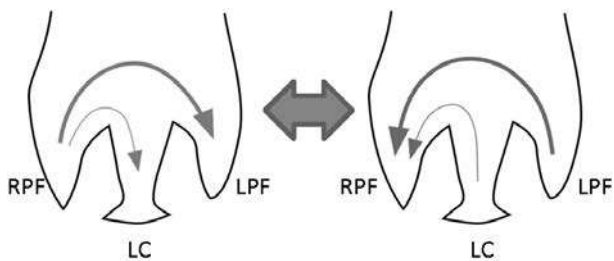


母音/u/の声道(左側面) 母音/u/の声道(正面)
図5 母音 /u/ 発声時の声道形状

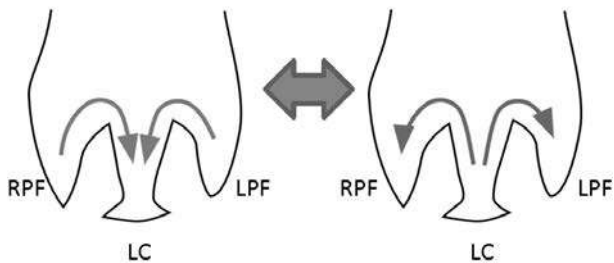
の左右にあつて、披裂喉頭蓋ヒダで喉頭腔と仕切られた袋状の空間であり、食道の入口を成している。下咽頭腔の形状の個人差は大きいですが、個人内では母音によらず形状が一定していることが知られている¹⁾。

喉頭腔は、長さが約2 cmの細長い空間で、声門直上の喉頭室は広く、それより上部の喉頭前庭は狭くなっている。この腔の音響的な役割については昔から多くの研究がなされている^{たとえば21)}。特に、歌唱フォルマントの生成における音響的な役割については詳しく研究されている^{22, 23)}。喉頭腔は咽頭に比べて非常に狭いため、喉頭腔はそれより下流の声道(咽頭と口腔、以下主声道と呼ぶ)に対して音響的に独立性が高い²²⁻²⁴⁾。そのため、声門を閉鎖端、咽頭への開口部を開放端とみなしたときの喉頭腔の共鳴(1/4波長共鳴: 約3.0~3.5 kHz)は、1つのフォルマントの生成を誘導し、多くの場合、それは第4フォルマントである²⁴⁾。一方、その他のフォルマントは主声道に由来する²⁴⁾。そのため、前庭ヒダ(仮声帯)を収縮させて喉頭前庭を狭めると、第4フォルマント周波数のみを低下させ、第3フォルマントに近接させることができる²⁴⁾。これが歌唱フォルマントの生成要因であると考えられる。また、計算器シミュレーションで喉頭腔を除去すると、第4フォルマントのみが消失し、2~4 kHzの周波数帯域のパワーが低下するが、その他のフォルマントや周波数帯域への影響は小さい^{24, 25)}。さらに、声門がわずかでも開くと喉頭腔の共鳴エネルギーは急激に減少するため、第4フォルマントは他のフォルマントに比べて時間的に急速に減衰する²⁶⁾。

梨状窩は、長さが約1.6~2.0 cm、容積が2.1~2.9 cm³の袋状の空間で、音響的には声道の分岐管として作用する²⁷⁾。すなわち、左右の梨状窩が共鳴してエネルギーを消費するために口唇から放射されるエネルギーが減少し、音声スペクトルの4~5 kHzの帯域に2つの深い谷(ディップ)を生成する²⁷⁾。興味深いことに、左右の梨状窩がそれぞれ独立に1つずつのディップを生成するのではなく、左右の梨状窩が2つの異なるモードで振動することによって2つのディップが生成される²⁸⁾。図6は2つのモード、非対称モード (asymmetric mode) と対称モード (sym-



At lower dip: asymmetric mode



At higher dip: symmetric mode

図6 左右の梨状窩で生じる2つの振動モード

metric mode) の模式図である。2つのディップのうち、周波数が低いディップ (lower dip) では、中央にある喉頭腔 (LC) をまたぐように右梨状窩 (RPF) と左梨状窩 (LPF) の間で振動が発生する (非対称モード)。一方、周波数が高いディップ (higher dip) では、LC と RPF、LPF それぞれの間で振動が発生する (対称モード)。音響的にみると、対称モードより非対称モードのほうが声門から口唇へ向かう系とのカップリングが弱いため、ディップは浅くなると考えられる。事実、周波数が低いディップは周波数が高いディップより常に浅い。また、左右の梨状窩が音響的に対称であれば非対称モードは励起されず、対称モードに由来するディップしか観察されなくなる²⁸⁾。

まとめると、下咽頭腔は約 3~5 kHz の間に 1つのフォルマントと 2つのディップを生成し、音声スペクトルではこれより上下にやや広い 2.5~5.5 kHz の帯域を特徴づける。下咽頭腔の形状には個人差があるため、フォルマントやディップの中心周波数にも個人差が生じる。しかし、下咽頭腔は舌根より下にあるため、母音の違いによる舌変形の影響を受けにくく、個人内では形状がほぼ一定している。したがって、下咽頭腔は母音によらず、その個人に特有の音響的な影響を音声スペクトルの 2.5~5.5 kHz の帯域に与える。これが声道の音響特性に由来する音声の個性の要因である。特に、喉頭腔に由来するフォルマントは、人間の聴覚感度が最も良い 3 kHz²⁹⁾ 付近に現れるため、声質など個性への影響が大きいと思われる。

VI. 声道伝達関数における音声の共通性と個人性

これまで述べてきたように、声道の音響特性には、声道 (口腔と咽頭) に由来する共通性と下咽頭腔 (喉頭腔と左右の梨状窩) に由来する個人性が含まれている。ここでは、これらの共通性と個人性が、実際の声道伝達関数にどのように現れるかを検討する。図7は母音 /a/ と /i/ の声道伝達関数である。太線はMRIで計測した声道の3次元形状から時間領域差分法で計算した伝達関数であり²⁵⁾、細線は同じ声道の3次元形状を樹脂で立体造形した声道模型の伝達関数を実測したものである³⁰⁾。太線と細線はよく一致していることから、シミュレーションの精度は高いといえる。太線に付された R1~R4 は伝達関数の第1~第4共鳴を示しており、PF_l、PF_u はそれぞれ左右の梨状窩の非対称モード、対称モードによって生じたディップをシミュレーションにより特定したものである。

主声道に由来し、舌変形で大きく変動する R1 と R2 は、図4のシミュレーションで示したように、/a/ では接近し、/i/ では分離している。これが母音を特徴づける音声の共通性である。R1 や R2 に比べると、下咽頭腔が生成する R4、PF_l、PF_u の位置は、母音間で差は小さいが完全には一致せず、2.5~5.5 kHz の細かなスペクトル形状も異なっている。これは、声道の他の部分の共鳴の影響も含まれているからである。しかし、喉頭腔が R4 を生成することで 3 kHz 付近の帯域のパワーが上昇し、左右の梨状窩が PF_l、PF_u を生成することで 4~5 kHz の帯域のパワーが下降している。このような大局的な構造が聴覚的に影響を与えて、音声の個性の由来となっていると考えられる。

なお、女性や子供などでは、男性に比べて声道が全体として小さいため、声道の共鳴や梨状窩に由来するディップの周波数はすべて高くなり、伝達関数は全体として高域にシフトする。この場合、声道全体の大きさそのものも個性といえるが、その個人でみれば、共通性は主声道に、個性は下咽頭腔に由来するとみなすことができる。最後に、本稿では取り上げなかったが、鼻腔や副鼻腔には舌のような可動部分がないので音声に定常的な音響特性を付与すると考えられるため、音声の個性の生成要因の一つであるといえる^{31, 32)}。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (課題番号 15K00263) の助成を受けた。

文献

- 1) Kitamura T, Honda K, Takemoto H : Individual variation of the hypopharyngeal cavities and its acoustic effects. *Acoust Sci & Tech*, 26 : 16-26, 2005.
- 2) Honda K, Kitamura T, Takemoto H, et al : Visualization of hypopharyngeal cavities and vocal tract acoustic modeling. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 13 : 443-453, 2010.
- 3) Barnwell YM : Human lingual musculature : an historical review. *Int J Oral Myol*, 2 : 31-41, 1976.

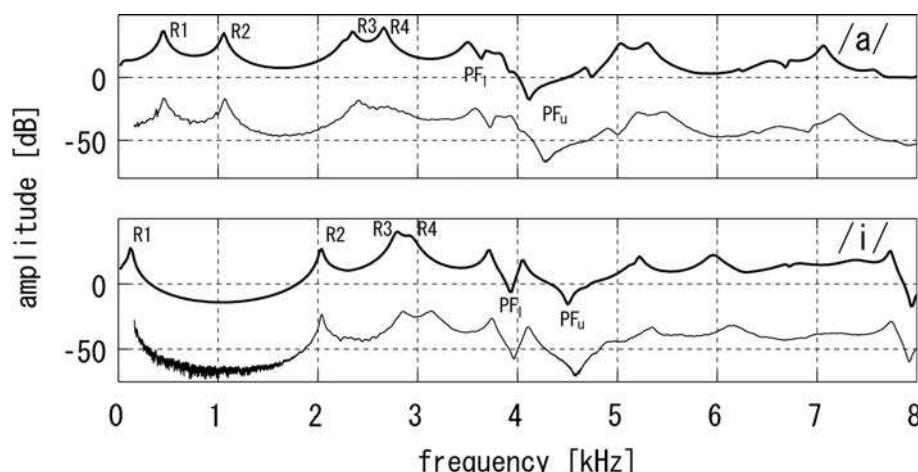


図7 計算（太線）と計測（細線）で求めた母音 /a/ と /i/ の声道伝達関数

- 4) Barnwell YM : The morphology of muscles styloglossus in fifteen-week human fetuses. *Int J Oral Myol*, 3 : 8-46, 1977.
- 5) Barnwell YM, Klueber K, Langdon HL : The anatomy of the intrinsic musculature of the tongue in the early human fetus : part I, M. longitudinalis superior. *Int J Oral Myol*, 4 (3) : 5-8, 1978.
- 6) Barnwell YM, Langdon HL, Klueber K : The anatomy of the intrinsic musculature of the tongue in the early human fetus : part II, M. longitudinalis inferior. *Int J Oral Myol*, 4 (4) : 5-8, 1978.
- 7) Langdon H, Klueber K, Barnwell Y : The anatomy of M. genioglossus in the 15-week human fetus. *Anat Embryol*, 155 : 107-113, 1978.
- 8) Langdon HL, Klueber KM, Barnwell YM : The morphology of M. palatoglossus in the 15-week human fetus. *Anat Anz*, 146 : 10-17, 1979.
- 9) Klueber KM, Langdon HL, Barnwell Y : The morphology of the vertical and transverse intrinsic musculature of the tongue in the 15-week human fetus. *Acta Morphol Neerl Scand*, 17 : 301-310, 1979.
- 10) Kier WM, Smith KK : Tongues, tentacles and trunks : the biomechanics of movement in muscular-hydrostats. *Zool J Linn Soc*, 83 : 307-324, 1985.
- 11) Takemoto H : Morphological analyses of the human tongue musculature for three-dimensional modeling. *J Speech Lang Hear Res*, 44 : 95-107, 2001.
- 12) Takemoto H : Morphological analyses and 3D modeling of the tongue musculature of the chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Am J Primatol*, 70 : 966-975, 2008.
- 13) Masaki S, Tiede MK, Honda K, et al : MRI-based speech production study using a synchronized sampling method. *J Acoust Soc Jpn (E)*, 20 : 375-379, 1999.
- 14) <http://www.baic.jp/reference/speechsamples/index.html#SingleShot>
- 15) 竹本浩典, 北村達也 : MRIに基づく音声生成の研究手法の概要. *電子情報通信学会誌*, 94 : 585-590, 2011.
- 16) Takemoto H, Honda, K, Masaki S, et al : Measurement of temporal changes in vocal tract area function from 3D cine-MRI data. *J Acoust Soc Am*, 119 : 1037-1049, 2006.
- 17) Honda K : Organization of tongue articulation for vowels. *J Phonetics*, 24 : 39-52, 1996.
- 18) Maeda, S : Compensatory articulation during speech : Evidence from the analysis and synthesis of vocal-tract shapes using an articulatory model. In Hardcastle W, Marchal A, eds, *Speech production and speech modelling*, Kluwer Academic Publisher, Amsterdam, 131-149, 1990.
- 19) Adachi S, Yamada M : An acoustical study of sound production in biphonic singing, Xöömij. *J Acoust Soc Am*, 105 : 2920-2932, 1999.
- 20) Williams PL, Bannister LH, Berry MM, et al : *Gray's Anatomy*. Churchill Livingstone, New York, 38th ed, 1995.
- 21) Bartholomew WT : A physical definition of good voice-quality in the male voice. *J Acoust Soc Am*, 6 : 25-33, 1934.
- 22) Sundberg J : Articulatory interpretation of the 'singing formant'. *J Acoust Soc Am* 55 : 838-844, 1974.
- 23) Sundberg J : *The Science of the Singing Voice*. Northern Illinois, University Press, DeKalb, IL, 1987.
- 24) Takemoto H, Adachi S, Kitamura T, et al : Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance. *J Acoust Soc Am*, 120 : 2228-2238, 2006.
- 25) Takemoto H, Mokhtari P, Kitamura T : Acoustic analysis of the vocal tract during vowel production by finite-difference time-domain method. *J Acoust Soc Am*, 128 : 3724-3738, 2010.
- 26) Kitamura T, Takemoto H, Adachi S, et al : Cyclicity of laryngeal cavity resonance due to vocal fold vibration. *J Acoust Soc Am*, 120 : 2239-2249, 2006.
- 27) Dang J, Honda K : Acoustic characteristics of the piriform fossa in models and humans. *J Acoust Soc Am*, 101 : 456-465, 1997.
- 28) Takemoto H, Adachi S, Mokhtari P, et al : Acoustic interaction between the right and left piriform fossae in generating spectral dips. *J Acoust Soc Am*, 134 : 2955-2964, 2013.
- 29) Fletcher H : Auditory patterns. *Rev Mod Phys*, 12 : 47-65, 1940.
- 30) Kitamura T, Takemoto H, Adachi S, et al : Transfer functions of solid vocal-tract models constructed from ATR MRI database of Japanese vowel production. *Acoust Sci & Tech*, 30 : 288-296, 2009.
- 31) Amino K, Osanai T : Speaker characteristics that appear in vowel nasalisation and their change over time. *Acoust Sci & Tech*, 33 : 96-105, 2009.
- 32) 竹本浩典, 北村達也, 蔭苗久則, 他 : コーンビーム CT で計測した鼻腔・副鼻腔の3次元音響解析. *信学技報*, 115 : 45-50, 2016.