

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2009
 課題番号：19591999
 研究課題名（和文） 音声ピッチの聴覚帰還制御特性の吃音・非吃音による違いとそれに関わる脳機構
 研究課題名（英文） The control characterization of voice pitch (F0) by auditory feedback and related brain activation of stutters and non-stutterers.
 研究代表者
 森 浩一（MORI KOICHI）
 国立障害者リハビリテーションセンター（研究所）・感覚機能系障害研究部視覚機能障害研究室長
 研究者番号：60157857

研究成果の概要（和文）：自己の発話は聴覚によってモニターされ、その周波数（F0）や構音等に運動指令からの誤差があれば実時間に聴覚から脳内の発話中枢に帰還されて修正される。本研究では単純発声時の音声の F0 の聴覚帰還制御特性を正確に求める方法を開発し、インパルス応答として表現した上で、潜時 150 ms 付近の最大利得が音声の基本周波数に依存して変化すること、吃音者のほとんどでは非吃音者と比較して高音発声での利得上昇が小さいことが判明した。機能的 MRI で調べたところ、この音声 F0 帰還制御の主な脳内関連部位は、右中側頭回、左右運動野、左下前頭回、右島であった。

研究成果の概要（英文）：The information of fundamental frequency (F0) and articulation of voice is fed back in real time by audition to the speech center of the brain for correcting deviation from the motor command. In this study, a method for accurately describing the F0 control characteristics of the auditory feedback was developed, and the peak amplitude of the resulting impulse responses with the latency of approximately 150 ms were compared between the groups of people who do and do not stutter. The response peak depended on the F0 for the control subjects of both sexes, while it did not increase with F0 for most of stuttering subjects. Functional MRI revealed the right middle temporal gyrus, right and left precentral gyri, left inferior frontal gyrus and right insula as related to the F0 feedback control.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：耳鼻咽喉科，神経科学，リハビリテーション医学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・耳鼻咽喉科学

キーワード：耳鼻咽喉学，音声，吃音，聴覚フィードバック，コミュニケーション障害，脳

1. 研究開始当初の背景

音声は、呼吸・発声・構音器官の運動が同時に協調して生じて実現される。それぞれの器官は発話意図に従って生成された運動コマンドによって実行され、これと並行して運動コマンドの複製と、自己音声の聴覚等の感覚入力との比較が行われ、誤差検出による実時間のフィードバック（帰還）によって目標制御が行われる。音声の制御に聴覚帰還が実時間で関与していることは、騒音下に声の大きさが反射的に大きくなる Lombard 効果や、遅延聴覚帰還 (DAF) の条件下で発話すると人工吃が生じること (Lee ら, 1950) などから知られている。しかし、その制御機構については未解明な部分が多い。

本研究は発話制御の中でも基本となる声の高さ（基本周波数、ピッチ）の制御について研究する。ピッチは生理学的には主に声門下圧（声帯直下の呼気圧）と喉頭調節によってほぼ決定される。言語コミュニケーションにおいては、タイミング・強さ・音色などと共に音声の韻律を構成し、発話の区切り、強調、抑揚などを示す重要な役割を果たす。さらに日本語では同音異義語の辞書的な意味を決定する役割も担っている。

声のピッチの聴覚帰還制御特性を探る方法として、発声中にヘッドホン経由で聴取している自己音声の周波数を突然ずらし、その後のピッチ変化を調べることで音声聴取から発声までの帰還制御の様式を明らかにしようとした研究が多数あるが、周波数変調の方向や大きさなどによって結果が一定しない (Burnett ら 1998)。河原ら (1995) は知覚できない程の微小な周波数変調を使用することで、発話者の意図や意識が介在しないピッチの帰還制御特性を比較的短時間で求める方法 (TAF) を開発した。ただし、原法では時間方向の計測がやや正確さに欠けることがあった。本研究では、この方法を用いて解析方法をより精密なものに改良し、潜時と利得を正確に求めることができるようにした。

研究代表者らは河原らの方法を遅延時間に曖昧さがないように改良し、吃音者では持続発声時の聴覚性のピッチ制御特性が 500 ms 以内の短い遅延時間の領域で異なっていること示した (佐藤, 森, 福島 2004)。これにより、ピッチ制御の異常が吃音の原因の一つとする仮説が成立する。一方で、この結果のみでは吃音者が DAF によって吃頻度が減少すること (Goldiamond, 1965) は説明しがたい。吃音訓練の補助として DAF を使用して発話する方法が使われているが、有効性は数ヶ月の訓練

後ようやく判定できるのが現状であり (酒井ら 2006)、吃音の病態生理の解明により早期に効果を予測できる検査が開発されることが望ましい。今回の研究はその基礎となるものである。

先行研究から、発話には補足運動野、Broca 野、運動野、島、聴皮質、大脳基底核、小脳などが関与していることが明らかになってきている。吃音者については、MRI によって大脳の解剖学的異常も報告されている。しかしながら、これらの部位が発話運動とその帰還制御にどのように関与しているのかは明らかになっていない。

一方、吃音者の言語による脳賦活は正常と異なり左優位を示さないことが多くの研究で明らかにされており、発話に直接関係する前頭葉のみでなく、側頭葉でも賦活が低下するなどの異常が先行研究で認められている。研究代表者らは脳磁図 (MEG) と近赤外分光法 (NIRS) の記録によって、音韻反応の左聴覚野・聴覚連合野への局在が失われるだけではなく、抑揚反応の局在も異常となり、重症者では左右が機能的に逆転する例も認めた (佐藤ら 2004)。このような異常が吃音発症から間もない幼児でも観察され、一方で聴覚フィードバック特性の異常が多くの成人吃音者で認められることから、吃音者の聴覚野の活動と聴覚帰還制御特性に関連があり、吃音の病態に密接に寄与している可能性が高い。

2. 研究の目的

- (1) 声のピッチの制御に注目し、その潜時と利得を定量的に求める方法を開発し、吃音者と非吃音者の制御特性の違いを明らかにする。
- (2) 声のピッチ制御の生理的神経基盤の詳細を明らかにするため、(1) と同様の条件下で機能的 MRI (fMRI) を実施し、聴覚帰還制御にかかわる脳部位を抽出する。
- (3) DAF 条件下の発話時の脳機能を調べ、吃音者と非吃音者で比較し、聴覚帰還と脳機能の関係を調べる。

3. 研究の方法

- (1) 音声の聴覚帰還制御特性の計測
持続母音「アー」の発声中に、周波数変調聴覚帰還 (transformed auditory feedback, TAF, 河原ら, 1995) をかけ、ピッチ (音声の基本周波数, F_0) の入出力関係からインパルス応答を算出する。
装置と回路： 発話音声を音楽用エフェクタ

に通し、MIDI (musical instrument digital interface) 経由のコントロールによって、音声のピッチに M 系列に従って周期的に半音未満の幅で周波数変調をかける。M 系列とは、自己相関が時間ゼロのみで 1 であるような特殊な信号列であり、2 信号に共通に含まれる場合には信号間の相互相関を調べることで伝達関数 (インパルス応答) を知ることができる。周波数変調深度はいくつか試行し、線形性が成立する範囲を確認する。

変調音は遮蔽雑音と混合されてヘッドホンないしコンデンサー式イヤホン (fMRI 時) より聴覚に戻される。遮蔽雑音は自声が骨導経路で直接聞こえてしまうのを防止する。対照として、周波数変調をかけない条件と、周波数変調の振幅を変えた条件を設定する。音声の録音とデータ処理: 発話音声と聴取音声の両者を同時に録音する。2 つの音声の同期を失わないようにピッチ抽出を行い、その周波数比が変調波形になるので、それに元の M 系列波形をフィットして抽出したピッチ波形の位相 (M 系列変調波に対する) を求めることができる。フィットした M 系列波形 (振幅を正規化) と発話音声の F0 の相互相関を計算することで、インパルス応答を定量的に算出することができる。

上述の M 系列による周波数変調を用いた実験では、音声回路が閉じているため、多重にループを回った信号が混入する。そのため、最初の早いループ以外は、正確なインパルス応答とは言えない可能性がある。最初の大きなピークは 150 ms 前後に出現するので、この応答が 2 回以上の聴覚帰還を経て出現するのは潜時 300 ms 以降となる (裾野を入ると 250 ms くらい以降)。従って、結果の解析は潜時 200 ms 以前のピークに限定した。

上述の問題を解消し、応答の遅い成分を定量的に評価するためには、発声を聴覚帰還回路に戻さない開回路を用いる必要がある。ここでは、M-系列の変調ではなく、聴覚に 500 ms の階段状の周波数変調 (1 半音) を 1 秒毎にランダムに上昇ないし下降方向にかけた合成音性を聞かせ、音声の F0 応答を主成分分析で調べた。課題としては、聴取音声を無視する課題 (無視課題) と、上昇と下降の回数を比較させる課題 (注意課題) を用いた。結果を主成分分析にかけ、主要な 3 成分を分離した。

(2) fMRI による TAF 下の脳機能計測

fMRI の騒音中で音声のみをフィードバックする必要性から、軟部組織伝導性のマイクロフォン (中島・鹿野: 音響学会誌, 2006) を使い、騒音の主帯域 (約 1 kHz とその倍音) をハイカットフィルターで除去し、かつ間欠撮像を行って fMRI の騒音が邪魔にならないようにした。この操作によってフィードバ

ク音声の構音に関連する情報 (ホルマント情報) もほとんど除去され、ピッチ情報のみが残る。TAF をかけない条件とかけた条件を比較することで、聴覚帰還制御にかかわる脳部位を特定でき、TAF の変調振幅を変えて相関分析をすることで、変調量に応じて賦活する領域を抽出することができる。解析は SPM を用いた (Wellcome Trust, 英国)。

(3) DAF を使用した発話時の脳機能

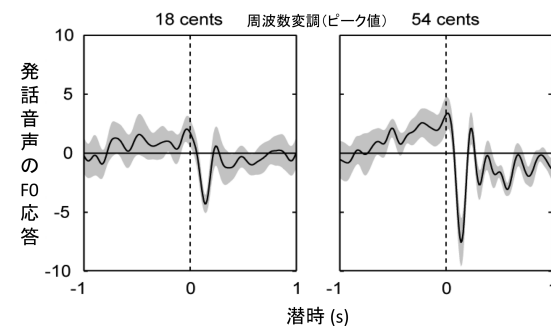
発話材料は 1000 文のデータベース (NTT) から、文章を視覚的に呈示して読ませた。遅延時間は非吃音者は最も非流暢を誘発しやすい 200 ms とし、吃音者は最も話しやすい遅延時間とした (100 ms か 200 ms)。それ以外の条件は TAF と同様である。

吃音者については吃音の標準的検査 (吃音検査法試案 1 ないし SSI-3) によって重症度と吃頻度の評価を行った。吃音被験者の重症度は軽度 ~ 中等度であった。

4. 研究成果

(1) 聴覚帰還による F0 の制御特性

音声の基本周波数 (F0) の制御特性の定量的測定方法を確定し、聴覚フィードバックによる制御のインパルス応答を求め、F0 の速い補償応答の大きさを算出できるようにした。下図は、聴取音声の周波数変調振幅を 2 通りにした時の、発話音声の基本周波数 (F0) のインパルス応答を示す (10 回発声の平均 ± S.E.)。



いずれも潜時 140 ms 付近に負のピーク応答を示し、この反応が、聴取した周波数の変動に対して補正的に働くものであることを示唆する。ただし、その周波数補正の振幅は聴取した音声の変調幅に比べると小さく (聴取周波数変位の 30% 未満)、かつ大きな変調 (半音の約 1/2、図右) を聴取した場合はその 1/3 の変調刺激 (図左) に比べて、応答のピーク振幅が倍に達せず、線形性が成り立つ範囲が狭いことが認められた。以降の行動実験は、非線形性の影響を少なくするため、比較的小さな変調によるものを使用した (いずれの変調量でも、周波数変調がかかっていることに気がついた被験者はいなかった)。

発声音の高さを变化させて制御特性を見た所、発声 F0 が高いと調節量が大きかった。応答のピーク値は、話声位の基本周波数にかかわらず、男女を含めて F0 の絶対値（声の高さ）に最も高い正の相関を示したが、声のモード（地声か裏声か）には関係がなかった。吃音者の多くは、高い声でも制御量が増加しなかった。ただし、高い声で制御特性が大きくなり、正常範囲の吃音者も存在した。すると、音声に注意を向けると制御量が変化する遅い成分と、注意の有無にかかわらず補正方向に変化する反射的な速い応答に分離することができた（岡崎ら、2010）。遅い成分は補正方向ではなく、追従方向にも見られた。一方、速い応答成分は TAF によるピーク潜時 200 ms 以内の速いインパルス応答に対応すると考えられ、この成分は声への注意の影響をほとんど受けなかった。

吃音は緊張状態や自分の発話を意識するかどうかによって症状の増悪を示すことが知られているので、注意がかかわる遅い成分が病態に強く関与することが予想されるが、音声への注意に関係しない速い応答成分において吃音者で異常があることについては、理由は不明である。しかし、一般に吃音では側頭葉（聴覚野）の活動が抑制されており（Fox ら、1996）その結果として F0 の聴覚帰還制御も抑制されているのかも知れない。吃音者でこの制御特性が例外的に正常範囲の者もいたことは、吃音の病態が一様ではないことを示唆し、F0 の帰還制御の異常が吃音の病態の本質ではない可能性と、これによって吃音の病態を分類できる可能性の両者があり得る。

(2) F0 の聴覚帰還制御応答に関わる脳部位

TAF ありとなしの比較で賦活する部位、ならびに TAF の変調量に相関する部位を検出した。いずれもほぼ同じ領域が賦活していたが、相関解析（下図）の方がやや狭い領域が賦活する傾向があった。主な賦活部位は右中側頭回、左右運動野、左下前頭回、右島であった。左下前頭回は相関解析のみで賦活が明らかになった（ $p < 0.0005$, uncorrected）。



今回の結果は被験者が意識しない程度の周波数変調を与えており、F0 の無意識的聴覚帰還制御に関わっている脳部位が検出できたと考えられる。先行研究では被験者が知覚できる大きさのステップ状の周波数変化を与えており、大部分は同様な賦活を示すが、右島の後部の賦活は本研究のみで見られた。一方、右下前頭回の活動は今回見られなかった。

男性被験者は左側頭葉の活動が高くないなど、男女差が認められた。吃音が男性に多いことと、この男女差との関係は、今後詰めて行きたい。

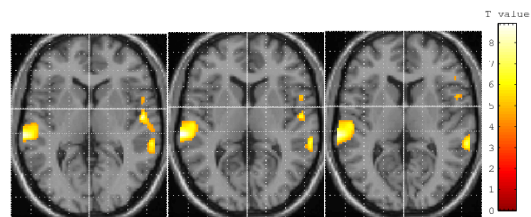
(3) DAF を使用した発話時の脳機能

非吃音者と吃音者を対象に、DAF と NAF（遅延なし）の条件下で機能的 MRI の計測を行った。fMRI 実施中の発話（文章の読み上げ）の録音の分析では、吃音者は比較的軽い者が多かったせい、DAF 条件と通常発話条件（NAF）で、吃頻度に有意差はなかった。一方、非吃音者は DAF 条件下で有意に吃頻度が増加した。いずれの群も、DAF 条件では有意に話速が低下した。

NAF 条件における両群共通の活動部位として、左右聴覚野・運動野が認められた。群間に相違の認められた活動部位は補足運動野で、吃音群の活動が低かった。

DAF 条件では両群とも右上側頭回後方、左上・中側頭回に活動が認められた。各群に固有の活動領域としては、非吃音群において左上側頭回（後方）と右下前頭回、吃音群において補足運動野が認められた。上側頭回の活動は、いずれの条件でも非吃音者群の方が高く、発話中に側頭葉（聴覚野）の抑制があるという先行研究と傾向が一致した。

先行研究で、非吃音者は発話時に左下前頭回（Broca 野）を使うが、吃音者は発話時に前頭部では右優位な活動が出現するとされている。今回の条件では、非吃音者においても左下前頭回の活動は見られず、発話負荷としては軽いものだったと考えられる。吃音者では DAF を使わない通常発話時（NAF 条件）に右下前頭回の賦活があったが、DAF によって、NAF 条件より大きな賦活が見られることはなかった。非吃音者は、DAF により右下前頭回の賦活が生じた（下図）。このことから、右下前頭回の賦活は、非流暢という状態（病態）に機能的に関連する反応性の活動であって、吃音者固有の賦活ではないと考えられ、訓練で吃音が改善すると、賦活が低下するのではないかと考えられる。



これらより、吃音・非吃音を問わず、右下前頭回と上側頭回が非流暢発話に強く関わ

ることが示唆された。賦活部位の一部は TAF による F0 制御に関わる部分と重なった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計8件)

- (1) Okazaki, S., Mori, K., Cai, C. Effects of delayed auditory feedback on the vocal time-reproduction. *Acoustical Science and Technology*. 31, 2010, in press. 査読有
- (2) 森浩一. 吃音検査. 特集 耳鼻咽喉科・頭頸部外科の検査マニュアル 方法・結果とその解釈, 耳鼻咽喉科・頭頸部外科. 82(5増刊号), 2010, 289-295. 査読無
- (3) Sakai N, Masuda S, Shimotomai T, Mori K. Brain activation in adults who stutter under delayed auditory feedback: An fMRI study. *International Journal of Speech-Language Pathology*. 2009;11(1): 2-11. 査読有
- (4) 森浩一. 脳機能研究から吃音治療を展望する. *コミュニケーション障害学*. 2008; 25(2): 121-128. 査読有
- (5) 森浩一. 聴性言語反応の発達と障害. *臨床脳波*. 49(6), 2007, 351-355. 査読無

[学会発表](計25件)

- (1) 岡崎俊太郎, 森浩一, 蔡暢. 聴覚フィードバックによる発声基本周波数制御に聴覚的注意が及ぼす効果. 聴覚研究会資料. 2010-3-5;40 (H2010-40): 207-12. 査読無
- (2) Okazaki S, Mori K, Cai C. Effect of the fundamental frequency and vocal register on the voice pitch compensation. *The Acoustical Society of America*. San Antonio; 2009-10-26/ 10-30. p. 2242. 査読無
- (3) 岡崎俊太郎, 森浩一. 吃音者および非吃音者における平均発声ピッチと聴覚フィードバックを用いたピッチ制御. 第54回日本音声言語医学会総会・学術集会 福島, 2009-10-15/10-16, p. 89. 査読無
- (4) 岡崎俊太郎, 森浩一, 蔡暢, 鎌谷大樹. 聴覚フィードバックに対する発話の引き込み現象. 日本音響学会 2009年春季研究発表会, 東京, 2009-03-17/03-19, p. 521-522. 査読無
- (5) Masuda S, Okazaki S, Sakai-Mizokami N, Kamatani D, Mori K, Nakajima Y. The neural basis subserving unconscious pitch control revealed by transformed auditory feedback: A magnetic resonance imaging study. *The 38th Annual Meeting of the Society for Neuroscience in North America*;

2008-11-15/11-19, Washington D.C. 査読無
(6) Mori K. Noninvasive assessment of language lateralization with in vivo near infrared spectroscopy. *The 50th Anniversary Symposium of the Eaton-Peabody Laboratory of Auditory Physiology*; 2008-6-13; Boston. 査読無

(7) Sakai N, Masuda S, Shimotomai T, Mori K. Brain activation in adults who stutter during reading under delayed auditory feedback: a fMRI study. *Oxford Dysfluency Conference 2008-6-3/6-6*. Oxford. p. 4. 査読無

(8) 岡崎俊太郎, 森浩一, 鎌谷大樹, 増田早哉子. 聴覚フィードバックによるピッチ調節機構に発声の基本周波数が及ぼす影響. 日本音響学会 2008年春季研究発表会, 津田沼, 2008-03-17/03-19, p.591-592.

(9) 岡崎俊太郎, 森浩一, 鎌谷大樹, 増田早哉子. 聴覚フィードバックを用いたピッチ調節特性の同定と定量的解析. 第52回音声言語医学会総会・学術講演会, 所沢, 2007-10-26/10-27, p. 66.

(10) 岡崎俊太郎, 森浩一, 鎌谷大樹, 増田早哉子. 吃音と聴覚フィードバック - そのメカニズムに関する基礎研究 -. 第4回吃音を語る会 東京, 2007-08-26,

[図書](計2件)

- (1) 森浩一. 言語障害. 山口徹, 北原光夫, 福井次矢 (編). *今日の治療指針 2008年版*. 東京: 医学書院; 2008. p. 1118.

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

[その他]

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 浩一 (MORI KOIHI)

国立障害者リハビリテーションセンター
(研究所) 感覚機能系障害研究部・室長
研究者番号: 60157857

(2) 研究分担者

酒井 奈緒美 (SAKAI NAOMI)

目白大学保健医療学部・助教

研究者番号: 60415362

増田 早哉子 (MASUDA SAYAKO)

慶応義塾大学社会学研究科・助教

研究者番号: 90415365

岡崎 俊太郎 (OKAZAKI SHUNTARO)

国立障害者リハビリテーションセンター
(研究所)・流動研究員
研究者番号：80455378