

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月20日現在

機関番号：82404

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23700330

研究課題名（和文） 聴覚・発話相互作用の時間的動態の神経基盤

研究課題名（英文） The neural basis and temporal dynamics of auditory-vocal interaction

研究代表者

岡田 美苗（OKADA MINAE）

国立障害者リハビリテーションセンター（研究所）・研究所 感覚機能系障害研究部・流動
研究員

研究者番号：40586442

研究成果の概要（和文）：流暢な発話は、聴覚・発話系の神経回路と発話器官の精緻な時間精度による円滑な連携により実現する。本研究では、疑似聴覚フィードバック法を用いて発声の定量的分析と脳機能計測を行い、発話の流暢性の障害をもつ吃音者と健常者を対象に、聴覚・発話系の発声制御の時間的特性とその神経基盤を調べた。実験の結果、聴覚・発声間の誤差検出に基づく補正方向の発声 F_0 応答から潜時の異なる3つの主成分が分離され、潜時約 600 ms の主成分に吃音の有無による差をみとめた。その神経基盤として、右一次運動野、小脳、右下前頭回、被殻、島の関与が示された。

研究成果の概要（英文）：Fluent speech is characterized by smooth coordination of organs involved in the auditory-vocal system in precise timing. This study examined temporal characteristics and the neural basis of auditory-vocal interaction using pseudo-auditory-feedback and fMRI methods in healthy adults and people who stutter (PWS). Results showed principal components of different latencies in a compensative fundamental frequency (F_0) response. This implies multiple neural mechanisms in different timing underlying the voice F_0 control based on the auditory-vocal error detection. The result of fMRI study showed the activation of right primary motor area, cerebellum, right inferior frontal gyrus, putamen, and insula as the neural basis of the voice F_0 control.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	320,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：認知科学、聴覚フィードバック、発声制御、吃音、感覚運動制御

1. 研究開始当初の背景

音声の聴取（聴覚）と生成（発話）とは密接に連動し、相互に影響しあう。我々の流暢な発話は、発話企図、発話運動器官、聴覚および体性感覚のフィードバック、そして自己モニタリングに関わる神経基盤のそれぞれが精緻な時間精度で円滑に連携し実現する。これらの神経基盤の連携に異常が生じると発話は困難となり、非流暢が生じる。

発話は聴覚系のフィードバックの影響を受け易い。発声中の聴覚フィードバックに数十から 200 ms の人工的な遅延を加えると、発話は非流暢になる (Lee, 1950)。また、発声中の聴覚フィードバックの周波数成分を変化させると発声 F_0 が変動し (Kawahara, 1993; Houde & Jordan, 1998)、潜時 200 ms 以下の速い補正応答と、潜時 200-700ms の遅い応答が生じる (Burnett et al., 1998; Hain et al., 2000)。このような変換聴覚フィードバック (Transformed auditory feedback: TAF) に対する速い補正応答は、聴覚・発話間の誤差検出に基づく反射的な発声制御を反映する。脳内では後部上側頭回（一次聴覚野を含む）と左側頭葉水平面（ウェルニック野を含む）(Guenther, 2006)、右島後部、一次運動野 (Masuda et al., 2007) が関与し、聴覚・発話間の誤差検出は主に右半球で行われる (Toyomura et al., 2007)。また、遅い追従応答は随意的な発声制御を反映し、聴覚フィードバックへの注意の影響を受ける (Burnett et al., 1998; 岡崎・森・蔡, 2010)。脳内では前帯状回、上側頭回、被殻といった予測や学習に関わる部位が関与する (Zarate & Zatorre, 2008; Zarate et al., 2010)

一方で、発話の流暢性に障害をもち、聴覚フィードバック経路の異常が指摘される吃音者は、発話中の聴覚フィードバックの変化に対し健常者と異なる発話応答を示す。吃音者の場合、遅延聴覚フィードバックにより健常者とは逆に発話が流暢になる (Van Riper, 1971)。また、少なくとも一部の吃音者では TAF で速い補正応答が抑制され、潜時 200 ms 以上の遅い発声応答に大きな揺れが生じる (佐藤・森・福島, 未発表データ)。脳内では、前頭と側頭の言語野間を連絡する弓状束の乱れや、右前頭の運動関連領域の過活動、左下前頭回（ブローカ野）の機能異常、左右聴覚野の機能的抑制や側性化の異常があり、関連脳部位間のタイミング異常も指摘されている (森, 2008)。しかし、吃音者の発声制御特性を定量的に示した研究や、その神経基盤の異常に関する知見は少ない。

健常者の聴覚・発話系の神経回路については複数のモデルが提案されている (Hain et al., 2000; Guenther, 2006)。なかでも音声

生成の計算論モデル (Directions Into Velocities of Articulators: DIVA) は、TAF に対する発話制御特性の解析と機能的磁気共鳴画像法 (Functional magnetic resonance imaging, fMRI) データとを関連付け、汎用性が高い。DIVA モデルでは、(1) 両側の聴覚野（後部上側頭回と側頭葉水平面）および体性感覚野（頭頂葉下部）のエラーマップで発話企図（ブローカ野）と聴覚フィードバック間の誤差が検出され、(2) 修正運動指令が右下前頭回（ブローカ野を含む）と運動前野腹側へ伝達、(3) 聴覚フィードバックの変化後 75-150ms に不随意的な補正応答が生じる (Guenther, 2006; Tourville et al., 2008)。さらに、吃音の中核症状である語頭の繰り返しモデル化も試みている (Civier et al., 2010)。

ただし、DIVA モデルは潜時 300 ms 前後の速い補正応答を対象とし、長潜時の遅い発話応答を含まない。この遅い発話応答には吃音者の病態が反映される。従って、発話制御の機序を説明するには遅い応答を考慮する必要がある。しかし、この遅い発話応答は、方法論上の問題、すなわち、実時間の TAF では聴覚フィードバック音声が多重に変調される問題により、これまで独立に検討されなかった。さらに、聴覚・発話系の発話制御メカニズムの数百 ms 単位の時間精度に対し、fMRI の時間分解能の限界が秒単位であることから、関連脳部位間の時間的連携の直接の証拠は示されていない。

そこで、本研究では新たな方法を用い、聴覚・発話相互作用における発話制御の時間的動態と、その関連脳部位間および時間的連携の解明を目指した。

2. 研究の目的

- (1) 発声中の聴覚フィードバックの変化に対して生じる短潜時 (< 200 ms) の発声応答と長潜時 (200 ms <) の発声応答の制御特性を定量的に明らかにする。
- (2) 発話の流暢性に障害をもつ吃音者と健常者の発声制御特性の違いを明らかにする。
- (3) 速い短潜時の発声制御と遅い長潜時の発声制御に関連して賦活する脳部位を脳機能計測により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 発声制御実験

本研究では、変換聴覚フィードバックに対する遅い発声 F_0 応答を解析するために疑似聴覚フィードバック法 (岡崎ら, 2010) を用いた。予めピッチ変化を施した音声を発声と同時に提示するため、聴覚フィードバックを

発声と独立かつ定量的な操作を可能とする。

参加者：健常男性 8 名 (19 - 33 歳)、健常女性 8 名 (22 - 24 歳)、吃音男性 10 名 (18 - 35 歳、重症度は軽度から中等度)。実験前に書面で参加者の同意を得た。実験は所属機関の倫理審査委員会の承認を得て行われた。

提示刺激：疑似聴覚フィードバック音声は MIDI 音源 (男声: $F_0 = 120$ Hz、女声: $F_0 = 240$ Hz) を加工した合成音声であり、合成音声のピッチ (音高) を変化量 100 cent でステップ状に変化させた。ピッチ変化方向は上昇 (U)、下降 (D)、または変化なし (N) の 3 条件とした。発声開始から 1 秒後に 500 ms のピッチ変化が 1 秒周期で 4 回生じた。

課題：参加者は母音 (/a/) を一定の音高を保つようにして 5 秒間持続発声した。発声中の自己音声を遮蔽するため背景雑音を提示した。

装置：発声の開始と終了を画面上の視覚刺激で合図し、音声と視覚刺激は PC および刺激提示プログラム (neurobehavioral systems, Presentation) で制御した。疑似聴覚フィードバック音声と背景雑音をミキサーで混合し、ヘッドセットへ両耳提示した。被験者の発声と疑似聴覚フィードバック音声はマイクを通じデジタルレコーダで記録した。実験は防音室で行った。

データ解析：発声応答の周波数解析を行い (自己相関法、解析窓 25 ms、ステップ幅 10 ms)、 F_0 系列を抽出した。 F_0 変調前の発声 F_0 を基準に相対値 (cents) へ変換した。さらに、主成分分析で潜時の異なる複数の応答成分を分離し、各主成分の因子負荷量を統計的に検定した。

(2) 脳機能計測

発声制御実験と同様の実験パラダイムを用い、fMRI による脳機能計測を行った。

参加者：健常男性 10 名 (20 - 36 歳)、吃音男性 5 名 (22 - 41 歳、軽度から中等度)。

提示刺激と課題：参加者本人の音声を予め録音し、加工した合成音声 (母音 /a/ の持続音声) を疑似聴覚フィードバック音声として使用した。ピッチ変化は 1 回、持続時間を 0 ms (変化なし) - 1000 ms まで 250 ms 毎に 4 条件設定した。ピッチ変化のオフセットを基準に撮像開始時間を設定した。課題遂行中の撮像音の干渉を防ぐため、間欠画像法を用いた。データ撮像は 1.5 T の MRI 装置で行い、結果を SPM8 で解析した。撮像前に同じ課題を防音室で行い、発声応答を記録した。

4. 研究成果

(1) 健常者の発声 F_0 制御特性と男女差

発声中に生じる疑似聴覚フィードバックの F_0 変調に対し、持続的な補正応答を観察した。補正応答の潜時とピーク値には男女差

があり、健常男性群では健常女性群に比べ補正応答の潜時が長く過渡的で、補正応答の振幅は小さい傾向があった (図 1)。

主成分分析の結果、寄与率 5% 以上の 3 つの主成分 (第 1 主成分: 潜時 620 ms、第 2 主成分: 潜時 280 ms、第 3 主成分: 潜時 190 ms) を得た (図 2)。これらの主成分の時定数は先行研究とほぼ一致し (岡崎ら、2010)、因子負荷量の男女差が有意であった。

この結果は、聴覚・発声間の誤差検出に基づく発声 F_0 制御に、時定数の異なる複数メカニズムが関与することを示唆した。男性の発声 F_0 制御のゲインは低く抑制的で、このような聴覚フィードバック経路の機能的な男女差は、発達性吃音における男女差、すなわち、男性の高い発症率と低い治癒率に影響している可能性がある。

(2) 吃音男性の発声 F_0 制御特性

吃音男性群では、健常男性群に比べ疑似聴覚フィードバックの変調に対する補正応答が遷延し、補正応答からベースラインの F_0 へ復帰しづらい傾向が見られた (図 3)。

主成分分析の結果、寄与率 5% 以上の 3 つの主成分 (第 1 主成分: 潜時 600 ms、第 2 主成分: 潜時 330 ms、第 3 主成分: 潜時 170 ms) を得た (図 4)。第 1 主成分の負荷量で吃音の有無の主効果が有意であったが、より潜時の短い主成分では有意差はなかった。

この結果は、発話の流暢性に障害のある吃音男性で、聴覚・発話間の誤差検出と不随意的な補正が機能することを示す。一方で、吃音男性では聴覚入力ゲインに応じた遅い F_0 調整が遅れるか、あるいは困難な可能性があり、この遅い潜時の発声制御メカニズムと吃音者の発話の非流暢性との関連があり得る。

(3) 発声 F_0 制御の関連脳部位

fMRI 実験の結果、発声中の疑似聴覚フィードバックの変調持続時間の長さに応じて、異なる脳部位の賦活が観察された (図 5、6)。また、健常男性と吃音男性の活動部位を比較したところ、聴覚フィードバックの変調持続時間 750 ms と 1000 ms の条件において、右一次運動野、小脳、下前頭回、被殻、島の賦活に有意差がみられた。これらの脳部位は、発声制御実験で明らかにされた潜時 600 ms 以降の遅い制御メカニズムを含む、発声 F_0 制御の神経基盤であると考えられる。吃音男性では、健常男性と異なる神経経路や賦活量が遅い発声 F_0 制御に影響する可能性が示された。

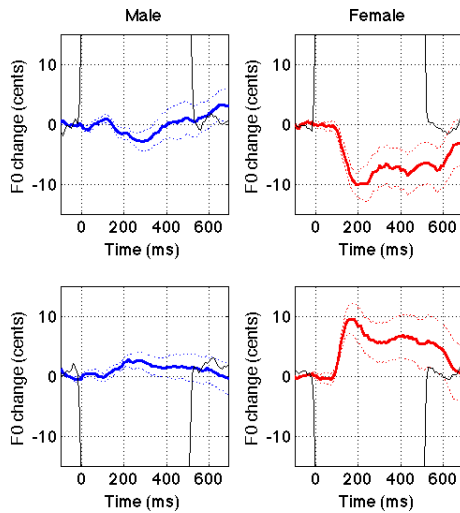


図1. 男性群と女性群の発声 F_0 応答。
男性8名(左段、青線)、女性8名(右段、赤線)の結果を示す。点線は標準誤差。上段は上昇条件(U)、下段は下降条件(D)の応答波形を示す。

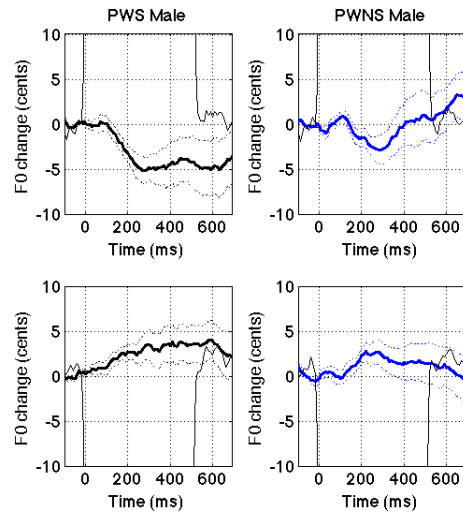


図3. 吃音男性群と健常男性群の発声 F_0 応答。
吃音男性8名(左段、黒線)、健常男性8名(右段、青線)の結果を示す。点線は標準誤差。上段は上昇条件(U)、下段は下降条件(D)の応答波形を示す。

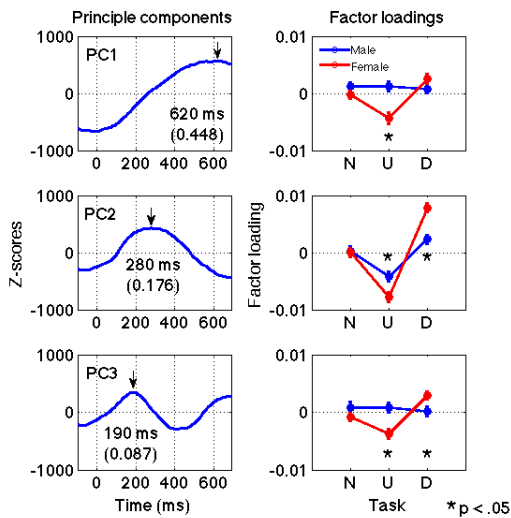


図2. 補正応答を構成する3つの主成分と因子負荷量。
左段は各主成分のZ得点を示し、各パネルの()内の数値は寄与率、矢印はピーク潜時を示す。右段は、男性群(青線)、女性群(赤線)の変化なし条件(N)、上昇条件(U)、下降条件(D)の因子負荷量。*は有意差の見られた条件。

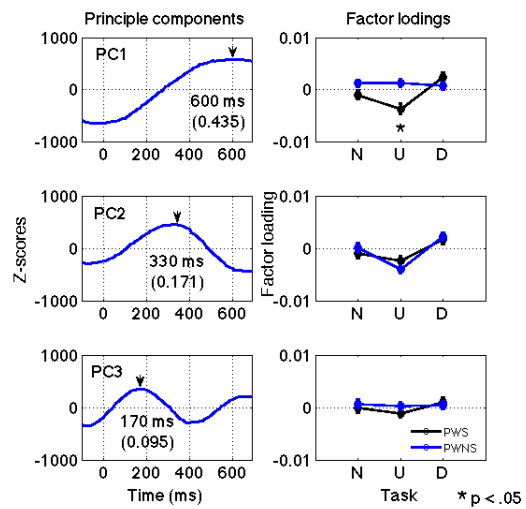


図4. 補正応答を構成する3つの主成分と因子負荷量。
左段は各主成分のZ得点を示し、各パネルの()内の数値は寄与率、矢印はピーク潜時を示す。右段は、吃音男性群(黒線)、健常男性群(青線)の変化なし条件(N)、上昇条件(U)、下降条件(D)の因子負荷量を示す。*は有意差の見られた条件。

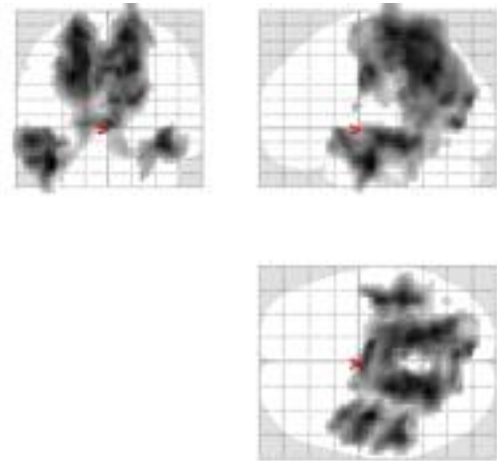


図5. 健常男性で補正応答に関連して活動した脳部位の一例
(変調持続時間 500 ms > 250 ms)

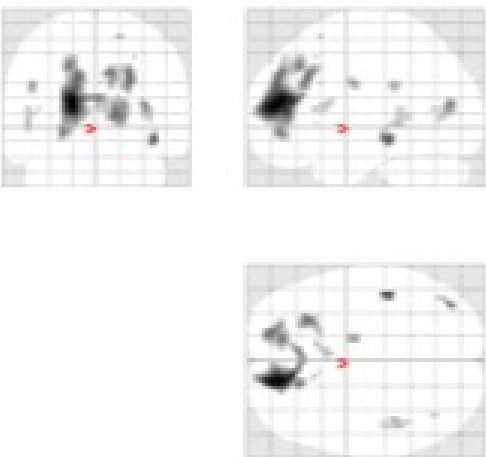


図6. 吃音男性で補正応答に関連して活動した脳部位の一例
(変調持続時間 500 ms > 250 ms)

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)

[学会発表] (計2件)

- ① 岡田美苗・森浩一・岡崎俊太郎他. 変換聴覚フィードバック課題における発声 F0 応答の男女差. 音声聴覚研究会：電子情報通信学会・日本音響学会共催. 2012/3/8-9, 埼玉.
- ② Okada, M., Mori, K., Okazaki, S., & Cai, C. Gender differences in voice F_0 control to pitch-shifted auditory feedback. Abstract of 42nd annual meeting of Society for Neuroscience. 2012/10/13-17, New Orleans, USA.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 美苗 (OKADA MINAE)

国立障害者リハビリテーションセンター
(研究所)・研究所 感覚機能系障害研究部・流動研究員

研究者番号：40586442