

原 著

吃音者における遅延聴覚フィードバック下の流暢性発話に関する脳活動
— 近赤外分光法を用いて —

石田 修

自己の発話が数百ミリ秒程度遅れて聞こえる遅延聴覚フィードバック (DAF) 下では、一部の吃音者は吃音症状が軽減するという DAF 効果が現れる。しかし、DAF 下で吃音が改善する要因や吃音者間で DAF 効果が異なる要因は明らかにされていない。本研究では、DAF 効果と脳活動の関連を調べるため、近赤外線分光法 (NIRS) を用いて、吃音者 11 名を対象に正常聴覚フィードバック (NAF) 条件下と DAF 条件下の脳活動を検討した。その結果、吃音者は NAF 条件よりも DAF 条件で左中心前回と左下前頭回に相当する部位で有意な oxy-Hb の増大が認められた。また、行動指標から DAF 条件で非流暢性が悪化した吃音悪化群 7 名と、改善した吃音改善群 4 名の 2 群に分類し、その脳活動を検討した。その結果、吃音悪化群では右上側頭回近傍に相当する部位、吃音改善群では左上側頭回近傍と左中心前回に相当する部位で活動が亢進していた。これらのことから、吃音者には聴覚情報処理特性の異なるサブタイプが存在する可能性が示唆された。

キー・ワード：吃音 流暢性発話 遅延聴覚フィードバック 近赤外分光法 上側頭回

I. 問題と目的

吃音は、音・音節の繰り返しや引き伸ばし、構音運動の停止などで発話が非流暢になる小児期発症の流暢性障害である (DSM-V)。吃音症状は幼児の 3~4% に現れ、その多くは自然治癒するが、約 1% は成人期になっても残存する (Bloodstein, 1995)。

吃音者は、数名が同時に文章を音読する斉読や独り言、白色雑音による聴覚遮断などの状況下では、吃音症状が軽減する (Andrews, Craig, Feyer, Hoddinott, Howie, & Neilson, 1983)。また、自己の発話を数十ミリ秒から数百ミリ秒遅らせて気導フィードバックする遅延聴覚フィード

バック (Delayed Auditory Feedback: 以下、DAF とする) 下でも、一部の吃音者は吃音症状が軽減する (Soderberg, 1969)。一方、日常で発話が流暢な健常話者は DAF 下で非流暢な発話になる (Lee, 1950)。このような現象は DAF 効果と呼ばれ、これまで様々な課題や実験条件下で行動面の変化を検討した研究が数多く行われてきた (例えば、Andrade & Juste, 2011; 永測, 1973)。

さらに、近年では陽電子放射断層撮影法 (Positron Emission Tomography: 以下、PET とする) や機能的磁気共鳴画像法 (Functional Magnetic Resonance Imaging: 以下、fMRI とする) を用いて、健常話者と吃音者を対象に DAF 下の脳活動が検討され、DAF 効果とその発生機序が明らかにされつつある。

fMRI や PET を用いて DAF 下の脳活動を検討

筑波大学大学院人間総合科学研究科・さいたま市立仲本小学校

した研究によれば、健常話者は、DAF条件においてフィードバックされる音声周波数変調させた条件よりも両側の上側頭回、左運動野、右下前頭回が活性化される (Hirano, Kojima, Naito, Honjo, Kamoto, Okazawa, Ishizu, Yonekura, Nagahama, Fukuyama, & Konishi, 1997)。また、DAF条件下では両側の上側頭回の活性と非流暢性発話の発生頻度との間に有意な正の相関があることや (Hashimoto & Sakai, 2003)、DAFの遅延時間が長くなるほど両側の上側頭回の活動が増大することから (Takaso, Eisner, Wise, & Scott, 2010)、両側の上側頭回の活動は遅れてフィードバックされる言語音知覚の向上にもなって生じる発話の非流暢性を反映するものと考えられる。

一方、健常話者と吃音者を対象に含めfMRIを用いてDAF下の脳活動を検討した研究も報告されている (Sakai, Masuda, Shimotomai, & Mori, 2009; Watkins, Smith, Davis, & Howell, 2008)。行動指標では、健常話者は遅延時間がなく即時に気導フィードバックされる正常聴覚フィードバック (normal auditory feedback : NAF) 条件よりもDAF条件で発話が非流暢になるが、吃音者は、NAF条件とDAF条件で非流暢性頻度に有意差はなく、両条件とも比較的流暢に発話できていた。また、脳活動は、両群に共通してDAF条件で右上・中側頭回、右下前頭回が活性化された。これらの研究では、吃音者においてNAF条件とDAF条件で比較的流暢に発話できていた要因として、DAFによる吃音症状の軽減効果だけでなく、fMRIの特性である撮像中の騒音や狭いガントリーも流暢性発話に影響を及ぼしていた可能性があるとして推測されている (Sakai et al. 2009; Watkins et al. 2008)。吃音者は、DAF以外にも、ノイズ等で聴覚フィードバックが遮断される騒音下や独り言などの自己の発話に対する聴覚的注意が逸れる状況下で吃音症状が軽減されるため (Andrews et al. 1983)、どの因子が流暢な発話をもたらしたのかは不明であり、検討の余地がある。また、騒音環境下では、静かな環境よりも発話の音圧・ピッチが上昇し、話す

速度が低下するロンバール効果が生じ (Siegel & Kennard, 1984)、聴覚や運動に関する脳部位は騒音によって活動が亢進することも報告されている (Bandettini, Jesmanowicz, Van Kylen, Bim, & Hyde, 1998; Elliott, Bowtell, & Morris, 1999; Tomasi, Caparelli, Chang, & Ernst, 2005)。したがって、吃音者を対象にDAF下の脳活動を検討する際は、流暢性発話に影響を及ぼす複数の独立変数 (DAF, 騒音, 独り言) を統制し、単一の独立変数 (DAF) 下での流暢性発話に関する脳部位を確認する必要がある。

そこで、本研究では行動研究と類似の条件下で実験ができる近赤外線分光法 (Near Infrared Spectroscopy : 以下、NIRSとする) に注目した。NIRSは、騒音がなく乳幼児や発達障害児でも測定可能な拘束性の少ない脳機能計測法である。NIRSを用いることで、DAF効果による流暢性発話時の脳活動を捉えられる可能性がある。

そこで本研究では、吃音者を対象にNIRSを用いて、騒音がない自然な発話環境下におけるDAF下の行動と脳活動の関連について検討する。さらに、従来から、DAF下では、吃音が改善する対象者と悪化する対象者に分かれることが知られているが (例えば、Naylor, 1953)、両者で相違が生じる要因については明らかにされていない。そのため、本研究では、吃音者間でDAF効果が異なる要因についての基礎的資料を得ることを目的に、両者での群間比較も併せて行う。

II. 方法

1. 対象者

吃音者12名 (男性10名, 女性2名, 平均年齢32.42歳±13.39歳) を対象とした。対象者は全員、知的な遅れや神経学的な異常は認められなかった。吃音者はセルフヘルプグループから実験協力者を募集し、実験の内容及び個人情報について説明を行った上で、書面にて同意を得た。

対象者には、Edinburgh inventory (Oldfield,

1971)に基づく利き手検査を実施した。同テストのスコアは+1から-1の値をとり、正が右利き、負が左利きを示し、より絶対値が大きいほど強い右利き、左利きを表す。全対象者のEdinburgh inventory (E.I) のスコアの平均と標準偏差は 0.82 ± 0.53 であり、このうち右利きでない者(1名)は解析から除外した。

吃音の重症度は、音読課題終了後に別の音読課題(モーラ数:190)を実施し、音読場面を録音したものから非流暢性割合(=非流暢性の分節数/総文節数 $\times 100$)を算出し(小澤・原・鈴木・森山・大橋, 2013)、吃音重症度評定尺度(Johnson, Darley, & Spriesterbach, 1963)に当てはめ、0~7の8段階で評定した。吃音重症度の評定結果は1が6名、2が1名、4が3名、5が1名であった。

2. 課題及び手続き

(1) 刺激: 音読に用いた刺激は「イソップ寓話集」から2編(A, B)が選定され(A:モーラ数294, 漢字出現率30%; B:モーラ数292, 漢字出現率31%)、ディスプレイ(48cm \times 27cm)の中央に各文字サイズをおよそ縦1cm \times 横1cm(フォントサイズ:20pt)で横書きの文章が提示された。

また、NIRS計測のベースラインとするため、注視点として「+」を設けて白色背景のディスプレイ中央に提示した。

(2) 条件: NAF条件とDAF条件の2条件を設定した。NAF条件では、音読の際に録音された対象者の音声即時にヘッドホンを通してフィードバックされた。DAF条件では、録音された対象者の音声が、発話から“200ミリ秒(ms)”遅延してフィードバックされた。なお、本研究のDAF条件における音声遅延時間は、吃音者を対象にDAF下の脳活動を検討した先行研究(Sakai et al. 2009; Watkins et al. 2008)と同様に200msに設定した。

音声フィードバックにはMulti Effector (RFX-2000, Zoom Corporation)を使用した。対象者の音声はマイクロフォンで受け、気導音による影響を取り除くため密閉型インナーイヤード

ホン(SONY MDR-EX35LP)を対象者の両耳に装着してフィードバックした。発話記録は、ICレコーダー(OLYMPUS Voice Trek V-22)により記録した。

(3) 手続き: 対象者は椅子に着座し、その眼前60cmにパソコンのディスプレイが、口元15cm以内にはマイクが配置され、イヤホンを装着した。

対象者には、ディスプレイに提示された文章を30秒間音読するよう求める音読課題を実施した。音読中は装着したイヤホンから提示される自分の声をよく聞き、出来るだけ正確に音読するよう教示した。また、音読課題の前後60秒間は注視点が提示され、画面中央の注視点を発話せずに注目するよう求めた。なお、DAF条件とNAF条件は対象者間でカウンターバランスをとり、音読時に提示される刺激Aと刺激BについてもNAF条件とDAF条件との間でカウンターバランスをとって実施した。

3. NIRS計測

NIRSは、近赤外光(700~900nmの波長の光)を照射し、その透過、反射光から生体内の酸素化ヘモグロビン(oxygenated-hemoglobin:以下、oxy-Hbとする)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxygenated-hemoglobin:以下、deoxy-Hbとする)、及び両者の加算である総ヘモグロビン(total-hemoglobin:以下、total-Hbとする)の濃度変化を検出する手法である。本研究では、島津製作所製の光脳機能イメージング装置(OMM-3000)を用いた。

記録チャンネル(ch)は4 \times 2の側頭葉ファイバホルダ下段の前方から2列目のプローブが国際10-20法のT3とT4になるように配置し、左右各10部位から脳血流を計測した。

Tsuzuki, Jurcak, Singh, Okamoto, Watanabe, and Dan (2007)やTzourio-Mazoyer, Landeau, Papathanassiou, Crivello F, Etard, Delcroix, Mazoyer, and Joliot (2002)の仮想的レジストレーションの結果から、右半球のch1、ch2、ch5、ch6、および左半球のch12、ch13、ch15、ch16は上側頭回からシルビウス溝周辺にかけての領域と推定

された。右半球の ch4、ch8、ch9、ch10、および左半球の ch17、ch18、ch19、ch20は中・下側頭回に推定された。右半球のch7、および左半球の ch14は下前頭回に推定された。右半球の ch3、および左半球の ch11は中心前回に推定された (Fig.1)。

4. データ処理

(1) 行動指標：音読課題遂行中30秒間で各対象者が音読したモーラ数から吃音症状が現れたモーラ数を減算し、NAF条件とDAF条件における可読モーラ数を求めた。また、音読課題遂行中30秒間で吃音症状が現れた文節数を総文節数で除算し、100を乗算して、各条件における非流暢性割合 (= 非流暢性の分節数 / 総文節数 × 100) を算出した (小澤・原・鈴木・森山・大橋, 2013)。これらの行動指標は、*t*検定でNAF条件とDAF条件の間の条件間比較を行った。

また、DAF条件の非流暢性割合からNAF条件の非流暢性割合を減算し、これをDAF効果とした。さらに、本研究ではDAF効果の個人差に注目し、DAF条件においてNAF条件よりも非流暢性割合が増加して症状が悪化した吃音悪化群7名 (吃音重症度の評定結果は1が6名、2が1名) と、非流暢性割合が減少して症状が改

善した吃音改善群4名 (吃音重症度の評定結果は4が3名、5が1名)、の2群に分類した。

(2) 脳血流：脳血流については、oxy-Hbの変化が局所脳血流量と最もよく相関することが動物実験により検証されていることから (Hoshi, Kobayashi, & Tamura, 2001)、本研究では神経活動の指標として先行研究でも頻繁に使用されるoxy-Hb変化の分析を実施した (例えば、Fallgatter, Roesler, Sitzmann, Heidrich, Mueller, & Strik, 1997; Noguchi, Takeuchi, & Sakai, 2002)。oxy-Hbは、NAF条件とDAF条件の課題開始前10秒間の注視点の注視区間をベースラインとし、ベースライン区間の平均oxy-Hbの値がゼロになるよう補正された。各対象者のNAF条件とDAF条件における課題中30秒間のoxy-Hbの平均値を求め、チャンネルごとにNAF条件とDAF条件の間のpaired-*t*検定を行った。

さらに、吃音対象者の中にもDAF条件で非流暢性発話が改善する対象者や悪化する対象者がいることに注目した。しかし、本研究では吃音改善群4名および吃音悪化群7名と対象者が少ないことから、十分な検定力が期待できない t 検定を避け、今後の吃音者研究において関心領域とする脳部位やサンプルサイズを決める基

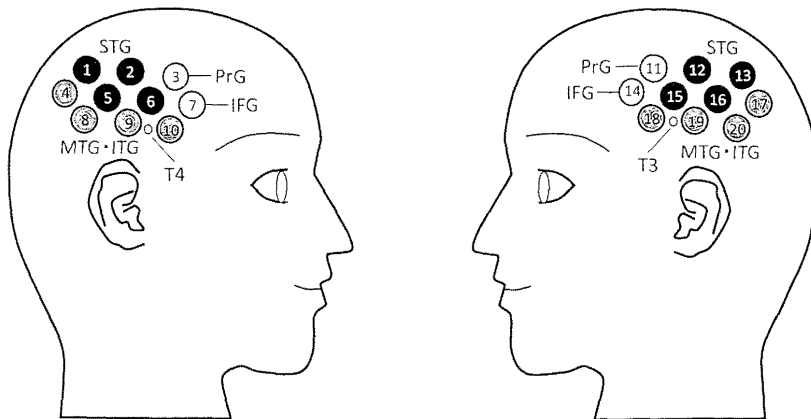


Fig. 1 左右側頭部におけるチャンネルの配置

Superior temporal gyrus(STG), Middle/Inferior temporal gyrus(M/ITG), Precentral gyrus(PrG), Inferior frontal gyrus(IFG)

礎資料とするため、各群におけるDAF条件とNAF条件の間のCohen's d を算出した。さらに、DAF条件とNAF条件の活性部位の違いを予備的に検討するため、群間のCohen's d も算出した。

また、吃音対象者の平均oxy-Hbについて条件間のpaired- t 検定を実施した結果、DAF条件とNAF条件の間で有意差が認められたチャンネルについては、 t 値と仮想的レジストレーションのMNI座標を用いて、MNI標準脳上にカラーマップを作成した。吃音改善群と悪化群の条件間、および群間のCohen's d についても、中程度の効果量(0, 5以上)を目安とし、その値をMNI標準脳上に描出してカラーマップを作成した。一連のカラーマップの作成には、NRFIのソフトウェアパッケージを用いた(Singh, Okamoto, Dan, Jurcak, & Dan, 2005)。

Ⅲ. 結果

1. 行動指標

可読モーラ数の平均と標準偏差は、NAF条件において128.64±39.05モーラ、DAF条件において100.27±22.19モーラだった。各条件における可読モーラ数について t 検定で条件間比較を実施したところ、DAF条件にける可読モーラ数はNAF条件よりも有意に減少した($t(10) = 3.61, p < .01$ Paired t-test)。

非流暢性割合の平均と標準偏差は、NAF条件において7.92±8.39%、DAF条件において12.10±6.12%だった。各条件における非流暢性割合について t 検定で条件間比較を実施したところ、DAF条件とNAF条件との間に有意な差は認められなかった。 $(t(10) = 1.03, n.s. Paired t-test)$ 。

また、実験の終了後に、2つの条件に対する読みの困難さの比較についての内省報告を聴取したところ、DAF条件の方がNAF条件よりも読みが困難であったという対象者7名(以下、吃音悪化群とする)と、DAF条件の方がNAF条件よりも読み易かったという対象者4名(以下、吃音改善群とする)の2群に分かれた。

そこで、吃音悪化群と吃音改善群の2群につ

いて、それぞれ非流暢性割合を算出した。その結果、吃音悪化群における非流暢性割合の平均と標準偏差は、NAF条件において2.81±3.49%、DAF条件において15.05±5.65%で、DAF条件で非流暢性割合が増加し、DAF条件では特に構音の誤りや語尾の繰り返し、引き伸ばし等の非流暢な発話が認められた。吃音改善群における非流暢性割合の平均と標準偏差は、NAF条件において16.86±6.83%、DAF条件において6.95±2.31%で、DAF条件で非流暢性割合が減少した。

2. 脳血流

(1) NAF条件とDAF条件の比較：音声フィードバックの遅延が脳活動に及ぼす影響を調べるため、各チャンネルにおけるDAF条件とNAF条件の課題中の平均oxy-Hbについて t 検定を実施した(Fig. 2)。その結果、DAF条件ではNAF条件に比べて、右上側頭回からシルビウス周辺の領域(ch5)、左中心前回(ch11)、および左下前頭回(ch14)で1%水準の有意なoxy-Hbの増大が認められた($t(10) = 4.18 \sim 4.36, p < .01$ Paired t-test)。他のchではDAF条件とNAF条件との間に有意な差は認められなかった。

(2) 吃音改善群と悪化群の脳活動とその比較：また、吃音悪化群と吃音改善群における脳血流の変化を比較するため、DAF効果の大きさを表す指標として、効果量(Cohen's d)を算出した。各群における効果量の結果をFig.3およびTable 1に示す。その結果、吃音改善群では、右上側頭回からシルビウス周辺の領域(ch1, 2)、左上側頭回からシルビウス周辺の領域(ch12, ch13, ch16)、左中心前回(ch11)、左下前頭回(ch14)で、DAF条件とNAF条件の間のoxy-Hbの差に中程度以上の効果量が認められた。一方、吃音悪化群では、右上側頭回からシルビウス周辺の領域(ch1, 5)、右中・下側頭回(ch4, 9)、左中心前回(ch11)、左下前頭回(ch14)で条件間のoxy-Hbの差に中程度以上の効果量が認められた。

これらのDAF条件における吃音の改善/悪化の脳活動の違いを予備的に検討するため、DAF-

NAFの差について群間の効果量を算出した結果をFig.4およびTable 1に示す。その結果、吃音改善群では悪化群に比べて、左上側頭回からシルビウス周辺の領域 (ch12, 13, 16) でoxy-Hbが増大する傾向にあり、中程度以上の効果量が認められた。一方、吃音悪化群では改善群に比べて、右上側頭回からシルビウス周辺の領域 (ch5) や右中/下側頭回 (ch9) でoxy-Hbが増大する傾向にあり、中程度以上の効果量が認められた。

IV. 考察

行動指標では、読み上げた音声が遅れてフィードバックされるDAF下において、一部

の吃音者では吃音症状が改善することが報告されている (Soderberg, 1969)。近年、これらの機序を検討するため、fMRIを用いた研究が行われるようになった。fMRIを用いた先行研究では (Sakai et al. 2009; Watkins et al. 2008)、吃音者はNAF条件とDAF条件のいずれの条件でも流暢な発話に改善された。しかし、fMRIの環境下における吃音者の流暢な発話は、DAFによる改善効果のみならず、fMRI計測時の騒音による改善効果 (マスキング効果) が重畳している可能性も指摘されている。また、独り言では吃音症状が軽減することも報告されており、騒

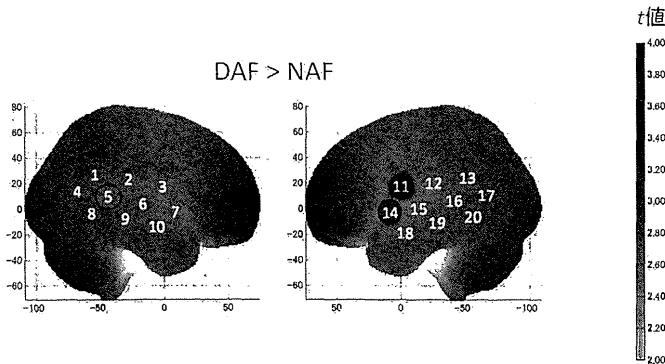


Fig. 2 NAF条件とDAF条件における脳活動のマップ (条件間比較)

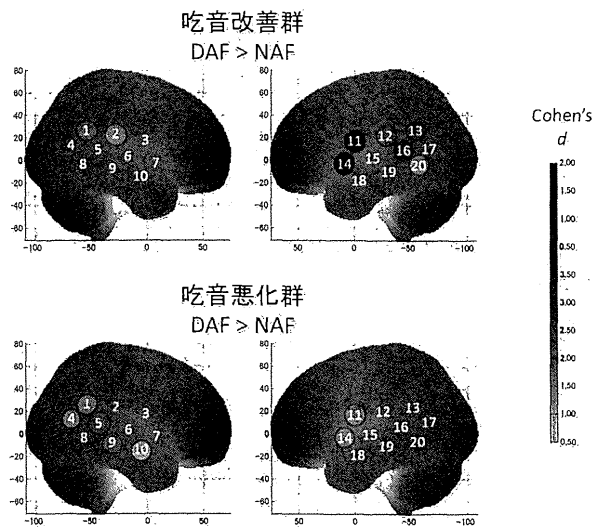


Fig. 3 吃音改善群と吃音悪化群におけるNAF条件とDAF条件の効果量 (条件間比較)

Table 1 吃音改善群と吃音悪化群における条件間及び群間の効果量

		改善群	悪化群	群間	
		DAF > NAF	DAF > NAF	改善群 > 悪化群	悪化群 > 改善群
R STG	Ch 1	0.917	0.675		
	Ch 2	0.635			
	Ch 5		1.170		0.652
R M/ITG	Ch 4		0.703		
	Ch 9		0.913		0.542
	Ch 10		0.512		
L STG	Ch 12	1.194		0.565	
	Ch 13	1.700		0.759	
	Ch 16	1.964		0.715	
L M/ITG	Ch 20	0.629			
L PrG	Ch 11	2.455	0.753		
L IFG	Ch 14	3.021	0.706		

Superior temporal gyrus(STG), Middle/Inferior temporal gyrus(M/ITG), Precentral gyrus(PrG), Inferior frontal gyrus(IFG), R(Right), L(Left)

音が鳴る中、狭いガントリー内に一人で発話を行うfMRIの研究では、DAF・騒音・独り言のいずれの要因で吃音症状が改善されるかを検討するには限界があった。そこで、本研究では、騒音と独り言の要因を除いた実験環境を設けて、吃音者11名を対象にNAF条件下とDAF条件下における発話と脳活動の関連について

NIRSを用いて検討した。

その結果、行動指標では、NAF条件よりもDAF条件で非流暢性割合が増加した対象者7名(吃音悪化群)と非流暢性割合が減少した対象者4名(吃音改善群)に分かれた。そのような結果は、先行研究でも報告されており、重症の吃音者の方がDAF下で吃音が改善しやすい

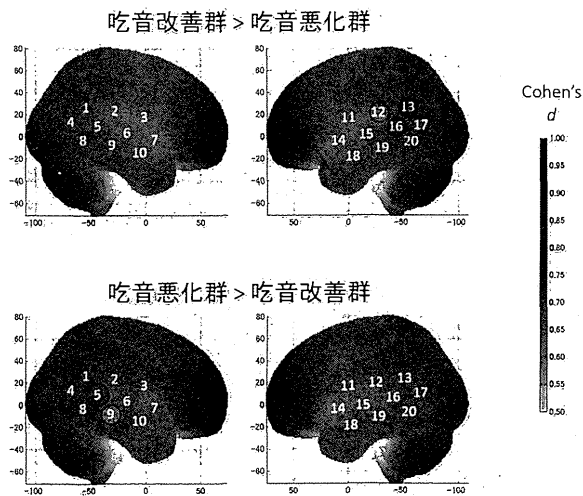


Fig. 4 吃音改善群と吃音悪化群における脳活動の差に関する効果量 (群間比較)

という従来の知見とも一致した (Naylor, 1953)。

吃音悪化群と吃音改善群の2群の脳血流について予備的に検討を行ったところ、吃音悪化群ではDAF条件において右上側頭回近傍 (ch1, 5)、右中・下側頭回 (ch4, 9)、左中心前回 (ch11)、左下前頭回 (ch14) に相当する部位がNAF条件よりも活性化される傾向にあり、側頭葉の脳活動は右半球の方が顕著であった。一方、吃音改善群ではDAF条件において右上側頭回近傍 (ch1, 2)、左上側頭回近傍 (ch12, ch13, ch16)、左中心前回 (ch11)、左下前頭回 (ch14) に相当する部位がNAF条件よりも活性化される傾向にあり、側頭葉の脳活動は左半球の方が顕著であった。

さらに、群間の効果量を比較したところ、吃音悪化群では右上側頭回近傍 (ch5) と中・下側頭回 (ch9) で改善群より活性化される傾向がある一方、吃音改善群では左上側頭回近傍 (ch12, 13, 16) で悪化群より活性化される傾向にあり、DAF条件における側頭葉の脳活動の側性化の様相は群間で異なっていた。DAF条件で吃音が悪化した対象者で顕著な脳活動がみられた右上・中・下側頭回は、健常話者を対象としたfMRIやPETの先行研究でもDAF条件で活性化されることが報告されている (Hashimoto et al. 2003; Hirano et al. 1997; Sakai et al. 2009)。これらの研究では、呈示された短文や単語を音読中に、読み上げた音声が遅れて聞こえてくると、言語音知覚や音韻意識に関わる上・中側頭回や縁上回が活動することが報告されている。また、言語音への聴覚的注意が向いていると上側頭回は右優位に活動することも明らかにされている (Hashimoto et al. 2003; Sakai et al. 2009)。これらのことから、読み上げた音声が遅れて聴覚フィードバックされる際、その言語音に対する聴覚的注意が向くほど、その後の発話の運動制御が困難になり、発話が非流暢になるものと考えられる。

一方、DAF下で吃音改善群においてのみ顕著に活動が認められた脳部位は、左上側頭回近傍に相当する部位であった。そのため、左上側頭

回近傍は、DAF効果による吃音の改善に特異的に関与する脳部位である可能性が考えられる。吃音改善群で活動が認められた左上側頭回は、音韻の符号化に関与すると考えられている (Graves, Grabowski, Mehta, & Gupta, 2008; Indefrey & Levelt, 2004; Levelt, Praamstra, Meyer, Helenius, & Salmelin, 1998)。吃音者の言語処理に焦点をあてた研究では、吃音者は健常話者と比べて音韻を符号化するのに時間がかかることが指摘されている (Postma, & Kolk, 1993; Sasisekaran, & De Nil, 2006; Sasisekaran, De Nil, Smyth, & Johnson, 2006)。また、fMRIやPETの研究では、吃音生起中には左上側頭回の活動が低下しているが、斉読などで吃音症状が改善すると左上側頭回が活性化されることも報告されている (Braun, Varga, Stager, Schulz, Selbie, Maisog, Carson, & Ludlow, 1997; De Nil, Kroll, Lafaille, & Houle, 2003; Fox, Ingham, Ingham, Hirsch, Downs, Martin, Jerabek, Glass, & Lancaster, 1996; Fox, Ingham, Ingham, Zamarripa, Xiong, & Lancaster, 2000)。本研究においても、吃音改善群における左上側頭回近傍相当部位の活動は吃音症状の改善に関連すると考えられ、DAFや斉読などによって吃音者における音韻の符号化の遅れが改善することを示唆しているのではないだろうか。本研究では、吃音者において音韻符号化に関する実験は実施していないものの、DAFによる改善効果の有無の背景には、群間で音韻符号化の遅れなどに違いがある可能性が考えられる。

さらに、吃音改善群ではDAF条件において左中心前回と左下前頭回でNAF条件よりも顕著に高い効果量がみられ、吃音悪化群の効果量よりも顕著に高かった。では、群間で効果量の差がみられる背景には、どのような要因が関与しているのだろうか。健常話者を対象にfMRIでDAF下における発話の非流暢性／流暢性と脳活動の関係を調べた先行研究によれば (Nota et al., 2011)、DAF下で流暢な発話が維持できる対象者は発話の運動プランニングに関与する左運動前野、左下前頭回、補足運動野が活性化さ

れることが報告されている。また、左中心前回、補足運動野、島皮質はDAF効果と負の相関があることから、DAF下で流暢な発話が維持できるほど、発話運動のプランニングに関わる脳部位の活動が増大することが示唆されている。このことから、吃音改善群では、DAF下で左中心前回と左下前頭回の活動が惹起され、発話が流暢になったものと考えられる。

本研究では言語音が遅れて聴覚フィードバックされるDAF下で、吃音症状が改善した群と悪化した群で側頭葉の側性化の様相が異なっていた。このことは、吃音者間で聴覚情報処理特性が異なるサブタイプが存在する可能性を示唆するものと考えられる。こうした吃音者間の聴覚情報処理特性の違いによって、DAFによる吃音改善の有無や脳活動の様相も異なるものと考えられる。

従来のは仮説では、吃音者は自己の発話に対する聴覚フィードバックの知覚に障害があると考えられており (Mysak, 1960)、セルフモニタリング機能の障害との見方もある。吃音と併存することもある異常な発話速度の速さや不規則さを特徴とするクラッタリングは、その症状の要因の一つにセルフモニタリング機能の障害があり、DAFによって自身の発話への注意を高めると症状が改善する場合がある (Louis, Kenneth, Myers, Cassidy, Michael, Penrod, Litton, Coutras, Olivera, & Brodsky, 1996)。日本語版クラッタリングチェックリストの適用可能性を検討した宮本 (2011) の研究では、学齢期の吃音を主訴とする児童のうち、15.9%がクラッタリングに該当していたことが報告されている。今後、吃音者を対象にDAF効果を検討する場合には、クラッタリングを併存する対象者が含まれているか否かを精査して、検討していく必要もあるだろう。

本研究では、吃音者間でDAF効果が異なる要因について予備的検討を行った。これまでDAF下で吃音の改善／悪化が生じる機序に着目して検討を試みた研究は筆者の知る限り見当たらない。今後、本研究の結果をもとに、パラ

メトリック検定に十分耐え得るサンプルサイズを確保し、更なる検討を加えることで、DAF下で吃音の改善／悪化が生じる機序解明につながるものと思われる。また、DAF下で吃音症状が改善した対象者と悪化した対象者では脳活動の様相も異なっていたことから、吃音者には聴覚情報処理特性の異なるサブタイプが存在し、そのタイプによって吃音症状が生じる機序や原因、並びに症状に効果的な支援の在り方が異なると考えられる。今後、聴覚情報処理特性の観点から吃音の発症要因を検討していくことで、各々のタイプに応じた支援法の選択やその効果予測の一助になることが期待される。

謝辞

本研究を実施するにあたり、実験の実施及び結果の分析について、高崎健康福祉大学の小林久男教授、鶴ヶ島市立栄小学校の河野武志氏に終始適切なお助言を賜り、ご指導いただきました。ここに感謝の意を表します。

文献

- American Psychiatric Association (2013) *Diagnostic and statistical manual of mental disorders. Fifth Edition: DSM-5*. Washington, D.C.
- Andrade, CR. & Juste, FS. (2011) Systematic review of delayed auditory feedback effectiveness for stuttering reduction. *Jornal da Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia*, 23 (2), 187-191.
- Andrews, G., Craig, A., Feyer, AM., Hoddinott, S., Howie, P., & Neilson, M. (1983) Stuttering: a review of research findings and theories circa 1982. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 48 (3), 226-46.
- Bandettini, PA., Jesmanowicz, A., Van Kylen, J., Birn, RM., & Hyde, JS. (1998) Functional MRI of brain activation induced by scanner acoustic noise. *Magnetic Resonance in Medicine*, 39, 410-416.
- Bloodstein, O. (1995) *A handbook on stuttering (5th edition)*. San Diego, CA, Singular Publishing Group.
- Braun, AR., Varga, M., Stager, S., Schulz, G., Selbie, S., Maisog, JM., Carson, RE., & Ludlow, CL. (1997) Altered patterns of cerebral activity during speech and language production in developmental stuttering.

- Brain*, 120, 761-784.
- De Nil, L.F., Kroll, R.M., Lafaille, S.J., & Houle, S. (2003) A positron emission tomography study of short-and long-term treatment effects on functional brain activation in adults who stutter. *Journal of Fluency Disorders*, 357-380.
- Fallgatter, A., Roesler, M., Sitzmann, A., Heidrich, A., Mueller, T., & Strik, W. (1997) Loss of functional hemispheric asymmetry in Alzheimer's dementia assessed with near-infrared spectroscopy. *Cognitive Brain Research*, 6, 67-72.
- Fox, P.T., Ingham, R.J., Ingham, J.C., Hirsch, T.B., Downs, H.J., Martin, C., Jerabek, P., Glass, T., & Lancaster, J.L. (1996) A PET study of the neural systems of stuttering. *NATURE*, 382, 158-162.
- Fox, P.T., Ingham, R.J., Ingham, J.C., Zamarripa, F., Xiong, J.H., & Lancaster, J.L. (2000) Brain correlates of stuttering and syllable production A PET performance-correlation analysis. *Brain*, 123, 1985-2004.
- Graves, W.W., Grabowski, T.J., Mehta, S., & Gupta, P. (2008) The left posterior superior temporal gyrus participates specifically in accessing lexical phonology. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 20 (9), 1698-1710.
- Hashimoto, Y. & Sakai, K.L. (2003) Brain activations during conscious self-monitoring of speech production with delayed auditory feedback: An fMRI study. *Human brain mapping*, 20, 22-28.
- Hirano, S., Kojima, H., Naito, Y., Honjo, I., Kamoto, Y., Okazawa, H., Ishizu, K., Ynonekura, Y., Nagahama, Y., Fukuyama, H., & Kunishi, J. (1997) Cortical processing mechanism for vocalization with auditory verbal feedback. *Neuroreport*, 8, 2379-2382.
- Hoshi, Y., Kobayashi, N., & Tamura, M. (2001) Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *Journal of Applied Physiology*, 90, 1657-1662.
- Indefrey, P. & Levelt, W.J. (2004) The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, 92, 101-144.
- Johnson, W., Darley, F.L., & Spriesterbach, D.C. (1963) *Diagnostic Methods in Speech Pathology*. Harper & Low, New York.
- Lee, B.S. (1950) Effects of delayed speech feedback. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 824-826.
- Levelt, W.J., Praamstra, P., Meyer, A.S., Helenius, P., & Salmelin, R. (1998) An MEG study of picture naming. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10 (5), 553-567.
- Louis, S.T., Kenneth, O., Myers, F.L., Cassidy, L.J., Michael, A.J., Penrod, S.M., Litton, B.A., Coutras, S.W., Olivera, J.L., & Brodsky, E.V. (1996) Efficacy of delayed auditory feedback for treating cluttering: Two case studies. *Journal of Fluency Disorders*, 21, 305-314.
- 宮本昌子 (2011) 日本語版クラッタリングチェックリストの適用可能性の検討. *音声言語医学*, 52 (4), 322-328.
- Mysak, E. (1960) Servo theory and stuttering. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 25, 188-195.
- 永淵正昭 (1973) Delayed Auditory Feedbackに関する文献考察. *音声言語医学*, 14 (2), 52-60.
- Naylor, R.V. (1953) A comparative study of methods of estimating the severity of stuttering. *Journal of Speech and Hearing Disorders*, 18, 30-37.
- Noguchi, Y., Takeuchi, T., & Sakai, K.L. (2002) Lateralized activation in the inferior frontal cortex during syntactic processing: Event-related optical topography study. *Human Brain Mapping*, 17, 89-99.
- Nota, Y., Masaki, S., & Ichinose, Y. (2011) Brain activity during speech under delayed auditory feedback. *Proceedings of 9th international seminar on speech production*. 329-335.
- Oldfield, R.C. (1971) The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9, 97-113.
- 小澤恵美・原由紀・鈴木夏枝・森山晴之・大橋由紀江 (2013) 吃音検査法. 学苑社.
- Postma, A. & Kolk, H. (1993) The covert repair hypothesis: Prearticulatory repair processes in normal and stuttered disfluencies. *Journal of Speech and Hearing Research*, 36, 472-487.
- Sakai, N., Masuda, S., Shimotomai, T., & Mori, K. (2009) Brain activation in adults who stutter under delayed auditory feedback: An fMRI study. *International Journal of Speech-Language Pathology*, 11, 2-11.
- Sasisekaran, J. & De Nil, L. F. (2006) Phoneme monitoring in silent naming and perception in adults who stutter. *Journal of Fluency Disorders*, 31, 284-302.
- Sasisekaran, J., De Nil, L. F., Smyth, R., & Johnson, C. (2006) Phonological encoding in the silent speech of

- persons who stutter. *Journal of Fluency Disorders*, 31, 1-21.
- Siegel, GM. & Kennard, KL. (1984) Lombard and sidetone amplification effects in normal and misarticulating children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 27, 56-62.
- Singh, AK., Okamoto, M., Dan, H., Jurcak, V., & Dan, I. (2005) Spatial registration of multichannel multi-subject fNIRS data to MNI space without MRI. *Neuroimage*, 27, 842-851.
- Soderberg, GA. (1969) Delayed auditory feedback and the speech of stutterers: A review of studies. *Journal of Speech & Hearing Disorders*. 34, 20-29.
- Takaso, H., Eisner, F., Wise, RJ., & Scott, SK. (2010) The effect of delayed auditory feedback on activity in the temporal lobe while speaking: a positron emission tomography study. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 53, 226-236.
- Tomasi, D., Caparelli, E., Chang, L., & Ernst, T. (2005) fMRI-acoustic noise alters brain activation during working memory tasks. *Neuroimage*, 27, 377-386.
- Tsuzuki, D., Jurcak, V., Singh, AK., Okamoto, M., Watanabe, E., & Dan, I. (2007) Virtual spatial registration of stand-alone fNIRS data to MNI space. *Neuroimage*, 34, 1506-1518.
- Tzourio-Mazoyer, N., Landeau, B., Papathanassiou, D., Crivello, F., Etard, O., Delcroix, N., Mazoyer, B., Joliot, M. (2002) Automated anatomical labeling of activations in SPM using a macroscopic anatomical parcellation of the MNI MRI single-subject brain. *Neuroimage*, 15, 273-289.
- Watkins, KE., Smith, SM., Davis, S., & Howell, P. (2008) Structural and functional abnormalities of the motor system in developmental stuttering. *Brain*, 131, 50-59.

—— 2016.8.29 受稿、2017.1.22 受理 ——

Brain Activity in Adults who Stutter During Fluent Speech with Delayed Auditory Feedback: A Functional Near-infrared Spectroscopy Study

Osamu ISHIDA

Using the delayed auditory feedback (DAF) condition, in which one hears his/her own speech with a delay of a few hundred milliseconds, some stutterers show improvement in their stuttering symptoms. However, the underlying mechanisms of the effect of DAF on stutterers and the reported inter-individual variabilities have not been clarified. To examine the relationship between DAF effect and brain activity, we used near-infrared spectroscopy (NIRS) on 11 stutterers to record their brain activity under normal auditory feedback (NAF) and DAF conditions. The DAF induced a more pronounced increase in oxygenated hemoglobin in the left precentral and left inferior frontal gyri compared with the NAF. We next divided the stutterers into two groups based on their behavioral indicators after DAF, seven stutterers whose disfluency had worsened and four whose disfluency had improved, and explored their brain activity. The results revealed elevated brain activity in the right superior temporal gyrus in those with worsened stuttering, while those with improved stuttering displayed an increase in the activity proximity of the left superior temporal and left precentral gyri. These findings suggest that stutterers may comprise distinct subgroups that present different characteristics of their auditory information processing system.

Key words: stuttering, fluent speech, delayed auditory feedback, near-infrared spectroscopy, superior temporal gyrus