

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 17 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21700283

研究課題名（和文） 外国語音声模倣に関与する神経基盤の小児発達研究

研究課題名（英文） Developmental study of neural correlates involved in foreign speech sound imitation in children

研究代表者

橋爪 寛（HASHIZUME HIROSHI）

東北大学・加齢医学研究所・助教

研究者番号：60506640

研究成果の概要（和文）：

本研究では、核磁気共鳴画像法（MRI）を用いて、学童期から思春期の子どもの外国語音声の発話時の脳活動とその発達的变化、および外国語音声発話の巧さと脳形態の関係を調べた。結果として、外国語音声模倣中の脳活動は、年少の小児では母語の発話時とほぼ差がないが、年齢とともにその差が顕著になること、外国語音の発音の精度は年齢とともに向上すること、また、外国語発音の巧さに関連した脳形態の違いが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：

Using magnetic resonance imaging techniques, we explored brain activity during the speech production of unfamiliar foreign speech sounds in children (from child to adolescent), and the developmental changes. We also examined the relationship between the ability of foreign speech sound production and brain structure. In results, it was found that there were almost no difference in brain activity during speech production task between foreign and native speech sounds in younger children, however the difference became clearer with age, and that the degree of accuracy of foreign speech sound production gradually improved with age. Furthermore, we found a significant correlation between the degree of accuracy of foreign speech sound production and children's brain structure.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

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：(1)脳・神経 (2)認知科学 (3)音声学 (4)小児 (5)発達

### 1. 研究開始当初の背景

近年、機能的磁気共鳴画像法（fMRI）をはじめとする非侵襲的脳機能イメージング技術を利用した脳科学研究は、我々の第二言語

習得過程に関する脳内メカニズムの理解を大きく変えつつある。

国際化した社会では、より一層の外国語コミュニケーション能力が求められており、わが国の英語教育においても「読み書き」から

「聞く・話す」に、より重点が置かれるようになった。したがって、効果的な指導法・学習法開発の前提として、第二言語習得の音声処理メカニズムの解明が強く求められる。

これまでの音声処理に関する研究は、言語学、心理学、音声学、教育学などの学問領域で数々のモデルが提案されてきた。現在、それらの知見と fMRI などの脳機能イメージング技術を組み合わせることにより、第二言語習得の音声処理に関わる脳メカニズムが明らかになりつつある。

現在明らかになっていることは、音声知覚学習効果と神経モジュールの関係 (Callan et al. 2003, NeuroImage, Golestani and Zatorre 2004, NeuroImage) や、音声産出に関しては、申請者のグループによる外国語音声模倣の神経基盤を調べた研究がある (Hashizume et al. 2008, Human Brain Mapping 2008)。しかしながら、第二言語習得における脳機能イメージング研究は、そのほとんどが成人を対象としたものであり、特に外国語音声学習の基礎となる音声模倣については、小児を対象に調べられた報告は全く見当たらない。

行動観察に基づく第二言語習得研究によれば、外国語学習の成果と年齢の関係については議論が分かれているが、その音声習得に限っては、多くの研究者が年齢との関係が比較的強いとしている (林ら 2006)。たとえば、Scovel (1988)によれば、12 歳前後に音声面に関する「臨界期」があるとし、その裏付けとなる研究結果も多く存在する。このことから、この時期には、脳内の外国語音声習得に関与する神経基盤に発達に伴う何らかの変化が起こっている可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、音声面に関して何らかの神経基盤が変化していると考えられる年代を含む 6 歳～18 歳の小児を対象に、第二言語習得において重要な外国語音声模倣に関与する神経基盤を、脳機能イメージング技術を利用して調べ、成人との違いや、発達に伴う変化を明らかにすることである。

## 3. 研究の方法

### (1) 被験者

母国語が日本語である右利きモノリンガル小児 52 人 (6-18 歳) が、本実験に参加した。MRI 撮像中に 3mm 以上の体動 (3mm 以上) があった被験者と課題パフォーマンスが極端に低かった被験者のデータを解析から除外し、合計 38 人のデータを用いて解析を行

った。

なお、本研究は東北大学医学系研究科の倫理委員会から承認を受け、参加者と保護者からは書面で同意書を取得して行った。

### (2) 刺激として用いた外国語および母語の言語音

音声刺激として、母国語話者が発話した 1 音節の音声を用いた。外国語音声の刺激 (L2) には、日本語にはない音素を含み、日本人が外国語であると感じる 1 音節の音声を、ペルシャ語、韓国語、スペイン語、フランス語から 16 種類選んだ。また、コントロール刺激には、日本語の 16 種類の 1 音節の音声を選んだ (L1)。

### (3) fMRI 課題

被験者は、MRI 撮像中に L2 または L1 の音声を聞いて、即座に聞いた音を繰り返して発話した (繰り返し課題)。コントロール課題としての音声知覚課題では、2 つの音声を聞いて、同じか違うかを判断させた (弁別課題)。繰り返し課題では、同じ 1 音節を 2 回提示し、弁別課題では、1 音節を 2 回提示するが、50% の確率で同じ音節を提示した。発話の量をコントロールするため、弁別課題では、2 つの音声と同じ場合は「お」、違う場合は「ち」と声に出して答えさせた。

fMRI 撮像中の繰り返し課題および弁別課題における被験者の発話は、MRI 対応のノイズキャンセリングマイク (FOMRI II, Optoacoustics 社製) を用いて収集し録音した。

### (4) fMRI 実験タイムコース

fMRI 実験は、課題 (繰り返し課題と弁別課題) × 刺激 (L2 と L1) の 4 条件で構成され、それぞれ L2 の繰り返し (R2 条件)、L1 の繰り返し (R1 条件)、L2 の弁別 (D2 条件)、L1 の弁別 (D1 条件) とした。実験は、1 ブロック 20 秒、ブロック間のレスト 12 秒のブロックデザインで行った。1 つのブロックには、4 つのトライアル (5 秒) で構成した。

### (5) 外国語音声模倣 (産出) 精度の評価

刺激の言語毎に 2 人の母国語話者が、L2 の繰り返し課題 (R2) の被験者の発話精度を、1 (非常に強い外国語アクセントがある) から 9 (全く外国語アクセントがない) の 9 段階で評価し、すべての試行の平均値を、被験者の外国語音声模倣スコアとした。

## (6) MRI 画像の取得

フィリップス社製の3テスラMRIスキャナー (Intera Achiva) を用いてMRI撮像を行った。

### ① 脳機能MRI画像

脳機能MRI画像は、EPI (Echo planner image) として取得し、撮像パラメータは、Repetition time (TR) = 5 s、Echo time (TE) = 30 ms、flip angle = 90°、スライス厚 = 4 mm、スライスギャップ = 1.3 mm、Field of view (FOV) = 192 mm、マトリックスサイズ = 64 x 64、ボクセルサイズ = 3 x 3 x 5.3 mm、ボリューム数 = 119とした。今回は、刺激音声をできるだけ明瞭に聞き取らせるため、また、発話の際の頭の動きが画像に与える影響をできるだけ小さくするために、画像の取得をTRの最初の1.5 sで行った (スパーススキャン)。

### ② 脳形態MRI画像

脳形態MRI画像は、Magnetization Prepared Rapid Gradient Echo (MPRAGE) 法によってT1強調画像として取得した。撮像パラメータは、TR=6.5 ms、TE=3 ms、Inversion Time (TI)=711 ms、FOV=24 cm、スライス厚=1 mm、マトリックスサイズ=240 x 240とした。

## (7) データ解析

### ① 脳機能MRIデータ解析

解析は、Statistical Parametric Mappingバージョン5 (SPM5) を用いて行った。まず、被験者毎の画像に、標準的な前処理 (撮像タイミング補正、頭部の動きの補正、空間的標準化、空間的平滑化) を行い、各条件に関連した脳活動モデルを表現するデザインマトリクスとともに一般線形モデルに組み込み、線形予測子 (脳活動) を計算した。次に、脳活動の条件間のコントラストとして、課題の主効果 (R2+R1)-(D2+D1)、言語の主効果 (R2+D2)-(R1+D1)、課題と言語の交互作用 (R2-R1)-(D2-D1) を算出した。ここで交互作用のコントラストは、L1の繰り返し時に対する、L2の繰り返し時の脳活動 (R2-R1) から、知覚上の難易度の差に関わる脳活動 (D2-D1) を差し引いたことを意味する。

次に、変量効果を考慮した集団解析として、上記の個人解析で得られた脳活動の各コントラストに対して、全脳対象で、1サンプルt検定、および、年齢を独立変数とした全脳対象の重回帰解析を行った。

### ② 脳形態MRIデータ解析

解析は、Statistical Parametric Mappingバージョン8 (SPM8) を用いて、Voxel-based morphometry (VBM) 解析を行い、局所灰白質体積および局所白質体積を計算した。灰白質、白質、脳脊髄液腔の分画には、SPM8に組み込まれている”New segmentation”を用い、空間的標準化には、Diffeomorphic Anatomical Registration Through Exponentiated Lie algebra (DARTEL) 法を用いた (Ashburner et al., 2007, NeuroImage)。空間的平滑化は、半値幅 8x8x8mm のガウス関数を用いて行った。

次に、外国語音声模倣スコアと局所灰白質体積および局所白質体積が相関を呈する領域を同定するために、局所灰白質体積および局所白質体積を従属変数、外国語音声模倣スコアを独立変数として、ボクセル毎の重回帰解析を行った。この際、脳形態との相関が知られている、年齢、性別、IQ、L2知覚課題成績は従属変数としてコントロールした。ここでは、関心領域 (ROI) として、脳機能MRIデータ解析における、R2条件時の脳活動 (レストをベースライン、 $P < 0.05$ , uncorrected) が見られた解剖領域である、左下前頭回後部、左下頭頂小葉、両側中心前回および中心後回、両側補足運動野、両側上側頭回、両側小脳と設定し、Small volume correction (SVC) (Worsley et al., 1996; Friston, 1997) を用いて統計検定を行った。ここで統計閾値として、 $P < 0.05$ , Family-wise error (FWE) correction によって多重比較補正を行った。解剖領域は、WFU pickatlas (Lancaster et al., 2000; Maldjian et al., 2003) を用いて設定した。

## 4. 研究成果

### (1) 外国語音声模倣の精度

被験者の発話の録音データを確認し、すべての被験者が教示に従って課題を行っていた。繰り返し課題、弁別課題ともに見逃しエラーはなかった。4名の被験者が弁別課題の正答率が低かった (D2とD1のいずれかが80%以下) ために解析から除外した。D2とD1の正答率の平均値および標準偏差は、それぞれ  $91.0 \pm 6.4\%$ 、 $95.9 \pm 5.1\%$  であった。外国語音声模倣スコアの平均値および標準偏差、最小値、最大値は、それぞれ  $4.8 \pm 0.8$ 、 $3.7$ 、 $6.0$  であった。外国語音声模倣スコアと年齢には有意な正の相関があった ( $r = 0.47$ ,  $P = 0.003$ ) (図1)。

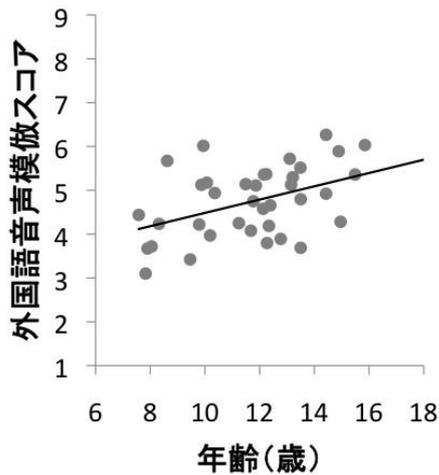


図1：被験者の外国語音声模倣スコアと年齢の関係（相関係数  $r=0.47$ ,  $P=0.003$ ）

### (2) 脳機能 MRI データ解析

1 サンプル t 検定では、課題の主効果のコントラスト  $(R2+R1)-(D2+D1)$  において、左半球感覚運動野の口領域で有意な賦活があった ( $P < 0.05$ , FWE corrected)。言語の主効果および課題と言語の交互作用に関しては、有意な賦活はなかった。

線形回帰解析では、左下前頭回弁蓋部において、課題と言語の交互作用のコントラスト  $(R2+R1)-(D2+D1)$  と年齢の間に正相関 ( $P < 0.01$ , uncorrected, 有効ボクセル数  $ke > 50$ ) が見られた (図2)。

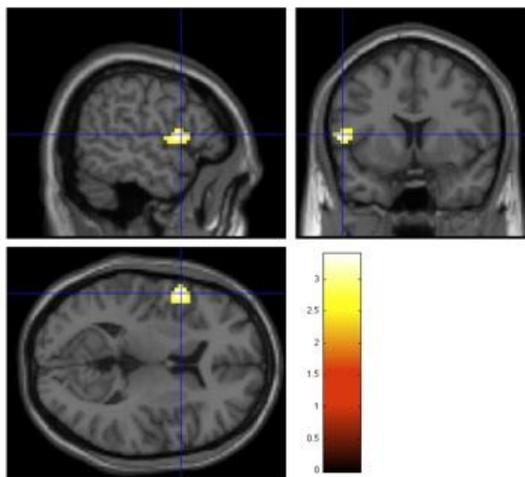


図2：外国語音声模倣中の脳活動と年齢の間に正の相関を呈した脳領域 ( $P < 0.01$ , uncorrected, ボクセル数  $ke > 50$ ) (左下前頭回弁蓋部)。

### (3) 脳形態 MRI データ解析

外国語音声模倣スコアと左縁上回前部の局所白質体積の間に統計的に有意な正相関が見られた (図3a)。また、外国語音声模倣スコアと右中前頭回の局所灰白質体積の間に統計的に有意な正相関が見られた (図3b)。

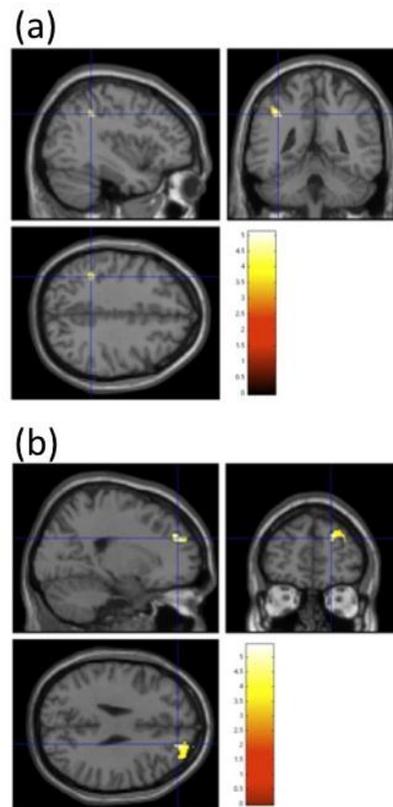


図3：外国語音声模倣スコアと脳形態に相関が見られた領域。(a) 左縁上回前部の局所白質体積 (b) 右中前頭回の局所灰白質体積 ( $P < 0.05$ , FWE corrected, SVC)。

### (4) 考察

外国語学習に重要となる外国語音声の模倣に関与する神経基盤とその発達的变化を明らかにするために、学童期から思春期の日本人小児を対象に、MRI および機能的 MRI を用いて、外国語音声模倣能力と脳形態の相関、および外国語音声模倣中の脳活動とその年齢変化を調べた。その結果、左縁上回前部の白質体積および右中前頭回の灰白質体積と、外国語音声模倣の精度の間に有意な正の相関が見られた。また、外国語音声模倣中の脳活動に関しては、母国語を繰り返す時に比べてより強く活動する領域は見つからなかったが、成人対象の先行研究で母国語に比べて外国語を発話する際により強く活動することが報告されている、左下前頭回弁蓋部の脳

活動が年齢とともに増加した。また同時に、年齢とともに外国語音声模倣の精度は向上した。

左下前頭回弁蓋部は、発話器官の運動プログラム作成に関与することが多くの成人研究で報告されている（例えば、Bohland and Guenther, 2006, NeuroImage）。今回の結果は、小児が外国語音声模倣を行う際、発話器官の運動プログラム作成において、年少の小児では外国語と母語をそれほど区別して処理しておらず、年齢とともに、区別して処理するようになることを示唆しており、その結果として、外国語音声模倣を即時に繰り返す能力の向上に繋がっている可能性がある。

また、脳形態と外国語音声模倣能力の関係に関しては、成人対象の先行研究で外国語音声模倣能力と左下前頭回弁蓋部と左縁上回前部の白質体積の間に有意な正相関が報告されている（Golestani and Pallier, 2007, Cerebral cortex）。小児を対象とした本研究では、外国語音声模倣能力と左縁上回前部の白質体積の間に有意な正相関が見られたが、左下前頭回弁蓋部には有意な相関は見られず、代わりに、右中前頭回の灰白質と有意な正相関が見られた。この小児と成人の違いは、小児と成人で外国語音声模倣能力を支える神経基盤が異なることを示唆している。

小児と成人で能力-形態の相関が見られた左縁上回前部は、言語音産出時に口内感覚処理に関わると考えられている（Callan et al., 2004, NeuroImage）。成人の先行研究で能力-形態の相関が見られた、左下前頭回弁蓋部は、発話器官の運動プログラムなど、より運動的側面に関与している（Bohland and Guenther, 2006, NeuroImage）と考えられているが、今回、小児で能力-形態の相関が見られた中前頭回は、ワーキングメモリー課題中に活動することがよく知られており（Leung 2002）、音を保持するメモリーストレージとしての機能を持つ（McNamara et al. 2008, PLoSone）ことを考えると、小児の外国語音声模倣能力は、音声情報の運動的側面よりもむしろ聴覚的側面と口内感覚との統合が重要な役割を果たしている可能性がある。

(5) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

これまで外国語音声模倣に関する神経基盤は国内外でも調べられてきたが、成人対象の研究に限られていた。本研究の成果は、それらの成人研究を発達的な視点で拡張させたという意味でインパクトがあると考えられる。国際化した社会では、より一層の外国語コミュニケーション能力が求められており、折しも、わが国においても小学校英語教育が

本格的に始まっている。しかしながら、どのような学習方法や方針が最も良いのかは未だ議論が続いている状態である。米国への移民を対象とした研究によれば、学童期から思春期は、外国語学習における音声習得の成果が年齢とともに大きく変化する重要な時期である（例えば、Flege, 1999）。本研究ではじめて明らかになった、学童期から思春期の日本人小児の外国語音声模倣能力の神経基盤とその発達的变化は、適切な学習方法や年齢に伴う音声習得成果の変化のメカニズムを考える上で重要な基礎データとなると考える。しかしながら、本研究で扱った外国語音声模倣は、音声習得の初期段階のみであり、実験デザイン上、外国語音声模倣が習得されていく過程を追跡して調査することは出来なかった。今後の展望として、小児の音声習得のメカニズムをより理解するために、そのような追跡調査や学習トレーニングの前後での脳形態、脳機能の変化を調べることに重要になると考えている。

#### 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 5 件）

① Hashizume H, Taki Y, Thyreau B, Sassa Y, Asano M, Asano K, Takeuchi H, Jeong H, Sugiura M, Kawashima R

“Anatomical correlates of non-native speech sound production in school children”

The 19th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Seattle, WA, USA, 2013.6.17 (Poster)

② 橋爪 寛, 瀧 靖之, 佐々 祐子, ティロー バンジャマン, 浅野 路子, 浅野 孝平, 竹内 光, 野内 類, 事崎 由佳, ジョン ヒョンジョン, 杉浦 元亮, 川島 隆太

“小児における外国語発音能力と外国語音産出に関わる脳活動の発達的变化の関係”

電子情報通信学会 思考と言語研究会, 山形, 2012.7.21 (ポスター)

③ Hashizume H, Taki Y, Sassa Y, Thyreau B, Asano M, Asano K, Takeuchi H, Nouchi R, Kotozaki Y, Jeong H, Sugiura M, Kawashima R

“Developmental changes in brain activation involved in unfamiliar speech sound imitation in children”

Society for Neuroscience 41th Annual Meeting, Washington D. C., USA, 2011.11.12

(Poster).

④ 橋爪 寛, 瀧 靖之, 佐々 祐子, 浅野 路子, 浅野 孝平, 竹内 光, ジョン ヒョンジョン, 杉浦 元亮, 川島 隆太

"Age-dependency in brain activation involved with imitation of unfamiliar foreign language sound: an fMRI study"

第33回日本神経科学会, 神戸, 2010.9.3 (ポスター)

⑤ Hashizume H, Taki Y, Sassa Y, Asano M, Asano K, Takeuchi H, Jeong H, Sugiura M, Kawashima R

"Age-dependent brain activation involved in foreign language sound imitation: an fMRI study"

16th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Barcelona, Spain, 2010.6.9 (poster).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋爪 寛 (HASHIZUME HIROSHI)  
東北大学・加齢医学研究所・助教  
研究者番号: 60506640

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号:

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号: