

P-3 神経科学的手法を用いた第二言語音素獲得メカニズムの解明*

岡田 理恵子[†]・倉橋 農[‡]

概要

第二言語における音素獲得には、音響的な特徴を基に音素を抽出する機能と、明示的に与えられるカテゴリー情報を基に音声を切り分ける機能、および調音の運動情報とが相互に関連していると言われる。本研究では、ハンガリー語の2種類の母音 (/ø/, /y/) の日本語話者による学習前後における脳活動の変化を fMRI で計測することで、これらの機能が音素獲得で如何に働くか、そのメカニズムを明らかにする。学習前には音響情報を処理する上側頭回のほか、カテゴリー情報を処理するとされる左前頭回に賦活を認め、1週間後では運動野の顔領域（口、舌）に相当する部位に、2週間後ではさらに小脳に賦活を認めた。以上から、第二言語における音素学習過程では、学習初期において音響情報と共に、明示的に与えられたカテゴリー情報を利用しているが、学習中期になると発声発語器官の情報を利用するようになることが示唆された。さらに学習後期では小脳が関与することから、情報処理の自動化が示唆された。

キーワード

日本語, ハンガリー語; 神経言語学, 第二言語習得; 音素獲得, 音響的情報, カテゴリー情報, 運動野, fMRI

1 背景と目的

第二言語学習において、母語に存在しない音素の学習はその言語の習得の重要な鍵となる。第二言語の音素学習には、音響的な特徴を基に音素を抽出する機能（ボトムアップ機能）と、明示的に与えられるカテゴリー情報を基に音声を切り分ける機能（トップダウン機能）とが相互に関連していると言われる (Myers 2014, Myers and Swan 2012)。さらに、Lametti et al. (2014) によると発話の運動情報が音声の知覚弁別の変化を引き起こすと考えられている。しかし、これら3つの情報処理が学習のどの時期にどのように働くかはまだ解明されていない。本研究では学習過程の脳活動の変化を fMRI で捉えることで、これらの情報処理の相互関係を明らかにする。

2 先行研究

近年の神経科学的研究では、第二言語の音素獲得には左前頭前野および側頭-頭頂葉が関与していると言われている (Golestani and Zatorre 2004, Myers and Swan 2012, Myers 2014)。Myers and Swan (2012) は、音声をカテゴリー化する処理は連続する音を比較対照する処理だとしている。Myers and Swan (2012) は、dental /d̪a/ - retroflex /ɖa/ - velar /ga/ の連続的な音声を聞かせカテゴリー化する課題を実施し、学習前と学習後に fMRI 撮像を行った。その結果、両側の下前頭回に賦活を認めたことから、カテゴリーに関するトップダウンの情報が再カテゴリー化に寄与していると指摘している。

これら一連の研究では、トップダウンの情報とボトムアップの情報がどのように相互に関連しているかは明らかではない。また、運動の情報については言及されていない。

Lametti et al. (2014) は、発話時に被験者が受け取るフィードバック音声を変化させることで、発話すな

* 本研究は JSPS 科研費 15K16748 の助成を受けたものである。本研究は昭和大学倫理審査委員会にて承認を得ている。実験は昭和大学発達障害医療研究所にて行った。

[†] rieko.o@h3.dion.ne.jp

[‡] kurahasi.minori@cmc.osaka-u.ac.jp

わち運動情報が音声知覚に影響を与えることを示している。この研究では明示的に「運動情報→音響情報」の方向へ情報が影響を与えていることを示している。しかしカテゴリー情報の関与には触れておらず、音声知覚の変化の全貌は明らかとはなっていない。

以上を踏まえ、本研究では、学習過程での fMRI 撮像を行うことで、学習時期におけるこれらの情報処理過程を明らかにする。

3 方法

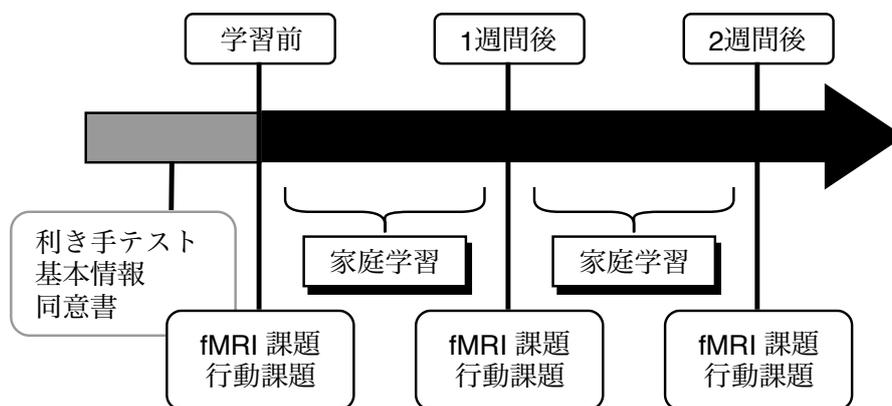


図1 実験概要

3.1 概要

対象は、20歳以上で脳神経疾患および精神疾患の経験を有しない、右利きの日本語母語話者とした。また、/ø/, /y/ の存在する言語の学習歴がないことを確認している。

図1に実験の概要を示す。被験者には実験開始前に同意取得のうえ、基本情報収集を行い2週間の実験に参加してもらった。fMRI および家庭学習の課題には、日本語に存在しないハンガリー語の2種類の母音 /ø/ と /y/ の弁別課題を用いた。この2種類の母音は日本語母語話者にはともに /u/ と認識されることの多い母音である。すなわち、これまで区別していなかった音声を弁別し、異なる音素として学習することになる。なお、本研究では弁別可能となることを音素の獲得とし、発音仕分けられるか否かの側面は計測の対象外としている。

被験者には2週間、タブレットを使用して2つの母音の弁別課題を家庭にて実施してもらった。fMRI 撮像は学習前、1週間後、2週間後に実施し、学習過程での脳活動の変化を計測した。撮像前には off-scan にて弁別課題を実施し、成績を記録している。

3.2 音声刺激

家庭学習、行動、fMRI 実験の各課題における音声刺激には、ハンガリー語の単音節無意味語を用いた。刺激音は無響室において以下の条件で合計 2448 音声を録音、録音後に音量の正規化を行った。このうち録音状態が悪い音声 211 を削除¹し、fMRI および行動実験、家庭学習課題にてランダムに抽出して用いた。

¹ 長母音に限っては女性1名の録音がすべて失敗しており、男女比および女声の種類が均等ではない。

- ハンガリー語母語話者 4 名（男性 2 名、女性 2 名）
- 下記の総当りで組み合わせた単音節無意味語 202 語
 - 母音： /ø/, /y/
 - 子音： /p/, /t/, /k/, /b/, /d/, /g/, /n/, /s/, /r/
 - 音節構造： V, CV, CVC, VC, VV（長母音）
- 各語 3 回、ただし長母音 VV については 6 回の録音

3.3 fMRI 実験

▶ fMRI 前 (off-scan) 学習前には、利き手調査、基本情報収集（年齢、外国語学習経験等）を行った。次に、パソコン上で下記の課題をヘッドフォンを装着した状態で実施した。

1. 音声聴取： /ø/ および /y/ の長母音音声 (VV) をランダムに呈示し、聞こえたら「1」、聞こえなかったら「2」のボタンを押す。これは音声聴取に慣れるために行った。
2. 異同弁別課題：音節構造は同一（CV, CVC, VC のいずれか）だが子音・母音が異なる可能性がある無意味語のペアを 100 個呈示し、母音が違う音か同じ音かを判別し、同じ場合は「1」、違う場合は「2」のボタンを押す。
3. 同定課題： /ø/ を「●の音」、 /y/ を「■の音」として説明。両者に属する音声を 9 個ずつ聞かせ、その特徴を被験者が記述する。以上を 3 回繰り返す。

この「●」「■」は音韻カテゴリーのラベルとみなすことができる。1 週間後、2 週間後の実験の時には 2 の異同弁別課題のみ実施した。

▶ fMRI 撮像 (on-scan) 学習前、1 週間後、2 週間後の 3 回 fMRI 撮像を実施した。撮像はすべて MAGNETOM (Siemens, 3T) にて行った。fMRI 課題では CVC の音節構造を持つ無意味語を刺激として用いた。コントロール課題として 1kHz の純音を聞かせた。ノイズのキャンセリングのヘッドフォンを装着し、反応ボタンのコントローラを左手に持たせた。「●の音」の時は左側のボタン、「■の音」の時は右側のボタン、純音の時は左側のボタンを押すように指示した。刺激は Presentation を用い、1 セッションにつき、 /ø/ 30 回・ /y/ 30 回・純音 30 回とし、事象関連デザインで、ランダムに提示した。1 度の撮像で 3 セッションの fMRI 撮像を行い、合わせて高解像度構造画像の撮像も行った²。

3.4 家庭学習課題

▶ 概要 家庭学習用に、タブレット PC 上で行う課題を用意した（図 2）。課題は下記の通り実施するよう指示した。

1. 初回の fMRI 課題実施から 1 週間、2 回目の実施から 1 週間
2. タブレット PC 上で行う 2 種類の課題「入門」「応用」をこの順で
3. 毎日 3 回

² fMRI の撮像条件は次の通りである。TR=2000ms, TE=50ms, number of slice=32, field of view=210mm; slice thickness=4mm, flip angle=90°, voxel size=3mm×3mm×4mm.

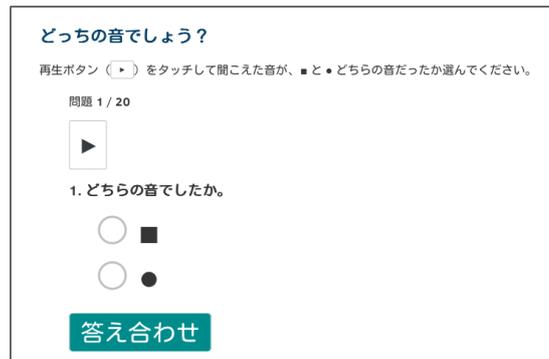


図2 家庭学習課題スクリーン

▶ **課題の構成** 「どっちの音：入門」と「どっちの音：応用」と題した2種類があり、「入門」は音声に長母音単独、「応用」は子音を伴う音節を用いているが、その他は同一の構成である。課題は開始後、以下を20回繰り返した後、正答率のフィードバックを表示して終了する。

1. ■/y/または●/ø/を含む音節をランダムに再生
2. ■と●、いずれの音声を含むか選択
3. 正誤のフィードバック

また実行ごとに、タブレット PC に被験者 ID、課題 ID、開始時間、各問の回答時間、再生音節名、各問の回答を記録している。

▶ **機器・ソフトウェア構成** 7インチのタブレット PC を用い、音声の聞き取り用にイヤフォンを利用した。課題はローカルの SD カードに保存した HTML と Javascript をウェブブラウザ上で実行する。使用した機器およびソフトウェアの詳細は以下の通りである。タブレット PC: Huawei MediaPad 7 Youth 2; OS: Android 4.3; ウェブブラウザ: Firefox 41.0; ライブラリ: JQuery1.9.1, JQuery Mobile 1.4.5, SlickQuiz 1.5.20³

3.5 解析

fMRI 解析には、Statistical Parametric Mapping software (SPM8; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) を用いた。fMRI の個人解析では「学習前 - コントロール」、「1 週間後 - コントロール」、「2 週間後 - コントロール」、「1 週間後 - 学習前」、「2 週間後 - 学習前」、「2 週間後 - 1 週間後」、「コントロール」の賦活領域を抽出した。集団解析では One-sample *t* test を行った (uncorrected, $p < 0.001$)。fMRI 課題の成績は、正答率を学習時期ごとに算出した。

4 結果

12名の被験者中、解析可能な被験者は8名であった。

fMRI 実験中課題の正答率の平均値は、学習前、1週間後、2週間後それぞれで 66.3%, 80.3%, 82.5% であった (図3)。

fMRI による計測の結果得られた脳賦活部位の一覧を表 1-3 に示した。座標は、賦活した脳領域の解剖学

³ <http://github.com/jewlofthelotus/SlickQuiz>

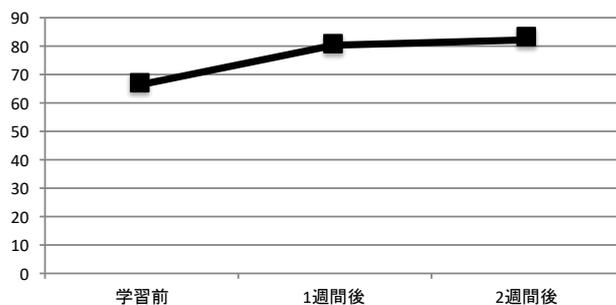


図3 正答率

的位置を示している。座標の数字は前交連からの距離を示す： x は水平方向の位置（左右）、 y は腹側-背側、 z は垂直方向の位置（頭側-尾側）をそれぞれ表す。 x 軸の負の値は、その領域が前交連から左に位置している（即ち、左半球にある）ことを示す。

学習前後で大きな差異は生じなかったが、学習段階別に次のような傾向を認めた。学習前には音響情報を処理する上側頭回のほか、左下前頭回に賦活を認めた（図4）。左下前頭回は2節で挙げたMyers (2014)がカテゴリ情報を処理すると主張する領域である。1週間後では運動野（中心前回）の顔領域（口、舌）に相当する部位に賦活を認めた（図5）。2週間後ではさらに小脳に賦活を認めた（図9）。

表1 学習前 - コントロール

脳領域	k	Z 値 (p 値)	MNI 座標		
			x	y	z
左下前頭回	21	4.22 (0.077)	-34	24	16
前帯状回	394	4.18 (< 0.000)	-12	24	34
左上頭頂小葉	85	4.11 (0.001)	-30	-56	52
右上側頭回	10	3.52 (0.21)	66	-22	-2
左上側頭回	40	3.49 (0.02)	-62	-18	6

表2 1週間後 - コントロール

脳領域	k	Z 値 (p 値)	MNI 座標		
			x	y	z
左中心前回	256	4.62 (< 0.000)	-42	2	28
右上側頭回	38	4.08 (0.011)	62	-12	2
左上側頭回	30	3.61 (0.021)	-54	-14	2
左島	48	3.52 (0.005)	-30	22	0

表 3 2 週間後 - コントロール

脳領域	k	Z 値 (p 値)	MNI 座標		
			x	y	z
右小脳中部	264	4.71 (< 0.000)	2	-52	-28
左中心前回	313	4.55 (< 0.000)	-42	2	36
左楔	350	4.22 (< 0.000)	-8	-72	6
左上頭頂小葉	173	4.08 (< 0.000)	-30	-68	50

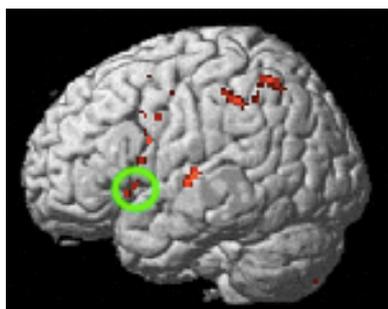


図 4 学習前

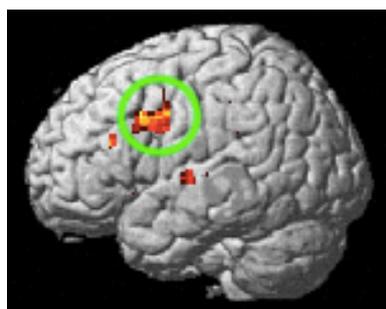


図 5 1 週間後

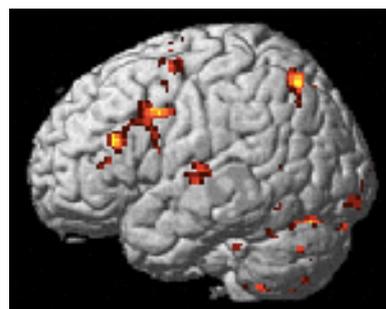


図 6 2 週間後

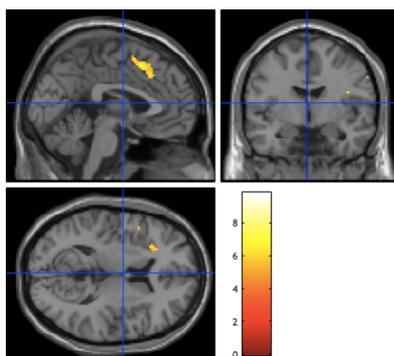


図 7 学習前 断面

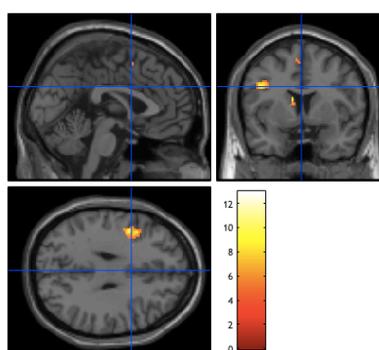


図 8 1 週間後 断面

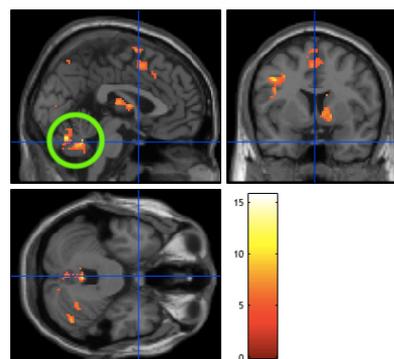


図 9 2 週間後 断面

5 考察と結論

本研究の結果から、第二言語の音素獲得について以下の点が示唆された (図 10)。

- 学習前から明示的なカテゴリ情報を利用する。
- 学習中期になると例え発音の練習を明示的にしていずとも発声発語器官の情報に関与する。
- 学習後期になると、処理の速度向上に伴い自動化された反応となってくると考えられる。

第二言語の音素獲得において、カテゴリ情報は学習前から明示的に与えられることが多い。その場合、学習過程において第一に弁別の手がかりとして機能すると考えられる。本実験では、1 週間後の段階で弁別が 80% 以上可能となっており、この時点で概ね 2 つの母音の知覚弁別が可能となっていたと思われる。この段階 (学習初期から中期) において運動野が活動するのは、明示的に発音をせずとも、弁別時に語を頭の

中で発声発語を行っていることを示唆する。すなわち、発声発語器官の運動に関する情報が音素獲得において音響情報を弁別する際に機能していると考えられる。このことは、Lametti et al. (2014) による運動情報が知覚に影響を与えているという主張と一致する。

以上から、第二言語の音素獲得においては、明示的なカテゴリ情報が用いられるのみならず、発声発語器官の運動情報のフィードバックが音響情報処理に利用されていることが脳活動から示唆された。本研究の解析では、各脳領域が機能する方向性、即ちネットワークまでは明示的に示すことができなかった。今後はネットワーク解析を進め、第二言語の音素獲得における効果的な課題作成へと繋げていきたい。

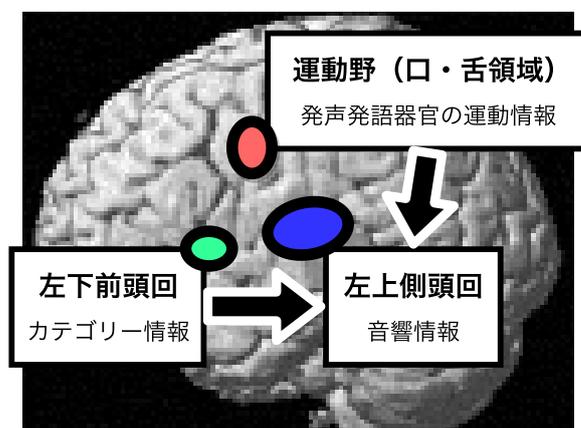


図 10 結論

参考文献

- Golestani, Narly and Robert J. Zatorre. 2004. Learning new sounds of speech: reallocation of neural substrates. *NeuroImage* 21:494–506.
- Lametti, Daniel R., A lie Rochet-Capellan, Shiller Neufeld Emily, Douglas M., and David J. Ostry. 2014. Plasticity in the human speech motor system drives changes in speech perception. *The Journal of Neuroscience* 20:10339–10346.
- Myers, Emily B. 2014. Emergence of category-level sensitivities in non-native speech sound learning. *Frontiers in Neuroscience* 8:1–11.
- Myers, Emily B. and Kristen Swan. 2012. Effects of category learning on neural sensitivity to non-native phonetic categories. *Journal of Cognitive Neuroscience* 24:1695–1708.