

## 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 16 日現在

機関番号：22604  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2010～2012  
 課題番号：22242012  
 研究課題名（和文） 脳機能にもとづく言語習得メカニズムの解明：学童期の横断的研究  
 研究課題名（英文） Neurocognitive investigation of syntactic processing on school-aged children: A cross-sectional study  
 研究代表者  
 萩原 裕子 (HAGIWARA HIROKO)  
 首都大学東京・人文科学研究科・教授  
 研究者番号：20172835

研究成果の概要（和文）：本研究は文法獲得の脳内基盤を明らかにするために、日本人小学生を対象として、英文法処理時の脳活動を事象関連電位と近赤外分光法の同時計測により可視化することを目的とした。語順違反文の処理において、英語高習熟度群は低習熟度群に比べて高い脳活動を示し、脳波では陽性波が観察された。母語のみならず外国語である英語の処理においても習熟度が増すにつれて左右半球の機能分化が進み、左半球への側性化が促進されることが分かった。

研究成果の概要（英文）： By using simultaneous functional near-infrared spectroscopy (NIRS) and event-related potentials (ERPs), we investigated the stages of L2 syntactic processing in Japanese elementary school children who learn English at school. In the processing of sentences with word order violations, increased bilateral cortical activation was found in the high proficiency group with more left lateralization compared to the low proficiency group. The positive ERP component was also observed in the high proficiency group. These results suggest that children are gradually acquiring the ability to recognize L2 grammatical rules (phrase structure rules) by learning them in the foreign language context.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	16,700,000	5,010,000	21,710,000
2011年度	14,800,000	4,440,000	19,240,000
2012年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
総計	37,100,000	11,130,000	48,230,000

研究分野：言語学

科研費の分科・細目：言語学

キーワード：統語処理、句構造規則、小学生の外国語学習、事象関連電位、近赤外分光法

## 1. 研究開始当初の背景

言語機能はヒトという種に固有の遺伝的に規定された属性である。その本質的特性は、「生成文法」の「ミニマリスト主義」の「併合」に集約される(Chomsky, 1995, 2002)。文を構成する基本である要素の組み合わせ（併合操作）の発達過程については、幼児の行動研究により、その発達年齢とプロセスが明らかになった。しかし、「言語習得」の脳内基盤の研究がまだ緒に就いたばかりということ

もあり、文法獲得の脳内基盤については、不明のままである。これまでに、事象関連電位ERPの統語処理成分ELAN/LAN, P600を指標として、行動研究の結果を追認する形でその特徴が明らかにされつつあるものの(Friederici, 2005)、誕生後、脳の成長の過程で、いつ、脳のどの部位で文法機能が発現し、何才頃に定着するのかについては、身体の拘束という観点から子どもに対して機能的磁気共鳴画像法fMRIや脳磁図MEGが使用しにく

いという倫理上の制約により、未解明のままである。研究代表者は、小学生を対象に、母語及び外国語の語彙の獲得に関するコホート調査を行い、多くのことを明らかにした。しかし、文法獲得の脳内基盤には未だ着手していない。

## 2. 研究の目的

本研究は、文法機能に焦点を絞り、小学生の英語文法処理時の脳活動を可視化することを目的とした。具体的には、(1) 語順違反文を処理する際の脳活動量や活動部位が学習と共に変化するか、もし変化するならばどのような変化が見られるのかについて、習熟度が異なると考えられる対照群を取り上げて比較・検討した。(2) (1)の目的を達成するために必要な技術開発を行った。小学生の非母語の文法機能に関する研究は新規であるのみならず機能的近赤外分光法 fNIRS は比較的新しい計測手法であるため、文法課題では先行研究が殆ど無い。さらに、fNIRS/ERP 同時測定という新たな試みのため、文法課題に相応しい実験プロトコルの開発から始まり、最終的な目標達成に至るまでに多くの開発要素 (fNIRS の解析手法の開発に至るまでの実験・解析プロセス) がある。これらの確立は今後の研究に繋がる重要な工程である。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験参加者

本研究は、日本で英語イマージョン教育を長年に渡り実施している小学校の健全な学童 92人を対象として、英語習熟度が異なると予想された2年生 (28人)、4年生 (36人)、および6年生 (28人) (男子43人、女子49人) にご参加頂いた。実験実施にあたっては予め研究の内容に関する十分な説明を行い、参加者には実験参加同意書を用意し、書面にて承諾書を提出して頂いた。

### (2) 実験方法・手順

本研究では、空間情報の取得を得意とする機能的近赤外分光法 (functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS) と時間分解能の高い事象関連電位 (Event-Related Potential, ERP) を併用した同時計測系を確立した。何れの計測系も非侵襲で、計測時の自由度が高い。また、fNIRS は fMRI などと比べ体動の影響を受けにくいと、小学生を対象とした研究に適している。それぞれの計測系の欠点を補いつつ利点を生かし、英文処理時の脳反応に関する空間・時間情報を統一的に扱い、脳機能の可視化を図った。また、計測時間の短縮という観点でも有効な計測手法である。

脳機能計測実験では、小学校に防音シールドルームを設置した。その中で対象児は椅子に座り、スピーカーから出力される英文を聞

くように指示された。スピーカーから聞こえてくる英文に正文や非文が混在しているという情報は対象児には何も伝えず、単に英語を聞いているように指示した。英文の正誤を問うボタン押しなどの特定の課題は課さず、リラックスして英文を聞いてもらった。

音声提示した英文は3種類(48文×3種類＝全144文)で、正文 (NP VP NP PP)、名詞句・動詞句の語順を入れ替えた文法規則 (句構造規則) の違反を伴う非文 (NP NP VP PP)、及び動詞句がなく名詞句と前置詞句のみから成るフィラー (NP NP NP PP) である。(※NP: noun phrase 名詞句, VP: verb phrase 動詞句, PP: prepositional phrase 前置詞句)

刺激は、慣れや予期をおさえ、かつ、提示間隔を短くするためにstochastic design (確率デザイン) に基づいて提示した。公開されているアルゴリズム「optseq2」を用いて提示順を決めた。

提示した英文の例

句	1st (P1)	2nd (P2)	3rd (P3)	4th (P4)
正文	My grandma (NP)	baked (VP)	a cake (NP)	in the afternoon. (PP)
非文	My grandma (NP)	a cake (NP)	baked (VP)	in the afternoon. (PP)
フィラー	My grandma (NP)	a cake (NP)	the cookies (NP)	with her aunt. (PP)

### ① NIRS 計測

fNIRS 計測では、国際 10-20 法を基準に左右半球合計 44 チャンネルを配置し、ブローカ野、ウェルニッケ野などの言語野を計測部位に含めた。大脳皮質の血中に含まれる酸素化ヘモグロビン (Oxy-Hb) および脱酸素化ヘモグロビン (Deoxy-Hb) の濃度変化を算出し、解析に用いた。(本研究において検討した解析方法の詳細は、「4. 研究成果」参照)

被験者群の平均脳活動量のデータは、3D デジタイザーによる 10-20 法の基準点及び fNIRS プローブ位置測定データを用いて測定位置の MNI 座標を推定し、MNI 標準脳座標系へ確率的にマッピングする空間的レジストレーション法により標準脳座標系上に表現した (Tsuzuki et al. 2007)。

### ② ERP 計測

脳機能計測後に実施した英語習熟度テストにおけるリスニングテストの成績をもとに、高習熟度群 (High) と低習熟度群 (Low) にグループ分けを行った。(③、図 4 参照)

脳波計測のために、5 つの探査電極 (Fz, Cz, Pz, F7, F8) を国際 10-20 法に従って配置した。刺激文は 4 つの句からなり、各句の平均提示時間 (合計 2978ms) を解析対象として分散分析を行った。成績 (Low・High) と文法性 (正文・非文) の交互作用が得られた電極に対しては、成績グループごとに、文法性を要因と

して、刺激提示開始から提示後 3600ms までを 300ms 区切りで  $t$  検定を実施した。検定の補正には FDR 法を用いた。

### ③ 行動データ

計測終了後に英語の総合的な習熟度を評価するため、英語テストを実施した。また、脳機能計測時に用いた課題文（英文）が文法的に正しいか、間違っているかをオフラインで問う問題（リスニングとリーディング形式）を実施した。その他、中央実行系の評価テストであるリーディングスパンテスト (reading span test: RST) を実施した。

## 4. 研究成果

### (1) fNIRS 解析の結果

#### ① データ解析方法の検討

本研究では、小学生が提示される刺激の種類やタイミングを予測できないようにした事象関連の刺激提示法を使用しているため、一般線形モデル (GLM) を使用した新たな解析方法の開発を行った。予備的な解析を行いつつ、解析手法の最適化を図っている。

小学生の血流動態反応に関するデータがないため、初期の解析では一般に用いられている成人の血流動態を仮定し、GLM を使用した解析を実施した。しかし小学生の血流動態反応が成人の仮定と同等であるか否かの確証がないため、解析に用いたモデルの妥当性について検討が必要であると考え、その後血流動態の応答の遅れに焦点を当て、様々な応答の遅れを反映したモデルで解析を行い、その中から最適なモデルを検討した。ここではその解析方法と解析結果について記す。

解析のモデルは以下の通りである。

標準的な血流動態応答関数は以下の式であらわされる。

$$h(\tau_p, \tau_u, t) = \frac{t^{\tau_p} e^{-t}}{(\tau_p)!} - \frac{t^{\tau_u} e^{-t}}{A(\tau_u)!}$$

右辺第一項は正に変化するガンマ関数、右辺第二項は負に変化するガンマ関数である。血流動態応答関数は正負 2 つのガンマ関数の単純な足し合わせで表現される。パラメータ  $\tau_p$  は正のガンマ関数のピークの遅れを反映し、パラメータ  $\tau_u$  は負のガンマ関数のピークの遅れを反映する。A は正負のガンマ関数の振幅比を表す。それぞれ、SPM8 での標準的な設定は  $(\tau_p, \tau_u, A) = (6, 16, 6)$  である。(※Statistical Parametric Mapping : SPM はポジトロン放出断層撮影法 (PET)、機能的磁気共鳴画像法 fMRI 等の解析で広く用いられており、脳賦活試験のデータから有意な血流増加を示した部位を統計学的に導き出し、当該部位を表示する脳機能統計解析ツール) 今回は計算コストの観点から  $\tau_p$  のみを可変としてモデルの検討を行った。具体的には、 $(\tau_p, \tau_u, A) = (\tau_p, \tau_p \times 16/6, 6)$  として、 $\tau_p$  は 0.5[s] 刻みで 3[s] から

20[s] まで可変とした (35 パターン)。

最適な  $\tau_p$  の決め方は以下の通りである。上記 35 パターンの HRF を用い、84 人分 (両親のどちらか又は両方が日本語話者でない被験者や測定中断・不良チャンネル等のある被験者のデータは解析から除外) 44 チャンネル 3 課題 (正文・非文・フィラー) のデータに対し GLM 解析を行い、各々の個人解析の  $t$  値を算出した。1 つのパラメータ設定に対し、 $t$  値は  $84 \times 44 \times 3$  個出力される。Oxy-Hb・Deoxy-Hb 共に 3 課題で非常に類似した時間特性を示すことから、課題間平均値を各課題に適用することに問題がないことなどを確認し、最終的に  $84 \times 44 \times 3$  個の総平均  $t$  値を算出し、その値が最も大きいパラメータ設定を最適なパラメータとした。各パラメータ設定での総平均  $t$  値を示す。

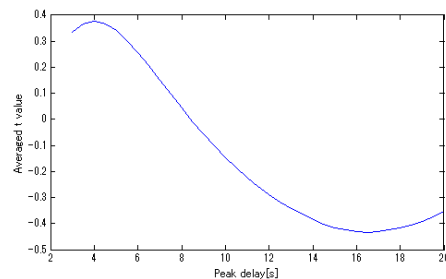


図 1. Oxy 信号に関するパラメータ設定と総平均  $t$  値 (最適値  $\tau_p = 4$ )

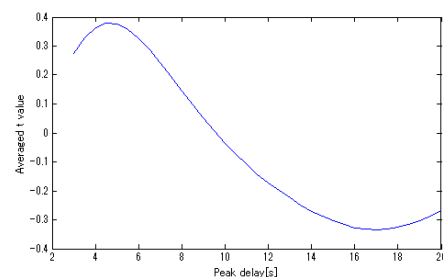


図 2. Deoxy 信号に関するパラメータ設定と総平均  $t$  値 (最適値  $\tau_p = 4.5$ )

図 1.2 の横軸は  $\tau_p$  の設定、縦軸は  $t$  値の総平均値である。

図 1 より Oxy 信号に対して  $t$  値が最大となったパラメータ設定は  $\tau_p = 4$  [s]、図 2 より Deoxy 信号に対して  $t$  値が最大となったパラメータ設定は  $\tau_p = 4.5$  [s] であった。Oxy・Deoxy 信号とも標準的な設定である 6[s] とは異なることが明らかとなった。これは成人と小学生の血流動態反応の違いや、課題による血流動態反応の違いに起因している可能性がある。以上の算出結果から得られた最適なパラメータ設定 (Oxy-Hb :  $\tau_p = 4$ , Deoxy-Hb :  $\tau_p = 4.5$ ) を用いて統計解析を行った。ここでは Oxy 信号に関する正文、非文、フィラーの各チャンネルにおける相対的な信号変化を示す GLM パ

ラメータ  $\beta$  を各チャンネルの信号のばらつきに対して正規化した値 (正規化  $\beta$ ) を統計解析に用いた集団解析の結果について報告する。

## ②解析結果

統計解析の結果、全ての文のタイプ (正文、非文、フィラー) の皮質反応において、学年 (2,4,6年生) と性別 (男女) の主効果は見られなかった。

総合的な英語運用能力を評価した英語テストのスコアを学年別にみると、図3に示すように学年の増加に伴い、平均的なテストスコアは明らかに増加した。しかし、6年生においては分散が少なく、ほぼ全ての生徒が高得点を獲得したが、低学年ほど平均点が低い傾向はみられたものの、同時に個人差が大きいことが分った。学年間に平均的な英語習熟度の差があるにも関わらず、皮質反応において学年間に統計的有意差が見られなかった理由として、低・中学年における英語習熟度の個人差 (分散) が大きい上に、それに伴う脳反応の個人差 (分散) が大きいことが影響していると考えられる。

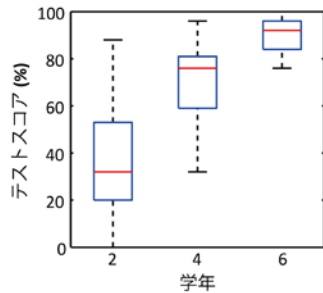


図3. 学年別の英語テスト (リスニング) スコア

次に、実験参加者を英語テスト (リスニング) のスコアにより2つの習熟度群に分けた。図4 (左) に英語テストスコアのヒストグラムを示す。テストスコアは正規分布を示さなかったが、人数がほぼ均等になるよう、図4 (左) に示すような2群に分けた (低習熟度群 (Low): 0-79%、高習熟度群 (High): 80-100%)。

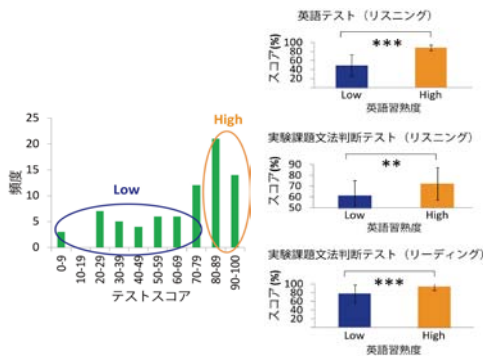


図4. (左) 英語テストスコアのヒストグラム (右) 低・高習熟度群の3つの英語テスト課題のテストスコア比較

図4 (右) に示すように、英語テスト、および脳計測実験で用いた刺激文の文法課題 (リスニング形式・リーディング形式) 全てにおいて、低習熟度群と高習熟度群で統計的有意差が見られた。

正文と非文処理時の脳活動、および正文とフィラー処理時の脳反応に統計的有意差が見られたが、低・高習熟度群の間に図5に示すような皮質活動の違いが見られた。①低習熟度群においては、正文処理時よりもフィラー処理時に左上・中側頭回の賦活が有意に増加した。この結果は、低習熟度群は動詞がなく名詞句と前置詞句の羅列の意味処理に高い負荷を要したことを示唆している。一方、高習熟度群においては正文処理時とフィラー処理時で脳反応に有意差は見られなかったことから、フィラーと正文で同程度の負荷であったと考えられる。②高習熟度群においては、非文処理時に広範な脳部位の活動が見られ、左右半球の機能分化 (左半球への側性化) が顕著であった。一方、低習熟度群は正文処理時よりも非文処理時においては脳活動の低下が見られた。

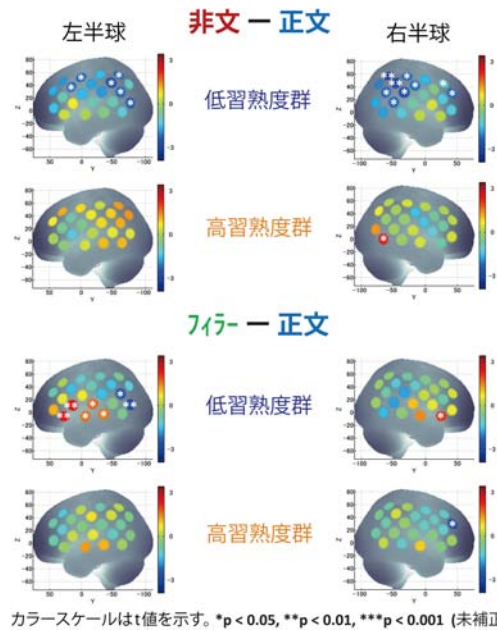


図5. 低・高習熟度群における非文、フィラー処理時の脳反応

上図は非文処理時の脳反応から正文処理時の脳反応を差し引いたもの、下図はフィラー処理時の脳反応から正文処理時の脳反応を差し引いたもの

低・高習熟度群の脳反応の統計的有意差は非文処理時において観察されたが、正文とフィラー処理時における脳反応には2群間で有意差はなかった (図6)。非文処理時において、高習熟度群は低習熟度群よりも脳の広範において信号変化が大きく低習熟度群に比べ、

左半球への側性化が見られた（棒グラフ）。低・高習熟度2群間のRSTスコアを比較したところ、高習熟度群が低習熟度群よりも有意に高得点を示した。低学年被験者の多い低習熟度群の作動記憶容量が、高習熟度群のそれよりも低いという結果は、一般に小学生児童の作動記憶容量が学年とともに増加する傾向と一致している。非文処理時の脳反応が作動記憶容量に依存すると仮定すると、作動記憶容量の高い（英語）高習熟度群に比べ、作動記憶容量の低い（英語）低習熟度群は同じ文を処理する際に、より多くの負荷を要すると考えられる。しかし、本結果においては、図6に示すように高習熟度群の方が高い脳活動量を示していることから、非文処理時の2群間の脳反応の有意差は作動記憶容量では説明できない。また、低・高習熟度群間に正文とフィルター処理時の脳反応差が見られないことから、非文処理時の脳反応の差が、年齢（発達）による解剖学的な脳の差異に起因するとも考えにくく、語順の処理に起因した差異をみていると考えられる。

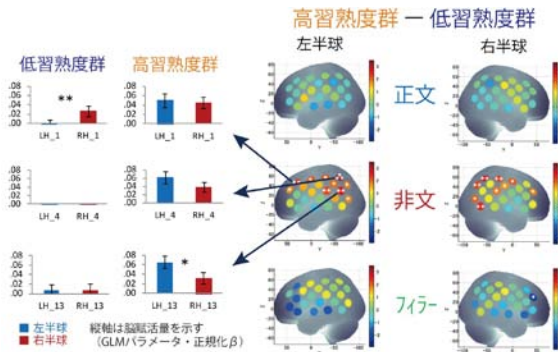


図6. 英文（正文・非文・フィルター）処理時の低・高習熟度群の脳反応比較

## (2) ERP解析の結果

全電極において、高習熟度群（High）では非文が正文よりも陽性方向に振れ、低習熟度群（Low）では非文が正文よりも陰性方向へ振れる傾向を示した。（図7）成績（Low・High）×文法性（正文・非文）×句（第1句目・第2句目・第3句目・第4句目）の分散分析を行った結果、Fz以外の電極で、成績×文法性に交互作用が認められた（Cz:  $p < 0.05$ , Pz:  $p < 0.005$ , F7:  $p < 0.05$ , F8:  $p < 0.05$ ）。成績の単純主効果は、高習熟度群では、CzとPzにおいて確認された（ $p < 0.05$ ）。低習熟度群では、Pzにおいて有意傾向が確認された（ $p < 0.05$ ）。高習熟度群におけるCz、Pz電極、低習熟度群におけるPz電極に対し、グループごとに文法性を要因としたt検定を行った結果、高習熟度群では、Cz電極において0-300ms区間と2100-2700ms区間において有意な差が認められた（ $p < 0.05$ ）。低習熟度群では、Pz電極において、300-600ms区間（ $p < 0.005$ ）、2700-3300ms区間（2700-3000ms:  $p < 0.005$ ,

3000-3300ms:  $p < 0.05$ ）、において、有意な差が認められた。

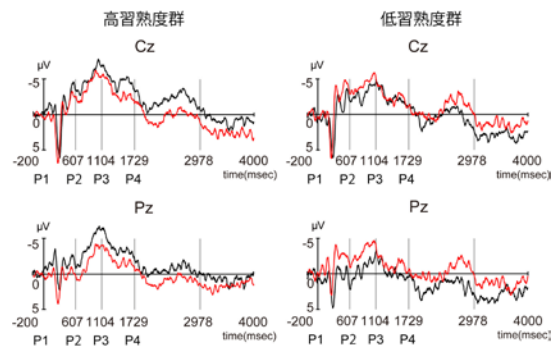


図7. 習熟度別による総加算平均波形

## (3) まとめ

本研究では、英語学習をしている小学校児童が英文を聞いている時の脳活動を記録し、言語処理時の脳反応を調べた。NIRS・ERP両解析結果から、英語習熟度の違いにより、文法違反のある英文処理時の脳反応に顕著な差が見られた。本研究により、学習による英語習熟度の増加に伴い、文法上の規則（句構造規則）を認知できる能力を獲得し、英文の聴覚刺激に対し、脳内で語順の違反を自動的に処理する能力を備えていく過程を、脳内処理の差異として可視化できることを示した。また、母語ではなく、外国語である英語の文法処理においても、習熟度と共に機能分化（左半球への側性化）が進むことを示した。この左半球への側性化が、発達と関連するものであるか、または発達とは独立に学習による習熟度の増加のみに起因するものであるかは、本研究の結果のみからは明らかではないが、現在、中学から本格的に英語学習を開始した公立中学校の学生を対象として、同実験を実施している。小学生および中学生の英語文法処理時の脳反応の違いを調べることにより、より多くの情報が得られることを期待している。解析条件の最適化も含め、現在解析途中であるが、今後中学生データとの比較検討を行い、さらに関心領域（ROI: Region of interest）毎の解析なども行っていく予定である。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

- ① Hata, M., Homae, F., and Hagiwara, H.: Semantic categories and contexts of written words affect the early ERP component. *NeuroReport*, 24(6) 2013, 292-297. 査読有  
DOI: 10.1097/WNR.0b013e32835f679d.

- ② Hidaka, S., (他 5 名), Hagiwara, H., and Koizumi, M.: Effect of second language exposure on brain activity for language processing among preschoolers. *Neuroscience Research*, 73, 2012, 73-79. 査読有  
DOI: 10.1016/j.neures.2012.02.004.
- ③ Hata, M., Homae, F., and Hagiwara, H.: Semantic relatedness between words in each individual brain: An event-related potential study. *Neuroscience Letters*, 501(2), 2011, 72-77. 査読有  
DOI: 10.1016/j.neulet.2011.06.044.
- ④ Sugiura, L., (他 2 名) Dan, I., Tsuzuki, D., Katura, T., and Hagiwara, H.: Sound to language: different cortical processing for first and second languages in elementary school children as revealed by a large-scale study using fNIRS. *Cerebral Cortex*, 21 (10), 2011, 2374- 2393. 査読有  
DOI: 10.1093/cercor/bhr023.
- ⑤ Koso, A., Ojima, S., and Hagiwara, H.: An event-related potential investigation of lexical pitch-accent in auditory Japanese. *Brain Research*, 1385, 2011, 217-228. 査読有  
DOI: 10.1016/j.brainres.2011.02.008.
- ⑥ Ojima, S., (他 2 名) Hoshino, T., and Hagiwara, H.: Age and amount of exposure to a foreign language during childhood: Behavioral and ERP data on the semantic comprehension of spoken English by Japanese children. *Neuroscience Research*, 70(2), 2011, 197-205. 査読有  
DOI: 10.1016/j.neures.2011.01.018.
- ⑦ Yusa, N., (他 6 名) Hagiwara, H.: Second language instinct and instruction effects: Nature and nurture in second language acquisition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23 (10), 2011, 2716-2730. 査読有  
DOI: 10.1162/jocn.2011.21607.
- ⑧ Ojima, S., (他 2 名) Hagiwara, H.: The acceleration of spoken-word processing in children's native-language acquisition: An ERP cohort study. *Neuropsychologia*, 49 (5), 2011, 790-799. 査読有  
DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2011.01.007.
- ⑨ Takahashi, J., (他 5 名), Hagiwara, H.: Effects of development and foreign language activities on the semantic processing of native language in preschool children. *Neuroscience*

*Research*, 69 (3), 2011, 246-251. 査読有  
DOI: 10.1016/j.neures.2010.12.003.

- ⑩ Ojima, S., (他 2 名) Hoshino, T., and Hagiwara, H.: Neural correlates of foreign-language learning in childhood: A 3-year longitudinal ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23 (1), 2011, 183-199. 査読有  
DOI: 10.1162/jocn.2010.21425.

[学会発表] (計 17 件)

- ① Hagiwara, H.: Toward effective English education based on brain science. The 16<sup>th</sup> Engineering Academy Round-Table-Meeting symposium, September 24, 2012, Fukuoka, Japan. [招待講演]
- ② 萩原裕子、脳はどのように言語を処理しているのか、日本私立小学校連合会、2012年8月22日、東京。[招待講演]
- ③ 萩原裕子、脳機能からみた外国語としての英語習得、大学英語教育学会、2012年6月2日、名古屋。[招待講演]
- 他 14 件

[その他]

ホームページ等

<http://www.comp.tmu.ac.jp/hagiwara>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

萩原 裕子 (HAGIWARA HIROKO)  
首都大学東京・人文科学研究科・教授  
研究者番号：20172835

### (2) 研究分担者

檀 一平太 (DAN IPPEITA)  
自治医科大学・医学部・准教授  
研究者番号：20399380  
星野 崇宏 (HOSHINO TAKAHIRO)  
名古屋大学・経済学部・准教授  
研究者番号：20390586

### (3) 研究協力者

杉浦 理砂 (SUGIURA LISA)  
首都大学東京・人文科学研究科・特任准教授  
保前 文高 (HOMAE FUMITAKA)  
首都大学東京・人文科学研究科・准教授  
秦 政寛 (HATA MASAHIRO)  
首都大学東京・人文科学研究科・特任研究員  
鎌水 秀和 (YARIMIZU HIDEKAZU)  
首都大学東京・人文科学研究科・博士前期課程  
松葉裕子 (MATSUBA HIROKO)  
首都大学東京・人文科学研究科・リサーチアシスタント