

【「英語教育フォーラム」特別講演】

脳機能からみた外国語としての英語習得

萩原裕子

首都大学東京

Abstract

The expectations of English language education in Japan have never been so high during the last few decades. To facilitate the effective learning and communication through English language, we must understand the basic mechanisms of brain development and language learning. In this invited article, we first explain the up-to-date information on the relationship between brain development and language acquisition and processing. Then, some of the results of our brain-based cohort study of elementary school children are briefly shown. It is emphasized that interdisciplinary collaboration and innovative technologies such as multichannel Event-related potentials and near infrared spectroscopy are effective to uncover the language functions in the children's developing brain. We hope that such effort may ultimately offer an insight into the effective English teaching/learning for schoolteachers and policy makers.

Key words: brain development, early foreign language learning, cohort study, event-related potentials, near infrared spectroscopy

キーワード：脳の発達、早期外国語学習、コホート研究、事象関連電位、近赤外光脳機能計測器

1. はじめに

現在の日本において、英語教育への期待はかつてないほどに高まっている。グローバル化と高度情報化がすすむ社会で、英語能力・英語によるコミュニケーション能力の育成は、日本の各分野の発展にとって欠かせない。身近な例としては、近年、大学も国際競争にさらされており、日本人学生の英語能力の向上と優秀な外国人留学生の確保は、各大学にとって最重要課題の一つであると言っても過言ではない。そのような状況において、ヒトの

言語能力の生物学的基盤を知ることが、英語教育が抱えている諸問題を解決する上でも参考になると思われる。本稿では、筆者がここ数年取り組んでいる小学生の脳研究について概説し、今後の日本における英語教育の発展について考察する。

2. 脳の発達と言語習得

言語習得は脳の発達と平行しておこなわれる。脳が発達するということは、神経細胞同士が連結して神経回路網を形成することである。その繋ぎ目の部分をシナプスというが、その密度によって脳の発達の度合いが分かる。脳の成長の速度とその過程は言語の違いによらずヒトに共通しており、場所によって発達する時期が異なる。構造・解剖学的知見によると、大脳皮質の言語関連領域では、シナプス密度の値が、聴覚野では1才でほぼ最大値に近づいているのに対して、ウェルニッケ野とブローカ野では3才で最大となっており、その後は減少する (Huttenlocher, 2002)。興味深いことに、ある単位あたりの密度と年齢との関係を見ると、月齢が上がるにつれて、聴覚野、ウェルニッケ野、ブローカ野の順番で一定の密度に達する。さらに、言語処理の脳内基盤という点では、聴覚野、ウェルニッケ野、ブローカ野を繋ぐ神経線維の束である「弓状束」の存在は欠かせないが、最近、拡散テンソル画像法 (diffusion tensor imaging, DTI) という、脳の神経線維の束を可視化する技法により、新たな知見が得られている。成人の弓状束については、2つの背側経路と1つの腹側経路があることが明らかになった (Catani, et al., 2005)。一方、新生児では、これらの経路のうち、腹側経路と、聴覚野とウェルニッケ野及び縁上回を繋ぐ背側経路 (弓状束の一部) は発達しているが、ブローカ野へ繋がる背側経路 (上縦束と弓状束の一部) が未発達のままであることが示された (Perani, et al., 2011)。神経線維が発達することにより母語の獲得が進むとすると、言語領域の中では、ブローカ野の発達が一番遅いことになる。言語野におけるこのような発達の順番は、言語機能を行為の獲得として見た場合、いかなる言語であれ、その過程は、音声知覚 (聴覚野) や理解 (ウェルニッケ野) が産生 (ブローカ野) に先んずるという、広く知られている現象と対応していて興味深い。また、脳全体をみると、成長に伴い大脳皮質 (灰白質) は徐々に薄くなるが、それにつれて軸索と呼ばれる神経線維 (白質) が成長して神経回路網が形成される。このプロセスは、20才以降も続くという (Gogtay, et al., 2004)。母語の発達初期に特に大きな変化がみられることは赤ちゃんの研究により明らかになったが、思春期またはそれ以降でも神経回路はダイナミックに改変していると言えよう。

このような脳の構造的な発達とは別に、脳の機能的なネットワークの発達を調べる研究がある。機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI) や、近

赤外光脳機能計測装置 (Near Infra-Red Spectroscopy, NIRS)を用いて、安静時の脳の機能的結合 (resting-state functional connectivity)を調べる研究が、最近、盛んになっている。解剖学的な結合と同時に、機能的な関係があるとされる脳領域の間の関係性も評価されるので、構造と機能の両方が反映されると考えられている。例えば、保前らは、多チャンネル NIRS を用いて、新生児・3ヶ月児・6ヶ月児の静睡眠時の脳の自発活動を測定した (Homae, et al., 2010)。その結果、脳の左半球と右半球の結合が月齢とともに形成されていくこと、また側頭領域と頭頂領域の関係性が、左半球のみで強く見られることを報告している。左半球の側頭から頭頂にかけては、成人では「後言語野」と呼ばれるウェルニッケ野や角回、縁上回などがあり、母語の獲得のメカニズムという点で興味深い。乳幼児以外では、小学校低学年の報告がある。7歳から9歳の児童と21歳から31歳までの成人の機能的結合を比較した研究であるが (Fair et al., 2008)、それによると、小学校低学年では、脳のデフォルト領域と呼ばれる部位 (安静時で脳の活動が高い領域) がまばらに結合しているが、その後の発達過程で一貫した相互連結のネットワークが形成されるとしている。特に、脳の前頭部と後方の頭頂をつなぐ大域的な結合は、小学校低学年以降、成人になる過程で強まることが明らかになった。前頭にはブローカ野が、頭頂には角回や縁上回が位置するが、7歳から9歳以降にこの領域間の結合が、特に強まるようである。筆者も母語の単語理解について脳波を用いて調べたところ、7歳から9歳の間に処理スピードが速まり、9歳以降はその処理時間が定着するという結果を報告した (Ojima, et al., 2011a)。小学校低学年は、脳の発達と言語習得にとって、ある意味で段階的な発達の時期と推測される。この神経学的な基盤としては、神経線維の髄鞘化による結合や、離れた脳部位同士の同期による結合など、さまざまな要因が関係していると考えられる。このように、母語は脳の成長に促されて自然に獲得される。では、第二言語や外国語の場合はいかなる神経基盤のもとに、どのような習得のプロセスを辿るのだろうか。

3. 脳科学と第二言語習得

第二言語や外国語の上達にかかわる要因には、学習開始年齢、習熟度、接触量、母語との言語間の距離などがある。一般に、語彙や文の意味処理には学習開始年齢はあまり関係しないが、音声・音韻や文法の処理には年齢がより深く関わると言われている。最近の第二言語習得研究の分野では、言語テストの成績や実験の反応時間などの行動指標のみならず、脳反応を直接観察する研究が盛んになってきた。特に、脳波の一種で、時間的な解像度に優れた事象関連電位 (Event-related potentials, ERP) を用いた研究は、音声・音韻、形態、意味、統語といった言語の各側面に、それぞれ特異的な生理的指標が報告されてお

り、欧米では学習者の言語能力を客観的に評価する方法として、広く用いられている。具体的には、意味的におかしな文の処理や、単語ペアのミスマッチの際に現れる N400、文法的に間違っている文の処理で現れる左前方陰性波 LAN 及び P600 など、それぞれ、意味処理や文法処理を反映する。

第二言語習得の領域では、外国語学習に関する研究が古くから行われているが、主にアメリカにおける移民の英語習得のような第二言語環境でのものが多く、日本のような外国語環境での子どもの英語学習については科学的なデータがない。アメリカの移民と日本にいる日本人とでは英語の学習環境が大きく異なり、移民が自然な環境下で英語を習得する場合と、日本のように、外国語として学校で形式的に学ぶ環境で英語を学習する状況を、直接的に比較することはできない。また、学習法や教授法についても、アメリカで開発された方法をそのまま日本で行うことが相応しいかどうか検討の余地がある。小学生の場合、母語も発達途上であり、母語および英語処理時の脳内メカニズム、またそれらの違いはほとんど分かっていない。

4. 脳機能からみた英語習得：小学生のコホート研究

そこで筆者は、科学技術振興機構社会技術研究開発センター研究開発領域「脳科学と社会」研究開発プログラム「脳科学と教育」の一環として、2006 年から 2008 年までの 3 年間にわたり「言語の発達・脳の成長・言語教育に関する統合的研究」というテーマで、言語習得の脳機能コホート調査を行った。コホート研究とは、大規模な集団を前方視的に追跡する手法で、同一集団内での発達的变化をみることができる。具体的には、関東圏にある公立と私立の 7 校の小学校にご協力いただき、さまざまな英語習熟度をもつ 6 才から 11 才までの小学生を対象に、英語テスト、国語テスト、学習環境についての質問紙に加えて、脳波・事象関連電位と近赤外光脳機能計測器を用いた脳計測実験を、年に 1 回、3 年間にわたり実施した。参加児童は、1 年目が 389 名、2 年目は 485 名、3 年目は 445 名で、1 年目の参加者の 84.8%が 3 年間参加した。コホート調査としては異例の高い定着率である。

5. 脳波・事象関連電位研究

脳機能にもとづく外国語学習で肝心なことは、まず、生物学的にみて、母語の発達と外国語の習得過程がどのような関係にあるかを明らかにすることである。脳波・事象関連電位の実験では、モニターに視覚提示された絵の内容と聴覚提示された英単語が意味的に一致している条件と一致していない条件を設定し、一致していない場合、つまりミスマッチへの反応として現れる N400 および後期陽性成分 (Late Positive Component, LPC) を観

察した。LPC は再分析や統合を反映されているとされている。

3年間のすべての検査に継続して参加した 322 名のデータを解析した結果、英語学習の進行にともなって出現する脳反応の変化は、先行研究で報告されている母語の獲得に見られる脳反応の変化と同じプロセスを辿ることが分かった (Ojima, et al., 2011b)。具体的には、図 1 に示す通り、解析対象者を 1 回目の英語テストの成績により、低得点群 (45%)、中得点群 (59.5%)、高得点群 (92.9%) に分け、それぞれの群につき 1 年目と 3 年目を比較したところ、1 年目で何も観察されなかった低得点群では 2 年後に頭皮上に広く分布する陰性波 (broad negativity, bNeg) が現れ (図 1-A, E)、1 年目で bNeg が観察された中得点群の 2 年後には N400 が出現した (図 1-B, F)。さらに 1 年目で N400 が認められた高得点群では 2 年後に LPC が出現した (図 1-C, G)。これら 3 つの ERP 成分の出現順序 (bNeg → N400 → LPC) は、幼児の母語獲得で報告されたものと同じであり、高得点群の母語である日本語の刺激に対しても出現している (図 1-D)。英語テストの成績が 3 年目は各群ともに上がっていること (低得点群: 67.8%、中得点群: 80.4%、高得点群: 99.1%)、また母語では各群ともに 1 年目から全ての ERP 成分が出現していることから、これらの脳反応の変化は英語の習熟度そのものの変化を反映していると言える。

これらの結果より、外国語の語彙学習の脳反応は、母語の語彙発達にみられる脳反応と同じプロセスを辿ることが分かった。この結果は、ヒトの単語習得のプロセスは、学習環境によらず強い生物学的制約を受けていることを示している。これまで、言語習得の生物学的制約は、感受性期との関係で音声・音韻や文法の発達について言及されてきたが、今回の研究で、単語の習得のプロセスもその影響を受けていることが明らかになった。

次に、学習時間と年齢との関係を探るために、上記の対象となった小学生のうち英語学習を経験している延べ 800 人の脳波データを分析した (Ojima, et al., 2011c)。学習開始年齢は 0 才から 7 才で、主に小学校、英会話教室、家庭学習などで学習し、誕生から調査した時点までの生涯学習時間は数十時間から数千時間であった。通常、学習開始年齢が低ければ生涯学習時間は長いという相関関係があるため、この二つの影響を統計的に分離した。その結果、図 2 に示す通り、分離する前は、学習開始が早ければ英語テストの得点が高く、N400 の振幅が大きいという傾向があったが、分離した後はこの傾向は逆転して、学習開始が遅い方が英語テストは高得点で、かつ N400 の振幅も大きいという結果になった。また、分離の有無にかかわらず、全学習時間が長ければ英語テストは高得点で N400 の振幅は大きいということが分かった。この結果は、外国語学習の開始年齢を考える上での一つの基礎データであるが、今回の限られた研究では、学習時間が一定の場合、むしろ遅く始めた子供が有利であるとの傾向が確認された。但し、前述のように、今回は小学校入学前

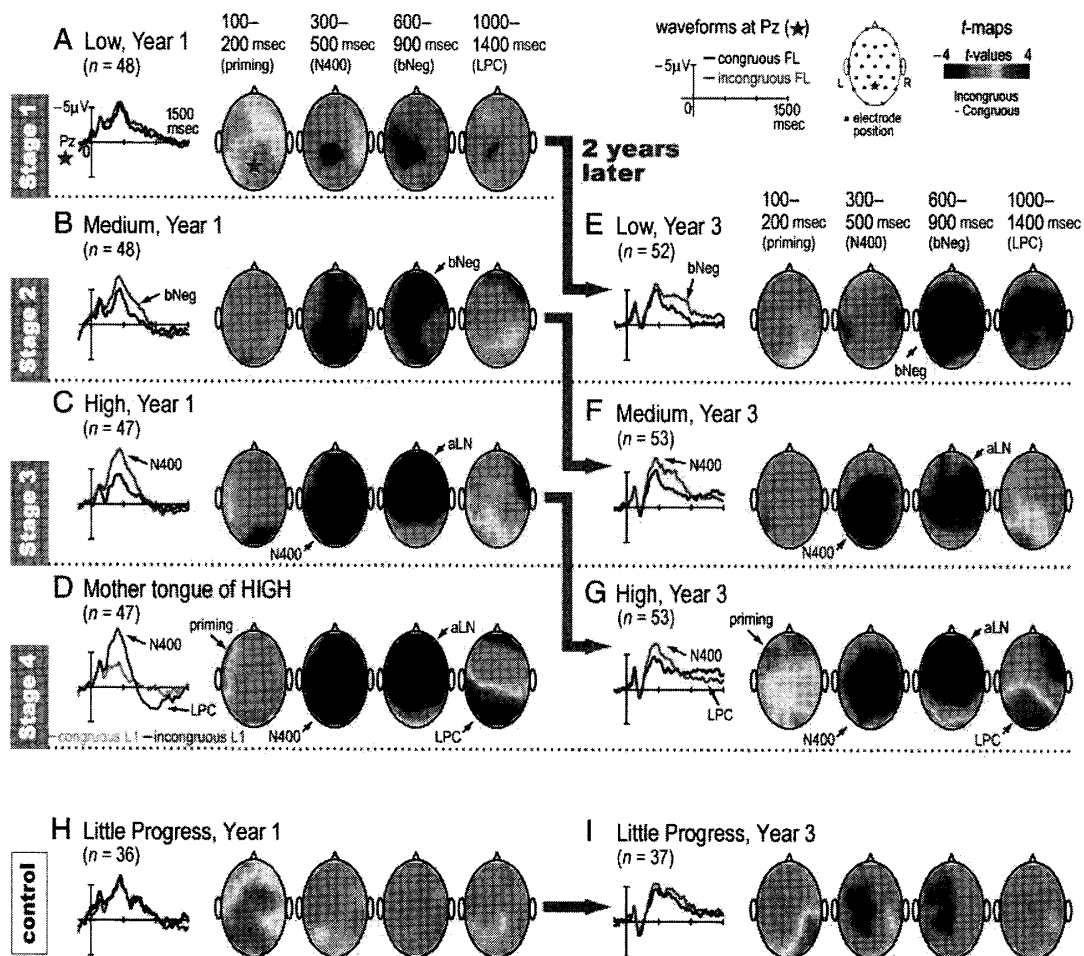


図1 英語習熟度により異なって出現した ERP 成分と2年後の推移 (Ojima, et al., 2011b より)

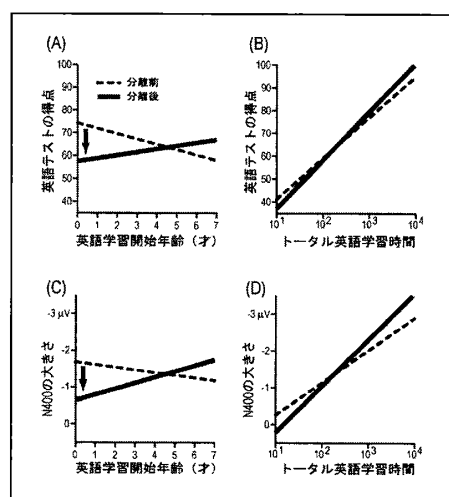


図2 学習開始年齢と学習時間の、英語テストと英語における N400 脳波成分の反応に対する影響 (Ojima, et al., 2011b より)

か入学時に英語学習を開始した子供が対象になっており、小学校入学以降に開始した子供については、現時点では直接的なデータはない。小学校英語の開始学年について社会的な関心事になっているが、どの学年で英語を導入するのがよいかを検討するためには、今後さらなるデータの蓄積が必要となる。

6. 近赤外光脳機能計測研究

次に、母語および英語の単語を復唱している時の脳内メカニズムを調べた (Sugiura, et al., 2011)。近赤外光脳機能計測器は、脳血流量の変化を捉えるもので、子供にも安全で計測時の負担も少ない。484 人の小学生（年齢：6～10 歳）について、母語（日本語）および外国語（英語）のそれぞれにつき、出現頻度の異なる 2 種類の単語（高頻度語と低頻度語）を用意し、合計 4 種類の復唱課題を実施した。高頻度語は 100 万語中 50 回以上の使用頻度、低頻度語は 100 万語中 5 回以下であった。

結果は、図 3 に示す通り、聴覚野付近では言語（母語 vs. 英語）や出現頻度（高頻度語 vs. 低頻度語）によらず同程度の脳活動で、左右半球差もなかった。一方、ウェルニッケ野付近、角回、縁上回では、単語の意味の理解度によらず、母語処理時の方が英語処理時より脳活動が有意に大きかった。聴覚野付近では母語と英語で脳活動に差がないのに対して、これらの脳の場所では顕著な差が見られたという結果は、ウェルニッケ野付近、角回、縁上回が、「言語音」の認知処理（音韻処理）の座であることを示している。つまり、小学生の段階ですでに脳が母語の音韻処理にチューニングされており、言語音として聞き慣れない英語は非語と同様に処理されていると考えられる。また、聴覚野付近やウェルニッケ野付近は、音声－言語処理のプロセスの初期段階にあたるが、脳の活動は左右半球で差はなかった。一方、音声－言語処理プロセスの後期段階（角回、縁上回、ブローカ野）では言語刺激の種類によってそれぞれの皮質が異なる反応を示し、高頻度語に対しては左半球の角回、低頻度語に対しては右半球の縁上回の活動が統計的に優位となった。また、ブローカ野では右半球の活動が優位であった。

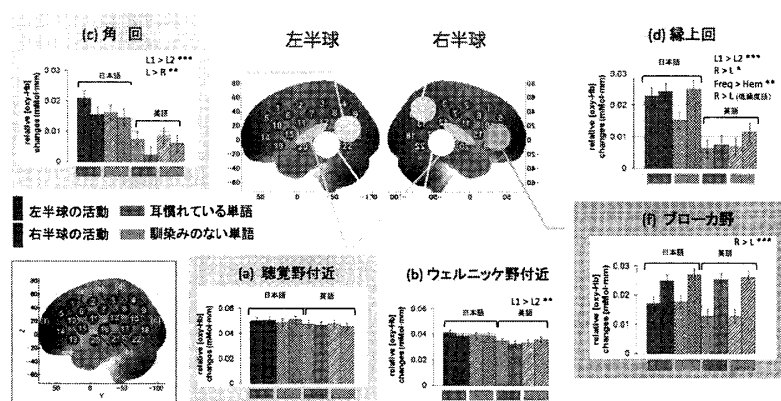


図3 単語復唱課題での脳活動 (Sugiura, et.al., 2011より)

一般に言語は左半球で処理されており、言語処理の中でも特に音韻処理には左右両半球が関与していると言われているが、この結果から、新しい単語を学ぶ時には右半球が重要な役割を担っている可能性が高いことが示唆された。あまり聞き慣れない低頻度語の音韻処理には、右半球の縁上回が深く関与し、聞き慣れた高頻度語に対しては左半球の角回の活動が高いという結果は、音声分析が進むと語彙の習得が進み、それに伴って脳活動が右半球から左半球へ移行する可能性を示している。また、この傾向は母語でも外国語でも同様に観察されたことから、言語に普遍的な現象であると考えられる。

音声は一つ一つの音（分節音、単音）が連結してできているため、分節的特徴と、分節音が連結した単位（音節、語、句など）に起こるリズム、アクセント、イントネーションなどの超分節的特徴に分けられるが、左半球では分節的特徴の処理、右半球では超分節的特徴の処理が行われている可能性が高いと考えられる。新しい言葉を学ぶ際には、外国語のみならず母語でもこの超分節的特徴の処理機能が重要であり、この機能が言語の上達を左右すると思われる。これより、左半球に加えて、右半球の縁上回および右半球のブローカ野に相当する場所が言語習得の初期に重要な役割を担っていると考えられる。この結果は、音声処理から言語処理の一連の過程において、音の入力のごく初期段階である聴覚野付近では言語の種類によらず音声として処理され、さらにウェルニッケ野、角回、縁上回、ブローカ野という高次な脳機能を担う場所へと処理プロセスが進むにつれて、より特化した「言語」の処理へ移行していくことを示唆している。

7. これからの展開

以上、脳の発達と言語習得という観点から、日本人小学生の英語学習のコホート研究を紹介した。日本人の英語教育について、これまではテストの成績や心理実験における正答率や課題処理時間などの行動指標を検討の資料としていたが、これからは、脳機能にもとづく言語習得および学習のメカニズムを理解する必要がある。そのために、人文系の領域でも脳科学の手法を用いた実験研究を推進することが望ましいが、とかく異分野という意識が働き、そう容易ではないように思われる。しかし、分野は違っても知りたいことの本質は変わらないのであり、分からない場合は、神経科学者や脳を熟知している情報工学の研究者とコラボレートするのがよい。欧米とは異なり、日本のような外国語環境での第二言語習得についてはデータが少ない。まずは、言語学、心理言語学の仮説やモデルにもとづいて、言語習得の神経科学的な基礎資料を収集すべきである。そして、研究者、教育者、政策立案者が協働して、脳機能にもとづいたより効果的な外国語の教授法や学習法の開発に取り組むことが重要である。研究成果を教育現場へ還元することが何より期待される。

参考文献

- Catani, M., Jones, D. K., & ffytche, D. H. (2005). Perisylvian language networks of the human brain. *Annals of Neurology*, 57, 8-16.
- Fair, D. A., Cohen, A. L., Dosenbach, N. U. F., Church, J. A., Miezin, F. M., Barch, D. M., Raichle, M. E., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2008). The maturing architecture of the brain's default network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 4028-4032.
- Gogtay, N., Giedd, J. M., Lusk, L., Yanashi, K., M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101, 8174-8179.
- Homae, F., Watanabe, H., Otake, T., Nakano, T., Go, T., Konishi, Y., & Taga, G. (2010). Development of global cortical networks in early infancy. *Journal of Neuroscience*, 30, 4877-4882.
- Huttenlocher, P. R. (2002). *Neural Plasticity: The Effects of Environment on the Development of the Cerebral Cortex*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.

- Ojima, S., Matsuba-Kurita, H., Nakamura, N., & Hagiwara, H. (2011a). The acceleration of spoken-word processing in children's native-language acquisition: An ERP cohort study. *Neuropsychologia*, 49, 790-799.
- Ojima, S., Nakamura, N., Matsuba-Kurita, H., Hoshino, T., & Hagiwara, H. (2011b). Neural correlates of foreign-language learning in childhood: A 3-year longitudinal ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23, 183-199.
- Ojima, S., Matsuba-Kurita, H., Nakamura, N., Hoshino, T., & Hagiwara, H. (2011c). 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, 197-205.
- Perani, D., Saccuman, M.C., Scifob, P., Anwender, A., Spada, A., Baldoli, C., Poloniato, A., Lohmann, G., & Friederici, A. D. (2011). Neural language networks at birth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108, 16057-16061.
- Sugiura, L., Ojima, S., Matsuba-Kurita, H., Dan, I., Tsuzuki, D., Katura, T., & Hagiwara, H. (2011). 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, 2374-2393.