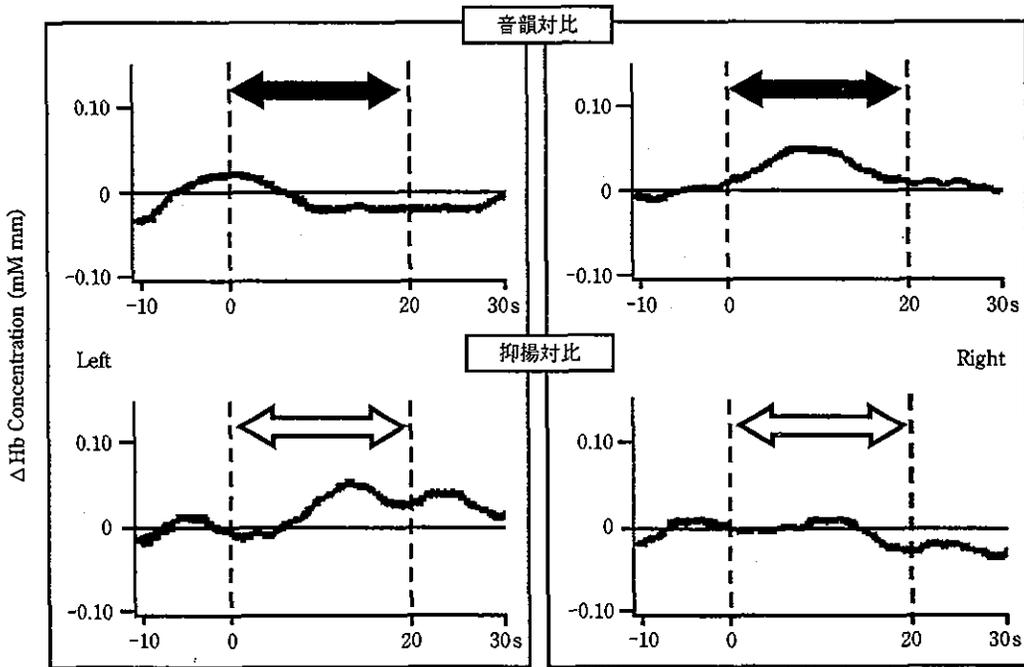


代表的な被験者のプローブ位置を本人の傍矢状断 MRI 画像に重ね合わせた。黒点がプローブ位置を示し、プローブ間が測定チャンネル(丸)となる。四角で囲まれた A の領域が聴覚野の中心を示し、灰色のついた測定チャンネルを側化指数計算に採用した。



上記した左右測定チャンネルの総ヘモグロビン反応を音韻(上)・抑揚対比(下)別に示す。縦軸に総ヘモグロビン変化量、横軸に時間をとり、図中の矢印(0-20s)は音韻(黒矢印)または抑揚対比刺激(白矢印)が提示された区間である。この被験者は非吃音者の典型パターン<sup>15)</sup>と左右逆転したパターンとなった。

図1 プローブ位置の MRI 画像への重ね合わせと NIRS 反応例

る音韻および抑揚処理の側性化について調べた。吃音者群は音韻・抑揚の側化指数間に有意差がなく、音韻処理に関して左優位性が見られなかった。言語処理における左優位性が見られない点で PET<sup>8,9)</sup>・MEG<sup>10)</sup>・fMRI<sup>21)</sup>・両耳分離聴法<sup>22)</sup>による研究とおおむね一致したものになった。

個人内の検定で、健常右利き成人の 85% で音韻処理が左優位と判定できる<sup>15)</sup>のに対し、成人吃音者の 80%

は左優位を示さず、逆に右優位となる被験者も 2 名存在した。すなわち、この手法は感度 100%、特異度 85% で吃音を診断できることになる。このように個人ごとに左右差が鋭敏に検定できるメリットがこの手法にあり、先行研究のように集団の平均値のみでなく、個人レベルでも、吃音と言語処理の脳半球優位性異常とに関連があることが確認された。

また、音韻処理の側化指数と吃音症状に負の相関が

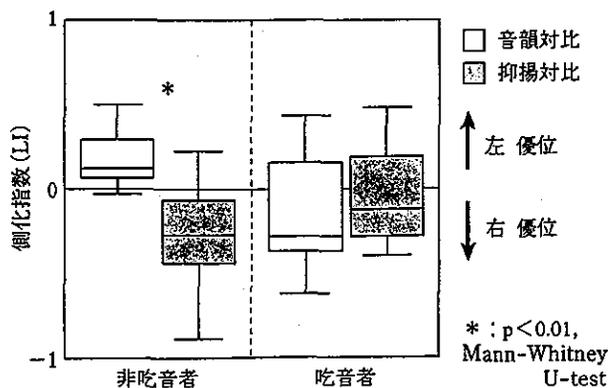


図2 音韻・抑揚処理の側化指数

左右聴覚野近傍の Hb ピーク変化量の側化指数(本文参照)を示す。比較対象として非吃音者 20 名の結果<sup>15)</sup>を左半に付す。図の箱は四分位を、箱内のバーは中央値を示す。また、ひげはレンジを示す。

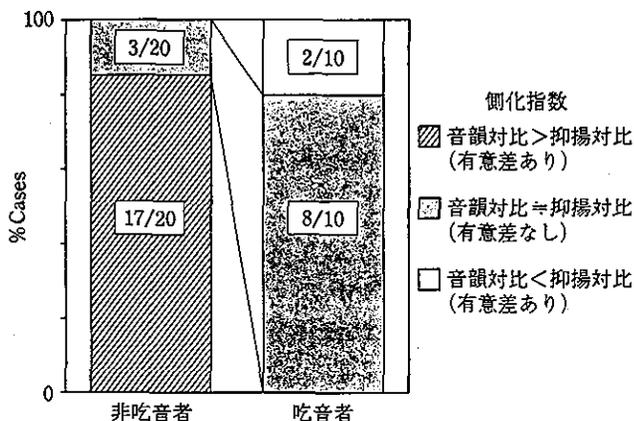


図3 音韻・抑揚対比間の個人内検定結果

個人内検定結果を人数の割合で被験者群ごとに示す。  
 ■: 抑揚対比より音韻対比で側化指数が有意に大きい(すなわち左優位)。  
 □: 音韻・抑揚対比間の側化指数に有意差なし。  
 □: 音韻対比より抑揚対比で側化指数が有意に大きい(右優位)。

あった。吃音症状には個人内でも変化することや大脳左右異常性に関して吃音治療後も残るとの報告もあり<sup>23)</sup>、慎重な検討が必要であるが、この相関からは側化指数の異常が比較的最近の病態を反映している可能性は高い。

NIRS 装置は原理的に無音で動作するので<sup>24)</sup>、今回のような聴覚誘発反応の検出に有利である。また、非侵襲的であるため繰り返しの測定が可能であり<sup>24)</sup>、年齢を問わず安全に使用できるため<sup>16)</sup>臨床応用にも適す。今回採用した NIRS は PET や MEG と異なり容易に小児にも適用でき、満 1 歳から音韻処理の左優位性が認められている<sup>16)</sup>。今後同様の検査を吃音小児にも行うことが可能である。

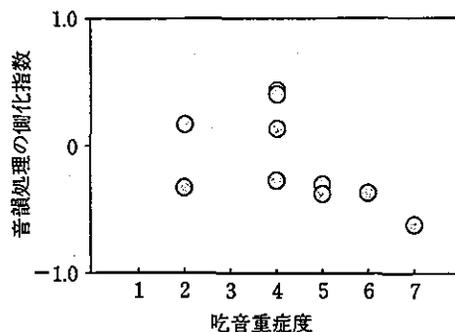


図4 音韻処理の側化指数と吃音重症度  
 被験者ごとの音韻処理の側化指数と吃音重症度の散布図。この 2 変数に負の相関が見られた (Spearman's,  $r = -0.64$ ,  $p < 0.05$ )。

### 結 論

成人吃音者を対象に、聴覚言語処理の左右聴覚野の機能分化について近赤外分光法脳オキシメータを用いて測定した。その結果、吃音者群は音韻・抑揚処理間の左右差が有意でなかった。個人内の検定では、健常右利き成人の 85% で音韻処理が左優位と判定できるのに対し、成人吃音者の 80% は左優位を示さず、逆に右優位となる被験者も 2 名存在した。この手法により吃音者の聴覚性言語処理の機能異常を客観的に捉えられることが判明した。

謝辞 刺激音は広島県立保健福祉大学コミュニケーション障害学科・今泉 敏教授に作成して頂きました。また本研究は厚生労働科学研究こころの健康科学研究事業補助金(吃音の病態解明と医学的評価および検査法の確立のための研究, H14-こころ-001, 15130801)の補助を受けて行われた。結果の一部は第 47 回日本音声言語医学会総会・学術講演会にて発表した。

### 文 献

- 1) Bloodstein, O.: A Handbook on Stuttering, National Easter Seal Society, Chicago, pp. 89-91, 1987.
- 2) Peters, T.J. and Guitar, B.: Stuttering: An Integrated Approach to its Nature and Treatment, Williams & Wilkins, Baltimore, USA, pp. 71-107, 1991.
- 3) 都築澄夫: 言語聴覚法シリーズ 13 吃音, 建帛社, 東京, 12-15 頁, 2001.
- 4) Conture, E.G., Rothenberg, M. and Molitor R.D.: Electroglottographic observations of young stutterers' fluency. J Speech Hear Res, 29 : 384-393, 1986.
- 5) Kidd, K.K.: Genetic models of stuttering. J Fluency Disord, 5 : 187-201, 1980.
- 6) Foundas, A.L., Bollich, A.M., Corey, D.M., et al: Anomalous anatomy of speech-language areas in adults with persistent developmental stuttering. Neurology, 57 : 207-215, 2001.

- 7) Sommer, M., Coch, M.A., Paulus, W., et al: Disconnection of speech-relevant brain areas in persistent developmental stuttering. *Lancet*, 360: 380-383, 2002.
- 8) Fox, P.T., Ingham, R.J., Ingham, J.C., et al: A PET study of the neural systems of stuttering. *Nature*, 382(6587): 158-161, 1996.
- 9) Wu, J.C., Maguire, G., Riley, G., et al: A positron emission tomography [<sup>18</sup>F]deoxyglucose study of developmental stuttering. *Neuroreport*, 6: 501-505, 1995.
- 10) 佐藤 裕, 入江正明, 出口利定, 他: 吃音者の言語音声認知における大脳半球左右差. *東京学芸大学紀要, 第一部門教育科学*, 50: 95-100, 1999.
- 11) Mysak, E.: Servo theory and stuttering. *J Speech Hear Disord*, 25: 188-195, 1960.
- 12) Lee, B.S.: Effects of delayed speech feedback. *J Acoust Soc Am*, 22: 824-826, 1950.
- 13) Cherry, C. and Sayers, B.: Experiments upon the total inhibition of stammeing by external control, and some clinical results. *J Psychosom Res*, 1: 233-246, 1956.
- 14) Salmelin, R., Schnitzler, A., Schmitz, F., et al: Functional organization of the auditory cortex is different in stutterers and fluent speakers. *Neuroreport*, 9: 2225-2229, 1998.
- 15) 古屋 泉, 森 浩一: 左右聴覚野の音声言語処理における機能分化—多チャンネル近赤外分光法(NIRS)による検討—。 *脳と神経*, 55: 226-231, 2003.
- 16) 佐藤 裕, 森 浩一, 古屋 泉, 他: 乳幼児の音声言語処理における左右聴覚野の発達—近赤外分光法による検討—。 *音声言語医学*, 44: 165-171, 2003.
- 17) 日本音声言語医学会吃音検査法小委員会, 森山晴之, 小澤 恵美, 他: 吃音検査法<試案1>について. *音声言語医学*, 22: 194-208, 1981.
- 18) Oldfield, R.C.: The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-113, 1971.
- 19) 山下優一, 牧 敦, 山本 剛, 他: 光トポグラフィー技術の将来像. *脳の科学*, 22: 1263-1268, 2000.
- 20) Imaizumi, S., Mori, K., Kiritani, S., et al: Task-dependent laterality for cue decoding during spoken language processing. *Neuroreport*, 9: 899-903, 1998.
- 21) Van Borsel, J., Achten, E., Santens, P., et al: fMRI of developmental stuttering: A pilot study. *Brain Lang*, 85: 369-376, 2003.
- 22) Curry, F.W. and Gregory, H.H.: The performance of stutterers on dichotic listening tasks thought to reflect cerebral dominance. *J Speech Hear Res*, 12: 73-82, 1969.
- 23) Forster, D.C. and Webster, W.G.: Speech-motor control and interhemispheric relations in recovered and persistent stuttering. *Dev Neuropsychol*, 19(2): 125-145, 2001.
- 24) 古屋 泉, 森 浩一: 近赤外分光法による閾値付近の聴覚誘発反応の測定. *Audiology Japan*, 43: 190-195, 2000.

別刷請求先: 〒359-8555 埼玉県所沢市並木4-1

国立身体障害者リハビリテーションセンター  
一研究所感覚機能系障害研究部  
佐藤 裕



# 言語認知研究における NIRS 機能検査

皆川 泰代      森 浩一

臨床精神医学 第 33 卷 第 6 号 別刷

アークメディア

# 特集

## NIRSによる機能画像の新展開

### 言語認知研究におけるNIRS機能検査

皆川 泰代<sup>1,2)</sup> 森 浩一<sup>1)</sup>

#### Key Words

言語優位半球, 音韻・韻律, 左右差, 聴覚野, 母語・非母語

#### 1 はじめに

言語は知覚・認知機能, 記憶, 運動機能などを駆使し, 心に起こるさまざまな事象に音声記号によるシンボルを与え, それを規則に従って組み合わせることで他者との相互交信を図る高次脳機能である。このレベルの記号操作能力はヒトに特異的な能力とされる。それゆえ言語処理に特化したモジュール性が脳内に存在するのか, はたまた他の認知機能と共通した能力の一部なのか? 還元論 vs 全体論ともいえるこの言語処理能力をめぐる論争は, 神経心理学的知見の蓄積や脳外科手術時の皮質電気刺激, 脳波による研究から, 近年における陽電子断層法 (PET), MRIなどの脳解剖ならびに機能画像化技術の発展に伴って, 脳内の言語表象のモデルが精密化されつつも, ますます白熱してきている。これらの脳機能画像化における最近の技術発展の1つが近赤外分光法 (NIRS; near-infrared spectroscopy) である。

NIRSは脳機能計測に使われるようになった歴史は浅いが, 無侵襲であることはもとより, 実験環境の自然性と脳波計と同程度の可搬性などの簡便性があり, 電磁気の干渉を受けず, 感度が比較

的高いことから, 成人のみならず乳幼児にも, 課題負荷時の脳機能計測に最適な装置の1つである<sup>1)</sup>。今後NIRSによって, 脳機能の発達過程に関する知見がさらに得られると思われ, 言語・認知の発達遅滞ないし異常の診断の補助検査としてのみならず, 言語を生み出す脳内機構や言語の進化についても洞察を与えてくれるような寄与があるものと期待される。

NIRSの精神科領域の応用に関しては, すでにうつ病や統合失調症における前頭前野の言語課題における活性化の異常<sup>2)</sup>や, 脳外科手術前のてんかん患者の言語優位側の決定<sup>25)</sup>にも応用されている。しかしながらNIRSが言語認知研究に用いられ始めたのは比較的最近であり, 臨床に応用された研究は少ない。本稿では, 主に言語聴取についてのNIRS研究について述べ, 今後の研究のヒントとなることを期待したい。

#### 2 左右半球の機能差・言語機能の局在性

大脳の左右半球機能の非対称性あるいは言語機能の局在性については, 19世紀以来の脳損傷研究や脳機能研究で, 左下前頭回が主に言語の発話や文法を司る領域 (ブローカ野), そして同じく左の上側頭回後部が主に言語理解や言語音処理に関する領域 (ウェルニッケ野) であることが明らかにされた。ウェルニッケ野の一部とされる側頭

Near-infrared spectroscopic measurement of human language function

<sup>1)</sup> MINAGAWA-KAWAI Yasuyo and MORI Koichi 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所 [〒359-8555 所沢市並木4-1]

<sup>2)</sup> 慶應義塾大学文学部心理学研究室科学技術振興機構

平面 (planum temporale) は解剖学的にも左右の非対称性, つまり左脳でより大きいことが報告されてきた<sup>1,5,6)</sup>。側頭平面は言語野の中心点ともいわれており<sup>23)</sup>, この解剖学的違いは言語処理の左優位性の構造的証拠ともされてきたが<sup>5)</sup>, 側頭平面の左右差については, 測定法によって結論に違いがみられるので注意深い検討が必要である。また, 肉眼や通常のMRIのスケールでの解剖的な左右差が明確にあるのは2/3程度の例であるが, アミタール法 (Wada test, 以下ワダ法) などの研究でも明らかなように機能的には90%以上で言語の脳内処理は左が優位であるので, 構造と言語能力の関係は1対1対応ではなく, 脳機能の部分的阻止か賦活検査によってのみ症例ごとに優位側を決定することができる。

音声言語は大きく母音・子音といった音韻 (分節音), そしてそれら分節音にかぶさる高さや強さなどの特徴である韻律 (prosody) に分けられるが, これら音韻・韻律聴取時の反応にも左右差が観察される。すなわち, 音韻は側頭平面を含む聴覚野近傍で左優位な反応がみられ, 楽音や言語の韻律 (非語彙的韻律) は右優位な反応がみられる (ただしプロの音楽家は楽音でも左)。同様に, ウェルニッケ野の損傷で音韻認知障害が起こり, ウェルニッケ, プローカ野の右の対向部分が損傷した場合, 言葉の抑揚の理解や表出が失われるプロソディー障害が起こる。

### 1. 言語優位側同定のためのNIRS検査

従来, 脳外科手術前の言語優位半球の判定のためにはワダ法が最も信頼性が高い検査として用いられてきたが, 侵襲的であることと薬剤の入手困難などの理由でそれに代わる方法が模索されており, NIRSによる検査法もいくつか提案されている。単語の視覚呈示による言語課題を課して脳活動を機能的MRI (fMRI) とNIRSで計測した場合, 側化指数が2つの計測法で相関し, 言語優位半球を同定する検査としてのNIRSの有用性を基礎づける報告がある<sup>10)</sup>。

### 2. 発話による検査

語流暢試験による反応をブローカ野とその対向部位の比較で優位側を決定する検査法が発表されている<sup>25)</sup>。この方法では発話ではなくて書字を

採用している。NIRSは皮膚を通して検査を行うため, 脳に達するまでの光の経路に血液動態が変化するものがあると脳機能を正しく計測できない。ブローカ野の外側には側頭筋があり, 発話や緊張に際して活動して血液量と酸素飽和度が増加し, さらには体積変化によって光プローブの皮膚との接触状況にも変化が出ることがあり, 発話による検査を行うと脳反応の数倍以上のアーチファクトが混入することがよくある。Watanabeらによる方法<sup>25)</sup>はそれを回避するため, 書字による検査を行っている。福田ら<sup>3)</sup>は同様の課題を発話によって行っているが, 記録部位が前頭前野であるため, 側頭筋の影響を受けない。ただし, この場合は言語優位側の同定目的ではなく, 精神疾患の検査として施行されている。

### 3. 音声聴取による検査

音声聴取による単語レベルの音韻・抑揚刺激呈示の手法も優位半球の判定に応用可能である。われわれはNIRSを使用した一連の研究<sup>4,12-14,21,22)</sup>で, 音韻や韻律処理における聴覚野およびその近傍の左右の機能差をとらえている。方法としては, ベース刺激としてある単語を20秒間繰り返し音声呈示した後に, テスト刺激として特定の特徴が異なる単語を比較呈示し, その変化に対する総ヘモグロビンの反応ピークの左右差を調べている。通常は群としての反応を統計検定しているが, 繰り返し回数が十分に多ければ個人ごとにも検定することが可能であり, この点が臨床応用を考えた場合に有用である。

ベース刺激/itta/に対して比較刺激を/itte/にした条件 (音韻対比条件) と, 同じベース刺激/itta/に対し異なる韻律特徴をもつ/itta?/を比較呈示した条件 (抑揚対比条件) での聴覚野近傍における総ヘモグロビンの変化量を計測すると, 右利き被験者については, 音韻対比条件では左聴覚野近傍が, 抑揚対比条件では右聴覚野近傍がより強く活動することが示された (図1)。個人ごとの評価では, 85%で音韻対比の方がより左優位の反応を示した。言語機能に関する左右差のこのような検出感度は, fMRIなどによるものとはほぼ同等であるが, ワダ法によるものより若干感度が低いといえる。

一方, 非右利き被験者群では左右聴覚野の差異

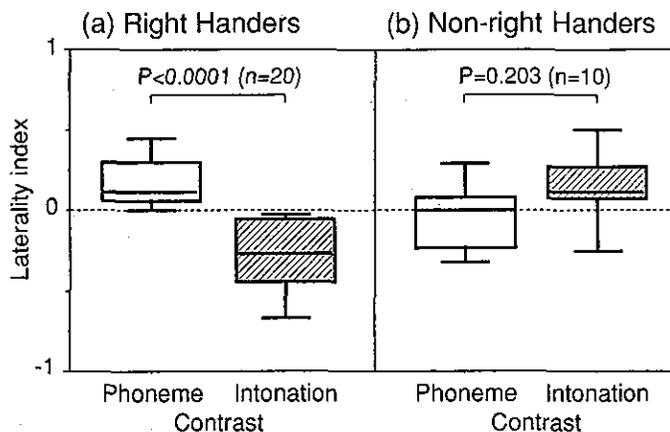


図1 利き手と音韻・抑揚対比の反応の側化指数

左(L)と右(R)の聴覚野近傍におけるヘモグロビン最大反応の側化指数を $(L-R)/(L+R)$ で求め、右利き被験者(a)と非右利き被験者(b)別に示す。

がはっきりみられなかった。個人ごとの評価では、半数では音韻対比の反応がより右に大きく出ており、右利きと反転していた。残りの半数では左右差が有意でなかった。これらの結果は、右利きについては従来の研究と矛盾しないが、左利きについてはワダ法ではなお半数以上が左優位に判定されることから、ワダ法がブローカ野ないし発語機能の局在により敏感だとすると、少なくとも左利きについてはブローカ野とウェルニッケ野で左右の分化の程度が異なる可能性を示唆している。しかし、ワダ法のように不活化による機能の欠失と、誘発反応のように刺激による機能の賦活の程度の左右差が一致するのかどうかという点に関しては、検討の余地があるところである。

### 3 乳幼児の発達変化

言語の左右半球機能差は生後どの時期に現れるのか？ それとも言語処理の左半球優位性は生得的なものなのか？ 音声言語処理の左右機能差については両耳分離聴検査や、事象関連誘発電位(ERP)を用いて検討されてきたが、音韻種の変化に対する脳反応はしばしば相反する結果が得られている<sup>15)</sup>。ERPより空間分解能の優れたNIRSを用い先述した音韻と抑揚に対する左右側頭葉の反応の差を乳幼児で検討した結果、左右機能分化の発達過程がとらえられた(図2)<sup>21)</sup>。生後7~10

カ月では音韻と韻律の対比条件で左右差が有意でないのに対し、11~12カ月群以降では、成人のように音韻変化が韻律変化よりも左優位になっている。このことは満1歳頃に音韻・韻律に対する左右側頭葉の機能分化が成立することを示すと考えられる。

新生児では、生後数日以内に音楽聴取で前頭葉の反応が出ることが確認されている<sup>19)</sup>。また、生後5日以内の新生児において、会話文聴取における脳活動が順再生の場合と時間的に反転して逆再生した場合とで比較され、順再生の会話を聞いた時のみ左聴覚野近傍で有意な活動がみられた<sup>18)</sup>。逆再生音は順再生音と全く同じ周波数成分を含んでいるため、音刺激の時間順序に依存した反応が新生児期にすでにあり、自然言語の時間順序に対する感度が高いといえる。この結果は、言語機能の個体発達と、言語のヒト固有性の観点から興味深い。しかし、この時期の乳児は言語音と非言語音の区別や、母語と非母語の区別を、音声の韻律的側面ないし一般的な聴覚機構で聞き分けていることが先行研究で示されており、さらにこのような音声の順・逆再生の区別は言語がないはずのタマリンでも可能である。したがって順再生と逆再生の比較のみでは母語であるゆえに、あるいは言語刺激であるゆえに反応が強いとは言い切れない<sup>15)</sup>。今後、順再生でより強い左聴覚野の活動が、具体的に何の処理を反映しているのか特定

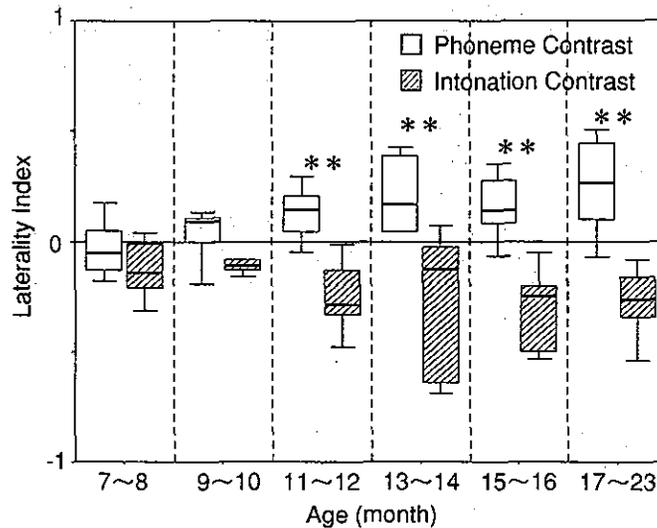


図2 乳幼児の音韻・抑揚対比の側化指数の発達の變化  
 \*\*は条件間の有意差を示す ( $p < 0.01$ )。他は  $p > 0.05$ 。

するための分析的研究が期待される<sup>11)</sup>。

#### 4 各種疾患の音韻処理にかかわる脳機能の左右差

ダウン症の乳児に先述した音韻・抑揚対比刺激の実験を行うと、左右の機能分化が健常児の平均よりも4カ月以上遅れていた。ダウン症は一般に言語発達の遅れがみられ、これまでは行動的指標による検査で評価されてきたが、NIRSでの結果は発話が現れるより以前の段階で聴覚処理機構の発達に遅滞があることを示唆する。同時にNIRSは乳幼児の言語発達検査として用いられる可能性を示した<sup>21)</sup>。

吃音はその発症と進展に精神力動的な機序が大きく影響することが知られているが、一方で、以前より両耳分離聴やPETの結果から、言語機能の左優位性をはっきりしないことが指摘されている。上述と同様の方法で音韻と抑揚の左右側頭葉の反応を調べたところ、右利き吃音者については、成人においても学童においても、群としては左右差が有意でなかった。個人ごとの評価では、80%で左右差が認められず、20%では左右が正常とは逆転していた。また、成人では重症度と左右差の指標が相関し、重症例では音韻反応の左右差が消えるのではなく、右で大きくなる傾向が認められた<sup>22)</sup>。このことはTravisら<sup>24)</sup>によって

1930年代から唱えられていた左右対立仮説(左右に優位性がないので、競合によって吃音が生じる)が正しくないことを示したものと見える。

統合失調症 (Schizophrenia, 以下SC) においては複数のレベルで言語に関連した障害が生じることが知られている。高次機能としては、言語性記憶や文脈の理解などの機能障害が生じる。同症状の患者に音声を両耳分離聴呈示した場合に左優位性(右耳優位性)がみられないとする報告もある<sup>7,16)</sup>。音韻認知のレベルでは、音韻弁別に対する感度が低くなることが知られている。例えば/ba/から/da/へ連続的に変化する合成音を聞いて音韻を同定する場合、健常者ではある時点で音韻の変化が明確に知覚される範ちゅう(カテゴリー)知覚が生じるがSC患者ではこれが生じない。これらに対応する脳反応がMEG(脳磁図)やERPにより計測されている<sup>8,9)</sup>。すなわち、音韻や純音を刺激として用いて、高頻度のベース刺激に対し低頻度のテスト刺激を呈示した際の脳反応(mismatch negativity; MMN)をみると、SC患者では音韻変化に対する左側頭部におけるMMNが健常群に比べて有意に小さい。しかしながら、これに対応するNIRSによる検査の知見はまだない。正常例や他疾患の研究からの類推が成立すれば、NIRSによっても同様な所見が得られる可能性は高いだろう。SC患者は解剖的にも左優位性がな

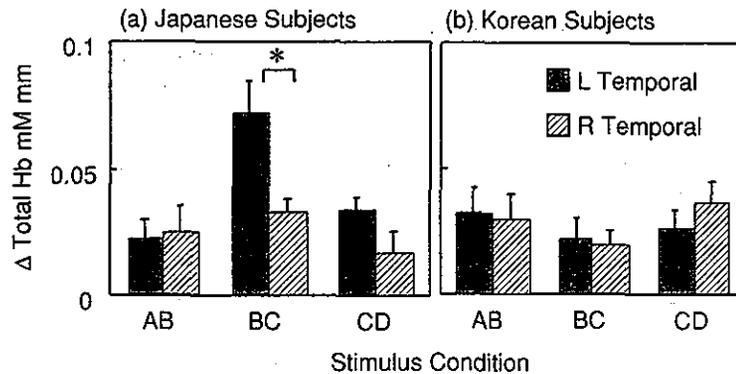


図3 長・短母音刺激に対する総ヘモグロビン反応

日本語母語話者(a), 非母語話者(b)における左右聴覚野の脳反応を刺激条件(AB, BC, CD)別に示す。\*は左右聴覚野反応の有意差を示す( $p < 0.05$ )。エラーバーは標準誤差を示す。

く、逆に左上側頭回部が小さい(萎縮する)ことが報告されている。この構造的障害は上記の音韻処理の異常や幻聴にも関連している可能性が指摘されている<sup>2,7)</sup>。

## 5 高次の言語・認知課題による反応

文理解や文法にかかわると思われる脳活動についても、音声刺激による研究が行われている。成人では、同じ文の単純な繰り返しを聞く場合と、意味のつながりをもつ物語を聞く場合の脳の活動の違いがNIRSによってとらえられている<sup>20)</sup>。被験者には片方の耳にターゲットとなる言語音刺激が、もう片方の耳には偽単語を並べた刺激が、両耳分離聴で呈示され、これらの刺激が左右耳で入れ替わったときにボタン押しをする課題が課せられた。ターゲット刺激が物語条件であった時、繰り返し条件よりも上側頭回および中側頭回で強い活動が観察されている。ここでの違いは物語条件での聴覚、記憶、言語処理過程へのより大きい負荷を反映していると解釈されている。

文理解には、音韻、意味、文法というようなさまざまなレベルの情報処理過程が含まれるが、そのうちの文法に焦点を当てた研究では<sup>17)</sup>、統語構造の正誤判断課題において左下前頭回が活動することが報告されている。この結果はfMRIによる研究で報告されていた結果と一致しており、言語の脳研究におけるNIRSの有用性を示したばかりでなく、複雑な課題ではfMRIと同様に event-

related paradigmが有用であることも示している。

## 6 母語と非母語における音韻処理

日本語は/kado/(角)対/kadoo/(華道)のように母音の長さで言葉の意味が変わる。これを長・短母音の音韻対立と呼ぶ。母音長の変化が主要な弁別手がかりとなる音韻は、世界的にみても比較的稀少である。この音韻は第一言語としても第二言語としても獲得が比較的困難であるといわれており、日本語学習者は「おばあさん」を「おばさん」などと間違えやすい。この長・短母音対比に対する脳内過程を日本語母語話者と韓国語を母語とする日本語学習者について検討した<sup>12-14)</sup>。

擬似単語/mama(a)/の第二母音長を等間隔で変化させた4つの刺激(第二母音長が短い方から、短母音:A, B, 長母音:C, D)を、音韻変化のない同一カテゴリーの2条件(A vs B, C vs D)と、音韻変化のあるカテゴリー変化1条件(B vs C)で呈示して音声の変化検出に関する脳反応を計測した。日本語母語話者群については、カテゴリー変化条件の時のみ、前述の音韻条件の/a/-e/母音の対比条件と同様に、左聴覚野に有意な総ヘモグロビン変化がみられたが、同じ長さの音響変化でも、音韻変化のない同一カテゴリー条件では左右差もみられず反応も比較的小さかった(図3)。一方で、第二言語として成人してから日本語を学び、日本語をかなり流暢に話せる韓国人被験者群の場合には、日本語話者にみられたような音韻変化に特異

的な脳反応はみられず、3条件は左右差もなく一貫した傾向もみられなかった<sup>14)</sup>。これらのことは母国語に特化した音韻処理機構が左聴覚野近傍(ウェルニッケ野)に存在すること、また長さ変化による音韻でも、音色で変化する音韻(例、/a/-/e/)と同様に、左優位に反応が得られることを示した。

同じ被験者群について、脳記録に使用したのと同じ刺激を用いて同定実験と弁別実験を行うと、日本語母語話者のみに行動的指標とNIRSのデータに相関がみられた<sup>13)</sup>。これについては、流暢とはいえ、言語敏感期以降の言語学習者では、非母語の音韻弁別行動に対応する脳反応が通常の音韻処理にかかわる皮質とは別の場所にできるか、同じ場所だとしても活動が弱くて検出できず、左右差を示さないなどの機序が考えられ、母語のようには明確な言語特異的な処理が行われていない可能性を示唆している。

## 7 おわりに

以上に概説したように、NIRSの言語研究は音声を刺激とした言語処理に関する研究が比較的多いが、これはNIRSがMRIの撮像騒音のような妨害要因がないために聴覚研究に利点があることが最大の理由であろう。fMRIで聴覚刺激を用いた場合、撮像騒音の影響を避けるためには間欠撮像を用いざるを得ず、撮像枚数が少なくなるために統計的検定力が低下し、反応の時間経過を観察するのも容易ではない。このため、NIRSで得られた聴覚反応を1.5テスラのfMRIでは容易には再現できないことも経験している。その他のNIRSの利点としては、冒頭に述べたとおりである。

NIRSの欠点としては、脳の深い部分の反応が記録できないことと、解像度が脳波よりはいいものの、fMRIやPETと比べると悪いことがあげられる。したがって、例えばパーキンソン病患者の検査としては、大脳基底核の記録ができないので、検査目的によっては片手落ちとなる。現時点ではNIRSは発展途上であるため、基礎データを積み上げている段階である部分も多い。NIRSを言語・認知研究へ応用するにはこのような利点と欠

点を考慮し、必要に応じて他の手法と併用することが必要になる。しかしながら、NIRSのほぼ完全な無侵襲性と、自然性、簡便性は、乳幼児や精神科領域を含めた種々の疾患の言語・認知にかかわる脳機能の検査の手段として、今後の臨床応用に大きな可能性をもつ。ここではその一端を紹介した。

## 文献

- 1) Beaton AA : The relation of planum temporale asymmetry and morphology of the corpus callosum to handedness, gender, and dyslexia: a review of the evidence. *Brain Lang* 60 : 255-322, 1997
- 2) Crow TJ : Schizophrenia as failure of hemispheric dominance for language. *Trends Neurosci* 20 : 339-343, 1997
- 3) 福田正人, 伊藤 誠, 須藤友博ほか: 精神医学における近赤外線スペクトロスコピー-NIRS測定の意味—精神疾患の臨床検査としての可能性—。 *脳と精神の医学* 14 : 155-171, 2003
- 4) 古屋 泉, 森 浩一: 左右聴覚野の音声言語処理における機能分化—多チャンネル近赤外分光法(NIRS)による検討—。 *脳と神経* 55 : 226-231, 2003
- 5) Geschwind N, Levitsky W : Human brain: left-right asymmetries in temporal speech region. *Science* 161 : 186-187, 1968
- 6) Good CD, Johnsrude I, Ashburner J et al : Cerebral asymmetry and the effects of sex and handedness on brain structure: a voxel-based morphometric analysis of 465 normal adult human brains. *Neuroimage* 14 : 685-700, 2001
- 7) Green MF, Hugdahl K, Mitchell S : Dichotic listening during auditory hallucinations in patients with schizophrenia. *Am J Psychiatry* 151 : 357-362, 1994
- 8) Kasai K, Yamada H, Kamio S et al : Neuromagnetic correlates of impaired automatic categorical perception of speech sounds in schizophrenia. *Schizophr Res* 59 : 159-172, 2003
- 9) Kasai K, Nakagome K, Itoh K et al : Impaired cortical network for preattentive detection of change in speech sounds in schizophrenia: a high-resolution event-related potential study. *Am J Psychiatry* 159 : 546-553, 2002
- 10) Kennan RP, Kim D, Maki A et al : Non-invasive assessment of language lateralization by transcranial near infrared optical topography and functional MRI. *Hum Brain Mapp* 16 : 183-189, 2002

- 11) 牧 敦, 山本由香里: 発達科学におけるニューロイメージング法を中心に一. ベビーサイエンス3: 28-43, 2003
- 12) Minagawa-Kawai Y, Mori K, Furuya I et al : Assessing cerebral representations of short and long vowel categories by NIRS, *Neuroreport* 13 : 581-584, 2002
- 13) Minagawa-Kawai Y, Mori K, Sato Y et al : Cerebral representation of Japanese phonemic length contrast in native speakers and late second language learners measured with NIRS. *Neurosci Res* 46 : S168 (P2-P146), 2003
- 14) Minagawa-Kawai Y, Mori K, Sato Y et al : Differential cortical responses in second language learners to different Japanese phonemic contrasts. *Neuroreport* 15 : 899-903, 2004
- 15) 森 浩一, 皆川泰代: 乳幼児の音声知覚と脳活動. *日本音響学会誌* 60 : 85-90, 2004
- 16) Neckelmann GF, Specht K, Smievoll AI et al : Left temporal lobe reduction in schizophrenia: an MRI voxel-based morphometry study. *Neuroimage* 16 : Abst No 15027, 2002
- 17) Noguchi Y, Takeuchi T, Sakai KL : Lateralized activation in the inferior frontal cortex during syntactic processing: an event-related optical topography study. *Hum Brain Mapp* 17 : 89-99, 2002
- 18) Pena M, Maki A, Kovacic D et al : Sounds and silence: an optical topography study of language recognition at birth. *Proc Natl Acad Sci USA* 100 : 11702-11705, 2003
- 19) Sakatani K, Chen S, Lichty W et al : Cerebral blood oxygenation changes induced by auditory stimulation in newborn infants measured by near infrared spectroscopy. *Early Hum Dev* 55 : 229-236, 1999
- 20) Sato H, Takeuchi T, Sakai KL : Temporal cortex activation during speech recognition: an optical topography study. *Cognition* 73 : B55-B66, 1999
- 21) 佐藤 裕, 森 浩一, 古屋 泉ほか: 乳幼児の音声言語処理における左右聴覚野の発達—近赤外分光法による検討—. *音声言語医学* 44 : 165-171, 2003
- 22) 佐藤 裕, 森 浩一, 小泉敏三ほか: 吃音者の聴覚情報処理における左右聴覚野の優位性—近赤外脳オキシメータによる検討—. *音声言語医学* 45 (印刷中)
- 23) Toga AW, Thompson PM : Mapping brain asymmetry. *Nat Rev Neurosci* 4 : 37-48, 2003
- 24) Travis LE : The cerebral dominance theory of stuttering: 1931-1978. *J Speech Hear Disord* 43 : 278-281, 1978
- 25) Watanabe E, Maki A, Kawaguchi F et al : Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neurosci Lett* 256 : 49-52, 1998

\*

\*

\*

<トピックス>

# 多チャンネル近赤外分光法による側頭部聴覚反応の測定

森 浩 一

(国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所感覚機能系障害研究部)

近赤外分光法 (near-infrared spectroscopy; NIRS) による多チャンネル脳機能計測 (「光トポ」とも称される) は、脳波計なみの手軽さで無侵襲に局所脳反応を記録できるので、小児科や精神科、乳幼児の脳機能の発達研究など、従来の脳機能計測法が適応しにくかった分野への応用が始まっている。無騒音なので聴覚への応用も期待され、音楽や言語音の提示による新生児の前額部脳反応も記録され<sup>1)</sup>、胎児の聴覚反応の記録も試みられている。本稿では、NIRSによる側頭部での聴覚・言語反応の計測を紹介する。

## I. 測定原理と特徴

生体は近赤外領域の光の透過性が比較的高く、頭皮上から照射し、散乱・吸収されて頭皮に戻る光を分光計測することで、脳内ヘモグロビン (Hb) の濃度変化を、酸素化 Hb と脱酸素化 Hb に分けて知ることができる。一般に脱酸素化 Hb の変化は小さいので、酸素化 Hb か総 Hb を脳賦活の指標としている。

照射・受光プローブの間隔を 3 cm にすると、賦活中心は 1 cm 以下の誤差で推定できる。光の減衰のため、4 cm 離れると感度が 1% 未満になり、賦活の局在を高い信号対雑音比で検出できる。脳からの信号の大部分は、脳表の皮質に由来する<sup>2)</sup>。乳幼児では頭蓋が薄く脳の透過性が高いため、成人より良好な脳信号が得られる。

近赤外光は光子エネルギーが低いので、蛋白や核酸を直接変性させることはない。市販装置の光出力は十分に安全な数 mW 以下なのでプローブ直下の皮膚表面でも温度上昇は 0.3°C 以下にとどまり、接触による機械的刺激以外には侵襲はないと言える。

## II. 方法

### 1) 刺激提示

NIRS は血液の反応を計測するため、誘発脳波のように速い刺激に同期した反応は記録できず、秒単位の反応になる。逆に長時間刺激しても聴覚反応は順応で低下するため、刺激時間の上限は 20 秒程度とした。反応のピーク潜時は数秒～十数秒であった (図 1)。

言語音刺激では、同一単語を繰り返し提示する基準区間と、もう 1 単語を加えてランダム順に提示する対比区間を交互に繰り返し、対比区間の反応を調べている。これによって単語間の違いの検出による反応を記録できる。

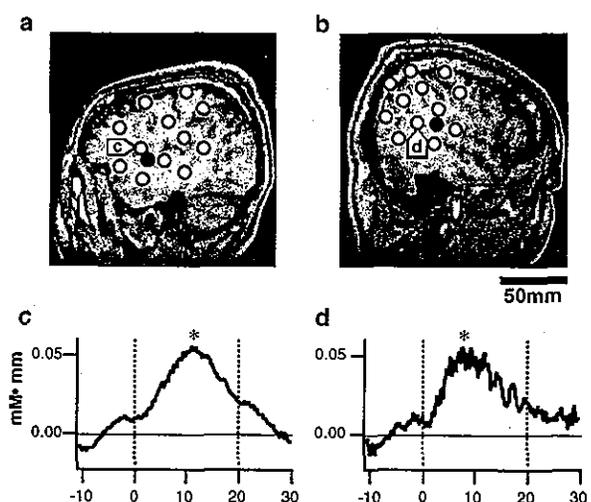


図 1 閾値の 1/3 オクターブ雑音に対する反応記録中心部位 (○) を左 (a) 右 (b) の MR 傍矢状断画像上に投射し、横側頭回外側後端 (●) 付近の記録中心 c, d での総 Hb の反応を下段に示す。縦の点線の間が刺激提示区間。(健聴例, \*:  $p < 0.05$ )

## 2) 記録方法

プローブを3 cm 間隔で3×3の格子状に配し、両側頭部で合計24チャンネルの同時記録を行った。これにより、厳密にプローブ位置を決めなくても側頭葉の聴覚反応を捉えることができ、またアーチファクトと信号の区別が容易になる。データは総Hbの変化を刺激開始に同期して加算平均し、直前の基準区間と比較して反応ピークが有意かどうか判定した。

## Ⅲ. 閾値刺激に対する反応

聴覚閾値の1/3オクターブ帯域雑音を刺激に使うと、健聴被験者については全員で閾値の音に対して有意な反応が得られた<sup>3)</sup>。純音では自覚閾値の音に対する反応は出にくく、上側頭回外側面の反応特性を反映していた。

難聴者についてもほぼ閾値の反応が得られるが、人工内耳装用者の場合には自覚閾値未満の刺激に対しても脳反応が検出された。閾下刺激に対する反応は健聴者と異なり、総Hbが減少する方向が多い。理由としては、耳鳴等による脳賦活が常時存在し、自覚閾値未満の人工内耳の刺激によってこれが抑制され、脳賦活の総計としては減少するためではないかと考えられる。このような症例で自覚閾値に一致した他覚閾値を得るためには、検査音以外の周波数に低レベルの雑音を負荷しておくなど、刺激方法に工夫が必要である。

## Ⅳ. 言語音刺激に対する反応

単語刺激を用いると、無侵襲に聴覚野の言語優位側を判定することができる<sup>3)4)</sup>。人工内耳装用成人でも同様であるが、抑揚の違いを音韻の違いとして異聴した場合には反応が左に側性化し、本人の自覚する聴取内容に対応していた<sup>5)</sup>。

反応側性化の発達をみると、6カ月齢乳児では対比刺激そのものに対する反応は出るが、音韻と抑揚間で反応側性化に差が認められない。これが有意になるのは11～12カ月齢群以降であり<sup>1)4)</sup>、行動上母国語以外の言語の音韻に対する感受性が低下する時期と一致した。

言語習得前失聴人工内耳装用児では、音韻対比刺激に対する反応が安定して左側性化を示すのは、装用開始後かなりの月数が経ってからであった<sup>5)</sup>。つまり、先天難聴児でも健聴小児と同様な

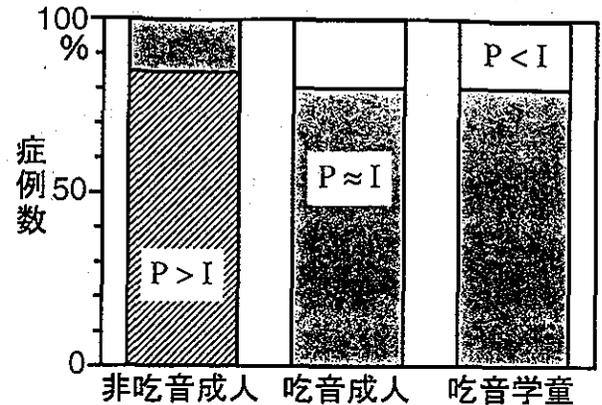


図2 吃音者の音韻・抑揚反応の側性化異常  
音韻 (P) と抑揚 (I) に対する反応の左への側性化の程度を比較した。非吃音者ではPが左優位(斜線)になるが、吃音者では有意差がなく(灰色)、一部の症例ではかえって右優位(白)であった。

発達変化が人工内耳装用開始後に起こることが、NIRSで観察された。

発達性吃音者では音韻・抑揚間で反応の側性化に有意差が認められず、症例の20%は正常とは逆に、音韻対比に対する反応がより右に側性化していた<sup>6)</sup>(図2)。さらに、側性化と吃音重症度に有意な相関があった。これは、聴覚野が吃音の病態生理に深く関わっていることを示唆する。

## V. おわりに

光トポはてんかんの術前検査のみ保険適応がある。方法論的になお改善の余地はあるが<sup>2)</sup>、耳鼻咽喉科領域でも各種疾患の補助検査や治療効果の判定などに応用が期待される。

## 参考文献

- 1) 森 浩一, 皆川泰代: 乳幼児の音声知覚と脳活動. 音響学会誌 60: 85-90, 2004.
- 2) 岡田英史: NIRS測定 of 工学的シミュレーション. 臨床精神医学 33: 735-740, 2004.
- 3) 森 浩一, 古屋 泉: 多チャンネル近赤外分光法による聴覚言語反応の観察とリハビリテーションへの適用の可能性. 脳の科学 22: 1293-1297, 2000.
- 4) 佐藤 裕, 森 浩一, 古屋 泉, 他: 乳児の音声言語処理における左右聴覚野の発達. 音声言語医学 44: 165-171, 2003.
- 5) 田中章浩, 森 浩一, 佐藤 裕, 他: 人工内耳装用者・児の音声弁別に対する脳反応と行動反応. 聴覚研究会資料 34: 189-194, 2004.
- 6) 佐藤 裕, 森 浩一, 小泉敏三, 他: 吃音者の聴覚言語処理における左右聴覚野の優位性. 音声言語医学 45: 181-186, 2004.

# Differential cortical responses in second language learners to different vowel contrasts

Yasuyo Minagawa-Kawai,<sup>1,2,CA</sup> Koichi Mori,<sup>1</sup> Yutaka Sato<sup>1</sup> and Toshizo Koizumi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Sensory and Communicative Disorders, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, 4-1 Namiki, Tokorozawa, Saitama 359-8555; <sup>2</sup>Independent Administrative Institution, National Institute for Japanese Language, 3-9-14 Nishigaoka, Kita-ku, Tokyo 115-8620, Japan

<sup>CA</sup>Corresponding Author: myasuyo@bea.hi-ho.ne.jp

Received 19 December 2003; accepted 12 January 2004

DOI: 10.1097/01.wnr.0000118983.36602.02

Near-infrared spectroscopy was used to measure hemodynamic responses in Korean subjects learning Japanese as a second-language to Japanese phonemic contrasts that are either phonologically distinctive or non-distinctive in their first-language. These results were compared with those of Japanese native listeners reported previously. Unlike the results observed in the Japanese subjects, the Korean subjects did not show category-specific neural responses to a durational contrast that is non-distinctive in

their first-language. The /a-e/ contrast elicited the larger response in the left auditory area, consistent with the results of the Japanese. These phoneme-dependent responses imply that the neuronal networks subserving the first and second-languages are either shared or exclusive according to the mutual relationship between the phonemic properties of the first and second-languages. *NeuroReport* 15:899-903 © 2004 Lippincott Williams & Wilkins.

**Key words:** Categorical perception; First language; Multilingualism; Near-infrared spectroscopy (NIRS); Phoneme perception; Second language; Suprasegmental; Vowel duration

## INTRODUCTION

Since perception of phoneme contrasts is heavily shaped by linguistic experience with the first-language (L1) phonology [1], second-language (L2) learners as adults have difficulty in perceptually differentiating certain phonemic contrasts in L2 (e.g. English /r-l/ by Japanese) [2]. Neuronal correlates of phonemic perception have been examined by quite a few studies [3-7], most of which reveal cerebral representations of L1 phonemes in the left temporal area. Some of these studies [3,4] verified neurophysiological evidence of L1-specific phonemic perception, comparing neural responses to L1 phonemes and non-native ones which had not been learned at all. However, neural substrates for phoneme processing of L2 learners are only starting to be explored [8] and few studies have tested highly-proficient L2 learners.

Japanese has phonemic contrasts that differ only in duration and appear in any syllable position. In a few languages, such duration-based contrasts are phonologically distinctive, i.e. two segments are distinctive if they provide a minimal morphemic contrast in the same environment as in right and light for /r-l/ contrast in the English phonological system [9]. Accordingly, many learners of Japanese as adults find it difficult to discriminate Japanese long/short vowels and consonants [10,11]. The present study measured the cerebral hemodynamic responses to this form of durational contrast for Korean subjects in order to address the question whether non-native speakers with a highly-proficient language command of Japanese would process non-native phonemes similarly to

distinctive ones in their native language. For this purpose, cerebral responses to stimulus pairs of /a/ and /e/ contrast which is distinctive in Korean language were also measured as a control experiment.

## MATERIALS AND METHODS

**Subjects:** Seven right-handed native speakers of Korean with normal hearing, aged between 27 and 40 years (mean ( $\pm$ s.d.)  $32 \pm 4.3$ ; three males, four females) served as subjects. Written informed consent was obtained before the experiment. All the Korean subjects had stayed in Japan for more than three years during which time they used Japanese in their daily activities. They started learning Japanese at the age of  $\geq 20$  years. The average Japanese learning experience was  $7.6 \pm 4.1$  years.

**Procedures:** Changes in the hemoglobin concentration and its oxygenation level in the bilateral temporal areas were recorded using a 24-channel near-infrared spectroscopy (NIRS) system (ETG-100, Hitachi Medical Co., Japan). The instrument emits continuous near-infrared lasers whose wavelengths were  $\sim 780$  nm and 830 nm. The laser beams were modulated at different frequencies and detected with lock-in amplifiers [12]. The sites of recording reside in the optical paths in the brain between the nearest pairs of incident and detection probes separated by 3 cm on the scalp surface. Five incident and four detection probes arranged in a  $3 \times 3$  square lattice were fitted on each lateral

side of the head. After the optical measurements, the positions of the optical probes were recorded with a 3D digitizer (Polhemus, Vermont, USA). The centers of recording sites were confirmed by superimposing the 3D coordinates onto T1-weighted MR brain images for each subject (Fig. 1). The channels nearest to the lateral end of the border between the transverse temporal gyrus and the planum temporale in a parasagittal projection were presumed to be in the auditory area. The recording channels whose centers were within the 1.5 cm radius of the above-mentioned border were selected. These channels should include the signals in the auditory cortex due to the spread of laser in the brain tissue [13]. Averaged  $x$ ,  $y$ ,  $z$  coordinates for the center of the auditory area were  $-61 \pm 2.3$ ,  $-9.4 \pm 3.1$  and  $5.2 \pm 1.7$  mm on the left side and  $62.8 \pm 2.0$ ,  $-8.8 \pm 4.4$  and  $5.0 \pm 1.7$  mm on the right side (Fig. 1), where positive  $x$  is to the right,  $y$  is to the anterior, and  $z$  superior (coordinate system of Talairach and Tournoux).

**Stimuli:** The stimuli consisted of four instances of /mama/ or /mama:/ whose final vowel were 151 ms (A), 184 ms (B), 217 ms (C) and 250 ms (D). These pseudo words were synthesized to have a Japanese unaccented pattern with a steady formant structure in the final vowel, using a PARCOR procedure by Rokubunken [14]. Since a pilot behavioral experiment with Japanese listeners showed that the phonemic boundary (PB) of long and short vowels resided between stimuli B and C, three sessions including across- and within-category conditions were performed using the adjacent two stimuli among the stimuli A–D. In session AB (a within-category condition), stimulus A was repeated for 20 s as a baseline block and then stimuli A and B were presented in a pseudo-random order with equal probabilities for another 20 s as a target block with SOA of 1.25 s. These two blocks were alternated and repeated at least five times. Similar procedures were carried out for session BC (an across-category condition) and session CD (a within-category condition). As a control, Japanese

analysis-synthesized words /itta/ and /itte/ [15] were presented in a similar paradigm as above, with /itta/ used both in baseline and target blocks and /itte/ appearing only in target blocks 50% of the time. A pilot behavioral experiment of identification confirmed that Koreans were able to identify /itta/ and /itte/ with an accuracy of 99.1%.

The four sessions (AB, BC, CD and /a-e/) were presented in random order to each subject. The subjects were instructed to listen to the stimuli delivered through insert earphones (Ear Tone 3A) at a comfortable level ( $\sim 70$  dB SPL).

**Behavioral test:** After the NIRS recording, the subjects participated in an identification test of Japanese long/short categories. The stimuli used in this test were the stimuli A–D and three stimuli whose second vowels were 173 ms, 206 ms and 228 ms in duration. The subjects were instructed to listen to the stimuli repeated 16 times each in a random order played back from a PC through headphone, and to identify whether the second vowel was phonologically long or not. Inter-stimulus interval (ISI) was initially 2 s and adjusted as each subject needed during practice: this adjusted ISI was referred to as a requested time for judgment (RTJ). The practice session presented some of /mama/ or /mama:/ stimuli that native Japanese judged long or short at 100% of accuracy. More than 70% of correct responses were required until RTJ for each subject was determined. The PB between the long and short vowels was defined as the vowel length where the fitted identification curve crossed 50% of the responses long. The curve was fit by the least square method weighted by the Müller Urban process [16].

**Data processing:** The concentrations of oxygenated (oxy-), deoxygenated (deoxy-) hemoglobin (Hb) and total Hb were calculated from the absorbance changes of 780 and 830 nm laser beams sampled at 10 Hz. After discarding the blocks with artifacts, the Hb concentrations of the remaining blocks were averaged 5 or 6 times synchronously to the target blocks, and smoothed over a 5 s moving average window.

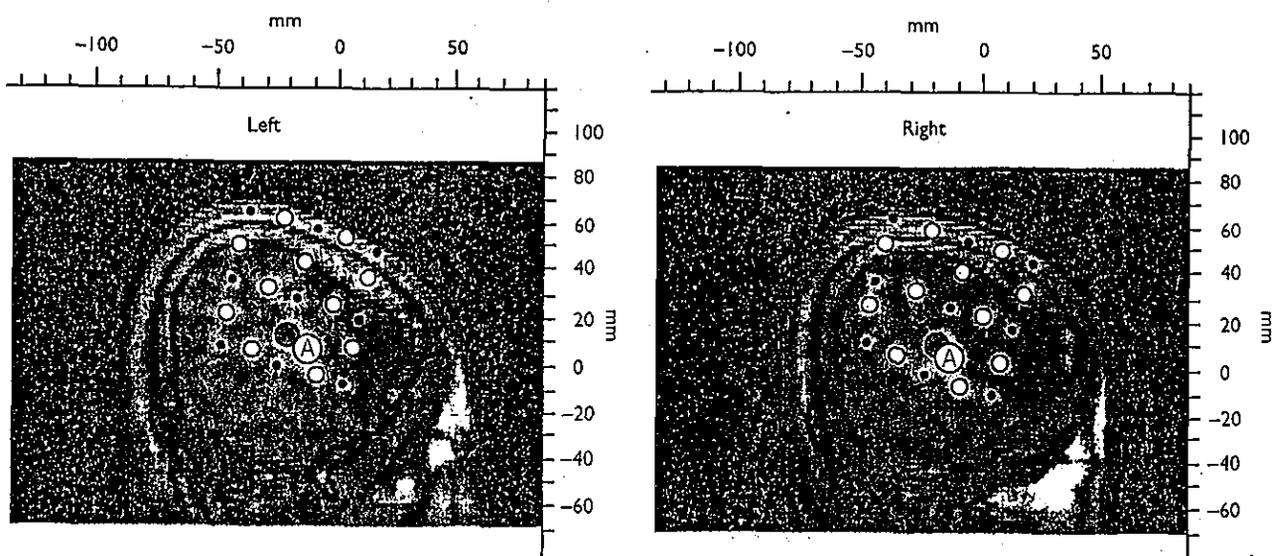


Fig. 1. Locations of the NIRS probes and the channels. NIRS probe positions (black dots) and the centers of the measurement channels (white circles) are superimposed onto the parasagittal MR brain images. The lateral posterior borders of the Heschl gyri are labeled A. The channels with the maximal responses are shown with gray circles. Positive is towards the anterior and the vertex in the scales.

The response peaks of the averaged target blocks were measured, and the z-scores of these peaks were calculated against the 10s baseline period just before the target block. A response with a peak z score > 1.96 ( $p < 0.05$ , uncorrected for multiple comparison) was considered a significant response.

**RESULTS**

**NIRS results:** The largest hemodynamic changes to the target stimuli were frequently found in the auditory area. In contrast, the responses observed in parietal and frontal area were small and varied in their temporal and amplitude pattern in all the subjects although limited parts (inferior part) of the frontal and parietal lobes were sampled (Fig. 1). One of the auditory channels that demonstrated the maximal peak responses on each side was selected for statistical analysis. Averaged coordinates for the channels chosen were  $y = -13 \pm 2.8$  and  $z = 9.2 \pm 2.8$  mm on the left side and  $y = -13 \pm 4.1$  and  $z = 11.7 \pm 2.7$  mm on the right side (only y and z coordinates are measured on parasagittal projection because the precise recording depths/or x, are not known). The hemodynamic responses peaked 6–14s after the target stimulus onset.

Figure 2a shows the averaged total Hb response peaks to the target stimuli for the three conditions of long/short

vowels. Two-way analysis of variance with condition (AB, BC and CD) and side (left and right) as factors revealed no significant main effects or interaction ( $F(2,36) = 1.38$ ,  $p = 0.27$ ;  $F(2,36) = 1.19$ ,  $p = 0.32$ ). There were at most two or three out of seven subjects showing significant peak hemodynamic responses for any of the three conditions (Fig. 3a), with no consistent hemispheric differences. Under the condition of distinctive phonemic contrast with /ita/ - /itte/ (/a-e/) stimuli, the averaged total Hb responses to the target stimuli were larger (Fig. 2b) than those for the long/short vowels. The peak hemodynamic responses were significant for all subjects, with five subjects in the left and the two remaining in the right or both sides of the auditory area (Fig. 3b).

To compare the response magnitude in the two different across-category conditions, two-way repeated measures ANOVA was performed with phonemic condition (/a-e/ vs BC in long/short vowels) and side (left and right) as factors. A significant main effect was observed for the phonemic condition ( $F(1,24) = 5.08$ ,  $p < 0.05$ ) with *post-hoc* Fisher's PLSD test, indicating that the /a-e/ phonemic contrast elicited the larger responses than the long/short vowel contrast ( $t = 2.16$ ,  $p = 0.02$ ). The leftward laterality was only significant for the /a-e/ contrast, and the laterality index calculated from  $(L-R)/(L+R)$ , where L and R are

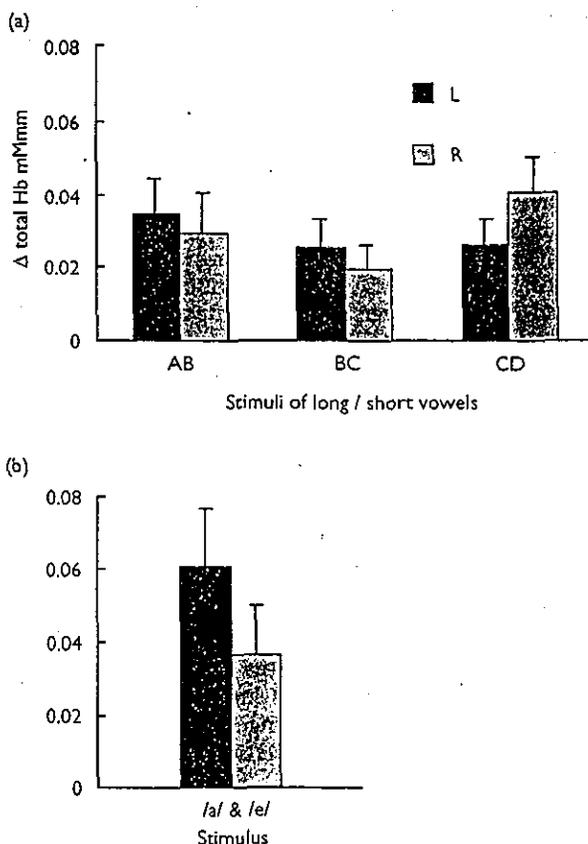


Fig. 2. Averaged values of the total Hb changes in the left auditory area (L) and the right auditory area (R). The stimulus conditions were (A) AB, BC and CD consisted of long/short vowels and (B) /a/ and /e/ stimuli. Error bars indicate s.e.

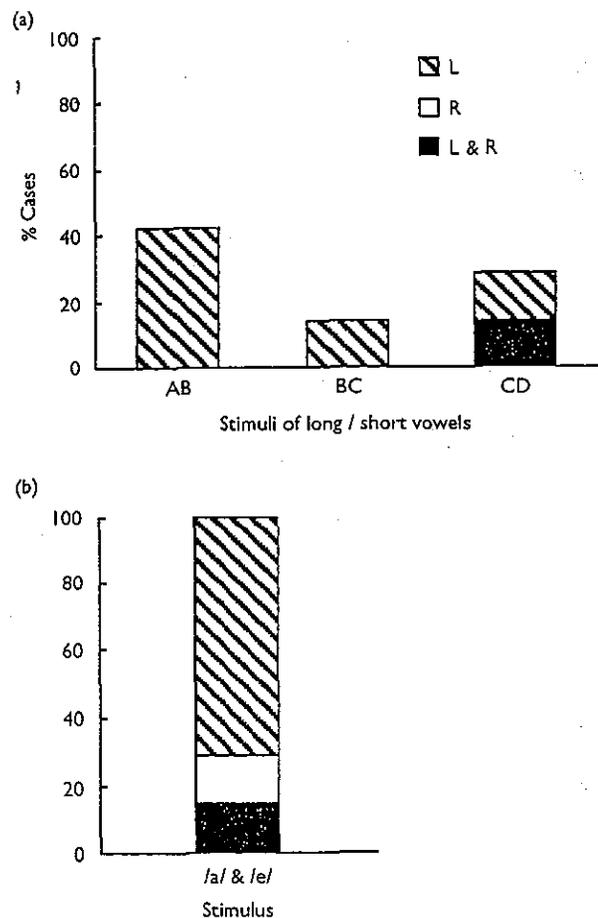


Fig. 3. Percentage of subjects who showed significant responses according to the stimulus conditions in the left (L) hemisphere, the right (R) hemisphere and both hemispheres (L + R). The stimulus conditions were (A) AB, BC and CD consisted of long/short vowels and (B) /a/ and /e/ stimuli.

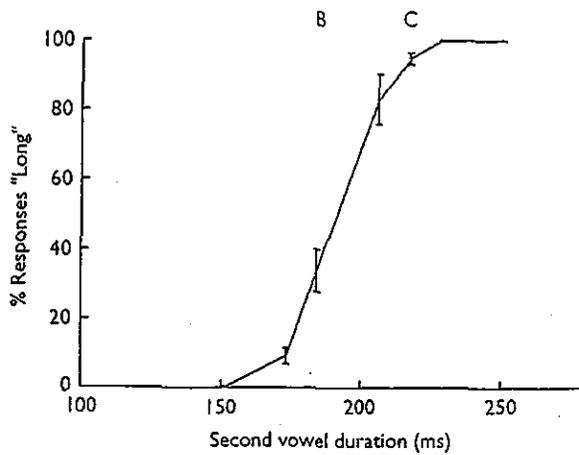


Fig. 4. Averaged identification rate of /mama/-/mama:/ continuum for the Korean subjects. Durations of stimuli B and C are indicated above the graph. The PB is estimated between stimuli B and C. Error bars indicate s.e.

maximal total Hb responses on the left and right side respectively was 0.32 (zero-test,  $p=0.026$ ) for the /a-e/ and 0.084 (zero-test,  $p > 0.05$ ) for the long/short vowel contrast.

**Behavioral results:** The behavioral test revealed that the averaged PB value was  $191 \pm 8$  ms ( $n=7$ ; Fig. 4), which fell between the stimuli B and C. Here the slope of identification curve was steepest which is suggestive of categorical perception. The averaged RTJ was  $3.4 \pm 0.37$  s ( $n=7$ ).

## DISCUSSION

Language-specific phoneme representations were revealed by the mismatch negativity (MMN) which reflected a phonological difference between frequent and infrequent stimuli [3,4]. As hemodynamic measurements with PET and NIRS can capture such change detection responses [17], the present study was also able to measure neural responses in L2 learners. The native Korean speakers who had become fluent in Japanese after puberty, showed differential cortical activities in response to the two kinds of Japanese phonemic contrasts. For the durational contrast, neither phoneme-specific nor left-dominant responses were observed, although behavioral tests showed categorical perception indistinguishable from that of native Japanese speakers [18]. In contrast, the across-category stimuli of /a/ and /e/ contrast elicited a larger response in the left auditory area than in the right, which is suggestive of linguistic perception. Furthermore, a pilot behavioral test showed that Korean subjects almost perfectly identified /a/ and /e/ contrast.

The observed differences in the cortical responses to the two types of contrasts could be accounted for by the distinctiveness of the respective contrasts in the subjects' native language. The /a/ and /e/ contrast is distinctive in the Korean phonology and shares a relatively similar phonetic space to that of the Japanese contrast [19]. Significant cortical responses to this contrast were observed in all subjects, although the experimental stimuli were apparently in a L2 context. These neural responses were consistent with the Japanese results that also demonstrated a leftward laterality [17]. On the other hand, the long/short durational contrast, which current phonological system in

Korean lacks, i.e. non-distinctive contrast, did not evoke the phoneme-specific responses as the /a/ vs /e/ contrast did for the same subjects. This was in clear contrast to the native Japanese results where the across-category, but not within-category, durational contrast elicited a larger response in the left hemisphere [18], indicative of linguistic processing. A question remains why the Koreans showed different neural response patterns to the long/short vowels even though their identification results were similar to those of the native listeners. The differences in response time between L1 and L2 speakers in the behavioral test may shed light on this question: RTJ was longer for the Korean group (RTJ = 3.4 s) than for the Japanese group (RTJ = 2.2 s, reanalysis of the data in [18]). The RTJ difference may reflect a different strategy from that of the L1 group for identifying phonemes which may result from the lack of phonemic representations in L2 Korean learners as revealed from the current NIRS results. These suggest that late L2 learners, who seem to have acquired L2 phonemes behaviorally, as shown by their identification scores, may still employ different neural process in dealing with L2 phonemes. However, this assumption should be further tested by detailed behavioral data. It has been a controversial issue whether individual bilinguals employ different neural substrates for L1 and L2 use. Some researchers have suggested that different networks are employed for L1 and L2 processing [20-22], others have reported the same neuronal substrates subserving L1 and L2 [23,24]. Although the discrepancy may be partly due to the differences in their task and/or L2 proficiency of the subjects [25], the present study proposes the following regarding the neuronal networks for L2 phonemic processing. Whether the same or different cerebral networks are recruited for L1 and L2 phonemes depends on the distinctiveness of the contrast and the position of the target phoneme in the L1 and L2 phonetic spaces. When a target phonemic contrast of L2 is also distinctive in L1 and fills the same or similar positions as in the L1 phonetic space, the same cerebral substrates for the L1 phonemes may be used in processing L2 phonemes. This was most likely the case with the present control stimuli (/a/ and /e/). However, when a contrast is not shared by the L1 and L2 phonetic space, cerebral networks that are not necessarily specific to phonemic discrimination could be employed, as was observed for Koreans listening to the long/short phonemic contrast.

## CONCLUSION

The current work provides crucial evidence in understanding the neural processes of L1 and L2 phonemes. The hemodynamic responses of the Koreans to the two types of L2 phonemic contrasts were different according to the phonological properties of the contrasts in L1, i.e., the distinctiveness and phonetic status in L1. These findings imply that the neuronal networks subserving L1 and L2 are either shared or different according to the mutual relationship between the phonemic properties in L1 and L2.

## REFERENCES

- Jusczyk PW. *The Discovery of Spoken Language*. Cambridge: The MIT Press; 1997.
- Miyawaki K, Strange W, Verbrugge R, Liberman AM, Jenkins JJ and Fujimura O. An effect of linguistic experience: the discrimination of [r]

- and [I] by native speakers of Japanese and English. *Percept Psychophys* 18, 331-340 (1975).
3. Dehaene-Lambertz G. Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *Neuroreport* 8, 919-924 (1997).
  4. Näätänen R, Lehtokoski A, Lennes M, Cheour M, Huotilainen M, Iivonen A *et al.* Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature* 385, 432-434 (1997).
  5. Koyama S, Gunji A, Yabe H, Oiwa S, Akahane-Yamada R, Kakigi R *et al.* Hemispheric lateralization in an analysis of speech sounds: left hemisphere dominance replicated in Japanese subjects. *Brain Res Cogn Brain Res* 10, 119-124 (2000).
  6. Rivera-Gaxiola M, Csibra G, Johnson MH and Karmiloff-Smith A. Electrophysiological correlates of cross-linguistic speech perception in native English speakers. *Behav Brain Res* 111, 13-23 (2000).
  7. Simos PG, Diehl RL, Breier JL, Molis MR, Zouridakis G and Papanicolaou AC. MEG correlates of categorical perception of a voice onset time continuum in humans. *Brain Res Cogn Brain Res* 7, 215-219 (1998).
  8. Imaizumi S, Ito H, Tamekawa Y, Deguchi T and Mori K. Plasticity of non-native phonetic perception and production: a training study. *Proc ICSLP* 5, 1887-1890 (1998).
  9. Chomsky N and Halle M. *The Sound Pattern of English*. Cambridge: The MIT Press; 1968.
  10. Minagawa-Kawai Y, Maekawa K and Kiritani S. Effects of pitch accent and syllable position in identifying Japanese long and short vowels: comparison of English and Korean speakers. *J Phonet Soc Jpn* 6, 88-97 (2002).
  11. Toda T. Interlanguage phonology: Acquisition of timing control in Japanese. *Austr Rev Appl Ling* 17, 51-76 (1994).
  12. Watanabe E, Maki A, Kawaguchi F, Takashiro K, Yamashita Y, Koizumi H *et al.* Non-invasive assessment of language dominance with near-infrared spectroscopic mapping. *Neurosci Lett* 256, 49-52 (1998).
  13. Yamashita Y, Maki A and Koizumi H. Near-infrared topographic measurement system: imaging of absorbers localized in a scattering medium. *Rev Sci Instrum* 67, 730-732 (1996).
  14. Imagawa H and Kiritani S. High speed speech analysis system using a personal computer with DSP and its application to pronunciation training. *Ann Bull Res Inst Logoped Phoniatr Univ Tokyo* 23, 175-164 (1989).
  15. Imaizumi S, Mori K, Kiritani S, Hosoi H and Tonoike M. Task-dependent laterality for cue decoding during spoken language processing. *Neuroreport* 9, 899-903 (1998).
  16. Müller GE. *Die Gesichtspunkte und die Tatsachen der Psychophysischen Methodik*. Wiesbaden: Bergmann; 1904.
  17. Furuya I and Mori K. Cerebral lateralization in spoken language processing measured by multi-channel near-infrared spectroscopy (NIRS). *Brain Nerve* 55, 226-231 (2003).
  18. Minagawa-Kawai Y, Mori K, Furuya I, Hayashi R and Sato Y. Assessing cerebral representations of short and long vowel categories by NIRS. *Neuroreport* 13, 581-584 (2002).
  19. Umeda H. Some problems on the contrastive study of Korean and Japanese. *J Jpn Lang Teaching* 48, 31-42 (1982).
  20. Albert ML and Obler LK. *The Bilingual Brain: The Neuropsychological and Neurolinguistic Aspects of Bilingualism*. New York: Academic Press; 1978.
  21. Dehaene S, Dupoux E, Mehler J, Cohen L, Paulesu E, Perani D *et al.* Anatomical variability in the cortical representation of first and second language. *Neuroreport* 8, 3809-3815 (1997).
  22. Kim KH, Relkin NR, Lee KM and Hirsch J. Distinct cortical areas associated with native and second languages. *Nature* 388, 171-174 (1997).
  23. Berthier ML, Starkstein SE, Lylyk P and Leiguarda R. Differential recovery of languages in a bilingual patient: a case study using selective amygdala test. *Brain Lang* 38, 449-453 (1990).
  24. Nakada T, Fujii Y and Kwee JL. Brain strategies for reading in the second language are determined by the first language. *Neurosci Res* 40, 351-358 (2001).
  25. Perani D, Paulesu E, Galles NS, Dupoux E, Dehaene S, Bettinardi V *et al.* The bilingual brain: proficiency and age of acquisition of the second language. *Brain* 121, 1841-1852 (1998).

Acknowledgements: The authors thank D. Erickson for assistance with English in the earlier version of the manuscript. This work was supported by Japan Society for Promotion of Science (No. 8484), Research grants from the Ministry of Health, Labor and Welfare of Japan (K.M.) and Japan Aging Research Foundation (Y.M.).