

□調査報告□

日本語聴解課題遂行時における日本語学習者の脳活動  
—近赤外分光法を用いた事例研究—

石鍋 浩\* 武田 湖太郎\*\* 谷口 敬道\*\*\*

抄 録

近赤外分光法(NIRS)は近年発展した非侵襲脳機能計測法である。本稿では中国人日本語学習者を対象とし、聴解課題とその逆回転音による対照課題遂行中の前頭葉・側頭葉の脳活動をNIRSにより計測した1例について報告する。聴解課題遂行時には、両側大脳半球の広範な領域で神経活動に依存すると考えられる酸素化ヘモグロビン濃度長の一過性上昇が計測され、また、この賦活領域はBroca野を含む左大脳半球が優位であった。これらの結果は、日本語学習者の日本語理解には広範囲かつ左半球優位な脳活動が関与していることを示す。より良い教授法や評価を目的とした脳活動計測装置としてNIRSの活用が今後有効になると考えられる。

**Keywords:** 近赤外分光法, 聴解, 日本語学習者

I. はじめに

近赤外分光法(Near-infrared spectroscopy: NIRS)は、頭皮上から照射され大脳皮質を透過して再び頭皮上で検出される近赤外光の光量変化を計測することにより、脳活動に伴う局所血中のヘモグロビン濃度長変化量を計測する、近年発展した非侵襲脳機能計測法である(山下ら1998;佐藤ら2005)。NIRSは、ほぼ完全に無侵襲である点、fMRIに比べ静かな計測環境である点、計測時に比較的拘束性が低いなどの利点を持つため、自然な姿勢における計測や、注意の集中を要する課題中の計測など、これまで計測することが難しかった条件における脳機能計測への利用が期待されている(武田ら2007)。

NIRSの特性を活かした言語性の課題の検討は、医療分野で多く見られ、臨床への応用が試みられている。古屋ら(2003)は、母音の音韻対比課題と抑揚対比課題による脳活動の測定を行い、音韻対比課題では左聴

覚野近傍が、抑揚対比課題では右聴覚野近傍が強く活動することを示した。また、NIRSを用いて言語優位半球を同定した研究では、脳半球の機能を抑制して侵襲的に言語機能を観察するアマタールテストとの間に高い一致率が見られ、アマタールテストの代替法としてNIRSの可能性が示された(渡辺2000;渡辺ら2003)。

第二言語習得分野における脳活動の研究も進められつつあり、韓国人日本語学習者を対象にした日本語の短母音と長母音の弁別課題および/a/と/e/の弁別課題の比較では、両者において異なる応答が見られた(Minagawa-Kawai et al. 2004)。fMRIを用いた研究では、中学1年生の日本語母語話者を対象に英語の動詞・過去形の学習前後の脳活動が比較され、左大脳半球前頭葉Broca野近傍が学習後に賦活することが報告された(酒井2005)。この報告は、個人の学習効果を脳活動の変化として捉えられる可能性を示している。

今後は、音韻や文法のように、ある一つの音声信号

受付日: 2009年3月3日 受理日: 2009年6月5日

\*国際医療福祉大学 国際交流センター

Center for International Exchange, International University of Health and Welfare

E-mail: steintopf@iuhw.ac.jp

\*\*国際医療福祉大学病院 神経内科 / 科学技術振興機構 CREST

Department of Neurology, International University of Health and Welfare Hospital / CREST, Japan Science and Technology Agency

\*\*\*国際医療福祉大学 保健医療学部 作業療法学科

Department of Occupational Therapy, School of Health Sciences, International University of Health and Welfare

が一定の流れに沿って解析されるレベルだけではなく、全体の脈絡の中で言語系の働きを理解するトップダウン的な見方(山鳥1997;田辺1997)からの脳活動測定を通し、より深い学習者の理解と教育への応用が進むと考えられる。特に、比較的自然的な姿勢と静かな環境下で簡便に計測を行うことができるNIRSの特性を生かすことで、実際のコミュニケーション場面に近い状況における学習者の脳活動が計測できると考えられる。

本研究では、日本語学習者を対象に広く普及している日本語能力試験の聴解問題をNIRS計測の課題として用い、対照課題では同聴解問題の逆回転音を使用した。両者は音響成分が同一であるが意味理解が可能かどうかには違いがある。また、聴解問題は音韻・形態・統語処理などの過程が切り離せない状態で含まれ、得られる結果はトップダウン的処理の脳活動であると考えられる。本稿では中国人日本語学習者を対象とし、学習者における日本語聴解時の脳活動について検討を試みた1例について報告する。

## II. 方法

### 1. 対象

中国人日本語学習者(Chinese Learner, 以下, CL)1名を対象とした(表1)。

表1 測定時のCLの背景

年齢・性別	35歳・男性
身分	留学生(学部, 3年生)
日本滞在歴	7年目
国籍・民族	中国・朝鮮族
母語	朝鮮語
その他の言語的背景	朝鮮語と中国語の2言語使用者
日本語能力	日本語能力試験1級合格歴あり

CLの日本語能力は、測定に伴いレベル判定テスト<sup>(注)</sup>を実施した結果と過去の日本語能力試験受験歴から、日本語能力試験1級合格水準以上であると考えられた。また、Edinburgh利き手テスト(Oldfield1971)の結果は、右手利きであった(LQ: Laterality Quotient = +80)。

測定に際し、装置の安全性、被験者のプライバシーの遵守などを口頭および書面で呈示し、協力への同意を得た。

### 2. 計測課題

計測課題は、聴解問題を聞き、正しい絵を選ぶ言語理解課題(課題1)と、課題1の逆回転音を聞き刺激再生中に呈示されたキューボタンを押す対照課題としての無意味音課題(課題2)から構成した。課題に用いる聴解問題は、2001-2006年度の日本語能力試験2級(日本語能力試験1・2級試験問題と正解, 日本国際教育支援協会, 2002-2007, 凡人社)から、聴解により画像を選択するものを使用した。課題1の刺激音は、添付された聴解問題のCDから8問選択した後、PCに取り込み(サンプリング周波数44.1kHz)作成した。聴解問題として選択した8問の刺激音持続時間は、全て30秒未満の課題に統一した。課題2の刺激音は、課題1で使用した8問をMulti-Speech Model 3700(KAYPENTAX<sup>TM</sup> Lincoln Park, NJ, U.S.A.)により逆回転させ、作成した。

刺激音は、課題1, 2ともPCからUSBオーディオ・インターフェイス(EDIROL UA-3FX, Roland Corporation, Hamamatsu, Japan)を介しスピーカ(Companion2 II, Bose Corporation, Framingham, MA, U.S.A.)より呈示した。聴解問題に用いた画像は液晶ディスプレイ上(解像度: 1024×768)に呈示した。刺激呈示にはSuperLab Pro 4.0(Cedrus, San Pedro, CA, U.S.A.)を用いた。

(注) 平成3-4年度日本語能力試験1-4級の語彙問題と文法問題(日本語能力試験1・2級試験問題と正解, 日本国際教育支援協会1993, 1994, 凡人社)から各級10問, 計80問のレベル判定テストを作成した。問題選択の基準は、外国人日本語能力試験実施委員会(日本語能力試験分析評価に関する報告書, 国際交流基金, 1995, 1996)の分析結果より、困難度0.25~0.80, 識別力0.30以上とした。結果(各級の正答率)は、4級100%, 3級100%, 2級90%, 1級85%であった。

課題 1 の画面呈示例を図 1A に、課題 2 の画面展開例を図 1B に示す。課題 1 は、聴解問題を聞き、呈示された 4 つの画像の中から問題の答えとして正しいものを 1 つ選択し、画像の位置に対応する応答ボタン(図 1C)を押すよう教示した。課題 1 の画像呈示時間は、刺激音が収まるよう、30 秒に統一した。課題 2 は、逆回転音再生中にキュー画面が呈示されたら、その位置に対応するボタンを押すよう教示した(図 1B)。課題 2 の画像呈示時間も課題 1 と同様に 30 秒に統一した。ボタン押しは、図 1C の応答ボタン 3 時の位置のボタンに右手人差し指又は中指、9 時の位置のボタンに左手人差し指または中指を添え、それぞれの手を使うよう教示した。12 時と 6 時の位置のボタンは親指も含め好きな方の手を使ってもかまわないとした。課題 1, 2 ともボタン押しの方法は同様に教示した。安静条件(課題間)では課題 1, 2 とも画面の中心 (+) を注視するよう教示した。安静条件の画面呈示時間は 30 秒とした。

NIRS 計測に用いる計測パラダイムとして、ターゲット課題とベースライン課題を交互に行い、両者の差を取ってターゲット課題に関連した脳活動を測定するブロックデザイン(武田, 加藤 2007)を用いた。本研究では、30 秒間の課題条件(課題 1 または 2)と 30

秒間の安静条件(無音)を交互に 8 回繰り返す刺激を作成した(図 2)。

課題 1 では、正しい答えを 4 つのボタンに 2 回ずつ(4 箇所×2 回=8 施行)割り振った。課題 2 も同様にキューの位置を割り振った。課題 2 のキュー呈示は、課題開始時より 13, 16, 19, 22 秒目から 5 秒間とし、各 2 回ずつ呈示した。

以上のようにして、課題 1 と課題 2 は、刺激音の呈示時間および音圧や周波数などの音響成分は同一で、意味理解が可能かどうかという点が異なった。また、組み合わせ上、同位置・同数のボタン押しがされ、指の動きも課題 1 と課題 2 ではほぼ同一条件となるように統制した。

### 3. NIRS 計測

NIRS 計測では、図 3 のように近赤外光の照射プローブと検出プローブを交互に格子状に配置し、片側 22 チャンネル(両側計 44 チャンネル)の同時計測を行った。

測定位置は、被験者の前頭葉から側頭葉をカバーするように、外耳孔と眼窩外縁を底辺とする正三角形の頂点が左大脳半球のチャンネル 12 (Ch12)、右大脳半球の Ch33 にあたるように配置した。図 3 六角形で囲んだ左側 Ch12

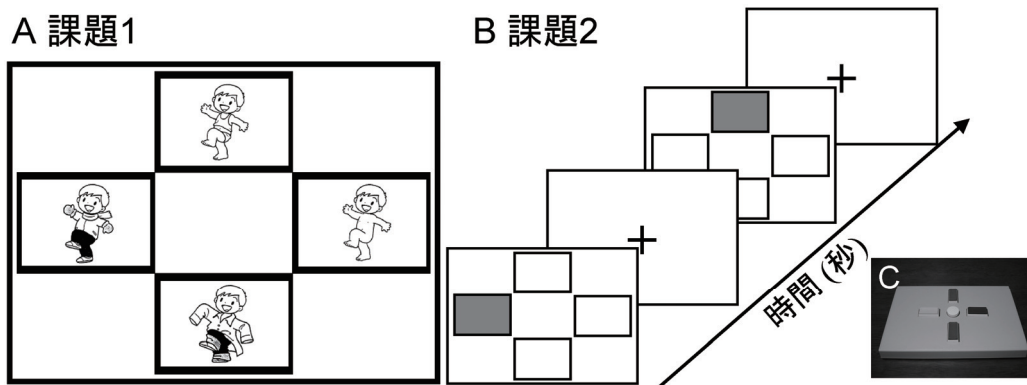


図 1 呈示画面例と応答ボタン

A: 課題 1, 聴解問題の呈示画面例

課題 1 の聴解問題スクリプト:「教示文: 2 人のお母さんが子どもについて話しています。子どもはどんな格好をしていますか。女 A: わあ、寒い。それにしても、しんちゃん元気ねえ。裸みたいな格好して。幼稚園の方針なの。女 B: いえ、お父さんの…。女 A: へえ。」

B: 課題 2, 課題遂行中の画面展開例, 逆回転音再生中に 4 つのボタンに対応する四角形のうち 1 つの色が変わる。

C: 応答ボタン

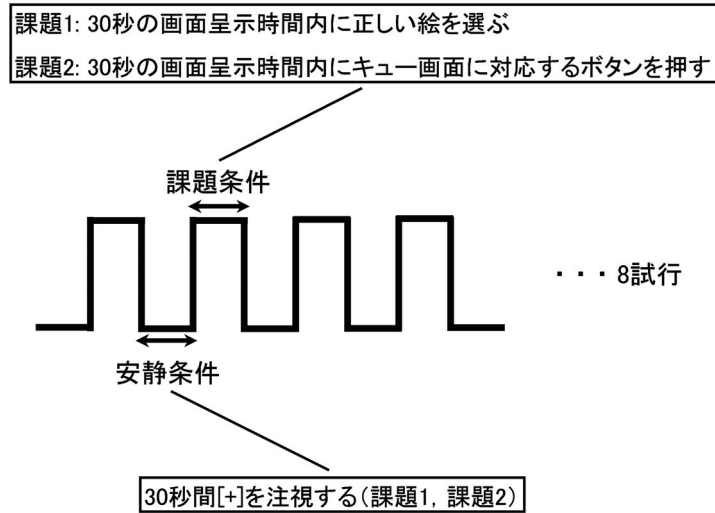


図2 計測パラダイム (ブロックデザイン)

30秒間の安静条件と30秒間の課題条件(課題1は言語理解課題, 課題2は無意味音課題)を交互に8回繰り返した。課題1は, 30秒間の画面呈示時間内に聴解問題の音声 flowed。課題2は, 30秒間の画面呈示時間内に逆回転音が流れた。また, 30秒間の画面呈示時間内に4つのボタンに対応する四角のうち一つの色が変わるキュー画面が呈示された。課題1, 2とも, その後画面中央に[+]が呈示される安静課題(無音)が30秒間続いた。

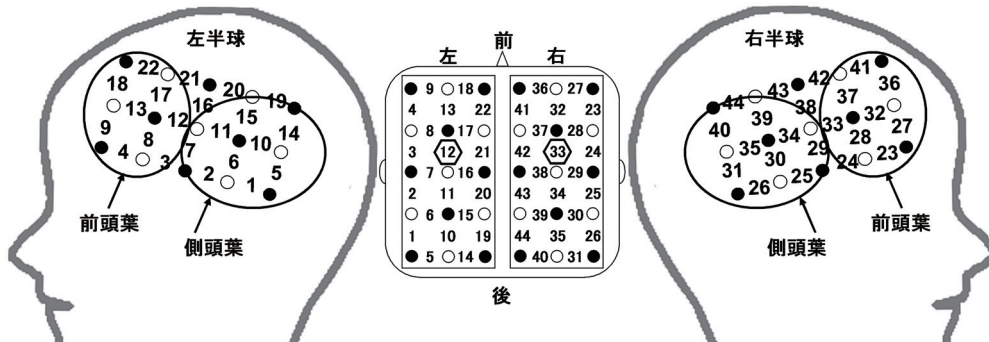


図3 プローブ配置図と計測チャンネル

●: 照射プローブ, ○: 検出プローブ, 1-22: 左半球チャンネル, 23-44: 右半球チャンネル

が Broca 野の後端(右 Ch33 は同等部位)にあたり(渡辺ら 2003), それより前方を前頭葉, 後方を側頭葉とした。測定時は, あご台を用いて頭部を固定した。

2波長の近赤外光(695 nm, 830 nm)を用い, 酸素化ヘモグロビン濃度長変化量( $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ )と脱酸素化ヘモグロビン濃度長変化量( $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ )を計測した。得られた計測データは, 1秒間の移動平均処理を施した後, 課題1, 2それぞれ計測チャンネルごとに加算平均した。本研究では, 課題1, 2の安静条件において

ベースラインが安定した課題開始直前8秒間の $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ のばらつきから Bonferroni 補正を行った有意水準( $z\text{-score} > 3.053$ )をチャンネルごとに算出し, 課題中に有意水準を越える $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が見られたものを有意な変化のあったチャンネルとした(Takeda et al. 2007)。なお, 課題1で不正解の問題があった場合および課題2で artifact が混入した場合は, その施行を除き加算平均した。信号処理および統計解析は, MATLAB 7(Mathworks, Natick, MA, U.S.A.)上で行った。

III. 結果

図4と5に示したように、複数のチャンネルにおいて、有意水準を越える $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の一過性増加(図中黒色太線)が認められた。また、これらのチャンネルは $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ (図中点線)の一過性の減少を示した。

課題1は、前頭葉(左半球はCh12, 右半球はCh33より前方のチャンネル)において、左半球で7チャンネル(Ch3, 4, 8, 9, 12, 13, 17), 右半球で4チャンネル(Ch24, 28, 33, 37)が有意な $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の増加を示した。側頭葉においては左右共に6チャンネル(左半球:Ch1, 2,

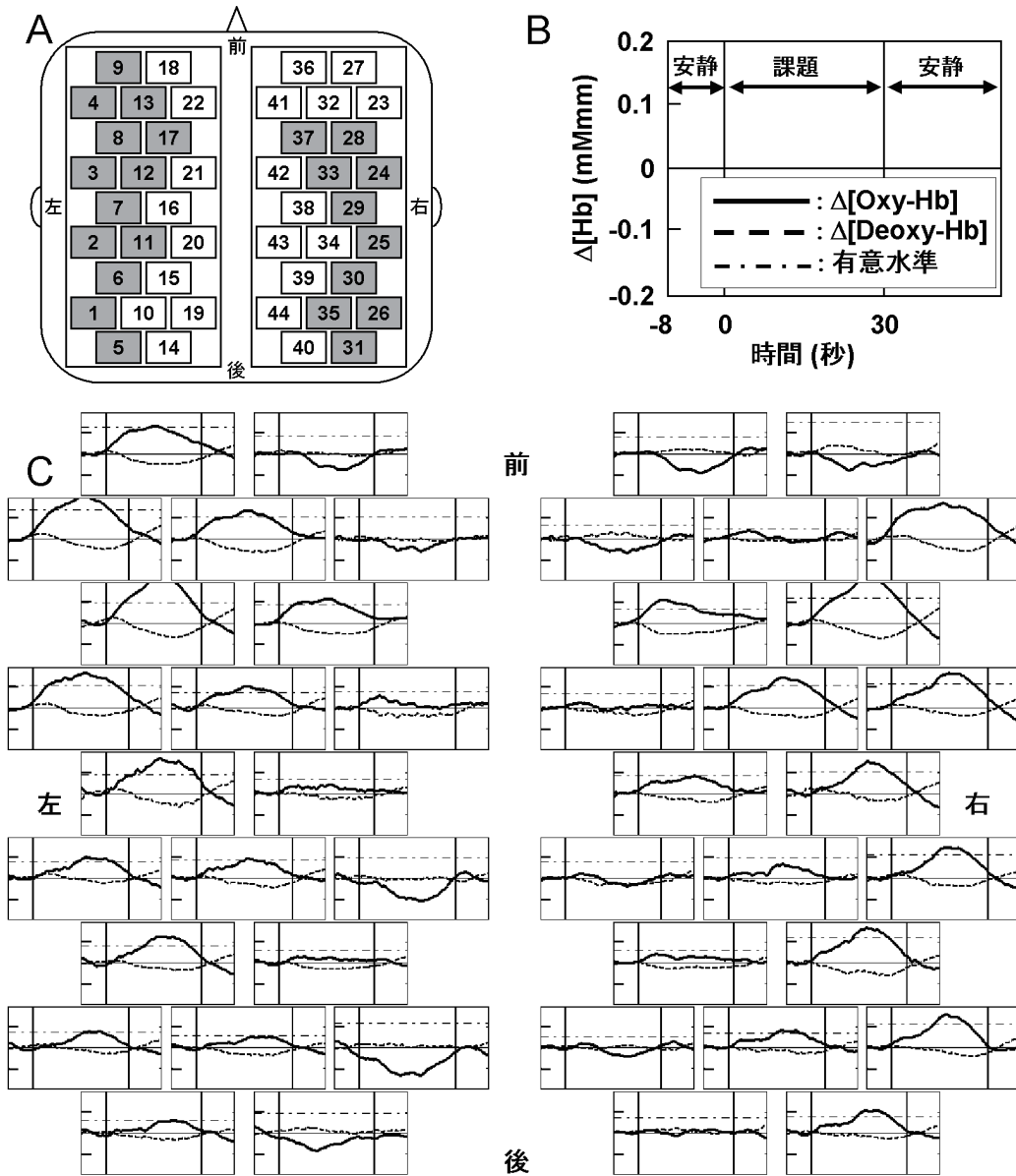


図4 課題1 全計測チャンネルの結果

- A: 頭部上のチャンネル配置。網掛けされたチャンネルは課題中に有意水準を越える $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が見られたチャンネルを示す。
- B: 各計測チャンネルのY軸は $\Delta[\text{Hb}]$  (Hb Max. ; 0.2, Hb Min. ; -0.2) (mMmm), X軸は時間(秒), X軸の0秒と30秒の位置の縦線が課題開始時と終了時を表す。黒色太線は $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ を, 点線は $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ を, 一点鎖線は $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の有意水準を表す。
- C: 各計測チャンネルの $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$  (黒色太線),  $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$  (点線) と $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の有意水準 (一点鎖線)。

5, 6, 7, 11, 右半球: Ch25, 26, 29, 30, 31, 35) に $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の有意な増加がみられた。課題2では、 $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が有意に増加したのはCh4のみであった。

IV. 考察

NIRS測定で得られたデータは、 $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が脳血流の変化を最も反映するとされている(Hoshi et al. 2001)。一方、 $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ は、脳血流の増加に伴いNIRSでは検出できない太い静脈系に追いやられるため見かけ上

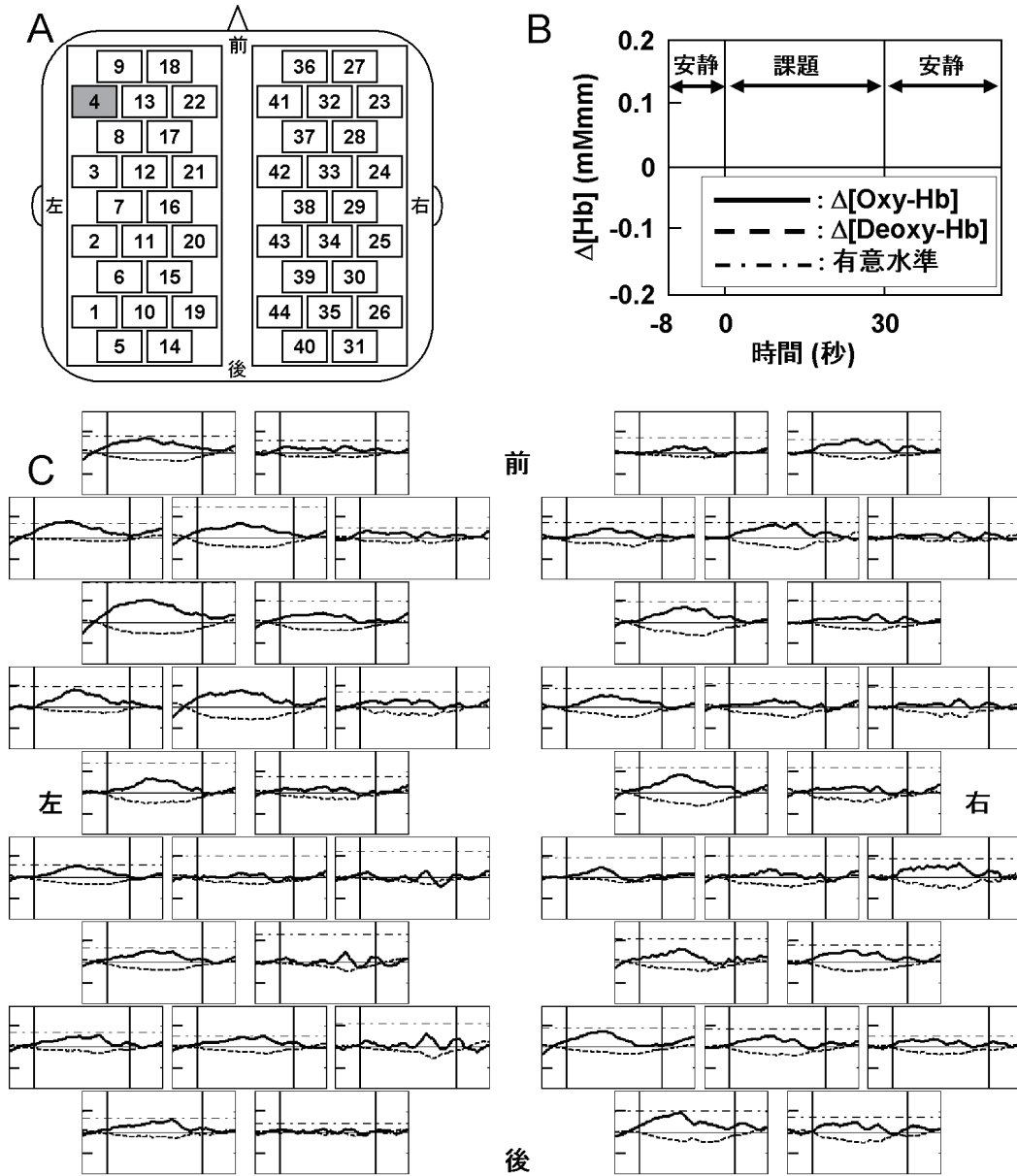


図5 課題2 全計測チャンネルの結果

- A: 頭部上のチャンネル配置。網掛けされたチャンネルは課題中に有意水準を越える $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が見られたチャンネルを示す。
- B: 各計測チャンネルのY軸は $\Delta[\text{Hb}]$  (Hb Max. ; 0.2, Hb Min. ; -0.2) (mMmm), X軸は時間(秒), X軸の0秒と30秒の位置の縦線が課題開始時と終了時を表す。黒色太線は $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ を, 点線は $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ を, 一点鎖線は $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の有意水準を表す。
- C: 各計測チャンネルの $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$  (黒色太線),  $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$  (点線) と $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の有意水準 (一点鎖線)。

減少する (灰田 2002)。そのため、NIRS 計測で得られる典型的な波形は、 $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が課題開始時から増加し課題終了後徐々にベースラインに戻る一過性的変化を示し、 $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ が一過性的減少を示すとされている (武田ら 2007)。本研究において脳賦活が認められたチャンネルにおける  $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ 、 $\Delta[\text{Deoxy-Hb}]$ は、NIRS 計測で得られる典型的な波形 (灰田 2002 ; 武田ら 2007) であった。なお、NIRS の各チャンネルの縦軸 (振幅) は、光路長の成分が重畳しており、また計測部位によって光路長が違ふと考えられるため、直接比較することは避けるべきであるとされている (武田ら 2007)。そこで本研究では $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ を主な分析対象とし、チャンネル毎の振幅ではなく有意な増加の見られたチャンネルの数をを用いた賦活領域の広さ比較 (Takeda et al. 2007) を行った。

課題 1 (日本語聴解問題)、2 (逆回転音) とともに刺激音の呈示時間および音圧や周波数などの音響成分は同一であった。また、組み合わせ上、同位置・同数のボタン押しがなされる測定デザインを採用し、指の動きへの影響も課題 1 と課題 2 はほぼ同一条件であると考えられる。さらに、課題 1 は、8 種類の聴解課題であり、ボタン押しのタイミングにばらつきがあることから、課題 2 のキュー呈示は課題開始時より 13, 16, 19, 22 秒目から 5 秒間とし、それぞれ 2 回ずつ呈示することにより、課題 2 においてもボタン押しのタイミングにばらつきが生じるようにした。そのため、刺激音の理解が可能かどうかという点で 2 つの課題は異なっていると考えられる。日本語理解が求められる課題 1 では広い範囲で $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ が有意に増加したのに対し、無意味音を聞いた課題 2 では顕著な広がり認められなかった。課題 1 において得られた $\Delta[\text{Oxy-Hb}]$ の広範囲にわたる増加は、CL の日本語聴解課題遂行時に両側大脳半球における広範な領域で神経活動が生じていることを示唆していると考えられる。

大脳皮質における言語野は左半球にあり、Broca 野と Wernicke 野を中核として成り立っているという (山鳥 1985 ; 岩田 1996 ; 乾ら 2001)。本研究においては、渡辺らの報告 (2003) にしたがって Broca 野の後端を推

定した。ここから、左側 Ch12 より前方が Broca 野を含む前頭葉と考えられるが、課題 1 では多くのチャンネルで有意な賦活が認められたのに対して、課題 2 の左側では Ch4 で賦活が見られるのみであった。このように言語理解を必要とする課題 1 で言語野の一つである Broca 野近傍と推定される部位がより広く賦活したことから、CL による言語理解に依存した脳活動である可能性が高いと考えられる。

左右両半球の賦活に着目したところ、課題 1 の左半球において多くのチャンネルで有意な賦活が認められた。特に、左半球 Broca 野の後端と推定される部分から前方にかけて右半球同等部位よりも多くのチャンネルで賦活が認められた。右手利きの者の言語機能は左半球が優位 (山鳥 1985 ; 岩田 1996) と言われる。CL も右手利きであった。以上の結果から、本例による言語機能も左半球が優位であることが示唆された。また、課題の性質の違いはあるが、外国語学習に関与する脳活動という点、そして左半球 Broca 野が活動したという点において酒井 (2005) による fMRI 研究と本研究の結果に一致点が見られた。

## V. 結語

NIRS を用い、学習者 1 例について日本語聴解時の脳活動を測定したところ、課題 2 との条件の相違点から、課題 1 の結果は学習者による聴解課題遂行時の脳活動に依存するものであると考えられた。また、賦活領域は Broca 野を含む左大脳半球が有意である可能性が示された。今後、被験者を増やし、同様の傾向が得られるか更に検討を重ねていく必要がある。

日本語学習者を対象とした脳活動の測定は研究の途に着いたところである。本研究における課題 1 は日本語聴解課題遂行時のトップダウン的処理過程の検討であるため、音韻・形態・統語処理などの刺激音に含まれる各要素が脳活動にどのように関与したかは不明であった。「聞く」という理解行為は、学習者の頭の中で行われるため観察が困難で、対象可視化の方法論の構築が日本語教育における問題 (石黒ら 2009) であるが、この問題に対し NIRS 計測の応用が期待できると考え

られた。今後、日本語学習者と日本語ネイティブの比較やレベル別の測定、継時的な測定による日本語習得過程における脳活動の変化の把握、母語別のデータ蓄積などを通し、より良い教授法や評価を目的とした学習者の脳活動探索の装置として NIRS の活用が今後有効になると考えられる。

## 謝辞

本研究は、科学研究費補助金、萌芽研究、日本語学習者による日本語音声知覚時の脳内活動について—NIRS 装置による測定—(19652048)の補助を受けた。

## 文献

- 古屋泉, 森浩一, 2003, 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(3), 226-231
- 灰田宗孝, 2002, 脳計測における光トポグラフィ信号の意味, MEDIX, 36, 17-21
- Hoshi Y., Kobayashi N., Tamura M., 2001, Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, Journal of Applied Physiology, 90, 1657-1662
- 乾敏郎, 安西祐一郎編, 2001, 認知科学の新展開 3 運動と言語, 183-188, 岩波書店

- 石黒圭ら, 2009, 特集「作文教育のための語彙研究」について, 1-3, 日本語教育
- 岩田誠, 1996, 脳とことば—言語の神経機構, 22-36, 37-54, 共立出版
- Minagawa-Kawai Y., et al., 2004, Differential cortical responses in second language learners to different vowel contrasts, Neuroreport, 15(5), 899-903
- Oldfield, R. C., 1971, The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory, Neuropsychologia, 9, 97-113
- 酒井邦嘉, 2005, 言語の脳内処理機構, 高次脳機能研究, 25(1), 153-164
- 佐藤大樹, 牧敦, 2005, 光による脳機能イメージング: 光トポグラフィ, 認知科学, 12(3), 298-299
- 武田湖太郎, 加藤宏之, 2007, Near-infrared spectroscopy—計測原理と臨床応用—, 脳科学とリハビリテーション, 5-14
- Takeda K., et al., 2007, Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: A longitudinal study with near-infrared spectroscopy, Neuroscience Research, 59, 136-144
- 田辺敬貴, 1997, 山鳥論文に対するコメント, 心理学評論, 40(3), 356-357
- 渡辺英寿, 2000, 光トポグラフィによる脳機能のマッピング, 神経内科, 53, 260-265
- 渡辺英寿, 川崎真護, 2003, 脳波・筋電図の臨床—光トポの主成分分析法による言語優位半球同定の検討, 臨床脳波, 45(9), 567-571
- 山鳥重, 1985, 神経心理学入門, 229-251, 医学書院
- 山鳥重, 1997, 言語生成の三重構造, 心理学評論, 40(3), 343-355
- 山下優一ら, 1998, 無侵襲脳機能画像計測システムとしての光トポグラフィ開発, MEDIX, 29, 36-40