

形式別、筆記テスト時と会話時の脳活動の検証に向けて：

fNIRS によるパイロットスタディ¹

平田 裕*

要旨

本稿は、「日本語学習者の脳活動が各種筆記テスト時と日本語での会話時でどのように質的・量的に違うのか客観的に明らかにする」という3年計画のプロジェクトの1年目、パイロットスタディの初期レポートである。7人の日本語学習者に数種類の筆記テストタスクと会話タスクを受けてもらい、タスク時の脳活動の状況を fNIRS で測定した。今回は脳活動の傾向を把握するために、マッピング解析、GLM 統計、賦活度順位評価の3つの分析を行った。

本稿の総論的な結論としては、今回の実験結果は特定のパターンや類似性を強く示唆するものではなかった。しかし、タスク毎に賦活部位が左脳右脳に分かれて分布するものや中央に寄ったものなど、特徴的な分布が見られ、同種類のタスクで類似性や特定のパターンを示唆するものもあった。次のステップとしては、今回観察された現象をより客観的に裏付ける分析が必要であり、今回得られた知見を活かして2年目の実験計画を立てる必要がある。

キーワード： 筆記テスト形式、脳活動、会話時との比較、fNIRS (functional near-infrared spectroscopy: 近赤外光分光法)

* 立命館大学 大学院 言語教育情報研究科教授

1. はじめに

1.1 研究の概要・目的

日本語教育を含め、近代の外国語教育においては、文法や単語などの知識偏重から実際の会話力／運用力を重視するようになってきているのは周知の通りである。しかし、実際問題として、教育現場では学習者の人数の問題や、「会話力」という総合的なスキルを客観的に評価する難しさから、教育成果を検証する方法として筆記テストに頼っている部分が多い(会話力評価の難しさについては、Bachman and Savignon 1986; Brown 2005 など)。筆記テストの代表的な形式としては、選択式、穴埋め式、記述式、翻訳などがあるが、これらのテスト形式の妥当性の検証は、今までのところ、学習行動および目標技能とテスト内容の対応の考察、そして統計的確認が主である(Bachman 1990; Bachman and Palmer 1996; 大友・中村 2002; Hughes 2002; 近藤ブラウン 2012 など)。

文法や単語などの知識を測ることは、もちろん学習成果の一部分を検証するためには必要なことである。しかし、選択式や穴埋め式のテストで高い点数が取れるように勉強し、実際にコンスタントに高い点数が取れるようになっても、日常生活の会話力に直接つながっていないというのも、私達自身の学習経験と教育経験から分かることである。では、どのようなテスト形式であれば、学習者がそれを意識することによって会話力向上につながり、教師側からすると会話力評価につながるのであろうか。言うまでもなく、筆記テストは本来会話力を測るものではない。会話力を測るには、会話をしながらその場で評価する場合と、録音したデータを評価する場合があるが、いずれにしても、実際の会話を直接評価するのが一番望ましい(牧野ほか 2001)。しかし、筆記テストを会話力向上やその評価に有効に使うことができれば、教育現場でのメリットは大きいと言える。

上にも述べたように、近年までのテスト形式の妥当性の検証は、内容や形式の考察、そして統計的確認が主だったものであった。技術の進歩に伴い、各種の脳イメージング機器が開発され、現在では言語学や応用言語学の分野でも盛んに研究に使われるようになってきている。本研究は、脳イメージング機器の1つである fNIRS (Functional Near-infrared Spectroscopy: 近赤外光分光法)を使い、日本語学習者の筆記テスト時と日本語会話時の脳活動を測定、その結果を比較検証することにより、日本語教育で慣習的に使われている筆記テストの各形式が、会話活動時の脳活動とどのように質的・量的に違うのか客観的に明らかにすることを最終的な目的としている。その結果をもって、会話力評価につながる筆記テストの形式についての考察につなげたい。現在は、3年間のプロジェクト計画の1年目、研究方法の確立自体を目標としている段階である。

1.2 研究課題、前提、研究の範囲

上に述べた本プロジェクト全体の最終目的に対し、今回は以下の3つを研究課題とする。

- 1) 最終的な研究目的に合うデータ収集方法、分析方法を検討する。本稿は、

パイロットスタディの初期レポートという位置づけである。

- 2) 学習者個人別に、各種筆記テストと会話時で、脳活動の賦活部位の分布にどのような違いがあるか検証する。
- 3) 個人別に、主な賦活部位の賦活の度合いが、各種筆記テストと会話時でどのように違うか検証する。

今回のパイロットスタディの被験者は7名で、被験者の属性を揃えることはできなかった。初級学習者が4名で、初中級から中級の範囲に入る学習者が3名、母語も様々であり、今回の実験では第2言語の英語で筆記テストの指示を読んで答えるというケースもあった。これらの諸条件から、本研究の結果で一般化を考えることはできない。テスト形式と会話時の脳活動について一般化を試みるのは今後の課題となるが、本研究は、あくまで研究方法の確立と、学習者個人内で筆記テスト時と会話時の脳活動を比較検証することに主眼を置くものとする。刺激に対する脳の賦活部位の特定や(脳の機能分布)、グループ間の特徴的差異を見つけようとするものではない。

fNIRS や fMRI など、脳イメージング機器を使ったこれまでの言語研究の主なタイプには2種類ある。1 つは、同一の属性をもつ被験者に対し違うタスクを行い、言語機能と脳賦活部分の対応を特定しようとするタイプの研究である(Quaresima *et al.* 2002; Gui *et al.* 2004; Scherer *et al.* 2006; Hatta *et al.* 2009 など)。もう1つのタイプは、中級学習者と上級学習者、健常者と統語失調症患者、諸条件の違うバイリンガルグループなど、属性の違う被験者グループ間の違いを検証しようとするものである(大石 2001, 2002, 2006; Kubota *et al.* 2005.; Taura and Nasu 2012 など)。これら2つの研究タイプは、どちらも言語機能と脳の部位の対応に着目した研究、言い換えれば、人と脳が主たる研究対象の研究だと言えよう。これに対し、本研究は各種筆記テストおよび会話という、実験で使用するタスク形式自体が主たる研究対象となるものである。

2. 研究方法

研究方法の概要としては、タスクとして被験者にタイプの違う筆記テストを数種類受けてもらい、続いて短い会話を行う。これらのタスク時の脳活動の状況を fNIRS で測定、様々な角度から分析し、脳活動について検証するとともに、データ収集方法・分析方法について考察するというものである。以下、各項目別に今回採用した研究方法を見ていく。

2.1 fNIRS

脳機能の測定手法としては、脳波測定 (EEG: Electroencephalogram)、ポジトロン断層撮影法 (PET: Positron Emission Tomography)、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: Functional Magnetic Resonance Imaging)、脳磁図 (MEG: Magnetoencephalography)、近赤外光分光法 (fNIRS: Functional Near Infrared Spectroscopy) などが利用されている。それぞれの測定方法の特

徴については、大堀ほか(2011)が分かりやすい比較表を提示している。

それぞれの測定方法で空間分解能(脳部位の特定)や時間分解能(言語刺激に対する反応時間計測)が違ってくるが、本研究では次の3つの理由からfNIRSを採用する。まず、無害な光を用い、非侵襲的で最も安全性が高いこと²。2点目としては、体の位置や向きに制約が少なく、筆記テストを受ける時の実際の状態に近い形で実験/計測ができること。そして最後に、fMRIと違い、fNIRSの測定装置は大きな音を発生しないので、筆記テストや会話など言語タスクを行うのに適しているからである。現実的に、fMRIではトンネル型の測定機器の中で頭部を固定する必要があり、通常の筆記テストを受けるような状態にはできない。

実験では島津製作所のfNIRS測定システム、FOIRE-3000を使用した。図1に示すように、FOIRE-3000は測定装置本体と測定デバイスである光ファイバースプロブ、そして測定と同期可能な刺激提示システムとビデオシステムとで構成されている³。今回の実験では刺激提示システムは不要で、筆記テストや会話自体が刺激タスクとなる。頭部にフレキシブルプロブホルダーという固定器具を装着し(図2参照)、測定デバイスである光ファイバースプロブを必要な本数取り付け。プロブホルダーは頭部のほぼ全面を覆うものから、測定部位に合わせて小さくしたものまで、数種類提供されている。今回は図2のような範囲のものを使用した。

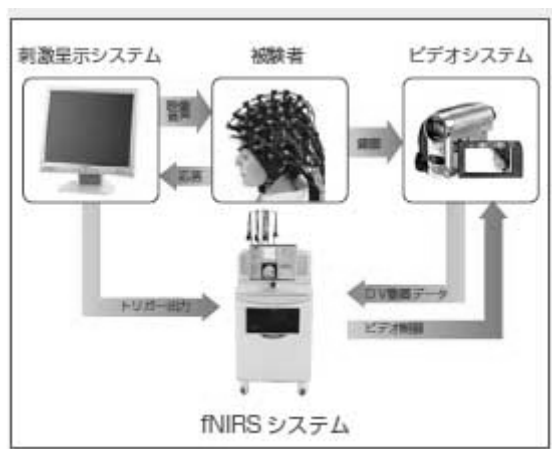


図1 fNIRS システム全体図



図2 プロブホルダー

今回の実験では、島津製作所の仕様の1つに沿い、下の図3と図4のように、縦3列・横9列で赤色と青色のプロブを配置した。プロブホルダーの装着にあたっては、鼻根点(ほぼ目と目の間)から頭頂を通る外周(うなじの窪みまで)の長さを測定し、鼻根点からその10分の1の距離のポイントに青8番の受光プロブが来るようにするとともに、ホルダーの最下列が脳波記録国際10-20法のT3-Fp1-Fz-Fp2-T4のラインに一致するように装着している(耳-頭頂-耳の外周を測定し、耳からその10分の1の距離がホルダー両端にくるように装着)。

FOIRE-3000 は $780 \pm 5\text{nm}$ 、 $805 \pm 5\text{nm}$ 、 $830 \pm 5\text{nm}$ の 3 種類の遠赤外光を使用し、血中のヘモグロビンの変化量を計測する。ホルダーに取り付けられた各プローブはそれぞれ 3 センチずつ離れており、13 個の赤色プローブは近赤外光の照射用、14 個の青色プローブは、反射して帰ってくる遠赤外光を受光するためのものである。下の図では白のボックス内の 1 から 42 で表されているが、この赤と青のプローブの間の 1 番から 42 番が実際の計測位置に対応している(チャンネルと呼んでいる)。

各チャンネルが実際に被験者の脳のどの部位を測定するかは、頭部の大きさや形でずれるが、一般に右利きの場合は図 4 の 25、33、34 近辺(左脳側)がブローカー野に対応する場合が多い。左利きの場合のブローカー野は、だいたい 30%から 50%ぐらいの割合で図 4 の 18、26、27 近辺(右脳側)だが、右利きの人と同様に左脳側に存在する場合、また、左右に分かれて存在する場合もある。言語機能に関する代表的な部位としては、ブローカー野、ウィルニッケ野、角回、聴覚野などが分かっているが、脳の様々な部位が言語機能に関係しており、詳しい機能分布についてはまだ明らかになっていない(坂井・久光 2011 など)。言語タスクに対する脳活動の研究で、前頭前野の働きに着目したものとしては、Kubota *et al.* (2005)、Ehlis *et al.* (2007)、Hatta *et al.* (2009)などがある。また、一般的なブローカー野(左脳部位)と前頭前野の働きを示唆する研究としては、大石(2001, 2002)、Gui *et al.* (2004)などがある。

今回の実験では、筆者が所属する研究科で実績がある手法を採用し、左右ブローカー野相当部位と前頭前野を中心に脳活動を測定している。ウィルニッケ野や角回など含め、測定部位を広げるのは、今後の課題としたい。

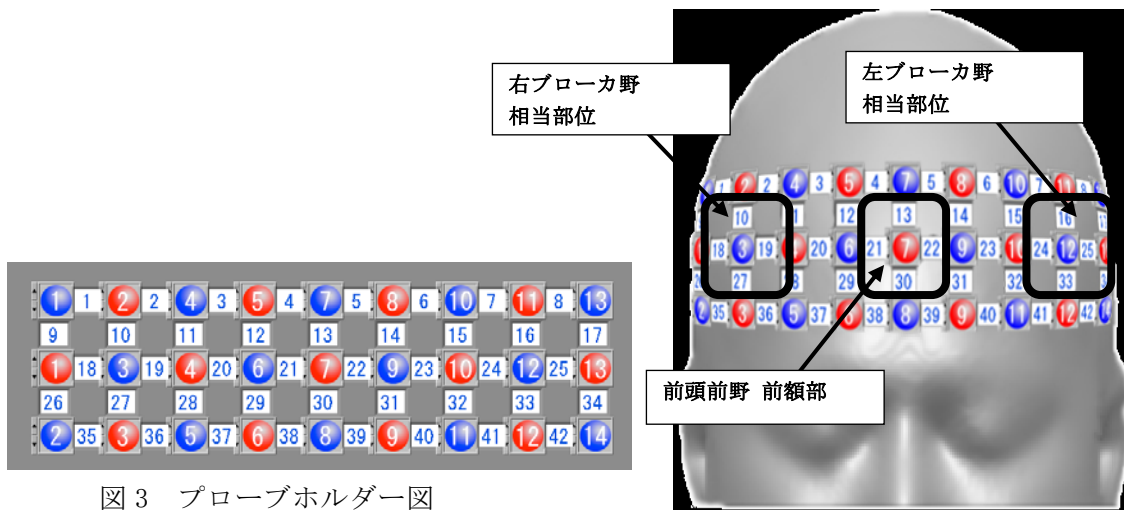


図 3 プローブホルダー図

図 4 プローブホルダー装着イメージ

2.2 被験者

実験の目的に対して理想的な被験者を十分な人数集めるのは常に難しい課題であるが、今回の場合も fNIRS 機のレンタルの日程と期間という制約条件もあり、被験者の人数は 7 名を

集めるにとどまった。fNIRS は非常に高価なシステムで、嶋津製作所の機器を青山商事経由のレンタルで使用した。以下、表 1 に被験者の一覧を示す。

表 1 被験者一覧

番号 被験者	性別	年齢	国籍	母語	学 日 習 本 歴 語	レ 日 ベ 本 ル 語	外 話 国 せ 語 る	利 き 手
1	男	19	インドネシア	インドネシア語	5 か月	初級	英語	全て右
2	男	24	ポーランド	ポーランド語	3 年	中上級	英語 ドイツ語 スペイン語 イタリア語	全て左
3	女	23	フランス	フランス語	5 か月	中級	英語	全て右
4	男	28	タイ	タイ語	1 年	初中級	英語	全て右
5	男	19	カナダ	英語	3 年	初級	タガログ語 (理解のみ)	全て右
6	男	19	中国	中国語	5 か月	初級	英語	全て右
7	男	19	中国	中国語	5 か月	初級	英語	全て右

表から分かるように、国籍も母語も様々であるが、被験者は全員留学生として日本語を勉強しているので、筆記テストには慣れている。利き手の調査にはエジンバラ利き手アンケートを使用した(書く、描く、投げる、歯ブラシ、蹴り足などで点数化するもの)。今回の 7 名の中には動作によって右利きと左利きが混在しているケースはなく、右利き 6 名、左利き 1 名(被験者 2)であった。日本語のレベルは自己申告と、筆者との会話から判断した。

今回の実験は、立命館大学「人を対象とする研究倫理審査委員会」による審査を受けている(受付番号: 衣笠 - 人 -2012) (Taura and Nakanan 2013 の Appendix 1 参照)。

2.3 タスクデザイン

ある機能に対応する脳部位を特定するためには、実験タスクをシンプルに、できるだけタスク遂行にその機能だけを使うデザインにすることが基本となる。被験者グループ間の違いを検証したい場合も、タスクが複雑であると脳活動も複雑になり、グループ間の違いが分かりにくくなるので、この場合もやはりタスクを十分にシンプルにする必要がある。また、タスクの長さについては、脳が落ち着いている状態から刺激を与えて脳の賦活が最初のピークを迎えるまで、一般的にはタスク開始から 4 秒から 8 秒ぐらいまでを測定することで充分であると嶋津製作所の方にアドバイスを頂いた。タスク遂行時間が長くなると、タスクの刺激以外も含め様々な要因で測定データが上下する「ドリフト」という状態になり、分析が難しくなる。

タスクの複雑さと長さに関する上述のような要件に対し、本研究の目的は、日本語教育の現場でごく一般的に行われている様々な形式の筆記テストを検証すること、つまり、実験タスク自体が研究対象となるので、タスクはできるだけ日常的に使用している筆記テストに近い方がよい。本研究では、タスクをシンプルで短くする脳実験上の必要性和、できるだけ通常の筆記テストフォーマットを維持する必要性という2つの要件のバランスを取ることが課題となる。脳活動の捉え方としても、刺激に対する反応部位の特定ということではなく、タスク遂行時、つまり筆記テストを受けている状態という比較的長いスパンでの全体的な脳活動の差異を見ることになる。

また、タスク毎の要件とは別に、実験全体の長さの要件もある。被験者は実験のためにプロブホルダーを頭に装着するので、ホルダーからの圧迫感もある上、かなり動きの制約を受ける。被験者に過剰な負荷をかけないようにするためには、実験全体の長さを30分ぐらいに抑える必要がある。

以上のことを考慮し、タスクデザインを行った。タスクとなる筆記テストの種類は、大きく分けると、(1)「選択穴埋め問題」(例：設問3つに対し、正答3つの選択肢)、(2)「訳問題」、(3)「選択肢問題」(例：設問1つに対し、助詞の選択肢4つ)、(4)「会話方式問題」の4タイプで、それに(5)「会話」が1つのタイプとして加わる。

これら5種類のタスクは、細かく分けると全部で12の独立したタスクとなっている。タスクの順番としては、だいたいの目安として簡単なものから複雑なもの、そして同タイプが続きすぎないように配置した。12のタスクの詳細な順序は、選択穴埋め2タスク、訳2タスク、選択肢2タスク、訳2タスク、会話方式1タスク、会話3タスクである。厳密には問題の難易度順にはなっていないが、実験としては基本的にそれぞれ独立したタスクで、タスク順の影響があってはいけない。タスクの順序の検討は留意事項、今後の課題としたい。

タスクのセットは、初級用と中級用の2種類、そして初級用は媒介語として英語を想定するものと中国語を想定するものの2種類を準備した。以下のセクションで初級用のタスクを見ていく。中級用は、初級用と同様の形式で単語や表現を中級用にアレンジしたものである。

2.3.1 選択穴埋め問題 (多 vs. 多) (TASK01, 02)

大きく選択肢形式タイプといっても、出題形式によって更に細かく分類できる。例えば、1つの設問に対し、似たような意味を持つ単語・表現の中から最適なものを選ぶタイプ、また、複数の設問に対し、同数の正答選択肢を与えるもの、さらに、同数ではなく攪乱肢を混ぜるものなどである。

今回の実験では、日本語の問題集などでもよく使われているものとして、設問の数と同数の正答選択肢の中から選ばせる問題を採用した。比較的簡単なタイプとして、名詞を選択肢にするものを TASK01、少し複雑なものとして動詞を選択し、活用させて書き入れるものを TASK02 とした。実際に実験で使った問題の提示形式は1ページに1タスクであるが、紙幅の関係上、本稿ではタスクの内容だけそのまま掲載する形とする。下の(1)と(2)は初級用の

TASK01 と TASK02 である。タスクの流れとしては、被験者は事前にこの問題形式の例を見てやり方を理解し、30 秒の休憩をはさんで TASK01 を行い、再度 30 秒の休憩の後、TASK02 を行うというデザインである。他のタスクも同様で、問題形式の理解はタスクの前に済んでいる。

- (1) TASK01 (max 2 分) 選択肢：相手、性格、意見
1. アンケートをして、() を集めました。
 2. 弟さんは、どんな () ですか？
 3. 次の試合は、いい () だと いいですね。

- (2) TASK02 (max 3 分) 選択肢：受ける、取る、通う、感じる
1. バスで () います。
 2. ストレスを () ことがありますか。
 3. 来週、テストを () なければなりません。
 4. 車の免許を () ました。

タスクが簡単すぎると脳の賦活が観察されない場合も考えられるので、名詞の選択肢は少し難しめのもので揃えた。使用している漢字自体はテスト項目ではないので、全ての筆記問題には振り仮名を振っている(以下、本稿では振り仮名を外す)。脳実験の要件としては設問を1つにした方がシンプルでよいが、複数の選択肢をどこに入れるか、その組み合わせで迷うというこの形式の特徴的要素を実験の中に入れたかったので、複数の設問を同時に聞いている。

このタスクだけでも、単語の理解、文章の理解、選択、活用、書くという行為など、様々な認知・行動要素が含まれており、複雑な脳活動になることが予想される。

2.3.2 訳問題 (TASK03, 04, 07, 08)

日本で行われる日本語教育では、クラス内では全て日本語を使い、配布物やテストも全て日本語という場合もあるが、特に成人の学習者の場合は文法の理解や単語の学習に対して母語や媒介語の使用を完全に排除できるものではない。学習者が単語を覚える際は、日本語と母語での意味を対応させた単語リストを作る(または利用する)というのも、ごく普通のことである。海外での日本語教育を見てみると、特に初級から中級までは学習者の母語を使う割合は高いと言える。訳形式のテスト問題も外国語教育では代表的なものの1つである。

前のセクションで見た TASK01/02 は選択式で単語力を問うものであるため、それに続く TASK03/04 は訳形式で単語と簡単な表現を問うものにした。TASK07/08 はもう少し長めの従属節などを訳形式で問う問題である。ここでは TASK03 と 08 を紹介する。媒介語は英語、または中国語である。

(3) TASK03 (max 2分)

1. _____ は よく分かりません。
2. きのうから _____ が ひどいんです。
reason
cough
3. 田中さんも、 _____ 。
Let's invite

(4) TASK08 (max 3分)

1. _____、 電車に間に合います。
If you take a taxi,
2. 毎日、単語を10コ _____。
(has decided to) memorize [everyday routine]
3. _____。
I did homework while watching TV.

初級の表現でも他の外国語にうまく訳せないものもあるので、訳をテスト形式として採用する場合は工夫が必要になる⁴。この問題形式の出来不出来は学習者の慣れの問題もあるが、今回の実験では正答率は考察の対象外としている。

脳実験のタスクとしての要件からすると、この問題形式では1つのタスクに1問という設定にできるが、TASK01と02の「多 vs. 多」の選択問題タスクにタスク全体としての負荷が近くなるように複数の設問を入れた。他のタスクの場合も同様であるが、タスク毎の設問数も今後の検討課題である。

2.3.3 選択肢問題 (1 vs. 多) (TASK05, 06)

この形式は選択肢形式の中でも1つの設問に対し複数の選択肢の中から正答を選ばせるものである。TASK05は助詞の設問3つ、TASK06は表現の設問3つとした。

(5) TASK05 (max 2分)

1. 雨 (に の で) バスが遅れました。
2. 京都から 電車 (に を で) 乗りました。
3. 日本の会社 (で を に) 勤めています。

(6) TASK06 (max 2分)

1. 電気が (ついた つけて ついて) いますよ。
2. ドアを (しめて しまっ て しまりまして) ください
3. もっと (大きい 大きく 大きくて) したら どうですか？

2.3.4 会話方式問題 (TASK09)

今回の実験では、この問題形式のみ、日本語教育でごく普通に行われているタイプではない。会話力向上と会話力測定につながる筆記テストの形式を模索する中で、筆者が実際に授業で使っているものがある。全体のコンセプトと、今回の実験で使った問題を以下に示す。

(7) できるだけ実際の会話に近い形にする。単語や表現という小さな単位のアウトプットではなく、大きなまとまりのある内容のアウトプットを課題とする。媒介語の使用は訳としてではなく、コンテキスト説明や指示のために使う。できるだけ文字情報ではなく、絵を使う。

(8) 自然な日本語を採点の基準とする。提示された会話相手から判断し、普通体と丁寧体の使い分けも評価対象とする(敬語なども)。あいづち、フィラー的な表現、終助詞なども評価対象とする。

(9) TASK09 (max 3分)

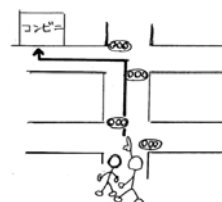
1. 日本人の tutor : 自分の町と京都、住むのは どちらがいいですか。

自分: _____
【Tell your choice, mentioning a few reasons.】



2. おばあさん: ^{ちか}近くにコンビニはありませんか。

自分: _____



この問題形式を実際にクラスで使うためには、単にテスト形式の採用というレベルではなく、会話力向上というコース全体の目標設定やそのためのプロセス、この形式のメリット・デメリットの説明など、学習者に対してクリアにしておく必要がある。また、学習者がこのテスト形式に慣れる必要もある。しかし、今回の実験では単にタスクとしての採用なので、被験者に問題形式の意図や評価対象項目についてなどの説明は行っていない。他のタスクと同様、一連の流れの中で例を見てやり方を理解し、タスクとして行うだけである。

2.3.5 会話 (TASK10, 11, 12)

会話のタスクは、筆記テストという形のタスクが終了してから、簡単な質問を3つ問いかける形で3つのタスクとして行った。3つの質問は、日本に来て一番楽しかったこと、日本に来て一番困ったこと、そして最後は、今日はここまでどうやって来たかである。会話のタスクは他のタスクと比べ、より複雑な脳活動を示すと考えられるが、自然なやり取りを心掛け、追加の質問をした場合もある。1つのタスク内での会話の長さは2分程度である。

2.4 実験手順

fNIRS を使った脳実験としては、短い休憩タスクと実験タスクを交互に配置し(「ブロックデザイン」と呼ばれる)、そのスケジューリングを fNIRS にインプットしてタスクの開始と終了のタイミングを自動的に記録するようにした方が後のデータ処理に便利である。しかし、ブロックデザインを採用すると、タスクの開始と終了を fNIRS がコントロールすることになるので、被験者毎にペースが違う比較的長めのタスクには向いていない。今回の実験では、通常の筆記テストに近いやり方という要件から、会話以外のタスクを紙ベースで被験者に渡し、被験者のペースで回答してもらおうという形式をとった。fNIRS でのデータの収集は「連続データ収集方法」ということになる。

具体的には、実験全体の説明、それぞれのタスクのやり方の例示、休憩タスク、9 つの筆記タスク、これら全てを 27 ページの冊子にまとめ、筆者が時間を測りながらページをめくる指示を被験者に出し、そのタイミングで fNIRS のデータ内にマーキングを入れる。筆記タスクについては、そのページのタスクが終わったら被験者が鉛筆でコップを叩いて合図をし、筆者が fNIRS のデータ内にマーキングを入れて、次の休憩タスクのページに進むように指示を出すようにした。流れとしては、「例」、「30 秒の休み」、「問題」、「休み」、「問題」、「休み」、これが 1 セットで、これを何回かリピーする形である。筆記タスクにはそれぞれ制限時間を設けたが、ほとんどの場合はその制限時間よりも早くタスクを終わっていた。

今回使用した fNIRS 機 FOIRE-3000 はビデオカメラとの同期ができるので、全体のタスク開始から終了まで被験者の様子を録画した。また、会話タスクについてはボイスレコーダーを使って全て録音している。

2.5 分析方法

fNIRS システムは、血液成分中のヘモグロビンの近赤外光に対する吸光量の変化を測定し、酸素化ヘモグロビン(oxy-hemoglobin: oxy-Hb)、脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-hemoglobin : deoxy-Hb)、そして総合ヘモグロビン(total-hemoglobin: total-Hb)の濃度変化を計算によって求める。実際に fNIRS が測定値として出すものは濃度変化と光路長の積で、単位は $\text{mM} \cdot \text{mm}$ (または $\text{mmol} \cdot \text{mm}$: ミリモル(/L)・ミリメートル)となる。NIRS の原理については、島津製作所の HP (2012) や、廣安ほか (2010) が分かりやすい説明を提供している。イメージとしては、oxy-Hb は酸素を運ぶ役割で動脈に多く、deoxy-Hb は酸素消費後のヘモグロビンで静脈に多いと考えると分かりやすい。福長ほか(2011)によると、NIRS の解析方法には未だスタンダードはなく、fMRI で使用される BOLD (blood oxygenation level dependent) 信号との対応付けとしてどの指標を用いるかは研究者の考え方によって異なっている。その中で、田村(2002)は「賦活に伴って血流増加が生じる事を一義的に受け入れるならば、光で計測する時、酸素化 Hb が最も敏感であり、また、信頼し得るパラメーターである。光で求められる全 Hb は血流変動とほぼ対応するが、その変動幅が小さい時は信頼できない。脱酸素化 Hb の挙動は非常に複雑である」

と報告している。BOLD効果によるfMRI信号の変化はdeoxy-Hbの量変化のみで決まるとされているが(山本 2007)、先行研究ではfMRIのBOLD信号とfNIRSのoxy-Hbが高い相関関係を示すという結果もあり(Strangman *et al.* 2002a; Toronov *et al.* 2007など)、oxy-Hbを代表値として使った先行研究にならい(Malonek *et al.* 1997; Strangman *et al.* 2002b; 福田 2009など)、本研究もoxy-Hbのみを分析対象とした。

今回の実験では測定は100ミリ秒(0.10秒)毎という設定になっているが、fNIRSの測定値は絶対値ではなく、0.10秒前と比較したヘモグロビン濃度の変化量と光路長の積であるため、分析のためには基準となるベースラインデータを引いた値を使わなくてはならない。ベースラインデータの求め方は様々な方法があるが、今回の分析ではタスク開始前10秒間の平均値とした。指定区間の平均値を使う方法はfNIRSのシステムで提供されている算出方法の1つであり、補正設定をすることによって自動的に差分算出を行える。

今回の実験は連続測定で行ったので、データをタスク毎に抽出する必要があった。被験者7名、それぞれ12タスクである。後述のfNIRSの統計ツールを使うためには、ブロックデザインを採用した場合に合わせて、「前レストタスクー後レスト」というデータにする必要があるため、タスクの前後に前レスト区間を10秒、後レスト区間を20秒加えてデータ抽出を行った⁵。ただし、一番最後の12番目の会話タスクは、そのタスクで実験終了となるため後ろに休憩タスクはなく、抽出したデータにも20秒の後レストは入っていない。また、FOIRE-3000の統計ツールはタスクマーカが入っていないと動かないので、fNIRSのエディターソフトを使ってタスク開始時(データの最初から10秒後)にタスクマーカを入れた。

fNIRSのトレンド解析とマッピング解析の画面は生データのままだと傾向がつかみにくいので、fNIRSの機能として提供してあるスムージング補正を使った。平均値を求めたり各種統計分析を行うためには、fNIRSからテキストデータとして出力したものを使うが、その場合はスムージング補正を行わず、測定データからベースラインデータの差分を求めただけの値を使用している。

既に本稿の最初の方で研究課題として述べたように、今回のパイロットスタディでは分析方法の評価・検討を行い、本研究の最終目的に合った分析方法の確立につなげることを課題の1つとしている。分析手法確立のための方針としては、まず全体の傾向をつかむ手法、次にその傾向を裏付ける手法を考える。本稿では全体の傾向把握のための3つの分析として、(1) マッピング解析(FOIRE-3000)、(2) GLM 統計分析(FOIRE-3000)、(3) 賦活度の順位評価の結果について述べる。観察結果を裏付ける分析方法としては、分散分析やクラスター分析を使うことも考えられるが、本稿の段階ではそこまでは至らなかった。

上記の3つの分析手法の最初の2つ、(1) マッピング解析と(2) GLM 統計分析は嶋津製作所のFOIRE-3000で提供されている機能であり、ここでいうGLM統計分析は一般的な統計手法を指すものではない。マッピング解析は脳の賦活状態を視覚的に捉えるために多くの先行研究で用いられているものである。FOIRE-3000のGLM統計分析は、今回の実験結果の全体の傾向把握のために使えるかどうかということで試用した。(3)の賦活度の順位評価は、12のタ

スク毎、かつ、42 チャンネル(42 脳部位)毎に、タスク実行時の fNIRS 測定値平均(ベースライン補正あり)をタスク期間全体の賦活度を表すものとみなし、42 の脳部位の賦活度順位を見ようというものである。全測定部位の賦活度を見る点ではマッピング解析と同じであるが、マッピング解析はタスク期間の平均ではなく、ある時点での賦活度をみるものである。

以上、本研究では3つの分析方法を使うが、先行研究で使われた分析手法の調査・検討も充分ではないので、この点も今後の課題としたい。

3. 実験結果と考察

3.1 マッピング解析

上でも触れたように、マッピング解析は嶋津製作所の FOIRE-3000 で提供されている機能で、脳の賦活状態を視覚的に捉えるのに有効である。本研究でも、分析の第一ステップ、タスク毎の賦活の傾向を把握するために使用する。今回の実験のチャンネル数(測定ポイント)は42であるが、マッピング図はプローブホルダー上のチャンネル位置に対応しており、測定ポイントの間の値は fNIRS が近似値を自動的に出して埋めている(3種類のロジックが提供されている)。下の図5にプローブホルダー/頭部とマッピング図の対応を示す。

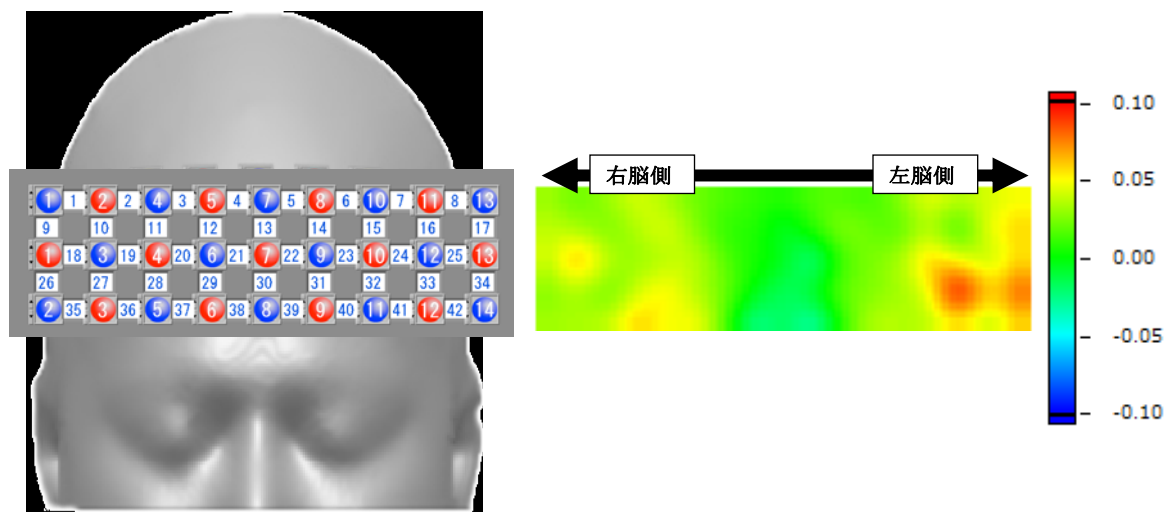


図5 プローブホルダー/頭部とマッピング図の対応

この図で分かるように、上下の対応はそのまま、マッピング図の左側が被験者の右脳に、右側が被験者の左脳に対応する。fNIRS の測定値の単位は mM. mm で、今回の実験では縦軸の最大値を±0.10 に設定している。図5右端のスケール図で分かるように、oxy-Hb の値が 0.10 の時に赤色、0.00 の時に緑色、-0.10 の時に青色の表示をする。この図でみると、被験者の左脳、チャンネル 33、34 近辺(ブローカー野と考えられる)が賦活していることが分かる。

次のセクションから、7名の被験者のタスク毎のマッピング図を示す。タスク中のどの時

点のマッピング図を出すかは、全体のトレンド図を見て、グラフが山になっているところを出した。山が数カ所ある場合はそれぞれマッピング図を出してみて、一番特徴的(賦活度が高い部分が多い)と思われる図を本稿には提示している。

マッピング図の名称に入れてある「16s」などはデータの開始位置からの時間で、0 から 10 秒までは休憩タスク、10 秒の時点からタスクスタートとなっている。例えば、「16s」の場合は、タスクを開始して 6 秒後のマッピング図ということになる。上述のようにマッピング図を出すためには基本的には山の位置を見ているが、島津製作所によると純粋な脳反応の実験としてデザインしたタスクでは刺激を与えてから 4 秒から 8 秒ほどで最大値になることが多いので、今回の実験結果を見る際もタスク開始後 6 秒近辺はチェックするようにした。全体の傾向としては、本実験のタスクは通常の筆記テストに近い形にしていることもあり、トレンドグラフの山がタスク開始から数十秒後にきているものも多く、また、タスク時間中に複数の山があるものも多かった。

3.1.1 被験者 1 のマッピング解析

図 6 が被験者 1 のマッピング図一覧である。被験者 1 名につき 12 のマッピング図を一覧として提示するのでマッピング図の名称が読みにくいのが、上段の左から TASK01、02、03、04、中段が TASK05 から 08 まで、下段が TASK09 から 12 までである。

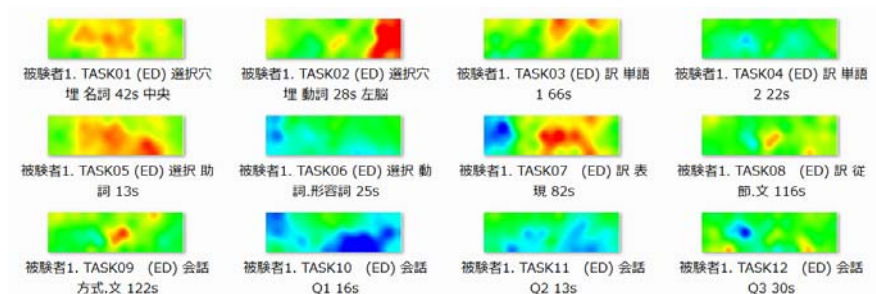


図 6 被験者 1 のマッピング図一覧

被験者 1 は初級学習者で、母語はインドネシア語、日本語は第 2 外国語で、今回の実験では英語を媒介語として使っている。被験者 1 で特徴的なのは、まず会話タスクの TASK10、11、12 でプラス(赤)の方の顕著な賦活状態が見られず、マイナス(青)が強く出ているという点である。これは他の 6 名の被験者とは全く逆のパターンで、この現象についての確認はまだ出来ていない。

その他の傾向としては、ブローカー野を含む左脳部位に強い賦活が見られるのは TASK02(選択穴埋 動詞)のみで、他のタスクの賦活は前頭前野前額部という傾向がある。賦活分布の細かい形をみると、TASK08(訳 従節.文)と TASK09(会話方式)では賦活が前頭前野の狭い領域に限られていることが分かる。TASK07 も類似性が少し認められる。

筆者が設定した筆記タスクの種類別に見てみると、同じ種類のタスクのペア、すなわち選択穴埋め(多 vs. 多)の TASK01 と 02、訳(単語)の TASK03 と 04、選択(1 vs. 多)の TASK05 と 06、訳(表現/従節)の 07 と 08、全てのペアで賦活の明確な類似性は認められない。1つの仮説となるが、この被験者の場合はテストフォーマットよりもテスト項目/内容の影響が強い可能性が考えられる。例えば、TASK02(選択穴埋め 動詞)だけブローカー野が強く賦活しているが、動詞の活用がその原因になっている可能性などである。

3.1.2 被験者 2 のマッピング解析

図 7 が被験者 2 のマッピング図一覧である。

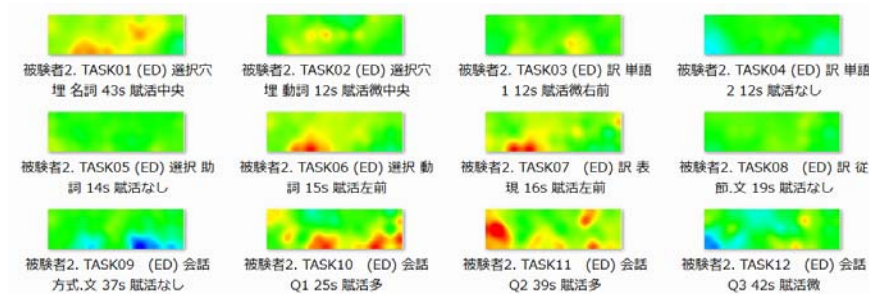


図 7 被験者 2 のマッピング図一覧

被験者 2 は今回唯一の左利きで、中上級学習者、母語はポーランド語、日本語は 5 番目ぐらいの外国語で、今回の実験では英語を媒介語として使っている。本稿のセクション 2.3 で取り上げたタスクは初級用だけであるが、初中級から中上級の被験者には中級用の別のタスクセットを作り、そちらを使用している。

まず、会話タスク TASK10、11、12 を見てみると、TASK10 と 11 で強い賦活が見られるが、賦活部位の分布はかなり違う。TASK10 は日本に来て楽しかったことについて話す、TASK11 は困ったことについて話すというタスクであるが、一般に左利き話者のブローカー野があるとされる右脳部位が強く賦活しているのは TASK11 の方で、TASK10 では前頭前野と左脳部の賦活が観察できる。また、「今日はどうやって来ましたか」という問いの TASK12 では強い賦活が見られない。会話タスクの結果からは、話者の脳は「会話」という行為の種類で異なる反応を示す訳ではなく、話者が感じる話す内容の難易度によって脳活動の程度と賦活部位が違うという仮説が導かれるだろう。さらに、話者が感じる難易度は、話す内容と話者の日本語力との相対的な関係で決まり、内容だけで決まるものではないと考えられる。これらの仮説は合理的な推測にも合致するものである。

筆者が設定した筆記タスクの種類別に見てみると、同じ種類のタスクのペア、すなわち選択穴埋め(多 vs. 多)の TASK01 と 02、訳(単語)の TASK03 と 04、選択(1 vs. 多)の TASK05 と 06、訳(表現/従節)の 07 と 08、全てのペアで賦活の明確な類似性は認められない。

3.1.3 全被験者の会話タスクのマッピング図

上のセクションで導いた仮説に関して、このセクションでは全被験者の会話タスクの結果を見てみたい。以下に7名の被験者のTASK10/11/12のマッピング画像を一覧にして提示する。

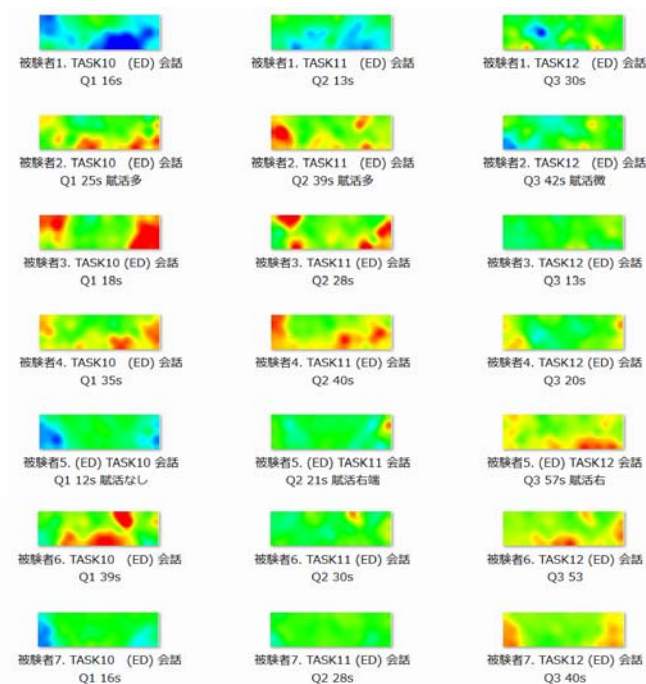


図8 全被験者の会話タスクのマッピング図一覧

この一覧では、上から順に被験者1から被験者7まで、左から右にTASK10、11、12である。TASK12だけTASK10/11と著しく違う賦活度／賦活分布が観察できるのは、被験者6以外の全員、被験者1、2、3、4、5、7である。

TASK12だけに注目すると、被験者1に関しては上でも述べたようにこの7名の中では例外的なマッピング図になっているが、それ以外の6名では、賦活の度合いが低い被験者2/3/4と、賦活の度合いが比較的高い被験者5/6/7の2グループに分かれていることが分かる。被験者2/3/4は初中級から中上級の3名で、会話内容を振り返ってみると、当日は実験を行った場所に自転車であって、どのようにして来たかという説明は比較的簡単だったと考えられる。一方、被験者5/6/7は初級学習者で、当日はバスを数本乗り継いだり、電車の乗り継ぎとタクシーなど、バス停の名前や駅名も含め、初級学習者には比較的難しいタスクであったことが脳の賦活度合いに表れていると考えられる。

被験者2/3/4と被験者5/6/7の2つのグループの対比ということであらためて3つのタスク間の違いを見てみると、中級者グループはTASK10「楽しかったこと」、TASK11「困ったこと」の2つで脳の賦活度が高く、TASK12では賦活度が低い。対照的に、初級者グループではTASK12「今日はどうやって来たか」が、分かりやすく言えば「一生懸命に答えた」タスクで

あったことが分かる。

中級者の TASK10/11 の賦活度を見ると、初級者にとって TASK10/11 が脳を活性化させる必要がないほど簡単であったとは言えない。1 つの推測としては、初級者は日本語の会話にまだ慣れておらず、既習の単語と表現に限りがあることなどから、ごく簡単な回答にとどまり、脳はあまり活性化しなかったとも考えられる。しかし、会話タスクの録音データで確認すると、初級 3 名が 1 つ 2 つの単語だけで答えを済ませているということでもなく、録音データからは単語を思い出そうとしたり、難しめの構文を使ったり、考えて話している様子が分かる。中級者の会話データも確認してみると、発話の流暢さや発話量には初級グループと中級グループでは明らかな違いがあった。被験者 5/6/7 の初級 3 名の中では被験者 6 だけが TASK10 で著しい賦活が見られるが、会話の正確性とは全く別問題であるが、脳の活動状況からは、被験者 6 が初級 3 名の中でも比較的中級グループに近い脳活動を示したと言えるのではないだろうか。現段階では TASK10/11 における初級者と中級者の脳活動の明らかな違いについて明快な説明はできないが、これも今後の課題としたい。

被験者 7 名のデータを見て、初級グループと中級グループにはもう 1 つ属性的な違いがある可能性がある。上の考察では例外的として被験者 1 は議論から外していたが、マッピング図にマイナス(青)表示が出てきたのは、被験者 1/2/5/7 で、被験者 2 だけが中級グループである。被験者 2 のマイナス表示は TASK12 で、TASK12 の賦活度が TASK10/11 よりも低いということでは他の中級者と同傾向である。初級者 1/5/7 は TASK10/11 における脳反応がほとんどゼロ(緑)かマイナス(青)である。被験者 1 の例外的データを説明する上でも、一緒に考えなければならない初級者データの傾向である。

会話データについての考察では最後にもう 1 点、話者のブローカー野に注目してみる。今回の実験のマッピング解析からは、会話という言語活動においてブローカー野が明らかに主たる機能を担っているとは言い難い結果となっている。上の図 8 で、被験者 2 の TASK11 は右脳のブローカー野(左利き)が顕著な賦活を示すが、被験者 3 の TASK10/11、被験者 4 の TASK10/11、被験者 7 の TASK12 など、賦活部位がマッピング図の両端に分かれているものがある。また、被験者 6 の TASK10/12 など、前頭前野の中央部分が強く賦活しているものもある。以降のセクションで被験者別の検証に戻り、筆記テストのタスクも見ていくが、賦活部位が両端に分かれるケースと中央に寄るケースは、会話タスクと同様に観察される。この実験結果は、言語タスクにおいては左脳(右利き)だけではなく、右脳の対応部位も賦活するという先行研究の結果にも合致し(Herrmann *et al.* 2003; Just *et al.* 1996; Kameyama *et al.* 2004; Yamadori 1998; Taura and Nasu 2012 など)、前頭前野の役割を示唆する先行研究の結果にも合致する(大石 2001, 2002; Gui *et al.* 2004; Kubota *et al.* 2005; Ehlis *et al.* 2007; Hatta *et al.* 2009 など)。ただし、今回の実験の被験者は全部で 7 名しかおらず、しかも属性が揃っていないので、分析結果の一般化については今後の課題としたい。

3.1.4 被験者3のマッピング解析

図9は被験者3のマッピング図一覧である。



図9 被験者3のマッピング図一覧

被験者3は中級学習者で、母語はフランス語、日本語は第2外国語で、今回の実験では英語を媒介語として使っている。この被験者は全般的に賦活度が低いタスクが多く、12タスクのうち顕著な賦活を示したのは会話タスクのTASK10と11だけである。この2つのタスクでは、脳の活性化部位がマップ図の両端に分かれるパターンが観察できる。著しい賦活とは言えないが、TASK01（選択穴埋 名詞）、TASK04（訳 単語）、TASK08（訳 従節）、TASK09（会話方式）の4つではスポット的な賦活が見られる。TASK09/10/11の3つは、この被験者のブローカー野の位置を示唆するものだと言えるだろう。

筆者が設定した筆記タスクの種類別に見てみると、同じ種類のタスクのペアで賦活の明確な類似性は認められない。

3.1.5 被験者4のマッピング解析

図10は被験者4のマッピング図一覧である。



図10 被験者4のマッピング図一覧

被験者4は初中級学習者で、母語はタイ語、日本語は第2外国語で、今回の実験では英語を媒介語として使っている。被験者3と似た賦活パターンで、2つの会話タスクTASK10と11が顕著な賦活を示し、TASK02/03/04/07/12の5つはスポット的な賦活を示している。

筆者が設定した筆記タスクの種類別に見てみると、TASK05（選択 助詞）、TASK06（選択 動詞、形容詞）、TASK09（会話方式）で、右端上部（左脳の測定部上端近辺）が強いマイナス（青）になっていることが分かる。TASK05 と 06 は同タイプの筆記テストとして設定したもののだが、TASK09 は全く別のタイプとして設定したものである。現在のところ、理由については考察できていない。

3.1.6 被験者 5 のマッピング解析

図 11 は被験者 5 のマッピング図一覧である。

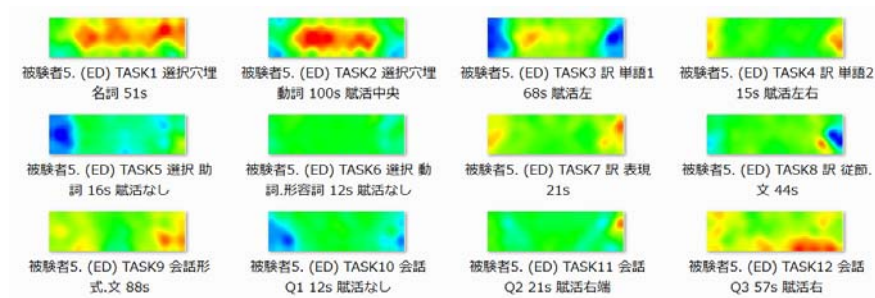


図 11 被験者 5 のマッピング図一覧

被験者 5 は初級学習者で、母語は英語、実験の媒介語も英語である。筆者が設定した筆記タスクの種類別に見てみると、選択穴埋めの TASK01 と TASK02 で中央に寄った特徴的な賦活分布が見られる（正確には、TASK01 は左脳部まで賦活部位が続いている）。また、プラス（赤）とマイナス（青）が混在するが、単語を対象とした訳形式の TASK03 と 04（訳 単語 2）、表現や従属節を対象とした訳形式の TASK07 と 08 で賦活パターンが両端に分かれる現象が確認できる。TASK09（会話形式）は一般的な筆記テストのタイプではないが、両端に分かれる賦活パターンとしては、TASK03/04/07/08 の訳形式グループと、会話タスクである TASK10 との類似性が認められる。以上のように、被験者 5 は他の被験者と比べると、タスク形式別の脳活動パターンが比較的類似性を示す傾向にあると言えそうである。

また、既に見たように、被験者 1 もマイナス（青）が特徴的だったが、被験者 5 のマッピング図でもマイナス（青）の分布が特徴的である。セクション 3.1.3 の会話タスクデータの検証で触れたが、被験者 1、5 とともに初級学習者であり、マイナス（青）の分布の説明については今後の課題としたい。

3.1.7 被験者 6 のマッピング解析

次は、被験者 6 のマッピング図一覧である。

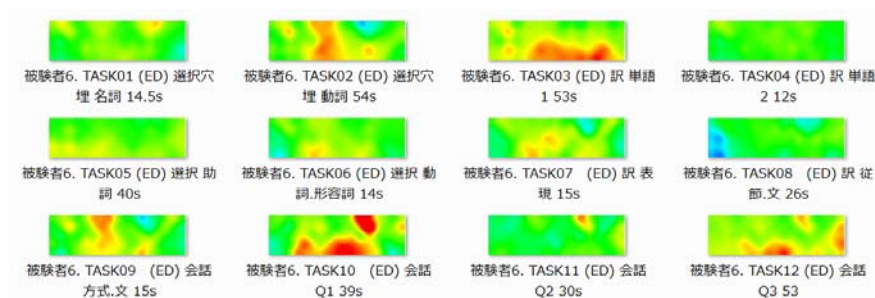


図 12 被験者 6 のマッピング図一覧

被験者 6 は初級学習者で、母語は中国語、実験の媒介語は中国語を使用した（訳の問題だけでなく、同意書や実験の説明など全て中国語）。賦活分布の傾向としては、全体として賦活部位が中央に寄ったタスクが多く、端部が顕著な賦活を示したのは会話タスクの TASK12 だけである。賦活部位の分布としては会話タスクの TASK10 と 12 は類似性を示していると言えよう。また、全く違う種類のタスクとして設定したもののだが、TASK02（選択穴埋 動詞）と TASK09（会話形式）にも賦活パターンの類似性が認められる。それ以外のタスクではタスク間に明らかな類似性は認められない。

前のセクションの被験者 5 とこのセクションの被験者 6 の会話タスクを見ると、TASK11 では左脳部でスポット的な賦活があり、全体としてほとんど活性化度が低い緑を示しているという点で、若干の類似性を認められる。TASK11 の会話録音データを確認すると、「困ったこと」の質問に対し、少し考える時間はあるが、被験者 5、6 ともに内容的には「日本は物価が高い」という答で、TASK10/12 と比べると比較的簡単な答えだった。学習者の日本語レベルと発話内容、それらと脳活動の関係については、今後の課題としたい。

3.1.8 被験者 7 のマッピング解析

最後に、被験者 7 のマッピング図一覧である。



図 13 被験者 7 のマッピング図一覧

被験者 7 は被験者 6 と同じ属性で、初級学習者、母語は中国語、実験の媒介語は中国語である。見て分かるように、全体として緑が多い。被験者 7 は右利きなので、ブローカー野は

一般的には左脳(画面右)にあるはずであるが、今回の実験の言語タスクで左脳に顕著な賦活が見られるのは会話の TASK12 のみである。この場合も左脳だけでなく、左右両側の賦活パターンとなっている。プラス(赤)とマイナス(青)の違いはあるが、TASK05 (選択 助詞)、10 (会話 1)、12 (会話 3) の 3 つに、右脳部 (画面左) の類似性が認められる。初級学習者のマイナスデータの説明については、他の初級者のところで述べたように今後の課題である。

3.2 GLM 統計 (FOIRE-3000 の解析ツール)

上のセクションで見てきたマッピング解析と同様、ここでいう GLM 統計の解析ツールは島津製作所の FOIRE-3000 で提供されているものを指す。マッピング解析は、あるタイミングでの測定エリアの賦活状態を視覚化するものであるが、GLM 統計の方はそれぞれの測定チャンネルにおける測定値の推移(トレンド解析画面で折れ線グラフで表示される)に対し、そのグラフ形状が線形モデルから得られた理論的なカーブとどれだけ近いかを検定する。言い換えると、マッピング解析はデータのスナップショットであるのに対し、GLM 統計はタスク期間全体のデータ推移を検証するものである⁶。

FOIRE-3000 の GLM 統計を行うには、基本的には[レストータスクーレスト]でブロックデザインを組み、それを複数回行うことで統計の信頼性をあげるという前提になっている。今回の実験は連続測定で、分析のためにかなり長めのタスクを 1 つ 1 つ抽出しており、全く同タイプのタスクの繰り返しもないので、GLM 統計処理にかけるには理想的な形ではない。しかし、上述のようにマッピング解析とは相補的な特徴があり、タスク間の類似性検証のためのヒントが得られるかもしれないので、試行としてこのツールを使ってみた。

GLM 統計ツールの設定は、有意水準 $p < 0.001$ 、多重検定の方法は Bonferroni、t 値はプラスのみとし、応答関数は Gaussian(正規分布)、タスク開始から最大値までの時間は 6 秒とした。ローパスフィルタのカットオフ周期はデータ長 (10 秒レスト、タスク、20 秒後レスト) の 2 倍、あとはタスク時間を入力した。検定の結果、実測値のトレンドグラフと理論カーブの関係が有意の場合、そのチャンネル画面が黄色になって出力される。今回は理論カーブとして Gaussian を使ったが、島津製作所の担当者の話しによると、fNIRS の実測値のモデル化はまだ確立していないとのことであった (FOIRE-3000 のマニュアルにも注記あり)。

結論としては、マッピング解析の場合と同様であるが、GLM 統計の検定結果は筆記テストの形式の違いが有意チャンネルの分布に明らかに関係していると強く示唆するものではなかった。しかし、有意チャンネルの分布がテスト形式別に比較的まとまっているデータもあった。その 1 名分の検定結果をマッピング図と並べて示し、FOIRE-3000 が提供する GLM 統計ツールの、本研究にとっての有効性について考察する。

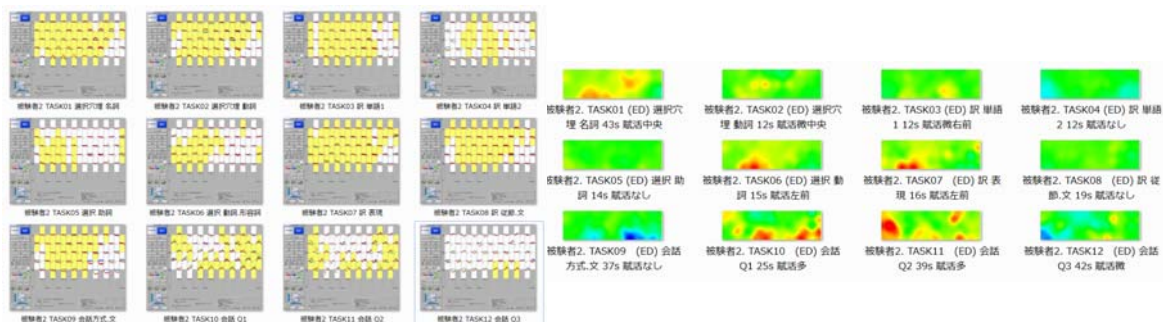


図 14 被験者 2 の GLM 統計検定結果とマッピング図一覧

上の図 14 の左側が、12 タスク別検定結果の画面の一覧である。対応する右側のマッピング図と同様、上段の左から TASK01 から 04、中段は TASK05 から 08、下段は TASK09 から 12 という順番で並んでいる。

被験者 2 の場合、右側のマッピング図ではテスト形式と賦活分布の相関を視覚的に認めることはできない。例えば、選択穴埋めの TASK01 と 02 では全く違う賦活分布を示している。他のペアやグループ、すなわち、単語レベルの訳 (TASK03/04)、選択 (TASK 05/06)、表現や従節レベルの訳 (TASK 07/08)、会話 (TASK10/11/12) でも同じで、ペア／グループ内で類似性は認められない。一方、左側の GLM 統計検定結果では、TASK01 と 02、03 と 04、05 と 06、07 と 08、そして 10 と 11 の間に類似性がありそうにも見える。これは科学としては第一段階の印象的把握でしかないが、分析方法の有効性検討で特に注目したいのは TASK05 と 06、そして 07 と 08 のペアである。右側のマッピング図では TASK05 と 08 はほとんど賦活していないが、左の GLM 統計の方は度合いの小さい賦活を捉え、TASK05 と 06 の間、そして 07 と 08 の間の類似性について視覚化していると言える。

マッピング図についてのまとめでも述べたが、マッピング図による視覚化は縦軸の設定に大きく影響を受ける。それに対し、GLM 統計の方は縦軸の増分に影響されないので、マッピング図では見逃してしまう類似性などの把握に有効かもしれない。例えば、賦活の度合いは極端に違うが、チャンネル毎にトレンドグラフが上下するパターンは似ている場合などである。

被験者 2 のデータでブローカー野に着目すると、彼は左利きで右脳にブローカー野があると考えられるが、マッピング解析の結果と同様、全ての言語タスクがブローカー野と強い相関があるとは言えない結果であった。被験者 2 の TASK03/08/12 では画面左のブローカー野相当部位の賦活推移が理想モデル曲線に対して有意になっていない。

本研究における GLM 統計ツールでの分析は試用であり、かなり無理があったと言わざるを得ない。しかし、タスク期間全体を見ること、そして、賦活の程度が低い場合にも注目するという視点は貴重なものと言える。FOIRE-3000 の GLM 統計ツールを本研究の目的のために使うには、様々な課題をクリアしなくてはならないが、その利用方法については今後も検討していきたい。

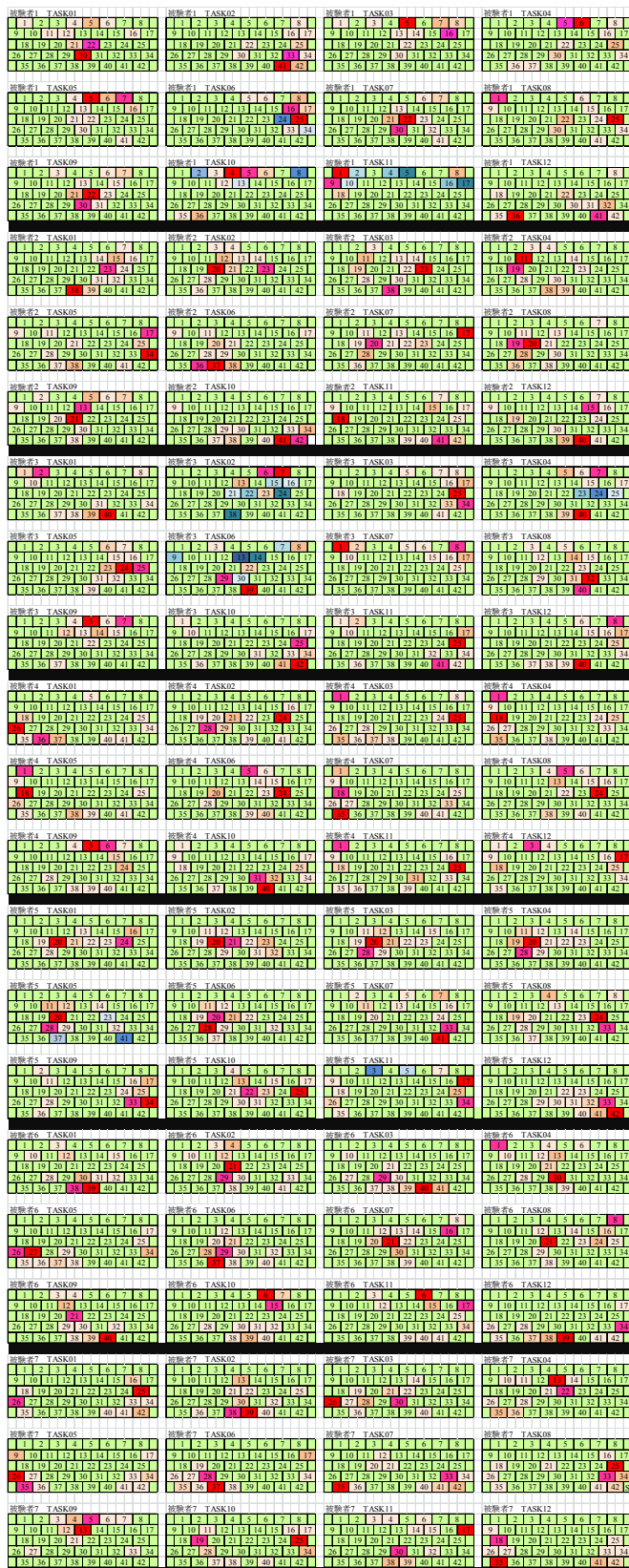
3.3 賦活度の順位評価

ここまで、マッピング解析と GLM 統計で実験結果を見てきた。マッピング解析は、あるタイミングでの脳の賦活状態を視覚的に捉えるものであり、GLM 統計の方は活性化状態の推移を理論グラフに照らし合わせて検定するものである。実験結果の全体像把握のため、もう 1 つのアプローチとしてそれぞれのタスク期間の fNIRS 値の総和(積算値)に注目した。データ処理としては、ベースラインデータ補正の後(スムージング補正なし)、タスク毎に抽出して Excel データに直し、前レスト 10 秒、後レスト 20 秒を除外し、それぞれの測定部位(チャンネル)毎の平均値を求め、チャンネル毎の順位を出した(但し、TASK12 は最後のタスクで後レストがないため、前レストのみ除外)。その後、平均値が大きいチャンネルの 10 位までをプローブホルダーのチャンネルレイアウトに合わせて示す図を作成した。

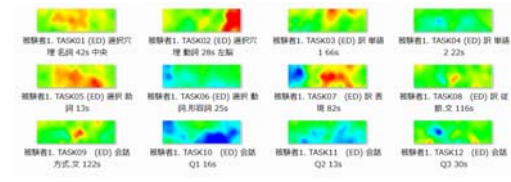
fNIRS データに対し統計処理を行うことに関しては、壇(2012)は、頭の部位によって光路長が異なるため、離れた位置にあるチャンネル間や隣接したチャンネル間でも比較はできないと指摘している。ただし、Katagiri *et al.* (2010)によると、左右半球の対応チャンネル間では統計的に顕著な光路長の差は認められていない。今回の分析は平均を使うだけであるが、部位別に光路長差を考慮するような対応はできていない。有意水準を設定して厳密に検定する分析と違い、視覚的な傾向の把握なので、ベースライン補正をただけの測定値で行った。測定部位ごとの光路長差の影響としては、測定値をそのまま色で視覚化するマッピング解析も同様だと考えられる。

次ページの図 15 に、全被験者/全タスクの賦活度平均順位マップと瞬間的な賦活度のマッピング図を並べて提示する。左が賦活度平均順位マップ、右が通常のマッピング図である。掲載上の都合のためかなり小さくて分かりづらいが、被験者内でのタスクの並びは前と同様、全て左からで、上段が TASK01 から 04 まで、中段が TASK05 から 08、下段が TASK09 から 12 までとなっている。左の賦活度平均順位マップでは、赤が賦活平均の 1 位のチャンネル、濃いピンクが 2 位、以下、茶系になっているが、濃い順に平均値が高かったチャンネルである(5 位以下は色の区別はできていない)。平均がマイナス値になっていたものは青系で示している。

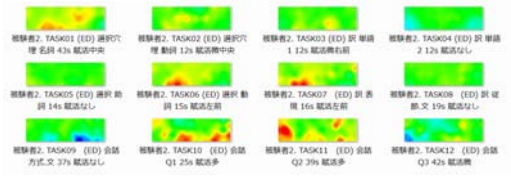
本研究の目的に対する現段階での結論としては、マッピング解析、そして GLM 統計での検証と同様であるが、タスク期間内で賦活度の平均を見ても、筆記テストの形式の違いが平均値順位の分布に明らかに関係しているとは言えない。しかし、マッピング図では見えなかった類似性が示唆されているデータもある。一番大きなグルーピングでの例は、被験者 5 の TASK01 から 06 までのグループと、TASK07 から 12 までのグループの対比だろう。前者のグループは選択穴埋めや訳形式で単語を問うタスクで、後者のグループは比較的長めの訳、会話式筆記テスト、そして会話タスクである。TASK01 から 06 までは、中央、または右脳側(画面左)に賦活平均値が高い部位が多かったが、TASK07 から 12 までは左脳側に平均値が高い部位が多くなっている。



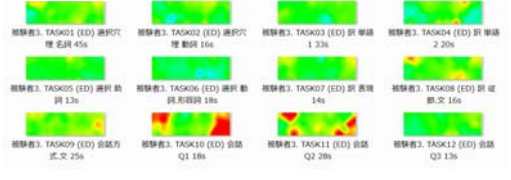
[被験者 1]



[被験者 2]



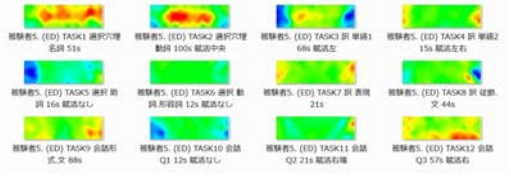
[被験者 3]



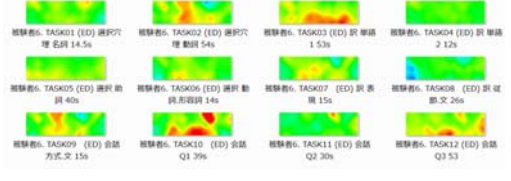
[被験者 4]



[被験者 5]



[被験者 6]



[被験者 7]



図 15 賦活度平均順位マップ(左)とマッピング図(右)一覧

図 15 を細かく見ると、被験者 5 の賦活平均では、単語レベルの訳である TASK03 と 04、選択式の TASK05 と 06、表現と従節レベルの訳の TASK07 と 08 がそれぞれかなりの類似性を示している。他の被験者については、被験者 6 の TASK07 と 08(表現と従節レベルの訳)、被験者 7 の TASK05 と 06(選択式)で、同種類のタスクにおいて類似性が認められる。

また、この賦活度平均マップからは、他にも今後の研究デザインのために有用なことがいくつか分かった。まず 1 点目は、マッピング解析の結果と同様だが、今回の言語タスクに対しては、ブローカー野が明らかに主たる機能を担っていると言えない場合があるということである。例えば、被験者 2 の会話タスク(TASK10/11/12)をみると、まず、TASK10 と 12 ではブローカー野のない左脳側が主として賦活している(彼は左利きで、ブローカー野は右脳側にあると考えられる)。TASK11 ではブローカー野近辺と思われる右脳部分のチャンネル 18 で賦活度平均値が高くなっているが、同時に左脳下部のチャンネル 41 近辺も平均が高いというように、両側賦活のパターンになっている。他の被験者で、同様に会話タスクで脳の両側で賦活度平均が高いのは、被験者 4 の TASK11/12、被験者 7 の TASK10 がある。中央と左脳部分に分かれているものとしては、被験者 5 の TASK10 や被験者 7 の TASK11 などがあげられる。他のタスクを見ても、ブローカー野は賦活度平均が高くない場合も多い(例えば、被験者 2 の TASK01/02/03/09 など)。

2 点目は、当然と言えば当然であるが、マッピング解析で見られる瞬間的に賦活度が高い部位と、賦活度平均マップで見られる平均値が高い部位は必ずしも一致しないということである。例えば、図 15 左の賦活度平均マップでみると、被験者 6 の TASK01 では前頭葉中央下部が高い値を示しているが、右のマッピング図でみると、瞬間的な賦活は左右上部の方が顕著である。もう 1 つ例をあげると、被験者 7 の TASK09 では、中央上部が高い平均値を示しているのに対し、瞬間的な賦活では中央上部はスポット的で、右脳側(画面左)の方が広く賦活していることが分かる。本研究の目的に対し、瞬間的に oxy-Hb が多くなった場合と平均的に多い場合について、どのように考えるべきかは今後の課題としたい。

以上が賦活平均順位マップでの考察である。繰り返しになるが、本研究で行っているマッピング図や賦活平均順位マップの検証は、あくまで実験結果の全体像や傾向を把握するためであって、その裏付けのためには統計的手法など、もっと厳格な分析が必要である。もちろん、本稿で指摘したイメージ的な類似性は偶然による可能性もある。また、本研究で検証を意図しているタスクはそれ自体がかなり複雑なタスクであるので、同じタスクに対して違う被験者の脳活動が同じにならないことが多いとも考えられる。

4. 結論

本研究は 3 年計画のプロジェクトのパイロットスタディという位置づけであるが、最終的には日本語学習者の脳活動が、各種筆記テスト時と日本語での会話時でどのように質的・量的に違うのか客観的に明らかにすることを研究目的としている。本稿では筆記テスト時と会

話時の脳活動の全体像・傾向を把握するために、(1) マッピング解析 (FOIRE-3000)、(2) GLM 統計 (FOIRE-3000)、(3) 賦活度順位評価という 3 つの分析を行った。最終目的に対する本稿の結論としては、今回の実験結果は各種筆記テスト時と会話時の脳賦活状態の間に特定のパターンや類似性を強く示唆するものではなかった。しかし、分析の結果、今後の研究デザインのために有用な知見も得られた。分析手法についての考察と今後の課題も含め、以下、このセクションでまとめる。

4.1 マッピング解析のまとめ

マッピング解析は視覚的に分かりやすいが、その色分けは縦軸の設定に大きく影響される。今回の分析では縦軸の最大値を $\pm 0.10\text{mM. mm}$ に設定したが、更に細かいスケールで見る必要があるかどうかは検討を要する。また、マッピング解析はある時点での脳賦活状態を示すだけなので、トレンドの分析と、タスク期間全体としての賦活を分析する必要もあると考えられる。以下、賦活部位の分布について分かったことを箇条書きでまとめる。

- [1] タスクのタイプは、大きく分けると、(1) 選択穴埋め問題 (TASK01/02)、(2) 訳問題 (TASK03/04、TASK07/08)、(3) 選択肢問題 (TASK05/06)、(4) 会話方式問題 (TASK09)、そして (5) 会話 (TASK10/11/12) の 5 タイプであったが、筆記テストの形式としては同形式でも、問題の内容によって脳賦活の部位と賦活の程度は異なっている。
- [2] 同様に、3 つの会話タスクでも被験者の日本語レベルと話す内容によって、脳の活性化は異なったパターンを示した。
- [3] 今回のタスクデザインでは、ブローカー野があると考えられる部位近辺だけが顕著に賦活、または、明らかにブローカー野近辺が主で他は従というような賦活パターンを示したケースは、被験者 1 の TASK02、被験者 2 の TASK11、被験者 3 の TASK09、被験者 5 の TASK07/09/11 と、全体の中では比較的少ない。
- [4] 賦活部位が特徴的に中央に寄るタスクと、左脳右脳両側に分かれるタスクが観察された。

4.2 GLM 統計分析のまとめ

FOIRE-3000 で提供している GLM 統計分析ツールはタスク期間全体のデータ推移を検証するものであり、マッピング解析とは相補的な特徴があると言える。今回の実験のタスクデザインは、できるだけ通常の筆記テストに近い形を採用したため、FOIRE-3000 で GLM 統計を行うのに適したデザインにはなっていなかったが、分析方法評価のために試行した。FOIRE-3000 の GLM 統計は縦軸の増分に影響されないため、マッピング図では見逃してしまう類似性などの把握に使える可能性がある。今後、有効に使っていくためには、GLM 統計を前提にしたタスクデザインを考えなくてはならないだろう。具体的には、同タイプの短いタスクを繰り返

し行うというブロックデザインを採用する必要がある。以下、賦活の推移について今回の GLM 統計で分かったことを箇条書きにする。

- [1] 有意チャンネルの分布がテスト形式別に比較的まとまっているデータもあった。被験者 2 のデータでは、TASK01 と 02、03 と 04、05 と 06、07 と 08、そして 10 と 11 の間に類似性の可能性があった。
- [2] ブローカー野については、被験者 2 の TASK03/08/12 などを見ると、ブローカー野相当部位の賦活推移が理想モデル曲線に対して有意になっておらず、今回のタスクについてはブローカー野と強い相関があるとは言えない結果であった。

4.3 賦活度順位評価のまとめ

賦活度順位評価は、タスク期間全体での賦活状態でデータを分析するために行ったものである。当然のことながら、ある時点の賦活状態を見るマッピング解析と、タスク期間中の平均値でデータを見る賦活度順位評価では、高賦活部位の分布は違う結果になった。この分析により今後の研究デザインのための有用な知見も得られたので、タスク期間中の賦活総和については今後も着目したい。ただし、今回のデータ処理には相当の手作業が必要であったので、実験の規模を大きくする場合は自動化の検討が必要である。今回の分析ではチャンネル毎の平均値でデータを見たが、全チャンネルの平均でタスク全体としての総和に着目する方法も考えられる。本稿ではそこまでの分析に至らなかった。得られた知見を、以下、箇条書きにする。

- [1] マッピング図では見えなかった類似性が示唆されているデータがあった。被験者 5 の TASK01 から 06 までのグループ(単語レベル)と、TASK07 から 12 までのグループ(文レベル)の対比で、前者は、中央、または右脳側に賦活平均値が高い部位が多かったが、後者では左脳側に平均値が高い部位が多くなっていた。
- [2] 被験者 5 の賦活平均では、単語レベルの訳である TASK03 と 04、選択式の TASK05 と 06、表現と従節レベルの訳の TASK07 と 08 にそれぞれかなりの類似性が認められた。被験者 6 の TASK07 と 08(表現と従節レベルの訳)、被験者 7 の TASK05 と 06(選択式)でも、同種類のタスクにおいて類似性が認められた。
- [3] 賦活度の平均値を見ても、今回のタスクについてはブローカー野が明らかに主たる機能を担っていると言えない場合が多かった。

4.4 今後の課題

今回の実験ではタスクをできるだけ実際の筆記テストに近い形にしたため、脳活動も複雑になったと考えられる。タスクが長くなると疲労などの要素も入ってくる。その実際のテスト時の脳活動が研究のテーマであるが、どのように単純化とのバランスを取るかが重要であ

ることが再確認できた。1つの実験デザインの方向性としては、単語の訳や選択肢問題など、比較的簡単な形式をブロックデザインで繰り返すことが考えられる。同じ被験者で、今回のように実際の状況に近いタスクと脳実験のために単純化したタスクを一度にできるとよいのだが、今回の実験だけでも全部で30分かかっており、これ以上長くすることは望ましくない。検証する筆記テスト形式に優先順位をつける必要がある。

被験者の人数と属性も、継続的な課題である。属性を揃えて人数を増やすのも1つの方向性だが、筆記テストの形式別の脳活動比較という目的のためには、同じ被験者に様々なデザインのタスクで実験を行った方が個人差の要因を少なくできるとも考えられる。今回はそれぞれの被験者で1回のみの実験であったが、同じ被験者に対し数日に渡って複数回の実験を行うことも考えたい。今回の実験と同じタスク、同様の属性の被験者での追実験も有用である。今回は脳実験のデータのみを分析したが、筆記テストタスクや会話を行った際の内省データも有用な情報になる可能性がある。

分析方法については、今回は脳活動の傾向把握を目的とした3つの方法を取ったが、今後は観察結果を裏付け一般化につながる分析方法を考えなくてはならない。本稿の総論的な結論としては、今回の実験結果は特定のパターンや類似性を強く示唆するものではないと述べたが、前の3セクションでもまとめたように、類似性や特定のパターンを示唆するものもあった。より客観的な検証を行うためには、統計の分散分析やクラスター分析を使うことも考えられるが、Katagiri *et al.* (2010)や壇 (2012)が指摘する脳部位による光路長の違いの影響は考慮する必要があるだろう。本稿については、パイロットスタディの初期レポートという位置づけとしたが、今後、今回の実験データに対して統計解析を試みる。

また、今回のタスクに関して言えば、ブローカー野を比較対象部位とする必然性について強い確証は得られなかったが、ウィルニッケ野や角回なども含めて測定し、比較対象部位を検討する必要がある。fNIRSの特性として空間分解能(脳部位の特定)が特に優れたものではないことを考慮すると、数カ所のデータを平均化して分析するなどの先行研究の手法は妥当だと考えられる(Yanagisawa *et al.* 2010; Taura and Nasu 2012など)。その場合も光路長差を考慮して左右対応領域とするのが望ましいと考えられる。

実験計画だけでなく、今回のデータの解釈や扱い方についても課題が残った。マッピング解析で見られたように、初級学習者のマッピング図では測定値がマイナス(oxy-Hbが減少)の部位の分布が特徴的だった。今回は連続測定であり、同一被験者の全種類のタスクで極端にマイナス部位の分布が出た訳ではないので、全く測定を誤ったとも考えにくい。被験者の属性によるものかどうか、検証が必要である。

また、賦活度順位の比較ではタスク期間中のoxy-Hbの総和に着目したが、本研究の目的に対し、瞬間的にoxy-Hbが多くなった場合と総量として多い場合についてどのように考えるべきかは、実験を重ね、瞬間値と総和のそれぞれを使った分析結果を比較検証して考察していく必要がある。

以上、このセクションではタスクデザイン、データ収集方法、データ分析について今後の

課題をまとめたが、fNIRS を使った研究手法は既に確立されているというよりも日進月歩の状態、筆者の先行研究調査も充分ではない。次の実験デザインのためには、更に広く先行研究を調べる必要がある。

予見されたことではあるが、今回の実験では研究テーマの複雑さがより具体的に明らかになったと言える。それに伴い、今後の課題を具体的にまとめることができた。3年計画のプロジェクトは、日本語学習者の脳活動が各種筆記テスト時と日本語での会話時でどのように質的・量的に違うのか明らかにすることを最終的な研究目的としているが、その1年目が終わった段階である。実験目的を細分化し、それに合わせてタスクデザインと実験スケジュールを組むことができれば理想的だが、現実的にはfNIRS機のレンタルと被験者集めが大きな支配要因となる(fNIRSのレンタルは1年に数日から1週間程度)。貴重な実験の機会を活かせるよう、本稿でまとめた課題を反映し、2年目の研究を進めていきたい。

注

1. 本研究は、科学研究補助金（挑戦的萌芽(H23~H25)、研究代表者：平田裕、課題番号：24652108)「形式別、筆記テスト時と会話時の脳活動の近似性の比較検証」の助成を受けて行っている。
2. 乳幼児を対象とした実験にも適した手法として使われている(桐谷・林 2007)。
3. 同機能で医療機器としての承認を受けている OMM-3000 は、ビデオカメラなどの周辺機器は一切接続できない。
4. 本稿の範囲外のトピックであるが、媒介語を単語/表現/文のテスト問題に使用する場合は、直訳としてではなく、学習者にうまく直訳できない単語/表現がたくさんあることを伝え、媒介語が表すものは、あくまで「伝えたい意味・内容の目安、内容と意図を説明するもの」という前提にした方がよいだろう。
5. 実際の休憩タスクはタスクの前後に30秒ずつとっているが、嶋津製作所の担当者に相談したところ、統計ツールのGLM統計分析のためには前後各10秒と20秒ほどでよいというアドバイスであった。
6. 正確にいうと、このGLM統計の検定に関わるのは反応のタイミングだけであり、その振幅は検定には関わらない。

参考文献

- 大石晴美(2001)「インプットからインテイクへの言語情報処理過程—言語の脳科学的視点より英語教育への応用—」『ことばの科学』第14号, 321-340.
- 大石晴美(2002)「リスニングとリーディングにおける言語情報処理過程を探る—光トポグラフィにおける脳科学的解明に向けて—」『金城学院大学論集 英米文学編』第43号, 25-47. (英語学論説資料第36号収録)
- 大石晴美(2006)『脳科学からの第2言語習得論』昭和堂
- 大友賢二(監修)・中村洋一(著)(2002)『テストで言語能力は測れるか』桐原書店
- 大堀裕一・田中美里・廣安知之・横内久猛(2011)「fMRI (functional Magnetic

- Resonance Imaging)」同志社大学 IS Report (研究レポート公開システム) <http://www.is.doshisha.ac.jp/isreport/entry/1552> (2013年02月14日ダウンロード)
- 桐谷滋・林良子(2007)「脳機能イメージング」河野守夫ほか『ことばと認知のしくみ』第2章 三省堂, 104-115.
- 近藤ブラウン妃美(2012)『日本語教師のための評価入門』くろしお出版
- 坂井建雄・久光正(2011)『ぜんぶわかる脳事典』成美堂出版
- 嶋津製作所(2012)「LABNIRS (ラボニルス) 原理と仕組み」
<http://www.an.shimadzu.co.jp/bio/nirs/nirs2.htm> (2013年02月20日最終参照)
- 田村守(2002)「光を用いた脳機能イメージング(1)」『臨床脳波』44, 389-397.
- 壇一平太(2012)「統計解析総論」酒谷薫(監)『NIRS -基礎と臨床-』新興医学出版, 49-54.
- 廣安知之・三木光範・横内久猛・田辺竜也(2010)「光トポグラフィ(NIRS)の基礎」同志社大学 IS Report (研究レポート公開システム)
<http://www.is.doshisha.ac.jp/isreport/entry/1552> (2013年02月16日ダウンロード)
- 福田正人(2009)『精神疾患とNIRS—光トポグラフィ検査による脳機能イメージング』中山書店
- 福長一義・大貫雅也・福井裕輝・舟久保昭夫・福井康裕・中島章夫・嶋津秀昭・石山陽事・大瀧純一(2011)「NIRSを用いたニューロフィードバックシステムの開発」『杏林医会誌』42巻1号, 2-11.
- 牧野成一・鎌田修・山内博之・斉藤真理子・荻原稚佳子・伊藤とく美・池崎美代子・中島和子(2001)『ACTFL OPI 入門』アルク
- 山鳥重(1998)『ヒトはなぜことばを使えるか—脳と心のふしぎ』講談社
- 山本徹(2007)「デオキシヘモグロビンとfMRI信号の多様な関係」『脈管学』47, 5-10.
- Bachman, L. F. (1990). *Fundamental considerations in language testing*. Oxford: Oxford University Press.
- Bachman, L. F. and Palmer, A. S. (1996). *Language testing in practice*. Oxford: Oxford University Press.
- Bachman, L. F. and Savignon, S. J. (1986). The evaluation of communicative language proficiency: A critique of the ACTFL oral interview. *The Modern Language Journal*, 70 (4), 380-390.
- Brown, A. (2005). *Interviewer Variability in Oral Proficiency Interviews*. New York: Peter Lang Publishing.
- Gui X., Qi D., Zhen J., and Chuansheng C. (2004). Mapping of verbal working memory in nonfluent Chinese-English bilinguals with functional MRI. *NeuroImage*, 22, 1-10.

- Herrmann, M. J., Ehlis, A.-C., and Fallgatter, A. J. (2003). Frontal activation during a verbal-fluency task as measured by near-infrared spectroscopy. *Brain Research Bulletin*, vol. 61, issue 1, 51-56.
- Hatta, T., Kanari, A., Mase, M., Nagano, Y., Shirataki, T. and Hibino, S. (2009). Strategy effects on word searching in Japanese letter fluency tests. evidence from the NIRS findings. *Reading and Writing*, 22, 1041-1052.
- Hughes, A. (2002). *Testing for Language Teachers. Second edition*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Just, M. A., Carpenter, P. A., Keller, T. A., Eddy, W. F., and Thulborn, K. R. (1996). Brain Activation Modulated by Sentence Comprehension. *Science*, 274, 5284, 114-116.
- Kamayama, M., Fukuda, M., Uehara, T., and Mikuni, M. (2004). Sex and age dependencies of cerebral blood volume changes during cognitive activation: A multichannel near-infrared spectroscopy study. *Neuroimage*, 22, 4. 1715-1721.
- Katagiri, A., Dan, I., Tsuzuki, D., Okamoto, M., Yokose, N., Igarashi, K., Hoshino, T., Fujiwara, T., Katayama, Y., Yamaguchi, Y., and Sakatani, K. (2010). Mapping of optical pathlength of human adult head at multi-wavelengths in near infrared spectroscopy. *Adv Exp Med Biol*, 662, 205-212.
- Kubota, Y., Toichi, M., Shimizu, M., Mason, R. A., Coconcea, C. M., Findiling, R. L., Yamamoto, K., and Calabrese, J. R. (2005). Prefrontal activation during verbal fluency tests in schizophrenia – a near-infrared spectroscopy (NIRS) study. *Schizophrenia Research*, 77, 65-73.
- Malonek, D., Dirnagl, U., Lindauer, U., Yamada, K., Kanno, I., and Grinvald, A., (1997). Vascular imprints of neuronal activity: Relationships between the dynamics of cortical blood flow, oxygenation, and volume changes following sensory stimulation. *Proceedings of Natural Science Academy of the United States of America*, vol. 94, no.26. 14826-14831.
- Quaresima, V., Ferrari, M., van der Sluijs, M. C. P., Menssen, J., and Colier, W. N. J. M. (2002). Lateral frontal cortex oxygenation changes during translation and language switching revealed by non-invasive near-infrared multi-point measurements. *Brain Research Bulletin* 59, No.3, 235-243.
- Scherer, L. C., Giroux, F., Lesage, F., Senhadji, N., Benali, H., and Ansaldo, A. (2006). An optical imaging study of semantic and syntactic processing by bilinguals. *Brain and Language* 99(1-2), 185-186.
- Strangman, G., Culver, J. P., Thompson, J. H., Boas, D. A. (2002a). A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *Neuroimage*, 17, 719-731.
- Strangman, G., Boas, D. A., and Sutton, J. P. (2002b). Non-invasive neuroimaing with near-infrared

light. *Biological Psychiatry*, 52, 679-693.

Taura, H. and Nasu, A. (2012). The effects of onset-age and exposure duration on the L2 as observed in brain activation: an fNIRS study. *Studies in Language Science*, 2, 19-42. Ritsumeikan University.

Taura, H. and Nakanan, M. (2013). Bilingual First Language Attrition from Linguistic and Neuroimaging Perspectives: A functional near-infrared spectroscopy (fNIRS) study. *Studies in Language Science*, 3, 17-41. Ritsumeikan University.

Toronov, V. Y., Zhang, X., and Webb, A. G. (2007). A spatial and temporal comparison of hemodynamic signals measured using optical and functional magnetic resonance imaging during activation in the human primary visual cortex. *Neuroimage*, 34, 1136-1148.