T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	バイリンガルにおける脳内の言語切替に関する神経言語学的研究
Title(English)	
著者(和文)	ライビョウビ
Author(English)	Miaomei Lei
出典(和文)	学位:博士（学術）, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9909号, 授与年月日:2015年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:赤間　啓之,中川　正宣,中山　実,脇田　建,山元　啓史
Citation(English)	Degree:, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9909号, Conferred date:2015/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

博士論文

バイリンガルにおける脳内の言語切替に関する神経言語学的研究

平成 27 年 2 月

東京工業大学

大学院社会理工学研究科

人間行動システム専攻

指導教員：赤間啓之　准教授

雷淼媚

目次

第 1 章　緒論 1
1.1　研究の背景 1
1.2　本研究の目的 5
1.3　本論文の構成 6
第 2 章　先行研究 11
2.1　バイリンガリズム 11
2.1.1　言語の切替 11
2.1.2　バイリンガルにおける言語切替の神経基盤 13
2.1.3　バイリンガルにおける認知モデル 19
2.2　言語の神経基盤 24
2.3　意味カテゴリーの神経基盤 30
第 3 章　本研究の位置づけと実験のまとめ 36
3.1　本研究の位置づけ 36
3.2　実験のまとめ 38
第 4 章　fMRI 実験：意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析 43
4.1　はじめに 43
4.1.1　背景 43
4.1.2　目的 46
4.2　fMRI 実験 1 46
4.2.1　実験の概要 46
4.2.2　実験参加者 47
4.2.3　実験刺激 48
4.2.4　実験デザイン 50
4.2.5　fMRI データの収集 53
4.2.6　本実験のデータ解析 53
4.3　結果及び考察 55
4.3.1　GLM の結果及び考察 55
4.3.2　MVPA の結果及び考察 60
4.3.3　GLM と MVPA 両方法の考察 65
4.4　まとめ 67
第 5 章　fMRI 実験：ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応 69

5.1　はじめに 69
5.1.1　背景 69
5.1.2　目的 70
5.2　fMRI 実験 2 70
5.2.1　実験の概要 70
5.2.2　実験デザイン 71
5.2.3　本実験のデータ解析 72
5.3　結果及び考察 73
5.3.1　GLM の結果及び考察 73
5.3.2　MVPA の結果及び考察 80
5.3.3　Searchlight 法の結果及び考察 81
5.4　まとめ 87
第 6 章　fMRI 実験：翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制の相違 89
6.1　はじめに 89
6.1.1　背景 89
6.1.2　目的 90
6.2　fMRI 実験 3 91
6.2.1　実験の概要 91
6.2.2　実験デザイン 92
6.2.3　本実験のデータ解析 94
6.3　結果及び考察 95
6.3.1　GLM の結果 95
6.3.2　MVPA の結果及び考察 99
6.3.3　Searchlight 法の結果 101
6.3.4　GLM 及び Searchlight の結果の考察 103
6.4　まとめ 108
第 7 章　総括及び今後の展望 110
7.1　総括 110
7.2　今後の展望 114
参考文献 116
付録 1　バイリンガル脳研究の方法と革新 129
1.1　GLM：一般線形モデル 129
1.2　多変量パターン解析 135
1.2.1　MVPA 135
1.2.2　Searchlight 141
付録 2　実験用刺激画像 143

付録 3　実験タスクの説明 150
謝辞 158
本研究に関わる業績報告 160

第 1 章　緒論

1.1　研究の背景

Words are some of the most powerful and important things I know....Language is the tool of love and the weapon of hatred. It's the bright red warning flag of danger– and the stone foundation of diplomacy and peace.

——　Ludwig Wittgenstein

言語とはあたかも空気のような存在であり、言語なしでは一時もこの世で支障なく生きることはできない。言語を扱えるという、人間のみが持つ天賦の能力は、非常に複雑な認知処理に裏打ちされており、それは高次なレベルの脳機能として捉えられる。言語処理とは①音声（文字）処理→②単語処理→③文処理（統語処理）→④意味処理→⑤文脈処理というプロセスであり、情報発信者の意図を理解することに繋がっている。ただし、言語能力と言っても一元的には定義できず、多種多様であると言える。相手の話した言葉を復唱する場合には、即座に音声を分析し、発声に必要な音素系列に変換し、運動器官を適切に制御しなければならない。対象の名前を命名する場合には、視覚のパターン認知がなされた後、名前の情報に変換し、それを音素系列に変換して発生系に伝える。さらに文字や単語の読み上げ機能も挙げられる。文を聞いて理解する過程も、正しく発話する機能も分析の対象となる。言うまでもなく、これらの諸過程の脳内メカニズムを解明することはひとつの科学として重要な意味を持つ。言語機能を明らかにすることは脳全体の機能を明らかにすることであると言って過言ではない。

人間は障害なく生まれれば、ほぼ例外なく少なくとも一つの言語を扱えるように成長する。しかしながら、グローバル化が進む現在、単一の言語（母語）だけでは、国際社会の要求に応えることができない。異なる言語間や国の間でよりよくコミュニケーションできるためには、後天的に第二言語を習得しなければならない。第二言語習得の最も理想的な仕方は母語のように自然に身につけることである。脳内に二つ以上の言語を、比ゆ的に言えば「住まわせる」ことである。今まで、二つの言語はどのような形で脳内で処理されているのか、言語学や心理学など様々な方面からアプローチされてきたが、脳科学の観点からまだ解明していない課題が多い。

言語と脳を関連づけた最初の発見は、有名なブローカとウェルニッケによるものである。19 世紀の外科医ポール・ブローカ（Paul Broca）は、脳卒中になった病人を治療した時、言語と関連する脳部位を発見した。その病人は言語を理解することができるが、tan という単語しか話せなかった。例えば、「誰ですか」という質問に対して「Tan, tan, tan, …… 」としか答えられない。死後明らかになったこの患者の脳損傷は、左下前頭回を中心としており、この領域をブローカは発話に関連する運動性言語中枢であるとした。この領域は現在ブローカ野と呼ばれている（図 1-1）。ブローカ野の分類や機能に関しては、現在も様々な議論が存在する（Boeckx et al.2014）。一方、脳外科医で神経学者のカール・ウェルニッケ（Carl Wernicke）が 1874 年に報告した失語症例では、ブローカの症例とは対照的に流暢な発話は行われるものの、言語理解に障害が見られた。脳損傷は左の上側頭回から中側頭回、角回（angular gyri）、縁上回（supramarginal gyri）にかけての領域を中心としており、特に上側頭回（superior temporal gyrus）をウェルニッケは言語理解に関連する感覚性言語中枢とした。現在、左上側頭回の特に後部がウェルニッケ野と呼ばれている。

このようにして、ブローカ野とウェルニッケ野は言語機能に関連する古典的な脳領域として記憶に留められ、現在も様々な脳研究で参照されている。

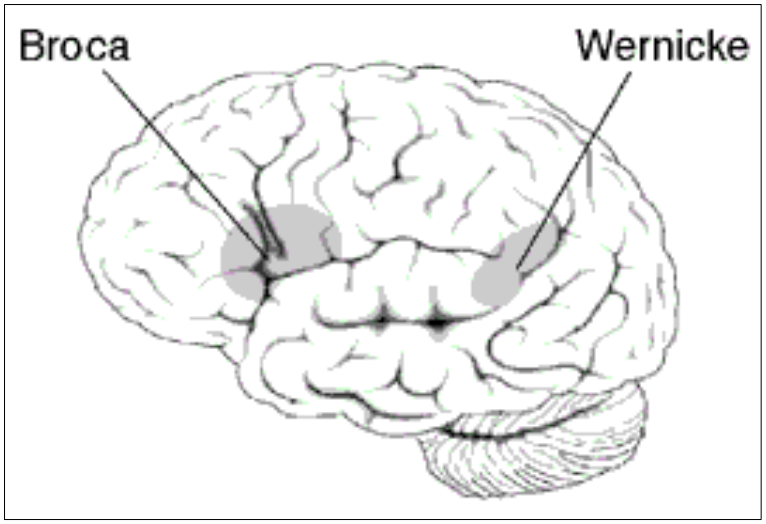


図 1-1：ブローカ野とウェルニッケ野（出典：www.wikipedia.org）

20 世紀後半に入り、PET(positron emission tomography 、陽電子放出断層撮影)、fMRI(functional magnetic resonance imaging、機能的磁気共鳴画像法)、NIRS(near-infrared spectroscopy、近赤外光脳機能イメージング)などの脳機能画像法が開発されたことによって、言語行動などの高次なレベルの脳機能を解明することが可能になった。特に fMRI は主に認知的な活動による脳の血流動態の変化を水素原子からの信号によって捉える仕組みである。fMRI のデータは時系列的に展開する 3 次元画像の形を取り、そのデータの基本単位は、ヴォクセル(voxel)、すなわち 3 次元の厚みをもった画素である。その画像がもつ値として、強度(輝度)が賦活値として扱われる。fMRI の大々的な普及は、人間の脳の活動の詳細な可視化、特に言語機能の解明を可能にしたと言える。

脳言語学(神経言語学)に話を絞ると、これまで同一言語に関する脳科学の研究は盛んに行われてきた。例えば、表意文字のみからなる中国語が使われる際、

脳の後頭葉に賦活が見られるが、表意文字の韓国語は逆に前頭葉を賦活することが知られている（Tan et al.2000;Yoon et al.2005）。ただしこれら二つの言語を話せるバイリンガル(両言語併用者)がどのようにこの二つの言語を同時処理しているのか、脳内の同一特定の部位で言語を切替えているのか、あるいは、同一の脳に対して、異なるタイプの言語はどのような個別の影響を及ぼしているのか、言語学習によって脳はいかなる可塑性を示すのかなど、解明すべき様々な問題が現状ではまだ残されている。

ここで、fMRI 研究の方法論について簡単にまとめておく。fMRI を用いて伝統的な脳データを分析する方法としては、一般線形モデル general linear model、GLM(以下 GLM と略する)が広く利用されている。これは、着目する実験条件のデータに関し、他の対照をなす実験条件との差分を t 検定あるいは f 検定により評価することで、相対的に大きな賦活を示す脳の領域を検出する方法である。このような形で特定化された脳の領域は、実験条件を担う場所であると判断されることになる(Friston et al. 1995; Friston et al.1996)。こうした解析法はひとつのヴォクセル(voxels) のもつ賦活値(輝度)を他のヴォクセル(voxel)と比較する際に統計的仮説検定を用いるので、単変量分析(univariate analysis)と呼ばれることもある。

一方、近年ヴォクセル(voxels) のもつ賦活値(輝度)を統計的に 1 個ずつ評価するのではなく、それらをまとめて賦活パターンとして分類する多変量パターン解析も行われるようになった。すなわち、機械学習のアルゴリズムを脳データに応用することであり、これは多変量(多ヴォクセル)パターン分析(Multi-voxel あるいは Multi-variate pattern analysis、略して MVPA)と呼ばれている(Haxby et al., 2001;Cox et al., 2003; Davatzikos et al., 2005; Haynes et al., 2006; Kamitani et al., 2005; LaConte et al., 2005; Mitchell

et al., 2004; Mourão-Miranda et al., 2012; Norman et al., 2006; O'Toole et al., 2007; Pereira et al., 2009; Mur et al., 2009; Weil et al., 2010)。MVPA は機械学習の方法として、一定の感度を示すヴォクセルを素性(features)として選択し、それらに対して分類モデルを計算した上で交差評価(cross-validation)によりそのモデルの予測精度を見るものである。また、多変量パターン解析には、ひとつの脳に対しひとつの機械学習モデルとその精度を計算する方法に加え、Searchlight 法といって、それぞれのヴォクセル単位で別々に機械学習を行い、ヴォクセルの強度(賦活値)の替わりに分類の精度を入れて脳地図を描く方法がある。（方法論について具体的な内容は付録で詳しく述べる。）この多変量パターン分析は今までの脳研究に新たな視点をもたらし、脳科学の方法論を拡大する上で大きな貢献をしているが、単変量分析と多変量パターン分析を併用した研究はまだ少ない。本研究はオリジナルな試みとして、この二つの解析方法を有効に統合して、結果を考察する。

1.2 本研究の目的

脳画像撮影の技術が近年大きく発展したことにより、脳の機能に関する様々な発見がもたらされてきたが、人間が二つ以上の言語をどのように脳内で切替えて言語処理を行っているのかについては、まだ解明されていない部分が多い。この問題が解明されれば、人間は脳機能への理解が深められるだけでなく、第二言語の習得に効果的な方法論を開発できる可能性がある。

また、伝統的な単変量分析である一般線形モデル(GLM)により、言語処理を行う脳データを解析するばかりだけでなく、多変量パターン分析(MVPA)という比較的新しい脳データの解析方法により、言語切替の脳機制の研究に挑戦しつつ、

その両者の結果の共通点、相違点を明らかにする。このような包括的・統合的分析により、新たな視点による脳言語学の議論の可能性を示唆する。

ここで、本研究のオリジナリティを三つの方面から示す。まず、1)fMRI 研究で重要な解析手法である単変量分析と多変量パターン分析を、バイリンガル研究という神経言語学の具体的な分野で初めて併用し、その結果を統合した最初の試みであるということである。2) 次に、fMRI 実験の場において、バイリンガル話者にとって従来の実験よりはるかに現実的な言語切替場面を再現したことが挙げられる。本研究ではリアルタイム翻訳を伴う、伴わないという二種類の実験タスクを言語切替の場面に採用したが、我々の知る限り、こうした複雑な実験タスクを採用した研究はまだ存在しない。3)さらに、アジアの言語である中国語、韓国語、日本語のバイリンガルを、その言語運用能力を考慮しながらfMRI 研究に採用したことである。今までは、英語やドイツ語など欧米圏のバイリンガル言語を対象とした fMRI 実験が主流であったが、アジアの言語に関するバイリンガル fMRI 研究は非常に少なく、本研究により、アジア言語を対象とした神経言語学の新たな知見がもたらされることを期待している。

要するに、本研究の目的は従来の一般線形モデルと多変量パターン分析により、言語切替がどのように脳内で処理されているのかを明らかにし、言語切替の神経基盤にさらに深く迫ってゆくことである。

1.3 本論文の構成

本論文の構成は、次の通りである。

第 2 章は、「先行研究」と題し、本研究の理論的な基礎である先行研究について説明する。まず、バイリンガリズムについて、言語の切替、バイリンガル

における言語切替の神経基盤とバイリンガルにおける認知モデルの三つの観点から概説する。また、それぞれの言語に特有な賦活領域として、単一言語の神経基盤を明らかにする。さらに、言葉は意味を運ぶ道具(媒体)であり、言葉の意味はその類似性によってひとつのカテゴリーとして分類できるので、バイリンガリズムと意味カテゴリーについて、神経基盤上で両者の関係についてアプローチする。本研究では特に、神経基盤が対照的に異なることが先行研究(Chao et al.(1999)；Martin et al. (1996)；Pulvermüller et al. (2005)； Akama et al. (2012)) より明らかな、「動物」と「道具」という、二つの意味カテゴリーを典型として取り上げ、神経言語学の議論を展開する。最後に言語切替の神経基盤を明らかにするという目標に対して、解決すべき課題をいくつか列挙、検討する。

第 3 章は、「本研究の位置づけと実験のまとめ」と題し、本研究の位置づけを示し、第 4~6 章で詳述する三つの fMRI 実験を紹介し、その位置づけを提示する。

第 4 章は「意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析」と題し、本研究で行った fMRI 実験のデザイン、方法、データ取得法、データ解析について論じる。第 4 章の実験では、14 人のバイリンガル（韓国語 - 中国語早期バイリンガル 7 人と中国語-日本語後期バイリンガル 7 人）を実験参加者に、意味カテゴリーとして「動物」と「道具」を表す写真とキャプションを刺激素材に取り上げ、それぞれの単語が表す概念についてその典型的な属性を想起させる連想タスクを課している。ここで韓国語 - はその通常のタスクに対し、従来は試みられていないような、言語切替の要素を入れ、バイリンガルの能力を明らかにするようなタスクにしている。実験は 2 セッションに分かれ、1 セッションを通じて、同一の刺激言語 A が呈示されて思考言語 B でタスクを行い、別のセッションでは

言語 A,B の役割を変更する。このようにして言語切替タスクが関与した時、MVPA を用いて意味カテゴリー分類が成功するかどうか、有意なモデルを構築できるかどうかと言う観点から実験を報告する。

第 5 章は「ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応」と題し、第 4 章で得られた知見を踏まえ、5 人の韓国語 - 中国語早期バイリンガルを対象として行った、言語切替つきの属性想起タスク実験に関して論じる。第 4 章の実験では、同一セッションの内部では同一の刺激言語を用いるのに対し、第 5 章の実験では、同一のセッション内で刺激言語:韓国語 - >思考言語:中国語、刺激言語:中国語 - >思考言語:韓国語というように、ランダムで複雑かつ素早い言語切替を行うという、きわめて難度の高い要素も加味した意味処理タスクになっている。さらに MVPA を駆使して、意味カテゴリーの分類のみならず、言語そのもの分類ができるかどうかを調べる。同時に、Searchlight 法の解析結果をもとに、言語切替の上で、実行調節(executive control)上重要な脳領域を抽出する。

第 6 章は「翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制の相違」と題し、第 3 章と第 4 章をさらに発展させ、8 人の韓国語 - 中国語早期バイリンガルを実験参加者として行った実験について述べている。第 4 章、第 5 章では、刺激素材において意味想起のしやすい対象物の写真も加えていたのに対し、第 6 章の実験では、視覚刺激を言語固有のものに絞り込むため、単語の綴りのみを刺激提示とする言語切替入りの連想タスク実験を行っている。また、この実験では、同一セッション内で刺激の言語はランダムに異なるものが呈示されるが、セッションによって、刺激言語と同じ言語を用いて連想タスクを行う条件と、刺激言語と異なる言語を用いて翻訳の関与した連想タスクを行う条件の 2 セッションを設定している。これはバイリンガル言語切替の様々なモードを検討することによって、バイリンガル脳の機制を細かく検討するためである。方法論的には

従来の GLM と最近の MVPA による分析を比較・統合することによって、総合的な考察により、言語切替の神経基盤を解明する。

第 7 章では、本研究の総括および今後の展望を示す。

本論文の構成を次のページに示す。

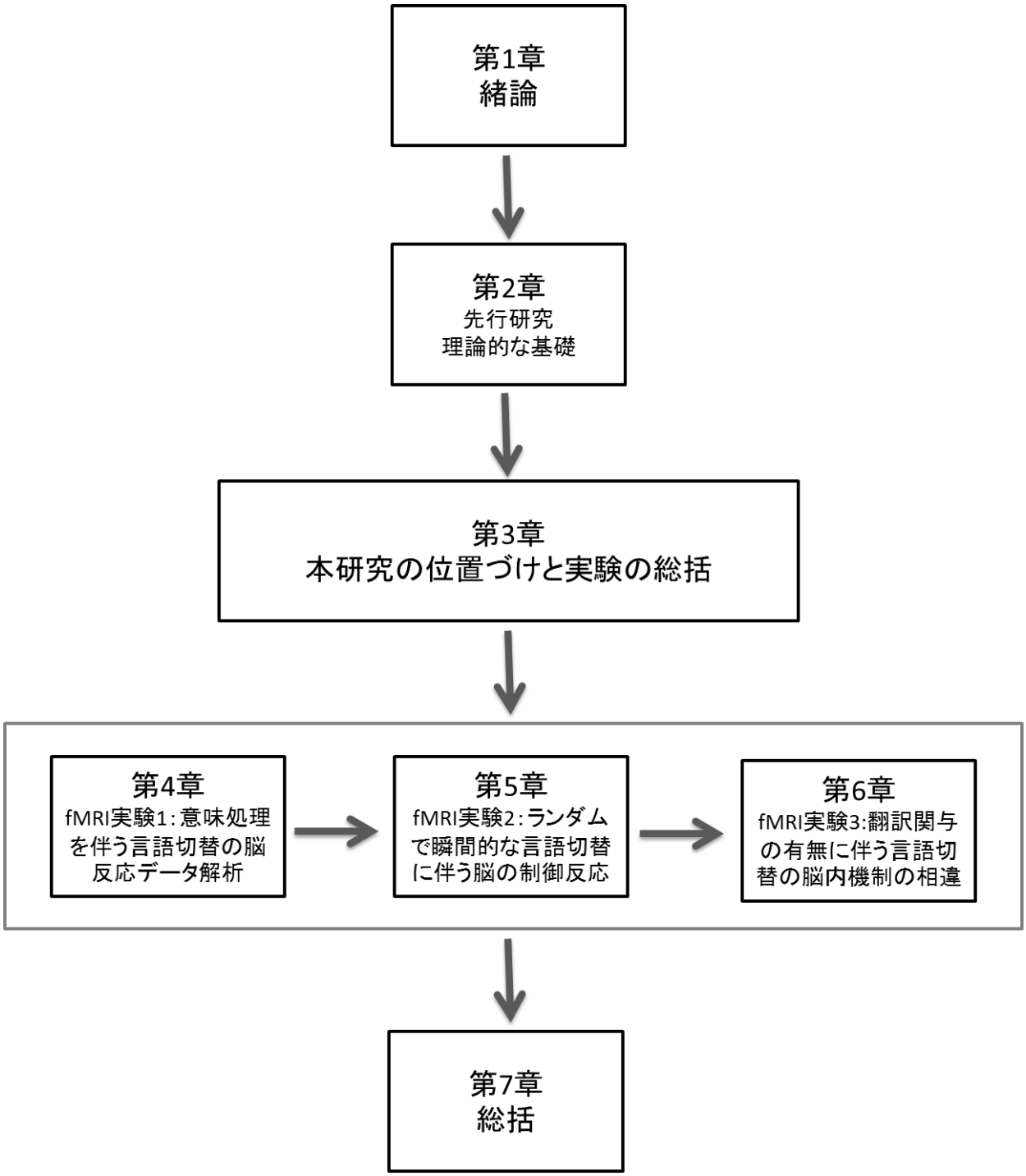

第1章
緒論
第2章
先行研究
理論的な基礎
第3章
本研究の位置づけと実験の総括
第4章
fMRI実験1：意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析
第5章
fMRI実験2：ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応
第6章
fMRI実験3:翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制の相違
第7章
総括

図 1-2:　本論文の構成

第 2 章　先行研究

2.1　バイリンガリズム

2.1.1　言語の切替

この節では、言語切替の定義とタスクについて説明する。

バイリンガルとは日常生活で自由にかつ効果的に二つの言語を使いこなせる人のことを指す。バイリンガル能力の測定については、いくつかの方面から指標が提起されてきた。例えば、二つの言語の習熟度、使用精度、使用文脈、モチベーションの度合い、または両言語の構造の距離などである。特に、習得年齢により、バイリンガルは二つのグループに分けることができると言われている(Paradis, 2003)。一つは早期バイリンガルで、もう一つは後期バイリンガルである。早期バイリンガルは乳幼児の頃から二つの言語を同時に習得した人のことを指す。一方、後期バイリンガルは 7 歳以降、第二言語として母国語以外もう一つの言語を習得した人のことである。

人間固有の生得的な言語能力のみならず、さらに二つの言語間での切替えることのできる能力は、昔から言語の研究者の関心を集めてきた。すなわち、人間はいかにして脳内で二つの言語を処理し、切替を行っているのか、この問題が完全に解明できた暁には、われわれは言語と脳についての深く根源的に理解し得たとして、遅い年齢からでも効率的に第二言語を学習する方法を見出すことができると期待される。緒論で既に述べたように、近年、PET、fMRI、NIRS などの神経画像取得の方法が著しく進歩してきたことにより、複雑な人間認知・

コントロール能力の神経基盤が徐々に明らかにされつつある。とくに、言語切替能力に関しては、Hernandez et al.(2000)がその先駆的な研究において、二つの基本的な問題を提起した。一つは、バイリンガルが話す複数の言語がどのような形で脳内において表現されているのか、つまり、それぞれの言語を担う場は神経空間内で重なり合い、互いにリソースを共有しているのか、それともそれらの言語は個別に分離された神経基盤に帰することができるのか、ということである。もう一つは一般的な意味で、言語切替を専門的に担う実行調節(executive control)用の神経基盤やネットワークが存在しているかどうかということである。

バイリンガルにおける言語処理の重要な問題、すなわち言語切替の問題に入っていく前に、まず、言語切替のタスクを定義しよう。従来の先行研究では、言語切替の定義については、暗黙の了解がなされ、曖昧に扱われてきたといって過言でない。通常、実験にはブロックデザインが採用されるが、各ブロック内は単一言語で、ブロック間で異なる言語の差異を見る単純な実験デザインが採用されることが常だった(Kim et al. 1997; Hernandez et al. 2001; Chee et al. 2003; Wang et al. 2007; Liu et al.2010) 。さらに各言語ブロック内で、言語刺激はランダムに呈示されるものの、それらの刺激に対するタスクは提示されたのと同一言語でタスクを行うものである(Kim et al. 1997; Hernandez et al. 2001; Chee et al. 2003; Wang et al. 2007; Chan et al. 2008; Liu et al.2010)。しかし、バイリンガル話者の日常生活では、このように、同一言語の使用状態が一定時間持続したのちもう一方の言語を使用する環境に移るとは限らない。そこには、異なる種類の言語切替の様態も存在している。それは、同時通訳も含む言語切替である。特に、移民や少数民族地域(例えば、中国の少数民族地域)の人々では、この同時通訳も絡む言語切替を行うほうが実生活にお

いて一般的である（Zhou 1992）。しかるに、我々の知る範囲では、このような同時通訳を含む言語切替の脳内機制に関する研究はまだ存在していない。そこで本研究では、この二つタイプの言語切替を実験内で採用し、両者の神経的メカニズムを比較検討する。具体的に言うと、実験 1 と実験 2 は同時通訳も絡む言語切替を扱うが、実験 3 は両方の切替タスクを採用する。

ここでひとつ留意すべき点があるので、特に書き記しておく。本研究で採用する連想タスクは、実験参加者が声を出さず、心の中で言葉を用いて想起するという内密(covert)タスクである。このタスクのデザインは、対象の属性想起や連想をタスクとした Mitchell et al. (2008) 、Akama et al.(2012)などの fMRI 実験でも採用されている。同時に、バイリンガルの先行研究でも、このような沈黙した内的言語活動の神経画像を取得する点で一致している。(Kim et al. 1997; Hernandez et al. 2001; Chee et al. 2003; Wang et al. 2007) 。 内密(covert)タスクが多く採用される理由は、バイリンガル fMRI 研究が言語切替のタスク自体に焦点を当てるのを目的としているので、発声活動が介入すると、左中心前回とブローカ野に発声による影響が現れ、言語切替によるものと区別ができなくなる恐れがある、というものである。ただし、顕在(overt)タスクと異なり、実験参加者がタスクに忠実に従事しているかどうか明確な証拠は得られず、実験参加者の外的態度と脳画像データを信頼するほかはないといううらみが残る。

2.1.2 バイリンガルにおける言語切替の神経基盤

この節では、バイリンガル言語切替における先行研究をまとめるとともに、それらが孕む問題点を議論する。ここでは、先述のように、習得年齢により、早期バイリンガルと後期バイリンガルに分けて分析する。

後期バイリンガルを実験対象として、言語切替の神経表現の探る研究は多数存在しているが、未解決の問題も数多く残っている。Price et al.（1999）は6名のドイツ語－英語の後期バイリンガルを対象に、PETを用いて翻訳と言語切替の実験を行った。L1（ドイツ語）とL2（英語）は視覚刺激として提示され、実験参加者に読むかまたは訳すように求めていた。ここで、L1は第一母語、L2は第二母語、もしくは後天的に学習した外国語を意味する略語である。Priceはまた、L1とL2が交互に提示された場合をもって、「言語切替」と定義している。その結果、言語切替の条件で、ブローカ野Broca’s area [1]と縁上回supramarginal gyriが賦活した。ここで注意すべきは、これらの領域が音韻に関する領域であるということである。一方、翻訳タスクは前帯状皮質anterior cingulate と 皮質下subcortical structuresに賦活をもたらした。また、翻訳しながらの切替タスクは、両側腹側小脳bilateral ventral cerebellum と 左中紡錘状回the left medial fusiformを賦活したとされる。

fMRIを使った実験としては、Lehtonen et al.（2005）が知られている。Lehtonen et alは、11名のフィンランド語-ノルウェー語の後期バイリンガルを対象に、文章翻訳のタスクで言語切替の神経基盤を研究した。後期バイリンガルのため、第二言語の能力には一定のばらつきが見られる。そのため母語であるフィンランド語の刺激を呈示された時、心の中でノルウェー語に翻訳するが、その後システムからノルウェー語の翻訳例が呈示され、実験参加者がその例が正しい訳文かどうかを判断しさえすれば良いというものである。また、対照条件として課されたコントロールタスクにおいては、刺激として呈示されたフィンランド語を暗記して、後に呈示されるフィンランド語のプローブ文と一致しているか

[1] 現在では脳科学の研究は欧米が主導して、出版されている論文はほぼ英語で書かれているのが現状である。そういう背景により、本論文では脳部位について日英語両方で説明する。

どうかを判断することが求められた。訳文判断タスクとコントロールタスクの差分をGLMで評価した結果、左下前頭回the left inferior frontal gyrus (BA 47) と左大脳基底核the left basal gangliaに有意な賦活が見られた。そこでLehtonenらは、左下前頭回the left inferior frontal gyrusの賦活が意味検索と関連すると分析し、左大脳基底核the left basal gangliaの賦活は一般の認知制御に関連すると結論付けた。

また、Wang et al. (2007)は12人の中国語 - 英語後期バイリンガルを対象に、画像命名課題を行った。Wangらによれば、有意に賦活している脳部位は右上前頭前皮質the right superior prefrontal cortex (BA9/10/32), 左中前前頭回left middle・superior frontal cortex (BA8/9/46), 右中帯状束right middle cingulum, 尾状核caudate (BA11)であった。そこで、彼らは言語切替を担う特定の領域を見つけることができなかったと述べ、言語切替の方向性も非対称であると報告した。

バイリンガル研究の第一人者として知られているのは、Abutalebi である。Abutalebi et al. (2008) は、12人のドイツ語-フランス語の後期バイリンガルを対象に、画像命名課題を使用し、単一言語条件と二言語条件の二つを用いてfMRIの実験を行った。単一言語条件では、実験参加者は提示された画像のドイツ語の名前や関連動詞を生成するように求められた。二言語条件では、提示した手掛かり語(キュー·ワード)に基づいて、画像のL1(ここではドイツ語)またはL2(ここではフランス語)のいずれかで名前や関連動詞を生成しなければならなかった。その結果、L1で命名する時、左尾状核the left caudate と 前帯状皮質anterior cingulate cortexの有意な賦活活動が注目された。また、弱い第二言語を使用する時、これらの領域の賦活はさらに強くなった。一方、Crinion et al., (2006) はドイツ語-英語の後期バイリンガルと日本語-英語の後期バイ

リンガルを対象にfMRI実験を行った。実験結果はAbutalebi et al. (2008)の結果と類似している。こうした知見を踏まえ、Crinionらは左尾状核the left caudateが使用中の言語の実行調節(executive control)において重要な役割を果たしていると結論付けた。

後期バイリンガル研究に比べ、一方、習得年齢の早い早期バイリンガルを対象とした神経言語学的研究は比較的に限定されており、その結果も議論の余地がある。たとえばHernandez et al. (2000) のfMRI研究では、6人のスペイン語-英語の早期バイリンガルを対象に、単一言語または混ぜ合わせた言語で画像命名タスクを行った。言語切替条件と単一言語条件のコントラストをGLMにかけた結果、左背外側前頭前野the left dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC, BA 9/46)とブローカ野の賦活が顕著に見られた。さらに、バイリンガル脳内で、異なる言語が異なる領域に基盤をもつという証拠は見られなかった、それぞれの言語を担う場は神経空間内で重なり合い、互いにリソースを共有していると報告した。

また、Hernandezらのもう一つの研究では、類似した神経基盤が言語切替に関与しているかどうかを調べている。6人の習熟度が高いスペイン語-英語早期バイリンガルがfMRI実験に参加した。彼らは単一言語の条件下では、同一言語で提示画像を命名するよう求められ。混合言語の条件下でが、スペイン語また英語で交互に画像命名するよう指示された。その結果、混合言語の条件下では、単一言語条件との差分において、右背外側前頭前野right dorsolateral prefrontal cortexに有意な賦活が検知されている。それに対し、逆方向の条件対照(単一言語条件マイナス混合言語条件)では有意な結果は得られなかった。そこで、Hernandezらは早期バイリンガルにおいて、言語切替は一般的な認知能

力機能の一つであり、また異なる言語は脳内の重複した領域で処理されていると主張した。

Chee et al. (2003) は 12 人の英語-中国語早期バイリンガルを対象として、発話せず黙して英語の単語または中国語と英語の単語を読む・理解するというタスクで fMRI 実験を行った。その結果、両言語に共通する脳部位として、左前頭前皮質 left prefrontal と側頭葉側面 lateral temporal regions が抽出された。これらの領域は意味検索に関する領域と分析されている。また、Chee らは、これらの領域は両言語を区別する役割も果たしていると述べた。 総括すると、後期バイリンガルを対象とした場合、言語切替の脳領域として、左下前頭葉 the left inferior frontal region (Price et al., 1999, Lehtonen et al., 2005 Abutalebi et al., 2008), 両側縁上回 bilateral supramarginal gyri (Price et al., 1999), 左尾状核 the left caudate (Crinion et al., 2006, Abutalebi et al., 2008), 左前帯状皮質 the left anterior cingulate cortex (Wang et al., 2007 と Abutalebi et al., 2008)、皮質下 subcortical structures (Price et al., 1999, Lehtonen et al., 2005)などが挙げられている。後期バイリンガル研究から総じて言えることは、言語切替には特定の固有領域が存在していないということ、そして、言語切替の方向が脳内反応の面で非対称であるということ、この二つである。

早期バイリンガルを対象とした研究では、関連する脳領域は左背外側前頭前野 the left dorsolateral prefrontal cortex (Hernandez et al., 2000), 右背外側前頭前野 the right dorsolateral prefrontal cortex (Hernandez et al., 2001), 左前頭前皮質 left prefrontal と側頭葉側面 lateral temporal regions (Chee et al. 2003)であるとわかっている。早期バイリンガルの場合は、言語の種類に関わらず、言語切替に関与する脳領域は共通で限定されている。

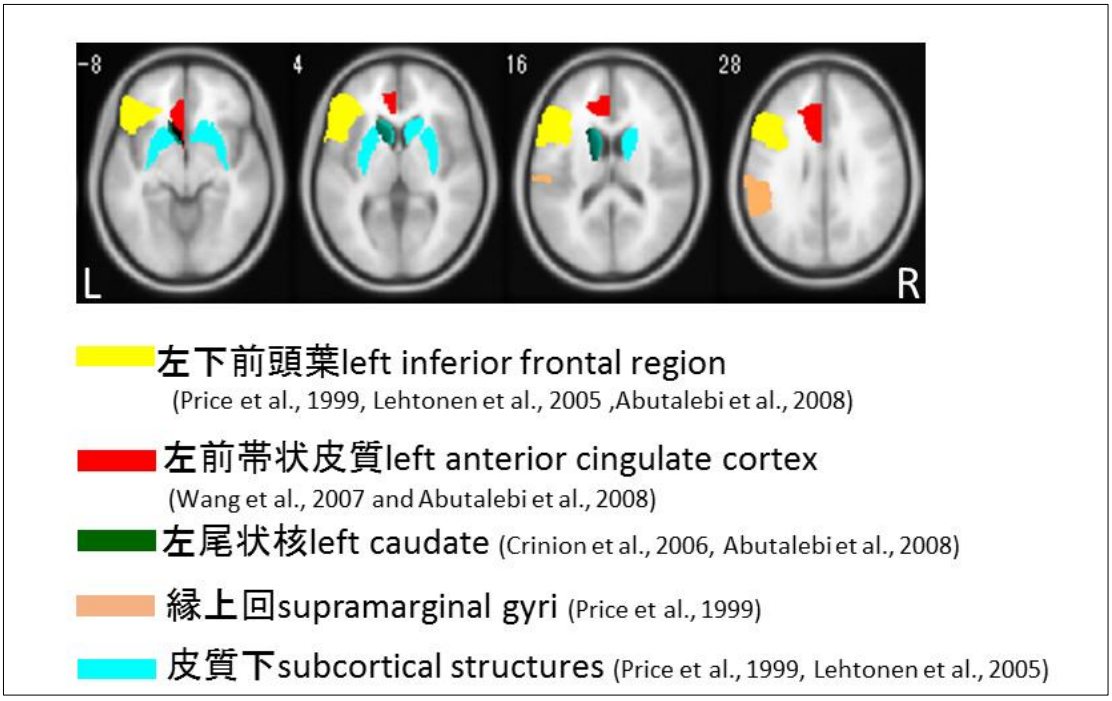


図 2-1： 後期バイリンガル研究の言語切替の神経基盤。 xjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、後期バイリンガルの先行研究から、言語切替に関与する神経基盤のまとめ。(Price et al., 1999, Lehtonen et al., 2005, Crinion et al., 2006 , Crinion et al., 2006, Abutalebi et al., 2008)

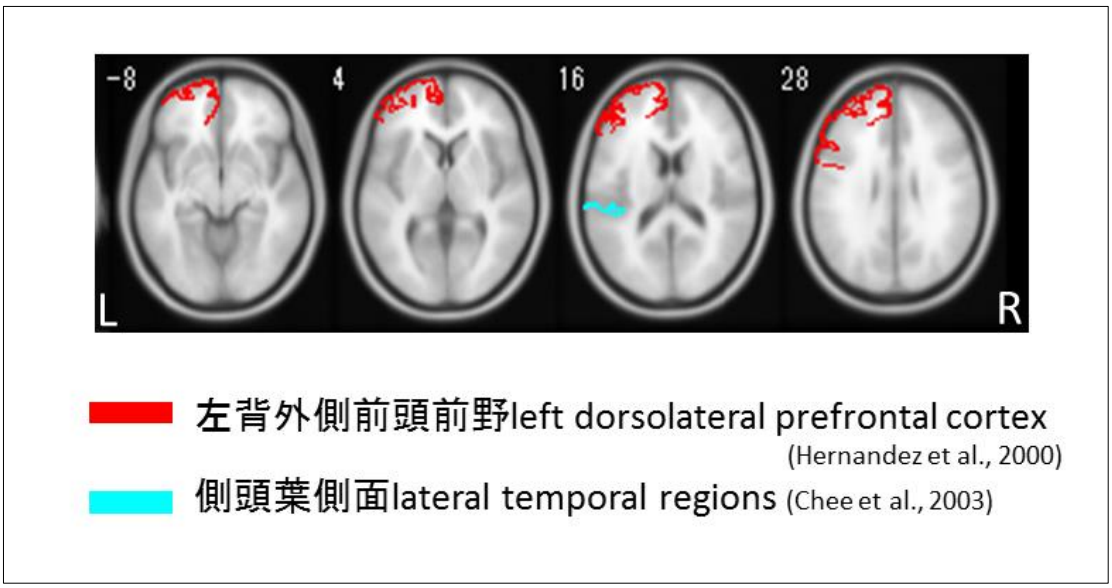


図 2-2： 早期バイリンガル研究の言語切替の神経基盤。xjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、早期バイリンガルの先行研究から、言語切替に関与する神経基盤のまとめ。(Hernandez et al., 2000, Chee et al. 2003)

2.1.3 バイリンガルにおける認知モデル

言語切替の神経基盤はまだ議論の余地があるだけでなく、言語切替の認知モデルも同様に様々な仮説が提案されている。ただし、これまでのところ、次に挙げるふたつのモデルが有力視され、そこに議論が集約されつつある。一つは言語特有モデル language-specific models (Costa et al. 2004)、もう一つは抑制モデル Inhibitory Control (IC) model (Green, 1986, 1998)と呼ばれるものである。言語特有モデルは、バイリンガルの語彙処理が活性化された L1 と L2 は独立な関係で、ターゲット言語だけが活性化されることを前提としている。

ターゲット言語とはバイリンガルは二つの言語の中から選択した表現したい言語のことである。それに対して、抑制モデルは、L1 と L2 の語彙選択は競争的、選択的な関係で、ターゲット言語の活性化が非ターゲット言語を抑制した結果であると主張している。例えば、L2 の画像命名タスクが要求された時、活性化された優勢的な L1 から L2 への競争関係を抑制する必要がある。後者のモデルにおいて、ターゲット言語の活性化のための抑制能力としては、二つの要素が決定的に重要だとみなされている。すなわち、抑制すべき言語の活性化レベルと非ターゲット言語の習熟度である(Green, 1986, 1998; Costa &Santesteban, 2004)。具体的に、L1 が常に自動的に活性化されるため、L2 はターゲット言語として使用する時、競争関係になる L1 を抑制する必要がある。そのため、L2 の習熟度は低い場合、抑制能力も低くなる。

また、抑制モデルには切替の非対称性という概念も同時に含まれている(Green, 1986, 1998)。第二言語から第一言語への認知上の調整には、反対方向の切替よりも認知的なコストがかかるとされている。言語切替にかかる努力の大きさをコストと考えた場合、そのコストは、条件が外的に強制的される場合に非対称となる、すなわち、どちらの言語からどちらの言語に切り替えるか、その方向性によって違いが現れる。話者が自主的に言語を切り替えるような場合には、おおむね対称になる、つまりほぼ差はない。また、言語切替にかかるコストの大きさは、言語の習熟度と関係があるとされる。早期バイリンガルは両言語間で切替を行っている時、言語切替にかかるコストはほぼ同等であると言われている。言語の習熟度が早期バイリンガルに比べて低い後期バイリンガルでは、このコストの非対称性がより大きい。特に Costa et al. (2004)は、言語を切替えながら画像命名を行わせる fMRI 実験を行い、こうした知見を裏付けている。Costa らによれば、言語の習熟度が低いバイリンガルは、そのタスクに

おいて抑制調節に依存することが大きく、一方、習熟度の高い早期バイリンガルは、その脳反応の特徴が言語特有のモデルに依存して現れる。また、早期バイリンガルは、第一母語と第二母語を切替えている際、非対称な切替コストを示さない。

こうした先行研究の文脈の中で、Abutalebi & Green(2008)が提案したバイリンガルの言語神経認知モデルは特に注目に値する。このモデルにおいては、言語切替に関する重要な脳領域が五つにまとめられている。すなわち、左背外側前頭前野 left dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC), 前帯状皮質 anterior cingulate cortex (ACC), 尾状核 caudate nucleus, 両側縁上回 bilateral supramarginal gyri (SMG)である。また、この言語切替に関わる脳領域は、言語のみならず、一般的な認知コントロールまた実行調節機能に関与していると述べている。具体的には、左背外側前頭前野 left DLPFC と両側縁上回 bilateral SMG は、一般に人が注意を払う時に働く前頭頭頂ネットワークに属する領域である。前帯状皮質 ACC と 尾状核 caudate nucleus は、認知コントロールが行われる際に必要とされる脳部位である。例えば、前帯状皮質 ACC はエラー検出に関連し、また、「顕著性ネットワーク」(salience network) と呼ばれるものの一部であると言われる。このネットワークは、人を行動に導くために、神経リソースを内部処理または外部の刺激に割り当てるためのものと考えられる(Seeley et al., 2007)。尾状核 caudate nucleus は、運動応答制御(motor response control)と目標指向行動に関与していることが知られている。また、刺激間で注意の焦点を切替える操作を強化し、前帯状皮質 ACC 及び前頭葉前皮質が活性化するために媒介的な役割を果たしているとされる(Hedden & Gabrieli, 2010)。このように、Abutalebi and Green (2008)が提案したバイリ

ンガル言語コントロールネットワークは、他の高度な認知機能と類似していて、同様な他の脳内ネットワークとリソースを共有していると考えられる。

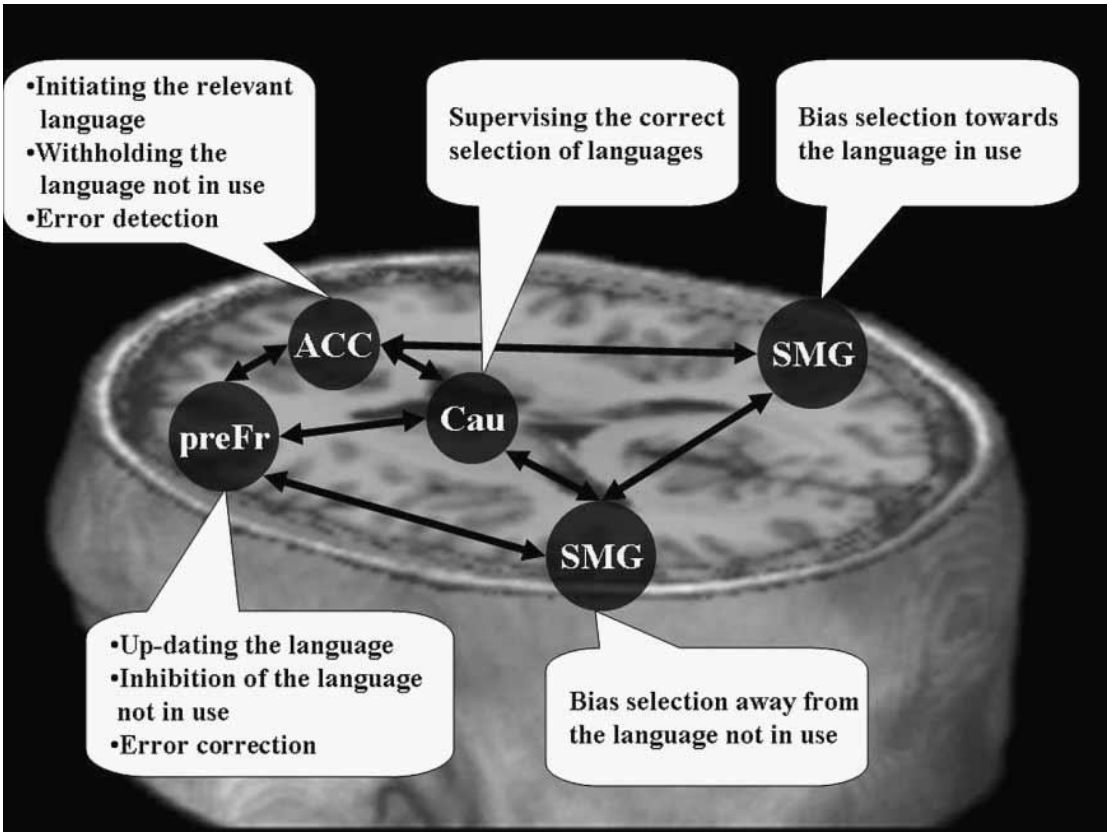


図 2-3： Abutalebi & Green(2008)が提案した言語切替の神経認知モデル

前帯状皮質 ACC：関連言語を引き起こす、使用しない言語を差し控える、エラー検出。左背外側前頭前野 preFr:言語を更新する、使用しない言語を抑制する、エラー検出。尾状核 Cau:正確な言語を選択することを監督する。左側縁上回 SMG:使用しない言語から離れる選択傾向。右側縁上回 SMG:使用言語を選択する傾向。(出典：Abutalebi, J., & Green, D. W. (2008). Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. Language and Cognitive Processes, 23(4), 557-582.)

近年、当該分野でとみに注目を集めている理論は、Duffau, 2008、Moritz-Gasser& Duffau, 2009 が提案した、新しい認知過程の言語切替の神経基盤モデルである。このモデルは以下のように要約される。言語の切替は脳内のある一部の特定した領域によって担われているのではなく、脳内の複数の部位が複雑に相互結合した脳内ネットワークに依存するこということである。この言語切替のネットワークは、「ホドロジカル(hodological)」な観点に基づいて想定されている。それは皮質―皮質下の脳領域を含み、例えば、実行調節システムの中核を為す前頭前皮質 prefrontal cortex,前帯状皮質 anterior cingulum, 尾状核 caudate、さらには言語の回路側頭葉後部 posterior temporal areas, 縁上回 supramarginal, 角回 angular gyri, ブローカ野 Broca’s area と神経束である上縦束 superior longitudinal fasciculus などを順次結合している。

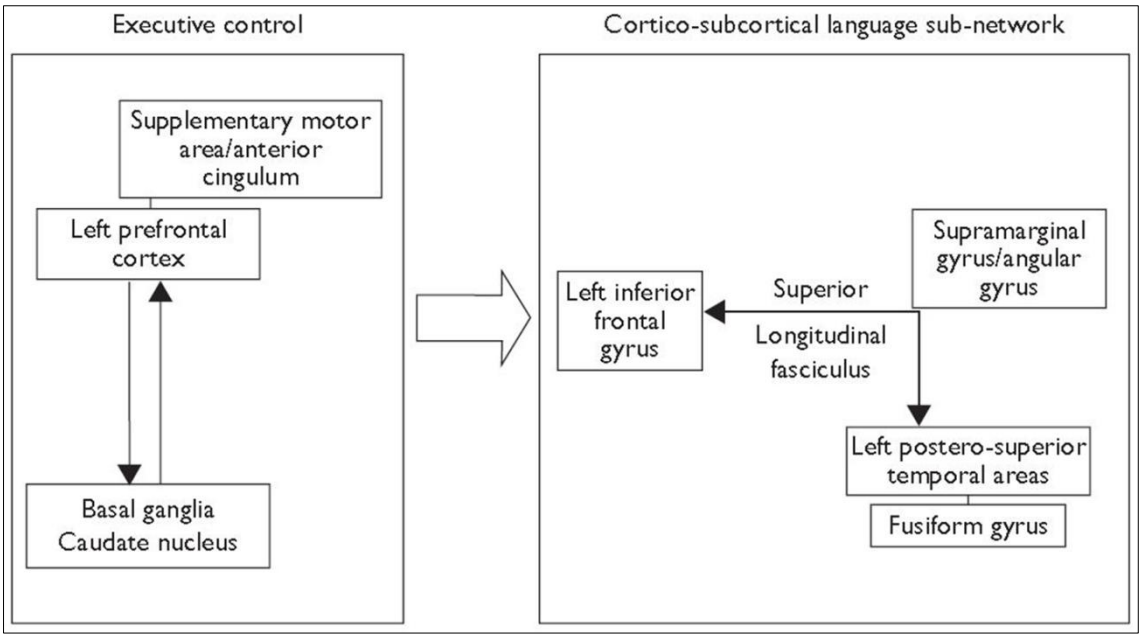


図 2-4： Duffau&Moritz-Gasser が提案した言語切替の神経基盤モデル

Executive control:　実行調節；Supplementary motor area:補足運動野；anterior cingulum:前帯状皮質；Left prefrontal cortex:左前頭前皮質；Basal ganglia:大脳基底核；Caudate nucleus:尾状核；Cortico-subcortical language sub-network:皮質―皮質下言語のサブネットワーク；Left inferior frontal gyrus:左下前頭回；Supramarginal gyrus: 縁上回；angular gyrus: 角回；superior longitudinal fasciculus：上縦束；Left postero-superior temporal areas:左後―上側頭葉；Fusiform gyrus: 紡錘状回。

（出典：Moritz-Gassera,S., Duffau, H. (2009). Cognitive processes and neural basis of language switching: proposal of a new model. Cognitive neuroscience and neuropsychology 1）

2.2　言語の神経基盤

この章では、本研究の実験で実際に刺激、タスクに使われた言語である、中国語、韓国語と日本語を、神経言語学の観点から、先行研究とそこで示されてきた知見を俯瞰する。本研究で取り上げられている三つの言語は、同じ東アジアの言語でありながら、異なる書記体系(writing system)を採用している。中国語は表意文字のシステム、日本語の仮名は音節文字のシステム、韓国語は独自のアルファベットである。

表意文字を使う中国語において、基本的に一つの漢字は一つの発音と対応している。中国語のこのような書記体系は英語のようなアルファベットとシステム的に異なる。またアルファベットの発音規則は中国語には適用できない。さ

らに、中国語とアルファベットを採用する言語のもう一つの違いは、文字のレイアウトである。多くのアルファベットシステムの言語の文字は、英語のような線形空間レイアウトである。中国語は意味を持つ正方形の形式の中に要素配置した非線形空間レイアウトである。韓国語は一つの例外で、表音文字のアルファベットシステムの言語でありながら、中国語と同じく非線形空間レイアウトを採用している（Tan et al.2001;Wang et al.2003；Lee et al.2003）。さらに、日本語の場合はもっと複雑で、漢字と仮名からなっている。漢字は表意システムであり、仮名は韓国語のハングルと同様アルファベットシステムである(Dong et al.2000; Nakamura et al.2002)。

さて、ここで、このような書記体系の違いが、それぞれの国民が言語を操る際の脳反応にどのような違いとなって現れるか、先行研究を取り上げる。Kuo et al.（2004）はfMRIを使って中国語の漢字の神経基盤について研究した。その結果、漢字処理に関する脳部位は左後頭葉―側頭葉left occipitotemporal region, 左背側視覚経路left dorsal processing streamと右中前頭回right middle frontal gyrusなどであり、またこれらの脳領域は一つのネットワークとして漢字の処理に関与しているということが判明した。さらに、中国語の音韻処理にいての脳部位は左中・下前頭回left middle/inferior frontal gyrus, 補足運動野supplementary motor areaと左側頭葉―後頭葉the left temporoparietal regionなどであると結論付けている。

Li et al.（2004）によれば、表音文字を使う英語の動詞は前頭葉（例：左前頭前回the left prefrontal cortex）で表現されているのに対して、名詞は後頭葉-側頭葉（the temporal-occipital regions）で表現されている。しかし、表意文字である中国語の動詞と名詞では、前述のような英語に現れたような結果は得られなかった。中国語における動詞と名詞は、左右半球の双方において、

広く重複した領域に有意な賦活をもたらしている。こうした結果を鑑みると、言語類型論は言語の神経表現に影響している仮説が支持される。すなわち、異なる書記体系は言語の神経表現までその差を反映させているというものである。

Tan et al. (2001) の研究においても、fMRI を使って中国語を読む場合と理解する場合のの神経表現にが明らかにされている。この研究は中国語の漢字の読み方の規則により、二つのグループを分けた。一つは規則のあるグループ（例えば：铜/tong2/と同/tong2/で、同じ「同」の部分を持ち、発音も同様である）、もう一つは不規則のグループである（例えば：训/xun4/と川/chuan1/で、同じ「川」の部分を持ち、発音は異なる）。結果、不規則の漢字を読む時、脳の左下―中前頭皮質 left infero-middle frontal cortex(BA9), 左運動野 left motor cortex, 右下前頭回 right infero-frontal gyri,両側上側頭野前部 bilateral anterior superior temporal areas, 前帯状皮質 anterior cingulate cortex を賦活した。また、規則のある漢字を読む時、右上前頭野と頭頂葉 Right superior frontal、頭頂葉 parietal regions (BAs 8/ 6, 7),両側楔部 bilateral cuneus が賦活された。実験参加者が中国語を読む時、fMRI データによると、一部の神経表現はアルファベットシステムの言語を読む時の神経表現に一致しているが、中国語を読む時の右脳の賦活が大きいことが注目に値する。この研究も、異なる言語は異なる神経表現をもたらすという仮説を支持している。

さらに、Tan et al. (2001) の研究では、左中前頭回 left middle frontal gyrus (BA 9)が中国語の意味理解と発音に重要な役割を果たしているという結果を得た。また、有意な賦活を見せた舌状回 the lingual gyrus と紡錘状回 the fusiform gyrus などは、中国語の漢字が視覚に及ぼす影響の現れであるとも示唆している。

Lee et al. (2004)は、互いに関連性がなく意味を形成しない漢字を読む時の脳活動を調査べたところ、脳の後頭部に注目すべき賦活が検出された。賦活部位は左側頭―頭頂葉 the left temporoparietal region（上頭頂回 superior parietal gyrus と縁上回 supramarginal gyrus)と左側頭葉―後頭葉 the left temporal-occipital junction である。

また、Xue et al. (2005) も後頭部の賦活に着目している。中国語母語話者が中国語を読む時の脳の賦活は、左下前頭回 the left inferior frontal cortex (BA44/45/47), 頭頂葉 the parietal lobule (BA40), 帯状皮質 the cingulate cortex (BA24/32)で有意に大きい。特に、左脳の紡錘状回 the fusiform cortex (BA19/37)の賦活が見られたのに対し、視覚的な形状の基本情報を処理する一次視覚野 primary visual cortex (BA17/18)には有意な結果が見られなかった。この結果から、中国語の表意文字の特徴が高次視覚野での処理の産物であることが示唆された。

このように、中国語の神経基盤については、実験タスクの違いなどにより、明確な脳領域はまだ確定できているとは言い難いが、中国語の表意文字の特徴により、一般レベルの言語野（下前頭葉 the inferior frontal gyrus）の賦活以外には、後頭葉の高次視覚野の活動も注目すべきであると言える。このことからも、異なる言語は異なる神経表現を形成するという仮説が再び支持されていることが見て取れる。

次に韓国語の神経基盤に関して、先行研究をまとめる。たとえば、Yoon et al.(2005)は韓国人母語話者が韓国を読む時の脳活動を記録したが、その結果、両側紡錘状回 bilateral fusiform gyrus, 左中前頭回 left middle frontal gyrus, 左上側頭回 left superior temporal gyrus, 右中側頭回 right mid

temporal gyrus, 中心前回 precentral gyrus と島皮質 insula の活動は有意と認められた。この結果は、一般的レベルでのアルファベットシステムの言語に特有の賦活パターンと一致している。

また Lee et al.(2001)の研究では、韓国人母語話者が韓国語と韓国語の漢字を読む時の脳活動が比較されている。SMG（縁上回 supra marginal gyrus ）は、韓国語母語話者が通常使うハングルを読む時に賦活した。一方、漢字を読む時、ブローカ野 Broca’s Area(BA 44) と 紡錘状回 the fusiform gyrus が賦活した。ここで注目すべきは、韓国人話者が普段使わない漢字を読む時であっても、中国語母語話者が通常使う漢字を読む場合と同様の一致した結果が現れるということである。

Kim et al. (2004) によれば、韓国語の神経表現はアルファベットシステムの言語と似たような音韻ループである。つまり、ブローカ野 Broca’s Area(BA45)、運動前野 premotor area(BA6)、左中側頭回 left middle temporal gyrus(BA21)、左上側頭回 left superior temporal gyrus (BA22) 、左上頭頂回 left superior parietal gyrus (BA7) と縁上回 supra marginal gyrus (BA40) である。

韓国語の神経基盤についても、まだ研究者の間で論争が進行中であるが、書記体系という観点では、アルファベットシステムの言語の脳賦活パターンと一致していることで意見の一致を見ている。

最後に日本語の神経基盤について、軽く触れておく。Nakada et al.(1998)によれば、日本語を読む時の関連する脳領域は以下のごとくである。後頭葉―側頭葉 occipital-temporal lobe, つまり、紡錘状回 the left fusiform gyrus (FG), 両側舌状回 the left and right lingual gyri (LG)と左下側頭溝 the left inferior temporal sulcus (ITS)である。また、日本語の書記体系は漢字と仮

名から構成されているいるので、表意文字の漢字と表音文字の仮名双方の特徴が混合して現れると考えられる（Nakamura et al.2002）。特に、日本語の仮名は音節を表示しているため、音韻の処理に関する脳部位に賦活が現れることが報告されている（Buchweitz　et al.2009）。ただし、本研究では、日本語その言語についての実験刺激としては用いなかったため、今後の課題に留めておく。

このように、中国語と韓国語は、書記体系の面に限定すれば非常に対照的な言語であると言える（図 2-5）。本研究で扱う韓国語 - 中国語バイリンガルが、この二つの言語を駆使し言語を切替えつつ、意味処理(概念の連想)を行う時、どのような脳活動が見いだされるか調べることが、本研究の一つの大きな目標である。また、韓国語 - 中国語バイリンガル研究も希少なため、本研究の結果は、異なる言語が脳にどのような反応をもたらすのか明らかにする上で、重要なケーススタディになるとも言える。特に、根本的に異質の書記体系を採用する言語間で切替を行う際、脳がいかなる賦活を見せるか知ることが重要である。

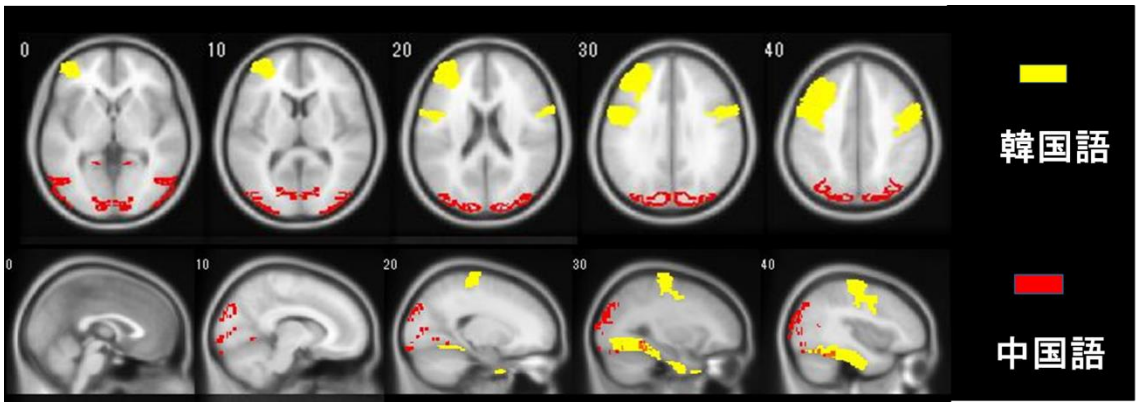


図 2-5:　中国語と韓国語の神経表現。xjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、中国語と韓国語の神経表現のまとめ。（Tan et al.2001;Yoon et al.2005）

2.3　意味カテゴリーの神経基盤

この節では、本研究で言語切替タスクに付帯させる意味処理、特に対象の属性・関連語の脳内検索に注目し、それを体系的に扱う上で必要な意味カテゴリーの神経基盤に関して先行研究に触れる。意味メモリ（semantic memory）という言葉が認知科学では使われているが、それは世界について獲得された、事実、概念、信念なども含む幅広い一般的な知識のことを指す。意味メモリはよくエピソードメモリ（episodic memory）と対になって議論されている。エピソードメモリは、特定の時間や場所で発生したことの記憶を指し、個人にとって唯一、具体的で内密に保持されるメモリである。例えば、昨日の朝食に何を食べていたのかはエピソードメモリの範疇に属するが、朝食に対する認識や評価は意味メモリとしてとらえられるものである。

脳の内部を非侵襲的に解明するニューロイメージング手法が発達する以前は、人々は欠損した器質的損傷と喪失した機能を対応付ける脳損傷と脳疾患の研究から、患者の意味メモリに関する脳内表現を知る他はなかった。これらの研究から、左脳が意味メモリにおいて重要な役割を果たしているということが解明された。たとえば左前頭前回 left prefrontal cortex を損傷した患者は、提示された単語に対して、その単語の意味が言うことができない。また側頭葉 temporal lobe を損傷した病人も、物体の名前を言えなくなる。したがって、少なくとも、左前頭前回 left prefrontal cortex　と側頭葉 temporal lobe は意味メモリの神経表現として役割を果たしていることがわかった。（Baldo et al.1998;Warrington et al.1975; Hart et al.1990）

こうした脳損傷の研究を補完するように、ニューロイメージングの研究でも、言語機能のマッピングに関しては、類似した結果がもたらされている。たとえ

ば、Demonet et al. (1992) の研究では、意味プロセスに関連する脳領域は左前頭前野 left prefrontal、頭頂葉　parietal、側頭葉後部 posterior temporal lobes とされている。

さらに単語連想タスクを用いた研究は、意味カテゴリーの神経基盤について根拠づけを与えている。異なるカテゴリーに属する対象(事物)は脳の異なる領域で処理されているという仮説である。Martin et al. (1995) は動作に関連する単語を連想するタスクにより、左中側頭回 left middle temporal gyrus, 左下前頭回 left inferior frontal cortex (ブローカ野 Broca's area), 左上側頭回 left superior temporal gyrus の賦活を見出した。それに対し、色を表す単語の連想タスクでは、両側紡錘状回 bilateral fusiform gyrus, 下側頭回 inferior temporal gyri の関与が明らかにされている。意味カテゴリーの神経基盤として、先行研究を通じ確立したとされるものは、「動物」、「道具」、「顔」、「建物」などの対象カテゴリーに関わるものである。その中で、最も明確に賦活部位が分かれるということで、対照的に扱われる意味カテゴリーは、「動物」と「道具」の対である。「動物」と「道具」に関わる言語刺激を使用し、それらの神経基盤を探る研究としては、Perani et al.(1995)と Martin et al.(1996)のものが最も古典的なものとされる。

まず Perani et al. (1995) は PET を用いて、単語マッチングタスクを行い、「動物」と「道具」の神経表現について研究した。「動物」に関する意味処理が脳の両側下側頭―後頭葉 inferior temporo-occipital areas を賦活させたのに対し、「道具」に関する意味処理は背外側前頭前皮質 the left dorsolateral frontal cortex も含む、左脳を中心に賦活をもたらしている。なおこの結果は脳損傷研究 (左前頭前回 left prefrontal cortex と側頭葉 temporal lobe) の結果と一致している。

Martin et al. (1996) は画像命名タスクを用いて、「動物」と「道具」についての思考による賦活が、それぞれ両側の側頭葉 temporal lobes とブローカ野 Broca’area に見られることを明らかにした。「動物」を命名する時、左中後頭葉 left medial occipital lobe の賦活も伴って見出される。すなわち一次視覚野である。一方、「道具」を命名する時、左前運動野 left premotor area が賦活した。この領域は手の動作と関連のある領域でもある。さらに、「道具」を命名する時、左腹側前運動野 left ventral premotor cortex が賦活したという報告もある (Grabowskiet al.1998,Chao et al.2000) 。つまり、「道具」を連想する時、「道具」を使用している具体的なイメージが関与し、動作に関連する脳部位も賦活するという解釈である。これは身体性理論(Embodiment Theory)とも呼ばれる (Pulvermüller et al. 2001)。

また、Perani et al.(1999)の二つの PET 実験では、画像マッチングタスクにより、「動物」対「意味のない画像」の賦活が後頭葉 occipital regions, つまり 舌状回 lingual gyrus と 左紡錘状回 left fusiform gyrus に見出された。「道具」に関しては、主に左脳 left hemispheric が賦活し、特に、 背外側前頭 dorsolateral frontal (Ba 44/6 and 45) と側頭皮質 temporal (Ba 21, 20) cortex の賦活が顕著であった。実験 2 では、「動物」と「道具」に関係する単語マッチングタスクが行われたが、「動物」に関する思考は左脳の後部に賦活をもたらしている。具体的に言うと、紡錘状回 fusiform (Ba 37) と 下後頭回 inferior occipital gyrus (Ba 18)、右上頭頂回 right superior parietal lobule (Ba 7) と 左視床 left thalamus である。「道具」に関しては、両側後頭部 (occipital regions) の中側頭回 middle temporal gyrus (Ba 21) と楔前部 precuneus (Ba 7)が賦活した。

さらに複数のタスク（視覚提示、マッチング、命名）を用いたChao et al.(1999)の研究からは、「動物」と「道具」の意味カテゴリーの神経基盤が分散ネットワークで表現されているという知見がもたらされた。具体的に述べると、様子・形式は腹側頭皮質（ventral temporal cortex）で表現され、動作は側面側頭皮質（lateral temporal cortex）表現されているという説である。

また、Moore et al.（1999）の研究でも、「道具」による賦活は左中側頭回後部the left posterior middle temporal cortexに認められた。彼らは「動物」による賦活脳部位は両側側頭葉前部bilateral anterior temporal と 右中側頭葉後部right posterior middle temporal corticesであると報告した。

総括すると、意味カテゴリーの神経基盤については、まだ詳細は論争の余地があるが、先行研究から得た知見から、「動物」と「道具」は側頭葉後部posterior temporal lobes(Chao et al.(1999)；Martin et al.（1996)）とブローカ野Broca’area（Martin et al.（1996)）に関連付けられると言って良いだろう。また、「動物」と「道具」に関する有意なヴォクセルは、分散した形で側頭葉に存在しているという知見もある(Chaoet al.(1999)；Martin et al.（1996)）。また、「動物」に関して、その意味処理が主に側頭葉―後頭葉の賦活をもたらすと考えられる。すなわち、両側の下側頭葉―後頭葉inferior temporo-occipital areas（ Perani et al.（1995)）、左中後頭葉left medial occipital lobe（Martin et al.(1996)）、舌状回the lingual gyrus bilaterallyと左紡錘状回the left fusiform gyrus、右上頭頂葉the right superior parietal lobule（Ba 7）と 左視床the left thalamus （Perani et al.(1999))、両側側頭葉前部bilateral anterior temporal と右中側頭葉後部 right posterior middle temporal cortices（Moore et al.（1999））である。「道具」に関しては、前頭葉と側頭葉（後頭葉の一部も含む）の賦活が注目に値する。具体的

には、左背外側前頭前野 the left dorsolateral frontal cortex（Perani et al.(1995)）、左前運動野 left premotor area（Martin et al.（1996）；Grabowskiet al.(1998)；Chao et al.(2000)）、背外側前頭葉 the dorsolateral frontal（Ba 44/6 and 45）と側頭葉 temporal（Ba 21, 20）cortex、中側頭回 the middle temporal gyrus（Ba 21）と楔前部 precuneus（Ba 7）(Perani et al.(1999)；Moore et al.（1999））である。

このように、両側の側頭葉（図 2-6）は、意味メモリとの関連で、重要な役割を果たしていると言える。「動物」と「道具」に関する言語反応では、有意な脳領域は後頭葉、側頭葉、また前頭葉のネットワークに分布していることがわかった。特に、「道具」に関する脳部位は、道具がそれを用いた動作と関連するため、運動前野の賦活ももたらすことがありうる。

ただし、これらの実験結果は、すべて同一言語を刺激とタスクに用いて得られた結果である。意味カテゴリーに関する脳内処理と同時に、二つの言語間で言語切替が行われている際は、その干渉が意味処理の神経基盤に対してどこまで及ぶかについては、まだ研究はなされていない。そこで、本研究では、意味カテゴリーの脳内表現に関する今までの知見を踏まえつつ、新しいファクターとしてバイリンガル話者の言語切替を導入し、意味カテゴリーの神経基盤の安定性を確認する。

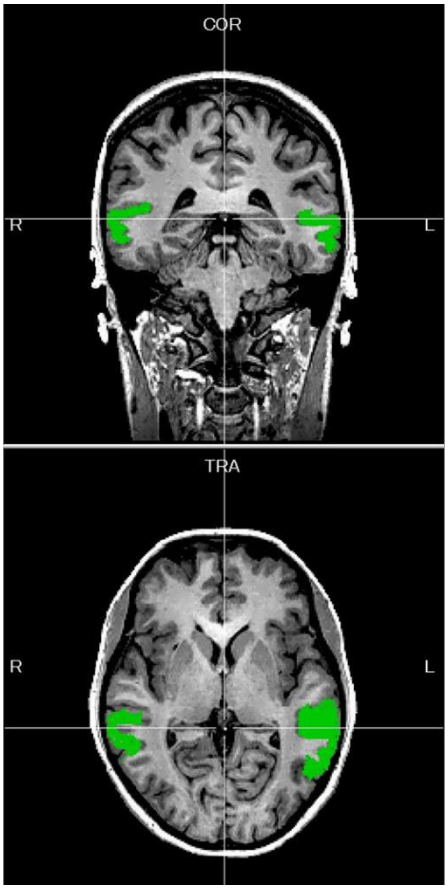


図2-6:動物と道具に関連する脳領域―側頭葉Chao et al.(1999)とMartin et al.(1996)のデータに基づいて、BrainVoyagerを用いて、側頭葉を表した。

第 3 章　本研究の位置づけと実験のまとめ

3.1　本研究の位置づけ

本節では先行研究の問題点を検討し、本研究の位置づけを明確にする。言語切替の神経基盤は未解決で、議論の余地がある。

まず、先行研究で言及したバイリンガル研究は、殆どアルファベットを用いた言語を対象とし、それを視覚刺激として使用している。アルファベットを用いないアジアの言語の間で、バイリンガルの脳はどのように切替を行っているのかは、まだ解明されていない。特に、表意文字の中国語と表音文字の韓国語との切替は興味深いトピックスである。

また、バイリンガル研究では、リーディングと画像命名が良く用いられる実験タスクである、例えば、リーディングタスクを用いたバイリンガル研究としては、以下の先行研究が挙げられる。Bai et al., 2011, Buchweitz et al., 2012, Chee et al., 2003 である。画像命名タスクの典型的な例は Hernandez et al., 2000, Hernandez et al., 2001, Rodriguez-Fornells et al., 2005 , Wang et al., 2007 である。本研究では、最初の二つの実験で画像とそのキャプションに対する連想タスクを用い、三番目の実験で、画像を用いない単語連想タスクを採用した。概念対象を典型的に表した画像刺激が随伴した場合、そこで提示された単語について、連想が容易になるためである。一方、単語の綴りだけを刺激として提示する場合は、補助的な画像による賦活を分析から取り除き、純粋に書記体系(ライティング・システム)からの賦活に分析を絞ることができる。また、本実験で単語連想タスクを用いた理由は、バイリンガル研究のように、異なる書記体系(ライティングシステム)がもたらす脳の神経表現を考慮しなけ

ればならない場合に、意味処理面では書字刺激に対して中立で、まとまった有意な賦活を得られると期待されるからである。

さらに、本研究の方法論的な独自性についてここで簡単に触れる。従来の fMRI によるバイリンガル研究では、基本的には一般線形モデル(GLM,単変量解析)を用いて、言語切替に関与している脳領域が抽出されている。MVPA(多変量パターン解析)を用いた、バイリンガル研究はまだ数が少ない（例外：Buchweitz et al. 2012）。一般線形モデル(GLM,単変量解析)では、ヴォクセルごとの統計的仮説検定を行うが、MVPA(多変量パターン解析)では、複数のヴォクセルを一括してパターンとして扱い機械学習によるパターン分類モデルを評価する。本研究はこれら二つの方法を併用して用いて、バイリンガル脳に関し、より多角的に分析したい。これまで、バイリンガル脳研究の分野では、GLM と MVPA を同時に用いて、バイリンガリズムを研究した fMRI 実験は、レヴューした範囲で存在せず、本研究が初めての試みである。

また本研究は韓国語 - 中国語早期バイリンガルと中国語 - 日本語後期バイリンガルを中心に、単語の連想タスクを用いてバイリンガルの両言語を併用した言語活動について、その神経基盤を探る。特に、概念連想を関与させた言語切替タスクと言っても、難易度によって、二種類のタスクが設定可能である。すなわち一つは刺激語と同一言語で連想するタスクであり、もう一つは刺激語とは異なる言語でタスクを行うという、同時翻訳も絡む切替タスクである。これは父母の母語が異なるような多言語環境に置かれた実際のバイリンガルの生活で、実際、頻繁に起こりうる状況を想定したものである。

3.2 実験のまとめ

本研究は言語切替の神経基盤を解明するために、三つの fMRI 実験を行った。

この実験を行うために、fMRI 実験デザインとデータ解析の二つの点で、独自のアプローチを提案し、それに則っている。一つはバイリンガルの実生活における多言語環境にとって現実的な言語切替を想定し、それがタスクに反映できる実験デザインである。もう一つは統計的仮説検定による一般線形モデル(GLM,単変量解析)と機械学習による MVPA(多変量パターン解析)を統合する実験データ解析方法の確立である。この二つの視点に基づいて、本研究では三つの段階に分けて、fMRI 実験を行った。

まず、本研究のデータ解析の方法を確立するための第一段階である。fMRI 実験１として、意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析では、先行研究で知られている最も対照的な意味カテゴリー対、すなわち「動物」と「道具」からの刺激を用いて、そこに従来の神経言語学では試みられていない言語切替の要素を加味した。実験１の目的は、単変量解析(GLM)と比較的最近の多変量パターン解析(MVPA)が、「言語切替を伴う概念処理」というパラダイムにおいて、神経データの解析に有効であるか検証するためである。そこで７人の韓国語 - 中国語早期バイリンガルと７人の中国語 - 日本語後期バイリンガルが参加し、言語切替を行いながらの単語連想タスクを行った。具体的に、意味カテゴリーとして「動物」と「道具」を表す写真とキャプションを刺激素材として提示し、それぞれの単語が表す概念についてその典型的な属性を想起させるものである。実験は日を分けた２セッションに分かれ、1 セッション目においては、刺激言語 A が通しで呈示されてそれと異なる思考言語 B でタスクを行い、別のセッションでは言語 A,B の役割を変更する。この切替タスクはセッション内で同一方向の切替となり、切替タスクとしては最も容易なものと言える。

その結果、従来の解析方法であるGLMにより、言語切替を随伴している状況下でも意味カテゴリーの安定した神経基盤を抽出することができた。「動物」に対応する脳の領域は右の中側頭回、右の中前頭回、右中心前回と左中後頭回である。一方、「道具」に対する脳の領域は左前頭頂葉と左縁上回である。この結果は先行研究、たとえばPulvermüller et al.(2001)とほぼ一致している。また、MVPAを用いた同一データの解析においては、セッション内とセッション間での意味カテゴリー分類において、高い分類精度が得られた。このように、早期バイリンガルと後期バイリンガルに関わらず、GLMとMVPAは、意味処理を伴う言語切替の脳反応データに適用することが可能であり、データ解析の手続きとして最も基本的な形式を確立することができたと言える。しかし、この実験デザインは、意味処理に言語切替の要素を導入したものの、同一のセッション内では、同一言語のみが提示されたため、意味カテゴリーの神経基盤と反応分類しか可能にならず、言語の分類予測モデルの構築はできなかった。

fMRI実験２では、より現実の言語切替の場面に近い、言語の分類予測モデルが立てられるよう、実験デザインを更新した。実験１では、同一セッションの内部では同一の刺激言語を用いるのに対して、実験２では、意味処理に関しては同一の枠組みを保持しつも、セッション内で刺激言語がランダムに変化するよう設定変更されている。このタスクの難度を考慮し、両言語の習熟度が高い５人の韓国語 - 中国語早期バイリンガルを対象とし、中国語と韓国語が刺激レベルでランダムに切り替えられ、中国語の刺激に対しては韓国語で連想し、韓国語の刺激に対しては中国語で連想するという、複雑かつ迅速な言語切替タスクが課された。その結果、まず、GLM解析により、言語切替の神経基盤に関して興味深い部位を抽出することができた。韓国語対中国語のコントラスト(前者と

後者の差分)に対する脳賦活部位は前頭葉に現れている。一方、反対方向のコントラストである中国語対韓国語の賦活は後頭葉に集中している。この結果は単一言語の神経基盤の先行研究（Yoon et.al, 2005；Tan et al.,2000）と一致しており、中国語が視覚提示された時、その書記体系(ライティングシステム)による言語の影響が大きいと考えられる。また、ここで明らかになった左中前頭回の賦活は、一般的に言語切替タスクに関与するとされる脳部位と一致している（Abutalebi et al. 2008）。更に、MVPA により、意味と言語の双方の観点から機械学習による分類モデルの構築を行った。交差評価(cross-validation)の結果、意味の分類は実験 1 とほぼ同様の水準で成功したが、言語の分類はやや劣り、実験参加者レベルで有意な予測モデルが構築できる場合とできない場合に分かれた。さらに、ヴォクセルごとに機械学習を行いモデルの精度を賦活値のようにヴォクセルに割り当てる Searchlight 法(Kriegeskorte et al., 2006,2007)により、意味カテゴリーの分類に情報を持つクラスター画像も取得できた。「動物」と「道具」に関して意味のあるヴォクセルは主に側頭葉に分散して存在している。また、言語の分類において有意なヴォクセル GLM の結果とほぼ同じ傾向を示し、言語切替に関する脳部位として、例えば、帯状束 Cingulum, 尾状核 Caudate、ブローカ野 Broca, ウェルニッケ野 Wernicke's area が得られた。言語切替の上で、実行調節(executive control)上重要な脳領域を抽出した。

実験 2 においては、言語に関する分類精度はそれほど有意になっておらず、また視覚提示は画像を併用しているため、言語そのものの神経基盤や情報を持つヴォクセルを抽出するのに不利な点があると考えられる。

fMRI 実験２から得られた知見を踏まえ、実験３では言語の綴りのみを視覚提示し、８人の韓国語 - 中国語早期バイリンガルを実験参加者として、さらに高度な条件での言語切替タスクを導入した。すなわち、バイリンガル話者の多言語併用環境にとって、現実の場面に近い言語切替を再現できる条件を考慮し、2種類の切り替えタスクを採用した。一つは各試行(trial)の内部で同時翻訳タスクを絡めるもの、focused simultaneous translation language switching、省略して FST であり、もう一つは通常の切り替えのタスクとして、situational non-translation language switching、省略して SnT と命名した。実験３の目的はバイリンガル脳内言語切替の神経基盤を明らかにする。その結果、2 種類の言語切替タスクにおいて、MVPA により、意味と言語の分類に成功した。また、韓国語 - 中国語バイリンガルにおける言語切替の神経基盤として、いくつかの重要な脳部位を明らかにすることができた。例えば、左下前頭回 the left inferior frontal gyrus（ブローカ野 Broca’s area)、左紡錘状回 the left fusiform、左尾状核 left caudate などである。興味深いことに、ここで得られた結果は、言語切替の最新のモデルである、ホドロジカルモデル(Moritz-Gasser and Duffau, 2009)を支持するものとなった。すなわち、言語の切替は脳の特定の一か所を頼るのではなく、脳内の幅広い領域にまたがるネットワークで行われているという考え方である。

下に掲げる表 3-1 はこの３つの実験の枠組と相違点を明確にするためのダイアグラムである。次章以降ではこれら３つの実験のそれぞれについて詳しく紹介し、議論の詳細を示していくものとする。

表 3-1：三つの fMRI 実験のまとめ

	fMRI実験1 意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析	**fMRI実験2** ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応	**fMRI実験3** 翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制の相違
目的	データ解析方法を確立する。	言語切替の神経基盤を探究する。	言語切替の神経基盤を解明する。
実験参加者	韓国語ー中国語早期バイリンガル**7**人 中国語ー日本語晩期バイリンガル**7**人	韓国語ー中国語早期バイリンガル**5**人	韓国語ー中国語早期バイリンガル**8**人
刺激提示	キャプションがついた黒白写真 例:  	キャプションがついた黒白写真 例:  	単語の綴り 例: 
実験タスク: 連想タスク	刺激言語が同一に提示され、 韓国語ー中国語早期バイリンガル 刺激言語: 中国語 → 思考言語: 韓国語 刺激言語: 韓国語 → 思考言語: 中国語 中国語ー日本語晩期バイリンガル 刺激言語: 中国語 → 思考言語: 日本語 刺激言語: 日本語 → 思考言語: 中国語	刺激言語がランダムに提示され、 刺激言語:韓国語あるいは中国語→ 思考言語:中国語あるいは韓国語	刺激言語がランダムに提示され、 ① 刺激言語と同じ言語を用いて連想タスクを行う条件 刺激言語:韓国語あるいは中国語→ 思考言語:韓国語あるいは中国語 ② 刺激言語と異なる言語を用いて翻訳の関与した連想タスクを行う条件 刺激言語:韓国語あるいは中国語→ 思考言語:中国語あるいは韓国語
セッション数	**2**	**1**	**2**
タスクの難易度と現実性			
解析方法	**GLM** **MVPA**	**GLM** **MVPA （Searchlight）**	**GLM** **MVPA （Searchlight）**
主な結果	**GLM**により、意味カテゴリー（動物と道具）の神経基盤を明らかにした。 **MVPA**により、意味カテゴリー（動物と道具）の有意な予測モデルを構築した。	**GLM**により、言語切替の神経基盤の興味深い脳領域を抽出した。 **MVPA**により、意味カテゴリーと言語両方予測モデルを構築した。 **Searchlight**により、意味カテゴリーと言語両方分類能力高い脳領域を抽出した。	**GLM**により、言語切替の神経基盤を確立した。 **MVPA**により、意味カテゴリーと言語両方有意な予測モデルを構築した。 **Searchlight**により、言語を分類する能力高い脳領域を抽出した。

第 4 章　fMRI 実験：意味処理を伴う言語切替の脳反応データ解析

4.1　はじめに

4.1.1　背景

言語能力は人間にとって天賦のものである。しかも、複数の言語を使い分ける能力は人間の探究上、最も重要なテーマの一つである。世界のグローバル化が進むにつれて、多くの人々が母国語に加え、第二言語も話せるようになってきた。第二言語の習得は現代人にとって最も重要な課題とされている。このように後天的な学習による習得に加え、民族の歴史的経緯により、人々が二つの言語を同時に使用し、生まれつき併用できる地域もある。例えば、中国の朝鮮族が暮らす延辺朝鮮族自治区である。朝鮮族のように、幼い時から二つの言語が話せるバイリンガルの脳内では、どのように二つの言語が互いに干渉し合うことなく区別され、瞬時に切り替えられるか、その処理のメカニズムはきわめて興味深い。このメカニズムはまだ解明されておらず、解明された暁には、脳の可塑性を活かし、年齢に関係なく効果的に第二言語を学びネイティブの域に近づく方法論の開発につながるかもしれない。さらに、バイリンガルの神経基盤研究の枠を越え、さらに関連する様々な能力に関しても、脳の未知の側面が探求され解明されることであろう。fMRI、PET などの神経画像処理(ニューロイメージング)技術の発達により、言語は脳内でどのように処理され表現されているのか、また特に複数の言語が併用された場合、脳内ではどのように切替えられているのか、解明の糸口がついた。

本研究の目的である、言語切替の神経基盤の解明に向けて、この章ではまず、単純な言語切替を対象としたfMRI実験デザインと、そのデータ解析の方法を確立する。すでに触れたように、fMRIデータを分析する伝統的な方法は一般線形モデル(GLM)であり、これは実験条件間のコントラスト(差分)を評価する上で、ヴォクセルごとの統計的仮説検定を行い、その結果をもとに実験条件に関して賦活する脳部位を確定する方法である。一方、最近のMVPA解析はヴォクセル単体で検定するのではなく、まとまったヴォクセルの振る舞いをパターンとしてとらえ、それらのパターンが区別できる有意な分類精度を持った機械学習モデルを計算できるか見るものである。これにより、異なる脳の状態や脳活動のパターンの間で、情報はどのようにエンコードされ、編成されているかをとらえる。今まで、MVPAは数多くの分野で幅広く用いられており、例えば意味カテゴリーの分類(Haxby et al.2001；Cox & Savoy 2003；Akama et al.2012)、一次視覚野における低レベルの視覚特徴の分類（Haynes & Rees 2005, Kamitani & Tong 2005）、聴覚野における聴覚刺激の分類（Formisano et al. 2008、Staeren et al. 2009）、さらに、意図など抽象的な脳の状態の分類（Haynes et al. 2007, Soon et al. 2008）、ワーキングメモリの内容の分類（Harrison & Tong 2009）などが特筆に値する。しかし、言語切替への応用、たとえば、バイリンガル話者は個別の試行においてどの言語で刺激を受容しタスクを行っているかを判別するモデルに関するMVPA研究は、まだ存在していない。

言語は意味を表す媒体であると言われる。直接的に言語自体、言語一般(そのもの)をいきなり対象として研究するのではなく、言語が扱う個別の意味カテゴリーに着目し、その違いがどのように処理されているか解明するアプローチは、その具体性、操作の容易さを考えるとまず有効である。意味はどのように脳内で表現されているのか、その研究は神経言語学のひとつの端緒となる。先行研

究によると、「動物」と「道具」は特徴的な二つの意味カテゴリーとして、脳内では異なる対照的な神経基盤において表現されることが知られている。人間は「動物」について連想する時、主に身体的特徴にフォーカスするので、後頭葉の視覚野が顕著に賦活する。一方、「道具」を連想する時、人間はしばしば実際にその道具を使うことを思い浮かべるので、視覚野というより、手足を動かす状況をシミュレートすることで、運動に関連する部位、たとえば運動野や感覚運動野も賦活することが多い。例えば、Pulvermüller (2001)の研究を始めとする身体性理論(embodiment theory)では、意味や概念知識は環境と人間の身体の間の相互作用という形で捉えられるので、異なる意味カテゴリーが異なる脳内基盤を持つというマッピングが提唱されている。

本実験では、この典型的な意味カテゴリーの処理を素材にしつつ、それらの媒体である言語も同時に切り替えるので、バイリンガルの条件も明確に確定しなくてはならない。そこで、一般に認められた分類に従い、言語の習得年齢に応じて、早期バイリンガルと後期バイリンガルに分けている。本実験はそれぞれこの二つのバイリンガルグループを対象として、母語と第二言語(早期バイリンガルでは第二母語、後期バイリンガルでは外国語)の間で言語切替の実験を行う。そして、GLM と MVPA をデータ解析に適用し、意味処理を伴う言語切替の解析を試みる。

すなわち、本実験は早期バイリンガルと後期バイリンガルを対象とした、言語切替を伴う意味処理に関して、その神経基盤を捉えるためのものである。次の節では、実験とデータ解析の詳細について述べる。4.3 節では、実験の結果と考察を扱う。最後に実験で得られた結論と問題点を検討する。

4.1.2　目的

fMRI 実験 1 の目的は本研究のデータ解析方法に関し、そのベースラインとなるものを確立することである。具体的に言うと、まず、言語を切替えるという条件の下で、意味カテゴリーの神経基盤は単一の言語で同様のタスクを行う場合に比してどのように変化するか、あるいは言語切替の条件にかかわらず一定の構造安定性(robustness)を示すか見る。特に MVPA を用いて、意味分類に有意な結果、高い分類精度が得られるかどうかを調べる。

このような目的をもって、以下のような fMRI 実験をデザインし、14 人のバイリンガルに対して、日を分けて２回のセッションを行った。

4.2　fMRI 実験 1

4.2.1　実験の概要

この実験は Akama et al.(2012)と Mitchell et al.(2008)の枠組に大筋は則ったデザインを採用している。事象関連(event-related)デザインであり、実験刺激は、画像とそのキャプションを同時に視覚提示するもので、各試行の順番はランダムである。実験参加者は、提示された刺激の表す対象について、その典型的な属性を連想の形で心の中に想起するよう、あらかじめ指示されている。fMRI の撮像条件は、TR1 秒、ヴォクセルの解像度は 3×3×6 ミリメートルである。スキャン範囲は、頭頂葉が少しはみ出て小脳の約半分が覆われる、斜めの 15 スライスにより設定されている。早期バイリンガルと後期バイリンガルの実験参加者は、それぞれ独立した言語切替のタスクからなる 2 セッションに参加した。一つのセッションでは、第一母国語（母国語）の刺激を見て、早期バイリンガルは第二母国語（後期バイリンガルは第二言語）で連想する。もう一つ

のセッションでは、早期バイリンガルは第二母国語（後期バイリンガルは第二言語）の刺激を見て、第一母国語（母国語）で連想する。

GLM 分析は 14 人の実験参加者のデータを使い、動物と道具の神経基盤を抽出した。MVPA の分析は、従来のセッション内の分類モデルとセッション間の分類モデルのふたつを単一主体(single subject)レベルで計算した。

4.2.2 実験参加者

韓国語 - 中国語早期バイリンガル 7 名（男 1 名、女 6 名）と中国語 - 日本語後期バイリンガル 7 名（男 3 名、女 4 名）が今回の実験に参加した。平均年齢は 24 歳（範囲 22 歳～28 歳）で、平均 18 年の教育を受けている（範囲 16 年～20 年）。

言語習得年齢は、その言語の脳における神経表現に影響を及ぼすとされている（Perani& Abutalebi 2005）。そのため、今回の実験では、早期バイリンガルと後期バイリンガルはそれぞれ独立した二つのグループに分けた。すべての実験参加者は、正常の視力あるいは矯正の視力で、右利きである。また、健康で、精神疾患はない。口頭で実験説明を行い、書面にてインフォームドコンセントを得た。実験はヘルシンキ宣言の理念に則り、東京工業大学大学院社会理工学研究科疫学研究倫理委員会で承認を受けたものである。

韓国語 - 中国語早期バイリンガルは中国朝鮮族で、出身は中国吉林省延辺自治区である。幼少時から家庭で韓国語を学び、学校に入ってから中国語の勉強を開始した。日常生活の言語環境も韓国語と中国語の二つの言語であった。5 点満点（1＝‘非常に下手’、5＝‘非常に上手’）の言語能力の自己申告によると、中国語の言語能力は‘非常に上手’という結果を得た。具体的に言うと、自己申告では読む平均 4.71、聞く平均 5.00、話す平均 5.00、書く平均 4.29 で

ある。同様に、韓国語の能力も‘非常に上手’と自己評価しているという結果を得た。読む・聞く・話す平均は 5.00 で、書く平均は 4.71 である。独立 2 標本の t テストにより、韓中早期バイリンガルの中国語と韓国語の能力については有意の差はない（読む t ＝1.549、書く t ＝1.643、$p>0.05$）。

中国語 - 日本語後期バイリンガルは日本語の学習者であり、18 歳以降日本語を学び、全員日本語能力試験一級に合格している。日本語能力試験一級は日本語能力試験の中で、最も高いレベルで幅広い場面で使われる日本語を理解することができるとされている。実験参加者は参加時には日本に滞在していて、日本での滞在平均年数は 6.3 年である。（範囲 2.5～8 年 SD＝2.12）。言語能力の自己申告によると、日本語の能力において、読む平均と聞く平均 4.13 で、上手であると自己評価がなされている。また話す平均 3.75、書く平均 3.75 で、やや上手という自己評価になった。また、母語である中国語の結果は非常に上手ということであった。書く平均 4.63、読む・聞く・話す平均は 4.88 になる。 t テストにより、中国語と日本語の間に有意の差が見られた(聞く t=2.898、読む t=4.243 、話す t=5.463、書く t=3.564、$p<0.05$）。よって、7 名の中国語 - 日本語後期バイリンガルは上級の日本語学習者と見なすことができる。

4.2.3 実験刺激

ここで使用された実験パラダイムは Mitchell et al.(2008)と Akama et al.(2012)の研究に基づいている。言語刺激とともに、コントラストが正規化されたグレースケールの写真 40 枚が使用された。これらの写真は EEG の賦活パターンを予測する研究（Murphy et al. 2009； Murphy et al. 2011）で既に使われている写真群から選ばれたものである。刺激写真が意味する対象は二つの意味カテゴリーに属するものとなっている。20 枚の写真は「道具」で、20 枚の写

真は「動物」である。また、写真のキャプションは三か国語（日本語、中国語、韓国語）のものが用意された。刺激提示はE-Prime software v.2.0を用いて行われ、最初のトリガー信号でプログラムが開始するようfMRIスキャナと同期させた。この実験では、一セッションは、6ラン(セット)によって構成され、各ラン(セット)の間に40秒間、実験参加者が注視点を見て休む時間が設けられている。各ラン内で、40枚の刺激はランダムに提示され、合計240回の刺激提示の試行が行われることになる。なお40個の刺激は以下の通りである。

Anteater（食蚁兽，アリクイ，개미핥기），armadillo（穿山甲，アルマジロ，아르마딜로），beaver（河狸，ビーバー，비버），camel（骆驼，ラクダ，낙타），deer（鹿，シカ，사슴），elephant（大象，ゾウ,코끼리），fox（狐狸，キツネ，여우），giraffe（长颈鹿，キリン，기린），gorilla（大猩猩，ゴリラ，고릴라），hare（野兔，野ウサギ，토끼），hedgehog（刺猬，ハリネズミ，고슴도치），hippopotamus（河马，カバ，하마），kangaroo（袋鼠，カンガルー，캥거루），koala（考拉熊，コアラ，코알라），mole（地鼠，モグラ，두더지），monkey（猴子，サル，원숭이），panda（熊猫，パンダ，참대곰），rhinoceros（犀牛，サイ，코뿔소），skunk（臭鼬鼠，スカンク，스컹크），zebra（斑马，シマウマ，얼룩말）. Tools: Allen key（六角匙，六角レンチ，앨런 볼트용 렌치），axe（斧头，斧，도끼），chainsaw（链锯，チェーンソー，동력 사슬톱），craft knife（工艺刀，クラフトナイフ，다용도 칼），file（锉刀，ヤスリ，줄），hammer（铁锤，ハンマー，망치），nail（钉子，釘，못），paint roller（油漆滚筒，塗量ローラー，페인트 롤러），trowel（抹泥刀，移植ゴテ，모종삽），pliers（钳子，ペンチ，펜치），plunger（活塞，パイプ吸引具，플런저），power drill（电钻，電気ドリル，동력 천공기），rake（耙子，熊手，갈퀴），saw（锯子，ノコギリ，톱），

scraper（刮刀，こすり落とし用ヘラ，긁어내는 도구），scissors（剪刀，ハサミ，가위），screw（螺丝钉，ネジ，나사），sickle（镰刀，鎌，낫），spanner（扳手，スパナ，스패너），tape measure（卷尺，巻き尺，줄자）.

実験刺激の書記体系は言語ごとに異なるものであり、中国語は純粋な表意文字であるのに対し、韓国語（ハングル）は表音文字である。また日本語は表意文字（漢字）と表音文字（かな）の組み合わせからなる。

4.2.4 実験デザイン

実験参加者は少なくとも一週間をおいて、二回のセッション実験に参加した。各セッションでは、実験刺激は一つの言語で提示され、もう一つの言語で連想タスクを行ってもらう。例えば、韓国語 - 中国語の早期バイリンガルに対して、第 1 セッションでは、実験刺激は韓国語で提示され、中国語で連想してもらう（これを韓国語 Korean の頭文字 K、中国語 Chinese の頭文字 C を取って K→C と略記する）、また第 2 セッションでは、実験刺激は中国語で提示され、韓国語で連想してもらう（C→K と略記する）。同様に、中国語 - 日本語の後期バイリンガルにも使用言語は異なるが、それ以外の条件は同じ連想タスクを指示する（日本語 Japanese の頭文字 J を取り、C→J と J→C）。さらに、言語間、実験参加者間内で、カウンターバランスを取り、順序効果など局所的要因をなるだけ相殺するようにした（図 4-1 と図 4-2）。

各トライアルでは、それぞれの刺激は 3 秒間提示され、その後は 7 秒間、注視点となる十文字(フィクセイションクロス)が提示された。また、各ランの後、40 秒間ずつフィクセイションクロスが提示され、ここでの脳の反応を MVPA においてはベースラインにした（図 4-3）。刺激提示の 3 秒間の中で、実験参加者は

提示された概念について連想タスクを行い、続く 7 秒間のフィクセイションクロスの時間は何も考えずに、安静に待機することが要求された。

実際の fMRI 実験で、実験参加者が各刺激に対して迷うことなく属性想起できるように、事前に十分なリハーサルタスクも行われた。(Mitchell et al. 2008)。特に、中国語 - 日本語後期バイリンガルの場合は、二つの言語の間に自己申告の運用能力上、有意差も見られたため、言語の熟達度も異なると考え、一時間以上のリハーサルタスクも行った。リハーサルタスクでは、事前に実験参加者に各刺激の属性を両言語で準備させ、fMRI 装置の中を想定して、実験刺激をランダムに提示し、反応に誤りが生じない程度まで、一時間以上の練習をさせた。実際の実験に入る前、正確にタスク言語を用い、属性想起と切替ができることを確認した上で、実験に臨んだ。

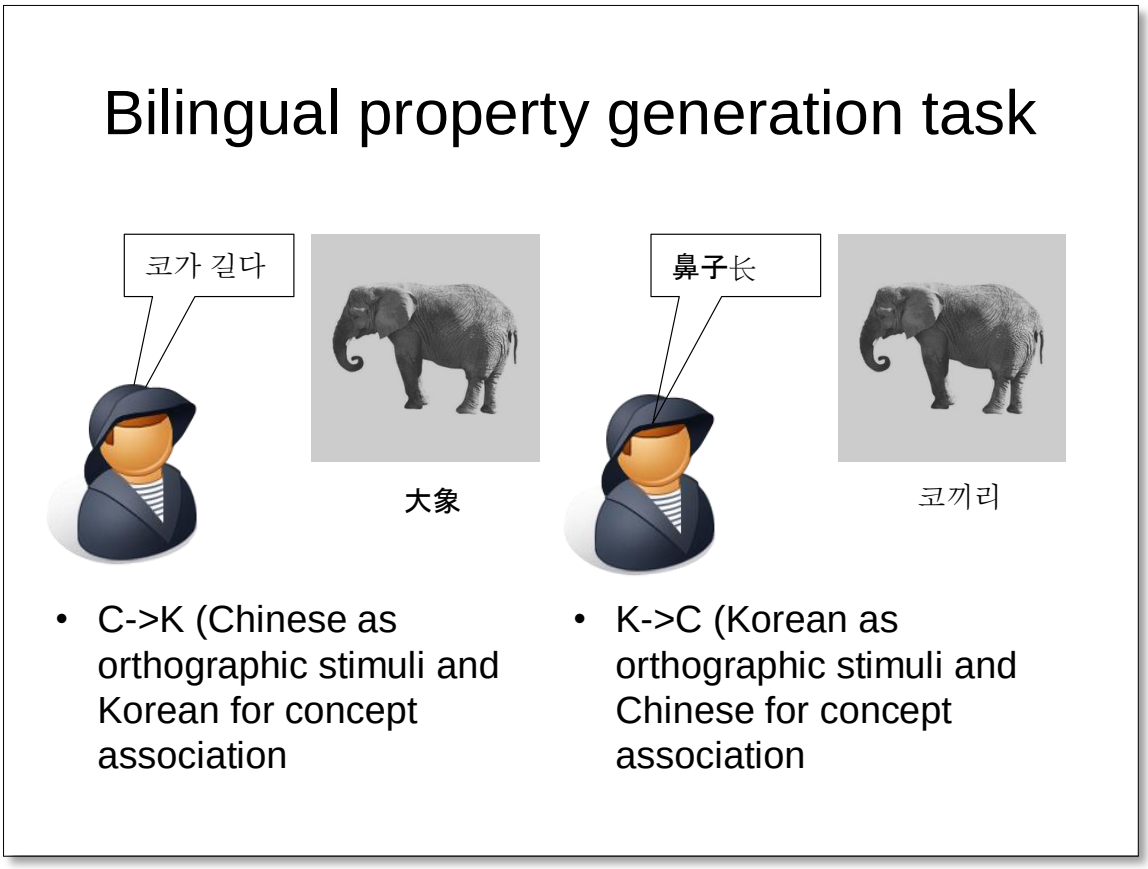


図 4-1：　韓国語 - 中国語バイリンガルにおける言語切替タスク

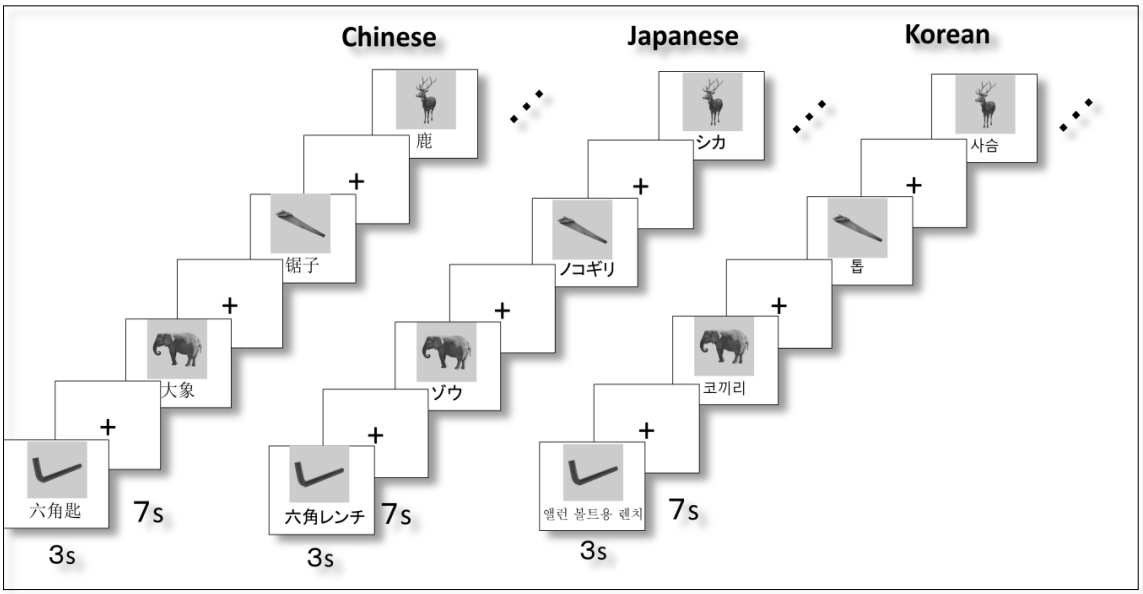


図 4-2：　三言語の実験刺激デザイン

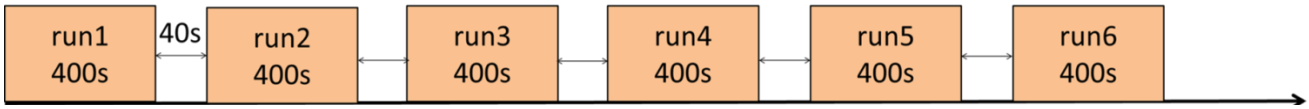


図 4-3： 1 セッションの実験デザイン

4.2.5 fMRI データの収集

本 fMRI 実験は、東京工業大学の所有する 3.0 テスラの GE 製の MRI スキャナを用いて行い、脳の解剖学的画像と機能的画像を撮影した。このスキャナは 8 チャンネルの高解像度のヘッドコイルを使用する。スキャン・パラメーターは Mitchell et al.(2008)に基づいていたものである。機能画像の繰り返し時間（TR）は 1000ms で、検出するまでの時間（エコー時間）（TE）は 30ms で、60 度のフリップ角（FA）を採用した。各ボリュームには 1mm のスライス・ギャップを設け、15*6mm のスライスで構成された。撮影面範囲（field of view)は、20*20cm で、撮影の収集マトリクスは 64*64 により、機能画像の空間的解像度を決定した。ヴォクセルサイズは 3*3*6mm^3 である。解剖学的画像の TR は 7.284ms、TE は 2.892ms、FA は 11 度、バンド幅は 31.25kHz、ヴォクセルサイズは 1*1*1mm^3 である。スライス角であるが、矢状面（sagittal view）の前方に眼の上を通り、後方に小脳を通過する-20 から-30 度の角度で撮影を行った。

4.2.6 本実験のデータ解析

取得された fMRI 画像に対しては、最初に一般線形モデルの解析を行った。まず実験の生データは Parametric Mapping software(SPM8, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)を使って以下のような前処理を施した。機能画像データは動作補正を行い、解剖的画像にはめ込まれ、灰

質（かいしつ）を同定するように切り分けられ、MNI 座標に従って標準化され、3mm 3mm 6mm のヴォクセルに切り分けられるよう、空間的解像度を設定した。まず、実験参加者ごとに、GLM の分析により、「動物」と「道具」の意味カテゴリー間で対比結果を得た（統計的補正なし(uncorrected)， $p<0.001$）。またグループ解析では、変量効果分析(random effect analysis)により、14 人の集団レベルで対比結果を画像化した。

その後、MVPA の解析を行ったが、その前提として SPM8 による前処理の際に、最後の平滑化(smoothing)のステップだけ省略した。MVPA は PyMVPA2.0 を使用して実行されたが、PyMVPA2.0 は、fMRI データの機械学習のため開発された Python2.7 のパッケージである。各セッションにおける各参加者のデータをセグメント化、正規化されて平滑化されていないもので、ヴォクセルパターンを識別するために、分類器を訓練した。各トライアルの中で、意味カテゴリー（動物と道具）の分類モデルを構築するためである。血行動態応答(haemodynamic response)を近似し、刺激提示後の遅延 4 秒からボックスカーの幅にして 4 秒を反応のピークとしてその平均を反応データに採用した。

分類器は PyMVPA パッケージ内の「ペナルティ付きロジスティック回帰分析 Penalized Logistic Regression classifier (PLR)」 を使い、意味カテゴリーの分類精度を得た。また単一実験参加者内のセッション内のみならずセッション間の分類精度も得られた。

4.3　結果及び考察

4.3.1　GLM の結果及び考察

14 人のデータに対し、まず個人ごとに GLM の計算した後、第二次レベルとしてグループ解析も行った。すなわち合計 14 人の実験参加者の 28 セッションに関して、SPM8 で変量効果分析を行っている（統計的補正なし(uncorrected), $p<0.001$）。脳活動は、クラスターサイズ 10 以上及び統計的閾値 $p<0.001$ を超えている場合だけを有意と見なしている。

図 4-4 と図 4-5 はそれぞれ「動物」対「道具」と「道具」対「動物」の脳賦活コントラスト(前者から後者を引いた差分)を示す画像である。また表 4-1 は賦活の認められた脳部位の名称を列挙している。「動物」対「道具」の T コントラストによると、「動物」に関する脳の賦活領域は右の中側頭回、右の中前頭回、右中心前回と左中後頭回である。一方、「道具」に関する脳の賦活領域は左前頭頂葉と左縁上回である。

この結果は、Demonet et al.(1992)と Pulvermüller et al. (2001)などで報告されている「動物」と「道具」に関連する脳の賦活部位とほぼ重なっている。つまり、動物の意味処理に関連する脳領域は後頭葉に集中し、道具の意味処理に関する脳領域は運動野の近くにあり、対象の操作などに関連している。この結果は身体性理論（Embodiment Theory）の解釈に有利なものとなっている。

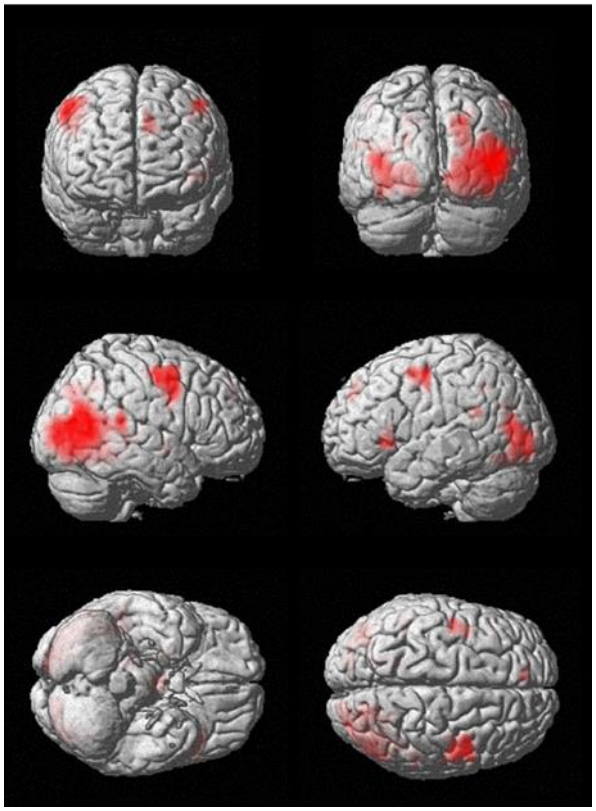


図 4-4： 動物対道具の脳賦活パターン（uncorrected, p<0.001）

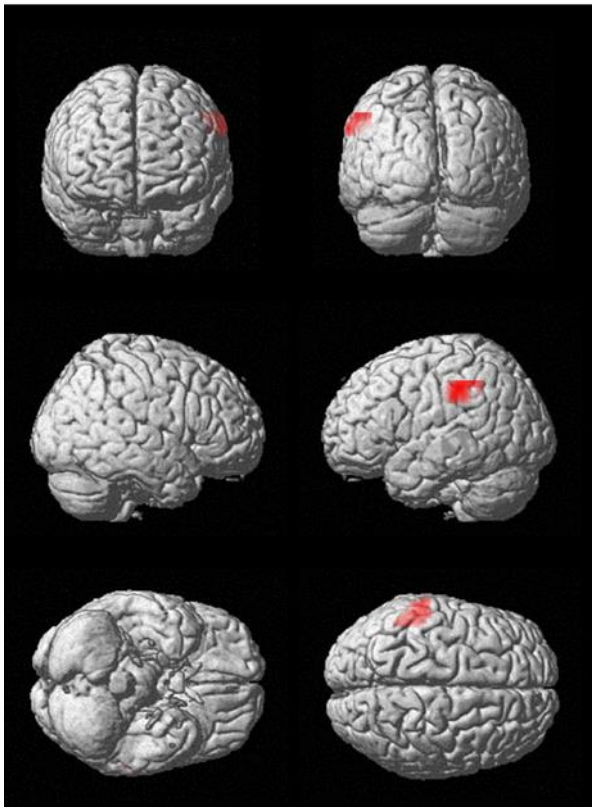


図 4-5：　道具対動物の脳賦活パターン（uncorrected, p<0.001）

表 4-1： 有意に賦活している脳部位（uncorrected,p<0.001）

動物対道具　Mammal>Tool		
脳部位 Brain region	MNI 座標[x,y,z] MNI coordinates	z スコア z -score
右中側頭回 R. Middle Temporal Gyrus	39,-67,22	5.03
右中側頭回 R. Middle Temporal Gyrus	45,-55,10	4.89
右中側頭回 R. Middle Temporal Gyrus	36,-61,16	4.86
右中前頭回 R. Middle Frontal Gyrus	54,-7,52	4.71
右中前頭回 R. Middle Frontal Gyrus	42,2,58	4.23
右中心前回 R. Precentral	36,-13,52	3.28
左中後頭回 L. Middle Occipital Gyrus	-39,-76,10	4.40
左中後頭回 L. Middle Occipital Gyrus	-15,-91,-8	4.09
左下後頭回 L. Inferior Occipital Gyrus	-36,-76,-8	3.85

道具対動物　Tool >mammal		
脳部位 Brain region	MNI 座標[x,y,z] MNI coordinates	ｚスコア z -score
左下頭頂回 L. Inferior Parital Gyrus	-51,-46,46	3.74
左下頭頂回 L. Inferior Parital Gyrus	-51,-34,46	3.56
左縁上回 L. Supramarginal Gyrus	-63,-34,34	3.40

4.3.2 MVPA の結果及び考察

単一参加者のセッション内の分類

続いて MVPA を適用したところ、言語切替の条件下でも、高い意味分類の精度が得られた。

韓国語 - 中国語の早期バイリンガルの実験では、各実験参加者の各セッションのデータを用いて、「動物」と「道具」の意味カテゴリーを区別するために、分類器を訓練した。「動物」と「道具」の二値の分類なので、母集団に二項分布を仮定した場合、サンプルサイズが全試行数 240 なので、5%水準で 55.8%が有意になり、それより小さい場合はチャンスレベルと見なされる。

図 4-6 に示すように、韓国語の刺激に対して中国語で連想するセッション（K->C）と中国語の刺激に対して韓国語で連想するセッション（C->K）の双方において高い分類精度が得られた。韓国語の刺激に対して中国語で連想するセッション（K->C）では、平均意味分類精度は 93.4%（SD＝0.04）で、一番高い精度は 98.8%（実験参加者１と６）であり、分類精度の範囲は 70.7%から 98.8%である。

一方、言語切替が逆方向の中国語の刺激に対して韓国語で連想するセッション（C->K）では、平均精度は 90.81%（SD＝0.09）で、最高精度は 96.7%（実験参加者 6）。分類精度の範囲は 77.5%から 96.7%である。つまり、両セッションの精度は高度に有意である。さらに、P2 と P7 を除いて、韓国語の刺激に対して中国語で連想する方がより高い精度が得られた。

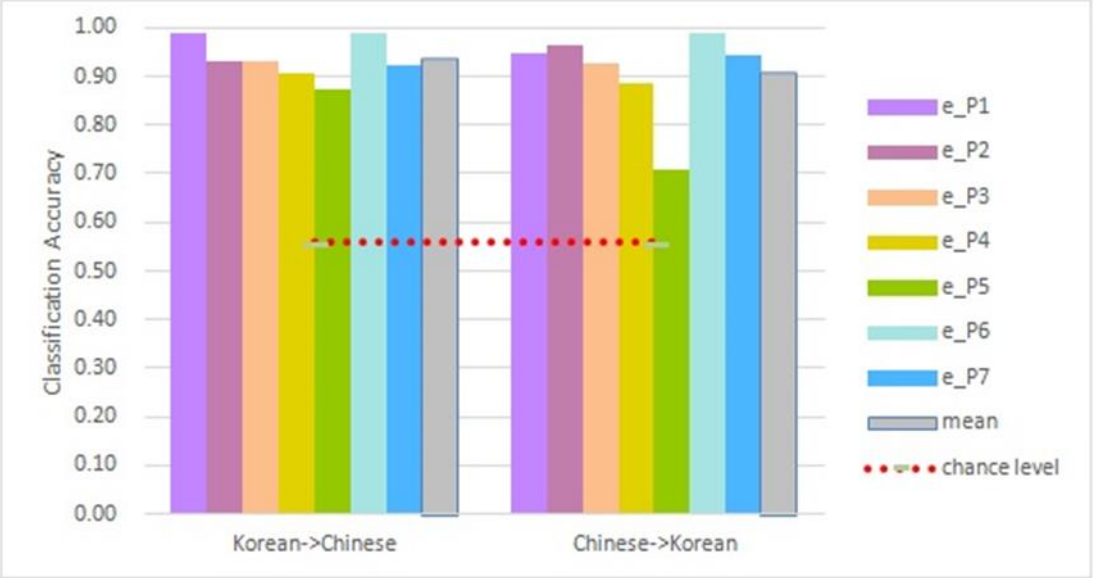


図 4-6： 韓国語 - 中国語早期バイリンガルにおける単一参加者のセッション内の意味分類精度

また、中国語 - 日本語後期バイリンガルのグループでは、分類精度の結果は図 4-7 に示すように、日本語の刺激に対して中国語で連想するセッション(J->C)では、平均精度は 92.74%（SD＝0.05）で、精度の範囲は 83.3%から 96.7%である。また、中国語の刺激に対して日本語で連想するセッション（C->J）では、平均精度は 91.6%で、精度の範囲は 77.5%から 97.5%である。

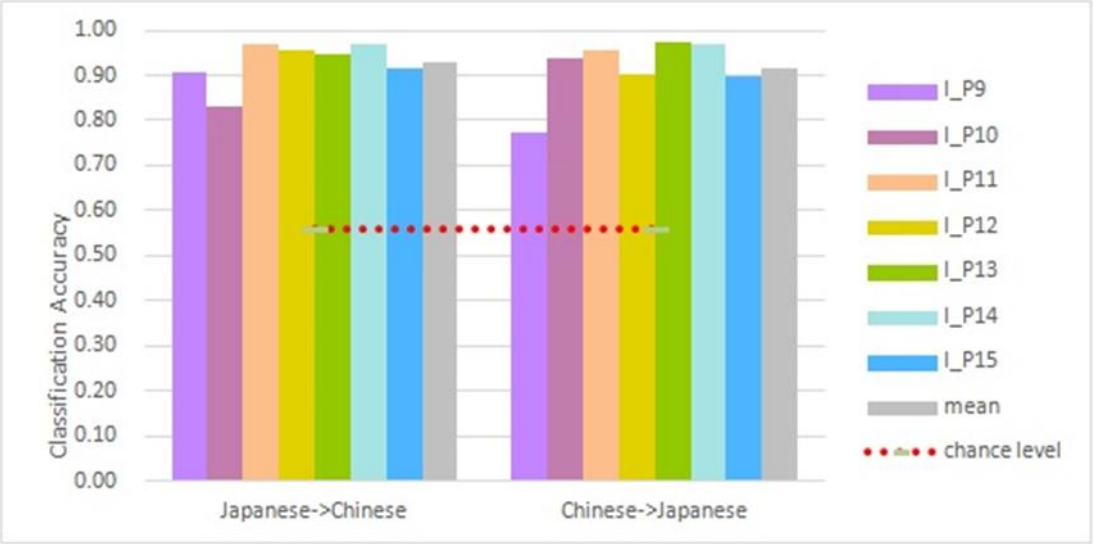


図 4-7： 中国語 - 日本語後期バイリンガルにおける単一参加者のセッション内の意味分類精度

単一参加者のセッション間の分類

ここでは、同じ実験参加者内での 2 セッションの間で、横断的に意味カテゴリーの分類ができるかどうかを検証する。この 2 セッションは異なる日に設定されたものである。同一実験参加者において、言語切替の方向がセッションごとに異なる場合でも、意味カテゴリーに関しては賦活パターンが共有されているかどうか、この実験参加者内-実験セッション間の分析によって確かめることができる。ここではまず、一方のセッションから分散分析(ANOVA)によって全ヴォクセルの f 値を計算し、その中で最も f 値が大きいヴォクセル 500 個が、試行ごとに反応が敏感で試行に関して情報を有しているものとして素性選択(feature selection)される。さらに分類のアルゴリズムとして PLR を一方のセッションデータに適用し、モデルのトレーニングを行った。同じ実験参加者の内部において、そのモデルを他方の取り置いたセッションデータに適用し、意

味カテゴリーを予想して実際の結果と比較した。さらにセッションの役割を交換し同様の手段で得られた精度も同時に計算する。

結果としては、単一参加者のセッション内での分類精度と比べてみると、クロスセッションの予測はさほど良好なものではないが有意であった。結果は図4-8と図4-9に示した通りであり、二項分布に基づくチャンスレベルも55.8%である。次に早期バイリンガル、後期バイリンガルごとに結果の詳細を見て行く。

韓国語 - 中国語早期バイリンガルでは、韓国語の刺激に対し中国語で連想するセッションのデータを訓練データとして、中国語の刺激に対し韓国語で連想するセッションのデータをテストする、つまり、(K->C) ->(C->K)の平均精度は83.6%(SD＝10%)であり、実験参加者にわたる精度の範囲は63.7%から94.2%であった。反対の方向(C->K) -> (K->C) では、結果も非常に有意なもので、平均精度は82.9% (SD=11%) 、範囲は62.9%から95.8%である。

中国語 - 日本語後期バイリンガルの結果では、日本語の刺激に対し中国語で連想するセッションのデータを訓練データとして、中国語の刺激に対し日本語で連想するセッションのデータをテストする、つまり、(J->C) ->(C->J)の予測平均精度は84.0% (SD＝8%) であり、実験参加者にわたる精度の範囲は70.4%から97.5%である。逆方向の機械学習、中国語の刺激に対し日本語で連想するセッションのデータを訓練データとして、日本語の刺激に対し中国語で連想するセッションのデータをテストする、つまり(C->J) -> (J->C)の平均精度は86.7% (SD＝5%) 、範囲は81.2%から93.3%であった。

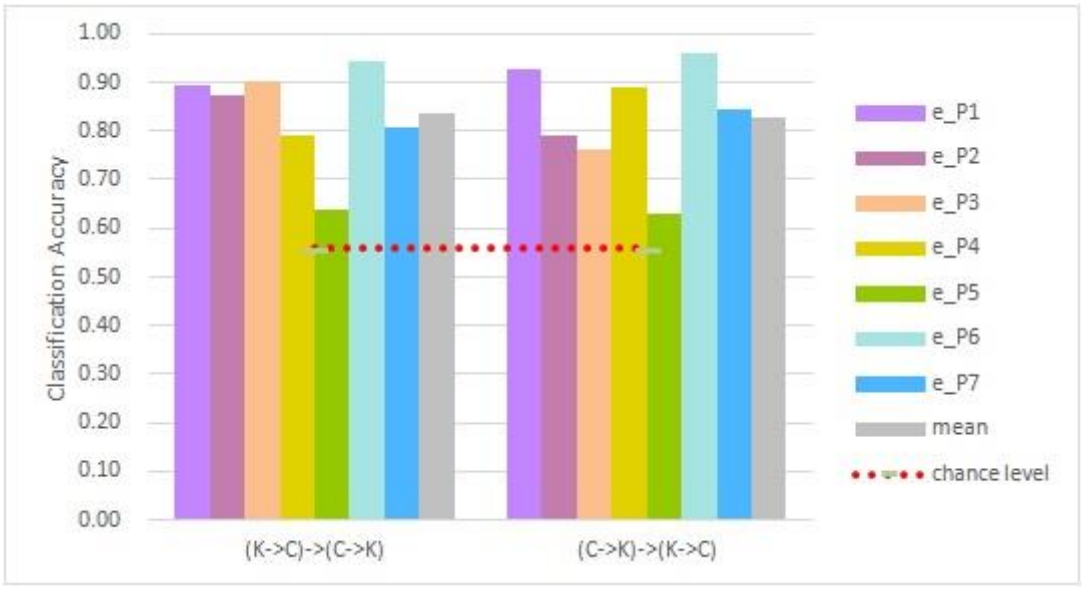


図 4-8： 韓国語 - 中国語早期バイリンガルにおける単一参加者のセッション間の意味分類精度

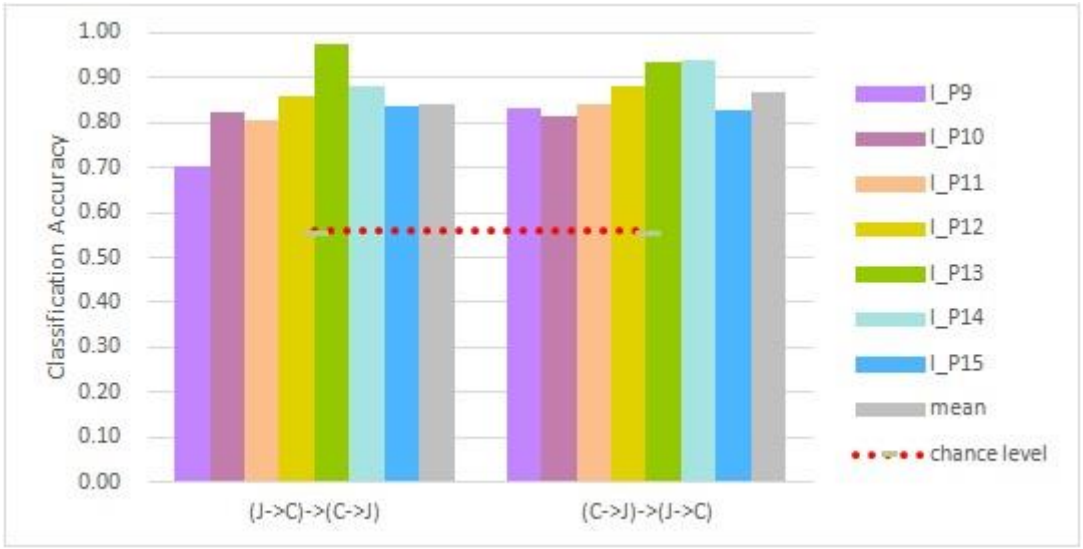


図 4-9： 中国語 - 日本語後期バイリンガルにおける単一参加者のセッション間の意味分類精度

このように、実験参加者内-実験セッション間の MVPA により、言語切替条件のもとにあっても、意味カテゴリーの予測モデルは成功裡に構築することがで

きた。この結果、MVPA は有力な分析方法として、GLM ともどもバイリンガル研究への応用が可能であるということが分かった。

4.3.3 GLM と MVPA 両方法の考察

本節では、GLM と MVPA という二つのデータ解析方法を行う必要性について議論する。

現在の脳科学の研究では、基本的に「機能局在仮説」という考え方に基づいて研究が進められている。機能局在仮説とは、脳のある部位がある特定の機能を担っており、別の部位は別の特定の機能を担っているように、機能が脳内に局在して分布し、部位と機能の間で一意的なマッピングが可能であるという仮説である。特に、ブローカやウェルニッケが、脳の損傷部位と言語機能との間に対応関係が成り立つという歴史的報告をして以来、「機能局在仮説」が主流となってきた。その後、神経疾患において脳に可視的な病巣が見つからないことなどから、「機能局在仮説」は一時期下火になり、現在も懐疑の眼で見られることもあった。しかし、脳機能画像法を可能にする技術や方法論が確立した二十世紀後半に機能局在仮説は留保つきではあるが、科学的根拠をもつものとされ、復活を遂げている。

機能局在仮説に基づく基本的なデータ解析方法は一般線形モデル（GLM）と呼ばれるものである。これは研究者が着目する実験条件のデータに関し、他の対照をなす実験条件との差分を t 検定あるいは f 検定により評価することで、相対的に大きな賦活を示す脳の領域を検出する方法である。脳活動の計測結果として提示される結果の脳画像は、差分に対する統計解析の結果である。統計的な閾値を決めて、その閾値を超えている活動のみを画像化しているため、差分の効果以外にも活動している要因が、それだけでは明らかにならないというこ

とである。一言で言うと、GLM の結果は相対的に賦活している脳部位を特定したにすぎないということである。

一方、伝統的に言われてきた機能局在仮説の限界は脳機能画像法分野でもその効力を失っていない。つまり、脳内での機能と領域との対応関係は一対一という単純なものではなく、機能は脳内において分散的表象(distributed representation)をもつという考え方である。実際、Haxby et al.(2001)の Science 論文は、従来の GLM を超えた新しい視点の解析方法として、多変量パターン解析(MVPA)を用いた。MVPA は根本的にデータ解析方法の視点を変え、従来の「何かを行っている時の脳活動の脳部位を明らかにする」という視点とは異なるアプローチを採用した、すなわち、「この脳活動あるいは脳パターンが見られた場合、その脳の主体はどのような活動を行っているのか、どのような情報がそこでエンコードされているのか」のように、脳機能データから実際の人間の思考や行動を読み取る（decoding）という視点である。具体的に言うと、MVPA は機械学習により、神経活動のパターンを分類することで、特定の条件における脳の状態を予測する方法である。また、その予測精度がヴォクセルごとに割り当てられ、ひとつの脳画像として生成する Searchlight 法と呼ばれる手法もある。Searchlight の結果も画像化することができるので、GLM による検定画像と比較可能だが、GLM と異なり、実験条件を分類・予測する情報を多く含んだヴォクセルのクラスターを示している。

この二つの解析方法を比較する研究は端緒についたばかりだが、Jimura et al.(2012)が注目に値する。GLM と MVPA を用い、全脳において、共通して意味を持つ脳領域は検出したが、無相関の異なる脳領域も同時に明らかにしている。すなわち、このふたつの解析方法では、同一実験条件であっても、それに密接に関連する情報の質・内容や表現形態が異なり、要は着目点にずれが見られる

ということである。その意味で、両者は相互補完的なものと言え、一方の解析法だけでは限界があるという考え方も成り立つ。その証左として、神経言語学の分野でも、バイリンガルの言語切替に関して GLM を用いた研究が GLM の限界について述べている例さえ存在する（Hernandez et al.2000）。この研究で著者は、fMRI や PET などの脳機能画像法を用いて言語を研究することは、人工衛星を用いて通信回線を調べると同様に難しいことであるとまで言い切っている。Hernandez によると、fMRI の空間解像度は他の脳機能画像法と比べると、優れた空間解像度を持っているが、言語の切替のような高次認知的な脳機能を調べるにはまだ不十分であるかもしれない（Hernandez et al.2000）。本研究は最初の試みとして、神経言語学の分野でこの二つの方法を有効に統合し、バイリンガル研究に適用した。同じデータに関して、異なる視点の分析を併用し統合することにより、それぞれの解析方法の不十分な点を補い、多角的な結果を提供したい。

4.4 まとめ

本章では、以前の知見を踏まえながら、早期と後期のバイリンガル話者に対し、言語切替の要素を導入したタスク環境において、意味カテゴリーとして「動物」か「道具」に属する刺激を提示する形で、連想タスク実験を行った。その結果、「動物」と「道具」の意味カテゴリーに対する神経基盤を明らかにすることができた。「動物」に関する脳の領域は右の中側頭回、右の中前頭回、右中心前回と左中後頭回である。一方、「道具」に関する脳の領域は左前頭頂葉と左縁上回である。この結果は先行研究とほぼ一致するものである（Demonet et

al.1992; Martin et al.1996; Chao et al.1999 ; Pulvermüller et al. 2001）。さらに、MVPA を用いて、同一実験参加者のセッション内とセッション間で機械学習により意味分類を行った結果、双方において高い分類精度が得られた。早期バイリンガルと後期バイリンガルを問わず、GLM と MVPA は、意味処理を伴う言語切替の fMRI データに同時に適用することが可能であり、データ解析の手続きとして最も基本的な形式を確立することができた。言語切替という環境下でも、概念処理を司る神経基盤には、一定の構造安定性(robustness)が認められた。

しかし、この実験の実験デザインでは、意味処理に言語切替の要素を導入したものの、同一のセッション内では、同一言語のみが提示されたため、意味の神経基盤と分類しか可能にならない。次の実験 2 では、意味カテゴリーの神経基盤と反応分類ばかりでなく、言語そのものの分類予測モデルの構築を目指すことになる。

第 5 章　fMRI 実験：ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応

5.1　はじめに

5.1.1　背景

第 4 章では、伝統的な同一言語の連想タスク実験に言語切替の要素をも導入し、言語切替の状況下で、GLM で意味カテゴリーの神経基盤と明らかにするとともに、MVPA で意味カテゴリーの分類予測モデルを構築することに成功した。GLM と MVPA は、ともに意味処理を伴う言語切替の脳反応データへ適用することが可能である。しかし、fMRI 実験 1 の実験デザインでは、同一セッションで同一の言語しか利用しないために、基本的に、言語間の賦活コントラストを検定したり、言語の分類モデルを構築したりすることはできなかった。同じセッション内で実験参加者が中国語の刺激しか与えられない場合、たとえ韓国語で連想して言語切替が行われたとしても、その切替の方向がセッション内で同一なため、条件の弁別に必要な刺激レベルでのコントラストの設定ができない。

そのため、バイリンガル話者の生活環境を考えて、より現実的な言語切替の場面に近い条件を課し、意味カテゴリーのみならず、トライアルごとの使用言語までも分類できるよう、また、言語切替の神経基盤が明らかになるよう、fMRI 実験 2 を設計した。この実験では、各試行において刺激がランダムな順序で提示されるので、実験参加者は刺激となる対象自体を予想できないばかりか、その対象がどの言語で提示されるかも予測することができない。つまり意味処理におけるカテゴリーの区別のみならず、意味を媒介する言語の種類の区別まで、ファクターとして導入したダブルターゲットの実験デザインのため、実験タス

ク自体も実験１に比べて困難なものになった。そこで第５章で説明する fMRI 実験は、両言語の熟達度の高い早期バイリンガルのみを対象に実験を行った。

5.1.2　目的

本実験の目的は、より現実の言語切替の場面に近い想定のもと、複雑かつ迅速な言語切替タスクが加わった意味処理において、GLM と MVPA の双方を併用する分析方法が効力を有するかどうか検証し、言語切替の神経基盤を探究することにある。言語の区別と言うファクターも導入したため、ダブルターゲットの困難で複雑な実験デザインを利用することになるが、バイリンガル話者の脳から意味と言語の同時分析・分類が可能であるかどうか、明らかにすることはこれまでにない試みであると言える。本章において、まず、5.2 節では実験の詳細を述べる、5.3 節では実験の結果と考察を検討する。最後に fMRI 実験 2 の結論と問題点を指摘する。

5.2　fMRI 実験 2

5.2.1　実験の概要

実験参加者は５人の韓国語 - 中国語の早期バイリンガルである（一人は男性である）。この５人は実験１の韓国語と中国語の実験も参加しているが、十分に期間を置いている。先述のごとく、今回の実験では同一セッション内に言語切替のタスクを導入したが、この５人の実験参加者はすでに実験１を経験していたので、リハーサルの段階で、難度が上がっても対応可能であると自己申告している。ただし、第二言語の習得能力を鑑みると、後期バイリンガルにとっては、相対的に困難な実験タスクであるため、本研究では早期バイリンガルに

対象を限定した。今回は意味と言語のダブルターゲットの分析であるが、このような二つの要因の相互作用について、神経基盤をめぐる仮説が存在していないので、この研究では、個別に意味カテゴリーと言語の種類に関し、分析を行った。

5.2.2　実験デザイン

まず、意味カテゴリー（ここでは簡略化された表示によって複雑な構成を表現するため、″m″と″t″の記号を使って「動物」と「道具」を代表させる）に基づいて、ランダムに選択することにより、刺激は m1、m2 と t1 と t2 に分けられる。m1 と t1 の実験刺激アイテムは、総計６回のラン(提示セット)において、奇数回目のランにおいては中国語で提示され（第 1、3、5 ラン）、また偶数ランにおいては、韓国語で提示される（第 2、4、6 ラン）。同様に、m2 と t2 のアイテムは奇数ランには韓国語で提示され、また偶数ランには中国語で提示される。刺激アイテムは実験 1 と同じようにランダムに提示される。このような均衡するランダムミックスのデザインにより、ダブルターゲット（意味カテゴリーと言語）の分析が可能になった。

実験タスクは言語を切替えながらの連想タスクである。つまり、3 秒間の刺激提示時間内で、中国語の刺激に対しては韓国語で連想し、また韓国語の刺激に対しては中国語で連想する。韓国語と中国語の刺激はランダムに提示されるので、実験参加者はあらかじめ次に何語が提示されるか知ることはできず、一定の緊張を維持しつつ瞬時に言語の切替をしなければならない。このような実験デザインは後期バイリンガルによって非常に難しいタスクだと考えられる。

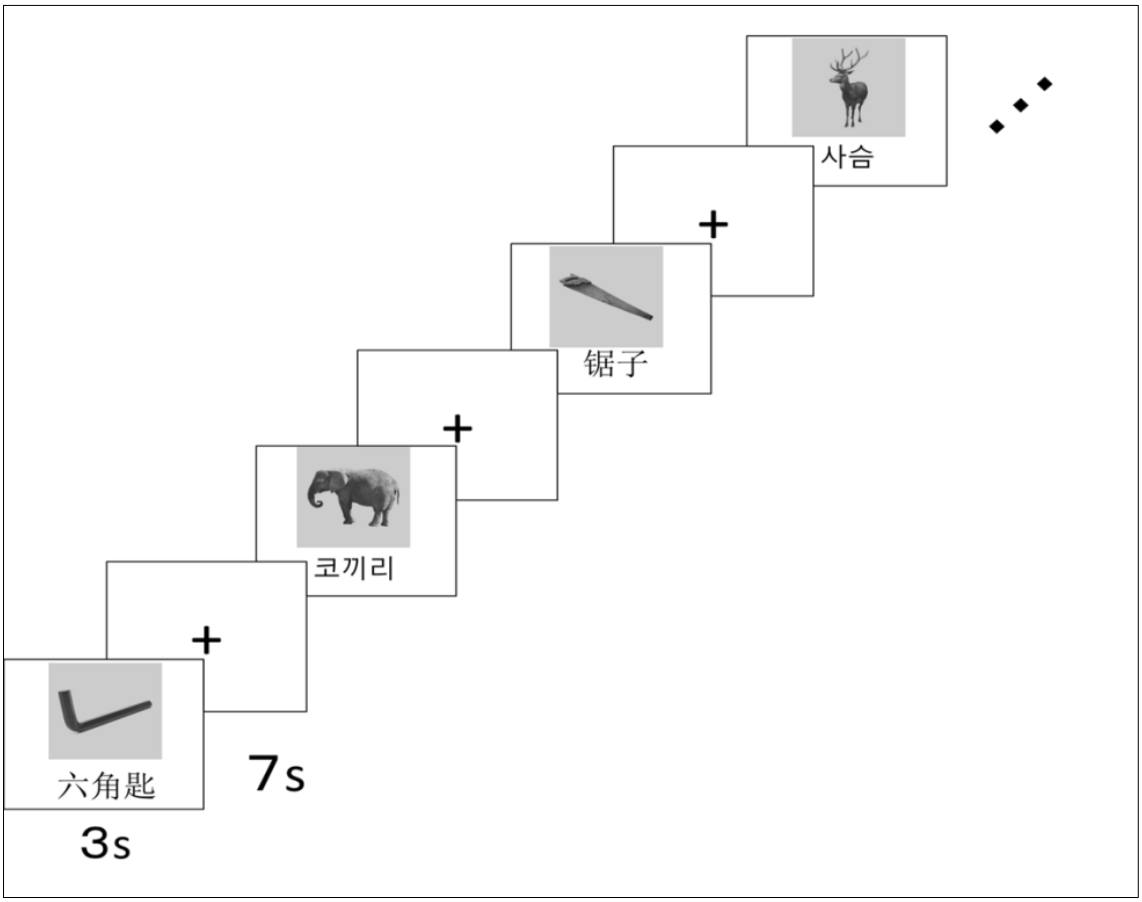


図 5-1：ランダムミックスの実験デザイン

5.2.3　本実験のデータ解析

実験 1 と同様に GLM と MVPA を使ってデータ解析を行ったが、実験 2 では新たに Searchlight 法と言う分析手法を導入して機械学習を行った。GLM 解析では、言語切替の中国語→韓国語と韓国語→中国語の対比賦活パターンが得られた。意味カテゴリーに関する脳部位は第 4 章で得られたので、ここでは割愛する。また、実験セッションが少ないため、全実験データが仮想的に同一主体から得られたものとして計算する固定効果分析(Fixed Effect Analysis)を用いて集団レベルの GLM を行った。

MVPA は、実験１から多くの条件を踏襲したが、ここでは意味カテゴリー分類に平行して、使用言語の分類も行っている。さらに Searchlight 法を通常の全脳に対する MVPA に合わせて利用している。Searchlight 法では、各ヴォクセルに関して機械学習を個別に行い、分類精度に基づく画像を作り上げる。その精度が高いヴォクセルがその条件に関して情報を持つヴォクセルと見なされるわけである。Searchlight は素性選択の方法としてよく使われているが(Pereira et al.2009）、興味深い脳部位の抽出方法としても使われている。またより具体的な解析方法は付録１で解説する。Searchlight 分析も PyMVPA2.0 パッケージを用いた。

具体的に、機械学習の分類器は「ペナルティ付きロジスティック回帰分析 Penalized Logistic Regression classifier (PLR)」で、searchlight の半径は 3 と設定した。また、各ヴォクセルの分類精度の Z 統計量を計算して、標準正規分布の仮説の下で 0.001 の p 値に対応する 3.08 の閾値を用いてスクリーニングした。最後に、実験参加者ベースの画像は XjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、出力した。

5.3　結果及び考察

5.3.1　GLM の結果及び考察

早期バイリンガルが言語切替を行っている際の中国語と韓国語の脳賦活部位を GLM を用いて明らかにした。まず、条件のコントラストの名前について説明する。「中国語 to 韓国語 - 対-韓国語 to 中国語」というのは、言語切替のタスクの中で、<<刺激提示は中国語で、連想タスクは韓国語で行う条件>>マイナス<<刺激提示は韓国語で、連想タスクは中国語で行う条件>>の謂である。つまり、

中国語を見て韓国語で連想する時の脳の活動領域であると考えてよい。これをここでは「中国語 to 韓国語」と略する。それに対し、「韓国語 to 中国語 - 対-中国語 to 韓国語」というのは、韓国語を見て中国語で連想する時の脳の活動領域として良い。これをここでは「韓国語 to 中国語」と略する。

固定効果分析においては、脳活動はクラスターサイズ 10 以上及び統計的閾値 $p<0.005$ を超えている場合だけ有意と見なしている。

図 5-2、図 5-3 と表 5-1 に示した通り、「韓国語 to 中国語」の脳賦活部位は前頭葉に見られる。具体的に言うと、右下前頭回 Right inferior frontal gyrus、右中前頭回 Right middle frontal gyrus、右中心前回 Right precentral gyrus、左中心前回 Left precentral gyrus、左下前頭回 Left inferior frontal gyrus、左中前頭回 Left medial frontal gyrus と左上前頭回 Left superior frontal gyrus などである。一方、「中国語 to 韓国語」の脳の賦活部位は後頭葉に集中している。具体的に、右中側頭回 Right middle temporal gyrus、右上側頭回 Right superior temporal gyrus、左上頭頂回 Left superior parietal gyrus、左角回 Left angular gyrus、左中後頭回 Left middle occipital gyrus、左上後頭回 Left superior occipital gyrus と右楔前部 Right precuneus などである。

「韓国語 to 中国語」の脳賦活部位のピークが存在する領域である左中前頭回（Talairarch　座標：-3,36,35；Z 値：3.45）あるいはその近くにある前帯状皮質（Anterior Cingulate Gyrus）は、バイリンガル脳の先行研究で、第一言語より第二言語のほうが賦活している部位と指摘されている脳領域である（Abutalebi　et al. 2008）。韓国語 - 中国語早期バイリンガルにとって、韓国語は第一母国語で、中国語は第二母国語に相当する。よって、「韓国語 to 中国語」という切替方向は、彼ら早期バイリンガルにとって比較的難しい切替方

向と言えるだろう。そのため、より認知的なコントロール、実行調節に増分の努力が必要となる。認知的なコントロールは前頭葉で行われることが知られており、本実験の結果でも前頭葉の賦活は興味深い。本実験での韓国語の刺激に対して中国語で連想する時の賦活するピーク脳部位は Abutalebi らの研究に合致していると見なして差し支えないだろう。さらに、本実験で見られたブローカ野の賦活は、複数の言語の脳賦活パターンの研究と一致している（Kim et.al, 1997）。また、もう一つ興味深い賦活脳領域は、左中心前回 left Precentral である、左中心前回は第二言語を処理する時必要とする音韻検索と関連していると言われる(Hernandez et al. 2009)。

その一方、「中国語 to 韓国語」の脳賦活部位は後頭葉に集中している。表意文字である中国語は刺激提示として使われているので、後頭葉に賦活が現れるという解釈が妥当だろう（Tan et al.,2000）。

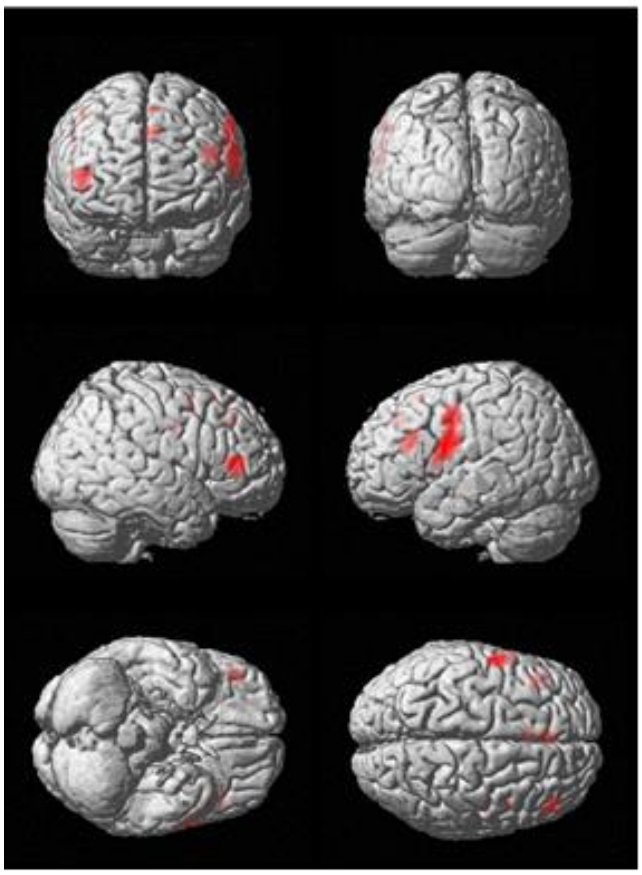


図 5-2:韓国語 to 中国語対中国語 to 韓国語の脳賦活部位(uncorrected, p<0.005)

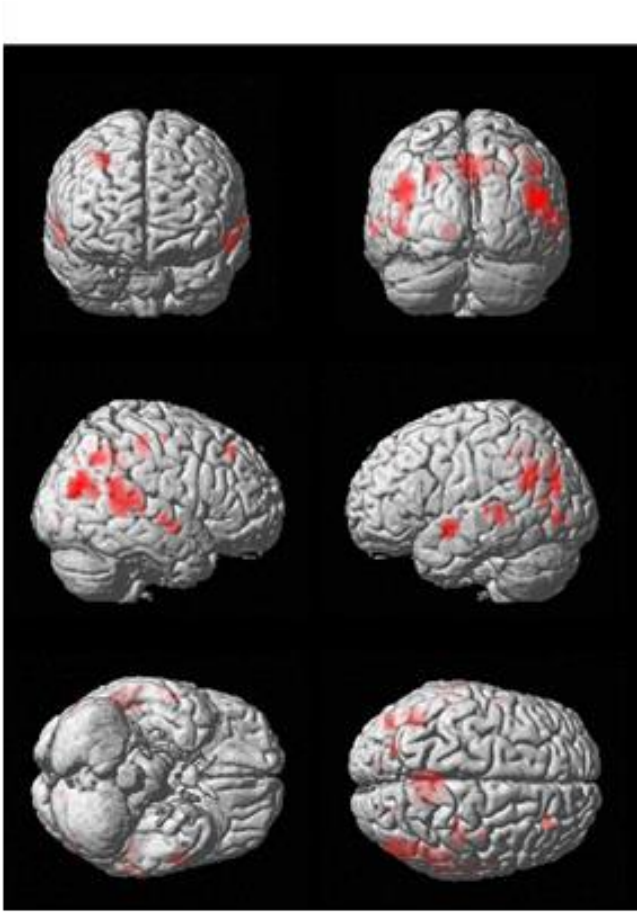


図 5-3:中国語 to 韓国語対韓国語 to 中国語の脳賦活部位(uncorrected, p<0.005)

表 5-1：有意に賦活している脳部位（uncorrected, p<0.005）

韓国語 to 中国語の賦活脳部位 Regions of brain activation of **K to C vs. C to K**	タライラッハ座標 Talairarch Coordinates	Z スコア Z value
前頭葉 Frontal		
右下前頭回 Right inferior frontal gyrus	48, 37, 7	5.43
右中前頭回 Right middle frontal gyrus	45, 7, 48	3.13
右中心前回 Right precentral gyrus	50, -5, 32	3.09
左中心前回 Left precentral gyrus	-56, 0, 20	4.96
	-56, 1, 37	3.46
左下前頭回 Left inferior frontal gyrus	-42, 26, 24	3.44
左中前頭回 Left medial frontal gyrus	-3, 36, 35	3.45
左上前頭回 Left superior frontal gyrus	-3, 22, 52	3.45

中国語 to 韓国語の賦活脳部位 Regions of brain activation of **C to K vs. K to C**	タライラッハ座標 Talairarch Coordinates	Z　スコア Z value
側頭葉 Temporal		
右中側頭回 Right middle temporal gyrus	50,-70,24	4.33
右上側頭回 Right superior temporal gyrus	53,-44,22	4.53
	53,-32,11	4.23
頭頂葉 Parietal		
左上頭頂回 Left superior parietal gyrus	-21,-51,45	3.07
左角回 Left angular gyrus	-42,-55,29	4.69
後頭葉 Occipital		
左中後頭回 Left middle occipital gyrus	-39,-75,30	3.78
左上後頭回 Left superior occipital gyrus	-21,-72,40	3.75
右楔前部 Right precuneus	6,-46,39	5.09

5.3.2　MVPA の結果及び考察

この実験デザインでは、意味カテゴリーと言語の分類の双方が同時に可能である。意味カテゴリーである「動物」と「道具」の分類については、機械学習による交差評価で高い精度が得られた。平均精度は 92.32%で、その範囲は 86.2%から 96.2%までである。しかし、使用言語である韓国語と中国語の分類については何人かの実験参加者については有意な結果にならなかった。平均精度は 53.84%で、範囲は 47.1%から 59.2%までである（図 5-4）。5 人の中で 3 人は有意の結果になっていて、2 人の結果はチャンスレベルであった。

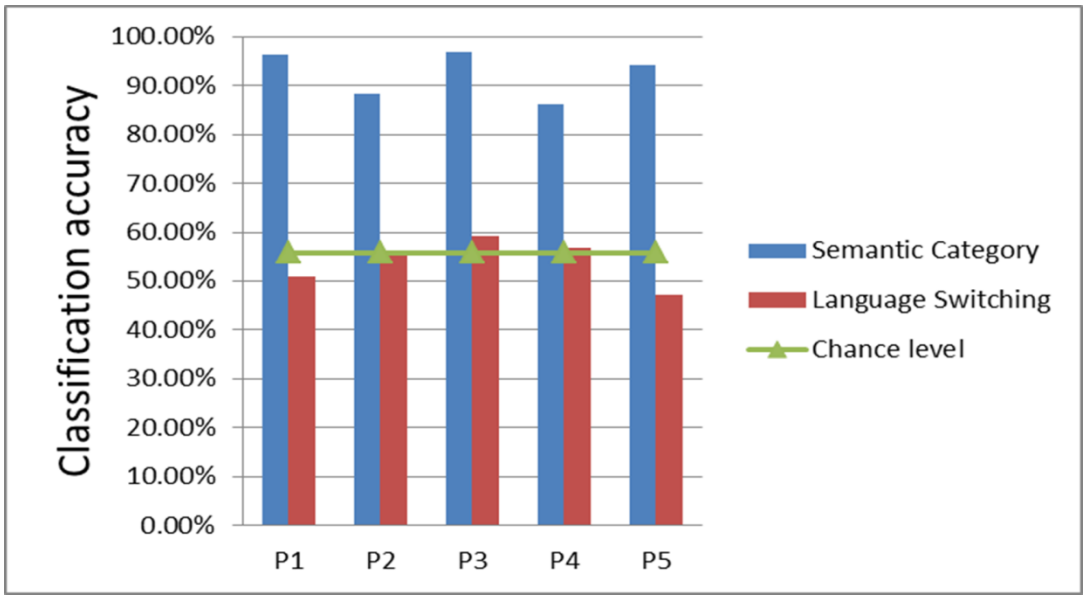


図 5-4：MVPA による意味カテゴリーと言語切替の分類結果

5.3.3 Searchlight 法の結果及び考察

Searchlight 法による分析についても、通常の実験参加者に一つの精度を割り当てる MVPA と同様に、意味カテゴリーの分類に基づく結果と使用言語の分類に基づく結果のふたつをここで論じる。

まず、意味カテゴリーの分類における Searchlight 法の結果は、以下の図 5-5 にまとめられている。MVPA は個人のデータを解析するのに有効だが、実験参加者間のモデリングは困難なため、結果は実験参加者個人ベースのものを併置した。ヴォクセルのクラスターは、XjView toolbox に基づいて計算されたものであり、意味カテゴリーを分類する上で重要な情報をはらむヴォクセルと見なしうる。5 人の実験参加者は同じような傾向を示している。具体的に述べると、意味分類において情報を持つ大きなクラスターは 4 つ見出される。一番大きなクラスターは右中側頭回 right middle temporal gyrus (BA37) と左中側頭回 left middle temporal gyrus (BA39)に存在している。 次に大きなクラスターは左下側頭回 left inferior temporal gyrus と右上側頭回 right superior temporal gyrus (BA41) に現れる。両側の中側頭回 middle temporal gyrus は分類精度高いヴォクセルのクラスターとして抽出されたわけである。

ここで特に、Chao et al.(1999)と Martin et al. (1996)が、「動物」と「道具」に関する意味のあるヴォクセルは、分散した形で側頭葉に存在していると結論付けたことを、あらためて想起したい。この結果は先行研究で検討した意味カテゴリーの神経基盤と一致している。

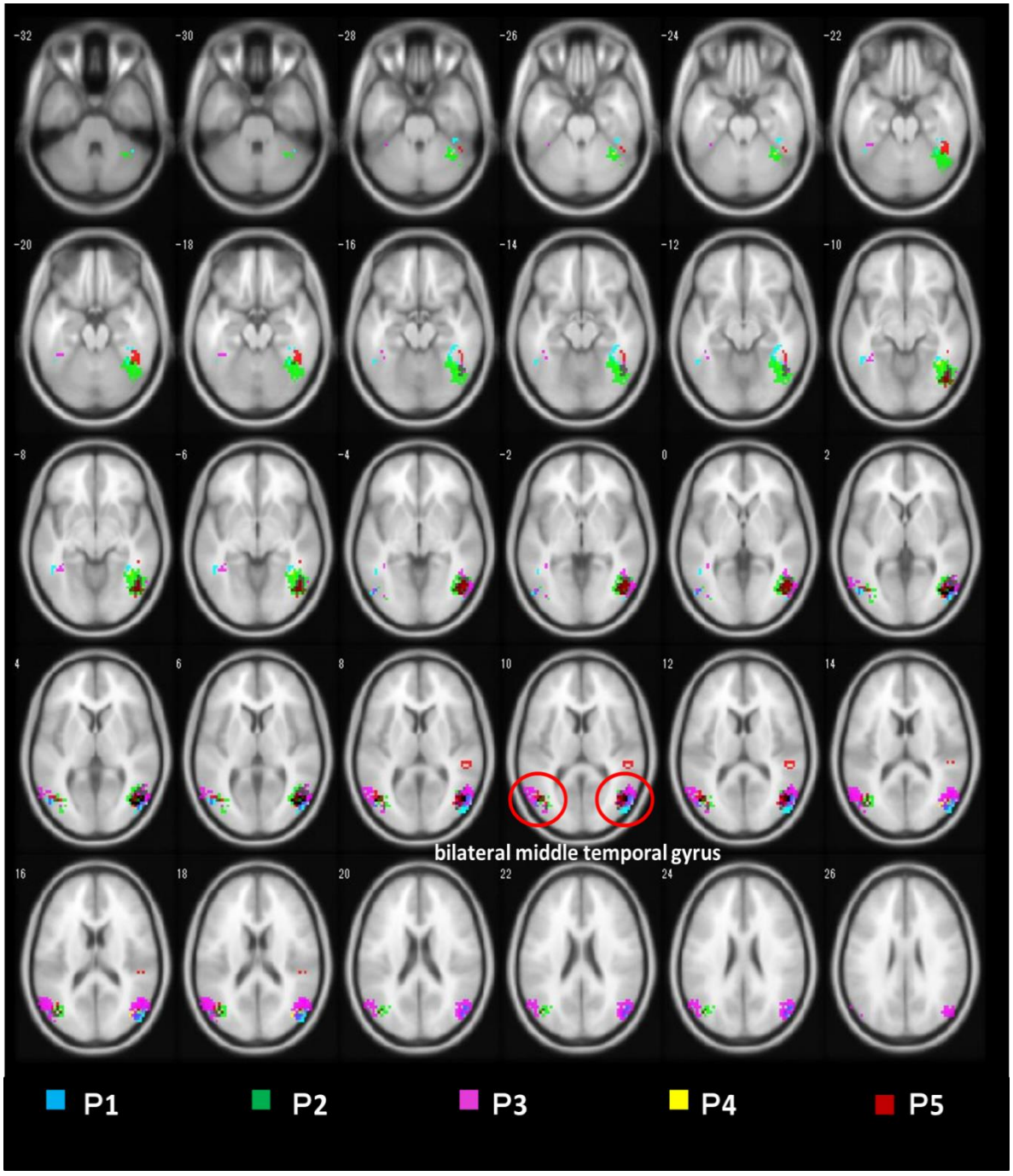
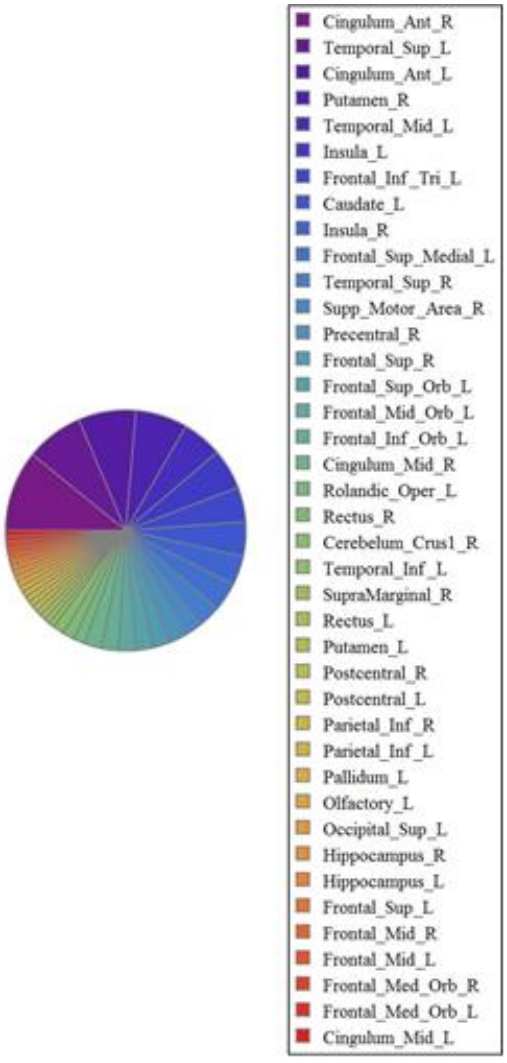


図 5-5：実験参加者別の意味カテゴリー分類に基づく Searchlight 法の結果。両側の中側頭回（bilateral middle temporal gyrus）は注目に値する。

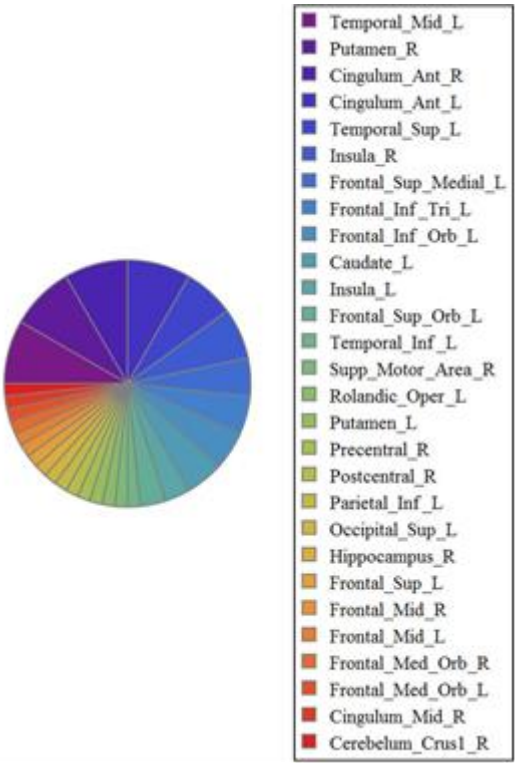
次に、言語切替における Searchlight 法の結果について述べる。実験参加者ごとの結果は以下の図 5-6 のように集約される。

言語を分類する精度はそれほど理想的なものではないが、ここで意味を処理する能力を捨象(スクリーンアウト)して、純粋に言語の弁別にとって大きな情報を持つヴォクセルを各実験参加者に抽出した。具体的には、searchlight 法により、実験参加者ごとに、意味を分類する上で重要ではないが言語を分類する上で重要なヴォクセル群を抽出した。具体的に言うと言語分類精度が意味分類精度に比べてそれぞれ 0.14、0.15、0.16、0.17、0.18 より大きいヴォクセルを抽出した。これらの段階的な域値は、言語分類精度が高いヴォクセルに絞り込みをかけるためである。さらに、AAL (Automated Anatomical Labeling) を用いて、それらのヴォクセルが所属する脳部位の名称を確定した。

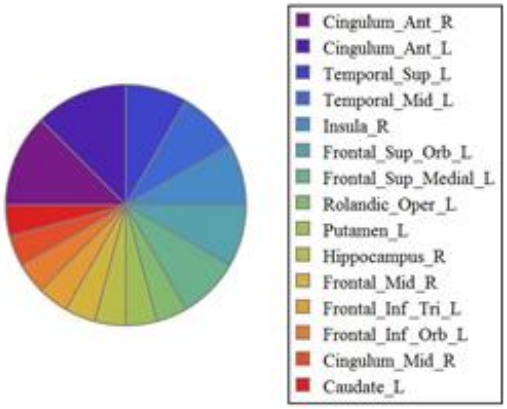
図 5-6 は実験参加者ごとに比較的に言語分類能力が高いヴォクセルが帰属する脳部位をパイチャートにより示している。実験参加者の個人差はあるが、前頭葉から側頭葉まで興味深いところがここで抽出されている。各パイの大きさ(扇形の為す角)は、その脳部位にラベリングされる重要なヴォクセルの割合に対応している。特に、バイリンガル研究 (Abutalebi、Crinion) で知られている言語切替に関する脳部位 (例えば：帯状束 Cingulum, 尾状核 Caudate、ブローカ野 Broca, ウェルニッケ野 Wernicke) がここで高い域値を越えても出現していることに注意を払いたい。すなわち Searchlight 法の結果では、言語切替タスクにおいて、実行調節(executive control)上重要な脳領域を抽出したと考えられる。Searchlight の結果から、言語の切替は一般の実行調節のネットワークの一部であるという定説が支持されたとも言える (Abutalebi & Green, 2008)；Moritz-Gasser & Duffau (2009))。このネットワーク仮説については次の章で詳しく触れることになる。


Cingulum_Ant_R
Temporal_Sup_L
Cingulum_Ant_L
Putamen_R
Temporal_Mid_L
Insula_L
Frontal_Inf_Tri_L
Caudate_L
Insula_R
Frontal_Sup_Medial_L
Temporal_Sup_R
Supp_Motor_Area_R
Precentral_R
Frontal_Sup_R
Frontal_Sup_Orb_L
Frontal_Mid_Orb_L
Frontal_Inf_Orb_L
Cingulum_Mid_R
Rolandic_Oper_L
Rectus_R
Cerebelum_Crus1_R
Temporal_Inf_L
SupraMarginal_R
Rectus_L
Putamen_L
Postcentral_R
Postcentral_L
Parietal_Inf_R
Parietal_Inf_L
Pallidum_L
Olfactory_L
Occipital_Sup_L
Hippocampus_R
Hippocampus_L
Frontal_Sup_L
Frontal_Mid_R
Frontal_Mid_L
Frontal_Med_Orb_R
Frontal_Med_Orb_L
Cingulum_Mid_L

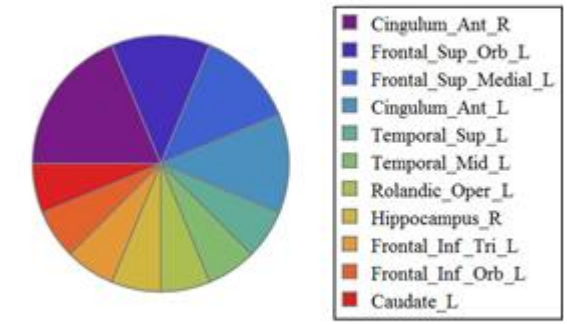
a


Temporal_Mid_L
Putamen_R
Cingulum_Ant_R
Cingulum_Ant_L
Temporal_Sup_L
Insula_R
Frontal_Sup_Medial_L
Frontal_Inf_Tri_L
Frontal_Inf_Orb_L
Caudate_L
Insula_L
Frontal_Sup_Orb_L
Temporal_Inf_L
Supp_Motor_Area_R
Rolandic_Oper_L
Putamen_L
Precentral_R
Postcentral_R
Parietal_Inf_L
Occipital_Sup_L
Hippocampus_R
Frontal_Sup_L
Frontal_Mid_R
Frontal_Mid_L
Frontal_Med_Orb_R
Frontal_Med_Orb_L
Cingulum_Mid_R
Cerebelum_Crus1_R

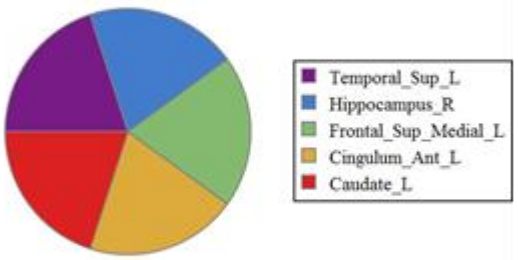
b


Cingulum_Ant_R
Cingulum_Ant_L
Temporal_Sup_L
Temporal_Mid_L
Insula_R
Frontal_Sup_Orb_L
Frontal_Sup_Medial_L
Rolandic_Oper_L
Putamen_L
Hippocampus_R
Frontal_Mid_R
Frontal_Inf_Tri_L
Frontal_Inf_Orb_L
Cingulum_Mid_R
Caudate_L

c



d



e

図 5-6：Searchlight に基づく言語分類精度が意味分類精度に比べてより大きいヴォクセルの脳部位名称。（a は言語分類精度が意味分類精度に比べて 0.14 より大きいヴォクセルの脳部位名称。b は言語分類精度が意味分類精度に比べて 0.15 より大きいヴォクセルの脳部位名称。c は言語分類精度が意味分類精度に比べて 0.16 より大きいヴォクセルの脳部位名称。d は言語分類精度が意味分類

精度に比べて 0.17 より大きいヴォクセルの脳部位名称。e は言語分類精度が意味分類精度に比べて 0.18 より大きいヴォクセルの脳部位名称。）

5.4 まとめ

本章では、fMRI 実験 1 の結果を踏まえて、言語切替の神経基盤に GLM と MVPA の双方から迫った。韓国語 - 中国語早期バイリンガルを対象に、一セッション内でランダムな言語切替タスクを課すことで、意味処理に対する分析に加え、GLM による使用言語間の t-コントラストの設定や、MVPA による言語間の分類予測モデルの構築が可能になった。

まず、GLM 解析により、言語切替の神経基盤に関する興味深い部位を抽出することができた。「韓国語 to 中国語」の脳賦活部位は前頭葉に現れ、一方逆方向のコントラストである「中国語 to 韓国語」の賦活は後頭葉に集中して見出された。この結果は言語の神経基盤の先行研究 (Yoon et.al, 2005;Tan et al.,2000) と一致している。中国語が視覚提示された時、その書記体系(ライティングシステム)による言語の影響が大きいと考えられる。また、左中前頭回の賦活は一般的に言語切替タスクに関与し、認知的コントロールする脳部位と一致している（Abutalebi et al. 2008）。

また、実験 1 と同様の MVPA を実行し、意味と言語の双方において分類モデルの構築を試みたところ、意味の分類は実験 1 に続き、超高度に有意なモデルが得られたが、言語の分類モデルの精度はやや劣るものであった。

さらに、ヴォクセルごとの分類精度を計算する Searchlight 法により、意味の分類に情報を持つヴォクセルのクラスター画像も描出することができた。その結果、「動物」と「道具」に関して弁別情報を持つヴォクセルが、分散した

形で側頭葉に存在していることが確認された。また、言語の分類において有意になヴォクセルも抽出することができた。その結果はGLMによる結果と類似した傾向を示し、それを裏付けるものである、すなわち、言語切替に関する脳部位、例えば帯状束Cingulum, 尾状核Caudate、ブローカ野Broca, ウェルニッケ野Wernickeなどが得られた。言語切替の上で、実行調節(executive control)上重要な脳領域を抽出できたと言える。

意味のある分析結果が得られたと同時に、実験2では問題点もいくつか残されている。セッション内部でのランダムな言語の提示により、言語の分類及び情報を持つヴォクセルの抽出はできたものの、実験参加者の脳全体を一括して捉えた場合、言語に関する分類精度はそれほど有意にはならなかった。視覚提示は文字情報とともに対象を表す画像を利用しているが、そのことは言語そのものの神経基盤や情報を持つヴォクセルを抽出するのに不利かもしれないということが考えられる。画像は言葉のイメージ化として、言葉のあらわす概念を具体的に提示し、それが現実世界で置かれた状況、文脈、環境を直感的に表現する。画像が実験刺激として果たす役割は、意味処理を円滑なものにし、その直感的なスキーマを越えて、言語主体を実際にその言葉が使われる場に擬似的に引き込むものであると考えられる。その意味で意味処理において補助的なもの以上の役割を担っているかもしれない。しかし、それらの要素は言語活動において付帯的なもの、本質的なものでないとも考えられる。画像のありなしは、このように言語とは何かという本質的な問いと密接に絡んでくる。本研究において、実験の結果、言語の判別モデルの精度と言う形で、その差が計量的に表されたことは意義があると思われる。言語そのものの神経基盤や情報を持つヴォクセルを抽出するため、次の実験で書記刺激(orthographic stimuli)のみを用いて、さらに複雑な言語切替実験を試みる。

第 6 章　fMRI 実験：翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制の相違

6.1　はじめに

6.1.1　背景

第 4、5 章でそれぞれ扱った実験 1,2 より、バイリンガル脳の言語切替に関し興味深い領域(regions of interest、略して ROI)がいくつか抽出された。例えば、帯状束 Cingulum, 尾状核 Caudate、ブローカ野 Broca, ウェルニッケ野 Wernicke などである。また、意味カテゴリーについて、その神経基盤の同定や予測(分類)モデルの構築が可能なように、言語切替時に使用される言語に関しても、神経基盤の同定は可能であり、精度は十分ではないというものの、予測(分類)モデルの構築がある程度は可能であると判明した。また、機械学習モデルをヴォクセルごとに計算する Searchlight 法を適用すれば、言語切替に関する情報を保持するヴォクセルを抽出でき、その結果が先行研究とある程度整合性が取れることも理解された。

しかし、言語の切替に関するモデルが完全には成功しなかった理由として、意味処理のための補助的刺激としての意味対象の視覚表現(事物の写真)が関与していることが考えられる。事物の写真による神経反応は実験から除去し、本研究の最終目標であるバイリンガル脳の解明に至るために、これまでキャプションに使われてきた言語刺激だけを実験に用いた方がよいと考えられる。そのため、本実験は韓国語と中国語の単語の綴り字を実験刺激として用いる。また、

本章も第5章と同じ理由で韓国語 - 中国語の早期バイリンガルを実験対象者とする。

また、実験2ではバイリンガル話者の多言語併用環境にとって、現実の場面に近い言語切替を再現することができたが、それを通常の言語切替の結果と比較することはできなかった。そこで新たに、実験タスクも2種類の言語切替タスクを採用する。一つは各実験試行の内部で同時翻訳タスクを絡める focused simultaneous translation language switching、省略してFSTであり、もう一つのタスクは通常の切替のタスクとして、situational non-translation language switching、省略してSnTと命名する。我々の知る限り、このような複雑な言語切替タスクを行う神経言語学的な研究はいまだ存在していない。

6.1.2 目的

本章では、言語の書記体系を考慮した綴り字のみの刺激を提示し、翻訳が介在するか否かで二種類に分かれる複雑な言語切替タスクを用い、GLMとMVPAの双方を併用し、韓国語 - 中国語早期バイリンガルにおける言語切替の神経基盤を明らかにする。特に、GLMにより抽出した賦活部位とSearchlight法により抽出した有意部位を比較し、統合的に考察する。

次節では実験の詳細とデータ解析を述べる。6.3節では、実験結果を考察し、最後に得た知見をまとめる。

6.2　fMRI 実験 3

6.2.1　実験の概要

8 人の韓国語 - 中国語早期バイリンガル（4 人が男性、年齢範囲は 25 歳から 28 歳）が実験 3 に参加した。すべての実験参加者は右利きであり、精神疾患などの病歴はない。この 8 人は験 1 と実験 2 と同じように、中国の朝鮮族の早期バイリンガルである。

今回の実験は対象を表す単語の文字だけを刺激にした。これまでの実験からその 50%に当る名詞 20 個を韓国語 - 中国語のペアの形で選択した。したがって意味カテゴリーも「道具」と「動物」が踏襲されている。以下にその 20 個の刺激となる単語を掲載する。

斧 - axe-斧头-도끼　　釘 - nail-钉子 - 못　　塗量ローラー - paint_roller-油漆滚筒-페인트　　ハンマー - hammer-铁锤-망치　　電気ドリル - power_drill-电钻-동력　ノコギリ - saw-锯子-톱　ハサミ - scissors-剪刀-가위　ネジ - screw-螺丝钉-나사　　鎌 sickle-镰刀-낫　　巻き尺 - tape_measure-卷尺-줄자　　サイ rhinoceros-犀牛-코뿔소　ゾウ - elephant-大象-코끼리　キツネ - fox-狐狸-여우　ゴリラ - gorilla-大猩猩-고릴라　野ウサギ - hare-兔子-토끼　ハリネズミ - hedgehog-刺猬-고슴도치　カンガルー - kangaroo-袋鼠-캥거루　パンダ - panda-熊猫-참대곰　シマウマ - zebra-斑马-얼룩말　　ラクダ-camel-骆驼-낙타

6.2.2　実験デザイン

この実験はデザインの基本的な枠組は第 4,5 章で扱った事象関連デザインをそのまま用いているが、実験 1 と同じく、実験参加者あたり、異なる日にわたって 2 セッションから構成されている。それぞれのセッションには、先に述べた 2 種類のタスクが割り当てられる。まず、 SnT （*situational non-translation* language switching）というタスクでは、韓国語と中国語の名詞がランダムに提示される刺激環境の中で、中国語の刺激に対しては中国語で連想し、韓国語の刺激に対しては韓国語で連想するという、試行間においてのみ言語切替を行う。すなわち言語切替は刺激と刺激の間の状況(situation)において発生し、各試行の内部では翻訳と言うタスクがまったく関与しない。次に、FST （*focused simultaneous translation* language switching)というタスクでは、SnT の場合と同様、韓国語と中国語の言語刺激がランダムに提示されるが、中国語の刺激に対しては韓国語で連想し、韓国語の刺激に対しては中国語で連想するというように、各試行の内部に置いて瞬時に言語を切替える、同時翻訳を介入させるタスクである。（図 6-1）以下は FST と SnT という省略語を使って解説する。また、実験参加者間で、どちらのタスクを先にするかは順序効果の相殺のためカウンターバランスもとっている。

早期バイリンガルにとっても比較的難しい実験デザインであるため、fMRI スキャナーの中でタスクを行うにあたり、事前に入念なリハーサルタスクも実験参加者に対して課した（Mitchell et al 2008）。

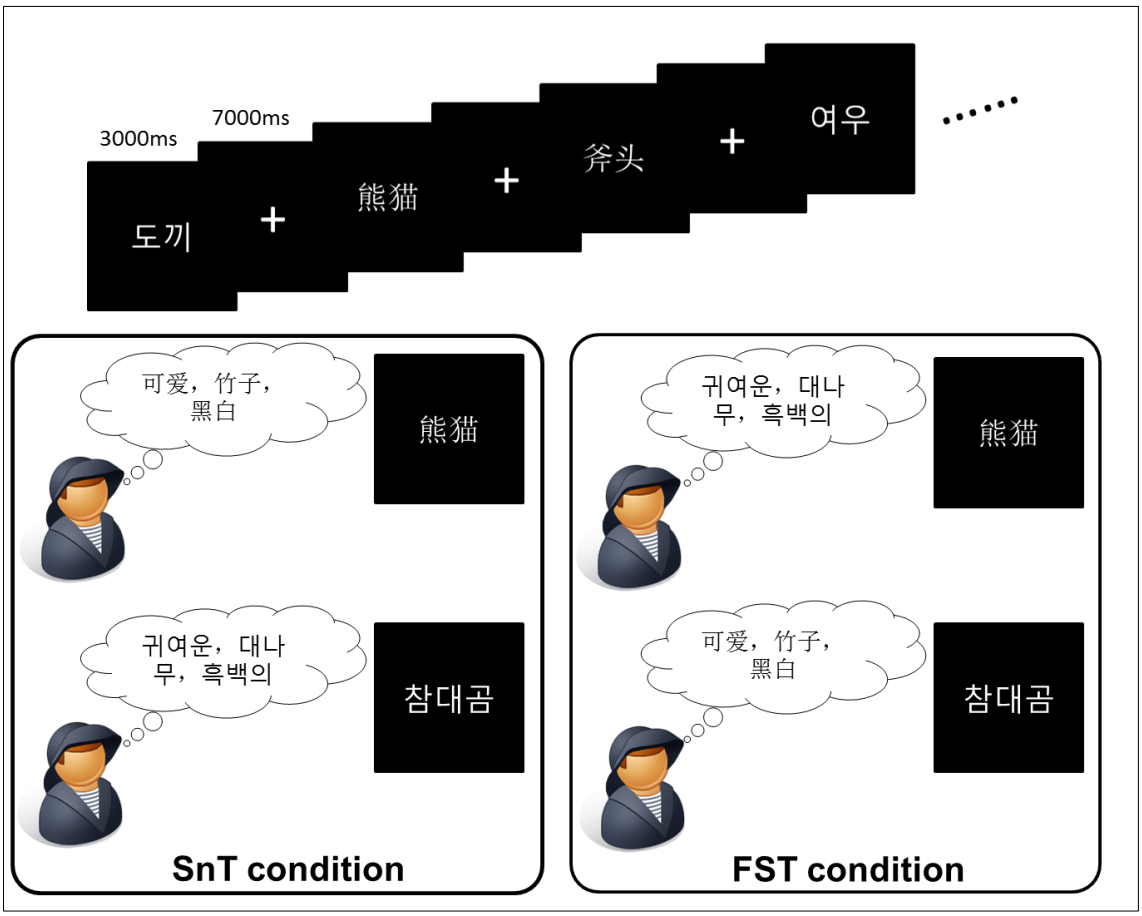


図 6-1：実験タスクデザイン。 SnT （situational non-translation language switching）というタスクでは、韓国語と中国語の名詞がランダムに提示される刺激環境の中で、中国語の刺激に対しては中国語で連想し、韓国語の刺激に対しては韓国語で連想する。FST （focused simultaneous translation language switching)というタスクでは、SnT の場合と同様、韓国語と中国語の言語刺激がランダムに提示されるが、中国語の刺激に対しては韓国語で連想し、韓国語の刺激に対しては中国語で連想する。

6.2.3　本実験のデータ解析

本実験もGLMとMVPAの双方を使ってデータ解析を行った。GLMでは中国語と韓国語の対比賦活パターンを探るべく、固定効果解析(fixed effect analysis)を用い、有意水準をp<0.05, FWE、クラスターサイズの域値4で計算した。

MVPAでは、実験2と同様に言語と意味のダブルターゲットで分類(予測)モデルの構築を行った。具体的な解析方法は既に論じたので、ここでは割愛する。

また第5章で扱ったMVPAの一種、searchlight法も、平滑化されていないfMRIデータに対して適用される。すなわち、各ヴォクセルに関して機械学習を個別に行い、分類精度に基づく画像のマップを作り上げた。その精度が高いヴォクセルがその実験条件に関して情報を持つヴォクセルと見なされ、GLMの結果によるコントラストマップと比較することができる。機械学習の分類器は「ペナルティ付きロジスティック回帰分析 Penalized Logistic Regression classifier (PLR)」を用い、searchlightの半径は3と設定した。また、各ヴォクセルの分類精度のZ統計量を計算して、標準正規分布の仮説の下で0.001のp値に対応する3.08の閾値を用いてスクリーニングを行った(すなわち閾値より小さい分類精度を持つヴォクセルの値は0とした)。最後に、実験参加者ベースの画像はxjView toolbox　(http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、GLMの結果と比較した。ここで明らかになるパターンは、分類精度が高く言語切替に関し情報を持つと考えられる脳部位を示している。

6.3　結果及び考察

6.3.1　GLM の結果

図 6-2 と表 6-1 は GLM の結果を示している。この実験では以下に論じる 4 つのコントラストが設定可能であるが、それらにより、いくつかの脳部位が言語切替のタスクで有意に賦活していることが明らかになった。まず状況の流れで言語を切り替えるだけでそこに翻訳が関与しない SnT タスクでは、“k2k-vs-c2c”と“c2c-vs-k2k”という 2 つのコントラストが設定される。“k2k-vs-c2c”は<<韓国語の刺激に対し韓国語で連想する>>-対-<<中国語の刺激に対し中国語で連想する>>という対比での差分に相当する。一方、“c2c-vs-k2k”は反対方向のコントラストで、<<中国語の刺激に対し中国語で連想する>>-対-<<韓国語の刺激に対し韓国で連想する>>という対比での差分を表す省略表現である。また、試行内で」同時翻訳が関与する FST では、“c2k-vs-k2c”、“k2c-vs-c2k”という 2 つのコントラストが設定される。“c2k-vs-k2c”は<<中国語の刺激に対し韓国語で連想する>>-対-<<韓国語の刺激に対し中国語で連想する>>というコントラストである。一方、“k2c-vs-c2k”は<<韓国語の刺激に対し中国語で連想する>>-対-<<中国語の刺激に対し韓国語で連想する>>というコントラストである。A-対(vs)-B というコントラスト表現は、A 条件から B 条件を引いた A 条件固有の結果を見るものである。GLM によれば、以上 4 つのコントラストに関して有意に賦活する脳領域は以下のとおりである。

k2k-vs-c2c:　有意に賦活している脳領域は左中前頭回（left middle frontal gyrus）（もしくは左下前頭回 left inferior frontal gyrus ブローカ野）、左中心前回（left precentral）、左尾状核（left caudate）である。

c2c-vs-k2k：右の上前頭回（right superior frontal gyrus）、左中心後回（left postcentral）と左内側上前頭回（left medial superior frontal gyrus）

に賦活活動が見られたが、このコントラストの賦活パターンはピークレベルで賦活したが、クラスタレベルでは有意になっていなかった。

k2c-vs-c2k:　このコントラストでは脳の前頭葉、側頭葉と頭頂葉に幅広く賦活が見られた。強く賦活した脳の領域は左中前頭回 left middle frontal gyrus、右補足運動野 right supplementary motor area、左中側頭回 the left middle temporal gyrus、右中側頭回 right middle temporal gyrus、左下頭頂回 left inferior parietal gyrus、左中心後回 left postcentral、右中心後回 right postcentral であった。

c2k-vs-k2c：脳の後頭領域が幅広く賦活した。左中後頭部回 left middle occipital gyrus、左下後頭部回 left inferior occipital gyrus および右上後頭部状回 right superior occipital gyrus であった。

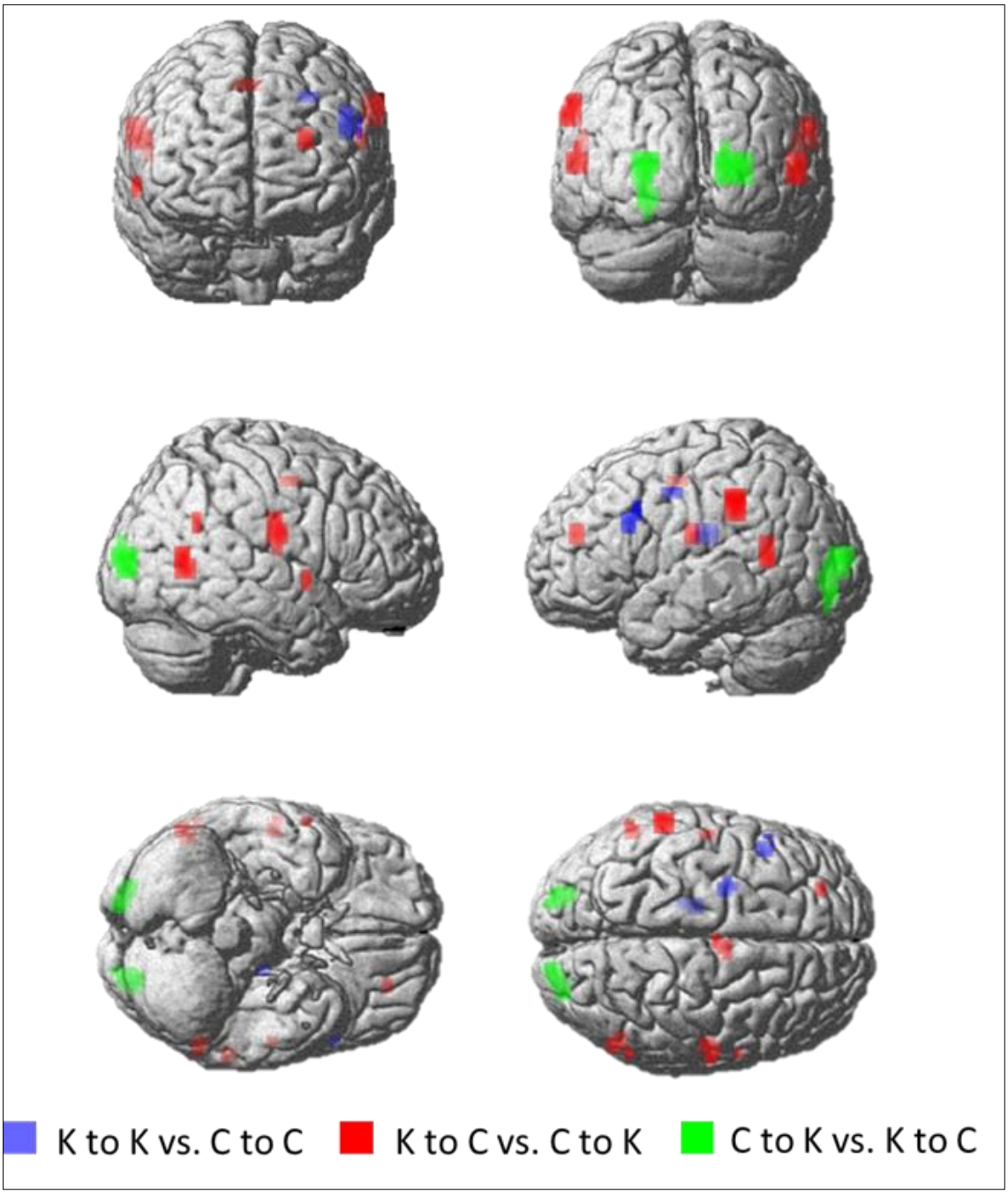


図 6-2：有意に賦活している脳部位(p<0.05, k>4, FWE corrected).

表 6-1：有意に賦活している脳部位(p<0.05, k>4, FWE corrected).

賦活した脳領域 Regions activated	Korean to Korean vs. Chinese to Chinese		Korean to Chinese vs. Chinese to Korean		Chinese to Korean vs. Korean to Chinese	
	MNI coordinate	Z スコア Z value	MNI coordinate	Z スコア Z value	MNI coordinate	Z スコア Z value
前頭葉 Frontal						
左中心前回 Left precentral gyrus	-27,-4,46	4.78				
左中前頭回 Left middle frontal gyrus	-45,17,28	4.72	-27,44,22	4.87		
右補足運動野 Right supplementary motor area			6,-4,52	4.82		
側頭回 Temporal						
左中側頭回 Left middle temporal gyrus			-57,-55,10	5.17		
右中側頭回 Right middle temporal gyrus			54,-61,4	5.00		
頭頂葉 Parietal						
左下頭頂回 Left inferior parietal gyrus			-60,-37,40	5.44		
左中心後回 Left postcental			-54,-16,22	4.60		
右中心後回 Right postcentral			57,-13,22	5.24		
後頭葉 Occipital						
左中後頭回 Left middle occipital gyrus					-21,-91,10	5.96
左下後頭回 Left inferior occipital gyrus					-21,-88,-8	5.42
右上後頭回 Right superior occipital gyrus					24,-94,10	-
他の脳領域 Other areas						
左尾状核 Left caudate	-18,-25,-22	4.50				

6.3.2　MVPA の結果及び考察

実験 2 と同様のダブルターゲットのデータ分析で、意味カテゴリーと使用言語の分類・予測モデルの構築が可能となる。SnT 条件では、意味カテゴリーである「動物」と「道具」の分類について有意な精度の機械学習モデルが構築できた。平均精度は 72.15％で、その範囲は 58.8％から 83.8％である。また使用言語としての韓国語と中国語の分類についても有意な結果になった。実験参加者の平均分類精度は 70.05％で、範囲は 60.4％から 86.2％であった。（図 6-3）。なお第４章で示した通り、有意水準が総試行数 240 で二項分布の仮定のもと、5%水準で 55.8%である。

FST 条件では、意味カテゴリーの分類平均精度は 73.15％で、範囲は 58.8％から 89.6％までである。使用言語の分類では実験参加者のうち一人だけ有意な結果になっていないが、実験参加者全体の平均精度は 66.8％で、範囲は 55.4％から 85％であった。（図 6-4）

この結果から、実験 3 では、同じく試行内の同時翻訳を課す実験 2 よりも、使用言語について MVPA による分類精度が上がったということである。その理由としては、刺激の提示方法の違いが考えられる。実験 2 では、概念対象を表す写真がそのキャプションとともに提示されたのに対し、実験 3 では文字のみが刺激として提示されている。文字刺激からダイレクトに属性タスクに繋げる場合、そこで使用する言語の処理に神経リソースが集中して使われるため、視覚表象に注意が拡散する実験 2 に比べて、使用言語を分類・予測する機械学習モデルの精度が向上したのではないだろうか。いずれにせよ MVPA を使った機械学習モデルの構築においては、複雑かつ迅速な言語切替の条件のもとでも、意味カテゴリーのみならず使用言語を予測する分類モデルが計算できたという結果になった。

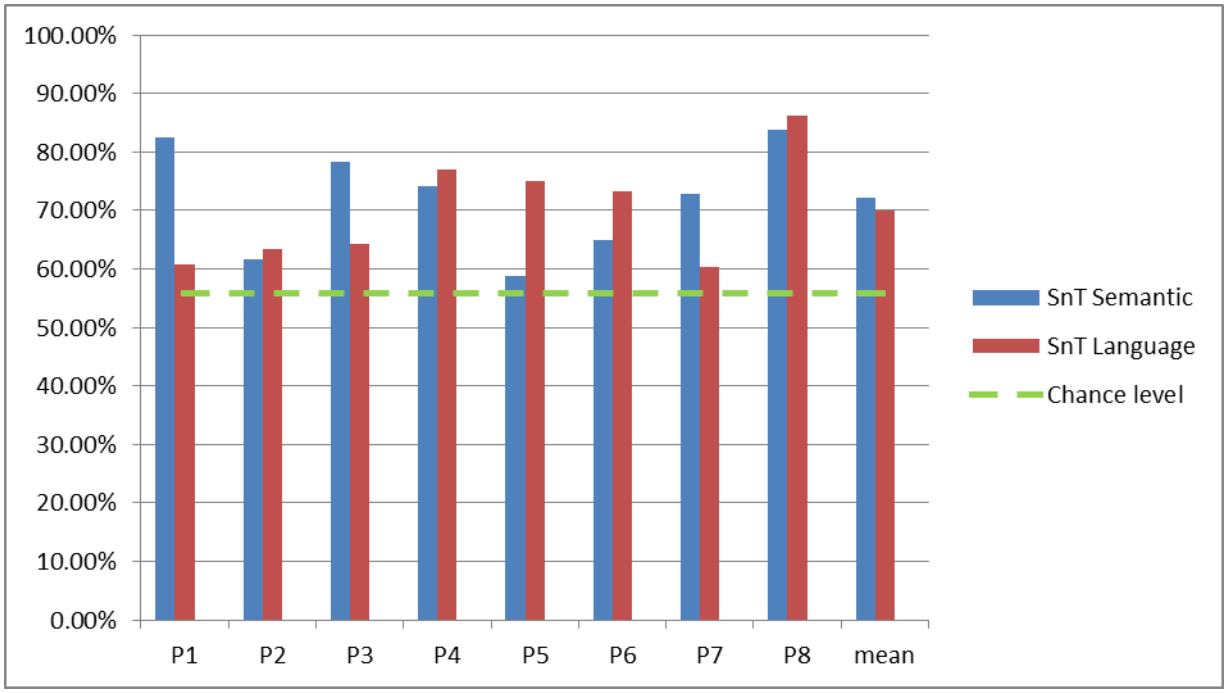


図 6-3：SnT 条件の MVPA による意味カテゴリーと言語切替の分類結果

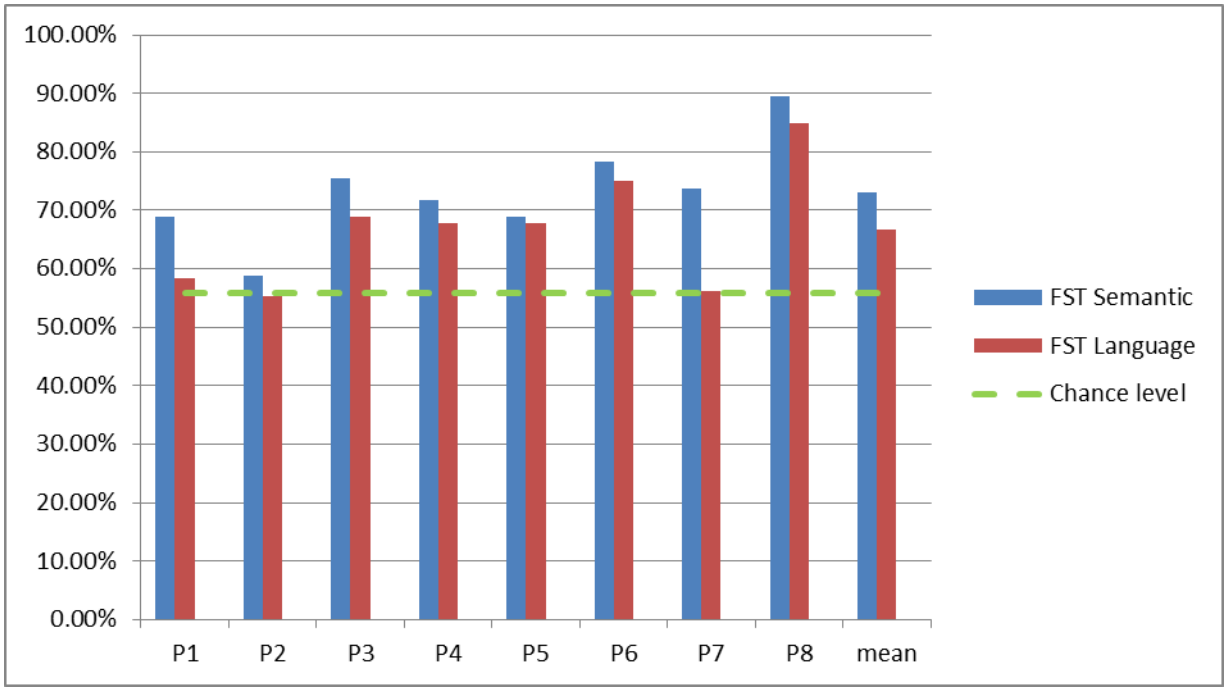


図 6-4：FST 条件の MVPA による意味カテゴリーと言語切替の分類結果

6.3.3 Searchlight 法の結果

以下の図 6-5 は Searchlight 法による結果を XjView toolbox を用いて図示している。以下の結果は言語分類能力が高いと見なされるヴォクセルのクラスターを示している。中国語と韓国語が弁別できるヴォクセルの一部は、バイリンガルの言語切替に強く関与していることが考えられる。なお、MVPA (Searchlight) は本質的に単一実験参加者の分析であるため、図 6-5 (a) に実験参加者ベースの SnT 条件の結果を、(b) に実験参加者ベースの FST 条件の結果を示した。P1~P8 はそれぞれの実験参加者に対応している。なお、(c) は二つの条件 SnT、FST ごとに全実験参加者のクラスターを統合し、グループベースの結果を表している。

SnT 条件では、二つの大きなクラスターが発見された。一つ目のクラスターのピークは左紡錘状回 left fusiform gyrus に存在し、もう一つは右下後頭回 right inferior occipital gyrus に存在した。また、いくつかの小さなクラスターは右上側頭回 right superior temporal gyrus、右楔前部 the right precuneus、及び左上側頭回 the left superior temporal gyrus に分布していた。

FST 条件では、言語分類能力が最も高いと見なされるヴォクセルは左紡錘状回、left fusiform gyrus、左小脳 the left cerebellum と左舌状回 the left lingual gyrus に集中していた。また、もう一つの大きなクラスターが右舌側状回 the right lingual gyrus、右中後頭回 the right middle occipital gyrus と右鳥距溝 the right calcarine に見出された。また、小さいクラスターも左中側頭回 the left middle temporal gyrus と縁上回 the supramarginal gyrus に観察された。

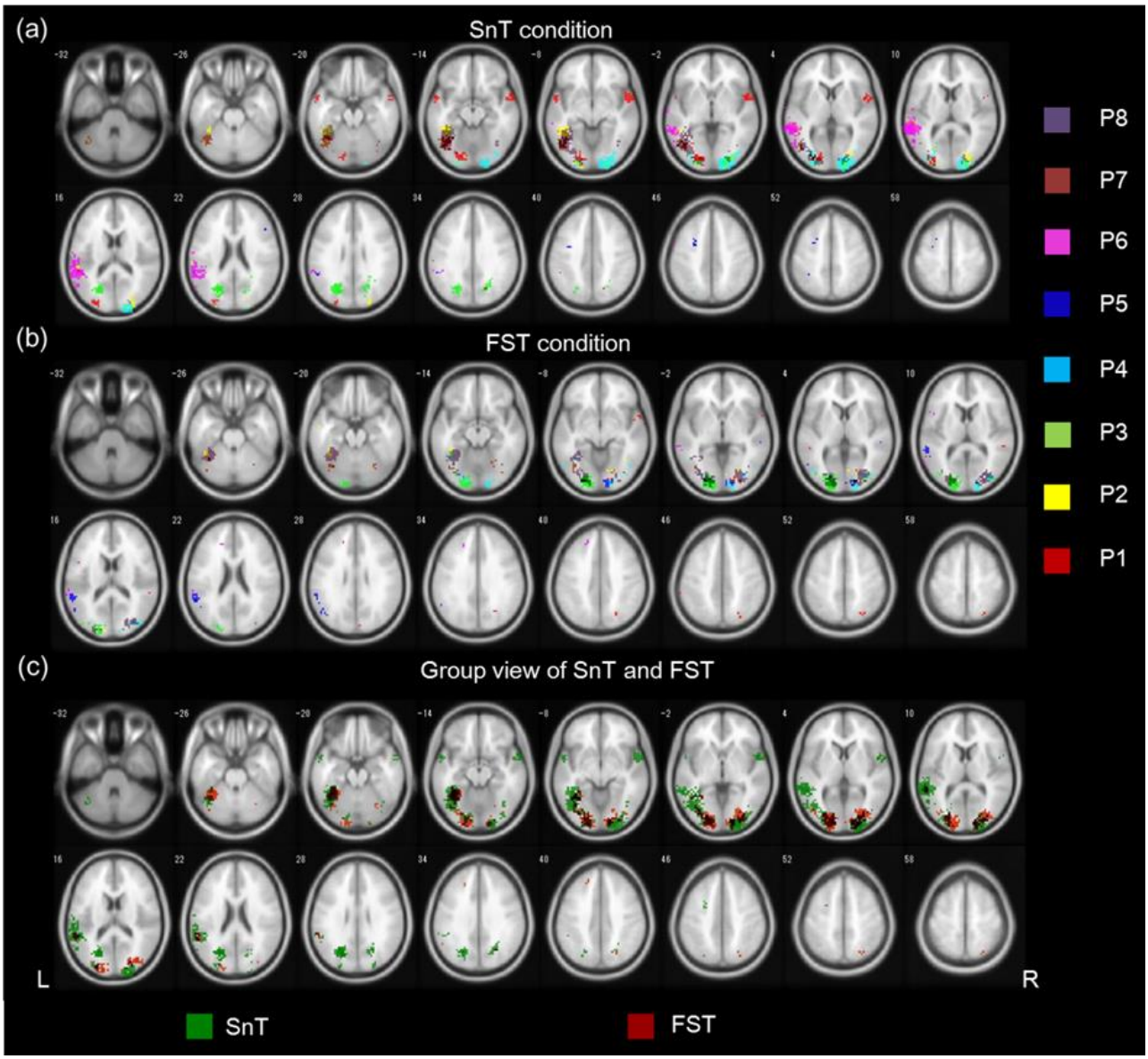


図 6-5：言語分類に基づく Searchlight 法の結果。P1～P8 がそれぞれ実験参加者であることを表している。結果の出力は xjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いた。

6.3.4　GLM 及び Searchlight の結果の考察

本章の実験 3 では、言語切替の本質を探究するために、韓国語 - 中国語早期バイリンガルを対象として二種類の言語切替タスクを課し、その際に使用される神経基盤を明らかにした。方法論としては、単変量分析である一般線形モデル GLM と多変量パターン分析 MVPA、特にその一種である Searchlight 法を利用して分析を行っている。Searchlight 法の結果から明らかになったことは、試行内に同時翻訳が入る難度の高い FST 条件では、使用言語の分類に関して予測精度の高いヴォクセルの脳内分布に関して、実験参加者がほぼ同じ傾向を示しているということである。FST 条件での Searchlight 法による分析の結果、感度の高いヴォクセルは、左紡錘状回 the left fusiform、両側の舌状回 lingual と左縁上回 left supramarginal gyri に集中している。それに対して、状況に応じて言語を切替るだけで翻訳は介入しない SnT 条件では、実験参加者の個人差が大きく、情報を持つヴォクセルは両側後頭葉、側頭葉と他の脳領域に広く分散して、実験参加者間では明確なパターンを形作らない。

この結果から、比較的難しい FST 切替タスクを行う時、実験参加者にとって認知的なコントロール(実行調節)が大きく必要となることが考えられる。そのため、脳の賦活パターンはより強く特定部位に集中していると考えられる。特に、Wang et al. (2007) は舌状回 lingual が言語切替時に視覚検索と注意制御において重要な役割を果たしていると主張したが、本研究における Searchlight 法の結果はそれを裏付けるものとなっている。

ただし、興味深い点として Searchlight が前頭葉において有意なヴォクセルを見つけることができなかった点が挙げられる。一方、GLM を利用した場合、韓国語刺激を条件とするコントラストである"k2k-vs-c2c"と"k2c-vs-c2k"が、前頭葉において有意な脳活動を抽出している。この二つのコントラストの場合、

その有意な脳領域には、視覚提示された韓国語の表音文字の特徴が影響を及ぼしていると推論できるだろう。先行研究を参照すると、前頭葉の賦活はアルファベットシステムの言語の読みに関連すると考えるのが自然である。

一方、GLM（c2k-vs-k2c のコントラスト）により検出された後頭葉の活動、あるいは Searchlight 法が絞り込んだ後頭葉のクラスターは、表意文字を用いる中国語の視覚提示に関連すると考えられる。先行研究では、中国語の漢字は脳の後頭葉を賦活するという報告が数多く見受けられる（Tan et al. 2001; Liu et al. 2003; Siok et al. 2004; Wang et al. 2007）。

むろん、言語が用いる文字、書記体系(writing system)の特徴は、言語切替のメカニズムと直接は関連せず、むしろ、実験に使用した言語を二つの母語とするバイリンガルに固有のものと見なす必要がある。しかし、本実験で抽出された脳領域には、言語切替、特に認知的に実行調節(executive control)と直接関連するものが多く含まれる。たとえば、Crinion et al. (2006)は、バイリンガルによる言語のコントロールにおいて、左尾状核 left caudate が重要な役割を果たしていると報告した。"k2c-vs-c2k"の有意なコントラストも同じ結果を示している。さらに、左側頭葉の賦活は一般的な言語処理の活動と関連しており、右側頭葉（"k2c-vs-c2k"に見られる）の賦活は、言語処理において注意を集中させる努力の活動と関連していると考えられる(Sabri et al., 2008)。

また、Moritz-Gasser and Duffau (2009)が提案した言語切替モデルにおいては、本実験でも特に注目される左紡錘状回 the left fusiform が重要な役割を果たしていると示唆されている。本研究では情報を持つヴォクセルが左紡錘状回 the left fusiform に集中しており、特に、SnT セッションでは、ピーククラスターのタライラッハ座標は(-36,-48,-14)で、左中紡錘状回 the left mid-fusiform gyrus (BA37)に位置している。FST セッションでは、ピーククラ

スターのタライラッハ座標は(-39,-51,-18)で、同様に左中紡錘状回 the left mid-fusiform gyrus (BA37)に位置している。多数の先行研究（Hernandez et al. 2006, 2009; Guo et al. 2011; Price et al. 1999; Moritz-Gasser and Duffau, 2009; Abutalebi et al. 2007）が左紡錘状回 the left fusiform が言語の切替に関連していることが実証されているため、本研究で発見された左紡錘状回 the left fusiform に位置しているヴォクセル・クラスターは、視覚的な文字刺激の処理によるものではなく、あくまで言語切替に本質的に関与していると確信すべき理由がある。

以下の視点から、この問題を詳細に検討する。すなわち、１）左紡錘状回 the left fusiform は、前後に大きく伸びた部位であるので、その機能は、確かに特に視覚野に隣接した後部では、文字刺激などの視覚処理に関与するかもしれないが、けっしてそれに限定された脳部位であると一元的に結論付けることはできない、ということ。２）バイリンガリズムなどの先行研究からして、左紡錘状回 the left fusiform の特に前部が、言語切替において果たす重要な役割は、fMRI 実験のみならず、電気刺激（direct electrical stimulation）による侵襲的技術を用いた研究により明らかにされている、ということである。

左紡錘状回 the left fusiform が言語処理に関与している証拠を、いくつかの先行研究を参照しつつここで詳細に述べておく。左紡錘状回 the left fusiform はその機能の違いにより、後部、中間と前部に分けることができるとされる。たとえば、後部(y = -60 to -70 in Talairach space)は、馴染み深い単語を読む時より、擬似単語を読む時、有意に大きく賦活した(Mechelli et al. 2005)。一方、中間部(y = -50 to y = -60)は、リーディングタスクや画像命名タスクのような単語検索タスクの時に賦活した(McCandliss et al. 2003; Price & Devlin, 2003; Price & Friston, 1999)。また、前部(y = -20 to -50)は視

覚提示と聴覚提示の違いに関わらず、意味に関連するタスクにおいて有意に大きく賦活した(Noppeney & Price, 2002; Mummery, Patterson, Hodges, & Price, 1998)。Price &Devlin, (2003)によれば、左紡錘状回 the left fusiform の賦活は、視覚提示と関連しない場合の平均座標が y = -43 (range -54 to -32)であり、視覚と関連している場合、平均座標 y= -60 であって、これは後部に存在している。Price&Devlin は、左中紡錘状回 left mid-fusiform gyrus は視覚提示と関連していないという観点を支持している。さらに、中国語-英語バイリンガルを対象とした言語研究(Xue et al. 2006)や、先天的に盲目の人を対象とした研究(Mahon et al. 2010)でも類似した結果が得られている。つまり、左紡錘状回 the left fusiform は非視覚処理、もしくは知覚に左右されない言語そのものに固有の本質的処理に関与していることが示されている。

言語の切替を研究するほかの文献からも、左紡錘状回 the left fusiform の関与は明らかである。注目すべき研究は、聴覚提示を用いて言語切替を調査した Abutalebi et al. (2007)の研究である。Abutalebi et al. (2007) は、BA37 (-38,-25,-18) が単語―意味処理のコントロールにおいて重要な役割をしていることを発見した。また、Hernandez et al. (2006, 2009) では左紡錘状回 the left fusiform が認知的処理に関与していると示した。認知制御タスクに必要な努力を引き出す役割を果たしているという可能性もある(Guo et al. 2011)。また、Price et al. (1999)の言語切替の研究でも、左紡錘状回 the left fusiform の関与が報告されている。

特に、Moritz-Gasser & Duffau (2009)が提案した言語切替モデルの中でも、左紡錘状回 the left fusiform は神経ネットワークの 1 ノードとして含まれている。さらに、数多くの言語切替に関する研究では、考察に関する章では左紡錘状回の機能を検討していないものの、結果の章では左紡錘状回を有意に賦活

する部位に含め、その役割について考察することなくその関与についてだけ報告している(Rodriguez-Fornells et al. 2005; Wang et al. 2007; Garbin et al. 2011; Chee et al. 2003) 。

fMRI のような非侵襲的な神経画像撮影のみならず、直接的な電気刺激(direct electrical stimulation) による侵襲的な技術を用いても、言語切替の研究において類似した視点がもたらされている。特に、侵襲的な電気刺激法を用いた場合、言語切替が大規模な前頭葉―側頭葉のネットワークの下で行われているという知見がもたらされている(Kho et al. 2007; Moritz-Gasser and Duffau (2009); Duffau et al. 2014) 。fMRI データの解析でも、伝統的な GLM を用いた場合、脳の後頭部において「より大きな賦活」が見つからない可能性があるが、本研究で用いた MVPA 法は左紡錘状回に言語切替情報を持つ有意なヴォクセルを抽出しており、この結果はまさしく侵襲的電気刺激法の結果と一致している。

以上の考察から、本研究でも左紡錘状回 the left fusiform が言語切替に関与していることを主張する。また、本研究が GLM と Searchlight 法の統合により抽出したいくつかの脳部位は、言語切替の解剖学において、最近とみに注目を集めるホドロジカルモデル(Moritz-Gasser and Duffau)を支持する根拠を提供している。つまり、言語の切替は、脳内の特定の限定された部位においてのみ行われるのではなく、後頭葉と前頭葉を広くまたがるネットワークにより実現されるということである。

今まで、伝統的な機能的解剖学の知見では、言語の切替は脳内の特定の領域（例えば：左前頭前野 the left prefrontal cortex, 左背外側前頭前野 the left dorsolateral prefrontal cortex など）において担われているとされてきた。それに対し、本研究では GLM と MVPA というふたつの異なる方法を併用し、同時

にいくつかの興味深い領域を幅広く抽出することができている。左紡錘状回 the left fusiform, 両側の舌側状回 bilateral lingual と左中心前回 left precentral frontal gyri などである。この結果は前頭葉―皮質下回路は言語コントロール(実行調節)において重要な役割を果たしている観点(Abutalebi & Green, 2008)と一致している。Abutalebi らも言語切替は脳内の特定の限られた部位に頼って行われるのではないという仮説を支持している。（本研究で抽出された部位のいくつかは Abutalebi らと異なるが、それは刺激言語の違いによるものではないかと考えられる。ただし、このことを証明するにはさらなる研究が必要である。）

本研究において、韓国語 - 中国語早期バイリンガルにおける言語の切替をめぐり、左中心前回と左紡錘状回が興味深い脳領域として抽出された。後頭葉から前頭葉に至るまで、言語切替の機制として、強く連結した脳内神経ネットワークが存在している可能性がある。このような言語切替のホドロジカルモデル(Moritz-Gasser&Duffau, 2009)の中のいくつかの重要な領域は、本研究から抽出されたものとその多くが一致しているため、我々の結果は言語切替のホドロジカルモデルを支持していると見なしうる。

6.4 まとめ

本章は、言語切替の神経基盤を明らかにすることを目的とし、韓国語 - 中国語早期バイリンガルを実験参加者として、言語の綴りのみを視覚提示し、それに対して 2 種類の言語切替タスクを行わせて、脳の fMRI 賦活データを取得した。タスクは、各試行(trial)の内部で同時翻訳タスクを絡める FST(focused simultaneous translation language switching の略)、および通常の切り替え

のタスク SnT(situational non-translation language switching)である。FST 条件では、早期バイリンガル話者が二つの母語を使い分ける生活環境により近いケースを再現する。GLM と MVPA(通常の方法と Searchlight 法)によりデータを解析したところ、2 種類の言語切替タスクにおいて、GLM では先行研究を指示しうる興味深い脳領域を有意なものとして抽出でき、MVPA により、意味と言語の双方において有意な分類モデルの構築に成功した。また本実験が取り上げた重要な脳部位、例えば左中前回 the left middle frontal gyrus（もしくは左下前頭回 left inferior frontal gyrus ブローカ野 Broca’s area)、左紡錘状回 the left fusiform、縁上回 left supramarginal gyri 左尾状核 left caudate などは、言語切替に関して最近脚光を浴びているホドロジカルモデルを支持している。つまり、すなわち、言語の切替は脳の特定の一か所を頼るのではなく、脳内の幅広い領域にまたがるネットワークで行われているという考え方である。

第 7 章　総括及び今後の展望

7.1　総括

本論文では、言語切替の神経基盤を明らかにすることを目指し、三つの段階に分け、fMRI 実験を行い、データの解析を行った。fMRI 実験 1 は伝統的な「動物」と「道具」という意味カテゴリーを前提として、連想・属性想起タスクに言語切替という要素を導入して、単変量分析である GLM に加え、多変量パターン分析 MVPA を試みて、本研究のデータ解析における基本的な方法を確立した。fMRI 実験 2 では、バイリンガル話者とって現実の言語切替場面に近い複雑なタスクをデザインし、ランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応という観点から、GLM と MVPA、さらには Searchlight 法を併用して、言語切替の神経基盤を探究した。fMRI 実験 3 では、実験 1、2 をさらに発展させ、翻訳関与の有無に伴う言語切替の脳内機制を見るため、刺激応答の過程で同時翻訳タスクを絡めるものと、絡めずただ状況に応じて使用言語を替えるだけものの 2 種類の言語切替条件を採用し、GLM と MVPA、さらには Searchlight 法を統合して、言語切替の神経基盤により広く、深くアプローチした。

本研究は、言語切替の神経基盤を探究する上で、実験デザインと解析方法の面でいくつか独創的なアプローチを編み出し、それに成功している。

実験デザインとしては、十分に統制された意味処理タスクを背景に、文字だけでなく補助的な視覚刺激を伴う容易で単純な言語切替タスクから、バイリンガル話者にとって現実の言語切替場面に近い、環境的(ecological)な条件を再現した複雑なタスクへと進化させていった。その結果、最終的に意味処理のみならず、使用言語に関しても統計的に有意なモデルを計算することができた。

解析方法としては、バイリンガル研究のみならず、神経言語学において初めての試みとして、従来の伝統的な単変量分析すなわち GLM(一般線形モデル)と多変量パターン分析 MVPA を併用した。なおかつそこに MVPA の一種である Searchlight 法を加えることで、GLM と MVPA の結果を統合することができた。この統合的な方法により、言語切替における最新のホドロジカル・モデルの妥当性を評価することが初めて可能になった。

最後に、本研究により得られた結論を以下のように要約する。

第 1 章では、本研究の背景を述べた上、本研究の独創性を示しつつ、研究目標を明確にした。本研究の目的は、言語切替の神経基盤を明らかにすることである。

第 2 章では、バイリンガリズム、言語の神経基盤、意味カテゴリーの神経基盤の三つの面から既往の研究を考察し、解決すべき課題を抽出した。この章は本研究の理論的な基礎を俯瞰したものである。

第 3 章では、本研究の位置づけを示し、第 4~6 章で詳述する三つの fMRI 実験を紹介し、その位置づけを提示している。

第 4 章から第 6 章にかけて、各章ごとに 3 つの fMRI 実験を扱い、言語切替の神経基盤に少しずつ迫っていった。

第 4 章では、先行研究（Akama et al.2012）の実績を踏まえながら、fMRI 実験 1、すなわち意味処理を伴う言語切替の脳反応実験を論じている。これは、韓国語 - 中国語の早期バイリンガルと中国語 - 日本語の後期バイリンガルに対し、「動物」と「道具」という意味カテゴリーに属する言語刺激の連想タスクに、簡単な言語切替のタスクを重ねて行った fMRI 実験である。データ解析方法とし

ては、GLM と MVPA を双方とも利用してそれぞれの解析法の有効性を検証した。その結果、GLM により、意味カテゴリーの神経基盤が先行研究の結果と一致していることが証明された。また、MVPA により、バイリンガルの習得年齢にかかわらず、セッション内とセッション間で高い分類精度が得られ、意味処理を伴う言語切替の脳神経データに基づき、意味予測モデルを構築することができた。しかし、fMRI 実験 1 で採用したデザインでは、その制約上、切替に使用した言語そのものに関するコントラストの評価や分類モデルの構築を行うことはできなかった。

第 5 章では、fMRI 実験 2 としてランダムで瞬間的な言語切替に伴う脳の制御反応実験を扱った。これは、第 4 章で可能にならなかった切替言語のコントラスト検定と分類・予測モデルの計算を試み、バイリンガル話者の現実の言語生活に近い、より複雑な実験デザインで言語切替の神経基盤を探ったものである。ランダムで瞬間的な言語切替は、後期バイリンガルにとっては著しく困難な実験タスクのため、朝鮮族の韓国語 - 中国語早期バイリンガルのみを対象とした。ここでもデータ解析法として、GLM と MVPA をともに使用したが、fMRI 実験 2 では意味カテゴリーのみならず、切替に使用した言語に関しても、コントラストの検定や分類・予測モデルの計算・評価を行うことができた。意味に関しては GLM、MVPA ともども非常に成功したが、言語の分類モデルの精度はそれほど有意なものではなかった。ただし、Searchlight 法で絞り込んだ言語切替情報に特化したヴォクセルは、認知コントロール、実行調節上重要であることが知られている脳部位に属していた。

第 6 章では、fMRI 実験 3 として、翻訳関与の有無を伴う言語切替の脳内機制を探る実験を行った。今まで実験で得た知見を活かして、言語の綴り字による刺激に限定し、実験タスクも、各試行の内部で同時翻訳タスクを絡めるものと、

状況の変化で言語が切り替わるだけの翻訳なしの 2 種類の切替タスクを採用した。その結果、fMRI 実験 2 では成功したとは言い難かった MVPA による切替言語の分類(予測)モデルの構築に成功した。また、また GLM と Searchlight を統合することで、言語切替に有意な賦活と分類の精度の双方から重要なヴォクセルを広く抽出し、多数の先行研究の結果と照合することができた。その結果、翻訳関与の有無を伴う言語切替の fMRI 実験の結果は、最近の言語切替に関する脳内ネットワークモデル、すなわちホドロジカルモデルと大きく重なることが証明された。

以上のように本研究では、バイリンガルにおける言語切替の神経基盤を段階を追って、広く、深く解明していくことに成功した。また、神経言語学では初めて、伝統的な単一ヴォクセルベースの統計的仮説検定である GLM に加え、ヴォクセルの振舞をパターンとしてとらえ機械学習を行う MVPA を併用することに成功した。言語切替に利用された言語を予測する分類モデルは、実験参加者ベースでほぼすべて成功した。さらに MVPA の一種である Searchlight 法を導入することで、実験条件に関して、分類能力の高いヴォクセルのクラスターを抽出することができ、バイリンガル研究で通常用いられる t 検定に基づくコントラストマップと、ヴォクセルごとに機械学習を行った結果の分類精度マップを比較・統合することができた。総合的にこれらの結果を考察した結果、最近注目を集めている言語切替のホドロジカルモデルを支持する証拠を提供することができた。

バイリンガルにおける言語切替の神経基盤について、本研究により解明がいっそう進んだことで、人間とって未知の部分が大きい言語脳への探究は、さらなる一歩が印されたと言える。この知見は、将来的に、脳科学に立脚した第二言語学習法へ応用されることが期待される。

7.2　今後の展望

今後の展望として、本研究により得られた成果から、二つの方面から提案を行う。

まず、バイリンガリズム研究の視点からである。本研究では言語切替に関しホドロジカルモデルの妥当性を支持する証拠を提供したが、脳内で神経ネットワークがどのように作動して言語切替を行うのかについては、まだ解明されていない。そこではfMRIのみならず、侵襲的方法とも接合した、より高度な実験が必要となるだろう。将来の研究はこの神経ネットワークの具体的な詳細を明らかにしたい。まず手始めに、本研究では十分扱えなかった、第二言語学習者としての後期バイリンガルのおける言語切替に関し、早期バイリンガルの神経基盤と比較して、その共通点と相違点について明らかにしたい。

また、本研究はバイリンガルの認知モデルにおける基本的なパラダイムを踏まえており、個別の言語活動の一過的な神経表現をとらえており、ターゲットになる言語のみが賦活するということを前提としている。つまり、バイリンガルが意識的に使用したい言語だけが活性化を生むということで、脳内の信号として捉えている。提示される刺激や検索というタスクに用いた言語以外は賦活せず、機能的画像データには乗らないということである。そこでは、他の習得言語の影響は、実験条件の相対的な区別というレベルで機能画像においてとらえることはない。また、韓国語-中国語早期バイリンガルの場合は、韓国語と中国語はそれぞれ第一母国語、第二母国語であり、英語や日本語は7歳以降学習した第三、四言語である。むろん、これらの第三、四言語が言語切替能力自体に影響を与える効果があることは否定できない。しかし、それは今後の課題として、第三、四言語を習得しているかいないかで、韓国語-中国語早期バイリンガル内の2グループを比較する2標本t検定を行うような、別の実験を企画す

る必要がある。そのためには、中国の大学との共同研究が必要不可欠で、現地で、第三、四言語が未学習の韓国語 - 中国語早期バイリンガル実験参加者データを取得することが望ましい。むしろ、バイリンガルは外国語の勉強に有利という仮説（Marian et al.2014） があり、言語切替の脳内ネットワークは単一言語話者より発達しているため、脳の容積を測る方法（Voxel Based Morphometry、VBM）を用いて、特定の脳部位の密度が他のグループに比べて有意に大きくなると考えられている（Abutaleibi et al.2011）。 韓国語-中国語早期バイリンガルの VBM は本研究では扱っていないが、今後の課題としたい。

更に、バイリンガル話者に対して、fMRI 実験のみならず、バイリンガル能力についてどう自己評価しているか、聞き取り調査も実施し、神経反応データと統合すれば、バイリンガリズム研究において新たな知見が得られると考えられる。

また、MVPA の方法論であるが、今後は素性選択などの方法を工夫して、集団的 MVPA、つまり実験参加者間での分類モデルの精度向上を目指したい。

参考文献

Abutalebi, J., Brambati, S. M., Annoni, J. M., Moro, A., Cappa, S. F., & Perani, D. (2007). The neural cost of the auditory perception of language switches: an event-related functional magnetic resonance imaging study in bilinguals. J Neurosci, 27(50), 13762-13769.

Abutalebi, J., & Green, D. W. (2008). Control mechanisms in bilingual language production: Neural evidence from language switching studies. Language and Cognitive Processes, 23(4), 557-582.

Abutalebi, J., David Green, (2007). Bilingual language production: The neurocognition of language representation and control. Journal of Neurolinguistics, 20, 242-275.

Abutalebi, J., Della Rosa, P. A., Green, D. W., Hernandez, M., Scifo, P., Keim, R., ... & Costa, A. (2011). Bilingualism tunes the anterior cingulate cortex for conflict monitoring. Cerebral cortex, bhr287.

Akama, H., Murphy, B., Li, N., Shimizu, Y., Poesio, M. (2012). Decoding Semantics across fMRI sessions with Different Stimulus Modalities: A practical MVPA Study. Frontiers in Neuroinformatics, doi: 10.3389/fninf.2012.00024.

Alink, A., Euler, F., Kriegeskorte, N., Singer, W., & Kohler, A. (2012). Auditory motion direction encoding in auditory cortex and high-level visual cortex. Hum Brain Mapp, 33(4), 969-978.

Baldo JV, Shimamura AP (1998). Letter and category fluency in patients with frontal lobe lesions. Neuropsychology, 12:259-267.

Bai, J., Shi, J., Jiang, Y., He, S., & Weng, X. (2011). Chinese and Korean characters engage the same visual word form area in proficient early Chinese-Korean bilinguals. PLoS One, 6(7), e22765.

Boeckx, Cedric, Anna Martinez-Alvarez, and Evelina Leivada. (2014). "The functional neuroanatomy of serial order in language." Journal of Neurolinguistics 32: 1-15.

Bode, S., He, A. H., Soon, C. S., Trampel, R., Turner, R., & Haynes, J. D. (2011). Tracking the unconscious generation of free decisions using ultra-high field fMRI. PLoS One, 6(6), e21612.

Buchweitz, A., Mason, R. A., Hasegawa, M., & Just, M. A. (2009). Japanese and English sentence reading comprehension and writing systems: An fMRI study of first and second language effects on brain activation. Bilingualism: Language and Cognition, 12(02), 141-151.

Buchweitz, A., Shinkareva, S. V., Mason, R. A., Mitchell, T. M., & Just, M. A. (2012). Identifying bilingual semantic neural representations across languages. Brain Lang, 120(3), 282-289.

Chao LL, Haxby JV, Martin A (1999). Attribute-based neural substrates in temporal cortex for perceiving and knowing about objects. Nat Neurosci, 2:913-919.

Chao LL, Martin A: (2000). Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. Neuroimage, 12:478-484.

Chan, A. H., Luke, K. K., Li, P., Yip, V., Li, G., Weekes, B., & Tan, L. H. (2008). Neural correlates of nouns and verbs in early bilinguals. Annals of the New York Academy of Sciences, 1145(1), 30-40.

Chee, M.W., Tan, E.W., Thiel, T., (1999). Mandarin and English single word processing studied with functional magnetic resonance imaging. J. Neurosci. 19, 3050–3056.

Chee, M.W., Hon, N., Lee, H., Soon, C., (2001). Relative language proficiency modulates BOLD signal change when bilinguals perform semantic judgments. NeuroImage 13, 1155–1163.

Chee, M.W., Soon, C.S., Lee, H.L. (2003). Common and segregated neuronal networks for different languages revealed using functional magnetic resonance adaptation. J. Cogn. Neurosci. 15, 85–97.

Corradi-Dell'Acqua, C., Hofstetter, C., & Vuilleumier, P. (2011). Felt and seen pain evoke the same local patterns of cortical activity in insular and cingulate cortex. J Neurosci, 31(49), 17996-18006.

Costa, A., & Santesteban, M. (2004). Lexical access in bilingual speech production: Evidence from language switching in highly proficient bilinguals and L2 learners. Journal of Memory and Language, 50(4), 491-511.

Costa, A., Santesteban, M., & Ivanova, I. (2006). How do highly proficient bilinguals control their lexicalization process? Inhibitory and language-specific selection mechanisms are both functional. J Exp Psychol Learn Mem Cogn, 32(5), 1057-1074.

Cox DD, Savoy RL. (2003). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) "brain reading": detecting and classifying distributed patterns of fMRI activity in human visual cortex. NeuroImage 19:261–70

Crinion, J., Turner, R., Grogan, A., Hanakawa, T., Noppeney, U., Devlin, J. T., et al. (2006). Language control in the bilingual brain. Science, 312(5779), 1537-1540.

Davatzikos, C., Ruparel, K., Fan, Y., Shen, D. G., Acharyya, M., Loughead, J. W., ... & Langleben, D. D. (2005). Classifying spatial patterns of brain

activity with machine learning methods: application to lie detection. Neuroimage, 28(3), 663-668.

Demonet JF, Chollet F, Ramsay S, Cardebat D, Nespoulous JL, Wise R, Rascol A, Frackowiak R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. Brain, 115:1753-1768.

Duffau, H. (2008). The anatomo-functional connectivity of language revisited. New insights provided by electrostimulation and tractography. Neuropsychologia, 46(4), 927-934.

Duffau, H., Moritz-Gasser, S., & Mandonnet, E. (2014). A re-examination of neural basis of language processing: proposal of a dynamic hodotopical model from data provided by brain stimulation mapping during picture naming. Brain Lang, 131, 1-10.

Formisano I, De Martino F, Bonte M, Goebel R. (2008). "Who" is saying "what"? Brain-based decoding of human voice and speech. Science 322:970–73

Friston, K.J., Holmes, A.P., Worsley, K.J., Poline, J.B., Frith, C.D., Frackowiak, R.S.J. (1994). Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. Hum. Brain Mapp. 2, 189–210.

Friston, K.J., Ashburner, J., Frith, C.D., Poline, J.B., Heather, J.D., Frackowiak, R.S.J. (1995). Spatial registration and normalization of images. Hum. Brain Mapp. 2, 165–189.

Gilbert, S.J. (2011). Decoding the content of delayed intentions. J Neurosci. 31: 2888–2894.

Grabowski TJ, Damasio H, Damasio AR: (1998). Premotor and prefrontal correlates of category-related lexical retrieval. Neuroimage, 7:232-243.

Green, D.W. (1986). Control, activation and resource: a framework and a model for the control of speech in bilinguals. Brain Lang. 27, 210–223.

Green, D.W. (1998). Mental control of the bilingual lexico-semantic system. Biling Lang. Cogn. 1, 67–81.

Guo, T., Liu, H., Misra, M., & Kroll, J. F. (2011). Local and global inhibition in bilingual word production: fMRI evidence from Chinese-English bilinguals. Neuroimage, 56(4), 2300-2309.

Haxby JV, Gobbini MI, Furey ML, Ishai A, Schouten JL, Pietrini P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. Science 293:2425–30

Haxby JV, Guntupalli JS, Connolly AC, Halchenko YO, Conroy BR, et al. (2011). A common, highdimensional model of the representational space in human ventral temporal cortex. Neuron 72:404.16

Hart J, Gordon B (1990). Delineation of single-word semantic comprehension deficits in aphasia, with anatomical correlation. Ann Neurol, 27:226-231.

Harrison SA, Tong F. (2009). Decoding reveals the contents of visual working memory in early visual areas. Nature 458:632–35

Haynes JD, Rees G. (2005). Predicting the orientation of invisible stimuli from activity in human primary visual cortex. Nat. Neurosci. 8:686.91

Haynes, J. D., & Rees, G. (2006). Decoding mental states from brain activity in humans. Nature Review Neuroscience, 7(7), 523–534.

Haynes JD, Sakai K, Rees G, Gilbert S, Frith C, Passingham RE. (2007). Reading hidden intentions in the human brain. Curr. Biol. 17:323–28

Hernandez, A.E., Martinez, A., Kohnert, K. (2000). In search of the language switch: an fMRI study of picture naming in Spanish–English bilinguals. Brain Lang. 73, 421–431.

Hernandez, A.E., Dapretto, M., Mazziotta, J., Bookheimer, S. (2001). Language switching and language representation in Spanish–English bilinguals: an fMRI study. NeuroImage 14, 510–520.

Hernandez, A. E., & Meschyan, G. (2006). Executive function is necessary to enhance lexical processing in a less proficient L2: Evidence from fMRI during picture naming. Bilingualism, 9(02), 177.

Hernandez, A. E. (2009). Language switching in the bilingual brain: what's next? Brain Lang, 109(2-3), 133-140.

Herrmann B, Obleser J, Kalberlah C, Haynes JD, Friederici AD. (2012). Dissociable neural imprints of perception and grammar in auditory functional imaging. Hum Brain Mapp, 33: 584–595.

Hodges JR, Patterson K, Oxbury S, Funnell E: Semantic dementia. (1992). Progressive fluent aphasia with temporal lobe atrophy. Brain, 115:1783-1806.

Jimura, K., Poldrack, R.A. (2012). Analyses of regional-average activation and multivoxel pattern information tell complementary stories. Neuropsychologia 50(4), 544-52.

Kahnt, T., Heinzle, J., Park, S. Q., & Haynes, J. D. (2011). Decoding different roles for vmPFC and dlPFC in multi-attribute decision making. Neuroimage, 56(2), 709-715.

Kamitani Y, Tong F. (2005). Decoding the visual and subjective contents of the human brain. Nat. Neurosci. 8:679.85

Kay KN, Naselaris T, Prenger RJ, Gallant JL. (2008). Identifying natural images from human brain activity. Nature 452:352–55

Kho, K. H., Duffau, H., Gatignol, P., Leijten, F. S., Ramsey, N. F., van Rijen, P. C., et al. (2007). Involuntary language switching in two bilingual patients during the Wada test and intraoperative electrocortical stimulation. Brain Lang, 101(1), 31-37.

Kim, K. H. S., Relkin, N. R., Lee, K., & Hirsch, J. (1997). Distinct cortical areas associated with native and second languages. Nature, 388, 171–174.

Kotz, S.A., Kalberlah C., Bahlmann J., Friederici A.D., Haynes J.D. (2012). Predicting vocal emotion expressions from the human brain. Hum Brain Mapp, doi: 10.1002/hbm.22041.

Kriegeskorte N, Goebel R, Bandettini P. (2006). Information-based functional brain mapping. Proc Natl Acad Sci U S A, 103: 3863–3868.

Kriegeskorte, N., & Bandettini, P. (2007). Analyzing for information, not activation, to exploit high-resolution fMRI. Neuroimage, 38(4), 649-662.

Kriegeskorte, N., & Bandettini, P. (2007). Combining the tools: activation- and information-based fMRI analysis. Neuroimage, 38(4), 666-668.

Kriegeskorte, N., Goebel, R., & Bandettini, P. (2006). Information-based functional brain mapping. Proc Natl Acad Sci U S A, 103(10), 3863-3868.

Kuo, W. J., Yeh, T. C., Lee, J. R., Chen, L. F., Lee, P. L., Chen, S. S., ... & Hsieh, J. C. (2004). Orthographic and phonological processing of Chinese characters: an fMRI study. Neuroimage, 21(4), 1721-1731.

LaConte, S., Strother, S., Cherkassky, V., Anderson, J., & Hu, X. (2005). Support vector machines for temporal classification of block design fMRI data. NeuroImage, 26(2), 317-329.

Lee, Donghoon, et al. (2001) "A fMRI study of word recognition in Chinese and Korean." Communication Sciences & Disorders 6.1: 1-25.

Lee, H. S., Fujii, T., Okuda, J., Tsukiura, T., Umetsu, A., Suzuki, M., ... & Yamadori, A. (2003). Changes in brain activation patterns associated with learning of Korean words by Japanese: an fMRI study. NeuroImage, 20(1), 1-11.

Lee, Chia-Ying, et al. (2004) "Neuronal correlates of consistency and frequency effects on Chinese character naming: an event-related fMRI study." Neuroimage 23.4: 1235-1245.

Lehtonen, M. H., Laine, M., Niemi, J., Thomsen, T., Vorobyev, V. A., & Hugdahl, K. (2005). Brain correlates of sentence translation in Finnish-Norwegian bilinguals. Neuroreport, 16(6), 607.

Liu, Y., Perfetti, C.A., (2003). The time course of brain activity in reading English and Chinese: an ERP study of Chinese bilinguals. Hum. Brain Mapp. 18, 167–175.

Liu, H., Hu, Z., Guo, T., & Peng, D. (2010). Speaking words in two languages with one brain: Neural overlap and dissociation. Brain research, 1316, 75-82.

Mahon, B. Z., Anzellotti, S., Schwarzbach, J., Zampini, M., & Caramazza, A. (2009). Category-specific organization in the human brain does not require visual experience. Neuron, 63(3), 397-405.

Marian, V., Chabal, S., Bartolotti, J., Bradley, K., & Hernandez, A. E. (2014). Differential recruitment of executive control regions during phonological competition in monolinguals and bilinguals. *Brain and language*, *139*, 108-117.

Martin A, Haxby JV, Lalonde FM, Wiggs CL, Ungerleider LG.(1995). Discrete cortical regions associated with knowledge of color and knowledge of action. Science, 379:649-652

Martin A, Wiggs CL, Ungerleider LG, Haxby JV (1996). Neural correlates of category-specific knowledge. Nature, 379:649-652.

Mitchell, T. M. (1997). In C. L. Liu (Ed.), Machine learning. Boston: McGraw-Hill.

Mitchell, T. M., Hutchinson, R., Niculescu, R. S., Pereira, F., Wang, X., Just, M., & Newman, S. (2004). Learning to decode cognitive states from brain images. Machine Learning, 57(1-2), 145-175.

Mitchell, T. M., Shinkareva, S. V., Carlson, A., Chang, K.-M., Malave, V. L., et al. (2008). Predicting human brain activity associated with the meanings of nouns. Science, 320, 1191–1195.

Momennejad, I., & Haynes, J. D. (2012). Human anterior prefrontal cortex encodes the 'what' and 'when' of future intentions. Neuroimage, 61(1), 139-148.

Moore CJ, Price CJ (1999). A functional neuroimaging study of the variables that generate category-specific object processing differences. Brain, 112:943-962

Moritz-Gassera,S., Duffau, H. (2009). Cognitive processes and neural basis of language switching: proposal of a new model. Cognitive neuroscience and neuropsychology 1

Mourão-Miranda, J., Oliveira, L., Ladouceur, C. D., Marquand, A., Brammer, M., Birmaher, B., Axelson, D., Phillips, M. L. (2012). Pattern recognition and functional neuroimaging help to discriminate healthy adolescents at risk for mood disorders from low risk adolescents. PLoS One, 7(2), e29482.

Mur, M., Bandettini, P. A., & Kriegeskorte, N. (2009). Revealing representational content with pattern-information fMRI—an introductory guide. Social cognitive and affective neuroscience, nsn044.

Nakamura K, Honda M, Hirano S, Oga T, Sawamoto N, Hanakawa T, Inoue H, Ito J, Matsuda T, Fukuyama H, Shibasaki H (2002). Modulation of the visual word retrieval system in writing: a functional MRI study on the Japanese orthographies. J Cogn Neurosci 14:104 –115.

Naselaris T, Kay KN, Nishimoto S, Gallant JL. (2011). Encoding and decoding in fMRI. NeuroImage 56:400.10

Norman, K. A., Polyn, S. M., Detre, G. J., & Haxby, J. V. (2006). Beyond mind-reading: multi-voxel pattern analysis of fMRI data. Trends in cognitive sciences, 10(9), 424-430.

O'Toole, A. J., Jiang, F., Abdi, H., Pénard, N., Dunlop, J. P., & Parent, M. A. (2007). Theoretical, statistical, and practical perspectives on pattern-based classification approaches to the analysis of functional neuroimaging data. Journal of cognitive neuroscience, 19(11), 1735-1752.

Paradis, M. (2003). Differential use of cerebral mechanisms in bilinguals. In M. T. Banich & M. Mack (Eds.), Mind, brain, and language: Multidisciplinary perspectives (pp. 351–370). London: Lawrence Erlbaum.

Perani D, Cappa SF, Bettinardi V, Bressi S, Gorno-Tempini M, Matarrese M, Fazio F: (1995). Different neural systems for recognition of animals and man-made tools. Neuroreport, 6:1637-1641.

Perani D, Schnur T, Tettamanti M, Gorno-Tempini M, Cappa SF, Fazio F: (1999). Word and picture matching: a PET study of semantic category effects. Neuropsychologia, 37:293-306.

Perani, D., & Abutalebi, J. (2005). The neural basis of first and second language processing. Current Opinion in Neurobiology, 15, 202–206.

Pereira F, Mitchell T, Botvinick M. (2009). Machine learning classifiers and fMRI: a tutorial overview. NeuroImage 45(Suppl. 1):S199–209

Perfetti, Charles A., et al. (2007)."Reading in two writing systems: Accommodation and assimilation of the brain's reading network." Bilingualism: Language and Cognition 10.02: 131-146.

Price, C.J., Green, D.W., Von Studnitz, R. (1999). A functional imaging study of translation and language switching. Brain 122, 2221–2235.

Price, C. J., & Devlin, J. T. (2003). The myth of the visual word form area. NeuroImage, 19(3), 473-481.

Rodriguez-Fornells, A., Van Der Lugt, A., Rotte, M., Britti, B., Heinze, H. J., & Münte, T. F. (2005). Second language interferes with word production in fluent bilinguals: brain potential and functional imaging evidence. Journal of Cognitive Neuroscience, 17(3), 422-433.

Sabri, M., Binder, J. R., Desai, R., Medler, D. A., Leitl, M. D., & Liebenthal, E. (2008). Attentional and linguistic interactions in speech perception. Neuroimage, 39(3), 1444-1456.

Shinkareva, S. V., Mason, R. A., Malave, V. L., Wang, W., Mitchell, T. M., et al. (2008). Using fMRI brain activation to identify cognitive states associated with perception of tools and dwellings. PLoS One, 3(1), e1394.

Staeren N, Renvall H, De Martino F, Goebel R, Formisano E. (2009). Sound categories are represented as distributed patterns in the human auditory cortex. Curr. Biol. 19:498–502

Siok, W. T., Perfetti, C. A., Jin, Z., & Tan, L. H. (2004). Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. Nature, 431, 71–76.

Soon CS, Brass M, Heinze HJ, Haynes JD. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. Nat. Neurosci. 5:543–45

Spiridon, M. & Kanwisher, N. (2002). How distributed is visual category information in human occipital-temporal cortex? An fMRI study. Neuron. 35 (6) 1157-1165

T. Nakada, Y. Fujii, K. Suzuki, I.L. Kwee (1998). "Musical Brain" revealed by high-field (3 tesla) functional MRI NeuroReport, 9, pp. 3853–3856

Tan, L. H., Feng, C. M., Fox, P. T., & Gao, J. H. (2001). An fMRI study with written Chinese. Neuroreport, 12(1), 83-88.

Tan, L.H., Liu, H.L., Perfetti, C.A., Spinks, J.A., Fox, P.T., Gao, J.H. (2001). The neural system underlying Chinese logograph reading. NeuroImage 13, 826–846.

Tan, L.H., Laird, A.R., Li, K., Fox, P.T., (2005). Neuroanatomical correlates of phonological processing of Chinese characters and alphabetic words: a meta-analysis. Hum. Brain Mapp. 25, 83–91.

Wang, M., Koda, K., & Perfetti, C. A. (2003). Alphabetic and nonalphabetic L1 effects in English word identification: A comparison of Korean and Chinese English L2 learners. Cognition, 87(2), 129-149.

Wang,Y.P.,Xue,G.,Chen,C.,Xue,F.,Dong,Q. (2007). Neural bases of asymmetric language switching in second-language learners: An ER-fMRI study. NeuroImage, 35, 862-870.

Warrington EK: (1975). The selective impairment of semantic memory. Quart J Exp Psychol, 27:635-657.

Weil, R. S., & Rees, G. (2010). Decoding the neural correlates of consciousness. Current opinion in neurology, 23(6), 649-655.

Xue, G., Dong, Q., Chen, K., Jin, Z., Chen, C., Zeng, Y., & Reiman, E. M. (2005). Cerebral asymmetry in children when reading Chinese characters. Cognitive Brain Research, 24(2), 206-214.

Xue, G., Chen, C., Jin, Z., & Dong, Q. (2006). Language experience shapes fusiform activation when processing a logographic artificial language: an fMRI training study. Neuroimage, 31(3), 1315-1326.

Yoon, H. W., Cho, K. D., Chung, J. Y., & Park, H. (2005). Neural mechanisms of Korean word reading: A functional magnetic resonance imaging study. Neuroscience letters, 373(3), 206-211.

Zhou Yaowen. (1992). Bilingualism and bilingual education in China. International Journal of the Sociology of Language, 97(1), 37-46.

付録１ バイリンガル脳研究の方法と革新

1.1 GLM：一般線形モデル

GLM分析はfMRIデータを解析において最もよく使われている解析方法である。fMRIデータは脳の空間的な位置情報を必要とし、x,y,zの各軸をもつ三次元の座標系を前提とした配列の形で考えることができる。また撮像の反復を考慮して1個のファイルに統合する場合は、時間という次元を入れて、四次元の配列ととらえられる。通常の分析方法では、脳画像の「厚み付きピクセル(画素)」である各ヴォクセルを単位として、実験条件ごとに示す賦活値の時系列変化をデザイン行列として設定し、条件間の差をコントラストとして、ヴォクセル・ベースでT検定などの統計的仮説検定を行う。しかし、この分析方法は、各ヴォクセルが脳内で唯一無二の不変の位置を表していることを前提としている。

実際には、各時点でのfMRIデータは様々なノイズに晒され、大きなばらつきを見せるのが普通である。その原因は、MRIスキャナの物理的変化や実験参加者の頭部動作(ヘッドモーション)、心拍や呼吸などである。ノイズの中から意味のある信号を抽出するためには、統計解析を行う前にデータの前処理作業を行うこと(preprocessing)が必要である。

fMRIデータの前処理

fMRIデータの解析を行うには、まずMRIスキャナーにより得られたローデータを解析が可能なファイル形式に変換する作業が必要となる。通常は最初に直接得られたデータは、撮影された画像にメタデータが組み込まれたDICOMという医療用のフォーマットになっている。一方、fMRIデータの解析を行うには、

AnalyzeやNifti等の形式の分析用ファイルに変換する必要が出てくる。Analyzeという形式は、拡張子が.hdrというファイルと.imgというファイルのペアからなり、前者は画像のヘッダファイルで、後者は画像の本体である。Niftiという形式は.niiという拡張子を取り、4次元データまで1個のファイルに統合することが可能である。このDicom Importという作業はMatlab上で動作するSPM8(Statistical Parametric Mapping, Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK)というソフトウェアにより実行することができる。

次は前処理に入る。前処理とはfMRIによる脳活動データを統計による解析が可能になるレベルまで、いろいろな補正作業を行う処理を指す。具体的には、5段階のステップから構成される。

はじめに、Realignment(再整列)を行う。これは、実験中に実験参加者の頭がx,y,z軸に沿ってスライドしたりそのまわりを回転したりするので、その動きを補正し、時系列に沿って一列に整列化する作業である。ただし、ヴォクセルの大きさ以上に頭が動いてしまった場合、特にゆっくりしたドリフトでなくランダムに動いてしまった場合は、補正は完全にはうまくできないと言われている。この場合は、その実験参加者のデータは廃棄することになる。本研究では、実験参加者には声を出して明示的な(overt)反応をするのではなく、内心で内密(covert)な単語検索をする反応を求めたが、その理由の一つとして、声を上げると顎の動きに伴って頭が大きく動く可能性があるということが挙げられる。

Realignmentの終了後に、Co-registration(共登録)　を行う。これは、次に行うNormalization(標準化)のための準備作業である。Co-registration では、解剖画像であるT1イメージと、脳機能データであるEPIイメージを重ね合わせる。次は、セグメント作業に移るが、ここでは構造画像と機能画像の両方をセグメント化をする。構造画像のヴォクセルの明るさと脳組織確率マップにより、

灰白質、白質と脳脊髄液の三つの脳組織をセグメント化する。その後、構造画像と機能画像を重ね合わせた上で、そのデータに基づいて空間的標準化 Normalization を行うことになる。Normalization では、個人差がある実験参加者の脳の大きさや形を、一つのテンプレートとなる脳イメージ(SPM の場合は MNI)にあてはめ、そのあてはめた結果を、機能画像の EPI イメージすべてに適用するというプロセスを行う。Normalization が終わった後、GLM の場合は、最後に EPI イメージの SN 比(信号対ノイズ比)を低減させるために、画像を平滑化させる Smoothing という処理を行う。具体的には、EPI 脳画像データに対して、x、y、z 軸の 3 方向に半値幅を 8mm に設定したガウシアンフィルタの畳み込み演算によって平滑化を行う。後述の多変量パターン分析 MVPA では、平滑化によって実際のヴォクセルがもつ重要な信号が隣接するヴォクセルとの調整により失われることを恐れ、データの平滑化を行わない。一般にデータの平滑化を行わない方が機械学習の精度が高いことが知られている。また本研究では、MVPA の計算のため PyMVPA2.0 というソフトウェアを利用するので、その要求形式に応じて、SPM8 上で時間も含めた Nii 形式の 4 次元データにも変換する。

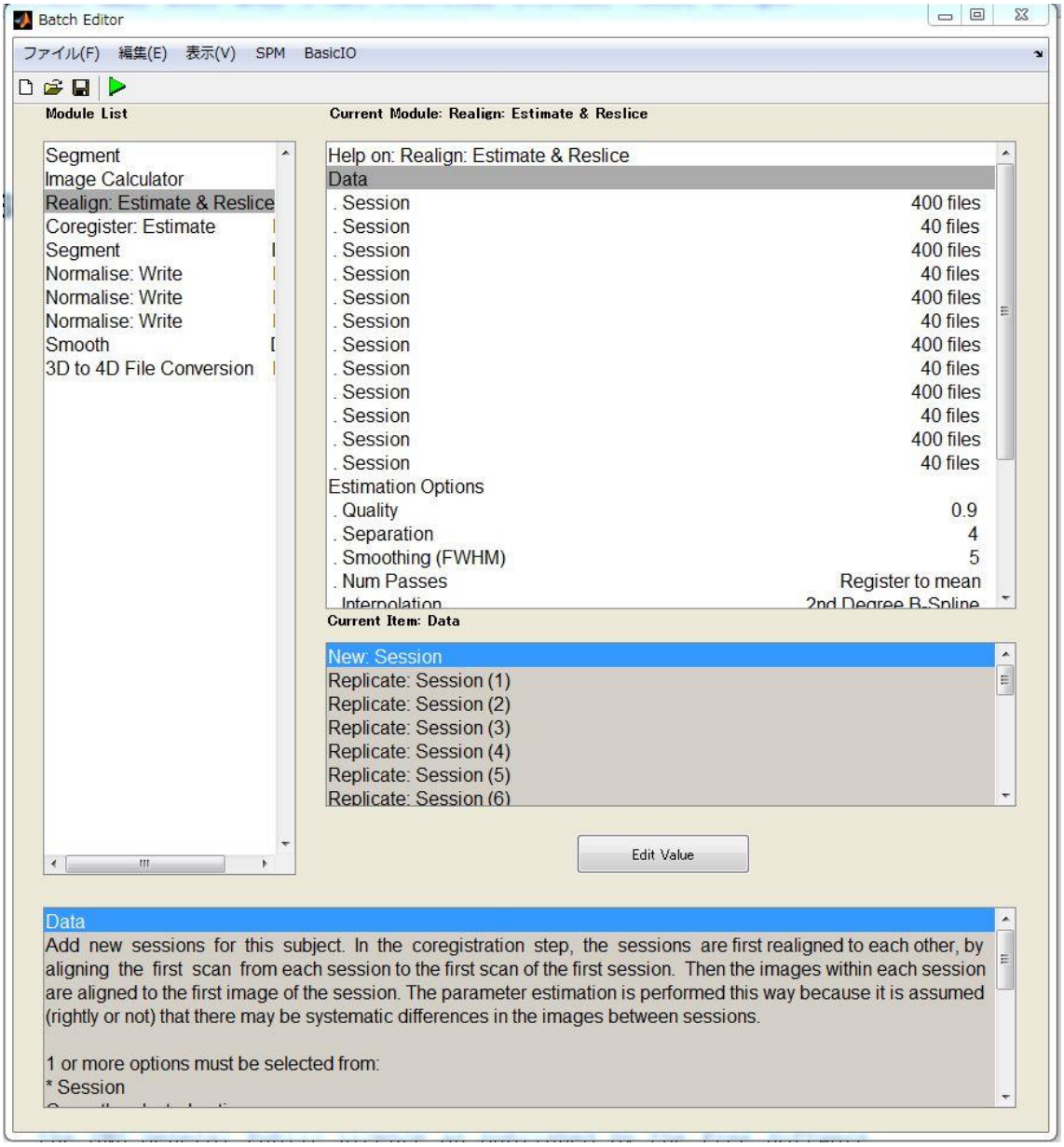


図 1-1：SPM のバッチエディタ

一般線形モデル（General Linear Model (GLM)）

一般線形モデル(GLM)は統計学で用いられる線形の回帰分析を利用したものである。これは fMRI の実験データが、異なるモデル係数の線形結合と無相関ノイズから構成されていることを前提としての統計検定である。通常、一般線形モデルの公式は以下のように表される。

$$y = X\beta + \varepsilon$$

しかし、fMRI 実験の場合は、y 、X、 β、 ε は全部行列として扱われる。左辺に位置する fMRI データ y は、右辺のように二つのデータマトリクスに分解される。ここでまず右辺の第一項の左側からかかる行列 X は、デザインマトリックスと呼ばれ、データから既知のものである。この行列で行は時間で、列はヴォクセルである。古典的最小二乗法により、ヴォクセルごとにパラメーターの β と残差の ε を独立に計算する。右辺の第一項の右側からかかる行列は、推定されるパラメーター行列で、行は時間で、列はパラメーターとしての回帰係数である。このパラメーターはしばしば β と呼ばれ、線形の回帰モデルにおける勾配に対応する。 ε は残差マトリクスであり、行は時間ポイントで、列はヴォクセルである。よって、データを解析する時、y と X は既知なので、β を求めるのは重要になる。ここでは、最小二乗法 Ordinary Least Square (OLS)を使って、残差（ノイズ）がもっと小さいような β を求めることになる。

本研究では、SPM8 を使って GLM の分析を行ったので、ここで計算法を簡単にまとめておく。前処理の後、次の 3 ステップの処理が必要となる。

1、 脳活動データを、GLM に必要なデータをデザイン行列の形にまとめる（Model specification）。

2、 上記の準備データからモデルを推定する（Model estimation）。

3、　条件間の差異をコントラスト(差分)の形で扱う（Contrast　作成）。

Model specification で最も重要なのは、生の脳活動データにおいてどの時点で実験参加者がどのような活動を行っていたか(タスクとその種類、および休止)を指定することである。本研究では、刺激はランダムな順番で提示され、刺激提示プログラムは、MRI スキャナーの撮像と時間的に同期するよう設定された E-Prime2.0 というソフトウェアにより作成されたものなので、デザイン行列の作成には E-prime のログファイルが必要になる。以上の時間に沿っての事象(イベント)データと脳活動データを統合させるのが、Model specification での作業となる。

Model specification が終わると、次はコントラストを設定して、条件間の差を統計的仮説検定を用いて行うステップに入る。ここでは、いわゆる「差分法」による統計解析を行う。そのために、課題 A－課題 B といったコントラストを作成する必要がある。本研究では、意味カテゴリーのコントラスト（動物と道具）と言語のコントラスト（中国語、日本語、韓国語）が対象となる。

GLM では個人レベル、すなわちファーストレベルのコントラストを作成し、実験参加者数だけこの作業を繰り返した後、実験参加者群レベル（セカンドレベル）の解析を行う。グループ解析の時、通常二つの方法がある。一つは固定効果分析（fixed-effects analyses）、もう一つはランダム効果分析（random-effects analyses）である。固定効果分析では、データがすべて同じ実験参加者から得られたものという仮定の上で計算している。ランダム効果分析では、実験参加者間の個人差も変量としている。

1.2　多変量パターン解析

1.2.1　MVPA

MVPA は機械学習により、神経活動のパターンを分類することで、特定の条件における脳の状態を予測する方法である。fMRI におけるデータ単位であるヴォクセルを一纏めのパターンとして扱うので、multi-voxel(マルチヴォクセル)あるいは multi-variate(マルチヴァリエイト)のパターンを分析するということから、MVPA(Multivariate or Multivoxel pattern analysis)と略される。MVPA はまた、ヴォクセルを 1 個ずつ扱って他のヴォクセルとの賦活値の差を統計的に検定する univariate な(単変量の)分析、すなわち GLM と対を為す。GLM はヴォクセルごとの解析であり、実験条件の賦活対比に T 検定(あるいは F 検定)を適用し、各ヴォクセルがβ値をもつ脳画像を作成するのに対して、MVPA は実験条件について推定モデルを構築し、交差評価(cross-validation)によりそれを現実のデータと照合して、モデルの予測精度を計算する。その予測精度がヴォクセルごとに割り当てられ、ひとつの脳画像として生成するための手法が Searchlight 法であり、これにより GLM と結果の比較が可能になる。近年、脳科学の世界で MVPA は盛んに用いられるようになっている。しかも GLM 分析と MVPA を両方使って、fMRI データを解析する動きも見られる（Jimura et al.,2012）。

以下は MVPA の特徴・利点について簡単に述べる。

まず、MVPA は脳の状態を GLM よりも細かい空間的な粒度(granularity)で評価する。先述のごとく、GLM では S/N 比を上げるため、データを平滑化するが、それがデータを局所的に安定化させるためのぼかしを入れることで、ヴォクセルにおいて、他の隣接ヴォクセルに依存しない、独自の細かい重要な情報を抹消してしまう可能性もある。MVPA 分析では、データを平滑化しないので、非常に粒度(granularity)の高い重要な情報を確保することができるため、しばしば平

滑化したデータに比べて高い精度をあげる場合がある。既往の研究では、MVAP を使って、様々な対象や各カテゴリーに関し、脳領域の抽出に成功している（Spiridon, M.& Kanwisher, N., 2002; Cox, D.D.&Savoy, R.L., 2003）。

1.2.1.1 MVPA の先行研究

MVPA の初期の代表的な研究は Haxby et al.(2001)のものである。Haxby らは「顔」や「背景」などの意味カテゴリーが、それらの神経基盤とされ、同一の解剖学的ラベルを貼られた同一の脳部位(腹部側頭葉 ventral temporal cortex)の中で、さらに複雑なパターンで表現されていることを解明した。従来の GLM を越え新しい視点をもたらしたこの MVPA 研究に啓発され、その後 MVPA を用いた研究は増加の一途を辿っている。例えば、Cox & Savoy (2003)は MVPA を使って、視覚野における物体カテゴリーの分類を行った。この研究においては、ヴォクセル選択や分類器の選択で様々に異なる方法が試されている。また、一次視覚野における低レベルの視覚特徴の分類（Haynes & Rees 2005, Kamitani & Tong 2005）、聴覚野における聴覚刺激の分類（Formisano et al. 2008、Staeren et al. 2009）、さらに、意図など抽象的な脳の状態の分類（Haynes et al. 2007, Soon et al. 2008）、ワーキングメモリの内容（Harrison & Tong 2009）などが MVPA の対象として取り上げられてきた。

Mitchell et al.（2008）の研究では、コーパスから計算された意味素性との間の共起情報をもとに、任意の名詞の神経表現を予測できるようになった。また、Akama et al.(2012)は Mitchell らの研究を踏まえ、MVPA を用いて異なる知覚モダリティでの名詞の意味処理の予測を行った。意味カテゴリーとして「動物」と「道具」を用い、実験参加者内で画像と日本語のキャプションによる視覚提示と聴覚提示で、それぞれ別セッションに分け fMRI 実験を行った。その結

果、セッション内の分類精度は80%から90%の非常に高い精度を得られ、セッション間の分類精度もそれにやや劣るが高度に有意な結果を得られた。

MVPAにおけるモデル化は、単一実験参加者内データを用いて機械学習により予測を行うことが原則である。Cox & Savoy (2003)などの報告でも、実験参加者間の予測精度は著しく低下する。したがって本研究でも複数の実験参加者から得られたMVPAの結果は、そのまま並行的に提示するにとどめている。

MVPAを使ったバイリンガル研究としては、Buchweitz et al. (2012) が知られている。Buchweitz らは、11人のポルトガル語―英語の後期バイリンガルを対象として、「道具」と「場所」の二つの意味カテゴリーに属する刺激をもとに連想タスクを要求した。MVPAを使って、一つの言語での連想データを用い、もう一つの言語の神経表現を予測したところ、言語間の予測は成功を収めた。この研究は、言語の神経基盤について言及していないものの、MVPAが異なる言語間を対象としたバイリンガル研究の方法論として有効であることを示唆している。

1.2.1.2 MVPAのプロセス

本研究のMVPAはPython2.7のパッケージPyMVPA2.0を使って分析を行った。fMRIデータはSPM8を使って前処理したが、平滑化を除く前処理で出力した4DのNifti形式ファイル、機能画像と同じ解像度でMNI空間に標準化された灰白質マスク、および実験刺激提示プログラムで出力したE-primeログファイルを準備しておく。次に、E-primeログファイルから実験条件と実行番号が対応するリストをテキストファイルとして生成する。以下、PyMVPAを使った計算プロセスを説明する。

1. 素性選択（ヴォクセル選択）

一般に機械学習においてモデル化のための特徴を抽出する作業を素性選択(feature selection)と呼ぶが､MVPA において素性はヴォクセルから選別される。MVPA は灰白質の中から、素性選択を行うが、その理由は、認知的な活動は灰白質において行われるとされるからである。ここでは分散分析(ANOVA)の f 値を使って、最も感度の高い（差が大きい）500 個のヴォクセルを選択した（図 1-2）。

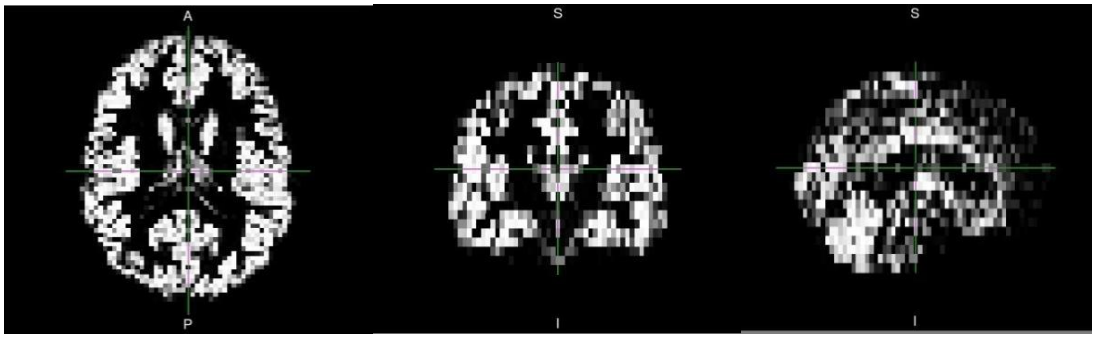


図 1-2：素性選択（灰白質から ANOVA により 500 個のヴォクセルを選択した）

2. データ値の抽出

脳の賦活パターンは実験条件下の血行動態の変化により生成したものである。本実験では血流動態反応関数(haemodynamic response fucntion)、特に反応ピークの遅延を考慮し、刺激提示後 4 秒目から 4 秒間のボックスカーを採取してその平均を取り、データの値とした（図 1-3）。

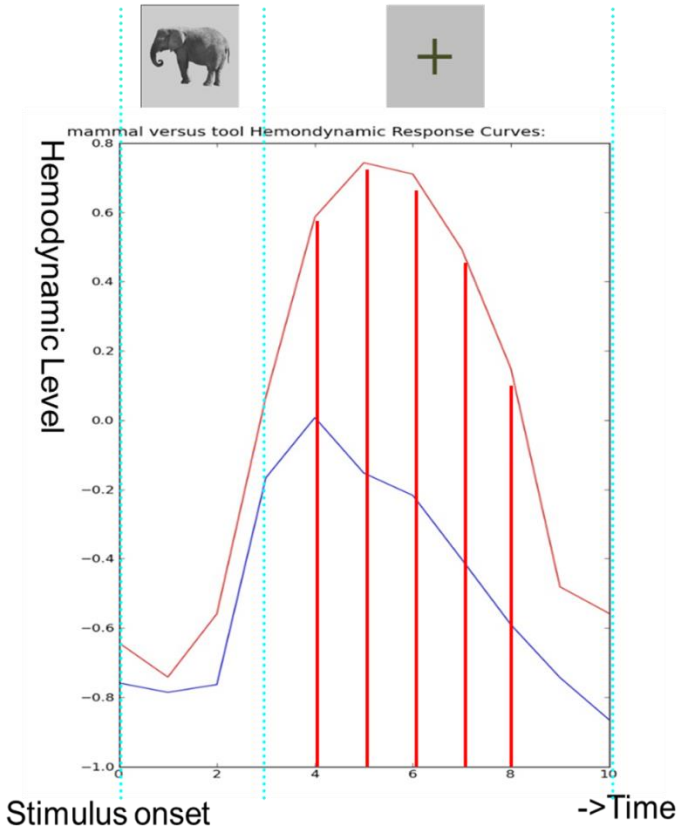


図 1-3：値の抽出　刺激提示後 4 秒、幅 4 秒

3. 機械学習

前にも述べたように、MVPA では、機械学習のアルゴリズムを用いる。つまり、fMRI の実データの一部を用いて分類モデルをトレーニングする。ここで用いる分類器はトレーニングデータの素性に基づいて訓練したアルゴリズムである。この分類器を用いて、神経活動のパターンを表現するモデルを構築し、新たな未知の例がどちらのラベルに分類されるかを予測する。実際には、残りのデータに適用して結果を予測し、それを分類精度という形で評価する。これが交差評価(cross-validation)である。

また神経画像解析の世界では、素性はヴォクセルである。ラベルは実験時に提示した刺激や行ったタスクなどの条件に対応する。本研究の場合は、ラベル

は意味カテゴリーである「動物」と「道具」、あるいは使用言語としての、中国語、韓国語、日本語である。

機械学習のアルゴリズムは多数存在しているが、基本的には線形分類器を使用している。例えば、サポートベクターマシン support vector machine (SVM) (Cox & Savoy (2003))、線形判別分析 linear discriminant analysis (LDA) (e.g., Carlson et al. 2003, O'Toole et al. 2005)、スパースロジスティック回帰 sparse multinomial logistic regression (SMLR) (Yamashita et al. 2008)、ペナルティ付きロジスティック回帰分析 Penalized Logistic Regression classifier (PLR) (Akama et al., 2012) などである。

4. 交差評価

本研究では、leave-one-out 6-fold 交差評価を行った。各実験参加者のデータを訓練用とテスト用に分けるとき、1 ランはテスト用に使わないで取り措いて、残りの 5 つのランを使ってモデルを計算し、その 1 ランでモデルのテストする方法を取っている。またこの過程をテスト用のランを替えながら 6 回繰り返し、平均の精度をもって最終的な評価値とする。(図 1-4)

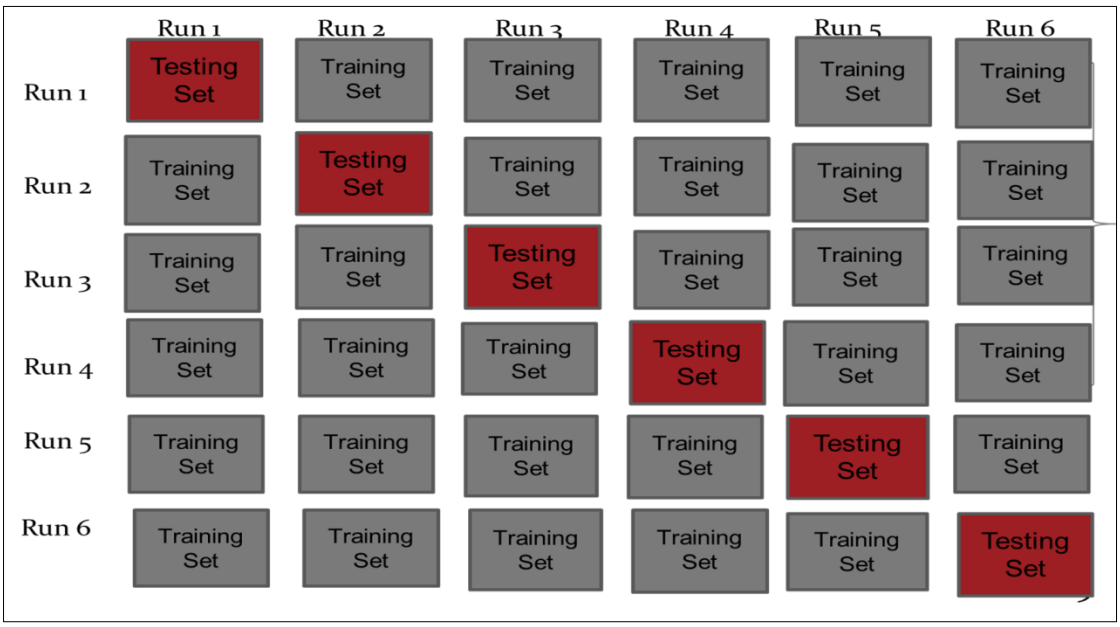


図 1-4：leave-one-out 6-fold 交差検証

1.2.2 Searchlight

最近 MVPA の一つの方法として特に注目を集めているのは、searchlight 法である（Kriegeskorte et al., 2006, 2007；Haynes et al., 2007）。Searchlight 分析も PyMVPA2.0 パッケージを用いた。具体的に、機械学習の分類器はペナルティ付きロジスティック回帰分析(PLR)で、searchlight の半径はヴォクセル 3 個と設定した。また、各ヴォクセルの分類精度の Z 統計量を計算して、標準正規分布の仮説の下で $p < 0.001$ に対応する 3.08 の閾値を用いてスクリーニングした。最後に、実験参加者ベースの画像は XjView toolbox (http://www.alivelearn.net/xjview)を用いて、出力した。

Searchlight では、各ヴォクセルに関して機械学習を個別に行い、分類精度に基づく画像を作り上げる。その精度が高いヴォクセルがその条件に関して情報を持つヴォクセルと見なされる。Searchlight は素性選択の方法としてよく使われているが（Pereira et al.2009）、興味深い脳部位の抽出方法としても使われている。

このアプローチは様々な研究領域における神経メカニズムの研究で用いられた。例えば、視覚の認識(Corradi-Dell’Acqua et al., 2011; Alink et al., 2012)、言語文法のプロセス(Herrmann et al.,2012)、意思決定の判別(Bode et al., 2011; Kahnt et al., 2011)、感情(Kozt et al., 2012)及び意図(Momennejad et al., 2012; Gilbert et al.,2011)などがある。

Searchlight の目標は実験条件に深く関連する脳領域を特定することなので、その結果形式が GLM と類似している。ただし、GLM が神経活動に関する条件の対比から検定された結果を画像に表すのに対して、Searchlight は分類精度の高いヴォクセルあるいは情報を持つヴォクセルクラスターを画像上で表すことになる。

付録 2　実験用刺激画像

動物：



Anteater (食蚁兽，アリクイ，개미핥기)



Armadillo (穿山甲，アルマジロ，아르마딜로)



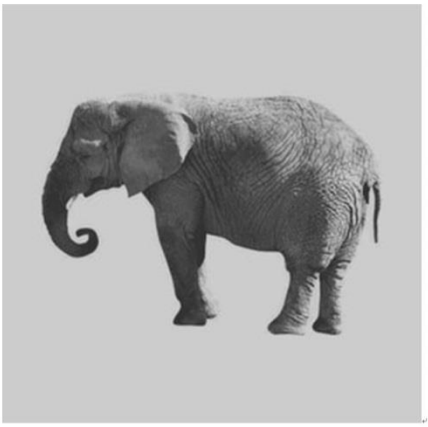
Beaver (河狸，ビーバー，비버)



Camel (骆驼，ラクダ，낙타)



Deer (鹿，シカ，사슴)



Elephant (大象，ゾウ，코끼리)



Fox (狐狸，キツネ，여우)。



Giraffe (长颈鹿，キリン，기린)。



Gorilla (大猩猩，ゴリラ，고릴라)。



Hare (野兔，野ウサギ，토끼)。



Hedgehog (刺猬，ハリネズミ，고슴도치)。



Hippopotamus (河马，カバ，하마)。



Kangaroo (袋鼠，カンガルー，캥거루)。



Koala (考拉熊，コアラ，코알라)。



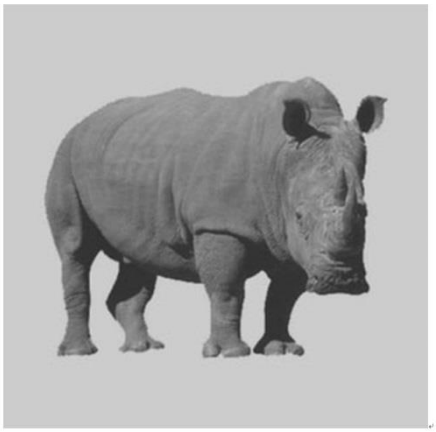
Mole (地鼠，モグラ，두더지)。



Monkey (猴子，サル，원숭이)。



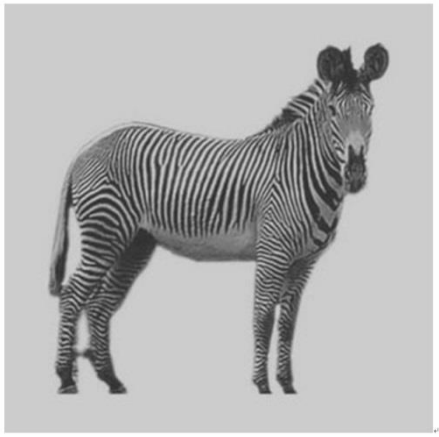
Panda (熊猫，パンダ，참대곰)。



Rhinoceros (犀牛，サイ，코뿔소)。



Skunk (臭鼬鼠，スカンク，스컹크)。



Zebra (斑马，シマウマ，얼룩말)。

道具：



Allen key (六角匙，六角レンチ，앨런 볼트용 렌치)。



Axe（斧头，斧，도끼）。



Chainsaw (链锯，チェーンソー，동력 사슬톱)。



Craft knife (工艺刀，クラフトナイフ，다용도 칼)。



File (锉刀，ヤスリ，줄)。



Hammer (铁锤，ハンマー，망치)。



Nail (钉子，釘，못)。



Paint roller (油漆滚筒，塗量ローラー，페인트 롤러)。



Trowel (抹泥刀，移植ゴテ，모종삽)。



Pliers (钳子，ペンチ，펜치)。



Plunger (活塞，パイプ吸引具，플런저)。



Power drill (电钻，電気ドリル，동력 천공기)。



Rake (耙子，熊手，갈퀴)。



Saw (锯子，ノコギリ，톱)。



Scissors (剪刀，ハサミ，가위).



Scraper (刮刀，こすり落とし用ヘラ，긁어내는 도구).



Screw (螺丝钉，ネジ，나사).



Sickle (镰刀，鎌，낫).



Spanner (扳手，スパナ，스패너).



Tape measure (卷尺，巻き尺，줄자).

付録３　実験タスクの説明

fMRI 実験１

韓国語 - 中国語バイリンガル

セッション１

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的黑白图片和它们的中文名称

每张图片会持续 3 秒

请在这段时间用韩语联想所展示图片的属性

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示图片的三秒内想图片的属性

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 张图片，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんはモノクロ写真とその**中国語の名前**を 3 秒間見ます。

その間は、写真に写った物の属性を**韓国語**で考えてください。

モノクロ写真が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 枚の写真が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

セッション 2

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的黑白图片和它们的韩语名称

每张图片会持续 3 秒

请在这段时间用汉语联想所展示图片的属性

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示图片的三秒内想图片的属性

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 张图片，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんはモノクロ写真とその**韓国語の名前**を 3 秒間見ます。

その間は、写真に写った物の属性を**中国語**で考えてください。

モノクロ写真が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 枚の写真が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

中国語 - 日本語後期バイリンガル

セッション 1

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的黑白图片和它们的中文名称

每张图片会持续 3 秒

请在这段时间用日语联想所展示图片的属性

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示图片的三秒内想图片的属性

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 张图片，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんはモノクロ写真とその**中国語の名前**を 3 秒間見ます。

その間は、写真に写った物の属性を**日本語**で考えてください。

モノクロ写真が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 枚の写真が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

セッション 2

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的黑白图片和它们的日文名称

每张图片会持续 3 秒

请在这段时间用汉语联想所展示图片的属性

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示图片的三秒内想图片的属性

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 张图片，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんはモノクロ写真とその**日本語の名前**を 3 秒間見ます。

その間は、写真に写った物の属性を**中国語**で考えてください。

モノクロ写真が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 枚の写真が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

fMRI 実験 2

现在开始进行 fMRI 实验。

您将会看到一系列的黑白图片和它们的名称。

每张图片会持续 3 秒，请在这段时间内联想图片属性。

看见汉语时用韩语联想

看见韩语时用汉语联想

紧接着图片会有 7 秒钟的“+”符号显示在屏幕上，

这段时间请什么都不要想。

请尽量在图片展示的 3 秒钟想它的属性，

休息的 7 秒钟什么都不要想。

每一轮包括 40 张图片，持续约 7 分钟。

整个实验共有 6 轮。

此提示将 15 秒后消失。

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんはモノクロ写真とその名前を 3 秒間見ます。

その間は、写真に写った物の属性を考えてください。

中国語を見たら、韓国語で連想してください。

韓国語を見たら、中国語で連想してください。

モノクロ写真が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 枚の写真が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

fMRI 実験 3

セッション１

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的汉语单词或者韩语单词

每个单词会持续 3 秒

请在这 3 秒内看到汉语单词时用汉语联想

看到韩语时用韩语联想

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示单词的三秒内联想

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 个单词，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんは中国語の単語あるいは韓国語の単語を 3 秒間見ます。

その間は、単語について連想してください。

中国語を見たら、中国語で連想してください。

韓国語を見たら、韓国語で連想してください。

単語が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 語が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

セッション 2

现在开始 fMRI 实验

您将会看到一系列的汉语单词或者韩语单词

每个单词会持续 3 秒

请在这 3 秒内看到汉语单词时用韩语联想

看到韩语时用汉语联想

紧接着会出现 7 秒的`+`

在这段时间请好好休息

请尽量在展示单词的三秒内联想

在休息的 7 秒内好好放松

每一轮包括 40 个单词，持续约 7 分钟，整个实验一共进行 6 轮

此提示 15 秒后消失

谢谢合作！

日本語訳文：

fMRI の実験をこれから始めます。

皆さんは中国語の単語あるいは韓国語の単語を 3 秒間見ます。

その間は、単語について連想してください。

中国語を見たら、韓国語で連想してください。

韓国語を見たら、中国語で連想してください。

単語が消えたら、考えをやめ、

+を見て 7 秒間休んでください。

1 セットでトータル 40 語が提示されます。

1 セットでおよそ 7 分かかります。６回繰り返します。

この表示はおよそ 15 秒で消えます。

ありがとうございます。

謝辞

本研究は 2011 年度―2014 年度の 3 年半、東京工業大学大学院社会理工学研究科・人間行動システム専攻・赤間研究室において博士論文研究として行ったものです。研究を進めるにあたり、多くの方にご指導・ご支援をいただきました。この場をお借りして心から御礼申し上げます。

赤間啓之准教授には指導教官として 3 年半にわたり研究のご指導を頂きました。博士課程で専攻を変える人は極めて少なく、私はその数少ない一人でした。三年前、脳、認知科学、神経科学について何も知らない私は、言語を脳の観点から解明したいという情熱をもって、赤間研究室に進学しました。その時より、赤間先生にずっと感謝しております。赤間研究室の一員として迎えていただいたことにも感謝しています。心より信頼してくださいまして、誠にありがとうございました。その後の日々熱心なご指導に感謝しています。赤間先生はゼロから神経科学、認知科学、計算工学の知識を教えてくださり、ディスカッションを通じて研究を的確な方向に導いてくださり、研究を楽しむ気持ちを持つことを示してくださいました。私の卒業後の進路についても多くのご支援をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

ご多忙にも関わらず本論文の審査をお引き受けてくださり、その都度有益なご助言を頂いた中川正宣先生、中山実先生、脇田建先生、山元啓史先生に感謝いたします。

fMRI 運営グループのリーダである東京工業大学社会理工学研究科の肥田野登先生、共同研究者の Brian Murphy にはいろいろお世話になりました。ありがとうございました。

研究室に在籍した 3 年半、先輩、後輩のみなさんにお世話になりました。本研究室の卒業生、李娜さんに感謝致します。本研究の韓国語の資料を作って頂き、お世話になりました。また、後輩の呉双さん、高璞さん、王政さんと一緒に、非常に貴重な研究室生活を送れました。ありがとうございました。

また、実験に参加したバイリンガル実験参加者にも感謝致します。

最後に、私を精神的に支え、研究に励めるように優しく見守ってくれた夫汪海林さん（彼も博士論文で「楽しんで」います）、そして私の両親に感謝致します。

平成 26 年 12 月

雷淼媚

本研究に関わる業績報告

Publications (International Journal papers with peer review)

- LEI Miaomei, AKAMA Hiroyuki, MURPHY Brian, Neural basis of language switching in the brain: fMRI evidence from Korean–Chinese early bilinguals. *Brain and language*, Elsevier, 2014, 138. doi:10.1016/j.bandl.2014.08.009. (第 6 章に対応)
- AKAMA Hiroyuki, MURPHY Brian, LEI Miaomei, POESIO Massimo, Cross-participant modeling based on joint or disjoint feature selection: an fMRI conceptual decoding study. *Applied Informatics*. Springer, 2014. doi:10.1186/2196-0089-1-1（第 4 章に対応）

Presentations (International Conference of CogSci: Member poster sessions with review)

- Miaomei Lei, Hiroyuki Akama, Brian Murphy (2014). Predicting the semantic neural representations in Korean-Chinese early bilinguals —An fMRI study, *poster presented at the 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society.* Quebec City, Canada. （第 5 章に対応）
- Miaomei Lei, Hiroyuki Akama, Brian Murphy (2013). Neural representations of language switching in early bilinguals: An fMRI study, *poster presented at the 35th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Berlin, Germany. （第 5 章に対応）

- Hiroyuki Akama, Miaomei Lei, Na Li, Brian Murphy (2012). Multi-Voxel Pattern Analysis Applied to the Language Switch in the Bilingual Brain-An fMRI Study, *poster presented at the 34th Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Sapporo, Japan. （第 4 章に対応）