

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330246

研究課題名(和文) fMRI・機械学習・形態測定学を融合した言語学習脳の構造的・機能的変化予測モデル

研究課題名(英文) Modelling of Predicting Functional and Structural Change in the Brain of Language Learners--Based on fMRI, Machine Learning and Morphometry

研究代表者

赤間 啓之 (AKAMA, HIROYUKI)

東京工業大学・リベラルアーツ研究教育院・准教授

研究者番号：60242301

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、心や脳が概念をどう処理するかを解明するニューロイメージングにおいて、神経的・認知的状態判別のための機械学習法(MVPA)を意味処理、言語切替に適用した研究を行った。特に、fMRI実験にあたり、各個人が持つそれぞれが個性的で特異な意味空間のモデリングを行う総合的なアプローチが重要であるという観点から、レビュー論文をBehaviormetrika誌に発表した。またPLoS ONE論文では、MiF(逆マルコフ逆F尺度)という計算法を提案し、連想概念辞書など小さな意味ネットワークを利用して、単語に関する連想タスクを行う脳の反応を有意な精度で予測することができることを証明した。

研究成果の概要(英文)：Multi-Voxel Pattern Analysis (MVPA) in functional magnetic resonance imaging (fMRI) studies is considered effective for studying how the human brain represents the meanings of words. We published a review paper in Behaviormetrika to emphasize the importance of holistic approaches in embodiment semantics using naturalistic and ecologically valid tasks of language comprehension and production, or elucidating semantic spaces of individual participants. In our PLoS ONE paper, we developed an original distance definition for graphs, called the Markov-inverse-F measure (MiF), and measured its effectiveness for predicting a neural activity recorded during conceptual processing in the human brain. Now we are submitting a paper to show that functional connectivity of the brain can be modulated by interventional stimuli and serve as an indicator of brain plasticity focusing the executive control of an oral motor function.

研究分野：神経言語科学

キーワード：脳 言語 fMRI 機械学習 複雑ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

本研究課題はそれに先立つこの研究は基盤研究(C)、課題番号:23500171、研究課題名:脳fMRI研究・機械学習・複雑ネットワークを融合した計算神経グラフ言語学の試み」をさらに発展させたものである。この研究では、人間の認知的な活動においては、単にひとつのタスク関連領域が賦活するのみならず、様々な部位の、それ自体説明が難しい部分的活動が連動的に関与していること、またタスク方略の違いから来る個人差も大きいことが分かり、それを時空間で探索的にモデリングする方法を提案できた。横断的(cross-sectional)な実験参加者「間」脳反応解読モデルや、fMRIデータの解析に機械学習と複雑ネットワークの融合を行う方法が模索されたが、実験参加者「内」における、学習バイアスによる脳の経年変化や可塑性を考慮した予測モデルの確立、すなわち縦断研究(longitudinal studies)に関して、この研究領域を発展させることが、研究開始当初の背景の問題意識として存在した。それに伴い、方向性強化学習をプレタスクとするfMRIマルチセッション実験の実施、計算神経言語学用Computational Neurolinguistics Toolboxのさらなる開発が当初より構想されていた。

2. 研究の目的

超高齢化社会を迎え、脳の可塑性に関して現在関心が高まっている。学習効果がもたらす脳の変化を検出するVBMという手法や、fMRI脳データに機械学習を適用し、未知の刺激に対する脳反応を予想するMVPAという手法が注目されている。本研究では言語刺激を利用し、実験参加者「内」における、学習バイアスによる脳の変化を考慮した予測モデルの確立を目的とする。すなわち言語刺激自体の順序や文脈、位置づけ・意味づけ、関心の方向性、受容の仕方などに、一定のバイアスをかけた学習を

課すことで、脳の構造面・機能面でどのようなミクロな変化が生じるか、神経レベルでの効果をモデル化することである。これによりfMRI脳研究の手法を深化させることができ、コーパス処理技術と相俟って言語機能に関する人工知能の基礎研究となりうると考えられる。要するに、本研究の目的は、教育や介入がもたらす脳の可塑性を機能・構造面で評価する脳神経科学の技術をあらたに提案することである。

3. 研究の方法

東京工業大学で研究代表者が管理者・オペレーターをしている脳磁気共鳴画像法(fMRI)装置を用いて脳画像データを取得し、fMRIデータをGLM(一般線形モデル)やMVPA(多変量パターン分析)あるいは、機能的連結性などの方法を用いて分析した。本研究課題にあっては、言語習得の過程において、教育と言う形での「介入」の効果をいかに計測するかが重要な課題である。人間の脳活動とその神経基盤を解明するにあたり、そうした熟達過程における能力獲得と脳の可塑性(plasticity)が本研究の当初からの目標であった。そのため、「経験と学習が様々な認知分野でもたらす脳変化(発達・成長)を、脳の形態測定学(morphometry)を通じて縦断的に探る」という目標が立てられていた。また、その知見を、ヴォクセルパターン解読学(voxel pattern decoding)と接合させ、人間の能力成長の機械学習モデルを計算することも射程に入っていた。そのため、我々はVBM(Voxel-Based Morphometry)という手法を利用し、言語学習の開始年齢・学習履歴の差と言う観点から、早期バイリンガルと晚期バイリンガルの脳解剖画像を比較し、ニューロン生成による関与部位の容積・密度の差を計算した。しかし、中心前回という脳部位において、早期バイリンガルの方が容積・密度の差が平均して大きい

という有意傾向が見られたものの、統計的に有意な結論を確立するには至らず、更なる研究の改善が必要であるということが判明した。

そうした生理学・解剖学の分野では、当初は、研究分担者の高野裕治氏の貢献が期待されていたが、高野氏はエフォートの取れない(科研応募資格のない)職に転出され、平成 27 年 4 月 1 日をもって、削除手続きをお認めいただき事由が生じた。新しく研究分担者として染谷芳明氏が追加され、本研究課題について、脳の可塑性(plasticity)に関する縦断研究(longitudinal studies)という基本的理念と方向性を維持しつつ、新しい研究分担者が深く知悉し、近年とみに注目を集める新たな方法論(特に安静時機能連結 :resting-state functional connectivity、略して RSFC)を導入する形で、さらに発展させるための変更を加えた。RSFC は、複雑ネットワーク(グラフ理論)の脳画像解析への応用であり、本研究課題の中にももともと包含されているものである。刺激がない状態でも同期した賦活パターンを示す高相関の脳部位が、実は同調ネットワークを形成して人間の活動に重要な役割を果たしている、と言う発見である。

新研究分担者の染谷氏は、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)の黎明期より、脳画像解析に携わってきた経験から、介入事前事後の RSFC を研究する上で最も適任であった。ただし、その際、本研究が重要なターゲットのひとつと考えている「言語習得の過程における介入」については、いくつかクリアすべき本質的な問題が残されていた。まず第一に、教育がもたらす脳の可塑性(plasticity)を RSFC によるネットワーク変化の形で検出できた先行例は、まだ十分な

数が記録されていない。実際に発話という口腔の運動を伴う言語活動と関連し、狭義の言語活動以外の RSFC 先行研究とも照合して、実験解析結果を解釈することが極めて重要となる所以であった。第二に、言語活動は、身体性言語学とも呼ばれるエンボディメント理論が示すように、言語は神経の知覚・運動系に深く根ざしており、話者の身体とその体性感覚の経験の中で組織化され、他者との共有へと繋がるものである。様々なレベルの身体反応が介在している。仮に介入=学習(教育)によって RSFC に有意差が生じたとしても、言語活動の何が具体的・実体的に変容したかを定位するのは解釈が困難であると予想される。体性刺激・感覚から言語刺激・理解までの連続的な神経反応レベルを定位するにあたり、まず RSFC のための fMRI は、どの程度正確に知覚、感覚、運動の変容を捉えるかというデータがあって、初めて言語活動の RSFC の位置づけも可能になるであろう。たとえば言語野に隣接する口領域は、言語と摂食、呼吸など様々な機能に対し、ネットワークを形成する形で深く関与しており、人間の身体における所謂ハードウェアとソフトウェアの界面を探る上で重要である。そして様々な知的・身体的介入、弱い暗黙の持続的介入、強くて直接的・明示的な介入など様々な種類を変え、脳内ネットワークの変容モデルを多面的に構成する必要がある。食事を味わい咀嚼する際の擬態語・音象徴語のように、身体がとらえる共感覚の言語別の音韻処理などがその典型的な例として挙げられる。

そこで 2015 年度以降、本研究テーマの「形態測定学」の中に、新規に方法論として「安静時機能連結(RSFC)」を導入し、そのデータ解釈の必要上、言語学習脳の高次機能だけに限定することなく、言語活動とその神

経基盤を共有し(乗り入れ)ている低次の知覚・運動系まで射程に取り入れ、言語学習による変容をそれらの神経基盤の中に位置づけられるよう、より発展的に研究を展開した。具体的には、安静時機能連結の fMRI データを収集し、感覚・運動・言語の刺激に応じて、介入以前以後のネットワーク変容を解析する最適な手法を開発を進めた。そこでは情報処理のレベルに応じた最適な低周波数帯の選出や、RSFC の機械学習によるモデリングなどの先端的なテーマも研究目標に導入した。そして、実験参加者ごとに介入以前以降の 2 セッションで fMRI 実験をおこない、機能的変容をネットワークモデルのレベルで解析を行った。

4. 研究成果

その成果は PLOS ONE, Springer という国際学術雑誌の出版社から、査読付き原著論文 2 本という形で公表するに至った。また「安静時機能連結(RSFC)」変化をグラフ指標から見る研究の結果は Acupuncture Modulates functional Connectivity of the Brain という、国際学術論文として現在、Neuroreport 誌に投稿中である。他に、前記の計算神経言語学用 Computational Neurolinguistics Toolbox については、研究代表者の Web サイト、<https://sites.google.com/site/akamatitechlab/research/computationalneurolinguistics> より公開し、海外より寄せられた質問にも応じるなど、研究成果の発信を強化している。

ここで当該年度に発表した業績のうち、主要なものを要約する。

Hiroyuki Akama, Brian Murphy, 2016. Emerging Methods for Conceptual Modelling in Neuroimaging, Behaviormetrika, Springer, DOI:

10.1007/s41237-016-0009-1

心や脳が概念をどう処理するかを解明するニューロイメージング、特に脳機能磁気共鳴画像法(fMRI)において、神経学的・認知的状態を判別するための機械学習の手法として、多ヴォクセルパターン分析(MVPA)が近年急速に普及し、進化を遂げつつある。この論文は、意味処理、言語切替をターゲットに、MVPA 研究を総括、この分野全体を俯瞰し、さらにここ 1、2 年の劇的な展開もフォローした review 論文である。心と脳が、特に言語を通じてどのように概念を処理するかという問いに、神経画像法のデータを用いた多変量パターン解析がもたらしている答えの可能性について、fMRI 実験にあたり実験参加者に人工的な試行ではなく、自発的発話のような自然でかつ生態学的に有効なタスクを設定することが、最近重要になりつつある観点だと言う知見を明らかにした。

Shunji Awazu, Akio Suzuki, Hiroyuki Akama, (2016). Mental simulation during comprehension of English and Japanese action sentences in English learners. 31st International Congress of Psychology (ICP2016), Yokohama. PS25P-13-323. (査読有)

この研究においては、日本人の英語学習者を対象に、外国語である英語の動作表現文の意味処理においても、身体性意味論が主張するように、心的シミュレーションに対応する脳の部位の賦活が認められた。

Hiroyuki Akama, Maki Miyake, Jaeyoung Jung, Brian Murphy, 2015. Using Graph Components Derived from an Associative Concept Dictionary to Predict fMRI Neural Activation Patterns that Represent the Meaning of Nouns,

複雑ネットワーク上の2つの点の間の距離指標として、測地的情報と共起的情報を融合した MiF(Markov inverse F-measure; マルコフ逆 F 尺度)という計算法を新たに提案し、それを連想概念辞書から抽出した意味ネットワークに適用したところ、言語コーパスとしてきわめて小さなデータサイズにもかかわらず、MiF 距離行列を用いると、Mitchell(2008)による fMRI データの機械学習モデルを改良でき、単語に関する連想タスクを行う脳の反応を有意な精度で予測することができることが判明した。つとに知られているように、Mitchel et al の Science 論文(2008)以来、電子化された言語資料の集成(コーパス)をもとに、人間の脳がそれぞれの言葉の意味をどう処理して反応するか、個別の単語について fMRI データに現れるパターンを分類し推定する人工知能の手法が開発されている。fMRI データの機械学習である MVPA(多変量パターン解析)を用い、言語コーパスからの情報を変数としてモデル化すると、人間の脳がいまどんな言葉を考えているか、たとえ fMRI データがその言葉の反応情報を含んでいなくとも、言語コーパスの方から予測できる。我々は、脳の意味処理をめぐる fMRI データに対し、非常に小さい単語連想辞書 EAT の意味ネットワークから計算したマルコフ逆 F 尺度(MiF)値行列を適用すると、脳の反応が、小さなコーパスサイズでも従来の方法より高い 78%の精度で推定できることがわかった。さらに、単語連想辞書の意味ネットワーク、すなわち単語と単語の間の概念の関連関係を表すネットワーク(グラフ)を、単語の意味処理を行う脳神経内の同時賦活ネットワーク(グラ

フ)に投影させる手法を提案し、異なるネットワーク(グラフ)間の関連性を解析する糸口を見出した。MVPA は人間の脳の心理的・生理的状态を「読む」技術として、意思表示が困難な障碍を持つ人々への支援を目標に、基礎研究が盛んに行われているが、本研究成果を発展させた場合、特に、個人的な連想・思考情報のプロファイルをもとに、人間の脳内の個人的な意味表現をさらに高い精度で検出して「読む」ことができるようになると期待される。

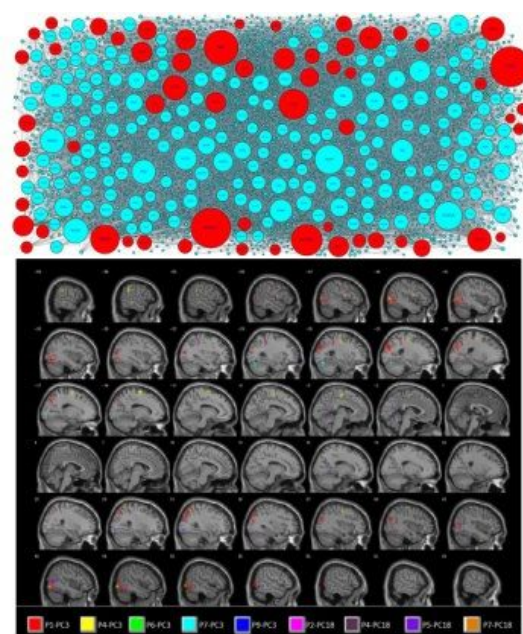


図: 連想辞書の意味ネットワークとそこから推定される脳の意味処理反応

その他、以下の学会発表も本研究と密接に関連する。

粟津 俊二, 鈴木 明夫, 赤間啓之. 英語学習者における日本語文と英語文理解時の運動シミュレーション, 2015 年度日本認知科学会第 32 回大会, 2015.

ここでは、英語学習者における日本語文と英語文理解時に身体性反応が加わると言う観点から以下の研究がおこなわれ、日本人の英語学習者を対象に、外国語である英語の動作表現文の意味処理においても、身体性意味論が主張するように、心的シミュレ

ーションに対応する脳の部位の賦活が認められた。

現在投稿済みの論文は、「安静時機能連結 (RSFC)」を導入し、そのデータ解釈の必要上、言語学習脳の高次機能だけに限定することなく、言語活動とその神経基盤を共有し(乗り入れ)ている低次の知覚・運動系まで射程に取り入れ、言語学習による変容をそれらの神経基盤の中に位置づけられるよう、より発展的に研究を展開したものである。具体的には、安静時機能連結の fMRI データを収集し、感覚・運動・言語の刺激に応じて、介入以前以後のネットワーク変容を解析する最適な手法を開発を進めた。この論文は Acupuncture Modulates functional Connectivity of the Brain: Generating a Small-World Network in Swallowing-related Areas というタイトルで Neuroreport 誌に投稿し、査読を受けている段階である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

1. Hiroyuki Akama, Brian Murphy, 2016. Emerging Methods for Conceptual Modelling in Neuroimaging, Behaviormetrika, Springer, DOI: 10.1007/s41237-016-0009-1 (査読有)

2. Hiroyuki Akama, Maki Miyake, Jaeyoung Jung, Brian Murphy, 2015. Using Graph Components Derived from an Associative Concept Dictionary to Predict fMRI Neural Activation Patterns that Represent the Meaning of Nouns, PLoS ONE, DOI: 10.1371/journal.pone.0125725. (査読有)

[学会発表](計 3 件)

1. Shunji Awazu, Akio Suzuki, Hiroyuki Akama, (2016). Mental simulation during comprehension of English and Japanese action sentences in English learners. 31st International Congress of Psychology (ICP2016), Pacifico Yokohama. PS25P-13-323. (査読有)

2. 栗津 俊二, 鈴木 明夫, 赤間啓之. 英語学習者における日本語文と英語文理解時の運動シミュレーション, 2015 年度日本認知科学会第 32 回大会, 2015. 千葉大学 (査読有)

3. 畑田泰伸, 宮崎祐介, 北岡哲子, 矢野隆一, 赤間啓之. fMRI を用いた触覚刺激による癒しに関する研究, 2015 年度日本機械学会, 2015. 北海道大学 (査読有)

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/akamatitech/ab/research/computationalneurolinguistics>

6. 研究組織

(1) 研究代表者 赤間 啓之

(Hiroyuki Akama)

東京工業大学・リベラルアーツ研究教育院・准教授
研究者番号: 60242301

(2) 研究分担者 栗津 俊二

(Shunji Awazu)

実践女子大学・人間社会科学部・教授
研究者番号: 00342684

(2) 研究分担者 高野 裕治

(Yuji Takano)

日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所・人間情報研究部・リサーチ・アソシエイト
研究者番号: 00424317

(2) 研究分担者 染谷 芳明

(Yoshiaki Someya)

慶應義塾大学・先導研究センター・特任助教
研究者番号: 20392714