

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：94301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H05395・20K20400

研究課題名（和文）ひらめき脳状態の解明：脳内ネットワークの切り替え検出とその可視化

研究課題名（英文）Understanding of brain-state of creative insight: switching of large-scale brain network

研究代表者

小川 剛史（Ogawa, Takeshi）

株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員

研究者番号：10614323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は「ひらめき」を生み出す脳内メカニズムを解明するために、脳内のマクロなネットワークの切り替えに着目し、多角的な脳情報とAI技術を組み合わせた定量化を目指した。空間的ひらめき課題中の脳活動を計測し、教師なし学習の隠れマルコフモデルに変更し、脳状態の抽出を行った。その結果、14個のネットワークを基に10個の脳状態によって表現されることを確認した。次に、言語的ひらめき課題中の脳活動計測実験を行った結果、空間的ひらめき課題共通する脳状態の定量化することができた。本研究を通じ、「創造性の神経科学」を取り扱うシンポジウムを開催し、国内に創造性研究を広めるという成果を上げることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、個人の創造性を決定づける動的な脳内ネットワークの定量化を行うことで、テーラーメイドなトレーニング法の提案や人材育成の適正化に役立つと考えられる。このような科学的エビデンスに基づいた創造性の認知機能の解明は、教育分野を通じた社会実装としての成果展開が考えられる。教育分野では、創造性を高めるトレーニング法を導入したカリキュラム・教材の作成や、スマホのアプリなどゲームを通じたアクティブ・ラーニング、遊びの要素を取り入れながら楽しみつつ学習するプレイフル・ラーニングでの応用が予想される。

研究成果の概要（英文）：This study aims to elucidate brain networks associated with creative insight by using machine learning techniques with multi-modal brain measurement. We conducted fMRI experiment during spatial insight problem solving, then we applied Hidden Markov Model to extract dynamic brain states. As a result, we succeeded to extract ten brain states from fourteen networks. In addition, we found a probability of one specific state was correlated with accuracy rate. Next, we conducted verbal insight problem experiment, then we found a state which was commonly found in the spatial insight problem solving even though different modality of problems.

研究分野：神経科学

キーワード：創造性 ひらめき 機械学習 脳活動計測 信号処理

1. 研究開始当初の背景

私たちは、難しい問題に直面したときに、答えが急に「ポッ」と思い浮かぶ「アハ体験」を伴う、「ひらめき」による問題解決を日常的に経験している。創造性の研究では、課題を行っていないときに活性化される、デフォルト・モード・ネットワーク（Default Mode Network: DMN）や、課題を行う際に活性化される実行制御ネットワーク（Executive Control Network: ECN）のようなマクロな脳内ネットワークの柔軟的な切り替えが、創造性の認知機能に関与していると考えられていた（Beaty et al., *Sci Rep*, 2015; Saggar et al., *Cereb Cortex*, 2017）。しかし、ひらめきが生じる際にどのようなネットワークが何をきっかけに切り替わっているのか、未だ解明されていなかった。

さらに、創造性の脳イメージング研究では、拡散思考の能力の個人差と脳内ネットワークの関係について論じているが、ただ単に奇抜な答えに対しスコアが高くなる拡散思考課題に対し、ひらめき課題は拡散思考しつつある解を見出すという収束思考を併せ持つ、きわめて高度な思考過程についてのみしか取り扱われていなかった。なぜなら、従来の脳イメージング研究の研究手法では、いつ生じるかわからないレアかつ高次の認知機能のイベントを検出することは極めて困難であった。

そこで、本研究では、1人の被験者から経時的な脳活動計測を行い、十分なサンプル数を確保しつつ、機械学習を用いて脳状態の識別を行うことで、ネットワークの切り替えを検出できるのではないかと、いう構想に至った。さらに、多角的な高時間・高空間分解能の脳活動計測データを用いることで、豊富な情報に基づいた、エビデンスが得られると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、日常的に経験する「ひらめき」による創造性の認知機能を用いた問題解決に関わる脳内メカニズムを解明することである。脳波（EEG）と機能的MRI（fMRI）の同時計測（EEG-fMRI）という多角的な高時空間分解能の脳活動計測とAI技術を組み合わせにより、ひらめきの原因と考えられているマクロな脳内ネットワークの切り替えをとらえ、ひらめきの脳状態（ひらめき脳状態）を可視化することを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、(1)ひらめきを誘発する課題の設計と経時的データの測定プロトコルの作成、(2)高次空間解像度の脳活動データに適した動的ネットワーク抽出法の開発と検証、(3)ひらめき課題中の脳活動への動的ネットワーク抽出法の適用と評価、という3つの計画に基づいて遂行した。

(1) ひらめきを誘発する課題の設計と経時的データの測定プロトコルの作成

時間的・物理的制約がある実験環境においても実施可能かつひらめきイベントを誘発する課題の設計を行った。すでにATRで実績のある「ひらめきテストバッテリー」(Aihara et al., *PLoS One*, 2017; Ogawa et al., *Sci Rep*, 2018)に含まれる、マッチ棒クイズと遠隔性言語連想課題を用いて、fMRI実験用の刺激プログラムを作成した。問題の回答時間なども、難易度や被験者によって異なるため、複数日（マッチ棒クイズ：3日間；遠隔性言語連想課題：2日間）にわたって、同一被験者から脳活動データの計測を実施した。

(2) 高次空間解像度の脳活動データに適した動的ネットワーク抽出法の開発と検証

動的ネットワーク抽出法として、Stacked Pooling and Linear Components Estimation法（SPLICE法；Hirayama et al., *ICML2017*）や教師あり学習のスパース線形回帰（Sato, *Neural Comp*, 2001; Yamashita et al., *Neuroimage*, 2008）により、ひらめき特有の脳状態の抽出を試みた。これらの手法の検証のために、EEG-fMRI同時計測実験において計測された安静時の脳活動を用いて、fMRI信号とEEG信号の予測精度について検証した。また、データ駆動的な手法として、隠れマルコフモデルやネットワーク解析などについても、適用および検証を実施した。

(3) ひらめき課題中の脳活動への動的ネットワーク抽出法の適用と評価

作成した計測プロトコルを用いて、ひらめき脳活動を計測するために、2種類の実験を実施した。予備実験において、ひらめき課題における各問題の難易度を評価し、計測セッションにおける課題の難易度を制御できるように調整した。それに基づき、まず、マッチ棒課題中の脳活動計測を15名の被験者に対し実施した。次に、遠隔性言語連想課題を用いた脳活動計測実験を4名の被験者に対し実施した。このようにして取得したデータを(2)で検証した解析法に適用した。

4. 研究成果

(1) EEG-fMRI同時計測データを用いた動的ネットワーク抽出法の検証

EEG データから抽出した動的なネットワーク情報が、fMRI 計測データをどの程度の精度で予測できるかどうか、課題中のデータを取得する予定であった。しかし、MRI 対応の EEG 計測装置が故障し、修理期間中に計測実験を行うことが困難になった。そこで、取得済みの安静時の EEG-fMRI データを用いて、精度の高い EEG データの動的ネットワーク信号の予測精度について検証した。特に、創造性に関与している DMN や ECN、注意に関わる顕著性ネットワーク (Saliency Network: SN) の予測精度について、SPLICE 法により抽出された EEG の動的ネットワーク情報と fMRI 信号の時間相関を評価した。その結果、個人のばらつきや計測ノイズなどの影響が大きく、十分な予測精度をもつ信号と抽出することが困難であることが判明したため、スパース線形回帰法によって信号を予測することを試した。しかし、長時間サンプルのデータの場合、データのサンプル数が大きすぎるため、計算量が膨大となり対応できないことが判明した。そこで、マルチバンドシーケンス法という高次空間解像度で撮像する fMRI 計測に注力し、教師なし学習である隠れマルコフモデルを適用し、動的な脳状態抽出を行うことに変更した。

(2) 統計的因果探索法による脳内ネットワークの統計的検証

多数の脳領域があり、それらの脳活動の因果関係を探索するのに用いることができる統計的因果探索の一つである、DirectLiNGAM 法を検証するために、指を動かす想像している最中の fMRI データを用いて、ネットワーク解析を行った。その結果、通常の一般線形モデルを用いた脳活動があった領域を特定する手法とは異なる、幅広い脳領域との関連性を示すことができた。条件間の統計解析も行い、運動実行と運動想像の脳領域間の因果関係の違いを示すことができ、論文誌に投稿した。一方、この手法をひらめき課題中のデータに適用することを検討したが、ひらめきイベントのサンプル数の少なから、本手法の推定精度が安定しないことが分かり、本研究での適用は行わなかった。

(3) 空間的ひらめき課題中の脳活動からの脳状態ダイナミクスの推定

3 日間の MRI 実験に参加した 15 名から、空間的ひらめき課題であるマッチ棒クイズ実施中の脳活動を取得し、隠れマルコフモデルを用いて、脳状態の推定を行った。すでに定義されている 14 のネットワークに全脳の脳活動を分割し、安静時およびマッチ棒クイズを行っている最中の脳活動データに一般線形モデルおよび隠れマルコフモデル解析を適用した。その結果、ひらめきによる問題解決の直前は、すぐに解いた場合や試行錯誤を行いながら解いた場合に比べ、DMN が活性化していた。隠れマルコフモデルから、10 個の脳状態が抽出され、ひらめきを得た時に特有な脳状態は、その出現頻度と問題の正答率に正の相関があることが分かった (図 1)。

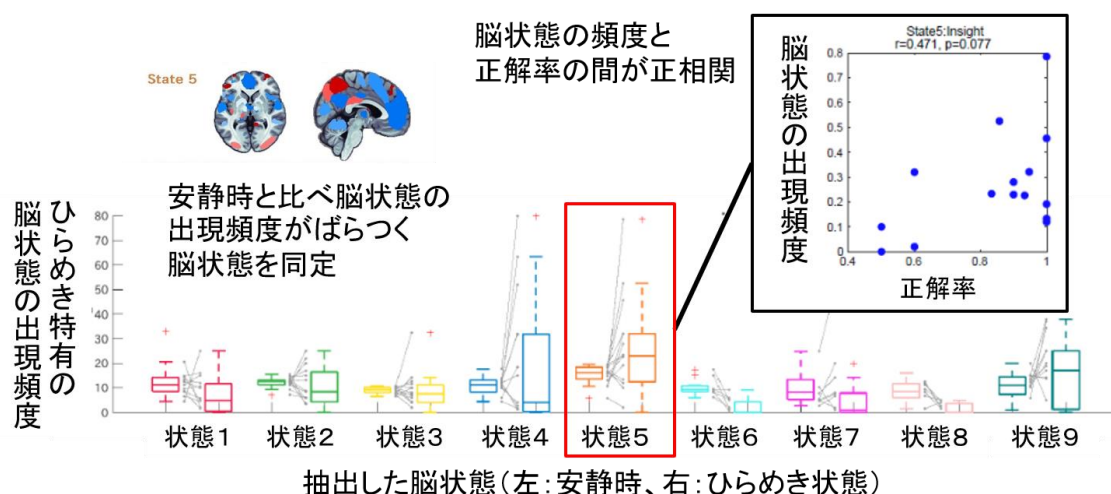


図 1. 空間的ひらめき課題中のひらめき状態特有の脳状態の出現頻度と正答率との対応

(4) 言語的ひらめき課題中の脳活動からの脳状態ダイナミクスの推定

当初は、(2) と同程度の規模の実験を行う予定であったが、コロナ禍での緊急事態宣言下での実験中止期間の影響により、4 名の実験参加者からデータを取得することができた。言語的ひらめき課題において、遠隔性言語連想課題中の脳活動を計測し、隠れマルコフモデルと一般線形モデルを用いて解析を行った。その結果、空間的ひらめき課題でひらめきに特異的に関連する脳状態と同様の傾向が抽出された。この結果は、問題の質が異なっても共通して使われる脳状態が存在し、定量的に評価することができることを示した。

(5) シンポジウムなどのアウトリーチ活動

本研究を通じ、日本神経科学大会において、初めて創造性を専門的に取り扱った、「創造性の神経科学」というシンポジウムを主催した。創造性に関する神経科学の領域の第一人者

である、東北大学・竹内光准教授とともにオーガナイズし、世界の第一線で活躍する研究者（Roger Beaty 先生、Anna Abraham 先生、Manish Saggar 先生）とともに講演を行い、国内に創造性研究を広めるためのアウトリーチ活動を行うことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ogawa Takeshi, Shimobayashi Hideki, Hirayama Jun-ichiro, Kawanabe Motoaki	4. 巻 October 22
2. 論文標題 Asymmetric effective connectivity within frontoparietal motor network underlying motor imagery and motor execution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 1-40
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2020.10.22.351106	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 6件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 通信行動が関わる脳機能の変化
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信行動工学研究会第14回研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 脳活動デコーディングを用いた運動想像と運動実行に関わる脳内ネットワーク
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信行動工学研究会第15回研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 ひらめくに関わる脳内ネットワークのダイナミクス
3. 学会等名 第16回通信行動工学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 非侵襲的脳機能イメージングによる脳活動計測と応用
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Ogawa
2. 発表標題 Individual trait and brain dynamics associated with creative insight
3. 学会等名 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takeshi Ogawa, Takatsugu Aihara, Okito Yamashita
2. 発表標題 Identification of brain regions underlying spatioal insight problem solving
3. 学会等名 The Society for the Neuroscience of Creativity(SfNC2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 ブレイン・テクノロジー
3. 学会等名 NTT docomo 5G evolution & 6G Summit (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 創造性の脳科学~脳の個性と働き方~
3. 学会等名 KANKOオンライン展示会2021 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川 剛史
2. 発表標題 脳ビッグデータを用いた創造性の個性
3. 学会等名 コミュニケーションクオリティ30周年記念ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小川剛史、竹内光、池田純起、瀧靖之、野内類、横山諒一、事崎由佳、中川誠秀、関口敦、飯塚邦夫、塙杉子、荒木剛、宮内カルロス誠、榊浩平、佐々祐子、野澤孝之、横田晋、マジストロダニエル、川島隆太
2. 発表標題 コネクトーム解析による認知機能の予測
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	川鍋 一晃 (Kawanabe Motoaki) (30272389)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長 (94301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	山下 宙人 (Yamashita Okito) (80418516)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・研究室長 (94301)	
研究協力者	相原 孝次 (Aihara Takatsugu) (10600918)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・連携研究員 (94301)	
研究協力者	平山 淳一郎 (Hirayama Jun-ichiro) (80512269)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 第43回日本神経科学大会、シンポジウム「創造性の神経科学：個性と脳ダイナミクス」を主催	開催年 2020年～2020年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------