

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：94301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12620

研究課題名（和文）言語的・空間的ひらめきにおける脳状態のダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Investigation of dynamical brain states underlying linguistic/spatial creative insight

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、日常的な問題解決に関わる「ひらめき」について、脳活動から脳のダイナミクスを捉えることを目的とし、言語的・空間的な認知課題中の脳活動の計測と、脳状態を抽出するための方法論の開発を行った。具体的には、認知機能と問題解決能力の関係の調査、言語的ひらめき課題および空間的ひらめき課題中の脳活動計測、再現性のあるひらめき行動を誘発する介入実験、大規模脳機能ネットワークの定量的解析法の開発を行った。これにより、ひらめきによる問題解決は、解析的に行う問題解決とは異なる脳状態であることを示唆する結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、非常に稀な頻度でしか観測することができない「ひらめき」による問題解決につながる脳状態の時間的変遷を理解するだけでなく、再現性の高いひらめきのために必要な条件・環境について示唆する結果が得られた。これは、問題解決のように、高次で複雑な認知機能を客観的に調査するための実験法を提供するだけでなく、実生活においても活用できる可能性を示した。教育機関や企業において、問題解決を必要とする場において役立つことが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to postulate the brain dynamics from brain activity related with 'creative insight' involved in everyday problem solving, and conducted the development of a methodology for measuring brain activity during verbal and spatial insight problem solving task and for extracting their brain states. Specifically, we conducted an investigation of a relationship between cognitive function and problem-solving ability, brain activity measurement during verbal and spatial insight problem tasks, intervention experiments to induce reproducible problem-solving behavior, and development of a quantitative analysis method for large-scale brain networks. As a result, it was suggested that problem-solving by insight is a different brain states from analytical or intuitive problem-solving.

研究分野：神経科学

キーワード：創造性 問題解決 機能的磁気共鳴画像法 統計的因果解析 状態遷移推定 介入 行動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

イノベーション創出や知的生産性向上に最も重要な認知機能として、アハ体験のような「ひらめき」を含む問題解決が知られている。近年の脳活動計測技術の向上と解析手法の発展により、創造性という高次な認知機能についても脳活動を含めて研究されるようになってきた。これまで、アイデア創出の過程を対象とした拡散思考の脳機能イメージング研究は、研究参加者の行動が定量化しやすいことから、先行して行われてきた。一方、「ひらめき」を伴う問題解決は、主観的な感覚が稀に生じる現象であるため、脳機能イメージング研究において、その変化を捉えることが困難であった。これらの問題を解決するために、遠隔性言語連想課題 (Remote associate test: RAT) という言語的なひらめきを誘発する課題を用いた神経基盤研究が行われてきた。それによると、右前側頭部や左背外側前頭前野に特異的な脳活動が生じることが示唆された。

しかし、これらの知見は、問題解決方法の条件の違いを示すものではあるが、ダイナミックな状態変化を定量化するものではなかった。一方、心理学においては、直列的な状態変化によりアイデア創出が生じる Wallas モデルや、複数の状態が相互作用にしながら創造的思考が生じているとする Geneplore モデルなどが提案されている。

そこで、本研究では脳内の大規模ネットワークの状態遷移に着目し、言語的・空間的なひらめきに関わる問題解決の脳状態を、脳活動計測とデータ駆動的情報抽出法を組み合わせることで実現できると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、言語的・空間的「ひらめき」の心理学的モデルと神経メカニズムを統合したひらめき脳状態のモデルを解明することである。そのために、異なるモダリティでのひらめき課題中の脳活動計測、再現性の高いひらめき行動へ誘導する行動実験プロトコルの作成、データ駆動的な大規模脳機能ネットワークの抽出法の開発を目指す。これにより、主観的な体験に近い心理学モデルを説明するひらめき脳状態の解明を試みる。

3. 研究の方法

本研究では、(1) ひらめき課題の脳活動・行動の計測、(2) 高時空間分解能の脳活動推定、(3) ダイナミック脳状態モデルの構築、という3つの計画に基づいて取り組む。

(1) ひらめき課題の脳活動・行動の計測

当初は、複数のひらめきの思考過程を計測するために、空間的ひらめき課題(マッチ棒クイズ)と言語的ひらめき課題(RAT)を高時間分解能の脳波(Electroencephalography: EEG)を用いて計測する予定であったが、脳波計や脳波キャップの故障により、一部の実験を機能的MRI(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)による脳活動計測実験に変更する。また、ひらめきの基盤となる認知機能との関係性や、介入によるひらめき行動の促進を観察し、再現性の高い実験プロトコルを作成するために、行動実験による検証を行う。

(2) 高時空間分解能の脳活動推定

脳波を用いた高時間分解能による状態推定法として、電流源推定法だけでなく、Stacked Pooling and Linear Components Estimation (SPLICE法、Hirayama et al., ICML, 2017)、EEG マイクロステート法、隠れマルコフモデルなど、データ駆動的推定法によるダイナミックな脳状態抽出法について検討する。

(3) ダイナミック脳状態モデルの構築

高時間分解能をもつ電流源推定した脳活動データを用いて、マクロな脳内ネットワークの切り替え検出法の開発を試みる。また、言語的ひらめきと空間的ひらめきの共通性や特異性について検証する。大規模な脳領域間のネットワークの定量化のために、統計的因果探索モデリング(線形非正規非循環モデル、Linear Non-Gaussian Acyclic Model: LiNGAM)の適用可能性について、fMRIの脳活動データについての適用可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 大規模な脳領域間のネットワークの統計的定量化

脳内における情報処理には、特定の脳領域のみならず、複数の脳領域が相互作用しながら関わっていることを示す方法として DirectLiNGAM 法について取り組んできた。しかし、従来法では条件間の統計的な比較方法について十分に検討されていなかったため、ブートストラッピング法を導入し、有効性を検討した。テストデータとして、指のタッピング動作の想像と実際の動きに関わる fMRI データ



を用いて、利き手や運動想像・実行の違いについて、脳領域間の直接効果がことなることを統計的に示した(Ogawa et al., Neuroimage, 2022)。この解析法によって、従来法では8個ほどの脳領域しか取り扱えなかったものが、20個の脳領域であってもデータ駆動的に、脳領域間の影響度を有向グラフによって統計的に可視化できる可能性を示した。

(2) ひらめきの基盤となる認知機能と促進因子の調査

当初、複数のひらめき思考過程の計測のため、EEGを用いた脳活動計測を行う予定であったが、脳活動計測器の故障により、行動実験に変更せざるを得なくなった。そこで、ひらめきを支える認知機能や問題解決の促進因子を見出すため、20分間の連合記憶に作業記憶課題(N-back課題)の認知負荷が与える影響について調査した。その結果、認知負荷が少ない条件の方が連合記憶課題の成績向上に寄与し、認知負荷が高い条件では連合記憶課題が阻害されることが分かった。これは、作業記憶の課題成績が低い群において、EEGのマイクロステート解析で脳状態が大きく変化することを示す研究代表者らが行った研究成果からも支持されるものであった(Tamano et al., Neuroimage, 2022)。

さらに、ひらめきなどの問題解決課題を用いた行動実験や脳活動計測実験において問題となっている、再現性の高い実験プロトコルの作成を行った。これまでの研究にて使用してきた、マッチ棒クイズを用いた空間的ひらめき課題において、ほぼ全員が解ける問題とそうでない問題があることはわかっているが、どのタイミングでどれくらいの確率で解けるのかは、個人差が大きく取り扱うことが難しかった。そこで、実験室内の道具を使うことに気付いたら簡単に解ける難問を用意し、どのような環境がひらめき行動を促進するのか検証した。まず、ひらめき行動を左右する大きな因子は、研究対象者個人の履歴や経験である可能性があることから、最初の課題練習時に特定の解法で解ける簡単な問題を十分に練習させた。次に、練習で行った簡単な問題に加え、それに実験室内の道具を使用しないと解けない難問を用意し、後者が解けないことを確認した。その後、練習課題とは関係ないが道具を使用する課題を行い、道具がヒントであることに気付くかどうかを観察した。最後に、もう一度、簡単な課題と、難問を解かせた結果、約50%の確率で道具を使って解けない問題が解けるようになった。これは、直接的に答えを教えずとも間接的に正解につながる行動をとらせることによって、ひらめき行動に結びつきやすくなることを示唆している。これにより、個人差が大きく発生頻度の低いひらめき行動を、一定の確率で生じさせることが可能となり、安定的な脳活動計測につながることを期待される。

(3) 言語的ひらめき課題中の脳活動計測と脳状態ダイナミクスの推定

言語的ひらめき課題中の脳活動データを解析するために十分なデータを取得するために、fMRIを用いた脳活動計測を実施した。これらを隠れマルコフモデルによる高時空間分解能の状態推定を行い、問題解決法による脳状態に遷移や脳状態の発生頻度について統計的な調査を行った。その結果、ひらめきを要する長時間の思考を行う際には、短時間で回答するときと比べ、デフォルトモードネットワークの活動が優位になる一方、短時間で回答する場合は中央実行ネットワークが有意に活動していることが示唆された。

また、長時間の思考による問題解決の際は、解析的に問題解決をしている時に比べ、より多くの脳状態を取ることがわかった。これは、難しい問題なると物の見方を変えるために、様々な脳の状態を取ることが、問題解決につながることを示唆するものとなった。この成果により、様々な課題を行っている時の脳状態のダイナミクスの比較を行うことが可能となり、時間変化に基づく認知課題間の類似性や特異性について定量化できる可能性を示した。さらに、心理学において提案されていた問題解決のモデルの一つである Geneplore モデルの方が、直列的な思考パターンによる問題解決モデルである Wallas モデルよりも脳状態の遷移を説明できることを示唆する結果が得られた。

(4) シンポジウムなどのアウトリーチ活動

本研究を通じ、電子情報通信学会・2024年総合大会(広島大学)において、「創発的問題解決の理解と支援：脳科学・心理学・情報科学の融合研究に向けて」という企画セッションを開催した。講演者として、高次認知機能や創造性の心理学または神経科学的研究に第一線で携わっている研究者を招待し、情報工学分野の研究者と創造性研究についての議論を行う機会を作ることができた。また、奈良先端科学技術大学院大学および早稲田大学において、創造性の脳機能イメージング研究に関する最新の動向と本研究での成果に関する講演を行った。このような活動を通じ、国内に創造性研究を広めるための活動ができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 247
2. 論文標題 Asymmetric directed functional connectivity within the frontoparietal motor network during motor imagery and execution	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 NeuroImage	6. 最初と最後の頁 118794 ~ 118794
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neuroimage.2021.118794	査読の有無 有
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2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小川剛史
2. 発表標題 空間情報の洞察的問題解決に関わる脳領域の同定
3. 学会等名 通信行動工学研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小川剛史
2. 発表標題 問題解決に関わる心理学・脳科学的アプローチ
3. 学会等名 第24回通信行動工学研究会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

個人のホームページ
<https://sites.google.com/site/introtakeshiogawa/publications?authuser=0>
ResearchMap
<https://researchmap.jp/takezono6/?lang=english>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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0件

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
---------	---------