

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12145

研究課題名(和文) マインドフルネスを「見える化」する：進化的最適化による瞑想時脳状態の特性化

研究課題名(英文) Quantifying mindfulness: Characterization of meditative brain states using an evolutionary optimization

研究代表者

日和 悟 (Hiwa, Satoru)

同志社大学・生命医科学部・准教授

研究者番号：00771247

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：マインドフルネスは、瞑想を通じて思考の彷徨いに気づき、適切な方向に注意を向けやすくなる方法として広く用いられている。本研究では、脳機能情報に基づいた科学的な実践支援法の構築を目的として、脳活動の計測と独自の解析技術により、瞑想に伴う実践者の変化と軌跡を「見える」化し、実践者にフィードバックする技術の研究に取り組んだ。MRIを用いた研究では、集中瞑想に伴う脳状態の動的な変化を見える化し、さらにマインドフルネスを定量化する一助となることが示された。また、この技術を自動車運転中のぼんやり検知技術に応用し、ドライバーの脳活動から、漫然運転の程度を予測することが可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多くの瞑想の実践プロトコルは、仏教やヨガにおける実践者の体験をベースに構築されているが、その定義は非常に抽象的かつ主観的である。このため、適切に実践できているかの客観的な判断が難しく、熟練の瞑想者との対話を通じて、自らの体験を共有し、適切な指導を受けながら体験的にその方法論を獲得する必要がある。つまり、よき「師」に出会い適切な指導を受けることもまた重要である。一方で指導者の質を担保する仕組みは未だ整備されておらず、不適切な指導を受け、有害事象につながる可能性もある。本研究の成果は、瞑想実践と指導に脳活動に基づいた科学的な基準を提供し得るものであり、前述の課題を解決に導くものである。

研究成果の概要(英文)：Mindfulness is widely used to become aware of wandering thoughts through meditation and efficiently direct attention in the appropriate direction. In this study, to construct a scientific practice support method based on information on brain functions, we investigated a technique to "visualize" the changes and trajectories of practitioners accompanying meditation and provide feedback to them by measuring brain activity using our original analysis technique. The experiments and analysis using MRI have shown that it can visualize the dynamic changes in brain states associated with focused meditation and help quantify mindfulness. We also adopted this technology to detect driver's distractions in an actual car environment. We showed that it is possible to predict the degree of distracted driving based on the driver's brain activity.

研究分野：認知神経科学

キーワード：マインドフルネス 瞑想 MRI 脳機能ネットワーク NIRS マインドワンダリング 機能的結合 漫然運転

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

マインドフルネスとは、「今起きている経験に判断を加えず、能動的な注意を向けること、またはそのような状態」であり、瞑想を通じて、自らの呼吸などの身体感覚に対して能動的に注意を維持する訓練を行うことで、思考の彷徨いに気づき、適切な方向に注意を向けやすくなるというものである。その概念は、Jon Kabat-Zin が開発したマインドフルネスストレス低減法の効果が心理臨床分野で認められたことを皮切りに一般化し、米国 Google などの著名企業で社員教育に瞑想が導入されるなど急速に普及した。

瞑想の実践プロトコルは、仏教やヨーガにおける長年の実践体験をベースに構築されているが、その定義は非常に抽象的かつ主観的である(例:鼻の下と上唇で形成される三角形の部分に注意を向ける)。このため、適切に実践できているかの客観的な判断が難しく、熟練の瞑想者との対話を通じて、自らの体験を共有し、適切な指導を受けながら体験的にその方法論を獲得する必要がある。つまり、よき「師」に出会い適切な指導を受けることもまた重要である。近年は指導者も増えつつあるが、一方で指導者の質を担保する仕組みは未だ整備されておらず、不適切な指導を受ける可能性も高まっている。不適切な瞑想実践は、例えば普段は気づかずに眠っていたトラウマ体験を掘り起こし、トラウマの再体験を生むなどの有害事象につながることもあるため、注意が必要である。すなわち、「どのようにマインドフルネスを定量化し、適切な実践を支援していくのか」という問いは、今、最も議論されるべき課題の一つである。

2. 研究の目的

本研究では、脳機能情報に基づいた科学的な実践支援法の構築を目的として、脳活動の計測と独自の解析技術により、瞑想に伴う実践者の変化と軌跡を「見える」化し、実践者にフィードバックすることを考える。瞑想の神経基盤に関する先行研究の多くが、一定期間の瞑想中の脳活動を一状態として扱っており、瞑想状態を「静的に、安定した状態」として解析を行っている。しかし、実際には、熟練者であっても瞑想中に注意がそれることもあれば、眠ることもあるため、必ずしも安定状態とは言えない。これに対して本研究では、瞑想に伴う脳活動状態の「変化」に着目し、瞑想前後の状態も含めてデータを計測し、脳状態の動的な変化を分析している点で独自性・創造性がある。

3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、本研究では、以下の研究開発項目に取り組んだ。

- (1) 瞑想初心者が集中瞑想を行う際に生じる脳機能変化の分析 (静的解析)
- (2) 集中瞑想に伴う脳状態の動的な変化の分析およびマインドフルネスの定量化 (動的解析)
- (3) マインドフルネス定量化技術の社会実装 (自動車運転への応用)

(1)では、fMRI により大学生・大学院生 29 名を対象とした集中瞑想における脳活動の計測を実施した。さらに、安静時と瞑想時の脳機能的な差異を明らかにするために、2つの状態において機能的結合度ネットワークを算出し、グラフ理論特徴量として次数中心性、媒介中心性、クラスター係数を算出した。さらに、自発性脳活動の強度を数値化するため、分数低周波振動振幅 (fractional amplitude of low frequency fluctuation: fALFF) を求めた。ここで、脳領域の分割には automated anatomical labeling (AAL) が用いられ、116 の領域において各特徴量が算出された。本研究では、被験者 29 名に対する 116 の脳領域それぞれに対する 4 つの特徴量を、3 相 3 元データとして取扱い、Tucker3 Clustering (T3Clus) を用いて、安静時と瞑想時の 2 状態を分類するために重要な脳領域及び特徴量を特定した。図 1 は、脳機能データに対して T3Clus を適用する概念図である。

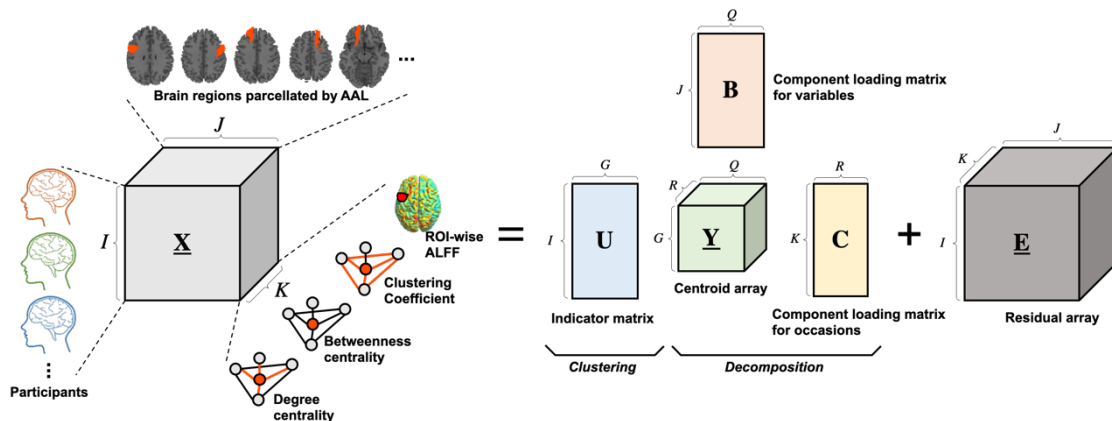


図 1 T3Clus による脳状態の分類および重要な特徴量の抽出
Tucker3 モデルは以下のように表すことができる。

$$\mathbf{X}_{I,JK} = \mathbf{U}\mathbf{Y}_{G,QR}(\mathbf{C} \circledast \mathbf{B})^T + \mathbf{E}_{I,JK}$$

ここで $\mathbf{X}_{I,JK}$ (サイズ $I \times JK$), $\mathbf{Y}_{G,QR}$ ($G \times QR$), $\mathbf{E}_{I,JK}$ ($I \times JK$) はそれぞれ \mathbf{X} ($I \times J \times K$), セントロイド配列 \mathbf{Y} ($G \times Q \times R$), 残差配列 \mathbf{E} ($I \times J \times K$) の行列表現である. \mathbf{U} ($I \times G$), \mathbf{B} ($J \times Q$), \mathbf{C} ($K \times R$) はそれぞれ, 観測データの G 個のクラスターへの分割を定義する指標行列, 各変数の成分負荷量行列, および各条件の成分負荷行列を表す. 記号 \circledast は行列のクロネッカー積を, G, Q, R はそれぞれクラスター数, 次元削減後の変数の数と条件数を示す. T3Clus は, 次の最適化問題を解くことによって, 3 相 3 元データ \mathbf{X} の次元削減とクラスターリングを行う.

$$\text{Minimize } F_{T3C}(\mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{U}, \mathbf{Y}) = \|\mathbf{X}_{I,JK} - \mathbf{U}\mathbf{Y}_{G,QR}(\mathbf{C} \circledast \mathbf{B})^T\|$$

subject to \mathbf{B} and \mathbf{C} column-wise orthonormal and \mathbf{U} binary and row-stochastic.

本研究ではこの I, J, K をそれぞれ 29 名の被験者群, 116 の脳領域, 4 つの特徴量に対応させ, T3Clus を用いて, 瞑想状態と安静状態の 2 クラスにおいて ($G = 2$), 脳領域を示す変数 116 次元を 2 次元に ($Q = 2$), 各脳領域の特徴を示す 4 次元を 1 次元に縮約する ($R = 1$) ことを実現する. なお, 通常 T3Clus はクラスターリングを行うものであるが, 今回の脳活動データでは, 安静条件と瞑想条件のラベルが付いているため, 指標行列 \mathbf{U} に予めこれらを設定することによって 2 クラス分類を行った. 結果として, T3Clus は前述の式の $\mathbf{C} \circledast \mathbf{B}$ を最適化することによって, 元データ空間から 2 次元空間への線形変換を求めることになる. 変換後の成分スコアは以下のように表現される.

$$\mathbf{Y}_{I,QR} = \mathbf{U}(\mathbf{U}^T\mathbf{U})^{-1}\mathbf{U}^T\mathbf{X}_{I,JK}(\mathbf{C} \circledast \mathbf{B})$$

この式から, 成分負荷行列 $\mathbf{C} \circledast \mathbf{B}$ が元データに対する係数行列になっていることがわかる. 線形モデルにおいては, 学習によって決定された特徴量に対する重みを観察することで, どの特徴量が分類に寄与しているかを定量化することが可能である. ここでは, T3Clus によって導出された $\mathbf{C} \circledast \mathbf{B}$ を分析することによって, 安静時と瞑想時の 2 状態を分類するために重要な脳領域及び特徴量を抽出した. 具体的には, 成分負荷量行列の要素に対する permutation test を行うため, 2 状態のクラスラベルをランダムに並べ替えたデータセットを 10,000 セット準備し, T3Clus を適用した. さらに, こうして得られた成分負荷行列 $\mathbf{C} \circledast \mathbf{B}$ の各要素に対して, 元のデータセットから得られた負荷量よりも絶対値の大きい負荷が与えられる確率を p 値とした. さらに, $p < 0.05$ を満たす脳領域と特徴量を分類に寄与する特徴として抽出した.

(2) では, (1) と同じデータに対して, 瞑想に伴う脳状態の動的な変化を可視化・定量化することに取り組んだ. 具体的には, 一定の時間窓ごとに BOLD 信号間の機能的結合度行列を求め, 時間ごとの機能的結合度行列を得た. 次に, その機能的結合度行列の中に瞑想中に特異的に発現する「瞑想メタ状態」が存在すると仮定し, 「瞑想実践区間において, 実際の計測データから算出された時点ごとの機能的結合度行列との平均類似度が最大となる」ように, このメタ状態の構造を, 逆問題 (最適化問題) を解くことによって特定した. 最適化アルゴリズムには, 進化的最適化アルゴリズムの一つである Nondominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) を用いた. メタ状態は瞑想経験者 7 名のデータから構築され, 特定されたメタ状態と, 時点ごとの機能的結合度行列との類似度を算出することで, 各被験者が瞑想実践中およびその前後でどの程度メタ状態を発現させているか, すなわち瞑想状態に近づいている度合いが数値化された.

(3) では, 機能的結合度に基づいてマインドフルネスの度合いを定量化する技術を, 自動車運転中の「ぼんやり」検知に応用できるかを検討した. いわゆるマインドフルネスと対局に位置すると考えられる「マインドワンダリング」の状態は, 日常生活でも 5 割近く発生すると言われていた. 自動車の死亡事故要因としても最も多い要因の一つが「ぼんやり」運転であり, これを脳の機能的結合度に基づいて未然に検知, 予測できれば, 社会的意義があると考えた. 具体的には, 「脳の活動パターンに基づいて, 突発的事象に対するブレーキ反応の遅れを予測できる」という仮説のもと, 自動車の運転中にランダムなタイミングでピープ音を鳴らし, 運転者がその音を聞いた直後にブレーキを踏むという実験を計画し, 運転者の脳活動と行動データを取得した. 次に, 機能的結合度行列を算出し, その直後のブレーキ反応時間を予測する回帰モデルを作成した. ここで, 脳活動の計測には functional near infrared spectroscopy (fNIRS) を用い, 脳血流変化, すなわち酸化ヘモグロビン濃度変化 OxyHb を計測した. なお, 回帰モデルは個人ごとに作成した. なお, 本研究は当初別のプロジェクトとして実施していたが, 充実したデータが取得できたこと, マインドフルネスの社会実装事例として最適であると判断し, 計画を変更して取り組んだものである.

4. 研究成果

(1) 瞑想初心者が集中瞑想を行う際に生じる脳機能変化の分析 (静的解析)

図 2 は, T3Clus により導出された安静時 (resting-state) および瞑想時 (meditative-state) 脳活動データの 2 次元表現を示している. 図 2 より, 第 1 成分のみで 2 状態を分類できていることがわかる. 図 3 に第 1 成分の成分負荷量を示した. 単純に負荷量の絶対値の大きさだけで判断する場合, 多くの脳領域が寄与しているように見える.

次に permutation test で有意となった脳領域及び特徴量を、表 1 及び表 2 に示す。表より、脳領域として 8 個、特徴量としてはクラスタ係数のみが抽出された。さらに、これらの係数の値がすべて正であることから、ある変量を正の方向に変化させた場合、図 2 の横軸上で正の方向、すなわち瞑想時のクラスに近づくことになる。このことから、初心者が瞑想を行うことにより生じる脳活動パターンの変化は、表 1 に示す 8 つの脳領域のクラスタ係数の増加となって現れることが示唆された。各脳領域の解釈および関連研究との比較についてはここでは割愛するが、default mode network (DMN) や front-parietal network (FPN) に含まれる脳領域が抽出されており、関連研究と整合する結果が得られた。以上より、初心者が集中瞑想を実践する際に生じる脳機能的な変化は、8 つの脳領域のクラスタ係数の増加により特徴づけられることが明らかになった。本研究の成果は、Frontiers in Human Neuroscience 誌にて掲載されている (Miyoshi et. al., 2020)。また、機能的結合度行列の閾値処理の部分について、汎用的な手法として発展させた方法を開発し、Entropy 誌にて掲載された (Tanioka and Hiwa, 2022)。

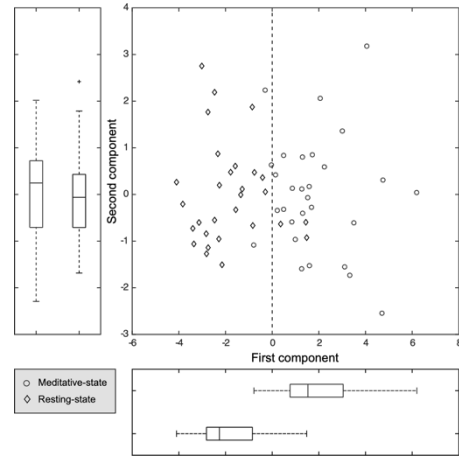


図 2 T3Clus による安静時・瞑想時の分類結果

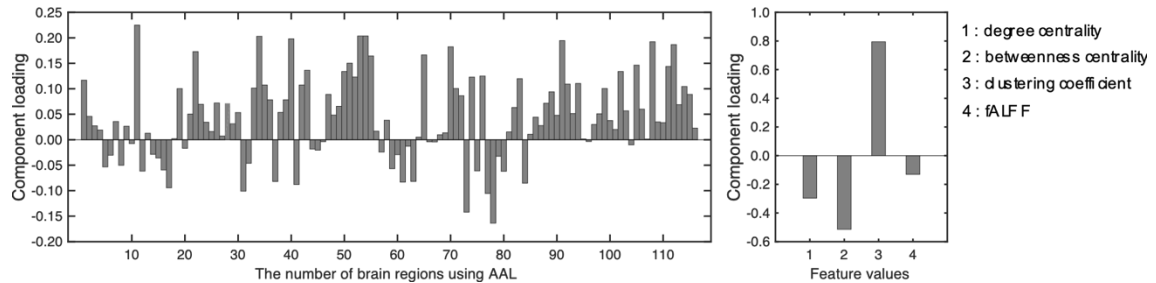


図 3 第 1 成分における成分負荷量の分布

表 1 抽出された脳領域

脳領域	負荷量	p 値
Frontal Inf Oper L	0.2250	0.0125
Occipital Inf R	0.2036	0.0215
ParaHippocampal R	0.1981	0.0224
Cerebelum 10 R	0.1923	0.0281
Cingulum Mid R	0.2031	0.0284
Cerebelum Crus1 L	0.1946	0.0309
Occipital Inf L	0.2036	0.0324
Paracentral Lobule R	0.1824	0.0397

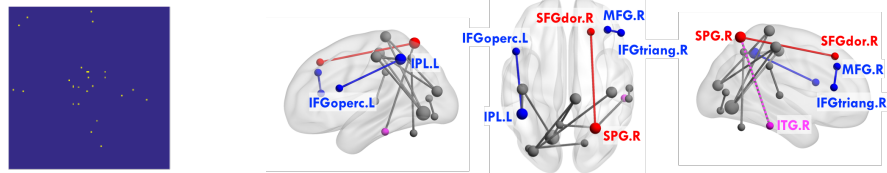
表 2 抽出されたネットワーク特徴

特徴量	負荷量	p 値
クラスタ係数	0.7943	0.0370

主たる貢献は、これまで多くの研究が瞑想熟練者を対象としたものであったが、本研究は実戦経験のない初心者を対象としたものであり、初心者でも決まったプロトコルで瞑想を行えば、脳機能ネットワーク構造に変化が生じ得ることを示した点である。また、fMRI を用いた瞑想中の脳活動分析の研究論文としては国内 7 例目 (Pubmed で「fMRI meditation」でヒットする文献に限る) であり、日本の観想神経科学の発展に寄与するものと考えている。

(2) 集中瞑想に伴う脳状態の動的な変化の分析およびマインドフルネスの定量化 (動的解析)

図 4(a) は、提案手法により抽出されたメタ状態を示している。メタ状態には 13 本の機能的結合のエッジが存在し、熟練者の瞑想中におけるメタ状態との類似度は 75.5% であった。図 4(b) は、このメタ状態のネットワーク構造を図示している。詳細な説明は割愛するが、注意に関わる重要なネットワークとして、背側注意ネットワークと腹側注意ネットワークの結合が含まれており、呼吸に注意を維持することにこれらの脳機能ネットワークが関与したことが示唆された。



(a) 行列表現 (b) ネットワーク表現

図4 抽出された瞑想メタ状態

次に、瞑想を実施していない前後 15 分間の fMRI データも利用し、計 20 分間の実験中の被験者の機能的結合度とメタ状態の類似度を算出した。図 5 は、類似度の時系列変化を示しており、いわば「いつ瞑想ができていたか」を見える化したものである。図 5 の左側には、7 名の熟練者の結果が示されている。メタ状態はこれら 7 名のデータから構築されているため、瞑想中にその類似度が高くなることは自明であるが、瞑想実施前の安静時ではその類似度が低くなっていることから、熟練者は瞑想の開始の合図に従って

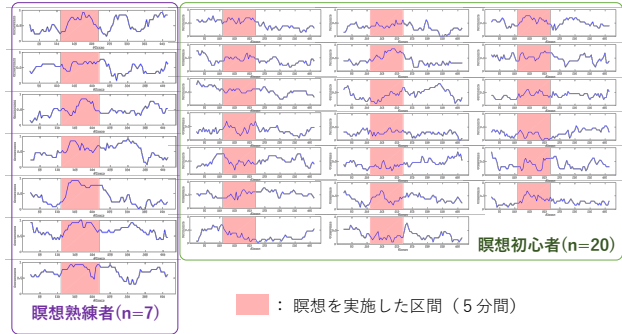


図5 T3clus による安静時・瞑想時の分類結果

適切に瞑想状態に入り、脳活動状態を変化させたことがわかる。一方で、瞑想終了の合図後も類似度が高い状態が維持されたり、計測の終盤で再び瞑想状態に近い状態になっていたりする被験者も見られた。熟練者の主観評価ではあるが、MRI スキャナー内は計測音こそ騒がしく感じるものの、暗室で目を閉じた状態で瞑想を実施せず安静状態を保つことが難しく、しばしば瞑想を実施しそうになったとの声があった。本手法はこのような変化も捉えている可能性がある。

一方、初心者の多くは、瞑想の開始終了と類似度の変化が同期していないことがわかる。実際、瞑想期間における類似度の平均は 43.3% であり、熟練者の 75.5% と比較して低いことから明らかである。ただし、個人ごとの類似度の変化を見ていくと、瞑想開始・終了の合図に合わせて類似度が変化している被験者もみられたことから、初心者であっても適切に実践できている被験者が含まれている可能性がある。このような被験者を抽出して継続的に実践と計測を行い、類似度が向上するかを検討していけば、本手法が実際に瞑想実践支援に貢献できるかを検証することができると考えられる。以上より、本研究成果は、集中瞑想に伴う脳状態の動的な変化を見える化し、さらにマインドフルネスを定量化する一助となることが示された。本研究成果は、国際会議 Organization for Human Brain Mapping (OHBM) 2018 および 2019 にて公表され、高い評価を得ている。

(3) マインドフルネス定量化技術の社会実装（自動車ドライバー状態推定技術への応用）

個人ごとに機能的結合度を説明変数、ブレーキ反応時間を目的変数とした回帰モデルを構築した結果、12 名中 11 名について、十分な精度を有するモデルを構築することができた。さらに、各被験者の予測精度が最も高い回帰モデルを解析し、漫然運転を特徴づける脳機能ネットワーク構造について分析した。図 6 のように、11 個のモデルは、各クラスターで使用されている機能的結合辺に基づいて、階層的クラスタリングにより 5 つのクラスターに分類された。その結果、背側注意ネットワーク (DAN)-感覚運動ネットワーク (SMN) および DAN-腹側注意ネットワーク (VAN) 結合の組み合わせが全クラスターに共通し、これらのネットワークが複雑なマルチタスク運転における注意力低下の程度を予測するために不可欠であることが明らかになった。また、ネットワーク内およびネットワーク間の結合パターンが異なる複数種類のモデルの存在も確認された。以上の結果から、運転中のドライバーの脳活動から、漫然運転の程度を予測することが可能であることを示した。本研究プロジェクトでは、マインドフルネスの見える化を目的として進めてきたが、この成果により、瞑想以外のシステムにも応用可能であることが示された。本成果は、bioRxiv にてプレプリントとして公開されており (Ogihara et. al., 2022)、国際論文誌で査読中である。

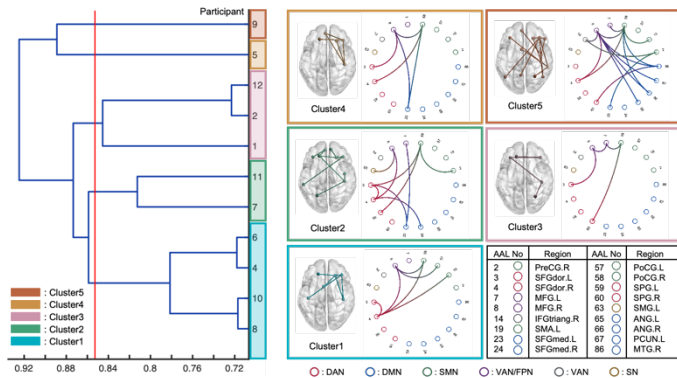


図6 回帰モデルの特徴分析結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kensuke Tanioka, Satoru Hiwa	4. 巻 -
2. 論文標題 Low rank approximation of difference between correlation matrices by using inner product	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 biorxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2021.02.23.432533	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 該当する

1. 著者名 Miyoshi Takuma, Tanioka Kensuke, Yamamoto Shoko, Yadohisa Hiroshi, Hiroyasu Tomoyuki, Hiwa Satoru	4. 巻 13
2. 論文標題 Revealing Changes in Brain Functional Networks Caused by Focused-Attention Meditation Using Tucker3 Clustering	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	6. 最初と最後の頁 1 - 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnhum.2019.00473	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 該当する

1. 著者名 Tanioka Kensuke, Furotani Yuki, Hiwa Satoru	4. 巻 24
2. 論文標題 Thresholding Approach for Low-Rank Correlation Matrix Based on MM Algorithm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 579 ~ 579
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/e24050579	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 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 S. Yamamoto, T. Hiroyasu and S. Hiwa
2. 発表標題 Is interoceptive attention during breath-counting meditation reflected in functional connectivity?
3. 学会等名 The 26th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Satoru Hiwa and Tomoyuki Hiroyasu
2. 発表標題 Manifold learning on time-varying functional connectivity matrices: A case study on meditation data
3. 学会等名 The 25th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shoko Yamamoto, Satoru Hiwa and Tomoyuki Hiroyasu
2. 発表標題 An fMRI study on the attentional state induced by breath-counting meditation
3. 学会等名 The 25th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古家知樹, 日和悟, 廣安知之
2. 発表標題 集中瞑想における「脳地図」の作成 (第二報: 個人毎の脳地図作成による個人差の検討)
3. 学会等名 日本マインドフルネス学会第6回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚友樹, 日和悟, 廣安知之
2. 発表標題 集中瞑想中の脳機能ネットワークにおける個人内変動の検討 (第2報: 高変動な脳領域の特定)
3. 学会等名 日本マインドフルネス学会第6回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiko Ogihara, Tomoyuki Hiroyasu, Satoru Hiwa
2. 発表標題 Estimating the degree of a driver's distraction based on functional connectivity analysis: An fNIRS study
3. 学会等名 Neuroscience 2021 (Society for Neuroscience) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 中島秀之、浅田稔、松原仁、橋田浩一、山川宏、栗原聡、松尾豊 (13.12 マインドフルネス (pp.365-368) を担当: 廣安知之, 日和悟)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 400
3. 書名 AI事典第3版	

1. 著者名 執筆者:64名(分担執筆)"第8章2節 人工知能を用いた脳活動データの解析と脳機能の解明," 「人工知能を用いた五感・認知機能の可視化とメカニズム解明」、技術情報協会	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 533
3. 書名 人工知能を用いた五感・認知機能の可視化とメカニズム解明	

〔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
研究分担者	廣安 知之 (Hiroyasu Tomoyuki) (20298144)	同志社大学・生命医科学部・教授 (34310)	

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