

瞑想中脳状態の脳機能ネットワーク解析

Brain functional network analysis of brain states during meditation

三好 巧真^{*1} 日和 悟^{*2} 廣安 知之^{*2}
Takuma MIYOSHI Satoru HIWA Tomoyuki HIROYASU

^{*1}同志社大学生命医科学研究科

Graduate school of Life and Medical Sciences, Doshisha University

^{*2}同志社大学生命医科学部

Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

In recent years, studies of mindfulness meditation, which is attracting attention as a way to realize Well-being, are active in the field of brain science, and it is thriving. We are conducting quantitative evaluation of brain state during meditation for the purpose of feedback of meditation state. In this paper, brain functional network was analyzed based on graph theory for brain activity data at the time of meditation measured with fMRI. From the results, feature quantities that can quantitatively evaluate the meditation state were examined.

1. 序論

近年,世界的に Well-being が注目されている。Well-being は世界保健機関の憲章において,健康な状態として定義されており,身体的,心理的,精神的,社会的に良好な状態であることを意味する。この Well-being は幸福度の向上につながることを期待されていることから,国や企業など様々な領域で注目が集まっている。

Well-being を実現する手法として,マインドフルネス瞑想があげられる。マインドフルネスの概念は,意識的な注意と気づきが鍛えられる仏教や他の瞑想法に基づくものであり,Kabat-Zinn はマインドフルネスを「意図的に今のこの瞬間の現実常に意識を向け,その現実をあるがままに知覚して,それに対する思考や感情には囚われないこと」と定義した [Kabat-Zinn 09]。瞑想には,一つのことの注意を集中する瞑想法と瞑想者の内部(心と身体)や外部(環境)で起こる出来事を評価することなく,ありのままに観察する瞑想法があり,これらの瞑想訓練によってマインドフルな状態が導かれる。マインドフルな状態は集中力向上やストレス低減につながり,結果として Well-being が実現することが期待されている。

近年ではマインドフルネス瞑想の効果に関して,脳科学の観点から様々な研究が行われている。その多くの研究が functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) を用いて行われ,マインドフルネス瞑想によって脳内の機能的・器質的变化が現れることが報告されている [Sood 13]。瞑想熟練者の脳活動からは,瞑想中に Default Mode Network (DMN), Salience Network (SN), Central Executive Network (CEN) の3つの脳内ネットワークの活性が見られたことが報告されている [Hasenkamp 12]。

しかし,瞑想経験の少ない瞑想初心者においては,瞑想の実践や自己による瞑想状態の判断が困難であるといった問題点がある。さらに,瞑想初心者の瞑想中の脳状態は十分に検討されていないことから,瞑想初心者の瞑想中の脳状態の解明が求められる。そこで本研究では,瞑想初心者に対する瞑想状態のフィードバックを目的として,瞑想初心者の瞑想時における脳状態を解明し,定量的評価を行っている。本稿では,瞑想初心者の瞑想中の脳活動を fMRI で計測し,グラフ理論に基づく脳機能ネットワーク解析を用いて,瞑想状態を定量的に評価することが可能な特徴量を検討する。

2. 解析手法

瞑想状態を定量的に評価するために,瞑想中の脳状態から特徴量を抽出する。脳内における情報処理は,複数の神経細胞が複雑なネットワークを形成することで行われるることから,本稿では脳内ネットワークの構造に着目する。そこで,グラフ理論による脳機能ネットワーク解析を用いて,グラフ理論特徴量を各脳領域ごとに算出することによって,瞑想状態における重要な脳領域や協調関係を抽出する。しかし,従来から用いられる脳の分割では領域数が多く,また,グラフ理論特徴量を複数組み合わせデータ分析を行う場合,次元数が多くなるため,瞑想状態における重要なグラフ理論特徴量を抽出することが困難となる。そこで,Reduced k-means clustering (RKM) を用いて次元縮約とクラスタリングを行う [De Soete 94]。これにより,最適な次元縮約とクラスタリングが行われ,脳状態の検討が可能となる。本章では,解析で用いた手法について述べる。

2.1 脳機能ネットワーク

脳機能ネットワークは機能的結合によって解析することが可能である。機能的結合は,fMRI によって得られた脳血流の時系列変化の相関から脳領域間の結合が示される [Bullmore 09]。脳領域間の相関係数に閾値を設け,相関係数が閾値よりも大きかった場合を結合あり,小さかった場合を結合なしとし,その結合によってネットワークを表現する。

2.2 グラフ理論

グラフ理論とは,いくつかのノードとそれらを結ぶエッジからなる図形をグラフと定義し,その性質を研究する数学の一分野である。脳内ネットワークにおいては,脳領域をノード,脳領域間の結合をエッジと考え,そのネットワーク構造をグラフ理論に基づいて定量的に解析することが可能となる。本稿では,脳機能ネットワークにおいて,他の領域と協調する中心的な役割をもつ脳領域を検討するため,次数中心性,媒介中心性の2つのグラフ理論特徴量を用いる。

2.2.1 次数中心性

次数中心性は,それぞれのノードのエッジ数を,そのノードの中心性とする。ノード i の次数中心性 k_i はノード i に対する総エッジ数 k を用いて以下のように表される。

$$k_i = \frac{1}{k} \sum_{i \neq j} a_{ij} \quad (1)$$

脳内ネットワークでは、次数中心性が高い領域は他の多くの領域と協調する中心的な役割を持つことを示す。

2.2.2 媒介中心性

媒介中心性は、あるノードが他の2つのノードを繋ぐ最短経路に含まれる割合を表したものである。ノード数を n 、ノード i とノード j 間の最短経路数を ρ_{ij} 、ノード v を通るノード i, j 間の最短経路数を $\rho_{ij}(v)$ とすると、媒介中心性 $b(v)$ は以下のように表される。

$$b(v) = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{i \neq v \neq j} \frac{\rho_{ij}(v)}{\rho_{ij}} \quad (2)$$

脳内ネットワークでは、媒介中心性が高い領域は他の領域の情報伝達の媒介的な役割を持つことを示す。

2.3 Reduced k-means clustering

クラスタリングは、複数のクラスにオブジェクトを分類することを目的としている。高次元データのクラスタリングを行う際、多くの研究において、主成分分析によって次元を縮約した後に、クラスタリングを行う手法が用いられる。しかし、主成分分析は必ずしもクラスタリング構造にあまり寄与しない変数を縮約するとは限らず、クラスタリング結果を不明瞭にする可能性がある [De Soete 94]。そこで、k-means 法に基づくオブジェクトのクラスタリングと主成分分析に基づく次元縮約を同時に行う RKM が提案された。対象 $I \times$ 変数 J のデータ行列 X に対して、RKM では目的関数 F_{RKM} を以下のように表す。

$$F_{RKM}(U, F, A) = \|X - UFA'\|^2 \quad (3)$$

ここで、 U は $I \times J$ のクラスタメンバーシップ行列、 F は $C \times Q$ のクラスタセントロイド行列、 A は $J \times Q$ の負荷量行列である。RKM では、設計変数を U, F, A として、目的関数 F_{RKM} が最小になるように最適化を行う。つまり、観測データと仮のクラスタの重心の間の距離の2乗が最小となるようなオブジェクトの分割を探索する。

3. 実験

3.1 実験概要

本実験では、瞑想法として、息の出入りを数えることによって呼吸に意識を集中させる「数息観」を用いる。数息観を行った時の脳活動を fMRI で計測し、脳機能ネットワーク解析を用いて脳状態を検討する。被験者は瞑想初心者 24 名 (22.88±0.48 歳、右利き、瞑想訓練時間: 30 時間以下、男性: 18 名、女性: 6 名)、瞑想熟練者 3 名 (45.00±8.00 歳、右利き、瞑想訓練時間: 1000 時間以上、男性: 3 名) である。MRI 装置は Echelon Vega 1.5T (日立製作所) を用いる。脳機能画像は Gradient Echo-Echo Planer Imaging (GE-EPI) シーケンスにより撮像する。

3.2 実験方法

実験設計を図 1 に示す。本実験は、瞑想前安静時、瞑想時、瞑想後安静時 (1)、瞑想後安静時 (2) の 4 区間、各 5 分で構成され、被験者にヘッドホンを装着した状態で MRI 装置を用いて撮像した。瞑想の開始時と終了時に、ヘッドホンを經由して「task 開始」、「rest 開始」の音声で瞑想の開始・終了の合図を行った。

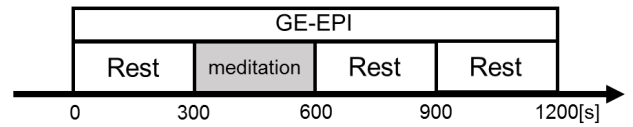


図 1: Experimental design

数息観に関して、「数息観を行っている間は閉眼・鼻呼吸であること」、「意図的に呼吸の長さを変えないこと」、「息を吸い始める時から数え始め、吐き終わるまでを 1 と数え、心の中で数えていき、10 まで数えたら、再び 1 から数え始めること」を指示した。また、「数を数え忘れる」、「数を数え間違える」、「呼吸を数えること以外に意識が逸れる」などの事象に気づいた場合は、再び 1 から数え始めることを指示した。さらに安静時は、呼吸の数え上げは行わず、楽な状態で過ごすように指示した。

3.3 解析

計測した fMRI データに対して、SPM12 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) を用いて、Realignment, Coregistration, Normalization, Smoothing の処理を行った。次に、脳活動領域における機能的結合の解析のため CONN toolbox [Whitfield-Gabrieli 12] を用いて脳機能ネットワーク解析を行った。CONN では、Automated Anatomical Labeling (AAL) を用いて脳領域を 116 領域に分割し、脳領域間の機能的結合の解析のため、計測した fMRI データから脳領域ごとの平均 Blood Oxygenation Level Dependent (BOLD) 信号と、脳領域間の平均 BOLD 信号の相関係数を算出した。さらに、相関係数行列に対して、各脳領域をエッジ、領域間の相関をノードとし、すべての結合のうち、実際に結合している割合が 15% となるように閾値を設定し、脳機能ネットワークの抽出を行った。得られた脳機能ネットワークに対し、グラフ理論を用いて、各脳領域ごとに次数中心性と媒介中心性を算出した。また、全被験者 27 人ごとに算出された 2 つの特徴量を変数とした 232 次元のデータに対して、RKM を用いて、被験者を 2 群に分類した。

3.4 実験結果・考察

RKM によって、瞑想時の次数中心性と媒介中心性で構成されたデータは、第 1 主成分のみの 1 次元に縮約され被験者の分類が行われた。クラスタリングの結果を図 2 に示す。瞑想熟練者 3 名を含む被験者 16 名の clusterA と瞑想初心者のみ 11 名の clusterB に分類された。瞑想熟練者を含む群と含まない群に分かれたことから、第 1 主成分は瞑想熟練者の脳状態との類似度を表す主成分であり、主成分軸の正側に位置する clusterA は熟練者と脳状態が似ているため瞑想状態にある群、主成分軸の負側に位置する clusterB は瞑想状態にない群であると考えられる。

次に、脳領域ごとの特徴量の主成分負荷量を図 3 に示す。主成分負荷量が大い変数はその主成分の特徴を十分に説明している変数であり、各群の特徴を説明するうえで重要な変数である。よって、主成分負荷量の大きな変数は、瞑想熟練者の脳状態に類似している clusterA を十分に説明していると考えられる。0.12 以上の主成分負荷量を示す変数として、右視床と右被殻、島の次数中心性が抽出された。高い主成分負荷量を示した右視床、右被殻、左島において、clusterA の被験者のうち半数以上で結合の見られた領域を図 4 に示す。これらの 3 つ

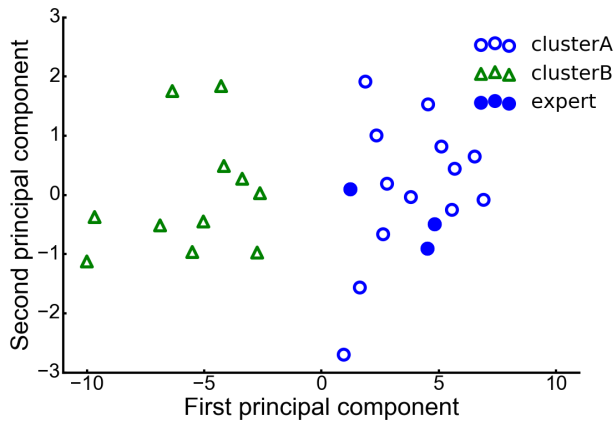


図 2: Results of clustering

の領域間には、それぞれが多く数の被験者において結合が見られたことから、右視床、右被殻、左島の間にネットワークが形成されることが分かる。島は注意散漫への気づきを担う Salience Network の一部で、個人の内部および外部の刺激の感知を行う。また、視床は全身の感覚に対する刺激情報を認識して、大脳皮質や大脳辺縁系に伝達を行う機能を持つ。被殻は大脳基底核の一部で、大脳基底核は行動制御の機能を持つ。これら3つの領域がネットワークを形成することで、島が瞑想中の注意散漫な状態を感知し、視床、被殻に情報伝達を行い、その情報から被殻において注意維持といった瞑想における適切な行動が導かれると考えられる。また、 -0.12 以下の主成分負荷量を示す変数として、後頭回、島距溝、左楔部、舌状回の次数中心性が抽出された。これらの脳領域は視覚処理に関連する領域で、瞑想状態にある場合、他の脳領域との結合を減らし、視覚処理の機能が使われなくなると考えられる。これらのことから、瞑想状態を特徴量によって評価する場合、右視床や右被殻、左島、視覚処理に関連する領域の次数中心性によって、瞑想状態を定量的に評価することが可能であると示唆された。また、媒介中心性では、大きな主成分負荷量を示す領域が存在しなかったことから、瞑想状態の評価において媒介中心性の差は見られないことが示唆された。

4. 結論

本稿では、fMRI を用いて瞑想初心者の瞑想時の脳活動を計測し、脳機能ネットワーク解析によって瞑想状態を定量的に評価することが可能な特徴量を検討した。各脳領域において、グラフ理論特徴量である次数中心性と媒介中心性を算出し、被験者の分類を行ったところ、瞑想熟練者を含む群と初心者のみの群に分かれた。主成分負荷量から、瞑想によって、島、視床、被殻間のネットワークが形成され、視覚処理に関連する脳領域と他の脳領域との結合数が減ることが分かった。これらのことから、島、視床、被殻、視覚処理に関連する脳領域の次数中心性が瞑想状態を評価するうえで有効な特徴量になることが示唆された。

参考文献

[Bullmore 09] Bullmore, E. and Sporns, O.: Complex brain networks: graph theoretical analysis of structural and functional systems, *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 10, No. 3, pp. 186–198 (2009)

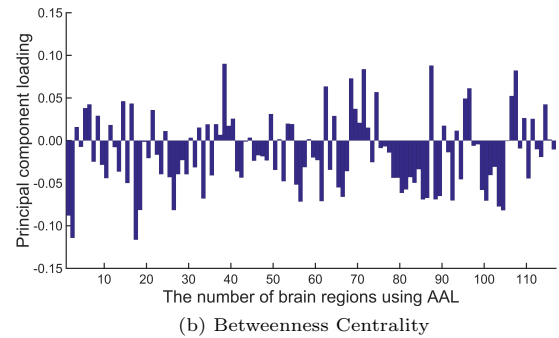
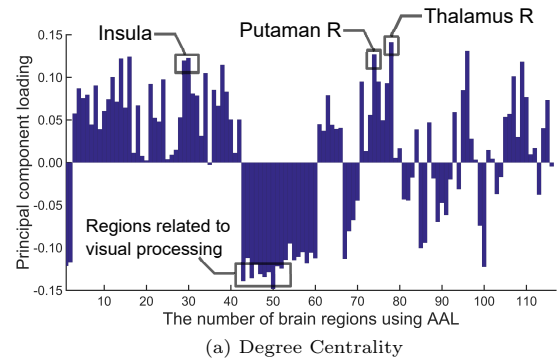


図 3: Principal component loading of each brain region

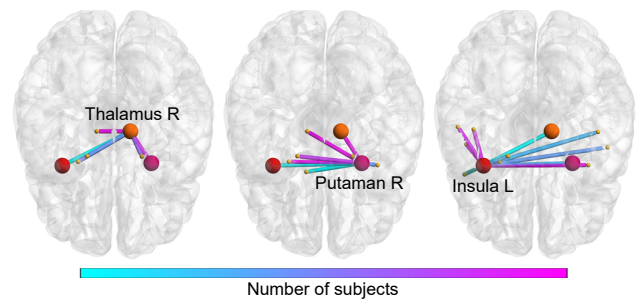


図 4: Regions where each brain region has connection

- [De Soete 94] De Soete, G. and Carroll, J. D.: K-means clustering in a low-dimensional Euclidean space, in *New approaches in classification and data analysis*, pp. 212–219, Springer (1994)
- [Hasenkamp 12] Hasenkamp, W., Wilson-Mendenhall, C. D., Duncan, E., and Barsalou, L. W.: Mind wandering and attention during focused meditation: a fine-grained temporal analysis of fluctuating cognitive states, *Neuroimage*, Vol. 59, No. 1, pp. 750–760 (2012)
- [Kabat-Zinn 09] Kabat-Zinn, J.: *Wherever you go, there you are: Mindfulness meditation in everyday life*, Hachette UK (2009)
- [Sood 13] Sood, A. and Jones, D. T.: On mind wandering, attention, brain networks, and meditation, *Explore: The Journal of Science and Healing*, Vol. 9, No. 3, pp. 136–141 (2013)
- [Whitfield-Gabrieli 12] Whitfield-Gabrieli, S. and Nieto-Castanon, A.: Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks, *Brain connectivity*, Vol. 2, No. 3, pp. 125–141 (2012)