

Well-beingの定量化に向けて: 脳機能ネットワークに基づくマインドフルネスの見える化の検討

Direction to quantifying well-being: Visualizing mindfulness based on functional brain network

日和 悟^{*1} 廣安 知之^{*1}
Satoru Hiwa Tomoyuki Hiroyasu

^{*1}同志社大学生命医科学部

Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

In this paper, authors claim that one of the best way to promote our well-being is to be aware of states of our own well-being. Therefore it is necessary to quantify and visualize the degree of well-being. Here we focus on quantifying psychological well-being, and consider achieving it based on neuroimaging technologies such as fMRI and fNIRS. Therefore, this paper proposes a novel method to define the brain activity pattern occurs during a certain mental state—referred to as a 'metastate'—using data-driven approach. The metastate is modeled as a functional connectivity network, and its characteristic structure is determined by evolutionary computation. The effectiveness of our proposed method is validated on the fMRI data measured during meditation said to improve our psychological well-being. The experimental results revealed that the metastate found by our method can be utilized to quantify how well we can meditate. It will also lead to quantifying our well-being.

1. 序論

Well-beingという言葉が最初に用いられたのは、1946年の世界保健機関 (WHO) 憲章草案^{*1}であるとされている。この中で well-being は "Health is a state of complete physical, mental and social well-being and not merely the absence of disease or infirmity." (単に病気や虚弱でないだけでなく、健康とは、身体的、精神的、社会的に良好な状態である。)と記述されている。一方、Well-being を幸福 (happiness) と表現することもできる。では、幸福とは何であろうか。何ををもって幸福とするのか、我々はどんなとき幸せとを感じるのか、自己を対象に限定しても、幸福な状態を定義することは難しい。

ポジティブ心理学は、幸福感や well-being の体系化に取り組む学問の一つであり、主観的幸福感を測定する尺度や、幸福感を促進する方法、幸福の要因などが近年盛んに研究されてきた。一方、デジタルテクノロジーに支えられた現代社会において、テクノロジーによる well-being の促進、あるいは well-being を妨げないテクノロジーの設計指針を試みる取り組みも行われつつある。Rafael A. Calvo らは、このようなポジティブ心理学とそれを取り巻く研究領域を支援するテクノロジーを総称して Positive Computing と呼び、テクノロジーのデザインと評価においても、well-being の測定を意識的に行うべきであると主張している [Calvo 17]。また、その著書の中で、Positive Computing において考慮すべき well-being を 3 つのカテゴリ：自己 (intra-personal)、社会的 (inter-personal)、超越的 (extra-personal) に分類しつつその決定因子を挙げている。ポジティブ感情や動機づけ、思いやりや共感、利他性などさまざまな well-being 決定因子が挙げられているが、これらをいかにしてテクノロジーの設計に組み込むのか、また、これらを促進するテクノロジーの要件について議論していく必要がある。

著者らは、well-being を促進するためには、自己の well-being の状態を知ることが重要であると考えている。例えば Fitbit や

Apple Watch などのヘルスケアガジェットは、ユーザの行動と生体情報を計測し、これを元にユーザの健康状態などを数値化しフィードバックすることでユーザの健康を促進することを目指している。デバイスからのフィードバックを元に、我々は自らの健康状態を知り、課題が見つければそれを改善し、良好であることがわかればその状態を継続しようとする。あるいは、行動の履歴から自らの生活スタイルや行動範囲について新たな気づきを得ることもあるかもしれない。自発的な観察だけでは定量化できないような自己の状態に対して、テクノロジーが果たす役割は大きい。しかしながら、これらのデバイスで計測できるのはあくまで身体的な活動であり、我々の well-being を総合的に促進するためには、心理的 well-being を定量化できるテクノロジーが必要である。

そこで本研究では、「テクノロジーによる well-being の定量化」を目的として、特に心理面 Well-being を数値化できるようなテクノロジーの開発に取り組む。また、心理状態や認知活動状態を計測するデバイスとして、機能的磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) や機能的近赤外分光法 (functional near-infrared spectroscopy: fNIRS) などの非侵襲脳機能イメージングを用い、計測された脳活動データから特定の心理状態の発現度合いを数値化するデータ駆動型アプローチを提案する。本稿では、心理状態の一例として、自己的な well-being 決定因子の一つとされているマインドフルネスを対象として、被験者のマインドフルネスの度合いを数値化することができるかを検討した。

2. 提案手法

2.1 メタ状態マッチングによる認知状態の定量化

脳活動によりヒトの状態を定量化するためには、脳活動データからどのような特徴を抽出するかが重要である。ヒトの脳においては、機能的に分化された複数の脳部位間の構造的・機能的な繋がりが、時間と共に変化している。例えば図 1(1)のように、fMRI や fNIRS などの装置により複数の計測点における脳活動の時系列データが得られたとき、それらが複数の脳領域で高い相関をもっていれば、それらの領域が特定の課題中に協調して活動するとみなすことができる。このような協調関係

連絡先: 日和悟, shiwa@mail.doshisha.ac.jp

^{*1} Constitution of WHO: principles, World Health Organization, <http://www.who.int/about/mission/en/>

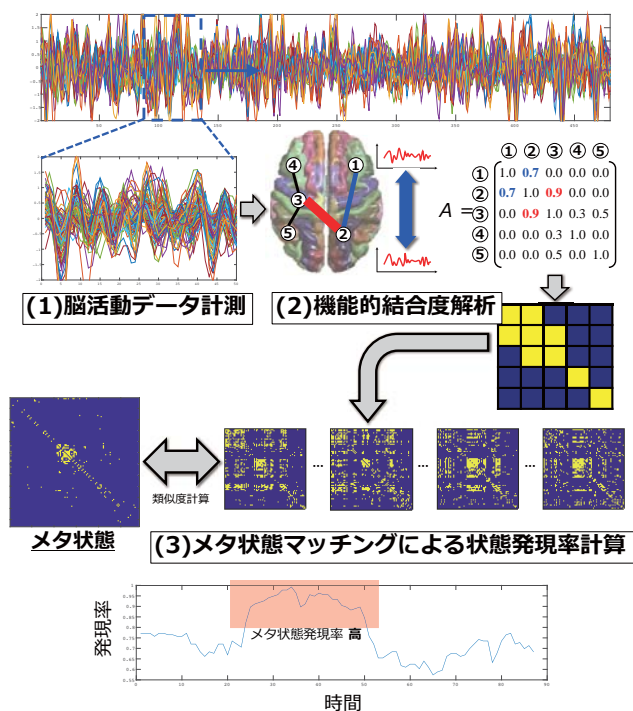


図 1: Framework of metastate matching method

を脳の機能的結合と呼ぶ。機能的結合の強さは時系列データ間の Pearson 相関係数などによって定量化され、図 1(2) のように 5 つの脳領域間の機能的結合度は対称行列によって記述することができる。これは脳領域をノード、機能的結合度をエッジとした重み付き無向グラフの隣接行列に相当し、脳活動状態をグラフにより表現していることになる。本研究では、この機能的結合度行列を被験者の脳活動状態を表す特徴量として用い、あらかじめ定義された特定の条件下（心理・認知状態）で発現する機能的結合度行列と比較し類似度を求めることにより、その状態の発現率を定量化する方法を提案する。ここで、特定の条件下における機能的結合度行列を記述したものを「メタ状態」と呼ぶことにする。このメタ状態を注意の集中・散漫や、感情の快・不快、共感などの要素ごとに定義することができれば、それぞれの状態を定量化することが可能である。図 1(3) はこの手順を示したものである。なお、図中の機能的結合度行列は、機能的結合度に閾値を設けて二値化（結合あり：1，結合無し：0）した行列を用いている。このように二値化することで、メタ状態に定義された結合が被験者の現時点における機能的結合行列内に存在しているかによって、メタ状態の発現率を数値化できる。

2.2 進化計算によるメタ状態の探索

提案手法の要となるのがメタ状態をどのように定義するかである。多くの神経科学研究により様々な認知状態と脳機能ネットワークの関係が明らかにされており、それらの研究結果を活用し、前提知識から機能的結合行列を定義し、メタ状態とすることもできるが、現在利用可能な脳機能イメージング装置で得られるデータは、装置の違いや個人差の影響を強く受けるため、再現性を確保することが難しい。そこで本研究では、使用したい装置や対象とする認知状態に合わせてメタ状態をデータ駆動型アプローチにより探索する方法を提案する。ここで、メタ状態を定義するという事は、個人差に影響を受けず、

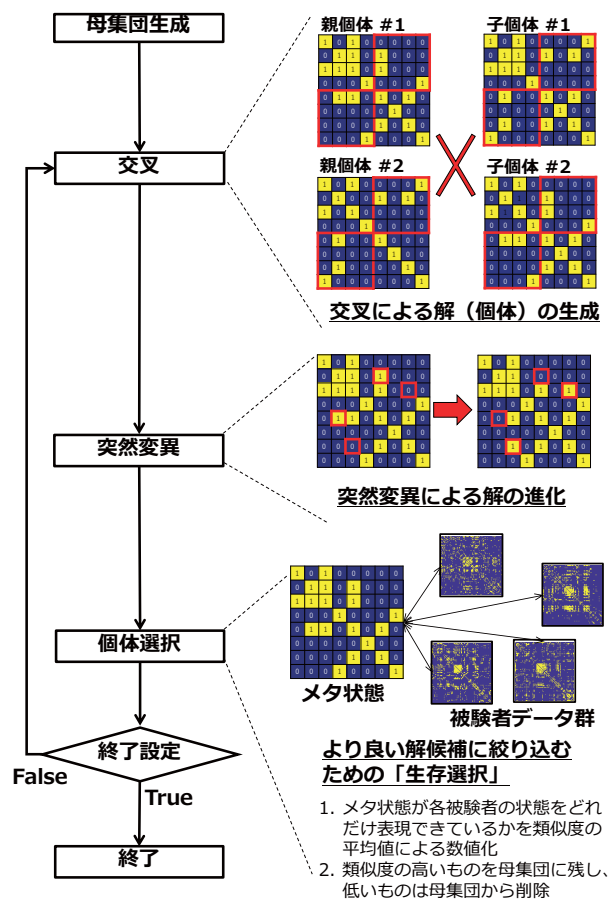


図 2: Evolutionary optimization to extract the metastate

万人に共通して存在する機能的結合を抽出することに他ならない。本研究では、同じ認知状態にある複数の被験者の脳活動データを計測し、そこから求めた各時点の機能的結合度行列に対して、全被験者に対する平均類似度が最大となるようなメタ状態を求める最適化問題とみなし、進化的最適化アルゴリズムによりメタ状態（最適解）を求める。図 2 は、メタ状態探索のフローを示している。複数のメタ状態の候補解が進化的最適化アルゴリズムにより生成され、全被験者の機能的結合度行列との平均類似度により評価される。評価の高い候補解は保存され、これをベースとして次の候補解が生成されていく。この手順を繰り返し行うことで、最適なメタ状態の構造が抽出される。

3. 実験

提案手法の有効性を確認するため、特定の認知状態として「マインドフルネス」を対象として、健常成人を対象とした fMRI 計測により安静時・瞑想時の脳活動を取得し、提案手法を適用することで瞑想状態＝マインドフルネスの定量化を試みる。実験では、瞑想の熟練者と初心者の瞑想実践中の脳活動を計測し、熟練者のデータからメタ状態を定義し、これを用いて初心者のマインドフルネスの度合いを数値化することとした。

3.1 被験者

初心者群 20 名（訓練時間 11 ± 45 h, 年齢 23.0 ± 2.6 歳）と、瞑想実践者群 7 名（訓練時間 1560 ± 435 h, 年齢 49.0 ± 17.0 歳, 7 名には同一被験者の測定 3 回分のデータを含む）の健康

な日本人成人男性が書面による同意の上、実験に参加した。瞑想者群はいずれも複数回の瞑想リトリート参加を経験している他、日常的に瞑想訓練を実施している。

3.2 実験プロトコル

瞑想の実践法には、呼吸に注意を維持しながらその出入りを数える数息観とよばれる瞑想法を採用した。実験参加者はヘッドホンを装着した上で、MRI スキャナーの中で5分間安静にした後、5分間の数息観を行い、その後10分間安静状態を保った。脳活動の計測はこれら計20分間連続して実施され、一度もMRI装置から出ることなく計測を続けた。なお、最初の安静時間終了後と瞑想時間の終了後に、それぞれヘッドホン経由で「瞑想開始」「瞑想終了」を音声により指示され、被験者はこれに従って瞑想の開始・終了時期を認識した。数息観の指示は計測前に準備室で行い、計測中は終始、閉眼・鼻呼吸を維持すること、自然な呼吸を心がけ意図的に変えないこと、息の吸い始めから吐き終わりを1として「いーち」「にーい」…と声に出さず数え、10まで数えたら再び1に戻り数え始めることを指示した。さらに、数え間違いや呼吸以外に注意が逸れた場合には、再び呼吸に意識を戻し、1から数え直すよう指示した。

3.3 脳機能イメージング

1.5T MRI Scanner Echelon Vega (日立製作所) を使用し、Gradient-Echo Echo-Planer Imaging (GE-EPI) シーケンスにより被験者の脳活動を計測した (TR=2500ms, TE=40ms, flip angle=90°, FOV=(240mm, 5.0-mm thick slices), matrix size=64×64, number of slices=25)。また、T1 構造画像は Rf-Spoiled Steady state Gradient echo (RSSG) シーケンスで撮像した (TR=9.8ms/TE=4.0ms/flip angle=8deg/FOV=(256mm, 1.0-mm thick slices)/matrix size=256×256/number of slices=192)。

3.4 前処理

計測された fMRI データに対して DPARSF [Yan 10] を用いて slice timing correction, realignment, MNI 空間への normalization (New Segment+DARTEL), CompCor アルゴリズム [Behzadi 07] による白質と脳脊髄液の影響除去、頭部の動き補正, smoothing (4-mm FWHM Gaussian kernel), linear trend 除去を行った後、BOLD 信号に対してバンドパスフィルタ (0.008—0.09Hz) を適用した。さらに、AAL アトラスにより脳領域を 116 に分割し、各領域の平均 BOLD 信号を抽出した後、125 秒幅の窓を 2.5 秒ずつシフトしながら、窓によって切り出された時系列信号に対して脳領域間の時系列相関を求め、各時点での 116 × 116 の機能的結合度行列を算出した。また、各行列を Fisher's z 変換し、結合度上位 15% の結合が保存されるようにバイナリ化した。

4. 結果と考察

4.1 メタ状態

図 3 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 3 の下部には、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。

4.2 メタ状態発現率の推定

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 4 は、類似度の時系列変化を示しており、これをマインドフルネスの指標の一つとみなすことができる。図 4 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な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、瞑想区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り、マインドフルネスの度合いの評価指標としての可能性が示された。

5. 結論

本稿では、well-being を定量化するための試みとして、脳活動データに基づく認知状態定量化の手法を提案した。さらに、心理的な well-being の決定因子の一つとしてのマインドフルネスに着目し、瞑想中の脳活動データからマインドフルネスの度合いを定量化できるかを検討した。実験結果から、提案手法が瞑想に伴う脳活動状態の変化を捉えており、認知状態の定量化手法としての本手法の可能性を見出すことができた。本手法は、与えられた脳活動データから特徴的な脳機能ネットワーク構造を抽出することができる汎用的なフレームワークを提供している。今後はマインドフルネスに関するデータの蓄積を図りつつ、well-being に関わる様々な認知状態のデータにも本手法を展開して行く予定である。

参考文献

- [Behzadi 07] Behzadi, Y., Restom, K., Liau, J., and Liu, T. T.: A component based noise correction method (CompCor) for BOLD and perfusion based fMRI, *NeuroImage*, Vol. 37, No. 1, pp. 90–101 (2007)
- [Calvo 17] Calvo, R. A. and Peters, D.: ウェルビーイングの設計論：人がよりよく生きるための情報技術 (渡邊淳司/Dominick Chen 監訳), *Positive computing : technology for wellbeing and human potential*, ビー・エヌ・エヌ新社 (2017)
- [Yan 10] Yan, C. and Zang, Y.: DPARSF: a MATLAB toolbox for "pipeline" data analysis of resting-state fMRI, *Frontiers in Systems Neuroscience*, Vol. 4, No. 13 (2010)

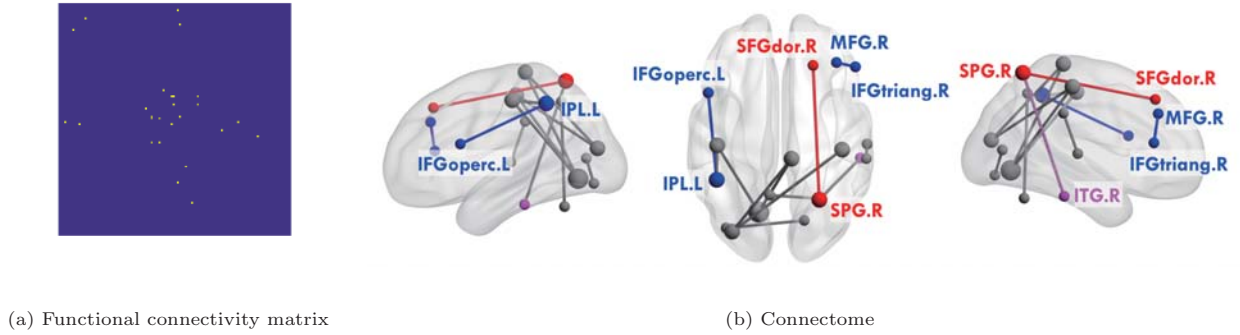


図 3: Metastate of meditation derived by proposed method

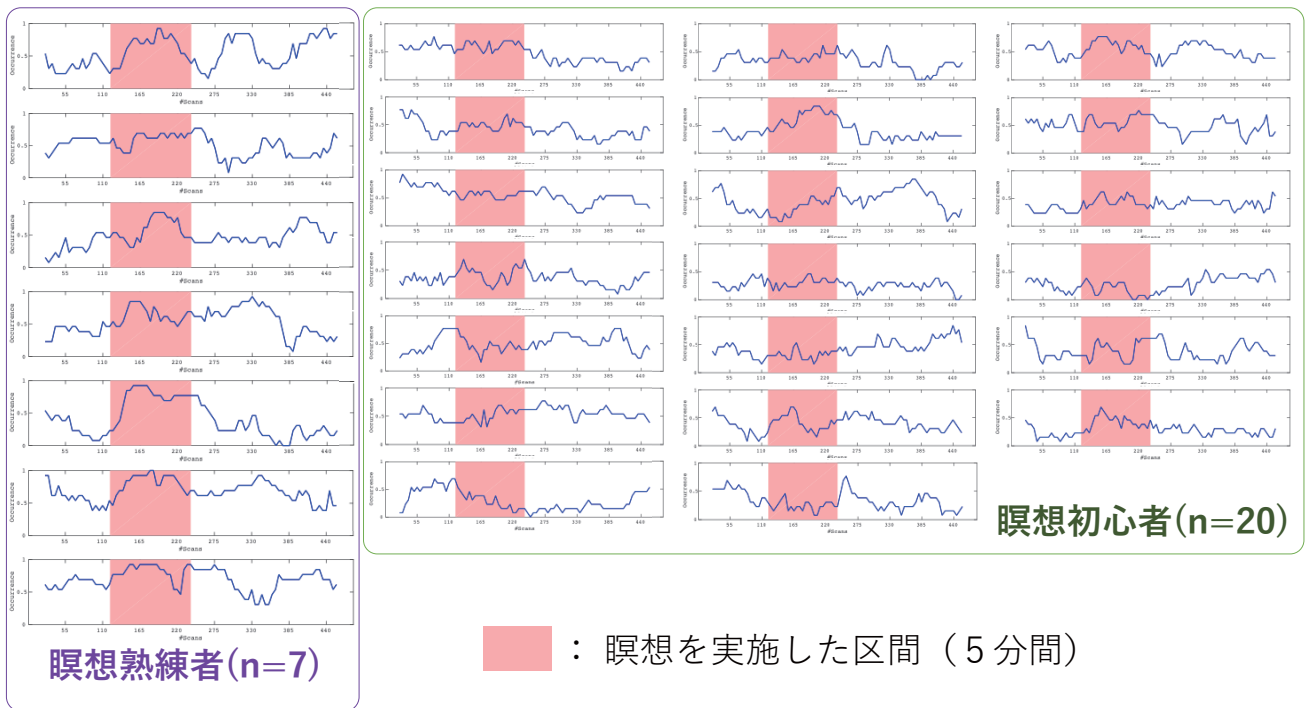


図 4: Estimation of occurrence of the meditative metastate