

# 脳機能情報による瞑想状態の検討

Investigation of meditation state using brain functional information

日和 悟<sup>\*1</sup>      飯塚 まり<sup>\*2</sup>      廣安 知之<sup>\*1</sup>  
Satoru Hiwa      Mari Iizuka      Tomoyuki Hiroyasu

<sup>\*1</sup>同志社大学生命医科学部

Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University

<sup>\*2</sup>同志社大学大学院ビジネス研究科

Graduate School of Business, Doshisha University

We human beings spend about fifty percent of the time of our waking hours without any awareness what we are doing now. It is said that such a mind wandering affects happiness. To overcome this issue, mindfulness meditation—paying attention to one’s experience in an accepting and nonjudgmental way—is getting popular. In this research, we focus a function of attention regulation in mindfulness meditation. In spite of its popularity, meditation needs a lot of practice until one experiences its effectiveness. We aim to reveal whether meditation beginners can derive any positive effect even by easy way of focusing their breathing and counting them. We measured brain activity during the meditation using functional magnetic resonance imaging and the whole-brain functional connectivity was analyzed based on the graph theoretical perspective. Analytical results showed that there were some differences of betweenness centrality and eigenvector centrality of brain functional network between resting and meditation state.

## 1. 序論

我々人間は、日常において起きている時間の約 50%を、「心ここに在らず」の状態、すなわち今まさに起っている行為に注意を向けられていない状態で過ごしていると言われてい [Killingsworth 10]。このような状態を思考の彷徨い＝マインドワンダリングと呼び、この状態にあると過去の経験や記憶、未来への不安感に捉われやすく、自己否定的な感情を生み出しやすいため、幸福感の低下につながるとも言われている [Killingsworth 10]。一方で、ビジネスの場に置き換えて考えると、約 50%の時間はマインドワンダリングにより目の前の作業に集中できていないことになる。この時間を減らすことができれば、過去の失敗経験などに捉われず、今本来行うべき作業に集中して効率的に作業をこなすことが期待できる。マインドワンダリングの状態から抜け出し、目の前の事象に集中するためには、能動的な注意の制御が重要であり、その実現手段として「マインドフルネス瞑想」が近年注目されている [Sood 13, Goldin 10, Tang 15]。

瞑想という行為は仏教から発展してきた修行法の一つであるが、マインドフルネス瞑想は幾つかの瞑想法を組み合わせで現代化したものであり、宗教や宗派、思想にとらわれずビジネスの現場や日常生活においても用いられ始めている。「マインドフルネス」とは、「今起きている経験に評価や判断を加えることなく、能動的な注意を向けること」と定義されており [Kabat-Zinn 94]、注意制御、感情制御、自己認知などの向上によって自己を安定化させる効果がある [Tang 15]。具体的な方法は、例えば自己の呼吸などの特定の事象に注意を向け続ける訓練を行うことで注意制御力の向上を図る「集中瞑想」と、対象を 1 つから自己やその周辺に生じる様々な事象・感覚に展開し、観察することによって、経験や価値判断にとらわれない状態を作り出す「洞察瞑想」の大別して 2 つの方法がある [Ainsworth 13]。

このようなマインドフルネス瞑想の効果を、脳科学的に検証し

連絡先: 日和 悟, 同志社大学生命医科学部医情報学  
科, 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3, 0774-65-6381,  
shiwa@mail.doshisha.ac.jp

ようとする研究も急速に広がっている。先行研究 [Marchand 14] では、熟練の瞑想者の脳は内側皮質, default mode network (DMN), 島皮質, 扁桃核, 外側前頭部, 大脳基底核などの活動において非瞑想者と異なることがわかっている他, 皮質の厚みなど構造的な変化をも引き起こすという [Lazar 06]。一方で、このような脳活動の変化が観察されているのは、1 日数時間の瞑想訓練を数年にわたって続けた実践者がほとんどであり、初心者とその効果を得るのは容易ではない。

それに対して本研究では、瞑想経験のない初心者が長時間の訓練を必要としない簡易な方法によって、注意制御力の向上などの効果が得られるかどうかを脳科学的に検証することを目的とする。そこで、自らの呼吸の反復を数える数息観 [Chihara 01] という簡易な瞑想法を用いて、訓練経験のない初心者が瞑想を行った際の脳の状態を functional magnetic resonance imaging (fMRI) により計測する。数息観は「呼吸」という特定の事象に対して注意の維持を行う集中瞑想の一種であるが、ただ呼吸に集中することは初心者には難しいため、呼吸の出入りを数えるというラベリングを行うことで集中しやすくなっており、瞑想経験のない初心者に適した方法である。本稿では、数息観中の脳活動において、特に全脳の各領域間の機能的な繋がり、脳機能ネットワーク構造の変化を定量的に分析することで、瞑想によって変化する脳領域やネットワーク構造の抽出を試みた。

## 2. 実験

### 2.1 概要

本実験では、瞑想経験の無い初心者が容易に実施できる瞑想法を行なった場合に、瞑想による脳機能状態の変化が生じているかどうかを確認するため、fMRI を用いた非侵襲脳機能計測により安静時・瞑想中の脳活動を計測し、それぞれの脳の状態を比較することとした。

### 2.2 被験者

被験者は初心者群 (22.33±0.58 歳, 右利き, 瞑想訓練時間: 0 時間, 健康な日本人成人男性) 3 名であり、全ての被験者は書面による同意の上、実験に参加した。

## 2.3 脳機能イメージング

MRI 装置 Echelon Vega 1.5T, (日立メディコ製) を用いて, 被験者の脳活動を Gradient-Echo Echo-Planer Imaging (GE-EPI) シーケンスにより計測した (TR=2500ms, TE=40ms, flip angle=90°, FOV=(240mm, 5.0-mm thick slices), matrix size=64×64, number of slices=25) .

## 2.4 実験プロトコル

瞑想前安静時, 瞑想中, 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, 被験者はヘッドホンをつけた状態で MRI 装置に入った. 全 4 区間を連続して実施し, 被験者は一度も MRI 装置から出ることなく計測を続けた. なお, 計測は安静状態で開始し, 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・終了を認識した. 実験デザインは図 1 の通りである. なお, 図中の部分は MRI 装置の出力が安定しない間のスライスを捨てる必要があるため, 6 スキャン分の安静時間を余分に設定しているものである.

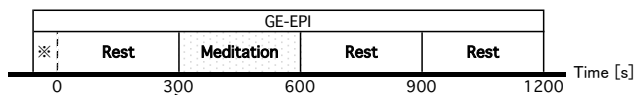


図 1: Experimental design

数息観の指示は, MRI 計測の前に準備室で行った. 課題中は終始, 閉眼・開口・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「いーち」「にーい」... と声に出さず心の中で数えていき, 10 まで数えたら, 再び 1 に戻って数え始めることを指示した. また, 数を忘れた場合や, 呼吸を数えること以外に意識がそれたことに気づいた場合は, また呼吸に意識を戻し, 再び 1 から数え直すよう指示した. 被験者は MRI 装置に入る前に数息観の練習を 3 分以内で行い, 指示通りに実施できることを確認した. さらに, 安静時に数息観と同じ効果が得られることがないよう, 安静時は呼吸や数の数え上げは行わず, 楽な状態で過ごすよう指示した.

## 3. 解析

### 3.1 機能的結合度の算出

計測した fMRI データに対して SPM8 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) を用いて Re-alignment, Slice Timing Correction, Coregistration, Normalization, Smoothing の処理を行い, 計測中の頭部の動き補正し, 個人脳の機能画像と T1 構造画像間での位置合わせを行い, 個々の脳画像を Montreal Neurological Institute (MNI) 標準脳に合うように調整した後に, full width at half maximum (FWHM) = 8 mm のガウシアンフィルタによる平滑化を行った. さらに, SPM8 による前処理を行ったデータに対して, CONN toolbox [Whitfield-Gabrieli 12] を用いて機能的結合度を算出した. 全脳の平均 BOLD 信号, 頭部の動きによるアーチファクト, 白質と脳脊髄液の BOLD 信号を回帰子として除去する他, 4 つのタスク期間に対する血流動態反応関数 (hemodynamic response function: HRF) の畳み込みにより主効果の抽出を行った上で, band pass filter (0.008 Hz-0.09 Hz) をかけた BOLD 信号をボクセルごとに抽出した. さらに, 解剖学的脳アトラスとして automated anatomical

labeling (AAL) を用いて脳を 116 領域に分割したのち, 領域ごとの BOLD 信号の平均値を各脳領域の代表信号として, 各領域の BOLD 信号の相関係数を算出した. 以上の処理により, 全領域間の相関は 116 × 116 の相関行列として得られる. さらに相関係数を Fisher の Z 変換により変換した値 ( $\beta$ ) を領域間の機能的結合度とした.

### 3.2 グラフ理論に基づく脳内ネットワークの解析

CONN で算出した相関行列に対して, 本研究では正の相関のみを解析対象とした. このため, 0 未満の要素はすべて 0 とした. 各脳領域をノード, 領域間の相関をエッジと見なせば, 脳部位間の機能的ネットワークと考えることができ, そのネットワークトポロジーをグラフ理論に基づいて定量的に解析することができる. ここでは, 安静時や瞑想中の相関行列から以下のようなネットワーク特徴量を計算し, 比較する.

### 3.3 媒介中心性 (betweenness centrality)

媒介中心性は全頂点对の最短経路がその点を通る割合である. すなわち, ある点を経路するエッジの数でその点の重要度を測る指標である. 脳内ネットワークでは, この値が大きい領域は, 他の領域との情報伝達の媒介役となっている可能性がある. ノード  $i, j$  間の最短パス数を  $\sigma_{ij}$ , ノード  $v$  を通るノード  $i, j$  間の最短パス数を  $\sigma_{ij}(v)$  とすると, 媒介中心性  $g(v)$  は以下のように定義できる.

$$g(v) = \sum_{i \neq v \neq j} \frac{\sigma_{ij}(v)}{\sigma_{ij}} \quad (1)$$

また, 媒介中心性はノード数を  $n$  として  $(n-1)(n-2)/2$  で除すことによって正規化できる.

### 3.4 固有ベクトル中心性 (eigenvector centrality)

中心性の最も単純な計算方法にあるノードにつながるエッジの数 (次数) を用いる次数中心性 (degree centrality) があるが, 固有ベクトル中心性ではこれを拡張して, 隣接点の中心性を反映して中心性を評価する. 具体的には, 隣接行列 (ここでは相関行列) の最大固有値に対応する固有ベクトルの要素が各ノードの固有ベクトル中心性である.

### 3.5 モジュール性 (modularity)

モジュール性は, ネットワークをいくつかのコミュニティ (クラスタ) に分割した際の, 分割の質を数値で示したものである. 具体的には, 分割されたクラスタに対して, クラスタ内のノード同士が繋がるエッジの割合から, エッジがランダムに配置された場合の期待値を引いた値として定義される. また, これを最大化するような分割を求めることになり, ネットワークのクラスタリングが可能である. クラスタ  $s$  内部のノード毎のエッジ本数の総和の, 総エッジ本数に対する割合を  $e_{ss}$ , クラスタ  $s$  から  $t$  に張られているエッジ本数の総エッジ本数に対する割合を  $e_{st}$ , コミュニティ  $s$  から他のコミュニティに向けて張られているエッジ本数の総エッジ本数に対する割合を  $f_{ss}$  とするとき, モジュール性  $Q$  は以下のように定義できる.

$$Q = \sum_{s=1} (e_{ss} - (\sum_{t=1} e_{st})^2) = \sum_{s=1} (e_{ss} - f_{ss}^2) \quad (2)$$

本研究では Newman 法 [Newman 06] によりモジュール性が最大となるようにネットワークのクラスタリングを行い, 瞑想によりネットワーク構造がどのように変化しているかを分析する.

表 1: Brain regions that show significant differences (paired  $t$ -test;  $P < 0.05$ ) in betweenness centrality

Brain region	$t$ -score
Frontal Inf Orb L	7.43
Supp Motor Area R	2.90
Calcarine L	3.95
Thalamus L	11.04
Temporal Mid R	4.40
Vermis 4 5	-4.70
Vermis 6	3.53

表 2: Brain regions that show significant differences (paired  $t$ -test;  $P < 0.05$ ) in eigenvector centrality

Brain region	$t$ -score
Occipital Sup L	5.41
Putamen L	-4.34
Pallidum L	4.09
Temporal Sup R	3.08
Temporal Mid L	-4.22

#### 4. 結果と考察

各個人の各区間（瞑想前安静時，瞑想中，瞑想後安静時 (1)，瞑想後安静時 (2)）の fMRI データに対して，機能的結合度行列を算出し，行列の要素ごとの加算平均を取り算出した平均機能的結合度に対して，モジュール性に基づくクラスタリング，媒介中心性，並びに固有ベクトル中心性を算出した．図 2 に，瞑想前安静時，瞑想中の機能的ネットワークに基づくコネクトームを示す．ノードは 116 領域の代表点を示し，クラスタごとに色分けしている．ノード間をつなぐエッジの色は機能的結合度の強さを表している．

瞑想前安静時，瞑想中それぞれのモジュール性の値は 0.2370, 0.2547 であった．図 2 よりクラスタを構成するノードが安静時と瞑想中で変化しており，また，ノード間の結合度の強さに変化が見られることから，2 つの脳の状態において機能的結合性に変化が生まれていることが示唆された．

次に，各個人の機能的結合度行列から構築したネットワークに対して，116 の脳領域ごと媒介中心性と固有ベクトル中心性を計算し，その平均値を求めた．さらに，瞑想中安静時と瞑想中の各ネットワーク特徴量について，対応のある  $t$  検定を行い，有意差が見られた領域を抽出した．媒介中心性で有意差が見られた領域を表 1 に，固有ベクトル中心性で有意差が見られた領域を表 2 に示す．

表 1 の脳部位において，Frontal Inf Orb L（左下前頭葉眼窩部）は感覚情報の統合や意思決定に関わるとされている．この部位での媒介中心性は安静時よりも瞑想中で低くなっており，呼吸への集中により感覚情報の統合を必要としなくなった可能性が考えられる．Supp Motor Area R（右補足運動野）は自発的な運動制御に関わるため，呼吸への集中により，この部位を経由する結合が変化した可能性がある．Calcarine L（左鳥距溝）は視覚処理に関わる領域であり，本実験では終始閉眼状態で計測を行ったため，課題との関連性は低いと考えられるが，瞑想中は安静時よりも媒介中心性が低くなっており，安静時にマインドワンダリングしていたとすると，瞑想によりマインドワンダリングの頻度が下がった可能性が示唆される．Thalamus L（左視床）は嗅覚以外の感覚情報を大脳新

皮質へ中継する役割を担うとされており，この部位の媒介中心性が安静時から瞑想中にかけて小さくなったことは，呼吸への集中によって身体的な感覚の情報に絞った可能性が示唆される．Temporal Mid R（右中側頭回）は，マインドワンダリング中の注意維持や転換に応じて活性化するという報告もあり [Hasenkamp 12]，数息観によってマインドワンダリングや注意制御に変化が生じている可能性が示唆された．

一方，表 2 の固有ベクトル中心性では，Occipital Sup L（左上後頭回）が抽出されたが，この部位は視覚連合野に位置している．この部位の固有ベクトル中心性は安静時に対して瞑想中は小さくなっていることから，瞑想中は呼吸への集中により，呼吸に関係のない情報の処理に関わる部位との結合が弱まったことが示唆される．次に，Putamen L（左被核）は Pallidum L（左淡蒼球）はいずれも大脳基底核の一部である．大脳基底核は，強化学習の役割があるとされており，大脳新皮質で処理された情報や視床への入力をもとに運動などの実行制御を行っていると考えられている．また，別のアプローチではあるが，呼吸法の一つであるヨガにおいて淡蒼球の活動が変化する報告もあり [Gard 14]，注目すべき部位であると言える．Temporal Sup R（右上側頭回）は聴覚処理や音声言語処理に関係するが，瞑想時に中心性が低下していることから，呼吸への集中により周囲の音環境へ意識に何らかの変化が生まれた可能性が考えられる．

以上のように，全脳を解剖学的アトラスにより分割し，領域間の機能的結合性をネットワークとして捉え，ネットワーク特徴量の変化を考察することで，課題において注目すべき脳部位を抽出することができた．ただし，被験者数が 3 名と少ないため，より信頼度の高い結果を得るために被験者数を増やして実験・解析を行っていく．また今後は，抽出された部位と機能的結合性の高い部位の関係を分析する他，瞑想経験者の脳活動も計測した上で，初心者との脳機能的な比較を行い，初心者が今回の瞑想法で経験者と同じ効果を得ることができているかを定量的に分析していく．

#### 5. 結論

本研究では，マインドフルネス瞑想の注意制御の機能に注目し，瞑想経験の無い初心者が数息観という簡易な集中瞑想によって注意制御力向上の効果を得ることができるかを検討することを目的とした．そこで，瞑想初心者 3 名の安静時・瞑想中の脳活動を fMRI によって計測し，解剖学的に定義された脳部位間の機能的結合性を算出した．さらに機能的結合性を各脳部位間をつなぐエッジとし，脳部位をノードと捉え，脳機能結合性のネットワークをグラフ理論の特徴量を用いて解析したところ，媒介中心性と固有ベクトル中心性において，安静時と瞑想中でその値が変化する部位が抽出された．変化が観察された右補足運動野や左視床，大脳基底核などの部位は，先行研究で瞑想中に活動や結合性に変化が生じる部位とされており，初心者においても，数息観によって瞑想による特定事象への注意制御の影響が生じている可能性が示唆された．

#### 参考文献

- [Ainsworth 13] Ainsworth, B., Eddershaw, R., Meron, D., Baldwin, D. S., and Garner, M.: The effect of focused attention and open monitoring meditation on attention network function in healthy volunteers, *Psychiatry Research*, Vol. 210, No. 3, pp. 1226–1231 (2013)
- [Chihara 01] Chihara, T.: *Respiration and Emotion*, chapter Breathing Regulation in Zen Buddhism, pp. 121–126, Springer Japan, Tokyo (2001)

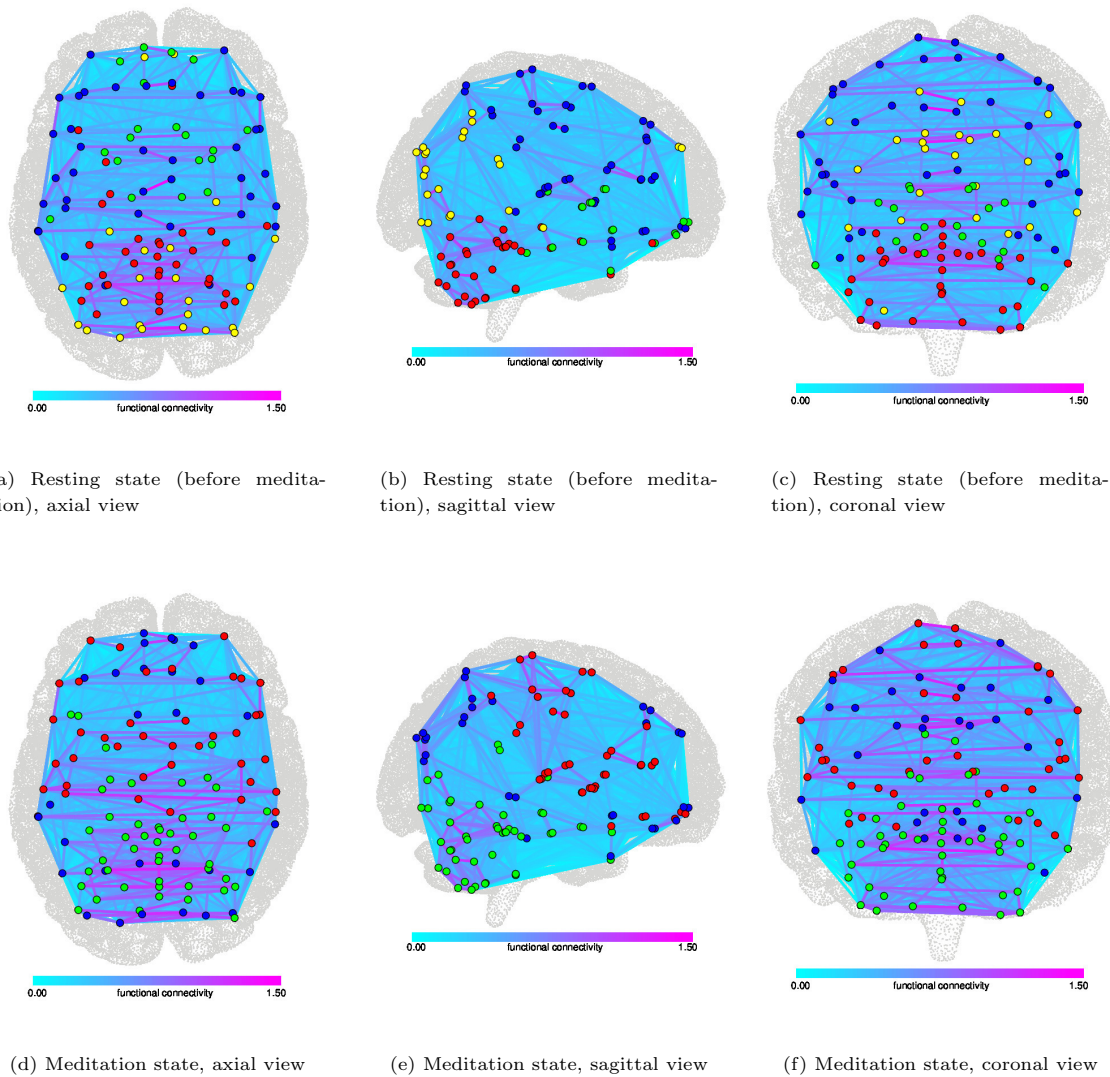


図 2: Comparison of brain functional network between resting state (before meditation) and meditation state.

[Gard 14] Gard, T., Noggle, J. J., Park, C. L., Vago, D. R., and Wilson, A.: Potential self-regulatory mechanisms of yoga for psychological health, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 8, No. SEP, p. 770 (2014)

[Goldin 10] Goldin, P. R. and Gross, J. J.: Effects of Mindfulness-Based Stress Reduction (MBSR) on Emotion Regulation in Social Anxiety Disorder, *Emotion (Washington, D.C.)*, Vol. 10, No. 1, pp. 83–91 (2010)

[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 94] Kabat-Zinn, J.: *Wherever You Go, There You Are: Mindfulness Meditation in Everyday Life*, Hachette Books (1994)

[Killingsworth 10] Killingsworth, M. A. and Gilbert, D. T.: A Wandering Mind Is an Unhappy Mind, *Science*, Vol. 330, No. 6006, p. 932 (2010)

[Lazar 06] Lazar, S. W., Kerr, C. E., Wasserman, R. H., Gray, J. R., Douglas, N., Treadway, M. T., Mcgarvey, M., Quinn, B. T., and Dusek, J. A.: Meditation experience is associated with increased cortical thickness, *Neuroreport*, Vol. 16, No. 17, pp. 1893–1897 (2006)

[Marchand 14] Marchand, W. R.: Neural mechanisms of mindfulness and meditation: Evidence from neuroimaging studies William, *World Journal of Radiology*, Vol. 6, No. 7, pp. 471–480 (2014)

[Newman 06] Newman, M. E. J.: Modularity and community structure in networks., *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 103, No. 23, pp. 8577–82 (2006)

[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)

[Tang 15] Tang, Y.-Y., Hölzel, B. K., and Posner, M. I.: The neuroscience of mindfulness meditation, *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 16, No. 4, pp. 213–225 (2015)

[Whitfield-Gabrieli 12] Whitfield-Gabrieli, S. L.: Conn: A Functional Connectivity Toolbox for Correlated and Anticorrelated Brain Networks., *Brain Connectivity*, Vol. 2, No. 3, pp. 125–141 (2012)

## 謝辞

瞑想中の fMRI 計測の実験設計について，京都大学大学院教育学研究科の藤野正寛氏に多大なるご助言を頂きましたことをここに厚く御礼申し上げます。