

評価理論に基づくマインドフルネス瞑想を起点とする ポジティブ再評価誘発メカニズムに関する脳機能モデルの構築

Construction of the brain function model about the positive reappraisal mechanism
in mindfulness meditation based on the Appraisal Theory

中村遥佳 *1
NAKAMURA Haruka

方思源 *2
FANG Siyuan

田和辻可昌 *3*4
TAWATSUJI Yoshimasa

松居辰則 *4
MATSUI Tatsunori

*1早稲田大学 人間科学部
School of Human Sciences, Waseda University

*2早稲田大学 グローバルエデュケーションセンター
Global Education Center, Waseda University

*3早稲田大学 大学院人間科学研究科
Graduate School of Human Sciences, Waseda University

*4早稲田大学 人間科学学術院
Faculty of Human Sciences, Waseda University

In stress reductive effect, the positive reappraisal mechanism in mindfulness attract attention. However, there is a problem on the explanation of the function based on structure and the link of human brain. Understanding the mechanism based on structure and the link of human brain is important to the essential understanding of the human cognitive activities. In this paper, we proposed the explanation of the function of attention control by mindfulness meditation in the positive reappraisal mechanism in mindfulness based on structure and the link of human brain. As a results, the simulation showed the activation of dlPFC・ACC・AI・PM and the deactivation mPFC・PCC that should play an important role in attention control by mindfulness meditation. Thus it was confirmed that we could explain the function of attention control by mindfulness meditation with neuroanatomical mechanism based on structure and the link of human brain.

1. はじめに

1.1 背景

私たちは日常生活において、マインドワンダリングであることが多い。実際に健康な大人の起きている時間の三分の一はマインドワンダリングである [Killingsworth 10]。マインドワンダリングとは「過去にしまった後悔や将来に対する不安など、今ここでの経験や課題に関係のない思考に注意を向けている状態」である [Killingsworth 10]。マインドワンダリング時には、幸福感の低減が見られる [Killingsworth 10]。そんな中ストレス低減、幸福感の向上などの人々の生活に対する向上的効果 [Garland 11] から注目を集めているのがマインドフルネスである。マインドフルネスは「今ここでの経験に評価や判断を加えることなく、能動的に注意を向けている状態」 [Kabat-Zinn 94] と定義される。マインドフルネス時には、マインドワンダリング時とは対症的に幸福感の向上が見られる [Garland 11]。

マインドフルネスのストレス減少の効果は、拡大視のようなネガティブな認知情動処理の減少よりもむしろ、ポジティブ再評価のようなジティブな認知情動処理の強化に由来していることが指摘されている [Garland 11]。マインドフルネスとポジティブ再評価の関係、メカニズムに関しては、評価理論 [Lazarus 84] に基づいた認知心理学レベルのモデルが、マインドフル処理モデルとして提唱されている [Garland 11]。その中でマインドフルネスは、出来事に対する怒りなどのネガティブな評価をなくし、新しいポジティブな評価を再構築するという役割を果たしている。また、近年は、fMRIを活用したマインドフルネス時の脳部位・ネットワークの機能的結合に関する研究も多く存在する [Tang 15]。

しかし、先行研究までの課題として、マインドフルネスとポジティブ再評価の関係の認知機能メカニズムは、実際の脳の構

造によって説明可能かという点が挙げられる [佐伯 83]。また、fMRI などにより明らかになった脳部位・ネットワークの機能的結合に関しては、構造的結合を反映しているかという点にも課題が残る [Greisius 07]。この課題はマインドフルネスとポジティブ再評価の関係だけではなく、認知機能全般に当てはまる課題である。人間の認知機能は脳内での情報処理を通して達成されているため、本質的な機能の理解には、神経解剖学的知見に基づく、実際の脳の構造に基づいたメカニズムの理解が必要である。例えば、ある認知機能を障害した時、その機能の治療を行うためには認知機能を達成している脳の動作原理に立ち返って原因の解明を行う必要がある。

1.2 目的とアプローチ

先行研究までの課題を踏まえ、本研究は、神経解剖学的知見に基づき脳機能モデルを構築することで、マインドフルネス時のポジティブ再評価メカニズムを説明することを目的とする。

マインドフルネスは、注意制御、感情制御、自己意識 [Tang 15] という複数の機能が相互作用した状態である。したがって本研究では、まず認知心理学モデルを構築することで、トップダウンにマインドフルネス時のポジティブ再評価誘発メカニズムを明確にする。そして示された機能間の関係を細分化し、それぞれの機能が実際の脳の構造に基づいてどのように説明されるかを、脳機能モデルの構築とシミュレーションにより、ボトムアップに考察する。

脳機能モデルの構築とシミュレーションによる認知機能の考察において、具体的に本報告では、考察対象の認知機能を「マインドフルネス瞑想による注意制御」へ焦点化する。本研究における脳機能とは、神経解剖学的知見に基づく脳内ネットワーク構造内の情報伝播の因果関係により説明される。ここで、神経生物学的なネットワークにはその粒度により多様に存在し [Peterson 15]、脳内での情報処理は、ニューロンなどの低次レベルでのモデル化が多く存在する。しかし、本研究で目指す脳機能による認知機能の説明においては、より高次のレベルの神経生物学的ネットワーク構造とメカニズムの理解が必要である [Peterson 15]。したがって本研究における脳機能モデルは、

連絡先: 中村遥佳, 早稲田大学 人間科学部, 埼玉県所沢市堀之内 135-1 フロンティアリサーチセンター 213 実験室, kh67h_wnn.nh@akane.waseda.jp など

細胞構築学という観点から粒度を統一した脳の部位 (e.g. 視床の内側核, 外側核, ...) を一つの構造単位とする, 高次なレベルのネットワーク構造に着目した上で構築する. そしてシミュレーションにより, マインドフルネス瞑想による注意制御機能が脳機能を持って説明可能であるかを明らかにする. また, 脳機能モデルに関しては, その説明力に関して妥当性の検証を行う.

本シミュレーションの結果, マインドフルネス瞑想による注意制御に関わるとされる背外側前頭前皮質 (dlPFC: dorsolateral prefrontal cortex)・前帯状回皮質 (ACC: anterior cingulate cortex)・前部島 (AI: anterior insula)・運動前野 (PM: premotor area) の活動の活性化, 及び内側前頭前皮質 (mPFC: medial prefrontal cortex)・後部帯状回皮質 (PCC: posterior cingulate cortex) の活動の抑制という挙動が確認された. また, 構築した脳機能モデルの妥当性の検証により感情の二重経路 [LeDoux 96] や青斑核の覚醒機能 [渡辺 17] などの先行知見との整合性が示唆された. このことから, 本脳機能モデルはマインドフルネス瞑想による注意制御機能に対して記述表現力を有していることが確認された.

2. 認知心理学モデルの構築

本研究の認知心理学モデルは Lazarus の評価理論 [Lazarus 84] に基づいている. また, マインドフルネスの注意制御と感情制御という二つの認知制御機能へ焦点化し, Garland らのマインドフル処理モデル [Garland 11] に基づき構築している. 以下に本研究で構築した認知心理学モデルを示す.

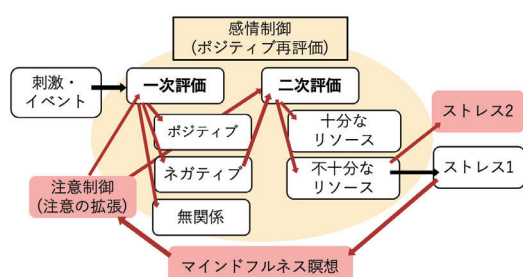


図 1: マインドフルネス時のポジティブ再評価誘発メカニズムに関する本研究で構築した認知心理学モデル

図 1 は本研究で構築した認知心理学モデルを示したものである. 人は日常のイベントや刺激に対して評価を行うことでストレス反応を表出している (ストレス 1) [Lazarus 84]. ここで, ストレス 1 はネガティブな認知処理が優勢となり表出される傾向にある [Teasdale 99]. また, ストレス 1 が表出されると, それに対するネガティブな認知処理が働き, 自分の内的な感情や思考に注意が向けられている状態 (マインドワンダリング) になる. マインドフルネス瞑想を行い, 外的な感覚刺激や体性感覚に注意を向けることで, 注意制御能力が向上する. 注意制御能力の向上により注意が拡張することは, 人間の評価機構に対して, ネガティブな認知処理を改善する方向へ効果を及ぼす. 本研究におけるポジティブ再評価とは, ネガティブな認知処理が改善された評価機構を意味する. 注意の拡張が評価機構へポジティブな効果を及ぼしても, 一連の処理によりストレス 2 が表出することがある (ストレス 2) が, 表出されるストレス 2 は, 適切なストレスである.

3. 脳機能モデルの構築とシミュレーション

3.1 考察対象

本報告では, 前節で認知心理学モデルの構築により明確にしたマインドフルネス時のポジティブ再評価誘発メカニズムのうち, 脳機能の観点から考察する対象機能を, マインドフルネス瞑想による注意制御機能へ焦点化する. マインドフルネス瞑想による注意制御機能を脳機能の観点から考察するために, 本小節では, マインドフルネス瞑想による注意制御機能が脳内での現象としてどのように表現されるかに関して述べる.

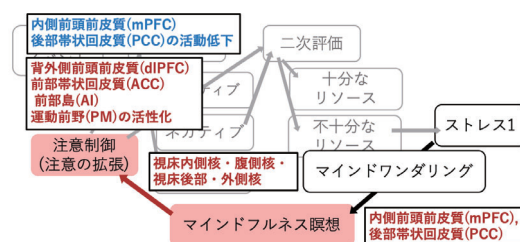


図 2: マインドフルネス瞑想による注意制御メカニズムに関する脳内での現象 (赤:活動の活性化が見られる脳部位, 青:活動の抑制が見られる脳部位)

図 2 は, 認知心理学モデルにおけるマインドフルネス瞑想による注意制御機能が, 脳内でどのような現象として記述されるかを示した図である. マインドワンダリング時の脳内での活動は, mPFC・PCC の活性化と関係が深い (図 2 右下) [越野 13]. マインドフルネス瞑想では, 外的な感覚刺激や体性感覚に注意を向けることで, 注意を様々な対象への注意を選択し, 切り替え, 維持する注意制御能力を訓練している. 外的な感覚刺激に注意を向けるとき, 感覚情報は, 脳内では視床を経由して情報が伝播する [McCormick 94] ため, マインドフルネス瞑想により最初に視床の各構造が感覚情報の入力を受けて活動する (図 2 中央). マインドフルネス瞑想による注意制御と関係の深い脳内での活動は, mPFC・PCC の活動抑制及び, dlPFC・ACC・AI・PM の活性化が挙げられる [Fox 16] (図 2 左上). したがって本報告において脳機能モデルのシミュレーションにより考察する対象は, mPFC・PCC の活動状態の変化と dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態の変化である.

3.2 脳機能モデルの構築

本小節では, 前小節を踏まえて, マインドフルネス瞑想による注意制御機能を, mPFC・PCC の活動状態の変化と dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態の変化から考察するために, 脳機能モデルの構築を行う. 脳機能モデルは, 細胞構築学的な観点から粒度を統一した脳の部位を基本単位とする脳内ネットワーク構造と, その脳内ネットワーク構造内の情報伝播を表現する計算モデルを, python3 系において実装した. 本報告において, 具体的に実装した脳の部位は, 視床の網様核・内側核・外側核・腹側核・視床後部, 橋の青斑核, 前頭葉の前頭眼窩皮質・前頭眼野・一次運動野・PM・dlPFC・mPFC, 後頭葉の一次視覚野・二次視覚野・視覚連合野, 側頭葉の一次聴覚野, 角回 (AG: angular gyrus), 頭頂葉の体性感覚野, 頭頂連合野, 扁桃体の中心核・基底外側核, 海馬 (CA1), ACC・PCC, AI・中部島・後部島, 大脳基底核の入力核・出力核・内在核である.

脳部位の活動状態を表現する計算モデルに関しては, 以下

の通りである。

$$\tau_i \frac{dx_i}{dt} = -x_i(t) + \sum_{j=1}^n w_{ji} x_j(t) + out.I_i + I \quad (1)$$

τ_i は、脳部位 (細胞群) i の時間変化のスケールを表す時定数である。 $-x_i(t)$ は、時刻 t における脳部位 (細胞群) i の出力を示している。 w_{ji} は、脳部位 (細胞群) j から i への入力リンクの重みを示している。 $x_j(t)$ は、時刻 t における脳部位 (細胞群) j からの入力 (脳部位 (細胞群) j の活動率に依存) を示している。 $out.I_i$ は、考慮できていない他の脳部位からの入力を示している。 I は、外的な入力を示している。本研究においては、マインドフルネス瞑想による外的な感覚刺激や体性感覚情報の入力を意味している。したがってこの項が存在するのは視床の内側核・腹側核・外側核・視床後部、青斑核のみである。

3.3 シミュレーション結果・考察

本小節では、前小節で構築した脳機能モデルのシミュレーションにより、脳機能の観点からマインドフルネス瞑想による注意制御機能 (mPFC・PCC の活動状態の変化と dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態の変化) を考察した。

3.3.1 mPFC・PCC の活動状態に関するシミュレーション

時定数 τ_i を調節することで、mPFC・PCC の活動状態の変化を観察した。時定数は活動状態の時間変化のスケールを調節するパラメータであり、時定数が小さいほど時間変化が大きいことを意味する。時定数を調節することで、脳部位の活動状態の変化の速さの関係と、マインドフルネス瞑想による注意制御の関係を考察する。時定数は $\tau_{thalamus}$, τ_{dmn} , τ_{other} の三種類に分類した。 $\tau_{thalamus}$ にはマインドフルネス瞑想により外的な感覚刺激に注意を向けることで感覚情報の入力がある、視床の内側核、腹側核、外側核、視床後部、青斑核が当てはめられている。 τ_{dmn} にはマインドワンダリング時に活動の活性化が見られる mPFC, PCC, AG, CA1, 視床の網様核が当てはめられている。 τ_{other} はその他の脳部位が当てはめられている。シミュレーション結果は $\tau_{thalamus}$ と τ_{dmn} の時の大小関係に着目して定性的な解釈を与える。 $\tau_{thalamus} < \tau_{dmn}$ の時は、マインドフルネス瞑想により外的な感覚刺激に注意を向けることで、視床の各構造の活動状態の変化がより早いことを示している。反対に、 $\tau_{dmn} < \tau_{thalamus}$ の時は、マインドワンダリング時において mPFC・PCC の活動状態の変化がより早いことを示している。以下にシミュレーション結果を示す。

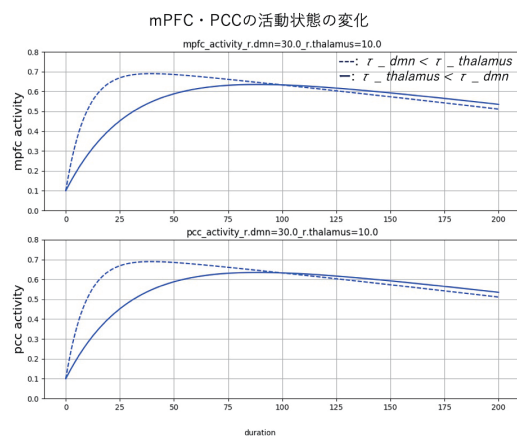


図 3: mPFC・PCC の活動状態に関するシミュレーション結果

図 3 は、mPFC・PCC の活動状態に関するシミュレーション結果 (具体値: τ_{dmn} が 10.0, τ_{dmn} が 30.0) を示している。 τ_{dmn} が当てはめられているマインドワンダリング時の賦活脳部位に関する初期値を 0.1, その他の脳部位の初期値を 0.0 としている。 $\tau_{thalamus} < \tau_{dmn}$ の時、mPFC・PCC の活動の抑制が観察された。ここから、マインドフルネス瞑想により感覚刺激に注意を向けることで、mPFC・PCC の活動が抑制されることから考察できる。

3.3.2 dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態に関するシミュレーション

脳部位の神経活動の処理資源の配分の関係 [越野 13] の観点から、出力の強さを意味しているリンクの重み w_{ji} を調節することで、dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態の変化を観察した。リンクの重みに関しては、 $w_{thalamus}$, w_{dmn} , w_{other} の三種類に分類した。割り当てている脳部位は、上述している時定数の分類と同様である。シミュレーション結果は $w_{thalamus}$ と w_{dmn} の大小関係に着目して定性的な解釈を与えた。 $w_{thalamus} > w_{dmn}$ の時は、マインドフルネス瞑想により外的な感覚刺激に注意を向けることで、感覚情報が経路する視床の各構造の神経活動に処理資源が多く配分され、視床の各構造からの出力の強さが強くなることを意味する。反対に、 $w_{dmn} > w_{thalamus}$ の時は、マインドワンダリング時における mPFC・PCC の活動状態の活性化から、mPFC・PCC の神経活動に処理資源が多く配分され、mPFC・PCC からの出力の強さが強くなることを意味する。以下にシミュレーション結果を示す。

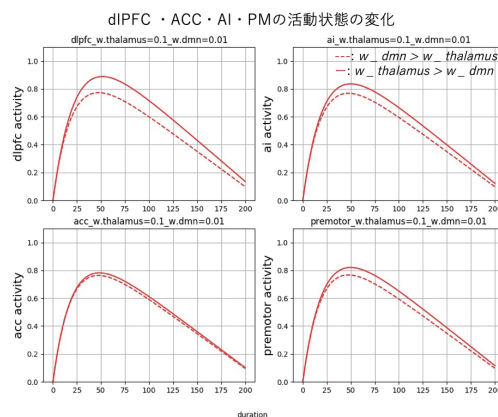


図 4: dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態に関するシミュレーション結果

図 4 は、dlPFC・ACC・AI・PM の活動状態に関するシミュレーション結果 (具体値: w_{dmn} が 0.01, w_{dmn} が 0.1) を示している。時定数の条件は $\tau_{thalamus} < \tau_{dmn}$ の条件、その他初期値の条件などは mPFC・PCC の活動状態に関するシミュレーションと同様の条件とした。 $w_{thalamus} > w_{dmn}$ の時、dlPFC・ACC・AI・PM の活動の活性化が観察された。ここから、マインドフルネス瞑想により感覚刺激に注意が向けることが、注意制御能力の向上を誘発していることを考察できる。

4. 脳機能モデルの妥当性検証

本研究は脳機能モデルに関して、妥当性検証を行なった。行なった妥当性検証は、構造破壊を伴わない臨床知見との整合性

検証と、構造破壊を伴う臨床知見との整合性検証の二種類である。構造破壊を伴わない整合性検証は、時定数を調節することで扁桃体の活動状態の変化を観察した。シミュレーションの結果、大脳皮質の脳部位の時定数より扁桃体の時定数が大きい時、扁桃体の活動状態の最大値の低下が観察され、感情の二重経路 [LeDoux 96] の説明ができる可能性を考察した。構造破壊を伴う整合性検証からは、リンクの重みを調節することで感覚野の活動状態の変化を観察した。シミュレーションの結果、青斑核がある時は感覚野の活性化が、ない時は感覚野の活動の現象が観察され、青斑核の覚醒機能 [渡辺 17] に関して説明できる可能性を考察した。

5. 総合的な考察

前節では、脳機能モデルとして実装した脳内ネットワーク構造内の情報伝播のシミュレーションにより、マインドフルネス瞑想による注意制御機能を考察した。ここで本研究における脳機能は、神経解剖学的知見に基づく脳内ネットワーク構造内の情報伝播の因果関係により説明されるため、本節では、シミュレーション結果の神経解剖学的メカニズムに関して、実装した脳内ネットワーク構造内の情報伝播の因果関係に着目し、説明する。

まず、マインドワンダリング時には mPFC・PCC の活動が賦活している。マインドフルネス瞑想により、外的な感覚刺激や体性感覚に注意を向けると、感覚情報が視床の各構造を経由して各感覚野へ伝播する。そして、視床の外側核からは dlPFC へ、視床の腹側核からは AI へと興奮性の出力が存在する。AI は ACC を活性化させ、ACC は dlPFC を活性化させる。また dlPFC は PM を活性化させる。ここで ACC と AI の活動はそれぞれ mPFC、PCC の活動を抑制する。これらの神経解剖学的メカニズムにより、dlPFC・ACC・AI・PM の活性化及び、mPFC・PCC の活動抑制が実現される。そして、dlPFC・ACC・AI・PM の活性化及び mPFC・PCC の活動抑制により、マインドフルネス瞑想による注意制御を脳機能の観点から説明することができる。

6. まとめと今後の課題

本研究は、マインドフルネス時のポジティブ再評価誘発メカニズムを、実際の脳の構造に基づいた脳機能の観点から説明することを目的とした。そして、本報告ではマインドフルネス瞑想による注意制御機能へ焦点化し、この機能が実際の脳の構造に基づいた形で脳機能の観点から説明可能であることが示唆された。今後は、注意制御から人間の評価機構へ与えるポジティブ再評価メカニズムに関して実際の脳の構造に基づいた形で脳機能の観点から説明を行う必要がある。また、脳機能モデルとシミュレーションの観点から何点か課題が挙げられる。具体的には実装する構造の選定に関する客観性や、実装する構造の増加に伴う因果解析の困難性、また、実装する脳内ネットワークのリンクの性質に関する、さらなる先行知見の調査の必要性、そしてシミュレーションにおけるパラメータの制約条件の厳密化などが挙げられる。今後はこれらの課題を踏まえた上で、脳機能モデルの構築とシミュレーションを図る必要がある。

参考文献

[Fox 16] Kieran C. R. Fox, Matthew L. Dixon, Savannah Nijeboer, Manesh Girn, James L. Floman, Michael Lifshitz, Melissa Ellamil, Peter Sedlmeier: “Func-

tional neuroanatomy of meditation: A review and meta-analysis of 78 functional neuroimaging investigations”, *Neuroscience and Behavioral Reviews*, Vol. 65, pp. 208–228, (2016)

[Garland 11] Eric Garland, Susan A. Gaylord, Barbara L. Fredricson: “Positive reappraisal Meditates the Stress-Reductive Effects of Mindfulness: An Upward Spiral Process”, *Mindfulness*, Vol. 2, No. 9, pp. 59–67 (2011)

[Greisius 07] Greisius MD, Flores BH, Menon V, et al.: “Resting-state functional connectivity in major depression: abnormally increased contributions from subgenual cingulate cortex and thalamus”, *Biological Psychiatry*, Vol. 62, pp. 429–437 (2007)

[Kabat-Zinn 94] Kabat-Zinn: “Wherever you go, There you are: Mindfulness Meditation in Everyday Life”, Hyepron (1994)

[Killingsworth 10] Killingsworth MA, Gilbert DT.: “A wandering mind is an unhappy mind”, *Science* Vol. 330, No. 932 (2010)

[Lazarus 84] Lazarus R. S., Folkman S.: “Stress, appraisal, and coping.” New York: Springer (1984)

[LeDoux 96] LeDoux J.: 「エモーショナル・ブレイン: 情動の脳科学」(松本元, 川村光毅ほか訳), 東京大学出版会 (2003): *The Emotional Brain-The Mysterious Underpinnings of Emotional Life*, Simon & Schuster Paperbacks (1996)

[McCormick 94] David A. McCormick, Thierry Bal: “Sensory gating mechanisms of the thalamus”, *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 4, pp. 550–556 (1994)

[Peterson 15] Steven E. Peterson, Olaf Sporns: “Brain Networks and Cognitive Architectures”, *Neuron*, Vol. 88, No. 1, pp. 207–219 (2015)

[Tang 15] Yi-Yuan Tang, Britta K. Holzel, Michael I. Posner: “The neuroscience of mindfulness meditation”, *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 16, No. 4, pp. 1–13 (2015)

[Teasdale 99] Teasdale, J. D.: “Emotional processing, three modes of mind and the prevention of relapse in depression”, *Behavior Research and Therapy*, Vol. 37, pp. S53–S57 (1999)

[越野 13] 越野英哉, 苧坂満里子, 苧坂直行: 「脳内ネットワークの競合と協調-デフォルトモードネットワークとワーキングメモリネットワークの相互作用-」, 心理学評論, Vol. 56, No. 3, pp. 376–391 (2013)

[佐伯 83] 佐伯胖: 「認知科学の諸問題」, 科学哲学, Vol. 16, pp. 21–34 (1983)

[渡辺 17] 渡辺雅彦: 「脳神経ペディア〜「解剖」と「機能」が見える・つながる事典」, 羊土社 (2017)