

脳情報学に基づく人間の認知・感情とその相互関係における研究†

楊 陽*

A Brain Informatics-Based Study on Human Cognition, Emotion, and Their Relationship†

Yang Yang*

This dissertation concentrates on the neural substrates underlying the human cognition, emotion, and their interactions. Directed by the systematic methodology of brain informatics (BI), functional magnetic resonance imaging (fMRI) experiments were performed to investigate the information processing of mental arithmetic, self-regulation of aversive emotion, and attention deployment of patients with major depressive disorder (MDD), which were utilized as typical paradigms to study the relationship between cognition and emotion. Four major findings could be concluded: 1) mental addition calculation is naturally automatic while subtraction calculation is complex; 2) both bottom-up suppression and top-down regulation are engaged in the self-recovery from aversive emotion; 3) cognition and emotion influence each other, since some cognitive resources and brain regions are shared by the both brain functions; 4) Abnormal functioning in the joint brain areas is more likely to lead to impairments in both cognitive and emotional functions simultaneously. Our findings demonstrate that human cognition and emotion are not isolated, but compete for cognitive resources for attention and executive control. The present thesis can also be considered as a case study for demonstrating the advances of BI methodology in accelerating progress towards a multi-level understanding of brain structure and function.

Key words: Brain Informatics, Systematic Investigation, fMRI, Mental Arithmetic, DCM, Emotion Regulation, Depression

脳情報学, 体系的な調べ, 加減暗算, 感情調整, うつ病

1 はじめに

人間の脳の非常に優れた情報処理プロセスを解明し、その機能的なモデルを応用することは、次世代の知的Webシステムの開発に繋がる。そのため、人間の脳がどのように情報を処理し、問題解決を行っているのかを系統的に分析することが重要である。

脳科学の発展に伴い、認知機能に伴う脳の活性部位の可視化が実現している。この技術から、人間の「心」の働き（認知・感情・記憶・意志など）を生み出す脳の構造と機能が解明されつつある¹。脳科学が急速に発展した背景として、非侵襲的に生体の脳機能を計測するためのさまざまな装置が登場し、実験の自由度が高まり幅広い研究者が携われるようになった。人間の情報処理プロセスの解明が、医学をはじめ、工学分野、心理学、言語学など様々な分野から期待されている。

脳情報学²は脳を複雑システムとして捉えた上で、人間の脳内情報処理メカニズムと関わる脳ビッグデータの収集・分析・管理・利用を横断的に行う新たな研究領域と考えられる。脳情報学の一つの目標は、まだ明らかになっていない人間の「思考」の基礎にある神経メカニズムの解明である³。この目標を達成するために、本研究では「多視点の立場・全過程の研究」という脳情報学の方法論に基づき、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) を利用し健常者の基本認知 (加減暗算)・感情 (調整) 機能・それらの機能の相互関係、及びうつ病患者特有の低下した認知と感情機能を研究した (図1)。

具体的には、次に4つの主な研究成果を挙げる。1) 加算は減算と比べ複雑ではなく、減算時は加算時に比べ追加の処理が必要である。2) 感情回復の時にボトムアップの抑制とトップダウンの認知調整の両方が利用され

† 原稿受理 平成28年2月26日 Received February 12, 2016

* 環境・情報工学専攻(Division of Environment and Information Sciences)

ている。3) 認知と感情はある脳の部位と認知資源を共有する。4) 機能障害の原因となる島皮質が刺激顕著性の検出に影響を与え、正の感情を低下させ、患者の快感の消失を招くという結果を導いた。更に、うつ病の病理解明及び診断と治療評価への新しい根拠を検討している。最後に、認知と感情の機能は独立した存在ではなく、提携する関係である結論を提出した。

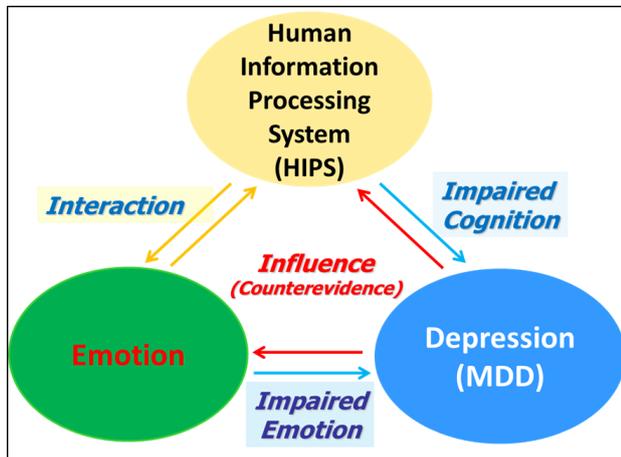


Fig. 1 Main contents of this thesis

2 論文構成

この論文は、全7章から構成されており、その概要は以下の通りである。第1章では、序論として研究の背景と研究の方向性と枠組みについて示した。第2章では、脳情報学の体系的な方法論を明示した。第3章では、人間の認知と感情機能、脳を対象とするfMRI技術の活用、世界範囲の重大な脳プロジェクトの現状の3つの側面から整理している。第4章では、加減暗算の間の神経メカニズムと情報処理の差について述べている。第5章では、嫌悪を感じた後の状態から冷静になるまでの脳の回復過程に注目し、脳の異なるストラテジーで自動的に感情の反応を調整することを検討している。第6章では、認知と感情が相互に与える影響と低下した認知機能と感情を持つうつ病患者の感情反応と注意支配を検討している。第7章は総括であり、申請論文の研究成果をまとめ、今後の人間認知に対する脳情報学の活用と体系的調査の展開について述べている。

3 論文内容

3・1 暗算時における加減算の認知処理に関する研究

人間は四則演算を行う時に、それぞれに対して用いるストラテジーが異なる⁴。数字の量を比較して操作をする減算と、記憶に保存された答えを直接取り出す乗算の違いは既に解明されている。しかし、加算と減算の間に本質的な違いが存在するか否かについては、未だ明らかにされていない。そこで、この問題に対してfMRI実験を実施し解明を試みた。一般線形モデルと機能的連結分析でデータを処理した後の結果、被験者群が減算を行う際に、左脳半球の下前頭回の賦活が加算した時よりも強

く見られた⁵。また、この部位は減算時に音韻処理を担当する脳ネットワークとの関連強度を高めることを発見した(図2)。更に、動的因果モデリング(DCM)⁶分析で減算が音韻や運動など複数の認知モジュールの統合を要することを示した。一方で、加算は減算と比べ複雑ではないことが確認できた。減算時は加算時に比べ追加の処理が必要であるため、計算時に更に時間を要し、正答率が低下する。

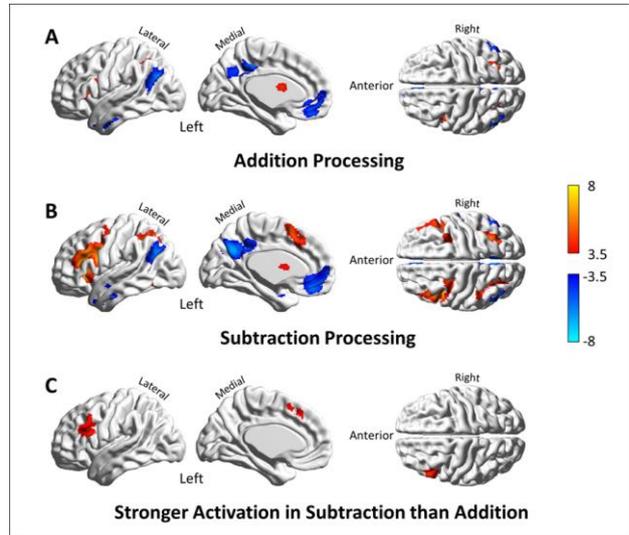


Fig. 2 Operation-specific brain regions

3・2 嫌悪状態からの感情回復に関する研究

被験者が嫌悪を感じた後の状態から冷静になるまでの脳の回復過程に注目した。fMRI実験を利用して、被験者群が嫌悪を感じる画像を見た後と、特に感情に変化を与えない画像を見た後の各反応を比較した結果、脳は異なるストラテジーで自動的に感情の反応を調整することを発見した。感情回復の初期に、脳は左側の尾状核を中心とするネットワークを配置して、受動的な感情抑制を行う。感情回復の後期になると、抑制ネットワークの賦活が次第に弱くなり、反対に背部の注意ネットワークの賦活が次第に強くなる。この遷移の間に被験者が能動的に注意のリソースを配分し、自身の注意を恐怖の体験から遠ざけることが明らかとなった⁷。これらの結果から、無意識下において人間の脳は異なるストラテジーを利用して感情状態を調整でき、感情回復の時にボトムアップの抑制とトップダウンの認知調整の両方が利用されていることが示唆された。また、この結果をDCM分析により検証した(図3)⁸。

3・3 暗算時における加減算の認知処理に関する研究

認知と感情が相互に与える影響を研究するために、注意を逸らすタスクを用意し、被験者の感情に変化が生じた直後に加減暗算を課したときの脳の認知処理過程を調査した。これにより、ネガティブな感情刺激が計算処理に強い妨害を与えることを解明した。ネガティブな画像を見た後の暗算は計算時間が明らかに長く正答率も低下したが、この現象はポジティブな感情刺激では見られな

かった。この現象に対し、fMRI の画像分析を用いて検証を行った。ネガティブな状態で計算した場合、認知活動と関連のある前頭-頭頂ネットワークの賦活がさらに強まり、認知と感情の間に交互作用効果が存在することが示唆された。これは、人間の脳にとってネガティブな感情刺激を受けた後に注意の焦点を計算へ移すことがより難しく、計算タスクを完成するために前頭-頭頂ネットワークが大きな労力を要し、賦活が強まった事が原因と考えられる。長い計算時間と低い正答率が焦点遷移の難しさを示している。

認知と感情の相互作用を多面的に解明するため、低下した認知機能と感情に関する研究も必要である。そこで、うつ病患者に感情に変化を与える画像タスクと暗算の注意を逸らすタスクを用意し、実験の結果を健常者と比較した。「思考が緩慢である」といううつ病患者の症例通り、患者群は健常者より正答率が低い結果となった⁹。この症例の神経メカニズムを解明するために、多様なデータを利用し体系的な調査を行った。初めに、脳の形態データと静止状態の機能データを統合的に分析し、辺縁領域-皮質回路と前頭-頭頂ネットワークの構造と機能における両方の変化がうつ病の感情調整の機能障害を引き起こすという結果を導いた¹⁰。次に、タスク状態と静止状態の機能データを統合的に分析し、機能障害の原因となる島皮質が刺激顕著性の検出に影響を与え、正の感情を低下させ、患者の快感の消失を招くという結果を導いた(図4)。最後に、拡散テンソル画像法で患者の白質の構造を観察し、前頭葉と辺縁系を繋ぐ鉤状束の異方性から異常を検出した。つまり、前帯状皮質と島皮質の異常な構造と機能が正の感情と負の感情の不適切なコントロールに繋がり、うつ病の「思考が緩慢である」という症例を招くことを発見した。

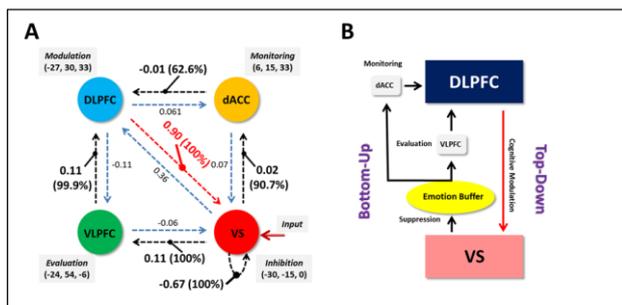


Fig. 3 Dynamic models for self-regulating aversive emotions

4 結論

複雑な脳科学の問題に対して、単一の実験と分析方法から研究することは困難である。そこで、脳情報学の体系的な方法論に基づき、多面的にこの問題に着手し、人間の認知・感情とその間の関係を調査した。この研究で、認知と感情の機能は独立した存在ではなく、提携する関係であることが判明した。認知と感情を繋ぐ脳の部位が損傷した場合、いずれかの機能を損ねる可能性がある。

本研究はうつ病の病理解明のための新しい根拠を示し、診断と治療評価への貢献が期待できる。更に、将来の研究に向けた脳情報学の活用と体系的調査の基盤を構築した。

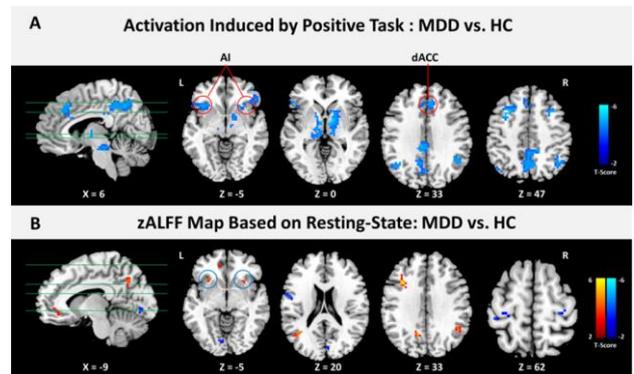


Fig. 4 Regions showing group differences in brain activation and zALFF

参考文献

- 1) N. Zhong et al., Brain Informatics-Based Big Data and the Wisdom Web of Things. IEEE Intelligent Systems (2015), 30(5): 2-7.
- 2) N. Zhong et al., Brain Informatics. IEEE Intelligent Systems (2011), 26(5): 16-21.
- 3) N. Zhong et al., Constructing a New-style Conceptual Model of Brain Data for Systematic Brain Informatics. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering (2012), 24(12): 2127-2142.
- 4) S. Dehaene et al., Three Parietal Circuits for Number Processing. Cognitive Neuropsychology (2003), 20: 487-506.
- 5) Y. Yang et al., Common and Dissociable Neural Substrates for 2-Digit Simple Addition and Subtraction. Springer LNAI 8211 (2013): 92-102.
- 6) K. Friston et al., Dynamic Causal Modelling. Neuroimage (2003), 19: 1273-1302.
- 7) Y. Yang et al., Shift of Brain-State during Recovery from Discomfort Induced by Aversive Pictures. Springer LNAI 8609, (2014): 45-56.
- 8) N. Zhong, Y. Yang et al., Self-Regulation of Aversive Emotion: A Dynamic Causal Model. Advances in Computational Psychophysiology. Science Supplement, 2 October 2015: 25-27.
- 9) T. Johnstone et al., Failure to Regulate: Counterproductive Recruitment of Top-Down Prefrontal-Subcortical Circuitry in Major Depression. Journal of Neuroscience (2007), 27: 8877-8884.
- 10) Y. Yang et al., Morphologic and Functional Connectivity Alterations in Patients with Major Depressive Disorder. Springer LNAI 9250, (2015): 33-42.

