

研究終了報告書

「統合情報理論の劣モジュラ性に基づく拡張とその神経科学への応用」

研究期間：2020年12月～2023年3月

研究者：北園 淳

加速フェーズ期間：2023年4月～2024年3月

1. 研究のねらい

我々の脳は、その内部で領域同士が複雑なネットワークを形成し、信号をやり取りすることで、多様な機能を実現している。意識という、私たちが主観的に体験する現象も、この脳領域同士が成す複雑なネットワークによって成り立っていると考えられている。しかしながら、意識が具体的に脳のネットワーク内のどの部分でどのように生じるのかは、現在でも明らかになっていない。

意識が生まれるメカニズムに関して、多くの仮説が提唱されている。その中で、有力視されているものの一つが、統合情報理論である。統合情報理論は、意識の生成には、脳内のネットワークで信号がやり取りされ情報が統合されることが本質的な役割を果たすと主張している。そして、この情報の統合が脳内のネットワークの中でも特に強い「情報のコア（コンプレックスと呼ばれる）」において意識が生じるとしている。

統合情報理論は、統合の度合いを定量化するために、シャノンの情報理論に基づく指標を用いる。提案者はこれまでの研究で、統合情報理論における概念が、劣モジュラ性と呼ばれる数理的な性質を元に、シャノンの情報理論だけでなく、より広いクラスに一般化可能であり、共通の数理構造を用いながらも、多様な観点でコアを新たに定式化できることを示した。

そこで本研究では、この一般化に基づき、新たなコアの定式化を行い、その数理的基礎を構築する。またそれらを用いて、神経ネットワークデータを解析し、意識を含む、個々の神経細胞の性質だけでは予測困難な、脳の複雑な情報処理原理の解明に挑む。

加速フェーズでは、開発した枠組みを広い分野へと展開することを主目的とする。ACT-X の本期間中、解析対象は主として神経科学のデータであった。しかしながら、本期間中に開発した手法は、神経科学のデータに限らない任意のネットワークデータに適用可能である。そこで加速フェーズでは、(1)扱いやすい形のツールを公開し、多くの方に使っていただくことで、他研究分野への展開を計る。また、(2)自身でも他分野への適用を行う。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究では、統合情報理論におけるコアの概念を一般化し、多様な観点でシステムのコアを新たに定式化した。また、その新たなコアの定式化を用いて、主に神経のネットワークデータの解析に取り組んだ。本報告書では、その中でも特に、「双方向の結合が強いネットワークコア」に関する結果について報告する。

この「双方向の結合が強いネットワークコア」に関する研究では、マウスの脳内の神経ネットワークを解析した。その結果、ネットワーク内で双方向の接続が特に強い部分が、意識に重要とされる領域で構成されることを示した。このことから、ネットワークの双方向性と意識が関係している



可能性が示唆される。

加速フェーズでは、開発した枠組みを広い分野へと展開することを目的とし、主として以下の二つの課題に取り組んだ。

- 多くの方に使っていただき、他研究分野に展開されることを目的とし、扱いやすい形のツールを作成に取り組んだ。とくに、大規模なシステムでも、短時間で解析可能とするため、コードの最適化と GPU による並列計算 (GPGPU) の適用により、さらなる高速化を行った。
- 自身でも他分野への適用を行った。特に群のなすネットワークを対象とした。

(2) 詳細

脳内では、脳の領域同士が、複雑なネットワークを構成し信号をやり取りすることで、さまざまな機能を実現している。私たちの主観的な体験である意識も、この脳領域同士が成す複雑なネットワークが担っていると考えられている。しかし、実際に脳のネットワーク内のどの部分が意識を担うのかは、明らかになっていない。

これまでの研究で、意識的な知覚が生じるには、脳の中で順行性と逆行性の両方の信号伝搬、すなわち双方向の信号伝搬が存在することが重要であることが示されている。このことから、脳内で意識を担う部分ネットワークでは、脳領域同士が双方向に接続していると考えられる。この考えに基づくと、脳内のどの部分ネットワークで脳領域同士が双方向につながっているのか、またその双方向の接続の強さはどのくらいなのかを評価することが意識を担う脳領域を特定するのに重要なステップになる。しかし、脳のネットワークは多数の領域から成り、複雑な構造を持つため、そのような部分ネットワークの特定は困難だった。

そこで本研究(主な研究成果リスト(1)-1)では、統合方法理論のコア概念を劣モジュラ性に基づき一般化することで、脳内ネットワークから、双方向の接続が特に強いコアを特定できるアルゴリズムを開発した(図1)。次に、開発したアルゴリズムをマウスの脳構造のネットワーク(コネクトームと呼ばれる)に適用した。このコネクトームは、脳全体の約400領域間の接続を表すデータである。

その結果、特に強い双方向の接続を持つコアは、これまでの研究で、意識を担う重要な部分であると示唆されてきた領域(大脳皮質と視床、前障と呼ばれる領域など)で構成され、一方で、意識に直接的に寄与しないとされてきた領域(小脳など)を含まないことが分かった。この結果は、脳内ネットワークの双方向性と意識が関係している可能性を示唆している。

今後の研究によって、脳内ネットワークの双方向性と意識の関係がより深く理解できれば、将来的に、意識障害などの理解や治療に役立つことが期待される。

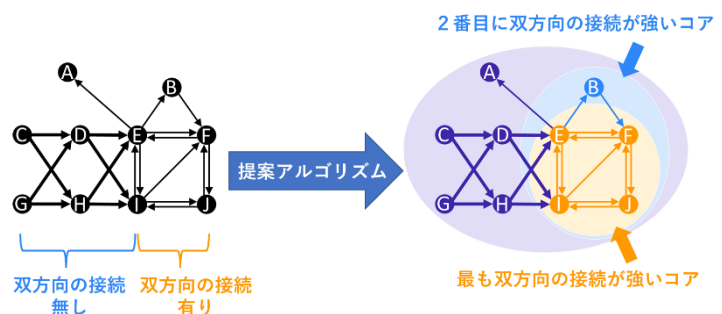


図1: 提案アルゴリズムによるネットワークの「コア」抽出の模式図。提案アルゴリズムによって、双方向の接続が最も強いコア、2番目に強いコア、3番目…、という形で、ネットワーク全体を階層的に分解することができる。

(加速フェーズ)多分野の多くの方にツールを使っていただくことを目的として、開発したアルゴリズムの動作の高速化(コードの最適化と GPU による並列計算)を行った。

上述の双方向の結合が強いネットワークコアの抽出については、既にかなり高速に行えており、数千程度の要素からなるネットワークでも、通常の計算機で現実的な時間内で実行可能である。一方で、他のタイプのコアについては、数十～百程度が限界であり、さらなる高速化が必要であった。そこで、コードの最適化と GPU による並列化を行った。結果、大幅な計算時間の短縮に成功した。例えば、要素数 200 の場合、20 日程度かかっていた計算が 4 時間程に短縮された。

3. 今後の展開

ACT-X の期間中、解析対象は主として神経科学のデータであった。しかしながら、開発した手法は、神経科学のデータに限らない、任意のネットワークデータに適用可能である。そこで今度、他研究分野への展開を計る。

その一歩として、まず、自らが他分野のデータへの適用を行い、また、使いやすい形でのツールを提供する予定である。この自身による他分野への適用とツールの提供については、ACT-X の本期間終了後 1 年程度を目安に実行予定である。その後数年～10 年程度のスパンで、さらに多くの分野に展開していくことが期待される。

(加速フェーズ実施後追記)

加速フェーズでは、他分野への展開を目標に、扱いやすいツールの開発と、他分野のデータの解析に取り組んだ。その結果、コードの高速化に成功した。これにより、多くの方にツールを気軽に使用していただくことを期待している。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

おおむね順調に当初の目的を達成できていると考えている。また、当初想定していなかったテーマにも発展している。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

本務や学生の指導も行うなかではあったが、順調に進められたと考えている。また、研究費執行については、コロナ禍で、出張予算の見込みが立てづらい部分もあったが、無駄なく対応できたと考えている。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究で開発したアルゴリズムのコードは、GitHub 上で公開(および公開予定)している。積極的に宣伝・普及することで、本研究で扱った以外の多種多様なネットワークへの適用が期待される。

領域会議を通して、多くの異分野の研究者と交流し研究成果を伝えることができた。また、複数の研究者に研究成果について興味を持っていただき、今後の解析対象の提案などもいただけた。

(加速フェーズ実施後追記)



本研究期間から継続しているテーマについても、想定以上の発展をしている。研究機関終了後も本研究期間・加速フェーズで取り組んだ内容の双方について、引き続き発展させていきたいと考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 1件

1. Jun Kitazono, Yuma Aoki, Masafumi Oizumi, “Bidirectionally connected cores in a mouse connectome: Towards extracting the brain subnetworks essential for consciousness”, Cerebral Cortex, 2022, bhac143, doi:10.1093/cercor/bhac143.

私たちの主観的な体験である「意識」が、脳内の神経ネットワークのどの部分で生じるのかは明らかになっていない。本研究では、マウスの脳のネットワークを解析し、ネットワーク内の双方向の接続が特に強い部分が、意識に重要とされる領域で構成されることを示した。このことから、ネットワークの双方向性と意識が関係している可能性が示唆された。

(2) 特許出願

該当なし。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

● 招待講演

“Bidirectionally connected cores in a mouse connectome: Towards extracting the brain subnetworks essential for consciousness”, Sydney University Systems Neuroscience and Complexity Seminars, Oct. 2021.

● 他の学会発表

1. Jun Kitazono, Yuma Aoki, Masafumi Oizumi, “Bidirectionally connected cores in a mouse connectome”, Cosyne 2021 (Online).
2. Tomoya Taguchi, Jun Kitazono, Shuntaro Sasai, Masafumi Oizumi, “Network cores of the human functional connectome”, 第31回日本神経回路学会全国大会(若手研究発表賞)

● コード

1. BidirectionallyConnectedCores
<https://github.com/JunKitazono/BidirectionallyConnectedCores>

● プレスリリース

1. 「脳内で双方向の接続を持つネットワークのコアを同定 ～意識を担う脳領域の解明に向けて～」 <https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220721-2/index.html>
2. ‘Pinpointing consciousness in animal brain using mouse “brain map”’ <https://www.u->



[tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00238.html](https://www.tokyo.ac.jp/focus/en/press/z0508_00238.html)

3. 'Identifying network cores of the brain with strong bidirectional connections'
https://www.jst.go.jp/pr/announce/20220721-2/index_e.html

- 依頼原稿

北園 淳, 「システムのコア抽出のための新しい枠組み –統合情報理論の劣モジュラ性に基づく拡張–」, 日本ロボット学会誌, 第 41 巻, 第 8 号, pp. 688–691, 2023 年 10 月.