



令和 4 年 7 月 2 1 日

科学技術振興機構（JST）  
Tel：03-5214-8404（広報課）

東 京 大 学  
Tel：03-5454-6306  
（教養学部等総務課）

## 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～

### ポイント

- 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。
- 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解明されれば、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。

JST 戦略的創造研究推進事業において、東京大学 大学院総合文化研究科の北園 淳 特任研究員、大泉 匡史 准教授、同大学 大学院情報理工学系研究科の青木 勇磨 大学院生は、マウスの脳内の神経ネットワークを解析し、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ました。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ます。

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ます。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ます。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、明らかになっていません。

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ます。このことから、脳内で意識を担う部分ネットワーク<sup>注1)</sup>では、脳領域同士が双方向に接続していると考えられます。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ります。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でした。

そこで本研究では、脳内ネットワークから、双方向の接続が特に強い部分ネットワーク、いわばネットワークのコア<sup>注2)</sup>を高速に特定できるアルゴリズムを開発しました。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<sup>注3)</sup>と呼ばれる）に適用しました。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す。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りました。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ます。

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されれば、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ます。

本研究成果は、協定世界時(UTC)2022年7月21日に科学誌「Cerebral Cortex」のオンライン版で公開されます。

本成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

**戦略的創造研究推進事業 CREST**

研究領域：「計測技術と高度情報処理の融合によるインテリジェント計測・解析手法の開発と応用」

(研究総括：雨宮 慶幸 高輝度光科学研究センター 理事長)

研究課題名：「情報網に潜む因果構造解析と高次元脳計測による意識メータの創出」  
(JPMJCR1864)

研究代表者：小村 豊(京都大学 大学院人間・環境学研究科 教授)

研究期間：平成30年10月～令和6年3月

JSTでは本領域で、計測・解析技術の深化による新たな科学の開拓や社会的課題の解決のために、多様な計測・解析技術に最先端の情報科学・統計数理の研究を高度に融合させることによって、これまでは捉えられなかった物理量・物質状態やその変化あるいは潜在要因などの検出、これまでは困難であった測定対象が実際に動作・機能している条件下でのリアルタイム計測などを実現するインテリジェント計測・解析手法の開発とその応用を目指します。

**戦略的創造研究推進事業 ACT-X**

研究領域：「AI活用で挑む学問の革新と創成」

(研究総括：國吉 康夫 東京大学 大学院情報理工学系研究科 教授)

研究課題名：「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」  
(JPMJAX20A6)

研究代表者：北園 淳(東京大学 大学院総合文化研究科 特任研究員)

研究期間：令和2年12月～令和5年3月

JSTでは本領域で、理工系や人文社会系を含むあらゆる学問分野に最先端のAIなどの情報科学技術を取り込むことで格段に強化・発展させることや、AIなどの情報科学技術との融合による学問分野の革新や新たな学問領域の創成、新しい価値の創造を目指します。

**戦略的創造研究推進事業 CREST**

研究領域：「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」

(研究総括：萩田 紀博 大阪芸術大学 アートサイエンス学科 学科長・教授)

研究課題名：「神経科学の公理的計算論と工学の構成論の融合による人工意識の構築とその実生活空間への実装」(JPMJCR15E2)

研究代表者：金井 良太(株式会社アラヤ 代表取締役)

研究期間：平成27年10月～令和3年3月

JSTでは本領域で、人間と機械の協働により新たな知を創出し、人・集団の知的活動の質向上を実現する知的情報処理システムを目指した研究開発を推進します。本CREST研究課題はAIPチャレンジプログラムを含みます。

## <研究の背景と経緯>

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・現象を実現しています。私たちの主観的な体験である意識も、この脳の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ます。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、明らかになっていません。

これまでの研究で、脳のネットワーク内で意識を担う場所を議論する際に鍵となるのは、脳領域間の信号伝搬の双方向性であることが示唆されています。例えば、ものを見た時の脳活動を調べた研究では、順行性の伝搬のみの場合には意識的な知覚が生じず、順行性の伝搬だけでなく逆行性の伝搬もある場合、つまり信号が双方向にやり取りされる際には、意識的な知覚が生じることが示されています (Lamme, 2018, *Phil. Trans. R. Soc. B.*; 図1)。また、この信号伝搬の双方向性は、ものが主観的に見えるかといった特定の意識的な知覚が生じるのに重要なだけでなく、起きてるか寝ているかといった意識レベルにも深く関与することが示唆されています。

これらのことから、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のではないかと考えられます (Tononi et al, 2016, *Nat. Rev. Neurosci.*)。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ります。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でした。

## <研究の内容>

そこで本研究ではまず、ネットワークから、双方向の接続が特に強い部分ネットワーク、いわばネットワークのコアを特定できるアルゴリズムを開発しました。提案したアルゴリズムは、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可能です。

例として、図2左のようなネットワークを考えます。このネットワークは、双方向の接続が全くない部分 (ノード<sup>注4)</sup> A、C、D、G、Hから成る部分) と、双方向の接続が多い部分 (ノードB、E、F、I、Jから成る部分) から構成されています。また、双方向の接続が多い部分の中でも、ノード集合E、F、I、Jは、互いに強く双方向に接続されていますが、ノードBは、ノードEとFとの間だけ接続を持ち、相対的には双方向の接続は弱くなっています。

このネットワークに提案アルゴリズムを適用すると、図2右のように、ネットワーク全体は3つの階層に分解されます。オレンジで示された部分が、双方向の接続が最も強い階層に相当するコアです。また、このオレンジの部分を含む、明るい青で示された部分が、2番目に双方向の接続が強いコアです。そして紫で示された部分、すなわち、ネットワーク全体が、3番目の階層です。このように、提案アルゴリズムによって、双方向の接続の強さに応じて、ネットワークを階層的に分解することができます。

ここで挙げた例は8個のノードのみから成る小さなネットワークですが、提案アルゴリズムは、脳などの、より大規模なネットワークからでも高速にコアを特定することができます。コアを通常の方法で総当りの探索をした場合には、計算時間が膨大となるため、数

十個程度のノードから成るネットワークの解析が限界となります。一方で、提案したアルゴリズムを用いれば、数千程度のノードから成るネットワークからでも、スーパーコンピュータなどではない通常の計算機を用いても、現実的な計算時間でコアを特定できます。これは、提案アルゴリズムが、単調性と劣モジュラ性<sup>注5)</sup>と呼ばれる2つの数理的な性質に基づき、効率的にコアを探索できるためです。

次に、提案アルゴリズムを、マウスの全脳のネットワーク（コネクトームと呼ばれる）に適用しました。このコネクトームは、脳全体の領域間の接続の強さを表すネットワークで、約400の領域から成ります。解析の結果、階層の上位に相当する、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に重要であると示唆されてきた領域（大脳皮質内と視床内の領域、前障と呼ばれる領域など）で構成されていました。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）は上位のコアに含まれず、双方向の接続が弱いことが分かりました。

強い双方向の接続を持つコアに含まれていた領域のうち、大脳皮質は、意識にとって不可欠であることが多くの研究で示唆されています。視床についても同様に意識との関連が示唆されており、特に、視床-皮質ループと呼ばれる視床と大脳皮質領域間の相互作用が意識にとって重要とされています。また前障は、ノーベル賞受賞者のフランシス・クリックが「前障は意識の神経基盤であり、脳というオーケストラを束ねる指揮者の役割を担う」という仮説を提唱するなど、意識に深く関わりと予想されてきた領域です。実際に近年の研究では、前障が覚醒と睡眠といった意識レベルの制御に関わることが示されています。一方で、上位のコアに含まれなかった小脳は、小脳欠損の患者でも意識が通常に保たれることなどから、意識に直接は寄与しないことが示唆されています。

また、接続の双方向性を考慮することが重要かどうかを評価するために、score分解やハブなど、双方向性を考慮せず接続の強い部分を抽出する、従来から広く用いられているネットワークコアの抽出アルゴリズムも適用しました。その結果、強い接続から成るコアは、必ずしも、意識に重要とされる大脳皮質・視床・前障といった脳領域で構成されているわけではなく、意識に直接寄与しないとされてきたさまざまな脳領域も多く含むことが分かりました。

以上の結果をまとめると、

- ネットワーク内の特に双方向の接続が強い部分（ネットワークコア）が意識に重要とされる領域で構成される。
- 従来の双方向性を考慮しないアルゴリズムを用いた場合、ネットワークコアは必ずしも意識に重要とされる領域で構成されるわけではない。

ということになります。これらのことから、脳内ネットワークの双方向の接続が特に強い部分と意識が関係している可能性が示唆されます。

## <今後の展開>

今回の研究では、ネットワークから双方向の接続が強い部分ネットワーク（コア）を高速に抽出するアルゴリズムを開発しました。また、開発したアルゴリズムをマウスの全脳のネットワークに適用し、コアが、これまでの研究で意識に関して重要とされてきた領域から成り、逆に意識に直接寄与しないとされる領域を含まないことを確認しました。一方

で、コアには、現在までの研究で意識との関係がまだあまり分かっていない領域も含まれていました。今後、そのような領域も含めて、双方向の接続が強いネットワークコアと意識の関係がより深く解明されることが期待されます。

また、今回の研究では、マウスのコネクトームを解析しましたが、コネクトームは解剖学的な接続を表すネットワークです。しかし、ある瞬間の意識体験に直接的に寄与するのは、解剖学的な接続そのものではなく、脳活動の結果生じる脳領域間の双方向の信号伝搬であると考えられています。ある領域間に解剖学的な接続が存在することは、必ずしも常に信号伝搬が存在することを意味せず、信号伝搬の強弱は時々刻々と変化します。この変化に応じて意識を担う部分ネットワークも変化しうると考えられます。したがって、このような意識の動的な変化を捉えるために、今後の研究では、脳活動データを元に信号伝搬を定量化し、コアを抽出することに取り組む予定です。

今後の研究によって、双方向の接続が強いネットワークコアと意識の関係がより深く理解されれば、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ます。

<参考図>

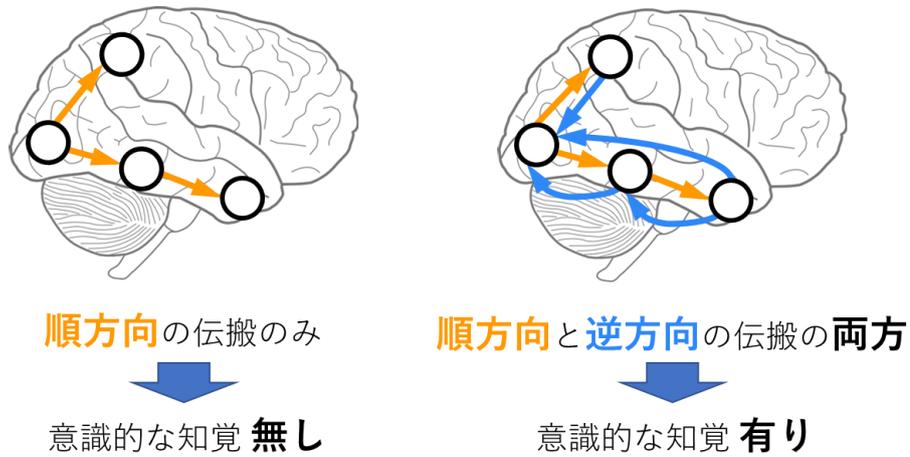


図1：意識にとって信号伝搬の双方向性が重要とされる。信号伝搬が順方向のみの時には意識的な知覚が生じない。一方で順方向と逆方向の両方の信号伝搬があるとき、つまり、信号伝搬が双方向の時、意識的な知覚が生じる。

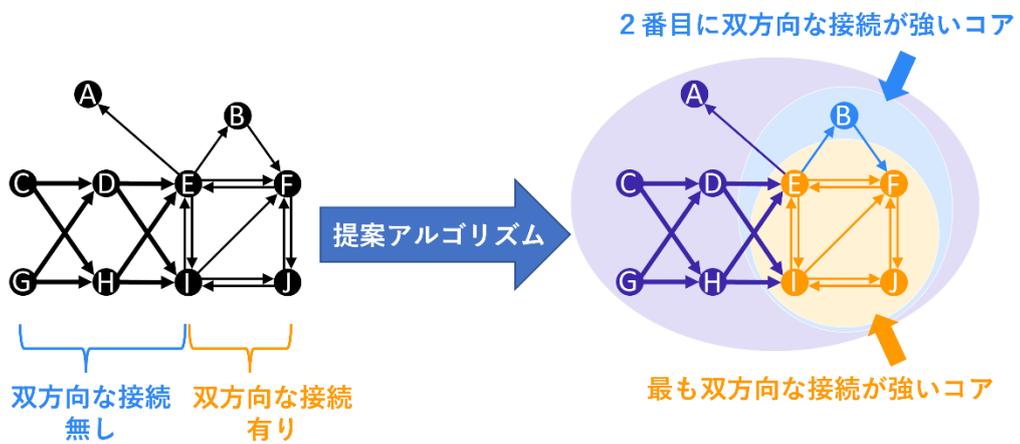


図2：提案アルゴリズムによるネットワークの「コア」抽出の模式図。提案アルゴリズムによって、双方向の接続が最も強いコア、2番目に強いコア、3番目…、という形で、ネットワーク全体を階層的に分解することができる。

## <用語解説>

### 注1) 部分ネットワーク

ネットワークのうちの一部のことを部分ネットワークと呼ぶ。

### 注2) コア

ネットワークの中でも、ノード同士が特に強く接続されている部分ネットワークのこと。これまでの研究で、接続の強さをどのように定義するかに応じて、コアの定義はさまざまなものが提案されている。本研究では、接続の双方向性を考慮したコアを新たに定義し、さらにそのコアを高速に特定可能なアルゴリズムを開発した。

### 注3) コネクトーム

脳内の神経ネットワーク構造のこと。つまり、脳内のどの領域同士がつながっているかを表すネットワーク構造のことを指す。

### 注4) ノード

ネットワークの構成要素のこと。図2を例にとれば、A、B、Cなど丸で囲まれたものがそれぞれ1つのノードである。

### 注5) 劣モジュラ性

劣モジュラ性は、集合関数の性質を表し、通常の実数値関数における凸性（関数が例えば  $y=-x^2$  のように上に出っ張った形を持つこと）に類似した概念である。離散最適化において重要な概念であり、機械学習などの分野で広く応用されている。

## <論文タイトル>

“Bidirectionally connected cores in a mouse connectome: Towards extracting the brain subnetworks essential for consciousness”

DOI : 10.1093/cercor/bhac143

## <お問い合わせ先>

### <研究に関すること>

北園 淳 (キタゾノ ジュン)

東京大学 大学院総合文化研究科 特任研究員

〒153-8902 東京都目黒区駒場3丁目8-1

Tel : 03-5454-6794

E-mail : c-kitazono[at]g.ecc.u-tokyo.ac.jp

大泉 匡史 (オオイズミ マサフミ)

東京大学 大学院総合文化研究科 准教授

〒153-8902 東京都目黒区駒場3丁目8-1

Tel : 03-5454-6796

E-mail : c-oizumi[at]g.ecc.u-tokyo.ac.jp

### <JST事業に関すること>

嶋林 ゆう子 (シマバヤシ ユウコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 グリーンイノベーショングループ  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
Tel : 03-3512-3531 Fax : 03-3222-2066  
E-mail : crest[at]jst.go.jp

宇佐見 健 (ウサミ タケシ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 先進融合研究グループ  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
Tel : 03-6380-9130 Fax : 03-3222-2066  
E-mail : act-x[at]jst.go.jp

前田 さち子 (マエダ サチコ)

科学技術振興機構 戦略研究推進部 ICTグループ  
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町  
Tel : 03-3512-3526 Fax : 03-3222-2066  
E-mail : crest[at]jst.go.jp

<報道担当>

科学技術振興機構 広報課

〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3  
Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432  
E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

東京大学 教養学部等総務課 広報・情報企画チーム

〒153-8902 東京都目黒区駒場3丁目8-1  
Tel : 03-5454-6306  
E-mail : koho-jyoho.c[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp