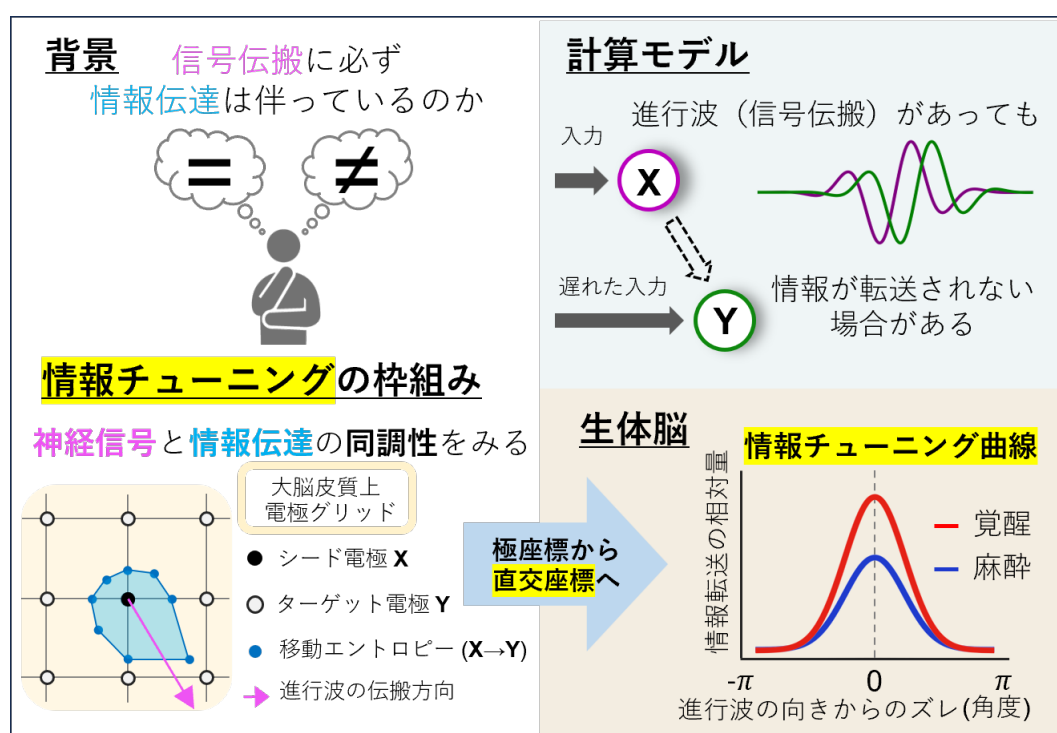


脳は、進行波を介して情報針路をガイドする

—意識がある時、脳内通信は安定し信頼できる—

概要

ニューラルネットワークの発展と共に、神経情報（neural information）という言葉が、便利に使われるようになりましたが、その意味は、むしろ曖昧化しています。そもそも脳科学において定義される「神経信号」に、情報理論で定義される「情報」は、運ばれているのでしょうか。京都大学大学院人間・環境学研究科 三澤魁 旺 研究員、小村豊 教授らの研究グループは、神経信号と情報の流れが、どの程度、結びついているかを評価できる、情報チューニングという枠組みを考案しました。まずシミュレーションでは、計算素子間を波の様に伝搬する進行波が存在するだけでは、情報伝達は保証されない事が分かりました。しかし生体脳では、大脳皮質上を伝搬する進行波の方向に沿って、情報が選択的に流れている（情報チューニングが起きている）事が確認されました。さらに覚醒時の脳は、麻酔状態に比べて、情報チューニングが鋭くなっていました。麻酔をかけると、意識が無くなりますが、その機構は謎です。本研究は、神経科学と情報科学を架橋するアプローチから、意識・無意識を弁別できる可能性を示しています。本成果は、2026年7月10日、Cell Press が刊行する分野横断型・国際誌「iScience」にオンライン掲載されました。



電気信号が波の様に伝搬する「進行波」と、情報理論で定義される「情報の流れ」の同調性を評価。計算モデル vs 脳および、覚醒 vs 麻酔状態の情報通信の違いが明らかになった。（イラスト：京大・小村研究室）

1. 背景

神経情報 (neural information) という言葉は、脳科学だけでなく情報科学の分野でも、よく使われますが、その意味するところは曖昧です。例えば脳は、特定の神経信号を生む一方、情報を処理する装置と言われます。神経信号は、電気活動として確かに定義されますが、「情報」とは、何を指すのでしょうか。これまで多くの神経科学者は、ヒトや動物に、様々な課題を行ってもらい、その課題に関わっている変数を使って、情報を間接的に示唆してきました。一方、情報科学で示す「情報」は、シャノンエントロピー (用語 1) をはじめ、不確からしさを減らす程度として、数理的に定義されます。私たちは、脳科学において定義される神経信号に、情報理論において直接的に定義される「情報」は、本当に載っているのだろうかという疑問を持ちました。

そこで本研究では、神経信号として、進行波という脳の中を電気活動が波のように伝搬する現象を抽出し、情報理論側の尺度として、移動エントロピーという向きをもった情報を示す指標を選択し、両者がどのくらい結びついているのかという視点から、この問題に取り組みました。手始めに、シミュレーションを行いました。具体的には、計算機の中で、二つのノード (X、Y) を用意し、進行波を発生させます。その時の X から Y への方角の移動エントロピーを計算したところ、必ずしも進行波に、移動エントロピーが伴っているわけではない事が分かりました (図右上)。では、生きている脳の進行波では、どうなっているのでしょうか。それを解析する中で、意識・無意識の差を生むメカニズムの一端がみえてきました。

2. 研究手法・成果

実験は、ラットを用いて、イソフルランというガス麻酔をかけた条件と、麻酔がかかっていない覚醒条件で、ECoG (用語 2) という神経データを取得しました。ECoG データは、多点高密度グリッド状電極を、大脳皮質の広範囲に留置することで、記録しました。この状況で、ラットの目に、光刺激を入力すると、覚醒・麻酔条件ともに、後頭葉の電極から電位変化し、その信号が周囲に連続的に伝搬していく様子が認められました。この進行波の時空間パターンをクラスタリングすると、麻酔条件の進行波は、後頭葉内に留まり、短時間で終了する一方、覚醒条件では、後頭葉だけでなく側頭葉・頭頂葉・前頭葉へと、進行波が、時間をかけて広範囲に伝搬することがわかりました。さらに、ある時刻の進行波の向きを、複数試行間で追っていくと、覚醒条件の方が、麻酔条件よりもばらつきが少なく、すなわち安定していました。

さてこの進行波に、情報理論で定義される情報 (移動エントロピー) が運ばれているか否かですが、この程度を定量するために、我々は、情報チューニングという枠組みを用意しました (図左下)。上述のように電極は、グリッド状で構成されています。ある 1 点のシード電極 (X) の周りには、8 点のターゲット電極 (Y1-Y8) があるので、X から Y へ 8 方向の移動エントロピーを算出でき、その値を極座標プロットします。一方、進行波は、ある時刻の X の電位の位相変化に基づいたベクトルとして定義されます。このベクトルの向きを基準に、そこからターゲット電極 Y への角度のずれを横軸にとった直交座標系で、さきほど計算した 8 点の移動エントロピーを、縦軸にプロットすると、ベル型の曲線が得られます (図右下)。今回これを、情報チューニング曲線と呼びました。従来の神経チューニング曲線 (用語 3) は、(課題に含まれる) 外的変数に対する神経応答の同調性を表していましたが、情報チューニングは、(神経信号に含まれる) 内的変数に対して、情報が、どのくらい同調して移送されるかを示す事になります。この情報チューニングの枠組みを使うと、大脳皮質上を伝搬する進行波の方向に、移動エントロピーのピークが観察されました。つまり、計算機上のシミュレーションとちがって、脳の中では、進行波が、情報ルートを媒介する基本モードになっている事が実証されました。さらに覚醒状態では、麻酔状態に比べて、情報チューニングが鋭くなっていました。興味深いことに、移動エントロピーの絶対量自体は麻酔時の方が高い傾向にあったので、特定の方向に情報を絞って伝える正確さ、いわば情報通信の「信頼度」が、覚醒時の方が優れている事がわかりました。

3. 波及効果、今後の予定

我々は、覚醒時に、認識できていた世界を、全身麻酔中には、一切、知覚できなくなります。このメカニズム自体、解明されていません。これまで神経科学の分野では、意識が消失する時に、どのように脳活動が変化するのかを調べてきました。その結果、ある脳領域群の活動量が高ければ意識があり、低ければ意識が無くなるという、単純な話では説明できないことが分かっています。一方、情報理論の分野では、広域の情報のやりとりが、意識を支えているという予想が立てられてきましたが、そのエビデンスが不明でした。本知見は、神経科学と情報科学を架橋するアプローチから、意識・無意識を峻別する指標が生まれる可能性を示しています。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JST CREST（課題番号 18071867）、JSPS 科研費（課題番号 JP21H04423）、内藤記念科学振興財団の支援を受けて行われました。

<用語解説>

- 1) シャノンエントロピー：情報理論の祖、クロードシャノンが導入した期待情報量。情報理論の指標は、数多くあるが、すべての定式の基礎をなす尺度。
- 2) ECoG (electrocorticography)：皮質脳波。通常の脳波は、表皮に電極を貼って計測するが、ECoG は、大脳皮質表面に直接、電極を留置するので、信号の歪みが少なく、ありのままの進行波を抽出できる。
- 3) 神経チューニング：感覚皮質におけるニューロンは、線分の方向や音の周波数など、外界のある特徴に同調して応答する特性を示し、感覚符号化の原理を支える。

<研究者のコメント>

広域脳からの ECoG 記録は、ラボにとって初挑戦でした。ラボ外の方々の協力も得て、その技術をハンドリングできるようになった事が、第一の喜び。第二の喜びは、行動課題に依存せず、情報を定義できると気づけた事。そこから、神経信号と情報伝達の結びつきが変化する動態を目にした時、大きな意義を実感しました。この実感が論文によって伝わると嬉しいのですが、今後も、自然知能の奥行を楽しめる仲間達と、新たな neural information の姿を発掘していきます。(コメント：小村豊)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Awake cortex stabilizes traveling waves for global and reliable information routing

(覚醒状態では、皮質進行波の安定化に伴って、情報ルートが広域化し、その信頼度が高くなる)

著者：Kaio Misawa, Koji Chinen, Akira Kawabata, Taro Kaiju, Takafumi Suzuki, Yutaka Komura

掲載誌：iScience DOI：10.1016/j.isci.2026.116728