

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」  
研究課題「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」

## 研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

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)

## §1 研究実施の概要

### (1)実施概要

我々の意識は、日常生活のなかで、たえず変化しているが、その意識状況を、客観的に評価できる手法は、現存しない。そこで本研究では、新たな情報科学と高次元計測法を融合させ、目に見えない意識のダイナミクスを捉え、意識の客観的指標を創出することを目的とした。そのために、研究代表者の小村グループが、意識を可視化するための計測を、主たる共同研究者として大泉グループが、意識の情報数理の構築を、鈴木グループが、意識の計測基盤の開発を担当し、研究を進めた。

本研究は、意識の生成に、脳内の双方向結合が重要であるという仮説からスタートしている。その数理基盤を構築するために、まず、大泉グループが、統合情報理論(IIT: integrated information theory)を背景にした解析アルゴリズムを開発した。このアルゴリズムによって、ネットワークの因果的な情報構造の抽出することができる。さらに、ネットワークの中で最も情報の統合が強い「情報のコア」を同定するが、その際に、劣モジュラ性と、要素を減らすと相互情報量が減少するという性質を用いて、組み合わせ最適化問題を解いたことで、計算時間を大幅に削減できた。

次に、鈴木グループが、小村グループと連携をとりながら、全脳レベルで、皮質脳波(EEG: electrocorticogram)を計測するための神経電極を開発した。この神経電極を、小村グループが、動物の脳外表面に留置し、覚醒下(意識あり)と麻酔下(意識なし)の状態間で、視覚応答パターンを比較した。その結果、大きな差が認められた。第一に、覚醒下では局所的な視覚応答が、麻酔下では全脳にバースト応答が広がっていた。第二に、覚醒下のみ、後頭葉に、6-13ヘルツの後期応答成分が観察された。その成分の位相解析をすると、feedforward と feedback の両方向に伝搬していることがわかった。

意識は、覚醒下でも、絶えず変動している。そのファインな変動をとらえるために、小村グループは、注意の瞬き(Attentional Blink)の動物モデルを確立した。注意の瞬きとは、次々と現れる画像のうち、先行する画像に注目していると、数百ミリ秒ほど後続する画像が知覚できない現象で、ヒト研究において、「知覚意識のコマ落ち」として知られていた。サルとヒトの心理物理関数に、動的時間伸縮法というアルゴリズムを適用することで、感覚情報を意識情報へ変換するスピードが、ヒトの方がサルに比べて速いことが分かると共に、両者の知覚意識システムはスケール不変の性質を共有することが示された。

現在、意識の研究において、大きく二つの理論が注目されている。一つは、上述の統合情報理論で、もう一つは、グローバルワークスペース理論である。これらの理論の検証に、時空解像度の高い脳データが得られる、モデル動物は、今後、益々、重要な役割を果たすことが予想される。

### (2)顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

#### 1. 「情報のコア」を効率的に抽出するアルゴリズム開発

概要: 脳の動的ネットワークの素子間の因果性を定量することは、意識レベルを評価する際に、重要である。このネットワーク構造と情報のコア抽出は、組み合わせ最適化問題を解く必

要があるが、ネットワークの要素数  $N$  に対して、指数関数で計算時間がかかるため、従来は計算不可能だった。この問題に対して、集合関数の劣モジュラ性を利用して、この最適化問題を解き、はじめて統合情報理論が、脳の実データに対して、適用可能であることを示した。

### 2. 知覚意識ダイナミクスの種間差と不変性

概要: ヒトの知覚意識のコマ落ち現象、注意の瞬きの動物モデルを確立した。知覚意識の時間ダイナミクスを支える機構を探り、意識の理論として、統合情報理論 (IIT: integrated information theory) と、グローバルワークスペース理論を実証できる恰好のモデルでもある。サルとヒトの心理物理関数を比較定量化することで、両者の意識化する計算機構の種間差とスケール不変性を、同時に示すことができた。

### 3. 意識レベルの差を反映した脳ダイナミクスの可視化

概要: ラットの全脳から ECoG(皮質脳波)を計測し、覚醒下と麻酔下の条件間で、視覚刺激の応答パターンを比較したところ、大きな差が認められた。第一に、覚醒下では局在的な視覚応答が、麻酔下では全脳にバースト応答が広がっていた。第二に、覚醒下のみ、後頭葉に、6-13 ヘルツの後期応答成分が観察された。その成分の位相解析をすると、feedforward と feedback の両方向に伝搬していることがわかった。

## < 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

### 1. 多点神経活動計測系の開発

概要: 認知機能は、一つの神経細胞の活動では決まらないので、神経活動の集団データが必要である。特に、意識のような高次脳機能を明らかにするために、全脳データがほしいところである。したがって本研究プロジェクトにおいて開発されたような多点神経電極とLSIとの融合化によって、広域の神経活動データの収集が進んでいけば、これまでの粗い局在機能論が優勢であった脳科学とは異なる見方や解像度の高い知見が、生まれるだろう。

### 2. 無線神経活動計測系の開発

概要: これまで神経活動を記録するには、電極と計測器を有線でつながれることがほとんどだった。そのために神経活動を記録している個体の行動には制限をかけざるを得なかった。本研究プロジェクトで開発されるような無線神経活動計測系を用いられたら、動物・ヒトを問わず、自由行動下での神経活動を記録することができ、医療や、BMI (Brain Machine Interface) への応用にも、良い効果をもたらすことが期待される。

### 3. 脳状態の遷移コストを定量する数理手法の開発

概要: 任意の2つの脳状態間の制御コストを uncontrolled path と controlled path の間の KL 距離 (Kullback-Leibler divergence) で定義し、最適制御は KL 距離を最小にするものと考え、最適制御コストを定量化した。線形確率システムにおいて、最適制御コストが、確率分布の平均を制御するコストと共分散を制御コストに分解できることを示した。

## < 代表的な論文 >

### 1. Efficient search for informational cores in complex systems: Application to brain networks. Jun Kitazono, Ryota Kanai, Masafumi Oizumi, Neural Networks 132, 232-244 (2020)

概要: 情報のコアは脳の中で、意識の生成に大きな役割を果たしていると予測されているが、本論文では、ネットワークの因果的な情報構造の抽出とネットワークの中で最も情報の統合が強い「情報のコア」を同定するアルゴリズムを開発した。情報のコアを探索する際に、

劣モジュラ性と、要素を減らすと相互情報量が減少するという性質を用いて、組み合わせ最適化問題を解いたことで、従来、現実的な時間で収まらなかった計算コストを大幅に削減できた。

2. High-density mapping of primate digit representations with a 1152-channel  $\mu$ ECoG array, Taro Kaiju, Masato Inoue, Masayuki Hirata, Takafumi Suzuki, Journal of Neural Engineering 18(3), 2021, 10.1088/1741-2552/abe245

概要: 本プロジェクトにおいて、意識レベルは、情報統合の程度によって定まるという仮説を置いている。したがって多点の神経活動データの記録が必須である。しかし多点化していくと、コネクタの数が頭部に収まらないという現実的な問題があった。本論文では、LSI と統合した多点高密度電極を開発し、実際に、急性実験でその電極を使って、SN比が高く、これまでの ECoG (皮質脳波) より、はるかに高い時空間解像度のデータを記録できることを確認した。

3. An inaccessible time to visual awareness during attentional blinks in macaques and humans, Koji Chinen, Akira Kawabata, Hitoshi Tanaka, Yutaka Komura, iScience, 2023, 10.1016/j.isci.2023.108208

概要: 注意の瞬きの動物モデルを確立した。注意の瞬きとは、次々と現れる画像のうち、先行する画像に注目していると、数百ミリ秒ほど後続する画像が知覚できない現象で、ヒト研究において、「知覚意識のコマ落ち」として知られていた。サルとヒトの心理物理関数に、動的時間伸縮法というアルゴリズムを適用することで、感覚情報を意識情報へ変換するスピードが、ヒトの方がサルに比べて速いことが分かると共に、両者の知覚意識システムはスケール不変の性質を共有することが示された。

## § 2 研究実施体制

### (1) 研究チームの体制について

#### ① 「小村」グループ

研究代表者: 小村 豊 (京都大学 人間・環境学研究科 教授)

研究項目

・意識のダイナミクス可視化

#### ② 「大泉」グループ

主たる共同研究者: 大泉 匡史 (東京大学・大学院総合文化研究科・准教授)

研究項目

・意識の情報数理の構築

#### ③ 「鈴木」グループ

主たる共同研究者: 鈴木 隆文 (情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター・室長)

研究項目

・意識の計測基盤の開発

### (2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

意識研究のワークショップ、BMI (Brain Machine Interface) の国際カンファレンスを開催し、いずれも、基礎から応用まで、幅広いテーマで国内外の研究者と、活発な議論を行った。