

## 人工知能技術に基づく人間（脳）の情報処理の解明

情報学研究科 システム科学専攻 論理生命学分野  
石井 信

### 1. はじめに

現在、各種の大規模なデータベースが整備され、それらビッグデータを用いた機械学習による人工知能（AI）が開発されることで、われわれの世界は大きく変えられつつあります。そこで用いられている機械学習器は、しばしば「深層学習」器ともよばれるニューラルネットワーク（NN）です。このNNは、F. Rosenblattにより1958年に提案されたパーセプトロンという神経細胞のモデルを源流とします。つまり、今のAIは脳の学習素子である神経細胞の機構を模倣するところからスタートし、独自の発展を遂げたものと言えます。また、脳の計算機構の理解から発展し、実用化されてきた技術も多数あります。例えば、ノイズキャンセラーなどに用いられているブラインド信号分離は、混線した複数の信号を分離する工学技術ですが、これはカクテルパーティ効果（パーティ会場のような、複数の音声や音楽が混じった雑多な音響環境であっても、われわれは特定の相手の発話だけを聞き出せること）、すなわち、脳の信号分離能力のモデル化の研究から始まっています。このように、脳の計算機構の解明とAI技術とは、互いに影響を与えながら相互に発展してきました。当研究室では、これらの「計算神経科学」（脳の計算機構の解明を目指す科学）および「脳型人工知能」（脳のモデルを基本とするAI技術）の発展の歴史を踏まえ、最先端のAI技術に基づく脳科学研究、また、最新の脳科学の知見を踏まえた次世代のAI技術の開発、さらには、そうしたAI技術を実社会で動作するロボットなどに応用するという、融合的かつ学際的な研究を進めています。

以下では、2022年に当研究室から発表された2報の論文の成果を中心に、最新のAI技術がいかにかに計算神経科学、すなわち、人間の脳が担う情報処理機構の解明につながるのかについて紹介します。

### 2. 人工知能技術を用いた視覚注意機構の解明（文献 [1]）

われわれ人間は何かを見るとき、網膜を通して膨大な情報を受け取ります。この時、それらの情報を効率よく処理するために、重要そうなものから順に焦点をあてていく「視覚注意」という機能が働きます。この視覚注意には、トップダウン型とボトムアップ型の二種類があるとされています。ボトムアップ型注意とは、ものの色・輝度・方位などの特徴が周囲と大きく異なることによって受動的に引き起こされるもので、例えばまぶしいものや蛍光色に思わず視線を向けてしまうのはこのタイプの注意によります。一方トップダウン型注意とは、経験や課題によって能動的に起こされる注意で、例えば何かものを探すときに視線が動くのはこのトップダウン型注意によるものです。眠っていない動物ではこれらの二つの注意は神経活動上で重なっているため、それらを区別するような解析は難しいという問題があります。当研究室の藤本啓介君（博士後期課程1回生）、林浩次郎君（修士課程2回生）らは、ボトムアップ型注意を誘発する強さを表現した顕著性マップ（図1下段）が同じになるような画像を生成することで、この問題を解決できると考えました。この研究では、同じ顕著性マップを持つ異なる画像を複数生成する技術を開発することと、その技術により生成された画像が、トップダウン型注意のメカニズムの解析に有用かを調べることを目的としました。そのために、AI技術として近年の注目を集めている深層学

習を用いた画像変換技術を開発し、類似した顕著性マップを持つ自然な画像（以後、「自然画像」）と自然でない画像（以後、「非自然画像」）のデータセットを生成することで、それらの画像を人に見せたときの脳活動（機能的核磁気共鳴画像法、fMRI）について実験と解析を行いました。

自然画像から顕著性マップを求める手法は既にいくつか提案されていますが、顕著性マップを逆変換して画像を作り出すような研究はまだありませんでした。この研究では、深層学習を用いることによってこの逆変換を実現し、自然画像からその自然画像と類似した顕著性マップを持つ非自然画像を作り出すことに成功しました（図1右上）。

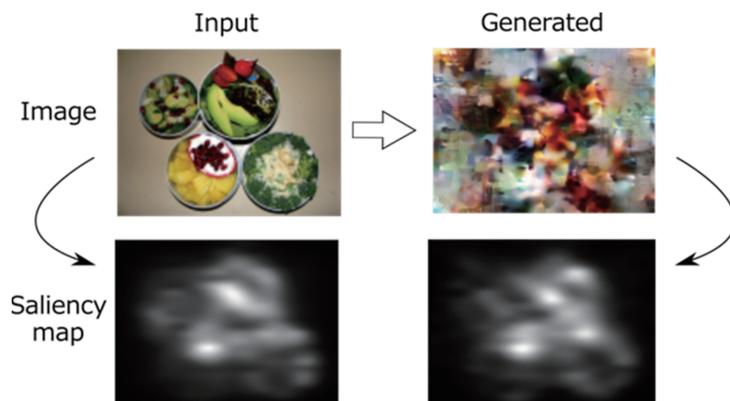


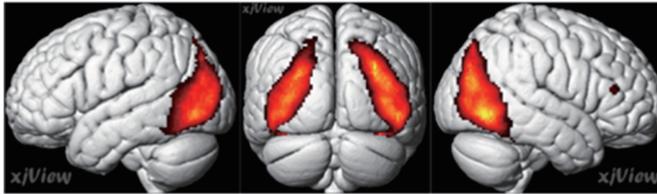
図1. 本研究で生成した画像ペアの一例  
左上が自然画像で、右上が非自然画像、それぞれの下にある画像がそれぞれの顕著性マップ。顕著性マップは、白色に対応する位置に目が惹かれやすいことを示す。それぞれの顕著性マップは類似しているが、自然画像と非自然画像は全く異なる画像となっており、非自然画像では文脈情報が少ない。

自然画像を見た時は、トップダウン型とボトムアップ型の2つの注意を誘発します。それに対し、ペアの非自然画像を見た時は、自然画像と同様のボトムアップ型注意を引き起こすのにも関わらず、文脈情報が少ない（何が映っているかわかりにくい）ため、トップダウン型注意はあまり誘発されないと考えられます。顕著性マップが類似した自然画像・非自然画像のペアを作り出すこの技術の開発により、今までは不可能だった、視覚注意をボトムアップ型とトップダウン型に切り分ける実験が可能になると考えられます。

開発した画像生成技術によって作られた自然画像と非自然画像のデータセットが、実際に人の視覚注意に関する実験に有効なものであるかを評価するため、脳の活動を非侵襲的に計測する手法の一つであるfMRIを用いた実験を行いました。実験では、用意した自然画像と非自然画像のデータセットから画像をランダムに実験参加者に見せ、fMRIによってそのときの脳活動を計測しました。自然画像を見ているときは、非自然画像を見ているときよりも両側の高次視覚野が有意に高い活動を示しました（図2(a)）。一方で、非自然画像を見ているときは、自然画像を見ているときよりも両側の一次視覚野と両側の下頭頂小葉が高い活動を示しました。こうした脳領域は、これまでにもトップダウン型およびボトムアップ型注意に関わることが示唆されてきており、この研究で用意したデータセットが、人の視覚注意機構の解明のための新しいツールとなる可能性を示唆しています。

この研究では、トップダウン型注意とボトムアップ型注意の仕組みについて解明するためのAIツールを用意することを目的としましたが、もしこのような視覚注意に関する仕組みが解明できれば、脳活動からトップダウン型注意に基づいて見ているものを復元するなど、新たなブレイン・マシン・インターフェース（BMI）技術の開発につながる可能性があります。こうした脳活動からの視覚情報の復元などの技術は、医療や犯罪捜査から家電や娯楽までさまざまな分野への応用が考えられます。また、ボトムアップ型注意の仕組みを解明することによって、建設作業や運転時の注意の欠如・逸れによる事故を予防するなど、危機管理サポートなどへの応用も考えられます。このように、人間の視覚注意のメカニズムを探ることは、われわれの日常に大きく影響を与える重要なものであると考えられます。

(a) Natural image &gt; Generated image



(b) Generated image &gt; Natural image

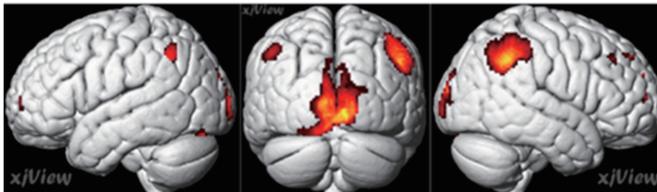


図 2. 脳活動解析の結果

自然画像と非自然画像を見せたときの脳活動の差分析。図 2 (a) は自然画像を見ているとき非自然画像を見ているときよりも(統計的に)有意に活動が高い脳領域で、図 2 (b) はその逆。

自然画像を見ているときは両側の高次視覚野が高い活動を示し、非自然画像を見ているときは両側の一次視覚野と両側の下頭頂小葉が高い活動を示した。

### 3. 部分観測迷路を探索する際の予測および確信度を脳活動から解読 (文献 [2])

われわれのいる実世界はしばしば曖昧さを含みますが、人はそのような曖昧な状況でも適切な意思決定を行うことができます。例えば、ターミナル駅など見た目が似通った構造が多く存在するような複雑な環境では、自分がどこにいるかがわからなくなり、その結果、目的地に向かってどう移動するかを決めるのが難しくなることがあります。こうした状況では、人は周辺の風景(シーン)などを手掛かりとして現在の位置に当たりをつけて、それを踏まえて目的地まで移動しようとしています。この時、移動しながらこの後で出現するシーンを予想し、その予想と新たに得られる観測とを比較することで、自分の位置の予想を正しいものへと更新していきます。この際の「予想」はこれから得られるであろう観測に対するものですので、脳の中に自身が創り出した「仮想現実」です。また、直感的に、自身にとって予想に自信があるかないかは、この仮想現実の脳内表現に影響があると思われます。当研究室の片山梨沙さん(博士後期課程2回生)はオックスフォード大学の吉田和子博士の協力を得て、こうした脳の中の仮想現実が、脳活動からAIにより取り出せる(再現できる)か、また、人が内省的に考える自信もAIにより取り出せるか、さらには、それらの再現性の間に関連があるのか(例えば、自信がある際に仮想現実が良く再現できるか)を調べました。そのために、実験参加者が、自身の位置が分からないまま未知のゴールを目指すバーチャルリアリティ(VR)迷路内で空間移動ゲームを行う際の脳活動を計測し、AI技術を用いた脳情報解読解析を行いました。

実験参加者に、fMRI計測装置内で空間移動ゲームに取り組んでもらい、脳活動を計測しました(図3)。ゲームは、格子状に部屋が並んだVR迷路内を探索しながら、移動する先の部屋のシーンを、ドアを開ける前に予測し、また、その予測に対する自信(確信度)を回答するというものです。事前に迷路の地図を記憶した実験参加者は、スタート位置や探索中の現在位置を教えずに貫えなくても関わらず、自分の意思で探索を進めるにつれてシーン予測に正解できるようになり、予測に対する自信も高くなりました。このことは、実験参加者がこれまでのシーンの観測を用いて迷路内での自身の位置を推定し、その位置推定と記憶した地図に基づいて、次に進む部屋のシーンの予測を行っていることを示しています。また実験参加者は、予測に自信がある(確信度が高い)時に、自信がない(確信度が低い)時と比較してより素早く予測シーンを回答していました。このことは、予測に対する確信度が高い時、実験参加者がより明瞭に予測シーンを思い浮かべられることを示唆しています。

実験参加者が次の部屋のシーンを予測している時に強い活動を示した脳領域を対象に、AI技術を用いて、実験参加者の脳活動から予測シーンとその予測に対する確信度が解読できるかを調べました。そ

の結果、予測シーンは上頭頂小葉・下頭頂小葉と背側運動前野から、予測に対する確信度はこれらの領域に加え前部前頭前野からも解読できることが示されました。また上頭頂小葉では、実験参加者のシーン予測に対する確信度が高い時、予測したシーンの解読精度も高くなることが明らかになりました。このことは、予測に対する自信が強い場合、予測シーンを表現する脳活動がより明瞭になることを意味しています。さらに、実験参加者が直接回答していない、迷路内での位置の予想に対する確信度を AI 技術を用いて推定したところ、下頭頂小葉では、AI が推定した（客観的な）自信の強さによって予測シーンの解読精度に差があることがわかりました。このことから、下頭頂小葉では迷路内の位置の予測が、上頭頂小葉ではその位置予測から導かれるシーンの予測が表現されている可能性があると考えられます。

本研究でのシーン予測とは部屋のドアの様子としていましたが、さらに一般化して、人間がイメージする快適な部屋や昔住んでいた家や街の様子を脳活動に基づき再現するなど、BMI を発展させた新しいコミュニケーションツールの開発につながる可能性があります。こうした空間移動（ナビゲーション）に付随するシーンの脳活動からの再現は、人を身体の拘束から解き放つ「メタバース」研究の課題の一つとなっています。また、われわれの空間移動に伴うシーンの予測は、ドローンや車両などの移動人工物に対して、脳と AI とをつないだ制御法など新しい応用につながります。例えば、移動人工物が交差点を曲がる際に、交差点の先の状態に関する人間の予測レベルの評価ができれば、人間と AI との協調的制御が車の運転などに使える可能性があります。この例の場合ですと、交差点の先のシーン予測の確信度が低い場合、AI への依存度を高め慎重に制御を行うなどが想定されます。さらに、人間の予測という心的世界の再現、また、それへの内省的評価（メタ認知）の再現は、われわれの自己意識の根源を探る意味で、学際的な意義があると思われます。

#### 4. まとめ

AI 研究に関わっていて時々受ける質問に「このまま行くと AI が意識を持つようになりますか」というものがありますが、それに対して「人間の意識が何のためにどのように発生するのが分からないので答えようがない」と回答しています。人間の意識研究はこの 10 年間で大きく進んだと言えますが、いまだ、「意識レベルの定量化」に留まっていて「何のためにどのように」に答えることはできていません。2 節で紹介した研究で「トップダウン型注意」という用語がありましたが、これは脳の自らの経験に基づく能動的な情報処理ということで意識と関連がありますし、3 節で紹介した研究での「確信度」はメタ認知の一種で、内省的な自己評価として、これもまた意識と関連があります。意識の定式化への一つの手がかりは、動的に環境に適合する動物の効率的な学習能力にあると考えています。実際に、現在の AI をもってしても、この効率的な学習能力は再現できていません。つまり、「機械の知」すなわち AI と「人間の知」すなわち脳機能モデリングとの対比こそが、「なぜわれわれは存在している（自ら）考えているのか」に対する答に近づく道であると考え、研究を進めています。

研究室の活動については以下の HP をご参照ください。

<https://ishiilab.jp/>

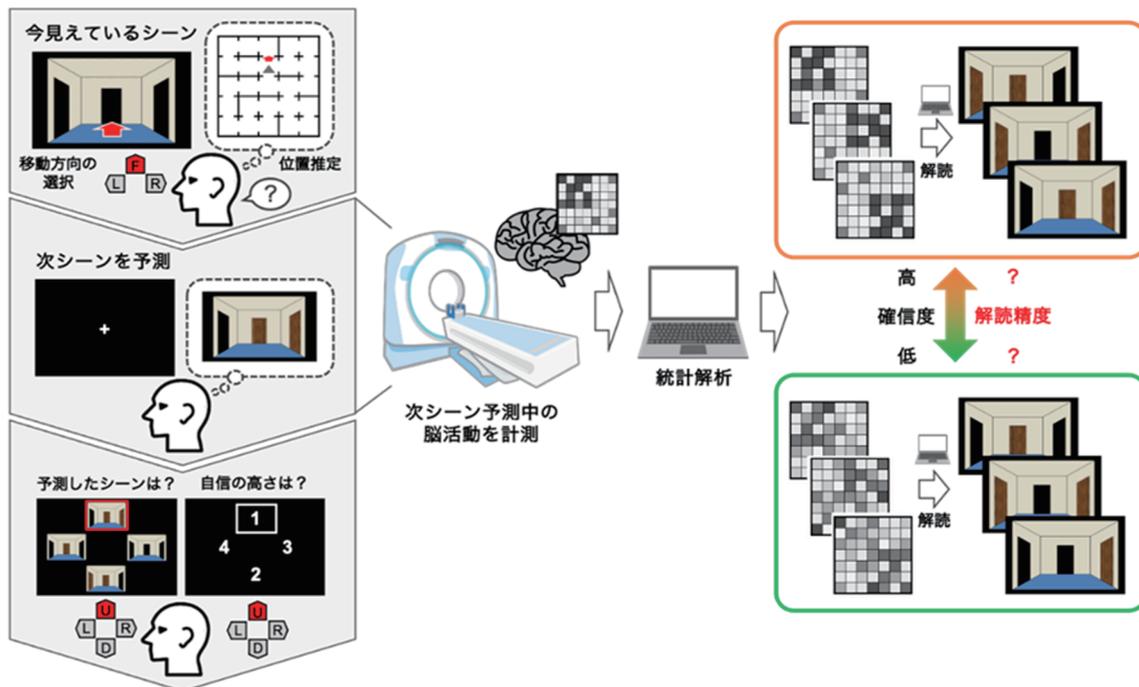


図 3. シーン予測課題と解析手法の概念図

実験参加者は事前に学習したグリッド構造のバーチャルリアリティ迷路内を、未知の初期位置から探索する。探索中、移動方向選択後に実験参加者は次に現れるシーンを予測し、その予測に対する確信度を評価するよう指示される。実験参加者は迷路内での現在位置を教示されないため、シーン予測課題に正答するためには、探索中の行動（どちらに移動したか）および観測シーンの履歴から現在位置を推定する必要がある。次に現れるシーンを予測している時の脳活動を計測し、AIによる解析によって予測シーンおよび確信度を解読する。また、データセットを確信度レベルに応じて分割し、予測シーンの解読精度を比較する。

#### 参考文献

- [1] Fujimoto, K., Hayashi, K., Katayama, R., Lee, S., Liang, Z., Yoshida, W., Ishii S. (2022). Deep learning-based image deconstruction method with maintained saliency. *Neural Networks*, 155, 224-241, <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.08.015>
- [2] Katayama, R., Yoshida, Y., Ishii, S. (2022). Confidence modulates the decodability of scene prediction during partially-observable maze exploration in humans. *Communications Biology*, 5: 367. doi: 10.1038/s42003-022-03314-y.