タイトル：「意識の神経相関」を超えて：「意識の構造」と「情報の構造」の特徴づけ、そして「構造間の関係性の同定」を目指して

英文タイトル：

Beyond the “Neural Correlates of Consciousness”: Characterizing the structure of consciousness and information and identifying their relationship

400x15-20 = 6000 から 8000 字

抄録 458字

我々が主観的に感じる意識と、脳の中で生じている物理・化学現象の間をつなぐ科学法則とは一体どのようなものだろうか？ 意識をめぐる謎は、現代科学が直面している謎の中でも最も巨大でかつ魅惑的なものの一つである。この謎を避け、人間や動物を外部から観測可能な行動のみから規定しようとする世界観では、幻覚・妄想などを訴える患者の意識の理解、さらには、言語報告のできない患者・乳児・動物の主観感覚の理解といった問題に、科学的なメスを入れることができない。近年、そのような世界観を乗り越え、意識の問題に真っ向から取り込もうとする科学者が中心となり、意識と脳の関係性を巡る実証的研究が大幅に進んできた。本稿では、現状見込みがあると考えられている意識研究のいくつかの研究の枠組みを概観する。さらに、従来の枠組みでは乗り越えるのが難しい意識の問題を解決するために、著者らが近年考えている方策を紹介する。著者らは意識経験の構造、さらに脳から生じる情報の構造、そして構造の間の関係性を明らかにする必要があると考えている。本稿ではそれを可能にする数学的ツール、圏論も簡単に紹介し、今後の展望を述べる。

索引用語

意識、現象学、構造、統合情報理論、圏論、

Consciousness、phenomenology、structure、integrated information theory、category theory、

所属先の住所

770 Blackburn, Monash Biomedical Imaging facility, Clayton, VIC 3168, Australia

著者名・所属

土谷 尚嗣・School of Psychological Sciences, Monash University,
Naotsugu Tsuchiya

大泉 匡史・東京大学大学院総合文化研究科
Masafumi Oizumi

山田 真希子・量子科学技術研究開発機構
Makiko Yamada

西郷 甲矢人・長浜バイオ大学
Hayato Saigo

計X字

1. 意識と脳の関係性と既存のアプローチの概観

画鋲を踏んでしまい、とんでもなく足の裏が痛い。痛みの原因を考えて気を紛らわそうと、専門書を手にする。足の末梢神経が脳に伝わるころまではとても詳しい説明がある。しかし、そこから先の説明はすっきりしない。一度脳に入ってしまったら、すべての神経活動は電気・化学反応になる。神経活動のパターンと活動場所によって、痛みを感じたり、モノが見えたり、音が聞こえたりする。これは一体どういうことか？ 意識の問題はあまりにも当たり前過ぎて気づくのが難しい。しかし、一度その謎に気づいてしまうと、これほど身近で不思議な謎はないことに驚く。

主観的な意識を生み出す脳は、草や機械と同じく物質の集合に過ぎない。その物質の集合から、われわれの主観的な意識はどのように生まれるのだろうか？ 意識の問題は捉えどころがなく、客観的な科学的手法による研究対象にならないと考えられてきた。歴史的には、意識は哲学の問題だとみなされ、20世紀の行動主義心理学において意識問題はタブー視されたほどであった。ところが、この数十年の理論的・方法的進展により、意識を巡る科学者の考えに以下のような変化が起きた。

第一に、意識に関する概念的な整理である。現在の意識研究においては、「意識」を「意識レベル」（昏睡・睡眠・麻酔下では低く、覚醒下では高い）と「意識の中身」に分けて考えることが多い。意識の中身は「クオリア」とも呼ばれ、すべての感覚モダリティ・思考・感情・自己意識・自由意志などを含んだ、自覚される経験すべてを含む。臨床精神医学における「せん妄」や「もうろう」は、軽度～中等度の意識レベルの低下と、意識の中身の質的变化もしくは変容を伴う。特に説明がない限り、本稿における「意識」とは意識の中身・クオリアのことを指す。

第二に、我々が直接に経験するこれらの主観的な意識が、20世紀の終わりごろから科学のまな板に乗ってきた。たとえば、意識の中身（視覚刺激が見えた・見えないなど）、あるいは意識レベルが変化する時の脳活動が、脳イメージングを使って詳細に調べることが可能になった。この数十年の意識研究の研究成果を概観するために、まず、これらの研究に大きな影響を与え、また現在でも有望だと考えられえている3つの研究の枠組みを紹介しよう。

（1）意識の神経相関

最初の枠組みは、Crick と Kochが提唱した「意識と相関する神経活動の同定」を目的とするものである¹。この枠組は、重大な成果を着実に積み上げ、今や意識の科学研究法として定着した²。意識と相関する神経活動の同定を目指す研究では、外部から脳に入ってくる情報を一定にした上で、意識の中身が変化するような視覚刺激を使うことが多い。例えば、下に示したルビンの壺の図形などである。これは筆者とその家族の顔を2つ並べ、画像編集して白黒にしたものだ。読者も、この図形を長く見ていると、いびつな白い花瓶のように見えてきたり、二人の横顔に見えてきたりするだろう。このような視覚刺激を使うと、外部刺激そのものとは相関がないが、被験者の主観的な意識の中身と相関するような神経活動を同定することができる。具体的な実験としては、このような刺激を健常者に見せ、その健常者に意識の中身を報告してもらっている最中に、健常者の脳をfMRIを用いて撮像したり、同じような刺激をてんかん患者に見せ、てんかん発作焦点を同定するために患者の脳内に留置した電極から直接に神経細胞の記録したりする。これらのデータを基に、意識の神経相関の同定を試みる。また、幻覚を伴う精神・神経疾患患者の協力を得て、同じ白い壁を見ているときに、はっきりと顔が見えてそこから声が聞こえてくるという幻

覚を感じているときの脳活動と、幻覚が生じていないときの脳活動を比較する、というfMRI研究などもこの枠組みの一部と考えられる。

（２）意識の機能にまつわる実験事実を整理するモデル・理論化

２つ目の枠組みは、心理学・認知科学・脳科学からの知見を総合的に融合し、意識の機能の説明を目指したモデルの提案である。中でもDehaeneのグローバル・ニューロナル・ワークスペース理論は、この数十年で目覚ましい発展を見せ、脳イメージングや心理実験などの結果により強いサポートが得られている³。ワークスペース理論は、意識と無意識の機能分担、記憶・注意・思考・感情などの意識と関係が深いと考えられている心理現象と意識の関係性などについて、質的なモデルと説明を与える。

（３）意識と物質の関係性を「情報」を通して理論化しようとする試み

３つ目の枠組みとして、Tononiの統合情報理論が挙げられる⁴⁻⁷。統合情報理論は、主観的に各人が体験する意識の特徴を抽出するところから始まり、そのような特徴を支えることができるような物理的なメカニズムとは一体どのようなシステムでありうるかについて数学的な仮説を立てる、という体裁をとる。これは、実験事実から出発して、実験事実をうまく説明するようなモデルを構築する２つ目の枠組みとは、理論の性質が大きく異なる。特に理論が注目するのは、一瞬の意識がもつその圧倒的な「情報量」とその「統合性」である。ここで言う「情報量」とは「区別」と考えてもよく、どんな一瞬の意識経験も他の意識経験と区別がつく、という意味である。「統合性」とは様々な情報（りんごを見た時の色・形など）が常に一つの経験として感じられるということである。この理論のユニークなところは「統合情報量」と呼ばれる数学的な指標を使い、意識を数学的に定量化できると提案するところである。せん妄やもうろう状態などにおいて、もし、患者本人にとって、今自分が経験している意識が、他の自分が経験しうる意識と「区別できない」状態になっているのであれば、患者の統合情報量は低くなっており、意識レベルが低下しているはずだ、という予測が立つ（これが最初に述べたせん妄やもうろう状態の一般的理解に合致する）。統合情報理論は、現在までにわかっている脳科学的知見に整合的な説明を与えるが、その直接的な検証は現在のところ十分に成されていない⁸。

以下では、これらの現状見込みがあると考えられている意識研究の問題点を指摘しつつ、それを乗り越えるための方策を紹介していきたい(より詳しい日本語による意識研究の概観は⁹を参照)。

２．意識のハードプロブレム

前節で概説したとおり、脳科学における脳計測手法の発展により、意識は哲学的思弁の対象として留まることに終わりを告げ、厳密な科学的手法により研究されるべき対象として、科学者に認識されてきている。脳と意識に関する実践的な知見は膨大に積み上げられ、それを整理する理論も提唱されている。

しかし、意識を支える脳活動に関する知見が積み重なるにつれ、哲学者のChalmersが唱えた「意識のハードプロブレム」と呼ばれる問題の本質がより明らかになってきた。ハードプロブレムとは、冒頭で紹介したような痛みなどの主観感覚が、なぜ、どのようにして、物質である脳活動から生じてくるか、に関しての本質的な説明が困難であるという問題である。なぜ、寝ているとき

には意識が生じないのか？ なぜ、視覚を司る脳部位からは視覚が生じ、聴覚部位からは聴覚が生じるのか？ これらの問に、これまでにわかっている物理法則で過不足のない説明を与えることはできるのか？ これらのハードプロブレムに対し、納得の行くような答えは今までの研究の枠組みで足りるのだろうか？

意識の神経相関同定の枠組みでは、意識と完璧に相関する神経相関が見つかったとしても、それが「どうして」意識と相関するかの説明は目指さない。ワークスペース理論は、哲学的には「機能主義」と呼ばれる考え方で、実は明確にハードプロブレムに立ち向かうことを避け、意識の中身がなぜ、どのように主観的に「報告可能」になるのかを説明しようとしている。一方、統合情報理論は、意識経験の特徴と統合情報構造は一致する、という仮説から始まっており、この仮説の妥当性が実験的に示されれば、理論の枠組みの中で、ある神経活動から「どうして」特定の意識が生まれるかに答えることが可能となる。しかしながら、それを検証するための手立てが具体的に示されていないため、理論の実験的検証が進んでいないのが現状である（ただし、^{10,11}を参照）。

これらの根源的な問題を乗り越えるためには、現時点で有力と考えられている意識研究の枠組みを超えて、パラダイム・シフトを起こす必要があると著者らは考えている。上記の枠組みに欠けているのは、意識そのものの「構造」を特徴づけ、それを理解するための実践的な手法に対しての提案である。確かに「脳と意識の関係性」の理解は近年大幅に進んだが、それは物質サイド（脳）の研究手法が整ってきたことが大きい。意識、主観的な経験サイドの理解はあまり深まったとは言えない。また、脳と意識の間に潜む関係性そのものを明らかにするための枠組みも不十分だろう。

一方で、これらの問題が見えてきたことが大きな進歩とは言えないだろうか。著者らは、意識そのものの理解も、関係性の理解を深めるための枠組みにも、具体的な解決法が提示できると考えている。これらがうまく解決できるならば、ハードプロブレムの壁に穴を開け、そこからハードプロブレムが崩れていくさまを見届けられるだろう。

3. 無報告課題と大規模報告課題による意識構造の特徴づけ

前節では、ワークスペース理論で扱うような多くの意識研究は、主観経験そのものではなく、主観経験の「報告可能性」の研究になっているということを指摘した。たとえば、ルビンの壺を用いた意識の神経相関同定研究では、壺が見えたか顔が見えたか、という主観「報告」に相関した神経活動を同定している可能性が高い。この限界を超えるために、筆者は「無報告」課題という研究法を提案している¹²。意識経験の中身は、状況と手段が整えば、言語を用いて報告しなくとも、たとえば眼球運動などで精度良く予測ができることがある。このような状況を使えば、報告可能だが報告のされない主観経験に相関した神経活動と、主観経験の報告という行為そのものに相関した神経活動を切り分けることができる。

無報告課題を使った研究が進む中で、意識研究者たちが気づきはじめたことの一つに、普段我々が「意識の主観性」について語るときに、本当に意識は「主観的」なのかということが実はわかっていない、ということがある。確かに、心理実験や脳科学実験で使うような痛みや匂いなどの感覚は個人差が大きい。また手品や心理学者が発見してきた様々なイリュージョンを例にとつて、意識は主観的であって我々の感覚は当てにならない、と言った主張をすることもできるだろう。一方で、おそらく、誰でもナイフで小指を切られたら痛いと感じられるだろうし、目をつぶれば目の前は真っ暗に経験されるはずだ。これらの場合、報告の必要なしに他人の意識経験を理

解することができる（しかし、同じことは動物や人工知能に当てはまらないことを考えるとこの議論が自明ではないことに気づくだろう）。無報告課題による意識研究は、どこまでの意識は本当に「主観的」であって、どこからの意識は完全に内部に秘められたままでありつづけるのか、を問うきっかけになり、ある意味、意識の構造の理解につながるといえる。

無報告課題では、「報告の必要性そのものを無くす」という課題・状況・手法を見つけることで報告可能性という問題を炙り出すことに主眼を置く。一方で、近年、インターネットを使った技術を使うことで、従来の心理学実験では不可能であった規模と精度で、意識の「情報量」の特徴づけが可能になりつつある。それが、近年筆者が提案している「大規模報告課題」である。

大規模報告課題は、統合情報理論が注目する一瞬の意識の情報量の多さ、という顕著な意識の特徴を考えなおすために考案された。果たして、我々が一瞬に感じる視覚情報とはどれだけの情報量をもつのだろうか？ 実は、この疑問は1950年代以降にシャノンが情報理論を唱えたときに、すぐに当時の心理学者らが飛びついた疑問であった。しかし、当時の限られた感覚刺激の生成手法と、限られた被験者の報告法によって得られた情報量の見積もりは、たかだか40ビット/秒という、1980年代に流行った家庭用ゲーム機並の情報量であった¹³。コンピュータの画面上に、たったの一秒間だけ、40個の四角形が提示されて、それぞれの四角形には、黒い点が入っているか、白い点が入っているかの二択を答えるというタスクをしよう。この状況で、全問正解することができるような人はいないだろう。そう考えると、40ビット（40問完全正解）というのは確かに人間の能力の上限、と言われると納得しそうになってしまう。その後の研究で、視覚以外のすべての感覚においても、40ビットの上限を超えることが難しいことが示されてきた。

しかし、そのような実験は「意識」の情報量を測っていると言えるだろうか？ 土谷らは、この疑問を現代的なビッグデータの手法を使って洗い直した（学会でのポスター発表は<https://doi.org/10.26180/5bfbc49846340>や[10.6084/m9.figshare.10279742.v1](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.10279742.v1)を参照）。我々は、日常生活において、四角形の白黒パターンなどを気にして生きていない。そのため、どんな白黒パターンも同じように見え「区別」できない。一方、一瞬テレビに写った写真からは、様々な思いが意識にのぼる。さらにいうと、白黒パターンにしる、写真にしる、「そこにはないもの」は「ない」と、はっきりと正確に「区別」できるはずだ。つまり、これまでの研究では、我々の意識経験の中では大きな情報を持つことができない視覚刺激・タスクを使って、情報量を見積もっていたため、情報量が過小評価されていた可能性がある。この仮説をもとに、写真に「写っているもの」と「写っていないもの」を聞く、というのが大規模報告課題の一例である。「写っていないもの」など「無限」にあるからそんなもの測れない、と思う読者もいるかもしれない。たしかに、大量の写っていないものを一人の被験者に聞き続けるのは拷問に近い。従来の心理学実験の方法を踏襲して、我々は写真を一瞬だけ見せた後に、一人の被験者から640個の質問を聞くという実験を行ってみたが、このやり方で大量のデータを取得するのは手間と時間がかかり過ぎる。そこで、インターネットで実験被験者を大規模に雇用するという新しい方法を採用し、一人の被験者からは10個の質問を聞き、他の人から更に10個、というようにして数千個の質問を簡単に大量の被験者から聞くという方法をとった。（この「大量の被験者」という側面も大規模報告課題という名前の由来になっている）。実験の結果、0.1秒ほどしか写真を見せなかったとしても、その写真に写っている概念や写真の一部を、写っていない概念や他の写真の一部と区別するという意味での情報量は、簡単に1000ビット/秒を超えることがわかった。

この大規模報告課題が明らかにしつつある重要な意識の構造の特徴として、意識にのぼっているものをそうと報告するのに比べ、意識にのぼっていないものをそうと報告するのは、より簡単であり正確、ということである。確かに、羊の写真を一瞬見せられたときに、それがヤギなのか、

牛なのかはよくわからないかもしれないが、それが車でも、海でも、文字でも、文房具でもないことははっきりと分かる。

まとめると、意識・クオリアの構造は、無報告課題によって、報告を切り離すことで「主観経験そのもの」を抽出したり、一方でインターネットを使った大規模報告課題によって、今までにない規模と精度で、意識の「情報量」特徴づけることができると考えている。意識の構造を具体的に明らかにすることは、現在までに有力と考えられている研究枠組みでは超えられない壁を超えるためには必要な第一ステップである。

4. 意識の構造と情報の構造を圏論（けんろん）によってつなげる

上に述べたようなさまざまな意識・クオリアの構造を、無報告課題や大規模報告課題を使って特徴づけたとしよう。次に重要になってくるのは、意識の構造を系統的に解析するという方法論だろう。ここでは、数学のトポロジーや圏論といった構造間の関係性を扱う分野を意識研究の分野に持ち込むことが重要になる¹⁴。

一度意識の構造が数学的に特徴づけられると、脳と意識の関係性に関する諸問題は、意識の構造がどのように脳内の神経細胞の繋がり方と神経細胞の活動パターンに対応するのか、という問いに置き換えられる^{10,11}（以降では、繋がり方と活動パターン両方を指して「神経構造」と呼ぶ）。視覚の構造を支える視覚部位の神経構造の特徴とは何か？ それは一体どのように聴覚の構造や聴覚部位の神経構造と異なるのか？

これまでの脳科学的知見から予想すると、神経構造は、意識の構造と一対一には対応しないはずである。このことは、神経構造には大量の意識の中身に相関しないものが含まれていることがから明らかである。一対一の対応というからには、ある神経構造から、意識の構造が一つに定まるだけでなく、逆にある意識の構造からも、神経構造が一つに決まらなければならない。意識ののぼらない脳活動の存在でこの論理は破綻する。一方で、神経構造から抽象化されて取り出される何らかの構造ならば一対一に対応する可能性がある。ここでは詳細は省くが、統合情報理論が提案する情報構造とは、まさにこの1対1に対応する可能性があるような抽象化された構造のことである^{4,5,8}。

もしも意識の構造を特徴づけることができ、さらに神経構造から情報構造を取り出すことができたとして、そこからどうすれば意識研究にパラダイムシフトを引き起こせるのか？ 著者が提案するのは、数学における「圏論（けんろん）^{14,15}」と呼ばれるツールを使うことである。圏論は、一見全く異なる構造の間に潜む関係性の様々なレベルの「同じさ」を記述できる。まさに、意識と情報の構造の関係性を明らかにするためのツールとしてうってつけであろう。

ただし、圏論は意識研究に応用されたことがほとんどないため、まずは圏論を意識の構造を特徴づけるために使う必要がある。たとえば、圏論で「自然変換」と呼ばれる概念を用いれば、意識の構造の特徴づけにおいて重要ではあるがこれまで研究されてこなかった問題にアプローチできると我々は考えている。では、この「自然変換」とは一体何者か？ まず、圏論は「圏」についての数学理論であり、圏とは「合成可能な関係からなるネットワーク」のことと考えられる。そして、二つの圏の間の「ネットワーク構造を保つ」対応付けのことを関手（かんしゅ）と呼んでいる。その「関手」の間の整合的な変換が「自然変換」である。

抽象的に感じるかもしれないが、自然変換は身近にあるので恐れる必要はない。例えば、画像で言えば、引き伸ばしや回転の類は自然変換だと考えられる。数学的に言えば「座標変換」のこと

である。たくさんの写真を、回転も拡大もしないで見る時のその見方を数学的に表現したものを、ある関手（かんしゅ）と考えることができる。時計回りに90度回転させて見る、というのに関手だし、2倍に拡大してみる、というのに関手である。これらの関手の間に、辻褄が合うような関係性（つまり座標変換）のことを指して「自然変換」と呼んでいるだけである。

こうした自然変換の概念は、例えば視覚経験の理解においても重要だろう。視線の先の中心窩（ちゅうしんか）で感じる視覚意識と、周辺視野で感じる視覚意識とで「辻褄が合っている」というのは当たり前だと、思うかもしれない。しかし（！）、実はここにもしかするとハードプロブレムを解く鍵になるような、意識に特有の構造が見え隠れしているかもしれない。実際、中心窩を通じた脳内の「表現」と周辺視野で感じる脳内の「表現」は全く「同じ」ではない。にもかかわらず、「目を動かすことで、周辺視野でははっきり見えない『同じ』文字や色が、中心窩でははっきり見える」という意識経験がある。全く異なる表現の間の「同じさ」が自然に経験され、それが自然に辻褄があうようにつながっている、というこの明白な意識経験が、中心窩と周辺視野を通じた表現の間の自然変換を実現する意識の構造を強く示唆する。しかしそれを直接に検証したような研究は今の所ない。著者らは、おそらくこうした自然変換を通じた変換の可能性を考えることで、神経構造から抽出した情報構造と、意識の構造の間の関係性を特徴付けることができると考えている。一方、こうした異なる表現の間にある自然変換は、むしろそれがあまりにも「自然」であり、かつそれが果たす役割が基本的過ぎて、従来の心理学が採用するような報告課題でそれを明らかにするのは非常に難しいかもしれない。このような意識の構造の根本構造にメスを入れるにも、無報告課題や大規模報告課題が役に立つと考え、我々は現在新たな手法を考案中である。

これらの意識構造の特徴づけのための基礎作業を行った後に、意識の構造と情報の構造を関係づけるというプロジェクトがいよいよ攻略可能な問題になってくるだろう。おそらく、数学的にも脳科学的にも、統合情報理論が提案するような一対一の構造関係を直接にいきなり検証することはできない。しかし、神経構造の一部に集中して、統合情報理論を使うなどして情報構造の一部を抽出することは十分可能である。さらに、その情報構造の一部と意識構造の一部の関係性は、自然変換などの圏論的な概念を用いれば、記述できる可能性がある。自然変換のような洗練された関係性の考え方を持ち込み、哲学や心理学が長い間使ってきた必要条件や十分条件といったような初歩的な関係性の特徴づけに厚みをもたせることで、脳と意識の関係性の謎を解くことに期待がもてる。

5. まとめ

この短い論考では、近年の意識研究の枠組みを概観した。現時点で有力と考えられる枠組みは、脳計測技術の進歩とそれに伴う知識の積み上げを整理・理論化することにある程度成功している。しかし、意識そのものの構造を明らかにするための具体的な方策が提案されていない。その結果、意識のハードプロブレムを克服することは確かに「困難」であろう。ブレイクスルーを起こすには、無報告課題や大規模報告課題等の新しい手法を提案し、より精細かつ系統的に意識の構造を特徴づける必要がある。意識の構造を明らかにするには、圏論などの数学的ツールを意識研究に取り入れる必要がある。意識の構造が特徴づけられさえすれば、神経構造、そしてそこから抽象化して得られる情報構造と、意識構造の関係性を圏論を使って特徴づけるという壮大なプロジェクトへと向かえる。それによって、現在説明の手立てのない意識に関する様々な謎 — 意識と無意識の違い、各モダリティ間のクオリアの違い、精神・神経疾患患者が訴える幻覚の理解、画鋲を踏んだ時のあの特有の痛みの源泉 — に統一的な説明が与えられる。これらの説明がハードプロブレムを解くかどうかは定かではない。しかし、DNA構造の発見が生命起源の謎

に関する議論の質を変化させた如く、意識と情報の構造の関係性の発見は、意識の謎の議論の質を大きく変化させ、哲学・心理学・脳科学・人工知能そして意識に関わる多くの分野に大きな影響を与えることになるだろう。

1. Crick, F. & Koch, C. Towards a neurobiological theory of consciousness. *Semin Neurosci* **2**, 263–275 (1990).
2. Koch, C., Massimini, M., Boly, M. & Tononi, G. Neural correlates of consciousness: progress and problems. *Nat Rev Neuro* **17**, 307–21 (2016).
3. Dehaene, S. *Consciousness and the brain*. (2015).
4. Tononi, G. An information integration theory of consciousness. *BMC Neurosci* **5**, 42 (2004).
5. Oizumi, M., Albantakis, L. & Tononi, G. From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: Integrated Information Theory 3.0. *PLoS Comput. Biol.* **10**, e1003588 (2014).
6. 大泉匡史. 意識の統合情報理論. *Clin. Neurosci.* **32**, 905–912.
7. 大泉匡史 & 土谷尚嗣. 温度計に意識はあるか？ - 意識レベルの定量化へ向けた理論と実践. *LiSA* **19**, 352–359.
8. Tononi, G., Boly, M., Massimini, M. & Koch, C. Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate. *Nat Rev Neuro* **17**, 450–61 (2016).
9. 土谷尚嗣. 意識. 脳科学辞典 10.14931/bsd.7118.
10. Haun, A. et al. Conscious perception as integrated information patterns in human electrocorticography. *eNeuro* doi: 10.1101/039032 (2017).
11. Haun, A. & Tononi, G. Why Does Space Feel the Way it Does? Towards a Principled Account of Spatial Experience. *Entropy* **21**, 1160 (2019).
12. Tsuchiya, N., Wilke, M., Frässle, S. & Lamme, V. A. No-Report Paradigms: Extracting the True Neural Correlates of Consciousness. *TICS* **19**, 757–770 (2015).
13. Nørretranders, T. *The user illusion: Cutting consciousness down to size*. (Viking, 1991).
14. 土谷尚嗣 & 西郷甲矢人. 圏論による意識の理解. 認知科学 **26**,.
15. 西郷甲矢人 & 能美十三. 圏論の道案内 ~矢印でえがく数学の世界~. (技術評論社, 2019).