

自由エネルギー原理に基づく神経回路の自己組織化における情報統合

間山輝紀, 高橋宏知

Consciousness, Integrated information theory, Free energy principle, Bayesian surprise, Cultured neuronal circuits

1. 序論

意識という現象はありとあらゆる主観的な経験である。それがなぜ、どのように立ち上がるのかは科学の最大級の難題とされている。

意識の統合情報理論 (Integrated information theory of Consciousness, IIT)[1] は意識を情報理論の観点から説明することを試みる理論である。IIT によれば意識は統合された情報であり、脳などの意識を支える物理的システムは情報を統合する能力がある。

一方で脳の自己組織化原理として提唱された自由エネルギー原理 (Free energy principle, FEP) [2] によれば脳は絶えず外界を推論している。この推論過程が意識に重要だとも考えられている。

IIT と FEP は実験的な適用が困難であり、両者の関係が調べられることはほとんどなかった。そのため、FEP に従う自己組織化の中で情報統合がどのように現れ、機能するかは未解明である。しかし近年、培養された神経回路が FEP に従って自己組織化することが示された [3]。これは情報統合の指標を比較的計算しやすい系である。そこで、本研究ではこの培養神経回路に対して情報統合の指標を計算し、自己組織化との関係を調べた。情報統合は、推論の更新量を表すベイジアンサプライズと正に相関するという仮説を検証した。

2. 方法

培養神経回路を用いた推論実験 [3] を行った。コンピュータ上に、外界のモデルである隠れ信号源を用意した。感覚刺激のモデルである電気刺激が信号源からノイズ混じりに生成された。刺激は一秒おきに神経回路に提示され、誘発応答が記録された。256回の刺激を1セッションとした。1回の実験で100セッションを行った。セッションごとに変分自由エネルギーとベイジアンサプライズを計算した。また実験中の誘発応答から、IIT やそこから派生した方法が提供する情報統合の指標を計算した。これらもまたセッションごとに計算した。

3. 結果

5つの神経回路を用いて14回実験を行った。Fig. 1 に示すように、変分自由エネルギーはセッションを通して有意に減少した (ウィルコクソン符号付き順位検定, $p < 0.05$)。

情報統合の指標を9つ計算した。Fig. 2 には代表として、[4] を参考に計算した Temporal Lempel-Ziv Complexity (t-LZC) と、ベイジアンサプライズの散布図を示す (両者は実験ごとにzスコアが取られた)。スピアマン相関係数は0.842であった。9つの指標とベイジアンサプライズとの相関係数のうち5つが0.7より大きかった。

4. 考察

培養神経回路は変分自由エネルギーを減少させるように自己組織化した。これは [3] の結果が再現されたことを意味する。

情報統合の指標とベイジアンサプライズが正に相関した。ベイジアンサプライズは感覚刺激に前もって持っていた予測から、感覚刺激後に持つ推論への更新量である。ある感覚刺激を予期できていた場合、ベイジアンサプライズが小さいと同時に、局所的かつ分散的な情報処理が行われ情報統合も

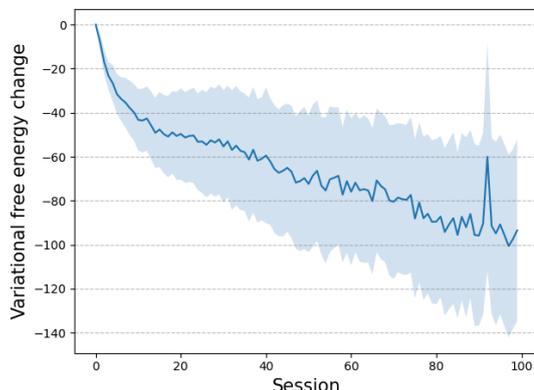


Fig. 1. Transition of variational free energy.

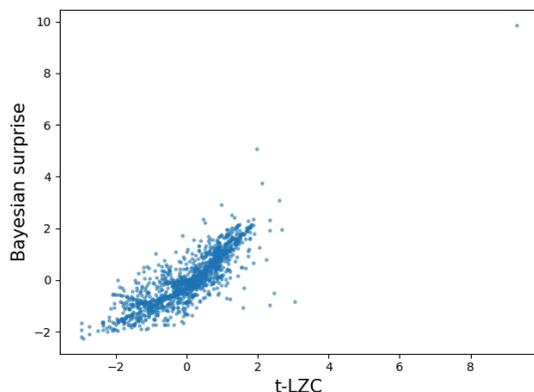


Fig. 2. Bayesian surprise and t-LZC.

小さい可能性がある。一方、予期できていなかった場合、ベイジアンサプライズが大きくと同時に、大域的で統合的な情報処理が行われ情報統合も大きい可能性がある。

5. 結論

本研究は培養神経回路を用いて意識を支える情報統合と FEP に従う自己組織化との関係を調べた。情報統合がベイジアンサプライズと正に相関するという仮説を支持する結果が得られた。意識やそれを支える情報統合は、推論の更新として現れ、機能する可能性が示唆された。今後は数学的定式化やシミュレーションを通して両者が相関するメカニズムの同定を試みる。

参考文献

- [1] G. Tononi, M. Boly, M. Massimini, and C. Koch, "Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate", *Nature reviews neuroscience*, vol. 17, no. 7, 2016, pp. 450–461.
- [2] K. Friston, "The free-energy principle: a unified brain theory?", *Nature reviews neuroscience*, vol. 11, no. 2, 2010, pp. 127–138.
- [3] T. Isomura, K. Kotani, Y. Jimbo, and K. J. Friston, "Experimental validation of the free-energy principle with in vitro neural networks", *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, 2023, p. 4547–4548.
- [4] A. G. Casali et al., "A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behavior," *Science translational medicine*, vol. 5, no. 198, 2013, p. 198–199.