

蔵本モデルにおけるカオスの統合情報量

Integrated Information of Chaos in the Kuramoto Model

1W173121-0 松野 紘大 指導教員 尾形 哲也 教授

MATSUNO Kota

Prof. OGATA Tetsuya

概要： 近年、意識の発生に統一的な説明を与えるとして統合情報理論が注目されている。この理論ではシステム内部で情報が統合されることで意識が生じると考えられ、統合により新たに生じる情報を統合情報量と呼ぶ。意識を解明するにはどのような場合に統合情報量が増加するか知見を得ることが重要となる。そこで、脳において生じる決定論的カオスに注目し、「脳内における非線形力学系において、ニューロンの活動が統合されることにより決定論的カオスが現れ、情報が生成されることで統合情報量が高まり意識が現れる」という仮説を立てた。本研究では蔵本モデルという非線形力学系を扱い、カオスによって統合情報量が高まるのか検証した。検証の結果、統合情報量はリアプノフ指数が正となる区間では高まり、アトラクターが安定した軌道になると同時に低下した。よって、蔵本モデルにおけるカオスで統合情報量が高まることが示された。これは仮説を支持する結果である。

キーワード：意識、情報、カオス、同期現象

Keywords: consciousness, information, chaos, synchronization

1. はじめに

意識がどのように発生しているか、様々な分野で研究が行われているが未だに解明には至っていない。その中で、意識の発生に統一的な説明を与えるとして統合情報理論[1]が注目されている。統合情報理論ではシステム内部において情報が統合されることで意識が発生すると考えられている。情報が統合されることにより、新たに生じる情報を統合情報量と呼ぶ。この統合情報量が意識レベルに対応していると考えられている。

そして、意識の発生するメカニズムであるが脳におけるニューロン同士の相互作用が関係していることは間違いない。脳の神経活動において見られる特徴的な現象の一つに決定論的カオスがある。この脳において生じる決定論的カオスと意識の関係を解き明かすことは非常に興味深い。

そこで、本研究では「脳内における非線形力学系において、ニューロンの活動が統合されることで決定論的カオスが現れ、情報が生成されることにより統合情報量が高まり意識が現れる」という仮説を立て、検証を行った。脳の数理モデルとして蔵本モデル[2]を扱い、蔵本モデルにおけるカオスの統合情報量を計算することで仮説の検証を行った。

2. 統合情報量の計測

統合情報量にはいくつかバージョンがあるが、本研究では Φ^* [3]と呼ばれる統合情報量を扱う。 Φ^* は

以下の式によって計算することができる。

$$\Phi^*(X^{t-\tau}; X^t) = I(X^{t-\tau}; X^t) - I^*(X^{t-\tau}; X^t) \quad (1)$$

第一項は過去の状態 $X^{t-\tau}$ と現在の状態 X^t から計算される相互情報量である。第二項も同様に相互情報量であるが、各要素が独立であるという仮定の下で計算される。仮想的にシステムの相互作用をなくした相互情報量との差を取ることで、システムが持つ統合情報量を定量化する。

3. 蔵本モデル

蔵本モデルとは同期現象を記述した数理モデルである。N個の振動子からなる蔵本モデルは以下のように定義される。

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i - \frac{K}{N} \sum_{j=1}^N \sin(\theta_j - \theta_i) \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

θ_i は各振動子の位相、 ω_i は各振動子の固有振動数、 K は結合強度を表す。 $K=0$ の場合、各振動子はそれぞれの固有振動数に従って振動する。 K が大きくなるにつれ振動子は同期するようになり、 K が十分に大きくなると全ての振動子が同期する。

蔵本モデルでは $N \geq 4$ の場合にカオスが見られる。蔵本モデルでは N が大きくなるほど強いカオス性を示すことが分かっている。

4. 実験設定

4つの振動子から構成され、それぞれの固有振動

数が $[-1.5, -0.5, 0.5, 1.5]$ である蔵本モデルについて統合情報量を計算する．状態の定義は位相，角速度，位相・角速度の3通りとした．位相，角速度は状態数10で離散化することで定義され，位相・角速度は位相と角速度を状態数3で離散化した後，それらを組み合わせることで状態数9として定義された．

このパラメータにおける蔵本モデルの振る舞いについては解析が行われており，カオスが現れることが分かっている[4]．以下の図1は先行研究よりリアプノフ指数の計算結果を引用したものである．このリアプノフ指数は以下のように定義される位相差について計算したものである．

$$\varphi_i = \theta_{i+1} - \theta_i, \quad i = 1, \dots, 3 \quad (3)$$

リアプノフ指数が正となるのは結合強度が $K_{td} \approx 1.41$ から $K_{cr} \approx 1.83$ の区間である．

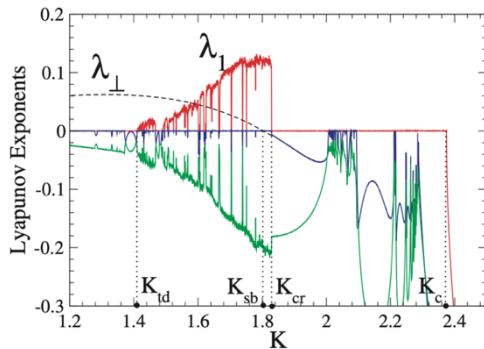


図1 実験パラメータにおけるリアプノフ指数

5. 実験結果

位相，角速度，位相・角速度の統合情報量を図3に示す．どの状態の定義においてもリアプノフ指数が正となる区間では全体的に統合情報量が高い傾向が見られる．しかし， $K_{sb} = 1.80$ から急激に統合情報量が低下した．

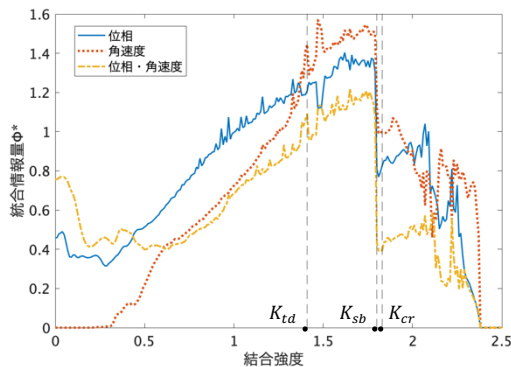


図2 蔵本モデルにおけるカオスの統合情報量

急激に統合情報量が低下した結合強度 $K_{sb} = 1.80$ 付近のアトラクターを確認したところ図3のようになった． $K=1.79$ では不規則な軌道を描いているが， $K=1.80$ から安定した軌道へと変化している様子が見られ，カオス性が消失していることが分かる．そして， $K=1.81$ になると軌道はリミットサイクルを描くようになる．このことから，統合情報量の急激な低下はカオス性の消失によって引き起こされていると考えられる．

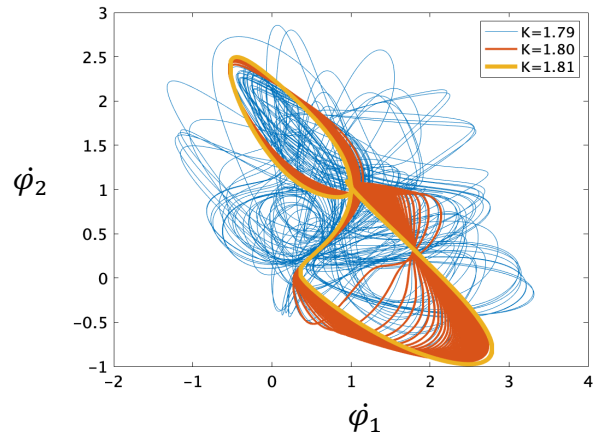


図3 $K=1.80$ 付近におけるアトラクター

6. 結論 (まとめ)

蔵本モデルについて統合情報量を解析したところ，リアプノフ指数が正となる区間では統合情報量が高まることが確認できた．そして，カオス性が消失し，アトラクターが安定した軌道を描くようになると統合情報量は低下することが分かった．

このことから蔵本モデルにおけるカオスで統合情報量が高まることが示された．これは仮説を支持する結果であり，脳活動で見られるカオスにおいても統合情報量が高まる可能性が考えられる．

参考文献

- [1] G. Tononi, "An information integration theory of consciousness," *BMC Neuroscience*, 5:42, 2004.
- [2] Y. Kuramoto, "Self-entrainment of a population of coupled non-linear oscillators," *International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics. Lecture Notes in Physics*, Vol. 39, pp.420-422, 1975.
- [3] M. Oizumi, S.-i. Amari, T. Yanagawa, N. Fujii, N. Tsuchiya, "Measuring Integrated Information from the Decoding Perspective," *PLoS Comput Biol* 12(1): e1004654, 2016.
- [4] Y. L. Maistrenko, O. V. Popovych, P. A. Tass, "CHAOTIC ATTRACTOR IN THE KURAMOTO MODEL," *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 15, No. 11, pp. 3457-3466, 2005.