

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K17822

研究課題名（和文）細胞、脳、群れにおける適応的な自己維持のダイナミクスと情報的閉包

研究課題名（英文）Dynamics of Homeostasis and Informational Closure in Cells, Brains and Swarms

研究代表者

升森 敦士 (Atsushi, Masumori)

東京大学・大学院総合文化研究科・特任研究員

研究者番号：10870165

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に、神経回路と群れの自己維持について情報理論的な手法で研究を行った。神経回路の研究では、刺激を避ける原理と情報的閉包の関係について研究を行い、刺激回避と情報的閉包を実現する方法に対応関係があることが示唆された。群れの研究では、粗視化したスケール間での情報流を計算した。その結果、群れの表面でマイクロからマクロへの情報流が高くなり、群れの内部では逆向きの情報流が高くなるのが分かり、群れの表面で自己組織的に構造ができそれが安定化していることが示唆された。細胞については、化学反応による学習や自己維持に関して考察し、オートポイエーシスの膜モデルの拡張や反応拡散系によるモデル設計を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

生命における適応的な自己維持の性質は、システムのスケール（マイクロ・マクロなど）に関わらず、最も重要な特性である。本研究では、細胞、脳（神経回路）、群れというスケールの異なるシステムにおける自己維持について研究を行うことで、生命にとって本質的な適応的な自己維持を実現するための情報処理の原理を探求している。このようなスケールによらない生命の一般的な性質に関する研究を行うことは生命システムの理解に不可欠である。また、ここで得られる成果は、今後、人工システムを生命システムのように自律的でロバストなものへと拡張するために活かされることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we primarily employed information-theoretic methods to study the homeostasis of neural networks and flocks. In the study on neural networks, we explored the relationship between stimulus avoidance and informational closure, suggesting a correspondence between the methods that realize stimulus avoidance and informational closure. In the research on flocks, we calculated inter-scale information flow between micro and macro. As a result, we found that information flow from micro to macro scales was high on the surface of the flock, while the reverse information flow was high within the flock. This suggests that structures self-organize on the surface of the flock and contributing to its stability. With regard to cells, we discussed learning and self-maintenance via chemical reactions and made progress in model design by extending the membrane model of autopoiesis and implementing reaction-diffusion systems.

研究分野：人工生命

キーワード：ホメオスタシス 自律性 刺激を避ける原理 情報的閉包 スパイキングニューラルネットワーク ボイドモデル トランスファーエントロピー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

生命にとって適応的に自己を維持するという性質は、マイクロ・マクロなどのシステムのスケールによらず最も重要な性質であると考えられる。このような生命にとっての一般的な性質を理解することは根元的なテーマの一つである。これまでも、サイバネティクスの時代にアシュビーを中心にホメオスタシスの重要性が説かれ、近年でもホメオスタシスを出発点として議論が展開されるフリストンの自由エネルギー原理が注目を集めている。これらは、生命の一般原理として展開されるものであるが、関連する研究のほとんどが脳を前提としたものである。脳はあくまで、比較的マクロなスケールで、予測可能な環境を前提とした適応システムであると考えられる。脳だけでなく、単細胞のようなマイクロなスケールや、脳を持った個体の集合からなる群れのように、よりマクロなスケールをも視野に入れた総合的な視点が生命の一般的な性質を理解する上では重要である。

生命の原理について、自己の規定や自己維持といった視点から、これまでもオートポイエーシスなどの構造的な閉包や、自己触媒ネットワークによる触媒的な閉包など様々なかたちで議論されてきた。近年、情報理論的に自他の区別を定義する情報の閉包 (informational closure) が提案されているが (Bertschinger et al., 2008)、これは情報理論をベースとしており、システムのスケールや詳細によらず議論が展開できるという利点がある。

2. 研究の目的

本研究では、細胞、脳、群れというスケールの異なるシステムにおける自己維持について理論研究を行い、生命にとって本質的な適応的な自己維持を実現するための情報処理の原理を見出すことを目的とする。本研究では、特に、脳、群れの各モデルに関しては、シミュレーション実験を行い、それぞれのシステムスケールにおける適応的な自己維持の方法について、情報理論的な解析によって研究する。それらの結果をもとに、情報理論的な手法をベースとした統一的な視点から対比を行い、共通点と相違点について注目しながら解析することで、システムの詳細やスケールによらず、生命にとって本質的なホメオスタシスを実現するための情報処理の原理について議論を行う。

3. 研究の方法

本研究では、主に、神経ネットワークと群れに関して情報理論的な手法で自己維持に関する研究を行った。(1) 神経ネットワーク研究では刺激を避ける原理と情報の閉包の関係について、(2) 群れの研究では、粗視化したスケール間での情報流を計算することで、群れの構造について解析を行った。細胞に関しては、化学反応ルールによる学習や自己維持に関して考察し実験のためのモデル設計を進めた。具体的には、オートポイエーシスの膜モデルを拡張して刺激を避けるふるまいをさせるモデル、反応拡散系での入出力の因果関係の学習モデルの設計を進めている。これらについては今後の研究で引き続き進めていく予定である。

(1) 神経ネットワーク

神経ネットワークに関する研究では、スパイクングニューラルネットワークと情報の閉包について研究を行った。これまでにわれわれの行った研究によって明らかにしたスパイクタイミング依存可塑性 (STDP) を持ったスパイクングニューラルネットワークが刺激を避ける 3 つの方法 (行動、予測、分離) と、Betschinger らが示した情報の閉包を構成するための 3 つの方法 (control, modeling, independence) には対応関係があるように見える。そこで本研究では、刺激を避ける学習を行ったスパイクングニューラルネットワークのデータを解析することで、実際に情報の閉包が構成されているかどうかの検証を行った。

情報の閉包は情報理論に基づいてシステムの閉包の概念を形式化するもので、環境からシステムへの情報の流れがゼロになる状況として定義される。ここでの情報の流れは、トランスファーエントロピー (TE; Schreiber2000) として計算される。情報の閉包を実現する自明なものとして、環境とエージェントが独立している場合 (TE) だけでなく相互情報量もゼロになる) がある。非自明な情報の閉包として、TE はゼロであるが、環境とエージェントの相互情報量は高くなるケースが考えられ、その方法として大きく、環境のモデル化などによる適応 (modeling) と環境の制御 (control) の二つの方法があることが議論されている。

例えば、システム S と環境 E という二つのプロセスがあると仮定する。システムの状態は S_t 、環境の状態は E_t として表される。これら二つのプロセスは、チャンネ

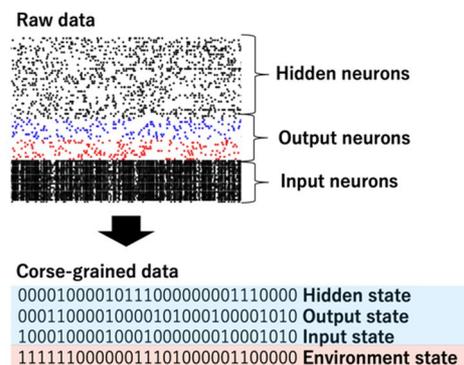


図 1. ニューロンのスパイクデータから粗視化したデータをつくる処理

ル \hat{s} と \hat{e} を介して相互に作用できるものとする。このシステム間の情報流 J_t は、環境 E_t の状態からシステム S_t の状態への条件付き相互情報量 I として定義され、以下のように計算できる：

$$J_t(E \rightarrow S) := I(S_{t+1}; E_t | S_t),$$

$$= I(S_{t+1}; E_t) - (I(S_{t+1}; S_t) - I(S_{t+1}; S_t | E_t)).$$

これは TE と一致する。ここで、相互情報量 $I(p; q)$ は $\sum p \log(p/q)$ として定義される。システムは、情報流がゼロになったときに情報的に閉じていると考えられる。自明なケースでは、システムは環境から独立しており、 $I(S_{t+1}; E_t) = 0$ 、 $J_t(E \rightarrow S) = 0$ となる。情報閉塞の非自明なケースは、 $I(S_{t+1}; E_t) > 0$ 、 $I(S_{t+1}; E_t) - I(S_{t+1}; S_t | E_t) > 0$ となる場合に生じる。非自明な情報閉包は以下のように定義することができる：

$$NTIC_t(E \rightarrow S) := I(S_{t+1}; S_t) - I(S_{t+1}; S_t | E_t).$$

非自明な情報閉包が現実的に生じるシナリオとして、modeling と control の二つが考えられる (Passive adaptation も (Bertschinger et al, 2006) で議論されているが、システムが環境中の全ての情報を観察できるという現実的でない仮定を前提としているため、ここでは含まない)。Modeling の場合、システムは環境のモデルを持つことで、環境のダイナミクスを予測し、適応することが可能になり、これによって、システムは自身の状態を環境と同期させることができる。結果として、環境からシステムへの情報流 $J(E \rightarrow S) = 0$ を最小にすることができる。しかし、非自明な情報閉包の尺度 $NTIC(E \rightarrow S)$ は、 J がゼロの場合でもシステムが予測的な適応能力を持つことを反映して、ゼロより大きい値を持つ可能性がある。Control のシナリオでは、システムは環境を制御することで環境に作用し、その結果、 ES 間の相互情報量は高いが、 E から S への TE は低く、かつ、 $NTIC_t > 0$ とすることが可能となる。

この $NTIC$ をスパイクニューラルネットワークの学習実験のデータを粗視化したデータ (図 1) をもとに計算することで、これらの関係について検証し考察を行った。

(2) 群れ

群れに関する研究では、主にスケール間の情報流の解析を行った。例えばボイドモデルのような場合、群れの数やダイナミックに変化し、かつ、その構成要素も常に変化しているようなケースでは、通常、小さな群れとそれらが集まったより大きな群れとの間の情報流を各エージェントの状態から計算するといったことは困難である。そこで本研究では、エージェント単位ではなく、空間を格子状に分割し、そのセル内にいるエージェントの状態を平均した値をそのセルの値とするといったかたちで粗視化する手法を提案する。これをボイドモデルの大規模な群れ (1.6 万~50 万) のデータ (図 2A) に適用した。いくつかのスケール (空間の各軸の分割数で表現すると、2、4、8、16、32、64 の 6 段階) で粗視化 (図 2B) したうえで各スケール間のトランスファーエントロピーを計算することで解析を行った。

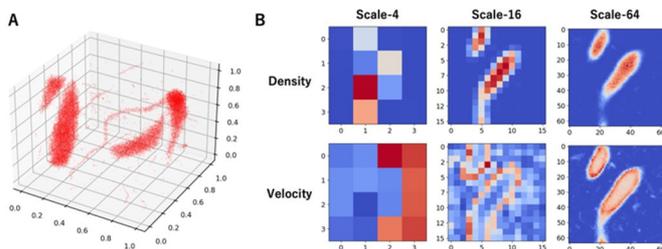


図 2. A: 群れのシミュレーションのスナップショット。B: 空間を粗視化したデータのサンプル。

マクロとミクロのスケール間の情報流を推定するために、我々はトランスファーエントロピー (TE; Schreiber et al., 2000) を用いた。この尺度は、二つの時系列間の情報の流れを定量化する。例えば、 a から b への高い TE は、 a が b の不確定性を減少させることを意味し、これにより因果関係の強さを推論することが可能となる。

時系列 J から時系列 I への転送エントロピーは以下のように定義される：

$$T_{J,I} = \sum p(i_{t+1}, i_t, j_{t+1}) \log \frac{p(i_{t+1} | i_t, j_{t+1})}{p(i_{t+1} | i_t)},$$

ここで、 i_t と j_t はそれぞれ時系列 I と J の時刻 t での値を示す。われわれは、エージェントの速度の時系列に基づいて TE を計算し、下向きの情報流 (高いスケールから低いスケールへの TE) と上向きの情報流 (低いスケールから高いスケールへの TE) を計算した (図 3)。

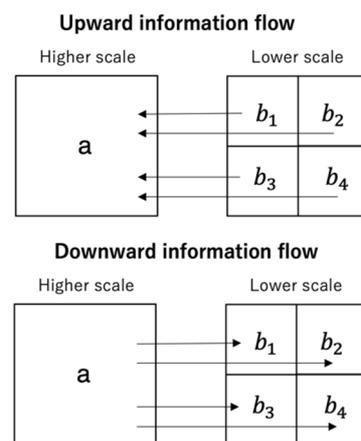


図 3. 上向きの情報流と下向きの情報流の概念図。

4. 研究成果

(1) 神経ネットワーク

Bertschinger による情動的閉包を形成する 3 つの方法は、スパイクニューラルネットワークの刺激回避の方法と一致するとわれわれは考えている。これを検証するために、スパイクニューラルネットワークを用いて行われた実験 (図 4) から得られたデータに対して、 $NTIC(E \rightarrow S)$ を計算した。

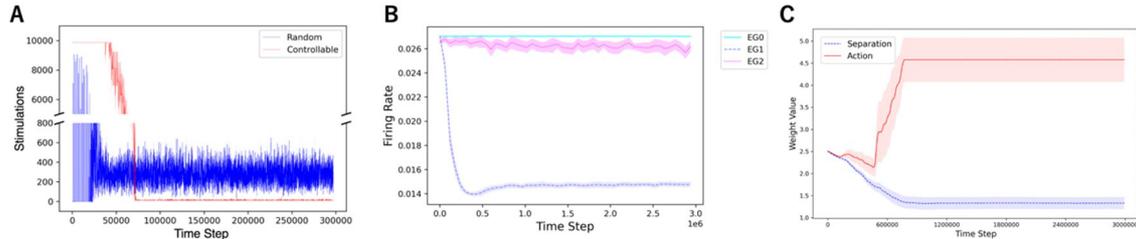


図 4. A: 刺激を避ける行動の学習実験の結果。刺激を回避するまでにかかったステップ数の時間変化。B: 予測による刺激回避の学習実験の結果。予測して予測されることで、予測可能な刺激を受けている EG1 のみ発火頻度が下がっている。C: 分離によって刺激を回避している実験の結果。行動で刺激が回避できない条件 (Separation) では入力ニューロンからの重みが小さくなっていることがわかる。

計算の結果を図 5 に示す。

行動による刺激回避の実験 (Action) の場合、 J と $NTIC$ の値はネットワークの初期化直後に両方とも増加するが、 J の値は $NTIC$ の値よりも高い (図 5A)。つまり、この状態は情動的閉包ではないと考えられる。 J の値が高い理由は、刺激を避けるために学習した行動がリアクティブなものであった (つまり、行動は刺激後に生じた) ためと考えられる。一方、高い $NTIC$ はおそらく、システムが環境に与える影響、つまり、行動によって刺激が止められた方法によるものである。

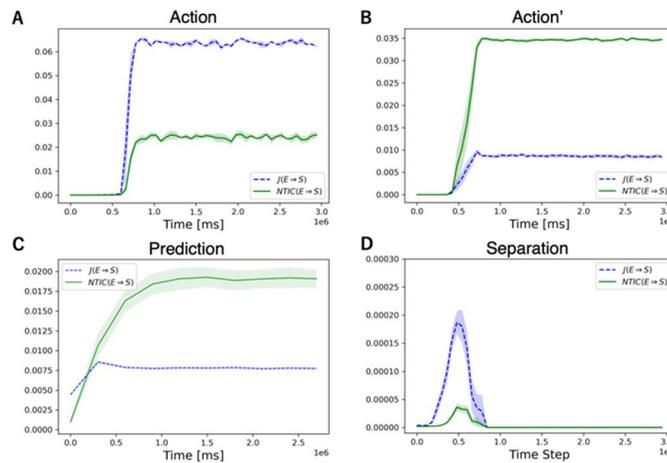


図 5. 非自明な情動的閉包 ($NTIC$) とトランスファーエントロピー (TE)。A: 外部刺激をとめるための学習実験。B: A の実験を内部刺激をとめると解釈した計算した場合。C: 予測実験。D: 分離実験。

別の行動生成のケース (Action') では、Action と同じ実験のデータを、ネットワークが内部のサブシステムから刺激を受けて出力ニューロンが特定のパターンを示すと、その内部刺激が停止するケースであると解釈して

計算したものである。このモデルが示す状況の一例として、空腹時に胃から信号が生成され、食物が摂取されるとその信号が停止するといった状況が考えられる。この場合、環境の状態は、ネットワークが環境から食物を得るような行動をした場合に 1、それ以外の場合に 0 であり、システムのデータは上述の最初の行動のケースと同様である。このシステム内からの刺激による行動生成の例では、 $NTIC$ の値はネットワークの初期化直後に J よりも高く、 J は安定した低い値であった (図 5B)。これは、情動的閉包を構成する傾向として捉えられる。これは、内部の刺激によって引き起こされる自発的な行動が、環境に影響を与えたことによる結果であると考えられる。これは、情動的閉包の非自明なケースのうちの control に対応していると考えられる。

次に、予測のケースでも、 TE は比較的低い値で安定し、 $NTIC$ は徐々に増加することが示された (図 5C)。刺激が存在しない状態でも入力ニューロンは自発的に発火するため、全ての入力ニューロンの発火を予測し、それらを出力 (抑制) ニューロンで抑制することが不可能であったため、 J の値はゼロに達しなかった可能性が考えられるが、 TE の値は低い値で安定しており、 $NTIC$ は高くなっていることから情動的閉包の傾向があると捉えられる。これは、情動的閉包の非自明なケースのうちの modeling に対応していると考えられる。

最後に、分離のケースでは、ネットワークの初期化後に J と $NTIC$ の両方がゼロになることが示された (図 5D)。この結果は、 $I(S_{t+1}; E_t) = 0$ であることを示しており、つまり、システムと環境は互いに独立している。この場合、分離による刺激回避は情動的閉鎖の自明なケースと一致す

ると考えられる。

このように、リアクティブな行動以外は情報の閉包を構成すると捉えられる結果であった。Action' のように自発的な行動や、予測と行動を組み合わせたプロアクティブな行動をする場合も同様に情報の閉包を構成すると考えられる。このようにシミュレーション実験と解析から、因果関係を強化していく STDP のダイナミクスによって刺激回避が生じ、その結果は情報の閉包を構成することが示された。今後、STDP のダイナミクスと情報の閉包の理論的なつながりについて詳細を研究していく。

(2) 群れ

各軸の分割数が 2, 4, 8, 16, 32, 64 の粗視化したデータに対して、スケール間の下向きと上向きの TE を計算した。図 6 左に示されるように、下向きの TE は、2 と 4 の間と、ミクロ側の空間解像度が高い 32 および 64 のスケールでより高い値を示した。一方、上向きの TE はミクロ側のスケールが小さくなるにつれて値が増加する傾向があった。これは 50 万個体のシミュレーションの場合でも同様の結果であった。この、特に下向きの TE に関しては、階層的な情報流の存在を示唆するものであり興味深い。

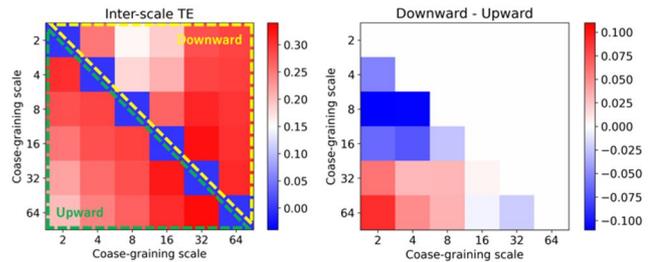


図 6. 左: スケール間の上向き・下向きのトランスファーエントロピー。右: 下向きと上向きの値の差分。

また、図 6 右にあるように、2, 4, 8 と 32, 64 の組み合わせでは上向きよりも下向きの TE が高くなる傾向がみられた。我々のシミュレーションにおける大きな群れ、小さな群れ、そして細い、糸のようにつながった群れの特徴は、それぞれスケール 2, 4, 8 での 1 セルレベルで捉えられていると考えられる。さらに、個体間の相互作用範囲は空間が 1 に正規化されたときに 0.01-0.05 の範囲であり、これはグリッドの解像度が 20-100 の範囲にあるときの 1 セルに相当する。上記の結果はこれらを反映した結果である可能性があり、今後より詳細な解析行っていく。

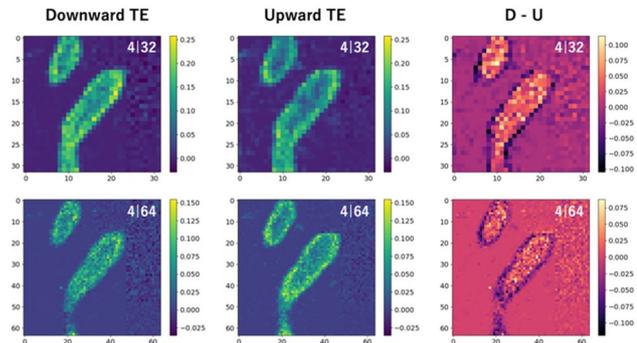


図 7. スケール間のトランスファーエントロピーの局所的な分布。左: 下向きのトランスファーエントロピー。中央: 上向きのトランスファーエントロピー。右: 両者の差分。

局所的な TE の分布をみると、群れの表面では上向きの TE が高い傾向があり、群れの内部では下向きの TE がより高くなる傾向がみられた (図 7 左・中央)。このパターンは、表面の上向き TE と群れ内の下向き TE を比較するとより明瞭になる (図 7 右)。これは群れの表面で自己組織化が生じ、それのできた構造によって内部の個体が制御され秩序状態が保たれていると解釈できる。また、各スケール内での隣接セルとの TE も計算したところ、群れの表面で特に高い値になることがわかった。情報のやりとりは群れ表面で生じていることを示唆している。これらは、50 万個体のシミュレーションの場合でも同様の結果であった。

このように群れの情報理論的な解析から、群の表面で構造をつくりそれが内部を制御することで群れが安定化しているといったように群れの自己維持の仕組みが見出された。今後の研究で、この群れと情報の閉包の関係についても引き続き研究を進めていく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 升森 敦士	4. 巻 37
2. 論文標題 自律性・模倣・憑依：ヒューマノイドAlter を用いた身体化された心の研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 人工知能	6. 最初と最後の頁 19～26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11517/jjsai.37.1_19	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Atsushi Masumori, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Stimulus Avoidance and Informational Closure in Spiking Neural Networks
3. 学会等名 AROB-ISBC-SWARM 2022（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 升森敦士
2. 発表標題 Defining and Building an Agency
3. 学会等名 第1回人工生命研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Atsushi Masumori, Norihiro Maruyama, Takashi Ikegami
2. 発表標題 Exploring Multi-Level Inter-Scale Information Flow in Large-Scale Boids Model
3. 学会等名 The 2023 Conference on Artificial Life（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------