

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：32652

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K03423

研究課題名（和文）ネットワーク理論の内在的展開

研究課題名（英文）Network Theory from Endo-perspective

研究代表者

春名 太一（Haruna, Taichi）

東京女子大学・現代教養学部・准教授

研究者番号：20518659

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：複雑系における異なるレベル間の関係の在り方に対する内在的観点からの研究を、ネットワーク上のダイナミクスと情報流、および内側から開いたネットワークについて行った。前者では、遺伝子調節ネットワークなどの数理モデルであるブーリアンネットワーク上の局所情報流の最適化からある種の臨界的なダイナミクスが選択されることを数理的に明らかにした。後者では、ネットワークの頂点をプロセスとみなすことを圏論的に定式化して内側から開いたネットワークを定義した。これから導出される側方経路概念を用いて頂点の入力あるいは出力としての重要度の指標を提案し、生物ネットワーク解析への応用を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ネットワーク上のダイナミクスと情報流に関する結果は単純化された数理モデルに対するものであるが、従来から数値シミュレーションが主な研究手法である複雑系の内在的観点からの理論研究において、数理的結果を得ることができることを示した理論的意義は大きい。内側から開いたネットワークに関する結果は、従来は別々に発展してきた主に統計物理学に基づく複雑ネットワークの科学と数学の圏論に基づくネットワーク理論の橋渡しとなる萌芽的な成果であり、両者の更なる相互作用による今後の発展が期待できるものである。

研究成果の概要（英文）：Modes of the relations between different levels in complex systems were investigated from the endo-perspective. In particular, we studied the dynamics and information flow on networks and networks open from within. In the former, we mathematically clarified that a kind of critical dynamics is selected from the optimization of local information flow on Boolean networks, which are mathematical models of gene regulatory networks. In the latter, we defined the notion of networks open from within by formulating the idea that nodes in a network are processes in the language of category theory. We proposed measures of the importance of nodes as inputs and outputs using the notion of lateral path derived from this formulation. We applied the measures to biological network analysis.

研究分野：複雑系科学

キーワード：圏論 ネットワーク 数理モデル

1. 研究開始当初の背景

本研究は、システム内在的な異なるレベル間の関係の在り方をどのように理解するかという、内部観測論をはじめとして古くから複雑系科学において議論されてきた問題について、より現代的な問題設定と技術を通じた数理的研究を行い、複雑系の作動原理の理解を深めることを目標として開始された。この目標を達成するために、当初は以下の二つの方向から研究を進めることになっていた。

- (1) ネットワーク上の状態のダイナミクスとそのダイナミクスが生み出す情報流の関係性についての研究
- (2) 入出力のある開いたネットワークを扱う圏論的ネットワーク理論の内在的展開

2. 研究の目的

上記の二つの方向性について以下の目的で研究を開始した。

- (1) 与えられたネットワーク上の状態のダイナミクスが生み出す情報流を定量化するだけでなく、逆にネットワーク内の各要素における局所的な情報流が最大化されるという制約が課されるとき、どのようなネットワーク上の状態のダイナミクスが選択されるのかを明らかにすること
- (2) 入出力のある開いたネットワークを扱う圏論的ネットワーク理論における「プロセスとしてのネットワーク」というアイデアをネットワーク自体へと内在化する「内側から開いたネットワーク」に関する理論を構築すること

3. 研究の方法

上述の二つの項目について、以下の方法で研究を行った。

- (1) 遺伝子調節ネットワークをはじめとした実世界の様々なネットワークのダイナミクスの数理モデルとして用いられ、またダイナミクスが生み出す情報流の定量化が容易であるブーリアンネットワークを対象とした。ネットワーク内の各要素における局所的な情報流を、その要素とその要素への入力となる要素たちとの間の局所時間遅れ相互情報量を用いて定義し、これを最大化するようにその要素の未来の状態が決定されるというモデルを考案した。このモデルの定常状態における振舞いを、コンピュータシミュレーションと数理的解析により調べた。
- (2) 圏論的ネットワーク理論を内在化するには、ネットワーク全体ではなく、ネットワーク内の各頂点をモノではなくプロセスとして考えるということである。このアイデアを圏論における Kan 拡張を用いて定式化すると、「頂点をプロセスとみなす」という考え方に対する圏論的普遍性から得られる、側方経路と呼ばれる有向ネットワークの経路概念が導出される。これを用いて、各頂点の入力あるいは出力としての重要度の指標を定義し、実世界の有向ネットワークデータに適用した。

4. 研究成果

上述の二つの項目について、当初の計画に直接関連する成果として以下を得た。

- (1) ブーリアンネットワーク上の局所情報流の最適化により、定常状態において各要素があたかも特定の時間発展規則（ブール関数）にしたがって状態変化する状況が出現することが数値シミュレーションの結果から予想され、定常状態で安定化するブール関数がみ出す条件を抽出した。その上で、抽出した条件をみ出すことが提案モデルにおいて安定化するブール関数がみ出すべき必要十分条件であることを数学的に証明した。また、安定化するブール関数は実際の生物の遺伝子調節ネットワークにおいてしばしば観測される canalyzing 関数と呼ばれるブール関数のクラスに属するものであり、かつ各要素が安定化したブール関数にしたがって時間発展する場合、系全体のダイナミクスは必ず臨界的になることを明らかにした。
- (2) 「研究の方法」で述べた有向ネットワークの側方経路概念に関する媒介中心性を定義した。側方経路とは、矢印の向きが交互に逆になっているような経路である。与えられた頂点に対して、その頂点を通過する一つの側方経路を考えたとき、その頂点はその側方経路に含まれる矢印の始点として通過される場合と、終点として通過される場合とがある。それぞれの場合に最短側方経路のすべてを考慮することで、その頂点の入力としての重要度を測る媒介中心性と出力としての重要度を測る媒介中心性を定義することができる。こうして得られた指標を遺伝子調節ネットワーク、神経ネットワーク、食物連鎖網のデータに適用して調べ、また関連する従来の指標との比較も行い、導入した指標が従来の指標では捉えがたい側面を明らかにできることを示した。

また、以上の二つの項目について、それぞれ以下のような派生する結果を得た。

- (1) 当初の計画では外部からの入力あるいは雑音がないネットワークのダイナミクスとその情報流を対象とすることになっていたが、入力のあるネットワークの情報処理能力の指標と

して知られている記憶容量に関する研究を行った。Echo State Network (ESN)と呼ばれるモデルにおいて、入力強度が弱い場合に記憶容量を平均場近似を用いて計算する理論を構築し、ネットワークの持つ記憶容量が最大化されるのは、入力が無い場合の臨界点の不安定側かつ入力がある場合の臨界点の安定側のパラメータ領域であることを示した。また、相互情報量やFisher情報量などの記憶容量に関連する指標についても定性的に類似の結果となることを示した。また、入力のあるダイナミクスの最も単純な設定として、要素数1の場合で、特に雑音誘起秩序や雑音誘起カオスが起る系の振舞いについても調べた。このような系については、雑音誘起現象のメカニズムには依存しないべき乗則を伴う間欠的ダイナミクスを抽出でき、これが乗法的確率過程の理論を用いて説明できることを示した。さらに、ネットワーク上のダイナミクスから得られる多変数時系列における時系列間結合の複雑性を定量化する方法を提案した。これは、各時系列のセグメントの順序パターンとその交わりから構成される単体的複体が、セグメントの長さをパラメータとして複体のフィルトレーションをなすことからそのパーシステントホモロジーを計算することができ、その1次ホモロジー群のランクを用いて時系列間結合の複雑性の指標を定義するというものである。この指標が、完全同期している多変数時系列では0、一定の一般的な条件をみたく独立な時系列からなる多変数時系列では時系列の個数が多いとき高い確率で値1をとることを証明した。どちらでもない場合には1より大きな値をとり得、時系列間結合の複雑性の尺度としての整合性が確立されたことになる。結合カオス系に対する数値シミュレーションを行い、非同期でも完全同期でもない、部分同期クラスターが生ずるパラメータ付近でこの指標が大きな値をとることを示した。

- (2) 当初の計画で「プロセスとしてのネットワーク」という考え方をネットワークに内在化するために用いた圏論のKan拡張を用いて、ネットワークを含む様々な数理モデルにおける選択構造の一般的定式化を行い、成長するネットワークのモデル、新規タイプ出現のポリヤの壺的モデル、標本空間縮減過程のモデルなどに適用した。成長するネットワークのモデルの研究においては、この定式化により従来は難しいとされていた、ネットワークの次数分布のべき乗則の指数が-1未満の任意の値をとる密なスケールフリーネットワークを生成できるモデルを提示した。さらに、この定式化の下でモデルの変形を行い、密なスケールフリーネットワークを生成するという性質は保ったまま、現実的な高次構造を生成されるネットワークに持たせることができる新しいモデルを作ることに成功した。新規タイプ出現のポリヤの壺的モデルの研究においては、この定式化により得られたモデルにおけるタイプの個数の確率分布の時間発展をFokker-Planck方程式とその漸近展開にもとづく近似理論により調べ、Zipfの法則、Heapsの法則、Taylorの法則と呼ばれる三つのべき乗則を導出することに成功した。標本空間縮減過程のモデルの研究においては、区間上の反復写像系にこの定式化を適用することにより、与えられた写像に対してそのランダムな写像の引き戻しをとる過程に基づく新しい標本空間縮減過程のモデルを導出した。さらに、与えられた写像に対する標本空間縮減過程から、その写像に依存する指数の値を持つべき乗則が得られることを示し、また逆に与えられた値の指数を持つべき乗則を生み出す写像を一般的に構成する方法を発見した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Taichi Haruna	4. 巻 33
2. 論文標題 Complexity of couplings in multivariate time series via ordinal persistent homology	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Chaos	6. 最初と最後の頁 43115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0136772	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Taichi Haruna	4. 巻 28
2. 論文標題 Sample Space Reducing Processes Arising from Random Inverse Images of Iterated Maps	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the Joint Symposium of AROB-ISBC-SWARM 2023	6. 最初と最後の頁 1382-1384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taichi Haruna, Kohei Nakajima	4. 巻 28
2. 論文標題 Generalized multiplicative stochastic processes arising from one-dimensional maps with noise	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 15-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-022-00790-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 春名太一	4. 巻 725
2. 論文標題 選択の構造としてのカン拡張：圏論とネットワークの数理モデル	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 数学セミナー	6. 最初と最後の頁 31-37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 春名太一	4. 巻 48
2. 論文標題 普遍性とそのゆらぎ：ネットワークの圏論的諸展開	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 現代思想2020年7月号	6. 最初と最後の頁 150-163
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Taichi Haruna, Yukio-Pegio Gunji	4. 巻 10
2. 論文標題 Analysis and synthesis of a growing network model generating dense scale-free networks via category theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 22351
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-79318-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Haruna, Kohei Nakajima	4. 巻 100
2. 論文標題 Optimal short-term memory before the edge of chaos in driven random recurrent networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.100.062312	査読の有無 有
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 -

1. 著者名 Taichi Haruna	4. 巻 3
2. 論文標題 Open networks from within: input or output betweenness centrality of nodes in directed networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Network Science	6. 最初と最後の頁 15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s41109-018-0076-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Haruna, Kohei Nakajima	4. 巻 20
2. 論文標題 Maximizing local information transfer in Boolean networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 New Journal of Physics	6. 最初と最後の頁 83046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1367-2630/aadbc3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Haruna	4. 巻 -
2. 論文標題 Uncertainty of the second order: Quasispecies model with inverse Bayesian inference	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-019-00526-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Taichi Haruna, Yukio-Pegio Gunji	4. 巻 9
2. 論文標題 Ordinal preferential attachment: a self-organizing principle generating dense scale-free networks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 4130
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-019-40716-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 多変数時系列に対する順序的パーシステントホモロジーの性質について
3. 学会等名 第37回SICE-SI共創システム部会/第16回内部観測研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Taichi Haruna
2. 発表標題 Sample Space Reducing Processes Arising from Random Inverse Images of Iterated Maps
3. 学会等名 Eighth International Symposium on BioComplexity (ISBC 8th 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 二重忘却系について
3. 学会等名 第36回共創システム部会研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一、中嶋浩平
2. 発表標題 Echo State Networkにおける雑音誘起記憶
3. 学会等名 第23回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 二重忘却系について～二つの事例～
3. 学会等名 2022年度内部観測研究会関東部会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 順序的パーシステントホモロジーと多変数時系列結合の複雑性
3. 学会等名 第15回内部観測研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 タイプとトークンの混同に基づく新規性出現モデルの解析
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Taichi Haruna, Kohei Nakajima
2. 発表標題 Generalized Multiplicative Stochastic Processes Arising from One-Dimensional Maps with Noise
3. 学会等名 Seventh International Symposium on BioComplexity (ISBC 7th 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Taichi Haruna
2. 発表標題 Partially Ordered Permutation Complexity
3. 学会等名 Ordinal Methods: Concepts, Applications, New Developments and Challenges (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 新規タイプ生成過程の圏論的分析
3. 学会等名 灘研究連絡会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 プロセスと制約：圏論で考えるネットワークの頂点と矢印の意味
3. 学会等名 圏論と実践的応用研究会（2020年4月26日）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 Kan拡張とランダムKan拡張
3. 学会等名 圏論と実践的応用研究会（2020年7月25日）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 ランダムKan拡張としてのランダム選択：複雑系ダイナミクスに潜む普遍的操作
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 春名太一、中嶋浩平
2. 発表標題 カオスの縁の前に～Echo State Networkの短期記憶について～
3. 学会等名 複雑コミュニケーションサイエンス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 ネットワークの圏論的数理モデリング
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2019（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taichi Haruna, Yukio-Pegio Gunji
2. 発表標題 A category theoretical perspective on an evolving network model
3. 学会等名 Conference on Complex Systems 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 観測過程の偶然性：圏論的定式化とそのネットワークの数理モデリングへの応用
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 ランダムKan拡張
3. 学会等名 第35回SICE-SI共創システム部会/第14回内部観測研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Taichi Haruna
2. 発表標題 Ordinal preferential attachment: Strictly local mechanism to produce scale-free networks
3. 学会等名 PROTOCOGNITION 2018, Workshop at ALIFE 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春名太一、郡司ベギオ幸夫
2. 発表標題 量化学子の置換がもたらすスケールフリーネットワーク
3. 学会等名 第2回共創学会年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 評価の実現がもたらすべき乗則
3. 学会等名 第32回SICE-SI共創システム部会/第13回内部観測研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taichi Haruna
2. 発表標題 Category theoretical insights into designing network models of living and social systems
3. 学会等名 Symposium on the Categorical Unity of the Sciences (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 春名太一
2. 発表標題 圏論的数理モデリングへ向けて
3. 学会等名 複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

複雑系科学研究室 http://www.lab.twcu.ac.jp/tharuna/study.html

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
---------	---------