

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420431

研究課題名(和文) 確率動力学にもとづくネットワーク上の人間-情報系のモデル化と制御

研究課題名(英文) Stochastic Dynamic Modeling and Control of Networked Human-Information Systems

## 研究代表者

早川 朋久 (Hayakawa, Tomohisa)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：30432008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：これまで行動経済学や社会科学の分野で議論されてきた、人間環境と情報の伝搬に関する確率動力学としての基礎論を、ネットワーク理論・確率過程論とを融合させて、動的システムの枠組みでモデル化した。モデルは離散時間モデルと連続時間モデルの両方を想定し、各主体を接続するネットワークは、有界なものから無限に広いモデルへと拡張していった。有界なネットワークモデルでは、グラフ理論とレプリケータ力学系を結びつけ、確率的有向ラプラシアンから状態方程式を抽出する手法を開発した。無限に広いモデルでは、パーコレーション理論を活用して、情報拡散の臨界確率を特徴付けた。

研究成果の概要(英文)：In this proposed research, a basic principle for stochastic dynamical systems for human-information networks was investigated. Specifically, the stochastic models are modeled as both finite and infinite networks depending on applications. For the finite networks, Laplacian turned out to play an important role as expected, whereas for infinite networks we made use of percolation theory to characterize the behavior of the information spread by analyzing critical probability of information transmission between agents under consideration.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワーク系 人間モデル ゴシッププロトコル

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、行動経済学や社会学の分野では、数理的解析手法を積極的に適用する試みがなされている。たとえば、情報の非対称性やプライスのパラドクスといった、ネットワーク上での社会現象の性質を特徴付けする研究結果が報告されている。社会における人間同士の情報交換をとまなう活動は、ネットワーク上の意志を持ったエージェントによる戦略的情報伝達活動がベースになると捉えることができるが、これは群ロボットなどが通信を行いながらあるプリインストールされたルールに従って行動を決定するシステムとは本質的に異なる。

(2) 人間による情報の伝達や、人間や情報の輸送経路選択問題では、個々人の選択判断（戦略）があるため、ミクロ的に考えればネットワーク上の確率システムとして理解することができる。ネットワーク理論はワッツ＝ストロガッツの「スモールワールド」によって多様な応用の可能性を再認識されたことによって、この10年の間に飛躍的に発展した。今後は、選択判断をする知的エージェント（主体）から構成されるネットワークに対して、個々のエージェントによる戦略立案（制御）とエージェントを取り巻く環境（ネットワーキング）の変化を、相互的に議論する構造化された知識体系を提示する手法が必要となってくることは明らかである。

(3) 従来の確率ネットワーク論における各エージェントは、ある機械的な確率法則に則って状態を変化すると仮定されてきた。正方形格子状に配置されたエージェントが確率的に情報を近隣のエージェントに伝達（ゴシップ）するモデルでは、エージェント同士を結びつけるリンク構造は変化せず、情報伝達の確率法則はマルコフ型、つまり過去の時系列情報を与えたとき、1期前の情報だけに依存すると仮定されている。しかしながら、実際のヒューマンネットワークにおける行動選択を考えた場合、現在と過去のデータのみに依存して機械的に振る舞うのではなく、人間は将来の環境変化や他のエージェントの振る舞いを予測しながら自分自身の振る舞いを規定しているはずである。

(4) また、人間同士の情報伝達においては、両者の利害や思惑が必ずしも一致しない場合には、戦略的行動が生じる。たとえば、情報の送り手は仮に誤った情報を送ることは社会的に許されないとしても、所有している情報を伝達しない（隠す）という行為は、開示情報の信頼性は高いが不都合な情報の非開示が想定されるような公共情報の発信においては極めて一般的である。あるいは、個々の人間のコミュニケーションでは、情報の非開示だけでなく、ウソ・真実やその中間といったような極めて不確かな情報の交換

が想定され、その情報の真偽は一般に検証が難しい。

### 2. 研究の目的

(1) 一般に、個々のエージェントが自分自身の評価関数を最大化するように振る舞うことは、ネットワーク上の全体のエージェントの総体的な評価関数を最大化することにはつながらない。その典型的な例にプライスのパラドクスと呼ばれる、ネットワーク構造の変化による総体パフォーマンスの低下現象がある。このことは、個々のエージェントのミクロ的振る舞いとネットワーク全体のマクロ的性質の関係を明らかにする必要があることを示唆している。本応募研究では、ゲーム理論的要素を含むランダム群集モデルであるレプリケータ力学系などに加えて、これまで動的システムとしては考慮されてこなかった人間-情報系の代表的モデルを動的にモデル化し解析していくことを主目的とする。特に、マクロモデルの中にミクロ的基礎を取り入れた融合問題を考えることにより、人間-情報系の動的システムにおける高度な戦略立案手法の原理を解明する。

### 3. 研究の方法

(1) 本提案研究では、これまで行動経済学や社会科学の分野で議論されてきた、人間環境と情報の伝搬に関する確率力学としての基礎論を、ネットワーク理論・確率過程論とを融合させて、動的システムの枠組みでモデル化し確立する。モデルは離散時間モデルと連続時間モデルの両方を想定する。各主体を接続するネットワークは、有界なものから無限に広いモデルへと拡張していく。有界なネットワークモデルでは、グラフ理論とレプリケータ力学系を結びつけ、確率的有向ラプリアンから状態方程式を抽出する手法を確立する。無限に広いモデルでは、パーコレーション理論を活用して、情報拡散の臨界確率を特徴付けていく。従来の静的モデルでの評価変数である情報の到達時間は、動的システムにおける（線形化）固有値として評価する。

### 4. 研究成果

(1) これからの人間-情報系のネットワーク理論では、情報の非対称性から生じる特性を考慮し、各エージェントはそのような前提の下で自分自身の行動戦略を決定する枠組みが必要となる。人間-情報系における情報交換は、各主体間の情報の非対称性を軽減させる行為と捉えることができるが、その手始めとしてまず、動的チーブトークモデルの構築とプライスのパラドクスの動的システムとしての定式化を行った。

動的チーブトークモデルの構築：人間同士のコミュニケーションにおいて情報の非対称性が存在する場合、情報の送り手と受け手の間の利害や思惑が一致しないときには、

コミュニケーションは両者のゲームであると考えられ戦略的行動が生じる。このとき、まず情報の送り手が真実・ウソ・その中間・隠蔽の4つの情報から選択して伝達する行為をレプリケータ力学系のモデルを参考にモデル化を検討した。

ブライスのパラドクスの動的システムとしての定式化：ブライスのパラドクスとは、ネットワーク上の始点から終点への経路選択問題において各主体が利己的に振る舞う場合、ネットワーク総体の性能を改善（移動時間が短くなるように）するために新たに経路を付け加えると、逆に性能が劣化することがあるという現象のことである。この静的モデルとして議論されているブライスのパラドクスを動的モデルとして再定式化し、パラドクスを見いだすことに至った。また、非負システムの1クラスであるコンパートメントシステムを考え、(線形化)システムの固有値での性能評価を行った。

(2) 上記(1)の結果にもとづいて、動的版ブライスのパラドクスを考慮した環境制御とゴシップによる情報拡散モデルの導出を行った。

動的版ブライスのパラドクスを考慮した環境制御：パラドクスを起こさないための環境（ネットワーク）変化の指標を検討した。具体的問題として、都市部での信号制御ネットワークを想定し、運転者は目的地への利己的戦略的経路選択を行う仮定の下での、ネットワーク全体の交通流量を最大化するための信号ネットワーク制御則を構成した。この際、各主体の行動はマルコフモデルでは表現できないことを確認し、マクロ経済学の動学的確率的均衡理論との類似性を考慮している。

ゴシップによる情報拡散モデルの導出：人間のネットワークにおける口コミ情報のように、各主体が互いに確率的に遭遇したときに持っている情報を伝達・交換する状況（ゴossiping）が考えられる。ゴossipingの最もプリミティブな問題設定が通信工学における一方向のゴossipプロトコルであり、比較的低い情報交換頻度でも確率的に通信をすることによって情報の拡散性を高める特性を利用していると考えられるが、情報発信者が複数存在するような双方向の情報伝達を考え、異なる情報伝達行為の干渉がどのようにネットワーク全体に対する情報拡散に影響を与えるかを考察した。簡単のために有界なネットワークを対象とした。

(3) これまで行動経済学や社会科学の分野で議論されてきた、人間環境と情報の伝搬に関する確率動力学としての基礎論を、ネットワーク理論・確率過程論とを融合させて、動的

システムの枠組みでモデル化した。このモデル化においては離散時間モデルと連続時間モデルの両方について考察を行った。各主体を接続するネットワークは、有界なものから無限に広いモデルへと拡張していくとし、有界なネットワークモデルでは、グラフ理論とレプリケータ力学系を結びつけ、確率的有向ラブラシアンから状態方程式を抽出する手法を解析した。無限に広いモデルでは、パーコレーション理論を活用して、情報拡散の臨界確率を特徴付けることに成功した。従来の静的モデルでの評価変数である情報の到達時間は、動的システムにおける（線形化）固有値として評価できることがわかった。

(4) チープトークにおける情報の非対称性解消のための戦略の特徴付けを中心に考察した。情報開示ゲームでは、当初存在していた情報の非対称性は情報伝達という行為そのものによって解消されることがわかっているが、一般のチープトークに対して、コミュニケーションが情報の非対称性を解消させる原理を、マルチエージェントシステムにおけるコンセンサス問題との類似性に着目して、ある状態量がネットワーク全体である同一の値・記号へと収束していくプロセスとして解析した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

M. A. S. Kamal, J. Imura, T. Hayakawa, A. Ohata, and K. Aihara, A vehicles-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 査読有, vol. 16, no. 3, pp. 1136-1147, 2015. DOI:10.1109/TITS.2014.2354380

A. Cetinkaya and T. Hayakawa, Feedback control of switched stochastic systems using randomly available active mode information, 査読有, Automatica, vol. 52, pp. 55-62, 2015. DOI:10.1016/j.automatica.2014.10.122

Q. Hui, W. M. Haddad, J. Bailey, and T. Hayakawa, A stochastic mean field model for an excitatory and inhibitory synaptic drive cortical neuronal network, IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 査読有, vol. 25, no. 4, pp. 751-763, 2014. DOI: 10.1109/TNNLS.2013.2281065

X. Zenga, Q. Hui, W. M. Haddad, T. Hayakawa, and J. M. Bailey,

Synchronization of biological neural network systems with stochastic perturbations and time delays, Journal of Franklin Institute, 査読有, vol. 351, pp. 1205-1225, 2014.  
DOI:10.1016/j.jfranklin.2013.10.008

〔学会発表〕(計 15 件)

A. Cetinkaya and T. Hayakawa, Sampled-data delayed feedback control for stabilizing unstable periodic orbits, IEEE Conference on Decision and Control, Osaka, Japan, December 16, 2015.

S. Sobajima and T. Hayakawa, Bifurcation and fractal of triangle folding map, IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems, Tokyo, Japan, September 27, 2015.

J. Nishimura and T. Hayakawa, Chaotic dynamics of orthogonally projective triangle folding map, IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, USA, December 15, 2014.

A. Cetinkaya and T. Hayakawa, Sampled-mode-dependent time-varying control strategy for stabilizing discrete-time switched stochastic systems, American Control Conference, Portland, USA, June 6, 2014.

L. Franek, T. Hayakawa, and A. Cetinkaya, Stochastic heat diffusion modelling with random walks on the non-uniformly gridded circle, American Control Conference, Portland, USA, June 4, 2014.

Y. Okamoto and T. Hayakawa, Back-ultradiscretization of 3-state stochastic cellular automata, SICE Annual Conference, Nagoya, September 15, 2013.

T. Ishikawa and T. Hayakawa, Chaotic behavior of the folding map on the equilateral triangle, IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, Toulouse, France, September 6, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 朋久 (HAYAKAWA TOMOHISA)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号： 30432008