

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K00347

研究課題名（和文）集合知の情報集約過程の定量的記述と社会的学習の影響

研究課題名（英文）Quantitative description of the information aggregation process of collective intelligence and the influence of social learning

研究代表者

守 真太郎（MORI, SHINTARO）

弘前大学・理工学研究科・教授

研究者番号：70296424

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）：強く相互作用するエージェントを記述する確率過程であるポリア壺過程、投票者モデルの数理的な研究を行った。情報カスケード相転移での普遍的な数理構造の解明に成功した。また、社会学習エージェント系に関するRogers'パラドックスを解明した。投票者モデルはアメリカ大統領選挙のデータを用いた検証、ポリア壺過程はオンラインショッピングサイトでのエージェントの分類、クレジットリスクの時間相関に応用した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会・経済現象のモデル化には数理モデルの理解が不可欠である。我々は、ポリア壺過程、投票者モデルを対象として、その数理構造に関する研究を行った。前者は非平衡相転移を示すが、その普遍的な構造を記述する普遍関数の導出に成功した。また、社会的学習という人類の文明・文化の基盤となる学習過程についてのパラドックスと集団でのシステミックリスクを解明した。また、データを用いて数理研究を社会・経済現象に応用し、その有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We conducted a mathematical study of the Polya urn process and the voter model, which are the fundamental stochastic processes that describe the strongly interacting agents. We succeeded in elucidating the universal mathematical structure in the information cascade phase transition. We also unraveled the Rogers' paradox on social learning agent systems. The voter model was verified using data from the US presidential election. The Polya urn process was applied to classify agents on online shopping sites and to describe the time correlation of credit risk.

研究分野：統計物理学

キーワード：社会的学習 相転移 確率過程 ABM

1. 研究開始当初の背景

集合知は現代情報化社会におけるキーコンセプトであり、それを有効活用する情報サービスの開発が今後も展開していくと考えられる。しかし、現代はゴルトンが牛の重さを推測するゲームを行っていた 20 世紀初頭とは異なる。当時ならヒトが参照できる情報も限られ、ゴルトンのゲームのように人々は独立に推測・選択することができ、結果として各自の持つバイアスが打ち消され、多数のヒトの推測の中央値が真の牛の重さに非常に近いものになる集合知メカニズムが機能することもあったかも知れない。しかし、現代の人々は WEB 上の情報サービスに頻繁にアクセスしながら選択を行うため推測・選択は独立ではない。またその選択や評価が WEB 上に情報として残るため、他人の評価がよいものを選択すれば正しい選択というわけにはいかない。では、他人の選択や評価を参考に社会的学習と集合知メカニズムの折り合いをどのようにすればよいのであろうか？また、社会的学習は低コストで情報を獲得できるとされ、ヒトという種に他の動物に対する優位性をもたらすとされている。しかし Rogers は、社会的学習にメリットがあれば、独自に情報収集を行う独自学習エージェントの比率が減少し、均衡点では両学習方法の適合度は同じになると指摘した。これが Rogers のパラドックスである。ヒトは文化という集合知のデータバンクを持ち、それがヒトの種としての適合度を高めていると考えられていたが、Rogers のパラドックスは社会的学習、文化のメリットを否定する。では、社会的学習によって集合知のメリットは完全に消滅するのであろうか？それとも Rogers のモデルで見落とされている重要なファクターがあるのではないだろうか？

2. 研究の目的

ヒトの持つ情報を集約し有用な情報を創出する仕組みは集合知と呼ばれ、現代の情報社会においてその有用性は増している。一方、その有用性により多数のヒトが集合知の結果を社会的学習して利用するため、集合知の精度を担保する情報の独立な集約が阻害され、集合知を歪め精度が低下することも指摘されている。本研究は、ヒトの選択に対する他者の選択の影響をモデル化し、集合知の集約メカニズムにおける情報の流れの定量化と他者の影響を排除した効率的な集合知集約過程の解明を目的とする。また、選挙、オンライン市場などのデータを用いて社会現象での情報の流れと社会的学習の関係を定量化し、集団意思決定のあり方、集合知の有効活用の提案を行う。

3. 研究の方法

情報カスケード、非定常多腕バンディット、選挙、オンライン市場のレーティング時系列データを対象とし、研究は実験と理論を並行して行う。理論研究は、(1) 情報カスケード実験のデータを用いた選択のモデル化と情報流の定量化、被験者の持つ情報の推定過程のアルゴリズム、(2) 非定常多腕バンディットの均衡状態の解析、(3) 平均場投票者モデルの統計的な性質の数理、選挙データを用いた検証、(4) レーティング時系列データの解析と情報流の定量化、効率的な集合知集約メカニズムの 4 点である。実験研究は非定常多腕バンディットでのエージェントプログラムと対戦するゲームを用いた実験を行う。

4. 研究成果

研究期間全体の成果

情報カスケード、社会的学習という経済・社会現象を理解・記述する上で最も重要な相互作用について、エージェントモデルと確率分布・相関関数の漸近的・普遍的な振る舞いを理論的に解析し、また、クレジットリスクの金融工学への応用について成果を得た。主な成果は以下の 2 つである。(i) 社会学習エージェント系は社会学習相互作用により個人レベルの期待リターンを改善しリスクを低下させることができる。しかし、パレート解、ナッシュ解などの最適解を採用したとき、系全体の期待リターンも高くなるとともに、リターンの分散がエージェント数のべき乗に比例して増加する。また、こうした最適解が強化学習により安定的に獲得される。(ii) 情報カスケードによる連続相転移の普遍関数と吸収状態相転移の普遍関数が同じ構造を持つことを示した。非線形ポリア壺の連続転移の普遍クラスは主に 2 つと考えてよい。

2017 年度

- (1) 非定常多腕バンディットゲームの社会的学習エージェント系の混合戦略(学習における社会的学習の比率 r)におけるナッシュ戦略・パレート戦略を厳密に求め、特にナッシュ戦略が進化論的な安定なロバストな戦略であることを示した。独自学習の成功確率、社会的学習の成功確率、環境の変化の確率、エージェント数の空間で、ナッシュ戦略・パレート戦略が独自学習のみの戦略より期待リターンが高くなる領域を厳密に求めた。
- (2) (1)理論的な結果を検証する集団実験を実施した。ナッシュ戦略を検証する実験では、被験者は概ねナッシュ戦略に対応するパラメータ近傍のパラメータを採用した。パレート戦略の検証実験でもパラメータに関してはパレート戦略の近傍のパラメータを採用した。しかし、ナッシュ戦略を検証する実験では平均リターンはナッシュ戦略の期待リ

ターンより有意に高く、そのメカニズムは不明である。実験データからは被験者の戦略に目立った特徴は確認できていない。

- (3) 選挙データのモデル化としてネットワーク上の投票者モデルを導入し解析を行った。
- (4) 非定常多腕バンディットゲームの社会的学習エージェント系の戦略パラメータ r を更新するモデルの解析を行った。期待リターンの差、期待リターンの微分などでダイナミクスが与えられたとき、戦略パラメータ r がナッシュに、全エージェントの期待リターンの微分でダイナミクスが与えられたときパレート戦略に収束することを示した。

2018 年度

- (1) 2017 年度(3)のネットワーク上の投票者モデルの解析とデータ解析を行った。ネットワークのノード上の得票率の同時分布関数の時間変化の Wright-Fisher 拡散方程式による定式化を行い、定常解を多次元正規分布により近似した。また過去 10 回のアメリカ大統領選挙データでの得票率のゆらぎの空間相関構造を再現することを示した。この結果は、選挙予想に用いられているモデルで使われている州の間の相関が非常に強い乱数のミクロなモデルとなるものである。
- (2) デフォルトの時系列データの確率モデルの解析を行った。S&P, Moodys' などのデフォルト確率の時系列データ解析によりデフォルト確率の時間相関が非常に長い可能性を示した。過去の研究ではデフォルトを引き起こす景気要因に時間相関を持たせることでデフォルト確率に時間相関を持たせていた。ベータ二項分布に記憶の効果をいれた確率モデルを導入し、記憶がべき乗則に従って減衰する場合、減衰の指数が 1 を臨界点として相転移することを理論的に示した。この相転移はデフォルト確率の推定が時系列データの解析から可能かどうか関係する。
- (3) 社会学習の最適戦略の進化と均衡解の解析。非定常多腕バンディットゲームでの社会的学習率の進化ダイナミクスの研究を進め、2017 年度から議論しているモデルについて、ナッシュ、パレート戦略への収束についてまとめた。また、前年度までに行った実験データの解析をすすめ、3 人グループの実験において、協力する誘因がある場合とない場合で社会的学習の比率が顕著に異なり、ある場合は中央値がパレート戦略の値にほぼ一致し、ない場合はナッシュ戦略の値よりも大きな値になることが分かった。

2019 年度

- (1) 社会学習や情報カスケードのモデルでイジング型の、つまり秩序変数を持つ相転移を示す非線形ポリア壺過程の秩序変数の漸近的な振る舞いを解析するため、確率微分方程式による定式化を行った。古典軌道とそのまわりのゆらぎとして近似的に扱い、臨界点近傍での秩序変数の振る舞いの理解に道筋をつけた。
- (2) デフォルト時系列データのモデル化については、2018 年度に行ったベータ二項分布モデルをアセット変数間の相関によりデフォルト相関を取り入れた Merton のモデルにした場合の解析を行った。ベータ二項分布を用いた場合、デフォルトの時間相関がべき乗則に従って減衰する場合、べき指数の値の 1 を臨界値としたイジング型の相転移を起こし、デフォルト確率の推定量が収束しない相の存在を示した。Merton モデルの場合も時間相関のべき指数の変化により相転移を示すが、それはデフォルト確率の推定量の収束の速さのサンプル数依存性に反映された。
- (3) 社会学習の影響をアマゾンの商品のレビュー投稿データを用いて解析を行った。従来示唆された、過去のレビュー点数の新レビューの評価への社会的影響は確認できなかったが、投稿件数に対して過去の投稿数に比例した確率法則を発見した。一方、そうした確率法則が示唆するレビュー件数の分布関数と実際の分布関数に大きな差異が認められた。この差異は、現在社会問題となっているサクラ投稿によるものと考えている。社会的学習のモデル化によりサクラの検知やマーケティングとしてのサクラの有効性といった研究の方向性を見いだすことができた。
- (4) ネットワーク上の投票者モデルの応用として、前回のアメリカ大統領選挙での世論調査データの解析を行い、得票率が示すよりも非常に強い相関を示すことを見いだした。モデル化の方向性を得ることができた。

2020 年度

- (1) 2019 年度の(1)で報告した手法を発展させ、情報カスケードのモデルでイジング型の相転移を示す非線形ポリア壺過程の相関関数の連続相転移近傍での普遍的な振る舞いを記述する関数の導出に成功した。
- (2) 2019 年度の(2)で報告した線形ポリア壺にメモリーカーネルを導入したモデルが示す相転移について、補助場を導入してマルコフ過程として確率微分方程式で解析を行い、相関関数の主要項・副主要項のべき減衰の指数を導出し、(i)のモデルが示す相転移とはまったく異なる普遍クラスに属することを明らかにした。
- (3) 複雑ネットワークモデルとして優先選択則で入次数・出次数に異なるウェイトを持つモデルを導入し、ウェイトが丁度 - 1 のときに 1 次元格子になること、次数分布がフェルミ分布となることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hisakado Masato, Mori Shintaro	4. 巻 563
2. 論文標題 Parameter estimation of default portfolios using the Merton model and phase transition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 125435 ~ 125435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2020.125435	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 M.Hisakado and S.Mori	4. 巻 544
2. 論文標題 Phase transition in the Bayesian estimation of the default portfolio	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica A	6. 最初と最後の頁 123480-123492
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2019.123480	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 K. Nakayama, R. Nakamura, M. Hisakado, and S.Mori	4. 巻 549
2. 論文標題 Optimal learning dynamics of multiagent system in restless multiarmed bandit game	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica A	6. 最初と最後の頁 124314-123427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2020.124314	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 K. Takeda, M. Hisakado and S.Mori	4. 巻 1
2. 論文標題 How to Collect Private Signals in Information Cascade: An Empirical Study	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of NetSci-X 2020: Sixth International Winter School and Conference on Network Science	6. 最初と最後の頁 201-212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-38965-9_14	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 Shintaro Mori, Masato Hisakado, and Kazuaki Nakayama	4. 巻 99
2. 論文標題 Voter model on networks and multivariate beta distribution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys. Rev. E.	6. 最初と最後の頁 052307-052316
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.052307	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 Nakayama Kazuaki, Hisakado Masato, Mori Shintaro	4. 巻 7
2. 論文標題 Nash Equilibrium of Social-Learning Agents in a Restless Multiarmed Bandit Game	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1937 ~ 1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-017-01750-z	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 Hisakado Masato, Sano Fumiaki, Mori Shintaro	4. 巻 87
2. 論文標題 The Pitman-Yor Process and an Empirical Study of Choice Behavior	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024002 ~ 024019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.87.024002	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 -

〔学会発表〕 計24件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 中山一昭、守真太郎
2. 発表標題 非線型Polya壺問題の自己相関関数の確率微分方程式による解析
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加賀谷侑吾、武田航太、守真太郎
2. 発表標題 オンラインモールのレビュー投稿時系列の確率モデルとFakeレビューの検出・影響評価
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中山一昭、守真太郎
2. 発表標題 記憶の減衰するPolya壺問題の定常分布と相転移
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守真太郎、久門正人
2. 発表標題 デフォルト時系列データのMerton Modelのパラメータ推定における相転移
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 守真太郎、久門正人
2. 発表標題 デフォルト確率の推定とべき減衰の記憶するポリア壺の相転移
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Harima and S.Mori
2 . 発表標題 How to estimate "Go no Sen"
3 . 学会等名 Complex System Society,CCS2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 S.Mor, R.Nakamura, M. Hisakado and K. Nakayama
2 . 発表標題 Reinforced Learning of Social learning in Restless Multiarmed Bandit Game
3 . 学会等名 Complex System Society,CCS2019 (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Takeda, M. Hisakado and S.Mori
2 . 発表標題 How to collect private signals in information cascade: Empirical Study
3 . 学会等名 Network Science Society, NetSci-X 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S.Mori, K. Nakayama and M. Hisakado
2 . 発表標題 Mean field voter model on network and data analysis of U.S. presidential election
3 . 学会等名 WEHIA2018, Society for Economic Studies with Heterogeneous Interacting Agents (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 M.Hisakado and S.Mori
2. 発表標題 Phase transition in estimation of parameters of low default portfolio
3. 学会等名 WEHIA2018, Society for Economic Studies with Heterogeneous Interacting Agents (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K.Nakayama, M.Hisakado and S.Mori
2. 発表標題 Nash Equilibrium and Optimal Strategy of Social-Learning Agents in a Restless Multiarmed Bandit Game
3. 学会等名 WEHIA2018, Society for Economic Studies with Heterogeneous Interacting Agents (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 守真太郎, 中山一昭
2. 発表標題 ネットワーク上の平均場投票者モデルとマルコフランダム場近似
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山一昭, 守真太郎
2. 発表標題 社会学習エージェント系におけるダイナミクスとナッシュ均衡への収束II
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 守真太郎, 中山一昭, 久門正人
2. 発表標題 社会影響モデルと多変数ベータ分布：アメリカ大統領選挙データの解析
3. 学会等名 Data-driven Mathematical Science
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山一昭, 守真太郎
2. 発表標題 非正常多腕バンディットゲームにおける最適戦略
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 守真太郎, 中山一昭
2. 発表標題 非正常多腕バンディットゲームでの社会的学習エージェントの相転移的な振る舞い
3. 学会等名 人工知能学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中山一昭, 守真太郎
2. 発表標題 社会学習エージェント系におけるダイナミクスとナッシュ均衡への収束
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中村隆造, 守真太郎
2. 発表標題 非定常多腕バンディットゲームの集団実験とESSナッシュ戦略の検証
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐野史昂, 守真太郎
2. 発表標題 衆議院総選挙の平均場投票者モデルとベイズ推定
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 守真太郎, 久門正人
2. 発表標題 2ch.netの投稿時系列データ解析とPitman分布の検証
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中山一昭, 守真太郎
2. 発表標題 社会学習エージェント系におけるナッシュ均衡とダイナミクス
3. 学会等名 横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 守真太郎, 久門正人, 高橋泰城
2. 発表標題 情報カスケードと相転移: 集団実験によるミクロと理論によるマクロの解明
3. 学会等名 横幹連合コンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 守真太郎, 佐野史昂
2. 発表標題 ネットワーク上の平均場投票者モデルとアメリカ大統領選挙のデータ解析
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山一昭, 中村隆造, 守真太郎
2. 発表標題 非定常多腕バンディットゲームにおける最適戦略
3. 学会等名 物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Sato, Aki-Hiro (Ed.)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 266
3. 書名 Applications of Data-Centric Science to Social Design	

〔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
研究 分 担 者	中山 一昭 (Nakayama Kazuaki) (20281040)	信州大学・学術研究院理学系・准教授 (13601)	
研究 分 担 者	高橋 泰城 (Takahashi Taiki) (60374170)	北海道大学・文学研究院・准教授 (10101)	

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