

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04220

研究課題名(和文) 個の多様性は社会構造にどう影響するのか？適応的ネットワークによる構成的アプローチ

研究課題名(英文) How does diversity of individuals affect the structure of society?: A constructive approach using adaptive networks

研究代表者

佐山 弘樹 (Sayama, Hiroki)

早稲田大学・商学大学院・教授(任期付)

研究者番号：30345425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,940,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、社会を構成する個の多様性が社会構造とその変化にどのような影響を及ぼすかを考察した。具体的には、適応的ネットワークという枠組みを用いて、個々人の性質に多様性を導入したシミュレーションモデルを複数構築し、体系的な計算実験によりその性質を調べた。また実社会ネットワーク時系列データ・社会実験データ等の解析から、社会における実際の個の挙動とその多様性を定量化し、数理モデルから得られた知見と照合した。その結果、個人の行動の多様性によって、「多様でありながら繋がっている」という従来理論では得られなかった社会の有り方が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スマートフォンやSNS等、個人レベルでの情報収集・拡散技術の発展により、社会構造の変化は加速し、同時に意見相違や地位格差の拡大のような不安定性も生じ始めた。こうした急速な情報化・ネットワーク化の進行は、マクロレベルで個々人の意図を超えた予想外の社会ダイナミクスを産み出しており、社会ネットワークの動的変化の理解・予測・管理は学術的・応用的に極めて重要な課題となっている。以上の背景のもと、本研究は、個の多様性が社会の動的変化に及ぼす影響を明らかにし、また多様な個の状態を維持しつつ社会の接続性も確保するにはどうすべきかという重要な問題について示唆を与えるもので、その学術的・社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：This study examined how the diversity of individuals constituting a society affects the social structure and its changes. Specifically, using the framework of "adaptive networks," we constructed several simulation models in which diversity was introduced into the characteristics of each individual, and investigated their properties through systematic computational experiments. In addition, we quantified the actual behavior of individuals and their diversity in society by analyzing real-world network time series data and social experiment data, and compared them with the findings obtained from the computational models. As a result, it was suggested that the diversity of individual behaviors could help achieve a "diverse yet connected" society, which was not predicted by existing theoretical models.

研究分野：複雑系科学

キーワード：多様性 社会構造 適応的ネットワーク 数理モデル 複雑系 社会ネットワーク シミュレーション
データ解析

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

近年におけるスマートフォンやソーシャルメディア等に代表される個人レベルでの情報収集・拡散技術の発展により、社会構造の変化は加速し、同時に意見相違や地位格差の拡大のような不安定性も生じ始めた。こうした急速な情報化・ネットワーク化の進行は、マクロレベルで個人々の意図を超えた予想外の社会ダイナミクスを産み出している。このような背景のもと、社会ネットワークの動的変化の理解・予測・管理は学術的・応用的に極めて重要な課題となっており、理論・実証の双方について盛んに研究が行われている。

この研究課題に関する既存研究は、いずれも社会の構成要素間の相互作用によって生じる創発的な社会進化を扱っているが、その大半は(1)意見や嗜好の伝播(状態遷移)もしくは(2)同種親和性(homophily)等の機序によるリンクの変化(構造遷移)のいずれかの考察に限られたものが多い。他方で、両者の共進化を考察した理論研究も少数ながら存在し、そこで用いられるモデルは適応的ネットワーク(adaptive network)と呼ばれる。適応的ネットワークでは構成要素の状態とそれらの間の繋がりとが互いに適応するように共進化し、それによって状態遷移・構造遷移のいずれかのみを考慮した場合には得られないような社会状態が予測される。しかしながら、既存研究のモデルは「適応的な社会ネットワークは『状態が均質な接続構造』(=少数派状態の消失)と『状態が不均質な分断構造』(=社会的接続性の破綻)の間で相転移を起こす」という、実社会に対して応用性の低い結論を導くのみに留まっている。これは、既存研究が専ら社会の構成要素が同質であるという単純化された仮定を採用しており、実社会が持つ個の多様性の役割を考慮していないためであろうと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は、社会を構成する個の多様性が社会構造とその変遷にどのような影響を及ぼすかを数理モデル化と実データ解析により明らかにする。より具体的には、状態と構造の遷移を同時に記述する適応的ネットワークを用い、個の性質に多様性を導入した数理モデルを構築し、体系的な計算実験及び数理解析によりその性質を考察する。また実社会ネットワーク時系列データ・社会実験データ等の解析から、社会における実際の個の挙動とその多様性を定量化し、数理モデルから得られた知見と照らし合わせて考察を行う。それらを通じて個の多様性と社会構造との関連を明らかにし、従来理論で得られなかった状態多様性と構造接続性が共存する可能性を探る。

3. 研究の方法

タスク1：適応的社会ネットワークの計算モデルの構築とそれを用いた計算実験

状態と構造の遷移を同時に記述可能な適応的ネットワークの枠組みを用いて社会ネットワークの挙動の構成的計算モデルを構築し、個の多様性を系統立てて変化させた実験条件下で大規模計算実験を行った。技術的にはPython, NetworkX 及び PyCX を用いて、ネットワーク型のエージェントベースドシミュレーションモデルとして実装を行った。計算実験から得られる主な従属変数としては、一定時間後に社会ネットワークが持つマクロレベルの秩序変数(状態多様性と構造接続性)を計測した。状態多様性はネットワーク内のノード状態分布の散らばりとして定量化し、構造接続性はネットワークの平均最短経路長やモジュラリティなどの構造指標を用いて計測した。最終的に、計算実験の結果得られた実験条件と従属変数の関係を解釈可能な形で特徴づけ、従来理論で予見されていなかった新規な社会挙動、特に状態多様性と構造接続性の共存が創発しうる条件を求めた。

タスク2：適応的社会ネットワークモデルの偏微分方程式による定式化と解析

前タスクで得られた計算モデルを、さらに偏微分方程式を用いてより数理的に定式化し、その挙動を解析した。不均質なノード群からなる適応的ネットワークという複雑な離散モデルの挙動を連続的な数理モデルで取り扱いやすくするために、各ノードの属性と状態をそれぞれ1次元連続値に限定し、さらにネットワークのサイズは無量大と仮定して全体を連続系に帰着した。これにより、状態-属性の組み合わせに関する確率密度関数と、異なる組み合わせ間の接続密度関数という、多次元定義域上の2つの連続関数によって社会全体の状態と構造が表現され、その動的変化を両関数についての偏微分方程式として記述することが可能になった。この偏微分方程式モデルの性質を数値積分により求め、それがノード属性の多様性の程度を主パラメータとして変化させた場合にどのように変化するかを体系的に調べ、その結果を前タスクで得られた結果と比較して得られた知見の普遍性・頑健性を検証した。

タスク3：実世界における社会ネットワークデータ・社会実験データの解析

実社会から得られる時系列社会ネットワークデータを詳細に解析し、個人々の状態・挙動の多様性がどの程度存在し、それらが社会ネットワークの状態遷移・構造遷移にどの程度影響しているかを定量的に計測した。データのソースとしては、アメリカで「言論の自由」を謳い右派に人

気のソーシャルメディアであった GAB と Parler から独自に取得したユーザとその投稿データ、及びニューヨーク州立大学ビンガムトン校にて行われた社会ネットワークにおける集団意思決定実験の結果を用いた。GAB と Parler のデータについては、主に個々人の挙動（表明された意見）がどの程度多様であるか、挙動の多様性が社会ネットワークの構造の変化にどのような影響を及ぼすか、また挙動の傾向が社会ネットワークにおける近傍からどのように影響を受けるか、等について、自然言語処理・機械学習の手法を用いて定量的に解析した。集団意思決定実験のデータについては、上記と同様の解析に加えて、参加者の多様性の空間配置を実験的に操作した場合に、個々人の挙動（表明された意見）にどのような効果が表れるか、についても解析を行った。

以上のように、多様な研究手法を用いた3つのタスクを通じて、個の多様性が社会の動的変化に及ぼす影響を明らかにし、また多様な個の状態を維持しつつ社会の接続性も確保するにはどうすべきかという応用的に重要な問題について貴重な示唆を得ることを狙った。

4. 研究成果

タスク1：適応的社会ネットワークの計算モデルの構築とそれを用いた計算実験

構築した適応的社会ネットワークモデルにおいて、個の挙動を規定する3つのパラメータ（意見相違に対する許容度、意見の変更度合い、接続の強さの変更度合い）の多様性をグリッドサーチにより掃引して体系的にシミュレーション実験を行った。その結果、3つのパラメータのうち、意見相違に対する許容度の多様性が、社会ネットワークの構造接続性と状態多様性の双方を同時に促進する効果があること（図1）、並びに他の行動パラメータについてはそれらのどちらか一方を促進する効果しかないことが明らかになった。また単純に社会全体で他者への許容度を上げるだけでは、社会の状態多様性は維持できないことも明らかとなった。この成果は、個々人の行動の多様性を促進することで、構造的接続性と意見・文化の多様性の双方を維持できる社会ネットワークという既存研究では見られなかった第3の社会状態を生みだしうることを示すもので、「多様でありながら繋がっている」という新たな社会の可能性を示唆し、かつ「多様性」の概念に対しても新たな意義と役割を与える、極めて重要な成果であると言える。

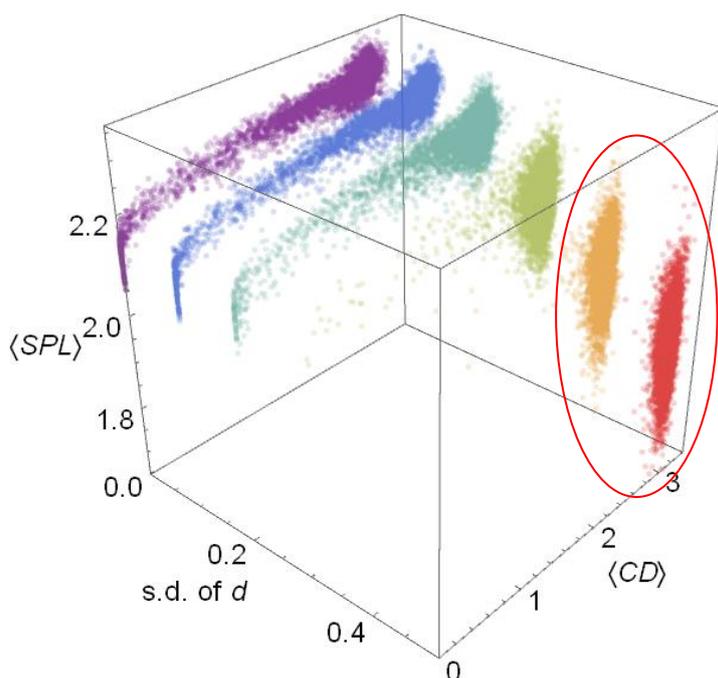


図1：本研究で構築した社会ネットワークの計算モデルにおいて個の行動パラメータ d （意見相違に対する許容度）の散らばりを増加させた場合のシミュレーション結果。 d の散らばりが大きい場合に、従来研究では観測されなかった高 $\langle CD \rangle$ （初期クラスタ間の意見の差異の平均 = 状態・意見の多様性） + 低 $\langle SPL \rangle$ （社会ネットワークでの平均最短経路距離）という第3の状態が現れる（赤円）。

また、本タスクについては更に英国ブリストル大学と共同研究を行い、別研究において発表済の大自由度常微分方程式による適応的社会ネットワークモデルにおいて、構成要素の挙動の多様性を導入するという拡張を行い、その挙動を計算的かつ体系的に調査することも行った。その結果、挙動が多様である場合、社会ネットワーク内における意見・情報は多様なまま保たれつつ、ネットワーク構造も分断を起こさずに接続性が維持される、という上述の結果と整合する結果が得られた。「行動の多様性」が持つ社会接続性と情報多様性を両立させる効果を、独立に開発された全く異なる複数の計算モデルで確認できたことは、極めて有意義な成果であるといえる。

タスク2：適応的社会ネットワークモデルの偏微分方程式による定式化と解析

先述のエージェントベースドモデルによって記述されていた適応的社会ネットワークの挙動を偏微分方程式を用いて連続的に定式化しなおして数値解析し、その挙動が元の計算的ネットワークモデルと定量的に一致することを確認した（図2）。この成果は、タスク1で得られた知

見が、計算実験で使われたシミュレーション手法の技術的詳細やモデルのサイズの有限性から来るアーティファクトではなく、極めて大規模な社会ネットワークに対しても同様に当てはまる普遍的な知見であったことを示唆するもので、その学術的意義は大きい。また、このタスクで達成したことは国際的に見ても非常にユニークなモデル化・解析手法の提案と実証であり、ネットワーク科学・複雑系科学・計算社会科学等の各方面から高評価を受けた。

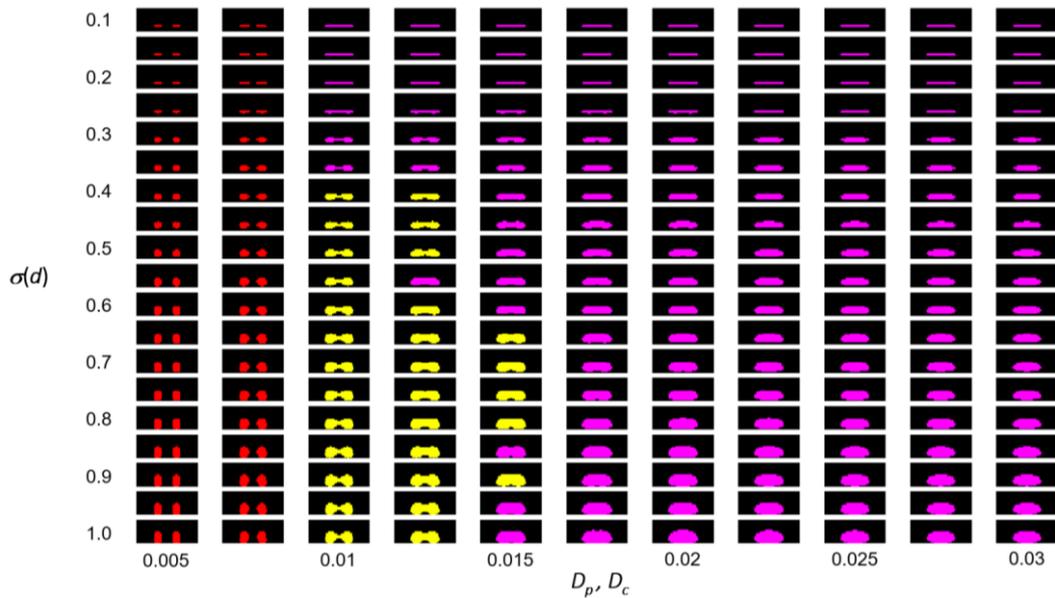


図2：偏微分方程式を用いて連続的に定式化しなおされた適応的社会ネットワークモデルの挙動。各パネルは、それぞれの実験条件下（縦軸：許容度の多様性；横軸：拡散係数）でモデル方程式の数値積分を一定の時間区間について行った後の状態 - 属性の組み合わせに関する確率密度関数の最終形状を示したものである。分布の形状を形態解析して分類した結果に基づいて色分けが成されている（赤：2つのクラスタに分断した社会状態；紫：単一クラスタに結合した社会状態；黄：2つのクラスタが緩く繋がっている第3の社会状態）。許容度の多様性が0.4あたりから第3の社会状態が発生することが確認できる。この結果は前述の計算モデルによる図1に示された結果とも合致する。

タスク3：実世界における社会ネットワークデータ・社会実験データの解析

ニューヨーク州立大学ビンガムトン校において実施された集団意思決定実験のデータ解析の結果、社会ネットワークの構造が局所的にクラスタ化し、かつ構成員のバックグラウンドが多様で、似たようなバックグラウンドを持つ者同士が隣接してクラスタを形成している場合に、生成されるアイデアの多様性が最も高くなりやすいことが確認された（図3A）。また、バックグラウンドの配置がランダムである場合に高品質のアイデアが最も生まれやすいこと（図3B）、異なるバックグラウンドをもつ者が隣接している状況では低クオリティのアイデアが淘汰されやすいこと（図3C）、などの大変興味深い結果が得られた。

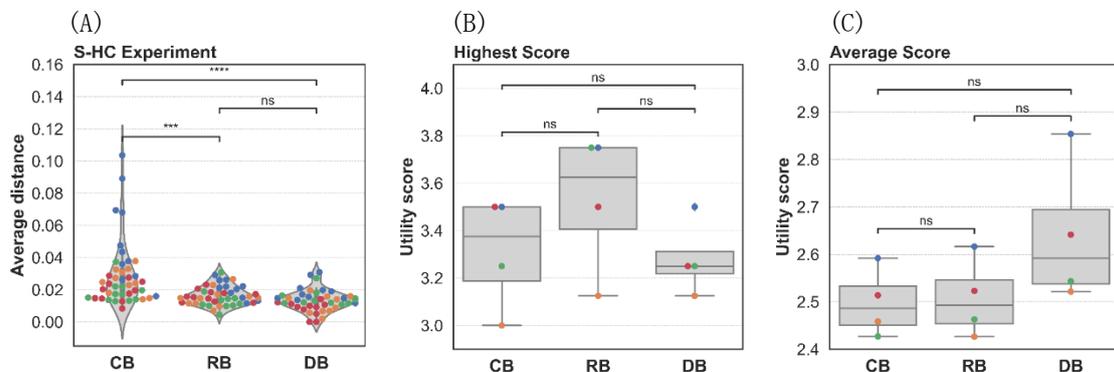


図3：ニューヨーク州立大学ビンガムトン校での集団意思決定実験の結果。CB, RB, DB はそれぞれ、似たようなバックグラウンドを持つ参加者が隣接している条件 (CB)、ランダムに配置されている条件 (RB)、異なるバックグラウンドを持つ参加者が隣接している条件 (DB) を表す。

(A) 生成されたアイデア間の意味的距離の分布。(B) 生成された最終アイデアの最高値の比較。

(C) 生成された最終アイデアの平均値の比較。サンプルサイズが小さいため (B), (C) は統計的に有意ではないが、傾向は明らかに見取れる。

また、上記の実験データに加え、GAB や Parler などのソーシャルメディアから得られたデータも含めて、交わされる意見・アイデアの奇抜性とそれらの意見・アイデアに対して与えられる関心度合いの間にある関係を調査した結果、それらの中に正の相関が見いだされた。この結果は、個々が持つ意見やアイデアの状態の散らばり・多様性が、社会ネットワーク構造に及ぼす影響を実証的に示すものである。

以上の実データ解析の結果は、行動の多様性と意見・文化の多様性の非自明な相互作用を定量的に裏付け、本研究で提唱した適応的社会ネットワークモデルの妥当性を実証するもので、非常に重要かつユニークな成果と言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Hiroki Sayama | 4. 巻 4(1) |
| 2. 論文標題 Representing and Analyzing the Dynamics of an Agent-Based Adaptive Social Network Model with Partial Integro-Differential Equations | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Northeast Journal of Complex Systems | 6. 最初と最後の頁 3 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22191/nejcs/vol4/iss1/3 | 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 該当する |
| 1. 著者名 佐山 弘樹 | 4. 巻 37 |
| 2. 論文標題 適応的ネットワーク型人工社会モデルによる社会分断の考察 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 人工知能 | 6. 最初と最後の頁 43～49 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11517/jjsai.37.1_43 | 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 Hiroki Sayama | 4. 巻 NA |
| 2. 論文標題 A partial integro-differential equation-based model of adaptive social network dynamics | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Conference on Artificial Life (ALIFE 2022) | 6. 最初と最後の頁 NA |
| 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 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 該当する |
| 1. 著者名 Sayama H., Yamanoi J. | 4. 巻 1 |
| 2. 論文標題 Beyond Social Fragmentation: Coexistence of Cultural Diversity and Structural Connectivity Is Possible with Social Constituent Diversity | 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 171-181 |
| 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_12 | 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14件（うち招待講演 9件 / うち国際学会 10件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Representing and analyzing the dynamics of an agent-based adaptive social network model with partial integro-differential equations |
| 3. 学会等名 NERCCS 2022: Fifth Northeast Regional Conference on Complex Systems, March 30-April 1, 2022, Buffalo, NY / online (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Representing and analyzing the dynamics of an agent-based adaptive social network model with partial integro-differential equations |
| 3. 学会等名 NetSci-X 2022: International School and Conference on Network Science, February 8-11, 2022, Porto, Portugal (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Understanding diversity, innovation and social evolution: Theoretical and experimental approaches |
| 3. 学会等名 Keynote talk at DB3D 2021: Don Bosco-Binghamton Big Data Online Conference, October 19, 2021, conference held online (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Where and how innovative ideas arise: Insights from collaboration experiments and social media analysis |
| 3. 学会等名 Invited talk at the Science of Innovation and Success Workshop, August 2-3, 2021, Waseda University, Tokyo, Japan + online. (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2 . 発表標題 Dynamical networks and systems as a model of social fragmentation |
| 3 . 学会等名 PSG-Binghamton International Research Webinar Series, held online, May 12, 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2 . 発表標題 Self-organization of society: Fragmentation, disagreement, and how to overcome those |
| 3 . 学会等名 Keynote talk at the First IEEE International Conference on Autonomic Computing and Self-Organizing Systems (ACSOS 2020), held online, August 20, 2020. (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1 . 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2 . 発表標題 Diversity and social evolution: Theoretical and experimental approaches |
| 3 . 学会等名 Invited talk at the Socioeconomic Networks and Network Science Workshop, July 3-4, 2020, Waseda University, Tokyo, Japan (conference held online) (招待講演) |
| 4 . 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1 . 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2 . 発表標題 Dynamical networks and systems as a model of social fragmentation |
| 3 . 学会等名 Invited talk at Clarkson Center for Complex Systems Science Seminar Series, held online, February 5, 2021 (招待講演) (国際学会) |
| 4 . 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 How do network structure and individual diversity affect collective innovation and social evolution? Theoretical, computational and experimental approaches |
| 3. 学会等名 Networks and Innovation Symposium at Waseda University (招待講演) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 How does diversity of individuals affect the structure of society? A constructive approach using adaptive networks |
| 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 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 How do network structure and individual diversity affect collective innovation and social evolution? |
| 3. 学会等名 Satellite Symposium on Machine Learning and Modeling for Complex Systems at the Conference on Complex Systems 2019 (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Beyond Social Fragmentation: Coexistence of Cultural Diversity and Structural Connectivity Is Possible with Social Constituent Diversity |
| 3. 学会等名 NetSci-X 2020: Sixth International Winter School and Conference on Network Science (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Beyond Social Fragmentation: Coexistence of Cultural Diversity and Structural Connectivity Is Possible with Social Constituent Diversity |
| 3. 学会等名 Center for Collective Dynamics of Complex Systems (CoCo) Seminar at Binghamton University |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hiroki Sayama |
| 2. 発表標題 Diversity and Social Evolution: Theoretical and Experimental Approaches |
| 3. 学会等名 CompleNet 2020: 11th International Conference on Complex Networks (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020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 |
|-------|---|--------------------------------|----|
| 研究分担者 | 山野井 順一 (Yamanoi Junichi) (20386543) | 早稲田大学・商学大学院・准教授 (32689) | |

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 | | | |
|---------|-------------------|--|--|--|
| 米国 | ニューヨーク州立大学ビンガムトン校 | | | |
| 英国 | ブリストル大学 | | | |