

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20760258

研究課題名(和文) 社会ネットワークを考慮した、ゲームの数理モデリングと協力行動の解析

研究課題名(英文) Computational modeling of games on social networks and analysis of cooperative behavior

研究代表者

増田 直紀(MASUDA NAOKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：40415295

研究成果の概要(和文)：ネットワーク上の進化ダイナミクスについて、フラクタル的なネットワーク上の囚人のジレンマ、方向のあるネットワーク上の適応度が定数である場合の進化ダイナミクス、適応度が定数かつ各状態において等しい場合のダイナミクスなどの解析を行った。その結果、ネットワーク上の進化ダイナミクスの様々な側面が明らかになった。協力行動の解析については、ネットワークの場合のみならず、学習のある直接互恵性や平均場相互作用の場合の間接互恵性などについても解析を行った。その結果、社会ネットワークと進化ダイナミクスの様々な接点が総合的に明らかにされた。

研究成果の概要(英文)：I analyzed various aspects of evolutionary dynamics on networks, such as the prisoner's dilemma game on fractal networks, evolutionary dynamics on directed networks in the case of constant fitness values, and dynamics of the cases in which different states have the same fitness. As a result, I clarified various aspects of evolutionary dynamics on networks. With regard to cooperative behavior, I examined not only the network cases but other cases such as direct reciprocity under individual learning and indirect reciprocity models with meanfield interaction between players. In sum, I obtained various linkages between social networks and evolutionary dynamics in an integrated manner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：(1)エージェント (2)ネットワーク (3)経済理論

1. 研究開始当初の背景

本研究では、他人が自分に協力的かどうかという動機に基づいて、多数の個体が移動したりネットワークの枝(相手との接続)をつなぎかえたりする場合に、形成される社会ネットワークの形(例：分権的なネットワーク、階層

的なネットワーク)を同定する。そして、そのネットワークにおける個人の役割(例：リーダー、情報媒介の要の位置にいる者、孤立した者)を同定する。動機は、囚人のジレンマゲームに基づいて与える。この問題設定は一見単純だが、(1)複雑なネットワークでのゲーム、

損得の定義は自明でない、(2) 従来のマルチエージェント系の関連研究では、ネットワークと個体の行動の両方が多彩にすぎて統一的な理解が難しい、(3) 人間社会の複雑ネットワークがこのような動的な個体行動の観点からどのように出現するかが理解されていない、という理由で新しい問題であった。

2. 研究の目的

ネットワークが固定されている場合に、ネットワークの種類や行動の個人差などの違いに応じて、どの場合に協力的行動が起こるかを同定する。社会行動には、協力的行動以外にも重要なものが多くあるが、社会ネットワークの生成と個人の利害との関係を明らかにするという目的に注力するために、協力的行動を主に研究する。

上記の目的を遂行するのに必要な、ネットワークでない場合の協力的行動解析一般や、ネットワークのダイナミクス一般についても、解析を行う。

3. 研究の方法

個体(エージェント)がなすネットワークは時不変な場合について、協力的行動が安定に起こるためのネットワークの形、ゲームの条件、個体の行動様式を同定する。進化ゲームの枠組みに基づいた解析を行う。各個体は、各時刻で協力または非協力を決定し、自分がつながっている他個体と、囚人のジレンマゲームやそれを単純化したような進化ダイナミクスを行う。相互協力が社会システム全体としては好ましいが、非協力をを行うことによって相手の協力を搾取するという誘惑が存在する。自分が得た総利得が大きいならば、その個体は同じ行動を続ける。総利得が小さければ、次の時刻で、より成功した隣人の行動を真似る。

4. 研究成果

いくつかの主結果について説明する。

(1) ネットワークの形、参加コストの有無、個体の行動力の差などに加えて、得られた利得に基づいて個体がどの他の個体の行動様式を真似するかという更新ルールが、ゲームのダイナミクスに大きな影響を及ぼすことを明らかにした。この更新ルールによる差は次数が一樣なネットワークでも見られることが知られている。また、現実世界によく見られるような次数が非一樣なネットワーク(例: スケールフリー・ネットワーク)において、その傾向はより顕著であるという結果を得た。

(2) ゲームの利得行列が非常に単純でジレンマがない場合についてのネットワーク上の集団ダイナミクスを詳しく調べた。具体的には、ダイグラフ(枝に方向がついているグラ

フ)上のダイナミクスを解析した。各頂点(個人) v は、AまたはBの状態をとる。 v は、自分の上流にいる反対の状態(意見、戦略などと見なせる)を持つ頂点が多いと、自分の状態を変更しやすい。固定確率とは、最終的にネットワーク全体が状態Aになる確率である。方向無しのネットワークでは、ある v のみがAである状況から出発する固定確率は、 v の次数で書かれる。しかし、ダイグラフでは、 v の次数だけでなくネットワークの大域構造が固定確率に大きく影響することを示した。このことを状態AとBに優劣差がない場合については一般的に示した。状態AとBに優劣差があつてよりゲーム的状况に近い場合については、数値計算と単純なグラフの解析を行った。

(3) また、ネットワークの生成モデルの数学的解析と、ネットワーク上の興奮系ダイナミクスの解析も行った。これらは、ネットワーク上のゲームダイナミクスを構築・理解するための補助的成果、と位置づけられる。

(4) ネットワーク上でゲームなどの相互作用を行っているエージェントの振るまいや集団挙動を記述するために、どのプレイヤーが重要な役割を持つことを同定することは重要である。重要性の定義により、一般に中心性の問題と呼ばれる。本年度は、特に枝に方向があるネットワークにおいて、頂点の中心性を決める手法を開発し、様々なネットワークに適用した。枝に方向がある場合、枝の根側のプレイヤーが枝の先側のプレイヤーを制御ないし支配していると見なすことができる。このとき、より強いプレイヤーを支配するプレイヤーは高い中心性を持つ。グーグルの検索エンジンに使われているページランクもそのような性質をもつ中心性指標であるが、本研究では、意見形成、集団同期、侵入等のダイナミクスにおける頂点の強さを解析的に定量化することによって、そのような中心性を考案した。ネットワーク上のダイナミクスによって意味づけられる中心性であるという意味で、アドホックな定義による中心性よりも強い基盤をもつ。

(5) 開発した中心性指標を効率よく、あるいは、解析的に見通しよく計算する算法を整備した。具体的には、反復法や、行列木定理などを応用することによって、提案した中心性指標を効率よく計算できることを定式化した。また、ネットワークがコミュニティ構造と言われるようなグループ構造をもつときについて、中心性を効率よく近似する手法を開発した。そして、その結果をいくつかの実データに適用して、その有効性を確かめた。特に、電子メールの送受信によって定義される人間関係ネットワークに指標を適用し、有効な結果を得た。

(6) これまで関わったことのない相手と取引

を行うとき、相手の評判が分かれば、非協力者に搾取されにくい。評判による間接互恵性は、新しい相手と出会う機会の多い社会 (e.g. インターネット上の商取引など) における協力行動を説明することができる。特定の評判の割り当てルールのもとで、評判が集団全体に十分かつ正確に行き渡る場合に、相手の評判が良いか悪いかを区別して協力する戦略が進化ゲームにおいて安定であることが知られていた。しかし、現実の社会では、集団内に評判が完全に伝わらず、相手の評判が分からないような不確実性が存在し得る。このような不確実性がある場合に、安定して集団の協力行動を支えるような評判の割り当てルールを理論的かつ網羅的に調べ、どのようなルールが協力行動を安定にするかを明らかにした。

(7) 2つの状態をもつ投票者モデルにおいて、各個人がどちらかの状態を選考しうる場合について、その数理モデルを提案し、平均場近似と数値計算によってモデルを解析した。少数の個人が片方の状態を選好すれば、残りの多数の個人が逆の状態を選好しても、少数の個人の方の意見に全体が行き着きやすいこと、そのダイナミクスはパラメータ領域について頑健に起こることなどを明らかにした。

(8) 人間は、進化ゲームが仮定するように得点の高い他者の真似を行うだけでなく、自分の過去の行動結果に基づいた学習を行うことが示唆されている。この要素は、ネットワーク上のゲームをモデル化するときにも重要となりうる。一方、学習下では協力行動が出現しにくいことがいくつかの異なる学習を用いた先行研究によって知られている。本研究では、2人ゲームの場合について、ある学習モデルを提案、数値解析した。相互協力が起こるパラメータ領域を数値的に明らかにし、多くの場合に相互協力がゲームの繰り返しを経るうちに達成されることを示した。

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 27 件)

1. T. Ueno, N. Masuda, S. Kume, K. Kume. Dopamine modulates the rest period length without perturbation of its power law distribution in *Drosophila melanogaster*. PLoS ONE, 7 (2), e32007 (2012).

2. H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Structure of cell networks critically determines oscillation regularity. Journal of Theoretical Biology, 297, 61-72

(2012).

3. S. Tanabe, N. Masuda. Evolution of cooperation facilitated by reinforcement learning with adaptive aspiration levels. Journal of Theoretical Biology, 293, 151-160 (2012).

4. N. Masuda. Clustering in large networks does not promote upstream reciprocity. PLoS ONE, 6 (10), e25190 (2011).

5. T. Takaguchi, N. Masuda. Voter model with non-Poissonian inter-event intervals. Physical Review E, 84, 036115 (2011).

6. T. Hasegawa, N. Masuda. Robustness of networks against propagating attacks under vaccination strategies. Journal of Statistical Mechanics, P09014 (2011).

7. T. Takaguchi, M. Nakamura, N. Sato, K. Yano, N. Masuda. Predictability of conversation partners. Physical Review X, 1, 011008 (2011).

8. M. Nakamura, N. Masuda. Indirect reciprocity under incomplete observation. PLoS Computational Biology, 7 (7), e1002113 (2011).

9. C. K. Yun, N. Masuda, B. Kahng. Diversity and critical behavior in prisoner's dilemma game. Physical Review E, 83, 057102 (2011).

10. N. Masuda, N. Nakamura. Numerical analysis of a reinforcement learning model with the dynamic aspiration level in the iterated Prisoner's Dilemma. Journal of Theoretical Biology, 278, 55-62 (2011).

11. T. Hasegawa, N. Konno, N. Masuda. Numerical study of a three-state host-parasite system on the square lattice. Physical Review E, 83, 046102 (2011).

12. N. Masuda, S. Redner. Can partisan voting lead to truth? Journal of Statistical Mechanics, L02002 (2011).

13. N. Masuda, H. Kori. Dynamics-based centrality for general directed networks. Physical Review E, 82, 056107 (2010).

14. T. Watanabe, N. Masuda. Enhancing the spectral gap of networks by node removal.

Physical Review E, 82, 046102 (2010).

15.N. Masuda. Effects of diffusion rates on epidemic spreads in metapopulation networks. New Journal of Physics, 12, 093009 (2010).

16.N. Masuda, Y. Kawamura, H. Kori. Collective fluctuations in networks of noisy components. New Journal of Physics, 12, 093007 (2010).

17.R. Toenjes, N. Masuda, H. Kori. Synchronization transition of identical phase oscillators in a directed small-world network. Chaos, 20, 033108 (2010).

18.N. Masuda, N. Gibert, S. Redner. Heterogeneous voter models. Physical Review E, 82, 010103(R) (2010).

19.A. Iwagami, N. Masuda. Upstream reciprocity in heterogeneous networks. Journal of Theoretical Biology, 265, 297-305 (2010).

20.N. Masuda. Immunization of networks with community structure. New Journal of Physics, 11, 123018 (2009).

21.N. Masuda, Y. Kawamura, H. Kori. Impact of hierarchical modular structure on ranking of individual nodes in directed networks. New Journal of Physics, 11, 113002 (2009).

22.N. Masuda, Y. Kawamura, H. Kori. Analysis of relative influence of nodes in directed networks. Physical Review E, 80, 046114 (2009).

23.N. Masuda, H. Ohtsuki. A theoretical analysis of temporal difference learning in the iterated Prisoner's Dilemma game. Bulletin of Mathematical Biology, 71, 1818-1850 (2009).

24.Y. K. Takahashi, H. Kori, N. Masuda. Self-organization of feedforward structure and entrainment in excitatory neural networks with spike-timing-dependent plasticity. Physical Review E, 79, 051904 (2009).

25.N. Masuda, H. Ohtsuki. Evolutionary dynamics and fixation probabilities in

directed networks. New Journal of Physics, 11, 033012 (2009).

26.N. Masuda. Directionality of contact networks suppresses selection pressure in evolutionary dynamics. Journal of Theoretical Biology, 258, 323-334 (2009).

27.N. Masuda, J. S. Kim, B. Kahng. Priority queues with bursty arrivals of incoming tasks. Physical Review E, 79, 036106 (2009).

[学会発表] (計 42 件)

[国際学会] (計 16 件)

1.N. Masuda. Dependence of oscillation regularity on structure of networks. Anomalous Statistics, Generalized Entropies and Information Geometry. Nara, Japan, March 6-10 (2012).

2.H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Structure of cell networks critically determines oscillation regularity. International Symposium on Complex Systems 2011. Tokyo, Japan, December 1-3 (2011).

3.T. Takaguchi, M. Nakamura, N. Sato, K. Yano, N. Masuda. Predictability of conversation partners in Japanese company offices. International Symposium on Complex Systems 2011. Tokyo, Japan, December 1-3 (2011).

4.T. Takaguchi, M. Nakamura, N. Sato, K. Yano, N. Masuda. Predictability of communication patterns and its correlates to individuals' positions in social networks. ECCS, Vienna, Austria, September 12-16 (2011).

5.H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Network structure dependence of oscillation regularity in coupled noisy oscillators. Engineering of Chemical Complexity. Berlin, Germany, July 4-8 (2011).

6.H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Design principle of precise neural clocks. ICCN2011. The 3rd International Conference on Cognitive Neurodynamics. June, 9-13 (2011).

7.T. Watanabe, N. Masuda. Sequential node

removal to increase the spectral gap of networks. NetSci, Budapest, Hungary June 8-10 (2011).

8.T. Takaguchi, N. Masuda. Effect of non-Poissonian inter-event intervals on opinion dynamics. NetSci, Budapest, Hungary, June 8-10 (2011).

9.H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Collective enhancement of temporal precision in networks of noisy oscillators. SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems. Snowbird, Utah, USA, May 22-26 (2011).

10.N. Masuda, Y. Kawamura, H. Kori. Collective phase diffusion in networks of noisy oscillators. SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems. Snowbird, Utah, USA, May 22-26 (2011).

11.H. Kori, Y. Kawamura, T. Okano, N. Masuda. Collective phase diffusion and temporal precision in networks of noisy oscillators. Dynamics Days Europe. Bristol, UK, September 6-10 (2010).

12.N. Masuda. Threshold networks with random weights and their extension to spatial networks. The 34th Conference on Stochastic Processes and their Applications. Osaka, September 6-10 (2010).

13.H. Kori, Y. Kawamura, N. Masuda. Theory of collective enhancement of temporal precision in oscillator networks. Biosignal 2010, Berlin, Germany, July 14-16 (2010).

14.N. Masuda. A method to immunize networks with community structure. Netsci 2010, Boston, USA, May 10-14 (2010).

15.Y. Yoshino, N. Masuda. Evolutionary Prisoner's Dilemma on dynamic networks: results for different payoff schemes. BIFI2010 International Congress, Zaragoza, Spain, February 3-6 (2010).

16.R. Toenjes, H. Kori, N. Masuda. Synchronization transition in sparse unidirectional networks of identical oscillators. Frontiers in network science advances and applications. Berlin, Germany, September 28-30 (2009).

[国内学会] (計 26 件)

1. 古谷修平, 増田直紀. ネットワーク上の労働市場モデルの解析. 第8回ネットワーク生態学シンポジウム. 慶應義塾大学, 藤沢, 神奈川 2012/03/15-16

2. 高口太朗, 中村光宏, 佐藤信夫, 矢野和男, 増田直紀. 社内ネットワーク中での会話相手選択パターンの予測可能性. 第8回ネットワーク生態学シンポジウム. 慶應義塾大学, 藤沢, 神奈川 2012/03/15-16

3. 増田直紀, 中村光宏. Coevolution of trustful buyers and cooperative sellers in the trust game. ゲーム理論ワークショップ. 浜松, 2012/03/06-07

4. 中村光宏, 増田直紀. 内集団びいきの前適応としての間接互惠性. 第4回日本人間行動進化学会, 北海道大学, 札幌, 2011/11/19-20

5. 高口太朗, 中村光宏, 佐藤信夫, 矢野和男, 増田直紀. 社会ネットワーク中での会話パターンの予測可能性. 日本物理学会 2011 年秋季大会. 富山大学, 富山, 2011/09/21-24

6. 古谷修平, 増田直紀. 複雑ネットワーク上の労働市場モデル. 日本物理学会 2011 年秋季大会. 富山大学, 富山, 2011/09/21-24

7. C. K. Yun, 増田直紀, B. Kahng. ネットワーク上の囚人のジレンマゲームにおける多様性と臨界的挙動. 日本物理学会 2011 年秋季大会. 富山大学, 富山, 2011/09/21-24

8. 田邊奨馬, 増田直紀. 個体の強化学習により促進される協力行動. 第21回日本数理生物学会年会, 明治大学, 東京, 2011/09/13-15

9. 高口太朗, 中村光宏, 佐藤信夫, 矢野和男, 増田直紀. 社会ネットワーク中での会話相手選択パターンの予測可能性. ネットワークが創発する知能研究会(JWEIN'11)信州大学, 松本, 2011/09/05-07

10. 増田直紀. 会話相手の予測可能性. オrganイズドセッション「人と環境にみる高次元のデータフローの生成と解析」, 2011 年度人工知能学会全国大会, いわて県民情報交流センター, 盛岡, 2011/06/01-03

11. 郡宏, 河村洋史, 増田直紀. 生物ペースメーカー組織における正確な振動の設計原理. 日本物理学会第66回年次大会, 新潟大学, 新潟, 2011/03/25-28

12. 長谷川雄央, 増田直紀. 伝播する攻撃に対するネットワークの頑健性. 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学, 新潟, 2011/03/25-28

13. 高口太朗, 増田直紀. 相互作用の時間間隔が非ポアソンの投票者モデル II. 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学 新潟, 2011/03/25-28

14. 増田直紀, N. Gibert, S. Redner. 非一様な投票者モデル. 日本物理学会第 66 回年次大会, 新潟大学 新潟, 2011/03/25-28

15. Y. Yoshino, N. Masuda. Evolution of cooperation is a robust outcome in the prisoner's dilemma on dynamic networks. ネットワーク生態学研究会, 2011/03/10-12

16. 高口太朗, 増田直紀. 接触イベントの時間間隔が非ポアソンの投票者モデル. ネットワーク生態学研究会, 2011/03/10-12

17. 中村光宏, 増田直紀. 不完全な評判情報のもとでの間接互惠性. ゲーム理論ワークショップ 2011, 名古屋大学, 名古屋, 2011/03/05-07

18. 中村光宏, 増田直紀. 不確実性のもとでの評判による間接互惠性 — ゲームによる分析. 第 3 回日本人間行動進化学会, 神戸, 2010/12/04-05

19. 増田直紀, 郡宏. 複数の上流部分があるネットワーク上のダイナミクスと中心性. 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 堺, 2010/09/23-26

20. 高口太朗, 増田直紀. 相互作用の時間間隔が非ポアソンの投票者モデル. 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 堺, 2010/09/23-26

21. 長谷川雄央, 増田直紀. ボロノイ分割に基づくカスケード故障モデル. 日本物理学会 2010 年秋季大会, 大阪府立大学, 堺, 2010/09/23-26

22. 中村光宏, 増田直紀. 不完全な情報のもとで間接互惠性を促進する社会規範の安定性解析. 日本数理生物学会, 北海道大学, 札幌, 2010/09/13-16

23. 長谷川雄央, 増田直紀. ネットワーク上の感染症のくちこみ予防対策の効果. 日本数理生物学会, 北海道大学, 札幌,

2010/09/13-16

24. 高口太朗, 増田直紀. 非ポアソンの相互作用の時間間隔は固定を促進するか. 日本数理生物学会, 北海道大学, 札幌, 2010/09/13-16

25. 吉野好美, 増田直紀. 動的なネットワークにおける囚人のジレンマ. 日本数理生物学会, 北海道大学, 札幌, 2010/09/13-16

26. A. Iwagami, N. Masuda. Upstream reciprocity in heterogeneous social networks. 日本数理生物学会, 北海道大学, 札幌, 2010/09/13-16

〔図書〕 (計 2 件)

1. 増田直紀. なぜ 3 人いると噂が広まるのか. 日本経済新聞出版社 (日経プレミアシリーズ) (2012).

2. 増田直紀, 今野紀雄. 複雑ネットワーク — 基礎から応用まで. 近代科学社 (2010).

〔その他〕

ホームページ等

いくつかの研究成果の日本語による解説を以下のホームページで行っている.

<http://www.stat.t.u-tokyo.ac.jp/~masuda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増田 直紀 (MASUDA NAOKI)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 40415295

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし