

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19740234  
 研究課題名 (和文) 複雑ネットワーク上のゲームダイナミクスの解析的研究  
 研究課題名 (英文) Analytical research of game dynamics on complex networks  
 研究代表者  
 守田 智 (Morita Satoru)  
 静岡大学・工学部・講師  
 研究者番号：20296750

## 研究成果の概要 (和文)：

近年、ネットワーク科学が様々な分野で複雑なシステムを解析する方法論として取り上げられている。本研究ではネットワーク上のゲームダイナミクスについて調べた。進化ダイナミクスがネットワーク構造によってどのような影響を受けるかを明らかにした。2体相関のみを考慮するペア近似という方法を拡張することで次数分布やクラスタリング係数の効果についての近似理論を構築した。さらに様々なネットワークモデルを用いてクラスタリング係数が意味についても考察した。

## 研究成果の概要 (英文)：

Recently, to analyze the behaviors and functions of complex systems, a new approach with focusing on network structure of them has been used in many fields of science. I investigated how network structure influences evolutionary games on networks. I extend the pair approximation to study the effects of degree fluctuation and clustering of the network. In addition, the meaning of clustering coefficient was examined in several models of network.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	500,000	0	500,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,500,000	300,000	1,800,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 (数理物理学・物性基礎)

キーワード：囚人のジレンマ, 格子モデル, 生態系モデル, 社会ネットワーク, 複雑ネットワーク, 進化ゲーム

1. 研究開始当初の背景  
 20世紀末以来、自然界や社会・経済で見ら

れるネットワークについての調査・研究が盛んに行われるようになっていた。このような

傾向は、計算機の発展に伴い比較的規模の大きいネットワークについても調べることが可能になってきたことによる。ほとんどの実在のネットワークが共通の構造を持ち、従来のモデルで用いられていた単純なネットワークとは異なることが明らかになっていた。このような実例を統計的に調べた研究によってネットワークのトポロジーこそシステムの機能を定める重要な役割を果たすという考えが受け入れられている。

一方、ゲーム理論の世界では囚人のジレンマが空間的な構造によって解決されるという研究があった。しかし違うルールを持つゲームの場合には逆に空間構造によって協力的な振る舞い阻害されるという報告もあり、空間構造の効果については理論的な解析も不足しており不明であった。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では、複雑ネットワークの研究分野でもあまり注目されていない空間構造を考慮したモデルについて考察する。特に人間関係や生物同士の競争に着目すると、これらは近距離で強く生じると考えられる。このようにゲーム理論の枠組みを空間構造を含んだものに拡張する必要がある。どのようなネットワーク構造がジレンマ的な状況で協力行動を促進するかを解明することを目的とする。

(2)有名な囚人のジレンマ問題は協力（黙秘）と裏切り（自白）の2種の戦略からなる対称ゲームである。お互いに協力すると合計利得が最大になるにもかかわらず、相手を出し抜く裏切り戦略が支配戦略となり協力行動は実現しないとされる。このようなジレンマ的な状況でどのようにして協力行動が生じるかは進化生物学の重大なトピックの一つとなっている。すなわち自然選択の効果から自分自身の子孫をより効率的に残す生物が最適なものとして生き残ると考えられているにもかかわらず、しばしば同種間の別のメンバーを助ける自己犠牲的行動がみられる。この謎を解くことが最終的な目的である。

(3)このような協力行動がどのようにして進化したかという問題に対する有力な仮説の一つがご近所同士が助け合うという空間構造の効果である。一般に血縁選択といわれるものとは異なり、血縁関係を仮定したものではない。このような空間効果が確かにあるということは、正方格子上的囚人のジレンマゲームのシミュレーションによって既に確認さ

れていた。しかし囚人のジレンマゲームを一般的に拡張した雪の吹きだまりゲームを用いたモデルによって空間構造が常に協力行動の進化にプラスに働くとは限らないことわかってきた。すなわち統合的な理論は無く、空間構造がゲームダイナミクスに与える影響は解析する価値は大きい。

(4)上記の解析を行うためには、複雑ネットワーク研究の視点で見た場合、空間構造とは何を意味するかを明らかにする必要がある。さらに社会ネットワークをゲーム理論の観点から調べ、その特徴を明らかにする。これは本研究を実際社会科学へ応用する礎を築くためである。

## 3. 研究の方法

(1)モデルとして囚人のジレンマゲームや雪の吹きだまりゲームを包括した一般的なゲームを用いる。空間構造をもつネットワークを構築する方法はいくつか考えられるが、ここでは単純な仮定による拡張ランダムネットワークモデルを用いる。

(2)近似理論として平均場近似とペア近似を用いる。ペア近似とは平均場近似を隣接ペア間の相関を考慮できるように拡張したものである。ペア近似と平均場近似を比較することで2対相関の影響を考察することができる。従来のペア近似では3対相関を無視しているため複雑ネットワークの特徴の一つであるクラスター性からくる影響は再現できない。ペア近似を拡張することでクラスター性の効果を考慮した理論を構築する。

(3)従来の格子進化ゲームモデルではプレイヤーの移動は考慮されていない。すなわちプレイヤー自体はネットワーク上のノードに張り付いており増殖と死亡によるもの以外の変化はないモデルがほとんどであった。ここに拡散的な移動を加える。移動の効果を大きくしていくと2対相関は減少し平均場近似の結果に近づくと考えられる。ところが平均場近似の安定解はゲーム利得表から得られるナッシュ解と一致するとは限らない。すなわち高頻度の移動を導入しても空間効果は0にはならず、ゲームダイナミクスの更新ルールに依存して様々な結果が導かれる。この結果を利用して更新ルールの違いと空間構造の違いの相互の影響について調べる。

(4)クラスタリング係数に着目した近似理論を確立してネットワークの空間構造を理解を深める。さらに実在ネットワークとの比較も行う。社会ネットワーク独特の特徴を明ら

かにする。

#### 4. 研究成果

(1) まずネットワーク上のダイナミクスとして進化ゲームを考えた。特に協利行動がどのようなネットワーク構造において進化しやすいかという問題に着目した。このような協利行動の進化の問題は進化生物学における基礎的問題の一つであり、社会科学的にも人間関係構造の問題として重要だからである。本研究ではネットワークを特徴付ける指標として主にクラスタリング係数について考察した。空間的に埋め込まれたネットワークではクラスタリング係数が高くなるという傾向があるからである。数値計算とペア近似を駆使した理論解析によってクラスタリング係数とゲームダイナミクスの定常解がどのように関連しているかを調べた。クラスター性がゲームの結果に与える影響を数式化した。

(2) クラスター性の大きさを数値化した量であるクラスタリング係数の定義はいくつか知られており、どの定義を用いるかで結果が異なっていた。このような多義性は理論を構築する際の障害になる。そこでクラスター性の定義を今一度見直すこととした。モデルとしては Kim が提案したネットワークモデルを拡張したものを採用した。このモデルでは初期値として連結グラフを用意し、ランダムなリンクの張替をクラスタリング係数が大きくなるようなバイアスをかけて繰り返し行う。このモデルによって次数分布が指定されたランダムネットワークからクラスタリング係数の高いものを作成できる。クラスタリング係数は定義が比較的簡単なためクラスター性の指標としてよく用いられているが、その数値を比較・評価するのは必ずしも容易ではない。クラスタリング係数がシステムサイズによるスケールリング則を持つことを示した。このスケールリング則を用いることにより異なるサイズのネットワークの間のクラスター性を比較することが可能になった。

(3) 上記のスケールリング則を実在のネットワークにも応用して解析を行った。実在のネットワークとしては既存のデータベースによるものの他、独自に進学ネットワークの調査も行った。

#### 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5件)

- ① Satoru Morita, Extended Pair Approximation of Evolutionary Game on Complex Network, PROGRESS OF THEORETICAL PHYSICS, 査読有, 119 巻 2008, 29-38
- ② Hiroyasu Nagata, Satoru Morita, Jin Yoshimura, Tokiya Nitta and Kei-ichi Tainaka, Perturbation experiments and fluctuation enhancement in finite size of lattice ecosystems: Uncertainty in top-predator conservation, Ecological Informatics 査読有, 3 巻, 2008, 191-201
- ③ Satoru Morita, Kei-ichi Tainaka, Hiroyasu Nagata and Jin Yoshimura, Population Uncertainty in Model Ecosystem: Analysis by Stochastic Differential Equation, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 77 巻, 2008, 093801 1-4
- ④ 守田 智, ネットワーク上のゲームダイナミクスとクラスタリング係数, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1663 巻, 2008, 159-163
- ⑤ 守田 智, ゲームにおけるネットワークの効果について, 数理解析研究所講究録, 査読無, 1597 巻, 2007, 241-245

#### 〔学会発表〕(計17件)

- ① 守田 智, 複雑ネットワークのクラスター性指標について, 日本物理学会第 65 回 年次大会, 2010 年 3 月, 岡山大学
- ② 守田 智, Game theory on complex networks, Japan-Korea Mini Symposium on Mathematical Biology in Hamamatsu, 2010 年 2 月, 静岡大学
- ③ 守田 智, 生態系モデルの確率振動, 定量生物学の会第二回年会, 2010 年 1 月, 大阪大学
- ④ 守田 智, クラスタリング性の強度を計測する方法について, 第 6 回 ネットワーク生態学シンポジウム, 2009 年 12 月, 産業総合研究所
- ⑤ 守田 智, 生物学におけるネットワークモデル, 生物現象に対するモデリングの数理, 2009 年 12 月, 京都大学
- ⑥ 守田 智, 複雑ネットワークのクラスター性に見られるスケールリング則, 日本物理学会 2009 年秋季大会, 2009 年 9 月, 熊本大学
- ⑦ 守田 智, Random Networks with Clustering, International Symposium on Complex Systems Biology, 2009 年 9 月, 東京大学
- ⑧ 守田 智, 協利行動に対するクラスタリ

- ングの効果, 一橋ゲーム理論ワークショップ 2009, 2009年3月, 一橋大学
- ⑨ 倉知宏憲, 守田 智, 吉村 仁, 泰中啓一, ハトタカゲームにおける空間効果は協調戦略を促進させるか?, 第71回情報処理学会全国大会, 2009年3月, 立命館大学
- ⑩ 守田 智, 複雑ネットワークのクラスタリング係数について, 第5回ネットワーク生態学シンポジウム, 2009年3月, 沖縄国際大学
- ⑪ 守田 智, Game Dynamics on Complex Networks: Clustering Effect, リズム現象の研究会 IV, 2009年3月, お茶の水大学
- ⑫ 守田 智, Game Dynamics on Networks and Clustering Coefficient, 第5回生物数学の理論とその応用, 2009年1月, 京都大学
- ⑬ 守田 智, 進学過程のネットワーク解析, 日本物理学会 2008年秋季大会, 2008年9月, 岩手大学
- ⑭ 守田 智, 泰中 啓一, 永田 博康, 吉村 仁, Population Uncertainty in Model Ecosystem: Analytical Results, 第18回日本数理生物学会大会, 2008年9月, 同志社大学
- ⑮ 守田 智, The effect of clustering structure: Evolutionary games on random regular networks, Dynamics Days Asia Pacific 5, the 5th International Conference on Nonlinear Science, 2008年9月, 奈良
- ⑯ 守田 智, 複雑ネットワーク上のゲームダイナミクス, 日本物理学会 第63回年次大会, 2008年3月, 近畿大学
- ⑰ 守田 智, 複雑ネットワーク上の進化ゲーム: ペア近似を用いた解析, 京都ゲーム理論ワークショップ, 2008年3月, 京都大学

[図書] (計1件)

- ① Martin A. Nowak 著, 竹内康博・佐藤一憲・巖佐 庸・中岡慎治 監訳 (13章担当) 進化のダイナミクスー生命の謎を解き明かす方程式ー 共立出版 (2008).

[その他]

ホームページ等

<http://tamori0.sys.eng.shizuoka.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

守田 智 (静岡大学・工学部)

研究者番号: 20296750

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし