

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：16201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740266

研究課題名(和文) 動的変化するネットワークと結合力学系との相互作用が生む秩序化へのダイナミクス

研究課題名(英文) Co-evolution of a network and the dynamical processes occurring on it

研究代表者

青木 高明 (Aoki, Takaaki)

香川大学・教育学部・准教授

研究者番号：30553284

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：ネットワークという言葉は、複雑に関係し合う「繋がり」を指す用語として広く利用されている。このような繋がりには固定されたものではない。むしろ、状態に応じて動的に変化する。この自由度の高い多様な繋がりには、どのように秩序化され形成されているのか。本課題では、人や資金、情報などといった資源がネットワーク上で拡散・輸送されるプロセスと、その資源量に連動して動的に変化するネットワークを力学モデルとして導入し、ネットワーク自体の形成過程を考察した。結果、このモデルは実データにおいて観察されているジップ則を再現すると同時に、この力学系がカオス解を持ち、非定常的に各ノードが栄枯盛衰を繰り返すことを発見した。

研究成果の概要(英文)：Real-world networks are not static, but continuously change to meet the evolving needs of society. To know where the networks will change, we need to understand the nature of changing networks, in which the reformation of the networks and the dynamical processes occurring on the network are interdependent. To understand the mechanisms governing such dynamical organization, we proposed a simple model of co-evolving network dynamics, combining the dynamics of random walkers and the dynamics of the weighted network. We found that under suitable conditions, the density of walkers and the link weights converge to stationary power-law distributions at the macroscopic level, but they continue to change with time at the microscopic level, even though the dynamics of the proposed model is completely deterministic. We numerically and theoretically analyzed the equilibrium states from perspective of the dynamical system and found that the system has multi-stability including chaotic states.

研究分野：非線形力学、ネットワーク科学

キーワード：ネットワーク科学 Adaptive network complex network

1. 研究開始当初の背景

今日、ネットワークという言葉は物理学のみならず、工学・生物学・社会学など学際的に利用され、関心を集めている。例えば、複雑に繋がった大規模な通信網や交通網、友人・社会関係、生体内代謝反応経路や神経回路網など、自由度の高い多様な相互作用関係を指してネットワークと称され、繋がりといい点に注目して系の特性を理解する試みが為されている。この自由度の高い多様な繋がりが、どのように秩序化され構造形成されているのか。本研究課題では、そのメカニズムをネットワークを介した物質や情報・ヒトや資金などの流通・拡散過程に則して解明を試みた。

ネットワークに関する先行研究として、大別して2つの研究の流れがある。一つはネットワーク構造の統計性に関する研究である。その研究成果により、現実のネットワークがランダムではなく普遍的な構造を持つことが明らかになっているが、その普遍的構造の機能的意義については依然未解決な点が多い。構造解析に際してネットワークはグラフとして単純化され、繋がりが持つ相互作用関係という側面が省略される。そのため、通信や交通・化学反応などといった系のダイナミクスとの関係性・機能性が見えてこない。もう一つの研究の流れとしては、ネットワーク上の結合力学系に関する研究が進められている。ネットワークを介した感染拡大や同期現象など、ネットワーク構造の機能特性が調べられてきた。このとき、ネットワーク構造自体は関心対象である物理現象と独立した生成規則で規定されることが大半であった。しかし、ネットワークという繋がりは系の相互作用関係を表現するものであり、系のダイナミクスと無関係に規定される物ではない。従って系のダイナミクスと連動した、ネットワーク構造の形成過程を理解する必要がある、本課題の提案に至った。

2. 研究の目的

ネットワークという言葉は、複雑に関係し合う「繋がり」を指す用語として、広く利用されている。このような繋がりは固定されたものではない。むしろ、状態に応じて動的に変化する。この自由度の高い多様な繋がりは、どのように秩序化され構造形成されているのか。本課題では、**結合力学系+動的変化するネットワーク結合**という新しい枠組みを提案する。反応拡散過程によるネットワーク上の資源の流通プロセスと、資源量に連動して動的変化するネットワークを数理モデルとして導入し、ネットワーク構造の形成過程を解明する。

3. 研究の方法

現実のネットワークは時々刻々と動的に変化している。この自由度の高い、かつ多様な繋がりが、どのように秩序化され構造形成されているのか。本課題では、形成メカニズムを結合力学系のダイナミクスに駆動される動的な結合変化(アダプティブネットワーク)という視点から解明する。

(1) 第一に、ネットワーク上ダイナミクスの代表例として拡散現象(ランダムウォーク)に注目した。ヒトや資金、情報などといったリソースがネットワーク上を拡散・輸送される現象は基礎・応用研究共に重要である。本課題ではリソース量に応じて、ネットワーク変化が動的に調整される状況を考察した(図1を参照)。これは例えば、企業資本金に応じて企業間取引量が増加・減少したり、あるいは別の例として都市サイズに応じて2都市間の交通や物流が調整される状況を想定している。このような可塑的ネットワークのダイナミクスを力学系としてモデル化し、その振る舞いを解析した。

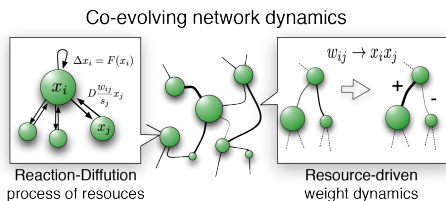
(2) 次にネットワークの時間変化情報として、イベント時系列データに注目した。多くの社会ネットワークにおいて、相互作用データはイベント時系列として得られる。メール、メッセージの送受信時刻データや通話の発生時刻がその例である。通常、ネットワーク構造はデータを時間的に積分することで得られるが、結果的に時間パターンに関する情報が欠落する。しかし実際、多くの社会活動パターンに共通する特徴として、イベント活動はバースト的(時間的不均一性)であるとの報告がある(Barabasi, A. L., Nature, 2005)。一方で積分化ネットワークは社会的関係性に関する情報を提供し、多数事例でリンク数(次数)が冪分布に従うことが知られている(構造的不均一性)。これらの時間的・構造的不均一性は、ソーシャル時系列データの両面であるが、従来は別々のモデルを用いて説明が為されてきた。これに対して本課題では、相互作用するポアソン過程の集団現象として、2つの不均一性を統一的に説明する確率モデルの構築を行った。

4. 研究成果

(1) 結果としてリソース分布が、実データにおいて観察されているジップ則を再現することを示した(Aoki & Aoyagi, PRL, 2012)。さらにミクロに見ると各ノードは栄枯盛衰を繰り返し非定常的となる。同様の現象は実データでも観察されており、決定論的力学モデルにて観察されることは興味深い。さらにこのミクロダ

イナミクスをリャブノフ解析で分類することで、この力学系が多数の固定点、周期解とともにカオス解を併せ持つことが判明した(Aoki, Yawata & Aoyagi, PRE, 2015)。またネットワークサイズが大きくなることでカオス解に至る確率が急増することから、大規模ネットワークでの非定常的ミクロダイナミクスはカオス解に由来するものと思われる。

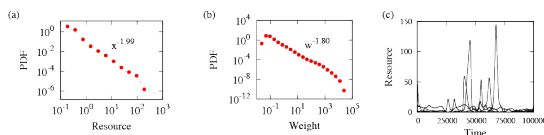
Schematic illustration of co-evolving dynamics of a network and the distribution of a diffusive resource on it.



Model equation

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = F(x_i(t)) + D \sum_{j \in N_i} [T_{ij} x_j(t) - T_{ji} x_i(t)],$$

$$\frac{dw_{ij}(t)}{dt} = \epsilon [x_i(t) x_j(t) - w_{ij}(t)].$$



- (2) このモデルでは、各ノードはポアソン過程に応じて、メッセージを他のノードに送信する。メッセージを受け取ったノードはその後のメッセージ送信確率を上昇させる一方で、送信ノードは確率が減少する。この時メッセージ送信の対象は、オンラインフォーラムなどの社会的ネットワークのデータ解析の知見を反映し、確率でランダムに、確率1-でメッセージ送信を行っているアクティブノードから選択する。このような相互作用を集団として繰り返すことで、集団として平衡状態に達する。確率が小さい条件では、積分化ネットワークは次数がべき分布(スケールフリー性)を再現すると共に、各ノードのメッセージイベント時系列からはバースト性が観測された。さらにモデルのマスター方程式を導出し、これを母関数解析することでメッセージ送信のパラメータに応じて、次数分布の分散が発散し転移が生じることを確認した。同時にメッセージイベントの時間間隔がべき分布となることを導出した(Aoki, Rocha & Gross, PRE, 2016)。

(位置づけと今後の展望)

ヒトの社会活動や遺伝子解析等の大規模データにおいて、ネットワークという視点からの解析が行われている。特に近年はネット

ワーク自体の高精度な時間情報を得ることができることから、ネットワークを静的なグラフ構造として見るのではなく、時間的変化を含めた解析が重要となっている。

本研究課題は、ネットワーク自体のダイナミクスを対象としており、物理学研究としてネットワーク時間変化の背後にある原理を探る上で、重要な基礎モデルを提供することができる。

今後は、さらに実データ解析を統合していくことで、より精度の高いモデル構築を目指していく。

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6件)

Temporal and structural heterogeneities emerging in adaptive temporal networks, Takaaki Aoki, Luis E. C. Rocha, and Thilo Gross, *Physical Review E Rapid Communication*, Vol. 93, 040301(R) (2016). DOI: 10.1103/PhysRevE.93.040301

Heterogeneity induces emergent functional networks for synchronization, Francesco Scafuti, Takaaki Aoki, and Mario di Bernardo, *Physical Review E*, vol. 91, 062913 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.91.062913

Self-organization of complex networks as a dynamical system, Takaaki AOKI, Koichiro YAWATA and Toshio AOYAGI, *Physical Review E*, vol. 91, 012908 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.91.012908

Hodge-Kodaira decomposition of evolving neural networks, Keiji MIURA and Takaaki AOKI, *Neural Networks*, vol. 62, 20-24 (2015). DOI: 10.1016/j.neunet.2014.05.021

Self-organization of a recurrent network under ongoing synaptic plasticity, Takaaki AOKI, *Neural Networks*, vol. 62, 11-19 (2015). DOI: 10.1016/j.neunet.2014.05.024

Scale-Free Structures Emerging from

Co-Evolution of a Network and the Distribution of a Diffusive Resource on It, Takaaki AOKI and Toshio AOYAGI, *Physical Review Letters*, vol.109, 208702 (2012).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.208702

〔学会発表〕(計 45 件)

Heterogeneities in temporal networks emerging from adaptive social interactions, Takaaki Aoki, Luis E. C. Rocha, and Thilo Gross, SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (2015/5/17 - 2015/5/21), 2013/5/17, Snowbird Ski and Summer Resort, Snowbird, USA, Oral.

Two kinds of heterogeneities emerging in adaptive temporal networks, Takaaki Aoki, Luis E. C. Rocha, and Thilo Gross, Netsci 2015 (International school and conference on network science) (2015/6/1-5), 2015/6/4, World Trade Center, Zaragoza, Spain, Poster.

Evolution of heterogeneous networks of oscillators for network control and synchronization Takaaki Aoki, Francesco Scafuti, Mario di Bernardo, Dynamics of Coupled Oscillators: 40 years of the Kuramoto Model (2015/7/27-31), 2015/7/28, Max Planck Institute for the Physics of Complex Systems, Dresden, Germany, Poster.

Scaling of Hodge-Kodaira decomposition distinguishes learning rules of neural networks, Keiji Miura and Takaaki Aoki, The 8th International congress on Industrial and Applied mathematics (2015/8/10-14), 2015/8/10, China National Convention Center, Beijing, China, oral (Invited).

Network organization as a dynamical system, Takaaki Aoki, The 8th International congress on Industrial and Applied mathematics (2015/8/10-14), 2015/8/10, China National Convention Center, Beijing, China, oral (Invited).

Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks Keiji Miura and Takaaki Aoki, The 4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (2015/8/26-28), 2015/8/28, Tokyo Metropolitan Univ., Tokyo, Japan, Oral (Invited).

Network organization as a dynamical system, Takaaki Aoki, The 4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (2015/8/26-28),

2015/8/28, Tokyo Metropolitan Univ., Tokyo, Japan, Oral (Invited).

An evolutionary strategy for network control and synchronization with application to neural systems, Francesco Scafuti, Takaaki Aoki, and Mario di Bernardo, The 4th IFAC Conference on Analysis and Control of Chaotic Systems (2015/8/26-28), 2015/8/28, Tokyo Metropolitan Univ., Tokyo, Japan, Oral (Invited).

A model of adaptive temporal networks, Takaaki Aoki, The 3rd East Asia Joint Seminar on Statistical Physics (2015/10/14-17), 2015/10/15, Korea Institute of Advanced Study (KIAS), Seoul, Korea, Oral (Invited).

Self-Organization of Temporal Network, Takaaki Aoki, Luis E C Rocha, Thilo Gross, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2015) (2015/12/1-4), 2015/12/3, HongKong, China, Oral (Invited).

適応的テンポラルネットワークモデルによるバースト現象の説明, 青木高明, 日本物理学会 第70回年次大会, 早稲田大学, 東京都新宿区, 2015/3/24, oral

適応的テンポラルネットワークモデルによるバースト現象の説明, 青木高明, 北陸応用数理研究会 2015, 金沢大学サテライトプラザ, 金沢市, 2015/2/21, oral

Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, Keiji Miura, Takaaki Aoki, International Workshop on "Topics in Differential Geometry and its Discretizations" (2015/11/10-12), Tohoku University, Sendai, Japan, 2015/1/18, oral

時間発展するネットワークの Hodge-小平分解による構造解析, 三浦佳二, 青木高明, 2014 年度応用数学合同研究集会 (2014/12/18-20), 龍谷大学瀬田キャンパス, 大津市, 2014/12/18, oral

Organization of adaptive networks as a dynamical system, Takaaki Aoki, NetCon@ECCS'14(2014/9/25), Lucca, Italy, 2014/9/25, invited.

Heterogenous cluster formation in the activity-dependent time-varying network, Takaaki Aoki, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA) 2014 (2014/09/14-18), Luzern, Switzerland, 2014/9/18, Oral.

テンポラルネットワークにおけるリソース拡散とその共変化過程, 青木高明, 日本物理学会秋季大会 (2014/9/7-10), 中部大学, 春日井市, 2014/9/10, 口頭発表.
ネットワーク上の資源拡散に伴ってスケ

- ールフリー構造が形成される力学モデル, 小松啓太, 青木高明, 根本幸児, 日本物理学会秋季大会 (2014/9/7-10), 中部大学, 愛知県・春日井, 2014/9/8, Poster 発表.
- Adaptive networks に基づくネットワーク構造の自己組織化, 青木高明, COMPLEX NETWORKS SUMMER SCHOOL 2014 (2014/8/18-2014/8/21), Tohoku University, 宮城県仙台市, 2014/8/20, トピック講義.
- The co-evolving dynamics of the temporally changing network and the diffusion dynamics of a resource, Koichiro Yawata, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Joint Annual Meeting of the Japanese Society for Mathematical Biology and the Society for Mathematical Biology (2014/7/28-8/1), Osaka International Convention Center, Osaka, Japan, 2014/7/29, Poster
- 21 Adaptive network of coupled phase oscillators by synaptic plasticity, Takaaki Aoki, Bristol-Kyoto workshop on stability and control of bi-pedal locomotion (2014/7/7-8), University of Bristol, Bristol, UK, 2014/7/8, Oral.
 - 22 Dynamic Network Organization Based on Co-Evolving Dynamics Between Resources on Nodes and Weighted Connections, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, NetSci 2014 (2014/06/2-6), Berkeley, California, 2014/6/5, Poster.
 - 23 動的に変化するネットワークにおける平衡状態の安定性, 青木高明, 八幡晃一郎, 青柳富誌生, 日本物理学会 第 69 回年次大会(2014/3/27-30), 東海大学 湘南キャンパス, 神奈川県平塚, 2014/3/30, Poster.
 - 24 Organization of complex networks as a dynamical system, Takaaki Aoki, RIMS Conference on New Directions in Applied Dynamical Systems & The 6th CREST-SBM International Conference (2014/03/10-14), Kyoto University, Kyoto, Japan, 2014/3/14, Oral.
 - 25 Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, Keiji Miura, Takaaki Aoki, Workshop on cortical dynamics: from the architecture to functions (2014/02/26-27), Kyoto University, Kyoto, Japan, 2014/02/27, Oral
 - 26 Self-Organized Network Structure Emerging from Co-Evolving Dynamics Between Resources on Nodes and Weighted Connections, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, Network Frontier Workshop 2013 (2013/12/04-06), Northwestern University Evanston, IL, 2013/12/04, Oral.
 - 27 トラフィックダイナミクスに基づくネットワーク自己組織化, 青木高明, 電子情報通信学会 非線形問題研究会 (2013/10/28-29), サポートホール高松香川県, 2013/10/29, 口頭発表(招待講演).
 - 28 動的に変化するネットワーク上における資源拡散系のべき分布の発生とミクロの非定常性, 八幡晃一郎, 青木高明, 青柳富誌生, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013/9/25-28), 徳島大学(常三島キャンパス), 徳島市, 2013/9/28, ポスター発表
 - 29 ネットワーク上のリソース分布と構造との相互作用系における平衡状態の解析, 青木高明, 八幡晃一郎, 青柳富誌生, 第 23 回日本数理生物学会大会 (2013/9/11-13), 静岡大学浜松キャンパス, 浜松市, 2013/9/12, 口頭発表
 - 30 Equilibrium state of an adaptive network depending on diffusion dynamics of a resource, Takaaki Aoki, Koichiro Yawata, Toshio Aoyagi, International Workshop on Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks (2013/9/9-11), Hokkaido University, Sapporo, 2013/9/10, Poster
 - 31 Stationary state of a recurrent network under ongoing synaptic plasticity, Takaaki Aoki, 包括脳ネットワーク夏のワークショップ(2013/8/29 - 9/1), 名古屋国際会議場 (名古屋市熱田区), 2013/8/31, ポスター発表
 - 32 ネットワーク可塑性による秩序化過程, 青木高明, FIRST 合原最先端数理モデルプロジェクト TWS23:結合振動子集団のダイナミクス、同期とパターン形成, 東大生産技術研究所, 東京都目黒区, 2013/8/19, 口頭発表
 - 33 Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, Keiji Miura and Takaaki Aoki, 2013 SIAM Conference on Applied Algebraic Geometry (AG13) (2013 8/1-8/4), Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA, Oral.
 - 34 Effects of synaptic plasticity in heterogeneous neural networks, Takaaki Aoki, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013) (2013/6/23-27), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, Poster.
 - 35 Hodge-Kodaira Decomposition of Evolving Neural Networks, Keiji Miura and Takaaki Aoki, The 4th International Conference on Cognitive Neurodynamics (ICCN2013)

- (2013/6/23-27), Agora for Biosystems, Sigtuna, Sweden, Poster.
- 36 ネットワーク上の反応拡散系とネットワーク形成の相互作用, 青木高明, 2013 年度第 1 回電子情報通信学会複雑コミュニケーションサイエンス時限研究会 (2013/6/3-2012/6/4), 立命館大学, 草津市, 2013/6/4, 口頭発表.
- 37 Self-Organized Network Structure by Co-Evolving Dynamics Between Reaction-Diffusive Resources on Nodes and Weighted Connections, Takaaki Aoki and Toshio Aoyagi, 2013 SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems (2013/5/19 - 2013/5/23), 2013/5/19, Snowbird Ski and Summer Resort, Snowbird, USA, Oral.
- 38 動的なネットワーク上の反応拡散系におけるミクロな非定常性, 八幡晃一郎, 青木高明, 青柳富誌生, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (2013/3/26-2013/3/29), 広島大学, 東広島市, 2013/3/27, 口頭発表.
- 39 Co-evolving Network Dynamics between Reaction-Diffusive Resources on Nodes and Weighted Connections, Takaaki Aoki, Toshio Aoyagi, 2012 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA 2012) (2012/10/22 - 2012/10/26), Palma, Majorca, Spain, 2012/10/25, Oral.
- 40 反応拡散系ダイナミクスに基づくネットワーク構造の形成過程, 青木高明, 青柳富誌生, 日本物理学会 2012 年秋季大会 (2012/9/18-2012/9/21), 横浜国立大学, 横浜市, 2012/9/21, 口頭発表.
- 41 反応拡散系ダイナミクスに基づくネットワーク構造の形成過程, 青木高明, CMRU 研究会"ネットワーク科学の数理と展開"(2012/9/13-2012/9/14), 東北大学, 仙台市, 2012/9/13 (招待講演).
- 42 変化するネットワーク上の結合力学系のダイナミクス, 青木高明, 科研費・新学術領域研究「伝達創成機構」若手討論会 第 1 回 ヘテロ・ニューロアナリシス研究会シンポジウム (2012/7/24-2012/7/25), 仙台国際センター, 仙台市, 2012/7/24, 口頭発表.
- 43 ネットワークとしてのシナプス可塑性の解明: 結合振動子系からのアプローチ, 青木高明, 東工大脳研究会講演会, 東工大すずかけ台, 横浜市, 2012/7/23, 口頭発表.
- 44 ネットワークとしてのシナプス可塑性の解明: 結合振動子系からのアプローチ, 青木高明, 応用数学連携フォーラム 星陵サテライト「第 5 回生命科学者のための使える数学セミナー」, 東北大学, 仙台市, 2012/6/26 (招待講演), 口頭発表.
- 45 変化するネットワーク上の結合力学系の

ダイナミクス, 青柳富誌生, 青木高明, 第 50 回自律分散システム部会研究会 (2012/6/15), 京都大学吉田キャンパス百周年時計台記念館 国際交流ホール, 京都市, 2012/6/15, 口頭発表(招待講演).

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.ed.kagawa-u.ac.jp/~aoki/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

青木 高明 (AOKI, Takaaki)
香川大学・教育学部・准教授
研究者番号: 30553284