

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540395

研究課題名(和文) 複雑ネットワークにおける非線形輸送モデルの統計物理学的特性

研究課題名(英文) Statistical physics approaches to nonlinear transport on complex networks

研究代表者

高安 美佐子 (TAKAYASU, MISAKO)

東京工業大学・総合理工学研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20296776

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：約百万社の企業の取引関係のビッグデータを解析し、取引関係のネットワーク構造が典型的な複雑ネットワークになっていることを踏まえて、そのネットワーク上でのお金やものの輸送を記述するモデルを構築した。まず、取引金額のデータがある取引ペアに関して流量とそれぞれの企業の大きさの統計的な関係を分析し、重力型とよばれる非線形な相互作用関係を確認した。次に、この非線形輸送の関係をシステム全体のネットワーク構造に適応し、ネットワークの構造から任意の地点の流量を推定する方法を確立した。また、ネットワーク構造の脆弱性に関してもパーコレーションモデルから新たな知見を得た。

研究成果の概要(英文)：By analyzing big-data about 1 million business firms, we firstly confirmed that the transaction network has typical properties of complex networks such as power law distribution of link numbers. We then observe the amount of flow between pairs and established a nonlinear transport relation in the framework so-called gravity law. Generalizing this pairwise relation to the whole network system, we constructed a nonlinear transport model which enables estimation of flow intensity at any point. Additionally, we defined a new quantity that characterizes fragility of network connectivity by applying theory of percolation.

研究分野：数理物理・物性基礎論

キーワード：複雑ネットワーク 非線形輸送システム 流域サイズ 相転移現象 凝集現象 分岐過程 頑強性 物流ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

複雑ネットワークの研究によって、特定の要素同志が強く相互作用する多自由度システムの研究への新しい道が開かれた。企業の取引ネットワークの構造に関しては、取引相手数の分布がベキ乗則にしたがうスケールフリーネットワークであり、ペアの距離の分布は最多値が5程度のスモールワールドであることは自分たちの先行研究で明らかになっていた。しかし、要素間の相互作用の基本形に関しては、解明されていなかった。

2. 研究の目的

当該研究では、約100万社の企業の取引関係のデータを元にして、複雑ネットワーク構造上での相互作用の関数形を明らかにし、基本的な統計物理的な特性を解明する。拡張重力型とよばれる相互作用を想定し、リンクで結ばれたノード間のフラックスを観測量と合わせることでシステムの基礎方程式を導出し、ネットワークの構造という空間的制約とシステムの動力学という時間発展がどのように影響し合っているのかに焦点を当てて現実の複雑システムにアプローチする。

3. 研究の方法

企業間の年間取引額に関するデータが数千社のペアについて入手されたので、それらに基づいて、重力型相互作用の基本形をいくつか想定し、どのような場合に、合理的にデータを説明できるのかを調べる。取引ペアの発注社から受注社にお金は流れ、ものやサービスはその反対に流れる。この流れの量(以下、フラックスとよぶ)を目的変数として、発注社と受注社の説明変数として、年間売上や資本金、年間利益、従業員数、取引相手数、などを用意し、どのような関数関係を想定すると、最もフラックスがうまく説明できるのかをしらみつぶし的に探索する。発注社と受注社のどちらも年間売り上げを説明変数とし、フラックスは発注社の売上の α 乗と受注社の売上の β 乗に比例する、という拡張重力型とよばれる相互作用を想定する。

次に、この拡張重力型相互作用を元にして、企業間取引データから見積もられる取引ネットワーク上で輸送関係を考察し、それぞれの企業の年間売上が満たすべき動力学方程式を立てる。約百万個の変数による非線形な微分方程式に注入項と散逸項を付加し、この方程式の定常解を数値計算によって求め、実際のデータと合わせることで、これらの項のパラメータの値を矛盾なく決める。

4. 研究成果

企業ネットワーク上での輸送の問題に関しては、非線形輸送モデルの基盤を構築することができた。このモデルにおいて非線形輸送の指数をモデルに見られる相転移現象を精査した。モデルの中で非線形輸送の指数を次第に大きくしていくと、ある閾値を越える

と、ネットワーク上で輸送のパターンが劇的に変わり、全域に渡る流れが局在するようになる。この相転移現象を数値解析と理論解析によって明らかにした。また、複雑なネットワーク輸送における大動脈に相当するツリー構造の抽出する手法も開発した。後者の成果は、論文として既に掲載され、前者に関しては論文を執筆中である。

また、成長率がランダムに独立に変動する要素が結合した集団の統計的性質を解析し、成長率の分布が安定分布になることを理論とシミュレーションによって確認した結果を論文として発表した。ここで予想される成長率の分布は、現実に観測される企業ネットワークにおける売上の成長率の分布と非常によく似ていることも見出した。

ネットワーク構造の頑強性を計算する標準的な方法として、パーコレーションモデルによってランダムにリンクを除去することによってシステム全体の連結性がどのように失われるかをシミュレーションと理論解析によって分析し、平均場的な相転移現象を起こすことを明らかにし、応用として、複雑ネットワークの頑強性指数を定義した。

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16件)

Koutarou Tamura, Hideki Takayasu, Misako Takayasu,

"Extraction of conjugate main-stream structures from a complex network flow",

Physical Review E 91, 042815, 査読有, 7 pages(2015)

DOI: 10.1103/PhysRevE.91.042815

Hirokazu Kawamoto, Hideki Takayasu, Henrik Jeldtoft Jensen, Misako Takayasu

"Precise Calculation of a Bond Percolation Transition and Survival Rates of Nodes in a Complex Network" PLoS ONE 10(4): e0119979, 査読有, 16 pages (2015)

DOI: 10.1371/journal.pone.0119979

Misako Takayasu, Kazuya Sato, Yukie Sano, Kenta Yamada, Wataru Miura, Hideki Takayasu

"Rumor Diffusion and Convergence during the 3.11 Earthquake: A Twitter Case Study"

PLoS ONE 10(4):e0121443, 査読有, 11 pages (2015)

DOI: 10.1371/journal.pone.0121443

Tsuyoshi Deguchi, Katsuhide Takahashi, Hideki Takayasu, Misako Takayasu

"Hubs and Authorities in the World Trade Network Using a Weighted HITS

Algorithm"
PLoS ONE 9(7):e100338, 査読有, 16 pages (2014)
DOI: 10.1371/journal.pone.0100338
田村光太郎, 高安美佐子
"企業間取引ネットワーク上での金の流れのモデル化とシミュレーション"
シミュレーション, Vol.33 No.4, 査読無, pp.16-22 (2014)
<http://www.jsst.jp/j/journal/contents/vol33.html>
由良嘉啓, 高安美佐子
"外国為替市場のシミュレーション"
シミュレーション, Vol.33 No.4, 査読無, pp.8-11 (2014)
<http://www.jsst.jp/j/journal/content/s/vol33.html>
Yoshihiro Yura, Hideki Takayasu, Didier Sornette, Misako Takayasu
"Financial Brownian particle in the layered order book fluid and fluctuation-dissipation relations"
Physical Review Letters 112, 098703, 査読有, 5 pages (2014)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.098703
Misako Takayasu, Hayafumi Watanabe, Hideki Takayasu
"Generalised Central Limit Theorems for Growth Rate Distribution of Complex Systems"
Journal of Statistical Physics Vol.155, Issue 1, 査読有, pp.47-71 (2014)
DOI 10.1007/s10955-014-0956-4
Yoshihiro Yura, Hideki Takayasu, Kazuyuki Nakamura, Misako Takayasu
"Rapid Detection of the Switching Point in a Financial Market Structure Using the Particle Filter"
Journal of Statistical Computation and Simulation Vol.84, Issue 10, 査読有, pp.2073-2090 (2014)
DOI:10.1080/00949655.2013.781603
Hayafumi Watanabe, Hideki Takayasu, Misako Takayasu
"Relations between allometric scalings and fluctuations in complex systems: The case of Japanese firms"
Physica A: 392, 4, pp.741-756 (2013)
DOI:10.1016/j.physa.2012.10.020
Koutarou Tamura, Wataru Miura, Misako Takayasu, Hideki Takayasu, Satoshi Kitajima, Hayato Goto
"ESTIMATION OF FLUX BETWEEN INTERACTING NODES ON HUGE INTER-FIRM NETWORKS"
International Journal of Modern Physics: Conference Series Vol.16, 査読有, pp.93-104 (2012)
DOI: 10.1142/S2010194512007805
Wataru Miura, Hideki Takayasu,

Misako Takayasu
"The origin of asymmetric behavior of money flow in the business firm network"
The European Physical Journal Special Topics Vol.212, Issue 1, 査読有, pp.65-75 (2012)
DOI: 10.1140/epjst/e2012-01654-7
Koutarou Tamura, Wataru Miura, Hideki Takayasu, Satoshi Kitajima, Hayato Goto, Misako Takayasu
"Money-Transport on a Japanese Inter-firm Networks: Estimating sales from the adjacency matrix"
Proceedings of The Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems Kyoto Japan, 査読有, pp.105-110 (2012), (ISBN978-4-99066920-1)
Hirokazu Kawamoto, Koutarou Tamura, Hideki Takayasu, Misako Takayasu
"Importance of Bridges in the Structure of Complex Networks"
Proceedings of The Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems Kyoto Japan, 査読有, pp.99-104 (2012), (ISBN978-4-99066920-1)
Hayafumi Watanabe, Hideki Takayasu, Misako Takayasu
"Biased diffusion on Japanese inter-firm trading network"
New Journal of Physics Vol.14, 043034, 査読有, 16 pages (2012)
DOI: 10.1088/1367-2630/14/4/043034
Wataru Miura, Hideki Takayasu, Misako Takayasu
"Effect of coagulation of nodes in an evolving complex network"
Physical Review Letters Vol.108, 168701, 査読有, 4 pages (2012)
DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.168701

[学会発表](計 82 件)

2015.03.24. 田村光太郎, 日本物理学会 2015 年春季大会, 早稲田大学 (東京都新宿区), 非線形輸送方程式の相転移と構造の関係
2015.02.20. 田村光太郎, 複雑ネットワーク・ウィンターセッション 2015, 北海道大学 (北海道札幌市), 大規模企業間取引データの解析と非線形輸
2014.12.26. 高安美佐子, 招待講演 国際高等研究所 研究プロジェクト 2014 年度 第 2 回研究会, 国際高等研究所 (京都府木津川市), 企業ネットワークの数理とその応用送現象
2014.11.05. Koutarou Tamura,

Social Modeling and Simulations +
Econophysics Colloquium 2014, Kobe,
Japan,
Basin structures of a complex network
with strongly biased nonlinear flow
2014.10.17. 高安美佐子, 招待講演
政府統計におけるビッグデータの活用な
どに係る勉強会(経産省大臣官房調査統
計グループ), 経済産業省(東京都千代田
区),
ソーシャルメディアの利活用事例につい
て
2014.10.15. 高安美佐子, 招待講演
日本学術振興会「放射線の影響とクライ
シスコミュニケーション」に関する先導
的研究開発委員会, 株式会社堀場製作所
東京支店(東京都千代田区),
東日本大震災時における Twitter 内での
デマの拡散と収束
2014.09.09. 田村光太郎,
日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学
春日井キャンパス(愛知県春日井市)
本流リンク抽出過程の一般化と企業間ネ
ットワークにおける応用
2014.08.20. 高安美佐子, 招待講演
第 35 回数理の翼夏期セミナー, 筑波大
学(茨城県つくば市),
社会・経済の現象の数理
2014.08.18. 田村光太郎,
複雑ネットワーク・サマースクール 2014,
仙台, 東北大学(宮城県仙台市)
複雑ネットワーク上の非等方的なフロ
ーにおける主要フローの構造解析
2014.08.07. 高安美佐子, 招待講演
2014 年度日本物理学会科学セミナー「非
平衡の世界ー凝集系、地震、経済、生命
まで」, 東大駒場キャンパス(東京都目
黒区)
経済・社会に観測される非平衡現象
2014.07.14. Misako Takayasu, Invited
talk
4th Ph.D. Summer School -Conference on
"Mathematical Modeling on Complex
Systems", Cultural Foundation
"Kritiki Estia" (Athens, Greece)
Statistical Physics of Financial
Markets
2014.07.10. Misako Takayasu, Invited
talk
International Conference on
Statistical Physics 2014(Rhodos,
Greece)
Similarity between colloidal random
walks and financial random walks
2014.06.05. Hirokazu Kawamoto,
NetSci2014, Berkeley(California, USA)
Finite-Size Scaling Laws at the
Percolation Transition Point of
Complex Networks
2014.06.02. Misako Takayasu, Invited

talk
International Conference on
Econophysics (2014) &Asia-Pacific
Econophysics Conference (2014),
(Shanghai, China)
Estimation of viscosity and Knudsen
number of markets from order-book data
2014.03.28. 三浦航,
日本物理学会 2013 年年次大会, 東海大学
(神奈川県藤沢市)
複雑ネットワークにおける優先的接続と
次数分布のベキ指数の関係性
2014.03.12-13. Wataru Miura,
CompleNet2014(Bologna, Italy)
Coagulation Phenomena ant the Sol-Gel
Transition on a Complex Network
2013.12.04. Misako Takayasu, Invited
talk
The 20th Annual Riskminds Conference,
Hotel Okura(Amsterdam, Netherlands)
The dynamics of the Japanese financial
markets and the Bank of Japan's
interventions: Real data case studies
2013.11.27. Koutarou Tamura,
International Conference on
Mathematical Modeling and Applications,
Meiji Univ.(東京都中野区)
New method for extracting supply chain
structure from inter-firm transaction
network
2013.11.18. Misako Takayasu, Invited
talk
ESHIA Winter Workshop in Singapore,
nanyang Technological University
(Singapore)
Network Properties of Business Firms in
Japan: From Structure to Transport
2013.09.26. 松崎剛史,
日本物理学会 2013 年秋季大会, 徳島大学
(徳島県徳島市)
企業間取引ネットワークを用いた距離の
統計性の研究
21 2013.09.20. Koutarou Tamura,
European Conference on Complex Systems
2013, World Trade Center Barcelona
(Barcelona, Spain)
Properties of nonlinear money
transport model and comparison with the
biased random walk model
22 2013.09.13. Misako Takayasu, Keynote
speech
AESCS2013 The 8th International
Workshop on Agent-based Approach in
Economic and Social Complex Systems,
Shibaura Institute of Technology
(東京都江東区)
Modeling of Japanese business
transactions; Evaluation of systemic
risks, and stress tests
23 2013.09.10. Hirokazu Kawamoto,

- International Workshop on Phase Transition, Critical Phenomena and Related Topics in Complex Networks, Hokkaido Univ. (北海道札幌市)
New Numerical Method for Estimating the Percolation Transition Point and Critical Exponents
- 24 2013.09.02. 高安美佐子, 統数研共同研究集会「経済物理学とその周辺」H25年度第1回研究会, キャノングローバル戦略研究所(東京都千代田区) 日本企業間取引ネットワークを用いた日本経済のストレステストの提案
- 25 2013.07.29. Misako Takayasu, Invited talk
Econophysics Colloquium 2013 & Asia Pacific Econophysicss Conference 2013, Postech (Pohang, Korea)
Estimation of flows in Business to Business transaction network
- 26 2013.06.18. Misako Takayasu, Invited talk
CORDIS FP7-ICT FET Proactive: "Dynamics and Coevolution in Multi-Level Strategic Interaction Games", CONGAS Delft Joint WP Meeting, Delft University of Technology (Delft, Netherland)
Analysis and modeling of one million Japanese firms' transactions: Evaluation of systemic risks, and stress tests
- 27 2013.06.03. Wataru Miura, NetSci2013 - Human Behavior and Network Science Workshop, Technical, Univ. of Copenhagen(Copenhagen, Denmark)
Empirical model of money transport and its application
- 28 2013.05.13. 高安美佐子, 招待講演
スーパーコンピュータによる社会シミュレーションとその将来, 理化学研究所計算科学研究機構(兵庫県神戸市) 社会・経済活動のマルチ階層シミュレーションにむけて
- 29 2013.04.17. Misako Takayasu, Invited talk
Workshop on Complexity and Systemic Stability, Imperial College London (London, U.K.)
Quick detection of financial market instability
- 30 2013.04.16. Misako Takayasu, Invited talk
Seminar talk at Prof. Aste's laboratory, Univ. College London(London, U.K.)
Review of study on business firm networks in Japan:Transport on complex networks
- 31 2013.03.29 笠原章弘, 日本物理学会 2013 年年次大会, 広島大学 (広島県東広島市)
- 日本企業 100 万社のデータを用いた企業の成長過程の観測
- 32 2013.03.13. Koutarou Tamura, CompleNet 2013 (Berlin, Germany)
Modeling of money transport and evaluating diffusiveness on Japanese inter-firm network
- 33 2013.01.15. 田村 光太郎, 日本学会議 物性物理学・一般物理学分科会シンポジウム「物性物理学・一般物理学の未来を語る」, 学会議講堂(東京都港区)
複雑ネットワーク上の非線形輸送における局在化転移
- 34 2012.12.15. 河本弘和, 第9回 ネットワーク生態学シンポジウム, 沖縄国際大学(沖縄県宜野湾市)
企業間取引ネットワークにおける脆弱性の解析
- 35 2012.12.14. 三浦航, 第18回交通流のシミュレーションシンポジウム, 名古屋大学(愛知県名古屋市)
複雑ネットワーク上で観測される非線形輸送現象とそのパラメータ推定
- 36 2012.12.13. Hirokazu Kawamoto, The 16th Asia Pacific Symposium on Intelligent and Evolutionary Systems, Kansai Seminar House (京都府京都市)
Importance of Bridges in the Structure of Complex Networks
- 37 2012.12.07. 河本弘和, 平成24年度 文部科学省 数学・数理科学と諸科学・産業との連携研究ワークショップ「複雑系ゆらぎデータの分析と制御: 超多自由度非定常系へのアプローチ」, 明治大学(東京都千代田区)
大規模企業間取引ネットワークで見られるパーコレーション相転移現象
- 38 2012.11.08. Koutarou Tamura, 2012 International Conference on Modeling, Analysis and Simulation, Meiji Univ.(東京都千代田区), 2012AS Poster Award for Excellence
Money-flow model on a Japanese inter-firm network and theoretical analysis of its properties
- 39 2012.10.28. 高安美佐子, 招待講演
明治大学先端数理科学研究科ワークショップ「複雑系ゆらぎデータの分析と制御: 脳から社会まで」, 明治大学(東京都千代田区)
購買行動と取引ネットワークからみる企業のゆらぎ
- 40 2012.10.21. 高安美佐子 招待講演
未来発見フォーラム 2012, 東京国際フォーラム(東京都千代田区)
人間社会の現象を経済物理学が切り開く!
- 41 2012.09.20. 笠原章弘,

- 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学(神奈川県横浜市)
日本企業 100 万社の財務統計量を用いた企業分類方法の研究
- 42 2012.09.13. 三浦航, 招待講演
CMRU 研究会 ネットワーク科学の数理と展開, 東北大学(宮城県仙台市)
凝集効果を考慮した複雑ネットワークの優先的成長モデル
- 43 2012.08.02. 河本弘和,
非平衡系の物理, 京都大学基礎物理学研究所(京都府京都市)
企業間取引ネットワークにおけるパーコ
- 44 2012.06.21. Wataru Miura,
NetSci2012, Evanston (Illinois, USA)
The relation between business firm network and coagulation of aerosols
- 45 2012.04.25. Misako Takayasu, Invited Talk
Complexity and Risk Seminar, Imperial College (London, U.K.)
Transition from power law to monopoly in complex business firm network

外 37 件

〔図書〕(計 3 件)

- 高安美佐子 他, 日本評論社, 学生・技術者のためのビックデータ解析入門, 2014, 256 pages
高安美佐子 他, 日本評論社, ソーシャルメディアの経済物理学, 2012, 183 pages
高安美佐子 他, 岩波書店, 計算科学 6 計算と社会, 2012, 61 pages

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称: 時系列データの変化点検出法およびプログラム、未来の時系列データ値の確率密度分布予測方法及びプログラム
発明者: 高安美佐子, 由良嘉啓, 中村和幸
権利者: 同上
種類: 特許
番号: PCT/JP2012/005697
出願年月日: 2012 年 9 月 7 日
国内外の別: 外国

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等
<http://www.smp.dis.titech.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高安 美佐子 (TAKAYASU, Misako)
東京工業大学・大学院総合理工学研究科・准教授
研究者番号: 20296776

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: