

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25282094

研究課題名(和文) 複雑系ネットワークのアプローチによる社会システムのクライシスに関する研究

研究課題名(英文) Study of Socio-Economic Crises Based on Complex Network Science

研究代表者

藤原 義久 (Fujiwara, Yoshi)

兵庫県立大学・シミュレーション学研究科・教授

研究者番号：50358892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：マクロ経済における景気循環、物価変動、経済危機などの理解は未解決の重要な社会的な課題である。数百万の企業・金融機関とその間の関係性ネットワークを含む大規模な実データに基づき、経済ネットワーク上での経済変動の同期や伝播の現象のモデル化・シミュレーションを行い、物価変動の伝播、経済的なストレス波及のダイナミクスなどを解明した。また、世界で初めて京コンピュータを大規模な経済シミュレーションに応用することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Price variations, economic crises and so forth in macro-economy are not yet well understood but important social problems. We study mechanism of business fluctuations, dynamics of price fluctuations, financial distress propagation, and related problems by modelling these systems and performing simulations and also by utilizing real and big data including millions of firms, banks and their relationships. We also employ the so-called K supercomputer to large-scale economic simulations for the first time in the world.

研究分野：経済物理学、複雑系ネットワーク科学

キーワード：社会システム 複雑系ネットワーク 経済システム financial crisis complex network

1. 研究開始当初の背景

世界では日本のバブル崩壊後も、アジア通貨危機、リーマンショック、欧州財政金融危機など経済危機と呼ばれる現象がたびたび起き、経済システムに深刻な打撃を与えている。また、グローバル化の進展とともに、東日本大震災やタイの大洪水などの局地的な大災害が瞬間に世界に波及し生産システムにしばしば深刻な被害をもたらしている。これらの著しい特徴として、システムの一部が破壊または変調をきたしたときに、経済ネットワークを通じてその影響が伝搬し、脆弱な部位に連鎖することがあげられる。こうした経済システム全体の大規模な破綻プロセス(クライシス)については、制御はおろか理解すらおぼつかないのが現状である[文献1]。

クライシスを理解して対処するには(1)経済現象における複雑ネットワークの構造と連鎖の解明と、(2)クライシス自体の予測不可能性や統計的性質の解明を、従来の学問領域の垣根を越えて行う必要がある。欧州連合(EU)が欧州全体での第7期研究プロジェクト(FP7)において「経済危機の予測」(Forecasting Financial Crises)を研究テーマとして掲げて、経済学者、物理学者、コンピュータ科学の研究者を結集してプロジェクトをスタートさせているが、このような問題解決から誘導された異分野融合チームによる研究は日本ではほぼ皆無である。そのため、研究代表者の藤原は研究分担者の青山ら他の研究者らと2013年3月にEU FP7国際協力プロジェクトに応募して採択された。したがって本研究は、同プロジェクトへの参加を機に、そこでの最新の研究動向や人的交流を活かして、世界的関心のある研究の成果を大きく発展させようとするものである。

また、近年の新しい展開として、複雑ネットワークの構造、機能とそのダイナミクスを理解しようとする複雑ネットワーク科学の進展が顕著である。その最大の国際会議であるInternational Workshop and Conference on Network Scienceが、Science(AAAS)、Natureらをスポンサーとして2006年以降毎年開催され、近年では生命現象、脳科学、社会に及ぶさまざまな分野への応用が展開されつつある。そのような中で、本申請は、経済ネットワーク上でのクライシスに焦点を絞るユニークなものである。大規模な実データの蓄積が進んでおり、また次世代スーパーコンピュータの拠点化が行われている日本の利点を活かすことが可能である[文献2,3]。加えて、経済物理学やノーベル経済学者らとの共同研究などの研究の蓄積があることも背景にある[文献4,5]。

2. 研究の目的

近年、リーマンショック、欧州財政金融危機、東日本大震災など、経済システムに危機的なダメージを与える事態が頻出しており、

社会システムのネットワーク的な脆弱性が大きな課題となっている。本研究は、こうした社会システムに見られるネットワークの脆さや破綻、すなわちクライシスについての実証的な研究を、複雑系システム科学を中心に、経済学、シミュレーション科学の研究を結集したアプローチによって行う。具体的には、生産、財政、金融などに関する現実の大規模な経済ネットワークデータを整備・解析した上で、その構造やダイナミクス、連鎖現象を複雑ネットワーク科学の手法を用いて解明する。また、破壊の長期記憶性、規模などの統計的性質、ネットワーク構造との関係を自己組織化臨界現象などの手法を用いて明らかにする。これら分析結果を基にモデルを構築して、大規模シミュレーションとその検証を行う。さらに、クライシス自体を緩和することのできる方策を見出して社会への提言を行う。

3. 研究の方法

(1) 複素主成分分析による時間のずれを含む大規模な相関構造の解析
変動の多変量時系列から主要な動きを取り出す解析としては、相関行列に対する主成分分析がこれまで用いられてきた。そこでは、シグナルを同時に大きく変動する成分として、ノイズをランダムな時系列でも得られる成分として分離する。特にランダムな時系列に対する同時刻相関行列の固有値分布に対する解析的な結果を与えるランダム行列理論が有用であり、株価変動の解析に用いられて成功した。しかし、同時刻相関では時間のずれをとともなう集団運動を取り出すことができないこと、変動が時間的に持続するような自己相関のある場合にはランダム行列理論が使えないことの困難があった。これに対して、Hilbert変換を用いた時系列の複素化では、各周波数成分の位相をずらしたものを解析的にうまく取り入れることで、それから構成される複素相関行列の中で相関の大きさを絶対値、時間のずれを位相として表現することができる。複素相関行列についての主成分分析を複素主成分分析と呼び、地球規模の気象現象の解析では一部用いられていたが、本研究グループが経済変動に初めて用いてその有効性を示した。また、自己相関がある場合のノイズの同定には自己相関を保ったランダム化を数値的に行う手法(rotational random simulation)が有用であることを示した。

(2) 巨大な経済ネットワークに対する複雑ネットワーク解析及びスパコン計算手法
企業間取引、所有関係、金融機関との貸出・借入先などの経済ネットワーク上で、物価変動の影響、特にデフレと負債の連鎖をモデル化するため、ネットワークの構造、機能とそのダイナミクスを理解する解析手法を用いる。また、実際に生じたリスク伝搬過程を解析することによって、その規模、地域、産

業やクラスタ(コミュニティ)構造との関連などを明らかにする。膨大な数の経済主体間の相互関係の数を考慮し、それらを含むデータ構造をメモリーに載せて直接データ解析を行ったり、関係性を動的に変化させるようなシミュレーションを行ったり、大規模な実データの解析とシミュレーションとの比較をするということが可能になってきている。これらの計算機リソースを活用して、さまざまなシナリオ下でのリスク連鎖モデルとそのシミュレーションを行った。特に、デフレの影響でそのストレスが経済全体にどのように分布するのかを定量化するため、債権者へのストレスが次々に伝播するモデルを DebtRank と同等な方法で構築した。これらの研究により、デフレ・負債連鎖による連鎖倒産への頑健性指標とストレス計測方法を構築した。

4. 研究成果

(1) 初年度は大規模データの整備とその解析を中心に行った。まず、財政・金融システムにおける信用ネットワークについては、研究分担者の青山が代表者となっている欧州連合(EU)研究プロジェクト(FP7)『経済危機の予測』(Forecasting Financial Crises)のデータを活用して、日本の金融機関と企業間の貸出・借入の関係性からなる重み付き2部グラフの信用ネットワークの構造解析を行った。さらにその上での経済的な脆弱性の伝播モデルを構築して、研究協力者の Guido Caldarelli (IMT Lucca, Italy), Stefano Battiston (ETH, Switzerland) らの構築した脆弱性指標である DebtRank の解析を行って、経済産業研究所(RIETI)発行の論文を発表した。また関連する論文を研究協力者の Mauro Gallegati (Ancona, Italy) と共同で査読付き論文として発表した。

一方、実際に生じた破綻に関する実証データを整備するため、東京商工リサーチと協力して同社が独自に保有する倒産データ、倒産企業と取引・保有等の関係をもつ企業のリストおよび財務情報を含む大規模データの特別仕様によるデータ購入を行った。

さらに今後用いることができると想定される基礎的な解析手法として、多変量時系列データに対するモデルからネットワーク構造を読み解く手法の開発、ベイズ統計を用いた一般状態空間モデルにおける推定手法であるデータ同化に関する研究も進めた。

(2) 大規模な経済変動のデータから集団的な運動やショックに対する変動の伝播を含んだダイナミクスを取り出すため、同時刻相関に対する主成分分析ではうまく取り出せない、時間遅れを含む集団運動を抽出することが可能な複素主成分分析の方法を確立して、次の問題に応用し成功した。物価の持続的下落、すなわち「デフレ」は経済全体に対する脅威であり、国内外でも現在大きな問題となっている。デフレは個別の財・サービス

の重み付き平均としての一般物価の下落である。膨大な数の個別価格変動のデータから集団の運動や変動の伝播を含んだダイナミクスを取り出すことが困難であった。これに対して複素主成分分析を応用した結果、集計的な物価のシステムティックな変動の情報を選び出すことに成功した。すなわち、真のコアとも言うべき物価は為替、時間外労働時間、失業率と相関しているが、マネー・サプライとは有意な相関をしていない。また、ミクロ個別物価の相互作用から生じる慣性が集計的な物価の振舞いを期待仮説よりうまく説明することも示して、日本銀行や国際会議などで発表を行った。

同じ解析手法は債券・為替市場のビッグデータにも応用が可能であることを示した。実際、米国ボストン大学のグループと共同して、国際的な債券と為替市場の集団運動とその伝播、アイスランド危機の実態も明らかにすることができた。この成果については、複雑系科学に関する競争率の高い国際会議に招待講演として発表した。

また、今後用いることができると想定される基礎的な解析手法として、気象学などで盛んに応用が進んでいるデータ同化の社会現象への応用を探るための基礎的な方法、多変量時系列データに対するモデルからネットワーク構造を読み解く手法の開発についての研究も進めた。

(3) これまでに研究を進めたモデリングとシミュレーションとその応用研究を完成させた。モデリングでは、経済ショックの伝播モデルである DebtRank を国内約百万社の企業とその生産ネットワークの実データに応用するモデル化を行った上で、理化学研究所計算科学研究機構の研究者らと共同で、大規模グラフ上での DebtRank 計算を京コンピュータで実行した。その結果、実データの経済ネットワーク上で全ノードの DebtRank 計算を行うことができ、ミクロレベルでの経済ストレスの評価が可能になった。また、さまざまな初期条件の下で業種などの集計レベルでの経済ストレスの評価も行うことを可能とした。

2008年9月のリーマンショック以降、経済システムの不安定性を未然に防ぐため「マクロ・プルーデンシャル・ポリシー」の重要性が求められてきたにもかかわらず、その正確な定義はこれまで必ずしも明らかでない。経済ストレスの伝播を解析することによって、これまでの研究成果をマクロ・プルーデンシャル・ポリシーの科学的な定義へと導く礎を築き上げることができた。

本研究で得られた成果を中心とする国際会議「International Conference on Big data in Economics, Science and Technology」を開催した。さらに、Cambridge University Press から書籍「Macro-Econophysics: New Studies on Economic Networks and Synchronization」として成果を出版するに

至った[文献 6].

<引用文献>

M. Buchanan, "Ubiquity: Why Catastrophes Happen", (Three Rivers Press, New York, 2001).

佐藤哲也『未来を予測する技術』(ソフトバンククリエイティブ, 2007).

所眞理雄『オープンシステムサイエンス: 原理解明の科学から問題解決の科学へ』(NTT 出版, 2009)

H. Aoyama, Y. Fujiwara, Y. Ikeda, H. Iyetomi, W. Souma, "Econophysics and Companies: Statistical Life and Death in Complex Business Networks", (Cambridge University Press, 2010).

G. De Masi, Y. Fujiwara, M. Gallegati, B. Greenwald, J. E. Stiglitz, Evolutionary and Institutional Economics Review, Vol.7, No.2, pp.209-232, 2011.

H. Aoyama, Y. Fujiwara, Y. Ikeda, H. Iyetomi, W. Souma, H. Yoshikawa, "Macro-Econophysics: New Studies on Economic Networks and Synchronization", (Cambridge University Press, 2017).

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 13 件)

Y. Fujita, Y. Fujiwara, W. Souma, Large directed-graph layout and its application to a million-firms economic network, Evolutionary and Institutional Economics Review, 査読有, vol. 13, 2016, DOI:397-408, 10.1007/s40844-016-0059-9

S. Kawata, Y. Fujiwara, Constructing of network from topics and their temporal change in the Nikkei newspaper articles, Evolutionary and Institutional Economics Review, 査読有, vol.13, 2016, 423-436, DOI:10.1007/s40844-016-0061-2

L. Marotta, S. Micciche, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, H. Aoyama, M. Gallegati and R. N. Mantegna, Bank-firm credit network in Japan. An analysis of a bipartite network, PLoS ONE, 査読有, vol.10, 2015, e0123079, DOI:10.1371/journal.pone.0123079

I. Vodenska, H. Aoyama, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, Y. Arai, Interdependencies and Causalities in Coupled Financial Networks, PLoS ONE, 査読有, vol.11, 2016, e0150994, DOI:10.1371/journal.pone.0150994

L. Marotta, S. Micciche, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, H. Aoyama, M. Gallegati and R. N. Mantegna, Backbone of credit relationships in the Japanese credit market, EPJ Data Science, 査読有, vol.5, 2016, 10, DOI:10.1140/epjds/s13688-016-0071-7

Y. Fujiwara, M. Terai, Y. Fujita, W. Souma, DebtRank Analysis of Financial Distress Propagation on Production Network in Japan, 経済産業研究所(RIETI) Discussion Paper, 査読有, 16-E-046, 2016, 1-16, DOI:無

T. Nakamura, T. Tanizawa, M. Small, Constructing networks from a dynamical system perspective for multivariate nonlinear time series, Physical Review E, 査読有, vol.93, 2016, 32323, DOI:10.1103/PhysRevE.93.032323

Y. Fujiwara, H. Aoyama, H. Iyetomi, H. Yoshikawa, Dynamics of Commodity Price Fluctuations, Proceedings of ECCS 2014: European Conference on Complex Systems, Eds. Battiston, S., De Pellegrini, F., Caldarelli, G., Merelli, E. (Springer, March 2016) Chapter 25, DOI: 10.1007/978-3-319-29228-1, 査読有

H. Yoshikawa, H. Aoyama, H. Iyetomi, Y. Fujiwara, Deflation/Inflation Dynamics: Analysis Based on Micro Prices, RIETI discussion paper, 査読無, vol.15-E-026, 2015, 1-60, DOI:無

R. Murakami, T. Nakamura, S. Kimura, M. Manabe, and T. Tanizawa, On possible origins of trends in financial market price changes, Physica A, 査読有, vol.420, 2015, 179-189, DOI:10.1016/j.physa.2014.11.021

H. Aoyama, Y. Fujiwara, M. Gallegati, Micro-macro Relation of Production: Double Scaling Law for Statistical Physics of Economy, Journal of Economic Interaction and Coordination, 査読有, vol.10 (2015) 67-78, DOI:10.1007/s11403-014-0124-6

Y. Ikeda, H. Aoyama, H. Yoshikawa, Synchronization and the Coupled Oscillator Model in International Business Cycles, RIETI Discussion Paper Series, 査読無, vol. No.13-E-089, 2013, 1-27, DOI: 10.1007/s11403-014-0124-6

Y. Ikeda, H. Aoyama, H. Yoshikawa, Direct Evidence for Synchronization in Japanese Business Cycles, Evolutionary and Institutional

Economics Review, 査読有, vol. 10, No.2, 2013, 315-327, DOI:無

[学会発表](計 20 件)

Y. Fujiwara, Modeling and Quantifying Financial Distress Propagation on Production Network, 21st Annual Workshop on the Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents (WEHIA), 2016年6月22日~2016年6月24日, Jaume I University of Castellon, Castello de la Plana, Spain
Y. Fujiwara, Financial Distress Propagation on Large-scale Banks and Firms Networks, 第21回進化経済学会京都大会2016, 2017年3月25日~2017年3月26日, 百周年時計台記念館, 京都大学, 京都府京都市

H. Aoyama, Synchronization Network of Consumer Purchase, Price, Ads and Word-Search, 21st Annual Workshop on the Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents (WEHIA), 2016年6月22日~2016年6月24日, Jaume I University of Castellon, Castello de la Plana, Spain
H. Aoyama, Interdependencies and Causalities in Coupled Financial Network, World Finance & Banking Symposium, 2016年12月14日~2016年12月15日, University of Dubai, Dubai, UAE

青山秀明, 経済物理学 : 時系列解析と同期ネットワーク, 第21回進化経済学会京都大会2016, 2017年3月25日~2017年3月26日, 百周年時計台記念館, 京都大学, 京都府京都市

青山秀明, 経済物理学とはなにか, RIEBセミナー, 2016年7月27日, 神戸大学経済経営研究所, 神戸市灘区

Y. Fujiwara, Quantifying Financial Distress in a Nation-wide Production Network, Econophysics and Sociophysics 2015, 2015年11月, JNU Convention Centre, Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India

Y. Fujiwara, DebtRank Analysis of Financial Distress Propagation on Production Networks, International Conference on Socio-Economic Systems with ICT and Networks, 2016年3月, 東京大学小島ホール, 本郷, 東京都

藤原 義久, 「京コンピュータを用いた大規模な経済ネットワーク解析とその可能性」, サイエントフィック・システム研究会(The Society of Scientific Systems, SS研) HPCフォーラム2015『計算科学の新潮流(フロンティア)』, 2015年8月, 富士通株式会社大会議室, 新橋, 東京都

H. Aoyama, Japanese Consortium for FuturICT - Present Status and Future Propects, Asia-Pacific Social Simulation Workshop 2015, 2015年8月, Jeju, Korea

H. Aoyama, Deflation and Money, Econophysics and Sociophysics 2015, 2015年11月, JNU Convention Centre, Jawaharlal Nehru University, New Delhi, India

青山 秀明, 個別物価と金融政策, 京都大学基礎物理学研究所研究会『経済物理学2015』: 新たな方向性を求めて, 2015年12月, 京都大学基礎物理学研究所湯川記念館, 京都市, 京都府

I. Vodenska, H. Aoyama, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, Y. Arai, E. H. Stanley, Interdependencies and Causality in Coupled Financial Networks, NeSci 2014, International School and Conference on Network Science, 2014年6月3日, Berkeley, California, USA

H. Aoyama, Dynamics of individual prices and macroeconomic indices, ECCS'14 (European Conference on Complex Systems), 2014年9月23日, Lucca, Italy

H. Aoyama, Synchronization Network of Global Foreign Exchange and Equity Markets, Complex Networks 2014, Third International Workshop on Complex Networks and their Applications, 2014年11月23~27日, Marrakesh, Morocco

H. Aoyama, Synchronization Network of Global Foreign Exchange and Equity Markets, EU-Japan Workshop 2015 in Kyoto and Osaka -Exploring complex socio-techno-environmental systems across the boundary, 2015年3月20日, 京都大学百周年時計台, 京都府京都市

Y. Fujiwara, Chained Financial Failures at Nation-wide Scale in Japan, International Workshop on Econophysics and Networks Across Scales, 2013年5月27日~31日, Leiden, Netherlands

H. Aoyama, Systemic Risk on Japanese Credit Network: DebtRank centrality measure on multi-layered network, The 18th Workshop on Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents, 2013年6月20日~22日, Reykjavik, Iceland

T. Tanizawa, T. Nakamura, Applications of a method of constructing networks based on time series model, International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), 2013年9月8日~11日, Santa Fe, USA

T. Tanizawa, T. Nakamura, A New Network Visualization Method of Time Series Data, International School and Conference on Network Science (NetSci), 2013年6月3日~7日, Copenhagen, Denmark

〔図書〕(計4件)

H. Aoyama, Y. Fujiwara, Y. Ikeda, H. Iyetomi, W. Souma, H. Yoshikawa, Cambridge University Press, Macro-Econophysics: New Studies on Economic Networks and Synchronization, 2017, 404 pages

橋本恭之, 鈴木善充, 木村真, 小川亮, 吉田素教, 清文社, 地方財政改革の検証, 2017, 317(pp.204-267)

F. Abergel, H. Aoyama, B. K. Chakraborti, A. Chakraborti, A. Ghosh, Springer International Publishing, Econophysics and Data Driven Modelling of Market Dynamics, 2015, 353 pages

A. Chakraborti, Y. Fujiwara, A. Ghosh, J.-I. Inoue and S. Sinha, Springer International, Switzerland, Econophysics and Data Driven Modelling of Market Dynamics (pp.237-286), 2015

〔その他〕

藤原義久, 青山秀明, 経済産業省中小企業庁委託調査, 平成27年度中小企業・小規模事業者の資金調達環境に関する財務状況等別分析調査事業報告書, 2016年3月

H. Yoshikawa, H. Aoyama, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, Dynamics of Inflation/Deflation, 日本銀行セミナー, 2014年7月16日, 日本銀行, 東京都中央区

T. Sato, A new bottom-up approach to realizing a fulfilling life: "Simulationics", FuturICT Science and Policy Symposium, 2013年7月16日, スイス大使館, 東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤原義久 (FUJIWARA, Yoshi)
兵庫県立大学・大学院シミュレーション学
研究科・教授
研究者番号: 50358892

(2) 研究分担者

佐藤哲也 (SATO, Tetsuya) (平成25年度
まで研究分担者)
兵庫県立大学・大学院シミュレーション学

研究科・教授

研究者番号: 80025395

木村真 (KIMURA, Shin)

兵庫県立大学・大学院シミュレーション学
研究科・准教授

研究者番号: 50419959

中村知道 (NAKAMURA, Tomomichi)

兵庫県立大学・大学院シミュレーション学
研究科・准教授

研究者番号: 50615789

島伸一郎 (SHIMA, Shin-ichiro)

兵庫県立大学・大学院シミュレーション学
研究科・准教授

研究者番号: 70415983

青山秀明 (AOYAMA, Hideaki)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号: 40202501

眞鍋雅史 (MANABE, Masashi)

嘉悦大学・ビジネス創造学部・准教授(平成
26年度までは兵庫県立大学・大学院シ
ミュレーション学研究科・准教授)

研究者番号: 20537071

(3) 連携研究者

家富洋 (IYETOMI, Hiroshi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 20168090

池田裕一 (IKEDA, Yuichi)

京都大学・大学院総合生存学館・教授

研究者番号: 90610858

相馬亘 (SOUMA, Wataru)

日本大学・理工学部・准教授

研究者番号: 50395117

吉川洋 (YOSHIKAWA, Hiroshi)

東京大学・経済学部・教授

研究者番号: 30158414

(4) 研究協力者

Vodenska, Irena (アメリカ・ボストン大
学)

Mantegna, Rosario (イタリア・パレルモ
大学)

Gallegati, Mauro (イタリア・マルケ州立
大学)