

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月14日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22300080

研究課題名（和文） 大規模経済ネットワークの構造とダイナミクス

研究課題名（英文） Structural and Dynamic Properties of Large-scale Economic Networks

研究代表者

家富 洋（IYETOMI HIROSHI）

東京大学・経済学研究科・特任教授

研究者番号：20168090

研究成果の概要（和文）：

ノード数が百万個程度の大規模複雑ネットワークに対してもその構造とダイナミクスを解析できる手法（コミュニティ抽出、可視化）を開発した。得られた手法の応用として、経済系ネットワーク（企業間取引によって形成された生産ネットワーク、銀行・企業間貸借関係に基づく信用ネットワーク、株価間の相関ネットワークなど）の解析を行った。このような経済現象を実証的に明らかにする試みから、いくつかの新しい知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

We have developed a methodology consisting of community detection and visualization for analyzing structural and dynamic properties of large-scale complex networks with the order of one million nodes. We then applied the developed methods to economic networks including production network formed by interfirm transactions, credit network between banks and firms, and stock correlation network. Such a study enabled us to obtain new insights into the economic phenomena.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	8,700,000	2,610,000	11,310,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学、感性情報学・ソフトコンピューティング

キーワード：複雑系、ネットワーク、可視化、コミュニティ、有向リンク、多重グラフ

1. 研究開始当初の背景

米国でのサブプライムローンに端を発した現在進行中の未曾有の経済危機は、世界経済が様々な関係（国境を越えた信用取引、貿易関係、サプライチェーンなど）で互いに密接につながっていることを再認識させるとともに、そのような大規模複雑ネットワーク

の構造とダイナミクスを明らかにする重要性を如実に物語っている。

世の中に存在する多量の情報を繋がり（ネットワーク）の視点から捉えることは、実在のネットワークがしばしばスモールワールド性やスケールフリー性を共有することが見出されて以来、国内外を問わずネットワー

ク科学としてこの 10 年間で急速に発展している。そのような新しい学問の対象は、情報通信ネットワークやインターネットでの相互リンク関係をはじめとして、遺伝子間相互作用、友人関係、企業間関係など枚挙のいとまがない。ネットワーク科学は、堅牢な通信ネットワークの構築、エイズウィルスの感染拡大の阻止、経済ショックに対するリスク管理など様々な研究分野において、その普遍性と重要性を今後ますます増していくと予想される。

多量の情報間の複雑な関係性を記述するネットワークの性質を理解するためには、ネットワークに含まれる本質的な構造をうまく見出すことが肝要である。その研究手法の一つとして、コミュニティ（強く結びついたノードのまとまり）の抽出がある。実在する多くのネットワークは、ノード間の繋がり密度が一律ではなく、高密度に結合しているコミュニティ部分とそれらを結ぶ密度が疎の部分から成っている。そのような複雑ネットワークの構造特性を把握するためには、人間の直感に訴える可視化も補助的手段としてとても有用である。

代表者らはネットワーク科学が経済現象の解明にとって重要な役割を果たすことを早くから認識し、本研究を実施するにあたって必要な予備的研究を十分に行ってきた。

2. 研究の目的

ノード数が百万個程度の大規模複雑ネットワークに対しても、その構造とダイナミクスを定量的に明らかにすることを可能にする解析手法を開発する。得られた手法の具体的な応用として、経済系ネットワーク(企業間取引、共同特許出願、銀行-企業間貸借関係など)の解析を行い、複雑系としての経済現象を実証的に明らかにする。

ネットワークの構造については、物理モデルと分子動力学シミュレーションとを組み合わせたネットワークの可視化およびコミュニティ解析(コミュニティの抽出、コミュニティの安定性診断、コミュニティ間の関係強度の評価など)に注力する。

ネットワークのダイナミクスについては、ネットワーク構造の時間的変化(銀行・企業間の与信)やネットワーク上のショック伝搬・カスケード過程(企業の連鎖倒産、信用リスクの伝搬など)に焦点をあてる。

3. 研究の方法

本研究で対象とする経済系ネットワーク(企業間取引、共同特許出願、銀行-企業間貸借関係など)は、ノード数が百万、リンク数が数百万にも達する大規模なものであり、その複雑な構造やダイナミクスの解明にあたっては、解析手法の高速化や効率化が必要

不可欠である。そのため、専用の PC クラスタを構築し、並列計算アルゴリズムを大いに活用する。

まず、リンクの重みや情報流の向きを無視したスケルトン・ネットワークに対して、パネ・電気モデルと分子動力学シミュレーションを組み合わせた構造可視化手法およびモジュラリティ最大化に基づくコミュニティの抽出手法を開発する。また、物理現象とのアナロジーや可視化を利用することによって、ネットワーク上のショックの伝搬やカスケード過程を解析するための手法を開発する。

次に、スケルトン・ネットワークに対する手法や理論解析結果を一般化し、リンクの重み付きネットワーク(取引量、共同特許数)、2部グラフ(銀行と企業)、有向ネットワーク(取引方向)などにも対応可能とする。この一般化によって、本研究で目指す経済現象へのネットワーク的アプローチがより精密なものとなる。合わせて抽出されたコミュニティ構造の安定性やコミュニティ間の関係強度を定量的に調べる手法を確立する。

さらに、銀行・企業間の信用関係の時間的変遷(銀行・企業間の貸借データの集積によって解析可能)をはじめとして、本研究で開発された解析手法を様々な経済現象の解明に役立てる。

4. 研究成果

(1) 研究手法の開発

- ① 重み付きの多重ネットワークや有向ネットワークへの応用を念頭に、ばね電気モデルに基づく分子動力学法を利用した大規模ネットワークの可視化手法を整備した。
- ② モジュラリティ最大化に基づくコミュニティ抽出手法を新しく開発した。この手法は、ネットワーク全体から出発し、最適な2分割を逐次探索するトップダウン的な最適化であり、ボトムアップ的(各ノードが別個のコミュニティをつくる状態から出発)な従来の方法と一線を画する。
- ③ コミュニティ間の関係強度を計測する評価関数(物質における凝集エネルギーとのアナロジー)を考案した。これはコミュニティ間の関係性を定量的に議論することを可能にする新しい試みである。
- ④ 大規模並列計算を占有的に実行するための PC クラスタを構築した。

(2) 生産ネットワーク

我が国における企業間取引によって形成された生産ネットワーク(約 80 万社、約 300 万取引)に対して、可視化とコミュニティ解析を行った(図 1 を参照)。

主要なコミュニティの可視化図を子細に見ると、コミュニティ内にさらに微細な構造

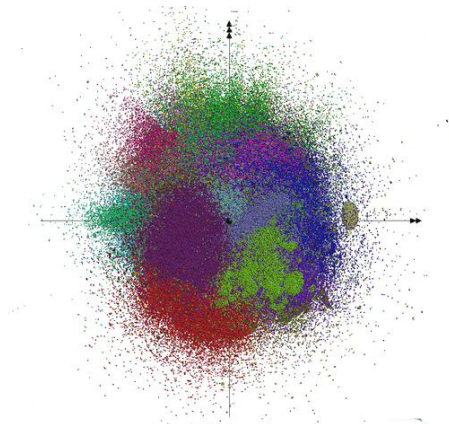


図1 生産ネットワークのコミュニティ分割

(サブコミュニティ)が隠されていることがわかる。つまり、企業間取引ネットワークは多重スケール・ネットワークとして特徴づけられる。コミュニティに留まらず、そのようなサブコミュニティ構造を明らかにすべく、さらにコミュニティ解析を進めた。サブコミュニティのレベルになると、コミュニティでは合体していた地域、業種、系列などが分離されることが確かめられた。もちろん、すべてのコミュニティ、サブコミュニティがそのような観点から理解できるわけではない。また、サブコミュニティ間の関係性の強さを定量的に評価し、サブコミュニティ同士の関係をデンドログラムの形で表示した(図2)。

企業間取引の有向性を考慮した可視化とコミュニティ解析についても実行し、コミュニティ内の階層構造を明らかにした。

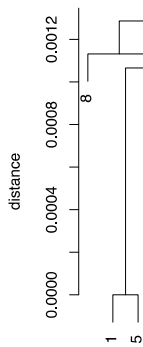


図2 生産ネットワークにおける最大コミュニティ内のサブコミュニティ(上位10個)間の関係性

(3) 信用ネットワーク

我が国の上場企業の金融機関別借入金データを購入手、研究用データベースを作成した。このデータベースによって構築される金融機関・企業間信用ネットワークは、時間的に変化する重み付き多重ネットワークであり、本研究にとって格好の研究題材である。

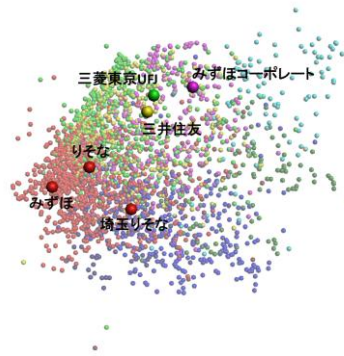


図3 信用ネットワークのコミュニティ(リンクの重みの違いを無視した場合)と都市銀行

得られた信用ネットワークについて、コミュニティを抽出し、可視化を行った(図3に例示)。さらに、コミュニティ間の類似性を測る指標を使い、コミュニティ構造の変遷を追跡した。そのようなコミュニティはリスクが高まりやすい銀行・企業集団とみなすことができる。企業と金融機関間の依存性が一般に非対称である点を考慮し、信用関係を双方向ネットワークとして捉えた。都市銀行に着目すると、銀行側からみた信用ネットワークでは都市銀行は過去30年にわたって1つの大きなコミュニティを形成している(図4を参照)。他方、企業側からみた信用ネットワークでは都市銀行が個々に独自のコミュニティを率いていることを示した。また、金融ビッグバンの前後での都市銀行の振る舞いを信用ネットワークの視点から明らかにした。

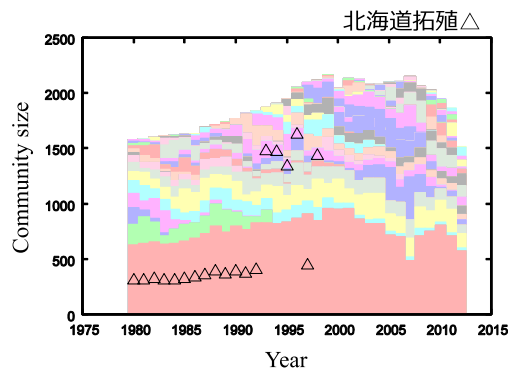


図4 信用ネットワークにおけるコミュニティ構造の変遷(銀行の企業に対する依存度でリンクの重みを評価)

合わせて「DebtRank」の概念を拡張することにより、信用関係に対して各銀行がもたらすリスクを評価する新しい指標を考案し、具体的に前述の信用ネットワーク上でのリスクを評価した。

(4) 株価相関ネットワーク

これまで、企業間の関係性を調べるために、取引の有無をリンクに対応させたネットワ

ークのコミュニティ抽出が行われてきた。しかし、企業間の関係性を表すものは取引の有無だけではなく、株価の銘柄相関もその1つである。そこで本研究は、銘柄間の相関行列をスペクトル分解し、ランダム行列理論に基づきノイズが除去された相関行列を隣接行列と見なすことにより、相関データから銘柄ネットワークを構築した。さらに、このようなリンクに正負の重みをもつネットワークに対して、フラストレーションと呼ばれる量を最小化することで、コミュニティ内に正のリンクがなるべく多くなるようなネットワークの分割を試みた。

具体的な研究対象として、東証一部上場企業の557銘柄、2707営業日(1996年1月4日から2006年12月29日まで)の株価日次データが選択された。上記の手法を用いて、株価相関ネットワークのコミュニティ抽出を行い、東京市場には4つの特徴的なコミュニティがあることを見出した。コミュニティ内ならびにコミュニティ間の相関状態を定量的に計測するためには、相関係数の偏極率が導入された。図5に示すように、得られた4つのコミュニティのうち、3つは互いに強い反相関関係にあり、残り1つのコミュニティ(銀行、電気・ガスなどの社会インフラに属する企業)は、他の相反する3つ

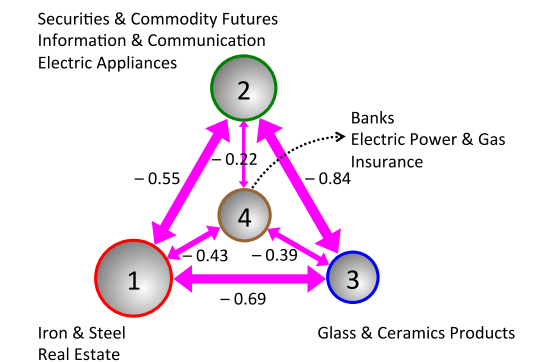


図5 東京市場(東証第1部)におけるフラストレーション構造

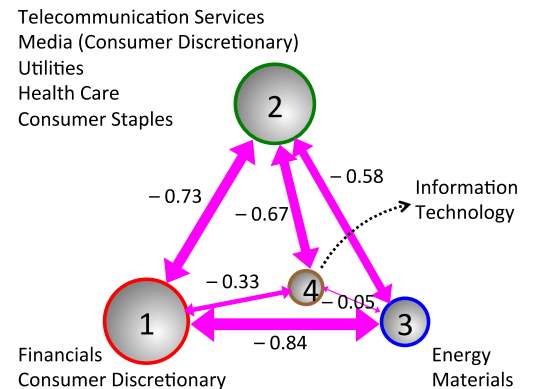


図6 米国市場(S&P500)におけるフラストレーション構造

のコミュニティと相対的に独立した地位を占めている。これらは、秘められた東京市場の相関構造である。

さらに、東京市場において発見した株価相関ネットワークにおけるフラストレーション構造が米国市場にも内在することを確認し(図6を参照)、そのような構造が成熟した市場において普遍的なものであるとの示唆を得た。また、ヒルベルト変換を利用することによって時系列の位相情報を取り出し、フラストレーション構造の起源を動的相関の観点から明らかにするための予備的研究を行った。

(5) その他

東日本大震災が与えた生産ネットワークに対するショックの緩和過程の解析とモデル構築、特許の共同出願関係を利用したイノベーションの創発に関するネットワーク的解析、景気循環を相互作用する振動子のネットワーク・モデルで理解する試みなどについても研究を進めた。

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24件)

- ① 松浦裕貴、飯野隆史、家富洋、銀行・企業間貸借ネットワークにおける銀行間関係の経年変化、統計数理研究所共同研究レポート「経済物理とその周辺(8)」、査読無、292巻、2013、31-40
- ② T. Yoshikawa, T. Iino, and H. Iyetomi, Observation of Frustrated Correlation Structure in a Well-Developed Financial Market, Prog. Theor. Phys. Suppl.、査読有、Vol. 194、2012、pp. 55-63
- ③ Y. Ikeda, H. Aoyama, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, K. Ogimoto, W. Souma, H. Yoshikawa, Coupled Oscillator Model of the Business Cycle with Fluctuating Goods Markets, Prog. Theor. Phys. Suppl.、査読有、Vol. 194、2012、pp. 111-121
- ④ T. Iino and H. Iyetomi, Subcommunities and Their Mutual Relationships in a Transaction Network, Prog. Theor. Phys. Suppl.、査読有、Vol. 194、2012、pp. 144-157
- ⑤ T. Iino and H. Iyetomi, Directional Bias between Communities of a Production Network in Japan, Smart Innovation, Systems and Technologies (Springer)、査読有、Vol. 16、2012、pp. 273-280

[学会発表] (計 68 件)

- ① H. Iyetomi, Frustration in Financial Markets、招待講演、Seminar at Center for Network Science、Central European University (ハンガリー)、2013 年 3 月 13 日
- ② H. Aoyama, Systemic Risk in Japanese Financial Network、招待講演、FuturICT workshop、MIT (米国)、2013 年 2 月 13 日-14 日
- ③ W. Souma, Revisiting Citation Dynamics、招待講演、International Workshop on Econophysics of Agent-based Models、Saha Institute of Nuclear Physics (インド)、2012 年 11 月 08 日-12 日
- ④ Y. Fujiwara, Chained Financial Failures at Nation-wide Scale in Japan、招待講演、Latsis Symposium 2012, Risk Center, ETH Zurich (スイス)、2012 年 9 月 11 日
- ⑤ T. Iino and H. Iyetomi, Multiscale Community Analysis of a Production Network of Firms in Japan、The 3rd International Conference on Intelligent Decision Technologies、Piraeus University (ギリシャ)、2011 年 7 月 22 日

[図書] (計 2 件)

- ① H. Aoyama, Y. Fujiwara, H. Iyetomi, and A.-H. Sato (eds.), *Econophysics 2011 – THE HITCHHIKER’S GUIDE TO THE ECONOMY* -, Prog. Theor. Phys. Suppl., No.194, 2009, pp.222.
- ② H. Aoyama, Y. Fujiwara, Y. Ikeda, H. Iyetomi, and W. Souma, Cambridge University Press, *Econophysics and Companies – Statistical Life and Death in Complex Business Networks*, 2010, pp.262

[その他]

- ① 青山秀明、『経済物理学への招待』、日本経済新聞「やさしい経済学」、2011 年 (連載 7 回)
- ② 家富洋、『経済物理学からみた景気変動』、日本経済新聞「やさしい経済学」2011 年 (連載 7 回)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

家富 洋 (IYETOMI HIROSHI)
東京大学・大学院経済学研究科・特任教授
研究者番号：20168090

(2) 研究分担者

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

相馬 亘 (SOUMA WATARU)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号：50395117

藤原 義久 (FUJIWARA YOSHIHISA)
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

(3) 連携研究者

池田 裕一 (IKEDA YUICHI)
京都大学・大学院総合生存学館・特定教授
研究者番号：90610858

(H22：研究協力者、H23：研究分担者)