

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H01506

研究課題名（和文）ネットワーク解析による金融市場の動的不安定性の解明

研究課題名（英文）Understanding the dynamical instability of financial markets using network analysis

研究代表者

小林 照義（Teruyoshi, Kobayashi）

神戸大学・経済学研究科・教授

研究者番号：10387607

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,500,000円

研究成果の概要（和文）：人や企業、銀行といった経済主体は、友人関係などの社会的繋がりや、経済的取引などの経済的繋がりを通じて複雑なネットワークを構成している。こうしたネットワークは平時であれば情報伝達や取引の効率性を高めるため、社会的に望ましい。しかし、銀行破綻や資産売りの連鎖など、このネットワークを通じた悪い影響の伝播も同時に起こりうる。本研究では、複雑な社会・経済ネットワークを通じた情報や銀行破綻の連鎖を数理モデル化し、破綻の連鎖が起こる条件やそのメカニズムを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年の社会・経済システムは急速に複雑化・グローバル化が進み、局所的なイベントが世界中に伝播し、世界的な現象となることが頻繁に起こる。今回のプロジェクトのテーマである金融危機は、金融市場におけるネットワークに内在する本質的な不安定性として考えられる。その意味で、簡略化した数理モデルでネットワーク上の拡散現象を理解することは、金融市場における金融危機の本質を理解することになり、どのような政策的対処が望ましいのかを議論するための基盤を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：Economic agents such as individuals, firms, and banks constitute complex networks through social ties such as friendships and economic ties such as economic transactions. Such networks are socially desirable in normal times because they enhance the efficiency of information transmission and transactions. However, adverse effects can also propagate through these networks at the same time, such as bank failures and chains of asset sales. In this project, we developed mathematical models that explain cascades of information and bank failures through complex social and economic networks, and clarified the conditions under which such cascading failures occur.

研究分野：ネットワーク科学、マクロ経済学

キーワード：金融ネットワーク 拡散 金融危機 カスケード 社会ネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

1990年代の日本のバブル崩壊やその後の金融危機、および2008年のリーマン危機によって顕在化した金融市場の不安定性は、金融市場のみならずその後のマクロ経済全体にも長く負の影響を及ぼしてきた。このような状況を受けて、近年の先端的なマクロ経済学では金融市場を取り入れたモデルが多く提案されており、実際の政策に活かすことが期待されている。

しかし、マクロ経済学で提案されている金融危機モデルは、ほとんどの場合が家計、企業、金融市場、中央銀行といった各セクターの最適化問題を解くいわゆるDSGE (Dynamic Stochastic General Equilibrium) モデルをベースとしており、その意味で従来のマクロ分析の延長線上にあると見てよい。DSGEモデルでは、マクロ経済全体の振る舞いを観測データとマッチさせたり、均衡の安定性を分析することに焦点が置かれる一方で、金融市場内部で発生する複雑な現象、例えば金融危機時に見られたような金融機関の破綻の連鎖現象などにおいて、その発生メカニズムの数理的な説明はなされていない。

## 2. 研究の目的

近年急速に発展しているネットワーク科学の分野では、金融市場をある種のネットワークとして捉えることで、金融危機のメカニズムに新たな視点からアプローチしてきた。例えば、銀行間ネットワークを通じた破綻の連鎖に加え、金融資産の「投げ売り」(fire sales)は金融機関と各金融資産の保有関係で形成されるネットワークの上で起こる現象として抽象化できるし、「銀行取付け」は人と人を結ぶ情報ネットワーク上で発生する連鎖現象だと考えることができる。平時であれば、銀行間取引ネットワークは決済システム上必要不可欠であるし、人の情報ネットワークは生活する上で有用な意味を持つ。しかし、そうしたネットワーク上で一度負の現象(銀行破綻や取付け)が発生すると、負の連鎖が既存のつながりを通じて急速に拡散してしまうことがある。

本研究は、従来のマクロ経済学的なアプローチではなく、ネットワーク現象というメソスケールの視点から金融市場内部の不安定性を数理的に解明する。金融市場のネットワーク的側面に理論・データの両面から焦点を当てることで、これまでのマクロ経済学では十分に理解されてこなかったネットワーク上の連鎖現象としての金融危機を分析するツールを開発する。また、そのためにネットワーク上の連鎖現象一般に関わる基礎的な数理構造を解き明かす。

## 3. 研究の方法

(1) ネットワーク上の連鎖現象一般に関わる基礎的な研究として、ゲーム理論に基づいた連鎖現象モデルを考え、それとネットワーク科学において解析されてきたカスケード・モデルとの関連を明らかにする。

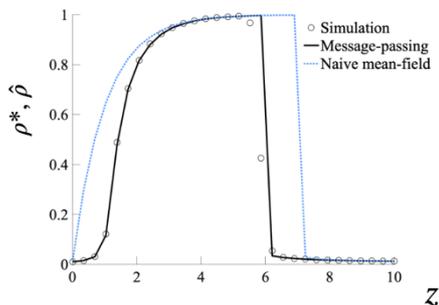
(2) 金融市場の「投げ売り」の数理モデルでは、金融機関(以下、銀行とする)およびそれらが保有する金融資産をノード(点)、資産保有関係をエッジ(枝)とするネットワークモデルを構築する。銀行間でポートフォリオの重複が存在するとき、ある銀行が破綻すると、その銀行が保有する金融資産は売却され、その資産価格が下落することから、共通の資産を保有する銀行のバランスシートも毀損する。もしこれが自己資本比率を維持するなどの理由でさらなる資産売却につながると、他の資産価格も下落し、バランスシートの毀損と資産価格下落の連鎖が続いていくことになる。こうした一連のダイナミクスについて、ネットワーク科学におけるカスケード・モデルの枠組みを利用することで動的不安定性が生じる条件などを求める。

## 4. 研究成果

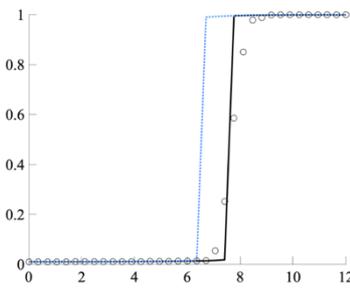
(1) 経済学におけるネットワーク・ゲーム研究の文脈では、プレイヤー同士が繋がりのネットワークを構成している場合に、それぞれが利得を最適化した結果としてナッシュ均衡が存在するのか、存在する場合には安定性はあるのか、などが議論されてきた。この時、解析的な証明を得るためにネットワーク構造は単純化され、例えば規則的な格子グラフなどが想定されることが多い。一方でネットワーク科学分野では、各個人の行動が単純な閾値ルールに従うことを仮定し、ネットワークを通じてどの程度の範囲まで影響力の伝播が起こるのかを解析的に求めることに重点が置かれてきた。ネットワーク構造はランダムネットワークなどの複雑な繋がりを持つものも想定され、より現実に応用可能性の高い分析だと言える。我々の研究では、独立に発展して

きた両分野の研究を結びつけるべく、ゲーム理論的基礎づけを持つ拡散モデルを構築し、統計物理学で用いられるメッセージ伝播法を応用することで複雑ネットワーク上でもカスケードサイズが正確に計算できることを証明した。また、メッセージ伝播式における均衡の存在性や収束性について解析的な証明を与えることで、ネットワーク科学における閾値モデルに対して厳密に解析的な特徴づけを行なった。

(a) Fractional threshold model

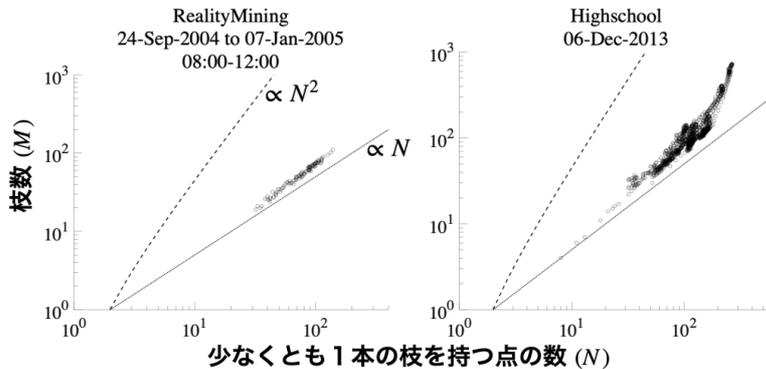


(b) Absolute threshold model



左図は、経済学の文脈で主に用いられてきた平均場近似法と、ネットワーク科学で用いられるメッセージ伝播法の比較である。横軸は平均次数、縦軸は平均カスケードサイズである。平均場近似はメッセージ伝播法に比べて精度が劣ることがわかる。

(2) 人や銀行が繋がりを構築して社会・経済ネットワークを形成する過程を時間を追ってみると、ほとんどのつながりが形成と消滅を繰り返している。つまり、一口にネットワークと言っても、どの時間において観察するかによって見られる構造が全く異なる。これをテンポラル・ネットワークと呼ぶ。そこで我々は、細かい時間間隔（例えば10分）ごとにスナップショットとしてのネットワークを集計し、それをデータ期間全体について並べてみることで特徴を観察した。

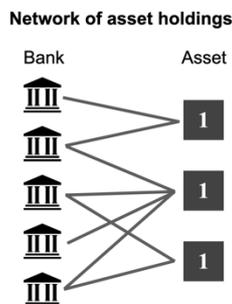


左図はネットワークの頂点数と枝数のプロットで、各点がある時間におけるスナップショットを示す。我々はこのプロットによって2種類のスケーリングが存在することを発見し、それを数理モデルによって説明することに成功した。具体的には、その場の人口が変化することに起因する場合（左パネルのケース）と、人口は一定だが各自の活動量が変化することによってネットワークのサイズや密度が変化する場合（右パネルのケース）があり、ネットワークを変化させるこれらの要因の違いが2種類のスケーリングを発現させていることがわかった。またその性質を利用することで、図のようなスケーリングの情報からその場の人口や活動量を正確に推計する方法も開発した。

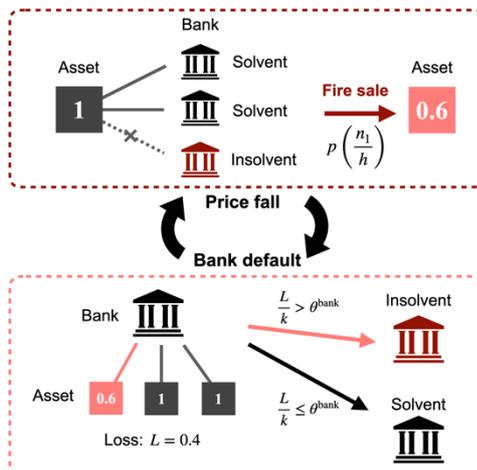
人口は一定だが各自の活動量が変化することによってネットワークのサイズや密度が変化する場合（右パネルのケース）があり、ネットワークを変化させるこれらの要因の違いが2種類のスケーリングを発現させていることがわかった。またその性質を利用することで、図のようなスケーリングの情報からその場の人口や活動量を正確に推計する方法も開発した。

(3) 銀行間でポートフォリオの重複が存在するとき、ある銀行が破綻すると、その銀行が保有する金融資産は売却され、その資産価格が下落することから、共通の資産を保有する銀行のバラン

(a)



(b)

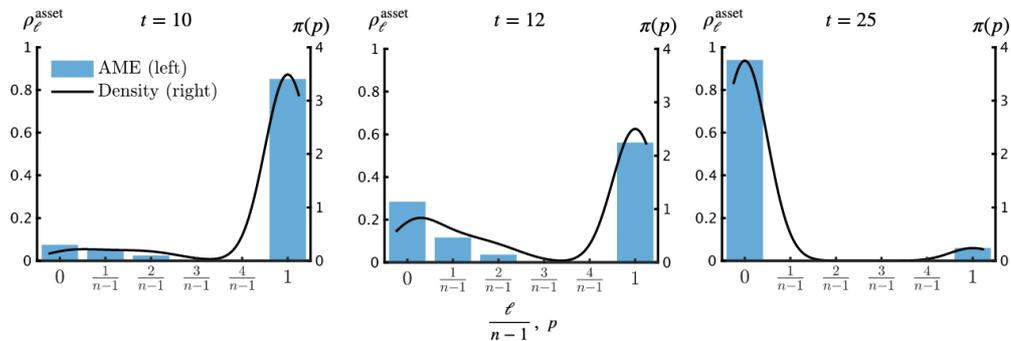


スシートも毀損する。そうしたダイナミクスを解析するために我々が考案した数理モデルを用いると（左図）、それはカスケードモデルの一つのケースとして考えることができ、カスケードが発生するための数理的な条件なども計算することが可能になる。

我々のモデルが特徴的なのは、通常のカスケードモデルにおいては各頂点の状態は二値(0 or 1)だったのに対し、本モデルでは資産（株式など）が頂点となるため、その状態は資産価格であり連続値を取り

し、本モデルでは資産（株式など）が頂点となるため、その状態は資産価格であり連続値を取り

うる点である。すなわち、従来型モデルのようにある一つの状態が伝播していくのではなく、各頂点の状態を表す実数値が「投げ売り」を通じて波及していくことになる。したがってこれまでの単純なメッセージ伝播法では計算が正確にできず、新たな方法が必要になる。我々は、離散値の複数状態を許す近似マスター方程式法 (AME 法) を応用し、状態数が十分多い場合の近似として連続状態を正確に計算することを可能にした。



上

の上の図は、AME 法で得られた離散価格のヒストグラムと、シミュレーションによる連続値の分布との比較である。状態数が 6 個程度あれば、A M E 法は実数値を取りうる価格に対しても良い近似となることがわかる。

このモデルをベースに、政策的に資産を買い支えた場合にどのようにダイナミクスが変化するかを分析することが可能になった。我々は、このモデルを現実の金融データに適用するため、E T F 市場における ETF 銘柄とそれらが保有する個別資産銘柄を頂点としたネットワークを構築し、政策分析を行なった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Matsui Akira, Kobayashi Teruyoshi, Moriwaki Daisuke, Ferrara Emilio	4. 巻 -
2. 論文標題 Detecting multi-timescale consumption patterns from receipt data: a non-negative tensor factorization approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Computational Social Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s42001-020-00078-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Hasui Kohei, Kobayashi Teruyoshi, Sugo Tomohiro	4. 巻 134
2. 論文標題 Optimal irreversible monetary policy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 European Economic Review	6. 最初と最後の頁 103707 ~ 103707
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.eurocorev.2021.103707	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小林 照義	4. 巻 65
2. 論文標題 金融システムに潜むネットワーク上の連鎖破綻リスク	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 163 ~ 168
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11509/isciesci.65.5_163	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kobayashi Teruyoshi, Genois Mathieu	4. 巻 11
2. 論文標題 The switching mechanisms of social network densification	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3160
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-021-82432-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi Teruyoshi、Genois Mathieu	4. 巻 102
2. 論文標題 Two types of densification scaling in the evolution of temporal networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 52302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.102.052302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi Teruyoshi、Masuda Naoki	4. 巻 72
2. 論文標題 Introduction to the special issue "Economics and Complex Networks"	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Japanese Economic Review	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s42973-020-00062-8	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計7件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Teruyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Scaling relations reveal the switching dynamics of temporal networks
3. 学会等名 CompleNet 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Teruyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Diffusion dynamics on monoplex and multiplex networks
3. 学会等名 日本経済学会 秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuro Kawamoto
2. 発表標題 Statistical tests for adjacency-matrix reordering
3. 学会等名 NetSci-X 2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shaunette Ferguson
2. 発表標題 Estimating the temporal dynamics of densification in human contact networks
3. 学会等名 NetSci-X 2022 ( 国際学会 )
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Teruyoshi Kobayashi
2. 発表標題 Two types of densification scaling in social and financial networks
3. 学会等名 NetSci2020: satellite workshop "Complexity Meets Finance: Data,Methods and Policy Implications" ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomokatsu Onaga
2. 発表標題 Fire sales as multistate contagion on bipartite networks
3. 学会等名 Complex Networks 2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shaunette Ferguson
2. 発表標題 Diurnal dynamics of financial systemic risk
3. 学会等名 NetSci-X 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ホームページ  <a href="https://terukobayashi.wordpress.com/">https://terukobayashi.wordpress.com/</a>          研究代表者HP  <a href="https://terukobayashi.wordpress.com/">https://terukobayashi.wordpress.com/</a></p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川本 達郎  (Kawamoto Tatsuro)  (10791444)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員    (82626)	
研究分担者	翁長 朝功  (Onaga Tomokatsu)  (90823922)	東北大学・学際科学フロンティア研究所・助教    (11301)	
研究分担者	近江 崇宏  (Omi Takahiro)  (90726134)	東京大学・生産技術研究所・特任准教授    (12601)	2年目より一般企業就職のため脱退

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	State Univesity of New York at Buffalo			
フランス	Aix Marseille Univ			
米国		University of Southern California		