

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23686019

研究課題名(和文)大規模経済データにみられる相転移挙動の計算科学的研究

研究課題名(英文)Computational science study on phase transition behavior observed in large-scale economic data

研究代表者

大西 立顕(Ohnishi, Takaaki)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：10376387

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,100,000円

研究成果の概要(和文)：スーパーコンピュータを活用して、大規模な経済データを相転移挙動の観点から研究した。企業間ネットワークは典型的な複雑ネットワークになっており、各企業のページランクの値が各企業の経済学的な特徴を反映していることを発見した。不動産バブルの時期を除き、面積を調整した住宅価格は対数正規分布に従うことを発見した。この性質を用いて不動産のバブル度を定量化し、不動産バブルの時空間ダイナミクスを観測した。

研究成果の概要(英文)：By using a supercomputer, large-scale economic data are studied based on phase transition behavior which are universally observed in various economic phenomena. We observed that the inter-firm networks display the typical properties of complex networks, and showed that the value of PageRank of each firm in the networks can describe economic role of the company. We found that size-adjusted house prices follow a lognormal distribution except for the period of the housing bubble. We quantified the magnitude of a bubble for each location of the house, and observed spatio-temporal dynamics of the housing bubble.

研究分野：数理工学

キーワード：経済物理学 ベキ分布 スーパーコンピュータ 超並列計算 企業間ネットワーク ページランク 不動産バブル 中心極限定理

## 1. 研究開始当初の背景

経済システムは売り手と買い手の間のモノ・金の交換（相互作用）として捉えられる。相互作用があっても個々がランダムにゆらげば系全体のゆらぎは正規分布に従う。しかし、個々が互いに強い相互作用を持ってゆらぐ臨界状態では、系全体のゆらぎは極めて大きく、ベキ分布（相転移挙動）に従う。近年、技術進歩により大規模な経済データを蓄積し、分析することが可能になってきている。現実の経済システムでは常に競争が働くため自動的に臨界状態になる仕組みが内在し、ベキ分布（相転移挙動）が普遍的に存在することが明らかになってきている。したがって、経済現象の理解には相転移挙動を調べることが重要である。

## 2. 研究の目的

臨界ゆらぎの視点から様々な経済データが分析され、経済現象の新たな科学的知見が明らかになりつつある。これらの成果を踏まえ、経済現象の本質である相転移挙動に注目し、超大量多様な経済データを超並列計算を用いて分析する。数理科学と経済学の両方の視点から従来と異なる手法で考察することで、統計的有意な法則性を見つけ出し、変動のメカニズムを解明する。

## 3. 研究の方法

経済現象は複雑で捉えにくいいため、良質で大規模なデータの利用が不可欠になる。これを満たすデータを利用して、主に以下のテーマについての分析を行う。

### (1) 企業間ネットワーク

- ・日本企業約 100 万社の取引ネットワーク
- ・企業間の振込ネットワーク
- ・人間関係のネットワーク

### (2) 不動産バブル

- ・首都圏（1都3県）の中古マンション売買データ（リクルート社提供の物件別住宅

取引情報、1986～2016年の週次データ、全物件数は約 100 万件）

- ・米国の住宅価格（Zillow.com から取得した2011年9月の1時点データ、全物件数は約11万件）

## 4. 研究成果

### (1) 企業間ネットワーク

2005年の日本企業約 100 万社の仕入先・販売先データを用いて、各企業がどの企業と取引しているかに関する有向ネットワークを構築し、解析した。ノード（企業）数は約 100 万、リンク（取引関係）数は約 400 万になる。各ノードの入次数（他のノードから入ってくるリンクの本数）、出次数（他のノードへのリンクの本数）はともにベキ分布し、スケールフリーネットワークになっている。一般に、ネットワークはいくつかの成分に分類することができる。ここでは、強連結成分（任意の2つのノード間に有向路が存在する成分）で最大のもの（最大強連結成分）のみを分析対象とする。全体の約 43% にあたる 426,602 社の企業が最大強連結成分に属している。リンクでつながっているノードを等確率に選んで移動するランダムウォーカー（単純ランダムウォーク）を考える。ページランクはネットワーク上のランダムウォーカーの定常分布として定義される。ページランクが大きくなるためには、単に入次数が多いだけでなく、隣接ノードのページランクが大きいことも重要になる。ページランクは、ウォーカーがそのノードに滞在する時間であると解釈できる。リンクの方向をお金の流れの向きにとると、ページランクは各企業に流れるお金の流量に対応する。また、リンクの方向を逆向きにして同様に定義されるページランクは、各企業に流れるモノの流量に対応す

る。これらのページランクは、ランダムウォーカーがどのくらいその企業に滞在するかを表現し、ネットワーク構造からみた企業の重要性を表す一つの指標になっている。各企業のページランクを算出した結果、ページランクは売上高と相関しているが、成長率とは相関していないことが分かった。これはリンク数と同様の性質である。ネットワークが完全にランダムにつながっていれば、ページランクと次数は同じ値になる。しかし、実際にはつながり方に相関構造があるため、同じ大きさの次数を持つ企業でも、ページランクの値が異なる企業も存在している。そこで、リンク数自体がページランクに与える影響を除去するために、単位リンク数あたりのページランクを考えた。その結果、リンクの多い企業については、単位リンク数あたりのページランクの大きい企業ほど成長率が大きいことが分かった。

また、国内の金融機関に協力いただき、2012年についての企業間の振込のデータを提供いただいた。データには、どの企業からどの企業にいくら金額が振込されたかについての情報が入っている。この振込データから現実のお金の流れのネットワークを構築し、最大強連結成分を抽出して解析を行った。各ノードの入次数、出次数はどちらもベキ分布に従い、スケールフリーネットワークになっている。ただし、入次数と出次数でベキ指数は異なり、非対称なネットワークになっている。次数  $k$  のノードに隣接しているノードの平均次数の  $k$  依存性を調べた結果、次数の大きなノードにつながっているノードの平均次数は小さく、ハブ企業同士がつながる確率は小さいことが判明した。つまり、ノード間はまったくランダムにつながっているわけではなく、つながり方には相関構造がある。ページランクについても算出し、企業間取引ネットワークと同様の性質を確認した。次に、企

業間の取引金額（振込総額）に注目し、振込総額とネットワーク構造の関係を調べた。各企業について、他の企業に支払った振込総額、他の企業から受け取った振込総額はどちらもベキ分布に従い、各企業に出入りする金額には大きな格差がある。振込総額は、次数ともページランクとも強く相関しており、振込総額が大きい企業は、ページランクも次数も大きい企業であることが多いことが分かった。そこで、振込総額が、ページランクと次数の二つの情報とどう関係しているかを詳しくみるために、ページランクと次数で条件つけた振込総額の平均値（ページランクと次数で二つの軸をとった二次元平面をセルで分割し、各セルに位置する企業についての振込総額の平均値）を調べた結果、ページランクや次数が大きい企業ほど振込総額が大きいという性質が確認した。さらに、同じ次数の企業同士で比較をすると、ページランクの大きい企業ほど振込総額が大きいことが分かった。また、ページランクが同じ値の企業同士では、次数の大きい企業ほど振込総額が大きい。したがって、次数とページランクの両方の情報を利用することで、振込総額をより精度高く推定できる可能性がある。現実利用できる顧客間取引データでは、顧客間の本当の取引金額が分からない場合が多い。ここで得られた知見を用いて取引金額を推定できるようになれば、企業間のつながりの影響をより現実的に解析し、ネットワークの脆弱性の視点からリスクを評価することが可能になると考えられる。

さらに、人間関係のネットワーク（数十万人）のデータを保有する企業と交渉を行い、データを入手した。分析のためのデータ整理を行い、基本的な統計性を調べ、どの時期のデータを利用するかを

検討した上で非負値行列因子分解を適用し、手法の有効性を確認した。そして、各個人が所属する企業に注目して、企業間のつながりを表すデータ行列を作成し、非負値行列因子分解を用いることで業界や関連企業ごとにクラスタ構造を抽出した。

## (2) 不動産バブル

首都圏の中古マンション売買に関する物件別取引データを分析した。まず、価格がどのような物件属性から決定されるかを調べた結果、価格は面積とは強く相関しているが、他の属性情報からの影響はほとんどないことが判明した。次に、価格が面積からどのように決定されるかを調べた。単純に考えれば、面積が倍になれば価格も倍になるという仮説が考えられる。この場合、物理量として平米単価（1平米当たりの価格）を用いれば物件の個性の違いが調整できることになる。しかし、実際にはこの仮説は成り立たず、面積が広がるほど価格は指数関数的に高くなるという法則があり、面積が50平米増える毎に価格が2倍になることが分かった。平米単価は、不動産業界の現場でもよく用いられているが、実際には物件を面積の小（投資用）、中（居住用）、大（お金持ち用）で三つにグループ分けした上で使用している。これは、平米単価では面積の調整がうまくできていないからである。面積が広がるにつれ価格が指数関数的に高くなる性質に基づいて、面積の違いを調整した面積調整価格を導入すれば、物件の個性の違いは完全に調整され、面積でグループ分けする必要もなく統一的な議論が可能になる。

首都圏のすべての物件について面積調整価格を観測すると、物件の個性の違いが調整済みであるにもかかわらず、異なる二つの物件の調整価格は必ずしも同じ値にはならず、物件によって多少ばらついている。このようなばらつきが、小さな誤差が集積

することで生じる正常ゆらぎの場合、ゆらぎの分布は正規分布に従う（中心極限定理）。したがって、ゆらぎの分布形状を観測することで正常ゆらぎなのか、そうでないかを調べることができる。データから面積調整価格のばらつき（ゆらぎ）分布を調べた結果、1998～2012年の平常時には正規分布（正常ゆらぎ）に従うが、バブルといわれる1986～1997年には正規分布から乖離し、裾の長いベキ分布に従うことを確認した。これは、面積調整価格のばらつきをゆらぎとして分析することでバブルの有無の判定が可能になることを示している。経済学では、バブルとは価格がファンダメンタルズ（本来あるべき価格水準）から乖離することであると定義される。この乖離を測定することができればバブルの判定が可能になるが、現実にはファンダメンタルズを正しく推計することはできないため、これに成功した事例はなかった。臨界ゆらぎの概念を応用することで、はじめてバブルの判定が可能になった。なお、バブル期には価格が激しく変動するため、ここで観測したバブル期のベキ分布は、定常とみなすことができない一年間の期間をまとめて観測しているために生じている可能性が懸念される。そこで、一週間毎に時期を区切った分析も行った結果、週別に分布を観測しても、年別に観測した場合と同じ結果が得られることが確認できた。したがって、懸念される可能性は排除できると考えられる。

平常時は、首都圏の調整価格は正規分布に従うため、ある二つの物件の調整価格の違いはせいぜい誤差（正常ゆらぎ）の範囲内の違いであり、二つの調整価格は概ね同じ値であるとみなせる。異なる場所に立地する二つの物件の調整価格が同じということは、この二つの物件の面

積や築後年数などの属性がもしもまったく同じであれば、同じ価格で取引されるということである。これは、同じ品質の二つの商品が同じ価格になっている（裁定取引の機会がない）ことに対応するため、二つの物件の間に価格裁定が働いていることになる。つまり、平常時は首都圏全体が一つの大きな同一需給圏（価格の形成について相互に影響を及ぼすような関係にある他の不動産の存する圏域）を形成し、首都圏全体が一物一価（同一の物件はほぼ同一の価格）の正常な状態になっている。一方、バブル時には首都圏全体が一つの同一需給圏にはなっていない。したがって、価格裁定が働かず一物一価にならないために、調整価格の違いは誤差（正常ゆらぎ）の範囲を越えて大きくなり、ゆらぎ分布は正規分布から乖離することになる。しかし、バブル時でも、首都圏すべての物件を観測するのではなく、地域の範囲を十分に狭めた特定地域内（同一需給圏内）の物件だけを観測すれば調整価格のゆらぎは正規分布に従うことを示すことができた。つまり、バブル時は、投資家が近視眼的になり関心を持つ地域の範囲が極端に狭くなるため、地域毎に異なる同一需給圏が形成されてしまい、首都圏全体は複数の同一需給圏で構成されることになる。そのため、観測する地域の範囲をどんどん狭めていけば、やがて同一需給圏内になり正常ゆらぎが観測されることになる。この狭める範囲の大きさ（同一需給圏の大きさ）を用いて「バブル度」を測ることができる。範囲が狭いほどバブル度は高くなり、広いほどバブル度は0に近づく。データから測定されたバブル度は、1980年代後半～90年代前半は恒常的に1.5を越え、その後はほぼ0（平常時）に近い値をとっている。安倍政権が誕生する2012年後半頃に再び変化が現れ、継続的に1を越える時期が観測され、過熱気味の状態になってい

ることが分かった。また、バブルが空間的にどのように発生し、伝播・波及し、崩壊していくか調べた結果、1988年頃に都心で発生したバブルが、都心の南西部へ波及し、1992年にバブルの度合いが一番強くなり、その後、南西部からバブルが終息し、1998年には完全にバブルが消失し、首都圏全域が同一需給圏になる様子を定量的に観測できた。

さらに、このように定義したバブルの度合いが現実のバブルの程度を反映していることをさらに確認するために、Zillow.comから取得した米国の住宅価格のデータを用いて、州の違いに注目してバブル度を州別に計算した。得られたバブル度の値と2011年10月時点でのその州の物件の差し押さえ率との関係を分析した結果、バブルになっている州ほど物件の差し押さえが多い傾向があることが確認できた。したがって、バブル度は現実のバブルの大きさを反映した量になっていると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 13 件）

- 1\_ Takaaki Ohnishi, Takayuki Mizuno, Chihiro Shimizu, Tsutomu Watanabe, "Power Laws in Real Estate Prices during Bubble Periods", International Journal of Modern Physics: Conference Series, vol.16, no.1, pp.61-81, 2012年, 査読有 DOI:10.1142/S2010194512007787
- 2\_ Takaaki Ohnishi, Hideki Takayasu, Takatoshi Ito, Yuko Hashimoto, Tsutomu Watanabe, Misako Takayasu, "On the Nonstationarity of the Exchange Rate Process", International

Review of Financial Analysis,  
vol.23, pp.30-34, 2012年, 査読  
有  
DOI:10.1016/j.irfa.2011.06.010

[学会発表] (計 30 件)

- 1\_ Takaaki Ohnishi, Takayuki Mizuno, Chihiro Shimizu, Hiroshi Iyetomi, Tsutomu Watanabe, "Estimating the Size of Market Areas and Bubbles in the Japanese Housing Market", Conference on Complex Systems 2015, 2015年09月28日~2015年10月02日, Tempe(Arizona)
- 2\_ Takaaki Ohnishi, Takayuki Mizuno, Chihiro Shimizu, Hiroshi Iyetomi, Tsutomu Watanabe, "Use of house price distribution for estimating a local bubble indicator", 11th German Probability and Statistics Days 2014, 2014年03月03日~2014年03月07日, Ulm (Germany)
- 3\_ Takaaki Ohnishi, Takayuki Mizuno, Chihiro Shimizu, Hiroshi Iyetomi, Tsutomu Watanabe, "Measuring the likelihood of housing bubbles: a spatio-temporal analysis", European Conference on Complex Systems 2013, 2013年09月16日~2013年09月20日, Barcelona (Spain)
- 4\_ Takaaki Ohnishi, Takayuki Mizuno, Chihiro Shimizu, Tsutomu Watanabe, "Using Property Price Distribution to Detect Real Estate Bubbles",

6th CSDA International  
Conference on Computational and  
Financial Econometrics, 2012年  
12月3日, Oviedo (Spain)

- 5\_ Takaaki Ohnishi, "On the evolution of the house price distribution", the 58th World Statistics Congress of the International Statistical Institute (ISI), 2011年8月22日, Dublin (Ireland)

[その他]

- 1 『日経ヴェリタス』に取材協力 (「都内マンションもはや高根の花」, 2015年8月9日~15日第387号3面掲載)
- 2 『月刊プロパティマネジメント』に取材協力 (「中古マンション売買価格のビッグデータを分析した「バブル度」を測る指標が完成」, 2015年8月号 pp.12 掲載)
- 3 『日刊不動産経済通信』に取材協力 (「東大、不動産のアベノミクス効果分析」, 2015年6月30日掲載)
- 4 『日経ヴェリタス』に取材協力 (「持ち直す不動産 東京はバブル前夜?」, 2015年4月19日~25日第371号48面掲載)
- 5 『Wedge』に寄稿 (「新・地球学の世紀 臨界現象の研究による経済制御の可能性」 2015年1月号 pp.100-101掲載)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大西 立顕 ( OHNISHI Takaaki )

東京大学・情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 10376387