

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23760074

研究課題名（和文） エージェント集団行動の大規模同期現象のモデルと推計

研究課題名（英文） Model and inference of extreme synchrony in collective behavior of agents

研究代表者

佐藤 彰洋（AKI-HIRO SATO）

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：50335204

研究成果の概要（和文）：4コア/8スレッド・8ノードの計算サーバ、ファイルサーバとコンソールからなるクラスター型並列計算システムを建設し、外国為替市場の1秒解像度高頻度データ66カ月分（2007年6月から2012年11月）（約5億8千万レコード）の収集・蓄積をおこなった。大規模同期現象を定量化する方法として二部グラフ上でのネットワークエントロピー法を開発し、エントロピーの週ごと最小値に対して極値分布（Gumbel分布）を仮定した情報量基準による時系列分割方法を提案した。各断片におけるパラメータ推定値を用いることによる有限混合モデルによる確率分布の外挿方法を確立し、研究期間中の連続分析をおこなった。提案手法を用いることにより2011年12月から2012年2月の間にこれまで観測されたことのない規模の大規模同期現象が取引で発生していたことを発見した。

研究成果の概要（英文）：

This study proposes a method to quantify the structure of a bipartite graph with network entropy from a statistical-physical point of view. The network entropy of a bipartite graph with random links is computed from numerical simulation. As an application of the proposed method to analyze collective behavior, the affairs in which participants quote and trade in the foreign exchange market are quantified by using the data during the period from June 2007 to November 2012 (about 580,000,000 records with 1-second resolution). The network entropy per node is found to correspond to the macroeconomic situation. A finite mixture of Gumbel distributions is used to fit with the empirical distribution for the minimum values of network entropy per node in each week. The mixture of Gumbel distributions with parameter estimates by segmentation procedure is verified by both Kolmogorov-Smirnov and Anderson-Dearling tests. The finite mixtures of Gumbel distributions which extrapolate the empirical probability of extreme events have an explanatory power with a statistically significant level.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・工学基礎

キーワード：経済物理学、データ科学、社会経済システム、エージェント

1. 研究開始当初の背景  
2008年7月頃から始まった世界同時金融危

機は、各国政府の危機脱却に向けた協調行動の結果、2009年1月頃には一旦収束したよ

うに思われた。しかしながら、この政策は、金融・不動産セクターに発生した多額の劣化債権を国家財政が吸収する手法であったため、経済規模の小さな国家の中には極度の信用収縮に陥り、国家財政破綻にいたる事態に進展した。特に、2009年8月以降、ドバイショック、ギリシャ危機などの世界規模で影響が波及する金融・財政危機や破たんがたびたび確認されるようになってきている。

このようなさなか、申請者は科学研究費補助金若手研究(B)「エージェント間情報伝達構造の網羅的分析」(H.21-H.22)(#21760059)において、網羅的な外国為替市場の高解像度データの連続収集と連続分析を行い、網羅的観点からのエージェント同調の可視化と定量化を行ってきた。この研究中、世界同時金融危機前後で多くの市場参加者が同調して取引を行う現象が起こっていることに気がついた。このような大規模同期現象の発生を捉えることおよびその発生頻度を推計することは金融市場の安定性を理解するために重要であると考え本研究を提案するに至った。

## 2. 研究の目的

近年の電子化された社会において、社会を構成するエージェントの行動を実際のデータから直接観測することが可能となりつつある。特に、経済危機などの危機的局面においてエージェントの行動が一定方向にそろう、同じ行動が一度に発生することが確認されている。本研究では、大規模なエージェントの同期現象の観測と、同期現象の発生確率を推定するためのモデルを開発し、現実社会におけるリスクファクタとしてエージェント行動の大規模同期現象の発生確率を用い、計量する方法論を確立することにある。

外国為替市場における大規模同期現象の発生頻度は極めて少なく、極値事象(extreme events)であるため、データからその発生に関する定量的知見を豊かにしていくためには、データの網羅的収集と実証分析、大規模計算に基づいた推定方法の確立、フィールド研究のバランスの取れた発展が重要である。本研究では、できる限り長期間にわたる高解像度データを収集し、並列計算に基づいた有限長データから発生確率を外挿する方法を確立し、極値事象の発生確率を推定する方法を開発する。更に、実際に外国為替市場に参加する金融実務家への聴き取り調査を行い、提案手法で得られた結果の実務的立場からの妥当性の検証をおこなった。

## 3. 研究の方法

外国為替市場のブローキングシステムに到着する通貨ペアごとの注文メッセージの到着と取引の発生を記録した高解像度データ

を用い、網羅的な観点から注文・取引の発生同期規模に対する分析を行う。大規模同期現象は発生頻度は極めて小さいが発生するとその社会的影響が極めて大きい稀少頻度事象の一種である。そのため、大規模同期現象の発生確率を有限数の観測データから経験(実証)分布により推計する場合、観測されていない規模の同期現象の確率は0と見積もってしまうという問題がある。この問題を克服するために、本研究では

①できる限り長期間のデータを収集して稀少頻度の発生をとらえる

②有限数の観測データから観測されていない規模の発生確率を外挿する

の二つの方法から外国為替市場における大規模同期現象を観測し、推計するための研究を行なった。長期間にわたる高解像度のデータの蓄積をおこない、これらを計算できる能力を有する並列計算システムを構築した。この並列計算システムとデータを用いて以下手法により適切な確率モデルの選定を行った。

1. 確率モデルを仮定し、単位リンク当たりのネットワークエントロピーの最小値時系列に対して最尤推定法を用いて確率モデルのモデルパラメータを推定する。

2. 推定された確率分布とデータとの間で適合度検定(Kolmogorov-Smirnov検定とAnderson-Darling検定)をおこない推定された確率分布のデータに対する適合度を計る。

3. 仮定された確率モデルが大規模同期現象を説明するのに適切なモデルとなるまで、1~2を繰り返す。

4. 最終的に得られた確率モデルを用いて観測されていない規模の大規模同期現象が発生する確率を外挿する。

この操作により得られた稀少頻度事象の発生確率は大規模同期現象の発生確率を推計するためのガイドとして用いることが可能と期待する。



図1 並列計算システムの全体像

## 4. 研究成果

4コア/8スレッド・8ノードの計算サーバと、

ファイルサーバ(HDD 2TB)、コンソールからなる並列計算システムを構築し(図1参照)、この並列計算機上に66カ月間(2007年6月~2012年11月)の1秒解像度データ約5億8千万レコードの注文と取引に関するデータを蓄積した。蓄積された高解像度データには39種類の通貨と11種類の貴金属2種類のバスケット通貨(AUD, NZD, USD, CHF, JPY, EUR, CZK, DKK, GBP, HUF, ISK, NOK, PLN, SEK, SKK, ZAR, CAD, HKD, MXC, MXN, MXT, RUB, SGD, XAG, XAU, XPD, XPT, TRY, THB, RON, BKT, ILS, SAU, DLR, KES, KET, AED, BHD, KWD, SAR, EUQ, USQ, CNH, AUQ, GBQ, KZA, KZT, BAG, BAU, BKQ, LPD, LPT)が含まれており図2に示す94種類の通貨ペアに対する注文価格と取引価格から構成されているデータを含んでいた。

52 currencies, 94 currency pairs

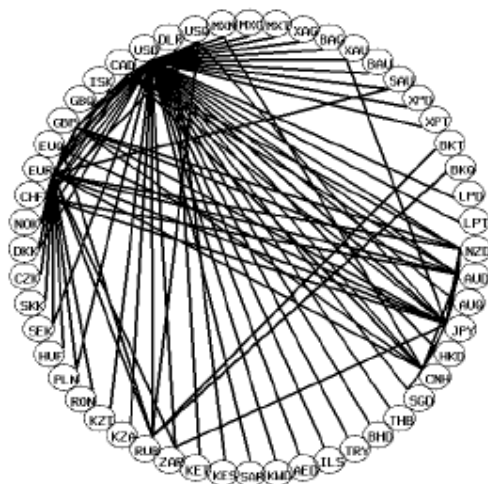


図2 データに含まれる通貨と通貨ペア(ノードは通貨を表し、通貨間を結ぶ直線として通貨ペアを表現する)

同期現象の代表変量として市場全体における通貨注文量・取引量の総和を用い、Gumbel密度を仮定することで最尤推定によるパラメータ推定およびKolmogorov-Smirnov(KS)検定とAnderson-Darling(AD)検定を用いた適合度検定を行った。推定されたパラメータを持つGumbel分布に対する適合度検定の結果、注文に対しては96%(KS), 89.9%(AD)の危険水準でGumbel密度を棄却する。取引に対しては44.3%(KS), 9%(AD)の危険水準でGumbel密度の仮定が棄却する結果を得た。各通貨ペアの1分ごとの注文回数と取引回数の各週最大値を図3に示す。注文回数は年々単調増加傾向にあり取引回数についてもしばしば増加することが確認される。平均値が変化する非定常性が存在するため、注文回数・取引回数の週ごと最大値をそのまま用いた場合、非定常性と大規模同期現象との区別

を十分にできないという問題が明らかになった。

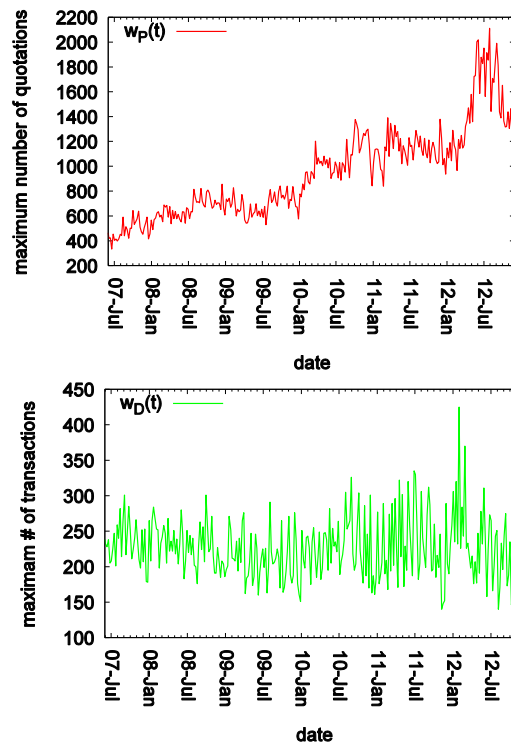


図3 (上)1分当たりの注文数の週ごとでの最大値。(下)1分当たりの取引数の週ごとでの最大値。

そこで本研究では二部グラフ上のネットワークエントロピーを導入した。ネットワークエントロピーを各通貨ペアにおける1分間当たりの注文回数(取引回数) $m_i(t)$ を実現するネットワークの組み合わせ総数の対数と定義する。

$$\Sigma(t) = \ln \prod_{i=1}^K \binom{M}{m_i(t)} = \sum_{i=1}^K \ln \frac{M!}{m_i(t)!(M - m_i(t))}$$

そして単位リンク当たりのネットワークエントロピー

$$\sigma(t) = \frac{\Sigma(t)}{\sum_{i=1}^K m_i(t)}$$

の一週間内での最小値を大規模同期現象の代表的変量であると仮定し、この時系列を極値分布によりフィットすることにより確率分布関を外挿することを試みた。極値分布理論に従うと最小値に対するGumbel密度は

$$P(v; \mu, \rho) = \frac{1}{\rho} \exp \left( \frac{v + \mu}{\rho} - e^{\frac{v + \mu}{\rho}} \right)$$

で与えられる。データ  $v(s')$  ( $s'=1, \dots, T$ ) に対する対数尤度関数は

$$l(\mu, \rho) = \sum_{s'=1}^T \ln P(v(s'); \mu, \rho)$$

であるので最尤推定量は以下の連立非線形方程式の解として与えられる。

$$e^{-\frac{\hat{\rho}}{\hat{\mu}}} = \frac{1}{T} \sum_{s=1}^T e^{\frac{v(s)}{\hat{\rho}}}$$

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{s=1}^T e^{\frac{v(s)}{\hat{\rho}}} v(s)}{\sum_{s=1}^T e^{\frac{v(s)}{\hat{\rho}}}} - \frac{1}{T} \sum_{s=1}^T v(s)$$

最尤推定量を用いた対数尤度差による時系列分割方法を用いることにより、発生確率を外挿するために極値分布の有限混合モデルを仮定し、混合比率とパラメータを時系列分割方法によって推計する方法を新たに開発した。具体的には、 $T$  個の時系列を  $s$  個と  $T-s$  個からなる 2 つの断片の結合であるとみなすことにより尤度比を構成しこの尤度比が最大となる箇所で時系列を分割する方法を Gumbel 分布に対して導入した。時系列全体が独立同一の Gumbel 分布からの抽出であると仮定した場合の対数尤度と  $s$  個の時系列と  $T-s$  個の時系列とでパラメータの異なる Gumbel 分布の結合と仮定した場合の対数尤度の差は時系列全体での最尤推定量  $\hat{\rho}$ 、左側と右側の最尤推定量を  $\hat{\rho}_L, \hat{\rho}_R$  とすると、

$$\Delta(s) \approx T \ln \hat{\rho} - s \ln \hat{\rho}_L - (T-s) \ln \hat{\rho}_R$$

により近似することができる。この  $\Delta(s)$  を用いるとふたつのモデルの間での赤池情報量基準の差  $\Delta AIC(s) = -2\Delta(s) + 4$  となる。この値が最小となる  $s$  において時系列の分割を行い、これを再帰的に繰り返すことにより時系列全体に適切な分割点を決定する。ここで停止条件として  $\Delta(s)$  の最小値が 10 以上となる場合はそれ以上の分割を行わないようにした。

本提案手法により分割を行った単位リンク当たりのエントロピーの週ごとと最小値を図 4 に示す。この時系列から 2011 年 11 月から 2012 年 2 月にかけてこれまでにない規模で取引が同期して発生していたことを発見した。更に、この大規模同期現象は 2012 年 2 月 14 日に決定された日本銀行による 10 兆円規模の金融緩和直後に終了していたことが確認される。

各セグメントとマクロ経済的に意味のあるイベントとの関連にちて調べた。推定されたモデルパラメータを用いた有限混合 Gumbel 分布を用いて適合度検定を行った結果、推定確率分布は注文については 83.1%(KS), 99.1%(AD), 取引については 21.3%(KS), 60.8%(AD) の危険水準で有限混合 Gumbel 分布の仮定を棄却する結果となった。注文に関しては有限混合 Gumbel 分布のモデルは比較的良好であると結論づけられる。

期間内 1 週間ごとでの注文や取引の観点からは特に市場全体での注文総数および取引総数が増加しているわけではないが、1 分解像度でネットワークをとらえた場合に注文と取引が市場全体で集中して発生する大規模同期現象を観測期間中でとらえることに成功した。この大規模同期現象は外国為替取引の注文に関しては 2012 年 2 月に、取引に関しては 2011 年 12 月から 2012 年 2 月にかけて繰り返し起こっていた。

1 分当たりの注文と取引に関して計算される単位リンク当たりのネットワークエントロピー値の生起確率の外挿を極値分布の有限混合モデルに基づく最尤法を用いたパラメータ推定方法と情報量基準差を用いた時系列分割方法を用いて行った。観測期間である 5 年間のデータをもとにネットワークエントロピーの最小値が観測される確率分布を有限混合モデルにより外挿した。

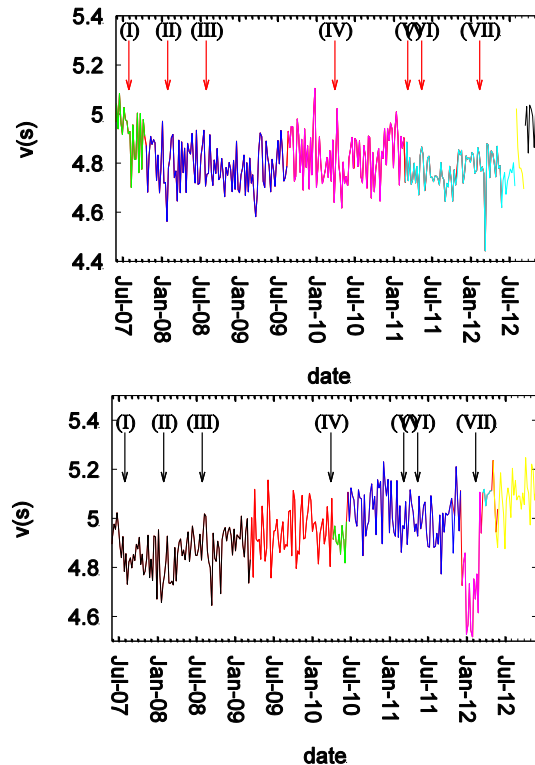


図 4 単位リンク当たりのネットワークエントロピーの各週最小値。各色はセグメントと表し同一セグメント内では独立同一の Gumbel 密度パラメータからの抽出とみなされる。(I)BNP Paribas ショック (2007 年 8 月), (II)Bear Sterns ショック (2008 年 2 月), (III)Lehman ショック (2008 年 9 月), (IV)European ソブリン債権危機 (2010 年 4 月 -5 月), (V)東日本大震災 (2011 年 3 月), (VI)米国債券シーリング危機 (2011 年 5 月), (VII)日本銀行による 10 兆円バレンタインデープレゼント

## 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 2 件)

(1) Aki-Hiro Sato, Takaki Hayashi, Janusz A. Holyst, "Comprehensive Analysis of Market Conditions in the Foreign Exchange Market: Fluctuation Scaling and Variance-Covariance Matrix", *Journal of Economic Interaction and Coordination*, Vol. 7 (2012) 167—179.

DOI: 10.1007/s11403-012-0089-2

(2) Aki-Hiro Sato, "Inference of Extreme Synchrony with an Entropy Measure on a Bipartite Network".

<http://arxiv.org/abs/1207.4860>

[学会発表] (計 11 件)

(1) 2013 年 3 月 29 日, 佐藤彰洋, "高解像度外国為替市場データを用いた市場状態推定とリスク計量", 数学・数理科学と諸科学・産業との協働によるイノベーション創出のための研究促進プログラム「金融リスクの計測・管理・制御に纏わる数理」, 大阪大学, [http://www-csfi.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/structure/workshop201303/16\\_30.pdf](http://www-csfi.sigmath.es.osaka-u.ac.jp/structure/workshop201303/16_30.pdf)

(2) 2013 年 3 月 15 日, 佐藤彰洋, J. A. Holyst, 林高樹, "外国為替市場のゆらぎのスケーリング則と相関分析", 統計数理研究所共同研究集会「経済物理学とその周辺」, 統計数理研究所

(3) 2013 年 1 月 25 日, Aki-Hiro Sato and Zdzislaw Burda, "Segmentation Analysis of Multivariate Time Series of Foreign Exchange Rates", JAFEE2012 冬季大会, 筑波大学 東京キャンパス, 東京; Aki-Hiro Sato, Zdzislaw Burda, Segmentation analysis of multivariate time series fo foreign exchange rates, 日本金融・証券計量・工学学会 冬季大会 2012 予稿集 (2013) 122-131.

(4) 2012 年 9 月 20 日, 佐藤彰洋, "外国為替市場における大規模同期現象の観測と発生確率の外挿", 日本物理学会 2012 年秋季大会, 横浜国立大学

(5) 2012 年 9 月 14 日, 佐藤彰洋, "外国為替市場における参加者行動の網羅的計量", 行動計量学会第 40 回大会, 新潟県立大学; 佐藤彰洋, "外国為替市場における参加者行動の網羅的計量", 日本行動計量学会第 40 回大会妙録集, Vol. 40 (2012) 132-145.

(6) 2012 年 8 月 27 日, 佐藤彰洋, "外国為替市場における大規模同期現象の観測と推計", 統計数理研究所共同研究集会「経済物理学とその周辺」、キヤノングローバル戦略研究所, [http://www.canon-igs.org/event/report/report\\_120827/pdf/120827\\_sato\\_presentati](http://www.canon-igs.org/event/report/report_120827/pdf/120827_sato_presentati)

on.pdf

(7) 2012 年 3 月 26 日, Aki-Hiro Sato and Janusz A. Holyst, "Comprehensive Analysis of Market Conditions in the Foreign Exchange Market: Fluctuation Scaling and Variance-Covariance Matrix", Spring Meeting of German Physical Society (DPG) 2012, Berlin Technical University, Berlin, Germany

(8) 2011 年 9 月 22 日, 佐藤彰洋, 林高樹, Janusz A. HOLYST, "外国為替市場における市場参加者の大規模同期現象のモデルと計量", 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学

(9) 2011 年 9 月 9 日, 佐藤彰洋, "エントロピーを用いた二部グラフ構造の定量化", 経済物理学とその周辺研究会, 統計数理研究所

(10) 2011 年 6 月 23 日, Hiroshi KAJIKAWA, Aki-Hiro SATO, "Mixture of compounded Poisson processes as a model of tick-by-tick foreign exchange market data and its parameter estimation procedure", ESHA/WEHIA 2011, Universita Politecnica delle Marche, Ancona, ITALY

(11) 2011 年 6 月 20 日, Aki-Hiro SATO, "Quantification of Bipartite Network Structure with Entropy", International Workshop on Coping with Crises in Complex Socio-Economic Systems - 2011, ETH Zurich, Zurich, SWITZERLAND

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://amech.amp.i.kyoto-u.ac.jp/~aki/wiki/index.php?23760074>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤彰洋 (AKI-HIRO SATO)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：23760074