

外国為替市場参加者行動の特異性検出方法:特異性の伝播と同期

佐藤 彰 洋†

外国為替市場において参加者の注文行動が集中することにより、注文行動頻度が瞬間的に上昇する特異的現象があることを見出した。この瞬間的な行動頻度の急上昇を検出する数理的方法としてメジアンフィルタに基づいた手法を提案し、行動頻度の瞬間的な上昇の伝播と同期を定量化・可視化する手法を開発する。この方法を用いて、24種類の通貨からなる、46種類の通貨ペアに対して、行動頻度の特異的上昇の伝播と同期を定量化・可視化し、行動頻度時系列の総合的な類似性とこの行動頻度の特異的な急上昇の伝播との間の相関関係を計算した。

Detecting singularity of behavioral frequencies in the foreign exchange market: Transmission and synchronization of their singularities

AKI-HIRO SATO†

Singular behavior of market participants in the foreign exchange market – quotation frequencies rapidly increase for a short period – is found. A mathematical method to automatically detect the rapid increases from multi-dimensional time series of quotation frequencies and computational technique to both visualize and quantify transmission and synchronization of them are proposed. By means of the proposal method for 46 kinds of currency pairs consisting of 24 currencies visualization and quantification of singular behavior in the foreign exchange market is conducted. The relationship between synchronization of this singular behavior and similarity structure among quotation frequencies is calculated.

1. はじめに

1990年代からはじまった、高速通信網の世界的な普及とともに電子決済の導入の結果、世界中の多くの金融市場ではコンピュータネットワークを通じた電子取引が行われるようになった。電子取引は経済性、速度、公平性の観点からそれ以前に行われていた人間を仲介した取引に対して強い競争力を持ち、2000年を境に加速的に普及してきた。

しかしながら、技術革新が進むほどに、金融市場において何が起きているかの全体像を人間の能力では捉えることが困難になりつつある。このため、人間の処理能力を大きく越えた情報を生成する金融市場の状態理解は益々重要な課題となっている。この問題を解決するために、金融工学や経済物理学、コンピューテーショナルファイナンスの分野では、金融時系列のモデル化と時系列分析が盛んに行なわれている^{1)~6)}。特に、高速大容量のデータから情報を縮約し現状を的確に知るために、情報処理技術を駆使する必要がある。本稿では

金融市場の市場参加者の行動の特異性の観点から情報を縮約し、金融市場の状態を定量化、可視化する数理的方法の提案を行う。

2. 注文行動頻度の上昇と特異性

市場参加者の行動を定量化するひとつの指標として、通貨ペア j の注文行動頻度を以下で定義する。

$$A_j(k) = \frac{1}{\Delta t} C_j(k\Delta t; (k+1)\Delta t) \quad (k = 1, 2, \dots), (1)$$

ここで、 Δt はサンプリング時間 $C_j(t_1; t_2)$ は時刻 $[t_1, t_2)$ における注文行動の回数である。ここでは、外国為替市場の高頻度金融時系列データを用いて外国為替市場の状態を行動頻度の観点から定量化することを考える。データはCQG社が提供する外国為替市場の建値提示に関するデータを用いた⁷⁾。図1に2006年10月16日から10月20日までのUSD/JPYの1分間当りのベストアスクと注文回数の時間変化を示す。瞬間的に1,000ticks/minを越えるインパルス状の注文行動頻度の急上昇現象が確認される。

3. 注文行動頻度の特異性検出方法

注文行動頻度の急激な上昇に着目し、これを時系列

† 京都大学大学院情報学研究科数理工学専攻
Department Applied Mathematics and Physics, Graduate School of Informatics, Kyoto University

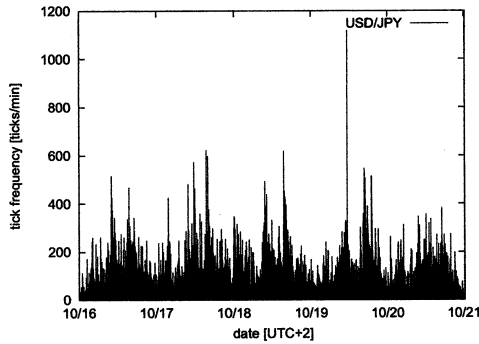


図1 2006年10月16日から2006年10月20日におけるUSD/JPYの1分間当りの注文行動頻度(下).

から検出する数値的方法を考える。ここでは、時系列からメジアンフィルタを用いてインパルス除去した補完の時系列を作成し、インパルス除去した時系列と元時系列との差が閾値を越えた場合にインパルスが検出されたとする手法を提案する。

3.1 メジアンフィルタ

インパルス性雑音の除去方法はこれまで画像処理や音声処理の分野において長く研究されてきた^{8)~10)}。メジアンフィルタとは対象とする時系列の中間値を出力するフィルターである。時系列 $x(k)$ に対してメジアンフィルタは以下で定義される。

$$\tilde{x}(k) = \text{Median}_{k' \in [k-K, k+K]} (x(k')) \quad (K > 0), \quad (2)$$

ここで、 $\text{Median}_{k' \in [k-K, k+K]} (x(k'))$ は区間 $[k-K, k+K]$ の間で $x(k')$ の値の大きい順序に並べたときの中間の値を意味する。

3.2 パルス位置の検出

メジアンフィルタを用いるとインパルス的に急激に値が変化する箇所は除去される。一方、インパルスのではない k の $\tilde{x}(k)$ と $x(k)$ はほとんど変わらないので、もとの時系列とインパルス性雑音を除去した時系列との差 $x(k) - \tilde{x}(k)$ を調べることで、インパルス性の急激な変動を捉えることができる。すなわち、

$$y(k) = |x(k) - \tilde{x}(k)|, \quad (3)$$

と定義すると、適当な $\theta > 0$ に対して、 $y(k) \geq \theta$ が成立する k がインパルスの存在する箇所と判定できる。インパルスと判定する閾値には任意性があるが、ここで閾値 θ は $y(k)$ の平均値 m からのずれが標準偏差 σ の D 倍以上である場合に特異的な値であるとみなすこととし、閾値を

$$\theta = m + D\sigma \quad (D > 0), \quad (4)$$

とした。 D を変化させてインパルス位置を検出した結果、 $D = 5.0$ 以上の値を取れば十分であることがわかった。

4. インパルスの検出

分析対象としたデータは、CQG社が提供する外国為替市場の建値提示に関する24種類の通貨：ニュージーランド・ドル(NZD)、オーストラリア・ドル(AUD)、シンガポール・ドル(SGD)、香港・ドル(HKD)、大韓民国・ウォン(KRW)、日本・円(JPY)、タイ・バーツ(THB)、インド・ルピー(INR)、パキスタン・ルピー(PKR)、南アフリカ・ランド(ZAR)、トルコ・リラ(TRL)、欧州連合・ユーロ(EUR)、デンマーク・クローネ(DKK)、チェコ・クルナ(CZK)、ポーランド・ズウォティ(PLN)、ハンガリー・フォリント(HUF)、スイス・フラン(CHF)、イギリス・ポンド(GBP)、スウェーデン・クローナ(SEK)、ノルウェー・クローネ(NOK)、カナダ・ドル(CAD)、メキシコ・ペソ(MXN)、ブラジル・レアル(BRL)、アメリカ合衆国・ドル(USD)からなる46通貨ペア(AUD/CHF, AUD/JPY, AUD/NZD, AUD/SGD, AUD/USD, CAD/CHF, CAD/JPY, CHF/JPY, EUR/AUD, EUR/CHF, EUR/CZK, EUR/GBP, EUR/HUF, EUR/JPY, EUR/NOK, EUR/PLN, EUR/SEK, EUR/TRL, EUR/USD, GBP/AUD, GBP/CAD, GBP/CHF, GBP/INR, GBP/JPY, GBP/NZD, GBP/USD, NZD/USD, USD/BRL, USD/CAD, USD/CHF, USD/DKK, USD/HKD, USD/HUF, USD/INR, USD/JPY, USD/KRW, USD/MXN, USD/NOK, USD/PKR, USD/PLN, USD/SEK, USD/SGD, USD/THB, USD/TRL, USD/ZAR)である。

2007年7月16日から20日までの5日間に対して、46種類の通貨ペアに対する $D = 5.0$ とした場合の、インパルス状の行動頻度の急上昇位置の時系列を図2に示す。インパルスが複数の通貨ペアにわたって同期したり、時間を前後し出現することが確認される。これを可視化するために、通貨をノード、通貨ペアを二つの通貨を表現するノードを結ぶリンクとして表現したネットワークに重ね、インパルスが確認される時間だけ太線で描いた図を図3に示す。インパルス状の行動頻度の急上昇が広い通貨にわたり同期して生じることが確認できる。また、大きな同期的インパルス発生の前兆として少数の通貨ペアに対してインパルスが連続的に発生することも確認される。

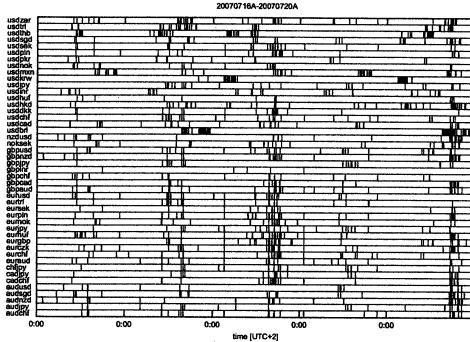


図2 2007年7月16日から2007年7月20日までの時系列を用いて提案アルゴリズムにより計算した行動頻度の急激な増加が認められる時間のグラフ。

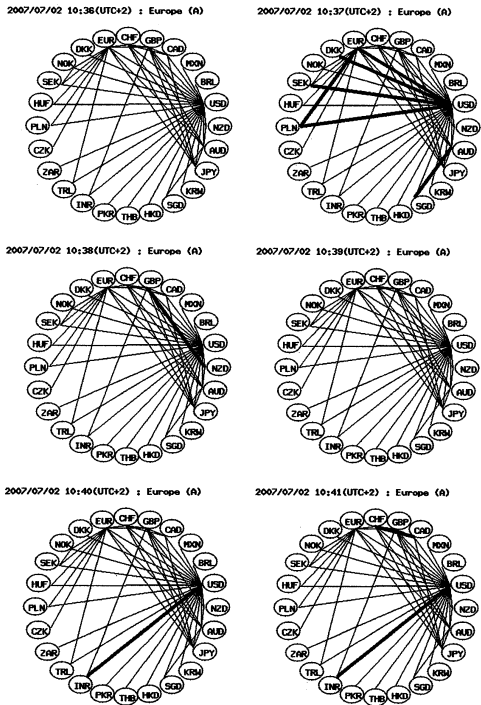


図3 2007年7月2日10時36分(UTC+2)から10時41分(UTC+2)のナップショット。インパルス状の行動頻度の急上昇が複数の通貨ペアにおいて同調して生じていることが確認できる。

5. 同期の定量化

M 種類の通貨ペアのうち j 番目の通貨ペアに対して、インパルス状の注文行動頻度の急上昇が検出されたとき $z_j(k) = 1$, 検出されなかったとき $z_j(k) = 0$

とする。このとき、

$$Q(k) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M z_j(k), \quad (5)$$

は金融市場全体での同期の指標 ($0 \leq Q(k) \leq 1$) となりえる。 $Q(k)$ が大きい場合、多くの通貨ペアに対して同期して注文行動頻度に対してインパルス状の急変動が生じていると解釈することができる。 図4に2007年7月16日から20日までの1週間に対して同期の指標の時系列を示す。 $Q(k)$ が大きな値を取る前後に、 $Q(k)$ の小さな値が続く傾向がある。これは少数の通貨ペアにおいて発生した市場参加者の特異的な行動が、市場全体に波及していく様子および収束していく様子を表わしていると考えられる。

6. スペクトル距離

更に、文献¹³⁾で提案している行動頻度時系列の総合的な類似性である規格化パワースペクトルに対する Jensen-Shannon ダイバージェンスと本提案手法との関係を調べた。 Hanning 窓を用いて局所化した時系列に対して、パワースペクトルをベリオドグラム推定法により推定し、規格化パワースペクトル $p_i(n, t)$ を計算した。 $n = 0$ を取り除いて JS を計算することにより、ティック頻度の平均値に無頓着に時系列間の類似性を評価する。 Jensen-Shannon ダイバージェンスはスペクトラルエントロピー

$$H(p(n, t)) = - \sum_{n=1}^{T-1} p_i(n, t) \log p_i(n, t), \quad (6)$$

を用いて

$$JS(t) = H\left(\sum_{i=1}^M \pi_i p_i(n, t)\right) - \sum_{i=1}^M H(p_i(n, t)), \quad (7)$$

により定義される。ここで $\pi_i > 0$ は重みを意味し $\sum_{i=1}^M \pi_i = 1$ となるように定義する。もし事前に時系列に対する知識がない場合には $\pi_i = 1/M$ とするとよい¹²⁾。 JS の定義より、 $JS(t)$ は常に非負: $JS(t) \geq 0$ であり、 $p_1(n, t) = \dots = p_M(n, t)$ であるときのみ、 $JS(t) = 0$ となる。このことから JS は行動頻度の市場全体における類似性を表わしている。 図4に行動頻度の総合的なスペクトル距離 $JS(t)$ とインパルス状の特異行動の同期指標 $Q(k)$ とを重ねてグラフに示す。 スペクトル距離が小さい場合、パルスの大きな同期が生じている場合が多数確認される。一方でスペクトル距離は大きくてもインパルス状の行動頻度の上昇がわずかに生じている場合も存在している。しかしながら、

総じて、行動頻度の類似性が全体的に高い場合、インパルス上の特異的な行動頻度の急上昇が広く同期して発生している。

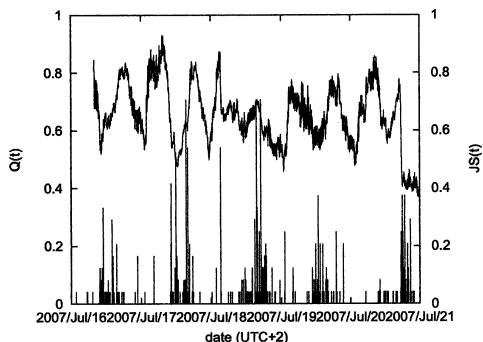


図4 2007年7月16日から2007年7月20日のスペクトル距離の平均値とパルス同期指標。

7. 結 論

注文行動頻度時系列で認められる行動頻度の急上昇現象が外国為替市場全体でどのように同期し、伝播しているのかを調べる目的で、メジアンフィルタを用いたインパルス状変動の抽出方法および、この抽出結果に基づいたネットワークによる可視化および同期の定量化方法を提案した。提案手法を用いることで、注文行動頻度の急激な上昇が、外国為替市場全体にわたりしばしば発生していることを確認した。また、特異的な行動頻度の急上昇の同期は前兆となる小さな変動を伴う傾向があること、および、インパルス状の行動頻度の急上昇の同期が行動頻度間のスペクトル距離の小さい時の生じやすいことを確認した。

このことから、市場参加者の注文行動の類似性(知覚情報と行動の類似性)が高い場合には、一部の市場参加者の行動の変調が市場全体に波及しやすい傾向があると結論付けることができる。

今後の課題として、今回見出された注文行動の特異的な変動の同期と伝播が外国為替市場のレート形成にどのように影響を与えているかを調べる必要がある。また、今回観測された実証的事実を説明可能なエージェントモデルの提案および理論分析が挙げられる。

謝辞 宗像豊哲博士(京都大学)、五十嵐頭人博士(京都大学)には本研究を進めるにあたり、有益な情報を頂いた。ここに謝意を表す。本研究は京都大学 Global COE プログラム「知識循環社会のための情報学教育研究拠点」の財政的援助を受けておこなわれた。

参 考 文 献

- 1) 高安秀樹, 高安美佐子, エコノフィジックス:市場に潜む物理法則, 日本経済新聞社 (2001).
- 2) Dacorogna, M.M., Gencay, R., Müller U., Olsen, R.B., and Pictet O.V., *An Introduction to High-Frequency Finance*, Academic Press, San Diego (2001).
- 3) Hayashi, K., Kaizoji, T., and Pichl, L.: Correlation patterns of NIKKEI index constituents towards a mean-field model”, *Physica A*, Vol. 383 (2007) pp. 16–21.
- 4) Casqueiro, P.X., and Rodrigues, A.J.L.: Neuro-dynamic trading methods, *European Journal of Operational Research*, Vol. 175 (2006) pp. 1400–1412.
- 5) Dempster, M.A.H, and Leemans, V.: An automated FX trading system using adaptive reinforcement learning, *Expert Systems with Applications*, Vol. 30 (2006) pp. 543–552.
- 6) Sato, A.-H., and Oshiro, J.: Quantifying similarity between markets with application to high-frequency financial data, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 75 (2006) p. 084005.
- 7) The data are provided by CQG Inc. <http://www.cqg.com>
- 8) 雛元 孝夫, 棟安 実治, 田口 亮, **非線形デジタル信号処理** 朝倉書店 (1999).
- 9) Tukey, J.W.: Nonlinear (Nonsuperposable) Methods for smoothing data, *Cong. Rec. EASCON’74* (1974) p. 674.
- 10) Asano, A., Itoh, K., and Ichioka, Y.: The nearest neighbor median filter: some deterministic properties and implementations, *Pattern Recognition*, Vol. 23, (1990) pp. 1059–1066.
- 11) Veldhuis, R., and Klabbers, E.: On the computation of the Kullback-Leibler measure for spectral distance, *IEEE transactions on speech and audio processing*, Vol. 11 (2003) pp. 100–103.
- 12) Sato, A.-H.: Frequency analysis of tick quotes on the foreign exchange market and agent-based modeling: A spectral distance approach, *Physica A*, Vol. 382 (2007) pp. 258–270.
- 13) 佐藤 彰洋: 多体 Jensen-Shannon スペクトル距離に基づいた市場参加者行動特性の定量化, *JWEIN2007 講演論文集* (2007) pp. 48–55.