

東京工業大学広報センター長  
大谷 清

## 金融市場のゆらぎのメカニズムを物理学で解明

### 【要点】

- 金融市場の売買注文板情報に2重の層構造を発見
- アインシュタインの揺動散逸関係を市場変動でも確認

### 【概要】

東京工業大学大学院総合理工学研究科知能システム科学専攻の高安美佐子准教授と由良嘉啓大学院生は、チューリッヒ工科大学のディディエ・ソネット教授、ソニーCSL シニアリサーチャー・明治大学客員教授の高安秀樹氏と共同で、ドル円市場の高頻度売買注文板データ（用語1）を分析し、取引価格の周囲の売買注文量の増減に特徴的な2重の層構造があることを発見した。

具体的には、取引価格に近い内側の層が価格変動を駆動する揺動力となり、外側の層は変動を制動する散逸作用を持つことを明らかにした。さらに、アインシュタインが発見した揺動散逸関係（用語2）が非物質系でも成立していることを初めて実証した。

これまで売買注文板データはデータ量が膨大なため解析が難しかったが、この研究により分析の道筋ができたことになる。今後、市場のビッグデータをリアルタイムで解析し、市場の安定性を計測するような技術に応用されることが期待される。

この研究成果は3月7日発行の米物理学会誌「フィジカル・レビュー・レターズ電子版」に掲載された。

### ●研究の背景と意義

市場価格の変動には、予測できないようなランダムな上下変動をする確率的側面と、インフレーションやバブルや暴落のように方向性を持って動く動力的側面があることは経験的に広く知られている。確率的な変動成分に関しては、前世紀中ごろから体系的に記述することができるようになり金融派生商品などの形で広く実務に応用されているが、動力的成分に関し

ては、今世紀に入ってから入手可能になった高頻度市場データの分析とともに理論的な研究が精力的に進められている段階である。

これまでの金融市場の常識では、買い注文と売り注文の総数の差が価格を上下させる原動力であると考えられてきた。本研究では、個々の売買注文を分子のようにみなす物理学的なアナロジーを導入し、膨大な板データを物理現象のように分析する新しいデータ解析方法を開発した。

解析の結果、売り注文と買い注文のそれぞれで、注文板の動きは統計的な性質が異なる内側と外側の2層構造になっており、内側の売買注文の変化は市場価格を駆動する力の役割を持っているのに対し、外側の売買注文は制動力の働きをしていることが発見された（図1）。

ミクロなレベルで駆動力と制動力がほぼ釣り合っていてマクロなレベルでランダムな変動を生み出す現象は、相対性理論で有名な高いインシュタインが20世紀初頭に水中を漂う微粒子に対して定式化し、それ以来、様々な物質で確認され、揺動散逸関係とよばれる現代物理学の一つの柱となっている。

市場変動という物質ではない現象においても、ゆらぎの増幅・抑制メカニズムが物質と同じ数理的構造になっていることを初めてデータから実証したことが、本研究が物理学として高く評価される理由である。

## ●今回の研究内容

高安准教授らは、ドル円の外国為替取引に関する高頻度売買注文板情報を分析した。このデータは、取引レートは千分の1円単位、時間刻みは千分の1秒刻みであり、1週間分だけでも情報量は3ギガバイトにもなる。各瞬間の売買取引板情報は、価格軸上で、スプレッドとよばれる隙間（売り注文と買い注文の価格の差）の下方に買い注文、上方に売り注文が積み上がった形状で表わされ、スプレッドに接した買い注文の上端（最良買値）に売り注文がぶつかること、あるいは、逆に、売り注文の下端（最良売値）に買い注文がぶつかることで取引が成立し、市場価格が確定する。

本研究では、まず、売り注文と買い注文のそれぞれに関して、最良価格からの深さごとに積み上がった注文板の量の変化と市場価格の変化の相関関係を分析した。その結果、ある深さを境にして、板の変動の特性が正反対になっていることが見出された。例えば、価格が上昇するとき、価格の進行方向にある売り注文は、スプレッドに近い内側の領域では減少するのに対し、スプレッドから遠い外側の領域では増加する。ドル円市場の場合には、内側と外側を分ける特徴的な深さは、およそ、百分の2円であった。

このような注文板の増減は、物理的な現象と類似している。例えば、無数の小さな分子に囲まれた粒子がある方向に動く時、粒子のごく近くの分子は粒子との衝突によって押しのけられて密度が減少するが、進行方向少し離れたところでは前方に押し返された分子が集まり、密度が上昇する。このような対応関係を想定することで、スプレッドを仮想的な粒子、売買注文を周囲の分子のようにみなすことができる。このアナロジーは単に直観的に正しいだけでなく、物質の分子と粒子の場合には普遍的に成立する揺動散逸関係が、市場のスプレッドと売買注文という仮想的な粒子と分子の間でも近似的に成り立っていることが確認された。

通常、市場の価格変動は連続的な確率変数によってモデル化されるが、我々は、連続変数による記述の限界も示すことができた。分子と粒子の場合には、粒子の動きを連続変数で記述することの妥当性はクヌーセン数（用語3）とよばれる量で評価する。ドル円市場のデータから見積もったクヌーセン数は0.02程度であり、ぎりぎり連続的な変数による記述が妥当な範囲には入るが、市場の状況によっては、連続変数では現象を記述できない可能性がある

ことも明らかになった。

## ●今後の展開

今世紀に入ってから金融市場の高度情報化が進み、取引はコンピュータネットワークを介して行われるようになった。コンピュータのプログラムが自動的に取引を発注するシステムの導入も増加し、市場の高速化が進んでいるのに対し、蓄積された膨大な市場データを分析する技術は、まだ、十分には開発されていないのが現状である。

今回の研究によって、最もミクロなレベルから価格の変動の仕組みをデータから分析する方法が開発されたことで、様々な応用が期待される。例えば、暴騰や暴落は、外側の領域の注文量が著しく減少して真空状態になることによって市場の変動に対してブレーキが利かなくなった状態において発生する現象である、と理解することができる。

そこで、板情報から市場の制動力の強さを常時観測し、もしも危険なレベルまで弱くなったときには外側の領域の注文量が増加するまでは市場の取引を一時的に停止させるなどの対策をうつことにより、暴騰や暴落に伴う市場の混乱を未然に回避できるような技術が開発されることを期待される。

## 【用語説明】

用語1：売買注文板データ

ドル円市場では、100万ドルを最小単位（1本）として売買されており、市場参加者は希望する売値と買値を本数とともに市場を取りしきるコンピュータサーバーに入力する。同じ価格で売り注文と買い注文がぶつかったとき、その価格で取引が成立し、売りと買いがぶつからない注文はそれぞれの価格に積み上げられる。取引が成立する前にキャンセルされる注文もある。人間が集まって取引をしていた頃には注文ごとに板を積み上げていた慣習から、これらの売買注文を集めた情報は板データとよばれる。

用語2：揺動散逸関係

1905年、アインシュタインは有名な相対性理論の論文の他に、水の中を漂う微粒子の不規則な動きであるブラウン運動の論文も書いている。微粒子は、水分子からの衝突によって運動エネルギーを得て揺動し、また、その運動エネルギーは水分子との衝突によって散逸される。この関係を定式化したものが、揺動散逸関係である。当時、物質が原子や分子から構成されているということは仮説の段階だったが、この論文がきっかけとなって、原子や分子が実在であることが立証された。

用語3：クヌーセン数

無数の小さな分子が飛び回る集団の中に粒子があるとき、粒子と分子が衝突する間隔の平均値を粒子の直径で割った比率としてクヌーセン数は定義される。この数値が0に近い場合には、粒子の運動は滑らかな連続的な変数で記述できるが、分子の密度が低く、クヌーセン数が十分の1程度よりも大きい場合には、個々の分子と粒子の衝突を個別に扱う必要があり、粒子の運動は連続変数では記述できない。

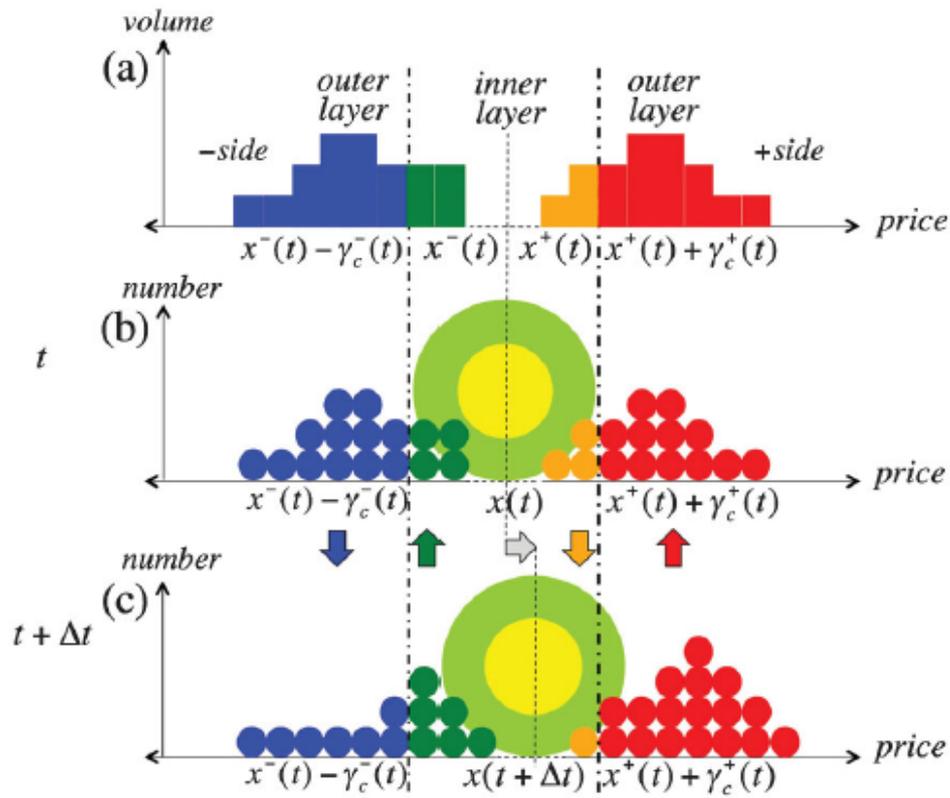


図1 金融市場の売買注文板情報と粒子・分子モデルの関係

【論文情報】

Financial Brownian Particle in the Layered Order-Book Fluid and Fluctuation-Dissipation Relations, Yoshihiro Yura, Hideki Takayasu, Didier Sornette, and Misako Takayasu, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 098703 (2014)  
 DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.098703

【問い合わせ先】

東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻  
 准教授 高安美佐子  
 Email: takayasu@dis.titech.ac.jp  
 TEL: 045-924-5640

【関連 Web ページ】

高安研究室  
<http://www.smp.dis.titech.ac.jp/>

顔 東工大の研究者たち Vol.6 高安美佐子  
<http://www.titech.ac.jp/research/stories/takayasu.html>