

人工市場シミュレーションを用いた 自己資本規制の金融市場に与える影響分析

Effects Analysis of CAR Regulations on Financial Markets using Artificial Market Simulations

平野 正徳*¹ 米納 弘渡*² 和泉 潔*²
Masanori HIRANO Hiroto YONENOH Kiyoshi IZUMI

*¹東京大学工学部 *²東京大学大学院工学系研究科
Faculty of Engineering, The University of Tokyo School of Engineering, The University of Tokyo

Basel regulatory framework, one of CAR (capital adequacy ratio) regulations, is said to make markets destabilized in a previous study. But the previous study included some inappropriate assumptions. So, this study assessed this destabilizing effects with a new model. In my model, FCN agents and 2 kinds of portfolio agents, CAR regulated ones and not regulated ones, were included. Using this model, some simulations were run. As results, the simulations revealed some facts: 1. Asset management using portfolio stabilizes markets and the stabilizing effect are significant if there are a lot of markets included in the portfolio; 2. CAR regulation destabilizes markets and vanish the stabilizing effects of portfolio. In addition, the results of my simulations suggest that CAR regulation does not only raise the chance of price crashes but also depress whole price.

1. はじめに

国際金融システムにおいて、金融機関の連鎖破綻が引き起こす市場不安定化(システミックリスク)を防ぐため、金融機関のリスク管理に関する規制が存在する。[BCBS 96]

バーゼル規制のようなリスク管理を行う銀行等が、株式市場等の資産市場で取引を行う場合、価格変動の大きい時期においては資産リスクが向上し、リスク管理の結果、資産売却を行い、市場を不安定化する可能性がある。[Hermsen 10]

このリスク管理が市場に与える影響について調査している[Yononoh 12]の研究においては、現実の金融市場を反映した人工市場モデルにより、日中の株価変動を考慮したシミュレーションを行なっているが、日中の株価変動に関していくつか考慮されていない点があった。さらに、規制が適用された場合の金融機関エージェントの行動において、簡略化のため、大域的最適解にたどり着くことが難しい行動を行うことがあった。

そこで、本研究においては、ポートフォリオによる資産運用の最適化を図るエージェントが存在する市場における、自己資本(CAR)規制が市場に及ぼす影響について、既存の研究の問題点を解消する新たな人工市場モデルを構成することで、規制が市場の安定性に与える影響を検証することとした。

2. モデル

まず、市場のモデルは、ザラ場(連続ダブルオークション(Continuous Double Auction))とし、銘柄ごとに市場が存在するとし、銘柄 D_i の理論価格(Fundamental Price)は、その対数リターンが平均 $\mu_{D_i} = 400$ 、分散 $(\sigma_{D_i})^2 = (0.001)^2$ に従うような幾何ブラウン運動(ランダムウォーク)になるように設定し、各銘柄間の相関はないものと仮定した。

市場に存在するエージェントは、①標準的なFCNエージェント、②規制なしポートフォリオエージェント、③規制ありポートフォリオエージェントの三種類とした。基本的な初期設定を以下のようにした。

- 各エージェントが最初に持っている株: 全銘柄 50 株ずつ
- 各ポートフォリオエージェントの資産: 8000
- 各ポートフォリオエージェントのレバレッジ: 10

2.1 FCN エージェント

マーケットの価格形成を促す標準的なエージェントとして、FCN エージェントを採用した。

従来の[Yononoh 12]とは異なり、1財を扱うポートフォリオエージェントではなく、予算制約のないFCNエージェントを利用することで、シミュレーションにおいて、綺麗な価格形成が期待できると考えた。

FCN エージェントとは、銘柄 D_i の期待リターン(価格変動率)をファンダメンタル項(Fundamental)、テクニカル項(Chartist)、ノイズ項(Noise)の3つの加重平均として計算をし、売買をするエージェントである。[Chiarella 02][Torii 15]

$$r = \frac{1}{w_F + w_C + w_N} (w_F \cdot F + w_C \cdot C + w_N \cdot N) \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{\tau_r} \ln(p_t/p_t^*) \quad (2)$$

$$C = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \ln\left(\frac{p_{t-i}}{p_{t-i-1}}\right) \quad (3)$$

$$N \sim N(0, \sigma_N) \quad (4)$$

p_t : 市場価格, p_t^* : ファンダメンタル価格, τ_r : 平均回帰速度([50, 150]の区間の一様分布), τ : 過去のどれくらいのチャートを参照するか([100, 200]の区間の一様分布), σ_N : ノイズの正規分布の標準偏差(0.001)

ここで、 $w_F, w_C, w_N \geq 0$ は各項への重みであり、今回は、 $w_F = 10.0, w_C = 1.0, w_N = 10.0$ と設定した。これは、市場の fat tail 性を評価できる尖度が現実合うようにパラメータサーチで決めた。

これらに基づき計算されたリターン r に基づいて、期待価格を $p_{exp} = p_t \cdot \exp(r \cdot \tau_h)$ と計算する。 τ_h は、どれくらい現在のポジションを維持するかというパラメータであり、[100, 200]の区間の一様分布になるように設定した。

連絡先: 〒113-8656 文京区本郷 7-3-1 東京大学工学部システム創成学科 システムデザイン&マネジメントコース
和泉・坂地研究室 平野正徳 HP: <https://mhirano.jp>

この期待価格が現在価格よりも高い時には p_{exp} で 1 株の買い注文を出し、現在価格よりも低い時には p_{exp} で 1 株の売り注文を出すという行動を毎ステップで行う。ただし、最良気配値の方が条件が良い場合はその価格で約定する。

また、このエージェントはあくまで価格形成のための標準的なエージェントであるため、価格の流動性を高めるために、他のエージェントとは異なり、空売り、信用買を無制限に行える。

2.2 規制なしポートフォリオエージェント

規制なしポートフォリオエージェントとは、資産管理をポートフォリオ最適化という形で行うエージェントのことである。[Yonenoh 12] で使用されている複数財取引のリスク管理なしエージェントをベースにして作成した。

このポートフォリオエージェントは全ての銘柄をポートフォリオにしてリスク管理を行いつつ取り扱う。

また、ポートフォリオ保有期間 T_P がそれぞれのエージェントで決まっており、平均、分散が 150 になるような指数分布に従っている。その T_P ごとにポートフォリオを組みなおす。基本的に T_P ごとにしか行動せず、その際の行動は次の様にした。①まだ約定していない注文をキャンセルする。②FCN エージェントと同様に期待価格を計算する。③ポートフォリオを組み直す (再計算)。④再構成したポートフォリオに合わせて現在のポジションとの差分の売買をする。

ここで、ポートフォリオの最適化においては、制約条件を予算制約と空売り禁止制約とし、目的関数は、[Markowitz 52] の平均分散アプローチに基づき、以下のように設定した。

$$EU(\mathbf{x}) = {}^t P_{exp} \mathbf{x} - \frac{1}{2} {}^t \mathbf{x} \Omega \mathbf{x} \quad (5)$$

ただし、ここで、 \mathbf{x} は全銘柄のポジションの行列で、各要素は正の整数のみを取り、 P_{exp} は全銘柄の期待価格行列、 Ω は T の期間の全銘柄間の分散・共分散行列である。この時、目的関数 $EU(\mathbf{x})$ を最大化するような、制約条件を満たす \mathbf{x} が、最適化後のポートフォリオである。

2.3 規制ありポートフォリオエージェント

規制ありポートフォリオエージェントは、2.2 節で述べたエージェントに加え、市場リスク規制導入後のパーセル I [BCBS 96] および修正後パーセル II [BCBS 06] の自己資本比率規制を参考にして作成した。

これらにおける自己資本比率規制は、過去の価格変動率の分布に基づく Value at Risk (VaR) を利用して、リスクを計算することで、今後の資産の損失可能性を自己資本と比較して、規制するものである。

$$(\text{自己資本比率 (CAR)}) = \frac{(\text{自己資本})}{12.5 \times (\text{市場リスク})} \quad (6)$$

$$(\text{市場リスク}) = (\text{時価総額}) \times (1 - \exp(-\text{VaR})) \quad (7)$$

$$(\text{VaR}) = -1.0 \cdot (99\% \text{片側信頼区間}) \cdot \sqrt{T} \cdot \sqrt{\mathbf{x} \Omega \mathbf{x}} \quad (8)$$

ここでいう時価総額はあくまでも、ポートフォリオとして組んでいる株式の分のみである。VaR の計算においては、99% 片側信頼区間を上側に取った時の下側限界を採用し、ルート T 倍法を採用している。[FFR+ 08] \mathbf{x} は全銘柄のポジション行列であり、 Ω は全銘柄間の分散・共分散行列である。さらに、今回は、リスク資産の保有期間 T を 10 に設定し、 Ω を過去、250 ステップの集計とした。これらは、市場リスク規制導入後のパーセル I [BCBS 96] で初めて導入された基準に従っている。

もともと、約 250 営業日のデータを分布に使用し、保有期間は 10 日間とするとされていることに基づいているが、今回は、これを、単純に 250 ステップと 10 ステップとした。これは、資本市場における自己相似性 (フラクタル性) [Masahiro 00][Shozo 97] や、そもそも、ブラウン運動は Fractal Brownian Motion (fBm) のハースト指数 (H) を 1/2 にしたものであること、VaR は全体で時間スケールに依存していないことに基づいている。

これらの計算に基づき、CAR が 0.08 以下になるようにポートフォリオを規制する。

もし、規制に引っかかった場合は、以下のアルゴリズムにより、ポートフォリオを再構成し、CAR を小さくすることとした。基本的な方法としては、ポートフォリオの総額を下げていく (=レバレッジを下げていく)。

1. 現在のポートフォリオ構成 \mathbf{x} に基づいた CAR を計算する。以下、 $CAR(\mathbf{x})$ とする。
2. 目標の規制基準の $CAR=0.08$ との比 R を以下のように定義し、計算する。

$$R = \frac{CAR(\mathbf{x})}{0.08} \quad (9)$$

3. 現在のポートフォリオ構成 \mathbf{x} の期待価格での時価総額を計算する。以下、 $Val(\mathbf{x})$ とする。
4. 次式に基づき、再度ポートフォリオを構成する時の予算制約 B を以下のように定義し、計算する。

$$B = \frac{1}{\frac{R-1}{2} + 1} \cdot Val(\mathbf{x}) \quad (10)$$

5. 予算制約 B のもとで、規制なしポートフォリオエージェント同様にポートフォリオを最適化し、 \mathbf{x} を更新する。
6. この新しい \mathbf{x} が $CAR(\mathbf{x}) \leq 0.08$ を満たしているかチェックする
7. 上記の式を満たしていれば、これを最終的な規制に違反しない最適なポートフォリオのポジションとし、満たしていなければ、1 に戻る。

規制が適用される状況でのエージェントの行動アルゴリズムは [Yonenoh 12] の手法と比べ、より最適化が進むと考えている。そもそも、[Yonenoh 12] ではチェビシェフ距離が 1 になるポジションのなかで最適なものを取っていき、規制に引っかからないところにたどり着くまで繰り返すという手法を使っていたが、これでは、あくまで局所最適に落ちるだけであり、大域的最適にはたどり着けない。さらに、実際に規制に引っかかった時の人の行う対応を考えると、最小単位ずつ売って行くということをしているとは考えにくい。

3. 実験方法

本研究の中心である、CAR 規制が市場に与える影響についての実験を説明する。

以下で説明する全ての実験において、評価する結果としては、[Yonenoh 12] と同様に理論価格 (ファンダメンタル価格) との下への乖離度 $DV_t = \ln(p_t/p_t^*)$ を使った。これに関して、 $DV_t \leq -0.05$ となっているステップ数を N_{DV} と定義した。これは、[Yonenoh 12] と閾値が異なっている。

さらに、全てのパラメータセットにおける実験は10試行ずつ行った。

また、試行ステップは60000ステップとした。

以下で、実際に行った2つの実験を説明する。

3.1 ポートフォリオエージェントの与える影響について

最初に、規制なしポートフォリオエージェントとFCNエージェントのみを使って、ポートフォリオエージェントの市場に与える影響について実験した。

- FCN エージェント数: 10000(固定)
- 規制なしポートフォリオエージェント数
: 0-100(10刻みで変更)
- 銘柄(マーケット)数: 1-10(1刻みで変更)

3.2 規制が与える影響について

次に、ポートフォリオエージェントの合計、つまり、規制なしポートフォリオエージェントと規制ありポートフォリオエージェントの合計を100に固定し、比率を変えて実験した。

- FCN エージェント数: 10000(固定)
- 規制なしポートフォリオエージェント数
: 0-100(10刻みで変更)
- 規制ありポートフォリオエージェント数
: 100 - (規制なしポートフォリオエージェント数)
- 銘柄(マーケット)数: 1-10(1刻みで変更)

4. 結果・議論

4.1 ポートフォリオエージェントの与える影響について

結果のグラフは図1の通りである。

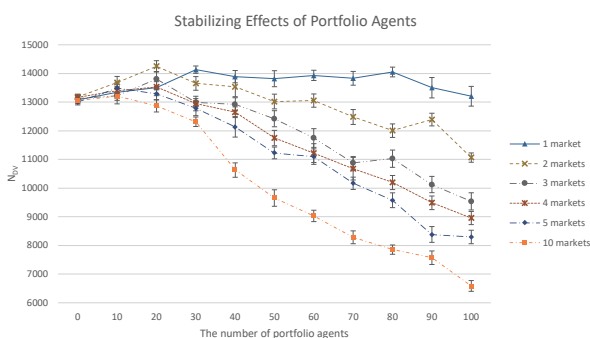


図1: ポートフォリオエージェントが市場に与える影響のグラフ。縦軸が理論価格から閾値以上の下への乖離が起きているステップ数。横軸はポートフォリオエージェントの数。銘柄(マーケット)数ごとにプロットしている。エラーバーは 1σ である。

ポートフォリオエージェントが増えるに従って、理論価格との下への乖離が少なくなっている。これは、ポートフォリオ運用が、市場を安定化させ、効率化させることを示唆している。

また、銘柄(マーケット)数が増えるほど、ポートフォリオエージェントが有効になっていることが確認できる。[Yonenoh 12]の研究においては、銘柄(マーケット)数が1である時と2である時の差は大きかったが、2以上に増えても、大きな違いが確認できなかった。しかし、今回の結果では、3銘柄(マケッ

ト)や4銘柄(マーケット)の場合でも同様に違いが発生しており、さらには10銘柄(マーケット)でも十分に乖離の低下が確認できた。

このような違いが発生したかという理由だが、[Yonenoh 12]では、価格形成をする標準的なエージェントを導入しておらず、1銘柄で[Markowitz 52]の手法でポートフォリオ最適化をするエージェントを導入していた。そのため、どのエージェントも非常に似た動きをしてしまい、ポートフォリオの効果が急激にサチレーションしてしまっていたのだと考えている。

また、FCNエージェントが10000であるのに対して、ポートフォリオエージェントが高々100しか存在しないにも関わらず、十分な影響が確認できていることから、FCNエージェントとポートフォリオエージェント比率の妥当性が確認できる。

4.2 規制が与える影響について

結果のグラフは図2の通りである。

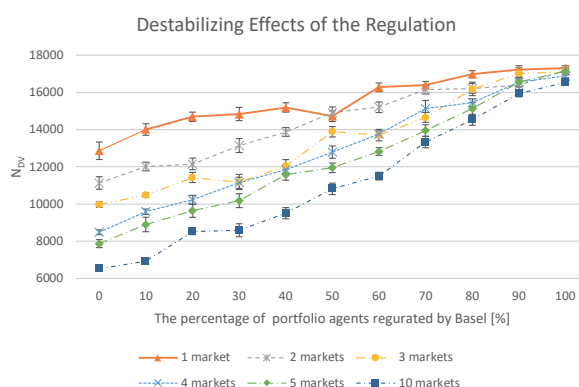


図2: 規制が市場に与える影響のグラフ。縦軸が理論価格から閾値以上の下への乖離が起きているステップ数。横軸がポートフォリオエージェントの中での規制ありエージェントの割合。銘柄(マーケット)数ごとにプロットしている。エラーバーは 1σ である。

規制ありポートフォリオエージェントがポートフォリオエージェントの中で占める割合を上げると、理論価格からの下への乖離が大きくなることが確認できる。

規制ありポートフォリオエージェントがポートフォリオエージェントの中で占める割合を上げて行くと、ポートフォリオエージェントが一切いない状況よりも、市場が不安定化する。

さらに、規制ありポートフォリオエージェントがポートフォリオエージェントの中で占める割合が増えるほど、銘柄(マーケット)数の増加に伴う市場安定性が小さくなっていることが確認できる。

最終的に図2の“The percentage of portfolio agents regulated by Basel”が100%の時においては、ほとんど銘柄(マーケット)数による変化がないことから、規制ありポートフォリオエージェントは、ポートフォリオエージェントが通常持つ、4.1節で明らかにした、ポートフォリオエージェントの市場安定化効果を完全に持っておらず、逆に、市場を不安定化することがわかる。

これがどのようなメカニズムであるのかということを考えると、市場価格が落ち、リスクが上がったような場合に、規制に引っかかり、手元のポジションを下げなければならない、というような現象が発生し、売りが売りを呼ぶような現象が起きていると考えられる。

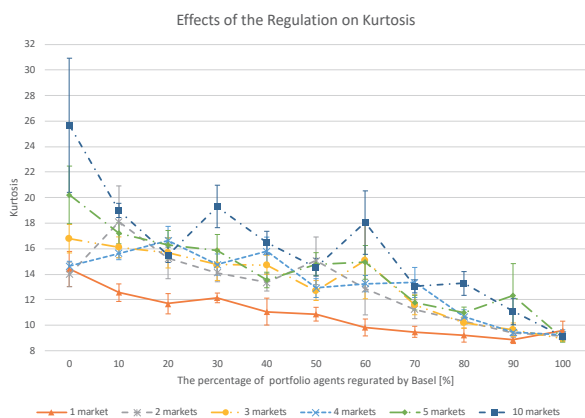


図 3: 規制ありエージェントの割合と尖度の関係。縦軸が尖度、横軸がポートフォリオエージェントの中での規制ありエージェントの割合。銘柄(マーケット)数ごとにプロットしている。エラーバーは 1σ である。

この図 3 は興味深い結果を示唆している。

規制ありポートフォリオエージェントの比率が大きくなるにつれて、尖度が小さくなるのである。これは、言い換えれば、規制ありポートフォリオエージェントの比率が大きくなると、fat tail 性が小さくなるというものである。

理論価格から下への乖離が大きくなるとともに、fat tail 性も小さくなるということは、逆に上への乖離が小さくなっているということを示唆していると考えられる。つまり、規制の導入により、連鎖的に売りが発生し、価格崩壊が起こるという考えは従来あったものの、実際には全体として、価格を押し下げているということが示唆されているのではないだろうか。

これが、どのような現象を示しているのかを考えてみる。VaR を使用している以上、上への価格の変動が増加した場合には、リターンの標準偏差が増加するため、リスク分布の裾野が広がることとなる。これは、VaR を正規分布で計算していることの支障であるが、リスク分布の裾野が広がれば、それは、下落のリスクも増加したことになる。このとき、VaR を利用すると、99%信頼区間における、下落可能性幅も増加する。つまり、リスクが増加し、CAR の分母が小さくなってしまい、CAR は大きくなってしまふ。その結果、市場価格が上昇していても、買い控え、あるいは、売りが発生してしまうのではないだろうか。

尖度と規制ありポートフォリオエージェントの比率の相関係数も、マーケット数毎の平均が、 -0.91 ± 0.033 となっており、かなり強い傾向性が確認できており、影響は否定できない。

これらの結果から、CAR 規制は、市場価格の下落を増加させるだけでなく、市場価格の上昇を抑えてしまい、市場に悪い影響を及ぼしていると考えられる。

5. まとめ

本研究においては、パーゼル規制のような CAR 規制が市場に不安定性を与えると想定し、ポートフォリオ最適化および規制がザラ場(連続ダブルオークション)方式の市場に与える影響について調査した。その結果、ポートフォリオ最適化に基づいた資産運用は市場を安定化させ、銘柄(マーケット)数が増えるほどその市場安定化効果は大きくなる。さらに、CAR 規制の存在は、市場に不安定性をもたらす、ポートフォリオの市

場安定化効果をなくしていくということがわかった。これらの結果は、どれも、[Yonenoh 12] の研究よりも明確な結果が出ており、今回のモデルの良さが表れていた。

さらに、CAR 規制の存在は、市場価格を押し下げ、価格上昇も抑えてしまうということが示唆された。これはこれまでになかった視点であり、かなりの強い傾向性を確認できている。これについては、さらに、この論を裏付ける検証をすべきだと考えている。

これらの結果から、複数の側面で CAR 規制は市場に悪影響を及ぼしている、と考えられる。

また、今回は、従来のパーゼル II までの規制に従ってモデルを組んだが、パーゼル III に対応したモデルを作成して、最新の規制がより良いのかどうかの検証をすべきだと考えている。

参考文献

- [BCBS 06] Basel Committee on Banking Supervision : International Convergence of Capital Measurement and Capital Standards, <http://www.bis.org/publ/bcbs128.pdf> (2006)
- [BCBS 96] Basle Committee on Banking Supervision : Amendment to the Capital Accord to incorporate market risks, <https://www.bis.org/publ/bcbs24.pdf> (1996)
- [Chiarella 02] Chiarella, C. and Iori, G.: A simulation analysis of the microstructure of double auction markets, *Quantitative Finance*, Vol. 2, No. 5, pp. 346-353 (2002)
- [FFR+ 08] FFR+ : VaR の計測と検証, http://www.ffr-plus.jp/material/pdf/0006/risk_meter_quantification_03.pdf (2008)
- [Hermsen 10] Hermsen, O.: Does Basel II destabilize financial markets? An agent-based financial market perspective, *The European Physical Journal B*, Vol. 73, No. 1, pp. 29-40 (2010)
- [Markowitz 52] Markowitz, H.: PORTFOLIO SELECTION, *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1, pp. 77-91 (1952)
- [Masahiro 00] Masahiro, K.: 価格変動のフラクタル性への統計物理的アプローチ, Bachelor Thesis, The University of Tokyo (2000)
- [Shozo 97] Shozo, T., Yoshikazu, I., and Wataru, T.: 自己相似性を用いたフラクタル時系列の予測とその応用, 情報処理学会研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS), Vol. 1997, No. 95(1997-MPS-015), pp. 33-38 (1997)
- [Torii 15] Torii, T., Izumi, K., and Yamada, K.: Shock transfer by arbitrage trading: analysis using multi-asset artificial market, *Evolutionary and Institutional Economics Review*, Vol. 12, No. 2, pp. 395-412 (2015)
- [Yonenoh 12] Yonenoh, H. and Izumi, K.: 人工市場を用いた自己資本比率規制に基づく市場リスク管理が複数資産市場に与える影響の分析, *JPX Working Paper*, Vol. 18 (2012)