

## 多体シミュレーションにおける同期現象と実社会での意思決定

田中 美栄子

宮崎大学工学部

〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1

E-mail: Mieko@cs.miyazaki-u.ac.jp

あらまし マルチエージェントモデルのシミュレーションが社会システムや生物システムの研究のなかで、様々の批判に晒されつつも、広く行われている。この問題点を探り方法論を確立させるためには具体的な試行を重ねながら知見を得ていく必要がある。ここではポジティブフィードバックモデルを考察し、そこから出てくる幾つかの有用な結果について述べた。特にインフレ傾向とデフレ傾向に対応する二つのパラメータの空間で二つの相に対応する価格時系列が現れ、その 2 相の境界で現実の為替データに近い統計性が表れることから、ふつう均衡価格といわれるものが実は揺らぎの大きい転移点に対応するという予想が具現している例と考えられることを示した。また間欠振動相が協力現象を伴う周期振動に移行する場合についてシミュレーション結果を考察した。

キーワード マルチエージェント、ポジティブフィードバック、均衡価格、間欠振動、協力現象、相転移

## Synchronization Observed in Multi-agent Model Simulations and the Real World Decision Makings

Mieko TANAKA-YAMAWAKI

Faculty of Engineering, Miyazaki University

1-1, Gakuen-kibanadai-nishi, Miyazaki, 889-2192 Japan

E-mail: [Mieko@cs.miyazaki-u](mailto:Mieko@cs.miyazaki-u)

**Abstract** Multi-agent models are widely used as a tool for studying social and biological systems under various kinds of objections. It is necessary to accumulate experiences in order to clarify those questions. We consider in this paper a model with positive-feedback decision rules and discuss on some useful outcomes from this model. The average price time series belong to two categories corresponding to two distinct phases in the parameter space (a,b), where a corresponds to the deflation parameter and b corresponds to an inflation parameter. Near the boundary of the two phases the price fluctuation has a statistical property very similar to the real foreign currency exchange data. We identify this observation to an evidence to show that the competitively -determined price that is normally explained as the equilibrium price is in fact corresponds to a critical region with large fluctuation. We have also considered a periodic oscillation that appears after intermittent motions with naturally-generated cooperative motion.

**Key words** Multi-agent, Positive feedback, Equilibrium price, Intermittent oscillation, Cooperative phenomena, Phase transition

## 1. はじめに

コンピュータの高速化により、マルチエージェントモデルシミュレーションがいろいろな部門で行われているが統一した方法論がなく場当たりのになりがちである。また、現実から程遠い単純化が行われているという批判もよく聞かれる。これらの問題について考察しつつ、一つの面白い結果を導くモデルについて考えたい。

## 2. マルチエージェント・シミュレーションの功罪

社会系、生物系、等の多自由度系の本質的な自由度のみを取り出してコンピュータの中に仕込み、シミュレーションを行う研究が盛んである。これは主として、仕込まれた自由のどのような役割を果たしているのかをなるべく詳しく定量的に研究しようというのがその目的である。すべての自由度を入れ込むことは不可能だし、また、多すぎる自由度を入れた場合、いくらでもパラメータをチューンすることができて何を調べているのかわからなくなってしまう。そうかと言って何が本質的で何がそうでないか、またいくつまで入れるのかはプログラマの主観によっており、客観的な基準が見出しにくい。マルチエージェントモデルを信用できない、とする見方はおおむねこのあたりの不確定さに依拠している。この立場に立つ人は、マルチエージェントモデルで何々がわかった、という話にはことごとく、「その結論の客観性は何処で保証されているのか」という疑問を返すことになり、「仮定を少しだけ修正することによっていくらでも異なる結論が導き出せるはずであるから全体が無意味である」という批判に繋がって行く。しかし自分で何かモデルを作ってコンピュータを走らせてみるならば、出発点にはなかった思いもよらない結果が出たりして、それまで数式をひねくってやっていたことがことごとくトートロジーに違いないと思えるほど様々の新しい知見を得たりするので、「創造的な仕事というのは数式をひねくっては出ない」と思えてくるものである。よって、マルチエージェントシミュレーションからは様々の面白い現象を見出すことができる一方、それらを導出するのに用いた仮定がその現象を記述するのに必要な要素を過不足なく含んでいるかどうかは多分に主観に依存してしまうことを避けられない。しかし一般にはすべての要素を入れようとせずに、KISS 原理 (Keep It Simple and Stupid) を重んじるのが良いとされている。

## 3. 理学と工学のあいだ

理学と工学は近いようで遠く、遠いようで近い。理学は自然に存在するものを観察することにより、その従う規則を発見しようとする営みであるが、工学はあくまで人工的にものを作ることを主眼とする。しかし自然のルールに反したことをやるとうまく行かないから自然の摂理を学んでそれを利用してものを作ろうとするのである。マルチエージェント

モデルは人間を想定した agent の集まりとしての社会システムであるため、「主観的な意思決定をする個体」という属性を入れ込まなければならない、という思い込みで左右されやすい。この結果、社会システムのシミュレーションは客観性に乏しく信用できない、という堂々巡りの議論が生じやすい。一方モデルビルダー側の論理は、例えばセルオートマトンにおいてありうる限りのルールを次々に仮定して、そのそれぞれについてシミュレーションを行い、がっかりするような結果と、思いもよらない面白い結果を導出するという、両面があったことを頭において、大抵は非常に単純化したモデルを作り、仮定には含まれなかった複雑、あるいは意外な結果が創出されたときに「面白い結果が出た」と喜ぶ。すなわちこの立場からは式変形に終始する、あるいは自然のコピーを再現しようとする理学はトートロジーでしかなく、またその逆の立場から見ると、客観性のない工学は信用できない、ということになる。

#### 4. 複雑系とは何か

複雑系研究にはシステム科学の考えが根本にあり、Everything depends on everything else、つまりどの要素もそれ以外の要素と密接にかかわっている、という事実を前面に置いた考え方が基本となっているが、前述のように、ここでいう要素数はできるだけ小さく押さえないと何をやっているのかが見えにくいし、一方では要素数が有限だと必ず何か重要な要素を考え落としているという批判を免れない。後者はしばしば「複雑系と言いながら単純なものしか考えていないではないか」という揶揄になって表現されたりしている。また、多体系は厳密に解けないことが殆どであるから、「どんな結論でも引き出せる怪しい話」、という批判も常套手段として用いられる。

#### 5. ポジティブフィードバックモデル

以下ではポジティブフィードバック意思決定を仮定した、一つの単純な経済システムのモデルとその結果を紹介する [1]。個体数は 100 とする。10 では少なすぎてシステムがすぐ壊れるし、1000 では大きすぎて計算時間がかかり過ぎるためその中間を取るのである。

各個体は初期値として同一の量の商品と金を持っているとする。商品は 1 種類しかなく、いくらでも分割可能で、消費も生産もされずただ取引だけが行われるものとする。商品と金でなく、2 種類の貨幣と思ってもよい。各個体は売り手であると同時に買い手でもあり、売り手としては各時刻ごとに価格を設定し、買い手としてはやはり各時刻ごとに自己資産の中からよその商品を買うための予算を設定する。このとき商品と金（あるいは貨幣 A と B）はそれぞれ独立に保存する。初期価格は皆同じとしておく。このような設定で取引は次のように行われる。

各個体  $i$  は時刻  $t$  で商品を  $g_i(t)$  という量と、金を  $c_i(t)$  という量だけ保有しており、売

り手として価格  $p_i(t)$  と予算  $b_i(t)$  という二つの情報を持っている。この情報は時刻  $t$  ごとに前回の取引時刻  $t-1$  での取引状況と二つのパラメータ  $(a,b)$  依存して次のように修正されることになる。  $a$  と  $b$  は正の定数とする。

前時刻  $t-1$  で自分の商品が売れなかったときは価格を下げる： $p_i(t) = p_i(t-1)/(1+a)$

前時刻  $t-1$  で自分の商品が売れたときは価格を上げる： $p_i(t) = p_i(t-1)(1+a)$

また、売るべき商品がなくて売れなかったなら価格のせいではないから、

$$p_i(t) = p_i(t-1)$$

予算  $b_i(t)$  のほうも同じルールで増減するとする。

更にこの予算  $b_i(t)$  は次のように使われるとする。

予算を使う  $i$  番目の個体はランダム順に選ばれ、 $b_i(t)$  を使って、一番安い値をつけた  $j$  番目の個体から商品を買う。それで  $b_i(t)$  を使い切れれば次の  $i$  番目の個体に買い手となる順を譲る。逆に個体  $j$  から商品をすべて買ってはまだ予算がある場合は次に安い個体  $j'$  から商品を買う。予算がなくなるまで次々と安いところから順に買いつづける。このようにして 100 個体全員が予算を使い切るか、全員が手持ちの商品を売り尽くすかしたところで時刻  $t$  の取引は終わる。取引が終了するまで買った商品をその時刻のうちにすぐに売り出すことはしない。これを  $t=1$  から始めて  $t=10000$ 、あるいは  $t=100000$ 、くらいまで繰り返す。モデルのパラメータは  $(a,b,N)$  の 3 つである。ここで  $a$  は価格の下げ幅で、これが大きいとデフレ傾向となるのでデフレパラメータ、 $b$  は価格の上げ幅で、これが大きいとインフレ傾向となるのでインフレパラメータとみなすことができる。 $N$  は個体数である。

$N=100$  と固定し、 $a$  と  $b$  は 0.1 以下の範囲で幅 0.01 のメッシュにとる。各時刻での、全

個体にわたる平均価格  $P(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t)/N$  を時系列として出力する。

## 6. 二つの相とその境界での相転移

価格時系列  $P(t)$  は二つのパターンに分かれ、それぞれはパラメータ空間  $(a,b)$  の二つの領域に対応する (図 1)。  $b < a$  では  $N=100$  の個体全員が参加しながら弱いカオスの性質を持った振動を続ける。振幅は途中で変化するがこれは低周波がだんだん欠落して行くだけで大勢に影響はない (図 2 (a))。一方、  $a < b$  では間欠性を持った振動が特徴で (図 3 (a))、長いあいだシミュレーションを続けるうちに当初  $N=100$  であった個体は次第に破産して脱落し、  $t$  = 数万以上で完全周期が出現する。この場合の殆どに同期現象が見られる。例えば図 5 (b) に示すのは図 3 (a) の時系列の  $t$  を非常に大きくしたところであるが、脱落する個体が増えて最後に 12 個体残り、2 個体ずつが連動して同一の運動をする 6 つのグループとなり、完全に周期的な運動に陥る (図 5 (b))。図 5 (a) にこの現象が起きる直前の過渡期の平均価格時系列を示し、図 5 (b) には 6 グループそれぞれの価格の動きを分離して図示した。また、図 2 と図 3 の (b) はそれぞれの時系列 (a) の  $\Delta t=1$  ごとにとった増分の頻度分布を規格化して

確率分布に直したものであるが、弱カオス域の図2では正規分布が最適関数となる。これに対し間欠域に対応する図3では指数 1.1 のレビ分布、すなわちコーシー分布が最適関数となる。また、図4(a)(b)は境界領域での価格時系列と時系列(a)の  $\Delta t=1$  ごとにとった増分の頻度分布を規格化して確率分布に直したものを示す。境界領域で指数  $\alpha=1.7$  程度のレビ分布でフィットできることがわかる。これは図6に示す、為替の実データの増分の頻度分布と一致し [2]、現実の価格変動が固定点でなく、相転移点に対応するはずだという予想 [3] の一つの証左と見ることができる。

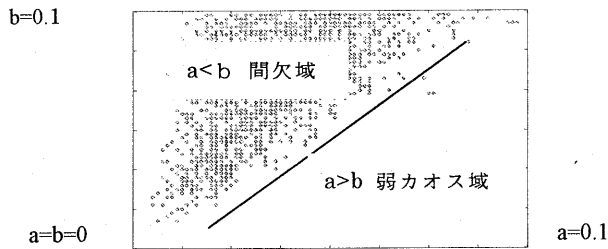


図 1. (a,b)面における、平均価格変動パターンの二つの相。点は間欠的振動の起きる場所を表し、点のない所が弱カオス領域である。この二つの相の境界は  $a=b$  の対角線にほぼ一致する。

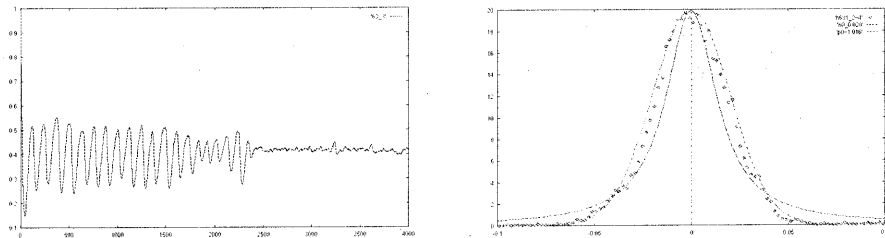


図2(a)(b) 弱カオス領域 ( $a>b$ ) では変位のヒストグラムは正規分布  $N(0, 0.02)$  になる。図は  $t=20000-40000$  の部分、パラメータは  $N=100, a=0.06, b=0.03$ 。

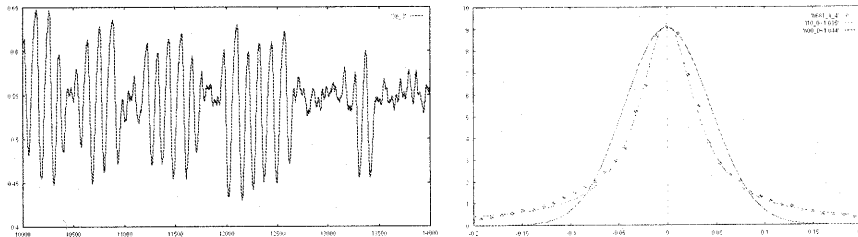


図3(a)(b) 間欠領域 ( $a < b$ ) では変位のヒストグラムは Lévy 分布  $L(1, 0.035)$  になる。  
 図は  $t=1-40000$  の部分、パラメータは  $N=100, a=0.06, b=0.08$ .

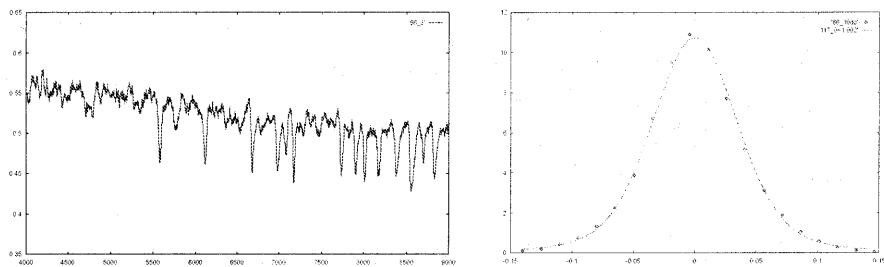


図4(a)(b) 二つの相の境界領域  $N=100, a=0.06, b=0.06$  のときの価格時系列  $t=1-100000$  は Lévy 分布  $L(\alpha=1.7, \beta=0.002)$ .

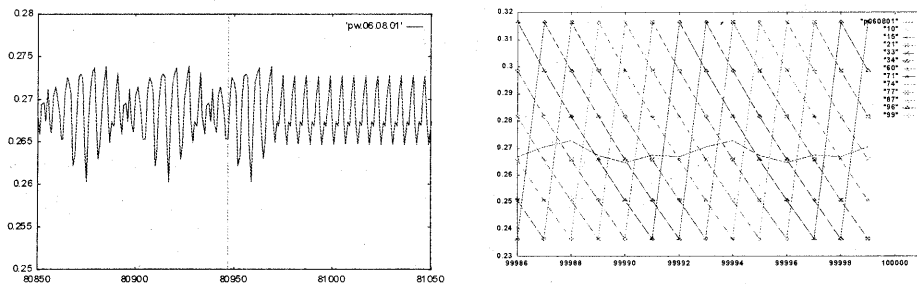


図5(a)は図4(a)の  $t=81000$  前後の様子を示す。次第に個体数が減り同期が起こっている。  
 (b)は残った12個体が2個ずつ6グループとなって完全周期運動する様子。

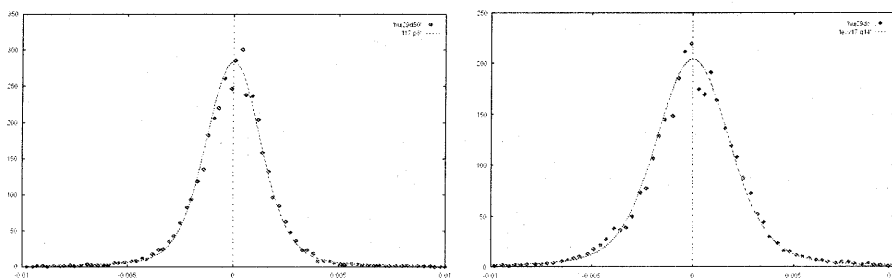


図6 現実の為替 TICK データは  $\alpha=1.7$  の Lévy 分布  $L(\alpha=1.7, \beta=0.000008, \Delta t=50)$  (左),  $\alpha=1.7, \beta=0.000014 \Delta t=100$  (右), データは1998年9月の2.9万点. 図4(b)と同じ指数  $\alpha$  がフィットする。

同期現象は図4に示した例だけでなく、間欠相の中であれば色々なパラメータ値に対して現れる。Ghashghaieらは為替データの価格変動が乱流の速度分布と似た性質を持つことをモーメントのスケーリング則を用いて示し、共通する性質として為替市場における情報流（乱流の場合はエネルギー流）のカスケード性によるものとする見解を示したが[4]、このような類推を拡張すれば、ここで見られる同期現象は社会現象のあちこちに散見できる。例えば破産が相次いで社会が危機的状況になったときに個体同士の協力が起き始めるのは良く見られる現象である。相補的な協力というよりはただ右へ習えをしている点も現実世界に良く見られる例である。

## 5. まとめ

マルチエージェントモデルについてしばしば聞かれる批判に対し、何が問題なのかを考察したのち、ポジティブフィードバックに基づくマルチエージェントモデルのシミュレーションから生成される価格時系列がパラメータ空間(a,b)で二つの相に分かれることと、それぞれの価格変動分布が、弱いカオスの相においては正規分布に、間欠性をもつ相においては $\alpha = 1$ から1.1のLévy分布になり、その二つの相の境界付近では $\alpha = 1.7$ 程度のLévy分布になることを示し、その境界領域での統計分布が為替の価格変動のそれと同じ分布になることを示した。これは現実の価格が相転移点にあるという予想に対して一つの証拠を与えるものと思われる。また、間欠性を持つ相では次第に取引から脱落する個体が増えて寡占状況が生まれるが、このとき一般に同期現象を伴い、複数の個体が一つの自由度のように行動する現象について考察した。

## 謝辞

この研究にあたっては文部科学省科学研究費一般C（課題番号10680361）の補助を受けています。また、総合研究大学院大学教育研究交流センター・グループ研究「新分野の開拓」小グループ「経済学」研究会を通しての活動に多くを負っています。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] Mieko Tanaka-Yamawaki, Information, Vol.4, pp.179-185, 2001.
- [2] Mieko Tanaka-Yamawaki, pp.135-142, "Empirical Science of Financial Fluctuations: The advent of Econophysics, 2002.
- [3] 高安秀樹「経済物理学」日本物理学会誌, 1999年1月号
- [4] S. Ghashghaie et. al., "Turbulent cascades in foreign exchange markets". Nature, 381, pp.767-770, 1996.