

マルチエージェント・シミュレーションを用いた エージェント行動とその影響分析*

松本裕介**

<要約>

マルチエージェント・シミュレーションが広く普及し、経済学の分野でも取り入れられるようになった。この手法の特徴は、自律的な意思決定主体の行動や相互作用によって、マクロな創発的現象を説明しようとする点である。

バブル崩壊後の日本で発生した長期にわたるデフレの原因として銀行による貸し渋りや、消費者の安さを第一に考える購買嗜好への変化などが挙げられる。そこで本論文ではマルチエージェント・シミュレーションを用いて経済主体を消費者、政府、銀行、企業とし、主に消費者の安さを第一に考える購買嗜好と、企業—銀行間の結びつき度合いがマクロ変数に及ぼす変化を研究対象とした。

分析の結果、企業—銀行間の繋がり度合いが弱いほどマクロ変数の変化幅を大きくし、また繋がり度合いが強いほど企業の存続に影響を及ぼすことがわかった。加えて、銀行に関して、企業—銀行間の結びつきが弱いほど銀行の倒産件数が多くなるのに対して、生き残った銀行にはより一層資産が集まっていることが示された。

<キーワード>

マルチエージェントシステム, 企業行動, 消費者行動, 銀行行動

* 今回の論文の執筆にあたって、寺西勇生准教授(慶應義塾大学商学部)から数々の貴重なコメントを頂いた。また研究を進めていく中で、寺西勇生研究会のメンバー、邑上裕介(東京大学大学院工学系研究科)から有益なコメントを頂いた。ここに記して感謝を申し上げたい。

** 松本裕介 慶應義塾大学商学部商学科 E-mail:yusukem-aichi@keio.jp

1. はじめに

経済学の歴史において、コンピュータ技術を駆使して、複雑な現象に迫るといふ動きを見られるようになったのは、それほど古くない。経済学の歴史は大きく3つに分けることができる。経済学の第1期は古典派経済学であり、主要な方法は概念的考察を基に文学的に記述するものであった。第2期は新古典派経済学やケインズ経済学であり、それらの主要な方法は数学の利用だった。そして第3期はコンピュータ技術を駆使して、数学的記述の難しい現象に迫ろうとするものであり、シミュレーションが主な方法となっている。第2期の経済学では、数学を用いることで論理的緻密さを生みだし、また最適化が最も良いとされ、それに向けて全てが調整されうるといふ前提に立っている。例えば、消費者の行動を「予算制約のもとでの効用最大化」とし、生産者は収穫逓減に直面すると仮定している。このような仮定は非現実であると、数多く非難され、ゲーム理論やミクロ的基礎づけなどを行うことで改良を加えていった。それと並行してマルチエージェント・シミュレーションは、コンピュータ技術の発達により、先ほどの問題に対する突破口を作り出そうとしている。

コンピュータ技術を用いるマルチエージェント・シミュレーションの特徴は、減少の中に存在する様々な要因をエージェントとして注目し、各エージェントの行動ルールと相互作用によって、全体としてどんな現象が生じるのかを説明しようとする点にある。経済学において、従来までのモデルには組み込むことのできない要素が注目を浴びることがある。例えば、西崎・上野・田中(2011)は、現実の経済において、その時々民間固有の望ましい物価の在り方に関する考え方、いわば「物価観」が大きく影響を与えているも考えられると述べている。このように、従来のモデルでは組み込むことのできなかった

バブル崩壊後の日本ではデフレが発生し、長期間にわたり継続している。その原因として、銀行による貸し渋り、消費者の消費嗜好の変化などが挙げられる。消費者は、「流通革命」と呼ばれる現象に加え、経済の停滞と先行きの不安がある環境下で、消費活動の中に有る無駄を削ぎはじめ、「やすくていいもの」、「レンタルでいい」といった考えで自らの購買行動を抑制し始めた。(小村) これらのような銀行行動や消費者行動が市場に対してどれくらいのインパクトを持つのかを分析するのに、従来までの経済モデルでは困難である。そこで、各自律的経済主体の行動・相互作用から創発的現象を説明しようとするマルチエージェント・シミュレーションを用い、銀行の行動や消費者の行動を取り上げ、それらの行動が市場にどれだけの変化をもたらすことができるのかを考えてみたい。

本論文の目的は、各エージェントの行動、特に消費者の行動と企業—銀行間の結びつき度合いが

市場にどのような影響をもたらすのかをシミュレーションすることである。本論文の特徴は、マルチエージェントモデルを採用した点である。消費者、企業、銀行の各エージェントがそれぞれ現実に近い行動をすることで、市場に与える変化を考察することができた。

最後に本論文の構成を簡単に記述する。まず、第2章でマルチエージェント・シミュレーションについて紹介する。第3章でシミュレーションを行う際のモデルについて解説する。第4章では、シミュレーションを行う上で必要なパラメータ(初期値)の設定を行う。第5章では各エージェントの行動と企業—銀行間の結びつき度合いの変化により市場がどのように変化するのかをシミュレーションする。そして、第6章では、本論文のまとめと課題について述べる。

2. マルチエージェント・シミュレーション

社会科学、とりわけ経済学で用いられる手法は、主に理論的アプローチと統計的アプローチの2つがある。

理論的アプローチの代表として経済理論がある。しかし、需給関係の一般均衡の概念や、合理的期待仮説などの人間は合理的な生き物とする仮定は現実感に乏しい。それ故に、市場現象の説明力や、現実への応用可能性などの観点から、新しいモデル構築の必要性が増している。

統計的アプローチとしてはマクロ計量モデルがある。これは過去のマクロ経済指標のデータを基にしてマクロ指標間を線型方程式に立式化し、それらの法的式から成る連立方程式を解くことにより、マクロ変数間の関係を明らかにしようとするものである。時代を経るごとに変数や方程式の規模は大きくなったものの、予測の精度は上がらず、オイルショックや1990年における資産価格パブル、2008年の世界金融危機など構造変化時には対応できず、また見抜くことができなかった。

また理論的アプローチと統計的アプローチの両者を組み合わせたものとして、ミクロ的基礎付けをしたDSGEモデルがある。これは、代表的な消費者や企業のミクロ的行動からマクロな変数を表す式を構築し、その式の中で仮定されているパラメータの値を、マクロ変数間の関係の理論値と統計的観察が一致するようにカリブレーションにより決定するというものである。しかしDSGEモデルでは、意思決定主体の多様性を無視してモデル式を構築するため、パラメータの値を設定する際に恣意性が発生する。すなわち、保証のないモデル式に実データをいれるため、複雑な経済システムを記述するのには限界がある。

上記のDSGEモデルやマクロ計量モデルは、観察対象となる現象全体の構造そのものをモデル化しようとするトップダウンアプローチによる手法である。一方、マルチエージェント・シミュレーションは上記の両方のアプローチと異なっている。

エージェントベースによる社会経済システムへのアプローチ、すなわちマルチエージェント・シ

ミュレーションの最大の特徴は、自律的な意思決定主体の行動と相互作用をモデル化して人工社会モデルをコンピュータ上に再現し、ボトムアップアプローチによるマクロな創発的現象を説明しようとする点にある。従来までマクロ現象は、大きな構造変化の背景には大きな経済的变化存在すると考え、上記のようなアプローチを採用してきた。しかしマルチエージェント・シミュレーションは、意思決定主体の行動とその相互作用がつもり重なり、時間を経て内部構造に変化がある水準を超えることで発生すると考えており、従来のアプローチと大きく異なる。このシミュレーションの利点は、マクロ的な仮定を一切置かず、意思決定主体にミクロ的行動と状態変数を仮定することで経済社会モデルを構築、マクロ現象を創発できることである。

最後にシミュレータに関して、本研究におけるシミュレーションは、マルチエージェント・シミュレーター“*artiso academic*”を利用し実装した。なお、同シミュレーションに際し、株式会社構造計画研究所が提供する「教育目的による無償貸与サービス」を利用した。

3. モデル

(1) モデルの説明

本論文ではDelli Gatti、鈴木、chenのモデルを基に、MASを構築する。本論文におけるモデルは、消費者・企業・銀行・政府から構成されている。消費者は生産者の生産した製品を購入することで効用を得る。企業、銀行は各々バランスシートを持ち、企業はつながりを持つ銀行と、銀行は企業—銀行間と銀行間での貸借をおこなう。政府は消費者や企業、銀行に対して課税をするとともに、消費者に対して補助金を付与する。これは、今回のモデルでは労働市場を考えていないため、給与の代替として、マネーサプライの流れを止めておくための措置である。

全体のモデル図は(表12)に示す通りである。

(2) 消費者エージェント

消費者エージェント x は消費量の関数である効用関数を最大化するように行動する。その際、消費者エージェントは、製品の購買に当たり、製品の価格のみを考慮するものとする。そしてそれぞれの消費者エージェントは、ステップごとに一定範囲内の自分の周りを見渡して、最も価格が低い製品を購入する。

また消費者エージェントは毎ステップごとにおいて、製品購入後かつ政府からの補助金受け取り後の所持金の一定額を、銀行 B 行のうちいずれかの銀行に貯金する。そして一定割合の利息を所持金に加えたものを、ステップ t における最終的な所持金とする。

(3) 企業エージェント

ステップ t における企業のバランスシートは、自己資本 $A_{i,t}$ と負債 $L_{i,t}$ から構成され、両者を合計したものを資産 $K_{i,t}$ とする。企業 N 社は各ステップにおいて、バランスシートを基に生産し自社の資産規模を拡大する。すなわちステップ t における生産関数 $Y_{i,t}$ は生産係数 φ を用いて以下のように表す。

$$Y_{i,t} = \varphi K_{i,t}$$

ただし生産係数 φ は企業 N 社で同様の値とする。

企業エージェントは、以下のような関係を満たす自社製品価格を持つ。

$$u_{i,t} = \frac{p_{i,t}}{P_t}$$

ここで P_t は市場価格、 $u_{i,t}$ は市場価格に対する i 番目の企業の相対製品価格を表している。

また企業がステップ t において銀行に返済するローンの総額 $L_{i,t}$ は以下のように表す。

$$L_{i,t} = \frac{1}{r} \sum_{x=t-\tau}^{t-1} (1+r) l_{i,t}$$

$$l_{i,t} = \sum_{y=1}^j l_{i,t}^y$$

r はマークアップ率を示し、利子率 r の関数である。また $l_{i,t}$ は x 期に借りたローンの総額、 $l_{i,t}^y$ は x 期に銀行 y から借りたローンを表す。

消費者エージェントと企業エージェント、それぞれのルールより、企業エージェント i のステップ t における収益 $\pi_{i,t}$ は以下のように表す。

$$\pi_{i,t} = p_{i,t} Z_{i,t} - L_{i,t}$$

$Z_{i,t}$ は、消費者エージェントのルールを基に購入された製品数を表し、 $Y_{i,t} \geq Z_{i,t}$ の関係が成立する。そして、次のステップの企業エージェント i の自己資本は $A_{i,t+1} = A_{i,t} + \pi_{i,t}$ で得られ、 $A_{i,t+1} \leq 0$ の企業は倒産したものとみなす。このとき、借入している銀行に対して、残っているローンの0.1~0.9倍したものが焦げ付いたローンとし、その分を銀行の自己資本の損失とする。企業が倒産した場合は、新たな企業が初期値のパラメータのもとで再度生まれるものとする。

(4) 銀行エージェント

銀行 B 行は、各ステップにおいて、バランスシートを基に繋がりのある企業または進行に貸し出しを行い、その利子から利益を得ることで自身の資産規模を拡大していく。

ステップ t における j 番目の銀行のバランスシートは、自己資本 $E_{j,t}$ と預金 $D_{j,t}$ から構成される。このとき、銀行 j が貸出可能な金額 $S_{j,t}$ は係数 α を用いて以下のように表す。

$$S_{j,t} = \frac{E_{j,t-1}}{\alpha}$$

銀行 j は企業 i に資金を貸し出す際に、企業 i が成長に最適な資産 $K_{i,t}^*$ を求める。そして $K_{i,t}^*$ は以下のような式で与えられる。

$$K_{i,t}^* = \frac{\varphi}{2c\varphi(\lambda r_{i,t}^j + (1-\lambda)l_{i,t})} + \frac{c\varphi A_{i,t}}{2c(\lambda r_{i,t}^j + (1-\lambda)l_{i,t})}$$

ここで c, λ は係数、 $r_{i,t}^j$ はステップ t において企業 i に融資したローン $L_{i,t}$ に対する利子率を表し、

$$r_{i,t}^j = \delta_j(l_{i,t})$$

で求められる。 $l_{i,t}$ は企業 i の自己資本とローンの比を示し、

$$l_{i,t} = \frac{G_{i,t}}{A_{i,t}}$$

と定義する。ここで $G_{i,t}$ は企業 i が持つローンの総額を示す。

銀行 j は、 $K_{i,t}^*$ から、企業 i の自己資本 $A_{i,t}$ を除いた金額をローン総額 $L_{i,t}$ として、貸出可能額 $S_{i,t}$ の範囲内で貸し出す。銀行 j は、自分と繋がりを持つ企業 i に対して貸し出しをする際、以下に示す安全性を求める。

$$P_t^{j,i} = 1 - \chi \left(\frac{G_{i,t}}{S_{j,t}} \right)^\psi$$

ここで χ と ψ は係数である。この安全性は貸出のリスクであり、 $P_t^{j,i} = 0.1$ であれば、10行の銀行のうち、1行が貸し出すことを表している。銀行 j は貸し出しの際、0~0.8までの値をランダムに取得し、この値が $P_t^{j,i}$ よりも大きい場合に貸し出しを実施する。

もし、企業 i が必要とするローン総額 $L_{i,t}$ が、銀行 j の貸出可能額 $S_{i,t}$ を超えていた場合、その不足分を他の銀行 k から借り入れることでその金額を補填する。また銀行 j が銀行 k から借り入れを実施する際も、企業が銀行から借り入れを行う際と同様の手続きをする。

銀行 j の収益 $\pi_{j,t}$ は、貸し出しを実施した企業と銀行からの利子の利益から、借り入れを行った銀行、また預金者に対する利子の支払いを引いたものであり、以下のように表す。

$$\pi_{j,t} = \frac{1}{\tau} \left(\sum_{i,t-\tau+1 < t < t} L_{i,t} r_{i,t}^j + \sum_{j,t-\tau+1 < t < t} L_{i,t} r_{i,t}^j \right) - \bar{r}_{j,t} (D_{j,t-1} + E_{j,t-1})$$

ここで $\bar{r}_{j,t}$ は預金者に対する利子率を表す。そして $E_{j,t+1} = E_{j,t} + \pi_{j,t}$ とし、 $E_{j,t+1} \leq 0$ になった場合、銀行 j は倒産したものとみなし、借入している銀行に対して、残っているローンの0.1~0.9倍を銀子の自己資本にダメージを与え、以降のシミュレーションには参加しない。

(5) 政府エージェント

政府は、消費者が製品を購入した際の消費税、企業と銀行が利益を生み出した際の法人税の2種類を徴税する。消費税率は8%、法人税率は40%とする。また政府は消費者に対して毎ステップ補助金を給付する。

4. カリブレーション

この章では、シミュレーションを行う際に必要な初期値、パラメータの値を設定する。

(1) 消費者エージェント

企業エージェントの各パラメータの初期値を(表1)で示す。消費者の貯金額は、総務省の家計調査報告より総世帯の年間平均支出額を算出、参考にした。

(2) 企業エージェント

企業エージェントの各パラメータの初期値を(表2)で示す。自己資本は、経済産業省が実施した商工業実態基本調査より日本の全企業数の99%を占める中小企業の自己資本比率から設定した。また市場価格 P_t は、ステップ $t-1$ における各企業の製品価格と生産量との加重平均とした。

(3) 銀行エージェント

銀行エージェントの各パラメータの初期値を(表3)で示す。自己資本は銀行・信託業の平均資本金額をベースにし、自己資本比率を10%とした。また返済期間や各変数については鈴木(2014)の値を採用した。加えて消費者の預金に対する銀行の利子率は、2003年の普通預金金利である0.001%を採用した。

(4) シミュレーション環境全体

ここではシミュレーションの環境全体に関する設定について述べる。本論文では、消費者エージェントを $x = 10000$ 、企業エージェントを $N = 1000$ 社、銀行エージェントを銀行 $B = 50$ 行、政府を1つとした。そして今回は、1ステップを半年とし、50ステップすなわち25年のシミュレーションに行った。

企業はシミュレーションの開始時に、企業1社につき銀行を1から3行をランダムに選択する。企業一銀行間の繋がりに関して、企業は10ステップ毎に銀行1行をランダムに変更する。

企業の相対製品価格 $u_{i,t}$ は、2ステップを1年とし、市場価格が目標とするインフレ率になるように設定した正規分布に基づく値をランダムに設定する。インフレ率や正規分布の平均、標準偏差は(表4)で示す。

次に銀行に関して、各銀行は、1行から(表5)で示す最大値の範囲内で他の銀行と繋がりを持つ。その際、1行から最大値まではランダムに選ぶ。そして銀行は13ステップ毎に銀行を1行変更する。

5. シミュレーション分析

本研究では、消費者、企業、銀行、政府から成るマルチエージェントモデルを構築し、各エージェントの動きと共に、企業—銀行間ネットワークの結びつき度合いの変化によって、市場がどのように変化するかをシミュレーションした。(表6)はシミュレーションにより得られた市場価格の推移である。ここでは消費者エージェントの、周囲を見渡し最低価格の製品を選び購入するという、ルールにより、大きく市場価格が変動することを確認することができた。

(表7)(表8)はシミュレーションにより得られたGDPに関する変化である。ここでGDPに関して、ステップ t における企業と銀行の収益($A_{i,t} > 0$ $E_{j,t} > 0$)の和により GDP_t を算出した。GDPに関する変化より、企業—銀行間の結びつき度合いが弱いほど変化率の変化幅が大きくなる傾向にある。これは、企業—銀行間の結びつきが弱いほど、相対的に銀行からの借入れが難しく、借入ができた際に大きく変化するためである。

(表9)は50ステップ、すなわち25年間にわたって倒産した企業の累計数、(表10)は倒産した銀行の累計数を示している。両者の表より、企業の倒産件数は企業—銀行間の結びつきが強いほど、およそ20年後以降に倒産件数が多くなる。これは、結びつきが強いほど企業は多くの銀行から借入れをしたが、返済することができなくなったことが原因だと考えられる。一方、銀行の倒産件数は企業—銀行間の結びつきが弱いほど銀行の倒産件数が多くなっている。

(表11)は、各年における各銀行エージェントの資産の合計を示している。(表10)(表11)より、銀行が徐々に倒産するのは対照的に、 $E_{j,t} > 0$ である各銀行エージェントの資産が増加していることがわかる。言い換えると、倒産した銀行は、市場から取り除かれるため、残った銀行の資産が増加し、メガバンクが出現しているのである。

6. おわりに

本論文では、マルチエージェントモデルを用い、消費者や企業、銀行、政府の行動と企業—銀行間の結びつきの度合いの変化から、市場がどのように変化するかを考察した。考察から、市場に存在する各エージェントの意思決定により、市場を大きく変化させることを確認することができた。具体的に、消費者の行動は企業の利益に影響を与え、物価にまで影響を与えていた。また企業—銀行間の結びつきの度合いが、企業の存続に大きく影響を与えていた。しかし、今回の企業の倒産件数は、企業生存率の観点から不適切である可能性がある。

今回のように経済を対象とした場合、実経済社会は多数の要素から成り立つ複雑なシステムであ

るため、より現実に沿うようなモデルを作成するためには、複数の異なる視点を取り入れ、よりモデルを巧み、精緻にする必要がある。取り入れるべき例として、今回使用したモデルでは考慮していなかった労働市場がある。労働市場を取り入れることにより、消費者は消費だけでなく労働という行動、ルールを与えることができる。これにより企業や銀行、政府を回る貨幣の流通をより具体的に見ることができる。

参 考 文 献

- 石川篤史鎌田康一郎倉知善行寺西勇生那須健太郎(2011)「『金融マクロ計量モデル』の概要」日本銀行ワーキングペーパー
- 北中英明(2005)「複雑系マーケティング入門—マルチエージェント・シミュレーションによるマーケティング—」共立出版
- 小村智宏(2010)「消費リストラが生むデフレ経済のダイナミズム」三井物産戦略研究所経済・産業分析室
- 塩沢由典(2000)「システム・アプローチに欠けるもの—経済学における反省—」社会・経済システム第19号55-67
- 鈴木義人(2014)「マルチエージェント・シミュレーションによる金融経済と実体経済の連関に関する分析」防衛大学校理工学研究科情報数理専攻知能情報研究室
- 高島幸成(2014)「ABMによるマクロ経済基本挙動再現の為のモデル構造に関する研究」千葉工業大学博士学位論文
- 西崎健司, 上野陽一, & 田中昌宏(2011)「日本の物価変動の背景: 事実と論点の整理」日本銀行ワーキングペーパーシリーズ
- 山影進(2013)「人口社会の可能性 人口社会構築指南 artisocによるマルチエージェント・シミュレーション入門」書籍工房早山
- Chan, C. K., & Steiglitz, K. (2008) "An agent-based model of a minimal economy" *Princeton University, Department of Computer Science, Princeton.*
- Delli Gatti(2003) "A new approach to business fluctuations : heterogeneous interacting agents, scaling laws and financial fragility" *journal of Economic Behavior & Organization* 489_512
- Greenwald, B. C., & Stiglitz, J. E. (1990) "Macroeconomic models with equity and credit rationing" *In Asymmetric information, corporate finance, and investment* (pp. 15-42). University of Chicago Press.
- 経済産業省 「商工業実態基本調査」〈<http://www.meti.go.jp/statistics/tyo/syokozi/result-2/h2c5keaj.html>〉
- 金融庁 「免許・許可・登録を受けている業者一覧」〈<http://www.fsa.go.jp/menkyo/menkyo.html>〉
- 総務省 「家計調査」〈<http://www.stat.go.jp/data/kakei/>〉

(表1) 消費者エージェントのパラメータ初期値

パラメータ名	値
所持金	3,000,000
補助金(半年)	1,500,000

(表2) 企業エージェントのパラメータ初期値

パラメータ名	値
自己資本	2,000,000
負債	8,000,000
生産係数	0.8
市場価格	100

(表 3) 銀行エージェントのパラメータ初期値

パラメータ名	値
自己資本	100,000,000,000
預金	1,000,000,000,000
返済期間	4
係数 α	0.1
係数 c	1.0
係数 λ	0.3
係数 χ	0.8
係数 ψ	0.1

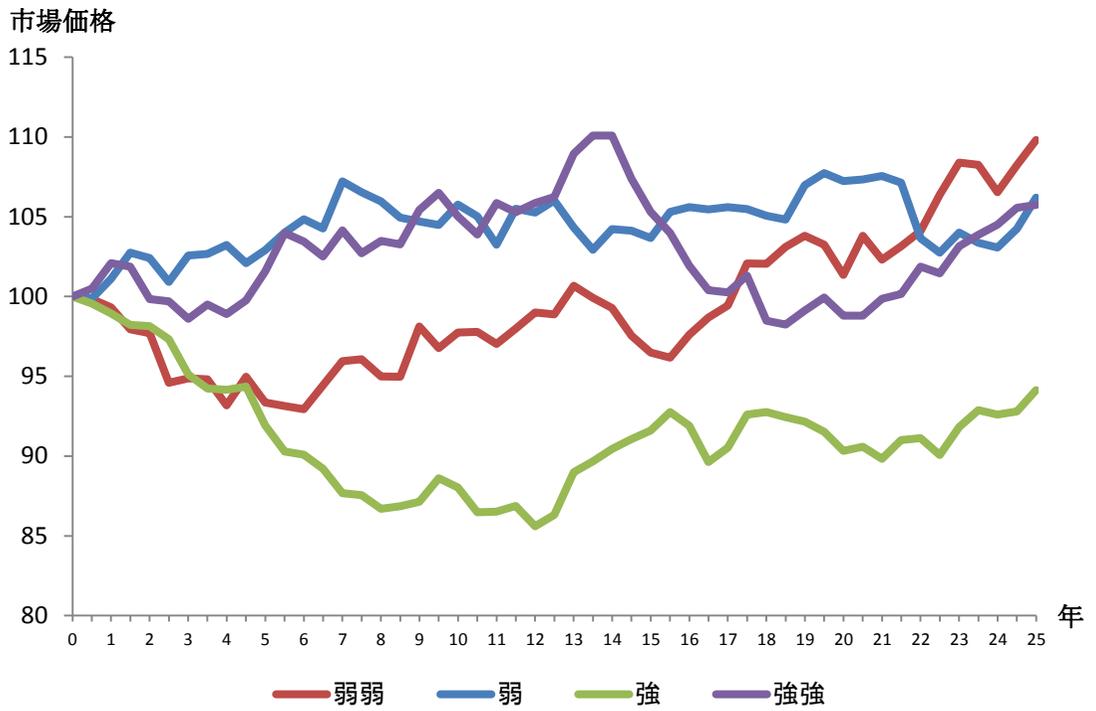
(表4) インフレ率、正規分布の平均、標準偏差

正規分布に関して	設定
市場価格の動向	一定
目標インフレ率	年率 2.0%未満
平均	1.0
標準偏差	0.40

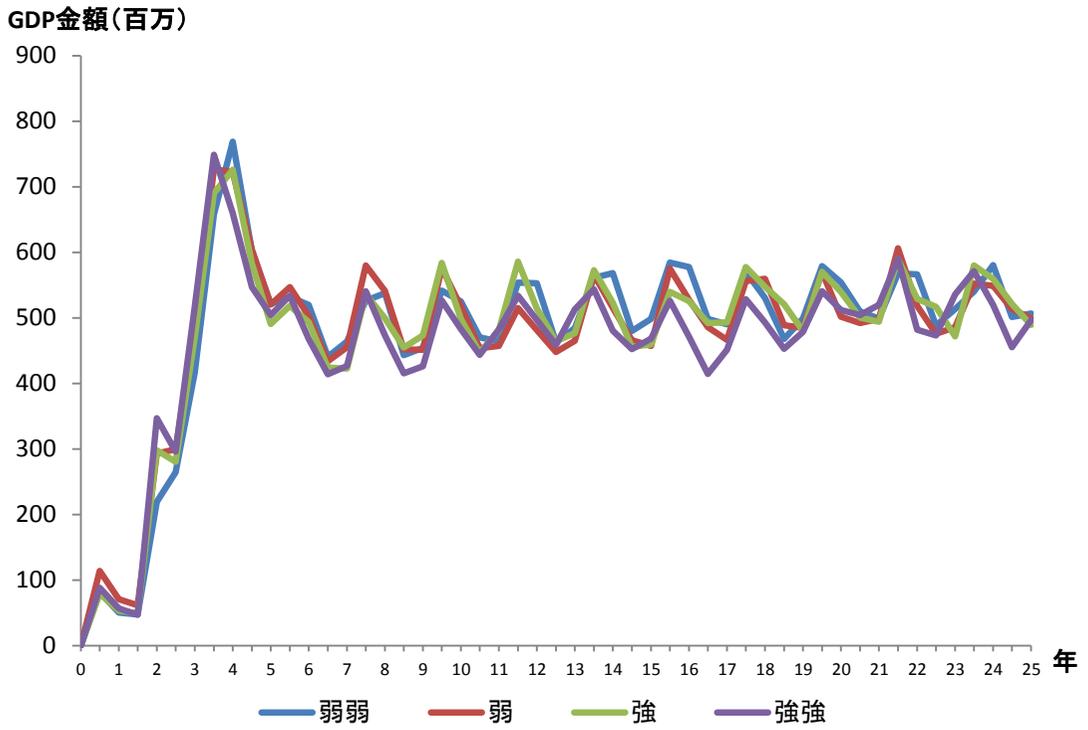
(表5) 銀行間の繋がり度合いと最大値

銀行間の繋がり度合い	繋がることのできる最大数
弱弱	6
弱	12
強	18
強強	25

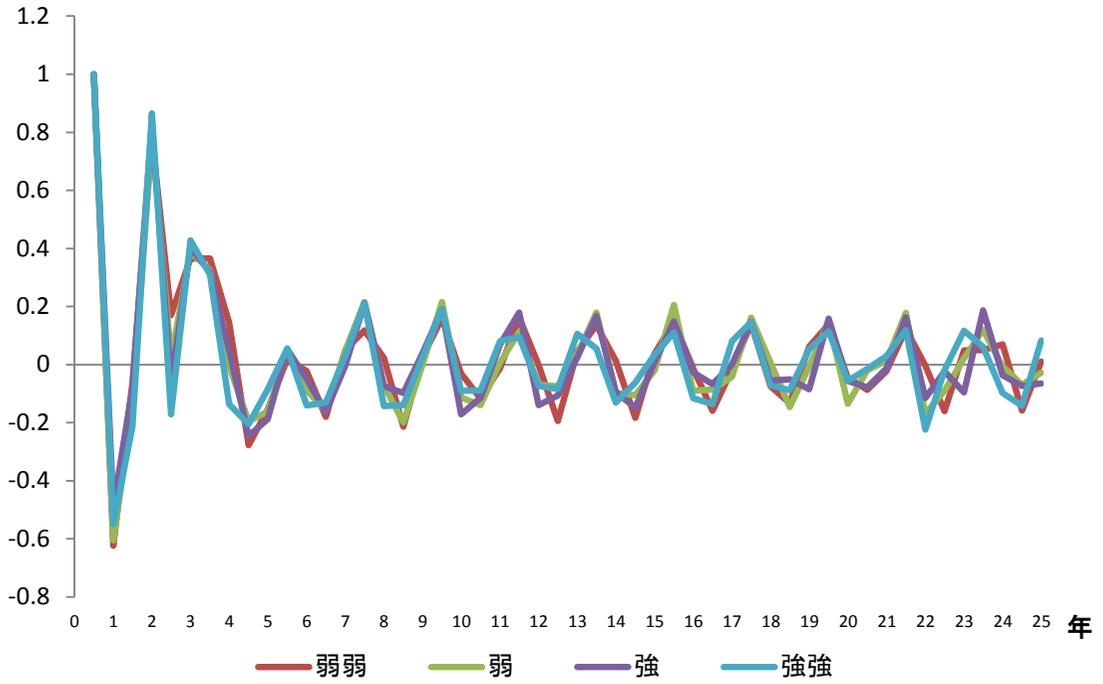
(表 6) 市場価格



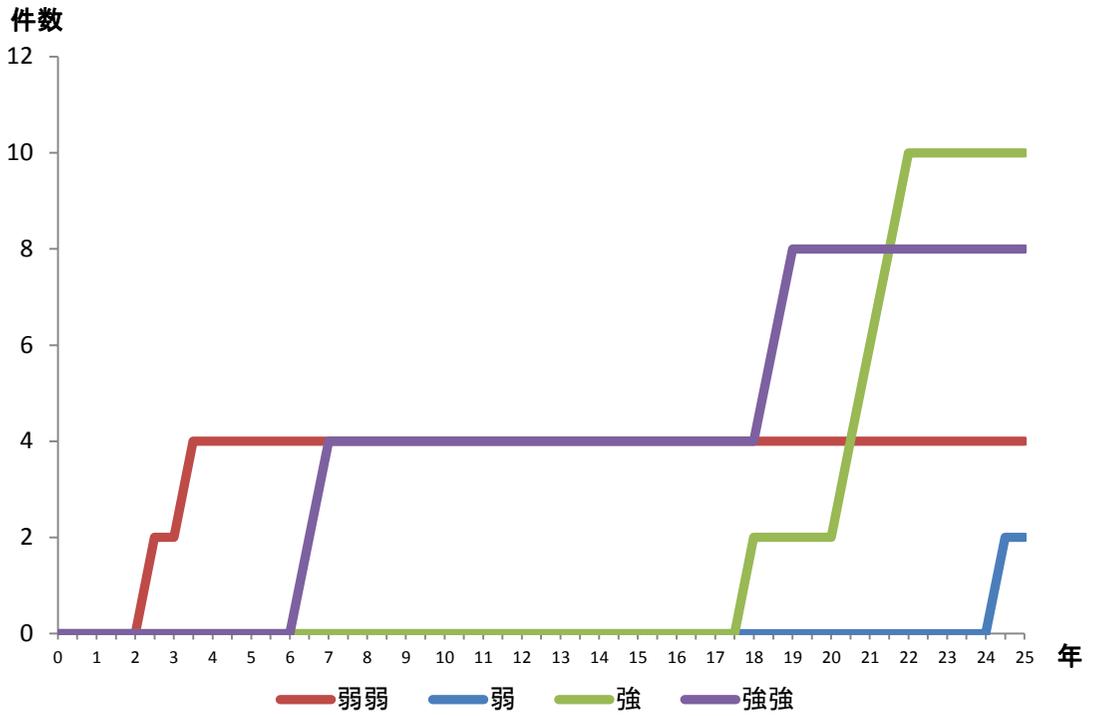
(表 7) GDP総額



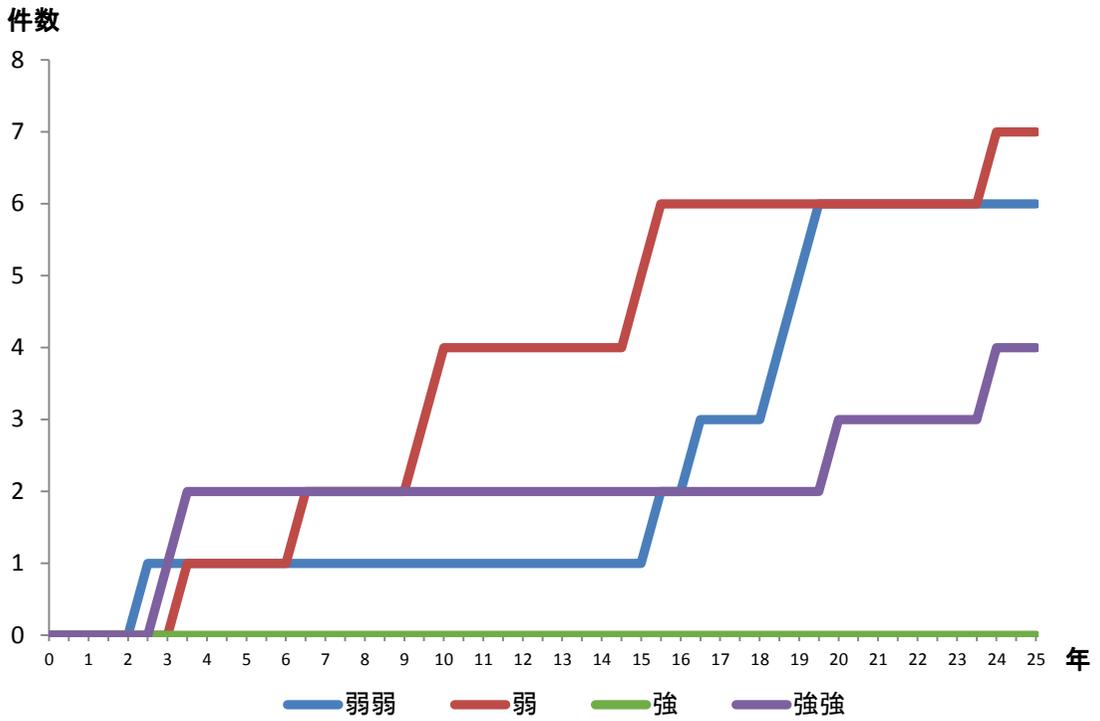
(表 8) GDP前半年度比変化率



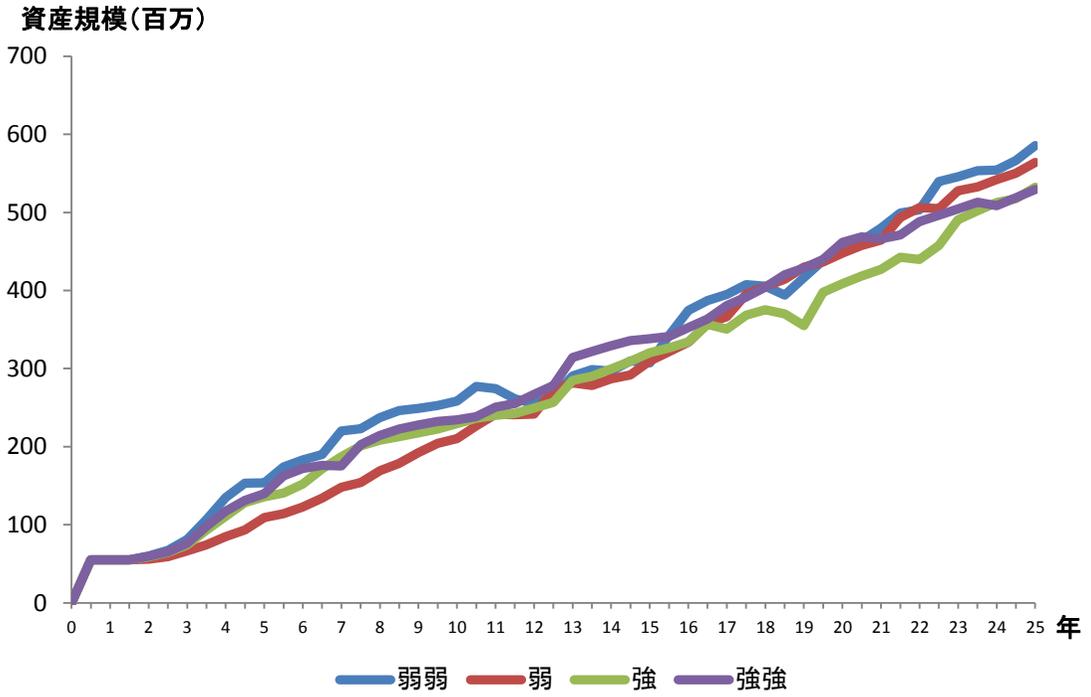
(表 9) 企業倒産件数<累計>



(表 1 0) 銀行倒産件数<累計>



(表 1 1) 銀行資產規模



(表 1 2) 全体のモデル図

