

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

鈴木 義人

1. はじめに

1.1 背景

2008年のリーマンショック以降、経済学や金融工学では、個々の金融機関の財務状況だけではなく、金融機関が相互に作用して形成される金融システムが抱えるシステムリスクが注目を帯びている。一方で、従来のマクロ経済モデルには、金融システムが組み込まれていないため、金融システムが機能不全を起こした際に、マクロ経済全体にどのような影響を与えるのか、分析が困難にしている。[1] 2012年末に発足した第2次安倍内閣は、デフレ脱却と物価安定を目的とした金融政策を実施している。その結果、金融経済を見ると、2012年11月の衆議院解散時に8664円だった平均株価は、2013年の末には、16000円前後で推移するまでに急速に回復し、それに伴い、実体経済も2013年12月の日銀短観では製造業・非製造業ともにプラスになるなど、回復傾向にある。しかしながら、このような金融政策が実体経済にプラスの効果をもたらすかについては、その賛否を含めて様々な議論が行われている。

1.2. 実体経済と金融経済

マクロ経済学は経済全体に関する研究である。対象として扱う経済現象は、1.1節で述べたリーマンショックのような大恐慌がなぜ発生したのか、雇用や生産が時間変化に応じてどのように変化するのかということである。1936年のケインズによる論文の発表を嚆矢とし、いくつかの学派に分かれながら、マクロ経済学は基本的原理や事象の分析に用いるツールが発見され続けてきた。発見された基本的原理やツールから社会保障制度や預金保険制度のような制度が生まれ、近年に至るまでの様々な経済危機の際にその効力を発揮し、マクロ経済学の視点を利用することは、国の経済だけでなく世界経済の安定に大きな影響を与えている。[2]

マクロ経済学は、多くの基本的原理やツールを提供し、政府の金政策等に大きな影響を与えているが、一方で、近年では従来のマクロ経済学では想定していない事態がいくつか生じている。その例としては、2008年のリーマンショックである。この原因は、今までマクロ経済学で考慮されていなかった金融システム内のネットワークによって引き起こされる部分から全体へと広がる相互作用の影響であると考えられている。また、発見された基本的原理やツールの欠点も指摘されている。これは、1つは従来のモデルが静的なモデルであり、市場の傾向は変化しないことを前提にしているため、モデルが著しく変化する場合に対応できないという指摘がある。2つ目はツールを利用する環境が、均質の行為者の中で、最適な平衡状態が存在し、大恐慌のような危機が発生しないという理想的な状況を想定しているため、現実の環境に適応させることが困難である可能性がある。[1]

以上で述べた点を克服するために、エージェントを利用したシミュレーション(ABS)研究が近年では増加している。ABSを利用することで、エージェントの動作から市場の傾向を動的に決定するこ

と異なる性質を持ったエージェント同士の相互作用を生起することが可能になる。加えて ABS を利用することで、発生したマクロ経済における事象に対してエージェントの動作、すなわちミクロ経済レベルでの振る舞いがどのように影響を与えているのか解析することが可能になる。

1.3 エージェントモデルの妥当性評価

1.2 節で述べたように、ABS による研究が増加する一方で、問題点も指摘されている。それは ABS で観測された結果が、現実の結果と一致するかという ABS の再現性にある。[3]

そのため、本研究では、シミュレーション結果が経済物理学の手法などを使って観測された一般的な法則性と一致するかどうかを比較することで、得られたシミュレーション結果の妥当性を評価する。経済物理学とは経済現象に対して物理学の手法を適応して分析する分野であり、実際の企業や銀行のデータの分析から企業や銀行の資産規模の分布に法則性が見られることを発見している。[4]

ABS によって得られたシミュレーション結果を実データから観測される法則性と照らし合わせながらモデルを改良することで ABS の妥当性を評価する。

1.4 研究目的

本研究では、MAS を構築し、マクロ経済現象の普遍的な性質を比較し、そのモデルの妥当性を評価し、妥当性のあるモデルを使って金融経済と実体経済の連関性について解明することを目的とする。シミュレーションでは、企業と銀行のエージェントを用意し、それぞれのエージェントはバランスシートモデルを持つ。また、企業エージェントは銀行エージェントとの繋がりを持ち、銀行エージェントは銀行エージェント同士の繋がりを持つことで、金融のネットワークを表現する。この中でシミュレーション結果と金融ネットワークの密度や製品の平均価格の変化に伴い、企業や銀行の規模、生存率、収益率や倒産件数がどのように変化するのか、比較検証を行う。

2. モデル

Delli Gatti [1] や Grilli [3] らによる既存モデルに基づき、それを拡張して Artiscoc 上でモデルを構築した。各企業と銀行は資産の状態を表す持つバランスシート持ち、繋がりのある企業－銀行間もしくは銀行間で貸借を行う。

2.1 企業エージェント

N 社の個別な企業エージェントは、各ステップにおいて、それぞれのバランスシートを基に生産を行い、収益を得ることで自身の資産規模を変動させていく。

ステップ t における i 番目の企業のバランスシートは、自己資産 $A_{i,t}$ とローン $L_{i,t}$ から構成される。自己資本 $A_{i,t}$ とローン $L_{i,t}$ を合わせたものを資産 $K_{i,t}$ とし、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

$$Y_{i,t} = \varphi K_{i,t} \quad (1)$$

で与える。生産係数 φ は全ての企業で同様の値とする。そして、各企業エージェントは以下の関

係を満たす自社製品価格 $P_{i,t}$ を持つ.

$$u_{i,t} = \frac{P_{i,t}}{P_t} \quad (2)$$

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す. 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 $\bar{L}_{i,t}$ は

$$\bar{L}_{i,t} = \frac{1}{\tau} \sum_{t-\tau+1}^t (1 + r_t^{i,j}) L_{i,t} \quad (3)$$

と表し, τ は返済期間, $r_t^{i,j}$ はステップ t において銀行 j から借りたローン $L_{i,t}$ に対する利子率を示す.

(1) から(3) 式を用いて, ステップ t における企業 i の収益 $\pi_{i,t}$ は以下のように定義する.

$$\pi_{i,t} = u_{i,t} Y_{i,t} - \bar{L}_{i,t} \quad (4)$$

そして, 次のステップの企業 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 i は倒産したものとす. このとき, 借入をしている銀行に対し, 残っているローンの $0.1 \sim 0.9$ 倍した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下で生まれたものとする.

2.2 銀行エージェント

B 行の個別な銀行エージェントは, 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銀行に貸出を行い, その利子から利益を得ることで自身の資産規模を変動させていく.

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産 $E_{j,t}$ 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

$$S_{j,t} = \frac{E_{j,t-1}}{\alpha} \quad (5)$$

と表す.

銀行 j は企業 i に資金の貸出を行う際に, 企業 i が成長に最適な資産 $K_{i,t}^*$ を求める. $K_{i,t}^*$ は以下の式で与えられる. [2]

$$K_{i,t}^* = \frac{\varphi}{2c\varphi(\lambda r_t^{i,j} + (1-\lambda)l_{i,t})} + \frac{c\varphi A_{i,t}}{2c(\lambda r_t^{i,j} + (1-\lambda)l_{i,t})} \quad (6)$$

ここで c, λ は係数であり, $r_t^{i,j}$ は

$$r_t^{j,i} = \delta_j(l_{i,t}) \quad (7)$$

で求められる. $l_{i,t}$ は企業 i の自己資本とローンの比(レバレッジ)を示し,

$$l_{i,t} = \frac{G_{i,t}}{A_{i,t}} \quad (8)$$

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

銀行 j は(5), (6), (7) 式から求められた $K_{i,t}^*$ から企業 i の自己資本 $A_{i,t}$ を除いた額を企業が必要とするローン額 $L_{i,t}^d$ とし, 貸出可能な金額 $S_{j,t}$ 内であれば貸出手続きを進める.

銀行 j は自分と繋がりの企業 i に対して貸出を行う際, 以下に示す安全性 $P_t^{j,i}$ を求める.

$$P_t^{j,i} = 1 - \chi \left(\frac{G_{i,t}}{S_{j,t}} \right)^\psi \quad (9)$$

ここで, χ, 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示す. 銀行 j は貸出の際に 0 から 0.8 の値をランダムで取得し, この値が $P_t^{j,i}$ よりも大きい場合, 企業に対して貸出を行う.

もし, 企業 i の必要とするローン額 $L_{i,t}^d$ が銀行 j の貸出可能な金額 $S_{j,t}$ を超える場合は不足分を他の銀行 k から借り入れることで補填を行う. 銀行 j が銀行 k から借入を行う際は, 企業が銀行から資金を借り入れる際と同様の処理を実施する.

銀行 j の収益 $\pi_{j,t}$ は貸出している企業及び銀行から利子の利益から, 借り入れている銀行と預金者への利子の支払いを除いたものとし, 以下の式で表される.

$$\pi_{j,t} = \frac{1}{\tau} \left[\sum_{i,t-\tau+1 < t' < t} L_{i,t'} r_{t'}^{i,j} + \sum_{j,t-\tau+1 < t' < t} L_{j,t'} r_{t'}^{j,j} \right] - \bar{r}_{j,t} (D_{j,t-1} + E_{j,t-1}) \quad (10)$$

ここで, $\bar{r}_{j,t}$ は預金者への利子率を表す. そして, $E_{j,t+1} = E_{j,t} + \pi_{j,t}$ とし $E_{j,t+1} \leq 0$ となったとき銀行 j は倒産したものとして, 借入をしている銀行に対し, 残っているローンの 0.1 ~ 0.9 倍を銀行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.

3. シミュレーション設定

3.1 企業エージェントのパラメータの設定

企業エージェントの各パラメータの初期値を表1で与える.

表1 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 $A_{i,0}$	65
ローン $L_{i,0}$	35
生産係数 φ	0.8
自社製品価格 $P_{i,0}$	10

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の平均値とする.

3.2 銀行エージェントのパラメータの設定

銀行エージェントのパラメータの初期値を表2で与える.

表2 銀行エージェントのパラメータ初期値

パラメータ名	値	パラメータ名	値
自己資本 $E_{j,0}$	50000	係数 c	1.0
預金 $D_{j,0}$	150000	係数 λ	0.3
返済期間 τ	4	係数 χ	0.8
係数 α	0.1	係数 ψ	0.1

また, 預金者への利子率 $\bar{r}_{j,t}$ は 0.00025 とし, 企業または銀行に対する利子率 $r_t^{i,j}$ は貸出の際に企業または銀行のレバレッジに基づき, 0.048 から 0.050 の間で設定する

3.3 シミュレーション環境全体

企業数を $N = 1000$, 銀行数を $B = 50$ とし, シミュレーションは 50 ステップ(1ステップは半年に相当)行う. 企業-銀行間の繋がりは, シミュレーション開始時に, 企業1社に対して銀行は1行から3行をランダムに選択する. 銀行間の繋がりはシミュレーション開始時に表3に示す値を最大値として, 1行から最大値までの間をランダムで取得する.

表3 銀行間の繋がりを表すネットワーク密度とリンク数

ネットワークの密度	最大リンク数
弱密度	6
中密度	12
強密度	25

また, 企業-銀行間の繋がりは 10 ステップ毎に各企業が繋がっている銀行を1行, 銀行間のつながりは 13 ステップ毎に各銀行が繋がっている銀行1行を変更する.

企業の相対製品価格 $u_{i,t}$ は, 2ステップを1年として, 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. インフレ率と正規分布の平均及び標準偏差を表4に基づくととき, 実際の市場価格の変化を図1に示す.

表4 インフレ率と正規分布の平均及び標準偏差

市場価格の傾向	目標インフレ率	平均	標準偏差
インフレ	年率 6.0%未満	1.028	0.43
一定	年率 2.0%未満	1.000	0.43
デフレ	年率 -2.5%未満	0.987	0.43

市場価格

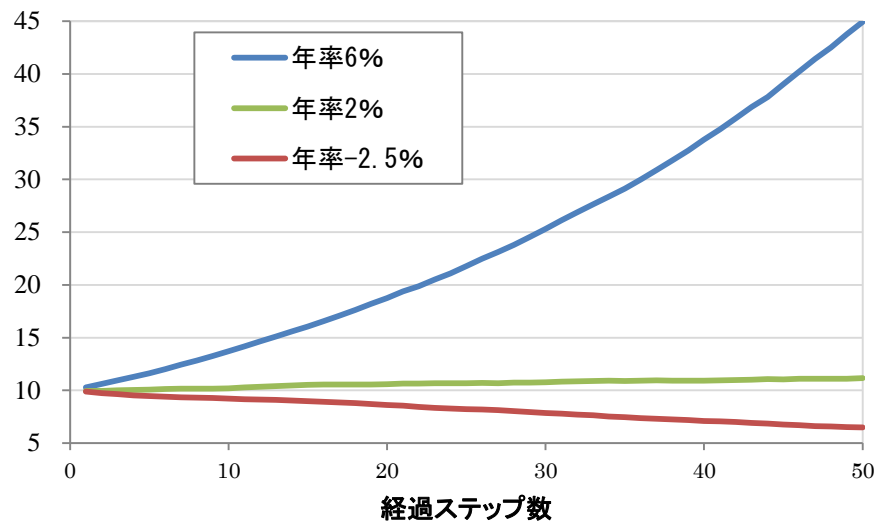


図1 市場価格の変化とインフレ率

4. シミュレーション結果とモデルの妥当性評価

4.1 GDP の成長率

GDP成長率

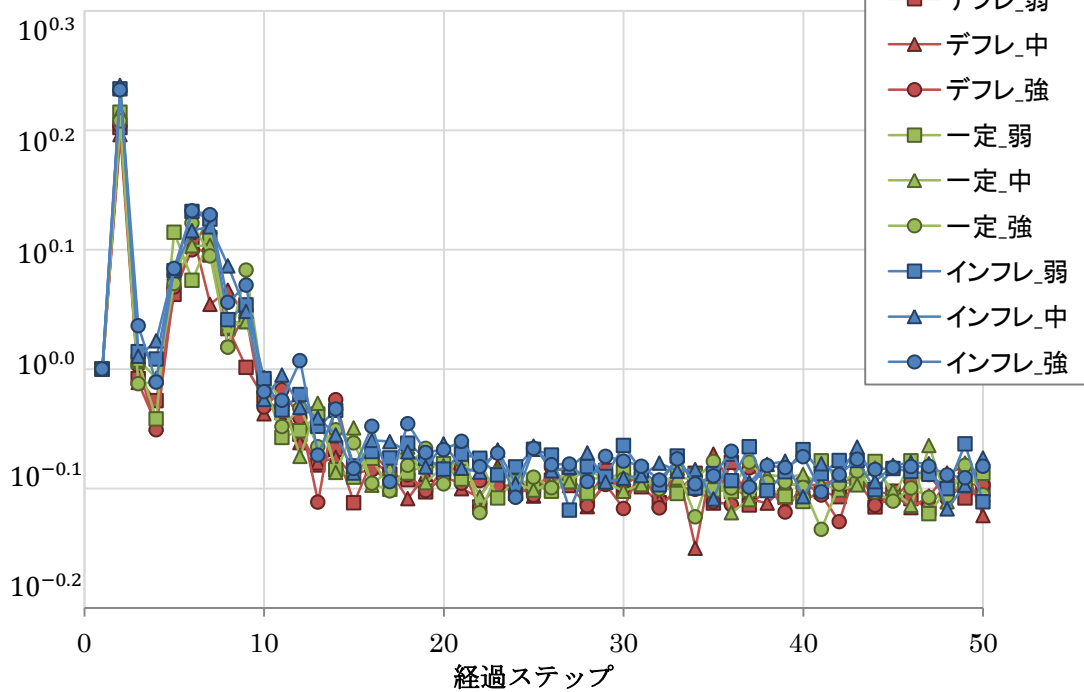


図2 GDP 成長率の推移(インフレ率・ネットワーク密度別)

図2及び図3はインフレ率及びネットワーク密度別の GDP 成長率の時間変化を示す。ここで、GDP 成長率はステップ t における今期の企業及び銀行の収益($A_{i,t} > 0$, $E_{j,t} > 0$)の和を GDP_t 、GDP の変化率(=GDP 成長率)を GR_t とし、 GDP_t と GR_t は以下の関係を満たす。

$$GR_t = \log_{10} \left(\frac{GDP_t - GDP_{t-1}}{GDP_{t-1}} \right) \quad (11)$$

GDP 成長率を比較すると、10 ステップ以前では大きな差は見られないが、それ以降ではデフレ傾向と一定はほぼ同様で、インフレ傾向は他のインフレ傾向より高い成長率を維持している。これは、相対価格の変化に付随して企業の収益も変化するため、図1に示すように、ステップが進むにつれて相対価格の影響が大きくなり、インフレ傾向では他の傾向より高い成長率を維持していると考えられる。一方、ネットワーク密度は密度が弱いほど GDP 成長率の変化幅が大きくなる傾向にある。これは、ネットワークの密度が弱いほど相対的に銀行から貸出を受ける機会が少ないことになり、企業が借入れを実施できた際に急激に成長するためである。

4.2 企業及びの銀行の成長率

各ステップにおける企業及び銀行の成長率を比較する。企業及び銀行の成長率を以下のように定める。

$$GR_{F,t} = \log_{10} \left(\frac{A_{i,t} - A_{i,t-1}}{A_{i,t-1}} \right) \quad (12)$$

$$GR_{B,t} = \log_{10} \left(\frac{E_{j,t} - E_{j,t-1}}{E_{j,t-1}} \right) \quad (13)$$

各国の企業の成長率の分布は対数正規分布に従うことが知られている。そしてそれは次の確率密度関数で与えられる。[4]

$$p(r|s_0) = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma(s_0)} \exp \left(- \frac{\sqrt{2}|r - \bar{r}(s_0)|}{\sigma(s_0)} \right) \quad (14)$$

ここで、 r は対数で表した成長率、 s_0 は基準となる期間の企業及び銀行の資産であり、 $p(r|s_0)$ は基準の資産が s_0 であるときの成長率 r の確率、 $\bar{r}(s_0)$ と $\sigma(s_0)$ は基準の期間の成長率の平均と標準偏差を示す。

図3及び図4に $r = GR_{i,t}$ または $GR_{j,t}$ 、 $s_0 = A_{i,t-1}$ または $E_{j,t-1}$ とし、収益がインフレ率とネットワークの密度の組み合わせによって最低、平均、最大となる場合の企業及び銀行のステップ 10, 30, 50 における成長率の分布を示す。

確率密度関数(対数表示)

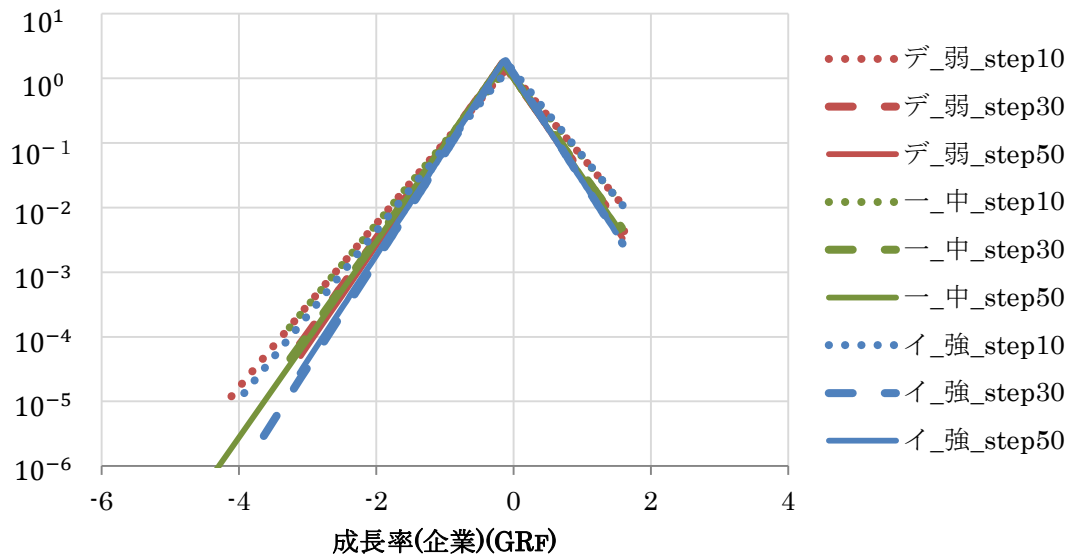


図3 企業の成長率の分布(ステップ 10, 30, 50)

企業の成長率の分布は、全体としてはインフレ率・ネットワークの密度・ステップ数に関わりなくほぼ同様の形状の分布をしていて、この形状は実際の企業の成長率の分布に良く似ている。[6]ただし、実際の企業の分布と比較してマイナス成長側が長くなっているが、これは倒産した企業や銀行が与えたダメージにより環境から資金が失われたことによるものである。

確率密度関数(対数表示)

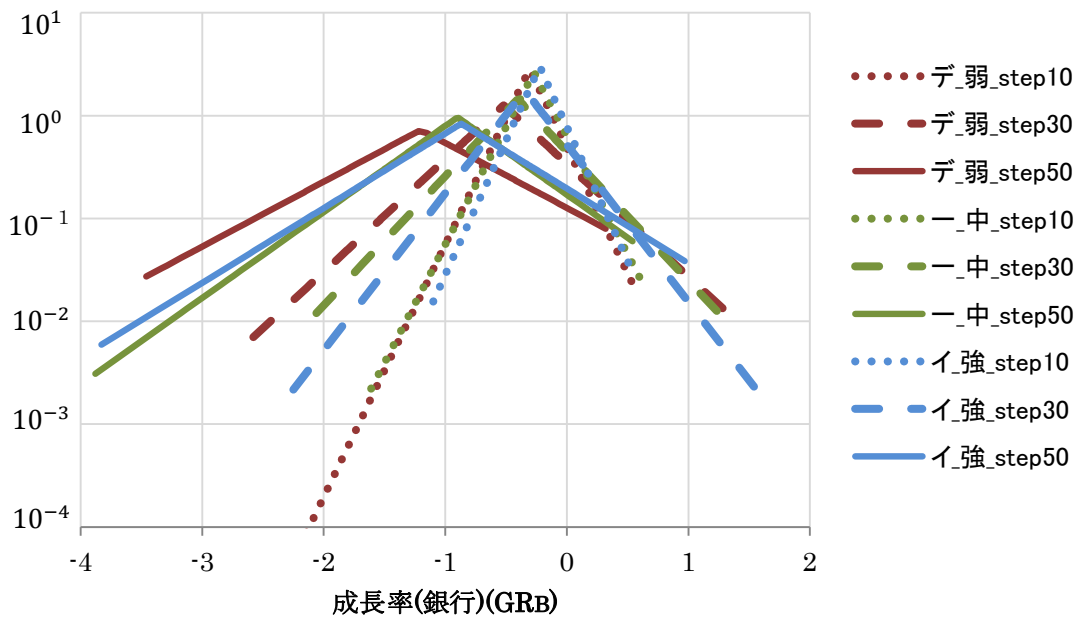


図4 銀行の成長率の分布(ステップ 10, 30, 50)

図4は銀行の成長率を示す。銀行の分布は 10 ステップではインフレ率とネットワークの密度の組み合わせによる場合の差異は小さいが、30 ステップ、50 ステップとなるに従って収益が悪い組み合わせほど分布の中心がマイナス方向に移動し、なす角度が広がる傾向にある。これは倒産による銀行の総数の減少と収益が悪化により、低い成長率となる確率が増えるとともに、より低い成長率になる可能性が生まれることを示している。また、マイナス成長側に長くなっているのは企業と同様に倒産した企業及び銀行によるものである。

4.3 企業及び銀行の資産規模の分布

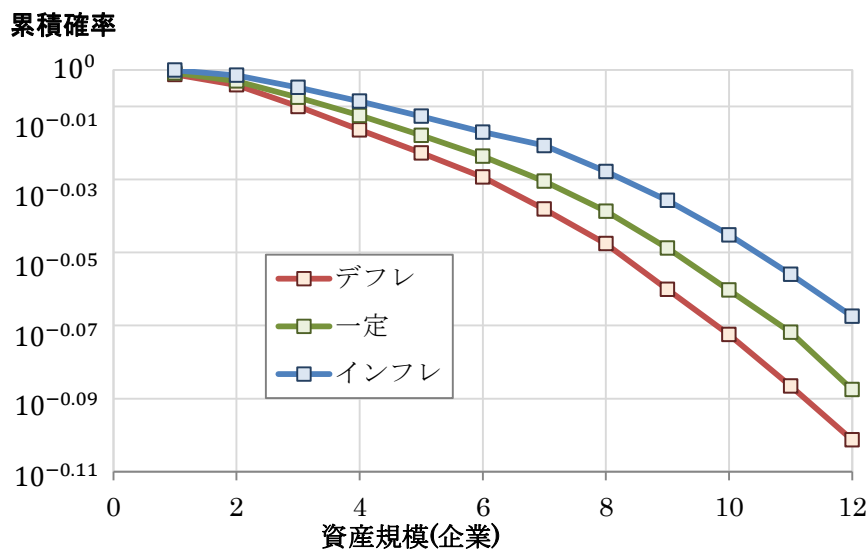


図5 企業の資産規模(累積確率)(50 ステップ)

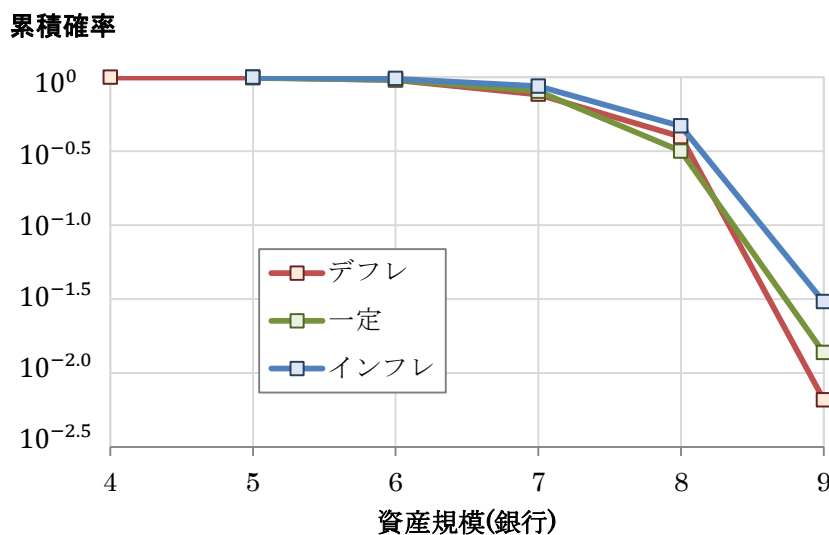


図6 銀行の資産規模(累積確率)(50 ステップ)

資産規模について、図5に企業(10^0 から 10^{12} の累積確率)、図6に銀行(10^0 から 10^9 の累積確率)を示す。企業については、実際の企業のうち、上場企業のみ資産規模の分布である対数正規分布[6]と似た分布となっている。これに対し、銀行の資産規模は対数正規分布とは異なり、べき分布となっている。企業と銀行の資産規模の分布が異なる理由は、企業は倒産した際に初期値で再スタートするため、小さい資産規模の企業が存在できる一方、銀行は成長しつつ倒産した際にシミュレーションから排除されるため、一部の銀行は資産規模に集中し、メガバンクが生まれている。

4.4 企業と銀行の年倒産

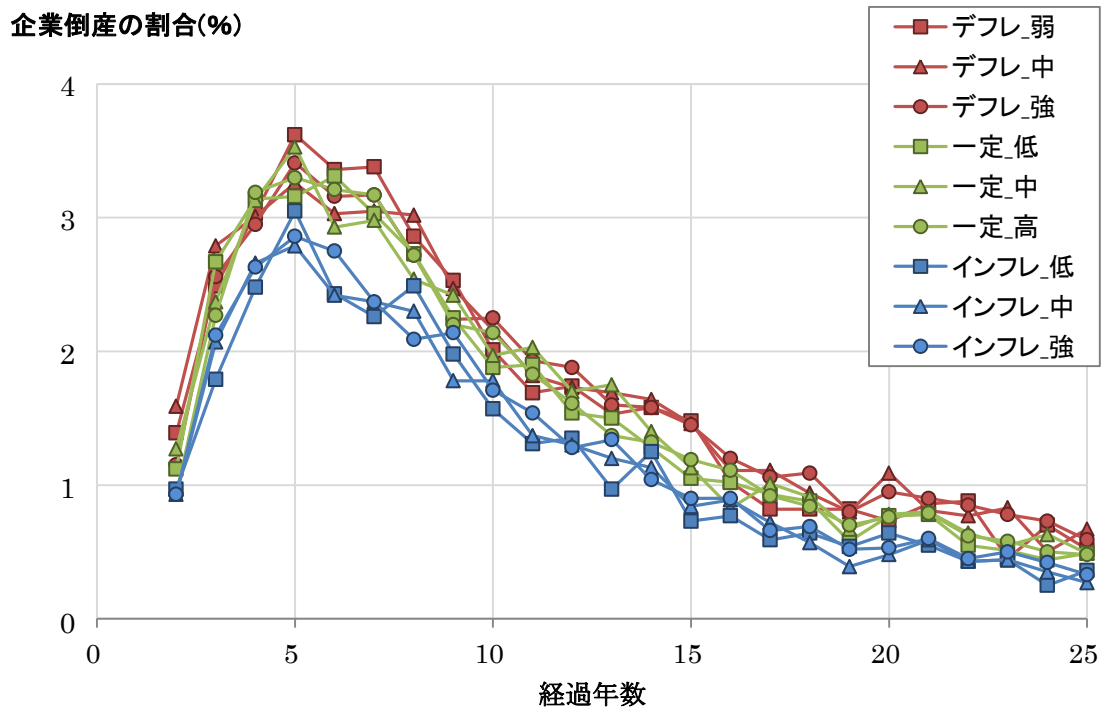


図7 企業の倒産割合(年間平均)

銀行の倒産割合(%)

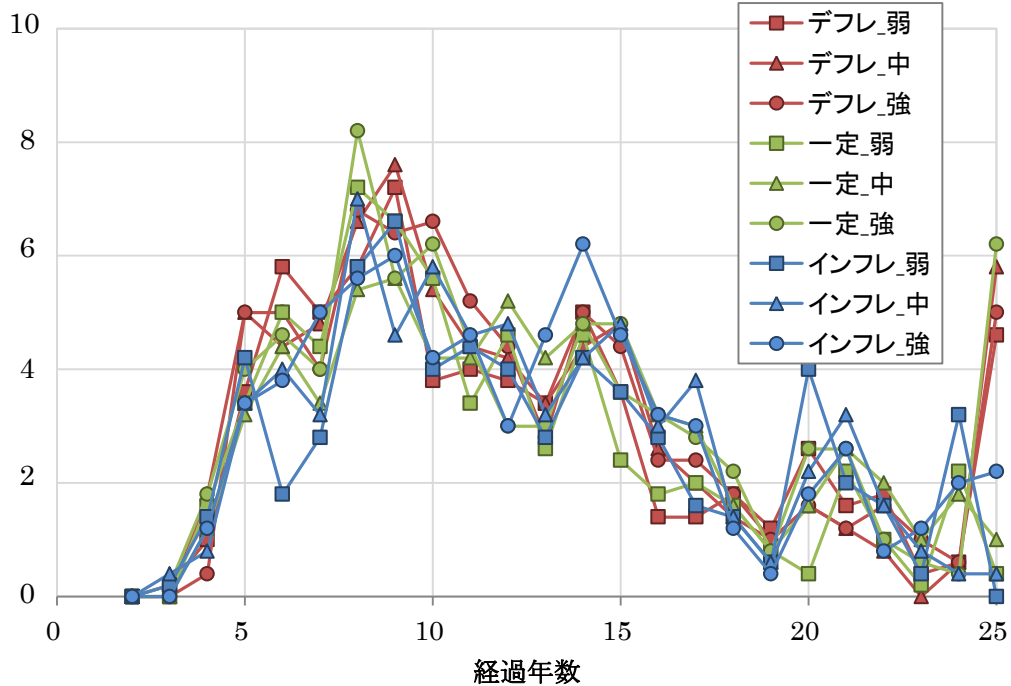


図8 銀行の倒産割合(年間平均)

図7に、全企業に対する倒産した企業の割合、図8には全銀行に対する倒産した銀行の割合を示す。企業の倒産については、図2で示した GDP 成長率に合わせて倒産件数も推移しており、GDP の変化と倒産件数に関係があることが分かる。一方、銀行の倒産件数は、年数が経つにつれて倒産件数が減少していく点とネットワークの密度が強いほど倒産件数が増える点は GDP の成長や企業の倒産と類似しているものの、インフレ率に関係なく倒産件数が変化する点、件数のピークとなる年数が異なる点や減少のスピードが一定しない点で異なる推移をしていることが分かる。

5. 金融経済と実体経済の関係

4章で示したシミュレーションの結果から、モデルの妥当性が評価できたことから、本モデルを用いて金融経済と実体経済の連関性についてネットワークの密度やインフレ率が異なるとき、企業と銀行の収益や倒産件数がどのように変化するのか、比較検証を行う。

5.1 インフレ率が連関性に及ぼす影響

インフレ率の影響を直接の受けているのはモデルの構成上では企業のみであるが、図2～図6より企業のみが影響を受けるのではなく、銀行も影響を受けているが確認された。このことから、インフレによる物価水準の高騰が国民の購買力を超えない限り、金融政策によってインフレ傾向に導くことは、企業の成長を促し、併せて銀行も成長できるものと考えられる。

5.2 金融ネットワークと連関性

インフレ率と比較するとネットワークの密度による影響は限定的である。成長面では図2～図4より、ネットワークの密度が高いほど企業と銀行は安定して成長するようになり、資産規模の差は小さくなる傾向にある。しかし同時に、企業及び銀行の倒産件数はネットワークの密度が強いほど増える傾向にある。これは借入機会が増える一方で、ローン返済に失敗する企業も増え、ローンの返済に失敗した企業の影響を銀行が蒙るためである。よって、銀行間ネットワークが強くなるほどマクロ経済全体の変化を複雑なものにするものと考えられる。

6. まとめと今後の展開

今回のモデルの挙動から、金融経済(=銀行)と実体経済(=企業)のそれぞれが受けた影響が他方に影響し、影響を増幅することや挙動を複雑にすることが明らかになった。しかし、今回使用したモデルにおいて、図3や図5から実際の企業の振る舞いに似ていることが確認できた一方、銀行については、シミュレーション終了時に半数以上の銀行が倒産しているなど現実との乖離が大きい可能性がある。この原因については、企業及び銀行モデルのパラメータ設定が現実と比較して適切でなかった可能性と、銀行間ネットワークの構造が影響していると考えられる。特に実際のネットワークについては今回採用したネットワーク構造と異なり、より複雑な構造をしているため、`artisoc` の機能だけでは再現することは難しい。これらの問題点を解決するために、今後はより適切なパラメータの設定のために実際の企業や銀行のデータを収集し、実データからのフィードバックをモデルに反映することと、ネットワーク構造を再現するためにネットワーク作成に有効である統計解析言語 R と `artisoc` の連携を実装することが考えられる。

引用文献

- [1] Delli Gatti, D. Di Guilmi, C. Gallegati, M. Palestrini, A. “A new approach to business fluctuations: heterogeneous interacting agents, scaling laws and financial fragility”. *Journal of Economic Behavior and Organization*. 56(4), 489 – 512, (2005).
- [2] ジョセフ・E・スティグリッツ, カール・E・ウォルシュ “スティグリッツ マクロ経済学 第3版” 東洋経済新報社(2007)
- [3] Richard Oliver Legendi, Laszlo Gulyas “Replication of the Macro ABM Model” CRISI, working paper (2012)
- [4] Micheael H.R. Stanley et al “Scaling behavior in the growth of companies” *NATURE*, vol 379 804-806(1996)
- [5] Ruggero Grilli, Gabriele Tedeschi, Mauro Gallegati “Markets connectivity and financial contagion”, DISES, working paper (2012)
- [6] 青山 秀明, 家富 洋 池田 裕一, 相馬 亘, 藤原 義久 “パレート・ファームズ” 日本経済評論社(2007)