

価格・生産・投資調整機能を内包した人工経済システムの 資金循環マルチエージェントシミュレーション

Multi-Agent Simulation of Fund Circulation in an Artificial Economic System Involving Self-Adjusting Mechanism of Price, Production and Investment

荻林成章*

Shigeaki Ogibayashi *

*千葉工業大学経営情報科学科

* Chiba Institute of Technology

高島幸成**

Kousei Takashima **

**日立情報システムズ株式会社

**Hitachi Information Systems, LTD

要旨：

マルチエージェントシミュレーションは近年広く社会問題や金融システムの解析に用いられている。一方種々の社会問題は多くの場合経済問題と密接な関係を有しているが、マクロ経済問題へのマルチエージェントモデルの適用例は比較的少ない。本研究では、生産者、消費者および銀行で構成され、価格・生産・設備投資の調整機能を内包する人工経済システムの資金循環マルチエージェントモデルを構築した。その結果、生産者や消費者のミクロ的な行動ルールとそれらの相互作用から市場価格の均衡や資金循環、景気循環などのマクロ的な経済システムの特徴を再現できることがわかった。

Abstract：

Multi-Agent Simulation is widely used in recent years to analyze the macroscopic behavior of social systems or financial systems. Previous research works on the macroscopic economic system, on the other hand, are not so many, although many of the social problems relate to an economical aspect. This study presents a multi-agent model of fund circulation in an artificial economic system which is composed of producers, consumers and a bank and involves self-adjusting mechanism of price, production and investment, in order to construct an artificial economic system with realistic behavior. As a result, it was revealed that characteristic behaviors of a real economic system such as equilibrium of market price, fund circulation among agents and business cycle etc. can be obtained as a result of the simulation based on the microscopic rules of acts of each agent and the interaction among them.

1. はじめに

マルチエージェントシミュレーションは対象システムを構成するエージェントのミクロ的な行動ルールとそれらの相互作用から社会システムのマクロ的挙動をシミュレートするもので、近年社会問題の解析に広く用いられている。一方、多くの社会的問題は経済と密接に関係している場合が多く、例えば物価と景気変動などに関する実証的な研究やゲーミングシミュレーションの観点からの研究はみられるが、市場における価格・生産量の調整機能や設備投資の増減機能、およびそれらの結果として生じる経済循環機構など、マクロ経済システムの基本的な挙動をミクロ的なエージェントの行動ルールとその相互作用から再現しようとするモデルは少ない[1]-[8]。

本研究では、価格や生産および投資などの自己調整機能を有する経済システムのマルチエージェントモデルについて検討し、実物経済システムの基本的挙動を再現できるモデルを提案する。

2. シミュレーションモデル

2.1 モデル概要

経済システムのマクロ的挙動を再現する上で最も基本的なエージェントは、生産者、消費者および銀行と考えられる。そこで本研究では次のように人工経済システムモデルを構成した。本モデルの人工経

済システムは図1に示すように、3種類の生産者、消費者、および銀行で構成され、3種類の生産者は原料を購入して消費者用の製品を生産するリテイラー、原料を生産してリテイラーに供給するホールセラー、およびリテイラーおよびホールセラーに設備を販売する設備生産者で構成される。また、リテイラーの製品およびホールセラーの製品（リテイラー用原料）は生産された後一旦市場に出され、それぞれ消費者およびリテイラーの購買ルールに基づき購入される。リテイラーおよびホールセラーの生産する製品は複数の製品種で構成され、各生産者の生産行動ルールおよび消費者の購買ルールもそれぞれの製品種についてそれぞれ独立に適用される。

各エージェントの行動ルールとそれらの相互作用をモデルで表し、期毎のシステム状態の変化をシミュレートすることにより、経済システムのマクロ的挙動に関わる特性値、すなわち市場の製品価格、市場に供給あるいは購入される製品の総額、銀行の預金額や貸出金額、各エージェント間の資金循環などを再現することが可能となる

本モデルの計算プログラムは Visual C++を用いエージェント、市場、製品、製品種、などをクラスのインスタンスとして記述しオブジェクト指向プログラミングにより構築した。

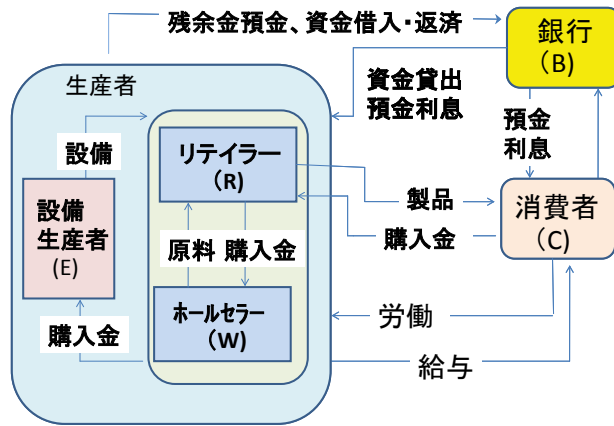


図1 経済主体及びそれらの相互関係

2.2 エージェントの行動ルール

各エージェントのミクロ的な行動ルールは、実際の経済システムにおける行動として一般的と思われる単純な行動を想定して、以下のように仮定した。

- ・消費者 (C と略称する) は生産者の下で労働し賃金を得、可処分所得の範囲内で製品を購入する。
- ・リテイラー (R と略称する) は消費者用製品を生産して市場に供給するとともに在庫状況に応じて生産量、価格を調整する他、設備投資および倒産行動を有する。
- ・ホールセラー (W と略称する) は R と同様の生産量、価格調整機能をもって R に原料を供給するとともに設備投資行動を有する。
- ・設備生産者 (E と略称する) は R、W の要求に応じて設備を供給する。
- ・銀行 (B と略称する) は消費者および生産者の剰余金を預かり、R および W の設備投資に必要な資金の貸出を行う。

各エージェントの行動ルールの概要を表1に示す。

表1 本モデルのエージェントと行動ルール

消費者 (C)	生産者のもとで労働し、賃金を得、可処分所得の範囲内で効用に合う最も安い製品を市場から順に選び購入する
リテイラー (R)	原料を購入して消費者向け製品を生産して市場に供給し、前期の製品在庫に応じて生産量・価格を調整し、生産量上限で在庫ゼロが一定期間続けば設備投資を行う。一方原価相当の製品価格設定において売上ゼロが一定期間続けばその製品の生産を中止し、全ての製品種の生産を中止すると倒産する。
ホールセラー (W)	リテイラー向けの原料製品を生産し市場に供給する。リテイラーと同様に生産量、価格、設備投資、倒産を決定する。
設備生産者 (E)	リテイラー、ホールセラーの要求に応じて、期当たりの生産個数上限を超えない範囲内で、設備を生産して供給する。
銀行 (B)	各エージェントから剰余金を預金口座に預かり、各生産者の不足運転資金の短期貸出と設備投資用資金の長期貸出を行う。

R 及び、W に関しては生産量調整、価格調整、設備投資、倒産等の行動ルールは共通のものとし、以下のように行動ルールを付与した。

・生産量調整行動

生産量調整は市場における自社製品の販売数に合わせて生産量の増減を行い、生産数量を調整する行動である。販売実績に基づき、過去数期分（販売記憶期間）の平均売上に基づき需要予測を行い、定期発注方式に基づき在庫切れの確率を 5% として在庫目標値を決定する。最短期の販売状況として生産量調整行動時に製品在庫を指標に用い、生産量増減係数 β を決定する。在庫目標値に β 倍した値から前期末在庫量を引いて次期生産量 q_{aim} とする。但し、次期生産量は保有する設備の生産上限までとし、1 生産者が生産することのできる製品種別は最大 3 までとした。

$$q_{aim} = (\bar{q} + 1.65\sigma) \times \beta - q_{stock} \quad \dots (1)$$

\bar{q} : 過去 n 期の売上実績に基づく需要推定値

σ : 過去 n 期の需要の標準偏差

q_{stock} : 前期末の在庫量

$\beta = 1.05 (q_{stock} = 0 \text{ の時})$ 又は $0.95 (q_{stock} > 0 \text{ の時})$

・価格調整行動

価格調整行動は自社の売れ行きによって製品種毎に販売価格を調整する行動であり、前期末在庫量がゼロであれば価格上昇フラグを 1 増加させ、前期末在庫量が正で目標在庫以下であれば価格下降フラグを 1 上昇させる。前期末在庫量が正で目標在庫以上であれば価格下降フラグを 2 上昇させ、これらのフラグが一定値に達した際に製品の価格を一定割合で上昇または下降させ、その際各フラグは 0 に戻す。

・設備投資行動

設備投資行動は、設備生産者から設備を購入し、自社の生産量上限値を上昇させる行動であり、在庫量がゼロかつ在庫目標値が生産上限値を超えた場合にフラグを 1 増加させ、在庫量が正の場合にフラグを 1 減少させ、フラグが一定値（設備投資要求指数）に達し、かつ長期借入金返済期間でない場合に、銀行から資金を借り入れ設備投資行動をとる。

・倒産行動

製造する製品種の減少は当該製品種の当期販売量が 0 であった場合に廃業フラグを 1 増加させ、販売量が 0 以外であった場合に廃業フラグを 1 減少させる。廃業フラグが所与の値（廃業指数）を超過した場合に当該製品種の生産を停止する。

生産を行っている製品種が全て生産停止となった際に当該企業は倒産とし、生産者エージェント自体が消滅することとした。倒産した生産者は銀行借入金があれば全額を返済し、所属消費者は別生産者にランダムに再配分されるものとする。

3. シミュレーション条件

人工経済システムにおける振舞いを確認するため、全てのエージェントが存在する C-R-W-E-B シミュレーション、の他に、C、R のみが存在する C-R シミュレーション、C,R の他に W を加えた C-R-W シミュレーションの3種類のシミュレーションを実施した。各シミュレーションの主な条件を表2に示す。

表2 シミュレーション条件

エージェント種類	C,R	C,R,W	C,R,W,E,B
消費者数	10	100	100
消費者固定給	6000~24000 ランダム	4000~8000 ランダム	4000~8000 ランダム
リテイラー数	3	10	20
ホールセラー数	0	3	3
製品初期価格	ランダム	ランダム	ランダム
リテイラー製品種	3	6	10
賃金支払いルール	———	賞与有	賞与有/無
生産調整ルール	有	有	有
価格調整ルール	有	有	有
短期借入ルール	———	無	有/無
投資ルール	———	無	有/無
倒産ルール	———	有	有/無
長期借入金返済期間	———	———	60/120/180

C-R シミュレーションでは、価格・生産量調整行動の条件について検討した。(1)より、定期発注方式に基づき在庫切れの確率を5%として在庫目標値を決定し、在庫目標値から前期末在庫量を引いて次期生産量とする。また、価格調整行動により価格の増減を行うものとする。需要予測に用いる販売記憶期間は3~50、価格変更限界フラグ数(価格調整行動指数)は3~10の間で変化させ、期あたりの価格および生産量の変更割合は共に5%とした。消費者の可処分所得は一定とした。

C-R-W シミュレーションではWはRの原料を生産して市場に供給し、Rは生産する製品種毎に市場から原料を購入し、C向けの製品を生産して市場に供給する。CはRまたはWのいずれか一つで労働して得た賃金を原資として市場からRの製品を購入する。この場合資金はシステム内で循環する。但し銀行の存在は無視しているため、Cの可処分所得は前期末の残金と新たに得た賃金の和となる。

CおよびRはそれぞれ市場から製品あるいは原料製品を購入するが、この際同じ製品種であれば市場の中で最も安価な製品を選択し購入するとした。

また賃金は固定給とボーナスで構成されるとし、固定給は4000~8000の間で乱数で決定した。生産者の賃金以外の初期経費は乱数で与えたが、生産原価はWの場合、製品1個当たりの賃金となり、Rの場合はそれに原料購入代金を加えたものとなる。固定給は每期利益の多寡にかかわらず支払うこととした。生産量・価格調整ルールについては、C-R シミュレーションの結果に基づき、販売記憶期間を5、

価格調整行動指数を10とした。これらの条件に加えて、Wの生産量上限値を300~600の間で変更し、R製品の価格および販売量への影響を調べた。

C-R-W-E-B シミュレーションでは、賃金支払いルール、および生産量・価格調整ルールに、設備投資行動ルールおよび倒産行動ルールを加えて、総合的な人工経済システムの挙動を解析した。賃金支払いについては売上から経費を引いた残額が固定給の額に満たない場合には不足額を銀行から短期借入金として借り入れる。Rの原料購入の際にも資金不足があれば不足額を銀行から借り入れる。短期借入金は翌期に一括返済する。ボーナス給ありの場合には、売上から固定給を含む経費、および長期、短期の借入金の返済金を支払った残額がプラスであればそのある割合を各Cエージェントの固定給に比例した割合でCにボーナス給として配分する。ボーナス給支払い比率は0.1~0.4としてその都度乱数で決定した。

また、設備投資要求指数は10とし、設備投資による生産量上限値の増加率は50%とした。この際の借入は長期借入金であり120期又は60期、180期の均等返済方式で返済する。1期を1カ月とすればこの返済期間は10年に相当する。貸出金利は1%/12期とした。廃業指数は20とした。

銀行は1者のみ存在しC,R,W,Eの各エージェントの剰余金を預金として預かり、RおよびWの資金要求に応じて資金の貸出を行う。銀行は手元資金不足を避けるために準備金を設定し手元資金が準備金を下回らないように資金管理をする。準備金は毎期、期首の預金総額に一定割合をかけた額とし、その割合は10%とした。生産者の短期および長期の貸出は預金総額から準備金を差し引いた額を上限とする。また長期貸出は設備投資要求を発生しているR,Wを乱数で選出し、貸出金上限値の範囲内で設備投資に必要な額の貸出を行う。

4. シミュレーション結果

4.1 C-R シミュレーション

消費者の可処分所得を一定値として、製品の価格、供給量、需要量の変化を解析した。この場合シミュレーション初期の製品価格のレベルによって需要と供給に大きな差異が生じるが、生産者の生産量・価格調整機能によって製品種毎に生産量と市場平均価格が変化し、図2に示すように、製品価格は製品種毎にほぼ一定値に収斂し、市場への製品供給量と消費者による購買量(総需要)はほぼ均衡することが確認された。この際、需要予測に用いる販売記憶期間は5未満では品不足と品余りの振れ幅大きく、20以上では均衡に長時間を要する傾向があることから、適正記憶期間は5~10程度であることがわかった。また価格調整行動指数についても価格変

化の振れ幅と均衡への収斂の観点から、10 程度が適正であることがわかった。

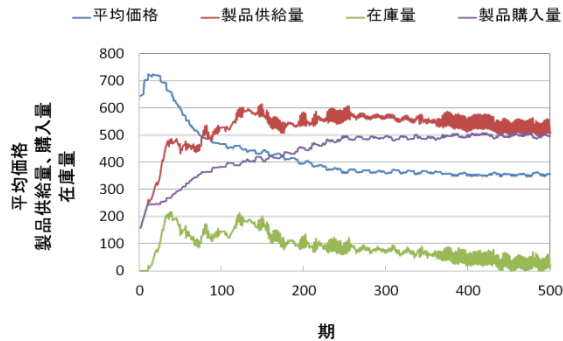


図 2 リテイラー製品平均価格、製品数の周期的変化

4.2 C-R-W シミュレーション

本シミュレーションでは、資金循環条件、すなわち消費者はいずれかの生産者のもとで労働して賃金を得、それが可処分所得となる条件とした上で、W の生産量上限を種々変更している。この場合、市場価格は計算のスタート後早期にほぼ均衡した値となり、また R の生産量が原料制約により制限されているため、W の生産量の上限值が低下するにつれて製品価格が上昇する傾向がみられ、W の生産量上限が 300 の場合には、いくつかの R について計算期間中に倒産が認められた。これは生産量が原料制約で限定されるために製品 1 個あたりの固定費負担が重くなり価格低下余力が小さくなるためである。

4.3 C-R-W-E-B シミュレーション

4.3.1 ボーナスルールありの場合の挙動

全てのエージェントをシステムに含め、設備投資ルールおよび銀行との取引を考慮した場合には、

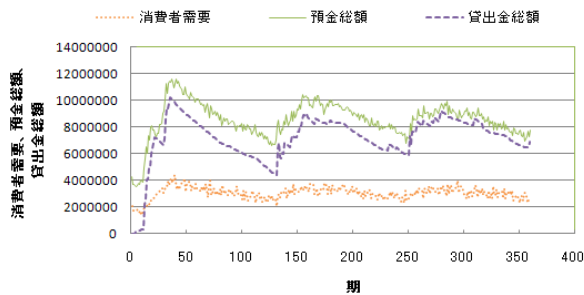


図 3 銀行預金総額、貸出金総額および消費者の総需要の周期的変化。

図 3 に示すように、銀行のトータル預金額、トータル貸出金額および消費者の総需要が期の変化とともに周期的に変動する現象、即ち景気循環が観察された。

本モデルにおいて景気循環がみられたメカニズムを確認するため、消費者の賃金の変化を解析した結果を図 4 に示す。

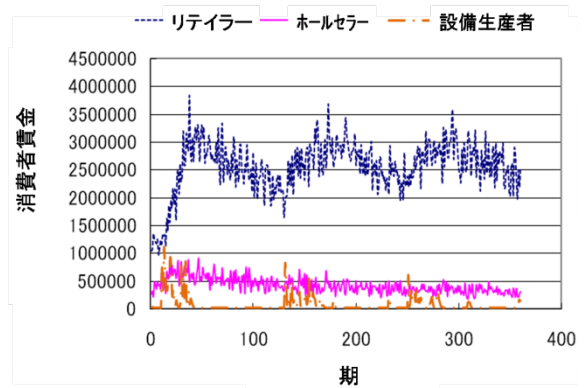


図 4 R,W,E 生産者の下で働く消費者の賃金の周期的変化。

図 4 に示すように、初期に E 生産者のもとで労働する消費者の賃金が大幅に増加し、その後 R および W のもとで労働する消費者の賃金が増加し、ある時点でピークを迎えた後下降に転じ、120 期程度の時期に再び設備会社での労働者の賃金の増加とそれに続く R 労働者および W 労働者の賃金が増加する傾向がみられ、これが反復して起こっている。

一方、この間の設備投資回数の変化を見てみると、図 5 に示すように、設備投資回数はおよそ 120 期の間隔で断続的に増加しており、設備投資回数の増加時期は E 労働者の断続的な賃金上昇時期とほぼ一致している。

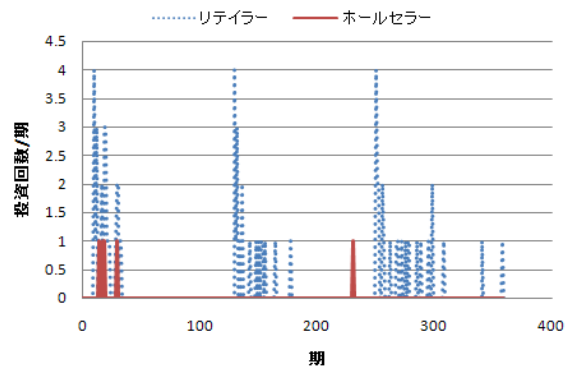


図 5 各期における生産者の設備投資回数

更に、この間の製品平均価格（すなわち物価水準）をみると、図 6 に示すように、預金額や賃金の総額が増加している時期に価格の上昇が起こっており、預金額や賃金の総額の増加・減少と製品平均価格の上昇・下降が時期的に対応していることがわかる。

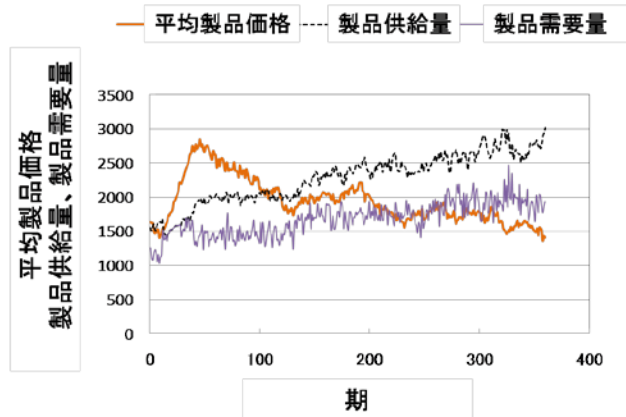


図 6 リテイラー製品の供給量、購買量、および平均価格の変化

なお、図 6 において、R 製品の平均価格が上昇下降を繰り返しつつ全体として低下しているのは、本モデルにおいて設備投資は考慮されているが設備の償却は考慮されていないために、図 5 に表れているように製品供給量が時間の経過に伴い増加するためであり、価格の低下に伴い需要も増加傾向を示している。

これらのことから、図 4、図 6 に見られる種々の特性値の周期的変動、即ち景気循環のメカニズムは次のように考えられる。まず景気回復の初期に、経費が少なく価格低下余力のあるいくつかの生産者が、低価格故の需要集中により生産能力が逼迫するため、その生産能力を上昇させるために設備投資を行う。それにより設備生産者が大きな利益を得、設備生産者の下で働く消費者の賃金が大きく上昇する。その結果、種々の製品の需要が増加し、それが、W および R の下で働く他の消費者の賃金上昇につながることで、更に種々の製品の需要が増加する。需要の増加により再び設備投資の需要が増加し、生産者利益の増加と需要増加の好循環が続く。一方、景気上昇期に製品価格も増加するため、ある時点で需要の反転が生じ、景気は下降に転じ、生産者利益の低下、賃金の低下、製品価格の低下が進行する。その後、製品価格の低下に伴いある時点で需要の反転が生じ、再び景気回復のステージに入る。この景気循環の周期は長期借入金返済期間とほぼ一致している。

以上のメカニズムの妥当性を確認するため、長期借入金返済期間を 60 期、180 期に変更して解析を行った結果を図 7 および図 8 に示す。

図 7 および図 8 に示すように、長期借入期の返済期間を 60 期、180 期に変更した場合にも、120 期の場合と同様に、銀行の預金総額、貸出総額および消費者需要が周期的に変動がみられ、かつその周期がそれぞれ長期借入金返済期間とおおむね一致していることが分かる。

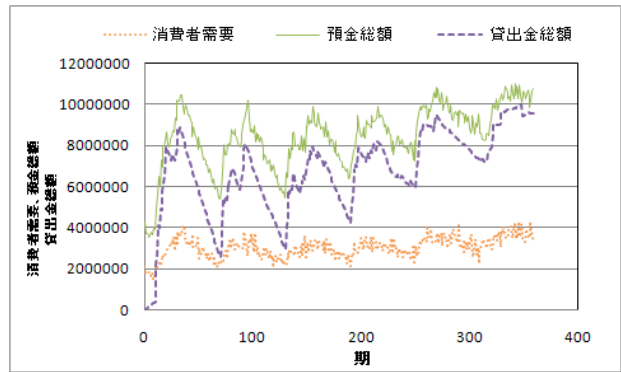


図 7 返済期間 60 期(n=60)における銀行預金総額

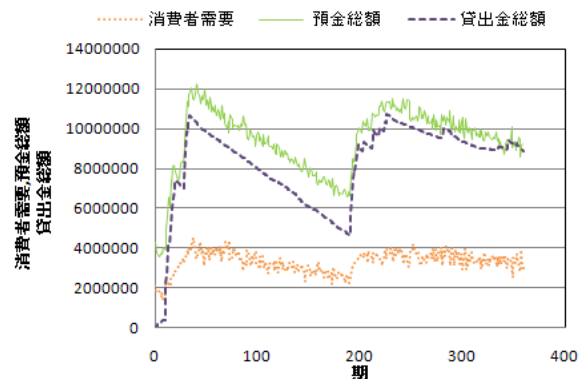


図 8 返済期間 180 期(n=180)における銀行預金総額

また図 7、図 8 の計算条件においても、図 4、図 5、図 6 と同様の、消費者賃金、設備投資回数、製品平均価格等の周期的変動が観察されることが確認された。

これらのことから、本モデルにおいて観察された景気の循環は、設備投資に伴う銀行借入れにより市場に流通する資金の流動性が増加することと、その後の物価上昇に伴う需要低下と、市場から銀行への資金の逆流が周期的に起こることによるものであり、実際の内生的景気循環の基本的メカニズムを再現しているものと思われる。

4. 3. 2 ボーナスルール無しの場合の挙動

一方、ボーナスルールを採用しない場合、即ち、生産者の利益に関係なく賃金を一定とした場合には、図 9 に示すように景気循環が発生せず、生産者の預金総額が一定に伸び続ける動きを示した。

また、ボーナスなしとした条件下では、図 10 に示すように、60 期までに 20 のリテイラー中 6 が倒産し、以降も断続的に倒産を起こす生産者が続き、最終的に 16 エージェントが倒産する結果となった。

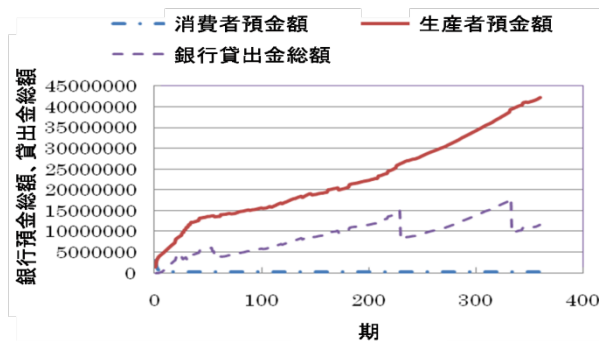


図9 ボーナス無しの場合の銀行預金総額、および貸出金総額の変化

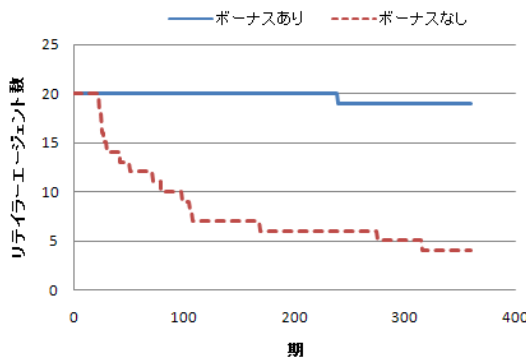


図10 ボーナス無しにおけるリテイラー数推移

同条件下での製品の平均価格、製品供給量、製品購入量の推移を図11に示す。生産者が減少する結果、製品供給量が徐々に低下し、市場全体に流通する製品の数量の低下に伴い価格が上昇する結果となった。

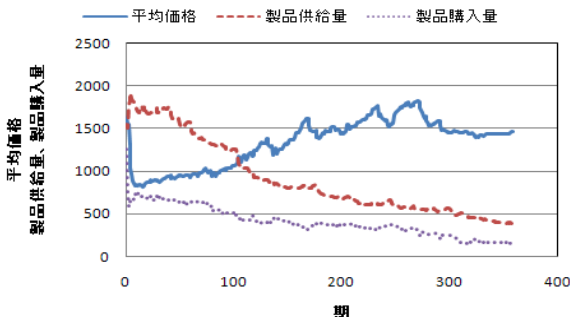


図11 ボーナス無し条件下でのリテイラー製品における平均価格、供給、需要量の変化

これは生産者の利益が消費者の賃金に反映されない場合には、生産者利益が消費者需要を刺激する効果がないために、生産者の生産コストの低下余力のない生産者は売上低下により倒産することとなり、市場の寡占化が進行する。その結果、生産者数の低下により価格低下余力のある勝ち組に売り上げが集中し、得られた利益により預金が増加し、資金がさらに勝ち組生産者へと流入するという歪みの加速現象が現れている。また、このサイクルを繰り返した

結果、需要低下により新たな設備投資は起こらず、資金は銀行に逆流する。

このことは、内需による景気回復を実現するためには生産者利益が消費者に還元されることが不可欠であることを示しているように思われる。

5. まとめ

価格、生産、および設備投資の自己調整機能、およびエージェント間の資金循環機能を内包した、消費者、3種類の生産者、および銀行からなる人工経済システムのマルチエージェントモデルを構築し、システムの振舞いを解析した。その結果、本モデルの人工経済システムは、価格の均衡、景気循環、など、実システムと類似の特徴が再現されることが分かった。

また、長期借入の返済期が一定の場合、景気の循環の周期は返済期間と一致することがわかった。本モデルにて観察された景気の循環は、設備投資に伴う銀行借入れにより市場に流通する資金の流動性が増加することと、その後の物価上昇に伴う需要低下と、市場から銀行への資金の逆流が周期的に起こることによるものであり、実際の内生的景気循環の基本的メカニズムを再現しているものと思われる。また、企業収益がプラスの時にその一部を従業員給与に還元しない場合には、消費が向上せずに寡占化が進行し市場の安定的な形成が困難になる結果が得られた。

今後本モデルのアプローチに加えて、政府、貿易、金融投資、金利、為替などの要因を考慮することにより、様々な経済問題の理解への応用に発展できる可能性があると考えられる。

参考文献

- [1]出口弘：「複雑系としての経済学」,日科技連出版,2001
- [2]西部忠：「進化経済学のフロンティア」日本評論社, 2004
- [3]寺野隆雄,出口弘：「社会科学におけるエージェント研究の動向と課題」,電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, No.535, 2002, pp25-32.
- [4]今福啓：「マルチエージェント社会における生産-消費間の資金循環ダイナミズムのモデル化と分析」,独協大学独協経済第84号,2007,pp55-64.
- [5]G.Dossi,G.Fagiolo and A.Roventini:”Lumpy Investment and Endogenous Business Cycles in an Evolutionary Multi-Agent Model”,Cybern Syst,Vol.38,No.7,2007,pp631-666
- [6]北村行伸：「物価と景気変動に関する歴史的考察」,日本銀行金融研究L所,金融研究 2002,3月
- [7]N.Basu,R.J.Pryor,,T.Quint,and T.Arnold, Aspen: “A Microsimulation Model of the Economy”, Sandia Report , SAND96-2459, Sandia National Laboratories,October,1996
- [8]三浦泰久,谷本潤,藤井晴行,萩島理：「持続可能型社会における経済システムに関する一考察—マルチ・エージェント・シミュレーションによる人間-環境-社会システムの解析—」電子情報通信学会技術研究報告, Vol.102, No.615, pp41-46