

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—

三浦 泰久^{*†} 谷本 潤[†] 藤井 晴行[‡] 萩島 理[‡]

^{†*}九州大学大学院総合理工学府 〒105-0123 福岡県春日市春日公園 6-1

[†]九州大学大学院総合理工学研究院 〒105-0123 福岡県春日市春日公園 6-1

[‡]東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: [†] {es202178,tanimoto,aya}@{cse.ec,cm}.kyushu-u.ac.jp, [‡] hfujii@arch.titech.ac.jp

あらまし 3つの経済主体からなる経済システムを人工社会に仮構した。本モデルに登場する3つの経済主体は政府、企業、消費者である。経済システムは動的マルチエージェントシステムである。モデルにおけるエージェントの学習には、ニューラルネットワークとGAを組み合わせたものを適用している。本モデルを用いて、数値実験を行い、その結果について考察を行った。

キーワード 経済モデル, 人間-環境-社会システム,
遺伝的アルゴリズム, ニューラルネットワーク

A Study on the Economics in an Environmental Conscious, Sustainable Society

—An analysis of the Human-Environmental-Society System by a multi agent simulation technique—

Yasuhisa MIURA[†] Jun TANIMOTO[†] Haruyuki FUJII[‡] and Aya HAGISHIMA[‡]

[†] Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

6-1 Kasugakoen, Kasuga-shi, Fukuoka, 816-8580 Japan

[‡] Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

E-mail: [†] {es202178,tanimoto,aya}@{cse.ec,cm}.kyushu-u.ac.jp, [‡] hfujii@arch.titech.ac.jp

Abstract An economic system was developed as a form of multi agent simulation on an artificial society in order to identify our feasible future for sustainable society. The economic system consists of three parts such as the government, companies and consumers, which have bilateral relations including dilemma situations. For instance, the government wants to reduce holistic CO₂ exhaustion in the nation to cooperate the international community, while consumers want less expensive products than environmental-conscious one. Then, at this moment, the government has to invest for suitable education system to lead the people facing environmental-conscious phase. The model can deal with these situations, where Neural Network and Genetic Algorithm were involved. This paper depicts the model structure and a discussion of the numerical experiment is presented.

Keyword Economic model, Human-Environment-Society System,
Genetic Algorithm, Neural Network

1. 緒言

所謂 COP3 (気候変動枠組み条約締結国会議/京都議定書) に対応して、我が国には 1990 年対比で 6% の温室効果ガス (CO₂ など 7 種) 削減が課されている。2002 年 6 月、衆参両院で COP3 は批准された。今後同議定

書が国際的に発効すると、日本に対する上記の削減目標は法的拘束力を有することになり、もし約束期間中に達成されねば厳しいペナルティが待ち受けている。然るに現下、我が国の温室効果ガス (以下代表して CO₂ と表記する) 排出量は 1990 年比で約 8% 増加しており

(環境省推計)、自助努力に加え JI、CDM、排出権取引を駆使したとしても現実的には目標達成は覚束ない状況にある。CO₂ 排出削減には技術開発投資が必要である。その必要な投資規模は日本のように既に省エネルギーが可成りのレベルにまで達している場合ほど大きなものとなる(これは所謂 MAC カーブが示唆するところである)。環境関連技術への投資は世上云うように新たな産業創生機会であるともいえないが、短期的には経済へ大きなドラッグフォースとなることは避けられない。勿論、環境コンシャスは疑義なく善なるテーゼではある。しかし、COP が一面アメリカ対欧州の政治的角逐から生まれてきた経緯を識り、現在の日本に環境、サステナビリティ等言葉先行の皮相なブームを観るとき、我々に刻下の生活レベルを落としてまでも環境コンシャスを志向するする堅固な覚悟があるとは到底思えないし、もしそうであるなら COP3 の枠組み参加を含め、環境問題に関する真摯な議論が今こそ惹起せられるべきではないかと思量されるのである。

本研究は以上のような背景の基に行われている。市民、企業の各主体が夫々の利得を追求するとき、それらが国家と云う大域の最適解とまま一致しないことは複雑系科学の教えるところである。本研究では、一方で利害の反する如上三者を、介在する経済システム、政治システム、社会システムを含めて、人工社会として構築し、マルチエージェントシミュレーションにより真の持続可能型社会のあり方を考究することが終極の目的である。本稿では、構成したプロトタイプモデルについて報告する。

経済システムの動特性に関しては、例えば、9 つの経済主体からなる経済システムを国民経済計算 SNA(System of National Account)で代数的に表現した出口の研究[1],[2]がある。本研究では、企業活動に伴う CO₂ 排出と消費者の購買行為、それを俯瞰する国家の営為をより大局的に取り扱うモデルを目指し、経済縮退なき持続可能型社会が果たして達成し得るのかを明らかにしたい。

2. モデル

2.1. モデルの構成

ある一国で閉じた経済、政治システムを考える。当該国には、1 つの政府、複数の企業、多数の消費者が存在する。これら三者がエージェントである。夫々の企業は、価格と CO₂ 排出量をスペックとする単種の製品を生産し、消費者は自らの信念に応じて購買活動を行う。国は企業への課税と消費者教育を介して時況を俯瞰する。本モデルでは、これらの因果関係を、学習プロセスを介在させたモデルとして構成する。図 1 の

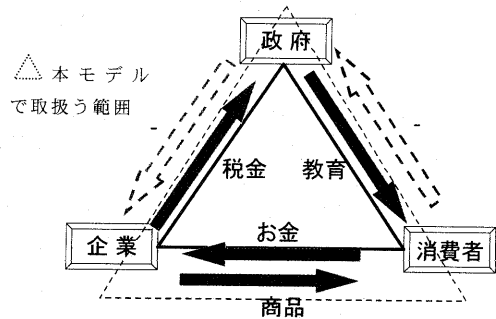


図 1 モデルの概念図

点線部が本モデルで取り扱う範囲である。

2.2. 企業エージェント

2.2.1. 商品

企業エージェントは商品を製造する。商品は消費者の生存に必須である。商品のパラメータは、商品の価格 Prc [monetary unit/個]と CO₂ 排出量を比喩する環境負荷度 L_{env} [仮想排出量/個](以下単位は略す)である。夫々は、各企業の投資による技術開発により低減させることが出来る。

2.2.2. 企業の収益

各企業エージェントは、収益 Pft [monetary unit]、売上高 S [monetary unit]、生産コスト C [monetary unit]、税金 T [monetary unit]、投資 Inv [monetary unit]の 5 つの属性値を持つ。以上は全て一期当たりの値で定義されている。なお、本モデルでは生産コストは売り上げに対して定率の値とし、生産活動におけるスケール効果は考えない。各企業の売上高 S 、環境負荷度 E_{env} は、それぞれ商品 1 単位当たりの価格 Prc および環境負荷度 L_{env} に売却された個数を乗じたものである。企業エージェント i の税金を控除する前の営業利益 (operating profit) P_o は次式で与えられる。

$$P_o(i) = S(i) - C(i)$$

税金 T には、環境税 T_{env} と法人税 T_{cor} が存在する。環境税とは、総環境負荷度 E_{env} に税率 RT_{env} を乗じて算出され、法人税 T_{cor} は前述の営業利益 P_o から環境税 T_{env} を引いた数値に税率 RT_{cor} を乗じて算出される。それぞれの算出式は次の通り。

$$T_{env}(i) = E_{env}(i) \times RT_{env}$$

$$T_{cor}(i) = (P_o(i) - T_{env}(i)) \times RT_{cor}$$

ただし、法人税は営業利益 P_o から環境税 T_{env} を引いた数値がマイナスの場合 ($P_o - T_{env} < 0$) には課税されない。

以上より、最終利益 P_{net} は

$$P_{net}(i) = P_o(i) - T_{env} - T_{cor}$$

で表される。

2.2.3. 投資活動

各企業エージェントは得られた最終利益 P_{net} 全額を投資活動に充てる。ある期において最終利益が赤字の企業は投資活動を行うことが出来ない。投資できる技術の種類は以下の2つである。

A) 価格（製造コスト）を改善する技術 I_A

B) 製造時の環境負荷度を改善する技術 I_B

投資Aは商品の価格を下げる効果がある技術 TL_A に投資する行為であり、投資Bは商品の環境負荷度を下げる効果のある技術 TL_B に投資する行為である。

投資A,Bという2種類の投資目標に対して、投資可能額である最終利益 P_{net} を割り当てる。投資A,Bに対する投資配分は、 $[0.0, 1.0]$, $[0.1, 0.9]$, ..., $[1.0, 0.0]$ の11組 ($I_{str,x}=11$) の離散的投資配分比から選択される。従って、投資配分 $RInv_A$, $RInv_B$ は、以下の様に表される。

$$RInv_A(k) = k \times 0.1$$

$$RInv_B(k) = 1 - RInv_A(k)$$

ただし、 $k = 0 \sim I_{str,x}$

ここで企業エージェント i の $RInv_A(k)$, $RInv_B(k)$ を選択する確率 $p_i(k)$ は、上記11組の離散的投資配分比のうち、 k 番目を選択する確率であり、以下に表されるニューラルネットワークの出力 o_k に対しルーレット選択を適用して求める。

$$o_k = \frac{1}{1 + \exp\left(-\sum_{j=1}^{N_Sense} w_{jk} \times s_j\right)}$$

N_Sense : 各企業エージェントのセンサー入力数

w_{jk} : 入力ユニット j から出力ユニット k への結合係数

s_j : センサー入力信号

各企業エージェントの結合係数 w_{jk} は後段で説明する遺伝的アルゴリズムを適用し、進化計算により学習させる。

投資による改善効果である技術レベルの差分 ΔTL_A , ΔTL_B は次式となる。

$$\Delta TL_A = -TL_A|_{now} \times P_{net} \times RInv_A \times \alpha$$

$$\Delta TL_B = -TL_B|_{now} \times P_{net} \times RInv_B \times \beta$$

ここで、 α , β は恣意的に定めた投資効率を表すパラメータである。ここでは $\alpha = \beta$ とする。従って、 $RInv_A > RInv_B$ であれば次期は今期より価格を重視した商品が市場に送り出されることになり、 $RInv_A < RInv_B$ であれば環境に配慮した商品となる。

なお、商品の価格 Prc と環境負荷度 L_{env} は、それぞれ「価格（製造コスト）の改善」と「環境負荷度の改

善」の技術レベルに等しいとする。

$$Prc = TL_A$$

$$L_{env} = TL_B$$

これら両者は各企業エージェントの商品情報である。

2.2.4. 入力信号

入力信号は1チャンネル ($N_Sense=1$) とし、その企業の商品のシェアが前回よりも拡大した場合に-1を、縮小した場合には1を付与する。

2.2.5. GAによる学習プロセス

結合係数 w_{jk} の進化計算は以下のプロセスに基づいて行う。進化計算の単位となる遺伝子は、入出力ユニットを結合する $k(=I_{str,x} \times N_Sense)$ 個で構成される重みのベクトルであり、 w_{jk} は $[-0.5, 0.5]$ でランダムに初期化されている。また遺伝子プールには n_{px} 個の遺伝子が存在する。この遺伝子プールは全企業で共有する。以上の遺伝子を用いて、以下の手順により遺伝的アルゴリズムを適用する。

(1) 各企業エージェント（全 N_{CPN} 社）は前述の遺伝子プールから各々1個の遺伝子を選択し、1回の生産-販売-投資活動からなる期を N_{est} ステップ繰り返す（1期=1ステップ）。その際に、後段で述べる適合度をその都度計算する。 N_{est} ステップ経過後の遺伝子は、使用済み遺伝子プールに移動する。

(2) (1)を n_{px}/N_{CPN} クール ($n_{px}/N_{CPN} \times N_{est}$ 期) 繰り返した結果、当初遺伝子プールに存在した n_{px} 個の遺伝子は全て使用済み遺伝子プールに移動したことになる。

(3) 使用済み遺伝子プールからそれぞれの適合度を基にルーレット選択により独立に2個の親遺伝子を選び出す。これらに交叉（交叉確率0.25）、突然変異（突然変位確率0.01）を施し、2個の子遺伝子を次世代の遺伝子プールに補充する。この作業を次世代の遺伝子プールが n_{px} 個に達するまで繰り返す。これにより、1世代が終了する。

2.2.6. 適合度

適合度 fit_x は、 N_{est} ステップ間における各企業エージェントの最終収益 P_{net} の和である。企業エージェントは自らのエゴである収益の向上を絶対目標としている。

$$fit_x = \sum_{i=1}^{N_{est}} P_{net}$$

2.3. 消費者エージェント

2.3.1. 消費者エージェントの概略

消費者エージェントは、1ステップごとに定額の収入を得、その全額をもって企業の生産する商品を購入する。次ステップへの繰越・貯蓄は考えない。

2.3.2. 消費者の価値観

消費者エージェントは企業の生産する商品を選択するために、各々異なる価値観を有する。この価値観は、政府エージェントの教育により変化する。価値観は W_{cost} , W_{env} で表される。前者は商品を選定する際に価格を重要視する重み、後者は環境負荷度を重要視する重みである。

$$W_{cost} + W_{env} = 1$$

2.3.3. 商品の選定

消費者エージェントは、自らの価値観により企業の生産する商品を選定する。選定方法は以下による(図2)。

(1) 商品情報である価格と環境負荷度をそれぞれ縦軸、横軸とした二次元平面に、各企業エージェントの商品情報をプロットする。基準点は初期状態を表し、全企業エージェントの商品情報プロットは計算開始時にはこの基準点に一致している。エピソードの進行に従い、投資活動に応じて各企業エージェントの商品情報プロットはこの基準点から左下の領域に向けて移動する。グレーにハッチした領域を逸脱することはない。

(2) 各消費者エージェントの商品選好は基準点を通る傾き $-W_{env}/W_{cost}$ の直線で表される。価格だけを見る $W_{cost}=1$ の消費者は横軸に平行な直線、環境負荷度しかみない $W_{env}=1$ の消費者は縦軸に平行な直線となる。

(3) 企業エージェント i の商品情報プロットから消費者エージェントの商品選好直線へ垂線を引きその距離を L_i とする。この消費者エージェントにとっては L_i が大きければ大きいほど自らの選好に適した商品となる。実際の商品選択は、 $L_i - \{L_{min}, (L_{max} - L_{min})\}$ にルーレット選択を適用して購入企業を決定する。ここで、 L_{max} , L_{min} はそれぞれ

れ全企業エージェントの距離 L の最大値、最小値である。

2.4. 政府エージェント

政府エージェントは、企業エージェントから法人税と環境税を徴収する。政府エージェントにとって自らの目標は、税収の確保とそれと相反する国内総環境負荷(全企業エージェントの生産活動に伴う環境負荷の総和)の低減である。環境負荷の低減には環境税を引き上げることで企業エージェントに直接働きかけるオプションがあり得るが、本稿では消費者エージェントに教育を施し、彼らの価値観を変化させることで間接的に企業の生産活動をコントロールする方法のみを考慮した。

2.4.1. 消費者エージェントへの教育

教育にはコストが伴う。すなわち、政府エージェントの教育コスト控除後の税収 Tax は以下にて表される。

$$Tax = \sum_{N_{cpw}} (T_{env} + T_{cor}) - C_{edu}$$

教育コスト C_{edu} は価格重視の価値観を付与するには低コスト、環境負荷度重視の価値観を付与するには高コストとし、前者から後者へは線形的に増加するとした^{*1}。

政府エージェントの教育の結果、消費者エージェントの価値観には $I_{str,y}$ グループの階層が存在する。各階層に属する消費者エージェントの価値観は以下にて付与する。ただし、 $Rnd()$ は $[0,1]$ の一様乱数を表す。

$$W_{cost} = 0.2 \times (1 - Rnd())$$

$$W_{env} = 1 - W_{cost}$$

ただし、 $l = 1 \sim I_{str,y}$

2.4.2. GA による学習プロセス

政府エージェントは全消費者エージェントに教育を施すに当たって、#1 から $\#I_{str,y}$ の各階層をどれだけの構成比にするかを意思決定する。 $\#I_{str,y}$ 階層の育成には教育コストがかからないが、環境負荷度重視の#1階層の撫育は税収を圧迫する。従って、教育の意思決定は税収が環境負荷かのジレンマを引き起こす。構成比の変更は遺伝的アルゴリズムによる学習プロセスに基づく。学習の周期は 2.2.5 節で説明した企業エージェントの学習に対してメタな関係となっている。具体的には、政府エージェントの 1 遺伝子を使用している間に企業エージェントは 10 世代進化する。

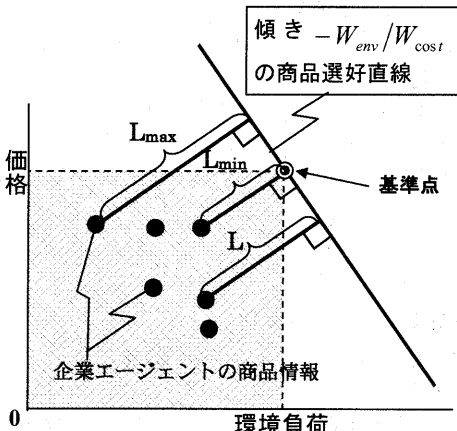


図2 商品の選定

*1 厳密には各階層ごとに異なる教育コストがかかり、環境負荷度重視の階層を育成するには高コストとした。

2.4.3. 適合度

適合度 f_t について、2つの概念を定義する。

- (1) 健全な国家財政 (税金-教育コストの最大化)

$$f_{t,y,tax} = Tax$$

その時点の財政状況をそのまま適合度とする。従って、政府エージェントは、企業エージェントの環境負荷の総和を全く省みない。

- (2) 環境コンシャス (環境負荷の最小化)

$$f_{t,y,env} = \sum_{N_{CPN}} (E_{env|now} - E_{env|ago})$$

国全体の環境負荷の差分を適合度にする。従って、自国の経済時況には顧慮しない。

3. 数値計算

政府エージェントの適合度を(1)健全な国家財政とした場合、(2)環境コンシャスとした場合について計算した。

1 試行は、政府エージェントが 100 世代進化するまで繰り返す。なお、政府エージェントの 100 世代は企業エージェントの 30000 世代に相当する。これを 1 エピソードとし、結果は 100 エピソードのアンサンブル平均で表す。

$N_{GMT}=1$ 、 $N_{CPN}=10$ 、 $N_{CSM}=20$ 、 $n_{px}=120$ 、 $n_{py}=30$ 、 $N_{est}=6$ 、 $I_{str,x}=11$ 、 $I_{str,y}=5$ とした。また、 P_{rc} 、 L_{env} の初期値は何れも 100 とした。

4. 結果

図 3~6 は(1)健全な国家財政とした場合の結果である。エピソード終了時 (政府エージェント 100 世代、企業エージェント 30000 世代) の全企業平均の商品価格と環境負荷度は 43.42、53.81 である。価格の方が低減幅が大きい (両パラメータは取り扱い上対称で初期値はいずれも 100)。

図 3 は第 1,10,100 世代における政府エージェントの行動選択確率、図 4 は教育によりもたらされた消費者エージェントの所属階層の構成推移である。

政府は自らの財政に直接関わる教育コストを縮減するために環境教育を怠り、結果として価格重視の消費者集団が形成されている。

図 5 は第 1,3000,30000 世代における企業エージェントの行動選択確率、図 6 は企業エージェントが摂った投資戦略の構成推移である。

低価格指向の消費者が増えるに従い、価格低減のための投資をする企業が増えている。環境負荷低減のための投資もそれなりに生き残るのは、消費者が自らの商品選好上最適のものを選択せずに確率的な揺らぎを加味しているためである。

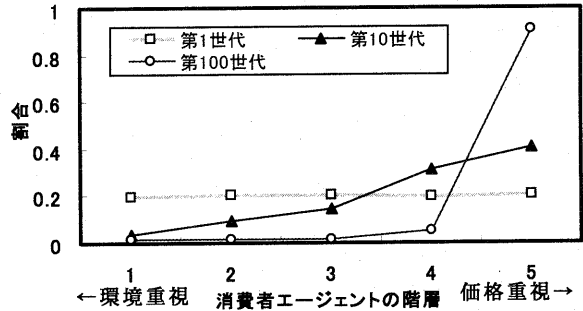


図 3 消費者エージェントの階層分布

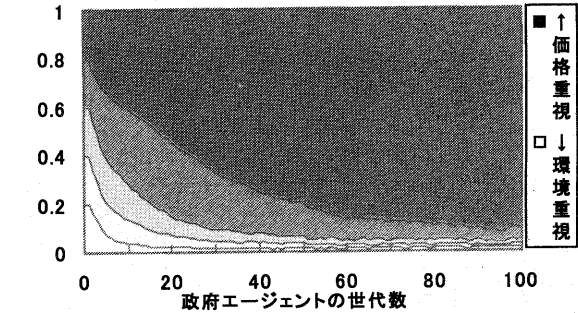


図 4 消費者エージェントの階層分布推移

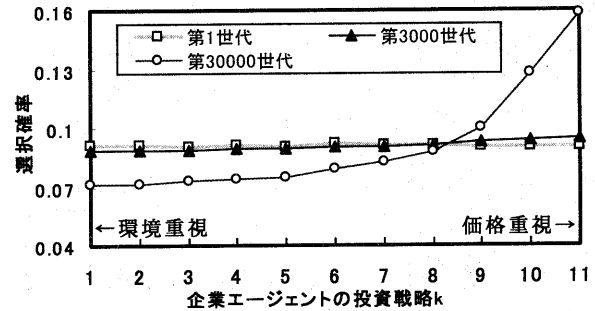


図 5 企業エージェントの投資戦略分布

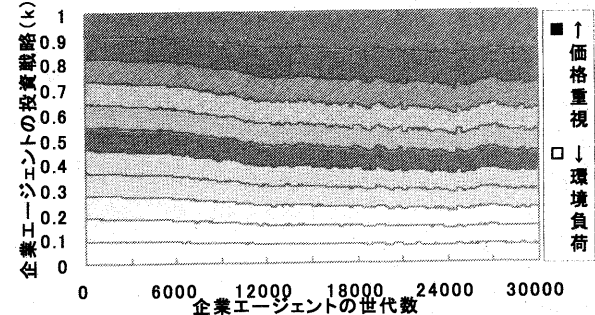


図 6 企業エージェントの投資戦略確率

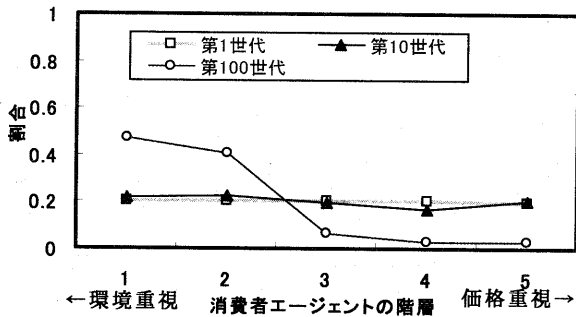


図7 消費者エージェントの階層割合

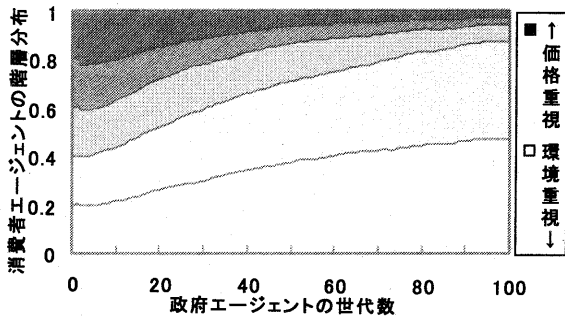


図8 消費者エージェントの階層分布推移

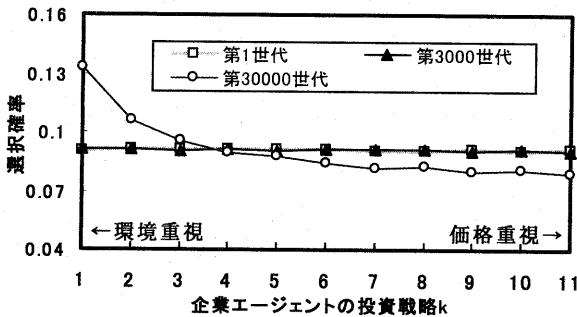


図9 企業エージェントの投資戦略確率

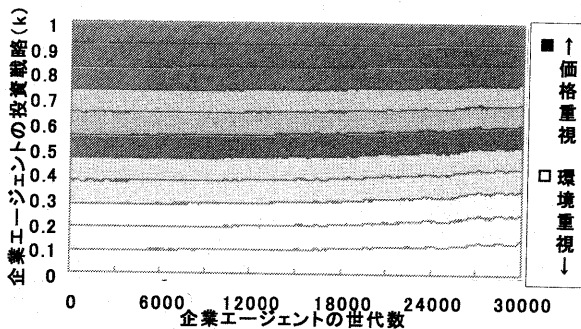


図10 企業エージェントの投資戦略確率

図7~10は国の方針が(2)環境コンシャスである場合である。エピソード終了時の全企業平均の商品価格と環境負荷度は51.01、47.30である。環境負荷度の方が低減幅が大きい。

政府は環境コンシャスの消費者を増やすべく、環境教育に力を入れている。それに呼応して、企業の投資戦略も環境コンシャス側にシフトしているが、(1)健全財政志向に比較して、その傾向は緩やかなものとなっている。これは、政府エージェントの適合度を考える際、財政は自らの教育投資を加減することで直接操作可能であるのに対して、環境負荷度は消費者教育を通じて間接的に企業の生産活動をコントロールせざるを得ないためである。

5. 結言

政府、企業、消費者からなるマルチエージェントシミュレーションモデルを構成し、数値計算結果と併せて報告した。本稿モデルにおいて、消費者選好の特性や政府の税率変更などいくつかの操作パラメータが考えられるので、この点に関して更に解析を進める。併せて、接続可能型社会の有り方を探る上で必要なモデルの付加リバイズを行う。

謝辞

本研究の一部は科研費萌芽研究(#14658122)、基盤研究(#14205087)による。関係各位に記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 出口弘, “経済システムの動的マルチエージェントモデル”, 第20回人工知能学会研究資料(SIG-FAI-9420-2 (10/3-4)), pp.9-16, 1994
- [2] 出口弘, 複雑系としての経済学, 日科技連出版社, 東京, 2000
- [3] 川村秀憲, 山本雅人, 大内東, “外部観測に基づく進化的フェロモンコミュニケーションの評価と群知能の創発現象に関する研究”, 計測自動制御学会論文集, 37(5), pp.455-464, 2001