

中小企業の環境経営の普及に関するエージェントベースモデリング： 方法と分析課題

在間敬子

京都産業大学経営学部 (zaima@cc.kyoto-su.ac.jp)

1. 研究の背景と本論文の目的

中小企業庁(2010)では、二酸化炭素排出量に占める中小企業の割合を、産業部門では 11%、業務部門では 43%と推計しており、中小企業が排出削減に取り組むことの重要性を指摘している。中小企業は、大企業に比べると規模が小さく個々の二酸化炭素の排出量も小さいが、環境省(2003)が指摘するように、小さな環境負荷でも積み重なると決して小さくはない。また、日本の製造業において、全企業数のうち中小企業の占める割合は約 99%であり、付加価値の割合では約 55%を占めている¹⁾。環境政策の観点では、企業数が多い中小企業の環境経営を促進することも、重要課題の 1 つである。

大手企業は環境経営を導入しており、製造業の中小企業の一部では、取引先大手企業からの要求に応じて、環境マネジメントシステムの認証取得など環境対策を実施しはじめている。在間(2008a)は、中小企業へのアンケート調査から環境経営を推進する条件として、以下の 3 つを明らかにしている。1 つは、厳しい市場環境下にある、あるいは、下請け型の中小企業では、取引先の環境配慮要求に応じて環境パフォーマンスを高めていることである。2 つは、市場環境が厳しくない、あるいは、経営資源に余裕がある、開発や販売などに強みがある、バランス型であるといった中小企業では、高い経済性により環境パフォーマンスを高めていることである。3 つは、いずれの場合でも、取引先や認証機関などによる環境情報サポートを利用することが有効なことである。

Parker et al (2009)は、既存の中小企業の環境経営推進に関する研究論文や、実際の環境政策では、中小企業の「タイプ」という視点が欠けていること、さらに、中小企業はさまざまなタイプがあるため単一の政策でなくタイプに応じた複数の政策が必要であることを指摘している。在間 (2010)では、環境経営の視点から中小企業を 4 つのタイプに分け、それぞれに必要な支援策が異なることを指摘し、中小企業や中小企業支援機関、地方自治体などへのヒアリング調査から、中小企業の環境経営を推進するための支援活動について、現状と課題を示している。

本研究では、中小企業の環境経営が普及する条件や支援策の役割に関して、エージェントベースモデリングによりシミュレーション分析を行う。ヒアリングやアンケートの実証研究で得られた知見をモデルに反映させ、シミュレーション結果から実証分析の有効性を評価し、さらなる分析課題を探る。すなわち、本研究では、中小企業の環境経営推進に関する研究の方法として、次ページの図 1 に示すような方法論の 3 角形を用いている。

本論文の目的は、中小企業の環境経営の普及条件を分析するエージェントベースモデリングの第一段階として、モデル化の方法を検討し、基本モデル設計を提示することである。さらに、基本モデルのシミュレーション結果を示し、今後の分析課題を示す。

以下、第 2 節では、中小企業の環境経営の普及条件を分析するためのモデル化の要素を示し、エー

エージェントベースモデリングとの関連を述べる。第3節では、環境問題やイノベーション普及に関するエージェントベースモデリング研究を概観し、本研究の特色を示す。第4節では、本研究の基本モデルを提示する。第5節では、基本モデルのシミュレーション結果を示す。第6節では、基本モデルの今後の分析課題、および、政策分析のための応用モデルの設計課題と分析課題を提示する。第7節で総括する。

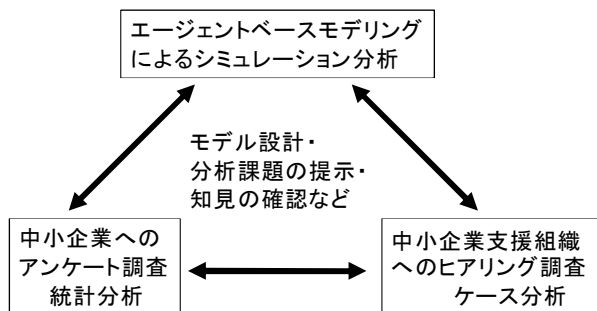


図1 本研究における方法論の三角形

2. モデル設計の要素とエージェントベースモデリングの方法

(1) 中小企業の環境経営の普及問題を記述するモデル設計要素

中小企業の環境経営の普及条件を検討するモデルに必要な要素を表1に示す。

表1 中小企業の環境経営に関するモデル設計の要素

| 項目 | 要素 |
|------------------------|-----------------------------------|
| ①市場 | 製品市場、部品市場 |
| ②経済主体 | 消費者、大企業、中小企業 |
| ③企業の意思決定 競争戦略 | 経済性・環境性の意思決定変数 経済性・環境性の「ルール」 |
| ④消費者の意思決定 | 選好、環境配慮の意識と行動 |
| ⑤行動変容・普及プロセス | 経済主体の学習 個々の学習・集団の相互作用と学習 |
| ⑥支援策分析 関連組織 中小企業 | 自治体、EMS認証機関、銀行、NPO 環境経営に関するタイプ |

まず、本論文では、これまで実証研究において主な対象としてきた下請け型の製造業の中小企業に焦点を当てる。そのため、少なくとも、中小企業が直面する市場、それらの取引先大手企業が直面する市場という2つ市場取引をモデル化する必要がある。従って、モデルには、消費者、大企業、中小企業という少なくとも3つのカテゴリーの経済主体の意思決定が含まれる。

企業の意思決定では、少なくとも経済性と環境性の意思決定変数を組み込む必要がある。従って、競争戦略としても、経済性と環境性の両側面を、意思決定をルールとして設計することが必要になる。

消費者の意思決定に関しては、多様な選好をモデル化することや、環境配慮に関する社会心理学の知見²⁾も考慮することも必要になる。

普及のプロセスは、意思決定を行う経済主体の行動変容や相互作用により生じる。行動変容や相互作用によるダイナミズムを表現するためには、個々のルールに基づく学習、集団相互の相互作用や学習を

モデル化することが必要である。

さらに、中小企業の環境経営を推進する支援策を分析する場合には、中小企業のタイプや、自治体、NPO、環境マネジメントシステムの認証機関、銀行などの関連組織とそれらの行動をモデル化することも必要になる³⁾。

(2) エージェントベースモデリングの方法

上述のように、中小企業の環境経営に関するモデル設計においては、複数の市場取引、複数の意思決定主体、複数の意思決定ルール、複数の学習モデルを組み込む必要がある。

また、経済学、経営学、社会心理学といった複数の領域にまたがるモデルを設計することになる。エージェントベースモデリングは、このような領域横断的なアプローチを可能にする有効な方法⁴⁾である。

エージェントベースモデリングでは、内部モデルを持ち自律的に意思決定を行うエージェントが相互作用することにより創発されるダイナミクスを明らかにすることができる。異なるカテゴリーのエージェントや、エージェントの多様な意思決定を、内部モデルやルールで記述することができる。Heckbert et al (2010)は、学問分野によりいくつかのエージェントベースモデリングの定義があるが、共通点は、ミクロなエージェントの相互作用によりマクロな結果が創発されることと、ヘテロなエージェントの行動のダイナミクスを明示的に表現することであると指摘している。さらに、Heckbert et al (2010)は、エージェントベースモデリングと他の方法の相違点を表2のように示している。

表2 方法の比較

| | ダイナミック フィードバック | 進化 | 自律性 | 多様な 相互作用 | 明確な適応 的意思決定 |
|----------------|-------------------|----|-----|-------------|----------------|
| 数理解析・統計解析 | × | | | | |
| システムダイナミクス | ○ | × | | | |
| 進化モデル | ○ | ○ | × | | |
| エージェントベースモデリング | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

出所) Heckbert et al (2010)をもとに筆者作成

エージェントベースモデリングは、「ダイナミックフィードバック (dynamic feedback)」「進化 (evolve)」「自律性 (autonomous)」「多様な相互作用 (heterogeneous interaction)」「明確な適応的意思決定 (explicit adaptive decision making)」を含むことが特徴である。

本研究では、中小企業が環境経営に取り組みそれが広まるプロセスを表現できるモデルを作成し、普及が生じる要因をシミュレーションから明らかにしようとしている。モデル設計においては、中小企業・大企業・消費者といった自律的な意思決定を行う多様なエージェント、ルールや周囲の状況への適応も含めた多様な意思決定を表現する内部モデル、エージェントの学習による行動変容、ミクロなエージェント間の相互作用から創発されるマクロなダイナミクスを含む必要がある。これらを含む方法として、エージェントベースモデリングが適していると言える。

3. 関連のあるエージェントベースモデリング研究と本研究の特色

(1) 環境問題に関する既存研究

在間(2008b)のレビュー論文では、環境問題に対する政策・制度デザインに関する既存研究を概観し、

エージェントベースモデリングの利点やモデルの特徴を整理している。既存研究が対象としている問題分野は大別して4つある。

1つは、企業の汚染排出制御という環境経済学の古典的問題の分野である。例えば、Kuscsik et al (2007)は、セルオートマトン型のモデルで汚染排出工場への分散型制御におけるフィードバックメカニズムの効果を分析している。

2つは、環境資源の利用や供給に関する問題の分野である。土地利用に関するエージェントベースモデリング研究を網羅したレビューとしては、例えば、Parker et al (2003)やMatthews et al (2007)がある。実証データや実験結果を踏まえたリアルなモデル設計やシミュレータにより、現実のケース分析が行われている⁵⁾。資源問題を取り巻くステイクホルダーが分析過程に参加して課題解決をはかるツールとしても活用されている⁶⁾。

3つは、環境配慮の普及に関する問題分野である。例えば、Mosler, and Martens (2007)は環境配慮の態度の普及に対するキャンペーンの効果を分析している。環境配慮型製品の普及に関する市場取引を含むモデル分析には、Zaima (2005, 2006)およびJanssen, and Jager (2002)がある。これらはエージェントの内部モデルに社会心理学の研究を踏まえていることが特徴である。最近では、具体的な製品・サービスを対象として実証研究やケース分析を踏まえたモデル設計がなされている。例えば、Schwoon (2006)やZhang et al (2011)燃料電池自動車を対象としている。

4つは、気候変動など地球規模の環境問題の分野である。例えば、山形・水田 (2001)は排出権取引に関する国際交渉を分析している。

本研究は、中小企業の環境経営の普及に関するものであり、環境配慮の普及に関する問題分野に属していると言える。しかし、この問題分野のエージェントベースモデリングでは、中小企業を対象とするもの、特に、2つの市場を含む経済取引を記述するモデルは皆無である。本研究は既存研究とはこの点で異なるものである。本論文では、中小企業の環境経営の普及を扱う第一段階のエージェントベースの基本モデルを提示する。

(2) イノベーション普及に関する既存研究

上述のように、本研究は環境配慮の普及問題に位置づけられる。この問題分野は、消費者や企業が環境配慮行動を採択するかどうかというイノベーション普及を扱うものである。近年、イノベーション普及を扱うエージェントベースモデリングによる研究は増えており、agent-based diffusion models と呼ばれている。この分野の優れたレビュー論文としては、Kiesling et al (2011)がある。

Kiesling et al (2011)は、イノベーション普及のエージェントベースの既存研究におけるモデル設計を分類している。表3にまとめる。

表3の分類を踏まえて、本研究のモデル設計の特色を表4にまとめた。本論文が提示する基本モデルでは、中小企業の環境経営というイノベーション普及に関するエージェントベースモデリングの第一段階として単純なモデルを設計する。今後の応用モデルでは、在間(2008a)や在間(2010)などの実証研究を組み込んだ、より妥当なモデルや政策分析を行う予定である。

表3 イノベーション普及のエージェントベースモデルの分類

| 項目 | モデル設計の分類 |
|-------------------|---|
| ①消費者の意思決定ルール・目的関数 | 採用者の割合の閾値 コスト最小化 期待利得最大化、期待利得の閾値 |
| ②消費者の状態・選択オプション | 2状態：採用・非採用 4状態：感染モデル 2状態間を確率的遷移 2状態以上で条件(採用者数や情報有無など)により遷移 |
| ③消費者の意思決定における社会心理 | 行動意図の決定要因に関する計画行動理論 コンシューマット・アプローチ 環境配慮の態度と行動の不一致 |
| ④消費者の多様性 | 消費者の採用性向（採用者数・期待利得などの閾値） 採用や製品の予定価格 コミュニケーション行動（コンタクトの頻度など） |
| ⑤社会的影響のモデル化のレベル | ミクロレベル（ロコミ） メゾレベル（近隣の相互作用） マクロレベル（全体で） |
| ⑥社会的影響で広まるもの | イノベーションの認知 信念・メッセージ 製品などに関する主観的な情報 |
| ⑦相互作用のトポロジー | 完全グラフ レギュラーネットワーク ランダムネットワーク スモールワールドネットワーク スケールフリーネットワーク |
| ⑧イノベーションの次元 | 内生的なイノベーションのモデル 共進化のモデル イノベーション間の競争のモデル |
| ⑨経済取引を含むモデル | 企業間競争を含まない（需要曲線や生産の学習曲線） 企業間競争を含む（価格や生産量の意味決定や調整） |
| ⑩モデルの妥当性 | 具体的な地域や具体的な製品 実証データ・ケース分析 |

Kiesling et al (2011)をもとに筆者作成

表4 本研究におけるモデル設計の特色

| 項目 | モデル設計の分類 |
|-----------------|---|
| ①目的関数 | 消費者:基本モデルでは効用関数なし(応用モデルで設計) 大企業・中小企業:利得最大化 |
| ②状態・選択オプション | 消費者:選好のタイプ(基本モデルでは固定) 大企業・中小企業:タイプにより価格と環境レベルの調整 それぞれタイプは相互参照・学習により変化 |
| ③意思決定における社会心理 | 基本モデルでは導入していない(応用モデルで設計) |
| ④多様性 | 消費者:タイプによる選択行動の多様性 大企業・中小企業:タイプによる選択行動の多様性 応用モデルでは情報アクセスなどの多様化も設計 |
| ⑤社会的影響のモデル化のレベル | 基本モデルでは同カテゴリーの集団学習でマクロレベル 応用モデルではミクロ・メゾのコミュニケーションモデル導入 |
| ⑥社会的影響で広まるもの | タイプに対する平均利得 応用モデルでは環境経営の評価なども組み込む |
| ⑦相互作用のトポロジー | 基本モデルでは導入なし 応用モデルではネットワークをモデル化 消費者のロコミや大企業と中小企業の取引関係など |
| ⑧イノベーションの次元 | 2つの市場の共進化 |
| ⑨経済取引を含むモデル | 企業間競争を含む(価格や生産量の意味決定や調整) 大企業、中小企業それぞれで |
| ⑩モデルの妥当性 | 基本モデルでは抽象的な製品 応用モデルで実証研究やケース分析の知見を入れる |

4. 中小企業の環境経営普及に関するエージェントベースモデリング：基本モデル

(1) 社会

基本モデルの社会は、消費者、大企業、中小企業の3つのカテゴリーのエージェントから構成される。エージェント数は、消費者 n_c 、大企業 n_L 、中小企業 n_s である。

社会には2つの市場がある。1つは、製品市場で、大企業が供給する製品を、消費者が購入する。もう1つは、部品市場で、製品に必要な部品を中小企業が供給し、大企業が購入する。

単純化のため消費者数は変化しないものとする。企業は倒産した場合には市場から退出するため、企業数は減少する場合もある。基本モデルでは、新規参入は考えない。

(2) 製品・部品

製品と部品はそれぞれ1種類で、大企業間、中小企業間で、それぞれ価格競争を行う。

(3) 環境活動

企業の環境活動の程度を「環境レベル」と呼ぶ。環境レベルは0以上の整数で表わされる。数値が大きいほど、環境活動の程度が進んでいることを意味する。

大企業は初期時点で e のレベルの環境活動を実施している。環境レベルは、工場やオフィスでの環境負荷削減、流通段階や製品の使用・廃棄段階の環境負荷削減、社会的活動などにの何らかの活動を追加することで向上する。モデルの単純化のため、何らかの活動を行った場合にレベルが1段階向上するものとする。企業の環境レベルは消費者に公表されている。

製品の生産・流通・使用・廃棄段階において何らかの環境負荷を削減した製品は環境配慮型製品⁷⁾である。節電になる電気製品やごみを減らせる薄型容器などは、使用や廃棄段階で消費者にメリットをもたらす。このような点を消費者の効用関数に、例えば品質モデルを用いて、反映させることが可能である。しかし、本論文の基本モデルでは、単純化のため、その設定を行わない。応用モデルの段階で設計する。

中小企業は初期時点で環境活動をしていないものとする。すなわち、環境レベルは0とする。中小企業の環境レベルの情報を大企業は入手できるものとする。製造業の中小企業は取引先企業から環境配慮要求を受けることもある⁸⁾が、基本モデルでは考えない。

(4) 消費者エージェント

①タイプと製品選択の意思決定

消費者は、大企業が供給する製品を、每期1単位購入する。製品選択に関して、消費者は表5に示す4つのタイプに分類される。価格重視のPタイプは、価格の最も安い企業の製品を購入する。人気重視のSタイプは、前期の販売量が最も多い企業の製品を選択する。気まぐれなRタイプは、全企業からランダムに購入する。環境重視のEタイプは、環境レベルが最も高い企業の製品を選択する。選択条件に適する企業が複数存在する場合は、それら中からランダムに1つ選ぶ。

消費者のタイプは初期に決まっており、配分はPタイプ、Sタイプ、Rタイプ、Eタイプそれぞれ r_P 、 r_S 、 r_R 、 r_E ($r_P+r_S+r_R+r_E=1$) である。シミュレーションでは配分を与えてランダムに割り振る。

表5 消費者のタイプ

| タイプ名 | 略号 | 製品選択ルール |
|------|-----------|---------------------|
| 価格重視 | P: Price | 価格が一番安い企業の製品を選択 |
| 人気重視 | S: Share | 前期の販売量が一番多い企業の製品を選択 |
| 気まぐれ | R: Random | ランダムに選択 |
| エコ重視 | E: Eco | 環境レベルが一番高い企業の製品を選択 |

②目的関数、学習、行動変容

消費者は、毎期、自らのタイプに従って行動する。基本モデルではモデルの単純化のため、消費者のタイプの変化はしないものとする。従って、ここでは効用関数も組み込まず、消費者エージェントの集団学習も組み込まない。消費者の嗜好やタイプの学習は応用モデルで設計する。また、応用モデルでは、環境配慮の態度と行動に関する社会心理モデルも反映させる。

(5) 大企業エージェント

①価格と環境レベルの意思決定

意思決定変数は2つある。

1つは価格で、企業は製品市場で価格競争にさらされているため、毎期、「価格を下げない」「価格を下げる」のいずれかを選択する。価格は、0以上の整数で表わされ、初期時点では p_L で、どの大企業も同じである。下げる場合は1だけ下げるものとする。

もう1つは、先程述べた環境レベルで、毎期、「環境レベルを上げない」「環境レベルを上げる」のいずれかを選択する。上げる場合は1だけ上げるものとする。本論文では、単純化のため、「価格を上げる」「環境レベルを下げる」という選択を考えないものとする。

表6に示すように、意思決定のタイプは4つに分類できる。どちらも変えない現状維持をNタイプ、価格だけ下げる価格重視をPタイプ、環境レベルを上げる環境重視をEタイプ、両方実施する場合をBタイプとする。4タイプの比率を均等にして、初期のタイプは、エージェントにランダムに割り振られる。

表6 企業の意思決定とタイプ

| | | 価格 | |
|-------|------|----------------|-----------------|
| | | 下げない | 下げる |
| 環境レベル | 上げない | 現状維持 N:None | 価格重視 P:Price |
| | 上げる | 環境重視 E:Eco | 両方実施 B:Both |

②生産量

大企業の生産量は、製品市場で消費者の需要により決まる。

③部品供給を受ける中小企業の選択と発注量

各大企業には長期的に取引を行う中小企業1社がある。大企業は、長期取引先以外に、毎期、取引する中小企業を1社選ぶものとする。短期取引先の中小企業の選択基準の基本は、価格が最も安い中小企業の中から選ぶ。環境レベルを上げないNタイプとPタイプの場合は、最低価格の中小企業からランダ

ムに選択する。環境レベルを上げる E タイプと B タイプの場合は、最低価格の中小企業のうち最も環境レベルの高い企業から選ぶ。選択ルールを表 7 に示す。

表 7 タイプと短期取引先の中小企業の選択基準

| | 第1基準 | 第2基準 |
|------|------|---------|
| Nタイプ | 最低価格 | ランダム |
| Pタイプ | 最低価格 | ランダム |
| Eタイプ | 最低価格 | 環境レベル最大 |
| Bタイプ | 最低価格 | 環境レベル最大 |

製品 1 単位につき、部品 1 単位を必要とする。大企業は、毎期、生産量のうち $2/3$ の整数値の部品を選択した短期取引先企業に発注し、残りを長期取引先の中小企業に発注する。ただし、長期取引先企業が倒産した場合には、全生産量分を短期取引先の中小企業に発注する。

④生産費用と環境活動費用

大企業の生産では、単純化のため、当該モデルの部品調達しかコストがかからないものとする。

環境活動に関しては、環境レベルを上げる場合に必要となる。ただし、レベルを上げる度に大きな費用を要するわけではない。環境レベルを上げて値が、 $1+3(k-1)$ 、 $k=$ 自然数 となる場合に、大きな費用 C_L が必要となり、他の場合は小さな費用 c_L ですむものとする。また、環境レベルを上げない場合には費用を要しないものとする。これまでの調査で得られた知見では、企業の環境経営では、初期費用や環境関連設備の投資費用は大きいですが、環境負荷削減による処理コスト削減のようなメリットもあるため維持費用は小さくなる。モデルでは、この点を考慮している。環境設備によりコスト削減が生じる場合には、ペイバック期間をすぎると費用が浮く効果もあるが、モデルの単純化のため、基本モデルでは考慮しない。また、環境ビジネスにより利益を獲得できる機会も基本モデルでは考えない。

⑤利得

大企業エージェントの毎期の利得は、以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{利得} &= \text{自社の製品価格} \times \text{生産量} \\ &\quad - \text{長期取引先の部品価格} \times \text{発注量} - \text{短期取引先の部品価格} \times \text{発注量} \\ &\quad - \text{環境レベル向上の有無} \times \text{環境活動費用} \end{aligned}$$

集計利得は、毎期の利得の和で表わされる。

⑥初期資金と倒産条件

初期資金を m_L とする。集計利得が赤字になった場合、初期資金と同額までは借り入れが可能なものとする。従って、集計利得が $-m_L$ 以下になった場合に倒産する。その場合は市場から退出するものとする。

⑦タイプの変更：集団学習

エージェントは自分のタイプに応じて意思決定を行う。同じタイプで t 期間意思決定を行うが、 $t+1$ 期

目には、製品市場での各タイプの平均利得を比較して、タイプを変更する。つまり、基本モデルでは、タイプ変容を、平均利得の大きさにより確率的に選択する強化学習として記述する。これは、より平均利得が高いタイプが、より選択される傾向があることを意味している。

(6) 中小企業エージェント

①価格と環境レベルの意思決定

大企業と同様に、意思決定変数は2つで、タイプは表6に示される4つがある。
初期価格は p_s で、最低価格を1とする。初期の環境レベルは0である。

②生産量

中小企業の実生産量は、部品市場で大企業の発注により決まる。

中小企業は、長期取引先の大企業が1社あり、その取引先が倒産していなくて取引先の実生産量が0でなければ発注を受ける。それ以外では、いずれかの大企業から短期取引先として選ばれた場合に発注を受けることができる。

④生産費用と環境活動費用

中小企業の実生産では、単純化のためコストを考慮しない。

環境活動に関しては、大企業と同様に、環境レベルを上げる場合に必要となる。環境レベルを上げたときに値が、 $1+3(k-1)$ 、 k =自然数 となる場合に、大きな費用 C_s が必要となり、他の場合は小さな費用 c_s ですむものとする。また、環境レベルを上げない場合には費用を要しないものとする。

⑤利得

中小企業エージェントの毎期の利得は、以下の式で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{利得} &= \text{自社の部品価格} \times \text{受注量} \\ &\quad - \text{環境レベル向上の有無} \times \text{環境活動費用} \end{aligned}$$

集計利得は、毎期の利得の和で表わされる。

⑥初期資金と倒産条件

初期資金を m_s とする。大企業と同様に、集計利得が赤字になった場合、初期資金と同額までは借入れが可能なものとする。従って、集計利得が $-m_s$ 以下になった場合に倒産する。その場合は市場から退出するものとする。

⑦タイプの変更：集団学習

大企業と同様に、エージェントは自分のタイプに応じて意思決定を行う。同じタイプで t 期間意思決定を行うが、 $t+1$ 期目には、部品市場での各タイプの平均利得を比較して、タイプを変更する。

(7) シミュレーションの期間

シミュレーションでは、集団学習を τ 回繰り返す。これは、例えば、 $t=3$ で $\tau=10$ の場合、1 期間を 1

か月すると、3 か月間は意思決定を変更しないが、4 半期ごとに見直し、10 年の変化を見るという意味になる。

5. 基本モデルのシミュレーション結果

(1) 実装と基本モデルのパラメータ設定

前節で提示した基本モデルを Java で実装した。

この基本モデルでは、表 8 に示すパラメータを与え、シミュレーションを行った。10 回のシミュレーションを行った結果を整理する。

表 8 基本モデルのシミュレーションにおけるパラメータ設定

| 項目 | パラメータ設定 |
|------------|--|
| エージェント数 | 消費者 $n_C=500$ 、大企業 $n_L=20$ 、中小企業 $n_S=20$ |
| 大企業の長期取引先 | 大企業と同じ番号の中小企業を割り当てる |
| 環境レベルの初期値 | 大企業 $e=5$ 、中小企業は0 |
| 消費者のタイプの比率 | Pタイプ $r_P=0.7$ 、Sタイプ $r_S=0.1$ 、Rタイプ $r_R=0.1$ 、Eタイプ $r_E=0.1$ |
| 製品・部品の初期価格 | 製品 $p_L=1000$ 、部品 $p_S=100$ |
| レベル上げる場合の | 大企業 $C_L=10000$ 、 $c_L=100$ レベル $=1+3(k-1)$ (k =自然数)になった時 C_L |
| 環境活動費用 | 中小企業 $C_S=1000$ 、 $c_S=10$ レベル $=1+3(k-1)$ (k =自然数)になった時 C_S |
| 初期資金 | 大企業 $m_L=10000$ 、中小企業 $m_S=1000$ |

(2) 収束パターンの予測

表 8 に示すように、消費者のタイプ比率のパラメータでは、価格重視の P タイプが多いので、大企業は「価格を下げる」選択を行う P タイプと B タイプが生き残ると予測できる。また、基本モデル設定では、大企業は短期取引先の選択では、基本的に「価格が最も安い中小企業」を第一基準にするので、やはり「価格を下げる」選択を行う P タイプが主に生き残ると予測できる。

(3) シミュレーション結果

表 9 は、10 回のシミュレーションで収束に関する結果をまとめたものである。

①大企業

表 9 で、大企業の収束のパターンは 3 つある。

1 つは、第 2・4・8・9 回のように価格重視の P タイプに収束するパターンである。このうち第 4 回と第 8 回は、収束するまでの P タイプと B タイプの共存期間が長かった。

2 つは、第 1・3 回のように両方実施の B タイプに収束するパターンである。

3 つは、第 5・6・7・10 回のように価格重視の P タイプと両方実施の B タイプが共存するパターンである。

表 9 に示されるように、B タイプに収束する場合には、倒産企業がある。これは、B タイプが価格を下げながら環境レベルを上げる行動をするため、定期的に必要となる大きな環境活用費用が 1 つの要因であると考えられる。

上述の3つの典型的なパターンを、図2に示す。

表9 収束結果

| | 大企業 | | | 中小企業 | | |
|------|------------------|-------|-------------|----------------------|-------|-------------|
| | 収束タイプ | 倒産企業数 | 最大利得企業名 | 収束タイプ | 倒産企業数 | 最大利得企業名 |
| 第1回 | B | 4 | LargeFirm10 | P→N ^{*1)} | 2 | SmallFirm18 |
| 第2回 | P | 0 | LargeFirm0 | B→P・N ^{*2)} | 8 | SmallFirm0 |
| 第3回 | B | 6 | LargeFirm8 | P→N | 1 | SmallFirm1 |
| 第4回 | P ^{*4)} | 0 | LargeFirm14 | P→N | 3 | SmallFirm7 |
| 第5回 | P・B | 0 | LargeFirm0 | P→N ^{*3)} | 5 | SmallFirm0 |
| 第6回 | P・B | 0 | LargeFirm16 | B→P・N | 9 | SmallFirm8 |
| 第7回 | P・B | 0 | LargeFirm9 | P・N | 0 | SmallFirm9 |
| 第8回 | P ^{*4)} | 0 | LargeFirm13 | P→N | 2 | SmallFirm16 |
| 第9回 | P | 0 | LargeFirm10 | P→N | 0 | SmallFirm11 |
| 第10回 | P・B | 0 | LargeFirm19 | P→N | 3 | SmallFirm17 |

P…価格重視のPタイプ、B…両方実施のBタイプ、N…現状維持のNタイプ

*1) P→Nは、Pタイプに収束し最低価格到達後はNタイプになる

*2) B→P・Nは、Bタイプに収束し最低価格到達後はPとNタイプになる

*3) この回は、Pタイプに収束するまでのPとBの共存期間が長い

*4) これらの回は、Pタイプに収束するまでのPとBの共存期間が長い

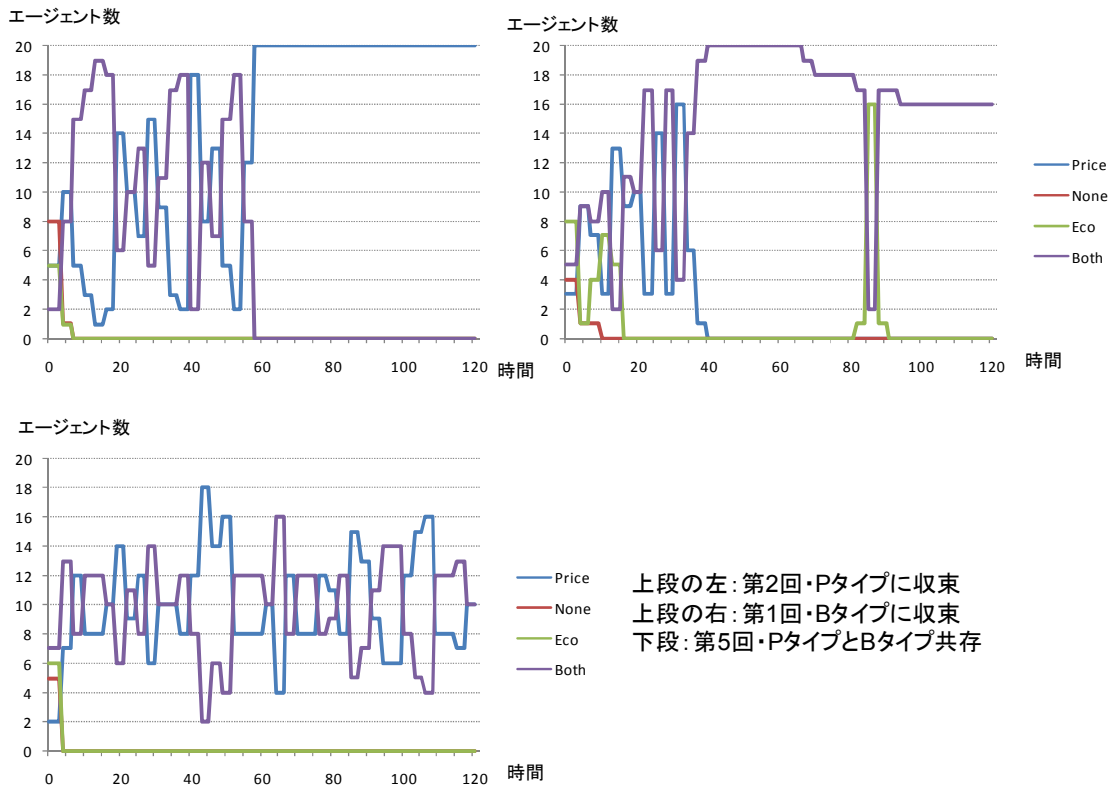


図2 大企業のタイプ収束のパターン

②中小企業

表9で、中小企業の収束のパターンは3つある。

1つは、第1・3・4・5・8・9・10回のように価格重視のPタイプに収束するパターンである。ただし、価格が最低価格に到達後は価格を下げるできないため現状維持のNタイプとなる。また、表9の第5回目はPタイプとBタイプの共存期間が長かった。

2つは、第2・6回のように両方実施のBタイプに収束するパターンである。この場合、最低価格に到達後は、PタイプとNタイプとなる。

3つは、第7回のようにPタイプとNタイプが共存するパターンである。大企業が短期取引先としての中小企業選択の第一基準が「最低価格」であるため、Nタイプが初期時間から生き残ることは予測とは異なる。この回のエージェント行動は(5)で検討する。

表9に示されるように、Bタイプに収束する第2回および第6回では、倒産企業数がそれぞれ8社、9社と半数近くもある。また、PタイプとBタイプの共存期間が長い第5回も倒産企業数は5社で4分の1にあたる。これは、大企業と同様に、Bタイプが価格を下げながら環境レベルを上げる行動をするため、定期的に必要となる大きな環境活用費用が1つの要因であると考えられる。

上述の3つの典型的なパターンを、図3に示す。

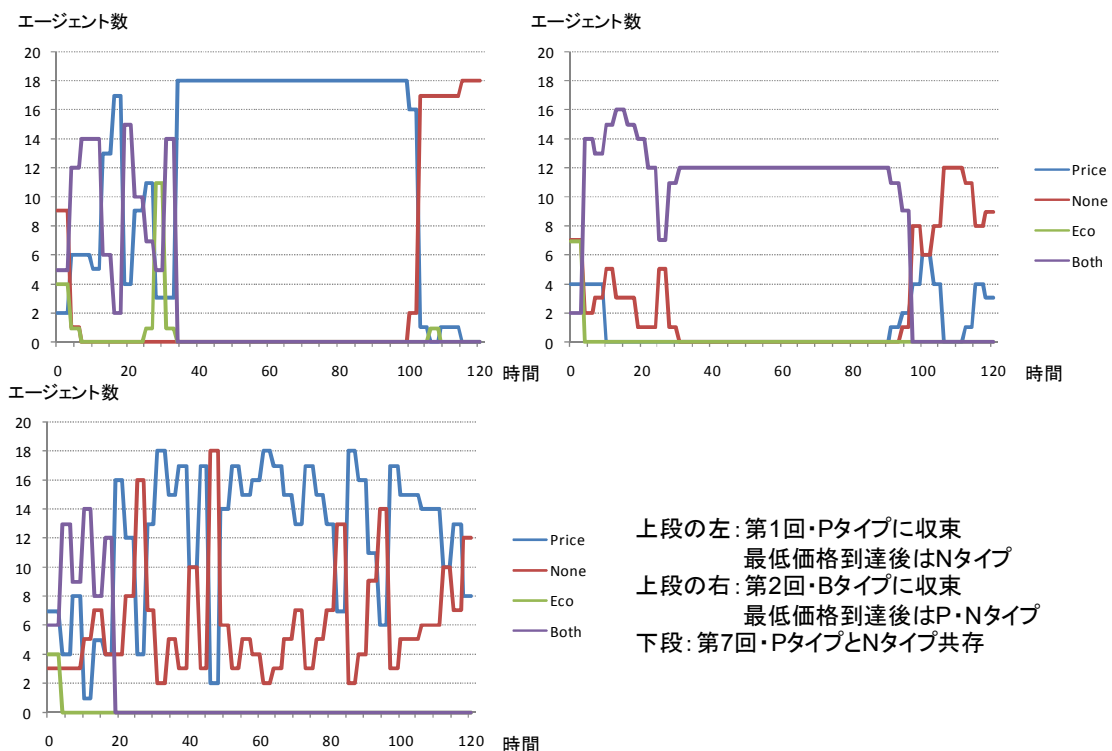


図3 中小企業のタイプ収束のパターン

(4) 最大利得獲得企業的意思決定

各回のシミュレーションでは、大企業、中小企業とも、特に高い集計利得を獲得する企業が1社登場した。図4および図5は、各回のシミュレーションで最も集計利得が高かった大企業および中小企業の

集計利得を比較したものである。

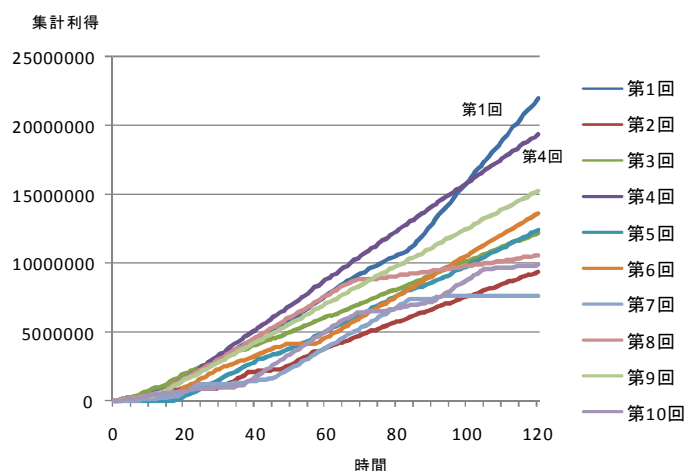


図4 各回の最大利得獲得企業の比較：大企業

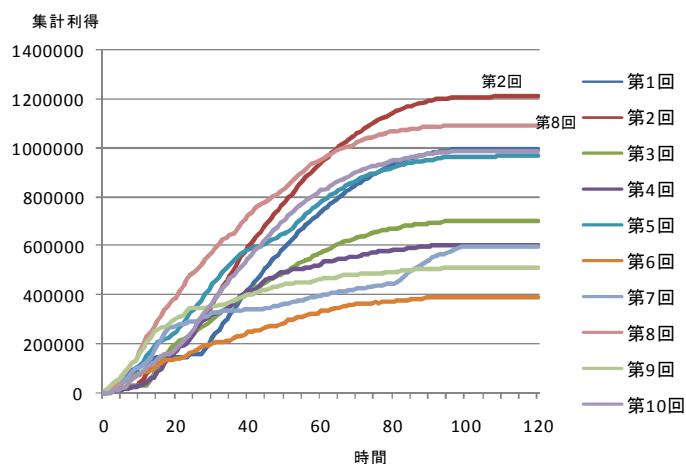


図5 各回の最大利得獲得企業の比較：中小企業

ここでは、図4および図5の上位2つの回について取り上げる。大企業の場合は、図4より第1回と第4回、中小企業では、図5より第2回と第8回である。

それぞれの回について、各エージェントの環境レベルと価格の時間変化を調べ、最大利得を獲得した企業の意思決定を明らかにする。

①大企業

図6に、第1回の、平均、終了時に最大価格の大企業、最小価格の大企業、最大利得獲得企業について、価格の時間変化を示した。第1回の最大利得獲得企業「LargeFirm10」は、最低価格の企業であった。第4回でも、第1回と同様に、最大利得獲得企業「LargeFirm14」は最低価格の企業であった。図は省略する。

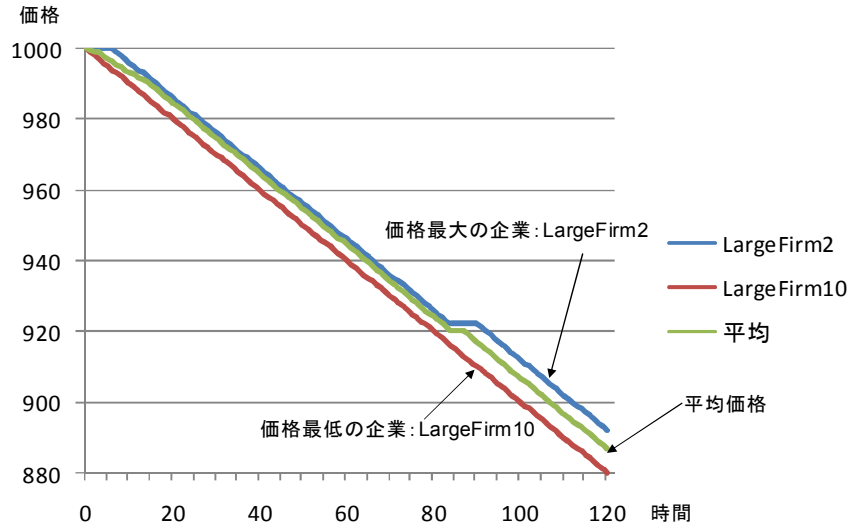


図6 第1回の大企業の価格変化

図7に、第1回の、平均、終了時に最大の環境レベルの大企業、最小の環境レベルの大企業、最大利得獲得企業について、環境レベルの時間変化を示した。第1回の最大利得獲得企業「LargeFirm10」は、ほぼ平均レベルの環境レベルを取っていたことがわかる。第4回では、最大利得獲得企業「LargeFirm14」は、最低レベルよりは大きい平均よりは小さい環境レベルを取っていた。図は省略する。

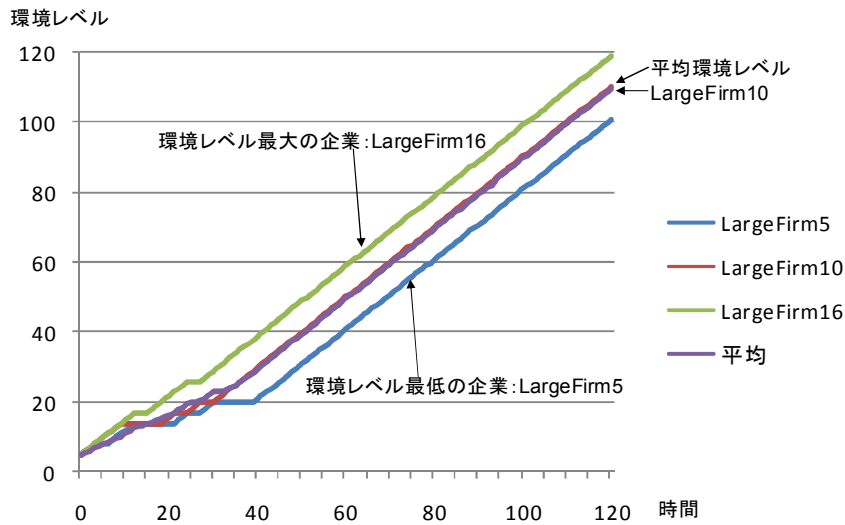


図7 第1回の大企業の環境レベル変化

②中小企業

図8に、第2回の、平均、終了時に最大価格の中小企業、最小価格の中小企業、最大利得獲得の中小企業について、価格の時間変化を示した。第2回の最大利得獲得企業「SmallFirm0」は、最低価格の企業であった。第8回でも、第2回と同様に、最大利得獲得企業「SmallFirm16」は最低価格の企業であった。図は省略する。

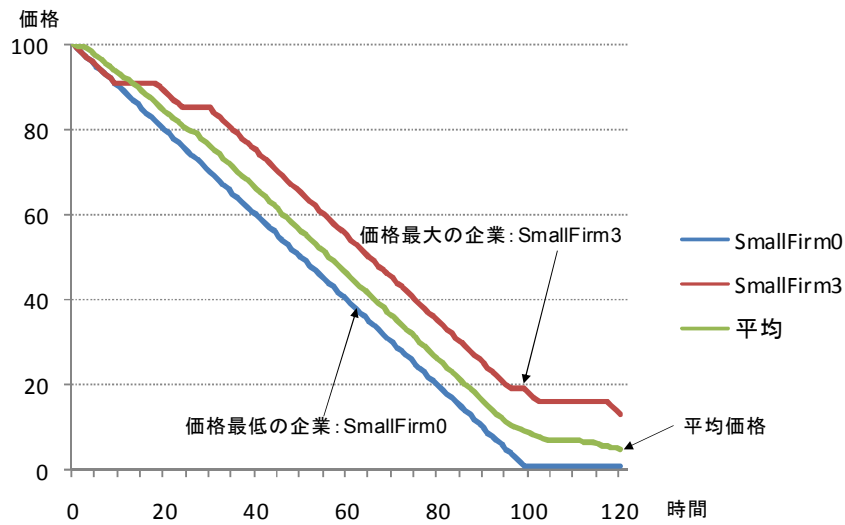


図8 第2回の中小企業の価格変化

図9に、第2回の、平均、終了時に最大環境レベルの中小企業、最小環境レベルの中小企業、最大利得獲得の中小企業について、環境レベルの時間変化を示した。第2回の最大利得獲得企業「SmallFirm0」は、環境レベル最大の企業であった。第8回では、最大利得獲得企業「SmallFirm16」は最大の環境レベルではなかったが、最大に近い値を取っていた。図は省略する。

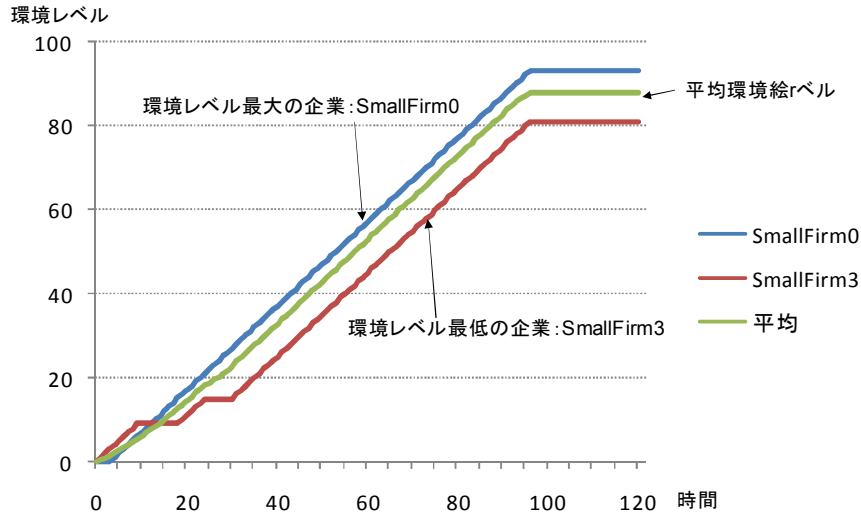


図9 第2回の中小企業の環境レベル変化

③企業の競争優位の戦略に関する考察

以上のことから、大企業では、環境レベルを平均程度に上げながら、価格を他企業より早く下げる戦略の場合に、大きな利得を獲得できると言える。また、中小企業では、価格を他社より早く下げながら、環境レベルを他社より早く高める戦略が、大きな利得を獲得できると言える。

(5) 第7回の中小企業

上述のように、第7回では、現状維持のNタイプと価格重視のPタイプの中小企業が生き残っている。

図10は、第7回の中小企業の、集計利得の時間変化を示したものである。最大利得獲得企業「SmallFirm9」は、15期頃までの間で突出して利得を高めていることがわかる。

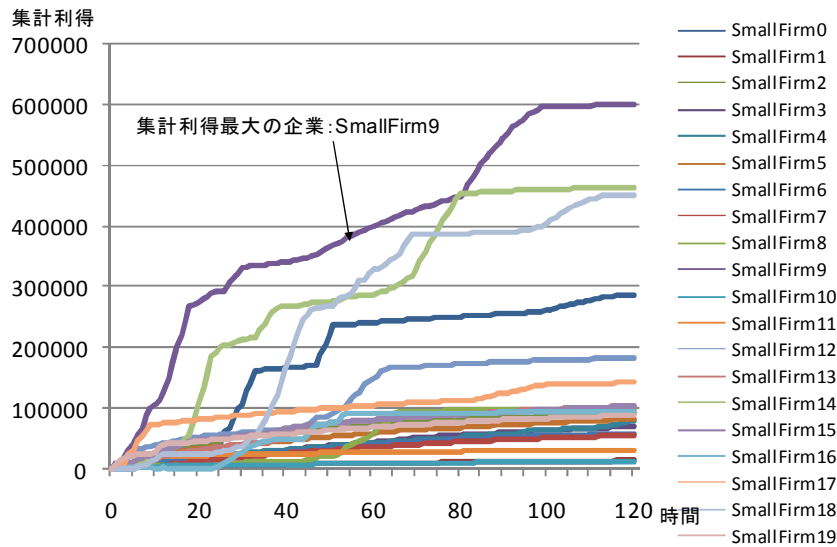


図10 第7回の中小企業：集計利得の時間変化

図11は、第7回の各中小企業が選択したタイプについて、38期までを示したものである。

最大利得獲得企業: SmallFirm9

| Time | SmallFirm0 | SmallFirm1 | SmallFirm2 | SmallFirm3 | SmallFirm4 | SmallFirm5 | SmallFirm6 | SmallFirm7 | SmallFirm8 | SmallFirm9 | SmallFirm10 | SmallFirm11 | SmallFirm12 | SmallFirm13 | SmallFirm14 | SmallFirm15 | SmallFirm16 | SmallFirm17 | SmallFirm18 | SmallFirm19 |
|------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | Eco | Price | Price | Eco | Price | Both | None | Eco | Price | Both | Eco | Both | Both | Price | Price | None | None | Both | Price | Both |
| 1 | Eco | Price | Price | Eco | Price | Both | None | Eco | Price | Both | Eco | Both | Both | Price | Price | None | None | Both | Price | Both |
| 2 | Eco | Price | Price | Eco | Price | Both | None | Eco | Price | Both | Eco | Both | Both | Price | Price | None | None | Both | Price | Both |
| 3 | Eco | Price | Price | Eco | Price | Both | None | Eco | Price | Both | Eco | Both | Both | Price | Price | None | None | Both | Price | Both |
| 4 | Both | None | Both | Price | None | None | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Price | Both | Price |
| 5 | Both | None | Both | Price | None | None | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Price | Both | Price |
| 6 | Both | None | Both | Price | None | None | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Both | Price | Both | Price |
| 7 | Price | Price | Both | Price | Price | Both | None | Price | Both | Both | Price | Price | None | Both | Price | None | Both | Both | Both | Both |
| 8 | Price | Price | Both | Price | Price | Both | None | Price | Both | Both | Price | Price | None | Both | Price | None | Both | Both | Both | Both |
| 9 | Price | Price | Both | Price | Price | Both | None | Price | Both | Both | Price | Price | None | Both | Price | None | Both | Both | Both | Both |
| 10 | Both | Both | Both | None | Both | Price | Both | Both | None | Both | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 11 | Both | Both | Both | None | Both | Price | Both | Both | None | Both | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 12 | Both | Both | Both | None | Both | Price | Both | Both | None | Both | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 13 | Both | None | Both | Both | Both | None | Price | Price | Both | Both | Both | None | Price | None | Price | Both | Both | Price | None | None |
| 14 | Both | None | Both | Both | Both | None | Price | Price | Both | Both | Both | None | Price | None | Price | Both | Both | Price | None | None |
| 15 | Both | None | Both | Both | Both | None | Price | Price | Both | Both | Both | None | Price | None | Price | Both | Both | Price | None | None |
| 16 | Both | Price | None | Both | Both | Both | None | Price | Both | Price | Both | Price | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 17 | Both | Price | None | Both | Both | Both | None | Price | Both | Price | Both | Price | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 18 | Both | Price | None | Both | Both | Both | None | Price | Both | Price | Both | Price | Both | Both | Both | None | Both | None | Both | Both |
| 19 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 20 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 21 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 22 | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 23 | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 24 | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 25 | None | None | None | None | None | None | Price | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None |
| 26 | None | None | None | None | None | None | Price | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None |
| 27 | None | None | None | None | None | None | Price | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None | None | Price | None | None |
| 28 | Price | None | None | None | None | None | Price | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 29 | Price | None | None | None | None | None | Price | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 30 | Price | None | None | None | None | None | Price | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price |
| 31 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price |
| 32 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price |
| 33 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price |
| 34 | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price |
| 35 | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price |
| 36 | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | None | Price | None | Price | Price | Price | Price |
| 37 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price |
| 38 | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | None | Price | Price | Price | Price | Price | Price |

Price・・・白 Both・・・青 Eco・・・ピンク None・・・黄

図11 第7回の中小企業の意味決定

図11の赤線で囲まれた最大利得獲得企業「SmallFirm9」は、15期までは両方実施のBタイプ(青色)であった。つまり、他社より早く環境レベルを上げ、同時に価格を下げている。このため利得を高めた。第7回では15期時点で7社も現状維持のNタイプ(黄色)が生き残っている。最大利得獲得企業「SmallFirm9」も、紫で囲まれた期間の19期から24期に、Nタイプ(黄色)を選択している。そのため、25期では、この企業の選択したタイプが広まっており16社にも上っている。

30期頃までの初期にこのような現象が起こっていたため、この回の中小企業ではNタイプが残ることになったと考えられる。

6. 応用モデルの分析課題

(1) 基本モデルのパラメータに関する感度分析

以下のパラメータに関して感度分析を行う。

まず、製品市場の選択に影響を及ぼすものとして、消費者のタイプ比率がある。第5節では、Pタイプの消費者が多いケースのみの結果を示した。他のケースも調べる。

また、大企業・中小企業の利得に影響を及ぼすものとして、環境レベルを上げる場合の環境コストがある。大企業の利得に影響を及ぼすものには、部品価格もある。これらのパラメータに関しても感度分析を行う必要がある。

(2) 応用モデルの設計・分析の課題

基本モデルは、非常に単純化したモデルであった。今後のモデル設計や分析の検討事項には、以下を挙げることができる。分析する問題に応じて、必要な要素をモデルに入れる。

① エージェントの行動モデルの設計課題

消費者では、効用関数や、環境配慮の態度と行動に関する社会心理学研究を踏まえたモデルを設計することができる。それにより、消費者の態度・行動変容を捉え、その影響を調べることもできる。また、消費者への対策の検討も可能になる。

企業では、「価格を上げる」「環境レベルを下げる」という行動もモデルに組み込むとも必要である。また、例えば、「環境レベルを上げるから価格を上げる」のように、環境活動と価格を関連付けて選択する行動をモデル化することで、より妥当なモデルを設計することができる。

② 環境活動に関する設計の課題

応用モデルでは、環境活動の内容と環境レベルの関連や、環境投資のペイバック期間なども考慮し、より現実に近いモデル設計を検討することも求められる。

環境活動の内容と環境レベルの関連づけを明示的にモデル化することによって、抽象的ではあるが「環境配慮型製品」としての扱いが可能になる。それにより、使用段階や廃棄段階などの消費者の効用への影響や、環境配慮型製品としての情報有無の設定なども設計することが可能になる。

また、環境投資のペイバック期間をモデル設計に取り入れることで、現実に見られる環境活動によって「費用が浮く」効果も組み込むことができる。

③中小企業のタイプと分析課題

最初に述べたように、中小企業には様々なタイプがあり、そのモデル設計は重要な課題である。応用モデルでは、主に、2つの側面でのタイプを検討する。

1つは、取引先企業との関係である。在間(2005,2007,2008a)に示すように、取引先との関わりによって、中小企業の環境活動は異なる。例えば、取引先から環境配慮の要求を受け、必要に迫られて開始する中小企業は多い。そのような場合に、取引先が自社の協力会社に環境対策の支援を行うケースもある。取引先との関わりを導入し、大企業と中小企業間のコミュニケーション効果を分析することは、本研究の主要課題の一つとしている。

2つは、環境経営に関するタイプである。在間(2010)で示すように、中小企業は環境経営面で4タイプに分類でき、それぞれの支援策は異なる。本研究では、応用モデルで、その設定をモデル化することを検討する。

④中小企業の環境経営に対する支援組織と分析課題

在間(2010)では、中小企業の環境経営に対する支援として、自治体の補助金などの政策、地域版の環境マネジメントシステム認証機関によるアドバイスや情報交流の場の提供、取引先企業などによる学習会やアドバイス、NPOによる環境対策支援、銀行による環境ビジネス支援などを挙げ、その役割を整理している。

現実に見られる支援策の効果や制度デザインについて分析するためには、基本モデルを拡張し、自治体 銀行、NPO、認証機関などのエージェントを導入し、それらの行動に関してモデルを設計する必要がある。

⑤実証分析結果との関連

これまでの実証研究で得られた知見をモデル設計に反映させることや、実証分析データを用いてシミュレーションを行うことも、今後の検討課題である。

7. 総括

中小企業の環境経営の普及は、環境政策としても重要課題の一つである。本論文は、中小企業の環境経営の普及条件を分析するためのエージェントベースモデリングの第一段階として、モデル化の方法を検討し、基本モデル設計を提示した。また、基本モデルのシミュレーション結果を示し、今後の分析課題も検討した。本論文で明らかにしたことは、次の4つである。

1つは、第2節で示したように、分析するためのモデル設計においては、複数の市場・エージェント・ルール、エージェントの学習による行動変容、ミクロなエージェント間の相互作用から創発されるマクロなダイナミクスを含む必要があり、これらを含む方法として、エージェントベースモデリングが適していることである。この方法によって、中小企業が環境経営に取り組みそれが広まるプロセスを表すモデルが作成でき、普及が生じる要因をシミュレーションから調べることができる。

2つは、第3節で示したように、中小企業の環境経営の普及条件を分析するエージェントベースモデ

リングは、環境問題に関する既存のエージェントベースモデリング研究では、環境配慮の普及を扱う研究分野に位置づけられるものの、既存研究にはないことである。

3つは、第4節で、第2節で挙げたモデル設計の要素を含めた単純なモデル設計を示したことである。また、このモデル設計を、第3節で示したように、イノベーション普及のモデル要素と対応して整理した。

4つは、第5節のパラメータ設定でのシミュレーション結果から示したように、環境レベルを平均程度に上げながら価格を他企業より早く下げる大企業、価格を他社より早く下げながら環境レベルを他社より早く高める中小企業が、利得を高めることである。

今後のモデル設計と分析課題については、第5節で示した。

現実には、中小企業の環境経営の導入は一部にしか進んでおらず、全体として底上げされるまでには至っていない。その点で、本論文で示した基本モデルのシミュレーション結果は、まだ現状を捉えていないと言える。エージェントベースシミュレーションでは、まず現実を再現するモデルを設計し、その上で政策・制度デザインのためのパラメータ設定やモデル拡張し、創発されるマクロなダイナミクスを調べる。従って、今後は、第5節で提示したパラメータによる感度分析や、応用モデル設計を検討することで、現実に近いモデルの再現と、政策・制度デザインのためのシナリオによるシミュレーション設計を行う。

謝辞 本研究は、日本学術振興会における科学研究費補助金基盤研究(C) (課題番号 23510057、研究代表者：在間敬子) の支援を受けている。ここに記して謝意を表す。

注

- 1) 例えば、中小企業庁(2007)参照。中小企業基本法では、製造業の中小企業は、「資本金3億円以下または常時雇用する従業員300人以下の会社および従業員300人以下の個人企業」と定義されている。
- 2) 環境配慮に関する社会心理学の研究については、例えば広瀬(2008)を参照。
- 3) 中小企業への支援策に関しては、在間(2010)を参照。
- 4) 領域横断的アプローチとしてのABMの有効性については、出口(2004)を参照。
- 5) 例えば、Evans and Kelley (2004)を参照。
- 6) 例えば、Barreteau et al[18]を参照。
- 7) 例えば、環境ビジネスに関する在間(2011)を参照。
- 8) 在間(2005,2007)を参照。

参考文献

- Barreteau, O., P. Garin, A. Dumontier, and G. Abrami (2003) "Agent-based facilitation of water allocation: case study in the Drome River Valley," *Group Decision and Negotiation*, Vol.12, pp.441-461.
- 中小企業庁(2007)『中小企業白書 (2007年版)』平成19年6月
- 中小企業庁(2010)『中小企業白書 (2010年版)』平成22年4月
- 出口弘(2004)「エージェントベースモデリングによる問題解決—エージェントベース社会システム科学としてのABM—」『オペレーションズ・リサーチ』Vol.49、No.3、pp.161-167
- Evans, T. P. and H. Kelley (2004) "Multi-scale analysis of a household level agent-based model of landcover change," *Journal of Environmental Management*, Vol.72, No.1-2, pp.57-72.

- Heckbert, Scott, Baynes, Tim, & Andrew Reeson (2010) "Agent-based modeling in ecological economics," *Annals of the New York Academy of Sciences*, Issue: Ecological Economics Reviews, Vol.1185, pp.39-53.
- 広瀬幸雄編(2008)『環境行動の社会心理学 環境に向き合う人間のこころと行動』北大路書房.
- Janssen, M. A., and W. Jager (2002) "Simulating diffusion of green products: Co-evolution between firms and consumers," *Journal of Evolutionary Economics*, Vol.12, pp. 283-306.
- 環境省(2003)『環境白書 (平成 15 年版)』
- Kuscik, Z., D. Holvath, and M. Gmitra (2007) "The critical properties of the agent-based model with environmental-economic interaction," *Physica A*, Vol.379, pp.199-206.
- Matthews, R. B., N. G. Gilbert, A. Roach, J. G. Polhill, and N. M. Gotts (2007) "Agent-based land-use models: a review of applications," *Landscape Ecology*, Vol.22, No.10, pp.1447-1459.
- Mosler, H.-J., and T. Martens (2007) "Designing environmental campaigns by using agent-based simulations: Strategies for changing environmental attitudes," *Journal of Environmental Management*, Vol.88, pp.805-816.
- Parker, D. C., S. M. Manson, M. A. Janssen, M. J. Hoffmann, and P. Deadman (2003) "Multi-agent systems for the simulation of land-use and land-cover change: a review," *Annals of the Association of American Geographers*, Vol.93, pp.316-340
- Parker, Craig M., Redmond, Janice, & Mike Simpson (2009) "A review of interventions to encourage SMEs to make environmental improvements," *Environment and Planning C: Government and Policy*, Vol. 27, pp. 279-301.
- Schwoon, Malte (2006) "Simulating the adoption of fuel cell vehicles," *Journal of Evolutionary Economics*, Vol. 16, pp.435-472.
- 山形与志樹・水田秀行(2001)「京都議定書・国際排出量取引のエージェントベースシミュレーション」『オペレーションズ・リサーチ』Vol.46, No.10, pp.555-560.
- 在間敬子(2005)「グリーン圧力が中小企業に及ぼす影響に関する実証分析：機械・金属業のケース」『商工金融』第 55 巻第 11 号、pp. 21-37.
- 在間敬子(2007)「中小企業の環境経営の現状と課題：機械・金属業とプラスチック業の業種間比較と経年比較から」『商工金融』第 57 巻第 5 号、pp. 47-60
- 在間敬子(2008a)「中小企業の環境経営推進の条件に関する実証分析：機械・金属業とプラスチック加工業のケース」『社会・経済システム』No.29、 pp.67-76.
- 在間敬子(2008b)「環境配慮型社会をデザインするエージェントベースモデリング：研究の現状と今後の分析課題」『オペレーションズ・リサーチ』Vol.53 No.12、 pp.678-685.
- 在間敬子(2010)「中小企業の環境経営に対する支援の現状と課題：地域社会における環境コミュニケーションデザインに向けて」『社会・経済システム』第 31 号(No.31)、 pp.45-58.
- 在間敬子(2011)「第 6 章 環境ビジネスを活かすソーシャル・ビジネス：「環境+ α 」の価値を持たせる」大室悦賀・大阪 NPO センター編著『ソーシャル・ビジネス—地域の課題をビジネスで解決する』中央経済社
- Zaima, Keiko (2005) "Effects of structural and behavioral strategies toward the environmentally conscious society: Agent-Based Approach," in T. Terano, H. Kita, T. Kaneda, K. Arai, and H. Deguchi (eds.): *Agent-Based Simulation From Modeling Methodologies to Real-World Applications*: 233-246, Springer-Verlag Tokyo.
- Zaima, Keiko (2006) "Agent-based simulation on the diffusion of research and development for environmentally conscious products," in K. Arai, H. Deguchi, and H. Matsui (eds.): *Agent-Based Modeling Meets Gaming Simulation*: 119-138, Springer-Verlag Tokyo.
- Zhang, Ting, Gensler, Sonja and Rosanna Garcia (2011) "A study of the diffusion of alternative fuel vehicles: An agent-based modeling approach," *Journal of Product Innovation Management*, Vol.28, pp.152-168.