

# 流通のためのマルチエージェント型モデル

—— 総取引数極小化原理についての発見物 ——

弘 津 真 澄

## 目 次

はじめに

### 1. 本実験におけるマルチエージェント型モデルの概要

- 1-1. マルチエージェント型モデルの開発環境
- 1-2. プログラムの概要
- 1-3. エージェント同士の関係
- 1-4. 基本的な共通動作
- 1-5. 初期値と定数

### 2. 発見物

- 2-1. 中間商人の理論上の上限値
- 2-2. 最初の発見物
- 2-3. 検証1 消費者, 小売, 卸売, そして製造業者の数を変化
- 2-4. 検証2 視野の変更
- 2-5. 検証3 小売業者, 卸売業者, そして製造業者の初期値の変更

### 3. 考察

おわりに

## は じ め に

本論文の目的は、流通を模して作成したマルチエージェント型モデルから得られた発見物を提示することである。これらの発見物は当初、目的としていたものではない。予定外のサプライズ (Surprise) である。いわば副産物のようなものである。もう少し言い換えると、犬が歩いていたら棒にあたっ

たようなものである。ただし興味深い現象であったので、記すことにした。

興味深い現象というのは、「総取引数極小化原理」で言うところの中間商人の上限値に近い値が出たということである。この原理自体については、古くから言われていることなので珍しいものではない。ここで興味深かったのは、全体を見渡すことができず単純な活動しかしない活動主体の総和として、この現象が浮かび上がってきたことである。

ただし、以下の点に注意して読んでいただきたい。マルチエージェント型モデルそのものが、もともと持っているヤッコー（やったらこうなった）に過ぎない側面を持っていることである。制約がある中で可能な限り、偶然に出現しただけのものではないという検証は試みたが、十分でなかったかもしれない。さらに、ここで起こった現象を十分説明できないものも、まだある。また検証の作業中に、さらに新たな発見もあった。

とはいうものの、本実験は、システムの開発工程のモデルでいうとスパイラル型に相当する。そのため、どこかで意識して止めない限り永遠に開発工程が終わらない。そこで本論文で区切りをつけることにした。また、多くの人の目に触れて、問題点が早く見つかることを期待している。

以下、ここで作成したマルチエージェント型モデルの説明をし、発見物の提示とその検証を行う。その後、検証作業などからの発見物をもとに、若干の考察を行う。

## 1. 本実験におけるマルチエージェント型モデルの概要

複雑系やマルチエージェントについての説明は、多くの書籍などで行われていることなので、ここでは省略する。早速、本マルチエージェント型モデルのプログラムについてである。

### 1-1. マルチエージェント型モデルの開発環境

まず、マルチエージェント型モデルの開発環境である。マルチエージェント型モデルを作成する上でのツールとして、汎用言語である手続き型言語(C, Pascal, Basic)とオブジェクト指向言語(C++, JAVA), および代表的なマルチエージェント型モデル向けシミュレータとしてStarLogo, KK-MAS, Ascape, RePast, Swarmなどがある<sup>1)</sup>。これらの詳細な比較については、下記注の書籍で行われている。それを参照されたい。

本マルチエージェント型モデルの開発環境としては、Visual Basic という開発言語を使用した。上記の範囲では、オブジェクト指向言語の仲間ということになる。選択理由は、次の通りである<sup>2)</sup>。

まず、汎用言語とマルチエージェント型モデル向けシミュレータとの比較である。どちらも自由度と簡便性に差がある。汎用言語は、自由度が高く簡便性に欠ける。マルチエージェント型モデル向けシミュレータは、自由度が低く簡便性に富む。自由度と簡便性とはトレードオフの関係にある。ここでは、汎用言語の自由度を採ることにした。

次に、手続き型言語とオブジェクト指向言語の比較である。マルチエージェント型モデルの記述にオブジェクト指向言語は非常に適しているため、選択の余地は無かった。オブジェクト指向言語の中から Visual Basic を選択したのは、筆者が慣れ親しんだ開発言語であっただけである。現在の Visual Basic はオブジェクト指向の記述が可能であるし、C++やJAVAの標準ライブラリに相当するライブラリも備えている。そのため、C++やJAVAと比較して若干異なる程度で、マルチエージェント型モデルを記述する上で開発言語による大きな差は無いと思われる。

---

1) 山影進, 服部正太編『コンピュータの中の人口社会』共立出版, 2002年8月10日, 244頁。

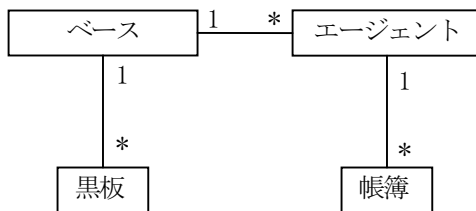
2) 開発環境の選択では、貝原俊也先生とそのゼミ生の意見を参考にさせていただきました。

マルチエージェント型モデルのコアになる部分を記述するにあたっては、(株)構造計画研究所の「KK-MAS (Multi Agent Simulator)」を参考にした。基本的な動作の部分は上記の「KK-MAS」の動作を模倣して作成した<sup>3)4)</sup>。

## 1-2. プログラムの概要

本マルチエージェント型モデルを記述したプログラムの概要は、図1-1のようになっている。

図1-1 プログラムの概要



まず、すべてのモジュールの根元となっている「ベース」である。この「ベース」に複数の「エージェント」が配置される。ここで、図1-1中の「ベース」と「エージェント」をつないでいる線上にある1と\*は、ひとつの「ベース」に任意の数の「エージェント」がつながっていることを示している。この「ベース」によって「エージェント」の動作のタイミングがコントロールされている。動作のタイミングそのものも「エージェント」にコントロールさせる方法を最初は採用していたが、実験を効率的に行うため、この形にした。「ベース」には、もうひとつ「黒板」が配置される。これには「エージェント」全体の動作結果などを総合計した統計的なデータが保持される。

3) 山影進，服部正太編『コンピュータの中の人口社会』共立出版，2002年8月10日，付録CD。

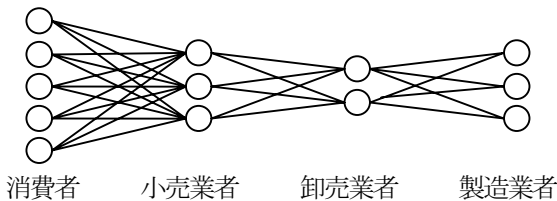
4) 株式会社構造計画研究所より無償提供を受けたKK-MAS。

次に、「エージェント」である。動作のタイミングだけは「ベース」に依存するが、それ以外は「エージェント」が独自に判断して動作する。「エージェント」には、「帳簿」が配置される。これには「エージェント」個別の動作結果が、各「エージェント」ごとに保持される。「エージェント」は、消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者の属性を持ったものがある。この属性に沿った振る舞いをする。

### 1-3. エージェント同士の関係

エージェント同士の関係は、流通を模して図1-2のようにした。連結の仕方は、川下から直前の川上への接続のみとした。本来であれば、消費者と卸売業者、消費者と製造業者、そして小売業者と製造業者も考慮されるべきだが、複雑になるため、ここでは考慮しないことにした。

図1-2 エージェント間の関係

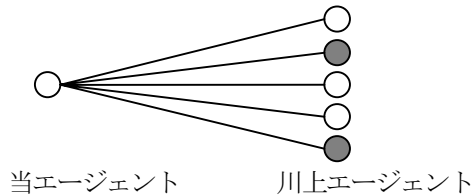


### 1-4. 基本的な共通動作

消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者の動作には、若干の差がある。しかし、大半の部分を占める基本的な動作は同じである。この基本的な部分は次のようになっている。

図1-3に示されるように、ある「エージェント」を「当エージェント」とする。すると複数の「川上エージェント」が存在する。図1-3では5つある。それぞれの「エージェント」には探索可能な数に制限（視野）があり、

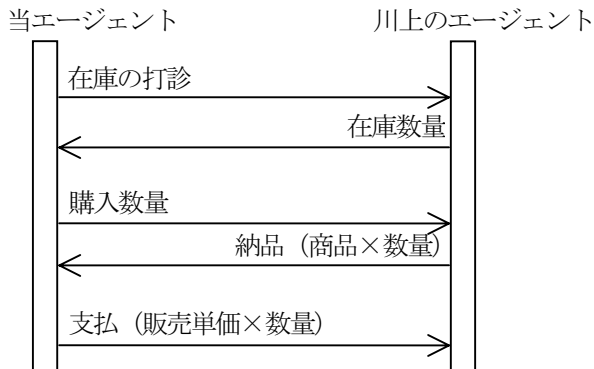
図1-3 エージェントの探索範囲



すべての「川上エージェント」の販売価格を見ることができない。図1-3では、「当エージェント」の探索可能な数は2つとした。ここでは、上から2番目と5番目が見えている。販売価格の見える「川上エージェント」はランダムに決まるものとした。

「当エージェント」は、販売価格の見える「川上エージェント」に対して、販売価格の安い順に順位をつける。この順位に従って、図1-4に示される打診と取引を行う。

図1-4 エージェント間のやり取り



まず、「当エージェント」は購入したい数量を決定する。次に、「川上エージェント」に対して在庫数量を打診する。これに対する返事と自分の購入したい数量を考慮して、購入数量を「川上エージェント」へ伝達する。この納

品と支払いが行われて、ひとつの取引が完了する。ひとつの取引で購入したい数量を満たすことができない場合、販売価格を見ることができる「川上エージェント」範囲内で、同様の取引を繰り返す。

このような取引をしていく中で、在庫があまれば販売価格を下げ、足りない場合は価格をあげる。そして、現金が0となったものは、削除（市場から退場）されることとした。

消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者の動作の違いは次のようなところにある。当然のことではあるが、消費者は販売をせず消費を行い、製造業者は仕入をせず製造を行う。また、購入したい数量を決定する仕組みを、消費者のみ単純なものにし、在庫しておきたい数量より少なくなった分だけ購入するようにした。他の属性のエージェントでは、「帳簿」に記録された販売数量などをもとに安全在庫を計算して決定した。

### 1-5. 初期値と定数

上記の仕組み以外に、様々なデータが定数として与えられる。各「エージェント」が最初に持っている現金の量、先にも上げた「川上エージェント」に対する探索可能な制限数、そして、各「エージェント」の固定費などがこれに相当する。これらの定数については、消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者の連鎖が途切れず全体が動作するように、探索的な方法で試行錯誤しながら当てはめたものである。

これらの定数のいくつかは後で、値を上下させて再実験し、初期値によって偶然そうなのではないことを検証した。

## 2. 発見物

### 2-1. 中間商人の理論上の上限値

「総取引数極小化原理」で言うところの中間商人の理論上の上限値とは、

次のようなことである。まずは、以下、商学辞典に記されていることである。

ホールによって唱えられた理論のひとつであって、生産者と小売業者との間で直接取引される場合よりも、生産者と小売業者との間に卸売業者が介在した場合のほうが、取引の数の合計値が少ないことを主張するものである。すなわち、供給者（生産者）数を  $S$ 、需要者（小売業者）数を  $C$  とすると、直接取引数は  $S \times C = SC$  であり、中間に媒介者（卸売業者）が  $W$  だけ介在すれば取引総数は  $W(S+C)$  になる。

$$W < SC / (S + C)$$

である限り総取引数は媒介者の介在により少なくなり、それにとまう流通費も低下するとされる。しばしば卸売業者の存在を是認する証拠として利用される<sup>5)</sup>。

中間商人の上限値とは、上記の説明中の  $SC / (S + C)$  である。上記の説明では、卸売業者に重心を置いて説明されているが、媒介者とも記されているように、中間に位置するものであればよい。本実験においては、消費者と卸売業者の間にある小売業者、そして小売業者と製造業者の間にある卸売業者が、ここでいう中間商人である。

## 2-2. 最初の発見物

この発見は、「1. 本実験におけるマルチエージェント型モデルの概要」で説明したモデルに、次のような条件を追加したときに見つかった。

図2-1中の「黒板」に、消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者といった属性ごとに「エージェント」が持っている現金を合計し、そのデー

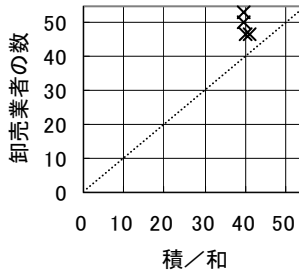
---

5) 久保村隆祐，荒川祐吉編『商業辞典』同文館，1982年4月30日，181頁。



タを蓄積した。属性ごとに現金の増加量が大きければ、その属性に「エージェント」を追加し、増加が小さいか反対に減少していれば追加しないというものである。

図 2-1 最初の発見物



当然のことながら、「エージェント」の追加がされると過当競争が始まり、販売価格は下がり、現金の増加量は減ってくる。「エージェント」の追加が多すぎると、現金の合計が減り始める。その中でいくつかの「エージェント」の現金が0となり、市場から退場する。このような現象繰り返しながら、あるところで均衡する。このときの消費者、小売業者、卸売業者、そして製造業者の数をカウントした。

最初に見つかったものをグラフ化したものが、図 2-1 に示されている。グラフの X 軸 (積/和) は、先の説明中の

$$SC/(S+C)$$

に相当する。ここでの中間商人は卸売業者であるので、S に製造業者の数、C に小売業者の数を入れることになる。Y 軸は、実験から得られた卸売業者の数である。グラフに示されるように、中間商人の理論上の上限値よりも若干多くはあるが、ほぼ同じ値が、偶然に得られた。

### 2-3. 検証1 消費者，小売，卸売，そして製造業者の数を変化

これが偶然でないことを確認するために、小売業者と製造業者の数を変えてみることにした。これらの数は自動的に変わってしまうので、恣意的に数値を与えることはできない。ただし、消費者の数を増やせば、これらの値が増えることが既に分かっていたので、消費者の数を増やし、そのときの小売業者，卸売業者，そして製造業者の数を得ることとした。

ただし、ここの検証では「視野」という定数を、消費者は2，小売業者は10，卸売業者は10とした。ここで視野とは、先でも説明したが、「川上エージェント」の販売価格を見ることができる探索可能な制限数のことである。ここでは、消費者の視野を他よりも狭くしてみた。そして初期値として小売業者，卸売業者，そして製造業者の数を全て50という数値を与え、そこから開始した。

得られた数値をグラフ化したものが図2-2，図2-3，そして図2-4である。多少のこぼこはあるものの、消費者の増加によって小売業者，卸売業者，そして製造業者ともに増加していることがわかる。ただし、小売業者と製造業者の数が、ある数値を境に伸び悩む現象は、現在のところ、理由は分からない。理由はどうであれ、ここでの目的であった、製造業者と小売業者の数を調べてみることに成功した。

ここで得られた製造業者と小売業者の数値を使用して、中間商人の理論上の上限値である  $SC/(S+C)$  を計算した。この計算結果を X 軸（積/和），そして実験から得られた卸売業者の数を Y 軸としてグラフにしたものが、図2-6である。中間商人の理論上の上限値と、実験結果の値との間に、若干のずれは認められる。しかし、ほぼ一致していることがわかる。

ここで、中間商人は製造業者と小売業者の間にある卸売業者だけでなく、消費者と卸売業者の間にある小売業者もそのひとつである。そこで、消費者と卸売業者の数値を使用した中間商人の理論上の上限値と、実験での実測値

図 2-2 小売業者の数 (視野=2)

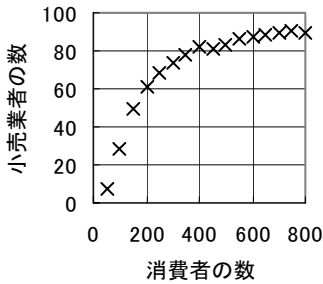


図 2-3 卸売業者の数 (視野=2)

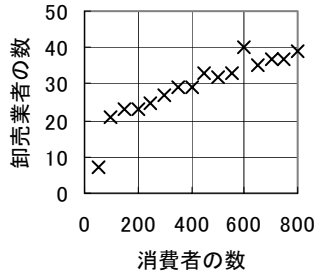


図 2-4 製造業者の数 (視野=2)

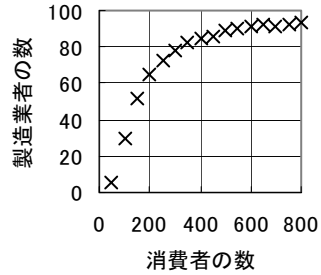


図 2-5 理論値との比較 (視野=2)

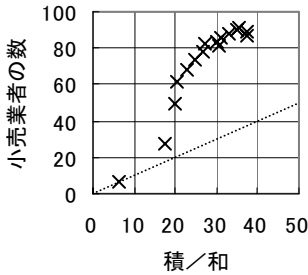
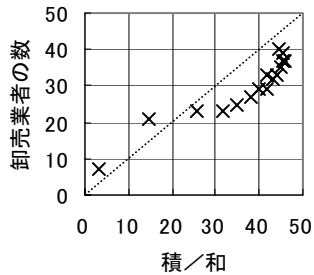


図 2-6 理論値との比較 (視野=2)



も比較してみた。これを示したグラフが、図2-5である。これは先のもの  
と比較して、大きくずれている。ただし傾向は似ているように思われる。

#### 2-4. 検証2 視野の変更

先では、消費者の視野のみを2としていた。ここでは、消費者、小売業者、  
卸売業者のすべての視野を10にして、再実験を行った。他の条件は「検証1」  
と同じである。このとき得られた値が、図2-7、図2-8、そして図2-9  
である。先ほどと同様に、多少のこぼこはあるものの、消費者の増加に  
よって小売業者、卸売業者、そして製造業者ともに増加していることがわか  
る。ある数値を境に伸び悩む現象は、小売業者と製造業者だけではなく卸売  
業者にもみとめられた。消費者の視野だけを10に変化させたため、小売業者  
の数の最大値が先の図2-2では90程度であったが、図2-7では60程度に  
下がっている。消費者の視野が広がることによって価格競争が激化し、より  
多くの小売業が淘汰されたものと思われる。

ここで得られた数値を使用して、小売業者と卸売業者の中間商人の理論上  
の上限値を計算し、実験から得られた実測値を比較した。この比較をグラフ  
にしたものが、図2-10と図2-11である。どちらも中間商人の理論上の上  
限值と実測値とが近いことが分かった。小売業者の場合は、図2-5と比較  
して、図2-10では大きくはずしている部分がなくなっている。消費者の視  
野が2から10へ変わったことが大きく影響していると思われる。

#### 2-5. 検証3 小売業者、卸売業者、そして製造業者の初期値の変更

複雑系の世界では、初期値の差によってその後の変化がまったく異なる場  
合もある。ここまでは、初期値として小売業者、卸売業者、そして製造業者  
の数を全て50という数値を与え、そこから開始していた。そこで初期値とし  
て異なる値を与えることによって、差があるのか、またないのかということ

図 2-7 小売業者の数 (視野=10)

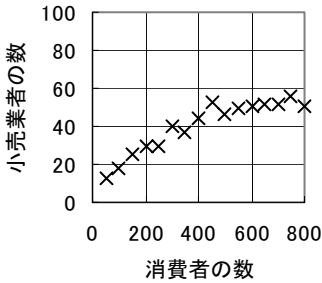


図 2-8 卸売業者の数 (視野=10)

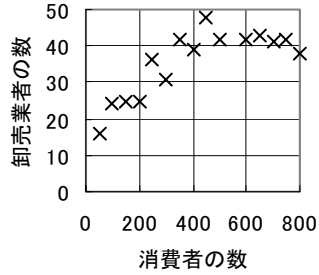


図 2-9 製造業者の数 (視野=10)

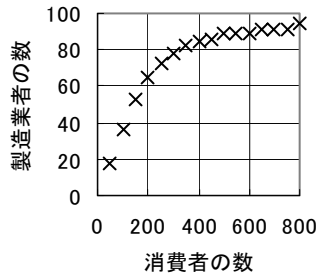


図 2-10 理論値との比較 (視野=10)

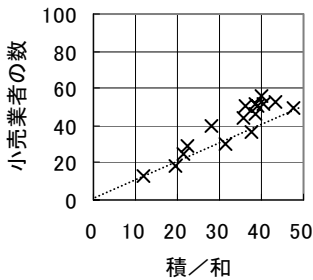
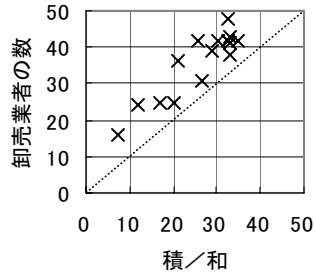


図 2-11 理論値との比較 (視野=10)



を検証してみた。

ここでの検証で使用した小売業者、卸売業者、そして製造業者の初期値の組み合わせは表2-1に示されるとおりである。ここでは、消費者の数は200と固定した。これは、先で行った検証1・2のように消費者の数の変更まで行くと、今所有の計算機の能力では、非常に多くの時間がかかる（実質不可能）ためである。消費者の視野については、2と10の両方を試した。

表2-1 初期値の組み合わせ

小 売	卸 売	製 造
5	50	50
50	5	50
50	50	5
5	50	100
5	100	50
50	5	100
50	100	5
100	5	50

結果を示したグラフが、図2-12～2-21である。グラフの配置は前の検証と同じである。グラフ中で<sup>しかく</sup>□で示した点が、小売業者、卸売業者、そして製造業者の初期値をすべて50にしたものである。一部には、エージェントの初期値が少なすぎたことが原因で、小売業者、卸売業者、そして製造業者のいずれかが全滅してしまい、流通の連鎖が途切れてしまった場合もあった。この場合は、グラフの点として記していない。

図2-12～2-21を見てもわかるように、初期値による差が認められる。しかし、ほぼ近い位置に集まっていることもわかる。中間商人の理論上の上限値が、ある初期値において偶然出現したものではないという検証には、十分だと思われる。

図 2-12 小売業者の数 (視野=2)

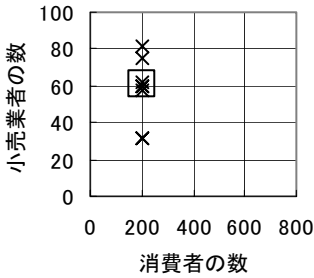


図 2-13 卸売業者の数 (視野=2)

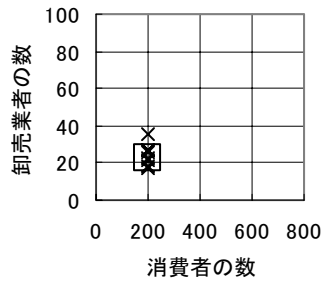


図 2-14 製造業者の数 (視野=2)

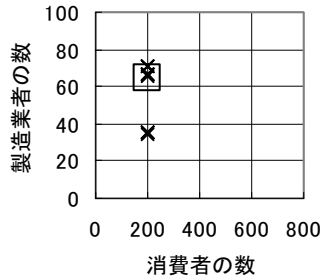


図 2-15 理論値との比較 (視野=2)

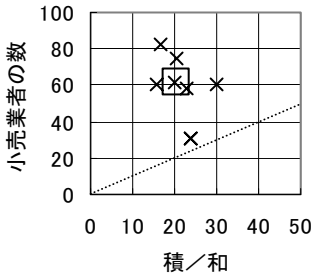


図 2-16 理論値との比較 (視野=2)

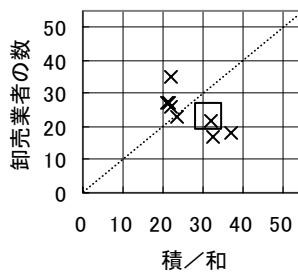


図 2-17 小売業者の数 (視野=10)

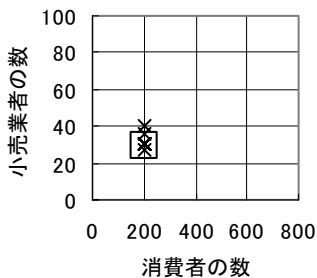


図 2-18 卸売業者の数 (視野=10)

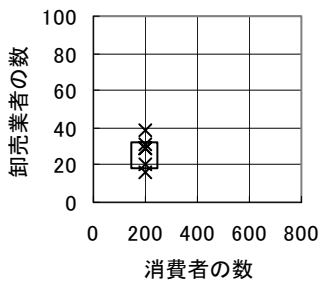


図 2-19 製造業者の数 (視野=10)

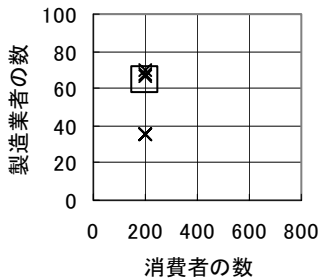


図 2-20 理論値との比較 (視野=10)

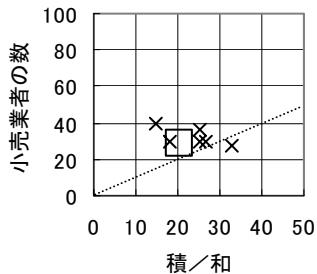
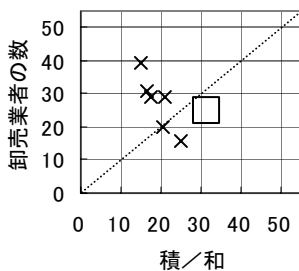


図 2-21 理論値との比較 (視野=10)





### 3. 考 察

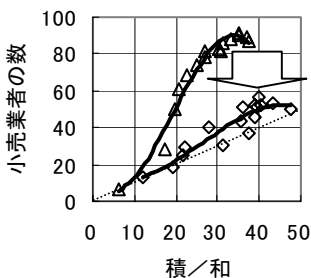
ここで作成したエージェントは、特殊な能力を持ったものではない。「1. 本実験におけるマルチエージェント型モデルの概要」に記されているとおり単純なものである。これらのエージェントの総和として、「総取引数極小化原理」で言うところの中間商人の理論上の上限値が浮かび上がってきた。この導出された現象が、単なる初期値などの偶然よるものでもないことが、上で検証された。

とすると、ここで作成したエージェント程度のものの中に、中間商人の理論上の上限値を規定する仕組みが内在されていると考えるほうがよいだろう。振り返って現実の状況はどのようになっているのであろうか。ここでは、商業統計などのデータと照らし合わせる、といったところまで踏み込むことはしないが、差異が見られることだろう。

上記の検証の副産物ではあるが、差異を作り出す可能性のあるものが、2つ見つかった。初期値と視野である。初期値については、もしかすると収束するのに時間がかかっていただけの可能性も含まれるが、視野については明らかな差が認められた。視野についてももう少し考察することにする。

図2-5と図2-10を合わせたものが、図2-22である。図2-22中、△は視野<sup>さんかく</sup>2を示し、◇は視野<sup>ひしがた</sup>10を示している。実線は、分布する点の近似曲線である。図2-22中の矢印のようなシフトは、消費者の視野の狭さゆえに存立しえた小売業者が、消費者の視野の拡大で存立できなくなったことを示している。今日、消費者はインターネットの普及で、より広い範囲で価格比較を行うことができる。このような消費者と直面している小売業者は、図2-22中の矢印のような圧力を受けているのかもしれない。ここでは、消費者の視野のみを対象に比較実験を行ったが、全ての段階で視野の拡大という現象があるだろう。インターネットを活用しているのは消費者だけでなく企業も同

図 2-22 視野 2 (△) と視野10 (◇) の比較



じで、グローバルソーシングを行っている。

また、中間商人の理論上の上限値と現実との間のずれが、視野のみで十分説明できるものであれば、これを逆手に取り、統計数値より中間商人の下流に位置するものの視野の広さの平均を推定することができるのかもしれない。

### おわりに

本論文では、まず、ここで作成したマルチエージェント型モデルの説明をした。この中でひとつひとつのエージェントは、非常に単純な動作をしていることを見てもらった。この単純なものの総和として、「総取引数極小化原理」で言うところの中間商人の上限値に近い値が浮かび上がってきたことを提示した。この現象が単なる偶然ではないことの検証も行った。この作業の中から、中間商人の川下エージェントの視野が狭いと、理論上の上限値から乖離する、という興味深い現象も見つかった。最後に、これらからインターネットを活用するようになった今日のこととあわせて、若干の考察を行った。

このような実験をしていく上で、計算機の能力とその計算能力を十分引き出すプログラミング能力も必要だとわかった。計算機の能力は今後さらに大きくなるのが容易に予測される。必要となるのは、プログラミング能力ということになる。ただ、このような能力がなくても実験が可能な環境の整備

も必要だろう。そのための試みが多くあるが、流通専用の環境ではないため、プログラミングに近い作業を要求される。そのためプログラミングをしなくても実験が可能な流通専用の環境整備もいるのではないかと思われる。

(2005年12月16日提出)

### 参考文献

- 巖俊一, 石和貞男訳『集団の生物学入門』培風館, 1977年1月30日 (E. O. Wilson, W. H. Bossert, *A primer of population biology*, Sinauer Associates, 1971)。  
 久保村隆祐, 荒川祐吉編『商業辞典』同文館, 1982年4月30日。  
 吉田民人, 鈴木正仁編著『自己組織性とはなにか』ミネルヴァ書房, 1995年12月30日。  
 『日本経済新聞』1993年10月17日, p.10 (群れが秩序生むロボット行動学, 自ら判断, 他機の後追う)。  
 『日本経済新聞』1995年5月8日, p.17 (第2部いま最前線で (1) 複雑な現象に挑む—読めぬ因果を読む (科学・新世紀))。  
 科学シミュレーション研究会『パソコンで見る複雑系・カオス・量子』講談社, 1997年2月20日。  
 合原一幸編『複雑系がひらく世界』日経サイエンス社, 1997年6月28日。  
 香取真理『複雑系を解く確率モデル』講談社, 1997年11月20日。  
 日本総合研究所編『生命論パラダイムの時代』第三文明社, 1998年6月30日。  
 生天目章『マルチエージェントと複雑系』森北出版, 1998年11月30日。  
 服部桂監修『「複雑系」を超えて』アスキー, 1999年2月10日 (K. Kelly, *Out of control: the rise of neo-biological civilization*, Addison-Wesley, 1994)。  
 米沢富美子監訳『自己組織化と進化の論理』日本経済新聞社, 1999年9月13日 (S. A. Kauffman, *At home in the universe: the search for laws of self-organization and complexity*, Oxford University Press, 1995)。  
 服部正太, 木村香代子『人口社会』共立出版, 1999年12月25日。  
 山影進, 服部正太編『コンピュータの中の人口社会』共立出版, 2002年8月10日。  
 奈良重俊訳『情報と自己組織化: 複雑系への巨視的アプローチ』シュプリンガー・フェアラーク東京, 2002年12月10日 (H. Haken, *Information and self-organization*, Springer-Verlag, 1988)。  
 寺野隆雄監訳『対立と協調の科学』ダイヤモンド社, 2003年6月5日 (R. Axelrod, *The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration*, Princeton University Press, 1997)。  
 高木晴夫監訳『複雑系組織論: 多様性・相互作用・淘汰のメカニズム』ダイヤモンド社, 2003年6月5日 (R. Axelrod and M. Cohen, *Harnessing complexity*, Free Press, 1999)。  
 和泉潔『人口市場』森北出版, 2003年7月5日。

貝原俊也「サプライチェーンにおける企業間交渉戦略へのマルチエージェント技術の適用」『人工知能学会誌』19 卷 5 号, pp.579-586, 2004 年 9 月。

北中英明『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, 2005 年 2 月。

R. H. Bordini ed., *Multi-agent programming: languages, platforms, and applications*, Springer, 2005.