

## 人工社会における集団的意思決定

塩村 尊\*

### 要 旨

集団が効率的に活動を進めるためには構成メンバーの価値観や選好の相違による対立を解消し、集団としての合意形成を行う必要がある。このためには各メンバーの意見を一つに集約することが求められるが、メンバー一人ひとりが自己の主張に固執すると、合意形成に失敗することになる。本稿の目的は個々のメンバーの選好を尊重しつつも、それを集団の意思決定に適応させることにより、集団としての合意が形成されていくプロセスをコンピュータベースのマルチエージェントモデルとして定式化し、集団的意思決定に関する研究のための土台作りを行うことにある。オブジェクト指向言語により記述されたこのモデルは差分プログラミングにより更に発展し、従来とは異なる観点からの分析手法を与えることになるであろう。

## Collective Decision-Making in an Artificial Society

Takashi SHIOMURA

### Abstract

In a democratic society, individual decision-making must be, to some extent, subordinated to group decision-making for the group to work efficiently. A consensus by members of a group, however, cannot be formed successfully if each member insists on his or her own requirement, sense of value or preference. The members must adapt themselves to the group in the process of collective decision-making. The purpose of this paper is to present a computer-based model of collective decision-making in an artificial society. This is the prologue to a scenario that shows the usefulness of multi-agent models in the social sciences. The model written by an object-oriented programming language, will allow us to develop an investigation through programming-by-difference, and provide a new point of view for researchers.

---

\*関西大学総合情報学部

## 1. はじめに

社会科学におけるマルチエージェントモデルに関する先駆的研究として、Schelling (1969) を挙げることができる。これは仮想空間内の個々の居住者に、彼とは異なる属性を持つ周辺住民の数が、ある臨界値を超えたならば移動可能な範囲内の空き地に居を移すという単純な動作を与えた時、このミクロ的挙動が住民の棲み分けというマクロ的挙動を創発することを観察したモデルであり、今日、分居モデルと呼ばれている。

Schelling は人の手による小規模な実験から分居を観察したが、その後のコンピュータと周辺環境の飛躍的発達、及び StarLogo, Swarm, RePast 等のソフトウェアの開発により、現在では比較的大規模なマルチエージェントモデルのシミュレーションが可能になっている。実際、Epstein and Axtell (1996) では Sugarscape をベースとした様々な興味深い研究が紹介されており、山影、服部編著 (2002) による KK-MAS を用いた種々の応用例はマルチエージェントモデルの有用性と可能性を示唆している。一方、生天目 (2001) は集団内の意思決定過程をマルチエージェントモデルとして記述し、合意形成の成功条件や支配戦略の普及過程に関するシミュレーション分析を行っている。

本稿の目的は、生天目 (2001) の集団的意思決定モデルを再構築し、そこにおいて若干、曖昧であった叙述を明確にすると共に、更なる考察のための土台を提供することにある。

## 2. マルチエージェントモデル

一般に、「理想的」民主主義の下では個人の選好順序を社会的に集約することは不可能であることが証明されている (松原, 2001, p.205参照)。これは Arrow (1963) の一般不可能性定理として知られているが、集団構成員が集団の意思決定に合わせて自ら選好を適応、修正するならば、たとえ投票のパラドックスがおこるようなケースにおいても集団として合意に至る場合がある。以下では集団構成員をエージェントと呼び、各エージェントの価値観や選好等、個人属性の異質性を認めた上で、これら複数のエージェントが協調的行動を取る時の集団における選好集約プロセスを記述する。

今、集団を構成する  $I$  人のメンバーそれぞれに  $J$  個の選択肢があり、これを記号  $O_j \in R^N$ ,  $N \geq 1$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  で表す。又、メンバー  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  により選択肢  $O_j$  が別の選択肢  $O_k$  よりも少なくとも同程度好まれることを2項関係  $O_j \succeq_i O_k$ , 或は  $O_k \preceq_i O_j$  で表す。ここで、選好順序  $\succeq$  は擬順序であると想定する。特に、 $O_j$  が  $O_k$  よりも強く好まれることを  $O_j \succ_i O_k$ , 又は  $O_k \prec_i O_j$  で表す。尚、丸山 (1995, p.8) は2項関係が反射性と推移性を満たす時に擬順序と呼び、生天目 (2001, p.71) は半順序と呼んでいる。一方、コルモゴロフ、フォーミン (1979, p.23) では2項関係が反射性、推移性に加えて、反対称性を満たす場合を半順序と呼んでいる。ここでは丸山 (1995) に従った。

エージェントの選好順序が与えられた時、次の手順で選択肢に対する選好インデックスを割

当てる。説明の便宜上、しばらく  $J = 5$  とし、エージェント  $i$  の 5 つの選択肢には選好関係

$$O_1 \succ_i O_2 \succ_i O_4, O_1 \succ_i O_3, O_2 \succ_i O_5$$

が与えられたものとする。ここで、選好関係とは選好順序が与えられた時、特定の選択肢の組に関する選好順序を意味している。この選好順序は完備ではないことに注意せよ。

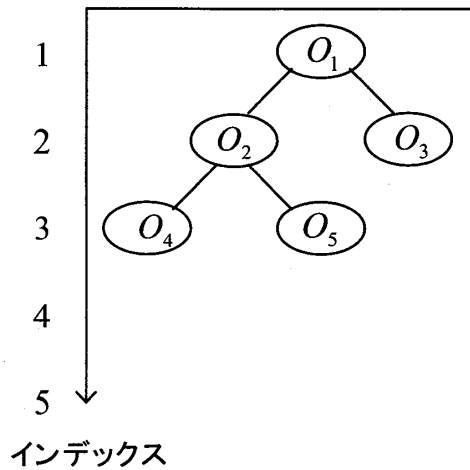


図1 選好関係のツリー表示：インデックスが小さい程、選好序列が高い。

上の選好関係を、より好まれる選択肢ほど上位に位置するツリーで表すと図1のようになるが、この時、最も選好される選択肢に整数 1 を割当て、選好序列が下位になる選択肢に 1 ずつ大きな数値を割当てる。従って、上の選好関係の場合、エージェント  $i$  の選好インデックスは表1の通りになる。同様にして、他のエージェントにも選好インデックスを割当てるものとする。このインデックスの割当て方法はビット演算を用いた生天目 (2001, pp.75-6) の方法と本質的に同じものである。

表1 選好インデックスの割当て

選択肢	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$
インデックス	1	2	2	3	3

$C_t^{(i)}(O_j) \geq 1$  を時刻  $t$  における選択肢  $O_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  に関するエージェント  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  の選好インデックスとする。エージェント  $i$  の選好インデックスのノルムを絶対値ノルム

$$\|C_t^{(i)}\| \equiv \sum_{j=1}^J |C_t^{(i)}(O_j)| = \sum_{j=1}^J C_t^{(i)}(O_j),$$

により定義した時,  $x_t^{(i)}(O_j) \equiv C_t^{(i)}(O_j) / \|C_t^{(i)}\|$  を規準化された選好インデックスと呼ぶ. この規準化されたエージェントの選好インデックスは, 彼が属するグループ内で集計され, 集団の規準化された選好インデックスが決定されるものとする. 即ち, 時刻  $t$  における選択肢  $O_j$  に関する集団の選好インデックスを  $G_t(O_j)$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  で表した時,

$$\begin{cases} G_t(O_j) \equiv \sum_{i=1}^{n_k} x_t^{(i)}(O_j), \\ z_t(O_j) \equiv G_t(O_j) / \|G_t\|, \end{cases}$$

とする. 但し,  $\|G_t\|$  は集団の選好インデックスに関する絶対値ノルムである. もし  $z_t(O_j) \leq z(O_k)$  であるならば, グループは時刻  $t$  において  $O_j$  は  $O_k$  よりも少なくとも同程度好まれる, 即ち  $O_j \succeq_{\bar{G}} O_k$  であると判断するものとする. 又,  $z_t(O_j) < z_t(O_k)$  であるならば,  $O_j$  は  $O_k$  よりも強く好まれる, 即ち  $O_j \succ_{\bar{G}} O_k$  であると判断するものとする. グループの選好順序  $\succeq_{\bar{G}}$  は完備な擬順序であることに注意せよ. このように定義された集団の選好インデックスは Borda 得点と等価なものである (松原, 2001, pp.194-5参照).

さて, エージェント  $i$  の選択肢  $O_j$  に関する選好インデックスは離散力学系

$$\begin{cases} C_{t+1}^{(i)}(O_j) = \alpha_t^{(i)}(z_t(O_j) - x_t^{(i)}(O_j)) + x_t^{(i)}(O_j), \\ x_{t+1}^{(i)}(O_j) = C_{t+1}^{(i)}(O_j) / \|C_{t+1}^{(i)}\|, \end{cases} \quad (1)$$

に従うものとする. ここで,  $\alpha_t^{(i)}$  は時刻  $t$  におけるエージェント  $i$  のグループの意思決定に対する適応度を測るものであり,  $0 \leq \alpha_t^{(i)} \leq 1$  を仮定する.  $\alpha_t^{(i)} \equiv 0$  の時, エージェント  $i$  は常に自己の選好を主張し,  $\alpha_t^{(i)} \equiv 1$  の時は常にグループの意思決定に従うことになるが, さしあたり, この適応係数は定数であると仮定する.

各エージェントの選好がグループの選好と一致した時, 即ち,  $z(O_j) \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} z_t(O_j)$ ,  $x^{(i)}(O_j) \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} x_t^{(i)}(O_j)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  が存在するものとして

$$z(O_j) = x^{(i)}(O_j), \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J,$$

が成立した時,

$$z(O_{j_1}) \geq z(O_{j_2}) \geq \dots \geq z(O_{j_{l-1}}) \geq z(O_{j_l}),$$

なる大小関係が得られたとするならば, 選択肢  $O_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, J$  に関するグループの選好関係が

$$O_{j_1} \succeq_{\bar{G}} O_{j_2} \succeq_{\bar{G}} \dots \succeq_{\bar{G}} O_{j_{l-1}} \succeq_{\bar{G}} O_{j_l}$$

として確定する. ここで,  $(j_1, j_2, \dots, j_l)$  は選択肢をグループの選好順序に基づき並べ替えた時の選択肢番号である.

### 3. オブジェクト指向言語による合意形成モデルの既述

マルチエージェントモデルは種々の属性と行動が与えられたエージェントの集団行動を分析することを目的としている。そして新たな発見を求め、エージェントには更なる属性と行動が追加され、モデルは進化していく。このような性格を持つモデルの記述には関連する属性と操作を一つの単位にまとめ、これを新たな単位に継承することのできるオブジェクト指向言語が適している。図2は標準C++言語により前節のモデルを既述することを念頭においた場合のUMLクラス図であるが、その本質は使用するオブジェクト指向言語には依らない。

どのような合意形成モデルもエージェントの選好インデックス、並びに適応係数に関するデータ読み込みとセット、及びシミュレーション結果の出力が必要になる。しかしながら、分析の対象とする集団の構造、或は分析目的により力学系、従ってこれに伴うグループの初期化と選好インデックスの集計方法が変化する。そこで、これら3つの操作に関してはインターフェイス、又は抽象クラスで仕様を定めておき、その実装は力学系を記述する派生クラスにおいて行うものとする。尚、標準C++言語はインターフェイス機能を持たないため、図2では抽象クラスを用いている。

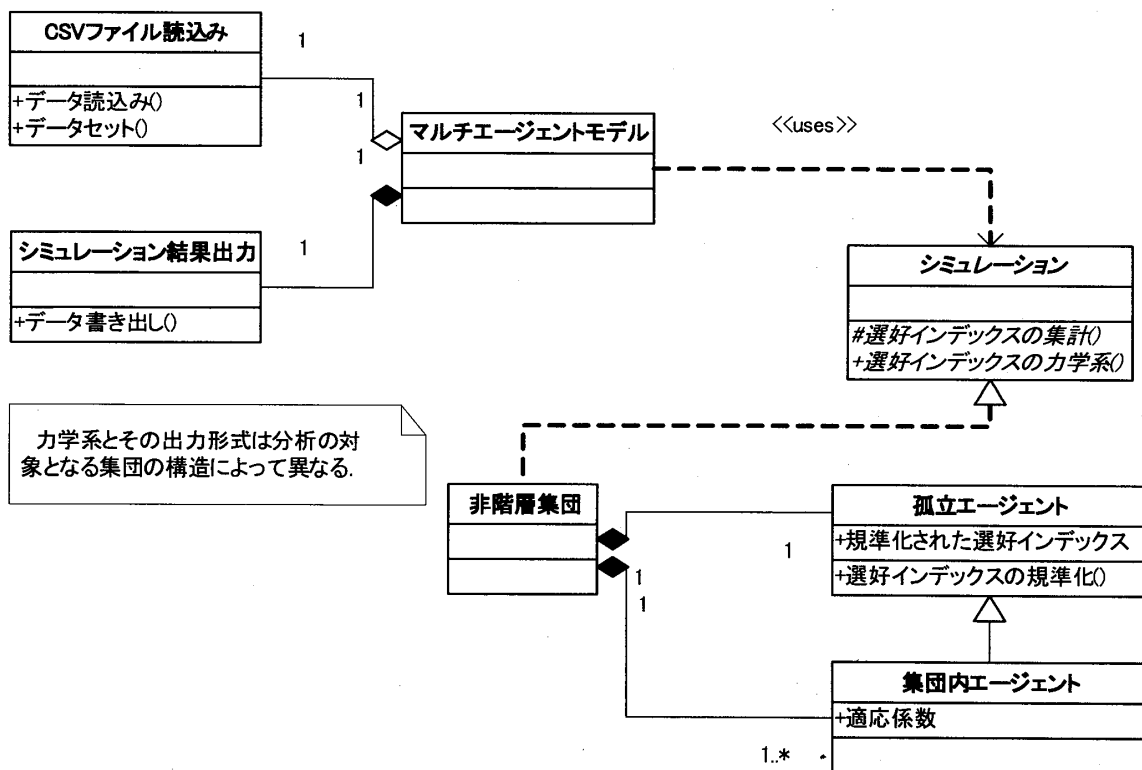


図2 合意形成モデルのUMLクラス図：斜体のクラス名と操作名は各々、抽象クラスと未実装メンバ関数であることを意味する。

集団から孤立したエージェントは自らの選好を集団に適応，修正する必要がないため，そのデータメンバとして選択肢の数と選択肢に対する選好インデックスを持つ。しかしながら，集団におけるエージェントはこれら2つに加えて適応係数を持つ。一方，集団内エージェントから構成されるグループを特徴付けるものは各エージェントの選好インデックスを集計，規準化した選好インデックスと選択肢の数であり，この意味において孤立エージェントと同じである。そこで，グループは孤立エージェントクラスのインスタンスとして生成し，集団内エージェントクラスは孤立エージェントクラスの派生クラスとして設計する。

#### 4. 非階層集団における合意形成

以下は前節で考察したコンピュータベースモデルの動作確認の意味も込めた生天目（2001）の再現である。集団を構成する5人のエージェントの選好関係が図3の通り与えられたものとする。エージェント2を除き，選好順序は完備ではないことに注意せよ。

$$\begin{aligned} \text{エージェント1: } & O_1 \succ_1 O_2 \succ_1 O_4, O_1 \succ_1 O_3, O_2 \succ_1 O_5, \\ \text{エージェント2: } & O_2 \succ_2 O_3 \succ_2 O_4 \succ_2 O_5 \succ_2 O_1, \\ \text{エージェント3: } & O_3 \succ_3 O_2 \succ_3 O_1, O_3 \succ_3 O_4 \succ_3 O_5, \\ \text{エージェント4: } & O_4 \succ_4 O_5 \succ_4 O_3 \succ_4 O_1, O_3 \succ_4 O_2, \\ \text{エージェント5: } & O_5 \succ_5 O_1, O_5 \succ_5 O_4 \succ_5 O_3 \succ_5 O_2. \end{aligned}$$

図3 非完備選好順序

図3の選好関係に上述した手順に基づき選好インデックスを割当てるものとする。この時，各エージェントの適応係数を表2のように与えるものとする。表中，ケース1はグループの意思決定に対する適応係数が高いエージェントから成る集団であり，ケース2は適応係数の低いエージェントから成る集団である。これら2つのケースのように，各エージェントの適応係数が同じ集団を，適応係数に関して同質な集団と呼ぶことにする。

表2 エージェントの適応係数

エージェント	ケース1	ケース2
1	0.9	0.1
2	0.9	0.1
3	0.9	0.1
4	0.9	0.1
5	0.9	0.1

力学系(1)を前提とした時、同質集団におけるエージェント、及びグループの選好インデックスの推移を表したものが図4、及び5である。図中Stepは(1)の反復関数、或は交渉回数を表しており、Scoreは規準化された選好インデックスを表している。

図より反復を繰り返すごとに各エージェントの選好インデックスはグループの選好インデックスに収束して行き、グループとしての選択肢に対する優先順位が確定して行く様を観察することができる。いずれの場合も最終的には表3のような選好インデックスが得られる。従って、グループとしての選好関係は

$$O_3 \underset{G}{\succ} O_4 \underset{G}{\succ} O_5 \underset{G}{\succ} O_2 \underset{G}{\succ} O_1,$$

となる。予想されるように、図4と5を比較すると適応係数の大きい同質集団の方が、そうではない同質集団よりも早く合意に達することが分かる。

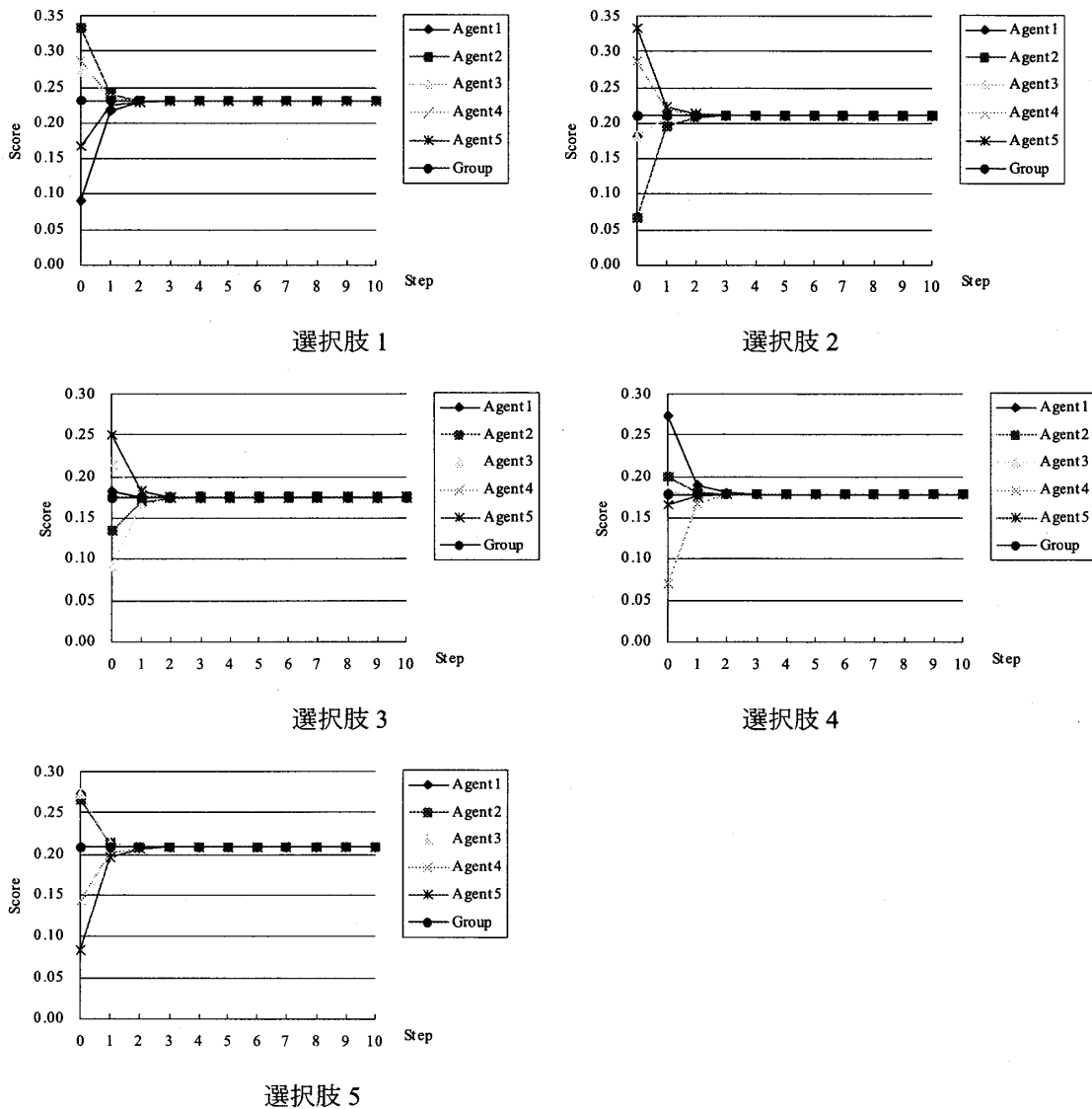


図4 適応度の高い同質集団における合意形成過程

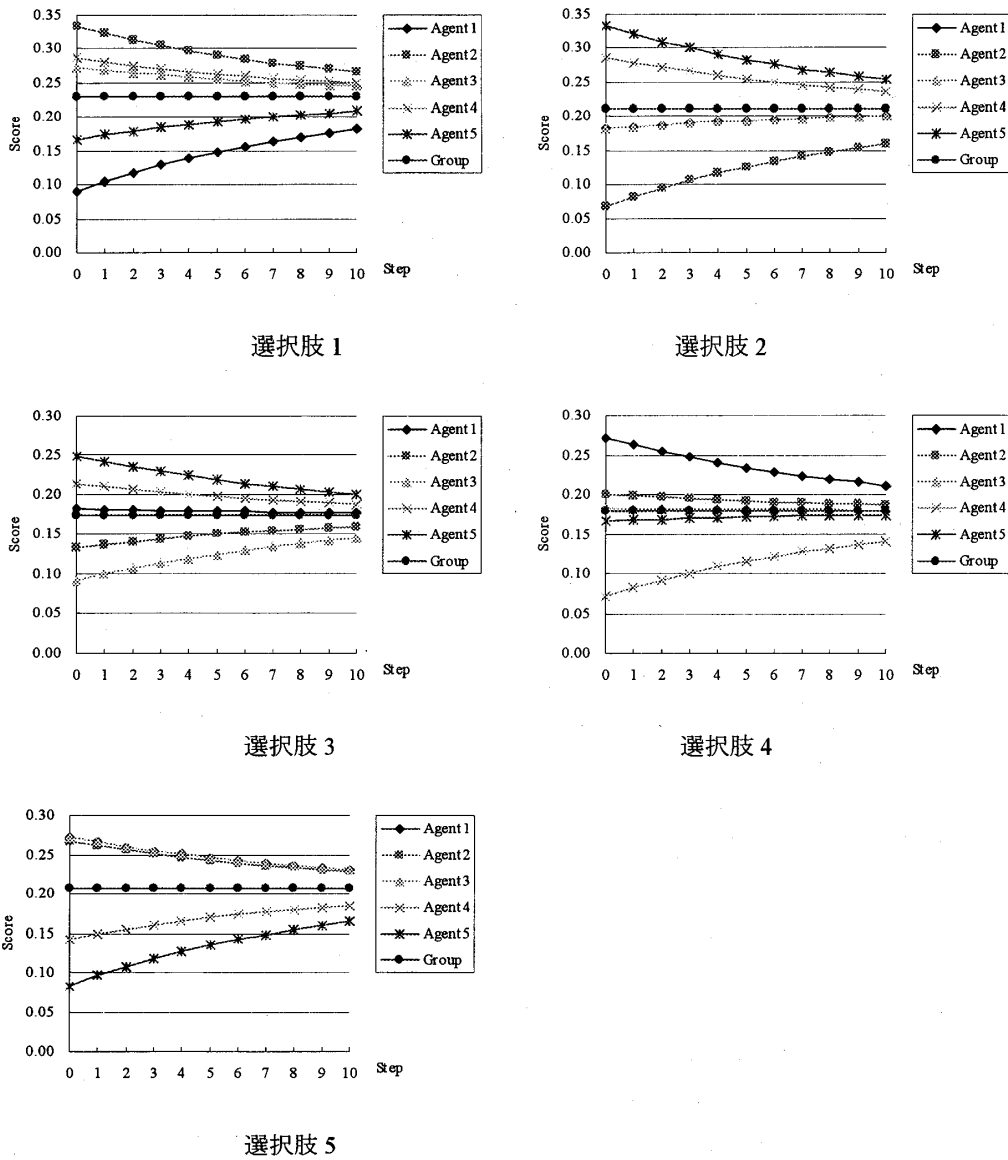


図5 適応度の低い同質集団における合意形成過程

表3 適応係数に関して同質な集団における選好インデックス：1000ステップ後の値。

選択肢	1	2	3	4	5
インデックス	0.22987	0.20987	0.17407	0.17853	0.20766

次に、多数決の原理の下では投票のパラドックスが起こる図6のような循環的選好関係を想定する。一方、適応係数に関しては表4の2つのケースを考える。ケース1は適応度の低い同質集団のものであり、ケース2は適応係数にバラツキを認める混質集団のものである。



$$\begin{aligned}
 \text{エージェント1: } & O_1 \succ_1 O_2 \succ_1 O_3 \succ_1 O_4 \succ_1 O_5, \\
 \text{エージェント2: } & O_2 \succ_2 O_3 \succ_2 O_4 \succ_2 O_5 \succ_2 O_1, \\
 \text{エージェント3: } & O_3 \succ_3 O_4 \succ_3 O_5 \succ_3 O_1 \succ_3 O_2, \\
 \text{エージェント4: } & O_4 \succ_4 O_5 \succ_4 O_1 \succ_4 O_2 \succ_4 O_3, \\
 \text{エージェント5: } & O_5 \succ_5 O_1 \succ_5 O_2 \succ_5 O_3 \succ_5 O_4.
 \end{aligned}$$

図6 エージェントの循環的選好関係

表4 循環的選好関係の場合における適応係数

エージェント	ケース1	ケース2
1	0.1	0.9
2	0.1	0.7
3	0.1	0.5
4	0.1	0.3
5	0.1	0.1

図6の循環的選好関係を前提とした場合、図7が示す通り、同質集団においては全ての選択肢に関する選好インデックスが共通の値、0.2に収束し、グループとして選択肢に優先順位を付けることができない。従って、この意味において合意形成に失敗する。これに対して混質集団においては最終的に表5のような値に収束し、グループとしての優先順位が

$$O_5 \underset{G}{\succ} O_1 \underset{G}{\succ} O_2 \underset{G}{\succ} O_3 \underset{G}{\succ} O_4,$$

として確定する。この理由は、適応係数に関して同質な集団においては一様にグループの意見に対して適応するため各エージェントの選好序列に変化が現れず、循環的選好関係が持続するのに対して、混質集団においてはエージェント間の適応度の差により循環的選好関係が崩れるためである（図7、及び8参照）。実際、適応度の高い柔軟な者が最も適応度の低い「頑固者」であるエージェント5に歩み寄りつつ合意が形成されて行く。適応度の多様性故に合意に至る事実は大変、興味深い。

表5 混質集団における選好インデックス: :1000ステップ後の値

選択肢	1	2	3	4	5
インデックス	0.17253	0.21255	0.24192	0.24642	0.12658

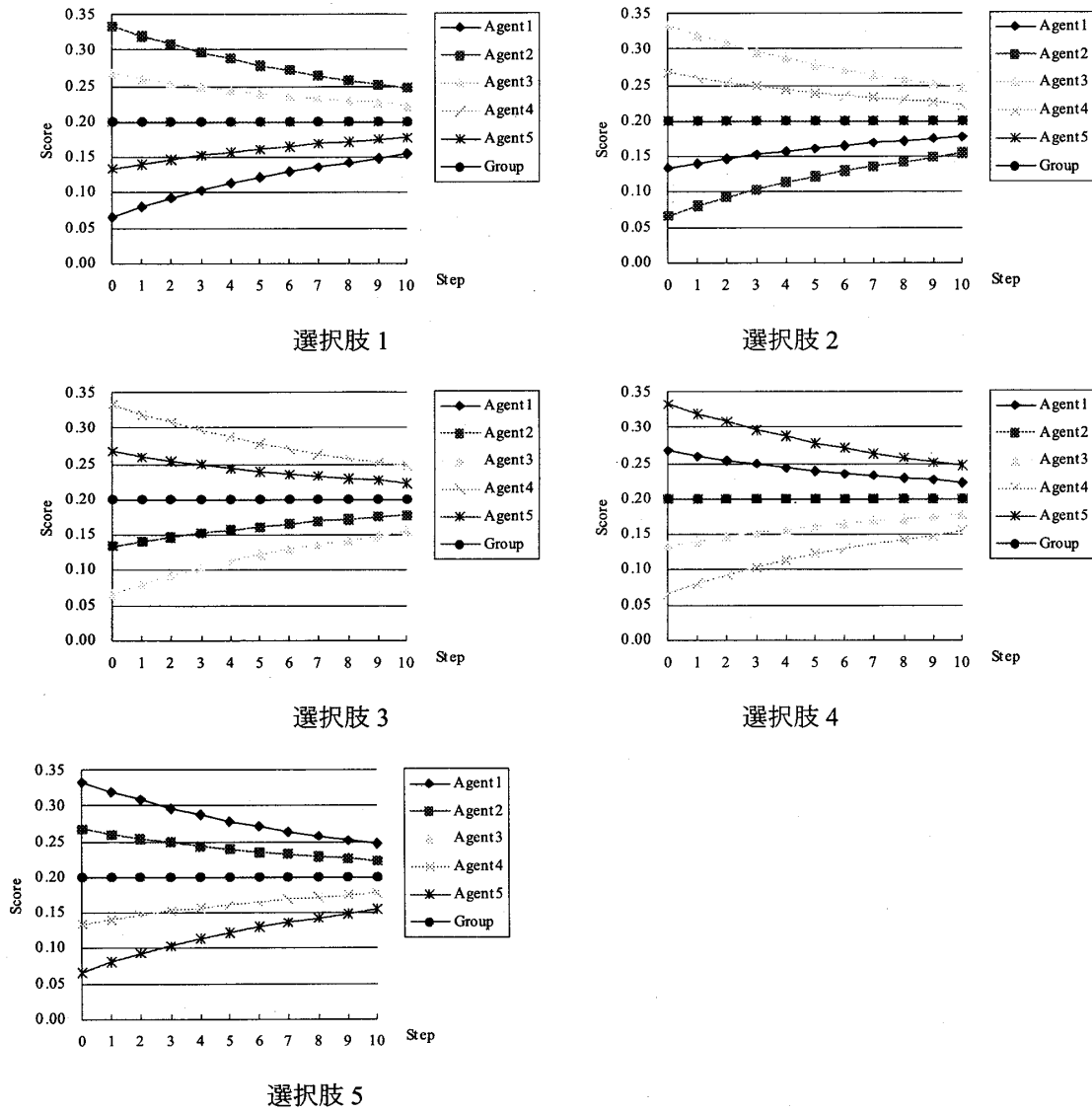


図7 循環的選好関係を持つ同質集団の合意形成過程

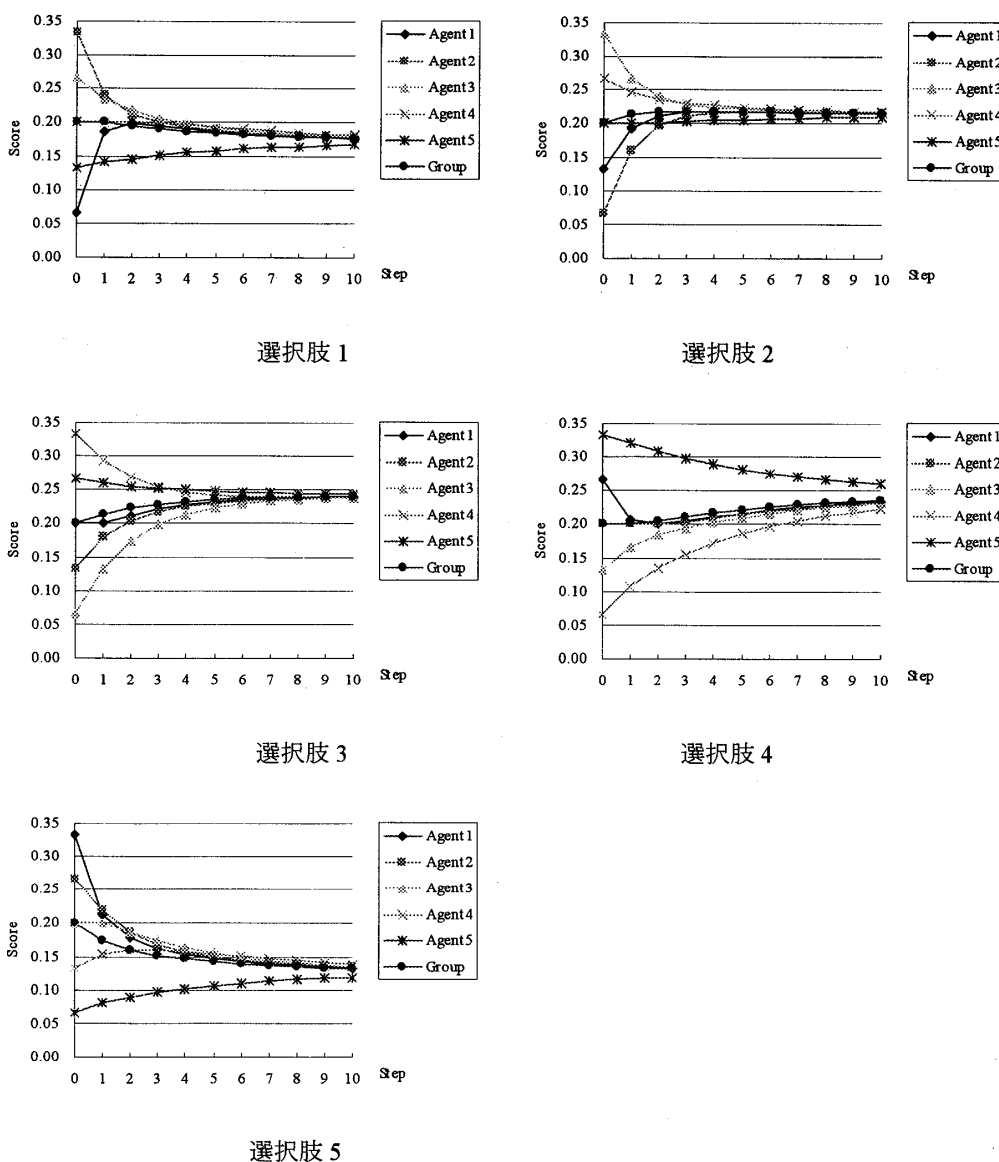


図8 循環的選好関係を持つ混質集団の合意形成過程

## 5. 結語

本稿で提示したマルチエージェントモデルは集団的意思決定過程を分析するための土台に過ぎず、その分析結果も生天目(2001)を再現したに過ぎない。これは本稿が更なる展開のための言わば序章を意図したものであることに依るが、生天目(2001)と同等のコンピュータベースモデルを手にすることができた今、次なる分析の方向が見えてくる。

これまで述べてきたモデルは意思決定上の階層構造が無い集団における合意形成に関するものである。しかしながら会社組織に典型的なように、集団内にはしばしば意思決定上の上位主体と下位主体が存在する。今や、我々のモデルに階層構造を持たせることは比較的容易であり、

生天目(2001)の階層集団モデルとは異なる観点から分析することが可能である。又、意思決定プロセスとして適応型の調整プロセスを考えてきたが、これが唯一のものでも必ずしも現実を反映したものでもない。意思決定プロセスの相違はどのような変化をもたらすのであろうか。

良く知られているように、一般に離散力学系の挙動は非常に複雑であり、任意の適応係数の下で集団が合意に達するとは限らない。適応係数の変化は合意形成プロセスにどのような変化をもたらすのであろうか。更には、選好インデックスと適応係数によって特徴付けられるエージェントに新たな属性が追加され、より人間らしくなった時、どのような変化が現れるのであろうか。これらの問題の多くが、ほとんど議論されていない。

ところで、和田(2004)は山影、服部編著(2002)に関する書評の中で、あまりにも非人間的な行動原理に基づく、特にエージェントの学習や最適化行動を欠くマルチエージェントモデルに対して批判を加えている。しかしながら、学習や最適化行動が組み込まれるか否かはマルチエージェントモデルの本質ではない。秩序立ったマクロ的挙動が、いかにして異質なエージェントのミクロ的挙動から創発するのかを示すことこそがマルチエージェントモデルの本質であり、それは時として自己の食欲を満たす、配偶者を探す、子孫を残す等の動物的、或は本能的行動の結果であるかもしれない。又、社会科学における安易なマルチエージェントシミュレーション分析の大量出現を懸念しているが、新しい分析手法として必ずしも認知されていない現段階においては、その有用性を見極めるためにも、むしろ出現が歓迎されるべきであろう。もちろん研究成果として報告される以上、それは慎重に吟味されたものでなければならない。多くの研究報告の中に淘汰の力が働き、真に有益な議論が残ることを期待する。

## 参考文献

- [1] Arrow, K. J.: Social Choice and Individual Values, 2nd ed., John Willey & Sons, New York (1963).
- [2] Epstein, J. M. and Axtell, R.: Growing Artificial Societies, Brookings Institution Press, Massachusetts (1996).
- [3] コルモゴロフ, フォーミン著, 山崎三郎, 柴岡泰光訳: 関数解析の基礎, 原著第4版, 上, 岩波書店, 東京 (1979).
- [4] 丸山徹: 数理経済学の方法, 創文社, 東京 (1995).
- [5] 松原望: 意思決定の基礎, 朝倉書店, 東京 (2001).
- [6] 生天目章: 戦略的意思決定, 朝倉書店, 東京 (2001).
- [7] Schelling, T. C.: Models of segregation, American Economic Review, Papers and Proceedings Vol.59, No.2, pp.488-93 (1969).
- [8] 和田淳一郎: 書評 山影進, 服部正太編 コンピュータのなかの人工社会, 日本選挙学会年報『選挙研究』, No.19, p.149 (2004).
- [9] 山影進, 服部正太編著: コンピュータのなかの人工社会, 株式会社構造計画研究所, 東京 (2002).