

局所的で異質な意思決定の集合現象

岩 永 佐 織[†] 生 天 目 章[†]

自己組織化や集合動作に関する研究では、ランダムで無秩序な状態から、ある特定の秩序が形成されるプロセスなどに関心が寄せられている。従来は、主に均質な要素の集合体を対象とし、また、ボトムアップのアプローチによってそのプロセスについて解明しようとする研究が多かった。本論文では、異質で自律した主体を対象とする。また、ボトムアップとトップダウンの両方のアプローチを融合し、そして、安定した秩序が自己組織化されるメカニズムを扱う。個々の主体の合理的な行為（マイクロ行為）とその集合体としての挙動（マクロ行為）の間には、双方向的な関係（マイクロ・マクロ・ループ）が存在する。ここでは、マイクロとマクロの側面から自己組織化される集合行為について考える。異質な主体で構成される集合体の動作を扱ううえで、異質な主体の配置関係も重要になる。本論文では、異質な主体の社会的配置と創発される秩序との関係についても明らかにする。

Local and Heterogeneous Decisions and Their Collective Phenomena

SAORI IWANAGA[†] and AKIRA NAMATAME[†]

There are many researches on self-organization and collective phenomena in which certain orders are formed. The previous researches have mainly focused on the collection of homogeneous individuals. In this paper, we take both bottom-up and top-down approaches, focussing on heterogeneity of individuals. We consider the micro-macro-loop between individuals' behaviors (micro-behaviors) and the collective behavior (macro-behavior). The assignment of individuals also become to be important for analyzing collective behavior consisting of heterogeneous agents. We also consider the relation between emerged order and the social assignment of heterogeneous individuals.

1. はじめに

個々に独自の行動ルールを持ち、自律的に振る舞う多数の主体（エージェントという）による集合動作に関する研究は、生物学¹⁾、経済学²⁾、社会学^{3),4)}など、さまざまな分野において多くの関心が寄せられている。それらの研究での中心的な課題は、独自の行動ルールを持つエージェントの集合体が生み出す「創発的な性質」や「自己組織性」である。エージェントどうしの相互作用の中から、個々のエージェントの行動に還元することのできない、新しい特性や現象などが生まれることを創発性⁵⁾という。また、ランダムな状態から、ある特定の秩序が形成されるプロセスを、一般に自己組織化⁶⁾という。

創発性や自己組織性の現象を理解するうえで重要となる概念が「マイクロ・マクロ・ループ⁷⁾」である。マイクロ世界とは、個々のエージェントを取り巻く世界であ

り、相互に働きかけること（相互作用）のできる小社会である。個々のエージェントには異なるマイクロ世界が対応し、マイクロ行為とは、それぞれのマイクロ世界での各エージェントの行為のことをいう。一方、マクロ世界とは、相互作用のネットワーク全体に引き起こされる世界である。マクロ世界（エージェント社会）における集合的な行為のことを、マクロ行為という。そして、マイクロ・マクロ・ループとは、マイクロ行為とマクロ行為の間に存在する相互規定関係のことである。マイクロ世界でのエージェントの行動がマクロ世界での特異な現象を生み出す。一方で、マクロ世界のありようが、マイクロ世界での各エージェントの行為の誘因となるという相互規定関係の下で、両者は1つの閉じた輪を作っている。個々のエージェントのマイクロ行為は、マクロ世界からは微々たるもので、その影響は無視できるほど小さいようにも思われる。しかしながら、各エージェントのマイクロ行為が集結されることで、マクロ世界の挙動が決定される^{8),9)}。さらに、マクロ世界全体の挙動が逆向きの影響となって、マクロ世界での各エージェントの行為を左右する。

[†] 防衛大学校

National Defense Academy

以上のようなマイクロ・マクロ・ループを考えるうえで、エージェント間の相互依存関係や相互作用の範囲が重要になる。エージェントは、自分の一存で自らの行動を決定するだけではなく、周囲（マイクロ世界）のエージェントの決定とも関わりを持っている⁷⁾。そのため、マイクロ世界に生じるさまざまな相互依存関係は、自らの行動を決めるうえで重要な役割を果たす。ここで、相互依存関係とは、あるエージェントの行為が他のエージェントの行為に影響を及ぼし、また、他のエージェントの行為によって自らの行為も影響を受けるような関係をいう。

相互作用の範囲を考慮したモデルとしては、(1) 全数モデル、(2) ランダムモデル、(3) 局所モデルなどが考えられる¹⁰⁾。全数モデルでは、各エージェントが他のすべてのエージェントと相互作用する¹¹⁾。ランダムモデルでは、任意に選ばれた少数のエージェントどうしが相互作用をする¹²⁾。一方で、局所モデルでは、各エージェントは近隣のエージェントとだけ相互作用する¹³⁾。本論文では、局所モデルの下で、多数の異質なエージェントが相互作用をするマイクロ・マクロ・ループについて考えていく。局所モデルの研究は、従来の研究で取り上げられることの多かったランダムモデルの研究の拡張として考えることができる。たとえば、エージェントをランダムに配置した場合の局所モデルでは、ランダムモデルでの研究成果とほぼ同じ結果が得られる。一方、エージェントを構造的に配置した場合の局所モデルでは、ランダムモデルの組合せとしてとらえられることが分かる。

これまでの研究では、各エージェントの固有の行動ルールが「どのように生まれたのか」についての議論が十分ではなかった。その疑問に対する1つのアプローチは、進化型計算モデルのように、自らの学習によって他の優れた者の行動ルールを獲得するというものである¹⁴⁾。本論文では、それらのルールは、個々のエージェントの合理的な意思決定メカニズムに基づくという立場をとる¹⁵⁾。そして、ゲーム理論でよく用いられる短視眼的な仮定を採用する。これは、他のエージェントは今回も前回と同じ選択をするであろうと、各エージェントが予想するという仮定である。また、局所モデルを用いることで、各エージェントのマイクロ世界は近隣のマイクロ世界と重複しているようなエージェントの社会を考える¹⁶⁾。そして、個々のエージェントの合理的な行為（マイクロ行為）とその集合体としての挙動（マクロ行為）との間に生じる双方向的な関係（マイクロ・マクロ・ループ）に焦点を当てる。また、異質なエージェントの集合体を扱ううえで、各エージェ

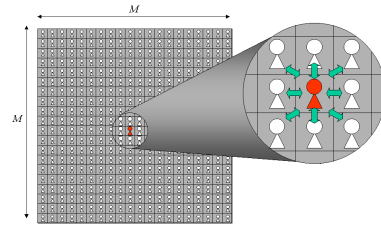


図1 エージェント社会の構成

Fig.1 Society of agents.

ントの配置関係が重要になる。異質なエージェントの社会的配置と創発される秩序との関係についても明らかにしていく。

2. エージェントの局所的な意思決定ルールと社会的配置

エージェントの社会として、図1に示す、 $M \times M$ の格子で構成される2次元平面を考える。それぞれの格子は、エージェントが1人ずつ存在し、社会全体では $M^2 (= N)$ 人のエージェントが存在する。また、各エージェントは周囲8近傍のエージェントと相互依存関係にある。図1の矢印で示すように、各エージェントは、最も近接した前後左右4方向、斜め4方向に位置する8人のエージェントのとる行為を考慮しながら、局所的に合理的な意思決定をする¹⁷⁾。空間的に境界のないエージェント社会を構成することで、社会全体では切れ目のない集合的な意思決定が行われる。すなわち、図1に示す2次元平面の両端に位置するエージェントは、反対側の端に位置するエージェントと相互作用をする。ここで、各エージェントの位置を (l, m) ($1 \leq l, m \leq M$)で表すと、左右の両端 $(1, m)$ と (M, m) に位置するエージェントが隣り合い、前後の両端 $(l, 1)$ と (l, M) に位置するエージェントが隣り合っている。このような局所モデルの下、各エージェントの局所的な意思決定は連鎖的につながる。

次に、異質なエージェントによる意思決定問題を定式化する。エージェント社会 $G = \{A_i : 1 \leq i \leq M\}$ において、各エージェントは、選択肢 S_1 または S_2 の二者択一の選択問題に直面している。各エージェントの利得は、相互依存関係にある周囲のエージェントの選択にも依存する。ここで、エージェント $A_i \in G$ が各選択肢を選んだ場合の利得関係を、表1の利得表で与える。これらの利得はエージェントによって異なり、各エージェントの異質性は利得表の中に反映される。

ある時点 t において、エージェント A_i の周囲8近

表 1 エージェント A_i の利得表
Table 1 The payoff matrix of agent A_i .

		The choice of 8 neighbors	
		$S_1 (p_i(t))$	$S_2 (1-p_i(t))$
Agent A_i	S_1	a_i	b_i
	S_2	c_i	d_i

傍で S_1 を選択するエージェントの割合を $p_i(t)$, S_2 を選択するエージェントの割合を $1-p_i(t)$ で表す. すると, エージェント A_i が, それぞれの選択肢を選ぶときの利得は期待利得として, 次式で与えられる.

$$U_i(S_1) = p_i(t)a_i + (1-p_i(t))b_i \quad (1)$$

$$U_i(S_2) = p_i(t)c_i + (1-p_i(t))d_i$$

以上の 2 つの期待利得の大小関係から, エージェント A_i にとって局所的に合理的な意思決定は, 次式で与えられる.

$$U_i(S_1) \geq U_i(S_2) \rightarrow S_1 \quad (2)$$

$$U_i(S_1) < U_i(S_2) \rightarrow S_2$$

期待利得 $U_i(S_1)$ と $U_i(S_2)$ を等しくする $p_i(t)$ の値が, エージェント A_i の合理的な意思決定の分岐点であり, それは次の方程式の解として求まる.

$$U_i(S_1) - U_i(S_2) = 0 \quad (3)$$

式 (3) を解くことで, エージェント A_i の合理的な意思決定の分岐点は, 次式で求まる.

$$p_i(t) = (d_i - b_i)/(a_i + d_i - b_i - c_i) \quad (4)$$

式 (4) の右辺の値を, エージェント A_i のしきい値として次式で定義しておく.

$$\theta_i = (d_i - b_i)/(a_i + d_i - b_i - c_i) \quad (5)$$

エージェント A_i の合理的な意思決定は, 相互依存関係にある近傍の 8 人のエージェントに関する情報 $p_i(t)$ および自らの固有のしきい値 θ_i の関数として, 次式で与えられる.

(ケース 1) $a_i + d_i - b_i - c_i > 0$ の場合

$$\begin{aligned} p_i(t) \geq \theta_i &\rightarrow S_1 \\ p_i(t) < \theta_i &\rightarrow S_2 \end{aligned} \quad (6)$$

(ケース 2) $a_i + d_i - b_i - c_i < 0$ の場合

$$\begin{aligned} p_i(t) \leq \theta_i &\rightarrow S_1 \\ p_i(t) > \theta_i &\rightarrow S_2 \end{aligned} \quad (7)$$

利得表 1 の各利得パラメータは, 各エージェントの価値観の違いが反映されている. そして, $a_i + d_i - b_i - c_i$ の符号によって, エージェント A_i の合理的な意思決定ルールが正反対になる. また, エージェントによって利得が異なるため, しきい値 θ_i も異なる. したがって, その合理的な意思決定がエージェントによって異なる. さらに, 周囲 8 近傍で S_1 を選択するエージェントの占める割合 $p_i(t)$ が異なるため, たとえ同じしきい値を持っていても, その合理的な意思決定はエー

ジェントによって異なることになる.

3. エージェントの異質性

本章では, エージェントの異質性に焦点を当てる. ここでは, エージェントの異質性を 2 つのレベルでとらえる. すなわち, 式 (6) または (7) の合理的な意思決定ルールに反映される異なる価値観レベルでの異質性, 式 (6) または (7) で与えられる同じタイプの意思決定ルールを持つが, しきい値が異なることによる異質性の 2 つのレベルである. 価値観の相違は, エージェント間の相互依存関係に関係している. ここで, エージェントの相互依存関係を, (1) 協調関係と, (2) 相互補完 (相補) 関係とに分類する¹⁷⁾. 協調関係とは, エージェントどうしが同じ行動をとり, そして相互に協調し合うことで, 全体の効率などが向上する関係のことをいう¹⁸⁾. このような協調関係の下でのエージェントの意思決定を, 協調的な意思決定という. また, 協調的な意思決定問題に直面しているエージェントを, 協調エージェントと呼ぶことにする.

一方で, 相補関係とは, エージェントどうして異なる行動をとり, そして, 相互に補完し合う (または分業する) ことで, 全体の効率が向上することになる関係をいう¹⁹⁾. 相補関係におけるエージェントの意思決定を, 相互補完 (相補) 的な意思決定という. また, 相補的な意思決定問題に直面しているエージェントを相補エージェントとして, 協調エージェントと区別して扱うことにする.

3.1 価値観の異質性

価値観の異なるエージェントを, 協調エージェントと相補エージェントとに分類した. そして, 協調エージェントの合理的な意思決定ルールは式 (6), 相補エージェントの合理的な意思決定ルールは式 (7) で, それぞれ与えられる. 次に, ネットワーク上に存在するサイトの選択問題を取り上げ, エージェントの異質性と合理的な意思決定ルールとの関係について明らかにする.

3.1.1 協調的な意思決定

まず, 協調エージェントによるサイト選択問題を考える. 各エージェントは, 2 つの選択肢を持っている. 選択肢 S_1 : サイト A を選択する. 選択肢 S_2 : サイト B を選択する. ここで, 協調エージェント A_i が, サイト A または B を選択した場合の利得関係を, 表 2 の利得表で与える.

一般に, 個人の行動には, 合目的性と状況依存性の両方の側面があるとされている²⁰⁾. ここでは, 合目的

表 2 サイト選択問題の利得表 (協調的な意思決定)

Table 2 The payoff matrix of site selection (coordinate situation).

		The choice of 8 neighbors	
		SiteA ($p_i(t)$)	SiteB ($1-p_i(t)$)
Agent A_i	Site A	$\alpha_i + \beta_i$	α_i
	Site B	0	β_i

性をサイト A に対する選好度 α_i , 状況依存性を, 他エージェントとの協調効果に対する期待度 β_i ($\beta_i > 0$) で表す. これらのパラメータは, 次のように解釈することができる. もし, $\alpha_i > 0$ ならば, エージェント A_i はサイト A を選好し, $\alpha_i < 0$ ならば, サイト B を選好している. その絶対値の大きさは, それぞれのサイトに対するエージェント A_i の選好の強さを表している. 一方で, β_i が大きければ, 他エージェントと同じサイトを選択することによる相乗効果に対する期待度が大きい. 逆に, β_i が小さければ, その期待度が小さいことを表している.

表 2 の利得表において, $(\alpha_i + \beta_i) + \beta_i - \alpha_i = 2\beta_i > 0$ となるので, 意思決定ルールは式 (6) で与えられる. また, しきい値 θ_i は,

$$\theta_i = (1 - \alpha_i/\beta_i)/2 \quad (8)$$

で与えられる.

ここで, 式 (8) で与えられるしきい値の意味合いについて考えてみる. しきい値が $\theta_i < 0.5$ となるのは, $\alpha_i > 0$ の場合である. これは, エージェント A_i はサイト A の方を選好していることを表している. 一方で, $\theta_i > 0.5$ となるのは, $\alpha_i < 0$ の場合であり, 逆にサイト B を選好していることを表している.

3.1.2 相補的な意思決定

次に, 相補エージェントのサイト選択問題について考える. 相補エージェント A_i の利得関係を, 表 3 の利得表で与える. 相補エージェントは, 混雑を避けるために他のエージェントとは異なるサイトを選択しようとする. エージェント A_i のサイト A に対する選好度を α_i , 他エージェントとの相補関係が成立することへの期待度を β_i ($\beta_i > 0$) とする. β_i が大きければ, 他エージェントと異なるサイトを選択することへの願望が強く, β_i が小さければ, その願望が弱いことを表している.

表 3 の利得表において, $\alpha_i - (\alpha_i + \beta_i) - \beta_i = -2\beta_i < 0$ となるので, 相補エージェントの合理的な意思決定ルールは, 式 (7) で与えられる. また, しきい値は,

$$\theta_i = (1 + \alpha_i/\beta_i)/2 \quad (9)$$

で与えられる.

表 3 サイト選択問題の利得表 (相補的な意思決定)

Table 3 The payoff matrix of site selection (complement situation).

		The choice of 8 neighbors	
		Site A ($p_i(t)$)	Site B ($1-p_i(t)$)
Agent A_i	Site A	α_i	$\alpha_i + \beta_i$
	Site B	β_i	0

3.2 利得上の異質性

本節では, 各エージェントの利得上の異質性について考える. 他と相互作用することで得られる利得はエージェントによって異なることから, しきい値も異なる. 式 (6) で与えられる協調エージェント, 式 (7) で与えられる相補エージェントの合理的な意思決定ルールから, そのしきい値によってエージェントを, 次のようなタイプに分類することができる.

(1) 協調エージェント

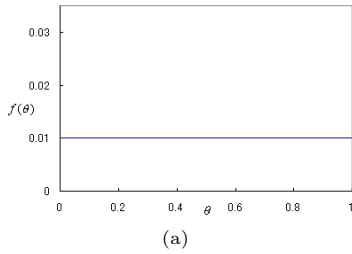
- (a) しきい値が $\theta_i \leq 0$ ならば, 協調エージェント A_i は他エージェントの選択に依存することなく, サイト A を選択する (サイト A のハードコアという).
- (b) しきい値が $\theta_i \geq 1$ ならば, 協調エージェント A_i は他エージェントの選択に依存することなく, サイト B を選択する (サイト B のハードコアという).
- (c) しきい値が $0 < \theta_i < 1$ ならば, 協調エージェント A_i の合理的な意思決定は, 他エージェントの選択に依存する (状況依存型エージェントという).

(2) 相補的エージェント

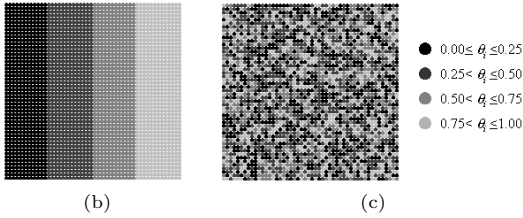
- (a) しきい値が $\theta_i \geq 1$ ならば, 相補エージェント A_i は他エージェントの選択に依存することなく, サイト A を選択する (サイト A のハードコア).
- (b) しきい値が $\theta_i \leq 0$ ならば, 相補エージェント A_i は他エージェントの選択に依存することなく, サイト B を選択する (サイト B のハードコア).
- (c) しきい値が $0 < \theta_i < 1$ ならば, 相補エージェント A_i の合理的な意思決定は, 他エージェントの選択に依存する (状況依存型エージェント).

4. エージェント社会の多様性

前章では, エージェントの異質性を, 合理的な意思決定ルールの特徴としきい値の違いの 2 つの異なるレベルでとらえた. 本章では, 異質なエージェントで



(a)



(b)

(c)

図 2 (a) しきい値の密度関数 (1)

(b) 構造配置 (c) ランダム配置

Fig. 2 (a) Distribution pattern of threshold (1)

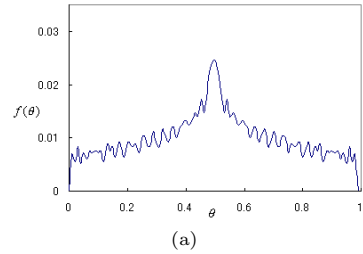
(b) structural assignment (c) random assignment.

構成される社会の多様性をいかに表現するかについて考える．社会 G を構成している各エージェントは、個々に異なるしきい値を持っている．そのような異質なエージェントの社会の多様性は、しきい値の分布状態によって特徴づけることができる．ここで、同じしきい値 θ を持つエージェントの数を $n(\theta)$ で表し、これを N で割った $n(\theta)/N$ を、 $f(\theta)$ で表す．それをしきい値の密度関数として、次式で定義する．

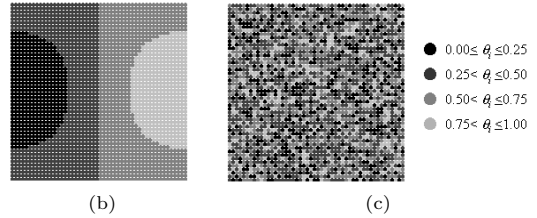
$$f(\theta) = n(\theta)/N \quad (10)$$

しきい値の密度関数の例として、図 2(a), 3(a) および 4(a) に示す 3 つのケースを考える．図 2(a) に示すのは、しきい値の分布が一樣な社会である．図 3(a) で示す社会は、しきい値が、 $0 < \theta < 1$ の範囲にある状況依存型のエージェントで構成され、その中でも中間的なしきい値 0.5 を持つエージェントが多く存在する．図 4(a) に示すのは、しきい値が $\theta = 0$ または $\theta = 1$ を持つハードコアのエージェントが多く存在する社会である．これらの密度関数の例はいずれも、しきい値が 0.5 以下と 0.5 以上となるエージェントとが半分ずつ存在する．すなわち、サイト A およびサイト B を選好するエージェントが同じ割合で存在する例である．

局所モデルでは、エージェントの位置関係によって、社会全体の挙動も大きく異なる．したがって、エージェントの位置関係が重要になってくる．ここで、位置関係として「構造配置」と「ランダム配置」の 2 つを考える．構造配置とは、図 2(b), 3(b) および 4(b) に示すように、似たしきい値を持つエージェントどうし



(a)



(b)

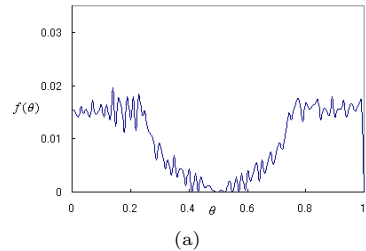
(c)

図 3 (a) しきい値の密度関数 (2)

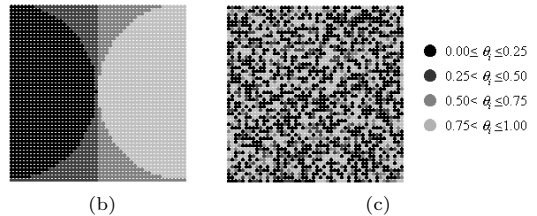
(b) 構造配置 (c) ランダム配置

Fig. 3 (a) Distribution pattern of threshold (2)

(b) structural assignment (c) random assignment.



(a)



(b)

(c)

図 4 (a) しきい値の密度関数 (3)

(b) 構造配置 (c) ランダム配置

Fig. 4 (a) Distribution pattern of threshold (3)

(b) structural assignment (c) random assignment.

が隣接して配置されている場合である．一方、ランダム配置とは、図 2(c), 3(c) および 4(c) に示すように、さまざまなしきい値を持つエージェントがバラバラに配置されている場合である．

5. シミュレーション結果

シミュレーションでは、格子の規模を $M = 50$ とし、 $N = 2500 (= M^2)$ 人で構成されるエージェント社会を考える．

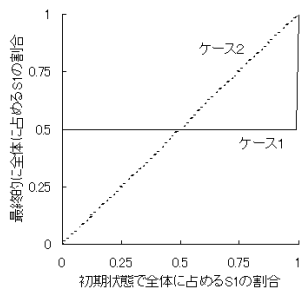


図 5 シミュレーション結果の見方
Fig. 5 Illustration of simulation result.

5.1 協調エージェントの意思決定の連鎖性と自己組織性

本節では、協調エージェントで構成される社会について考える。以下に示すシミュレーション結果の解釈を容易にするために、図 5 に典型的なシミュレーション結果の例を示す。グラフの横軸は、初期段階でサイト A を選択するエージェントの占める割合（集合行為の初期値）、縦軸は、均衡状態においてサイト A を選択するエージェントの占める割合（集合行為の最終値）を示している。すなわち、横軸は、各エージェントが相互作用する以前の段階での各エージェントの意思決定の集計を表している。縦軸は、周りの動向に自らの意思決定を適応させ、そして意思決定に変化がなくなった均衡状態での集計を表している。

初期段階においては、それぞれの割合で各エージェントがサイトを選択している。このときのサイト選択状況は、各エージェントのしきい値によらずランダムに与えた。初期のサイト選択状態が与えられると、周りの状況に応じて各エージェントはそれぞれに合理的に判断をし、次の段階での集合行為を形成する。これは、各エージェントの周りの状況が変化することも示している。そして、次の段階での集合行為が新たな初期状態となって、次々段階での集合行為が変化していく。よって、初期状態と周りの動向を同じものととらえ、以下では考えていく。

ケース 1 の例では、初期段階での割合に関係なく、 S_1 を選択するエージェントと S_2 を選択するエージェントに分かれている。すなわち、各エージェントの意思決定は、周りの動向に影響されることなく、自らの選好を強く反映した結果になっている。このような集合的意決定は「目的」的であるといえる。また、最終段階での集合行為が初期段階からどのくらい変化したかによって、集合行為の安定性を考える。初期の割合によって、集合行為が異なる場合は不安定、集合行為が初期の割合に依存しない場合を安定であるという。

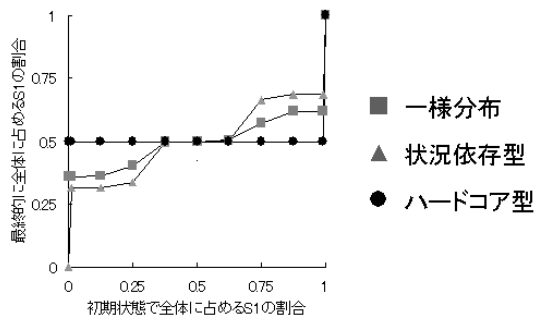


図 6 シミュレーション結果（構造配置の場合）
Fig. 6 Simulation result (structural assignment).

このケースでは、安定であるといえる。一方で、ケース 2 では、均衡状態での集合的意決定が初期値に比例している。すなわち、各エージェントの意思決定が、自らの選好よりも周りの動向に強く依存した結果になっている。このような集合的意決定は「状況依存」的であるといえる。また、このケースの集合行為は不安定である。

ここで、各エージェントが他と相互作用をせず、それぞれ独自に判断をした場合を考える。この場合、エージェントはそれぞれ選好に基づいて選択をする。そのため、各エージェントの選択は、エージェントのしきい値が 0.5 以上/0.5 以下の分類と一致し、 S_1, S_2 を選択するエージェントに半分ずつに分かれる。本論文では、他エージェントとの相互作用によって、各エージェントの選択が変化し形成される集合行為を求める。そのために、 S_1 の比率を考慮して考えている。

図 2(a), 3(a) および 4(a) のしきい値密度関数の下で、協調エージェントが構造配置された場合(図 2(b), 3(b) および 4(b))の集合行為の様相について、図 6 に示す。構造配置の場合、いずれのケースでも、初期値に依存することなく集合行為は約 0.5 に収束している。すなわち、初期状態がどうであれ、最終的には、サイト A を選択するエージェントとサイト B を選択するエージェントとに半数ずつ分かれる。異質なエージェントが構造配置された場合には、それぞれのミクロ世界は同じ選択をするエージェントで構成されるので、社会全体（マクロ世界）としては、2次元平面の左右でエージェントの選好は異なる。この 3つのケースでは、左側の社会はサイト A を選好するエージェントで構成され、右側の社会はサイト B を選好するエージェントで構成される。そして、各エージェントの意思決定は、全体の集合的意決定にあまり依存せず、各自の選好を反映したものになる。このことから、構造配置の下では、個々のエージェントの選好が自ら

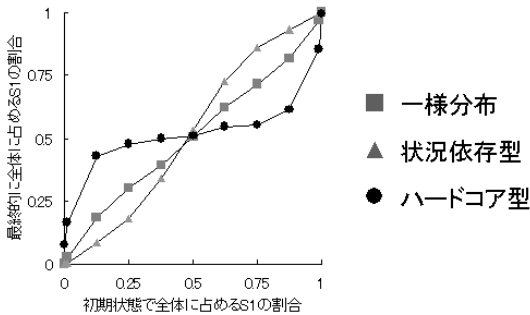


図7 シミュレーション結果(ランダム配置の場合)
Fig.7 Simulation result (random assignment).

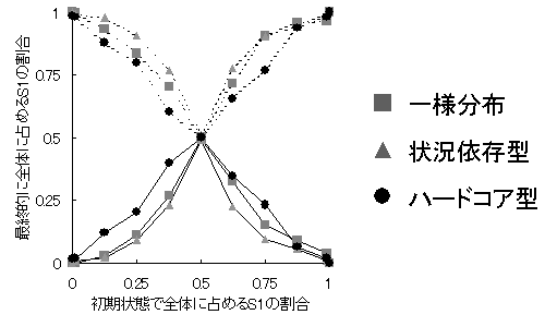


図8 シミュレーション結果(構造配置の場合)
Fig.8 Simulation result (structural assignment).

の意思決定に強く反映され、エージェントの個人的な選好を強化する配置といえよう。

次に、同じエージェントがランダム配置された場合の集合行為の様相を、図7に示す。いずれのケースでも、集合行為は、初期値にほぼ比例した値に収束している。すなわち、最終的にサイトAを選択するエージェントの占める割合は、初期の値とほぼ同じ割合になる。異質なエージェントがランダム配置されることで、相互に影響を強く受けるため、初期状態から抜けきれなくなっている。そして、集合行為は、個々のエージェントの選好を反映したものではなく、周囲の動向に強く依存したものになる。このことから、ランダム配置は、異質なエージェントを没個性化させてしまう配置といえよう。

協調エージェントで構成される社会にあって、エージェントの配置関係によってまったく異なる現象が生まれることが分かった。異質なエージェントがバラバラに配置されるならば(ランダム配置)、各エージェントの意思決定は、自らの選好を反映したものではなく、周囲の動向に強く依存し、不安定なものになる。そして、似たしきい値の者がバラバラに配置されることで、自らの選好を重視しやすいハードコアに近いエージェントが「状況依存型」としての傾向が強まる。一方で、似たしきい値を持つ同質なエージェントが隣り合わせて配置されるならば(構造配置)、状況依存型のエージェントの意思決定は、周囲の動向にあまり依存せず、自らの選好を強く反映した「ハードコア」としての傾向が強まる。そのことで、社会全体での集会的な意思決定も安定したものになる。

5.2 相補エージェントの意思決定の連鎖性と自己組織性

次に、相補エージェントだけで構成される社会の集合行為について考える。協調エージェントの場合と同じように、図2(a)、3(a)および4(a)のしきい値密

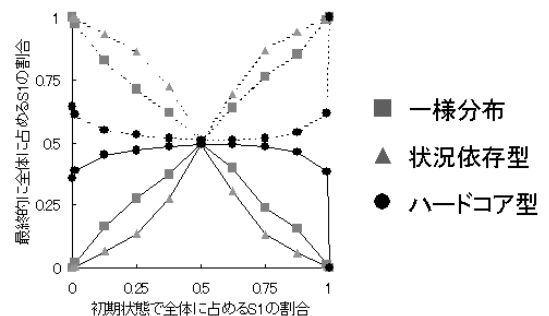


図9 シミュレーション結果(ランダム配置の場合)
Fig.9 Simulaion result (random assignment).

度関数の下での集合行為を考える。相補的な意思決定においては、多くの人がサイトAを選択すると、次の時点では多くの人がサイトBを選択することになる。そして、集合行為には振動が現れる。これを、図8と図9の中では、点線で集合行為の最大値、実線で最小値を表している。

構造配置の場合(図8)、いずれのケースでも、集合行為は初期値にほぼ比例した値で振動を繰り返している。すなわち、ほぼ初期状態で与えられた割合で、サイトAを選択する状態とサイトBを選択する状態を交互に繰り返す。

相補エージェントが隣接して配置されるならば、振動現象が生じ「状況依存型」としての傾向が強まる。しかしながら、バラバラに配置されたならば、自らの選好を強く反映した「ハードコア」としての傾向が強まる。

相補的な相互依存関係の下での意思決定の特徴は、協調的な依存関係とは異なり、安定した秩序に収束することなく、絶えず変化する。相補的な相互依存関係とは、各エージェントが異なる選択肢をとり「相互に補完し合う」(サイト選択問題の例では、サイトAとサイトBを選択するエージェントにうまく棲み分け

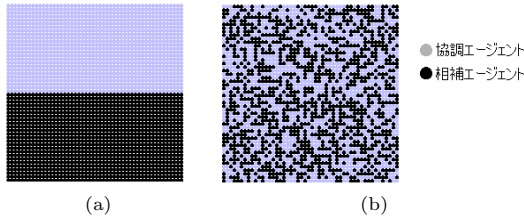


図 10 (a) 構造配置 (b) ランダム配置

Fig. 10 (a) Structural assignment (b) random assignment.

ができる)ことで、お互いに高い利得が得られる関係をいう。ところが、多くのエージェントが同じ選択肢を選択してしまうことで、利得を得ることができない状況が繰り返されてしまう。このような現象は、しきい値が似たエージェントが隣接して配置されることで(構造配置),より顕著に現れる。しかしながら、さまざまなしきい値を持つエージェントをできるだけバラバラに配置するならば(ランダム配置),このような振動現象は緩和され安定した秩序が得られる。

5.3 協調エージェントと相補エージェントが混在する社会

今までは、エージェントのしきい値が異なる場合の異質性について、シミュレーションを行ってきた。次に、価値観の異なる、いわばメタレベルで異質なエージェントの組合せを考える。そして、価値観の異なる協調エージェントと相補エージェントが共存する社会を考える。正反対の行動ルールを持つエージェントが混在する場合には、しきい値だけでなく、価値観の異なる協調および相補エージェントの配置関係も問題になる。図 10 (a) のようにエージェントが集まって配置されている場合を「構造配置」、図 10 (b) のように双方がバラバラに配置されている場合を「ランダム配置」として分類する。

ここでは、協調エージェントと相補エージェントが 50%ずつ存在し、図 2 (a), 3 (a) および 4 (a) に示すしきい値密度関数を持つ社会を考える。いずれの場合もしきい値の配置はランダム配置(図 2 (c), 3 (c) および 4 (c))とした。協調および相補エージェントが図 10 (a) に示すように構造配置された場合の集合行為の様相を、図 11 に示す。相補エージェントが存在することによって集合行為に振動が現れるので、点線は最大値、実線は最小値を表している。構造配置の場合、いずれのケースでも、集合行為は、初期値にほぼ比例した値に収束している。すなわち、最終的にサイト A を選択するエージェントの占める割合は、初期の値とほぼ同じ割合になる。価値観の同じエージェントが隣接して配置されるならば、自らの選好より周りの動向

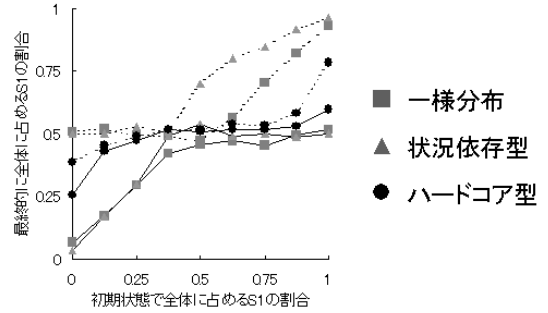


図 11 シミュレーション結果(構造配置の場合)

Fig. 11 Simulation result (structural assignment).

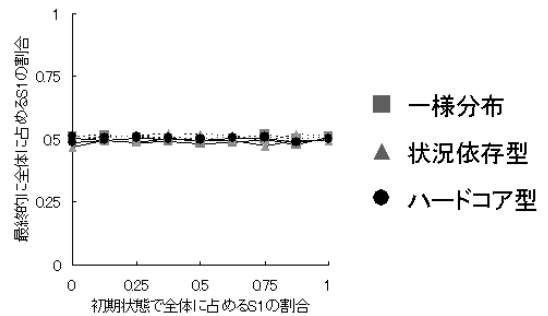


図 12 シミュレーション結果(ランダム配置の場合)

Fig. 12 Simuraion result (random assignment).

に依存した意思決定が行われ、そのことで、不安定な集合行為を形成することが分かる。

次に、協調エージェントと相補エージェントをランダムに配置された場合の集合行為の様相を、図 12 に示す。いずれのケースでも、初期値に依存することなく集合行為は約 0.5 に収束している。すなわち、初期状態がどうであれ、最終的には、サイト A を選択するエージェントとサイト B を選択するエージェントとに半数ずつ分かれることになる。異なる価値観を持つエージェントがバラバラに配置されることによって、状況依存型のエージェントであっても、その意思決定は全体の動向に影響されることなく、自らの選好が強く反映された集合行為を形成することが分かる。

5.2 節で示したように、相補エージェントだけで構成される社会では、振動現象が現れることが多かったが、協調エージェントというまったく価値観の異なるエージェントが加わることで、安定した秩序が形成されることは大変興味深い結果である。協調エージェントと相補エージェントの両方で構成される社会では、それらのエージェントの配置関係によってまったく異なる現象が生まれる。価値観の同じエージェントが隣り合わせて配置されるならば(構造配置),各エージェ

ントの意思決定は、固有の選好を反映したものではなく、社会全体の集合的な意思決定は不安定したものになる。一方で、異なる価値観を持つエージェントがバラバラに配置されるならば（ランダム配置）、各エージェントの意思決定は、周囲の動向にあまり依存することがなく、各自の選好を反映したものになり、社会全体での集合的な意思決定も安定したものになる。

6. 終わりに

本論文では、局所的に合理的な意思決定をする異質なエージェントの集合的意思決定を扱った。そして、個々のエージェントのミクロ行為と集合行為との間に生じる双方向的な相互作用（ミクロ・マクロ・ループ）に着目し、異質なエージェントによって創発される集合行為の秩序や自己組織化現象などを明らかにした。エージェント社会には、異なる価値観、異なる利得表を持つエージェントが存在するが、それらの社会的な位置関係が集合行為の形成に大きな影響を与えることを明らかにした。協調エージェントまたは相補エージェントだけで構成される社会では、エージェントの個性を強化する配置と没個性化させる配置が存在し、また、安定した集合行為と不安定な集合行為とを形成することがある。協調関係においては、同質なエージェントが隣り合わせて配置されることで、協調関係を促進させるようなミクロ・マクロ・ループが生まれる。一方、相補関係においては、異質なエージェントがバラバラに配置されることで、相互補完関係を促進させることになるミクロ・マクロ・ループが生まれる。また、社会に価値観の異なる協調エージェントと相補エージェントが存在する場合には、それらがバラバラに配置されることによって、価値観の異質性を乗り越え、それぞれの個性を強化し、そして、安定した集合行為を形成する。すなわち、価値観の異なるエージェントが混在して配置されることで、協調関係および相補関係の双方を促進させるミクロ・マクロ・ループが生まれることがある。

参 考 文 献

- 1) J・メイナードスミス(著), 寺本 英, 梯正之(訳): 進化とゲーム理論—闘争の論理, 産業図書(1985).
- 2) ポールクルーグマン(著), 北村行伸, 妹尾美起(訳): 自己組織化の経済学, 東洋経済新報社(1997).
- 3) Schelling, T.: *Micromotives and Macrobehavior*, Norton (1978).
- 4) ジョシュア・M・エプスタイン: 人工社会—複雑

- 系とマルチエージェント・シミュレーション, 構造計画研究所(1999).
- 5) 伊藤宏司: 知の創発—ロボットは知恵を獲得できるか, NTT出版(2000).
- 6) 都甲 潔, 江崎 秀, 林 健司: 自己組織化とは何か—生物の形やリズムが生まれる原理を探る, 講談社(1999).
- 7) 塩沢由典: ミクロマクロループについて, 京都大学経済学会経済論叢, Vol.164, No.5 抜刷(1999).
- 8) Bikhchandani, S., Hirshleifer, D. and Welch, I.: A Theory of Fad, Fashion, Custom and Cultural Change as Informational Cascades, *Journal of Political Economy*, Vol.100, No.5, pp.992–1026 (1992).
- 9) Gaylord, R.J. and D'Andria, L.J.: *Simulating Society—A Mathematica Toolkit for Modeling Socioeconomic Behavior*, Telos (1998).
- 10) Fudenberg, D. and Levine, D.: *The Theory of Learning in Games*, The MIT Press (1998).
- 11) Hofbauer, J. and Sigmund, K.: *Evolutionary Games and Population Dynamics*, Cambridge Univ. Press (1998).
- 12) Weibull, J.: *Evolutionary Game Theory*, The MIT Press (1996).
- 13) Holland, G.: *Hidden Order*, Addison-Wisely Publishing (1995).
- 14) Sipper, M.: *Evolution of Parallel Cellular Machines*, Springer (1997).
- 15) Iwanaga, S., Namatame, A.: The Complexity of Collective Decision, *Journal of Nonlinear Dynamics and Control* (to appear).
- 16) Nowak, M.A. et al.: The Arithmetics of Mutual Help, *Scientific American* (June, 1995).
- 17) Iwanaga, S. and Namatame, A.: Asymmetric Coordination of Heterogeneous Agents, *IEICE Trans. on Information and Systems*, Vol.E84-D, No.8, pp.937–944 (2001).
- 18) Huberman, B. and Glance, N.: Diversity and collective Action, *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Systems*, Springer (1993).
- 19) Arthur, W.B.: Inductive reasoning and Bounded Rationality, *American Economic Review*, Vol.84, pp.406–411 (1994).
- 20) 太田昌克, 飯田敏幸, 河岡 司: 人の同調行動に基づく意思決定モデル, 人工知能学会誌, Vol.11, No.6, pp.927–932 (1996).

(平成 13 年 5 月 29 日受付)

(平成 14 年 2 月 13 日採録)



岩永 佐織 (学生会員)

1971年生。1994年宇都宮大学工学部応用科学科卒業。2001年防衛大学学校理工学研究科情報数理専攻前期課程修了。現在同後期課程在学。マルチエージェント，進化型計算等の

研究に従事。



生天目 章 (正会員)

1973年防衛大学学校応用物理学科卒業。1977年スタンフォード大学大学院修士課程修了。1979年同博士課程修了 (Ph.D.)。同年航空幕僚監部勤務。1987~1988年ジョーメ

イソン大学客員助教授。現在防衛大学学校情報工学科教授。マルチエージェント，進化型計算，ゲーム理論，進化経済等の研究に従事。人工知能学会，進化経済学会，AAAI，ACM，IEEE 各会員。
