

集合行為の効率性と公平性

岩永 佐織† 生天目 章†

† 防衛大学校情報工学科
〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

E-mail: † {g40074, nama}@nda.ac.jp

あらまし 自己組織化現象とは、無秩序な状態から特定の秩序が形成されるプロセスをいう。従来は、均質な主体を対象した研究が多かった。本論文では、局所的に相互作用しあう異質な主体を対象とし、その自己組織化現象を扱う。様々な動機や利害関係、固有の意思決定ルールをもつ主体同士の局所的な相互作用の中から、それぞれの簡単な意思決定ルールからは予想できないような、社会全体としての集合行為が自己組織化される様子を明らかにする。また、主体の異質性や社会の多様性が集合行為の形成に果たす役割を明らかにする。そして、社会全体としての効率性を向上させるような社会の構造を明らかにする。

キーワード 集合行為, 自己組織化, 局所的な相互作用, 異質性, 多様性, 効率性, 公平性

Efficiency and Equity of Collective Behavior

Saori IWANAGA †, and Akira NAMATAME †

† Department of Computer Science, National Defense Academy
Hashirimizu 1-10-20, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-8686 Japan

E-mail: † {g40074,nama}@nda.ac.jp

Abstract There are many researches on self-organization in which certain orders are formed. The previous researches have focused on global interaction of homogeneous agents. In this paper, we focus on local interaction of heterogeneous agents. We show that agents' behaviors produce sometimes-unexpected collective behavior, while agents myopically evolve their behaviors based on their rules. We consider the relation between collective behavior and heterogeneity of agents. From the simulation results, we found the society which can raise efficiency.

Key words Collective behavior, Self- Organization, Local interaction, Heterogeneity, Diversity, Efficiency, Equity

1. はじめに

自然界における進化は、各要素の単純な行動ルールと要素同士の相互作用からの自己組織化現象と捉えられることが多い[1]。昆虫の群れや細胞組織の形成、免疫系などは、その好例である。このように、生物などの生命体には、人工物にはない動作原理などが存在している。その主な動作原理となっているのが、自己組織性である。一般に、ランダムな状態から特定の秩序が形成されるプロセスを自己組織化という[2]。開放性・非線形性が強く働きさまざまな環境の下で、生物は極めて柔軟に適応するように進化してきた。そして、生命系におけるさまざまな自己組織化現象などに着想を得て、それを情報処理モデルとして取り入れるための研究が盛んに行われている[3][4]。また、個々に独自の行動ルールをもち、自律的に振舞う多数の主体（エージェントという）の集合動作を対象とする複雑系の研究は、自然科学に限らず経済学[5]、社会学[6][7]などの多くの分野において関心が寄せられている。

本論文では、異質な自律したエージェントの相互作用の中から生まれる自己組織化現象を扱うため、ゲーム理論の観点からエージェントの行動ルールとエージェント間の相互作用に焦点を当てて考える。従来のゲーム理論では、各エージェントが同じ利得行列をもち、均質なエージェント同士の相互作用を扱う研究がほとんどである[6][8]。本論文では、各エージェントがそれぞれ異なる利得行列をもち、異質なエージェント同士の相互作用を扱う。

異質なエージェント社会での自己組織性の現象を扱う上で重要となる概念が、「マイクロ・マクロ・ループ[9]」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をいう。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し、一方で、マクロ世界のありようがマイクロ世界で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、Fig.1 に示すように、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あり、その影響は無視できる程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。さらに、マクロ世界全体の挙動が逆向きの影響となって、マイクロ世界での各エージェントの行為を左右する。

本研究では、マイクロ・マクロ・ループに焦点を当てる。そして、様々な動機や利害関係、固有の意思決定ルールをもつエージェント同士の局所的な相互作用の中から、それぞれの簡単な意思決定ルールからは予想できないような社会全体としての集合行為が自己組織化される様子を明らかにする。また、エージェントの異質性や社会の多様性が集合行為の形成に果たす役割を明らかにしていく。そして、社会全体としての効率性を向上させるような社会の構造を明らかにする。

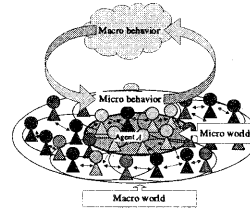


Fig.1 Micro-Macro Loop

2. エージェント社会の設定

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なく、他エージェントの行動にも影響を受ける[9]。相互依存関係とは、自分の行動が他エージェントの行動に影響を及ぼし、他エージェントの行動によって自らの行動も影響を受けるような関係をいい、ゲーム理論では、利得行列で表すことができる。相互依存関係には様々な種類が存在するが、本論文では、協調的な相互依存関係を扱っていく。

各エージェントのとりうる行動には2つの選択肢 S_1 と S_2 があり、そのどちらかを自分で選択するものとする。各エージェントが期待できる利益（以下、利得という）の大きさは、どちらの選択肢を選ぶかによって決定される。また、相互依存関係にある他エージェントの行動にも依存する。ここで、エージェント同士がとる行動の組み合わせを考え、エージェント A_i の獲得する利得を Table.1 の利得行列で与える。もし、エージェント同士が同じ選択肢を選択

するならば、エージェント A_i は利得 $1-\theta_i (\geq 0)$ または $\theta_i (\geq 0)$ を得る。それ以外の場合に得る利得は 0 である。これは、お互いに同じ行動をとることによって効率性が向上する協調的な相互依存関係を示している。また、エージェントによって利得パラメタ θ_i は異なり、エージェント毎に異なる利得行列をもつ。

Table.1 Payoff matrix ($0 \leq \theta_i \leq 1$)

Choice of agent A_i \ Choice of other Agents	S_1	S_2
	S_1	$1-\theta_i$
S_2	0	θ_i

本論文では、エージェント社会 G として、Fig.2 に示すような $M \times M$ の格子で構成される 2 次元平面を考える。それぞれの格子には、エージェントが 1 人ずつ位置し、社会全体では $N (= M \times M)$ 人のエージェントが存在している。

2.1 相互作用モデル

ミクロ・マクロ・ループを考える上で、エージェントの相互作用の範囲や行動ルールが重要になる。相互作用の範囲を考慮したモデルは、大きく(1)大域モデル(2)局所モデルに分けて考えられる[10]。大域モデルは、Fig.2(a)に示すように、各エージェントがその位置関係によらず社会全体の誰とでも自由に相互作用できるモデルである。各エージェントは、社会全体がどのような行動をとっているのかという共通の情報を知ることができ、共通の情報に基づき、それぞれ判断をして行動を決定する[11]。これは、各エージェントのミクロ世界がマクロ世界と同じく大きい場合であると捉えることができる。

一方、局所モデルでは、Fig.2(b)に示すように、各エージェントが近隣のエージェントとだけ相互作用するモデルである[12][13]。多くの状況においては、エージェントが社会全体の情報を正しく知ることができるとは限らない。そこで、エージェントの情報収集や行動などの能力に限界があるという仮定を採用して、各エージェントが周辺のエージェントだけと相互作用し、相手の情報だけを収集することができる局所モデルを扱う。これは、各エージェントのミクロ世界が周辺のエージェントに限られる場合である。それぞれのエージェントのミクロ世界は狭いものであるが、それらが重なり合うことによって、各エージェントの局所的な意思決定は社会全体に連

鎖的に広がっていくことになる。ここでは、空間的に境界のないエージェント社会を構成し、社会全体で切れ目のない相互作用を可能にしている。(Fig.2 に示す 2 次元平面の端に位置するエージェントは、反対の端に位置するエージェントと相互作用をする。) 本論文では、特に、各エージェントが最も近接した前後左右 4 方向、斜め 4 方向に位置する 8 人と相互作用する局所モデルを扱い、そのモデルにおける自己組織化現象について考えていく。また、局所モデルにおいては、エージェントの位置関係が問題となってくるため、その配置を考慮していく。



Fig.2 (a) Global interaction (b) Local interaction

2.2 行動ルール

各エージェントの行動ルールとして、最適反応ルールを採用する。これは、各エージェントが自己の利得行列に基づき、最適な行動を決定する方法である。各エージェントは、ミクロ世界の動向を知り、それぞれの選択肢を選択した場合の期待利得を計算して最適な行動を選択する。すなわち、各エージェントは、それぞれの選好、社会の動向に応じて、自己の利益を最大限にするために合理的に判断をして行動する。ここで、時刻 t において、それぞれのミクロ世界 M_i の中で S_1 を選択するエージェントの割合を $p_i(t)$ ($0 \leq p_i(t) \leq 1$) と定義する。(大域モデルではミクロ世界 M_i とはエージェント社会全体を指す。一方で、局所モデルではミクロ世界 M_i とは周囲 8 近傍のエージェントを指す。) すると、エージェント A_i が選択肢 S_1 または S_2 を選択した場合に獲得する期待利得 $\bar{U}_i(S_1)$, $\bar{U}_i(S_2)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{U}_i(S_1) &= p_i(t)(1-\theta_i) \\ \bar{U}_i(S_2) &= (1-p_i(t))\theta_i \end{aligned} \quad (1)$$

期待利得 $\bar{U}_i(S_1)$, $\bar{U}_i(S_2)$ を比較して、エージェント A_i の最適な行動は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} p_i(t) \geq \theta_i &: S_1 \text{ を選択する} \\ p_i(t) < \theta_i &: S_2 \text{ を選択する} \end{aligned} \quad (2)$$

このルールが最適反応ルールとなる。式(2)は、 S_1 を選択するエージェントの割合 $p_i(t)$ が自己の利得パラメタ θ_i より大きければ、 S_1 を選択することを示している。すなわち、合理的な意思決定の分岐点と

なる θ_i をエージェント A_i の意思決定のしきい値として捉えることができる。また、エージェントによって θ_i が異なるため、その意思決定はエージェント毎に異なる。よって、エージェントの異質性を表す利得パラメタがそれぞれの行動に影響を与えることになる。さらに、局所モデルにおいては、同じ θ_i をもっていても、周囲で S_1 を選択するエージェントの割合 $p_i(\theta)$ がエージェントの位置関係によって異なり、その意思決定が異なる。すなわち、大域モデルにおいては、エージェントの異質性を表す利得パラメタがその行動に影響を与え、局所モデルにおいては、利得パラメタと位置関係がエージェントの行動に影響を与えることになる。

3. エージェントの異質性と社会の多様性の表現

本節では、エージェントの異質性と社会の多様性について考える。それぞれの相互作用によって、獲得する利得 (θ_i または $1-\theta_i$) はエージェント毎に異なる。この利得行列の異質性をエージェントの異質性として捉えることができる。

次に、エージェント社会の多様性を考える。様々な利得行列をもつエージェントで構成されている社会の多様性は、利得パラメタの分布によって特徴づけることができる。ここで、 N 人で構成されたエージェント社会 G の中で同じ利得パラメタ θ をもつエージェント数を $n(\theta)$ で表す。そして、 $n(\theta)$ を N で割ったものを利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ として次式で定義する。

$$f(\theta) = n(\theta) / N \quad (3)$$

本論文では、Fig.3 に示す利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ で表される4つのエージェント社会を扱う。いずれも利得パラメタ θ_i の平均は0.5とした。

$$\frac{\int_0^1 \theta \times f(\theta) d\theta}{\int_0^1 f(\theta) d\theta} = 0.5 \quad (4)$$

ケース1の社会は、全員が同じ利得パラメタをもつ均質な社会を表現している。全員の θ_i が0.5であり、 S_1 と S_2 に対する選好は全員が同じく高い社会である。一方、ケース2, 3, 4は、様々な利得パラメタをもつエージェントからなる多様な社会を表現している。ケース2は、 $0 < \theta_i < 1$ であるエージェントで構成され、その中でも S_1 と S_2 に対する選好が同じであるエージェント ($\theta_i = 0.5$) が多数存在する同質な社会である。ケース3の社会は、利得パラメタが一様に分布している最も多様な社会である。そ

して、ケース4の社会には、利得パラメタが0または1であるエージェントが多く存在している。(2)式より、利得パラメタ0のエージェントは周囲の動向によらず必ず S_1 を選択し、1のエージェントは必ず S_2 を選択する。いずれの社会も、 $\theta_i < 0.5$ であるエージェントが半数存在し、残りの半数は $\theta_i > 0.5$ である。すなわち、 S_1 と S_2 を選好するエージェントが半数ずつ存在する社会である。そして、利得パラメタの密度関数は0.5を中心に線対称である。

$$f(\theta) = f(1-\theta) \quad (5)$$

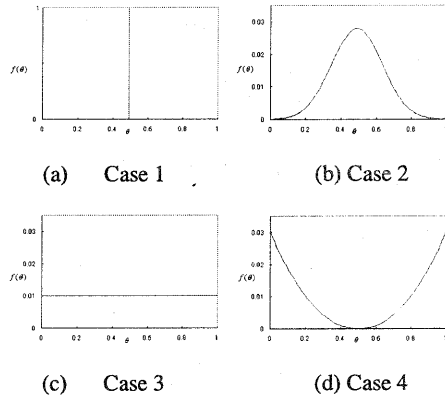
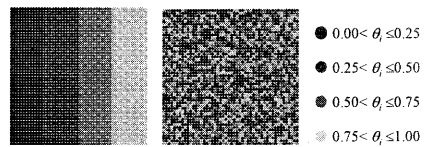


Fig.3: The distribution of payoff parameter θ_i

本論文では、特に、局所モデルを扱う。局所モデルでは周囲とのみ相互作用するため、近傍のエージェントの性質によって各エージェントの行動も異なり、集合行為も異なってくる。そこで、様々な利得パラメタをもつ各エージェントの配置に焦点を当て、エージェント社会を「構造配置」と「ランダム配置」の2つの配置に分類して考える。構造配置とは、Fig.4(a)に示すように、利得パラメタ θ_i の似たエージェント同士が隣接して配置されている場合である。社会全体で、各エージェントは順序正しく配置されている。一方、ランダム配置とは、Fig.4(b)に示すように、 θ_i の似たエージェント同士がバラバラに配置されている場合であり、社会全体では各エージェントが無秩序に配置されている。



(a) Structural assignment (b) Random assignment
Fig.4: Configuration of heterogeneous agents (case 3)

本論文では、社会の多様性として、利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ とエージェントの配置という2つの側面を扱う。

4. ミクロ及びマクロレベルからの集合行為の評価

本論文では、局所モデルにおける集合行為を大域モデルと比較しながら、効率性と公平性という2つの評価基準を用いて評価していく。ここで、集合行為とは、社会全体で S_1 を選択するエージェントの割合をいう。また、効率性とは、集合行為が社会全体に望ましいものかを評価する尺度であり平均利得で表される。そして、公平性は、エージェントの得た利得の分布で表される。

まず、大域モデルにおいて、効率性と公平性を計算値によって求める。集合行為を y で表すと、大域モデルでの行動ルールは、(2)式より次式で表される。

$$y \geq \theta_i : S_1 \text{ を選択する}$$

$$y < \theta_i : S_2 \text{ を選択する} \quad (6)$$

よって、集合行為が y で与えられたとき、 S_1 を選択しているのは利得パラメタ θ_i が y 以下のエージェントであり、 S_2 を選択しているのは θ_i が y より大きいエージェントである。よって、Table.1 より、 S_1 を選択しているエージェント A_i は、

$$u_i = y(1 - \theta_i) \quad (0 \leq \theta_i \leq y) \quad (7)$$

の利得を得ている。そして、 S_2 を選択しているエージェント A_i は、次式の利得を得ている。

$$u_i = (1 - y)\theta_i \quad (y < \theta_i \leq 1) \quad (8)$$

したがって、社会全体の平均利得、すなわち、効率性は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \int_0^y (1 - \theta) y f(\theta) d\theta + \int_y^1 \theta (1 - y) f(\theta) d\theta \\ &= 0.5(1 - y) + y \int_0^y f(\theta) d\theta - \int_0^y \theta f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (9)$$

本論文で扱う4つの社会における望ましい集合行為としては、全員が同じ行動をとり全体の効率性が向上する場合、及び各エージェントの選好関係が反映される場合が考えられる。すなわち、

- (i) 全員が S_1 を選択する場合 ($y=1.0$)
- (ii) 全員が S_2 を選択する場合 ($y=0.0$)
- (iii) 選択が半分ずつに分かれる場合 ($y=0.5$)

である。この3つの場合において、効率性を求めると、次のようになる。

$$(i) \quad y=1.0 \text{ の場合, } \bar{U}=0.5 \quad (10)$$

$$(ii) \quad y=0.0 \text{ の場合, } \bar{U}=0.5 \quad (11)$$

$$(iii) \quad y=0.5 \text{ の場合, } \bar{U}=0.5 - \int_0^{0.5} \theta f(\theta) d\theta < 0.5 \quad (12)$$

$$\text{ケース 1 : } \bar{U}=0.25, \text{ ケース 2 : } \bar{U}=0.279,$$

$$\text{ケース 3 : } \bar{U}=0.375, \text{ ケース 4 : } \bar{U}=0.4375$$

このように、大域モデルにおいては、効率性は高々0.5である。

次に、利得の分布 $g(u)$ を考える。 S_1 を選択するため(7)式の利得を得るエージェントの割合 $g_1(u)$ は、 $g_1(u) = f(1 - \theta)$ である。また、(7)式から、 $g_1(u)$ は、

$$g_1(u) = f(1 - \theta) = f(u/y) \quad (0 \leq \theta_i \leq y, y \neq 0) \quad (13)$$

で表される。一方、 S_2 を選択するため(8)式の利得を得るエージェントの割合 $g_2(u)$ は、 $g_2(u) = f(\theta)$ である。(8)式から、 $g_2(u)$ は次式で表される。

$$g_2(u) = f(\theta) = f(u/(1 - y)) \quad (y < \theta_i \leq 1, y \neq 1) \quad (14)$$

したがって、社会全体で各エージェントが得た利得の分布(公平性)は、次式で表される。

$$g(u) = g_1(u) + g_2(u) \quad (15)$$

それぞれの場合の公平性は、次のようになる。

$$(i) \quad y=1.0 \text{ の場合, } g(u) = f(u) \quad (0.0 \leq u \leq 1.0) \quad (16)$$

$$(ii) \quad y=0.0 \text{ の場合, } g(u) = f(u) \quad (0.0 \leq u \leq 1.0) \quad (17)$$

$$(iii) \quad y=0.5 \text{ の場合, } g(u) = 2f(2u) \quad (0.25 \leq u \leq 0.5) \quad (18)$$

(16)(17)式は、利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ と一致し大きな利得格差が存在する。(18)式は、 $f(\theta)$ を横方向に $1/2$ に縮小し、中心で右に折り返したものであり、エージェントの利得は $0.25 \sim 0.5$ の範囲内にある。このように、大域モデルにおいては、公平性は利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ や集合行為 y に依存する。

次の節では、同じ社会であっても、局所的に相互作用することによって、より高い効率性や公平性をもつ集合行為が得られるかどうかシミュレーションにより明らかにする。

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 50×50 とし、 $N=2500$ 人で構成されるエージェント社会を考えた。大域モデルにおけるシミュレーション結果を Fig.5 に示す。各エージェントが相互作用することによって得られた、最終的な集合行為を Fig.5(a) に示し、社会全体の平均利得を Fig.5(b) に示している。Fig.5(a)(b) の横軸は、初期段階において社会全体で S_1 を選択するエージェントの割合(集合行為の初期値)を表している。均質な社会においては、初期の割合によって集合行為が異なる。初期の段階で S_1 を選択するエージェントの割合が 0.5 より小さければ、集合行為は 0 に収束し全員が S_2 を選択し、 0.5 以上ならば、集合行為は 1 に収束し全員が S_1 を選択する。

集合行為が0,1に収束した場合ともに平均利得は0.5となっており、計算値(10)(11)式と一致していることが分かる。Fig.5(c)は、初期割合を0.5と与えた場合に最終段階で各エージェントが獲得した利得の分布を表している。この場合、均質な社会では集合行為が1に収束するため、計算値(16)式と同じく全員の利得は0.5になる。

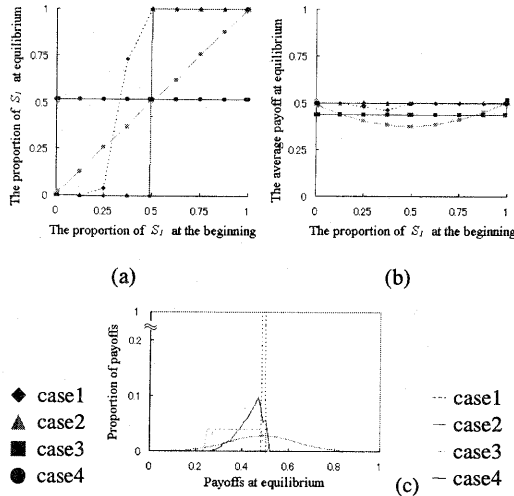


Fig.5: Simulation results (Global model)

(a) Collective behavior (b) Social efficiency

(c) Equity (when initial proportion of S_1 was 0.5)

一方で、多様な社会においては、社会の多様性(利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$)によって集合行為が異なる。いずれの多様な社会も S_1 , S_2 を選好するエージェントが半数ずつ存在する。そして、ケース4の社会では、いかなる初期割合においても、それぞれの選好を反映して、集合行為は0.5に収束し S_1 と S_2 に半数ずつに分かれる。ケース3では、初期の割合と同じ割合で各選択肢を選択することになる。しかし、ケース2の社会での集合行為は均質な社会と同じになってしまう。ここで、平均利得をみると、ケース2で0.5、ケース4で0.437、ケース3で0.5以下となっている。計算値と比較すると、ケース2では集合行為が0または1に収束し(10)(11)式と一致している。ケース4では、集合行為が0.5に収束し(12)式と一致している。そして、ケース3では、(9)式より、平均利得は集合行為に依存し、 $\bar{U} = 0.5(y-0.5)^2 + 0.375$ となる。これも、シミュレーション結果と一致している。次に、個々のエージェントの利得を調べてみると、エージェント間に利得

格差が生まれていることが分かる。初期割合を0.5と与えた場合には、ケース2では集合行為が1に収束し、(16)式のように利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ が現れている。ケース3, 4では集合行為が0.5に収束し、(18)式のように0.25~0.5に $f(\theta)$ の右半分が現れている。

同様に、均質な社会の局所モデルにおけるシミュレーション結果をFig.5に点線で示す。集合行為は、大域モデルと同様に初期状態によって異なるが、その変化は緩やかである。また、平均利得も約0.5となり、初期割合0.5を与えられた場合の利得は全員0.5となる。このことから、均質な社会でのシミュレーション結果は大域モデルの場合とほぼ一致していることが分かる。

次に、ランダム配置における局所モデルのシミュレーション結果をFig.6に示す。いずれの社会においても、変化が緩やかであるが、集合行為は大域モデルとほぼ同じになる。また、平均利得も約0.5になり、大域モデルの計算値(10)(11)(12)式に近似している。しかし、エージェント間には大きな利得格差が生まれている。初期割合を0.5で与えると、いずれも集合行為は0.5に収束している。大域モデルの計算値では、集合行為が0.5に収束した場合、(18)式より、各エージェントの利得は0.25~0.5である。シミュレーションの結果からは、0.25~0.5の利得を得るエージェントが多く存在し、その他の利得を得るエージェントも存在している様子が分かる。

ランダム配置では、それぞれのマイクロ世界はエージェント社会の縮図と捉えることができる。そのため、局所的に相互作用をするモデルにも関わらず、社会全体と相互作用するモデルとシミュレーション結果に近似できる。

一方、構造配置の場合には、いずれの社会においても初期状態によらず、集合行為は約0.5に収束し選好を反映して S_1 と S_2 を選択するエージェントに半数ずつに分かれる(Fig.7(a))。これは、 $\theta_i < 0.5$ である(社会の左半分に位置する)エージェントが S_1 を選択し、 $\theta_i > 0.5$ である(社会の右半分に位置する)エージェントが S_2 を選択している状態である。また、各エージェントは高い利得を獲得し(Fig.7(c))、いずれのケースにおいても平均利得は大域モデルの場合よりも高くなっている(Fig.7(b))。

構造配置では、各エージェントは同じ行動をとりやすいエージェントと交流するため、マイクロ世界の全員が同じ選択肢を選びやすく、選好に基づいた行

動をとりやすくなる。これが社会全体に伝播し、 S_1 と S_2 に選好が二分している社会においては、選択も S_1 と S_2 に二分される。

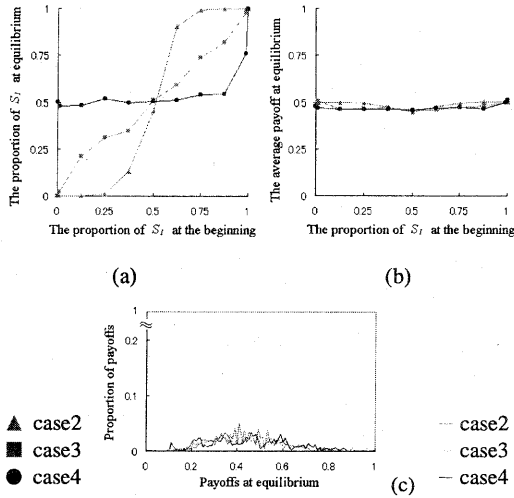


Fig.6: Simulation results (Random assignment)
 (a) Collective behavior (b) Social efficiency
 (c) Equity (when initial proportion of S_1 was 0.5)

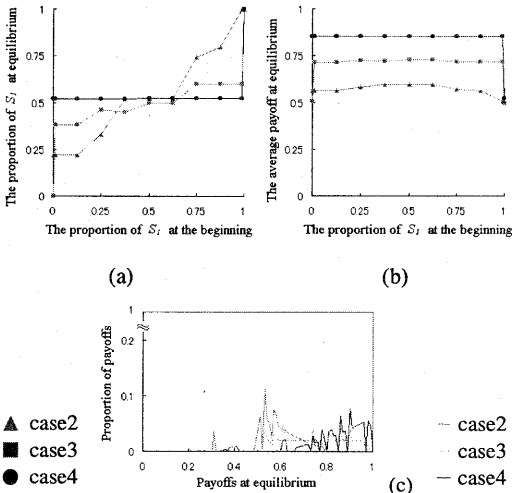


Fig.7: Simulation results (Structured assignment)
 (a) Collective behavior (b) Social efficiency
 (c) Equity (when initial proportion of S_1 was 0.5)

ここで、次のような社会について考えてみる。 $\theta_i < 0.5$ であるエージェント(社会の左側)をグループA、 $\theta_i > 0.5$ であるエージェント(社会の右側)をグループBとして、2つのグループで構成される社会とする。それぞれのグループでは、各エージェン

トは位置関係によらずグループ全体の誰とでも自由に相互作用できる(大域モデル)。しかし、グループ間での相互作用は行われぬものとする。すると、グループAでは初期状態によらず全員が S_1 を選択し、グループBでは全員が S_2 を選択することになる[13]。そして、グループAでエージェント A_i は、次式の利得を得る。

$$u_i = 1 - \theta_i \quad (\theta_i < 0.5) \quad (19)$$

また、グループBでエージェント A_i は、

$$u_i = \theta_i \quad (\theta_i > 0.5) \quad (20)$$

の利得を得る。したがって、社会全体の平均利得(効率性)は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \int_0^{0.5} (1-\theta) f(1-\theta) d\theta + \int_{0.5}^1 \theta f(\theta) d\theta \\ &= 2 \int_0^{0.5} \theta f(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (21)$$

ケース1: $\bar{U} = 0.5$, ケース2: $\bar{U} = 0.558$,

ケース3: $\bar{U} = 0.75$, ケース4: $\bar{U} = 0.875$

これは、シミュレーション結果と近似している。

次に、利得の分布 $g(u)$ を考える。グループAで(19)式の利得を得るエージェントの割合 $g_A(u)$ は、

$$g_A(u) = f(1-\theta) = f(u) \quad (0.5 \leq u \leq 1.0) \quad (22)$$

で表される。一方、グループBで(20)式の利得を得るエージェントの割合 $g_B(u)$ は、次式で表される。

$$g_B(u) = f(\theta) = f(u) \quad (0.5 \leq u \leq 1.0) \quad (23)$$

したがって、社会全体で各エージェントが得た利得の分布(公平性)は、次式で与えられる。

$$g(u) = 2f(u) \quad (0.5 \leq u \leq 1.0) \quad (24)$$

これは、利得パラメタの密度関数 $f(\theta)$ を中心に右に折り返したものになっており、シミュレーション結果と近似している。

以上から、構造配置した局所モデルは、中間的な選好(0.5)をもつエージェントを境にして、左右のグループ同士では相互作用せず、グループ内だけで相互作用する大域モデルと同じであることが分かる。

局所的な相互作用をする場合には、エージェントの配置が集合行為、効率性と公平性に影響を与える。ランダム配置においては、社会の多様性を反映したマイクロ・マクロ・ループが存在し、社会の多様性が集合行為に影響を与え、エージェント間では利得の格差が生まれる。しかし、効率性は初期割合や社会の多様性に依存せず約0.5となっている。一方で、構造配置では、各エージェントの選好を反映するマイクロ・マクロ・ループが存在し、選好関係を反映した集合行為を形成する。そして、個々のエージェントの利得が高くなるために、社会全体の平均利得も

向上する。

6. 効率性と公平性の関係

ここで、効率性と公平性の関係について明らかにする。ケース2, 3, 4における効率性と公平性の関係を求め Fig.8 に表す。縦軸は平均利得 (Fig.5,6,7(b)より) を示し、横軸は利得のばらつきの指標 (Fig.5,6,7(c)より) を示している。ばらつきの指標は、 $(1 - \text{ばらつき幅})$ で与えた。この指標が大きいほど公平であることを示す。

大域モデルでは、公平性、効率性は社会の多様性に大きく依存する。また、ランダム配置の局所モデルでは、公平性が低く効率性も高くない。構造配置では、社会の効率性は高く公平性もやや高い。このように、同じ社会であっても、相互作用の相違によって、効率性と公平性の関係を分類できる。そして、構造配置されたエージェントが局所的に相互作用することによって、高い効率性とある程度の公平性を備えた集合行為が得られることが分かる。

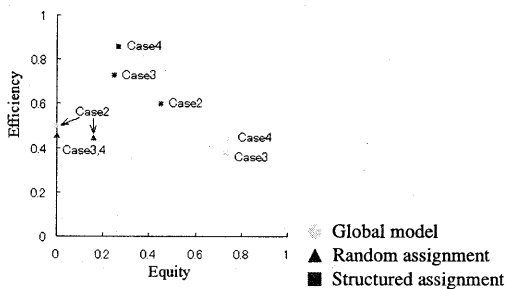


Fig.8: Efficiency vs. Equity

7. おわりに

様々な動機や利害関係、固有の意思決定ルールをもつエージェント同士の局所的な相互作用の中から、それぞれの簡単な意思決定ルールからは予想できないような社会全体としての集合行為が自己組織化される様子を明らかにした。また、エージェントの異質性や社会の多様性が集合行為の形成に果たす役割を明らかにした。エージェントが局所的に相互作用することによって、社会全体としての効率性を向上させるような集合行為が生まれたが、その社会の構造を明らかにすることができた。

ランダム配置された社会で局所的な相互作用をする場合には、社会の多様性を重視した集合行為が自己組織化された。また、エージェント間には、社会

の多様性を反映して、利得格差が生じ不公平感が生まれている。しかし、効率性については、社会の多様性を克服し一定となることが分かった。これは、大域モデルと近似できた。

構造配置された社会で局所的な相互作用をする場合には、選好関係を重視した集合行為が自己組織化され、多様性を克服し一定の集合行為を示した。また、高い効率性と公平性を得られた。これは、大域モデルの組み合わせとして近似できた。

文 献

- [1] Sipper M., Evolution of Parallel Cellular Machines, Springer, 1997.
- [2] 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.
- [3] カール・シグムンド, 数学で見た生命と進化—生き残りゲームの勝者たち, 富田勝監訳, 講談社, 1996.
- [4] J・メイナード・スミス, 進化とゲーム理論—闘争の論理, 寺本英 梯正之訳, 産業図書, 1985.
- [5] ポール・クルーグマン, 自己組織化の経済学, 北村行伸 妹尾美起訳, 東洋経済新報社, 1997.
- [6] Schelling T, Micromotives and Macrobehavior, Norton, 1978.
- [7] 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.
- [8] Subrahmanian V.S. (etc) : Heterogeneous Agent Systems. The MIT Press, 2000.
- [9] 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.
- [10] Fudenberg D., Levine D., The Theory of Learning in Games, The MIT Press, 1998.
- [11] Hofbauer J., Sigmund K., Evolutionary Games and Population Dynamics, Cambridge Univ. Press, 1998.
- [12] Holland G., Hidden Order, Addison-Wisely Publishing, 1995.
- [13] Iwanaga S., Namatame A., "Asymmetric Coordination of Heterogeneous Agents", IEICE Trans. on Information and Systems, Vol. E84-D, No.8, pp.937-944, 2001.
- [14] Iwanaga S., Namatame A., "Evolutionary Dynamics of Heterogeneous Agents with Local Interactions", The 5th A-J Joint Workshop on Intelligent and Evolutionary Systems, Dunedin, pp136-44, 2001.