

ヒューリスティックモデルを自律主体システムに適用した 自己組織化現象のカオス特性について

今井正文
西川智登

本論文は、ヒューリスティックモデルを適用した多数の自律主体で構成される自律主体システムによって集団行動をモデル化し、集団行動の自己組織化の過程を考察しようとするものである。集団行動における自己組織化は多数の自律主体が相互作用により発生するものとして、自律主体が互いに相互作用をするような簡単な行動規則(if-thenルール)を持つ構成要素によって定義される自律主体システムを提案し、システム全体の相互作用と活動量の状態推移を観察することにより見られる自己組織化の現象について議論していく。また、自律主体の構成要素数を変化させることによって、相互作用に伴い自己組織化のレベルが変化しカオス特性を持つことを明らかにした。

On Chaotic Characteristics of Self-organizing Phenomena Applied Heuristic Model to Autonomous Agent System

Masafumi Imai
Tomonori Nishikawa

Abstract: This paper deals with the modelling as the behavioral characteristics of group by autonomous agent system, which applied heuristic model, composed by autonomous agents, and discusses the process of self-organization on behavioral system. Self-organizing characteristics on a behavioral system is regarded as arisen from interaction of autonomous agents, we proposed autonomous agents system defined by components which have the simple behavioral rules (if-then rules) so that autonomous agents bring about interaction each other. And then we discuss the phenomena of self-organization by observing the state transition of interaction and activities in behavioral system. Furthermore, by varying in quantity the components of autonomous agents, we clarified a change in self-organizing characteristics companied by interaction was able to illustrate the existance of the chaotic characteristics.

Key Words: self-organization, Chaotic attractors, Lyapunov spectrum, Autonomous agent

1 緒論

本論文は、多数の自律主体 (autonomous agent) によって構成される集団システム、すなわち、自律主体システム (autonomous agent system) における自己組織化の現象についてヒューリスティックモデルを適用して考察するものである。多数の自律主体が相互作用しながら行動する自律主体システムを提案し、システムの相互作用と活動量の状態推移に観察される自己組織化の現象について議論する。全体を制御するような機能無しでシステムが機能すること、そこにおいて自己組織化のレベルが変化することを示す。さらに、自律主体の構成要素数を変化させることによって相互作用のレベルとともに自己組織化のレベルが変化することは、自律主体システムの特性がカオス特性を示すことから、自律主体システムが非線形特性を有することを明らかにする。

2 自律主体システム

構成要素の自律性を認めて集団を編成するとそれはエージェントシステムで動くようになり自己組織化の現象が生じるということは定性的には良く知られている¹⁾。本論文では、集団を多数の自律主体から構成された複雑多主体システムとして、集団行動における自己組織化は多数の自律主体が

相互作用により発生するものとする^{2) 3) 4)}。自律主体が互いに相互作用をするような簡単な行動規則 (if-thenルール) を持つ構成要素によって定義されるヒューリスティックモデルを導入することによって、自律主体システムにおける自己組織化の現象を議論する。さらに、この自律主体システムは、構成要素数を変化させることにより、相互作用のレベルの変化に対応して自己組織化のレベルが変化すること、そこにおいてカオス特性が観察できることを示す。

2.1 自律主体の行動規則

図1に示すような、多数の自律主体が、それぞれ目標物を探索して定位置に移動するような自律主体システムを考える。自律主体システムの構成要素となる自律主体は以下のようないくつかのif-thenルールによって行動する。ただし、これらの自律主体は、離脱が無く接触によって行なわれる情報伝達によって相互作用を行なうものとする。

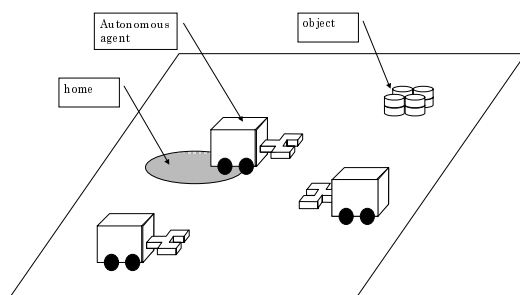


図1 自律主体システムの概要

- 1) 高木晴夫：「情報化組織はポリアージェントシステム」, 経営行動研究学会, 第6回全国大会講演論文集, pp. 8-12 (1996)
- 2) H. Ulrich and G. J. B. Probst 著 徳安 彰 訳：「自己組織化とマネジメント」, 東海大学出版局, pp. 61-117, pp. 159-183 (1992)
- 3) 今井正文, 西川智登：「自律主体システムにおける自己組織化」, 日本経営システム学会誌, pp. Vol. 15, No. 2, (1999)
- 4) M. Imai, S. Shimizu, T. Nishikawa : Self-organization of Non-linear Model, The 14th International Conference on Production Research, vol. 2, pp. 1398-1401 (1997).

自律主体システムの行動規則

全ての要素は定位置(home)から出発し、ステップ時間毎のランダム移動により目標物(object)を探索するが、目標物が見つからなければ一定時間毎に定位置に戻る。

もし移動した場所に目標物があれば、位置を記憶し定位置(home)に持ち帰る。定位置に目標物を置いて再び目標物を取りに行くが、目標物が無ければ再びランダム探索を行う。

他の構成要素と接触した場合、どちらかが目標物の情報を持ってれば情報伝達される。

目標物の位置情報を持たない要素が情報伝達された場合、伝達情報に従って目標物を運びに行く。

このif-thenルールによって行動する自律主体の行動規則の例を図2、図3に示す。図2は、行動規則①、②、③に従って、ランダム探索によって目標物を見つけた時の自律主体の行動規則の例を示しており、図3は、行動規則④、⑤に従った情報伝達(相互作用)による行動規則の例を示している。このif-thenルールによって行動する多数の自律主体は、個々の自律主体は基本的にはランダムな探索を行なうが定位置に戻ることによって周期性を持つものとする。また、自律主体同士の接触による目標物の位置情報の伝達は相互作用を生み、相互作用によって要素同士の協同現象すなわち自己組織化が起こることになる。

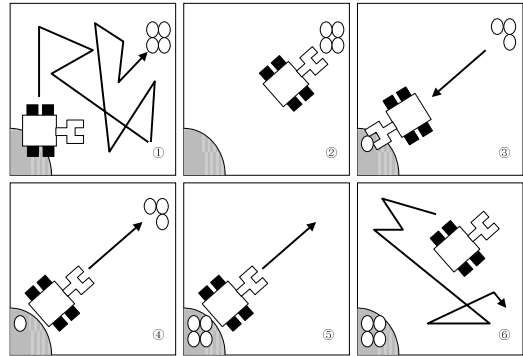


図2 自律主体の行動規則の例

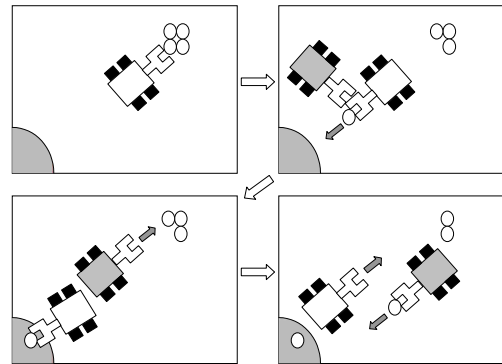


図3 自律主体の行動規則の例(相互作用)

2.2 自律主体システムのカオス性

カオス理論はいろいろな分野で応用されているが、このカオス性が多くの現象に含まれていることや非線形性によって発生することはよく知られている。組織行動の自己組織化モデルの自己組織化においてカオス性が重要であることをふまえて、多数の自律主体によって構成される自律主体システムの自己組織化現象におけるカオス性を考察する^{3) 4) 5) 6)}。ただし、本論文の自律主

5) 今井正文, 清水静江, 西川智登:「自己組織化モデルにおけるカオスに関する研究」, 日本経営システム学会誌, pp15-20, Vol. 13, No. 1, (1996)

6) 今井正文, 清水静江, 西川智登:「自己組織化モデルにおける非線形現象について」, 日本ファジィ学会誌, pp127-132, vol. 8, No. 4, (1996)

体システムはデータ生成の構造が明確ではないため、組織の自己組織化モデルで用いた通常のリアプノフスペクトルとは異なる計算手法を用いて最大リアプノフ数を求める^{7) 8)}。自律主体システムの生成するデータを状態空間表示して得られた点の集合から、なるべく近い2点 $x_i(t), y_i(t)$ を取り、この2点の τ 時間後の距離の比 $\Lambda_{ij}(t, \tau)$ を求めて、多くの N 個の点について距離の比の平均操作を行えば時間 t における最大リアプノフ数 λ が求められる。具体的には、以下のように計算される。

$$\Lambda_{ij}(t, \tau) = \frac{|x_i(t+\tau) - y_j(t+\tau)|}{|x_i(t) - y_j(t)|} \quad (2.1)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\tau N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \log \Lambda_{ij}(t, \tau) \quad (2.2)$$

上式(2.1), (2.2)で得られた $\lambda(t)$ を時間 t について平均した最大リアプノフ数 λ が正の値に収束すれば、自律主体システムにカオス性が存在しているといえる。

3 シミュレーション

3.1 自律主体システム

自律主体システムに以下の表1に示されるような要素数 N だけを変化させたパラメータを与えたタイプ1 ($N=20$)、タイプ2 ($N=60$)の二つのモデルを用意し、構成要素数 N によって要素間の相互作用、及び自律主体システム全体の挙動が変化することを示す。ただし、図4に示すように構成要素数を N とした場合、時刻 t における各構成要素の位置を $x_i(t), y_i(t), (i=1, \dots, N)$ 、各構成要素の相互作用の数を $Int_i(t)$ 、各構成要素 i

が移動した目標物の数を $Obj_i(t)$ とする。また、表1における時間単位 $step$ と距離単位 $unit$ は、構成要素が自律主体システム内を移動する場合の計算上の仮想的な時間と空間の単位であり、目標物の配置制限時間は目標物が配置されてから構成要素によって運ばれる運ばれないに関わらず定期的に除去される時間とし、目標物の再配置時間は目標物が構成要素によって全て運ばれるか配置制限時間が経過して除去されてから再び配置されるまでの時間としている。

表1. 自律主体システムのパラメータ

	タイプ1	タイプ2
自律主体の要素数N	20	60
総計算時間T	8000 step	
目標探索の制限時間	20 ± 5 step	
目標探索の移動距離	-5 ~ 5 unit / step	
目標物の位置	$x = [5 \sim 6], y = [7 \sim 8]$	
目標物の配置数	30個/1回	
目標物の再配置時間	15 step	
目標物の配置制限時間	30 step	

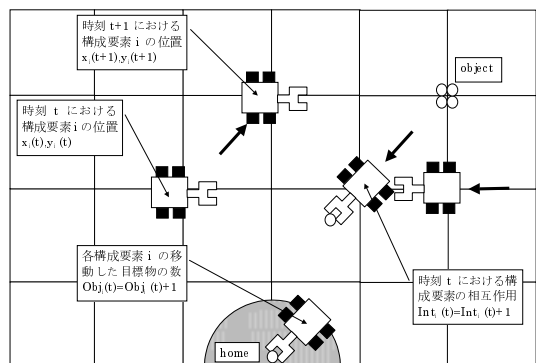


図4 自律主体システムの状態変数

7) I. Shimada and T. Nagashima : A numerical approach to ergodic problem of dissipative dynamical systems, Progr. Theor. Phys., vol. 61, No. 6, pp. 1605-1616 (1979).

8) 長島弘幸, 馬場良和 : 「カオス入門」, 培風館, pp. 85-88, pp. 105-108 (1992)

3.1.1 構成要素数が少ない場合 (タイプ1)

構成要素数を $N=20$ としたタイプ1の時刻 t における各構成要素の位置を $x_i(t), y_i(t), (i=1, \dots, N)$, 各構成要素の相互作用の数を $Int_i(t)$, 各構成要素 i が移動した目標物の数を $Obj_i(t)$ とした場合の自律主体システムの挙動を計算すると図5から図10までの図が得られる。自律主体のうち1つだけを取り出した場合の移動の軌跡図5とその自律主体の位置 $x_i(t), y_i(t)$ および相互作用数の時系列データ図6より, 個々の構成要素はランダムな探索と情報を得た場合の規則的な目標物の移動によって複雑な挙動をしていることがわかる。各自律主体の位置 $x_i(t), y_i(t)$ を x 軸, y 軸方向の移動量に変換しシステム全体で平均した場合の移動量の平均

$$|x(t)| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i(t+1) - x_i(t)|,$$

$$|y(t)| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i(t+1) - y_i(t)|$$

と相互作用の平均

$$Int(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Int_i(t)$$

の時系列データを図7に示す。この移動量の平均と相互作用の平均を状態空間表示すると図8のようになる。移動量の平均と相互作用の平均図7, 図8をみると, 構成要素間の情報交換による相互作用が生成され, システム全体の挙動が複雑になっていることがわかる。このタイプ1のパラメータにおいて自律主体システムは, 構成要素間の情報交換による相互作用によって, 相互作用による規則性と探索行動によるランダム性が共存している状態, すなわち, 自己組織化が達成された状態であるといえる。最大リアプノフ数の収束の様子を図9に示す。

最大リアプノフ数 λ_1 は -0.0198 となり, 負の値を持つことからカオスではないことがわかる。時刻 t において各構成要素 i が定位置に移動した目標物の数 $Obj_i(t)$ を図10に示す。このときの定位置に移動された目標物の総数は全体で $\sum_i Obj_i(t) = 2044$ となり, 移動された目標物の構成要素当りの平均 $Obj(t) = 102.2$ となる。カオスではないことと移動された目標物の構成要素当りの平均が高いことから, 相互作用による規則性が探索行動によるランダム性に比べて強い状態であるといえる。

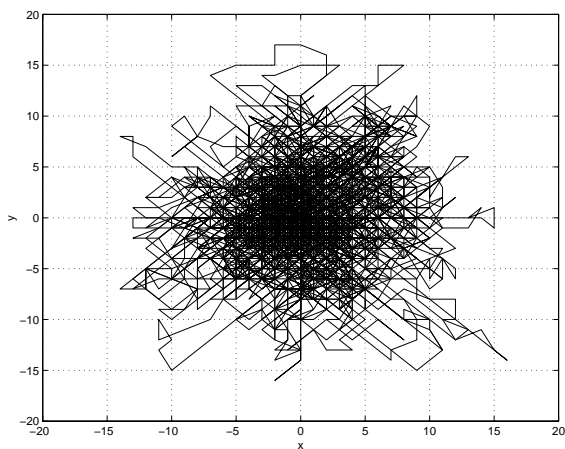


図5 自律主体の移動の軌跡の例

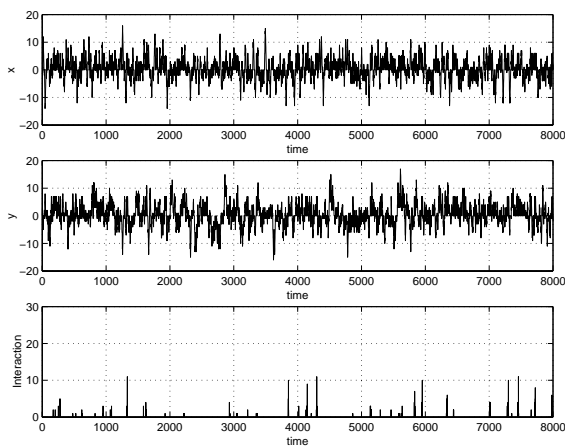


図6 自律主体の位置と相互作用の例

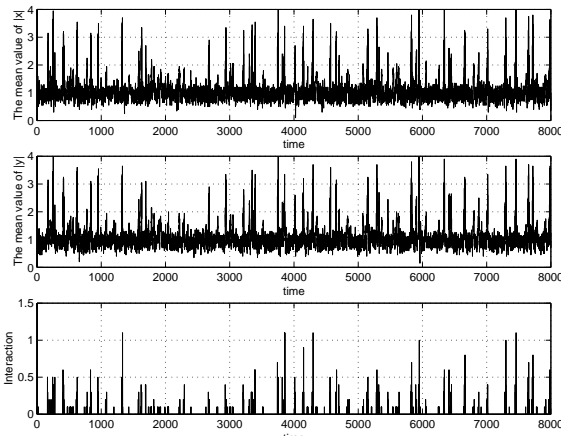


図7 移動量の平均と相互作用の平均

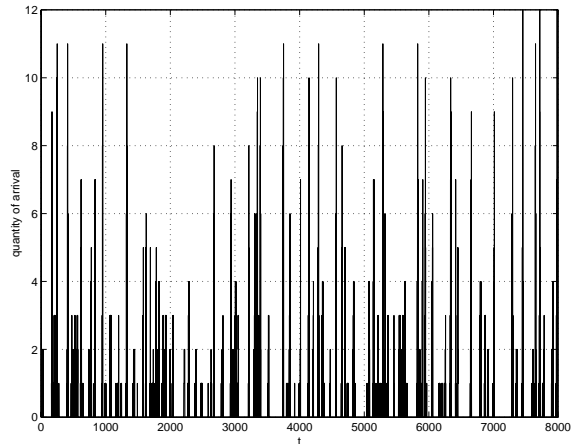


図10 定位置に移動された目標物の数

3.1.2 構成要素数が多い場合(タイプ2)

構成要素数を $N = 60$ としたタイプ2の自律主体システムの挙動を計算すると図11から図16が得られる．移動の軌跡の例図11とその自律主体の位置 $x_i(t)$, $y_i(t)$ および相互作用数の例図12より，個々の構成要素はランダムな探索と情報を得た場合の規則的な目標物の移動によって，複雑な挙動をしていることがわかる．移動量の平均と相互作用の平均図13，図14より，構成要素間の情報交換による相互作用が生成され，システム全体の挙動が複雑になっていることがわかる．このパラメータにおいても自律主体システムは，構成要素間の情報交換による相互作用によって，自己組織化が達成された状態であるといえる．最大リアプノフ数の収束の様子を図15に示す．この自律主体システムの最大リアプノフ数 λ_1 は0.0177となり，正の値を持つことからカオスであることがわかる．時刻 t において各構成要素 i が定位置に移動した目標物の数 $Obj_i(t)$ の推移を図16に示す．このときの定位置に移動された目標物の総数は全体で $\sum_i Obj_i(t) = 4523$ となり，移動された目標物の構成要素当りの平均 $Obj_i(t) = 75.38$ とな

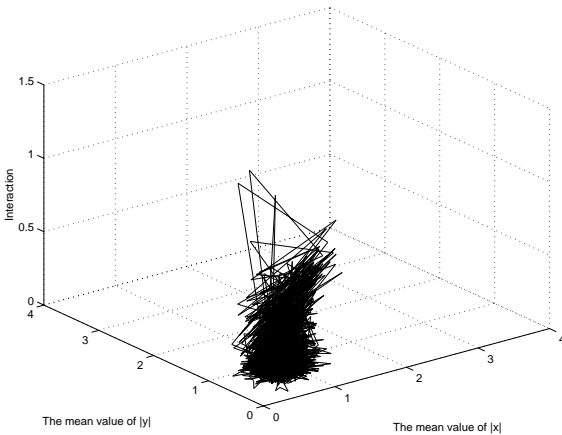


図8 移動量の平均と相互作用の平均

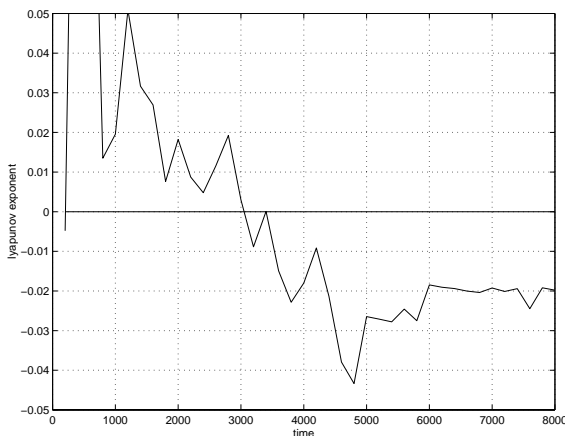


図9 最大リアプノフ指数

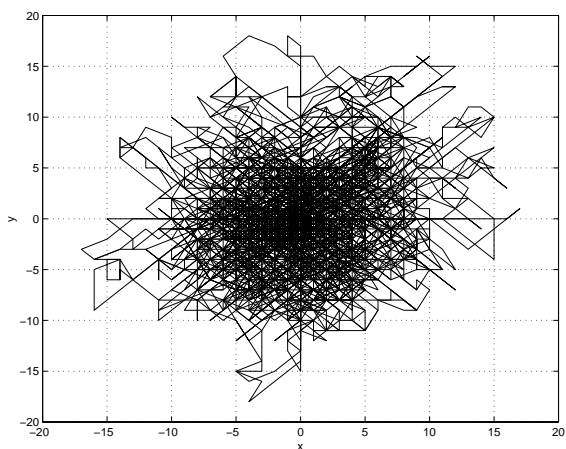


図 11 自律主体の移動の軌跡の例

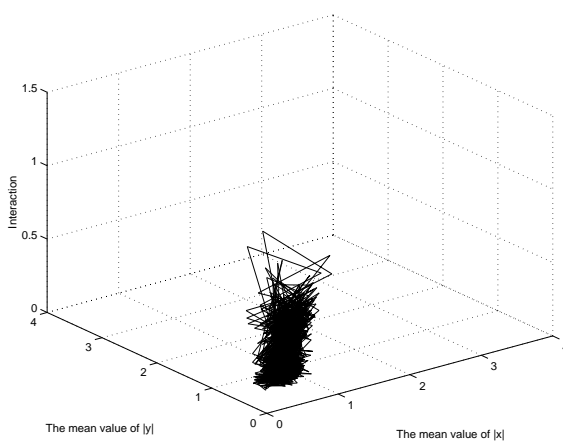


図 14 移動量の平均と相互作用の平均

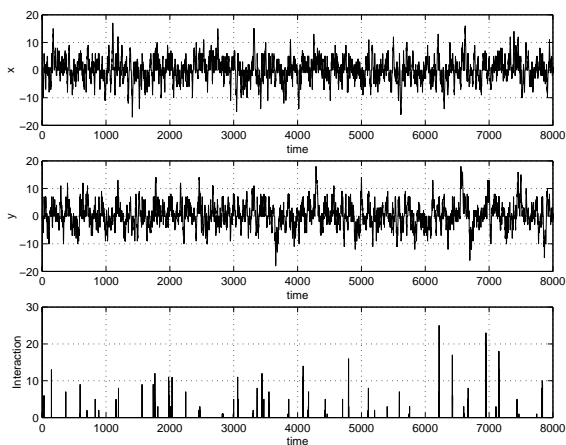


図 12 自律主体の位置と相互作用の例

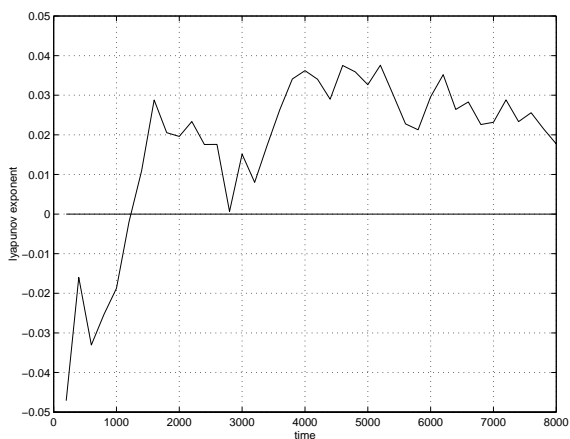


図 15 最大リアプノフ指数

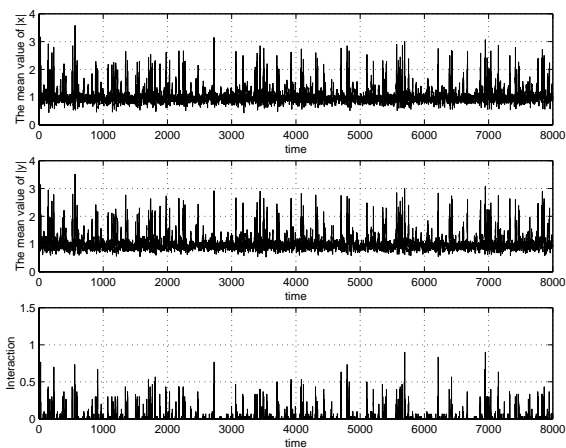


図 13 移動量の平均と相互作用の平均

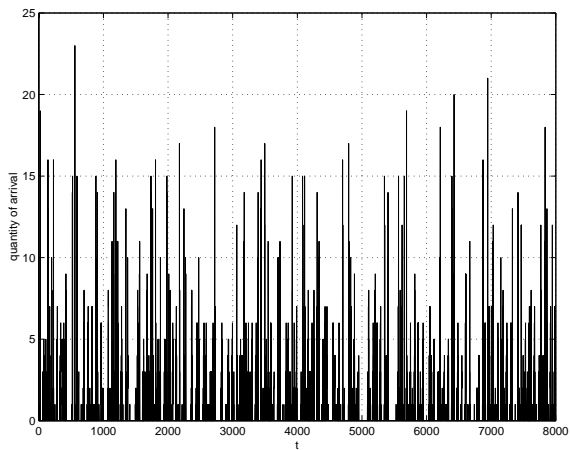


図 16 定位置に移動された目標物の数

る．カオスの存在と移動された目標物の構成要素当りの平均がタイプ1に比べて低いことから，このパラメータにおいて相互作用による規則性よりも探索行動によるランダム性が強い状態であるといえる．

3.2 自律主体システムの自己組織化のレベル

構成要素数 N の変化に対応する自律主体システムの挙動の変化を考察するために，以下のような自己組織化のレベルを表す関数 s を導入する．

- ・ 移動量の平均：

$$s(\bar{x}, \bar{y}) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i(t+1) - x_i(t))^2 + (y_i(t+1) - y_i(t))^2}$$

- ・ 相互作用の平均：

$$s(Int) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N Int_i(t)$$

- ・ 目標物移動数の平均：

$$s(Obj) = \frac{1}{TN} \sum_t \sum_{i=1}^N Obj_{ji}(t)$$

- ・ 最大リアプノフ数： $s(\lambda) = \lambda$

ただし，構成要素数 N ，各構成要素の位置を $x_i(t), y_i(t) (i=1, \dots, N)$ ，各構成要素の相互作用 $Int_i(t)$ ，移動した目標物数 $Obj_{ji}(t)$ とする．

構成要素数 N を2から70まで変化させた場合の移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ ，相互作用の平均： $s(Int)$ ，目標物移動数の平均： $s(Obj)$ ，最大リアプノフ数 $s(\lambda)$ を計算すると図17から図20が得られる．図17の移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ は，少ない構成要素数 N で急速に増加しある程度の範囲で増加減少するが，特に構成要素数 $N = 20 \sim 26$ で高い値を示していることがわかる．図18相互作用の平均

$s(Int)$ は，構成要素数 N の増加に対して増加傾向を示し，図19目標物移動数の平均 $s(Obj)$ は，構成要素数 N の増加に対して一旦増加し構成要素数 $N = 20$ で最大値を示した後に減少をしていることがわかる．自律主体システムの挙動の変化を考察すると，構成要素数 N の増加により相互作用の平均： $s(Int)$ が増加し，目標物の位置情報を各構成要素が得ることによって活動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ と目標物移動数の平均 $s(Obj)$ が増加するが，目標物が有限なために構成要素数 N がある程度以上になると飽和・減少すると解釈できる．図20最大リアプノフ数 $s(\lambda)$ は，構成要素数 N に対して正負の符号を複雑に示しているが，移動量の平均と目標物移動数の平均が高い値を示す構成要素数 N の範囲において負の符号を持つことが示された．これらのことを構成要素数 N の変化に対する自律主体システムの自己組織化レベルの変化として考察すると，移動量の平均と目標物移動数の平均が大きい値を持つパラメータ領域において高い自己組織化が達成されており，自己組織化のレベルが変化する場合にカオス特性が存在すると解釈することができる．

さらに，相互作用と自己組織化の関連を調べるために自律主体システムの相互作用に関する行動規則を削除し，相互作用の機能を停止させたて構成要素数 N を2から70まで変化させた場合の自律主体システムの移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ と目標物移動数の平均： $s(Obj)$ を図21，図22に示す．移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ と目標物移動数の平均： $s(Obj)$ に関して比較すると，相互作用の機能がある場合の図17，図19に対して，相互作用の機能がない場合の図21，図22の方が明らかに低いレベルであり，自己組織化のレベルが

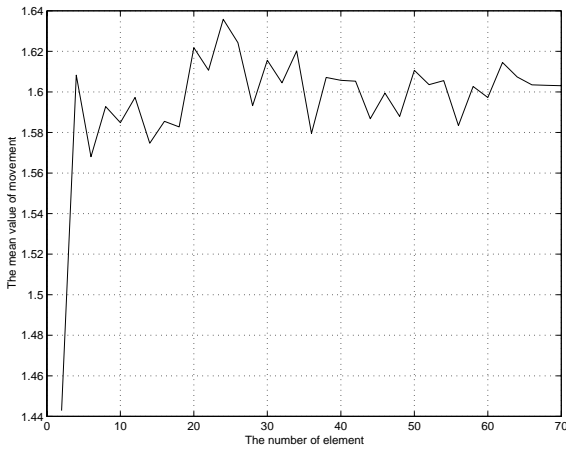


図 17 構成要素数 N と移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$

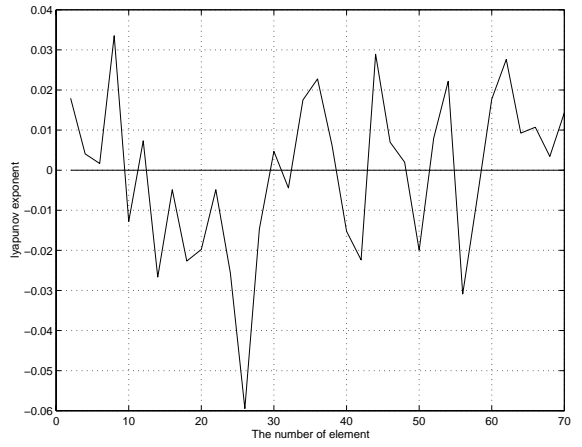


図 20 構成要素数 N とリアプノフ数 $s(\lambda)$

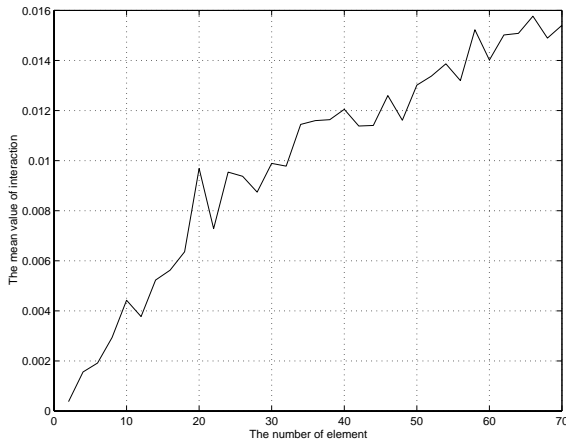


図 18 構成要素数 N と相互作用の平均: $s(Int)$

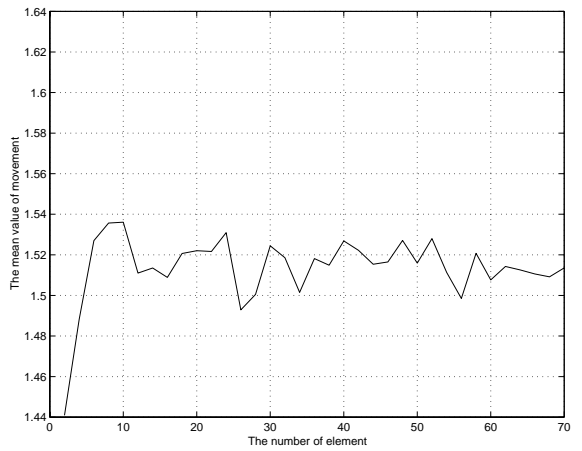


図 21 構成要素数 N と移動量の平均 $s(\bar{x}, \bar{y})$ (相互作用の機能を停止した場合)

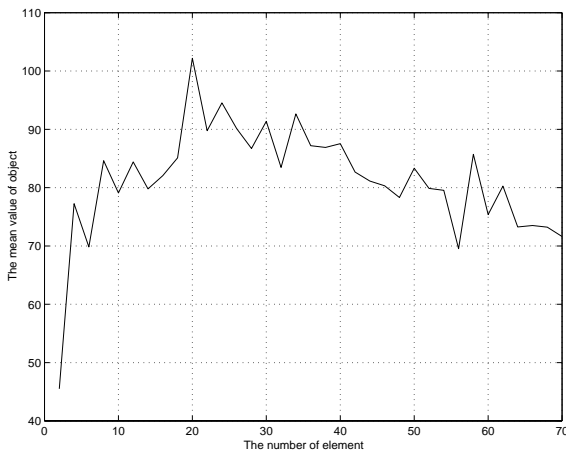


図 19 構成要素数 N と目標物移動数の平均: $s(Obj)$

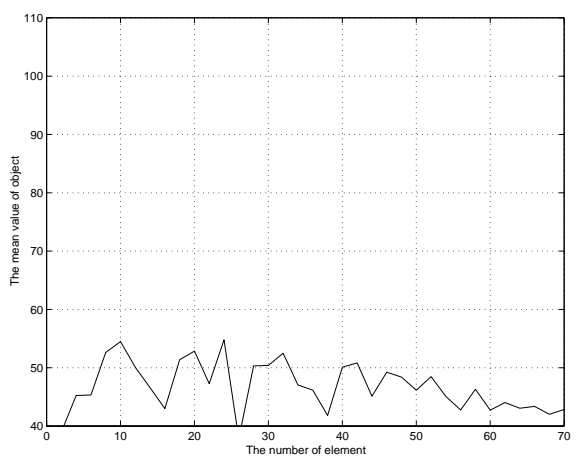


図 22 目標物の移動数の平均 $s(Obj)$ (相互作用の機能を停止した場合)

低い状態であることがわかる。この相互作用の機能を停止させた場合に自己組織化のレベルが低くなるという結果は、本論文の自律主体システムに自己組織化の現象が生じていることと、自己組織化が構成要素間の相互作用によって大きく影響を受けることを示している。

4 結 論

本論文は、多数の自律主体によって構成される自律主体システムにおける自己組織化の現象についてヒューリスティックモデルを適用して考察した。簡単な行動規則 (if-thenルール) を持つ多数の自律主体が相互作用しながら行動する自律主体システムを提案し、システム全体の相互作用と活動量の状態推移を観察すると自己組織化の現象が生じていること示した。自律主体システムにおいて、構成要素数の変化による相互作用の増加などによって自己組織化のレベルが変化すること、及び、自己組織化のレベルが変化する状況においてカオス特性が存在することを明らかにした。