

## 群れ行動の創発と同期行動における ネットワーク構造の影響

青柳 優<sup>†1</sup> 生天目 章<sup>†1</sup>

近傍のエージェントどうしが、情報を相互参照することで、局所的な相互作用することにより、位置の調整と速度の同期が生まれ、群れ行動は創発される。その背景にあるネットワーク構造は、単位球グラフである。このようなネットワーク構造においては、エージェントどうしの連結が必要であり、お互いに離れた状態にあると、群れ行動は創発しない。そこで、本論文では、個々のエージェントが連続的な近傍の情報参照に加え、パルス的に、わずかな確率でランダムに遠隔参照をすることで、連結のない離散状態から群れ行動を創発するシミュレーションを行う。このとき、群れ行動の背景にあるネットワーク構造がランダムグラフからスモールワールドネットワークへと構造が変化する。また、エージェントどうしの凝集と速度の同期に注目し、これらの値と近傍のエージェント数および群れクラスタの成長との関係について調べ、その背景にある結合グラフの特性について考察する。

### Effects of the Network Topology on Synchronization and Emergence of Flocking Behavior

MASARU AOYAGI<sup>†1</sup> and AKIRA NAMATAME<sup>†1</sup>

This paper addresses the problem of synchronization in networked agents by studying the flocking behavior of agents in 3D. It has been shown that flocking behavior results from the class of local control laws for the collection of agents. Flocking can occur when local action exploits the network properties of the underlying interconnection among agents. Network connectivity affects the performance and robustness properties of a system of networked agents. It is important for the agents to act in coordination with the other agents. To achieve coordination, individual agent doesn't need to share information but to refer some one's action. Therefore, in order to achieve a certain convergence and robustness in environmental change, an appropriate network protocol must be designed. A consensus protocol is an interactive method that provides the group with a common coordination variable. Thus, a probable conjecture is that a small-world graph should result in flocking behavior. This paper examines

the conjecture by describing the occurrence of flocking behavior and the underlying connection between agents. It is shown that the occurrence of flocking behavior in the synchronization of networked agents is directly associated with the connectivity properties of the interconnection network. The robustness of the system to arbitrary switching of the network topology was also examined.

#### 1. はじめに

生命システムは、予期しない環境の変化に対しても、うまく適応することができる。それは、生命システムが一元的な方法で管理、統制されることなく、多数の自律した個体どうしの局所的な相互作用とそれらの多重のフィードバックにより成り立っていることに由来する<sup>1)–5)</sup>。このことから、生命システムの研究から得られる知見を人工のシステムに応用するための研究に大きな関心が寄せられている<sup>6)–9)</sup>。

このようなシステムを成り立たせる生命体の情報交換のネットワークに関する研究の中から、Wattsらは、スモールワールドネットワーク<sup>10)</sup>を発見し、近年の複雑系の立場からのネットワークの研究の発展に大きな貢献をしている。

Reynoldsは、鳥や魚等の生物の世界で観察される群れ行動を仮想空間内で表現するためのモデル化を提案している<sup>11),12)</sup>。このモデルは“Boids”モデルと呼ばれ、自律的に行動する個々のエージェントは、近傍の他のエージェントの行動に対応した簡単な3つの行動ルールに従って、相互作用することにより、群れ行動を創発することが知られている<sup>13),14)</sup>。

Boidsモデルのような仮想世界の群れ行動モデルを応用し、現実世界の無人の航空機やロボットによる自己組織化された編隊行動へ適用しようとする試みもある<sup>15)–17)</sup>。

群れ行動を創発するには、個々のエージェントは、時々刻々と変化する他のエージェントの相対位置および相対速度の情報をリアルタイムに取得し、処理する必要がある<sup>13),14)</sup>。現実世界の群れ行動への応用を考えた場合、安定した群れ行動を低コストで実現するためには、処理すべき情報量の削減とともに、簡素なアルゴリズムが求められる。情報の参照を近傍のエージェントに限定することは、情報量の局限や障害物の回避等外的な環境からの刺激に対する群れ行動のロバストネスの確保に有効である。

しかし、近傍のエージェントの情報のみを参照する場合、エージェントどうしが遠く離れ

<sup>†1</sup> 防衛大学校  
National Defense Academy of Japan

ていると、お互いの情報を参照しないため、群れ行動を創発しない。それに対し、参照の範囲を広げると、それだけ、処理すべき情報量も増加する。そこで、近傍参照の利点を生かしつつ、うまく情報量を抑えながら、遠方を参照することが求められる。

ところで、Granovetter は、人同士のつながりの中で、日常的に接触している親しい人々との絆よりも、むしろ接触頻度が低く、普段は疎遠にしている人々との絆のほうが、情報収集や情報伝達に優れているという理論（弱い紐帯理論）<sup>8)</sup>を提唱している。

ここで、本論文では、各エージェントは、近傍のエージェントと相互参照に加え、遠隔のエージェントに対しても時おり参照することにする。これは、Granovetter による弱い紐帯理論に相当する考え方である。

このような群れ行動の 3 次元マルチエージェントシミュレーションを行う。その中で、離散した状態から、エージェントどうしが凝集し、速度を同期させるまでの群れ形成の過程におけるエージェント間の情報参照ネットワークの推移とそれを通じた相互作用を明確化する。

## 2. 同期問題とスモールワールドネットワークの関係に関する研究

生物にみられる同期現象（ホタルの発光の同期<sup>19)</sup> や心筋細胞活動の同期<sup>20),21)</sup> 等）では、隣接する振動子がパルス的な信号による相互作用により創発するものとして理解されている<sup>22)</sup>。そのほか、ネットワーク化された振動子の同期問題についていくつかの研究例がある<sup>23)–25)</sup>。

Watts らは、同期現象<sup>26)</sup> が生まれるネットワークの研究の中から、弱い紐帯理論に相当するスモールワールドモデル<sup>10)</sup>を考案し、同様のトポロジ的特性が、映画俳優の共演関係や、電力系統、線虫の神経細胞等、現実世界の様々なネットワークにも共通して存在することを示している<sup>27)</sup>。

ほとんどの複雑系システムのネットワークにおいて、ノードは自律的に活動し、それらを接続するリンクは、時間とともに生成消滅を繰り返す。現実世界のネットワークを動的なエージェントが相互に接続されたものととらえると、そのネットワーク特性は、時間とともに様々に変化する。

ネットワーク化された動的なエージェントが同期する場合の安定性の制御は興味深いものである。Olfati-Saber らは、動的なエージェントが連結されたネットワークにおけるコンセンサス問題について、最大のクラスタに対応するグラフラプラシアン行列の 2 番目に小さな固有値（代数的接続性<sup>28)</sup>）に注目したスペクトル分析を行っている<sup>29),30)</sup>。コンセンサス問題とは、すべてのエージェントの状態に依存するある量が、どのようにエージェントの合

意の形成に影響するかについて議論するものである。

また、Olfati-Saber は、ネットワークにおける代数的接続性の相転移現象を検証し、スモールワールドネットワークでは、コンセンサス問題における合意形成の収束が速いことを示している<sup>31)</sup>。

## 3. Boids モデルと群れ行動の創発

### 3.1 Boids モデル

個々のエージェントは、ある範囲内に位置する他のエージェント（以下、近傍のエージェントという）と局所的に相互作用する。それらの相互作用が多重に連結されることで、群れ行動は創発される。

Boids モデルでは、個々のエージェントは、近傍のエージェントの相対位置および相対速度の情報に基づき、Cohesion, Separation, Alignment の 3 つの行動ルール（以下、これらの頭文字をとって、CSA ルールという）に従って行動する。CSA ルールは、力学的側面からみると、個々のエージェントの推進力であり、それぞれ次のような働きをする<sup>12)</sup>。

- (1) Cohesion（凝集ルール）は、近傍のエージェントの中心位置への引力として働く。これにより近傍のエージェントどうしは凝集する。
- (2) Separation（分離ルール）は、近傍のエージェントからの斥力として働く。これにより、近傍のエージェントとの衝突を防止する。その力の大きさは、距離に反比例する。
- (3) Alignment（同期ルール）は、近傍のエージェントの平均速度に合わせるような力として働く。これにより、近傍のエージェントどうしの速度が揃う。

個々のエージェントは、自律的にこれらを合成した推進力を働かせることで、速度および位置を逐次変化させる。

### 3.2 群れ行動の創発

我々は、以前、群れ行動の創発を力学的視点から解析している<sup>13),14)</sup>。Boids モデルでは、個々のエージェントは、近傍のエージェントの相対位置および相対速度の情報に基づき、CSA の 3 つの行動ルールを発火し、自律的に運動する。

今、 $N$  体のエージェント集団の中の任意のエージェント  $i$  ( $= 1, 2, \dots, N$ ) の近傍に、 $n_i$  体のエージェントが存在するものとする。エージェント  $i$  ( $= 1, 2, \dots, N$ ) を基準とした近傍のエージェント  $j$  ( $\neq i$ ) の相対位置ベクトルを  $\vec{d}_{ji}$ 、相対速度ベクトルを  $\vec{v}_{ji}$  で表す。そして、近傍のエージェントに関する平均相対位置ベクトル  $\vec{D}_i$ 、平均相対速度ベクトル  $\vec{V}_i$  を次式で定義する。

$$\begin{cases} \vec{D}_i = \frac{1}{n_i} \sum_j^{n_j} \vec{d}_{ji} \\ \vec{V}_i = \frac{1}{n_i} \sum_j^{n_j} \vec{v}_{ji} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、近傍にエージェントが存在しない場合 ( $n_i = 0$ ) は、 $\vec{D}_i = \vec{V}_i = \vec{0}$  とする。また、 $\vec{D}_i$  方向の単位ベクトルを  $\vec{e}_{D_i}$  で表す。すると、各エージェント  $i$  ( $= 1, 2, \dots, N$ ) に働く CSA ルールに由来する力の合力  $\vec{F}_i$  は、次式で与えられる。

$$\vec{F}_i = \left( w_{ci} - \frac{w_{si}}{D_i} \right) \vec{e}_{D_i} + w_{ai} \vec{V}_i \quad (2)$$

ここで、 $w_{ci}$ 、 $w_{si}$  および  $w_{ai}$  は、それぞれ Cohesion、Separation および Alignment に関する力の係数であり、 $D_i = |\vec{D}_i|$  である。

このように、合成力  $\vec{F}_i$  は、近傍のエージェントの相対的な中心位置方向 ( $\vec{D}_i$  方向) の力と平均相対速度ベクトル方向 ( $\vec{V}_i$  方向) の力の重み付き一次結合となる。近傍のエージェントとの相互作用の結果、式 (2) の第 1 項、すなわちエージェント間の相対位置に基づく引力と斥力の合力の項により、エージェントどうしは凝集する。さらに、式 (2) の第 2 項、すなわちエージェントの相対速度ベクトルに基づく調整力により、各エージェントは速度ベクトルを合わせる (以下、このことを速度の同期という)。このようにして、エージェント間の相互作用から凝集と速度の同期が生まれ、群れ行動が創発される。

各エージェントに CSA の行動ルールによる力が作用する状態で、十分な時間が経過すると、それらの力が釣り合うようになり、群れ全体で等速度運動をとる。このとき、個々のエージェントに働く力は時間に対して一定となり、群れ行動は定常状態になる。

式 (2) の第 1 項は、Cohesion および Separation の合力であり、これを  $\vec{S}_i$  とおく。

$$\vec{S}_i = \left( w_{ci} - \frac{w_{si}}{D_i} \right) \vec{e}_{D_i} \quad (3)$$

Cohesion および Separation の合力  $\vec{S}_i$  によるポテンシャル  $\phi_i(D_i)$  は、次式で表され、これを図 1 に示す。

$$\phi_i(D_i) = \int |\vec{F}_{csi}| dD_i = w_{ci} D_i - w_{si} \log D_i \quad (4)$$

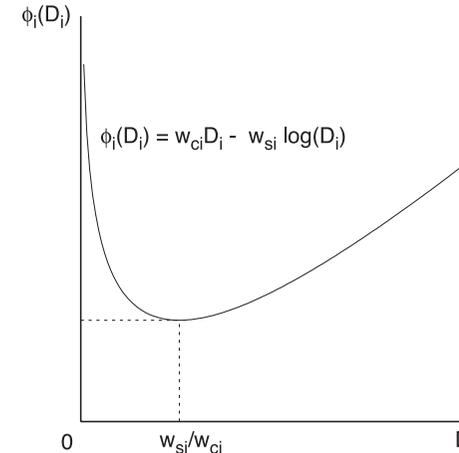


図 1 Cohesion ルールと Separation ルールから生まれる位置ポテンシャル (式 (4))

Fig. 1 Position potential that comes from Boids model. It arises from relationship between Cohesion and Separation rules.

#### 4. スモールワールドネットワークの構成法

Watts ら<sup>10)</sup> のスモールワールドネットワークの  $\beta$  モデル (以下、WS モデルという) による、ノード (エージェント) の空間配置を考慮した空間グラフの構成法は次のとおりである。  $N$  個のノードすべてが次数  $k$  ( $= (0, N]$ ) で接続する正則グラフについて、接続しているノードを近傍ノード、リンクを近傍リンクとし、それ以外を遠隔ノードとする。その状態から、各ノードの次数  $k$  を保ちながら、近傍リンクを確率  $P_{WS}$  ( $= [0, 1]$ ) で、ランダムに遠隔ノードとつなぎかえる。つなぎかえたリンクを遠隔リンクとする。このとき、ノードあたりの近傍リンク数は  $k(1 - P_{WS})$  本、遠隔リンク数は  $kP_{WS}$  本となる。

Newman ら<sup>32)</sup> は、正則グラフのノードにランダムにリンクを追加する形で、WS モデルを改良している (以下、NMW モデルという)。このモデルでは、正則グラフの近傍リンクの切断が不要となる。近傍のノードと次数  $k$  ( $= (0, N]$ ) で  $N$  個のノードからなるグラフについて、近傍リンクをつなぎかえる代わりに、確率  $P_{NMW}$  ( $= [0, 1]$ ) でランダムに追加する。このとき、ノードあたりの近傍リンク数は  $k$  本、遠隔リンク数は  $kP_{NMW}$  本である。

表 1 に、スモールワールドネットワークの各構成法における平均リンク数、平均近傍リンク数および平均遠隔リンク数を示す。このようにして生成された、スモールワールドネッ

表 1 ネットワークの構成法と平均リンク数の比較．ここで，エージェント（ノード）が持つ平均リンク数を  $d$ ，格子モデルのリンク数を  $k$ ，WS モデルのリンクのつながり換え確率を  $P_{WS}$ ，NMW モデルの遠隔リンクの追加確率を  $P_{NMW}$ ，エージェント数を  $N$ ，任意のエージェント  $i$  の近傍のエージェント数を  $n_i$ ，遠隔ノード生成確率を  $p$  とする

Table 1 Comparing construction methods of network and the average number of links.

モデル	平均リンク数 (次数) $d$	平均近傍リンク数 $k_1$	平均遠隔リンク数 $k_e$
WS モデル	$k$	$k(1 - P_{WS})$	$kP_{WS}$
NMW モデル	$k(1 + P_{NMW})$	$k$	$kP_{NMW}$
群れ行動モデル 1 (単位球グラフ)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$	0
群れ行動モデル 2 (スモールワールドネットワーク)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{n_i + (N - n_i)p\}$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N - n_i)p$
群れ行動モデル 3 (完全グラフ)	$N$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i$	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N - n_i)$

トワークは，同じノード数と平均次数からなるランダムネットワークと比べて，固有経路長  $L$  が同程度でありながら，クラスタリング係数  $C$  が高いという特徴を持つ<sup>27)</sup>．

### 5. ランダムパルス参照ネットワークの構成法

Boids モデル<sup>12)</sup> では，近傍のエージェントどうしの局所的な相互作用により，群れ行動が創発される．この場合，エージェントどうしの情報参照ネットワークは，各エージェントが他のエージェントを認識する距離（視程）を半径とする球体内（視界）で結合する片方向のリンク（以下，近傍リンク）で接続された，単位球グラフ（Unit Ball Graphs）<sup>33)</sup> あるいはランダム幾何グラフ（Random Geometric Graphs）<sup>34)</sup> となる．ここで，リンクの向きは，参照する側から参照される側へ向かう向きとする．また，相互参照するエージェントどうしは双方向のリンクとなる．このようなネットワークにおいては，エージェント間の物理的距離が重要な要素となる．たとえば，視界の範囲外のエージェント（遠隔のエージェント）どうしは，お互いを認識できず，相互作用は起こらない．つまり，すべてのエージェントが離散していて，視界外にある状況下では，群れは形成されないことは明白である．

そこで，ある確率で，遠隔のエージェントと片方向リンク（以下，遠隔リンクという）を

接続することにする．

個々のエージェントは，距離が  $r$  以下の近傍のエージェントの相対位置および相対速度の情報を常時参照して，CSA ルールを発火する．もしも，近傍のエージェントが存在しなければ，CSA ルールを発火しない．つまり，近傍のエージェントどうしは，つねに近傍リンクを確立し，お互いが距離  $r$  より離れた場合には近傍リンクを切断する．すべてのエージェントが離散した状況から，群れ行動を創発させるために，遠隔のエージェントに対する情報参照を追加することにより解決したいが，そのとき，なるべく処理すべき情報量の増加を抑える工夫が必要である．すなわち，各エージェントが処理すべき CSA ルールに関する処理量は，他のエージェントとのリンク数  $k$  に対して  $O(k)$  のオーダーとなるので，リンク数をなるべく増加させずに，群れ行動を形成することが望ましい．そこで，個々のエージェントは， $k_1$  本の近傍リンクに加え，単位時間ごと（ここでは，シミュレーションステップごと）に，確率  $p$  で，遠隔のエージェントについて，情報参照の有無を決定することとする．これにより，パルスのように接続する，平均  $k_e$  本の有向の遠隔リンクが生成される．この確率  $p$  は，遠隔参照の頻度を与えるもので， $p$  が小さいほど，遠隔参照における情報量を抑えることができる．

こうすることで，エージェントどうしのネットワークは，距離のカットオフによる空間グラフ的側面と，距離によらず，ランダムに，パルスのように接続する関係グラフ的側面の 2 つの側面を持つことになる．

今， $N$  体のエージェント集団を考える．その中のエージェント  $i$  ( $= 1, \dots, N$ ) の周囲の半径  $r$  の球の範囲内に， $n_i$  ( $= [0, N]$ ) 体の近傍のエージェントが存在し，それ以外の  $(N - n_i)$  体のエージェントを遠隔のエージェントとする．ここで，エージェント  $i$  は，すべての近傍のエージェントとの近傍リンクに加え，確率  $p$  で遠隔のエージェントと遠隔リンクを持つとする．すると，近傍リンクの平均値  $k_1$  および遠隔リンクの平均値  $k_e$  は，それぞれ次式となる．

$$k_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (5)$$

$$k_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (N - n_i)p \quad (6)$$

したがって，エージェントの平均リンク  $d$  は，次式となる．

$$d = k_l + k_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{n_i + (N - n_i)p\} \quad (7)$$

ここで定義したモデルのリンク数を表 1 に示す．遠隔リンク生成確率  $p = 1$  の場合は，すべてのエージェントがお互いにリンクし，完全グラフとなる．遠隔リンク生成確率  $p = 0$  の場合は，近傍リンクのみとなり，単位球グラフまたはランダム幾何グラフとなる．

## 6. シミュレーション

近傍リンクとランダムな遠隔リンクからなるスモールワールドネットワーク構造が群れ行動の創発に及ぼす影響について，シミュレーションについて明らかにする．群れ形成過程の遠隔リンク生成確率  $p$  の依存性を調べるため，代表的な  $p = 1$ ， $10^{-3}$  および  $10^{-4}$  の場合を比較する．時刻（シミュレーションステップ） $t = 0$  で，100 体のエージェントがお互いに視程  $r$  より離れた状態になるように，ある半径を持つ球体内にランダムに配置する．また，各エージェントの速度ベクトルをランダムに与える（ただし，その大きさの上限を 0.2 とする）．

遠隔リンク生成確率が  $p = 1$  のときは，すべてのエージェントがお互いに接続する完全グラフとなる．これに対し， $0 < p < 1$  のときは，近傍リンクを形成していないランダムグラフから開始し，エージェントが凝集し，近傍リンクを形成するようになると，スモールワールドネットワークとなる．

### 6.1 遠隔リンク生成確率と群れ形成の関係

エージェントの位置の標準偏差  $SD(x, y, z)$  と速度の標準偏差  $SD(v)$  を測定することで群れの形成過程におけるエージェント集団の凝集性と速度の同期性を定量的に評価することができる． $SD(x, y, z)$  はエージェント集団全体の凝集の度合いを表し， $SD(v)$  はエージェント集団全体の速度の同期の度合いを表す．そして，十分な時間が経過して，エージェントの群れ行動が定常状態になる場合は， $SD(x, y, z)$  および  $SD(v)$  はある一定の値に収束する．

図 2 (a) および (b) は，それぞれ遠隔リンク生成確率  $p = 10^{-3}$  および  $10^{-4}$  のエージェント集団のシミュレーションの一例である． $p = 10^{-4}$  のとき，群れの形成を確認できないが， $p = 10^{-3}$  のときは，群れが形成されることを確認できる．

このようなエージェント集団全体の凝集性を表すエージェントの位置の標準偏差  $SD(x, y, z)$  の時間的推移を図 3 (a) に示す．遠隔リンク生成確率  $p = 1$ （完全グラフ）の場合は，時間経過とともに， $SD(x, y, z)$  が減衰した後，一定値に収束することが分かる．これは，個々の

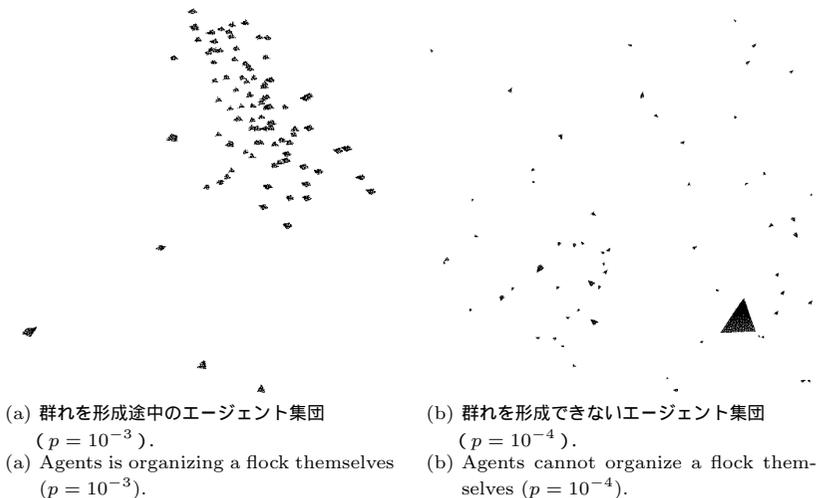


図 2 群れを形成する場合と形成しない場合のシミュレーション結果の比較．遠隔リンク生成確率が  $p = 10^{-3}$  の場合と  $p = 10^{-4}$  の場合の時刻  $t = 200$  のときの結果の例

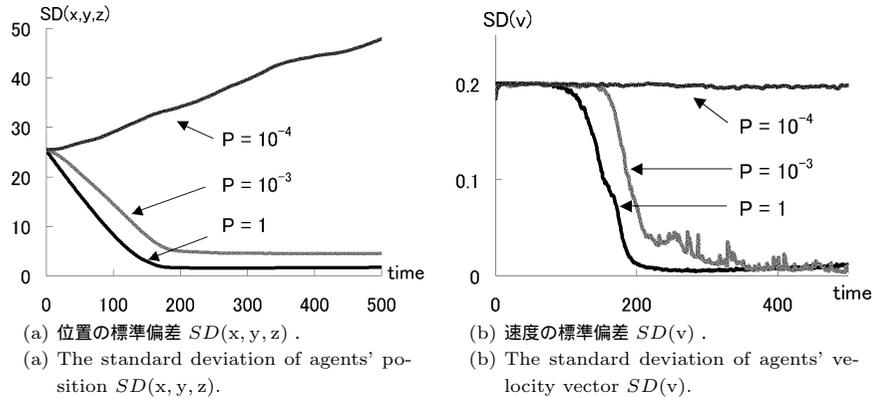
Fig. 2 Comparison the simulation result that agents organizing a flock ( $p = 10^{-3}$ ) with the one that they can not ( $p = 10^{-4}$ ).

エージェントが，Cohesion ルールによる引力で凝縮し，Separation の行動ルールによる斥力と釣り合っエージェント間の相対位置が安定して定常状態となることを示している．また，わずかな遠隔リンク生成確率  $p = 10^{-3}$  であっても，完全グラフと同様の推移を示すことが分かる．しかし，遠隔リンク生成確率が小さい  $p = 10^{-4}$  の場合では， $SD(x, y, z)$  は単調増加し，エージェント集団の拡散することを示している．

また，エージェントの速度の同期性を表す，速度の標準偏差  $SD(v)$  の時間的推移を図 3 (b) に示す．初期状態（時刻  $t = 0$ ）では，非同期の状態 ( $SD(v) = 0.2$ ) である． $p = 1$  および  $10^{-3}$  の場合は，時間経過とともに速度が同期した状態 ( $SD(v) = 0$ ) への相転移がみられる．また， $SD(x, y, z)$ （図 3 (a)）が初期状態からすぐに減衰を開始するのにに対し， $SD(v) = 0$  の減衰開始までには，タイムラグがある．これに対し， $p = 10^{-4}$  の場合は，同期の相転移を生じず， $SD(v) = 0.2$  を維持する．

### 6.2 ネットワークの平均リンク数と凝集性

次に，エージェントの持つリンク数の推移をみることにする．これにより，群れ行動の背景にあるネットワーク構造と，情報処理量の推移を比較する． $p = 1$ （完全グラフ）の場合，



(a) 位置の標準偏差  $SD(x, y, z)$ .  
 (b) 速度の標準偏差  $SD(v)$ .  
 (a) The standard deviation of agents' position  $SD(x, y, z)$ .  
 (b) The standard deviation of agents' velocity vector  $SD(v)$ .  
 図 3 位置の標準偏差  $SD(x, y, z)$  と速度の標準偏差  $SD(v)$  の推移  
 Fig. 3 The transition of the standard deviation of agents' position  $SD(x, y, z)$  and the one of agents' velocity vector  $SD(v)$ .

$N$  体のすべてのエージェントは相互にリンクを持つので、どのエージェントのリンク数もつねに上限値  $d_{max} = N - 1$  となる (グラフモデルごとの平均リンク数, 近傍リンク数および遠隔リンク数を表 1 に示す). 図 4 は, 平均リンク数  $d$  を上限値  $d_{max}$  で規格化した値  $d/d_{max}$  の推移を示す. また, 図 5 (a) は近傍リンクの数  $k_l$  の推移, 図 5 (b) は遠隔リンクの数  $k_e$  の推移を示す. 近傍リンク数  $k_l$  は, 個々のエージェントの近傍のエージェント数であり, 個々のエージェントの周囲の局所的な凝集性ととらえることもできる.

$p = 10^{-4}$  の場合は, 遠隔リンク数  $k_e$  がわずかに  $10^{-2}$  である (図 5 (b)) ため, 初期状態でたまたま近くに位置したエージェントどうしがわずかな近傍リンク  $k_l$  を持つ (図 5 (a)) もの, エージェントの平均次数  $d/d_{max}$  (図 4) は, つねにほぼ  $0.0 (\approx 10^{-2}/99)$  で, 群れ行動を創発しない.

$p = 1$  (完全グラフ) では, すべてのエージェントのリンク数がつねに  $d_{max}$  である. エージェントが凝集することで, 遠隔リンク数  $k_e$  が優位な状態から, 近傍リンク数  $k_l$  が優位な状態へと相転移がみられる. これは, 図 3 (a) で示したように, エージェントどうしが凝集し,  $SD(x, y, z)$  が臨界を超えると, 近傍リンク  $k_l$  が急増するためであると考えられる.

$p = 10^{-3}$  の場合は,  $p = 10^{-4}$  と  $p = 1$  の様相をあわせ持つ. 図 5 (b) に示すように, 遠隔リンク数はつねに  $k_e = 10^{-1}$  程度に抑えられている. これは,  $p = 10^{-4}$  の場合と同様である. しかし, 図 5 (a) に示すように, 時刻  $t = 100$  から 200 にかけて, 近傍リンク数  $k_l$  に

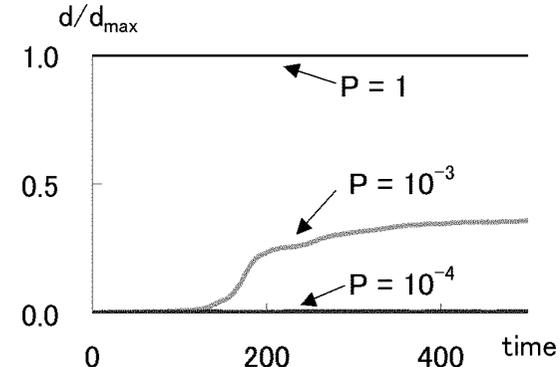


図 4 規格化された平均リンク数  $d/d_{max}$  の推移 (各エージェントが持つ平均リンク数  $d$  を完全グラフの平均リンク数  $d_{max}$  で規格化した値)  
 Fig. 4 The transition of the normalized average number of links.

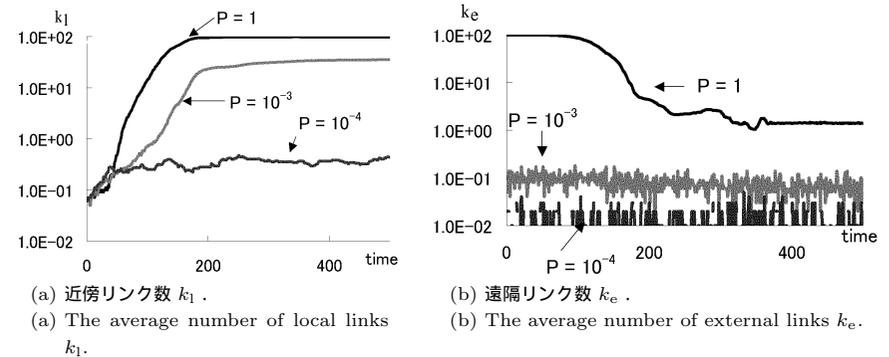


図 5 近傍リンク数  $k_l$  と遠隔リンク数  $k_e$  の平均値の推移  
 Fig. 5 The transition of average number of local links and external links.

相転移がみられる.  $p = 1$  の場合と同様であるが,  $k_l$  の値は  $p = 1$  の場合よりも 3 割程度に抑えられている.

### 6.3 エージェントの情報参照ネットワークのsmall-world性

次に, 近傍リンクおよび遠隔リンクにより連結されたエージェントの情報参照ネットワークのクラスタリング係数と固有経路長について調べる.

$p = 1$  (完全グラフ) の場合は, つねにクラスタリング係数は  $C = 1$ , 固有経路長は  $L = 1$

43 群れ行動の創発と同期行動におけるネットワーク構造の影響

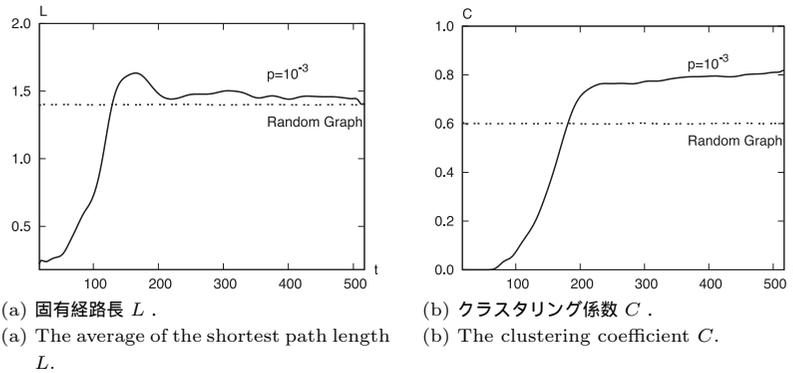


図 6 情報参照ネットワークの固有経路長  $L$  とクラスタリング係数  $C$  の推移 (ランダムリンク生成確率  $p = 10^{-3}$ ). 群れの形成時 ( $t = 500$ ) の時点と同じ平均リンク数 (最大値で規格化して  $d/d_{max} = 0.6$ ) を持つランダムグラフの値との比較

Fig. 6 The transition of the average of the shortest path length  $L$  and the clustering coefficient  $C$  of information reference network behind agents behavior.

である。

$p = 10^{-3}$  の場合の情報参照ネットワークの固有経路長  $L$  の推移を図 6 (a) に、クラスタリング係数  $C$  の推移を図 6 (b) に示す。また、両図には、比較のため、同じ平均リンク数を持つランダムグラフ (近傍リンクはなく、遠隔リンク生成確率を  $p = 0.6$  とする場合) のシミュレーション結果を示す。図 6 (a) と (b) から、固有経路長  $L$  とクラスタリング係数  $C$  は、時刻  $t = 0$  (離散状態) のときは、ほぼ 0 である。そして、時刻  $t = 100$  付近から増加し、平均リンク数が同じランダムグラフと比べて、固有経路長  $L$  が同程度であるのに対し、クラスタリング係数  $C$  が高くなるのが分かる。このように、 $p = 10^{-3}$  のとき、エージェント間の情報参照ネットワークは、スモールワールド性を示す。

6.4 群れクラスタの成長過程

近傍リンクにより直接あるいは間接的に連結されたエージェントのグループ (以下、群れクラスタという) は、凝集が進むにつれ、その規模 (エージェント数) を拡大する。ここで、片方向の遠隔リンクにより接続され、一時的に情報を参照されるのみのエージェントは、群れクラスタの構成員として、対象外とする。図 7 は、最大の群れクラスタを構成するエージェント数  $N_g$  を指標として、 $p = 1, 10^{-3}$  の場合の群れの成長過程を示す。 $N_g$  が増加を開始するまでにタイムラグがある。その時刻は、近傍リンク数  $k_1 \simeq 1$  (図 5 (a) 参照) とな

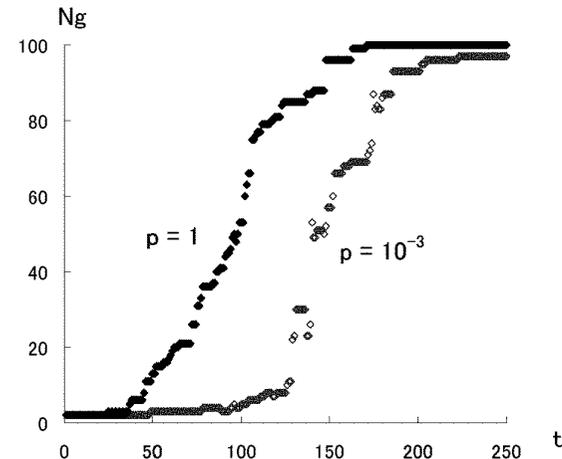


図 7 群れクラスタの成長過程。  $p = 1$  および  $10^{-3}$  の場合の最大の群れクラスタを構成するエージェント数  $N_g$  の推移 (偶然に近傍に位置するエージェントの存在により、 $N_g = 2$  から開始)

Fig. 7 The growth process of the agents cluster.

る時刻とほぼ一致し、これを臨界点として群れクラスタの増加が始まることが分かる。

また、 $p = 1$  の場合に比べ、 $p = 10^{-3}$  の場合は、増加の開始が遅れるが、増加の進行速度 (グラフの傾き) に大きな違いはみられない。つまり、完全グラフ、スモールワールドネットワークともに群れの成長速度には変化はみられないことが分かる。また増加は、離散的、段階的であることから、群れクラスタどうしが段階的に結合を繰り返して成長していることが分かる。

6.5 群れの成長過程における凝集性と同期性

次に、群れクラスタの成長過程に関して、エージェント全体の凝集性、同期性および各エージェントの近傍の凝集性 (群れ行動の相互作用に関わる情報量) の応答性を比較する。図 8、図 9 および図 10 は、 $p = 10^{-3}$  のときの比較である。各値は、それぞれの最大値で規格化されている。縦軸に、最大の群れクラスタの大きさ  $N'_g$  をとり、エージェントの平均近傍リンク数  $k'_1$  の増加、位置の標準偏差  $SD(x, y, z)'$  および速度の標準偏差  $SD(v)'$  の減少にとともに、群れクラスタが拡大する過程を示している。

図 8 から、 $SD(x, y, z)'$  に対する  $N'_g$  の変化をみると、ある程度凝集が進んでから ( $SD(x, y, z)' = 0.47$ ),  $N'_g$  の急激な増加が始まることが分かる。これは、凝集度がある

44 群れ行動の創発と同期行動におけるネットワーク構造の影響

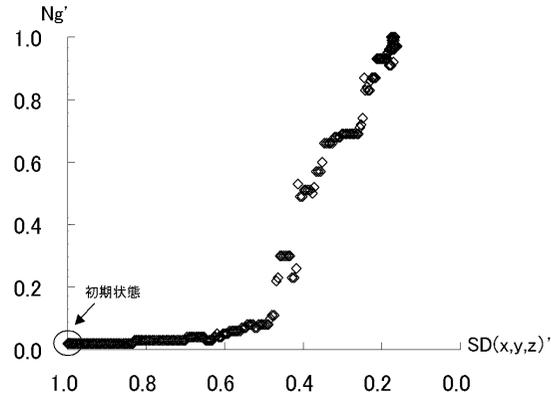


図 8 エージェントの全体の凝集性と最大の群れクラスタの関係 ( $p = 10^{-3}$  のとき, 最大値で規格化した, 位置の標準偏差  $SD(x, y, z)'$  に対する最大の群れクラスタのサイズ  $N_g'$ )

Fig.8 The largest agents cluster size in relation to the condensed level  $SD(x, y, z)'$  ( $p = 10^{-3}$ ).

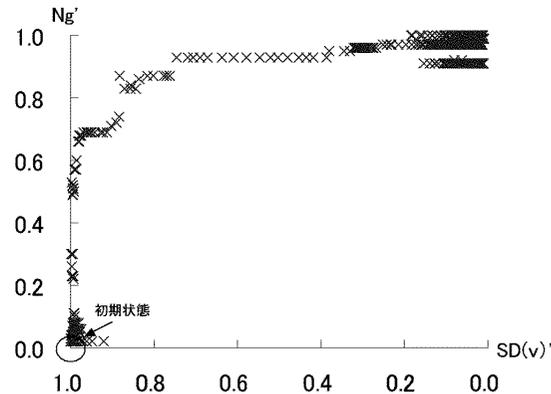


図 9 速度の同期と最大の群れクラスタの関係 ( $p = 10^{-3}$  で, 最大値で規格化した, 速度の標準偏差  $SD(v)'$  に対する最大の群れクラスタのサイズ  $N_g'$ )

Fig.9 The largest agents cluster size in relation to the synchronized level of velocity  $SD(v)'$  ( $p = 10^{-3}$ ).

程度高まってから, 群れクラスタの成長が始まることを示している.

これに対し, 図 9 と図 10 に示すように,  $k_1'$  および  $SD(v)'$  に対する  $N_g'$  変化には同期がみられ,  $k_1'$  および  $SD(v)'$  が初期値に近い段階から,  $N_g'$  は急激に増加した後,  $N_g' = 0.7$

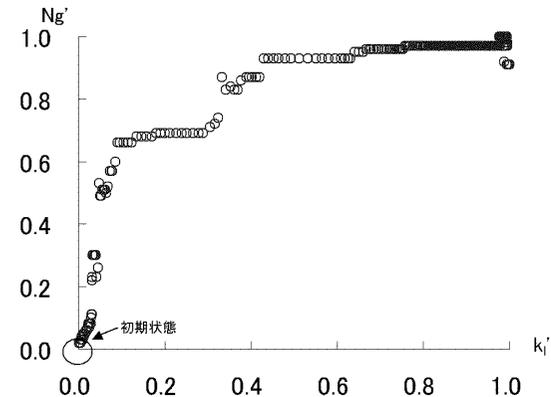


図 10 エージェントの局所的な凝集性と最大の群れクラスタの関係 ( $p = 10^{-3}$  のとき, 最大値で規格化した, 平均の近傍リンク数  $k_1'$  に対する最大の群れクラスタのサイズ  $N_g'$ )

Fig.10 The largest agents cluster size in relation to the average of local condensed level of agents  $k_1'$  ( $p = 10^{-3}$ ).

付近に到達すると,  $N_g'$  の増加は緩やかになることが分かる. 逆に, これを  $N_g'$  に対する  $k_1'$  および  $SD(v)'$  の変化ととらえると, ある程度, 群れクラスタ ( $N_g'$ ) が成長してから, 各エージェントの近傍の凝集性つまり群れ行動の相互作用に関わる情報量 ( $k_1'$ ) と速度の同期性 ( $SD(v)'$ ) が急激に増加することを示している.

また,  $k_1'$ ,  $SD(x, y, z)'$  および  $SD(v)'$  いずれに対しても,  $N_g'$  が段階的, 離散的に増加している. これは, 図 7 の考察のとおり, 群れクラスタどうしが結合を繰り返すことで, 段階的, 離散的に成長することを示している.

## 7. おわりに

自律的に行動する個々のエージェントが, 他のエージェントの相対位置および相対速度の情報参照して, 凝集かつ速度の同期の相互作用をすることで, 群れ行動が創発する. 情報の参照を近傍のエージェントに限定することは, 情報量の局限や障害物の回避等外的な刺激に対する群れ行動のロバストネスの確保に有効である. しかし, お互いの情報を参照することはできない位置にいと, エージェントは群れ行動を創発しない. このような場合, 近傍だけでなく遠隔のエージェントの情報を参照する必要があるが, 近傍の参照の利点を残しておきたい. そこで, 本論文では, 近傍参照の空間グラフ的構造を持つエージェント集団に,

パルス的に、ランダムな遠隔参照を加えることで、近傍と遠隔のネットワーク特性をあわせ持つ関係グラフの特性を持たせた。これは、Granovetter の弱い紐帯理論<sup>18)</sup> に相当するものである。

このようなネットワーク構造を持つ群れ行動は、完全グラフに比べ、エージェントの行動の意思決定に対する処理量を大幅に削減可能である。

そのようなネットワーク構造を持つエージェントの3次元の群れ行動の創発過程の相転移について、離散したエージェントどうしの凝集と速度の同期に注目し、各エージェントの近傍のエージェント数および群れクラスタの成長との関係について調べた。その結果、エージェントの情報参照ネットワークがランダムグラフの場合でも、参照確率が十分に高いと凝集すること。そして、凝集が進み、近傍のエージェントどうしの相互参照が始まると、エージェントの情報参照ネットワークの構造は、スモールワールドネットワークに移行して、群れ行動を創発することが分かった。

また、創発される群れクラスタは、群れのクラスタどうしの結合により、段階的、離散的に成長することが分かった。さらに、その過程において、まず遠隔のエージェントどうしが凝集して、群れクラスタの成長が始まり、群れクラスタがある程度成長したところで、近傍のエージェントどうしの凝集およびエージェントの同期が開始することが分かった。

### 参 考 文 献

- 1) Resnick, M.: *Turtles, Termites, and Traffic Jams*, The MIT Press (1997).
- 2) Dorigo, M. and Stützle, T.: *Ant Colony Optimization*, The MIT Press (2004).
- 3) Kennedy, J. and Eberhart, R.C.: *Swarm Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers (2001).
- 4) Bonabeau, E., Dorigo, M. and Theraulaz, G.: *Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press (1999).
- 5) 金子 勝, 児玉龍彦: 逆システム学, 岩波書店 (2004).
- 6) Sims, K.: Evolving Virtual Creatures, *Computer Graphics (Proc. Siggraph '94)*, pp.15-22 (1994).
- 7) Sims, K.: *Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition (Proc. Artificial Life IV)*, Brooks & Maes, MIT Press (1994).
- 8) Langton, C.G.: *The proceedings of an interdisciplinary workshop on the synthesis and simulation of living systems (Artificial Life)*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1987).
- 9) Ray, T.: *An Approach to the Synthesis of Life (Artificial Life II)*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (2004).
- 10) Watts, D.J. and Strogatz, S.H.: Collective dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, Vol.393, No.6684, pp.440-442 (1998).
- 11) Reynolds, C.W.: Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model, in *Computer Graphics, Proc. SIGGRAPH '87 Conference*, SIGGRAPH, pp.25-34 (1987).
- 12) Reynolds, C.W.: Steering Behaviors For Autonomous Characters, *Proc. Game Developers Conference*, pp.763-782 (1999).
- 13) Aoyagi, M. and Namatame, A.: Dynamics of Emergent Flocking Behavior, *Proc. 7th International Conference on Cellular Automata for Research and Industry, ACRI 2006*, pp.557-563 (2006).
- 14) Aoyagi, M. and Namatame, A.: Incremental Development of Networked Intelligence in Flocking Behavior, *Emergent Intelligence of Networked Agents*, Namatame, A., Kurihara, S. and Nakashima, H. (Eds.), *Studies in Computational Intelligence*, Vol.56, pp.1-12, Springer (2007).
- 15) Dudenhofer, D.D. and Jone, M.P.: A formation behavior for large-scale micro-robot force deployment, *WSC '00: Proc. 32nd conference on Winter simulation*, pp.972-982, Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA (2000).
- 16) Reif, J.H. and Wang, H.: Social potential fields: A distributed behavioral control for autonomous robots, *WAFR: Proc. workshop on Algorithmic foundations of robotics*, Natick, pp.331-345, A.K. Peters, Ltd., MA, USA (1995).
- 17) Nardi, R.D. and Holland, O.: UltraSwarm: A Further Step Towards a Flock of Miniature Helicopters, *Proc. SAB Workshop on Swarm Robotics* (2006).
- 18) Granovetter, M.S.: The Strength of Weak Ties, *The American Journal of Sociology*, Vol.78, No.6, pp.1360-1380 (1973).
- 19) Buck, J. and Buck, E.: Synchronous fireflies, *Scientific American*, Vol.234, pp.74-85 (1976).
- 20) Peskin, C.S.: *Mathematical Aspects of Heart Physiology*, New York University (1975).
- 21) Ikeda, N., Yoshizawa, S. and Sato, T.: Difference Equation Model of Ventricular Parasytostole as an Interaction between Cardiac Pacemakers Based on the Phase Response Curve, *J. Theor. Biol.*, Vol.103, No.3, pp.439-465 (1983).
- 22) Kuramoto, Y.: *Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence*, Springer-Verlag (1984).
- 23) Mirollo, R.E. and Strogatz, S.H.: Synchronization of Pulse-Coupled Biological Oscillators, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, Vol.50, No.6, pp.1645-1662 (1990).
- 24) Díaz-Guilera, A., Pérez, C.J. and Arenas, A.: Mechanisms of synchronization and

- pattern formation in a lattice of pulse-coupled oscillators, *Phys. Rev. E*, Vol.57, No.4, pp.3820–3828 (1998).
- 25) 吉野 隆: Random Geometric Graph 上の結合振動子系のマクロな性質, 形の科学会誌, Vol.20, No.1, pp.126–127 (2005).
- 26) Strogatz, S.H.: From Kuramoto to Crawford: Exploring the onset of synchronization in populations of coupled oscillators, *Phys. D*, Vol.143, No.1-4, pp.1–20 (2000).
- 27) Watts, D.J. (著) 栗原 聡, 佐藤進也, 福田健介 (訳): スモールワールド, 東京電機大学出版局 (2006).
- 28) Fiedler, M.: Algebraic connectivity of graphs, *Czechoslovak Mathematical Journal*, Vol.23, No.98, pp.298–305 (1973).
- 29) Olfati-Saber, R. and Murray, R.M.: Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol.49, pp.1520–1533 (2004).
- 30) Olfati-Saber, R., Fax, J.A. and Murray, R.M.: Consensus and Cooperation in Networked Multi-Agent Systems, *Proc. IEEE*, Vol.95, No.1, pp.215–233 (2007).
- 31) Olfati-Saber, R.: Ultrafast consensus in small-world networks, *Proc. American Control Conference*, pp.2371–2378 (2005).
- 32) Newman, M.E.J., Moore, C. and Watts, D.J.: Mean-Field Solution of the Small-World Network Model, *Phys. Rev. Lett.*, Vol.84, No.14, pp.3201–3204 (2000).
- 33) Kuhn, F., Moscibroda, T. and Wattenhofer, R.: On the locality of bounded growth, *PODC '05: Proc. 24th annual ACM symposium on Principles of distributed computing*, New York, NY, USA, ACM, pp.60–68 (2005).
- 34) Dall, J. and Christensen, M.: Random Geometric Graphs, *Physical Review E*, Vol.66, p.016121 (2002).

(平成 20 年 1 月 11 日受付)

(平成 20 年 6 月 25 日再受付)

(平成 20 年 8 月 26 日採録)



青柳 優 (学生会員)

1994 年新潟大学理学部物理学卒業。1996 年北陸先端科学技術大学院大学材料科学研究科物性科学専攻修了。同年防衛庁入庁。OR およびシステム開発に従事。2006 年防衛大学校理工学研究科情報数理専攻修了。現在、防衛大学校理工学研究科後期課程電子情報工学系専攻在学中。電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本シミュレーション学会各学生会員。



生天目 章 (正会員)

1973 年防衛大学校応用物理学専攻卒業。1976~1979 年スタンフォード大学大学院修士課程および博士課程 (システム・経済学専攻)。1987~1988 年ジョージメイソン大学客員助教授。現在、防衛大学校情報工学科教授。マルチエージェント, 複雑系科学, ゲーム理論, 意思決定等の研究に従事。著書『マルチエージェントと複雑系』(森北出版),『戦略的意思決定』(朝倉書店),『ゲーム理論と進化ダイナミクス』(森北出版),『Adaptation and Evolution in Collective Systems, Advance in Natural Computation – Vol.5』(World Scientific) 等。進化経済学会, AAAI, ACM, IEEE 各会員。