

マルチエージェント・システムによるリーダーおよび群れの創発

佐藤 尚[†] 橋本 敬[‡]

北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科

〒923-1292 石川県能美郡辰口町旭大1-1

Tel : 0761-51-1882

e-mail : stakashi@jaist.ac.jp[†], hash@jaist.ac.jp[‡]

あらまし

多数の個体が調和的活動を行う「群れ」は社会を構築する上で基盤となる。したがって、社会システムを研究するために群れの形成メカニズムを探ることは重要であると考えられる。本論では、信頼行動という相互作用と内部ダイナミクスにより、どのような群れが形成され、群れがどんな性質を持つかをマルチエージェント・システムにより研究する。「信頼行動」は人間関係の形成に重要な役割を果たしており、ここでは、それを「相手を疑わず、頼ること」という意味で捉え形式化する。計算機実験の結果として、自発的な階層化によって群れが生成されることを示す。また、行動パターンを非一様にしたモデルでは、一様にした場合より群行動が長く維持されやすいことが分かった。

キーワード 群れ、群行動、信頼行動、内部ダイナミクス、自発的階層化、マルチエージェント・システム

Emergence of Leaders and Swarms in Multi-Agent System

Takashi Sato[†] Takashi Hashimoto[‡]

School of Knowledge Science,

Japan Advanced Institute of Science and Technology

Address : 1-1, Asahidai, Tatsunokuchi, Ishikawa 923-1292, JAPAN

Tel : 0761-51-1882

e-mail : stakashi@jaist.ac.jp[†], hash@jaist.ac.jp[‡]

Abstract

A swarm in which individuals act in concord with each other is the basis of society. Therefore, it is important to investigate the formation mechanism of the swarm to study social systems. In this paper, we study how the swarm is formed and what properties it comes to have through the interaction of the trust behavior and internal dynamics with a multi-agent system. The "trust behavior" plays an important role in human relationships. It is thought of as here that "a person has no doubt of another one and counts on him/her." As results of computer simulations, the swarms are formed in terms of spontaneous stratification of agents. The swarms can be maintained longer in the non-uniform type model than in the uniform type.

key words

Swarm, Swarming Behavior, Trust Behavior, Internal Dynamics, Spontaneous Stratification, Multi-Agent System

1. はじめに

自然界には「群れ」を成し、ある種の社会を形成する生物が数多く存在する。例えば、社会性昆虫はコロニー内外において、各個体が相互作用しながらコロニーのバランスを保っていることが社会性昆虫の研究者によって発見された^[1]。これは社会性昆虫が個々の相互作用により群れ全体を高度に自己組織化しているということを裏付けるものである^{[1]-[3]}。我々人間も群れを成し、社会を形成している種の一つである。先に示した社会性昆虫が作る社会と大きく異なる点は、人間の作る社会が非常に複雑であることと、人々の間に信頼が存在しなければ人間の社会は成り立ち得ないことである。信頼が必要である理由は、信頼が人々の間の、あるいは組織の間の社会的な関係を形成する上で潤滑油の働きをし、信頼なくしては、社会関係や経済関係を含む全ての人間関係の効率が著しく阻害されることになるからである^[4]。

上の例より、多様な機能を実現するための社会を構築する上で、複数の個体が群れを成し相互に作用することは重要であると考えられる。取り分け人間社会においては、他者を信頼して行動するということが社会を高度に発展させていく上で重要であろう。

社会の形成プロセスにおいて更に重要なものとして、群れの各構成員の内部ダイナミクスが挙げられる。生物は自分の内部状態が変化することによって行動を変化させる。この内部状態は環境や他個体など外からの影響を受けて変化するだけでなく、入力がない状態でも変化する。生物の群を表現するモデルとしてはReynoldsのBoidがある^[5]。このモデルでは、いくつかの簡単なルールに従うエージェントが群れとして非常に多様な振る舞いを見せ、その動きはまるで本物の鳥や魚などの群れの動きを見ているかのようである。しかし、階層的な群れ構造や分業といった、社会において重要だと考えられる性質を示すには至らない。社会において、個体は同じ入力に対して常に同じように反応するのではなく、多様な振る舞いを行う。これは内部状態の変化が影響して同じ入力に対する解釈の仕方を変えることにより対応する出力が変わったからと説明できる。したがって、群れを構成するエージェントに多様な振る舞いを発生させ複雑な構造の群れを形成する上で、内部ダイナミクスは重要な役割を果たすと考えられる。しかしながら、群れの形成プロセスにおいて、個々の相互作用と内部ダイナミクスとの関係についてはあまり研究されていない。

本論では、他者を信頼することによって関係付けられる人間の群れを対象とし、まず、その群れがどのように形成されるのかを見る。さらに、群れの形成および維持において重要と考えられる個々の相互

作用に対して、内部ダイナミクスがどのような影響を与えるのかということを調べる。

2. マルチエージェント・システム

本研究では、群れ形成に対して内部ダイナミクスと個々の相互作用がどのように関係するのかということ調べるために、マルチエージェント・システムをコンピュータ上に構築し、シミュレーション実験を行う。このシステムは、空間を移動しながら他個体と相互作用する複数のエージェントで構成される。ここでは、まず、上で述べた「他者への信頼に基づく行動」（以下、信頼行動）を形式化し、その信頼行動を基本行動とするエージェントを定義する。

2.1 信頼行動の形式化

他人を信頼するということは人間社会においてよく見られる。これは複数の人間が行動を共にする上で、重要な役割を果たすと考えられる^[4]。この信頼の辞書的な意味としては「信じて頼ること」とある^[6]。ここでは、信頼を「相手を疑わず、たのみとする」という意味で捉え、信頼行動を次のように形式化する：1) エージェントが他個体と遭遇した際、互いに相手の特徴づける要素（身体的特徴やその人の評判など）を調べる。2) 好印象を得た相手に対して信頼関係を結ぶ。3) 信頼した相手が発したメッセージを受理する。4) 受け取ったメッセージに従って行動する。なお、このとき交わされるメッセージは、発した本人およびその外的要素（他個体や環境など）によって「真」であると保証されないにもかかわらず受理されるものとする。

2.2 信頼行動を行うエージェント

メッセージの宣言、受理および移動

ここでは、上で形式化された信頼行動を実行するエージェントをより具体的なモデルとして定義する。エージェントは初期にエージェントIDが割り当てられる。また、 ch と th の二つの内部変数を持つ。 $ch(0.0 < ch < 1.0)$ は、エージェントの魅力や評判などを表し、 $th(0.0 < th < 1.0)$ は、エージェント自身の他個体への信頼し難さの程度を表す。

エージェントは空間中を移動することができる。移動する際、自分がどの方向へ移動するかということメッセージとして隣接サイト（ノイマン近傍＋自分の位置）に宣言する。

エージェントが他個体と遭遇したとき、そのエージェントは隣接サイトを占める個体（以下、隣接個体）のうち最大の ch と自分の th を比較する^[7]。もし、注1) 複数の隣接個体が等しい ch を持ち、それが最大の場合は、エージェントIDが最小の個体を選ぶ。

隣接個体の最大 $ch \geq$ 自分の th であれば、その ch を持つエージェントを信頼することにし、その個体の宣言したメッセージを受理する。

メッセージの受理が終わると、各エージェントは移動を行う。他個体を信頼するエージェントは信頼相手の宣言した方向へ移動する。信頼する相手がいないエージェントは自分の宣言した方向に確率 hp で移動する。

エージェントの内部ダイナミクス

我々は行動へ影響を及ぼす人間の内部状態の変化を重要視し、モデルに対して非常に単純化した形で組み込んだ。すべてのエージェントは次の式(1)~(4)に従う内部ダイナミクスを持つ(図1参照)。

$$ch(t+1) = \begin{cases} r_H^{ch} \cdot ch(t) + (1.0 - r_H^{ch}) \cdot L^h & (1) \\ r_D^{ch} \cdot ch(t) + (1.0 - r_D^{ch}) \cdot l^h & (2) \end{cases}$$

$$th(t+1) = \begin{cases} r_D^{th} \cdot th(t) + (1.0 - r_D^{th}) \cdot L^h & (3) \\ r_H^{th} \cdot th(t) + (1.0 - r_H^{th}) \cdot l^h & (4) \end{cases}$$

ここで、 $ch(t)$ および $th(t)$ は、step t の内部変数の値を表す。 r_H^{ch}, r_D^{ch} ($0.0 < r_H^{ch}, r_D^{ch} < 1.0$)は、内部変数を更新する際、エージェントが自分の宣言通り移動したときに用いる ch と th の変化率である。 r_D^{th}, r_H^{th} ($0.0 < r_D^{th}, r_H^{th} < 1.0$)は宣言通り移動しなかったときに用いる変化率を表す。また、 L^h, l^h および L^h, l^h はそれぞれ各内部変数の上限値、下限値を表す。

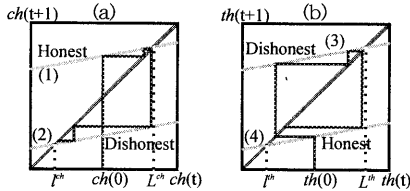


図1. (a)内部変数 ch 、(b)内部変数 th のダイナミクス

エージェントの宣言した移動方向と実際に移動した方向が同じ場合、そのエージェントの ch は、図1(a)の「Honest」と示された直線(式(1))に従って増加する。そのエージェントを信頼している全ての個体の th は、図1(b)の「Honest」と示された直線(式(4))に従って減少する。一方、宣言方向と実際に移動した方向が異なる場合、 ch は図1(a)の「Dishonest」と示された直線(式(2))に従って減少し、その個体を信頼している全てのエージェントの th は図1(b)の「Dishonest」の直線(式(3))に従って増加する。

すなわち、この内部ダイナミクスは、信頼を裏切ると ch が下がり、裏切らなければ ch が上がる、また、裏切られると th が上がり、裏切られなければ th が下がる、というものになっている。

群れと群行動

本システムにおける、群れおよび群行動を定義する。ここで云う「群れ」とは、三個体以上のエージェントが信頼関係を形成している状態を指す^{注2}。また、「群行動」とは、上記群れが信頼関係を維持しつつ、移動することとする。

3. シミュレーション実験の結果

本研究では、エージェントの内部ダイナミクスと群れの形成の関係を調べるために、エージェントの行動パターンが異なる二つのモデルを比較する実験を行う。一方のモデル($hp=ch$ モデル)は、この行動パターンを内部変数に依存させるものである。ここではその関係を最も簡単に $hp=ch$ という形で導入する。これは ch の値が大きいエージェントほど、宣言通り移動しやすいことを意味する。もう一方($hp\&ch$ モデル)は、行動パターンが外からの影響力により決められるモデルである。ここでは、その外的影響力を、エージェントの内部変数とは独立に全個体で同じ値をとる hp を設定することで表現する。このモデルは、全てのエージェントの行動パターンが hp によって決まるため、非常に単純化したある種の社会的規範を hp で表現したモデルといえる。

コンピュータシミュレーション実験ではエージェント数は100、空間は 50×50 の周期境界を持つ2次元空間で、複数のエージェントが同一サイトに入ることができる。ここでは簡単のため、 $r_H^{ch} = r_D^{ch} = r_H^{th} = r_D^{th} = r_H^{ch} = r_D^{ch} = r_H^{th} = r_D^{th} = L$ とし、 $l^h = l^h = l = 0.01$ に固定する。更に、 $hp\&ch$ モデルの L は0.99に固定する。全エージェントの内部変数の初期条件は $ch(0)=th(0)=0.5$ である。

3.1 自発的階層化による群れ形成とエージェント・タイプの分化

エージェントは他個体と相互作用していくうちに ch と th の値が変化していく。これによりエージェント間で ch および th に格差が生じる。この格差が生じることにより、信頼する側とされる側という階層化が生じ、この関係によって群れが作られる。この階層化の様子を図2に示す。

$hp=ch$ モデル(図2(a))においては、 L が高いときは高い ch を持つ個体と低い ch を持つ個体とに分かれるようになり、明確な階層化が生じている。このとき、次節に示すように大きな群れが現れる。一方、 $hp\&ch$ モデルの場合(図2(b))、 $hp=0.8$ の設定のときに階層化は見られるが、 $hp=ch$ モデルほどには階層間の差は開かない。また、 $hp=0.99$ では殆どの個体で $ch \geq 0.9$ と注2) 2つのエージェントがたまたま隣接して信頼関係を形成する場合がある。しかし、その場合の信頼関係は壊れやすい。ここでは、そのような偶然性を排除するために「三個体以上」という制約を設けている。

なり、 $hp=0.5$ では一様に分布するのでどちらの場合も階層化が見られず、安定した群れはできにくい。

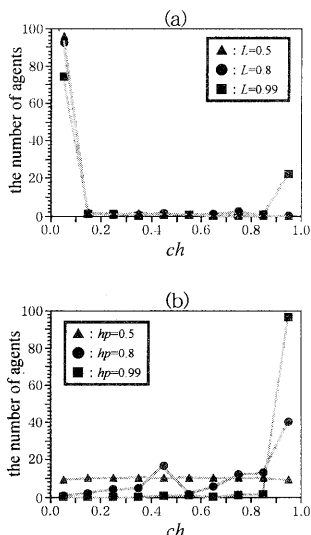


図2. ch の分布。横軸は幅0.1で10段階に分けた ch を示しその範囲の ch を持つエージェント数（1 stepあたりの平均）を縦軸に示した。(a) $hp=ch$ モデル、(b) $hp\&ch$ モデル。

群れを構成するエージェントは表1の三種類に分化した。この三つのタイプは内部変数の関係から見分けられる。本実験で見られた群れの殆どは、一個体の $leader$ ないし $charisma$ とそれに付き従う複数の $believer$ によって構成されていた。

表1. 三種類のエージェント。群れの構成するエージェントの内、 i はあるエージェント、 j は i 以外の全てのエージェントである。

	振る舞い	内部変数の関係
$charisma$	群れの全構成員から信頼され、それらを信頼しない	$ch_i > ch_j, ch_i \geq th_j, th_i > ch_j$
$leader$	群れの全構成員から信頼され、その中の1個体を信頼する	$ch_i > ch_j, ch_i \geq th_j$
$believer$	他個体を信頼する	制限なし

3.2 群れのサイズ

$hp=ch$ モデルと $hp\&ch$ モデルにおける群れサイズ（すなわち、一つの群れを構成するエージェントの数）を比較する。図3に示される平均群れサイズは式(5)で測った。

$$\text{平均群れサイズ} = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T \frac{1}{N(t)} \sum_{i=0}^{N(t)} S_i(t) \quad (5)$$

ここで、 $S_i(t)$ はstep t の i 番目の群れサイズ、 $N(t)$ はそ

の時点での群れの数、 T はシミュレーションを行った総step数である。

図3に示されているように、平均群れサイズは殆どのパラメータ領域で、 $hp\&ch$ モデルの方が $hp=ch$ モデルよりも大きい。しかし、 $hp=ch$ モデルでは平均群れサイズは L に対して指数関数的に増加し、 $L > 0.9$ では $hp\&ch$ モデルよりも大きくなっている。

$hp\&ch$ モデルにおいて、群れサイズは hp に対して大きく変化しない。これは、全てのエージェントの行動が hp に依存し、全個体の内部変数が殆ど同じように変化するためである。 hp が小さい場合には、ほぼ連続的な ch が分布し(図2(b)、 $L=0.5$)、群れを率いる個体が裏切った際に、直ぐに別のエージェントに取って代われ群れは大きくならない。 hp が大きいときは、エージェント間の差が生じず(図2(b)、 $L=0.99$)、この場合も大きな群れは形成されない。一方、 $hp=ch$ モデルでは、エージェント間に大きな格差が生じる。このモデルは各エージェントの ch に自らの行動が影響を受けるため、 ch の最大値である L が低い場合はその値まで ch を到達させたエージェントでも、その値を保持し続けることは難しい(図2(a)、 $L=0.5$)。しかし、 L を高い値に設定すると、それに伴って大きい ch を持つエージェントが生まれるようになり、エージェント間に大きな格差が生じる。すなわち、少数の $leader/charisma$ と多数の $believer$ という比率になる(図2(a)、 $L=0.99$)。

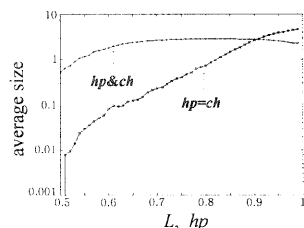


図3. 二つのモデルにおける群れのサイズの比較。横軸は $hp=ch$ モデルでは L 、 $hp\&ch$ モデルでは hp 、縦軸は平均の群れサイズを対数でとった。 $r^a=r^b=0.5$ である。

3.3 群行動の持続時間

次に、5000step（6000step中、最初の1000stepはランジェントとして廃棄）の実験での群行動持続時間（同じ $leader$ または $charisma$ が群れを率いて移動している間の連続step数）の平均を図4に示す。

図4に示されているように、 $hp=ch$ モデルの平均持続時間が L に対して指数関数的に増加していることが分かる。一方、 $hp\&ch$ モデルの場合、殆どのパラメータ領域において $hp=ch$ モデルの平均持続時間より下回っており、群行動を長く維持できていないことが分かる。また、 $hp=ch$ モデルと比べて大きく異なる点は、 hp を大きく設定したとしても、群行動の平均持

続時間は大きく増大しないことである。特に、 hp を0.9以上に設定した場合、逆に平均持続時間が減少している。

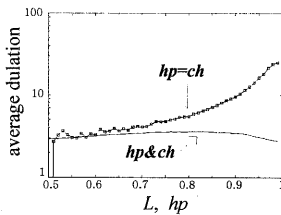


図4. 二つのモデルにおける群行動持続時間の違い。縦軸は平均持続時間の対数をとったもので、横軸は $hp=ch$ モデルの場合は L 、 $hp&ch$ モデルの場合は hp である。

群行動の持続時間は、群れを率いているエージェントのタイプに影響を受ける。たとえば、*leader*が率いる群れは、その*leader*が群れの中の他個体を信頼してしまい、自分の宣言ではなく信頼した相手の宣言通りに動くため、*believer*全員の信頼を裏切ってしまう確率が高くなる。したがって、*leader*が率いる群れの群行動持続時間は長くなりにくい。しかし、*charisma*が率いる群れは、*charisma*以外のすべてのエージェントが完全に*charisma*を信頼する。そして、*charisma*は他のエージェントを信頼することはないので、*charisma*が宣言無視をしない限り群行動持続時間は延びる。また、 $hp=ch$ モデルにおいては、 L の値が大きいほど、宣言無視をしにくい（高い ch を持つ）*charisma*が発生するために、群行動持続時間が延びている。よって、群行動持続時間は、強く L に依存していると云える。一方、 $hp&ch$ モデルでは、 hp を大きく設定した場合に、殆どのエージェントが自らの ch を高めるため、個体間格差が生じにくい。したがって、*charisma*が発生しにくくなり、その結果として、群行動の持続時間は短くなるのである。

3.4 群行動の生成と崩壊

エージェントの行う群行動を観察してみると、局所的にはエージェント同士で、大局的には群れ同士で相互作用しながら、複数の群れが生成と崩壊を繰り返していることが分かった。エージェントは相互作用としての信頼行動によって内部変数の値を変化させ、その結果として非対称関係という階層化を自発的に起こした。この階層化により、 ch と th の値の関係から信頼する者と信頼される者とに分かれ群れは形成される。

一方、群れが崩壊するときには、以下に示す二種類のパターンがあることが分かった。

- ・ *leader/charisma*が、宣言無視をして ch を減少させ、*believer*の th よりも低くなる場合

- ・ 群れと群れが衝突する場合

さらに、 $hp=ch$ モデルにおいて、一つの群れの中で群れを率いる個体が交替したり、群れと群れが衝突したとき、それらが崩壊するだけでなく一つの群れに合体するという振る舞いも見られた。群れの合体に注目してみたところ、二個体存在した*charisma*の内、片方が*leader*となって合体した群れを統率するが、直ちに、もう片方のエージェントに入れ替わり、それが*charisma*として群れを率い始めるという様子も観察された。

3.5 内部変数の変化率による違い

内部変数の変化率(r^{ch}, r^{th})の設定による結果の違いを見てみると、 $hp=ch$ モデルにおいては、 r^{ch} を小さく（すなわち、一回の変化を大きく）した方が群れのサイズ、数ともに大きくなっていることが分かった。また、 r^{th} の変化は群れのサイズに殆ど影響を与えていない。一方、 $hp&ch$ モデルにおいては、変化率の設定による大きな違いは殆ど見られない。

4. 議論

我々のモデルでは、すべてのエージェントの ch および th の初期値を同じ値にしているにも関わらず、局所的な相互作用としての信頼行動を通じた内部ダイナミクスにより、信頼される者と信頼する者という階層化が自発的に起き、その結果として群れが形成されることが確認された。ここで見られた群れを率いる*leader*ないし*charisma*はエージェント同士の信頼行動という相互作用から生まれた。つまり、信頼行動が対等な関係の均衡状態を崩すことで、群れを率いる先導者を生み出したわけである。このような結果は、どのような場合にどういったリーダーが存在するかという記述的なリーダーシップ論に対して、いかにしてリーダーが生まれるかというダイナミクスを示しており、リーダーの形成プロセスに関する研究において構成論的アプローチが有効であることを示唆するものである。また、パワー(社会的勢力)研究では、影響者が自分自身の私的な目標を設定して被影響者に働きかける場合、リーダーシップとは区別して「権力の行使」と呼んでいる^[7]。このような観点からは、*charisma*を群れの中の権力者と見ることもできる。

エージェントは自発的に三種類に分化し群れが作られる。特に、 $hp=ch$ モデルにおいては、大きい L の値を設定した場合、高い ch を持つ*charisma*が発生しやすくなるため、それに伴い群行動持続時間が延びる。では、高い ch を持つ*charisma*が率いる群れの構造は固定化されるのだろうか。実際はいくら高い ch を持つ*charisma*といえども、100%宣言通りに移動する

わけではないので、*charisma*が宣言無視をしたとき *charisma*の*ch*に匹敵する*ch*を持ったエージェントが群れに存在するならば、先導者の交替はあり得る。事実、実験では群れの中の信頼関係の構造が動的に変化する様子が観察されている。また、群れと群れの合体による先導者の交替という振る舞いも観察された。このような群れによる振る舞いは現実世界において見られる様々な社会的な関係のダイナミクスを非常に抽象化したものとして捉え直すことができる。例えば、マルチエージェント・システム全体をある政党に、その中で形成される群れを政党内の派閥に対応付けたとすると、群れにおける信頼関係のダイナミクスは政党内派閥の離合集散ダイナミクスとして解釈することができる。よって、行動心理学等から得られた知見を補うことにより、更に現実的な人間の群行動シミュレーション実験が可能であると思われる。

本研究では、内部ダイナミクスが直接エージェントの行動に影響を与える $hp=ch$ モデルの方が直接影響を与えない $hp\&ch$ モデルよりも、群れをより長く保持することが確かめられた。また、 $hp=ch$ モデルにおいて、群れの数およびサイズが L に対して指数関数的に増加することが見られた。これは、エージェントの行動に掛かる制限の緩和というある種の環境の変化に応じた振る舞いをするという $hp=ch$ モデルの性質を示している。逆に、 hp および L を低い値に設定した場合、 $hp\&ch$ モデルの方が群れの数、サイズにおいて、 $hp=ch$ モデルよりも優位であることが確かめられた。個々の相互作用によってある種の自己組織化を見せる $hp=ch$ モデルを多様行動型あるいは自律分散型システム、独立に設定した変数によって強い影響を全エージェントが受ける $hp\&ch$ モデルを一様行動型あるいは中央管理型システムと解釈するならば、二つのモデルを比較する実験で得られた結果は、環境から一定の割合で掛かる制限が少ない場合には、自律分散型システムが中央管理型システムよりもロバストな振る舞いを見せ、環境により適応するシステムであることを示唆する。一方、逆に制限の多い環境においては、自律分散型システムが有効な構造を自己組織化できず、それに対して中央管理型システムは優位となることを示唆するものである。

本システムにおいては、パラメータの値をどのように設定しようとも、上で述べた群れの型以外に、より多様かつ柔軟な信頼関係で結ばれた群れが安定した群行動を発生させることはなかった。これはエージェントがお互いに発したメッセージを受理し合った場合、群れとして同一方向へ移動すること、または、それらのエージェントが隣接し続けることが確率的に発生しにくいということと、相互に信頼関係を結ぶことを一組の間でしか許さない（つまり、相互信頼関係が一組できて、その関係が維持されている間は、その二つのエージェントから他の個

体に対して信頼関係が結ばれることはない）という非常に単純化したモデルにしたことが原因である。

したがって、エージェント同士で信頼し合っている状態（つまり、一方的なメッセージの授受ではなく、全てのエージェントがお互いにメッセージを送受可能な状態）は、本モデルでは形成することができないのである。図5に示されるような多様な信頼関係がエージェント間で結ばれるようになるためには、本モデルで組み込まれなかった、エージェント同士による宣言の交渉および記憶、複数個体との相互信頼関係の形成、メッセージの伝播などについて考慮する必要がある。

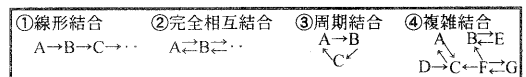


図5. 実験で見られなかった信頼関係パターン

5. おわりに

本論では、信頼行動という相互作用と内部ダイナミクスにより、どのような群れが形成され、群れがどんな性質を持つかをマルチエージェント・システムにより研究した。その結果として、自発的な階層化による群れの生成を示した。また、自律分散的なモデルでは、群行動が長く維持されやすいことが分かった。マルチエージェント・システムを用いる研究は、動物行動学や行動生態学といった現実世界におけるフィールドワークと相補的な関係にあり、より有意義な成果を得るためには、相互に成果を反映させつつ研究を発展させねばならないだろう。

6. 謝辞

本研究を進めるにあたり、北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科橋本研究室の皆様には、数多くの議論に参加していただき、また本研究室の計算機環境を整えていただきました。ここに感謝の意を表します。

7. 参考文献

- [1]松本忠夫, 東正剛, "社会性昆虫の進化生態学", 海游舎, 1996.
- [2]酒井聡樹, 高田壮則, 近雅博, "生き物の進化ゲーム-進化生態学最前線: 生物の不思議を解く-", 共立出版, 1999.
- [3]Detrain, C., Deneubourg, J.L., & Pasteels, J.M., "Information Processing in Social Insects", Birkhäuser, 1999.
- [4]山岸俊男, "信頼の構造-こころと社会の進化ゲーム-", 東京大学出版会, 1998.
- [5]Reynolds, C.W., "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model", *Computer Graphics*, 21(4), pp.25-34, 1987.
- [6]新村出(編), "広辞苑", 岩波書店, 1991.
- [7]狩野素朗, "対人行動と集団", ナカニシヤ出版, 1995.