

Ant System: フェロモン相互作用モデルによる社会的知能に関する考察

山本 仁志
Hitoshi Yamamoto

電気通信大学大学院
情報システム学研究科
hitoshi@is.uec.ac.jp

太田 敏澄
Toshizumi Ohta

電気通信大学大学院
情報システム学研究科
ohta@is.uec.ac.jp

要旨:

個体間の相互作用によって創発する集団の適応的な行動は、人工知能や最適化の分野で着目されているが、社会科学的領域においても重要な意義を持つ。単純な個体の相互作用から複雑な挙動が創発する例の代表的なものとして Ant System が挙げられる。Ant System は、アリの群におけるフェロモンを用いたコミュニケーションを基盤にして、マクロな制御機構を持たないシステムが個々の相互作用ルールのみによって、適応的に集団として効率的に機能するメカニズムをモデル化したものである。本小論は、Ant System を MAS 上に実装することで、フェロモン相互作用から適応的な集合的秩序が生成する過程を観察可能にした。更に、フェロモン濃度の変化を、企業活動における成功市場への集中度として表現することで、企業を取り巻く市場環境の変化に対して、企業がどのような戦略を選択すべきかの指針を与える。

キーワード:

Ant System, Agent-Based Approach, R&D, Social Intelligence, Emergent Behavior

1. はじめに

個々の要素の相互作用がもたらす集合的秩序生成のメカニズムを理解することは、社会制度や企業戦略を設計するための重要な基盤となる。本研究では、集合的秩序を「さまざまな特性を備えた自律的な個人が相互作用をおこなった結果出現する大域的なパターンや全体的な傾向」と定義する。個人の行動がもたらす大域的なパターンの理解は、古くから研究の対象であった。例えば Hayek(1976)は、自生的秩序を「人々が社会で行為するとき、ある特定の目的の達成を意図することなく、生み出されるパターンあるいはルールのこと」と表現し、景気の循環を自生的秩序の一例として説明した。近年の情報技術の発展は、動的過程を記述・追跡する計算機シミュレーションを可能にした。

社会現象をモデル化するアプローチとして、個々の行動要素を Agent として記述し、Agent 間の相互作用ルールを規定することで現象を理解する、Agent-Based Approach が着目されている(Axelrod,1997)。Agent-Based Approach は、社会で観察される複雑な振舞いは、個々の相互作用の結果として創発するという考え方に基づいている。本研究では、創発を、「要素の集合とその相互作用ルールで定義されるシステムが、相互作用を繰り返した結果、演繹的な手法では予見することが困難な振舞いをみせること」と定義する。こうし

た、相互作用のダイナミクスをもつシステムの挙動を解析的に分析することは、非常に単純なシステムに対しても困難であり、シミュレーションを用いる必要がある(例えば Wolfram(1986)など)。社会現象の多くは、内部状態を持つ個々の要素(要素とは、人であったり、組織であったり、様々である)が、環境と相互作用をしながら意思決定をおこない、その結果が環境にフィードバックされるという構造になっている。このような構造を持つ社会における創発現象を理解するためには、ダイナミクスの記述能力に優れた Agent-Based Approach が有用であるといえる。

Agent 間の局所的な相互作用から大域的な秩序が生成する代表的な事例として、Ant System がある。アリのような社会性昆虫は、単純な環境認知能力と行動ルールしか持たないと考えられているが、優れた社会的知能を発揮し、餌を効率的に集めている。こうした社会性昆虫の相互作用ルールを応用した研究は多くの分野でなされている。例えば、車谷(2000)は、人工知能の立場からアリの集団的協調行動をモデル化し、挙動を観察している。また、例えば Dorigo et. al.(1996)のようにアリのフェロモンコミュニケーションを巡回セールスマン問題など最適化の領域に応用した研究は、Ant colony optimization(ACO)としてひとつの研究領域として確立している。近年では、アリのフェロモンコミュニケーションを自律分散システムとして実装する試みもなされている(石垣他,2004)。

本研究では、アリが餌を探索し集団で採取する際に、フェロモンと呼ばれる化学物質をコミュニケーション手段として用いる仕組みを、フェロモン相互作用モデルと呼び、その基本的な性質を検証するために、MAS 上に実装する。また、フェロモン相互作用の強弱は、過去の状態への依存度合いと解釈できる。これを、過去の成功体験への依存度合いと解釈することで、市場の環境変動に対して、望ましい企業の R&D に対する投資戦略を Ant System を用いて考察することが可能になった。

2. Ant System のモデル化

Ant System は、創発の事例として非常に特徴的である。第一に、要素であるアリは、マクロのゴール(効率的に餌を集める)を知らない。更に環境の認知も限定できである。行動ルールは、フェロモンと呼ばれる化学物質を追跡することと、餌を入手したらフェロモンを散布しながら巣に帰るといふ、非常に単純なものである。個々のアリの行動をコントロールする集約的な制御機構は存在しない。このような局所的でかつ単純な行動ルールしか持たないにもかかわらず、アリのコロニー全体を観察すると、非常に柔軟にかつ複雑な挙動をみせつつ餌を効率的に集めている。本研究では、個々の要素であるアリをエージェントとしてモデル化する。また、環境は2次元空間として表現する。

2.1 採餌行動の定式化

本研究では、車谷(2000)に基づいて Ant System を 2.1 節のようにモデル化する。このモデルの概要を以下に示す。エージェントは、「探索モード」「フェロモン誘引モード」「トレイル追跡モード」「帰巣モード」の4つの状態をとる。

【探索モード】

エージェントは初期状態において「探索モード」である。このとき、2次元空間上をランダムウォークする。

【フェロモン誘引モード】

エージェントが空間上にフェロモンを感知すると、「フェロモン誘引モード」に遷移する。このときエージェントは、フェロモン濃度の濃いほうに移動する。

【トレイル追跡モード】

エージェントが空間上にトレイルを感知すると、「トレイル追跡モード」に遷移する。このときエージェントは、トレイルを巣と逆の向きへ辿って移動する。

【帰巣モード】

エージェントが空間上に餌を発見すると「帰巣モード」に遷移する。このときエージェントは、巣に向かって最短距離で移動する。更にこのとき、フェロモンを道筋に残しながら移動する。この道筋に残されたフェロモンをトレイルと呼ぶ。

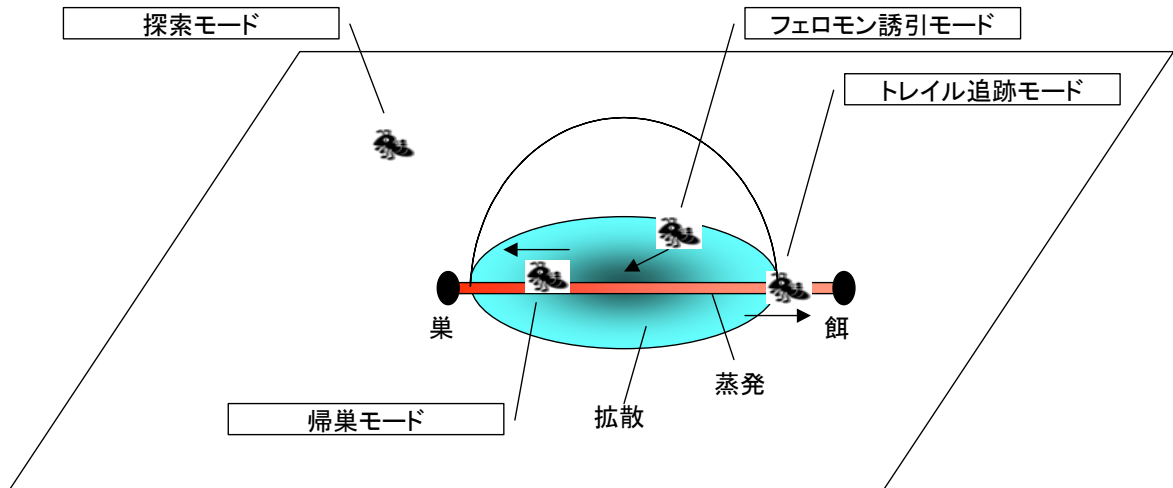


図 1 : Ant System の概念図

図 1に Ant System の概念図をまとめる。この基本モデルに関して車谷(2000)は、アリの多くの種の行動のいくつかの共通項を抜き出して一般化したものである、と述べている。本研究では、トレイルの蒸発及びフェロモンの拡散に関して単純なモデルを仮定し、フェロモン相互作用を実装した。上記のエージェントの状態遷移は図 2のようにまとめることができる。

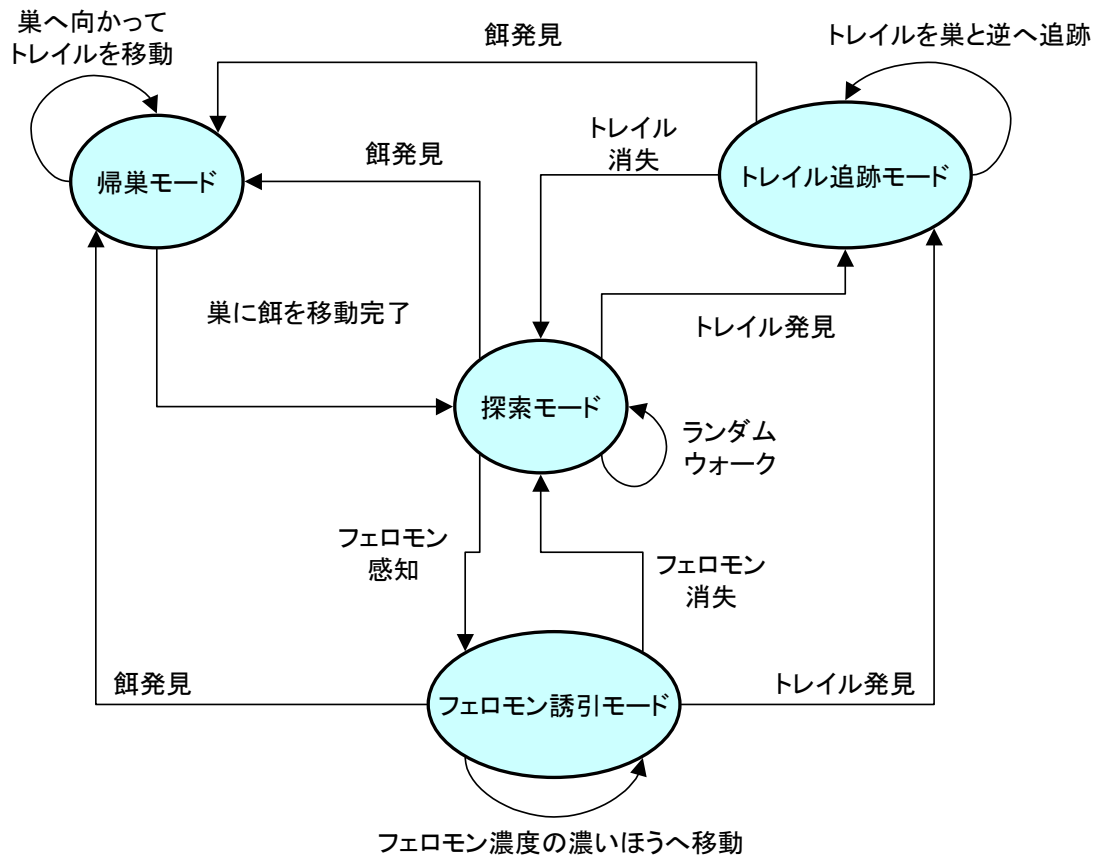


図 2 : エージェントの状態遷移図

エージェントが餌を発見すると、餌場から餌が 1 単位減少し、エージェントが巣まで運搬すると、コロニー全体の餌所有量が 1 単位増加する。エージェントが「帰巢モード」にあるとき、エージェントはフェロモンを一定量 (=100) 道筋に残す。これをトレイルと呼び、トレイル上のフェロモンは時間単位ごとに蒸発し減少する。時間 t における座標 (x,y) のトレイル濃度 $DT(x,y,t)$ を、式 (1) によって表現する。ここで α はトレイル蒸発率である。

$$DT(x, y, t) = DT(x, y, t-1) - \alpha \quad (1)$$

トレイルから蒸発したフェロモンは空間上を拡散する。時間 t における座標 (x,y) のフェロモン濃度を $DF(x,y,t)$ として、フェロモンの拡散過程を式 (2) で表現する。ここで β はフェロモン残存率である。

$$DF(x, y, t) = \alpha/4 \left(\sum_{i,j=-1}^{i,j=1} DF(x+i, y+j, t-1) \times \beta \right) \quad (2)$$

エージェントは、時間=0 において巣穴 $(x=25,y=25)$ にいてすべて探索モードからシミュレーションを開始するものとする。

3. シミュレーション環境の実装

2節で構築したモデルに基づいてフェロモン相互作用を用いた採餌行動のシミュレーション実験をおこなう。シミュレーション実験で操作可能なパラメータを表 1にまとめる。R&D 比率とは、新たな資源の探索行動を主におこなうエージェントの比率である。R&D エージェントは、「フェロモン誘引モード」と「トレイル追跡モード」に遷移しない。基本的に「探索モード」で新しい餌を探索する。餌を発見すると、フェロモンを残しながら巣に戻る。これによって他のエージェントに餌の存在を連絡する。一度巣に戻ると再び「探索モード」で餌を探索する。本節で論じる基礎的な実験においては、R&D 比率=0 に設定する。

表 1：操作パラメータ一覧

パラメータ	説明
トレイル蒸発率	トレイル濃度が単位時間あたりに減少する量
フェロモン残存率	拡散するフェロモンが空間に残存する割合
アリの数	空間上に存在するアリエージェントの数。シミュレーション期間中は一定値
えさ初期値	シミュレーション開始時に出現する餌場の数。シミュレーション期間中は一定値。ただし、アリによって完全に採取された場合、消滅する。
環境変化	シミュレーション中、餌場の位置が変化する時間間隔
R&D 比率	全体のエージェントに占める R&D エージェントの比率

図 3は、シミュレーション実行中の様子を示したものである。各エージェントは、前節で述べたように単純な行動ルールと相互作用しかおこなっていないが、集団として効率的に餌を採取していることがわかる。シミュレータ上で赤いラインで示されているものがトレイルである。色の濃淡で濃度が視覚的に把握できるようになっている。青で示され、空間的に広がっているものがフェロモンである。トレイルと同じように色の濃淡で濃度が表現されている。空間上の中央に巣がある。

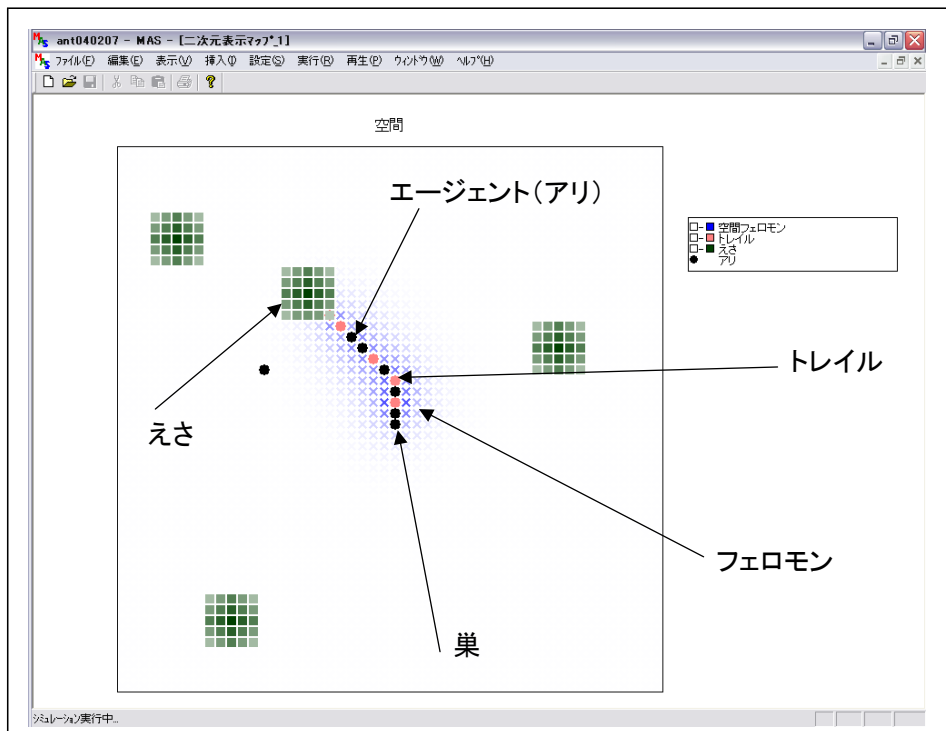


図 3 : シミュレーションの実行状況

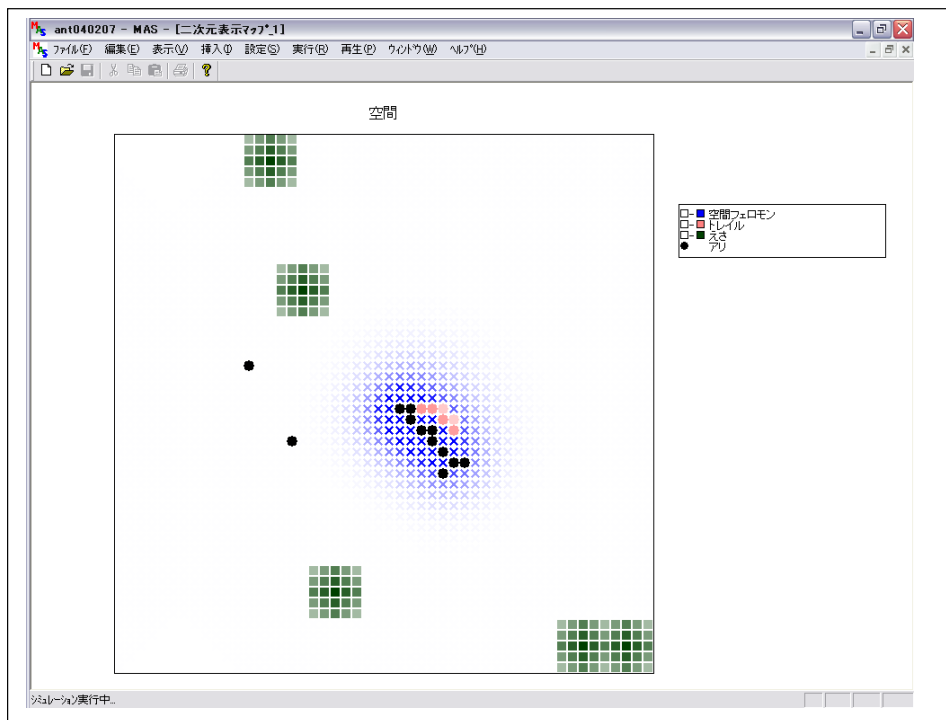


図 4 : シミュレーションの実行状況 (環境変動直後)

図 4は、環境変動直後の様子である。フェロモン及びトレイルが残存しているため、エージェントは、そこに餌がないにもかかわらず、引き続き誘引され続けてしまう。

トレイル蒸発率およびフェロモン残存率は、多く残るようにしたほうがより効率的に他のエージェントを誘引することができるので、餌の採取効率も上がると考えられるが、環境変動がある場合には、むしろ蒸発率が高いほうが柔軟に変動に対応できるとも考えられる。

次節では、トレイル蒸発率およびフェロモン残存率を社会科学的に解釈し、環境変動に対して柔軟に対応できるエージェント集団の条件について探る。

4. シミュレーション実験：環境変動と R&D エージェントの効果

本研究では、トレイル蒸発率とフェロモン残存率の違いを、企業が現在利潤をあげることができる安定的な事業に集中する度合いとして解釈する。ここでは、エージェント社会全体がひとつの企業を表現し、個々のエージェントは企業内のひとつの事業ユニット（もしくは個人）を表現する。環境変動パラメータにより餌の場所が変わることは、企業が参加する市場において、技術革新やニーズの変化などで環境が変わり、利潤をあげることができる事業が変わったことを示す。餌を安定的に連続して収集することが、企業が安定した利潤をあげていることを表現する。トレイル蒸発率が低く、とフェロモン残存率が高いということは、企業は利潤をあげている事業に資源を集約する戦略をとっているということである。逆に、トレイル蒸発率が高く、とフェロモン残存率が低いということは、一度利潤をあげ始めた事業に関しても、多くの資源を連続的に投入するのではなく、他のその事業への投入をある程度抑える戦略をとっているということである。シミュレーション結果をこのような解釈することで、環境変動が大きい市場や逆に環境変動が小さい市場において、どの程度現在利潤の中心となっている事業に集約すべきかを議論するための指針が得られる。

そのためのシミュレーションの観察指標に関して述べる。エージェント社会全体のマクロなゴールは、餌を効率的に収集することである。そのため、全体の餌保有量は重要な観察指標である。次に、社会にとって、環境変動に対してどれだけ柔軟に対応できるかということも重要な目的となる。そこで、「働きエージェント比率」として、全エージェントのうち、餌を運搬している「帰巢モード」エージェントの比率を観察する。これは、企業内の活動で解釈すると、利潤の見込める安定的な事業に従事している割合と考えることができる。表 2は、モデル上の変数と解釈の対応をまとめたものである。

表 2：モデル上の変数と解釈の対応

Ant System モデル	解釈
エージェント	事業ユニット
えさ保有量	企業の利潤
働きアリ率	安定的事業への集約率
トレイル蒸発率・フェロモン残存率	現在利潤をあげている事業へ、どの程度連続的に経営資源を投入するか

4.1 環境変動と戦略に関するシミュレーション

本節では第一に、トレイル蒸発率とフェロモン残存率の違いによる、エージェント社会の環境変動に対する頑健性を議論する。トレイル蒸発率・フェロモン残存率の組合せは、単純化のため、現在の事業に高集中度合いで集約する戦略の場合を、トレイル蒸発率=2、フェロモン残存率=0.75 で表現し、以後の記述では、「現状依存戦略」と呼ぶ。また、低い集中度合いで集約する戦略を、トレイル蒸発率=6、フェロモン残存率=0.6 で表現し、「現状否定戦略」と呼ぶ。

そのほかのシミュレーションパラメータを含めて、表 3にまとめる。

表 3：パラメータの設定一覧

パラメータ	設定値
(トレイル蒸発率, フェロモン残存率)	現状依存のとき(2, 0.75) 現状否定のとき(6, 0.60)
エージェント数	20 エージェント
えさ初期値	5 箇所
環境変動	大きいとき=50 小さいとき=200
シミュレーション時間	1000 ステップ

図 5は、環境変動が小さく、現状依存戦略のときのえさ保有量と働きアリ比率をプロットしたものである。横軸はシミュレーション時間である。図 6は、環境変動が小さく、現状否定戦略のときのえさ保有量と働きアリ比率をプロットしたものである。

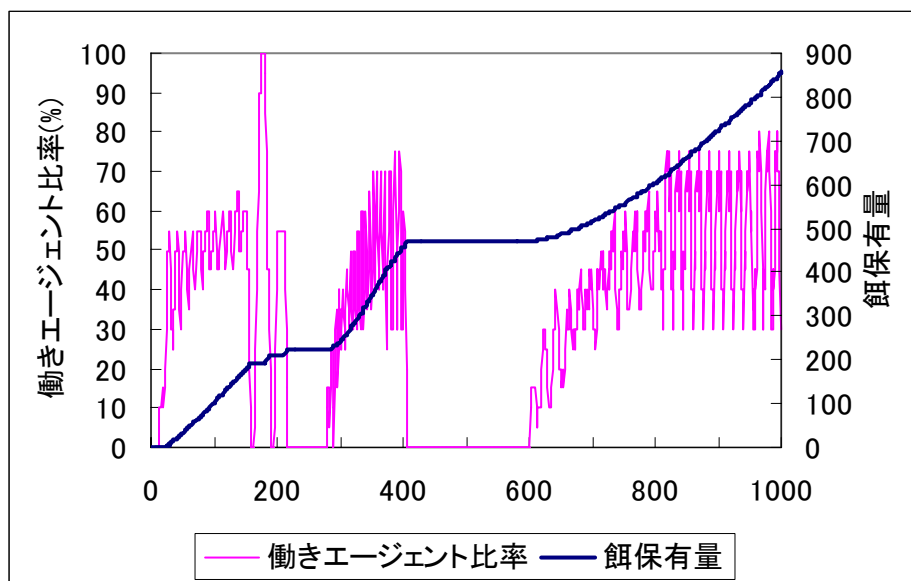


図 5：環境変動が小さく現状依存戦略のときのシミュレーション結果

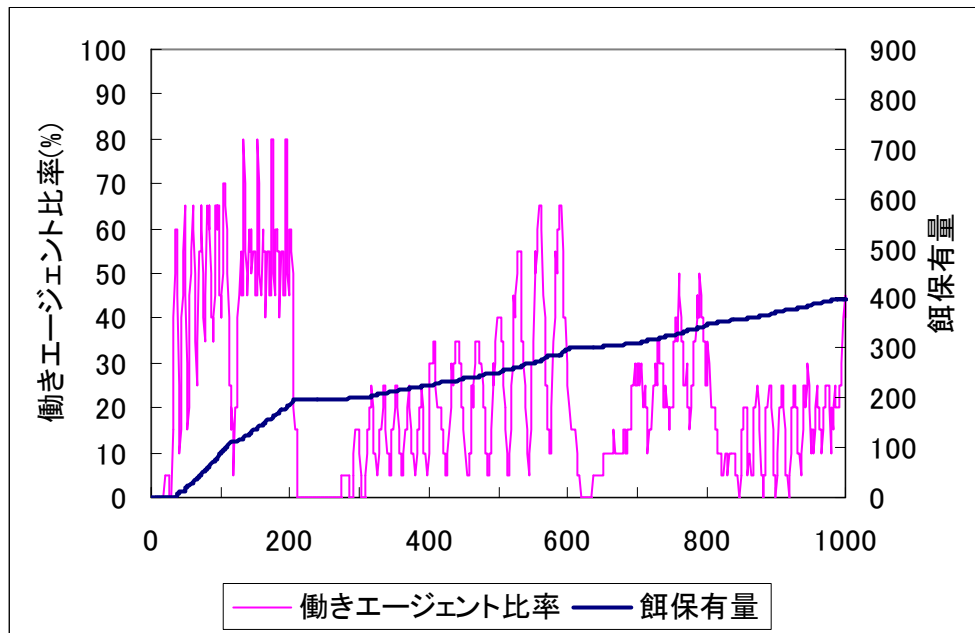


図 6：環境変動が小さく現状否定戦略のときのシミュレーション結果

図 5 および図 6 からわかるように、環境変動が小さい（稀にしか環境が変わらない）環境下では、現状依存戦略のほうが餌保有量において大きく優位となっている。これは安定的な事業環境にある企業は、経営資源の多くを現在の優良事業に投資すべきであるという指針を与える。しかし、現状依存戦略では、シミュレーション時間が 200 および 400 のときに完全に餌を収集できなくなっている。これは、ひとつの餌場にエージェントが集中しすぎたため、環境変化の際に、他の場所を探索できず、長期間にわたって過去の餌場に誘引され続けたためである。これは、安定的な事業環境であっても、経営資源の過度の集中化はリスクが大きいことを示唆する。逆に現状否定戦略では、トータルの餌保有量は少ないものの、常に安定的に利得をあげている。しかし、環境変動が小さいにもかかわらず、連続的に周囲のエージェント誘引しないために、効率的に餌を収集できずに、総利得は小さいままになってしまっている。

続いて、環境変動が大きいときのシミュレーション結果を示す。図 7 は環境変動が大きく現状依存戦略のときのシミュレーション結果である。図 8 は、環境変動が大きく現状否定戦略のときのシミュレーション結果である。

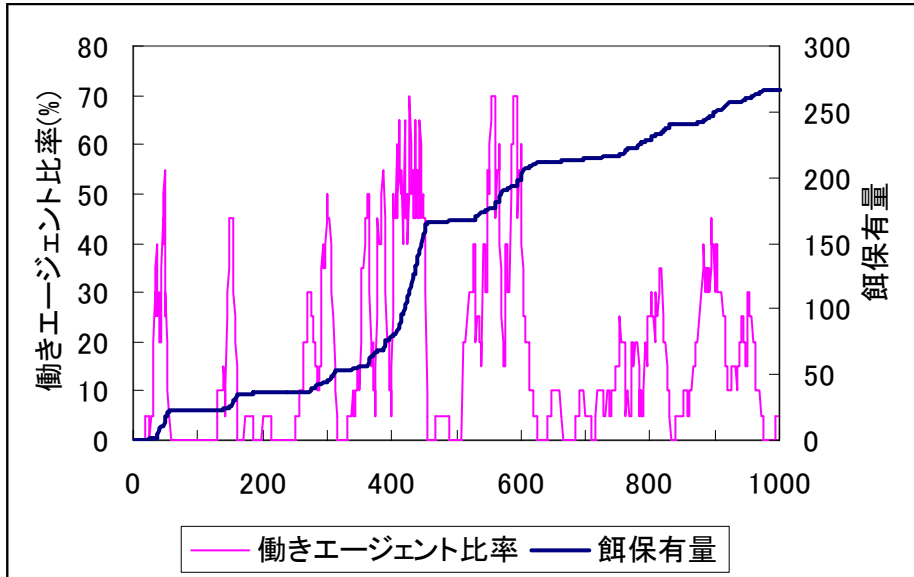


図 7：環境変動が大きく現状依存戦略のときのシミュレーション結果

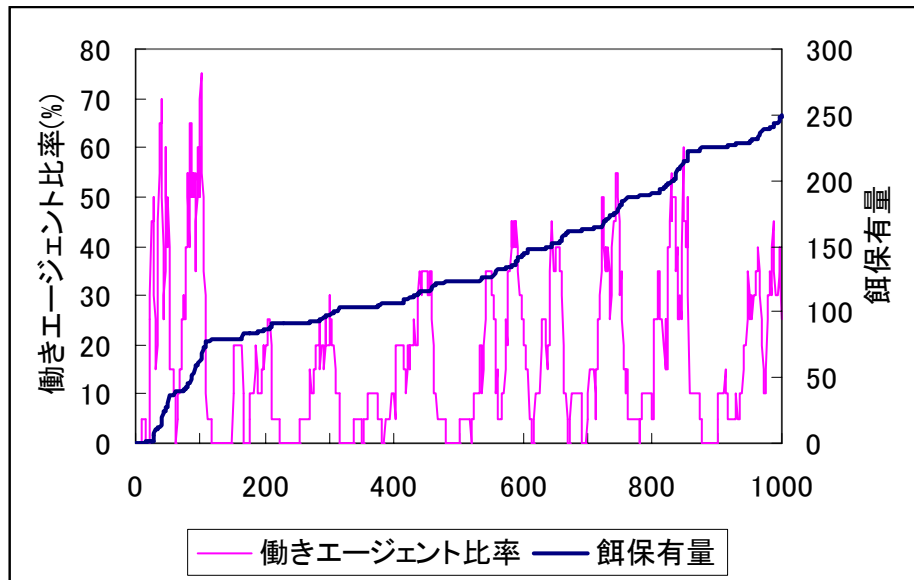


図 8：環境変動が大きく現状否定戦略のときのシミュレーション結果

シミュレーション結果からわかるように、どちらの戦略においても総餌保有量に大きな変化は見られない。しかし、現状依存戦略においては、まったく餌を獲得できない期間が断続的に存在する。つまり、環境変動が小さい状況と比較して、現状否定戦略のほうが相対的に優位といえる。

4.2 R&D エージェントの導入によるシミュレーション

続いて、R&D エージェントを導入したモデルによるシミュレーション実験をおこなう。本研究では、R&D エージェント比率は 30% で実験をおこなった。

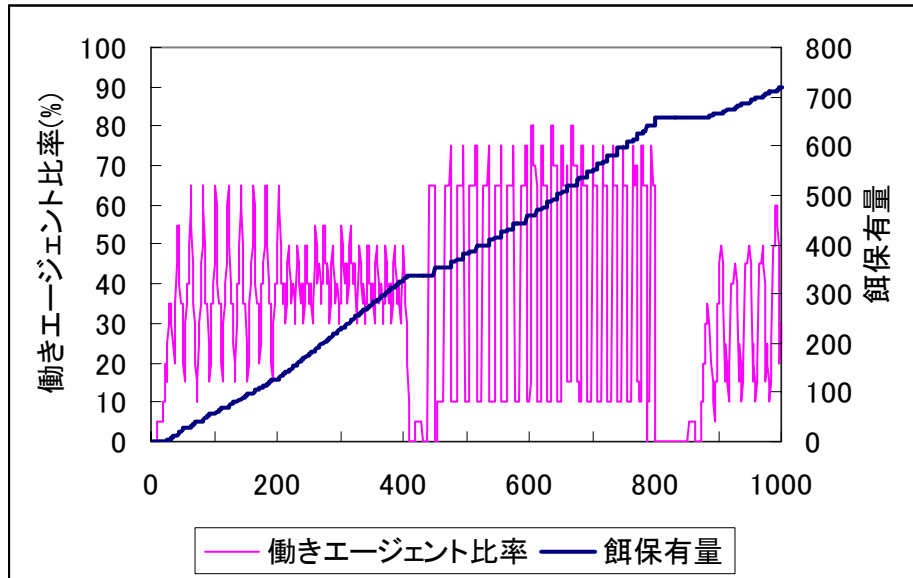


図 9：環境変動が小さく現状依存戦略のときのシミュレーション (R&D エージェントあり)

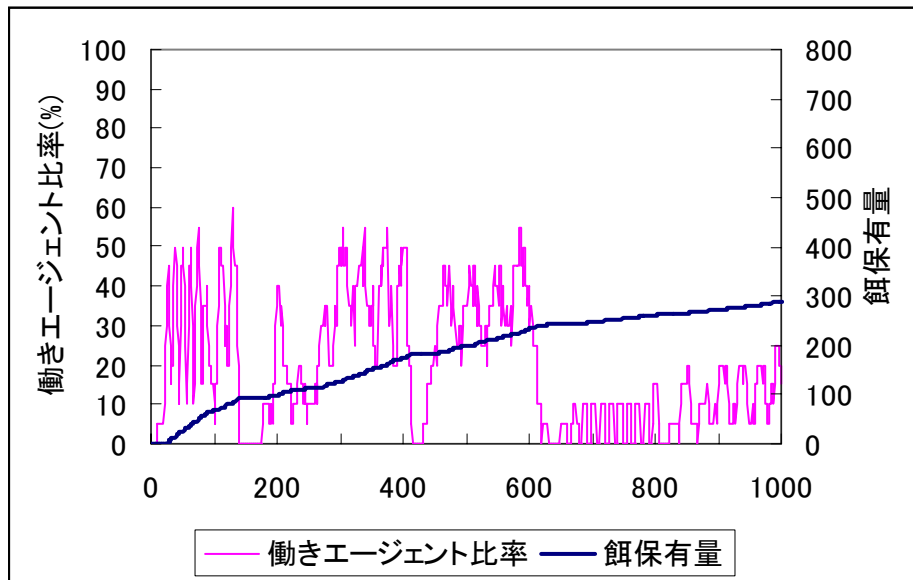


図 10：環境変動が小さく現状否定戦略のときのシミュレーション (R&D エージェントあり)

図 9および図 10からわかるように、R&D エージェントを導入することによって、現状依存戦略は安定的に高い餌の収集がおこなえるようになった。逆に現状否定戦略では、集中的に餌を集める能力が低減してしまう影響が大きく、餌を効率的に集められていない。

続いて、環境変動が大きい環境における実験結果を示す。

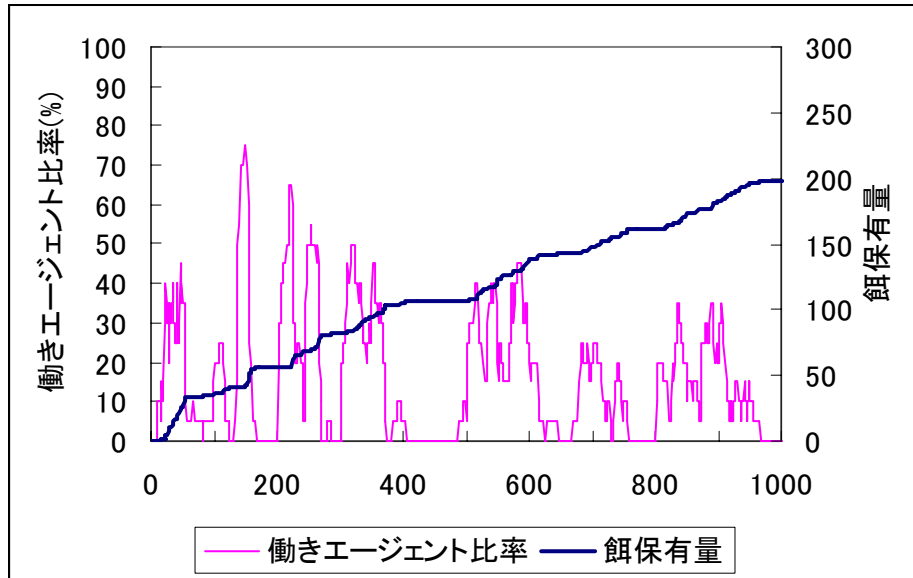


図 11：環境変動が大きく現状依存戦略のときのシミュレーション (R&D エージェントあり)

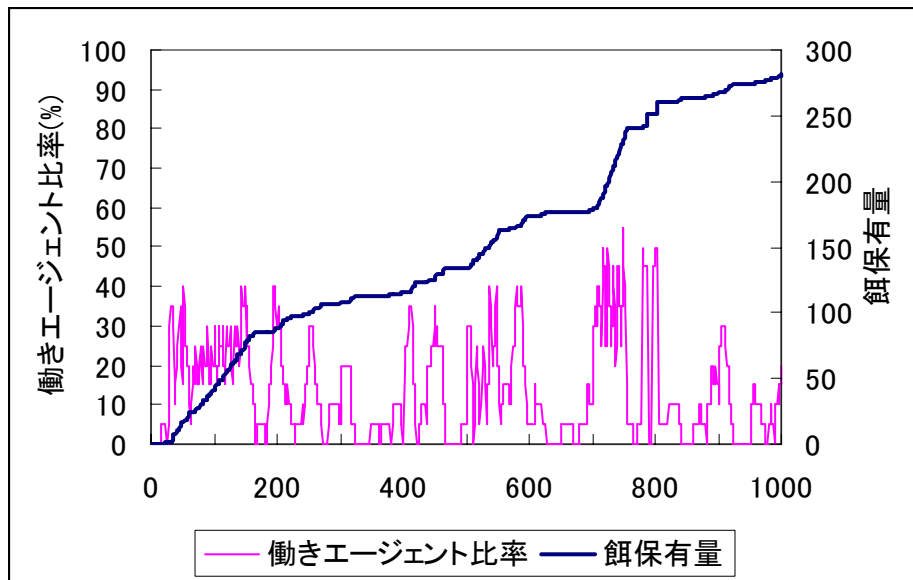


図 12：環境変動が大きく現状否定戦略のときのシミュレーション (R&D エージェントあり)

図 7、図 8の結果と同様、二つの戦略に大きな差は見られないが、現状依存戦略において、環境変動が小さいときのように安定的に餌を収集することはできていない。これは、環境変動が大きいため、環境が変わったあともその場所に集中してしまう影響が大きく効率的な収集ができないためと考えられる。

5. 考察

図 5 から図 12 において、環境変動と戦略の関係、および R&D エージェントの影響を実験した。本節では、これらの結果をまとめ、企業において経営資源をどのように分配すべきであるかを考察する。

まず、このような Ant System で表現可能な企業とはどのような企業であろうか。これは、各事業ユニットが利益に責任を持つ事業部製組織が該当すると考えられる。なぜならば、事業ユニットが利益に責任を持つ組織形態の場合、事業ユニットは、経営層からの評価のために利益の確保を最優先にすると考えられる。この場合、現在安定的に利益をあげている事業環境に誘引されると考えられるからである。

続いて、4 節の実験の結果をまとめる。表 4 に R&D エージェントがないときのシミュレーション結果をまとめる。環境変動が小さい場合は、現状依存戦略のほうが利得は大きいですが、長期にわたって利得を得られないことがあるので、この期間を存続できるかどうかによってとるべき戦略は変化する。環境変動が大きいときには、利得に差がないため、環境変動に柔軟に対応できる現状否定戦略のほうが適しているといえる。

表 4 : R&D エージェントがないときのシミュレーション結果

	戦略	特徴
環境変動 (小)	現状依存戦略	<ul style="list-style-type: none">利得は高い長期にわたって利得をあげられない期間がある
	現状否定戦略	<ul style="list-style-type: none">利得は低い安定的に利得をあげている
環境変動 (大)	現状依存戦略	<ul style="list-style-type: none">利得は現状否定戦略と同等利得をあげられない期間が断続的にある
	現状否定戦略	<ul style="list-style-type: none">利得は現状依存戦略と同等利得は連続的にあげられている

表 5 は、R&D エージェントがあるときのシミュレーション結果である。R&D エージェントが存在することで、現状依存戦略が安定的に利得を得られることがわかった。このことから、事業部制の様な組織形態の組織においても、利益に責任を持たない R&D 組織を独立して維持することが、環境変動に対して柔軟に対応できる組織設計に重要であるといえる。

表 5 : R&D エージェントがあるときのシミュレーション結果

	戦略	特徴
環境変動 (小)	現状依存戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・ 利得は高い ・ 連続的に利得をあげている
	現状否定戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・ 利得は低い ・ 安定的に利得をあげている
環境変動 (大)	現状依存戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・ 利得は現状否定戦略と同等 ・ 利得をあげられない期間が断続的にある
	現状否定戦略	<ul style="list-style-type: none"> ・ 利得は現状依存戦略と同等 ・ 利得は連続的にあげられている

6. まとめ

本研究では、個々の相互作用から大域的な現象を観察するための事例として、Ant System によるフェロモン相互作用をとりあげ、MAS 上に実装し実験をおこなった。また、フェロモン相互作用を社会科学的に解釈することで、市場の環境変動と企業の経営資源の投入戦略を議論した。

その結果、現在の優良事業に集中的に経営資源を投入することは、環境変動の際、全社的に利益をあげられなくなってしまう危険があり、むしろ優良事業であってもあまり集中しない戦略が望ましいことがわかった。しかし、利益に責任を持たず探索を主におこなう R&D エージェントが存在する場合には、そのほかの事業ユニットは優良事業に集中しても、企業全体としては安定的な利益を得られることがわかった。

References

- [1] Axelrod, R., "The Complexity of Cooperation", Princeton University Press, 1997.
- [2] Dorigo, M., Vittorio Maniezzo and Alberto Colomi, "The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, Vol.26, No.1, pp.1-13, 1996.
- [3] Hayek, R.I., "The road to Serfdom", Routledge, 1944, (一谷藤一郎(訳), 『隷従への道』, 東京創元社, 1976)
- [4] 石垣陽, 田中健次, 伊藤誠, "フェロモンコミュニケーションを利用した自律移動型センサ群による監視の高信頼度化", 計測自動制御学会学会誌 Vol.40, No.1, pp.1-8, 2004.
- [5] 車谷浩一, "蟻コロニーにおける協調採餌行動のマクロモデルの生成 (1) - 単純モデルにおけるシミュレーションとモデル生成", 人工知能学会誌, Vol.15, No.5, pp.829-836, 2000.
- [6] Wolfram, S., "Theory and Applications of Cellular Automata", World Scientific, 1986.