

誤認の適応性に関するエージェントベースモデル

赤石 仁^{†a)} 有田 隆也^{††b)}

Agent Based Modeling for Investigating Adaptivity of Misperception

Jin AKAISHI^{†a)} and Takaya ARITA^{††b)}

あらまし 誤認は一般的に否定的な文脈で用いられる言葉である。しかし、ある行動を促進するような情報を獲得する場合には、集団中の個体が誤認することにより行動の多様性が増加し、結果的に誤認が集団全体としては有利に働くことがあり得る。本論文では、誤認の影響について多様性の観点から、(1) 基本的な誤認の適応性、(2) コミュニケーションの基本的性質、(3) コミュニケーションにおける誤認の適応性、(4) 誤認の適応性における情報の有する行動特異性、の4点について仮説を立てた。次に、資源探索問題を対象としたシンプルなエージェントベースモデルを構築し、情報を周りの環境から直接獲得する場合に生じる誤認である直接誤認と、コミュニケーションを通して情報を獲得する際に生じる間接誤認の両者をもたらす影響を、シミュレーション実験により調べた。その結果、誤認がエージェントの行動における多様性を増大し適応性に貢献し得ること、正確なコミュニケーションはエージェントの行動における多様性を減少し得ること、及び誤った情報を共有することで適応性を下げ得ることが示された。更に、情報特性としての行動特異性が低い場合、誤認の適応性が低下する傾向が示された。我々は、多様性をもたらす要因としての誤認の適応性に関する研究が、認知科学、ミーム学、そして工学にかかわる根本的な問題に新たな知見を生み出すのではないかと考えている。

キーワード 誤認、多様性、適応性、エージェントベースモデル

1. ま え が き

多様性は様々な研究分野における中心的なテーマの一つである。特に複雑系や人工生命などの新しい研究分野において、直接的、あるいは間接的に多様性に関して議論がなされてきた[4]。例えば、帰納的推論システムを複雑適応系とみなし、その自己組織化と多様性に注目して考案された、Arthurによる“El Farol bar”問題は、多様性の起源にかかわる代表的な問題である[6]。その設定においては、エージェント群が毎週、あるバーに行くことを考える。しかしバーの席数は限られており、店に行くエージェント数が全体の60%以下の場合のみ、楽しむことができる。そこで、各エージェントにおけるバーに行くかどまるかの判断が問

題となる。ただし、各エージェントがその判断において利用可能な情報は、バーに行った人数に関する過去の履歴のみである。各エージェントは、バーに行く人数を推測するための、複数の予測器をもち(例:2週間前と同じ数、過去4週間の平均数など)、その中から、今までの信頼度(的中率)が最も高い予測器を使用して、過去の履歴から、エージェント数が60%以下になるかどうかを予測し、行くか行かないかを決定する。そして、その週にバーへ行った人数が判明した後、エージェントは各予測器の予測が的中したかどうかに応じて、それぞれの信頼度を変更する。このようなエージェントの推論は、演繹的推論に基づくものではなく、また正確な予測モデルでもない。もし、全員が来週バーに行く人数は少ないと予測したならば、全員がバーに行ってしまうことにより、その予測器は使われなくなる。よって、“El Farol bar”の設定では、予測の一般性は成立し得ず、この推論システムの多様性は増加するであろうという問題である。Arthurによる実験によって、推論システムが帰納的で限定されたものにもかかわらず、予測器群のダイナミックな「生態系」のバランスによる多様性の調整により、バーへ

[†] 名古屋大学大学院人間情報学研究所, 名古屋市
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市
Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

a) E-mail: jin@create.human.nagoya-u.ac.jp

b) E-mail: ari@info.human.nagoya-u.ac.jp

行く人の割合が最適レベルである 60% 近辺で変動することが示された。

一般的に、このようなダイナミクスは、集団中で選択される行動の頻度の変化に依存して、ある行動を行う個体の適応度が変化するという、いわゆる頻度依存の適応度関数によって発生し得るものである。このテーマに関しては、特に行動生態学と集団遺伝学の分野で、特定の条件下での均衡状態に注目した研究がなされてきた。ある形質が集団中で一般的になるほど、その形質をもつ個体の適応度が減少するような頻度依存の適応度関数をもつ選択を、負の頻度依存淘汰という。つまり、より低い頻度の形質をもつ個体は、一般的な形質をもつ個体より高い適応度をもつということである。このような負の頻度依存淘汰が集団における遺伝的な多様性の増加を促すことが、ゲーム理論を用いて示されている [13]。

このような観点から、多様性の起源と進化を解明しようとする場合、コミュニケーション若しくは言語の役割は重要となると考えられる。例えば、ある特定の行動を促進する情報があり、しかも、その行動が負の頻度依存の性質をもつとする。もし、この情報がコミュニケーションによって集団中で共有されるならば、その行動の発生頻度は増加し、集団における行動の多様性は減少するであろう。このことは、集団としての適応度が減少を意味することになる。この現象を多様性の起源と進化という観点から離れて身近な現象としての例を示すならば、混雑していない道路に関する情報をコミュニケーションによって多数の人が知り、同一の行動をとると今度はその道路への集中が起こり、余計に非効率な事態を引き起こすことがあり得るということである。

有田と小山は、動物の指示信号を念頭において設計した、コミュニケーションシステムに関するシンプルなモデルを用いて、このような多様性の進化を研究している [5]。彼らのモデルでは、信号の発信者がある意味に対応する言葉を発声し、受信者はその言葉を受け取る。受信者は、自らの語彙表を用いてその言葉に対応する意味を探して解釈する。その意味が発信者の語彙表の意味と等しい場合に会話が成功する。しかし、食物の存在を知らせる指示信号である食物コールの例を挙げると、会話が成功しても、食物コールを聞いて駆けつけた個体間で食物獲得の際に競争が生じ、何割かの受信者は食物の獲得を望んだにもかかわらず獲得に失敗することが想定できる。つまり、負の頻度依存

特性がこのようなコミュニケーションシステムにも存在し、この場合には語彙表の多様性が議論の対象となる。また、エージェントが自分で見つけた資源を独占することと、発見した資源を他のエージェントと共有することの間にはトレードオフの関係が設定されている。資源の獲得量に基づく語彙表の進化シミュレーション実験により、コミュニケーションシステムは、人口サイズの拡大、突然変異率の減少、資源の制限に対応して、その言語的多様性を自律的に調節することが示された。

以上から、人間など生物の集団における行動の多様性の起源の観点から、Arthur により研究された推論システムや、有田らのコミュニケーションシステムなどで示されたように、集団行動の多様性が自律的に発現する様々なシステムが異なるレベルにおいて存在すると考えられる。我々は、そのようなシステムの一つとして、認知システムの基礎となる認識システムを対象とする。誤って情報を認識する「誤認」を、単なる負の効果をもつ誤りとしてとらえず、多様性を生み出す機能の一つとなり得るという仮説を立て、検証することを本研究の目的とする。そこで、資源探索問題を対象とした、シンプルなエージェントベースモデル [1] ~ [3] を構築し、誤認によって発生する集団行動の多様性と適応度の変化に注目してシミュレーション実験を行う。この問題は El Farol bar 問題、Minority game [8]、Blind Hunger Dilemma [12] などと同様に、負の頻度依存と呼べるような特性をもつものである。

これまで、認識システムにおける誤認を機能的な面からとらえた計算論的なモデルに基づく研究はほとんどなされていなかったが、これに注目した数少ない研究として資源探索問題を対象とした Doran のマルチエージェントモデルがある [10], [11]。彼は、エージェントが到達すると死亡する致死地帯が存在する環境において、他のエージェントを回避しつつ資源を探索する過程で生じる、他のエージェントの存在とその位置に関する誤認に注目して実験を行った。なお、彼の研究では、「誤認」は、エージェントが実際には存在しない他のエージェントの存在を信じるという、事実とは合致しない事象を信じることを意味している。実験の結果、致死地帯にエージェントが存在するという認識をもたらす誤認が適応的となり得ることが判明した。しかし、この研究は、集団内における行動の多様性に起因した誤認の適応性を対象としたものではなく、誤認の結果が直接的に適応的となるという単純な設定に

基づくものであった。

なお、本論文では、「適応」(adaptation) という用語に関しては、生物学、特に進化学や生態学などで使われているような意味合い、つまり「一定の環境内での生存または繁殖に有利になるような遺伝性の形質」として用いている。具体的には、「適応度」(fitness) は、ある形質をもつ個体の集団がその形質をもたない個体の集団と比較してある観点(本論文では資源の獲得量)からどれだけ優れているかという意味、「適応的」(adaptive) は、(ある形質が) 集団としての適応度の増加をもたらしているという意味、「適応性」(adaptivity) は(ある形質の) 適応的な性質という意味で使用する。

2. 仮 説

誤認は、環境における事象の正確な状態と、我々の感覚器官を通して周りの世界について情報獲得したときに受け取る状態の間の差異を生み出す作用として定義される。一般的に誤認は非適応的であると考えられている。しかし、ある特定の行動を促進するような情報を個々が獲得するときに誤認が生じた場合、集団の視点から誤認に良い効果がある場合があると考えられる。

誤認の適応性は、以下のような場合に現れると考えられる。はじめに、集団中の個体がある特定の行動を促進する情報を共有する。これは、集団的視点からは情報の多様性が減少することを意味する。そして、集団の行動多様性が減少し、結果的に情報共有が非適応的となり得る。この視点から見ると、情報を獲得したときに誤認が生じた場合、集団の認識は多様化され、集団の行動も多様化される。このような状況下で、多様化をもたらすことにより誤認は結果的に適応的となり得る。一方、コミュニケーションは情報共有の一般的な手段の一つである。言い換えるなら、コミュニケーションは集団認識の多様性減少を促す傾向がある。そのため、コミュニケーションでの誤認もまた適応的となる可能性がある。

誤認をその情報源により 2 種類に分類する。正しいと仮定できる情報源(例えば、狭義の環境)から直接情報を獲得する場合に生じる誤認を直接誤認と呼ぶ。また、正しいことが確認されていない情報源(例えば、他のエージェントなど)から間接的に情報を獲得する場合に生じる誤認を間接誤認と呼ぶこととする。図 1 に情報の流れと誤認の発生を示す。同図において長方

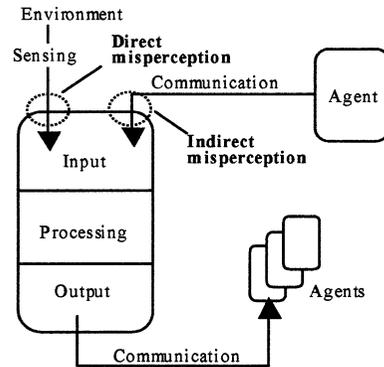


図 1 情報の流れと誤認の発生
Fig. 1 Information flow and occurrence of misperception.

形はエージェント各個体を表し、矢印は情報の流れを表す。ここで、誤認の適応性に関する仮説を以下のようにまとめる。

(1) 集団中である特定の行動の頻度が増加(行動の多様性が低下)すると、その行動の適応性が低下するような、適応性が頻度に依存する行動がある場合、その特定の行動を促進し行動頻度を上昇させるような情報を環境から直接獲得する際の誤認(直接誤認)は、行動多様性を増加し、集団の適応度を増加させ得る。

(2) コミュニケーションによって、(1)のタイプの情報を他個体と共有することは、認識の多様性を減少し得るので、誤認の適応性を減少し得る。

(3) (2)の、コミュニケーションの際の誤認(間接誤認)は(1)と同様に集団の適応度を増加させ得る。

(4) (1)~(3)の効果はその情報が行動を特定する度合に応じて変わる。例えば、ある特定の行動以外のすべてを促進(特定の行動のみを抑制)する場合、最も効果が小さい。

3. モ デ ル

3.1 エージェント

2. の仮説を検討するために、資源探索問題を対象とするエージェントベースモデルを構築した。タスクは、正方形のセルに区切られた 2 次元平面フィールド上でエージェント(ロボット)が資源を探索し収集するものである(図 2)。フィールドの初期化時に、設定した資源密度で資源または資源と毒を一樣に分布する。フィールド上の資源と毒の位置は、試行中不変である。資源または毒がエージェントに獲得されつくすと、1

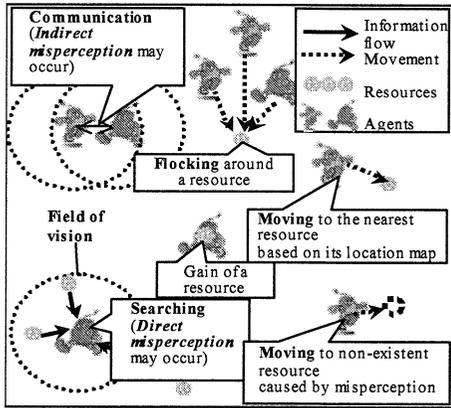


図 2 エージェントベースモデルによる資源探索
Fig.2 Model for a resource-searching problem in a virtual multi-agent world.

ターン経過後、同じ場所に 1 資源量/ターンの速度で最大資源量まで回復する。

初期化によりフィールド上に設定された数のエージェントを一様に分布させる。各エージェントは自ら知覚した、若しくはコミュニケーションによって得た資源の位置と量に関する地図情報を記憶する。地図情報はフィールドと同じ大きさの記憶領域からなり、それぞれの記憶領域には x, y の座標で表される実際の環境に対応した位置、資源、毒の有無、及び、資源、毒がある場合その量が記憶される。

エージェントは、視界範囲内にある資源と毒、他のエージェントを認識する。移動速度は 1 ターンに移動可能なセル数を意味する。エージェントはフィールドの外や他のエージェントが存在するセルには移動できない。

エージェントは自らのセンサで、視界内にある資源や毒の有無、資源や毒がある場合は、その位置と量を認識する。認識した情報は自らの地図情報に上書きする。また、エージェントは視界内に存在する他のエージェントと 1 対 1 のコミュニケーションを行うことができる。コミュニケーションの有無はパラメータとして指定し、有の場合、可能な他のエージェントと必ずコミュニケーションを行い、無の場合、コミュニケーションは行われない。コミュニケーションが行われた場合、エージェントは自らが認識しているすべての資源と毒の位置を相互に伝達する。なお、資源または毒がないという情報は伝達されない。情報を伝達されたエージェントは自らの地図情報に上書きする。もし、

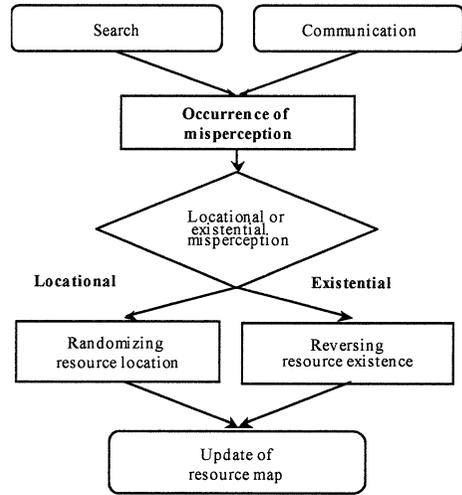


図 3 誤認の種類
Fig.3 Kinds of misperceptions.

情報同士が矛盾した場合、すべて新しい情報により上書きされる。例えばコミュニケーションによって A 地点に資源があると認識し、その後自ら A 地点に資源がないと認識すれば、地図情報には A 地点には資源がないと上書きされる。

エージェントの移動は、自ら認識している地図情報のみに基づいて行われる。現在のエージェントの位置から、量にかかわらず最も近いと認識している資源の位置を目標として、距離を縮める方向へ移動する。等距離に獲得可能な資源があると認識している場合は、それらの中からランダムに目標が設定される。地図情報に資源の認識が全くない場合はランダムウォークを行う。毒の情報を地図にもっていた場合、その場所に移動しない。そして、移動終了後にエージェントと同じセルに資源が毒があった場合は、その場所にある資源若しくは毒をすべて獲得する。エージェントが誤認により毒のあるセルに移動した場合、獲得資源量から毒の量だけ引かれる。

3.2 誤認

モデルで取り扱う情報の種類としては、資源と毒の位置と、それらの有無、及び量があり、エージェントがコミュニケーション、若しくは自らの知覚により情報を得る際、誤認が発生する可能性がある(図 3)。

本モデルでは、資源と毒の位置、及びそれらの有無についてのみ誤認が行われるものとした。まず、誤認が発生した場合、資源または毒の位置、若しくは有無に関する誤認が排他的に選択される。その選択は等し

い確率でランダムになされる。資源または毒の有無にかかわる情報を属性情報と呼び、その情報にかかわる誤認を属性誤認と呼ぶ。また位置にかかわる情報を位置情報と呼び、位置にかかわる誤認を位置誤認と呼ぶ。位置誤認が生じた場合、属性は正確に認識するが、位置はフィールド内のランダムに決められた位置にその情報で伝えられた場所にあると認識する。属性誤認が生じた場合、位置は正確に認識するが、属性は逆転して認識される。つまり、資源がある場所には、資源が存在しないものとして認識される。また、毒の情報を得る際にも誤認が設定された確率で生じ、位置誤認若しくは、空白地帯と間違える属性誤認が生じる。空白地帯にも位置誤認または属性誤認が生じ、属性誤認の場合、等しい確率で資源または毒であると誤識する。

3.3 アルゴリズム

シミュレーション実験は次の手順に従って実行される。

(1) 資源、毒、エージェントをフィールド上に、一様に分布させる。

(2) 視界内のあるセルにいる他のエージェントとコミュニケーションを行う。地図情報を交換するとき誤認が間接誤認率に基づいて発生する。

(3) あるセルの資源、毒情報を知覚する。このとき、直接誤認率に基づいて誤認が発生する。(2)(3)を視界内のすべてのセルに対して繰り返す。

(4) 認識している最も近い資源へ移動する。認識がなければランダムに移動する。

(5) 同じセルにある資源、毒を獲得する。フィールドの資源は同じ場所に時間の経過とともに回復する。

以上(2)から(5)までを1ターンとし、全エージェントがこれを繰り返す。

4. シミュレーション実験

4.1 設定

誤認とコミュニケーションが集団行動に及ぼす影響を調べるため、5種類のシミュレーション実験：直接誤認の影響(実験1)、正確なコミュニケーションの影響(実験2)、間接誤認の影響(実験3)、行動特異性(実験4,5)を行った。

実験で使用したパラメータとして、ターン数は5000、フィールドサイズは 10×10 (非トラス状)、エージェント数は20個体、視界はエージェントを中心とした半径3セル、移動速度は1ターン当り1セル、資源密度は20%、1ターン当りの資源最大回復量は1、試

行数は10とした。

いずれの実験も、全エージェントが獲得した資源の平均で集団としての適応性の評価を行い、またエージェント全体の行動と認識に関する多様性の評価も次に述べる尺度を用いて行った。実験1から3及び5は資源のみを分布させ、実験4では資源とともに毒を分布させた。

4.2 多様性の尺度

誤認の適応性は、誤認が多様性を調節することによって得られるのではないかという仮説を検証するため、適応性と誤認の関係と同時に、エージェント行動の多様性と誤認の関係についても調べた。エージェントは資源へ向けて移動の際、ターンごとに移動目標を定めて移動する。そこで、エージェントの集団的行動における多様性の尺度として、エージェントのある時点での移動目標の分布を、情報源の発する信号の分布とみなしたときの平均情報量、つまりエントロピーを用いた。フィールド上のある点を多くのエージェントが移動目標としている状態が多様性の低い状態であり、移動目標の重複が少なく分散している状態が、多様性の高い状態である。行動多様性 H_b を以下の式で定義する。

$$H_b = \sum_{i=1}^m -\frac{a_i}{n} \log_2 \frac{a_i}{n}$$

ここで、 m はエージェントに目標とされているセルの数、 n は全エージェント数、 a_i は i 番目の目的地を移動目標としているエージェントの数である。 m の最大値は n 、最小値は1となる。

一方、認識の多様性は、エージェントの認識がどれだけばらついているかを表すものである。そこで、認識の多様性の基準として、エージェント間のあるセルの属性に関する認識の割合を、情報源が発する信号の割合とみなしたときのエントロピーを求め、全セルに関するエントロピーを合計したものを認識の多様性の基準とした。これを情報多様性と呼ぶ。つまり、全エージェントがすべてのセルにおいて、同じ認識をもった状態が多様性の低い状態であり、認識し得るセルの属性が均等に認識されている状態が、最も多様性の高い状態といえる。この情報多様性 H_p を以下の式で定義する。

$$H_p = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^k -\frac{p_{ji}}{n} \log_2 \frac{p_{ji}}{n}$$

ここで、 c は全セル数、 k はセルが認識され得る状態数、 p_{ji} はセル j の状態を i と認識しているエージェント数、 n は全エージェント数である。 k は通常は空白地帯と、資源での 2 状態を表す 2 となり、行動特異性の実験を行うときのみ毒の状態が加わり 3 となる。

4.3 直接誤認の影響

まず誤認の基礎的な性質を把握するため、コミュニケーションによる情報獲得を行わず、自らの知覚のみに誤認が加わった場合、どのような影響を及ぼすかについて調べた。よって直接誤認のみが検討対象となる。直接誤認率を 0% (直接誤認無し) から 100% (常に誤認) まで変え、直接誤認の影響を調べた。

実験結果を図 4 と図 5 に示す。図 4 は、直接誤認率の変化による獲得資源量の変化のピーク部分を拡大して示したものであり、図 5 は直接誤認率の変化による平均獲得資源数と行動多様性、情報多様性の変化の全体を示したものである。図 4 より、獲得資源量は直

接誤認率 3% 近辺にピークがあることが分かる。誤認が生じない直接誤認率 0% と比較してピークの平均獲得資源量は約 40% 増加している。また、図 5 より、行動多様性、情報多様性とも獲得資源量の増大に合わせて直接誤認率 3% まで急激に上昇し、その後緩やかに上昇していることが分かる。

また、獲得資源量の変化を時系列で表したグラフを図 6 に示す。結果は 2 区間の移動平均をとったものである。誤認率が 0% の場合、獲得資源量ははじめの 5 ターンでわずかに上昇しその後ほぼ一定となっている。これは、エージェントがまず資源に近寄り、その後はその近辺の資源を確実に獲得していることを表しているためと考えられる。誤認率 3% では 500 ターンまで資源獲得量が上昇し、その後定常状態に落ち着いている。これは、誤認が集団行動を多様化させた結果、集団としての探索範囲が拡大し、誤認による資源獲得を困難にする負の効果を上回ったためであると考えられる。また、誤認率が高くなるにつれ、獲得資源量の振動が大きくなっている。誤認率 0% では、ほぼ一定に推移するのに対し、3% では若干の振動が見られ、60% では振幅が 1 資源に相当する大きさになっている。これは、誤認率の増加に伴い、資源獲得の確実性自体が下がったためであると考えられる。

これらの結果より、直接誤認は個々の認識に誤りをもたらし、行動を多様化することで適応的となり得ることが示された。直接誤認による行動多様化は、個々のエージェントの探索範囲を広げ、ある資源へのエージェントの集中を防ぐという正の効果と、資源の確実な獲得を困難にする負の効果をもち、直接誤認率 3% 近辺でこれらの効果のバランスがとれ適応的になると考

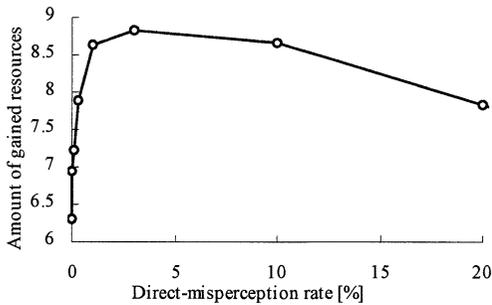


図 4 直接誤認の影響
Fig. 4 Effects of direct misperception.

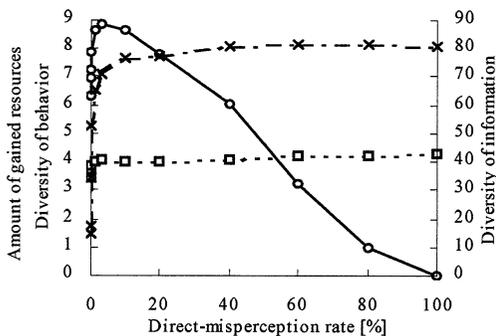


図 5 直接誤認の影響 (直線: 平均獲得資源量, 破線: 行動多様性, 一点鎖線: 情報多様性)
Fig. 5 Effects of direct misperception (continuous line: the amount of the average gained resource, dotted line: diversity of behavior, dash-dotted line: diversity of information).

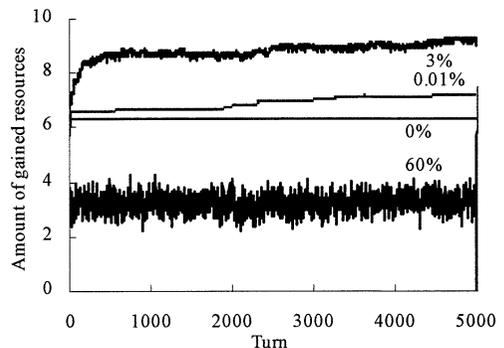


図 6 直接誤認の影響: 獲得資源量の推移
Fig. 6 Effects of direct misperception: change in the amount of gained resource.

えられる。

4.4 コミュニケーションの影響

この実験では、エージェント間のコミュニケーションを導入した。エージェントは情報を自らのセンサか、他のエージェントとのコミュニケーションによって獲得する。コミュニケーション自体の影響を調べるために、この実験では間接誤認は発生しないこととする。直接誤認の影響と同様に直接誤認率を変化させ、コミュニケーションの特性を観察した。

実験結果を図7と図8に示す。図7にコミュニケー

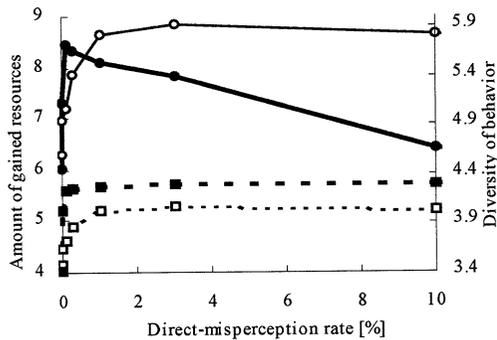


図7 コミュニケーションの影響 (太線: コミュニケーションあり, 細線: コミュニケーションなし, 直線: 平均獲得資源量, 破線: 行動多様性)

Fig. 7 Effects of communication (thick line: with communication, thin line: without communication, continuous line: the amount of the average gained resource, dotted line: diversity of behavior).

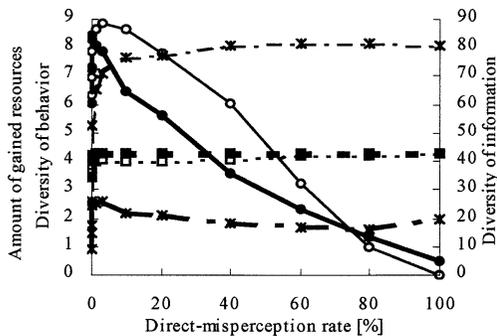


図8 コミュニケーションの影響 (太線: コミュニケーションあり, 細線: コミュニケーションなし, 直線: 平均獲得資源量, 破線: 行動多様性, 一点鎖線: 情報多様性)

Fig. 8 Effects of communication (thick line: with communication, thin line: without communication, continuous line: the amount of the average gained resource, dotted line: diversity of behavior, dash-dotted line: diversity of information).

ションを導入した場合と、直接誤認のみの場合の獲得資源量と行動多様性を比較した結果の一部を拡大したものを示す。図8は獲得資源量, 行動多様性, そして情報多様性について比較したものの全体を示す。

図7の直接誤認率0.01%から0.3%の間に見られるようにコミュニケーションの導入によりコミュニケーションがない場合より獲得資源量が増加している。しかし、図7, 図8に見られるように、コミュニケーションを導入した場合、直接誤認率0%では行動多様性, 情報多様性, 獲得資源量がともに低下している。これは、正確な情報が集団で共有されることにより情報多様性が減少し、エージェントがある資源に過度に集中し行動多様性が減少したため、獲得資源量が減少したと考えられる。また、直接誤認率1%以上ではコミュニケーションの導入により獲得資源量が約40%低下していることが示された。これは直接誤認による誤った情報を集団内で過剰に共有したために、資源の確実な獲得が困難となり獲得資源量が低下したと考えられる。また、獲得資源量の時間的推移に関しては、直接誤認の実験結果と同様の結果となった。

これらの結果からコミュニケーションは、共有する情報が正確な場合には、行動の多様性を減少させるため誤認の適応性を減少し得ることが示された。また、共有する情報に含まれる誤りが大きい場合も誤認の適応性を減少し得ることが示された。

4.5 間接誤認の影響

直接誤認率を0%に固定し、間接誤認率を0% (送信者が伝えたことを常に正しく受け取る) から100% (送信者が伝えたことを全く正しく受け取らない) まで変えて、間接誤認の影響を調べた。実験結果を図9に示す。同図より間接誤認率0.1%で適応性と行動多様性が最大となり、間接誤認率0%より平均獲得資源数が約40%上昇していることが示された。また、間接誤認率の上昇に伴い情報多様性が増大することが示された。これは間接誤認により、コミュニケーションによる情報の共有量が減少したことを示していると考えられる。また、獲得資源量の時間的推移に関しては、直接誤認の実験結果と同様の結果となった。

これらの結果から、適度な間接誤認はコミュニケーションによる集団認識の多様性減少を防ぎ、コミュニケーションを適応的なものとし得ることが示された。

4.6 行動特異性

これまでの実験において、情報はエージェントを資源の存在する位置へ移動する行動を促進するもので

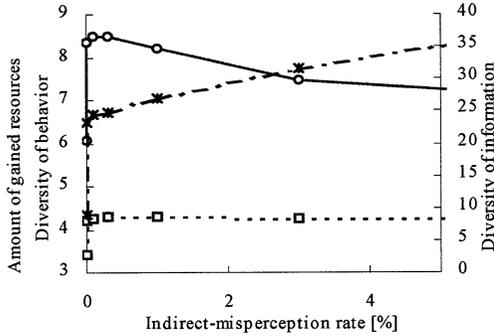


図 9 間接誤認の影響 (直線: 平均獲得資源量, 破線: 行動多様性, 一点鎖線: 情報多様性)
 Fig. 9 Effects of indirect misperception (continuous line: the amount of the average gained resource, dotted line: diversity of behavior, dash-dotted line: diversity of information).

あった。そこで、情報が促進する行動の特定の度合、つまり、行動特異性が変化した場合の誤認の適応性に関する実験を行った。ここでは、最も特異性の低いと考えられる、ある特定の行動以外の全行動を促進する情報、つまり、特定の行動のみ抑制する情報に関して検討するために毒を導入した。なお、この実験では資源に対して誤認は生じないものとする。毒や空白地帯に属性誤認が発生した場合、空白地帯または毒と誤認し、資源と誤認することはないものとする。毒に関するパラメータとして、毒の密度は資源と同じ 20%、1 ターン当りの毒の最大回復量も資源と同じ 1 とする。

はじめに、直接誤認率を 0% から 100% まで変更し、毒に対する直接誤認の影響を調べ、資源に対する直接誤認の影響と比較した。獲得した資源量を単純に比較した場合、毒を導入した実験結果の獲得資源量が低下しているのは自明であり、誤認の影響を比較しにくい。そこで、誤認率の変更による獲得資源量の変化を明確に比較するため、直接誤認率 0% 時の獲得資源量を基準とした相対獲得資源量で比較を行った。エージェントは資源の探索に自らのセンサのみを用い、他のエージェントとコミュニケーションを行わない。よって直接誤認のみが生じ得る。図 10 に毒を導入した場合と、導入していない場合の相対獲得資源量の比較を示す。毒に対する誤認は資源に対する誤認と比較した場合、行動多様性の上昇が約 10% 少ない。また、毒に対する誤認では、獲得資源量はほぼ横ばいで最大でも約 25% 増加させるのにとどまるのに対し、資源に対する誤認は、直接誤認率 3% 付近で最大となり、約 40% の

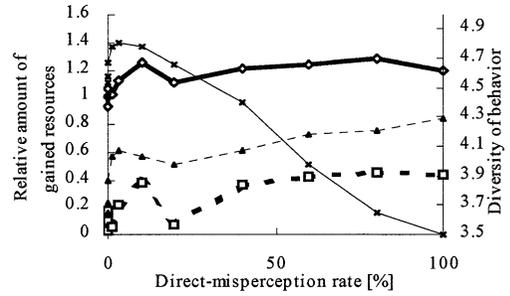


図 10 行動特異性に関する直接誤認の影響 (直線: 平均獲得資源量, 破線: 行動多様性, 太線: 毒の導入, 細線: 資源のみ)
 Fig. 10 Effects of direct misperception for behavioral specificity (continuous line: relative gained resource, dotted line: diversity of behavior, thick line: with poisons, thin line: without poisons).

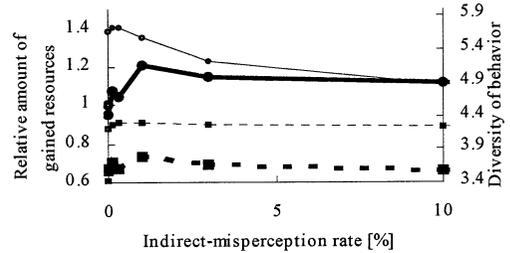


図 11 行動特異性に関する間接誤認の影響 (直線: 相対獲得資源量, 破線: 行動多様性, 太線: 毒の導入, 細線: 資源のみ)
 Fig. 11 Effects of indirect misperception for behavioral specificity (continuous line: relative gained resource, dotted line: diversity of behavior, thick line: with poisons, thin line: without poisons).

獲得資源量の増加をもたらしていることが分かる。この結果より、直接誤認の行動多様性を増加させる効果が行動特異性に依存すると推測される。

次に、間接誤認について実験を行った。図 11 に、毒を導入した場合としない場合について、間接誤認の影響を間接誤認率 0% を基準とした相対獲得資源量と、行動多様性を示す。資源に対する間接誤認は最大で約 40% 相対獲得資源量を増大させているのに対して、毒に対しては約 20% しか間接誤認の適応的な影響が見られない。また、行動多様性も資源に対する誤認が導入された場合平均で約 20% 上昇しているのに対して、毒に対して誤認が導入された場合、約 2% の上昇にとどまっている。よって、間接誤認の場合でも、行動多様性を増加させる効果が行動特異性に依存すると推測さ

れる。

これらの実験によって示された資源と毒の差は、その情報によって促進される行動の特異性の差である。ある資源についての情報の所有は、特定の行動を促進し、毒に関しての情報の所有は、ある特定の行動以外の相対的に幅広い行動を促進する。そして、幅広い行動を促進する情報について、更に多様性を増大させても、その影響は小さい。そのため、資源に対する誤認と比較して、毒に対する誤認の影響は小さくなっている。

また、誤認の影響と行動特異性の関係を別の観点から検討するため、毒を加えない設定で更に実験を行った。資源の分布等の設定には変更はないが、エージェントは、その資源の位置だけでなく、そこを中心とした 3×3 の正方形の範囲に資源があると認識するものとした。例えるならば、今までのモデル（基本モデルと呼ぶ）では、はっきりと地上に認識できるような、行動特異性が高い情報源としての資源を想定していたのに対し、このモデル（拡大モデルと呼ぶ）は、地下に埋まっている資源のような、大まかな位置は把握できるが、明確には場所を特定することが難しい、つまり行動特異性が低い情報源としての資源を想定している。

実験で使用したパラメータは、拡大モデル、基本モデルともに、フィールドサイズは 20×20 、エージェント数は 20 個体、資源密度は 5%、その他のパラメータはこれまでの実験と同様である。基本モデルと拡大モデルでは、モデル内で扱う情報の特異性が異なることから、実際に獲得した資源量や行動多様性がその影響で異なることは自明であり、実際の獲得資源量などの比較では、行動特異性の差異による誤認の影響を把握することが困難となる。そこで、基本モデルと拡大モデルのそれぞれにおいて、誤認がない場合（誤認率 0%）の結果を基準として正規化して比較する。

図 12 に実験結果を示す。横軸は直接誤認率、縦軸は誤認率 0% の値を基準とした獲得資源量比と行動多様性比を示す。同図において獲得資源量比を比較すると、直接誤認率が 20% 未満で行動特異性がより低い基本モデルの方が、拡大モデルより適応的となっている。また、行動多様性比でも基本モデルの方がより大きな変化を示している。よって、拡大モデルは基本モデルより誤認率の変化による影響が少ないことが示された。これは、拡大モデルでは、基本モデルと比較して資源の位置をより広い範囲として表しているため、情報源

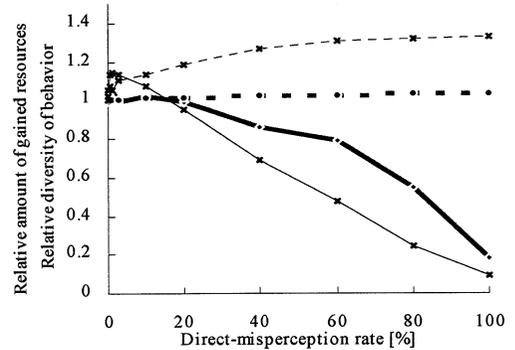


図 12 行動特異性に関する直接誤認の影響：拡大モデル（細線：基本モデル，太線：拡大モデル，実線：獲得資源量比，破線：行動多様性比）

Fig. 12 Effects of direct misperception for behavioral specificity: expanded model (thin line: base model, thick line: expanded model, continuous line: relative gained resource, dotted line: relative diversity of behavior).

からエージェントが得られる資源の位置に関する情報の数が多く、エージェントが選択可能な移動目標が多数あることから、誤認の影響を受けなくとも行動多様性が増加し、結果的に、誤認による影響が減少したためと考えられる。また、間接誤認についても同じ設定で実験を行ったが、同様の結果が得られた。これらの実験結果は、行動特異性が高いほど、より誤認の影響が増加するという我々の仮説を支持する方向性をもつものである。

5. むすび

本論文では、人間や生物に内在する多様性が負の頻度依存特性に類する要因により自律的に発現し得るとの見解に基づいて、認知システムにおける多様性を生み出す誤認が集団行動の多様性を調節し適応的となり得ることに関する仮説を提示し、シミュレーション実験によって定量的に検討した。実験により、誤認がエージェントの認識と行動の多様性を増大し、適応的となり得ること（仮説 1, 3）が定量的に示された。一方、正確なコミュニケーションはエージェントの行動多様性を減じることで、誤認の適応性を減少し得ること（仮説 2）が確認された。また、コミュニケーションで共有される情報に誤りが多い場合も非適応的となり得ることが確認された。更に、情報が促進する行動の特異性が異なる設定で比較した結果は、いずれも誤認の適応性に関する行動特異性の仮説（仮説 4）を支持する方向性をもつものであった。行動特異性と誤認の

影響の関係をより明確に示すことは今後の課題である。

我々は多様性をもたらす要因としての誤認の適応性に関する研究が、以下のような興味深いテーマに新たな知見を生み出すものと期待している。第1に、人間の感覚器官の不完全性に関する機能主義的な説明である。感覚器官はしばしば誤ることが知られているが、これは構造的物理的な限界以外に、進化的に説明され得るのではないかという点である。本モデルを用いてこのようなテーマを検討するために、誤認率を各エージェントのもつ遺伝的パラメータとし、資源の獲得量をエージェントの適応度として世代交代させることによって誤認率を進化させるような拡張を考案中である。第2に、このような誤認の適応性を人間の文化的側面を遺伝とのアナロジーとしてとらえるミーム学の研究分野における議論 [7] の中に位置づける立場である。Dawkins はミームを遺伝子と同様な複製子の一つと考え、寿命、多産性、そして複製の正確さの三つを複製子が成功するための要素であるとした [9]。しかし、本実験結果は情報複製時の誤りが適応的であるという結果を示しており、第3の要素と対立している。遺伝子とミームの対立に関しては様々な議論があるが、情報の具体的な内容にかかわらないレベルでこの対立があることを明らかにしたのは注目すべき点であろう。第3に、工学的な技術の進歩に対するアンチテーゼとしての可能性である。例えば、群ロボットシステムにおいて、ロボットのセンサ感度の限りない向上がシステム全体の性能向上に必ずしもつながらない状況や、ノイズが機能的役割を果たし得る状況はあり得るのではないかという問いかけである。現在、この点の検討のために群ロボットシステムを開発中である。

文 献

- [1] 赤石 仁, 有田隆也, “誤認の適応性に関するマルチエージェントモデル,” 第11回インテリジェント・システム・シンポジウム講演論文集, pp.229–234, 2001.
- [2] J. Akaishi and T. Arita, “Multi-agent simulation showing adaptive property of misperception,” Proc. 2002 FIRA Robot World Congress, pp.74–79, 2002.
- [3] J. Akaishi and T. Arita, “Misperception, communication and diversity,” Proc. Artificial Life VIII, pp.350–357, 2002.
- [4] 有田隆也, 人工生命 (改訂新版), 医学出版, 2002.
- [5] T. Arita and Y. Koyama, “Evolution of linguistic diversity in a simple communication system,” Artificial Life, vol.4, no.1, pp.109–124, 1998.
- [6] W.B. Arthur, “Inductive reasoning and bounded rationality,” American Economic Review, vol.84, pp.406–411, 1994.
- [7] S. Blackmore, The meme machine, Oxford University Press, 1999.
- [8] D. Challet and Y.C. Zhang, “Emergence of cooperation and organization in an evolutionary game,” Physica A, vol.246, pp.407–418, 1997.
- [9] R. Dawkins, The selfish gene, Oxford University Press, 1976.
- [10] J. Doran, “Modeling collective belief and misbelief,” Proc. AI and Cognitive Science, pp.89–102, 1994.
- [11] J. Doran, “Simulating collective misbelief,” J. Artificial Societies and Social Simulation, vol.1, no.1, 1998. <http://www.soc.surrey.ac.uk/JASSS/1/1/3.html>
- [12] C. Numaoka, “Introducing the blind hunger dilemma: Agents’ properties performance,” Proc. ICMAS’95, pp.290–296, 1995.
- [13] M.J. Smith, Evolution and the theory of games, Cambridge University Press, 1982.

(平成 15 年 1 月 10 日受付, 10 月 20 日再受付)



赤石 仁 (学生員)

1996 東北工大・工・通信工卒。1998 同大大学院博士前期課程了。(株)富士通ビジネスシステム勤務を経て、現在、名古屋大学大学院人間情報学研究所博士後期課程在学中。人工生命の研究に従事。



有田 隆也 (正員)

1983 東大・工・計数工卒。1988 同大大学院工学系研究科了。工博。名古屋工業大学講師, カリフォルニア大学ロサンゼルス校客員研究員を経て、現在、名古屋大学大学院情報科学研究科教授。人工生命や複雑系科学の研究に従事。言語の進化, 人間行動の進化, 進化的計算論などに興味をもつ。人工知能学会, 情報処理学会, 日本認知科学会各会員。