

蟻コロニーモデルの設計手法の提案と2つの設計例

中村 真理[†] 車谷 浩一^{††}

蟻は、局所的情報に基づいて行動する多数の個体間の通信によってコロニー全体で集合現象を示す社会性昆虫として知られる。本稿では初めに、蟻個体の分化とフェロモン信号の空間分布パターン形成を同時に取り扱う蟻コロニーモデルの設計手法を提唱する。この手法を用いて蟻の信号感受性を操作し、蟻個体の行動則に様々な構造を導入すると、コロニー全体の分業調整が可能になりモデルの改造が容易になる。その実例として本稿では次の2通りのモデルを設計し、そのダイナミクスを分析・再構成する。まず1番目の応用例として、蟻個体の道標フェロモン感受性を変えて蟻の行動則に新しいルールを順次付加し、3種類の採餌行動モデル（非誘引・誘引・不応期モデル）を設計する。採餌行動に際し個々の蟻は探索・輸送・動員のサブタスクの1つに従事する。蟻のサブタスク間配分を調整することにより、3種類の採餌行動モデルは異なる採餌戦略を示す。なかでも特に蟻が信号感受性を切り替える不応期モデルは、デッドロックを回避する安定な挙動や無駄のない配分調整の結果、つねに最も高い採餌効率を示す。次に2番目の応用例として、互いに独立な信号を用いてゴミ塚作りと採餌行動の2つのタスクを同時に遂行する分業モデルを設計する。分業モデルの蟻の行動則では、反応拡散系としてふるまう2つのタスクモジュールが互いに接続されている。この分業モデルは採餌効率を補償するよう両タスク間で弱い相互作用を示す。

A Method for Designing Ant Colony Models and Two Applications

MARI NAKAMURA[†] and KOICHI KURUMATANI^{††}

An ant colony comprised for many ants communicating by pheromone signals shows collective behavior through signal patterns formed by them. First in this paper, we devise a method for designing ant colony model, and next we apply the method to design following two types of ant colonies, introducing structures into ant's behavior rule by focusing on ant sensitivity to signals. In the first type, we modify design of three foraging models (trail, attraction and desensitization) repeatedly, changing ant sensitivity to recruit pheromone, in order to improve foraging efficiency by regulating allocation of ants to food-search, recruitment and food-carry subtasks. Out of these foraging models, the desensitization model shows the best foraging efficiency as a result of its stable behavior without deadlock and trade-off between food-search and recruitment subtasks. In the second type, we design a task-allocation model between foraging and waste-piling tasks, by coupling the two task modules using independent signals in ant's behavior rule. It shows weak interaction between the two tasks through distributions of desensitized ants in each task, which compensates for the decrease in foraging efficiency.

1. 緒言

同じルールを共有する同質多数のエージェントが信号に応じて数種のサブグループに分化し、分化したエージェントが各々信号を発信しつつ各種作業を分担し、全体で信号を共有しつつ仕事を遂行する系につい

て考える。1) エージェントの信号感受性を操作して、2) エージェントのサブグループ間状態遷移に様々な構造を導入し、3) 各サブグループのエージェントの行動に分担作業を埋め込むと、系全体の仕事が組織化される。このとき“信号感受性 + 状態遷移 + 作業埋め込み”の効果的な組合せにより系の記述や操作が容易になる。その一例として本稿では蟻コロニーモデルを取り上げる。

蟻は地下生活への適応を経て、嗅覚・触覚等の近接感覚に依存して低速で歩行するよう特殊化しているが、狭い視野や低い機動性の埋め合わせにフェロモン分泌や個体接触等の個体間通信手段を極度に発達させ、コロニー全体で多様な集団行動（採餌行動やゴミ塚作り

[†] 独立行政法人産業技術総合研究所セルエンジニアリング研究部門
Research Institute for Cell Engineering, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

^{††} 独立行政法人産業技術総合研究所情報技術研究部門
Information Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

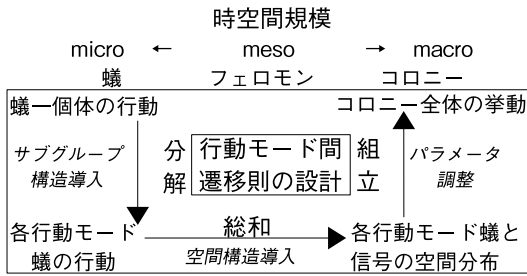


図1 蟻コロニーの設計手法

Fig. 1 Method to design ant colony models.

等)を進化させることにより多様なニッチに適応している^{1),2)}。

蟻コロニーでは蟻個体の行動とコロニー全体の挙動の時空間規模が大きく隔たるため、このような系の中でも特に取扱いが容易である。筆者らは、局所的情報に基づいて瞬間的に行動する多数の同質な蟻個体どうしがフェロモン等の嗅覚信号を用いて間接的に通信を行い、中間の時空間規模で変動する信号パターンの形成を通してコロニー全体で長期的・大域的な集合現象を組織化する数理モデルを研究した³⁾。さらにこのモデルに定性推論を適用して蟻と信号の相互作用を記述するマクロな系の挙動の推論器を作成した⁴⁾。定性推論では一般に系が複雑になるにつれ解の候補が多くなる問題が生じる。

そこで本稿では、蟻のサブグループ分化と空間パターン形成を同時に取り扱う蟻コロニーモデルの設計手法を提案する(図1)。本手法は両者の絡み合った構造を操作対象としており、定性推論と相補的に使用できる。この手法は次の3段階からなる。

- (1) サブグループ構造の導入：蟻はフェロモン信号等の局所の手がかりに応じて行動モードを変える。蟻1個体の行動は、行動モード間遷移則でつながれた数種類の行動モードに分解される。
- (2) 空間構造の導入：信号を発する蟻の分布から信号の空間分布が導かれると同時に、各行動モード蟻の信号に対する挙動から各モード蟻の空間分布が求められる。
- (3) パラメータ調整：各モード蟻や信号の空間分布を同じモード間遷移則に従って組み立て、設計意図どおりの因果関係が成立するようパラメータを調整する。

上記の手続きにより、各モード蟻集団間の空間分布のダイナミクスが設計できる。

さらに本章冒頭で述べたように、蟻個体の信号感受性を操作してモード間遷移則に複雑な構造を導入し、各モード蟻の行動に各種作業を埋め込んで各モード蟻集団に作業を分担させると、上記の手法を用いて系全

体の仕事の組織化を記述できる(2.1.4項に説明するようにフェロモンの挙動はごく単純で、多数の蟻が共有する性質上、こちらに複雑な構造は導入し難い)。これを利用して本稿では次の2通りの蟻コロニーモデルを提唱する。

2章では異なるフェロモン感受性を持つ3種類の採餌行動モデル(非誘引・誘引・不応期)を設計する。採餌行動モデルでは、蟻の各種サブタスクへの配分調整を通じて採餌効率を高めるよう蟻の道標フェロモン感受性を順次修正し、各モデルの行動モード間遷移則に上記修正に対応する新しい行動モードを順次付加していく。3つの採餌行動モデルの中で、特に不応期モデルは安定した挙動と無駄のない配分の結果、つねに高い採餌効率を示す。本稿では上記手法を用いて各モデルのダイナミクスを構成し、採餌効率向上の機構を説明する。

3章ではゴミ塚作りと採餌行動の2つのタスクを同時に遂行する分業モデルを設計する。分業モデルでは、独立な信号を用いる2つのタスクモジュールを行動モード間遷移則上で接続している。このモデルのパターン形成や分業調整を調べるとタスク間の弱い干渉が観測されるので、本稿では上記手法を用いてモデルのダイナミクスを構成し、干渉の発生機構を説明する。

2. 採餌行動モデルの逐次的改造

本章2.1節では実際の蟻の採餌行動を説明し、モデルの設定を列挙する。2.2-4節では3種類の採餌行動モデル(非誘引・誘引・不応期)について説明する。最も単純な非誘引モデル(2.2節)をもとに、動員を強化した誘引モデル(2.3節)、状況に応じ信号感受性を切り替える不応期モデル(2.4節)を設計し、各モデルの挙動を説明するとともに、前述の手法を用いて各モード蟻集団の空間分布のダイナミクスを構成する。2.5節では分業調整・挙動の安定性・採餌効率を指標として3種類の採餌行動モデルの数値実験結果を比較する。2.6節では関連する他のモデルと本稿のモデルを比較する。

2.1 採餌行動のモデル化

2.1.1 実際の蟻の採餌行動の説明

蟻は餌を探して地面を徘徊し、餌を見つけたら道標フェロモンを地面に分泌しつつ真っ直ぐ餌を巣まで持ち帰る。道標フェロモンは地面から徐々に蒸発し大気中に広く拡散する。他の蟻がこの信号を感知すると信号に従って餌場へと動員される。動員された蟻が餌を得れば信号を強化しながら餌を巣まで運ぶが、餌が運び尽くされると信号は強化されなくなり蒸発していず

れ消える．

2.1.2 採餌行動理論とサブタスク構造の導入

各種資源の配分により最適な採餌行動を実現する採餌行動理論⁵⁾の観点から，“未知餌場や信号の探索”，“餌の輸送”，“既知餌場への動員”の3つのサブタスクへの蟻の配分に注目する．本稿では採餌効率をコロニー全体の餌運搬量で定義する．採餌効率は輸送サブタスクへの配分を概ね反映している．

探索サブタスク蟻より動員サブタスク蟻の方が短い時間で効率良く餌場に到達できるが，探索サブタスク蟻の密度がある程度減るとコロニー全体で未知の餌の探索にかかる時間が増大する．探索・動員両サブタスクのトレードオフにより高い採餌効率が実現される．

2.1.3 モデルに用いた餌供給条件とパラメータ

採餌効率評価のため本稿では“1カ所の餌場が運び尽くされると同時に一定の大きさの餌の塊が地上のランダムな位置に供給され，地上に存在する餌場の数がつねに一定に保たれる”よう餌供給を制御して数値実験を行う．

その他のパラメータは以下のとおり．

マクロ（蟻コロニー）規模のパラメータ：

- コロニーは $0 \leq x, y < 100$ (grid) の平面領域上を移動する蟻 600 個体で構成される．
- 上記領域内部の高さ $0 \leq z < 3$ (grid) の格子点でフェロモン濃度が計算される（地面 $z = 0$ は反射端，他境界は吸収端）．詳細は次節を参照．
- 巣は地面の中心にあり，餌の塊は巣から半径 45 grid 以内のランダムな位置に供給される．地上のすべての蟻は巣の匂いから巣の方向を判別する．

ミクロ（蟻個体）規模のパラメータ：

- 蟻が刺激を受けてから行動を変えるまでに要する時間を 1 step とし，蟻個体の感知域半径は 1 step 間の蟻移動距離に等しく 1.5 grid とする（このとき蟻は最大 9 個の地上格子点の信号を感知し移動できる．信号に従う時，蟻は格子点上を移動するが，格子点上の蟻が隣接格子点の信号を感知し移動するためには 1 grid 以上が必要）．
- 探索中の蟻は確率 0.1/step でランダムに進行方向を転換し（方向転換率が極端に高い場合には蟻の平均移動速度が落ちるため探索コストが上がる），上記領域の境界線で領域内部に反射する．
- 蟻 1 個体は一度に餌 1 unit を輸送する．

このような蟻コロニーモデルが集合現象を示すには“1匹の蟻の残した信号が消える前に 1 匹以上の蟻が動員され信号を上書きする”ことが必要であり，このとき“個体密度あるいは信号強度が臨界値を超えると

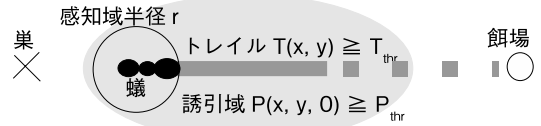


図2 道標フェロモンの作る信号領域
Fig.2 Signal regions of recruit pheromone.

非誘引モデル

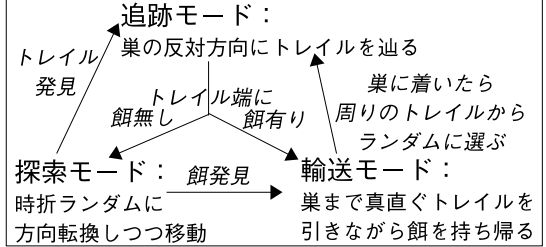


図3 非誘引モデルの蟻の行動モード間遷移則
Fig.3 Behavior of ants in each mode and mode transition rule in trail model.

集合現象が発生する”ような単純な状態変化が観察される³⁾．

2.1.4 道標フェロモン信号のモデル化

地上および大気中の道標フェロモン濃度 $T(x, y)$ ， $P(x, y, z)$ を用いてフェロモンの蒸発 (1) と拡散 (2) を以下のように定式化し，これを格子点上で差分化して 1 step につき 3 回計算した．

$$(\partial/\partial t + \gamma_{vap})T(x, y) = 0 \tag{1}$$

$$(\partial/\partial t - \gamma_{dif}\Delta)P(x, y, z) = 0 (z > 0) \tag{2}$$

$$or = \gamma_{vap}T(x, y) (z = 0)$$

ただし $\Delta = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2)$

$T(x, y)$ ， $P(x, y, 0)$ が閾値 T_{thr} ， P_{thr} より大きい領域を各々トレイル及び誘引域と定義する（図2）．

トレイルの存在時間は {フェロモン分泌量/ T_{thr} } と減衰係数 γ_{vap} の比で決まり，誘引域の広さは {フェロモン分泌量 $\times \gamma_{vap}/P_{thr}$ } と拡散係数 γ_{dif} の比で決まる．本稿では 1 匹の蟻が残したトレイルが他の蟻を餌場に動員するまで持続するよう $\gamma_{vap} = 3 \times 0.07$ ， $T_{thr} = 0.01$ ，蟻 1 個体の 1 step 間のフェロモン分泌量 = 10.0 とおいた．またこのとき誘引域が蟻の感知域よりも十分大きく広がるよう $\gamma_{dif} = 3 \times 0.14$ ， $P_{thr} = 0.01$ とおいた．

2.2 非誘引モデルの設計とその挙動

2.2.1 非誘引モデルの行動モード遷移則

初めに蟻が地上のトレイルだけに感受性を持つ最も単純な非誘引モデルを設計する．コロニーは探索・輸送・追跡モード蟻からなり，それぞれ探索・輸送・動員サブタスクを遂行する．図3に示す各モードの蟻

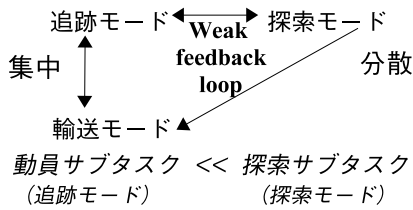


図 4 非誘引モデルの各モード蟻集団間のダイナミクス
Fig. 4 Distribution of ants in each mode and their dynamics in trail model.

の行動とモード遷移条件を以下に列挙する。

- 探索モード蟻は時折ランダムに方向転換しながら直進し、餌を見つけると輸送モードへ、トレイルを見つけると追跡モードへ移行する。
- 追跡モード蟻は巣と逆方向にトレイルをたどり、トレイル端に餌があれば餌を取って輸送モードへ移行し、餌がなければ探索モードへ移行する。
- 輸送モード蟻は巣まで真っ直ぐ餌を持ち帰り、巣についたら餌を放置して追跡モードに移行し、巣周辺のトレイルの中からランダムに1つを選択する。

2.2.2 非誘引モデルの数値実験例

図 14-1 (後出) には非誘引モデルの数値実験例を示している。この数値実験は餌場 5 カ所、餌の塊サイズ 300 units の餌供給条件下で行った。図 14-1 左の分布図で、大きい灰色の点は餌場、青紫色の領域はトレイル、小さい点は蟻を示す (水色・黄・朱色の点は探索・追跡・輸送各モードの蟻を示す)。図 14-1 右中段は (上から下へ) 探索、追跡、輸送各モード蟻の割合について 200 step 分の履歴を示す。図 14-1 右下段はコロニーの餌獲得量について 200 step 分の履歴を示す。

非誘引モデルでは探索モードの蟻が多く、すべての餌場に弱い安定した動員が起きることが分かる。

2.2.3 非誘引モデルのダイナミクス

各モード蟻とトレイルの空間分布を考慮して図 3 の行動モード間遷移則から非誘引モデルの各モード蟻集団間のダイナミクスを構成したものを図 4 に示す。探索モード蟻は広く分散するが他の蟻はトレイル上に集中する。面積の狭いトレイルでは多数の蟻を動員できないので、特に餌場が少ない場合、多くの蟻が探索に無駄な時間を費やす。このとき非誘引モデルには全サブタスクを循環する弱いフローが現れる。

2.3 誘引モデルの設計とその挙動の説明

2.3.1 誘引モデルの行動モード遷移則

動員サブタスクを強化するため、蟻がトレイルと誘引域の両方に感受性を持つ誘引モデルを設計し、図 5 に示すようにモード間遷移則に誘引モードを付け加え

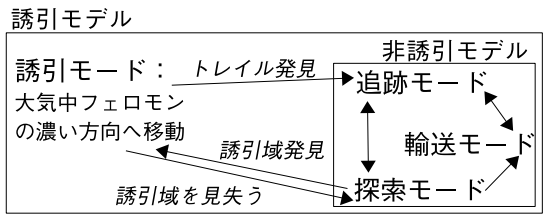


図 5 誘引モデルの蟻の行動モード間遷移則
Fig. 5 Behavior of each mode ants and mode transition rule in attraction model.

る。誘引モード蟻の行動は次のとおり。

- 探索モード蟻が誘引域を見つけたら誘引モードに移行する。
- 誘引モード蟻は感知域中の大気中フェロモン濃度最大点に移動し、トレイルを見つけたら追跡モードに移行し、誘引域を見失ったら探索モードに移行する。

2.3.2 誘引モデルの数値実験例

図 14-2a, b, c には誘引モデルの数値実験例を示している (餌供給条件は図 14-1 に同じ)。図 14-1 の説明に加えて、図 14-2a, b, c 左の分布図では、マゼンタ色の領域は誘引域、その中の黄緑色の点は誘引モードの蟻を示す。図 14-2a, b, c 右中段では (上から下へ) 探索、誘引、追跡、輸送各モード蟻の割合について 200 step 分の履歴を示している。

誘引モデルはデッドロックを繰り返し、不規則かつ不安定な長期変動を示すことが分かる。この長期変動は、探索モード蟻の割合から以下の 3 段階に分けられる。

- (1) 探索減少段階 (図 14-2a): 探索モード蟻が多い間はすべての餌場に動員が起こるが、探索モード蟻が誘引域内部に捕われ急減するにつれ、動員サブタスク (誘引 + 追跡モード) 蟻が増増する。
- (2) 過剰動員段階 (図 14-2b): 探索モード蟻の極端な減少にとともに、信号領域内に囲い込まれた大量の動員サブタスク蟻が少数の餌場に次々と集中して動員を起す。以下にその機構について簡単に説明する。餌場に動員された大量の蟻の集団は、餌を取り尽くした後トレイルが蒸発するまで空のトレイル端周辺にとどまる (図 14-2b 左)。トレイル蒸発後これらの蟻はいっせいに誘引モードに移行し、誘引域が蒸発するか他の誘引域に呑み込まれるまで、誘引域内のフェロモン濃度最大点にとどまり続ける (このような空のトレイル端や誘引域中最大点を“偽信号”とする)。過剰動員段階では探索モード蟻が極端に減るため新しい餌場の探索に長い時間がかかるが、いったん新しい餌場が見つかり、偽信号に動員されていた大量の蟻が信号に従い一塊になってその餌場へと移動し、短時間で餌

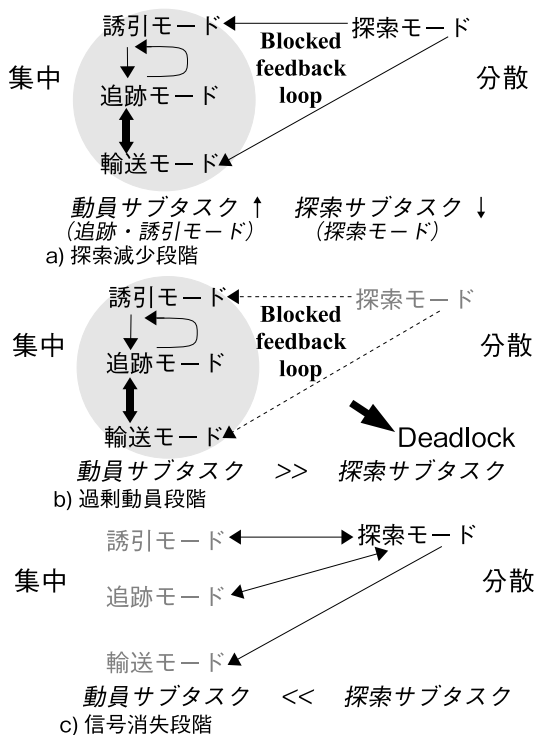


図6 誘引モデルの各モード蟻集団間のダイナミクス
Fig.6 Distribution of ants in each mode and their dynamics in attraction model.

を取り尽くす．そのため過剰動員段階では動員サブタスクの極端な優勢とともに餌獲得量やモード間配分の激しい不規則な変動が観察される(図14-2b右)．偽信号の消失までに新しい餌場を発見できない場合、デッドロックに陥る．

(3) 信号消失段階(図14-2c)：デッドロック発生後に誘引域が蒸発すると、すべての蟻が探索モードに戻り地上に広がる．これらの蟻が新たな餌場を見つけて再び探索減少段階に移行するまでのごく短期間、探索サブタスクの独占が観察される．

以上の長期変動のサイクルは不規則だが、供給される餌の塊が小さくなるにともない短くなる傾向にある．

2.3.3 誘引モデルのダイナミクス

前項の長期変動の発生機構を説明するため、誘引モデルのダイナミクスを図5の行動モード間遷移則と各種空間分布から構成したものを図6に示す．誘引域の内部では誘引・追跡モードから探索モードへの遷移が妨げられるので、全サブタスクを循環するフローが遮断される(図6a, b)．そのため探索減少段階(図6a)では、探索サブタスク蟻が誘引域に捕捉されて急減し、その分動員サブタスク蟻は急増する．さらに過剰動員段階(図6b)では、大量の動員サブタスク蟻が新し

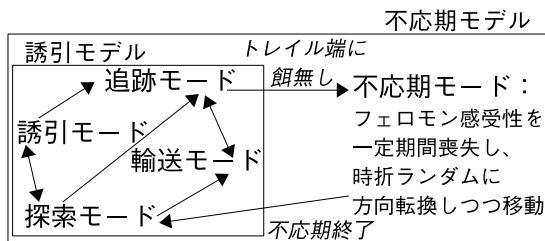


図7 不応期モデルの蟻の行動モード間遷移則
Fig.7 Behavior of ants in each mode and mode transition rule in desensitization model.

い餌場への動員を待機しながら偽信号に拘束される間、探索サブタスク蟻の極端な減少によって新しい餌の探索が困難になり、いずれデッドロックが発生する．誘引・追跡モードから探索モードへの遷移が復活するのはデッドロック発生後の信号消失段階(図6c)で、このとき誘引域が消失してすべての蟻が探索モードに戻る．

2.4 不応期モデルの設計とその挙動

2.4.1 不応期モデルの行動モード遷移則

前節の誘引モデルの過剰動員を解消するため“空のトレイル端に動員された蟻は一定期間フェロモン感受性を喪失する”と仮定し、行動モード間遷移則に不応期モードを付け加えた不応期モデルを設計する(図7)．不応期モード蟻の行動は次のとおり．

- 輸送モード蟻が餌のないトレイル端にだどりつくと、不応期モードに移行する．
- 不応期モード蟻は一定期間フェロモン感受性をなくし、時折ランダムに方向転換しながら直進する．不応期終了後は探索モードへ移行する．

本モデルでは誘引域を越えて不応期モード蟻が広がるよう道標フェロモン不応期間を20 stepとした．

2.4.2 不応期モデルの数値実験例

図14-3には不応期モデルの数値実験例を示している(餌供給条件は図14-1, 2に同じ)．図14-1, 2の説明に加えて、図14-3左では青い点是不応期モード蟻を示す．図14-3右中段では(上から下へ)不応期、探索、誘引、追跡、輸送各モード蟻の割合について200 step分の履歴を示している．

不応期モデルは短期的な変動は示すものの、すべての餌場への安定した動員と探索・動員両サブタスクへの偏らない配分と高い採餌効率を示すことが分かる．

2.4.3 不応期モデルのダイナミクス

不応期モデルのダイナミクスを図7の行動モード間遷移則と各種空間分布から構成したものを図8に示す．不応期モデルでは不応期モード経由の新しいパスの形成により探索モードへのフローが生じるため、探

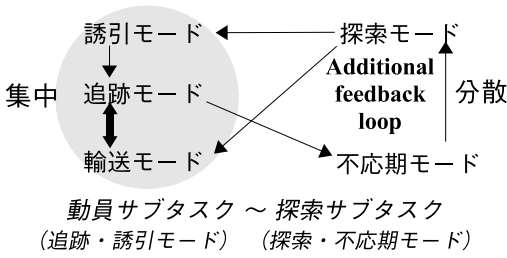


図 8 不応期モデルの各モード蟻集団間のダイナミクス
 Fig. 8 Distribution of ants in each mode and their dynamics in desensitization model.

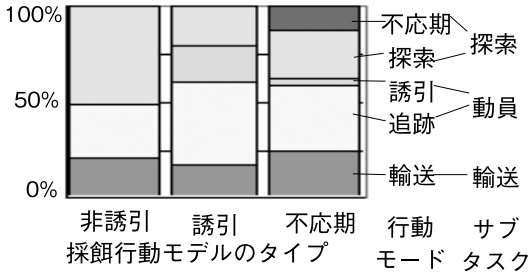


図 9 配分調整：各モデルの各モード蟻割合の時間平均の比較
 Fig. 9 Allocation among subtasks: average rate of ants in each mode in three foraging models.

索モード蟻の増加によりすべての餌場への動員が起これると同時に、探索モードから誘引・輸送モードへのフローも復活する。このとき蟻は無駄に滞留することなく全サブタスク間で循環するため、不応期モデルは探索・動員サブタスク間のトレードオフにより高い採餌効率を実現する。

2.5 3種類の採餌行動モデルの比較

これら3種類の採餌行動モデルの挙動を、分業調整・動作の安定性・採餌効率の3点で比較した。

2.5.1 サブタスク間配分調整の比較

餌場5カ所・餌の塊サイズ300 unitの餌供給条件下で各モデルの数値実験を5,000 step行い、各モード蟻割合の時間平均を図9に示す。各モデルの特徴は次のとおり。

- 非誘引モデルではトレイルが狭く十分な動員が起きないので、蟻はトレイルや新しい餌を見つけるまで長い時間をランダムな歩行に費やしており、半分以上の時間が探索サブタスクに配分されている。
- 誘引モデルでは、過剰動員段階で蟻は偽信号に長時間拘束されるため(全段階を時間平均した場合でも)半分以上の時間が動員サブタスクに配分されている。
- 不応期モデルは蟻が無駄な時間を費やさず全サブタスク間で循環するように設計されているので、探索・動員サブタスク間のトレードオフにより輸送サブタスクへの配分の増加を示す。

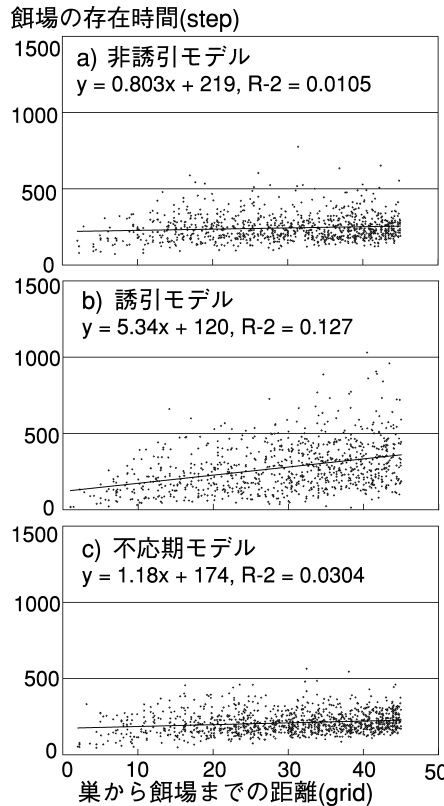


図 10 安定性：各モデルの餌場存在時間分布の比較
 Fig. 10 Stability: Distributions of existence time of food site in three foraging models.

2.5.2 動作の安定性の比較

各モデルの動作の安定性を比較するため、前節の数値実験結果から、巣～餌場間距離に対する“餌場が供給されてから消えるまでの時間”の分布を図10に示す。餌供給条件は前節に同じ。

非誘引・不応期モデルでは安定した挙動を反映し、巣～餌場間距離にあまり依存しない集中した分布を示す。

これに対し誘引モデルでは不安定な挙動を反映して、巣～餌場間距離に強い相関を持ち分散の大きい分布を示す。特に過剰動員段階では“餌場の発見から除去までの時間”は著しく短縮されるが、探索モード蟻の極端な減少のため“餌場の出現から発見までの時間”は長くなるとともに大きくばらつく。このとき信号領域間の動員の競合により巣から遠い餌場の探索が阻害され、巣～餌場間距離と餌場の存在時間の間に強い相関が生じる。

2.5.3 採餌効率の比較

餌供給条件(餌の塊サイズと餌場の数)を変えて3種類の採餌行動モデルの数値実験を行い、各モデルの

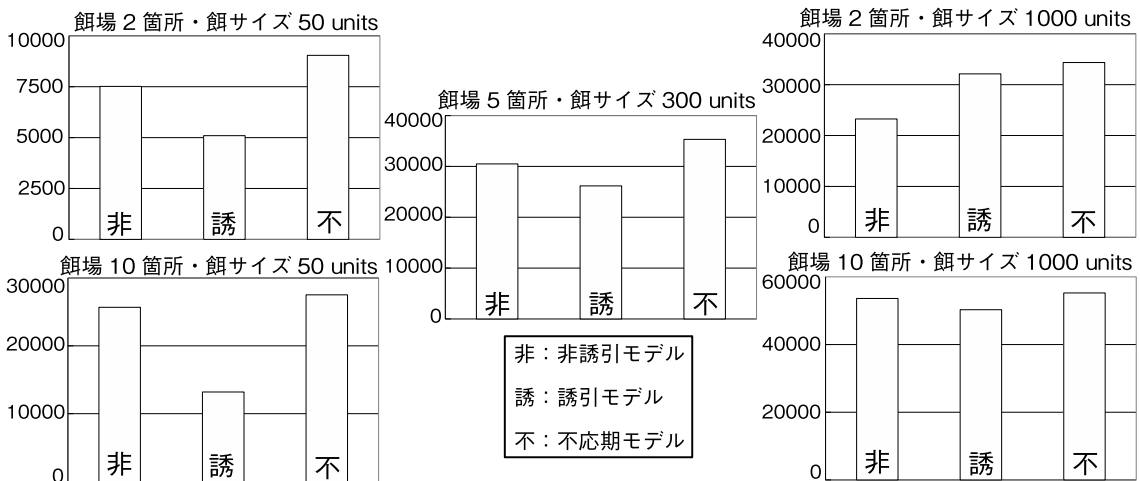


図 11 採餌効率：各モデルの 5,000 step 間の餌輸送量（10 試行平均）の比較

Fig. 11 Foraging efficiency: Amount of food carried by ants in three foraging models for 5,000 steps averaged across 10 simulations.

5,000 step 間の餌輸送量（10 試行平均）を比較して図 11 に示す。結果は以下のように要約される。

- 餌サイズ・餌場数の増加につれ、探索コストの減少により全モデルで餌輸送量が増加する。
- 餌サイズ・餌場数によらず、これらのモデルの中では不応期モデルが最大の餌輸送量を示す。
- 誘引モデルでは餌サイズが小さいときデッドロック頻度が増えるため餌輸送量が相対的に減少する。
- 非誘引モデルでは餌の数が少ないとき信号領域が狭く動員が弱いため餌輸送量が相対的に減少する。ただし信号の持続時間に対し餌サイズが極端に小さい場合には、1 匹の蟻の残した信号が餌場よりはるかに長く持続する事態が生じ、偽信号に動員される蟻が増えるため採餌効率を引き下げる。本稿のパラメータ下では餌サイズが 20 unit 以下または 4 unit 以下のとき、非誘引モデルまたは通信を行わないモデルが最も高い採餌効率を示す。餌サイズが小さい場合にはサイズに応じて時定数の短い信号を使用する等の対応が必要となる。

2.6 蟻の採餌行動のモデル研究について

本章では採餌行動理論⁵⁾の成果をふまえて行動モード間遷移則にサブタスク構造を導入し、サブタスク間の配分調整により採餌効率を上げるよう新モードを順次付加し、3 種類の採餌行動モデルを設計した。なかでも不応期モデルは図 8 に示すとおり、動員・輸送サブタスク蟻の誘引域への集中（近距離の興奮性相互作用）と不応期モード蟻の分散（広い側抑制）により反応拡散系機構⁶⁾と同様のふるまいを示した。

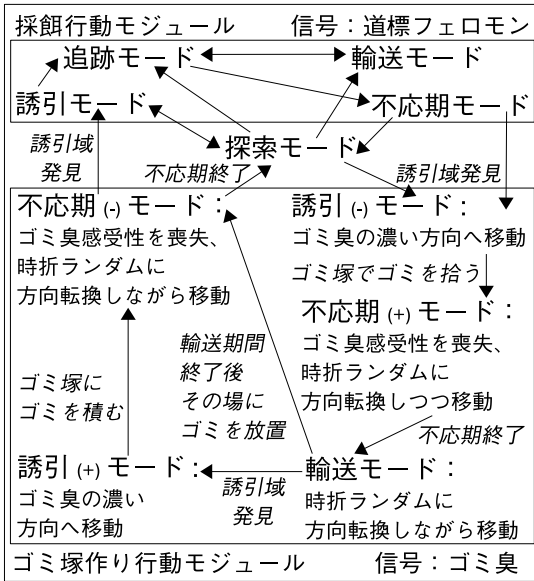
数理生物学分野の集団モデルの多くは、簡単な微分

方程式により個体の挙動を集団間のダイナミクスで近似した人口動態モデルを用いており、空間構造とサブグループ構造を同時に扱うことが難しい^{1),7),8)}。蜂のように広い視野と高い機動性を持つ飛翔性の社会性昆虫と異なり、蟻のような歩行性の社会性昆虫は（少なくとも巣外活動に関しては）信号の空間分布を利用して多様な集合現象を発達させており、両方の構造を同時に取り扱う方法が必要となる²⁾。

これに対しエージェントモデルでは複雑な個体行動の設定が容易で、両方の構造を同時に取り扱うのに適している^{3),9),10)}。Ant Colony Optimization では、本稿のモデルと同様に信号と蟻集団間の相互作用を通じて信号パターンを外部記憶として利用しているが、モデルの目的は経路探索に特化している。Genetic Algorithm (GA) は集合現象の自己組織化や個体行動の進化・組織化を取り扱う点で本稿のモデルと共通している。本稿では生物学的知見を利用して“信号感受性 + 状態遷移 + 作業埋め込み”の組合せを操作し、系の改造を容易にする設計方法を提案した。これに対し GA では創発の結果として合目的な個体行動が進化するが、その際コロニー全体の作業分担がどう組織化されるかは明示されない。GA が最適解の創発を目的とする場合、本稿のように余分な構造を導入して解の探索にバイアスをかけるには十分な考慮が必要となるだろう。

3. 同時に2つのタスクを遂行する分業モデル

次に、独立な信号を用いて採餌行動とゴミ塚作りを同時に遂行する蟻コロニーの分業モデルを設計し（3.1



(+/-) は蟻がゴミを持つか持たないかを示す指標

図 12 分業モデルの行動モード間遷移則

Fig. 12 Behavior of ants in each mode and mode transition rule in task-allocation model.

節), モデルの数値実験結果から 2 つのタスク間の弱い相互作用の存在を確かめ (3.2 節), その際のパターン形成と分業調整の機構について調べる (3.3 節).

3.1 分業モデルの設計

3.1.1 実際の蟻のゴミ塚作り行動の説明

探索中の蟻がゴミを見つけると, ゴミを持ち去って歩き回り, ゴミ塚を見つければ塚にゴミを積み上げ, しばらく経っても塚が見つからなければその場にゴミを置き捨てる. ゴミ塚特有の匂い (オレイン酸等) が蟻をゴミ塚に誘引し, 多数の蟻が同じことを繰り返すうちに地上には少数のゴミ塚が形成される^{(8),(9)}.

3.1.2 分業モデルの行動モード間遷移則

採餌行動とゴミ塚作りを同時に遂行する分業モデルを設計し, その行動モード間遷移則を図 12 に示す. 採餌行動には道標フェロモンを, ゴミ塚作り行動にはゴミ臭を信号に用いており, 蟻はどちらかに排他的に反応する. 図 12 上半分の採餌行動モジュールには 2 章の不応期モデルが用いられ, 図 12 下半分のゴミ塚作り行動モジュールには前節で説明したゴミ塚作り行動がモデル化されている. どちらのタスクにも蟻が滞留しないよう, 不応期モードを介して両タスクモジュールを行動モード間遷移則上で接続している. ゴミ塚作り行動モジュールの各モード蟻の行動は次のとおり (+/- は蟻がゴミを持つか持たないかを示す指標).

- 探索モード蟻や“採餌行動の不応期モード”蟻が

ゴミ塚の誘引域を見つけると誘引 (-) モードに移行する.

- 誘引モード蟻は感知域内のゴミ臭最大点に移動する. ゴミ塚に到達すると, 誘引 (-) モード蟻はゴミを塚から拾い不応期 (+) モードへ移行し, 誘引 (+) モード蟻はゴミを塚に積み上げ不応期 (-) モードへ移行する.

- 不応期モード蟻は一定期間ゴミ臭感受性をなくし, 時折ランダムに方向転換しつつ直進する. 不応期 (+) モード蟻は不応期を終えると輸送モードへ移行する. 不応期 (-) モード蟻は道標フェロモン誘引域を見つけると“採餌行動の誘引モード”へ移行するが, 誘引域に遭遇しないまま不応期を終えると探索モードへ移行する.

- 輸送モード蟻はゴミを持って時折ランダムに方向転換しながら直進する. 輸送モード蟻は輸送期間中にゴミ塚の誘引域を見つけると誘引 (+) モード蟻に移行し, 塚の誘引域に遭遇しないまま輸送期間を終えるとその場にゴミを置き捨て不応期 (-) モードへ移行する.

3.1.3 数値実験に用いた条件とパラメータ

ゴミ臭の拡散は次のように定式化される (ただし, $S(x, y, z)$ は大気中のゴミ臭濃度を示す).

$$(\partial/\partial t - \gamma'_{dif}\Delta)S(x, y, z) = 0 (z > 0)$$

$$or = \gamma'_{vap} \times ((x, y) \text{ 上のゴミ個数}) (z = 0) \quad (3)$$

分業モデルの数値実験のパラメータを以下に示す.

- 採餌行動に関するパラメータは 2 章に同じ.
- ゴミ臭不応期は 20 step, ゴミ輸送期間は 70 step.
- ゴミ臭の減衰・拡散定数と閾値は $\gamma'_{vap} = 3 \times 0.1$, $\gamma'_{dif} = 3 \times 0.1$, $S_{thr} = 0.1$.
- ゴミを放置するとき, 最寄の格子点上に置く.
- 補則として蟻がゴミを巣に戻すことを禁じる.

誘引域が広くなる, あるいはゴミ輸送期間が長くなるにつれ, 形成される塚の数は減少する. また地上のゴミ総量が少ない場合, すべてのゴミを蟻が持ち歩くため塚が形成されなくなる (上記パラメータの下ではゴミ総量が約 200 unit 以下の場合この現象が見られる).

次節では“初期状態で巣の上にゴミ 1,000 unit が積まれており” “つねに 5 か所の餌場が存在するよう 300 unit の餌の塊が順次供給される” 条件下で行った分業モデルの数値実験結果について解説する.

3.2 数値実験結果: タスク間の弱い相互作用

図 14-4 に分業モデルの数値実験例を示す. 図 14-4 左の分布図で, 小さい点は各モード蟻を示す. また, 大きい灰色の点は餌場を, 青紫色の領域はその誘引域

を示す。さらに、大きい黒点はゴミ塚を、ページユ色の領域はその誘引域を示す（塚誘引域は道標フェロモン信号領域に上書きされて表示されている）。図 14-4 右中段には各モード蟻の割合について 200 step 分の履歴を示す（上から下へ：1. 探索 + ゴミ臭不応期 (-) + フェロモン不応期モード, 2. フェロモン誘引モード, 3. 追跡モード, 4. 餌輸送モード, 5. ゴミ臭誘引 (+/-) モード, 6. ゴミ輸送 + ゴミ臭不応期 (+) モード, の蟻の割合を示す）。図 14-4 右下段には餌獲得量について 200 step 分の履歴を示す。

5,000 step × 5 試行の数値実験結果から、分業モデルは次のような弱いタスク間相互作用を示すことが分かる。

- パターン形成：与えられた餌場分布に応じて、常時 10~15 力所程度の大きな塚が生成消滅を繰り返す。
- 分業調整：ゴミ塚作りタスク（ゴミ輸送 + ゴミ臭不応期 (+) + ゴミ臭誘引 (+/-) モード）に 28% もの蟻を配分しているにもかかわらず、分業モデルはかなり高い採餌効率（2 章の不応期モデルの 84%）を維持する（上記のゴミ塚作りタスクにはフェロモンに反応するゴミ臭不応期 (-) モード蟻が加算されていない。同タスクへの蟻の配分を最小限に見積もっていることに注意）。

3.3 分業モデルのダイナミクス

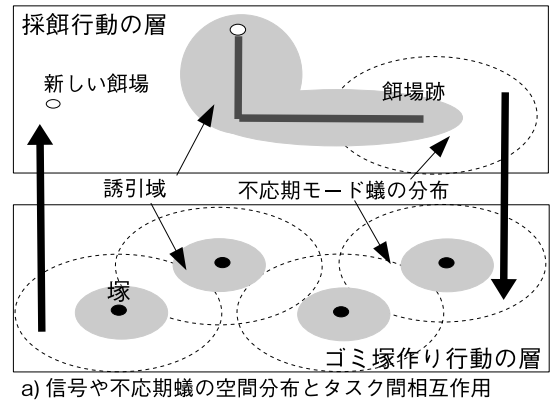
前節の数値実験結果のような弱いタスク間相互作用が生じる機構を図 13 a) を用いて説明する。

- パターン形成：餌場跡の空のトレイル端周辺に局地的にフェロモン不応期個体が増える。これが優先的にゴミ臭に反応し付近の塚からゴミを持ち去るため、餌場跡周辺ではゴミ塚の消滅が頻発し、少し離れた場所に新たな塚が形成される（図 13 a) 上層）。

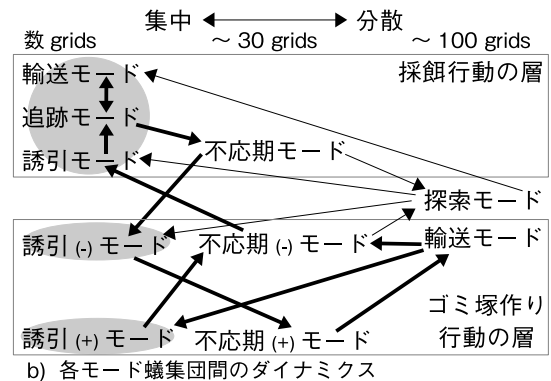
- 分業調整：地上に広がるゴミ輸送モード個体はゴミ放出後に不応期 (-) モードに移行し、優先的にフェロモン信号に反応する。広く分散する不応期 (-) モード蟻が採餌行動の探索サブタスクを補償するよう動作し、採餌効率の低下を埋め合わせる（図 13 a) 下層）。

採餌行動・ゴミ塚作りの両タスクは反応拡散系⁶⁾と同様にふるまうので、2つの反応拡散系を抑制系（不応期モード）を介してつなぐことにより、系全体で餌場の除去に応じた塚分布パターンを形成する。

前述の設計手法を用いて各行動モード蟻集団間のダイナミクスを構成する（図 13 b)）。採餌行動・ゴミ塚作り行動各モジュール単独で蟻コロニーモデルを構成する場合には、各モジュール内部に不応期モード経由で探索モードを通じ遅滞なく蟻を循環させるフローが生じる。不応期モードを通じ両モジュールを接続する



a) 信号や不応期蟻の空間分布とタスク間相互作用



b) 各モード蟻集団間のダイナミクス

図 13 分業モデルの両タスク間のダイナミクス

Fig. 13 Distributions of ants in each mode and their dynamics in task-allocation model.

ことにより2つのフローが融合し、探索モードを経由せず両タスクに蟻を循環させる新たなフローが生じる（図 13 b) 太線）。その結果、採餌効率の埋め合わせ等の両タスク間の相乗効果が観測される。

3.4 ゴミ塚作り行動のモデル化と分業モデル研究

本稿のゴミ塚作り行動は文献 11) のモデルを単純化したものである。同じ文献 11) のモデルをデータの自動分類に特化したモデル⁹⁾も提唱されている。

本稿の分業モデルの数値実験では、採餌行動からの擾乱を受け続けるため、比較的多数の小さなゴミ塚の生成消滅を繰り返す。そこで、ゴミ塚作り行動だけを行う蟻コロニーを構成して数値実験を行うと、上記のモデル^{9),11)}や実際の蟻と同様に、比較的少数の大きな塚を形成する。

Gordon は人口動態モデルを用い、本稿の分業モデルに似た構造を持つ以下の分業モデルを提唱した^{8),12)}。

- タスク i に失敗した蟻が一定確率以上でタスク i に失敗した蟻に会うと刺激への不応状態に遷移する。
- タスク i に失敗した蟻や不応状態蟻が一定確率以上でタスク j に成功した蟻に会うとタスク j に切り替

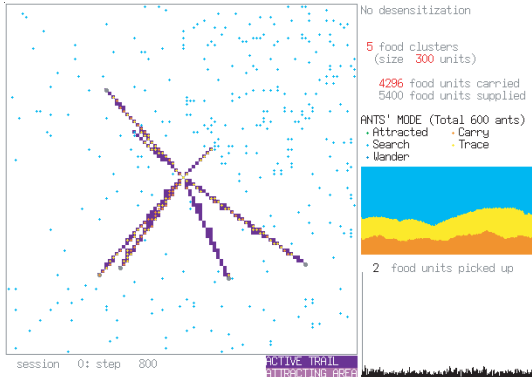


Fig. 14-1 非誘引モデル (800step)

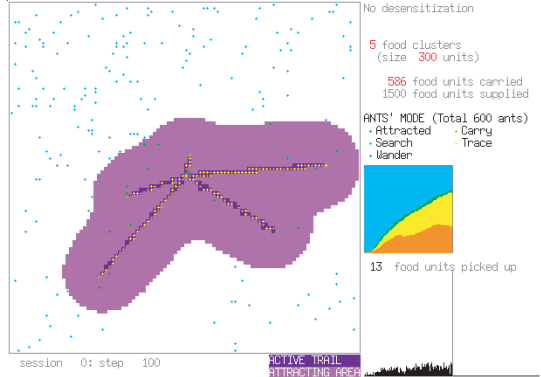


Fig. 14-2a 誘引モデル (100step) : 探索減少段階

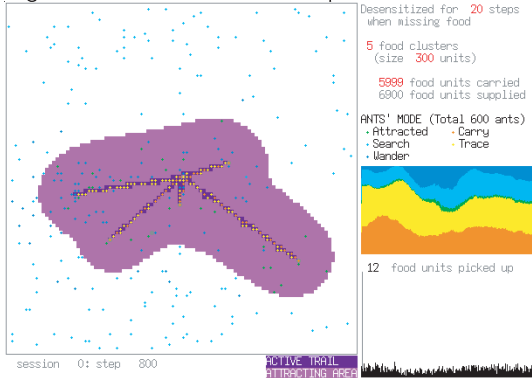


Fig. 14-3 不応期モデル (800step)

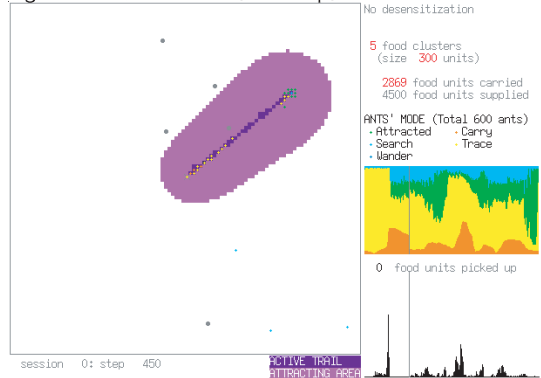


Fig. 14-2b 誘引モデル (450step) : 過剰動員段階

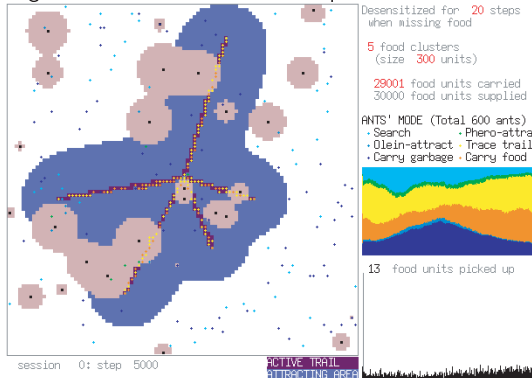


Fig. 14-4 分業モデル (5000step)

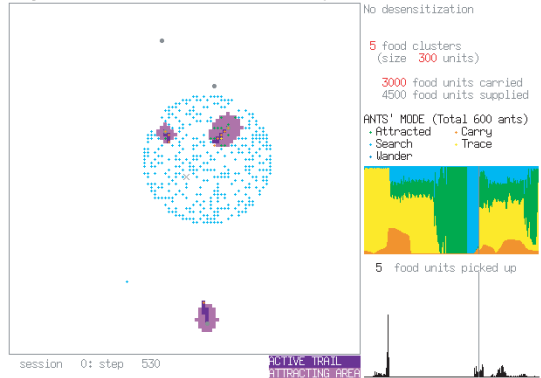


Fig. 14-2c 誘引モデル (530step) : 信号消失段階

図 14 蟻コロニーモデルの数値実験例：採餌行動モデル（非誘引，誘引，不応期）と分業モデル

Fig. 14 Snapshots of ant colony models: Three foraging model and task-allocation model.

える。

このモデルは空間構造を持たずタスクも極度に単純化されているが、迅速に効率的な分業調整を実現する。その際 Gordon が *L. fuliginosus* で観測したような蟻個体間の接触率の制御³⁾ が有効に作用する。

本分業モデルでは個体間の直接接触を考慮していないが、Gordon のモデル同様に不応期モードを介して異なるタスク間をつないでおり、両タスクの不応期

モード蟻分布を反映した効率的な分業調整 (図 13) を行う。

4. 考 察

4.1 本モデルのパラメータ設定について

本稿のモデルでは巣が採餌行動の特異点なので、巣周辺での蟻の行動則変化に対し系の挙動は敏感に変化するが、巣周辺の蟻の行動則が本稿の設定どおりなら

パラメータ変化に対し系はロバストである．このとき系は単純な反応拡散系⁶⁾と同様にふるまうので次の条件が必須となる．

1. 近距離の興奮性相互作用：トレイルが数 step 以上にわたり持続し，誘引域が蟻の感知域より広がるよう，信号パラメータ（減衰・拡散定数，閾値，分泌量）を設定する必要がある．本稿では，多くの蟻に上書きされた偽信号をなるべく早く揮発させたいので γ_{vap} をある程度大きくとった．さらに，新しい餌場を発見した蟻1個体の残すトレイルを他の蟻が餌場に動員されるまで維持したいので γ_{vap} に合わせて T_{thr} を小さくとった．

2. 広い側抑制：不応期モード蟻が誘引域外部に到達できるよう信号不応期の長さを設定する必要がある．不応期が短い場合，不応期モード蟻が誘引域を越えられず過剰動員は解消しない．逆に不応期が長過ぎる場合，蟻が大量に不応期モードに滞留し採餌効率が落ちる．これらを考慮し本稿では不応期を 20 step とした．

4.2 本モデルの生物学的妥当性

4.2.1 蟻の信号不応期について

本稿の非誘引・誘引モデルや塚作り行動のモデルに関しては生物学的に無理のない設定を用いており，実際の各種の蟻の集合現象を定性的に再現する．不応期モデルに関して現在まで蟻の信号不応期は実験上確認されていないが，文献 13) では実際の集合現象において未知の負のフィードバックの存在が繰り返し示唆されており，不応期はそのような機構の中でも特に単純なものである．

不応期の妥当性について，行動主義生物学では採餌成功/失敗という報酬/罰が関わる場合に，様々な動物が容易に感覚閾値を変える実験結果が知られている．また生理学的にも動物の感覚情報処理の様々な段階で，刺激への応答が履歴により変化する機構が確認されている．

4.2.2 モデルの動作の評価基準について

本稿では採餌効率だけを評価基準に用いたが，実際の蟻では採餌リスクを最小化するよう行動する種が多い^{8),13)}．ゴミ塚作り行動に関しては生物学的意義が不明なので（縄張り誇示説⁸⁾もあるが，塚分布を変え続ける理由は未解明），本稿では評価基準を導入しなかった．

4.3 本設計手法の他の分化モデルへの応用について

本手法は多数の同質なエージェントが信号に応じて分化・分業を示す系に応用できる．ただし詳細なモデル化のためには，サブグループ構造を推定できる程度にエージェントの内部状態が観測可能であることが望

ましい．

4.3.1 蟻個体間の直接接触とそのモデル化

触角接触や社会胃の食物交換等による蟻個体間の直接接触は多くの種で観測されている¹⁾．蟻が信号上に密集している状態では本稿の手法を容易に直接接触に拡張できる．ただし *L. fuliginosus*⁸⁾ のように分散状態での直接接触を考える際には，“近隣個体から1個体を捕捉し信号を交換しながら接近遭遇する”ために，高い指向性を持ち迅速に変化する信号（多分視聴覚信号であろう）や広い感知域を考慮しなければならず，本稿の手法には修正が必要となる．同様の機構は，自律分散ロボット間の衝突回避に本手法を応用する際にも必要となる．

4.3.2 蜂コロニーのモデル化

近年ミツバチのゲノム解読が進み，分業に関わる遺伝子発現機構が徐々に解明されている．蜂個体は広い視野と高い機動性を持ち，巣の状態を望ましい状態に保つよう動作する．輻輳を防ぐため，蜂コロニーは蜂の信号感受性に大きな個体差が生じるような様々な機構により制御されている²⁾．蜂コロニーモデルに本稿の設計手法を適用する際には，個体や信号の空間分布の代わりに蜂の信号感受性の分布を考慮する必要がある．

4.3.3 細胞分化モデルへの応用

本稿で用いた反応拡散系は本来，細胞分化のパターン形成モデルとして提唱された⁶⁾．細胞分化にエージェントモデルを導入することにより，複雑な遺伝情報のモデル化がある程度容易になる．本手法を細胞分化のモデルに適用する際には，エージェントの移動の代わりに，細胞の増殖や死・体積排除・不可逆分化等を考慮する必要がある．

5. 結 論

本稿ではまず蟻の分化とパターン形成を同時に取り扱う蟻コロニーの集合現象のモデルの設計手法を提唱する．この手法を用いて，蟻の信号感受性を操作して行動モード間遷移則に構造を導入するとともに各モード蟻の行動則に作業を埋め込むことにより，分業調整が容易になる．本稿ではその実例として以下の2通りのモデルを設計し，それらのダイナミクスを説明する．

1. モード付加による採餌行動モデルの逐次的改造：

- 最も単純な非誘引モデルでは動員が弱いため，蟻は探索に長い時間を費やし，モデル全体で探索サブタスクに偏った配分が生じる．特に餌場の数が少ないとき探索時間が延び，他モデルと比べ採餌効率の低下が著しい．

- 動員強化のため誘引域感受性を付与した誘引モデ

ルでは、蟻は偽信号に拘束され長時間を費やすため、モデル全体で動員サブタスクに偏った配分が生じる。探索サブタスク蟻減少により新しい餌場の探索が妨げられデッドロックを繰り返すため、モデルは不安定で不規則な長期変動を示す。特に餌の塊が小さいときデッドロック頻度が増え、他モデルと比べ採餌効率の低下が著しい。

● デッドロック回避のため不応期を仮定した不応期モデルでは、蟻は各サブタスクを無駄なく循環するため、安定な挙動と探索・動員サブタスク間のトレードオフを示し、他モデルに比べつねに高い採餌効率を示す。

2. タスクモジュールを組合わせた分業モデル：

このモデルは餌場分布に応じたゴミ塚分布パターンを形成するとともに、採餌行動・ゴミ塚作り両タスク間で不応期個体の拡散を介して採餌効率減少を補償するよう弱い干渉を生じる。

参 考 文 献

- 1) Hoelldobler, B. and Wilson, E.O.: *The Ants*, The Belknap Press (1990).
- 2) 松本忠夫, 長谷川寿一 (編): *動物の社会行動, 生物の科学遺伝別冊 16*, 裳華房 (2003).
- 3) Nakamura, M. and Kurumatani, K.: Formation mechanism of pheromone pattern and control of foraging behavior of an ant colony, *Artificial Life V*, Langton, C. and Shimohara, K. (Eds.), pp.67-74, The MIT Press (1997).
- 4) 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, 2), *人工知能学会誌*, Vol.15, pp.829-843 (2000).
- 5) Stephens, D. and Krebs, J.: *Foraging theory*, Princeton University Press (1986).
- 6) Turing, A.: The chemical basis of morphogenesis, *Phil. Trans. B.*, Vol.237, pp.37-72 (1952).
- 7) Deneubourg, J.-L., et al.: Probabilistic behavior in ants; A strategy of errors?, *J. Theor. Biol.*, Vol.105, pp.259-271 (1983).
- 8) Gordon, D.M.: *Ant at work*, The free Press (1999).
- 9) Bonabeau, E., et al.: *Swarm Intelligence*, Oxford Univ. Press (1999).
- 10) 大内 東ほか: マルチエージェントシステムの

基礎と応用, コロナ社 (2002).

- 11) Deneubourg, J.-L., et al.: *The dynamics of collective sorting: Robot-like ant and ant-like robot, From animals to animats 1*, pp.356-365, The MIT Press (1991).
- 12) Pereira, H. M. and Gordon, D. M.: A trade-off in task allocation between sensitivity to the environment and response time, *J. theor. Biol.*, Vol.208, pp.165-184 (2001).
- 13) Detrain, C., et al.: *Information processing in social insects*, Birkhaeuser (1999).

(平成 16 年 12 月 31 日受付)

(平成 17 年 6 月 13 日再受付)

(平成 17 年 8 月 24 日再々受付)

(平成 17 年 9 月 3 日採録)



中村 真理

1989 年東京大学工学部計数工学科数理工学コース卒業。同年電子技術総合研究所入所。ライフエレクトロニクス研究センター所属。2004 年産業技術総合研究所セルエンジニアリング研究部門所属。日本数理生物学会会員, 日本神経回路学会会員ほか。生物の数理モデル化に興味を持つ。



車谷 浩一 (正会員)

1989 年東京大学大学院工学系研究科博士課程精密機械工学専攻修了。工学博士。同年電子技術総合研究所入所。情報科学部所属。1996 ~ 1997 年, スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) 人工知能研究所 (LIA) 客員研究員。1999 年創発大域ダイナミクスラボリーダ。2001 年産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センターマルチエージェント研究チーム長。2004 年情報技術研究部門マルチエージェントグループ長。マルチエージェント, 社会シミュレーション, 複雑系ネットワーク, コピキタスコンピューティング等に興味を持つ。