

## 環境変化下での蟻集団のトレイル戦略評価

大阪府立大学 工学研究科 田尾知巳(Tomomi Tao)  
中川寛之(Hiroyuki Nakagawa)  
西森拓(Hiraku Nishimori)  
Department of Mathematical Science  
Osaka Prefecture University

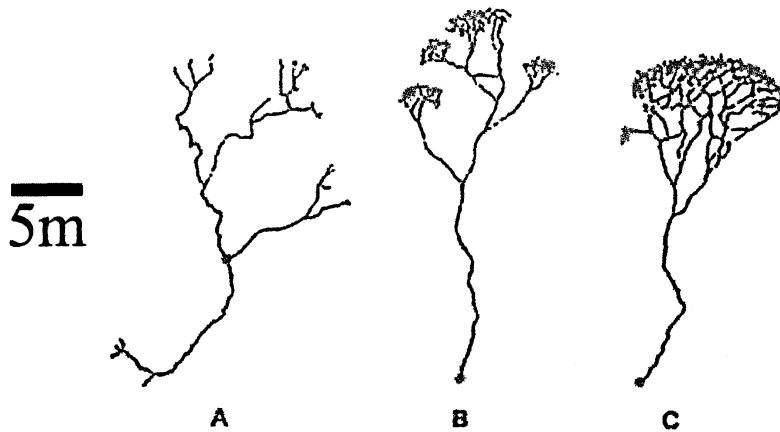
### 1. はじめに

社会性昆虫として知られている蟻は、フェロモンを媒介とした利他行動をとることにより、1個体能力の単純総和よりも、集団としてはるかに大きな仕事を果たすことが知られている<sup>1-13)</sup>。この現象は一般的に群知能と呼ばれている。このような現象に着目し、限られた能力しか持たない個体が、集団として機能する事で、どれだけ大きな仕事を取り出せるものなのかという事を、実際の生物現象と比較を交えてシミュレーションを行い調べた。更に、その結果に対して、いかにしてその仕事量が決定するのかを示し、環境変動下で蟻集団のとっている採餌戦略の有効性を評価した。

### 2. モデル

蟻集団に関する研究は、生物学を中心として古くから盛んにされており、数多くの研究結果が報告されている<sup>1-13)</sup>。図1は、軍隊蟻が採餌時に集団として、巣のような場所から餌場までの間に作る道(トレイル)<sup>1-8)11-13)</sup>のパターンの観測結果である。A, B, Cそれぞれ種が違う軍隊蟻で、採る餌の種も異なる。Cは、採る餌の1個体サイズが小さく、存在する数が多いような餌環境でのトレイルパターン。Aは、餌の1個体サイズが大きく、数が少ない餌環境でのトレイルパターンを表している。Bは、それぞれの中間の状況となっている。これらの採餌行動において共通している特徴は、餌の存在が不確実で変化するという要素と、それに対応するようにトレイルパターンが分岐しているところである。

我々はまず、環境が変化する状況下で、このように集団が環境に適応するようなモデルを構築し、分岐パターンの再現を目指し、モデルの有効性を確かめた後、そのパターンと仕事量を比較することによって、集団の採餌行動の評価を行なっていく。



Eciton hamatum    Eciton ranax    Eciton burchelli  
 Rettenmeyer 1963    Burton & Franks 1985

図1. 蟻集団の採餌行動パターンの観測結果

#### フェロモン相互作用

蟻同士の相関は、フェロモンを媒介として行なわれていることが、実験と観測からすでに明らかになっている。採餌の際には、特に、餌を見つけた後、その餌を巣まで持ち帰る間中、他の蟻に餌があることを知らせるためにリクルートフェロモンを放出し、地面にマーキングすることが解っている。他の蟻は、そのリクルートフェロモンを辿ることによって、餌場までたどり着き易くなる。更に、蟻が足の裏から足跡フェロモンを地面につけながら歩いていることが、近年、京都工繊大学の山岡教授の実験から解っている。これは、世界的には未だ広く知られておらず、過去の蟻集団のモデルには採用されていない。

我々は、この足跡フェロモンと、リクルートフェロモンの2種類のフェロモンを使うモデルを構築した。(足跡フェロモンを採用することにより、従来のモデルよりも観測結果に近いパターンを示すことができた。)

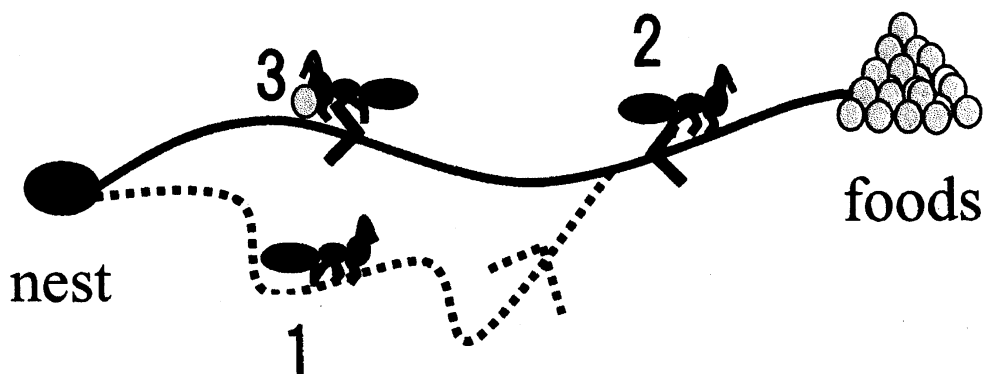


図2. 蟻の各モードの説明

### 蟻のモード

蟻は、図2のような3つのモードを持つとする。

モード1：ランダムモード

巣から出た蟻は、頭方向の前3方向に

対してランダムに選んで進む。

この時、足跡フェロモンを放出。

進んだ先の格子に閾値以上のリクルート

フェロモンがあれば、モード2に移行する。

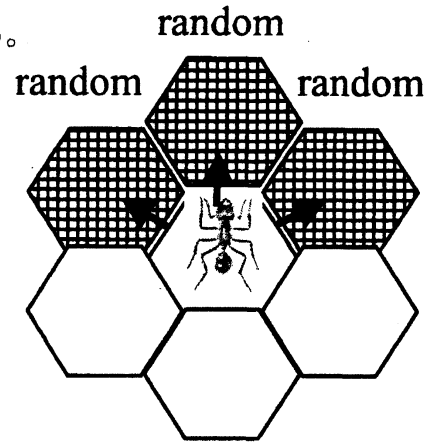


図3. ランダムモード

モード2：追跡モード

頭方向の前3方向から、リクルートフェロモン濃度に依存した確率で選んで進む。この時、足跡フェロモンを放出。餌に辿りつければモード3へ移行する。

$$P_a = \exp(-\Delta a/T)/Z \quad (1)$$

$$\Delta = \rho_{rec}^a - \rho_{rec}(x,n) \quad (2)$$

$P_a$ ：選択される方向の確率  $a$ ：頭方向の前3方向のいずれかの方向

$\rho_{rec}$ ：リクルートフェロモン濃度  $x$ ：蟻の位置

$Z$ ：規格化因子  $T$ ：ランダムネス  $n$ ：タイムステップ

モード3：帰巣モード

頭方向の前3方向から、足跡フェロモン濃度に依存した確率で選んで進む。この時、リクルートフェロモンを放出。

$$P_a = \exp(-\Delta a/T)/Z \quad (3)$$

$$\Delta = \rho_{foot}^a - \rho_{foot}(x,n) \quad (4)$$

$\rho_{foot}$ ：足跡フェロモン濃度

### フェロモンの時間発展

フェロモン以下の式で蒸発、拡散するとする。

$$\rho_b(x,n+1) - \rho_b(x,n) = -A_b \rho_b(x,n) \quad (5)$$

$$\rho_b(x,n+1) - \rho_b(x,n) = -D(\langle\langle \rho_b(x,n) \rangle\rangle \cdot \rho_b(x,n)) \quad (6)$$

b: フェロモンの種類

A: 蒸発係数 D: 拡散係数

$\langle\langle \rangle\rangle$ : 蟻の位置 x とその近傍の格子との平均

### 3. シミュレーション

右図のような巣が一箇所、上方に位置が固定された2箇所の餌場を設置する。

150×150の三角格子

周期境界

蟻の総数500

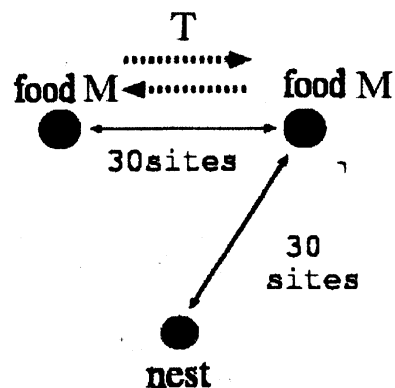


図4. シミュレーションの設定

初期状態: すべての蟻は、巣の位置。モードはランダムモード。

給餌のスケジュール: 左右片方ずつ、餌量Mを周期Tで与える。

このMとTをコントロールパラメータとしてモンテカルロシミュレーション<sup>15,16)</sup>を行なった。

### 4. シミュレーション結果

図5は、餌供給量Mと、給餌周期Tの状況でのトレイルパターンをアンサンブル平均した結果。V字、Y字、I字などの典型的なパターンが見られた。(VやY字のパターンは、図7のようにスナップショットとして見ると、片側だけのトレイルとなっているが、時間平均をとっているため、図5のようなパターンとなっている。)

図6のグラフは、それぞれのトレイルパターンの給餌量に対する餌獲得効率を表している。ここで、効率は、単位モンテカルロステップ<sup>15,16)</sup>当たり蟻が巣に持って帰ってきた餌量と定義している。1個体の蟻が1回に持って帰ってこられる餌量は、1とした。餌が増えるにしたがってトレイルパターンの遷移が見られた。

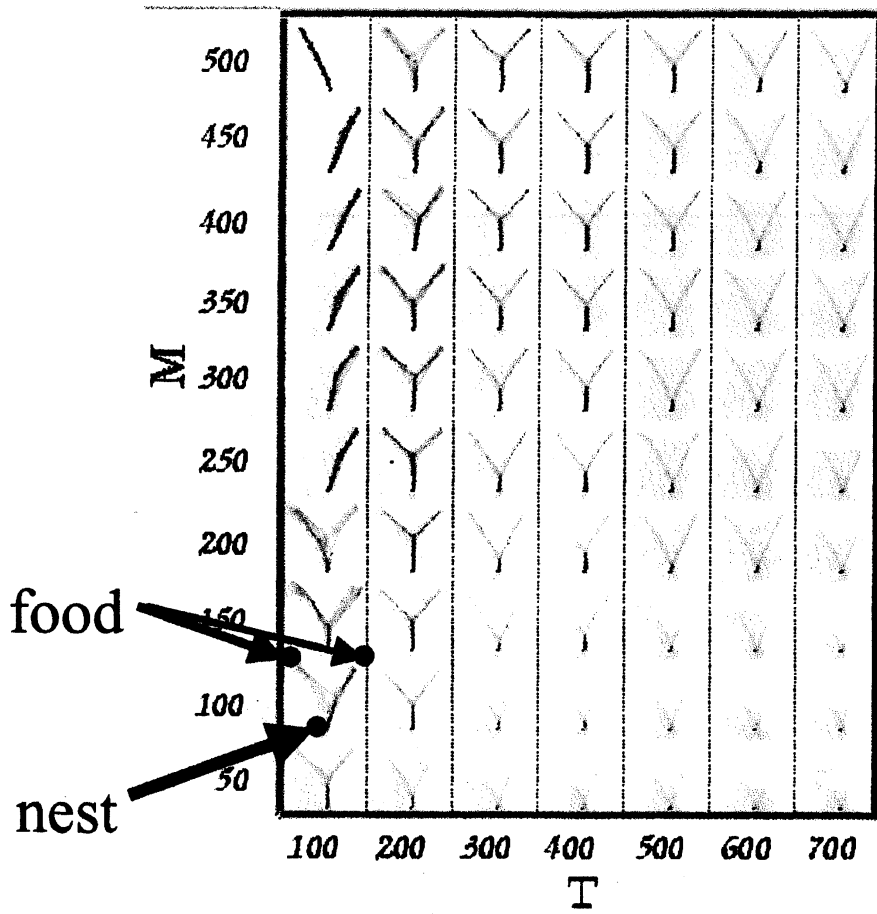


図5. 餌量 $M$ と給餌周期 $T$ に対するトレイルパターン

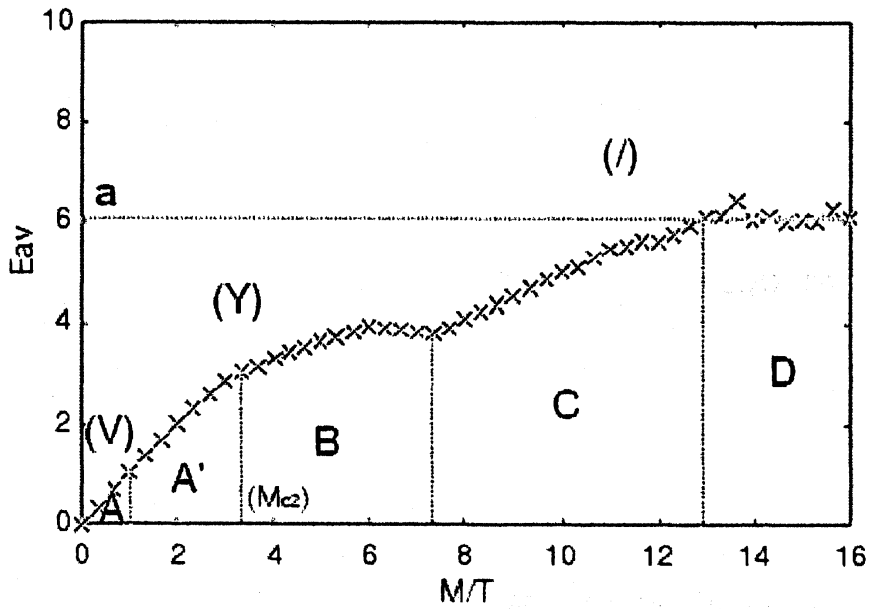


図6. シミュレーション結果2: 採餌効率とパターンの関係性 (給餌周期  $T=600$ )

## 7. 分析

図6の結果の各給餌量とトレイルパターンの関係性はいかにして決まるのか、そして、その採餌戦略であるトレイルパターンは、効率という観点から見て有効な戦略なのかを調べるために、以下のような定義を行なって分析を行う。

$$a_v = \gamma N * (mv / 2L) \quad (7)$$

$$a_y = \gamma N * (mv / 2L') \quad (8)$$

ここで  $a_v$ ,  $a_y$  は、それぞれトレイルパターン戦略における単位時間毎の集団の餌獲得量。  $m$  は、1固体の蟻が持てる餌量。  $N$  は、蟻総数。  $v$  は、1個体の蟻の速度。  $\gamma$  は、すべての蟻が採餌に参加している(トレイル上にいる)訳ではないことから、蟻の採餌参加率とした。  $L$  は、それぞれのトレイルの巣から餌までの距離を表している。

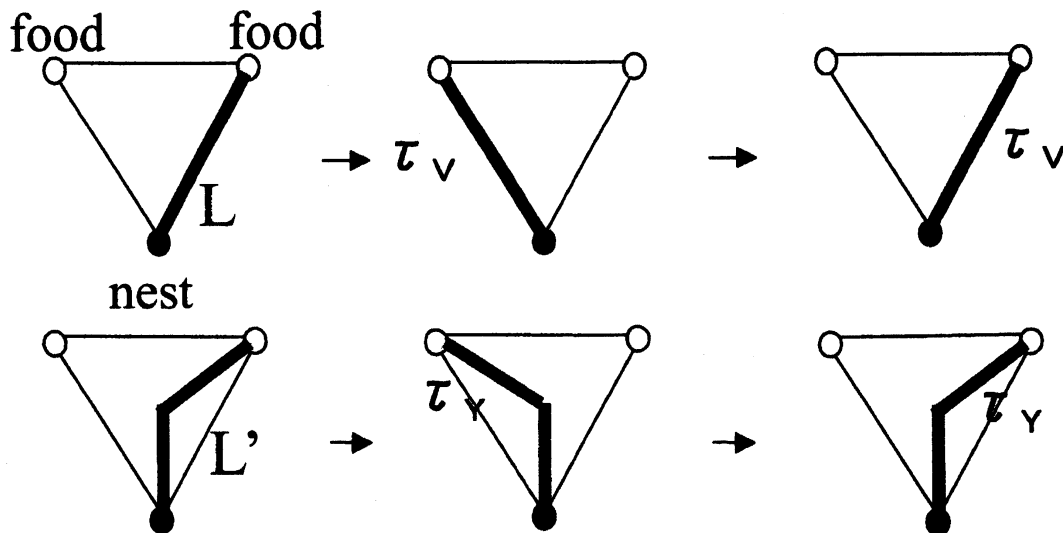


図7. トレイルの形成とそれまでの時間  $\tau$

更に、蟻が新たに巣から餌場にトレイルを作るまでの時間を  $\tau$  と定義する。蟻は、片方の餌を採り尽すと、リクルートフェロモンの放出を取り止めるので、トレイルは維持できなくなり消滅する。そして新たな餌場を求めて新たなトレイルを作る。その時にかかる時間を  $\tau$  とした。図7を見ると分かるように、V字のトレイル戦略をとると、餌場までの距離はY字の場合に比べると短くなるが、餌を採り尽した時、新たにトレイルを作るまでの時間はY字の場合と比べて長くなり、V字戦略とY字戦略との間にはトレードオフの関係性が存在する。

以上の定義を、餌場餌量の時系列のグラフ上に示したのが、図8である。(図8はV字戦略)  $M_{c1}$  は、給餌周期  $T$  の間で、蟻が完全に片方の餌場の餌を採り

尽す量が、給餌した餌量と一致する時の餌量を表す。 $M_{C2}$ は、Y字戦略下での同量を表すものとする。図8の右図のように、給餌周期 $T$ の間に蟻が餌を採り尽くせない状態の時、餌の残量 $M_{res}^V$ が発生することとなる。

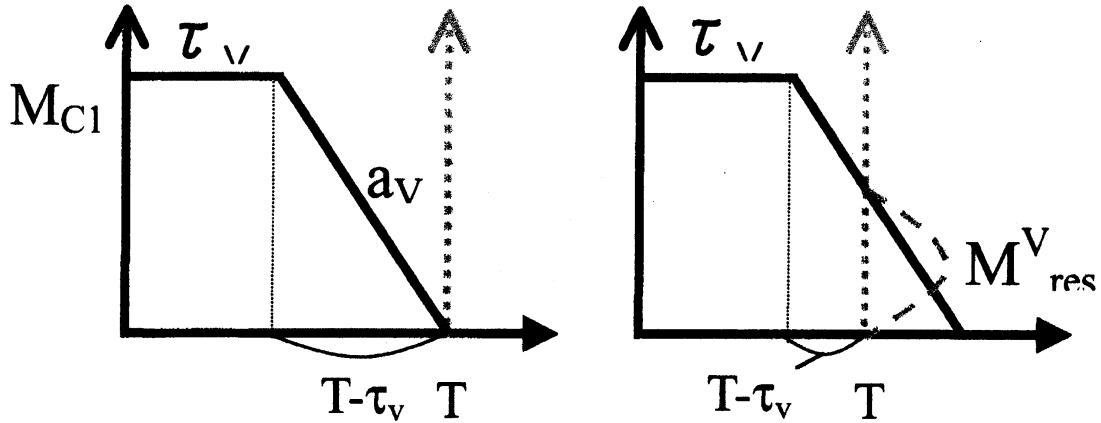


図8. 餌場餌量の時系列(V字トレイル)

残量が発生しない状況での $M_{res}^V$ と効率はそれぞれ(9),(10)式となり、残量が発生する状況での $M_{res}^V$ は、それぞれ(11),(12)式となる。

$$M_{res}^V(T) = 0 \quad \left(\frac{M}{T} < \left(1 - \frac{\tau_v}{T}\right)a_v\right) \quad (9)$$

$$E_{av}^V = \frac{M}{T} \quad (10)$$

$$M_{res}^V(T) = M - (T - \tau_v)a_v \quad \left(\frac{M}{T} \geq \left(1 - \frac{\tau_v}{T}\right)a_v\right) \quad (11)$$

$$E_{av}^V = \left(1 - \frac{\tau_v}{T}\right)a_v \quad \left(1 - \frac{\tau_v}{T}\right)a_v \quad (12)$$

同様にして、Y字戦略時の残量、効率は、以下のようになる。

$$M_{res}^Y(T) = 0 \quad \left(\frac{M}{T} < \left(1 - \frac{\tau_Y}{T}\right)a_Y\right) \quad (13)$$

$$E_{av}^Y = \frac{M}{T} \quad (14)$$

$$M_{\text{res}}^Y(T) = M - (T - \tau_Y)a_Y \quad \left(\frac{M}{T} \geq \left(1 - \frac{\tau_Y}{T}\right)a_Y\right) \quad (15)$$

$$E_{\text{av}}^Y = \left(1 - \frac{\tau_Y}{T}\right)a_Y \quad (16)$$

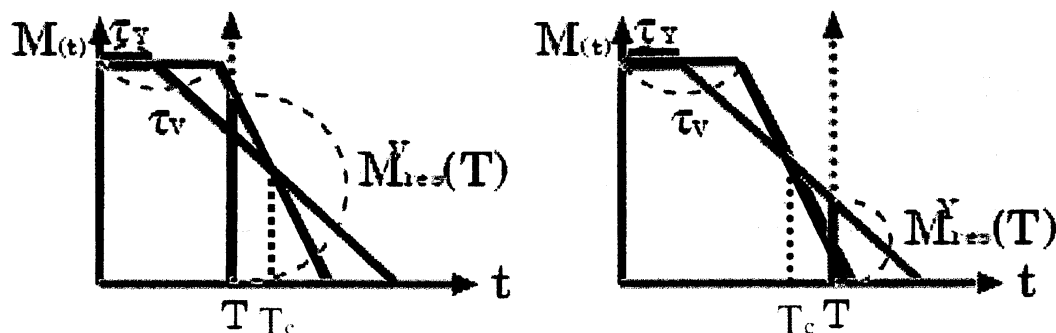


図9. 給餌周期  $T$  と、V字、Y字戦略の残量の関係

図9は、V字、Y字戦略それぞれの残量が、給餌周期  $T$  が変化する時にどのような関係性になるのかを示すグラフである。丁度、V字、Y字の残量が一致する状況での給餌周期を  $T_c$  とした。給餌周期  $T$  が  $T_c$  よりも小さい時、Y字戦略を選択した方がV字戦略よりも残量が少なくなるために、採餌戦略としては有利であると言える。給餌周期  $T$  が  $T_c$  よりも大きい時は、逆の関係となっていることが分かる。 $T_c$  は、式(11)(15)から、式(17)のように表すことができる。

$$T_c = \frac{\tau_v a_v - \tau_Y a_Y}{a_v - a_Y} \quad (17)$$

図6の結果は、給餌周期  $T=600$  であるので、 $T_c$  を確かめることにより図6の結果の採餌戦略の選択の有効性を評価することができる。シミュレーションでは、 $m=1$ ,  $N=500$ ,  $v=1$ ,  $L=30$  と設定して計算し、シミュレーション結果から採餌参加率が  $\gamma=0.8$  と見積もれるため、これらの値を式(7),(8)に代入すると  $a_v, a_Y$  が出る。 $\tau_v, \tau_Y$  は、 $M_{c1}$  をV字戦略が崩れてY字戦略へ移行しだした時の給餌量を、 $M_{c2}$  は、Y字戦略の効率が式(14)の線からずれ始めた時の給餌量として結果から見積もり、それぞれを式(11)(15)に代入し求め、式(17)の値を出すと、 $T_c=1600$  となった。図6の結果は  $T_c$  よりも小さい状況での結果であるので、給餌量が増えた場合に、シミュレーション結果で蟻集団がV字戦略からY字戦略に戦略を移行しているのは、効率の高い戦略を環境変化に適応して選択していると評価することができる。



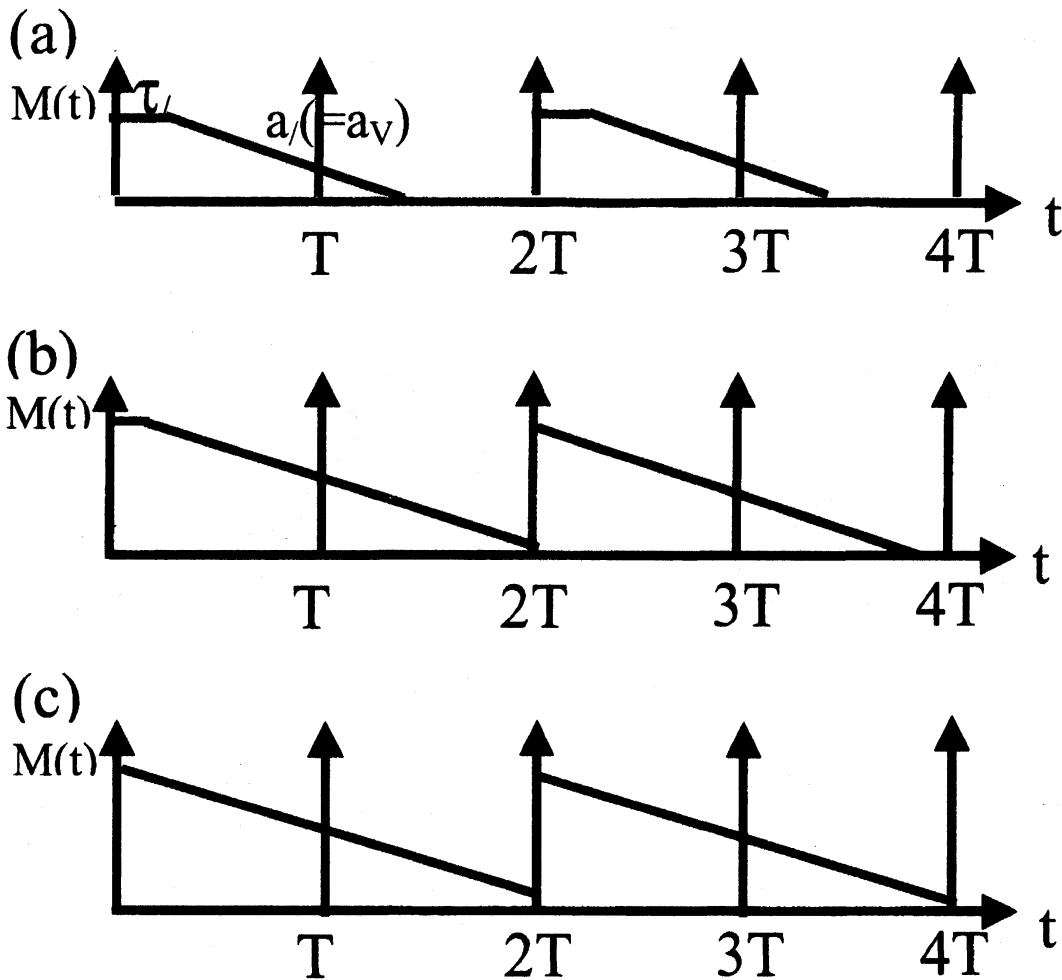


図 10. 餌量飽和までの各状況での餌場餌量の時系列

更に給餌餌量が増えていく状況を考える。図 10 の時系列は、すべてどちらか片側の餌場餌量に関する時系列で、(a) の状況になると、蟻集団は給餌周期  $T$  の間に餌を採り尽くすことができなくなり、他方に餌が給餌されても、同トレイルを維持したまま餌を採り続ける状況となる。すべてその餌を採り尽くした後、新たなトレイルを作って他方の餌場を目指すが、初めに形成していたトレイルの方向への給餌が周期  $2T$  に行なわれるため、消滅しきれない履歴を残したもとのトレイルの方向に再びトレイルが  $\tau_0$  かけて形成されることとなる。その状況下での時系列を表したのが (a) となっている。 $a_1$  は、トレイルの形状が V 字戦略時の片方と同型であるので、 $a_1 = a_v$  となる。

より増えた状況 (b) では、一度片方にトレイルが形成されてしまうと、初めに形成した同方向に給餌される周期まで取り付くことができずに、再度給餌された餌を  $2T$  以後も同トレイルを維持したまま採餌し続ける。しかし、 $4T$  までには、取り付くしてしまうという状況ができる。そして、 $\tau_0$  かけてトレイル

を再形成して、4 Tごとにこの過程を繰り返すこととなる。この状況の時系列が(b)である。

最終的な飽和状態を指すのが(c)で、この状態になると、蟻集団は一度トレイルを形成した後は、給餌される餌を採餌しきれないまま、常に同じトレイルを維持する状態となる。それら(a)(b)(c)の採餌効率は、式(18)(19)(20)のようになる。

$$E'_{av} = \frac{M}{2T} \quad \left(\frac{M}{T} < (2 - \frac{\tau'}{T})a\right) \quad (18)$$

$$= \frac{M}{4T} + (2T - \tau') \frac{M}{4T} \quad \left((2 - \frac{\tau'}{T})a \leq \frac{M}{T} < 2a\right) \quad (19)$$

$$= a_v (= a_v) \quad \left(2a \leq \frac{M}{T}\right) \quad (20)$$

結果6に対して、理想的な時系列を想定して効率を導きだしたものを、図11にまとめた。この図は、よく結果6を表現しているように見える。特に、結果6で示した蟻集団のとしたトレイル戦略とその効率に関して着目すると、このモデルでの蟻集団は、お互いが出すフェロモンの局所情報だけを用いて、餌環境が変化する状況によく適応して、効率の高いトレイル戦略を選択していたことが、ここから評価することができる。

## 7. 総括

本稿では、餌場環境が変化する状況下での、蟻集団の戦略について調べた。餌量M、給餌周期Tのコントロールパラメータに対してのトレイルパターンを示し、その関係性を示すことができた。また、そのトレイルパターンと効率性について議論し、局所情報のみを使うエージェントシステムにおいても、変化する環境に適応し、効率の高い戦略を選択できるということを示すことができた。この研究の発展として、各蟻に感度の強弱をつけることで個体の個性を表現し、その個性が、集団としての仕事効率にいかに関与するかという研究を行なっている。環境が一定下では、個性の効果は見られないが、環境が変化する状況下では一定の効果があることが分かってきている。

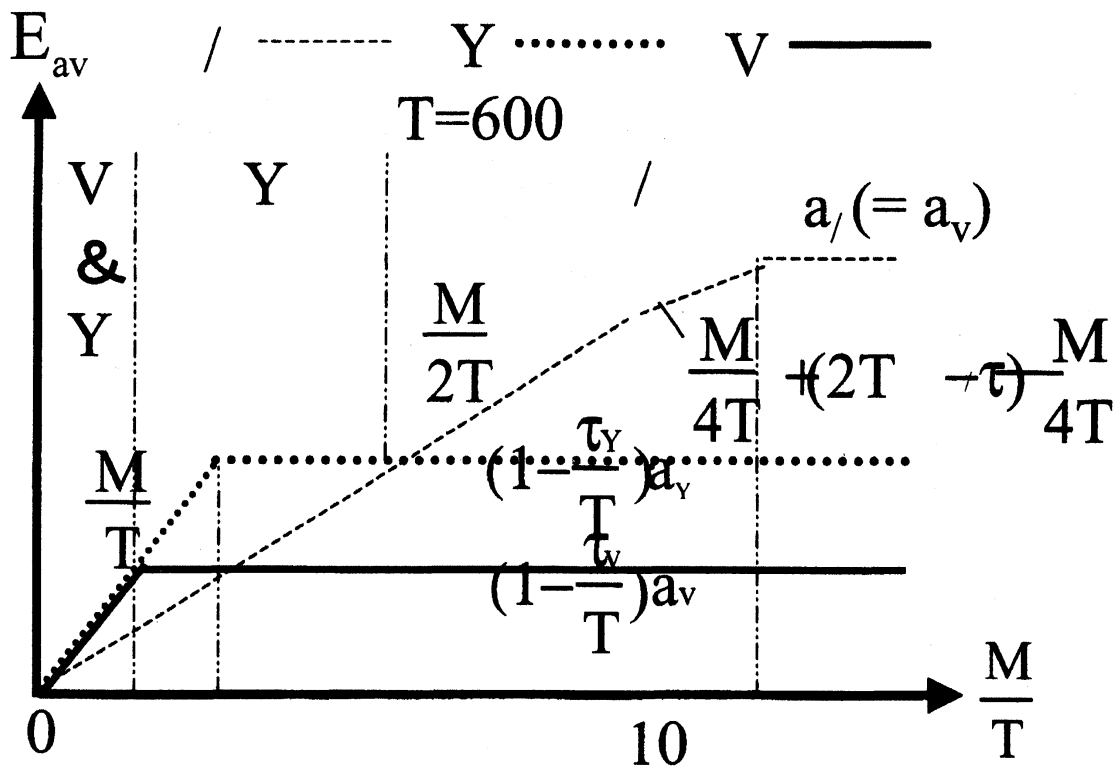


図 1 1. 理想的な時系列から導きだした給餌餌量  
に対するトレイルの効率

#### 参考文献

- 1) B. Holldobler B. and Wilson E. O. The Ants (Belknap, Cambridge, 1990)
- 2) W. H. Gotwald, jr. Army Ants (Cornell University press, Cornell, 1995)
- 3) Holldobler B. and Moglich M. [Insectes Sociaux] {27} (1980) {237}.
- 4) Haefner J. W. and Crist T. O. [J. Theor. Biol.] {166} (1994) 299.
- 5) Deneubourg J. L. and Goss S. and Franks N. and Pasteels J. M.  
[J. Insect Behavior.] {2} (1989) 719.
- 6) Deneubourg J. L. and Goss S. [Ethology Ecology & Evolution.] {1} {1989} 295.
- 7) D. Helbing and F. Schweitzer and P. Molnar [Phys. Rev. E] {56} {1997} 2527.
- 8) F. Schweitzer, K. Lao and F. Family [BioSystems.] {41} (1997) 153.
- 9) E. Bonabeau, M. Dorigo and G. Theraulaz [Swarm Intelligence]

(Oxford University press, Oxford, 1999)

- 10) K. Sugawara, M. Sano {Phys. D} {100} (1997) 343.
- 11) N. Shimoyama, K. Sugawara, T. Mizuguchi, Y. Hayakawa, and M. Sano  
{Phys. Rev. Lett.} {76} (1996) 3870.
- 12) K. Nishinari, D. Chowdhury and A. Schadschneider  
{Phys. Rev. E} {67} (2003) 36120.
- 13) D. Chowdhury, V. Guttal, K. Nishinari and A. Schadschneider  
{J. Phys. A: Math. Gen} {35} (2002) L573.
- 14) F. Schweizer and B. Tilch {Phys. Rev. E} {66} (2002) 26113.
- 15) T. Tao K. Tainaka and H. Nishimori {J. Phys. Soc. Jpn.} {68} (1999) 326.
- 16) Tao, Tomomi; Nakagawa, Hiroyuki, Yamasaki, Masato, Nishimori, Hiraku  
{J. Phys. Soc. Jpn.} {78} (2004)