

# 環境変動に対する適応行動と繁殖休眠の進化による渡りの創発

末次克也<sup>†</sup> 武藤敦子<sup>†</sup> 加藤昇平<sup>†</sup> 伊藤英則<sup>†</sup>

<sup>†</sup>名古屋工業大学

## 1 はじめに

進化シミュレーションを用いて、実生命体の生態や行動を解明しようという研究が盛んに行われている。本研究では北中米大陸に生息するオオカバマダラ (*Danausplexippus* L., *Nymphalidae*, *Lepidoptera*) の生態に着目した。この蝶は、春になるとメキシコから五大湖周辺まで世代交代を行いながら北上し、秋になると越冬のためにメキシコまで南下する「渡り」と呼ばれる行動を行う。また、夏の終わりから秋にかけて羽化する蝶は、繁殖休眠 (発生休止, Reproductive Diapause) により延命することで、世代交代の時期を調節するという特徴がある [1]。しかし、これらの行動や特徴をどのようにして獲得したのかは未だに解明されていない。

我々はこれまでに、「氷河期以降の気温上昇」が渡りを引き起こした要因であると考えてモデル化し、実験によりエージェントの渡り行動を観察してきた [2]。しかし、これまでの研究では特定の地域に待機するという行動が現れず、実際のオオカバマダラの渡りと大きな違いがあった。本研究では、エージェントが繁殖休眠を獲得することで渡りに与える影響について考察する。

## 2 環境

本研究における生態系は、5つのエリアから構成される。それぞれのエリアは北中米大陸の各地域をモデルとし、南から北へ順に  $area_0, area_1, \dots, area_4$  とする。 $area_i$  ( $i$ :識別子) を式 (1) で定義する。

$$area_i (Agent_i, Plant_i, tmpr_i, daylight_i) \quad (1)$$

本研究では、渡りを引き起こす環境要因として、気温  $tmpr_i$  と日照時間  $daylight_i$  の2つに着目した。 $Agent_i$  および  $Plant_i$  は、 $area_i$  が保持するエージェントと植物の集合である。

### 2.1 気温と日照時間

$y$  年  $d$  日における  $area_i$  の気温  $tmpr_i(y, d)$  は、長期的環境変動  $tmpr_i^{long}(y)$  および短期的環境変動  $tmpr_i^{short}(d)$  から決定される。

$$tmpr_i(y, d) = tmpr_i^{long}(y) + tmpr_i^{short}(d) \quad (2)$$

長期的環境変動とは、氷河期以降の平均気温の上昇 [3] をモデルとしている (図 1(a))。短期的環境変動とは、地球の公転により発生する 1 年間の気温変動をモデルとし、本稿では National Climatic Data Center が提供する気象データベース [4] より、過去 20 年間分の気温データを抽出・加工したものをを用いた (図 1(b))。

$d$  日における  $area_i$  の日照時間  $daylight_i(d)$  は  $d-1$  日からの増減で表す。春分と秋分を決定し、春分から秋分までを "Long", それ以外を "Short" とする。

### 2.2 植物

エリア上には、エージェントのエネルギー源となる植物が存在する。植物は一定の日数が経過した場合、またはエージェントに捕食された場合に消滅する。植物は最適気温を持ち、エリアの気温が植物の最適気温に近いほど 1 日あたりの発生量が多くなる。

\*Emergence of Migration by the Evolution of Adaptive Behavior and Reproductive Diapause toward Environmental Change, Katsuya SUETSUGU<sup>†</sup>, Atsuko MUTOH<sup>†</sup>, Shohei KATO<sup>†</sup> and Hidenori ITOH<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Nagoya Institute of Technology  
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan  
{suetsugu, shohey, atsuko, itoh}@juno.ics.nitech.ac.jp

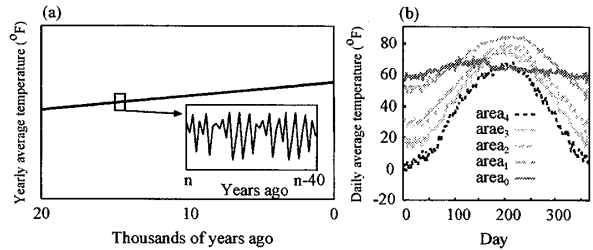


図 1: (a) 長期的環境変動, (b) 短期的環境変動.

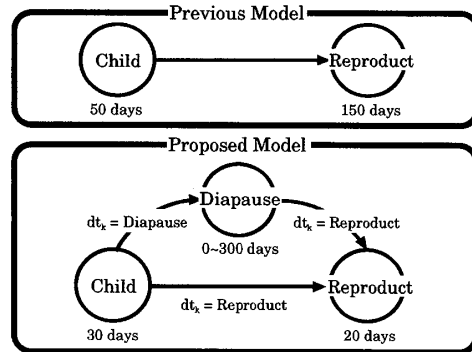


図 2: エージェントの状態遷移。(上) 従来モデル, (下) 提案モデル.

## 3 エージェント

エージェント  $a_k$  ( $k$ :識別子) を式 (3) で定義する。

$$a_k (ea_k, st_k, ds_k, tdt_k, age_k, in_k, type_k) \quad (3)$$

$ea_k$  は環境順応値,  $st_k$  は行動決定テーブル,  $ds_k$  は繁殖休眠時の最適気温シフト値,  $tdt_k$  は状態決定テーブル,  $age_k$  は年齢,  $in_k$  はエネルギー値,  $type_k$  は状態である。 $ea_k, st_k, ds_k, tdt_k$  は遺伝子として子個体生成時に受け継がれる。

エネルギー値は、1 日毎に行動に従い更新される。エネルギーがなくなると寿命 (3.3 節で説明) を迎えた時、エージェントは消滅する。

### 3.1 知覚

エージェントは、表 1 の 5 つの情報を知覚する。

表 1: 知覚情報

変数	値	知覚情報
$X_0$	Cold/Suitable/Hot	気温をどのように感じるか
$X_1$	Short/Long	日照時間をどのように感じるか
$X_2$	Yes/No	他のエージェントを発見したか
$X_3$	Yes/No	植物を発見したか
$X_4$	Yes/No	エネルギーは十分か

$X_0$  は式 (4) を用いて判断される。 $suit_k$  は、エージェントの最適気温である。

$$suit_k - ea_k \leq tmpr_i \leq suit_k + ea_k \quad (4)$$

気温  $tmpr_i$  が条件式 (4) を満たす時 "Suitable", 上限を上回る時を "Hot", 下限を下回る時を "Cold" とする。

### 3.2 行動

エージェント  $a_k$  は、知覚情報と行動決定テーブル  $st_k$  を用いて、表 2 の 5 つの行動から行動  $act$  を決定する (式 (5))。

$$act = st_k(X_0, X_1, X_2, X_3, X_4) \quad (5)$$

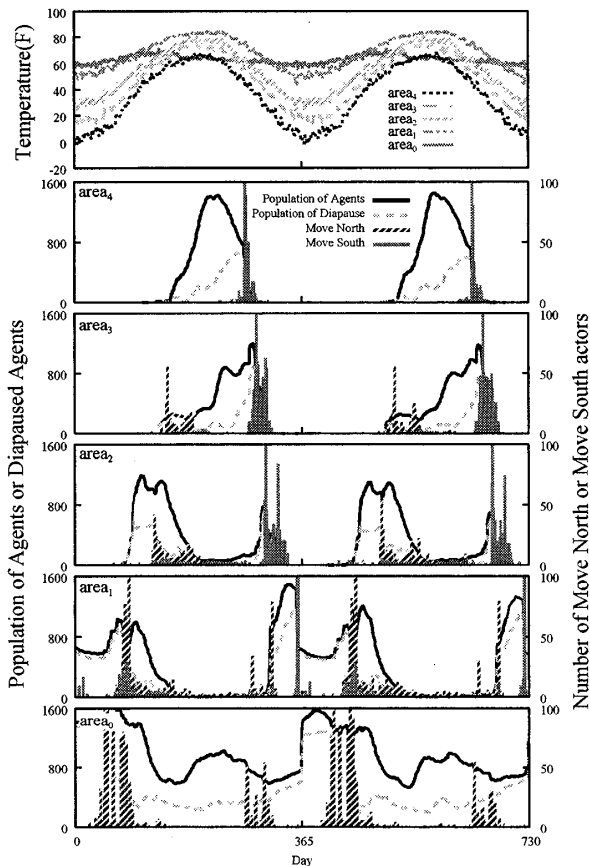


図 3: シミュレーション結果:各エリアのエージェント数.

表 2: エージェントがとり得る行動

	略称	行動内容
Reproduce	R	エージェントを生成する
Eat	E	植物を捕食する
Move North	$M_n$	北側のエリアに移動する
Move South	$M_s$	南側のエリアに移動する
Do Nothing	N	何もしない (待機)

### 3.3 状態

図 2 に示すように, 従来モデルではエージェント  $a_k$  の状態  $type_k$  は "Child" (幼生期) と "Reproduce" (繁殖期) の 2 状態のみであったのに対し, 提案モデルでは新たに "Diapause" (繁殖休眠期) を導入した. "Child" から "Diapause" を経て "Reproduce" にいたるような状態遷移が可能である.

エージェントの初期状態は "Child" である. この状態の時, "E", "N" 以外の行動をとることができない. また, 30 日間は他の状態に遷移することができない.

$type_k$  が "Diapause" の時は, "R" 行動をとることができないが, 寿命は 300 日であり, いつでも "Reproduce" に状態遷移できる. また, 最適気温が  $suit_k^{Diapause}$  になる (式 (6)).

$$suit_k^{Diapause} = suit_k - ds_k \quad (6)$$

つまり,  $ds_k$  の値が大きいほど寒さに強く, 暑さに弱くなる.

$type_k$  が "Reproduce" の時は, すべての行動をとることができ, 寿命は 20 日である.

エージェントは知覚情報  $X_0, X_1$  と状態決定テーブル  $t dt_k$  により次の状態を決定する (式 (7)).

$$type_k = t dt_k(X_0, X_1) \quad (7)$$

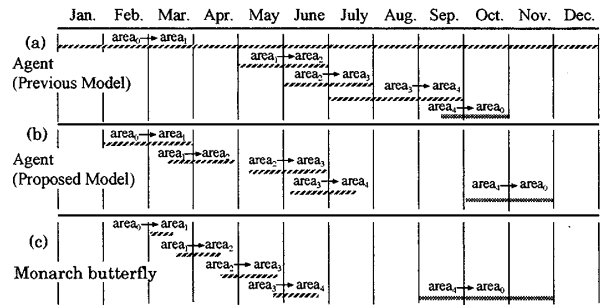


図 4: 渡りの比較: (a) 従来エージェント, (b) 提案エージェント, (c) オオカバマダラ (実生態).

## 4 実験と結果

提案モデルを用いてシミュレーションを行った. 1 年を 365 日とし, 実験期間は 2000 年間とした.

図 3 に 1999 年から 2000 年における各エリア毎の全エージェント数, 繁殖休眠期のエージェント数, 北または南のエリアへ渡ったエージェント数を示す.

実験の結果, 以下の行動が創発した.

- 8 月から 3 月に繁殖休眠期のエージェントが増加
- 4 月から 7 月に繁殖休眠期のエージェントが減少
- $area_0$  から  $area_3$  または  $area_4$  へ渡る
- $area_1$  から  $area_3$  または  $area_4$  へ渡る

エージェントは, 日照時間が短く気温が寒いとき繁殖休眠を行い, 日照時間が長く気温が適温または暑いとき繁殖休眠から繁殖期に遷移するように進化した. また, 春から夏にかけて北上し, 秋の終わりから冬にかけて南下, 春まで越冬地で過ごし, 春になると再び北上するという 1 年間の行動サイクルが創発した.

次に, エージェントが創発した渡り行動と実生態のオオカバマダラの渡り行動を比較する. 図 4 に (a) 従来モデル, (b) 提案モデル, (c) 実際のオオカバマダラ [5] のエリアごとの渡りの時期を示す. 従来モデルでは  $area_0$  における待機期間が存在せず, 1 年中  $area_0$  から  $area_1$  に向かって渡りを行っていたのに対し, 提案モデルでは冬の間は  $area_0$  から  $area_1$  への渡りは行わず,  $area_0$  に待機する (越冬) 期間が現れた. オオカバマダラの実際の渡り行動と比較しても, 提案モデルでは十分に類似している行動を獲得できたと言える.

## 5 おわりに

本研究では, オオカバマダラの生息地域の短期的・長期的環境変動, 及び繁殖休眠に着目したモデルを提案した. 実験の結果, エージェントが実生態のオオカバマダラに類似した渡り行動を獲得した. この結果から, 繁殖休眠はオオカバマダラの渡りにおける重要な要素の 1 つであると考えられる.

## 参考文献

- [1] M. Tatar, C.-M. Yin: Slow aging during insect reproductive diapause: why butterflies, grasshoppers and flies are like worms, *Experimental Gerontology*, 36, pp.723-738 (2001)
- [2] H. Hashizume, A. Mutoh, S. Kato, T. Kunitachi, H. Itoh: Emergence of Cross-Generational Migration Behavior in Multiagent Simulation, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol.13, No.3, pp.304-311 (2009)
- [3] 藤井 理行: 極域アイスコーアに記録された地球環境変動, *地学雑誌*, Vol.114 (3), pp.445-459 (2005)
- [4] National Climatic Data Center: NNDC Climate Data Online (Global Summary of the Day), <http://cdo.ncdc.noaa.gov/CDO/cdo> (Retrieved on 2009)
- [5] Annenberg Foundation: *Journey North* (2009)