

# エージェントモデルによる周期ゼミの進化メカニズムの解明

伊東啓<sup>†</sup> 柿嶋聡<sup>†</sup> 上原隆司<sup>‡</sup> 守田智<sup>#</sup> 小山卓也<sup>§</sup> 曾田貞滋<sup>§</sup> John R. Cooley<sup>¶</sup> 吉村仁<sup>†</sup>  
 静岡大学創造科学技術大学院<sup>†</sup> 名古屋短期大学保育科<sup>‡</sup> 静岡大学大学院総合科学技術研究科<sup>#</sup>  
 京都大学大学院理学研究科<sup>§</sup> Dept. Ecology & Evolutionary Biology, University of Connecticut<sup>¶</sup>

## 1. はじめに

周期ゼミ(素数ゼミとも呼ばれる)は 13 年または 17 年の素数周期で大発生する北米に生息する昆虫の蟬であり、昆虫の中でも長い生活史を持つ。なぜこのような蟬が誕生したのかは大きな謎であり、これまでにいくつかの進化仮説が提唱された。その一つに、氷河期への環境適応説がある[1]。セミのような植物に寄生する昆虫の成長速度は、寄生先の植物の成長速度に依存する[2]。植物の成長は有効積算温度による「気温依存の成長」であるため、セミの幼虫も気温の積算によって成熟する。氷河期では成長速度の低下により、羽化までの時間が長くなることで成虫の個体数が減少し、交尾機会が減少してしまうと考えられる。そこで、少ない個体数でも羽化を同調させることで交尾機会を維持するために成長速度に合わせた様々な周期性を獲得したという仮説である。

このように、周期ゼミは第一段階目の進化「様々な周期性の進化(10~20年)」の後に、「交雑回避のための素数周期の進化(13,17年)」の二段階進化が起こったと考えられる[1,3]。ここでは、既に数値計算によって導かれている素数周期の進化の前段階である、周期性進化の再現[4]の概略を説明し、議論を展開していく。

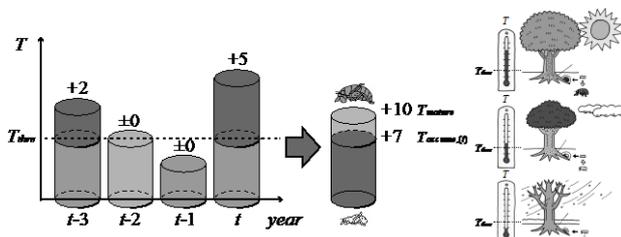


図1. 有効積算温度のイメージ図。成長限界温度( $T_{thre}$ )を超えた濃い色の部分の和が有効積算温度( $T_{accume}$ )であり、上図の場合、 $2+0+0+5=7$ だけ積算したことになる。羽化に必要な温度( $T_{mature}$ )は10としている。

## 2. モデル

個体ベースのモデル(IBM: Individual based model)を用いて、平均気温の低下(氷河期)を再現する。今回はランダムな突然変異や遺伝を導入

した個体ベースモデルを用いてセミの一生を再現し、1万 step(年)時間でセミの個体数を観察する。

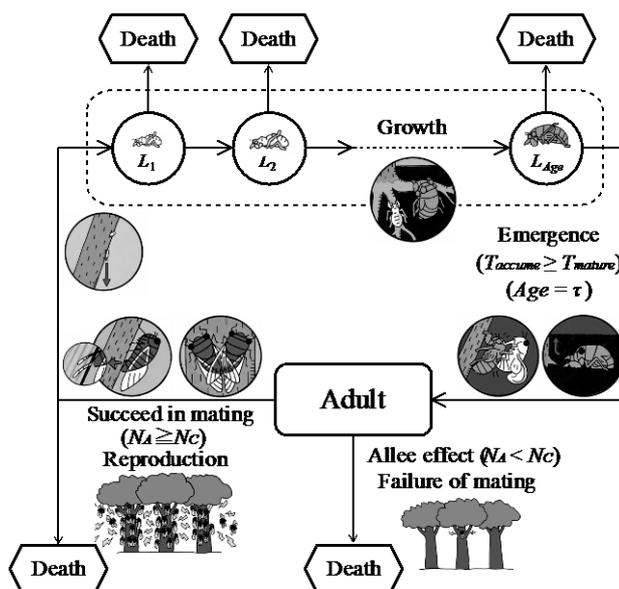


図2. IBMの概要。シミュレーションの流れは以下の通り。1:初期配置された10,000の成虫(普通のセミ)が交尾し、幼虫を生む。2:幼虫はその年の幼虫個体数から算出される環境収容力による死亡率を受ける。3:幼虫はその年に算出された温度によって成長する。4:幼虫の中で有効積算温度が達成されたものが羽化する。5:羽化した成虫個体数  $N_A$  が、アリー効果による死亡閾値  $N_C$  よりも多ければランダムに選ばれた相手と交尾し、増殖する。少ない場合は全成虫が死亡する。6:交尾後成虫は死亡し、生まれた個体が幼虫に加えられる。これを999Stepまで繰り返す。1,000Step目から相互の突然変異が導入され、全個体の遺伝子に突然変異を起こし、周期ゼミを誕生させる。10,000Stepまで同様に繰り返す、持っている遺伝子ごとにセミの個体数を計測する。

### ・遺伝子の設定

セミの遺伝子には、有効積算温度が達成されることによって羽化する「温度依存遺伝子(a)」と、周期という時間が過ぎることによって羽化する「周期依存遺伝子(A)」の二種類の遺伝子を設定

した。AA と Aa の遺伝子を持つものが周期ゼミとなる。aa の遺伝子を持つセミは普通のセミとなる。1,000Step 目からそれ以降、相互の突然変異が導入され、全個体の全対立遺伝子に突然変異率 0.001 で A↔a の変異が起こる。

### 3. 結果

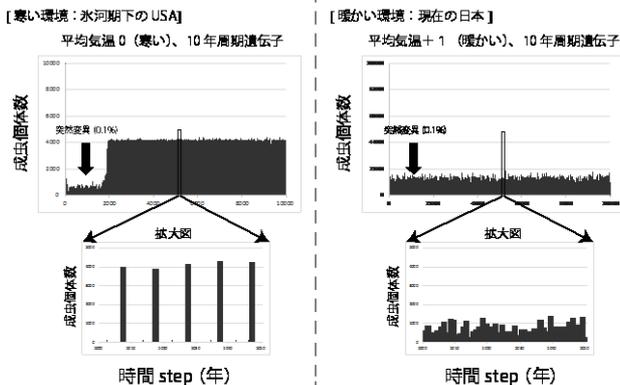


図 3. 1 回実行のシミュレーション結果(10 年周期遺伝子)。(左) 平均気温が低い環境での毎年の成虫個体数。(右)平均気温が高い環境での毎年の成虫個体数。

結果として、平均気温が低下することによって周期遺伝子の浸透が観察された。周期遺伝子の浸透により、北米に見られる大発生が再現される。一方、平均気温が高い状態だと、日本と同じように中規模の羽化が毎年観察される。

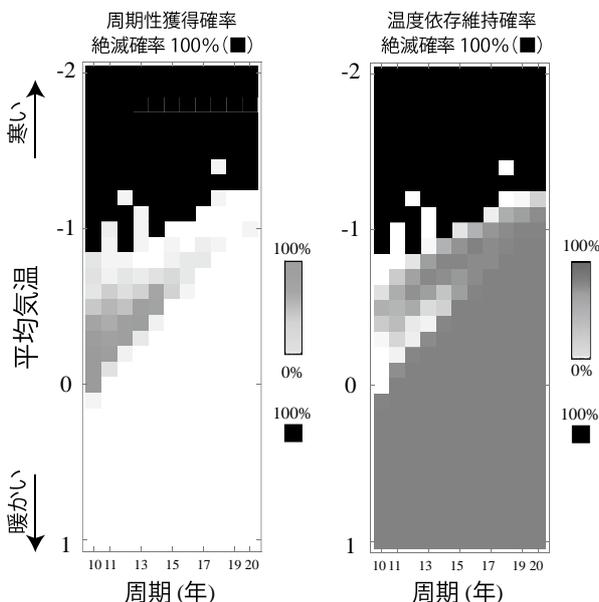


図 3. 50 回試行のシミュレーション結果。横軸：獲得周期、縦軸：平均気温。(左) 周期性獲得確率。(右)温度依存維持確率。

平均気温帯によって獲得される周期の長さが異なる。周期が短いほど周期性獲得確率は大きくなる。

### 4. 考察

本モデルは、だんだんと平均気温が低下するようなモデルではなく、最初に平均気温が設定される点に注意が必要である。同様に、複数の周期遺伝子を導入した場合はどうなるのか、今後の研究が望まれる。

しかし、セミが周期性を獲得する上で重要な点を浮かび上がらせている。「環境・気候の確率的変動 Environmental variability」と、「個体差 Individual differences」という二重の変異・幅が周期性獲得の再現の条件であることを示している。

また、セミが低気温によって絶滅してしまう絶滅限界領域の周辺で周期性が獲得されることが示されている。これは気候変動による平均気温の低下(氷河期)が周期ゼミの先祖に周期性獲得を促した可能性を示唆している。

さらに、獲得周期が長い(17~20 年)ほど平均気温が低い環境で周期性が浸透することが見て取れるが、これは現実と矛盾しない結果である。実際の周期ゼミの生息域は、13 年ゼミが南部に生息しており、17 年ゼミは 13 年ゼミよりも北部に生息している。実際には 10~20 年の間で様々な周期ゼミが誕生したものの、交雑の観点から 13 と 17 という素数周期だけが残ったという Yoshimura(1997)の仮説を補強する結果を得られている[1,3,4]。

### 5. 引用文献

1. Yoshimura J. 1997. The evolutionary origins of periodical cicadas during ice ages. *Am. Nat.* 149: 112-124.
2. Bernardo J. 1993. Determinants of maturation in animals. *Trends. Ecol. Evol.* 8: 166-173.
3. Tanaka Y. et al. 2009. The Allee effect in the selection for prime-numbered cycles in periodical cicadas. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106: 8975-8979.
4. Ito H. et al. 2015. Evolution of periodicity in periodical cicadas. *Sci. Rep.* 5: 14094.

Agent model explains the evolution of periodical cicadas  
 † Hiromu Ito, Satoshi Kakishima, Jin Yoshimura • Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University  
 ‡ Takashi Uehara • Nagoya College  
 # Satoru Morita • Graduate School of Integrated Science and Technology, Shizuoka University  
 § Takuya Koyama, Teiji Sota • Graduate School of Science, Kyoto University  
 ¶ John R. Cooley • Department of Ecology and Evolutionary Biology, University of Connecticut