

素数ゼミの進化シミュレーション： 素数サイクルの優位性の検証

田中 裕美¹ 湧美 良太² 吉村 仁³ 泰中 啓一³

兵庫県立大学大学院¹ 静岡大学大学院² 静岡大学創造科学技術大学院³

米国の中西部から南部：東部にかけて存在する周期ゼミは、13及び17年の素数年の周期で大発生することがよく知られている。その理由として、同時発生による交雑が素数でない周期の絶滅を引き起こしたという仮説がある。近年、私たちは、交雫によって素数周期が選択される事を整数数値シミュレーションモデルによって実証した。今回、新たに素数周期が選択される為の重要な要因として、ある限界個体数以下に個体数が減少した場合絶滅が促進されるという効果が必要であるということがわかった。本報告では数値シミュレーションモデルを用いてこれを検証する。

1. はじめに

米国の広い地域において存在する周期ゼミは13及び17年の素数年の周期で大発生するので素数ゼミとも呼ばれている。その理由として、氷河期の到来による環境悪化に伴い、同時発生による交雫が素数でない周期の絶滅を引き起こしたという仮説がある(Cox and Carlton 1988, Yoshimura 1997)。まず私たちは、この仮説を従来の遺伝アルゴリズムとは異なる、より現実に即した新しい進化シミュレーションモデルを構築し検証を行った。さらにその過程において新たに、素数周期の優勢を誘発する重要な条件：整数以下切下げるに事により個体数が減少した場合絶滅が促進されるという効果(*以下、切下げ効果と呼ぶ(Alee 1931,))が必要であるということを発見した。このことも、同様の進化シミュレーションモデルを用いて検証を行った。

2. モデル

私たちは10-20年の発生周期を現す11種の遺伝子を持つ個体群のダイナミクスにおける離散モデルを構築した(Yoshimura et al. in press)。ここにおいて出生年を含めた幼虫個体数を $N_{I,t}$ 、成虫個体数を N_A とする。

このモデルにおいて鍵となる2つのパラメータ、幼虫生存率 S ($0 < S < 1$) と成虫羽化成功率 E ($0 < E < 1$) を設定する。この2つのパラメータは共に遺伝子によらず一定とする。また、モデルを単純なものとするため、卵サイズ(産卵量) C を($C=25$)と固定した。さらに、周期形質の遺伝はメンデル遺伝の法則に従い、短周期優性とし、遺伝子型を $[i,j]$ とあらわす。

出生年が与えられた時、各周期をもつ幼虫の時間 t における個体数はそれぞれ：

$$N_{I,t}(i,j) = S \times N_{I,t-1}(i,j) \quad (1)$$

であらわされる。同様に成虫個体数においては

$$N_{A,t}(i,j) = E \times N_{I,t}(i,j) \quad (2)$$

時間 t において遺伝子型 $[i,j]$ と $[m,n]$ を持つ各個体間の交尾により産まれる幼虫の個体数は

$$\text{Num. offspring} := \frac{1}{2} N_{A,t}(i,j) \times F(N_{A,t}(m,n)) \times C \quad (3)$$

ここにおいて F は対象の遺伝子型を持つ個体の頻度であり

$$F(N_A(m,n)) = \frac{N_A(m,n)}{\sum N_A}$$

とあらわされる。

遺伝子型 $[i,j]$ と $[m,n]$ を持つ各個体間の交雫により産まれてくる個体が持ち得る遺伝子型は $[i,m]$ 、 $[i,n]$ 、 $[j,m]$ 、 $[j,n]$ である。遺伝子型 $[i,m]$ を例にする。その遺伝子型を持つ時間 t においての幼虫個体数は

$$N_{I,t}(i,m) = \sum_x \sum_z \left\{ \frac{1}{2} N_{A,t}(i,x) \times F(N_{A,t}(m,z)) \times C \right\} \quad (4)$$

となる。他の遺伝子型においても同様である。

私たちはこのモデルに切下げ効果を組み込むため、個体数計算を整数切下げ計算において行うこととした。また、対照実験として切り下げ効果を含めないため、整数切上げのケースも計算を実行した。

An evolutionary simulation of periodical cicadas :
Evaluating the superiority of prime-numbered cycles

1 Yumi Tanaka : University of Hyogo

2 Ryota Atsumi : Shizuoka University

3 Jin Yoshimura, Kei-ichi Tainaka

Department of Systems Engineering, Shizuoka University

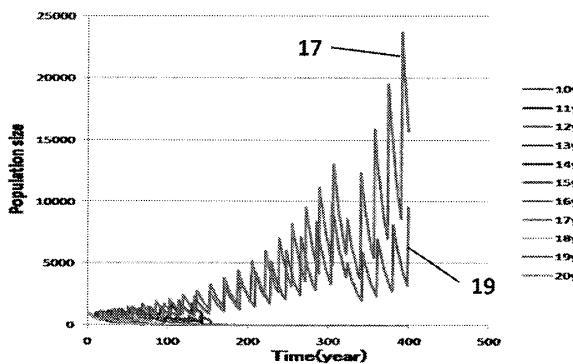


Fig. 1a

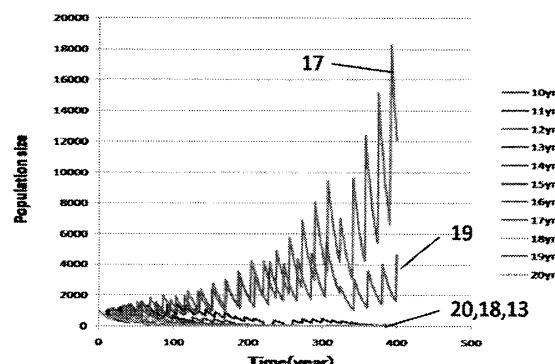


Fig. 1b

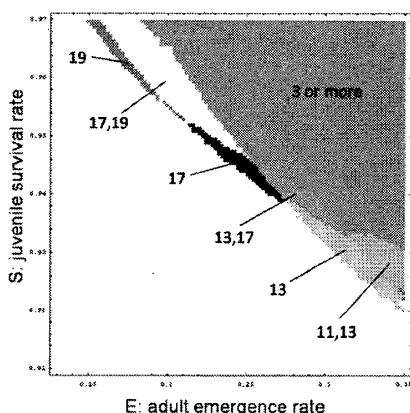


Fig. 2a

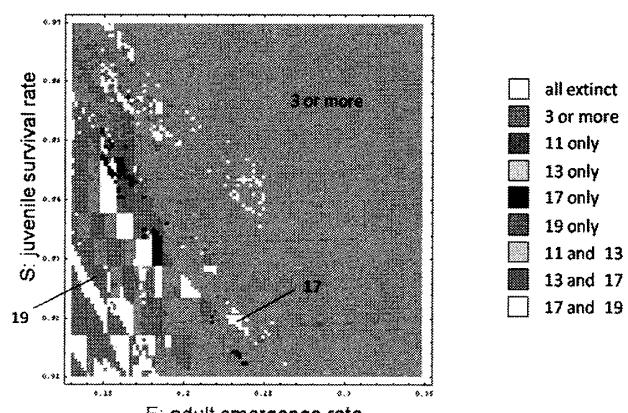


Fig. 2b

今回実験において、各周期個体間における何かしらの初期値優位性は設定しなかった。

各周期個体それぞれ、初年度より初期値 1000 個体の 1 令幼虫からシミュレーションを開始し、任意のモンテカルロステップ数まで上述の式に従い増殖と死亡を繰り返す。

3. 結果と考察

すべてのシミュレーションにおいて、私たちは 10~20 年の周期を持つ 11 種個体群を用意した。本報告において、切下げ効果を含めたシミュレーションの結果と含めなかつた実験(整数切上げ)を比較した。切下げ効果を含めた場合、素数周期(17, 19)が生き残った(Fig. 1a)。これは初期値によらず、常に成り立つ。対して、切下げ効果を含めなかつた場合、素数周期以外の周期も生き残った(Fig. 1b)。これは初期値を変化させた場合、異なる挙動を示す。

次に整数切上げ、整数切下げの各場合において、羽化成功率と幼虫生存率を組み合わせた相図を算出した(Fig. 2)。整数切下げの場合、パラメータの組み合わせにより素数周期のみが生き残る領域が広く見られる(Fig. 2a)。対して整数切上げの場合、ほとんどの領域において多数の種が共存していることが見て取れる(Fig. 2b)。

4. 結論

本研究の結果により、実際の素数ゼミと同様、交雑による素数進化の可能性を実証することができた。また、計算困難な実際に即した複雑系における進化を、本モデルにおいてシミュレーションすることが可能となった。

参考文献

- Allee, W. C. 1931. Animal Aggregations: A Study in General Sociology. Chicago: University of Chicago Press.
- Cox, R. T. and Carlton, C.E. 1988. Paleoclimatic influences in the ecology of periodical cicadas (Homoptera: Cicadidae: Magicicada spp.). American Midland Naturalist, 120: 183-193.
- Yoshimura, J., Hayashi, T., Tanaka, Y., Tainaka, K. And Simon, C. Selection for prime-numbered intervals in a numerical model of periodical cicada evolution. Evolution (in press).
- Yoshimura, J. 1997. The evolutionary origins of periodical cicadas during ice ages. Am. Nat., 149: 112-124.