

2018年9月6日 サイエンスカフェ in 静岡 第128話

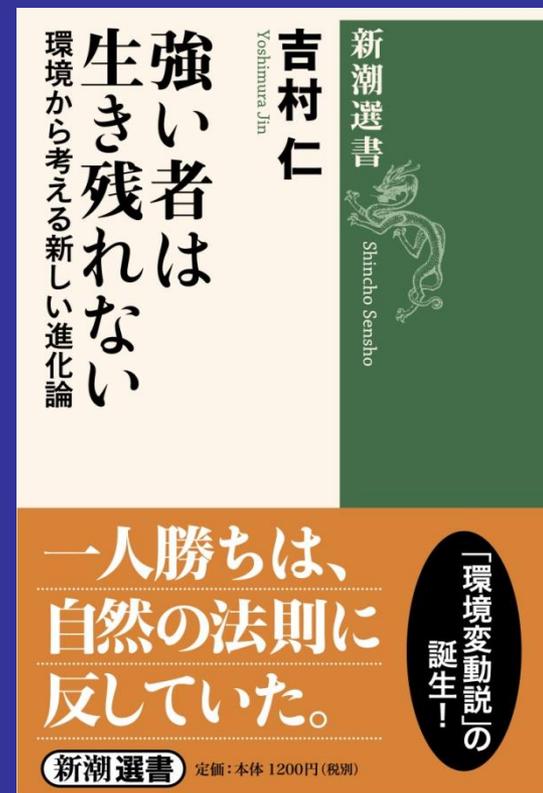
# 素数ゼミの謎 ～進化物語の科学～



吉村 仁  
静岡大学



工学部数理システム工学科



# 周期ゼミ = 素数ゼミ





Periodical Cicadas

# 素数ゼミの謎！

- 13年に1度、あるいは17年に1度、素数の年にのみ大発生！
- その間成虫の発生なし
- 昆虫で最長の生活史
- 非常に強い定着性と集合性
- 近縁3種共存
- 各種共、北で17年、南で13年周期
- 世界でアメリカ東—中南部のみ

# 周期ゼミ

17年に1回、でてくる！

はじめに12さい(2012年)で見たら、

つぎは29さい(2029年)...

つぎは46さい(2046年)...

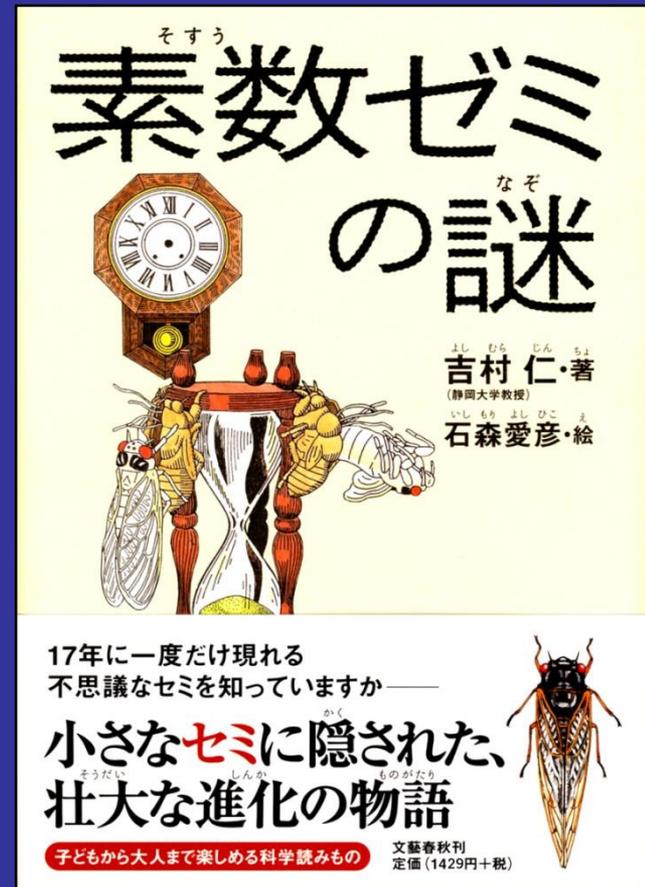
つぎは63さい(2063年)...

つぎは80さい(2080年)...

さいご97さい(2097年)...

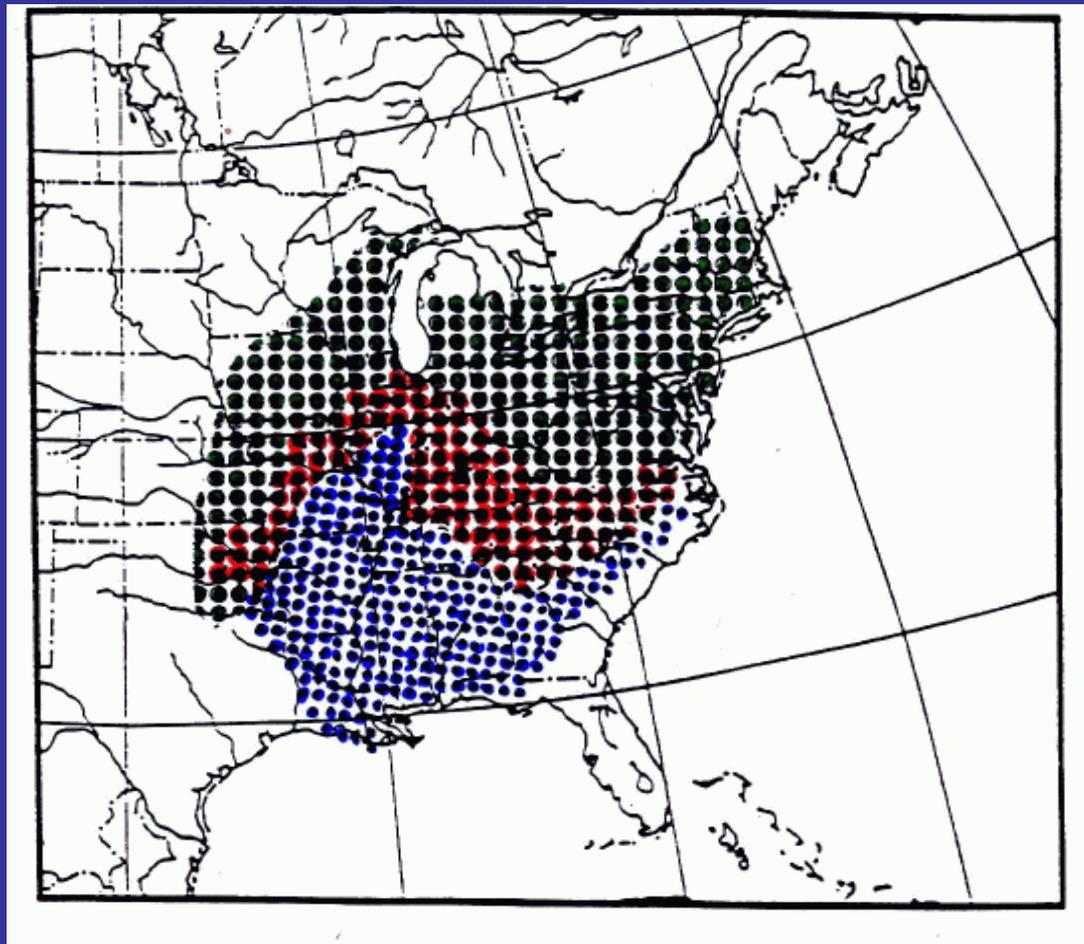
# 素数ゼミの秘密！

- 周期：17年または
- 13年の素数
- 世界一長生きの虫





# 周期ゼミの住んでいる所



-  17-y cycle
-  13-y cycle
-  overlap zone

After Cox & Carlton 1988

















# Adam and Eve Of Periodical Cicada

周期ゼミのアダムとイブ  
—セミの国の創世記—

# もくじ

第一章： エデンの園

第二章： 氷河期のおとずれ

第三章： アダムとイブ

第四章： リフュージアの出会い

第五章： 氷河期のおわり

# 第一章 エデンの園

周期ゼミの祖先

アブラゼミみたい

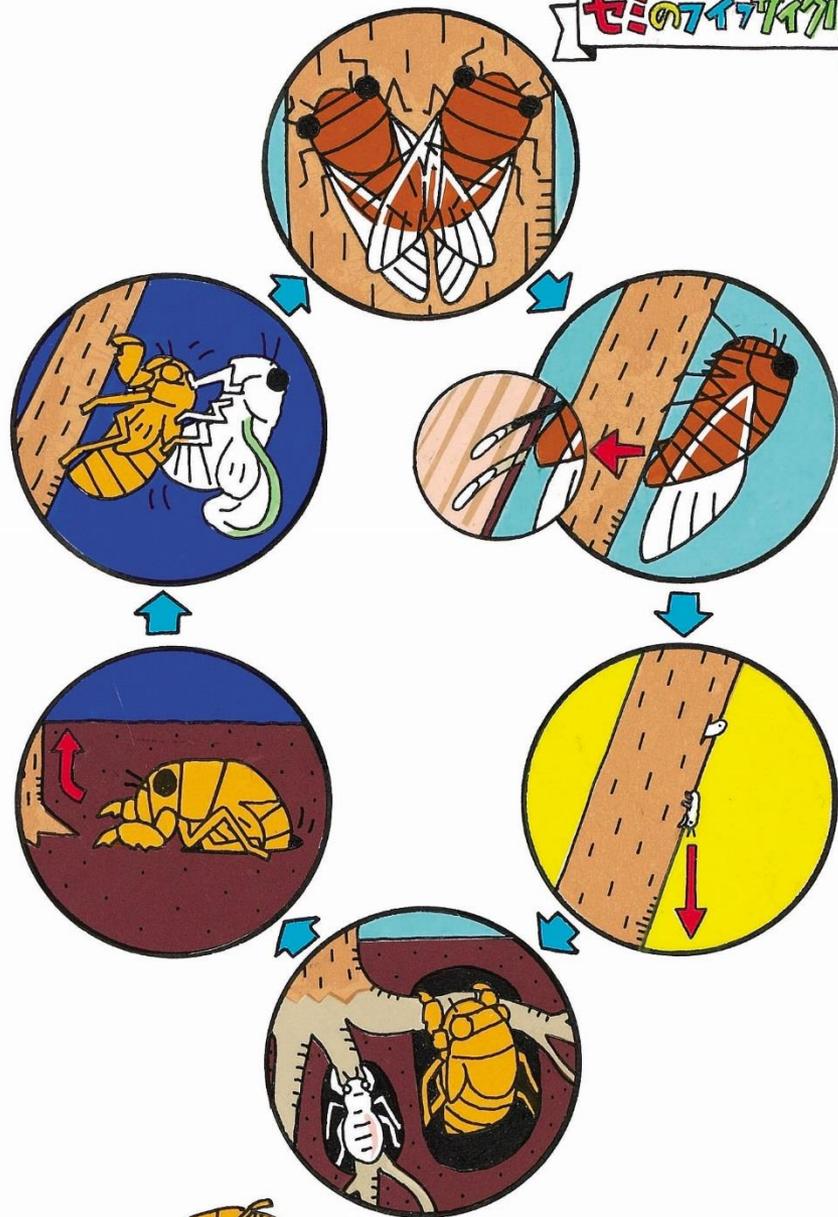
毎年でてくる

幼虫：地下で木の根から水をのむ

5-10年：大きさできまる

成虫：鳥のえさ、とてもおいしい

# セミのライフサイクル



## 第二章 氷河期のおとずれ

氷河期の訪れによって寒くなる

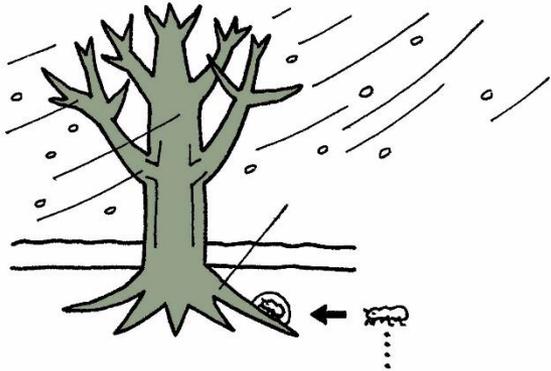
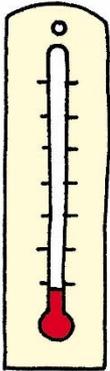
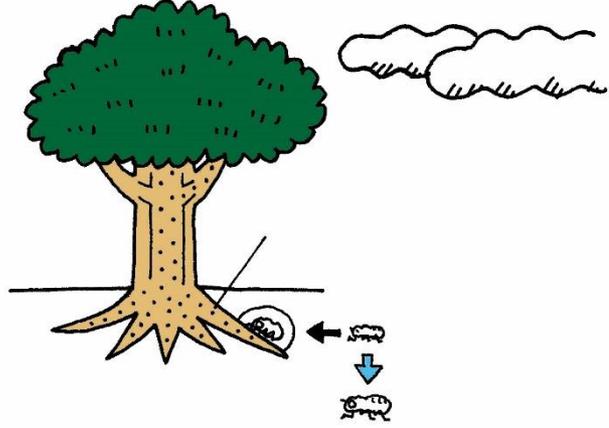
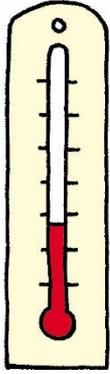
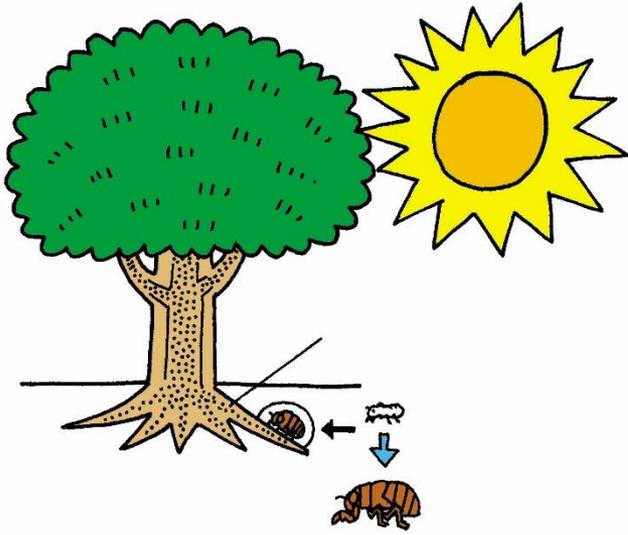
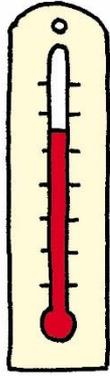


大きくなれない → 10年が15年に！  
幼虫はみんな餓死・凍死



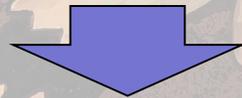
成虫になれない  
ラッキーな成虫：**恋人がいない!!!**





# 第三章 アダムとイブ

ラッキーなアダムとイブが結婚(交尾)



同じところで、子どもが同じようにそだつ

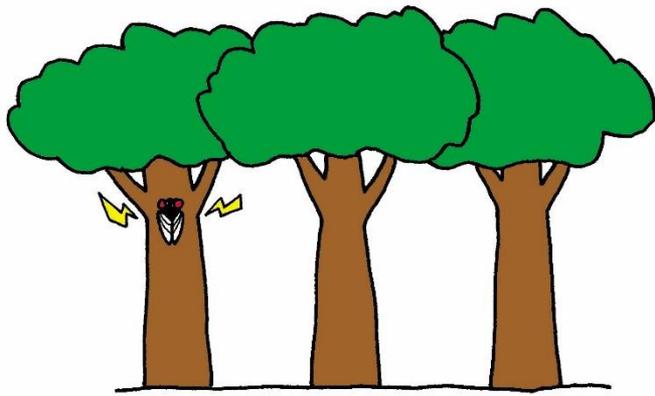
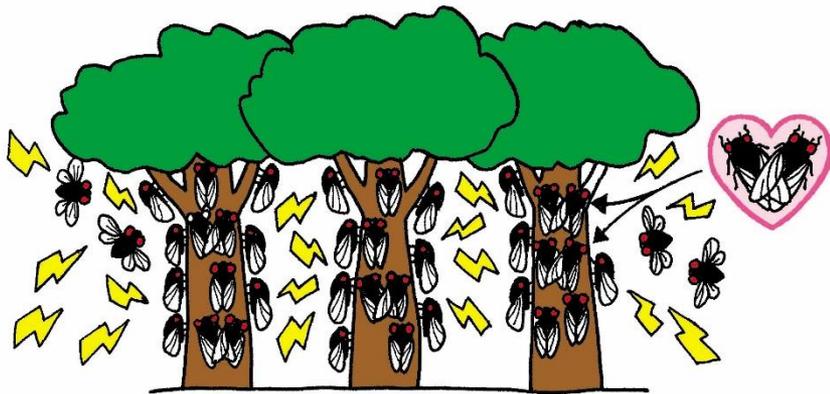
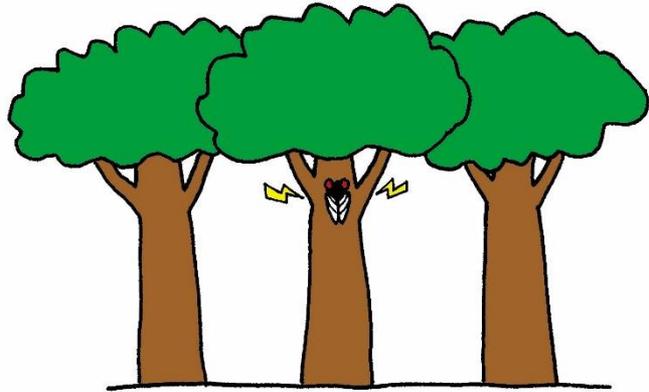


同じ年にでてくる(ずれると相手がない)



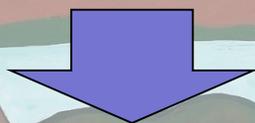
でる年が年数できまる(10~20年周期)





# 第四章 リフュージアの出会い

違う周期のセミが出会う



相手を間違えて、交尾(交雑)する



子どもの周期がずれる → 結婚できない



仲間が減少する(アリー効果) → **絶滅**



# 17年と13年の意味は！？

- 10－20年周期のセミたちが生まれた
- なぜか17年と13年だけが生きのこった？
- 17と13は、素数！
- 素数とは？

# 九九(くく)に出てこない素数

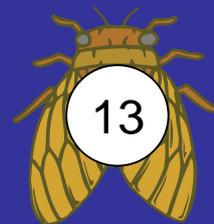
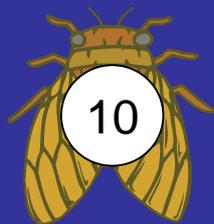
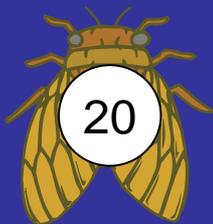
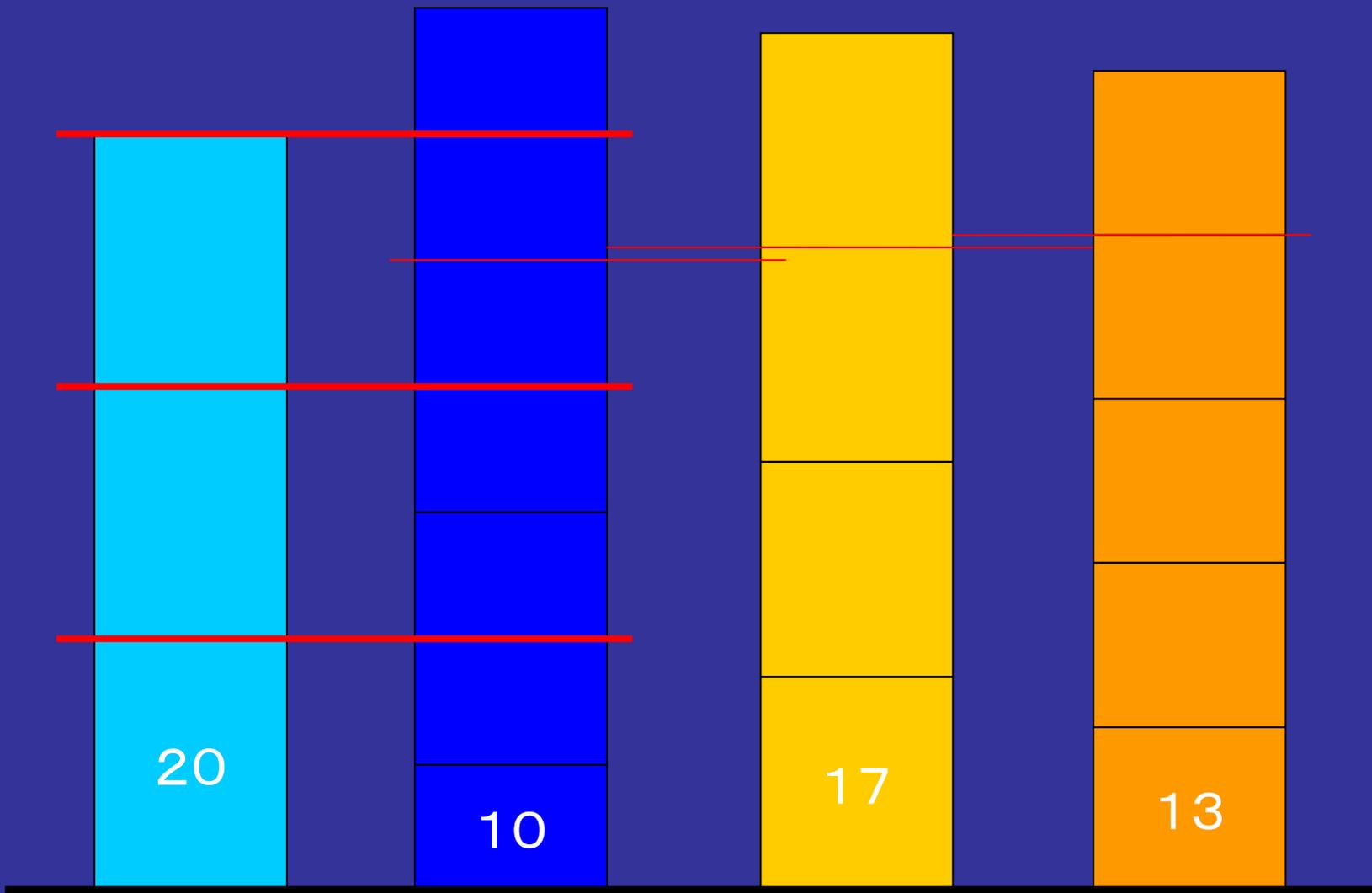
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
4	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
6	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
7	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
8	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
9	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90

11

13

17

19



# 周期ゼミの出会い

	12	13	14	15
12年		156	84	60
13年	156		182	195
14年	84	182		210
15年	60	195	210	

	15	16	17	18
15年		240	255	90
16年	240		272	144
17年	255	272		306
18年	90	144	306	

# 14-18年周期の同時発生率 (単位/1000年): 北方地域

その他の	年周期				
周期	14	15	16	17	18
1	18	16	16	11	20
2	3.4	3.6	3.1	1.8	4.3
3	.34	.36	.33	.22	.39

5つの周期すべて - 0.012 年

# 12-15年周期の同時発生率 (単位/1000年): 南方地域

---

その他の 周期	年周期			
	12	13	14	15
1	26	12	15	19
2	4.0	2.0	3.1	3.5

---

4つの周期すべて - 0.18 年

# 少ないセミはすぐ絶滅

17年と15年ゼミがであうと？

- 17年は、オス4匹き、メス4匹き
- 15年は、オス2匹き、メス2匹き



# 頻度依存の交配

15  
10

17  
90

が同時に発生すると...

15年メスの出会い確率と交尾相手

15y ♀	15♂と交尾	17♂と交雑
1匹 当り	$\frac{10}{10 + 90} = 0.1$	$\frac{90}{10 + 90} = 0.9$
10匹	1匹	9匹

# 頻度依存の交配

⑫  
50

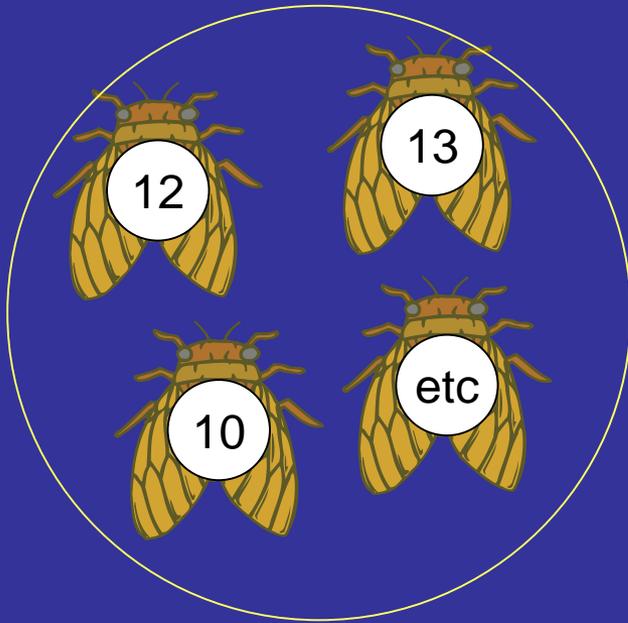
⑬  
300

⑭  
150

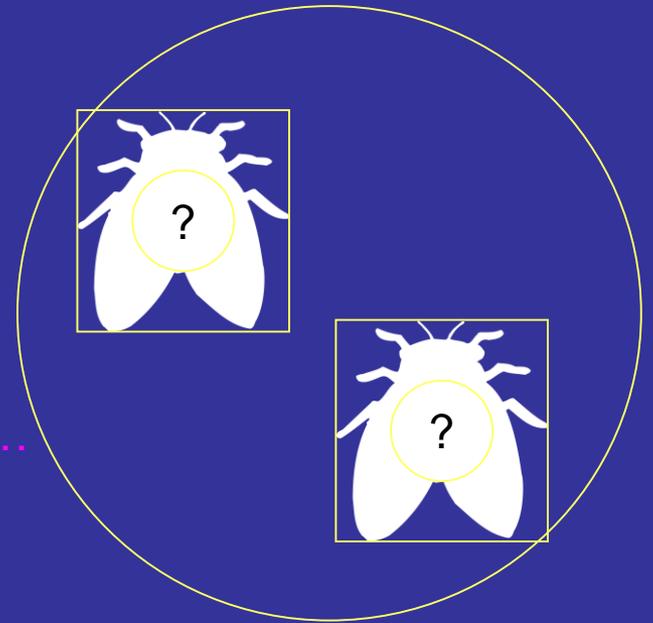
が同時に発生すると...

## ⑫メスの出会い確率と交尾相手

⑫ ♀	⑫ ♂と交尾	⑬ ♂と交雑	⑭ ♂と交雑
1匹	$\frac{50}{50 + 300 + 150} = 0.1$	$\frac{300}{50 + 300 + 150} = 0.6$	$\frac{150}{50 + 300 + 150} = 0.3$
50匹	5匹	30匹	15匹



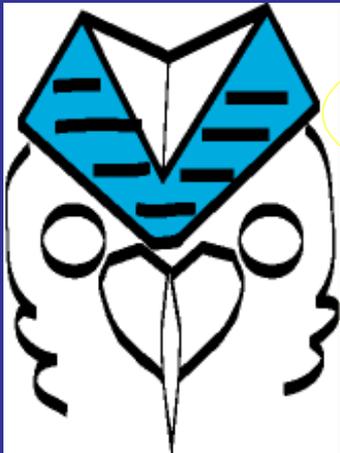
ときはながれて...



いろいろな周期のむれ

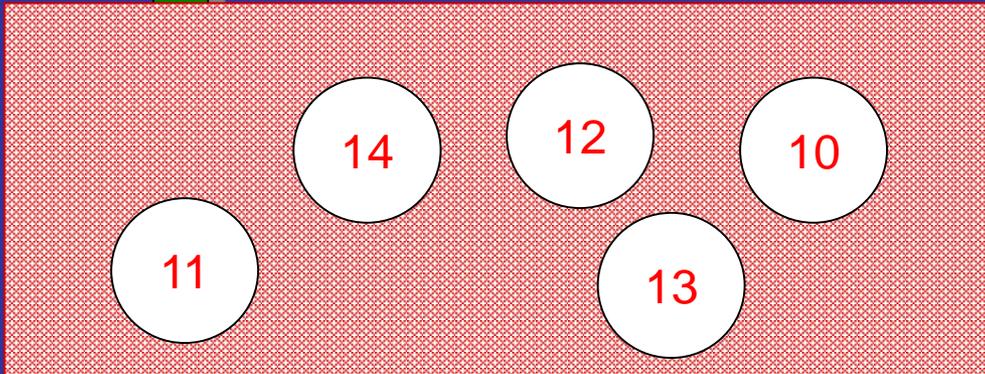
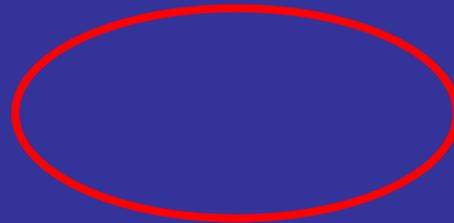
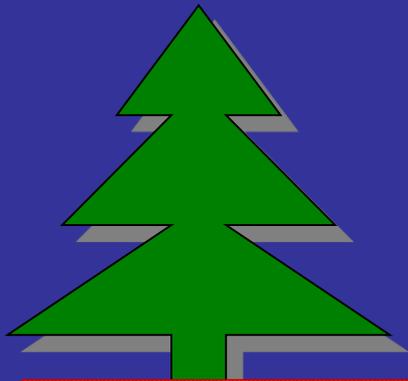
何が生きのこるか？

パソコンゼミは？



# 羽化：幼虫→成虫

交尾



- $P = E \times L_{\text{last}}$
- $P$  : 成虫の群サイズ
- $E$  : 羽化率  
( $0 \leq E \leq 1$ )

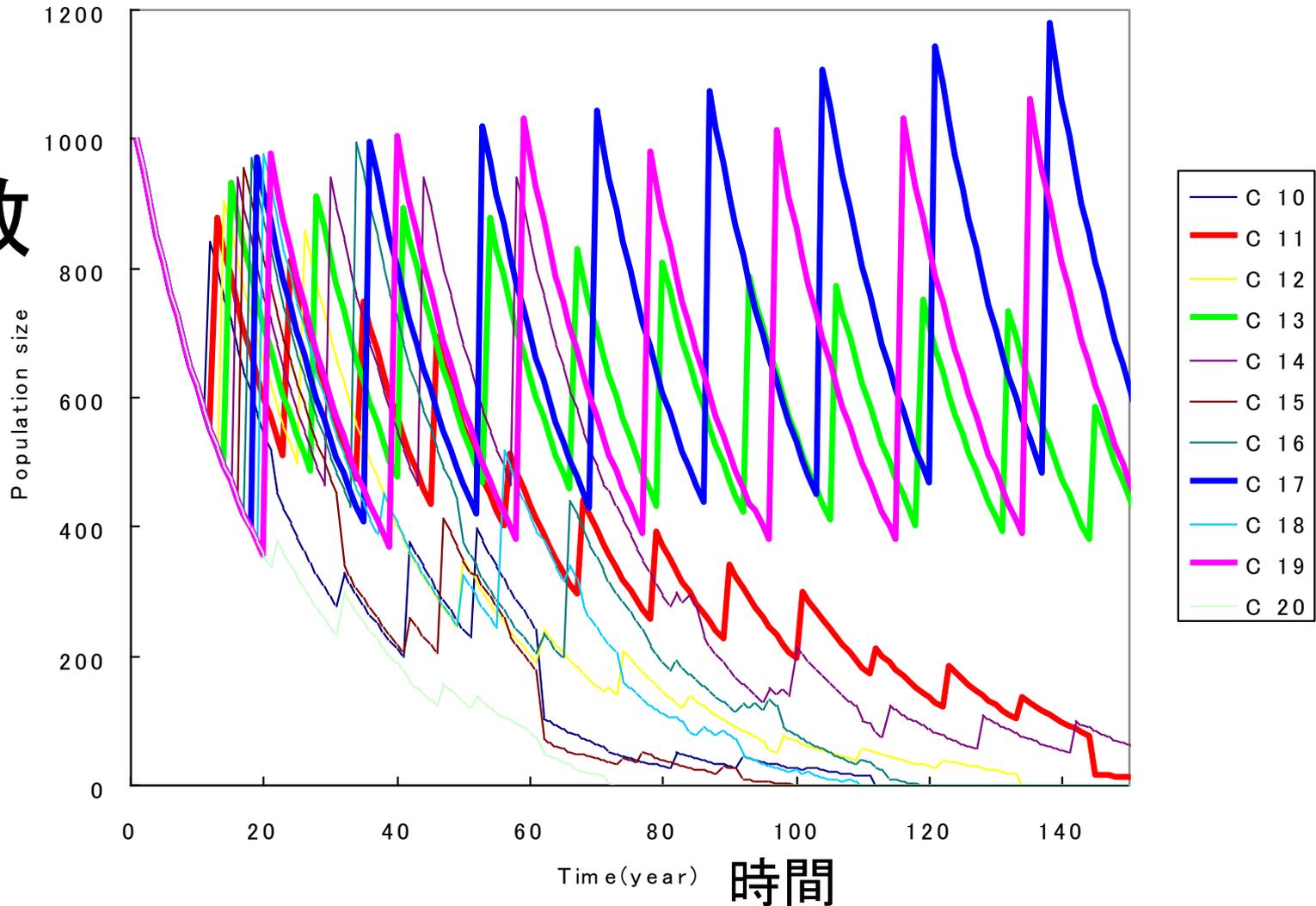
- $L_t = S \times L_{t-1}$
- $L_t$  : 幼虫の群サイズ
- $S$  : 幼虫の生存率  
( $0 \leq S \leq 1$ )

# モデルの仮定

- 幼虫の生存率  $S$  : 環境に依存
- 羽化率  $E$  : 環境に依存
- メスの卵数 =  $A \times$  成長期間

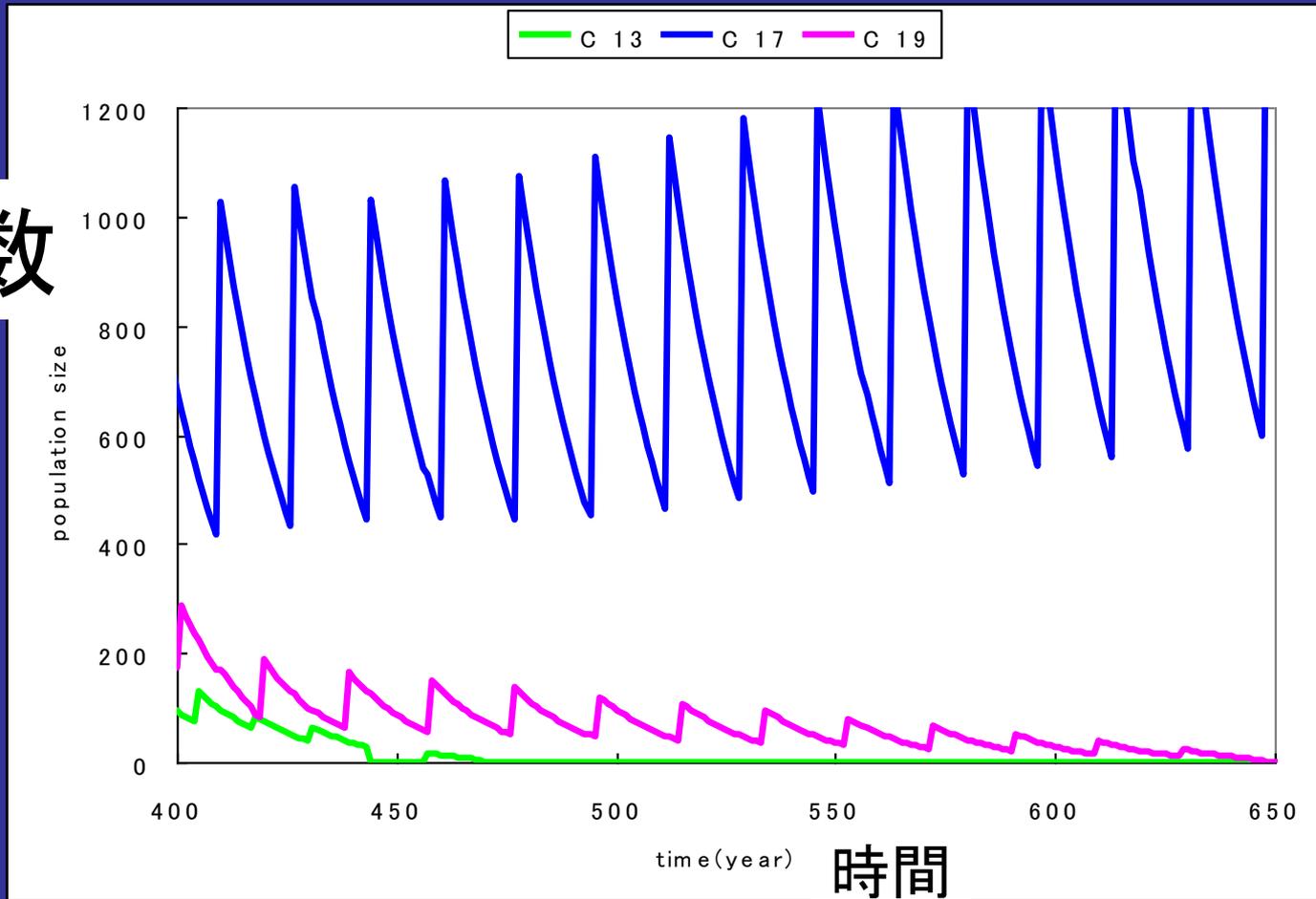
# コンピュータ実験 1

数



# コンピュータ実験 1

数

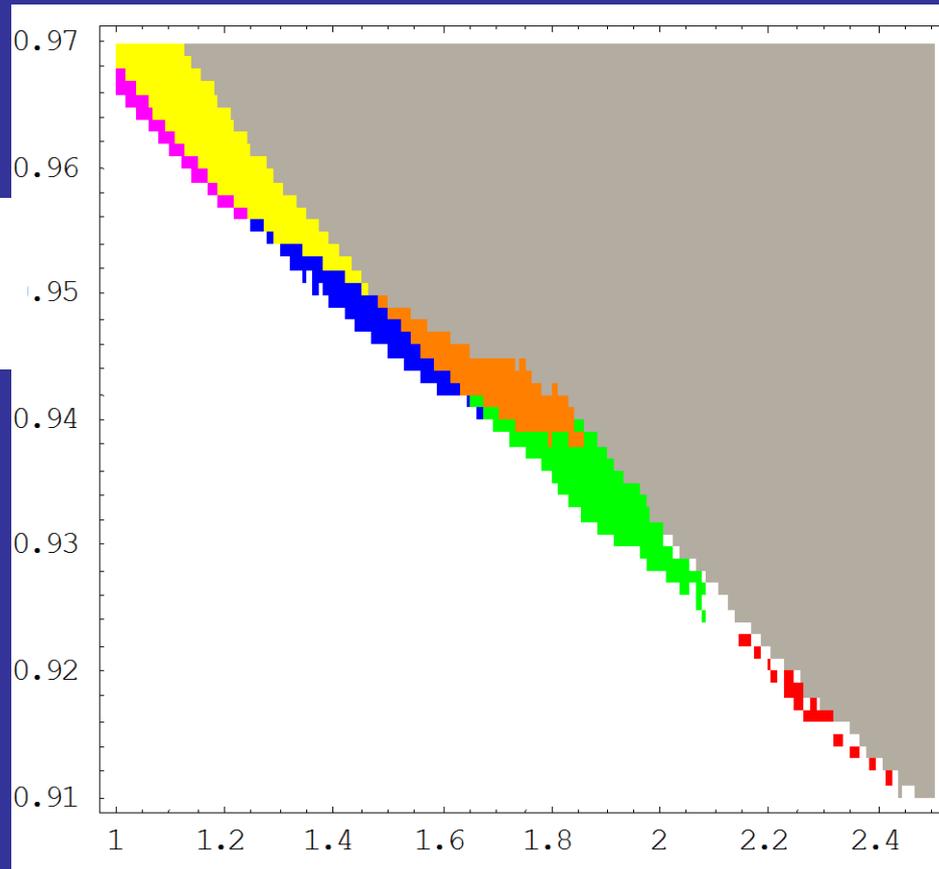


# 1000年後の周期 ？絶滅のふち？

かんきょう3:羽化率

$$E = 0.2$$

- 絶滅
- いろいろ
- 11
- 13
- 17
- 19
- 17, 13
- 19, 17



かんきょう2:  
幼虫生存率

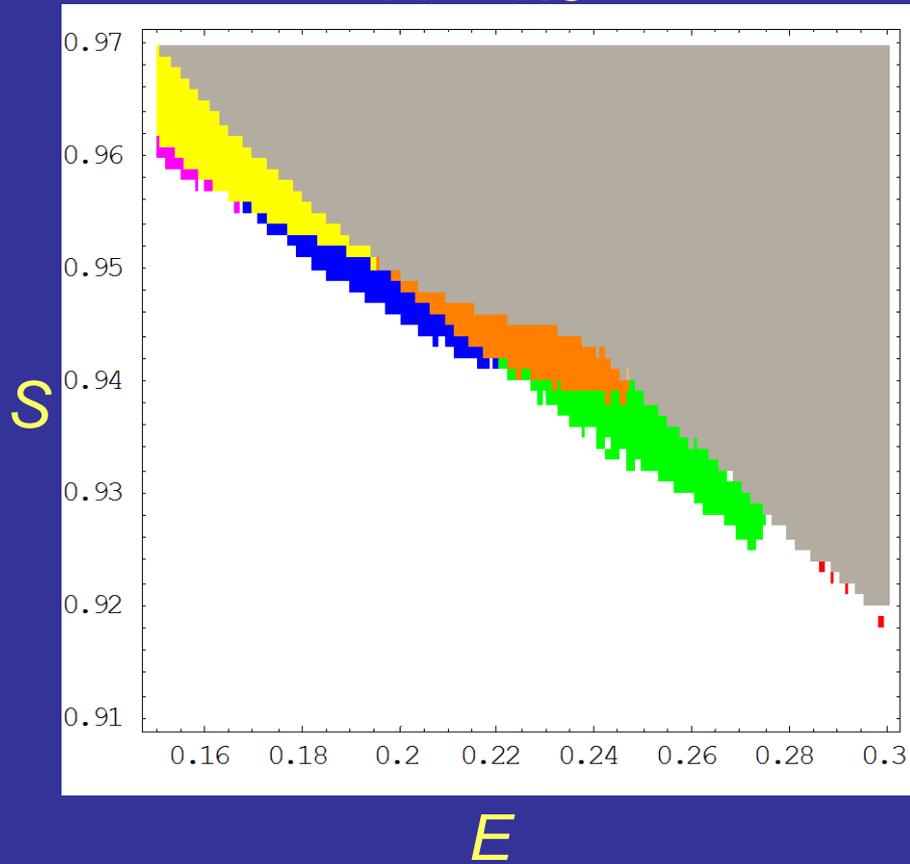
S

かんきょう1:卵数

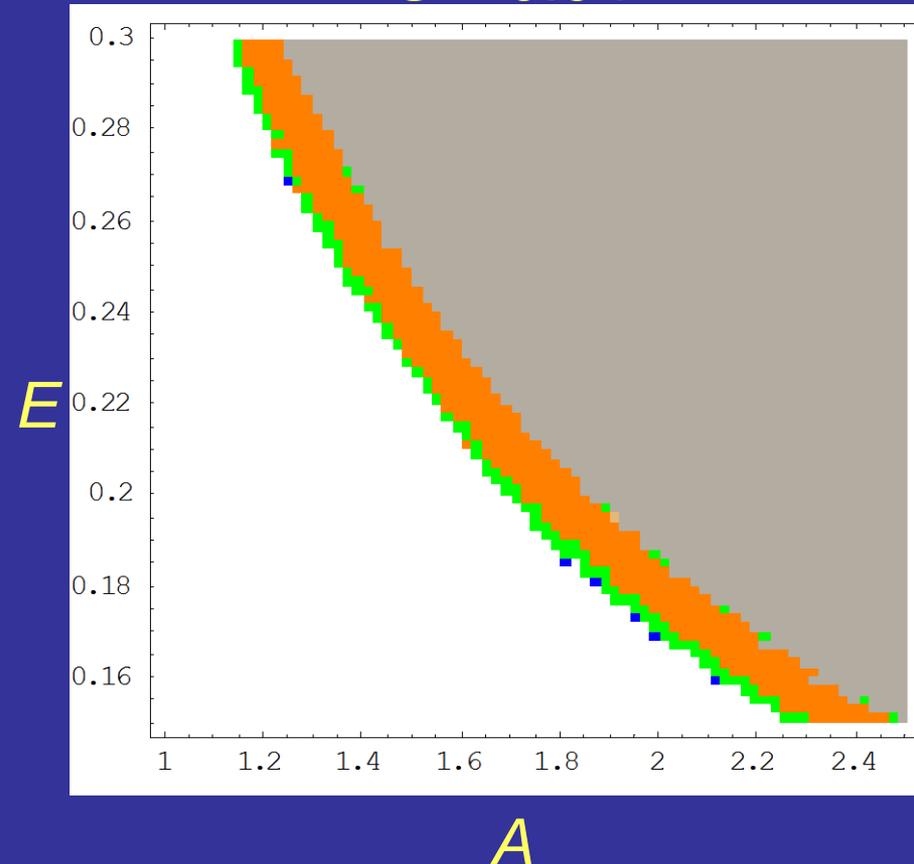
A

# 絶滅のふち

$A = 1.5$



$S = 0.94$



# 比較実験(米国科学アカデミー紀要)

- 素数選択実験

個体数は、実数(小数点)

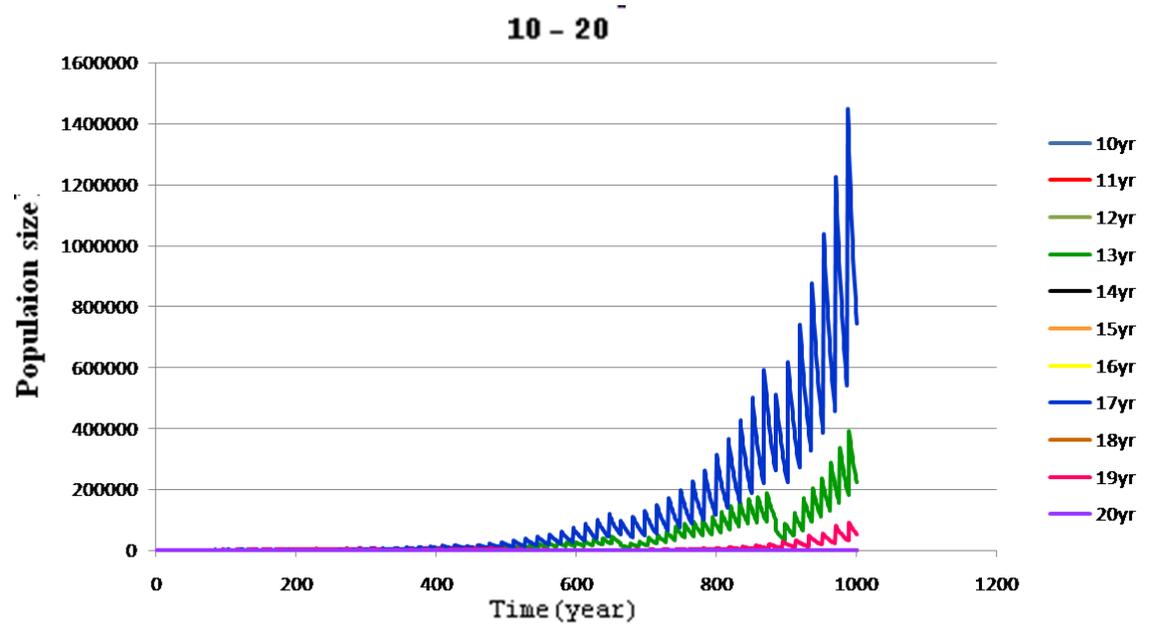
絶滅限界:  $N_c = 100$  個体

- コントロール実験(対照実験)

個体数は、実数(小数点)

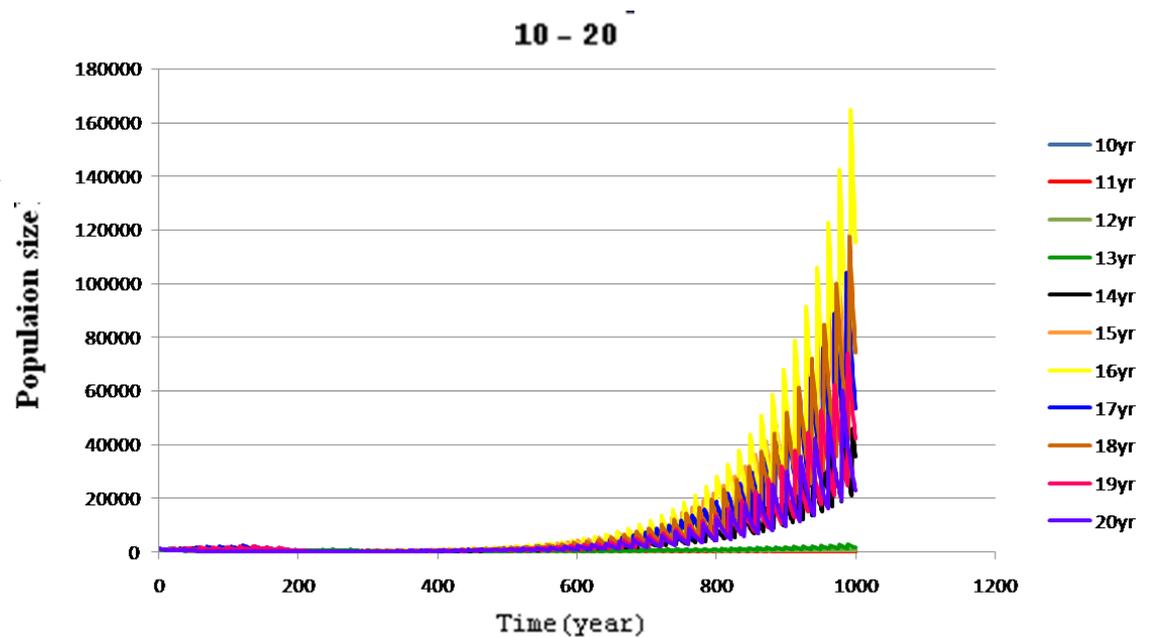
# アリー効果

$$N_c = 100$$

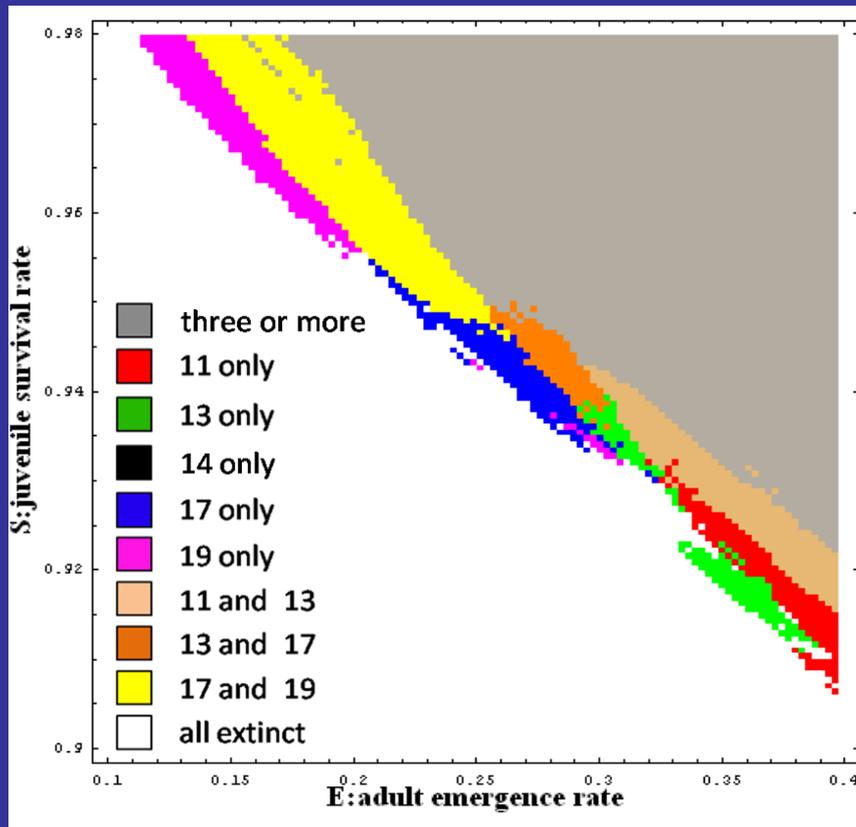


# コントロール 実験

$$N_c = 0$$

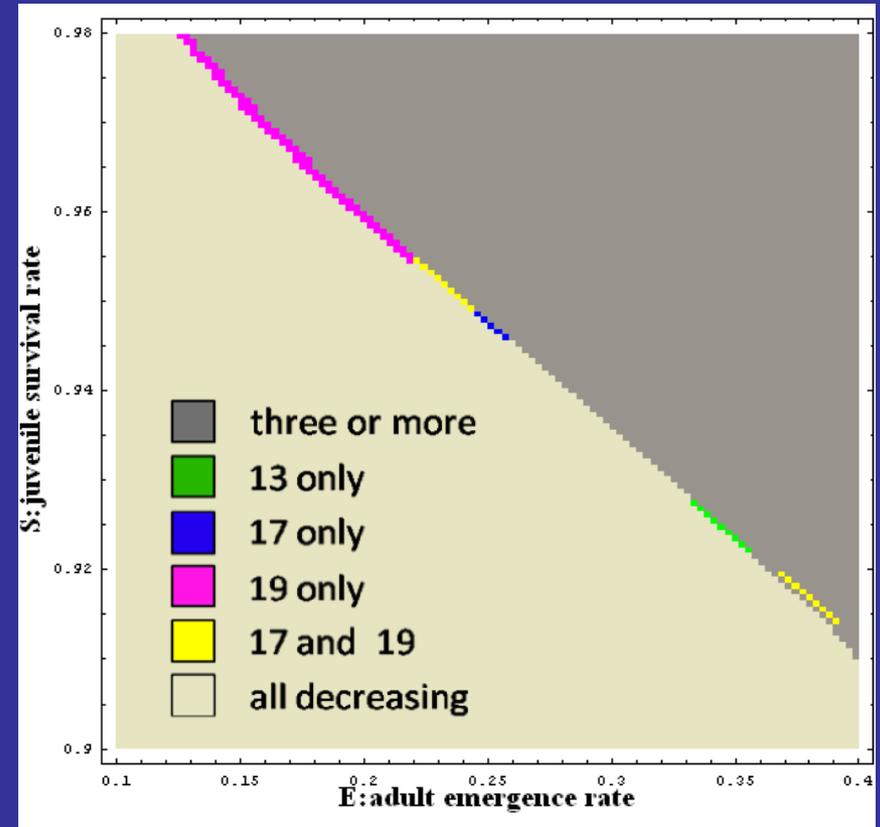


# アリー効果



$N_c = 100$

# コントロール実験



$N_c = 0$

# 科学

✉ kagaku@asahi.com

## 米の素数ゼミ 周期の訳にアリー効果

静岡大教授らモデル実験で解明  
15年と17年ごとに大発生する米の素数ゼミ。その周期の成立に、生物集団の個体数がある程度以下になると急に絶滅に向かう「アリー効果」



07年に米中部で大発生した17年ゼミ。米イノイ州、上田俊夫撮影

ミ、絶滅予兆に報告した。17という素数(1とそれ以外の数で割り切れない数)の発生周期から「素数ゼミ」とも呼ばれる。素数だと、他の数の最小公倍数が大きくなり、他の周期ゼミとの交雑や融合を避けるのに都合がいいと考えられてきた。

静岡大の兵庫県立大大学院生の田中裕美さんは、捕まってきた米田に注目して、17年周期に注目した。生物集団の個体密度が高くなるとそこにこの幼虫が産む雌雄が出会えなかったり、出会う前に捕食者に食べられたりして、密度の低下に拍出がわたり、絶滅へ向かう。吉村さんは10・20年のそれぞれの大発生の周期のゼミが異なること、幼虫の餌となる植物の生育状況が異なること、アリー効果が働く場合、餌の異なるゼミの交雑で生じる小集団などが次々と消えていく中、交雑機会が少ない素数ゼミ

北米で、十三や十七といった素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

## 「素数ゼミ」の謎解明



教授提供

特定年に北米で大量発生

〇〇四年、米東部で数十億匹の十七年ゼミが発生した。理由として、他の周期ゼミと羽化が重なりにくいことが挙げられてきた。羽化が重なる、交雑が起きても仲間が少なく、繁殖や生存に不利になる。十二、十五年周期のゼミがいた場合、十二年ゼミは十四、十五年ゼミとそれぞれ八十四年、六十年に一度重なるのに対し、素数周期の十三年ゼミは最短でも百五十六年に一度しか重ならず、交雑する素数ゼミ(吉村仁静岡大

## 静岡大など研究チームが「算出」

雌の可能性が少ない。吉村教授らは十年から二十年までの十一種の周期の七、十三、十九年周期の順で個体数が多くなり、その生存率や羽化率、産卵数、他は途中で絶滅。素数ゼミも、千年単位で個体数変化をシミュレーション、仮説の証明を試みた。ところが、単純に世代交代を繰り返すだけでは、周期による差は少なく、素数ゼミの優位性はみられなかった。そこで、自然界にみられる一種の個体数が一定の数か、兵庫県立大などの研究員も参加している。

リー効果をシミュレーションに導入したところ、十年までの十一種の周期の順で個体数が多くなり、その生存率や羽化率、産卵数、他は途中で絶滅。素数ゼミも、千年単位で個体数変化をシミュレーション、仮説の証明を試みた。ところが、単純に世代交代を繰り返すだけでは、周期による差は少なく、素数ゼミの優位性はみられなかった。そこで、自然界にみられる一種の個体数が一定の数か、兵庫県立大などの研究員も参加している。

### 朝日小学生新聞

朝日新聞の姉妹

## 素数ゼミのなぜ

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

## ほかのゼミと出会うと絶滅 周期重なりにくく生き残る

静岡大 吉村仁教授

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

## なぜ13年と17年の周期で大発生?



13年	17年	14年	15年
124	150	84	90
134	150	162	195
144	84	182	210
154	60	195	210

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

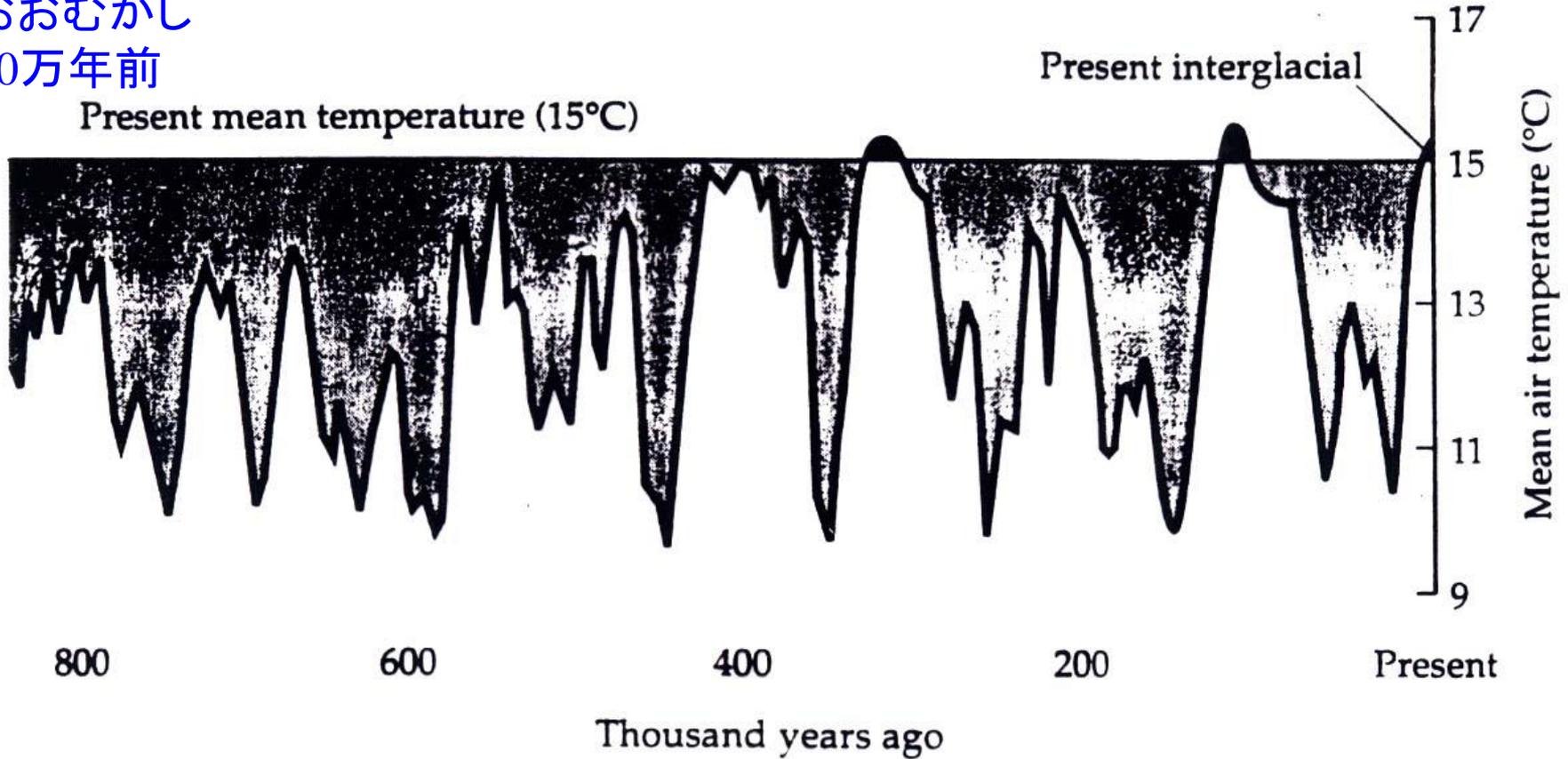
素数ゼミは、素数(1とそれの数以外では割り切れない数)の年数ごとに大量発生する不思議な「素数ゼミ」。なぜ、素数の年だけに集中するようになったかを、静岡大の吉村仁教授(進化生物学)らの研究チームが二十五日までに、コンピューターによるシミュレーションで再現し、米科学アカデミー紀要電子版に発表した。

# はるかむかしの氷河期

現時点

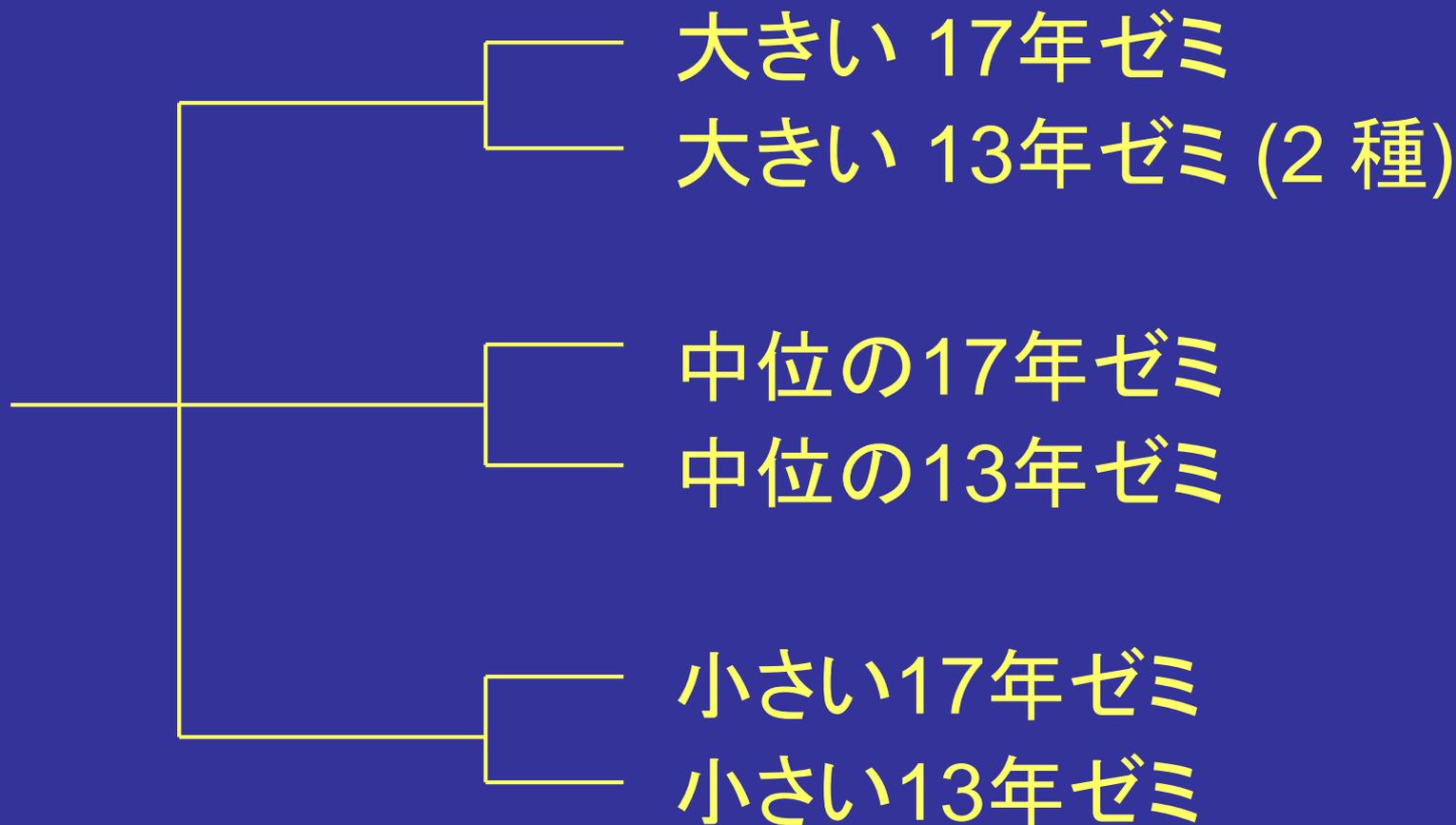
おおむかし  
80万年前

Present mean temperature (15°C)

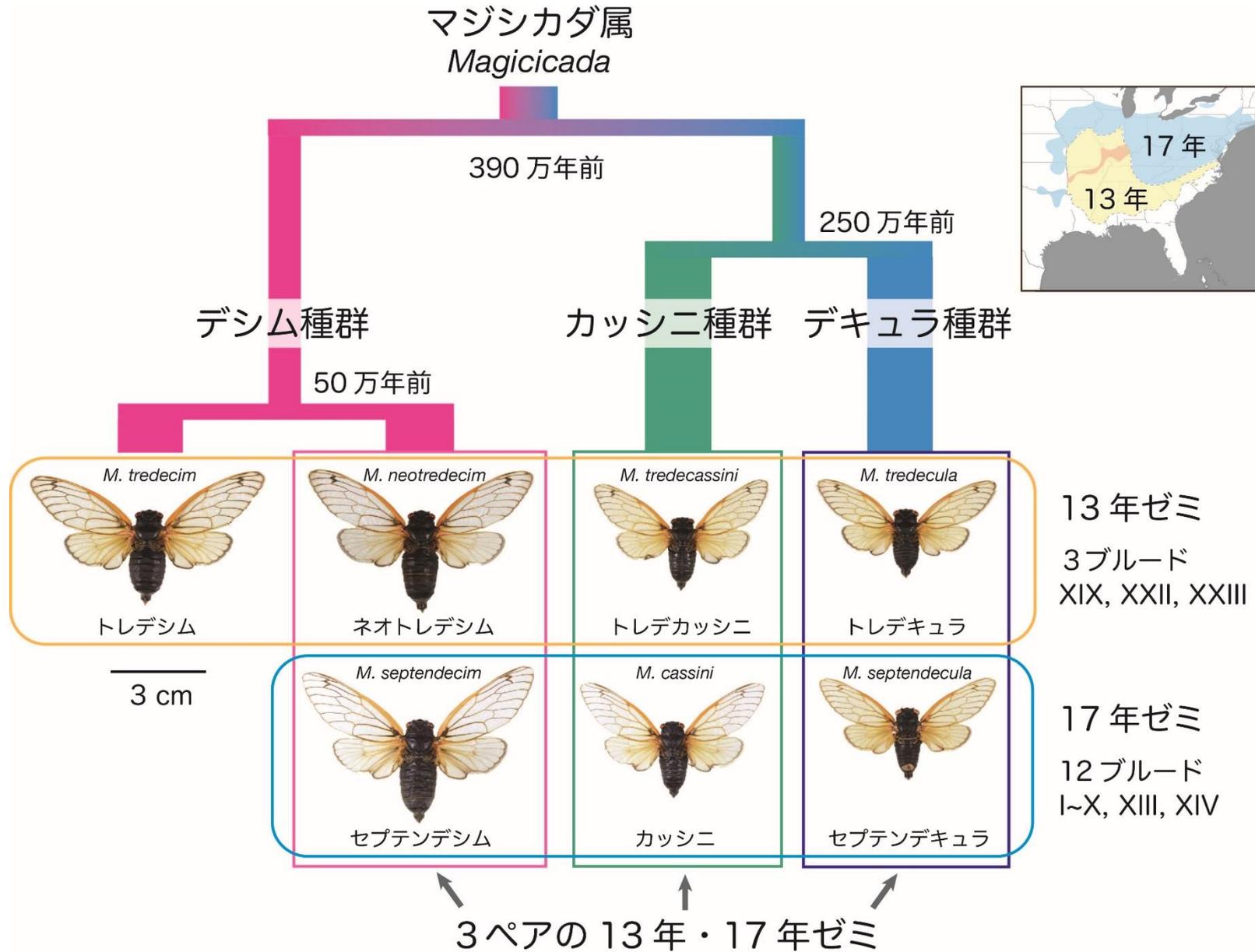


(Gates 1993)

# 予測：13・17年周期の独立進化



# 素数ゼミの分子系統



# 7種の進化の順番

- 氷河期1

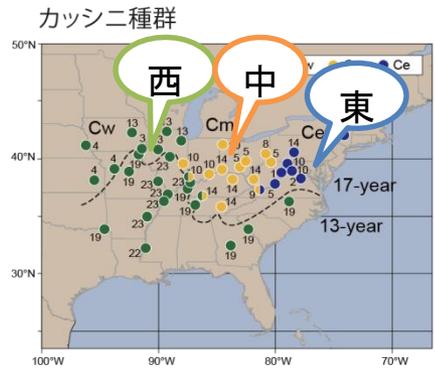
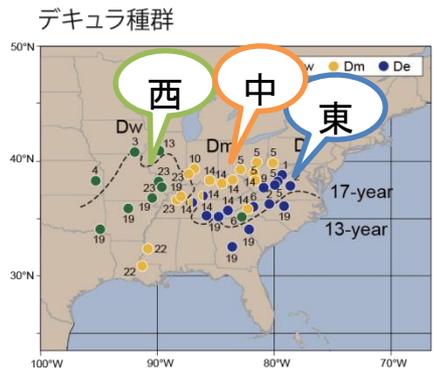
  - 大きい種: 17年(北)と13年(南)2種

- 氷河期2

  - 中位の種: 17年(北)と13年(南)

- 氷河期3

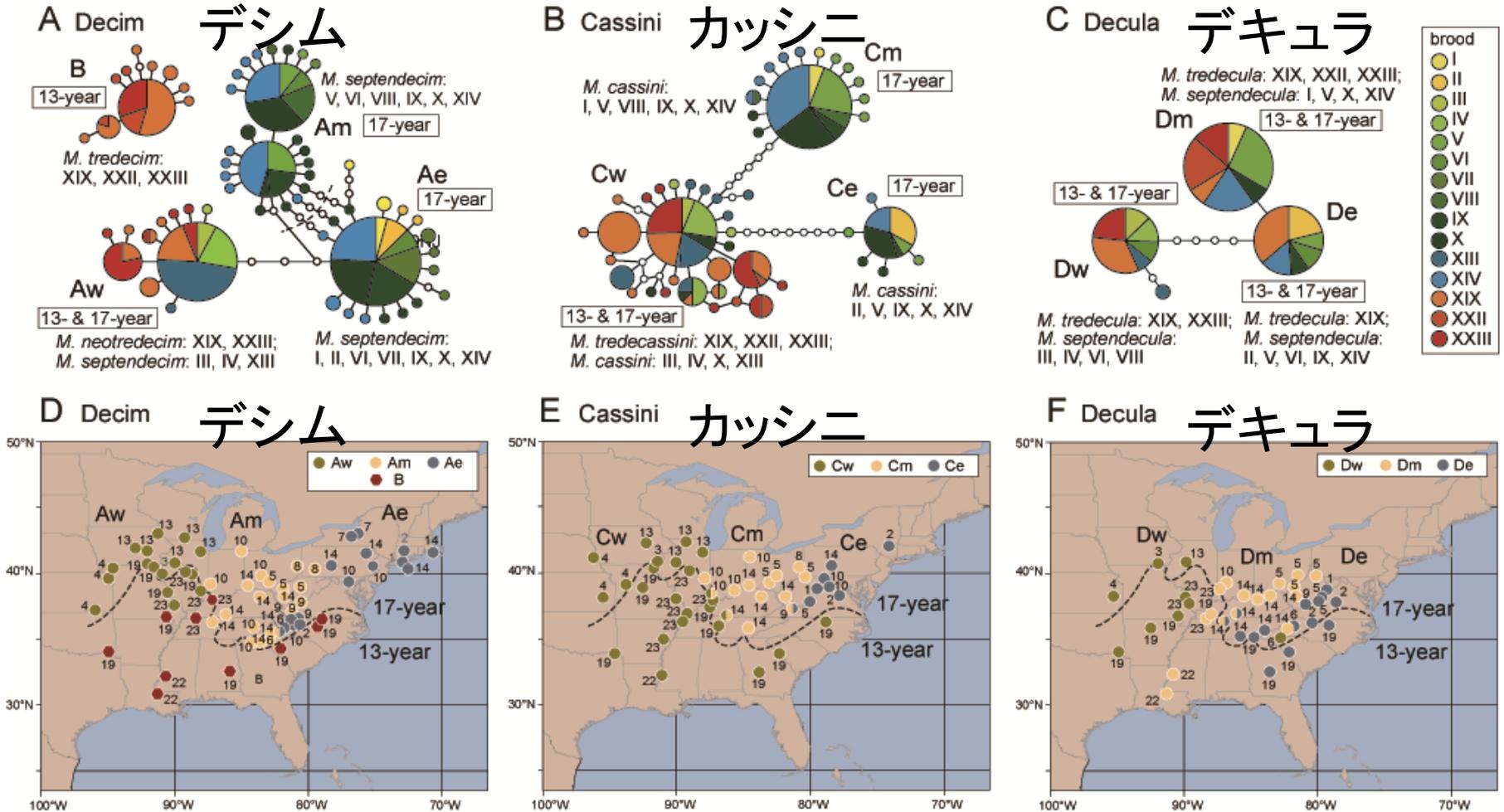
  - 小さい種: 17年(北)と13年(南)



ミトコンドリア系統群の地理的分布

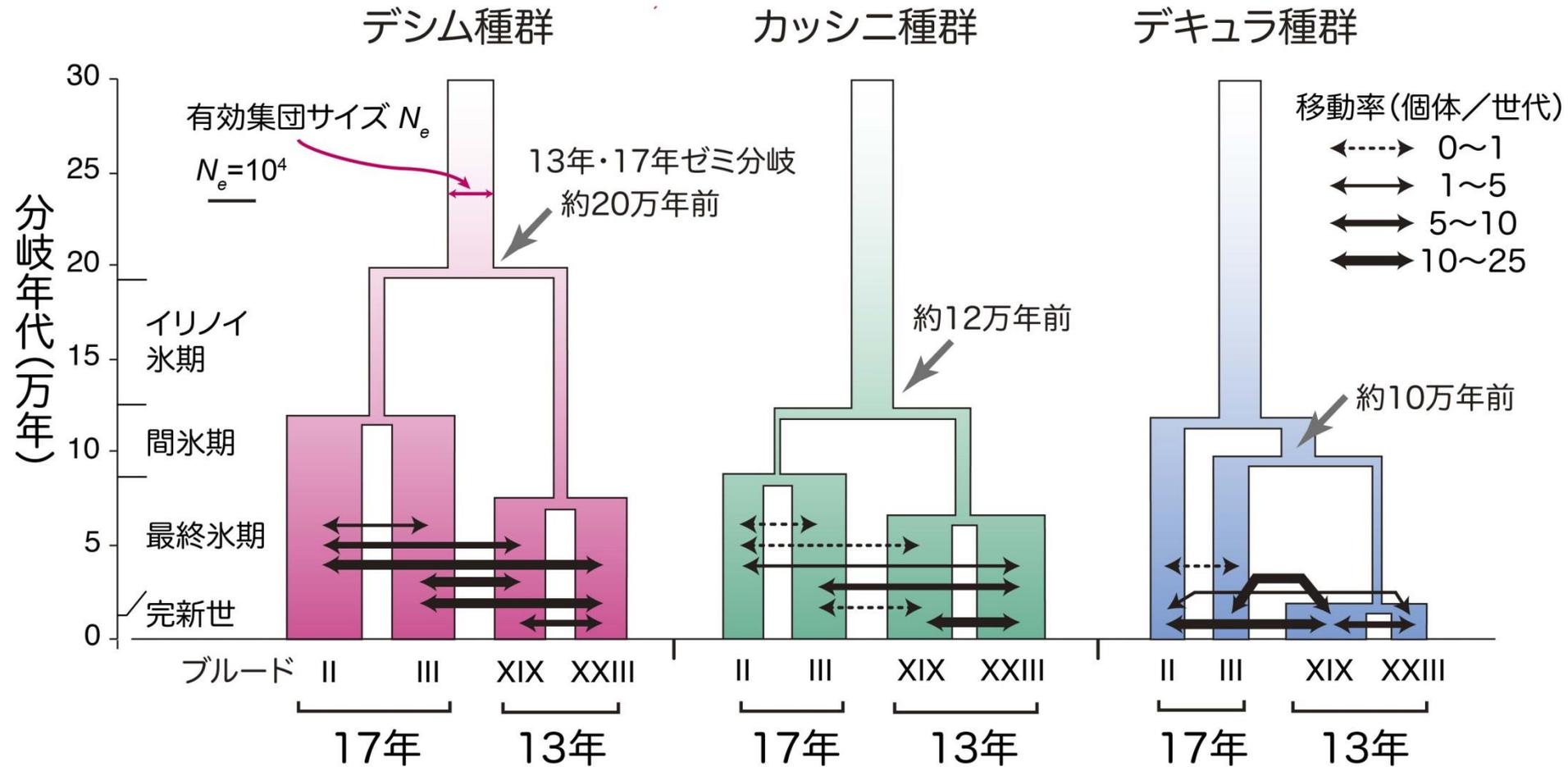
周期ゼミの系統樹

# ミトコンドリアの塩基配列の多様性(上)と塩基配列系統の地理的分布(下)



3種群は地理的分化パターンが類似している  
 いずれも合衆国東部で、西・中央・東の系統グループに分かれる(デシム種群には、南の系統グループもある)  
 →最終氷期の避難場所が共通して3つに分かれていた?

# 新しい謎： 13・17年間の共通遺伝子群



# 第五章 氷河期のおわり



素数でないセミたちは、絶滅

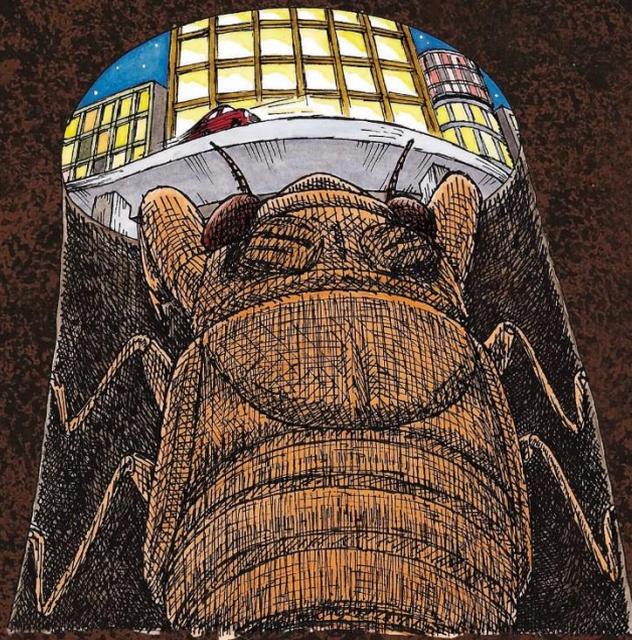
17年・13年ゼミたち

- はやく成虫になった → 誰もいない！
- 遠くへ行ってみた → No mates!!

もとにはもどれない！

# 今、シカゴ の まち中で

地球温暖化の中でも  
しぶとく生きぬく  
周期ゼミ





第3種郵便物認可

# ひと

「17年ゼミ」の謎解きを続ける静岡大教授

よしむら じん 吉村 仁 さん(52)



森や草むらを、ポリ容器の「虫かご」を手に歩き回る。狙いは、米北東・中部で17年ごとに大発生する「17年ゼミ」だ。5月末から3週間余り、イリノイ州周辺でのゼミ採りに明け暮れた。カナダの大学で研究員だった90年、同

僚から「なぜ正確な周期を持つのか。君には解けないだろう」と冗談半分に言われ、謎解きにはまった。

北米の大半が氷河に覆われていたころ、このゼミの祖先は点在する森に閉じ込められていたに違いない。寒いから成長に時間がかかる。同時期に大発生すれば子孫を残すには有利だ。周期が17年という素数(1とその数自身でしか割り切れない整数)なら、他のゼミとの競合も少ない。「物語」はすぐに思いついた。

それを数学で補強してじっくり理論にまとめ、7年後に論文を発表。05年には「素数ゼミの謎」という著書も出した。サルやチョウ、プランクトンなど研究した生物は多いが、「世間では『ゼミの専門家』になってしまいました」。

17年ゼミにも発生の地域や年が異なるいくつかの「族」がいる。今年のゼミ採りは遺伝子からそれらの起源に迫る第一歩だ。「進化の歴史を再構築したい。ここまで来たら、いっそライフワークに」戦前にブラウン管を使ったテレビを開発し、世界で初めて受像に成功した高柳健次郎氏は祖父。「『やりたいだけ、やりなさい』と、いつも言われてきた」。その言葉を、いまも大切にしている。

文・写真 上田 俊英

# 素数が守った17年ゼミ

## 競合少なく数増える

17年ごとに大発生する米国の「17年ゼミ」の羽化が、イリノイ州など米中部でピークを迎えている。今年の予想発生数は世界の総人口を上回る70億匹。米国では「うるさく」「庭木が傷む」「掃除が大変」など悪役と見なされがちな17年ゼミ。しかし、その正確な体内時計には「進化の不思議」が詰まっている。

(米シカゴ上田俊英)

イリノイ州シカゴ郊外へ、静岡大の吉村仁教授(進化理論)とゼミ捕りで種が違おうという。ほかに出かけた。住宅地のわきの森に入ると、赤い目の17年ゼミが、木の幹だけでなく、周囲の草にも鈴なり状態だった。全長4センチほど。日本のニイゼミ並みだが、細身なのでより小さく見える。そのうえ無防備で簡単に捕れる。「17年ゼミは長い距離を飛べない。大発生するので、遠くまで結婚相手を探しに行く必要がなかったのでしょう」と吉村さん。

よく見ると、ひとまわり小さいゼミが交じっている。大きい方は腹がオレンジ色なのに、小さい方は黒い。大きい方は「セプテンデシム」、小さい方は「カッシーニ」で種が違うという。ほかにもう1種、小型の17年ゼミがいるそうだ。シカゴの歴史・自然史博物館「フィールド博物館」のダン・サマーズ昆虫収集部長によると、今年の羽化の第一報は5月19日。「前回の60億匹を超え、70億匹は発生するとみられている」。大発生は1カ月ほど続く。

17年ゼミは、南部で13年ごとに大発生する「13年ゼミ」と、遺伝的に近い。両者は発生地域と発生年が異なる計15の「族」に分かれている。吉村さんは今年から各族のゼミを採集し、遺伝子の違いを調べる計画だ。「17年ゼミと13年ゼミはどう分化したのか。各族の関係はどうなっているのか。進化の歴史を再構築したい」



続々と羽化する17年ゼミ。シカゴ郊外で、上田写す

なぜ大発生の周期は17年と13年なのか。謎を解くカギは、17と13が「素数」(1とその数自身でしか割り切れない整数)ということにある。たとえば16年、17年、18年ゼミがいた場合、周

## 米で今夏70億匹予測／温暖化で周期異変も

期が素数の17年ゼミは他のゼミと最も出合いにくい。16年ゼミは18年ゼミと144年ごとに出合うが、17年ゼミとの出合いは272年に1回だ。吉村さんによると、17年ゼミだけが他のゼミとの競合が少ない分、数が増える。たまた他のゼミと出合っても、数が多いので交雑を免れ、正確な体内時計を維持できる。「素数でも11年では成長に時間が足りず、19年では長すぎて死亡率が高まり、生き延びられなかった」と推測する。

地球温暖化で体内時計が狂うことはないのか。フィールド博物館のサマーズさんは「大発生の周期がずれることはありうる」と言う。根拠は69年の「異変」だ。この年、今年と同じ族のゼミの一部が4年も早く羽化した。イリノイ州で自然保護に取り組む非政府組織「LCFP」のジェニファア・フィリピアクさんは「地中にある17年の間に温暖化で森林が減ったり、生息地が水没したりすれば、それこそ生存の危機です」と心配する。



『強い者は絶滅する！』

おわり

強い者は  
生き残れない  
環境から考える新しい進化論

吉村仁  
Yoshimura Jin

新潮選書



Shincho Sensho

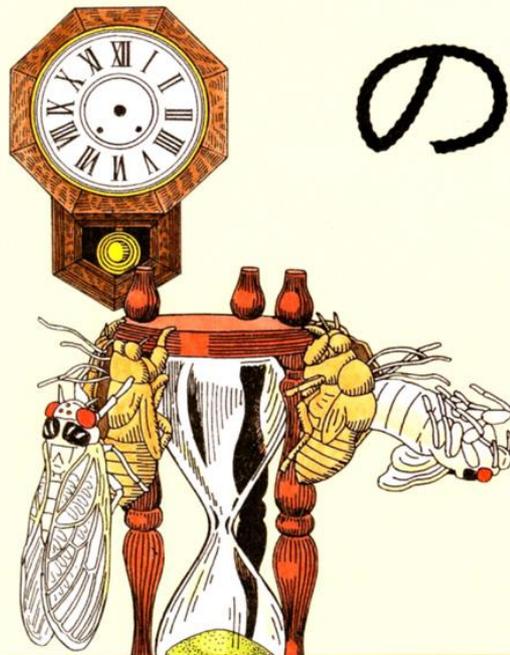
一人勝ちは、  
自然の法則に  
反していた。

「環境変動説」の  
誕生！

新潮選書

定価：本体 1200円（税別）

そすう  
素数ゼミ  
の謎  
なぞ



よし むら じん ちよ  
吉村仁・著  
(静岡大学教授)  
いし もり よし ひこ え  
石森愛彦・絵

17年に一度だけ現れる  
不思議なセミを知っていますか——

小さな<sup>かく</sup>セミに隠された、  
<sup>そうだい</sup>壮大な<sup>しんか</sup>進化の<sup>ものがたり</sup>物語

子どもから大人まで楽しめる科学読みもの

文藝春秋刊  
定価（1429円＋税）



セミ採りの必殺技

デモンストレーション

# ファイルの使用注意

- イラスト・記事は著作権があるので、個人的利用及び教育研究を除き無断を使用しないこと。とくに、ウェブ掲載は不可です。
- 写真・イラストのない図表は自由に使ってください。講義など教育目的ではご自由にお使いください。出展を明示お願いします。
- ご不明の点は、吉村仁までメールで。