

**Numerical experiments
on variation of species diversity
in size-dependent evolutionary system**

サイズに依存した進化システムにおける
生物種の多様性変動の数値実験

佐々木貴教

修士論文発表会 (2/9)

Contents

- Introduction

 - 惑星科学としての数理生態学、本研究の目的

- Methods

 - 捕食-被食関係、ゾウの時間 ネズミの時間

- Results & Discussions

 - Result 1 : 特定の進化パターンとその解析
 - Result 2 : 進化のサイズ依存性の影響

- Conclusion

Introduction

—1995年—

51 Pegasi の周りに “Hot Jupiter” を発見

[Mayor & Queloz, 1995]

～2005年2月5日

147個の系外惑星を検出

(ほとんどが巨大ガス惑星)



—1995年—

51 Pegasiの周りに“Hot Jupiter”を発見

(Mayor & Queloz, 1995)

～2005年2月1日

147個の系外惑星を検出

(ほとんどが巨大ガス惑星)

～20??年

地球型系外惑星の発見

地球外生命の研究へ “Astrobiology”



数理生態学

究極的な問い：

どのような惑星表層環境のもとで、
どのような進化を経れば、
惑星上に安定で多様な生態系が形成しうるのか？



数理生態学の現状：

地球の生態系すら正確に記述できていない
進化をうまく表現できていない
恣意的な仮定・解釈が多い

数理生態学の先行研究

[May, 1972]

種間の相互作用が強くなるとシステムが不安定化



現実世界では複雑で多様なシステムが安定に存在

[Tokita & Yasutomi, 2003] [Yoshida, 2003a,b]

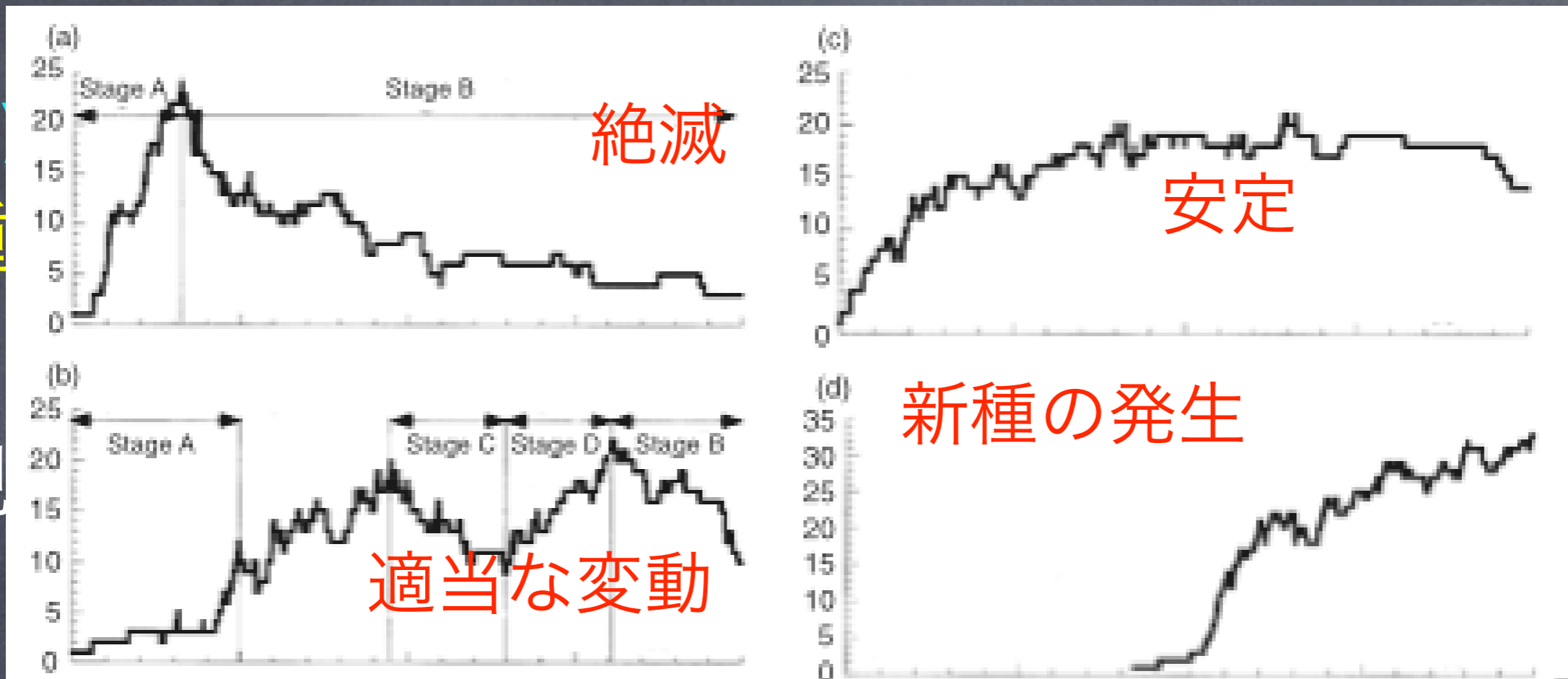
ランダムマトリックス・共生関係・種の進化

→ 安定な生態系を実現

自律的な増加・絶滅を実現

数理生態学の先行研究

[Ma] 種
現



定化
存在

[Tokita & Yasutomi, 2003] [Yoshida, 2003a,b]

ランダムマトリックス・共生関係・種の進化

→ 安定な生態系を実現

自律的な増加・絶滅を実現

本研究の目的

仮想的生物群集を用いた数値実験

- ・異なる初期値を用いた統計的実験
- ・異なる進化システム間での比較実験



生態系の一般的な進化パターンの存在

進化システムの違いが系の安定化に与える影響

Methods

Lotka-Volterra 方程式

$$\frac{dM_i}{dt} = M_i \left(r_i + \sum_{j=1}^n a_{ij} M_j \right)$$

M_i : 種 i の生物量

r_i : 自然増加率

a_{ij} : 種 i, j 間の相互作用

パラメータ

w : 重量

r : 自然増加率

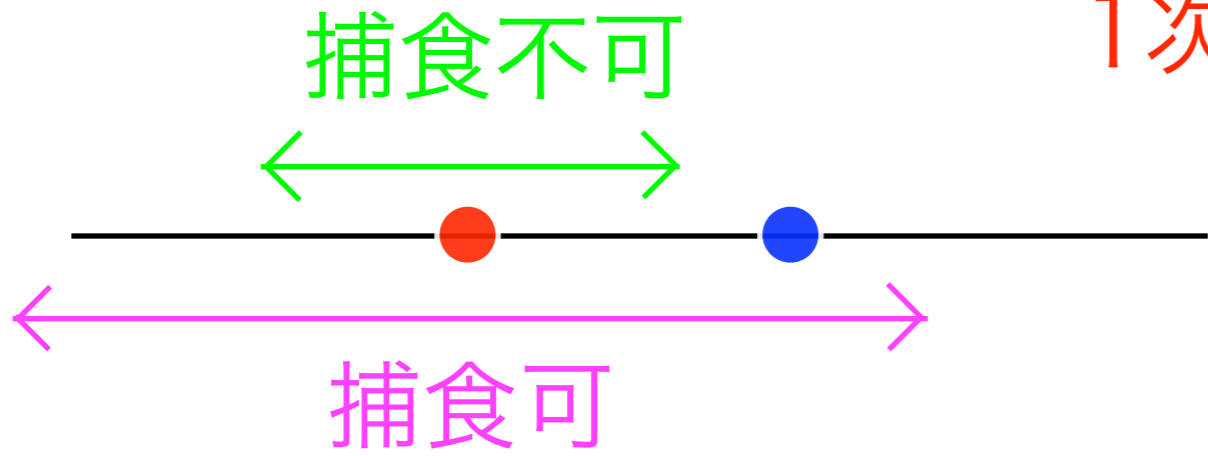
$D[k]$: 被食特性

$A[k]$: 捕食特性

P : 捕食幅

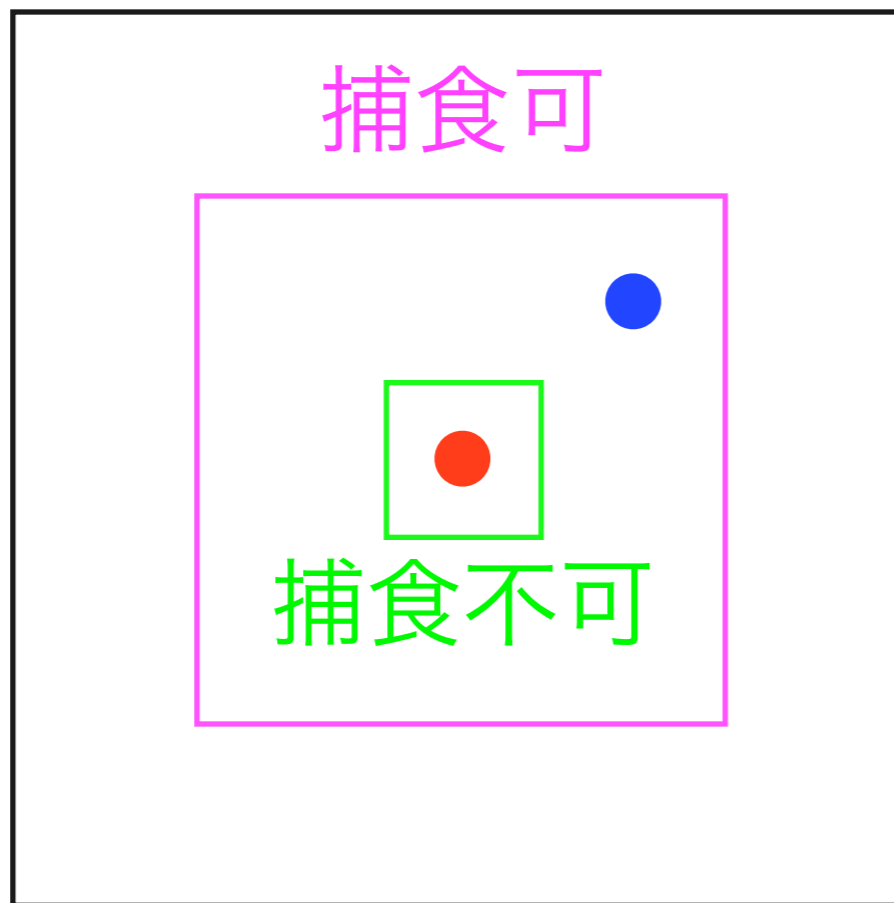
種 i の捕食特性 A_i と 種 j の被食特性 D_j の差と
種 i の捕食幅 P_i との大小によって a_{ij} を決定する

1次元



- 種 j の被食特性
- 種 i の捕食特性
- ↔ 種 i の捕食幅

2次元



- 種 j の被食特性
- 種 i の捕食特性
- 種 i の捕食幅

いくつかの仮定

- 動物と植物を考える
- 動物の自然増加率 0
(動物は捕食によってのみ繁殖する)
- 動物は自分より小さい動物のみ捕食する
- 植物は自然増加によってのみ繁殖する
- 種の進化・枝分かれを定期的に起こし、娘種のパラメータは親種から微少変化させて与える
- 代謝・進化速度にサイズ依存性を設ける
- 本研究では動物の多様性変動のみを見る

サイズ依存性

代謝効率はサイズの4分の1乗に比例

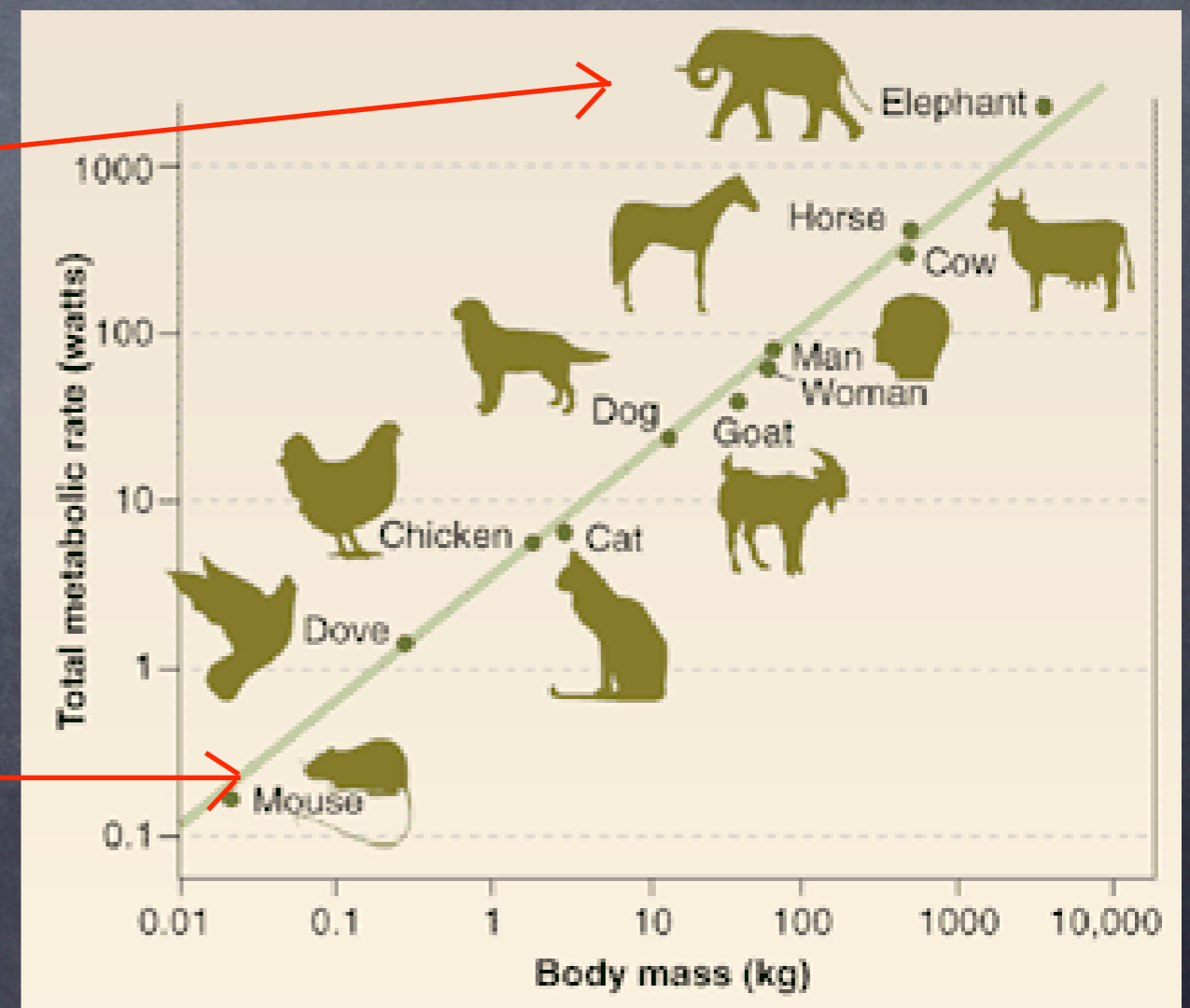
タイムスケールはサイズの4分の3乗に比例

[Schmidt-Nielsen, 1984]

ゾウは生物量が増えづらく進化速度が遅い

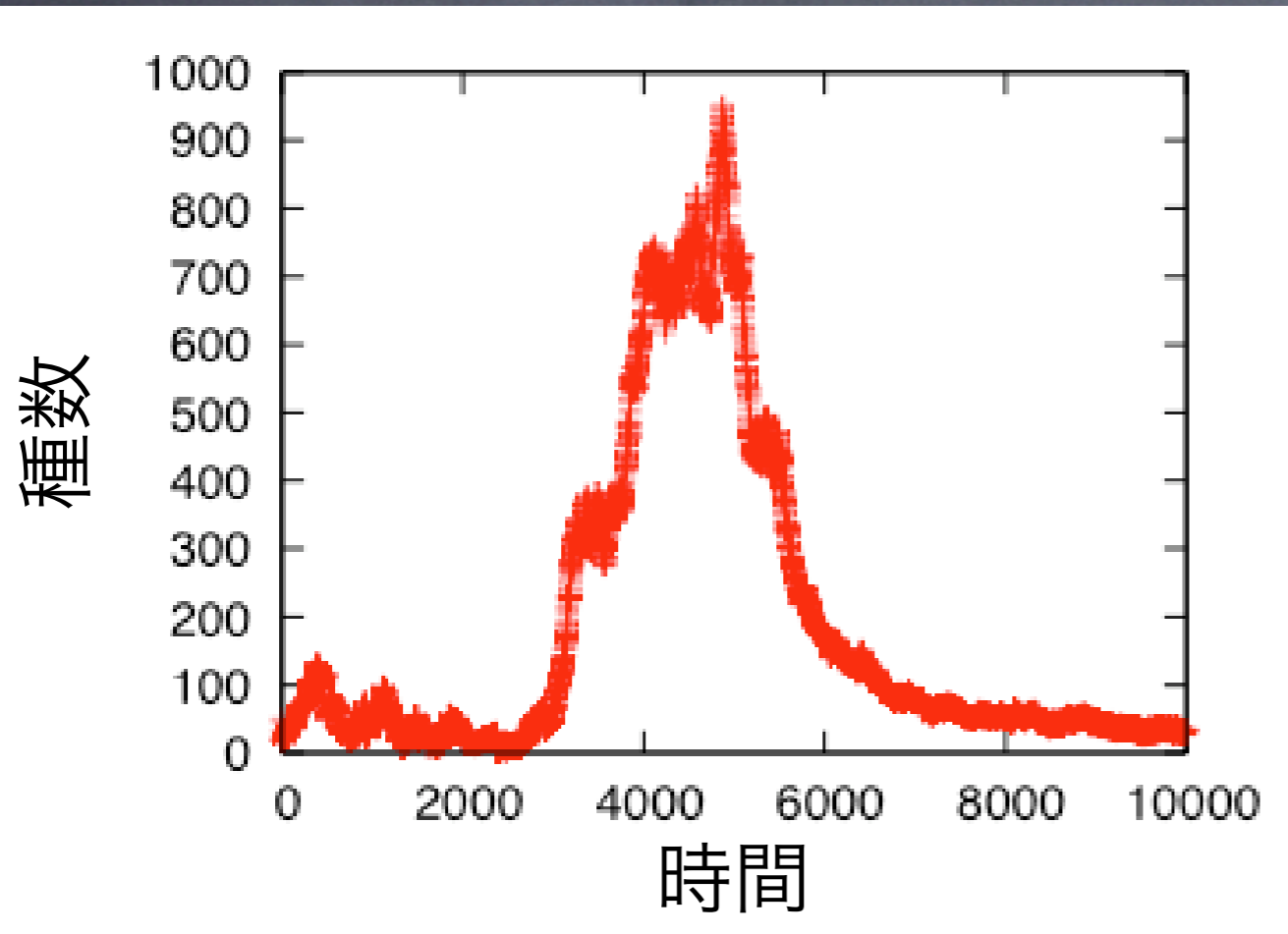


ネズミは生物量が増えやすく進化速度が速い

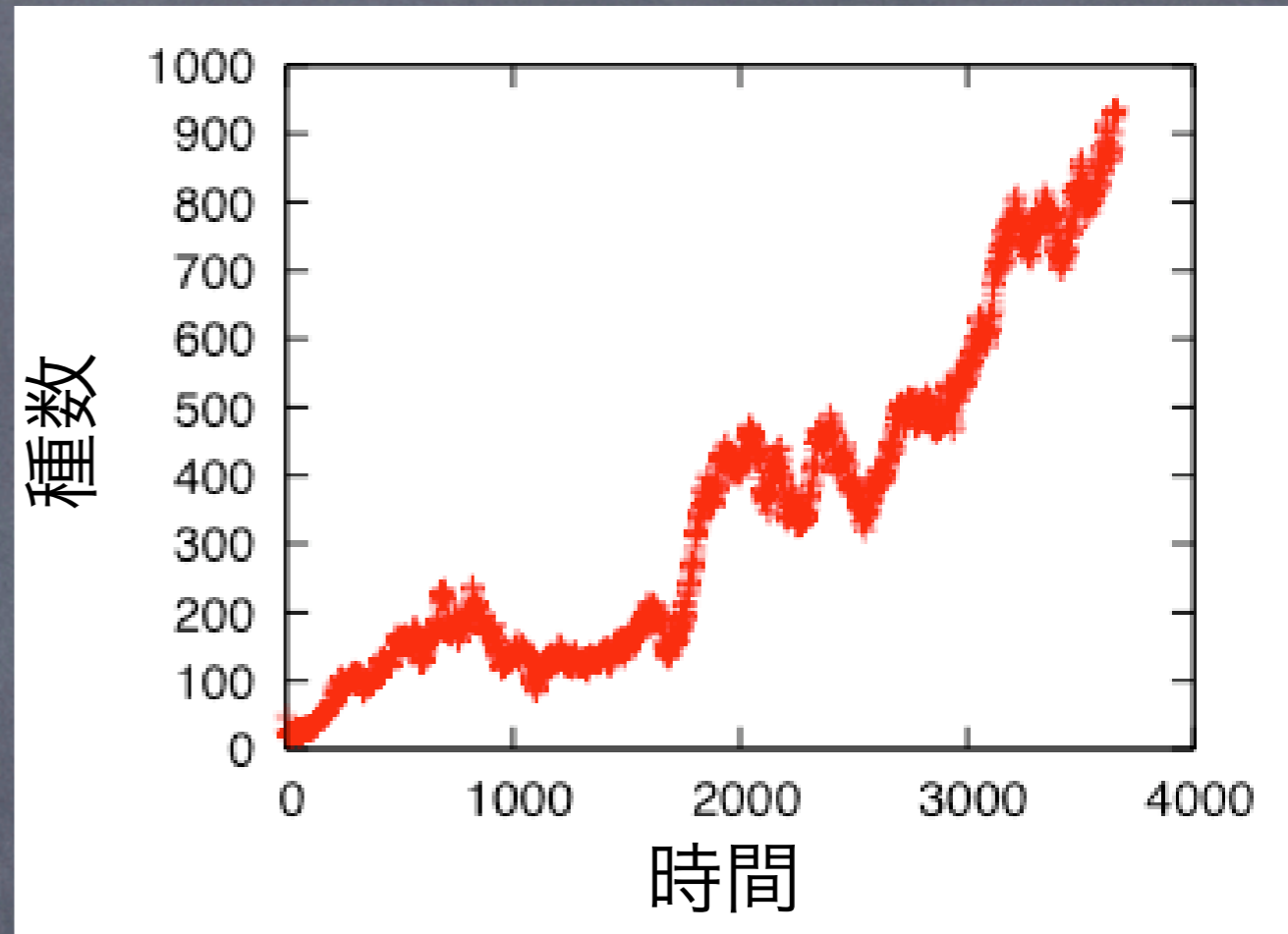


Results & Discussions

結果 1 : 2つのパターン

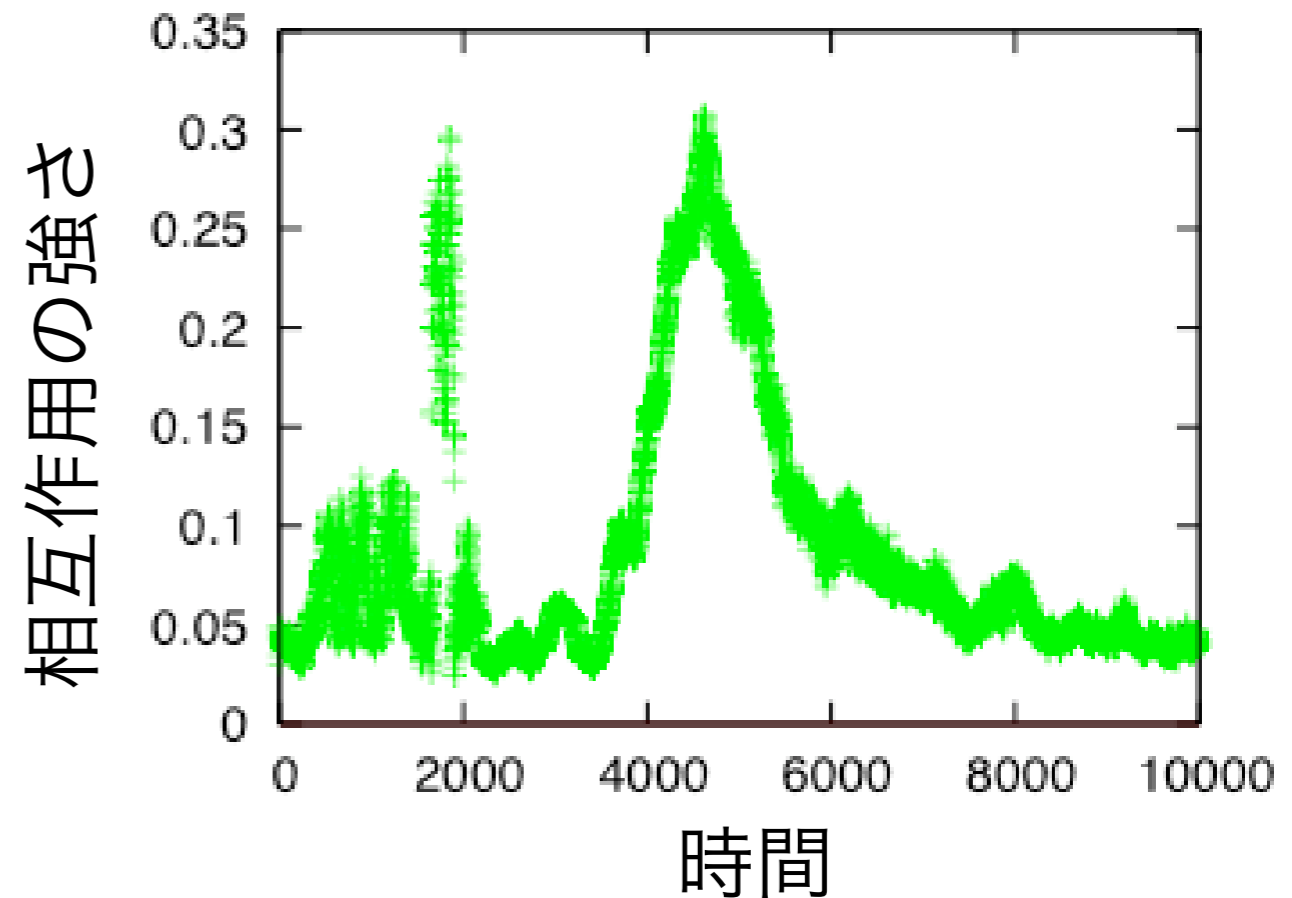
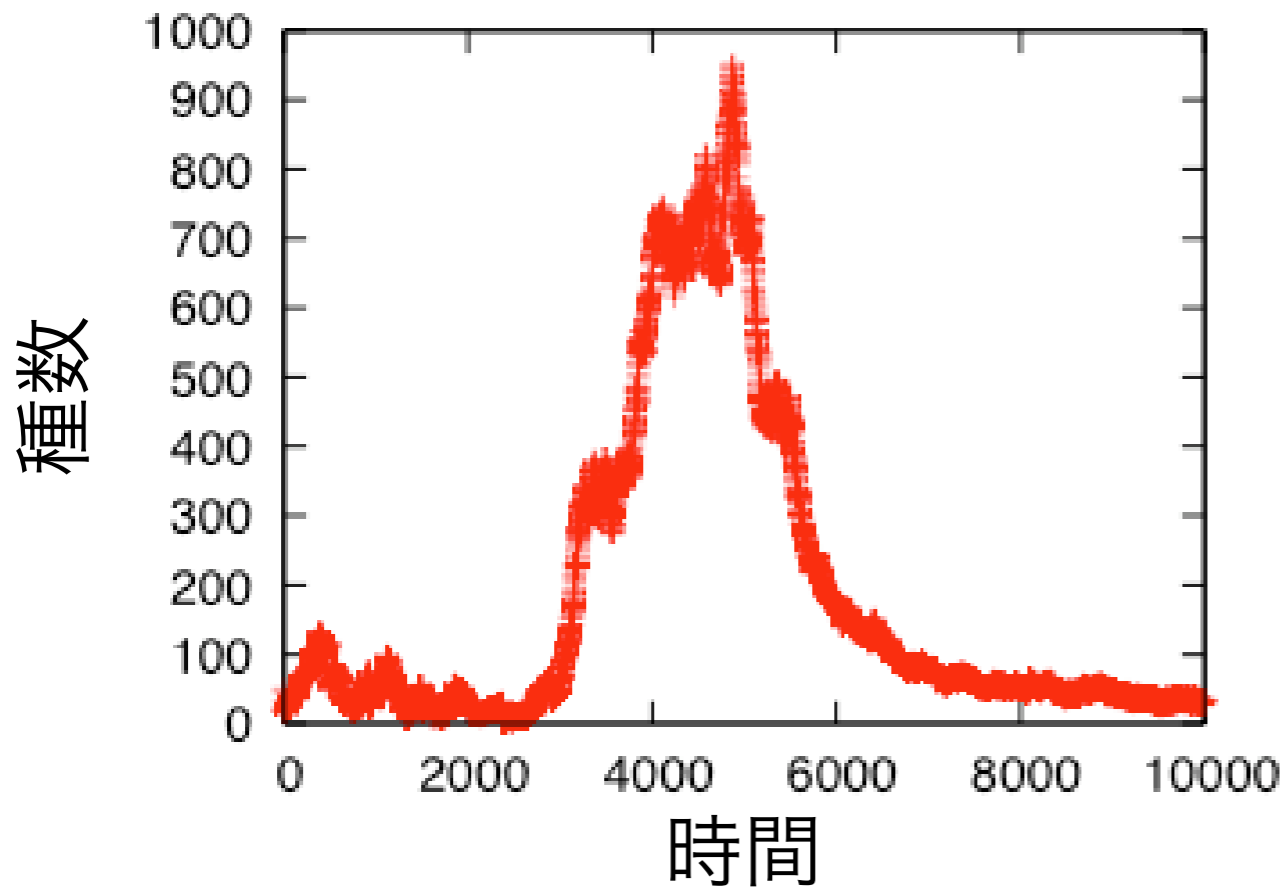


安定パターン



発散パターン

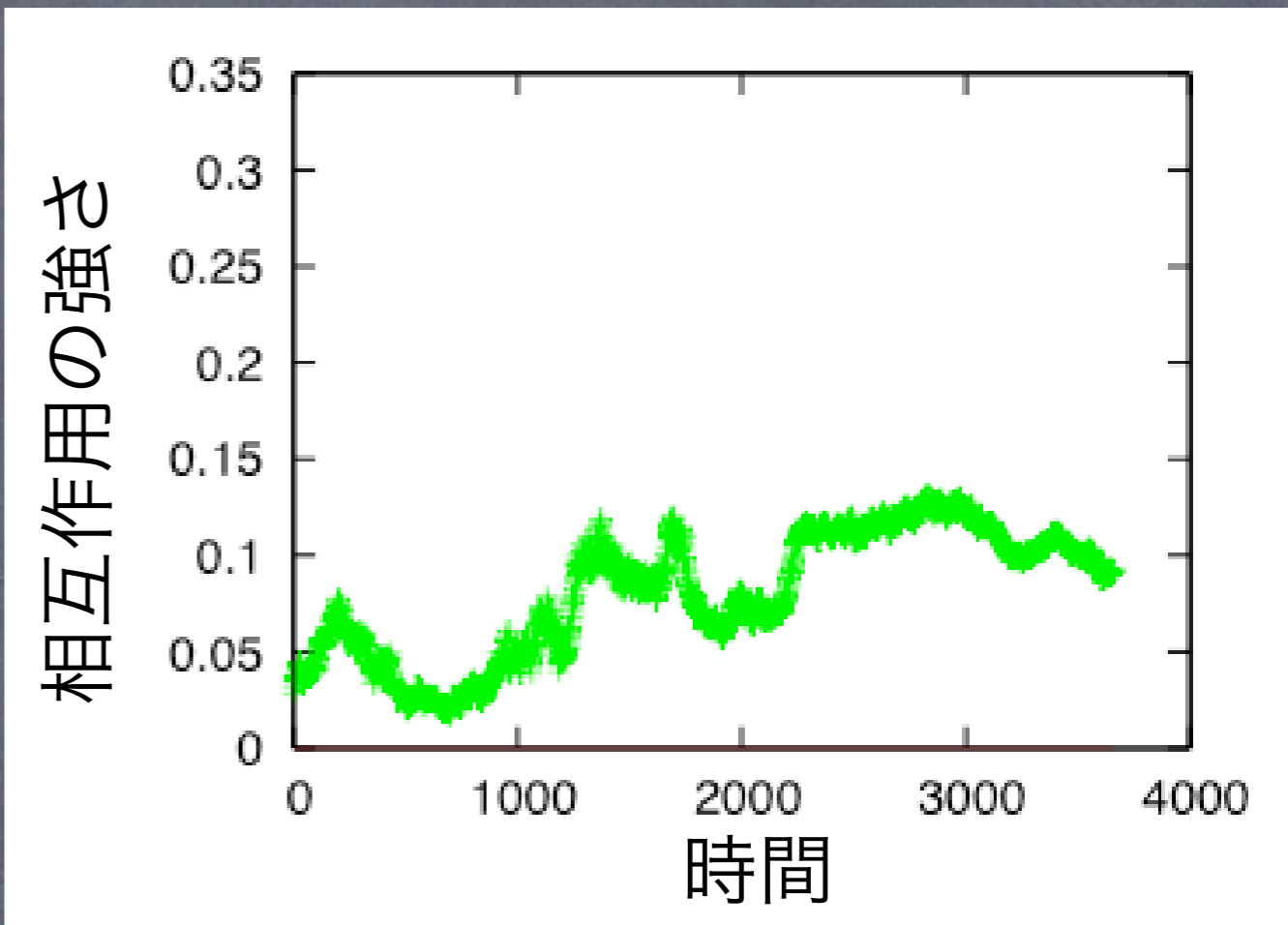
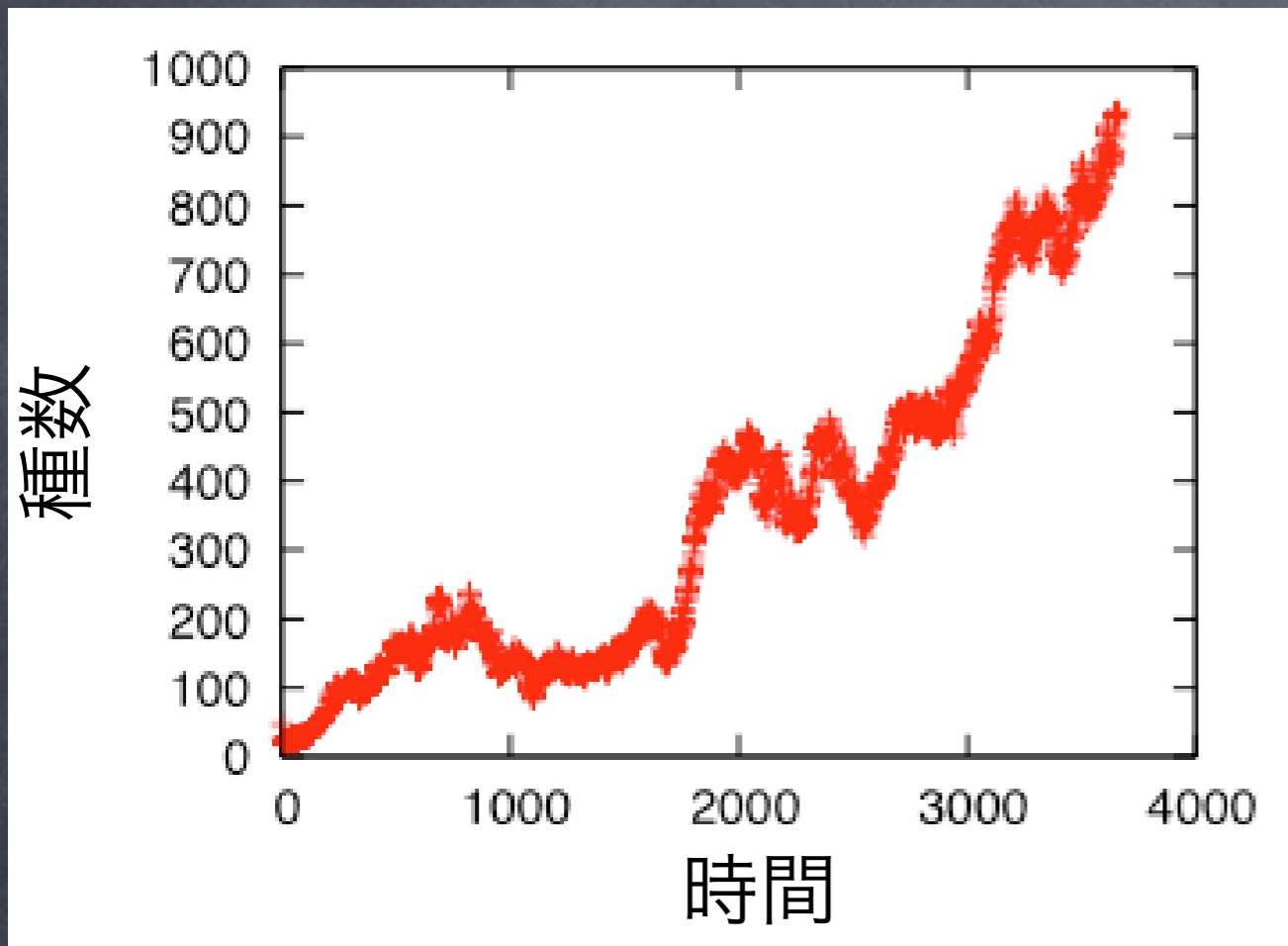
結果1：2つのパターン



安定パターン

種数の増加とともに種間の相互作用が強くなり
0.25を超える付近で種数が激減し安定する

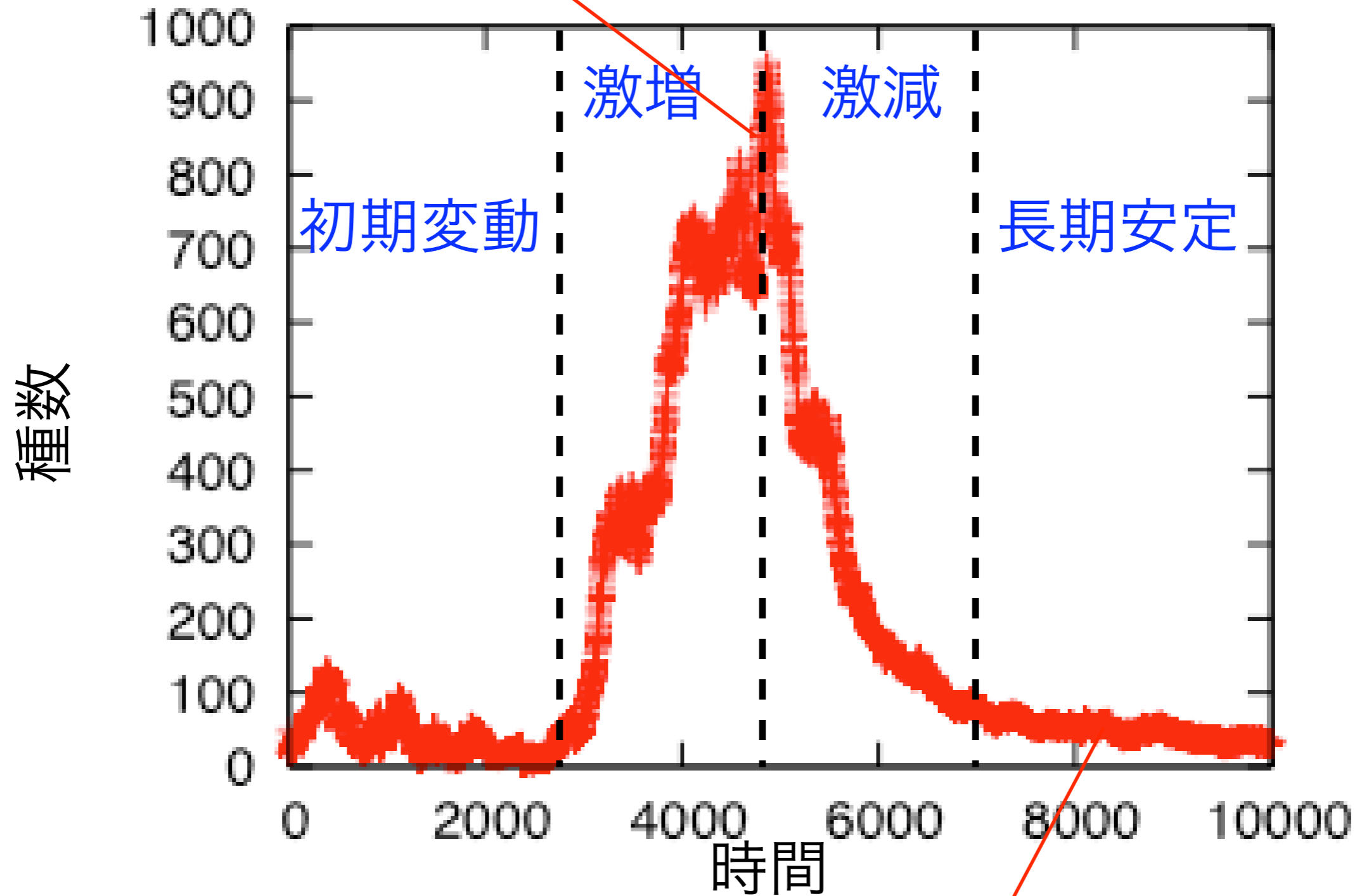
結果1：2つのパターン



発散パターン

種間の相互作用は弱く (0.1程度) 全体に特徴的な傾向は見られない

ここでの相互作用の強さを**臨界相互作用**とする



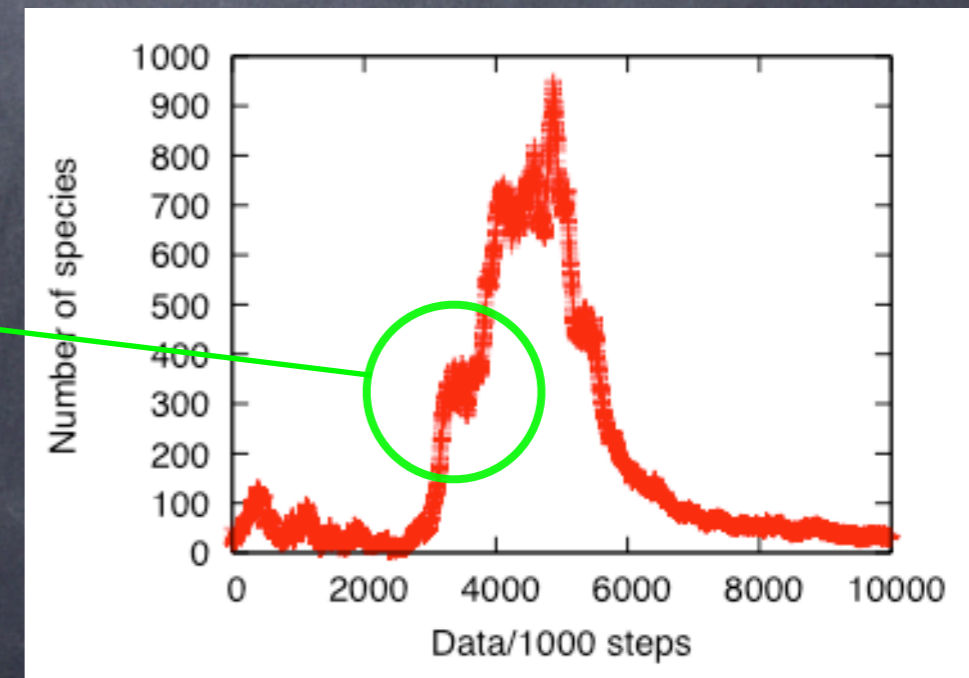
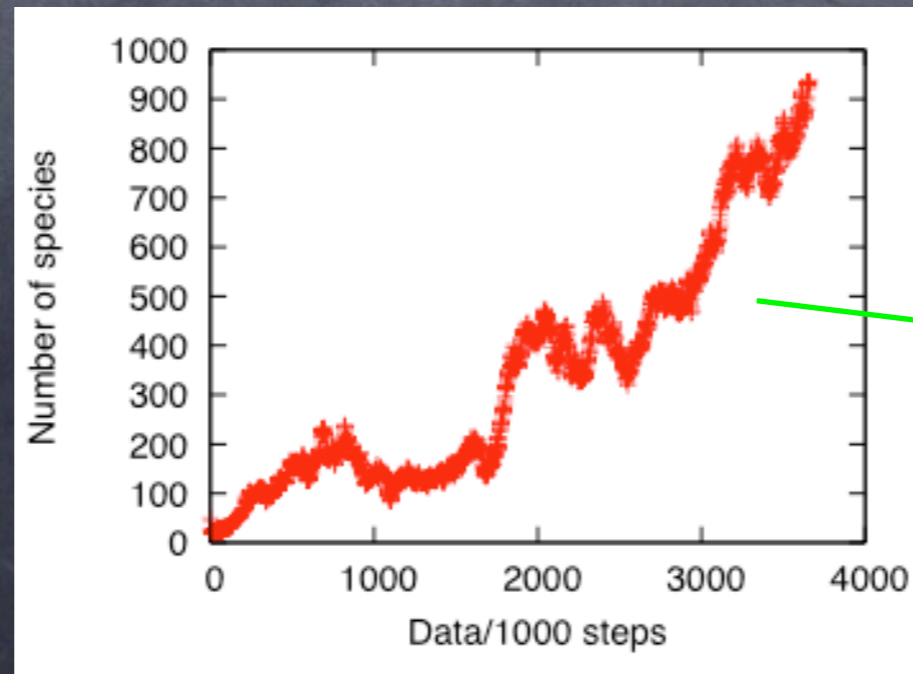
安定期の平均種数を**安定種数**とする

	安定パターンの数	安定種数	臨界相互作用
基準	6/10	53	0.31
進化速度 2 倍	1/10	25	0.19
進化速度半分	9/10	46	0.27

進化が遅い方が安定化パターンが現れやすい

← 自然淘汰のタイムスケールとの兼ね合い

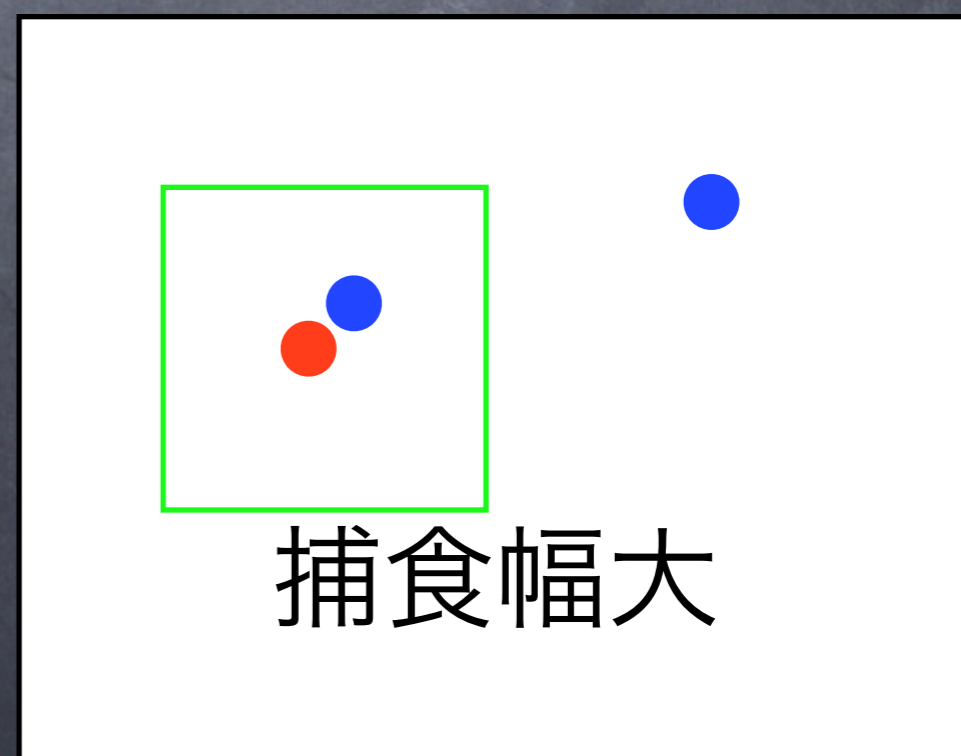
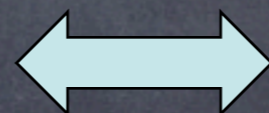
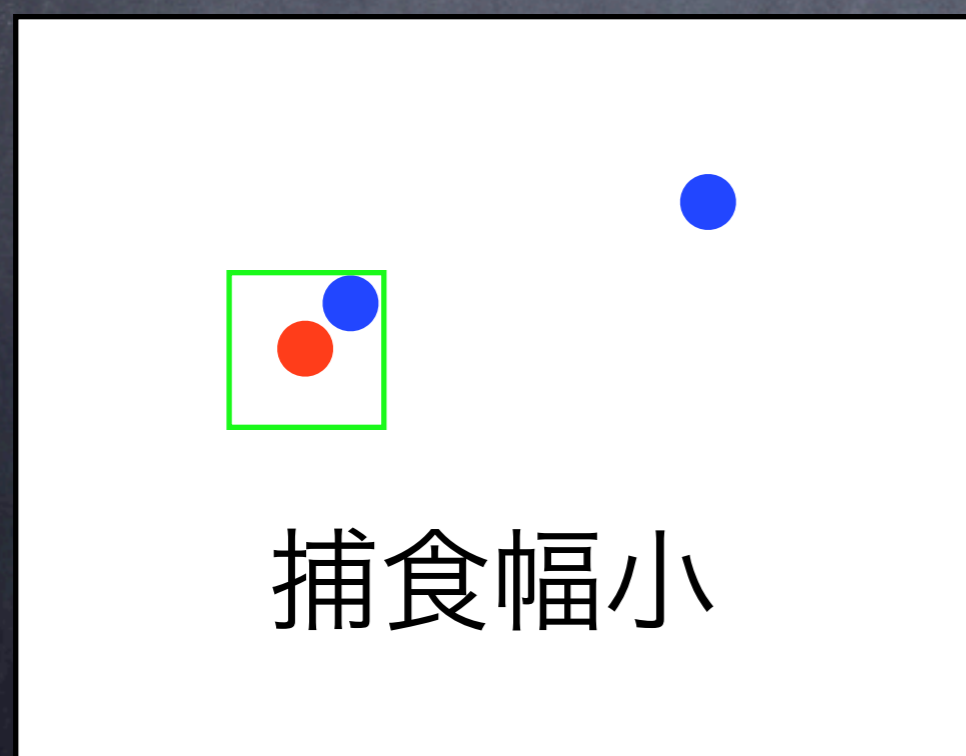
発散パターン
 ||
 激増ステージ



	安定パターンの数	安定種数	臨界相互作用
基準	6/10	53	0.31
捕食幅 P=2	3/10	73	0.23
捕食幅 P=8	4/10	183	0.45

捕食幅が広いほど系全体の安定種数は大きくなる

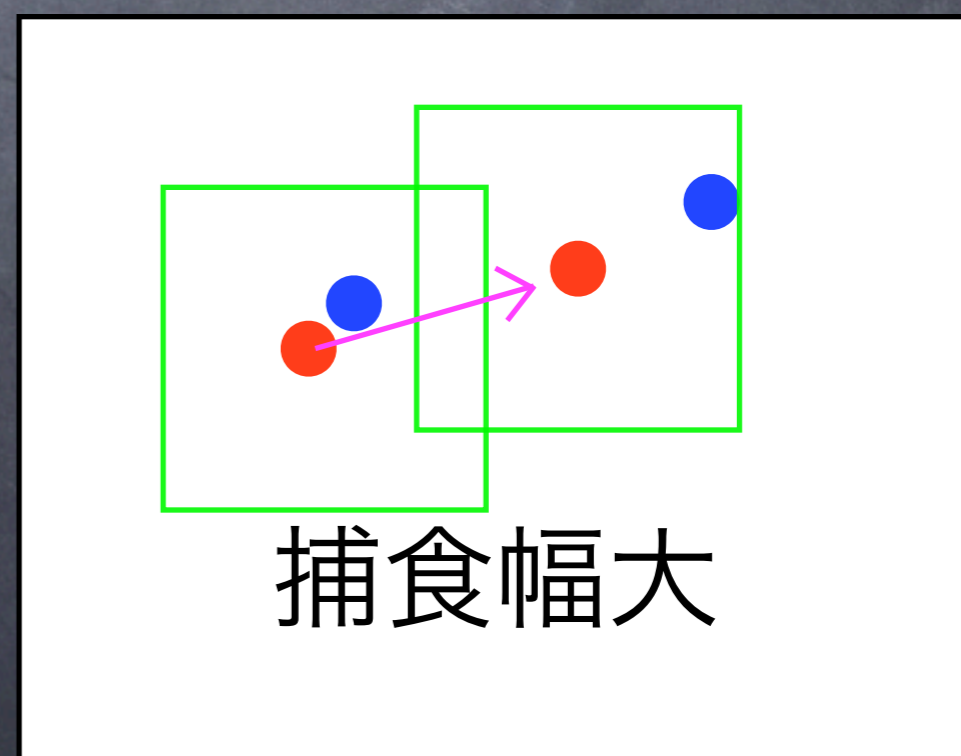
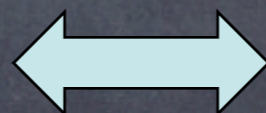
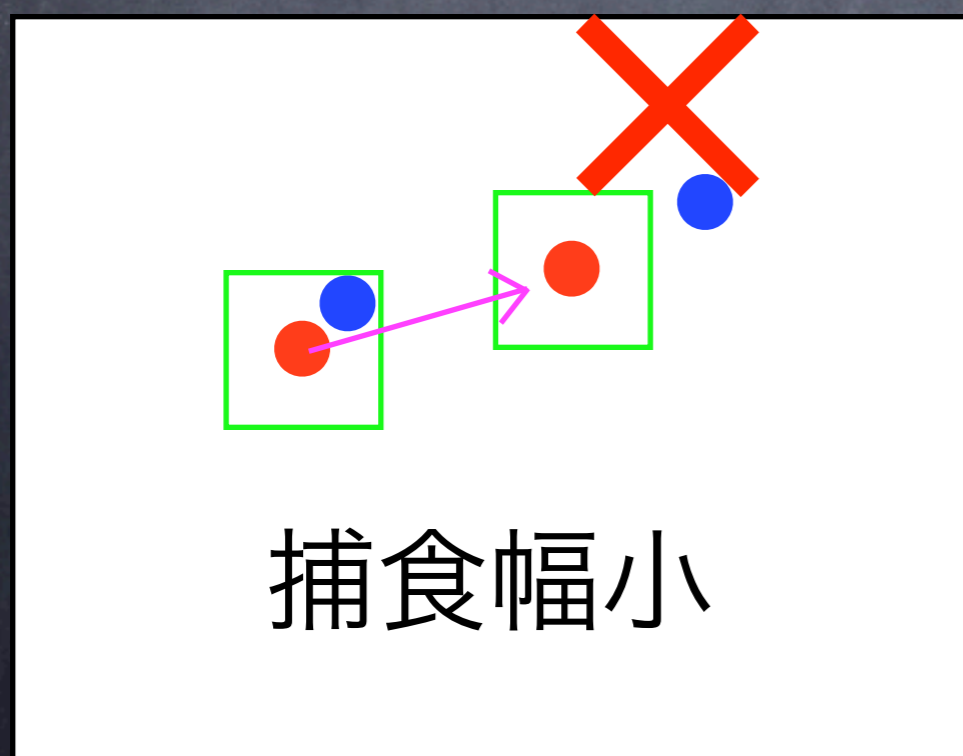
← 捕食幅が広い方が餌の乗り換えが容易



	安定パターンの数	安定種数	臨界相互作用
基準	6/10	53	0.31
捕食幅 P=2	3/10	73	0.23
	4/10	183	0.45

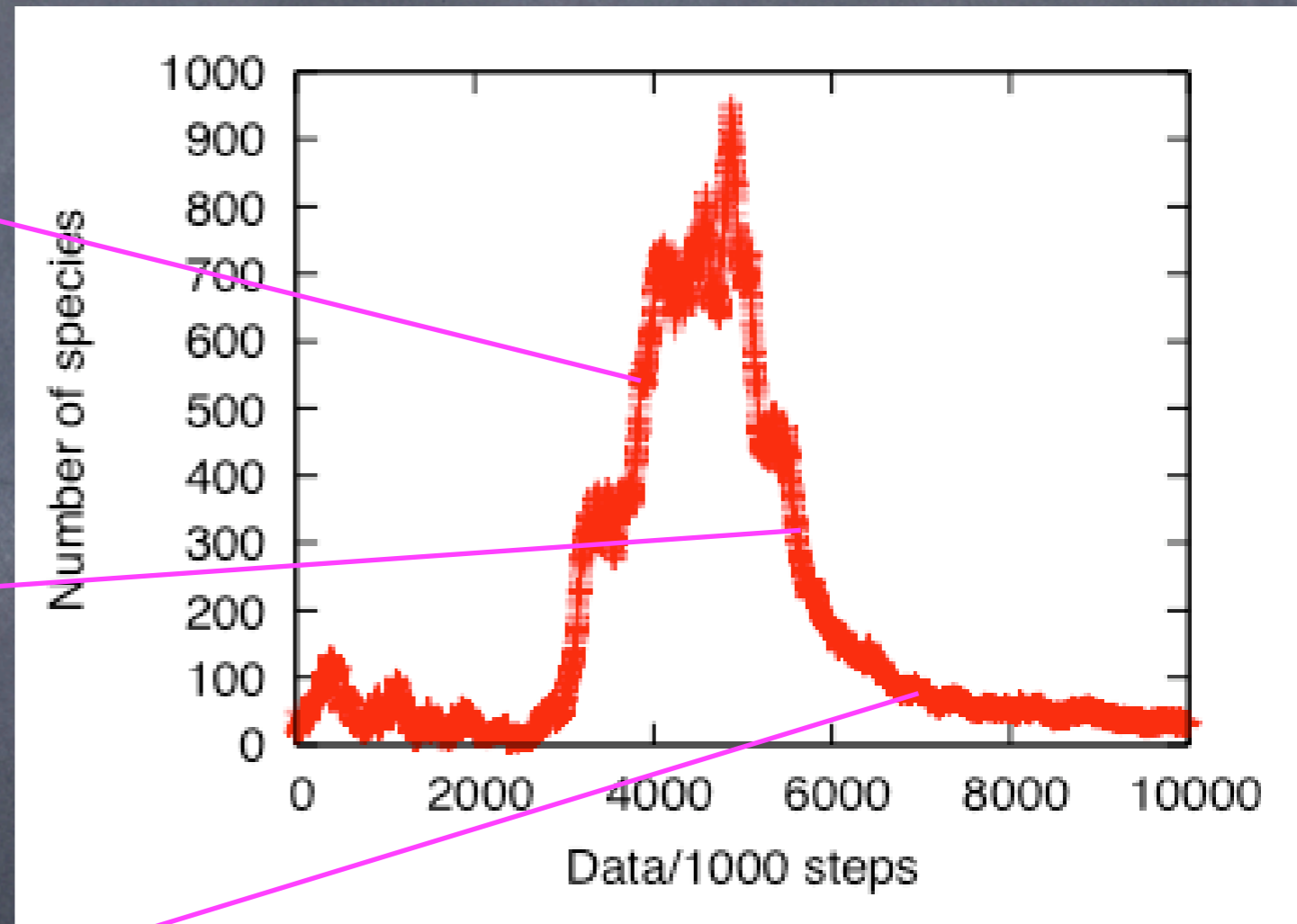
捕食幅が広いほど系全体の安定種数は大きくなる

← 捕食幅が広い方が餌の乗り換えが容易



～結果1のまとめ～

- ・生態系システム進化の固有パターンがみられた
- ・種数の増加と共に種間の相互作用が強くなる
- ・相互作用が大きくなりすぎると系が不安定化、種数が減少する
(時期は進化速度に依存)
- ・相互作用が小さい状態で系が安定化する
(種数は捕食幅に依存)



種の爆発的増加
断続平衡説

化石記録が示していること [Sepkoski, 1984]

種の爆発的增加

カンブリア爆発

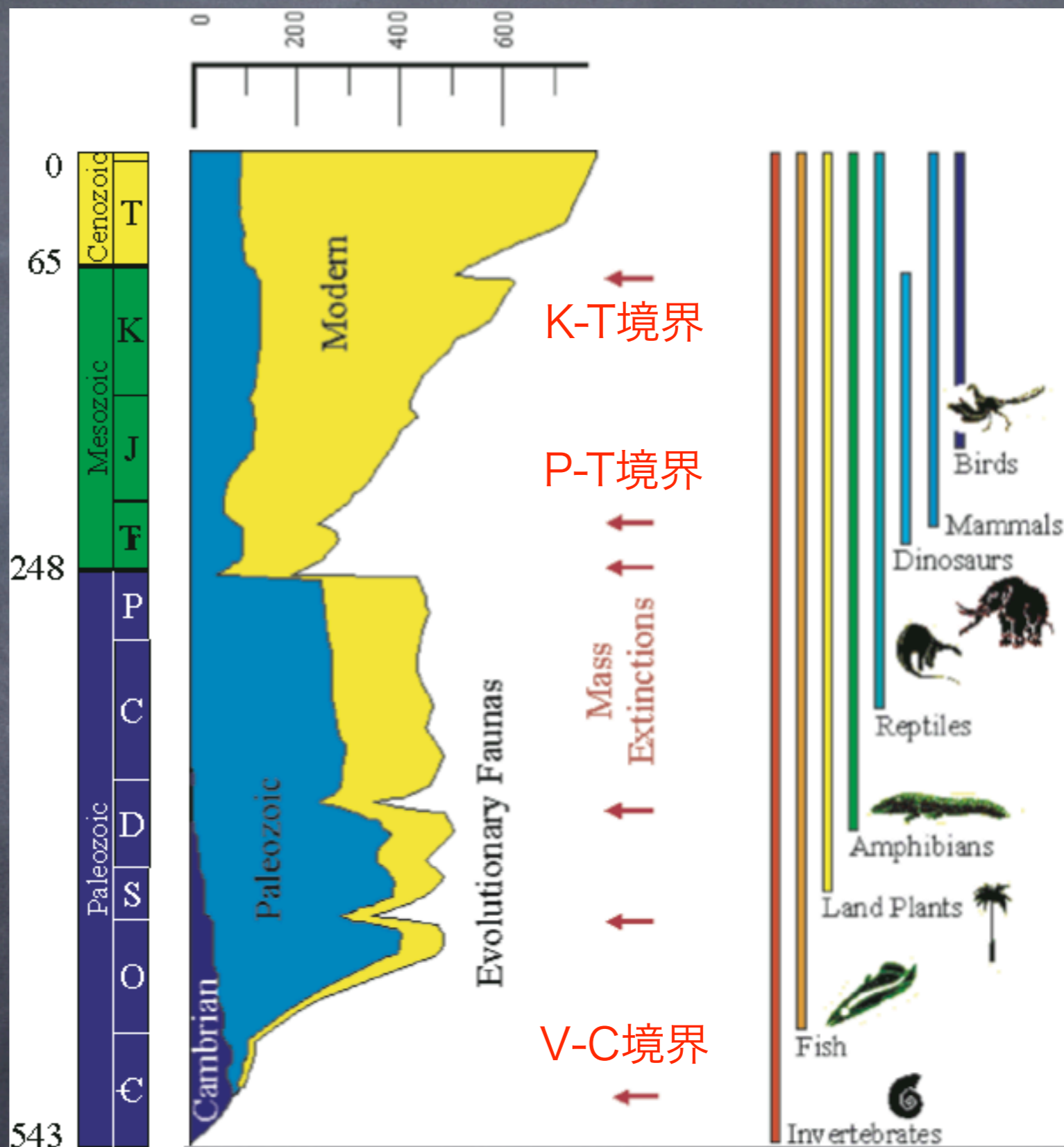
動物群の入れ替わり

カンブリア紀型

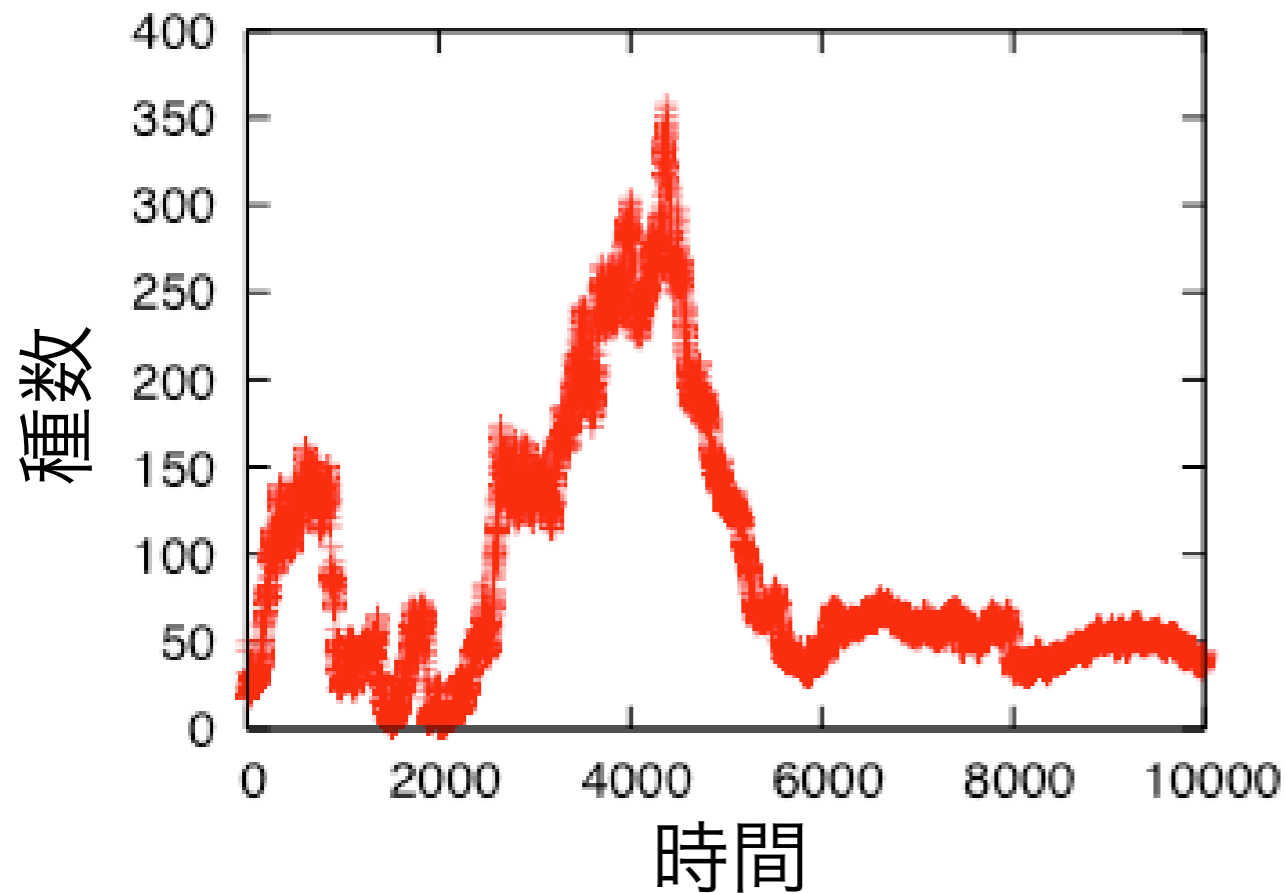
古生代型

現代型

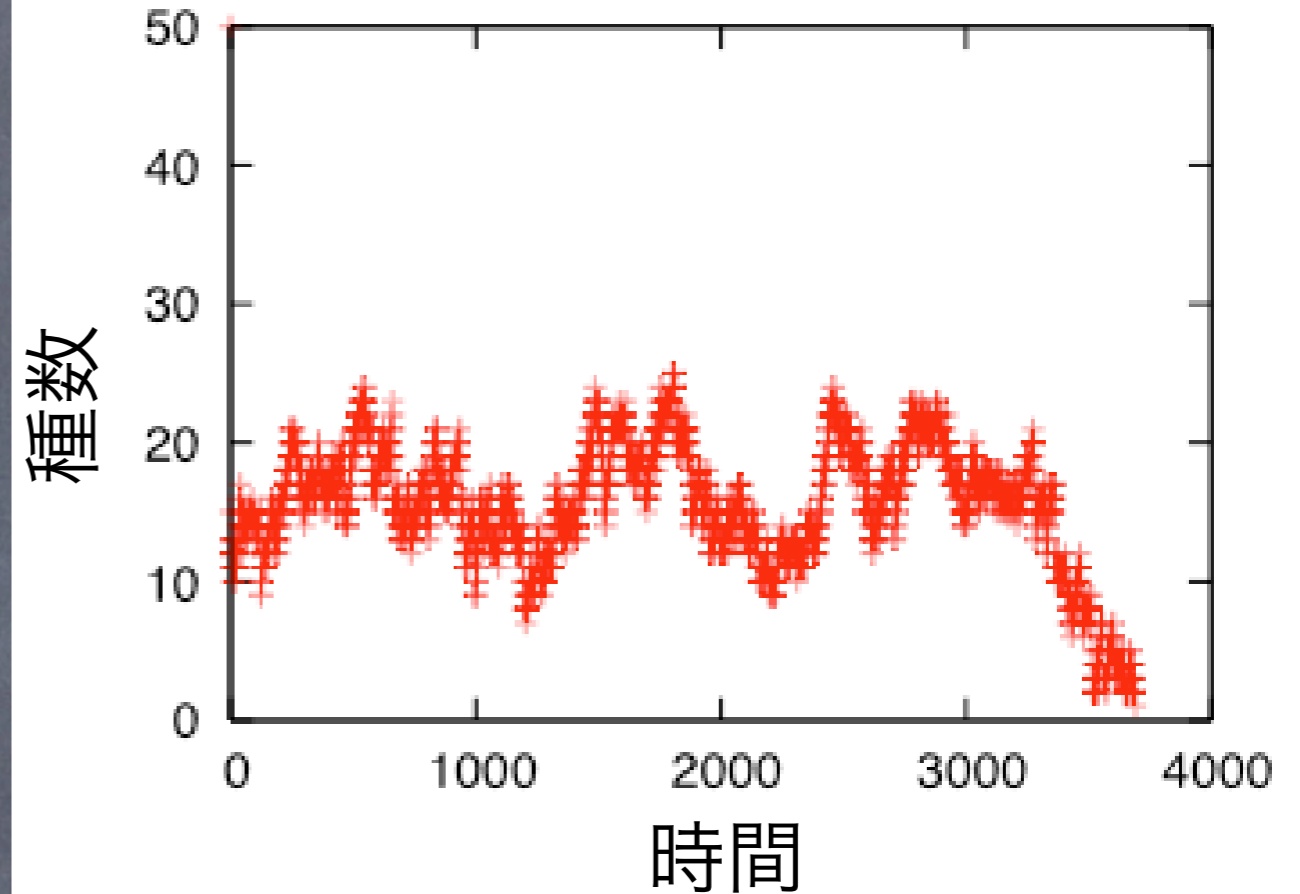
6度の大量絶滅



結果2：サイズ依存性の影響

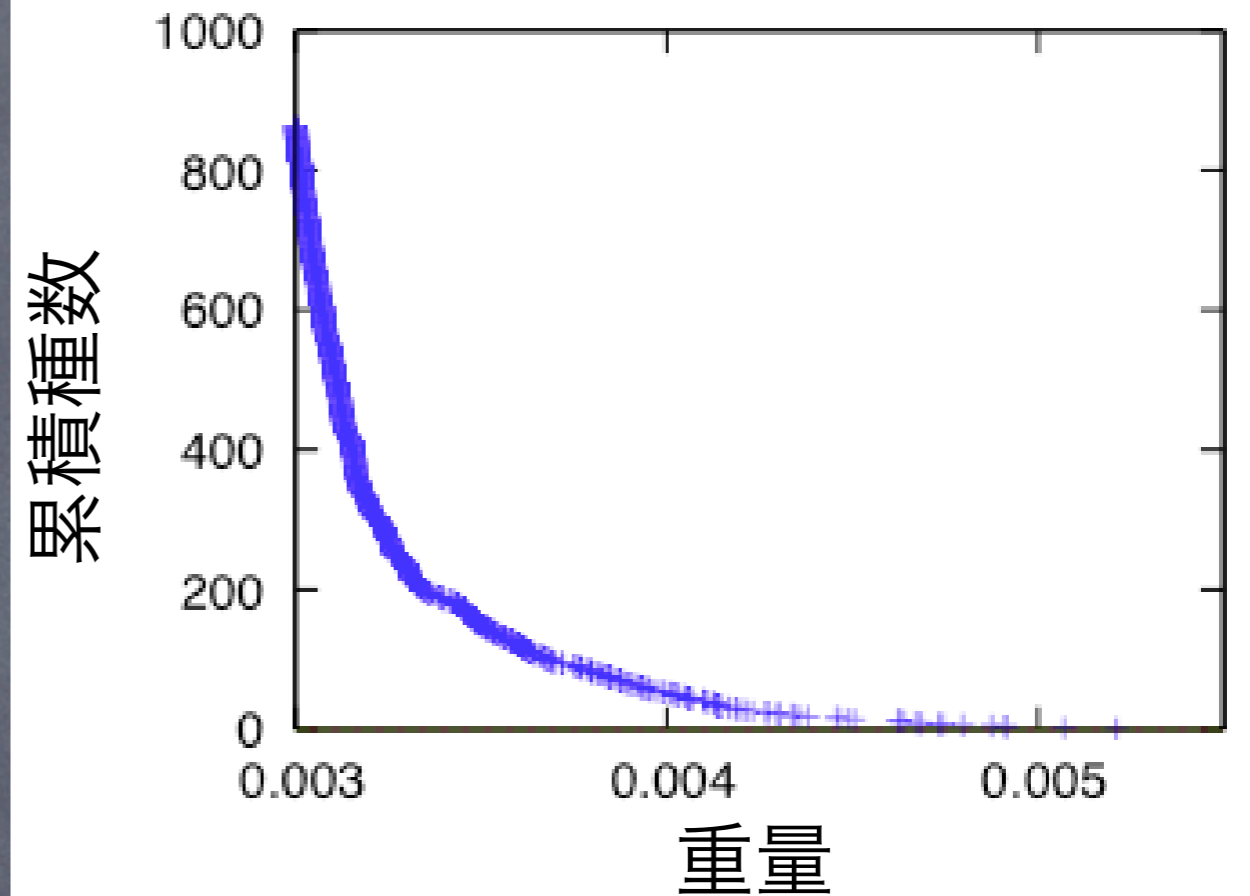
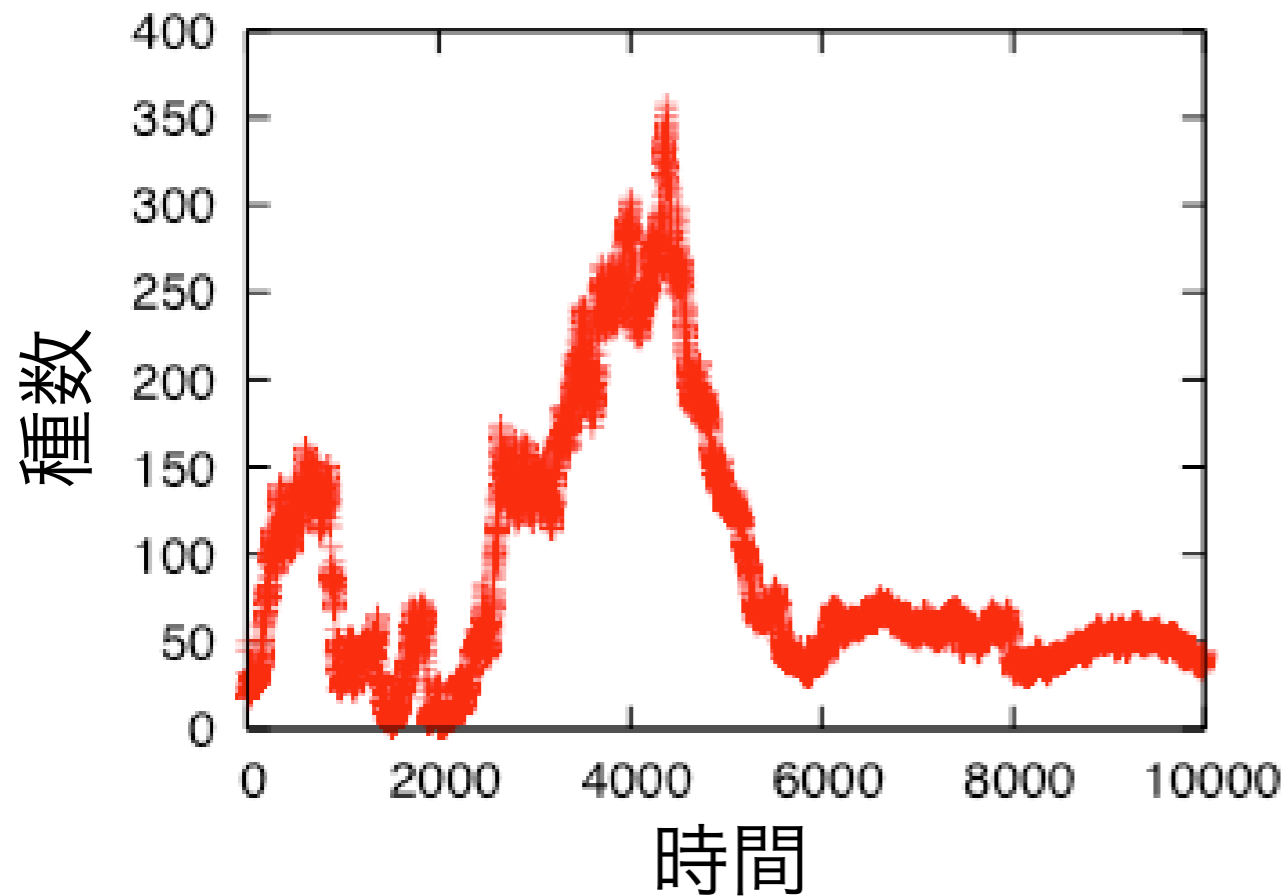


サイズ依存あり
(小さい種が速く進化)



サイズ依存なし
(ランダムな順で進化)

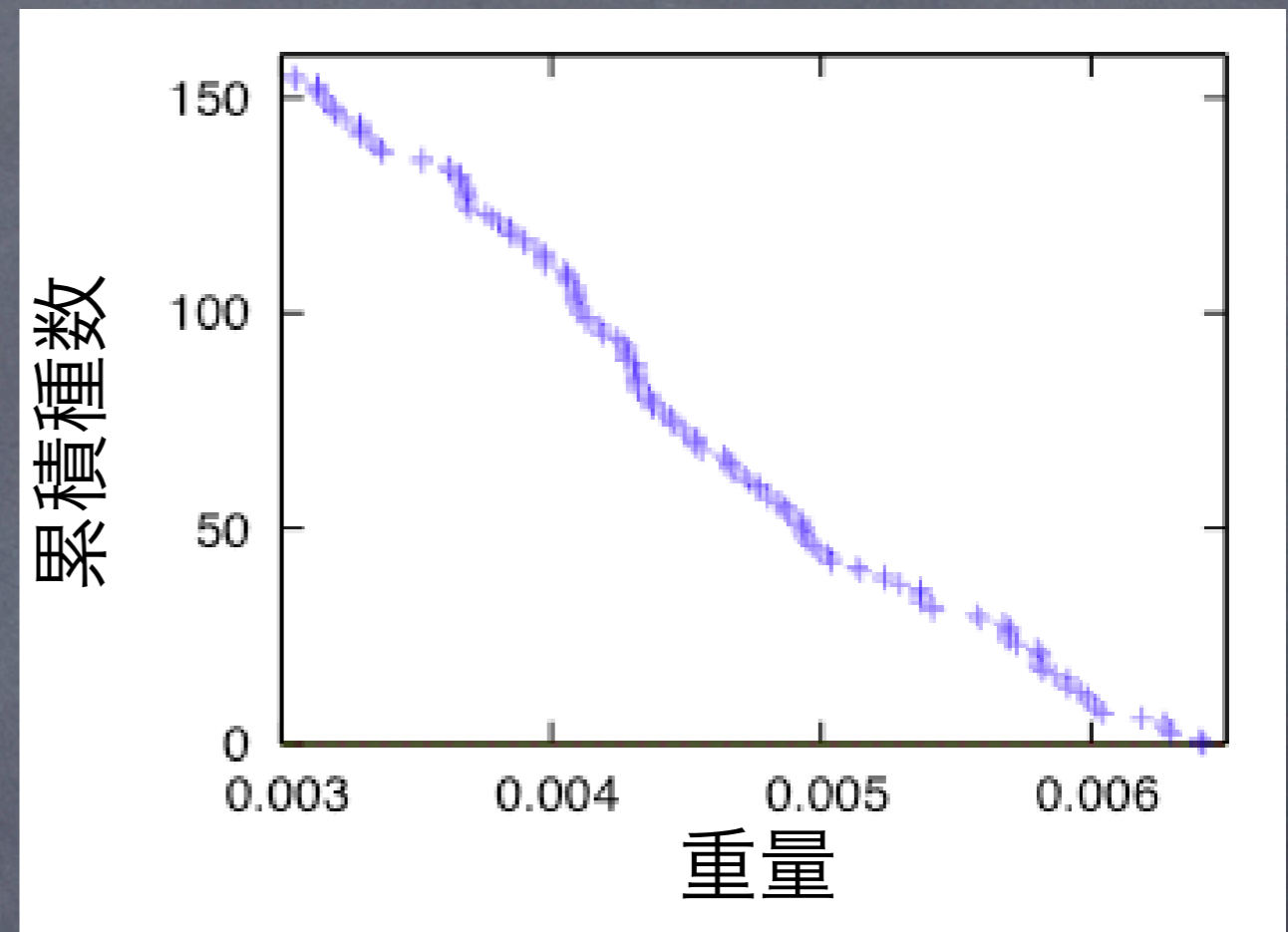
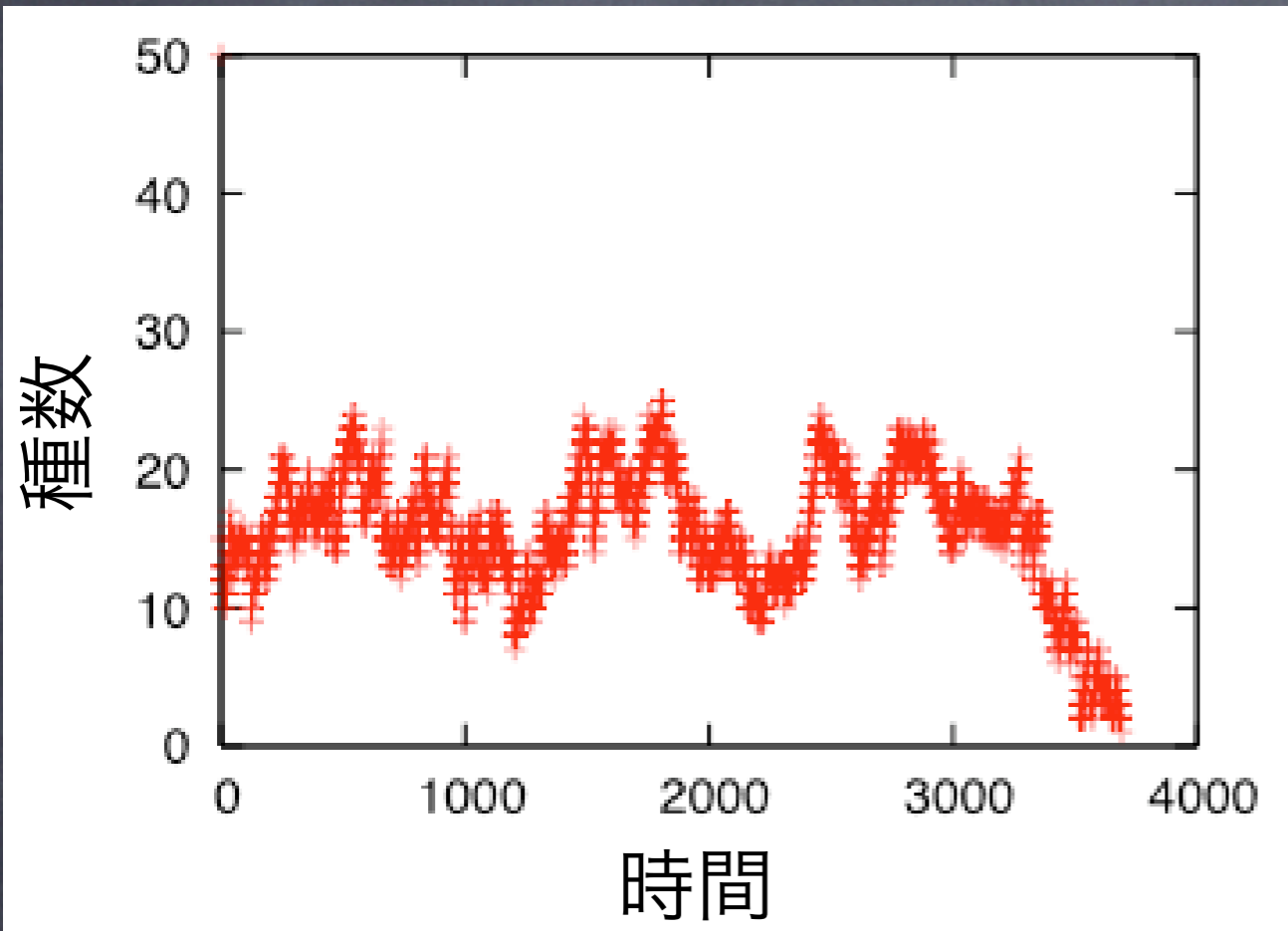
結果2：サイズ依存性の影響



サイズ依存あり
(小さい種が速く進化)

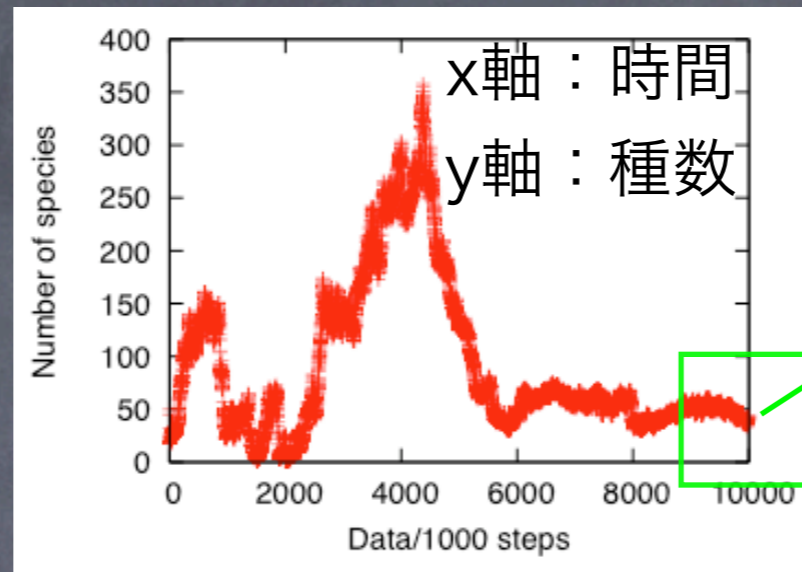
系全体がべき乗のサイズ分布を持つ

結果2：サイズ依存性の影響



サイズ依存なし
(ランダムな順で進化)

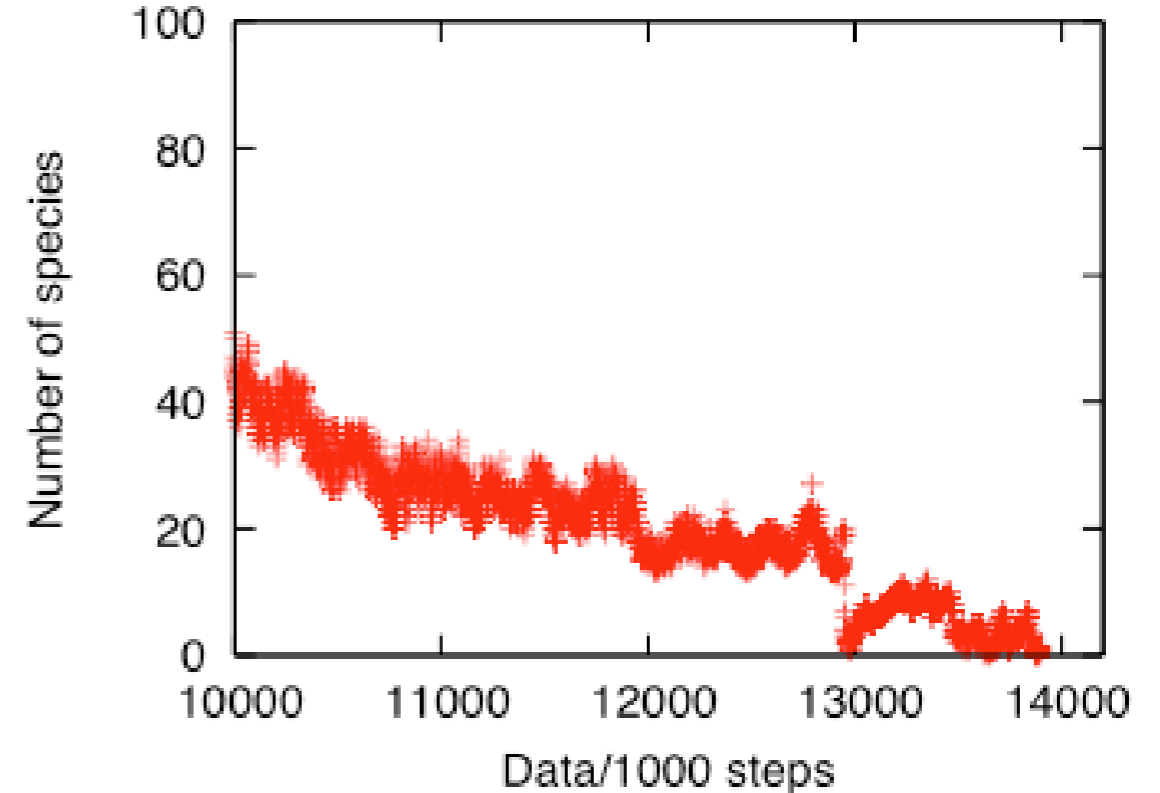
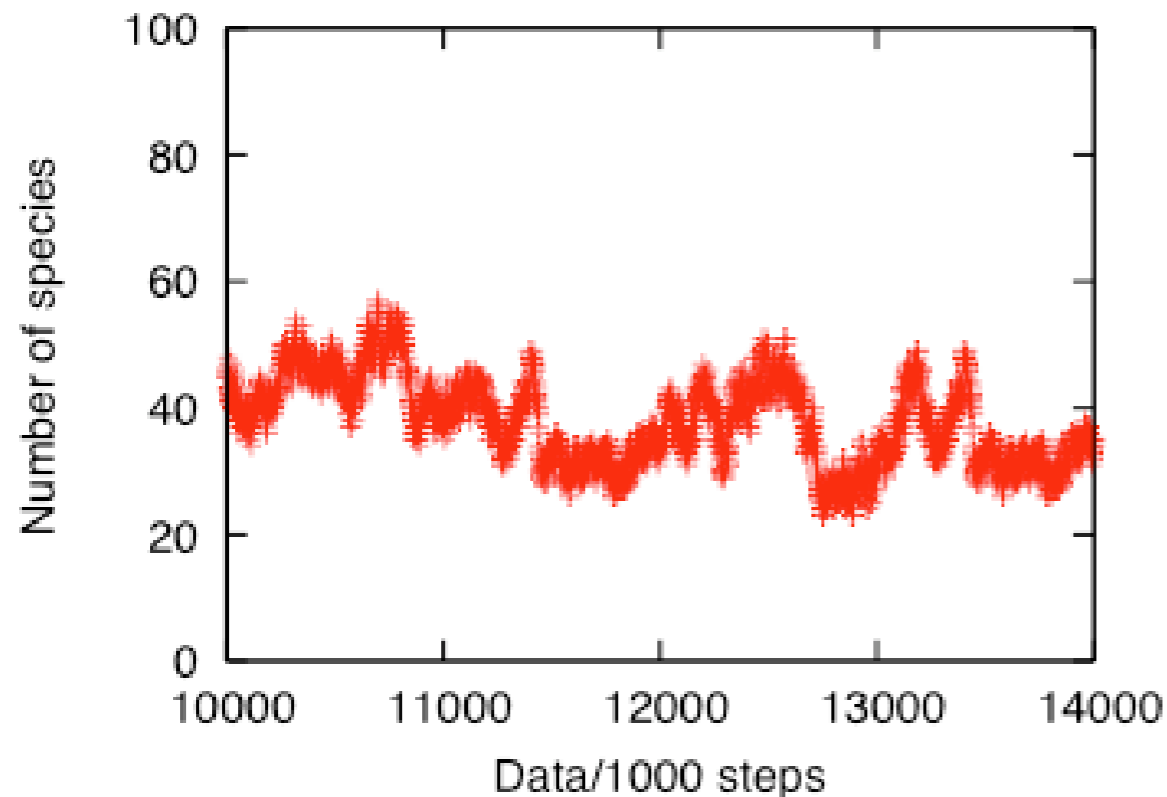
べき乗のサイズ分布を持たない (ほぼ線形)



x=10000 で
二手に分かれる

進化速度に
サイズ依存ありのまま

進化速度のサイズ依存
をなしにする



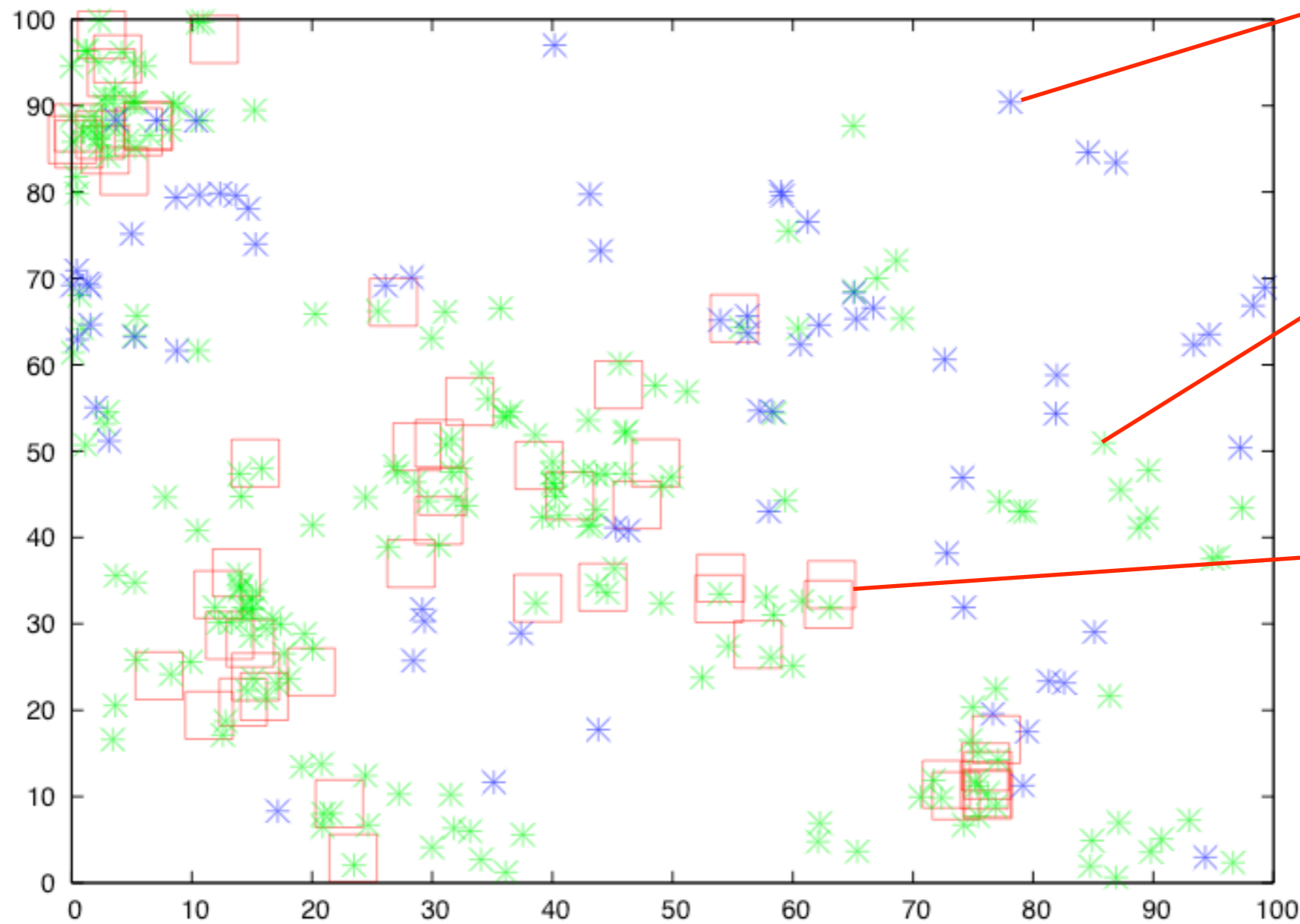
～結果2のまとめ～

- ・ サイズに依存した進化システム
→ 系全体がべき乗のサイズ分布で安定化
- ・ サイズに依存しないランダムな進化システム
→ べき乗のサイズ分布を持たず不安定化
- ・ 一度長期安定状態に入った後でも、進化システムをランダムなものに変えると不安定化

常にサイズの小さい種がサイズの大きい種よりも多く存在することが、安定状態を保つカギ

結果3：種間相互作用マップ

パラメータ空間



青星：動物

緑星：植物

赤四角：
各動物の
捕食範囲

草食動物 >> 肉食動物 の状態で安定化する

Conclusion

- 生物種の多様性変動に関する数値実験を行った
- 進化速度のサイズ依存性を導入した
- 固有の進化パターンが現れた
 - 初期変動 → 激増 → 激減 → 長期安定
 - 種の爆発的增加、断続平衡説と調和的
- 進化速度がサイズに依存せずランダムな場合、種数は安定しなかった（長期安定後でも同様）
 - べき乗のサイズ分布が多様化・安定化のカギ

Future Works

- 現実の生態系のサイズ分布は？
- 環境変動とそれに対する応答？
- 進化に本質的なパラメータは？



進化のサイズ依存性を含め、必要十分な
仮定とパラメータを用いたモデル作り

どのような惑星表層環境のもとで、
どのような進化を経れば、
惑星上に安定で多様な生態系が形成しうるのか？