



Responses to Environmental Change: Adaptation or Extinction

Richard Frankham and Joel King solver

5.1 Introduction

すべての個体群は、環境の変化に対し、適応や分布の変化で対応するか、絶滅に追いやられる。適応は以下の2つの型に大別される。

- 個体レベルの**表現型可塑性** [phenotypic plasticity] による生理的馴化
- **自然選択** [natural selection] による個体群の遺伝的組成の変化

可塑的な適応には環境への対応に限界があるのに対し、遺伝的適応では個体群がそれまでに持っていた耐性のレンジを越えることができる。⁽¹⁾

遺伝的適応の速さは、**個体群の遺伝的多様性**、**個体群サイズ**、**世代時間**、**繁殖余剰** (?) [reproductive excess]などに依存する。

5.2 Types of Abiotic Environmental Change

非生物的物理環境の変化は、主に3つの空間スケールの異なるクラスに区別できる。

- 殺生物薬や毒物：重金属・殺虫剤・環境汚染物質（局所～地域スケール）
- 大気汚染：酸性雨・窒素酸化物（NO_x）・オゾン（地域～大陸スケール）
- 気候的要因：CO₂濃度・気温・降水量・紫外線照射（地球スケール）

環境変化の時間スケールと個体群の**世代時間**の相対的な関係は、進化可能性 [evolutionary potential] と世代あたりの選択の強さに大きく影響する。(Box 5.1)

(Box 5.1) 他殖性個体群の環境変化に対する選択反応

R : 量的形質の1年あたりの変化

t : 選択を受ける世代数 T : 世代時間

S_i : 選択差 [selection differential] (選択された親集団の形質の平均 - 集団の形質の平均)

h^2 : 量的形質の初期遺伝率 $N_{e,i}$: 有効個体群サイズ

(a) 進化可能性は、遺伝的多様性 (遺伝率)、選択差、有効個体群サイズ、世代時間に依存。

(b) R の最大値 (選択の限界) (c) 突然変異を考慮

環境変化の空間スケールも進化可能性に影響する。小スケールでの環境変化は、絶滅を回避できる空間的レフュージをもたらし、迅速な進化の重要な要因なり得る。

5.3 Adaptive Responses to Climate Change

気候の変化は、ほぼすべての生理的生態的プロセスに影響し、個体数や分布を規定する大きな要因となっている。

気温の上昇は一樣ではなく、低緯度より高緯度、夏より冬、最高気温より最低気温の上昇をもたらすと予測される。

(1) 高木注：変異が供給されれば、ということ？ なお、可塑性も遺伝的なものなので適応進化しうる。



Physiological and phenological effects of climate change

◆ イチモンジチョウ *Ladoga camilla* ⁽²⁾

1920~40年の間に分布が北に拡大 (Fig. 5.1a)。1930~42年にかけての6月の気温の上昇との関連? (Fig. 5.1b)。

6月の気温の上昇は幼虫と蛹の生存率を高める。発育期間が短くなることで鳥の捕食軽減の可能性も。成虫の時期 (6~7月) の気温は野外♀の蔵卵数と正の相関が見られた (Fig. 5.1c)。

多くの生物において、気候の変化は**特定のステージ**に影響。そのため、生物の生活環のイベント (孵化、羽化、芽吹き、開花 etc...) の起こるタイミングが、資源や天敵のものとずれが生じる。→**phenological mismatch**

Rapid adaptations to local climate conditions

◆ *Drosophila subobscura*

ヨーロッパ原産で、体サイズに地理的クライン (北に行くほど体サイズ大)。

1970年代に北アメリカ西海岸に定着し、25年の間に California から British Columbia まで分布が拡大→原産地と同様の体サイズクラインを形成 (Fig. 5.2)

◆ コドリंगा *Cydia pomonella*

定着先の緯度に応じて、異なる臨界日長 (休眠に入る日長) のパターンが形成。

◆ ベニザケ *Oncorhynchus nerka*

導入後、9~14世代で生存率と孵化サイズが局所適応。

5.4 Adaptive Responses to Thermal Stress

◆ 大腸菌 *Escherichia coli*

20°C 2000世代→適応度は祖先集団に比べ若干増 (9%)、温度耐性は上下限とも 1~2°C 低下
42°C 2000世代→適応度は上昇したが、温度耐性幅は変化せず。(Fig. 5.3)

◆ キイロシヨウジョウバエ *Drosophila melanogaster*

25°C 4年系統→メスの生涯繁殖成功は温度に応じて変化せず

16.5°C 4年系統→繁殖成功が 16.5°C で高く、25°C で低くなる (Fig. 5.4)

◆ タバコスズメガ *Manduca sexta*

高温での成長：採餌効率が制限

低温での成長：採餌効率とアミノ酸吸収効率が制限 (Fig. 5.5)

低温と高温に対する進化的反応は異なる場合が多い。

環境変化に関係する形質の背景には、複雑な生理的メカニズムと遺伝的構造が存在。

5.5 Adaptive Responses to Pollution

(2) 高木注:本文中では *Ladoga* となっているが間違い。しかも挿絵はアメリカイチモンジ (別種・アメリカでの white admiral) に見える。

◆ 工業暗化 [industrial melanism]

200 種以上の蛾で観察されている。オオシモフリエダシヤクの例 (Fig. 5.6)

◆ 重金属耐性

銅、亜鉛、水銀、カドミウム耐性植物が鉱山周辺に見られる。Red maple の例 (Fig. 5.7)

◆ 殺虫剤耐性

200 種以上の害虫で迅速な進化が知られている。微生物の抗生物質耐性も同様。

5.6 Adaptive Responses in Endangered Species

環境変化に適応できない場合、個体群サイズは縮小。そうすると、より進化しにくい状況に

- 遺伝的変異の喪失の加速
- 近親交配の増加による適応度の減少。近交弱勢 [inbreeding depression]
- 有害突然変異の蓄積 ⇒ mutational meltdown

Box 5.2 遺伝的多様性の進化

H_t : 世代 t でのヘテロ接合度 (突然変異なし)

F_t : 世代 t での近交係数 [inbreeding coefficient]

u : 遺伝子座あたりの突然変異率

(a) ヘテロ接合度の減少率は小集団で大きい (b) ヘテロ接合度は小集団ほど小さくなる

Lynch et al. (1995b) は 50~世代の時間スケールでの保全を考える上で、有害突然変異の蓄積が問題となると主張。

ショウジョウバエによる実験 (45~50 世代) では、有害突然変異の蓄積は見られなかったが、小集団 ($N_e=25, 50$) では近交弱勢がみられた。

→他殖性の個体群では有害突然変異の蓄積より近交弱勢の方が、保全上緊急課題になる可能性。

◆ 個体群サイズと進化可能性

ボトルネックを経験させたショウジョウバエ個体群では進化ポテンシャルが低い (Fig 5.8)

絶滅危惧種では、以下の特徴から環境変化に対する、進化ポテンシャルが相対的に低い

- 有効個体群サイズが小さいため、進化速度が遅い
- 遺伝的多様性が低い場合も多く、遺伝率も低い可能性
- 世代時間が長いものが多い
- 繁殖率が低いものが多い
- 小集団では、近交弱勢により繁殖率がさらに低くなる可能性

5.7 Concluding Comments

絶滅の危険性を軽減するには、

- 人為的環境変化を最小限にとどめる



- 改変された環境の修復
- 生息地外での保全や再導入
- 近親交配を避け、遺伝的多様性を維持するような遺伝的管理

分断化された個体群間での個体の交換による遺伝的多様性の回復を行った例はほとんどない。⁽³⁾

→ほぼ唯一の事例：red-cockaded woodpecker

絶滅危惧種の保全において、適応進化はそれほど重要視されていない（せいぜい遺伝的多様性の低下を防ぐ程度）。しかし、数年から十数年のスケールで環境変化に対する進化的適応は起こりうる。

環境の変化に対して、適応進化が起こる可能性と、絶滅に追いやられる可能性のどちらが起こりやすいかの定量的情報は不足している。進化的、生態的要因の相互作用の中で、現在中程度の進化ポテンシャルを持っている種の長期的な生存において適応の潜在的役割を理解することが、これから進化保全生物学者が貢献できる重要な課題だろう。

(3 注：植物では結構あるのではないかという指摘あり