学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士（環境科学）　　　　氏　名　　　　　大泉　嶺

学 位 論 文 題 名

Age-size structured models with stochastic growth and optimal life history
（確率的成長下における齢—サイズ構造モデルと最適生活史）

地球規模の環境変動は現代の人類が直面する喫緊かつ未解決問題の一つである．それは我々人間社会の経済活動に大きな影響を及ぼすだけではなく，生態系や生物多様性などの維持にとっても深刻な問題をもたらすことが懸念されている．その一つに生活史の不確実性がある．生物の生活史は様々な不確実性に影響されている．例えば、気温、天候、採餌、遺伝的な個体差などがある．これら不確実性を構成する要素は二種類の不確実性に大別できる．気温、天候など生物集団全体に影響を及ぼす不確実性と遺伝的形質の差異や生活史における採餌成功率の差異など個体差が持つ不確実性である．前者を外的不確実性、後者を内的不確実性とよぶ．これまで、多くの生態学者は外的不確実性の生物集団への影響に目を向けてきた．なぜなら、外的不確実性が個体群の内的自然増加率を減少させる事が一般に示されており、その影響は種の保全に負に働くからである．しかし、内的不確実性の集団への影響は外的不確実性の持つそれと比べて体系的に研究されていない．また、野外における研究ではこれら二つの不確実性の効果を区別する事は難しい．つまり、自然界での生活史を取り巻く不確実性の個体群への影響を解析するには外的不確実性だけでなく、内的不確実性の影響をも考慮しなければならない．

そこで本研究では、内的不確実性の影響を受ける個体群を仮定し、その個体群動態と生活史進化について理論的な研究を行った．本研究ではサイズ（X_a）成長に内的不確実性を持つ線形人口モデル（齢 - サイズ構造モデル）を用い、内的不確実性影響下での個体群動態と生活史進化を解析する一般理論を構築した．この理論では新しい線形人口モデルとして以下の経路積分モデルを導入する．

$$\underbrace{P_t(a,y)}_{\text{人口ベクトル}} = \underbrace{n_{t-a}(x)}_{\text{初期個体数}} \times \underbrace{K_a(x \to y)}_{\text{projection function}}$$

$$K_a(x \to y) = \underbrace{\int_{x_0=x}^{x_a=y} D(x) \exp\left\{\int_0^a d\tau L\left(\dot{X}_\tau, X_\tau\right)\right\}}_{\text{Lagrangian表示}} \qquad (1)$$

この経路積分モデルは生活史におけるサイズ成長率と死亡率を作用積分の量として表現する事が特徴である．この表現を用いると、内的不確実性の存在下では一般にサイズ成長曲線は死亡率の影響を受ける事を示す事が出来る．また、このモデル

により、具体的にEuler-Lotka方程式

$$\begin{gathered}\underbrace{1=\psi_{\lambda^*}(x)}_{\text{Euler-Lotka方程式}}\\ \underbrace{\psi_\lambda(x)}_{\text{目的関数}}:=\int_0^\infty da\exp\{-\lambda a\}\mathbf{E}_x\left[\underbrace{F(X_a)}_{\text{繁殖率}}\underbrace{S(a)}_{\text{生残率}}\right]\end{gathered} \tag{2}$$

を導くことによってその生活史が個体群動態に与える影響の解析を可能にした．そのEuler-Lotka方程式を構成する関数（目的関数）はその種の繁殖齢のcumulant母関数、繁殖齢分布、基本再生産数などの統計量を与える事ができる．

一方、決定論的モデルでは目的関数を最大化する繁殖スケジュールや成長戦略が存在するとき、それは内的自然増加率をも最大化するという定理がある．内的自然増加率を最大化するためには、一個体あたりの基本再生産数を大きさだけでなく世代交代の速度も重要な要素である事が知られている．目的関数を最大化する戦略の生物学的意味はこれら二つの要素を同時に最適化する事である．本研究ではこの定理を用いて内的不確実性の下での最適繁殖スケジュールの解析手法、および確率制御理論を用いる事で最適生活史進化を解析するための基本となる以下の方程式を導く．

$$\begin{cases}-\inf_v\left\{\overline{H}_x^v+\lambda\right\}\tilde{\psi}_\lambda(x)+\underbrace{F(x)}_{\text{繁殖率}}=0\\ \overline{H}_x^v:=\underbrace{-g(x,v)\dfrac{d}{dx}-\dfrac{1}{2}\sigma(x,v)^2\dfrac{d^2}{dx^2}+\mu(x,v)}_{\text{生活史を決める要素}}\end{cases} \tag{3}$$

この方程式はHamilton-Jacobi-Bellman 方程式(HJB方程式)とよばれる確率制御理論における基本方程式の一つであり、最適制御によって最大化された目的関数（値関数）がこれに従う．値関数が導かれることは同時に内的自然増加率を最大化する最適制御が存在する事を意味する．　さらに、生活史における制御の対象として死亡率が含まれない場合、最適制御は基本再生産数を最大化する戦略と等しくなる事を示す．言い換えると、死亡率が制御されないのであればそれは世代交代の速さは内的自然増加率の変化に関係ない事を意味する．

最後に応用例として、最適スケジュール問題と最適資源利用モデルを解析する．本研究では一回繁殖型生物の最適繁殖スケジュールを考える．この理論では一回繁殖型生物はある成熟サイズに達した時に繁殖を行う．このとき目的関数が最大となるような成熟サイズを解析する．結果、最適成熟サイズは繁殖率と初期体サイズのみで決まる事、また内的不確実性は外的不確実性とは異なり内的自然増加率に対して正に働く場合があることを示せる．また、最適資源利用モデルでは高成長率・高分散と低成長率・低分散の二つの餌資源から、一回・多回繁殖型生物それぞれの最適な資源利用頻度を解析する．その結果、内的不確実性の存在下では、餌資源の多様性が種の存続に重要な役割を果たす場合があることが分かる．この研究における理論はより一般的な生命現象に応用可能であるので、今後より複雑な生命現象に対し応用、発展が期待できる．