

|                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title            | 不確実性下の外来種管理                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Sub Title        | Invasive species management under uncertainty                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Author           | 小谷, 浩示(Kotani, Koji)<br>柿中, 真(Kakinaka, Makoto)<br>松田, 裕之(Matsuda, Hiroyuki)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Publisher        | 慶應義塾経済学会                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Publication year | 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Jtitle           | 三田学会雑誌 (Keio journal of economics). Vol.100, No.3 (2007. 10) ,p.747(165)- 771(189)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| JaLC DOI         | 10.14991/001.20071001-0165                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Abstract         | <p>外来種管理問題は世界中で認知され、生態系・農業被害軽減にかかる最重要課題である。他の資源管理と同様に、外来種管理でも不確実性が存在し、それらを事前に考慮した管理戦略が求められている。本稿は、外来種が翌期にどの程度増殖するか分からないとする「過程誤差」と政策決定者が現状の外来種個体数について不正確にしか把握できないとする「測定誤差」という二つの不確実性に着目し、外来種の最適管理戦略について分析する。</p> <p>As the invasive species management problem is recognized all over the world, this issue has indeed become important for the mitigation of ecosystem and agricultural damage.</p> <p>As with management of other resources, uncertainty exists regarding invasive species management, requiring careful consideration in advance of management strategies.</p> <p>This study analyzes an optimal management strategy on invasive species, focusing on two uncertainties: "process error," where it is not known to what degree invasive species will proliferate in the next period; and "measurement error," where policy decision makers can only inaccurately grasp the present population of invasive species.</p> |
| Notes            | 小特集：環境経済学の新展開(上)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Genre            | Journal Article                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| URL              | <a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20071001-0165">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN00234610-20071001-0165</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

不確実性下の外来種管理

## Invasive Species Management under Uncertainty

小谷 浩示(Koji Kotani)

柿中 真(Makoto Kakinaka)

松田 裕之(Hiroyuki Matsuda)

外来種管理問題は世界中で認知され、生態系・農業被害軽減にかかる最重要課題である。他の資源管理と同様に、外来種管理でも不確実性が存在し、それらを事前に考慮した管理戦略が求められている。本稿は、外来種が翌期にどの程度増殖するか分からないとする「過程誤差」と政策決定者が現状の外来種個体数について不正確にしか把握できないとする「測定誤差」という二つの不確実性に着目し、外来種の最適管理戦略について分析する。

### Abstract

As the invasive species management problem is recognized all over the world, this issue has indeed become important for the mitigation of ecosystem and agricultural damage. As with management of other resources, uncertainty exists regarding invasive species management, requiring careful consideration in advance of management strategies. This study analyzes an optimal management strategy on invasive species, focusing on two uncertainties: "process error," where it is not known to what degree invasive species will proliferate in the next period; and "measurement error," where policy decision makers can only inaccurately grasp the present population of invasive species.

## 不確実性下の外来種管理

小 谷 浩 示<sup>\*</sup>  
柿 中 真<sup>†</sup>  
松 田 裕 之<sup>‡</sup>

### 要 旨

外来種管理問題は世界中で認知され、生態系・農業被害軽減にかかる最重要課題である。他の資源管理と同様に、外来種管理でも不確実性が存在し、それらを事前に考慮した管理戦略が求められている。本稿は、外来種が翌期にどの程度増殖するか分からないとする「過程誤差」と政策決定者が現状の外来種個体数について不正確にしか把握できないとする「測定誤差」という二つの不確実性に着目し、外来種の最適管理戦略について分析する。

### キーワード

生物経済モデル、外来種管理問題、過程誤差、測定誤差、動的計画法・最適制御

### JEL Classification

Q57, Q58

## 1 緒 言

外来種問題は今や世界中で認知され、生態系保護や農業被害軽減を目的として様々な対策が講じられるようになっている [(14); (15)]。一般的に実行されている対策は、大きく二つに分類される。一つは、外来種が海外から持ち込まれることを未然に防ぐ事前的管理、もう一つはすでに定着してしまった外来種を捕獲するなどして個体数管理をする事後的管理である。本稿では、経済分析の対象として、後者の事後的管理に着目する。

外来種管理が厄介な問題である理由の一つとして、古典的な再生可能資源管理問題とは異なり、「根絶」という社会一般には聞こえの良い選択肢の存在があげられる。外来種の個体数が増加する

---

\* E-mail address: kkotani@iuj.ac.jp

† E-mail address: kakinaka@iuj.ac.jp

‡ E-mail address: matsuda@ynu.ac.jp

につれて、農業被害や生態系破壊といった社会的損失が増大する。捕獲管理費用を考慮しないならば「根絶」が最も合理的な施策であることは自明である。しかし、残念ながら現実はその単純ではない。現存の外来種個体数が捕獲によって減少するにつれて、一頭捕獲するのに要する捕獲努力量は指数関数的に増大し、捕獲費用が一気に上昇することが一般的に散見される [(11); (1); (19)]。既存の実証研究は、根絶の難しさを示す一つの逸話を残している。

外来種個体数の最初の 90~99%を捕獲する費用より、  
最後の 10~1%を捕獲する費用の方が高くなり得る。

こうした状況は、言い換えれば、現存個体数の減少に伴う捕獲効率の悪化に起因する。我々は、これを「捕獲効率の罨」と呼ぶこととし、外来種管理を困難にする大きな要因だと考えている。この捕獲効率の罨に着目して、経済分析を行ったのが我々の以前の研究 [Kotani et. al.(7)] である。

しかし、捕獲効率の罨だけが外来種管理を困難にする要因ではない。一般的な再生可能資源管理と同様に様々な不確実性が存在し、それらも外来種管理の成否を分ける大きな要因となる。不確実性を考慮した再生可能資源管理を論じた既存の研究は多数存在するが、それらの殆どは、現存の個体数を正確に把握できるという仮定の下に、過程誤差による最適管理戦略への影響を分析している。その代表的な研究である Reed (16) は、過程誤差が定性的な結果には影響を与えず、過程誤差がない場合と同様に取り残し一定戦略が最適であることを示した。更に、過程誤差の度合いが増すにつれ、取り残し一定のレベルを上昇させることが最適であることを導いた。

残念ながら、現実の資源管理問題では、現存の個体数を正確に把握できる場合は稀である。より現実性に則した分析のためには、過程誤差のみならず測定誤差を同時に考慮する必要がある [(3);(17);(9)]。外来種管理においても、殆どの場合、対象外来種の生態自体が未知であるため、現状の個体数推定値が不正確である。本稿では、「過程誤差」と「測定誤差」という二つの不確実性を伴う動学モデル上で最適政策を分析・考察する。

外来種の事後的管理に関する経済分析を行った研究は幾つかある。それらの何れも分析の基本的枠組みとして、長期的社会損失の最小化を目的とし、最適管理戦略を導出している。Olson and Roy (12) は過程誤差を考慮した離散時間動学モデルを構築し、どのような状況で根絶を目指すべきかを分析した。Eisewerth and Johnson (4) は、決定論的枠組みで連続時間動学モデルを構築し、最適制御を用いて平衡点がどのような因子によって影響を受けるのかを分析した。更に、Eisewerth and van Kooten (5) は、測定誤差の存在の下でファジィ制御を適用し、最適管理戦略を導出した。しかし、それら一連の研究は、我々が重視する「捕獲効率の罨」、つまり現存個体数が減少すればするほど、捕獲が困難になるという状況は考慮されておらず、一頭捕獲するのに必要な捕獲努力量は現存個体数に対して独立という仮定を置いている。

既存研究の中で、唯一「捕獲効率の罨」を暗に考慮している研究は、Olson and Roy (13) である。彼らは、捕獲効率という概念を用いずに一般的な関数形の下で、現存個体数に依存する捕獲費

用を考慮して、最適管理戦略を特徴付けた。しかし、彼らの結果では、具体的に「捕獲効率の罫」が最適戦略にどのように影響を与えているのかは分析対象ではなく、かつ、彼らの分析は決定論的で不確実性を考慮していない。つまり、既存研究では、我々が着目する二つの要因、「捕獲効率の罫」と「不確実性」の両方を同時に考慮し、最適管理戦略の導出を施した研究は未だ存在していない。

こうした状況を受けて、Kotani et. al. (7) は、決定論的枠組みにおける離散時間動学モデルを構築し、捕獲効率が現存個体数に依存した場合の最適戦略を分析した。主な結果は以下のようにまとめられる。まず、外来種の現存個体数に対する捕獲効率の感度がある一定以上に大きい場合には、根絶を諦め取り残し一定戦略を採用することが最適である。反対に、捕獲効率の感度が低い状況では、根絶を狙うことが最適となり得る。その際、根絶を狙うべきか否かについては、現存の個体数についてある基準点 (Skiba point) が存在し、個体数がその基準点より大きい場合は根絶を諦め、それ以下である場合には根絶を狙う戦略が最適となる。つまり、捕獲効率の感度が低いか高いかが根絶を狙うべきか否かの判断基準となり得ることを提示している。

本稿では、我々の既存研究 Kotani et. al. (7) での捕獲効率の罫を考慮した数理モデルの上に、「過程誤差」と「測定誤差」という二つの不確実性を考慮し、外来種の最適管理戦略について分析を行う。はじめに、過程誤差のみを考慮した場合の最適管理戦略を分析し、次に測定誤差を加えて、個々の不確実性に対し、「如何に外来種の捕獲管理戦略を変えていくべきか」を提示する。漁業管理に代表される不確実性下での古典的な再生可能資源管理とは定性的に異なる、外来種特有の最適戦略について議論することを試みる。更に、不確実性下で最適戦略を実行した場合に獲得される社会厚生 of 現在の価値について、個々の不確実性がどのような影響を与えうるのかについても考察する。

## 2 数理模型

先行研究で我々が構築したモデル、つまり、捕獲効率が外来種の現存個体数に依存する場合を考慮した離散の無限期間動学モデルに、過程誤差と測定誤差の二つの不確実性を新たに加えたモデルを構築する。過程誤差と測定誤差を、それぞれ独立した確率変数  $Z_t^g$  と  $Z_t^m, t = 0, 1, 2, \dots, \infty$  で表す。この二つの不確実性を表す確率変数はマルコフ性を満たし、動的計画法の適用が可能となる。更に、それら不確実性は期待値 1 でかつ有限サポート  $[1 - z_k, 1 + z_k], z_k \in [0, 1)$  を持つ確率分布  $\Phi^k, k = \{g, m\}$  に従うと仮定する。政策決定者にとってこれらの確率分布は既知であるとする。

次に、過程誤差がどのように外来種の個体数に影響を与えるのかを説明する。 $t$  期の個体数 (ストック) を  $x_t$ 、捕獲数を  $w_t$ 、取り残し量を  $s_t$  とすると、個体数  $x_t$  の状態方程式は

$$x_t = Z_t^g F(s_{t-1}), \quad s_t = x_t - w_t \quad (1)$$

と表される。 $F(\cdot)$  は自己増殖関数と呼ばれ、取り残し量に対して微分可能の凸型で  $F(0) = 0$  及

び  $F'(0) \in (1, \infty)$  を満たすものとする。更に、一意の正の平衡点  $F(\tau) = \tau$  が存在し、その点を基準として、 $F(s) > s$  と  $F'(s) \geq 0$ ,  $s \in (0, \tau)$ , を満たすものとする。これらの仮定は、一般的な再生可能資源管理モデルの状態方程式でも適用されている [Clark (2)]。翌期の個体数の期待値は  $\mathbb{E}(x_t | s_{t-1} = s) = F(s)$  となる。

さらに、測定誤差が状態変数  $x_t$  にどのような影響を及ぼすかを説明する。はじめに測定誤差が存在する場合 ( $z_m > 0$ )、政策決定者は真の個体数を知ることができず、彼らが得られる情報は、個体数推定調査による推定値  $m_t$  のみである。その推定値を、以下のように定式化する。

$$m_t = Z_t^m x_t. \quad (2)$$

真の個体数がゼロであれば政策決定者の得る個体数推定値もゼロである。また、真の個体数が正であれば個体数推定値も正であるが、その場合、真の個体数と個体数推定値は必ずしも一致しないことが上記の式 (2) で表されている。政策決定者は今期の個体数推定値  $m_t$  をもとに、当期の戦略を決定しなければならない。

これまで説明してきた二つの不確実性を伴う数理モデルは、決定論的設定を内包している。二つの不確実性を表す確率変数  $Z_t^g$  と  $Z_t^m$  に関するパラメータである  $z_g$  と  $z_m$  をゼロと設定した場合が決定論的モデルに対応している。

次に、動学モデルの利得関数について説明する。まず、毎期の利得はその期の取り残し量から被る社会的損失と捕獲費用の和とする。 $t$  期の社会的損失を  $D(s_t)$  とし、 $D(\cdot)$  は  $s_t$  に対し単調増加かつ凹型であると仮定する。一方、捕獲費用  $C(w_t, x_t)$  は捕獲数と現存個体数に依存し、 $w_t$  に対し単調増加であるものとする。この捕獲費用が  $C(x, x) < \infty$  であれば、有限の費用で根絶可能である一方、 $C(x, x) = \infty$  ならば根絶不可能であることを意味する。そして、社会が每期獲得する利得は、

$$u(x_t, w_t) = -D(x_t - w_t) - C(w_t, x_t). \quad (3)$$

と表せる。

ここで、捕獲費用に関する議論を補足し、捕獲効率と捕獲費用を関連付ける。一般的に個体数に依存する捕獲効率  $q(x_t)$  は

$$q(x_t) = bx_t^{\theta-1} \quad (4)$$

と定式化される。捕獲効率とは、一単位捕獲努力量あたりに対し、捕獲の対象となり得る個体数の割合を意味する。この捕獲効率の式にはパラメータが二つある。 $b$  は単に個体数の単位を調整するパラメータで、 $\theta$  は現存個体数に対する捕獲効率の感度を表す。 $\theta \geq 1$  であれば、現存個体数の減少に伴い、捕獲効率が悪くなる。 $\theta < 1$  であれば反対である。上記の捕獲効率に基づいて一単位努力量あたりの捕獲数 (CPUE: Catch per unit of effort) は

$$p(x_t) = xq(x_t) = bx_t^\theta \quad (5)$$

となる。もし一単位努力あたりの費用が  $k$  であるならば、現存個体数が  $x_t$  である時に、一単位捕獲に要する費用は

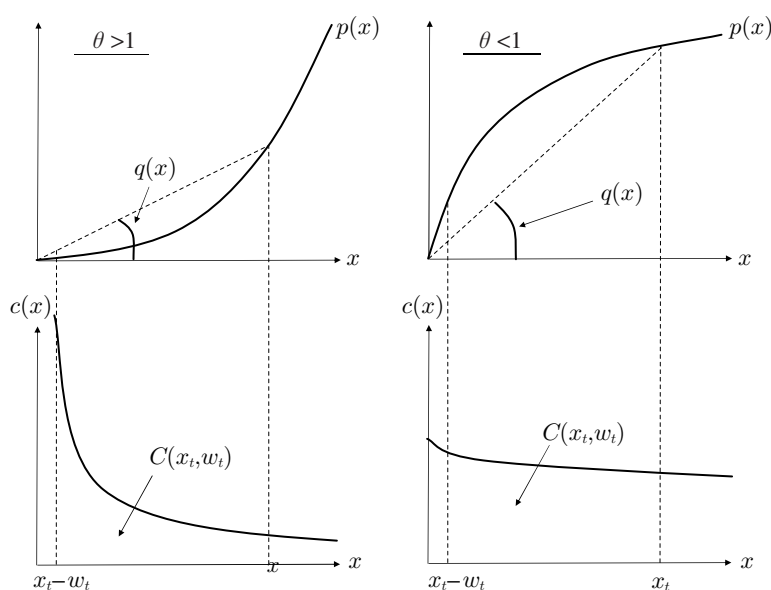
$$c(x_t) = \frac{k}{bx_t^\theta}, \quad (6)$$

となる。この一単位に要する捕獲費用  $c(x_t)$  は、 $w_t$  だけ捕獲を行う際の捕獲費用と以下のように関連付けられる。

$$C(w_t, x_t) = \int_{x_t - w_t}^{x_t} c(n) dn. \quad (7)$$

これまでの捕獲効率に関する設定は、再生可能資源管理の分析では一般的であり、詳しい導出については以下の文献を参照して頂きたい [(16);(2);(10)]。重要なのは、捕獲効率の感度を表すパラメータ  $\theta$  が捕獲費用、特に一単位捕獲に要する費用の特徴に影響を与える点である。図 1 が示している通り、 $\theta$  が 1 以上であるかないかは、現存個体数が減少した場合の捕獲の困難さを表しており、 $\theta$  が大きくなればなるほど個体数減少に伴う一単位捕獲費用は一気に増大する。捕獲効率、その感度、CPUE、そして捕獲費用との関係は図 1 のようにまとめられる。

図 1 捕獲効率、CPUE と捕獲費用



最後に、これまで説明してきたモデルを無限時間の離散動学モデルとして発展させる。前期の取り残し量  $s_{t-1}$  を所与として、状態方程式 (1) に基づいて確率的に今期の外来種個体数  $x_t$  が決定する。しかし、測定誤差が存在すれば、政策決定者が手にする情報は、式 (2) に基づき確率的に決まる個体数推定値  $m_t$  である。政策決定者は、この個体数推定値に基づいてマルコフ戦略、つまり今期の

目標捕獲個体数  $y_t$  を定めるものとする。このとき、今期の実際の捕獲個体数は  $w_t = \min\{y_t, x_t\}$ 、取り残し量は  $s_t = x_t - w_t$  と表される。

政策決定者は、外来種管理に関わる長期的社会費用の最小化を目的とするものと仮定する。この場合、政策決定者が直面する問題は

$$\begin{aligned} \max_{\{y_t\}_{t=0}^{\infty}} \quad & \mathbb{E} \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t u(x_t, w_t) \right\} \\ \text{s.t.} \quad & x_t = Z_t^g F(s_{t-1}) \\ & m_t = Z_t^m x_t \\ & w_t = \min\{y_t, x_t\} \\ & s_t = x_t - w_t \end{aligned} \tag{8}$$

と定式化され、 $\rho \in (0, 1)$  は経済割引率、 $\mathbb{E}$  は期待オペレーターである。この問題に対応する Bellman 方程式は、

$$v_t(m_t) = \max_{y_t} \mathbb{E}\{u(x_t, w_t) + \rho v_{t+1}(Z_{t+1}^m Z_{t+1}^g F(x_t - w_t))\}, \tag{9}$$

である。ここで、 $v_t(m_t)$  は動学モデルの評価関数であり、個体数推定値の関数となる。言い換えると、ある戦略に基づいて目標捕獲個体数を決定し続けた場合に、社会が獲得する社会利得（費用）の期待値である。

上記のモデルで不確実性の影響を分析する前に、決定論的動学モデルを構築した我々の先行研究の結果を簡潔にまとめる。我々の先行研究では特に現存個体数に対する捕獲効率の感度を表すインデックス  $\theta$  に着目して最適政策を議論している。本研究と関連している主な結果は以下の2点である。

1. 現存個体数に対する捕獲効率の感度  $\theta$  が十分に大きい場合、根絶を目指す戦略は最適とは成り得ず、ある内点  $s^* > 0$  をターゲットとして取り残し一定戦略が最適戦略となる。
2. 現存個体数に対する捕獲効率の感度  $\theta$  が十分小さい場合、根絶を目指す戦略が最適となり得る。この場合、ある基準値（Skiba point）が存在して、現存個体数がその基準値よりも小さいならば、根絶を目指すし、また、大きい場合は放置する戦略が最適戦略となる。

### 3 過程誤差

このセクションでは、過程誤差のみを考慮した動学モデルで最適戦略について分析を行う。測定誤差を表す確率変数  $Z_t^m$  は1の定数（ $z_m = 0$ ）である。はじめに、最適戦略を特徴付けるため、今



期の利得に関して以下のような変換を行う。

$$u(x_t, w_t) = -[Q(x_t - w_t) - Q(x_t)] - D(x_t - w_t).$$

関数  $Q(x)$  は  $Q(x) \equiv \int_x^M c(n)dn \in [0, \infty]$  と定義され、捕獲により個体数を  $M = \max\{(1 + z_g)F(s) | (1 + z_g)F(s) \geq s, s \geq 0\}$  から  $x$  まで減少させるのにかかる費用を表す。ここで、一階・二階微分は  $Q'(x) = -c(x) < 0$  及び  $Q''(x) = -c'(x) > 0$  となる。以上の変換を適用することで動学モデルの目的関数は、毎期の取り残し量  $s_t$  のみに依存する関数として以下のように書ける。

$$\mathbb{E} \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t u(x_t, x_t - s_t) \right\} = Q(x_0) + \mathbb{E} \left\{ \sum_{t=0}^{\infty} \rho^t \Gamma(s_t, Z_t^g) \right\}. \quad (10)$$

$\Gamma(s_t, Z_t^g) \equiv -Q(s_t) - D(s_t) + \rho Q(Z_t^g F(s_t))$  は、今期に  $s_t$  を取り残したことから生じる社会的利得の現在価値を表しており、その期待値は以下ようになる。

$$g(s) = \int_{1-z_g}^{1+z_g} \Gamma(s, z) d\Phi^g(z) = -Q(s) - D(s) + \rho \int_{1-z_g}^{1+z_g} Q(zF(s)) d\Phi^g(z). \quad (11)$$

ここで注目すべき点は、(8) 式で定式化された動学モデルにおける最適戦略の導出は、毎期の取り残し量  $s_t$  を選択変数として、式 (10) を最適化することと同じことである。つまり、最適戦略を分析する上で、 $g(s)$  の形状が  $s$  に対して凸であるかどうかが重要となる。

決定論的モデルでは、 $g(s)$  に対応する関数は、

$$h(s) = -Q(s) - D(s) + \rho Q(F(s)), \quad (12)$$

となる。その  $h(s)$  の形状は、これまで我々が説明してきたモデルの構成要素の中でも特に、捕獲効率の感度  $\theta$  に大きく依存する。 $\theta$  が十分に大きい場合、 $h(s)$  が  $s$  に対して凸型となり、かつある内点  $\bar{s} \in (0, M)$  で  $h(s)$  を最適化する最適解が存在する。この場合、内点  $\bar{s}$  をターゲットとした取り残し一定戦略が最適となり、根絶戦略は最適とはなりえない。一方、 $\theta$  が十分に小さい場合、 $h(s)$  が  $s$  に対して凹型となり、根絶戦略が最適となり得る。これらの結果は、我々の先行研究における決定論的動学モデルで解析的に導出した結果である。

過程誤差が存在する場合においても、決定論の場合の分析方法と同様に、 $g(s)$  を基に最適戦略の特徴付けを試みる。決定論で取り残し一定戦略が最適の状況では、不確実性下でもある程度まで解析的に最適戦略を分析できる。一方、決定論で根絶戦略が最適となり得る状況では、解析的分析は困難である。故にここから先は、これら二つの状況に場合分けし、それぞれについて過程誤差が最適戦略にどのような影響を与えるのか、解析的分析と数値計算実験を用いて結果を提示していく。

### 3.1 取り残し一定戦略の場合

このサブセクションでは、決定論で取り残し一定戦略が最適である場合において、過程誤差が最適戦略に与える影響を分析する。前述の通り、決定論においては、捕獲効率の感度  $\theta$  が十分に大きい場合に  $h(s)$  が凸型で内点の最適解  $\bar{s}$  を持ち、取り残し一定戦略が最適となる。過程誤差を考慮した場合の  $g(s)$  も同様に内点  $\sigma \in (0, M)$  で最適解を持つものとして議論を進めていく。 $g$  が凸型で最適解を持つ為の必要条件は、

$$g'(s) = \left[ c(s) - \rho \int_{1-z_g}^{1+z_g} z c(zF(s)) F'(s) d\Phi^g(z) \right] - D'(s) \quad (13)$$

が  $s \in [0, M]$  に対して単調減少となることである。 $c(s)$  は取り残し量が  $s$  のときにそこから限界的に一個体だけ捕獲するのにかかる費用を表しており、また、 $\rho \int_{1-z_g}^{1+z_g} z c(zF(s)) F'(s) d\Phi^g(z)$  は、取り残し量  $s$  のときに限界的に一個体、より多く取り残すことから得られる捕獲費用削減の現在価値を表している。故に、 $B(s) \equiv c(s) - \rho \int_{1-z_g}^{1+z_g} z c(zF(s)) F'(s) d\Phi^g(z)$  は、今期において  $s$  だけ取り残すことから得られる捕獲費用におけるネット損益の現在価値と解釈できる。例えば、 $\rho \int_{1-z_g}^{1+z_g} z c(zF(s)) F'(s) d\Phi^g(z)$  が相対的に  $c(s)$  より大きいならば、将来捕獲を行うよりも今期に捕獲を行うほうが得ということになる。

また、 $\sigma$  と  $\bar{s}$  の大小関係を調べるために、 $g(s) - h(s)$  について一階微分をとり整理すると、

$$g'(s) - h'(s) = \rho F'(s) \left[ c(F(s)) - \int_{1-z_g}^{1+z_g} z c(zF(s)) d\Phi^g(z) \right] \quad (14)$$

となる。ここで、Reed (16) による分析と同様に、上記の式に Jensen 不等式を適用すると、以下のように  $\sigma$  と  $\bar{s}$  の大小関係は  $xc(x)$  の形状または  $\theta$  に依存することが示される。

**結果 3.1** (1)  $\theta > 1$  であるならば、 $xc(x)$  が  $x$  に対し凹型であり、 $\sigma < \bar{s}$ ; (2)  $\theta = 1$  であるならば、 $xc(x)$  が  $x$  に対し線形であり、 $\sigma = \bar{s}$ ; (3)  $\theta < 1$  であるならば、 $xc(x)$  が  $x$  に対し凸型であり、 $\sigma > \bar{s}$ 。

この結果を踏まえ、過程誤差の度合い  $z_g$  が増加した場合に、 $\sigma$  がどのように変化するか更なる結果を得ることが可能である。我々の仮定では、 $z_g$  を大きくすると、過程誤差の期待値は 1 のままで誤差の幅だけが増え、二次の確率優位 (second-order stochastic dominance) の条件を満たされている。この場合、以下の結果を得る。

**結果 3.2**  $\theta > 1$  であれば、 $z_g$  が大きくなるにつれ  $h'(s) - g'(s) > 0$  は上昇するため、 $\sigma$  は  $z_g$  に関して単調減少である。一方、 $\theta < 1$  であれば、 $z_g$  が大きくなるにつれ  $g'(s) - h'(s) > 0$  は上昇するため、 $\sigma$  は  $z_g$  に関して単調増加である。

この結果は、 $\theta$  が 1 以下であるかどうかによって、 $z_g$  に対して  $\sigma$  が単調減少であるか、単調増加であるかが決定されることを示唆している。

ここで留意すべき点は、過程誤差が存在する場合、 $g(s)$  の最適解  $\sigma \in (0, M)$  を導出したとしても、式 (8) で定式化された動学的最適化問題の最適戦略を見つけたことにはならないという事実である。決定論における最適戦略は、 $h(s)$  の最適解  $\bar{s} \in (0, M)$  をターゲットとした取り残し一定戦略であった。しかし、Reed (16) が示したように、過程誤差が存在する場合は、あくまで  $\sigma$  は最適戦略である取り残し一定のターゲット  $s^*$  の下限、つまり  $s^* \geq \sigma$  でしかない。 $s^* = \sigma$  となるためには、 $\sigma$  がセルフサステイニング (self-sustaining) という条件を満たすことが必要である。セルフサステイニングの条件とは、ある確率分布  $\Phi^g(z) > 0$  を持つ過程誤差の全ての  $z \in [1 - z_g, 1 + z_g]$  に対して  $zF(\sigma) \geq \sigma$  となることである。つまり、今期  $\sigma$  だけ取り残した場合、翌期の個体数が確率 1 で  $\sigma$  より大きいならば、 $\sigma$  はセルフサステイニングといえる。

$g(s)$  と  $h(s)$  が凸型で内点の最適解を有し、かつ  $g(s)$  の最適解  $\sigma$  がセルフサステイニングであるならば、過程誤差が存在している場合の最適戦略に関して、上記の結果 3.1 と結果 3.2 を直接適用することができる。この場合、 $g(s)$  と  $h(s)$  が凸型で内点の最適解を有する条件を満たすためには  $\theta$  が小さくないときであることに注意する必要がある。まず、結果 3.1 から、 $\theta > 1$  であれば、過程誤差がある場合の方が無い場合に比して、取り残し一定戦略のターゲットをより低く設定することが最適戦略である一方、 $\theta < 1$  であるならば、過程誤差がある場合の方が無い場合に比して、取り残し一定戦略のターゲットをより高く設定することが最適戦略である。更に、結果 3.2 から、過程誤差の度合い  $z_g$  が増加した場合に取り残し一定戦略のターゲットがどのように変化するかを考察することができる。

**結果 3.3** ( $\sigma$  がセルフサステイニングである場合)  $\theta > 1$  であれば、過程誤差  $z_g$  の増加は、最適戦略である取り残し一定のターゲットを低下させる。逆に、 $\theta < 1$  であれば、過程誤差  $z_g$  の増加は取り残し一定のターゲットを上昇させる。

次に、 $g(s)$  と  $h(s)$  が凸型で内点の最適解を有するものの、 $\sigma$  がセルフサステイニングの条件を満たしていない場合を考察する。直感的に言えることは、我々の仮定では、過程誤差に関する不確実性の度合い  $z_g$  が大きくなるにつれ  $\sigma$  がセルフサステイニングではなくなるという事実である。この点は、 $z_g$  が 0 と 1 に近い極端な場合を想定すれば分かり易い。

$\sigma$  がセルフサステイニングではない場合については、もはや解析的な分析は困難であるため、数値計算実験を用いて分析を試みる。そのため、自己増殖関数  $F(s)$  と社会損失関数  $D(s)$  等について特定の関数を想定する。社会損失関数については、

$$D(s) = a_1 s + \frac{a_2 s^2}{2} \quad (15)$$

で、 $a_1 \geq 0, a_2 > 0$  と仮定する。次に自己増殖関数については、典型的なロジスティック関数

$$F(s) = rs \left(1 - \frac{s}{K}\right) + s \quad (16)$$

を仮定し、 $r > 0$  は内的自然増加率、 $K > 0$  は環境収容量である。この数値計算実験で適用する関数は、我々が数理模型のセクションで紹介したモデルの基本的仮定を満たしており、同様の関数は既存の研究でも用いられている [(13; 4)]。ここで数値計算実験によって最適戦略を導出するアルゴリズムは Judd (6) で紹介されている評価関数反復法 (value function iteration algorithms) を適用し、Matlab でコードを組んだ。

パラメータの基本設定としては、捕獲費用  $c(x)$  について  $b = 1$  と  $k = 250$ ；社会損失関数  $D(s)$  について  $a_1 = 1$  と  $a_2 = 2$ ；自己増殖関数  $F(s)$  について  $r = 0.3$  と  $K = 10$ ；経済割引率について  $\rho = 0.95$ ；捕獲効率の感度について  $\theta = 1.1$  とした。この設定では、決定論的動学モデルでの最適戦略は  $\bar{s} = 3.9$  をターゲットとした取り残し一定戦略となる。この結果を基に、過程誤差の程度を  $z_g \in \{0.25, 0.50, 0.75\}$  と上昇させていく。数値計算実験での過程誤差の確率分布は、前出の仮定を満たすサポート  $[1 - z_g, 1 + z_g]$  の一様分布を仮定する。この三つの過程誤差の程度  $z_g \in \{0.25, 0.50, 0.75\}$  に対し、 $\sigma$  はセルフサステイニングの条件を満たしていない。

図2 ベースケース（取り残し一定戦略の場合）：  
過程誤差の存在下での最適捕獲戦略  
zm = 0

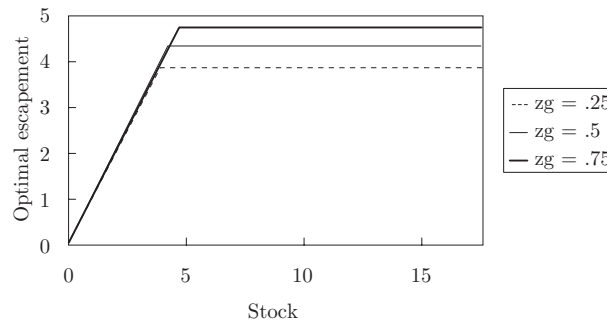


図2は過程誤差が増加するにつれて最適戦略がどのように変化するかを示しており、結果は以下のようにまとめられる。

**結果 3.4** ( $\sigma$  がセルフサステイニングでない場合) (1) 取り残し一定戦略が最適戦略である；(2) 過程誤差の程度  $z_g$  が増加するにつれ、最適戦略である取り残し一定のターゲットは上昇する。

はじめに、取り残し一定戦略が最適戦略であり続けるという定性的結果は過程誤差の程度  $z_g$  に依存しない。次に、取り残し一定のターゲットが過程誤差の程度  $z_g$  に関して単調増加であるという点は注目に値する。直感的な説明は以下のとおりである。過程誤差の程度が  $\sigma$  をセルフサステイニングでなくする程度に大きい場合には、それは同時に捕獲をすることなしに自然と翌期に個体数が減少する確率が高くなることを意味している。このことは、捕獲に対してより消極的となることが捕獲費用の削減につながることを示唆している。そのため、取り残し一定戦略という定性的結果に影響を与えないものの、ターゲットを高め設定するという戦略が最適となる。我々は、資源経済学分野で一般的に用いられる他の自己増殖関数や社会損失関数、さらには他のパラメータセットでも、上述の数値計算実験例と同様の結果が定性的に得られることを確認した。

最後に、決定論で取り残し一定戦略が最適の場合において、 $\sigma$  がセルフサステイニングの条件を満たす場合とそうでない場合の結果（結果 3.3 及び結果 3.4）を基に、新たな結果を提示できる。それは、過程誤差に関する不確実性の程度  $z_g$  が、最適戦略である取り残し一定のターゲットにどのような影響を与えるのか、である。 $\theta > 1$  の場合と  $\theta < 1$  の場合に分けて、以下のようにまとめることができる。ここで、 $z_g$  がゼロに近い、もしくは十分に小さければ、 $\sigma$  はセルフサステイニングであり、ある一定以上に大きいと  $\sigma$  はセルフサステイニングでなくなることに留意する。

**結果 3.5 [ $\theta > 1$  の場合]**  $z_g$  が十分に小さい場合は、 $\sigma$  がセルフサステイニングであるため、 $\sigma$  をターゲットとした取り残し一定戦略が最適戦略となり、かつ  $z_g$  の増加は最適戦略である取り残し一定戦略のターゲット  $\sigma$  を低下させる。一方、 $z_g$  がある程度大きく、 $\sigma$  がセルフサステイニングでなくなれば、 $z_g$  の増加は最適戦略である取り残し一定戦略のターゲットを上昇させる。つまり、 $z_g$  がゼロから上昇するにつれて、最適戦略である取り残し一定戦略のターゲットは低下した後上昇する。取り残しターゲットは U 字型変化として特徴付けられる。

**結果 3.6 [ $\theta < 1$  の場合]**  $z_g$  が十分に小さい場合は、 $\sigma$  がセルフサステイニングであるため、 $\sigma$  をターゲットとした取り残し一定戦略が最適戦略となり、かつ、 $\theta > 1$  の場合とは逆に  $z_g$  の増加は最適戦略である取り残し一定戦略のターゲット  $\sigma$  を上昇させる。 $z_g$  がある程度大きくなって  $\sigma$  はセルフサステイニングでなくなれば、 $\theta > 1$  の場合と同様に  $z_g$  の増加は最適戦略である取り残し一定戦略のターゲットを上昇させる。つまり、 $z_g$  がゼロから上昇するにつれて、最適戦略である取り残し一定戦略のターゲットは常に上昇することになる。

結果 3.5 と結果 3.6 のより詳細な証明の説明については、Kotani et.al. (8) を参照していただきたい。その論文では、外来種管理だけでなく、より一般的な再生可能資源管理でも、結果 3.5 と結果 3.6 と同様の定性的結果を得られることを提示している。

### 3.2 根絶の場合

このサブセクションでは、決定論で根絶戦略、つまり一気に個体数をゼロにするべく捕獲することが最適戦略である場合に、過程誤差が最適戦略にどのような影響を与えるのかを分析する。決定論で根絶が最適となり得る状況下で、かつ不確実性が存在する場合の最適捕獲戦略の解析的分析は困難である。よって、数値計算実験の結果を基に議論する。

このサブセクションでの数値計算実験で用いる関数ならびにパラメータセットは前サブセクションで採用したものと同一である。唯一変更するものは、捕獲効率の感度で、 $\theta = 0.5$  と設定する。これは決定論で解析的に導出した命題において、十分に低い捕獲効率の感度に対応している。この状況での決定論動学モデル上での最適戦略は、全ての個体数に対し即座に根絶に追い込むことである。この動学モデルに三つの過程誤差の程度  $z_g \in \{0.25, 0.50, 0.75\}$  を想定し、それぞれの最適戦略を導出することによって、過程誤差が最適戦略にどのような影響を与えるのかを示す。

図3 ベースケース（根絶戦略の場合）：  
過程誤差の存在下での最適捕獲戦略  
 $z_m = 0$

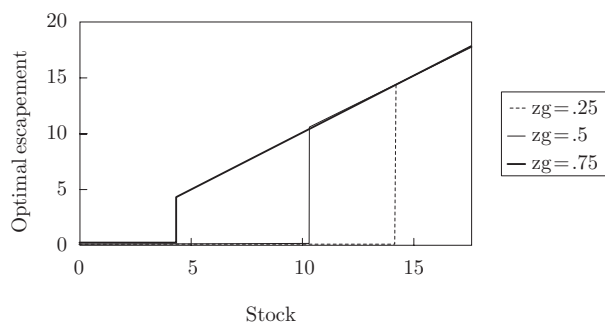


図3は数値計算実験より求められた最適戦略の変化の結果を表している。過程誤差の導入が最適戦略に Skiba point と呼ばれる基準点を作り出している。その基準点より現存個体数が少なければ、一気に根絶に追い込み、そうでなければ外来種個体数を放置するという戦略が最適戦略となる。また、過程誤差の程度が大きくなるにつれて、Skiba point が原点に近づいていくことが伺える。本稿に記載していないが、 $z_g$  を1に近づけると、完全放置、つまり、どの現存個体数に対しても捕獲活動を行わないことが最適となることも確認した。これらの議論は以下のような結果にまとめられる。

**結果 3.7 （過程誤差の最適戦略への影響：根絶の場合）** 過程誤差の程度  $z_g$  が大きくなるにつれ、Skiba point が出現し、原点に近づいていく。Skiba point より現存個体数が少なければ、一気に根絶に追い込み、そうでなければ個体数を放置するという戦略が最適戦略となる。

この定性的な結果に対する説明は、前サブセクションとほぼ同様のものである。つまり、過程誤差

の程度が大きければ大きいほど、費用をかけて捕獲をする必要はなくなるということである。むしろ、過程誤差によって根絶に追い込むのにちょうど良い個体数に減少するまで待ち、その機会を得た時に根絶に追い込むことがより効率的である。他の関数やパラメータセットを用いて感度分析も行ったが、定性的な結果は同じであった。

## 4 測定誤差

このセクションでは、過程誤差を考慮し分析した前出の動学モデルに測定誤差を加えて分析を行う。測定誤差が存在する場合、Sethi et. al. (18) も述べているように解析的な分析は困難である。よって、このセクションでも全般的に数値計算実験の結果による分析が中心となる。

測定誤差  $Z_t^m$  の確率分布は、 $[1 - z_m, 1 + z_m]$ ,  $z_m \in [0, 1)$  のサポートを持つ一様分布とし、マルコフ性を満たすものとする。 $z_m$  は測定誤差の程度を表し、それが大きいと、式 (2) に基づいて確率的に間違った個体数推定値が出力される可能性が高くなる。つまり、 $z_m$  が大きいほど、真の個体数  $x_t$  とかけ離れた個体数推定値  $m_t$  を基に捕獲戦略を決めなければならない。

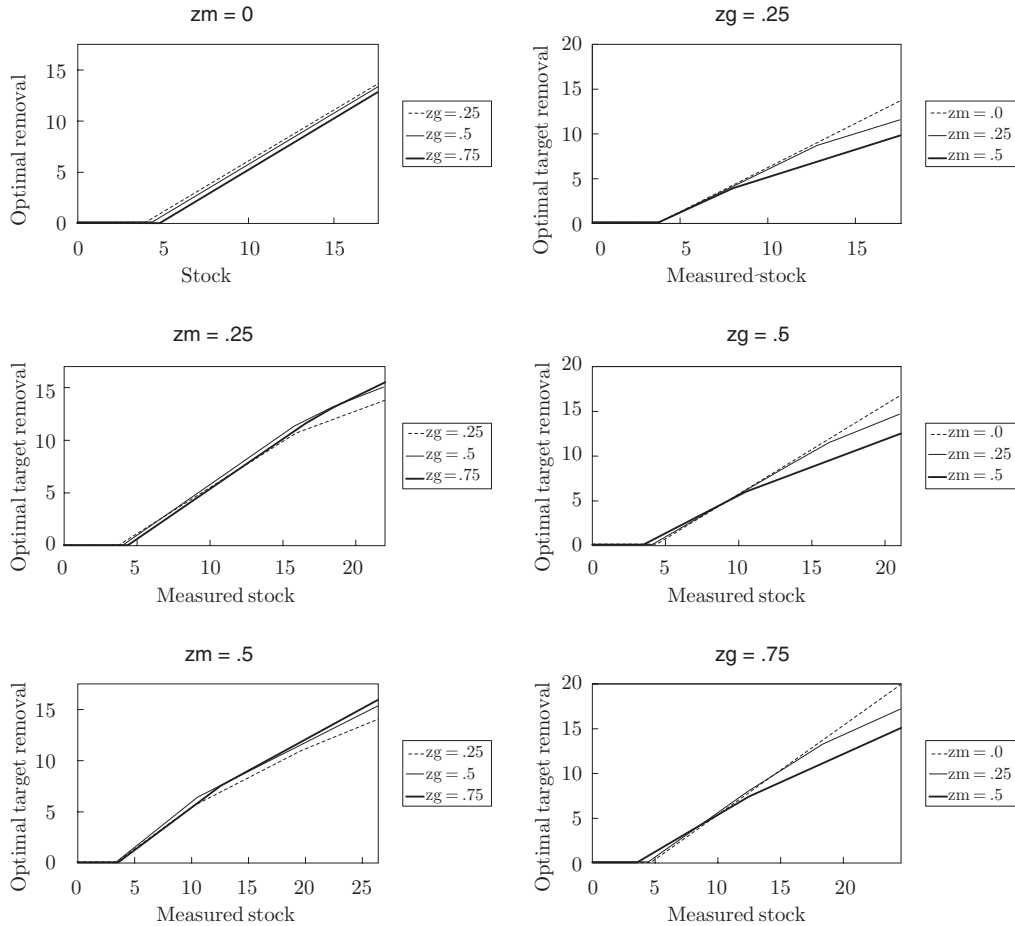
このセクションでも、過程誤差の議論と同様に、決定論において (i) 取り残し一定戦略が最適の場合と (ii) 根絶戦略が最適の場合に分けて、測定誤差が最適捕獲戦略に与える影響を分析する。二つの測定誤差の程度  $z_m \in \{0.25, 0.50\}$  の影響を数値計算実験の結果で示した上で、測定誤差がない場合との比較検討を行う。

### 4.1 取り残し一定戦略の場合

このサブセクションでは、決定論で取り残し一定戦略が最適である状況に着目し、測定誤差の存在が最適戦略にどのような影響を与えるのかを分析する。そのため、結果を常に二パターン提示していく。一つは、ベースケース、つまりこれまで過程誤差の分析で用いた関数とパラメータセットを用いる場合である。もう一つはサブケース、つまりベースケースのパラメータセットと比して社会損失関数で用いられた  $a_2 = 2$  を単に  $a_2 = 1$  と変更したケースの結果を提示する。この二パターンの結果を示す理由は、一つは感度分析、もう一つは同じ定性的な結果が得られるかどうかを確認するためである。

図4と図5は、測定誤差と過程誤差が同時に存在する場合の最適戦略を示している。図4がベースケース、図5がサブケースに対応している。各図は、六パネル提示しており、左側の三パネルが測定誤差の程度  $z_m = \{0, 0.25, 0.5\}$  を固定し、過程誤差の程度を  $z_g = \{0.25, 0.5, 0.75\}$  と動かしたときの結果を、そして右側の三パネルは反対に過程誤差の程度  $z_g = \{0.25, 0.5, 0.75\}$  を固定し、測定誤差の程度を  $z_m = \{0, 0.25, 0.5\}$  と動かしたときの結果を示している。

図4 ベースケース（取り残し一定戦略の場合）：  
過程誤差と測定誤差の存在下での最適捕獲戦略 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]

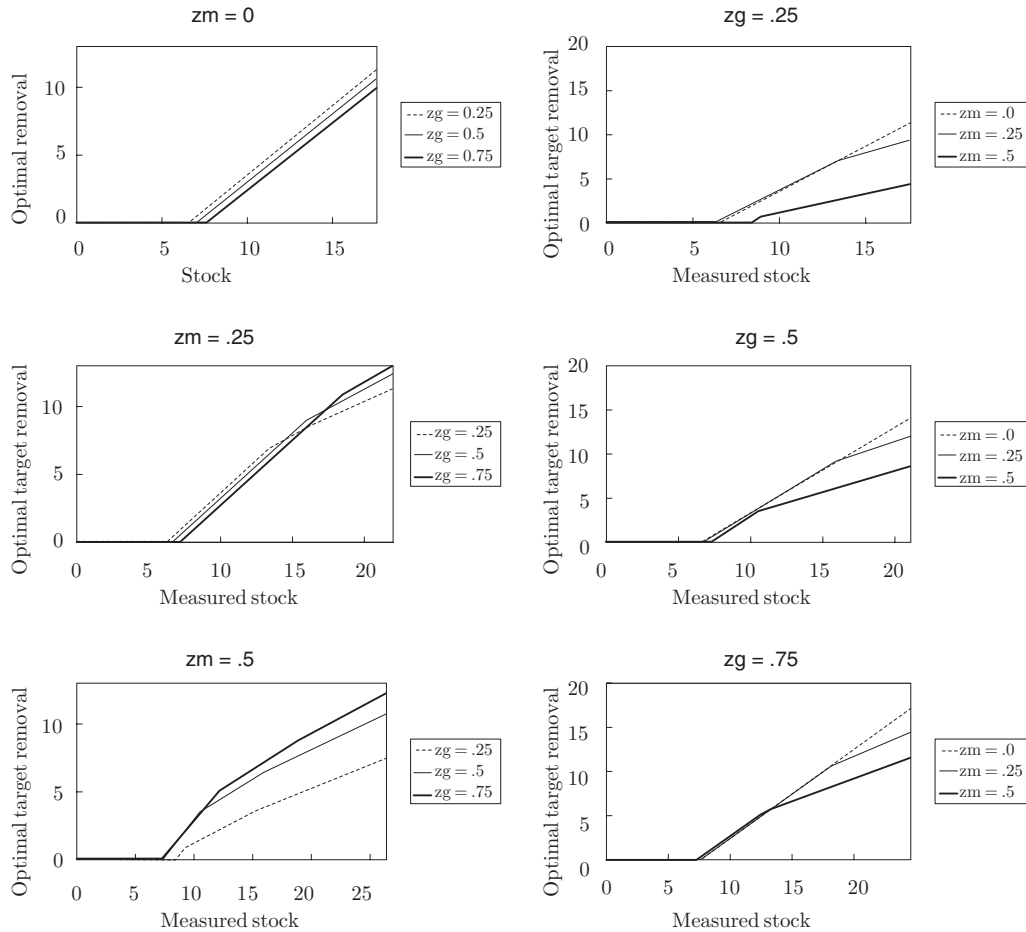


この図の見方で留意すべき点は、過程誤差のセクションとは最適戦略の表示方法が異なることである。当セクションでは取り残し量  $s$  が縦軸ではなく、目標捕獲個体数  $y$  が縦軸に設定されている。この表示法を採用した理由は、測定誤差が存在すると真の個体数  $x_t$  は常に未知であるため、特定の取り残し量を確率 1 で達成することは不可能であることに起因している。言い換えると、測定誤差が存在すれば、政策決定者が確実にとれる行動は、あくまで目標捕獲個体数の設定でしかなくなってしまふ。そのため、最適戦略が依存する要素は、現存個体数  $x_t$  ではなく、個体数推定値  $m_t$  となる。

この最適戦略の表示方法において、取り残し一定戦略は、個体数推定値がターゲットレベルに到達するまで目標捕獲個体数をゼロと設定し、一旦個体数推定値がターゲットよりも大きくなったときに傾き 1 で大きくなった分だけ捕獲するというグラフで示される。その例が図 4 における  $z_m = 0$  のパネルで示されている最適戦略である。これは図 2 で示した取り残し一定戦略と同じ結果を表示



図5 サブケース（取り残し一定戦略の場合）：  
過程誤差と測定誤差の存在下での最適捕獲戦略 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]



しており，異なるのは縦軸のみである。

測定誤差が最適戦略に与える影響について，主に四つの定性的結果を順に示すこととする。

**結果 4.1** 測定誤差が存在すれば，取り残し一定戦略は最適ではない。

これは，図4と図5より確認できる。測定誤差が存在しなければ，不確実性は過程誤差のみなので，取り残し一定戦略が最適であり続けることは，前セクションで述べた。しかし，測定誤差が存在すると，ある個体数推定値の基準点  $m_t^*$  までは，目標捕獲個体数をゼロに設定し，一度その基準推定値を超えると目標捕獲個体数を個体数推定値に対して，非線形（凸型）で変化させていくことが最適となる。また，測定誤差の程度が大きい場合，つまり  $z_m = 0.5$  の場合は特に取り残し一定戦略が

らのズレが明瞭になる。

**結果 4.2** 測定誤差の程度  $z_m$  が十分に大きい状況では、過程誤差の程度  $z_g$  の増加とともに、目標捕獲個体数をより大きく設定することが最適となる。

図 4 と図 5 の左側の三パネル、つまり  $z_m$  を固定し  $z_g$  を動かした場合の最適戦略の変化は上述の結果を示唆している。測定誤差が存在しない場合 ( $z_m = 0$ )、過程誤差の程度が増加するにつれ、捕獲をより控えるのが最適であった。しかし、測定誤差が十分に大きい場合 ( $z_m = 0.5$ )、過程誤差の程度が増加するにつれ、目標捕獲個体数を増加すべきであることが伺える。つまり、過程誤差の最適戦略への影響は測定誤差の程度に大きく依存するという結果が示されている。

この結果に対する背景は以下のように説明されうる。測定誤差が存在しなければ、政策決定に影響を与える不確実性は過程誤差のみである。この場合、不確実性による利得への影響は、過程誤差による翌期、そして将来の利得に関してのみであり、今期の利得には不確実性は伴わない。一方、測定誤差が存在すると将来の利得だけでなく、今期の利得も不確実を伴うこととなる。つまり、測定誤差の程度が大きくなると、過程誤差の増大にともなって今期の利得に関する不確実性がより増大していく。この場合、今期の利得に関する不確実性から生じる損益に対しても、より注意を払わなければならない。よって、測定誤差が大きい状況で、過程誤差を大きくしていくと翌期のみならず、今期の利得に関するリスクが増大する。今期の利得に関するリスクを制御するため、過程誤差の上昇とともに目標捕獲個体数もより大きく設定することが望ましくなる。

**結果 4.3** 測定誤差の程度が増加するにつれて、個体数推定値  $m_t$  に対する目標捕獲個体数の設定の感度はより鈍化する。

この結果は、図 4 と図 5 の右側の三パネル、つまり  $z_g$  を固定し  $z_m$  を動かした場合の最適戦略の変化より理解できる。過程誤差の程度を固定させ、測定誤差の程度を大きくした場合、最適戦略における目標捕獲個体数  $y_t$  の個体数推定値  $m_t$  に対する傾きが小さくなる。

測定誤差の程度  $z_m$  は、個体数推定精度の指標と理解できる。同じ個体数推定値  $m_t$  を得たとしても、測定誤差の程度が大きいほど、その  $m_t$  に基づいた一頭捕獲した場合の価値はより小さいと考えられる。なぜなら、より不正確な情報により捕獲を行うことは、望ましい捕獲を阻害することに他ならないためである。手元にある情報がより不正確であればあるほど ( $z_m$  が大きくなればなるほど)、捕獲を行う価値は減少する。個体数推定値の上昇と伴に個体数に関する情報はより不正確になるため、上記のような結果を得るに至る。

**結果 4.4** 目標捕獲個体数をゼロとするか否かの個体数推定値の基準点  $m_t^*$  は測定誤差の程度  $z_m$  により影響を受ける。

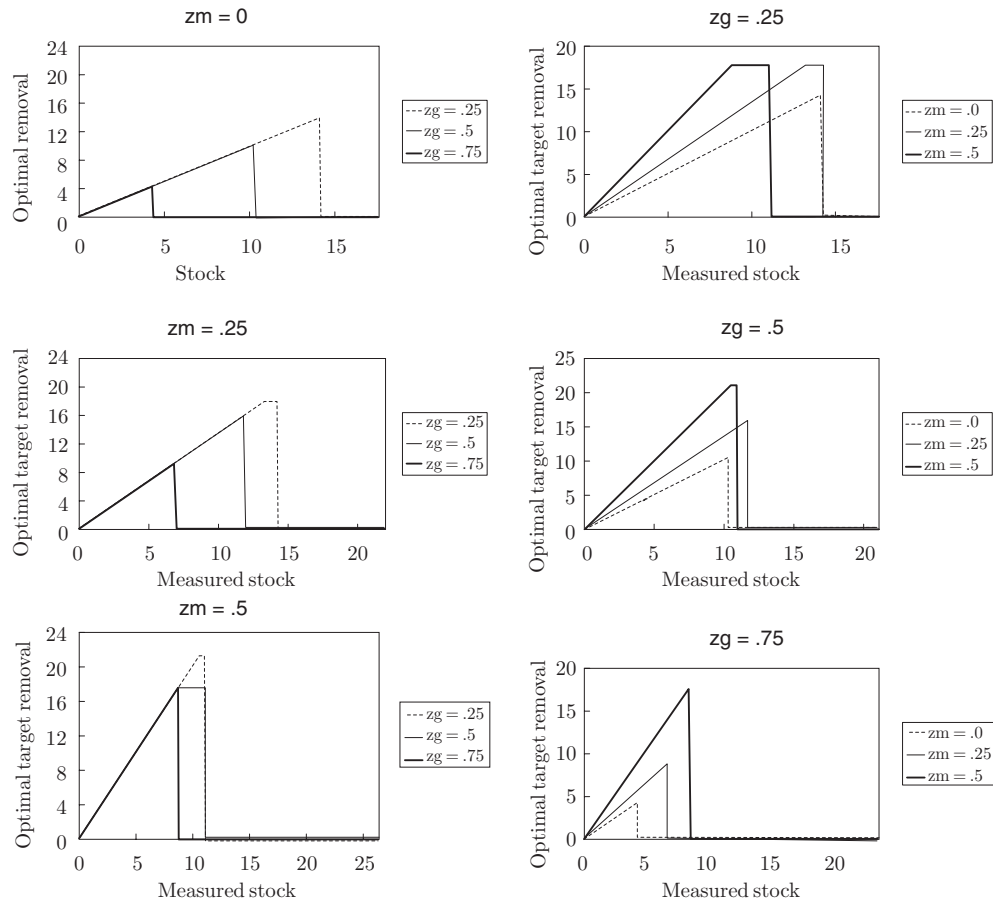
図 4 と図 5 の右側三パネルは、この結果を示唆している。測定誤差の程度が  $z_m = 0.25$  のように大きくない場合には、過程誤差のみの場合と比して、その個体数推定値の基準点に大きな差異は認められない。しかし、 $z_m = 0.5$  のように測定誤差の程度を大きくすると、その基準点が大きく影響を受ける場合がある。特に、図 4 と図 5 の過程誤差を  $z_g = 0.75$  に固定したパネルはそれぞれ、測定誤差の程度の増加に伴って、 $m_t^*$  が小さくなる場合に対応している。過程誤差を  $z_g = 0.75$  に固定した二つのパネルを見ると、その基準点の近傍において、 $z_m = 0.5$  の場合の目標捕獲個体数は、 $z_m = \{0.25, 0\}$  の場合と比して、より高く設定されている。しかし、ある一定以上個体数推定値  $m_t$  が大きくなると、 $z_m = 0.5$  の場合の目標捕獲個体数を、 $z_m = \{0.25, 0\}$  の場合と比して、より低く設定することが最適となる。この結果は前出の結果でも述べたように、 $z_m$  が上昇するにつれ、情報の不確実性が増加することに起因しており、外来種からの被害が大きい場合 ( $a_2 = 2$ ) に顕著に起こりうると考えられる。また、図 5 の過程誤差を  $z_g = 0.25$  に固定したパネルでは、測定誤差の程度の増加に伴って、 $m_t^*$  が大きくなる状況を示している。このような状況は、サブケースのように社会被害 ( $a_2 = 1$ ) が小さく、情報の不正確さの悪影響が他の要因 (社会損失等) より優先している場合に起こりうる。

#### 4.2 根絶戦略の場合

このサブセクションでは、決定論で根絶戦略が最適である場合に、測定誤差の存在が最適戦略にどのような影響を与えるのかを分析する。図 6 と図 7 はそれぞれ過程誤差のセクションで分析したパラメータセットと関数形を用いて、そこに測定誤差を加えて数値計算実験を行った結果を示している。ここで、図 6 はベースケースで、図 7 はサブケースの結果に対応している。留意すべき点は、前サブセクションと同様に、最適戦略の表示において、縦軸として目標捕獲個体数を用いているということである。測定誤差が存在するとき、即座に根絶を狙うことは、目標捕獲個体数を正の確率で起こり得る最大の真の個体数に設定することと同じことである。よって根絶を狙うという戦略は、図 6 と図 7 では、個体数推定値の  $m_t$  に対し、線形に目標捕獲個体数を設定している場合である。また、完全放置の戦略は、目標捕獲個体数をゼロに設定することである。

決定論の場合、ベースケースでは全ての個体数に対し即座の根絶が最適であるのに対し、サブケースでは、Skiba point がある個体数 4.0 あたりで存在し、現存個体数がそれ以下であれば根絶、それ以上であれば完全放置が最適となる。まず、過程誤差のセクションでも示した通り、図 6 と図 7 の測定誤差がない状況では、過程誤差の程度  $z_g$  が大きくなればなるほど、Skiba point が出現し、か

図6 ベースケース（根絶戦略の場合）：  
過程誤差と測定誤差の存在下での最適捕獲戦略 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]



つ原点に近づいて行くことに留意する。

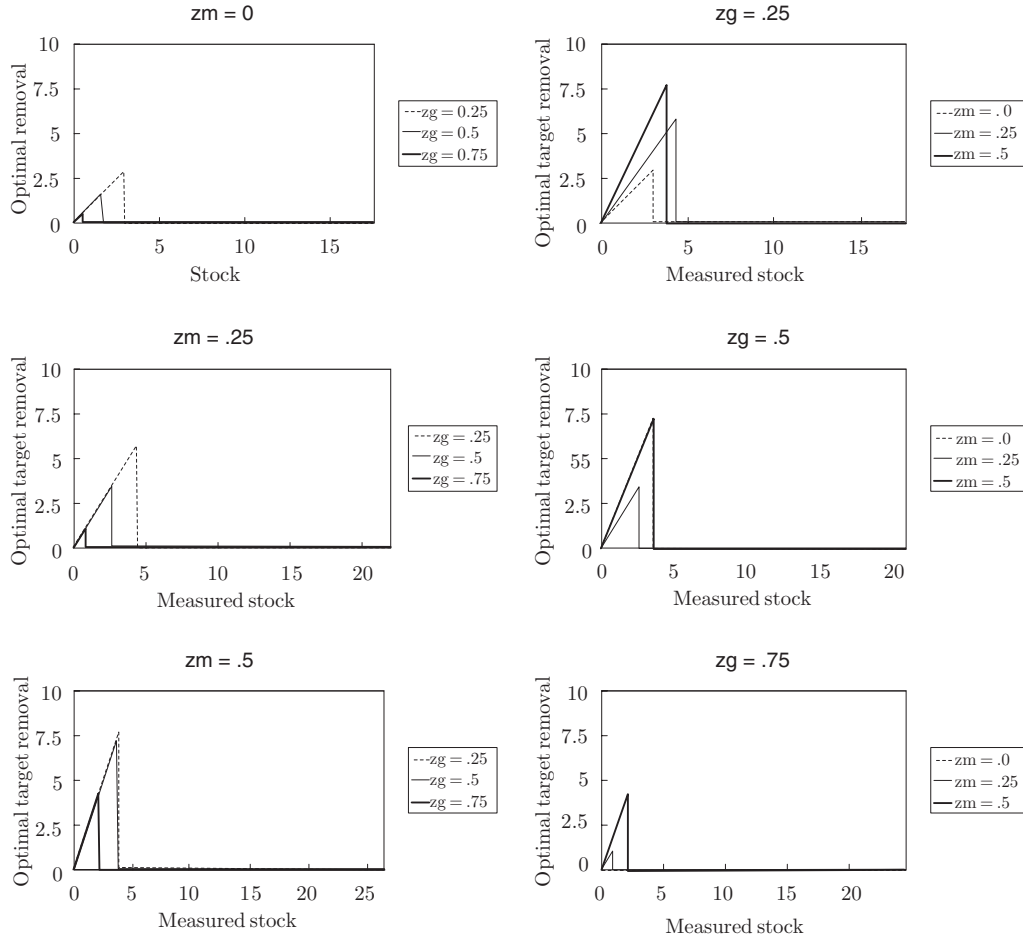
図6と図7の測定誤差が存在する場合のパネルに着目すると、どのような比較基準を適用しても、測定誤差が存在するとき、過程誤差のみの場合で示されたような Skiba point に関する明瞭なパターンは見受けられない。図6と図7は、測定誤差の程度  $z_m$  が Skiba point の位置に影響を与えていることを示している。しかし、その影響に関してシステマティックなパターンは見受けられず、唯一、傾向があるとすれば、測定誤差の程度が大きい場合、過程誤差の程度の変化に対する Skiba point の位置の変化が鈍化していることくらいであろう。

## 5 不確実性の評価関数への影響

このセクションでは、不確実性下での動学モデルで定義された評価関数  $v(m_t)$ 、即ち、政策決定

図7 サブケース（根絶戦略の場合）：

過程誤差と測定誤差の存在下での最適捕獲戦略 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]



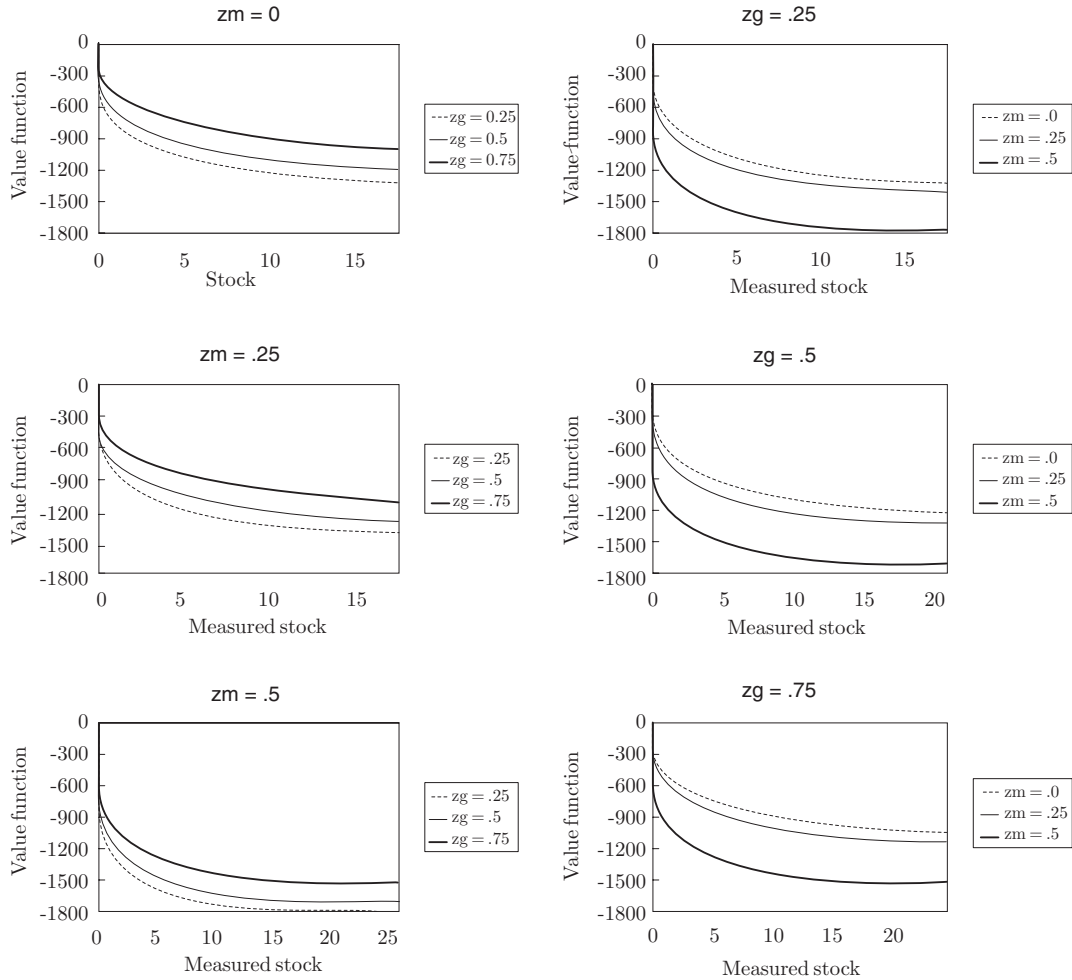
者が最適戦略を実行し続けた際に獲得する長期的社会厚生 of 現在価値が各々の誤差によってどのような影響を受けるのかを考察する。前セクションと同様に、決定論で取り残し一定戦略が最適の場合と根絶戦略が最適の場合の二つに場合分けし、結果を提示する。

### 5.1 取り残し一定戦略の場合

決定論で取り残し一定戦略が最適の場合を考察する。図8と図9は、順にベースケースとサブケースの結果を提示している。双方の図を見比べた時、評価関数と各々の誤差の関係性について、明快なパターンが見受けられる。はじめに、図8と図9の左側三パネルは、測定誤差の程度を固定し、過程誤差の程度を動かしたときの評価関数への影響を描写している。共通点は、過程誤差の程度が大きくなるにつれ、評価関数が上方にシフトしていることである。これは、過程誤差の程度が大き

図 8 ベースケース（取り残し一定戦略の場合）：

評価関数 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]

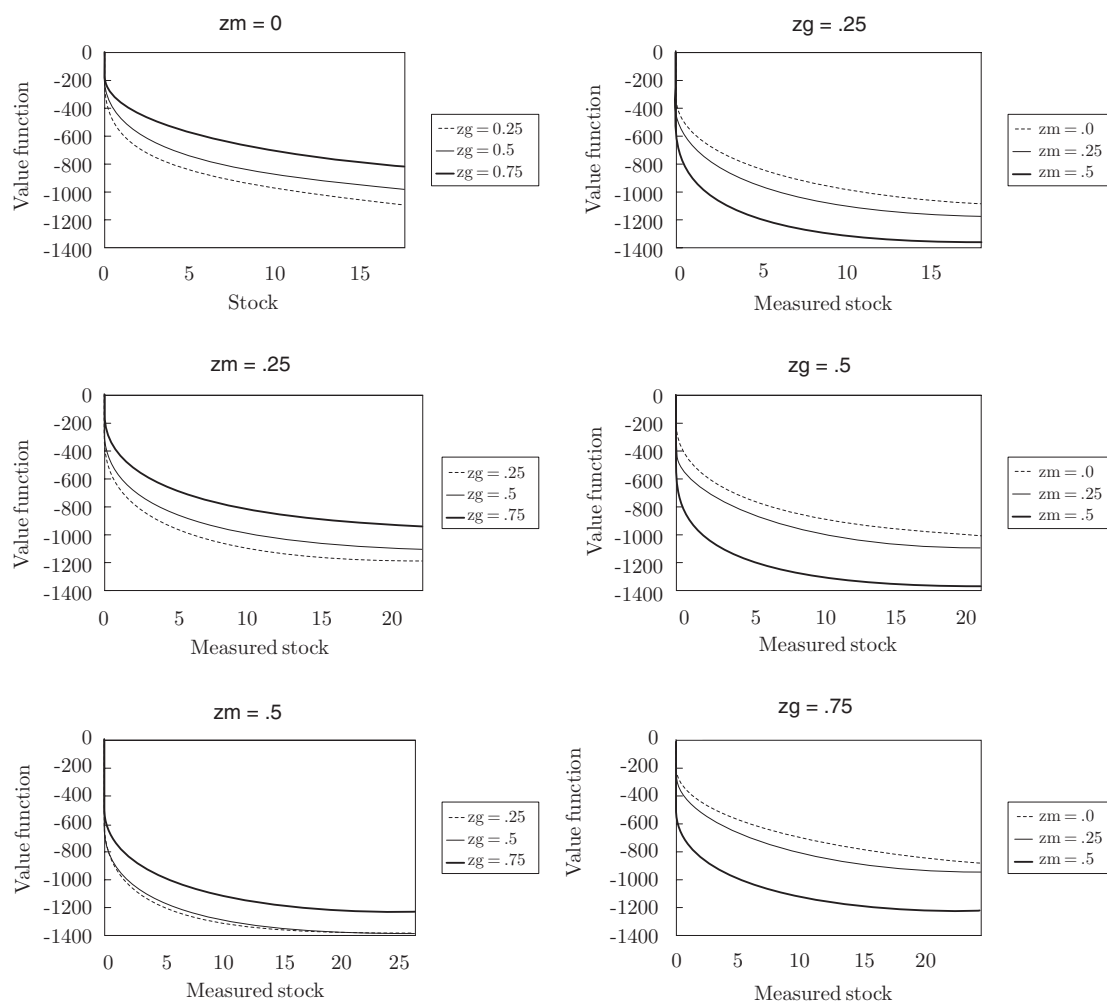


いほど、最適戦略に伴う社会費用の期待値を低くすることが可能なことを意味している。

**結果 5.1**（過程誤差の評価関数への影響：取り残し一定戦略の場合）過程誤差の程度  $z_g$  の増加は、評価関数へ正の影響を与える。

次に、図 8 と図 9 の右側三パネルは、過程誤差の程度  $z_g$  を固定し、測定誤差の程度を動かしたときの評価関数への影響を表している。共通した定性的結果は、測定誤差の程度が大きくなるにつれ、評価関数が下方にシフトしている点である。これは、直感的な理解とも一致する。つまり、現在の個体数推定値の誤りが大きければ大きいほど、如何に政策管理者がその誤差に基づいて最適戦

図9 サブケース（取り残し一定戦略の場合）：  
評価関数 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]



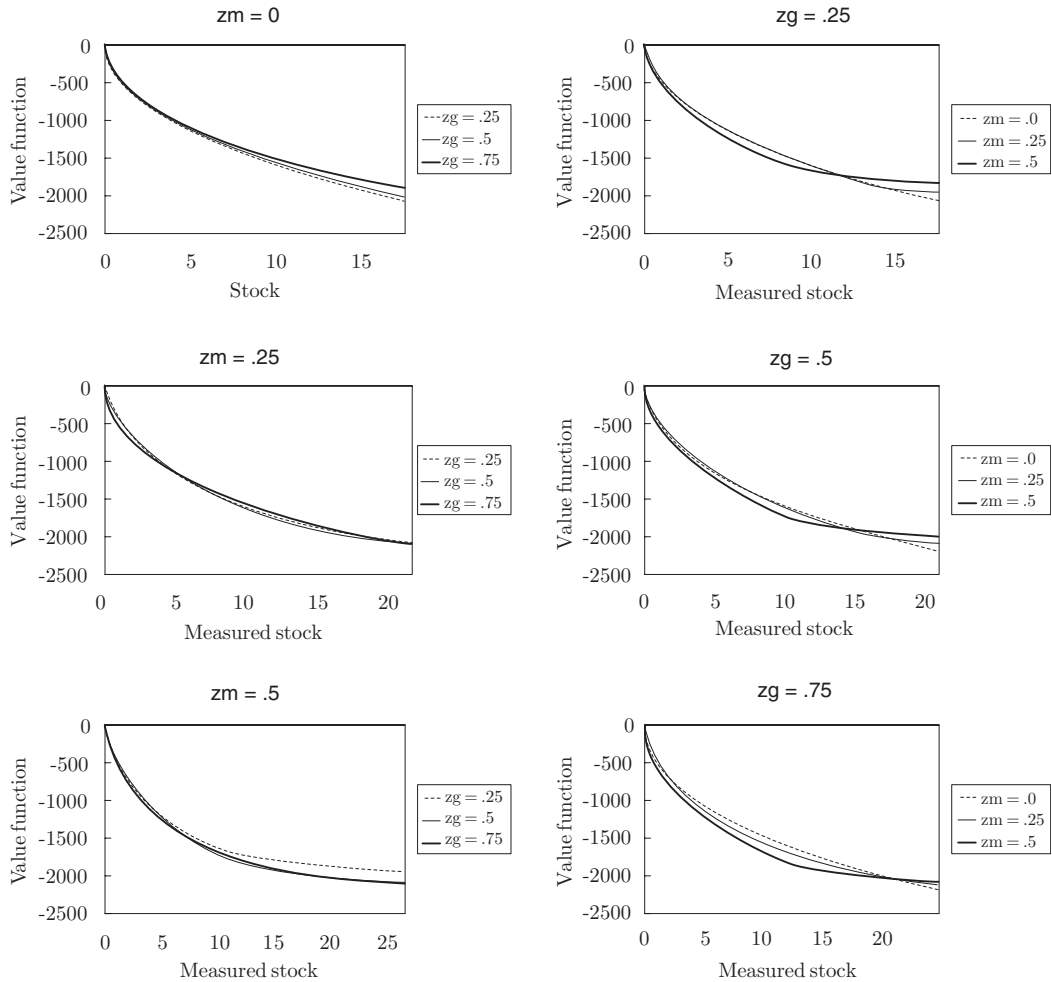
略を実行しても、そこから得られる社会損失の期待値は常に大きくならざるを得ないということである。この結果は、漁業管理問題において以前に示された Clark and Kirkwood (3) の結果と一致している。

**結果 5.2** （測定誤差の評価関数への影響：取り残し一定戦略の場合）測定誤差の程度  $z_m$  の増加は、評価関数へ負の影響を与える。

## 5.2 根絶戦略の場合

次に決定論で根絶戦略が最適である場合に着目する。ここでは、ベースケースについてのみの結

図 10 ベースケース（根絶戦略の場合）：  
評価関数 [Fix  $z_m$  (Left); Fix  $z_g$  (Right)]



果を提示する。その理由は、取り残し一定戦略が最適の場合に比して、明快な定性的結果が得られなかったためである。図 10 は各々の誤差の度合いが評価関数に与える影響を示している。左側三パネルは、測定誤差の程度を固定し、過程誤差の程度を動かした場合、また、右側三パネルは、逆に、過程誤差の程度を固定し、測定誤差の程度を動かした場合の結果を表している。

測定誤差が存在する場合、測定誤差と過程誤差が評価関数に与える影響は非常に複雑になる。図 10 は、誤差の程度を動かしても評価関数がシフトするのではなく、お互いにクロスしていることを示している。つまり、各々の誤差が社会的損失の現在価値を上昇させるのかどうかを判断することは、一般的に困難であることを意味している。

但し、測定誤差が存在しない ( $z_m = 0$ ) の場合は、過程誤差の程度が大きくなると、評価関数は上



方にシフトすることが分かった。しかし、一旦、測定誤差が存在すると、このような明快なパターンは全く見受けられず、評価関数同士が複雑に交差する場合が殆どであった。故に、結論として、根絶を目指す状況では、各々の誤差が評価関数に正の影響を与えるか否かについての判断は困難である。

## 6 討論

本稿は、過程誤差と測定誤差という二つの不確実性を考慮した外来種管理の離散時間動学モデルを構築し分析した。前述の結果は、解析的分析と数値計算実験に基づくものである。特に、測定誤差が存在すると、動的計画法・最適制御理論による解析の特徴付けは難しくなり、数値計算実験が唯一の分析手法であることに留意すべきである。故に、特殊な関数や分布を用いれば、我等が提示した数値計算実験とは反対の結果が出てくる可能性も否定できない。しかし、我々は、再生可能資源管理で一般的である自己増殖関数や社会損失関数、またパラメータの値も幅広く動かす事により、本稿で提示した結果の頑健性も確認してある。

外来種管理は、近年注目され始めた問題であるが故に、その重要性にも関わらず、経済分析や管理手法は未だ十分に解析されていない。特に、複数の不確実性に着目し、捕獲管理戦略について議論をした論文は、本稿が初めてであろう。特に我々が取り上げた測定誤差は、殆どの外来種管理では共通の特徴であるものの、その最適管理戦略への影響は分析されていなかった。本稿では、測定誤差はマルコフ性を満たし、かつ政策決定者も今期の個体数推定値にのみに基づいてアクションを決定するという仮定を置き数理モデルを構築した。将来の研究課題は、この仮定をより現実に近い分析することであろう。多くの資源管理では、過去の推定値に基づき現存個体数の推定値を決定している可能性がある。この場合カルマンフィルターの手法が必要になる。つまり、最適なフィルターデザインとは何か、という課題である。そして、そのフィルターに基づいた最適戦略を導出することは、現実の資源管理にとって、有益な示唆を与えるものと信じている。

(横浜国立大学大学院環境情報研究院, 日本学術振興会特別研究員)

(国際大学大学院国際関係学研究科講師)

(横浜国立大学大学院環境情報研究院教授)

## 謝 辞

2007年3月に開催された慶應経済学会コンファレンス「環境経済学の新展開」において発表の機会を与えて頂き、かつ貴重なコメントをくださった細田衛士と大沼あゆみの各氏、さらに、2007年日本経済学会春季大会において有益なコメントをくださった赤尾健一氏及びセッション参加者に感謝します。また、本研究は、日本学術振興会特別研究奨励費(課題番号:1807056, 小谷浩示)「順応的資源管理におけるリアルオプションと最適制御による経済分析」、及び科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号:19530221, 代表者:柿中真)「不確実性下の順応的資源管理:理論と実際」からの援助を受けており、ここに感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- [1] M. Bomford and P. O'Brien. Eradication or control for vertebrate pests. *Wildlife society bulletin*, Vol. 23, pp. 249–255, 1995.
- [2] Colin W. Clark. *Mathematical bioeconomics*. John Wiley and Sons, Inc., 2 edition, 1990.
- [3] Colin W. Clark and Geoffrey P. Kirkwood. On uncertain renewable resource stocks: Optimal harvest policies and the value of stock surveys. *Journal of environmental economics and management*, Vol. 13, pp. 235–244, 1986.
- [4] Mark E. Eisewerth and Wayne S. Johnson. Managing nonindigenous invasive species: Insights from dynamic analysis. *Environmental and resource economics*, Vol. 23, No. 3, pp. 319–342, 2002.
- [5] Mark E. Eisewerth and G. Cornelis van Kooten. Uncertainty, economics, and the spread of an invasive plant species. *American journal of agricultural economics*, Vol. 84, No. 5, pp. 1317–1322, 2002.
- [6] Kenneth L. Judd. *Numerical methods in economics*. MIT Press, 1998.
- [7] Koji Kotani, Makoto Kakinaka, and Hiroyuki Matsuda. Dynamic economic analysis on invasive species management: Some policy implications of catchability. GSIR Working Papers: Economic Analysis and Policy Series EAP06-2, International University of Japan, 2006.
- [8] Koji Kotani, Makoto Kakinaka, and Hiroyuki Matsuda. Optimal escapement levels on renewable resource management under process uncertainty: Some implications of convex unit harvest cost. Working Paper, Yokohama National University, 2007.
- [9] Craig Loehle. Control theory and the management of ecosystems. *Journal of applied ecology*, Vol. 43, pp. 957–966, 2006.
- [10] Erling Moxnes. Uncertain measurements of renewable resources: Approximations, harvesting policies and value of accuracy. *Journal of environmental economics and management*, Vol. 45, pp. 85–108, 2003.
- [11] Judith H. Myers, Anne Savoie, and Ed van Randen. Eradication and pest management. *Annual review of entomology*, Vol. 43, pp. 471–491, 1998.
- [12] Lars J. Olson and Santanu Roy. The economics of controlling a stochastic biological invasion. *American journal of agricultural economics*, Vol. 84, No. 5, pp. 1311–1316, 2002.
- [13] Lars J. Olson and Santanu Roy. Controlling a biological invasion: A non-classical dynamic economic model. Working Paper, 2004.
- [14] Charles Perrings, Mark Williamson, and Silvana Dalmazzone. *The economics of biological invasions*. Edward Elgar, 2000.
- [15] David Pimentel, Rodlfo Zuniga, and Doug Morrison. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological economics*, Vol. 52, pp. 273–288, 2005.
- [16] William J. Reed. Optimal escapement levels in stochastic and deterministic harvesting models. *Journal of environmental economics and management*, Vol. 6, pp. 350–363, 1979.
- [17] J. Roughgarden and F. Smith. Why fisheries collapse and what to do about it? *Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 93, No. 10, pp. 5078–5083, 1996.
- [18] Gautam Sethi, Christopher Costello, Anthony Fisher, Michael Hanemann, and Lary Karp. Fishery management under multiple uncertainty. *Journal of environmental economics and management*, Vol. 50, pp. 300–318, 2005.

- [19] Daniel Simberloff. Today tiritiri matangi, tomorrow the world! Are we aiming too low in invasion control? In Mick N. Clout and C. R. Veitch, editors, *Turning the tide: The eradication of invasive species*, pp. 4–12, 2002.