

特集：作物保護と生物多様性

生物多様性を踏まえた有害生物の順応的リスク管理

横浜国立大学環境情報学研究院 松 田 裕 之

I 水産学における MSY 理論との決別

順応的管理やリスク管理という用語は最近ようやく定着してきたが、順応的リスク管理という用語は、まだ日本ではなじみが薄い。生態系が不確実性をもつということは古くから知られているが、農林水産業における管理理論はそれに十分対応していなかった。その典型例として、まず、水産学における最大持続漁獲量 (Maximum sustainable yield, MSY) 理論から順応的リスク管理への「進化」の様子と、現時点での問題点を紹介する。

野生生物の資源量 (個体数) が世代 (または時間) とともに $N_{t+1} = N_t \exp[r(1 - N_t/K) - F_t]$ のように変化すると仮定する。ここで N_t と F_t はそれぞれ t 年目のある生物の個体数と捕獲率 (漁獲死亡係数)、 r と K はそれぞれ内的自然増加率と環境収容力を表す。捕獲数 C_t は漁期と繁殖期の関係によって異なるが、繁殖期の後に漁獲されるとすれば、 $C_t = N_t \exp[r(1 - N_t/K)](1 - \exp[-F_t])$ と表される。 $F_t = 0$ かつ $r < 2$ ならロジスティック方程式と同じく、個体数はやがて K に漸近する。捕獲率が $F_t = F$ と一定のとき、平衡個体数 N^* は $N^* = K(1 - F/r)$ となり、 $F > r$ のときに資源は枯渇する。持続可能な漁獲量を最大にする捕獲率 F は $e^F(1 + F - r) = 1$ の解であり、解析的には求められないが、例えば $r = 1$, $K = 1,000$ のとき、図-1 のような関係が得られ、MSY は $F = 0.561$ のときに $C = 336$ となる。

MSY 理論は、水産学の教科書なら必ず載っている古典である (クラーク, 1988)。通常は連続時間の微分方程式を用いるが、本稿では害虫の個体群動態でよく使われる離散時間のリッカー方程式を用いた。持続可能な漁業は資源を長期的に有効利用するための方途であり、乱獲を避けることが保障される。

しかし、MSY 理論にもかかわらず、漁業の乱獲問題は深刻である (HANNESSON, 1996)。水産学の教科書では、乱獲をもたらす理由を二つ挙げている。一つは持続可能な漁業を行ったときに将来得られる利得は、経済学的には割り引いて評価されるため、乱獲による目先の利益よ

り低く評価されるからである。もう一つは、共有資源 (コモンズ) を利用するため、自分が自制しても他者が乱獲すれば、目先の利益は相手に奪われ、将来の持続可能性はともに失い、裏切り者が得をするからである (松田, 2000)。

だが、最近になってより根本的な問題点が指摘されるようになった。MSY 理論は資源量と再生産関係 (図-1 で用いた関数形など) が正確にわかっていること、環境変動などがなく一定の漁獲圧をかけ続ければ定常状態に漸近すること、他種との種間関係を無視できることを前提として成り立っている。しかし、生態系は不確実であり、非定常であり、複雑である。MSY 理論はこれら生態系の特徴を踏まえていない。乱獲は、資源量減少幅の過小評価、資源回復力の過大評価、楽観的な環境予測などによって起こる。

図-2 は、ある水産資源の資源管理効果を示したものである。このように、ある条件設定に対して一通りの未来を描いていた。これでは漁業者を説得することは難しい。彼らは資源が滑らかに回復しないことをよく知っている。

近年では、水産資源管理の数値モデルには様々な不確実性を考慮するようになっている。一つは資源量推定、再生産関係のパラメータ推定などにかかわる推定誤差である。もう一つは、海況などにより再生産率 (特に、初期死亡率) が異なるという過程誤差 (process error) である。さらに、漁獲割当量や努力量などの管理自体が合

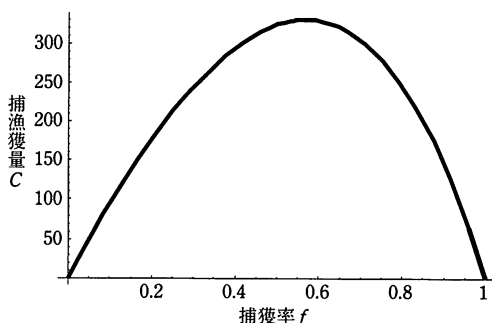


図-1 捕獲率 F と平衡状態での漁獲量 C との関係 ($r = 1$, $K = 1,000$ のとき)

意した通りに実施されないという実行誤差 (operational error) を考慮することもある。国際捕鯨委員会やマグロ類の国際管理組織では、計算機上に架空の個体群、漁獲物等のデータを作り、資源量を現実と同様に推定して管理方針を決める仮想現実モデル (operating model) によって、誤差を詳細に検討している (松田, 2004)。

このように、不確実性と非定常性を考慮した管理モデルは確率モデルになり、一通りの未来を描くことはない。その結果、ある管理目標を必ず達成できると予測できることはまれで、管理に失敗するリスクが生じる。したがって、資源管理は必然的にリスク管理になる (浦野・松田, 2007)。図-3 にその一例を示す。縦軸が資源量ではなく、資源が100万トン以上に回復する確率を示している点に注意してほしい。マサバのような浮魚類の場合、数年に一度、初期生存率が高くて当歳魚が大量に漁場に来遊する「卓越年級群」が出現する。これが頻繁

にあれば資源は回復しやすく、来なければ回復しない。卓越年級群の発生頻度は時代によっても異なるが、事前に予測できない。浮魚資源の主要な過程誤差は、このように初期生存率の年変動である。

このように、不確実性を考慮してリスク管理を行うことが水産資源管理においては重要である。しかし、一定の捕獲率を維持しては、採算性と環境保全を両立させることはほとんど不可能である。これを解決するのが、順応的管理と呼ばれる方法である。水産資源管理でも順応的管理は推奨されているが、次章で鹿 (野生鳥獣管理) の例で紹介する。

もう一つ、MSY 理論を多種系にあてはめた場合、種の存続を保証するとは言えない。図-4 は架空の食物網モデルによる、食物網全体から得られる漁獲高を最大にする解を求めたものである。図-4 (a) の例では6種が共存しているが、図-4 (b) の例では種4を絶滅させて

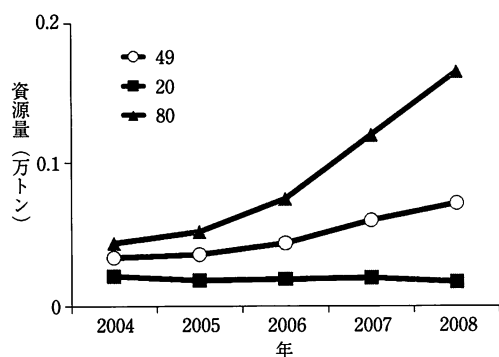


図-2 ある水産資源の2003年の合意形成過程で提出されたグラフ
再生産力に関する三つのシナリオごとに、資源量変化の将来予測がそれぞれ一つの値で示されている。

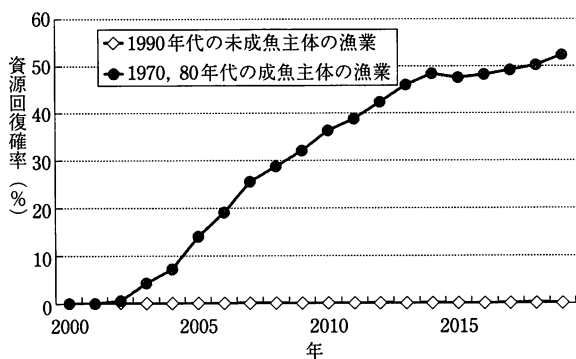


図-3 マサバ太平洋系群の資源回復確率 (KAWAI et al., 2002より改変)
1970, 80年代のように成魚中心に獲った場合と1990年代のように未成魚中心に獲った場合の将来予測。

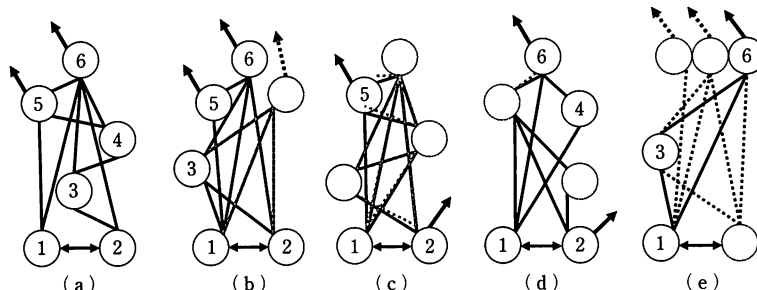


図-4 5種類の架空の6種系における食物網全体から得られる持続可能な漁獲高を最大にする解

1～6は種を表し、種間をつなぐ線は捕食関係があることを示す。矢印はその種が利用されていることを示し、数字のない○と点線はその種がMSY状態では絶滅していることを表す (MATSUDA and ABRAMS, 2006より改変)。

種5と6を利用する状態がMSYになる。1種しかない資源動態モデルを考えれば、その種を枯渇させては持続的な利用ができないためMSYが種の存続を保証することは自明である。しかし、多くの種がある食物網で、すべての種を存続させることが、最大の持続的漁獲高を達成するとは限らない。1,000組程度の食物網を無作為に作った結果、6種が共存できた例は1%以下だったという。すなわち、多種系を考えれば、MSY理論は種の共存を保障するものではない。

II シカと農業の共存

古来、人と野生鳥獣は共存してきた。「鹿脅し(ししおどし)」という風物もあり、昔から獣害はある程度人を悩ませていた(湯本・松田, 2005)。田畑や林に近寄らないようにするとともに、鳥獣を捕獲することで、被害を減らしてきたといえる。現在では、捕獲という選択肢を避ける世論があり、猟師の高齢化により駆除態勢が整わなくなりつつある。また、森林を伐採してニホンジカの餌となる草地を増やし、林道を張り巡らして移動しやすくし、かつては放し飼いの犬と猟師を警戒していたシカも、のびのびと採食し、移動し、繁殖するようになった。エゾシカの個体数と分布面積は1世紀前を凌ぐといわれている(図-5)。

北海道では、1998年から順応的管理に相当する密度依存的な捕獲率を実施している(表-1)。これは前章で紹介した水産資源の順応的管理を模したものである。水産では資源量指数に応じてきめ細かく捕獲率や漁獲可能量を定めるが、表-1では4段階に分けた大まかな措置のみを管理計画の中で定め、実際の努力量は毎年の検討会や地域協議会によって決めている。

要は、目標とする個体数指数と許される変動幅を定め、個体数を毎年監視し、目標水準より高ければ減ら

し、低ければ増やすように捕獲率を調節する。数理モデルでは、表-1のような管理を行った場合、大発生水準を解消した後は、個体数指数を5~50%に維持することができ、100年後までこの変動幅に収める確率がほぼ95%にできると試算している。明治時代のように豪雪が来て大量死が起きることも想定されるので、失敗するリスクを0にすることはできないが、十分低く抑えることができるように管理計画が設計されている。すなわち、エゾシカ管理計画は、順応的リスク管理の例である。

この管理計画で注目すべきは、方針の分岐点である個体数水準を、個体数の絶対値ではなく1993年の個体数を100%とした相対値で表したことである。初め、行政の抵抗は強かった。当時、北海道の行政文書では1993年度末の個体数を12±4.6万頭(90%信頼区間)と推定していた。しかし、我々が個体群動態モデル(MATSUDA et al., 1999)を用いて計算したところ、その後の雄の捕獲数が年間3万頭程度に達していることが説明できず、この推定値は過小推定であると考えた。将来絶対数が見直されることを想定したが、例えば目標頭数を3万頭に設定すると、実際に20万頭いた場合にはかなり減らさなくてはならない。野生鳥獣の個体数はしばしば過小評価されるが、相対的な増減は把握しやすく、相対値で管理するほうが頑健である。

はたして2000年には、北海道は我々が個体数推定の論文(MATSUDA et al., 2002)を出すより早く、行政文書で12万頭説から20万頭説に修正した。

図-6に示したように、1998年に道東地区で緊急減少措置を発動してから、2000年にかけて個体数を減らすことに成功した。しかし、個体数の総数は予想した20万頭より多いと見られ、その後は減らし続けることができず緊急減少措置が続いている。その間に、西部の個体群が増え始め、今では東部に劣らぬ個体数に増えていると見られる。我々は、限られた狩猟者を東西両方に配分しなければならなかった。

減り止った原因として、シカの狩猟者への警戒心が強

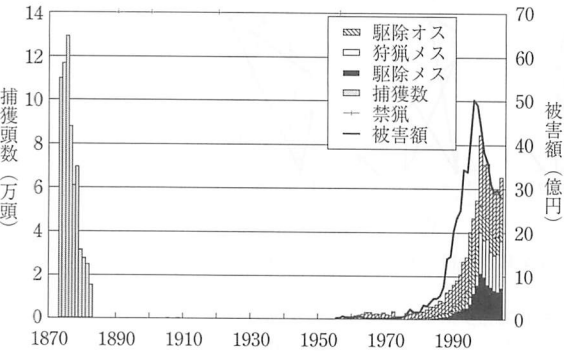


図-5 北海道のシカ捕獲統計(湯本・松田, 2005より)

表-1 エゾシカ保護管理計画(道東)の捕獲率(松田, 2000より改変)

個体数指数	措置(方策)	備考
大発生水準(50%)以上	緊急減少措置	早期決着が鍵
目標水準(25%)以上	漸減措置	雌主体の捕獲
目標水準(25%)以下	漸増措置	雄主体の捕獲
		雌は禁猟
許容下限水準(5%)以下	禁猟措置	性比の偏り過ぎも
または豪雪翌年		避ける

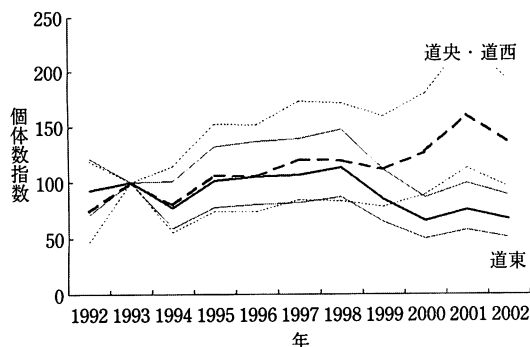


図-6 北海道東部と西部のエゾシカ個体数指数の年次変化の推定値 (YAMAMURA et al, 投稿中より改変)

まったこと、国有林が禁猟のためにシカが逃げ込んでいることが指摘されている。数年前から強く申し入れた結果、2006年度猟期から日曜日に限り国有林でも狩猟できるようになった。

エゾシカの自然増加率は年15%とも20%とも言われている。雄は100 kgを超える大型獣でありながら、1.5歳で成熟し、2歳から毎年1頭ずつ出産するという。成獣の自然死亡はほとんどない。シカを害獣とみなすとその駆除には膨大な費用がかかるが、シカは明治時代は肉や皮や角が利用されていたことから資源として考えれば、自然増加率の高い極めて理想的な種である。北海道ではシカを資源とみなし、有効利用を促進しているが、ほとんどの府県ではシカを害獣とみなしている。表-1の許容下限水準はエゾシカが絶滅危惧種に指定されないように定めているが、2009年のエゾシカ保護管理計画の改定案では安定した捕獲数を確保するために下限水準を引き上げ、個体数指数が25%から50%の間で維持することを目指そうとしている。

III 害虫生態系における順応的リスク管理の可能性

害虫管理については不勉強だが、殺虫剤、天敵等様々な対策を総合的に駆使する工夫がなされていると聞く。順応的リスク管理の文脈に照らせば、継続監視によって得られた状態に応じていくつかの防除手段を使い分けることによって、害虫大発生などのリスクを減らすことができれば、順応的リスク管理と呼ぶことができる。

順応的管理が、よく生態系管理とセットで推奨されている点には注意が必要である。順応的管理が不確実性と非定常性に対して頑健であることは理論的に支持されているが、種間相互作用のある複雑系に対して頑健である

かどうかは誰も確かめていない。

簡単な例を示す (MATSUDA and ABRAMS, 印刷中)。被食者 R と捕食者 P の系で、被食者を捕獲する場合を考える。個体数変動の数理モデルは

$$\frac{dR}{dt} = (r - aR - bP - f)R$$

$$\frac{dP}{dt} = (-d + bR)N$$

ただし r と d はそれぞれ被食者の内的自然増加率と捕食者の死亡率、 a 、 b は正の定数、 f は捕獲率を表す。単位時間当たりの捕獲量 C は $C = fR$ であり、 $f = 0$ ならよく知られたロトカ・ヴォルテラ方程式である。

通常の順応的管理では、捕獲対象種 (被食者) の資源量に基づいて捕獲率を調整する。しかし、上記の被食者・捕食者系の定常状態は $R = d/b$ 、 $P = (r - f - ad/b)/b$ であり、捕獲率 f を調整しても被食者個体数は変わらない。捕獲率 f が $(r - ad/b)$ より大きければ、捕獲対象の被食者ではなく捕食者が絶滅する。この系では、被食者を利用して減るのは被食者自身ではなく、それを利用している捕食者である。

この系の場合には、被食者でなく、捕食者の個体数に基づいて捕獲率を調整すれば、生態系を壊さない管理が可能となるだろう。したがって、順応的管理は生態系管理においても有効といえるかもしれない。そのためには、生態系の何をベンチマークとし、それらの状態に応じてどんな方策を表-1のように事前に準備するかが、順応的生態系管理の鍵になる。利用対象種だけを見て方策を調節しても、生態系全体を守ることはできない。

すなわち、順応的管理は万能ではない。結局は、当該生態系についての理解を深め、適切な管理計画を立てなければ管理は成功しない。これは当然のことであるが、順応的リスク管理が頑健であることを理論的に示すことができているのは、筆者の知る限り個体群管理だけといってもよい。生態系の状態が1変数で表すことができればよいが、上記のように2変数 (2種) になった途端に管理方法に工夫が必要になる。

それでも、状態に応じて方策を変える順応的管理は、その方策転換が適切なものであれば、管理が失敗するリスクを減らすうえで有効だろう。そのためには、順応的生態系管理の実績を積み重ねる必要がある。現時点では、スローガンだけが先行している。個体群管理においてさえ、国際捕鯨委員会では科学委員会がまとめた改定管理方式が実施に至らず、マグロの国際管理でも漁獲量の過少申告問題などが生じている。

研究者の生態系への理解を反映した管理計画を作ることができるなら、その成否は研究者の責任である。幸いエゾシカ保護管理計画では、我々研究者の管理計画骨子

を行政はほぼそのままに受け入れて実施している。まだ成功しているとは言えないが、いったん個体数を減らしたことの意義は大きい。シカが警戒して撃たれにくくなるということは事前に予想していたことであり、だからこそ思い切って捕獲努力量をあげて早期解決を図った。それに失敗した時点で次の手を考えねばならないのは、実社会の常である。

生態系は複雑である。個体群管理でさえ、理論的にうまくいくはずの管理でも、実際にそうなるとは限らない。しかし、常に状態を監視し続け、状態変化に応じて方策を変える準備をしておくという順応的管理の発想と、一通りの未来を予測せずに、様々な事態を想定してその対策を事前に準備するというリスク管理の発想は、野生生物管理を行ううえで必須のことである。行政の対応は、しばしば希望的観測だけを述べる「だろう」運転になりがちである。自動車の運転に例えれば、「かもしれない」運転が必要なのである(松田・西川, 2007)。

引用文献

- 1) C. W. クラーク (1988): 生物資源管理論, 田中昌一監訳, 恒星社厚生閣, 東京, p. 149 ~ 153.
- 2) HANNESON, R. (1996): Fisheries Mismanagement: The Case of the North Atlantic Cod., Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 160.
- 3) KAWAI, H. et al. (2002): Fish. Sci. 68: 961 ~ 969.
- 4) 松田裕之 (2000): 環境生態学序説, 共立出版, 東京, 211 pp.
- 5) ——— (2004): ゼロからわかる生態学, 環境, 進化, 持続可能性の科学, 共立出版, 東京, 252 pp.
- 6) ———・西川伸吾 (2007): 日本ベントス学会誌 62: 93 ~ 97.
- 7) MATSUDA, H. and P. A. ABRAMS (in press): American Fishereis Society, Proceedings of the 4th World Fisheries Congress.
- 8) ——— et al. (1999): Researches on Population Ecology 41: 139 ~ 149.
- 9) ——— et al. (2002): Wildlife Society Bulletin 30: 1160 ~ 1171.
- 10) ——— and P. A. ABRAMS (2006): Ecol Appl. 16: 225 ~ 237.
- 11) 浦野紘平・松田 裕編著 (2007): 生態環境リスクマネジメント, オーム社, 東京, p. 1 ~ 209.
- 12) 湯本貴和・松田裕之編 (2005): 世界遺産をシカが喰う—シカと森の生態学, 文一総合出版, 東京, p. 65 ~ 82.

(新しく登録された農薬 33 ページからの続き)

かんきつ: そうか病, 黒点病, 灰色かび病, 褐色腐敗病, 黄斑病, そばかす病: 収穫 14 日前まで
りんご: 炭疽病, 黒点病, 黒星病, うどんこ病, モニリア病, 斑点落葉病, 赤星病, 輪紋病, すず点病, すず斑病, 褐斑病: 収穫前日まで
なし: 輪紋病, 黒斑病, うどんこ病, 黒星病, 炭疽病: 収穫前日まで
もも: 黒星病, うどんこ病, 灰星病, 縮葉病 (休眠期), 黒斑病: 収穫前日まで
ネクタリン: 黒星病, うどんこ病, 灰星病, 縮葉病 (休眠期), 黒斑病: 収穫前日まで
うめ: 黒星病, うどんこ病, 灰色かび病, すず斑病: 収穫 7 日前まで
小粒核果類: 環紋葉枯病: 収穫 7 日前まで
ぶどう: 黒とう病, ベと病, 枝膨病, 晩腐病, 灰色かび病, 褐斑病, うどんこ病, さび病: 収穫 14 日前まで
かき: うどんこ病, 落葉病, 炭疽病, 灰色かび病: 収穫 14 日前まで
キウイフルーツ: 灰色かび病, 貯蔵病害 (灰色かび病): 収穫前日まで
あけび (果実): うどんこ病: 収穫 7 日前まで
すもも: 炭疽病: 収穫 7 日前まで
ブルーベリー: 斑点病: 収穫 14 日前まで
さんしょう (果実): さび病: 収穫 14 日前まで
マンゴー: 炭疽病: 収穫前日まで
バナナ: 黒星病: 収穫 21 日前まで

「除草剤」

● **オキサジクロメホン・ベンスルフロンメチル・ベンゾビシクロン粒剤**
 22007: ホクコーブワスワン 1 キロ粒剤 51 (北興化学工業) 07/09/19
 22008: プラスワン 1 キロ粒剤 51 (デュボン) 07/09/19
 オキサジクロメホン: 0.80%, ベンスルフロンメチル: 0.51%, ベンゾビシクロン: 2.0%
移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ, ミズガヤツリ, ヒルムシロ, セリ
 ● **オキサジクロメホン・ベンスルフロンメチル・ベンゾビシクロン水和剤**
 22005: ホクコープラスワン L フロアブル (北興化学工業) 07/09/19
 22006: プラスワン L フロアブル (デュボン) 07/09/19
 オキサジクロメホン: 1.2%, ベンスルフロンメチル: 1.0%, ベンゾビシクロン: 4.0%
移植水稻: 水田一年生雑草, マツバイ, ホタルイ, ウリカワ, ミズガヤツリ, ヒルムシロ, セリ (近畿・中国・四国)
 ● **フェンメディファム乳剤**
 22019: ベタナール乳剤 (北海三共) 07/09/19
 フェンメディファム: 14.7%
てんさい (移植栽培): 広葉雑草, イネ科雑草

「植物成長調整剤」

● **ダミノジッド水溶剤**
 22004: キクエモン (ファインアグロケミカルズ) 07/09/19
 ダミノジッド: 85.0%
きく (切花用): 節間の伸長抑制, 花首の伸長抑制
きく (ポットマム): 節間の伸長抑制