

## 個体群生態学は使い物になるのか？ — 昆虫生態学者が考えたミナミマグロの資源管理

黒田 啓行 (水産総合研究センター 遠洋水産研究所)

### 1 はじめに

自然界には不思議で、面白いことがたくさんあり、それらを研究する人たちがいる。一方では、社会からの要請に基づき、科学者として仕事をしている人たちもいる。個人的な話で恐縮だが、私は学生時代、サイカチマメゾウムシの個体群動態と休眠性の進化について研究してきた (黒田 2001)。その後、2001 年より現職場でミナミマグロの資源管理に関する業務 (?) を担当している。私自身の経験に基づけば、生物集団の動態を理解するという面で、両者に基本的な違いは感じられない。もちろん、研究対象や目的の違いによって、研究の際の問題点は異なってくるが、それは自然界を理解する上での共通の問題が異なる視点から提示されているに過ぎない。その意味では、生態学が社会からの要求にどの程度応えられているか、言い換えれば「使い物になるのか」という問題意識を持つことは、自らを厳しく評価することにつながり、同時に学問としての重要性を社会へアピールする一つの手段にもなるだろう。ここでは、みなみまぐろ保存委員会 (CCSBT) で現在進んでいる管理方式の開発の様子を紹介し、個体群生態学に関連する知見や技法が実際の資源管理の場でどの程度の成果をあげているのかを検討した上で、今後個体群生態学に何が必要なのかを考えてみたい。生物資源管理は人類の食糧問題にも直結する非常に重要な研究課題で、科学者としての社会的責任も大きい、それだけ挑戦しがいのあるテーマであることをまず初めに記しておきたい。

### 2 ミナミマグロ管理の難しいところ

石油資源などとは異なり、魚は生き物であるため、たとえ漁獲により個体数が減ったとしても、魚が繁殖することにより個体数は回復する。単純なロジスティックモデルによる個体群動態を仮定した場合、環境収容力の半分のレベルで個体群を維持すれば、最も多くの漁獲を持続

的に得ることが出来る (平松 2004a)。自然の水産資源はきちんと管理さえできれば、無理に餌を与えたり、稚魚を放流しなくても、魚が自然と“湧いてくる”のだ。まさに自然の恵みである。

しかし、残念ながら実際の漁業は乱獲に陥りやすい。その理由としては、自由競争がもたらす過当競争と経済的な割引率の問題が挙げられる (松田 2000)。短期的な利益を考えるなら、魚を取り控えるという行動を促す要因は少ない。しかし、1992 年の地球サミット (国連環境開発会議) や 1994 年の国連海洋法の発効を受け、このような乱獲を防ぎ、資源を持続的に利用していくために、資源管理を行う重要性が以前にも増して強調されている。

ミナミマグロ漁業は 1992 年よりみなみまぐろ保存委員会 (CCSBT) によって管理されている。現加盟国は、日本、オーストラリアを含む 5 カ国で、主要な漁業国がほとんど加盟している。漁業は 1950 年代に始まり、最盛期の 1960 年代初頭には 80000 トンもの漁獲があったが、資源状態の悪化を受け、1990 年代以降、実質的な漁獲量は約 15000 トンに押さえられている (魚住 2003)。しかし、現在漁獲高だけでも全世界で 800 億円近くあり、資源管理を行う上で雇用など経済的影響を無視するわけにはいかない。

CCSBT では、国別の漁獲量の上限、つまり漁獲可能量 (TAC) を設定することで、管理を行っている。この TAC を CCSBT 本委員会に勧告するのが、科学者 (CCSBT 科学委員会) の主要な役割である。なお、国内の TAC 対象魚種については、科学者が勧告するものは生物学的許容漁獲量 (ABC) と呼び、それを踏まえて漁業審議会が TAC を決定する。これまで CCSBT では TAC を勧告する際、ミナミマグロの資源量を推定し、近年の資源動向を把握した上で、簡単な将来予測を行い、管理目標と比較し、漁獲を現状より増やすか減らすかを考えて

きた（ちなみに、管理目標は現在見直し中である）。しかし、ミナミマグロの資源状態を把握することは実際には難しく、長年 TAC を合意できない状況が続いていた。私が考えるに、資源評価が難しい理由は以下の通りで、他の水産資源にも当てはまる所が多いだろう。

①分布や生活史に関する情報不足…漁業の実態から、ミナミマグロは南半球の温帯域、南緯 30 度から 50 度あたりに生息していると考えられている。しかし、水の中は見えない。そのため、分布域や回遊経路を把握するだけでも難しく、さらに生理寿命も 40 歳以上と長いと、昆虫のように個体群過程をつぶさに追いかけることは現実的には不可能である。マグロの生息は意外とわかっていない。

②漁業データに頼っている…分布域が広く、また調査費用にも限りがあるため、科学調査により漁業と独立したデータを集めることは難しい。そのため、資源解析に使えるデータのほとんどは漁獲量や CPUE（努力量あたりの漁獲量。資源量指数とも呼ばれる。）などの漁業データである。漁業データは大量にあるため、うまく使えば強力な情報源となるが、どこまで資源状態を反映しているのか定かではない。また操業が行われていない場所の情報は一切得られないという問題もある。ちなみにこの問題が発端となり、日本を含む加盟国間で国際裁判が争われたこともある（小松・遠藤 2002）。

③漁業の激しい変化…ミナミマグロ漁業は時代によって、大きく変化してきた。魚や環境の変化より、人間側の変化の方が大きいように感じる。ここ 10 年だけでも、畜養（養殖）の開始、台湾などの新規参入、魚価の下落など資源管理に大きな影響を与える出来事が次々と起こっている。当然、将来の動向を予測することも難しい。また漁法、漁獲対象年齢、操業場所などが加盟国間で異なることも問題を複雑にしている。

このようにミナミマグロの資源量推定や将来予測を行うのは、非常に難しく、不確実性はとても大きい。しかし、科学者に求められるのは、翌年の TAC を勧告することである。たとえ資源状態に対する現状認識が一致しても、TAC を数字で出す段階で、議論は進まなくな

る。ありふれたアドバイスで、お茶を濁す戦法は使えないのだ。ではこの科学的知見と社会の要求の大きなギャップをどう埋めていけばいいのか。次に、CCSBT 科学委員会でに行われている管理方式の開発プロジェクトについて紹介したい。

### 3 管理方式の開発プロジェクト

CCSBT 科学委員会では 2002 年より本格的に管理方式（Management Procedure、以下 MP）の開発が行われている（会議レポートは CCSBT の WEB ページ <http://www.ccsbt.org/> で公開されている；平松 2004b も参照）。MP とは、CCSBT の定義によれば、「TAC を決めるために事前に定められたルール」のことである。事前にルールを決めておけば、あとで揉める心配はない。MP と言えば、IWC（国際捕鯨委員会）の改訂管理方式（桜本 1998）が有名だが、現実に運用されている例は未だに少なく、CCSBT のプロジェクトへの注目度は高い。開発は加盟国の研究者と諮問パネルにより共同で行われているが、Ray Hilborn（ワシントン大学教授）などの著名な研究者達と一緒に仕事をするのは大変刺激的である。

開発作業の基本の流れは、「ミナミマグロ個体群動態を模倣した仮想現実モデル（Operating Model、以下 OM）を不確実性を十分に考慮した上で構築し、そのもとで複数の MP を比較し、種々の不確実性に対してより頑健な方策を選び出す」という極めて常識的なものである。資源や漁業に対する不確実性が大きいと、真実を把握することは難しいが、その真実が含まれているであろう範囲を絞り出し、それら全てに対してうまく管理できる MP を事前に作っておけば、真実がわからなくても管理は出来る。つまり「結果オーライ」の発想である。そのためコンピュータの中に、仮想ミナミマグロ個体群を作りあげ、その中で仮想漁業を行うという計算機実験を繰り返す。その中で MP は OM から提供される CPUE データや漁獲物の年齢構成データなどから翌年の TAC を導き出す。OM は科学委員会共同で制作され、MP は各自が開発した上で、コンテストが行われた。

OM を構築するために、まず魚の年齢構成と漁業の影響を考慮した個体群動態モデル（年齢構

成モデル) が作られた。このモデルには再生産(親子)関係のプロセス誤差や CPUE の観測誤差、また漁業の時間変化なども取り込まれている。ミナミマグロの実情に合わせたかなり詳細なモデルである。次に過去のミナミマグロデータを用いて、動態モデルの各パラメータを最尤法により推定する。ここで言う過去のデータとは、漁獲量や漁獲物の年齢構成、CPUE データなどである。当然、全ての情報が同じ結果を示唆するものではなく、各情報の信頼性に応じて、尤度関数における重みを決める。この重み付けはある程度、研究者の主観に依る場合も多い。またいくつかのパラメータに関しては、事前分布を考慮するなど、ベイズ統計のアイデアも取り込まれている。

不確実性には多くの要因があるが、その一つはパラメータの推定誤差である。当初は MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロ) 法でその大きさを推定していたのだが、モデルが若干不安定で計算時間がかかりすぎるという理由で(通常、短期間の会議中に多くのランを試さなければならない)、現在はもう少し簡略化した代替の手法が用いられている。最終的には、再生産関係や自然死亡率、CPUE の信頼性など、重要な要因について、推定誤差などを考慮し、2000 の繰り返しから成る OM が作られた。将来予測は加入量の変動や CPUE の観測誤差を考慮した上で、2032 年まで行う。寿命が 40 歳

を越える魚に対して、およそ 30 年間の将来予測は短すぎるかもしれないが、それより先の漁業形態を想像することは難しいという理由で、責任の持てる現実的な期間に設定されている。

図 1 は漁獲量一定 (10500 トン) の場合と CPUE 情報を利用した順応的管理の一つ (HK5; Hiramatsu et al. 2004) のもとでの漁獲量 (TAC) と資源量の将来予測の結果である。2022 年における資源量の中央値が同じになるように MP を調整しているため、その期間の漁獲量の平均値は実はほとんど差がない。しかし、漁獲量一定方策では資源状態が悪い場合でも、漁獲を変化させないため、資源の減少が止まらず、また反対に資源状態が良くても、漁獲を上げることができない。一方、HK5 はどちらの場合にも、漁獲を適切にコントロールできる。HK5 のほうが良さそうだ。

実際 MP を選択する際、次の観点から性能が検討された。漁獲の最大化、資源の安全性、漁獲の安定性の 3 つである。前者二つは当然だが、現実の管理を考える上で、漁獲の安定性も重要な要因である。TAC が毎年変動すると、設備投資の問題など漁業者への負担が大きい。図 1 で漁獲の変化が 3 年毎なもの、それを意識した結果である。議論を進めていくうちに明確になったのは、上記 3 点を全て同時に満たす MP を作るの難しいということである。どこかにトレードオフが生じてしまうため、どの要素を重

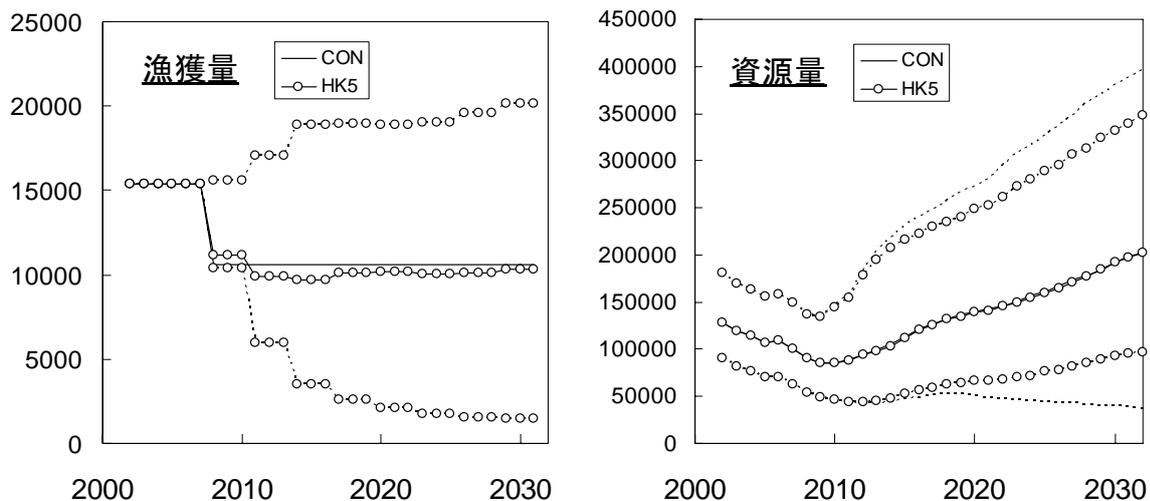


図 1 漁獲量一定方策 (CON) と順応的管理の一つ (HK5) の将来予測の結果 (左: 漁獲量 右: 資源量; 実線は中央値、点線は 10% 点、90% 点; OM は 2004 年 4 月の会議で使用されたもの)

視するかで好ましいMPは異なる。しかし、この部分は個々の価値観に依存する問題でもあるため、科学者だけでなく、関係者全員で結論を出すことになりそうだ。ちなみに、これまで30以上のMPが検討されてきたが、最終候補として、2004年4月に4つに絞られた。私が考案したHK5もその一つである。現在の予定では2006年までにMPを完成させ、2008年から運用されることになっている。

#### 4 個体群生態学に今後必要なもの

「OMを利用して、不確実性に頑健なMPを開発する」という発想自体は、野生生物管理に幅広く適用可能であり、今後主流になると思われる。しかし、実際にやってみると、教科書通りに進まない事が多い。一番苦勞したのは満足なOMを作り上げることである。実際、一度完成したOMが現実を反映していないことが判明し、再度作り直すことになった。いくら不確実性を考慮したと言っても、その「不確実性」を「確実に」捉えることは容易ではない。かといって、なんでもかんでも不確実だと見なしてしまうと、これもまた説得力の欠けるモデルになるだろう。この辺りをいかにうまく判断していくかが科学に課された今後の宿題だと思う。また言うまでもなく、順応的管理もやり方によっては個体群をかえって不安定化させる可能性があるため、どのような情報をもとに、どのように施策にフィードバックさせていくかを慎重に検討する必要がある。

このように、私の感想はどこか歯切れが悪い。正直な所、現状の科学のレベルではCCSBT本委員会の期待には十分に答えられていない。資源評価やMP開発といった個別のテーマだけでなく、資源管理をどう客観的に効率よく行っていくかという全体のデザインに関しても力不足は否めない。例えば、限られた予算内で、どのような調査を行えば、もっとも管理に役立つ情報を得られるのかといった問題は、現場の科学者ならよく遭遇する切実なものである。しかし、CCSBTの場合、その科学の不十分さを理解した上で、先に進もうという雰囲気の関係者にあるように感じる。MP開発でも、運用後、開発時に想定しなかったことが起きた場合の対処方法を予め明確にすることになっている。

MPの開発プロセス自体を順応的にしておけば、資源管理は良い方向に進むだろう。この分野はまだまだ試行錯誤を繰り返しながら、経験を蓄積していく段階である。困難も多いが、責任を持って挑戦していくしかない。

ミナマガロの資源管理が抱える問題は、他の水産資源や陸上の動植物でも多かれ少なかれ当てはまる部分があるだろう。昆虫生態学者が水産資源の研究に飛び込んでみて、今後の個体群生態学に必要なと感じたものを、最後にまとめておきたい。自戒の念を込めて書いたものだが、話の単純化のため、私の偏見が顕著になっている部分は、お許し頂きたい。

#### ①統計学的手法を用いたパラメータ推定と不確実性の評価

水産資源学は使えるデータが限られているせいか、漁業データや調査データから最尤法やベイズ統計を使って、個体群動態に関するパラメータを推定することが多い（平松 1992, Hilborn and Mangel 1997）。また実学の側面が強いせいか、得られた推定値に対するバイアスや推定誤差などへの関心も強い。生態学ではどちらかというと、パラメータ値は調査で「実測する」ものという姿勢が強いように思われる。その姿勢そのものは素晴らしいものだが、測定値が真の値のように一人歩きするのは問題である。測定誤差やサンプリング誤差などの検討は必要である。また長期の時系列データなどがあれば、実験的操作が難しい対象でもパラメータ推定が可能である。統計というと「〇〇検定」を使って有意差を出すことに執着しがちだが、推定論の方にも注目する必要がある。生態学には質のいいデータが多いのだから、もっと活かす方法があるだろう。最近では環境分野を中心に生態学でも不確実性の評価にベイズ統計の発想が使われはじめているようだ（Ellison 2004, Clark 2005）。もちろん最新の手法を使用することが、問題の解決に必ずつながるわけではない。同時に次の新しい手法を開発していく必要がある。

#### ②計算機実験

OMは何もMPの開発だけに使われるものではない（Hilborn and Mangel 1997, Peck 2004）。水産資源学では、資源評価法の頑健性を調べること

などにも用いられている。生態学でもサンプル数やデータのバイアスが調査や実験結果にどのような影響を与えるのか知りたい時などがあるだろう。そのような場合は、パソコン上に仮想の個体群を作成し、仮想のサンプリングをするなどして、結果の頑健性を調べてみればよい。野外調査をデザインする際にも、事前の検討は有用であり、必要である。

③意思決定の枠組みにおける科学の役割  
資源管理は科学者だけで行うわけではない。実際の管理の中で、いかに科学をうまく使って意思決定を行っていくかという全体の枠組みをデザインする必要がある。その意味で、今後経済学や社会科学との連携も重要になってくるだろう。CCSBTのMP開発プロジェクトでは、開発プロセス自体が管理に必要な論点を整理し、建設的な議論を促す役割を果たしている。定期的に行行政や水産業界、環境団体など関係者と話し合いを続けることで、結果ではなくプロセスに関して議論を重ねることは、価値観の異なる者同士が合意形成を図る際に重要なことである。保全や管理の仕事を進めていく上で、今後生態学者は異業種の人たちと接する機会も多くなるだろう。直接学問とは関係ないかもしれないが、これからはコミュニケーション能力も必要とされるのかもしれない。

現在、水産資源管理の分野では、複数種管理や生態系管理への関心や必要性が急速に高まっている。このようなテーマは個体群生態学や群集生態学の知見が生かせそうなテーマである。資源管理の明るい未来のために、関心のある方はどんどん参入してもらいたい。分野間の壁など越えてしまえば、いかに低いものかすぐに実感できるであろう。

## 文献

- Clark, S. J. (2005) Why environmental scientists are becoming Bayesians. *Ecology Letters* 8: 2-14.
- Ellison, M. A. (2004) Bayesian inference in ecology. *Ecology Letters* 7: 509-520.
- Hilborn, R. and Mangel, M. (1997) *The Ecological Detective: Confronting Models with Data*. Princeton University Press.
- 平松一彦 (1992) 最尤法による水産資源の統計学的研究—パラメータ推定とモデル選択—. 遠洋水産研究所研究報 29: 57-114.
- 平松一彦 (2004a) 3. 水産資源管理. In: ワシントン条約附属書掲載基準と水産資源の持続可能な利用 (松田裕之・矢原徹一・石井信夫・金子与止男編), p. 44-60. 自然資源保全協会.
- 平松一彦 (2004b) CCSBT で開発中の管理方式 (Management Procedure) について. 資源管理談話会会報 34: 42-71.
- Hiramatsu, K., H. Kurota, H. Shono, and N. Takahashi. (2004) Behaviors of CPUE-based management procedures examined through the CCSBT final trial specifications. *CCSBT 管理手続き特別会合文書 CCSBT-MP /0404/08*.
- 小松正之・遠藤 久 (2002) 国際マグロ裁判 (岩波新書 新赤版). 岩波書店. 222p.
- 黒田啓行 (2001) 植物食昆虫の個体群動態と生活史スケジュールの進化. *日本生態学会誌* 51: 131-136.
- 松田裕之 (2000) 環境生態学序説—持続可能な漁業、生物多様性の保全、生態系管理、環境影響評価の科学. 共立出版. 211p.
- Peck, L. S. (2004) Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *TRENDS in Ecology and Evolution* 19: 530-534.
- 桜本和美 (1998) 漁業管理の ABC—TAC 制がよくわかる本—. 成山堂書店. 200p.
- 魚住雄二 (2003) マグロは絶滅危惧種か (ベルソブックスシリーズ15). 成山堂書店. 180p.