

水産資源管理談話会報

第 34 号

日本鯨類研究所 資源管理研究センター

2004年 9月

翻訳・公表希望者は以下の手続きとり、著者の許可を得た上で翻訳・公表する。

1. 翻訳・公表希望者は文章（FAX、手紙）で著者、表題および会報の号を明記し、資源管理談話会事務局を通じて要請し、著者の許可を得て翻訳・公表する。
2. 翻訳公表物を資源管理談話会事務局に送付する。

目次

お知らせ	2
漁船規模に階層性がある場合の漁業管理問題		
	鈴木直樹 3
シンポジウム「明日の漁船像を考える」		
	川島敏彦 10
ミナマグロ資源管理、怒涛の歴史の中で		
	辻 祥子 26
ミナマグロ調査漁獲から得られたもの		
	高橋紀夫 30
CCSBT で開発中の管理方式(Management Procedure)について		
	平松一彦 42
(投稿) MCMC 入門		
	平松一彦 72
会報 33 号松田著「生物学的許容量決定規則の課題と展望」		
	落丁の図 (図 1, 図 2) 77

CCSBT で開発中の管理方式 (Management Procedure) について

平松一彦 (遠洋水研)

1. はじめに

水産資源の適切な評価や管理のためにこれまで様々な方法が検討され、また実際の資源評価や管理に適用されている。しかし、過去数十年にわたる努力にもかかわらず成功しているとは言いがたい分野でもある。この原因としては資源の状態や動態に関する知見が乏しいという「不確実性」の問題と、他の科学のように「実験」によってモデルや仮定の妥当性を検討できず、信頼性のある結論を導き出すことが難しいという「検証不能性」の問題が挙げられる。

近年、現実には実験を行う代わりにコンピュータ上で仮想現実を作り、そこで資源評価や資源管理の「実験」を行い、適切な方法をさぐる試みが行われるようになった。シミュレーションでは真の資源状態が分かるため、資源評価・管理の失敗・成功を判断することができる。さらに仮想現実として現実の不確実性に対応するような幅広い状況を考えることにより、不確実性に対し頑健な管理を開発することが可能である。コンピュータ上の仮想現実モデルはオペレーティングモデル (Operating Model; OM) と呼ばれ、このようなシミュレーションによって開発された管理の方法は管理方式 (Management Procedure; MP) と呼ばれる。

従来の (TAC による) 資源管理では、資源評価結果から F_{MSY} などを推定し、それから許容漁獲量を決める。あるいはこれに加えて、 F_{MSY} や一定の漁獲量の下での将来予測のシミュレーションを行い、資源量の動向から管理の妥当性を判断する。しかし、通常資源評価や将来予測には大きな誤差があり、推定された F_{MSY} や将来予測結果の信頼性は高くない。上述の方法で示された許容漁獲量で本当に適切な資源管理ができるのか、正直なところ保証の限りではない。また、現実の資源評価は毎年行われ、 F_{MSY} などの管理の指標値も新たなデータに基づいて毎年修正されていくが、 F や漁獲量を一定とした将来予測ではこれは考慮されない。このように、これまでの単純な資源評価と将来予測に基づく管理方法では、その管理の妥当性を判断することは難しい。MP の開発においては、仮想現実モデルを用いたシミュレーションにより実際にその資源管理を行ったのと同じ状況を作り出し、管理方法の妥当性を検討する。

本稿では CCSBT (みなみまぐろ保存委員会) で開発中の管理方式について紹介する。このような OM を用いた MP の開発方法やその考え方については、わが国では鯨類関係の一部の研究者を除いては、あまりなじみが無かった。このためまず第二章でこの方法の概要を簡単に紹介し、用語の整理を行うとともにこれまでの歴史について述べる。第三章では、OM を用いた MP 開発方法の詳細について述べる。第四章では CCSBT によるミナミマグロの MP のこれまでの開発状況について紹介する。さらに第五章で MP 候補の開発例を示すと共に、MP 開発における問題点や我が国資源管理への適用の可能性について論じる。

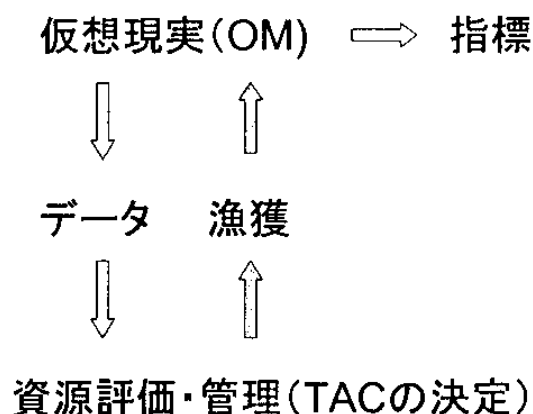


図1. OMを用いたシミュレーションによる管理方法の検討の概念図

開発されたMPにより実際に適切な管理が行われるためには、OMを用いたシミュレーションの考えかたやMPの開発に当たってどのような検討が行われるか、研究者のみならず行政官や業界関係者等が十分理解しておくことが必要である。本稿では、本文中での数式の使用は最小限に控え、概念をわかりやすく書くことに努めた。

2. 管理方式の概要

2-1. OMを用いたMP開発の概要

コンピュータ上になるべく現実の資源動態に近いモデル(OM)を作る。このモデルから漁獲量や資源動向に関するデータを得、検討したい管理ルールに従い許容漁獲量(TAC)を決定する。そしてこのTACに基づき仮想的な漁獲を行う。これを繰り返し、漁獲量や資源状況についてモニターし、妥当な管理となっているか検討する(図1)。

コンピュータ上の仮想現実であるので、管理に失敗して絶滅させてしまっても何の問題もない。何度でも繰り返して徹底的に検討することが可能である。現実の状況がよくわからない場合、例えば成熟年齢が8歳なのか10歳なのか不明であるといった場合には、成熟年齢が8歳と10歳の2種類のOMを作成し、どちらでも適切に管理できるような管理方法を見出せばよい。また資源から得られるCPUEや体長組成のデータには、サンプリング誤差や何らかのバイアスが含まれるのが通常である。仮想現実から発生させるデータには、現実のデータと同様の誤差などが含まれるようにしておく必要がある。このようにOMは現実の状況を反映し、かつ不確実性を十分カバーしたものとする必要がある。

資源評価手法の検討であれば、推定された資源量などの値とOMの真の値とを比較することで直接的に可能である。しかし、資源管理の場合には何が正解かは必ずしも明確では

ない。このため、管理結果の評価には以下のような方法がとられる。まず、適切な管理の目標が決定される。これは通常、1)漁獲量が多いこと、2)漁獲量の年変動が少ないこと、3)資源が安全な状態にあること、の3種類が選ばれることが多い。そして、これらの目標に対応する指標として例えば、1)管理開始後の平均漁獲量、2)管理開始後の漁獲量の変動割合、3)管理開始後の最低資源量等が選ばれる。シミュレーションで得られるこれらの指標を見ることにより、管理方式を評価・比較する。もっともらしい仮定の範囲で、なるべく沢山安定して漁獲でき、資源水準が悪くならないような資源評価・管理方法を、シミュレーションによって見出すわけである。

2-2. 用語とこれまでの歴史

水産分野で最初に開発された MP は、IWC（国際捕鯨委員会）による改定管理方式（Revised Management Procedure; RMP）である（桜本,1990；桜本,1996；田中,1998；Cooke,1999）。その後魚類に対しても適用が試みられているが、これらに関しては我が国ではほとんど紹介されてこなかった。また OM や MP の考え方に関する紹介も一部に留まっている（田中,1993；田中,1997；勝川,1999）。このため MP の概念は国内ではまだ一般的ではなく、関連する用語にも統一された訳語はない。例えば IWC 関係者は RMP を改定管理方式と呼んでいる。これによれば MP は管理方式と訳するのが妥当であるが、管理手続き、管理戦略等と訳することもある。

MP の意味については国外でも混乱がみられているようで、2001 年の CCSBT の科学委員会（SC）では用語の整理がはかられている（CCSBT,2001）。CCSBT の定義によれば、MP とは「新しいデータが得られた時に TAC をどう変更するか事前に合意された一連のルール。①インプットデータ、②データを処理するアルゴリズムまたはモデル、③アルゴリズムのアウトプットを TAC に変換するルール、の3種類からなる。」である。一方、Butterworth and Punt(1999)は MP の説明として「事前に決められたデータを使って管理方法を勧告する一連のルール。シミュレーションによってそのルールの挙動は評価されている。管理方式は完全に実行可能でそのために入力データは実際に収集できる情報でないといけない。」としている。挙動がシミュレーションで事前に評価されているという点が重要である。CCSBT の定義ではシミュレーションに関する言及は無いが、後述のように CCSBT における MP 開発作業の大半は、OM の構築とそれを用いた MP 候補のシミュレーションテストであった。本稿では MP を「OM を用いたシミュレーションによって検討され、事前に合意された実行可能な管理の方法」といった意味で使うことにする。

以下に MP に関係する英語とそれに対応する訳語（「」で示す）、その意味を示す。訳語は前述のように確立されたものではない。

・ Management procedure : 「管理方式」、「管理手続き」。本稿では MP と示す。上記の定義のように完成された一連の TAC 決定ルールを示す場合以外に、MP の開発・評価作業も含める場合（広義）や、TAC の計算方法の部分のみ（狭義）に対しても使われることがあ

るようである。また完成された MP ではなく、MP 候補と言うべき所を MP と略している場合も多い。

- ・ Operating model : 「オペレーティングモデル」。しいて訳せば「仮想現実モデル」、あるいは「作業モデル」か。本稿では OM と示す。

- ・ Conditioning : 適訳なし。しいて訳せば「条件付け」。本稿では英語のままとする。OM を過去のデータに合うように条件付ける、あるいは過去のデータに合うような資源変動を OM で再現するといった意味である。Conditioning において OM 中の未知のパラメータや資源量が推定されるため、この作業自体は資源評価に近い。一方、conditioning された OM を用いて MP 候補のテストが行われるがこれは将来予測に近い。Conditioning に使われる OM プログラムと、MP 候補のテストに使われる OM プログラムは別のものとなる。

- ・ Performance statistics : これも適訳なし。しいて訳せば「管理の指標」ぐらいか。本稿では PS と示す。管理結果を評価するための指標であり、通常、漁獲量、漁獲の変動、資源量に関する 3 種類に分類される。これらの指標を見て、漁獲量が大きく、漁獲の変動が少なく、かつ資源が安全であるような管理方法を探索する。

MP は南アフリカおよびナミビアの各種の小型浮魚類 (Germont et al., 1999; Butterworth, 1999)、NZ のミナミイセエビ (Starr et al., 1997)、豪州のギンサワラ (Punt and Smith, 1999) 等の管理に適用されている。なぜか南半球での適用例が多いが、北半球でも問題なく適用できるはずであり、North Sea plaice (Kell et al., 1999) や北東太平洋のオヒョウ (Parma, 2002) を対象とした検討もなされている。

3. OM を用いた MP の開発方法

MP 開発のためには、まず OM の基本構造を決定し、過去のデータに適合するように OM の conditioning を行う。さらにそれから MP 候補のシミュレーションテスト用の OM (プログラム) を作成する。また管理目的とそれに対応する PS を設定する。そして MP テスト用 OM を用いて MP 候補で管理した場合のシミュレーションを行い、PS を見ることで MP 候補の妥当性を検討する。MP 開発の一般的な手順は以下のようなものである。

- ・ OM の基本構造の確定

対象とする資源に対応した資源動態のモデルを作成する。例えば寿命が 30 歳の魚であれば、30 歳近くまでの年齢構造を考えたモデルが妥当であろう。計算可能で、実際の資源の変動を記述するのに十分なモデル構造とする。年齢構造のあるモデルを考えた場合、自然死亡係数、成長式、再生産関係、成熟率、資源尾数、漁業のモデル等が必要となる。仮定できるものは仮定し、できないものは conditioning によって推定することになる。

- ・ 管理目標と PS の設定

管理目標を決定し、これがどの程度達成できたかを定量的に示す PS を設定する。通常、

漁獲量の最適化（最大化）、漁獲量の安定、資源の安全性（乱獲状態にならない）などが管理目標となる。これに対応して、管理開始後の平均漁獲量、漁獲量の年変化、管理開始前後での資源量の比や資源量の最小値、などが PS としてとりあげられることが多い。これらの作業は、行政・業界等関係者全員の理解と合意の下で行う必要がある。

・過去のデータを用いた OM の conditioning と妥当な OM の選択

利用可能なデータ、例えば漁獲量、資源量指数など使い、OM を用いて過去の資源変動を再現させ不明のパラメータの値を推定する。この作業自体は資源評価とほぼ同様であるが、目的は資源評価自体ではなく、MP のテスト用の妥当な資源動態の作成である。データや生物自身の実際の不確実性を十分考慮にいれる一方で、非現実的な挙動を示さないことが必要である。通常、種々の不確実性により唯一の結果（パラメータ値、モデルの仮定）に特定できないことが多い。このため複数の仮定に基づく OM が用いられることになるが、そのそれぞれが OM と呼ばれることがある。このようなときにはむしろ OM シナリオといった表現が妥当なようにも思われる。妥当な資源動態を示し、かつ不確実性も十分考慮されているような OM を MP テスト用に選択する。OM シナリオの数が多すぎると後の作業化が大変であるが、少なすぎると不確実性の範囲を十分とらえられない可能性がある。

・MP の評価と選択

選択された OM（シナリオ）を用いて、種々の MP 候補で管理を行った場合のシミュレーションを行い、PS を計算する（図 1）。このシミュレーション自体は従来の将来予測と似た作業となる。PS を比較することにより、適切な資源管理が可能な管理方式を見出す。

OM や MP が複雑であればこれら一連の作業（OM の作成と conditioning、MP のテスト）は、プログラムのバグや非現実的なモデルの使用を避けるため、単純なものから複雑なものへ段階的に行うことが望ましい。

MP の評価を一つの OM で一つの PS を用いて行うのは容易である。すなわち PS が最適となる MP 候補が最も優れた MP となる。しかし、通常 OM シナリオは複数あり、また PS も複数存在する。この場合の比較は単純ではない。

PS として平均漁獲量を考え、3 種類の OM シナリオ（1, 2, 3）に対し、3 種類の MP 候補（A,B,C）の結果が以下ようになったとする。

MP	A	B	C
シナリオ 1	30	10	40
シナリオ 2	40	40	40
シナリオ 3	50	70	50

この場合、PS の値が大きいほど漁獲量の観点からは望ましい MP である。表から明らか

ように、MP-C はどの場合でも MP-A より漁獲量が大きく、MP-C の方が優れていることがわかる。しかし MP-C と MP-B の比較はこのままではわからない。シナリオ3の可能性が非常に高く、シナリオ1の可能性はほとんど考えられないのであれば MP-B が望ましいし、どれも同じ程度の可能性があるのであれば MP-C が優れた管理方式である。このように各シナリオのもっともらしさで重みをつけて比較するのもひとつの方法である。各シナリオの重みを 0.1、0.4、0.5 とすると、MP-B は 52、C は 45 となって、B の方が望ましい。

これらの重みは、conditioning の結果の当てはまりの良さ、従来知見、研究者の主観などによって決められる。データへの当てはまりの良さを尤度関数などを用いて評価できれば客観的であるが、異なるシナリオ間で必ずしもそういった比較が可能であるとは限らない。この場合には従来知見なども考慮し、最終的には研究者が主観的に重みづけることになる。

次に PS 間の比較を考える。通常、3 種類程度の目標に対応する複数の PS が使われる。これらの目標間にはトレードオフがあり、例えば漁獲量を増加させると、資源は減少するのが普通である。少数の PS に絞込み、同じ平均漁獲量でより安全な管理方式、あるいは同じ最終年の平均資源量でより沢山の漁獲を上げられる管理方式を選択することは可能である。しかし、漁獲量と資源量のトレードオフの中でどういった管理を行うかの決定は、科学者よりも行政官の仕事である。

4. CCSBT におけるミナミマグロ MP の開発

CCSBT では長らく資源評価に用いる仮定や方法が日豪で異なり、資源評価結果が両国で一致せず資源管理の勧告が行えない状態が続いていた。これは、CPUE と資源量の関係、成熟年齢、VPA における高齢部分の推定方法といったような、様々な不確実性の取り扱いや推定の方法論についての見解が両国で一致していないことに起因している。これらの不一致は早急に解消できるとは考えられない一方で、適切な管理が必要とされていた。このため 2001 年の第 6 回科学委員会において種々の不確実性に対し頑健な管理方式の開発が勧告された。

本章ではこの 2001 年の科学委員会以降、どのような経緯を経てこれまでミナミマグロの MP が開発されてきたかを、各会議の報告書を基に当時の記憶を交えて紹介する（これら会議の報告書の多くは CCSBT のホームページ <http://www.ccsbt.org/> からダウンロード可能である）。MP 開発を主要な議題とした会議は、2002 年 3 月の第 1 回 MP 作業部会、2002 年 9 月の第 3 回資源評価作業部会、2003 年 4 月の第 2 回 MP 作業部会、2003 年 8 月の第 4 回資源評価作業部会の 4 回開催されている。これらの会議での様子を順に見ていくことにする。

なお CCSBT の会議は資源評価作業部会 (SAG)、科学委員会 (SC)、本委員会 (COM) の 3 段階から成る。SAG で資源評価を行い、その結果を受けて SC で資源管理の勧告を本委員会に行うというのが本来の姿であるが、この 2 年間は、SAG において資源評価の代わ

りに MP の開発に関する議論が行われた。また、近年 SAG および SC において加盟国の科学者以外に 4 名の諮問パネル（外部科学者）が参加している。MP 開発作業においてもこれら諮問パネルは主導的な役割を果たしている。

4-1. 2001 年 8 月第 6 回科学委員会

管理方式の定義、開発方針、具体的な行動計画などが決定された（CCSBT, 2001）。MP の定義は既に 2-2 で述べたとおりである。ここでは合意された行動計画を以下に示す。

・具体的な行動計画（開発スケジュール）

- ①全プロセスを管理するコーディネーターの指名
- ②プログラムの作成、記録、暫定的なトライアルのためにコンサルタントを雇う
- ③ワークショップの開催
 - (a)OM の詳細、管理方式の幾つかの候補、ロバストネストライアル、PS 等の文書化
 - (b)今後の作業のタイムテーブルの決定
- ④コンサルタントあるいは加盟国の科学者が OM を使ってパラメータ推定を行い、結果を検討し、OM 毎に暫定的なシミュレーションで使うパラメータ値を決める。
- ⑤コンサルタントあるいは加盟国の科学者が第一段階のトライアルを行う。
- ⑥ワークショップを開催し
 - (a)OM の過去のデータへのあてはまりの良さを評価する
 - (b)各 OM に重みをつける
 - (c)第一段階のトライアルの結果を検討する
 - (d)修正箇所を決定し第二段階のシミュレーションを決める
- ⑦コンサルタントあるいは加盟国の科学者が第二段階のトライアルを行う。
- ⑧ワークショップを開催し、結果を評価し SC に管理方式を勧告する。

4-2. 2002 年 3 月第 1 回 MP 作業部会

MP の開発で使用される OM の基本的な仕様、conditioning に用いるデータとその方法、MP テスト用の OM の仕様、MP を評価する指標などが決定された（CCSBT, 2002a）。さらに今後行われるシミュレーションの種類、今後の開発スケジュールなどが決定された。これらはコーディネーター（外部科学者の一人）が中心となってとりまとめられた。また OM に関するプログラムはコンサルタントにより作成されることになった。

・OM の基本構造

年齢構成を考慮し、Beverton-Holt 型の再生産曲線に従う資源動態モデルを基礎とする。年齢は 30 歳まで考慮し 30 歳以上はプラスグループとする。再生産の変動は対数正規分布を仮定し、自己相関も考慮する。漁業は、1)豪州表層漁業、2)日本の 4-9 海区および日本型

のはえ縄漁業、3)台湾のビンナガ漁業の混獲および流網漁業、4)日本の海区2ではえ縄漁業、5)インドネシアおよび日本の海区1（産卵場）ではえ縄漁業、の5種類に区別して扱う（後に5）はインドネシアと日本に区別し6種類となる）。これらの漁業別に一定の選択率を仮定するが、操業の変化が見られる漁業では4年毎に変化させる。成長、成熟などはモデル内部では推定せず、従来の資源評価に用いられていた値を仮定する。自然死亡係数は従来資源評価で用いられていた3種類の値に加え、モデル内部での推定も可能とする。

・OMのconditioningの方法

Conditioningには、全漁獲量、インドネシア漁業および豪州表層漁業の年齢別漁獲尾数、はえ縄漁業の体長別漁獲尾数、日本のはえ縄漁業のCPUE、標識再捕結果がデータとして使用され、年齢別漁獲尾数、体長別漁獲尾数、CPUE、標識再捕数に関する尤度関数を作成し、ベイズ統計により推定する。推定されるパラメータは再生産関係式に関するパラメータ、各漁業の選択率に関するパラメータ、毎年の加入尾数、自然死亡係数等である。

・管理目標とPSの決定

管理目標として、漁獲量の最大化、資源の安全性、漁獲量と努力量の年変化の最小化の3種類が合意された。またMPのテストのシミュレーション期間として20年間で合意された。具体的なPSとして、平均漁獲量、親魚資源量、親魚以外の資源量、産卵ポテンシャルなど数十種類の指標が挙げられたが、第一段階のMPのテストでは合意された9種類のPSを最低限示すことになった。

・シミュレーションの種類

MPテストのシミュレーションは、簡単なものから複雑なものへ以下のような階層で行われることになった。

- 1)点推定値に基づいた、完全に決定論的なシミュレーション。
- 2)将来予測の部分に観測誤差（資源量指数の観測誤差）を導入したシミュレーション。
- 3)将来予測の部分に上記2)に加え、プロセス誤差（再生産曲線からのずれ）を導入したシミュレーション。
- 4)上記の将来予測の誤差に加え、conditioningで得られる推定値の事後分布を用い、推定値の誤差も考慮したシミュレーション。
- 5)複数のOM（シナリオ）を組み合わせたシミュレーション。

4-3. 2002年9月第3回資源評価作業部会

第1回MP作業部会の合意事項に沿ってコンサルタントにより作成されたOMの検討が行われた。幾つかのconditioning結果を検討し、ある程度ミナミマグロの資源動態とその不確実性を示すものとして9種類のシナリオが合意された。そしてこれをもとに次回まで

に各国で第一段階の MP の開発を行うことになった。同時に OM にさらなる不確実性を導入する試みが行われた (CCSBT, 2002b)。

・ Conditioning 結果の検討と OM (シナリオ) の選択

コンサルタントによって作成された OM を用いて、会議前に種々の仮定の下で conditioning が行われた。この結果の検討から、以下の 3 種類が資源の動態を決める重要な仮定とされた。

1)再生産関係の密度依存の大きさを決めるパラメータ h (steepness ; 付録 A6 参照)

2)選択率の変化の仮定

3)成魚 (10+歳) の自然死亡係数の値 M_{10}

上記の結果を参考に、会議中にさらに種々の仮定に基づく conditioning が行われ、データへの当てはまりや結果の妥当性等の観点から検討された。第一段階の MP 候補のテスト用の OM として、最終的には 9 種類の OM (シナリオ) が選択された。これらは、生産性の大小 ($h=0.3,0.6,0.9$)、 M_{10} の値 ($M_{10}=0.05,0.10,0.15$) 等を組み合わせた 8 種類と、 h と M_{10} をパラメータとして推定しその事後分布を利用するモデル 1 種類からなっている。これらはあくまで第一段階の MP テストのための OM で、必ずしもミナミマグロの不確実性を十分にとりこんだモデルではない。

ここで行われた作業は、基本的には OM を資源評価モデルとした資源量推定作業と同じものであった。しかし真の資源状態を追求するのが目的ではなく、妥当な不確実性の範囲をさぐりそれをカバーするような OM シナリオを選ぶことに重点が置かれた。種々の条件下で推定を行い、データからうまく推定できないパラメータの特定、パラメータ値の仮定が資源量推定に大きな影響を与えるパラメータの特定、データへのあてはまりによる仮定の妥当性の検討などがほぼ同時に行われ、なかなかわかりにくかった。

会議終了後、選択された OM を基に、MP を評価するためのシミュレーションプログラムが MP コンサルタントにより作成され、各国科学者に配布された。

・ OM における不確実性の考慮

第一段階の OM でまだ考慮されていない不確実性の範囲が検討された。CPUE と資源量の非線形性、成長の変化など点について第一段階の OM を拡張し、conditioning 結果に与える影響やその妥当性について次回までに検討することとなった。これも後日コンサルタントによってプログラムが作成され、各国に配布された。

4-4. 2003 年 4 月第 2 回 MP 作業部会

第一段階の OM を用いた MP の検討結果が日豪の研究者から発表された。さらに第二段階で使用される OM の仕様が検討され、18 種類の基本的な OM のシナリオと robustness test 用の 25 種類のシナリオが決定された。結果の取りまとめ方法についても議論されたが、合

意に至らず次回会合でさらに検討されることになった (CCSBT, 2003a)。

・第一段階の MP の検討結果の報告

日豪より 20 種類近くの MP 候補の検討結果が示された。提案された方法は CPUE を指標とした比較的単純な構造の MP と、プロダクションモデルなどを用いて資源評価を行って管理する MP に大別でき、またこれ以外に一定の漁獲量で管理した場合の結果が比較のために示された。提案された方法はいずれも漁獲量一定の場合より適切な管理となっている。今回は結果の提示のみで、MP 候補間の比較は行わなかった。

以下に提案された MP 候補の概要を簡単に紹介する。CPUE を用いた方式は、CPUE の増減によって TAC を増減させるというもので、一例を挙げると以下のようなものである。

$$TAC_{y+1} = TAC_y(1 + kX) \quad (1)$$

ここで、X は過去 10 年間の日本のはえ縄漁業の CPUE のトレンド (正確には CPUE の対数の傾き)、k はパラメータである。k>0 であれば、CPUE のトレンドにあわせて TAC が増減することになる。k の値やトレンドを計算する年数を変えて適切な管理をさぐる。CPUE を指標とする管理方式として、(1)式以外にも様々なバリエーションが考えられている。本会合に向けて検討した CPUE 情報を用いた MP 候補の検討の一例を 5-1 に示す。

一方、プロダクションモデルを用いた方法としては例えば以下のような方法が示された。まずプロダクションモデルにより MSY、B_{MSY}、現存量 B_y 等を推定する。B_{MSY} と B_y との比較により以下の式により TAC を決める。

$$TAC_{y+1} = wTAC_y + (1-w)MSY \left(\frac{B_y}{B_{MSY}} \right) \quad (2)$$

ここで w は前年の TAC の影響に関するパラメータで、w=0 であれば前年の TAC にかかわりなく TAC が決定される。w=0 で B_y=B_{MSY} であれば TAC=MSY となる。

・第二段階の OM の仕様

拡張された OM プログラムを用いて、種々の不確実性の検討が行われた。ひきつづき steepness と M が主要な不確実性として認識されたが、新たに日本のはえ縄漁業の漁獲率 q が毎年 1% ずつ増加するというシナリオが追加された。これらは主要な不確実性に対応するものとして reference sets とされた。Reference sets は 3 種類の h (0.3, 0.55, 0.8)、3 種類の M、2 種類の q の組み合わせの 18 通りのシナリオからなる。

一方、これ以外の不確実性についても検討され、これらは robustness test として MP の結果に与える影響が検討されることになった。Robustness test は、CPUE と資源量が直線関係からずれている場合、過去に漁獲率の急な変化があった場合、reference set とは異なる M、過去の環境収容量の変化、など 25 種類からなる。

・結果の取りまとめ方

最適な MP を選択するためには、複数のシナリオを用いて検討した MP の結果を比較する必要がある。この方法として、シナリオに重み付けする方法、足切り基準 (Robustness criteria) を設定して合致する MP を選択する方法が検討された。そしてこれらのハイブリッド型である足切り基準を設定し、それに合格した MP についてシナリオの重み付けをして結果を比較するといった方法がとられることになった。足切り基準について幾つか案が出されたが、合意には至らなかった。

一方 MP の妥当性を示す指標である PS についても検討が行われ、従来の PS に加え、6 種類が追加され全部で 14 種類となった。

4-5. 2003 年 8 月第 4 回資源評価作業部会

第二段階の OM を用いた MP テストの結果が日豪などから発表された。最終段階のテストに使用する OM が決定された。また種々の OM シナリオによる MP テストの結果をとりまとめて比較する方法が決定された (CCSBT, 2003b)。

・第二段階の MP の検討結果の報告

報告された MP は前回同様 CPUE のトレンドやプロダクションモデルによるものが主であったが、新たに VPA を用いた方法なども示された。前回同様、個々の MP の比較は行わなかった。

・最終テスト用の OM の選択

主要な不確実性として、M、h、CPUE と資源量の非線形性 ω の 3 つが選択され、これらの値の範囲と重み付けの方法が以下のように決定された。なお h と ω の重みは、会議参加者の見解の中央値をとることにより決定された。

M: ベイズ統計の事後分布が使われる。Conditioning における推定値のあてはまりに依存した重みとなる。

h: 0.3~0.8 の間を 3 等分され、それぞれに 0.2、0.6、0.2 の重みが与えられた。

ω : $\omega=1$ (CPUE と資源量は線形) に 0.6、 $\omega=0.75$ (CPUE と資源量の関係は弱い非線形性を持つ) に 0.4 の重みが与えられた。

M は事後分布を用いた確率分布として扱われるので、h に関する 3 種類と ω に関する 2 種類の 6 種類のシナリオが reference case となり、上記のような重み付けで扱われることとなった。

また robustness テストとして結果に影響を与え、かつある程度可能性のあるものとして以下の 4 種類のシナリオが決定された。

- ・ CPUE と資源量の関係の基準の年齢の変更: 8 歳~12 歳に変更

- ・環境収容量の変化：1977年で変化
- ・ q の突然の変化：2006年に漁獲率の20%の増減
- ・漁獲量のバイアス：1969～1990年の漁獲量を5%増、1991年以降（含将来）の漁獲量を15%増

・結果の比較方法

複数のシナリオによるMPの結果をとりまとめ比較する方法は大きな議論となったが（付録参照）、以下のように決定された。

上述のように重み付けられた reference case シナリオを用いて、 S_{2022}/S_{2002} のメジアンがちょうど0.7、1.1、1.5となるように各MP候補を調整（チューニング）し、その時のPS等を比較する。これは資源量に関するひとつの指標を固定することにより、それとトレードオフの関係にある漁獲量に関するPSなどを比較しやすくするというものである。また、漁業の安定性の重要性が指摘されたため、毎年TACを変更する場合と、3年間TACを一定とする管理の2種類を検討することとなった。

20年間の資源量と漁獲量の変化の図などが示される予定であるが、新たに合意された17種類のPSなどを用いて資源量の最小値、漁獲量の年変動（AAV）、TACの変化の妥当性、50年間のシミュレーション結果なども比較に使用される。

最終的にはこれらを用いて2004年の本委員会でMPが決定される。上記のような方法で妥当な決定が可能か、2003年の本委員会に諮られることとなった。

4-6. 今後の予定

最終的なMPテスト用のOMプログラムがコンサルタントによって作成され、それを用いて各国でMPのさらなる開発が行われる。そして、各国で少数の適切なMP候補が選ばれ、2004年4月に実施される第3回MP作業部会に S_{2022}/S_{2002} を用いたチューニング結果が資源量や漁獲量の年変化の図や種々の統計量を用いて示される。これらの資料を用いて、本会議に勧告する最適なMPが選択される（一つに絞れるか、複数となるかは不明）。2004年10月の本会議では、選択されたMPのどのチューニングのオプションを用いるかが決定される。これによりMPの仕様が完全に決定され、最新のデータを用いてMPにより2005年のTACが決定されることになる。

5. 議論

5-1. MP開発の実例

MP開発の実例として、第2回MP作業部会に提出したCPUEのトレンドを用いた管理方式のうち、筆者が担当したものについて紹介する。

図2は2002年9月に合意されたOMのシナリオのうちの8種類について、一定の漁獲量（ほぼ現状の漁獲量）で漁獲した場合の漁獲量と親魚資源量の20年間の変化を示したも

のである（ただし決定論的である）。8種類のシナリオのうち破線で示した2種類は生産力が低く（ $h=0.3$ ）、一定の漁獲を続けると資源は直線的に減少する。それ以外の、生産力が中程度（ $h=0.6$ ）または高いシナリオ（ $h=0.9$ ）では資源は増加している。生産性の低いシナリオについては早急に漁獲を減少させる必要がある一方、その以外のシナリオについては漁獲増も可能である。CPUEの動向からTACを増減させて管理する方法を考えてみる。

CPUEのトレンドを用いた管理方法として、まず前述の(1)式を用いた方法を検討してみる。(1)式において $k=1$ としてTACを決定し管理した場合の漁獲量と親魚資源量の変化を、図3に示す。資源量の動向に合わせて漁獲量が変化していることがわかる。2つの生産力の弱いシナリオでは漁獲量が減少し、資源量の低下にある程度の歯止めがかかっている。一方、それ以外のシナリオでは漁獲量は増加している。漁獲量一定の場合と比較して妥当な管理となっているのがわかる。しかし、生産力の弱いシナリオでは資源量が完全には下げ止まっておらず、もう少しTACの変化を大きくした方がよさそうである。そこでCPUEのトレンドにより依存するように $k=2$ とした場合のシミュレーション結果を図4に示す。生産力の弱いシナリオに対してはより急激に漁獲量が減少し、資源の低下に歯止めがかかっている。しかしながら、生産力が高い場合に漁獲量を急に上げ過ぎ、資源の低下ひいては漁獲量の低下をまねいている。このような行き過ぎは資源管理上望ましくない。

いろいろと試行錯誤を続けた結果、図5に示すように、CPUEのトレンドが上昇している場合には緩やかにTACを増加させ、トレンドが減少している場合には急激にTACを減少させるような管理方式であれば比較的妥当な管理となることがわかった。図6に結果を示すが、生産性の高低によらず20年後には資源はほぼ定常状態となっている。ここでは決定論的な結果のみ示したが、CPUEの観測誤差や加入の確率変動を考慮した場合でも比較的良好的な結果が得られた。

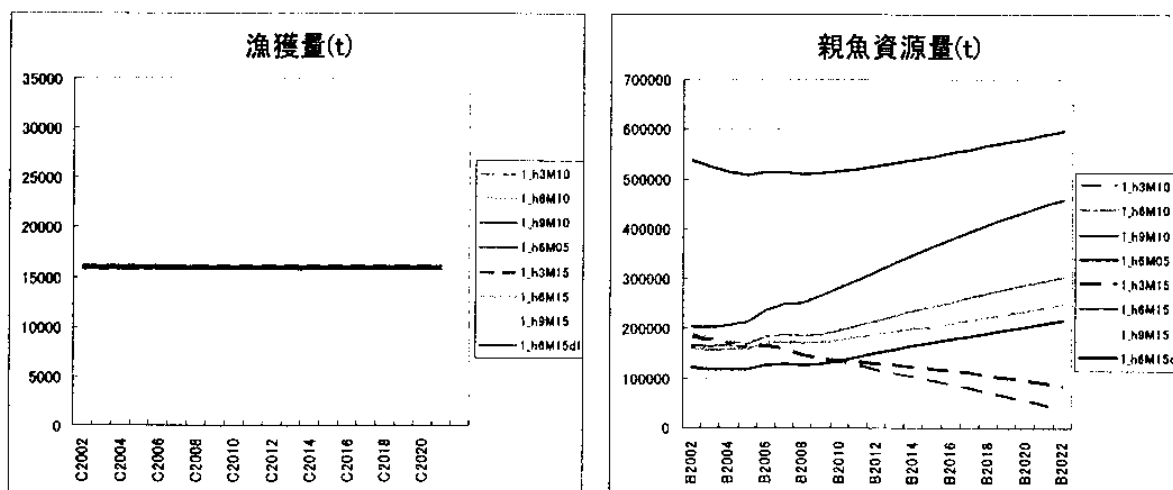


図2. 8種類のOMシナリオについて漁獲量一定で漁獲した場合の親魚資源量の変化。破線は生産力が低いシナリオに相当。

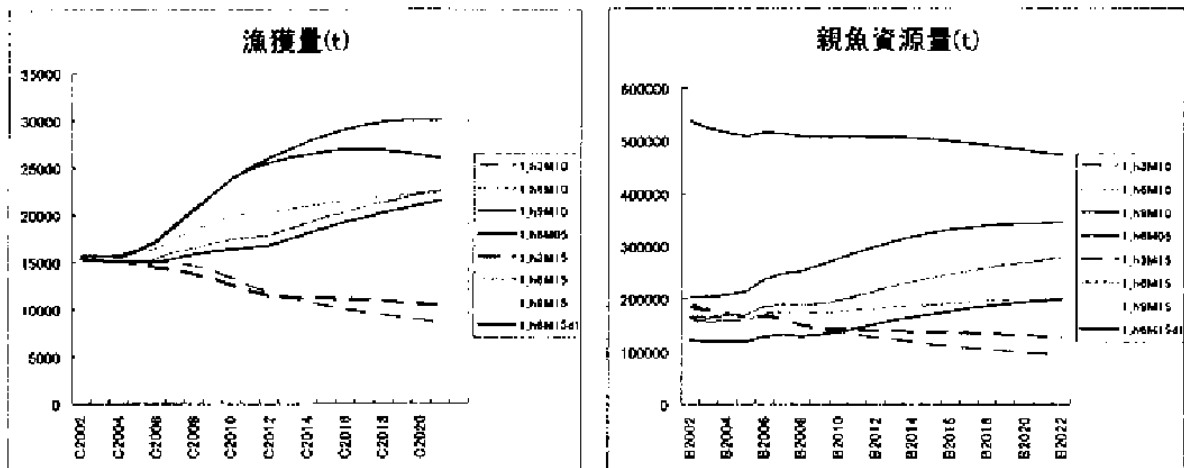


図3. $TAC_{y+1}=TAC_y(1+X)$ で管理した場合の漁獲量と親魚資源量の変化

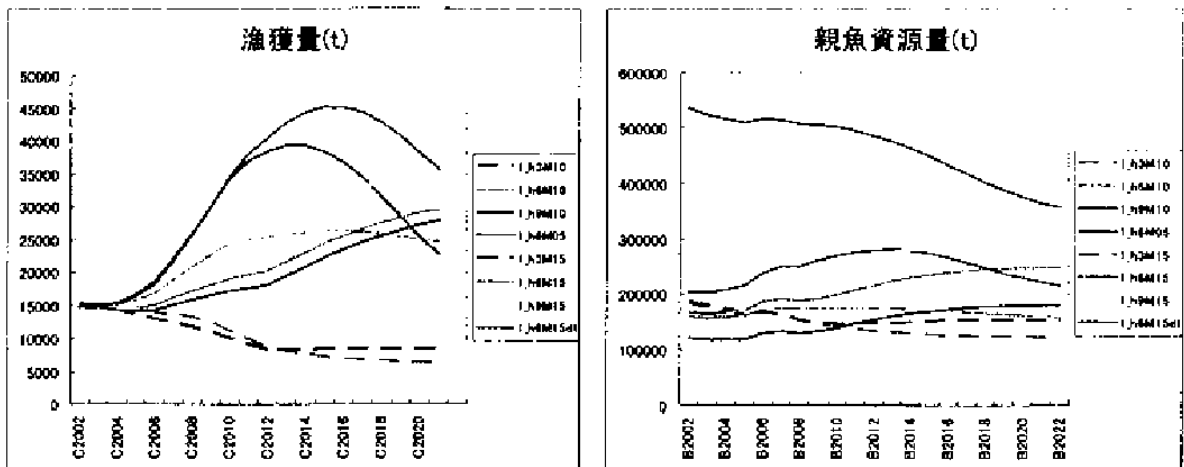


図4. $TAC_{y+1}=TAC_y(1+2X)$ で管理した場合の漁獲量と親魚資源量の変化

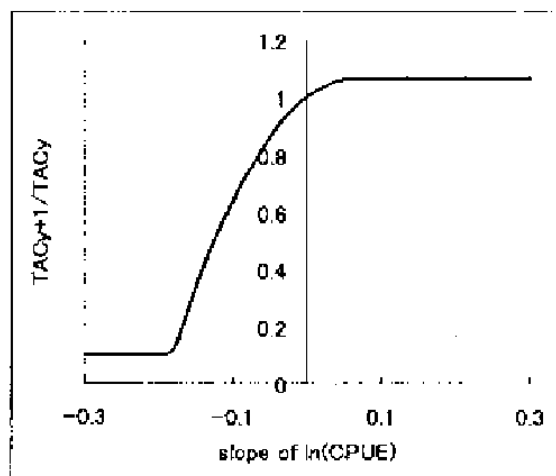


図5. CPUEの傾きに対して非対称な管理方式。縦軸はTACの年変化を示す。

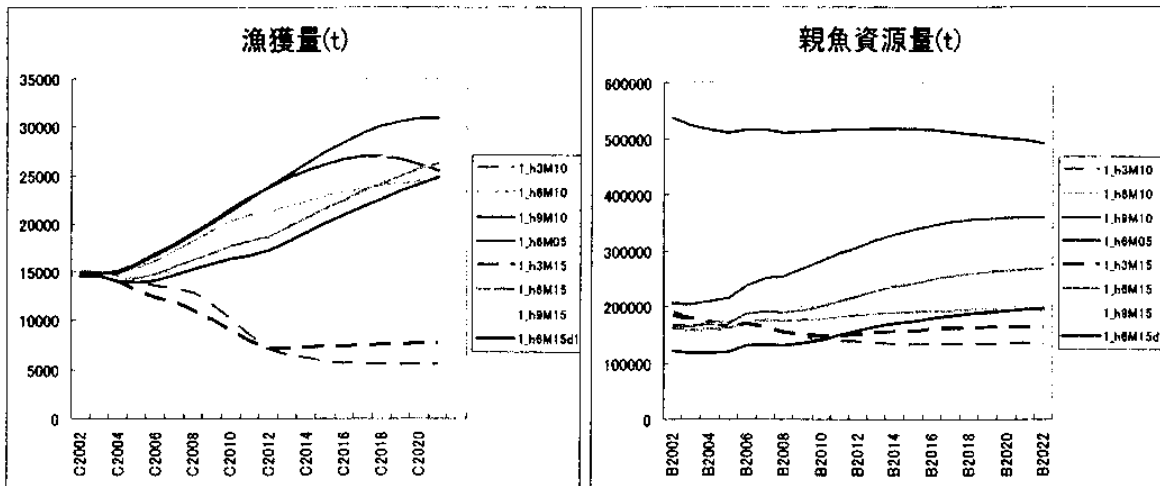


図6. 図5の管理方式を用いた場合の漁獲量と親魚資源量の変化

5-2. MP 開発の問題点

CCSBTにおけるMP開発作業が進む中で、様々な問題点も明らかになってきた。

・MP 開発概念の把握の困難さ

従来の管理方法の検討においても将来予測のシミュレーションが行われるが、MP開発で行われるシミュレーションは単純な将来予測ではなく、あくまでも仮想現実を用いたある種の実験によるMP候補のテストである。単純な将来予測よりもひとひねりしたものになっており、このあたりがなかなか理解されにくいようである。またMP開発にはOMとMPの2種類のモデルが必要となる。OMは仮想現実モデル、MPは管理の方法で全く別物である。しかし、MPとして詳しい資源評価を行ってTACを決定することも可能で、このような場合、MPの構造はOMに類似したものとなる。これまでしばしばOMとMPを混同した議論を聞いたことがあるが、両者を混同すると何をやっているのかさっぱりわからなくなってしまう。

また既に述べたように、仮定している資源動態モデルは同じでも、conditioningに用いるOMとMPテスト用OMは別のプログラムである点にも注意が必要である。Conditioningでは過去のデータを用いてOMのパラメータの推定が行われるが、MPテスト用のOMではこれとは逆に、conditioningで推定されたパラメータ値を用いて資源動態モデルを動かし、CPUEデータなどを発生させることになる。

・合意形成の困難さ

MP開発に当っては、OMで扱うべき不確実性の範囲（例えばhの値の範囲等）と、複数のOMシナリオやPSを用いてMP候補を比較する方法に関し、合意形成が必要となる。

OMの不確実性に関しては、悲観的な方向（小さなh）に重点を置くと、あまりTACを増やさないうような保守的なMPが、楽観的な方面（大きなh）に重点を置くと、TACを増加させやすいMPが、それぞれ最適なものとして選択される可能性が高い。このためもともと資源評価結果に意見の相違があると、OMに合意するのがなかなか難しい。それでもCCSBTではなんとか合意されたが、これは資源評価を行っているのではなく、適切なMPを選択するためのテストの範囲を決めているという共通理解があったからこそと思われる。

MPの比較・選択方法についても、複数のシナリオの複数のPSの結果を総合的に判断して行う必要があり、なかなか難しい部分である。やり方によっては、可能性が非常に低い悲観的なシナリオに注意が向きがちになり、必要以上に保守的なMPとなる可能性もある。

・行政、業界への説明の困難さ

MPの概念を把握することの困難さについては既に述べたが、これをさらに行政官や漁業者に説明し理解してもらうのはさらに困難を伴う。MPテストのためのシミュレーションが、研究者がパソコンゲームをやっているだけと見なされる可能性もある。あるいはこれとは逆に、遂に正確な現実のシミュレーションが可能になったと誤解される恐れもある。

管理目標の設定や最終的なMPの選択は科学者のみでは行えず、行政官や漁業者の意向や判断が不可欠である。MPの概念やMPの開発方法について、根気よく対話を続ける努力が必要であろう。

5-3. 我が国周辺資源管理への適用の可能性

我が国のTACによる資源管理は、研究者がABC（生物学的許容漁獲量）を算定し、これを参考に水産庁が（厳密には水産政策審議会の審議を経て農林水産大臣が）TACを決定するという形式になっている。ABC算定の基準となるのはMSYであるが、MSYが推定できない魚種も多いし、MSYや B_{MSY} が推定できたとしても生物学的観点のみからどのような漁獲量が適切かを示すことは困難であることが多い。例えば現在の資源量が B_{MSY} の半分であるとして、どのような漁獲が生物学的に適切であろうか。資源量を B_{MSY} に回復させるという点については異存が無いが、その方法については自明ではない。生物学的に最も確実な方法は禁漁であるが、これは漁業の観点からは適切な選択ではない。現状の漁獲量とあまり変わらないような漁獲を続けながら回復をはかる場合には、さらに資源を減少させてしまうリスクを負うことになる。漁業の保護の重要性と資源悪化のリスクを考慮した上で判断する必要があり、科学者だけでは不可能である。

ABCの算定値あるいは算定方法に対し、漁業者サイドから問題が提起されることも多くなってきている。現在のようにABCとTACを区別して扱うのはもはや賢明ではないかもしれない。上記の例であれば、研究者が禁漁から現状維持までさまざまなオプションとその将来予測結果を示し、行政官がそれから一つを選択するというのも一つの方法である。しかしそれだけでは、資源評価や将来予測結果の信頼性に関してはほとんど分からない。

また、現在 ABC は ABC 算定ルールに基づいて決定されているが、この算定ルールの根拠は必ずしも明らかではない。すなわち不確実な資源評価結果を用いて算定ルールに従って ABC を算出し管理を行った場合、本当に適切な管理ができるのか保証がない。

これらの点からみて、今後、OM を用いたシミュレーションによる検討は我が国周辺の資源管理においても有力な手段となるのではないかと考えている。

6. おわりに

本稿では、MP とは OM を用いた徹底的なシミュレーションによって検討された管理の方法であるとの立場から、その一般的な考え方や CCSBT における開発の状況を紹介した。CCSBT での MP 開発に関する議論は、これまで MP の開発の経験があり、ノウハウを持つ研究者が中心となって進められた。遠洋水研のミナマガログループでは MP 開発の経験がなかったため、事前に情報収集を行って会議に臨んだが、経験不足は否めなかった。

OM を用いたシミュレーションによる検討は、資源評価を始めとして様々な推定方法やモデルの検討に適用可能である。実験等で検証できない分野にとっては非常に有力な手段となろう。資源管理手法の検討や評価はこれまで困難であったが、OM の導入により今後大きく変わることが予想される。

今後、OM を用いたシミュレーションや MP 開発のノウハウを蓄積していくことが必要であろう。

引用文献

- Butterworth D. S. 1999. Taking stock: science and fisheries management entering the new millennium. Inaugural Lecture, New Series No.212, University of Cape Town, 1-30. (立川賢一訳、再評価：新しいミレニアムに入る科学と漁業管理. 日本水産資源保護協会月報、No.433:1-11, No.434:1-14)
- Butterworth D. S. and Punt A. E. 1999. Experiences in the evaluation and implementation of management procedures. ICES Journal of Marine Science, 56:985-998.
- Butterworth D. S., Ianelli J. N. and Hilborn R. 2003. A statistical model for stock assessment of southern bluefin tuna with temporal changes in selectivity. *Afr. J. mar. Sci.* 25:331-361.
- CCSBT. 2001. Report of the Sixth Meeting of the Scientific Committee (August 2001).
- CCSBT. 2002a. Report of the First Meeting of Management Procedure Workshop (March 2002).
- CCSBT. 2002b. Report of the Third Stock Assessment Group Meeting (September 2002).
- CCSBT. 2002c. Report of the Seventh Meeting of the Scientific Committee (September 2002).

- CCSBT. 2003a. Report of the Second Meeting of the Management Procedure Workshop (April 2003).
- CCSBT. 2003b. Report of the Fourth Stock Assessment Group Meeting (August 2003).
- Cooke J. G. 1999. Improvement of fishery-management advice through simulation testing of harvest algorithms. *ICES Journal of Marine Science*, 56:797-810.
- Geromont H. F., De Oliveira J. A., Johnston S. J. and Cunningham C. L. 1999. Development and application of management procedures for fisheries in south Africa. *ICES Journal of Marine Science*, 56:952-966.
- Haddon M. 2001. *Modelling and Quantitative Methods in Fisheries*. New York, Chapman & Hall, 406pp.
- Haist V., Parma A. and Ianelli J. 2002. Initial specification of operating models for southern bluefin tuna management procedure evaluation. CCSBT-SC/0209/7. 43 pp.
- Hilborn R. and Walters C. J. 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment. Choice, Dynamics and Uncertainty*. New York, Chapman & Hall, 570pp.
- 勝川俊雄. 1999. Management procedure と日本の資源管理型漁業. 月刊海洋, 号外 No.17:123-128.
- Kell L. T., O'Brien C. M., Smith M.T., Stokes T. K. and Rackham B.D. 1999. An evaluation of management procedures for implementing a precautionary approach in the ICES context for North Sea plaice (*Pleuronectes platessa* L.). *ICES Journal of Marine Science*, 56:834-845.
- 小松正之・遠藤 久. 2002. 国際マグロ裁判. 岩波新書 810. 岩波書店. 東京. 232pp.
- Parma A. M. 2002. In search of robust harvest rules for pacific halibut in the face of uncertain assessments and decadal changes in productivity. *Bull. Mar. Sci.*, 70(2):423-453.
- Punt A. E. and Smith A.D.M. 1999. Harvest strategy evaluation for the eastern stock of germfish (*Rexea solandri*), *ICES Journal of Marine Science*, 56:860-875.
- 桜本和美. 1990. モデル依存型鯨類資源管理方式. 鯨類資源の研究と管理. 恒星社厚生閣, 173-183.
- 桜本和美. 1996. クジラ類資源の管理と IWC. クジラに学ぶ (北原武編). 成山堂書店, 98-122.
- 田中栄次. 1993. 水産資源の管理とモデル選択. 水産学シリーズ 97, 恒星社厚生閣, 82-89.
- 田中栄次. 1997. 漁業資源管理におけるシミュレーション. 月刊海洋, 29(5):277-280.
- 田中昌一. 1998. RMP について. 水産資源管理談話会報, 19号:3-16.

付録：

ミナミマグロの MP の開発のために作成された OM の構造、その conditioning の方法、MP テストのためのシナリオ、PS 等は開発作業の過程で大きく変更された。ここでは 2003 年 10 月時点でのものを、各会議の報告書や OM の仕様書(Haist et al., 2002)を基に、なるべく詳しく記載する。

A1. OM の基本的構造

加入した魚が自然死亡係数 M と漁業によって減少し、親魚になると再生産関係に従って再生産するという、通常使われる年齢構造のあるモデルが基本である。再生産関係は Beverton-Holt 型を仮定し、自己相関のある対数正規誤差でそのまわりにばらつくとする。生長に関するパラメータは外部より与える。漁業は 6 種類に分類し、年初または中間でのパルスの漁獲として扱う。以下にそれぞれの要素をもう少し詳しく示す。

・資源動態

基本的な資源動態は以下の式で記述される。

$$N_{y+1,a+1} = N_{y,a} \left(1 - \sum_{f1} H_{f1,y,a}\right) \left(1 - \sum_{f2} H_{f2,y,a}\right) \exp(-M_a) \quad (A1)$$

0 歳は再生産関係から与えられる。また 30 歳以上はプラスグループとして扱われる。H は年始め(f1)および中間(f2)での漁獲による減少を示し

$$H_{f,y,a} = s_{f,y,a} F_{f,y} \quad (A2)$$

$$F_{f,y} = \frac{C_{f,y}}{\sum_a s_{f,y,a} N_{y,a}} \quad (A3)$$

である。ここで $s_{f,y,a}$ は漁業 f の a 歳の選択率、 $F_{f,y}$ は漁業 f の漁獲割合である。なお、(A3)式において、年中間の漁業に対しては N は年の中間での値、C が重量であれば分母も資源量とする。また F が大きい場合には補正が行われる (説明は省略)。

・再生産関係

Beverton-Holt 型を仮定し、誤差は対数正規で自己相関を考慮する。

$$R_y = \frac{\alpha S_y}{\beta + S_y} \exp\left(\tau_y - \frac{\sigma_R^2}{2}\right) \quad (A4)$$

$$\tau_y = \rho \tau_{y-1} + \omega_y$$

ここで S は親魚資源量、 ρ は再生産関係式からの残差の系列相関係数である。実際には α 、 β のかわりに steepness parameter h が用いられる (A15 式参照)。

・漁業の記述

漁業は、1)日本の4-9海区および他の日本型のはえ縄漁業、2)台湾のビンナガ漁業の混獲および流網漁業、3)日本の海区2ではえ縄漁業、4)日本の海区1(産卵場)ではえ縄漁業、5)インドネシアの産卵場ではえ縄漁業、6)豪州表層漁業、の6種類に分類される。このうち1)と2)は年中央でのパルス漁業、その他は年初のパルス漁業として扱われる。

・選択率

選択率 s は年齢の関数で、各年において平均値が1になるように規格化される。年齢に対してなめらかな変化となるよう、3次の差分に相当するペナルティ項が付けられる。漁業1)と6)では年変化も考慮される。年変化は4年毎におこり、その間の変化は無いものとする。その他の漁業では選択率の年変化はない。

・自然死亡係数

年齢別の自然死亡係数を

$$M_a = M_0 - (M_0 - M_{10}) \left(\frac{a}{10} \right)^{0.7} \quad (\text{A5})$$

で計算する。ここで M_0 、 M_{10} は推定パラメータである。 M_{10} は10歳以上に適用される。

・標識再捕のモデル

標識魚に対しても非標識魚と同じ資源動態を仮定する。ただし放流年は別扱い。再捕尾数の期待値 r は、標識魚の数を $T_{y,a}$ として

$$r_{f,y,a} = s_{f,y,a} F_{f,y} T_{y,a} \quad (\text{A6})$$

となる。再捕の報告数の期待値は、これに報告率 λ を掛けたものとなる。

A2. Conditioning の方法

Conditioning の作業自体は資源評価に近い。上記のモデルを用いて、体長・年齢組成、CPUE、標識再捕などに関する尤度関数を作成し、ベイズ統計によって再生産関係のパラメータや自然死亡係数などを推定する。

これら OM の構造とパラメータの推定方法は、Butterworth et al.(2003)のミナミマグロ資源評価モデルと類似したものとなっている。

計算は漁業開始(1952年)以前の1931年から行われ、2001年まで推定される。漁獲量データは2001年まで用いられるが、体長組成やCPUEは2000年までである。

A2.1.使用するデータ

Conditioning に使用する基本的なデータは、全漁獲量、漁獲物の体長組成または年齢組成、CPUE、標識再捕データである。また付随して年齢別体長、体長・体重関係などの情報も必要になる。

- ・全漁獲量：1952年～2001年の6種類の漁業別漁獲量。
- ・漁獲物体長・年齢組成：1)～4)の漁業の年別の漁獲物体長組成、5)と6)の年別漁獲物年齢組成、1952年～2000年。
- ・CPUE：1969年～2000年までの4歳以上の日本のはえ縄 CPUE。提案されている5種類の CPUE のメジアンを使用。
- ・標識再捕データ：1991年～1997年の年別年齢別放流尾数と再捕尾数（放流年および放流年以後）、報告率

これらに加え、年別年齢別体長（年初と年中央の2種類）、体長・体重関係のパラメータ、体長・年齢組成データの有効サンプルサイズ（年別、漁業別）、 q の年による変化、などの数値やパラメータを与えてやる必要がある。

A2.2.推定するパラメータ

Conditioning において以下のパラメータが推定される。

B_0 ：初期親魚資源量

q ：はえ縄 CPUE と資源量の比例係数

h ：再生産関係の steepness parameter

σ_I ：CPUE（の対数）のばらつきの標準偏差

M_0 ：0歳の自然死亡係数

M_{10} ：10歳以上の自然死亡係数

ω_y ：加入尾数の毎年の再生産関係式からのずれの項

$S_{f,1951,a}$ ：各漁業の選択率

$\gamma_{f,y,a}$ ：選択率の年変化（漁業1）と6)のみで4年おき

なお再生産関係の系列相関のパラメータ ρ は0として推定された。

A2.3.尤度関数

CPUE、体長・年齢組成、標識再捕の3種類のデータに対応する3種類の尤度関数が作成される。全漁獲量は正確な値として扱われる。

- ・CPUE データの尤度

$$-\ln L = n_I \ln(\sigma_I) + \frac{1}{2\sigma_I^2} \sum_y \left(\ln(I_y) - \ln(\hat{I}_y) \right)^2 \quad (A7)$$

ここで I は CPUE、 n_I は CPUE のデータ数。なお $\hat{\cdot}$ はモデルから予測される値を示す。CPUE

の予測値は資源量から

$$\hat{I}_y = qq_y \sum_{a=4}^{30} \left(\frac{S_{f1,y,a}}{\frac{1}{27} \sum_{j=4}^{30} S_{f1,y,j}} N_{y,a}^* \right)^\omega \quad (\text{A8})$$

によって計算される。ここで N^* は年の中間での資源尾数、 q は資源量と CPUE の比例係数、 q_y は q の年依存性を示し外部より与える（毎年 0.5% 増加を仮定）。

・体長組成・年齢組成の尤度

$$-\ln L = \sum_{f,y,k} n_y^f p_{f,y,k} \ln(\hat{p}_{f,y,k}) \quad (\text{A9})$$

ここで $p_{f,y,k}$ は y 年の漁業 f における体長または年齢階級が k の魚の比率、 n_y^f は有効サンプル数である。体長組成の予測値は、 a 歳の体長分布を平均 μ_a 、分散

$$\sigma_a = 2 + \frac{\mu_a}{30} \quad (\text{A10})$$

の正規分布として計算する。平均体長 μ_a は外から与えられる。

・標識再捕の尤度

$$-\ln L = \sum_{y,a} \frac{1}{2} \left(\frac{\sqrt{r_{y,a}} - \sqrt{\hat{r}_{y,a}}}{1.6} \right)^2 \quad (\text{A11})$$

ここで $r_{y,a}$ は放流から一年以上たってから y 年に a 歳で再捕された標識魚の数である。

A2.4. ペナルティ項または事前分布

推定に当っては尤度関数に加えさまざまなパラメータに対するペナルティ項および事前分布が付け加えられる。

・再生産関係の残差のペナルティ項

$$-\ln L = \frac{1}{2} \sum_y \left(\frac{\omega_y}{0.6} \right)^2 \quad (\text{A12})$$

・ M_0 、 M_{10} 、 h に関する事前分布

$$-\ln L = \frac{1}{2} \left(\frac{M_0 - 0.4}{0.04} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{M_{10} - 0.1}{0.06} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{h - h^*}{0.1} \right)^2 \quad (\text{A13})$$

ここで h^* は指定された h の範囲の中央値である。

・ 選択率に関する事前分布

$$-\ln L = \sum_{f,y,a} \frac{1}{2} \left(\frac{\ln s_{f,y,a+3} - 3 \ln s_{f,y,a+2} + 3 \ln s_{f,y,a+1} - \ln s_{f,y,a}}{0.3} \right)^2 + \sum_{f,y,a} \frac{1}{2} \left(\frac{\gamma_{f,y,a}}{\sigma_s} \right)^2 \quad (\text{A14})$$

第一項は年齢間のなめらかな変化、第二項は年変化に関する項である。 σ_s として漁業 1) では 0.5、漁業 6) で 2 が使われる。

ここで示した尤度関数とペナルティ項・事前分布の和が目的関数となる。

A3. MP テストに用いる OM の仕様とシナリオ

MP のテストは、基本的には conditioning に用いられたのと同じ構造の OM で、conditioning で推定されたパラメータを用いて行われる。ただし、いくつか変更が行われ、また本文中でも述べたように不確実性をカバーするために、単一のパラメータ値ではなく幅広い設定の下でシミュレーションが行われる。本文中でも述べたように、conditioning は資源評価作業に近いが MP テストは将来予測作業に近く、モデルの仮定などが同一でも全く別のプログラムが必要となる。Conditioning で 2001 年まで推定されているので、MP テスト用 OM では 2002 年から 20 年間のシミュレーションを行う。ただし、現状に合わせて 2004 年までの TAC は 2001 年の漁獲量と同じとし、2005 年の TAC から MP 候補によって TAC を決定し管理する。

MP テスト用 OM からは CPUE データや各漁業の年齢別漁獲尾数データが出力される。これを用いて MP 候補のプログラムが TAC を計算する。TAC はテスト用 OM に渡され、OM プログラム内で資源動態の計算が行われ、再び CPUE や漁獲尾数データが出力される。これが 20 年間繰り返される。さらに、A3.2. で示すような方法でパラメータの値を変えて 2000 回の計算が行われる (2000 個のシナリオの下でシミュレーションが行われると考えてよい)。

なお以下に示した reference case 以外に、robustness テストとして、(A8)式で基準となる選択率の年齢範囲を変えた場合、1977 年にレジームシフトが生じこの前後で再生産関係が変化している場合、2006 年に突然 q の変化が生じる場合、漁獲量の推定値がバイアスを持っている場合の検討も行われる。

A3.1. Conditioning との相違点

・ 再生産関係

Conditioning では $\rho = 0$ で推定されたが、MP テスト用 OM では残差から計算された ρ の値 (おおよそ 0.6 前後となる) を用いて、自己相関があるモデルを用いて加入尾数を発生さ

せる。また、再生産関係式からのばらつきの大さを示す(A4)式の τ の標準偏差 σ_R は、1965年～1995年の推定値（ただし下限を 0.4 とする）が使われる。

- ・ 漁業と選択率

6種類の漁業のうち、3)と4)は行われていないため、漁業はそれ以外の4種類となる。これら4種類の漁業間でのTACの配分は従来どおりの比率とする。

各漁業の選択率はconditioningで推定された最近年の値が使われるが、漁業1)、6)に関してはランダムな変動が導入された。さらに漁業6)については、3歳魚の割合が少なければ他の年齢にターゲットする効果が導入された。

- ・ CPUEデータの発生方法

CPUEデータは(A8)式を用いて発生させられるが、これに自己相関のある対数正規誤差項が掛けられる。自己相関、誤差の標準偏差とも過去のデータからの推定値が用いられる。ただし標準偏差の下限は0.2とする。

- ・ 年齢組成データの発生方法

各漁業の有効サンプルサイズ（30個～500個）の下で、多項分布によってデータが発生させられる。漁業1)と2)に関しては体長組成として発生させたあと、スライス法により年齢組成に変換される。

A3.2.テスト用OMのシナリオ

自然死亡係数、steepness、CPUEと資源量の関係の3種類に関しては、唯一の値を使用せず、conditioningの事後分布や外部から指定する複数の値を使用する。

- ・ 自然死亡係数 M_0 、 M_{10}

M_0 、 M_{10} ともconditioningにおいてベイズ統計で推定された事後分布を用いる。事後分布からのこれらの値の発生はMCMC（後述）によって行う。

- ・ Steepness parameter h

0.3から0.8までを低(0.300-0.467)、中(0.467-0.633)、高(0.633-0.800)に3等分し、それぞれの範囲では一様分布に近くなるように設定される。実際には比較的一様となる事後分布が用いられ、M同様MCMCによって値が発生させられる。低中高それぞれの重みは0.2、0.6、0.2とする。

- ・ CPUEと資源量の関係 ω

(A8)式の ω が、1（直線関係）と0.75（非線形）の場合の2種類を行う。それぞれの重み

は 0.6 と 0.4 とする。

A4. 使用される PS

PS は会議のたびに数が増え、最終的には以下の 17 種類が使われることになった。ここで、Y は管理開始年（今回のシミュレーションでは 2002 年）、S は親魚資源量、C_{surface} は表層漁業の漁獲量である。

$$(1) \frac{1}{5} \sum_Y^{Y+4} C_y \quad (2) \frac{1}{20} \sum_Y^{Y+19} C_y \quad (3) \frac{1}{20} \sum_Y^{Y+19} \frac{C_{surface,y}}{C_y}$$

$$(4) \frac{S_{Y+5}}{S_Y} \quad (5) \frac{S_{Y+20}}{S_Y} \quad (6) \frac{S_{2020}}{S_{1980}} \quad (7) AAV = \frac{1}{20} \sum_{Y-1}^{Y+18} \frac{|C_{y+1} - C_y|}{C_y + 1^{-6}}$$

$$(8) \text{Min}_y \left\{ \frac{S_y}{S_y} \right\} \quad (20 \text{ 年間での最小値})$$

$$(9) \frac{S_{2020}}{S_{MSY}}$$

$$(10) \frac{1}{5} \sum_{y=2018}^{2022} \frac{C_y(\text{age2 and older})}{\text{Total Biomass}_y(\text{age2 and older})} \Bigg/ \frac{C \text{ at MSY}(\text{age2 and older})}{\text{Total Biomass at MSY}(\text{age2 and older})}$$

$$(11) A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta TAC)_i I_i$$

$$I_i = \begin{cases} 0 & TAC_{2005} < TAC_{2008} < TAC_{2011} \\ 0 & TAC_{2005} > TAC_{2008} > TAC_{2011} \\ 1 & \text{その他} \end{cases} \quad (\text{ここで } \Delta TAC = TAC_{2004} - TAC_{2000})$$

$$(12) \#[\Delta TAC_{y-1} * \Delta TAC_y] < 0 \quad (\text{ここで } \Delta TAC = TAC_y - TAC_{y-1})$$

$$(13) \#[\Delta S_y * \Delta TAC_y] < 0$$

$$(14) S_{2022} / S_{2022}^* \quad (\text{ここで } S_{2022}^* \text{ は漁獲がない場合の 2022 年の SSB})$$

$$(15) \text{Min}[\Delta TAC_y] \quad (\text{但し h 低のシナリオのみ})$$

$$(16) \text{2018 年} \sim \text{2022 年の親魚資源量の回帰係数が正となる確率}$$

$$(17) \text{Min}(CPUE_y) / CPUE_{2022}$$

このうち(1)、(2)、(10)は漁獲量の最適化、(4)、(5)、(6)、(8)、(9)、(14)、(16)は資源状態の健全性、(7)、(12)、(15)、(17)は漁獲の安定性、(11)、(13)は管理の整合性の指標である。管理の整合性とは新たな概念であるが、(11)であれば、当初の TAC の増減の方向がその後の TAC 変化の方向と整合性があったかどうかを見る指標となっている。すなわち、管理開始後 TAC を増加させた後すぐに減少させる（あるいはその逆）といったことが生じる程度を示している。また(13)は TAC の変化の方向と親魚資源量の変化の方向の整合性の指標である。

A5. 結果の取りまとめと比較方法

・合意された方法

MP 候補間の比較は、2022 年と 2002 年の親魚資源量の比を固定して行われる。各 MP 候補において、パラメータ（例えば(1)式における k の値など）を調整（チューニング）することにより、2000 回のシミュレーションにおける S_{2022}/S_{2002} のメジアンが、それぞれ 0.7、1.1、1.5 となるような 3 種類の管理結果を示す。S の比に関して同一の条件下で漁獲量を比較することにより、MP 間の比較が可能となる。また漁獲量以外に、上記の PS として示された様々な指標によって比較する。

漁獲量の安定性も重要な要因であり、MP として TAC の変化を毎年行うオプションと 3 年おきに行うオプションの 2 つを示すこととなった。

このように MP の比較方法の大枠は決まったが、具体的にどの PS に注目して比較するかといった点になると現時点ではまだはっきりしていない。2004 年 4 月開催予定の第 3 回 MP 作業部会ではこのあたりで議論が紛糾する可能性もある。研究者レベルで最適な MP について合意されれば、あとは親魚資源量の比とそれと反比例の関係にある漁獲量などを見ながら、本委員会がどのようなチューニングパラメータの値で管理を行うか最終的な判断を下すことになる。

・合意に至るまでの議論

複数のシナリオで行われている MP のシミュレーション結果の比較方法として以下の 3 種類が議論された。

- 1) 重み付け平均をとる方法：各シナリオのもっともらしさによる重み付け平均をとる。
- 2) 個別に比較する方法：各シナリオを個別に比較する。シナリオ数が少ない場合に可。
- 3) 足切りによる方法：各シナリオにもっともらしさのランクをつける。ランクに依存した資源量に関する基準を設定し、それを満たすことができない MP は足切りする。残った MP の中で漁獲量の観点で最適なものを選択する。

2)の方法はシナリオ数が多いと現実的ではない。3)の方法についてかなり議論されたが MP のパラメータを調整すれば、資源量に関する基準をクリアできることから、資源量に関する目標を同じにして（チューニングして）、その上で漁獲量の比較などを行うことが適

切であろうとのことになった。

チューニングの対象を決定するには、管理目標が本委員会から示されていることが望ましいが、明確ではないため、研究者からの案として S_{2022}/S_{2002} が示されることとなった。

A6. 用語の説明

CCSBT における MP の開発作業において、水産資源学の教科書（和書）には載っていない用語がいくつか使われ、非常に重要な役割を果たした。ここではそれらについて簡単に説明する。

・ Steepness parameter h

Beverton-Holt 型再生産曲線は通常(A4)式のように記述される。しかしこの形であるとパラメータである α 、 β の値が与えられてもどれくらいの大きさの密度依存性があるかといった具体的な曲線のイメージがつかみにくい。このため steepness h を用いた定式化が盛んになってきている(Haddon,2001)。 h は以下の式で定義される。

$h = (\text{未開発の親魚資源量から } 20\% \text{ の親魚資源量での加入尾数}) / (\text{未開発状態での加入尾数})$ 従って、 $h=0.2$ であれば密度効果は全くなし（親子関係は直線）、 $h=1$ であれば強い密度効果あり（親魚資源量によらず加入尾数は一定）ということになる。ミナミマグロの OM では h の大小によって資源動態が大きく変化し、今回の OM 作成に当って不確実性のキーパラメータとなった。最終的には $h=0.3\sim 0.8$ の値が使われることになった。

なお(A4)式を h を使って書くと

$$R_y = \frac{4hR_0S_y}{B_0(1-h) + (5h-1)S_y} \exp\left(\tau_y - \frac{\sigma_R^2}{2}\right) \quad (\text{A15})$$

となる。ここで、 R_0 と B_0 はそれぞれ未開発状態での加入尾数と親魚資源量であり、これらの具体的な計算はややめんどろである。

・ MCMC(Markov Chain Monte Carlo algorithms : マルコフ連鎖モンテカルロ法)

MCMC は指定した確率分布に従うような乱数を発生するアルゴリズムである。これを用いることによって、解析的な計算が困難な複雑な確率分布で積分した値などを数値的に計算することができる。ベイズ統計においては事後分布の計算が難しかったが、MCMC を用いると数値的に計算することができるため、現在ベイズ統計で多用されている。

このように MCMC 自体は数値計算のひとつの手法であるが、CCSBT の MP 開発においては、MCMC がベイズ統計の事後分布の利用と同義で用いられていた。すなわち MCMC で計算するという意味は conditioning で得られた M や h の事後分布を用いてテスト用 OM を動かすということを意味している。

附記

・ミナミマグロ資源評価をめぐる

筆者が初めてミナミマグロの資源評価会議に出席したのは1990年のことである。ちょうど遠洋水研の会議室で開催されていたため、VPAの部分だけでも出席するよう言われて参加することになった。ミナミマグロに関しては日豪で共同調査も行われていたので、両国仲良く資源評価をしているのかと思っていたら、豪州の研究者が開口一番「日本のVPAの結果は信用できない」と言い出したので、驚愕した記憶がある。既にしばらく前から資源評価をめぐる厳しい対立関係にあったらしい。それからしばらくは日豪間で相手の資源評価の叩き合いをしているといった印象であった。日本側の解析の若干の不備を指摘して、豪州の科学者が「日本のやっていることは科学ではない」などと発言したこともあった。しかし、それでも一応は科学的な議論が主であり、CPUEの標準化やVPAの方法について細かな議論などが交わされたりした。ミナミマグロ会議は日本語も公用語であり、会議には通訳が入る。資源評価の方法論に関する非常に専門的な議論が延々と続き、「一応訳はしているが何を言っているのか全く分からない」という悲鳴を通訳の方から聞いたこともある。しばらくこのような状態が続いたが、議論をしても平行線をたどるだけであることが明らかになってくると、「何を議論するかという議論」や「どういった形式で議論するかという議論」に多くの時間が割かれることとなり、実際の方法論や仮説に関する議論がほとんど行われないうような状態になった。こうなると科学委員会としては末期的である。調査漁獲が計画されたのはちょうどそんな頃であった。そしてそれは国際裁判へと発展し（小松・遠藤, 2002）、しばらくの間資源評価自体が行われなくなった。

・OMについて

OMの考え方を初めて知ったのは、Hilborn and Walters(1992)の教科書である。本文中にも述べたように、他の多くの科学分野では実験によって検証可能であるが、水産資源学ではこの部分ができないため、水掛け論になったり、あっているのかいないのかさっぱりわからない仮設や理論をもとに評価がなされることになる。OMを用いたようなやり方を用いないと、水産資源学に発展性は無いのではないかと思った。しかしなかなか自分自身では適用する機会がないままになっていた。

CCSBTでOMを用いたMPが開発されることとなったのを機会に、このノウハウをぜひマスターし、広く知ってもらいたいと思い、国内の資源評価会議などで積極的に紹介している。CCSBTでの議論を見て、その実施にはいろいろと難しい面もあることを改めて認識したが、やはりこういった方法論は必要であると考えている。

・OMとフィードバック管理

IWCのRMPの紹介ではフィードバック管理に重点が置かれることが多い。しかし、RMPが反捕鯨派も含めて合意されたのは、フィードバック管理を使ったからというより、OMを

用いたシミュレーションを徹底的に行ったことが大きいのではないかと個人的には考えている。

フィードバック管理とは、松田(1999)によれば「毎年同じ方策をとり続けるのではなく、状況変化に応じて方策を変える管理」である。水産資源管理では「資源状態によって F を変える」といった意味で使われているようである。この場合 F の絶対値とそれをどのように変えるかが問題で、資源状態によって F を変えさえすればうまく管理できるわけではない。例えば資源量の減少に伴い F を極端に下げると、禁漁と大きな TAC を繰り返すような管理に成りかねない。フィードバック管理でありさえすれば良いというものではなく、それが本当に適切な管理であるかどうか、OM を使ったシミュレーションによる検討が不可欠である。一方、F 一定の管理も理想的な状況では十分妥当な管理である。F 一定に近い管理でもかまわないのか、それとも資源状態によって F を大きく変えるような管理とすべきなのかはその資源や漁業の状況、資源評価の精度等に依存し、やはりシミュレーションによって検討するしかないと思う。なお上記の定義であれば、漁獲量一定方策も資源量によって F が変化することになるので、りっぱなフィードバック管理の一つである（ただしフィードバックの方向が逆であるが...）。

・ CCSBT での MP 開発

OM を用いた MP の開発については、IWC での話を少し聞いていた程度で、具体的な知識はほとんど無かった。CCSBT 会議には IWC での RMP 開発経験者やその他の魚種に適応した経験者などの出席があり、議論はそれらの研究者のリードの下に行われた。IWC での RMP 開発以降、様々な魚種に適用される中で、いろいろと新しい概念やノウハウも蓄積されつつあるようである。RMP に関する多少の知識程度では議論に付いていくには全く不十分で、内容を理解するのに非常に苦労した。また本稿を取りまとめるに当り、あらためて過去のレポートなどを読み返してみると、理解が不十分であった点や重要性を正しく認識できていなかった部分が目に付いた。CCSBT で使われた MP 開発のノウハウを、本稿で少しでも紹介できたらと思う。

・ CCSBT の MP 開発と IWC の RMP 開発

談話会では会場が鯨研の会議室ということもあって鯨類研究者からの質問がいくつかあったが、全体としてかなり発表内容が分かりにくかったようであった。私の発表の拙さによる面が大きいのであろうが、IWC の RMP の開発と CCSBT の MP の開発では以下の 2 点が大きく異なっており、理解の障害になっているものと思われる。

主な不確実性の違い：鯨類では RMP の実施に当って系群の仮説が大きな問題となっている。系群の仮説を変えた OM が幾つも作成されて、管理方法の検討が行われている。ところが、ミナミマグロの場合は産卵場が一箇所ということもあって一系群ということで合意されている。従って、鯨類で最大の問題となっている系群構造は全く問題となっていない。

一方、鯨類の場合、親子関係はかなりはっきりしている。卓越年級などはおこらないし、その逆の弱い年級などもないようである。このためシミュレーションでは親子関係に確率変動を入れていない。生産性の大きさについてのみ不確定性を考慮し、2種類のMSYR (MSY/MSYL) でシミュレーションが行われている。これに対し、まぐろ等の魚類では、再生産関係が不明確である。シミュレーションを行う場合、大きな確率変動を与える必要があるし、そもそも再生産関係として何らかの関数関係が仮定できるのかどうかすら定かでない場合が多い。このため、OMによるシミュレーションは再生産関係の不確実性を重視したものとなる。このように鯨類とミナミマグロでは主要な不確実性が異なっている。

シミュレーションの方法の違い：IWCにおけるRMP開発の初期段階では比較的一般的な状況でのシミュレーションが行われたようである。そして、実際の資源への適用に際しては系群構造の不確実性を考慮したImplementation simulation trialを行い、最終的な管理方法を決定する。これに対し、CCSBTのMP開発では最初からミナミマグロ資源への適用を想定し、ミナミマグロデータを用いてコンディショニングが行われたOMを用いてMPの検討が行われている。IWCのRMP開発段階のシミュレーションとImplementation simulation trialを同時に行っているようなものである。

・CCSBTでのその後の状況

2003年10月に開催された本委員会の議論、およびMPテスト用OMを用いたシミュレーションの暫定的な結果から、MP候補の比較方法や使用するPSについて今後いくつか修正が加えられる予定である。2003年11月現在、電子メールを通じて検討が続けられている。