

〈寄稿〉

TACを算定する新しいアプローチ：ミナミマグロの管理方式の開発と運用

黒田啓行^{1,2†}, 境 磨², 高橋紀夫³, 伊藤智幸²

A new approach for setting TACs: Development and implementation of a management procedure for Southern Bluefin Tuna

Hiroyuki KUROTA^{1,2†}, Osamu SAKAI², Norio TAKAHASHI³ and Tomoyuki ITOH²

みなみまぐろ保存委員会（CCSBT）では、2011年からTACの算定に管理方式（MP）が使われ始めた。このMPの運用は地域漁業管理機関としては世界初である。本稿では、CCSBTで2002年から始まったMPの開発過程と近年の運用実態について概説した。MPは観察データからTACを算定するための一連のアルゴリズムであり、徹底的なシミュレーションによりその性能が評価され、不確実性に対して頑健で、かつ管理の目的に適合したものが選ばれる。シミュレーションモデルの作成、MPのアルゴリズムの構築、MP間の性能比較、最終案の選定、管理目標の扱い、定期レビューなど一連の議論についてまとめた。CCSBTでの先駆的事例が我が国における管理戦略評価の今後の発展と科学的知見に基づく資源管理の推進に貢献することを期待する。

The Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna (CCSBT) has implemented a management procedure (MP) to guide the setting of the total allowable catch (TAC) since 2011. The implementation of the MP in the CCSBT was the world's first case for regional fisheries management organizations. We reviewed how the MP has been developed since 2002 in the CCSBT and it has been implemented recently to the management of southern bluefin tuna. The MP is defined as a pre-agreed series of algorithms to specify the TAC based on monitoring data. Candidate MPs were tested by extensive simulation work using an operating model, and then a MP, which shows robustness to a variety of uncertainties and meets management objectives, was finally adopted by the CCSBT. This paper overviews a series of discussion topics: the construction of the operating model, the development of MP algorithms, the performance comparison among candidate MPs, the selection of the MP, the set of management objectives, and the review process of the MP implementation. We hope that this pioneering work done by the CCSBT will contribute to the further development of management strategy evaluation in Japan and the promotion of science-based fishery resource management.

Key words: management strategy evaluation, operating model, CCSBT

はじめに

水産資源を合理的に利用し続けるために、科学的知見に基づく資源管理の重要性が社会的に強調されるようになってきた。しかし、研究者が直面している課題はまだ多い。資源管理を難しくしている主な要因として、次の3点が挙

げられる。第一の要因は、生態系が複雑でその動向の予測が困難な点である。自然の複雑さや変動の大きさに対して、人間の科学的知見には限界があるため、水産資源の動態を正しく予測することは容易ではない。また資源評価で使われる漁業データや調査データにも誤差やバイアスはつ

2015年5月20日受付, 2015年10月5日受理

¹ 水産総合研究センター西海区水産研究所・資源海洋部
〒851-2213 長崎市多良町1551-8

Seikai National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, 1551-8 Taira-machi, Nagasaki, Nagasaki 851-2213, Japan

² 水産総合研究センター国際水産資源研究所・くろまぐろ資源部
〒424-8633 静岡市清水区折戸5-7-1

National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency, 5-7-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka, Shizuoka 424-8633, Japan

³ 水産総合研究センター国際水産資源研究所・くろまぐろ資源部
〒236-8648 横浜市金沢区福浦2-12-4

National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan

[†] kurota@affrc.go.jp

きものである。第二の要因は、科学的実験や検証が難しい点である。資源の管理方策の妥当性を野外実験などで実際に検証することは容易ではない。第三の要因は、管理の目標が人によって異なる点である。一般に、管理目標として「漁獲量の最大化」、「漁獲量の安定」、「資源の保護」などが挙げられるが (Punt, 2006), これらの目標を全て同時に達成することは難しい。

これらの要因が複雑に絡み合い、かつて資源管理に混乱をもたらしたのがミナミマグロを管理するみなみまぐろ保存委員会 (CCSBT: Commission for the Conservation of Southern Bluefin Tuna) である。また解決策の一つを提示したのもこの委員会だと言える。CCSBTは2002年より漁獲可能量 (TAC: Total Allowable Catch) を決める新しいアプローチである管理方式 (MP: Management Procedure) の開発に着手した。途中で数年の中断があったものの2011年に最終合意し、地域漁業管理機関として世界初の運用を始めた。MPとはあらかじめ定められたアルゴリズムにより、漁業や調査データからTACを決める漁獲制御ルール (HCR: Harvest Control Rule) である (高橋, 2014)。例えば、「CPUEが前年から10%上昇すれば、翌年のTACを5%増加させる」といったように、CPUEなど資源動向に関する情報をMPへ入力すると、MP内部で資源状態を判断し、それに応じたTACを出力するようなイメージである。ちなみに、MPの日本語訳としては、「管理方策」や「管理戦略」なども用いられるが、本稿では「管理方式」を用い、より一般的な意味での管理の方法に言及する際に「管理方策」という言葉を一部で使った。

このCCSBTにおけるMPの開発と運用は資源管理の歴史上、重要な成果であるが、残念ながら我が国では実状があまり知られていない。そこで、本稿では、CCSBTでMPの開発や運用に携わった経験に基づき、開発過程や課題などについてまとめた。なお、初期の開発の様子や問題点については、平松 (2004) や Kolody et al. (2008), Kurota et al. (2010) などと言及されている。またMP完成直後にその開発の概要を紹介したものとして黒田 (2012) がある。さらに、MPの完成が乱獲資源の再建に果たす役割やMPの詳細な仕様などについては、Hillary et al. (in press) で述べられている。CCSBTのウェブサイト (<http://www.ccsbt.org/>) でも科学委員会やMP作業部会の会合報告書、MPの仕様書などが日本語で公開されている。

ミナミマグロの生態と漁業の変遷

高橋 (2014) に従い、概説する。ミナミマグロは南半球の高緯度温帯域に広く分布し、特にインド洋を中心に大西洋の東部から太平洋の西部にかけて漁場が形成される。インドネシア南岸とオーストラリア北西岸に囲まれた低緯度海域が唯一の産卵場であり、遺伝的にも形態的にも地理的変異が見られないため、単一の系群として管理されている。

大きさは最大体長2メートル、体重150キロを超える大型のマグロである。10歳前後で成熟が始まり、寿命は25年以上と考えられている。

本格的な商業漁業として日本のはえ縄操業が1950年代初頭に開始され、オーストラリアの缶詰用の竿釣りと合わせた漁獲量は1961年に最高の8万トンを超えた。その後、日本による産卵場での漁獲の自主規制があったものの、オーストラリアの缶詰用のまき網漁業の発展により、1980年代初めまで約4万トン以上の漁獲が続いた。その後、資源状態の悪化などにより、2か国の漁獲量は減少する一方、ニュージーランド、韓国、台湾、インドネシアによるはえ縄操業が始まった。ちょうどこの頃、資源管理への機運も高まり、1982年に日本、オーストラリア、ニュージーランドによる3国間会議が組織された後、1989年に漁獲実績を下回る漁獲枠が初めて設定され、実質的な管理が始まった。そして、1994年にこの枠組みを公式化する形でCCSBTが上記3国により設立された。2000年代以降、韓国、台湾 (正式には拡大委員会のメンバー)、インドネシアも加盟し、現在、主要な漁業国は全て加盟している。1990年代から2000年代半ばの報告漁獲量は1万5千トンから2万トン程度であり、親魚資源量は初期資源量の10%未満と推定され、乱獲状態にある。

現在の主な漁法ははえ縄とまき網で、インドネシア以外のはえ縄操業は高緯度の索餌域で主に4-10歳の未成魚を漁獲対象とし、インドネシアは産卵場に集まる10歳以上の親魚を対象としている。オーストラリアでは、1990年以降、2-4歳の若齢魚を半年程度育成する畜養が盛んになり、その種苗を確保するオーストラリア大湾でのまき網操業が主な漁獲である。ほとんどのミナミマグロは日本に輸出され、クロマグロと並ぶ最高級マグロの一種として、主に寿司や刺身として食される。

CCSBTによる管理

CCSBTではTACによる出口管理を主な管理措置として実施している。TACは国別に配分され、それぞれの国内の管理は旗国主義により各国が責任をもって行うことになっている。委員会内の全ての意思決定は全会一致が原則であり、各国が納得いくまで議論を深めることができる反面、意見の相違が大きいと、意思決定が難しくなる場合がある。

TACは科学委員会からの勧告に基づき、各国の管理者 (行政代表者) からなる本委員会が決定する。科学委員会は加盟国の研究者 (20-30名)、独立議長、諮問パネル (4名ほど) からなる。独立議長と諮問パネルは本委員会からの依頼を受け、加盟国間の合意形成を促進するために、第3者の立場から議事進行や意見調整、研究のアドバイスなどを行う。諮問パネルの権限は公式に保障されており、例えば科学委員会でTACの勧告案に合意できない場合でも、

諮問パネルが独自の見解を本委員会に示すことができる。これまでに、レイ・ヒルボーン（アメリカ）、ジョン・ポープ（イギリス）、ジム・イアネリ（アメリカ）、アナ・パルマ（アルゼンチン）など、世界最高水準の知識と経験をもつ水産資源学者が諮問パネルを務めている。この諮問パネル制度は後述の国際裁判の後、強化された。また諮問パネルは個別の問題に関する作業部会のリーダーを担当することもあり、MP開発についてはパルマ博士がリーダーを務めた。

1990年代、CCSBTではTACは資源評価と将来予測の結果に基づき算定していた。具体的には、まず漁獲量やCPUE（Catch Per Unit Effort）、年齢別漁獲尾数などのデータをもとに、チューニングVPA（Virtual Population Analysis）と呼ばれる資源評価モデルにより、過去から現在までの資源量や漁獲死亡率などを推定し、資源の現状を診断する。さらに、いくつかの一定の漁獲量のもとで、将来予測を行い、将来の資源回復レベルにより適切なTACを選定する。しかし、現実には資源評価にまつわる不確実性が、この一連の算定過程を困難にし、TACの合意形成を妨げた。例えば、CPUEから分布域全体の資源量を反映した資源量指数を計算する際、過去には漁獲があったが、現在は操業していない場所に魚がいるとみなすかどうかによって、資源量指数が示す資源の動向は変わってくる。特に、ミナミマグロのように、資源の減少だけでなくTAC設定による管理措置に伴って操業場所／時期が歴史的に大幅に縮小している場合、この問題は深刻となる。このような不確実性により、1990年代後半、科学委員会で資源評価結果に合意できないことが多く、できた場合でも本委員会でTACが設定できない状況が続いた。さらに、この資源量指数の不確実性を解消するために1998年と1999年に実施された日本の調査漁獲をめぐり、科学の名を借りた商業漁業だと主張するオーストラリアとニュージーランドが日本を国連海洋法裁判所に提訴するに至った（小松・遠藤，2002）。2000年に出された判決では、この問題は裁判で争う事案ではないと訴えが退けられたが、この出来事をきっかけにCCSBTにおける科学プロセスの正常化を求める機運が高まった。ちなみに、ミナミマグロは1994年に国際自然保護連合（IUCN）のレッドリストに絶滅危惧IA類（絶滅寸前）として掲載されており、野生動物保護の観点からも国際的な注目度が高い。ただし、このリスティングには問題点が指摘されている（矢原ら，1996）。

MPの開発

このような管理の行き詰まりを解消するため、本委員会での合意のもと、2002年にMPの本格的な開発が始まった。研究者間の議論は2000年から始まっていたが、2001年に科学委員会からの正式な提案を受け、MPの開発が本委員会により承認された。従来のように資源評価やTAC算定

の結果について合意するという形式とは異なり、TAC算定に使用する情報や算定のアルゴリズム、意思決定の過程について事前に合意しておくという点が対照的である（高橋，2014）。この根幹には順応的管理や予防的措置の哲学があり、不確実性の存在を前提とした管理が考えられている（黒田ら，印刷中）。MPの考え方は国際捕鯨委員会で最初に開発され、1994年に改訂管理方式（RMP: Revised Management Procedure）と呼ばれるMPが採用された（田中，2002）。しかし、監視制度等に関する合意が成立していないため、国際捕鯨委員会ではいまだ使われていない。CCSBTにおけるMPの開発は地域漁業管理機関では国際捕鯨委員会に次ぐもので、国際捕鯨委員会で培われたノウハウが活かされている部分も多い。

MPの開発で一番大変なことは、MPのアルゴリズム以外にも管理目標や想定外の出来事への対応策など多くのことを事前に決めておかなければならないことである。研究者だけで決められない事柄も多く、管理者や利害関係者（漁業者や環境NGOなど）などと公式、非公式を問わず何度も意見交換を行った。諮問パネルが各国を巡回し、説明会を開催したこともあった。MPとは何かという基本的な説明に加えて、ミナミマグロの場合、資源の再建と漁業の維持をどう両立させるのかというイメージを加盟国間で共有することが特に重要であった。そのために、研究者が提供する解析結果をもとに管理者や利害関係者が意見を絞り、必要な場合は研究者にさらなる解析を要求するというやり取りを本委員会と科学委員会間で何度も行った。

オペレーティングモデル（OM）の作成

MPは種々様々な不確実性に対して、頑健である必要がある。上記の例だと、未操業の場所に魚がいる場合でもいない場合でも、うまく管理できるMPが理想的であり、もしそのようなMPが開発できれば、この不確実性に対しては頑健だと言える。その検証のため、まず、ミナミマグロの資源動態を真似た仮想現実モデルをコンピュータ上に作る。これをオペレーティングモデル（OM: Operating Model）と呼ぶ。OM上での仮想ミナミマグロ資源に、MPが算定するTACに従った漁獲を行い、資源量の変化をシミュレーションすることで、MPの性能を評価する（Fig. 1）。コンピュータ上では、いくらでも管理の失敗が許されるので、様々なアイデアに基づくMPをテストできる。このようなシミュレーションによるMPの評価プロセス全体は管理戦略評価（MSE: Management Strategy Evaluation）とも呼ばれる。最近では様々な解析手法の妥当性がOMを使ったシミュレーションにより検討されている（市野川ら，2015）。

OMは科学委員会が共同で作成した。単一系群を前提とした年単位の年齢構造と再生産構造をもつモデルであり、海域間の魚の移動など空間構造は考慮していない（Kurota et

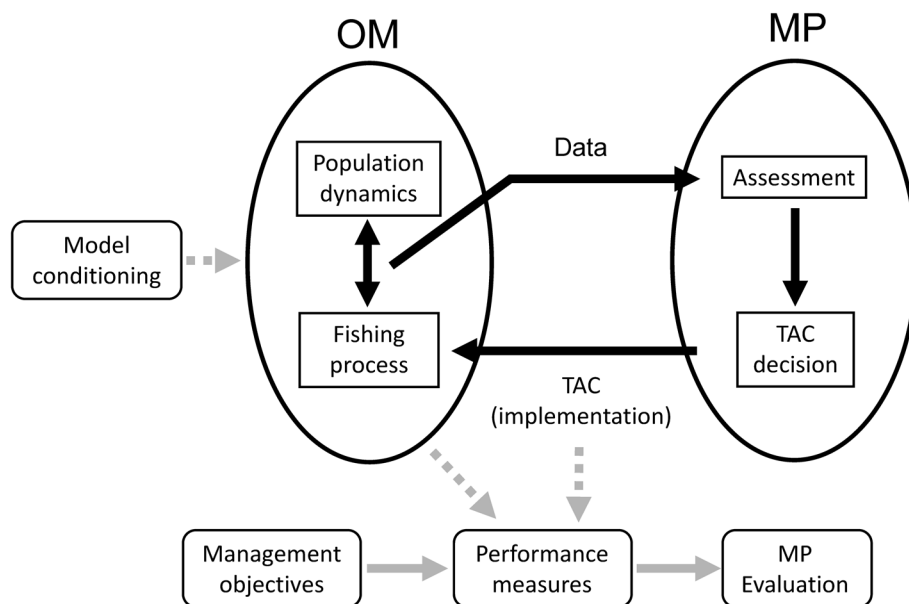


Figure 1. Conceptual overview of MP development using OM approaches (Kurota et al., 2010).

al., 2010). ミナミマグロの個体群動態を真似るため、ミナミマグロの過去50年以上に及ぶ漁業データや調査結果を上手く説明できるように種々のパラメータを推定した。これを条件付け (conditioning) と呼ぶ。この条件付けの作業自体は、通常の資源評価とほぼ同じであり、実際CCSBTではこの条件付けしたOMを資源評価モデルのベースとしても使用している。用いたデータは漁法別漁獲量、漁獲物の体長・年齢組成データ、はえ縄CPUE、航空機目視調査による加入量指数、標識再捕データなどである。これらのデータと成長式などの生物情報から、1950年代から2011年までの資源量、漁獲死亡率、加入量、漁獲の体長・年齢別選択率などのパラメータを推定した。再生産関係のパラメータや自然死亡率については後述のようにいくつかの値を仮定して解析し、不確実性を考慮した。様々な情報を一つの統計モデルで統合しているという意味で、このモデルは統合型資源評価モデル (黒田, 2014) と呼ばれるモデルの一種である。OMやMPのプログラムはAD Model Builder (Fournier et al., 2012) というC++をベースとした最適化用のプログラム言語で書かれた。このOMはCCSBTが独自に開発したプログラムであるため、Stock Synthesis (Methot and Wetzel, 2013) などの既存の資源評価ソフトを使用した場合に比べて、ミナミマグロの特性に合わせた細かいモデル化がしやすい。

資源評価ではなく、MP開発用のOMとして使う場合、不確実性の把握と定量化がより重要になってくる。CCSBTのOM開発では、重要な不確実性の要因として、パラメータ推定の不確実性 (再生産関係と自然死亡率)、条件付けデータの不確実性 (CPUE標準化手法)、モデル構造の不

確実性 (CPUE予測時の年齢別選択率の仮定) などを考慮した (CCSBT, 2011a)。例えば、OMでは再生産関係としてベバートン-ホルト式を仮定しているが、一般的にマグロなどの浮魚資源では再生産関係の把握は難しい。そのため、ステイブネス (Mangel et al., 2010) と呼ばれる生産性を表すパラメータをあらかじめ幅広い5つの値 (この例では0.55, 0.64, 0.73, 0.82, 0.9; ここではそれぞれをシナリオと呼ぶ) に固定して、他のパラメータの推定を行った。しかし、この場合、モデルの推定結果が5つ出てくるため、それらのシナリオ間の相対的重要度をどう捉えるかが次の問題となる。今回のOM開発ではそれぞれのシナリオの尤度に応じて重みをつけることにした。尤度とはあるモデルのもとで観察されたデータが生じる確率のことである。すなわち、尤度によるシナリオの重みづけとは観測データをよく説明できるシナリオほど重要な結果だとみなすが、説明力が低いシナリオも無視しないことを意味する。後述のように、MPの評価では平均的な振る舞いだけでなく、資源状態が悪いシナリオにどう対処できるかを見るため、パラメータ値の分布の裾野部分の取り扱いが重要になることもある。自然死亡率など他の不確実性の要因についても、同様に尤度に基づく重みづけをしたが、CPUE予測時の年齢別選択率の仮定のように、専門家の判断で重みを事前に固定した要因もあった。上記の要因の組み合わせにより、320通りのシナリオを想定し、それぞれのシナリオに適宜重みをつけることで、最終的にMPのテスト用に2000シナリオを用意した。このシナリオのセットをCCSBTでは「リファレンスセット」と呼び、MPを評価する際の基礎となるシナリオセットとして利用した。

リファレンスセットで考慮された不確実性の要因以外にも、他の不確実性（例えば、CPUEと資源量との非線形な関係）や極端な状況（例えば、加入量の急減）を想定したシナリオを用意し、MPのさらなる頑健性を調べた。これらのシナリオにおけるMPの評価は「頑健性テスト」と呼ばれ、開発期間を通して、数十のシナリオが用意された。最終的には、加入の急減や漁獲効率の急増など、管理が非常に難しい状況でどこまで管理ができるかという検討に用いられた。

このように、MPのテストのため、たくさんのシナリオを用意し、様々な状況を想定したが、当然想定外のことが起こる可能性もある。このような例外的な状況に対しては、「メタルール」（後述）という意味決定のフローチャートをあらかじめ用意した。シミュレーションで検討できることには限界があるため、想定したことを明確にしたうえで、さらに想定外のことが起こることも事前に想定しておくことが重要である。

MPの作成

CCSBTで作成したMPは、はえ縄CPUEとオーストラリア大湾での航空機目視調査による加入量指数などを入力データとしてTACを算定するものである。MPをテストする際には、この算定過程を模倣し、過去の資源量指数のデータとOMから出力される将来の資源量指数データを用いて、MPにより将来のTACを算定する（Fig. 1）。OMはこのTACに従い漁業が行われた場合の、翌年のミナミマグロの資源量と資源量指数をシミュレートする。この更新された資源量指数に基づき、再び次のTACをMPにより計算する。それぞれのシナリオに対して、このループを2012年から2042年まで繰り返して将来予測を行い、MPの性能を評価した。MPが算定するのはCCSBT全体のTACであり、基本的に漁業種別の漁獲割合は変化させない。はえ縄CPUEと航空機目視調査による加入量指数はTAC算定に有用な情報で、今後も継続して使用可能だと思われるという理由で選ばれた。なおOM上で仮想データを発生させる際は観測誤差を付加し、さらに将来の加入量変動（将来予測の不確実性）も考慮した。MPの算定スケジュールとしては、前年までのデータ（ただし、加入量指数は当年のものまで）を用いて、翌々年以降3年間のTAC（3年間は同じ値）を算定することを想定した。

MPは各加盟国の研究者が独自に候補を開発し、科学委員会で性能を競い合った。比較的単純なアルゴリズムを持つものが多く、一番複雑なものでもせいぜいプロダクションモデルを使ったもので、通常の資源評価で使われるような複雑なモデル（例えば統合型資源評価モデル）を用いたMPは提案されなかった。これは管理者や利害関係者にもわかりやすいMPが望まれたことや、データの永続的な利用可能性を考慮して複雑なモデルで資源評価をするほどの

情報がOMからMPに与えられていないこと、リファレンスセットだけでも2000シナリオにもなる膨大な計算をこなすには時間的制約がきつかったためと思われる。より本質的な問題として、複雑なモデルほどモデルの前提が破たんした際の頑健性が低いという問題もあったのかもしれないが、この点に関する包括的な検討は今後の課題であろう。

例として、最終候補に残った2つのMPを概説する。一つは日本が開発したHK7（MP名は開発者の氏名に基づく）と呼ばれる単純なアルゴリズムに基づくMPである（Kurota et al., 2011）。このMPは「過去7年間のCPUEのトレンド」と「過去3年間の加入量指数と目標値との大小」からそれぞれTACを求め、その低い方を保守的に採用する。MPにはいくつかの調整パラメータが含まれているが、TACの変化が緩やかになるようなパラメータが選ばれている。もう一つは、オーストラリアが開発したBREM（Biomass Random Effect Model; Hillary and Preece, 2011）と呼ばれるモデルベースのMPで、まず若齢魚と親魚から成る比較的簡単な資源動態を仮定し、CPUEと加入量指数から現在の資源量と資源の増減、加入量を推定する。そして、それらの推定値と目標値との大小からTACを算定する。

MPの評価

MPは大きく分けて3つの観点、「漁獲量の最大化」、「漁獲量の安定」、「資源の保護」から評価された。理想の管理として、漁獲量の最大化と資源の保護には異論はないだろう。これに加えて、漁獲量（TAC）の年変動を小さくしたいという意見が主に漁業関係者から聞かれた。これは価格を安定させたり、操業の計画を立てやすくしたりするためのようで、この意見を反映して、最終的にTACの変更は3年に一度、変更幅の上下限は±3000トンと定められた（ちなみに、これらの制約のリスクも事前に評価したうえで変更方法を決定した）。これら3つの理想に対する達成度を定量的に評価するために、パフォーマンス指標をいくつか設定し、それらの値を見て将来予測の結果を要約した。それぞれの3つの観点に対するパフォーマンス指標の例として、将来5年間の平均漁獲量、漁獲量の年変動率の平均、予測期間中の最低資源量などが挙げられる。

MPの評価を行う際に重要なことは、管理の理想間のトレードオフ（二律背反）を正しく捉えることである。MPの開発を通して認識されたことは、3つの理想を同時に満たすMPは存在せず、特に「漁獲量の最大化」と「資源の保護」、および「漁獲量の安定」と「資源の保護」にはトレードオフが存在することである。つまり、資源の保護を優先すると、漁獲量の最大化と安定をある程度犠牲にせざるを得ない。このような場合、資源の利用と保護のバランスのとり方について管理者や利害関係者の合意が不可欠であり、研究者が提示する解析結果をもとに何度も議論が行わ

れた。異なる目標のパフォーマンス指標を一つの値に統合し、その最適化を目指すアプローチも考えられるが（市野川ら, 2015）、そのためにはそれぞれの指標の重みづけなど統合方法への合意が必要となるため、CCSBTでは統合よりもトレードオフを認識したうえで議論を深めることを選んだ。

これらのトレードオフの存在は異なるMPの性能を比較する際にも問題となる。例えば、「漁獲量は多いが、資源量が少なくなる」MPと「漁獲量は少ないが、資源量が多くなる」MPの優劣を判断するような場合である。そこでCCSBTでは、比較を容易にするため、資源の暫定的な管理目標を満たすように、各MPのパラメータを調整したうえで、性能を比較した。管理目標は「親魚資源量を初期資源量の20%水準に〇〇年に△△%の確率で回復させる」というものである。達成年（2035年あるいは2040年）や達成確率（60%、70%、90%）の候補によって、将来の資源回復像が大きく変わり、MPの優劣が変わる場合もある。なお、CCSBTの創設時の管理目標は「親魚資源量を2020

年に1980年水準に回復させる」であったが、のちに達成が不可能に近いことが判明したため、MPの開発に合わせて管理目標の見直しが行われた。上記の暫定的な管理目標の設定はこの見直しによるものである。

MPの選択

Figure 2aはリファレンスセットにおける9つのMPの漁獲量と資源量の変化を示している（CCSBT, 2010）。同じ管理目標の条件を満たしているにもかかわらず、資源量と漁獲量（TAC）の軌跡はMPにより異なる。素早く大幅にTACを削減するほど、資源は短期間で再建され、資源崩壊のリスクも小さく、将来のTACも多くなるが、その一方でTACの大幅削減という社会経済的痛みを最初に受け入れる必要がある。この結果は「early pain, late gain」と称され、施策の実行と得られる成果のタイミングに関するトレードオフとして認識された。2010年6月のMP作業部会では、より早い資源再建を優先したい本委員会の意向を反映させ、TACの早期削減をある程度認めるMP（HKとBREM）を最終案の

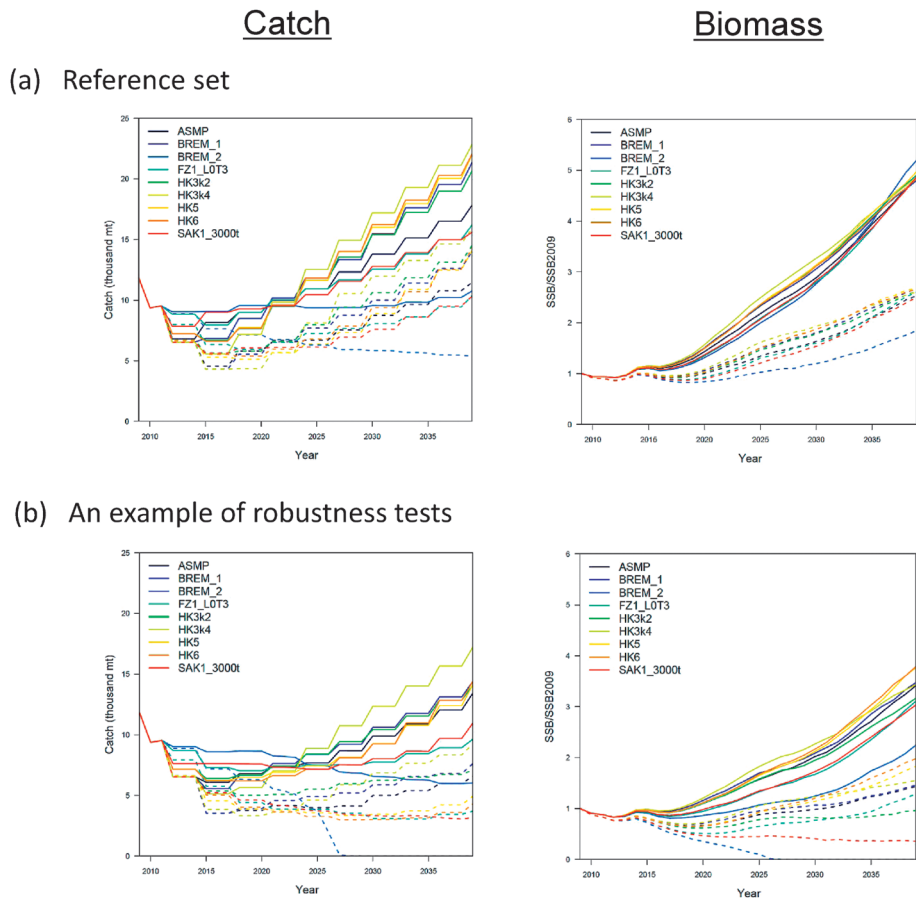


Figure 2. Results of future projections (left panel: catch; right panel: relative spawning stock biomass) under nine MP candidates for (a) the reference set and (b) an example of robustness tests (non-linear relationship between CPUE and stock biomass). Trajectories are represented by the median (thick line) and lower 10th percentile (dotted line) (CCSBT, 2010). BREM_1 and HK6 were selected as final MP candidates in the MP workshop held on June 2010.

候補として選んだ (CCSBT, 2010). これらのMPは悲観的なシナリオの頑健性テストでも、資源を高い確率で回復させることができる点も評価された (Fig. 2b).

その後、最新のデータによるOMの条件付けの更新 (その結果、近年の資源回復が明らかになった) を行い、2011年7月の科学委員会にてHKとBREMの比較が行われたが、

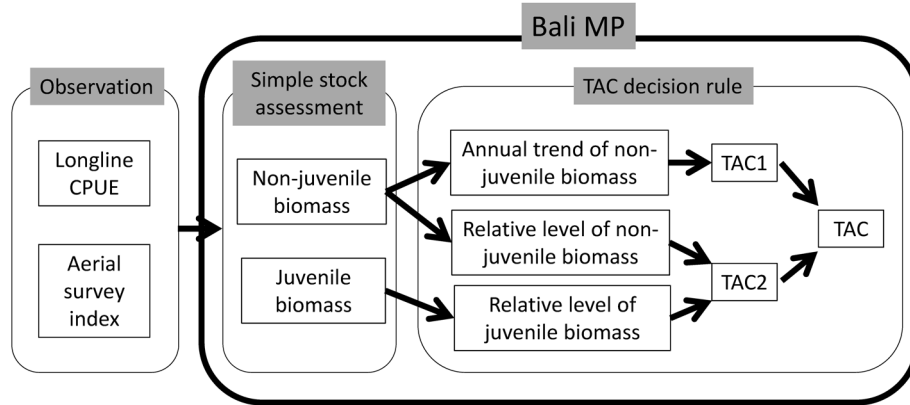


Figure 3. Conceptual framework of the Bali MP. Biomass of juvenile (recruitment) and non-juvenile (sub-adult and adult) is estimated by a simple stock assessment (biomass random effect model) from longline CPUE and aerial survey index, and then TAC is determined based on trend and level of these biomass estimates.

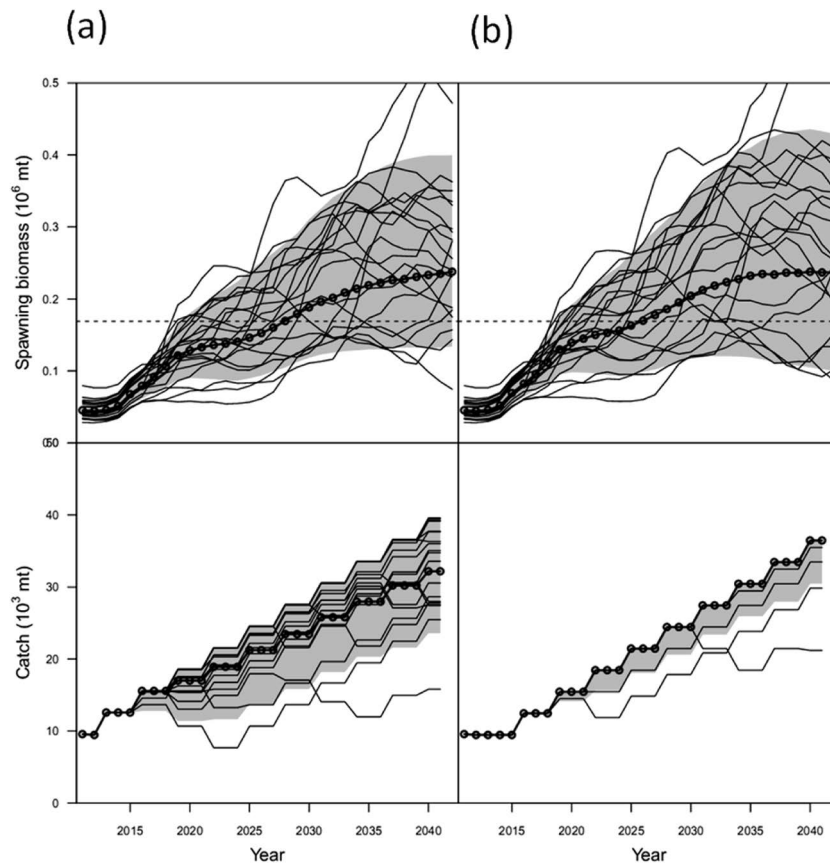


Figure 4. An example of future projection under the Bali MP (upper panel: spawning stock biomass; lower panel: catch; CCSBT, 2011a). 2000 trajectories are represented by the 10th and 90th percentiles (shaded area), the median (thick bold line with squares), and 20 individual realizations (thin lines). 20% of unfished spawning stock biomass is represented by a dotted line in the upper panel. CCSBT decided to increase TAC gradually from 9,449 to 12,449 t in 2012–2014, though this example shows an increase of (a) 3,000 t and (b) 0 t in 2013.

最終的にこれら2つを統合した「バリ方式」が科学委員会の最終案として合意された (Fig. 3; CCSBT, 2011a). HKもBREMも十分な性能を示したが, アルゴリズムを組み合わせた方が種々の頑健性テストの評価が高くなったため, 最終的に統合版のバリ方式が選ばれた. バリ方式では, 若齢魚と親魚の資源量の推定まではBREMの簡易的な資源評価モデルを使うが, それらからTACを算定する際には, 目標値との大小関係を用いるBREMのアルゴリズムに加えて, 資源量のトレンドを使うというHKのアイデアが取り入れられている. それぞれのアルゴリズムから計算された2つのTAC (TAC1とTAC2; Fig. 3) の平均が最終的なTACとなる (Hillary et al., in press).

そしてついに2011年10月の本委員会でバリ方式が正式に採用され, 即時に2012–2014年のTACが決定された (CCSBT, 2011b). 地域漁業管理機関ではMPが使われた世界初の成果である. この時, CCSBT設立以来, 初めてTACが増枠されたため, マスコミ等ではその結果が強調されたが, 資源管理上, より重要なことは, MPの完成と具体的な管理目標の再設定がなされたことである. 同じMPでも資源再建の達成年や達成確率によって, 将来の資源量や漁獲量の軌跡は異なるが, 本委員会では暫定的な管理目標として漁業も資源も同時に徐々に回復させるオプション (達成年2035年, 達成確率70%) が選ばれた (Fig. 4).

定期レビューとメタルール

CCSBTではMP実施後のレビューについても事前に手順を定め, 想定外の状況が生じた場合にとるべきTAC決定までの意思決定のプロセスを明確にしている. このルールは「メタルール」と呼ばれている. そのため, 想定外の状況が生じていないか常にモニタリングし, 定期的にレビューすることになっている. 毎年の科学委員会では, はえ縄CPUEや航空機目視調査による加入量指数などの漁業や資源状態に関する指標を確認する. 例えば, これらの指標がMP開発時に想定した値の範囲から大きく逸脱していないか, また資源動態について重大な新知見が得られていないかなどを検討する. そして, 3年ごとに詳細な資源評価を行い, 資源量などの評価結果がMP開発時の予測の範囲から外れていないか確認する. このことはMP実施後も資源評価が必要であることを意味する. 基本的に, 資源の現状把握は資源評価で行い, TACの算定はMPで行うという役割分担であるが, 両者が示唆する資源の動向に大きな齟齬がないか確認する必要がある. さらに, 6年ごとにMPのパフォーマンスを総括し, 見直しの必要性について検討する. いずれのレビューにおいても, 例外的な状況が生じたときみなされた場合, MP以外の方法によるTAC設定も検討し, 科学委員会が勧告案をまとめることになっている. MPは2035年という中長期的な資源回復を意図して作られているため, 場合によっては一時的に資源が減少すること

もありうる (Fig. 4). 目先の資源変動に一喜一憂せず, 決められたレビュープロセスに従いモニタリングを続けることが重要である.

MPの運用状況

2011年に完成したバリ方式はこれまでに2度TAC算定に使われ, 2011年と2013年にそれぞれ2012–2014年と2015–2017年のTACが設定された. 2011年はMPの完成が予定より1年ずれ込んだため, 特別に翌年以降のTACを定めた. 2000年代半ばからの加入量の回復を受け, 2011年のMPによる2012–2014年のTACの勧告は上限一杯の3,000トンの増加 (9,449トンから12,449トンへ) であった. しかし, 本委員会では資源回復を少しでも優先させるため, 2012–2014年のTACの増加幅に制限 (0トン, 1,000トン, 3,000トン; Figure 4は0トンと3,000トンの例. ただし, MP実施は2013年) をかけることを検討し, 最終的にそれらの折衷案である3年間かけて毎年少しずつ12,449トンまで増加させることにした. 一方, 2013年のMPの勧告は2,200トンの増加であったが, 翌年の資源評価結果の確認などの条件がついたものの, こちらは基本的に受け入れられた. この差は本委員会として資源の回復基調に少しずつ自信が持てるようになってきたからかもしれない.

資源状態は2012年, 2013年の定期レビュー (CCSBT, 2012, 2013), 2014年の詳細な資源評価によるレビュー (CCSBT, 2014) とともに大きな問題はなく, MP開発時の予測の範囲内で資源は回復し, はえ縄CPUEも予測の範囲内で安定している. ただし, 航空機目視調査による加入量指数は変動が大きく, 2012年はリファレンスセットにおける予測 (95%範囲) の下限付近に, 反対に2014年は上限以上に変動した. この結果を受け, 科学委員会では, 想定外の状況にあたるか否か議論されたが, 頑健性テストの一つとして, 航空機目視調査指数の変動係数が大きい状況にもバリ方式はうまく対処できることを事前に確認していたため, 想定外の状況とはみなさず, MPによるTAC勧告を保持することとなった. 頑健性テストの重要性が示された事案である. また資源動態についての新知見として, 近親遺伝子分析 (Bravington et al., 2013) という新しい技術に基づく資源量推定が可能になり, 2014年の資源評価ではこの情報もOMの条件付けのデータとして利用された. 新たに推定された資源量のトレンドはOM開発時の推定値と大きな齟齬はなかったため, メタルールを発動する問題とはみなされなかった. MP実施後も新知見を取り込むことで, 資源評価やOMの精度向上を図っている. これらの状況から, 2014年の段階まではMPは順調に運用されたと言ってよい.

ところが, オーストラリア政府の予算や調査員の確保などに問題があり, 2015年の航空機目視調査が実施されなかった. 今後の調査継続についても確証が得られていな

い。これはMPへの入力データの一つである目視調査による加入量指数が得られないことを意味する。残念ながら、頑健性テストでもこの事態は想定していなかったため、想定外の状況が生じたと言えよう。2015年4月現在、2015年データの欠測および今後の調査中止または調査縮小の影響についてシミュレーションによる評価が行われようとしている（その後、10月の本委員会で、航空機目視調査の再開と当面のMPの運用継続が決まった；CCSBT, 2015）。実際の資源管理ではいろんなことが起こるものである。

まとめ

MPの利点

ここでは、MPの開発と運用の利点について、CCSBTでの経験から4点指摘したい。

まず、MPの基本的な価値として、不確実性に対してより頑健なTACの算定ができるようになった点である。最終的なリファレンスセットと頑健性テストに加えて開発途中に検討されたシナリオを合わせると、膨大なシナリオのもとでMPのパフォーマンスを評価したことになるが、提案された多くのMPの頑健性は意外と高かった。常識的なアルゴリズムを持つMPであれば、情報が限られていても、合理的な管理は可能であることを意味する。これはミナミマグロが長寿命などの理由で比較的安定した資源であることや、はえ縄CPUEや加入量指数など資源状態をある程度正しく反映したデータが利用可能なことと関係しているかもしれない。通常の資源評価では不確実性についてあれこれ疑心暗鬼になり、議論がまとまらないことも多いが、机上の概念的な議論を続けるより、実際にシミュレーションで検証してみることが重要であるという教訓である。

第二に、TACに関する意思決定が透明化され、迅速化された点である。これまでのCCSBTのTAC決定においては、事後的に人間の判断を要する場面が多すぎ、結局まとまらないことが多かった。MP運用後も実際には本委員会の判断で慎重なTAC増枠がなされたりもしたが、MPによって多くのTAC算定過程が自動化され、迅速で透明な意思決定に貢献している。ミナミマグロの場合、MPはこれまでTACの増枠を勧告してきたが、MPへの合意は場合によってはTACの減枠の受け入れを約束したことも意味する。社会経済的にも大変重い決定であり、慎重な議論が求められた。

関連する第三の利点として、データ収集からMPの運用、TACの決定、管理の実施まで、一貫した管理システム全体の整備が進んだことが挙げられる。資源管理においては、一連の過程が全て整備されることが重要で、データ収集が未整備など、どこか一つでもいい加減な段階があれば、管理はうまくいかない。また、MPの開発を通して、管理の目的や手段について、研究者、管理者、利害関係者の間の意思疎通が進み、それぞれの管理過程が改善され、信頼性

が担保された点は大きい。

最後の利点として、科学委員会が正常化し、科学的議論を深めることができた点が挙げられる。以前は資源評価結果という最終結果の是非を巡る表面的な論争が絶えなかったが、OMの共同開発やMPの選択の議論などを通して、解析手法や意思決定の妥当性といった「中身」の議論を成熟させることができた。このことはミナミマグロの生物学的、資源学的理解も促進させた。MPが完成すれば、それで管理が全て上手くいくわけではない。管理における不確実性を少しでも少なくするための基礎研究の重要性は変わらない。

今後の課題

MPは合理的な資源管理の実現に貢献しうるツールだが、一方でまだまだ課題も多い。筆者らが遭遇した課題を4点挙げておく。

第一に、現状を正しく反映させたOMを作るのは結構難しい点である。10年にわたる開発期を通して、通常のデータの更新以外にもOMの修正を何度も行わざるを得なかった。どちらかといえば、MPのアルゴリズムの開発よりもその基盤となるOMの開発の方に時間がかかったと言える。一番大きな予想外の出来事は2005年に発覚した過剰漁獲の問題である。過去10-20年の漁獲量が報告量を超えていた可能性が指摘され、これによりOMだけでなく、一度は2005年に合意されたMP（プロダクションモデルに基づくバタワース・森方式）も破棄せざるを得なくなった。著者らを含め研究者の落胆ぶりは大きかったが、そこで得られた教訓はKolody et al. (2008) や Kurota et al. (2010) にまとめられている。ちなみに、MPの開発は、漁業管理が強化され資源評価のやり直しが終了した後、2009年に再開された。またこの出来事以外にも将来予測とその後の現実との齟齬が何度か見られ、その度にOMを改良することになった。例えば、2000年代初頭の加入量の急減や、その後のCPUEの急増など、想定外のことが何度か起こった。「減多に起こらないこと」は実際よく起こるという教訓である。直近の資源状態は近い将来のTACに直接影響するため、OMに現実を反映させるための試行錯誤はある程度避けられないだろう。

このことと関連する第二の課題は、不確実性を適切に捉えられるかというもう少し本質的な問題である。時間や人的資源、科学的知見の不足により、現実には検討可能な不確実性の種類や範囲は限られる。例えば、魚の回遊や分布の偏りなどの問題はモデリングも難しく、また不確実性を定量的に検討するための知見も限られているため、今回のOM・MP開発では扱われていない。先の教訓も踏まえると、現実的な対応策としては、どの不確実性をモデルで想定したかを明確にしたうえで、メタルールの枠組みを活用しながら、現実の資源のモニタリングに注力することであ

ろう。MPを過信せず、常に慎重に対応すべきである。

研究者にとっての第三の課題は、管理者や利害関係者などとのスムーズな意思疎通である。MPの開発過程では、研究者だけでは決められない問題も多く、管理者や利害関係者に意見を求める機会も多かった。実際の管理上の問題は研究者だけで把握することは難しい。特に、管理目標の設定やそこに至るまでの方策の決定は容易ではなく、Fig. 4のように細かい具体的なオプションを科学委員会が本委員会に事前に提示することで、本委員会での議論を促進するように努めた。本来このような問題は本委員会が主導して決定すべきものであるが、実際には科学委員会のサポートが必要で、両委員会の良い関係が科学的かつ現実的な管理方策の実施には不可欠である。しかし、OMやMPの開発作業自体は専門的で複雑なため、どこまで意思疎通ができていたかは不明である。MPの目的や利点とともに、その限界についても正しく理解してもらうことが重要であろう。

第四の課題は、人材や時間面、財政面での制約である。MPの開発では研究者としてモデリング技術だけでなく、利害関係者との折衝も含めた総合的な能力が問われた。CCSBTには資源管理について経験豊富な研究者が多数かかわっていたため、MPの開発を成し遂げることができたが、前例のないことを自分たちで考えなければならない場面は多々あり、簡単なことではなかった。またCCSBTではMPの完成まで中断期間を含めて10年の時間を要したが、その間の各国研究者の雇用や諮問パネルの招聘、10回以上の会議の開催などに関する費用は安いものではない（もちろん高いか安いかはMPがなかった場合のコストとの比較が公平な判断となるだろう）。しかし、CCSBTでの経験を多くの研究者や関係者と共有できれば、今後はこういった制約は多少小さくなっていくだろう。

最後に

CCSBTがMPの開発に成功し、実施にまで至った理由として、国際裁判後のCCSBT正常化への期待の高まりや、資源再建という共通の目標が明確だったこと、漁業国が少なく漁業データなどが比較的しっかりしていたこと、経験豊富な研究者に恵まれていたことなどが考えられる。またMP運用の開始時に資源が回復基調にあり、TACの増加が見込まれたことも無関係ではないだろう。ある意味、好条件が整っていたと言える。現在、他の地域漁業管理機関でもMPの開発が実施もしくは予定されている。CCSBTと比べて有利な点、不利な点、どちらもあると思うが、他の事例との比較を通して、MPによる管理の成功や失敗の要因が明らかになるかもしれない。MPによる管理は始まったばかりであり、MPの開発方法も管理手法も確立されたわけではない。CCSBTの成果を基盤にさらに新しいアプローチの発展が期待される。

MPが完成し、CCSBTの資源管理は大きな前進を遂げたが、ミナミマグロ資源そのものはまだ再建の途上にあることを忘れてはならない。2014年の資源評価によれば、親魚量は回復基調にあるとはいえ、初期資源量のわずか7%ほどの低位水準にある。近年加入量が増加しているため、TACの増枠を認めることになっているが、加入の増加が親魚量の確実な増加につながるのか今後慎重にみていく必要がある。またMPの頑健性はMPが算出するTACが守られることで担保されていることは言うまでもない。つまり、MPによる管理を成功に導く鍵は、いかに漁業管理を行うかにもかかっている（高橋, 2014）。日本では2006年に全漁獲物に個体識別標識をつけるなど、厳しい漁獲モニタリング施策が導入された。CCSBT全体でも2008年に輸出時に漁獲証明文書が必要となるなど、管理体制は整いつつある。漁獲量の不確実性についてはいまだに解決されていない部分もあるが、少なくとも人間が解決できる不確実性については解決しておくべきである（Kurota et al., 2010）。

謝 辞

本原稿に対して有益なコメントを下された東京大学の平松一彦准教授、水産総合研究センターの依田真里氏、市野川桃子氏、安田十也氏、福田漠生氏に感謝申し上げる。また査読者からも貴重なコメントをいただいた。

引用文献

- Bravington, M., P. Grewe and C. Davies (2013) Close-kin update. Paper submitted to the CCSBT Extended Scientific Committee Meeting. CCSBT-ESC/1309/BGD03.
- CCSBT (2010) 第3回オペレーティング・モデル及び管理手続きに関する技術会合報告書。2010年6月21–25日。シアトル、アメリカ合衆国。
- CCSBT (2011a) 第16回科学委員会会合報告書。2011年7月19–28日。バリ、インドネシア。
- CCSBT (2011b) 第18回委員会年次会合報告書。2011年10月10–13日。バリ、インドネシア。
- CCSBT (2012) 第17回科学委員会会合報告書。2012年8月27–31日。東京、日本。
- CCSBT (2013) 第18回科学委員会会合報告書。2013年9月2–7日。キャンベラ、オーストラリア。
- CCSBT (2014) 第19回科学委員会会合報告書。2014年9月1–6日。オークランド、ニュージーランド。
- CCSBT (2015) 第22回委員会年次会合報告書。2015年10月12–15日。麗水、韓国。
- Fournier, D. A., H. J. Sang, J. Ancheta, J. Ianelli, A. Magnusson, M. N. Maunder, A. Nielsen and J. Sibert (2012) AD Model Builder: Using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models. *Opt. Method. Software*, **27**, 233–249.
- Hillary, R. and A. Preece (2011) Updated technical specifications and performance analyses for MP1. Paper submitted to the CCSBT Extended Scientific Committee Meeting. CCSBT-ESC/1107/12.
- Hillary, R. M., A. L. Preece, C. R. Davies, H. Kurota, O. Sakai, T. Itoh, A. M. Parma, D. S. Butterworth, J. Ianelli and T. A. Branch (in press)

- Scientific alternative to moratoria for rebuilding depleted international tuna stocks. *Fish Fish.*, DOI: 10.1111/faf.12121.
- 平松一彦 (2004) CCSBTで開発中の管理方式 (Management Procedure) について. *水産資源管理談話会報*, **34**, 42–71.
- 市野川桃子・岡村 寛・黒田啓行・由上龍嗣・田中寛繁・柴田泰宙・大下誠二 (2015) 管理目標の数値化による最適なABC算定規則の探索. *日本水産学会誌*, **81**, 206–218.
- Kolody, D., T. Polacheck, M. Basson and C. Davies (2008) Salvaged pearls: lessons learned from a floundering attempt to develop a management procedure for Southern Bluefin Tuna. *Fish. Res.*, **94**, 339–350.
- 小松正之・遠藤 久 (2002) 「国際マグロ裁判」. 岩波書店, 東京, 232 pp.
- Kurota, H., K. Hiramatsu, N. Takahashi, H. Shono, T. Itoh and S. Tsuji (2010) Developing a management procedure robust to uncertainty for Southern bluefin tuna: a somewhat frustrating struggle to bridge the gap between ideals and reality. *Popul. Ecol.*, **52**, 359–372.
- Kurota, H., N. Takahashi, O. Sakai and D. S. Butterworth (2011) Performance of the empirical management procedure (MP2) under the updated operating models. Paper submitted to the CCSBT Extended Scientific Committee Meeting, CCSBT-ESC/1107/34.
- 黒田啓行 (2012) 10年越しの悲願達成: ミナミマグロのTACを決める管理方式が完成しました. *ななつの海から*, **2**, 3–7.
- 黒田啓行 (2014) 資源評価とその方法. 「マグロの資源と生物学」水産総合研究センター, 成山堂書店, 東京, 183–196.
- 黒田啓行・米崎史郎・牧野光琢 (印刷中) 水産資源管理の考え方. 「ワシントン条約と水産資源」水産総合研究センター, 文一総合出版, 東京.
- Mangel, M., J. Brodziak and G. DiNardo (2010) Reproductive ecology and scientific inference of steepness: A fundamental metric of population dynamics and strategic fisheries management. *Fish Fish.*, **11**, 89–104.
- Method, Jr., R. D. and C. R. Wetzel (2013) Stock synthesis: A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fish. Res.*, **142**, 86–99.
- Punt, A. E. (2006) The FAO precautionary approach after almost 10 years: Have we progressed towards implementing simulation tested feedback-control management systems for fisheries management. *Nat. Res. Model.*, **19**, 441–464.
- 高橋紀夫 (2014) ミナミマグロ. 「マグロの資源と生物学」水産総合研究センター, 成山堂書店, 東京, 120–135.
- 田中栄次 (2002) IWC改訂管理方式. 「鯨類資源の持続的利用は可能か」加藤秀弘・大隅清治編, 生物研究社, 東京, 45–49.
- 矢原徹一・松田裕之・魚住雄二 (1996) マグロは絶滅危惧種か? 絶滅のリスク評価をめぐる. *科学*, **66**, 775–781.