受賞者総説

シミュレーション法による資源量の予測
および資源管理方策に関する研究

(平成 12 年度日本水産学会賞田内賞受賞)

桜 本 和 美*

東京水産大学

Studies on the forecasting and management for
fisheries resources using simulation method

Kazumi Sakuramoto*

Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

1. はじめに

資源管理研究の中心課題の一つは、対象とする水産資源に対する有効な管理方策を確立することである。そのためには資源量の絶対数や産卵親魚と加入量の関係、種間関係や環境要因、漁獲の影響等々資源を変動させるメカニズムを明らかにする必要がある。従来より上記事項の重要性は十分に認識され研究されてきたが、資源変動のメカニズムは未だほとんどの魚種について不明のままである。その原因は上記研究に必要なデータの入手が質・量ともに困難であること、対象とする生物資源を変動させる機構そのものが色々な要因により影響を受けるため複雑で、明確な因果関係を見つけ出すことが難しいためである。今後とも地道に上記研究を続けていかなければならないが、一方ではまた、早急に解決しなければならない問題として資源管理の実行が迫られている。

このような状況のもとでとり得るべき次善の策は、複雑なシステムに対して不確実な情報のもとでもロバストな推定、予測、管理等の実行が可能な方法を開発することである。本研究は上記課題に答えることを目的としており、それを実行するために以下の3つのステップを用いた。すなわち、

- 1) 対象資源、対象漁業に対する注意深い観察と詳細な漁獲および調査データの解析、
- 2) 最適な数理モデルの構築、
- 3) シミュレーションによる検討、

の3つである。これら3つのステップはそれぞれが独立したものではなく、相互に深く関連しあっている。注意深い観察・詳細な調査の解析なくして妥当なモデルは

作成できないし、また、モデルやシミュレーションによる詳細な検討が新たな調査の必要性を示唆する等である。ここでは、上記3ステップを含めてシミュレーション法と呼ぶこととし、以下にその研究の概要を述べる。

2. 鯨類資源の解析および管理方式

国際捕鯨委員会 (IWC) は 1982 年商業捕鯨の 10 年間禁止案 (商業捕鯨モラトリアム) を採択した。また、1990 年までに商業捕鯨の再開について検討することとし、鯨類資源の抱括的評価および新しい管理方式の開発に着手した。^{1,2)} 資源の抱括的評価のうち、南半球産ミンククジラについては以下の2つの事項が主要な検討課題となっていた。1つは競合種であるシロナガスクジラの減少に伴って、南半球産ミンククジラが 1960 年代以降増加しているという主張に対してその正否を判定することである。他の1つは観測された南半球産ミンククジラの性成熟年齢の低下傾向が正しいか否かを判定することである。上記は競合種であるシロナガスクジラの減少により引き起こされる事象として生物学的には十分に起り得る現象ではあったが、同時にそれは南半球産ミンククジラの資源豊度が健全であることを示すことでもあり、捕鯨をやめさせたいと考えるグループにとっては都合のよいものではなかった。そのような背景があったことから上記現象の妥当性をめぐっては IWC 科学委員会内においても熾烈な論争が展開された。

前者すなわち、南半球産ミンククジラが 1960 年代以降増加傾向にあることについては、年齢別の捕獲データを用い新しくミンククジラ用のセパラブル VPA (コホー

* Tel : +81-3-5463-0563, Fax : +81-3-5463-0563, E-mail : sakurak@tokyo-u-fish.ac.jp

ト解析の1種)を開発し加入量の推定を試みた。^{3,4)}しかし、当初この試みはうまくいかなかった。その理由はセパラブル VPA では捕獲の選択性(大きいクジラほど砲手に狙われやすく捕獲されやすい等)がデータを利用する期間内では変化しないという仮定が必要であるが、南半球産ミンククジラの場合には1971~1973年と1974~1981年の2つの期間でこれらが大きく変化していたからである。シミュレーションにより検討を加えながらモデルの改良を繰返し上記の問題点を解決した結果、年間増加率は3~4%と推定された。しかしながらセパラブル VPA は自然死亡係数が既知という条件が必要である(コホート解析でも同じ)。当然推定された年間増加率は使用した死亡係数の値に依存する。シミュレーションにより検討した結果では、年間増加率は自然死亡係数の値に依存するものの上記の増加傾向が否定されるためには、自然死亡係数は0.12/yearという極めて高い値を想定しなければならないことがわかった。すなわち、推定された加入量の増加傾向は否定できないが、年間増加率の値は自然死亡係数の推定精度に依存するという結果となった。

後者について、すなわち成熟年齢の低下傾向を否定する研究者の根拠は2つあった。1つはヒゲクジラ類の年齢は耳垢栓を用いて査定されるが、その年齢査定誤差によって見掛け上の成熟年齢の低下傾向が観測されるとするもの。他の1つは出生した年が捕獲年に近い鯨ほど早熟の鯨しか捕獲されない傾向(晩熟の鯨はサンプルとして漁獲データに入っていない、Truncation effect と呼ばれる)があり、それによって見掛け上性成熟年齢の低下傾向が観測されるというものである。上記の2つの問題を解決するため、鯨が出生してから成長し性成熟に達する過程、捕獲の過程、捕獲された鯨から耳垢栓が採取され実験室で耳垢栓が年齢査定され結果が集計されるまでの全プロセスを数理モデル化し、シミュレーションにより上記の指摘の妥当性を検討した。^{5,6)}シミュレーションではいろいろなタイプや大きさの年齢査定誤差、Truncation effect、年齢別選択性の影響、資源の増加・減少の影響、成熟鯨と未成熟鯨の分布の相違や早熟の鯨は短命である等々、その他考え得るあらゆる可能性を考慮した。その結果、もし資源中の鯨の性成熟年齢が実際に低下していないのであれば観測されたような低下傾向は検出されることがわかった。上記性成熟年齢の低下傾向は1997のIWC科学委員会においてようやくその正当性が認められた。

新管理方式はBWU(シロナガス換算)方式に代って1972年からIWCで採用され、商業捕鯨モラトリウムが実施された1986年まで用いられた。新管理方式はPella-Tomlinsonモデルを仮定した捕獲枠算定規則であるが、実際の運用に際しては初期資源量、現存資源量、

MSY(最大持続生産量)率の3つの推定値を必要とした。しかし、新管理方式はそれら推定値の精度については何も言及していなかったため推定誤差の影響が問題視され、その結果不確実性の名のもとに新管理方式は不採用となってしまった。不確実性という概念が席卷していた当時のIWC科学委員会にあってはもはや鯨類資源の管理は不可能であるという雰囲気は支配的になりつつあった。

田中は余剰生産モデルを仮定しない全く新しい概念のもとづくフィードバック管理方式を1980年既に日本水産学会誌に発表していた。⁷⁾そこで上記を応用した新しい鯨類資源の管理方式を作成しIWC科学委員会に提案した。⁸⁾この論文のユニークな点は提案したコンピュータ・シミュレーションにもあった。従来IWCでは単にパラメータの感度テスト等としてしかシミュレーションは利用されていなかったが、上記論文ではコンピュータの中に1つのスモールワールドを作ることを試みていた。すなわちコンピュータの中に自己増殖する人工的な鯨資源をつくりだし、その資源に対して管理を実行した場合の検討を行うというものである。1つの海域に2つの系群が存在している場合や、1つの系群が2つの海域にまたがって分布している場合などを想定し、実際にはそのような情報がないという条件で管理を実行した場合の検討等を行った。本研究が契機となって、以後IWC科学委員会では上記のようなコンピュータ・シミュレーションが主流となり威力を発揮した。

また、上記の論文はIWC科学委員会に以下のような影響も与えた。不確実性の名のもとに鯨類資源の管理は不可能であると多くの研究者が口をそろえて主張しているときに、上記の論文はそのような不確実な状況下でも鯨類資源の管理が可能であることを示していた。そうするとそれまで管理は不可能であると言っていた研究者までが新しい管理方式を開発し『私の提案する管理方式の方がより優れている』と主張しはじめたことである。結局5つの管理方式が提案されたため、どの方式がもっとも優れているかを決定するための詳細かつ膨大なシミュレーションテストが何年にもわたってくり返された。IWC科学委員会のこのような新しい管理方式開発のためのプロセスは国際的にも高く評価されているが、⁹⁾その中で本研究が果たした役割は極めて大きいと言えよう。

3. 資源変動のメカニズムと漁況予測

北海道東岸沖のマイワシ,¹⁰⁾東北海域のカツオ,¹¹⁻¹³⁾秋田県の大ハタ,^{14,15)}および、カナダ大西洋岸セントローレンス湾ズワイガニ資源¹⁶⁾等について漁獲量や資源量を予測するための新しい方法を提案した。漁獲量や資源量を予測するためには資源変動のメカニズムを明らかにする必要がある。本研究では資源変動要因を決定す

るための手段として予測手法を用いるという逆の発想で解析を行った。すなわち、ある要因による資源変動への寄与をみるためにその要因によりどの程度予測がうまくいくかを検討するという方法で分析を進めた。1例を述べる。

秋田県におけるハタハタの漁獲量は1963年から1975年までの13年間は連続して1万トンを越えていたが1975年を境に急減し、1984年には74トンと実に200分の1以下に激減してしまった。上記の減少に対し、秋田県では1992年9月から1995年9月までの3年間ハタハタ漁業を全面禁漁とし、また、禁漁後の1995年からは底びき網漁船の隻数の削減、禁漁期間の設定など厳しい漁業規制を行うとともに、県独自のTAC制を導入し資源の回復を図っている。その結果、1995年以降設定されたTACの値は毎年増大しており、禁漁効果によるものであると考えられている。しかしながら上記漁獲量増大のメカニズムについては不明のままである。

秋田県沿岸には日本海北系群の主産卵場が多く、また、秋田県のハタハタ漁獲量は近接する県を含めた全漁獲量の8割以上を占めているので、秋田県の漁獲量変動を同系群全体の変動と見てもよいだろう。本研究では秋田県沿岸域の水温変動と漁獲量変動との関係について解析し、秋田県沖9 km地点の水深200~300 m層の1~3年前の9月の水温が、その年の漁獲量を決定する重要な役割を果たしていることを明らかにした。また、秋田県の沿岸漁獲量と沖合漁獲量を予測（外挿）する数理モデルを作成し、上記要因でどの程度漁獲量の変動が予測できるかを検討した。その結果、同モデルによって1970年代半ばの激減の様子や近年の低水準の様子をうまく外挿することができた。さらに同モデルを用いることによって3年間の禁漁期間中の漁獲量を予測し、それをもとに禁漁効果を判定した。その結果、禁漁の効果、環境要因が禁漁効果に与える影響、禁漁後のTAC（総許容漁獲量）制度が果たしている資源管理上の重要性等々が明らかとなった。上記研究結果は環境が資源変動に与える影響の大きさを数量的に示した1つの事例として極めて興味深い。

4. ファジィ理論の資源解析手法への応用

国連海洋法条約が1994年に発効したことに伴い、条約を批准し排他的経済水域を設定した国は、TACにより水産資源を管理することが義務づけられた。¹⁷⁾ 現在、TACを設定するための資源解析の主要な方法はコホート解析である。本解析は漁獲データの観測誤差、自然死亡係数の推定誤差、設定するターミナルFの妥当性等々によって、資源管理上特に重要な最近年の資源推定値へのバイアスが大きいために問題点として指摘されてい

る。本研究ではファジィ理論を応用することにより、上記の不確実性に対してよりロバストな新しいコホート解析法を創出し、シミュレーションにより手法の性能を検討した。^{18,19)} 性能の検討は資源管理上重要と考えられる加入量の増加、減少傾向の検出に焦点をあてて行った。その結果、ファジィ理論を応用した方法は従来の方法に比べ年齢別データにかなり大きな観測誤差がある場合でも加入量の増加（減少）率の推定値の分散が小さいことがわかった。しかしまた、推定値の大きさ自体は設定したメンバーシップ関数やファジィ・ルール等によって影響を受けることもわかった。したがって、実際の適用にあたってはニューラルネットワーク等の方法がそうであるように教師信号（既に推定されている過去の加入量の値等）を用いて、メンバーシップ関数やファジィ・ルール等を事前にチューニングしておく必要がある。上記と全く同じメンバーシップ関数とファジィ・ルールを用い、全く主題の異なる問題、すなわち東北海域のカツオの漁獲量予測を行い良好な結果を得ていることから、¹²⁾ 常識的に設定できる範囲のメンバーシップ関数やファジィ・ルールであっても、いろいろな課題に対して十分実用的な推論結果が得られると判断された。しかし、より最適なメンバーシップ関数とファジィ・ルールを如何に決定するかは重要な問題であり今後の検討課題とした。上記以外でもファジィ理論を用いた鯨類資源の管理方式²⁰⁾や道東沖のマイワシの漁獲量予測などを行っている。また、コホート解析の拡張として水温データ等の環境要因を取り入れた場合等についても検討している。このように柔軟で観測誤差に対してロバストなファジィ理論は水産資源管理の研究に有効な方法だと考えられる。

5. おわりに

海の中のことはわからないことが多い。いきおいある仮定のもとでの議論とならざるを得ない側面をもつ。互いに共通の土俵にたって議論するのであれば、その中で妥当と考えられる解決策が見つかる余地もあろうが、一方が建設的ではない議論に終始すれば多くの仮定が崩れ議論が成り立たなくなってしまう場合もある。IWC科学委員会での議論はそのような水産資源科学がもつ脆弱さを浮き彫りにした面もあるが、その一方でまた、改訂管理方式を完成させ鯨類資源の管理が可能であることを示し得たのは科学の力（数理資源解析）の有効性を示すものであるとも言えるだろう。不確かな状況の中でいかに効率的でロバストな資源の解析・管理を実行していくかというアプローチの仕方は、ダイレクトに資源変動機構の解明を行っていくという方法とともに、今後とも資源管理研究の主要課題でありつづけることは間違いなさそうである。

もう一つ注意を喚起したいことはデータの大切さであ

る。ハタハタ資源の解析では30年以上にもわたる水温データの蓄積があってはじめてハタハタ資源に与える水温の重要性が明かになった。水温が直接資源変動に影響を与えるのか、間接的にすなわち、水温が餌の量等に影響しその結果資源変動に影響を与えるのか等の詳細については今後さらに検討を進めていかなければならない。しかし、現時点では少なくとも9月の低層水温が資源変動を大きく左右する指標となっていることが明らかになった。この研究を契機に改めて水温の重要性が注目され、若狭湾のアカアマダイ資源²¹⁾や噴火湾のスケソウダラ資源、福井県沿岸のアカガレイ資源(森山, 私信)等の変動が水温との関係から解析されている。しかし、最初に述べたようにそれらの研究は水温のデータがあってはじめて可能になったことである。黙々と水温のデータの収集に当たられた方々のご努力を高く評価したい。と同時にまた水産資源研究の特殊性にも注意を払いたい。研究者が長期にわたるすべてのデータを集めることは不可能である。長期にわたる質のよいデータを集めそれを解析する資源研究のための効率的なネットワークづくりが水産資源研究には不可欠である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、東京水産大学元学長、財団法人日本鯨類研究所顧問、田中昌一博士、故 吉原友吉博士、東京水産大学名誉教授、平山信夫博士、東京水産大学教授、北原武博士、同、山田作太郎博士、鈴木直樹博士、財団法人日本鯨類研究所元理事長、故 池田郁夫博士、同、長崎福三博士、同理事長、大隈清治博士、西海区水産研究所所長、嶋津靖彦博士、三重大学教授、粕谷俊雄博士、遠洋水産研所、加藤秀弘博士、杉山秀樹氏はじめ秋田県水産振興センターの方々、茨城県水産試験場、二平 章博士には多大の御指導を賜った。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) 桜本和美. モデル依存型鯨類資源管理方式「鯨類資源の研究と管理」(桜本和美・加藤秀弘・田中昌一編) 恒星社厚生閣, 東京, 1991; 173-183.
- 2) 桜本和美. 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, 東京, 1996; 98-122.
- 3) Sakuramoto K, Tanaka S. A new multi-cohort method for estimating Southern Hemisphere minke whale populations. *Rep. Int. Whal. Commn.* 1985; **35**: 261-271.
- 4) Sakuramoto K, Tanaka S. Further development of an assessment technique for Southern Hemisphere minke whale populations using multi-cohort method. *Rep. Int. Whal. Commn.* 1986; **36**: 207-212.
- 5) Sakuramoto K, Kato H, Tanaka S. A simulation study of several factors which may influence the estimates of a trend in age at sexual maturity of the Antarctic minke whale. *Rep. Int. Whal. Commn.* 1985; **35**: 285-289.
- 6) Sakuramoto K, Tanaka S, Kato H. A simulation study of the effects of ageing error on trends in age at sexual maturity of the Antarctic minke whale. *Rep. int. Whal. Commn.* 1986; **36**: 213-219.
- 7) Tanaka S. A theoretical consideration on the management of a stock-fishery system by catch quota and on its dynamical properties. *Bull. Japan. Soc. Fish.* 1980; **46**: 1477-82.
- 8) Sakuramoto K, Tanaka S. A simulation study on management of whale stocks considering feedback systems. *Rep. int. Whal. Commn.* 1989; Special Issue, 11, 199-210.
- 9) Hilborn R, Walter C. J. Quantitative fisheries stock assessment. Chapman and Hall, New York, 1992; 1-570.
- 10) 湯 祖格, 桜本和美, 和田時夫, 北原 武, 原田泰志. 道東沖マイワシ漁況のファジィ推論による予測. 日水誌 1992; **58**: 1873-1882.
- 11) Sakuramoto K, Nihira A, Ohnishi S. Factors of catch fluctuations of skipjack tuna in the north-eastern waters of Japan and its forecasting. *Fisheries Science* 1995; **61**: 921-925.
- 12) 桜本和美. ファジィ理論を用いた東北海域のカツオの漁況予測. 平成4年度長期予測高度化技術開発試験報告書, 釣漁業情報サービスセンター, 東京, 1993; 36-62.
- 13) 桜本和美. 東北海域のカツオ漁獲量の予測について—異常年の予測をいかに行うか!?—. 水産資源管理談話会報 1995; **14**: 3-12.
- 14) Sakuramoto K, Kitahara T, Sugiyama H. Relationship between temperature and fluctuations in sandfish catch (*Arctoscopus japonicus*) in the coastal waters off Akita Prefecture. *ICES Journal of Marine Science* 1997; **54**: 1-12.
- 15) Sakuramoto Sugiyama H, Suzuki N. Models for forecasting sandfish catch in the coastal waters off Akita Prefecture and the evaluation of the effect of a 3-year fishery closure. *Fisheries Science* 2001; **67**: 1-12.
- 16) Sakuramoto K, Wade E, Surette T, Moriyasu M. Modeling approach to the southern Gulf of St. Lawrence snow crab (*Chionoecetes opilio*) Fishery (Area12) based on the annual trawl survey data (1989-1999): Preliminary results. Document submitted to the resource assessment meeting held in January 2000. 2000/016. pp. 1-54.
- 17) 桜本和美. 漁業管理のABC, 成山堂書店, 東京, 1998; 1-200.
- 18) Sakuramoto K. A method to estimate relative recruitment from catch-at-age data using fuzzy control theory. *Fisheries Science* 1995; **61**: 401-405.
- 19) 桜本和美. ファジィ・システム(青木一郎・竹内正一編, 漁業と資源の情報学) 恒星社厚生閣, 東京, 1999; 101-111.
- 20) 桜本和美. ファジィ理論を用いた鯨類資源の管理. 水産資源管理談話会報, **4**, 1991; 3-17.
- 21) 鈴木直樹, 北原 武, 桜本和美, 吉田 愛. 若狭湾におけるアカアマダイの資源量変動と水温の関係. 平成12年度日本水産学会秋季大会講演要旨集, 2000; 137.