受賞者総説

イセエビの資源評価と漁業管理*1

(平成7年度日本水産学会賞奨励賞受賞)

山 川 卓*2

三重県水産技術センター

イセエビは黒潮の影響を直接受ける太平洋沿岸域での最も重要な水産資源のひとつである。地先への定着性が強く高価なことから、古くから漁業者同志の話し合いに基づく自主的な管理が地先ごとに実践されてきた。

著者はイセエビの望ましい漁業管理について指針を示すことを主な目的に、三重県和具地区の刺網漁業を具体例に資源評価手法や資源（漁業）特性値を精査し、資源の有効利用と再生産確保のための最適漁獲方策を検討した。ここではその概要を紹介する。

1. イセエビ漁業管理の基本的な考え方

イセエビの生活史には不明な点が多い。ふ化後沖合へ分散したフィロソマ幼生は沿岸へ着底するまでの期間、浮遊生活を送ると考えられるが、分散・移送過程や沿岸への来遊機構、浮遊期間の長さ、系群、再生産関係などは不明である。人工飼育ではふ化からブルルスへの変態までに307日間,¹⁾および340日間と391日間,²⁾日本栽培漁業協会南伊豆事業場における219尾の変態例では231~417日間、平均322.8日間を要した。³⁾天然での幼生の期間も同程度と考え、海産生物の浮遊幼生期間としては相当長い部類に属することになる。

イセエビ刺網漁業の管理方策には、禁漁区や禁漁期間の設定、漁獲制限体長（頭胸甲長）の設定、漁具の制限（網の種類、目合い、糸の太さ、材質、網数など）、休漁、漁期の短縮、輪採、小型個体の再放流など様々なものがあり、管理の導入契機や定着過程も地先ごとに多様である。

このように系群や再生産関係が不明で漁業管理の現状も地区ごとに異なるため、イセエビでは地先ごとの加入資源の有効利用を主体とした管理が現実的で妥当であろう。ただし、加入あたり漁獲量や漁獲金額の最大化を目標とする管理では所与の加入資源から得られる「利得の

最大化」のみが目標とされるため、結果的に加入乱獲を招く危険性が否定できない。資源の平衡状態の維持に必要な産卵数を確保するための何らかの歯止め策を組み合わせる必要がある。

2. 体長組成データの解析による成長の推定

パーソナルコンピュータの発達と普及に伴い、体長組成から漁獲物の年齢組成や成長を推定する手法・ソフトウェアが急速に進歩しつつある。なかでも経時的な複数時点でのデータを一括解析する手法³⁻⁵⁾は、推定に用いる仮定の比較と妥当なモデルの選択、パラメータの信頼区間の推定などが見通し良く行え、安定した推定結果を得ることができる。本研究では、従来の手法³⁻⁵⁾では解析が困難であった、年による成長変動のある場合でも複数データの一括解析が可能な手法を提示した。和具におけるイセエビの頭胸甲長組成データに適用し、漁獲物の齢別組成、加入、成長などを精査した。

目的関数の尤度は多項分布で表現した。各パラメータは未知として推定する場合と、既知として固定する場合が任意に選択でき、年による成長変動にも一括解析での対応が可能なように複数の値を採用できる。適用は1990年から1995年までの5年間の各漁期（10月~4月）の10月、11月、12月、3月、4月の雌雄別の頭胸甲長組成データ（約6万尾分）に行った。

複数データの一括解析によって妥当なモデルが見通し良く選択でき、安定した推定結果が得られた。AICの値の比較の結果、成長の季節変動、齢に従う標準偏差の変化、全減少係数を導入するとモデルの妥当性が高まった。年によって成長は異なり、密度従属的な成長が示唆された。各年齢の推定甲長の5年間の平均値は、雄では1齢が45.0 mm、2齢が62.4 mm、3齢が74.1 mm、雌では1齢が42.3 mm、2齢が56.2 mm、3齢が64.7 mm

*1 Stock Assessment and Fisheries Management of the Japanese Spiny Lobster *Panulirus japonicus*.

*2 Takashi Yamakawa (Fisheries Research Institute of Mie, Hamajima, Shima, Mie 517-04, Japan).

*3 関根信太郎、鈴木重則、島康 洋、野田 忠：イセエビフィロソマ幼生の飼育Ⅷ。フィロソマの期間と成長。平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集、1995, p. 66.

(いずれも10月1日時点での値; 齢はプエルルスから起算)であった。漁獲対象の主群は2齢群であった。漁期内の1齢群の加入の進行状況と年変動に基づき、刺網漁具の漁獲選択性が推算された。

3. 拡張 DeLury 法による資源評価

刺網によるイセエビの CPUE は漁場内の資源密度のみならず、水温や月の周期などの環境要因によっても大きく影響を受ける。漁具能率を一定として解析を行う従来型 DeLury 法では、環境の変化に起因するデータ変動のために資源評価結果が偏っていたり、推定精度が低いなどの弊害が生じる恐れがある。本研究では DeLury 法の拡張を行い、環境要因によって漁具能率が変化する最尤モデルを導出した。⁶⁾そして各種の統計モデルを導入し、妥当なモデルの検討と資源評価を行った。⁷⁾

期ごとの既知の漁獲尾数と漁獲努力量、推定すべき初期資源尾数と漁具能率を用いて尤度を表現した。漁具能率には従来の一定型に加え、水温や太陰月周期、波浪などで変化する14通りのモデルを導入した。統計モデルには、確率分布関数の異なる9通りのモデルを仮定した。和具における1990年10月～1991年4月漁期の日別の漁獲量-努力量-環境データに適用した。漁業資源への完全加入群である2齢以上の漁獲尾数を用いた。

漁具能率を一定とする従来型モデルよりも、変化するモデルで妥当性が大幅に向上した。なかでもモデルⅥ⁶⁾が最も妥当と判断された。①水温が高く、②月相が新月前後で、③波浪が高い、条件で漁具能率は高くなり、各環境要因の変動に伴うイセエビの活動性の変化を反映していると考えられた。

統計モデルでは負の二項分布モデルが最も妥当であった。平均と分散がほぼ等しい単純ランダムモデルでは AIC が著しく大きく、実際の分散は相当大きいことが示唆された。このことは集中分布とみなせるイセエビの分布生態を反映していると考えられた。統計モデルの相違によって推定値の信頼区間は大きく異なった。負の二項分布モデルによる信頼区間は相当広がったが、1991～1992年漁期と1992～1993年漁期を加えた3年間のデータを一括して解析した結果、信頼区間は実用に耐えうる程度にまで狭くなった。

4. 複数年級群解析による資源評価

コホート解析と拡張 DeLury 法の統一的扱いによる複数年級群モデルを提示し、齢別資源尾数、漁具能率、漁

獲選択曲線などの同時推定を行った。⁸⁾本モデルは基本漁獲方程式中の漁獲係数を、漁具能率とサイズによる選択率、漁獲努力量の積に分解したもので、従来型 VPA の“separability の仮定”を一般化し、“基本漁獲方程式による統一的扱い”⁸⁾を具体化したモデルに相当する。

尤度は条件付き負の二項分布の積で表した。漁具能率は前項のモデルⅥを、漁獲選択曲線はシグモイド型曲線を仮定した。各年級群の資源尾数には計算上の関係と1齢群の性比を制約として導入した。自然死亡係数 M は①未知として他のパラメータと同時推定する、②既知として与える ($M=0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30$)、場合を設定した。1990年10月から1995年4月までの5年間の日別漁獲量-努力量-環境データに適用した。

環境による漁具能率の変化や、成長変動に伴う漁獲選択率の変化を反映した自然な推定を行うことができた。各群の初期資源尾数が推定され、齢別雌雄別の群ごとに漁獲、自然死亡、翌年への繰越し状況が明示された。年間漁獲率は1齢群では16.9～27.2% (雄)と9.9～21.1% (雌)、2齢群では63.6～74.4% (雄)と52.4～66.2% (雌)、3齢以上の群では66.7～79.1% (雄)と64.2～76.8% (雌)であった。推定された漁獲選択曲線によると加入は頭胸甲長40mm前後で始まり、50～60mmで急激に選択率が高まった。 M も未知として同時推定する(①)と、現実にはあり得ない値($M=0$)に収束した。 M を既知として与える(②)と初期資源尾数は M の値に伴って増大したが、漁具能率と漁獲選択曲線は安定した推定結果が得られた。

従来の separability の仮定のように漁獲係数を“年に固有な係数”と“齢に固有な係数”へ分離するだけでは推定誤差が大きいと考えられる。本手法に拠れば、利用可能な情報と未知パラメータの違いによって、現実に対応した柔軟なモデル選定が可能である。

5. 漁獲努力の漁期内最適配分に基づく漁業管理

加入資源の有効利用には漁期内での漁獲調節という短期的視点からの管理と、対象資源の生涯を対象とした、より長期的視点からの管理が考えられる。まず最初に、漁期内での漁獲努力の最適配分について検討した。⁸⁾

初期資源尾数が既知の閉じた資源を考える。漁具能率の変化を考慮し、漁獲努力の任意の配分のもとで日別の期待漁獲量が計算できる。価格や漁具能率の推移、操業経費、混獲物や兼業漁業による収入を考慮し、期間中の漁家所得を最大にする漁獲努力の配分を最大原理⁹⁾で求

⁸⁾ 山川 卓・松宮義晴: Separability に関する情報を活用した複数年級群解析。平成7年度日本水産学会秋季大会講演要旨集、1995, p. 22.

⁹⁾ 山川 卓・松宮義晴・山内 淳: イセエビ刺網漁業における漁獲努力量の漁期内最適配分。平成7年度日本水産学会春季大会講演要旨集、1995, p. 200.

めた。漁期終了時には一定数以上の獲り残し尾数を確保し、1日の漁獲努力量には上限（出漁30隻）を設定する。目的関数に考慮する要因の異なる、6通りの解析を行った。兼業漁業はトラフグ延縄、ブリ建網、カツオ曳縄の各漁業とした。

価格が漁獲量と独立の場合、漁獲すべき時期には全隻が出漁し、抑える時期には全く出漁しない方が最適であった。価格が漁獲量に左右される場合は、中間的な隻数の配分もありうる。単位漁獲努力の付加による限界利益が高い時期および漁業に出漁する方が最適である。

目的関数にイセエビの漁獲金額のみを考慮した場合は、価格の高い時期に集中的に出漁する方が最適となった。イセエビ漁獲金額と操業経費を考慮した場合は、市場価格の高い時期に加えて、漁具能率が比較的高い時期にも出漁する方が最適となった。さらに混獲物による収入や兼業漁業による利益まで考慮すると、要因の組合せに応じて漁獲努力の最適配分は大きく変化した。

6. 産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策

Matsuda *et al.*（未発表）は一定数以上の産卵数を確保し資源の平衡状態を維持する制約条件のもとでの最適漁獲方策を、最大原理を用いて導いた。本研究では産卵に関与する親資源量の経済評価の概念を目的関数に導入することによって、漁獲努力の生涯配分に基づく加入資源の有効利用と産卵資源量の確保を同時に図る管理モデルを提示し、イセエビ刺網漁業へ適用した。^{*6}

前項での目的関数（漁家所得に関する総現在価値）に、産卵に関与する親資源量の経済評価項「卵の経済的評価金額 $\tau \times$ 雌の齢別資源尾数 $\times$ 抱卵数」を加え、最大化のための漁獲努力の最適配分を求めた。解析は、最大原理と非線形最適化法を用いて①特定の単一齢群を選択的に漁獲できる場合、②複数の齢群を同時に漁獲する場合、について行った。

産出卵の経済的評価金額 τ の導入により、加入資源の有効利用と再生産管理を結びつけて考察できる。各時点での“現在価”が、“将来収獲価”と“繁殖経済価”の和よりも大きい場合は全隻が出漁し、それ以外は全く出漁しない方が最適となる。単一年齢群の選択的漁獲が可能な場合（①）は、漁獲努力の生涯最適配分を齢別の漁期内方策として明示できた。卵の経済的評価金額 τ が大きいほど、高齢群を集中的に漁獲する最適方策が得られた。複数年齢群を同時に漁獲する場合（②）は漁獲努力の漁期内最適配分に加え、 τ が大きいほど50%選択体長の大きな、鋭い最適漁獲選択曲線が得られた。現実

の漁業では、漁具の見直しに拠る漁獲開始齢の引き上げと総漁獲努力量の低減が必要である。①、②共に、 τ の増大に伴って加入あたり産卵数（SPR; Spawning per Recruit）は多くなり、加入あたり漁獲金額（YPR）は減少した。資源の維持やMSYの達成に必要な産卵数が予測できれば、 τ の調節によって必要卵数を確保しながら加入資源の有効利用を図る最適な漁獲方策が決定できる。

7. 展望

本研究で展開した資源評価手法や漁業管理の考え方はイセエビ以外の魚種にも適用可能である。その一方で、比較的容易に入手できる銘柄別漁獲量データや既知の情報をもとに解析が行える、より簡便な手法の開発も望まれる。研究者全般への普及をめざしたソフトウェアの開発も重要である。

産出卵の経済評価の概念を導入すれば、地域単位の管理（加入資源の有効利用）と系群全体での管理（再生産管理）を、評価金額 τ を介して結びつけることができる。加入資源の有効利用は各地域での漁業者の所得向上の意欲と密接に結びつくため、漁業者団体の自主的な管理が醸成されやすい利点があるが、資源の平衡の維持に対しては何ら保証がない。一方、再生産管理は系群全体を対象に資源の永続的利用をめざすもので、管理対象となる資源の範囲は一般に個々の漁業者の行動範囲よりも広い。このため、個々の漁業者の当面の生産活動には具体策として反映されにくい。産出卵の経済評価を導入すれば資源全体の再生産管理を漁業者の所得と対比させて評価できるため、各地域での管理が行われた自然の結果として全体での再生産管理が達成できることになる。

近年、生物学的管理基準（Biological Reference Points）のひとつとして、加入あたり産卵量（SPR）の概念が多くの魚種で重用されるようになった。¹⁰⁻¹³⁾ SPRに基づく管理基準は資源全体での親と仔の量的関係に関する直接的な評価を必ずしも必要としないため、乱獲の回避のための簡便かつ現実的な基準として注目される。本研究による手法とSPRによる管理は加入あたり産卵数の考え方で共通であり、両者を組み合わせながら現実の漁業管理へ有効に活用できる。

乱獲の回避のために最低限必要なSPRの閾値（補償%SPR）についてMace and Sissenwine¹¹⁾は27種91資源のデータで検討し、平均で18.7%、8割のケースで30%以下であったとし、補償%SPRの不祥種の管理ではとりあえず30%の値を採用することを薦めた。現状の和具におけるイセエビの%SPRを概算すると15%

^{*6} 山川 卓・松宮義晴・山内 淳：イセエビの産卵資源量の経済価値を考慮した加入資源の最適漁獲方策。平成7年度日本水産学会秋季大会講演要旨集，1995，p. 22.

程度の値となり、漁獲過剰と考えられた。最適漁獲方策を導入すると、卵の経済評価を行わないケース ($r=0$) でも %SPR は 37.4% (漁獲選択曲線の傾きに制約がある場合) と 41.2% (傾きが自由の場合) となり、相当の改善が期待される。

補償 %SPR は生活史パラメータの似通った近縁種では近い値になることが知られている。¹¹⁾ 補償 %SPR が不祥の種でも近縁種での値をデフォルト値として与えて当面の管理を推進し、随時、情報更新を行いながら望ましい管理へ近づけていくような利用が可能である。その際、生活史戦略の検討に基づく生活史パラメータの理論的推定¹⁴⁻¹⁶⁾や、次々と更新される情報を客観的手順でその都度取り込みながら意思決定が行えるベイズのアプローチ^{17,18)}などが有効に活用できよう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、終始懇切な御指導を賜った東京大学海洋研究所の松宮義晴教授に深く感謝申し上げます。和具漁業協同組合の磯和大典組合長、伊藤弘参事をはじめ、同組合の職員の方々ならびに漁業者の方々には調査にあたって甚大な御協力をいただいた。三重県水産技術センターと三重県栽培漁業センターの職員の方々ならびに南勢志摩県民局伊勢農林水産事務所水産部普及員室の方々、志摩町水産農林課の方々には調査に多大なる御協力をいただいた。厚く御礼申し上げます。

以下の方々には数々の貴重なご助言、ご援助を賜った。東京大学名誉教授の清水誠博士、同大学海洋研究所の沖山宗雄教授、杉本隆成教授、同大学大学院農学生命科学研究科の谷内透教授、同大学教養学部の岸野洋久助教授、同大学海洋研究所の大西修平博士、森山彰久氏、勝川俊雄氏、豊橋技術科学大学の小出水規行博士、東京水産大学名誉教授の野中忠博士、同大学水産学部の北原武教授、北田修一助教授、九州大学理学部の松田裕之助教授、長崎大学水産学部の山内淳助教授、水産庁中央水産研究所の赤嶺達郎博士、遠洋水産研究所の平松一彦博士、三重大学生物資源学部の白木原国雄教授、原田泰志助教授に深甚なる感謝を申し上げます。

文 献

- 1) T. Yamakawa, M. Nishimura, H. Matsuda, A. Tsujigado, and N. Kamiya: Complete larval rearing of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus*. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 55, 745 (1989).
- 2) J. Kittaka and K. Kimura: Culture of the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* from egg to juvenile stage. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 55, 963-970 (1989).
- 3) D. Pauly: A review of the ELEFAN system for analysis of length-frequency data in fish and aquatic invertebrates, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No. 13, Manila, 1987, pp. 7-34.
- 4) P. Sparre: A method for the estimation of growth, mortality and gear selection/recruitment parameters from length-frequency samples weighted by catch per effort, in "Length Based Methods in Fisheries Research" (ed. by D. Pauly and G. R. Morgan), ICLARM Conf. Proc. No. 13, Manila, 1987, pp. 75-102.
- 5) D. A. Fournier, J. R. Sibert, J. Majkowski, and J. Hampton: MULTIFAN: a likelihood-based method for estimating growth parameters and age composition from multiple length frequency data sets illustrated using data for southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 47, 301-317 (1990).
- 6) T. Yamakawa, Y. Matsumiya, M. Nishimura, and S. Ohnishi: Expanded DeLury's method with variable catchability and its application to catch-effort data from spiny lobster gillnet fishery. *Fisheries Sci.*, 60, 59-63 (1994a).
- 7) T. Yamakawa, Y. Matsumiya, and S. Kitada: Comparison of statistical models for expanded DeLury's method. *Fisheries Sci.*, 60, 405-409 (1994b).
- 8) 平松一彦: 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—. 遠洋水産報, 29, 57-114 (1992).
- 9) L. S. Pontryagin, V. G. Boltianski, R. V. Gamkrelidze, and E. F. Mischenko: 最適過程の数学的理論 (関根智明), 文一総合出版, 東京, 1967, 380pp.
- 10) C. P. Goodyear: Spawning stock biomass per recruit in fisheries management: foundation and current use, in "Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management" (ed. by S. J. Smith, J. J. Hunt, and D. Rivard), Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., Vol. 120, National Research Council Canada, Canada, 1993, pp. 67-81.
- 11) P. M. Mace and M. P. Sissenwine: How much spawning per recruit is enough?, in "Risk Evaluation and Biological Reference Points for Fisheries Management" (ed. by S. J. Smith, J. J. Hunt, and D. Rivard), Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci., Vol. 120, National Research Council Canada, Canada, 1993, pp. 101-118.
- 12) P. M. Mace: Relationships between common biological reference points used as thresholds and targets of fisheries management strategies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 51, 110-122 (1994).
- 13) R. A. Myers, A. A. Rosenberg, P. M. Mace, N. Barrowman, and V. P. Restrepo: In search of thresholds for recruitment overfishing. *ICES J. mar. Sci.*, 51, 191-205 (1994).
- 14) R. A. Myers and R. W. Doyle: Predicting natural mortality rates and reproduction-mortality trade-offs from fish life history data. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 40, 612-620 (1983).
- 15) Y. Hiyama, T. Kitahara, and T. Tokai: Numerical prediction of a relation among growth, reproduction and mortality in iteroparous fish populations. *Res. Popul. Ecol.*, 30, 267-278 (1988).
- 16) Y. Hiyama and T. Kitahara: Theoretical consideration of effect of fishing mortality on growth and reproduction of fish populations. *Res. Popul. Ecol.*, 35, 285-294 (1993b).
- 17) C. W. Clark: 生物資源管理論 (田中昌一監訳), 恒星社厚生閣, 東京, 1988, 300pp.
- 18) S. W. Frederick and R. M. Peterman: Choosing fisheries harvest policies: when does uncertainty matter? *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 52, 291-306 (1995).