

## 〈総説論文〉

## 繁殖特性を考慮した水産資源管理

谷津明彦

## Considerations of reproductive characteristics for fisheries management

Akihiko YATSU

Among reproductive characteristics of commercially exploited fishes, only age at maturity is currently taken into account in calculating spawning stock biomass (SSB), which is one of the standard biological reference points in the traditional single-species fisheries management. Recent studies on the Atlantic cod and fishes in the California Current suggested importance of diversity in age structure of spawners, and fishing would elevate stock variability under fluctuating environmental conditions, mainly through “longevity overfishing”. Therefore, in addition to SSB, conservations of biodiversity including age compositions, local sub-stocks and reproductive characteristics of spawners, coupled with marine protected areas, are necessary for a robust management. This can be viewed within a framework of the Ecosystem Approach to Fisheries.

**Key words:** fisheries management, age structure, maternal effects, biodiversity, ecosystem approach

## 1. はじめに

わが国の水産資源評価では、情報が限られている魚種系群を除き、資源管理基準として主に加入量当たり産卵量 (SPR; Spawner per Recruitment) や再生産関係あるいは加入量当たり漁獲量 (YPR; Yield per Recruitment) が用いられている (水産庁・水産総合研究センター, 2008)。再生産を考慮しない YPR 管理を除き、SPR 管理も再生産関係を用いた管理においても、年齢別の成熟率などの繁殖特性がパラメータとして重要である (桜本, 1998)。たとえば、マサバ *Scomber japonicus* 太平洋系群の成熟率は、年齢、各年齢時の体長、各年齢の資源尾数および環境水温の影響を受けるため (渡邊, 2010)、成熟率とその説明要因のモニタリングが必須である。マサバでみられたように、資源量の減少に応じて成長が速まり成熟が若齢化する現象は、一般に補償的な表現型の可塑性として知られているが、漁獲による遺伝的变化を伴う可能性が指摘されている (勝川・渡邊, 2010)。そのため、漁獲が資源変動に及ぼす影響は複雑であると考えられる。

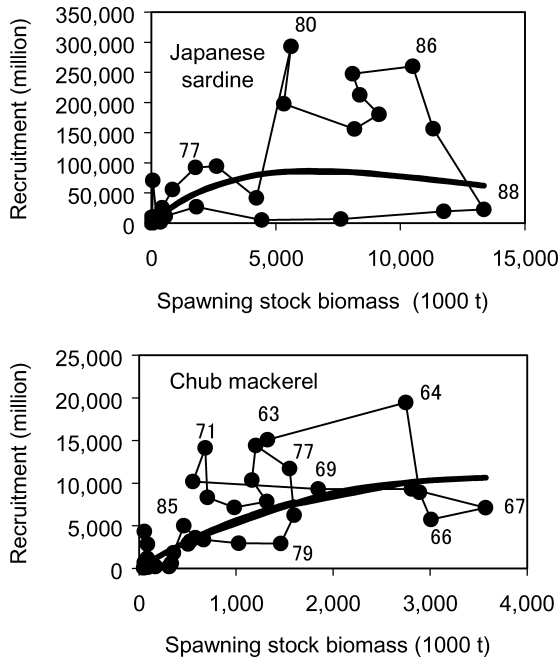
資源が定常状態にあれば、加入量はリッカー型再生産曲

線で代表されるように、親魚量が再生産成功率 (RPS; Recruitment per Spawner) に及ぼす密度効果だけで説明が可能である。ところが、実際にみられる再生産関係の大部分では、加入量が再生産曲線から数年あるいは10年スケールの傾向をもって外れることが多い (Fig. 1)。すなわち、マイワシ *Sardinops melanostictus* では1970-1987年の加入量はリッカー式の上側、1988年以降は下側に主にみられる。マサバでは1969年から1977年まではリッカー式の上側、1978年以降は下側に位置する年が多い。このような非定常な再生産関係においても、親魚量 (SSB; Spawning Stock Biomass) に応じた漁獲係数 ( $F$ ; fishing mortality coefficient) の調整により漁獲量の長期的最大化を図ることができる (山川, 2005)。わが国のABC (Allowable Biological Catch; 生物学的許容漁獲量) 算定規則においても  $F$  一定方策を基本としつつ、親魚量がある閾値を下回った場合には  $F$  を抑制することを基本としている (Fig. 2)。また、米国における水産資源管理では最大持続生産量 (Maximum Sustainable Yield; MSY) を達成する水準に資源量を維持するとされており、実際には底魚類では未開発状態のSSBの40%を確保することになっている (Berkeley et al., 2004)。このようにSSBを基本とする管理の背景には親魚の年齢構成などは影響しないことが前提となっているが、はたしてこの仮定は妥当だろうか？

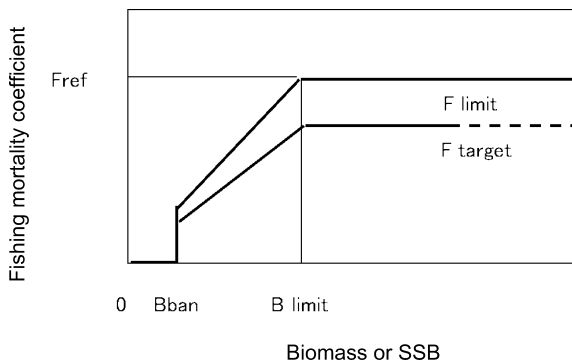
本論文では、非定常な再生産関係を導く要因として、再生産成功率の変動や親魚量と産卵量の関係について考察

2008年8月14日受付, 2009年1月9日受理  
 (独) 水産総合研究センター中央水産研究所  
 National Research Institute of Fisheries Science, Fisheries Research  
 Agency, 2-12-4 Fukuura, Kanazawa, Yokohama, Kanagawa 236-8648,  
 Japan  
 yatsua@fra.affrc.go.jp

し、水産資源管理にはSSBの確保だけでは不十分であり、繁殖特性や生物多様性の考慮が必要なことを紹介する。なお、生物多様性とは、生物種における遺伝的なもの、回遊経路や年齢構成など生態的な多様性、種の多様性、生物群集の多様性、生態系を支える景観の多様性を含む幅広いものである。



**Figure 1.** Relationship between spawning stock biomass and recruitment numbers in the Japanese Pacific stocks of Japanese sardine and chub mackerel with fitted Ricker curves (modified from Yatsu et al. (2005)). Numeral next to a dot represents year of recruitment (1900+).



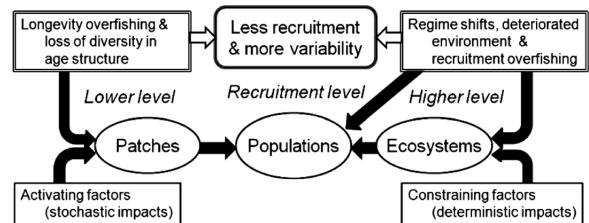
**Figure 2.** Diagram of the Japanese harvest control rule (modified from <http://abchan.job.affrc.go.jp/digests19/rule/rule19.pdf>). Bban: no fishing level, B limit: limit reference point for stock recovery, F limit: limit reference point of fishing mortality coefficient ( $F$ ),  $F_{ref}$ : reference point of  $F$ ,  $F$  target: target reference point of  $F$ , SSB: spawning stock biomass.

## 2. 魚類の資源変動要因と繁殖特性

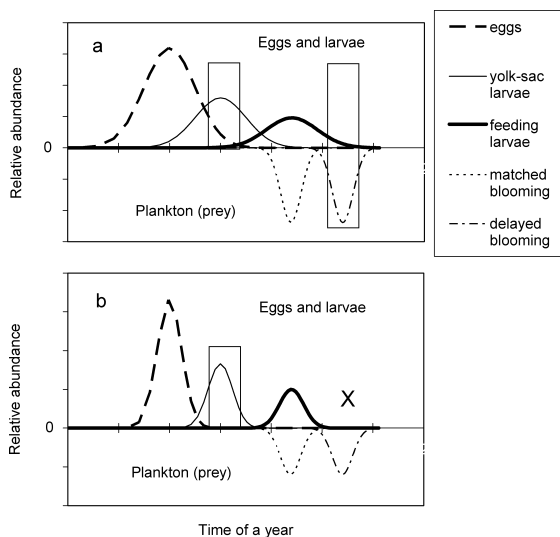
一般に、魚類は小型卵を大量に産出する。また、海洋生態系は基本的に「大が小を食う」構造であるため（谷口, 2008）、小型卵を産む魚類の初期生残率は極めて低く、海洋環境変動の影響を受けやすい。再生産成功率RPSは年々大きな変動を示すが、産卵数が親魚量と直線的な比例関係にあると仮定すると、RPSは初期生残率を反映すると考えられる。しかし、実際には親魚の栄養状態や肥満度が産卵数に影響する（Berkeley et al., 2004; Ottersen et al., 2006; 森本, 2010）。一方、ある年の産卵期全体を通じてみた場合、初期生残率はすべての卵パッチに対して一定でないことも容易に想像できる。すなわち、稚仔魚の生残率は産卵場位置や産卵時期あるいは卵質（遺伝的特性、親魚の栄養学的特性などを含む）により大きく異なることが考えられる。実際、このことは一部の魚類で遺伝的多様性や耳石微量成分の解析に基づいて証明されている（Berkeley et al., 2004）。

Bailey et al. (2005) は、RPSに影響する要因として、(1) 制約条件 constraining factors（環境の長期変動、長寿命捕食者の豊度、個体群内の密度効果などの決定論的過程）と(2) 励起条件 activating factors（稚仔パッチの輸送、餌や捕食者との出会い、地域的なエピソード現象などの確率的過程）の峻別を提起した（Fig. 3）。繁殖特性は上記のような補償的な表現型の可塑性を通じて制約条件に関与すると考えられる。一方、サイズあるいは年齢選択的な漁獲を通じて個体群の年齢構成が大きく変化した場合、繁殖特性の変化とともに卵や稚仔魚の輸送過程も変化することが想定される（後述）。

初期生残率に大きな影響を与える要因の一つに、初期餌料との時空間的マッチ・ミスマッチがある。実際、親潮域の動物プランクトンのブルーム時期には年々および10年規模の変動が知られており、アリューシャン低気圧の強い時代には鉛直混合が盛んなため海洋の成層化が遅れることによりブルームは遅くなる（Chiba et al., 2006）。一方、魚類では高齢個体は若齢に比べて産卵期が早いことが多い（Berkeley et al., 2004）。魚類の産卵期と発育速度に規定される摂餌盛期とプランクトンのブルーム時期に



**Figure 3.** Diagram of population dynamics under climatic regime shifts, environmental deteriorations and two-types of overfishing. Middle and lower portions of this figure were simplified from Bailey et al. (2005).



**Figure 4.** Hypothetical diagram of temporal match (a) and mismatch (b) between a plankton blooming and fish spawning period and subsequent ontogenetic development. Tall open box indicate a case when a delayed blooming matched with feeding larvae and short open box indicates spawning period (egg distribution) that presumably corresponding to the tall box.

ミスマッチが生じた場合でも、親魚の年齢構成や生理生態特性の多様性が十分にある場合には産卵が相対的に長く行われることにより、餌と巡り合いの可能性がある程度確保される (Fig. 4aの四角)。しかし、親魚量や親魚の多様性が極端に少なくなると完璧なミスマッチが生じることになる (Fig. 4bのX)。同様に、ローカルなサブ個体群の減少あるいは消滅による空間的なミスマッチ確率の増加も考えられる。

Atlantic cod *Gadus morhua* は資源が近年急減し、資源管理が強化されているにもかかわらず、回復しない系群が多い。その原因の一つとして、高齢雌の割合の著しい低下が懸念されている (Ottersen et al., 2006)。すなわち、Atlantic codのノルウェー系群における「加入量-水温の相関関係」は親魚の平均年齢が高かった年代にはみられなかったが、近年の親魚の若齢化に伴い、水温が加入量に大きな影響を及ぼしている。Ottersen et al. (2006) はこのメカニズムとして、高齢魚の産卵期間と高齢魚が生む卵の鉛直分布範囲が若齢魚のそれより広く、体重当たり産卵量も高齢魚ほど多いことを挙げている。また、Berkeley et al. (2004) は、カサゴの1種について高齢親から生まれた仔魚の成長は若齢親に由来する仔魚より約3倍速かつ飢餓耐性が大きいこと (油球の大きさが原因と考えられている)、親魚の年齢により産卵期や産卵場が異なること示した。また、Hsieh et al. (2006) はカリフォルニア海流域の魚類約30種について成熟年齢と年々の加入量の変動係数の関係を調べ

たところ、両者には負の相関関係があり、さらに同様な成熟年齢を有する種間で比較すると漁獲対象種が未開発種より変動が大きかったと報告している。これらの例から、高齢な親魚の存在により資源変動が環境変動に対して頑健になっていると考えられる。なお、本来長い寿命を持つ水産資源において、漁獲により寿命が短縮化される現象は「寿命乱獲」 longevity overfishing と呼ばれている (Beamish et al., 2006)。

このように、漁獲による高齢魚の著しい減少が水産資源の変動を環境変動に対してより敏感にするばかりか、資源の回復力も鈍化させている (Fig. 3)。高齢個体の減少以外の生物特性の劣化要因としては、遺伝的多様性の減少、地域 (サブ) 個体群の減少や消滅、サブ個体群間のネットワークの分断が考えられ、これらは総体として個体群構造の単純化と生態系における機能の変化をもたらすと想定されている (Perry et al., 2009)。さらに、このような変化は複雑な非線形過程を含むため、この影響の一般化は困難とされている。

### 3. 資源管理への意義

それでは、漁獲による生物特性劣化はどこまで許されるのか？ それは個体群の適応能力あるいは復元力に依存するため、画一的には決められないだろう。たとえば、SPR管理においても  $F30\%$  SPR (漁獲がないときのSPRの30%を確保する漁獲係数  $F$ ) などが基準として提唱されているが (Mace and Sissenwine, 1993)、持続的な漁業を保証するSPRはRPSの変化に対応して変化するものである。また、持続的な資源の管理には順応的管理が有効であることも論じられているが、資源動態メカニズムの解明に基づく管理手法の高度化に対する期待も大きい。しかし、個体群の適応能力や復元力は、生物が有する諸特性間の相互作用も関与した複雑な非線形過程を含むと考えられるため (Perry et al., 2009)、後者は大きな科学的なチャレンジである。

Beamish et al. (2006) はカナダBC州のギンダラ *Anoplopoma fimbria* を例として、以下のように長寿命の意義と資源管理への警鐘を鳴らしている。ギンダラは最長で113歳まで生きるが、加入量は海洋環境の10年規模変動に応じて変動してきた。環境が悪い時代には加入は全く途絶えるか極めて少ない。日本のマイワシやマサバでも気候レジームに対応した加入量のリッカー型再生産式からの10年規模の偏差がみられている (Fig. 1)。そのため、北太平洋のレジームシフトに応じた20年間程度のギンダラの加入ゼロ時代に適応するための一つの生活史戦略として、ギンダラは長寿命を進化させたと考えられる。このような条件好転を長期間にわたり待つ戦略は植物におけるシードバンク (長期間地中に埋蔵され環境が整ったときに発芽する種子) にもみられる。ちなみにBC州の漁業対象種の多くが寿命30年以上を有する (Beamish et al., 2006)。

高齢個体は一般に大型であるため自然死亡率は比較的小さい。したがって、進化的適応の結果として生じた長寿命を漁獲により失わせるリスクが極めて高い。また、親魚の年齢によりRPSが異なることがすべての魚類において証明されたわけではないが、仮に若齢親のRPSが低い場合には漁獲の影響がより顕著に生じることになる。そのため、SSBに加えて親魚の年齢構成の多様性の確保が予防的観点から必要である。なお、魚類の生活史戦略とレジームシフトに応じた資源管理については谷津(2005)を参照された。

MSYの概念に基づく単一種管理には近年風当たりが強いが、マサバ太平洋系群やスケトウダラ *Theragra chalcogramma* 日本海北部系群にみるように、未成魚の多獲(成長乱獲)やRPSに見合わない強い漁獲圧(加入乱獲)が依然として改善されていないのが現状である。まずは、成長乱獲と加入乱獲に対応した単一種管理の着実な実施が望まれる。ただし、YPR管理だけに注目すると大型個体すなわち高齢魚が選択的に漁獲されることになるため、未成魚の保護とともに成魚についても各サイズ(年齢)をバランスよく漁獲することに留意する必要がある。

小型魚保護のための選択的漁獲は多くの魚種漁法で検討され実施されているものの、高齢魚保護のための漁法改良例を筆者は知らない。このような状況にあって、大型魚(高齢魚)保護のための現実策としては、海洋保護区の設置が適当と考えられる。すなわち、大型魚と小型魚の分布回遊が異なる場合は、大型魚が集中する漁場の時空間的制限が管理手法として適当であろう。漁業に加入した後に体長や年齢で分布に差があまりみられない場合でも、漁場の空間的制限によりその規模に応じた多様な年齢構成の確保が期待される。すなわち、個体の空間的混合頻度と保護区面積に応じて、保護区内に多様な構成を持つ群れが残り残される確率が変化すると考えられる。

また、わが国のABC算定においても予防的な値(ABCtarget)が提示されているが(水産庁・水産総合研究センター, 2008), TAC決定にはほとんど考慮されていないようである。年齢構成の若齢化の影響を含むさまざまな不確実性に対処する予防的アプローチの早急な採用が望まれる。

次の段階として、環境変動と漁獲の影響(生物特性を含む)の関係や資源評価と管理に内在する不確実性を踏まえた順応的管理、漁業者などの持つ幅広い知見の活用、自治的管理などを包括する「漁業への生態系アプローチ Ecosystem Approach to Fisheries」(Garcia et al., 2003; Garcia, 2006)の適用を検討すべきと考える。

生態系アプローチとは、2000年の生物多様性条約第5回締約国会議において採択された、同条約の理念と方法論を示す原則である。また、土地資源、水資源、生物資源の持続的利用と統合管理のための戦略でもある。ここで、文化

的な多様性を持った人間もさまざまな生態系に必要な構成要素とされている。なお、生態系アプローチは資源管理の「革命」ではなく、現状の管理からの段階的な「進化」と位置づけられている(Garcia, 2006)。繁殖特性を含む生物多様性が保全されることが、長期的にみて水産資源の安定的・持続的な利用に不可欠と考えられる。

## 引用文献

- Bailey, K. M., L. Ciannelli, N. A. Bond, A. Belgrano, and N. C. Stenseth (2005) Recruitment of walleye pollock in a complex physical and biological ecosystem: a new perspective. *Prog. Oceanogr.*, **67**, 24–42.
- Beamish, R. J., G. A. McFarlane and A. Benson (2006) Longevity overfishing. *Prog. Oceanogr.*, **68**, 289–302.
- Berkeley, S. A., M. A. Hixon, R. J. Larson and M. S. Love (2004) Fisheries sustainability via protection of age structure and spatial distribution of fish populations. *Fisheries*, **29**, 23–32.
- Chiba, S., K. Tadokoro, H. Sugisaki and T. Saino (2006) Effect of decadal climate change on zooplankton over the last 50 years in the western subarctic North Pacific. *Global Change Biol.*, **12**, 1–14.
- Garcia, S. M. (2006) The Ecosystem Approach to Fisheries. <http://www.globaloceans.org/globalconferences/2006/pdf/SergeGarcia.pdf>
- Garcia, S. M., A. Zerbi, C. Aliaume, T. Do Chi and G. Lasserre (2003) The ecosystem approach to fisheries. Issues, terminology, principles, institutional foundations, implementation and outlook. FAO Fish. Tech. Paper, No. **443**, FAO, Rome, 71 pp.
- Hsieh, C. H., S. C. Reiss, J. R. Hunter, J. R. Beddington, R. M. May and G. Sugihara (2006) Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, **443**, 859–862.
- 勝川木綿・渡邊良朗 (2010) 選択的漁獲による生活史の進化. 水産海洋研究, **74** (特集号), 84–89.
- Mace, P. P. and M. P. Sissenwine (1993) How much spawning per recruit is enough? *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, **120**, 101–118.
- 森本晴之 (2010) 日本産マイワシにおける繁殖特性の時空間変化とその個体群動態への影響. 水産海洋研究, **74** (特集号), 35–45.
- Ottersen, G., D. Ø. Hjermann and N. C. Stenseth (2006) Changes in spawning stock structure strengthen the link between climate and recruitment in a heavily fished cod (*Gadus morhua*) stock. *Fish. Oceanogr.*, **15**, 230–243.
- Perry, R. I., P. Cury, K. Brander, S. Jennings, C. Möllmann and B. Planque (2009) Sensitivity of marine systems to climate and fishing: concepts, issues and management responses. *J. Mar. Syst.*, **79**, 427–435.
- 桜本和美 (1998) 「漁業管理のABC」成山堂書店, 東京, 200 pp.
- 水産庁・水産総合研究センター (2008) 平成19年度我が国周辺水域の漁業資源評価 (第1~3分冊), 1517 pp.
- 谷口 旭 (2008) 海洋生態系におけるプランクトンの重要性と研究の歴史概観. 「海洋プランクトン生態学—微小生物の海—」谷口 旭監修, 成山堂書店, 東京, 1–14.
- 渡邊千夏子 (2010) マサバ太平洋系群の繁殖特性の変化とその個体群動態への影響. 水産海洋研究, **74** (特集号), 46–50.
- 山川 卓 (2005) 長期的な漁獲圧の調整システム. 「レジームシフトと水産資源管理」青木一郎ほか編, 恒星社厚生閣, 東京, 61–71.
- 谷津明彦 (2005) レジームシフトとTAC対象資源の管理「レジームシフトと水産資源管理」青木一郎ほか編, 恒星社厚生閣, 東京, 11–23.
- Yatsu, A., T. Watanabe, M. Ishida, H. Sugisaki and L. D. Jacobson (2005) Environmental effects on recruitment and productivity of the Japanese sardine, *Sardinops melanostictus*, and chub mackerel, *Scomber japonicus*, with recommendations for management. *Fish. Oceanogr.*, **14**, 263–278.