平成 25 年度水産学奨励賞

飼育実験によるサンマの資源動態モデルに寄与する生体情報の取得

中 屋 光 裕

北海道大学水産学部

The acquisition of the biological information to contribute the population dynamics
model of Pacific saury by captive experiment

MITSUHIRO NAKAYA

Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

水産資源の持続的利用には、資源の変動機構の解明と精度の高い資源動向予測、それに基づく適正な資源管理が必要である。サンマ *Cololabis saira* は、北太平洋亜寒帯海域から亜熱帯海域に分布する重要な水産資源であり、日本、ロシア、韓国、台湾などが漁獲を行っている。¹⁾ 日本では、漁獲可能量制度 (TAC) による本種の資源管理が行われている。しかし、本種は大規模な回遊を行い、産卵期は長く、産卵場も広いので、資源動向予測に欠かせない成長・成熟、初回産卵時の年齢や年齢別の産卵親魚の割合、個体ごとの産卵間隔や総産卵数などの再生産特性に不明な点が多い。サンマの資源動向の予測精度を高めるためには、野外調査とともに、飼育実験により生物学的パラメータを取得して、資源動態モデルを活用した資源動向予測が現実的かつ有効な手段である (図 1)。サンマの成長を再現するために、低次生態系モデルと魚類生物エネルギーモデルを結合させた NEMURO. FISH モデルがあるが、²⁾ 呼吸量、代謝量などのパラメータは他魚種で得られた値を利用している。

そこで、サンマの生活史を通じた飼育手法の確立と、生物学的特性の把握を目的とした飼育実験・研究を実施した。サンマの受精卵は、現三重県水産研究所の協力により、熊野灘で採集されたもので、卵管理および飼育は現北海道区水産研究所厚岸庁舎で行った。一連の飼育実験により、1. ふ化仔魚の生存能力、2. 生活史初期の減耗と成長の関係、3. 稚魚期以降の飼育環境下特有の死亡要因の把握と対策、4. 初回産卵までの成長・成熟過程に関して、以下の知見を得た (図 2)。

図 1 資源動向予測の精度を高めるためには

図 2 サンマの生活史を通じた飼育技術の確立

1. ふ化仔魚の生存能力（無給餌生残時間、摂餌開始期の遅れが成長・生残に及ぼす影響）

これまでに、野外におけるサンマの初期生残と成長の関係について研究成果が得られているが、³⁻⁵⁾ ふ化仔魚の飢餓耐性は不明である。サンマは北太平洋に広く分布し、産卵期はほぼ周年にわたり、卵・仔魚は表面水温 10~25℃ で採集され、日本沿岸では主に 15~18℃、⁶⁾ また、主分布域は 18~23℃⁷⁾ や 15~20℃⁸⁾ に形成されるという報告もある。本研究では、野外で卵・仔魚が採集されている 10~25℃ の水温範囲でふ化仔魚を無給餌で飼育して、水温と生残可能な時間の関係を調べた。その結果、ふ化仔魚（0 日齢）の無給餌半数（全数）致死日数は、10, 15, 20, 25℃ のそれぞれで順に 9.7, 7.6, 6.2, 5.4 日（14.0, 10.5, 8.0, 6.5 日）であった。⁹⁾ この結果は、低水温ほど生残に対して好適な餌環境に遭遇するまでの猶予期間が長くなることを示唆している。現在、サンマの主な産卵水温帯である 15~20℃ において、好適な餌環境に遭遇するまでの猶予期間や、ふ化から摂餌開始までの期間とその後の成長・生残の関係を精査中である（Nakaya *et al.* 未発表）。これらの研究により、飢餓による直接的な死亡だけでなく、累積的な成長の遅れがその後の生残にどのように影響するかを明らかにする。今後、飼育環境下で求められたサンマ仔魚の成長・生残に好適な環境（餌と水温のバランス）と野外調査で得られる卵・仔魚の分布データを照合し、資源加入量変動機構の解明に繋げたい。

2. 生活史初期の減耗と成長の関係

魚類の初期減耗は、さまざまな要因が複合されて引き起こされ、被食は最終的な死亡要因と考えられている。¹⁰⁾ Takasuka *et al.* は、¹¹⁾ フィールド調査でカタクチイワシとその捕食者を同時に採集し、捕食者の胃から発見された個体と生きたまま採集された個体の耳石輪紋解析を行い、成長選択的な生残を確認している。しかし、このように被捕食両者が同時に採集されるケースは稀で、サンマを含む大半の魚類については、野外で成長選択的な生残を直接証明した例はほとんどない。一般に、仔魚から変態して稚魚になるまでの期間は体のつくりかえが激しいため、特に減耗が激しい時期と考えられている。¹²⁾ なお、変態終了の指標には、すべての鰭条が成魚と同様の定数に達した時点とするものや、体型変化が収束した時点とするものなどがある。¹³⁾ 本研究では、飼育環境下でサンマの成長・生残過程および変態過程（鰭条形成や体型変化）の記録に加え、死亡個体と生残個体の成長を比較するために耳石日周輪解析を行った。20℃ 飼育環境下において、ふ化後 40 日目にはすべての個体の鰭条が定数に達しており、また体型変化は、それ以降収束する傾向がみられた。なお、その時の平均体長は約

40 mm であり、およそこのサイズが変態期の終了、すなわち稚魚期の開始時期であることが明らかになった。次に、ふ化から稚魚になるまでの生残と成長の関係を調べた。その結果、稚魚になる前に死亡する個体と生残して稚魚になる個体の間には、ふ化後 1 日目から成長に有意差がみられ（一元配置分散分析： $p < 0.01$ ）、生残して稚魚になる個体の方が高成長であった。¹⁴⁾ これは、被食など外的要因以外の減耗要因、つまり内的要因（卵質・母親効果など）による減耗も生じていることを示すとともに、野外でもふ化直後から稚魚期までの累積的な成長の遅れが、加入量に影響を及ぼす可能性を示唆するものである。

3. 稚魚期以降の飼育環境下特有の死亡要因の把握と対策

遊泳力の高いクロマグロ *Thunnus thynnus* の飼育現場では、構造物への接触・衝突ダメージによる死亡が頻繁に生じている。^{15,16)} 小型ではあるが、サンマもまた遊泳力が高く、水槽などに収容すると傷つきやすく、¹⁷⁻²⁰⁾ タモなどで掬うと鱗がはがれやすいため、飼育が困難な魚種である。²¹⁾ 水族館では、体表が傷つき死亡しやすいマンボウ *Mola mola* を飼育するため、水槽内部にビニールシートをとりつけて体表のダメージを軽減している（アクアワールド茨城県大洗水族館：<http://www.aquaworld-oarai.com/learning/manb>；2014 年 4 月 8 日参照）。本研究では、水族館におけるマンボウの飼育を参考に、水槽内部にビニールシートの覆いを施し、稚魚期以降、成長して遊泳力のついたサンマの水槽壁面への接触・衝突が原因と考えられる死亡の軽減効果を検証した。ビニールシートの覆いを取り付けた水槽（ビニールシート区）と取り付けない水槽（コントロール区）では、生残率に有意差が認められ（ビニールシート区 = 88%，コントロール区 = 61%， χ^2 検定： $p < 0.05$ ）、ビニールシート区の方が生残率は高かった。ビニールシートの覆いは稚魚期以降の生残率を高め、水槽内で成魚まで安定的に飼育することを可能にした。²²⁾

4. 初回産卵までの成長・成熟過程

サンマの産卵は、20℃ の飼育環境下でふ化後 243 日、平均体長約 25 cm から確認された。²³⁾ 重回帰分析の結果、生殖腺指数は体サイズ、肥満度、ふ化後日数のうち、ふ化後日数が成熟に与える影響が最も大きかった。²³⁾ 野外では、これまでに体長 20 cm ほどの小型の成熟個体が採集されている。^{24,25)} 本研究結果から、このような小型個体は日齢的には成熟に達してもおかしくないが、何らかの理由で十分に成長できなかった個体である可能性が示された。

サンマの卵細胞の発達様式は非同期発達型を示し、1

産卵期に複数回産卵することが知られており,^{26,27)}野外調査で採集されたサンマのバッチ産卵数については、これまでに様々な報告がある(500-4000粒,²⁶⁾ 947-2547粒,²⁷⁾ 120-1720粒,²⁸⁾ 300-4500粒²⁹⁾)。本研究では、産卵を経験していない200~220日齢の飼育魚の卵巣観察を行い、卵径分布を調べた。その結果、99%の卵巣卵径に重複がみられたが、残り1%の卵巣卵は極めて大きく、その数は289~350粒と推定された。また、水槽内ではじめて産卵が確認された頃の卵数は多くても1日数百粒ほどであった。産卵は、はじめて確認されてから断続的にみられ、産卵開始からおよそ50日目以降には、1日あたり産出される卵数が増大した。これらの観察例から、野外で採集された個体のバッチ産卵数の差は、産卵回数の違いによることが示唆された。

5. おわりに

これらの成果は、サンマの再生産特性解明の第一歩であり、資源動態モデルを用いた実効性の高い資源管理方策の策定に寄与できることを願っている。すでに、一連のサンマ飼育実験により、呼吸量や代謝量などのパラメータが得られており、NEMURO. FISHモデルの改良にも貢献している(図3)。現在、飼育で得られたデータから、個体ごとの産卵間隔、生涯における総産卵数の推定や経産個体の判別方法の開発は、巢山らを中心に進められており、今後、野外個体群への適用が期待される。これにより、サンマ資源の持続的な利用に欠かせない正確な情報提供と、資源管理の実現に貢献することが予想される。

最後に、水産資源の持続的な利用について、私見を述べさせて頂く。すでに減り過ぎた資源については、正確な情報提供と資源管理だけでなく、資源を大切に利用する方法の開発と普及が必要である。一部の漁業者は、これらの重要性を認識して実践を開始している。しかし、後継者の少ない地域では、どちらかといえば持続的な利用をめざしたこれらのとりくみには否定的である。今後

は、水産資源の持続的な利用のために、正確な情報提供と資源管理に加え、後継意欲を湧かせる水産業における将来像の提示や、経営の安定化をはかる活動(漁獲物の付加価値を増大させる方法の提案と普及)は欠かせない。

謝 辞

サンマの飼育試験を行うにあたり、北海道区水産研究所厚岸栽培技術開発センターの森岡泰三博士をはじめ、安藤 忠博士、市川 卓博士、白藤徳夫博士、神保忠雄研究員、鈴木重則主任研究員、関谷幸男室長、錦昭夫所長、福永恭平主任研究員、村上直人主任研究員(五十音順)には有益なるご助言、多大なるご協力、試行錯誤の機会を与えて頂き、奥泉美智子氏、源田美枝子氏、佐々木美穂氏、鈴木裕子氏、出越幸子氏、橋本志満子氏、番藤祐輔氏(五十音順)には多大なるご協力を賜ったことを感謝いたします。また、飼育試験が円滑に行えるようご指導・ご支援いただいた東北区水産研究所八戸支所の上野康弘室長、巢山哲博士、中神正康博士、中央水産研究所の清水昭男博士、飼育をはじめにあり有益な情報を提供して頂いた財団法人福島海洋科学館の津崎 淳氏、山内信弥氏、サンマ受精卵の採集にご協力いただいた三重県水産研究所の山田浩且博士をはじめ、青森県から和歌山県に至る太平洋側各県の水産試験場の関係者各位に御礼申し上げます。最後に、推薦者である北海道大学水産科学研究所の桜井泰憲教授、ならびに同研究院の高津哲也教授、高橋豊美名誉教授には、受賞対象となった一連の研究成果を上げるために欠かせない、研究者としての下地づくりにご尽力頂いたこと、深く感謝いたします。

文 献

- 1) 水産庁増殖推進部 独立行政法人水産総合研究センター、我が国周辺水域の漁業資源評価 第一分冊 水産庁増殖推進部(水産庁独立行政法人水産総合研究センター編)、東京、2005。
- 2) Ito S, Kishi MJ, Kurita Y, Oozeki Y, Yamanaka Y, Mergray BA, Wernner FE. Initial design for a fish bioenergetics model of Pacific saury coupled to a lower trophic ecosystem model. *Fish. Oceanogr.* 2004; **13**, Suppl. 1: 111-124.
- 3) Watanabe Y, Butler JL, Mori T. Growth of Pacific saury, *Cololabis saira*, in the northeastern and northwestern Pacific Ocean. *Fish. Bull.* 1988; **86**: 489-498.
- 4) Watanabe Y, Oozeki Y, Kitagawa D. Larval parameters determining preschooling juvenile production of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the northwestern Pacific. *Can. J. Fish. & Aquat. Sci.*, 1997; **54**: 1067-1076.
- 5) Watanabe Y, Kurita Y, Noto M, Oozeki Y, Kitagawa D. Growth and survival of Pacific saury *Cololabis saira* in Kuroshio-Oyashio transitional waters. *J. Oceanogr.* 2003; **59**: 403-414.
- 6) Odate S. On the distribution of larvae and young of the saury, *Cololabis saira*, and the condition of maturity of the

図3 サンマ資源動態モデル(Ito et al. 2004)の改良(黒抜き部分が改良済み、下線部が今後の改良点を示す)

- gonad of the spawning fish in the neighborhood of Izu islands and the north-eastern sea of Japan. *Bull. Tohoku Reg. Fish. Res. Lab.* 1956; **7**: 70-102.
- 7) Hattori S. Studies on fish larvae in the Kuroshio and adjacent waters. *Bull. Tokai Reg. Fish. Res. Lab.*, 1964; **40**: 1-158.
 - 8) Iwahashi M, Isoda Y, Ito S, Oozeki Y, Suyama S. Estimation of seasonal spawning ground locations and ambient sea surface temperatures for eggs and larvae of Pacific saury (*Cololabis saira*) in the western North Pacific. *Fish. Oceanogr.* 2006; **15**: 125-138.
 - 9) Nakaya M, Morioka T, Fukunaga K, Murakami N, Ichikawa T, Sekiya S, Suyama S. Relationships between survival period and temperature of newly hatched Pacific saury *Cololabis saira* under starvation conditions. *Aquaculture Sci.* 2009; **57**: 625-626.
 - 10) Bailey KM, Houde ED. Predation on eggs and larvae of marine fishes and the problem of recruitment. *Adv Mar Biol.* 1989; **25**: 1-83.
 - 11) Takasuka A, Aoki I, Mitani I. Evidence of growth-selective predation on larval Japanese anchovy *Engraulis japonicus* in Sagami Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 2003; **252**: 223-238.
 - 12) Tanaka M, Goto T, Tomiyama M, Sudo H. Immigration, settlement and mortality of flounder (*Paralichthys olivaceus*) larvae and juveniles in a nursery ground, Shijiki bay, Japan. *Neth. J Sea Res.* 1989; **24**: 57-67.
 - 13) Kendall AW, Ahlstrom EH, Moser HG. Early life history stages of fishes and their characters. In: Moser HG, Richards WJ, Cohen DM, Fahay MP, Kendall AW, Richardson SL (eds). * *Ontogeny and systematics of fishes*. * American Society of Ichthyologists and Herpetologists, Special publications Vol. 1, Allen Press Inc, Lawrence 1984; 279-352.
 - 14) Nakaya M, Morioka T, Fukunaga K, Murakami N, Ichikawa T, Sekiya S, Suyama S, Ueno Y, Shimizu A. Verification of growth dependent survival in early life history of Pacific saury *Cololabis saira* using laboratory experiment. *Environ. Biol. Fish.* 2011; **92**: 113-123.
 - 15) Miyashita S, Sawada Y, Hattori N, Nakatsukasa H, Okada T, Murata O, Kumai H. Mortality of northern bluefin tuna *Thunnus thynnus* due to trauma caused by collision during early grow out culture. *J. World Aquacul. Soc.* 2000; **31**: 632-639.
 - 16) 石橋泰典. 種苗生産における衝突死. 日水誌 2006; **72**: 949-950.
 - 17) 津崎 淳. サンマの飼育と展示-I. アクアマリンふくしまニュース 2000; **2(2)**: 2-3.
 - 18) 津崎 淳. サンマの飼育と展示-II. アクアマリンふくしまニュース 2000; **2(3)**: 1-2.
 - 19) 津崎 淳. サンマの飼育と展示-III. アクアマリンふくしまニュース 2001; **3(1)**: 1-2.
 - 20) 津崎 淳. サンマの飼育と展示-IV. アクアマリンふくしまニュース 2001; **3(2)**: 1-2.
 - 21) 山内信弥, 藤井健一, 松崎浩二. 水族館での水槽展示を目的とするサンマ成魚の採集と輸送の試み. 動物園水族館雑誌 2006; **48**: 14-17.
 - 22) Nakaya M, Morioka T, Fukunaga K, Murakami N, Ichikawa T, Sekiya S. Effectiveness of using a vinyl sheet to reduce mortality during rearing of Pacific saury *Cololabis saira*. *Aquaculture Sci.* 2010; **58**: 301-303.
 - 23) Nakaya M, Morioka T, Fukunaga K, Murakami N, Ichikawa T, Sekiya S, Suyama S. Growth and maturation of Pacific saury *Cololabis saira* under laboratory conditions. *Fish. Sci.* 2010; **76**: 45-53.
 - 24) 菅間恵一. 耳石の性状からみたサンマのポピュレーション構造-I. 北水試報告 1957; **16**: 1-12.
 - 25) 堀田秀之. 鱗・耳石によるサンマのポピュレーション構造の分析とその成長. 東北水研報 1960; **16**: 41-64.
 - 26) 巢山 哲, 桜井泰憲, 島崎健二. 夏季の中部北太平洋におけるサンマの成熟と日齢について. 日水誌 1996; **62**: 361-369.
 - 27) 小坂 淳. 西太平洋におけるサンマの生活史とそれに基づく資源変動の考察. 東北水研報 2000; **63**: 1-96.
 - 28) 久保雄一. 太平洋産サンマ *Cololabis saira* (Brevoort) の生態学的研究-II 生殖腺について. 茨城県水試研報 (昭和 25・26 年度) 1954; 87-97.
 - 29) Hatanaka M. Biological studies on the population of the saury, *Cololabis saira* (Brevoort) Part 1 Reproduction and growth. *Tohoku J. Agr. Res.* 1955; **6**: 227-312.