平成 26 年度水産学進歩賞

海産魚介類の種苗量産技術の開発と資源増殖への応用に関する研究

浜 崎 活 幸

東京海洋大学大学院海洋技術研究科

Studies on mass seed production technologies for marine fish and shellfish and
their application to stock enhancement

KATSUYUKI HAMASAKI

*Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology,
Minato, Tokyo 108-8477, Japan*

1. 研究の概要

著者は、カニ類、イセエビ、マダコ、ハタ類、カンパチ等の水産上有用な魚介類の種苗量産技術開発研究に取り組んできた。具体的には、小型容器・水槽を用いた飼育実験によって、餌料系列、栄養、飼育環境、疾病等が幼生の摂餌、発育・成長、行動、生残に及ぼす影響を明らかにし、最適飼育条件を把握した上で、その効果を大型水槽で検証した。これによって、種苗量産を阻害する要因と防除方策を明らかにし、まず 100 万尾規模でガザミ類の種苗量産技術を開発した。¹⁾引き続き、ガザミ類の安定種苗生産を阻害するゾエア期における疾病の生物防除とメガロパ幼生への変態異常現象の原因解明に取り組んだ。²⁻⁴⁾また、種苗生産研究をズワイガニ、ケガニ、イセエビ、マダコ等へ展開し、ズワイガニとマダコでは世界に先駆けて種苗量産に成功するとともに、^{5,6)}イセエビでは 100 L 規模での幼生飼育における生残率の向上と安定化が達成された。⁷⁾さらには、水産総合研究センターのハタ類とカンパチの種苗生産研究に参画し、種苗量産技術の向上に寄与した。^{8,9)}

種苗量産技術の進展により、ガザミ類では大量種苗放流が可能になった。しかし、ガザミ類の種苗に装着可能な標識は未開発で、長らく放流効果は明らかではなかった。著者らの研究グループは、高知県浦戸湾で、トゲノコギリガザミ種苗の遺伝標識放流を行い、回収率までの放流効果を定量評価した。¹⁰⁾また、クルマエビの放流効果をレビューし、¹¹⁾トゲノコギリガザミに加え、コウライエビやヨーロッパアンロブスターの放流効果を比較評価し、放流効果に影響する特性を明らかにした。¹²⁾さらに

は、ガザミの放流効果についても分析を試みた。¹³⁾また、クルマエビとアワビ類の漁獲量は環境により大きく変動することを解明し、環境変動の影響を受けた資源の増殖に向けた問題点を指摘した。¹⁴⁻¹⁶⁾

以上の研究成果に加え、種苗放流による資源増殖の基礎として、ノコギリガザミ類、アサリ、コブシメ、マダイ等について、繁殖生態、生活史、遺伝的多様性や集団構造等の資源生態に関する研究を進め、¹⁷⁻²⁰⁾現在は水産資源の増殖と同じ技術的枠組みである「希少性甲殻類（ヤシガニとオカヤドカリ類）の保護増殖」研究を展開している。²¹⁾

以上の研究内容のうち、本稿では、ガザミ類、ズワイガニ、ケガニの種苗生産技術開発および甲殻類の種苗放流効果の評価に焦点をあてて研究成果の概要を紹介したい。

2. カニ類の種苗生産における幼生の大量死とその防除

カニ類の種苗生産では、ゾエア幼生やメガロパ幼生がしばしば大量死する。一方、カニ類幼生をビーカー等の小型容器に収容し、毎日ピペットで幼生を吸い取り、新しい海水と餌（ワムシ、アルテミア）を入れた容器に移し替えると、稚ガニまで高い生残率で飼育できる。例えば、種苗量産が難しいズワイガニやケガニでも稚ガニまでの生残率がそれぞれ 57% と 82% であった例がある。^{22,23)}小型容器を用いた飼育と種苗生産水槽の大きな違いは、前者では毎日幼生を新しい環境（餌、海水）に移すことができるが、後者では不可能なことである。このことが、疾病発生や幼生の変態に影響を及ぼし、カニ類幼生の種苗量産を困難にしている大きな要因になって

いる。

2-1. ガザミ類

疾病 小型容器では疾病により死亡した個体を取り除くことができるが、種苗生産水槽では困難である。そうすると、死亡個体が感染源となり、疾病が蔓延する。アミメノコギリガザミの種苗生産では、ゾエア幼生の背棘等の器官内部が壊死し、幼生が大量死する現象が頻発する（壊死症と仮称）。本症は *Flavobacteriaceae* に属する細菌による感染症で、原因菌はニフルスチレン酸ナトリウム（NFS-Na）に感受性を示し、試験的には同剤 2 ppm 浴によって防除できる。²⁾ しかし、水産用医薬品使用基準により NFS-Na の使用が制限されていること、また薬剤使用による環境負荷や耐性菌の問題を背景として、壊死症原因菌をターゲットとした生物防除技術の開発に取り組んだ。²⁾ まず、種苗生産環境から細菌株を分離し、原因菌との競合培養試験等を通じて、1 株を選択した。この細菌を大量培養し、100 kL 水槽に毎日添加して種苗生産を実施したところ、細菌添加区では、第 4 齢ゾエアまでは対照区に比較して壊死症罹病率が低減され、生残率は高く推移した。しかし、添加翌日の飼育水中の添加細菌数は飼育日数にともない減少し、第 5 齢ゾエアからメガロパにかけて壊死症罹病率は上昇し、生残率は大きく低下した。このように、生物防除による種苗生産を実用化する上で、飼育水中での添加細菌の維持・増殖技術の開発が課題として残された。

幼生の変態異常 種苗生産水槽では、幼生の摂餌効率を高めるため、飼育水中に生物餌料が残存するように給餌管理され、また生物餌料の餌として植物プランクトンが添加される。そうすると、植物プランクトンの種類と量によって生物餌料の栄養価が変わり、幼生の発育と生残に大きな影響を及ぼす。ガザミ類の種苗生産では、n-3 系高度不飽和脂肪酸を含有するナンノクロロプシスや淡水クロレラの添加量が多いと、ゾエアとメガロパの中間的な形態を示す最終齢ゾエアが出現する。このような過剰発育ゾエアはメガロパへ正常に変態できずに大量死するが、植物プランクの添加量を抑えることで過剰発育を抑制することができる。^{24,25)}

全国の種苗生産機関におけるガザミの変態異常現象の発生状況を把握する目的で、ガザミの第 4 齢ゾエアとメガロパのサンプルを得て、形態を観察し、生残状況と対応させてみた。³⁾ その結果、過剰発育ゾエアの変態異常現象による大量死に加え、背棘や尾叉等のゾエア的な形態形質が残存したメガロパ、すなわち未熟なメガロパが出現すると、大量死が発生する現象を見出した。これら大量死を防除するには、カニ類幼生の変態メカニズムを知る必要がある。カニ類幼生の眼柄には成体と同様に脱皮に大きな影響を及ぼす X 器官-サイナス腺神経分泌系が存在する。ガザミゾエア幼生の左右の眼柄を解剖針

を用いて異なる日齢で除去して飼育したところ、ゾエアのメガロパの形態形質の発現はゾエア期を通じて X 器官-サイナス腺系の影響を受けて強化されること、メガロパへの変態は第 3 齢ゾエア後期に制御されることが示唆された。⁴⁾ また、第 3 齢ゾエア後半に淡水クロレラを多量に添加すると、未熟メガロパが出現することが明らかとなり、植物プランクトンがワムシを介して脱皮・変態に関わる内分泌を攪乱しているものと推察された。²⁶⁾ ガザミ類の種苗生産では、生物餌料の餌として植物プランクトンが添加される。この植物プランクトンの添加による栄養過多によってメガロパのゾエアが出現し、また第 3 齢ゾエア後半でピンポイント的に内分泌を攪乱し、未熟メガロパが出現するものと推察された。このように、一般的に行われてきた飼育管理によってガザミ幼生の変態異常が惹起されていたのである。現在、植物プランクトンに依存しない種苗生産手法の開発に取り組んでおり、カニ類全般に通じる飼育手法になるものと期待している。

2-2. ズワイガニ・ケガニ

ズワイガニの種苗生産では、幼生は当初は浮上遊泳しているが、次第に水槽底に沈降するようになり、大量死する。水槽底に沈降した幼生の背棘は折れている場合が多く、水槽底に溜まった生物餌料の糞や死亡個体等に起因して増殖した細菌に日和見的に感染する確率が高くなり、大量死が発生する可能性が考えられた。そこで、生物餌料の保有細菌数、特にビブリオ属細菌数を低減させるための薬浴剤として利用されてきた前出の NFS-Na 浴の効果を試験したところ、生残率の向上効果が認められ、種苗量産が可能なことを示した。^{5,27)} この幼生の沈降による大量死現象は、ケガニの種苗生産でも認められている。²⁸⁾

甲殻類幼生の遊泳行動には光環境が大きな影響を及ぼす。そこで、ズワイガニとケガニ幼生の走光性を調べた。^{27,29)} ズワイガニの第 1 齢ゾエアは明瞭な正の走光性を示したが、それ以降弱くなり、メガロパでは光に対して反応しなかった。また、縦型容器では、明暗条件に関わらず、ふ化当日の第 1 齢ゾエアは表層に分布したが、幼生の浮遊性は次第に失われ、第 2 齢ゾエアとメガロパは容器の底に沈降した。このように、ズワイガニ幼生が水槽底に沈降する現象は幼生の行動特性によるもので、天然海域における鉛直分布に対応している。飼育環境下でズワイガニ幼生の浮遊性を確保するためには、何らかの方策が必要である。そこで、飼育水を機械的に攪拌する装置の効果を調べたところ、幼生の浮遊率が向上し、先の薬浴効果と合わせて種苗量産の成功に寄与した。^{5,27)} 一方、ケガニ幼生は負の走光性を示す場合が多く、明環境下で沈降しやすい特性を有していた。飼育水の機械的攪拌効果を透明水槽と黒色水槽を用いて予備的

に調べたところ、浮遊率の向上に有意な効果は認められなかったが、光環境の影響を受けない黒色水槽の暗黒条件下で浮遊率は高い値を示した。²⁸⁾ 甲殻類幼生は暗黒下でも摂餌可能なことから、³⁰⁾ 日長の短縮によりケガニ幼生の浮遊率が向上し、大量死を防除できる可能性がある。

3. 甲殻類の種苗放流効果の評価

甲殻類は脱皮して成長するため、装着した外部標識が脱落しやすい。また、甲殻類の種苗サイズは数 mm から数 cm 程度で、外部標識の装着は困難な場合が多い。このため、種苗放流効果の定量評価は長らく困難であったが、1990 年代半ばから、金属製の内部標識 Coded Wire Tag がクルマエビの種苗放流調査に試用されるとともに、クルマエビの放流個体を漁獲サイズまで追跡可能な新しい体部分標識手法（尾肢切除法）が開発され、放流個体の回収率が推定されるようになった。¹¹⁾ このような内部標識や体部分標識の他に、アロザイム、ミトコンドリア DNA、マイクロサテライト DNA 等の遺伝マーカーを標識として利用する方法が提案されてきたが、放流効果を定量評価した事例はなかった。著者らの研究グループは、高知県浦戸湾において、ミトコンドリア DNA を遺伝標識としたトゲノコギリガザミの放流効果を定量評価した。^{10,31)} 5 年にわたって、毎年異なるハプロタイプの雌から生産した種苗を放流し、放流個体の混合率に基づき回収率（0.24–1.70%）を推定した。¹⁰⁾

日本のクルマエビ、トゲノコギリガザミに加え、中国のコウライエビとノルウェーのヨーロピアンロブスターの種苗放流効果調査事例に基づき、放流個体の回収率、漁獲体重、各種の生活史特性を比較評価することを試みた。¹²⁾ その際、放流種苗 1 尾あたりの期待漁獲量（Yield per release, YPR）を「回収率×漁獲体重」として試算したところ、平均的にはクルマエビ 1 g、コウライエビ 2 g、ヨーロピアンロブスター 37 g、トゲノコギリガザミ 4 g となった。高い放流効果が期待できる生活史特性は、狭い生活圏と大きな漁獲体重であり、一般的に生活圏が広く漁獲体重が小さい、すなわち YPR が小さいクルマエビ類の漁獲量を上げるには、大量の種苗放流を必要とする。

クルマエビの漁獲量は 1985 年には 3741 トンを記録したが、その後減少を続け、現在では 500 トン程度まで激減している。この間に種苗放流量が大幅に減少したことから、それが漁獲量の減少要因とされることもあるが、先述したように YPR が小さいことから、そのような見方は現実的ではない。クルマエビは外海域で産卵することから、内湾への回帰・加入に海流が大きな影響を及ぼすことが想定される。そこで、クルマエビの資源量指数に及ぼす親潮、黒潮、対馬暖流の勢力指数の影響を一般化加法モデルで解析したところ、暖流の勢力が強い

とクルマエビ資源は減少することが示唆された。¹⁴⁾ そのメカニズムは現在のところ不明であるが、環境変動によってクルマエビの資源量が大きく変動しているようである。

一方、クルマエビと並び古くから栽培漁業対象種として放流が継続されてきたガザミの放流効果についても分析した。ガザミは多くが発生年内に漁獲加入することに着目し、年内の種苗放流量に対し漁獲量をプロットすると、漁獲量の下限値は放流量にともない増加した。¹³⁾ このことは、放流が漁獲の底上げになっており、下限よりは環境変動による資源変動を示すものと解釈された。それら変数間の回帰分析によって、瀬戸内海における YPR は 34 g 程度と見積もられ、瀬戸内海で生活史を完結し、漁獲体重の大きい本種の特性を反映したものと推察される。

4. おわりに

本稿では、著者が関わったカニ類の種苗生産研究と甲殻類の種苗放流効果を概説した。カニ類の安定種苗生産を阻害する主要因は、疾病と幼生の発育・変態異常である。疾病については、薬剤によらない生産体系を構築する必要があり、そのためには生物防除の研究開発が必須である。また、幼生の行動特性を考慮した飼育技術の開発も重要である。幼生の発育・変態異常現象については、ようやくメカニズム研究の緒に就いた段階であり、今後は変態に関わる内分泌機構等について研究を進める必要がある。わが国では、種苗生産技術の進展によって、多くの魚介類で種苗放流事業が実施されている。ここで紹介した甲殻類も含め、放流した種苗が実際に生き残って漁獲されることがわかってきた。しかし、放流効果（YPR）には対象種の生活史特性に起因した限界がありそうで、しかも水産資源は環境変動によって大きく変動するのが普通である。今後、種苗放流事業を有効に進めるには、このような対象種の特性を考慮し、種苗放流の必要性も含めた議論が必要になるであろう。

謝 辞

本研究は、著者が所属した日本栽培漁業協会、水産総合研究センターおよび東京海洋大学で実施したものです。その間に、多くの方々にご指導、ご助言をいただきました。特に、東京海洋大学教授北田修一先生、元九州大学教授北島 力先生、東京海洋大学名誉教授渡邊精一先生、水産総合研究センター増養殖研究所の皆川 恵所長、元日本栽培漁業協会（現、水産総合研究センター）の村上恵祐氏、照屋和久氏、團 重樹氏をはじめとする諸先輩・同僚の皆様、東京海洋大学の学生諸子に、記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 浜崎活幸. ガザミ類の安定種苗生産技術の開発に関する研究. 日本水産学会誌 2003; **69**: 701-704.
- 2) Dan S, Hamasaki K. Evaluation of the effects of probiotics in controlling bacterial necrosis symptoms in larvae of the mud crab *Scylla serrata* during mass seed production. *Aquacult. Int.* 2015; **23**: 277-296.
- 3) Dan S, Kaneko T, Takeshima S, Ashidate M, Hamasaki K. Variations in larval morphology and their relationships to survival during mass seed production by the swimming crab, *Portunus trituberculatus* (Brachyura, Portunidae). *Aquaculture* 2013; **414-415**: 109-118.
- 4) Dan S, Kaneko T, Takeshima S, Ashidate M, Hamasaki K. Eyestalk ablation affects larval morphogenesis in the swimming crab *Portunus trituberculatus* during metamorphosis into megalopae. *Sex. Early Dev. Aquat. Org.* 2014; **1**: 57-73.
- 5) Kogane T, Dan S, Hamasaki K. Improvement of larval rearing technique for mass seed production of snow crab *Chionoecetes opilio*. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 851-861.
- 6) 浜崎活幸, 福永恭平, 吉田儀弘, 丸山敬悟. マダコ浮遊期幼生の生残・成長に及ぼすナノクロロプシスの効果および 20 m³ 水槽を用いた飼育事例について. 栽培漁業技術開発研究 1991; **19**: 75-84.
- 7) Murakami K, Jinbo T, Hamasaki K. Aspects of the technology of phyllosoma rearing and metamorphosis from phyllosoma to puerulus in the Japanese spiny lobster *Panulirus japonicus* reared in the laboratory. *Bull. Fish. Res. Agen.* 2007; **20**: 59-67.
- 8) 照屋和久, 與世田兼三, 岡 雅一, 西岡豊弘, 中野昌次, 森 広一郎, 菅谷琢磨, 浜崎活幸. 光周期がマハタ仔魚の摂餌, 成長および生残に及ぼす影響. 日本水産学会誌 2008; **74**: 645-652.
- 9) 今井彰彦, 岩崎隆志, 橋本 博, 浜崎活幸, 照屋和久, 浜田和久, 虫明敬一. 飼育試験と鰯の個体発生から推察したカンパチ仔魚の鰾開腔メカニズム. 日本水産学会誌 2001; **77**: 845-852.
- 10) Obata Y, Imai H, Kitakado T, Hamasaki K, Kitada S. The contribution of stocked mud crabs *Scylla paramamosain* to commercial catches, estimated using a genetic stock identification technique in Japan. *Fish. Res.* 2006; **80**: 113-121.
- 11) Hamasaki K, Kitada S. A review of kuruma prawn *Penaeus japonicus* stock enhancement in Japan. *Fish. Res.* 2006; **80**: 80-90.
- 12) Hamasaki K, Kitada S. Potential of stock enhancement for decapod crustaceans. *Rev. Fish. Sci.* 2008; **16**: 164-174.
- 13) Hamasaki K, Obata Y, Dan S, Kitada S. A review of seed production and stock enhancement for commercially important portunid crabs in Japan. *Aquacult. Int.* 2011; **19**: 217-235.
- 14) Hamasaki K, Kitada S. Catch fluctuation of kuruma prawn *Penaeus japonicus* in Japan relative to ocean climate variability and a stock enhancement programme. *Rev. Fish. Sci.* 2013; **21**: 454-468.
- 15) Hamasaki K, Kitada S. The enhancement of abalone stocks: lessons from Japanese case studies. *Fish. Fish.* 2008; **9**: 243-260.
- 16) 浜崎活幸, 北田修一. 環境変動と資源増殖—アワビ類を事例として—. 「水産資源の増殖と保全」(北田修一, 帰山雅秀, 浜崎活幸, 谷口順彦編) 成山堂書店, 東京. 2008; 86-104.
- 17) Ogawa CY, Hamasaki K, Dan S, Kitada S. Fishery biology of mud crabs *Scylla* spp. at Iriomote Island, Japan: species composition, catch, growth and size at sexual maturity. *Fish. Sci.* 2011; **77**: 915-927.
- 18) Hamasaki K, Ishibashi Y, Kitada S. Reproduction of an alien *Ruditapes* clam (Bivalvia: Veneridae) on recreational clam-gathering grounds in Tokyo Bay, Japan *Mollusc. Res.* 2014; **34**: 54-61.
- 19) Dan S, Hamasaki K, Yamashita T, Oka M, Kitada S. Age-based life cycle traits of the broadclub cuttlefish *Sepia latimanus* confirmed through release-recapture experiments. *Aquat. Biol.* 2012; **17**: 181-195.
- 20) Hamasaki K, Toriya S, Shishidou H, Sugaya T, Kitada S. Genetic effects of hatchery fish on wild populations in red sea bream *Pagrus major* (Perciformes, Sparidae) inferred from partial sequence of the mitochondrial DNA. *J. Fish Biol.* 2010; **77**: 2123-2136.
- 21) Hamasaki K, Ishiyama N, Yamashita S, Kitada S. Survival and growth of juveniles of the coconut crab *Birgus latro* under laboratory conditions: Implications for mass production of juveniles. *J. Crust. Biol.* 2014; **34**: 309-318.
- 22) 小金隆之, 團 重樹, 浜崎活幸. ズワイガニ幼生の生残と脱皮・成長に及ぼす n-3 高度不飽和脂肪酸の影響. 日本水産学会誌 2009; **75**: 1004-1010.
- 23) 神保忠雄, 浜崎活幸, 芦立昌一. ケガニ幼生の生残, 発育および摂餌に及ぼす水温の影響. 日本水産学会誌 2007; **73**: 1081-1089.
- 24) Hamasaki K, Suprayudi MA, Takeuchi T. Mass mortality during metamorphosis to megalops in the seed production of mud crab *Scylla serrata* (Crustacea, Decapoda, Portunidae). *Fish. Sci.* 2002; **68**: 1226-1232.
- 25) Hamasaki K, Suprayudi MA, Takeuchi T. Effect of dietary n-3HUFA on larval morphogenesis and metamorphosis to megalops in the seed production of mud crab, *Scylla serrata* (Brachyura: Portunidae). *Aquacult. Sci.* 2002; **50**: 333-340.
- 26) Dan S, Sui Y, Kaneko T, Takeshima S, Ojima D, Miyoshi T, Hamano K, Ashidate M, Hamasaki K. Abnormal morphology in megalopas of the swimming crab, *Portunus trituberculatus* during seed production: causes and prevention. *Aquacult. Res.* 2015; in press.
- 27) 小金隆之, 浜崎活幸, 團 重樹. ズワイガニ種苗生産における飼育水の攪拌と薬浴による生残率の向上. 日本水産学会誌 2007; **73**: 226-232.
- 28) 市川 卓, 村上直人, 森岡泰三, 村上恵祐, 浜崎活幸. ケガニ種苗生産における光環境が幼生の沈降と発育に及ぼす影響. 水産増殖 2014; **62**: 65-73.
- 29) 市川 卓, 那波洋子, 浜崎活幸, 村上恵祐. 飼育したケガニ幼生の走光性, 鉛直分布, 体密度と外部形態の発育に伴う変化. 日本水産学会誌 2014; **80**: 349-359.
- 30) Hamasaki K, Ogiso Y, Dan S, Kitada S. Survival, development and growth of larvae of the coconut crab, *Birgus latro*, cultured under different photoperiod conditions. *Aquacult. Res.* 2015; doi:10.1111/are.12699.
- 31) Imai H, Obata Y, Sekiya S, Shimizu T, Numachi K. Mitochondrial DNA markers confirm successful stocking of mud crab juveniles, (*Scylla paramamosain*) into a natural population. *Aquacult. Sci.* 2002; **50**: 149-156.