

日本海

リサーチ & トピックス

2018年9月 第23号



川底に埋設放流するサケ発眼卵

- 省コストなサケ増殖手法「発眼卵放流」の導入を目指した研究の紹介
- 能登・佐渡沖合域の流れ場とブリ来遊の経年変動
- カニ幼生の“内的な発育最適温度”の推定

編集 日本海区水産研究所



国立研究開発法人
水産研究・教育機構

目 次

省コストなサケ増殖手法「発眼卵放流」の導入を目指した研究の紹介 飯田真也（資源管理部・沿岸資源グループ）	3
能登・佐渡沖合域の流れ場とブリ来遊の経年変動 和川拓（資源環境部・海洋動態グループ）、 久保田洋（資源管理部・資源管理グループ）	6
カニ幼生の“内的な発育最適温度”の推定 山本岳男（資源生産部・資源増殖グループ）	9

表紙の解説

川底に埋設放流するサケ発眼卵

写真撮影および解説 飯田真也（資源管理部・沿岸資源グループ）

発眼卵放流では、パイプを通じて発眼卵を川底に流し込み埋設する。発眼卵は衝撃に非常に強く、本作業によってダメージを受けることはない。仔魚・稚魚期の飼育コストを必要とせず、現行の稚魚放流に比べて省コストな増殖手法である。放流された卵は河床内の浸透水で呼吸することから、それらの生残率を高めるためには、新鮮な水が十分供給されるよう、通水性の高い場所に放流することが重要である。

省コストなサケ増殖手法「発眼卵放流」の導入を目指した研究の紹介



飯田真也（資源管理部・沿岸資源グループ）

サケの発眼卵放流に適した河川環境を確かめました。また、その放流効果を検証するための標識調査を現在進めています

【はじめに】

日本のサケ *Oncorhynchus keta* については人工授精した卵を稚魚に育てて放流するふ化放流事業（図1）による資源管理が行われてきた。しかし、サケの漁獲量がそれほど多くない本州日本海側（富山県以北）では、増殖事業経費の縮減や電気・餌代の高騰、さらには従事者の高齢化などを理由にふ化放流事業を継続することが困難な地域が増えてきた。今後、本州日本海側のサケ資源を持続的に利用していくためには、従来のふ化放流事業の継続を図りつつ、より省コストな増殖手法の実用化に取り組む必要がある。

省コストな増殖手法の1つとして発眼卵放流が

知られている。発眼卵放流とは、発眼期に達した卵（以下、発眼卵）を河床に埋設する増殖手法である（図2）。卵飼育までは従来のふ化放流事業と同様に飼育するが（図1：①～③）、仔魚飼育以降を自然界に委ねることで増殖コストを削減出来る。著者らは発眼卵放流を導入するにあたって必要な情報を得るべく研究を推進しており、本稿では今まで得られた成果および進行中の研究についての概要を紹介する。

【サケ発眼卵放流に適した河川環境の検討】

日本の河川は早い流れの瀬、深く穏やかな淵など地形的な変化に富んでいる。しかし、どのよう

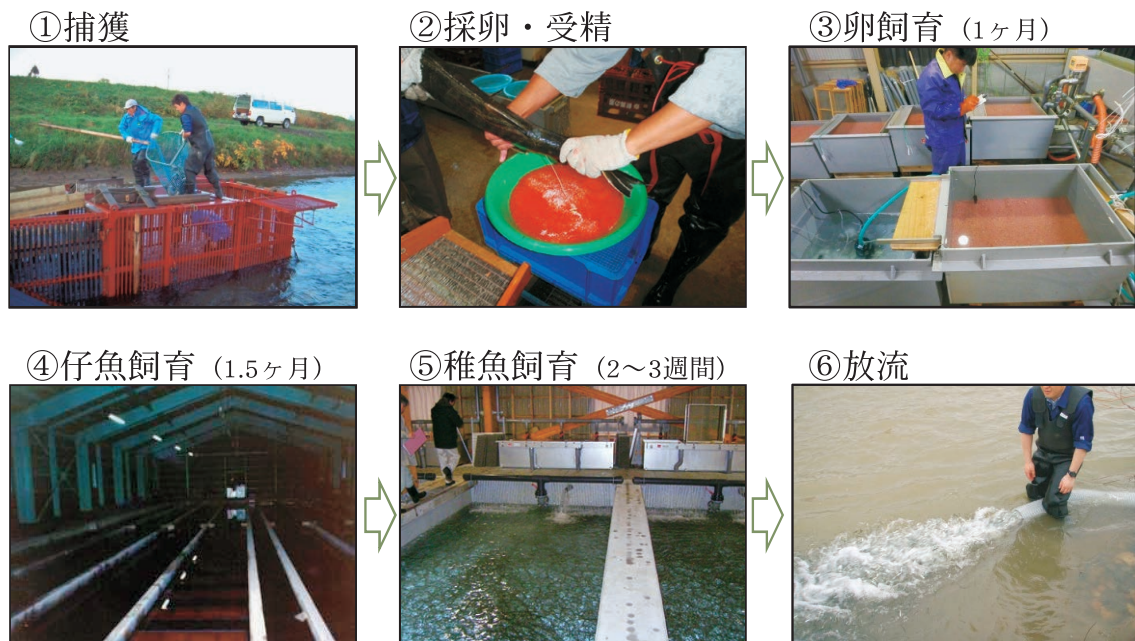


図1. サケふ化放流事業の一般的な作業工程
括弧内は水温10℃で飼育した場合の平均的な飼育期間を示す。

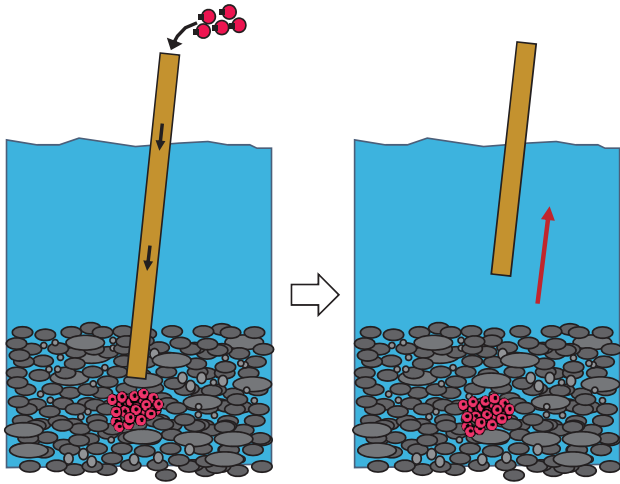


図2. 発眼卵放流の一般的な作業手順
河床へ挿入したパイプを通じて発眼卵を流し込み(左図)、パイプを抜くことで放流は完了する(右図)。

な環境にサケの発眼卵放流を行えば高い生残率で稚魚を生産出来るのかは十分明らかにされていなかった。そこで、発眼卵放流に適した河川環境を把握するため、①川底の砂礫組成、②動水勾配(意義は後述)、③水深、④流速を観測した場所で発眼卵放流を実施し(新潟県北部の荒川水系において2013年に19カ所、2014年に23カ所)、発眼卵が稚魚に育つまでの生残率と環境要素の関係を統計モデルを用いて検討した(Iida *et al.*, 2017)。

生残率の平均値は、2013年では92.7%(範囲57.2~100%)、2014年では71.5%(同6.4~100%)だった。生残率は川底に含まれる粒径2mm以下の細かな土砂の割合が高いほど低下した(図3a)。この理由として、細かな土砂が多いと河床の隙間が埋められて新鮮な水が供給されにくくなり、その結果、低酸素状態に陥った可能性が考えられた。

河床内の水環境と生残率の関係を動水勾配を用いて調べたところ、動水勾配と生残率の間に確かな関係は認められなかった(図3b)。なお、動水勾配とは表層と河床内の水交換に関する指標であり、河床から表層に向かって水が湧き上

がる場所ではプラスの値、表層から河床へ水が浸透する場所ではマイナスの値を示す。サケは川底から表層に向かって水が湧き上がる場所(すなわち、動水勾配がプラス)を優先的に選択して産卵すると認識されてきた。当初、動水勾配がプラスであれば生残率は高まることが予想された。近年、サケが産卵する条件が産卵時期によって異なることが明らかとなり、産卵期の前半に産卵するサケは表層水が浸透する場所(動水勾配がマイナス)を選択する傾向にあることが分かってきた。これらを踏まえると、発眼卵放流群が稚魚に育つまでの生残率を高めるという観点において、動水勾配を考慮する必要性は低いと判断された。

また、水深や流速との関係については、生残率は水深が浅いほど(図3c)、また、流速が速いほど(図3d)高まることが分かった。河川水に含まれる土砂が河床内へ経時的に侵入する量は、水深が深いほど、また、流速が遅いほど多くなることが実験的に確かめられている。このことから、

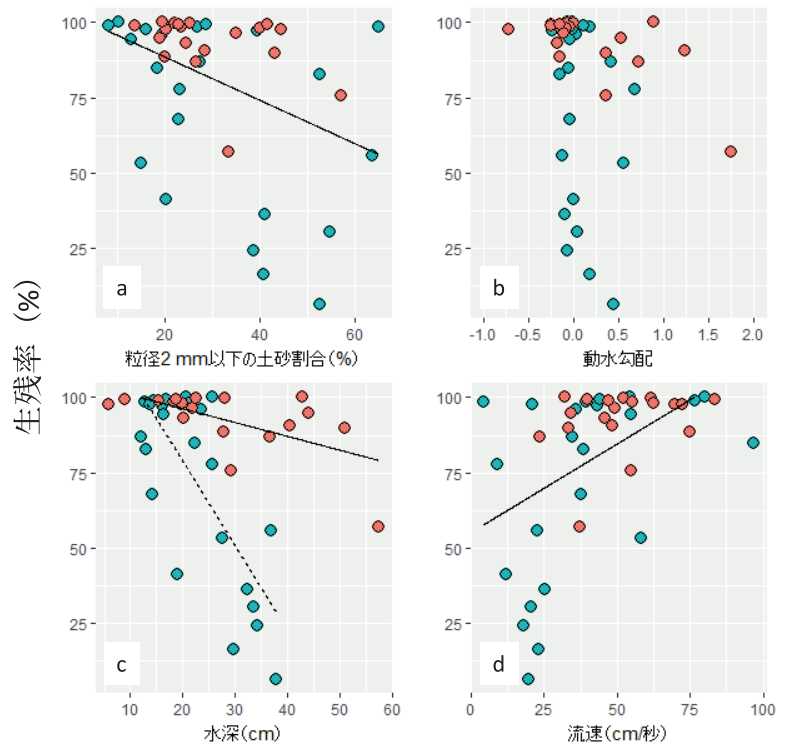


図3. 発眼卵放流群が稚魚に育つまでの生残率と放流環境の関係
赤丸が2013年級群(N=19)、青丸が2014年級群(N=23)を示す。生残率に対する環境要素の確かな影響が認められた場合、その関係性を直線で表した。水深(c)が生残率に与える影響度(直線の傾き)は調査年によって異なったため、2013年級分を実線、2014年級分を点線で示した。

水深が浅く、また、流速が速い環境では経時的な土砂の侵入が抑制されて河床の通水性が低下しにくく、その結果、生残率が高かったと考えられた。

以上から、卵が稚魚に育つまでの生残率が高い発眼卵放流を行う環境として、細かな土砂が少なく（高い通水性の確保）、流速が速くて浅い場所（経時的に侵入する土砂の抑制）を選択することが重要であり、動水勾配に配慮する必要性は低いと言える。

【発眼卵放流群の回帰率推定】

本州日本海側において、放流したサケ稚魚が放流先の河川へ回帰する確率（以下、回帰率）は0.3%程度と考えられている。しかし、発眼卵放流で生産したサケ稚魚がどれだけ回帰率を示すのか、検証した事例はない。今後、発眼卵放流の導入を検討するにあたって、その回帰率を把握しておく必要がある。そこで、著者らは新潟県三面川水系滝矢川において、2016年と2017年の12月、アリザリン・コンプレキソン（ALC）標識（図4）を施したサケ発眼卵10万粒を河床に埋設して放流した。発眼卵放流で生産されたサケ稚魚は川から海へと移動して成長し、3～5年後、再び自らが生まれた三面川へ帰ってくる。帰ってきたサケ親魚に含まれるALC標識魚の混入率を調べることで、発眼卵放流由来のサケ親魚数を推定、すなわち発眼卵放流群の回帰率を算出することが可能となる。今後、数年にわたり発眼卵放流群の回帰率を調べ、発眼卵放流の増殖手法としての有効性を検討していくこととしている。

【おわりに】

発眼卵放流は発眼期までで飼育を終えるため、稚魚放流に比べて仔魚が稚魚に育つまでのおよそ2ヶ月（図1：④～⑤）の飼育コストを削減出来る。サケ発眼卵放流群の放流効果（≒回帰率）は現時点で明らかでないものの、サクラマスに関しては、稚魚放流群と発眼卵放流群の費用対効果（漁獲可能サイズの魚を1尾生産する費用）を比較した場合、発眼卵放流群の方が優れていたことが報告されており（岸・徳原、2017）、サケ発眼

卵放流についても十分な費用対効果が期待される。また、飼育期間が短いことから稚魚放流に比べて魚病の拡散リスクが少ないとされ、生態系への配慮という点でも優れている。

一方、日本の河川では流域開発事業等の影響によって河床に細かな土砂が堆積するなど、その環境が荒廃している状況が散見される。前述したとおり、発眼卵放流群が稚魚に育つまでの生残率は河川環境に影響を受ける（図3）ことから、そのような状況においては、発眼卵放流を行う前に河床材を適当なサイズの小石と入れ替えるなど、河川環境を回復させることが必要となる。また、技術者の高齢化が進んだ状況においては、発眼卵放流規模に見合った作業労力の確保も課題となるだろう。従来の稚魚放流をどれだけ発眼卵放流に代替していくか、その配分は放流河川的环境（良好な河床環境が存在するか）や放流を行うふ化場の実情（掘削作業労力の確保が可能か）など多角的な視野で検討しなければならない。

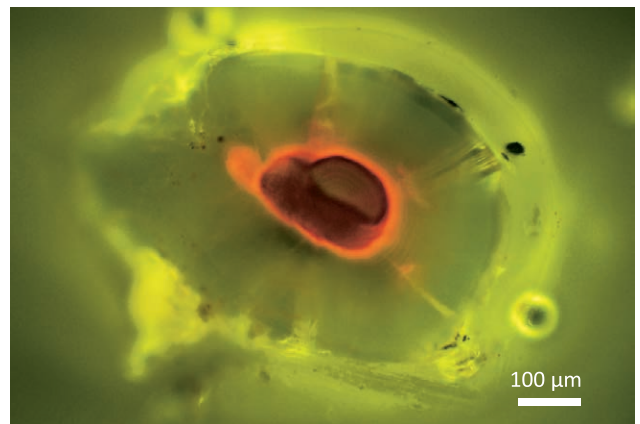


図4. サケの発眼卵をALC溶液200ppmに24時間浸漬させて耳石に施されたALC標識（中央のオレンジ色のリング）

【引用文献】

- Iida M., Imai S., Katayama S. 2017: Effect of riverbed conditions on survival of planted eyed eggs in chum salmon *Oncorhynchus keta*. Fish. Sci., 83, 291-300.
- 岸 大弼, 徳原哲也, 2017: ヤマメ稚魚放流個体および発眼卵放流個体の残存状況と費用対効果の比較. 岐阜県水研報, 62, 1-7.

能登・佐渡沖合域の流れ場と ブリ来遊の経年変動

和川拓（資源環境部・海洋動態グループ）、
久保田洋（資源管理部・資源管理グループ）



日本海能登・佐渡沿岸域へのブリの来遊に重要な、沖合域の流れ場の構造とその経年変動を明らかにしました

【はじめに】

日本海のブリの多くは、冬季に日本海の佐渡島と能登半島の沖合域を北から南に回遊し、沿岸域に接近（来遊）して定置網で漁獲される。この海域は冷水渦・暖水渦の断続的な去来・発達の影響を受け、流れ場（流れの向き・大きさの空間分布）や水温・塩分などの海洋環境の時空間変動が大きく、ブリの回遊に大きな影響を与えると考えられる。ブリは高水温の海洋環境を好んで回遊することが知られており、これまでは主に、水温場やその時間変動とブリの沿岸域への来遊の関係について調べられてきた。このように、ブリの来遊の変動を理解するためには、水温場の変動を理解することが重要である。加えて、水温場は流れ場の影響を強く受けるため、あるいは、ブリの漁模様には流れの変化自体が影響するとも考えられているため、流れ場の変動を理解することもまた重要な課題である。そこで、本研究では能登・佐渡沖合域における流れ場の経年変動の特徴を明らかにするため、24年間に及ぶ長期的な人工衛星海面高度観測データを解析した。

海面高度とは、海面の流れ場を表す“流線関数”という意味合いを持つ物理変数である。例えば、天気図において風が高気圧域を右手に見て吹くのと同じく、海面高度が高い海域を右手に見て水は流れる。海面高度データは1993年に海面高度計を装備した人工衛星が打ち上げられて以降、誰でも解析できるデータとして公開されているものであり、これ以降、海面の流れ場の構造やその変動の海洋物理学的研究は劇的に進展した。現在では、

複数の人工衛星海面高度計観測による、水平0.25度×0.25度に格子化された1日毎のデータが公開されている。

(<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products.html>)

【流れ場の経年変動】

新潟県から石川県への寒ブリの来遊期である11月から1月において、海面高度の経年変動の特徴を捉えるため、経年変動成分を用いて主成分分析を行った。この場合の主成分分析とは、第1主成分から順に時空間変動の分散（エネルギーとみなしても良い）が大きく、各主成分の固有ベクトル（空間分布）が海面高度の水平分布に対応し、スコア（時間変化）はその経年変動を示す。主成分分析は、特徴的な空間分布を統計的に抽出し、その時間変化を定量的に解析することが可能となるのが大きな利点である。

日本海全域に及ぶ空間スケールの流れ場の経年変動成分を反映した第1主成分（寄与率41.2%、未掲載）に対し、第2主成分（寄与率13.2%）は能登半島沖合域と佐渡島沖合域に逆向きの2つの渦（渦対）が分布する空間パターンであった（図1）。能登半島沖の渦は、この海域に出現する暖水渦の強さを、佐渡沖の渦は沖合からの冷水の貫入の強さを反映している。この空間パターンの時間変化を示す主成分スコアは、1年から4年の周期で渦対の流れ成分の向きが入れ替わる変動をしていたことを示している（図2）。すなわち、2009年（2009年は、2009年11月から2010年1月の

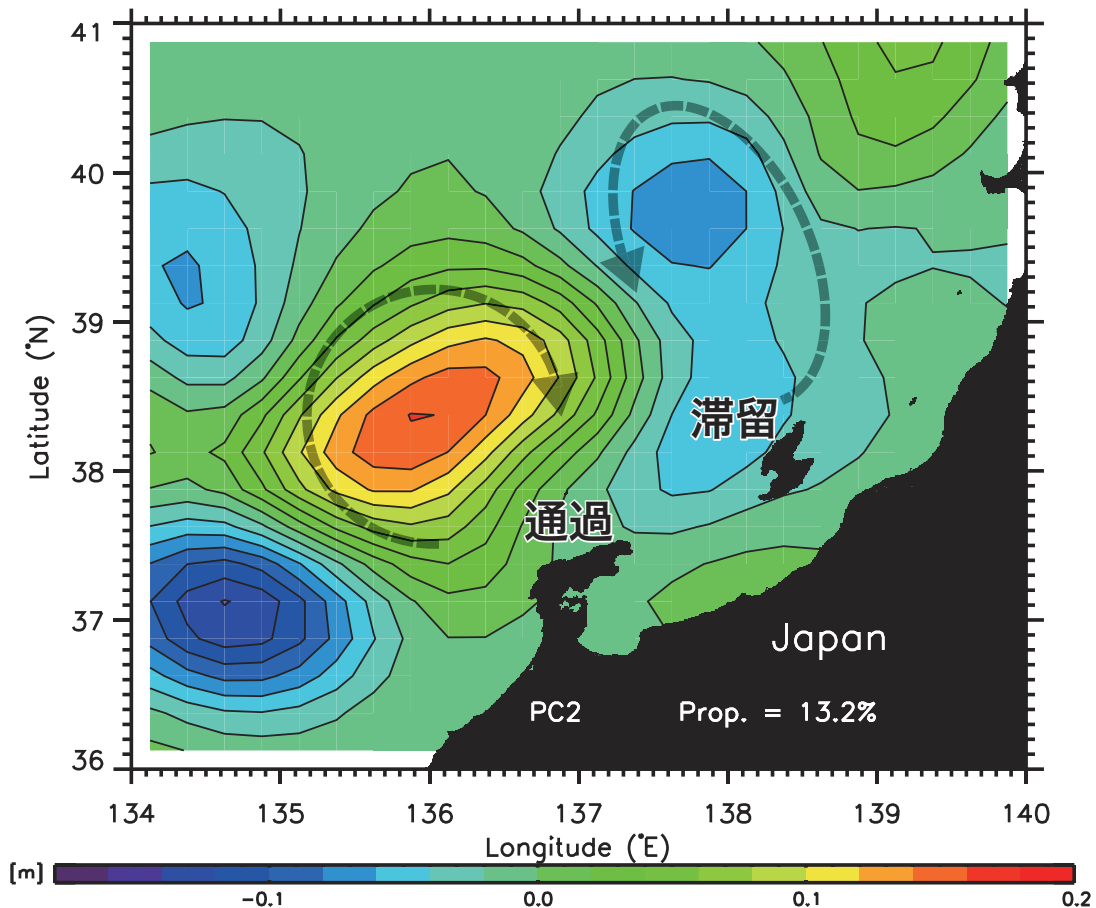


図1. 冬季（11～1月）の流れ場の経年変動成分（海面高度の第2主成分の固有ベクトル）

平均値を表す)、2011年、2015年のような主成分スコアが正の年には、佐渡島沖合では北東向きの流れ成分が強まり、能登半島沖合では南西向きの流れ成分が強化していた。一方、2010年、2014年のような主成分スコアが負の年には、佐渡島沖合では南西向きの流れ成分が強まり、能登半島沖合では北東向きの流れ成分が強まる変動をしていた。

上記のように、海面高度データの解析から、渦の存在が、能登・佐渡沖合域における流れ場の変動にとって重要であることがわかってきた。水平規模が100km程度のこれらの渦は、中規模渦と呼ばれる。これらの中規模渦の形成メカニズムは現状では明らかにはなっていないが、この海域を流れる対馬暖流などの海流の不安定化や、陸岸・海底地形の影響と考えられている。近年の高解像度数値シミュレーションモデルや人工衛星観測の発達により、中規模渦の形成メカニズムの究明や、その生物・化学的環境へのインパクトの評価が進

むことが期待されている。特に、沿岸漁業・養殖業にとっては、中規模渦のような時空間規模を持った変動現象が、漁業対象種の来遊の多寡や沿岸漁場・養殖環境の急変等をもたらすことが知られており、海洋の中規模現象に関する研究は水産海洋学においても重要なテーマとなっている。

【ブリの来遊の経年変動】

新潟と富山の冬季のブリ漁獲量から作成したブリ漁獲量比と海面高度の第2主成分スコアの比較から、冬季に南下回遊するブリにとって、流れ場の変動がどのような影響を与える可能性があるかを検討した(図2)。主成分スコアが正の年は、佐渡島沖合は北向きの流れが強まるため南下するブリが通過しにくく(佐渡島周辺で滞留しやすく)て沿岸への来遊量が増え、能登半島沖合は逆に南向きの流れが強まるため通過(南下)しやすく(富山湾でブリが滞留しにくく)て来遊量は減る、という影響があると考えられる。実際、ブリ

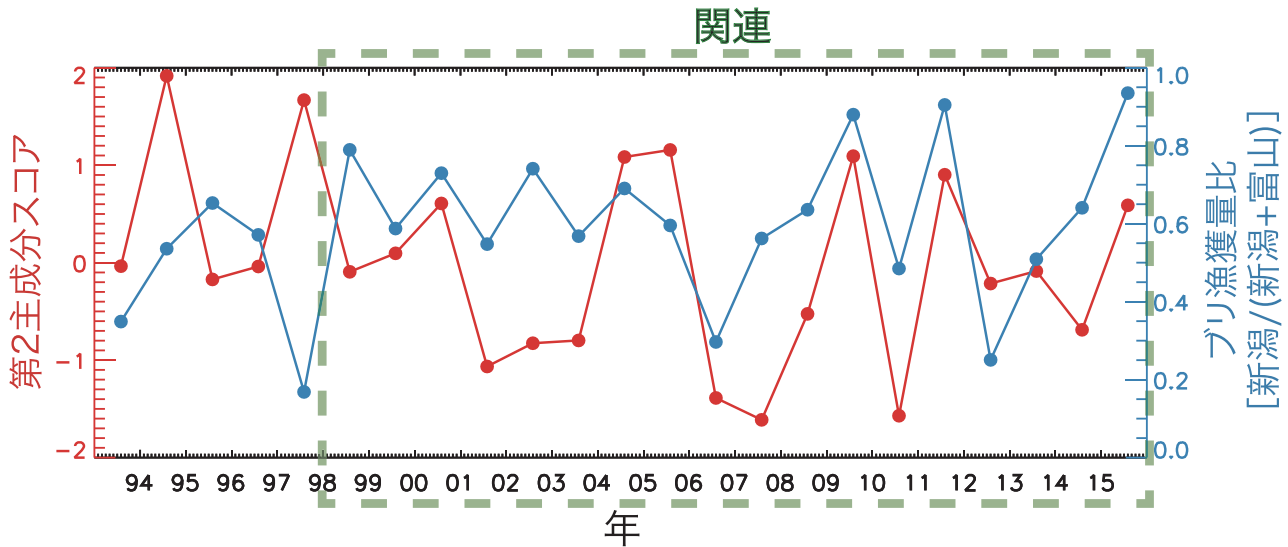


図2. 冬季（11～1月）の海面高度の第2主成分のスコア（赤色）と2歳以上ブリの漁獲量比：新潟／（新潟+富山）（青色）ブリ漁獲量比の平年値は0.59であり、これより大きな値は、新潟側に漁獲が偏っていることを意味する。

漁獲量比の大きな正の値で示されるように、富山湾では記録的なブリの不漁に見舞われ、その一方で新潟県では平年並みの漁獲量となった2015年から2016年の冬季に、主成分スコアが正となっており、流れ場とブリ漁獲量の間には想定される関連が見られた（図2）。他の年についても調べてみると、1998年以降（緑色破線領域の期間）のブリ漁獲量比の変化のうち、33%は流れ場の変動で説明できることがわかった。

【おわりに】

今後、今回得られた流れ場の時空間変動パターンと各地先における漁獲量の経年変動データの詳

細な解析を通じて、ブリの来遊経路や空間分布の変動の要因の解明に貢献していきたいと考えている。また、今回の解析は海面高度データの情報のみを基にしたものであるが、現在、流れ場の変動メカニズムそのものを明らかにし、さらにブリの実際の回遊水深帯も考慮してブリの来遊の変動現象を理解するため、中層を含めた海洋内部の情報も合わせた研究にも取り組んでいるところである。これらの研究を推進することによりブリの来遊の経年変動のメカニズムに関する理解を深め、漁業現場で役立つ予測技術の開発につなげていきたいと考えている。

カニ幼生の “内的な発育最適温度”の推定

山本岳男（資源生産部・資源増殖グループ）



カニ幼生の発育に最も適した温度を、飼育水温と発育日数の関係式から推定できることを明らかにしました

【はじめに】

外温動物である多くの水産有用種は、周囲の環境の温度が変わると、生残率、成長速度（growth rate）、発育速度（development rate、発育日数の逆数、1/日）、産む卵のサイズと数が変化する。したがって温度は、将来の漁獲量を予測したり、養殖生産量を安定させたりするうえで重要な要因である。そうした観点から、水産有用種は様々な温度で飼育され、彼らにとって最も適した温度や、適さない温度が推定されてきた。しかし、過去の多くの研究では、生き物に適した温度が「生き残りが良く成長が早い温度」と考えられがちであったこと、さらに温度と発育速度の関係には、直線モデルである「有効積算温度法則の式」に当てはめられることが多いという、二点の問題があった。図1を見ていただくとイメージしやすいが、温度と発育速度の関係は、中間的な温度域では確かに直線傾向だが、低温側や高温側では明らかに異なり、直線モデルでは観測データ全体を描写できない。一方、近年発表されたSharpe-Schoolfield-Ikemoto model（SSIモデル、Ikemoto, 2005）は、大きく斜めに傾いた緩やかなS字状のカーブをよく描写するので、観測値への当てはまりが良い。さらにSSIモデルには、外温動物の発育にとって真に最適とされる、“内的な発育最適温度（ T_{ϕ} ）”を推定出来る利点もある。

これまでSSIモデルは、昆虫、ダニ、マラリア原虫等に適用され、マラリア原虫とマラリアを媒介する蚊の T_{ϕ} が気温と一致する季節にマラリア患者数が増加することや、農業害虫の T_{ϕ} が気温と一致

する時期に農作物の被害が増大することなどが明らかになっているが、水産分野への応用例は無い。そこで、水産有用種であるカニ幼生に適用し、SSIモデルがカニ幼生にも当てはめられるか、また推定された T_{ϕ} は有用であるかを検討した。

【SSIモデルの構造】

SSIモデルは、これまでに多く開発されてきた、単にデータ値の示す傾向を外見的になぞるだけの経験的モデルと異なり、物理学の一分野である熱力学の法則に基づいて構築された理論モデルである。すなわち、SSIモデルでは、酵素が関与する細胞周期の進行による細胞の分裂・増殖速度を外

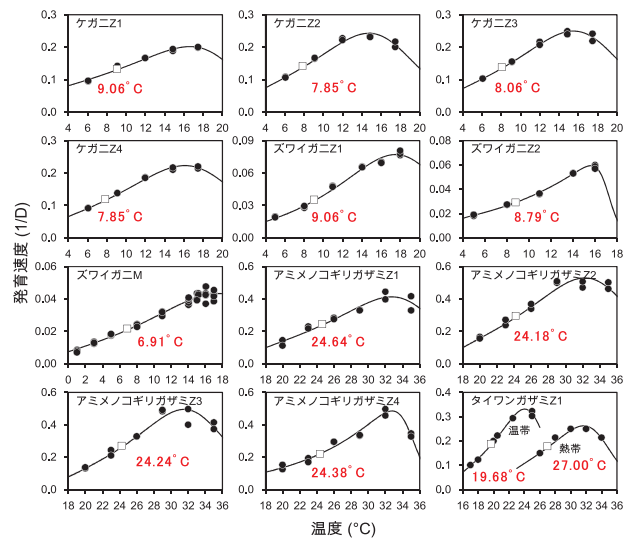


図1. カニ幼生の温度と発育速度の関係
黒丸は観測値、実線がSSIモデルの曲線を示す。四角はSSIモデルから推定された T_{ϕ} で、値を赤字で示した。Zはゾエア、Mはメガロパを表す。（Yamamoto et al., 2017より引用・改変）

温動物の発育速度ととらえ、温度との関係を示したものであり、以下の式で表されている。

$$r(T) = \frac{\rho_{\Phi} \frac{T}{T_{\Phi}} \exp\left[\frac{\Delta H_A}{R} \left(\frac{1}{T_{\Phi}} - \frac{1}{T}\right)\right]}{1 + \exp\left[\frac{\Delta H_L}{R} \left(\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T}\right)\right] + \exp\left[\frac{\Delta H_H}{R} \left(\frac{1}{T_H} - \frac{1}{T}\right)\right]}$$

SSIモデルのパラメータは表1にまとめた。目的変数は r (発育速度) で、説明変数は T (絶対温度 K , $0^{\circ}C = 273.15K$) である。分母は、1を第1項として、第2項と第3項はそれぞれ低温および高温の酵素反応に対する悪影響の程度を表しており、それぞれ低温になるほど、あるいは高温になるほど値が急激に大きくなって、発育速度はそのぶん低下する。すなわち、低温の悪影響も高温の悪影響もほとんどない中間的な温度においては、第2項と第3項はゼロに近づき、分母の値はほぼ1となる。分母の温度関数はその1を極小値とするU字形をしている。したがって分子は、酵素が関与しない、無機化学的な反応の温度関数とみることができ、温度の上昇に伴って幾何級数的に反応速度が増加する単調増加曲線を示す。各温度における分子の値を分母の値で除してプロットし、それらをつないだものがモデル式全体であり、S字型を示す。

ところで、低温と高温による悪影響が最低になる、つまり分母の値がほぼ1になる温度こそが内的な発育最適温度 (T_{Φ}) と定義されており、それが成立するためには各パラメータ間に次の様な関係が必要である (数学的には温度が T_{Φ} のとき

分母を微分してその値ゼロ、すなわち極小値をとると考える)。

$$T_{\Phi} = \frac{\Delta H_L - \Delta H_H}{R \ln\left(-\frac{\Delta H_L}{\Delta H_H}\right) + \left(\frac{\Delta H_L}{T_L}\right) - \left(\frac{\Delta H_H}{T_H}\right)}$$

したがって、SSIモデルはこれら上記の2つの式から構成されている。

【SSIモデルの当てはめ】

SSIモデルを当てはめるには、低温から高温の幅広い発育データと、高温側で (できれば低温側でも) 発育速度が曲線を描くデータポイントが必要である。また推定された T_{Φ} の値の有用性を検討するには、温度と生残や成長の関係、分布域の温度が分かっていることも必要である。これらの条件を満たすものとして、ケガニの第1~4齢ゾエア (神保ら, 2007)、ズワイガニの第1~2齢ゾエアとメガロパ (Yamamoto *et al.*, 2014)、アミノコギリガザミの第1~4齢ゾエア (Hamasaki, 2003)、温帯 (Bryars & Havenhand, 2006) と熱帯 (Efrizal, 2016) のタイワンガザミの第1齢ゾエアのデータを用いた。

推定された T_{Φ} の値は、図1と表2に示した。各種幼生の T_{Φ} を第1齢ゾエアと比較すると、亜寒帯から温帯に生息するケガニとズワイガニ ($9.06^{\circ}C$) < 温帯のタイワンガザミ ($19.68^{\circ}C$) < 亜熱帯のアミノコギリガザミ ($24.64^{\circ}C$) < 熱帯のタイワンガザミ ($27.00^{\circ}C$) となり、暖水域に生息する種ほど高かった。さらに、ふ化後、発育に伴って徐々に水深が深く水温の低い場所へ移動するズワイガニでは、 T_{Φ} が徐々に低下することも明らかになった。

各種幼生の T_{Φ} は、飼育実験で最も生き残りが良い温度と近い値であった (表2)。ケガニのゾエア幼生では温度と成長の関係が調べられており、 $6 \sim 9^{\circ}C$ で体サイズが大きくなるとされている。ケガニのゾエア幼生の T_{Φ} は約 $8 \sim 9^{\circ}C$ で、この値は高成長の温度と近かった。さらに、各種幼生の T_{Φ} と天然海域で幼生が採集されている温

表1. SSIモデルの変数と定数

記号	説明
r	発育速度 (1/day) : 目的変数
T	温度 (K, $0^{\circ}C = 273.15K$) : 説明変数
R	気体定数 (1.987cal/K/mol)
T_{Φ}	内的な発育最適温度 (K)
ρ_{Φ}	$T = T_{\Phi}$ の時の発育速度 (1/day)
ΔH_A	反応が活性化されるエンタルピー (cal/mol)
ΔH_L	低温不活性と関係するエンタルピーの変化 (cal/mol)
ΔH_H	高温不活性と関係するエンタルピーの変化 (cal/mol)
T_L	低温により酵素が半分不活性となる温度 (K)
T_H	高温により酵素が半分不活性となる温度 (K)

表2. カニ幼生の“内的な発育最適温度 (T_{ϕ})”、生き残りと成長が良い温度、および天然海域の分布水温

種	齢期	T_{ϕ}	高生残	高成長	分布水温
ケガニ	第1 齢ゾエア	9.06°C	9°C ^{*1}	6 ~ 9°C ^{*1}	0.4~10°C (道東オホーツク海) ^{*2} 3~14°C (道南噴火湾) ^{*3} -1~10.8°C (ロシア極東日本海) ^{*4}
	第2 齢ゾエア	7.85°C			
	第3 齢ゾエア	8.06°C			
	第4 齢ゾエア	7.85°C			
ズワイガニ	第1 齢ゾエア	9.06°C	5~14°C ^{*5}	-	2.8~15.0°C (日本海) ^{*6}
	第2 齢ゾエア	8.79°C	5~14°C ^{*5}	-	0~13°C (北西大西洋) ^{*7}
	メガロパ	6.91°C	5~14°C ^{*5}	-	0.8~13.9°C (日本海) ^{*6}
アミメノコギリ ガザミ	第1 齢ゾエア	24.64°C	23°C ^{*8}	-	22~27°C (八重山諸島) ^{*9, 10}
	第2 齢ゾエア	24.18°C		-	
	第3 齢ゾエア	24.24°C		-	
	第4 齢ゾエア	24.38°C		-	
タイワンガザミ (温帯)	第1 齢ゾエア	19.68°C	20.5°C ^{*11}	-	8~23°C (サウスオーストラリア) ^{*12}
タイワンガザミ (熱帯)	第1 齢ゾエア	27.00°C	26~ 28°C ^{*13}	-	25~30°C (フィリピン) ^{*14}

^{*1}神保ら (2007), ^{*2}阿部 (1977), ^{*3}上田ら (1999), ^{*4}Scherbakova & Korn (2011), ^{*5}Yamamoto *et al.* (2014), ^{*6}Kon *et al.* (2003), ^{*7}Conan *et al.* (1996), ^{*8}Hamasaki (2003), ^{*9}大城 (1986), ^{*10}Ogawa *et al.* (2011), ^{*11}Bryars & Havenhand (2006), ^{*12}Bryars & Havenhand (2004), ^{*13}Efrizal (2016), ^{*14}Ingles & Braum (1989) より引用。

度とを比較すると、いずれにおいても T_{ϕ} はその生息温度 (分布水温) の範囲内にも含まれた (表2)。なお、アミメノコギリガザミのゾエア幼生は採集された事例が無いことから、生息温度はメガロパ幼生の採集事例からの推定である。これらのことからSSIモデルから推定される T_{ϕ} は、カニ幼生においても最適な温度であると考えられた。

【おわりに】

今回は、カニ幼生を用いて T_{ϕ} の有用性を明らかにした。今後、他の水産有用種においても T_{ϕ} の解明がすすめば、養殖や種苗生産において飼育水温を T_{ϕ} に設定することで、より安定した生産が可能となるだろう。さらに天然海域においては、 T_{ϕ} の温度帯が広がる海域や時期を把握することで、対象となる生物が今後増えるのか、減るのかを予測できるかもしれない。また、 T_{ϕ} と一致する温度帯が存在する時期や場所を調べれば、これまで採集記録が無い生物 (例えば本報告で扱ったアミメノコギリガザミのゾエア幼生) の分布域を推定できる可能性もある。

SSIモデルに興味を持たれた方は、池本 (2010、2011) において日本語で分かりやすく解説されている。ただしそこで紹介されている解析手順は少し古くなっている。現時点での最新の解析プログラムは、Ikemoto *et al.* (2013) のウェブサイト <http://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2012.01525.x> に Supporting Information として掲載されているので参照されたい。また、一般には公開されていないが、池本孝哉博士らが開発された統計解析ソフトR用のパッケージプログラムの配布許可を頂いたので、必要であれば著者 (takeoy@affrc.go.jp) までご連絡いただきたい。

なお、本報告はYamamoto *et al.* (2017) の内容を要約したものである。

【引用文献】

- 阿部晃治, 1977: 道東近海におけるケガニの初期生活. 水産海洋研究, 31, 14-19.
- Bryars S.R., Havenhand J.N., 2004: Temporal and spatial distribution and abundance of blue swimmer crab (*Portunus pelagicus*) larvae

- in a temperate gulf. Mar. Freshw. Res., 55, 809–818.
- Bryars S.R., Havenhand J.N. 2006: Effects of constant and varying temperatures on the development of blue swimmer crab (*Portunus pelagicus*) larvae: laboratory observations and field predictions for temperate coastal waters. J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 329, 218–229.
- Conan G.Y., Starr M., Comeau M., Therriault J.C., Maynou i Hernández F.X., Robichaud G., 1996: Life history strategies, recruitment fluctuations, and management of the Bonne Bay fjord Atlantic snow crab (*Chionoecetes opilio*), in: Baxter, B. (Ed.), High Latitude Crabs: Biology, Management, and Economics. Alaska Sea Grant College Program, Fairbanks, pp. 59–97.
- Efrizal, 2016: Effects of temperature on survival rate and larval development of blue swimming crab, *Portunus pelagicus* (Linnaeus, 1758) under laboratory conditions. Asian J. Appl. Sci., 4, 120–134.
- Hamasaki K., 2003: Effects of temperature on the egg incubation period, survival and developmental period of larvae of the mud crab *Scylla serrata* (Forskål) (Brachyura: Portunidae) reared in the laboratory. Aquaculture, 219, 561–572.
- Ikemoto T., 2005: Intrinsic optimum temperature for development of insects and mites. Environ. Entomol., 34, 1377–1387.
- 池本孝哉, 2011: 昆虫やダニの「内的な発育最適温度」の理論と実際 (1) 内的な発育最適温度とは何か. 植物防疫, 65, 448–453.
- 池本孝哉, 2011: 昆虫やダニの「内的な発育最適温度」の理論と実際 (2) 推定計算法. 植物防疫, 65, 510–514.
- Ikemoto T., Kurahashi I., Shi P., 2013: Confidence interval of intrinsic optimum temperature estimated using thermodynamic SSI model. Insect Sci., 20, 420–428.
- Ingles J.A., Braum E., 1989: Reproduction and larval ecology of the blue swimming crab *Portunus pelagicus* in Ragay Gulf, Philippines. Int. Revue ges. Hydrobiol., 74, 471–490.
- 神保忠雄, 浜崎活幸, 芦立昌一, 2007: ケガニ幼生の生残, 発育および摂餌に及ぼす水温の影響. 日水誌, 73, 1081–1089.
- Kon T., Adach T., Suzuki Y., 2003: Distribution of snow crab, *Chionoecetes* spp., larvae off Wakasa Bay in the Sea of Japan. Fish. Sci., 69, 1109–1115.
- Ogawa C.Y., Hamasaki K., Dan S., Kitada S., 2011: Fishery biology of mud crabs *Scylla* spp. at Iriomote Island, Japan: Species composition, catch, growth and size at sexual maturity. Fish. Sci., 77, 915–927.
- 大城信弘, 1986: ノコギリガザミ増殖場造成実験調査. 昭和60年度沖縄特定開発事業推進調査西表島水域漁場開発計画調査結果報告書, 34–49.
- Scherbakova N.V., Korn O.M., 2011: The period of occurrence, density, and distribution of larvae of three commercial crab species in Peter the Great Bay, Sea of Japan. Russ. J. Mar. Biol., 37, 478–488.
- 上田吉幸, 高柳志朗, 宇藤均, 依田孝, 1999: 噴火湾周辺海域におけるケガニ (*Erimacrus isenbeckii*), クリガニ属 (*Telmessus* spp.) 幼生の出現盛期. 北水試研報, 55, 97–103.
- Yamamoto T., Yamada T., Fujimoto H., Hamasaki K., 2014: Effects of temperature on snow crab (*Chionoecetes opilio*) larval survival and development under laboratory conditions. J. Shellfish Res., 33, 19–24.
- Yamamoto T., Jinbo T., Hamasaki K., 2017: Intrinsic optimum temperature for the development of decapod crustacean larvae based on a thermodynamic model. J. Crustacean Biol., 37, 272–277.

発行：国立研究開発法人水産研究・教育機構

編集：国立研究開発法人水産研究・教育機構 日本海区水産研究所
〒951-8121 新潟市中央区水道町1-5939-22
電話：025-228-0451(代) FAX：025-224-0950
<http://jsnfri.fra.affrc.go.jp/>