

③ サケ幼稚魚回遊モデル

実施機関及び担当者:

北海道区水産研究所 生産環境部 生産変動グループ: 東屋知範、黒田 寛
北海道区水産研究所 生産環境部 資源増殖グループ: 鶴沼辰哉、横田高士

【目的】

高解像度海洋循環モデルを用いて、太平洋および日本海沿岸の双方から放流されたサケ幼稚魚の移送経路をシミュレーションし、サケ稚魚の遊泳条件および回遊経路を推定する。

【方法】

飼育実験の魚体分析とデータ解析による成長率から生物エネルギーモデルのパラメータを設定し、サケ幼稚魚回遊モデルに導入する。

高解像度海洋循環モデルを用い、サケ幼稚魚回遊モデルにおける遊泳方向決定アルゴリズムを①受動態移動、②生物エネルギーモデルによる成長を最大にする方向に遊泳、③流れの逆向きに遊泳とするように設定し、各遊泳条件における回遊経路を検証する。

サケ幼稚魚を模した粒子のスタート位置は北日本海沿岸と太平洋沿岸とし、1日1回385個の粒子を投入する(図1)。モデルで調べるサケ幼稚魚の回遊の期間は3月1日～8月31日までとする。③の条件では、オホーツク海に到達する粒子数と遊泳速度の関係を調べるため、遊泳速度を5～100cm/sまで5cm/s毎(21段階)に設定してシミュレーションを行う。そして、各遊泳速度に対するオホーツク海に達する粒子数、その投入時期、投入からオホーツク海に達するまでの日数、経験水温を調べる。

高解像度海洋循環モデルによる2003年～2018年までの再解析値を用いてオホーツク海に達する粒子の経年変化を調べ、その投入時期と投入海域のサケ稚魚適水温(8℃～13℃)との関係を調べる。

1990年～2011年における3月～8月までの毎日の海面水温(SST)データ(NOAA High-resolution Blended Analysis of Daily SST and Ice)解析を行い、北日本周辺におけるサケ稚魚の適水温の長期変動傾向と来遊数の関係を把握する。

【結果】

1) 生物エネルギーモデル

サケ稚魚の湿重量の時間変化は式(1)で表される。

$$dW/dt=(C-(R+SDR+E+F))*W \quad (1)$$

ここで、Wは湿重量、tは時間、Cは餌の消費による増加率、Rは呼吸・代謝、SDRは特異動的作用、Eは排泄、Fは排出による減少率である。生物エネルギーモデルをサケ稚魚回遊モデルに導入することにより、成長を最大にする方向に遊泳するアルゴリズムが構築でき、その遊泳条件の検証が可能となった。また、サケ稚魚の成長要因を時空間的に把握することができる。その例として、図2にサケ稚魚回遊モデルに用いた海洋環境下における6月のサケ稚魚の正味の湿重量の増減率の空間分布を示す(ここで、サケ稚魚の餌生物濃度は海面Chl-a濃度に比例すると仮定した)。正味の湿重量の増減率は主に水温分布に支配され、適水温に対応する日本海沿岸や東北沿岸から噴火湾にかけての海域では、正味の湿重量の増加率が相対的に高い。一方、水温が低い道東からオホーツク海域ではCの餌の消費が相対的に小さくなり、水温が高い東北沖合海域ではRの呼吸・代謝が相対的に高くなって、これらの海域では正味の湿重量の増加率が小さくなることがわかった。

2) 粒子追跡実験

サケ幼稚魚回遊モデルにおける移動条件が受動態移動のみの場合、石狩湾から投入した粒子はオホーツク海まで達し(赤色)、秋田沿岸から投入した粒子は北海道日本海沿岸、津軽海峡を通過して日高湾まで達した(図 3(a) 黄色)。このように日本海沿岸から投入した粒子の移動経路は観測結果と似ていた。しかし、この条件で太平洋沿岸から投入した粒子(緑、青、水色)は、観測結果と似ていなかった。移動条件を生物エネルギーモデルによる成長を最大にする方向に遊泳するようにした場合、サケ稚魚回遊モデルで再現された回遊ルートは観測結果を再現できなかった(図 3(b))。移動条件を流れと逆向きに遊泳するように設定した場合(遊泳速度 35cm/s 以上)、道東沿岸から投入した粒子(緑色)はオホーツク海まで、静内沿岸から投入した粒子(青色)は道東沿岸まで、東北沿岸から投入した粒子(水色)は日高湾までそれぞれ達した。この条件下のモデル結果は太平洋側における観測結果と似ていた(図 3(c))。道東沿岸から投入した粒子は遊泳速度が増すほどオホーツク海まで達する粒子数(青色棒)は増加し、投入からオホーツク海に達するまでの時間(緑色棒)は短くなった(図 4)。これらの結果から、サケ稚魚の遊泳速度が尾叉長に依存すると仮定すれば、太平洋沿岸からオホーツク海に達するには大型のサケ稚魚ほど有利になることが示唆される。

3) 経年変化

道東沿岸から投入された粒子でオホーツク海まで到達した粒子数と投入海域の適水温の経年変化を図 5 に示す。サケ稚魚回遊モデルでの投入粒子数は各年一定であるが、オホーツク海に到達する粒子数には経年変動があり、2010 年以降にオホーツク海まで到達する粒子数は相対的に少なかった。投入海域が適水温になる時期より早い時期に投入された粒子は、オホーツク海までの経験水温がサケの分布水温(2.7°C~15.6°C)より低かった(青色)。投入海域の水温が適水温の時期に投入された粒子はほぼサケの分布水温でオホーツク海まで達することがわかった。この結果は、太平洋側道東では、沿岸域の水温がサケ稚魚適水温になる時期にサケ稚魚が降海することが生残に有利になる可能性を示唆する。

石狩湾から投入された粒子でオホーツク海まで到達した粒子数と投入海域の適水温の経年変化を図 6 に示す。オホーツク海に到達する粒子数には経年変動があり、2010 年~2014 年は相対的に到達する粒子数は少なかった。投入海域が適水温となる時期よりも約 1 ヶ月以上早く投入された粒子が、サケの分布水温内でオホーツク海に達していることがわかった(緑色)。一方、投入海域が適水温時期となる時期に投入された粒子は、オホーツク海に達するまでの経験水温はサケの分布水温より高温になることがわかった(赤色)。この結果は、日本海側では、沿岸海域がサケ稚魚適水温になるより早い時期にサケ稚魚が降海していることが生残に有利になる可能性を示唆する。

4) 襟裳以東サケ来遊数に基く SST 合成解析

襟裳以東のサケ来遊数(1989 年~2010 年級群)の平均からの偏差が1標準偏差(+ σ)以上の年級群(1989 年、1999 年、2001 年、2003 年)と- σ 以下の年級群(1995 年、2006 年、2008 年)の 2 群を抽出した。この 2 群の年級群が降海時に経験した翌年春季の SST をそれぞれ平均し、SST の合成図を作成した。ここで+ σ 以上(- σ 以下)の年級群が経験した SST を GOOD(BAD)年 SST とする(図 9(a))。襟裳以東沿岸における 3 月の GOOD 年 SST は 1°C~4°Cであったのに対し、BAD 年 SST は 0°C~2°Cであった。同海域の 4 月の GOOD 年 SST は 2°C~5°C、BAD 年 SST は 2°C~3°Cであった。5 月の GOOD 年 SST は 5°C~8°C、BAD 年 SST は 4°C~6°Cであった。このように春季の襟裳以東沿岸における GOOD 年 SST と BAD 年 SST の差は GOOD 年 SST が約 2°Cほど高温であった(図 9(b))。一方 GOOD 年 SST から求めた襟裳以東沿岸における適水温になる時期は、BAD 年の適水温になる時期よ

り早い(図 10(a))、適水温が終る時期については両者の明確な差はみられなかった(図 10(b))。結果的に GOOD 年の適水温期間は BAD 年の適水温期間より長かった(図 10(c))。このことから、サケの来遊数は、降海時に経験する水温だけでなくサケ稚魚の適水温期間にも関係しているのかもしれない。

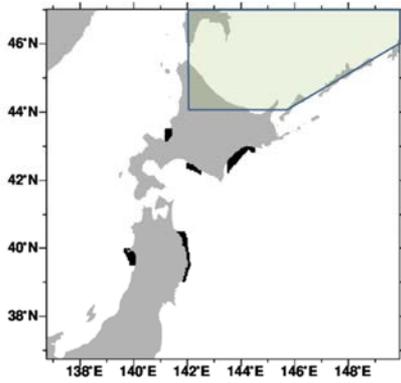


図 1. サケ稚魚回遊モデルの計算領域とサケ稚魚を模した粒子を投入した海域(黒色)。ハッチ部分に入った粒子をオホーツク海に達した粒子とした。

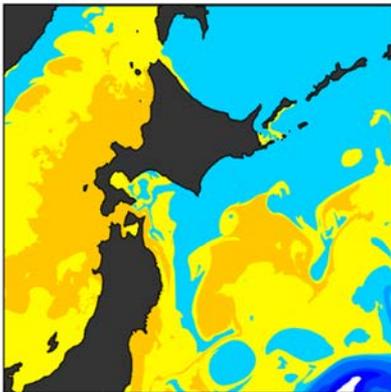


図 2. モデルに用いた海洋環境下における 6 月の生物エネルギーモデルから見積られるサケ稚魚の正味の湿重量の増減率の空間分布。暖色(寒色)は湿重量が増加(減少)する海域。

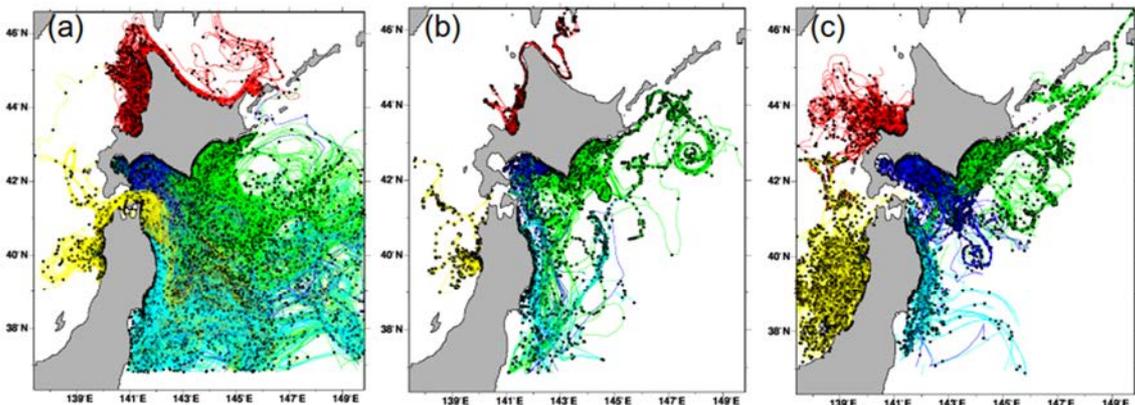


図 3. サケ稚魚回遊モデルによる粒子の移動軌跡。(a)受動態移動のみのケース、(b)生物エネルギーモデルによる成長を最大にする方向に遊泳のケース、(c)流れの逆向きに遊泳するケース。粒子の移動軌跡は赤:石狩湾、緑:道東沿岸、青:静内沿岸、黄:秋田沿岸、水色:岩手沿岸から投入した粒子、黒点:10 日毎の粒子の位置。

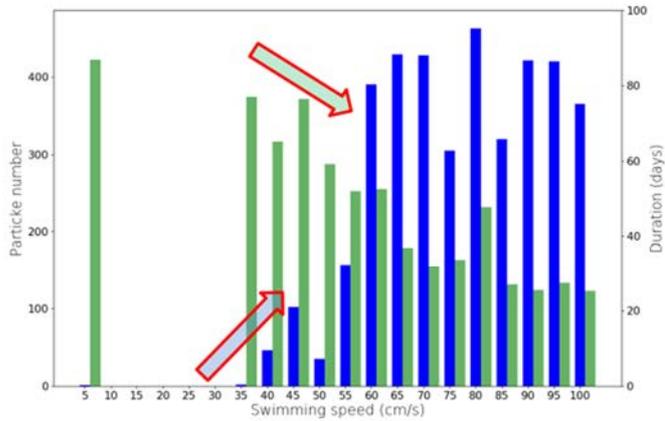


図 4. 遊泳速度と道東沿岸から投入した粒子のうちオホーツク海に達した粒子数(青色棒)、投入からオホーツク海までの日数(緑色棒)の関係。横軸は遊泳速度(cm/s)、縦軸は粒子数(左)と日数(右)。

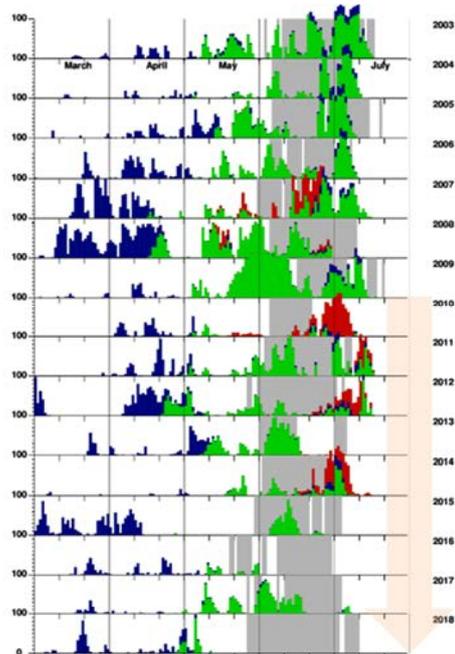


図 5. 道東沿岸から投入した粒子のうちオホーツク海に達した粒子数の経年変化。横軸:投入時期、縦軸:粒子数、青:オホーツク海に達するまでにサケ分布水温(2.7°C~15.6°C)より低温を経験した粒子数、緑:オホーツク海にサケ分布水温内で到達した粒子数、赤:オホーツク海に達するまでにサケ分布水温より高温を経験した粒子数、灰:投入海域がサケ稚魚の適水温(8°C~13°C)期間。

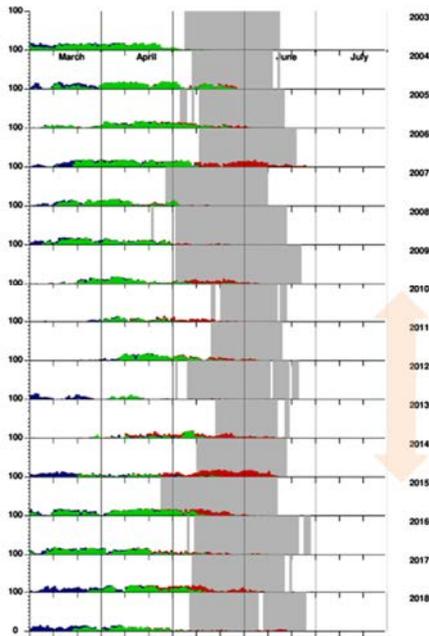


図 6. 石狩湾から投入した粒子のうちオホーツク海に達した粒子数の経年変化。横軸:投入時期、縦軸:粒子数、青:オホーツク海に達するまでにサケ分布水温(2.7℃～15.6℃)より低温を経験した粒子数、緑:オホーツク海にサケ分布水温内で到達した粒子数、赤:オホーツク海に達するまでにサケ分布水温より高温を経験した粒子数、灰:投入海域がサケ稚魚の適水温(8℃～13℃)期間。

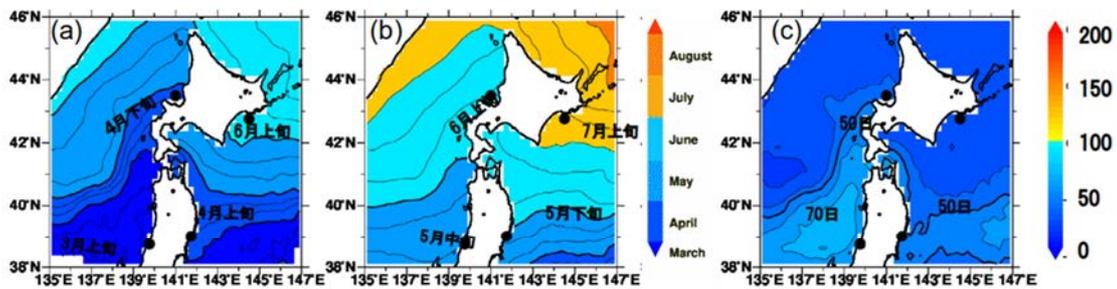


図 7. サケ稚魚の適水温についての長期平均。(a)サケ稚魚の適水温になる時期の長期平均。(b)サケ稚魚の適水温が終わる時期の長期平均。細線 10 日インターバル、太線 30 日インターバル。(c)サケ稚魚の適水温期間の長期平均。細線 10 日インターバル、太線 50 日インターバル。

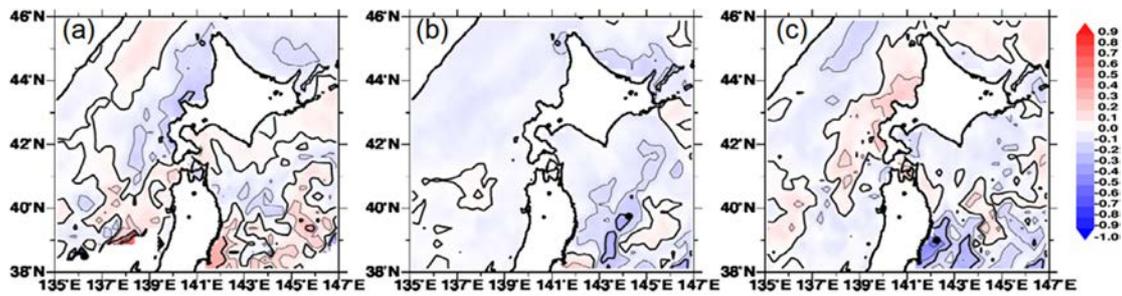


図 8. サケ稚魚の適水温についての長期傾向。(a)サケ稚魚の適水温がはじまる時期の長期傾向、(b)サケ稚魚の適水温が終わる時期の長期傾向。寒色(暖色)は適水温がおわる時期が早く(遅く)なる傾向の海域を示す。(c)サケ稚魚の適水温期間の長期傾向。暖色(寒色)は適水温期間が長く(短く)なる傾向の海域を示す。

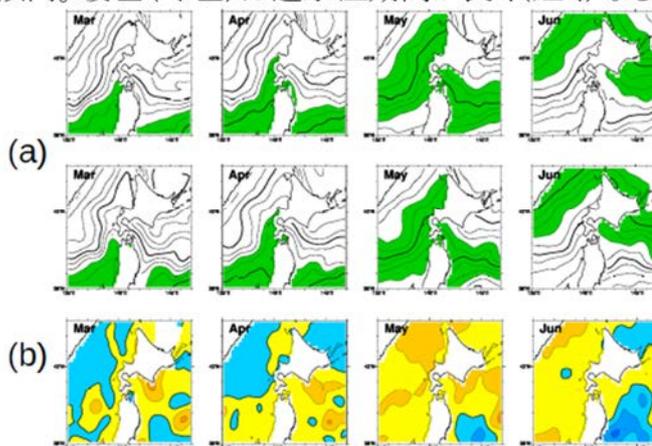


図 9. 襟裳以東のサケ来遊数に基く春季の SST 合成図。(a)上段は GOOD 年 SST、下段は BAD 年 SST。緑色は適水温(8°C~13°C)。(b)春季の GOOD 年 SST と BAD 年 SST との差。暖色(寒色)は GOOD 年 SST が BAD 年 SST より高い(低い)海域を示す。コンタインターバルは 1°C。

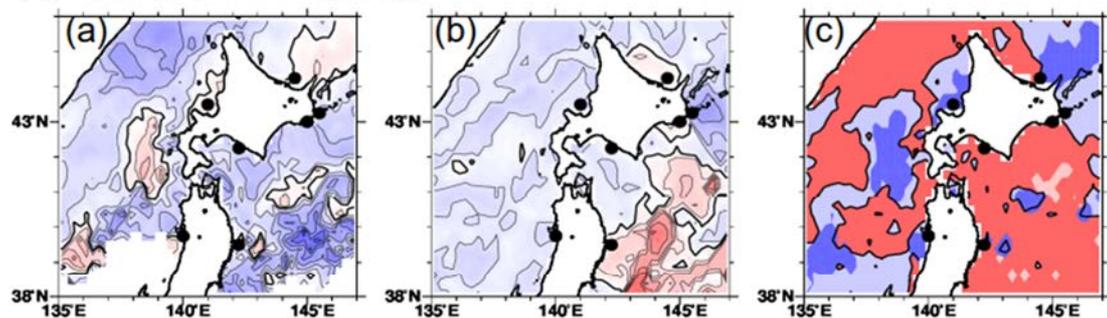


図 10. GOOD 年 SST と BAD 年 SST から求めたサケ稚魚の適水温。(a)GOOD 年 SST と BAD 年 SST から求めたサケ稚魚の適水温になる時期の差、(b)GOOD 年 SST と BAD 年 SST から求めたサケ稚魚の適水温が終わる時期の差。寒色(暖色)は GOOD 年の適水温になる時期が BAD 年の適水温になる時期より早い(遅い)海域を示す。(c)GOOD 年 SST と BAD 年 SST から求めたサケ稚魚の適水温期間の差。暖色(寒色)は GOOD 年の適水温の適水温期間が BAD 年の適水温期間より長い(短い)海域を示す。