

③ サケ幼稚魚回遊モデル

執筆者（水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター
海洋環境部 東屋知範）

実施機関及び担当者

水産研究・教育機構 水産資源研究所 水産資源研究センター海洋環境部寒流第1グループ：
東屋知範、黒田 寛
社会・生態系システム部 沿岸生態系寒流域グループ： 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】

- 1) 2015年～2017年の3月～5月における釧路川、石狩川、静内川の河川流量、放流時の稚魚の尾叉長とその放流期別の回帰率の関係を調べる。
- 2) 北海道太平洋側に降海する回帰率が相対的に高い2003年級群、2011年級群と回帰率が相対的に低い2006年級群、2015年級群が経験した2004年と2007年、2012年と2016年の2組の海洋環境の比較を行なう。高解像度海洋循環モデルによる2004年、2007年、2012年、2016年の再解析値を用い、釧路川、石狩川、静内川の各河口から投入したサケ稚魚を模した粒子追跡実験を行う（図1）。粒子の遊泳効果は考慮せず、粒子投入後30日の間の経験水温・塩分、投入地点からの軌跡と移動距離を調べる。
- 3) 2003年～2018年までの高解像度海洋循環モデル再解析値を用いて、石狩川河口付近から毎日1680個の粒子を投入する粒子追跡実験を行う（図1）。投入した粒子のうちオホーツク海まで到達する粒子数を調べる。この場合も投入する粒子には遊泳効果を考慮しない。積分時間は3月1日～7月31日とする。各粒子の位置、オホーツク海への到達有無、経験水温を記録する。投入粒子数に対するオホーツク海（図1の45°N、142°E以東）に到達した粒子数の割合（到達率）を投入日毎に求める。

【結果及び考察】

- 1) 河川の時期別回帰率とその時の河川流量とサケ稚魚放流時サイズの関係を図2に示した。
静内、十勝川の放流時期に対するサケ回帰率のピークは4月中旬であったが、釧路川では4月下旬にピークがあった。河川流量が多い期間や稚魚のサイズが大きい状態で放流された場合の回帰率は相対的に高くなる傾向であった。
- 2) 図1に北海道太平洋沿岸の釧路、十勝、静内川河口域から降海するサケ幼稚魚を想定した粒子追跡実験の適用海域を示す。黒色の矩形がサケ幼稚魚を模した粒子を投入地点で、釧路、十勝、静内川河口域に対応する。回帰率が相対的に高い2003年級群が経験した2004年と回帰率が相対的に低い2006年級群が経験した2007年の海洋環境の比較を行なった。図3に釧路川、十勝川、静内川から6月に投入した粒子の30日間移動経路を旬毎に示す。13℃より高い水温を経験した場合は赤色、経験水温が8℃～13℃の場合は緑色、8℃より低い水温を経験した場合は青で示した。2007年の粒子は2004年の場合に比べ沿岸域に留まり、経験水温は13℃以上で、2004年より高水温を経験した。2007年6月に投入した粒子の30日間の平均移動距離は2004年の同期間の平均移動距離に比べて短かった（図4）。図5に北海道太平洋沿岸グリッドにおける水温の時空間変化を示す。サケ稚魚の適水温（8℃～13℃）になる場合には着色した。横軸を東向きの空間グリッドとし、縦軸は1月1日からの日数である。適水温の着色域は右肩上がりを示し、適水温時期が襟裳以西から道東へ移っていった。適水温になる時期は2004年と2007年ではほぼ同じだが、日高湾から十勝川河口周辺

海域における適水温の期間は、2007 年では約 10 日間となり 2004 年よりかなり短かった。2006 年級群の 6 月に経験した海洋環境は、沿岸に滞留したことでサケ稚魚の適水温期間がかなり短くなった。このことが 2006 年級群の回帰率の低下になったのかもしれない。

次に回帰率が相対的に高い 2011 年級群が経験した 2012 年と、回帰率が相対的に低い 2015 年級群が経験した 2016 年の海洋環境の比較を行なう。十勝川河口から投入した粒子の 2016 年 5 月の経験水温は、2012 年の経験水温より低く、同期の経験塩分は 2012 年投入経験塩分より高かった (図 6)。河川流量の季節変化の違いが粒子の経験塩分の違いとなった。また、2016 年の十勝川河口から投入した粒子は、沖合の暖水塊によって沖合へ拡散した (図 7)。一方、2016 年の 5 月に釧路川河口から投入した粒子は日高湾付近まで沿岸に沿う移動が少なかった (図 7)。2015 年級群は沖の暖水塊により、サケ稚魚にとって良好な輸送ルートが変更され、回帰率の低下になったかもしれない。

3) 石狩湾から投入した粒子のうち、オホーツク海に到達した粒子の到達率を図 8 に示す。横軸には投入日、左縦軸には到達率、右縦軸には投入地点である石狩湾の水温変化を示す。青棒はオホーツク海に達したが 2.7°C より低い水温を経験した割合、緑棒は良好の経験水温でオホーツク海に達した割合 ($2.7^{\circ}\text{C} \leq \text{経験水温} \leq 15.7^{\circ}\text{C}$)、赤棒はオホーツク海に達したが 15.7°C より高温を経験した割合、黒棒はオホーツク海に達しない割合をそれぞれ示した。良好な経験水温で到達率が高く多い年は 2008、2009、2010、2011、2015、2016 年で、到達率が低い年は 2012、2013、2014 年であった。各年ともに到達率が高くなる投入時期は、サケ稚魚の適水温時期 (黄色線) よりかなり時期である。

同じ年でも到達率は、投入時期、投入期間によって変わるので、3 月～7 月までの到達率の経年変化と石狩川のサケ回帰率の経年変化の対応を単純に見ることはできない。そこで本調査では、①オホーツク海に到達できるサケ稚魚数がサケ回帰率と関係する、②サケ稚魚の降海時期 (粒子投入時期) が沿岸水温に依存すると仮定し、実際の石狩川の回帰率の経年変化と粒子追跡実験による到達率の経年変化が同期する粒子投入水温帯 (投入時期) を推定した。具体的には、投入開始水温を $0.2^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ までを 0.2°C 刻みで変化させ、各投入開始水温から 0.2°C 刻みで 15°C まで増加させた温度帯を投入期間として、計 3750 通りの投入ケースの到達率の経年変化を作成した。そして、これらの到達率の経年変化と回帰率の経年変化の相関係数が最も高くなる場合の水温帯を粒子の投入時期とした。つまり推定された水温帯が各年のサケ稚魚の離岸時期と仮定される。

石狩川のサケ回帰率と粒子の到達率の経年変化の相関係数が最も高くなった投入時の水温帯は $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ で、相関係数は $+0.79$ であった図 9(a)。図 9(b) に沿岸水温 $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ の温度帯で投入した場合の到達率の経年変化 (黒線) と石狩川の回帰率の経年変化 (赤線) で示した。2015 年を除き両者はほぼ同期している。図 8 に水温 $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ の期間を水色の棒で示した。この投入時期は実際の千歳川の放流時期 (黒三角と横バー) とほぼ重なっており、この投入時期が石狩川のサケの回帰率と関連するサケ稚魚の離岸時期である可能性を示唆する。2010、2011、2015 年の石狩川の回帰率は低い、粒子の到達率が高くなる期間がある。これらの年は、水色の投入時期と到達率が高くなるであろう流れ環境に一致していないと考えられる。2012 は到達率の高くなる時期は短い、石狩川の回帰率は高かった。このことは、水色の投入時期と到達率が高くなるであろう流れ環境の時期と一致したためと考えられる。一方、2013、2014 年では最大の到達率でも 25～60% と相対的に低く、その期間も短く、石狩川の回帰率も低い年であった。

石狩川の回帰率の経年変化と同期する投入期間の水温幅は 0.8°C ($3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$) であった。同じ 0.8°C の温度幅で日平均到達率が最大になる水温時期を各年について調べ、その時に投入した場合の日平均到達率と $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ で投入した場合の日平均到達率と比較した。図 10 に $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ で投入した日平均到達率を黒点、その年の最大になる日平均到達率を赤点で示した。2008、2014 年を除いて、投入時水温 (時期) を変更することによって日平均到達率が向上する。特に 2009、2010、2011、2016 年では到達率が 20% 以上高くなった。

2008 年は良好であるが、2014 年は投入時期を変更しても到達率の向上が見込めない年であった。各年において、到達率が向上する投入時期とその温度帯を図 11 に示す。到達率が向上する投入時期は $3.6^{\circ}\text{C}\sim 4.4^{\circ}\text{C}$ 温度帯の時期から 1 ヶ月後ぐらいの間で、稚魚の適水温時期よりは早い時期となる（図 11 (a)）。到達率が向上する投入時期の水温帯は約 $4^{\circ}\text{C}\sim 7^{\circ}\text{C}$ であった（図 11 (b)）。以上のことは、放流時期を変更（時期を遅く）により回帰率が向上する可能性を示唆する。

【まとめ】

サケ稚魚がオホーツク海に達するには

- ・ 日本海沿岸から降海するサケ稚魚は放流時期が重要になる。
- ・ 太平洋沿岸から降海するサケ稚魚はオホーツク海に達するまでの遊泳力が重要になる。

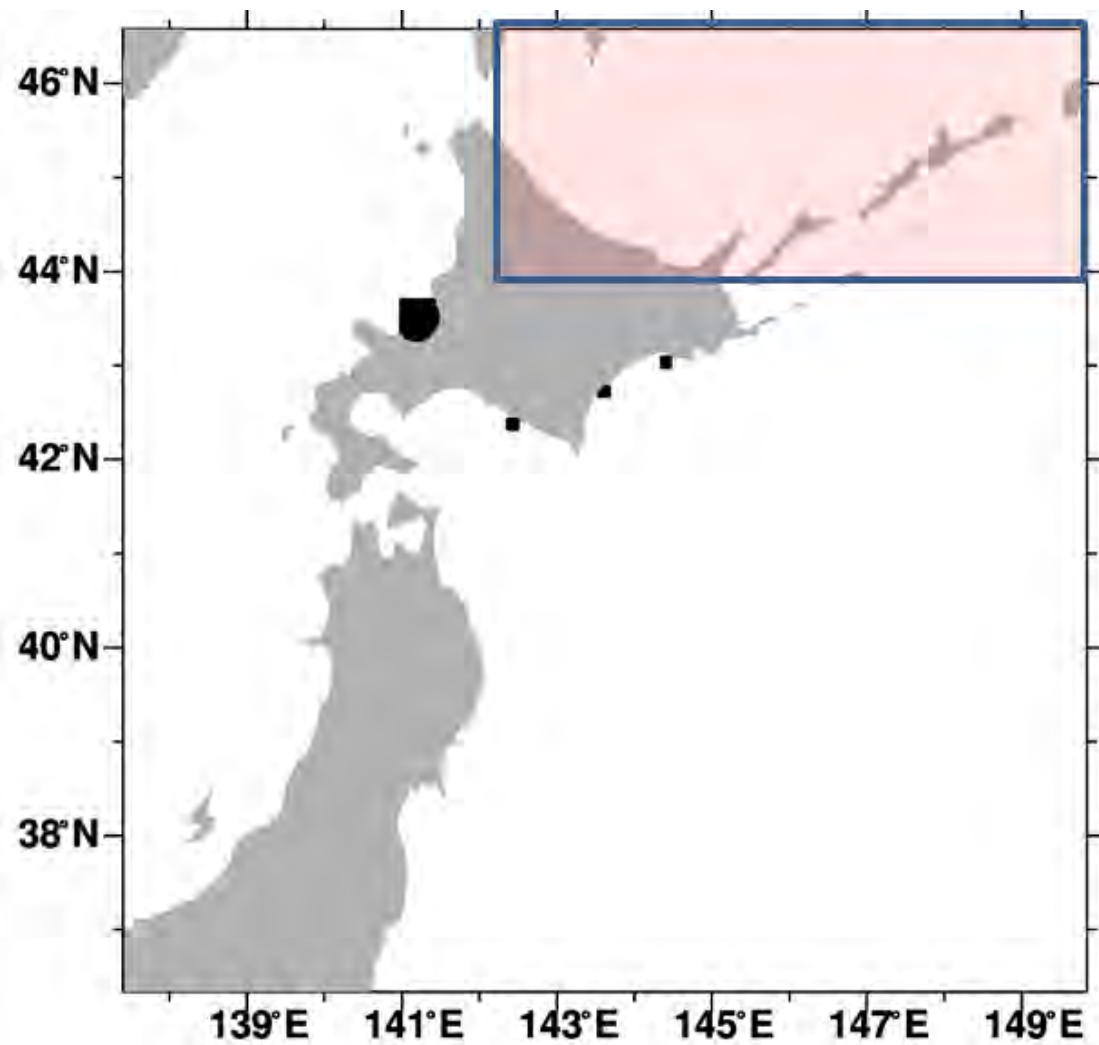


図 1. サケ稚魚回遊モデルによる粒子追跡実験の領域と投入地点

北海道日本海側の投入地点は石狩川河口、太平洋側の投入地点は左から静内川、十勝川、釧路川河口。石狩川河口からの投入粒子については、赤ハッチで示すオホーツク海に到達した粒子数と経験水温を調べた。

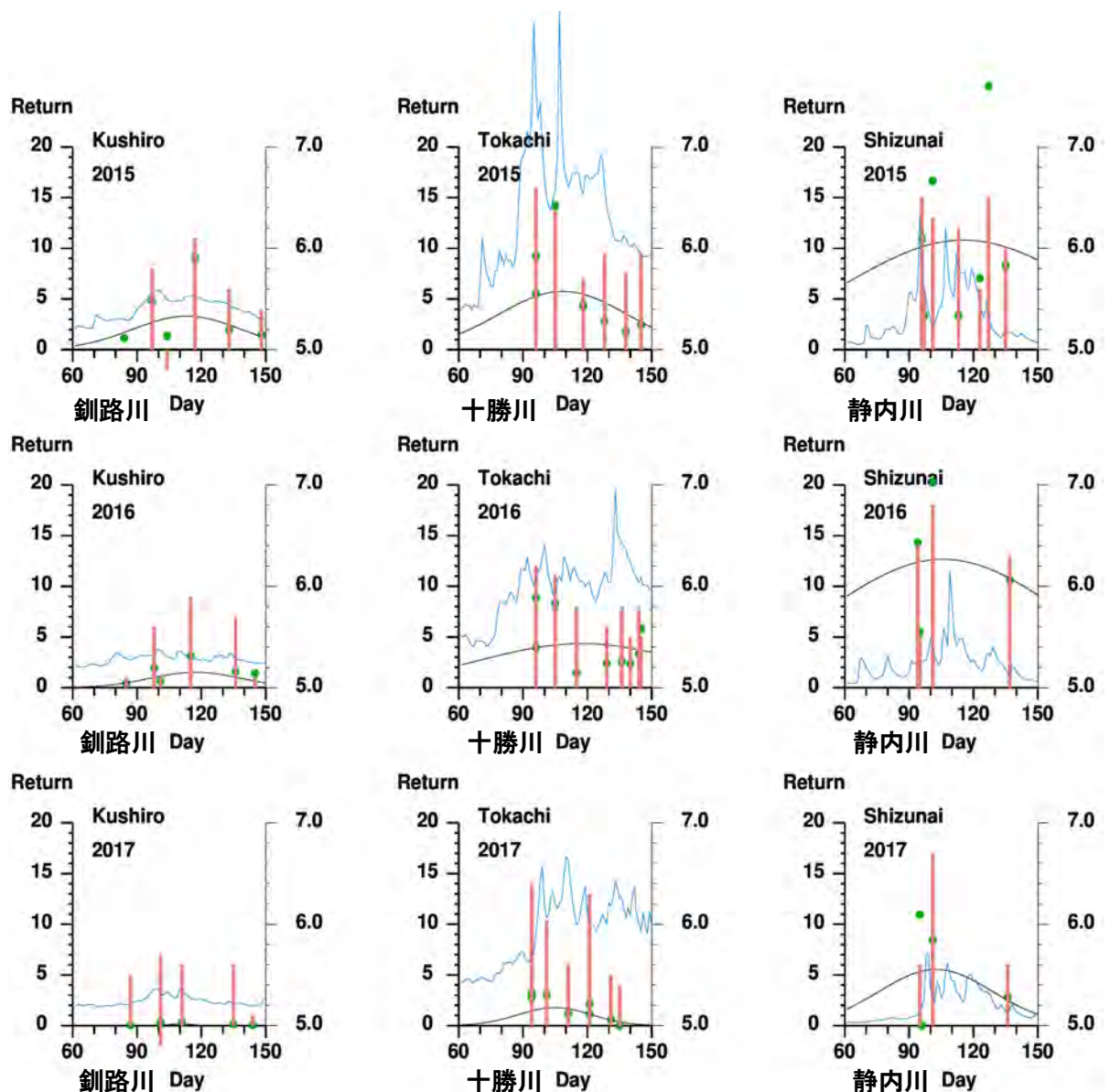


図 2. 釧路川、十勝川、静内川の放流時期別回帰率

緑ドットは放流期別の回帰率（相対値）、黒線は回帰率のフィッティングカーブ、赤棒線は放流時の尾叉長（右縦軸）、青線は河川流量を示す。左列順に釧路川、十勝川、静内川、上段から 2015、2016、2017 年を示す。

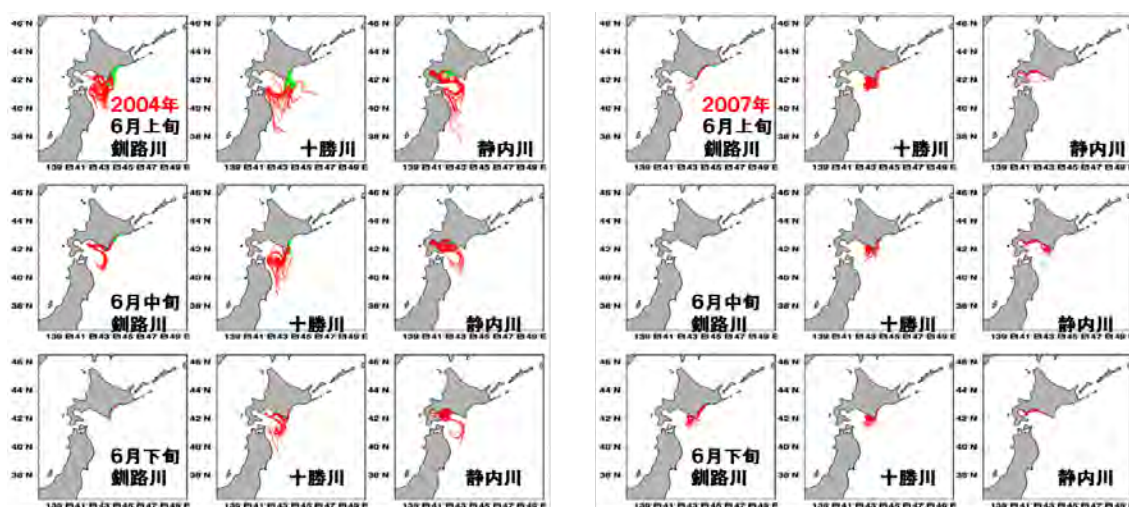


図 3. 2004 年と 2007 年の 6 月上中下旬に太平洋側から投入した粒子の 1 ヶ月間の軌跡と経験水温

左の 9 組が 2004 年、右の 9 組が 2007 年。左から釧路川、十勝川、静内川から投入した粒子の軌跡。緑線：8℃～13℃の経験水温。赤線：13℃以上の経験水温。

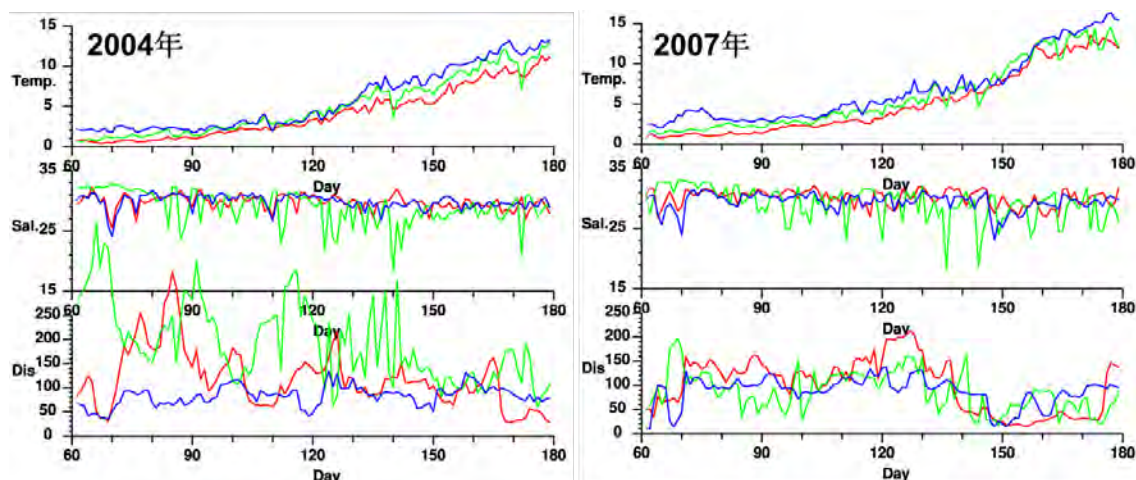


図 4. 2004 年（左側）と 2007（右側）年の 3 月～6 月まで投入した粒子の 1 ヶ月間の経験水温（上段）、経験塩分（中段）、投入地点からの距離（下段）

赤：釧路川河口からの投入粒子、緑：十勝川河口からの投入粒子、青：静内川河口からの投入粒子。

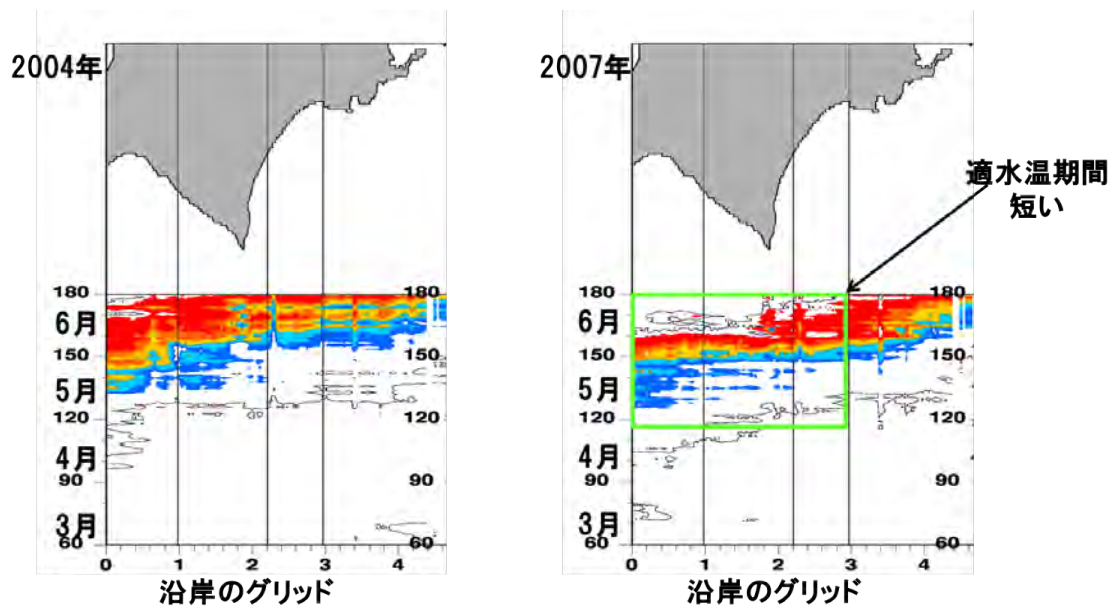


図 5. 2004 年と 2007 年の北海道太平洋沿岸のグリッド水温の時間空間変動
 左：2004 年、右：2007 年。横軸：地図に対応する空間グリッド地点、縦軸：3 月 1 日が 60 日とし 6 月末までの日数。黒線：5°C 間隔のコンタ。8°C～13°C の温度帯の場合に着色。

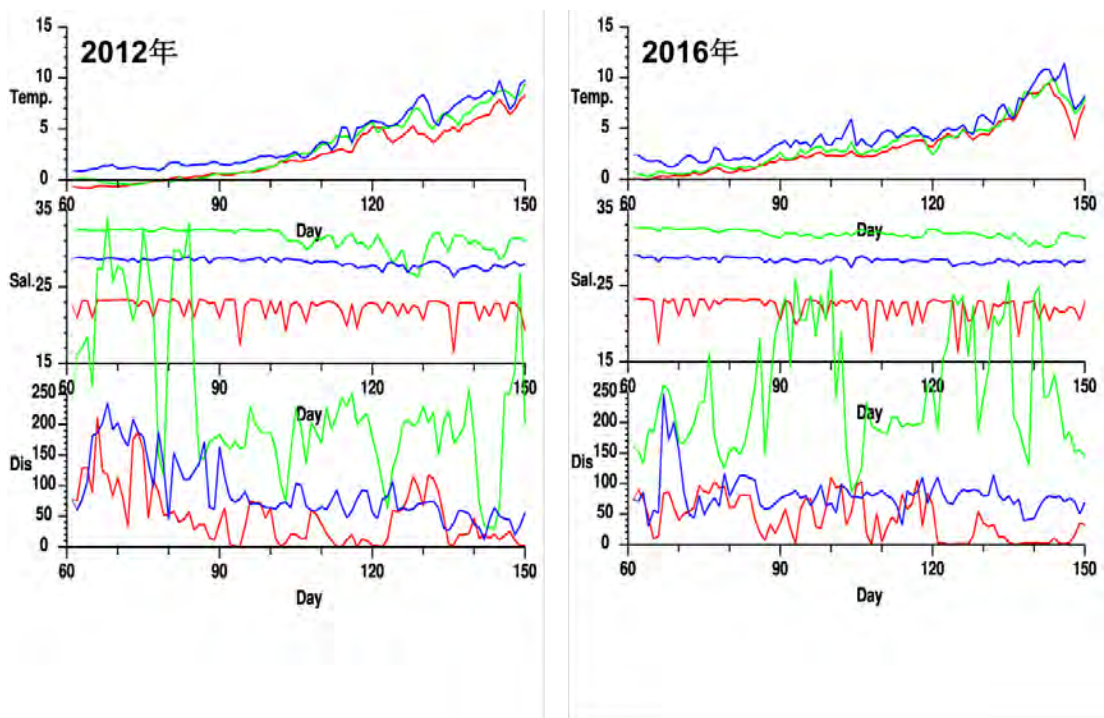


図 6. 2012 年（左側）と 2016（右側）年の 5 月に投入した粒子の 1 ヶ月間の経験水温（上段）、経験塩分（中段）、投入地点からの距離（下段）
 赤：釧路川河口からの投入粒子、緑：十勝川河口からの投入粒子、青：静内川河口からの投入粒子。

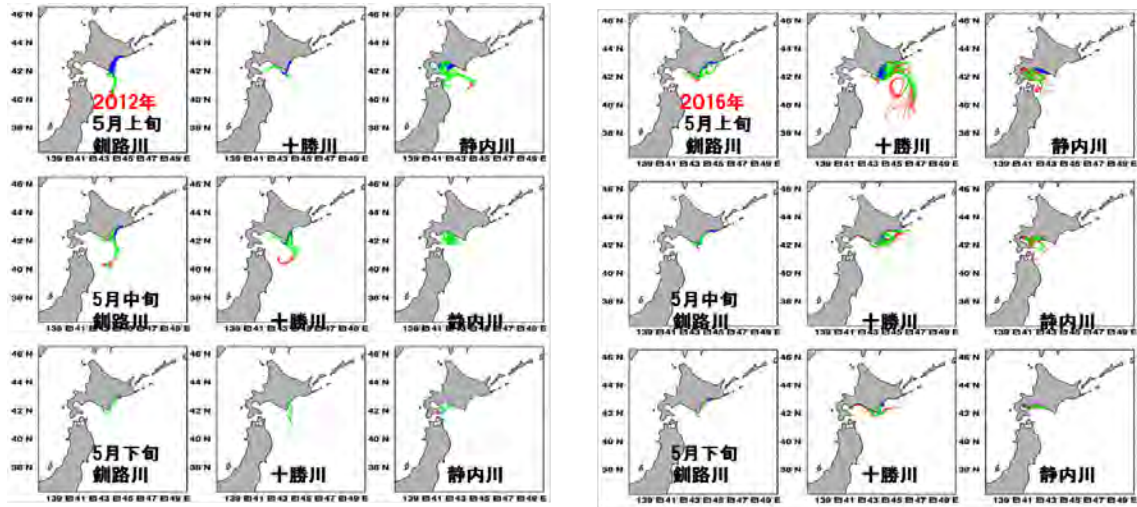


図 7. 2012 年と 2016 年の 5 月に太平洋側から投入した粒子の 1 ヶ月間の軌跡と経験水温
 左の 9 組が 2012 年、右の 9 組が 2016 年。左から釧路川、十勝川、静内川から投入し
 た粒子の軌跡。緑線：8℃～13℃の経験水温。赤線：13℃以上の経験水温。

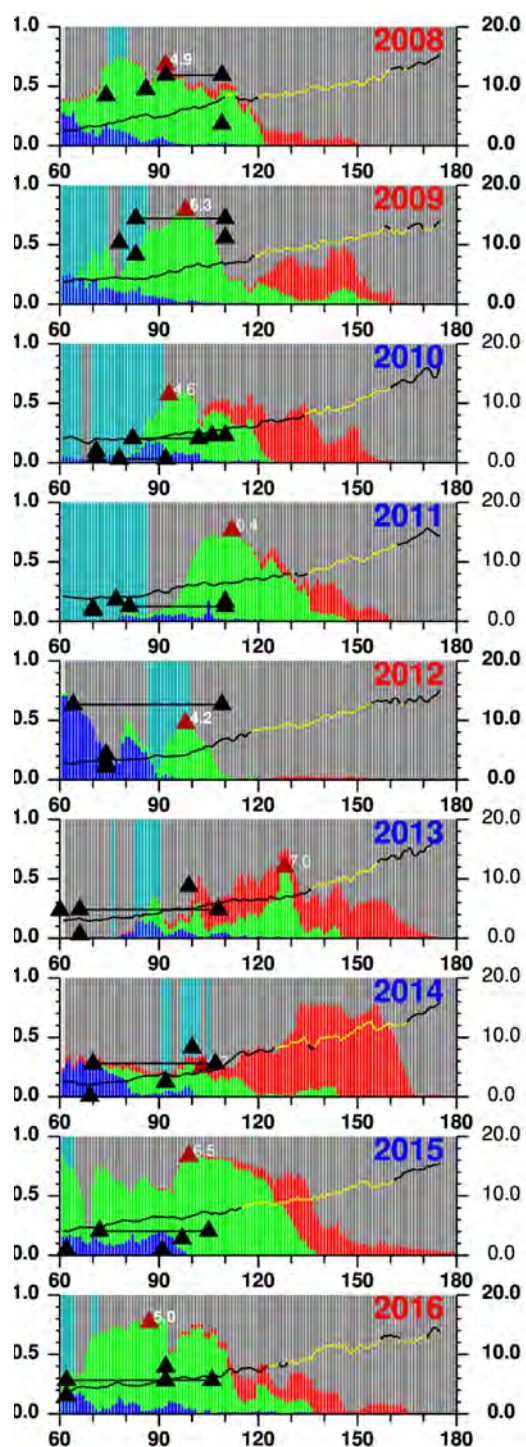


図 8. 石狩川河口からの投入粒子に対する日毎の到達率の経年変化

青棒：2.7℃より低温を経験し到達した割合、緑棒：良好な経験水温（2.7℃～15.7℃）して到達した割合、赤棒：15.7℃より高温を経験し到達した割合、黒棒：オホーツク海に到達しない割合。水色棒：水温 3.6℃～4.4℃の時期、黒線：投入地点の水温、黄色線：投入地点の水温が 8℃～13℃の場合、黒三角と横棒：千歳川の放流時と期間、高さがその放流に対する相対回帰率、年の赤色表示：石狩川回帰率が平均より高い場合、年の青色表示：石狩川回帰率が平均より低い場合。

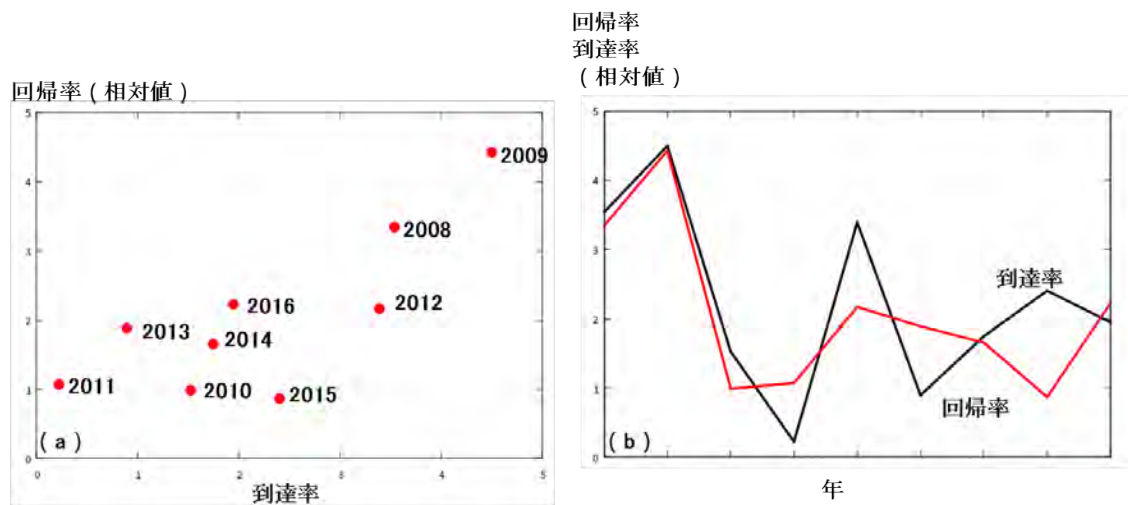


図 9. 石狩川河口から水温帯 $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ で投入した粒子数のオホーツク海への到達率（相対値）と石狩川の高帰率（相対値）の散布図と経年変化
 (a) : 散布図、相関係数 $R=0.79$ 。x 軸は到達率の相対値、y 軸は回帰率の相対値、相関係数 $R=0.79$ 。(b): 経年変化、x 軸は年、縦軸は到達率の相対値と回帰率の相対値。

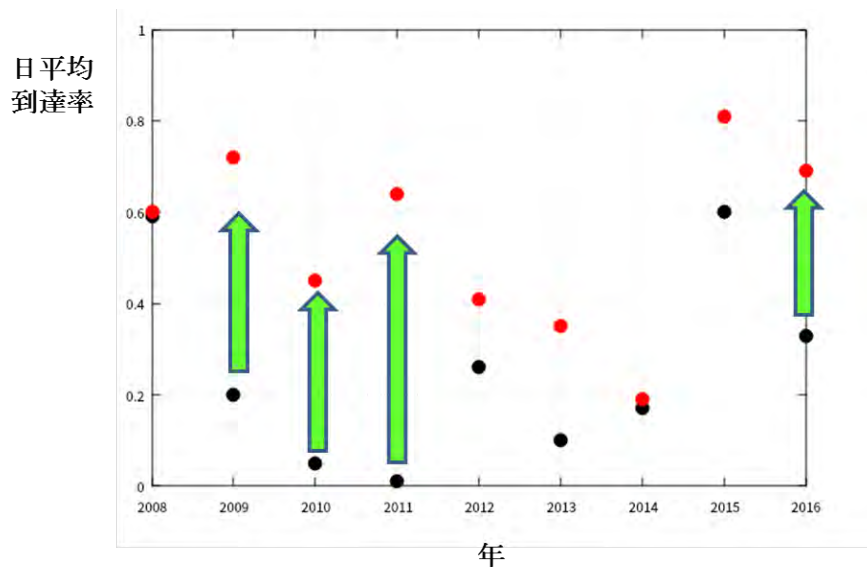


図 10. 各年の投入時期水温の変更による日平均到達率の変化
 黒 : $3.6^{\circ}\text{C} \sim 4.4^{\circ}\text{C}$ で投入した場合の日平均到達率、赤 : 日平均到達率が最大になるように投入時期水温帯を変更した場合の日平均到達率。

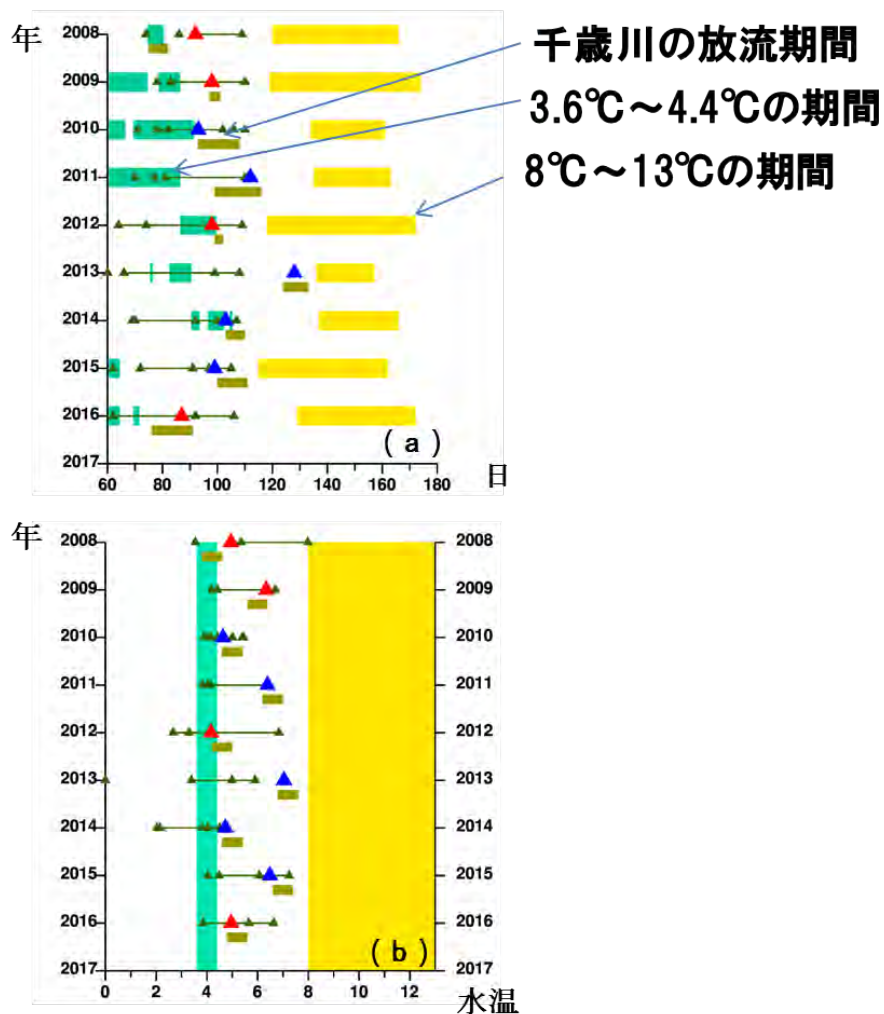


図 11. 各年の稚魚の適水温時期（8℃～13℃）、3.6℃～4.4℃の時期、日平均到達率が最大になる時期(a)と各年の 8℃～13℃と 3.6℃～4.4℃と日平均到達率が最大になる水温(b)
 (a)黄色バー：8℃～13℃、水色バー：3.6℃～4.4℃、オリーブグリーン：日平均到達率が最大になる時期、小緑三角：千歳川放流時期、赤三角：平均より高い回帰率の年で最大到達率になる日、青三角：平均より低い回帰率の年で最大到達率になる日。(b)黄色バー：8℃～13℃、水色バー：3.6℃～4.4℃、オリーブグリーン：日平均到達率が最大になる水温、小緑三角：放流時期の沿岸水温、赤三角：平均より高い回帰率の年で最大到達率になる日の水温、青三角：平均より低い回帰率の年で最大到達率になる水温。