

## 日本系サケの資源変動と沿岸海洋環境の関係

さいとう としひこ  
齋藤 寿彦 (調査研究課生物資源研究室)

### はじめに

わが国のサケ資源は人工ふ化放流事業により維持されており、1970年代半ば以降、サケの資源量は飛躍的に増大しました(図1)。近年の資源状態に注目すると、1996年には8,879万尾と史上最高の来遊数(沿岸漁獲数+河川捕獲数)を記録しましたが、その後4年連続で漸減傾向をたどり、2000年には1996年の半分の水準まで来遊数が落ち込みました。2001年の来遊数は5,856万尾となっており、5年ぶりに前年実績を上回りました。このように、最近の来遊数は過去30年には見られなかった変動を示しましたが、それでも全国的に見れば依然高い資源水準が維持されていると言えます。

日本系サケ資源の増大は、大型の稚魚を沿岸滞泳に適した時期に放流することを目的とした、給餌飼育技術の導入と適期放流技術の開発によるものが大きいと考えられています(Kobayashi 1980; Mayama 1985; Kaeriyama 1999)。さらに北太平洋におけるサケ属魚類の資源が、日本系サケ同様1970年代半ば以降著しく増加していることから、北太平洋の海洋環境がサケ属魚類の生息にとって好適に変化したことも日本系サケ資源が増大した大きな要因だったようです(Beamish and Bouillon 1993; Kaeriyama 1996)。最近になり、北太平洋の長期海洋環境変動が、サケ属魚類をはじめとする多くの水産生物の資源変動を引き起こしていることが明らかになってきました(Beamish et al. 1999; 田所 2001)。日本やアラスカなどのふ化場産魚を除けば、北太平洋のサケ属魚類は野生魚が多いことから、環境変動により資源量の多寡が決まっていると考えるのは納得できます。一方、人工ふ化放流技術により人為的にコントロールされている日本系サケの場合、放流時の沿岸海洋環境の重要性について長年指摘されてきたものの、それが資源変動にどう関わるのかについて検討した研究は極めて少ないのが現状です(例えば Fukuwaka and Suzuki 2000)。そこで今回は、放流されたサケ幼稚魚が海洋生活初期を過ごす沿岸海洋環境に注目し、日本系サケの回帰率と海洋環境との関係について調べた結果を紹介します。

### サケ稚魚放流数と回帰率

わが国のように河川規模が小さいために河川の上流域まで農鉱工業の振興や都市化による開発が進み、さらにえん堤などの河川工作物が多数建設された河川環境下では、天然産卵により現在のサ

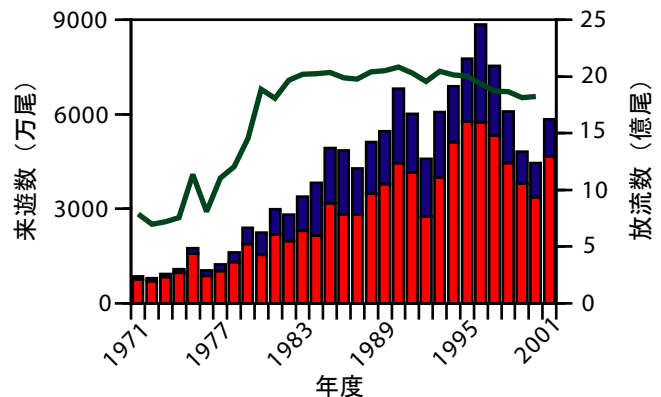


図1. 日本系サケの放流数(折線グラフ)と来遊数(棒グラフ)。赤色は北海道の、青色は本州の来遊数をそれぞれ表わす。

ケ資源水準を維持することは困難です(Kobayashi 1980; 酒井 1988)。そのため、日本のサケ資源は大多数が人工ふ化放流由来というのが実情です。日本系サケ資源が急増した1970年代半ば以降のサケ稚魚の放流数と回帰率を地域別に図2に示しました。回帰率というのは、同じ年生れの稚魚(年級群といいます)のうち、親魚になって日本へ回帰したサケの総尾数を、その年級群の放流数で割った値(パーセント)です。最近ではサケの高齢化が進み、同じ年級群であっても親魚になる年齢が2-8年と様々です。つまり、毎年日本の沿岸や河川で捕獲されるサケは、生まれた年の違った親魚の集団なのです。それを年級群ごとに振り分けて回帰率を求めるためには、サケの鱗を用いて年齢査定を行い、捕獲されたサケの年齢構成を明らかにする必要があります。ちなみに当センターでは、毎シーズン全国の主要な河川や沿岸で捕獲されたサケ40,000-60,000尾の年齢査定を行い、年齢構成の把握に努めています。さらに本州については、各県独自の年齢査定結果なども参考にさせて頂いています。しかし、同一年級群に由来する親魚に注目すると、99パーセント前後の魚が2-6年魚として回帰するようです。したがって、ここでは2-6年魚の親魚を対象に回帰率を求めることにし、1999年に6年魚として日本へ回帰した1993年級群までの結果を示しました。

各地域とも1980年代初め以降、放流数はほぼ一定で推移しています。毎年、北海道では5つの地域で各々約2億尾、本州太平洋では約6-7億尾、そして本州日本海では約2-3億尾のサケ稚魚が放流されており、全国合計では約20億尾の放流数となっています。最近になり、若干放流数は減少して

いますが、それでも全国で18-19億尾の放流数が維持されています。一方、回帰率は地域によって大きく異なっています。この一因として、各地域の“地の利”の違いが挙げられます。最近の研究によれば、日本沿岸を離岸した日本系サケ幼稚魚の多くは、初夏から晩秋にかけてオホーツク海に分布します(浦和 2000)。近年、北海道オホーツクと北海道根室の回帰率が他の地域にくらべて高くなっていますが、これらの地域は次の生息場所であるオホーツク海に最も近い位置にあります。他方、本州日本海の回帰率が一番低くなっていますが、この地域は世界的に見てもサケの分布域のほぼ南限に位置しているのに加え、放流されたサケ幼稚魚は日本海における春の対馬暖流の北上を避けながらオホーツク海まで移動しなければなりません。このように、日本沿岸からの離岸の過程を考えただけでも、幼稚魚が体験する沿岸海洋環境は地域によって大きく異なっており、そのことが増殖効果の現れ方の違いに反映されていると考えられます。

### 回帰率の地域間比較

回帰率が地域によって異なっていることはわかりましたが、果たしてどの地域の間で回帰率の変動は似ているのでしょうか？もし回帰率の変動に類似性が認められれば、それらの地域に共通した原因により回帰率の変動が生じている可能性も考えられます。このように、資源変動の要因を探るために、地理的に離れた資源の変動を比較する手法(マルチストック分析)がしばしば用いられます(例えば、Thompson and Page 1989; Peterman et al. 1998)。

まず、全国7地域間で1976-1993年級群の回帰率を相関分析により総当たりで比較してみました(表1)。表中の値は相関係数を示し、統計学的に有意と認められた組み合わせについては、その有意水準に応じてセルの色を変えて表示しました。相関分析の結果、統計学的に有意な正の相関が北海道オホーツクと北海道根室、北海道根室と北海道えりも以東、および北海道えりも以西と本州太平

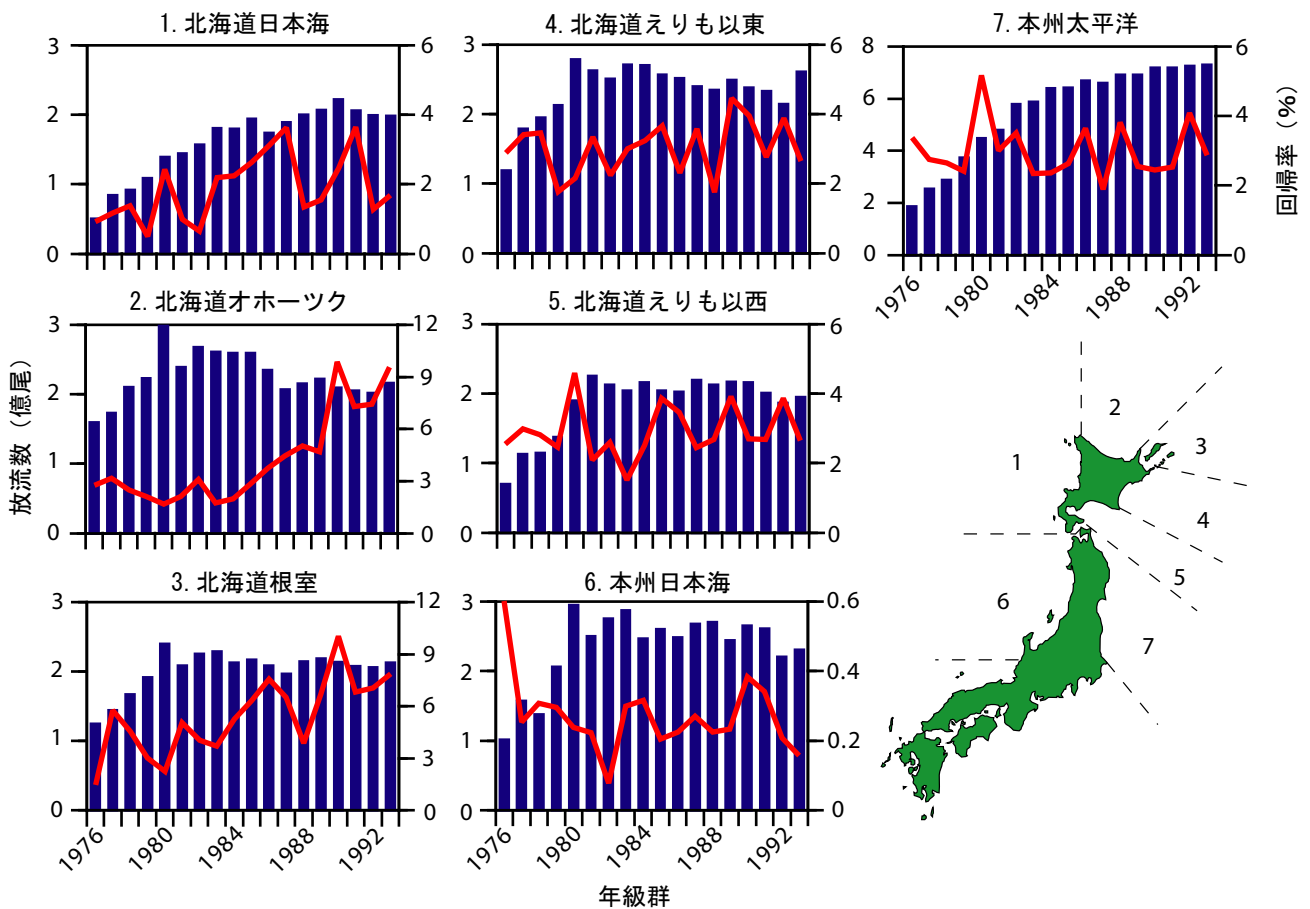


図2. 全国7地域におけるサケ1976-1993年級群の放流数(青棒グラフ)と回帰率(赤折線グラフ)。地図はそれぞれの地域区分を示す。本州日本海および本州太平洋については、沿岸域でサケ漁業の行われている石川県および茨城県以北のデータをそれぞれ使用した。

洋の3つの地域の組み合わせで認められ、これらの地域の回帰率は似た変動を示すことがわかりました。

さらに同じ回帰率のデータを、データの類似性を表わすクラスター分析により解析した結果を図3に示しました。クラスター分析によって回帰率が似ていると考えられた地域は、北海道オホーツクと北海道根室、そして北海道えりも以西と本州太平洋の組み合わせでした。さらに、その他のグループ分けに注目すると、ほぼ地理的に近い地域から順にまとめられていることがわかりました。

### 回帰率の変動要因

回帰率の地域間比較によって、回帰率は地理的に隣接した地域の間で似た傾向を示しながら変動していることが示唆されました。このことは、地理的に近い地域に共通した“何らかの原因”によって回帰率の良し悪しが決まっている可能性を意味しています。一体その原因とは何でしょうか？ そのためには、降海後のサケの分布および回遊経路を考慮することが大切です。沖合域におけるサケの分布に関する知見から推察すると（小倉 1994）、各地域由来の日本系サケが混じりあって生息している沖合域で、減耗のしかたが地域系群ごとに違っていて、そのために地域ごとの回帰率に違いが生じる可能性は低いと思います。むしろ、各地域由来のサケが異なる回遊経路をとる時期 - すなわち、幼稚魚が日本沿岸から沖合へ向かう海洋生活初期、あるいは産卵直前の親魚が母川へ向けて日本沿岸へ回遊する産卵回遊時 - に減耗のしかたが地域系群ごとに違っていると考えたほうが妥当です。さらに日本沿岸域で地域ごとの回帰率に違いが生じていると仮定した場合、地理的に近い地域では沿岸海洋環境がより似ているものと予想されるため、隣接した地域で回帰率の変動が似ていたとする先程の結果も説明できます。それでは、海洋生活初期と産卵回遊時のどちらで減耗が生じているのでしょうか？ 一般に魚類の場合、生活史初期の減耗が極めて大きく、成長すると死亡率が低下することが知られています（例えば、伊藤ら 1992）。したがって、産卵間近の親魚の段階で大きな自然死亡が生じているとは考え難く、むしろ人間の手を離れて自然界で生活し始める海洋生活初期に、沿岸海洋環境により減耗が生じ、それが地域ごとの回帰率に違いをもたらしている可能性が考えられます。

### 沿岸海洋環境と回帰率

日本系サケの回帰率が海洋生活初期の沿岸海洋環境によって影響を受けている可能性を前段で

表1. 相関分析によりサケ1976-1993年級群の回帰率を全国7地域間で比較した結果。表中の値は相関係数を示し、統計学的に有意な組み合わせについては有意水準に依じセルの色を変えて表示した（青、 $p < 0.05$ ；赤、 $p < 0.01$ ）。

	北海道 オホーツク	北海道 根室	北海道 えりも以東	北海道 えりも以西	北海道 日本海	本州 日本海	本州 太平洋
北海道 オホーツク	-						
北海道 根室	0.66	-					
北海道 えりも以東	0.23	0.49	-				
北海道 えりも以西	0.19	0.13	0.11	-			
北海道 日本海	0.26	0.47	0.31	0.17	-		
本州 日本海	-0.08	-0.26	0.21	-0.16	0.22	-	
本州 太平洋	-0.06	-0.37	-0.43	0.51	-0.20	-0.28	

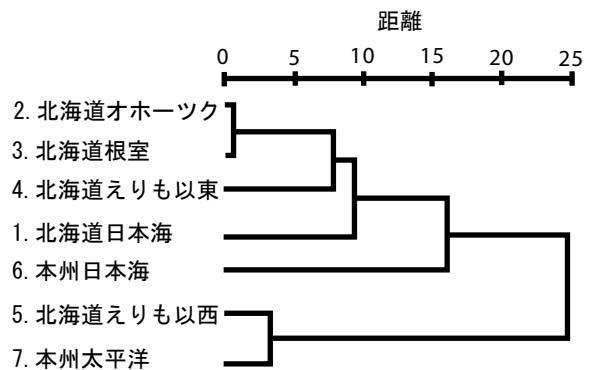


図3. サケ1976-1993年級群の回帰率について、全国7地域間でクラスター分析を行った結果（デンドログラム）。地域区分は図2を参照。各地域の回帰率に見られる、スケールの違いに起因する影響を取り除くため、回帰率は地域ごとにZ変換を行った後に分析した。クラスター化の方法にはワード法を、距離の測定方法には平方ユークリッド距離をそれぞれ用いた。

記しましたが、これは地域ごとの回帰率を、既存の知見に照らし合わせて導きだした推論にすぎません。そこで、先程の分析の結果、回帰率の変動が似ていると考えられた北海道オホーツクと北海道根室、および北海道えりも以西と本州太平洋について、1976-1993年級群（1977-1994年の放流群）の回帰率とこれらの年級群が幼稚魚のときに体験した沿岸海洋環境との関係を調べてみました。

これまで海外で行われた研究によると、冬季の海洋環境は、続く春から夏にかけての海洋生産に大きな影響力を持つことが報告されています（Brodeur and Ware 1992）。また、日本沿岸域で行われたサケ幼稚魚に関する研究によれば、表面海水温が5-13 の時、幼稚魚は沿岸域に分布します（小林 1977；入江 1990）。したがってこれらの知見より、(1)サケ稚魚の放流される前年11月か

ら放流年7月までの表面海水温と(2)サケ稚魚が放流されて日本沿岸から離岸するまでの時期(沿岸滞泳-離岸期)に、沿岸域に形成された表面海水温5-13 帯の面積の2つを沿岸海洋環境の指標としました。

図4には沿岸海洋環境を測定した範囲を示しました。北海道えりも以西と本州太平洋に関しては、北海道えりも岬以東の道東海域も測定範囲に含まれています。これは太平洋側に放流されたサケ幼稚魚が太平洋沿岸を陸地沿いに北上するためです(入江 1990)。多くの場合、日本沿岸域に分布するサケ幼稚魚は、距岸18-30 km以内に多数分布しますが、東北沖の太平洋海域では距岸約100 kmの沖合における分布も報告されています(入江 1990)。したがって、沿岸海洋環境を測定する範囲はおおむね距岸100 kmを含むように設定しました。表面海水温データは、気象庁が公表している緯度、経度1度格子間隔の旬平均のデータベース(NEAR-GOOS Regional real time database)を使用しました。なお、前述の測定範囲内における平均表面海水温と表面海水温5-13 帯面積の計算には、海洋版地理情報処理ソフトのマリンエクスプローラーVersion 3.1(環境シミュレーション研究所、川越市)を利用しました。

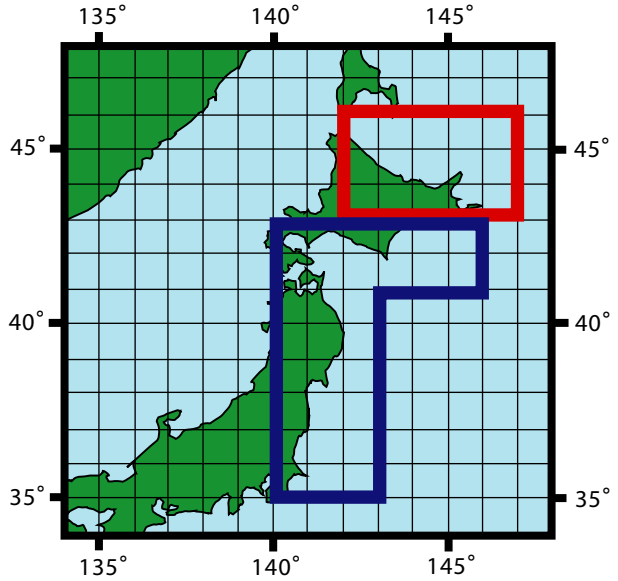


図4. 沿岸海洋環境の計算を行った範囲。赤枠は北海道オホーツクと北海道根室の、青枠は北海道えりも以西と本州太平洋の測定範囲をそれぞれ示す。枠内の海域について、(1)11-7月の平均表面海水温および(2)沿岸滞泳-離岸期の表面海水温5-13 帯面積を計算した。

**北海道オホーツクと北海道根室** 北海道オホーツクと北海道根室について、回帰率と沿岸海洋環境との関係を図5に示しました。図5aの平均表面海水温は、1976年11月から1994年7月までの期間について、まず旬ごとに平均を求め(18年平均)、次にその18年平均からの差(偏差)の形で各年の旬表面海水温を表わし、最後にそれを各年級群について放流前年の11月から放流年の7月まで平均することにより計算しました。北海道オホーツクと北海道根室の場合、表面海水温5-13 帯の面積と回帰率の間に関係は認められませんでした。11-7月までの平均表面海水温と回帰率の間には統計学的に有意な正の相関が検出されました。つまり、これらの地域グループでは、例年よりも表面海水温が高い時に回帰率が良い傾向(低い時はその逆)にありました。ところで、回帰率の良い年と悪い年では、表面海水温はどのように違っているのでしょうか?このことを検討するために、回帰率の最も良かった年級群と最も悪かった年級群を3つずつ選びだし、その時の11-7月までの表面海水温の平均を求めて比較してみました(図6)。その結果、回帰率の良い年には1-4月の表面海水温が例年(18年平均)よりも高めに推移していました。この高めの表面海水温がどのようなプロセスを経てサケ幼稚魚の生き残りを高めたのかは不明です。しかしながら、他の海域における研究事例を参考にすると、冬季の高水温が海域の生物生

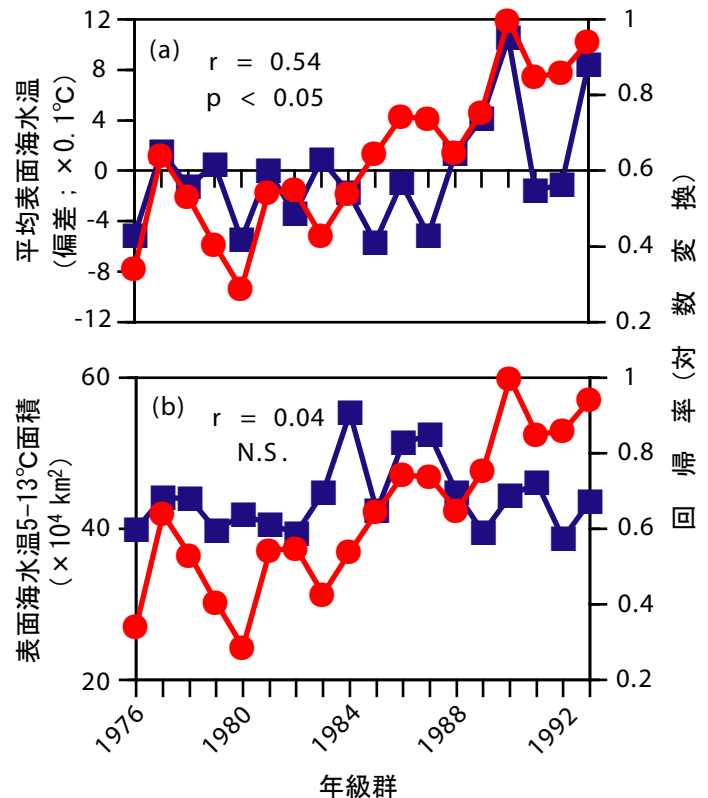


図5. 北海道オホーツクおよび北海道根室におけるサケ1976-1993年級群の回帰率(赤)と、(a)11-7月の平均表面海水温(青)および(b)4-7月の沿岸滞泳-離岸期に形成された表面海水温5-13 帯面積(青)との関係。rは相関係数を、pは有意水準をそれぞれ表わす。N.S.は危険率5%で有意差が認められなかったことを示す。

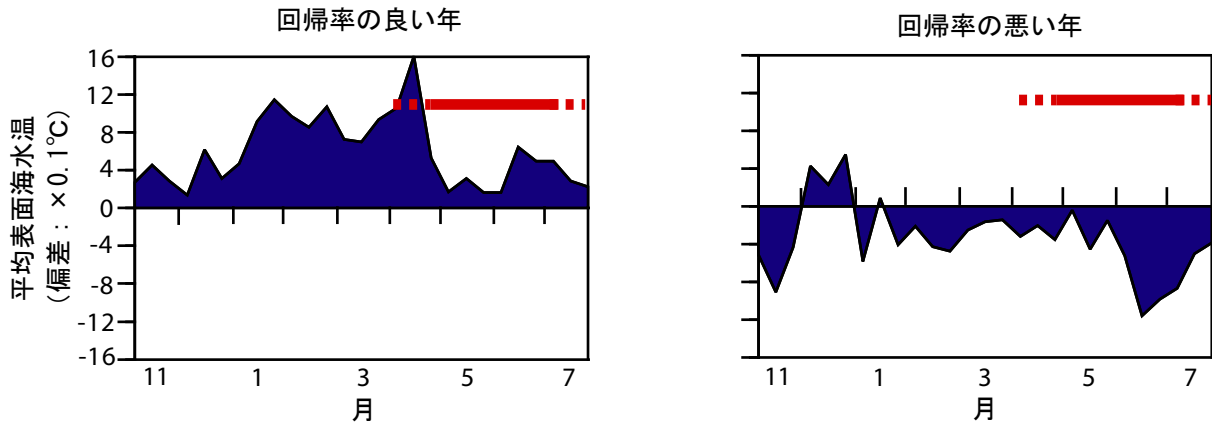


図6. 北海道オホーツクおよび北海道根室においてサケ回帰率の最も良かった3年級群と最も悪かった3年級群の、稚魚の放流される前年11月から放流年7月までの平均表面海水温。赤色の破線は両地域におけるサケ幼稚魚の沿岸滞泳 - 離岸期を表わす。

産を高め、それによってサケ幼稚魚の餌環境が好転したのかもしれませんが、また、回帰率の悪い年は5-7月の表面海水温が例年よりも低くなっていました。この時期は、両地域におけるサケ幼稚魚の沿岸滞泳から離岸期に相当するため、沿岸域での幼稚魚の成長が低水温により制限された結果、生き残りが悪くなった可能性も考えられます。

**北海道えりも以西と本州太平洋** 北海道えりも以西と本州太平洋の結果を図7に示しました。図中の値は基本的に図5と同じ手法により計算しましたが、唯一違うのは表面海水温5-13 帯面積の総和を求める際、時期を3-7月にした点です。この理由は、本州太平洋のサケ稚魚放流時期が北海道に比べて早いためです。北海道えりも以西と本州太平洋の場合、回帰率と表面海水温5-13 帯面積との間に有意な正の相関が認められましたが、11-7月の平均表面海水温との間には関係が見られませんでした。したがって、これらの地域では、沿岸滞泳から離岸期にかけて、表面海水温5-13の海域が多く存在すると、サケ幼稚魚の生き残りが良いものと推察されました。そこで、回帰率の良い年と悪い年の海洋環境を把握するために、再び最も回帰率の良い年級群と最も悪い年級群を3つずつ選びだし、両者の表面海水温の平均を求めてみました(図8)。その結果、7月の表面海水温の分布に最も違いが認められました。この時期、回帰率の良い年には表面海水温5-13 帯が北海道えりも以西地域の沿岸に存在していますが、回帰率の悪い年にはそれが北海道えりも岬付近まで後退しています。このことより、回帰率の悪い年には、サケ幼稚魚の分布可能な表面海水温が、例年よりも早く太平洋沿岸域から消滅している可能性が考えられました。えりも岬以東の道東海域では、サケ幼稚魚が例年5月下旬から8月上旬(盛期は7月上旬から中旬)にかけて分布し、この時期に分布する幼稚魚には、必ずしも北海道えりも以東起

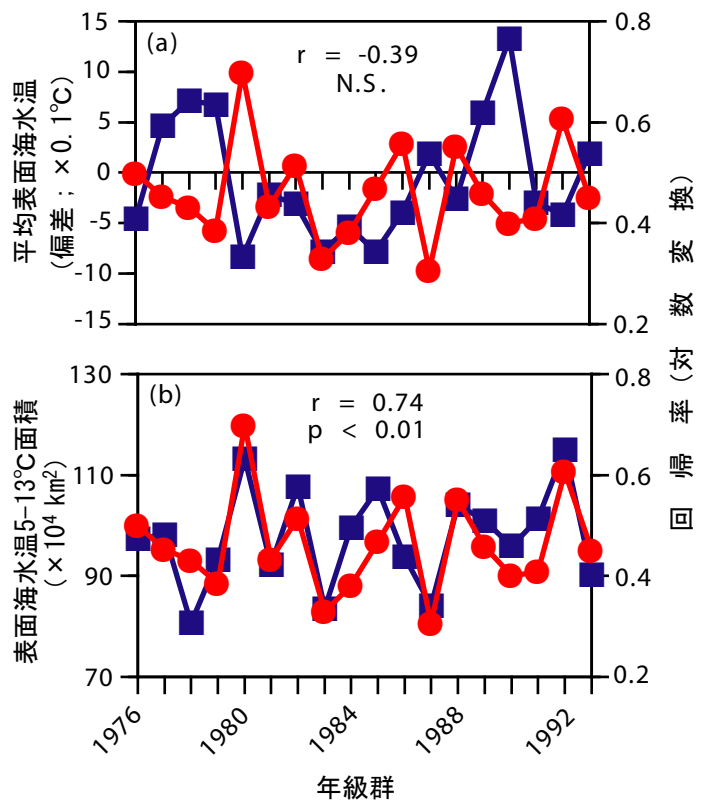


図7. 北海道えりも以西および本州太平洋におけるサケ1976-1993年級群の回帰率(赤)と、(a)11-7月の平均表面海水温(青)および(b)3-7月の沿岸滞泳 - 離岸期に形成された表面海水温5-13 帯面積(青)との関係。rは相関係数を、pは有意水準をそれぞれ表わす。N.S.は危険率5%で有意差が認められなかったことを示す。

源のものだけではなく、本州太平洋や北海道えりも以西起源と思われる大型魚も含まれます(入江1990)。陸地沿いを北上しながら移動する本州太平洋や北海道えりも以西の幼稚魚にとって、分布可能な水域の消長は成長や移動に密接に関連している可能性が高く、それが生き残りを左右しているのかもしれませんが。

今後の課題

今回、北海道オホーツクと北海道根室、および北海道えりも以西と本州太平洋という2つの地域グループに注目して回帰率と沿岸海洋環境の関係を見てきました。その結果、これらの地域のサケ幼稚魚の生き残りは、海洋生活初期の日本沿岸域で大きな影響を受けるという点では共通していますが、それを左右する沿岸海洋環境は地域グループによって異なる可能性が示されました。しかし残念ながら、回帰率との関係が認められたこれらの沿岸海洋環境でさえ、それがどのようなプロセスを経てサケ幼稚魚の生き残りに影響を及ぼしているのかについては推測の域を出ません。今後この点を明らかにするためには、沿岸域におけるサケ幼稚魚や餌生物などのモニタリング調査を継続することによってデータの蓄積を図り、その中から減耗要因を特定していくことが必要です。その際忘れてならないのは、サケ幼稚魚は日本沿岸域を広範囲にわたって移動することから、それを効率的に把握するための調査体制を確立することです。そのためには、これまで以上に当センターや道県、そして大学など関係機関の協力が大切になります。このような地道な調査や研究を続けることで、将来的には各地域の沿岸海洋環境に合致した独自のふ化放流技術の開発が可能になるものと考えます。

人工ふ化放流事業により維持されているわが国のサケ資源ですが、その資源変動には海洋環境が大きく関与しているのは明らかです。最近の地球規模の大気・海洋に関する研究の進展により、地球の気候・海洋変動は数年から100年周期という自律的な変動周期をもちながら変化していることがわかってきました(見延 2001)。なかでも、北太平洋亜寒帯水域上空に存在するアリューシャン低気圧の盛衰は、北太平洋の海洋環境に大きな影響力を持つことで知られています(Beamish et al. 1999; 田所 2001)。ここ30年だけでも、1970年半ばに勢力の増大したアリューシャン低気圧は、1980年代後半に急速に衰退し、そして10年経った1990年代後半に再び勢力を強めています(田所 2001)。このように、ある気候状態から別の気候状態への遷移はレジームシフトと呼ばれており、レジームシフトが海洋環境の変化を介して、サケ属魚類をはじめとする多くの水産生物の資源変動に影響していることが明らかになってきました(川崎 1994; Beamish et al. 1999; 田所 2001)。もっとも、レジームシフトが生じたからといって、必ずしもサケ属魚類の資源量が単純に以前のレジームの水準に逆戻りすることはないようですが(Beamish et al. 1999)、それでも将来、海洋環境がいつ、どの海域でサケ属魚類の生き残りにとって厳しい状態に変化するかわかりません。元来サケは、このように絶えず変動をくり返す海洋環境

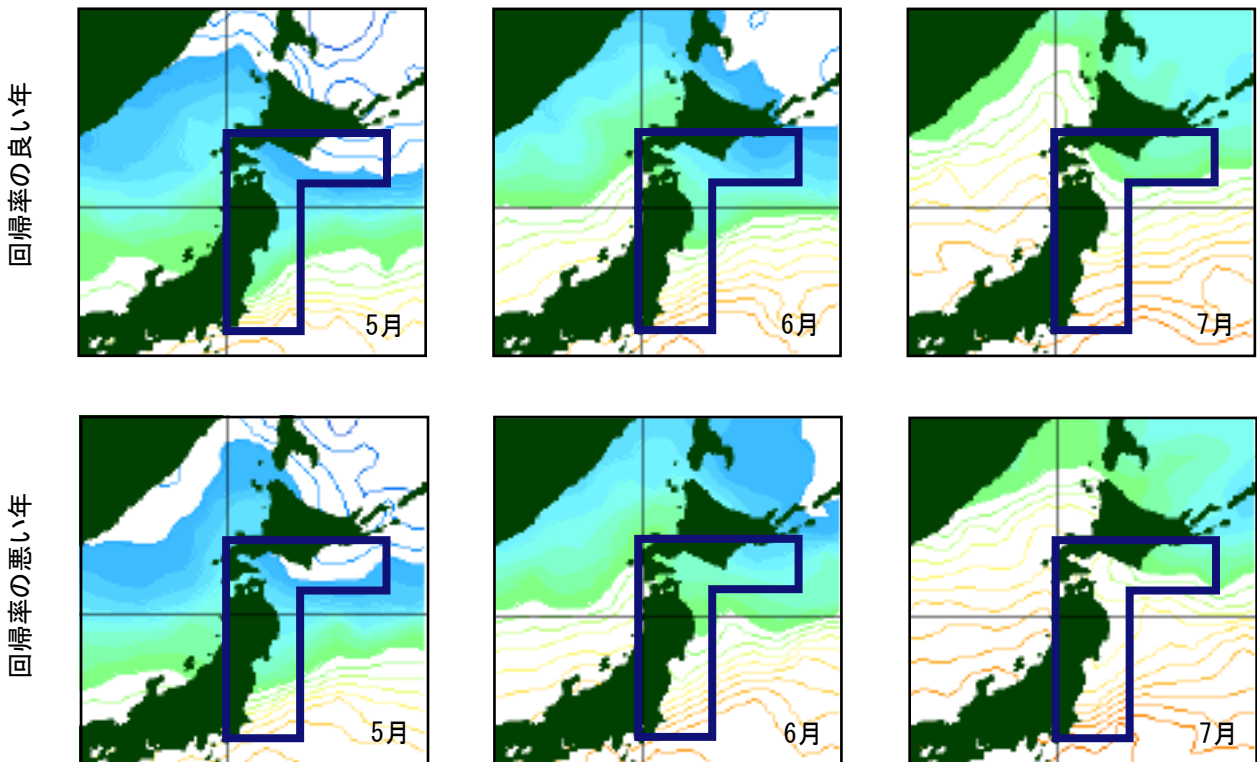


図8. 北海道えりも以西および本州太平洋においてサケ回帰率の最も良かった3年級群と最も悪かった3年級群の、沿岸滞泳 - 離岸期(5, 6, 7月上旬)における平均表面海水温の分布。着色された水域は表面海水温5-13℃を示す。青枠は両地域について沿岸海洋環境を計測した範囲を表わす(図4参照)。

下で、長い年月をかけて各地域の生息環境に適応してきました。その意味では、地域固有のサケ集団こそ、最も海洋環境の変動に耐性があり、その地域に定着しやすい特性を備えていると言えます。したがって今後は、各地域固有のサケ集団を特定し、その生物学的特性を明らかにするとともに、地域固有の集団を維持活用していくための資源管理体制を整えることも重要と考えます。

## 引用文献

- Beamish, R. J., and D. R. Bouillon. 1993. Pacific salmon production trends in relation to climate. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 50: 1002-1016.
- Beamish, R. J., D. J. Noakes, G. A. McFarlane, L. Klyashtorin, V. V. Ivanov, and V. Kurashov. 1999. The regime concept and natural trends in the production of Pacific salmon. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 516-526.
- Brodeur, R. D., and D. M. Ware. 1992. Long-term variability in zooplankton biomass in the subarctic Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 1: 32-38.
- Fukuwaka, M., and T. Suzuki. 2000. Density-dependence of chum salmon in coastal waters of the Japan Sea. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, No. 2: 75-81.
- 入江隆彦. 1990. 海洋生活初期のサケ稚魚の回遊に関する生態学的研究. *西水研報*, 68: 1-142.
- 伊藤嘉昭・山村則男・嶋田正和. 1992. 動物生態学. 蒼樹書房, 東京. pp. 137-140.
- Kaeriyama, M. 1996. Population dynamics and stock management of hatchery-reared salmon in Japan. *Bull. Natl. Res. Inst. Aquacult.*, Suppl. 2: 11-15.
- Kaeriyama, M. 1999. Hatchery programmes and stock management of salmonid populations in Japan. In *Stock enhancement and sea ranching*. Edited by B. R. Howell, E. Moksness and T. Svåsand. Fishing News Books, Oxford. pp. 153-167.
- 川崎 健. 1994. 浮魚生態系のレジーム・シフト(構造的転換)問題の10年 - FAO専門家会議(1983)からPICES第3回年次会合(1994)まで. *水産海洋研究*, 58: 321-333.
- 小林哲夫. 1977. 沿岸滞泳期におけるサケ・マス幼魚の生態. *水産海洋研究会報*, 31: 39-44.
- Kobayashi, T. 1980. Salmon propagation in Japan. In *Salmon ranching*. Edited by J. E. Thorpe. Academic Press, London. pp. 91-107.
- Mayama, H. 1985. Technical innovations in chum salmon enhancement with special reference to fry condition and timing of release. *NOAA Tech. Rep., NMFS*, 27: 83-86.
- 見延庄士郎. 2001. 長期気候変動と中高緯度の気候・海洋変動. *海と環境*(日本海洋学会編). 講談社サイエンティフィック, 東京. pp. 88-98.
- 小倉未基. 1994. 北太平洋の沖合い水域におけるサケ属魚類の回帰回遊行動. *遠洋水研報*, 31: 1-139.
- Peterman, R. M., B. J. Pyper, M. F. Lapointe, M. D. Adkison, and C. J. Walters. 1998. Patterns of covariation in survival rates of British Columbian and Alaskan sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) stocks. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55: 2503-2517.
- 酒井健司. 1988. 河川環境 - 母なる川は今. 日本のサケマス-その生物学と増殖事業(久保達郎編). *たくぎん総合研究所*, 札幌. pp. 74-77.
- 田所和明. 2001. 海洋環境の変化と海洋生態系. *海と環境*(日本海洋学会編). 講談社サイエンティフィック, 東京. pp. 192-202.
- Thompson, K. R., and F. H. Page. 1989. Detecting synchrony of recruitment using short, autocorrelated time series. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46: 1831-1838.
- 浦和茂彦. 2000. 日本系サケの回遊経路と今後の研究課題. *さけ・ます資源管理センターニュース*, 5: 3-9.