

# 気候変動とシロザケ個体群動態 －生態系をベースとした 持続可能な資源管理に向けて－

北海道大学国際本部

特任教授 帰山 雅 秀

第 **563** 号  
(第48巻 第11号)

編 集 一 般 財 団 法 人 東 京 水 産 振 興 会  
発 行

日本漁業は、沿岸、沖合、そして遠洋の漁業といわれるが、われわれは、それぞれが調和のとれた振興があることを期待しておるので、その為には、それぞれの個別的な分析、乃至振興施策の必要性を、痛感するものである。坊間には、あまりにもそれぞれを代表する、いわゆる利益代表的見解が横行しすぎる嫌いがあるのである。われわれは、わが国民経済のなかにおける日本漁業を、近代産業として、より発展振興させることが要請されていると信ずるものである。

ここに、われわれは、日本水産業の個別的な分析の徹底につとめるとともに、その総合的視点からの研究、さらに、世界経済とともに発展振興する方策の樹立に一層精進を加えることを考えたものである。

この様な努力目標にむかってわれわれの調査研究事業を発足させた次第で冊子の生れた処に、またこれへの奉仕の、ささやかな表われである。

昭和四十二年七月

財団法人 東京水産振興会  
(題字は井野碩哉元会長)

目次

気候変動とシロザケ個体群動態  
—生態系をベースとした—

持続可能な資源管理に向けて—

第五六三号

一、はじめに.....	1
二、北海道シロザケ個体群サイズの時系列変化.....	3
三、サケとは.....	8
四、長期的な気候変動とサケ類のバイオマス動態.....	13
五、温暖化とサケ類のバイオマス動態.....	21
六、サケ類と生態系サービス.....	28
七、今後の課題.....	33

時事余聞 編集後記

かえり  
帰山雅秀

略歴

▽一九四九年小樽市生まれ。  
水産科学および生態学の領域において国内外で活躍し、特にサケ科魚類の生態学に関する研究分野では優れた業績を上げ、指導力とパランス感覚で世界のこの分野をリードしている。日本学術会議連携会員。二〇一三年に北海道大学大学院水産科学研究院教授を退職後、現在は北海道大学国際本部の特任教授として新渡戸カレッジ等グローバルリーダー教育に携わっている。主な著書は「最新のサケ学」(単著)、「サケ・マスの生態と進化」(共著)、「Salmon」(共著)、「最新水産ハンドブック」(共著)、「Fisheries for global welfare and environment」(共著)、「サケ学大全」(編共著)など多数。

# 気候変動とシロザケ個体群動態

—生態系をベースとした

持続可能な資源管理に向けて—

北海道大学国際本部

特任教授 帰山 雅秀

## 一．はじめに

わが国のシロザケ来遊数は一九七〇年代後半から著しく増加してきたが、一九九〇年代後半に八千万尾強のピークをむかえた後、減少傾向に転じ、現在では三〜四千万尾台で推移するようになり、今後の動向が懸念されるようになってきた。ここでは北海道におけるシロザケを中心に温暖化および気候変動に伴う生活史とバイオマスの動態について紹介し、今後の資源利用のあり方を生態系ベースの持続可能な資源管理と

いう視点から述べることにする。

これまでのような経営中心の個体群レベルあるいは種レベルでのMSY中心の水産資源管理には限界があり、海洋生態系における環境収容力の動態と個体群の変動との関係といった生態系ベースの資源管理の展開が求められている。

ここで「資源」とはいうまでもなく人類が食料として利用する海洋生物の漁業資源のことである。川崎健先生は、人類にとってコモンズである大気―海洋系と漁業資源に対する系の外側からの最大の攪乱要因は、地球温暖化と過剰漁獲（乱獲）であり、このコモンズをいかに管理するかが問われていると指摘し、漁業資源を持続的に管理する場合、資源変動が資源増加量と漁獲の強さの間の平衡系であり、「漁獲」を内力化し、「環境」はノイズであるとし外力化するMSYの概念からは脱却すべきであると述べている。そういう意味では、これまでのような経営中心の個体群レベルあるいは種レベルでのMSY中心の水産資源管理（e.g. TAC）には限界があり、海洋生態系における環境収容力の動態と個体群の変動との関係といった生態系ベースの資源管理の展開が求められている。

海洋生態系は複雑でダイナミックな不確実性の高いシステムである。気候変動やENSOなどの自然要因と、地球温暖化や乱獲などの人為的要因により常に攪乱されている。不確実性の高い海洋生態系を人為的に「制御」しようとする試みは現実的ではない。人類も地球生態系の一構成種にすぎないのだから。生態系の構造と機能は、長い地球の歴史と進化過程で培われてきた種多様性と遺伝的多様性からなる生物多様性に依存しており、現在観察されている生物多様性の低下は生物間相互作用の構成要素の脱落を意味し、生態系サービスの低下や生態系の単純化につながっている。その典

型的な例の一つが「温暖化」現象であろう。

## 二、北海道シロザケ個体群サイズの時系列変化

自然再生産した野生魚は、明治時代、一、〇〇〇万尾を超えて漁獲され、北海道全域のシロザケ個体群サイズはきわめて大きかったことが推察される。

北海道に回帰するシロザケの来遊数の経年変化を図1に示した。自然再生産していた野生魚は、明治時代、特に一八九〇年前後には一、〇〇〇万尾を超えて漁獲されていた。当時の漁業が北海道でも石狩川を中心とする道央圏に限定されていたことを考えると、北海道全域で自然再生産するシロザケ個体群サイズはきわめて大きかったことが推察される。北海道では一八八〇年に千歳中央孵化場が建設されたのを機に、シロザケの資源管理を野生魚の遡上産卵保護から、人工孵化放流事業へ変えた。ところが、孵化場からの稚魚の放流数が増加するにつれて、親魚の来遊数はむしろ減少傾向に転じるようになった。小林哲夫さんによると、この現象はそれまでの野生魚の産卵場保護を中心とする資源管理にかわった、本来漁業資源造成の担い手であるはずの人工孵化放流事業が未熟な技術と親魚の売却益を運営資金とした増殖体制との相乗作用により生じたものとみなされている。その後、北海道のシロザケ個体群サイズは一九六〇年代まで三〇〇〜五〇〇万尾の低い水準で推移することとなった。

一九七〇年代以降、シロザケ来遊数は増加に転じ、一九八〇年代までは稚魚の放流数とパラレルに連動し、三、〇〇〇万尾を超えるまでになった。その後も来遊数

来遊数は、一九九〇年代後半に六、〇〇〇万尾台のピークをむかえた後、減少傾向に転じ、現在では三〜四千万尾台で推移

は、稚魚放流数が一定になったにも関わらず、増加し続け、一九九〇年代には五、〇〇〇万尾を超えた。この現象は、当初、人工孵化放流事業における給餌飼育技術と適期放流技術による技術革新の成果によるものと信じられていた。確かに、一九八〇年代まではそれを裏付ける科学的知見も得られているが、一九九〇年代以降の現象についてはそれだけでは説明がつかなくなってきた。来遊数は、一九九〇年代後半に六、〇〇〇万尾台のピークをむかえた後、減少傾向に転じ、現在では三〜四千万尾台で推移している(図1)。なお来遊数は二〇〇〇年に一時著しく減少しているが、これは一九九七/九八年スーパー・エルニーニョに端を発する東部ベーリング海における円石藻コリス・ブルームによる珪藻―オキアミ類系の生態系の崩壊に起因する。この時、日本系シロザケのみならず、ブリストル湾系ベニザケ *O. nerka* やハシボソミズナギドリ *Puffinus tenuirostris* などの海鳥のバイオマスも餌であるオキアミ類の消失で飢餓により著しく減少した。このように、一九九〇年代以降のシロザケの来遊数は人工孵化放流事業のみでは説明がつかなくなり、気候変動を含む海洋生態系の動態とも深く関係していることが示唆されるようになってきた。

#### 個体群の密度依存効果

動物は、ある環境収容力以内で個体数が増えていくと餌や生息場所には限りがあるので、成長が制限されたり、個体間の競争が激化したりする。このような現象のこと

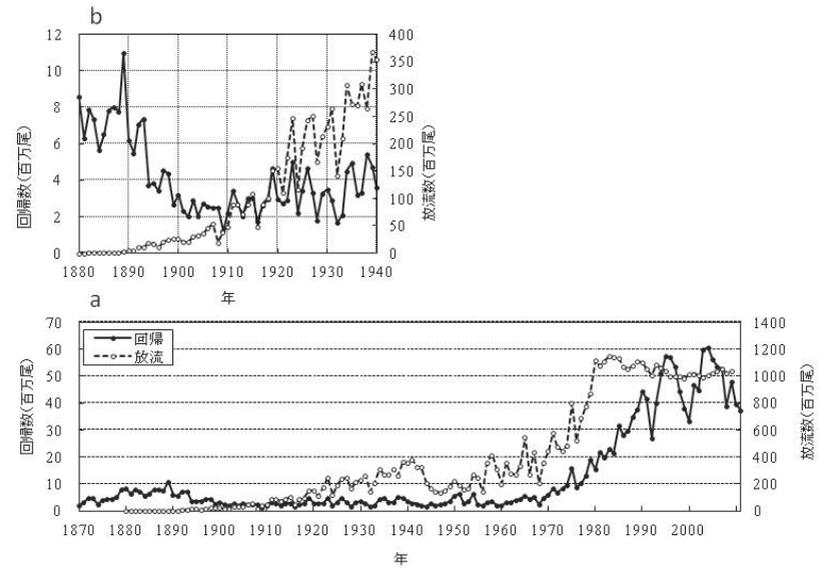


図1. 北海道系シロザケ個体群サイズの経年変化 (a: 1870-2011年, b: 1880-1940年, 実線: 来遊数, 破線: 放流数)

密度依存効果による個体数変動のメカニズムの共通した現象は(1) 個体の成長量の低下としての小型化高齢化、(2) 拡散的な移動分散、(3) 繁殖価の低下、(4) 疾病の流行、(5) 死亡率の増加へと進行し、最終的には個体群の崩壊が考えられている。

を個体群の密度依存効果という。密度依存効果は個体群生態学の中心テーマの一つである。さて、ここではまず環境収容力と現存量との差を残存環境収容力RCCと定義してみよう。そしてRCCと北海道に帰ってきたシロザケ親魚の平均体サイズと平均成熟年齢との関係をみてみよう(図2)。図から明らかのように、RCCが減少するほど体サイズは小さくなり、平均成熟年齢は高齢化している。すなわち、環境収容力に余力がなくなるほど、シロザケは小型化高齢化することをこの図は表している。これは正しく密度依存効果の現象そのものである。密度依存効果による個体数変動のメカニズムについてはストレス説、行動遺伝説、血縁選択説などさまざまな仮説が立てられているが、共通した現象としては(1) 個体の成長量の低下としての小型化高齢化、(2) 拡散的な移動分散、(3) 繁殖価の低下、(4) 疾病の流行、(5) 死亡率の増加へと進行し、最終的には個体群の崩壊が考えられている。貧栄養湖の支笏湖に生息するヒメマスが、かつて環境収容力を越える過放流により繁殖価が低下し、水カビ病が大流行し、個体群が崩壊したことがある(帰山一九九二)。しかし、このような例はきわめて稀で、環境収容力が高く、広大な北太平洋ではめったに起こることではない。事実、密度効果テストであるVarley-Gradwell法の分析結果では、北海道系シロザケは密度依存的死亡が観察されておらず、死亡率はむしろ海洋環境の変動により影響を受けていることが分かっている。

これまでのところ、この密度依存効果は個体群レベルに留まっているとみなされて

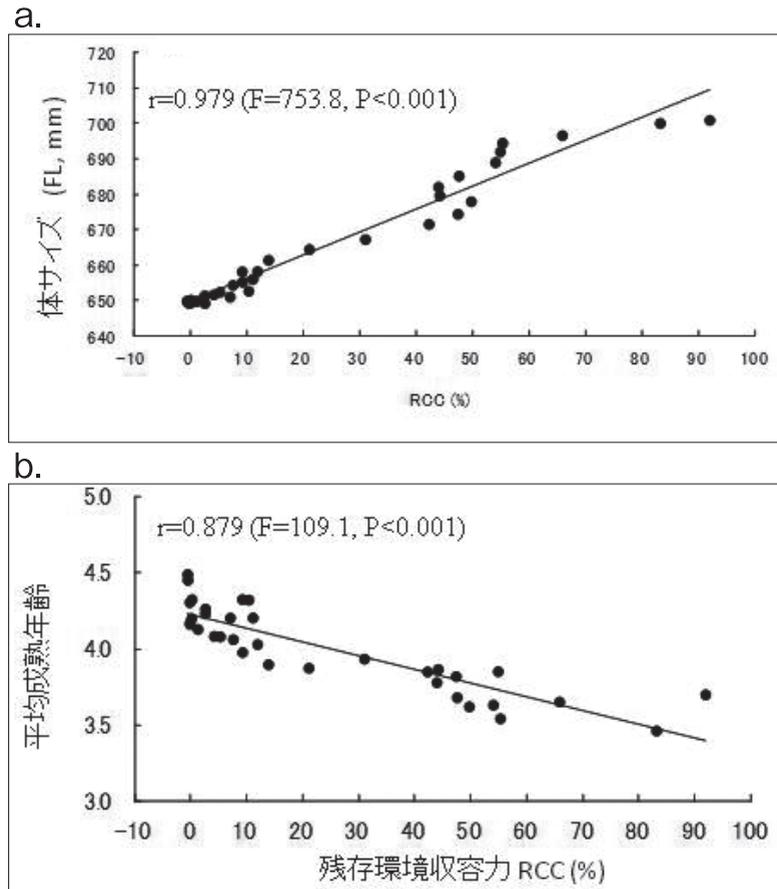


図2. 北海道系シロザケ個体群の残存環境収容力と体サイズ(a)あるいは平均成熟年齢(b)との関係。

密度依存効果は、野生魚の小型化高齢化を誘引し卵数や卵サイズなどの繁殖価を低下させ、ひいては再生産力にまで影響を及ぼす

いる。しかし、個体群レベルを越えた場合、すなわちこの密度依存効果が種レベルまで拡大して同所的に生息するシロザケ野生魚にまで影響が及んだ場合、厄介な問題が生じる。つまり密度依存効果は、野生魚の小型化高齢化を誘引し卵数や卵サイズなどの繁殖価を低下させ、ひいては再生産力にまで影響を及ぼす。最近、ロシア系野生シロザケが著しく増加するとともに、日本に回帰するシロザケの小型化が観察されるといわれている。このことは、密度依存効果が個体群レベルにとどまらず、種レベルでも起こることを示唆している。したがって、シロザケに限らず魚の個体群管理を行う場合には、生息する生態系の環境収容力をベースとした種レベルの個体群間相互作用を配慮することが求められている。

### 三. サケとは…

私たちが日常的に「サケ・マス」として親しんでいる魚は、広義にはサケ科魚類 Salmonidae をさす。わが国には、そのうちイトウ属 *Hucho*、イワナ属 *Salvelinus* およびサケ属 *Oncorhynchus* が生息する。ここではサケ属魚類のことをサケ類とよぶ。サケ類は、サクラマス *O. masou*、ギンザケ *O. kisutch*、マスノスケ *O. ishawytscha*、ベニザケ *O. nerka*、シロザケ *O. keta*、カラフトマス *O. gorbuscha*、スチールヘッド・トラウト *O. mykiss* およびカットスロート・トラウト *O. clarki* の原

則八種からなる(図3)。

日本には、北海道から九州まで広く分布するシロザケと北海道東部に分布するカラフトマス、日本が分布の南限域にあたるベニザケ、サケ類の祖先種で日本海周辺にしか分布しないサクラマスの四種のみが、在来種として生息している。ニジマスは米国から移入された外来種であり、キング・サーモンとして知られるマスノスケやギンザケも日本には自然分布しない。

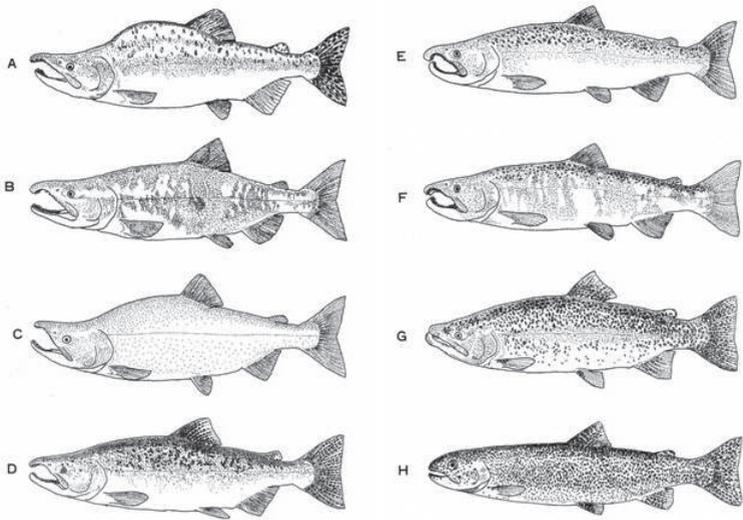


図3. サケ属8種 (A: カラフトマス, B: シロザケ, C: ベニザケ, D: マスノスケ, E: ギンザケ, F: サクラマス, G: ニジマス, H: カットスロート・トラウト).

サケ類の種数は、現在八〜一四種と研究者により異なる

サケ類の分類は混乱だらけ

サケ類の種数は、現在八〜一四種と研究者により異なる。例えば、サクラマス群といわゆるサクラマス *O. masou masou*、アマゴ *O. masou ishikawae*、サツキマスおよびピワマス *O. masou subsp.* は亜種レベルで扱われる場合もあるが、同種の個体群レベルで扱われる場合もある。アマゴ・サツキマスは体側に朱点を有すること、スモルトの降海時期が冬季でサクラマスの春季より遅いことから、一部の研究者は亜種としている。一方、黒潮の影響で夏季まで海水温が高く、春季にスモルト化して降海することができずに、水温の低い冬季のみ海洋を利用する形質が残ったのがアマゴ・サツキマスでサクラマスの生活史多型の地域個体群にすぎないと主張する研究者もいる。同じような例がアメリカ大陸のニジマス群においても言える。ニジマス *O. mykiss* は淡水残留型をニジマス、降海型をスチールヘッド・トラウトと呼ぶが、ニジマス群をさらに亜種としてゴールデン・トラウト *O. mykiss aglabonita*、アパッチ・トラウト *O. gilae apache* やギラ・トラウト *O. gilae gilae* などに分ける研究者もいる。

一九八九年にアメリカ水産学会はニジマスをサルモ属からサケ属に移した。それまでは、サケ科魚類を外形から属単位で区別するのが比較的容易であった。すなわち、サケ科魚類はまず頭部背面が平坦か、丸みを帯びるかでイトウ属と他に分かれ、前鋸骨ぜんきょこつと口蓋骨の歯帯を基準に、T字型はサルモ属、M字型はイワナ属、そして小字型はサケ属と分類することができた。現在、サケ科魚類の種検索には、とりあえずニジマスのみをサルモ属に席をおくことにより、同じ分類基準を踏襲しているが、なかなか収まりがわるい。

サケ類の起源と進化

サケ類の起源について、研究者のさまざまな仮説

サケ類の起源について、カナダのニーブさんは更新世の水河期と間氷期に北太平洋環帯で起こった一連の地理的隔離、特に日本海の内進と海退が原因で生じた地理的隔離を通して、ニジマスの祖先型からサクラマスか、その直接の祖先が分化したという仮説を立てた。その理由として、日本海周辺にのみニジマスが自然分布せず、それに替わってサクラマスが分布することをあげている。この仮説は生物地理学にも評価されている。また、分子生物学の研究結果から類似した進化的方向性がシロザケにおいても観察されており、きわめて興味深い。一方その反論として、サケ科の最古の化石が始新世に現れていること、ベニザケの祖先種で絶滅種 *Oncorhynchus salax* の化石がアイダホ州南西部の中新世層から発見され、サケ類は更新世よりかなり古い時代に分化したと主張する研究者もいる。

サケ類の生活史戦略は条件戦略

生物が生まれて成長し、繁殖後に死に至る過程を生活史というが、生物がどのような生活史をもつかはその生物の進化の過程により決定される。行動生態学では、生活

史パターンや行動などの形質を戦略、各個体が選択可能な生活史や行動を戦略の表現型として戦術と定義される。したがって、生活史戦略は繁殖や生存などの生活史に関する形質が自然選択により適応的に進化した結果とみなされる。

サケ類の生活史戦略を、多様な生活史をもつベニザケに見てみよう。ベニザケの生活史パターンは、①浮上後一〜二年、長くて三年湖沼などの淡水で生活した後にスモルトとなって海に移動する降海型、②降海型ベニザケのなかでも成長のよい個体（特に雄個体に多い）が淡水で一生を過ごし、遡上してきた降海型ベニザケと交配する残留型、③そしてこの残留型を祖先とするがすべての個体が淡水で一生を送るコカニ型、の三タイプに分けられる。残留型ベニザケは、湖沼性ベニザケともよばれるが、同一個体群に降海型スモルトと残留型の二つの生活史パターンをもち、残留型個体の方がスモルトに比べて成長もよく、大型である。動物にとってベネフィットとなる餌生物量や生息場所のことを資源というが、湖沼性ベニザケはこの資源環境が悪くて個成長が劣る場合、また資源環境が良好でも個体群密度が著しく高い場合ほどスモルトがたくさん出現する。スモルトは残留個体に対して明らかに劣位に位置するが、密度依存効果や資源環境の悪化にともない、春季の高い代謝活性時に降海する。すなわち、ベニザケは、負けるが勝ちではないが、淡水域から追い出された降海型スモルトが数年後には淡水域に残留した個体よりも大型で高い繁殖価（卵の数と大きさ）をもって産卵のため回帰する。しかし、降海することによるリスクは高く、降海型の生残率は

残留型より低い。残留型はスニークすることにより降海型との交配は可能である。生物の適応度は生残率と繁殖価との関数である。結果的に、残留型と降海型の適応度はそれほど差がないことになる。したがって、両者に勝ち負けは無いことになる。

動物は、ある個体が二つ以上の戦略をとることはできないが、条件に応じて二つ以上の戦術をとり得る。このような戦略を条件戦略という。サケ類の生活史戦略は、餌や生息空間などの資源が得られれば残留し、得られない場合は移動（降海）という、まさしく残留と移動の二つの戦術に基づく条件戦略といえる。したがって、もともと淡水起源であったサケ類は、このような生活史戦略をとりながら、いかに早い発育段階で海洋生活へ適応するかという方向で進化してきたとみなすことができる。

#### 四．長期的な気候変動とサケ類のバイオマス動態

サケ類のバイオマスは、長期的な気候変動とよくリンクする。太平洋では一〇年以上の長い周期で大気と海洋が連動して変動するが、それを表す指数として太平洋十年規模振動指数（PDO）がある。PDOは北緯二〇度以北の太平洋における海面水温（SST）偏差の経験的直交係数（EOF）第一モードの時間係数であり、PDOがプラスのとき、SSTは平年より北太平洋中央部で低く、北太平洋東部や赤道域では高くなる傾向を示す。北太平洋におけるサケ類の漁獲量とPDOの時系列変化をみる

サケ類の生活史戦略は、餌や生息空間などの資源が得られれば残留し、得られない場合は移動（降海）という、まさしく残留と移動の二つの戦術に基づく条件戦略

アリユーション低気圧は、アラスカ湾やベーリング海の生物生産力に大きく影響する。すなわち、冬の嵐がサケ類の環境収容力を高める

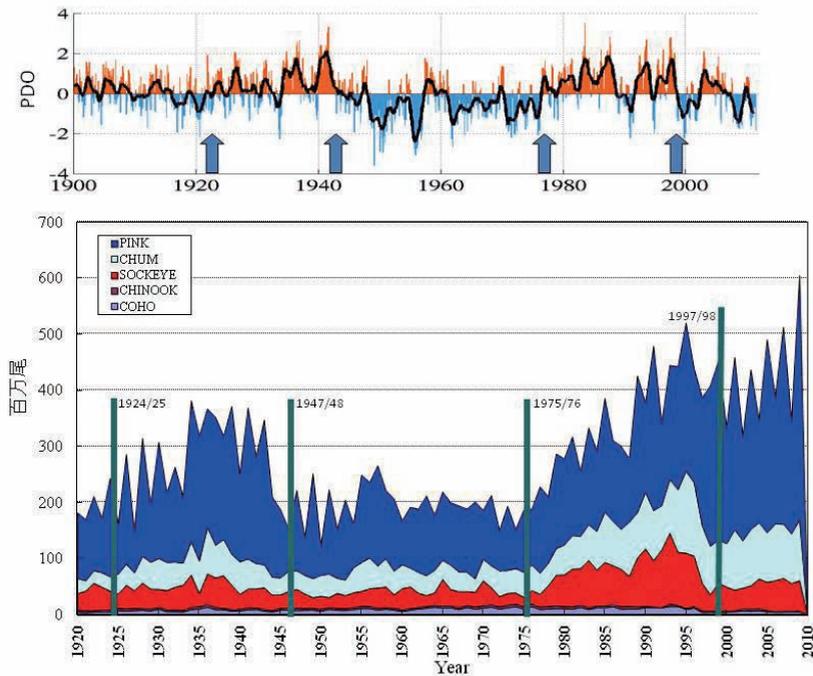


図 4. 北太平洋における PDO (A) とサケ類の漁獲数 (B) の時系列変化 (PINK: カラフトマス, CHUM: シロザケ, SOCKEYE: ベニザケ, CHINOOK: マスノスケ, COHO: ギンザケ, 矢印と棒: 気候レジーム・シフト).

と、サケ類は PDO がプラスに転じると増え、マイナスになると減る (図 4)。

PDO は、冬季のアリユーション低気圧の強さと深く関係しており、アリユーション低気圧が強いとプラスに、弱いとマイナスに変化する。ベーリング海を含む北太平洋東部では、アリユーション低気圧の勢力が増すと偏西風が強まり、亜寒帯海流とその続流であるアラスカ海流やアラスカ沿岸海流を強める。沿岸海流は渦流を増やし、潮汐と相乗的に作用して沿岸水を攪拌し、底層に沈殿していた大量の栄養塩 (窒素やリンなど) を表層へ運ぶ。その栄養塩は、アラスカ海流やアラスカ環流によってアラスカ湾全域へ分布する。同様に、ベーリング海東部でもアリユーション低気圧の強化によって冬嵐が活発となり、海水の鉛直混合が著しくなり、底層の栄養塩が表層へ拡散する。また、反時計回りの低気圧の渦は南方から湿った暖気と暖水呼び込み、アラスカ湾やベーリング海東部の表層水温を押し上げる。このようにアリユーション低気圧は、アラスカ湾やベーリング海の生物生産力に大きく影響する。すなわち、冬の嵐がサケ類の環境収容力を高めるといえる。

PDO がプラスからマイナスへ、あるいはマイナスからプラスへ中長期的に変化することを「気候レジーム (体制) がシフトする」という。PDO は一九七五／七六年以降プラスの傾向が強く、その間サケ類は増えたが、一九九七／九八年以降はマイナスに転じる場合が多くなってきた。一九九七／九八年は二〇世紀最強の「スーパー・エルニーニョ」が起こり、それが次のレジームシフトをもたらした。北太平洋全体の

サケ類はコペポダ類、オキアミ類、端脚類、翼足類、クラゲ類、多毛類などの動物プランクトンから、小型魚類やイカ類などのネクトンまで幅広く摂餌する。

サケ類の漁獲量は、ロシアのみカラフトマスとシロザケの増加が著しいために全体で高い水準を維持しているが、環境収容力は確実にピークを越え、それを境にベニザケは減少し、わが国のシロザケも同じ傾向をたどっている。北米大陸のワシントン州やオレゴン州のサケ類も同様の傾向を示す。どうも南方のサケ類はこの期を境に減少傾向へ向かっているようにみえる。北太平洋におけるサケ類の環境収容力は、どうやら一九七〇年代後半から続いてきたこれまでの「よき時代」から、次の気候レジームの転換で変わりつつあるようである。

#### 海洋におけるサケ類の摂餌栄養動態—粗食ほど繁殖？

北太平洋とその附属海はサケ類の海洋生活の中心である。このような海域において彼らは何を食べているのだろうか？ 秦玉雪さんは、北太平洋におけるサケ類の摂餌栄養動態を詳細に研究した。彼女によると、サケ類はコペポダ類、オキアミ類、端脚類（テミスト類）、翼足類、クラゲ類、多毛類などの動物プランクトンから、小型魚類やイカ類などのネクトンまで幅広く摂餌する（図5）。

北太平洋の海域毎に、サケ類の胃内容物を見ても（図6）。アラスカ湾では亜寒帯海流域もアラスカ環流域においても、シロザケを除き小型のイカ類（主にヒメドスイカ）を卓越的に食べている。ここでのシロザケはクラゲ類や翼足類などあまりエネルギー価の高くない餌生物を食べている。一方、反対側の西部亜寒帯環流域ではマ

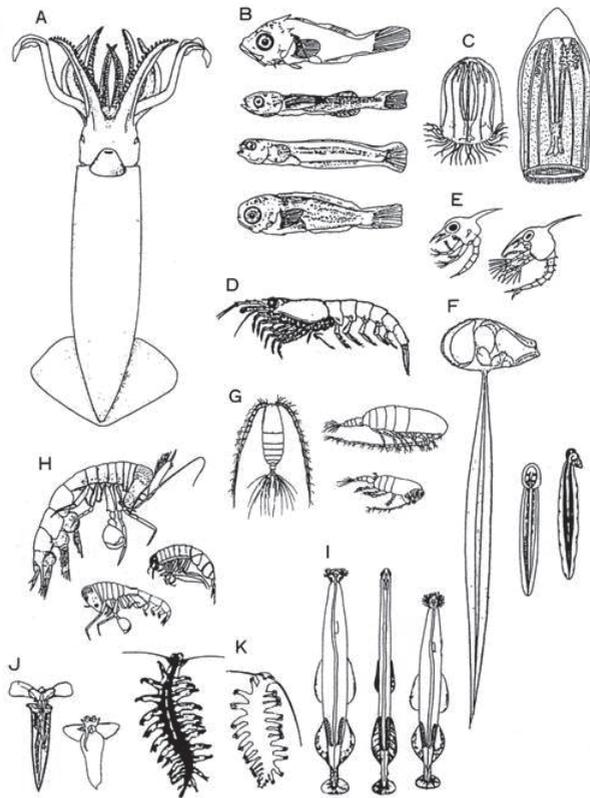


図5. 海洋におけるサケ類の主な餌生物.

A: ヒメドスイカ, B: 魚の稚魚, C: クラゲ類, D: オキアミ類, E: カニの幼生, F: 尾虫類, G: コペポダ, H: 端脚類, I: ヤムシ類, J: 翼足類, K: 多毛類.

海洋におけるサケ類の摂餌パターンは、ベニザケ、カラフトマスおよびシロザケからなるプラントトン食と、ギンザケ、マスノスケおよびスチールヘッド・トラウトのネクトン食に大別される。

マスノスケがイカ類を、ギンザケが稚仔魚を卓越的に摂餌するが、他種の胃内容物は多種多様である。ベーリング海では、やはりマスノスケがイカ類を、ベニザケ、シロザケおよびカラフトマスが多様な動物プランクトンを摂餌している。総体的に海洋におけるサケ類の摂餌パターンは、ベニザケ、カラフトマスおよびシロザケからなるプラントトン食と、ギンザケ、マスノスケおよびスチールヘッド・トラウトのネクトン食に大別される(図7)。言うまでもなく、餌生物の多様性はプランクトン食(H=1.0)の方がネクトン食(H=1.4)に比べて高い。

原子番号(陽子数)は同じながら、質量数(陽子と中性子の総和)が異なる物質のことを同位体という。同位体には放射線を発して中性子を放つ不安定な放射性同位体(例えば $^{14}\text{C}$ )と常に安定している安定同位体( $^{12}\text{C}$ と $^{13}\text{C}$ )がある。 $^{13}\text{C}$ に対する $^{12}\text{C}$ の割合を炭素安定同位体比という。窒素安定同位体比は、生態系における生物の栄養段階を表し、高い種ほど食物連鎖の上位に位置する。また第一次生産者(植物ないし植物プランクトン)の炭素安定同位体比は固有の生態系を表すので、それをみれば生態系の特徴が分かる。

サケ類の炭素と窒素の安定同位体比をみると、栄養段階を表す窒素安定同位体比はマスノスケが最も高く、スチールヘッド・トラウト、ギンザケがそれに続き、その下にベニザケ、カラフトマスおよびシロザケが位置する(図8)。すなわち、栄養段階はネクトン食の方がプランクトン食より高いといえる。興味深いことに、北太平洋に

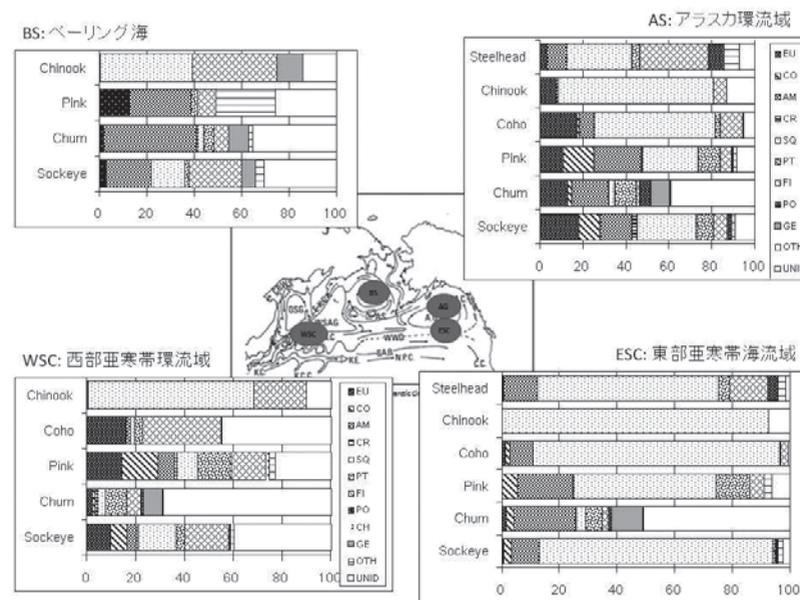


図6. 北太平洋の各海域におけるサケ類の胃内容物。  
Chinook: マスノスケ, Steelhead: スチールヘッド・トラウト, Coho: ギンザケ, Pink: カラフトマス, Chum: シロザケ, Sockeye: ベニザケ, EU: オキアミ類, CO: コペポダ類, AM: 端脚類, CR: 甲殻類幼生, SQ: イカ類, PT: 翼足類, CH: ヤムシ類, GE: クラゲ類, OTH: その他, UNID: 消化物。

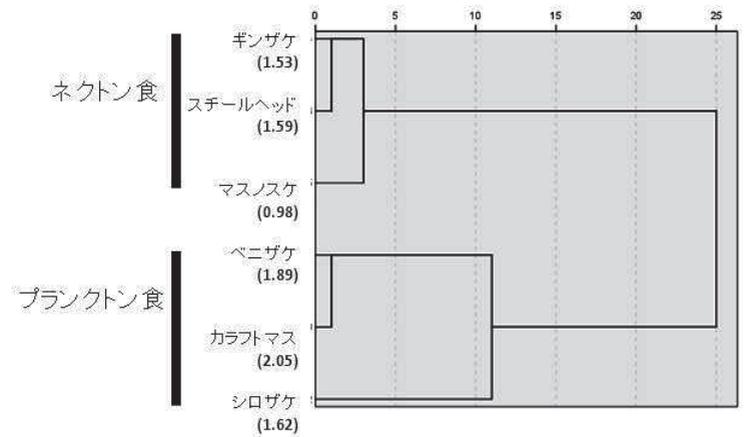


図7. クラスタ分析結果による北太平洋におけるサケ類の摂餌パターン。

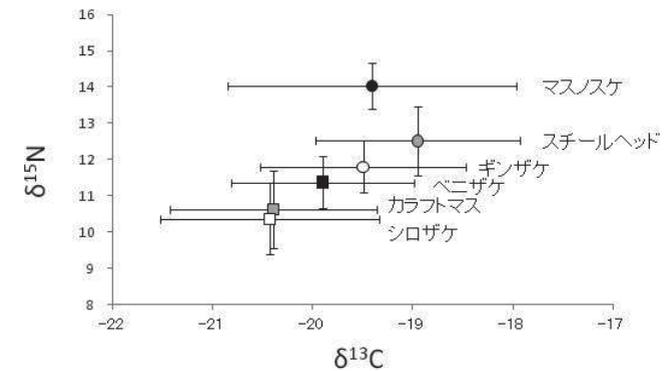


図8. アラスカ湾におけるサケ類の炭素 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) と窒素 ( $\delta^{15}\text{N}$ ) の安定同位体比。

おけるサケ類のバイオマスはプランクトン食が九〇%以上を占める。グルメな食生活をしているようにみえるネクトン食のバイオマスは一〇%に満たない。サケ類は素食なほどバイオマスが多く広く海洋に分布しているといえる。

## 五. 温暖化とサケ類のバイオマス動態

最近の温暖化のメカニズムと要因については、小氷河期からのリバウンド説と人間活動に起因するCO<sub>2</sub>増加によるグリーンハウス効果説（IPCC第四次評価報告書）に二分される。ここではそのメカニズムについては述べないが、温暖化が確実に進行しているのは事実である。海洋の海面水温では、一九〇〇年から二〇一一年までに日本海で一・二〜一・七℃/一〇〇年、太平洋で〇・六〜一・三℃/一〇〇年上昇している。日本海の表層水温の時系列変化を季節毎に一九八〇年以降でみてみると、実は温暖化の影響は秋季に最も顕著であり（昇温速度〇・〇六六℃/年、 $r^2=0.551^{**}$ ）、春季はあまりみられない（同〇・〇二九℃/年、 $r^2=0.181^*$ ）。

良しにつけ悪しきにつけ、温暖化がサケ類にも影響を及ぼしている。一九九〇年代に大量に回帰した北海道のシロザケは、そのプラスの影響を受けていた可能性が高い。サケ類は降海直後と海洋での最初の越冬時に著しく減耗すると考えられている。孵化放流されている日本系シロザケの場合、降海直後の減耗はある程度孵化場でカバーさ

良しにつけ悪しきにつけ、温暖化がサケ類にも影響を及ぼしている

オホーツク海で過ごす秋季までの成長量が日本系シロザケのその後の生残に著しい影響を及ぼすことになる。

れており降海直後の減耗は野生魚に比べるとかなり軽減されていると考えられる。日本系シロザケは数ヶ月の沿岸生活の後、夏季と秋季をオホーツク海で過ごし成長する。そして北西亜寒帯環流域で最初の越冬をむかえる。したがって、オホーツク海で過ごす秋季までの成長量が日本系シロザケのその後の生残に著しい影響を及ぼすことになる。

私たちは一九四〇年代から二〇〇〇年代はじめまでに回帰した石狩川系シロザケ親魚の鱗を分析し、一年目の成長量をバックカリキュレーション法により推定した(図9)。その結果、北海道系シロザケは一九九〇年代から二〇〇〇年をはじめにかけ一年目の成長が著しくよい。またその成長量と生残率との間には顕著な相関が観察された。このことは日本沿岸域とオホーツク海での成長が良ければ良いほど生残率が高いことを示している。一方、一年目の成長量はオホーツク海の夏季と秋季のSSTと正の相関を、冬季の海氷面積と負の相関を示す。なぜ北海道系シロザケは一九九〇年代～二〇〇〇年代はじめにオホーツク海で成長が良かったのか?このメカニズムを様々な気候変動指数を用いてパス・モデルにより調べた。パス・モデルとは、仮定された因果体系の中である変数が他の変数に影響を及ぼす因果的な効果を実際のデータに基づいて推定する方法である。その結果、地球表面の気温偏差(SAT)が直接オホーツク海の夏・秋季のSSTに作用して高め、それが北海道系シロザケの生残率を高め、個体群サイズを増大させていたことが分かった(図10)。言い換えれば、最近の温暖

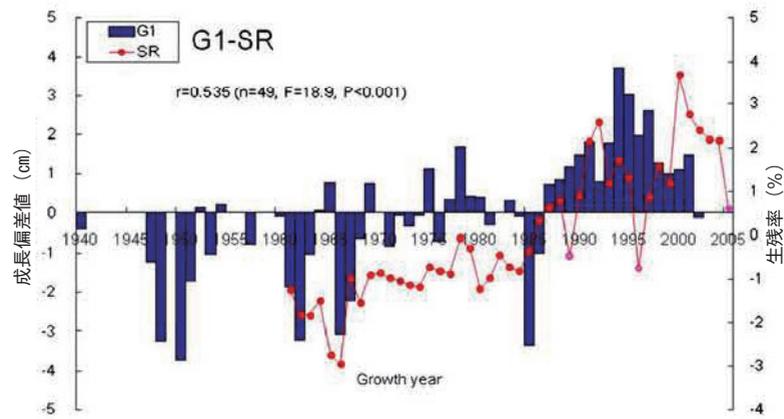


図9. 北海道系シロザケの1年目の成長と生残率の時系列変化。1年目の成長は回帰親魚の体サイズと鱗分析から推定した。成長と生残率との間には顕著な正の相関が観察され、生残率は1年目の成長で85%の確率で予測可能である。

IPCCの第4次評価報告書の  
SRES-A1Bシナリオに基づき、  
将来の北太平洋におけるシロザ  
ケの海洋分布を予測

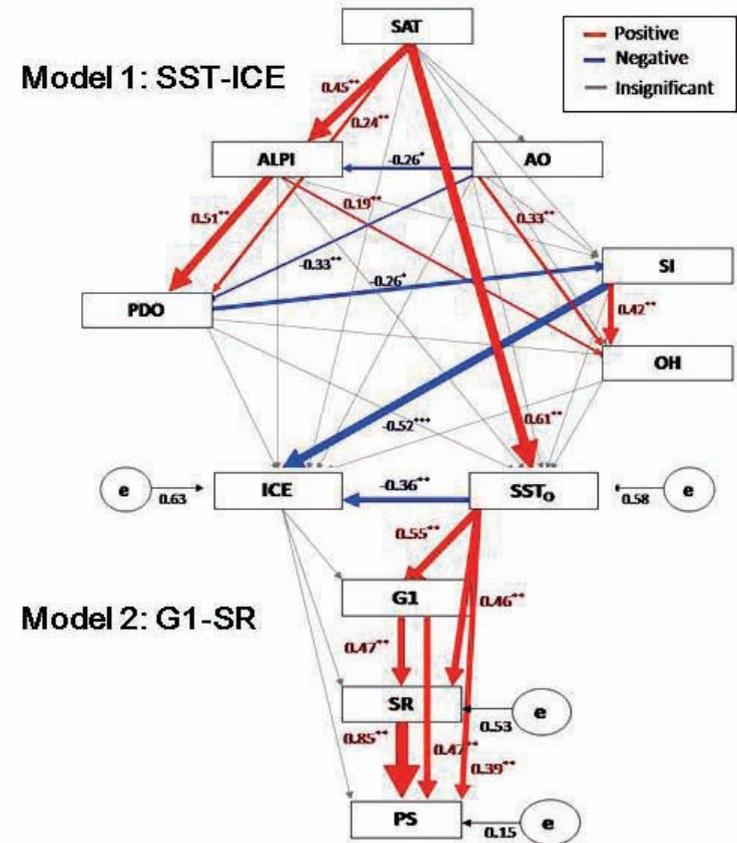


図 10. 気候変動がオホーツク海の海洋環境、北海道シロザケの成長、生残率およびバイオマスに及ぼす影響に関するパス・モデル結果。

SAT: 北半球の気温偏差値, ALPI: アリューシャン低気圧指数, PDO: 太平洋十年規模振動, ICE: オホーツク海の海氷面積, AO: 北極振動, SI: シベリア高気圧指数, OH: オホーツク海高気圧, SST<sub>0</sub>: オホーツク海における夏・秋季の平均表層水温, G1: 北海道シロザケの1年目の成長量, SR: 北海道シロザケの生残率, PS: 北海道シロザケのバイオマス(個体群サイズ)。

化が北海道系シロザケにプラスの影響を及ぼしてことになる。なお、このパス・モデルの結果、SATは直接冬季のアリューシャン低気圧(ALPI)にも影響し、それがPDOに作用していることも分かった。

さて、それでは温暖化は良いことづくめか? 日本海を北上する対馬暖流の勢力は一九九〇年代以降強まり、九月に平均二〇℃等温線が宗谷岬を越える年が年々増加してきた。その結果、北海道の日本海側に九月までに回帰するシロザケ早期群の来遊数は対馬暖流の強い年ほど少なくなる傾向を示すようになってきた(図11)。シロザケ親魚は産卵回遊といえども、さすがに二〇℃以上の高水温海域は避けるようである。これは温暖化の負の影響をみなすことができるかも知れない。それではわが国のシロザケは将来どうなるのであろうか。

IPCCの第4次評価報告書のSRES-A1Bシナリオに基づき、将来の北太平洋におけるシロザケの海洋分布を予測してみた(図12)。その結果、シロザケは温暖化の促進により(1)オホーツク海やアラスカ湾はもとより、ベーリング海でも分布域が狭まり、環境収容力は減少するであろう。その結果、密度依存効果が促進されるかも知れない。一方、(2)分布域はチャクチ海など北極海へ拡大して行く可能性が高い。(3)越冬海域はこれまでのアラスカ湾から西部亜寒帯環流域へ変わるかも知れない。わが国のような南の分布域では、(4)早期に回帰するシロザケは産卵回遊ルートを暖水に遮られる心配がある。(5)その幼魚は春季の沿岸滞在期間が短くなり、十分

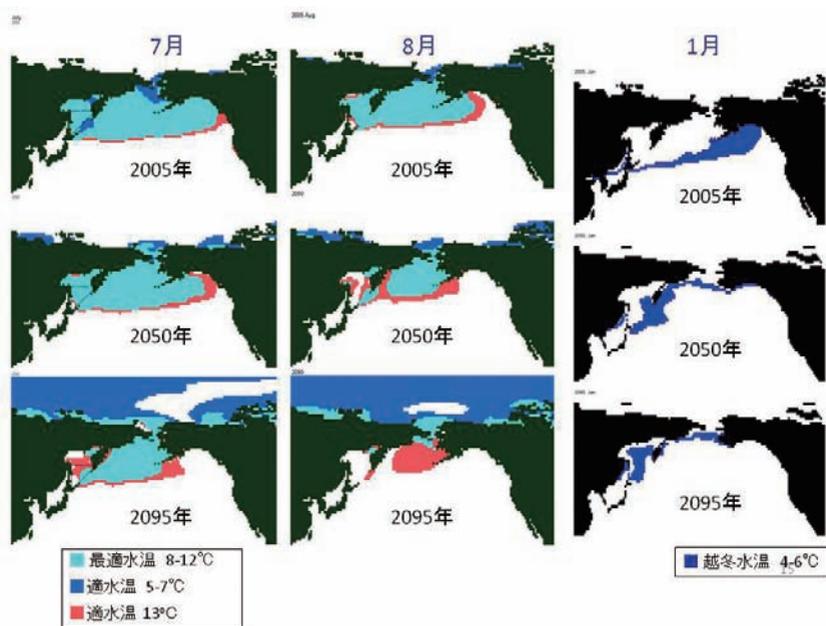


図 12. 温暖化によるシロザケの海洋分布の予測図. 予測は IPCC 第四次報告書の SRES-A1B シナリオに基づく.

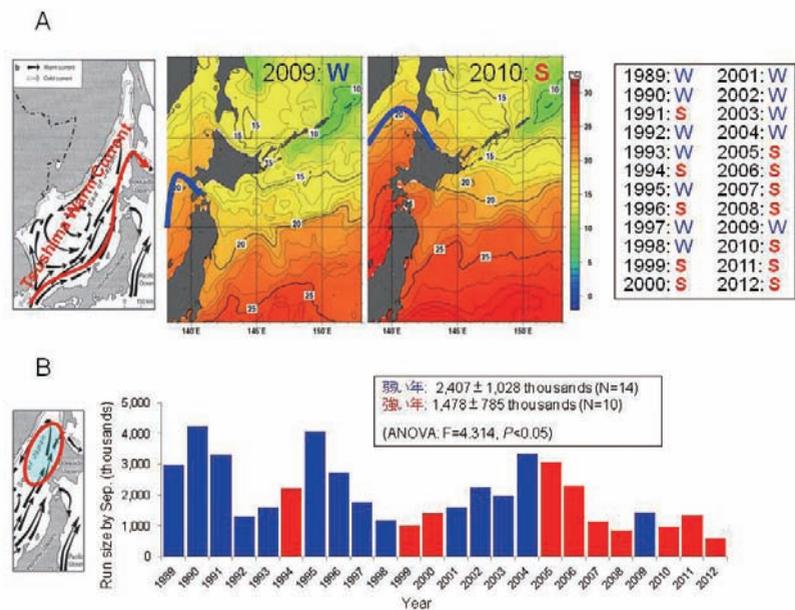


図 11. 温暖化がシロザケ回帰親魚に及ぼす影響.

A: 対馬暖流と9月の日本海周辺における表層水温分布図 (気象庁より). 対馬暖流が弱い年 (W) と強い年 (S) の経年変化 (対馬暖流が強い年は、20°Cの等温線が宗谷岬を越える).

B: 北海道日本海系シロザケの早期回帰量の経年変化. 対馬暖流が強い年の回帰量 (1,478 ± 785 千個体) は明らかに弱い年 (2,407 ± 1,028 千個体) より少ない。(早期回帰量: 9月までの沿岸漁獲数と河川捕獲数の合計)

な成長が得られずに早い発育段階で沖合へ移動しなければならず、生残率が低下するであろう。また(6)オホーツク海への回遊ルートを失う恐れがあり、千島列島沿いに新たな回遊ルートをみつけることができるかが今後の生き残りに大きく影響して、ることなどが分かった。現在より気温が一〜二℃ほど高かった縄文海進の時代にもシロザケが分布したので心配に当たらないとの意見もある。しかし、時間を考えると、縄文時代は三、〇〇〇〜四、〇〇〇年かけて気温が二℃変化したのに対し、最近の温暖化ではわずか一〇〇年で二℃上昇し、年間の昇温速度は四〇倍に達する。シロザケには環境への適応能力にそれだけのスピード力があるのだろうか？興味につきない。

## 六．サケ類と生態系サービス

生態系は不確実性の高いシステムであり、その構造は非生物環境と長い時間をかけて進化してきた生物の集合体との相互作用であり、その機能は生物多様性(種多様性と遺伝的多様性)により維持されてきた。生物多様性は食う―食われる関係、共生・寄生関係、餌や生息空間などの資源をめぐる競争などの生物間相互作用により作り出されてきた。その生物間相互作用ネットワークの構成要素が脱落すると、生物多様性の低下が起こる。生態系の機能や、生態系を構成する生物から人類が得るベネフィットを生態系サービスという。例えば、北太平洋生態系のキーストン種であるサケ類は

生物間相互作用ネットワークの構成要素が脱落すると、生物多様性の低下が起こる

母川へ産卵遡上することにより、陸圏生態系において海由来物質(MDN)の運搬(基盤サービス)および生物多様性の維持(調整サービス)に、また人類の食料(供給サービス)や環境・情操教育や安らぎ(文化的サービス)に生態系サービスとして貢献している。そのうち供給サービスと文化的サービスは私たちは直接享受しているので分かりやすい。しかし、基盤サービスと調整サービスは、私たちが生活している生態系へのいわば底支えとして機能しているために、なかなかそのありがたさに気がつかないでいる。

### サケ類による陸域への物質輸送

サケ類による海から陸への物質輸送の研究に最初に取り組んだジュダイらは、アラスカのコーディアック島カラック湖に遡上するベニザケが湖沼生産力の制限因子であるリンを五トン供給することを明らかにしている。また、寿司ネタで有名なドナルドソン・ニジマスをつくったワシントン大学のドナルドソンは、世界最大のベニザケ生産湖であるイリアムナ湖におけるリン流出入のメカニズム研究に取り組み、湖へのリン供給量の実に六〇%がベニザケ死骸によりもたらされることを明らかにしている。

数多くの動物が、河川を遡上するサケ類を餌資源として利用する。知床半島に生息するヒグマが越冬用の餌としてカラフトマスを利用する。アラスカ沿岸でサケ類を食べるハイイログマは、デナリー国立公園などの内陸で主に植物や昆虫を食べている個

イリアムナ湖へのリン供給量の六〇%がベニザケ死骸によりもたらされる

炭素と窒素の安定同位体比分析は、生態系の物質循環や食物網を明らかにする手法としてきわめて有効な手段

体より体サイズが大きく、産子数が多く、生息密度も高いといわれている。

炭素と窒素の安定同位体比分析は、生態系の物質循環や食物網を明らかにする手法としてきわめて有効な手段である。動物の炭素と窒素の安定同位体比は基本的に生態系に組み込まれている食物連鎖の元である一次生産者（植物）の同位体組成を反映する。一次生産者の安定同位体比は陸域より海洋生態系の方が高いことから、濃縮係数から海の物質がどれだけ陸の生物に取り込まれたかを推定することができる。南東アラスカのバラノフ島サツシン川では滝の下までカラフトマスが遡上するが、滝の下の魚類や河畔林の窒素安定同位体比は滝上のそれらより著しく高い。サケ類を食べている動物で栄養段階が高くなるのはクマ類に限らず、タイリクオオカミでも、またヒトにおいても観察されている。カナダのフレーザー川沿川に住む先住民は食生活を海洋タンパク質（サケ類）に依存する部族ほど高い炭素安定同位体比を示す。河畔林生態系では、サケ類の死骸が植物の窒素プールに果たす役割は大きい。知床半島のヤナギ類やアラスカのカナダトウヒの葉の窒素安定同位体比は河川から離れるにつれ減少するが、これは洪水やクマなどのベクターにより運搬されるサケ類死骸の量と関係している。

わが国の河川は自然生態系といえるか？—知床世界自然遺産地域ルシヤ川の例

このように遡河性回遊魚であるサケ類は、環北太平洋の陸域生態系の生物多様性と物質輸送としての役割を果たす。わが国ではこのような系をもった河川は、それほど多くはない。宮腰靖之さんによると、北海道ではシロザケが遡上する約二〇〇河川のうち、再生産が人工孵化放流でなく自然産卵により行われている河川は五〇〜六〇に及ぶという。しかし、サケ類による陸域への物質輸送が観察されている河川はきわめて少ない。越野洋介君は、知床半島の世界自然遺産地域内四小河川に産卵遡上するカラフトマスとシロザケが海の物質を陸にどのくらい運ぶかを研究した。ルシヤ川では数多くのカラフトマスが遡上し、ヒグマなどに越冬用の貴重な餌供給するばかりでなく、海起源物質を陸域生態系へ運搬している。しかし、運搬される海起源物質の濃縮率は北米大陸の同程度の河川に比べてきわめて低いことがわかった（図13）。

この河川には三基の低ダムがあり、カラフトマスの産卵遡上に影響を及ぼしている。ダムが河道を固定し、河川を直線化し、川幅を狭め、流速はきわめて速い。また、本来、河川の氾濫原では河川水があちこち伏流浸透し、サケ類の好適な産卵場を形成するが、ルシヤ川ではダムが氾濫原を遮断し、河川水の伏流浸透を妨げている。そのため、ルシヤ川におけるカラフトマスの産卵環境収容力は〇・〇九床/mと低い。また、ルシヤ川におけるカラフトマス産卵床直上の流速（平均0.16ms<sup>-1</sup>）はアラスカのそれ（0.05〜0.07ms<sup>-1</sup>）に比べて著しく速い。そのため、ちよつとした増水でも彼らの産卵床は流出してしまう。このように、わが国では世界自然遺産地域という自然が比較的よく保護されているはずの知床半島の河川においてさえ、野生サケ類による物質循

漁業はすでに持続可能な資源管理とは言えず、ウナギ類やマグロ類などの一部の海洋生物は乱獲により種の存続が危ぶまれている

海洋生物は、本来、漁業にとって持続可能な資源のほうである。FAOの漁業統計によると、二〇一一年に世界で生産された水産物一五四万トンのうち、食料として利用されたのは一三二万トン（八五％）である。そのうち、養殖されたものは六三・六万トン（四二％）で、食料として利用されたものの約半分を占める。自然再生産している海洋生物の漁獲量は二〇〇〇年以降減少傾向を示し、九〇万トンに過ぎない。すなわち、漁業はすでに持続可能な資源管理とは言えず、ウナギ類 *Anguilla* sp. やマグロ類 *Thunnus* sp. などの一部の海洋生物は乱獲により種の存続が危ぶまれている。一方、世界の養殖生産量は指数曲線的に増加しているが、いろいろな問題を内包している。例えば、東南アジアにおけるエビ養殖はマングローブ林などの沿岸生態系を破壊したり、使用された大量の有機物や抗生物質による水質汚染が深刻化している。また養殖タイセイヨウサケ *Salmo salar* には、野生魚に比べダイオキシンやPCBなどが高濃度で蓄積されている。

## 七. 今後の課題

環は、河川生態系の構造と機能が不完全なために、十分ではない。



図 13. 知床半島ルシャ川におけるカラフトマスによる海起源物質の陸域生態系への輸送経路。

私たちは食料としてサケをほんとうに大事にしているだろうか？

### シロザケの漁獲量と水揚げ金額

さて、私たち人類が食料としてサケ類の生態系サービスの恩恵を受けていることは先に述べた。果たして、私たちは食料としてサケをほんとうに大事にしているだろうか？北海道シロザケの漁獲量と水揚げ金額の経年変化をみると(図14 A)、一九九〇年以降の両者はパラレルに連動していない。両者の関係では、漁獲量約一二万トンで最大の水揚げ金額を示す(図14 B)。このことはシロザケの需要と供給のバランスは一二万トンが最大であることを意味する。それを裏付けるように、北海道漁連の情報によるとこれまでの国内におけるシロザケの最大消費量は約一三万トンである。漁獲量二〇万トンは明らかに過度な国内供給量となっている。これまでガバナンスとしてシロザケ資源管理に携わる行政機関は、北太平洋の環境収容力を無視して、最大漁獲量二〇万トン以上を漁業資源目標とし、その人工孵化放流計画もその資源水準に焦点を絞っている。その根拠は何なのか？このように見ると、シロザケ漁業とその人工孵化放流事業は果たして、自然科学はもとより経済学的にも食料産業を反映しているといえるのだろうか？

### 生物多様性と漁業

知床半島は海洋生態系と陸上生態系の相互作用が顕著な「生態系」と絶滅危惧種や固有種が生息する「生物多様性」の高い地域ということで、二〇〇五年に世界自

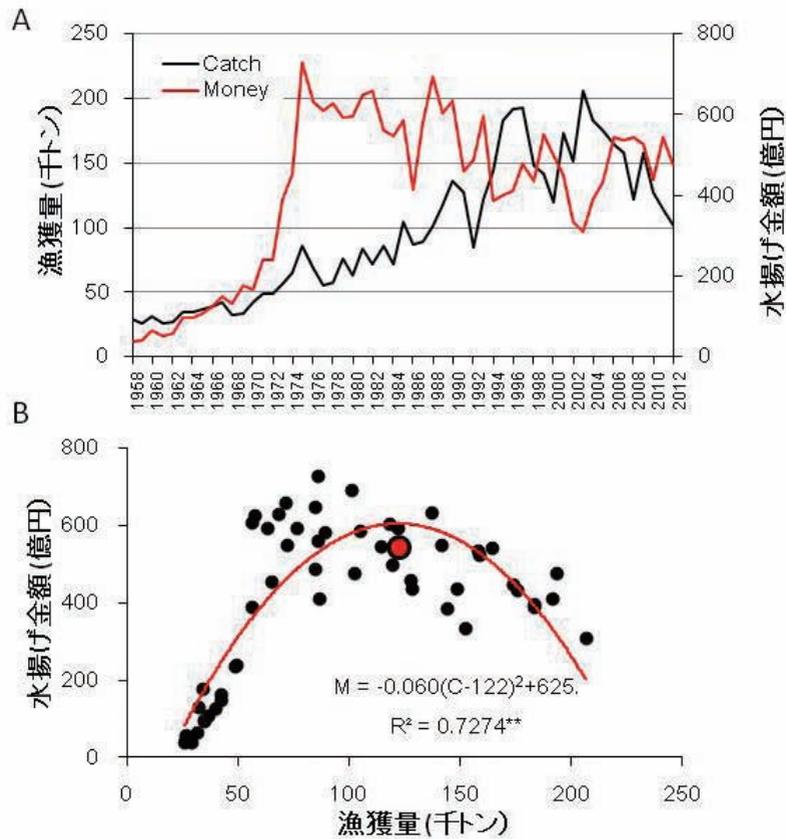


図 14. 1958～2012 年における北海道シロザケの漁業動態。A: 漁獲量と水揚げ金額の経年変化。B: 漁獲量と水揚げ金額の関係。赤丸：2013 年 11 月 10 日現在。

世界自然遺産を維持するため  
に、知床科学委員会の海域ワー  
キンググループでは海洋環境・  
生態系の保全と持続的漁業の両  
立からなる多利用型海域管理計  
画を策定

然遺産に登録された。この世界自然遺  
産を維持するために、知床科学委員会  
の海域ワーキンググループでは海洋環  
境・生態系の保全と持続的漁業の両立  
からなる多利用型海域管理計画を策定  
した。最近二〇年間の知床半島におけ  
る漁業をみてみると、漁獲量と生物多  
様性は減少傾向にあるのに対して、生  
態系の平均栄養段階は増加しているこ  
とが分かる(図15)。この二〇年間で、  
スケトウダラ、マダラ、キチジ、カレ  
イ類、カニ類や貝類などが著しく減少  
あるいは漁獲されなくなり、反対にシ  
ロザケやソイ類などの栄養段階が高い  
種(TL=3.0~3.5)の漁獲が増えた  
ために漁獲物の平均栄養段階は上昇し  
た。このことは、この海域の生態系は  
むしろ単純化し、栄養段階の高い種が

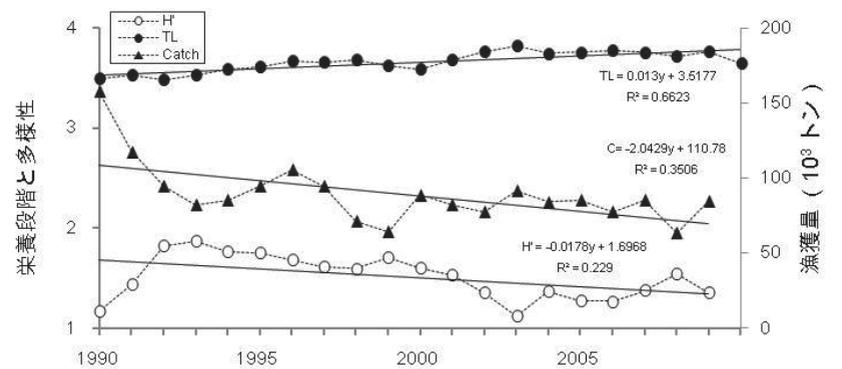


図15. 知床半島における漁獲生物の漁獲量(Catch)、生物多様性(H')および平均栄養段階(TL)の経年変化。H': シャノン・ウィナー指数, TL:  $(\sum(TL_i \times W_i)) / \sum W_i$ , 但し、種*i*における栄養段階 $TL_i$ , 漁獲量 $W_i$ 。

知床半島の河川ではシロザケの  
「野生魚」が産卵遡上し自然再  
生産しているが、その数はきわ  
めて少ない。

増えたことを意味する。

### 野生魚と孵化場魚

さて、知床半島で最近漁獲される魚類の六〇%以上はシロザケであるが、そのほと  
んどは人工孵化放流された「孵化場魚」である。知床半島の河川ではシロザケの「野  
生魚」が産卵遡上し自然再生産しているが、その数はきわめて少ない。先にも示した  
ように、わが国では明治時代に人工孵化放流技術を導入する過程でシロザケ野生魚を  
減らした苦い経験があるが、北海道全体でもシロザケ野生魚が自然再生産している河  
川は五〇〇六〇河川と多くなく、バイオマスも小さい。それでは北太平洋全体で野生  
魚と孵化場魚の動態はどうなっているのだろうか? シロザケのバイオマス増大期は  
一九三〇年代と一九九〇年代の二期あるが、その内容は著しく異なる。一九三〇年代  
はほとんどが野生魚であったのに対して、一九九〇年代になると野生魚が著しく減少  
し、孵化場魚が全体の過半数にまで増加している。孵化場魚の多くはわが国起源のも  
の(五〇六千万尾)が多いが、アラスカから放流された孵化場魚(約一千万尾)も多く、  
南東アラスカの来遊数の七〇〇九〇%を孵化場魚が占める。最近では、ロシアからの  
孵化場魚も増えているとの情報もある。このように、シロザケは野生魚が減少傾向を  
続けているのに対し、孵化場魚は著しく増加してすでにバイオマスの五〇%を超えた。

北海道シロザケの野生魚と孵化場魚の遺伝学的課題

サケ類の孵化場魚が野生魚に及ぼす影響は、これまでも密度依存効果、集団有効サイズ、遺伝的多様性の低下、近交弱勢、集団の固有性の喪失、家畜化に伴う適応力の低下などのほか、行動学および生理学に関する研究が数多く行われてきた。

北海道南部の噴火湾に注ぐ遊樂部川<sup>ウツラカハ</sup>は、河川延長が約二九kmにも関わらず、その流域面積は三五〇km<sup>2</sup>と広い。ここでは、明治の二期、「種川制」により「種育場」としてシロザケの自然産卵保護が盛んに行われてきた。遊樂部川は、それに加え、荒れ川でシロザケの捕獲がむずかしいこともあり、比較的最近まで自然再生産する野生魚が多かった。横谷亮太君は、遊樂部川へ回帰するシロザケの遺伝学的集団構造を明らかにするために、ミトコンドリアDNA (mtDNA) 調節領域の5'末端前半部分四八一塩基を分析した。その結果、遊樂部川で産卵するシロザケのうち一〇月集団と一二月集団にはハプロタイプ(遺伝子座位にある対立遺伝子)の出現頻度に差が見られず、一二月集団のみが他集団と異なり、出現したハプロタイプの数も少ないことが分かった。さらに遊樂部川の一〇月・一二月集団は、北海道の他河川、千歳川、十勝川および西別川のシロザケ集団と遺伝的分化が認められないことも分かった(図16)。このことは、遊樂部川シロザケでは、一〇月と一二月の集団には人工孵化放流事業の卵移植により遺伝的攪乱が生じており、一二月産卵群のみが遊樂部川固有の集団を維持していることを示唆している。実はこのような現象は、北日本全体のシロザケ個

遊樂部川シロザケでは、一〇月と一二月の集団には人工孵化放流事業の卵移植により遺伝的攪乱が生じており、一二月産卵群のみが遊樂部川固有の集団を維持している

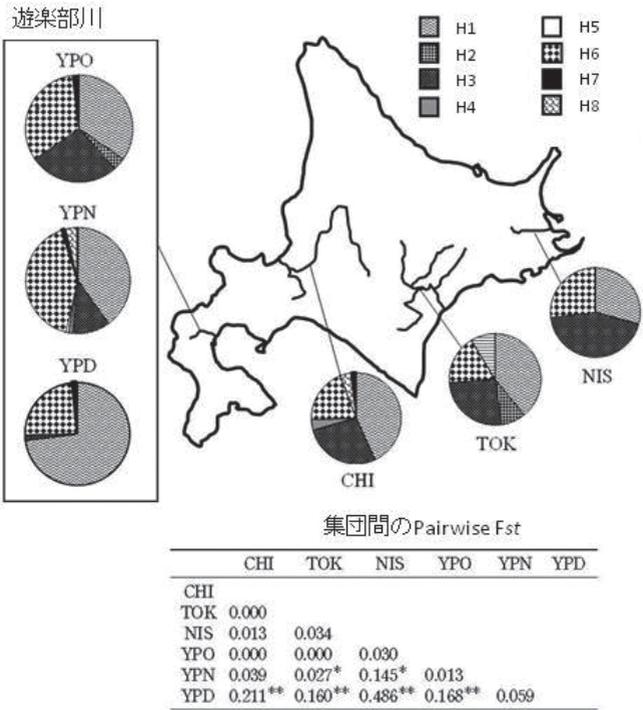


図 16. 遊樂部川シロザケ集団のミトコンドリア DNA 調節領域における塩基配列変異。H1～H8: ハプロタイプ1～8。遊樂部川シロザケ集団: 10月産卵群(YPO), 11月産卵群(YPN), 12月産卵群(YPD), 千歳川集団(CHI), 十勝川集団(TOK), 西別川集団(NIS)。

千歳川では、シロザケ遡上数が少なかった一九六〇年後半から一九七〇年前半にかけて総放流数の六〇%以上が全道各地からの移植卵で占められており、地場卵がほとんど放流されていないことが分かった。

群において起きていることが最近分かってきた。

石川県の手取川には、早く帰ってくるシロザケを増やすために一九七九～一九九五年に北海道の主に石狩川より大量の発眼卵が移植された。永井愛梨さんらは同様の方法で手取川のシロザケの mtDNA 分析を行い、奇妙なことに気がついた。手取川へ移植された発眼卵はほとんど千歳孵化場からのものであるにも関わらず、手取川シロザケは、千歳川とは地理的に大きく隔離された他河川（十勝川や西別川）と遺伝的分化が認められなかった。このことは何を意味するのか？そこで、卵の移植元である千歳川におけるシロザケ孵化場魚の放流歴を調べてみた(図17)。その結果、千歳川では、シロザケ遡上数が少なかった一九六〇年後半から一九七〇年前半にかけて総放流数の六〇%以上が全道各地からの移植卵で占められており、地場卵がほとんど放流されていないことが分かった。すなわち、それ以後、千歳川のシロザケ孵化場魚は地場集団よりも移植された集団により再生産されており、その発眼卵が全国の河川に移植放流されたことを意味する。その結果が手取川シロザケ集団の遺伝子構造に表れたのである。

日本のシロザケ孵化場魚はロシアや北米の野生魚よりハプロタイプ数が多く、ハプロタイプ多様度は高いので、メタ個体群でみると日本系シロザケの遺伝的多様性は高いことになる。しかし、日本に回帰する前期のシロザケには、河川内の個体群は多く

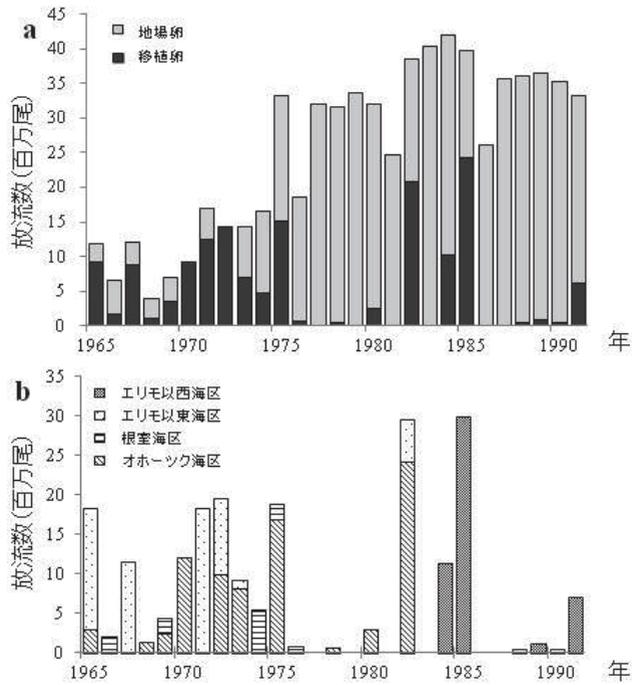


図 17. 千歳川における孵化場魚の放流経過。  
(a) 地場卵と移植卵, (b) 移植卵の内訳。

ほとんど発眼卵移植の対象外で、孵化放流事業にも利用されてこなかった北海道シロザケの後期群は、各個体群が固有に自然再生産されてきた可能性が高く、各個体群の固有性を有する貴重な遺伝資源とみなすことができる。

のハプロタイプを持つが、河川間の個体群において遺伝的差異はほとんど見られない。一方、これまであまり孵化放流事業に利用されてこなかった一二月以降に産卵帰する後期群は、ロシアや北米の野生魚と同じように保有するハプロタイプ数は少なく、ハプロタイプ多様度も低い(表1)。すなわち、これらのことは、北海道におけるシロザケ前期群の各個体群は遺伝的多様性が高いというより、発眼卵の移植により遺伝的攪乱を受けていた可能性が大きいとみなされる。それに対して、ほとんど発眼卵移植の対象外で、孵化放流事業にも利用されてこなかった北海道シロザケの後期群は、各個体群が固有に自然再生産されてきた可能性が高い。すなわち、この後期群は各個体群の固有性を有する貴重な遺伝資源とみなすことができる。

北太平洋は新たな気候レジームに入り、それは必ずしもサケ類にとって有利とは限らないこと、温暖化がこれからサケ類の回遊と生産に益々影響を強めることが予想されることはすでに述べた。孵化場魚は温室育ちで人為的選択を受けていることもあり、野生魚に比べ環境変化に対する適応力が劣るといわれている。数こそ少ないがわが国に残る野生魚は適応度が高く、環境の変化に強い遺伝資源として貴重である。今後、このような野生魚をどのように保全しあるいは回復していくかが、わが国のシロザケにとってきわめて重要であると考ええる。

表1. シロザケの遺伝的多様度. ミトコンドリア DNA 調節領域におけるハプロタイプ多様度 ( $h$ ) と塩基多様度 ( $\pi$ ).

個体群	$h$	$\pi$	備考
日本	0.63±0.01	0.0028	16 河川, Abe et al. (2004)
ロシア	0.43±0.03	0.0025	10 河川, Abe et al. (2004)
北米	0.34±0.02	0.0008	21 河川, Abe et al. (2004)
千歳川	0.71±0.04	0.0038	Sato et al. (2001)
十勝川	0.75±0.04	0.0039	Sato et al. (2001)
西別川	0.67±0.03	0.0040	Sato et al. (2001)
遊楽部川 10 月	0.71±0.02	0.0024	Yokotani et al. (2009)
遊楽部川 11 月	0.67±0.04	0.0020	Yokotani et al. (2009)
遊楽部川 12 月	0.43±0.06	0.0010	Yokotani et al. (2009)

## バックキャストによる持続可能な資源管理と河川生態系の復元

国家の持続可能性のバロメーターであるIUCNの健全性指数(WI)で、スウェーデンは世界一位を獲得している。スウェーデンは福祉国家として知られていたが、科学者の合意と政治家の決断によって、生態学的に持続可能な社会への道として「緑の福祉国家」をめざしはじめた。その結果がWIに反映したといわれている。その背景には、スウェーデンは「現在から将来を見る」または「長期ビジョンが不明確なまま現状を追認する」フォアキャストではなく、「将来から現在を見る」あるいは「長期ビジョン年次から方向を検証しながら社会を変えていく」バックキャストを選択したことによると小澤徳太郎さんは述べている。なお、フォアキャストの手法が「地球の資源は無限」という前提に立つて現状を延長・拡大するのに対し、バックキャストの手法は「地球の資源は有限」という前提でいつまでに何をするかという方針と政策を決め、国をあげて社会を変えていく方法であるといわれる。そのためには、現状を徹底的に分析し、それに基づき将来ビジョンと目標を定め、常に現状をモニターする必要がある。

先に知床世界自然遺産地域の例で見たように、わが国の河川は自然生態系からきわめて遠い人工的な生態系になってしまった。生態系の生物多様性を保全することはきわめて重要な基本的課題である。人工的に孵化放流するシロザケが増える一方で、河川生態系の環境悪化で自然産卵する野生魚は著しく減少した。しかしそれでも個体数

バックキャストの手法は「地球の資源は有限」という前提でいつまでに何をするかという方針と政策を決め、国をあげて社会を変えていく方法

は少ないものの、現在、北海道では約六〇河川で野生魚が自然再生産している。これらの野生魚は生活史を通して孵化場魚より生態的ニッチと栄養段階が高く、遺伝的多様性が高く、環境変化に対する適応力が高いことが分かっている。今後の温暖化の脅威に対処するためにも、自然選択に強く、環境変動への適応力の高い野性魚のリハビリテーションとレジリエンスをはかるべきである。そのためには、魚類が生息できる河川生態系の復元が基本となることは言うまでもない。サケ類をはじめ生物とそれらを構成する水圏生態系を持続的に保全するためには予防原則と順応的管理からなる生態系アプローチ型リスク管理の導入がきわめて重要である。すなわち、長期ビジョンが不明確なまま現状を追認し、将来を予測するフォアキャストの手法でなく、現状を徹底的に分析し、それに基づき将来ビジョンと目標を定め、常に現状をモニターしつつ目標に向かうバックキャストの手法による生態系アプローチ型リスク管理が大切である(図18)。

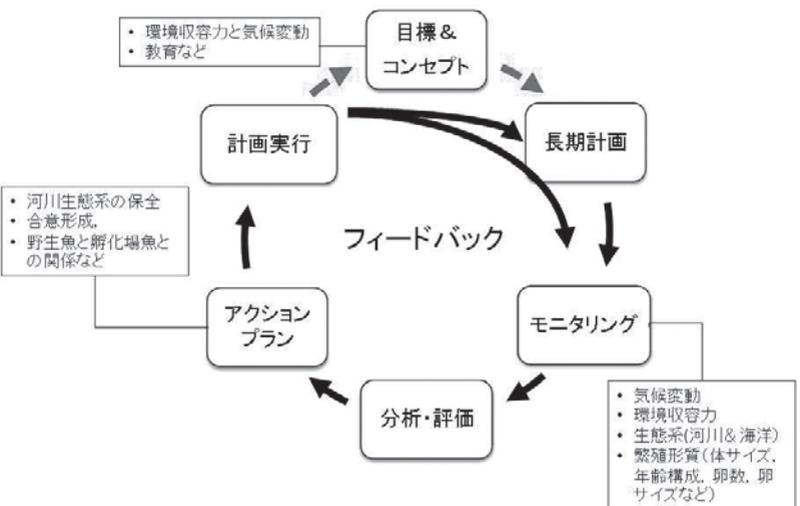


図 18. サケ属魚類の生態系アプローチ型リスク管理。

### 参考文献

- Abdul-Aziz OI, Mantua NJ, and Myers KW. 2011. Potential climate change impacts on thermal habitats of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.) in the North Pacific Ocean and adjacent seas. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 68: 1660-1680.
- 赤祖父俊一・二〇〇三『正しく知る地球温暖化：誤った地球温暖化に惑わされないうちに』誠文堂新光社・東京
- Drinkwater KF, Beauprand G, Kaeriyama M, Kim S, Ottersen G, Perry RI, Pörtner HO, Polovina JJ, Takasuka A. 2010. On the processes linking climate to ecosystem changes. *J. Mar. Sys.* 79: 374-388.
- Gross MR. 1987. Evolution of diadromy in fishes. *American Fisheries Society Symposium* 1: 14-25.
- Hites RA, Foran J, Carpenter DO, Hamilton MC, Knuth BA, and Scwager SJ. 2004. Global assessment of organic contaminants in farmed salmon. *Science* 303: 226-229.
- Hunt GL, Stabeno P, Walter G, Sinclair E, Brodeur RD, Napp JM, Bond NA. 2002. Climate change and control of the southeastern Bering Sea pelagic ecosystem. *Deep-Sea Res II* 49:5821-5853.
- Hunt, G.L., McKinnell, S., 2006. Interplay between top-down, bottom-up, and wasp-

- waist control in marine ecosystems. *Progress in Oceanography* 68: 115-12.
- 帰山雅秀, 一九九四. ベニザケの生活史戦略―生活史バタンの多様性と固有性. 「川と海を回遊する淡水魚―生活史と進化」(後藤晃・塚本勝巳・前川光司編) pp. 101-113. 東海大学出版会, 東京.
- 帰山雅秀, 二〇〇一. 避けて通れないサケのエピソード. 魚のエピソード (尼岡邦夫編), p. 134-150. 東海大学出版会.
- 帰山雅秀, 二〇〇二. 最新のサケ学. iv+129. 成山堂, 東京.
- 帰山雅秀, 二〇〇四. サケの個体群生態学. pp. 137-163. サケ・マスの生態と進化 (前川光司編), 文一総合出版, 東京.
- 帰山雅秀, 二〇〇七. サケ類の生態系ベースの持続的資源管理と長期的な気候変動. レジーム・シフト―気候変動と生物資源管理 (川崎健・花輪公雄・谷口旭・二平章編), p. 132-139. 成山堂書店, 東京.
- 帰山雅秀, 二〇〇八. サケから考える水産食料資源の展望. 北海道からみる地球温暖化 (吉田文和編), p. 11-25. 岩波書店, 東京.
- 帰山雅秀, 二〇一〇. サケによる海から河川への物質輸送. 野生動物保護の事典 (丸山直樹他編), pp. 245-250. 朝倉書店, 東京.
- Kaeriyama M and Edpalina RR. 2004. Evaluation of the biological interaction between wild and hatchery population for sustainable fisheries management of Pacific salmon. *In*: Leber KM, Kitada S, Blankenship HL, Svassand T (eds). Stock enhancement and sea ranching. 2nd ed. p. 247-259. Blackwell Publishing, Oxford.
- 帰山雅秀・南川雅男, 二〇〇八. 湖河性魚類による陸域生態系への物質輸送. 安定同位体スコープで覗く海洋生物の生態―アサリからクシラまで (富永修・高井則之編), p. 110-122. 恒星社厚生閣, 東京.
- Kaeriyama M and Qin Y. 2014. Biological interactions between wild and hatchery-produced Pacific salmon. *In*: Salmon (eds: Woo PTK and Noakes DJ) p. 223-238. Nova Science Publishers, Inc.
- Kaeriyama M, Seo H, Kudo H, and Nagata M. 2012. Perspectives on wild and hatchery salmon interactions at sea, potential climate effects on Japanese chum salmon, and the need for sustainable salmon fishery management reform in Japan. *Environ. Biol. Fish.*: 94: 165-177.
- 帰山雅秀・永田光博・中川大介 (編著). 二〇一三. サケ学大全. xi+297. 北海道大学出版会, 札幌.
- 川崎健, 二〇〇七. 総論レジーム・シフト―地球システム管理の新しい視点. 「レジーム・シフト―気候変動と生物資源管理」(川崎健ら編). 1-20. 成山堂書店, 東京.
- 小林哲夫, 二〇〇九. 日本サケ・マス増殖史. 311. 北海道大学出版会, 札幌.
- Koshino Y, Kudo H, and Kaeriyama M. 2013. Stable isotope evidence indicates the

- incorporation of marine-derived nutrients transported by spawning Pacific salmon to Japanese catchments. *Freshwater Biology* 58: 1864-1877.
- Kruse GH. 1998. Salmon run failures in 1997-1998: a link to anomalous ocean conditions? *Alaska Fishery Research Bulletin* 5: 55-63.
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78: 1069-1079.
- McDowall RM. 1998. *Diadromy in fishes*. 308. Croom Helm.
- Miyakoshi, Y., Urabe, H., Saneyoshi, H., Aoyama, T., Sakamoto, H., Ando, D., Kasugai, K., Mishima, Y., Takada, M., and Nagata, M. 2012. The occurrence and run timing of naturally spawning chum salmon populations in northern Japan. *Env. Bio. Fish.* 94: 197-206.
- Myers RA and Worm B. 2003. Rapid world wide depletion of predatory fish communities. *Nature*. 423: 280-283.
- 小澤徳太郎・二〇〇六・スウェーデンに学ぶ「持続可能な社会」. 2853. 朝日新聞社、東京.
- Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, Froese R, and Torres F Jr. 2005. Fishing down marine food webs. *Science* 279: 860-863.
- Peterson WT, and Schwing FB. 2003. A new climate regime in northeast Pacific ecosystem. *Geophys. Res. Lett.* 30: 1896, doi: 10.1029/2003GL017528.
- Primavera JH. 2005. Mangroves, fishponds, and the quest for sustainability. *Science* 310: 57-59.
- 秦玉雪・永井愛梨・工藤秀明・帰山雅秀. 二〇一三. 遊樂部川のサケ *Oncorhynchus keta* における野生魚と孵化場魚の安定同位体比について. 日本水産学会誌 79: 872-874.
- Seo H, Kudo H, and Kaeriyama M. 2011. Long-term climate-related changes in somatic growth and population dynamics of Hokkaido chum salmon. *Environ. Biol. Fish.* 90: 131-142.
- Stabeno PJ, Bond NA, Kachel NB, Salo SA, and Schumacher JD. 2001. On the temporal variability of the physical environment over the south-eastern Bering Sea. *Fisheries Oceanography* 10: 81-98.
- 浦和茂彦・二〇〇〇. 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.

## 時事余聞

◇：新渡戸稲造はアメリカで海外生活を送っていた。アメリカには日常生活の規範として聖書があり、これが有識者の行動規範であった。特に「ノブレス・オブ

リージュ」(高い身分に伴う責任と義務)は彼等の間では広く使われていた。これに刺激を受け半ば対抗する「意味合いもあって、日本には「武士道」があることを訴えた。その初版本は新渡戸記念館にあり、序文には「我が愛する叔父、太田時敏にこの小著を捧ぐ」と記されている。太田は盛岡藩家老の檀山佐渡らと戊辰戦争を戦い敗れている。

◇：日本の武士道の根源は江戸時代の儒学者山鹿素行らが説いた。武士は農、工、商が働いているのに何もせずに彼等を支配している。だから質素に生き品格を高め教養を積めという点にある。この思想が寺子屋を通じて庶民に広められた。一言でいえば「君、君たらずとも臣、臣たり」である。主君に対する絶対的忠誠が求められた。

◇：一方、同じ武士道でも佐賀藩に

「葉隠」がある。この書物は山本常朝を訪ねてきた佐賀藩士田代陣基が常朝から聞いた話をまとめたもので、「武士道とは死ぬことをみつけたら」という。しかし真の意味は「武士は死を覚悟して死んだつもりで葉の陰でひっそりと忠節をつくすべきだ」であり大分誤解されている。ただ新渡戸武士道と違う点もある。「君、君たらざれば臣、臣たらず」である。主君が能力が足らず国を治めきれない場合は、臣下がこれにとつてかわつてもいい、という意味。中国流の易姓革命の考え方が少し入っている。

◇：政界は目下、安倍首相の決断で衆院戦が展開されている。政界では選挙協力や野党再編の動きが急速に動いている。なにしろ告示から選挙まで僅かしかない。短期間に必要なだけの施策の協力や選挙準備ができるのか。背後には各党の財政基盤の強弱がうかがえる。一党を仕切るには膨大な費用がかかるに違いない。急場間に合わせられない政党や党員が予想されなくはない。「君、君たらざれば、臣、臣たらず」の場面もあり得るや。(K)

## 編集後記

北海道の野生のシロサケは明治時代、一千万尾を超えて獲れていた。しかし、資源管理を野生魚の遡上産卵保護から人工孵化放流事業に切り替えた。以来、北海道への来遊数は一九九〇年代に六千万尾まで増加したものの、現在では三、四千万尾に留まっているという。こうした変化に対し、著者はサケの生態系と気候変動との関係性を踏まえた持続可能な資源管理手法の必要性を述べています。豊富な科学データに基づく詳細な評論に心から感謝申し上げます。

### 「水産振興」 第五六三号

平成二十六年二月一日発行

(非売品)

編集兼  
発行人 井上恒夫

発行所

〒104-0055 東京都中央区豊海町五番一号  
豊海センタービル七階

一般財団法人 東京水産振興会

電話 ☎ 三五三三八一一  
FAX ☎ 三五三三八二一六

印刷所 (株)連合印刷センター

(本稿記事の無断転載を禁じます)

ご意見・ご感想をホームページよりお寄せ下さい。

URL <http://www.suisan-shinkou.or.jp/>

平成二十六年二月一日発行（毎月一回一日発行）五六三号（第四十八卷一號）