特集 変わりつつある海

気候変動とサケ属魚類バイオマス変動シナリオ

帰山 雅秀

北海道大学大学院水産科学研究院

Scenario on biomass variation of Pacific salmon concerning the climate change

MASAHIDE KAERIYAMA

Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

1. はじめに

2007年秋季、北海道の対馬暖流影響海域では10月になっても表層水温 SST が 20℃ 以上と高く、シロザケ *Oncorhynchus keta* の来遊時期が遅れ、漁模様も芳しくなかった。マスコミは、この現象を「地球温暖化の影響」と大きく報道し、にわかに温暖化が海洋生物に影響を及ぼしはじめたかの印象を人々に与えた。実は、わが国に回帰するシロザケは以前から温暖化の影響を受けていた可能性が高い。さて、気候変動に関する政府間パネル IPCC は 2007 年 2 月に第 4 次報告書を公表し、地球温暖化が人為起源の温室効果ガスの増加に起因すると断定した。ここでは、水産学会企画広報委員会からの「特集：変わりつつある海」執筆依頼に答えるために、亜寒帯海域生態系のキーストン種であるサケ属魚類 *Oncorhynchus* spp. と長期的な気候変動との関係、北海道系シロザケの長期的な成長変動を解説し、IPCC の排出シナリオ SRES による気温上昇予測モデルによる温暖化シナリオに基づく 100 年後のシロザケ分布予測結果について紹介する。

2. 北海道日本海沿岸およびオホーツク海の海洋環境の時系列変化

田中 (2002)¹⁾は、1895～2000 年の北海道日本海沿岸 9 定点における沿岸水温データを標準化した。図 1 には、2002 年までのデータを付加して標準化された水温の経年変化を示してある。標準化水温の 5 年間移動平均をみると、北海道日本海の沿岸水温は時系列に右肩上がりの傾向を示し、その上昇傾向は特に 1980 年代以降顕著である。また、標準化水温は 1912 年と 1985 年を境に、それぞれ、0.7℃ および 0.6℃ ほど段階的に上昇しており、これはレジーム・シフトを表しているのかもしれない。いずれにせよ、北海道日本海沿岸の水温は時系列的に上昇しており、1980 年代以降その傾向は顕著であるといえそうだ。

図1 北海道日本海沿岸における標準化水温の経年変化¹⁾
実線および点線は、それぞれ、5 年移動平均と水温レジームを示す。

オホーツク海における年平均 SST と海水面積との間には、1980 年代以降、顕著な負の相関が観察される。²⁾ここ 30 年間でオホーツク海の海水面積は約 10% 減少した。オホーツク海の海水の拡がり、その風上での地上気温と相関する。³⁾この気温は 50 年間で約 2℃ 上昇しており、地球全体の平均気温の上昇率（過去 100 年間で 0.74℃）より著しく高く、オホーツク海の風上にあたる北半球の寒極は温暖化の影響を強く受ける場所であると言われている。⁴⁾

最近 50 年間、オホーツク海の中層水では、水温が著しく上昇し、溶存酸素が減少傾向を示す。³⁾このことは、オホーツク海では最近海水の生成量が減って、冷たい重い海水の沈み込みが減少していることを表している。⁴⁾すなわち、近年の温暖化はオホーツク海において水温の昇温、海水と熱塩循環の低減および海水の沈み込み減少といった影響を及ぼしている。^{4,5)}このことを裏付けるかのように、オホーツク海では 1980 年代以降動物プランクトンおよび魚類のバイオマスは減少傾向を示している。⁶⁾

3. 北海道系シロザケの生活史と生残

発育に伴う生物の形態や行動などの phenotype (表現型) の変化は、その種の生息環境への適応結果であることはいうまでもない。わが国のシロザケは、春季、産卵床から浮上し内部栄養から外部栄養へ移行した直後に、稚魚期の発育段階で雪解け増水中の河川を降海する。その後、彼らは内部骨格の形成が終了する幼魚期まで沿岸海域で生活した後、6月末までにオホーツク海へ移動する。夏季と秋季をオホーツク海で過ごした幼魚は、海洋での最初の越冬を北西亜寒帯環流域で過ごし、翌年の春にはベーリング海へ移動、活発な摂餌活動を展開し、著しく成長する。彼らは、晩秋までベーリング海で過ごしたのち、海洋での2回目以上の越冬をアラスカ湾で行う。このように、未成熟魚は、春から晩秋までベーリング海で摂餌回遊して成長し、冬季にはアラスカ湾で越冬する生活を繰り返し、成熟するとベーリング海からカムチャツカ半島東岸、千島列島沿いに南下し、それぞれの母川へ産卵回帰する。^{7,8)}

シロザケのクリティカルな減耗は、降海直後の海洋初期生活期⁹⁾と海洋での最初の越冬期¹⁰⁾に起きる。その結果、北海道系シロザケの生残率は降海時(孵化場からの放流時)の体サイズとオホーツク海回遊時の成長量によってほぼ85%の精度で予測することができる。²⁾ すなわち、北海道系シロザケは大型で降海し、オホーツク海で成長が良いほど、その生残率は高いといえる。

4. オホーツク海における海洋環境の変化が北海道系シロザケの成長と生残に及ぼす影響

北海道系シロザケの成長パターンの時系列変化を、鱗分析に基づくバックカリキュレーション法により観察した結果、オホーツク海におけるシロザケの成長は1990年代以降著しく良好である(図2)。オホーツク海における海水面積の割合とシロザケ成長量との間には顕著な負の相関が、また反対に、オホーツク海の夏・秋季の表層水温 SST とシロザケ成長量との間には著しい正の相

関が観察される。²⁾ このことは、オホーツク海では冬季の海水が少なく、夏・秋季の SST が高いほどシロザケの成長は良好であることを意味する。先に述べたようにオホーツク海では海水の減少により、表層水の沈み込みが弱まり、生物生産量は1980年代以降減少傾向にある。2000年代初期には動物プランクトン1.75億トン、魚類1千万トンにまで落ち込んだと推定されている。⁶⁾ しかし、オホーツク海における日本系シロザケ幼魚のバイオマスはそれほど大きくなく(e.g., 放流数20億個体×生残率10%×平均体重20g=4,000トン)、オホーツク海の魚類生産量に占める割合はきわめて小さいと考えられる。したがって、幼魚の成長には、餌生物量よりも代謝活性(成長速度)に関連する水温の方が著しく影響している可能性が高い。

さて、このオホーツク海の海水状態を北海道オホーツク海沿岸の流水接岸状態からもっと長期間にわたってみると、流水はこの百年間ではほぼ直線的に減少しており、丁度気温が反対の傾向を示していることから、地球温暖化が確実に起こっていることを示す証拠のひとつであると考えられている。¹¹⁾ このことは、先のオホーツク海の海洋構造の変化とよく一致する。

北海道におけるシロザケの生残率(回帰率)の時系列変化をみると(図3)、生残率は右上がりの傾向を示し、1990年代に著しく増加していることが分かる。北海道系シロザケの中でも、オホーツク海に隣接するオホーツク海沿岸および根室海峡に回帰する個体群の生残率の増加が著しい。なお、1995~1996年級群生残率の急激な低下は1997/98年気候イベント(エル・ニーニョ効果)を要因とするベーリング海生態系の急変(円石藻ブルーミング)に起因する。^{12,13)} この生残率の変動は先のオホーツク海における成長パターンとほぼ一致する。²⁾ したがって、このような現象は、現在のところ、温暖化がオホーツク海に生息する北海道シロザケの成長と生残にプラスの影響を及ぼしていることを示唆している。

図2 石狩川回帰シロザケ親魚の海洋1年目における成長量の時系列変化

時間軸は生活年を、年齢は親魚の回帰年齢を、それぞれ示す。成長量は鱗分析結果とその成長バックカリキュレーション法により求められた。

図3 北海道系シロザケの生残率の時系列変化
時間軸は年級を表す。A：北海道全体の生残率，
B：各海区の生残率（PE：太平洋東部沿岸，PW：太平洋西部沿岸，OS：オホーツク海沿岸，JS：日本海沿岸，NS：根室海峡沿岸）。

5. サケ属魚類の環境収容力と密度依存効果

亜寒帯海域に広く分布するサケ属魚類のバイオマス変動は、長期的な気候の変化とリンクする。例えば、シロザケ、ベニザケおよびカラフトマスの3種の環境収容力(K)は、亜寒帯海域生態系の生産力に影響を及ぼす冬季アリューシャン低気圧の勢力(ALPI)とリンクして変動する。¹⁴⁾ 一方、環境収容力とバイオマスの差を残存環境収容力RCCとすると、北海道系シロザケのRCCと回帰親魚の体サイズとの間には顕著な正の相関が、また平均成熟年齢との間には著しい負の相関が観察される。¹⁵⁾ このことは、個体レベルの体成長速度が密度依存効果により低下することを表している。北海道系シロザケに対するこのような密度依存効果は、先の鱗分析の結果から、海洋生活2年目以降のベーリング海で起きていることから明かである。²⁾ 換言すれば、ベーリング海ではサケ属魚類は長期的な気候変動とリンクして環境収容力が変化し、環境収容力とバイオマスとのバランスにより密度依存効果の影響を受けているとみなすことができる。

図4 IPCC SRES-A1B シナリオと適水温から推定したシロザケ分布変動予測
成長・摂餌期の適水温は8~12°C^{7,17)}とした。

6. 温暖化の今後の影響

このように、北海道系シロザケの摂餌・成長エリアはオホーツク海とベーリング海の2海域であり、それらの海域は、それぞれ、彼らの生残率と環境収容力に影響を及ぼす。この地球温暖化はサケ類に今後さらにどのような影響を及ぼすのか。ここでは、IPCCのSRES-A1Bシナリオに基づいて50年後および100年後のシロザケの状態について予測を試みた。なお、北太平洋SSTの予測データは岸道郎氏（北海道大学大学院水産科学研究院）との共同研究結果に基づく。このような地球温暖化の予測は、IPCC報告書の結果からも明らかにように、不確実性に基づくため、全球的な傾向においてもモデル間のばらつきは大きい。まして、地域的なパターンともなればモデル間で定性的な傾向さえ異なる場合もある。¹⁶⁾ 従って、単一モデルの結果に過度に依存するのが危険であることは言うまでもない。そのことを前提に予測を行った。

予測の結果、例えば、サケ属魚類が生息する北太平洋の7月のSSTは2005年に比べて2050年には1~4°C、2095年には3~8°C上昇する。特に、陸に近い海域でのSST上昇は著しく、オホーツク海では2050年までに1.3~4.6°C、2095年までに3.7~8.2°Cも上昇することが予想される。シロザケの成長・摂餌期における最適水温は飼育実験による成長速度⁷⁾とオホーツク海における分布密度¹⁷⁾から8~12°Cと考えられている。図4に、この最適水温から夏季・秋季(7月~10月)のシロザケの分布予測を示した。その結果、①2025年までは、現在の分布とあまり大きくは異なること、②北太平洋全体では、東部海域(アラスカ湾)での生息域の縮小が著しいこと、分布域が北方へ移動し、夏季には北極海の一部で分布域が拡大すること、③北海道系シロザケは2050年までにオホーツク海への回遊ルートを失い、

2100 年までには生存が著しく困難になること, ④ベーリング海のシロザケの分布域と環境収容力は 2050 年までに大幅に減少し, 密度依存効果が進むこと, 2095 年までには分布域が失われる恐れがあることなどが予測される。

7. 今後の課題

以上の結果と予測から, 今後の水産資源管理のあり方について考えてみよう。言うまでもなく, 本来, 水産生物資源は再生できる持続可能な資源である。川崎 (2007)¹⁸⁾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, 漁業資源の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 (Maximum Sustainable Yield) 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資源管理 (e.g., TAC) には限界がある。少なくとも漁業対象種を取り巻く生態系を視野に資源管理を行っていくことが必要である。

しかし, 水圏生態系は, 複雑でダイナミックな不確実性の高いシステムであり, 気候変動やエル・ニーニョなどの「自然要因」と地球温暖化や乱獲などの「ヒューマン・インパクト」により常に攪乱されている。そのような不確実性の高い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。生態系の構造と機能は, 長い進化過程で培われ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, 生態系サービスや回復力の喪失につながっている。その一つの典型が「温暖化」現象であろう。

そのような現状下で, 予防原則と順応的管理に基づく生態系アプローチ型持続可能な資源保全管理をどう展開するかが今後の重要な課題であると考えている。¹⁹⁾

文 献

- 1) 田中伊織. 北海道西岸における 20 世紀の沿岸水温およびニシン漁獲量の変異. 北水試研報 2002; **62**: 41-55.
- 2) Kaeriyama M, Yatsu A, Noto M, Saitoh S. Spatial and temporal changes in the growth patterns and survival of Hokkaido chum salmon populations in 1970-2001. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.* 2007; **4**: 251-256.
- 3) Nakanowatari T, Ohshima KI, Wakatuchi M. Warming and oxygen decrease of intermediate water in the north-western North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955-2004. *Geophys. Res. Lett.* 2007; **34**, L04602. 1-4.
- 4) 大島慶一郎. 温暖化で変わるオホーツク海—弱まる北太平洋へのポンプの働き. リテラポブリ 2008; **34**: 34-35.
- 5) 中野渡拓也. 地球温暖化のカナリア, オホーツク海. 「北海道からみる地球温暖化」岩波書店, 東京. 2008; 4-10.
- 6) Merzlvakov A, Dulepova E, Chuchukalo V. Modern state of pelagic communities in the Okhotsk Sea. *Abst. 14th PICES Ann. Metg.* 2005; 32.
- 7) 帰山雅秀. サケ *Oncorhynchus keta* (Walbaum) の初期生活に関する生態学的研究. さけ・ますふ研報 1986; **40**: 31-92.
- 8) 浦和茂彦. 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 2000; **5**: 3-8.
- 9) Healey MC. Timing and relative intensity of size-selective mortality of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during early sea life. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1982; **39**: 952-957.
- 10) Beamish RJ, Mahnken C, Neville CM. Evidence that reduced early marine growth is associated with lower marine survival of coho salmon. *Trans. Am. Fish. Soc.* 2004; **133**: 26-33.
- 11) Aota M. Long-term tendencies of sea ice concentration and air temperature in the Okhotsk Sea coast of Hokkaido. *PICES Sci. Rep.* 1999; **12**: 1-2.
- 12) Kruse GH. Salmon run failures in 1997-1998: a link to anomalous ocean conditions? *Alaska. Fish. Res. Bull.* 1998; **5**: 55-63.
- 13) 帰山雅秀. レジーム・シフトはサケ属魚類のバイオマス動態と生活史に影響を及ぼすか? 月刊海洋 2003; **35**: 127-132.
- 14) Kaeriyama M, Edpalina RR. Evaluation of the biological interaction between wild and hatchery population for sustainable fisheries management of Pacific salmon. In: Leber KM, Kitada S, Blankenship HL, Svasand T (eds.) *Stock Enhancement and Sea Ranching, Second Edition: Development, pitfalls and opportunities*. Blackwell Publishing, Oxford. 2004; 247-259.
- 15) Kaeriyama M. Evaluation of carrying capacity of Pacific salmon in the North Pacific Ocean for ecosystem-based sustainable conservation management. *NPAFC Tec. Rep.* 2003; **5**: 1-4.
- 16) 河宮未知生, 羽角博康, 坂本 天, 吉川知里. 気候モデルによる地球温暖化時の海洋環境予測. 月刊海洋 2007; **39**: 285-290.
- 17) Ueno Y, Ishida Y. Summer distribution and migration routes of juvenile chum salmon (*Oncorhynchus keta*) originating from rivers in Japan. *Bull. Nat. Res. Inst. Far. Seas Fish.* 1998; **33**: 139-147.
- 18) 川崎 健. 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) 成山堂書店, 東京. 2007; 1-20.
- 19) 帰山雅秀. 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」岩波書店, 東京. 2008; 11-25.