海に生きる動物（なかま）たち（全 12 回）

第 11 回　温暖化とサケの母川回帰

浦野明央（北海道大学名誉教授）

今から 20 年余り前のこと、二酸化炭素などの温室効果ガスによる地球の温暖化についての報告書が、「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」によって刊行された。同じ頃、文部省（当時）の意向を受け、東京大学海洋研究所（現大気海洋研究所）は海洋生物と温暖化の関係を分子レベルで研究しようという部門を発足させた。その立ち上げの任に当たった筆者は、二つの課題を設定した。その一つが、温暖化が生物に与える影響を、サケの回遊を通して見ていこう、というものであった。

サケを研究対象にしたのには幾つかの理由があった。まず、サケの仲間（以下サケ・マス類）は、北半球の寒冷な環境に生息する代表的な冷水魚で、その分布が大きく水温の影響を受けていることである。そのため、温暖化によって北太平洋の水温が上昇すると、サケ・マス類の分布が狭められることが予測されていた。また、北半球の高緯度帯では、冬の荒天によって海洋に吸収された二酸化炭素を利用して大増殖する植物プランクトンの栄養分が、食物連鎖により、最終的にはサケ・マス類により陸に運ばれるという生態系を作っている。しかも、サケ・マス類については、他の魚種より、遺伝子についてより多くの情報が蓄積されていたのである。

沿岸のサケに起きていたこと

筆者自身は「遺伝的にプログラムされている」という本能行動の遺伝子プログラムを解読し、そのプログラムが温暖化によってどう変わるか分かれば面白いと考えていた。そこで、代表的な本能行動と考えられるサケの回遊を分子レベルで研究し始めたのであるが、昔から、野生動物を理解するためには、同じことを 5 年間はやらなければ、と言われていた。この言葉にしたがい、三陸のサケと石狩水系のサケを相手に、10 年近く同じようなことを繰り返しているうちに、年により、測定データの回遊にともなう変動パターンが異なること、しかもそれと沿岸水温との間に関係があることに気付いた。

三陸のサケ　今回の東日本大震災で大きな被害を受けた岩手県の大槌は、日本のサケ研究のメッカと言ってもいい場所である。筆者も東京大学海洋研究所の大槌臨海研究センターを利用し、1992 年と 1993 年には、大槌湾口、大槌湾内および大槌川河口において母川に回帰してきたサケから解析のための試料を入手した。また、1994 年と 1995 年には海水から淡水への移行実験を行った。ところが、いずれの実験でも、血中のナトリウムイオン（以下 Na+）濃度の変動パターンが年によって違ってしまったのである（図 1）。

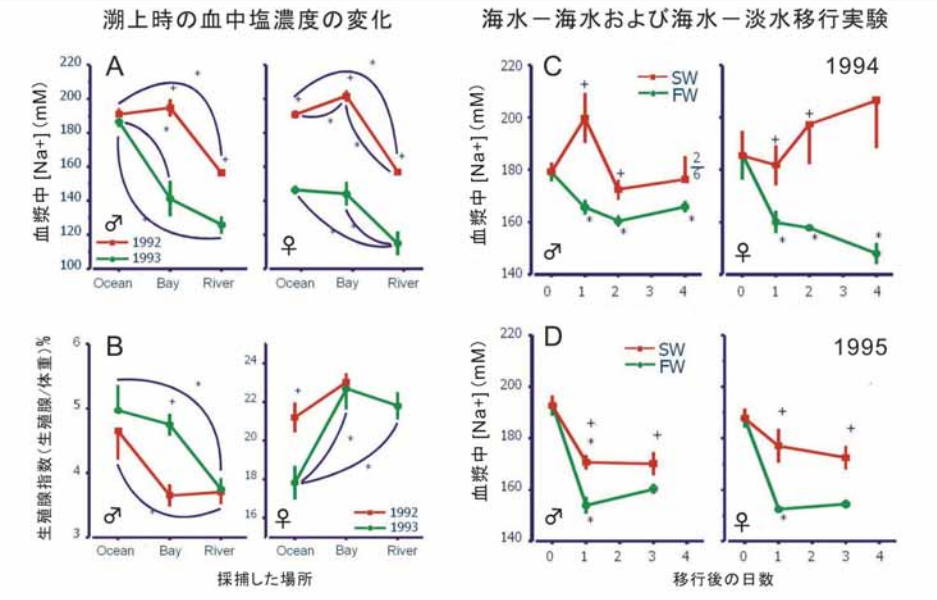

図 1　大槌に回帰してきたサケの淡水適応時の血中 Na^+ 濃度の変動パターン。A：1992 年と 1993 年に湾口（Ocean）、湾内（Bay）および河口（River）で採捕したサケの血中 Na^+ 濃度。水温が高かった 1992 年と、水温が低かった 1993 年の違いに注意。B：A で用いた個体の性成熟度。1992 年に採捕したサケの方が生殖腺が発達している。註）雄の精巣は、精細胞が精子になるので重量が減少していくが、雌の卵巣では成熟とともに卵が大きくなり、卵巣重量が増加していく。C と D：大槌湾口で捕らえたサケを、海水中に留置しておくものと淡水に移すものに分け、日を追って血中 Na^+ 濃度の変化を解析した結果。水温が低かった 1995 年には、海水中でも Na^+ 濃度が減少していることに注目して欲しい。（Saito 他 , 2001 より）

当初は、なぜこのようなことになったのか分からなかった。分かっていたのは、雄雌いずれも、生殖腺がより発達していた 1992 年と 1994 年（図 1 左下）に、海水中での血中の Na^+ 濃度が高かったことである。これは、淡水に適応するためのプログラム（前回参照）が、すでに働き始めているのに、河川に溯上できず、海水中にいたためではないだろうか。では、何が溯上を妨げていたのだろ

う。

この疑問にヒントを与えてくれたのは、大槌の大謀さん（定置網の指揮・統括をする漁師）の「水温が下がるとサケは湾内を走る」という一言だった。この言葉は、沿岸水温がサケの溯上行動の鍵になっていることを示している。事実、さまざまな漁師の言い伝えを科学的に検証した大槌臨海センターの研究グループは、水温が 15℃を下回るようになると、サケがどっと湾内に入ってくることを確かめている（乙部弘隆他 , 2000）。

そこで 1992 年から 1995 年までの三陸沿岸の表面水温の分布を、海上保安庁の公表データをもとに作図したところ、1992 年と 1994 年は黒潮の影響で水温が高く、1993 年と 1995 年は親潮の影響で水温が低かった（図 2）。沿岸

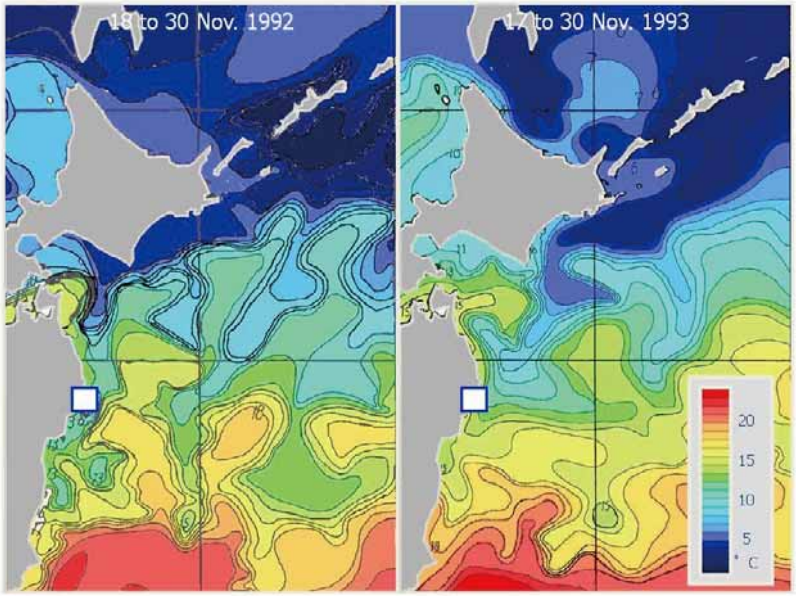

図 2　三陸沿岸におけるサケの母川回帰最盛期の表面水温の分布。図中の小さな白い四角は大槌で、1992 年はその沖合の水温が高かったが、1993 年は親潮の先端が大槌にまで達していた。1994 年と 1995 年の表面水温の分布も同様であった。（Saito 他 , 2001 より）

の水温が低かった年は、回帰してきたサケの淡水適応機能が、プログラム（前回参照）にしたがって順調に作動した。一方、水温が高かった年は、生殖腺が発達していても、高水温によって接岸が妨げられるので、プログラムが海水中で先行して働いてしまった、と考えられないだろうか。

石狩系のサケ　上に述べた大槌での結果をまとめてみると、沿岸の高水温が冷

水魚であるサケの遡上行動を妨げることを示唆している。また、それにより、淡水適応のプログラムが進行している海中の成熟個体は、血中の過剰な Na^+ を排出できず、体液中の Na^+ 濃度が上昇してしまうと考えられる。では、本当にこう考え、話を一般化してもいいのだろうか。

三陸の川は短く、河口から産卵場（あるいは孵化場）までの距離はたかだか数 km なので、母川に遡上しようとしているサケの生殖、とくに最終成熟を制御する機構と、体液の恒常性を維持する機構とが、相互に作用している可能性が高い。この 2 つを切り離して解析しないと、サケが母川に帰ってきた時に、実際にはどのようなことが起きているのか、はっきりしたことが言えない。そこで、筆者の研究グループは、河口から産卵場までの距離が長い河川として石狩水系を選び、1995 年から 2005 年までの 11 年間にわたってサケの試料を集め、血中の塩分濃度やステロイドホルモンの変動を解析した。

母川回帰にともなう血中の Na^+ 濃度の変化を、北洋から石狩川の支流である千歳川上流の孵化場までの試料がそろっている 2001 年から 2003 年までのデータで比較したのが図 3 である。年が違っても、Na^+ 濃度は、海水レベルから

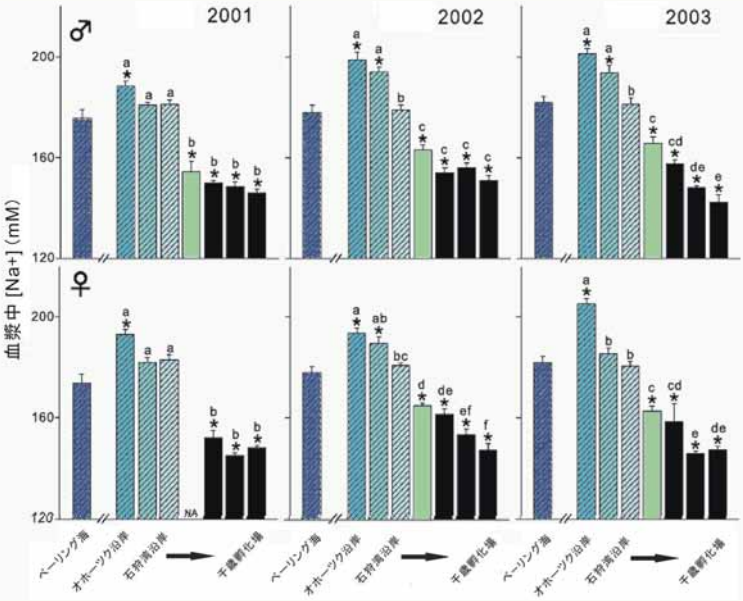

図 3　母川回帰にともなう血中の Na^+ 濃度の変化。北洋から石狩水系にまで到るサケの試料を、2001 年から 2003 年にわたって採取した。この 3 年間は目立った海洋環境の変動が見られなかったので、この図で示した変動が、プログラムにしたがったサケの母川回帰時の標準的なパターンであろう。（Onuma 他 , 2010 より）

沿岸での若干の上昇を経て、淡水レベルになる変動パターンはほとんど同じで

あった。この３年間以外の年も、血中の Na^+ 濃度の変動パターンはよく似ていた。

一方、性ステロイドホルモンの１つであるテストステロン[1)]の濃度（図４）

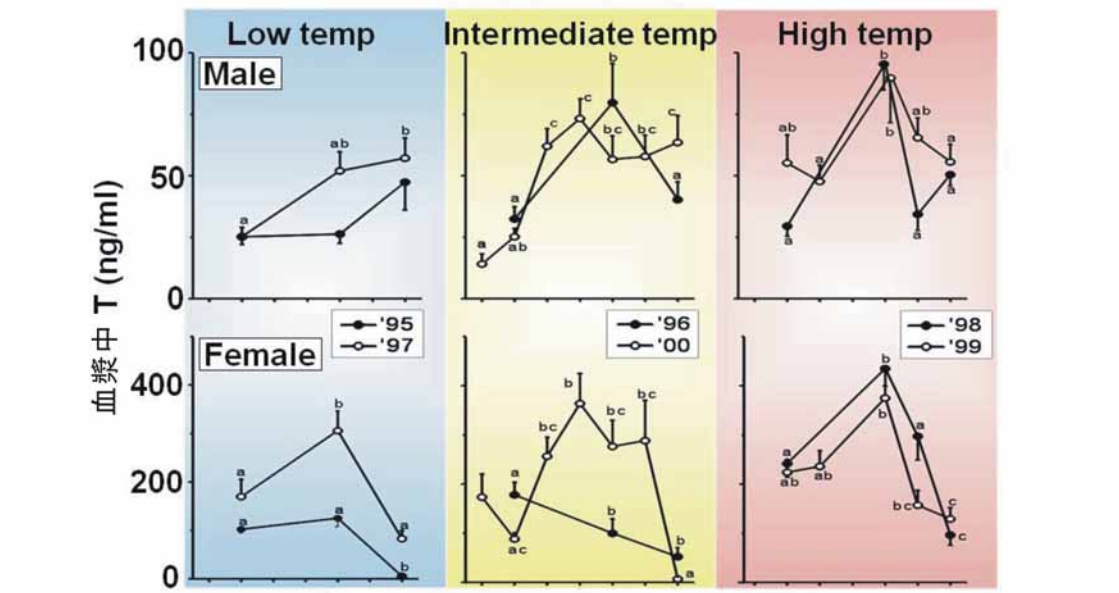

図４　母川回帰時の石狩水系のサケの血中テストステロン濃度の変動。1995 年から 2000 年にわたって採取した試料を解析した結果を、石狩湾の表面水温にあわせて並べたもので、水温によって変動パターンが違っていた。低水温、中間的な水温、高水温、それぞれのグラフの左端は石狩湾、右端は孵化場。間は中間の石狩川と千歳川の捕獲場所。（Onuma 他 , 2003 より）

には、年毎に変動パターンの違いが見られた（Onuma 他 , 2003）。このパターンの違いは、年による沿岸水温の違い（図５）を反映したもので、沿岸の水温が高かった年ほど、溯上するサケの生殖腺は成熟していた。

詳しくは述べないが、オホーツク沿岸から千歳の孵化場までの回遊では、サケは水温の高い所を避けて泳いでいた。また、石狩湾の水温が 20℃を切ると、溯上する個体数が増えるとされている。したがって、石狩川のサケでも、三陸のサケと同じように、沿岸の高水温が溯上行動、ひいては溯上するサケの成熟度に影響を与えていると言ってよいだろう。

温暖化はサケにとって深刻な問題

黒潮の影響　冷水魚であるサケは高水温に敏感であると考えられている。筆者の研究室がフィールドとした三陸沿岸と石狩水系は、図２と図５からも明らかなように、北国ではあるが、黒潮の影響を強く受けている。黒潮の勢いが強

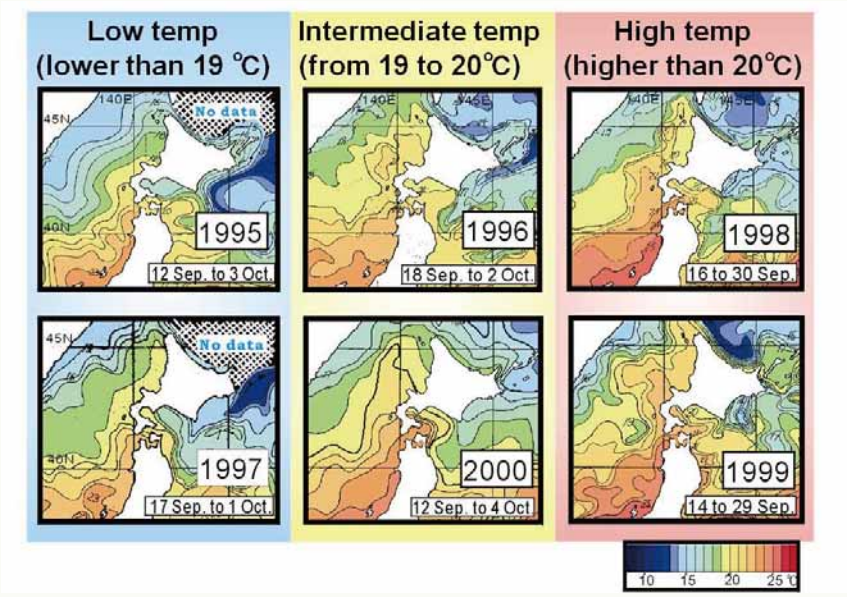

図 5　1995 年から 2000 年にわたる北海道周辺の表面水温の分布。石狩水系における母川回帰の最盛期、すなわち 9 月下旬のデータで、図 4 と対応。（Onuma 他 , 2003 より）

いと三陸沖、あるいはオホーツク沿岸から知床沖にかけて大きな暖水塊ができるので、サケの母川回帰が妨げられ、なかなか沿岸に寄ってこられないことになる（図 6）。逆に、親潮の勢いが強ければ、サケは滞りなく接岸し、まだ生殖腺が完全には成熟していないうちから、母川に回帰・遡上する。この時には浸透圧調節の機構が、プログラムにしたがって働くことになる。このように、サケの母川回帰にとって、黒潮と親潮のせめぎ合いは極めて重要な問題である。そのせめぎ合いにエルニーニョとラニーシャ[2)]、さらには温暖化が関わっているかもしれないが、現時点では明確なことを言うほどデータが揃っていない。温暖化がエルニーニョとラニーシャにどのような影響を与え得るかも含め、長期にわたる調査・研究が必要な分野である。

この連載の本論からは外れるが、三陸沖の海洋環境の変動とサケ資源の消長についての情報は、温暖化にともなう北海道や東北の太平洋側のサケ資源の変動を知り、予測するのにたいへん重要である。それにも関わらず、研究の進展は微々たるものであるし、それに東日本大震災の影響もあって研究体制が大きな被害を受けた。大震災からの復興計画には、20 年先あるいは 30 年先をみた三陸の生態系の調査・研究計画を加えて欲しいと願っている。

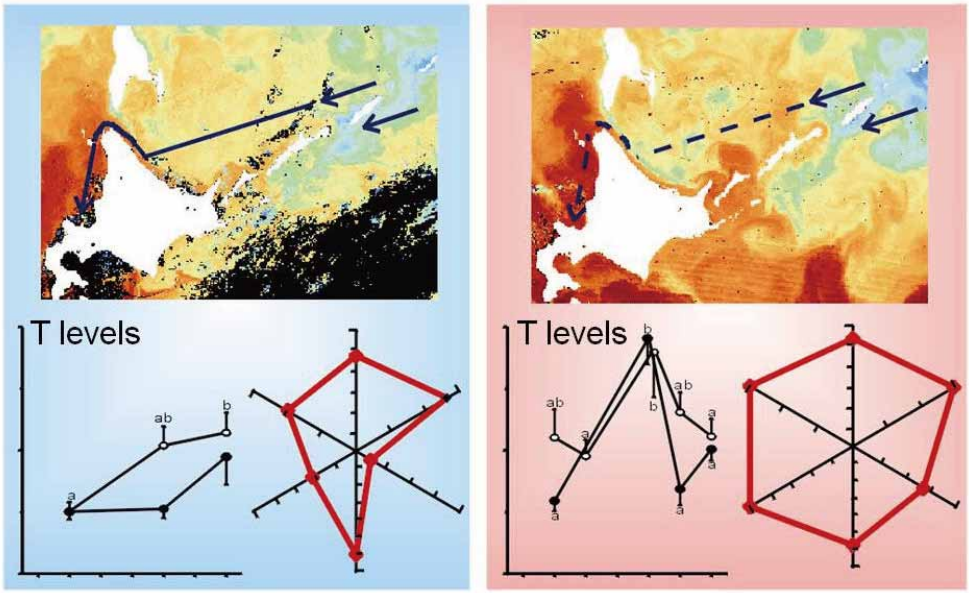

図６　黒潮の延長である対馬暖流が弱い年（背景が水色のパネル）は、石狩川に遡上してきたサケの成熟がそれほど進行していないことが、血中テストステロンの変動パターン（折れ線グラフ）および生殖腺の発達度を示す幾つかのパラメーターのレーダーチャートから分かる。逆に、対馬暖流が強い年（桃色のパネル）には、北海道では、知床から北方四島にかけて水温の高い水域が広がり、それがサケの接岸を妨げる。そのため、成熟がほぼ完了した状態で接岸し、母川を遡上する。図には示していないが、このようなサケでは、ストレスホルモンであるコルチゾル（副腎皮質ホルモン）の血中濃度が大きく上昇している。

註

1)　テストステロン：生殖腺から分泌される性ステロイドホルモンには、アンドロゲンあるいは雄性ホルモン（ヒトでは男性ホルモン）と呼ばれる物質と、エストロゲンあるいは雌性ホルモン（ヒトでは女性ホルモン）と呼ばれる物質がある。テストステロンは代表的なアンドロゲンであるが、繁殖期のサケの場合、雌の血中濃度が、なぜか雄のそれより高濃度である。石狩水系では、雌雄いずれでも、沿岸から孵化場までの間に、テストステロンの血中濃度が一過性に上昇する。しかも、血中濃度の上昇開始に合わせるかのように、血中の Na+ 濃度が淡水レベルに向かって低下し始める。

2)　エルニーニョが発生すると日本周辺の海水の温度が低下し、ラニーニャによって海水温が上昇すると言われている。本稿で紹介した三陸沿岸、あるいは石狩湾の表面水温が高かった年には、エルニーニョ／ラニーニャ発生海域において、エルニーニョの後の海水温の低下、あるいは大きなラニーニャ現象が見られている（気象庁ホームページ参照）。

参考文献

乙部弘隆，都木靖彰，阿保綾子：三陸沿岸に回帰したサケの遡上に至るまでの行動と海象・気象との関係. Nippon Suisan Gakkaishi 66: 705-712（2000）

Makino, K., Onuma, T.A., Kitahashi, T., et al.: Expression of hormone genes and osmoregulation in homing chum salmon: a minireview. Gen. Comp. Endocrinol. 152: 304-309（2007）

Onuma, T.A., Ban, M., Makino, K., et al.: Changes in gene expression for GH/PRL/SL family hormones in the pituitaries of homing chum salmon during ocean migration through upstream migration. Gen. Comp. Endocrinol. 168: 356-368（2010）

Onuma, T., Higashi, Y., Ando, H., et al.: Year-to-year differences in plasma levels of steroid hormones in pre-spawning chum salmon. Gen. Comp. Endocrinol. 133: 199-215（2003）

Saito, D., Ota, Y., Hiraoka, S., et al.: Effects of oceanographic environments on sexual maturation, salinity tolerance, and vasotocin gene expression in homing chum salmon. Zool. Sci. 18: 389-396（2001）

本稿へのコメント・質問は aurano@sci.hokudai.ac.jp でお待ちしています。