

研究成果情報

日本系サケのベーリング海までの回遊要因とベーリング海から日本沿岸に回帰するときの遊泳行動

あずまや とものり

東屋 知範 (北海道区水産研究所 生産環境部)

はじめに

サケ (*Oncorhynchus keta*) は太平洋さけ・ます類のなかでカラフトマスに次いで多い種です。その中で日本系サケの個体群はほとんどが孵化放流によって維持されています (Kaeriyama 1999; Hiroi 1998)。近年サケの遺伝解析だけでなく耳石温度標識によって、日本系サケは北太平洋亜寒帯海域全体に分布回遊していることが確かめられるようになってきました。これらの研究によると、放流・降海後の日本系サケ幼稚魚は沿岸水域で3ヶ月程度過ごした後、1年目の初夏から晩秋にかけてオホーツク海で生活します (図 1)。そして水温の低下に伴い 11 月頃にオホーツク海を離脱して南下を開始し、北太平洋西部域で最初の越冬を行います。その後夏までにベーリング海へ北上すると考えられています。ベーリング海で索餌回遊をして成長した後、北太平洋東部で越冬した日本系サケは、ベーリング海と北太平洋東部の間で季節による南北移動を繰り返しながら摂餌し成長します。そして最終成熟を迎える初夏になると順次ベーリング海を離脱して、日本沿岸の母川に回帰すると考えられています。しかしなぜ日本系サケがはるか遠いベーリング海や北太平洋東部まで回遊するのか明らかではありません。そこで簡単なサケ回遊数値モデルを作成し、日本系サケがベーリング海まで回遊する要因を調べてみました (Azumaya and Ishida 2004)。

サケ回遊数値モデル

サケ回遊数値モデルは計算機で数値的に動かします。そのため、モデル内のサケは粒子として扱い、自泳による能動的な移動と海流による受動的な輸送を粒子の移動要因と仮定しました。ここでサケの自泳速度はサケの体長/秒とし、自泳する方向は好適水温としました。季節毎のサケの好適水温は、観測で得られたサケの生息分布と水温の関係から決定しました。具体的にモデルの数値計算は次のような過程で行います。①現在の粒子の位置を基準位置とし自泳方向と粒子の位置における海面流速を求めます。このとき、自泳方向は気象庁による $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ グリッド月平均表面水温データから、粒子の位置における水温と粒子の周りの水温を評価し決定します。一方、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ グリッドの月平均風データ (Hellerman and Rosenstein 1983) と人工衛星 TOPEX/Poseidon による月平均海面高度データを用いて $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ グリッドの海面流速を計算し、粒子の位置を囲む流速データから粒子の位置における流速を見積もります。②自泳速度と流速に数値モデルの計算時間間隔 (10 分) をかけ 10 分間に粒子が移動する距離を計算します。③現在の粒子の位置に移動距離を加え新しい粒子の位置を求めます。④新しい粒子の位置を基準位置として更新します。①~④の計算過程を繰り返すことによって、降海した 9 月から翌々年の 2 月までのサケの回遊経路を推定し

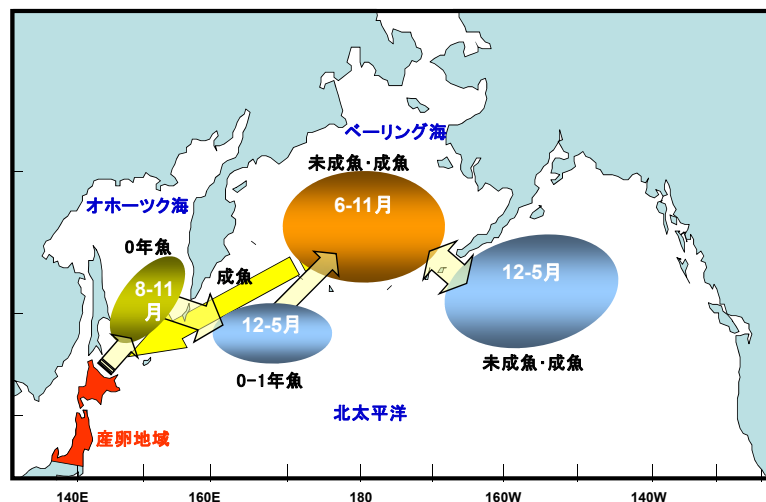


図 1. 日本系シロサケの主要な回遊経路の推定図 (浦和 2000 を改変)。

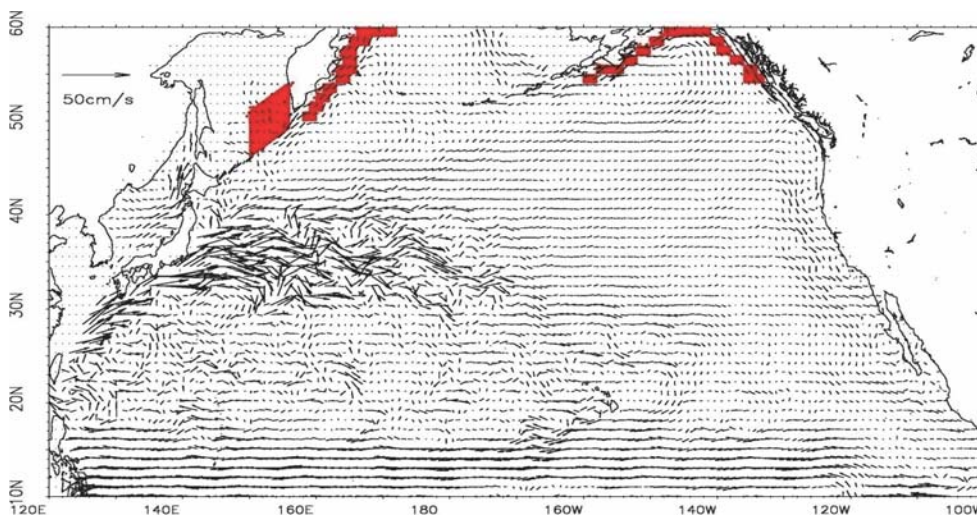


図 2. サケを模した粒子のスタート地点 (赤塗). 左からアジア系群, 東カムチャッカ系群, 北アメリカ系群. 矢印は回遊モデルで用いた TOPEX/Poseidon と風データから計算した 9 月における海面における流向・流速. (Azumaya and Ishida 2004 を改変)

ました. このモデルでは夏季にオホーツク海に入る日本系を含むアジア系群, 東カムチャッカ系群そして北アメリカ系群のサケを模した計 480 個の粒子を, 図 2 に示した場所にスタート地点として置きました. 数値実験ではサケの自泳と海流による輸送の場合 (ケース 1), サケの自泳のみの場合 (ケース 2) そして海流の輸送のみの場合 (ケース 3) のそれぞれについての回遊経路を計算し日本系サケがベーリング海まで回遊する要因を調べました.

図 3(a)にケース 1 の計算結果の平均回遊経路を示します. ケース 1 では日本系を含むアジア系群のサケは秋から冬にかけて南方向に移動しオホーツク海から北太平洋に出ました. その後アジア系群のサケは北太平洋で 40° N の 180° 付近にかけて分布越冬し, 翌年の春季には 40° N に沿って東に移動し 6 月から北へ移動しました. 7 月にはアジア系群のサケはベーリング海に入りました. 次の冬季にはアジア系群のサケは再び南下し中部北太平洋からアラスカ湾へ移動しました. 北アメリカ系群のサケは夏季に北西へ移動し冬季に南東に移動しておりアラスカ湾を楕円状に回遊をしました. このケース 1 のモデル結果は Fredin et al. (1977) の結果や浦和 (2000) の調査結果 (図 1) と似ており, 本サケ回遊数値モデルは現実サケの回遊経路を良く再現しているようです. 一方, ケース 2 ではアジア系群のサケは秋から冬にかけて南方向へ向かい, オホーツク海から北太平洋に移動します (図 3(b)). 春まで 40° N 付近に留まり, 夏季になると再びオホーツク海に戻ってしまいました. このケース 2 ではアジア系群のサケはベーリング海まで達することができず, 回遊範囲が西部北太平洋とオホーツク海に限られました. この

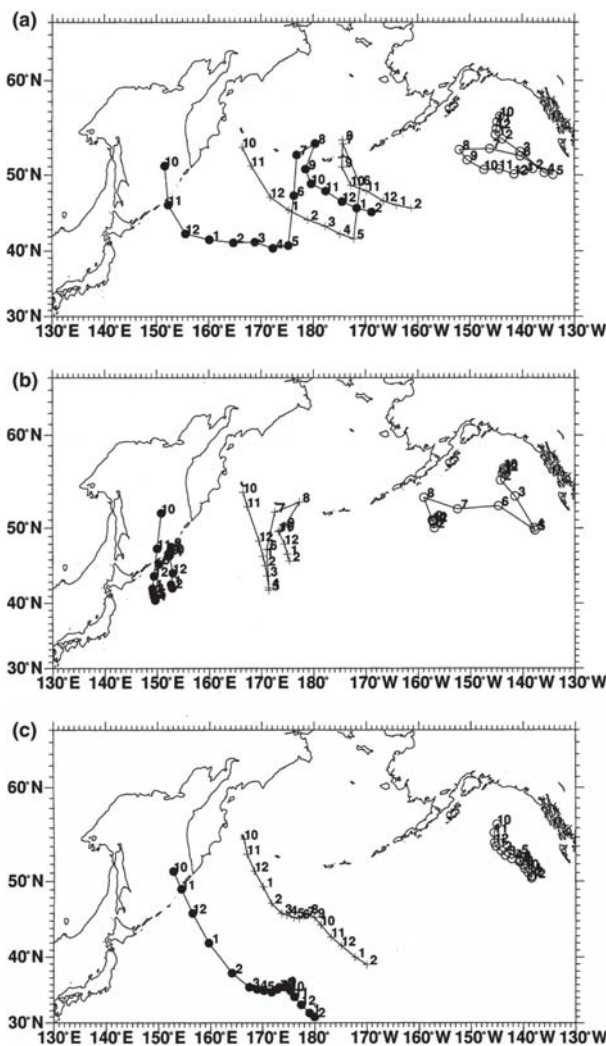


図 3. サケ回遊数値モデルによる回遊経路の計算結果. (a) ケース 1: 自泳と海流による輸送, (b) ケース 2: 自泳のみ, (c) ケース 3: 海流による輸送のみ. ●は日本系を含むアジア系群, +は東カムチャッカ系群, ○は北アメリカ系群の平均回遊経路, 数字は月を示す. (Azumaya and Ishida 2004 を改変)

ようにサケの自泳のみという条件では現実的な回遊経路を再現できませんでした。次にケース 3 ではアジア・東カムチャッカ系群のサケは 40° N より南まで移動し夏季にベーリング海に入ることにはできませんでした (図 3(c))。このように海流による輸送のみという条件でも現実的な回遊経路を再現できませんでした。従って、自泳による能動的移動と海流による受動的輸送という 2 つ要素が合わさることによって、アジア系群のサケは日本からはるか離れたベーリング海や中部北太平洋まで回遊すると考えられます。

アーカイバルタグに記録された回帰するサケの遊泳行動

母川に回帰する時の実際のサケの遊泳行動を調べるため、1998 年～2000 年のさけ・ます資源調査において、夏季ベーリング海中央部で採集されたサケの成熟個体の体内にアーカイバルタグ (NWM 製) を装着し同地点で放流しました。放流した同年の秋に北海道沿岸でアーカイバルタグが装着されたサケ 5 個体が回収されました。アーカイバルタグにはサケがベーリング海から北海道沿岸に回帰するまでの間に経験した海水温 (経験水温)、水深、体温そして光強度が 256 秒または 512 秒間隔で記録され、サケの詳細な遊泳行動が明らかになってきました。図 4(a) に示すようにサケは昼間と夜間では遊泳行動が異なっており、昼間は数分の間に 60 m 以上も潜ったり浮上したりして盛んな鉛直遊泳行動が観察されました。これ

に対し夜間は表層に滞在し昼間のような盛んな鉛直遊泳行動はみられませんでした。サケの昼間の平均遊泳深度と標準偏差は 20 m, 32.9 m であるのに対し、夜間ではそれぞれ 4 m, 9.6 m となり、昼間の平均遊泳深度は夜間よりかなり深く変動も大きいことがわかりました。遊泳深度にともない昼間の平均経験水温と標準偏差も 8.8°C, 3.4°C であり、夜間の 10.6°C, 2.4°C より低く変動も大きいです。何故このような行動をするのでしょうか。サケの餌生物は夜間には海面に分布し昼間には下層へ移動します。そのため餌生物の行動とサケの遊泳行動は同期していると考えられます。しかし餌生物のいる下層にずっとサケが滞在すればよさそうに思えますが、実際は図 4(a) のような約 20 分周期の鉛直遊泳行動をしています。このような行動はサケが餌をついばんでいるためとも考えられます。一方、サケの体温 (図 4(b) の太線) をみると、昼間の平均体温・標準偏差 (9.0°C, 2.9°C) で夜間 (10.7°C, 2.3°C) と経験水温ほど昼間と夜間の差がありませんでした。昼間の体温の標準偏差は経験水温の標準偏差より小さく、体温の変動が経験水温の変動より小さいことがわかります。サケの体温をサケの体の熱伝導率と経験水温から推定すると図 4(b) の細線になり、サケの体温を良く再現できます (Azumaya and Ishida 2005)。つまりサケがゆっくり鉛直遊泳行動すると、体温は水温に近づいてゆきます。しかし、観測されたような短い周期で鉛直遊泳行動をおこなうと、下層の水温まで体温が低下する前にサケは表層へ移動するので、結果的にサケの体温は下層の水温まで低

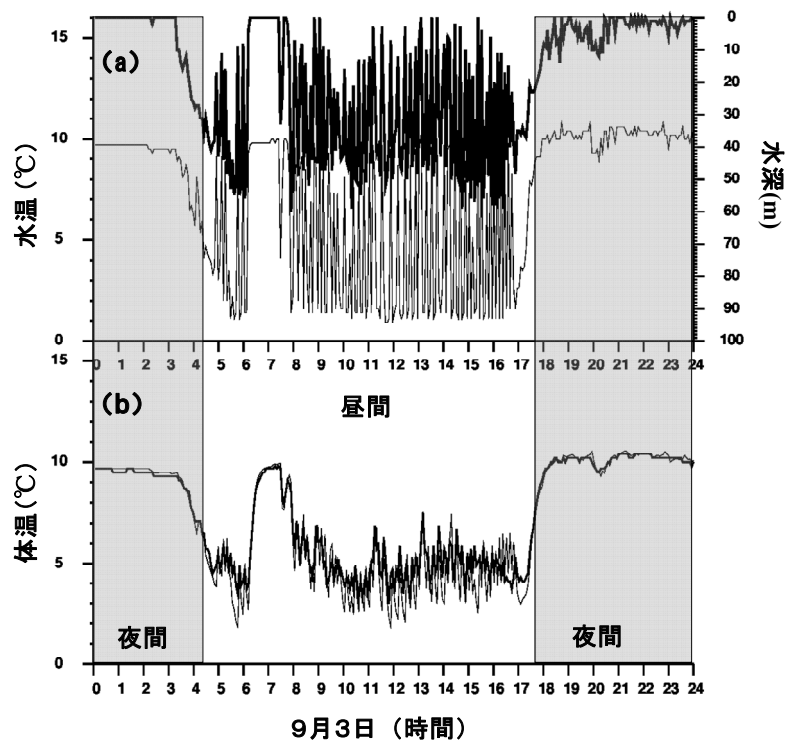


図 4. アーカイバルタグで記録された 1998 年 9 月 3 日の遊泳水深・経験水温・体温の時間変化。アーカイバルタグは 1998 年 7 月 12 日北緯 56 度 30 分、東経 180 度で採集されたサケに装着され、サケは同日・地点で放流された。同年 10 月 10 日に標津沖でこのサケは再捕され、アーカイバルタグは回収された。(a) 水深 (太線)、経験水温 (細線)。(b) 体温 (太線)、水温と体の熱伝導率から推定した体温 (細線)。網掛けは夜間を示す。(Azumaya and Ishida 2005 を改変)

下せず、その変動は小さくなります。季節毎のサケの生息水温を調べると、冬季に観測された生息水温 (2.7°C) は最も低く、サケの生息下限水温と考えても良いでしょう (Azumaya et. al. 2007)。アーカイバルタグで昼間に記録されたサケの体温は 3°C 以下には低下しませんが、経験水温は 1°C 以下に低下することもあり、下層の水温はサケにとって低すぎる可能性があります。もしサケが餌を捕るために下層に滞在し続けたら、体温が生息下限水温より低下してしまいます。そのため、昼間に観測された頻繁な鉛直遊泳行動は体温を維持するという役割もあるのかもしれない。

おわりに

日本系サケの回遊経路やその時の遊泳行動が次第に明らかになってきました。しかし、日本系サケの降海してからオホーツク海までの回遊経路、ベーリング海から日本沿岸までの回帰経路やその回帰方法など、日本系サケの回遊についてだけでも多くの不明な部分が残っています。紹介したサケ回遊数値モデルは、サケの母川回帰までは再現できません。母川回帰までをモデルによって再現するには、モデルの中にサケが母川に回帰する方法や条件を入れなければなりません。最近の研究では、生まれた母川の地磁気情報を粒子に記録させておき、海洋生活期から母川回帰する時になると、記録された地磁気情報と粒子の周りの磁場を評価して、粒子が母川まで戻る数値モデルがつけられています (Bracis and Anderson 2012)。

引用文献

- Azumaya, T., and Ishida, Y. 2004. An evaluation of the potential influence of SST and currents on the oceanic migration of juvenile and immature chum salmon (*Oncorhynchus keta*) by a simulation model. *Fish. Oceanogr.*, 13: 10-23.
- Azumaya, T., and Ishida, Y. 2005. Mechanism of body cavity temperature regulation of chum salmon (*Oncorhynchus keta*) during homing migration in the North Pacific Ocean. *Fish. Oceanogr.*, 14: 81-96.
- Azumaya, T., Nagasawa, T., Temnykh, O. S. and Khen, G. V. 2007. Regional and seasonal differences in temperature and salinity limitations of Pacific salmon (*Oncorhynchus* spp.). *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, 4: 179-187.
- Bracis, C., and Anderson J. J. 2012. An investigation of the geomagnetic imprinting hypothesis for salmon. *Fish. Oceanogr.*, 21: 170-181.
- Fredin, R.A., Major, R.L., Bakkala, R.G. and Tanonaka, G. 1977. Pacific Salmon and the High Seas Salmon Fisheries of Japan (Processed report). Northwest and Alaska Fisheries Center, National Marine Fisheries Service, Seattle, WA, USA. 324 p.
- Hellerman, S. and Rosenstein, M. 1983. Normal monthly windstress over the world ocean with error estimates. *J. Phys. Oceanogr.*, 13:1093-1104.
- Hiroi, O. 1998. Historical trends of salmon fisheries and stock conditions in Japan. *N. Pac. Anadr. Fish Comm. Bull.*, 1: 23-27.
- Kaeriyama, M. 1999. Hatchery programmes and stock management of Pacific salmon. In *Stock Enhancement and Sea Ranching*, ed. B. R. Howell, E. Moksness and T. Svasand. Blackwell, Oxford. pp. 153-167.
- 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.