

温暖化に伴う東北・北海道サケの行方：サケを守りつつ、 サケの恵みを受ける

北海道大学北極域研究センター 帰山雅秀

地球温暖化の進行は止まることを知らない。世界平均気温は、2024年とうとう産業革命前より1.5°Cを越えた。全球の平均海面水温 SST も2024年は過去最高(14.1°C)を記録した。私たちは、「気候変動は人間の幸福と惑星の健康に対して脅威であり、私たちは持続可能な将来を確保する機会の窓を急速に閉ざそうとしている」[1] ことを真剣に考え、行動することが求められている。

生態系は複雑で、ダイナミックで、不確実性の高いシステムである[2]。生態系のレジリエンスは、システムの環境収容力と生物多様性で評価され、ロックストロームはそれらの「閾値」であるティッピングポイントを越える点をプラネタリー・バウンダリーと定義した[3]。9群からなるプラネタリー・バウンダリーは、2009年には気候変動、生物多様性および生物地球化学的循環(窒素、リン等)の3群が越えていたが、わずか14年後の2023年には更に新しい物質(マイクロプラスチック、PFAS、放射性物質、GMOs等)、土地生態系の機能低下(森林伐採、都市化など)、淡水生態系の変化(青い水や緑の水)の3群が加えられ、6群が越境するようになった[4]。このように私たち人類の人口増加と活発な活動により、地球は私たち自身を含む生物が安全に生息する領域を大きく逸脱しつつある。ここでは、その一例を地球温暖化が南辺部に位置する日本のサケに及ぼす影響について紹介する。

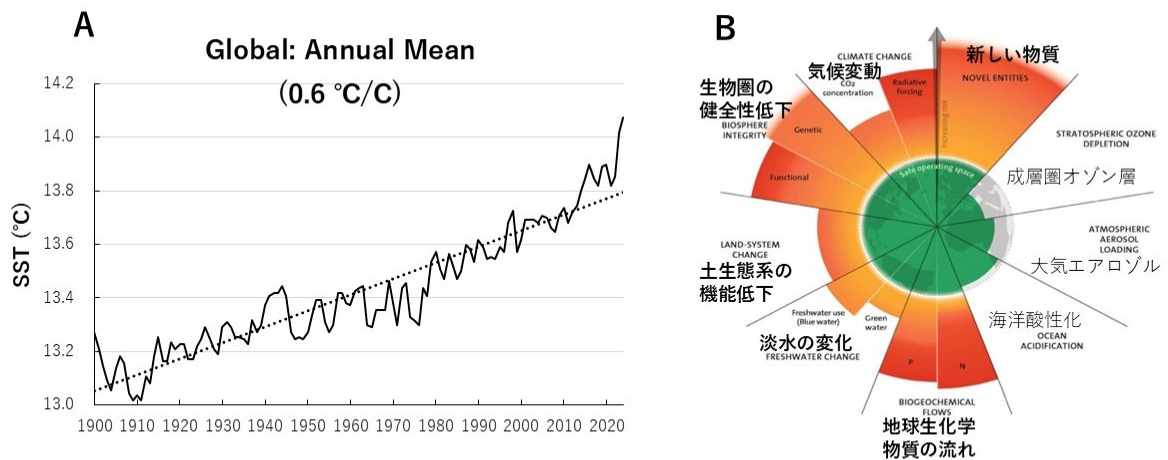


図1. 人類の活動に基づく地球環境の著しい変化。(A) 全球の海面水温の時系列変化。データは気象庁のCOBE-SST Databaseより。1900年以降、1世紀に0.6°C上昇し続けている。特に、2020年以降顕著である。(B) 2023年現在のロックストロームのプラネタリー・バウンダリー[3, 4]。

最近のサケ類のバイオマス動態と気候変動との関係

北太平洋のサケ類全体のバイオマスは、1975/76年の気候レジームシフト後、増加の一途をたどってきた。最も多いのがカラフトマス(62%)、ついでサケ(20%)、ベニザケ(14%)の順で、これら3種で全体の95%以上を占める(図2)。サケ類バイオマスの時系列変化を地域別にみると、北方のロシア

は 2000 年代後半以降増加傾向を示し、アラスカは 1990 年代以降高位安定を維持している。一方、南方のカナダのブリティッシュ・コロンビア（カナダ BC）は 1990 年代以降、日本は 2000 年代後半以降、顕著な減少傾向を示している（図 2）。

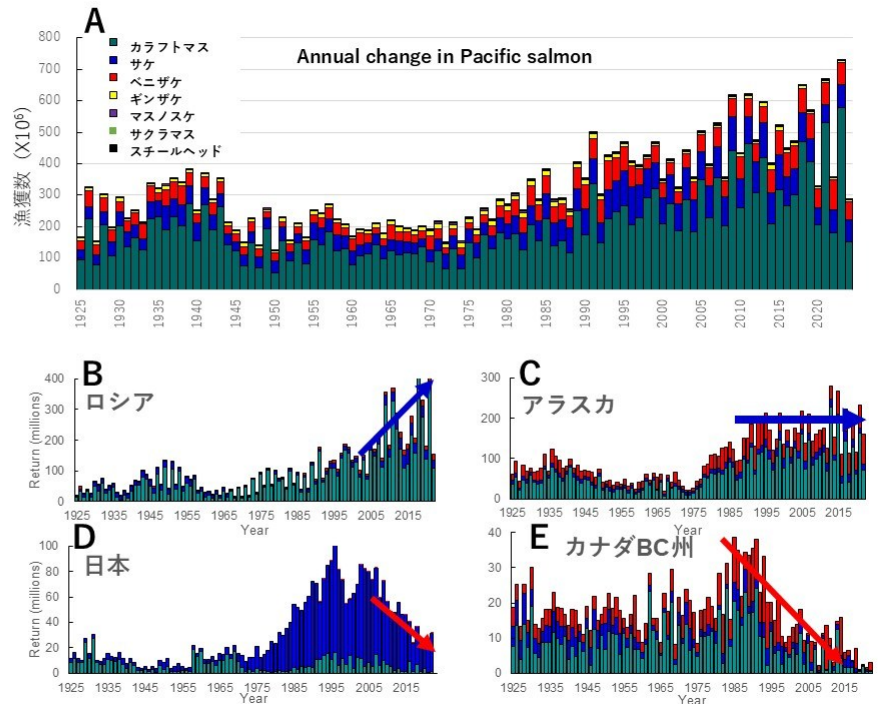


図2. サケ類バイオマスの時系列変化. データは, NPAFC Databaseより (Kaeriyama 2023 [5] 改変) .

北太平洋海面におけるサケの代謝活性温度（5～12.5℃）のエリアを適水温エリアとして、1980 年代から 2020 年代までの時系列変化を図 3 に示した。適水温エリアは、6 月に 2000 年代後半以降オホーツク海と西ベーリング海の沿岸域に接岸している。この時代からオホーツク海および西部ベーリング海の沿岸はサケ降海幼魚にとって好適な生息環境となり、バイオマスが著しく増加した時代と一致していることがわかる。一方、サケ類の幼魚が沖合へ移動する 7 月には、適水温エリアは太平洋の東岸では 1990 年代から、西岸の日本（北海道）では 2010 年代以降離岸するようになった。この時代はカナダ BC 系と北海道系サケの減少傾向が著しくなりはじめた時期と一致する。また、8 月になると、2010 年代以降、オホーツク海では適水温エリアが急激に減少するようになり、北海道系サケの環境収容力と生残率が減少する時代と一致する[5]。

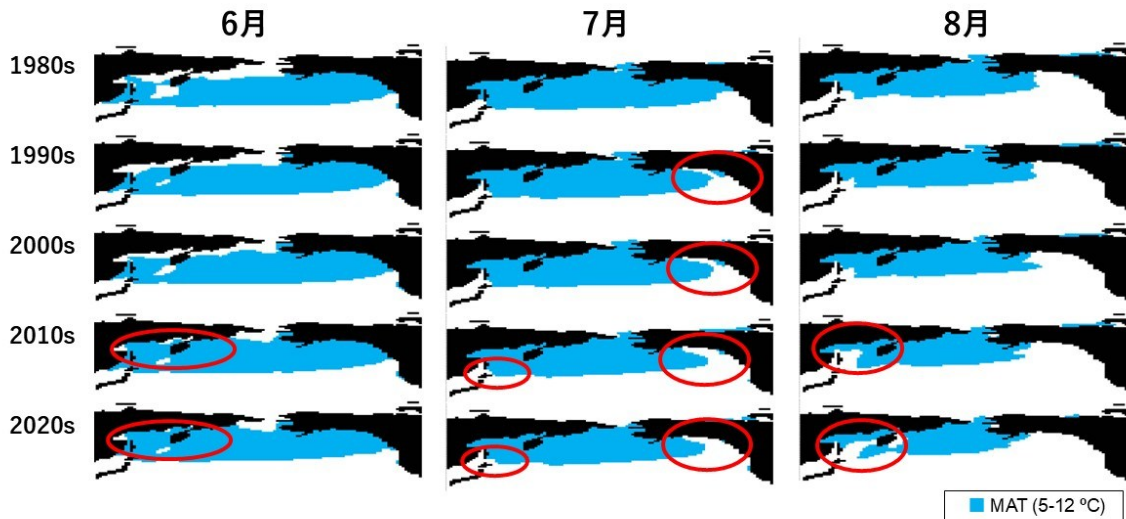


図3. 1980～2020年代の6～8月、北太平洋におけるサケの適水温エリアの時系列変化. 1980～2010年代は10年平均値, 2020年代は2020～2024年の5年平均値. データは気象庁のCOBE-SST Databaseより (Kaeriyama 2023 [5] 改変).

三陸沿岸におけるサケ幼魚の生活史パターンと地球温暖化との関係

三陸沿岸に回帰したサケ親魚の鱗からバックカリキュレーション法により幼魚期に沖合移動した体サイズ（離岸サイズ）を評価すると、サケ回帰数は幼魚の離岸サイズが 10cm-FL 以上で急激に増加することが分かる（図 4A）。最近、三陸沿岸における春の海面水温は増加傾向（0.043°C/年）にあり、結果的に幼魚が沿岸に生息する期間は年々減少傾向（-0.016 日/年）を示す（図 4C）。したがって、幼魚の沖合移動サイズは年々減少し、回帰率（親魚回帰数／幼魚放流数）も減少傾向を示す（図 4D, 4E）。これらのことは、三陸沿岸では地球温暖化の影響で海面水温の昇温に伴い、サケ幼魚は沿岸滞在期間が短くなり、十分成長できずに沖合移動せざるを得ず（図 4B）、その結果として生残率が著しく低下してきたことを示唆している [5]。

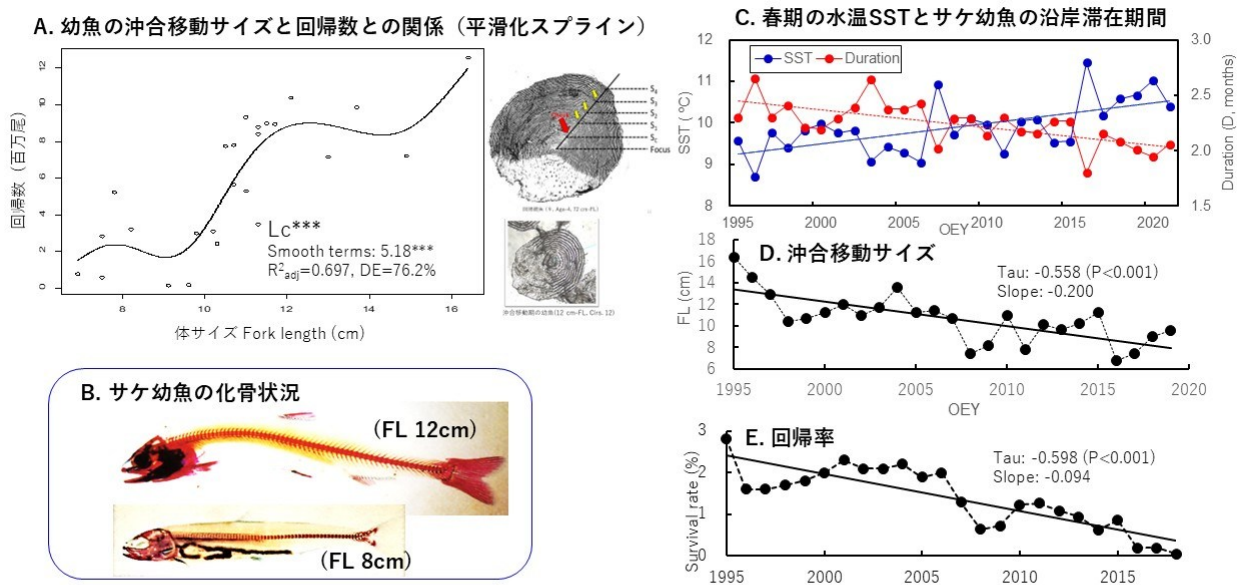


図4. 三陸沿岸におけるサケ幼魚の沖合移動サイズと回帰数との関係（一部Kaeriyama 2023 [5]改変）。

ベーリング海における北海道系サケとロシア系カラフトマスとの種間相互関係

地球温暖化の影響により著しくバイオマスが増加したカラフトマスの奇数年級群は、ベーリング海において栄養カスケードをボトムアップ型からトップダウン型へ変え、他魚種との種間相互作用にネガティブな影響を及ぼしている[6]。北海道系サケは、西部ベーリング海でロシア系カラフトマスと同所的に分布する。2000年代後半以降、温暖化によりロシア系カラフトマスのバイオマスと環境収容力は著しく増え続けている。一方、北海道系サケのそれらは減少傾向を示す(図5A)。ロック・ボルテラ競争モデルから両者の種間相互関係を求めると、北海道系サケは2000年代後半まではロシア系カラフトマスより優位であったが、それ以降ロシア系カラフトマスに負けるようになってきた(図5B)[7]。

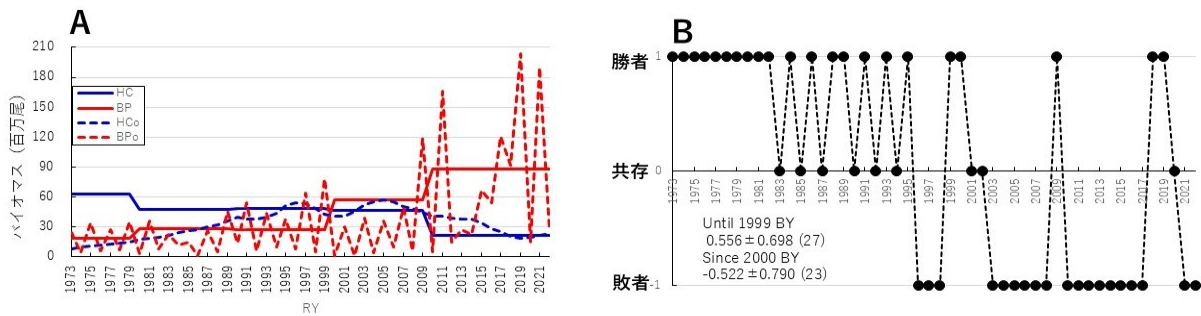


図5. 西ベーリング海における北海道系サケとロシア系カラフトマスのバイオマス、環境収容力および種間相互関係の時系列変化。A: 北海道系サケ(青線)とロシア系カラフトマス(赤線)のバイオマス(点線)と環境収容力(実線)の時系列変化。B: ロック・ボルテラの競争式から求めた北海道系サケとロシア系カラフトマスの種間相互関係の時系列変化[7]。

日本系サケの回帰数は、北海道では2004年以降、本州では1996年以降、減少傾向に転じている。サケを日本海側の対馬暖流(本流、津軽暖流、宗谷暖流)の影響を受ける暖水系と太平洋側の親潮寒流の影響を受ける冷水系に分け、ピーク時の来遊数(N_0)とt年後の来遊数(N_t)から減少率

($\ln(N_t/N_0)$)を求めると、時系列の減少傾向は北海道および本州ともに暖水系に比べて冷水系の方が著しいことがわかる(図6)。同様のことは北太平洋の東岸においても観察され、カナダBC系サケ(冷水系)の方がそれより南方のWOC系サケ(暖水系: ワシントン州、オレゴン州およびカリフォルニア州)に比べて顕著な減少傾向を示す(図6)。このことは、比較的南方に分布するサケでは冷水系の方が暖水系に比べて温暖化に比較的弱いことを示唆している[4]。

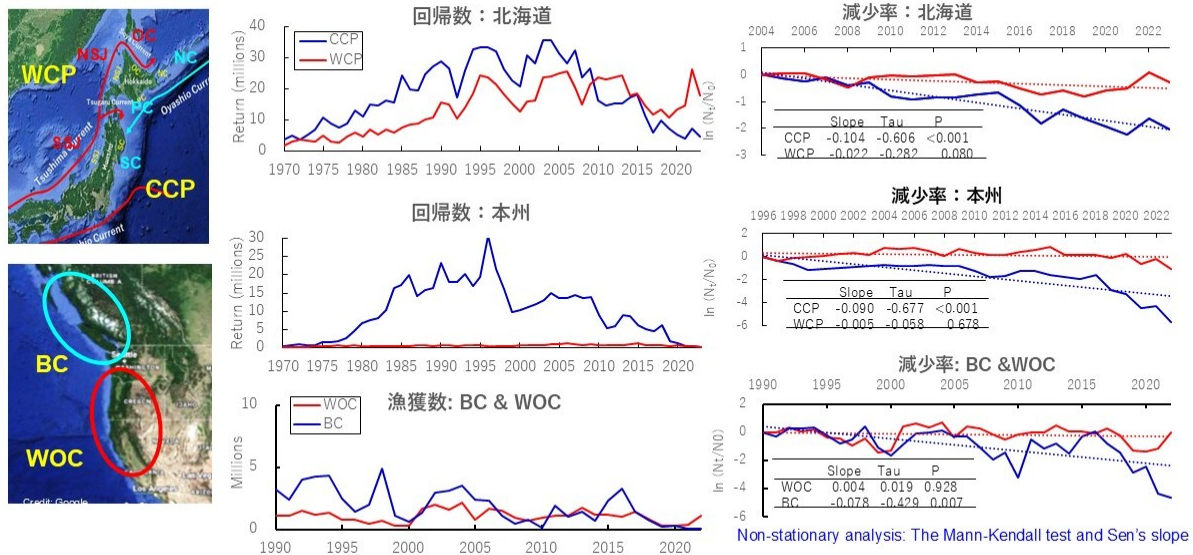


図6. 南方系サケの回帰数と減少率の時系列変化

縄文時代におけるサケの分布

縄文時代におけるサケの分布を、奈良文化財研究所の全国遺跡報告データベース

(<https://sitereports.nabunken.go.jp/ja>) よりサケ遺存体の出現状況から調べた。その結果、縄文の草創期 4 件、早期 8 件、前期 25 件、中期 33 件、後期 28 件および晩期 30 件の遺跡からサケ遺存体の発掘が確認された (図 7)。気温が現在とほぼ同じぐらいであった縄文中期以後では、北海道から太平洋側では茨城県まで、日本海側では富山県まできわめて広範囲に数多くの遺跡でサケ遺存体が発掘されている (図 7B)。一方、縄文の草創期から早期は 12 件と数は少ないものの両サイドでサケ遺存体が発掘されている。興味深いことに、草創期には多摩川の支流が流れていたと考えられる前田耕地遺跡 (東京都あきる野市) で大量のサケ遺存体が発掘されている。しかし、縄文前期になると、サケ遺存体は本州では対馬暖流系の津軽暖流域の青森県七戸町 (二ツ森貝塚) 付近から富山県 (桜町遺跡) までの日本海側には広く分布するが、岩手県以南の太平洋側には出現しない (図 7A)。この縄文前期は南極氷床コアサンプルの酸素安定同位体分析結果から、現在より気温が 2°C ほど高く [8]、いわゆる縄文海進の時代

と一致する。このことは、先述した地球温暖化の影響が顕在化しつつある現在のサケの冷水系と暖水系の減少傾向の動態（図5）とも共通した現象とみることができる。ただし、縄文海進時には、全球気温が2°C上昇するのに2000年を要した。現在の気温は約100年で1°C以上昇温しており、その昇温速度は縄文海進時より10倍早い。今後、サケがこの高い昇温速度に適応していけるかどうか注視していく必要がある。

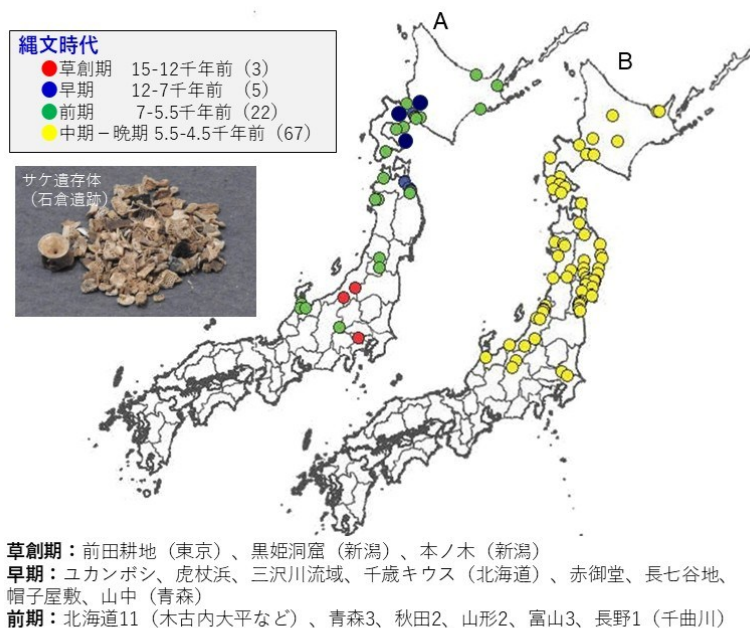


図7. 縄文時代にサケ遺存体が出現した遺跡 [4].

地球温暖化の危機にさらされている日本のサケ

以上のことから、日本系サケは地球温暖化のネガティブな影響により、①幼魚は沿岸水温の昇温に伴う沿岸滞在期間の短縮により、十分成長できずに沖合移動し、その結果として生残率が低下していること、②2010年代以降、オホーツク海の夏期 SST 昇温が適水温エリアの減少をもたらしていること、③ベーリング海では2000年代後半以降、北海道系サケが西ベーリング海系カラフトマスとの種間相互作用の影響を受けることにより、著しく減少していると考えられる。

サケを次世代に残すために

わが国は1970年代までに乱獲と自然河川生態系の喪失によりサケの野生魚を著しく減少させてきた苦い経験を有する[10]。南辺部に位置する日本系サケは地球温暖化によるネガティブな影響を受けるようになってきた。今後温暖化がさらに加速し、わが国のサケにとって不利な環境が続くことは容易に予測される[9]。すでに三陸のサケは危機的な状況にまで減少し、危惧種としての対応が求められており、今はサケを「利用」するより「守る」ことを優先すべきではないかと考える。サケ類の野生魚は、1河川で多様な産卵時期と産卵場から複数の個体群からなるメタ個体群を形成するため、適応度および遺伝的多様性が高く、孵化場魚に比べてさまざまな環境に適応している[11-14]。限られた環境条件に人為的にセレクトされた孵化場魚の適応度はその環境下では高いが、そうでない環境下では必ずしも高くはないと考えられる（図8）。

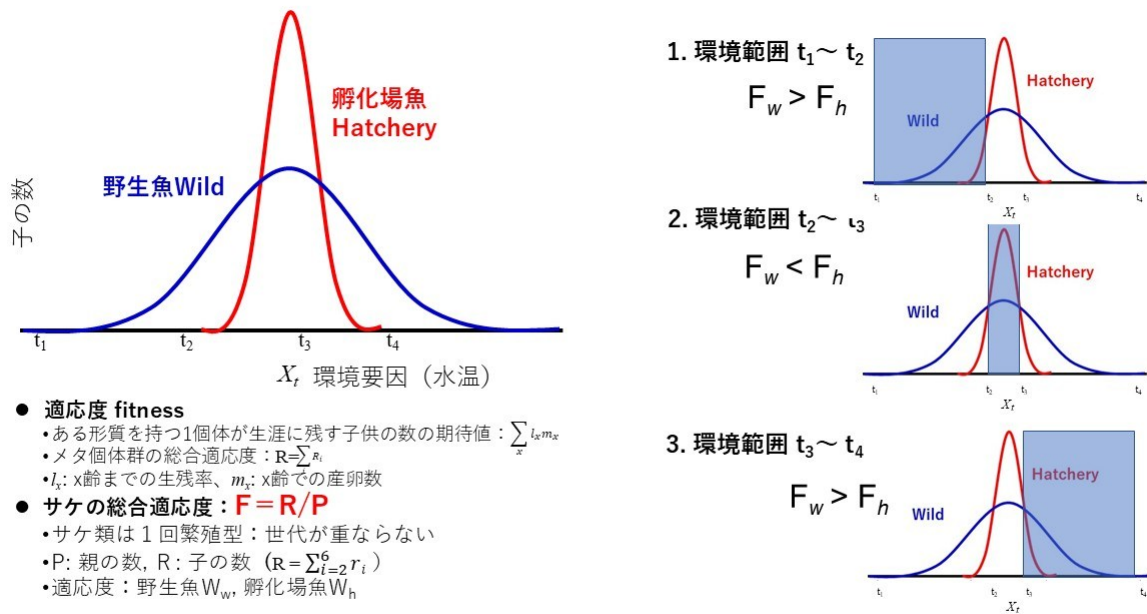


図8. サケの野生魚と孵化場魚の総合適応度

8

野生魚の適応度と多様性のレジリエンス、各地域個体群の遺伝形質、回遊行動などの生物特性などは、今後、サケの持続可能な資源保全管理のツールとして重要であろう [11, 15-16]。そのためには地域固有の野生個体群の回復と保全是必須条件であり、まず再生産の場である河川生態系のリハビリテーションとレジリエンスは急務である。また食料産業という観点から、人工孵化放流事業により生産されている孵化場魚も無視できない。わが国におけるサケの環境収容力に見合う人工孵化放流計画の見直しと新たな資源管理評価技術、海洋環境の変化に対応した放流技術のイノベーションをはかる必要がある。孵化場魚による密度依存効果、個体群の遺伝学的固有性や多様性への攪乱、繁殖成功度や家畜化にともなう適応力の低下を防ぐためにも、今後は野生魚と孵化場魚のゾーニングを具現化して行くことが最も重要な課題となってくるであろう(図9) [9, 11, 14-15]。

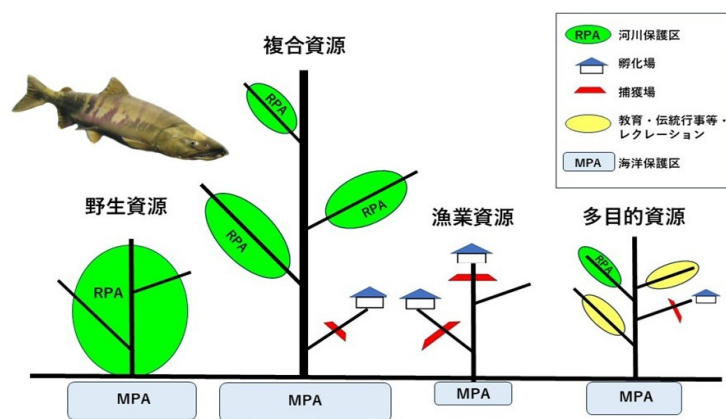


図9. ゾーニングによるサケ持続可能な資源保全管理.

参考文献

- [1] IPCC. 2023. 第6次評価報告書統合報告書. 政策決定者向け要約. pp 49. <https://www.env.go.jp/content/000265059.pdf>.
- [2] 鷲谷いづみ. 2001. 生態系を蘇らせる. 日本放送出版協会, 東京.
- [3] Rockström J, et al. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.
- [4] Richardson K, et al. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances* 9: 1-16.
- [5] Kaeriyama M. 2023. Warming climate impacts on production dynamics of southern populations of Pacific salmon in the North Pacific Ocean. *Fisheries Oceanography*, 32: 121-132 (2023). <https://doi.org/10.1111/fog.12598>.
- [6] Ruggerone GT, et al. 2023. From diatoms to killer whales: impacts of pink salmon on North Pacific ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 719: 1–40. <https://doi.org/10.3354/meps14402>.
- [7] Kaeriyama M, Alabia ID and Urawa S. 2025. Production trend of Hokkaido chum salmon estimated by multivariable models incorporating environmental factors and biological interactions in the North Pacific Ocean. NPAFC Technical Report 23: 34-39. <https://doi.org/10.23849/npafctr23/4bb8ty>.
- [8] Watanabe O, et al. 2003. Homogeneous climate variability across East Antarctica over the past three glacial cycles. *Nature* 422: 509-512. <https://doi.org/10.1038/nature01525>.
- [9] Kaeriyama M and Sakaguchi I. 2023. Ecosystem-based sustainable management of chum salmon in Japan's warming climate. *Marine Policy* 157: 105842. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105842>.
- [10] 小林哲夫. 2009. 日本サケ・マス増殖史. 北海道大学出版会, 札幌.
- [11] 帰山雅秀. 2018. サケ学への誘い. 北海道大学出版会, 札幌.
- [12] Brannon EL. 1987. Mechanisms stabilizing salmonid fry emergence timing. In: *Sockeye salmon (Oncorhynchus nerka) population biology and future management* (eds. Smith HD, Margolis L and Wood CC). *Can. Spec. Publ. fish. Aquat. Sci.* 96: 120-124.
- [13] 秦玉雪・永井愛梨・工藤秀明・帰山雅秀. 2013. 遊楽部川のサケ *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.
- [14] Urawa S, Beacham TD, Fukuwaka M and Kaeriyama M. 2018. Ocean ecology of chum salmon. In: *The ocean ecology of Pacific salmon and trout* (ed. Beamish RJ), pp. 161-317. American Fisheries Society, Bethesda. <https://doi.org/10.47886/9781934874455>.
- [15] 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. <https://doi.org/10.1007/s10641-011-9930-z>.
- [16] Kaeriyama M and Edpalina RR. 2004. Evaluation of the biological interaction between wild and hatchery population for sustainable fisheries management of Pacific salmon. In: *Stock enhancement and sea ranching, 2nd edition: Developments, pitfalls and opportunities* (eds. Leber KM, Kitada S, Blankenship HL and Svasand T), pp. 247-259. Blackwell Publishing, Oxford.