

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H04968

研究課題名(和文) 南限域に母川回帰するサケの温度適応機構の解明と温暖化への応答予測

研究課題名(英文) Temperature adaptation mechanisms of chum salmon returning to natal rivers in the southern limit of their distribution and their response to global warming

研究代表者

北川 貴士 (Takashi, Kitagawa)

東京大学・大気海洋研究所・准教授

研究者番号：50431804

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：岩手県において、秋に北上川を遡上するサケと冬に三陸河川を遡上するサケの温度生理学的特性を、代謝速度を計測することによって評価した。その結果、遡上期が早く、河口から産卵場への遡上距離も長い北上川群の適水温範囲は三陸群よりも約3℃高い範囲を示した。数理モデルから、北上川群は急流を遡上できる能力と高水温下でもエネルギー消費が低いといった代謝特性を備えていることが示唆された。野外実験からは、高い流速下では休息を伴う遊泳を行うことで効率的に遡上を行うことも分かった。以上より北上川群の代謝特性は高水温期の長距離の河川遡上に適応したものであることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果により南限分布域でのサケの温度適応機構の実態の理解が飛躍的に進むのみならず、本種の地球温暖化に対する応答予測とそれに基づいた保全や管理対策に繋がることを期待される。また、直近の課題となっている資源の回復に、北上川群のような野生種が果たす役割が明確になり、その商業的価値も高まるものと考えられる。これらは、国際連合が纏めた持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)のGoal 14にも繋がる。

研究成果の概要(英文)：In the Sanriku coastal area, Japan, early-run chum salmon experience high water temperatures during their migration, compared with those of the late-run fish, suggesting that the two populations might have different thermal performance. Thermal performance characteristics of chum salmon that return to the Kitakami River in autumn and the Kasshi River in winter were examined by measuring metabolic rates. The aerobic scope of the Kitakami population peaked at a temperature that was 3°C higher than that of the Kasshi fish. A mathematical model suggests that the Kitakami population can run up rapids and metabolic characteristics such as low energy consumption even at high water temperatures. Also, the fish attached with data-loggers released in the Kitakami River performed efficient run-up by swimming with rest at high stream velocity. These results suggest the Kitakami fish population adjusts their metabolism to enable them to swim upstream with long-distance in the warmer conditions.

研究分野：魚類行動・生理生態学

キーワード：サケ 温度適応 南限 温暖化 三陸 北上川 有酸素代謝範囲 至適水温

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

サケ (*Oncorhynchus keta*) は国内消費のみならず海外輸出品としても利用される、わが国で重要な水産資源である。本種の漁獲量は、生物学的知見の蓄積、ふ化放流技術開発に支えられ、1996年に最盛期を迎えたが、以降は減少傾向にある。加えて三陸沿岸のふ化場が東日本大震災の被害を受けたため、さらなる資源量低下が懸念されており、資源回復には一層の学術的知見の蓄積が重要となっている。本種は、ふ化後降海し、3~5年ベーリング海やアラスカ湾で過ごした後、母川に回帰する冷水種である。岩手県・宮城県の三陸沿岸および流入河川は、本種分布の南限付近に位置する。南限域は適水温域より高い水温の影響を受けると考えられるため、この水域に回帰する本種集団の温度適応の実態を詳細に調べることは、今後の地球温暖化による環境変化に伴う本種の分布状況を予測するうえで不可欠である。しかし、これまでは北海道集団を扱った生物学的研究が主であったため、本州の一級河川を中心とした生態調査は稀であった。

2. 研究の目的

三陸沿岸河川および北上川でのサケの遡上時期を調べたところ、三陸群の盛期が11月下・12月上中旬であるのに対し、北上川群は高水温期の10月上・中旬に迎えることが分かってきた。カナダ・フレーザー川に遡上するベニザケ (*O. nerka*) は、支流ごとに集団が遺伝的に分化しており、長距離を遡上する集団ほど広温にわたって遊泳能力が持続され、その原因として、酸素供給をつかさどる心臓のサイズが大きいこと、心筋に含まれるアドレナリン受容体数が高いことが明らかにされている (Eliason et al. 2011)。このことから、本種においても来遊時期が異なる群で、内的 (生理的) 耐性の違いにより、温度耐性・遊泳能力に差異が生じると予想される。

本研究では、南限域に位置する母川に回帰するサケ親魚の温度適応機構を明らかにすることを目的とし、(1) 閉鎖循環式水槽を用いた温度耐性・遊泳能力の計測、(2) バイオロギングによる野外の行動生態・遊泳生理の計測、(3) 数理モデルによる本種の遡上遊泳特性の把握、

(4) 心筋アドレナリン受容体分析、および (5) 成熟状態の推定を行い、本種の三陸群・北上川群集団で比較を行った。

3. 研究の方法

(1) 初秋に北上川を遡上するサケ集団と冬季に三陸河川 (釜石：甲子川) を遡上する集団の温度特性を、代謝速度を計測することによって評価した。計測にはスタミナトンネルと呼ばれる閉鎖型の実験水槽を用いた。水槽内でサケを半強制的に遊泳させ、溶存酸素量の変化を計測することで、両集団間の代謝速度を計測した。

(2) 数理モデルを構築し、北上川のサケの代謝特性が回遊 (移動) コストに及ぼす影響について検討した。モデルにはサケが遡上中に疲労し、休息するという効果を含めた。(1) より得られた北上川群の最大酸素消費速度をもとに持続可能な遊泳速度を水温ごとに推定し、それ以上の速度での遊泳には休息のコストが加算される設定とした。

(3) 2016~2017年にかけて、電波発信機による追跡調査を北上川 (10月上~11月下旬) と甲子川 (11月下~12月下旬) で行なった。遡上、産卵時の経験水温を明らかにするために、一部の個体に行動記録計を装着し、経験水温を記録した。

(4) 北上川と甲子川で採集した本種から心筋を摘出し、組織の一部を放射性リガンドに浸漬した。液体シンチレーションカウンターで放射活性を測定し、アドレナリン受容体数、タンパク量あたりのアドレナリン受容体量、結合親和性 (K_d)、最大結合数 (B_{max}) を算出した。

(5) 北上川に遡上するサケの成熟状態を推定するために、河口付近 (追波湾) 中流域、産卵場所 (豊沢川) で捕獲された個体の血中の $17\alpha, 20\beta$ -ジヒドロキシ-4-プレグネン-3-オン (DHP) 濃度を測定した。

4. 研究成果

(1) 12月に遡上する三陸 (甲子川 (釜石市) 遡上) 群の、有酸素代謝範囲から推定された適水温範囲は、 $10.7 \sim 17.5^\circ\text{C}$ (至適水温: 14.0°C) であったのに対し、北上川群は $12.8 \sim 20.8^\circ\text{C}$ (至適水温: 17.6°C) と、三陸群よりも約 3°C も高くなった (図)。北上川群の安静時の代謝速度は三陸群と比較して低かったことから、北上川群は高水温下でのエネルギー消費が少ないこともわかり、北上川群は高い水温で効率よく遡上できることが予想された。

(2) 数理モデル用いて北上川群のサケの河川移動 (遡上) コストを流速・水温条件を変えて推定したところ、流速が 0.8 m s^{-1} を超えるような条件下では、休息を伴う遊泳が移動コストを最小化することがわかった。また、適水温から至適水温帯である $12.8 \sim 17.8^\circ\text{C}$ 付近がコストを最小にすると推定された。

(3) 野外調査の結果、北上川の河口から約 50 km 地点では 0.8 m s^{-1} 以上の流速区間が出現しており、行動記録計を用いた放流実験からも 50 km より上流域で、供試魚は休息を伴う遊泳を行っ

ていた。また、北上川群の遡上時の経験水温は、数理モデルによって推定された移動コストを最小化する水温と一致していた。北上川群の遡上時期が早い理由については、稚魚のオホーツク海までの回遊が関係していると考えられた。北上川河口は三陸海岸の南端に位置し、北上川で生まれた稚魚は他の集団に比べ長距離を回遊しなければならいため、早期に降海する必要がある。そのため親魚は、稚魚の降海に合わせて水温の高い時期に、産卵に適した上流域まで遡上する必要があると考えられた。

(4) 北上川の10、11月、甲子川の11、12月の水温はそれぞれ、16.9、12.1、11、8.5°Cであった。心筋アドレナリン受容体の結合親和性(Kd)の平均値について、北上川の10、11月、甲子川の11、12月がそれぞれ247.02、202.65、287.44、752.62(nM)となった。最大結合数(Bmax)の平均値については、北上川の10、11月、甲子川の11、12月がそれぞれ、18.03、30.54、23.57、48.60(fmol mg protein⁻¹)となり、両河川とも水温低下に伴い増加する傾向が見られた。これは、低水温に代謝を一定に保つための応答であると考えられた。一方、Kdの差異は甲子川で顕著であった。これは魚体の生理状態に起因するものであると考えられた。

(5) 最終成熟誘起ホルモンであるDHPは北上川河口から産卵場所に進むにつれて上昇し、北上川系群が遡上中に成熟していることが分かった。一方、甲子川遡上個体を含む三陸後期群では湾内ですでに最終成熟を迎えており(豊沢川捕獲個体と同程度の成熟度)、二つの系群の遡上生態が大きく異なることが明らかになった。また北上川に遡上中の個体の鰓でのNa⁺, K⁺, ATPaseやNa⁺, K⁺, 2Cl⁻共輸送体など浸透圧調節関連分子の遺伝子発現は成熟が進むにつれて変化するなど、環境塩分に依存しないこの時期特有の遺伝子発現パターンが認められた。

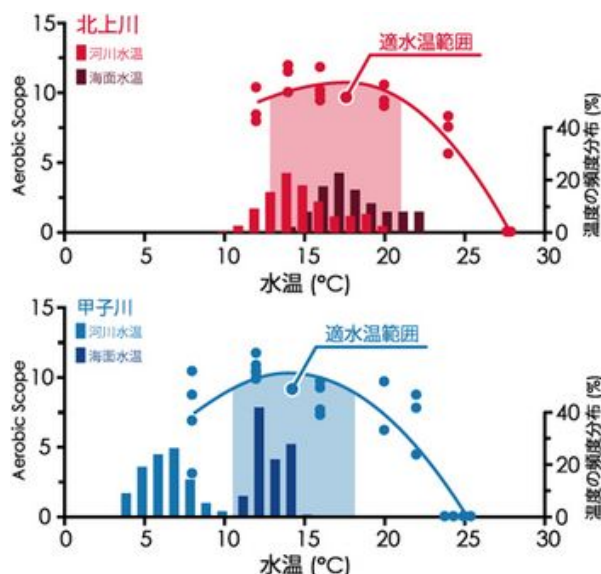


図1：北上川と甲子川（三陸後期群）のサケの適水温範囲と環境水温。丸印：有酸素代謝範囲（酸素消費速度の最大値と安静時の代謝速度の差）。ヒストグラム：河川水温と海面水温の頻度分布。適水温範囲：有酸素代謝範囲の最大値の90%以上を示す範囲。

< 引用文献 >

Eliason EJ, Clark TD, Hague MJ, Hanson LM, Gallagher ZS, Jeffries KM, Gale MK, Patterson DA, Hinch SG, Farrell AP (2011). Differences in thermal tolerance among sockeye salmon populations. *Science* 332, 109-112.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takaaki K. Abe, Takashi Kitagawa, Tuya Makiguchi, Katsufumi Sato	4. 巻 222
2. 論文標題 Chum salmon migrating upriver adjust to environmental temperatures through metabolic compensation.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Experimental Biology	6. 最初と最後の頁 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） jeb.186189 doi: 10.1242/jeb.186189	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 北川貴士	4. 巻 40
2. 論文標題 データ・ロガーによるサケの行動解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 海洋と生物	6. 最初と最後の頁 449-452
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 北川 貴士, 川上 達也, 野畑 重教, 峰岸 有紀, 伊藤 元裕, 大竹 二雄, 青山 潤, 兵藤 晋	4. 巻 83
2. 論文標題 通し回遊魚に対する震災の影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本水産学会誌	6. 最初と最後の頁 681~684
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.2331/suisan.WA2432-11	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Takashi Kitagawa, Susumu Hyodo, Katsufumi Sato	4. 巻 119
2. 論文標題 Atmospheric depression-mediated water temperature changes affect the vertical movement of chum salmon <i>Oncorhynchus keta</i>	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Marine Environmental Research	6. 最初と最後の頁 72-78
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.marenvres.2016.05.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shigenori Nobata, Takashi Kitagawa, Kiyoshi Tanaka, Kosei Komatsu, Yoshinori Aoki, Katsufumi Sato, Yoshio Takei, Susumu Hyodo	4. 巻 36
2. 論文標題 Spreading of river water guides migratory behavior of homing chum salmon <i>Oncorhynchus keta</i> in Otsuchi Bay, a narrow inlet with multiple river flows	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Zoological Science	6. 最初と最後の頁 449-457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2108/zs190026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 飯野佑樹, 阿部貴晃, 北川貴士, 長坂剛志, 清水勇一, 太田克彦, 川島拓也, 河村知彦
2. 発表標題 水温や餌料環境がサケ稚魚の代謝速度を介した成長速度に与える影響.
3. 学会等名 2018年度水産海洋学会研究発表大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯野佑樹, 阿部貴晃, 北川貴士, 長坂剛志, 清水勇一, 太田克彦, 川島拓也, 河村知彦
2. 発表標題 サケ稚魚の代謝速度と成長速度に及ぼす水温と餌料環境の影響
3. 学会等名 第12回サケ学研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川貴士
2. 発表標題 東北太平洋岸に回帰するサケ親魚の遊泳行動および代謝特性.
3. 学会等名 第11回サケ学研究会・特集「サケの資源変動要因を探る」(北海道大学) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部貴晃, 北川貴士, 牧口祐也, 佐藤克文
2. 発表標題 遡上時期の異なる本州サケ集団間でみられた適水温の違い
3. 学会等名 第11回サケ学研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 北川貴士
2. 発表標題 データ・ロガーによるサケの行動解析
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会春季大会シンポジウム「環境変動下におけるサケの持続可能な資源管理」(東京海洋大)(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部貴晃, 北川貴士, 牧口祐也, 佐藤克文
2. 発表標題 遡上時期の異なる本州サケ集団間でみられた高温耐性と至適水温範囲の違い
3. 学会等名 平成30年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北川貴士, 阿部貴晃, 伊藤元裕, 川上達也
2. 発表標題 大槌湾におけるサケ稚魚分布調査と今後の展開
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「南限のサケ研究-地域性に基づく新たな生物資源像」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野畑重教, 青木良徳, 伯耆匠二, 北川貴士, 佐藤克文, 竹井祥郎, 兵藤 晋
2. 発表標題 サケの母川回帰行動と性成熟との関係に関する研究
3. 学会等名 平成29年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野畑重教
2. 発表標題 大槌湾におけるサケ回帰親魚の行動生理学的解析
3. 学会等名 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「南限のサケ研究-地域性に基づく新たな生物資源像」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 阿部貴晃, 北川貴士, 牧口祐也, 佐藤克文
2. 発表標題 遡上時期の異なるサケ集団間での至適水温範囲の違い
3. 学会等名 第64回日本生態学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 阿部貴晃, 北川貴士, 牧口祐也, 佐藤克文
2. 発表標題 遡上時期の異なるサケ集団間での至適水温範囲の違い
3. 学会等名 平成29年度日本水産学会春季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野畑重教, 青木良徳, 伯耆匠二, 北川貴士, 佐藤克文, 兵藤晋
2. 発表標題 三陸沿岸におけるサケの遡河行動開始の生理学的背景
3. 学会等名 第12回サケ学研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	野畑 重教 (Nobata Shigenori) (00526890)	東京大学・大気海洋研究所・特任助教 (12601)	
研究 協力者	阿部 貴晃 (Abe Takaaki)		
連携 研究者	小系 智子 (Koito Tomoko) (10583148)	日本大学・生物資源科学部・講師 (32665)	