

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04543

研究課題名(和文) 鱭および耳石の安定同位体・微量元素組成によるサケの沖合生活期における生態の解明

研究課題名(英文) Life history of chum salmon *Oncorhynchus keta* during the period migrating in the North Pacific inferred from scale and otolith elemental and stable isotopic compositions

研究代表者

大竹 二雄 (Otake, Tsuguo)

東京大学・大気海洋研究所・特任研究員

研究者番号：20160525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,600,000円

研究成果の概要(和文)：1980年代と2010年代に岩手県津軽石川に遡上したサケ鱭の安定同位体比(^{15}N 、 ^{13}C)から両年代のサケの餌生物に変化がないことを明らかにした。また、2011年に北海道の河川に遡上したサケ鱭の安定同位体比から若齢(2歳)・小型で遡上した個体の栄養段階が他の年齢群に比べて高く、その回遊経路や摂餌環境が異なる可能性を示した。また、2011、2012年に本州、北海道の各河川に遡上したサケの耳石微量元素の成長に伴う変化を調べ、Ba/Ca、Li/Ca、Sr/Caに周期的変化がみられること、またBa/Ca、Li/Caのピークの位置と高さが由来河川で異なり、サケの回遊経路が多様であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Stable isotope analysis (SIA; ^{15}N , ^{13}C) of scales from chum salmon (*Oncorhynchus keta*) ascending the Tsugaruishi River (Iwate Prefecture) in the 1980s and 2010s revealed that food item of 2010s fish during their migration in the North Pacific did not differ from that of 1980s fish. Younger aged (two-year-old) fish comprised of small sized one has higher relative growth rate during last growth period (RGR) with higher scale ^{15}N than fish of higher ages, suggesting that they inhabited an feeding environment that yielded higher SI in early migration period. It also indicates that they might have a migration route different from the other aged fish having lower RGR and lower SI. Otolith elemental analysis revealed that Ba/Ca, Li/Ca and Sr/Ca periodically fluctuated in the otolith portion corresponding to the migration period in the North Pacific. Those peak positions and levels were different among the individual origins, suggesting that migration route varied among origins.

研究分野：魚類生態学

キーワード：サケ 鱭 耳石 安定同位体比 微量元素

1. 研究開始当初の背景

近年、我国の水産重要種の一つであるサケの来遊数(産卵遡上魚数)の減少と小型化が顕著であり、その減少要因を解明し資源増加に向けた方策の立案が喫緊の課題になっている。近年のサケ来遊数減少の要因として北太平洋におけるレジームシフトや温暖化などの環境変化による沖合生活期の減耗の増加、冬季の水温上昇に起因する降海直後の初期減耗の増加、産卵親魚の沿岸回遊期の減耗などが考えられている。しかし、いずれについても実証には至っていない。

2. 研究の目的

(1) 近年、鱸の窒素・炭素安定同位体比(^{15}N 、 ^{13}C)が体組織の安定同位体比の変化と同調し、個体の生息場所や由来判別(Rmsay et al. 2012, Woodcock et al. 2014)、栄養状態や摂餌生態の解析(Trueman et al. 2012)に有効であることが指摘された。本研究では鱸の安定同位体比分析により不明な部分が多いサケの沖合生活期の摂餌生態に関する知見の集積を図る。鱸は1980年代からの膨大な試料の蓄積がある。そこで、本研究では過去から蓄積された鱸を活用し、サケの来遊数の多かった1980年代に岩手県に来遊したサケの鱸と来遊数が減少し小型化が著しい近年の鱸の安定同位体比を比較することで来遊数の変動と沖合生活期の摂餌生態との関係を明らかにすることを目的の一つとした。

(2) サケの耳石の微量元素組成によるサケの由来(母川)判別、および回遊履歴の推定の可能性については、本研究代表者を含む多くの研究者により指摘されてきた。本課題においては、本研究代表者がこれまで進めてきた北海道、本州日本海側、本州太平洋側(岩手県)に回帰したサケの耳石微量元素分析を用いた回遊履歴の推定に関する研究をさらに進展させることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) **予備的検討**: サケの鱸の安定同位体比分析法を確立するため、鱸分析試料の前処

理(洗浄と酸処理)が分析結果に与える影響、分析に必要な試料重量、同一個体内の鱸間の安定同位体比のばらつき、Overplating(古い組織の上に新しい組織が重なって形成される)が安定同位体比に及ぼす影響を検討した。分析には岩手県熊野川に2011年12月に産卵遡上したサケの鱸を用いた。洗浄液には5% H_2O_2 - 5% NaOH 、酸処理には1.2N HCl を用い、洗浄の有無と酸処理の有無の4通りの組み合わせを検討した。また、上記の洗浄液で洗浄した鱸について、1枚を1/2、1/4、1/8、1/16に分割し、それぞれを秤量した上で分析し、1/2分割の鱸の分析結果を基準として分析に必要な最小重量を検討した。同一個体内の鱸間の安定同位体比のばらつきについては、1個体当たり5部位から採取した鱸を分析し、それらの結果を比較した。分析に用いた鱸は洗浄処理のみを施した。Overplatingの影響については4歳、5歳の産卵遡上魚を用い、下記の式(1)、(2)が成立するものと仮定して検討した。

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{回帰1年前測定値}} = (1-X_1) \delta^{15}\text{N}_{\text{回帰1年前の成長帯の推定値}} + \delta^{15}\text{N}_{\text{回帰年の成長帯の測定値}} \dots(1)$$

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{回帰1年前測定値}} = (1-X_2) \delta^{15}\text{N}_{\text{回帰2年前の成長帯の推定値}} + \delta^{15}\text{N}_{\text{回帰1年前の成長帯の推定値}} + \delta^{15}\text{N}_{\text{回帰年の成長帯の測定値}} \dots(2)$$

なお、 X_1 、 X_2 はそれぞれ回帰1年前と2年前のOverplatingの割合を示し、測定値と推定値はそれぞれの年齢毎の平均値を用いた。

安定同位体比分析にはいずれも東京大学大気海洋研究所の安定同位体比質量分析装置(FLASH2000/DELTA V, Thermo Fisher Scientific社製)を用いた。試料は秤量後、スズ箔または銀箔で包み、燃焼法で分析した。リファレンスガスには窒素と二酸化炭素を用い、ワーキングスタンダードとしてアラニン($^{15}\text{N}=1.3\text{‰}$ 、 $^{13}\text{C}=-19.6\text{‰}$ 、SIサイエンス社製)を用いた。ワーキングスタンダードの測定は分析の最初と最後に8個、その間9~15試料毎に1個の割合で行った。安定同位体比はいずれも標準試料の千分偏差(式

(3))として求め、窒素、炭素の標準試料としてそれぞれ大気中の窒素と PDB(Pee Dee Belemnite; 矢石化石)を用いた。

$$\delta \text{値} = [R_{\text{試料}}/R_{\text{標準試料}} - 1] \times 1000 \quad \dots(3)$$

R: 窒素、または炭素安定同位体比

(2) **鱗の安定同位体比の年代間比較**: 来遊数の多かった年代と少なかった年代の鱗の安定同位体比の比較には、岩手県津軽石川に1982年~1984年と2011~2013年に産卵遡上したサケ3~6歳の鱗を材料とした。いずれも遡上ピーク時に採捕した個体を用いた。鱗の分析には Overplating の影響を配慮し、各個体から得られた鱗の最外縁の成長帯(前年の冬季以降に形成された部分)のみを用いた。いずれも前処理として洗浄のみを行い、酸処理は施さなかった(本研究内容(1)-の結果より)。分析は予備検討(1)で記した方法で行った。

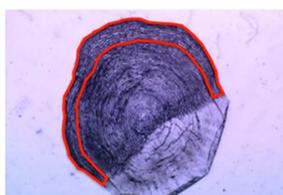


図1. 分析に用いたサケ鱗の最外縁部

(3) **鱗の安定同位体比と摂餌・成長の関係**: 2011年に北海道静内川に産卵遡上したサケ3~6歳魚と2013年に北海道石狩川に産卵遡上した2歳魚の鱗を材料とした。分析には(2)同様、最外縁の成長帯のみを用いた。鱗はいずれも洗浄処理のみを施し、予備検討(1)で記した方法で分析を行った。

(4) **耳石の微量元素分析による回遊履歴の推定**: 2011年に北海道4地域、本州日本海側、岩手県の計13河川に産卵遡上したサケ4歳魚計47個体の耳石を材料とした。分析にはレーザーアブレーション装置(213nm ND-YAG laser ablation system, New Wave社製)を装着したICP質量分析装置(7700型、Agilent社製)を用い、耳石核を研磨表出させた耳石表面の核から縁辺までの線分

析を行った。

4. 研究成果

(1) 予備的検討

洗浄、酸処理が分析結果に及ぼす影響:

^{15}N については洗浄、酸処理とも分析結果に影響は認められなかったものの ^{13}C については酸処理で有意な増加が認められた。洗浄によっても若干の増加が認められたもののその変化は小さかったことから、以降の分析は洗浄のみを施すのが良いと判断された。

分析に必要な試料の重量: 試料の重量が

0.1 mg 以下で分析値のばらつきが大きくなったことから、鱗の安定同位体分析には少なくとも0.1 mg 以上の鱗試料が必要であると結論された。

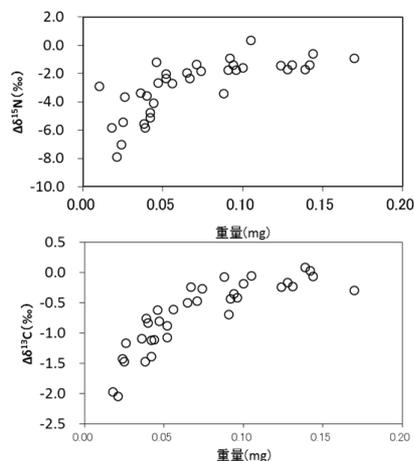


図2. 鱗分析試料の重量(mg)と $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の値の変化率
同一の鱗を1/2に分割した試料の安定同位体比との差の変化を示す。

同一個体の鱗間の安定同位体比のばらつき

: 同一個体の異なる部位の鱗での ^{15}N と ^{13}C の分析値の標準偏差はそれぞれ 0.18~0.72‰、0.08~0.62‰であり、同一個体内の分析値の変化はきわめて小さかった。これより、同一個体内の鱗の安定同位体比に部位による違いは無視することができ、鱗分析には複数の部位から採取したものをまとめて分析することも可能であることが示された。

Overplating が安定同位体比に及ぼす影響

: (1)、(2)式から遡上年の成長帯の安定同位体比に及ぼす産卵遡上1年前の影響は、4歳魚で0.62、5歳魚で0.63と推定され

た。また、5歳魚で推定された回帰2年前の影響は0.42と推定された。いずれも影響の程度は大きく、1年以上前に形成された成長帯の分析結果の解釈には注意を要することが明らかになった。

(2) 鱗の安定同位体比の年代間比較

最外縁成長帯 ^{15}N は3歳の値が4~6歳の値に比べて低かった。一方、1982~1984年と2011年~2013年の産卵遡上魚の鱗安定同位体比に違いは認められなかった。 ^{13}C についても産卵遡上の年代間での違いは認められなかった。これらのことは両年代のサケが沖合生活期において餌としている生物種、あるいは餌としている生物種の栄養段階に違いがないことを示唆する。

(3) 鱗の安定同位体比と摂餌・成長の関係

鱗最外縁成長帯の ^{15}N と ^{13}C はそれぞれ9.5~13.4‰と-17.6~-14.0‰であった。安定同位体比と供試魚の年齢、尾叉長、鱗最外縁部の相対成長率、肥満度との関係を調べると、 ^{15}N には尾叉長との間に正の相関があり、この変化は栄養段階の変化と関係しているものと考えられた。一方、 ^{13}C にはいずれとの間にも関係性は認められなかった。2歳魚(石狩川遡上群)の小型個体は鱗最外縁部の ^{15}N はより高齢で遡上した個体に比べて高い値を示し(図3)、鱗最外縁部の相対成長率も高かった(図4)。これらのことは、2歳で産卵遡上した個体の産卵回遊開始前の栄養段階が他の個体とは異なり高い段階にあり、摂餌海域(回遊履歴)が他の年齢群の個体と異なった、すなわち異なる回遊経路を辿った可能性を示唆する。

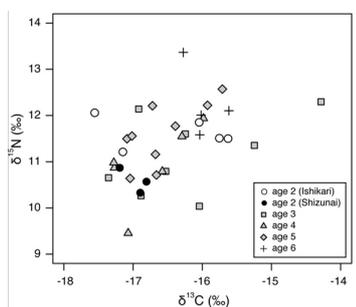


図3. 産卵遡上年齢と鱗最外縁成長帯の安定同位体比

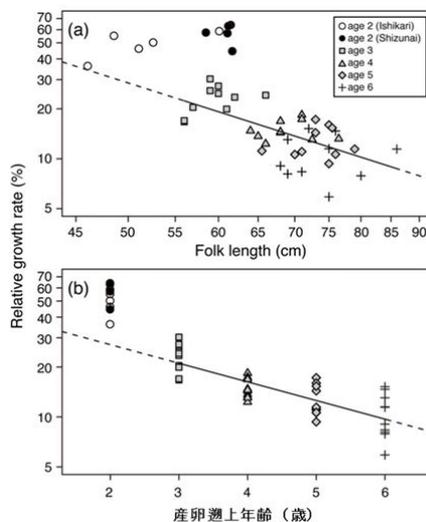


図4. 産卵遡上年齢と産卵遡上年の成長率

(4) 耳石の微量元素分析による回遊履歴の解明

各河川に産卵遡上した4歳魚の耳石の微量元素(Ca, Li, Na, Mg, K, Mn, Zn, Sr, Ba)の生活史断面を比較すると沖合生活期に対応する耳石部分においてBa/Ca, Li/Ca, Sr/Caに周期的な変化が認められ、さらにBa/CaとLi/Caのピークの位置と高さによって由来河川の地理的分布による違いが認められた。このことは日本産サケの回遊経路に母川地域による違いがあることを示唆し、サケの沖合域における回遊経路が従来考えられていたよりも多様である可能性を示す。

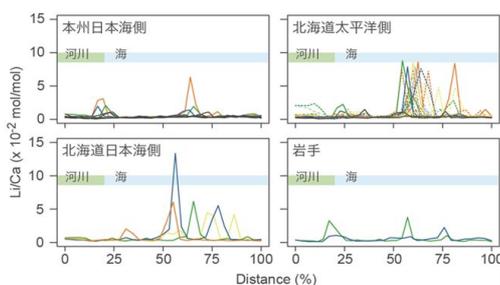


図5. 耳石Li/Caの成長に伴う変化。由来河川間でピークの位置や高さが異なる。

(5) サケ来遊数減少について

本研究より、来遊数の多かった1980年代と来遊数の少ない2010年代でサケの安定同位体比に違いがないことが明らかになった。このことは、両年代間で沖合生活期サケの摂餌生態に大きな変化がない、すなわち餌としている動物プランクトンの種組成や栄養段階に変化はないことを示している。これより、

サケの成長海域である北太平洋のプランクトン組成に変化はなかったものの海域全体としての生産性が低下した、あるいは温暖化に伴う海水温の上昇によりサケの生活海域が北上し、生活海域の面積自体が減少するとともに他種との餌を巡る競合が厳しくなったかもしれない、これらのことが来遊数減少の要因として挙げられる可能性がある。本研究から鱸の安定同位体比が産卵回遊期の摂餌生態の一端の解明につながる情報を提供すること、また耳石微量元素分析による回遊履歴推定の可能性が改めて示された。今後、さらに鱸や耳石の化学分析による研究を進めることでサケの沖合生活期の生態の理解のさらなる深化が期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

- 1) Shirai K., Otake T., Amano Y. (他 6 名, 2 番目) Temperature and depth distribution of Japanese eel eggs estimated using otolith oxygen stable isotope. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, (in press)
- 2) Miller M.J., Wouthyzen S., Otake T., Tsukamoto K. (他 10 名, 10 番目) Contrasting biodiversity of eel larvae across the central Indian Ocean subtropical gyre. *Deep-Sea Research Part II*, 査読有, (in press)
- 3) 北川貴士, 川上達也, 大竹二雄 (他 5 名, 6 番目) 大槌湾周辺における東北地方太平洋沖地震後の海洋生態系の変化. *日本水産学会誌*, 査読なし, 83: 681-684, 2017
- 4) Fullenbach C.S., Schone B.R., Shirai K., Takahata N., Ishida A., Sano Y. Minute co-variations of Sr/Ca ratios and microstructures in the aragonitic shell of *Cerastoderma edule* (Bivalvia) – Are geochemical variations at the ultra-scale masking potential environmental signals? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 査読有, 205: 256-271, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.02.019>
- 5) Kubota K., Shirai K., Murakami-Sugihara N., Seike K., Hori M., Tanabe K. Annual shell growth pattern of the Simpson's hard clam *Mercenaria stimpsoni* as revealed by sclerochronological and oxygen stable isotope measurements. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 査読有, 465: 307-315, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.05.016>
- 6) Hata M., Kawakami T., Otake T. Immediate impact of the tsunami associated with the 2011 Great East Japan Earthquake on the *Plecoglossus altivelis altivelis* population from the Sanriku coast of norther Japan. *Environmental Biology of Fishes*, 査読有, 99: 527-538, 2016. DOI 10.1007/s1064-016-0495-8
- 7) Miller M.J., Feunteun E., Tsukamoto K., Otake T. (他 9 名, 13 番目) Biodiversity and distribution of leptocephali from west of the Mascarene Plateau in the southwest Indian Ocean. *Progress in Oceanography*, 査読有, 137:84-102, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.026>
- 8) Feunteun E., Miller M.J., Tsukamoto K., Otake T. (他 8 名, 12 番目) Stable isotope composition of anguilliform leptocephali and other food web compositions from west of the Mascarene Plateau. *Progress in Oceanography*, 査読有, 137: 69-83, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.05.024>
- 9) Hori M., Sano Y., Ishida A., Takahata N., Shirai K., Watanabe T. Middle Holocene

daily light cycle reconstructed from the strontium/calcium ratios of a fossil giant clam shell. Scientific Reports, 査読有, 5: 8734, 2015. DOI 10.1038/srep08734

- 10) Takahata H., Asami R., Otake T., Abe O., Miyajima T., Kitajima H., Iryu Y. Quantitative analysis of intraspecific variations in the carbon and oxygen isotope compositions of the modern cool-temperature brachiopod *Terebratulina crossei*. Geochimica et Cosmochimica Acta, 査読有, 170: 301-320, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2015.08.006>
- 11) 大竹二雄, 川上達也, 畑正好, 武島弘彦, 東日本大震災がアユ資源に及ぼした影響, 日本水産学会誌, 査読なし, 82: 146, 2016

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 大竹二雄, 川上達也, 畑正好. 東日本大震災がアユ資源に及ぼした影響, 平成 27 年度日本水産学会理事会特別シンポジウム「東北の海は今, 震災後 4 年間の研究成果と漁業復興」(招待講演), 平成 27 年, 東北大学(仙台市)
- 2) 川上達也, 畑正好, 武島弘彦, 大竹二雄. 東日本大震災で攪乱を受けたアユ個体群の回復過程, 平成 27 年度日本水産学会秋季大会, 平成 27 年, 東北大学(仙台)
- 3) Kawakami T., Shimizu Y., Otake T. (他 6 名, 9 番目) otolith stable isotope and trace element analyses to reconstruct migration history of Chum salmon *Oncorhynchus keta*. Symposium on growth-survival paradigm in early life stages of fish: controversy, synthesis, and multidisciplinary approach (国際学会), 平成 27 年, 中央水産研究所(横浜市)
- 4) 川上達也, 白井厚太郎, 大竹二雄 (他 5 名, 8 番目) 耳石微量元素分析によるサケの回遊履歴推定の可能性. 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 平成 28 年, 東

京海洋大学(東京都)

- 5) 有我啓作, 佐々木剛, 川上達也, 大竹二雄. 耳石 Sr:Ca 比を用いた宮古湾産サクラマスの回遊履歴の推定. 平成 28 年度日本水産学会春季大会, 平成 28 年, 東京海洋大学(東京都)
- 6) 清水まどか, Miller M.J., 青山潤, 木村伸吾, 大竹二雄, 塚本勝巳. 南太平洋に生息するレプトセファルス幼生の分布特性. 平成 29 年度日本水産学会春季大会, 平成 29 年, 東京海洋大学(東京都)

〔図書〕(計 1 件)

- 1) Amano Y., Shiao J-C., Ishimura T., Yokouchi K. Shirai K. Otolith geochemical analysis for stock discrimination and migratory ecology of tunas. In “Biology and ecology of Bluefin tuna” pp. 225-250, CRC press (Florida, USA), 2015

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大竹二雄 (OTAKE Tsuguo)
東京大学・大気海洋研究所・特任研究員
研究者番号: 20160525

(2) 研究分担者

白井厚太郎 (SHIRAI Kotaro)
東京大学・大気海洋研究所・助教
研究者番号: 70463908