

令和4年度
海洋生態系の放射性物質挙動調査事業
報告書

令和5年3月

国立研究開発法人
水産研究・教育機構

令和4年度海洋生態系の放射性物質挙動調査事業報告書

目 次

はじめに	1
成果の詳細	
1 海洋生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
1-1 海水および海底堆積物の放射性セシウム濃度の把握および変動要因解析	3
1-2 海産生物における放射性セシウムの動態把握	10
1-3 水産物におけるストロンチウム-90 とトリチウムの濃度の把握	20
1-4 魚類生息環境判別技術の開発	25
2 内水面生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
2-1 内水面魚類における放射性物質濃度予測モデルの作成	29
2-2 内水面生態系における放射性物質の挙動把握	54
2-3 福島県富岡川における放射性物質の挙動に関する調査	65
3 福島県水産業の復興及び再生のための総合研究	
3-1 福島県産水産物の高品質化技術開発	74
3-2 消費者視点を基盤とした福島県産水産物の販売戦略構築	80

はじめに

2011年3月11日の東日本大震災に伴う東京電力（株）福島第一原子力発電所（以下「東電福島第一原発」という。）の事故により、大量の放射性物質が放出され、福島県やその近接水域の水生生物及びその生息環境が汚染された。福島県の漁業は操業の自粛を余儀なくされ、福島県の漁業再開に向けた基礎情報を得るため、小規模な操業および販売を試験的に行う「試験操業」が2012年6月に開始された。試験操業は2021年3月末で終了となり、2021年4月から本格操業への移行期間となっている。水揚量は2012年には震災前2010年の0.5%となったものの、徐々に増加して、2022年には震災前2010年の21.6%まで回復した。

事故以降、現在までのモニタリングから、海水中の放射性セシウム濃度が低下し、多くの水生生物の汚染が低減していることが把握された。その一方で、放射性セシウム濃度の高い個体の出現が散発的に見られるなど、さらなる原因の解明を進めることが必要であり、生態系における放射性セシウムの動態や食物連鎖を通じた放射性セシウムの移行過程を把握することが重要な課題となっている。

本報告書は、令和4年度に実施された「海洋および内水面における放射性物質の挙動に関する研究」、そして「震災後の資源状態および漁業の動向に適応した福島県漁業再開のための研究」についてまとめたものである。水生生物やその餌生物、生息環境中の放射性セシウム濃度や安定同位体比等の精密データを蓄積し、生態系の中の放射性セシウムの動態（それぞれに含まれる放射性セシウムの濃度がどのような地理的分布を示し、さらに時間的にどのように変化しているのか、また相互の関係はどうなっているかなど）を明らかにし、現状の把握と今後の見通しを示すことに貢献する。福島県産水産物だけでなく、東北地域、茨城県産、千葉県産の水産物についても実際の検査結果は低い濃度であるにもかかわらず、消費者の水産物汚染への懸念は未だ継続している。また、日本産水産物の輸入に関して厳しい規制を行っている国もある。このことは、現在の水産物汚染の状況が国内外の消費者に十分理解されていないことを示している。国内外の消費者の水産物に対する不安の払拭や風評被害の抑制のためにも、水生生物中の放射性物質濃度とその変化のモニタリングを継続し、食物連鎖を通じた放射性物質の挙動を把握していくこと、また得られた成果を丁寧に情報発信していく必要がある。

1. 海洋生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 1-1	課題名：海水および海底堆積物の放射性セシウム濃度の把握および変動要因解析
研究機関・研究グループ名	水産資源研究所 水産資源研究センター 海洋環境部 放射能調査グループ ¹ 寒流第2グループ ² 底魚資源部 底魚第2グループ ³ 水産技術研究所 環境・応用部門 水産工学部 水産基盤グループ ⁴
担当者職名・担当者名	グループ長・帰山秀樹 ¹ 、主任研究員・重信裕弥 ¹ 、主任研究員・笈茂穂 ² 、主幹研究員・桑田晃 ² 、研究支援職員・横内克己 ² 、主任研究員・富樫博幸 ³ 、研究支援職員・櫻井慎大 ³ 、研究員・時岡駿 ³ 、主任研究員・古市尚基 ⁴

1. 研究内容及び方法

(1) 仙台湾及び福島県沖を対象に 2011 年度からデータ取得を継続している海水の放射性セシウム(Cs-137 及び Cs-134)濃度を調査した。これまで同様、仙台湾のモニタリング定点 3 地点(E1、E4 及び C5、図 1a)において、表層、中層、近底層の 3 層より試料を採取した。福島県沖海域では課題 1-2 で実施している底びき網による魚類採取観測点において海水試料を採取した。今年度は 5 観測点(FDN070、HRN100、HRN180、ENA100 及び SOU080、図 1a)で実施した。これらの海水試料は全てガラス繊維濾紙で濾過し、溶存態の Cs-137 濃度及び Cs-134 濃度を測定した。また、春季(2022 年 3 月)及び秋季(2022 年 9 月)に福島県の極沿岸域 16 地点において採水を実施した(図 1a)。本試料については 0.45 μm のカートリッジフィルターによる濾過を行い、溶存態の Cs-137 濃度及び Cs-134 濃度を測定した。極沿岸域における同様の試料採取、分析は 2013 年 8 月より計 18 回実施している。より詳細な時系列変動を解析する目的で、福島県いわき市小名浜地先において週 1 回の頻度の海水採取、Cs-137 濃度及び Cs-134 濃度の測定も継続している(図 1a)。本試料は小名浜地先から揚水し、濾過槽を通過後の濾過海水を 0.45 μm のカートリッジフィルターで濾過した試料を分析している。本報告では昨年度報告した 2022 年 1 月 24 日以降の結果について報告する。これら極沿岸 16 地点、小名浜地先における海水の放射性セシウム濃度モニタリングは福島県水産海洋研究センターとの共同研究として実施している。

(2) 仙台湾及び福島県沖の海底堆積物に含まれる Cs-134 濃度及び Cs-137 濃度の調査を実施した。今年度は仙台湾のモニタリング定点 3 地点、課題 1-2 で実施する福島県沖海域の底びき網による魚類採取観測点、過去の報告により表層堆積物の放射性セシウム濃度が高いと指摘されてきた福島県沖海域の水深 100m 付近の観測点において柱状採泥による海底堆積物の採取を行った。実際の観測点を図 1b に示す。海底堆積物はマルチプルコアラーあるいは G.S.型表層採泥器を用いた柱状採泥を行い、堆積物の表層から 1 cm 刻みで 0-1 cm、1-2 cm を、2 cm より下層を 2 cm ごとの層別に最大 20 cm まで採取した。また、一昨年度まで継続された研究課題「海底土中の放射性 Cs 濃度の時空間変動把握」で実施された宮城県、福島県及び茨城県海域の経度約 5 分間隔で配置した観測点における Cs-137 濃度の水平・鉛直分布の経年変動を考慮し昨年度に設定した 34 観測点(図

1b の青丸)における層別海底堆積物試料を採取し、分析が完了した一部の試料について放射性セシウム濃度の鉛直分布を昨年度報告した。昨年度採取した海底堆積物の分析を全て終了したため、今年度報告する。

2. 令和4年度進捗状況・成果

(1) 福島県沖 (FDN070、HRN100、HRN180、ENA100 及び SOU080) における海水試料の Cs-137 濃度 (海水 1m³あたりの濃度; Bq/m³) は 1.3~2.4 Bq/m³の範囲であった (図2の「福島県沖」)。仙台湾における海水試料の Cs-137 濃度は 1.9~2.8 Bq/m³の範囲であった。これらの地点における海水試料の Cs-134 は全て検出下限値未満 (≤1.1 Bq/m³)であった。福島県北部の新地から県南部の勿来までの 16 地点において採取した極沿岸海水の Cs-137 濃度は 2.3~12 Bq/m³の範囲にあり、Cs-134 濃度は検出下限値未満 (≤1.2 Bq/m³)であった。2022 年 2 月 2 日~12 月 19 日の期間、福島県いわき市小名浜地先の海水における Cs-137 濃度は 1.9~7.1 Bq/m³の範囲にあり、Cs-134 濃度は検出下限値未満 (≤1.2 Bq/m³)であった (図2)。なお、図2の仙台湾及び福島県沖の Cs-137 濃度は鉛直3層の平均値を示している。いずれの地点においても 2018 年以降ほぼ同レベルの濃度水準で推移している。2019 年 10 月に小名浜地先の海水で 1 ヶ月ほど継続した Cs-137 濃度の上昇は台風による出水の影響が大きかったことが明らかになっている (Takata *et al.*, 2020)。このような台風に伴う出水が原因と考えられる一時的な Cs-137 濃度の上昇を除いた 2019 年から 2021 年の小名浜地先における海水の Cs-137 濃度は 2.5~11 Bq/m³ (2021 年度)、2.6~9.5 Bq/m³ (2020 年度)、2.1~14 Bq/m³ (2019 年度)、2.1~16 Bq/m³ (2018 年度) の範囲にあり、2022 年度の濃度変動幅(1.9~7.1 Bq/m³)は過去数年間と同程度の濃度範囲で推移している (図2)。福島県極沿岸部、福島県沖の海域(FDN070、HRN100、HRN180 及び SOU080)及び仙台湾における海水の Cs-137 濃度は昨年までの傾向を維持し、東京電力株式会社福島第一原子力発電所 (東電福島第一原発) 事故からおよそ 5 年間の時空間変動 (例えば Kaeriyama, 2017) に比べ、その変動幅が大幅に縮小していることが確認された。一方で、2019 年の台風 19 号 (令和元年東日本台風) による出水イベントで顕著であった河川からの Cs-137 の供給に伴う沿岸部の海水の Cs-137 濃度の変動に関連し、河川水の影響が大きな低塩分な水域における観測事例が報告されている (例えば 2012 年の夏井川 ; 帰山ら, 2013、あるいは 2014 年の阿武隈川 ; Kakehi *et al.*, 2016)。これら河口域においては塩分と溶存態 Cs-137 濃度の関係が希釈直線から外れるプロットが報告されており、河口域では陸域から供給される懸濁物質からの Cs-137 の溶出が強く示唆されている。昨年度は本研究で取得している沿岸部の海水の Cs-137 濃度と塩分との関係を調べたが明瞭な関係は見られなかった。Aoyama *et al.* (2023)は東電福島第一原発近傍における海水の Cs-137 濃度と降水量の関係について先行降雨指数(Antecedent precipitation index, API; American Meteorological Society, 2012)を用い解析している。その結果、海水の Cs-137 濃度と API の間には相関が認められ、その関係は 5 日間~7 日間積算 API において最大となる傾向を報告している。本研究では小名浜地先で得られた海水の Cs-137 濃度と、小名浜における降水量から計算した API との関係を整理した。図3に小名浜地先における海水の Cs-137 濃度と 1 日から 7 日間までの積算 API との相関係数をプロットした。Aoyama *et al.* (2023)同様に降水量の積算日数が増えるほど相関係数が高くなり 5 日間積算 API において最大値を示した。このように海水の Cs-137 濃度と 5 日間積算 API に相関が見られるという結果は、流域へ降った雨が河川を經由し河口域へ流入することや、降雨に伴い河口域へ輸送された陸起源懸濁粒子から Cs-137 の溶脱が起きる

プロセスなどが沿岸域の海水のCs-137濃度に影響を与えていることを示唆している(Aoyama et al., 2023)。

(2) 本研究では福島県沖を中心に宮城県及び茨城県沖の水深 200 m までの大陸棚海域を対象とした海底堆積物に含まれる放射性セシウムの状況について、深さ 20 cm 層まで把握することを目的とした。これは昨年度整理したとおり底魚類の行動生態（潜砂行動）ならびに摂餌生態（表在性ベントス食/埋在性ベントス食）を考慮すると、底魚類（例えばカナガシラ、カレイ類、ヒラメ、キアンコウ）は海底堆積物の表層～10 cm 程度を主に利用していること、一部の魚類においては 10cm より深い層を利用しているものもある（例えばアカエイ、カスザメ、ホシエイ）ためである。また、東電福島第一原発事故の影響評価が主たる目的であるため、昨年度よりゲルマニウム半導体検出器による測定時間を 24 時間以上とし、可能な限り事故由来が明白な Cs-134 の検出を試みた。実際、2021 年に採取しガンマ線測定に供した 345 検体のうち、135 検体で、2022 年に採取しガンマ線測定に供した 186 検体のうち 78 検体でそれぞれ Cs-134 を検出した。これら Cs-134 を検出した試料における 2011 年 3 月 11 日に減衰補正した Cs-134/Cs-137 比は 2021 年で 0.90 ± 0.13 (n=135)、2022 年で 0.91 ± 0.10 (n=78) となり、調査した海域における海底堆積物における Cs-137 の大部分は東電福島第一原発由来であることが確認された。図 4 に 2021 年、2022 年ともに試料を採取した観測点における海底堆積物の Cs-137 濃度鉛直分布の経年変化を示す。これらの観測点では Cs-137 濃度の鉛直分布に明瞭な経年変化は認められない。図 5 には魚類採取観測点における Cs-137 濃度の鉛直分布の 2020 年から 2022 年までの 3 年間の経年変化を示す。なお、2020 年の観測では鉛直分布の層厚が異なる点に留意されたい。いずれの観測点においても 3 年間での顕著な濃度変化も、鉛直分布パターンの変化も認められなかった。なお、Cs-137 とは異なり、東電福島第一原発事故にのみ由来することがほぼ確実である Cs-134 濃度について、当該事業における海底堆積物を対象とした調査では 2016 年まで報告されていた。そのため、海底堆積物における東電福島第一原発事故由来の放射性セシウムの経年変動は 2016 年までの Cs-134 濃度のデータと 2021 年、2022 年の Cs-134 濃度について比較することでより直接的な評価ができるであろう。海底堆積物の放射性セシウム濃度を規定する主な要因として、粒子の表面吸着に密接に関連する比表面積の指標となる粒度組成が挙げられる。昨年度は粒度組成、有機物含有率と関連のある含水率と Cs-137 濃度の関係を整理し、弱い正の相関が確認されている。今年度は有機物含有率と Cs-137 濃度との関係について検討するため、強熱減量を求め、Cs-137 濃度との関係を整理した。図 6 に 2021 年に採取した試料について有機物含有率の指標となる強熱減量と Cs-137 濃度の関係を示す。福島県沖及び仙台湾において強熱減量と Cs-137 濃度に正の相関関係が認められる。特に仙台湾の名取川河口(E1 及び E4)では仙台湾の他の観測点より Cs-137 濃度が高く、この 2 箇所特有の相関が認められた（図 6b）。今後も海底堆積物の Cs-137 濃度と底質との関係を整理し、海底堆積物における放射性セシウムの分布を規定している要因について精査する必要がある。

3. 今後の課題

(1) 仙台湾、福島県沖合海域において溶存態 Cs-137 濃度の時間変動はかなり小さくなった。しかしながら、その濃度は東電福島第一原発事故の影響が無かったと仮定した場合の濃度レベル（2022 年において 0.8 Bq/m^3 ）までは低下していない。濃度自体が大きく低下し、変動幅も小さくなったものの、本研究で経時変化を追跡している観測点では海水の Cs-137 濃度と陸域からの負荷

の影響について、降雨との関係を先行降雨指数を用いることで示すことに成功した。すなわち、今後も降雨に伴い陸域に沈着した放射性セシウムが海域へと供給され、海水の放射性セシウム濃度を変動させることが強く示唆される。さらに、台風等に伴う大規模な出水に起因する沿岸域の溶存態 Cs-137 濃度の上昇は定期的に発生する恐れもある。そのため、引き続き海水に含まれる溶存態 Cs-137 濃度の変動を注視する必要がある。

(2) 福島県沖海域における海底堆積物からは Cs-134 の検出が続いており、Cs-137 濃度範囲も事故前の 5.0 Bq/kg-dry に比べ高い値が検出されている。さらに 2011 年 3 月 11 日に減衰補正した Cs-134/Cs-137 比は 2022 年においても 0.91 ± 0.14 (n=78) であり、東電福島第一原発事故に起因する放射性セシウムが海底堆積物の深さ 20cm までの大部分を占めることが確認された。底魚類の行動生態や摂餌生態を考慮すると、福島県沖に生息する底魚類の生息環境としての海底堆積物は深部まで未だに東電福島第一原発事故の影響を強く受けていること、その分布パターンの変化が小さくなってきていることがうかがえることから、今後も海底堆積物の放射性セシウム濃度の鉛直分布についても把握していく必要がある。また、強熱減量と放射性セシウム濃度の関係から示唆される、有機物などの底質情報や粒度組成と放射性セシウム濃度の関係について鉛直方向でのさらなる評価も残された課題である。

引用文献

American Meteorological Society (2012) Antecedent precipitation index, Glossary of Meteorology.

https://glossary.ametsoc.org/wiki/Antecedent_precipitation_index

Aoyama *et al.* (2023) Radiocaesium and other radionuclides in the coastal region of Fukushima. In: Aoyama *et al.*, Radionuclides in the Marine Environment. University of Tsukuba Press, Ibaraki, pp. 153-184.

帰山ら (2013) 夏井川-仁井田川河口域周辺における懸濁態および溶存態放射性セシウムの存在割合. 日本地球化学会年会要旨集, 2013, 60 巻, 2013 年度日本地球化学会第 60 回年会講演要旨集, セッション ID 3B13, p. 200

Kaeriyama, H. (2017) Oceanic dispersion of Fukushima-derived radioactive cesium: a review. *Fish. Oceanogr.*, 26, 99-113.

Kakehi *et al.* (2016) Radioactive cesium dynamics derived from hydrographic observations in the Abukuma River Estuary, Japan. *J. Environ. Radioact.*, 153, 1-9.

Takata *et al.* (2020) Suspended particle-water interactions increase dissolved ^{137}Cs activities in the nearshore waters during typhoon Hagibis. *Environ. Sci. Technol.*, 54, 10678-10687.

図表

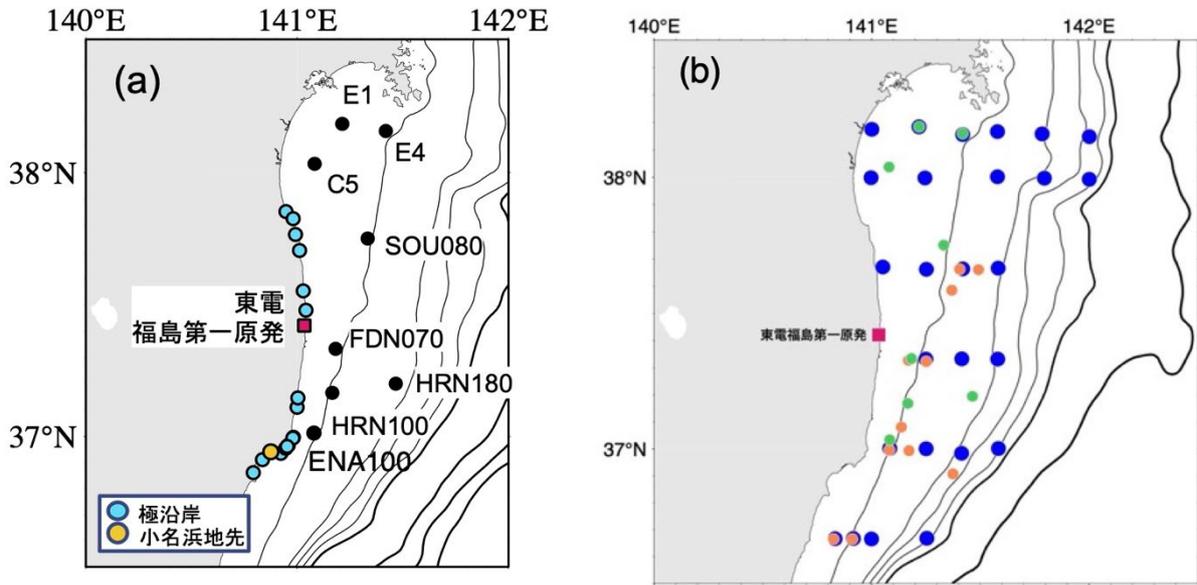


図 1. (a) 2022 年度調査にて海水を採取した観測点。黒丸は海水の時系列モニタリング観測点、水色は年 2 回の極沿岸海水採取観測点、オレンジは小名浜地先における週 1 回の頻度での観測点。等深線の細線は 100 m 間隔、太線は 500 m 間隔。(b) 海底堆積物を採取した観測点。青丸は 2021 年度の観測点、オレンジは 2022 年度の観測点、緑は魚類採取観測点。等深線の細線は 100m 間隔、太線は 500 m 間隔。

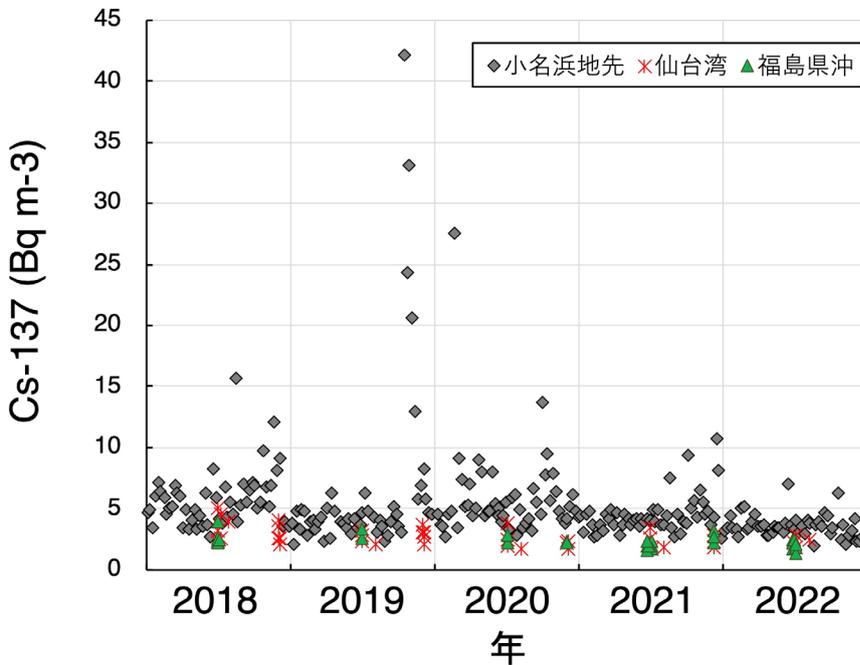


図 2. 仙台湾、福島県沖及び小名浜地先における海水の Cs-137 濃度。仙台湾と福島県沖は表層、中層、近底層の平均値。

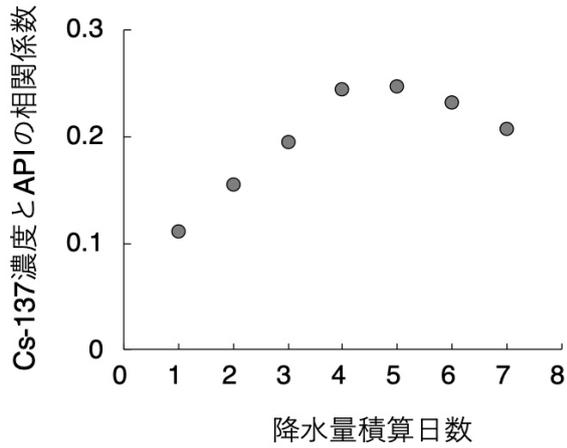


図 3. 溶存態 Cs-137 濃度と先行降雨指数の相関係数と先行降雨指数の計算に用いた降水量の積算日数の関係。

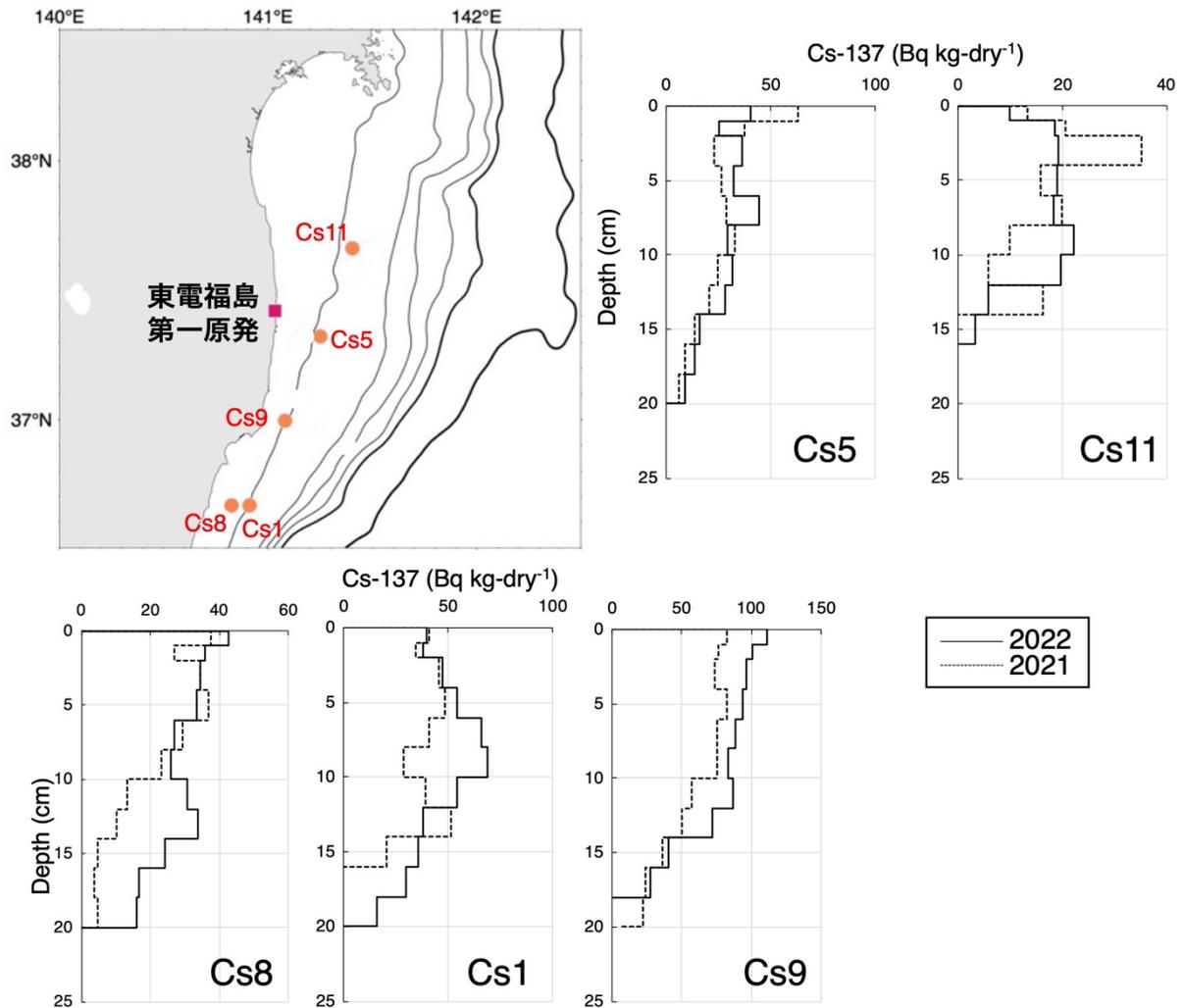


図 4. 2021 年及び 2022 年の福島県沖における海底堆積物の Cs-137 濃度鉛直分布

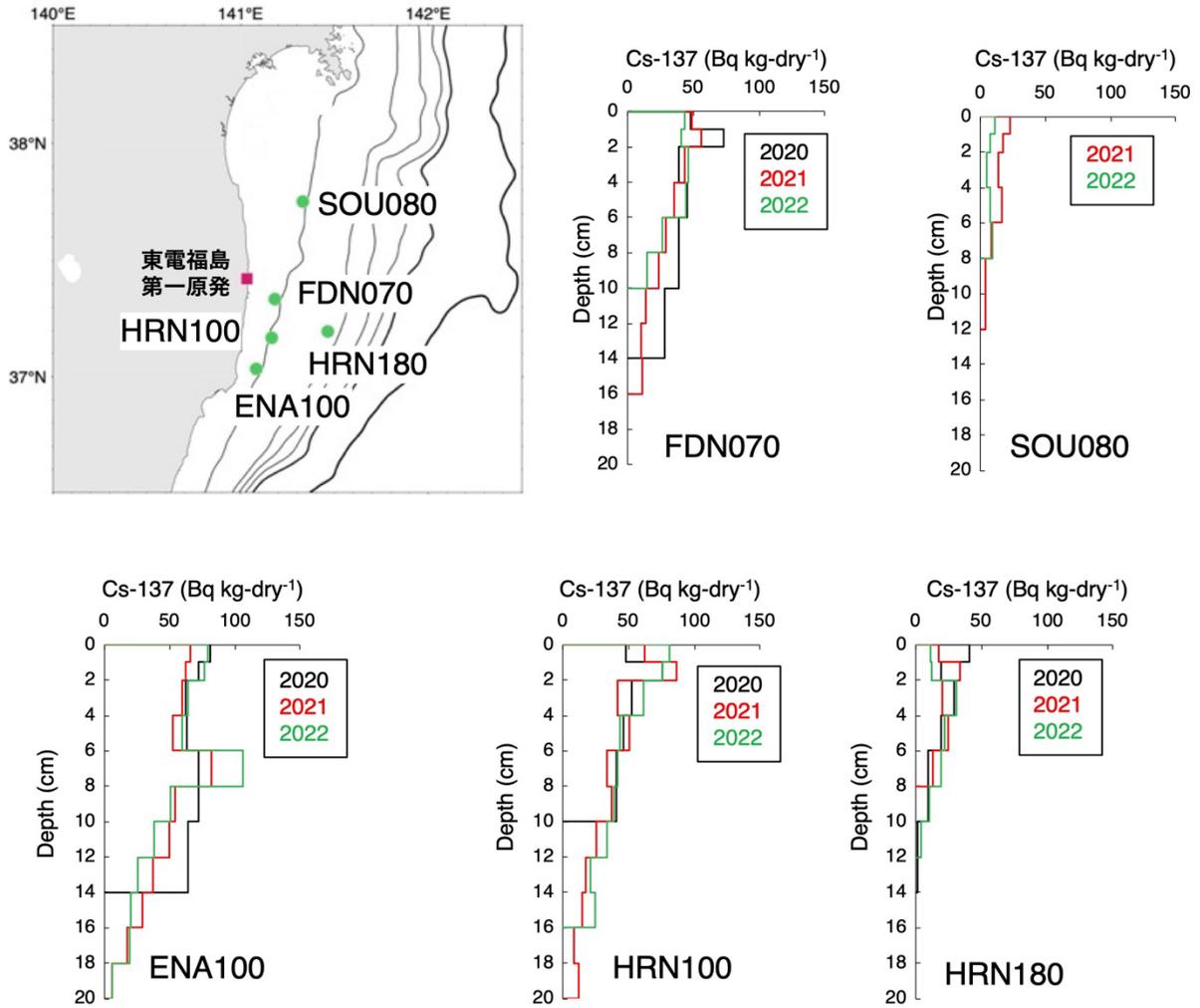


図 5. 2020 年、2021 年及び 2022 年の魚類採取観測点における海底堆積物の Cs-137 濃度鉛直分布.

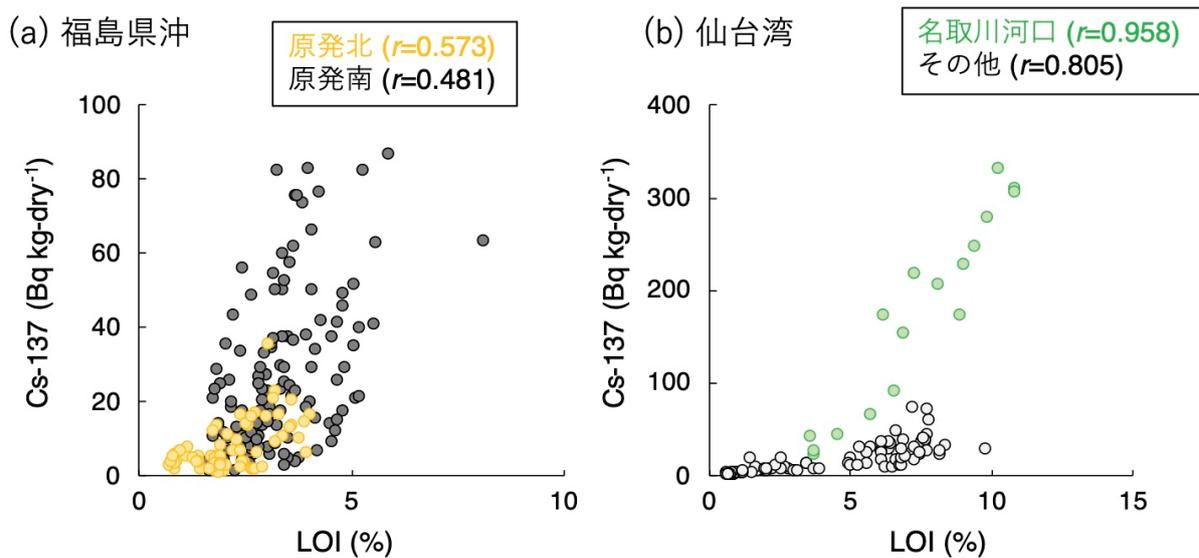


図 6. 2021 年に採取された海底堆積物の Cs-137 濃度と強熱減量 (loss on ignition: LOI) の関係.

1. 海洋生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 1-2	課題名：海産生物における放射性セシウムの動態把握
研究機関・研究グループ名	水産資源研究所 海洋環境部 放射能調査グループ ¹ 水産資源研究所 海洋環境部 暖流第1グループ ² 水産資源研究所 海洋環境部 寒流第2グループ ³ 水産資源研究所 海洋環境部 ⁴ 水産資源研究所 底魚資源部 底魚第2グループ ⁵
担当者職名・担当者名	主任研究員・重信裕弥 ¹ 、主幹研究員・森田貴己 ¹ 、グループ長・帰山秀樹 ¹ 、主任研究員・安倍大介 ² 、主任研究員・岡崎雄二 ³ 、主任研究員・笈茂穂 ³ 、主幹研究員・田所和明 ³ 、部長・栗田豊 ⁴ 、主任研究員・富樫博幸 ⁵ 、研究員・時岡俊 ⁵ 、研究等支援職員・櫻井慎大 ⁵ 、グループ長・成松庸二 ⁵

1. 研究内容及び方法

(1) 福島県沖と仙台湾に生息する海産生物について、放射性セシウム (Cs-134 と Cs-137) の濃度水準とその推移を明らかにする目的で、機構所属の調査船蒼鷹丸と若鷹丸、漁船を用いた役割による海産生物調査を実施した。上述の調査で放射性セシウムの測定に十分な量を確保することが困難な浮魚類の一部は市場から購入した。本年度実施した海産生物調査は 2022 年 4 月から 11 月にかけて、福島県の相馬沖水深 80 m 域 (SOU080)、請戸沖水深 30 m 域 (UKD030)、東京電力福島第一原子力発電所沖水深 30 m 域 (FDN030)、50~80 m 域 (FDN070)、富岡沖水深 30 m 域 (TMO030)、広野沖水深 30 m 域 (HRN030)、50~100 m 域 (HRN100)、180 m 域 (HRN180)、江名沖水深 30 m 域 (ENA030)、100 m 域 (ENA100)、仙台湾の水深 30~120 m 域 (E4 を含む) の調査海域において、刺し網、釣り、ソリネット、ORI ネット、ドレッジ、及び底びき網を用いて実施した (図 1)。採取した海産生物は種または大まかな分類群を同定し、筋肉または体全体から調製した試料を測定して放射性セシウム濃度を求めた。動物プランクトン試料は目合い 2 mm のメッシュで 2 mm 未満の試料をとりわけ、放射性セシウム濃度の測定と大まかな分類群の組成を分析した。

また、同海域の海産魚類における餌生物を介した Cs-137 の移行経路を確認するため、採取した海産生物の一部は安定同位体比分析と胃内容物分析に供した。安定同位体比分析では、魚類と一部の甲殻類試料は筋肉片を使用した。動物プランクトンと一部の甲殻類を除く底生生物の分析には体全体を使用した。全ての試料は真空凍結乾燥処理を行った後、メタノールとクロロフォルムの混合液 (比率は 1 : 2) にて 24 時間脱脂後、質量分析計を用いて測定した。

(2) 魚類の餌生物中に含まれる生物が利用可能な状態の Cs-137 量を把握する目的で、2022 年 7 月 3 日に FDN070 において、ソリネットとドレッジを用いて採取した多毛類試料、ソリネット (目合い 0.33 mm) を用いて底層で採取した 2 mm 未満の動物プランクトン試料、ORI ネット (目合い 0.33 mm) を用いて中層で採取した 2 mm 未満の動物プランクトン試料について、リーチング実験を実施した。昨年度の調査結果から、底層で採取した動物プランクトン試料には、海底堆積物由来の粒子が多く混入している可能性が示唆されていたことから (水産研究・教育機構, 2022)、本

年度は同日、同地点で中層と底層で採取した動物プランクトン試料をリーチング実験に用いて、その結果を比較することとした。

採取した餌生物試料は真空凍結乾燥処理後に測定して Cs-137 濃度を求めた後、試料中に含まれる総 Cs-137 量を算出した。リーチング実験では、逐次抽出法 (Tessier *et al.*, 1979) で報告されている F1: イオン交換態、F2: 炭酸塩態、F3: Fe-Mn 酸化物態、F4: 有機物・硫化物態、F5: ケイ酸塩態 (残留物態) の 5 つの分画のうち、生物の消化管内に混入した場合には体内に取り込まれると考えられる F1~F4 の分画に存在する Cs-137 を、生物が利用可能な状態で存在する Cs-137 として抽出の対象とした。リーチング実験は逐次抽出法の F4 分画の抽出方法を参考にし、30%過酸化水素水を用いた処理を実施した。F1~F4 分画で存在する Cs-137 をまとめて抽出液として回収した後に Cs-137 濃度を測定し、試料重量から抽出液中に含まれる Cs-137 量を求めて、総 Cs-137 量に対する割合を求めた。

(3) 底魚の Cs-137 濃度に影響を及ぼす可能性が考えられる海底堆積物中の間隙水 (堆積物粒子の隙間に存在する水) に含まれる Cs-137 濃度について、その推移を明らかにする目的で、福島県沖の SOU080、FDN070、HRN100、HRN180、及び仙台湾の E4 で採取した海底堆積物と間隙水 (0-5 cm 層) の Cs-137 濃度を測定した。間隙水は海底堆積物からブフナー漏斗でろ過して採取した。得られた間隙水試料は 0.45 μm のフィルターでろ過し、リンモリブデン酸アンモニウム共沈法により濃縮して Cs-137 濃度を測定した。また、間隙水を得た海底堆積物について、有機物含有量の指標となる強熱減量の値 (%) を求め、間隙水の Cs-137 濃度との関連性を調べた。

2. 令和 4 年度進捗状況・成果

(1) 2021 年 10 月 6 日から 2022 年 12 月 1 日にかけて、福島県沖と仙台湾で採取した海産生物から 504 検体の測定試料を調製し、放射性セシウム濃度 (Cs-134 + Cs-137) を測定した。その結果、すべての検体で食品における出荷制限の基準値である 100 Bq/kg-wet を下回った。魚類筋肉部位試料で最も高い濃度の放射性セシウムが検出されたのは、2022 年 11 月 27 日に ENA030 で採取したコモンカスベで 6.56 Bq/kg-wet であった。

福島県沖と仙台湾で採取した浮魚類 4 種 (カタクチイワシ、マイワシ、マアジ、マサバ) の筋肉部位と動物プランクトン試料における Cs-137 濃度の推移を図 2 に示す。2022 年に採取したマイワシとマサバの Cs-137 濃度算術平均 (Bq/kg-wet) \pm 標準偏差 (検出下限値未満の検体を除く) は、福島県沖ではマイワシで 0.110 ± 0.0387 ($n = 2$)、マサバで 0.169 ± 0.0134 ($n = 2$) であった。仙台湾ではマイワシで 0.0839 ± 0.0352 ($n = 3$)、マサバで 0.121 ± 0.0332 ($n = 4$) であった。2000 年から 2010 年にかけて、我が国の太平洋側で採取したマイワシとマサバの Cs-137 濃度水準は、マイワシで $0.038 \sim 0.090$ Bq/kg-wet、マサバで $0.087 \sim 0.14$ Bq/kg-wet であり (農林水産省, 2002-2012)、事故前の Cs-137 濃度水準と比較すると、福島県沖ではまだ事故前よりも若干高い水準であったが、仙台湾ではほぼ事故前の水準にまで Cs-137 濃度が低下していた。一方、動物プランクトン試料の Cs-137 濃度は福島県沖で 0.167 ± 0.166 ($n = 6$)、仙台湾で 0.198 ± 0.138 ($n = 6$) となり、動物プランクトンを餌生物とする浮魚類と比較して濃度水準がやや高く、濃度にばらつきが認められた。

事故前の 2010 年に銚子沖で採取されたマイワシとマサバの Cs-137 濃度 \pm 測定誤差は、それ

ぞれ 0.052 ± 0.0038 Bq/kg-wet、 0.14 ± 0.0053 Bq/kg-wet と報告されている（農林水産省、2012）。また、2010年に茨城県沖の表層で採取した海水のCs-137濃度算術平均（mBq/L） \pm 標準偏差は 1.4 ± 0.20 （ $n = 5$ ）であった（環境放射能データベース：<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>）。これらの値から求めた事故前の濃縮係数 \pm 誤差伝播を考慮した誤差範囲は、マイワシで 37 ± 6.0 、マサバで 100 ± 15 である。2022年1月から7月までの間に東電福島第一原発の沖合15 km(St. T-5)で採水した表層海水のCs-137濃度算術平均(mBq/L) \pm 標準偏差は 2.54 ± 0.928 （ $n = 29$ ）であった（原子力規制委員会ホームページ：<https://radioactivity.nra.go.jp/ja/list/428/list-1.html>）。この値から、2022年に福島県沖で採取した浮魚類4種について濃縮係数 \pm 誤差伝播を考慮した誤差範囲を求めた結果、カタクチイワシで 53.9 ± 22.5 、マイワシで 43.3 ± 22.0 、マサバで 66.5 ± 24.9 、マアジで 354 ± 293 となり、カタクチイワシ、マイワシ、マサバの3種については、濃縮係数の値がほぼ事故前と同等の水準に戻っていることを確認した。

2017年から2022年にかけて、福島県沖の5定点（UKD030、FDN070、TM0030、HRN030、HRN100）で採取した底魚筋肉部位試料におけるCs-137濃度を図3に示す。2022年に採取した底魚におけるCs-137濃度算術平均（Bq/kg-wet） \pm 標準偏差は、UKD030で 1.01 ± 0.325 （ $n = 16$ ）、FDN070で 0.572 ± 0.228 （ $n = 21$ ）、TM0030で 1.13 ± 0.665 （ $n = 93$ ）、HRN030で 1.07 ± 0.546 （ $n = 54$ ）、HRN100で 0.387 ± 0.137 （ $n = 9$ ）となり、いずれの調査地点においてもCs-137濃度は1 Bq/kg-wet前後の水準であった。

2022年6月から9月にかけて福島県の相馬沖と仙台湾で採取した海産生物の炭素・窒素安定同位体比（ $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ ）の2次元マップを図4に示す。各海産生物の食性分類は、胃内容物分析の結果に基づいて行った。両海域における餌生物と捕食者との関係性は、魚食性魚類（スズキ、ヒラメ等）が栄養段階の上位に位置するプランクトン系列（動物プランクトン/プランクトン食性魚類/魚食性魚類）、甲殻類食性魚類（アイナメ、カナガシラ等）が上位に位置する甲殻類系列（甲殻類/甲殻類食性魚類）、及びベントス（甲殻類を除く）食性魚類（マガレイ、マコガレイ）が上位に位置するベントス系列（ベントス/ベントス食性魚類）の3系列に分けられた。前年度までの分析結果との比較、及び相馬沖と仙台湾との比較において、食性の傾向に大きな相違は認められなかった。

2022年7月3日にFDN070においてORIネット（中層）とソリネット（底層）を用いて採取した2 mm未満の動物プランクトン試料について、大まかな分類群組成を調べた結果を図5に示す。中層と底層における動物プランクトンの分類群組成（湿重量）は、どちらもカイアシ類・オキアミ類などの甲殻類が卓越しており、中層と底層との間で明確な組成の違いは認められなかった。

(2) 2022年7月3日にFDN070で採取した多毛類の乾燥試料（16.0 g）を測定した結果、Cs-137濃度は 19.2 Bq/kg-dry で、この試料中に含まれる総Cs-137量は 0.307 Bqであった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液（247.7 g）のCs-137濃度は 0.149 Bq/kg-wet、生物利用可能な状態のCs-137量は 0.0369 Bqとなり、総Cs-137量の12.0%に相当した。この結果から、カレイ類などの底魚類にとって重要な餌生物となる多毛類のCs-137濃度は、消化管内などに混入している無機堆積物に吸着しているCs-137に大きく影響を受けており、Cs-137濃度の実測値は底魚類の餌生物として過大評価されている可能性が示された。

2022年7月3日にFDN070の中層で採取した動物プランクトンの乾燥試料(106.0 g)を測定した結果、Cs-137濃度は0.658 Bq/kg-dryで、この試料中に含まれる総Cs-137量は0.0697 Bqであった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液(298.2 g)のCs-137濃度は0.111 Bq/kg-wet、生物利用可能な状態のCs-137量は0.0331 Bqとなり、総Cs-137量の47.5%に相当した。また、同日にFDN070の底層で採取した動物プランクトンの乾燥試料(12.0 g)を測定した結果、Cs-137濃度は4.38 Bq/kg-dryで、この試料中に含まれる総Cs-137量は0.0527 Bqであった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液(125.7 g)のCs-137濃度は0.171 Bq/kg-wet、生物利用可能な状態のCs-137量は0.0215 Bqとなり、総Cs-137量の40.8%に相当した。これらの結果から、動物プランクトンのCs-137濃度実測値も多毛類ほどではないが過大評価されている可能性が示された。

中層と底層で採取した動物プランクトン試料の分類群組成はほぼ同じで、総Cs-137量に対する生物が利用可能な状態のCs-137量の割合にも大きな違いは認められなかった。したがって、底層動物プランクトン試料のCs-137濃度が中層よりも高くなった要因は、分類群組成の違いや海底堆積物に由来する無機懸濁態に吸着していたCs-137量が多かったことでは説明ができない。これらの結果から、底層では中層よりも動物プランクトン自体のCs-137濃度が高い可能性の他に、リーチング実験によって抽出液として一緒に回収される餌や有機的な付着・混入物の量、それらのCs-137濃度が影響している可能性が示唆された。

(3) 2018年から2022年にかけて福島県沖と仙台湾で採取した間隙水(0-5 cm層)におけるCs-137濃度の推移を図6に示す。2022年に調査を実施した5地点(SOU080、FDN070、HRN100、HRN180、E4)における間隙水中のCs-137濃度(mBq/L) ± 測定誤差は、SOU080で 23.3 ± 1.81 、FDN070で 36.9 ± 1.44 、HRN100で 19.8 ± 0.900 、HRN180で 25.4 ± 1.33 、E4で 9.23 ± 0.529 、となり、いずれの地点でも昨年度と比較するとCs-137濃度は若干高くなっていた。

2018年から2022年にかけて採取した間隙水と海底堆積物のCs-137濃度との間に相関関係は認められなかった(図7、スピアマンの順位相関係数検定:危険率5%、同順位補正相関係数 $r_s = 0.0356$)。間隙水のCs-137濃度は、海底堆積物中でイオン交換態(F1分画)として存在するCs-137の量に依存するため、海底堆積物の性状に大きく影響を受けると考えられる。そこで、2021年と2022年に採取した間隙水のCs-137濃度と海底堆積物中の強熱減量との関係性を調べた結果、負の相関関係が認められた。(図8、スピアマンの順位相関係数検定:危険率5%、同順位補正相関係数 $r_s = -0.6485$)。

3. 今後の課題

(1) 本年度の調査結果から、福島県沖ではカタクチイワシ、マイワシ、マサバの濃縮係数が事故前と同じ水準となっており、浮魚とその周辺(表・中層)の海洋環境(餌生物と海水)との間でCs-137の相互移行が平衡状態になりつつある事が示唆された。また、福島県沖の底魚類筋肉中に含まれる放射性セシウム濃度は、東電福島第一原発から10 km圏内の調査地点であっても、1 Bq/kg-wet前後の水準で推移していることを確認した。一方で、福島県沖で採取した海産生物における放射性セシウム濃度は依然として事故前よりも若干高い水準であることから、今後も東電福島第一原発の周辺海域を中心に海産生物調査を継続し、海産生物における放射性セシウム濃度の

推移を把握する必要がある。

(2) 昨年度より実施している海産生物の乾燥試料を用いたリーチング実験では、実験により得られた残渣物と抽出液を測定することによって、元の乾燥試料中に含まれる総 Cs-137 量はほぼ回収していることを確認している（水産研究・教育機構，2022）。しかし、逐次抽出法（Tessier *et al.*, 1979）は海産生物のように有機物を大量に含む試料を実験対象として想定していないため、この手法では試料中の有機物を完全に溶解させることができなかった。この実験の最終目的は、餌生物における湿重量当たりの Cs-137 濃度を求めることであり、その値はリーチング実験によって得られた生物が利用可能な状態の Cs-137 量と、実験によって失われた（完全に溶解した）試料重量から算出する。そのため、本来の目的を達成するためには、試料中に含まれる有機物が溶け残らない新たなリーチング実験手法を確立する必要がある。次年度は、灰化試料を用いたリーチング実験手法の開発に取り組むと共に、餌生物試料のデータ集積を継続する。

(3) 間隙水の Cs-137 濃度は昨年度と比較して若干高い濃度であったが、これまでの調査結果からも年ごとに多少の変動が認められている。また、間隙水の Cs-137 濃度に影響を及ぼす要因の一つに強熱減量との負の相関関係が示されたが、データ数が少ないことや、東電福島第一原発からの距離が調査地点間で大きく異なることから、地理的な特性の違いが影響した可能性も考えられる。本年度示された傾向については、引き続き調査を継続してデータを十分に集積した上で、再検討する必要がある。

引用文献

水産研究・教育機構（2022）令和3年度海洋生態系の放射性物質挙動調査事業報告書．1-2：海産生物における放射性セシウムの動態把握，p. 10-19.

Tessier A., Campbell PGC. & Bisson M. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Anal. Chem.*, 51: 844-851.

農林水産省（2002-2012）農林水産省関係放射能調査研究年報．C 水産関係．海産生物放射能調査：太平洋沿岸域海産生物放射能調査.

図表

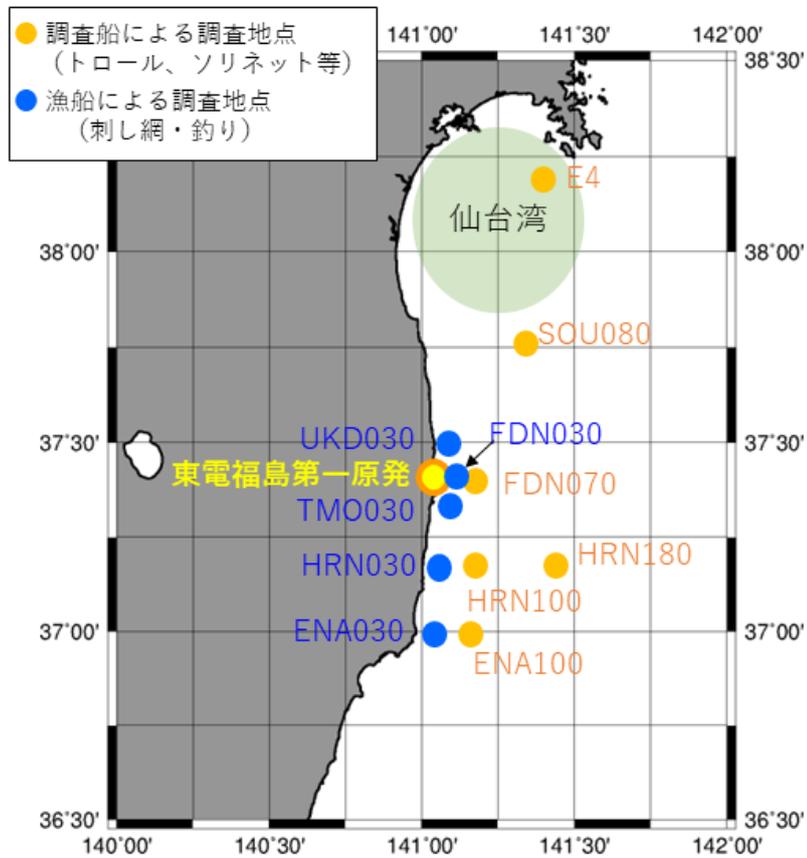


図 1. 2022 年度の調査海域図。仙台湾の海産生物試料は、E4 以外の地点でも実施した調査船調査と市場からの買い付けにより入手した。また、E4、SOU080、FDN070、HRN100、HRN180 では間隙水を得るための採泥調査も実施した。

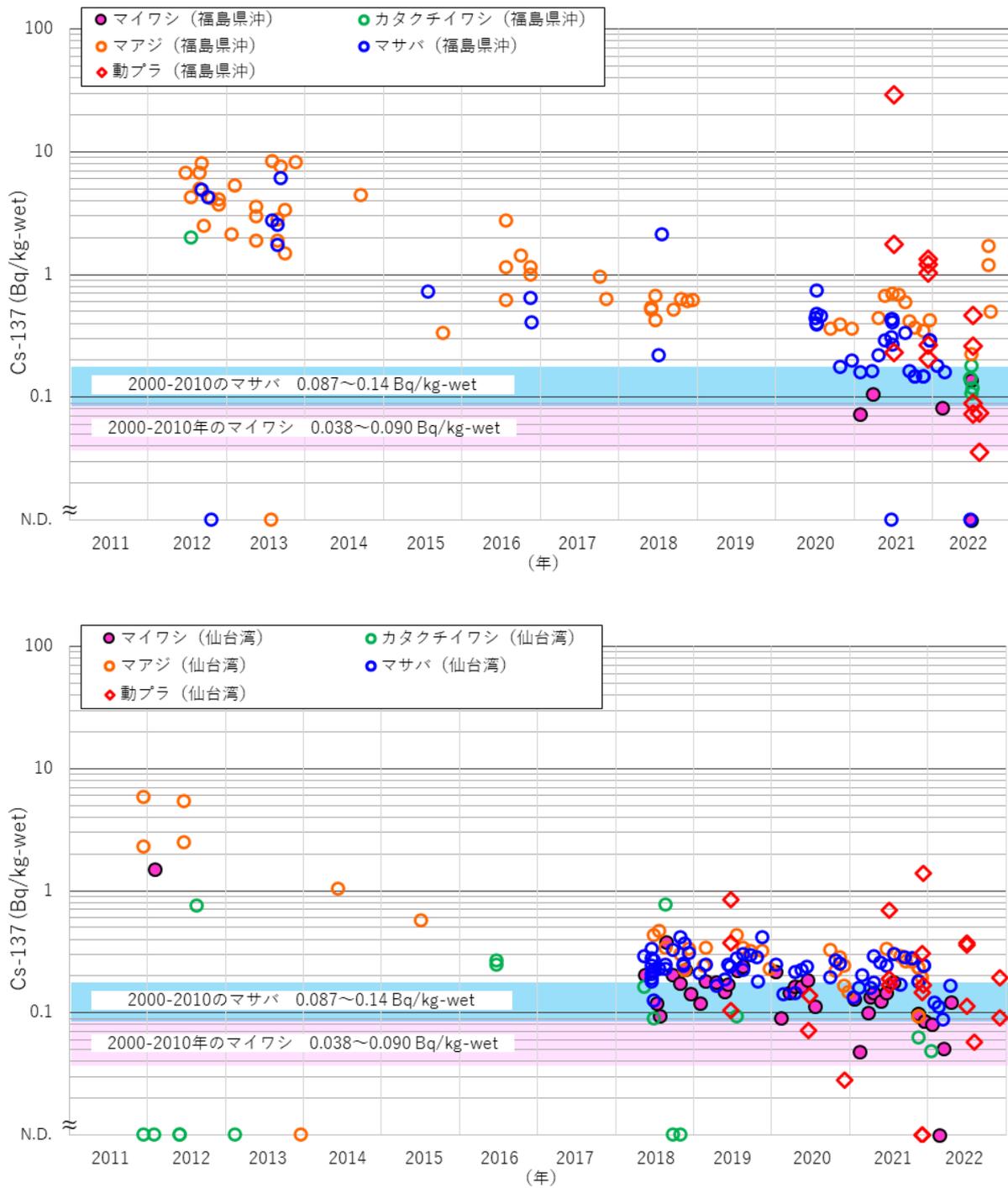


図2. 福島県沖（上段）と仙台湾（下段）で採取した浮魚類筋肉部位と動物プランクトンにおけるCs-137濃度の推移。青とピンクの網掛けの帯は、2000年から2010年にかけて我が国の太平洋側で採取したマサバとマイワシのCs-137濃度範囲を示す。

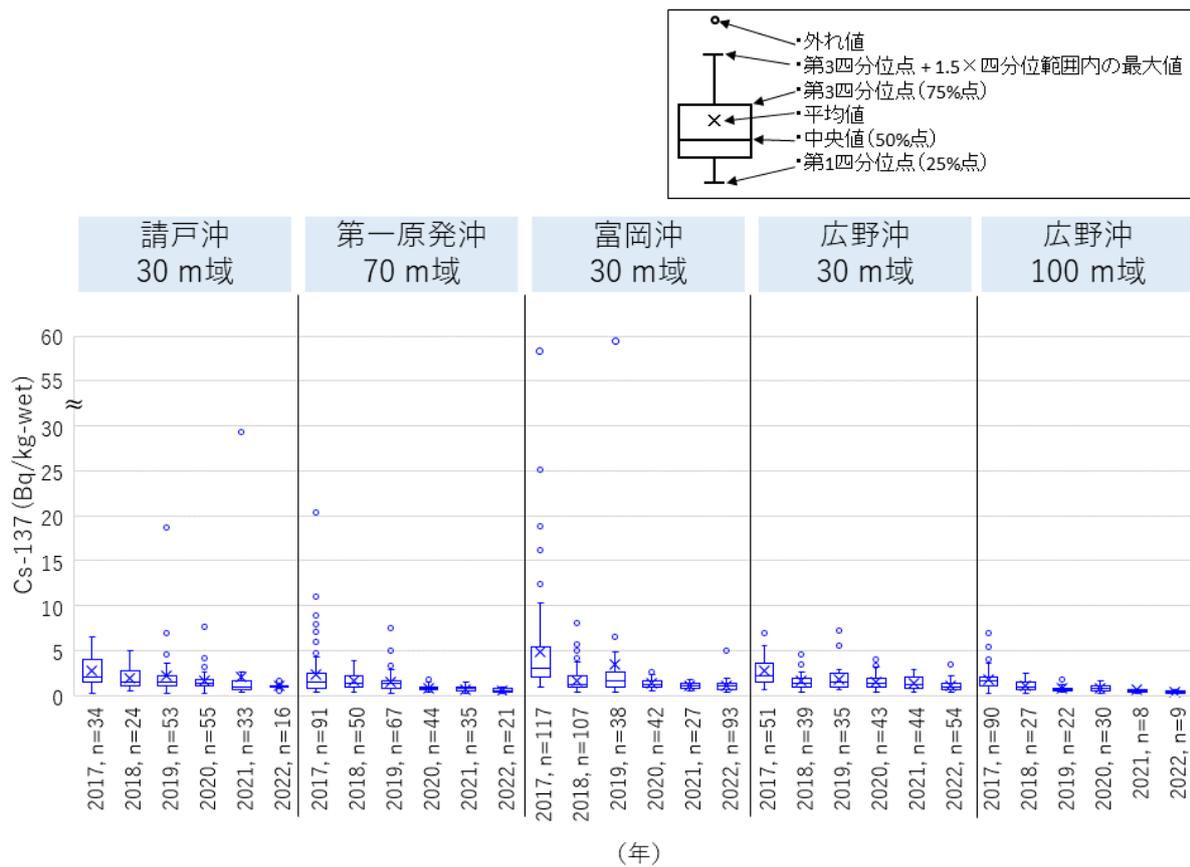


図 3. 2017 年から 2022 年にかけて福島県沖の 5 定点で採取した底魚類筋肉部位における Cs-137 濃度の推移

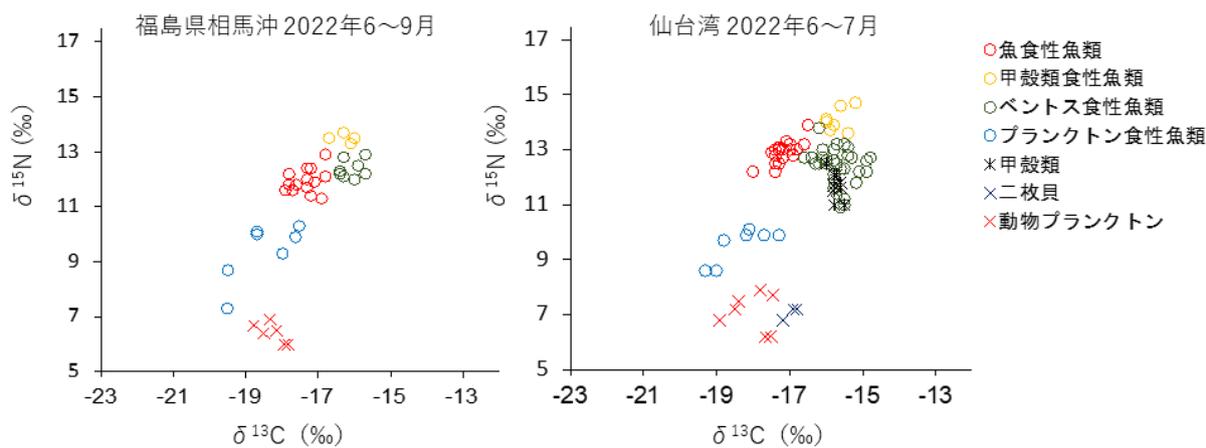


図 4. 2022 年 6 月から 9 月にかけて福島県の相馬沖と仙台湾で採取した海産生物における炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}C$ 、 $\delta^{15}N$) の 2 次元マップ

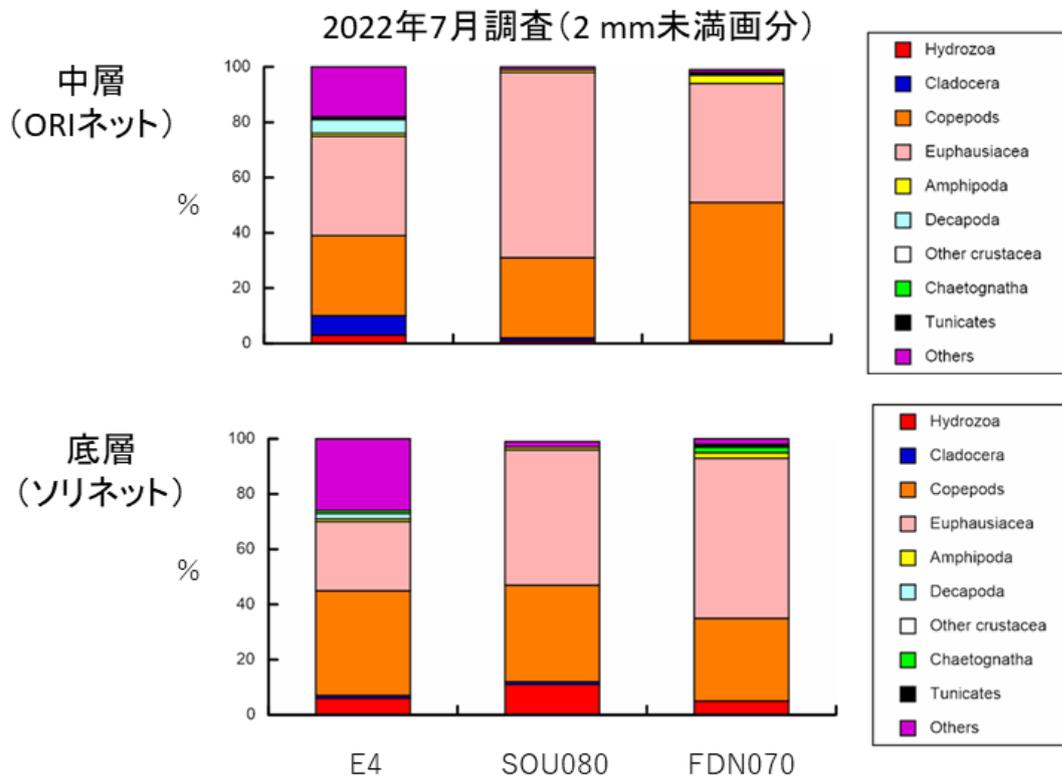


図5. 2022年7月に中層と底層で採取した2 mm未満画分の動物プランクトン試料分類群組成

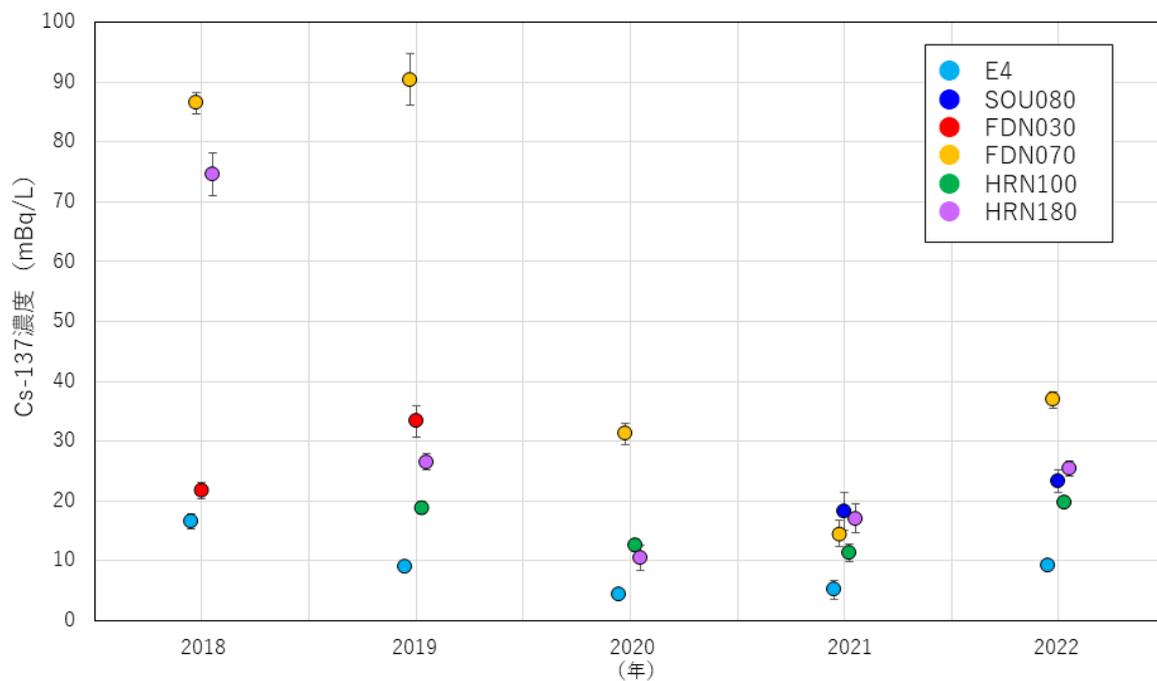


図6. 福島県沖と仙台湾で採取した間隙水(0-5 cm層)に含まれるCs-137濃度。プロットのエラーバーは測定誤差を表す。

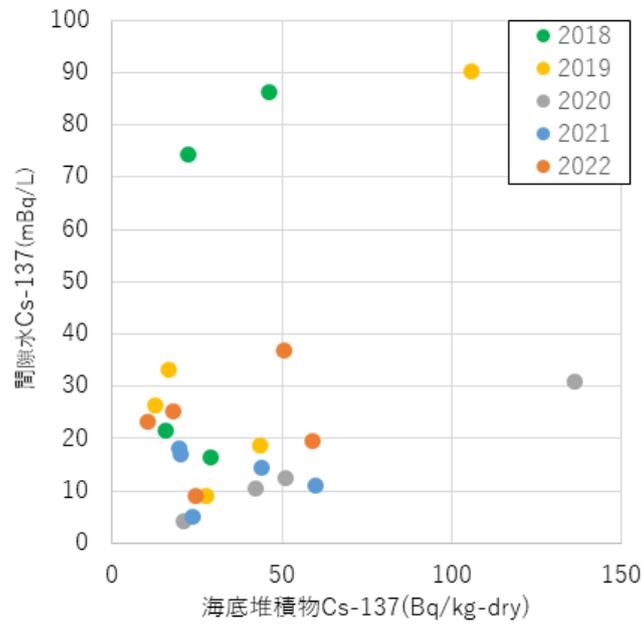


図 7. 2018 年から 2022 年に採取した間隙水と海底堆積物における Cs-137 濃度の関係

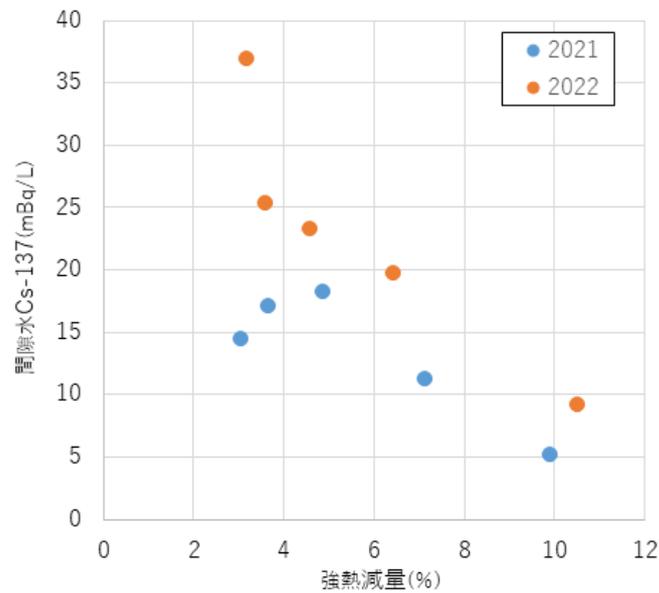


図 8. 2021 年と 2022 年に採取した間隙水の Cs-137 濃度と海底堆積物中の強熱減量との関係

1. 海洋生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 1-3	課題名：水産物におけるストロンチウム-90 とトリチウムの濃度の把握
研究機関・研究グループ名	水産資源研究所 海洋環境部 放射能調査グループ
担当者職名・担当者名	研究員・三木志津帆、研究支援職員・東畑顕、主任研究員・重信裕弥、主幹研究員・森田貴己

1. 研究内容及び方法

(1) 水産物におけるストロンチウム (Sr) -90 濃度データの蓄積

Sr-90 は、東電福島第一原発の事故による放出量は多くなかったが、過去の大気核実験や原発事故で注目された核種の1つであり、本事故に由来する Sr-90 の濃度変化を把握するため、主に福島県沖で採取した水産物における Sr-90 濃度を測定した。Sr-90 分析は公定法（文部科学省、2003改訂）に準じた。図1にこれまでの水産物試料の採集位置を示す。福島県沖の魚類における Sr-90 濃度の推移は、東電福島第一原発から 20 km 圏内で採取した魚類中の Sr-90 濃度（東京電力、2012～2022）と併せて評価した。

(2) 水産研究・教育機構（水産機構）におけるトリチウム (H-3) 濃度の分析

東電福島第一原発の事故により敷地内に貯蔵されている H-3 を含む多核種除去設備（Advanced liquid processing system, ALPS）処理水の処分に関する基本方針が取りまとめられ、ALPS 処理水は希釈して海洋へ放出することが決定された（2021年4月13日）。これにより、将来的に水産物中の H-3 濃度のモニタリングデータが社会的に求められると予想される。魚類の H-3 分析は、魚体内の水分として存在する自由水型 H-3（Tissue-free water tritium, TFWT）と、魚体内の有機物組織と結合して存在する有機結合型 H-3（Organic bound tritium, OBT）を別々に測定するが、試料を燃焼して燃焼水を回収する OBT 分析法の難易度が高い。これまでに水産機構では、試料を燃焼するために Pyrolyser-6 Trio（Raddec International, UK）を導入し、燃焼水を回収する条件を確立した。しかし、粉碎した乾燥筋肉試料を長さ約 300 mm、内径 17 mm の細い石英管へ充填する作業に時間を要し、大気中に存在する H-3 の混入リスクが高まる危険性があった。そこで本年度は、市販の長さ 90 mm、内径 19 mm の石英製円筒ろ紙に試料を充填して燃焼する方法を検討した。試料は 2021年6月及び 2022年6月に福島県富岡川水系滝川ダムで採集したイワナを用いた。イワナから筋肉を採取し、凍結乾燥により水分を除去後、粉碎して乾燥筋肉試料とし、OBT 分析は公定法（文部科学省、2002改訂）に準じた。九州環境管理協会へ粉碎済みの乾燥筋肉試料を送付し、OBT の分析結果を比較した。

現在の日本周辺の海洋環境における H-3 濃度を把握するため、水深 5 m 以浅の表層海水及び魚類筋肉中の TFWT 濃度を測定した。海水試料は主に調査船蒼鷹丸で採取し、魚類試料は蒼鷹丸や用船等で入手し、H-3 の分析は公定法（文部科学省、2002改訂）に準じた。令和3年度までの当該課題の H-3 濃度データの内、トリピュア装置を用いて試料を濃縮して測定していたデータは、濃縮係数を誤っていたため本年度修正した。

2. 令和4年度進捗状況・成果

(1) 水産物における Sr-90 濃度の測定結果は、水産庁及び水産機構のウェブサイトに随時報告

し、2011年からこれまでに310検体分を公表した（2023年3月20日現在）。表1に2022年度に公表した30検体におけるSr-90濃度の測定結果を示す。魚類は6検体でSr-90が検出され、すべて原発事故前のバックグラウンドレベル（ <0.046 Bq/kg-wet; Miki et al., 2017）であった。魚類の他は、イセエビ（#288）全体でSr-90が検出され、その濃度は2021年度に公表した福島県沖のヒラツメガニ、2020年度に公表した福島県沖のヒラツメガニ及びガザミ全体と同水準であった。2019年の日本海におけるズワイガニ及びベニズワイガニの甲羅におけるSr-90濃度は検出下限値未満（ <0.11 ） $\sim 0.26 \pm 0.060$ Bq/kg-wetであることから、特異的に高い濃度ではない。図2に、水産機構及び東京電力が福島沖で採取した魚類におけるSr-90濃度及びCs-137濃度の結果を示す。福島沖の魚類におけるSr-90濃度及びCs-137濃度は、共に低い濃度で推移している。

(2) 日本周辺の表層海水中のH-3濃度は検出下限値未満（ <0.050 ） $\sim 0.15 \pm 0.010$ Bq/L、魚類筋肉中のTFWT濃度は検出下限値未満（ <0.071 ） $\sim 0.22 \pm 0.016$ Bq/Lであった（図3）。また、魚類筋肉中のOBT濃度は全て検出下限値未満（ <0.34 ）であった。魚類筋肉中のTFWT濃度と海水中のH-3濃度は同レベルであり、さらに日本周辺の海域におけるH-3濃度は0.22 Bq/L以下の低濃度で推移している。

イワナ筋肉中のOBT分析のクロスチェック結果を図4に示す。1試料のみ検出下限値未満となった他はすべて1 σ 以内で一致しており、市販の円筒ろ紙を用いた燃焼法に問題はないことが分かった。これにより、魚類筋肉中のOBT分析法の検討は終了し、水産機構におけるH-3分析基盤は確立した。

3. 今後の課題

(1) 水産物におけるSr-90濃度を随時公表している機関は多くなく、またそれぞれの試料の採取海域は限定されている。食の安全上、Sr-90濃度による水産物への問題はないが、高濃度のSr-90を含む汚染水の2次処理が適切に行われているかを今後注視されることが考えられる。よって、今後も福島県海域を含めて種々の水産物におけるSr-90濃度を測定し、原発事故の影響を継続的に調査する必要がある。

(2) 東電福島第一原発の敷地内にはH-3を含むALPS処理水等が多量に保管されており、この処理水を希釈して海洋へ放出することが決定された。これまで本課題の成果により、魚類筋肉中のH-3濃度は海水中のH-3濃度と同レベルであり、海洋環境におけるH-3のモニタリングはより測定が簡易な海水を主軸に実施可能である。しかし、水産物におけるH-3濃度の実データも社会的に求められることは予想される。水産物中のH-3分析ができる機関は限られており、水産機構においてH-3分析基盤を維持していく必要がある。

引用文献

Miki, S., et al. (2017) Concentrations of Sr-90 and Cs-137/Sr-90 activity ratios in marine fishes after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. Fisheries Oceanography, 26, 221-223.

東京電力（2012～2022）魚介類の核種分析結果〈福島第一原子力発電所20km圏内海域〉
文部科学省（2003改訂）放射性ストロンチウム分析法，放射能測定法シリーズ2

図表

表 1. 2022 年度に Sr-90 濃度を公表した水産物の試料一覧。左端の番号（#）は水産機構のウェブサイトにおける公表番号を示す。

#	魚種	測定部位	採集地点	採取日	Sr-90 Bq/kg-wet		Cs-137 Bq/kg-wet	
285	マダイ	全体(除内臓)	福島	2021/9/16	0.018	±0.0056	0.47	±0.013
296	チダイ	全体(除内臓)	福島	2021/11/8	0.033	±0.0099	0.25	±0.013
299	マトウダイ	全体(除内臓)	福島	2021/11/8	0.038	±0.0098	0.67	±0.017
291	ホウボウ	全体(除内臓)	福島	2021/9/26	<0.016		0.68	±0.015
397	シラス	全体	福島	2022/9/27	0.0085	±0.0023	0.096	±0.0054
398	シラス	全体	福島	2022/9/27	<0.0047		0.088	±0.0054
281	カタクチイワシ	全体(除内臓)	仙台湾	2021/7/27	<0.0063		0.097	±0.088
282	カタクチイワシ	全体(除内臓)	仙台湾	2021/7/27	<0.0089		0.11	±0.0094
289	カタクチイワシ	全体(除内臓)	仙台湾	2021/9/16	<0.010		0.072	±0.0082
304	カタクチイワシ	全体(除内臓)	福島	2022/6/26	<0.013		0.13	±0.015
305	カタクチイワシ	全体(除内臓)	福島	2022/6/27	<0.013		0.14	±0.0140
310	カタクチイワシ	全体(除内臓)	福島	2022/7/2	<0.012		0.14	±0.020
283	ニベ	全体(除内臓)	福島	2021/9/22	0.0025	±0.0065	1.1 ^{*1}	±0.017
290	ゴマサバ	全体(除内臓)	仙台湾	2021/9/16	<0.012		0.13	±0.0091
306	ユメカサゴ	全体(除内臓)	福島	2022/6/29	<0.013		0.16	±0.015
286	マゴチ	全体(除内臓)	福島	2021/9/16	<0.017		0.74	±0.015
307	マルアオメエソ	全体(除内臓)	福島	2022/6/30	<0.012		0.18	±0.014
287	ヒラメ	全体(除内臓)	福島	2021/9/16	<0.011		0.65	±0.013
284	ヒラメ	全体(除内臓)	福島	2021/9/26	0.019	±0.0050	0.74 ^{*2}	±0.013
309	ヒラメ	全体(除内臓)	福島	2022/7/2	<0.013		0.29	±0.016
302	クロマグロ	全体(除内臓)	千葉	2022/4/24	<0.016		0.32	±0.0091
303	カツオ	全体(除内臓)	静岡	2022/5/15	<0.013		0.19	±0.0074
293	マダラ	全体(除内臓)	青森	2021/10/4	<0.0083		0.13	±0.0088
295	マダラ	全体(除内臓)	岩手	2021/10/7	<0.011		0.15	±0.0091
300	マダラ	全体(除内臓)	福島	2021/11/11	<0.011		0.24	±0.0090
301	マダラ	全体(除内臓)	宮城	2021/11/21	<0.0069		0.13	±0.084
308	マダラ	全体(除内臓)	福島	2022/6/30	<0.013		0.083	±0.014
292	スケトウダラ	全体(除内臓)	青森	2021/10/4	<0.011		0.14	±0.0093
294	スケトウダラ	全体(除内臓)	岩手	2021/10/7	<0.0096		0.12	±0.0088
288	イセエビ	全体	福島	2021/9/16	0.037	±0.011	0.23	±0.016

*1 Cs-134 濃度は 0.040±0.0076 Bq/kg-wet

*2 Cs-134 濃度は 0.025±0.0067 Bq/kg-wet

誤差は計数誤差を示す。

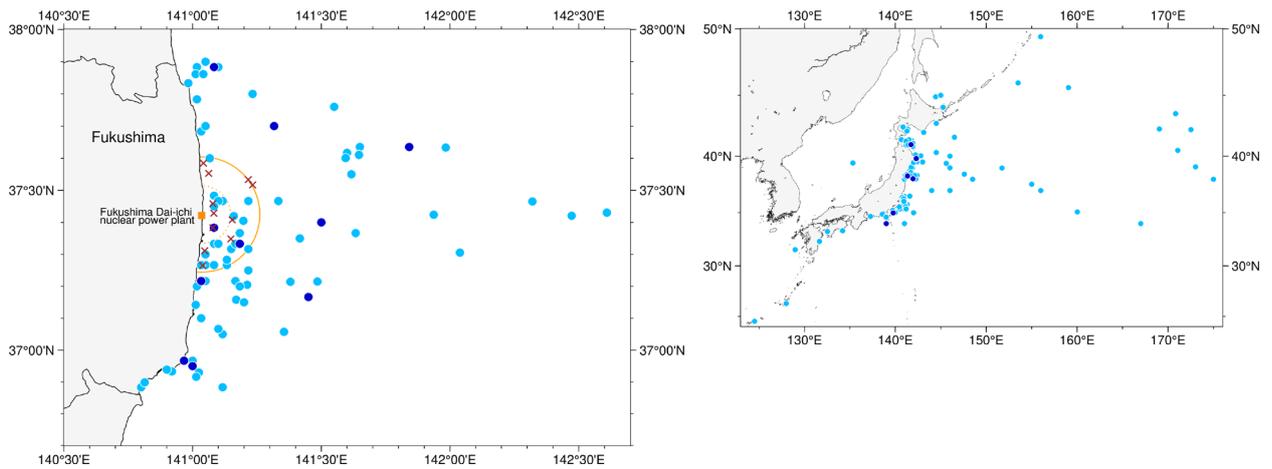


図1. 福島県沖（左図）及び福島県沖以外（右図）における水産物試料の採集位置。薄い青丸（●）は水産機構（2011～2022）、濃い青丸（●）は水産機構（2022～2023）、茶バツ（×）は東京電力（2012～2021）の公表データを示す。橙の正方形（■）は東電福島第一原発、橙の内円は東電福島原発から 10 km 圏、外円は 20 km 圏を示す。

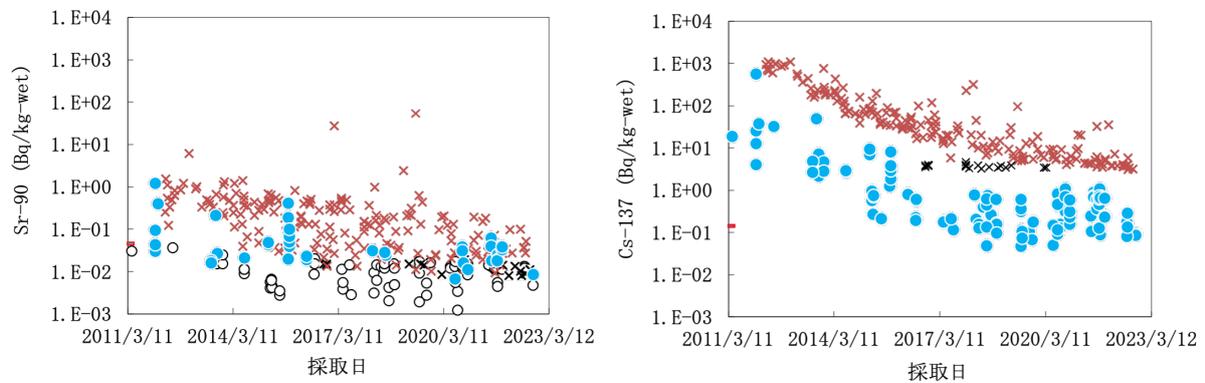


図2. 福島県沖の魚類における Sr-90 濃度（左図）と Cs-137 濃度（右図）の推移。青丸（●）及び白抜き黒丸（○、 < 0.036 Bq/kg-wet）は水産機構（2011～2023）、茶バツ（×）及び黒バツ（×； Sr-90 < 0.019 Bq/kg-wet； Cs-137 < 4.7 Bq）は東京電力（2012～2022）の公表データを示す。

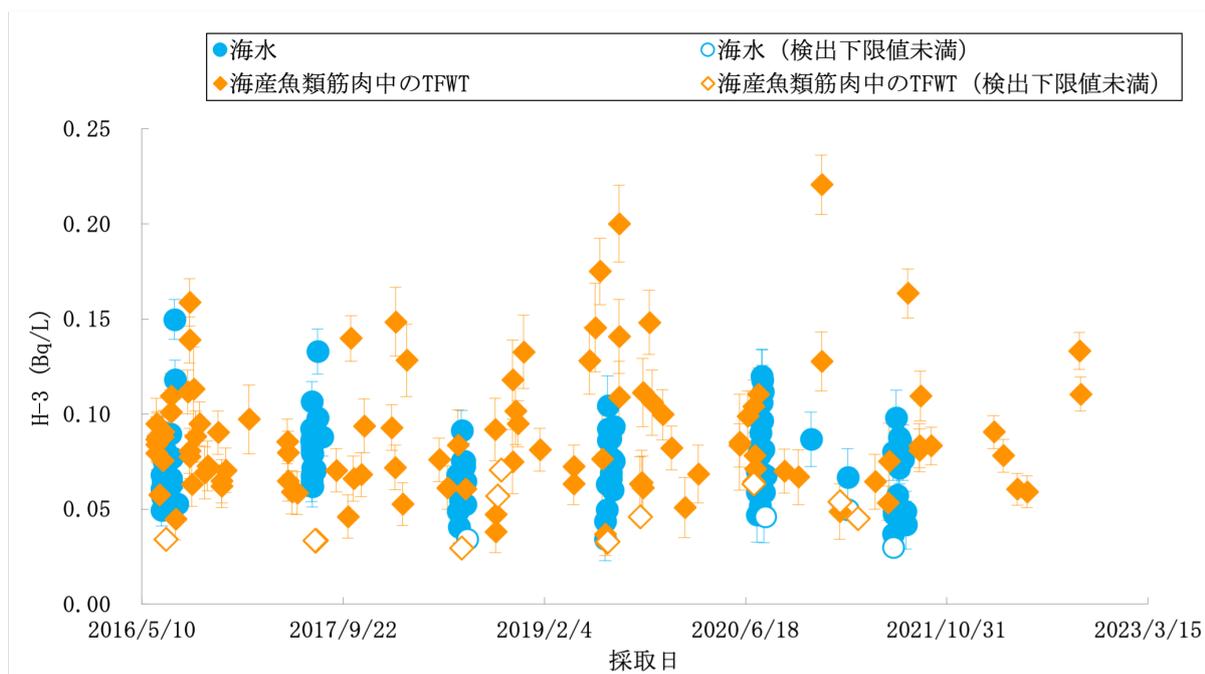


図 3. 日本周辺の表層海水中の H-3 濃度及び魚類筋肉中の自由水型 H-3 (TFWT) 濃度の推移。エラーバーは計数誤差 (1σ) を示す。

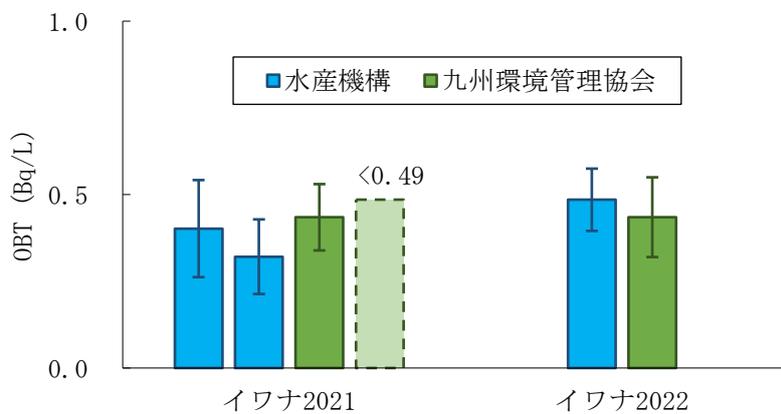


図 4. 淡水魚類乾燥筋肉試料を用いた OBT 分析のクロスチェック結果。エラーバーは計数誤差 (1σ) を示す。

1. 海洋生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 1-4	魚類生息環境判別技術の開発
研究機関・研究グループ名	水産資源研究所 水産資源研究センター 海洋環境部 放射能調査グループ ¹ 底魚資源部 底魚第2グループ ²
担当者職名・担当者名	主幹研究員・森田貴己 ¹ 、主任研究員・重信裕弥 ¹ 、富樫博幸 ² 、 研究員・三木志津帆 ¹ 、研究支援職員・東畑颯 ¹ 、櫻井慎大 ²

1. 研究内容及び方法

2015年4月以降、福島県海産物において100 Bq/kg-wet を超過した試料は、2019年1月にコモンカスベ、2019年5月（東京電力, 2019）、2021年2月、4月、2022年1月のクロソイの5試料のみである（水産庁, 2023）。基準値超過の試料数は非常に少ないが、復興途上にある福島県水産業においては、検出されること自体が復興の障害となりえる。そのため、基準値超過の試料が出現する原因の解明が求められている。基準値超過試料はモニタリングの結果等から東京電力福島第一原子力発電所の港湾内（以下「F1 港湾内」という。）に生息していた魚類ではないかと推測されているが、科学的に証明されていない。そこで本課題では、F1 港湾内を含め基準値超過試料が経験した環境を判別する技術を開発することを目的とした。昨年度までは、耳石中の安定元素濃度による判別法も行っていたが、今年度は耳石の全β線を用いた判別法のみを行った。このβ線は耳石中に含まれるSr-90から放出されていることが示唆されている（Fujimoto *et al.*, 2015）。昨年度使用したF1 港湾内試料数及びF1 港湾外試料数はそれぞれ41、25であったが、今年度はそれぞれ56、111に増やした。全β線の測定は、耳石全体を2πガスフローカウンターにより60分間測定を3回繰り返し行った。また、測定値は、バックグラウンドの測定を適宜行いバックグラウンドのカウントを差し引いた後に解析に使用した。バックグラウンドを差し引いた後にマイナスカウントとなった測定値は0カウントとして使用した。

判別試料として2021年2月、4月、2022年1月に採取されたクロソイ（福島水産海洋Cより耳石提供）を試料とし、F1 港湾内もしくはそれに似た環境での生息経験を有するか否かの判別を行った。これら判別試料の情報は表1に示した。

2. 令和4年度進捗状況・成果

(1) 耳石の全β線を用いた判別

(a) 閾値を設定した方法での判別

F1 港湾内で採取された試料の耳石から検出されたβ線は、0から3,850カウントである。一方、港湾外で採取された試料の耳石から検出されるβ線は、0から4.67カウントであり、5カウント以上のものはない（図1）。判別試料においては全て5カウント以上が検出された。そこで仮の閾値を5カウントとして設定し判定すると、判別試料は全てF1 港湾内もしくはそれに似た環境での生息経験を有すると考えられた。

(b) 閾値を設定しない方法での判別

ロジステック回帰分析を用いて、判別試料が全て F1 港湾内もしくはそれに似た環境での生息経験を有する確率を検討した (図 2)。耳石中の β 線カウントを説明変数とした場合、もしくは耳石の β 線カウントと筋肉中の Cs-137 濃度の両方を説明変数とした場合の両方で、判別試料は全て高い確率 (80~100%) で F1 港湾内もしくはそれに似た環境での生息経験を有すると考えられた。

3. 令和 4 年度成果の考察と今後の課題

耳石の β 線を用いた判別分析では、判別試料は全て F1 港湾内もしくはそれに似た環境での生息経験を有する、もしくは経験を有する確率が高いと判別された。

昨年度まで行っていた安定元素を用いた判別は、仮に F1 港湾内に生息経験があったとしても、その後に F1 港湾外に生息しているとその影響がでてしまい、港湾外で採取された基準値超過試料の判別には適していないと考えられる。耳石の β 線を用いた判別法は、こうした影響が少ないと考えられ、また分析が簡易であり汎用性が高い方法であると思われる。しかし、F1 港湾内では、 β 線が検出される試料と検出されない試料が存在しているため、耳石の β 線を用いた判別分析が確定的な判別方法であるとは言えない。特に、問題となるのは筋肉中の Cs-137 濃度が高いが、耳石の β 線カウントが低い試料である。こうした試料は実際に F1 港湾内で確認されており、今後 F1 港湾外に出てくる可能性は否定できない。今後はこうした試料に対応できる判別方法の開発が必要である。

これまで東京電力ホールディングス (株) は、F1 港湾内での魚類駆除及び F1 港湾内外への魚類の移動を防止する対策を行ってきた。F1 港湾内での魚類駆除数は、2012 年度から 2023 年 1 月末日までで累計 8010 匹となっている。この数から魚類が F1 港湾内に入っていることは明らかである。2022 年 1 月の基準値超過クロソイの採取後、福島県漁業協同組合連合会等の要請等により、東京電力ホールディングス (株) は F1 港湾内において基準値超過魚類が発生しないよう環境改善の取り組み開始しており、今後はこの取り組みの効果が期待される。

謝辞

本研究では、福島県水産海洋研究センターとの共同研究「生息環境履歴が魚類の放射能汚染に及ぼす影響把握」から提供された耳石試料を使用しました。耳石試料提供に感謝します。

富岡港での魚類採取には、福島大学環境放射能研究所の和田准教授、高田特任准教授、金指研究員に協力して頂いた。小名浜港の魚類は、ふくしま海洋科学館の富原獣医師に提供して頂いた。ここに感謝の意を記します。

引用文献

東京電力 (2019) 福島第一原子力発電所 20 k m 圏内海域で採取したクロソイの測定結果 (続報)
https://www.tepco.co.jp/decommission/data/analysis/pdf_csv/2019/3q/fish01_190911-j.pdf,
(参照 2023-03-11)

水産庁 (2023) 水産物の放射性物質調査の結果について。

<https://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>, (参照 2023-03-11)

Fujimoto K. et al. (2015) Use of otolith for detecting strontium-90 in fish from the harbor of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *Environ. Sci. Technol.*, 49, 7294-7301.

図表

表 1. 判別試料の情報

Sample ID	採取日	年齢	筋肉中のCs-137濃度 (Bq/kg-wet)	耳石全体からのβ線 (カウント/60min)	耳石試料提供先
FS-1	2021/2/22	4	474	10.9 ± 2.22*	福島水産海洋C
FS-2	2021/4/1	3	270	16.2 ± 1.70*	福島水産海洋C
FS-3	2022/1/26	4	1340	39.0 ± 2.36*	福島水産海洋C

*3回測定 of 標準偏差

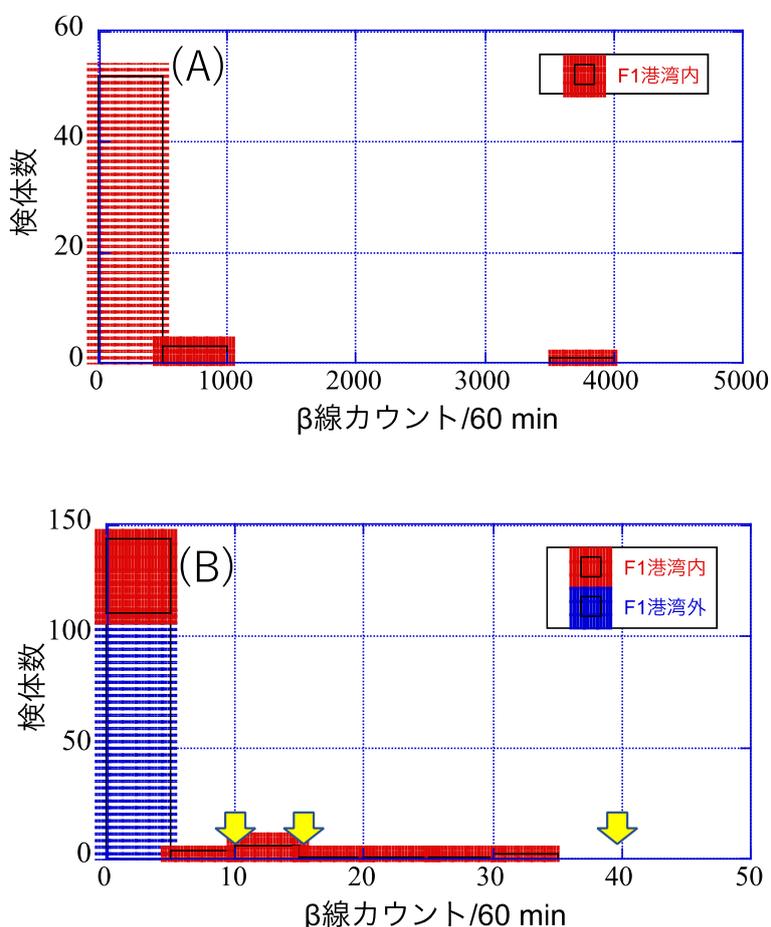


図 1. F1 港湾内外から採取された試料の耳石全体からのβ線カウントと試料数の関係.

(A) F1 港湾内試料。(B) β線カウントが50カウント以下のみ。図中の黄色矢印は判別試料の耳石中のβ線カウントの位置。両図ともβ線カウントがマイナスのものは0として表示している。

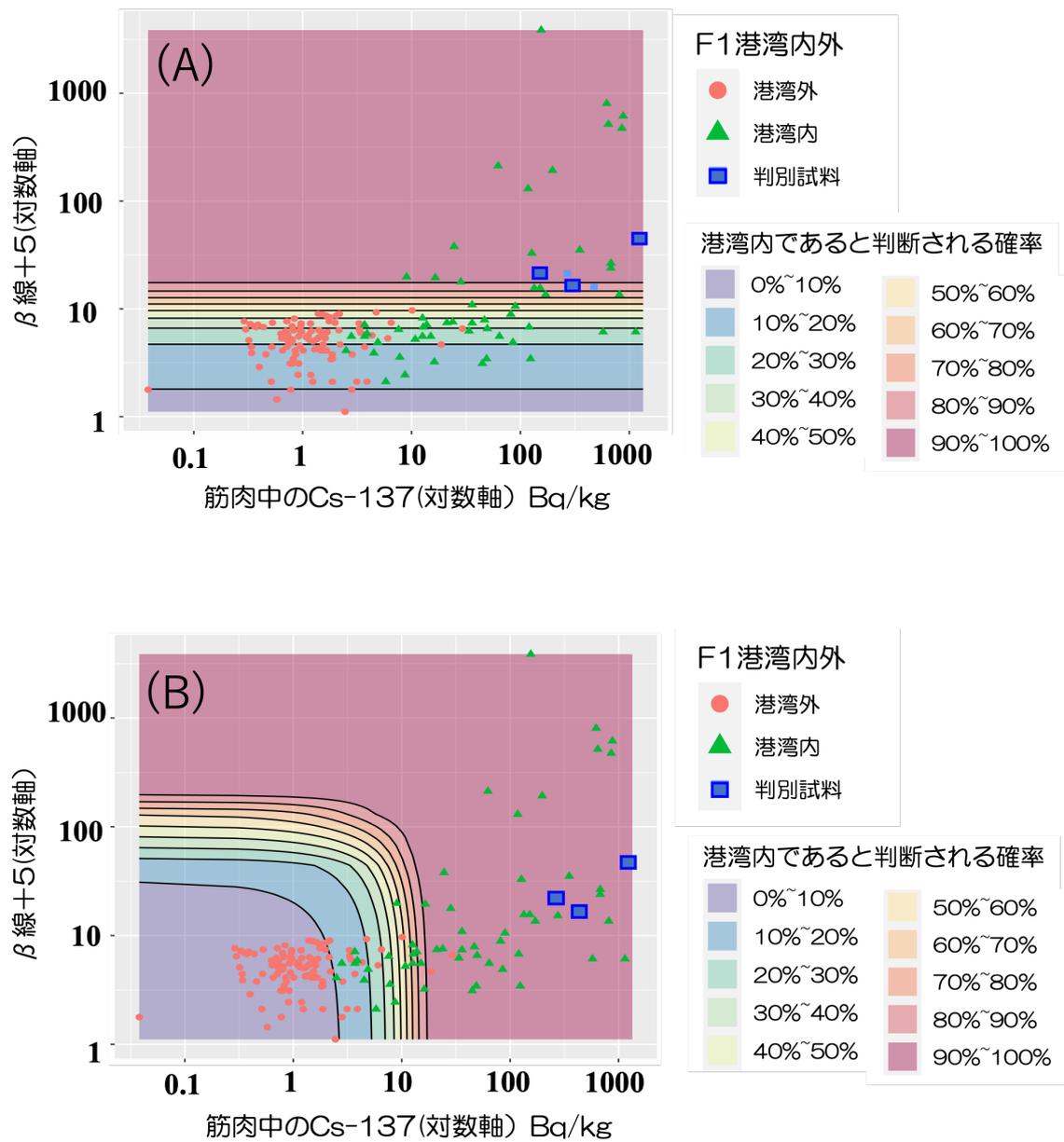


図2. ロジスティック回帰による判別試料の判別.

(A) 耳石全体からの β 線カウントを説明変数としたロジスティック回帰分析。(B) 耳石全体からの β 線カウントと筋肉中のCs-137濃度を説明変数としたロジスティック回帰分析。

2. 内水面生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 2-1	課題名：内水面魚類における放射性物質濃度予測モデルの作成
研究機関・研究グループ名	水産技術研究所 沿岸生態システム部 内水面グループ ¹ 福島県内水面水産試験場 ² 千葉県水産総合研究センター 内水面水産研究所 ³ 栃木県水産試験場 ⁴ 水産資源研究所 海洋環境部 放射能調査グループ ⁵
担当者職名・担当者名	主幹研究員・山本祥一郎 ¹ ， 研究員・真壁昂平 ² 研究員・佐合慶祐 ³ ， 主任研究員・渡邊長生 ⁴ 主任研究員・増田賢嗣 ¹ ， グループ長・帰山秀樹 ⁵

1. 研究内容及び方法

東日本大震災から10年以上が経過した今なお、東北・関東地方の湖沼河川に生息する魚類から食品の安全基準値を上回る濃度の放射性セシウムが検出され、それらの水面では出荷制限や採捕自粛が続いている。ヨーロッパの一部の水面では、魚類の放射性物質濃度半減期がチェルノブイリ事故からの経過にともない長期化するという報告がなされており、水産研究・教育機構が調査を行ってきた水面においても同様の傾向が確認されている。時間的に変化する放射性物質の動態を正しく理解するためには、今後も生態系を構成する生物各種及び非生物に含まれる放射性物質濃度を測定し、最新のデータを用いて将来予測を更新していく必要がある。本課題では、福島県、栃木県、千葉県の調査対象湖沼河川において、魚類、環境水、底泥、プランクトン、魚類の餌生物等の放射性物質濃度を調べるとともに、これらの時系列データを基に実効生態学的（環境）半減期を推定する。さらに、これまでに蓄積した主要内水面魚種の放射性物質濃度データ及び公表済みデータを用いて、放射性物質濃度の減少速度の変化をモデル化し、減少速度の鈍化が生じている水域や魚種の抽出を行う。

方法：

(1) 2022年6月及び10月に、空間線量が異なる福島県内の3河川（木戸川、井出川、新田川）の下流部及び上中流部の各定点（木戸川下流、井出川上流、井出川中流、井出川下流、新田川下流、新田川支流飯樋川、図1）において、魚類各種、環境水、底泥、河床付着藻類（シルト含む）、及び水生生物（甲殻類等）のCs-137濃度測定のための標本採集調査を行った。魚類の採捕は電気ショッカー、釣り、投網、たも網を用い、水生生物はたも網を用いて採取した。

2022年8月から11月にかけて、福島県の秋元湖において、魚類各種、環境水、底泥、動物プランクトン及び水生生物（甲殻類）のCs-137濃度測定のための標本採集調査を行った。魚類の採捕は刺し網を用いて行い、プランクトンについては目合0.1mm、口径45cmのプランクトンネットを用い、水面下約1m層を水平曳きにて採集した。採集した魚類については、筋肉部位を採取し試料とした。ただし、筋肉部位が少量の一部個体については、複数個体をまとめて1試料とした。

(2) 千葉県手賀沼において、2022年6月～7月、10月に魚類各種（ギンブナ、コイ、ニホンウナ

ギ、モツゴ(6月のみ)、環境水、底泥、魚類の餌生物と想定されるエビ類各種(スジエビ、テナガエビ、アメリカザリガニ)、ユスリカ、プランクトン、付着藻類、水生植物についてCs-137濃度測定のための標本採集調査を行った。魚類及びエビ類は、張網(定置網の一種)、筌(せん)を用いて採捕した。環境水は表層水を20L、底泥は600mlを、それぞれ定点にて採取した。底泥、ユスリカの採取にはエクマンバージ採泥器を用いた。プランクトンは、目合0.1mm、口径30cmのプランクトンネットを用い、水面下約1m層を水平曳きにてサンプリングした。藻類は、栈橋の表面に付着したものをプラスチック容器を用いて採取した。魚類及びエビ類は全長、体長、体重を計測した後、ギンブナ、コイについては個体毎に筋肉部位を試料とし、ニホンウナギについては発育段階(黄ウナギまたは銀ウナギ)を区分した後、皮付きの筋肉部位を試料とした。ただし、全長10cm未満のフナは種判別が困難なことから除外した。モツゴについては魚体全体(胃内容物を含む)を全長により3階級(5cm未満、5cm以上7cm未満、7cm以上)に分け、各階級について複数個体を1試料とした。エビ類については、体全体を用いて複数個体を1試料とし、アメリカザリガニのみ全長9cm以上は個体毎に、9cm未満は複数個体を1試料とした。

利根川(千葉県香取市及び東庄町地先)において、2022年10月~11月にニホンウナギ、環境水、底泥について、Cs-137濃度測定のための標本採集調査を行った。ニホンウナギの採捕は10月の調査時には漁具として「筌(せん)」、「うなぎ鎌」を、11月には「うなぎ鎌」を用いた。環境水は表層水を20L、底泥は600mlを、それぞれ定点にて採取した。底泥の採取にはエクマンバージ採泥器を用いた。ニホンウナギは、全長、体長、体重を計測した後、黄ウナギ・銀ウナギを区分し、皮付きの筋肉部位を試料とした。また、耳石を摘出し年齢査定を行った。

(3) 栃木県中禅寺湖において、2022年5月~7月に魚類各種(ヒメマス、ホンマス、ブラウントラウト、レイクトラウト、ニジマス、ワカサギ、ウグイ、フナ、カジカ、ヨシノボリ、スジエビ、ヌカエビ)、環境水、底泥(11地点)について、Cs-137濃度測定のための標本採集調査を行った。環境水については、2022年10月にも採水した。魚類は、刺し網、釣り、電気漁具を用いて採捕し、個体毎に筋肉部位を試料とした。ただし、ワカサギ、カジカ、ヨシノボリ、スジエビ、ヌカエビについては、複数個体を1試料とした。環境水は定点にて20Lを採水し、底泥は湖岸近くに設定した11定点にて、エクマンバージ採泥器を用いて採取した。

(4) 水産庁ホームページ(<https://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>)にて公表されているワカサギ及びイワナの放射性セシウム濃度データを抽出し、下記(5)により推移傾向の解析を行った。

(5) 各試料の放射性セシウム濃度の測定には、ゲルマニウム半導体検出器を用いた。環境水はガラスフィルター(濾過グレードGF/F)を用いて濾過し、底泥、プランクトン、藻類は目視によりゴミ、木片等を除去し、恒温器にて十分に乾燥させた後にCs-137濃度測定試料とした。河床付着物(シルト含む)については、ガラスフィルター(濾紙グレードGF/F)を用いて漉しとり、Cs-137濃度測定用試料とした。魚類以外の水生生物については、標本全体を測定試料とした。

放射性セシウム濃度の推移傾向の解析については、これまでに得られた時系列データを用いて1成分の指数関数モデル($Q_t = Q_0 e^{-kt}$)と2成分の指数関数モデル($Q_t = Q_1 e^{-k_1 t} + Q_2 e^{-k_2 t}$;ただし、 Q_t は

時間 t における Cs-137 濃度を示す) それぞれへの当てはめを行い、赤池情報量基準 (AIC) によるモデル選択を行った。2 成分の指数関数モデルは、放射性セシウム濃度の減衰速度が時間とともに変化していることを示し、モデルの第 1 項では事故後放射性セシウムが河川をとおして流出または底泥に吸着するなどして生態系から急速に放出されていく過程を、第 2 項は生態系内に留まった放射性セシウムが生態系内を循環し減衰速度が緩やかになる過程をそれぞれ表していると考えられている。2 つの関数式により得られた AIC の差が十分に大きく (概ね 5% 以上の差)、かつ 2 成分の指数関数モデルでの値が低い場合は、濃度の低下傾向に明らかな変化が生じているとみなし、選択されたモデルによる係数を用いて各試料の実効生態学的半減期を推定した。

2. 令和 4 年度進捗状況・成果

(1) 福島県の調査河川における 2022 年の環境水、底泥、付着藻類 (シルト含む) の Cs-137 濃度を図 2 に示した。環境水については、木戸川下流が 6 月、10 月ともに検出下限値以下 (6 月検出下限値 1.2mBq/kg、10 月検出下限値 1.5mBq/kg)、井出川上流が 6 月 2.4mBq/kg、10 月 4.9mBq/kg、井出川下流が 6 月 5.2mBq/kg、10 月 5.5mBq/kg、新田川下流が 6 月 8.8mBq/kg、10 月 8.3mBq/kg、飯樋川が 6 月 12.0mBq/kg、10 月 19.0mBq/kg であった。河川水の濃度は飯樋川で最も高く、次いで新田川、井出川、木戸川の順であった。全ての調査河川で季節による顕著な濃度差は認められなかった。底泥では、木戸川下流が 6 月 38.2Bq/kg-dry、10 月 12.2Bq/kg-dry、井出川上流が 6 月 130Bq/kg-dry、10 月 203Bq/kg-dry、井出川下流が 6 月 61.8Bq/kg-dry、10 月 45.9Bq/kg-dry、新田川下流が 6 月 199Bq/kg-dry、10 月 307Bq/kg-dry、飯樋川が 6 月 2880Bq/kg-dry、10 月 2750Bq/kg-dry であった。河川水と同様に、飯樋川が最も濃度が高く、新田川、井出川、木戸川の順に低くなった。付着藻類では、木戸川下流が 6 月 4370Bq/kg-wet、10 月 21.2Bq/kg-wet、井出川上流が 6 月 1925Bq/kg-wet、10 月 93.7Bq/kg-wet、井出川下流が 6 月 1956Bq/kg-wet、10 月 14.6Bq/kg-wet、新田川下流が 6 月 806Bq/kg-wet、10 月 126Bq/kg-wet、飯樋川 6 月 135Bq/kg-wet、10 月 705Bq/kg-wet であった。河川水や底泥と異なり、付着藻類の濃度は必ずしも飯樋川で最も高いわけではなかった。また、飯樋川を除く全ての河川で、10 月より 6 月試料の Cs-137 濃度が著しく高く、濃度の季節差が確認された。

木戸川下流に生息するアユの Cs-137 濃度は、6 月採捕個体で平均 (範囲) 1.9 (ND-8.0) Bq/kg-wet、10 月採捕個体で 1.3 (1.2-1.5) Bq/kg-wet であった。2012 年からの推移を見たところ、河川水、底泥、付着藻類、アユのいずれも過去に最高値が確認されてから有意な濃度の低下傾向が確認された (図 3)。河川水の濃度については、2 成分の指数関数モデルのほうが 1 成分の指数関数モデルよりもあてはまりがよく、Cs-137 濃度の減少速度の鈍化が確認された。一方、底泥、付着藻類、アユについては、2 つの指数関数モデルの AIC 値に大きな違いは確認されなかった。各試料について選択されたモデルを用いて推定された実効半減期は、環境水が 36 日、 7.7×10^{19} 日 (2 成分指数関数モデルによるそれぞれの成分での推定値、以下、2 成分モデル)、底泥で 582 日 (1 成分指数関数モデルによる推定値、以下、1 成分モデル)、付着藻類 (シルト含む) で 1.8×10^{20} 日 (1 成分モデル)、アユで 255 日 (1 成分モデル) であった。

井出川上流の魚類の Cs-137 濃度を図 4 に示した。6 月に採捕したイワナの平均 Cs-137 濃度 (範囲) は 19.5 (10.6-68.7) Bq/kg-wet、10 月採捕個体は 42.7 (14.0-160) Bq/kg-wet であり、ヤマメでは 6 月採捕個体 20.3 (12.7-31.8) Bq/kg-wet、10 月採捕個体 109 (35.7-230) Bq/kg-wet で

あった。イワナ、ヤマメともに、6月と比較して10月に採捕された個体の方が平均Cs-137濃度は高かった。

井出川中流の魚類各種のCs-137濃度を図5に示した。6月に採捕したイワナ及びヤマメの平均Cs-137濃度(範囲)はそれぞれ24.5(12.1-56.0)Bq/kg-wet、52.2(32.2-81.2)Bq/kg-wetであった。井出川中流ではウグイが採捕され、その濃度は6月採捕個体で35.8(29.1-48.8)Bq/kg-wet、10月採捕個体で196(105-286)Bq/kg-wetであった。井出川上流に生息するイワナ、ヤマメと同様、ウグイにおいても10月採捕個体の方が平均濃度は高かった。

井出川下流にて採捕した魚類のCs-137濃度を図6に示した。各魚種の平均Cs-137濃度(範囲)は、6月に採捕したアユで15.4(13.0-19.0)Bq/kg-wet、10月採捕個体で20.8(14.6-27.2)Bq/kg-wet、ウグイは6月採捕個体で21.1(13.6-31.8)Bq/kg-wet、10月採捕個体で21.8(10.8-28.1)Bq/kg-wet、ウナギは6月採捕個体で11.9Bq/kg-wet、10月採捕個体で8.5(7.8-9.3)Bq/kg-wet、ヤマメは10月採捕個体で12.2Bq/kg-wet、カジカは6月採捕個体で16.2(14.7-19.7)Bq/kg-wet、10月採捕個体で17.8(15.5-19.1)Bq/kg-wet、ヤツメウナギは6月採捕個体で5.2(3.3-8.9)Bq/kg-wet、ヨシノボリは10月採捕個体で20.3Bq/kg-wet、ボウズハゼは10月採捕個体で27.1(20.8-34.8)Bq/kg-wet、スジエビは10月採捕個体で12.8Bq/kg-wet、ヌカエビは10月採捕個体で7.68Bq/kg-wet、モクズガニは10月採捕個体で24.2Bq/kg-wetであった。採捕された全個体のCs-137濃度の範囲は3.3~34.8Bq/kg-wetであり、井出川下流では基準値100Bq/kg-wetを超える個体は確認されなかった。

新田川支流飯樋川のCs-137濃度を図7に示した。各魚種の平均Cs-137濃度(範囲)は、イワナでは6月に採捕した個体で184(82-318)Bq/kg-wet、10月採捕個体で245(122-406)Bq/kg-wet、ヤマメは6月採捕個体で211(142-393)Bq/kg-wet、10月採捕個体で309(131-600)Bq/kg-wet、アブラハヤは10月採捕個体で83.0(28.9-280)Bq/kg-wet、ホトケドジョウは10月採捕個体で29.0Bq/kg-wetであった。飯樋川において採捕されたイワナ、ヤマメはほとんどの個体が100Bq/kg-wet以上であり、最高値はヤマメの600Bq/kg-wetであった。一方、同所的に生息するアブラハヤ、ホトケドジョウの濃度は、イワナ、ヤマメと比べて低く、基準値を超えたのは10月に採捕されたアブラハヤの1個体280Bq/kg-wetのみであった。

新田川下流の魚類のCs-137濃度を図8に示した。各魚種の平均Cs-137濃度(範囲)は、6月に採捕したウナギで11.9Bq/kg-wet、10月採捕個体で8.5(7.8-9.3)Bq/kg-wet、フナでは10月採捕個体で18.3(15.0-21.0)Bq/kg-wet、ナマズでは6月採捕個体で35.9(26.2-45.5)Bq/kg-wet、10月採捕個体で158(52.0-310)Bq/kg-wet、ニゴイでは6月採捕個体で15.0(10.3-19.6)Bq/kg-wet、10月採捕個体で9.9(9.6-10.3)Bq/kg-wet、オイカワでは10月採捕個体で9.0(5.7-15.9)Bq/kg-wet、カジカでは10月採捕個体で11.1(9.5-14.8)Bq/kg-wet、カワムツでは10月採捕個体で7.7(6.2-10.6)Bq/kg-wet、チチブでは10月採捕個体で12.3(6.6-23.9)Bq/kg-wet、ボウズハゼでは10月採捕個体で16.4(12.8-30.3)Bq/kg-wet、ボラでは10月採捕個体で19.8Bq/kg-wet、タモロコでは10月採捕個体で8.6(6.4-12.8)Bq/kg-wet、マハゼでは10月採捕個体で13.9Bq/kg-wet、ヨシノボリでは10月採捕個体で8.7(5.5-11.9)Bq/kg-wet、モクズガニでは10月採捕個体で29.0(28.1-31.5)Bq/kg-wet、スジエビでは10月採捕個体で10.4(7.9-12.9)Bq/kg-wet、ヌカエビでは10月採捕個体で14.4(12.4-16.4)Bq/kg-wetであった。ほとんど魚種において、平均Cs-137濃度は5.5~45.5Bq/kg-wetの範囲であったが、10月に採捕されたナマズのみ平

均 Cs-137 濃度平均値が 158Bq/kg-wet と高い値を示した。一方、6 月に採捕されたナマズの平均 Cs-137 濃度は 35.9Bq/kg であり、ナマズにおける大きな個体差の存在が確認された。

2012 年から調査を継続している新田川下流において環境水、底泥、付着藻類（シルト含む）及びアユの Cs-137 濃度の推移を見たところ（図 9）、いずれも過去に最高値が確認されてから 2022 年までの期間において有意な濃度の低下傾向が確認された。これらについてモデル選択を行ったところ、環境水、底泥、付着藻類では 2 成分モデルの方が当てはまりは良かったが、アユでは AIC 値に大きな違いは認められなかった。推定された実効半減期は環境水で 130 日、1063 日（2 成分モデル）、底泥で 36 日、 -4.0×10^{27} 日（2 成分モデル）、付着藻類（シルト含む）で 80 日、 5.8×10^{20} 日（2 成分モデル）、アユで 365 日（1 成分モデル）であった。

福島県の秋元湖における 2022 年の環境水、底泥、動物プランクトンの平均（範囲）Cs-137 濃度は、それぞれ 2.3mBq/kg、926（750-1100）Bq/kg-dry、17.2Bq/kg-dry であった。環境水、動物プランクトンについては過去に最高値が確認されてから 2022 年までの期間における濃度の有意な低下傾向が確認されたが、底泥のみ定点観測を開始した 2014 年以降に有意な濃度の上昇が確認された（図 10）。底泥採取地点は湖内にある湾の中心部であり、陸域から流入した放射性物質が堆積しやすい環境であると考えられる。モデル選択の結果、環境水、動物プランクトンともに濃度の推移傾向に明瞭な時間的変化は確認されなかった。

秋元湖における 2022 年の魚介類の Cs-137 濃度を図 11 に示した。各魚種の平均 Cs-137 濃度（範囲）は、11 月に採捕したイワナで 37.0Bq/kg-wet、ウグイでは 8 月採捕個体 30.5（13.7-45.2）Bq/kg-wet、11 月採捕個体で 28.6（21.0-41.0）Bq/kg-wet、ギンブナでは 8 月採捕個体で 20.7（15.3-27.7）Bq/kg-wet、ワカサギでは 8 月採捕個体で 12.4Bq/kg-wet、コクチバスは 8 月採捕個体で 27.5（18.2-37.3）Bq/kg-wet、11 月採捕個体で 29.6Bq/kg-wet、ニゴイでは 8 月採捕個体で 20.2Bq/kg-wet、ウチダザリガニでは 8 月採捕個体で 29.4Bq/kg-wet であった。全ての魚種の濃度は 50Bq/kg-wet 未満であり、確認された最高値はウグイの 45.2Bq/kg-wet であった。秋元湖に生息する全ての魚種では過去に最高値が確認されてから 2022 年までの期間に Cs-137 濃度の有意な低下傾向が確認された（図 12）。これらのうち、濃度推移の明瞭な時間的変化が確認されたのはフナ類であった。各魚種について選択されたモデルにより推定された実効生態学的半減期は、ウグイで 1019 日（1 成分モデル）、イワナで 989 日（1 成分モデル）、フナ類で 153 日、1677 日（2 成分モデル）、ワカサギで 2410 日（1 成分モデル）、コクチバスで 573 日（1 成分モデル）、ニゴイで 1504 日（1 成分モデル）、ウチダザリガニで 374 日（1 成分モデル）となった。

(2) 千葉県の手賀沼における 2022 年の環境水 Cs-137 濃度は、平均（範囲）24（14-33）mBq/L、底泥は 161（98.4-224）Bq/kg-dry であった。2015 年からの推移を見たところ（図 13）、実効生態学的半減期（1 成分指数関数モデルにより推定）は、環境水が 3914 日、底泥が 1891 日と推定された。

2022 年に採捕した魚類各種の Cs-137 濃度の平均（範囲）は、ギンブナ 26（13-47）Bq/kg-wet、コイ 30（16-58）Bq/kg-wet、ニホンウナギ 15（1.4-45）Bq/kg-wet、モツゴ 9.0（5.7-12）Bq/kg-wet であり、コイで 50 Bq/kg-wet を超える個体が確認された。2015 年からの推移を見ると、全ての魚種で Cs-137 濃度の有意な減少傾向が確認された（図 14）。これらの魚種について 1 成分指数関数モデルと 2 成分指数関数モデルへの適合を調べたところ、いずれの魚種も両モデルの AIC の

値に顕著な違いは認められなかった。各魚種の実効生態学的半減期（1成分指数関数モデルにより推定）は、ギンブナ 2129 日、コイ 2297 日、ニホンウナギ 1131 日、モツゴ 3187 日と推定された。このうちギンブナについては、調査開始から 2021 年までのデータを用いた実効生態学的半減期推定値は 2001 日であり、2022 年のデータを加えることで半減期が長期化することが示された。

2015 年から 2022 年にかけて採捕したギンブナの全長は 100-352 mm の範囲であり、全長と Cs-137 濃度との間に相関関係は認められないか、またはその関係性は弱いものであった（2016 年 $R^2=0.06$, $P<0.05$, 2017 年 $R^2=0.06$, $P<0.05$; 図 15）。ギンブナで確認された Cs-137 濃度の個体差は、取り込む餌生物の種類や量、環境水の Cs-137 濃度などが影響していると推察されるが、その要因は現時点で明らかではない。

2016 年から 2022 年にかけて採捕したニホンウナギのうち、黄ウナギの全長は 249-775 mm の範囲であり（図 16）、2018 年、2019 年、2020 年、2021 年、2022 年サンプルでは、全長と Cs-137 濃度との間に有意な正の相関関係が認められた（2018 年 $R^2=0.70$, $P<0.01$, 2019 年 $R^2=0.61$, $P<0.01$, 2020 年 $R^2=0.70$, $P<0.05$, 2021 年 $R^2=0.90$, $P<0.001$, 2022 年 $R^2=0.91$, $P<0.001$ ）。銀ウナギは採捕個体数が 4 個体と少なく、推移傾向を把握することができなかった。

2022 年に採捕したモツゴの Cs-137 濃度は、全長 5 cm 未満が 5.7 Bq/kg-wet、5-7 cm が 9.9 Bq/kg-wet、7 cm 以上が 12 Bq/kg-wet であった（図 17）。過去の結果と同様、大型の検体ほど Cs-137 濃度が高い傾向が認められた。ただし、モツゴは 1 歳の繁殖後にほとんどの個体が死亡するため、これまで 50 Bq/kg-wet を超える濃度は確認されていない。

2022 年に採捕した餌生物各種の Cs-137 濃度の平均（範囲）は、スジエビ 14.8 (14.7-14.8) Bq/kg-wet、テナガエビ 21 (16-27) Bq/kg-wet、アメリカザリガニ 23 (21-25) Bq/kg-wet、ユスリカ 6.7 (4.5-8.9) Bq/kg-wet、プランクトン 41 (20-63) Bq/kg-wet、付着藻類 103 (20-186) Bq/kg-wet、水生植物 3.9 Bq/kg-wet であり、プランクトンと付着藻類が魚類と比べて特に高い濃度を示した。ただし、プランクトンサンプルに懸濁物等が含まれている場合は、Cs-137 濃度が過大に評価されている可能性がある。

千葉県利根川における 2022 年の環境水 Cs-137 濃度は 2.5 mBq/L、底泥は 31 Bq/kg-dry であった。2015 年からの推移を見たところ（図 18）、底泥のみ有意な減少傾向が確認された。底泥の実効半減期（1成分指数関数モデルにより推定）は 969 日であった。底泥については、2019 年 12 月を境に Cs-137 濃度の推移傾向に変化が見られ、同年秋に利根川流域で発生した豪雨に伴う底泥環境の変化が影響している可能性が考えられた。

2022 年に採捕したニホンウナギの Cs-137 濃度は、平均（範囲）3.1 (0.49-35) Bq/kg-wet^{*1} であった。2015 年からの推移を見ると（図 19）、黄ウナギでは概ね 10 Bq/kg-wet 以下の濃度で推移し、2022 年は全ての個体が 4.0 Bq/kg-wet 未満であった。一方、銀ウナギでは個体差が大きく、2022 年には 2 個体が 15 Bq/kg-wet を上回った。こうした差が生じる原因としては、育った環境の Cs-137 濃度や餌生物の種類や量が影響すると思われるが、詳細は不明である。

2015 年から 2022 年にかけて採捕した黄ウナギの全長は 255-795 mm の範囲であり、2018 年、2019 年、2020 年は全長と Cs-137 濃度との間に有意な正の相関が認められた（2018 年： $R^2=0.26$, $P<0.001$ 、2019 年： $R^2=0.16$, $P<0.001$ 、2020 年： $R^2=0.28$, $P<0.001$ ）（図 20）。しかし、その関係性は手賀沼の黄ウナギと比べると弱く、利根川と手賀沼では濃度に影響する要因が異なる可能性がある。同期間に採捕した銀ウナギの全長は 402-941 mm の範囲であり、2017 年のみ Cs-137 濃度

との間に有意な正の相関が認められた ($R^2=0.62$, $P<0.01$) (図 21)。ただし、2017 年は銀ウナギの Cs-137 濃度の個体差が小さく、全ての個体が 5.0 Bq/kg-wet 未満であった。

2021 年から 2022 年にかけて採捕したニホンウナギの年齢は 3-10 歳の範囲であり、2022 年に採捕した銀ウナギで最高 35 Bq/kg-wet の個体が確認され、2021 年と同様、銀ウナギは黄ウナギに比べて Cs-137 濃度の個体差が大きい傾向が認められた (図 22)。

※1 : 採捕した 50 検体中 10 検体が検出下限値未満 ($<0.807-0.994$ Bq/kg-wet) のため、40 検体で算出

(3)2022 年 5 月、10 月に採水した中禅寺湖の環境水 Cs-137 濃度はそれぞれ 11.0mBq/L、6.5mBq/L であった。2012 年からの推移を見たところ(図 23)、環境水濃度は有意に減少していることが確認された。一方、2022 年に採取した底泥の濃度は平均(範囲)168.78(17.6-621) Bq/kg-dry であり、有意な減少傾向は確認されなかった。

2022 年 5 月から 7 月に採捕された魚類各種の平均(範囲)Cs-137 濃度は、ヒメマス 15.6(11.6-19.1) Bq/kg-wet、ホンマス 24.6(2.2-36.1) Bq/kg-wet、ブラントラウト 33.0(7.0-64.5) Bq/kg-wet、レイクトラウト 25.9(2.6-41.8) Bq/kg-wet、ニジマス 19.6(15.2-23.1) Bq/kg-wet、ウグイ 52.8(14.0-292.0) Bq/kg-wet、フナ 16.4(7.4-29.3) Bq/kg-wet、カジカ 2.05 Bq/kg-wet、ヨシノボリ 9.4 Bq/kg-wet、ワカサギ 7.3 Bq/kg-wet、スジエビ 1.0 Bq/kg-wet、ヌカエビ 1.2 Bq/kg-wet であった。2012 年からのデータを合わせたところ、全ての生物種で Cs-137 濃度の有意な減少傾向が認められた(図 24)。これらの魚種について AIC を用いて指数関数モデルへの適合を調べたところ、カジカのみ明瞭な推移傾向の変化が認められた。それぞれの魚種の実効生態学的半減期(1 成分指数関数モデルにより推定)は、ヒメマス 1289 日、ホンマス 1627 日、ブラントラウト 1674 日、レイクトラウト 1810 日、ニジマス 2125 日*、ワカサギ 1312 日、ウグイ 3514 日、フナ 1782 日、ヨシノボリ類 889 日、スジエビ 1390 日、ヌカエビ 1423 日、カジカ類 24 日、3302 日(2 成分モデル)、と推定された。

*ニジマスの半減期は他魚種と比べ極端に長く推定されたが、ニジマスについてはサンプルに放射性セシウムを含まない養殖魚が含まれるため、ここでの推定値は参考値扱いとする。

(4)水産庁ホームページから公表されているワカサギの放射性セシウム濃度データについて、指数関数モデルによる推移傾向の分析を行った。1 集団あたり 10 検体以上調べられた集団(7 湖沼)についてデータを解析したところ、いずれの集団も濃度の有意な低下傾向が確認された(図 25)。AIC によるモデル判別の結果、小野川湖、秋元湖、赤城大沼、霞ヶ浦では濃度の低下傾向が時間とともに明瞭に変化していることが示された。それぞれの集団における実効生態学的半減期は、中禅寺湖 1169 日(1 成分モデル)、桧原湖 146 日(1 成分モデル)、榛名湖 468 日(1 成分モデル)、赤城大沼 229 日、3925 日(2 成分モデル)、秋元湖 179 日、9167 日(2 成分モデル)、霞ヶ浦 108 日、3533 日(2 成分モデル) 小野川湖 78 日、2216 日(2 成分モデル)と推定された。

イワナでは調べた全ての河川(複数の支流データを合わせた解析を含む)で、濃度の低下傾向が時間とともに変化していることが示された(図 26)。それぞれの集団の実効生態学的半減期は、阿武隈川水系烏川 215 日、7810 日(2 成分)、阿武隈川水系上川支流(摺上ダム上流)215 日、5981 日(2 成分)、阿武隈川水系上川支流(摺上ダム下流)109 日、2807 日(2 成分)、阿武隈川水系横川 112 日、2642 日(2 成分)、阿武隈川水系小川 110 日、3418 日(2 成分)、阿武隈川水系荒川 76

日、1228日(2成分)、名取川(支流全てを併せて計算)89日、1751日(2成分)、北上川(支流全てを併せて計算)61日、1397日(2成分)と推定された。

3. 今後の課題

本課題により、各調査河川・湖沼に生息するほとんどの魚類及び環境水や底泥など環境項目についてCs-137濃度レベルを把握し、さらに将来予測のための実効生態学的半減期を推定した。これらのデータは、今後、規制解除や漁場のあり方を検討する際の参考データとして活用されることを期待したい。水産庁より公表されているデータを用いて推移傾向の解析を行ったところ、ワカサギやイワナの多くの集団では濃度の減少傾向が時間とともに変化していることが確認された。魚体のCs-137濃度レベルは環境水の濃度に強い影響を受けるため(R2年度放射性物質挙動調査事業報告書)、これらの集団では環境水の濃度推移も時間とともに変化していることが考えられる。今後、他魚種についても濃度データの収集を図り、推移傾向の分析を進めていく。

利根川のニホンウナギでは、銀ウナギでCs-137濃度の個体差が大きく、この個体差は体サイズの変異に関係しないことが改めて確認された。今後このような個体差が生じる要因を明らかにする必要がある。

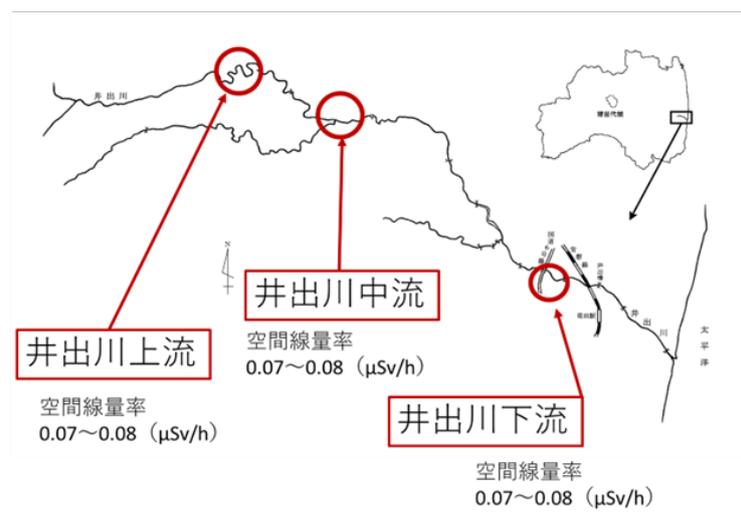
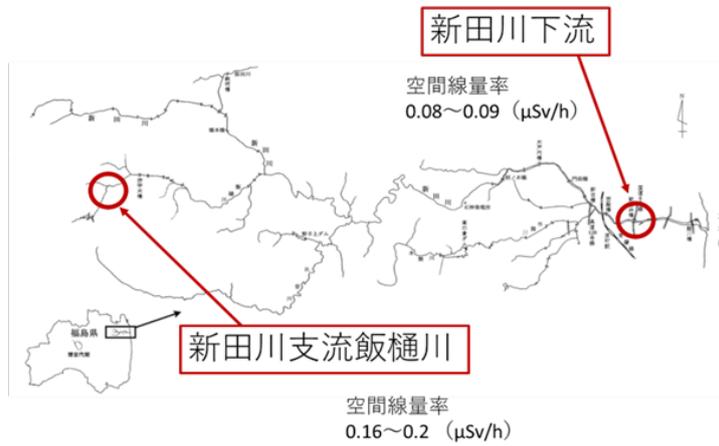
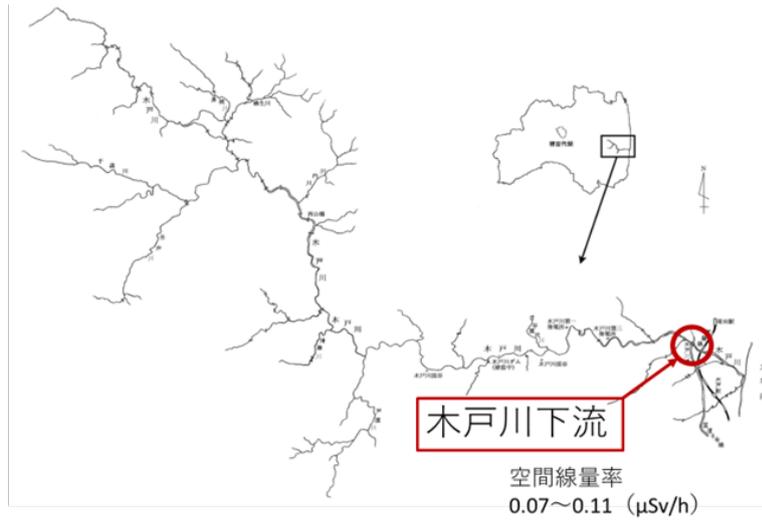


図1 木戸川、新田川、井出川に設定した調査地点、および調査地点の空間線量率

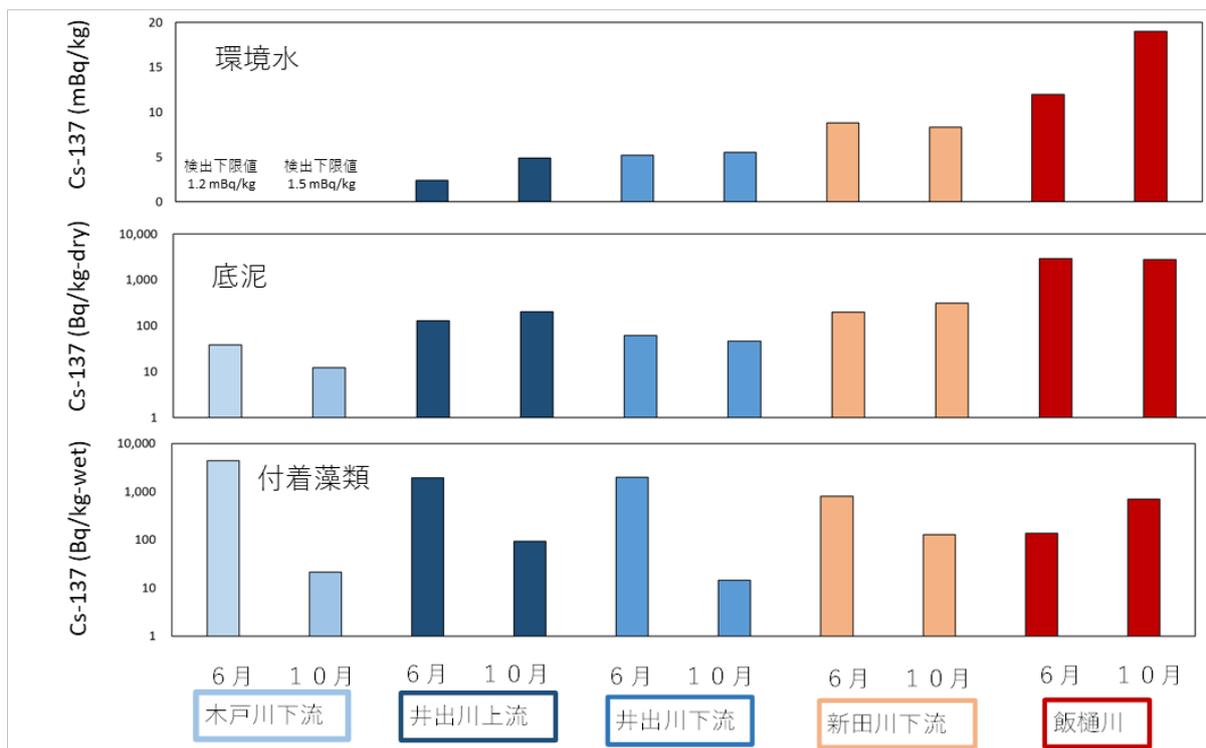


図2 各調査地点の環境水、底泥、及び付着藻類（シルト含む）のCs-137濃度

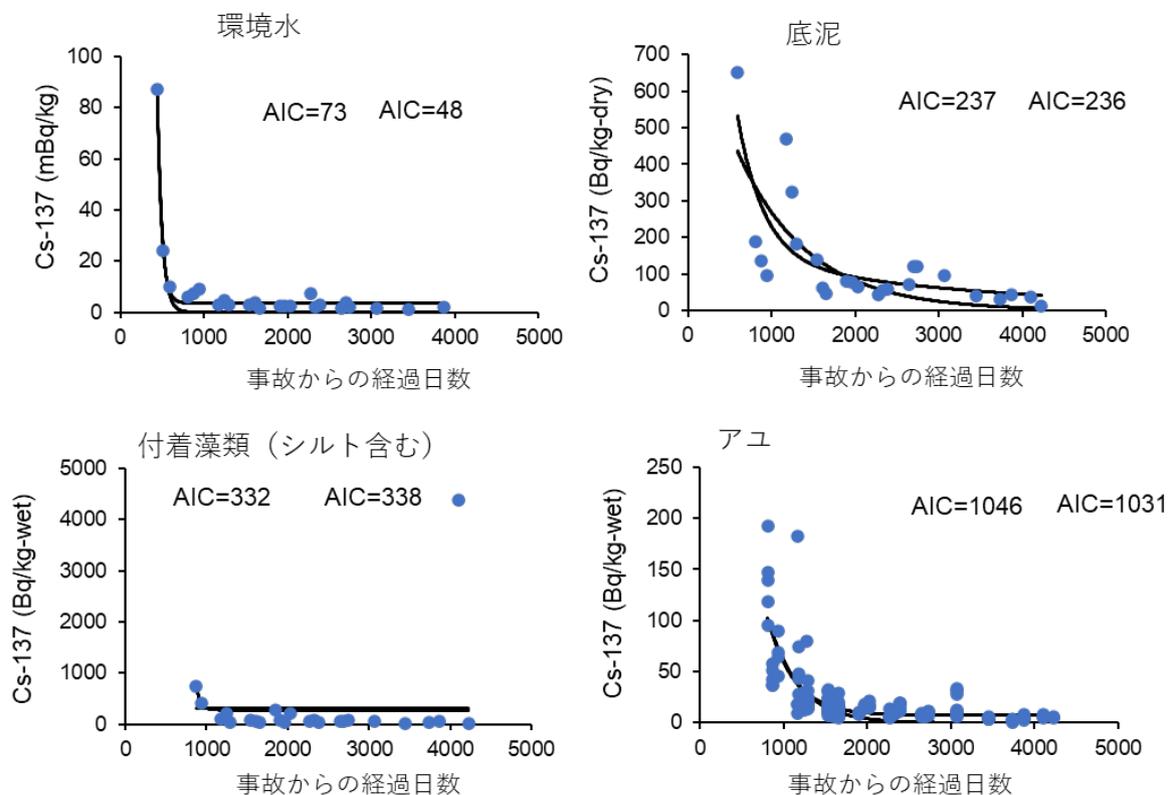


図3 木戸川下流の環境水、底泥、付着藻類（シルト含む）、アユのCs-137濃度の推移。およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

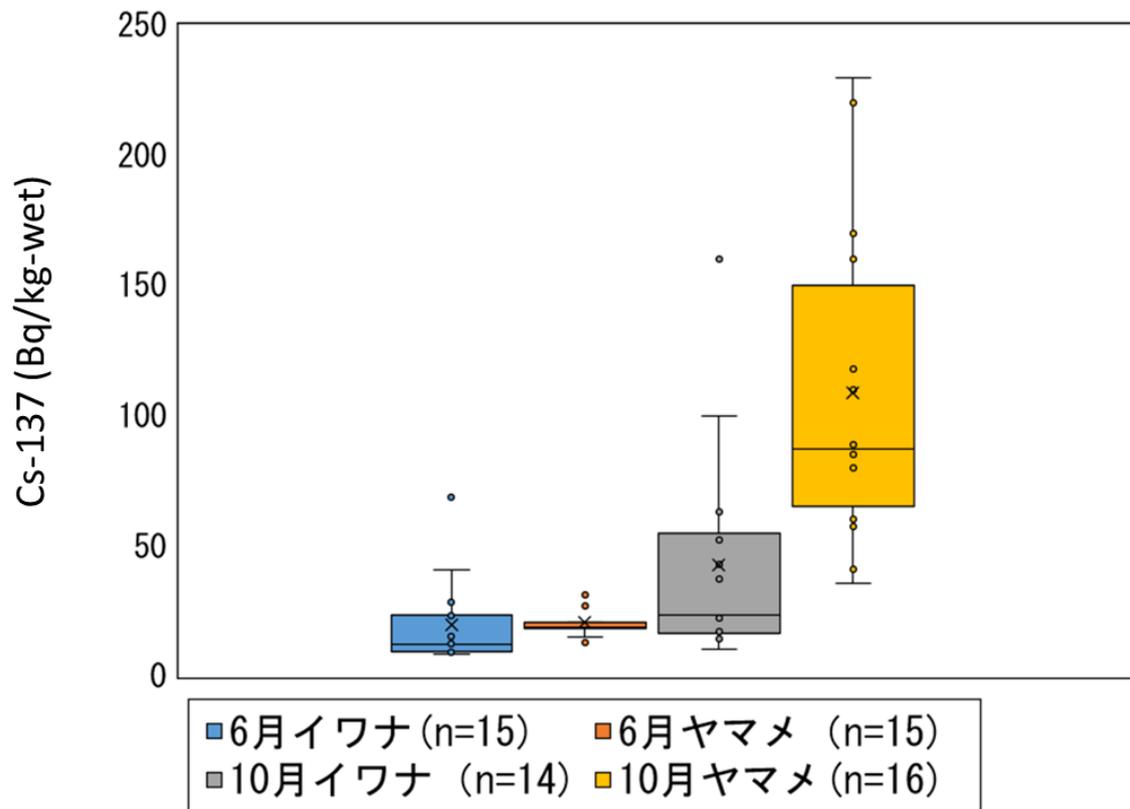


図4 井出川上流の魚類各種のCs-137濃度

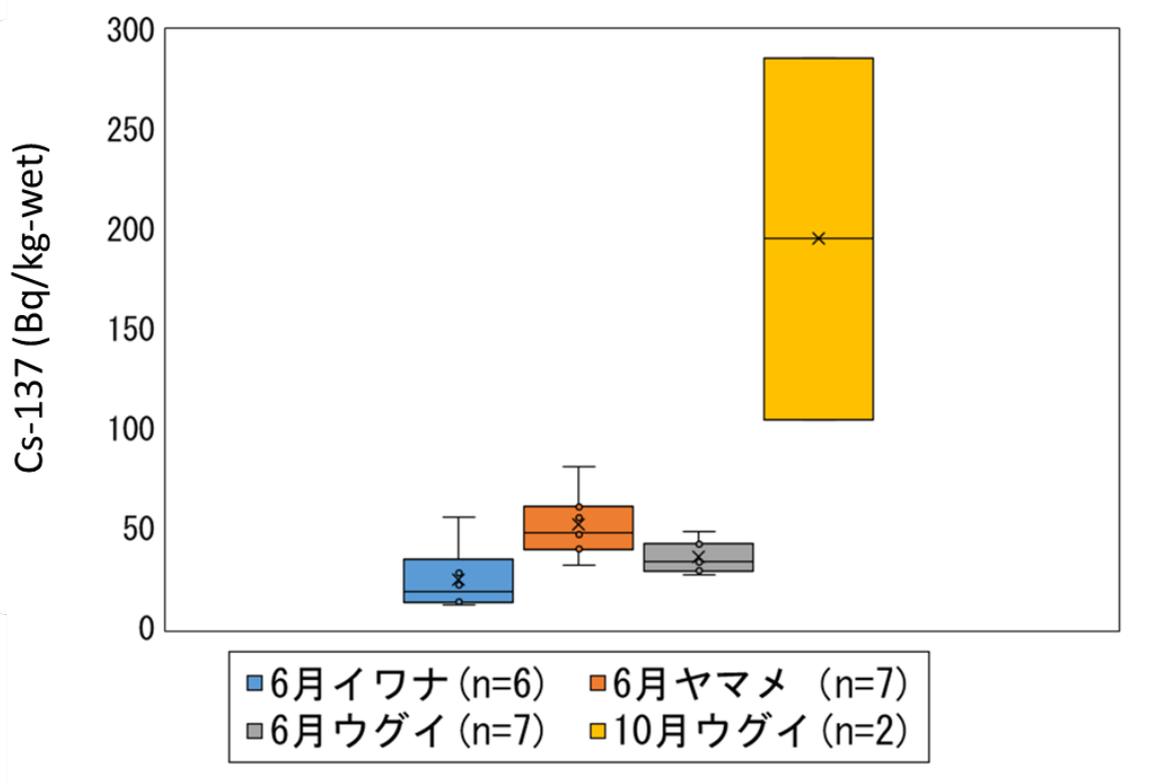


図5 井出川中流の魚類各種のCs-137濃度

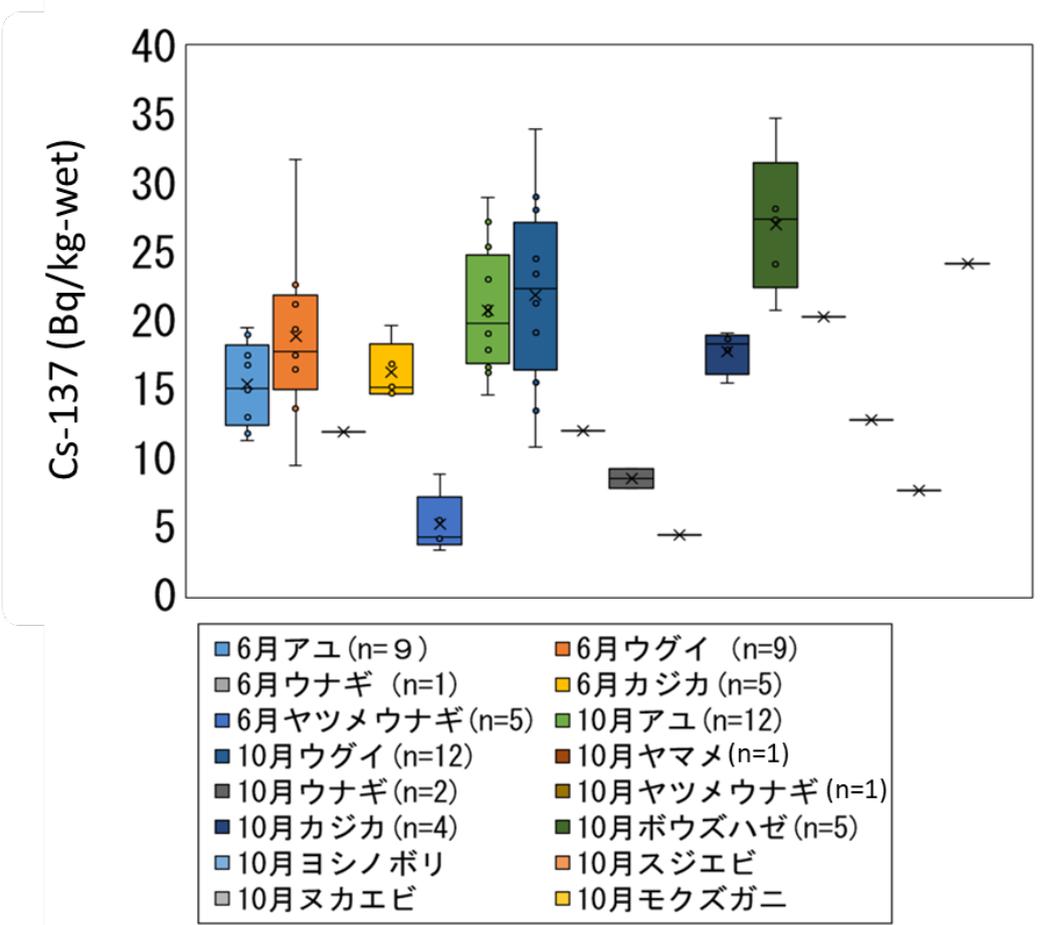


図6 井出川下流の魚類各種のCs-137濃度。スジエビ、ヨシノボリ、ヌカエビ、モクズガニについては複数個体を1試料とした

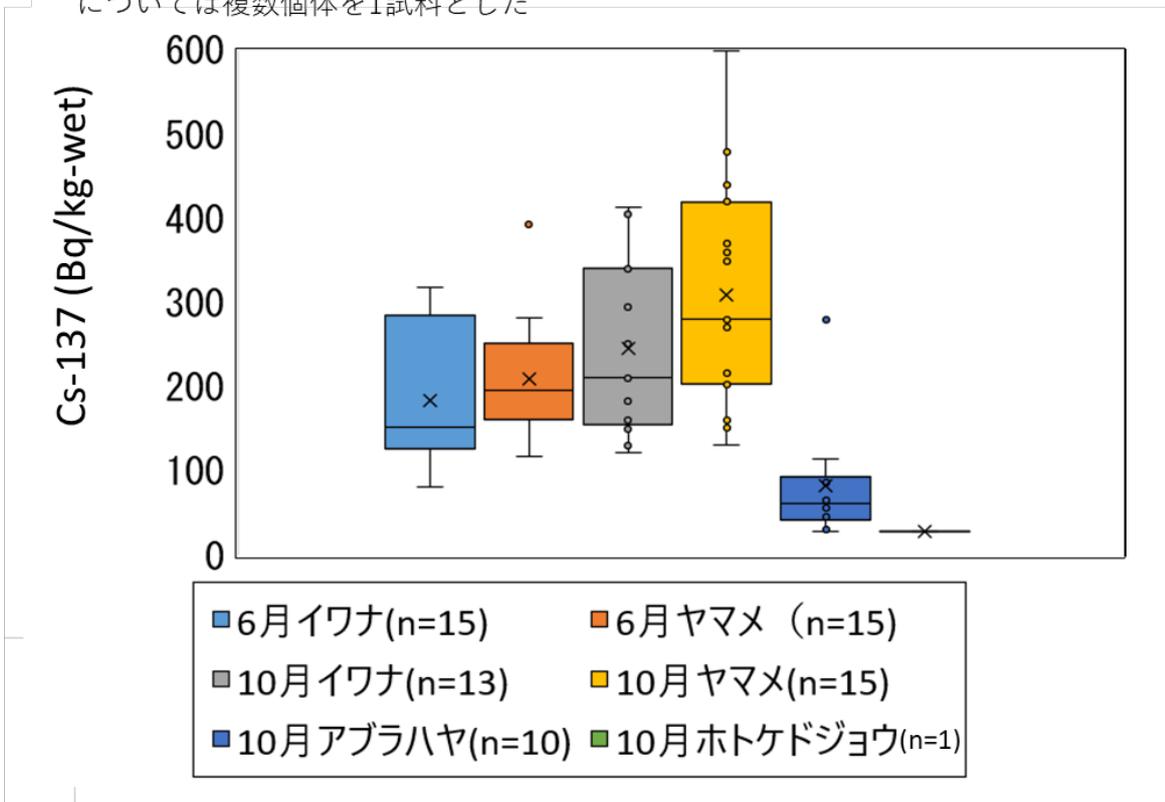


図7 飯樋川の魚類各種のCs-137濃度

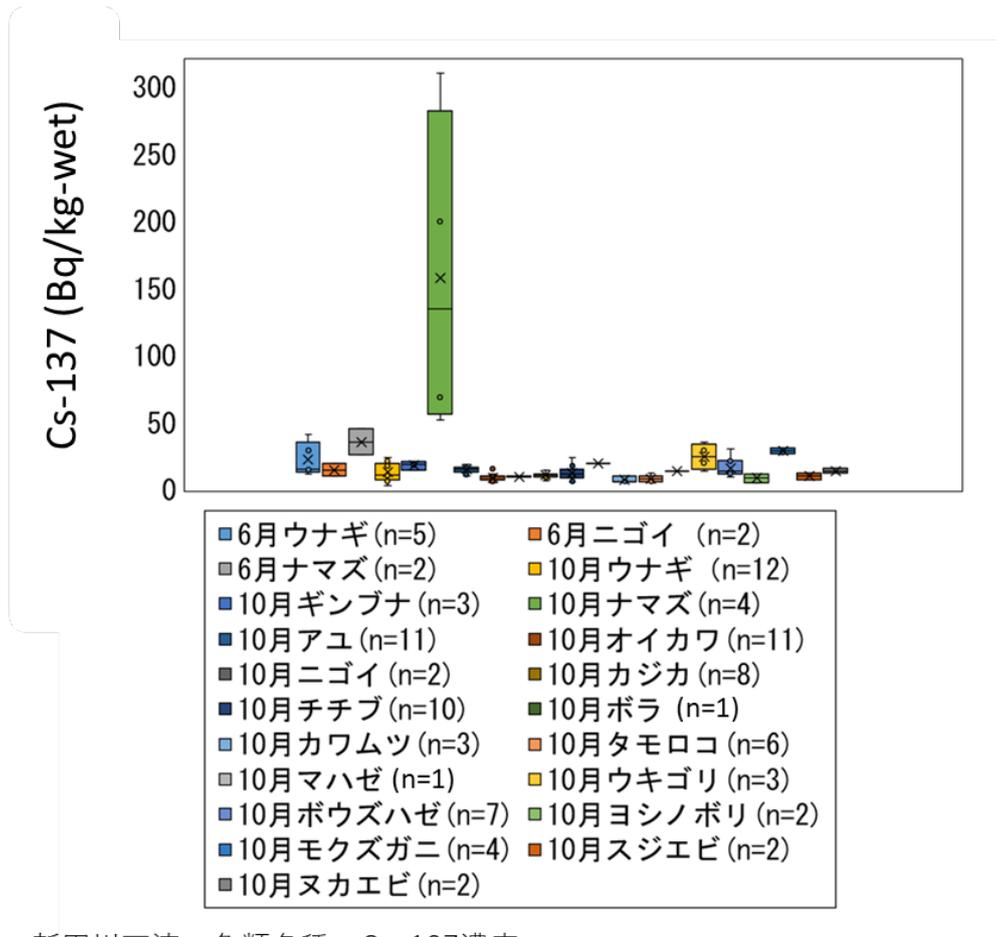


図8 新田川下流の魚類各種のCs-137濃度

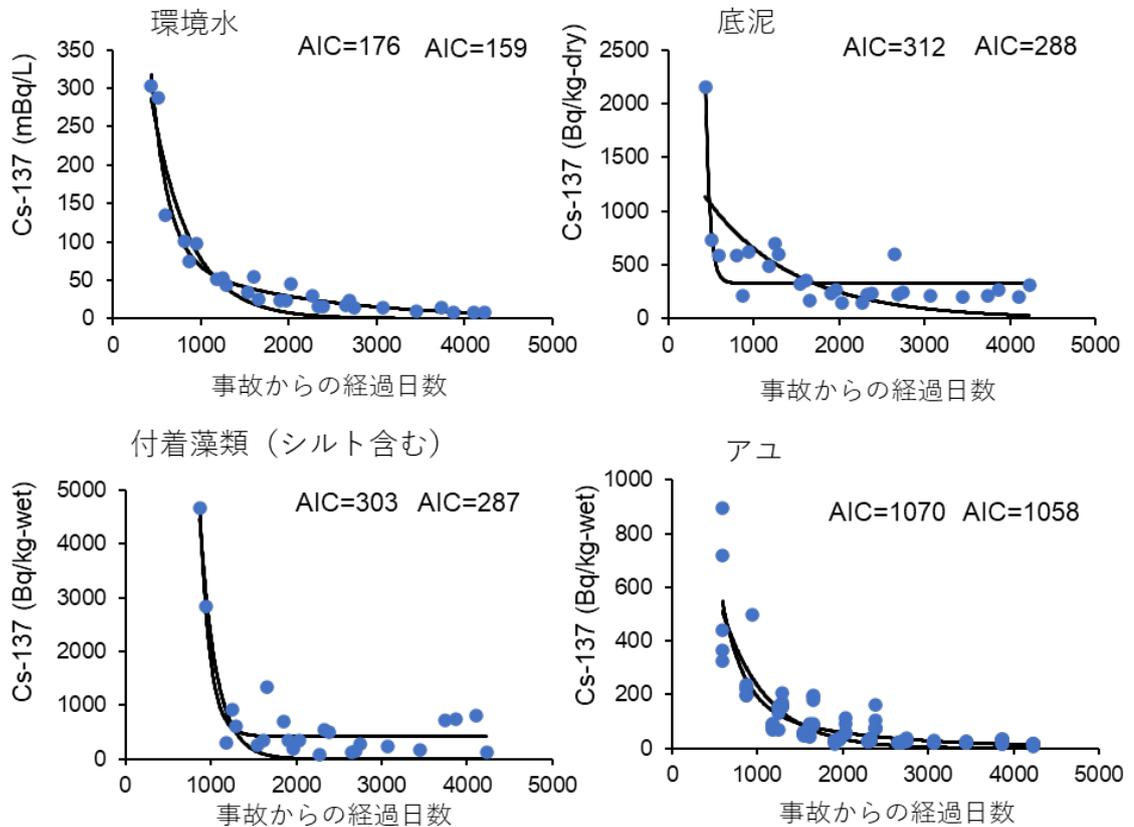


図9 新田川下流の環境水、底泥、付着藻類（シルト含む）、アユのCs-137濃度の推移。およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

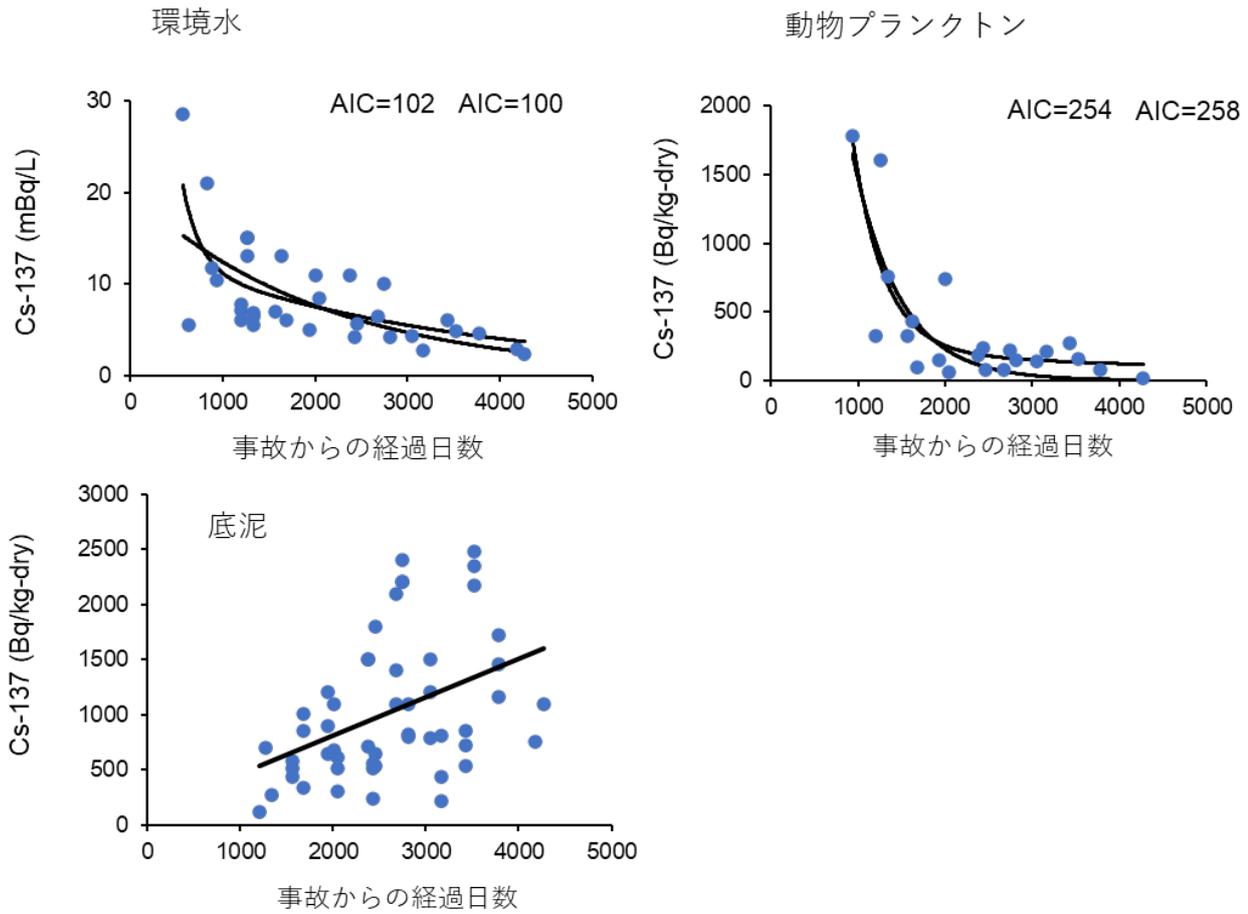


図10 秋元湖の環境水、動物プランクトン、底泥のCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

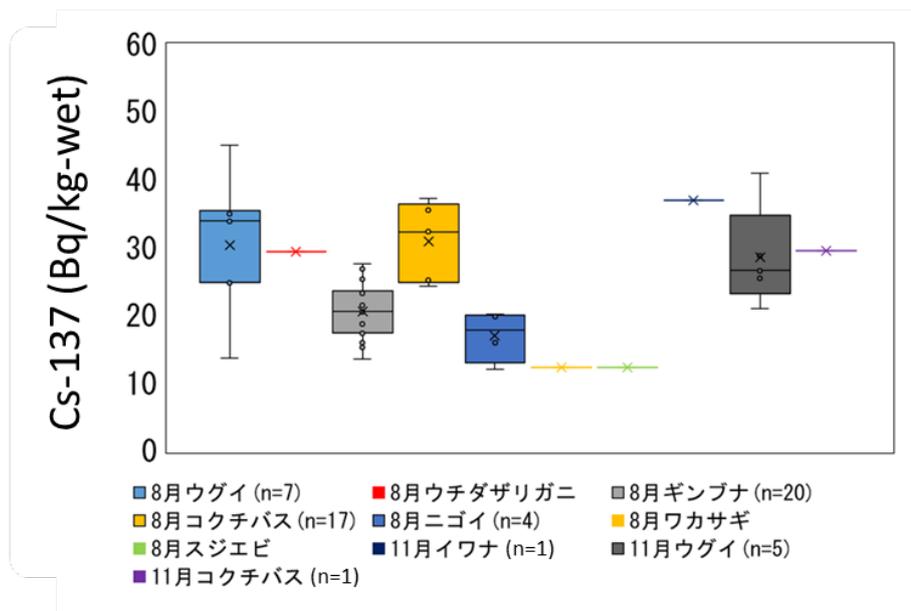


図11 秋元湖の魚類各種のCs-137濃度。ワカサギ、スジエビについては複数個体を1試料とした

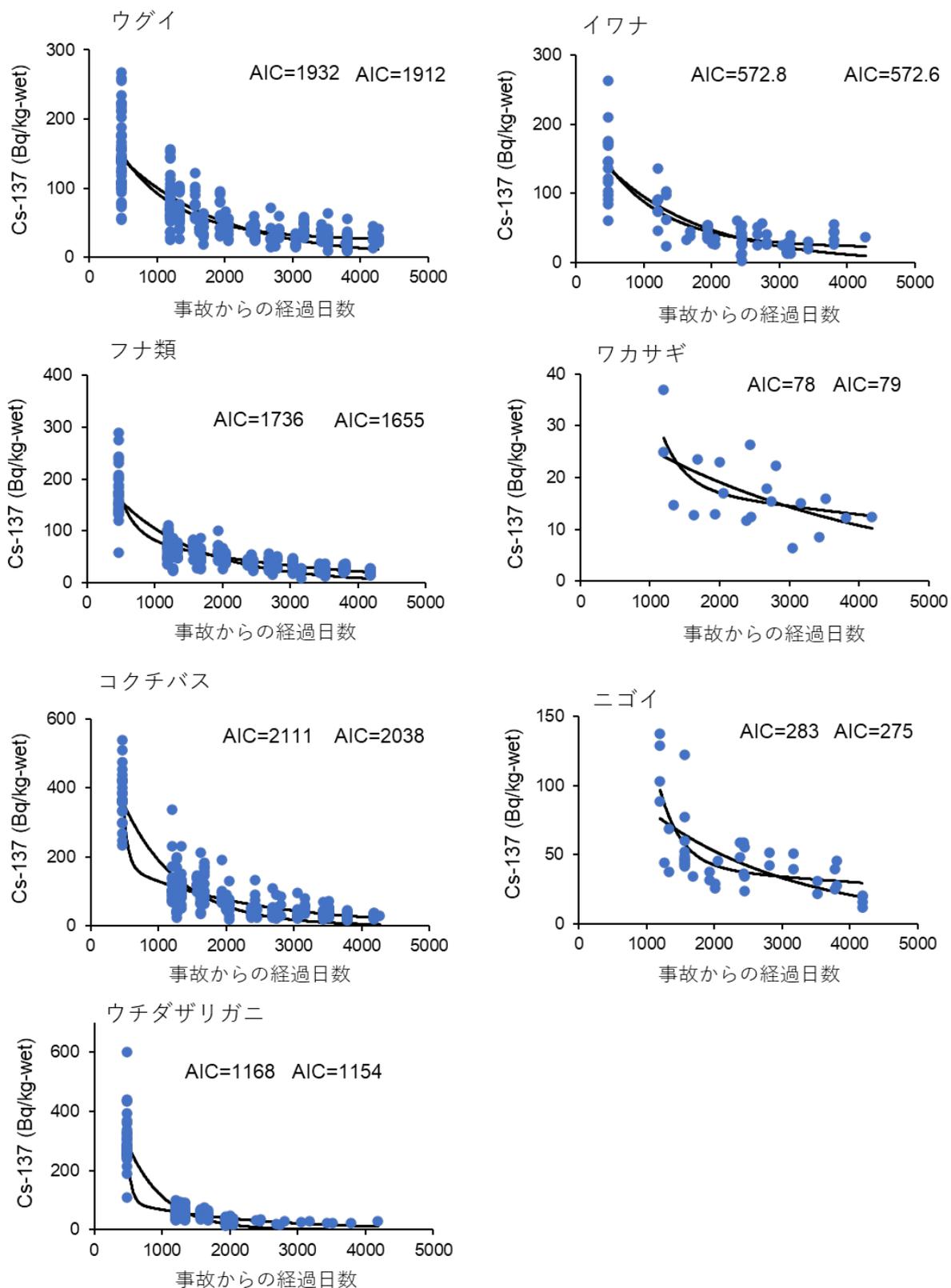


図12 秋元湖に生息する魚類各種のCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

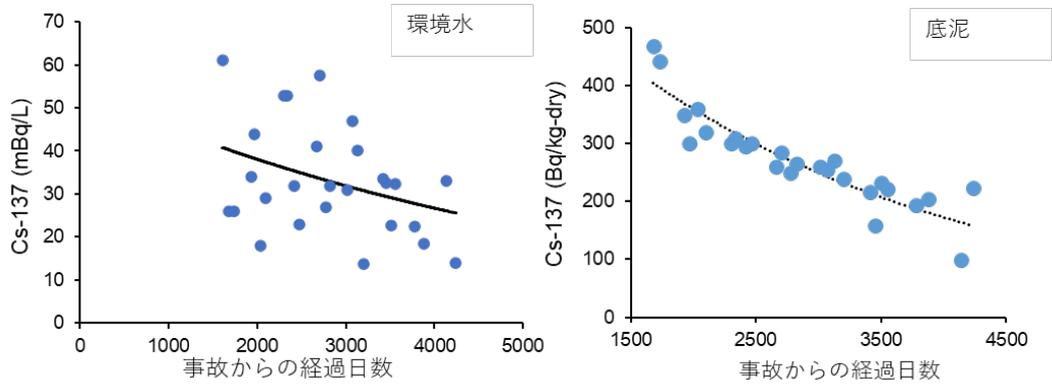


図13 手賀沼における環境水と底泥のCs-137濃度の推移。点線は、指数関数曲線を示す

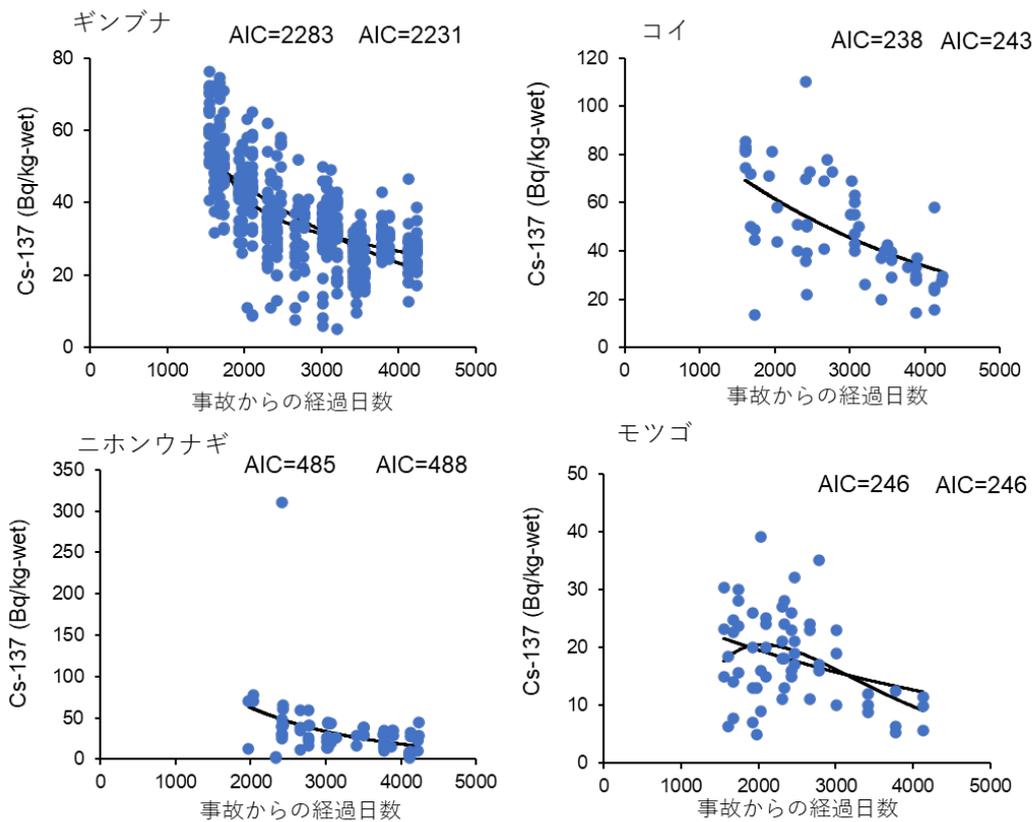


図14 手賀沼におけるギンブナ、コイ、ニホンウナギ、モツゴのCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

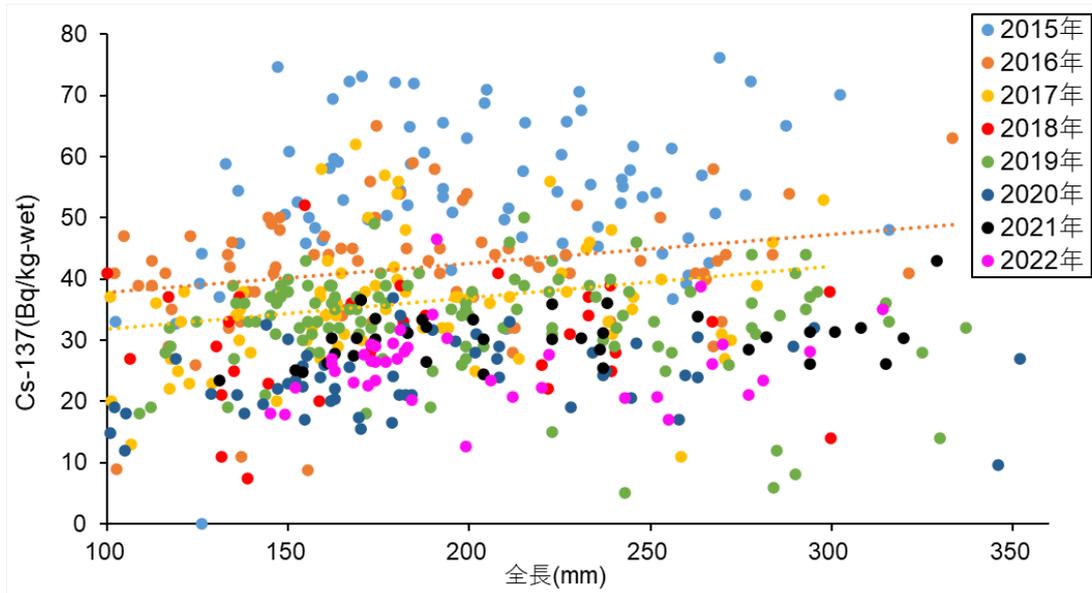


図15 手賀沼におけるギンブナの全長とCs-137濃度との関係。点線は、一次回帰直線を示す

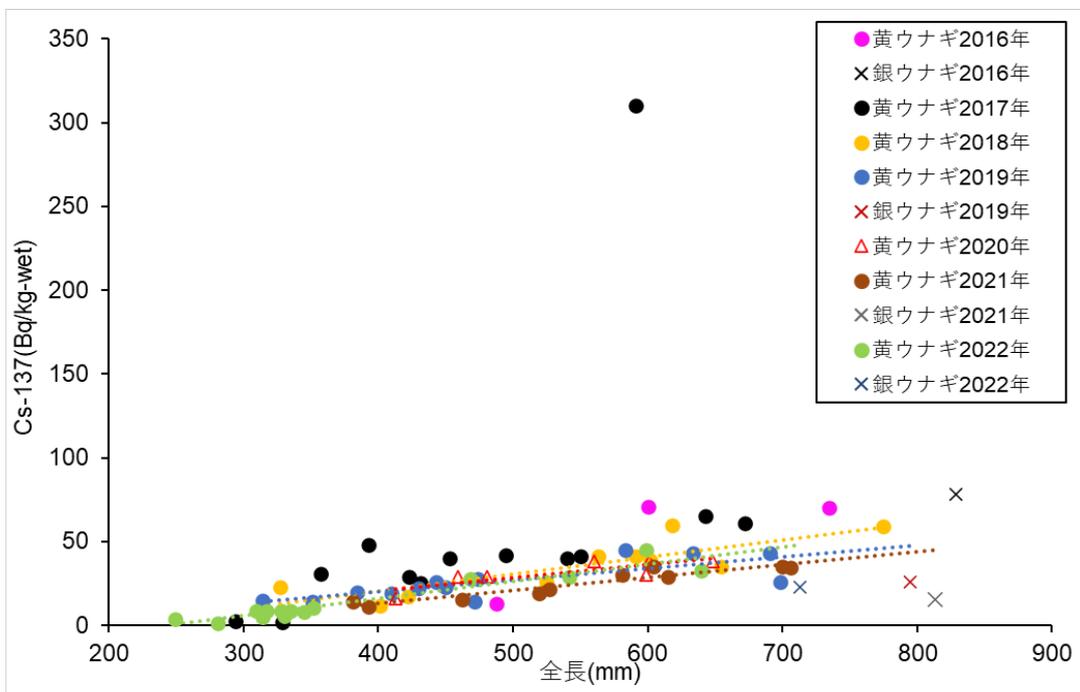


図16 手賀沼におけるニホンウナギの全長とCs-137濃度との関係。点線は、一次回帰直線を示す

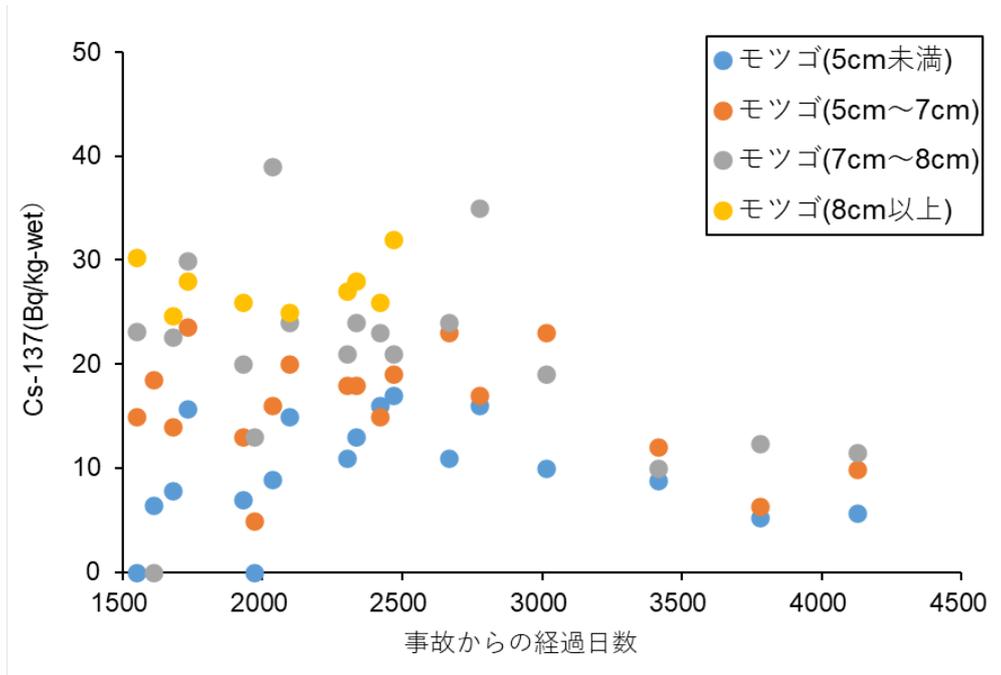


図17 手賀沼におけるモツゴの全長別Cs-137濃度の推移。なお、検出下限値未満のデータは0 Bq/kg-wetとして表記した

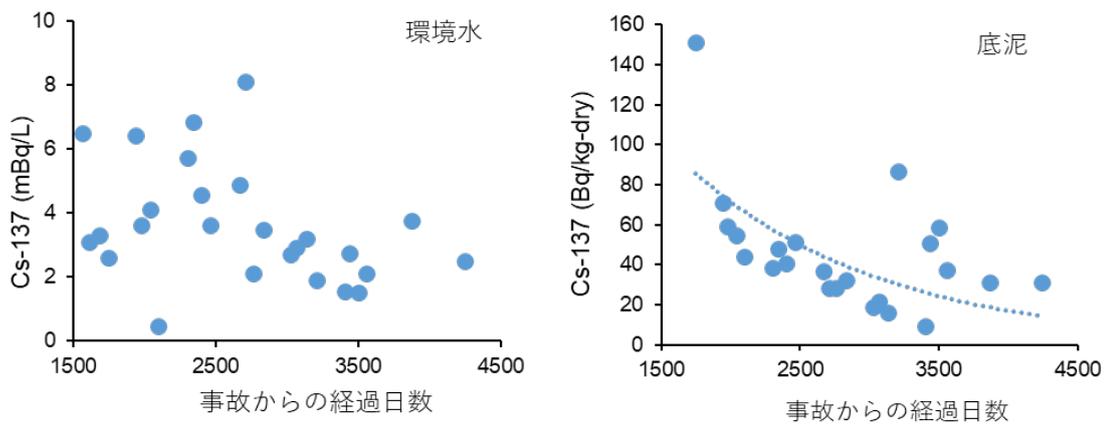


図18 利根川における環境水と底泥のCs-137濃度の推移。点線は、指数関数曲線を示す

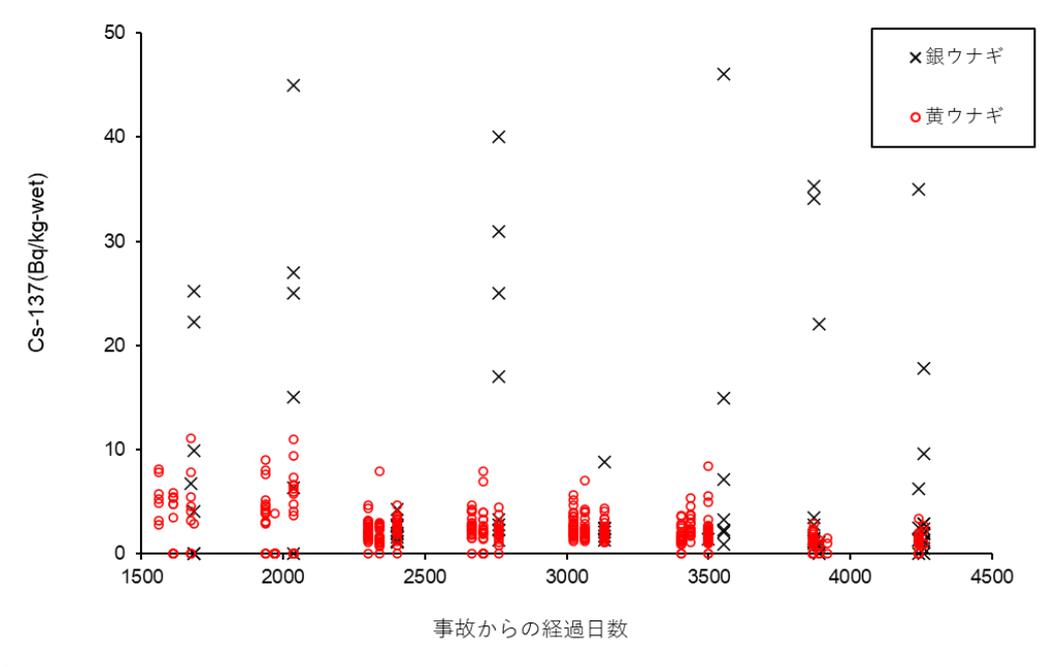


図19 利根川におけるニホンウナギのCs-137濃度の推移。なお、検出下限値未満のデータは0 Bq/kg-wetとして表記した

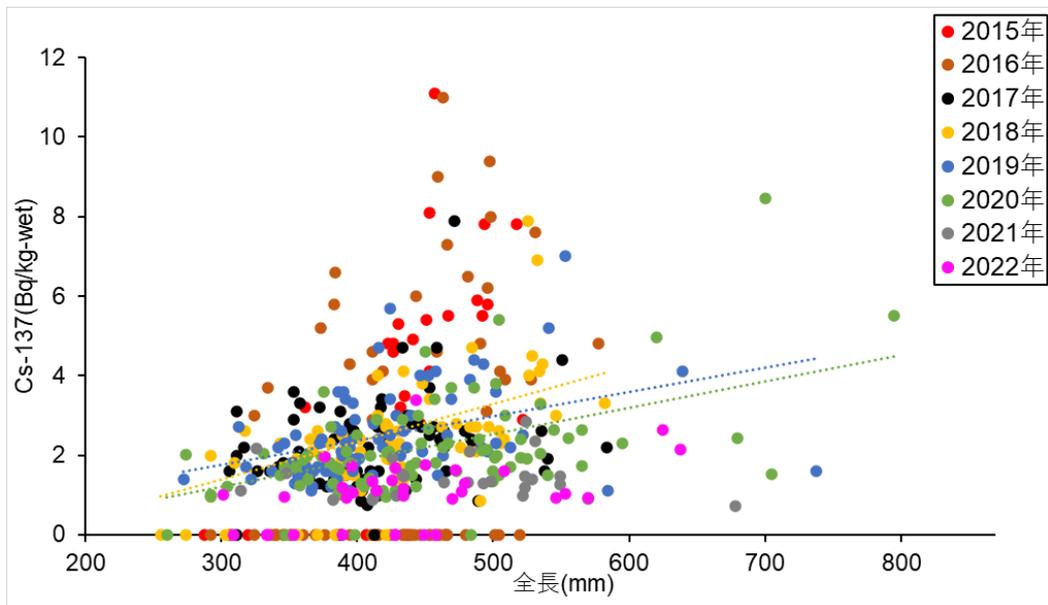


図20 利根川における黄ウナギの全長とCs-137濃度との関係。点線は、一時回帰直線を示す

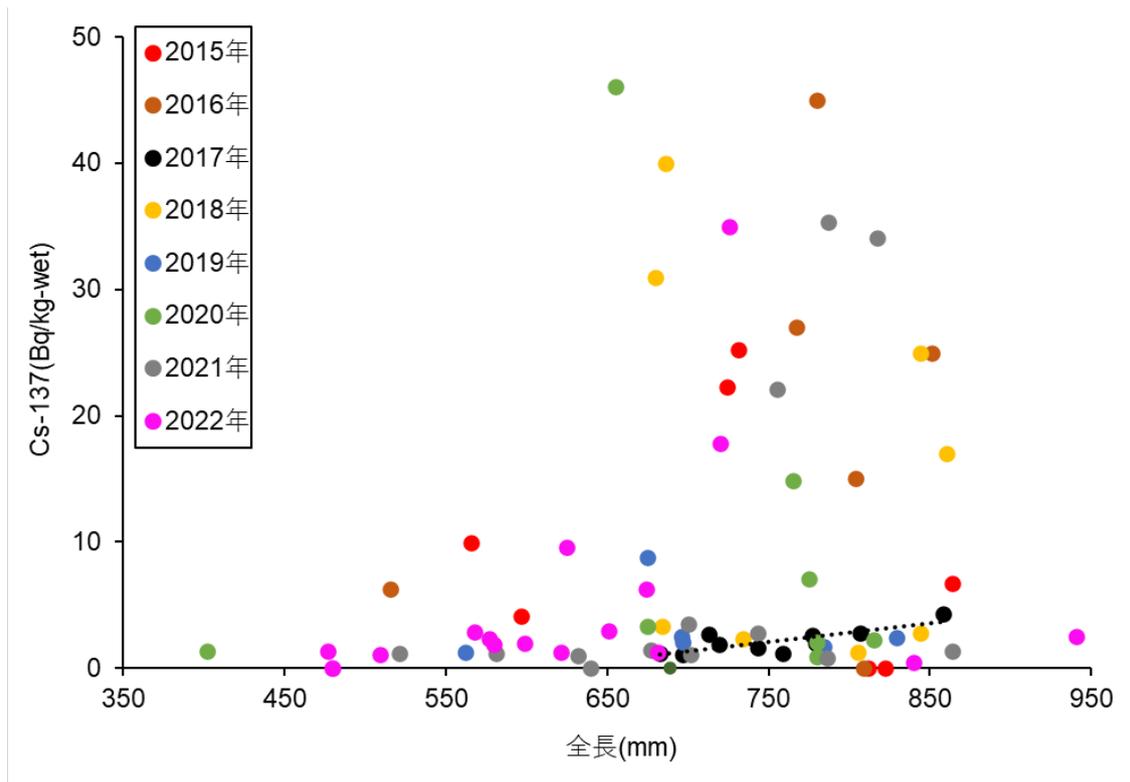


図21 利根川における銀ウナギの全長とCs-137濃度との関係。点線は、一時回帰直線を示す

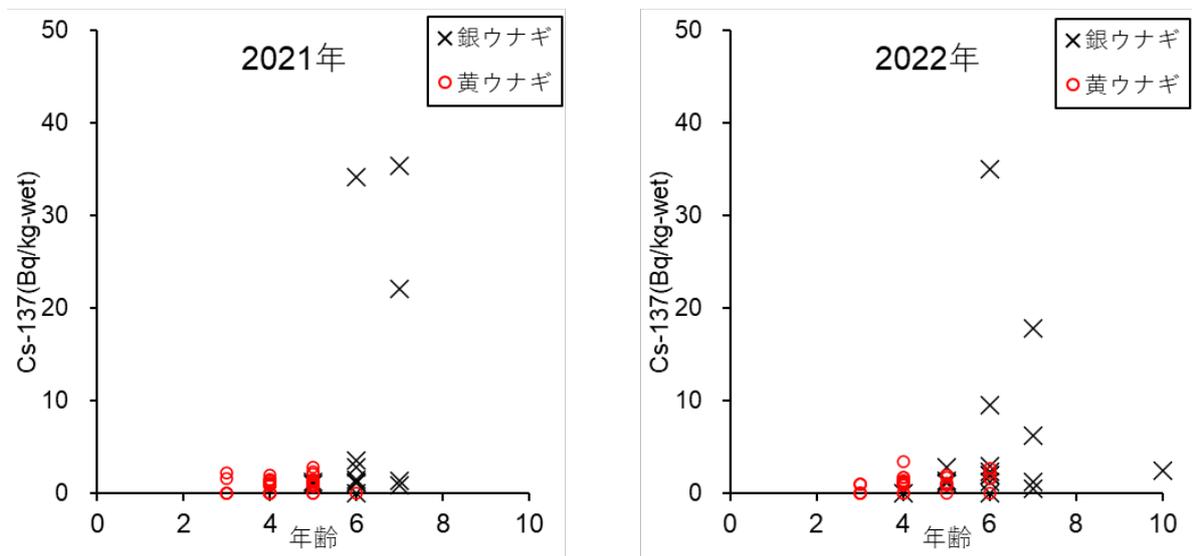


図22 利根川におけるニホンウナギの年齢別、発育段階別のCs-137濃度。なお、検出下限値未満のデータは0 Bq/kg-wetとして表記した

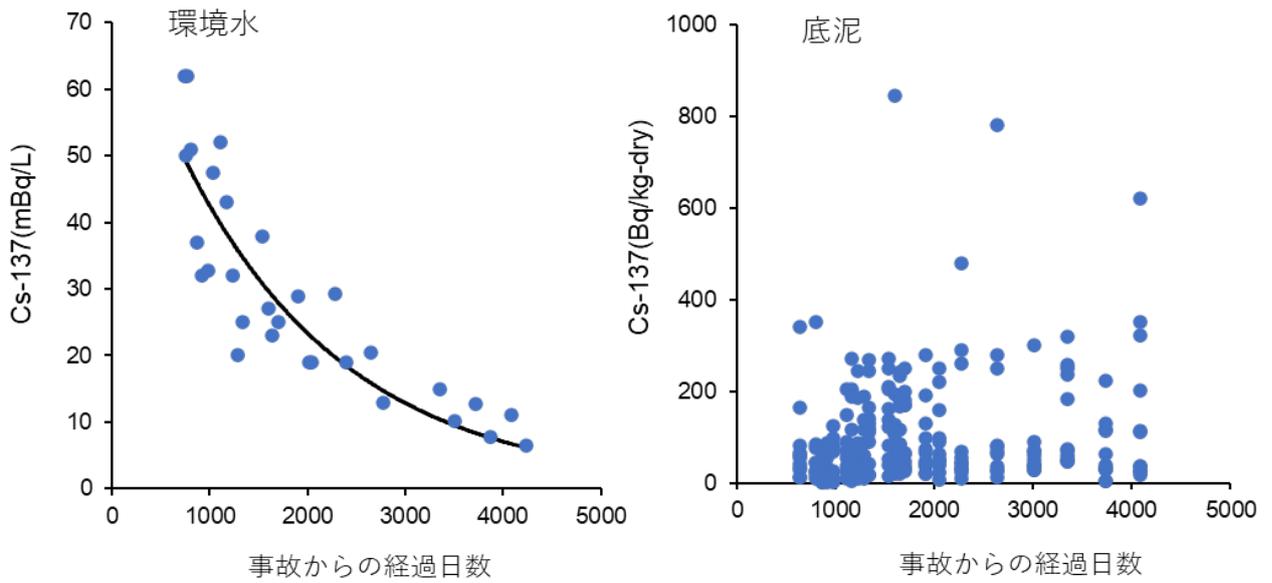


図23 中禅寺湖における環境水と底泥のCs-137濃度の推移。曲線は、指数関数曲線を示す

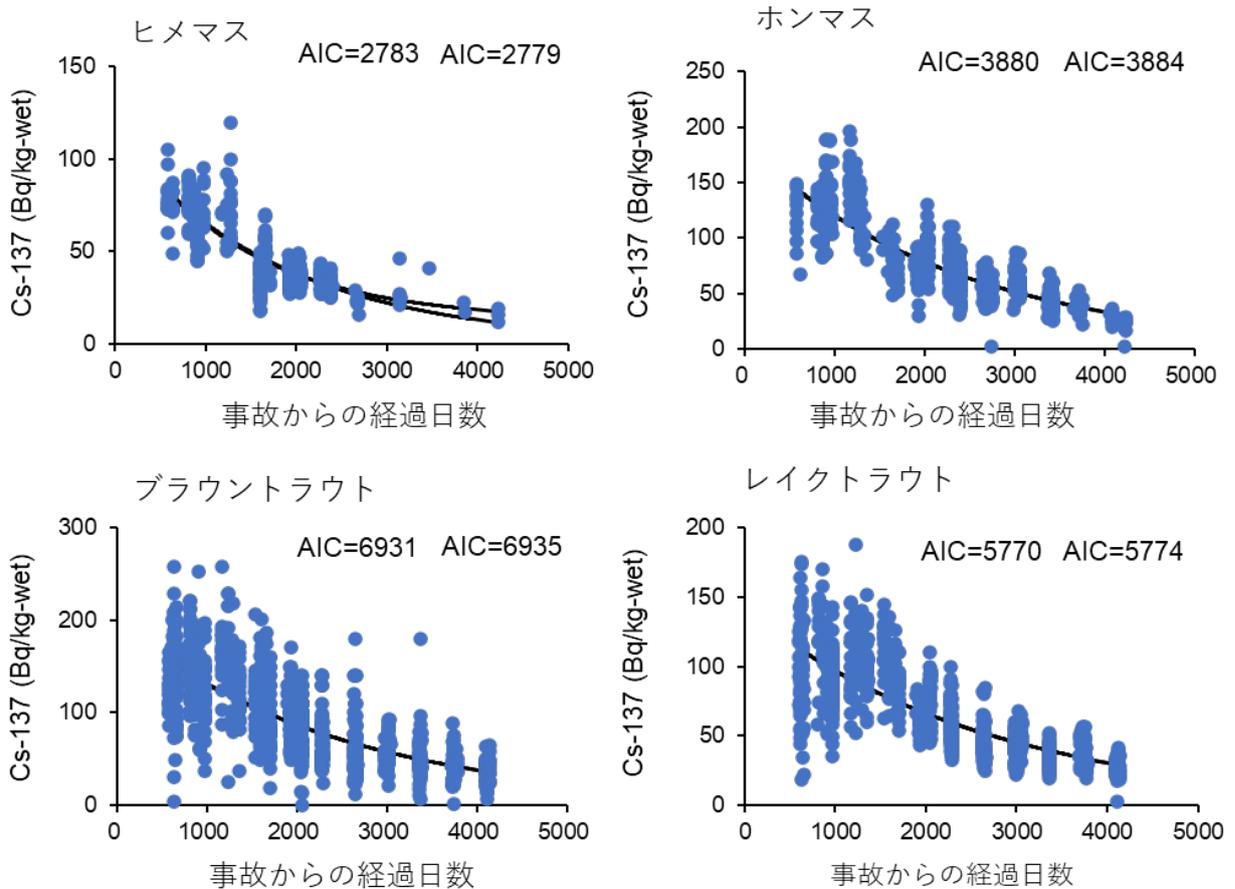


図24 中禅寺湖に生息する各魚種のCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）

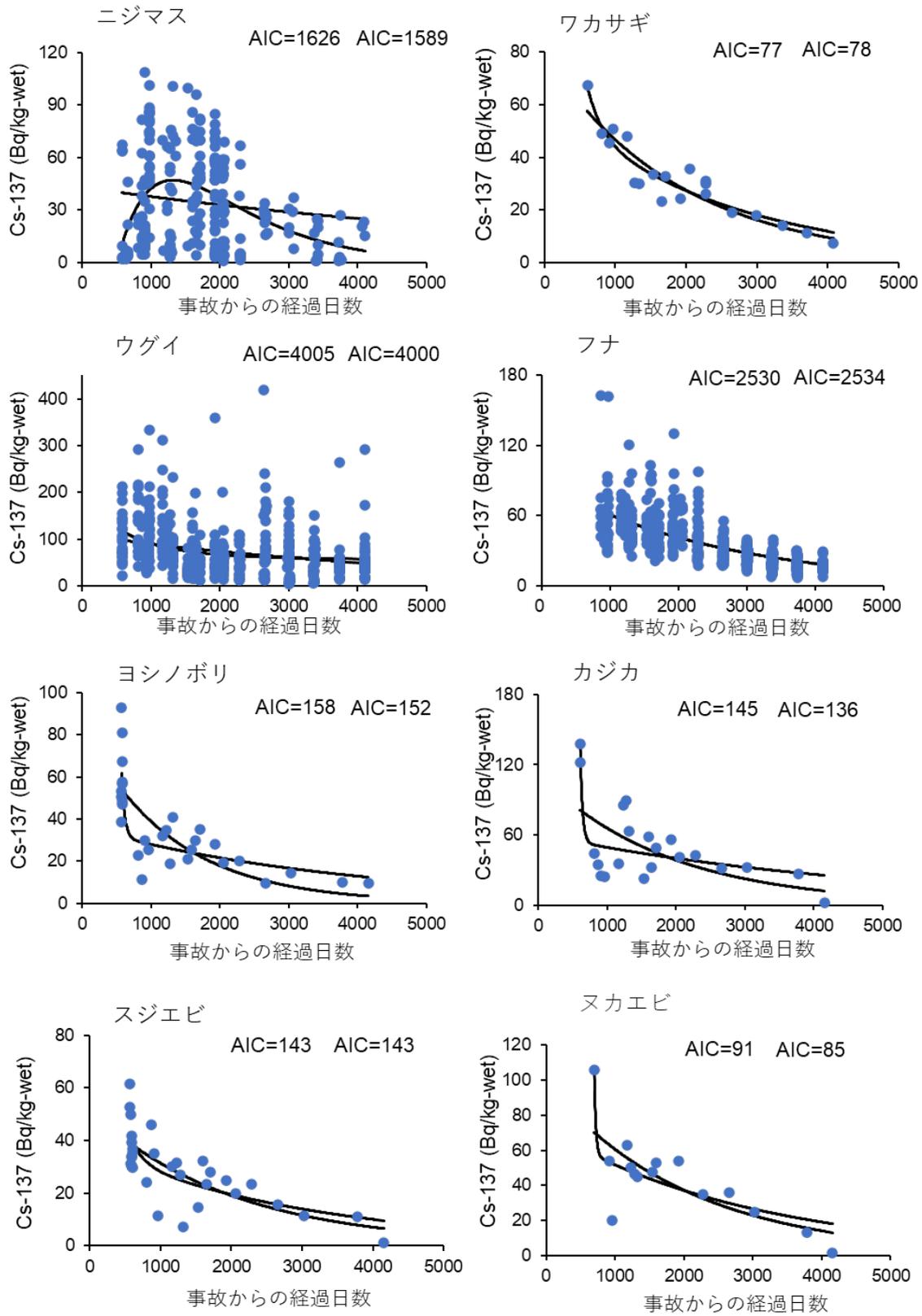


図24 つづき

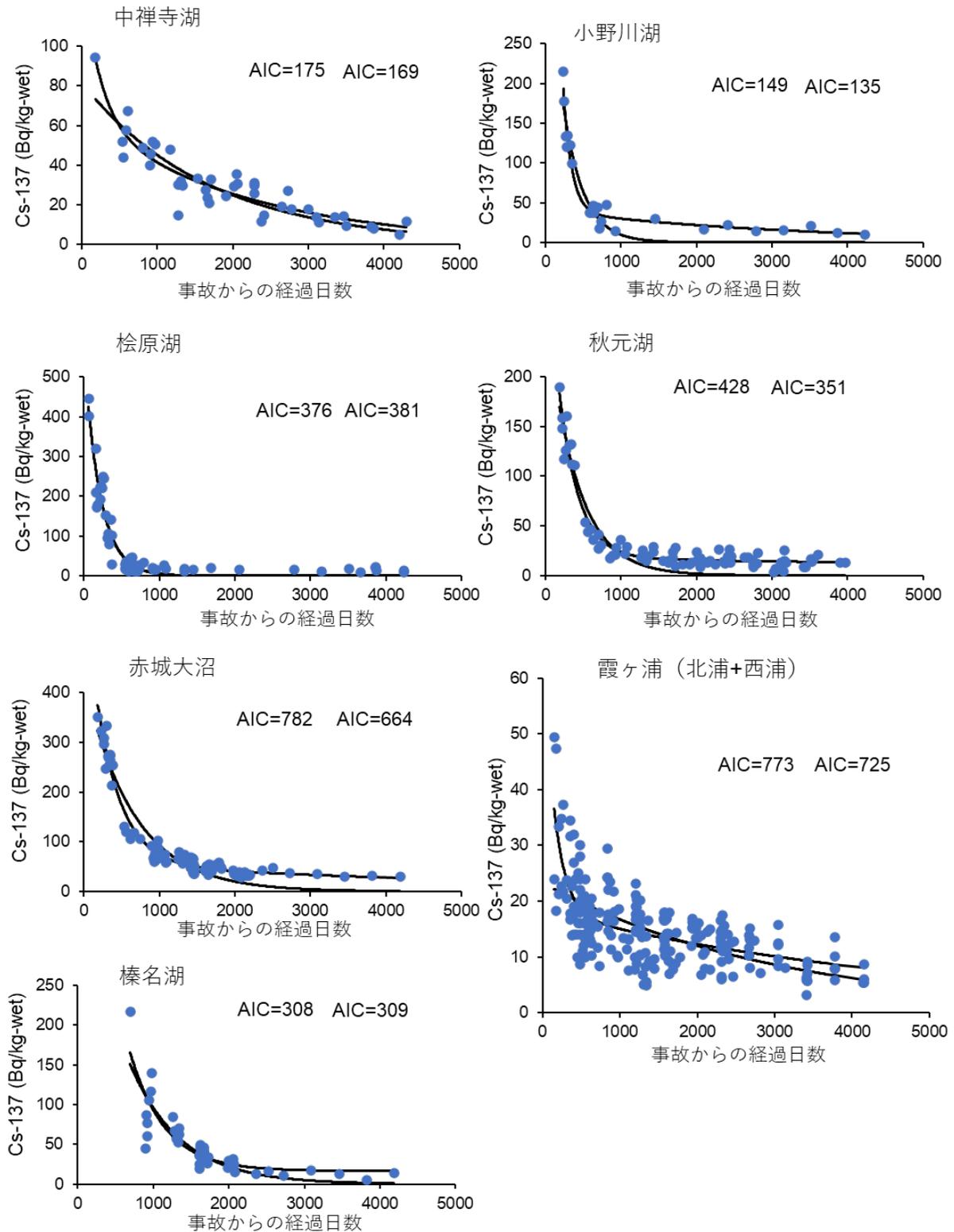
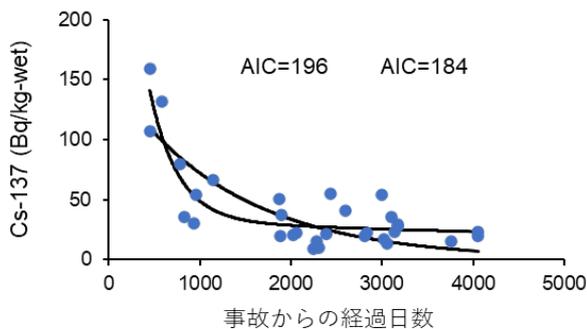
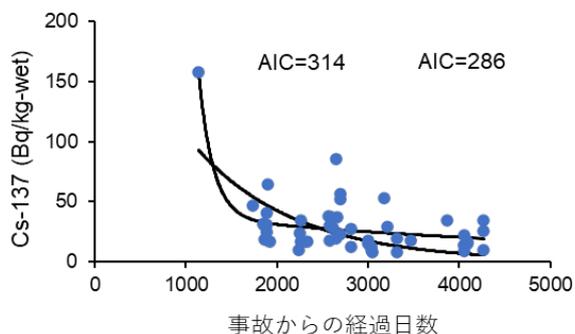


図25 各湖沼に生息するワカサギのCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）。水産庁ホームページ(<https://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>)にて公表されているデータを解析

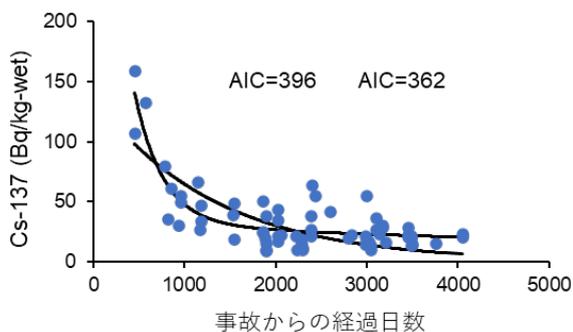
阿武隈川水系摺上川支流烏川（福島県福島市）



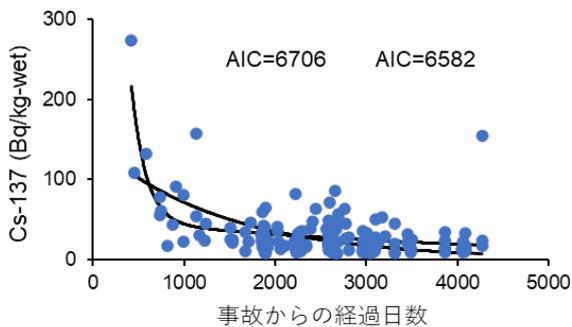
阿武隈川水系摺上川支流小川（福島県福島市）



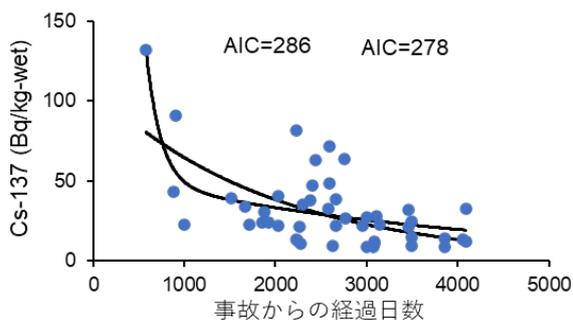
阿武隈川水系摺上川支流（摺上ダム上流）
（福島県福島市）
（柳沢、中ノ沢、中津川、手沢、烏川）



阿武隈川水系摺上川支流（摺上ダム下流）
（福島県福島市）
（摺上川、茂庭沢、布入川、赤沢、鱒沢、赤川、小川、横川、菱川）



阿武隈川水系摺上川支流横川（福島県福島市）



阿武隈川水系荒川、荒川支流（福島県福島市）
（天戸川、徳沢、鍛冶屋川）

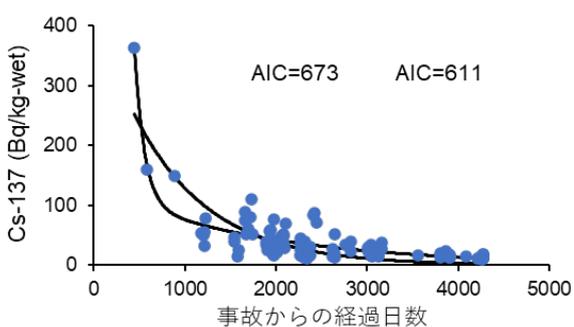


図27 つづき

図26 各河川に生息するイワナのCs-137濃度の推移およびAIC値（左は1成分指数関数モデル、右は2成分指数関数モデルによる値をそれぞれ示す）。水産庁ホームページ（<https://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html>）にて公表されているデータを解析

旧北上川、水系支流すべて（宮城県栗原市、大崎市）

（旧北上川、一迫川、二迫川、マダラ沢、小野松沢、三迫川、新場沢、保呂内沢、寒場沢、上芦沢、岩魚沢、古沢、大谷川、杉ノ森沢、重沢川）

名取川、水系支流すべて（宮城県仙台市、川崎町）

（名取川、太郎川、北川、名乗沢、本砂金川、前川、碓石川、大倉川、横川、神掛川、濁又沢、戸立沢、新川川、北沢、南沢、熊沢、穴戸沢、湯川、広瀬川、大行沢、樋口沢、姉滝）

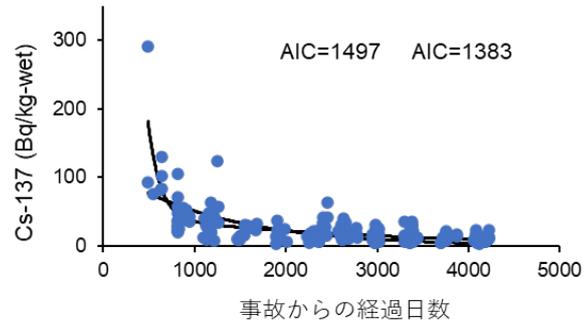
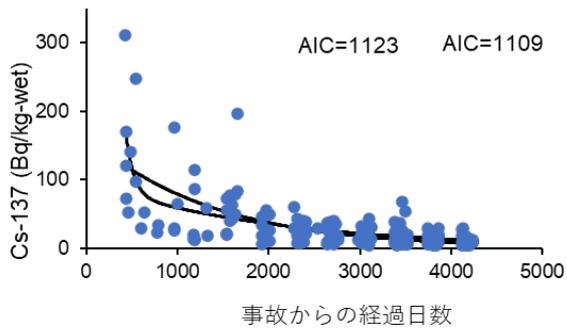


図26 つづき

2. 内水面生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 2-2	課題名：河川生態系における放射性物質の動態把握
研究機関・研究グループ名	水産技術研究所 沿岸生態システム部 内水面グループ ¹ 福島県内水面水産試験場 ² 千葉県水産総合研究センター内水面水産研究所 ³ 水産資源研究所 海洋環境部 放射能調査グループ ⁴ 水産資源研究所 水産資源研究センター 底魚第2グループ ⁵
担当者職名・担当者名	主任研究員・増田賢嗣 ¹ 、主幹研究員・山本祥一郎 ¹ 、主任研究員・松田圭史 ¹ 、研究員・真壁昂平 ² 、研究員・佐合慶祐 ³ 、主任研究員・重信裕弥 ⁴ 、グループ長・帰山秀樹 ⁴ 、主任研究員・富樫博幸 ⁵ 、研究員・時岡駿 ⁵ 、研究支援職員・櫻井慎大 ⁵

1. 研究内容及び方法

調査河川・湖沼（福島県井出川・新田川、栃木県中禅寺湖、千葉県手賀沼・利根川、図1）において、魚類へとつながる放射性物質の移行経路を把握するため、河川（湖）水、底泥などの他、主要な餌生物と魚類の採集調査を実施した。魚類の食性及び生態系構造の把握には、胃内容物分析及び安定同位体比分析（CN比分析）を実施した（利根川においてはニホンウナギのみ）。

方法：

- (1) 調査河川のうち福島県井出川（上流及び下流、図2）、新田川・飯樋川（新田川支流）（図2）では6月及び10月に、千葉県利根川では10月から11月にかけて試料採集調査を実施した。
- (2) 調査湖沼のうち栃木県中禅寺湖（図2）においては4月から7月にかけて、千葉県手賀沼（図2）においては6月及び10月に、試料採集調査を実施した。
- (3) 魚類については胃内容物分析を実施し、それぞれの水面において各魚種が取り込む主要な餌生物を把握した。餌生物の構成を把握するために、餌生物の重量割合（%W）を求めた。胃内容物から出現した餌生物*i*については、以下の式を用いて算出した（新野ら2017）。

$$\%Wi = \frac{\text{全標本から出現した}i\text{の総重量}}{\text{全餌生物の総重量}} \times 10^2$$

胃内容物は脊椎動物、軟体動物、十脚類（エビ、カニ等）、トンボ幼虫、カゲロウ幼虫、カワゲラ幼虫、トビケラ幼虫、ユスリカ幼虫、その他水生昆虫類、羽化後陸生昆虫、純陸生昆虫類、水陸不明昆虫類、植物質、砂礫、不明消化物等、その他に分類した。砂礫は便宜上、餌生物とみなした。脊椎動物には魚類及び両生類が含まれるが、多くは魚類であった。羽化後陸生昆虫とはトンボやカゲロウ等、幼虫期を水中で過ごす昆虫の成虫である。十脚類以外の水生の節足動物はその他水生昆虫類に含めた。いずれも検出されなかった個体を

空胃とした。

- (4) 得られた生物試料より炭素・窒素安定同位体比分析を実施して、生態系構造を把握した。
- (5) 湖沼におけるプランクトン試料については目合い 0.1mm の網を使用して水面下 1 m 層を曳網した。得られたサンプルについて、リーチング実験を実施した。
- (6) 小課題「内水面魚類における放射性物質濃度予測モデルの作成」で得られた放射性セシウム濃度データと安定同位体比データを併せることで、各魚種の放射性物質移行経路を検討した。

2. 令和 4 年度進捗状況・成果

(1) 福島県井出川水系の上流及び下流、新田川水系の上流域（支流の飯樋川）及び下流において 6 月及び 10 月、また千葉県利根川では 10～11 月に試料採集を実施し、魚類及び餌生物（水生昆虫等）を採集した。

(2) 栃木県中禅寺湖では 3～6 月、千葉県手賀沼では 6～7 月及び 10 月に試料採集を実施し、魚類及び餌生物（プランクトン等）を採集した。

(3) 中禅寺湖及び手賀沼における各種魚類の胃内容物を分析した。中禅寺湖においては、サケ科の 4 種（レイクトラウト $n = 30$ 、ブラウントラウト $n = 30$ 、ホンマス $n = 12$ 、ニジマス $n = 4$ ）の胃内容物には重量割合 (%Wi) で 24.9%～61.7%の脊椎動物が認められた（図 3）。この脊椎動物のほとんどが魚類であり（図 3）、また脊椎動物のうち 23.1%～96.4%をワカサギが占めた（図 4）。ワカサギ以外には、レイクトラウトの胃内容物としてサケ科が 16.2%、ブラウントラウトの胃内容物としてカジカ科が 13.3%認められた（図 4）。また、ホンマスの胃内容物で最も多かったものは 2021 年度、2022 年度のいずれも脊椎動物（21.8%及び 61.7%）であり、その他にユスリカの幼虫が両年とも認められた（14.6%及び 6.7%）（図 5）。これらのことから、中禅寺湖のサケ科魚類の餌は主に魚類であるが、魚類の内容及び魚類以外の餌生物については若干の違いが認められた。サケ科魚類では、河川環境下における魚種ごとの生息環境や餌生物の使い分けの存在が示唆されており（Heggenes and Saltveit 1990, Miyasaka et al. 2003）、湖においても類似の機構が Cs-137 の取り込みに影響を及ぼしている可能性が考えられる。手賀沼においては、ニホンウナギの胃内容物として 6 月 $n = 11$ には脊椎動物が、10 月 $n = 4$ には十脚類が認められた（図 6）。手賀沼ではギンブナ、コイにおいても 6 月（2022 年度はギンブナ $n = 21$ 、コイ $n = 4$ ）、10 月（2022 年度はギンブナ $n = 18$ 、コイ $n = 2$ ）とも十脚類が認められた（図 6）。ユスリカ幼虫や植物質成分は、ニホンウナギ、ギンブナにおいて認められた（図 6）。これらより、手賀沼におけるニホンウナギ、ギンブナ、コイは共通して十脚類を餌生物として利用しており、またその他に得られる餌がある場合にはそれも利用することが示唆された。利根川のニホンウナギについては、黄ウナギ $n = 33$ からは十脚類のみが認められ、その他は内容不明であった。また銀ウナギ $n = 17$ については、2021 年度においては全個体が空胃であったが、2022 年度においては内容不明ながら胃内容物が認められた（図 7）。

(4) 河川・湖沼における食物網構造の把握には、炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) を利用した。安定同位体比分析において、魚類及び甲殻類は筋肉片を使用した。1 個体で測定できる大型の水生昆虫の分析には、胃内容物の影響を除去するため、頭部、胸部、翅のいずれか、またはそれらの混合部位を使用した。1 個体で測定不可能な小さな水生昆虫については体全体を使用し、それでも分析量に達しない場合は複数個体を混合した。全ての試料は凍結乾燥した後、メタノールとクロロフォルムの混合液 (比率は 1:2) にて 24 時間脱脂後、質量分析計を用いて測定した。

食物網構造の経年変化を把握するため、昨年度と同一地点の飯樋川 (新田川支流) と新田川下流において、2021 年 6 月と 2022 年 6 月に採取した水生昆虫、甲殻類及び魚類の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の 2 次元マップを図 8 に示した。2022 年 6 月の水生昆虫については、竹門 (2005) に従い、肉食性とデトリタス食性に分けて図示した。いずれの河川においても、2021 年と 2022 年の各生物群の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の取り得る範囲は概ね一致しており、食物網構造の経年変化は大きくないことが分かった。

今年度、新たに調査を実施した井出川について、2022 年 6 月に採取した生物の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の 2 次元マップを図 9 に示した。これまで調査した福島県内の河川 (新田川や木戸川など) と類似した食物網構造となっていた。井出川上流の魚類の $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ は未測定であるものの、下流域では魚類の $\delta^{15}\text{N}$ は水生昆虫よりも高く、魚類の主要な餌生物が水生昆虫であることを確認した。また、下流域において、甲殻類 (スジエビ、ヌカエビ等) の $\delta^{15}\text{N}$ は魚類と同程度の位置にプロットされた。スジエビの食性は、ミジンコ、水生植物、魚の死体などを食べる雑食性である (奥田ほか 1996)。甲殻類の $\delta^{15}\text{N}$ が高かった要因の 1 つに、魚の死肉など、生態系の高次に位置する生物も餌生物として利用していたことが考えられる。

中禅寺湖及び手賀沼における魚類を中心とした $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の 2 次元マップを図 10 に示した。中禅寺湖では、サケ科魚類で $\delta^{15}\text{N}$ は高く、コイ科魚類で低い傾向が見られ、餌生物の違いを反映していると考えられた。ワカサギは、動物プランクトンを主要餌料としており、その他、ユスリカ幼虫なども採餌している (高橋 1982)。ワカサギの $\delta^{15}\text{N}$ の平均 (‰) \pm 標準偏差は 9.33 ± 0.356 ($n = 10$)、プランクトンの $\delta^{15}\text{N}$ は -0.41 ± 1.14 ($n = 10$) であり、1 栄養段階毎の $\delta^{15}\text{N}$ の上昇から考えると (Minagawa & Wada 1984; 3.4‰)、プランクトンの値は低くなっていた。現場のサンプリング状況から、今回分析に供したプランクトン試料は、植物プランクトンが大半を占めていたと考えられたため (山本私信)、 $\delta^{15}\text{N}$ が低かったと推測された。手賀沼では、甲殻類やユスリカ幼虫が、魚類の餌生物になっていることを確認した。また、ニホンウナギの $\delta^{15}\text{N}$ が食性を考慮するとやや低い値となっていたが、安定同位体比を測定したニホンウナギの全長が 281~345 mm と比較的小型であったことから強い魚食性ではなかった可能性は考えられた。ただ、ニホンウナギの餌と考えられる生物が測定できておらず、詳細は分からなかった。

データ量の多い新田川下流、中禅寺湖及び手賀沼を対象に、 $\delta^{15}\text{N}$ と Cs-137 濃度との関係より、餌生物を介した Cs-137 の生物濃縮について検討した (図 11)。魚類を中心とし生物の $\delta^{15}\text{N}$ と Cs-137 濃度との関係では、新田川下流及び手賀沼では正の相関が認められ、餌生物を介した Cs-137 の生物濃縮が示唆された。一方、中禅寺湖では、ウグイで散発的に高い濃度の個体が出現するなど、必ずしも生態系の上位捕食者で Cs-137 濃度が高いわけではなかった。中禅寺湖で相関が見られなかった要因として、中禅寺湖が手賀沼や新田川と比較して広く、また深いことから、水域起源の食物網 (中禅寺湖の場合は主に植物プランクトン由来とみられる) の影響がより大きく、またプランクトンを主な餌生物として利用するワカサギが存在することから、由来の大きく異なる

複数の食物網が存在する可能性が考えられた。なお、中禅寺湖については、魚種別に $\delta^{15}\text{N}$ と Cs-137 濃度との関係も見ているが、ブラウントラウトのみ正の相関が認められた。ブラウントラウトの食性、生活場所、生活様式などから考察したものの、解釈には至らなかったため本報では示さなかった。

(5)湖沼のプランクトン試料中に含まれる生物が利用可能な状態の Cs-137 量を把握する目的で、2022 年 6 月に中禅寺湖で採取したプランクトン試料と、2022 年 7 月と 10 月に手賀沼で採取したプランクトン試料について、課題 1-2 と同じ手法でリーチング実験を実施した。中禅寺湖のプランクトン乾燥試料 (19.0 g) を測定した結果、Cs-137 濃度は 3.52 Bq/kg-dry で、この試料中に含まれる総 Cs-137 量は 0.0669 Bq であった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液 (359.4 g) の Cs-137 濃度は 0.128 Bq/kg-wet、生物が利用可能な状態の Cs-137 量は 0.0460 Bq となり、総 Cs-137 量の 68.8 %に相当した。

手賀沼で 7 月に採取したプランクトン乾燥試料 (2.90 g) を測定した結果、Cs-137 濃度は 285 Bq/kg-dry で、この試料中に含まれる総 Cs-137 量は 0.827 Bq であった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液 (98.8 g) の Cs-137 濃度は 2.45 Bq/kg-wet、生物が利用可能な状態の Cs-137 量は 0.242 Bq となり、総 Cs-137 量の 29.3 %に相当した。同様に、手賀沼で 10 月に採取したプランクトン乾燥試料 (5.78 g) を測定した結果、Cs-137 濃度は 659 Bq/kg-dry で、この試料中に含まれる総 Cs-137 量は 3.91 Bq であった。この乾燥試料についてリーチング実験を行った結果、抽出液 (201.7 g) の Cs-137 濃度は 2.97 Bq/kg-wet、生物が利用可能な状態の Cs-137 量は 0.599 Bq となり、総 Cs-137 量の 15.3 %に相当した。

これらの結果から、手賀沼のプランクトン試料には Cs-137 が吸着した無機懸濁態が多く混入していたと考えられ、過去に報告されてきたプランクトン試料の Cs-137 濃度は過大評価であった可能性が唆される。手賀沼は最も深い地点でも水深が 4 m に満たない浅い湖沼であるため、プランクトン試料を採取する際に底泥等に由来する無機懸濁態が混入しやすいと考えられる。一方、水深の深い中禅寺湖の表層で採取されたプランクトン試料は、総 Cs-137 量に対する生物が利用可能な状態の Cs-137 量の割合が高く、底泥に由来する無機懸濁態の混入量が少ないと考えられる。

(6) 中禅寺湖では、サケ科 4 魚種のうちではレイクトラウトの $\delta^{15}\text{N}$ が最も高かった。しかしレイクトラウトの Cs-137 濃度の 90 パーセンタイル値が 40.4 Bq/kg-wet であったのに対してブラウントラウトでは 49.9 Bq/kg-wet と高く、より Cs-137 濃度が高い個体が出現する確率が高かった。また $\delta^{15}\text{N}$ がサケ科 4 魚種よりもさらに低いウグイの Cs-137 濃度の 90 パーセンタイル値は 87.8 Bq/kg-wet であり、ブラウントラウトよりもさらに Cs-137 濃度が高い個体が出現する確率が高かった。

手賀沼については、胃内容物の結果からはニホンウナギが十脚類あるいは魚類を利用していると考えられるが、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ の 2 次元マップではニホンウナギは魚類各種やスジエビ、テナガエビ、アメリカザリガニなどと比較して $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ とともに低かった。これらの結果について統一的に理解するのは難しく、解釈のためには対象とする生物をより広げた調査、あるいは再現性の確認が必要である。

3. 今後の課題

2021年度の調査からは、福島県各河川の上流域において $\delta^{13}\text{C}$ の分布の幅が狭く、陸域由来の食物網と水域由来の食物網のそれぞれの起点となる生物の $\delta^{13}\text{C}$ の差が小さいことから、Cs-137濃度に関する陸域の影響について $\delta^{13}\text{C}$ をもとに検討することが困難であることが示唆された。今年度のデータも、井出川、飯樋川ともに $\delta^{13}\text{C}$ の分布の幅が狭いという点で2021年度の飯樋川及び木戸川上流の結果と類似していた。陸域の影響とCs-137濃度の関係があるかどうかを検証するためにはさらなる陸生昆虫や落ち葉などを含めた $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及びCs-137濃度のデータの蓄積が必要である。

中禅寺湖の魚類においては、 $\delta^{15}\text{N}$ が高い魚種だからといって必ずしもCs-137濃度が高い個体が多く出現するとはいえない。ウグイは比較的 $\delta^{15}\text{N}$ が低いにもかかわらずCs-137が高い個体が多く認められており、その他の魚種と比較して陸域の影響が強い餌生物を利用している可能性が考えられる。またブラウントラウトは $\delta^{15}\text{N}$ がレイクトラウトよりも低いにもかかわらず、Cs-137が高い個体が多く出現するが、これについては生息環境や餌生物の嗜好性の違いが関係している可能性が考えられる。このような問題を検証するためには、中禅寺湖における各魚種の胃内容物の分析を重ねて、各魚種の餌生物の傾向を把握すること、中禅寺湖周辺の陸生生物や落葉のCNマップ上の位置を把握することが有効である可能性がある。

また手賀沼においてはリーチング実験によって、これまで魚類や他の餌生物と比較してかなり高いCs-137濃度を示してきたプランクトンサンプルについて、多くの無機懸濁物を含んでいたために、測定値がプランクトンの実際のCs-137濃度よりも高かった可能性が示された。プランクトンを経由するCs-137の移行を検討するためには、プランクトンのCs-137濃度をより正確に把握する必要がある。一方で、手賀沼のニホンウナギの $\delta^{15}\text{N}$ 及びCs-137濃度のいずれもが他の魚種や十脚類よりも $\delta^{15}\text{N}$ が低かった。2022年6月のニホンウナギの胃内容物から29.1(%W)のユスリカが検出されたこと、安定同位体比分析に供されたニホンウナギが全長350 mm以下の比較的小型のものであったこと、2022年7月に採集したユスリカのCs-137濃度が8.85 kg/Bq-wetと、十脚類と比較して低かったことから、成長に伴う食性の遷移などが考えられ、さらなるデータの蓄積が必要である。

参考文献

- 新野洋平・柴田淳也・富山毅・坂井陽一・橋本博明（2017）瀬戸内海中央部燧灘周辺におけるタチウオ *Trichiurus japonicus* の食性. 日水誌 83, 34-40.
- Heggenes J. and Saltveit S.J. (1990) Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar* L., and brown trout, *Salmo trutta* L., in a Norwegian river. J. Fish Biol., 36, 707-720.
- Miyasaka H., Nakano S. and Furukawa-Tanaka T. (2003) Food habit divergence between white-spotted charr and masu salmon in Japanese mountain stream: circumstantial evidence for competition. Limnology, 4, 1-10.
- 竹門康弘（2005）底生動物の生活型と摂食機能群による河川生態系評価. 日本生態学会誌, 55: 189-197.
- 奥田重俊・柴田敏隆・島谷幸宏・水野信彦・矢島稔・山岸哲（1996）川の生物図典. (財)リバー

フロント整備センター，東京. pp. 674.

高橋一孝（1982）河口湖におけるワカサギ食性調査I. 山梨県魚苗センター事業報告書，52-54.

Minagawa M. and Wada E. (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 48, 1135-1140.

図表

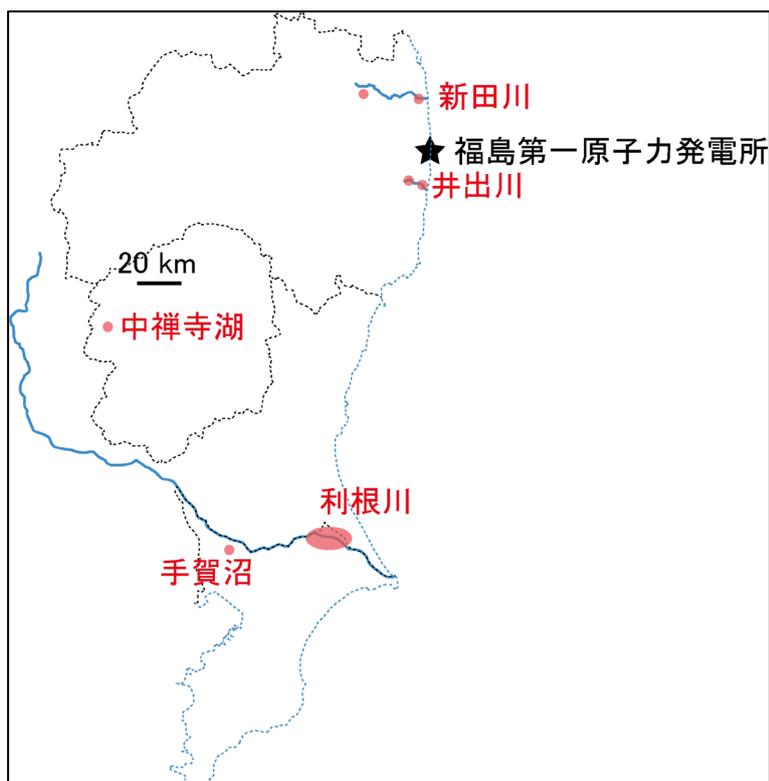
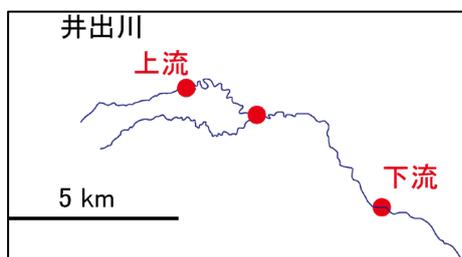
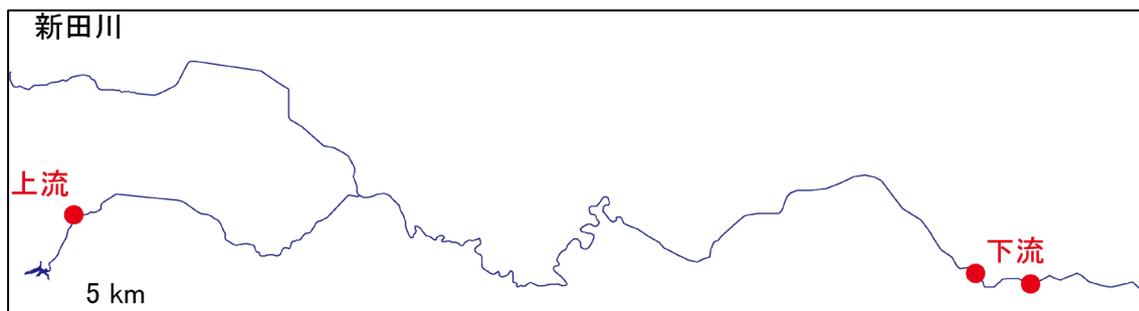


図1 各調査地点と福島第一原子力発電所との位置関係。



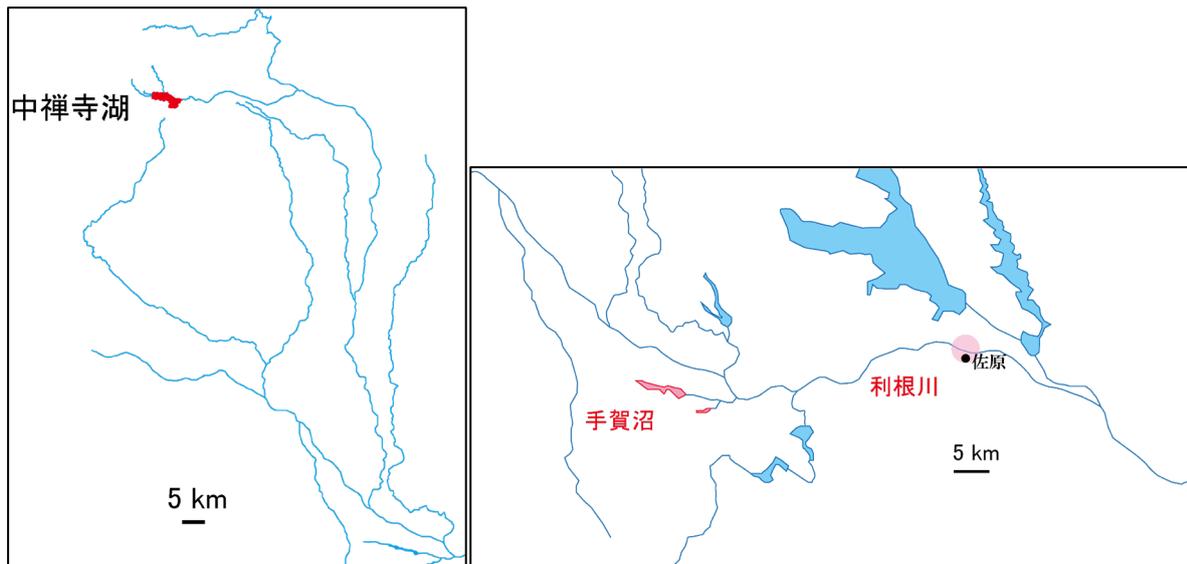


図2 各河川における調査地点と、中禅寺湖及び手賀沼の位置。新田川下流は2地点の試料を含む。

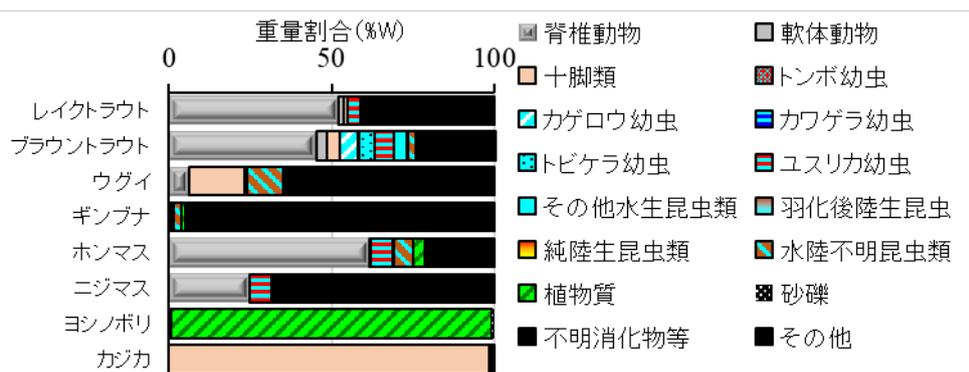


図3 中禅寺湖（4-7月）における魚類の胃内容物

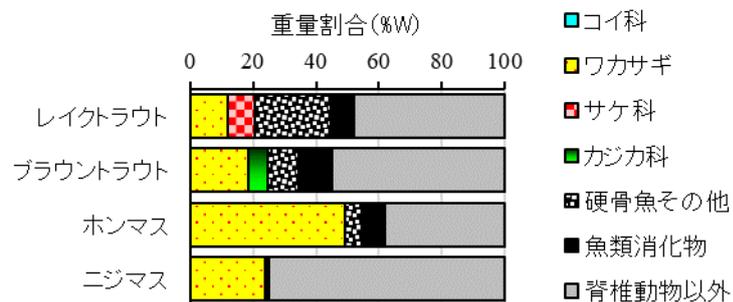


図4 中禅寺湖におけるサケ科魚類4種の胃内容物のうち、魚類の内訳

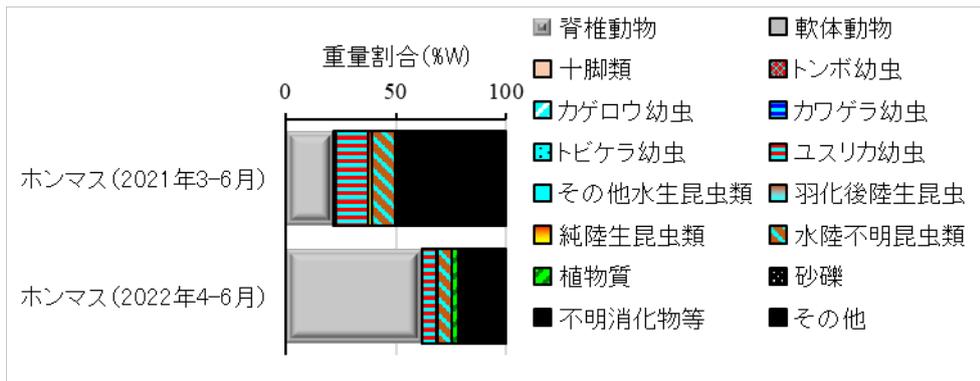


図5 中禅寺湖のホンマスの胃内容物の、年度間の比較。

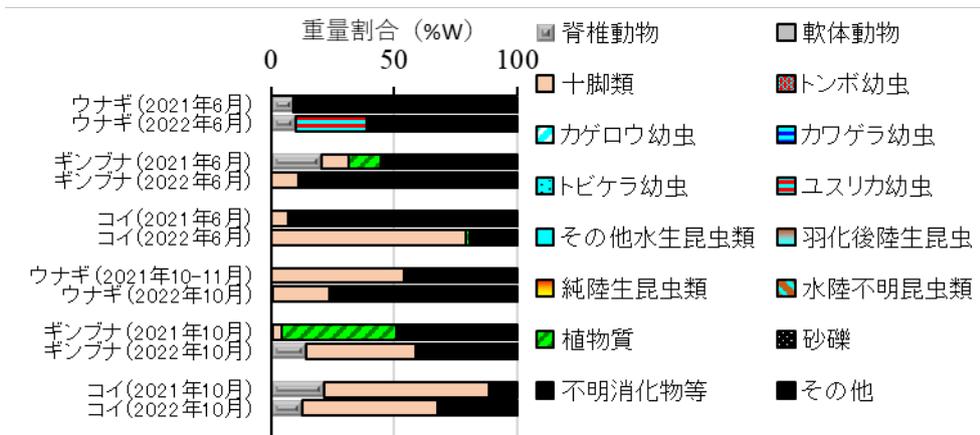


図6 手賀沼における魚類の胃内容物。年度間の比較も併せて示した。

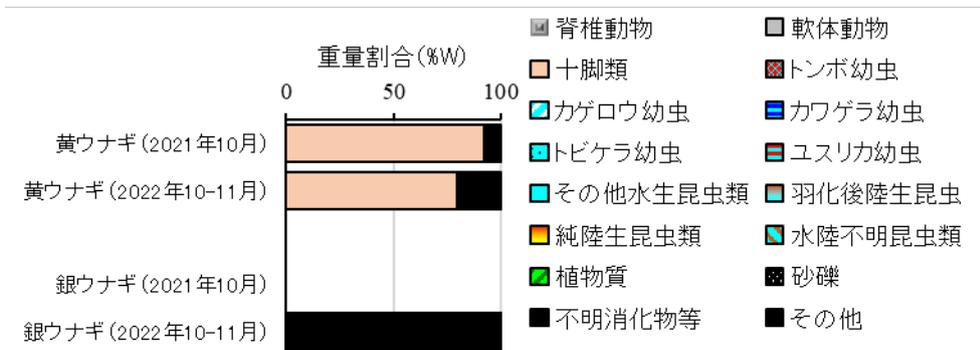


図7 利根川のニホンウナギの胃内容物。黄ウナギと銀ウナギの間の比較、及び年度間の比較。

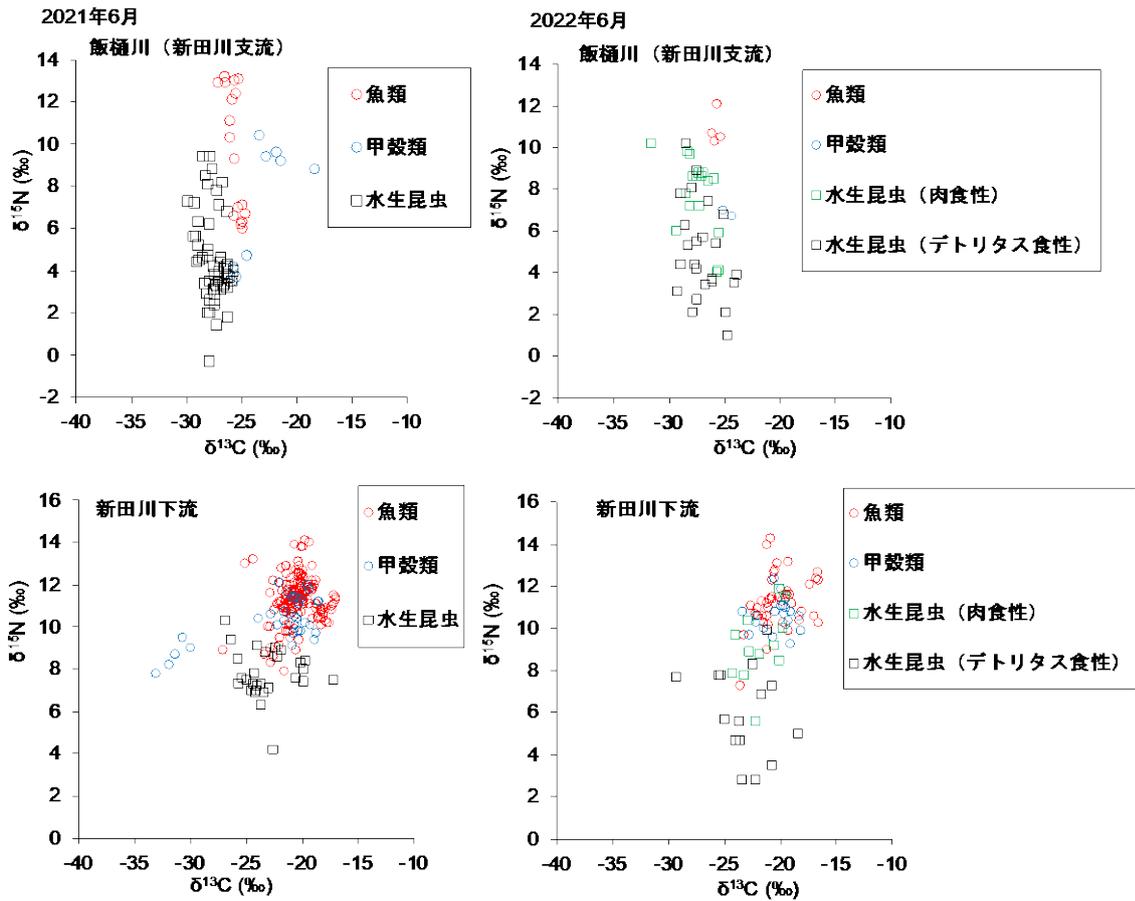


図8 飯樋川（新田川支流）（上段）及び新田川下流（下段）における2021年6月（左図）と2022年6月（右図）の炭素・窒素安定同位体比の2次元マップ。

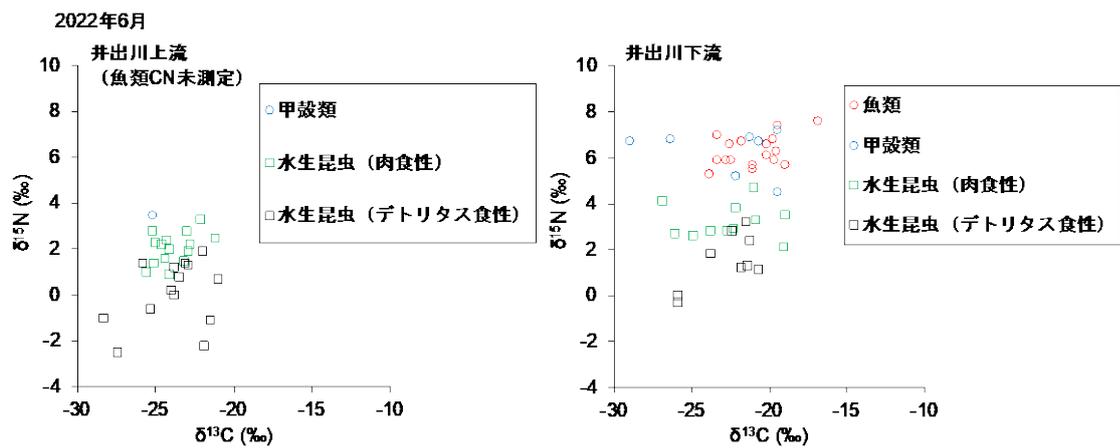


図9 井出川上流及び下流における2022年6月の炭素・窒素安定同位体比の2次元マップ。

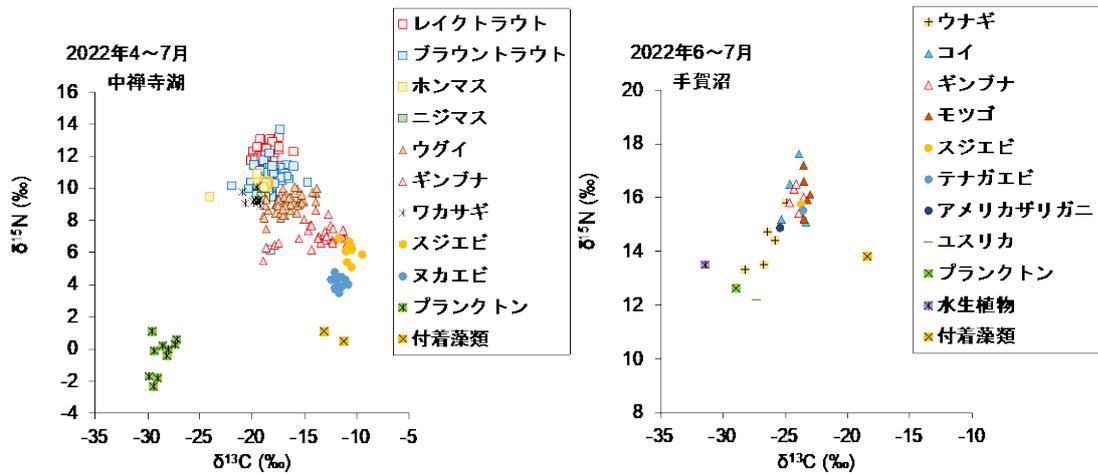


図 10 中禅寺湖及び手賀沼における炭素・窒素安定同位体比の 2 次元マップ。

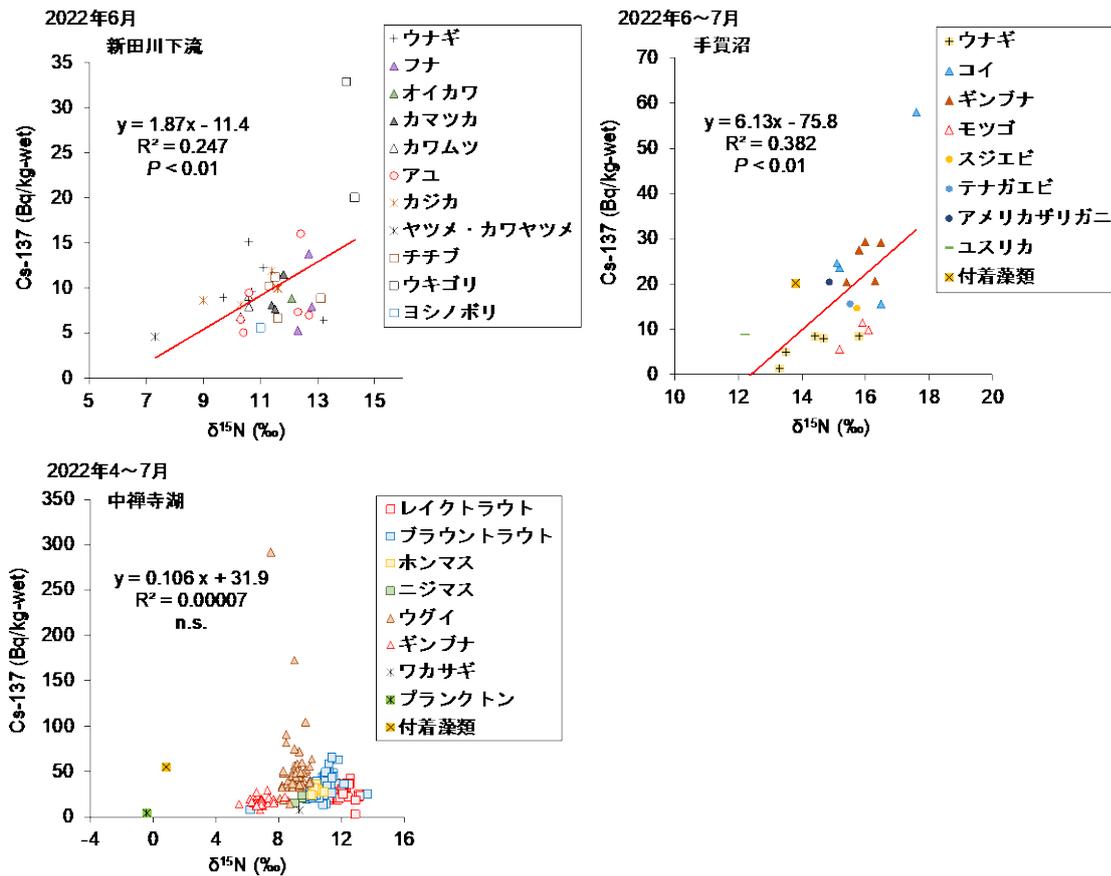


図 11 新田川下流、中禅寺湖及び手賀沼における魚類を中心とした生物の窒素安定同位体比と Cs-137 濃度との関係。Cs-137 濃度のスケールは各地点によって異なっている。

2. 内水面生態系における放射性物質の挙動に関する研究	
課題番号 2- 3	福島県富岡川における放射性物質の挙動に関する調査
研究機関・研究グループ名	水産資源研究所 水産資源研究センター 海洋環境部 放射能調査グループ
担当者職名・担当者名	主幹研究員・森田貴己、主任研究員・重信裕弥、 研究員・三木志津帆、研究支援職員・東畑顕

1. 研究内容及び方法

(1) 研究内容

福島県の内水面では、漁業再開に向けた福島県のモニタリング調査により安全性が確認され、漁業が再開されている河川もあるが、周辺の汚染状況から直ぐの漁業再開の見込みがない河川ではモニタリング調査も行われていない。そうした河川では、汚染状況の把握や汚染源の特定が望まれている。また、モニタリング調査が行われている河川でも魚類の放射性セシウム（Cs）濃度にバラツキがあり出荷制限解除に至らない河川が多い。こうした河川では濃度のバラツキの要因解明も望まれている。

本研究課題では、福島県双葉郡川内村から同郡富岡町に至り太平洋に注ぐ河川である富岡川で調査研究を実施し、魚類の放射性 Cs 汚染状況とその汚染源の特定を目的としている。富岡川では現在漁業は自粛中であるが、福島県のモニタリング調査も行われていないため、地元漁協から汚染状況の把握が望まれている。

なお、本調査は福島大学環境放射能研究所への委託事業「福島県富岡川における放射性物質の挙動に関する調査（代表：和田敏裕准教授）」によって行われている。

(2) 研究方法

富岡川において図 1 の調査地点を設けた。St. 1 の一部調査を 2022 年 5 月と 10 月に、St. 1 の残りの調査と他の調査地点の調査を 2022 年 6 月と 12 月に行い、イワナ、ヤマメ、エゾウグイ、ニホンウナギ、アユ等の魚類、水生昆虫及び陸生昆虫、湖底や川床の泥、河川水を採取した。魚類は河川では電撃捕魚機を用いて採取し、滝川ダム湖では刺網で採取し、全長・尾叉長（頭胸甲長）・体長・体重の計測後、主に筋肉部位を放射性 Cs の測定試料とした。捕食物調査のため胃内容物も確認している。昆虫類は網やトラップ等で採取した。川床の泥はスコップで、滝川ダム湖では柱状採泥器やグラブ採泥器を使用した。河川水はポンプで採水しカートリッジフィルター（1 μm）でろ過後、Cs カートリッジフィルターで Cs を捕集した。Cs-137 の測定は、well 型及び同軸型 Ge 半導体検出器により行なった。

2. 令和 4 年度進捗状況・成果

(1) 調査地点の状況

図 2 に各調査地点の空間線量率を示した。空間線量率は下流域で高い傾向にある。St. 1、滝川ダム、St. 2 の 3 地点では除染の基準となる $0.23 \mu\text{Sv/h}$ を超える値が検出されている。これは昨年と同じ傾向である。今年度は、滝川ダムと St. 1 の間に新たに調査点を設け、この空間線量率の

上昇について詳しく調べた。その結果、St. 1-2 付近から下流に向かって上昇することが判明した。図 3 に各調査地点における表層土の Cs-137 濃度を示した。滝川ダム湖においては水深が深くなるにつれて(ゲートに近くなるにつれて)Cs-137 濃度が上昇していた。図 4 に滝川ダム湖底土中の Cs-137 濃度を層別に示した。昨年度同様に濃度のピークは見られなかった。通常、ある程度の深さの地点に濃度のピークが見られ、この層が東電福島第一原発事故時のものであることが多い。例えば、福島県内の大柿ダム湖では、14-16 cm に明瞭な濃度のピークが見られている (Konoplev et al., 2022)。しかし、滝川ダム湖の湖底土ではこうしたピークが見られない。これは、滝川ダムは 2011 年 2 月に完成しているが、その後直ぐに東電福島第一原発事故が生じたため、一度も運用されておらず、湖底にかなりの泥が溜まっており今回の採泥ではピーク地点まで届いていないためと考えられる。6 月に採取した湖底の表層土を形態別分析 (Tessier et al., 1979) したところ、イオン交換態及び有機態に含まれる Cs-137 量は、それぞれ全体の 1.5~1.9 %及び 1.1~1.8 %しか存在しておらず、今後湖底に溜まった泥が下流域に放出されても、下流での生態系に移行する Cs-137 量は少ないことが予想される。図 5 に滝川ダム湖水及びその他調査地点の溶存態 Cs-137 濃度を、図 6 に滝川ダム湖の水温、D0 (溶存酸素)、日平均水温 (水深 2.5m) を示した。滝川ダム湖の溶存態 Cs-137 濃度は、6 月と 12 月共に D0 の低い底層で高かった。河川では下流ほど溶存態 Cs-137 濃度が高く、空間線量率と相関していることから (図 2)、周辺陸域からの影響を受け濃度が高くなっていると考えられる。

(2) 滝川ダム湖及び St. 2~4 で採取されたイワナについて

本課題ではイワナ、ヤマメ、エゾウグイ、アユ、ニホンウナギ等を採取した。ここではイワナについて述べる。1 例として、図 7 に採取したイワナのサイズ (全長) 組成を示す。滝川ダムで採取されたイワナは河川 (St. 2, 3) で採取されたものよりも大型の傾向がある。

図 8 にイワナ筋肉中 (河川個体は筋肉主体であるドレス部) の Cs-137 濃度 (Bq/kg-wet) を示す。河川では、6 月採取個体より 12 月採取個体のほうが濃度は高い傾向にあり、基準値を超過した検体は St. 2 の 12 月に採取されている。滝川ダム湖では 6 月と 12 月で有意差はなく、基準値超過検体は両月で採取された。図 9 にイワナのサイズと各調査地点の 6 月と 12 月の筋肉中 (河川個体はドレス部) の Cs-137 濃度 (Bq/kg-wet) を示した。滝川ダム湖では、6 月と 12 月のまとめた解析では、サイズが大きくなるにしたがい筋肉中の Cs-137 濃度が上昇するサイズ効果が見られたが、6 月と 12 月を分けた解析では 6 月のみサイズ効果がみられた (6 月と 12 月: $r = 0.38$, $p < 0.05$, 6 月: $r = 0.57$, $p < 0.005$)。

図 10 に各調査地点でのイワナ胃内容物の分類群ごとの湿重量比を示した。河川の個体は陸生生物も多く捕食しているが、滝川ダム湖の個体はほぼ水生生物 (特に魚類) を捕食している。滝川ダム湖の個体では、空胃の個体も多かった。現在、他の個体の胃内容組成を調べるとともに、採取している昆虫類の Cs-137 測定を進めている。また、魚類の炭素・窒素安定同位体元素比の分析も現在進めており、食性と Cs-137 濃度の関係を整理中である。

(3) St. 1 で採取されたアユについて

図 11. に富岡川 St. 1 で採取されたアユのドレス部もしくはホールボディー (内臓を含む) の Cs-137 濃度の関係を示した。ドレス部測定で基準値 (100 Bq/kg-wet) を超過した検体はなかつ

た。ドレス部では5月よりも10月採取の個体のほうが濃度は高い傾向にあるが、ホールボディー（内臓を含む）で比較するとそうした傾向にない。アユ試料では、ホールボディー（内臓を含む）の測定では濃度が高くなる傾向にあり、これは胃内容物に含まれる藻類やシルトが原因と考えられている（Tsuboi et al., 2015, Morishita et al., 2019）。そこで、内臓試料を形態別分析（Tessier et al., 1979）を参考に、過酸化水素水で処理しケイ酸塩態とそれ以外の形態に吸着するCs-137に分け分析した。ケイ酸塩態吸着Cs-137は体内に吸収されず、それ以外の形態に吸着するCs-137は体内に吸収されていると考えられる。内臓1kg中のCs-137がケイ酸塩態とそれ以外の形態に吸着する量を図12に示す。アユ内臓でのケイ酸塩態吸着の割合は、10.1~91.3%と幅広かったが、これはアユの摂餌時のケイ酸塩態の取り込み量の違いを示していると考えられる。

3. 今後の課題

本課題は本年度が2年目であり、全体としては得られた結果はほぼ昨年度と同様であるが、昨年の結果を考慮して追加した調査もいくつかあり、結果の考察が進んでいる。河川水中のCs-137濃度が上流から下流に至る間に変化が見られ下流ほど濃度が高くなる現象について、流域からの影響が示唆されていたが、今年度調査地点を追加したことにより、影響を与えている流域が絞られてきた。次年度はさらに詳細に調査し、上昇する原因を解明したい。富岡川では河川とダム湖で同種の魚類が採取できることから、食性とCs-137濃度の関係が明らかになりつつある。次年度は、より詳細に餌料生物を調査することにより、魚類の放射性Cs濃度にバラツキが生じる要因の解明に繋がりたいと考えている。

謝辞

本課題の調査は、富岡川漁業協同組合の了承の下で行われており、関係者のご理解に感謝します。

引用文献

Konoplev A. et al. (2022) Reconstruction of time changes in radiocesium concentrations in the river of the Fukushima Dai-ichi NPP contaminated area based on its depth distribution in dam reservoir's bottom sediments. *Environmental Research*, 206, 112307.

Tessier, A. et al. (1979) Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 51, 844-851.

Tsuboi, J. et al. (2015) Exposure of a herbivorous fish to ^{134}Cs and ^{137}Cs from the riverbed following the Fukushima disaster. *Journal of Environmental Radioactivity*, 141, 32-37.

Morishita, D. et al. (2019) Spatial and seasonal variations of radiocesium concentrations in an algae-grazing annual fish, ayu *Plecoglossus altivelis* collected from Fukushima Prefecture in 2014. *Fisheries Science*, 85, 561-569

図表

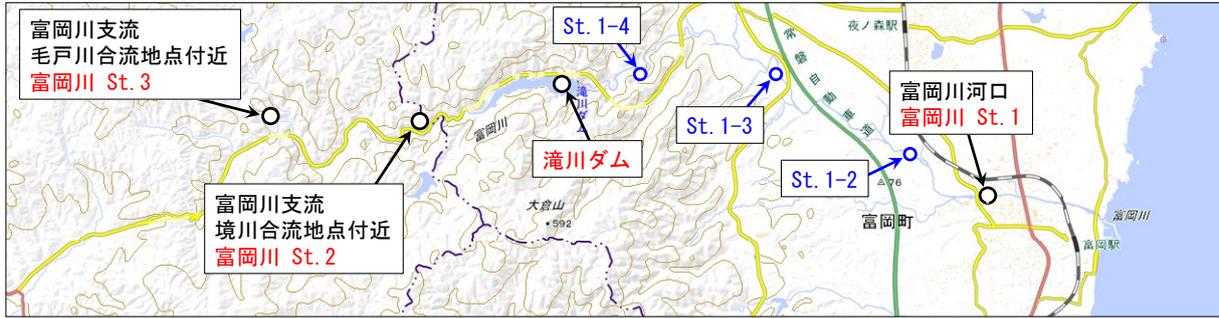


図 1. 調査地点（地理院地図にサンプリング地点を追記して掲載）

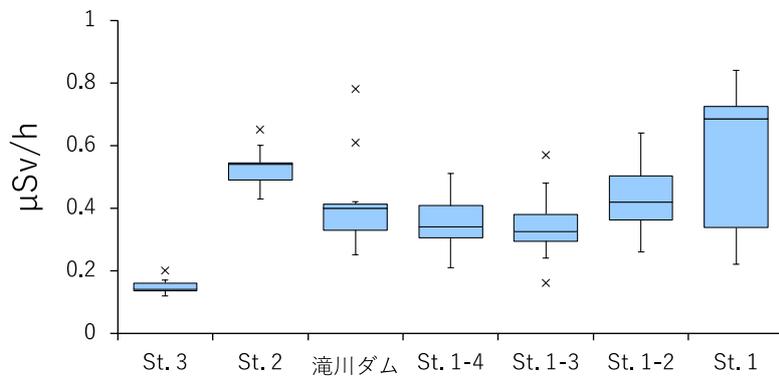


図 2. 調査地点における空間線量率

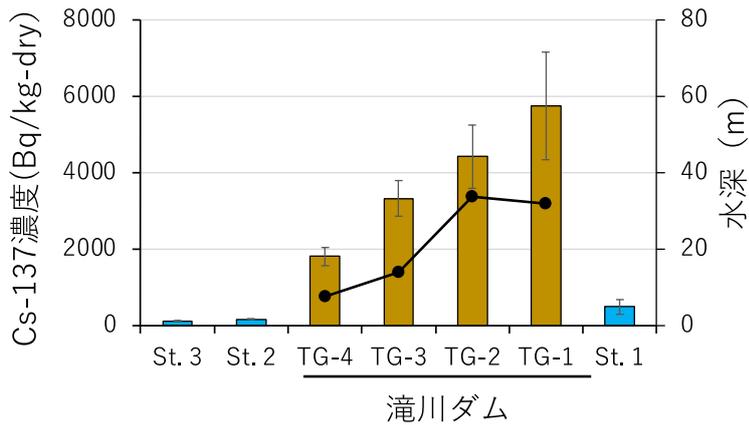


図 3. 各調査地点における表層土の Cs-137 濃度. 折れ線は水深を示す（右軸）。

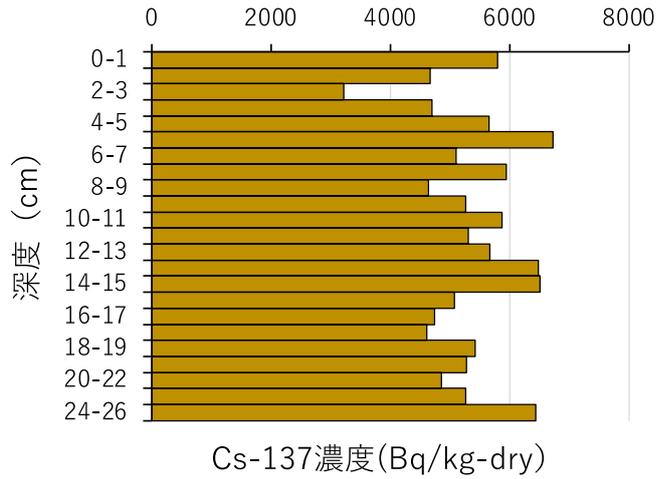


図 4. 滝川ダム湖の湖底土中の層別 Cs-137 濃度. 調査地点は、図 3 の TG-1 の地点。

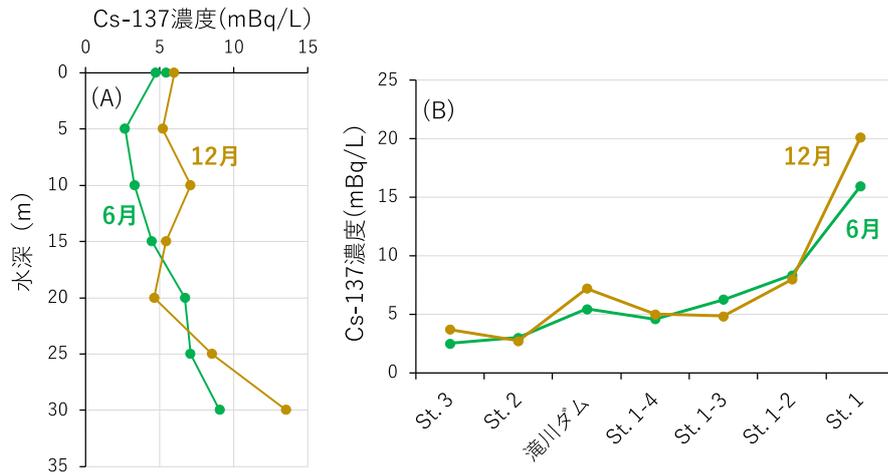


図 5. 滝川ダム湖水及び河川水中の溶存態 Cs-137 濃度. (A) 滝川ダム湖での溶存態 Cs-137 の鉛直分布. (B) 各調査地点での溶存態 Cs-137 濃度. 滝川ダム湖の濃度は各水深の平均値。

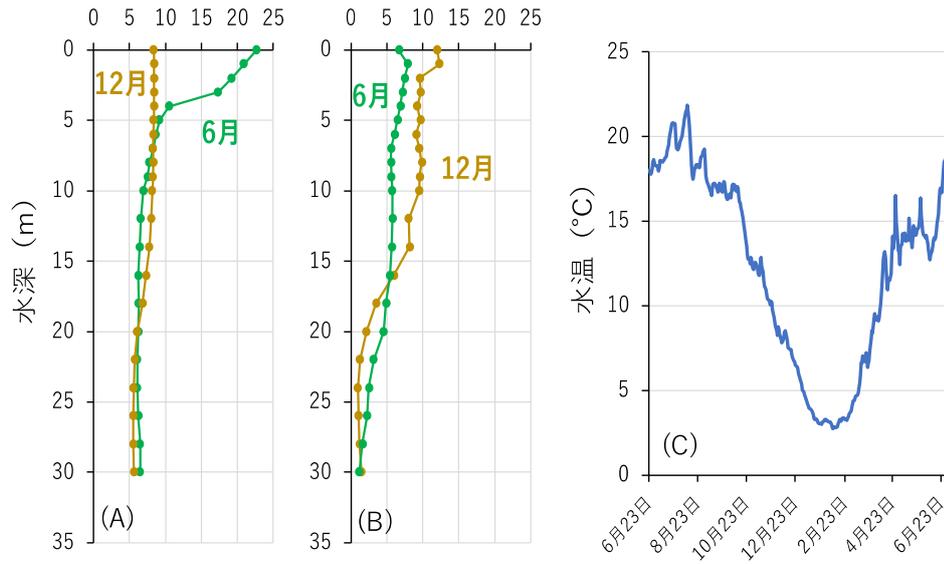


図6. 滝川ダム湖の、緑：水温（℃）、黄土：DO（mg/L）、青：日平均水温（水深2.5m）

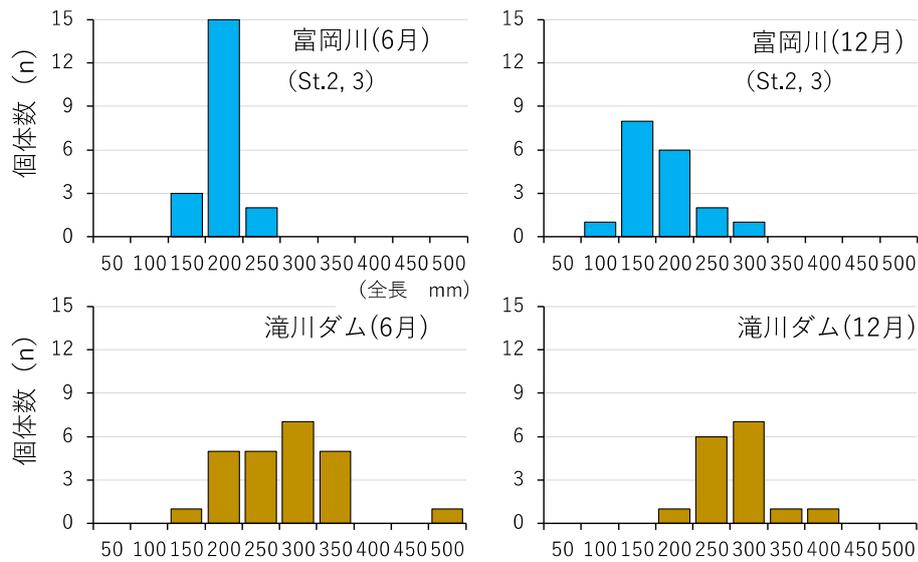


図7. 採取されたイワナのサイズ組成.

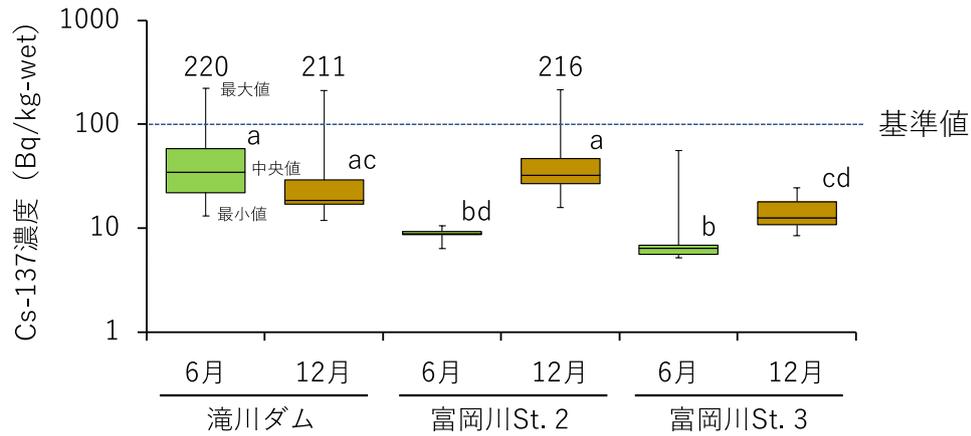


図8. イワナ筋肉中（河川個体はドレス部）のCs-137濃度. グラフ内の数字は基準値（100 Bq/kg-wet）を超過した検体のCs-137濃度. 異なる英字はKruskal-Wallis, Steel-Dwassにより有意差あり（ $P < 0.05$ ）。

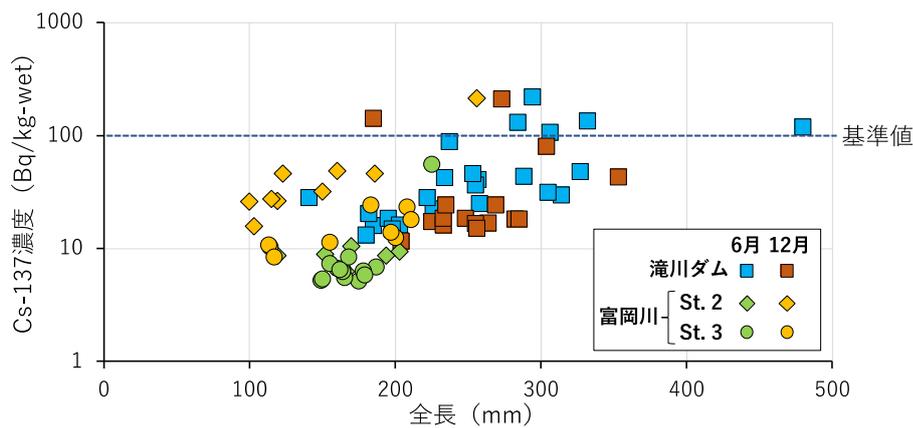


図9. イワナのサイズと各調査地点の6月と12月の筋肉中（河川個体はドレス部）のCs-137濃度（Bq/kg-wet）

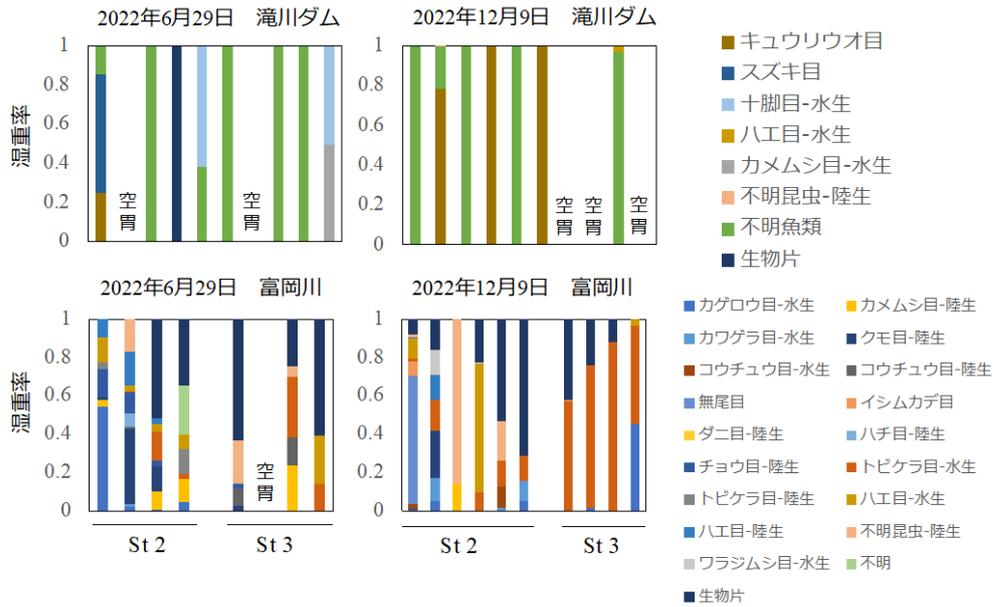


図 10. 各調査地点でのイワナ胃内容物の湿重量比.

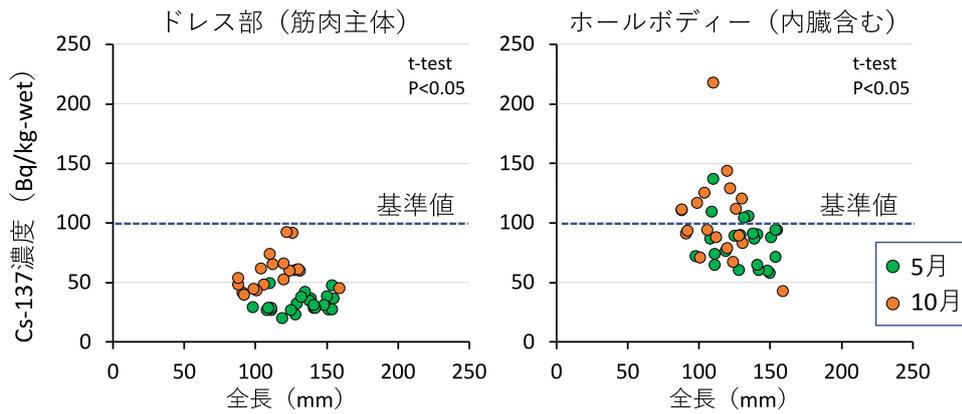


図 11. St. 1 で採取されたアユの全長と Cs-137 濃度の関係.

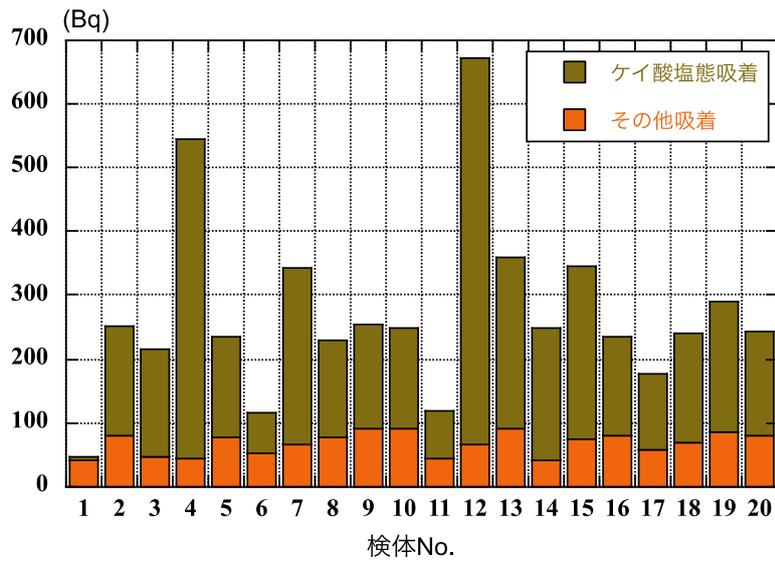


図 12. St. 1 で採取されたアユ内臓 1kg 中のケイ酸塩態とそれ以外へ吸着する Cs-137 量

3. 福島県水産業の復興及び再生のための総合研究	
課題番号 3-1	課題名：福島県産水産物の高品質化技術開発
研究機関・研究グループ名	水産技術研究所 環境・応用部門 水産物応用開発部 付加価値向上グループ ¹ 福島県水産海洋研究センター 漁場環境部 ²
担当者職名・担当者名	主任研究員・今村伸太郎 ¹ 、村田裕子 ¹ 、橋本加奈子 ¹ 研究員・富谷敦 ²

1. 研究内容及び方法

(1) 魚類の血抜きは、鮮度保持や貯蔵中の肉質劣化を抑制するために重要な処理であり、鰓膜や尾部静脈から海水水中に放血する方法が一般的である。水産物応用開発部では、これまでに養殖ブリ類を対象とし、血管内容物置換器具（特許出願済）を開発し、従来の方法より高効率、簡便、大量処理が可能な脱血方法を提案した。福島県沿岸で漁獲されるヒラメの高品質化に貢献するため、今年度は福島県で漁獲されたヒラメ活魚を用いて血抜きの効果を検証した。

(2) 令和4年5月11日、5月19日、6月1日、6月9日、6月23日、7月3日、7月18日、7月25日、8月3日に福島県いわき市下神白地区、5月12日、6月16日、7月20日に沼之内地区において、貝焼きの原料となるキタムラサキウニ10～16個体を水研横浜庁舎に送付した。なお、ウニの漁場は、下神白地区はアラメ藻場、沼之内地区は、5月がカジメ、6月と7月がコンブ藻場であった。これらのウニについて、殻高、殻径、重量を計測後、生殖巣を取り出して重量計測、一部をデビットソン液で固定し、残りを分析用に-40℃で凍結保管した。固定した組織から組織切片を作製し、ヘマトキシリンエオシン染色後、顕微鏡観察により性別と成熟ステージを判定した。

凍結保管した生殖巣からエキスを調製し、エキス中の遊離アミノ酸、グリコーゲンを分析した。

6月30日に製造したいわき産のウニ貝焼きといわき市内店舗で購入した岩手県産、宮城県産、茨城県産、チリ産の貝焼きについて、色、味成分の比較及び官能評価を行った。

(3) 近年、相馬地区の沖合底びき網で10～12月にかけてサバ類が漁獲されるようになった。そのサバ類を有効活用したいと相馬地区の沖合底曳き網漁業者から要望があったため、漁獲物の性状を把握し加工品としての用途を検討した。令和4年10月31日に相馬原釜漁港に水揚げされたサバ類の一般成分を測定し、そのサバ類を原料にして一夜干しと漬け井を試作した。

2. 令和4年度進捗状況・成果

(1) 福島県で漁獲されたヒラメ活魚（平均重量約1.51-5.9kg、尾叉長46～70cm）を用い、延髄破壊後に3時間氷水中で冷却後、血液置換器具（流量1.5リットル/分、1-3分）を用いて脱血を行なった。放血を行なっていない個体、鰓膜切断による海水水中での放血及び血管内容物置換器具を用いた血液置換の3つの処理を比較したところ、放血を行なっていない個体では、多量の血液は筋肉中にも残存していたが、鰓膜切断により海水水中で放血することで血液の残存が大幅に減少することがわかった。一方、血管内容物置換器具を用いて血液置換を実施したところ、放血と比較して脱血効率が高く、魚肉の白色度及び透明度が向上した（図3-1-(1)-1）。テクスチャーアナライザーを用いて、魚肉のテクスチャーの経時変化を調べたところ、軟化が抑制される傾向

があった。次に、におい識別装置 (FF-2020, 島津製作所) を用いてヒラメ肉の魚臭を比較した。サンプルは、冷蔵で7日間貯蔵したものから血合筋を含む切り身 (各 60g) を採取し、ミンチにした後、におい袋中で 40℃、1 時間処理し、発生した気体を分析に用いた。その結果、臭気指数相当値は血液置換によって有意に低下することがわかった (図 3-1-(1)-2)。成分は、硫黄系、有機酸系及びアルデヒド系の魚臭が低減された。福島県沼之内市場では、活魚と鮮魚の取り扱いがあるが、鮮魚に対しても血液置換が可能であるのか試験を行なった。鮮魚の死後経過時間が分からなかったことから、活魚を用いて試験をした。活魚を海水氷中に入れ、5 時間貯蔵後に、血液置換を実施した。その結果、血液の凝固は確認されず、良好に血液置換することが可能であった (図 3-1-(1)-3)。この結果から、近海漁業で漁獲されたヒラメを海水氷で冷却し、市場に流通したものを運搬し、仲買によって陸上で血液置換することが可能ではないかと考えられた。沼之内市場 (6 月) では、ヒラメ活魚が最も高額であり、鮮魚はやや安価に取引されていた (図 3-1-(1)-4)。活魚の一部で死魚が発生しており、活魚と比較して、かなり安価に取引されていた。また、活魚に対しては、入札後に延髄破壊や血抜き処理はほとんど実施されていなかった。これらのヒラメに対して、血液置換を実施することで高品質化させることが可能であると考えられた。血液置換は、福島県魚介類の付加価値化に貢献すると考えられた。

(2) キタムラサキウニの成熟ステージは、いずれの地区で漁期の初め (5 月) は、すべて成長期 (ステージ 2) で、漁期半ば (6 月~7 月上旬) に一部の雄個体で成熟の進行が見られ、8 月に成熟前期に移行した個体が見られた。昨年度の下神白地区では、7 月中旬に漁期を終え、この時期には半数以上の雄個体が成熟前期 (ステージ 3) に移行していた (図 3-1-(2)-1)。今年度は、昨年度に比べ、成熟の進行が遅く、それに伴い 8 月上旬まで漁が行われた。生殖巣指数は、下神白地区では、漁期の初め (5 月) から徐々に増加が見られたが、沼之内地区では、ほぼ一定であった (図 3-1-(2)-2)。

生殖巣の遊離アミノ酸総量は下神白地区で 2700~3500、沼之内で 3700~4600mg/100g と沼之内のほうが高い値であった。沼之内地区のウニはアルギニン含量が高い個体が多く、このことが総量に関係していた。一方、甘味を呈するグリシンとアラニンは、下神白のほうが高い傾向があった。ウニの美味しさに関与している Glu, Gly, Ala, Val, Met の総量は漁期中、いずれの地区でほぼ一定であった。特に、甘味の強い Gly 含量が、沼之内の 6 月を除く、いずれの地区と付月で 1000mg/100g を超えていた。また、同様に甘味を呈する Ala 含量も 250mg/100g を超えていた。

グリコーゲン含量は、6~10%の変動があった。下神白では、昨年度と同様に 6 月に一旦低くなった。一方、沼之内では、6 月に一旦増加し、7 月に低下した。その変化は、いずれの地区で、上記の美味しさに関与しているアミノ酸の総量の変化に似ていた。(図 3-1-(2)-3)。

いわき産貝焼きと他産地産の比較から、うま味 (グルタミン酸) と甘味 (グリシン、アラニン) に関係するアミノ酸の総量は、いわき産は、岩手県産に次いで高い値であった。アルギニンの量は、215~334 mg で市場価値を有し、さらに 255 mg 以下で市場価値が高いという報告がある。これによると、いわき産と岩手県産は、それぞれ 217 と 248mg/100g で商品価値が高い、宮城県産は、298mg/100 で商品価値を有する。一方、チリ産と茨城県産は、商品価値の範囲から外れていた (図 3-1-(2)-4)。グリコーゲン含量は、茨城県産が最も高く、いわき産は、岩手県産に次いで 3 番目に高い値であった (図 3-1-(2)-5)。当所 6 名のパネルによる官能評価結果から、いわき産は、色、味、食感いずれも評価が高かった (味と食感は 1 位、色は岩手と並んで 2 位)。アミノ酸及びグリ

コーゲン含量は、岩手県産のほうが高いが、実際の官能評価では、いわき産の方が高い評価であった。この理由として、色、食感、香り（岩手県産は磯の香りがあり影響していることも考えられた）も味に影響していると考えられた。色については色差計の値から、チリ産は黄色と赤色が高く、官能評価でも色の評価が最も高かった（図 3-1-(2)-6）。

(3) 令和 4 年 10 月 31 日に相馬原釜漁港に水揚げされたサバ類の平均尾叉長は 24.6 ± 2.4 cm、平均体重 136.6 ± 42.6 g であり、種判別を行ったところマサバであった。一般成分を測定したところ、水分 $76.7 \pm 0.8\%$ 、タンパク質 $21.3 \pm 0.5\%$ 、脂質 $0.8 \pm 0.6\%$ 、灰分 $1.5 \pm 0.1\%$ であり、加工品として重要な脂質は少ない傾向にあった（表 3-1-(3)-1）。そのマサバを原料として一夜干し（図 3-1-(3)-1）、漬け井（図 3-1-(3)-2）を試作した。所内職員、相馬地区の沖合底曳き網漁業者等に食味してもらった結果、食味は良好との評価が多かった。一夜干しでは、脂が少ないサバ類であるがしっとりしているとの意見があった。フィレを塩水に漬けることにより過度の脱水を防ぐこと、食塩の作用によって魚肉タンパク質の親水性が変化することにより、脂の少ないサバ類でもしっとりした仕上がりになったと考えられる。また、漬け井も好評であったが、冷凍原料を用いて試作し、またそれを再冷凍したものである。生食用途の場合、冷凍中の品質劣化を防止しなければならないが、調味液につけて冷凍することにより品質劣化を防ぐことができたと考えられた。

3. 今後の課題

(1) 福島県で漁獲されたヒラメ活魚に対する血液置換の効果を示したが、鮮魚に対して効果があるのか明らかにする必要がある。

(2) 今回、いわき産のウニの貝焼きと他産地の貝焼きを比較し、官能評価や色調などでは、高い評価を得ているが、グリコーゲン含量や遊離アミノ酸総量では、いわき産よりも高い産地の貝焼きがあった。今回比較に用いたウニの貝焼きは、漁期終盤のグリコーゲン含量及び遊離アミノ酸含量少ない時期の原料を使用していたことから、原料ウニの成分含量が高い時期の原料では、品質もより高い製品が製造できていた可能性が考えられる。また、漁期中での製品の品質に変化があるかどうか不明であるため、次年度は、漁期中の原料ウニと貝焼き製品の品質との関係を調べ、より多くの市場差別化要素を見出す予定である。

(3) 今年度行った試験では、脂が少ないサバ類でも一夜干しや漬け井にすることにより食味も良好になり有効活用できる可能性があることから、相馬地区の沖合底びき漁業者及び漁業協同組合連合会から令和 5 年度も継続して研究を行って欲しいとの要望があったため、研究を継続する予定。令和 5 年度は 10～12 月にかけて試験を行い、漁期中の一般成分の変化を調べ、加工用途の検討を行う予定。

4. 備考

なし

図表



図 3-1-(1)-1 脱血後の筋肉中の残存血液の様子

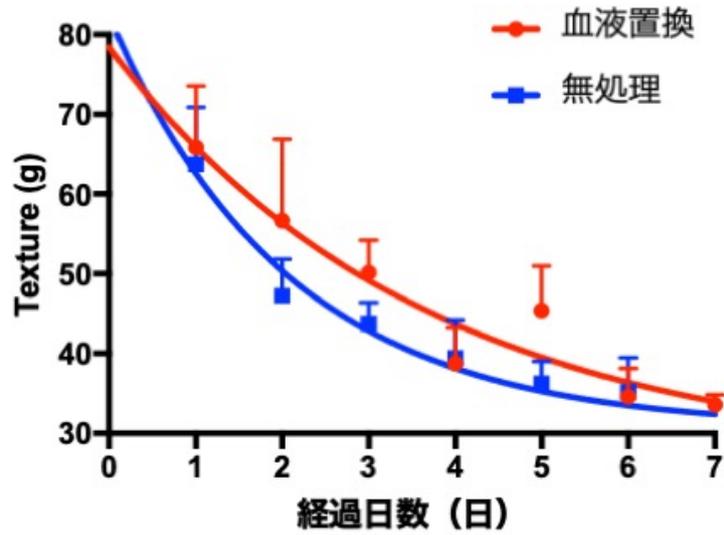


図 3-1-(1)-2 血液置換されたヒラメ肉の軟化抑制

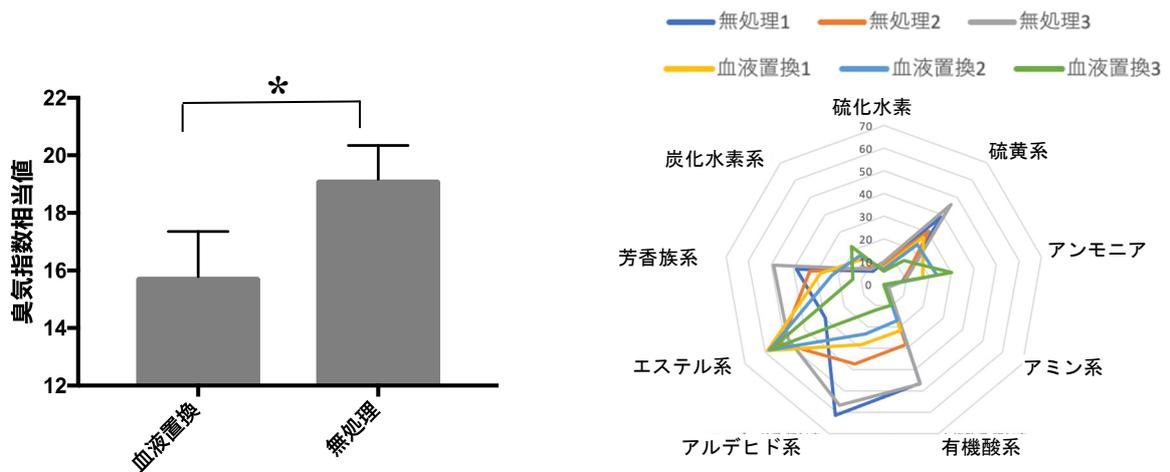


図 3-1-(1)-3 血液置換されたヒラメ肉の魚臭抑制効果

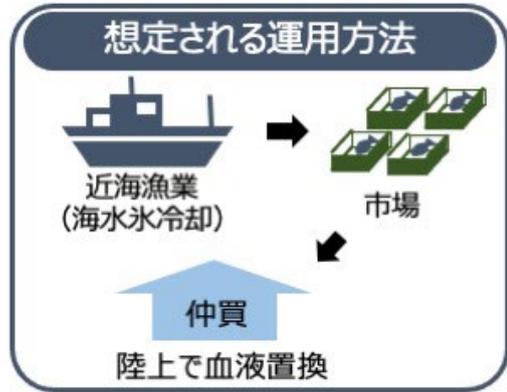
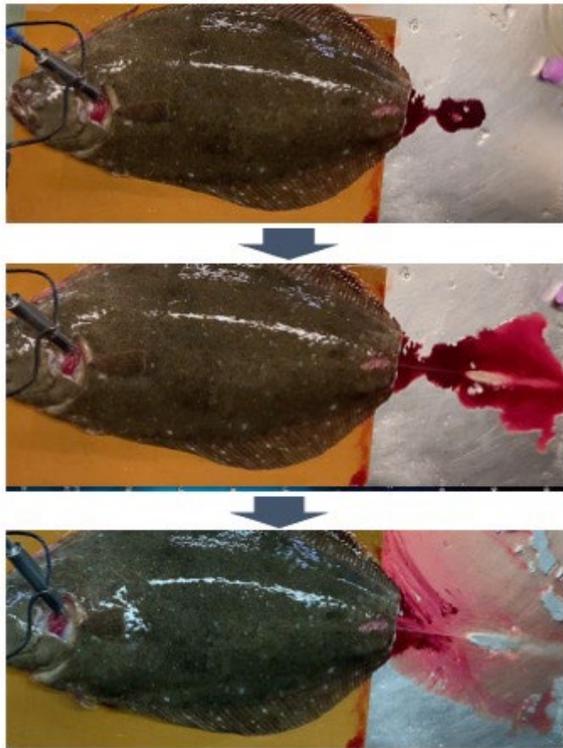


図 3-1-(1)-4 鮮魚における血液置換

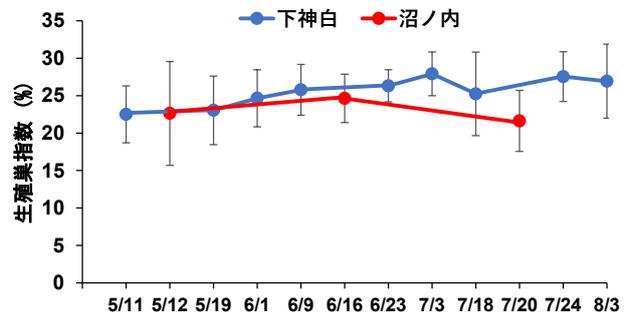
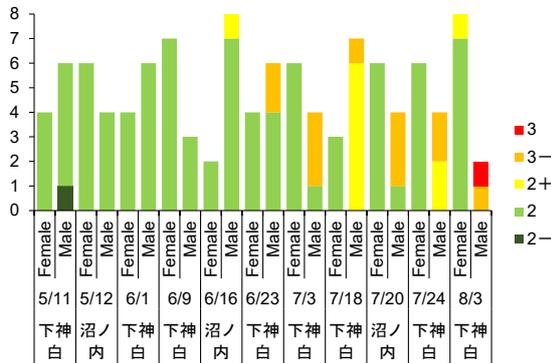


図 3-1-(2)-1 成熟ステージの変化

図 3-1-(2)-2 生殖巣指数 (GI) の変化

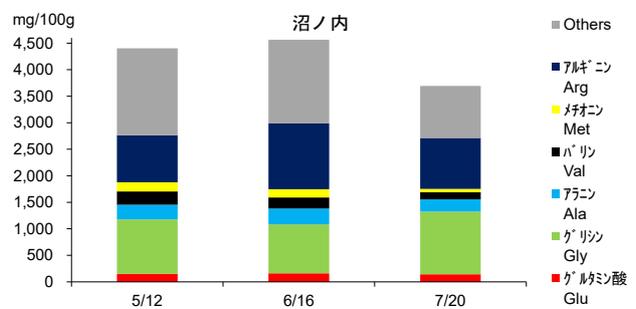
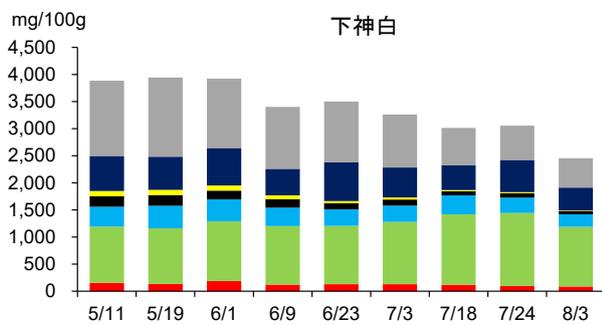


図 3-1-(2)-2 遊離アミノ酸組成の変化 (左: 下神白、右: 沼之内)

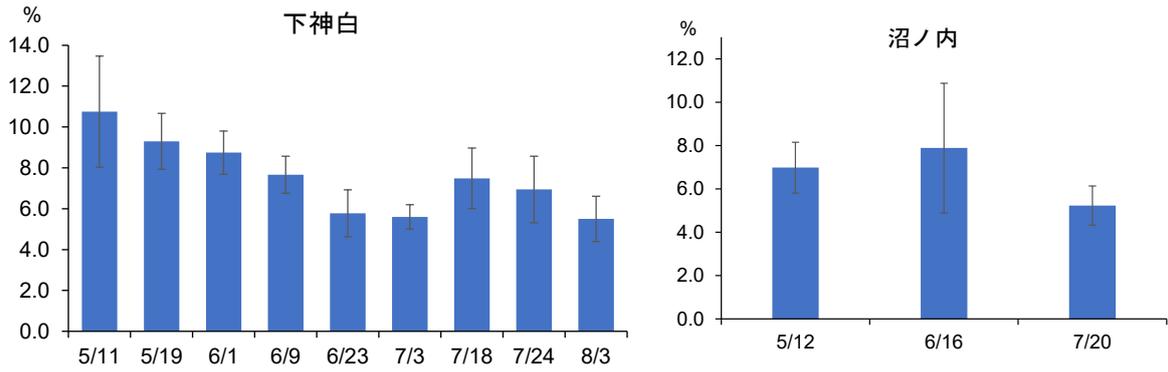


図 3-1-(2)-3 グリコーゲン含量の変化 (左：下神白、右：沼之内)

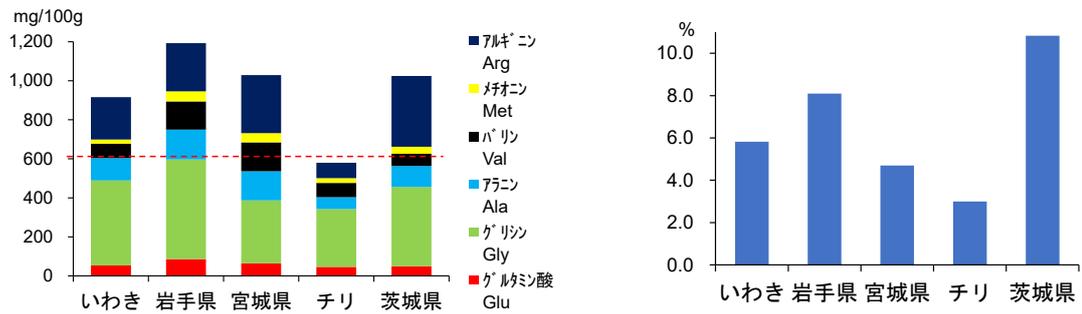


図 3-1-(2)-4 貝焼きの遊離アミノ酸

図 3-1-(2)-5 貝焼きのグリコーゲン含量

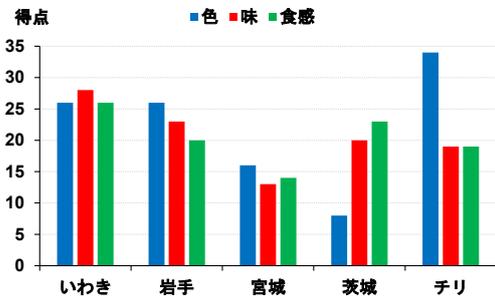


図 3-1-(2)-6 貝焼きの官能評価結果

表 3-1-(3)-1

調査対象のマサバの一般成分 (%)

水分	76.6 ± 0.8
タンパク質	21.3 ± 0.5
脂質	0.8 ± 0.6
灰分	1.5 ± 0.1



図 3-1-(3)-1 サバの一夜干し

図 3-1-(3)-2 サバの漬け丼

3. 福島県水産業の復興及び再生のための総合研究	
課題番号 3-2	課題名：消費者視点を基盤とした福島県産水産物の販売戦略構築
研究機関・研究グループ名	水産技術研究所 環境・応用部門水産物応用開発部付加価値向上グループ ¹ 水産資源研究所 社会・生態系システム部漁業管理グループ ²
担当者職名・担当者名	グループ長・石原賢司 ¹ 研究員・世古卓也 ¹ 、主任研究員・神山龍太郎 ²

1. 研究内容及び方法

(1) 福島県産水産物の消費に関する調査

【購買意欲を喚起する情報提供の方法に関する調査（マアナゴ）】

福島県産水産物の消費喚起のためには、消費者の購買意欲を高める施策が求められる。令和3年度の調査では、鮮度や味、レシピの情報提供が消費者の評価に影響を及ぼすことを明らかにした。しかし、味の情報提供の効果は、情報提供の方法や情報の内容によって異なる可能性が示唆された。また、レシピラベルの効果は調理ニーズなどの個人属性と関係することが示唆された。そこで令和4年度の調査では、ウェブアンケートにより消費者評価データを集め、味に関する情報の提供方法の違い（言葉での説明、グラフでのデータ提示等）や消費者の属性（調理ニーズや調理経験等）が消費者の評価に及ぼす影響を選択実験により明らかにすることを目的とした。

評価対象を令和3年度の成分分析により大型個体では脂質含量が多いことが明らかとなったマアナゴをとし、価格（4水準）、レシピラベルの有無（2水準）および個体サイズ（2水準）を選択実験の属性とした（表(1)-1）。完全実施要因計画によりプロフィールを作成し、D効率性が最適となるように8選択肢集合を抽出した。調査時において質問の順序はランダムとした。図(1)-1は調査時に提示された画面の例である。

情報提供による消費者評価の改善効果を分析するために、回答者に対して8回提示される選択実験の質問のうち、4番目と5番目の質問の間にマアナゴの脂質含量に関する情報提供の画面を挿入した。提供した情報は、脂質含量に関する情報提供方法2種類（言葉と絵を用いた生育環境に関するストーリー情報／グラフを用いた成分分析の結果に関する科学的情報）と言葉の表現2種類（「脂乗りが良い」／「脂質含量が多い」）を組み合わせた計4種類で、いずれも大型個体の方が脂乗りが良い（脂質含量が多い）ことを説明したものである（図(1)-2）。一人の回答者に対して、4種類からランダムに選ばれた1種類の情報のみが提供された。情報提供の直後に、提供された情報内容を正しく覚えているかを確認する質問を挿入した。調査票では選択実験の質問以外に、消費者の属性（年齢、性別、家族構成、年収等）や水産物購入に関する態度や行動（魚の購入頻度、魚を購入する際に最も重視する点等）、マアナゴの食経験や調理経験、好みなどを尋ねた。調査対象者は福島県産水産物の主な流通先と考えられる関東1都6県（茨城県、栃木県、群馬県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県）の消費者3,000名とし、人口統計に基づいて都道府県別年齢別男女別の人口構成に即してサンプル数を割り付けた。

得られたデータを潜在クラスロジットモデルにより分析した。潜在クラスロジットモデルとは、消費者を選好の異なる複数の集団（クラス）に分け、クラスごとに異なるパラメータを推定する

という選択実験データの分析手法である。データのうち、8つの質問全てで「どちらも買わない」を選択した消費者や不自然な回答をおこなう消費者をサンプルから除いた。分析に用いた変数は表(1)-2の通りである。潜在クラスロジットモデルではクラス数を2から順に増やしたところ、クラス数5で推定結果が収束しなくなった。収束したモデルのうち最もBICの低いクラス数4のモデルを最終的に採択した。

【トリチウムやALPS処理水に関する知識の調査】

トリチウムやALPS処理水に関する知識、ALPS処理水放出後の検査結果への信頼、国産マガレイと比べた福島県産マガレイへの支払意思額に関するウェブアンケート調査を実施した。関東1都6県、宮城県及び福島県の3500人の消費者を対象とした。トリチウムやALPS処理水の知識については、復興庁広報資料「ALPS処理水について知ってほしい3つのこと」に掲載される情報に基づき作成した令和3年度と同じ内容とした。また、福島県産マガレイへの支払意思額については仮想市場評価法により回答を得た。具体的には、スーパーマーケットでマガレイの切り身を購入しようとしているという仮想状況において、国内産マガレイ160g250円を基準として福島県産マガレイ160gをいくらなら買ってもよいかを、支払いカード方式により選択させた。マガレイの評価の質問で「価格差によらず買わない」と回答した消費者及び普段魚を買わない回答者を除いた残りのサンプルのデータを用い、グループデータ回帰により支払意思額に影響を及ぼす要因を分析した。アンケートではカレイ類に関する認知度や食経験、好み等も尋ねた。

(2) 福島県産水産物の味覚情報の探索と可視化

福島県産水産物の消費喚起のためには、福島県産水産物の食品科学的特徴を調査し、その脂の乗りや味、食感といった情報を数値化することが必要である。また、それらの情報を旬の特定やレシピ開発に用いることで消費者に馴染みのある情報に変換し、魅力を発信することが重要である。本研究では、福島県産水産物の味覚情報を捉えることを目的として、福島県沿岸で漁獲される水産物（マアナゴ、カレイ類）を対象に成分分析と官能評価を実施した。

【マアナゴの評価】

マアナゴは小名浜地区に水揚げされたものを産地仲買人を通じて購入した。中型サイズがもっとも高値で取引され、大型、小型の順に価格が下がるというヒアリング結果に基づき、マアナゴのサイズと味の特徴を明らかにすることを目的とした。図(1)-5のアンケート結果に基づき、各種サイズのマアナゴについて遊離アミノ酸分析を行い、旨味・甘味成分の含有量を評価した。官能評価は東京家政大と共同で図(1)-4の結果に基づき、消費者に好まれた3つの調理法（天ぷら、白焼き、煮アナゴ）について分析型官能評価を行なった。

【カレイ類の味覚情報の可視化】

カレイ類は味覚情報の取得及びその可視化を目的として、福島県で水揚げされるカレイ類を産地仲買人を通じて購入し、テイストマップの作成に用いた。カレイ類はナガレメイタガレイ、マガレイ（1,6,11月）、ムシガレイ、ソウハチガレイ、マコガレイ（2,9月、ヌケマコ）、ナメタガレイ、イシガレイ、サメガレイ、メイタガレイ、ミギガレイ、アカガレイ、ヤナギムシガレイ、ヒレグロ、ヌマガレイ（宮城県産）、マツカワ（北海道産）、ホシガレイ（岩手県産）を用いた。官能

評価は分析型官能評価とし、ハウス食品分析テクノサービスにて実施した。カレイ類は5枚におろし（小型のカレイは3枚に）、皮を除去したのち、加熱によるドリップ流出を避けるため、真空包装した。加熱調理を前提とするため、2分間湯煎で加熱し、部位による味の差をなくすためほぐし身としてパネリストに提供した。パネリストは訓練された、魚が嫌いでない者6人とした。20種類の検体を1日で評価する場合、パネリストの負担が大きく評価精度が低下するためマガレイ（1月）を基準品として、1日4種類、5日間で評価を行なった。評価項目は甘味、旨味、脂ののり、コクとし、テイストマップは各サンプルについて6人のパネリストの甘味、旨味、脂ののり、コクの評価結果の平均点を主成分分析することで作成した。各軸の意味については、各軸に寄与する成分に基づき決定した。

(3) 福島県産水産物の流通に関する調査

福島県産水産物では震災以前のように流通量が回復しない原因として流通の固定化などの問題が指摘される。こうした流通上の問題の解決に資するために、バリューチェーンのうち関東及び福島の流通業者や小売業者等が産地に求めるニーズや課題を明らかにすることを目的とした。小売業者5社に対して取材申込みをおこない、うち、1社から書面にて回答を得た。

2. 令和4年度進捗状況・成果

(1) 福島県産水産物の消費に関する調査の結果

【選択実験による情報の提供方法の分析結果（マアナゴ）】

アナゴの食経験に関する回答の集計結果を図(1)-3に示す。回答者のうち1404人(46.8%)が「一年以内に食べたことがある」、1095人(36.5%)が「一年以内ではないが食べたことがある」と回答した。食べたときのメニューや料理方法としては、「天ぷら」が最も多く1046人(34.9%)、次いで「煮穴子」が945人(31.5%)に選択された。調理経験に関する回答の集計結果を図(1)-4に示す。家庭でアナゴを調理した経験のある回答者は276人(9.2%)であった一方、2529人(84.3%)が「調理した経験がない」と回答した。アナゴの調理経験のある回答者に、どの料理方法の経験があるかを尋ねた結果、天ぷらが最も多く159人、次いでかば焼きが97人、煮穴子が93人であった。どのような品質のアナゴを購入したいかを尋ねた結果、「脂乗り」が最も多く896人(29.9%)に、次いで「うま味」が692人(23.1%)に選択された(図(1)-5)。

レシピラベルや大型サイズ、情報提供の効果に関する潜在クラスモデルによる分析の結果を表(1)-3に示す。消費者は4つのクラスに分類された。レシピラベルのパラメータはどの消費者クラスでもプラスで有意となった。マアナゴのような加熱調理での消費が想定される商品では、調理レシピを商品に添付することがどの消費者層でも高く評価されることを示された。

大型サイズであることへの評価はクラスにより異なり、クラスAとCでは有意なプラスとなる一方、クラスDでは有意なマイナスとなった。つまり、同じ魚種かつ同じ重量の商品でも、消費者によって個体サイズに対する評価が異なることが示された。メンバーシップ関数における個人属性のパラメータから、クラスDの特徴としてアナゴの食経験が多いことを指摘できるが、なぜ食経験が多い人ほど大型サイズを低く評価する傾向があるのかは今後さらに分析が必要である。

情報提供と大型サイズの交互作用が5%水準で有意となったのはクラスCであった。この消費者

層では情報1～4の全てのパラメータがプラスで有意だった。生育環境に関するストーリー的な情報（情報1及び2）よりも成分分析結果に関する科学的情報（情報3及び4）の方が推定値が大きい傾向にあった。つまり、この消費者層では情報提供が評価向上に有効であり、かつ、科学的情報の提供が効果的であったと言える。一方、言葉の表現として「脂乗りが良い」（情報3）と「脂質含量が多い」（情報4）の間では、「脂質含量が多い」の方が点推定値が大きく、必ずしも「脂乗りが良い」という表現がよいという結果とはならなかった。クラスCの特徴として、大型サイズを好む、魚の購入頻度が高い、アナゴの調理経験が多い、研究機関への信頼が高い、せっから（熟慮性指数が低い）、ということがメンバーシップ関数の結果から言える。

カレイ類の知識や食経験に関する回答結果を図(1)-6に示す。回答者の44%が個別の魚種名を知らなかった。回答者の57%が、カレイ類を魚種名まで区別せずに食べていることが明らかとなった。カレイ類の魚種を区別し特定のカレイ類を好きと回答した消費者のほとんどは、その魚種を好きな理由として「おいしい」を選択した（図(1)-7）。カレイ類で重視する味や食感としては食感の柔らかさ、脂の乗り、味の濃さが最も多くの回答者に選択された。カレイ類の好きな食べ方としては、煮魚が最も多くの消費者に選択された。したがって、カレイ類の販売にプロモーションにおいては食感の柔らかさや脂乗りの良さに注目しておいしさをアピールすることが有効と考えられた。

トリチウムに関する知識の質問では、66%の消費者が「どれも知らない」と回答し、令和3年度に比べ5%程度知識が普及していた。ALPS処理水等に関する知識の質問では、54%の消費者が「どれも知らない」と回答し、令和3年度に比べて8%程度知識が普及していた。令和4年度の調査は11月に実施されており、その時点では知識の普及が進んでいなかったと考えられる。しかし、最近では広報活動が活発におこなわれていることから、令和5年3月現在では状況が変化していると予想される。マガレイに対する評価の質問では、国産（250円/160g）よりも低い価格を選択する消費者が存在したが、その中の少なくない割合が、そもそも魚やマガレイ自体が好きではないという産地とは無関係の理由により低い価格を選択していたことが分かった。また、魚を普段買わない人にALPS処理水等の知識を持たない人が多い傾向があった。そのため、福島県産マガレイの評価に及ぼす知識等の影響の分析にはさらなる分析・検討が必要と考えられた。

(2) 福島県産水産物の味覚情報の探索と可視化

【マアナゴの評価】

2021年5月から11月に購入したマアナゴ62個体（重量：153.8-2132.8g）の皮を除去した筋肉の遊離アミノ酸含有量を測定した。特にうま味に関連するアミノ酸としてグルタミン酸（Glu）、甘味に関連するアミノ酸としてグリシン（Gly）、アラニン（Ala）について定量した。水揚げ地での選別を考慮し、サイズ別に小型（ ≤ 250 g）、中型（ $250 < \text{重量} \leq 500$ g）、大型（ > 500 g）に分類して集計した。グルタミン酸含有量は小型サイズで 14.8 ± 6.61 mg/100g（ $n = 8$ ）、中型サイズで 12.1 ± 3.03 mg/100g（ $n = 19$ ）、大型サイズで 9.5 ± 3.84 mg/100g（ $n = 35$ ）であり、大型サイズの値は小型サイズと比較して有意に低かった（図(2)-1a）。グリシン含有量は小型サイズで 30.9 ± 11.5 mg/100g（ $n = 8$ ）、中型サイズで 32.2 ± 15.7 mg/100g（ $n = 19$ ）、大型サイズで 27.9 ± 14.6 mg/100g（ $n = 35$ ）で、群間に有意な差は認められなかった（図(2)-1b）。アラニン含有量は小型サイズで 14.0 ± 6.30 mg/100g（ $n = 8$ ）、中型サイズで 10.6 ± 2.56 mg/100

g (n = 19)、大型サイズで 10.2 ± 3.27 mg/100 g (n = 35) であり、大型サイズの値は小型サイズと比較して有意に低かった (図(2)-1c)。分析型官能評価の評価項目は東京家政大で用意した訓練されたパネリストによる試食と言葉出しを経て決定した。焼きアナゴについては肉厚感、うま味、脂の濃厚感、ジューシーさ、身のほぐれやすさ、弾力、小骨が挙げられた。アナゴ天ぷらについては肉厚感、生臭さ、香ばしさ、塩味、うま味、味の強さ、ふんわり感、弾力、ジューシーさ、小骨が挙げられた。煮アナゴについては肉厚感、生臭さ、香ばしさ、塩味、うま味、味の強さ、ふんわり感、弾力、ジューシーさ、小骨が挙げられた。上記の評価項目に対し、中型のマアナゴを基準とした評価を行なったところ、焼きアナゴでは小型個体の脂の濃厚感、ジューシーさが有意に低く ($p < 0.05$)、大型個体の肉厚感 ($p < 0.01$)、うま味、脂の濃厚感、ジューシーさ ($p < 0.001$) が有意に高かった (図(2)-2)。アナゴ天ぷらでは小型個体の生臭さが低い傾向にあり ($p < 0.1$)、味の強さが有意に高かった ($p < 0.05$)。大型個体は肉厚感 ($p < 0.001$)、うま味、香ばしさ ($p < 0.01$)、ジューシーさ ($p < 0.05$) が有意に高く、ふんわり感は高い傾向 ($p < 0.1$) が認められた (図(2)-3)。煮アナゴでは小型個体と中型個体に有意な差が認められなかった。大型個体では肉厚感、弾力 ($p < 0.05$)、うま味 ($p < 0.01$) が有意に高く、ジューシーさ、味の強さが高い傾向 ($p < 0.1$) が認められた (図(2)-4)。これらの官能評価結果は表(2)-1にまとめた。以上の結果から、小型のマアナゴは中型個体と比較して加熱調理後の味に大きな差はないが、生臭さが弱く、あっさりとした味が特徴であることが示された。大型のマアナゴは中型個体と比較して、加熱調理で肉厚感、うま味、ジューシーさを強く感じられることが特徴であることが示された。大型のマアナゴは常磐沖に特徴的な個体であるだけでなく (石田敏貝ら「常磐海域におけるマアナゴについて」福島水試研報第 11 号、2003)、それらは脂質含量が高く、DHA、EPA といった機能性脂肪酸が多いこと (令和 3 年度報告書参照)、調理後の味において中型個体と異なる特徴を有することは、福島県産マアナゴの魅力を発信するのに有用な情報であると言える。

【カレイ類の味覚情報の可視化】

官能評価は図(2)-5に示すほぐし身を 6 人のパネリストに提供し試験した。6 人のパネリストによる分析型官能評価の結果の平均を表(2)-2に示した。本結果に対して主成分分析を行ったところ、主成分 1 が固有値 3.28、寄与率 82.07%、主成分 2 が固有値 0.39、寄与率 9.78%であった (表(2)-3)。主成分負荷量は表(2)-4に示す通りであった。各試験品の官能評価結果の平均を各主成分の値に換算した主成分得点を 2 次元にプロットし、テイストマップを作成した (図(2)-6)。主成分負荷量から主成分 1 (縦軸) は味の濃さと解釈した。主成分 2 (横軸) は固有値、寄与率が低いため明確な解釈はできないが、正方向に脂のり、コクが強く、負方向に甘味、旨味が強いことが挙げられた (図(2)-7)。テイストマップから、マガレイは季節によって味が異なること、刺身で美味とされるカレイが固まっていること等が明らかになった。

(3) 流通調査の結果

カレイ類は関東の量販店においてほぼ常に取り扱いがあり、仕入れ形態はラウンド、販売形態は切り身であり、歩留まりが悪く調理加工にも時間がかかると回答された。したがって、カレイ類は定番品だが加工コストが高いことが課題となり、仕入価格の低さが産地ニーズになると考えられた。令和 3 年度の文献レビューでは、量販店において天然魚の取扱いが全体として一層困難

となっている一方、スポット品（大量漁獲され浜値が安い天然魚）に対してはニーズがあることを指摘したが、これを裏付ける調査結果であったと言える。したがって、水揚に関する情報を消費地の流通業者に積極的に提供することが販路拡大に有効という考察が支持された。

また、本年度の調査結果では、キンメダイが関東の量販店において時々取り扱われると回答された。つまり、キンメダイのような高級魚も量販店においてニーズがあることが明らかとなった。小売店同士の競争激化を背景に、ほとんどの客が経由する鮮魚部門の魅力改善は来店客の経験価値を高める施策のひとつとなっている（令和3年度のレビューの結果）。キンメダイのような見栄えがよく売場の魅力向上につながる魚種を量販店に提案することも、販路拡大に有効と考えられる。

3. 今後の課題

(1) 消費者調査

これまで生鮮水産物の商品を分析対象に調査を実施してきた。しかしながら、福島県産水産物を用いた加工品についても研究ニーズがある。そのため、加工品を分析対象とした調査の実施が今後の課題である。また、令和4年度に収集したALPS処理水等の知識と福島県産水産物の消費者評価の関係に関するデータについては、引き続き分析の改善を進める必要がある。

(2) 福島県産水産物の味覚情報の探索と可視化

福島県産マアナゴについてサイズ（小、中、大）と調理法（焼きアナゴ、アナゴ天ぷら、煮アナゴ）の組み合わせによる官能評価を行ったことで、それぞれのサイズの加熱調理後の客観的な味の特徴が明らかになった。一方で実際の消費者の嗜好性評価はできていない。福島県産マアナゴを好む属性を明らかにするためには、小型もしくは中型個体と福島県産マアナゴに特徴的な大型個体を用いて各種調理法とサイズの組み合わせによる嗜好型官能評価を実施する必要がある。また、今年度の研究で食品を販売するのに必要な性質としての嗜好性（味）に関する情報を得ることができた。福島県産マアナゴの競争力をさらに強化するには嗜好性に加えて健康機能性や簡便性に関する研究が必要である。健康機能性についてはDHA、EPAに関する情報を既に得ているが、エキス成分や微量元素を含む栄養素に関する評価を行い、消費者にとって安全で、美味しく、体に良いマアナゴであることを発信できるように研究を進める必要がある。

福島県産のカレイ類については水揚げの多様性を訴求力とした美味しさの発信が可能であるテイストマップを作成した。テイストマップは商品の味の特徴の差異を直感的に理解できるため、味を知りたいという大多数の消費者に対して有効な情報提示方法である。一方で、カレイ類に求められる「食感が柔らかい」（図(1)-7）という要素はテイストマップに含まれない。今回の分析型官能評価で食感に関するキーワードを選択式で定性的にデータを取得しているため、今後解析を実施することで各種カレイの味と食感の特徴を消費者に提示できるようにする必要がある。また、カレイ類の成分評価を実施することで、味の違いの根拠となる成分を同定することが今後の課題である。

図表

(1) の図表

表(1)-1 選択実験の属性と水準

属性	水準
価格 (円/100g)	500/600/700/800
レシピラベル	有り/無し
アナゴの個体サイズ	大型/小型

表(1)-2 変数とコーディングの説明。

変数	説明
価格	500/600/700/800(円/200g)
レシピラベル	レシピラベルの有無(レシピあれば1、なければ0)
大型サイズ	アナゴの個体サイズ(大であれば1、小であれば0)
大型×情報1	情報1の提供後で、かつ、情報内容を正しく理解していた場合1、そうでなければ0。 情報1:海流の影響でアナゴが大きく育つ。大きいアナゴは2倍 脂が乗っている。
大型×情報1	情報2の提供後で、かつ、情報内容を正しく理解していた場合1、そうでなければ0。 情報2:海流の影響でアナゴが大きく育つ。大きいアナゴは2倍 脂質含量が多い。
大型×情報1	情報3の提供後で、かつ、情報内容を正しく理解していた場合1、そうでなければ0。 情報3:分析の結果、大きいアナゴは2倍 脂が乗っている。
大型×情報1	情報4の提供後で、かつ、情報内容を正しく理解していた場合1、そうでなければ0。 情報4:分析の結果、大きいアナゴは2倍 脂質含量が多い。
年齢	年齢階層。20s=1, 30s=2, ..., 80s=7
女性	女性ならば1、そうでなければ0
世帯員数	家庭の構成員数
収入	世帯収入。200万円未満=100, 200万円以上~400万円未満=300, 400万円以上~600万円未満=500, 600万円以上~800万円未満=700, 800万円以上~1,000万円未満=900, 1,000万円以上~1,500万円未満=1250, 1,500万円以上=1750
魚を買う頻度	魚の購入頻度。ほぼ毎日=6, 週に2,3回=5, 週に1回=4, 2,3週に1回=3, 月に1回=2, 月に1回未満=1
アナゴの食経験	アナゴ(穴子)をこれまでに食べたことがあれば1、そうでなければ0
アナゴの調理経験	煮穴子を調理した経験があれば1、そうでなければ0
アナゴの調理意欲	アナゴを調理した経験がなく、煮穴子を調理してみたいのであれば1、そうでなければ0
アナゴの脂乗りを重視	アナゴの品質の好みとして脂の乗りを選択すれば1、そうでなければ0
流通業者への信頼	水産物の品質に関する情報源としての「スーパーなどの小売業者」への信頼度。信頼できる=5、やや信頼できる=4、どちらともいえない=3、あまり信頼できない=2、信頼できない=1
研究機関への信頼	水産物の品質に関する情報源としての「国や都道府県などの公的な研究機関」への信頼度。信頼できる=5、やや信頼できる=4、どちらともいえない=3、あまり信頼できない=2、信頼できない=1
熟慮性	熟慮性指標に関する3つの質問の正答数。

表(1)-3 潜在クラスロジットモデルの推定結果

変数	推定値			
	Class A	Class B	Class C	Class D
定数項	2.746***	1.578***	2.827***	9.452***
価格	-0.007***	-0.002***	-0.002***	-0.009***
レシピアベル	0.503***	3.631***	0.209***	0.148**
大型サイズ	0.230**	0.007	0.922***	-0.909***
大型×情報1	2.448	137.830	1.498***	-0.025
大型×情報2	4.408*	249.967	1.487***	-0.271
大型×情報3	2.176	187.496	2.096***	0.219
大型×情報4	0.697	99.887	2.496***	-0.043
定数項		-3.710***	-1.334**	-1.420***
年齢		0.017***	0.002	-0.003
女性		-0.176	-0.680***	-0.600***
世帯員数		-0.119	-0.081	-0.043
収入		0.000	0.000**	0.000**
魚を買う頻度		0.069	0.223***	0.082
アナゴの食経験		0.607	0.324	0.545**
アナゴの調理経験		-0.130	1.035**	0.782*
アナゴの調理意欲		0.306	0.143	0.078
アナゴの脂乗りを重視		0.066	0.102	0.153
流通業者への信頼		0.341**	0.101	0.138
研究機関への信頼		0.150	0.209**	0.188**
熟慮性指数		-0.228*	-0.164*	-0.052
クラス割当確率	0.229	0.101	0.376	0.294
サンプル回答者数	1733			
サンプル回答数	13864			
AIC	21566.46			
BIC	22101.59			

***: 1%水準、**:5%水準、*:10%水準

スーパーマーケットの鮮魚売場で生（なま）のマアナゴ（一般的なあなご（穴子）の開き）の開きが売られていたら、どれを購入しますか、あるいは購入しませんか。

選択肢	①	②	③
見た目		 <p>煮穴子におすすめ 【レシピ】 ① 皮面に熱湯をかけ、包丁の背でぬめりをこそげ落とす。 ② 鍋に★調味料を入れて中火で煮立たせる。火を止めアナゴを皮目を下にして加える。 ③ 落としふたをして弱火で15分煮る。</p> <p>★調味料 酒 大きじ1 みりん 大きじ1 砂糖 大きじ1 しょうゆ 大きじ1 水 2.0.0cc</p>	<p>どちらも購入しない</p>
商品タイプ	小サイズ2尾	小サイズ2尾	
レシピ	なし	あり	
価格(200g/パック)	700円(税込)	800円(税込)	

図(1)-1 選択実験の画面例

次の文章は水産物流通業者に対するインタビューの内容です。

「福島県の沿岸では暖流と寒流がぶつかるため、プランクトンが豊富。それをエサにする小魚も多く、よい漁場となっています。その恩恵を受けて、アナゴが大きく育つのです。大きいアナゴは餌をたっぷり食べているので、小さいアナゴに比べて2倍も脂が乗っています。」



情報1:脂乗りが良い、情報2:脂質含量が多い

次の文章は公的な研究機関から提供された情報です。

「福島県の沿岸で漁獲されたマアナゴの脂質含量を分析しました。その結果、大型のマアナゴでは小型のマアナゴに比べて脂の乗りが約2倍であることが明らかとなりました(図)。」

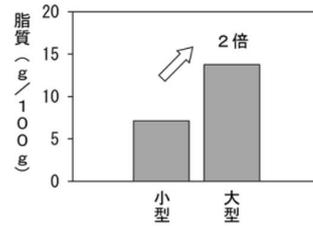
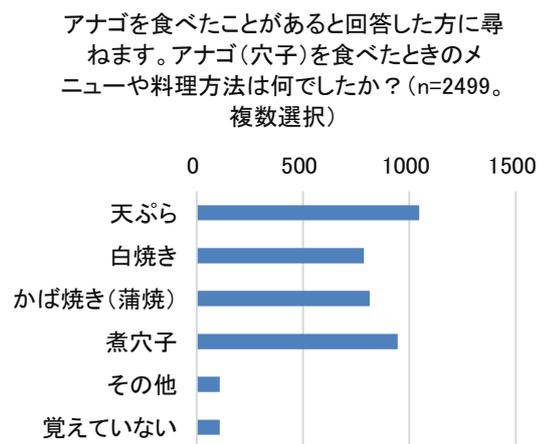
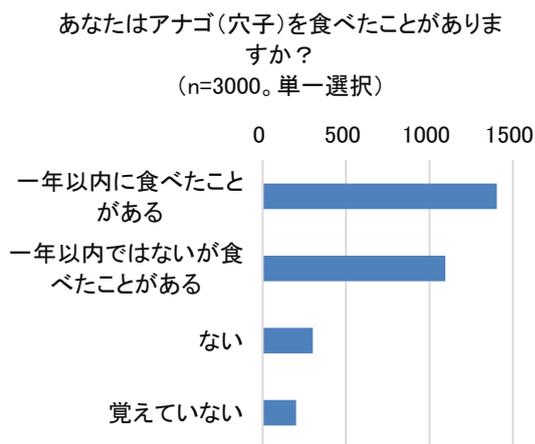


図 マアナゴの脂質含量のサイズ別比較

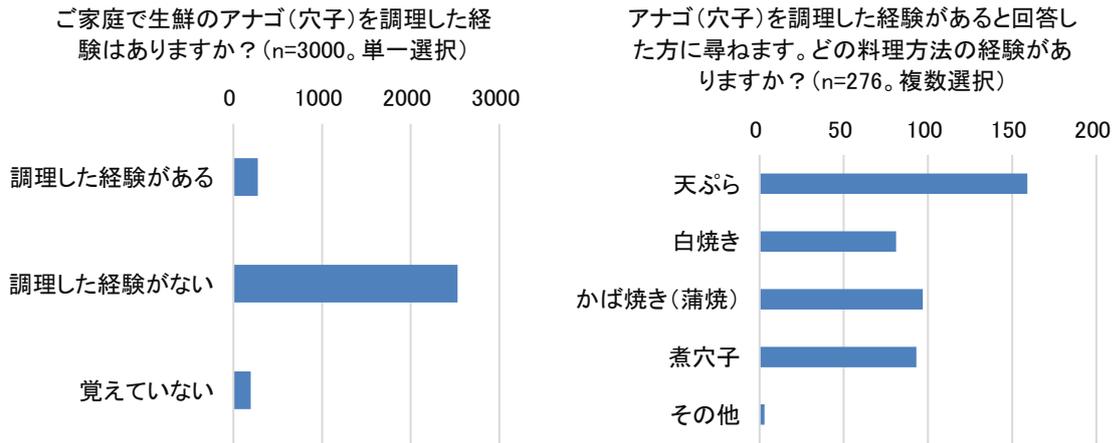
情報3:脂乗りが良い、情報4:脂質含量が多い

図(1)-2 情報提供の内容

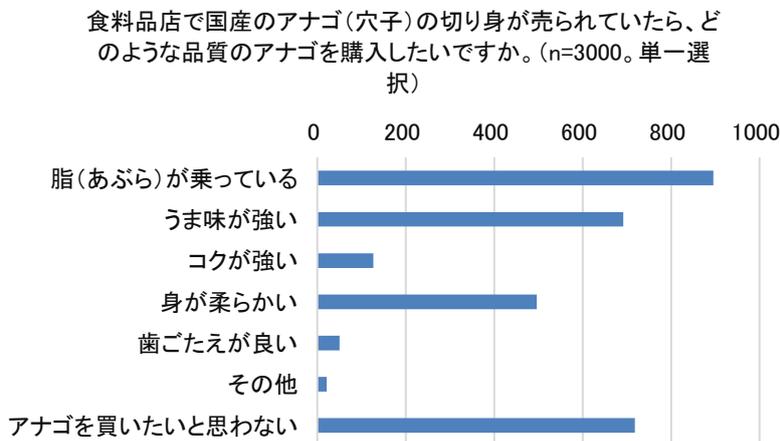
注：情報1は生育環境に関するストーリー情報で「脂乗りが良い」という表現、情報2は生育環境に関するストーリー情報で「脂質含量が多い」という表現、情報3は成分分析の結果に関する科学的情報で「脂乗りが良い」という表現、成分分析の結果に関する科学的情報で「脂質含量が多い」という表現



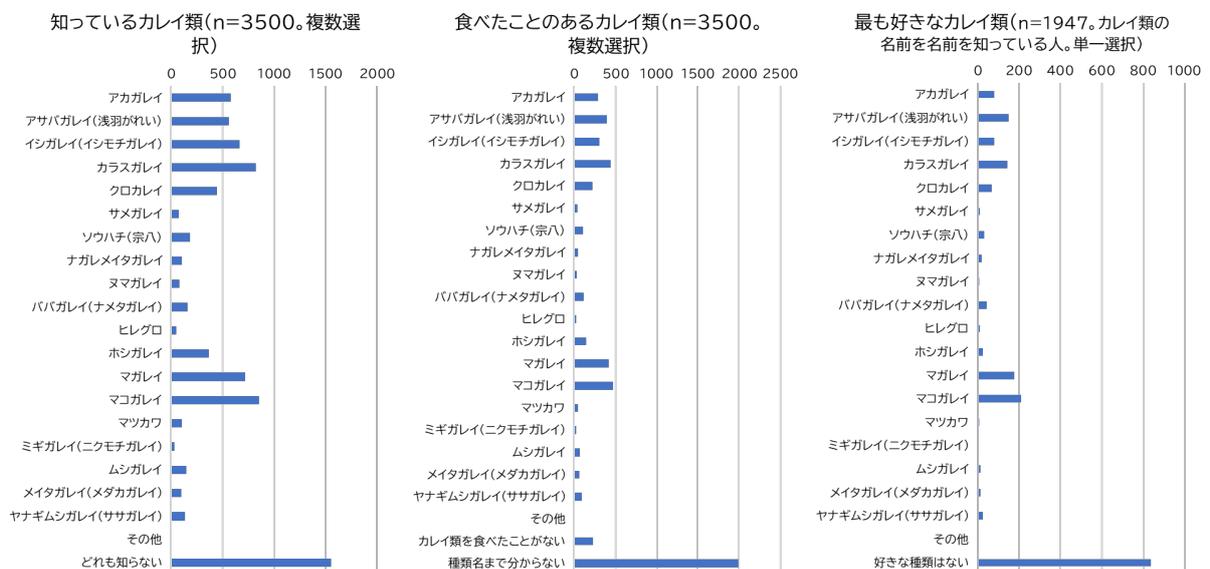
図(1)-3 アナゴの食経験に関する回答の集計結果



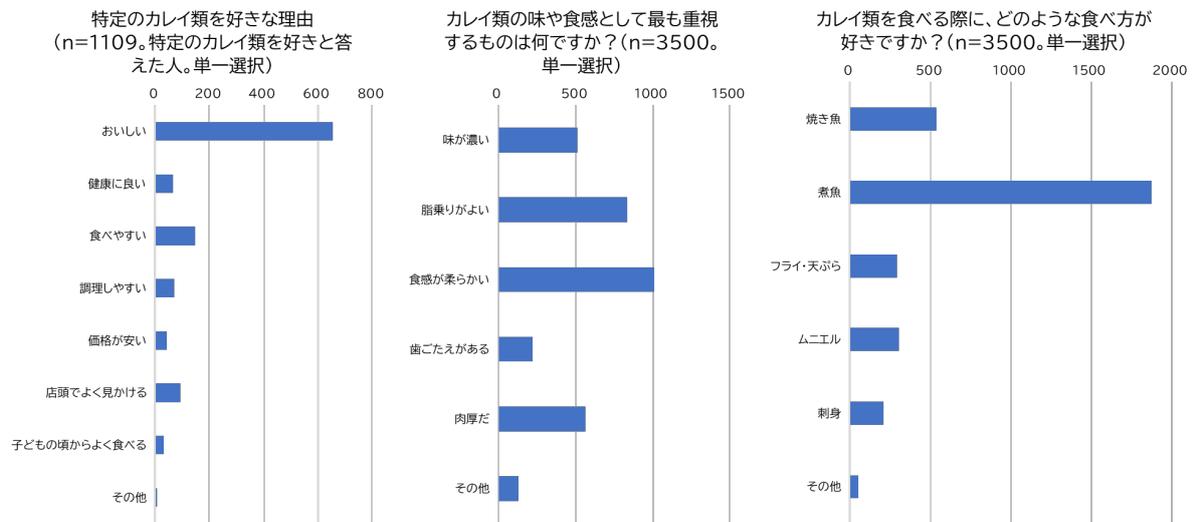
図(1)-4 アナゴの調理経験に関する回答の集計結果



図(1)-5 消費者が重視するアナゴの品質項目の集計結果



図(1)-6 カレイ類魚種の認知度、食経験、好みに関する回答結果



図(1)-7 特定のカレイ類を好きな理由、重視する味や食感、好きな食べ方に関する回答結果

(2) の図表

表(2)-1：カレイ類の分析型官能評価結果の平均値

	焼きアナゴ		アナゴ天ぷら		煮アナゴ	
	小	大	小	大	小	大
肉厚感		++		+++		+
うま味		+++		++		++
脂の濃厚感	-	+++	/	/	/	/
ジューシーさ	-	+++		+		(+)
身のほぐれやすさ			/	/	/	/
弾力						+
<hr/>						
小骨						
生臭さ (-)						
<hr/>						
香ばしさ	/	/		++		
塩味	/	/				
味の強さ	/	/	+			(+)
ふんわり感	/	/		(+)		

斜線部は評価なし。+++ $p < 0.001$, ++ $p < 0.01$, +/- $p < 0.05$, (+/-) $p < 0.1$, Dunnett's multiple comparisons test

表(2)-2：カレイ類の分析型官能評価結果の平均値

評価項目	基準品	ナガレメイタガレイ	マガレイ (11月)	マガレイ (1月)	マガレイ (6月)	ムシガレイ	ソウハチガレイ
甘味	0.0	0.7	0.0	0.3	1.0	-0.2	0.0
旨味	0.0	1.2	0.5	0.7	1.8	0.2	0.8
脂ののり	0.0	1.2	-0.5	0.8	0.3	-0.5	0.7
コク	0.0	1.0	0.8	0.3	1.5	-0.5	0.8
<hr/>							
評価項目	マコガレイ (2月)	マコガレイ (9月)	マコガレイ (ヌケマコ)	ナメタガレイ	イシガレイ	サメガレイ	メイタガレイ
甘味	0.7	-0.3	-1.2	0.7	-0.8	0.0	0.3
旨味	0.8	-0.2	-0.5	0.7	-0.2	0.8	0.5
脂ののり	0.5	-0.5	-0.3	0.3	-0.5	1.2	-0.2
コク	0.7	-0.3	-1.0	0.5	-0.2	1.3	0.0
<hr/>							
評価項目	ミギガレイ	アカガレイ	ヤナギムシガレイ	ヌマガレイ (宮城県産)	マツカワ (北海道産)	ホシガレイ (岩手県産)	ヒレグロ
甘味	0.8	-0.3	0.0	0.2	-0.3	0.0	0.5
旨味	1.2	0.2	-0.3	1.0	-0.2	-0.2	1.2
脂ののり	0.8	-0.7	-0.2	0.7	-1.0	-0.2	0.3
コク	1.0	-0.7	0.0	0.7	-0.3	-0.5	0.3

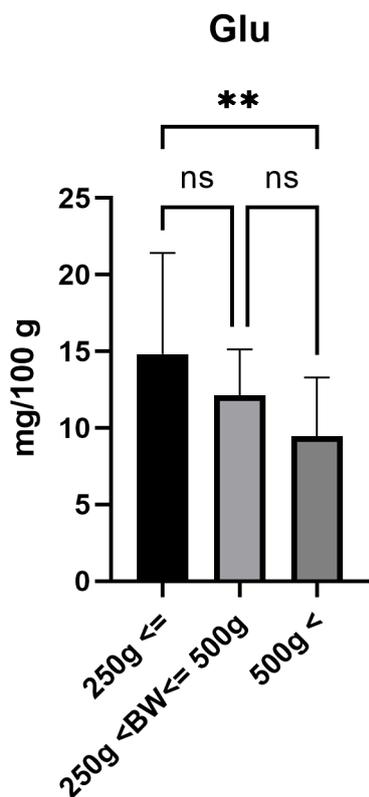
表(2)-3 : 各主成分における固有値と寄与率 (%)

主成分 No.	固有値	寄与率 (%)
1	3.28	82.07
2	0.39	9.78
3	0.22	5.40
4	0.11	2.75

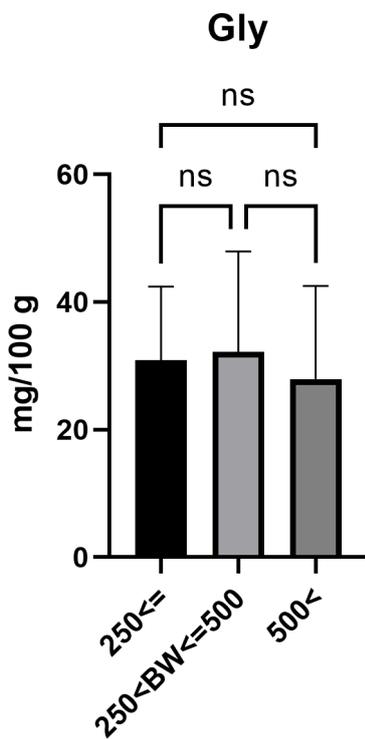
表(2)-4 : 各評価項目の主成分負荷量

評価項目	主成分 1	主成分 2
甘味	0.885	-0.382
旨味	0.950	-0.134
脂ののり	0.856	0.472
コク	0.930	0.066

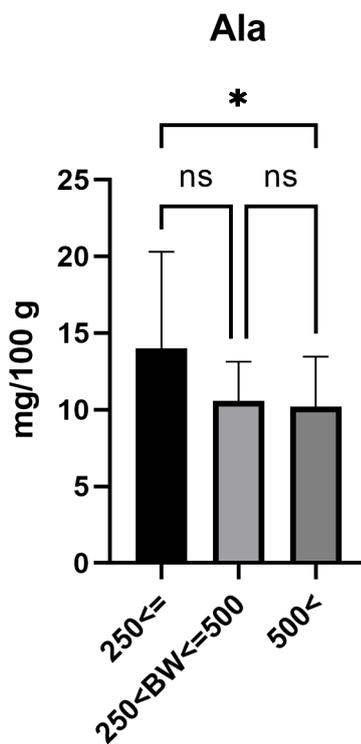
a



b

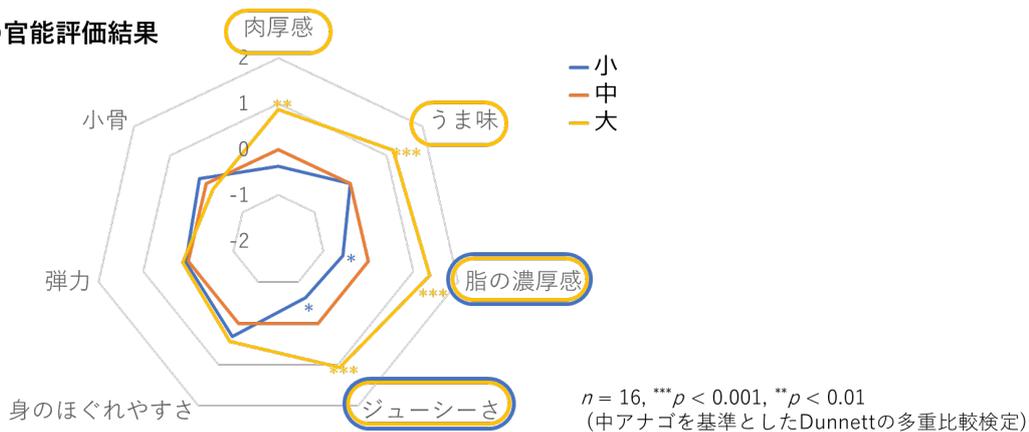


c



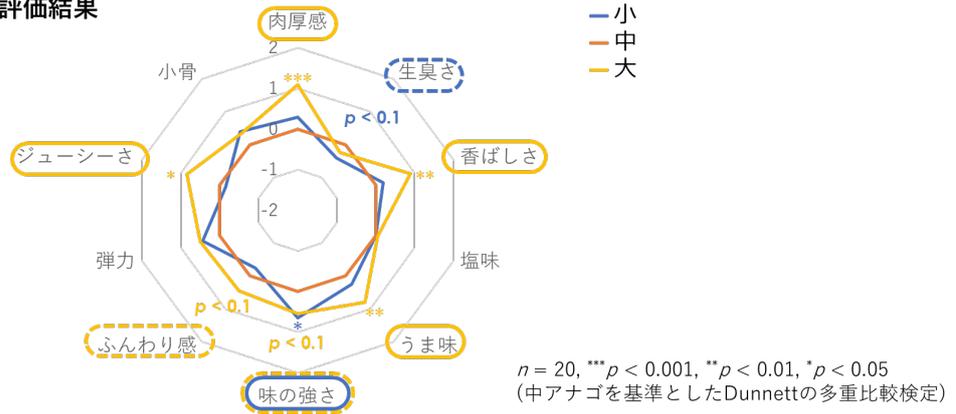
図(2)-1：各種呈味性アミノ酸のサイズ別含有量の比較 (mean ± SD, *: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, Tukey's multiple comparisons test)。

焼きアナゴの官能評価結果



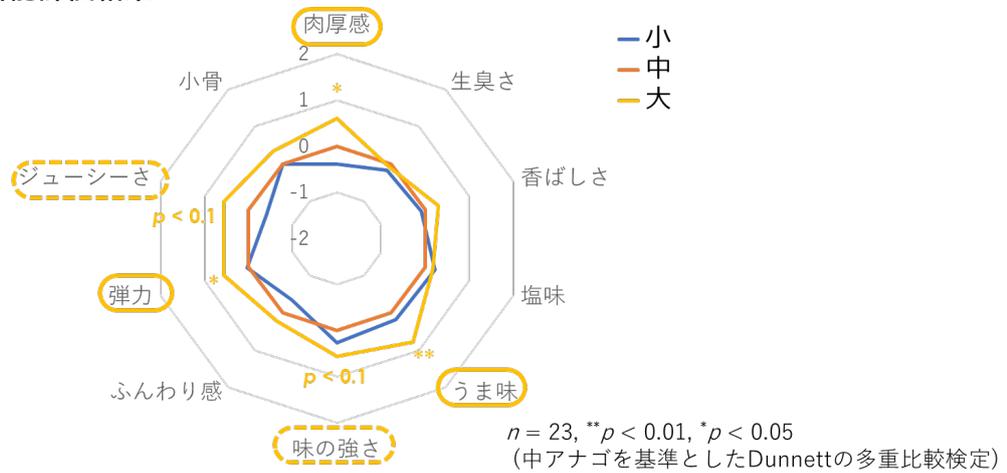
図(2)-2：焼きアナゴの官能評価結果

アナゴ天ぶらの官能評価結果



図(2)-3 : 焼きアナゴの官能評価結果

煮アナゴの官能評価結果

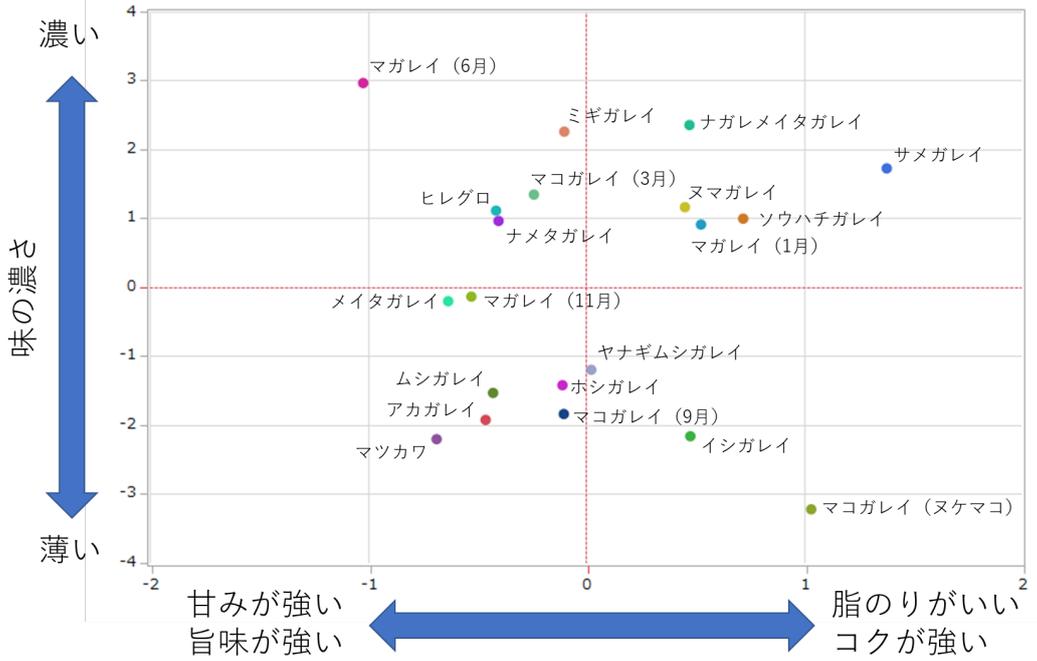


図(2)-4 : 煮アナゴの官能評価結果



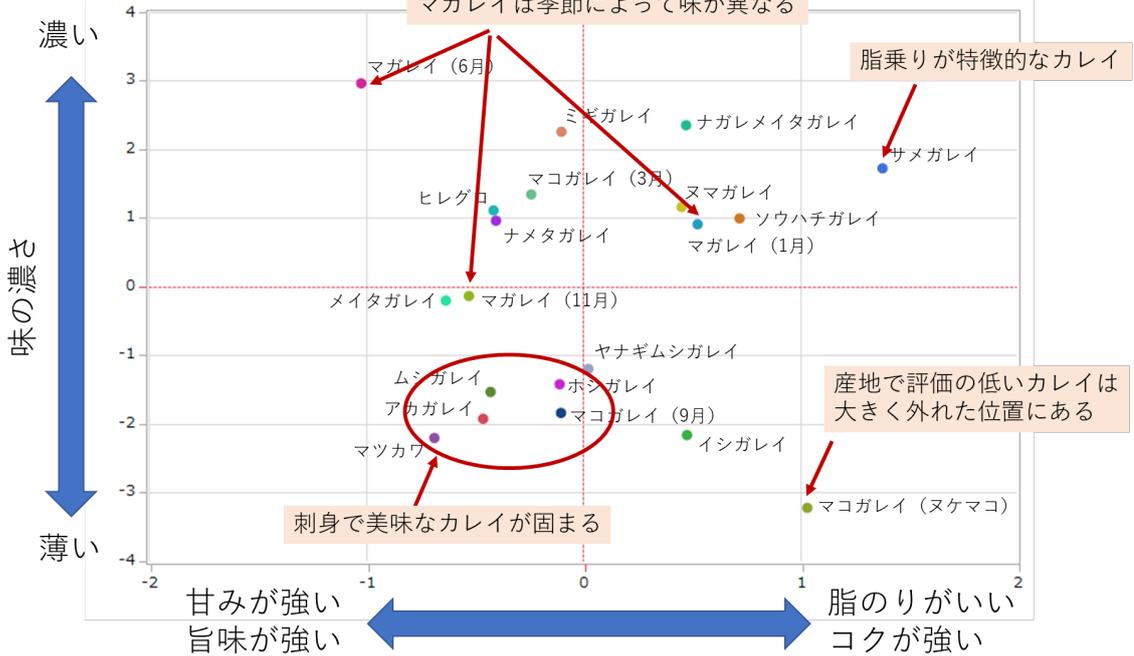
図(2)-5 : カレイ類の官能評価に用いた加熱済ほぐし身

カレー類のテイストマップ



図(2)-6 : カレー類のテイストマップ

カレー類のテイストマップ



図(2)-7 : カレー類のテイストマップに対する考察