

令和2年度
東京電力福島第一原子力発電所事故
対応の調査研究における主要成果

令和3年3月
(研)水産研究・教育機構



-目次-

0. はじめに

1. 福島県海域の海水の放射性セシウム濃度の状況
2. 海底土中の放射性セシウム濃度の時空間変動把握
3. 沿岸海底堆積物の沖合への輸送動態解明
4. 東電福島第一原発周辺海域における魚類の放射性セシウム濃度
5. 海底土中の間隙水とカレイ類の放射性セシウム濃度
6. 福島県沖および仙台湾における生態系内の放射性セシウムの移行
7. 海産魚類におけるストロンチウム-90濃度
8. 栃木県中禅寺湖に生息する魚類の放射性セシウム濃度
9. 内水面魚類に関する放射性物質の取り込みおよび排出過程に関する研究

0. はじめに

2011年3月に東京電力(株)福島第一原子力発電所(東電福島第一原発)から環境中に放出された放射性物質により、福島県やその近接水域に生息する水生生物が汚染されました。これまでに経験したことのない状況の中で、食品としての安全性が危惧されたことから、水産研究・教育機構(当時の水産総合研究センター)では、事故直後から水産物の放射能調査に取り組んできました。2011年4-6月期は福島県の水産物で基準値の100Bq/kg-wetを超過する割合は52.7%でしたが、2015年10-12月期以降では0.1%まで低下し、水産物の放射能汚染は大幅に改善してきたと言えます。

水産研究・教育機構では、水産庁をはじめとする関係機関と連携して科学的に十分なモニタリング体制をとってきていますが、一方で原発の現状や廃炉作業のトラブルなどが報道されるたびに不安が呼び起こされ、風評被害などによって東北の水産業の復興に大きな支障をきたしているのも事実です。

福島県漁業協同組合連合会は、事故直後に県下の沿岸および沖合漁業の操業を自粛することを決定し、現在も試験操業を除き漁業活動が自粛されています。2012年6月に3種を対象として開始された試験操業は、対象魚種、漁業種および操業海域を順調に拡大し、2017年3月に福島県下漁業協同組合長会において出荷制限魚種を除くすべての魚介類を対象とすることになりました。その後、2020年2月までに海産魚の出荷制限はすべて解除されました。こうした状況において、風評被害を払拭し活気ある東北の水産業を取り戻し発展させることが、日本の水産業のために急務となっています。

水産研究・教育機構では、震災直後から水産庁委託事業「放射性物質影響解明調査事業」(平成28年度で終了)及び復興交付金による「海洋生態系の放射性物質挙動調査事業」を実施しています。ここでは、令和2年度までに得られた主な成果をとりまとめて報告します。我々は、水産物の放射性物質濃度の動向の把握とともに、どのような経路を経て水産物が汚染され、また、その汚染が軽減されていくのかといった過程を科学的に明らかにすることにより、引き続き東北の水産業の復興・創生に貢献していきたいと考えています。

1. 福島県海域の海水の放射性セシウム濃度の状況

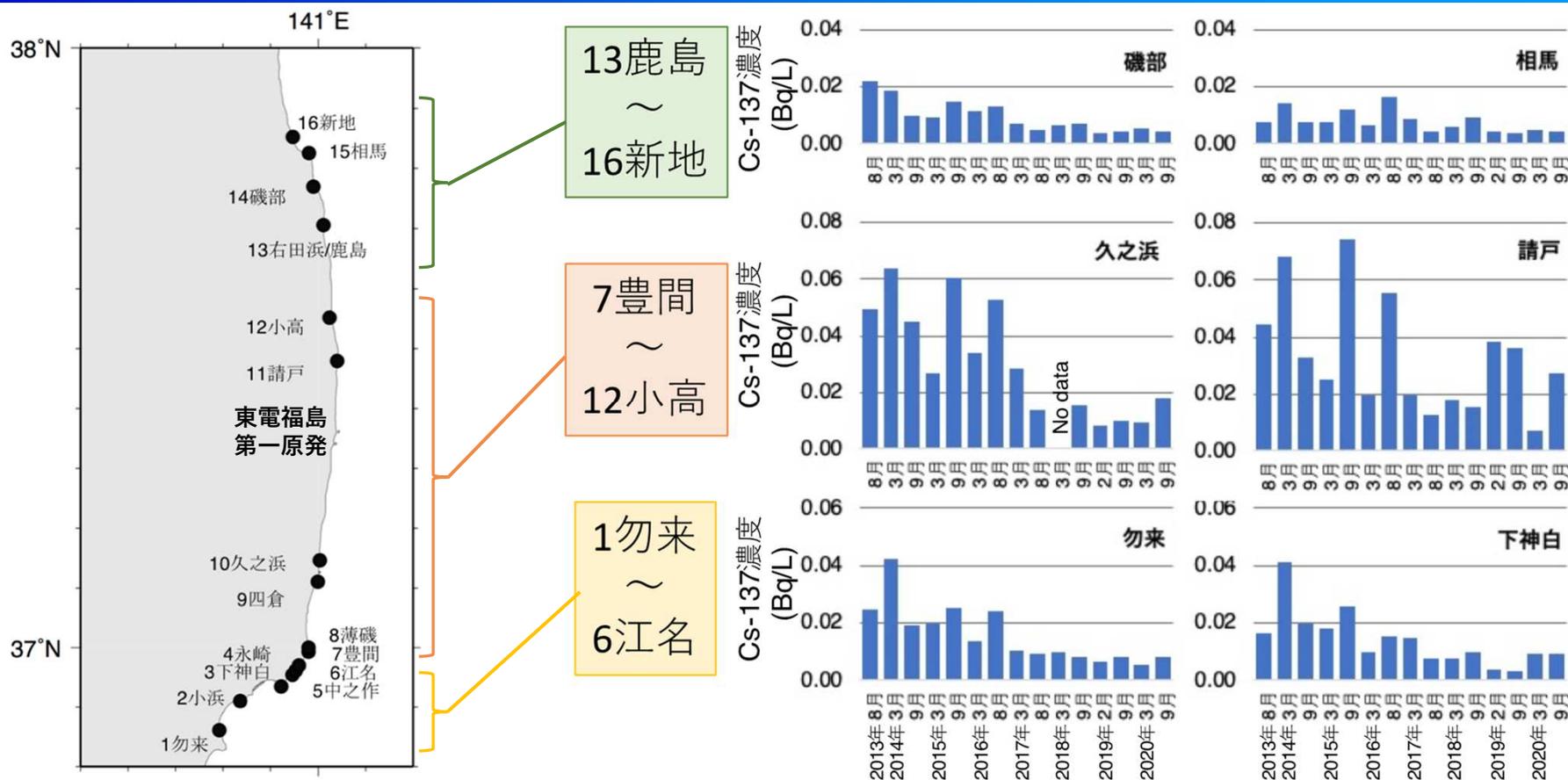


図1. 福島県極沿岸における海水の採取位置（全16地点）および代表的な地点における海水の放射性セシウム(Cs-137)濃度。

- ◇ 福島県の海岸線近傍における海水の放射性セシウム(Cs-137)濃度を継続調査しています（図1）。
- ◇ 調査は2013年9月から2020年9月までの期間、福島県の南部（勿来）から北部（新地）までの16地点において15回実施しました。
- ◇ 事故後数年の期間は原発の北側より南側で高濃度な傾向が見られましたが、データの蓄積により詳細な地理的分布が明らかとなってきました。
- ◇ 原発南側全域が高いわけではなく、勿来から江名では2014年3月*を除き、原発北側（鹿島～新地）と同程度の低濃度で推移しています。*2014年3月は爆弾低気圧の通過に伴い南下流が強化された影響であることが明らかとなっています。

2. 海底土中の放射性セシウム濃度の時空間変動把握

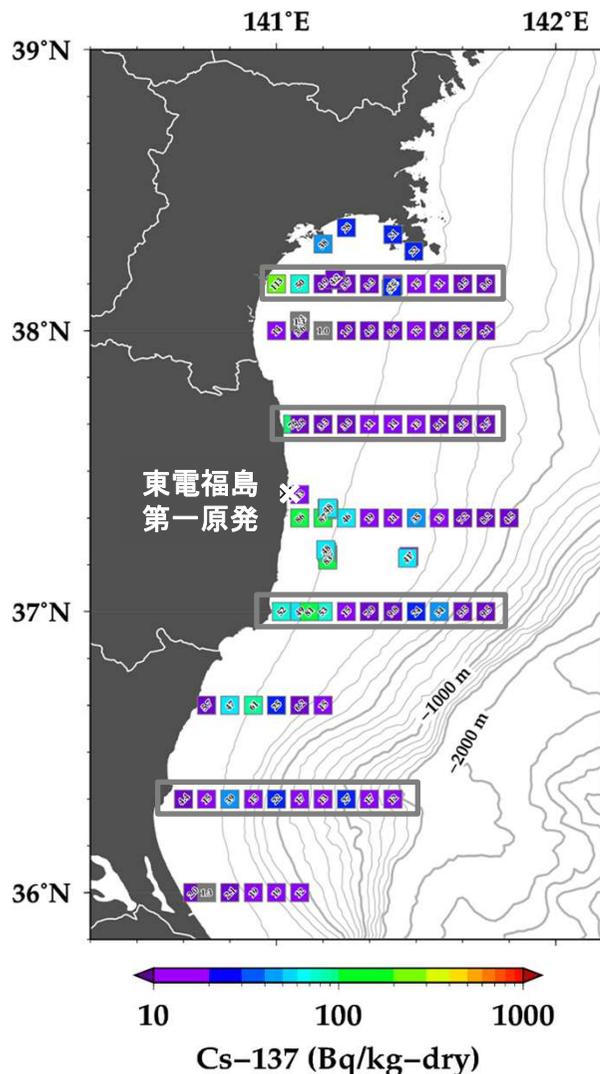


図1. 2019年(灰色で囲まれた領域)と2020年の海底土調査による海底土表層(0-1cm)中のCs-137濃度分布図。

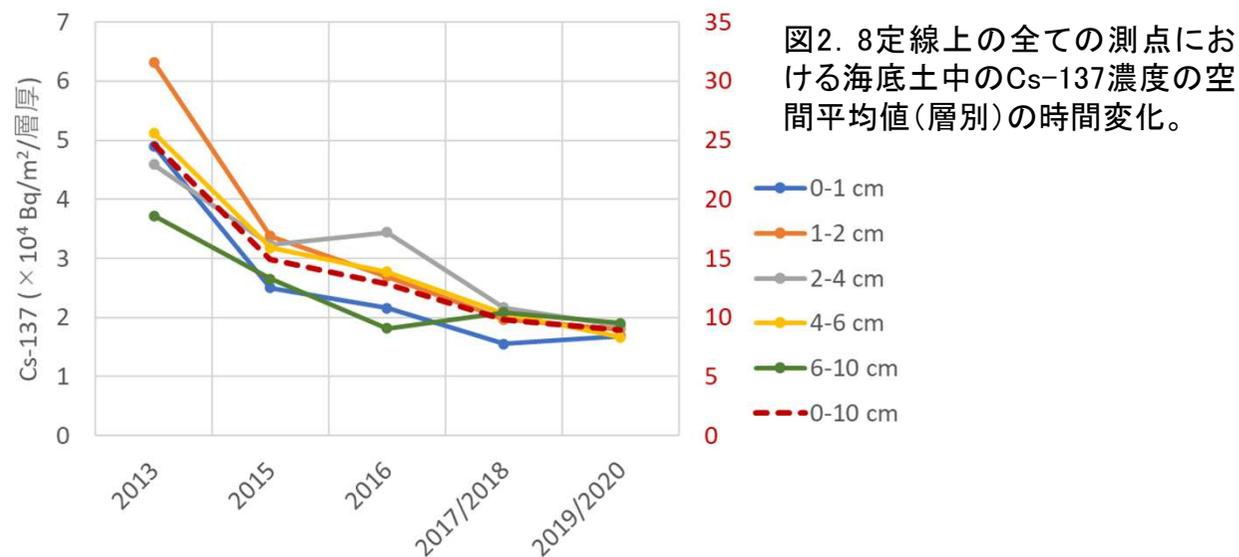


図2. 8定線上の全ての測点における海底土中のCs-137濃度の空間平均値(層別)の時間変化。

- ◇ 宮城、福島および茨城沖における経度5分間隔の4定線ほかで調査を行い、引き続き海底土中の放射性セシウム(Cs)濃度の経年変化を調べました。2020年の海底土表層(0-1cm)中の放射性Cs濃度は最大で86.5 Bq/kg-dryでした。また、沖合の多くの地点では10 Bq/kg-dry以下でした(図1)。
- ◇ 海底土中の放射性Cs量の水平平均値は、ほとんどの層で調査開始時より減少傾向であることを確認しましたが、下層(6-10 cm)における最近約5年間では増減傾向が不明瞭でした(図2)。調査領域の10 cmまでの深さの放射性Cs量は2013年から6割以上減少していました。
- ◇ 下層での平均放射性Cs量の停滞要因は、沿岸域では減少傾向の測点が多く見られた一方で、沖合域の下層では放射性Cs量が増加傾向にあることがあったためです。沿岸表層に存在していた放射性Csが海底土とともに沖合へ水平輸送され、さらに汚染の少ない新たな海底土が再堆積した可能性が示唆されます。

3. 沿岸海底堆積物の沖合への輸送動態解明

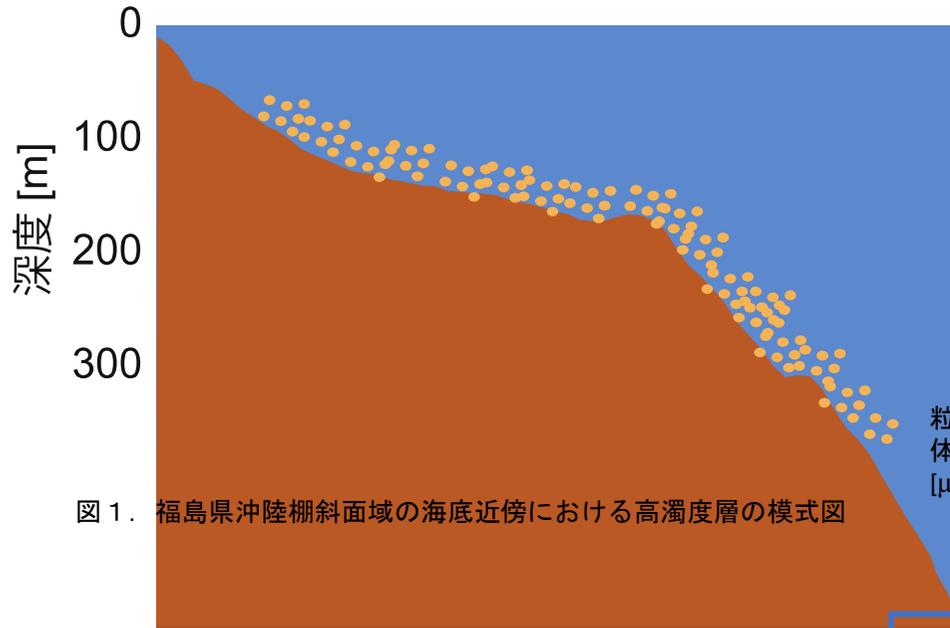


図1. 福島県沖陸棚斜面域の海底近傍における高濁度層の模式図

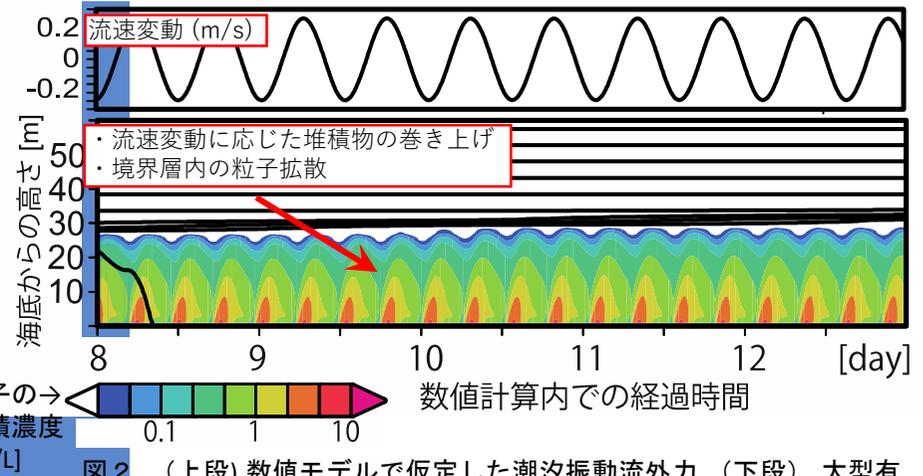


図2. (上段) 数値モデルで仮定した潮汐振動流外力 (下段) 大型有機物粒子 (比重1.4, 粒径100 μ m) の時間-深度変化の計算例。等値線は0.2 $^{\circ}$ C間隔の水温。

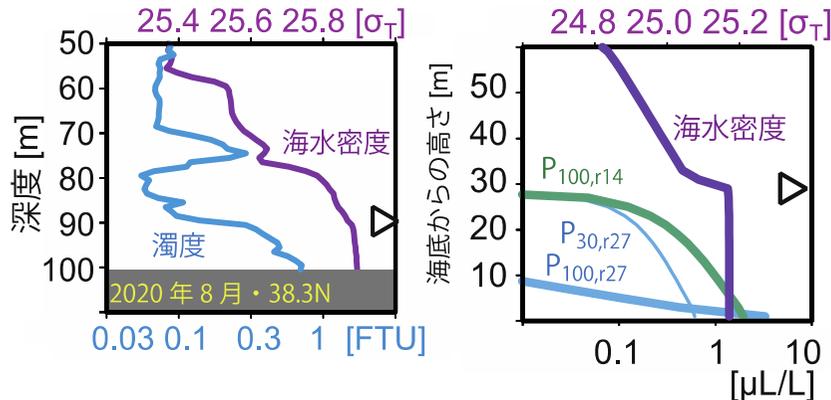


図3. (左) 観測された海水密度および濁度の鉛直分布の例。(右) 計算された海水密度、大型有機物粒子 ($P_{100,r14}$)、大型土粒子 ($P_{100,r27}$)、および小型土粒子 ($P_{30,r27}$) の鉛直分布。△は海底境界層の上端。

- ◇ これまでの現地調査により陸棚斜面域の海底近傍に海水の密度が一樣で高濁度な海底境界層の存在が確認されました (図1)。
- ◇ 海底境界層に存在する粒子は海底から再懸濁された粒子であると考えられ、海底堆積物に含まれる放射性セシウムを輸送していることが想定されます。
- ◇ 潮汐流を外力条件とした数値モデル実験によって海底境界層や高濁度層の形成メカニズムを考察しました (図2)。
- ◇ 数値モデルでは海底境界層が数十mの厚さまで発達し層内には小型土粒子や大型有機物粒子が境界層内に広く分布しました (図3右)。
- ◇ 一方で大型土粒子は境界層内で海底からの高さとともに急速に減少する結果が得られました (図3右)。
- ◇ 現地調査結果 (図3左の濁度) はこのような様々な粒子濃度分布の組み合わせで構成されていると考えられます。

4. 東電福島第一原発周辺海域における魚類の放射性セシウム濃度

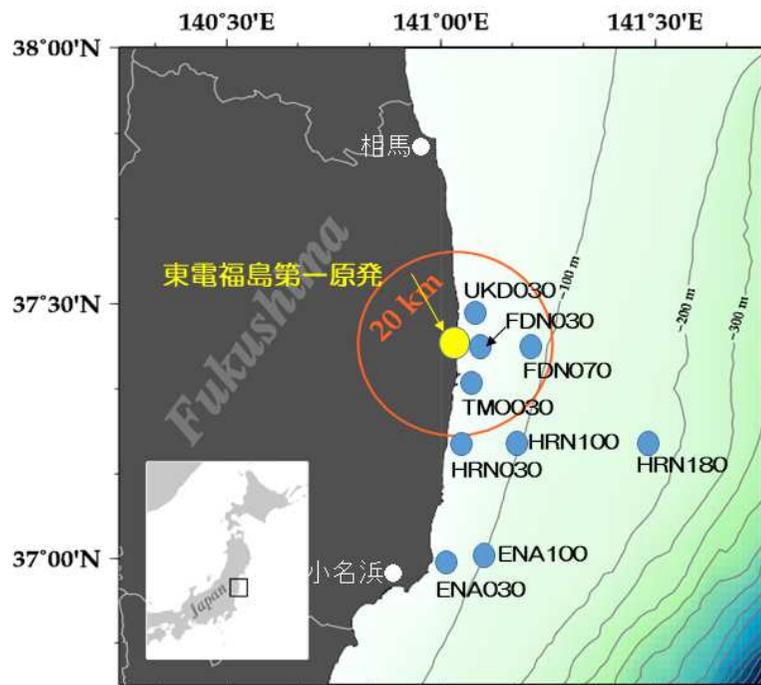


図1. 福島県沖の調査地点。FDN030はスライド1-5で報告する海底土の採取地点。

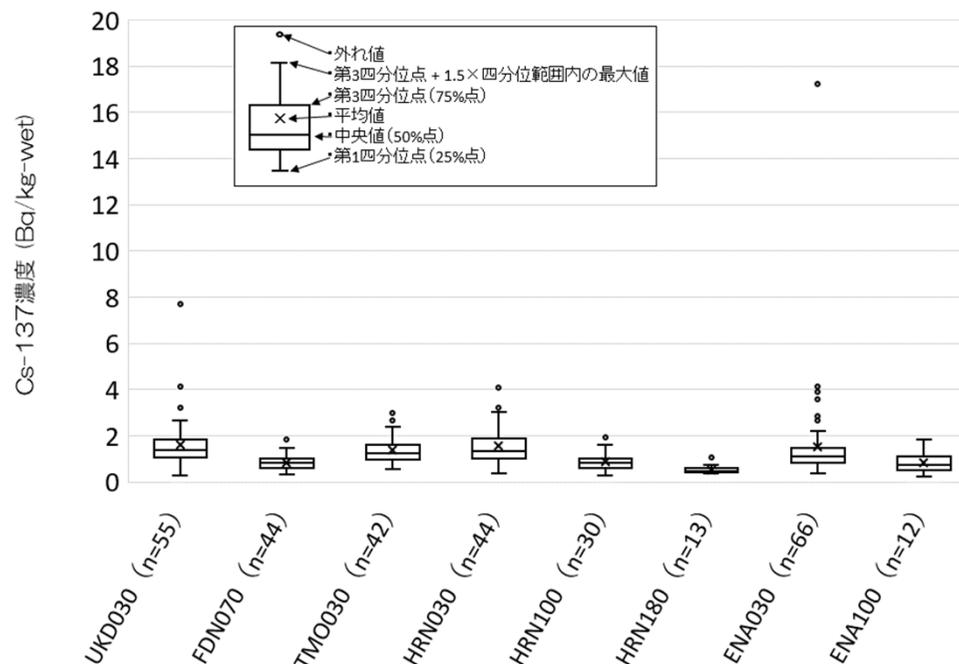


図2. 福島県沖で採取した底魚筋肉部位のCs-137濃度海域間比較

◇ 2020年7月から11月にかけて、福島県沖の8地点で海産生物調査を実施し(図1)、採取した魚類の放射性セシウム濃度(Cs-134 + Cs-137)を測定しました。筋肉部位試料で最も高い濃度が検出されたのは、2020年7月19日に江名沖30 m域(ENA030)で採取したカスザメの18.1 Bq/kg-wetでした。

◇ 福島県沖の各調査地点で採取した底魚(マコガレイ、ヒラメ、アイナメ、シロメバルなど)の筋肉部位に含まれるCs-137濃度を図2に示します。算術平均が最も高い値を示したのは、広野沖水深 30 m域(HRN030)の1.54 Bq/kg-wetでした。東電福島第一原発沖水深70 m域(FDN070)、広野沖水深100 m域(HRN100)、広野沖水深180 m域(HRN180)、江名沖100 m域(ENA100)の4地点では、1.00 Bq/kg-wetを下回る濃度水準でした。

5. 海底土中の間隙水とカレイ類の放射性セシウム濃度

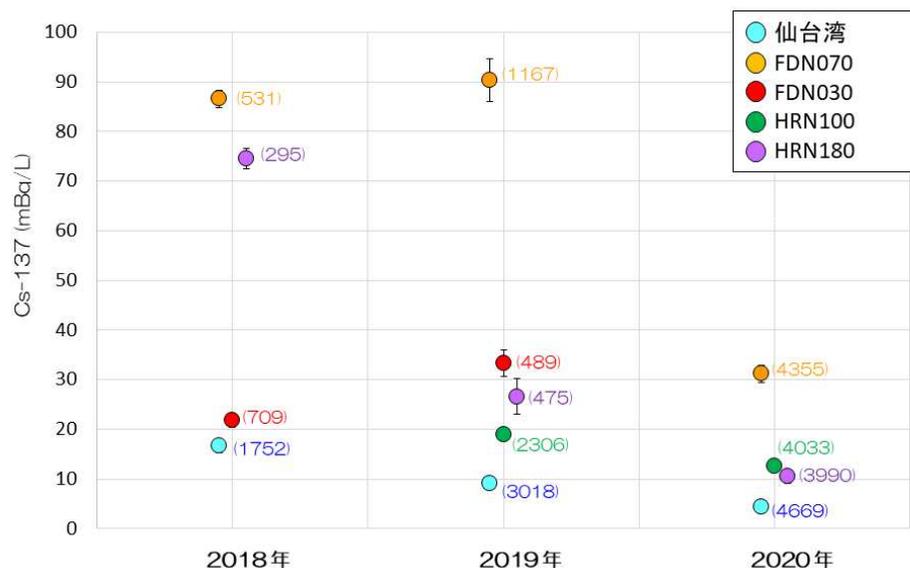


図1. 間隙水中に含まれるCs-137濃度と分配係数の推移。
エラーバーは測定誤差、()内の数字は分配係数*を示す。

*分配係数 = (海底土のCs-137濃度/間隙水のCs-137濃度)

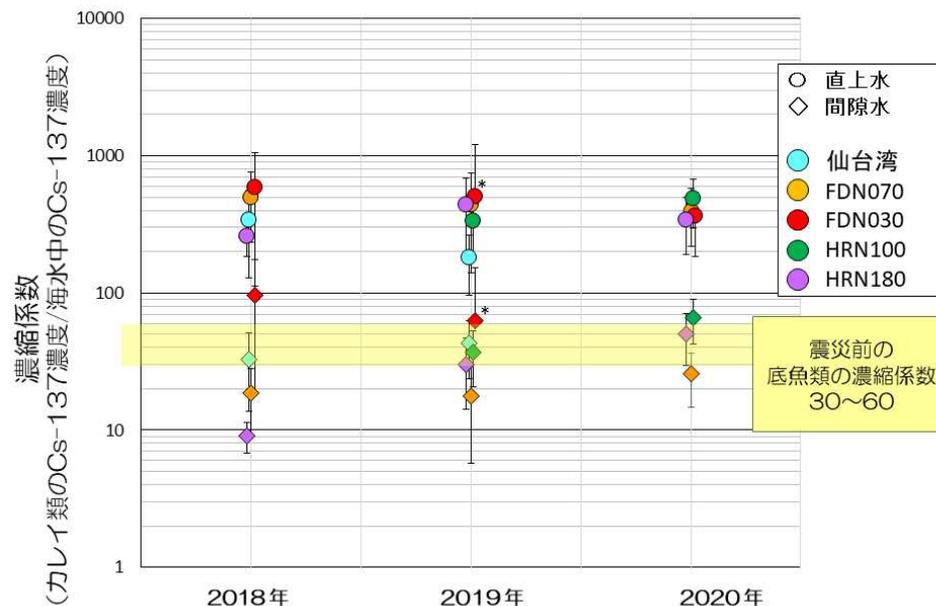


図2. 海底の直上水と間隙水に対するカレイ類濃縮係数の推移。
エラーバーは誤差伝播を考慮した誤差範囲を示す。

*FDN030(2019年)の誤差は直上水が±710、間隙水が±88.5でY軸の最小値を下回るため、負の方向の誤差範囲を表示しない

◇ 2018年から2020年にかけて東電福島第一原発沖30 m域 (FDN030) および70 m域 (FDN070)、広野沖100 m域 (HRN100) および180 m域 (HRN180)、仙台湾で採取した海底土(0-5 cm層)中に含まれる間隙水のCs-137濃度と分配係数の推移を調べました(図1、調査地点の詳細は1-4の図1を参照)。その結果、2020年に採取した間隙水のCs-137濃度は、欠測のFDN030を除く各地点で2019年から低下し、分配係数は2018年以降の最高値を示しました。このことは、海底土から間隙水に溶出するCs-137の量が減りつつあることを示唆しています。

◇ 上述した5地点における直上水と間隙水に対するカレイ類濃縮係数の推移を調べた結果(図2)、直上水の濃縮係数は間隙水よりも一桁高い水準で推移していました。また、2020年の間隙水に対するカレイ類濃縮係数は、概ね震災前の底魚類の濃縮係数(30~60)と同等の水準になりつつあることが分かりました。このことは、底魚類のCs-137濃度は間隙水中に含まれるCs-137に影響を受けていることを示唆しています。

6. 福島県沖および仙台湾における生態系内の放射性セシウムの移行

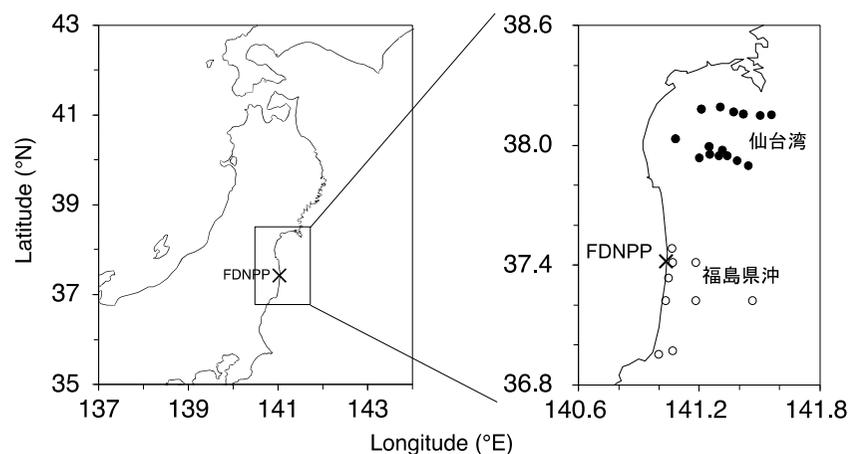


図1. 福島県沖および仙台湾の調査点
図内のFDNPPは、東電福島第一原発を表す。

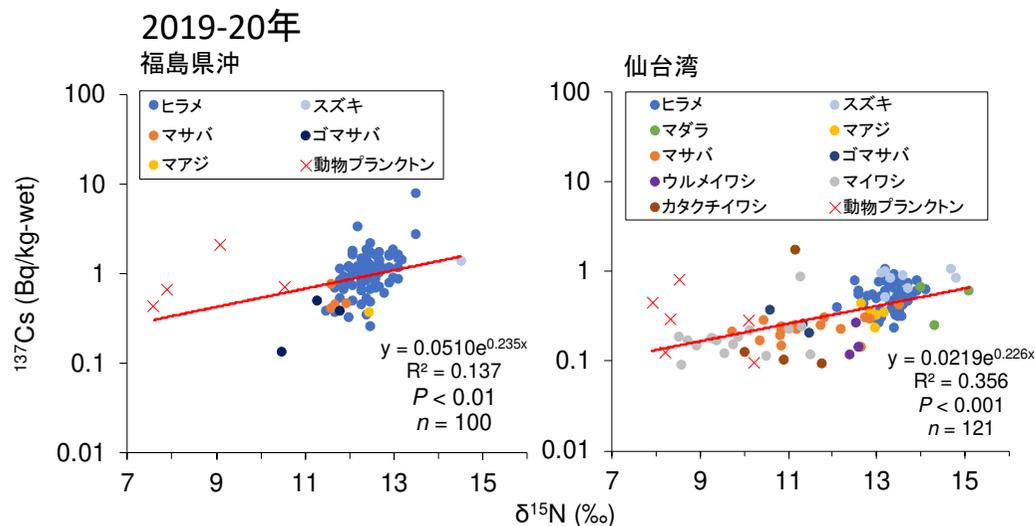


図2. 福島県沖および仙台湾における窒素安定同位体比とCs-137濃度との関係

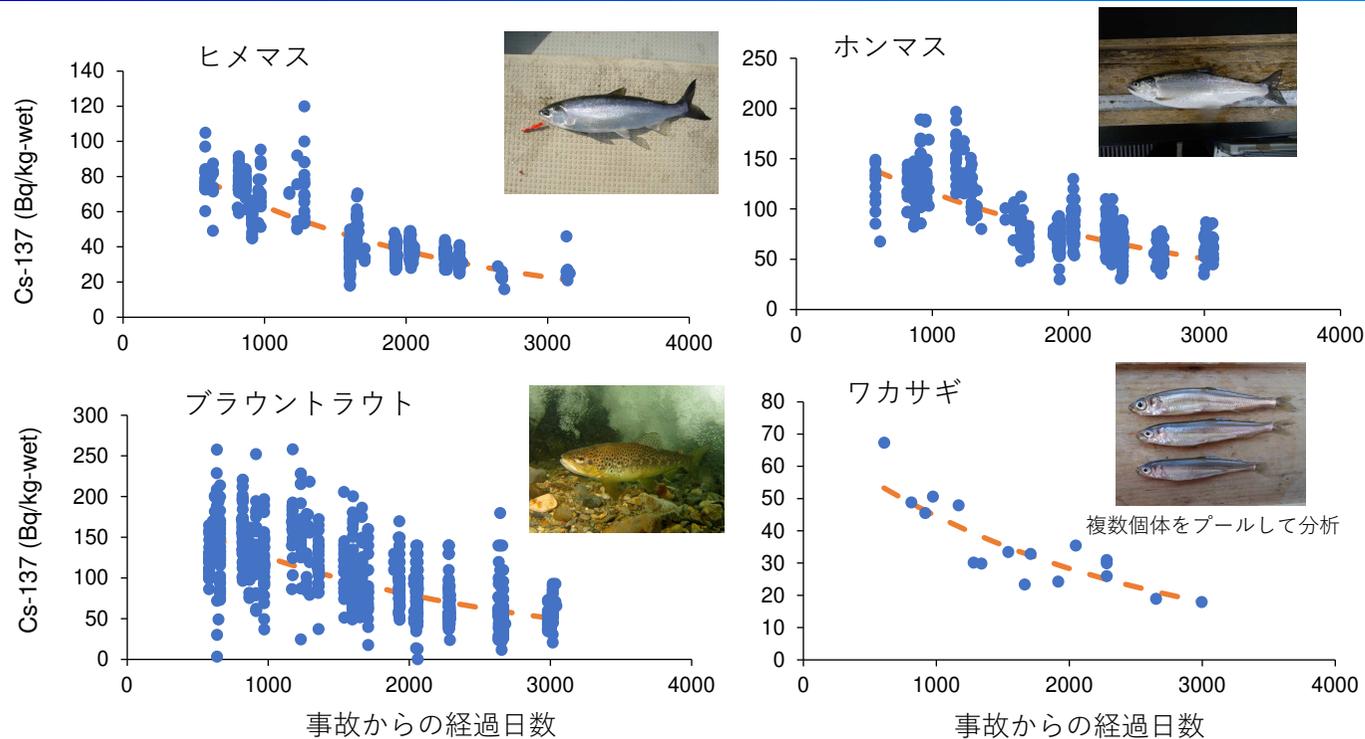
◇ 福島県沖と仙台湾に設定した調査点（水深30-120m 図1）で、2011年11月以降、調査船や底びき網漁船等で採集した魚類および餌生物の放射性セシウム（Cs-137）濃度を調べています。

◇ 同時に窒素安定同位体比（ $\delta^{15}\text{N}$ ）も調べることで漁獲対象となる魚類の栄養段階を推定し、食物連鎖による放射性物質の濃度変化の把握も行っています。

◇ これまでの調査の結果、両海域の餌生物と魚類における $\delta^{15}\text{N}$ とCs-137濃度には、有意な正の相関が見られました（図2）。この結果は、餌生物のCs-137が食物連鎖を介して上位の捕食者（魚類）へ取り込まれていることを示しています。

◇ ただし、回帰式から推定される1栄養段階毎（ $\delta^{15}\text{N}$ は3.4‰上昇すると仮定）の濃度上昇比は福島県沖で2.23、仙台湾で2.13であり、事故前の値（約2、笠松1999）と近くなっていました。このことは、動物プランクトンより上位の魚類（捕食者）の食物連鎖では、Cs-137濃度に乖離（特定の生物で濃度が高いこと）がないことを示唆しています。

8. 栃木県中禅寺湖に生息する魚類の放射性セシウム濃度



中禅寺湖

図1. 栃木県中禅寺湖に生息する代表的な魚類の放射性セシウム(Cs-137)濃度の推移。図中の点線は統計学的に有意な減少傾向があることを示す。

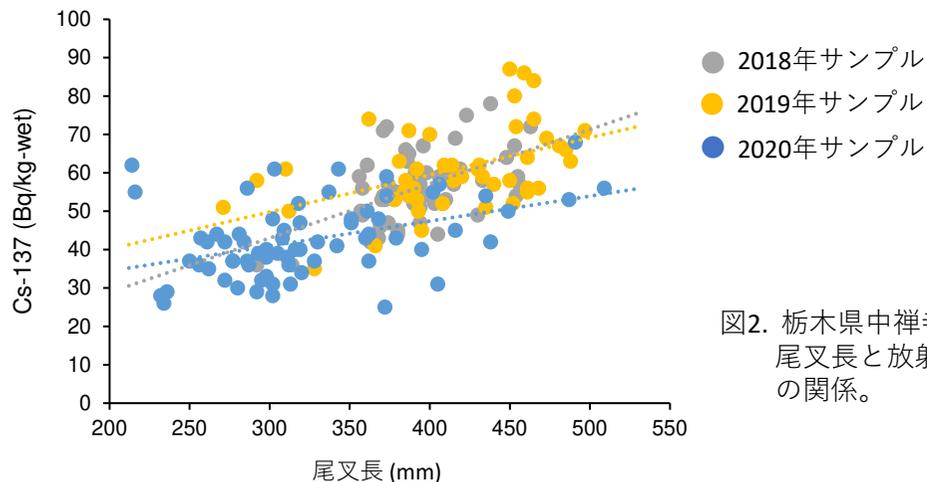


図2. 栃木県中禅寺湖に生息するホンマスの尾叉長と放射性セシウム(cs-137)濃度との関係。

- 水産研究・教育機構は、栃木県中禅寺湖に生息する代表的な魚類について放射性セシウム(Cs-137)濃度の推移を調査しています。
- 中禅寺湖に生息するほとんど魚種から、Cs-137濃度の低下傾向が確認されています(図1)。
- Cs-137の実効生態学的半減期は、ヒメマスでは約1380日、ホンマスでは約1640日、ブラウントラウトでは約1560日、ワカサギでは約1480日と推定されました。
- ホンマスでは大型個体ほどCs-137濃度が高いという関係が認められました(図2)。

※ 水産研究・教育機構と栃木県水産試験場による共同調査

9. 内水面魚類に関する放射性物質の取り込みおよび排出過程に関する研究

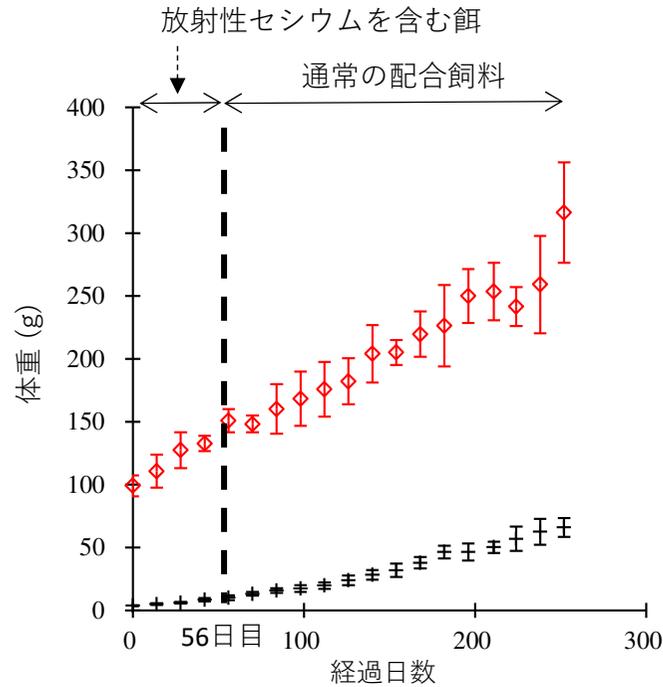


図1 各飼料を与えた期間と各供試魚の体重変化

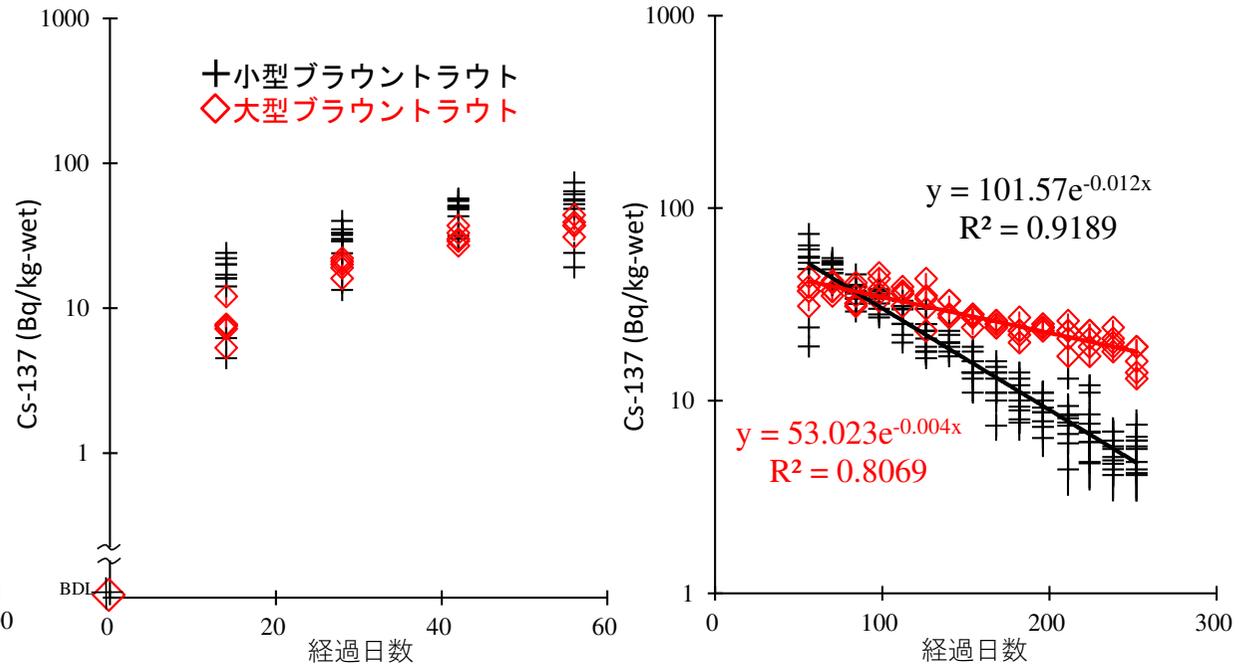


図2 実験期間の各供試魚の筋肉の放射性セシウム濃度変化

- 同種内で放射性物質濃度やその推移傾向に差をもたらす要因のひとつと考えられる体サイズの違いに着目し、体サイズの違いが放射性セシウムの取り込みと排出過程や生物学的半減期等に与える影響を調べました。
- 試験区は小型ブラウントラウト区（平均体重3.9g）、大型ブラウントラウト区（105g）として、それぞれ1面の水槽に收容し、約10°Cの湧水をかけ流しで飼育しました。試験開始日から56日目まで、90 Bq/kg-wetの放射性セシウム濃度の餌を与え、その後252日目まで通常の配合飼料を与えました（図1）。2週間毎に小型ブラウントラウト区で10尾、大型ブラウントラウト区で5尾サンプリングを行い、筋肉の放射性セシウム濃度の変化を調べました。
- 飼育開始から56日目までの放射性セシウム濃度の上昇率は、小型ブラウントラウトと大型ブラウントラウトで有意な差は認められませんでした（図2左）。一方、放射性セシウム濃度の下降率は大型より小型ブラウントラウトで有意に高く、実効生物学的半減期は大型ブラウントラウトの161日間に対して、小型ブラウントラウトでは57日間と短いことがわかりました（図2右）。