

平成31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2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. 海底近傍の粒子に含まれる放射性セシウム濃度の把握
3. 海底土中の放射性セシウム濃度分布と経年変化
4. 海底土周辺海水中の放射性セシウムの濃度分布
5. 東電福島第一原発周辺海域における魚類の汚染状況
6. 底魚における放射性セシウム濃度の推移とその傾向について
7. 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
8. 海産魚類におけるストロンチウム-90濃度
9. 栃木県中禅寺湖に生息する魚類の放射性セシウム濃度
10. 福島県内河川に生息するアユの放射性セシウム濃度
11. ヤマメによる放射性セシウムの取り込みおよび排出過程

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、平成31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

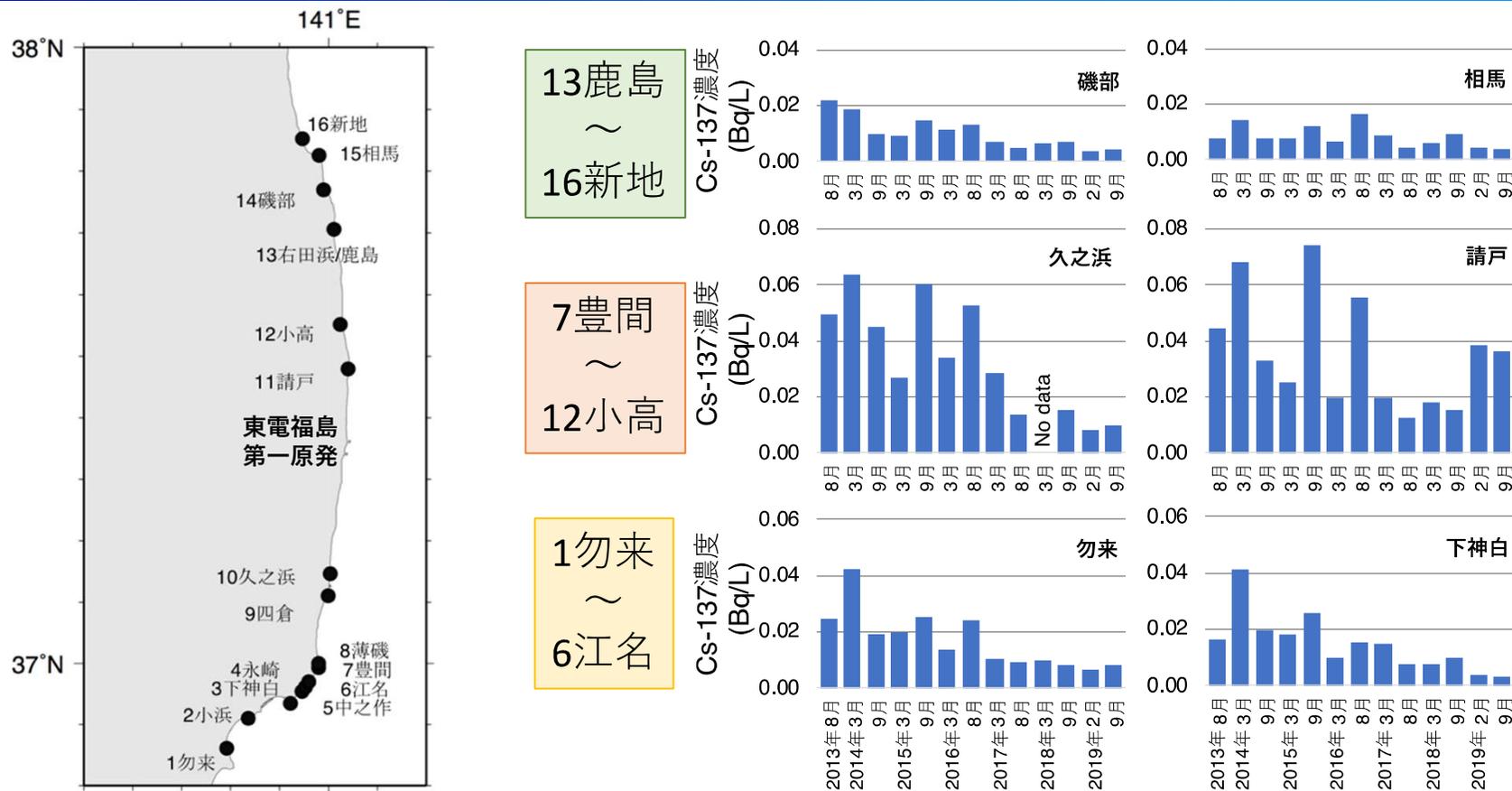


図1. 福島県極沿岸における海水の採取位置（全16地点）および代表的な地点における海水の放射性セシウム(Cs-137)濃度。

- ◇ 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2019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13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近年、詳細な地理的分布が明らかとなりました。
- ◇ 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. 海底近傍の粒子に含まれる放射性セシウム濃度の把握

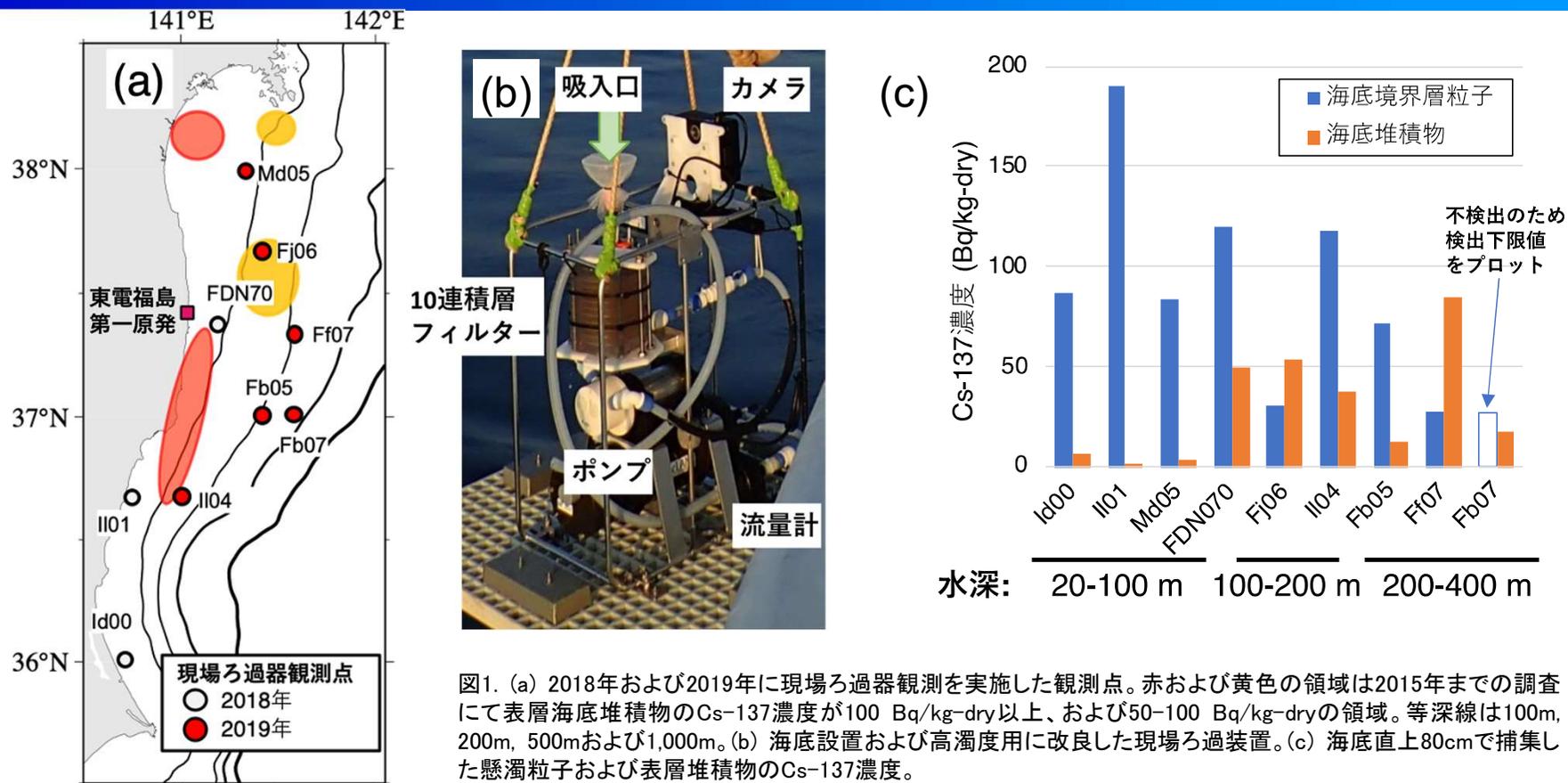


図1. (a) 2018年および2019年に現場ろ過器観測を実施した観測点。赤および黄色の領域は2015年までの調査にて表層海底堆積物のCs-137濃度が100 Bq/kg-dry以上、および50-100 Bq/kg-dryの領域。等深線は100m, 200m, 500mおよび1,000m。(b) 海底設置および高濁度用に改良した現場ろ過装置。(c) 海底直上80cmで捕集した懸濁粒子および表層堆積物のCs-137濃度。

- ◇ 海底に沈着した放射性セシウムの再懸濁・輸送に伴う移動を把握する観測を実施しています(図1a)。
- ◇ これまでの調査により陸棚斜面域の海底近傍に海水の密度が一定で高濁度な層(海底境界層)が発達し、この高濁度を構成する粒子が放射性セシウムの輸送媒体と考えられます。
- ◇ そこで、海底境界層の粒子に含まれる放射性セシウム濃度を明らかにするために現場ろ過装置(図1b)を改良し観測を行いました。
- ◇ その結果、水深20m~200mの多くの測点において海底直上80cmの懸濁粒子の放射性セシウム濃度は表層堆積物の放射性セシウム濃度よりも高いことが明らかになりました(図1c)。

3. 海底土中の放射性セシウム濃度分布と経年変化

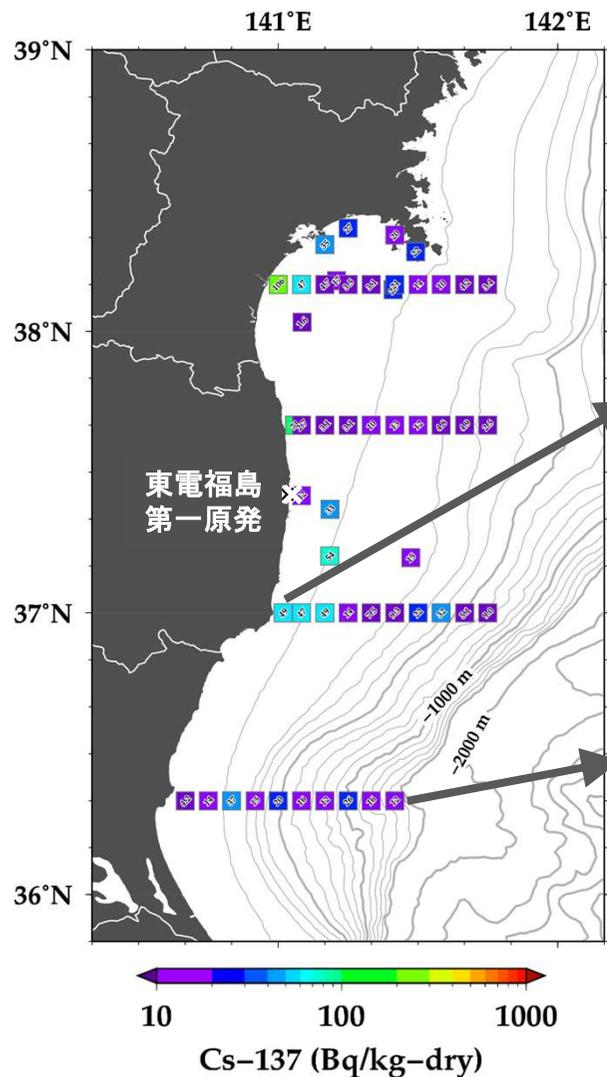


図1. 2019年の海底土調査による海底土表層(0-1cm)中のCs-137濃度分布図。

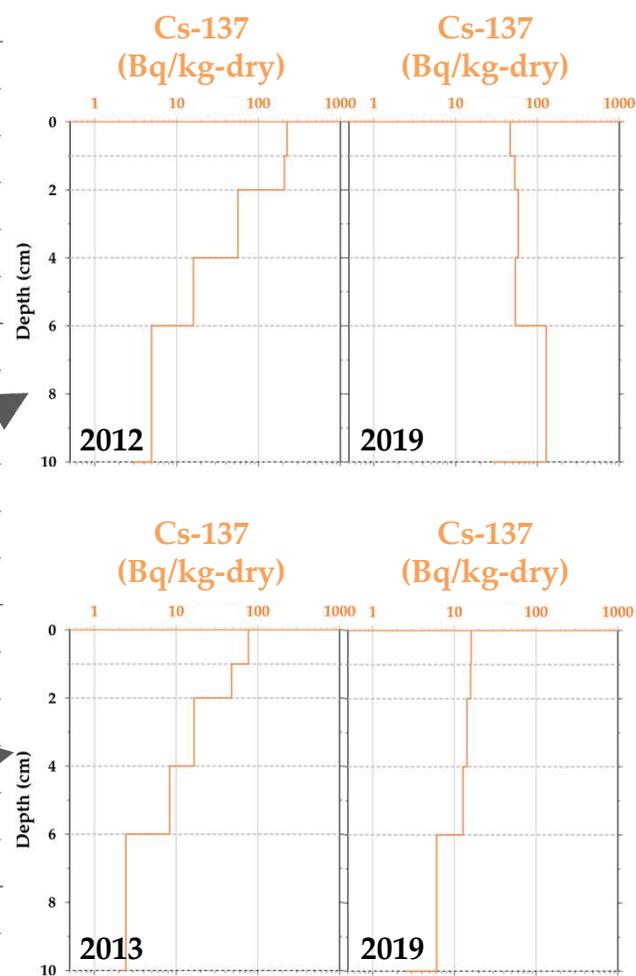


図2. 福島県南部沿岸(上)と茨城県中部沖合(下)の地点における海底土(0-10cm)中のCs-137濃度の鉛直分布。左下に調査年を示す。

◇ 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-137)濃度の経年変化を調べました。

◇ 2019年の海底土表層(0-1cm)中のCs-137濃度は最大で106 Bq/kg-dryでした(図1)。また、沿岸付近の地点での濃度は数十Bq/kg-dryでしたが、沖合の多くの地点では10 Bq/kg-dry以下でした(図1)。

◇ 海底土表層のCs-137濃度は、ほとんどの場所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、深度によっては調査開始時よりも濃度が上昇している地点も見られました(図2)。

◇ 下層でCs-137量が増加した要因の一つとして、かつて表層域に残存していたCs-137濃度が高い海底土が水平輸送されるとともに、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。

4. 海底土周辺海水中的放射性セシウムの濃度分布



図1 ニスキン採水器を内側にとりつけたマルチプルコアラー採泥器

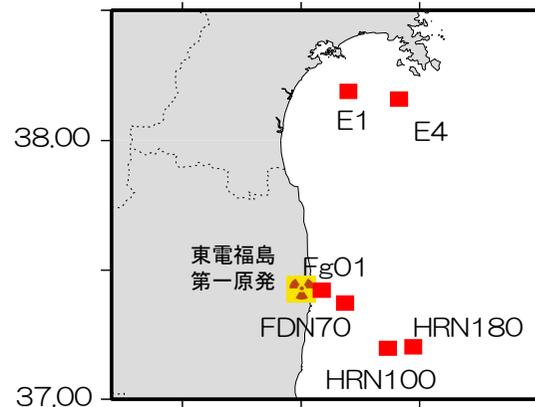


図2. 試料採取地点

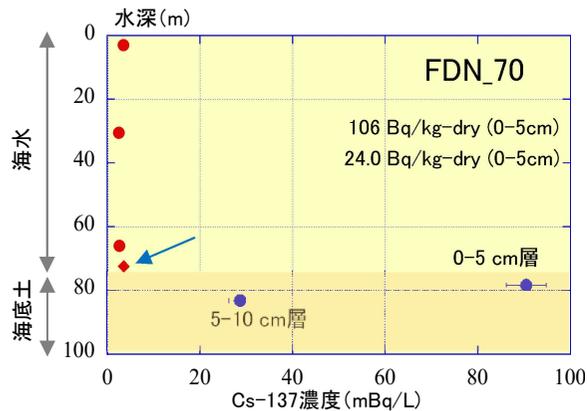


図3. FDN70地点での海水および間隙水中のCs-137濃度。赤丸は海水中の濃度、赤菱形(図中、矢印)は図1のニスキン採水器で採取した直上水中の濃度、青丸は間隙水中の濃度を示す。図中に数字で示した濃度は海底土の0-5cm層と5-10cm層中のCs-137濃度。エラーバーは計数誤差。

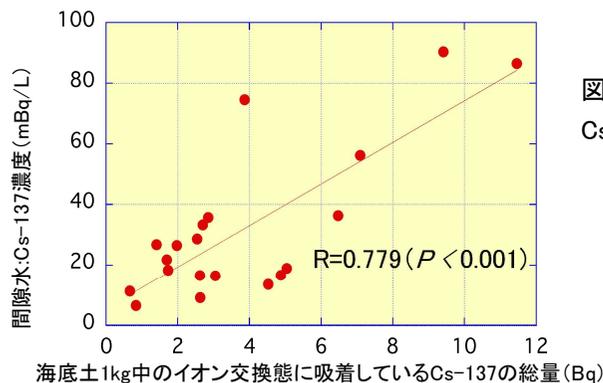


図4. 海底土1kg中のイオン交換態に吸着しているCs-137の総量と間隙水中のCs-137濃度の関係。

◇ 海底土から溶出した放射性セシウム(Cs-137)が海底近くに生息する水産物に及ぼす影響に関する調査を平成30年度に引き続き調査しました。

◇ 前年度と同様にマルチプルコアラー採泥器にニスキン採水器を取り付け、直上水の採取を行いました(図1)。

◇ 福島・宮城沖において(図2)、採水と海底土中の間隙水の採取を組み合わせた調査を行い、放射性Cs濃度の分布から周辺の生態系に及ぼす影響を検討しました。

◇ 昨年同様、直上水中の放射性Cs濃度は、それよりも上層の濃度と同程度で、海底土から溶出する放射性Csを含む水は、海底直上で希釈・拡散されていると考えられる結果でした(図3)。したがって溶出したCs-137の水産物への影響はないと考えられます。

◇ 間隙水中の放射性Cs濃度は、いずれの地点でも直上水よりも2.4倍から25倍程度高い濃度でしたが、水産物が直接影響を受けたとしても食品上問題となる濃度ではありませんでした。

◇ 間隙水の放射性Cs濃度は、海底土1kg中のイオン交換態に吸着しているCs-137の総量と有意な相関がありました。

5. 東電福島第一原発周辺海域における魚類の汚染状況

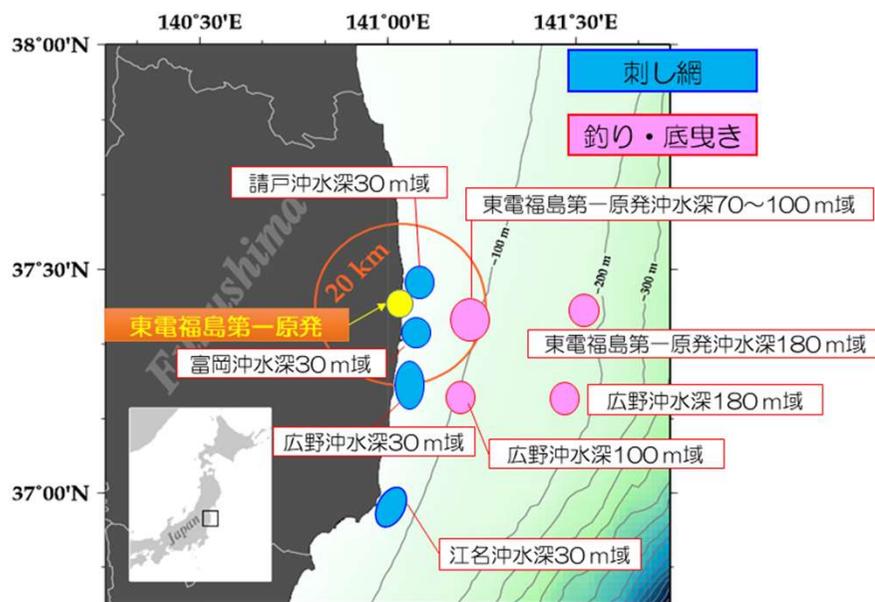


図1. 2019年から2020年にかけて福島県沖で実施した海産生物調査地点

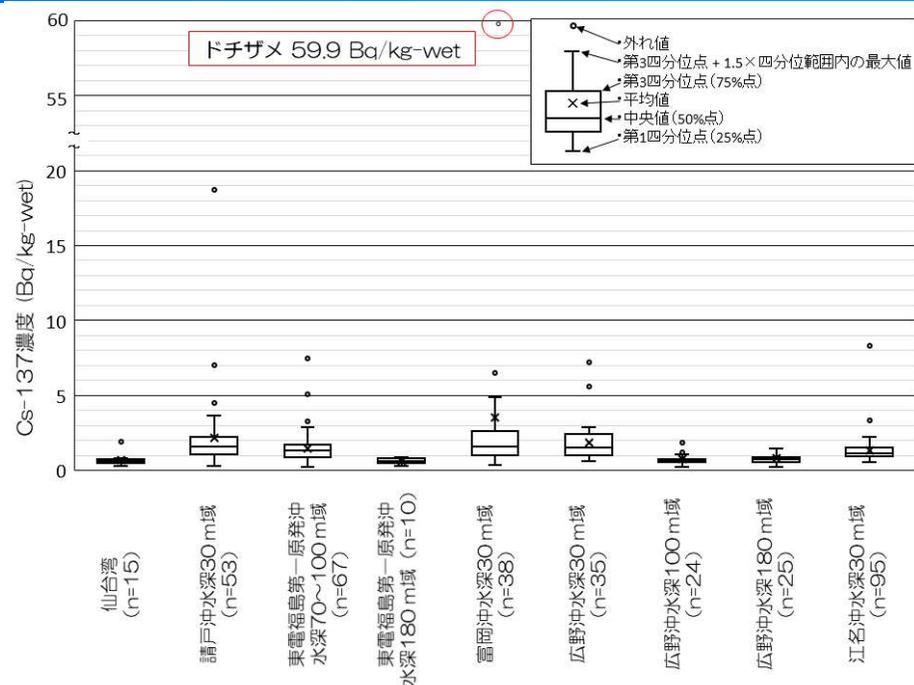


図2. 底魚筋肉部位のCs-137濃度海域間比較

- ◇ 2019年1月から2020年1月にかけて、福島県沖(図1)と仙台湾で海産生物調査を実施し、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。
- ◇ 底魚(マコガレイ、ババガレイ、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濃度について、9つの調査地点間で比較を行いました(図2)。その結果、平均値が最も高い値を示したのは富岡沖水深 30 m域の 3.51 Bq/kg-wetでした。仙台湾、東電福島第一原発沖水深180 m域、広野沖水深100 m域、広野沖水深180 m域の4地点では、1.00 Bq/kg-wetを下回る濃度水準でした。
- ◇ 2019年から2020年にかけて実施した調査で採取した全ての魚類(マアジ、マサバなどの浮魚を含む)の筋肉部位試料409検体からは、放射性セシウム濃度(Cs-134 + Cs-137)が基準値の100 Bq/kg-wetを上回る検体は見つかりませんでした。最も高い濃度は、9月27日に富岡沖水深30 m域で採取したドチザメ(全長:950 mm、体重:4187 g)の64.1 Bq/kg-wet(Cs-137濃度:59.9 Bq/kg-wet)でした。

6. 底魚における放射性セシウム濃度の推移とその傾向について

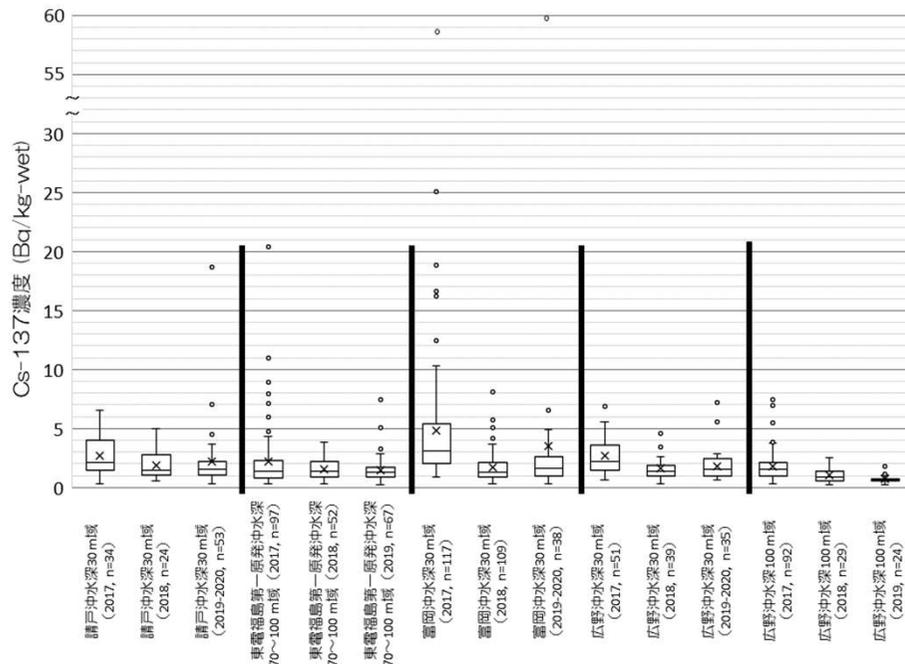


図1. 福島県沖5地点で採取した底魚の筋肉部位におけるCs-137濃度の推移と海域間比較

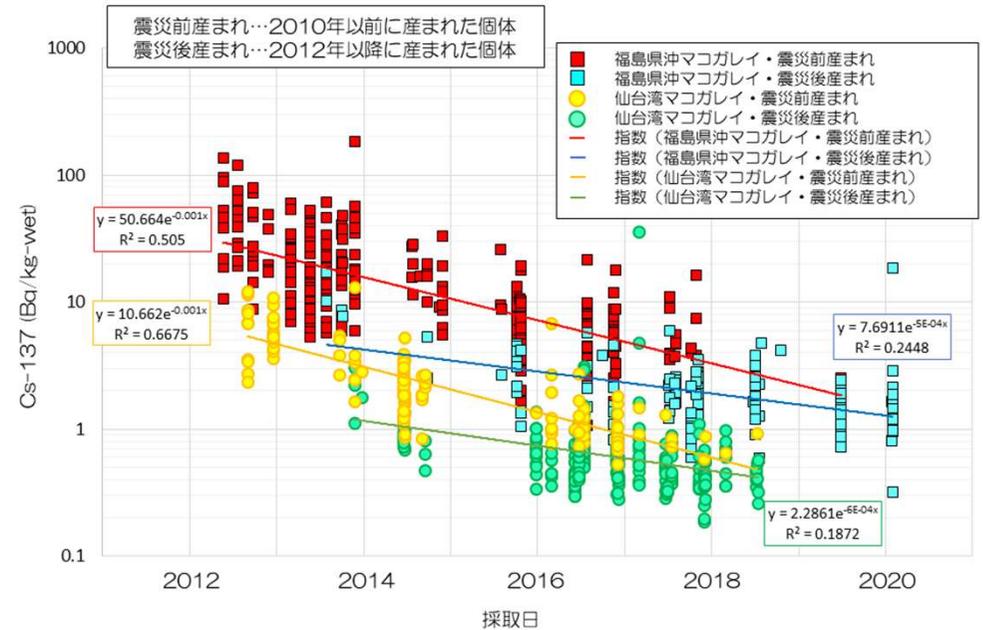


図2. 福島県沖と仙台湾で採取したマコガレイの年級群別Cs-137濃度の推移

- ❖ 福島県沖の5つの調査地点(請戸沖水深30 m域、東電福島第一原発沖水深70~100 m域、富岡沖水深30 m域、広野沖水深30 m域、広野沖水深100 m域)で採取した底魚の筋肉部位に含まれるCs-137濃度について、調査地点ごとに年度間で比較を行いました(図1)。その結果、どの調査地点においても2018年度と2019年度との間ではCs-137濃度に統計的な有意差が認められず、Cs-137濃度の低下傾向が認められませんでした。
- ❖ 底魚のCs-137濃度で低下傾向が認められなかった要因を明らかにする目的で、福島県沖と仙台湾で採取したマコガレイについて、震災前産まれ年級群(2010年以前に生まれた個体群)と震災後産まれ年級群(2012年以降に生まれた年級群)とに分けて、それぞれCs-137濃度の推移を調べました(図2)。その結果、2016年頃から出現率が高くなり始めた震災後産まれ年級群のCs-137濃度は、低い水準ではありますが、震災前産まれ年級群と比較すると低下速度が緩やかな傾向にあることが分かりました。
- ❖ 震災発生から約9年が経過し、浮魚類と比較して相対的に寿命の長い底魚類でも、マコガレイのように震災前産まれ年級群と震災後産まれ年級群の世代交代が起きていると考えられます。その結果、底魚全体や種レベルで放射性セシウム濃度の推移を捉えると、低下傾向が確認しにくくなったと考えられます。

7. 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

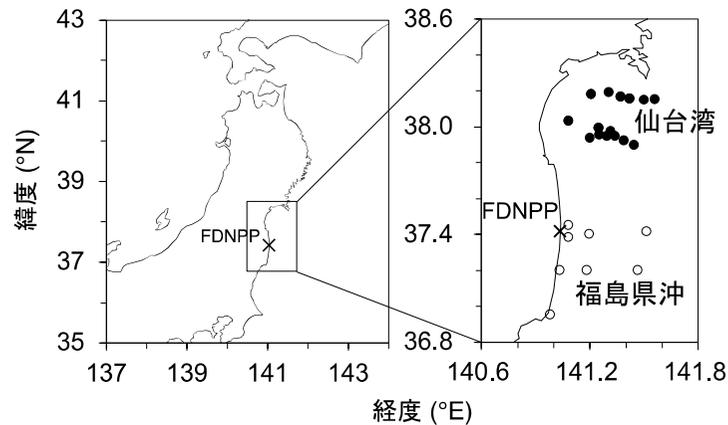


図1. 福島県沖および仙台湾の調査点
図内のFDNPPは、東電福島第一原発を表す。

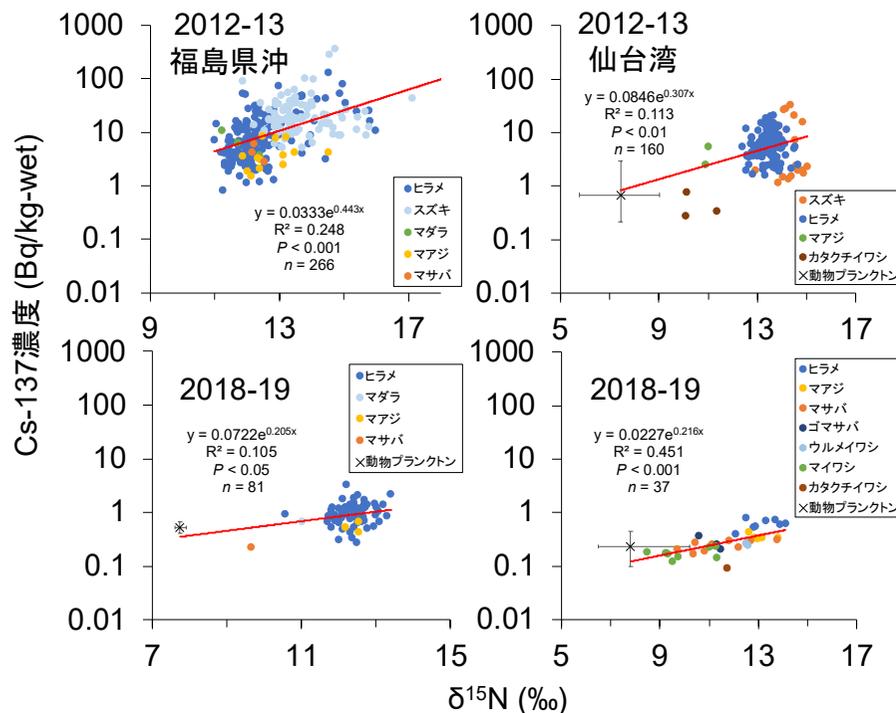


図2. 福島県沖および仙台湾における窒素安定同位体比とCs-137濃度との関係
図内の動物プランクトンのエラーバーは、データ範囲を表す。

◇ 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、環境中のCs-137が食物連鎖を通じて濃縮し、栄養段階の高い魚類ほどCs-137濃度が高い傾向があることを示しています。

◇ また、図2の回帰式から推定される栄養段階毎（ $\delta^{15}\text{N}$ で3.4‰）のCs-137の濃度上昇比は、両海域ともに、2012-2013年は事故前よりも高い値でしたが、2018-2019年は事故前の値近くまで低下しました。このことは、両海域で魚類における事故直後の初期汚染水の影響が小さくなり、魚類のCs-137濃度が環境（海水、餌生物）からの取込みで説明できる水準に低下し、極端に高い値が出にくくなっていることを示唆しています。

8. 海産魚類におけるストロンチウム-90濃度

水産研究・教育機構では、水産物の安全性を確認するために福島を含む日本周辺で採取された海産魚類中のストロンチウム(Sr)-90濃度とセシウム(Cs)-137濃度を調査しています。

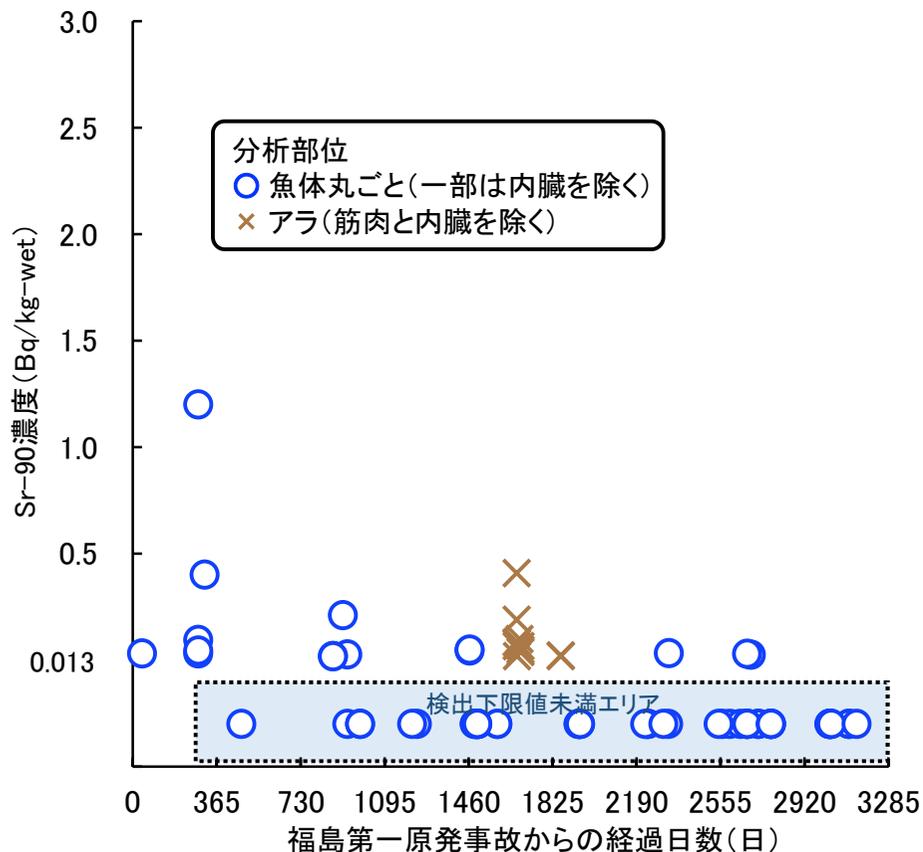
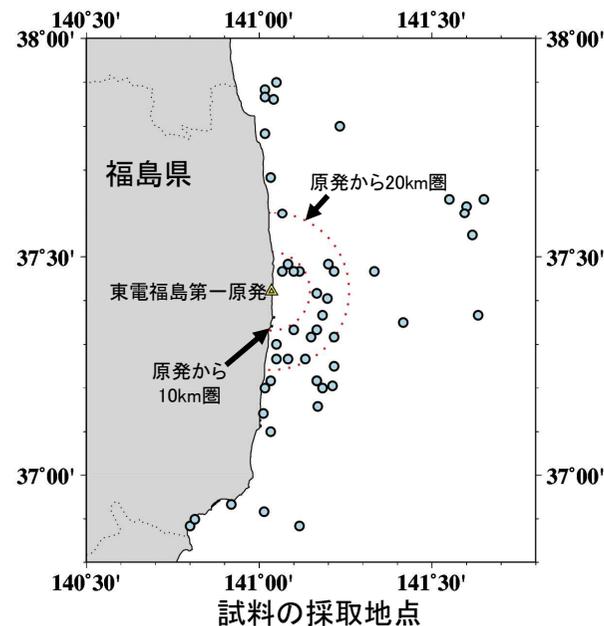


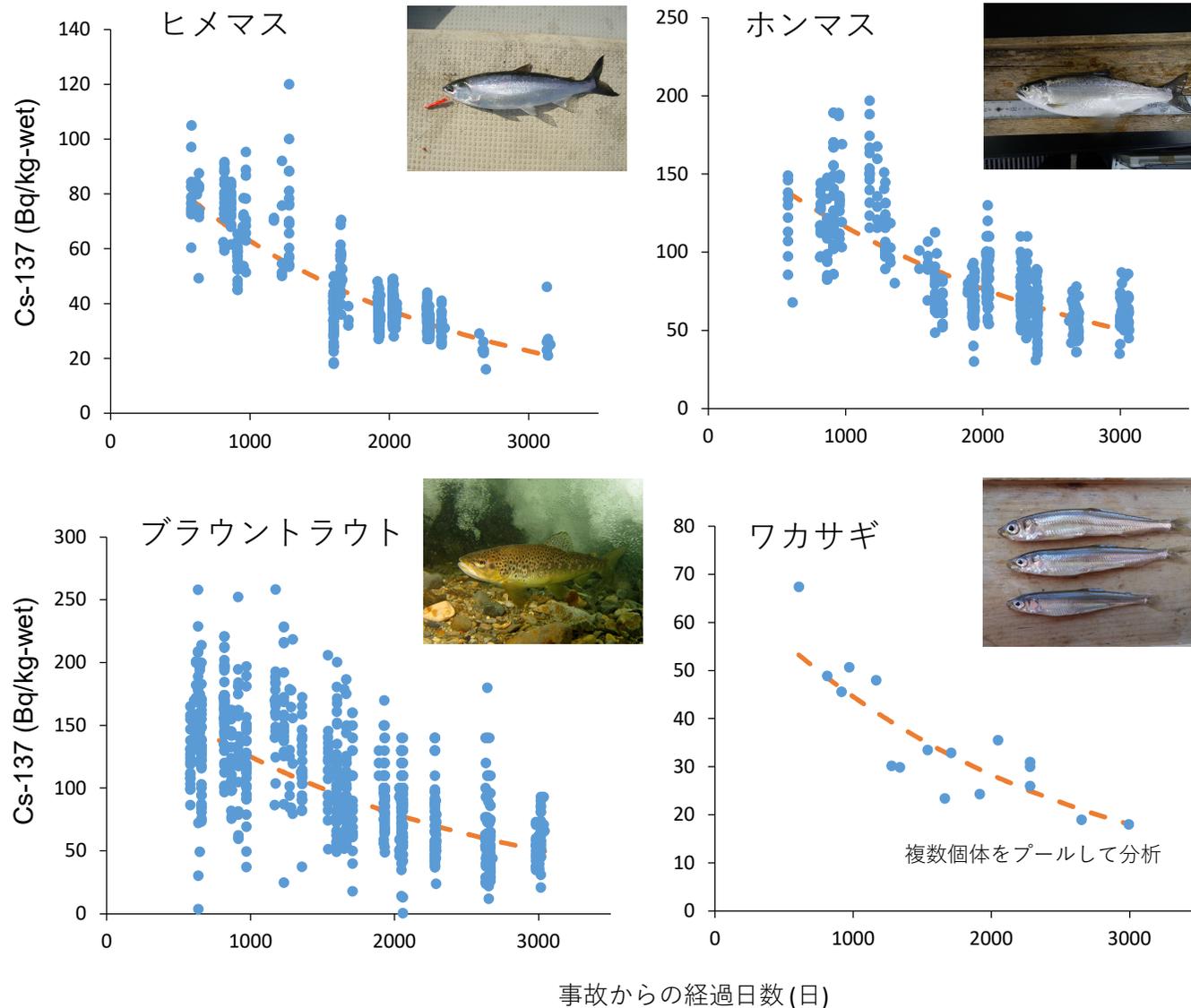
図1. 福島県沖で採取された海産魚類におけるSr-90濃度
 内は検出下限値未満(< 0.0020-0.036 Bq/kg-wet)の試料を示す。
 (Srは骨組織に多く存在することから、主に骨で構成されるアラの測定も行っています。)



- ◇ 福島県沖の海産魚類のSr-90濃度は、Cs-137濃度よりも大幅に低く(*)、原発事故直後に記録した最高値(1.2 Bq/kg-wet)を除くと、0.5 Bq/kg-wet以下でした(図1)。
- ◇ 令和元年度に公表した福島県沖の海産魚類におけるSr-90濃度はいずれも検出下限値未満(< 0.017 Bq/kg-wet)でした(図1)。
- ◇ また、福島県沖以外で採取された海産魚類のSr-90濃度は原発事故前20年間の平均濃度(0.025 ± 0.021 Bq/kg-wet以下)と同水準でした(*)。

(*)これまでの水産物におけるSr-90およびCs-137濃度の測定結果
<https://www.fra.affrc.go.jp/eq/result.html>

9. 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

➤ 水産研究・教育機構では、栃木県中禅寺湖に生息する代表的な魚類について、2012年10月から放射性セシウム(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の魚種でCs-137濃度の低下傾向が確認されています(図1)。

➤ 推定された各魚種のCs-137の実効生態学的半減期は以下の通りとなっています。

- ・ヒメマス: 約1,360日
- ・ホンマス: 約1,670日
- ・ブラウトラウト: 約1,530日
- ・ワカサギ: 約1,530日

※ 水産研究・教育機構と栃木県水産試験場による共同調査

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。

10. 福島県内河川に生息するアユの放射性セシウム濃度

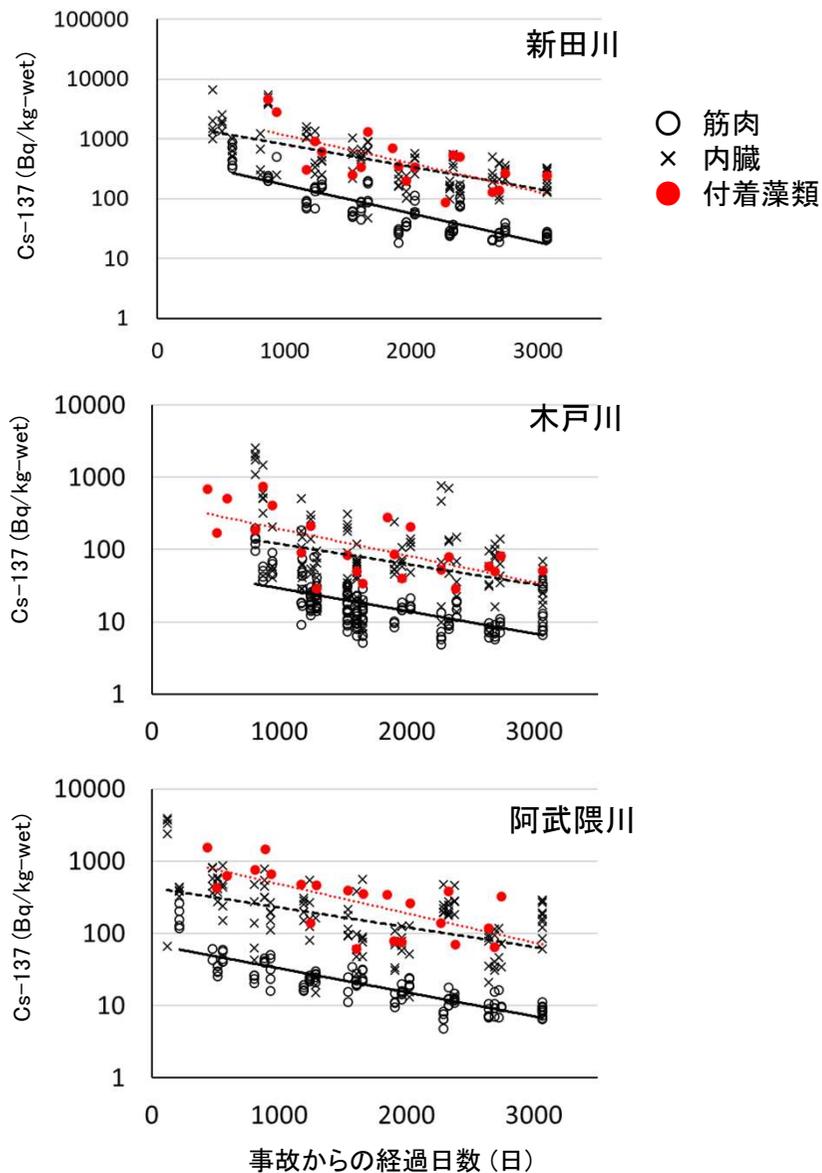


図2. 福島県新田川、木戸川、阿武隈川に生息するアユの筋肉、内臓(胃内容物を含む)、藻類(シルトを含む)の放射性セシウム(Cs-137)濃度の推移。図中の実線及び点線は、統計学的に有意な減少傾向があることを示す。

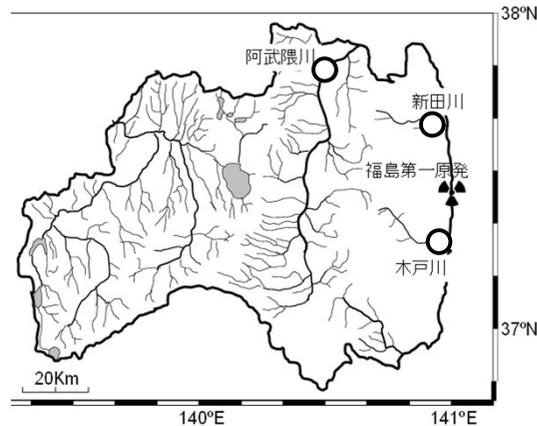


図1. アユの調査を行った河川

	筋肉	内蔵
空間線量	相関あり	相関あり
水	相関あり	相関あり
付着藻類	相関あり	相関あり
河川底泥	相関あり	相関あり

図3. アユの筋肉および内臓のCs-137濃度と、空間線量もしくは河川水、付着藻類、河川底泥のCs-137濃度との相関を統計的に検討

- 福島県浜通りの新田川では、2011年6月からアユの出荷制限が続いています。
- 上記河川(図1)で採取したアユの筋肉、内臓(胃内容物を含む)および石に付着した藻類(アユの餌生物)の放射性セシウム(Cs-137)濃度は、いずれも低下傾向が認められました(図2)。
- アユ筋肉部位のCs-137濃度は内臓部位よりも低く、内臓部位の濃度は藻類と同程度か、やや低い値で推移していました。
- アユ筋肉部位と内臓部位のCs-137の実効生態学的半減期は、新田川でそれぞれ628日と805日、木戸川では960日と1078日、阿武隈川では838日と1003日と推定されました。
- アユの筋肉部位・内臓部位のCs-137濃度は、採集地点の空間線量や水、付着藻類、底泥のCs-137濃度と相関関係があることがわかりました(図3)。

※ 水産研究・教育機構と福島県内水面水産試験場による共同調査

11. ヤマメによる放射性セシウムの取り込みおよび排出過程

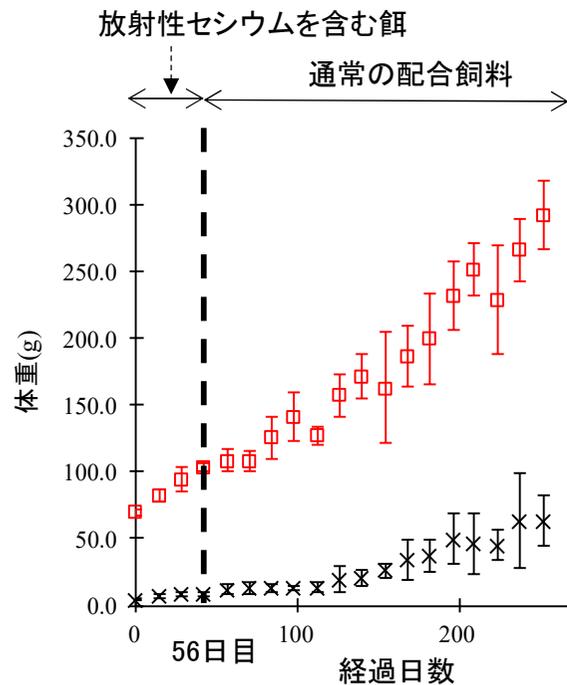


図1 各飼料を与えた期間と各供試魚の体重変化

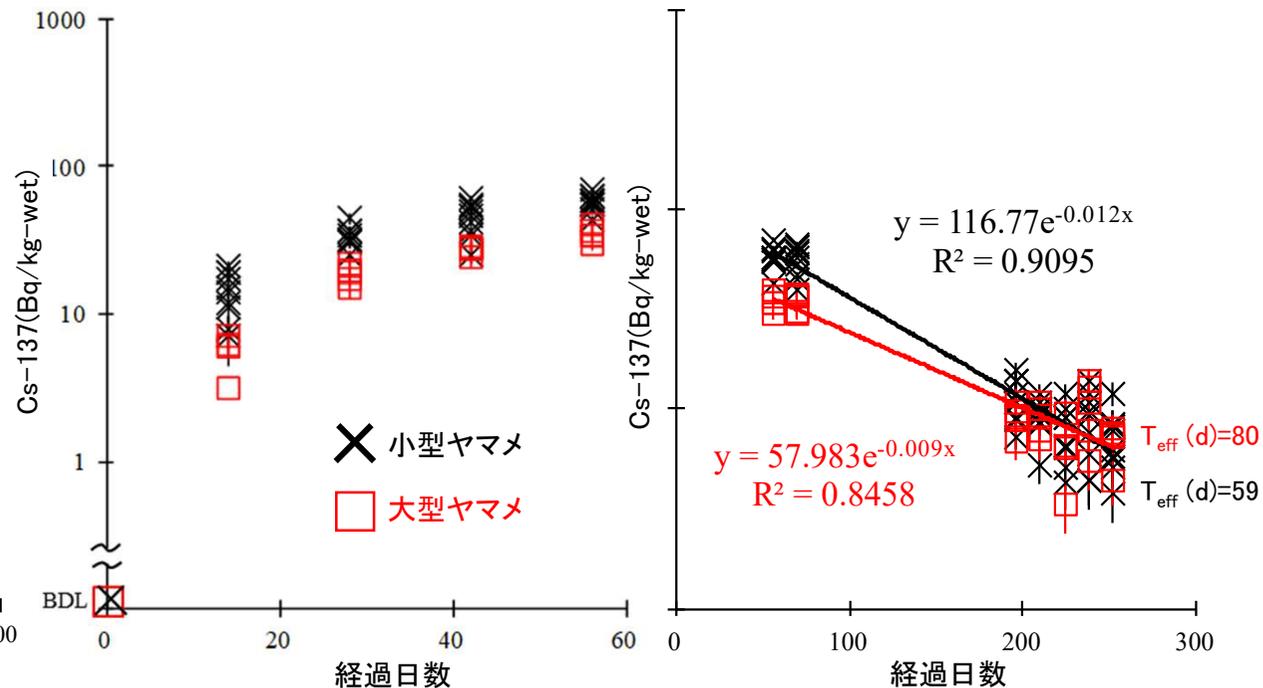


図2 実験期間の各供試魚の筋肉の放射性セシウム濃度変化

- 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、ヤマメを用いて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。
- 試験区は小型ヤマメ区(平均体重4.6g)、大型ヤマメ区(同73.9g)として水槽に收容し、約10°Cの湧水をかけ流して飼育しました。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。
- 56日間での放射性セシウム濃度の上昇率は、小型ヤマメが大型ヤマメに比べて有意に高いことがわかりました(図2左)。また、放射性セシウム濃度の下降率は大型より小型ヤマメで有意に高く、実効生物学的半減期は大型ヤマメの80日間に対して、小型ヤマメで59日間と短いことがわかりました(図2右)。