

平成27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

平成28年3月
(研)水産総合研究センター

-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. 海底堆積物中の放射性セシウム濃度
3. 海底堆積物の動向予測(数値シミュレーション)
4. 第一原発周辺海域における海産生物の汚染状況
5. 仙台湾および福島県北部沖合定点における生態系内の移行
6. 東北海域におけるヒラメの汚染履歴の推定
7. 海底土から海産生物へ移行する放射性セシウムの評価
8. 海底土中の放射性Csの水産物への影響評価
9. 海産魚類におけるストロンチウム-90濃度
10. 栃木県中禅寺湖に生息する魚類の放射性セシウム濃度
11. 福島県内河川における放射性セシウム移行経路調査
12. 福島県内湖沼における魚類の餌の放射性セシウム濃度
13. 千葉県内湖沼河川における淡水魚の調査結果

0. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(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、その食品としての安全性が危惧されてきました。事故から2016年2月末日までの間に、福島県の水産物は37,138検体の検査が行われています。2011年4-6月期には100Bq/kg-wetを超過する割合が52.7%ありましたが、2016年1-2月期にはその割合は0%になりました。この数字から、汚染は着実に改善の方向に向かっていることは明らかです。

2015年度は福島第一原発海水配管トレンチに溜まっていた高濃度汚染水の除去、港湾内海底の被覆工事の終了、海側遮水壁の完成、凍土壁の運用開始と汚染水対策において大きく前進した年度です。しかしながら、過去数回にわたる汚染水漏洩等により、福島県だけでなく東北産の水産物でさえ安全性に疑問が持たれ、いわゆる風評被害が発生しています。実際のところ、福島第一原発近傍海域でさえ、汚染水漏洩による水産物への影響は見られていません。福島県漁業協同組合連合会は、事故後直ぐに県下全ての漁業を自粛することを決定し、現在も一部の試験操業を除き漁業活動は自粛されています。当初3種から始まったこの試験操業は、現在では72種まで対象種を拡大しましたが、本格操業へはいまだ険しい道のりが続いています。

私たちは、水産物中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、またその汚染がどのように軽減されていくのかといった科学的プロセスを丁寧に説明していくことが、風評被害払拭に重要であると考えています。水産総合研究センターは、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」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、これらの事業で得られた主な成果をとりまとめて報告いたします。

1. 福島県海域の海水の放射性セシウム濃度の状況

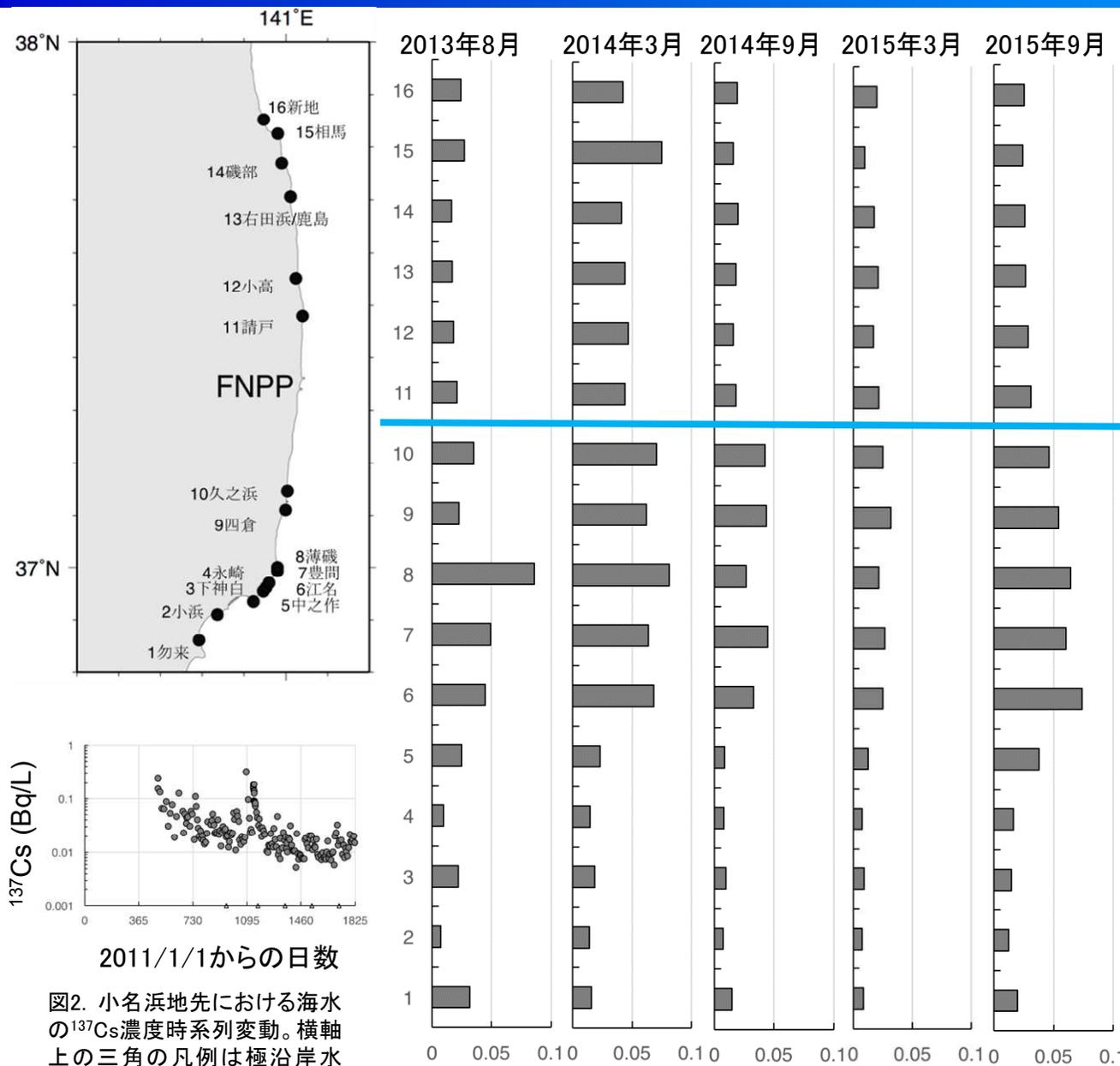


図1. 福島県極沿岸の16地点における海水の放射性セシウム(^{137}Cs)濃度。左から2013年8月、2014年3月、9月、2015年3月および9月の結果。福島第一原発の位置を青線で示す。

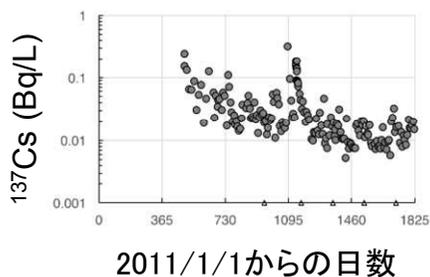


図2. 小名浜地先における海水の ^{137}Cs 濃度時系列変動。横軸上の三角の凡例は極沿岸水採取日を表す。

- ◇ 福島県の極沿岸における海水の放射性セシウム濃度を調査しました。調査は2013年8月～2015年9月の期間、福島県の北部(新地)～南部(勿来)までの16地点において5回実施しました(図1)。
- ◇ 海水の放射性セシウム濃度は変動が大きいものの、福島第一原発の北側に比べ、南側で濃度が高い傾向にありました。
- ◇ 原発南部における濃度範囲は、我々がこれまでに報告している小名浜地先における値(図2)と同程度(0.01～0.1Bq/L)で推移していることが確認されました。

2. 海底堆積物中の放射能セシウム濃度

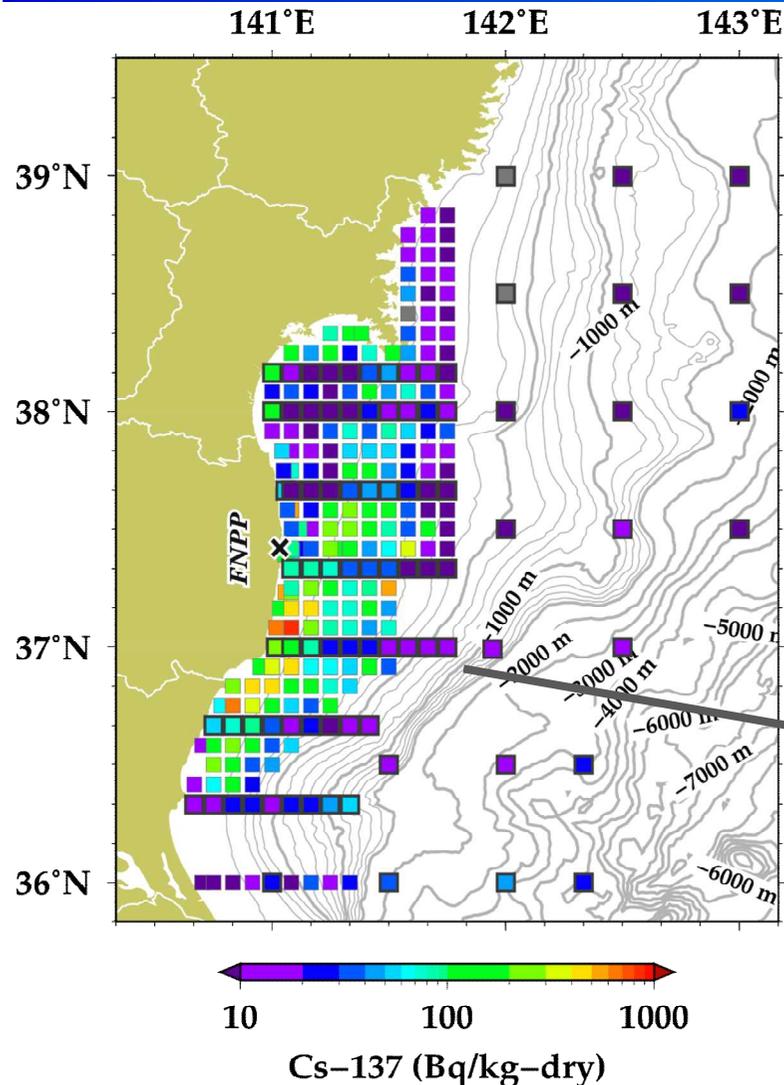


図1. 海底土マッピング調査による海底堆積物表層(0-1cm)中のCs-137濃度分布。灰色のタイルは、濃度が検出下限値(1.3 Bq/kg-dry程度)未満であったことを示す。太枠で囲んだタイルが今年度実施した調査結果。

- ◇ 経度緯度・経度5分解像度の海底堆積物中における放射性セシウム濃度分布の実態把握調査において反復調査を実施し、その時間変化を調べました。
- ◇ 堆積物表層(0-1cm)中の放射性セシウムの濃度の水平的な高低のパターンは維持されているものの、全体的な濃度レベルが継時的に減少傾向にありました。例えば福島県南部沖では、放射性セシウムの物理半減期の効果を差し引いても、堆積物表層中の濃度は平均的に、2012年度の調査結果から約7割低下していることが分かりました。
- ◇ 減少した分の放射性セシウムの一部は、堆積物のより下層に移動している可能性が分かりました。下層に移動した放射性セシウムは、海底の生態系に及ぼす影響が少なくなると考えられます。また、陸棚斜面外洋域に緯度・経度30分解像度の新規調査点を設けて同時に海底土調査を行い、減少した分の放射性セシウムのほかの一部が、第一原発よりも南方かつ沖合に水平輸送されている可能性も明らかになりました。

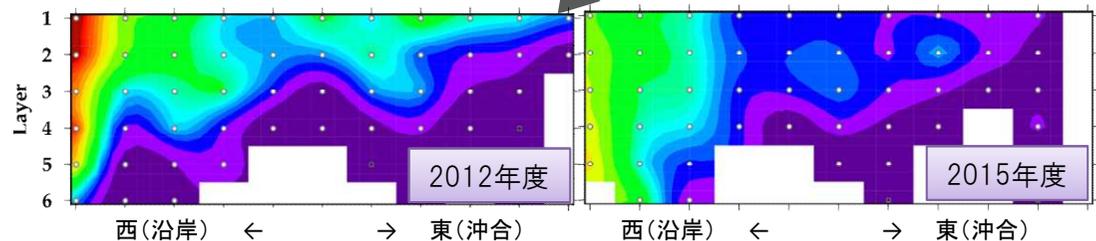


図2. 2012年と今年度(2015年)における福島県南部沖の東西(横軸)定線での海底土調査による堆積物中のCs-137濃度の鉛直層(縦軸)断面図。海底堆積物は海底面から14 cm深までの間で6層(0-1, 1-2, 2-4, 4-6, 6-10, 10-14 cm)に分割して分析した。

3. 海底堆積物の動向予測(数値シミュレーション)

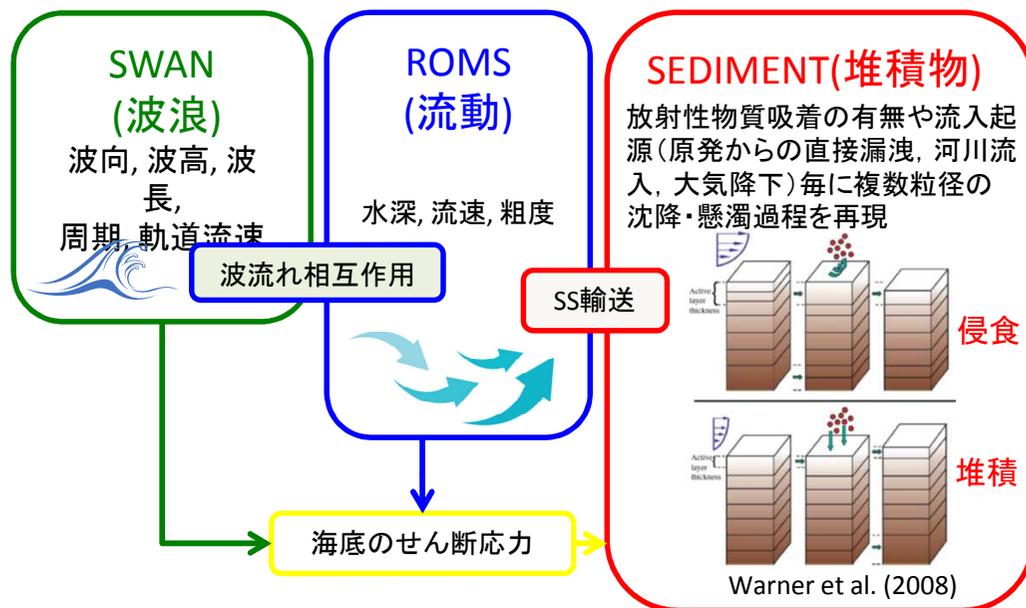


図1. 海底堆積物中に含まれる放射性物質の輸送評価の為に構築した流動・波浪・堆積物結合モデルの概念図。

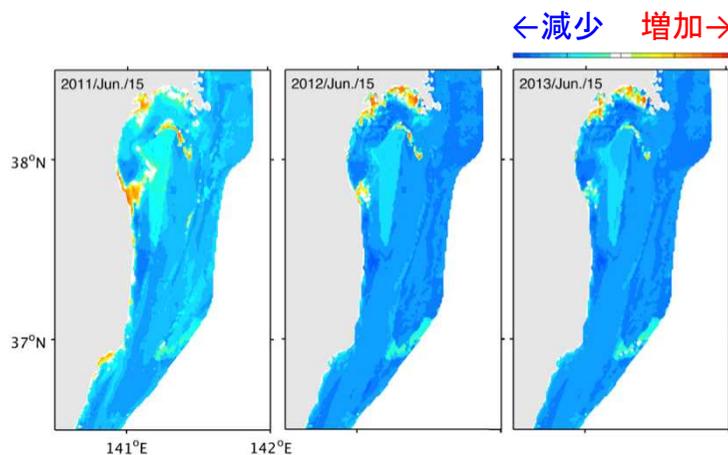


図2. 数値シミュレーションにより推定した堆積物中の放射性物質総量の時空間変化(初期値との差)の例。
 ※計算結果は、初期条件や堆積物の流動性の設定など、様々な条件によって左右される。

◇ 原発事故により海洋に放出された放射性物質の一部は、泥などの海底堆積物に吸着することで海域に長く留まることが、これまでの調査により明らかとなっています。水産総合研究センターでは、流動や波浪と放射性物質を含む堆積物の挙動を表現する結合モデルを構築(図1), 様々な条件下で数値シミュレーションを実施することで、堆積物中の放射性物質が輸送・拡散する過程を再現、東北沿岸の放射性物質の量がどのように変化するかを評価するという取り組みを行っています。

◇ 数値シミュレーションの結果は、放射性物質質量の時間変化が海域毎に異なることを示しています(図2)。これは、海域毎に異なる波浪や流動場、堆積物の粒径組成の違い、上流域からの移流など、複合的な要因によるものです。

◇ 開発したモデルを用いて実施した様々なシミュレーション結果の解析や現場観測データとの比較検証により、放射性堆積物の挙動や、流出起源毎の寄与の定量化など、東北沿岸における原発事故の影響に対する理解が大きく進展することが期待されています。

4. 第一原発周辺海域における海産生物の汚染状況

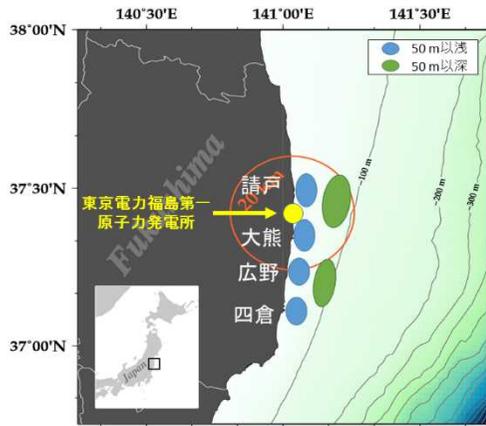


図1. 2015年度に第一原発周辺海域で実施した海産生物の調査地点。

表1. 各調査海域で採取した底魚のCs-137濃度(Bq/kg-wet)幾何平均値

調査海域	検体数	幾何平均値 (幾何標準偏差に基づくばらつきの範囲)
請戸沖(50m以浅)	29	5.42 (2.09~14.1)
請戸沖(50m以深)	29	2.70 (1.40~5.21)
大熊沖(50m以浅)	60	9.27 (3.71~23.2)
広野沖(50m以浅)	34	5.31 (1.95~14.5)
広野沖(50m以深)	50	3.51 (1.54~8.04)
四倉沖(50m以浅)	32	4.90 (1.90~12.6)

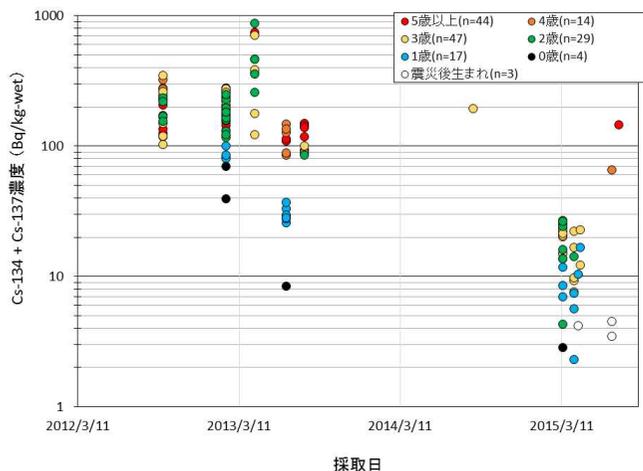


図2. 震災当時(2011年3月)の年齢別に比較した福島県沖シロメバルの放射性セシウム濃度(Cs-134 + Cs-137)。シロメバルの年齢は耳石から推定した。

◇ 2015年3月から11月にかけて、福島県の請戸沖、大熊沖、広野沖、四倉沖で採取した50種299検体の海産生物試料について放射性セシウム濃度を測定しました(図1)。その結果、基準値の100 Bq/kg-wetを上回ったのは、7月19日に大熊沖50m以浅の海域で採取したシロメバルの145 Bq/kg-wetのみでした。今年度の調査で基準値を上回った検体の出現率は0.334 %となり、平成26年度の3.47 %と比較してさらに低い値を示しました。

◇ 各調査海域で採取した底魚のCs-137濃度幾何平均値は、どの海域でも10 Bq/kg-wet以下でした(表2)。事故から4年以上が経過し、第一原発のごく周辺海域でも海産生物の放射性セシウム濃度は順調に低下している事が確認されました。

◇ 他の魚種と比較してやや高めの放射性セシウムが検出されているシロメバルについて、2012年以降に採取した158個体の放射性セシウム濃度を個体別に測定しました。更に、耳石から推定した震災当時の年齢別に放射性セシウム濃度を比較した結果(図2)、基準値を超えた97個体全てが震災当時に2歳以上であった事が分かりました。この結果から、本種の放射性セシウム濃度が現在もやや高めに推移している要因の一つは、事故直後に大量の放射性セシウムを取り込んだ個体が、現在も数多く生残しているためである事が示唆されました。

5. 仙台湾および福島県北部沖合定点における生態系内の移行

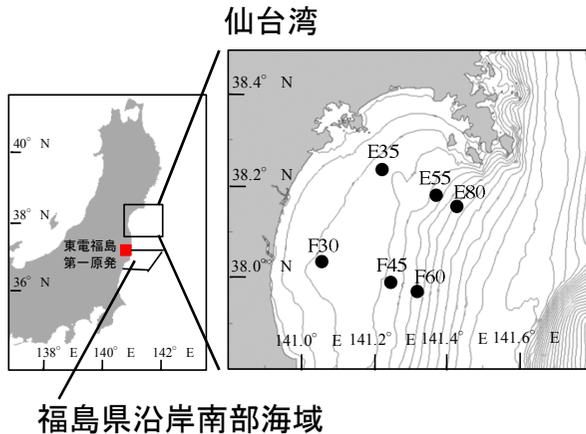


図1. 仙台湾および福島県沿岸域南部海域の調査点。

◇我々は、仙台湾の水深30-80mの6定点を対象に、2011年6月から年4回の頻度で、若鷹丸および小型底曳網漁船を用いて、魚類および餌生物の採集を行っています(図1)。

◇仙台湾で採集された魚類のCs-137濃度は、事故後のいずれの期間であっても、福島県沿岸南部海域で採集された魚類より低い値でした(図2)。

◇仙台湾における、事故後1000-1500日の魚類のCs-137濃度は、測定された全ての魚類で10Bq/kg-wet以下になっていました(図2)。

◇仙台湾の事故後1000-1500日におけるCs-137濃度の大小関係は、魚食性 \geq 甲殻類食性 \geq ベントス食性 \geq プランクトン食性の順となっていました。この大小関係は、事故前の濃縮係数(笠松1999; 魚食性=60~90, 甲殻類食性=60, ベントス食性=30, プランクトン食性=30)と類似していました。仙台湾では初期汚染の影響が福島県に比べ大きくなかったため、食性の違いが顕在化していると考えられます。

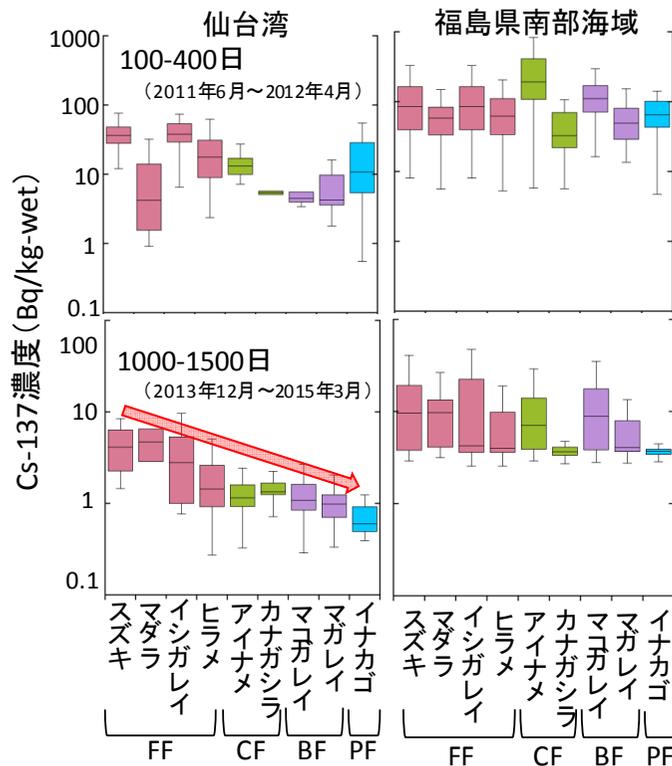


図2. 仙台湾および福島県沿岸域南部海域におけるCs-137濃度の魚種(食性)間比較. 福島県南部海域のCs-137濃度は、水産庁HPより引用した。各箱ひげ図の赤色は魚食性(FF), 緑色は甲殻類食性(CF), 紫色はベントス食性(BF), および水色はプランクトン食性(PF)をそれぞれ表す。

6. 東北海域におけるヒラメの汚染履歴の推定

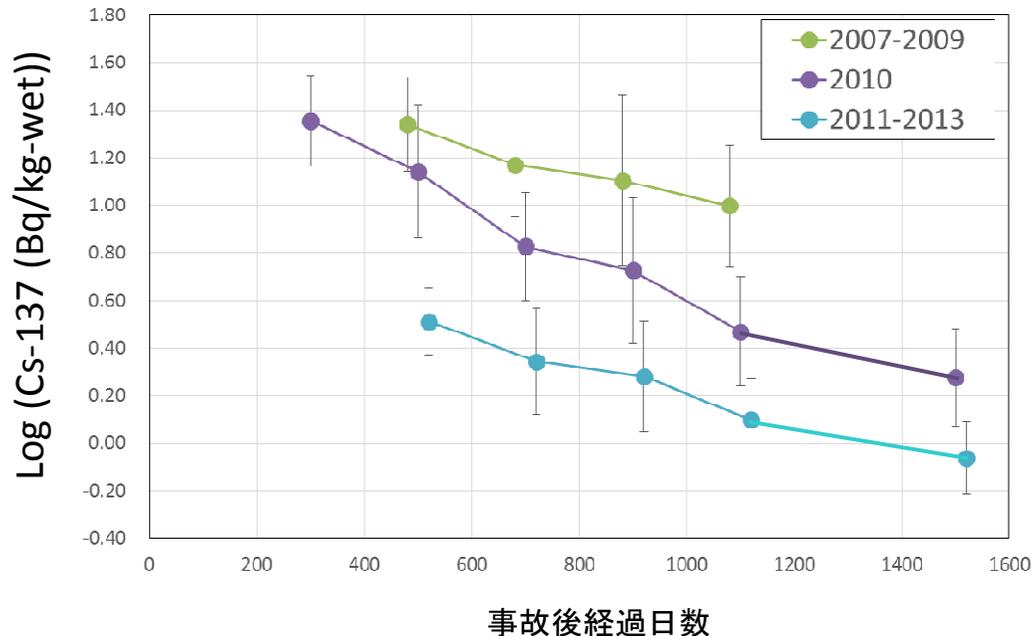


図1. 仙台湾で採集されたヒラメのCs-137濃度の推移

凡例の数字はヒラメの生まれた年(年級)を表す。Cs-137濃度は対数変換した値。プロットは平均値, 縦線は±標準偏差を表す。

◇仙台湾で採集されたヒラメのCs-137濃度の事故後の変化を, 生まれた年(年級)別に調べました(図1)。

◇事故前生まれ(2007~2009年級, 2010年級)にくらべ, 事故後生まれ(2011~2013年級)のCs-137濃度が低い原因は, 事故直後の汚染を経験した(事故前生まれ)かしていないか(事故後生まれ)の違いと考えられます。事故後4年以上経過した事故後1400~1600日においても, 両者の違いが認められました。両年級群間で分布や摂餌生態の違いはないので, 未だに事故当初の汚染強度の違いの影響が残っているのかもしれませんが, ただし, Cs-137濃度自体は事故前生まれが1.9Bq/kg-wet, 事故後生まれが0.87Bq/kg-wetであり, ともに低い値でした。

◇ともに事故前生まれの2007~2009年級と2010年級の違いは, 魚体の大きさによってセシウムの収支が異なることを示唆しています。

◇年級による濃度や低下速度の違いの原因を明らかにするためには, 海水からの取り込み係数, 摂餌量, 生物学的半減期(排出速度)を定量的に調べる必要があります。

7. 海底土から海産生物へ移行する放射性セシウムの評価

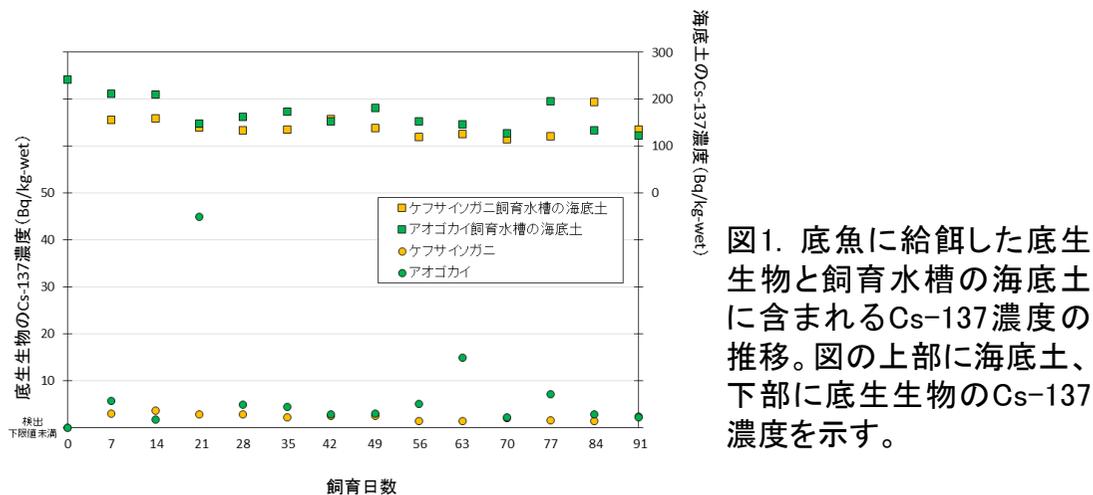


図1. 底魚に給餌した底生生物と飼育水槽の海底土に含まれるCs-137濃度の推移。図の上部に海底土、下部に底生生物のCs-137濃度を示す。

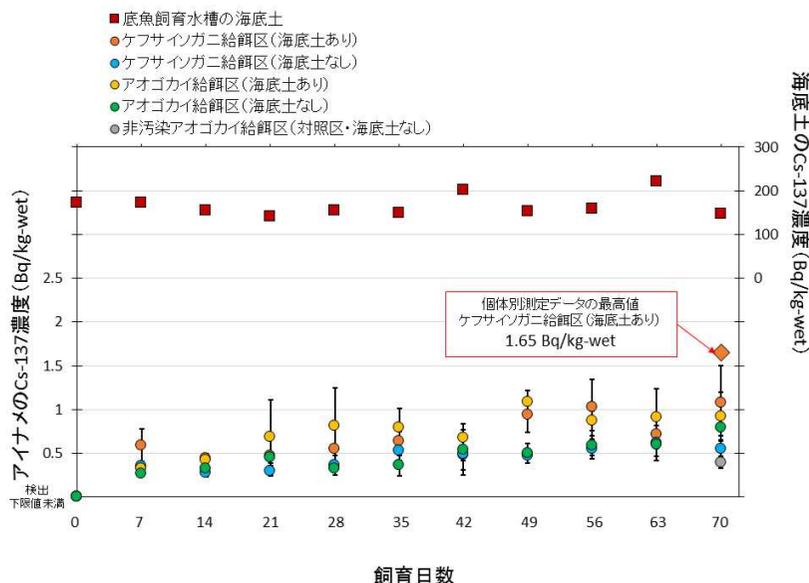


図2. アイナメと飼育水槽の海底土に含まれるCs-137濃度の推移。図の上部に海底土、下部にアイナメのCs-137濃度を示す。毎週、各試験区から数個体を採取し、個体別に筋肉部位試料を測定した。図中の○プロットとそのエラーバーは、複数個体の測定値から算出した算術平均値と標準偏差を示す。

◇ 飼育実験により、福島県沖の海底土から餌生物を介して底魚へと移行する放射性セシウムを評価しました。5t水槽を2基用意し、一方に福島県沖の海底土(実験開始時のCs-137濃度は242 Bq/kg-wet)を敷き詰め、もう一方には海底土を敷き詰めないで底魚のアイナメを飼育しました。飼育実験は小名浜沖から揚水した濾過海水のかけ流し条件下で行い、現在の福島県沖を想定した飼育環境を再現しました。

◇ アイナメに給餌する底生生物として、ケフサイソガニとアオゴカイを飼育しました(図1)。アイナメへの給餌を開始した飼育21日目以降におけるCs-137濃度の算術平均はアオゴカイで8.54 Bq/kg-wet、ケフサイソガニで2.06 Bq/kg-wetでした。この濃度は、2015年11月に福島県の南部沿岸域で採取した底生生物と同等の水準でした。

◇ 底生生物を給餌して飼育したアイナメのCs-137濃度は、実験開始直後に各試験区で微増した後は大きな変動はなく、概ね1 Bq/kg-wet以下の水準で推移しました(図2)。この結果から、現在の福島県沖において底魚が海底土から新たに放射性セシウムを取り込み、基準値を上回る水準に達する可能性は極めて低いという事が示されました。

8. 海底土中の放射性Csの水産物への影響評価

- F1 : (1M酢酸Na)抽出→イオン交換態(表面吸着物)
- F2 : (1M酢酸Na + 酢酸)抽出 →炭酸塩態
- F3 : (0.04M ヒドロキシルアミン)抽出 →Fe-Mn 酸化物態
- F4 : (0.02M 硝酸 + 30%過酸化水素水)抽出→有機物
- F5 : (残渣) →ケイ酸塩態

図1. Tessierら(1979)の逐次抽出法を用いた分画

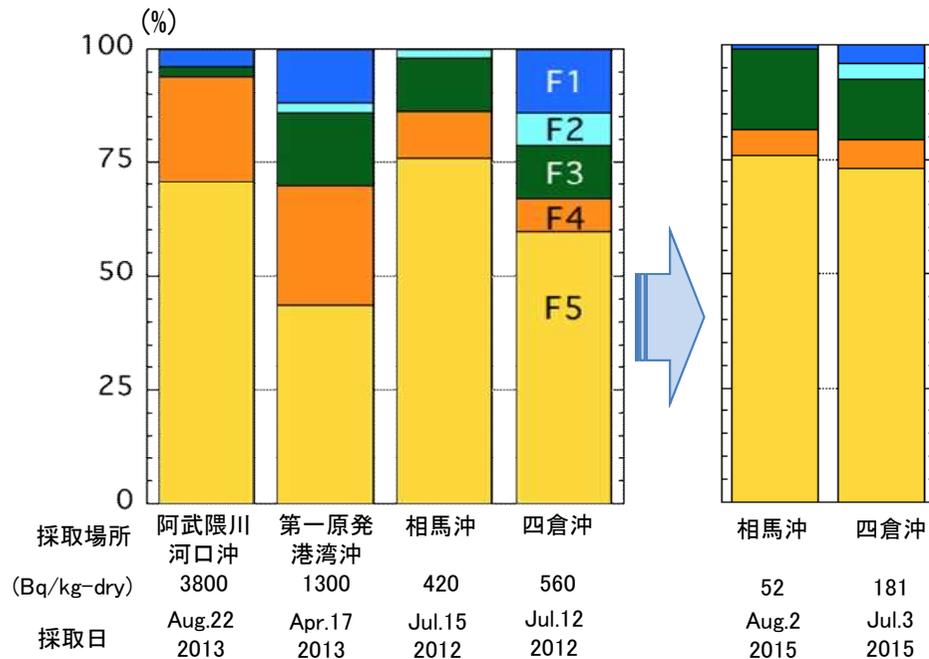


図2. 海底土中のCs-137量の形態別割合

◇放射性Cs (Cs-134 + Cs-137)によって汚染された海底土による水産物の汚染が懸念されているが、これまでの知見から、その海底土の一部しか水産物を汚染させないと示唆されます。本課題では、この水産物を汚染させると考えられる部分の割合、そしてその割合の経年変化を調べました。

◇逐次抽出法による分画(図1)を行いそれぞれのフラクション(F)の割合とそこに含まれる放射性Csの割合を調べました。F5は、水産物を汚染させない部分、その他の部分(F1~F4)は汚染させる能力がある部分と考えられます。

◇阿武隈川河口域の海底土はCs-137濃度が高いが、大部分のCs-137はF5に存在しています。一方、第一原発港湾沖ではF5に存在している割合は小さいです(図2)。

◇2012年と2015年を比較すると、相馬沖と四倉沖の両方で濃度の低下がみられ、かつ四倉沖ではF5に存在する割合が増加していました(図2)。

◇海底土のCs-137濃度は減少傾向にあり、F5に存在する割合も増える傾向にあることから、水産物に対する海底土汚染は改善方向に向かっているといえます。

9. 海産魚類におけるストロンチウム-90濃度

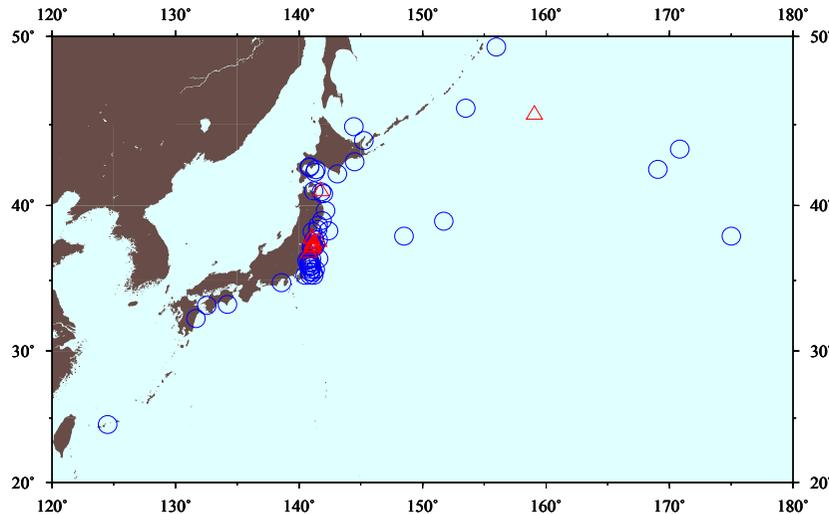


図1.これまで(2011年4月～2016年1月)放射性ストロンチウム濃度を分析した試料の採取地点。(△)は2016年度の採取地点。

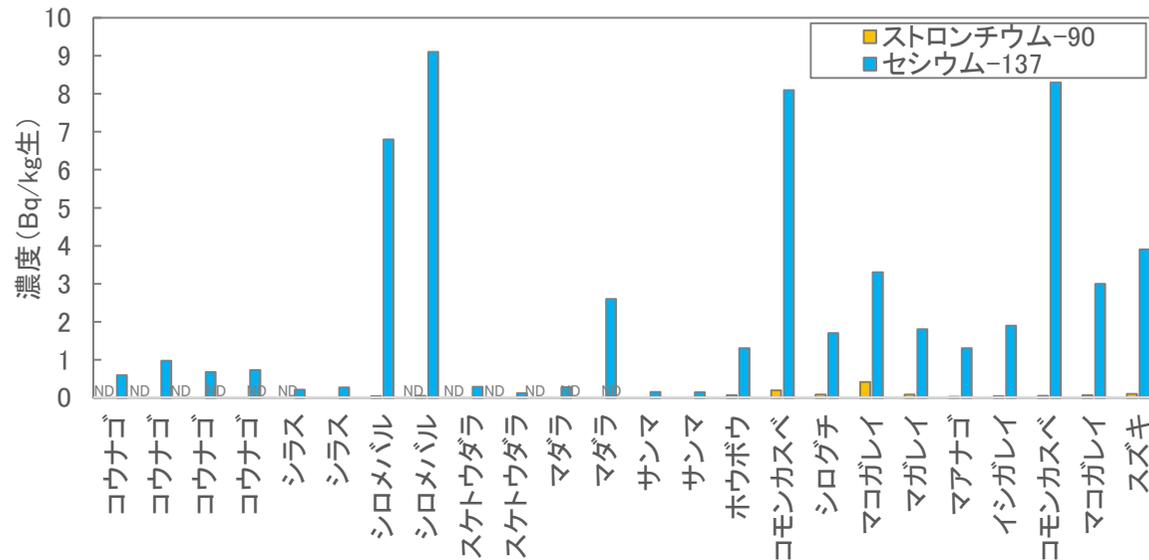


図2. 2015年度に採取した魚類におけるストロンチウム-90およびセシウム-137濃度の結果。NDは検出下限値未満。

◇ 福島原発事故によりストロンチウム-90を含んだ汚染水が海洋へ漏えいしていました。水産物中のストロンチウム-90汚染が心配されたため、我々は2011年4月から海産魚類を中心にモニタリング調査を行っています。

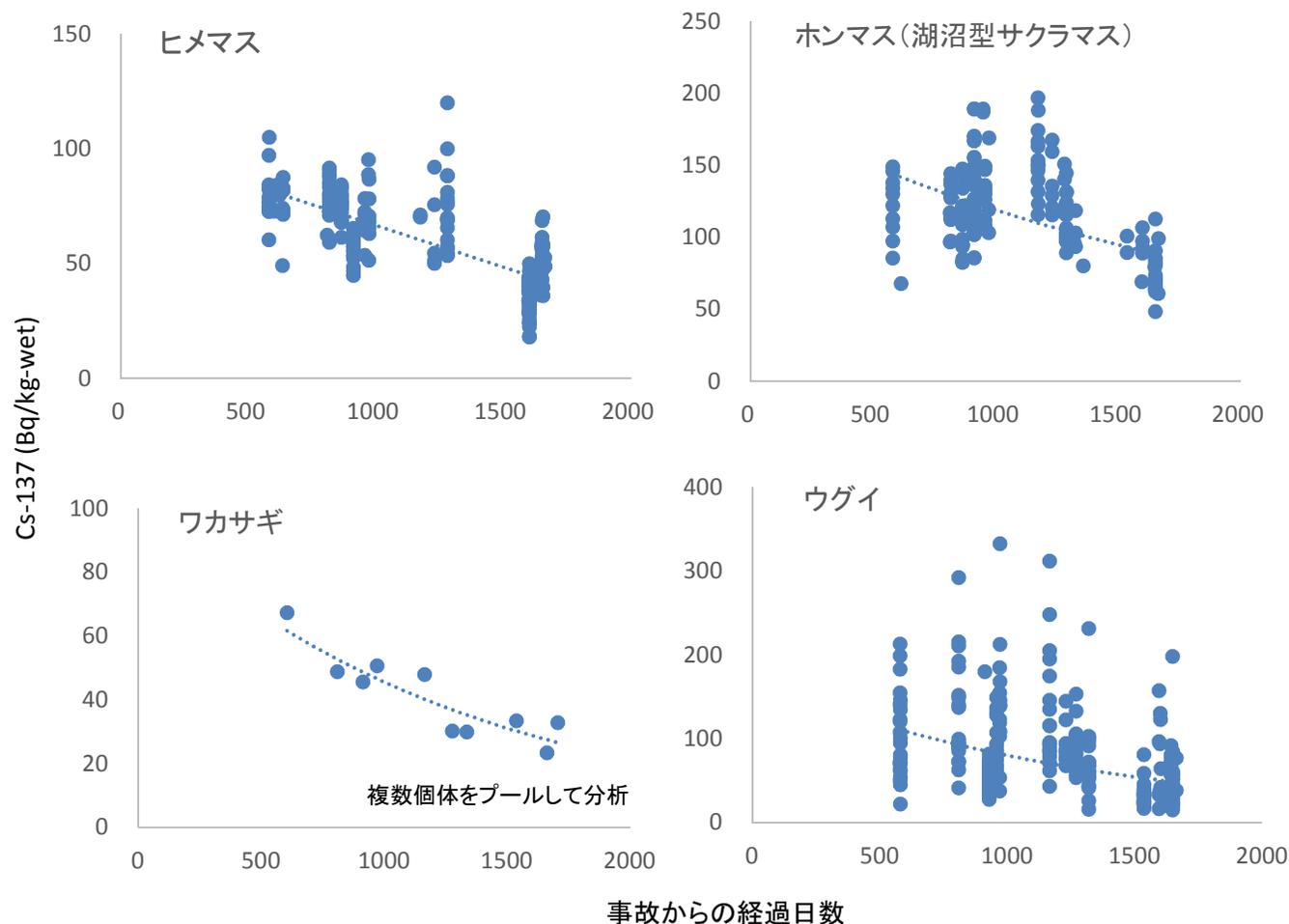
◇ 2015年度は15魚種24検体のストロンチウム-90濃度を測定しました(図1)。20検体は福島沖で採取、そのうちの12検体からストロンチウム-90が検出しましたが、いずれもセシウム-137よりも著しく低濃度でした(図2)。

◇ 福島県沖以外の魚類からは、2011年4月～2016年7月に至るまで、ストロンチウム-90は検出していません。

◇ これまでの水産物における放射性ストロンチウム濃度の測定結果は、下記リンク先をご参照ください。

<https://www.fra.affrc.go.jp/eq/result.html>

10. 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

◇ 水産総合研究センターは、2012年10月から栃木県中禅寺湖に生息する代表的な魚類について、放射性セシウム濃度の推移を調べる調査を実施しています。

◇ 中禅寺湖に生息するほとんど魚種から、放射性セシウム濃度の減少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、ワカサギやウグイでは約900日、ヒメマスでは約1000日、ホンマスでは約1500日と推定されました。

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濃度の推移。図中の点線は、統計学的に意味のある減少傾向があることを示す。

11. 福島県内河川における放射性セシウム移行経路調査

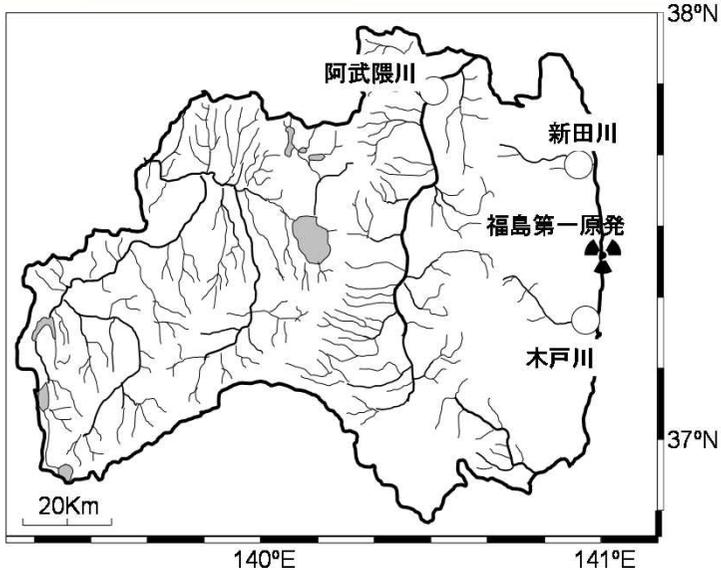


図1. 調査を行った3河川

- ◇ 福島県浜通りの新田川、木戸川、中通りを南北に貫く阿武隈川（宮城県内の支流白石川を除く）では、アユの出荷制限が続いています。
- ◇ 2011年から2015年にかけて、福島県内をながれる3河川（図1）で、付着物（アユの餌生物）、アユの内臓（胃内容物を含む）および筋肉のCs-134 + Cs-137濃度をモニタリングしたところ、時間の経過とともに減少する傾向がみられました（図2）。
- ◇ 筋肉のCs-134 + Cs-137濃度は、内臓より変動が少なく、内臓の濃度の16%程度でした。
- ◇ 物理的半減期がおよそ30年と長いCs-137について、濃度の明瞭な減少傾向がみられるようになった2013年以降のデータを用いて、実効生態学的半減期（Cs-137濃度が半分になるまでに要する時間）の推定を行いました。その結果、Cs-137濃度の実効生態学的半減期は、アユの内臓で457～520日、筋肉で556～997日と推定されました（表1）。

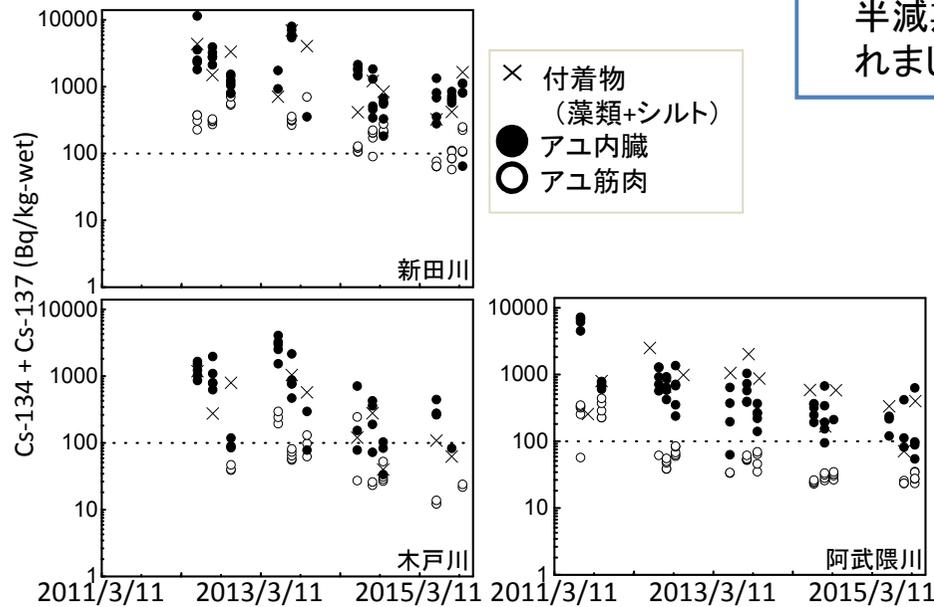


図2. 付着物（アユの餌生物である藻類およびシルト、×）、アユの内臓（●）および筋肉（○）のCs-134 + Cs-137の濃度

表1. 2013～2015年のCs-137濃度から推定したアユ内臓および筋肉の生態学的半減期（日）

		サンプル数	初期濃度 (Bq/kg wet)	減少係数	生態学的半減期 (日)
新田川	内臓	39	6000	0.00134	520
	筋肉	50	440	0.00085	812
阿武隈川	内臓	60	976	0.00140	494
	筋肉	53	57	0.00070	997
木戸川	内臓	42	2550	0.00152	457
	筋肉	41	198	0.00125	556

12. 福島県内湖沼における魚類の餌の放射性セシウム濃度

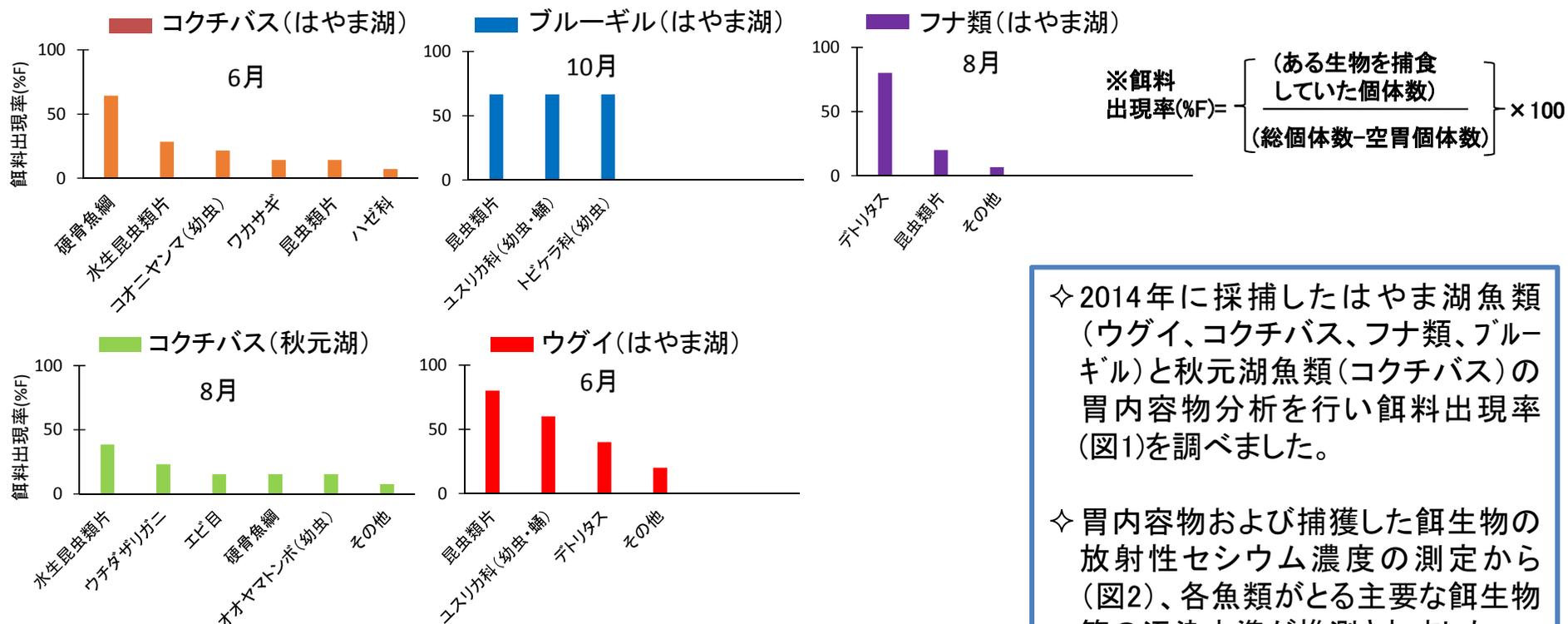


図1. 魚類(2014年採捕)の胃内容物と餌料出現率

◇ 2014年に採捕したはやま湖魚類(ウグイ、コクチバス、フナ類、ブルーギル)と秋元湖魚類(コクチバス)の胃内容物分析を行い餌料出現率(図1)を調べました。

◇ 胃内容物および捕獲した餌生物の放射性セシウム濃度の測定から(図2)、各魚類がとる主要な餌生物等の汚染水準が推測されました。

◇ 餌から魚類筋肉への主な放射性セシウムの移行経路は、はやま湖のコクチバスには魚から、秋元湖のコクチバスには甲殻類と魚から、はやま湖のブルーギルにはユスリカや昆虫から、はやま湖のウグイにはユスリカや昆虫、デトリタスから、はやま湖のフナ類にはデトリタスからであると推測されました。

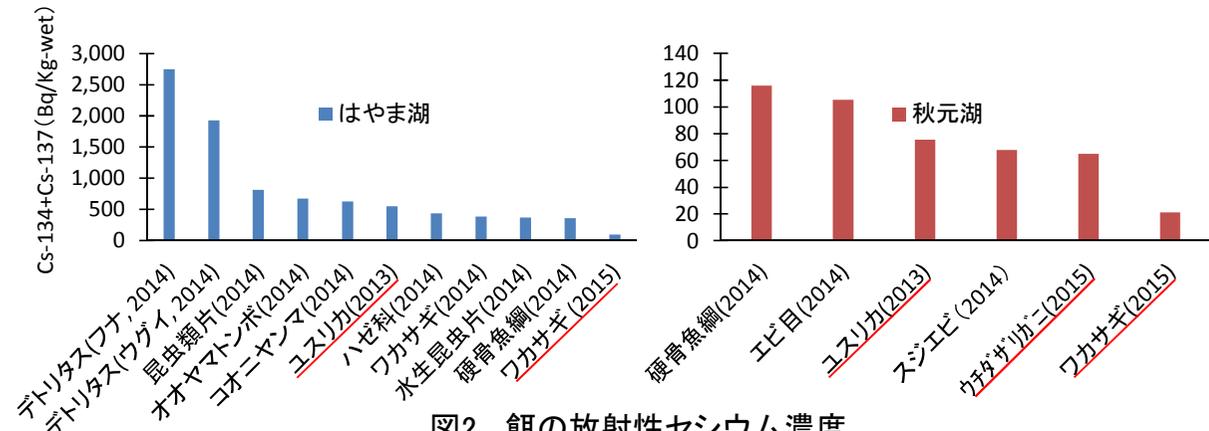


図2. 餌の放射性セシウム濃度

※()は採取した年、放射性セシウム濃度は採取した年の値
 — 捕獲した餌生物

13.千葉県内湖沼河川における淡水魚の調査結果

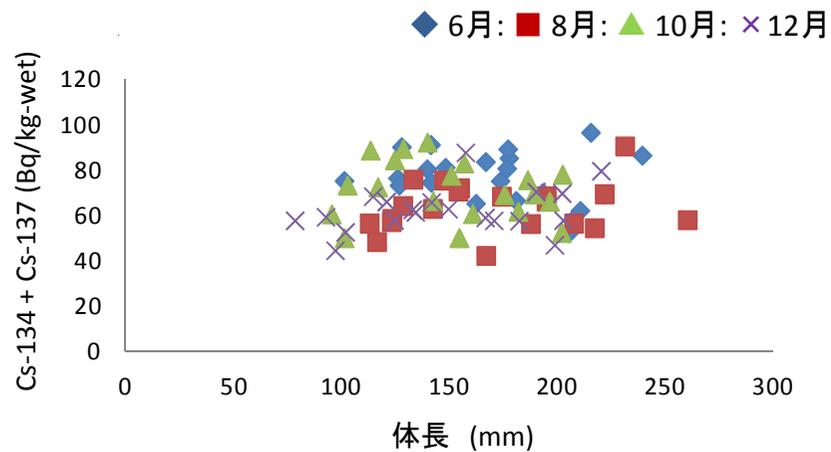


図1. 千葉県手賀沼において採集したギンブナの体サイズとCs-134 + Cs-137濃度との関係

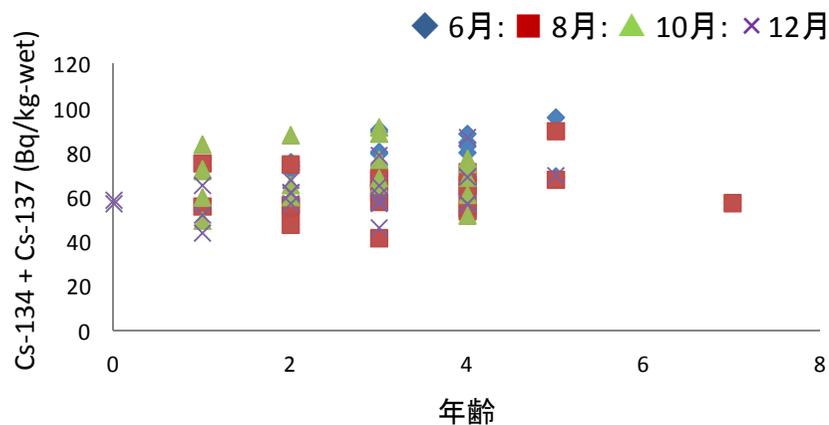


図2. 千葉県手賀沼において採集したギンブナの年齢とCs-134 + Cs-137濃度との関係

◇千葉県手賀沼(流入河川を含む)では、ギンブナ、コイ、ウナギ、モツゴに県の要請による出荷自粛または国による出荷制限が行われています。

◇2015年6月から12月にかけて、手賀沼に生息するギンブナとモツゴを採集し、体サイズ、年齢と放射性セシウム濃度との関係を調べました。

◇ギンブナでは放射性セシウム濃度と体サイズ、年齢との間に明瞭な関係が見られなかったのに対し(図1, 図2)、モツゴでは高齢・大型個体ほど放射性セシウム濃度が高くなる傾向が認められました(図3)。

本調査は、千葉県水産総合研究センターと共同して実施しました。

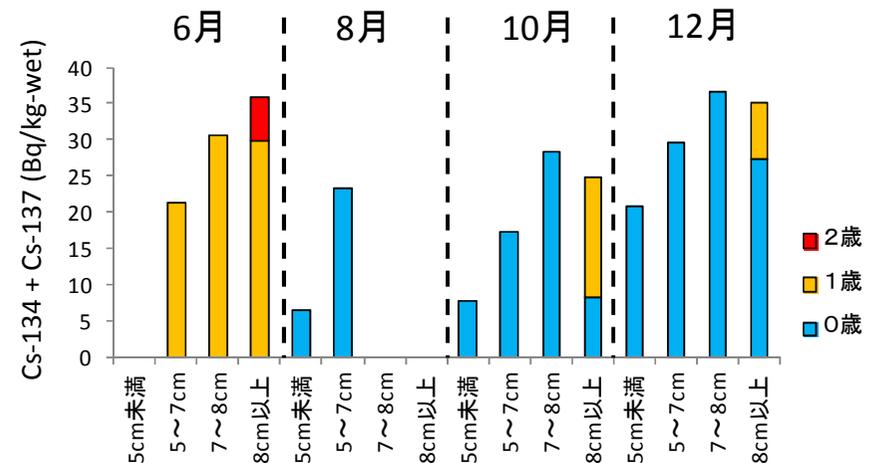


図3. 千葉県手賀沼において採集したモツゴの体サイズ、年齢とCs-134 + Cs-137濃度との関係 (Cs-134 + Cs-137濃度は複数個体をプールした値)