

平成25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26年6月
(独)水産総合研究センター

-目次-

0. はじめに
1. 福島県とその近接水域における水とプランクトンの状況
2. 河川から海域への放射性物質の放出
3. 海洋底層の環境長期連続モニタリング
4. 福島沿岸のベントスの状況
5. 福島沿岸の底魚における放射性セシウム濃度
6. スズキの放射性セシウムの動向
7. 東北海域のヒラメの汚染状況の推移
8. マダラの汚染状況の推移
9. 飼育実験による底魚類の汚染・排出過程の調査
10. 水産物中の放射性ストロンチウムについて
11. 湖沼性魚類の放射性セシウム濃度の推移
12. ヒメマス、ホンマスの放射性セシウム排出過程
13. 湖水に含まれる放射性セシウム濃度の季節変動
14. アユの放射性セシウム取り込み経路の解明

0. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所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2014年5月末までの間に、福島県の水産物について、19,927検体の検査が行われています。2011年4-6月には100Bq/kg-wetを超過する割合が53 %もありましたが、2014年1-3月にはその割合は1.7 %まで減少しており、汚染の程度は着実に改善の方向に向かっています。加えて、今回の事故後、福島県漁業協同組合連合会は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。2013年8月、東京電力は事故後継続して放射性セシウム等を漏洩し続けていたことを公表しましたが、その影響は福島第一原発専用港内及びその近傍でのみ見られるだけであり、試験操業海域での影響は全く見られていません。しかしながら、このような状況下でも、未だ流通する水産物の安全性に疑問をもたれています。

現状のように水産物の汚染が軽減したのは必然的であり、その背景には科学的根拠が存在しています。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は、水生生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生生物が汚染されるのか、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重要であると、私たちは考えています。私たち独立行政法人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」を実施してきました。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. 福島県とその近接水域における水とプランクトンの状況

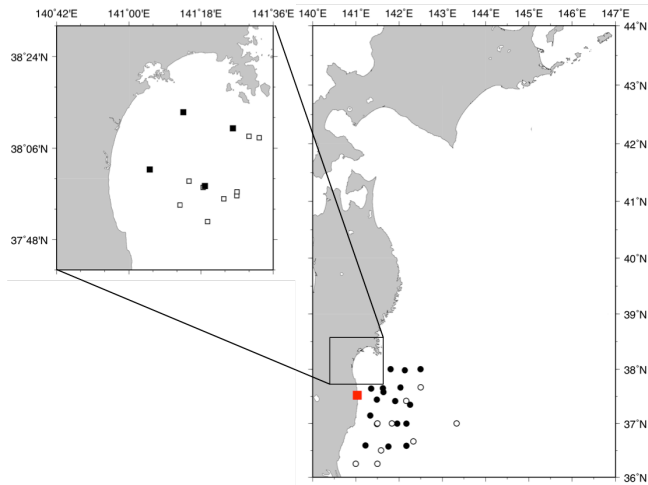


図1. 水研センターによる海水および動物プランクトン採集地点(2011年~2013年)。

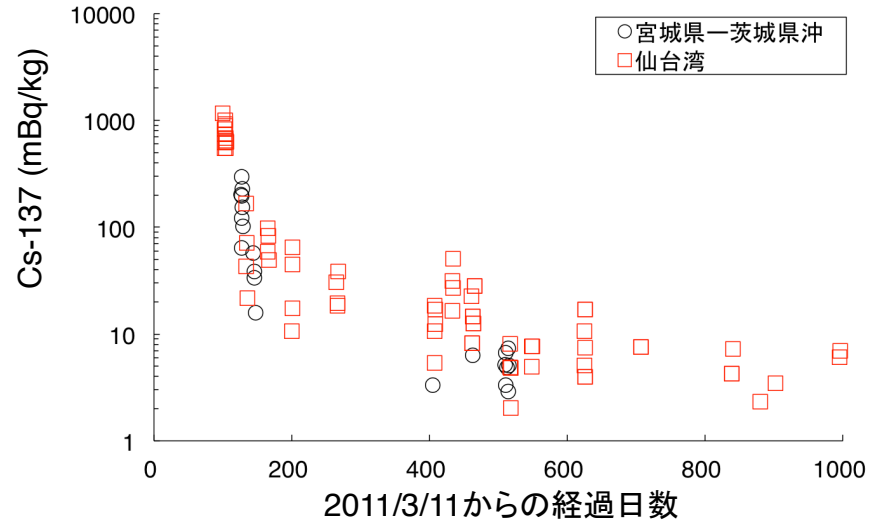


図2. 宮城県一茨城県沖海域および仙台湾における海水の放射性セシウム(Cs-137)濃度の時間変化。

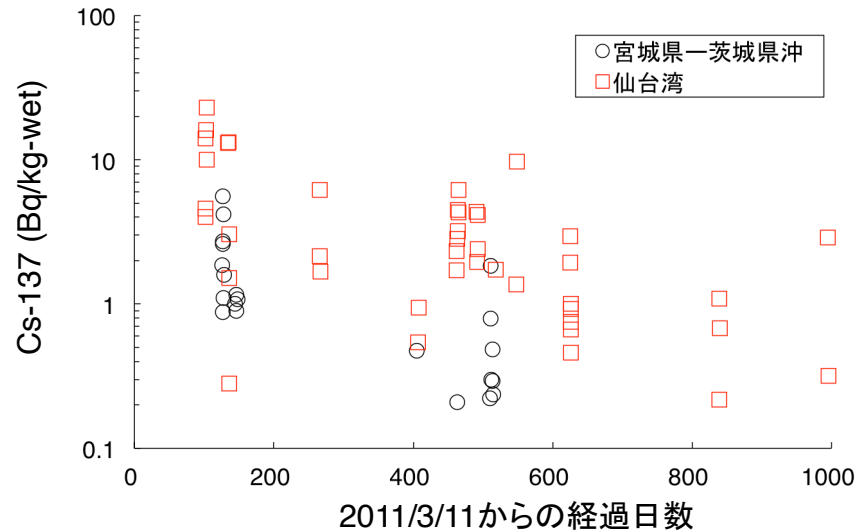


図3. 宮城県一茨城県沖海域および仙台湾における動物プランクトンの放射性セシウム(Cs-137)濃度の時間変化。

◇ 2012年末まで順調に低下した宮城県一茨城県沖海域と同様に仙台湾の海水の放射性セシウム濃度は2013年以降も順調に低下し, 2013年末には事故以前の水準(~2mBq/kg)と同程度まで低下しました(図2)。

◇ 動物プランクトンの放射性セシウム濃度も海水と共に順調に低下しており, 濃度にばらつきが見られるものの, 1Bq/kg-wet以下の範囲で変動しました(図3)。

2. 河川から海域への放射性物質の放出

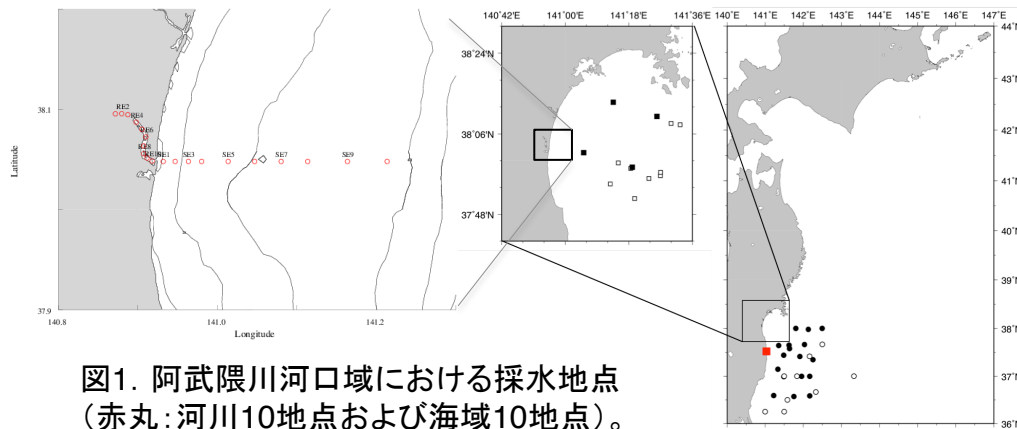


図1. 阿武隈川河口域における採水地点
(赤丸: 河川10地点および海域10地点)。

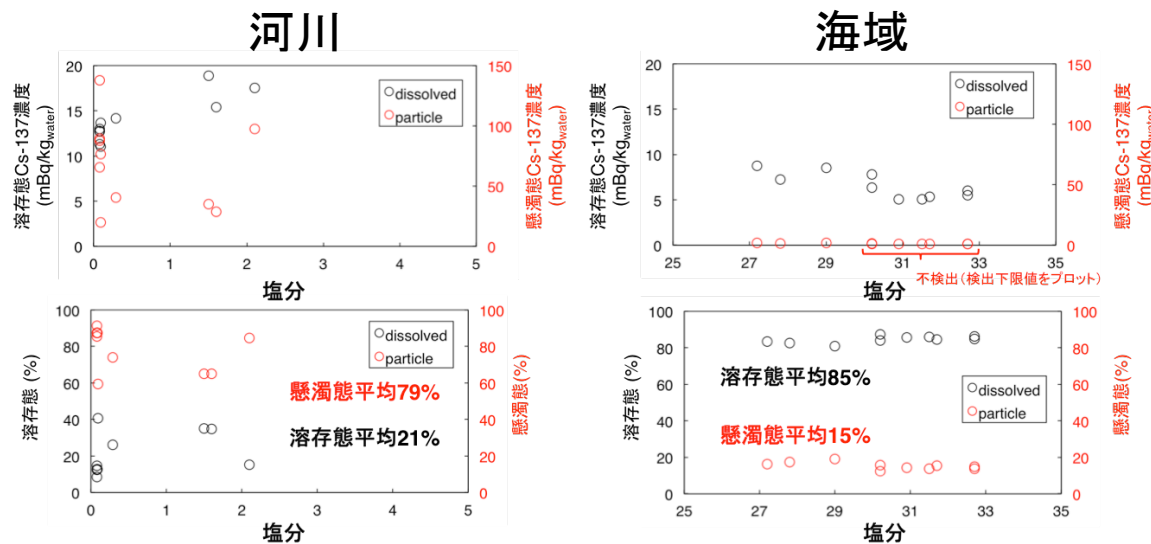


図2. 阿武隈川河口域における塩分と溶存態および懸濁態放射性セシウム (Cs-137)濃度 (上図) および存在割合 (下図) の関係。

◇ 阿武隈川河口域において、陸域から海域へ供給される放射性セシウムの存在状態を、溶存態(水)と懸濁態(粒子)に分け調査しました(図1)。

◇ 塩分が0~2‰程度の河川では放射性セシウムの79%が懸濁態で存在しました。一方で、塩分が27‰以上の海域では放射性セシウムの85%が溶存態で存在することが明らかとなりました(図2)。

◇ 同様な観測結果は福島県夏井川の河口域においても観測されており¹、陸地から河川を通じて海域へ供給される粒子に吸着した放射性セシウムの一部は海水と混合することで溶出し、溶存態へと変質していることが示唆されました。

◇ 一方で、海域の溶存態放射性セシウム濃度は沖合の濃度と同程度であり、懸濁態から溶存態へ移行した放射性セシウムはすぐに希釈されるものと考えられます。

1: 帰山ら: 2013年度日本地球化学会第60回年会講演要旨集

3. 海洋底層の環境長期連続モニタリング

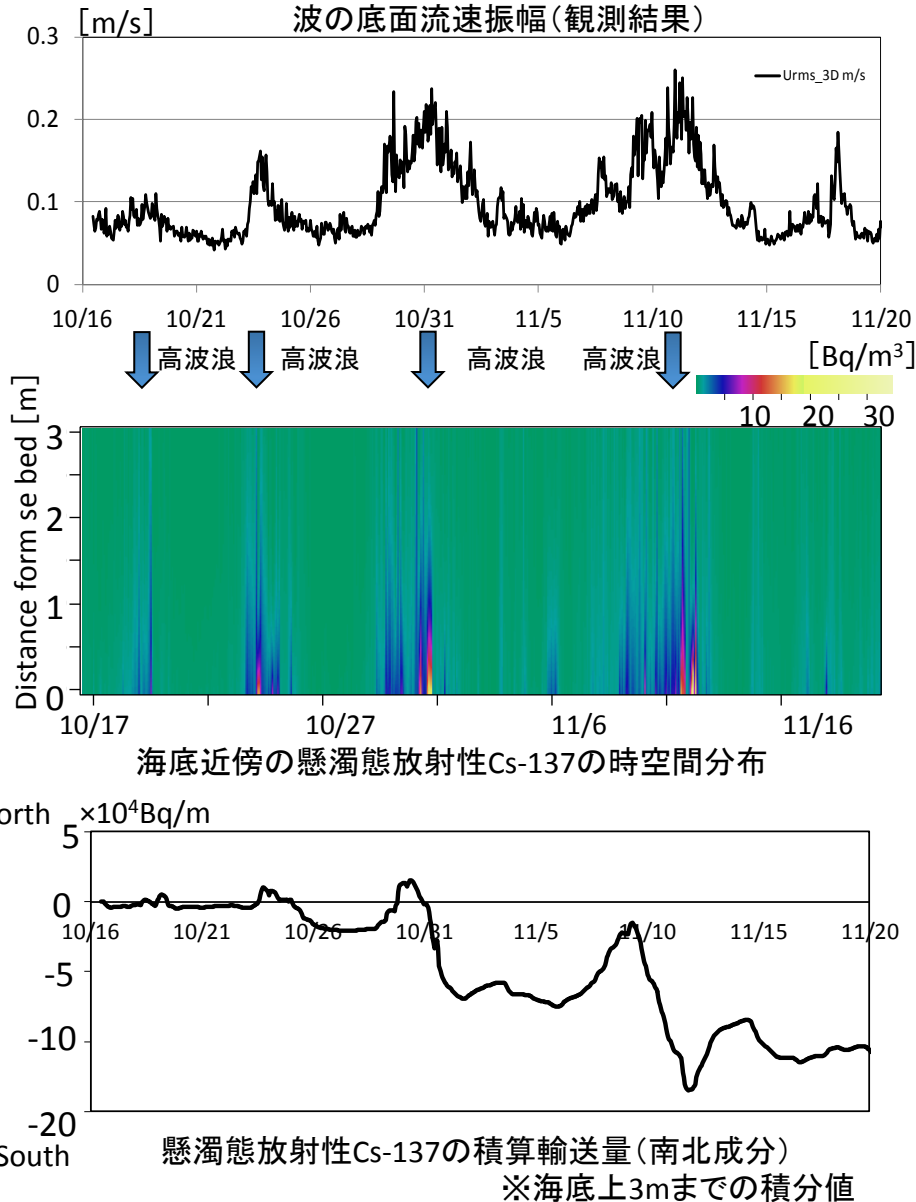


図-1 観測結果から推定されたいわき沖水深30m帯底層の懸濁態放射性セシウム-137濃度の時空間分布と積算輸送量。

◇底魚類などへの影響が懸念される海底土や海底付近の懸濁物を介した放射性物質の移動・挙動を把握するため、福島～茨城県海域を対象とした底層環境と海底土・懸濁物動態に関する下記の2種類のモニタリングを2012年10月から継続的に実施しています。

◇モニタリングは、基本的な環境項目(流れ, 底層濁度)を長期間連続計測する『底層環境連続モニタリング』と海底地形や底層懸濁物を含む海底境界層の詳細な挙動を集中的に計測する『海底境界層観測』から構成されています。

◇これまでの調査結果に基づき、海底近傍の懸濁態放射性セシウム(Cs)-137の時空間分布、水平方向の輸送量を算出し、いわき沖水深30m帯海底では、高波浪時に海底上2~3mの範囲で懸濁態放射性Cs-137濃度が上昇、これが数日スケールの流速変動と相まってステップ的に沿岸方向に輸送される性質などが確認されています。

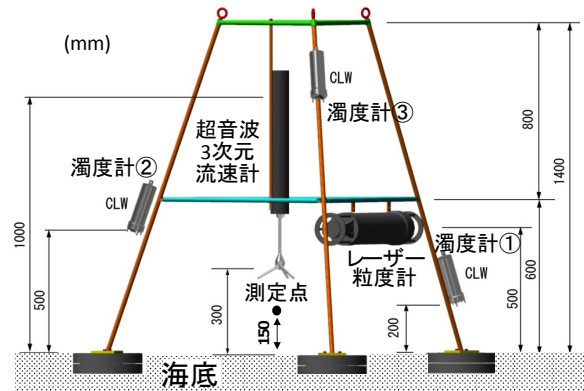


図-2 海底境界層観測システム FRA-TRIPOD

4. 福島沿岸のベントスの状況

表1. 2013年10月に調査地点1で採取したベントスと魚類の放射性セシウム濃度。

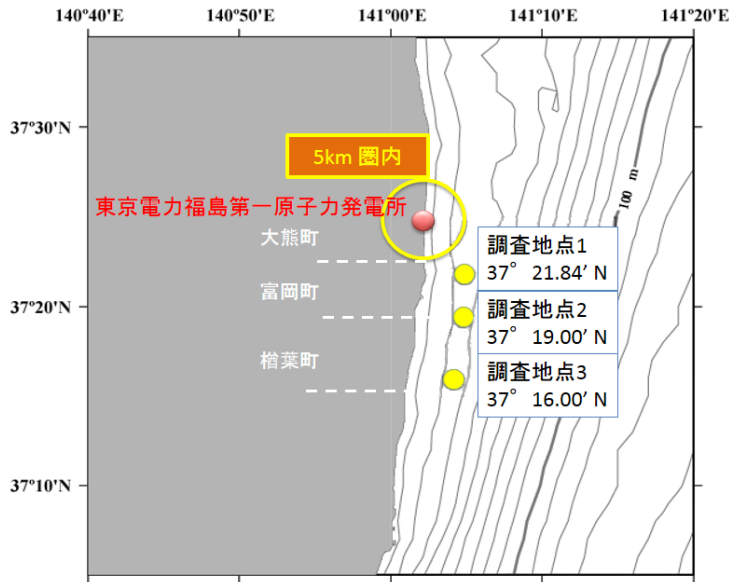


図1. ベントスの調査地点。

分類群・種名等	測定部位	Cs-134 + Cs-137 (Bq/kg-wet)
テロリ類	全体	検出限界未満
イソメ類	全体	11.2
ハボウキゴカイ類	全体	99.4
ホシムシ類	全体	15.0
フサゴカイ類	全体	30.2
オフエアゴカイ類	全体	検出限界未満
ウロコムシ類	全体	12.1
サメハダヘイケガニ	全体	4.37
エビジャコ類	全体	1.09
ヤドカリ類	全体	6.84
ヒラコブシ	全体	3.58
ヒラメ	筋肉	23.3
コモンカスベ	筋肉	161
アイナメ	筋肉	14.9
シロメバル	筋肉	202
イシガレイ	筋肉	14.8
ババガレイ	筋肉	161

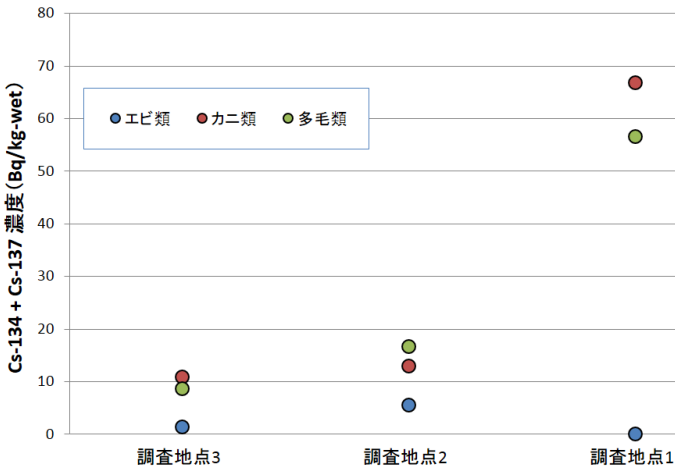


図2. 2013年5月に原発南側の沿岸域で採取したベントスの放射性セシウム濃度。

- ◇ 本調査で採取したベントスの放射性セシウム濃度は数～数十Bq/kg-wetの範囲にありました。調査地点1は、その他の調査地点と比較して高めの値を示しましたが(図2)、種組成の違いが影響していると考えられました。
- ◇ より細かな分類群に分けた結果、分類群によって明確な違いが認められました。比較的高い値を示したハボウキゴカイ類の体内には、摂餌の際などに混入したと考えられる海底土が確認でき、ベントスにおける放射性セシウム濃度の測定値には、体内または体表に付着した海底土が影響を及ぼしていると考えられました。
- ◇ ベントスと同じ海域で採取した魚類からも基準値を上回る値の放射性セシウムが検出されており、今後も同海域においてベントスとその捕食者である底魚について、放射性セシウムの調査を行う予定です。

5. 福島沿岸の底魚における放射性セシウム濃度

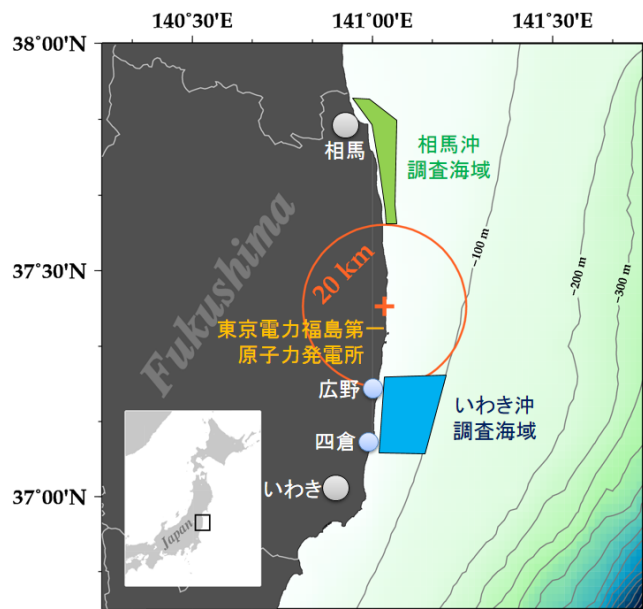


図1. 福島県沖の調査海域

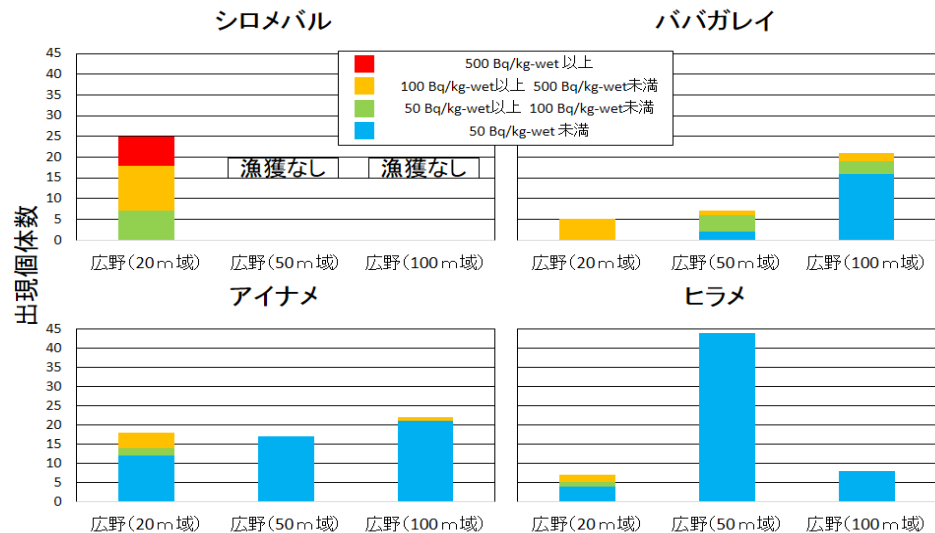


図3. 2013年に広野沖で採取した底魚4種の個別測定結果に基づく放射性セシウム濃度の階級別出現個体数

* 放射性セシウム濃度はCs-134 + Cs-137

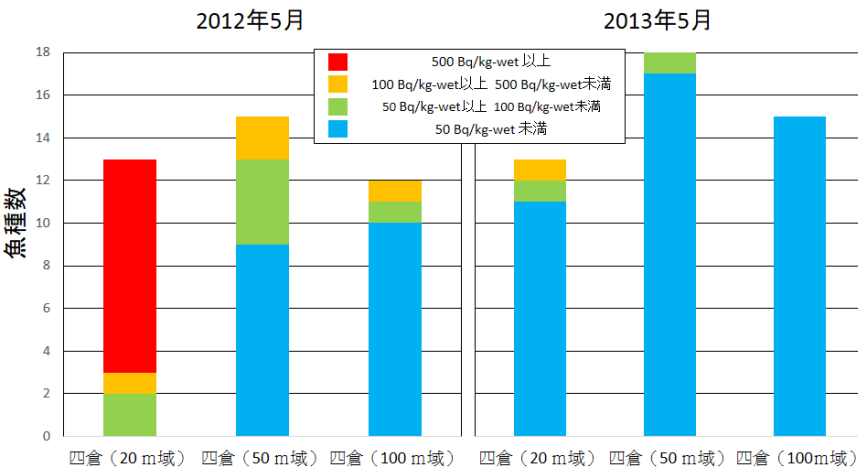


図2. 四倉沖で水深別に採取した底魚の放射性セシウム濃度*階級別出現魚種数

* 放射性セシウム濃度はCs-134 + Cs-137

* 個別測定した魚種は全個体の幾何平均値を代表値とした

◇ 四倉沖では水深の異なる調査地点で採取した底魚について、2012年5月と2013年5月の調査結果とを比較しました(図2)。その結果、いずれの水深帯においても基準値を上回る魚種の出現率は順調に低下していることが明らかになりました。

◇ 広野沖では、個別に筋肉試料の放射性セシウム濃度を測定しました。500Bq/kg-wetを超える個体が出現したのはシロメバルの水深20m以浅のみでした。また、魚種によって放射性セシウム濃度の階級別出現パターンには違いが認められ、魚種ごとの生理・生態学的な特徴が影響している可能性が示唆されました。

6. スズキの放射性セシウム濃度の動向

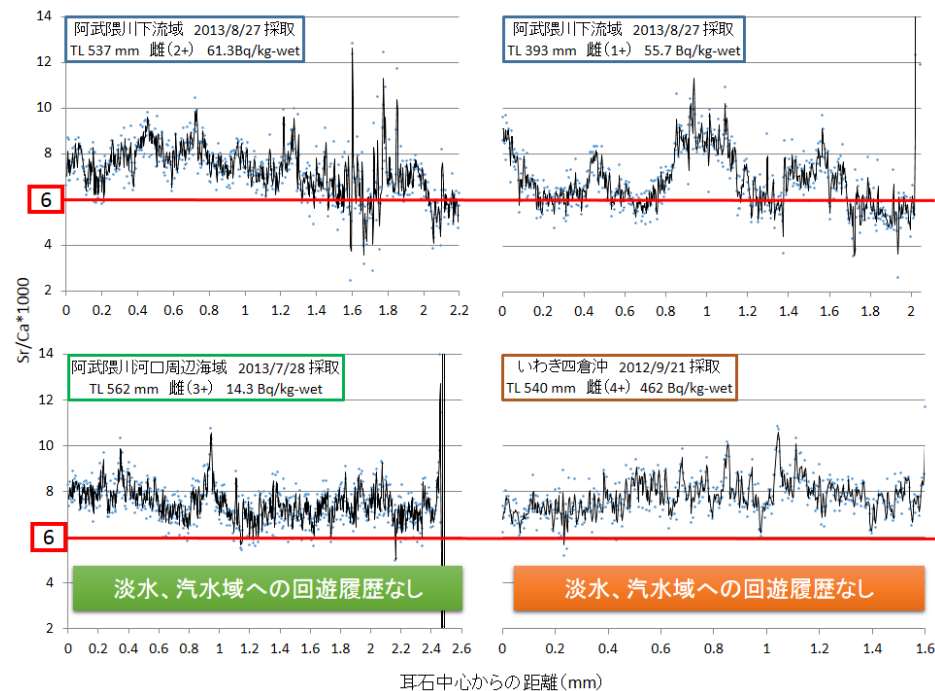
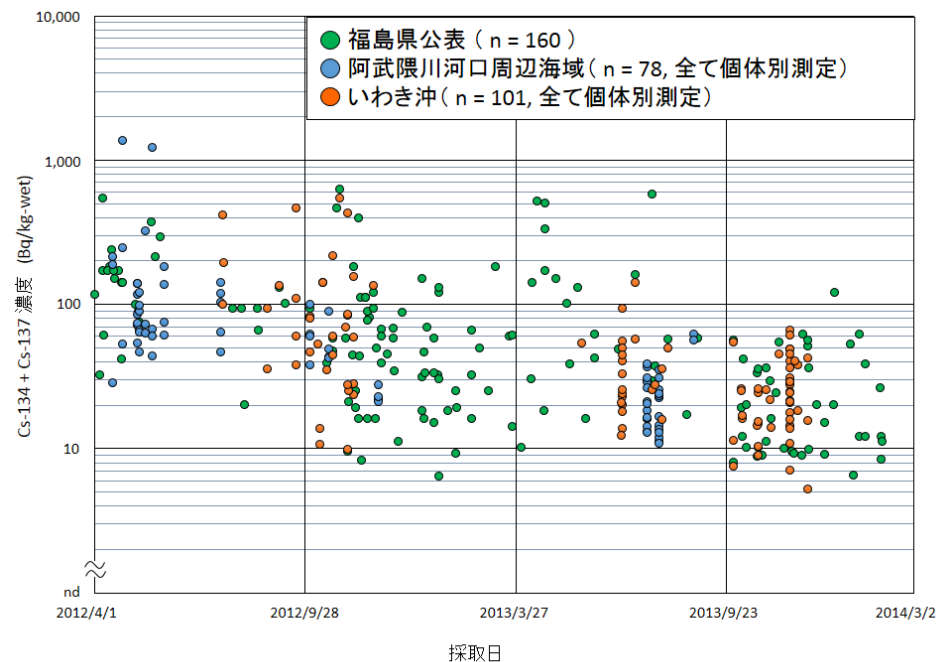


図1. 阿武隈川河口周辺および福島県沖で採取されたスズキの筋肉中の放射性セシウム濃度。

図2. スズキ耳石の微量元素分析。

- 比較的高濃度の放射性セシウムが検出されているスズキについて、これまで公表されているデータに2013年のデータを加えて時系列的な推移を分析を行ったところ、福島県沖と阿武隈川河口周辺海域のいずれの調査地点においても、スズキの放射性セシウム濃度は漸減傾向にある事が明らかになりました(図1)。また、2013年4月以降に採取したスズキの放射性セシウム濃度幾何平均値は福島県沖で24.6 Bq/kg-wet (n = 67)、阿武隈川河口周辺海域で21.0 Bq/kg-wet (n = 31)となり、調査地点間で有意な差は認められませんでした(t検定 $P > 0.05$)。
- 耳石の微量元素分析では、塩分濃度と飼育水温を調整した飼育実験を行い、河川利用の目安はSr/Ca=6/1000前後である事が明らかになりました。この指標値を基に解析を行ったところ、2011年春以降に一定期間河川を利用していた可能性がある個体は6/38個体で、全体の2割に満たない事、これら河川を利用していた可能性のある個体の放射性セシウム濃度はいずれも基準値を下回る値であった事、基準値を上回っていた個体には明確な河川利用履歴が認められなかった事から、河川の利用履歴と放射性セシウム濃度との間に明確な関連性はなく、スズキで基準値を上回る個体が出現する要因は、河川利用が原因でないと考えられました。

7. 東北海域のヒラメの汚染状況の推移

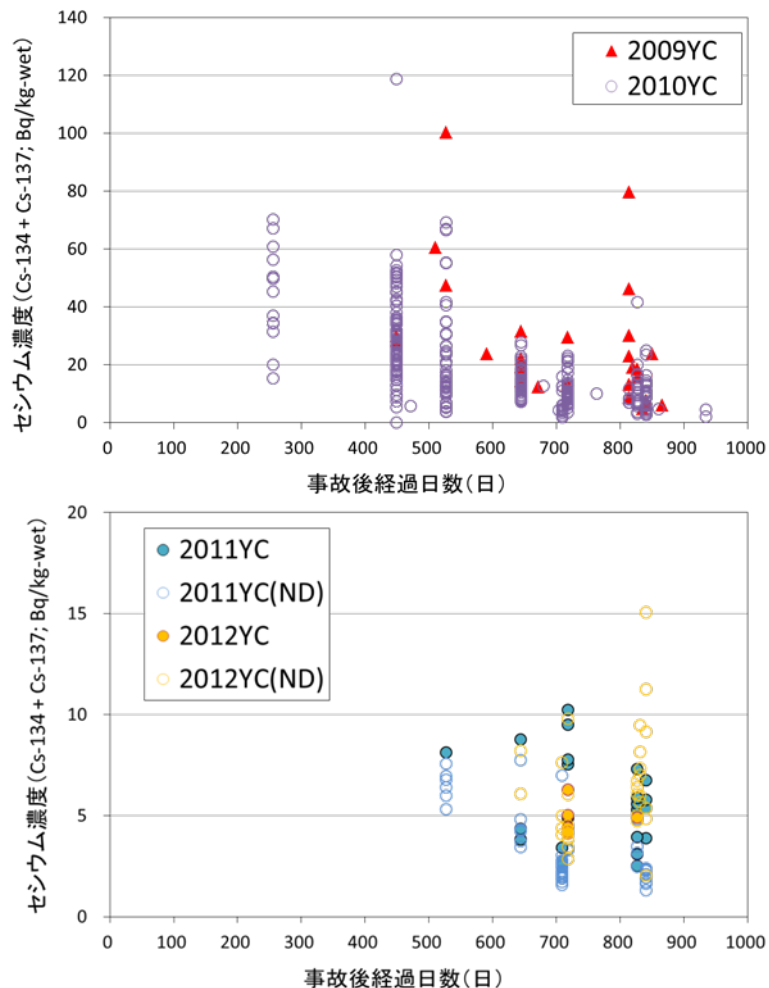
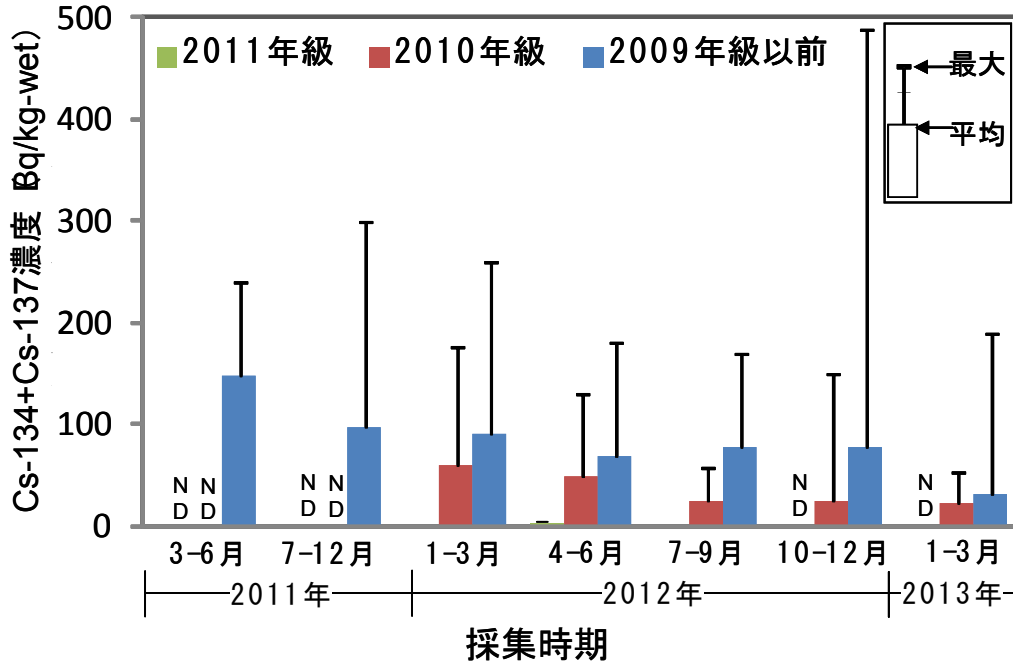


図1. ヒラメ年級群別の事故後経過日数と放射性セシウム濃度の関係。2009、2010年級群(YC)(上)と2011、2012YC(下)。2011YC(ND)、2012YC(ND)は検出限界値以下であった個体で、放射性セシウム濃度は検出限界値を示した。上下図のY軸の値が異なることに注意。

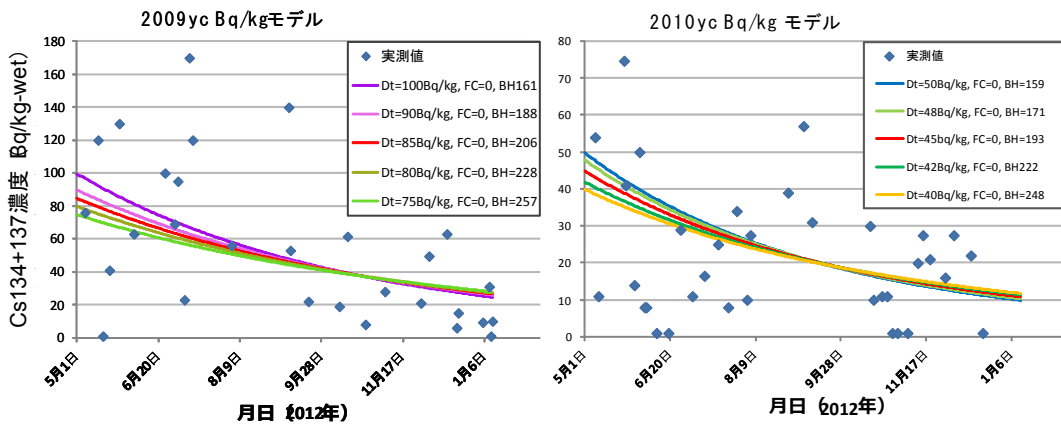
- ◇ 東北海域のヒラメについて、年級群ごとに放射性セシウム濃度の時系列変化を調べて、年級群間の違い、特に事故前に生まれた年級群と事故後に生まれた年級群の違いの有無を検討しました。ヒラメ稚魚は7月前後に着底することから、2011年級、2012年級は、それぞれ、2011年7月以降、2012年7月以降の放射性セシウム取り込み量の指標となります。
- ◇ 事故前に生まれた2009、2010年級群(YC)と事故後に生まれた2011、2012YCの放射性セシウム濃度の推移は明瞭に異なっていました(図1)。2009、2010YCはモニタリング開始時の最大値が100Bq/kg-wet程度でしたがその後減少傾向が認められました。これに対して、2011、2012YCの放射性セシウム濃度はほとんどの個体が検出限界以下であり、測定された最大値はそれぞれ10.2、6.3 Bq/kg-wetでした。年級群間の違いは、全長-放射性セシウム濃度関係でも明瞭に認められました。
- ◇ 以上のことから、事故後数ヶ月以降では、ヒラメによる放射性セシウム取り込み量は少ないと推察されました。2010YCより高齢の個体で相対的に高い放射性セシウム濃度である個体も、減少過程にあると考えられます。

8. マダラの汚染状況の推移



- ◇ 時間の経過に伴うマダラの放射性セシウム濃度の減少過程を年齢別に調べるとともに、放射性セシウムの摂取が低いと考えられる大陸棚斜面に分布している時期の放射性セシウム濃度の減少過程を2009以前の年級と2010年級について調べました。
- ◇ 放射性セシウム濃度はより高齢の年級ほど高い傾向が認められ、いずれの年級でも減少傾向が認められました。震災発生時に生まれて間もない仔魚だった2011年級からはごく低濃度の放射性セシウムしか検出しないことが明らかになりました。

図1. 2011年3月～2013年3月における年級別放射性セシウム濃度の時系列変化。



- ◇ 陸棚斜面域に分布している時期(5～1月上旬)の放射性セシウム濃度は、時間の経過とともに大幅な減少が認められました。その海域での放射性セシウム摂取を0と仮定したときの放射性セシウム濃度が半減する日数は2009年以前の年級で206日、2010年級で193日前後と推定されました。

図2. 2012年5月～12月におけるマダラ2009、2010年級の放射性セシウム減少過程とその関係式。

9. 飼育実験による底魚類の汚染・排出過程の調査

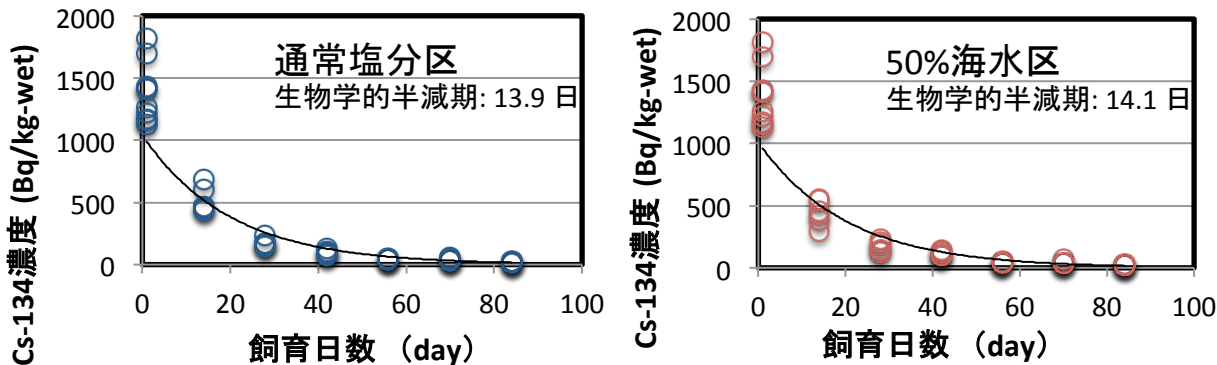


図1. 筋肉中のCs-134濃度がほぼ一定となるように調整したヒラメ幼魚を用いた飼育実験結果。

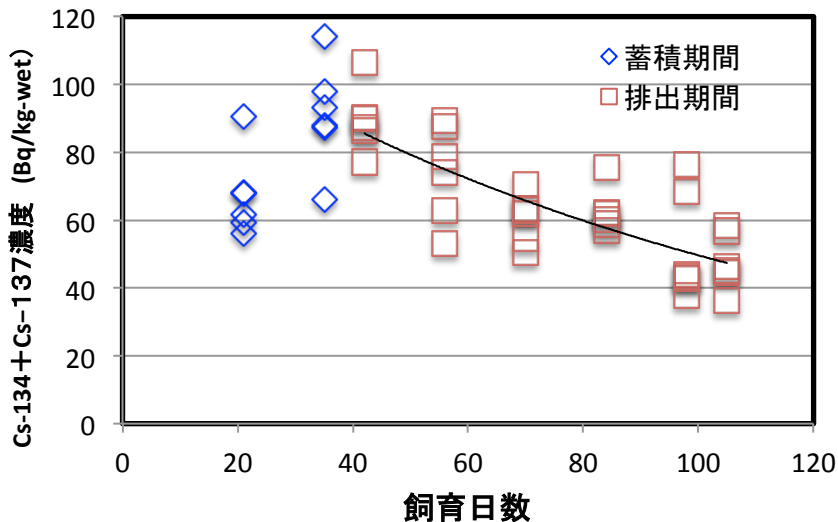


図2. 既知濃度の放射性セシウム投与によるヒラメ筋肉中の放射性セシウム濃度の変化。

◇ヒラメ稚魚を用いた排出試験では、通常海水区と塩分を半減させた50%海水区において放射性セシウムの排出に差はありませんでした。

◇推定された生物学的半減期は約14日でした。これは幼魚の成長により魚体が大きくなるにつれ、単位重量あたりの濃度が低下する(成長希釈)効果によるものと考えられました。

◇魚が幼魚の時に放射性セシウムを一時的に取り込んだ場合、代謝により排出する分に加え、成長に伴う希釈効果によっても放射性セシウム濃度は減少することが示されました。

◇一定量(0.3Bq/g-dry)の放射性セシウムを含む餌を非汚染のヒラメに投与し、体内の放射性セシウム濃度を高めた後、放射性セシウムを含まない餌で追加飼育し、体内の放射性セシウム濃度の変化を調べました。

◇飼育開始後35日間で筋肉中の放射性セシウム濃度は平均で91Bq/kg-wetまで上がりました。

◇非汚染の餌で飼育を続けた場合、飼育開始後105日で48Bq/kg-wetまで下がりました。生物学的半減期は約70日と推定されました。

10. 水産物中の放射性ストロンチウムについて

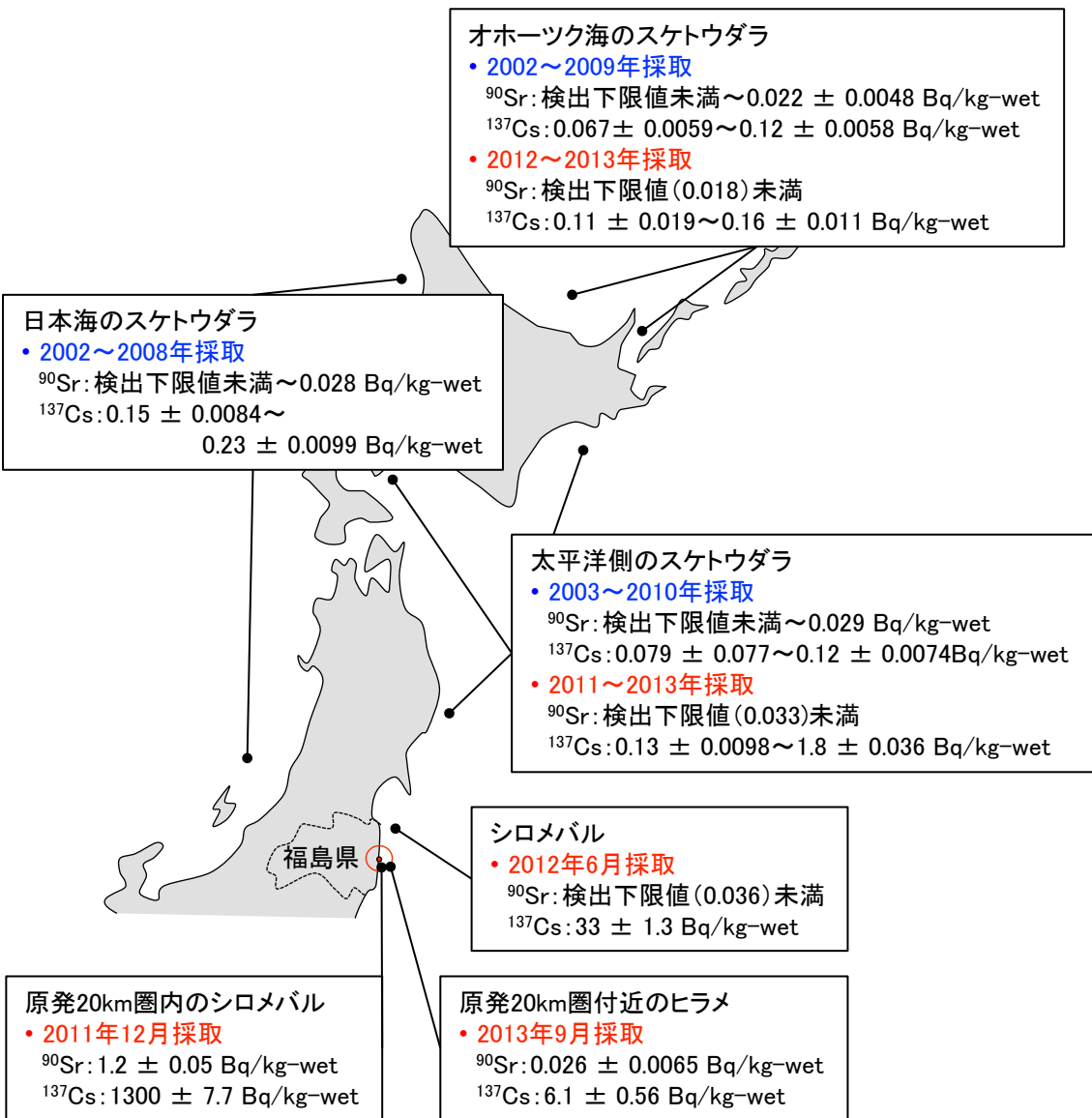


図1. 東京電力福島第一原発事故前後に東日本沿岸各地で採取された魚類のSr-90濃度(測定部位は全体、あるいは内蔵を除いたもの)およびCs-137濃度(測定部位は全体、内蔵を除去したもの、あるいは筋肉)。

◇ 原発事故後に東日本沿岸各地で採取したスケトウダラからストロンチウム(Sr)-90は検出されませんでした(検出下限値 = 0.033 Bq/kg-wet.)。原発事故前のスケトウダラのSr-90濃度は0.029Bq/kg-wet以下であったことから、東日本のスケトウダラは事故前と変わらない濃度であることが分かりました。

◇ 東電福島第一原発から20 km圏付近で採取したヒラメからSr-90が検出しました(0.026 Bq/kg-wet)。これは、スケトウダラの検出下限値程度です。ヒラメのSr-90濃度は、放射性セシウム(Cs)-137の200分の1以下でした。

◇ 福島県沿岸で採取したシロメバルのSr-90濃度は、2011年に1.2Bq/kg-wetを検出しましたが、2012年は検出下限値(0.036)未満でした。これらの結果から、原発事故由来のSr-90の汚染範囲は限定的であることが考えられます。

◇ 海藻のSr-90濃度については、2013年に宮城県で採取したノリで 0.065 ± 0.017 Bq/kg-wet、ワカメで 0.055 ± 0.013 Bq/kg-wetでした。2001～2010年に日本全国各地(北海道～沖縄)で採取した海藻類は、検出下限値(0.014)未満 $\sim 0.061 \pm 0.012$ Bq/kg-wetでした。

1. 湖沼性魚類の放射性セシウム濃度の推移

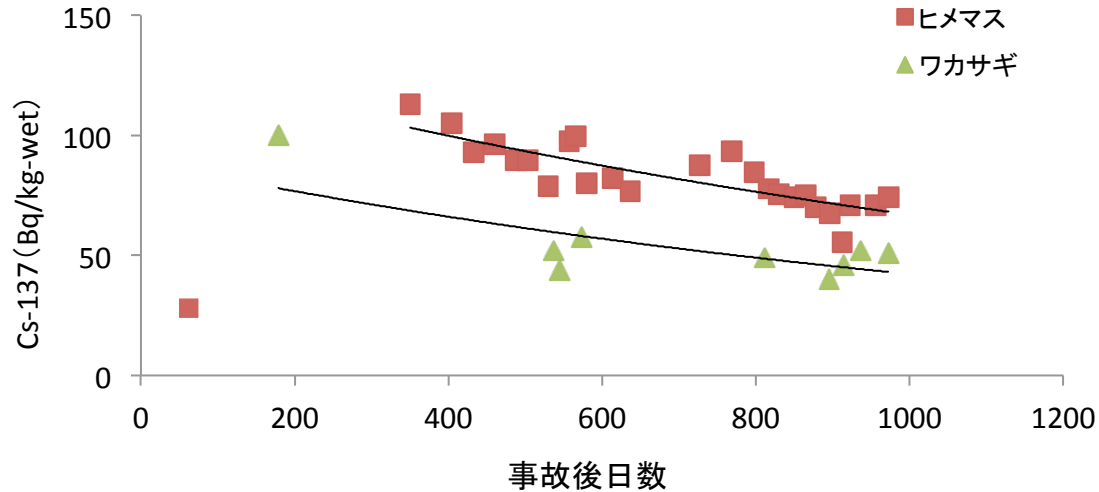


図1. 栃木県中禅寺湖に生息するヒメマス・ワカサギの放射性セシウム濃度の推移

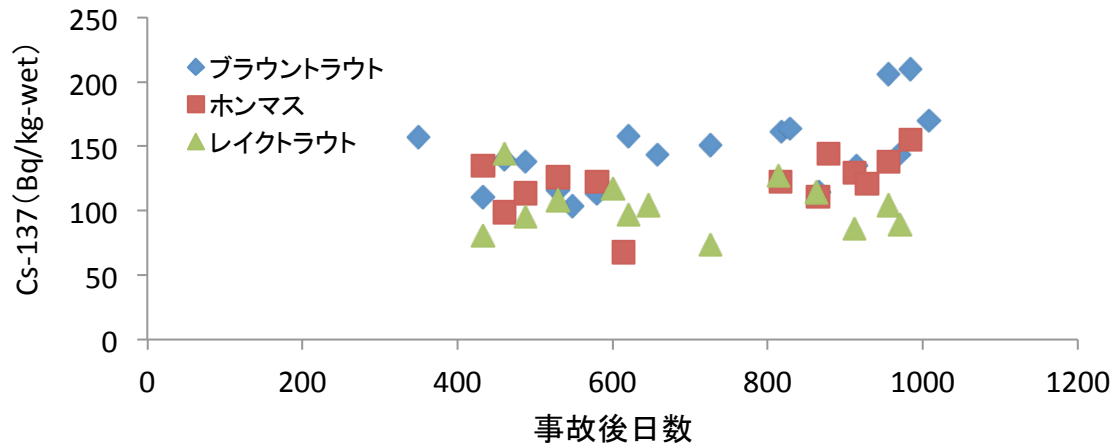


図2. 栃木県中禅寺湖に生息するブラウントラウト・ホンマス・レイクトラウトの放射性セシウム濃度の推移

- ◇ 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モニタリング調査をおこないました。
- ◇ ヒメマスやワカサギなど主にプランクトンを摂食する魚類では、放射性セシウム濃度の減少傾向が認められ、セシウム-137濃度はヒメマスが1041日、ワカサギが929日で半減することがわかりました(図1)。
- ◇ 一方、魚食性の強いブラウントラウト、ホンマス、レイクトラウトでは放射性セシウム濃度の明瞭な減少傾向は確認されませんでした(図2)。これらの魚種が利用する餌生物に未だ放射性セシウムが含まれていることが考えられます。

12. ヒメマス、ホンマスの放射性セシウム排出過程

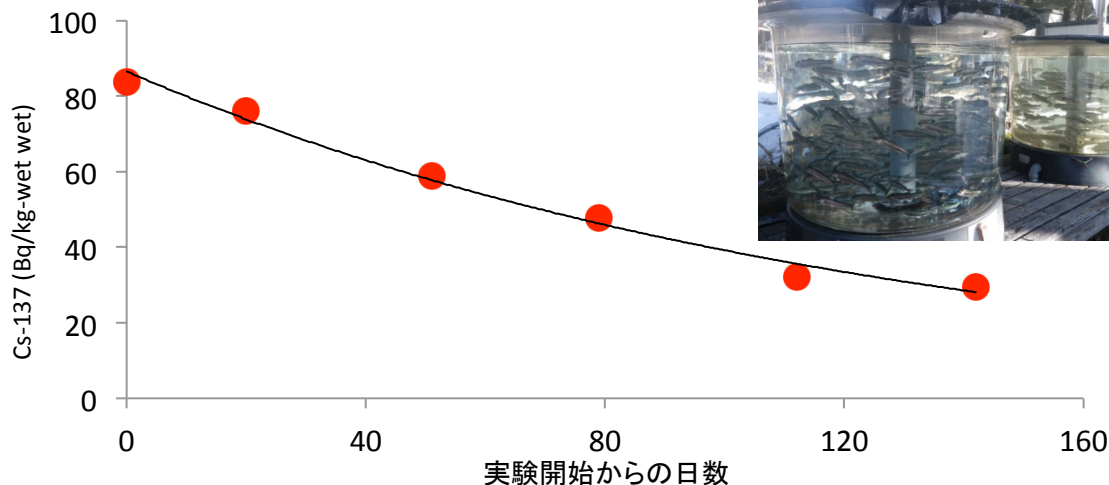


図1. ヒメマス筋肉中の放射性セシウム濃度

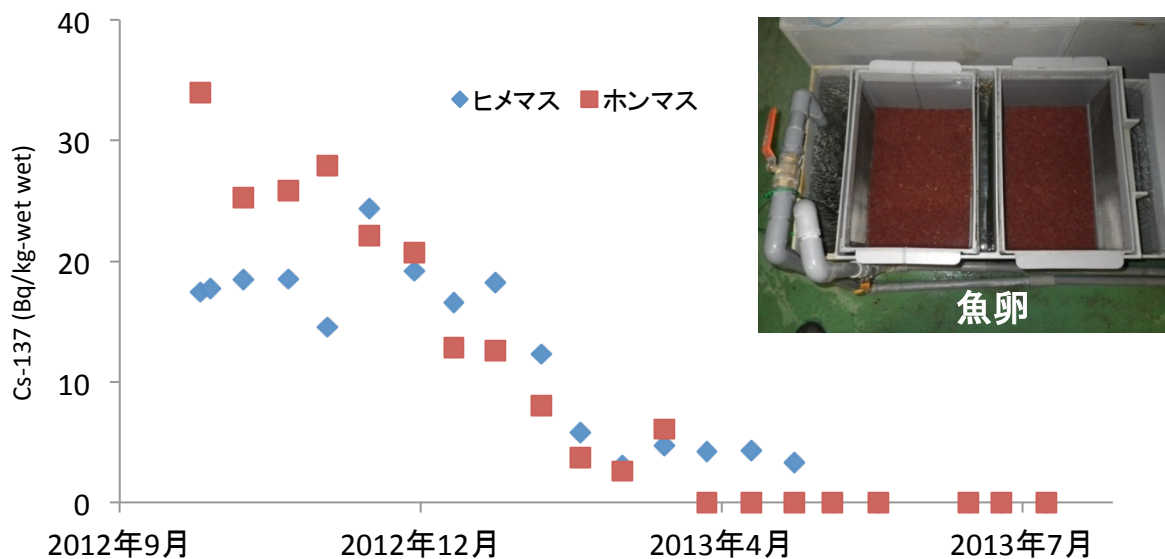


図2. ヒメマス、ホンマスの受精卵または孵化仔稚魚中の放射性セシウム濃度

◇ 放射性セシウムの排出速度を調べるために、放射性セシウムが含まれた餌を与え筋肉中の放射性セシウム濃度を高めたヒメマスに、放射性セシウムが含まれない配合餌料を与えて飼育したところ(体重の約1%/日を給餌、飼育水温は約9-10°C)、筋肉中の放射性セシウム濃度は約86日で半減することがわかりました(図1)。

◇ また、栃木県中禅寺湖の流入河川に遡上したヒメマス、ホンマスから得られた卵を受精させ、受精卵または孵化仔稚魚の放射性セシウム濃度を定期的に測定したところ、両種とも時間とともに放射性セシウム濃度は低下し、受精から約200日後には放射性セシウムが検出されなくなりました(図2)。

13. 湖水に含まれる放射性セシウム濃度の季節変動

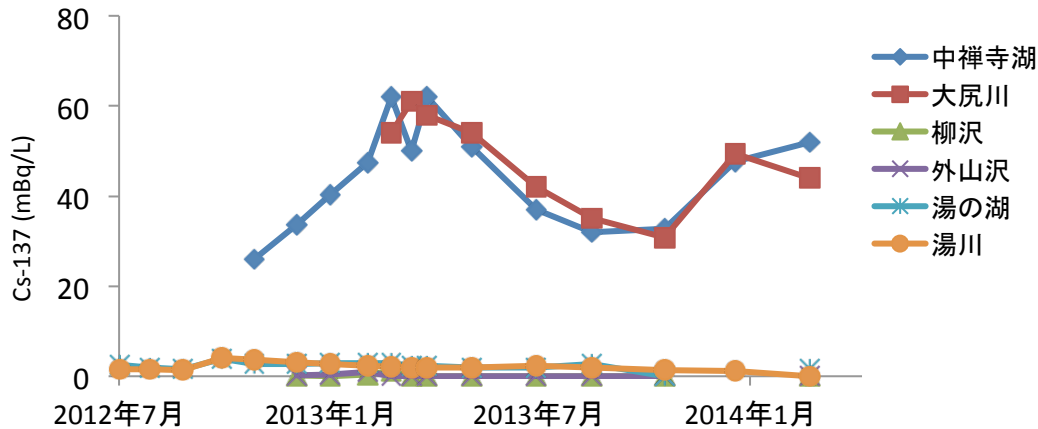


図1. 中禅寺湖水系の水に含まれる放射性セシウム濃度(溶存態)の推移

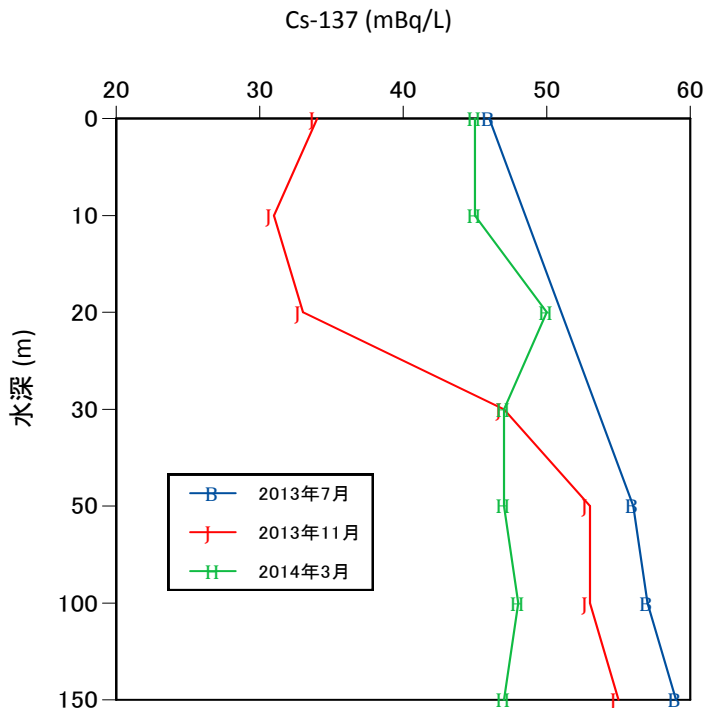


図2. 中禅寺湖水の深度別放射性セシウム濃度

- ◇ 栃木県中禅寺湖および流出入河川の水に含まれる放射性物質濃度(溶存態)をモニタリングしました。
- ◇ 中禅寺湖の表層水および流出河川(大尻川)の放射性セシウム濃度には季節変動がみられ、冬季から春季にかけて高く、夏季から秋季にかけて低くなることがわかりました(図1)。
- ◇ 一方、上流域に位置する湯ノ湖や中禅寺湖の流入河川(湯川、外山沢、柳沢)の濃度は、中禅寺湖と比べて低く、また顕著な季節変動は確認されませんでした。
- ◇ さらに、中禅寺湖において深度別に放射性セシウム濃度を測定したところ、水温躍層が形成される11月に水深20m以浅の放射性セシウム濃度が低くなることがわかりました(図2)。
- ◇ 中禅寺湖では、冬季から春季にかけて湖水の水が鉛直方向に混合することがわかっています。中禅寺湖の表層水にみられる放射性セシウム濃度の季節変動は、この鉛直混合によりもたらされると考えられます。

14. アユの放射性セシウム取り込み経路の解明

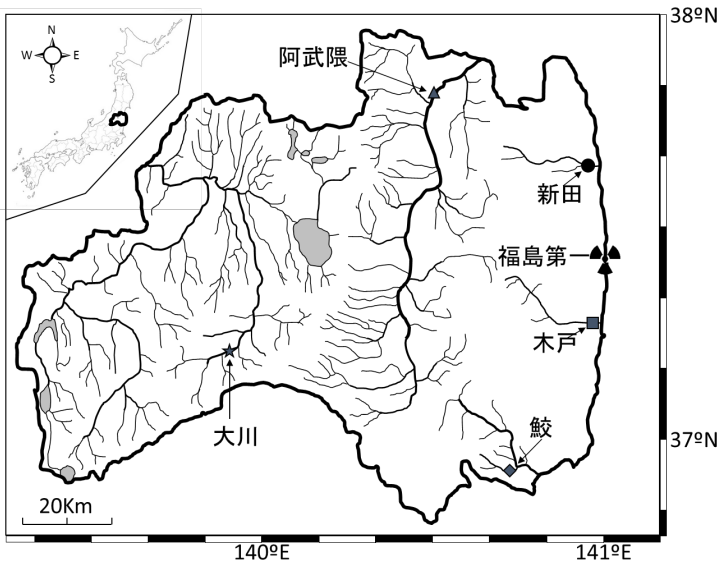


図1. 調査を行った5河川

- ◇ アユは川底の石についた付着藻類(コケ)を食べて成長します。川底の石には、上流から流れてきた細かい砂(シルト)が積もるため、アユはコケを食べると同時にシルトも一緒に飲み込んでいます。
- ◇ 2012年5月から2013年10月にかけて、福島県内をながれる5河川(図1)で調査を行った結果、アユの筋肉の放射性セシウム濃度は、内臓の濃度の15%程度であることがわかりました(図2)。また、内臓、筋肉ともに、放射性セシウム濃度は、2011年6月に採集された調査河川の流域(陸域)における地表面に沈着した放射性セシウム濃度の平均値(文部科学省による放射線量等分布マップより算出)と相関がみられました(図2)。
- ◇ セシウムはシルトにくっつきやすく、一度くっつくと剥がれにくいことが知られています。アユの体内に取り込まれる放射性セシウムはその多くがシルトにしっかりくっついた状態であり、消化されずに体外へ排出されていることがわかりました(図3)。

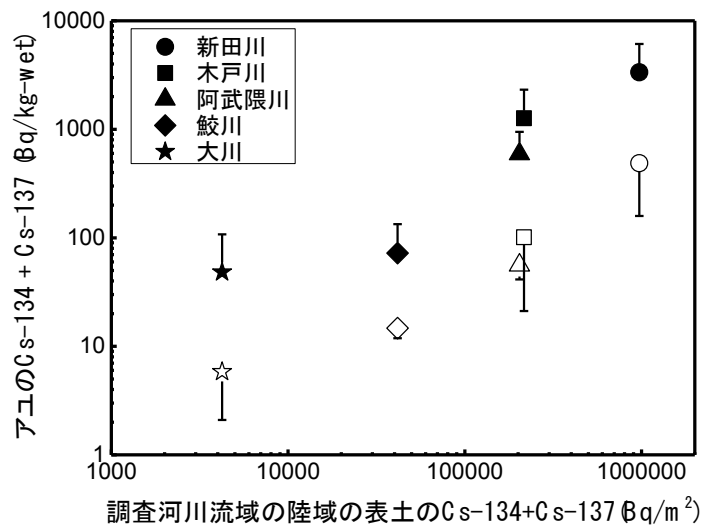


図2. 調査河川流域の陸域における表土とアユの内臓(●)および筋肉(○)のセシウム-134(Cs-134) + セシウム-137(Cs-137)の濃度(平均±標準偏差)

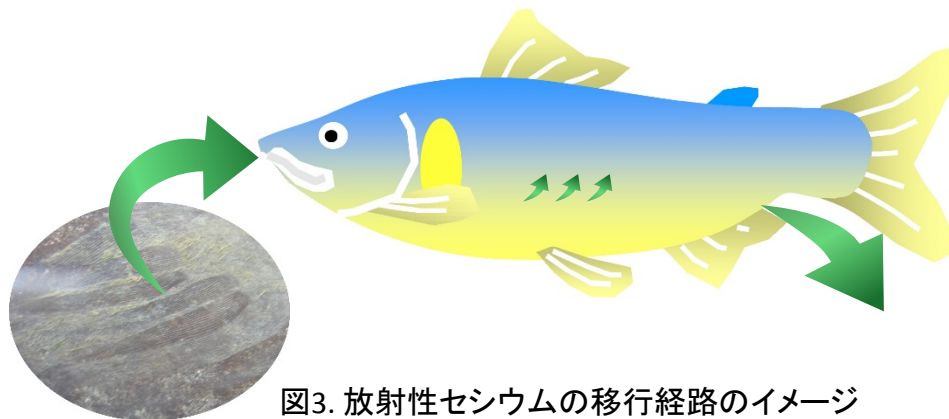


図3. 放射性セシウムの移行経路のイメージ