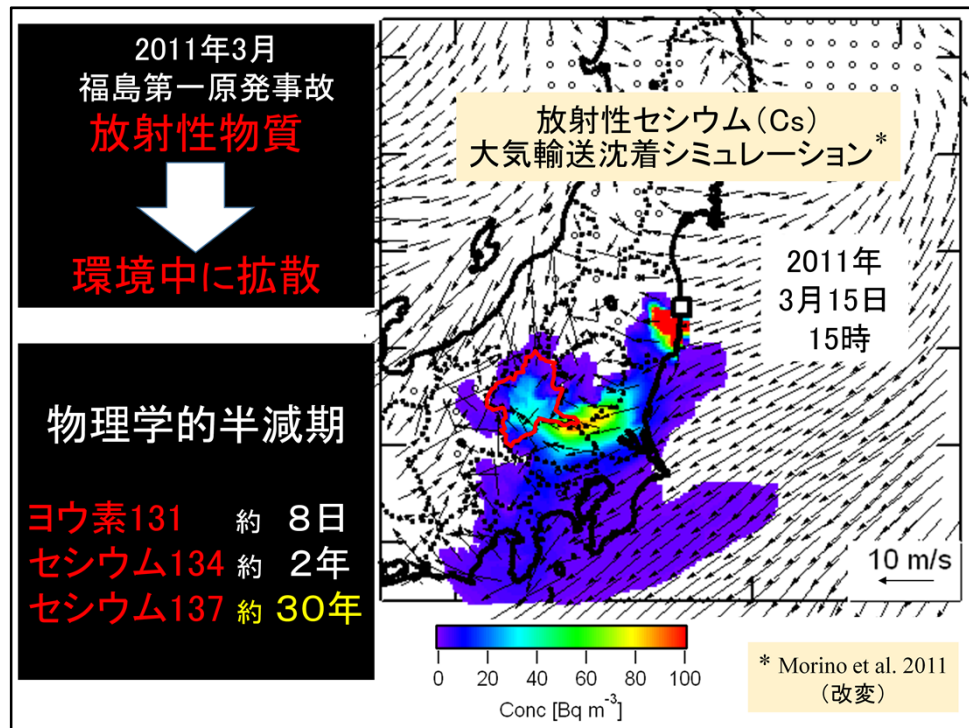
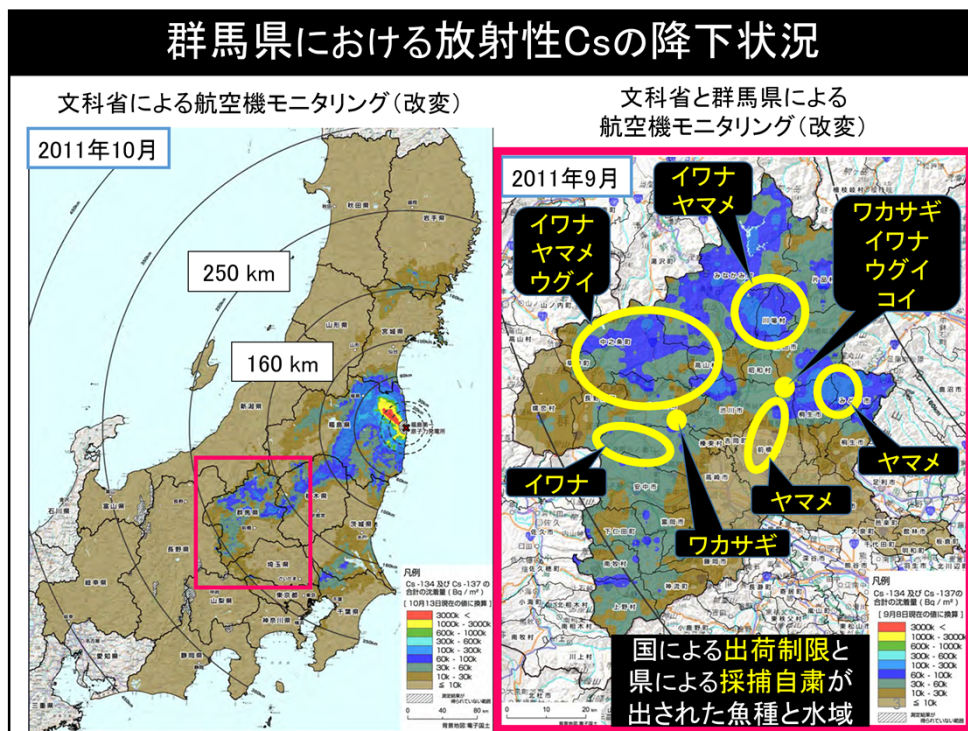




- ・業績名は「閉鎖性湖沼における放射性セシウムの動態解明」で、写真は中心的な調査フィールドである群馬県の赤城大沼です。
- ・赤城大沼は赤城山のカルデラ湖で、標高1345 m、最大水深17.5 m、湖岸延長4.6 km、湖水面積0.87 平方kmです。
- ・湖水の平均滞留時間は2.3年で、ダム湖である群馬県の草木湖の45日、梅田湖の90日に比べ、閉鎖性が極めて高いと言えます。
- ・ワカサギ、ウグイ、コイ、イwana等が生息し、特にワカサギ漁場として9月から3月まで賑わい、秋はボート釣り、冬は氷上穴釣りが楽しめます。



- ・2011年3月11日の東日本大震災にともなう福島第一原子力発電所(福島原発)事故により、放射性物質が環境中に拡散しました。
- ・拡散した主な放射性物質は放射性ヨウ素や放射性セシウムで、物理学的半減期はヨウ素131が約8日、セシウム134が約2年、セシウム137が約30年です。
- ・このため本研究では特段の説明がない限り放射性セシウム(Cs)、特に半減期の長いCs-137を調査対象としました。
- ・図は大気輸送沈着シミュレーションの一コマで、放射性Csは主に太平洋側へ流れていましたが、3月15日15時には北東の風により群馬県(赤枠)上空に運ばれてきました。



- ・左図は航空機から2011年10月時における地表の放射性Csの沈着量を観測した結果で、福島原発から栃木県北部を経て160～250 km離れた群馬県(赤枠)北西部にも高濃度の沈着が認められます。
- ・右図は群馬県の放射性Csの沈着量と、国による出荷制限指示と県による採捕自粛要請が出された河川湖沼のエリア(黄円)です。
- ・対象魚種はワカサギ、イワナ、ヤマメ、ウグイ、コイで、水域は18河川2湖沼に達し、これらの漁場では魚類の放射能汚染に加え、遊漁者の激減に伴う入漁料収入の減少という漁業被害が生じました。
- ・さらに風評被害により観光業も含めた地域経済の収縮が顕著となり、漁協組合員ら水産関係者の先の見えないことへの不安は計り知れないものとなりました。
- ・特にワカサギ釣りのメッカとなっている赤城大沼においては、2011年8月時の放射性Cs濃度(Cs-134+Cs-137)が当時の食品規制値である500 Bq/kg超の640 Bq/kgを呈し、閉鎖性が高い湖だけに水圏生態系における放射能汚染の将来的な推移が社会的にも大いに注目されました。

閉鎖性湖沼における放射性Csの動態解明

放射能研究グループ

群馬県水産試験場 久下敏宏・鈴木究真・新井肇・渡辺峻・湯浅由美・田中英樹・泉庄太郎(現:東海大)、
群馬大学 角田欣一・森勝伸(現:高知大)、 国立環境研究所 野原精一、
武蔵大学 薬袋佳孝、 東京都市大学 岡田往子、 金沢大学 長尾誠也

背景と目的

2011年、福島第一原発事故により
河川湖沼が放射能汚染



漁業や観光業、風評被害も含め
地域経済に甚大な影響、
将来への生活不安が増幅



水圏生態系における
汚染のメカニズムを解明



汚染の将来予測と今後の対策に貢献、
初動やモニタリング調査方法の確立

研究課題と実施年度

1 放射能汚染の現況を詳細に把握

2012—2013年

環境研究総合推進(環境省)

2 放射性Csの動態を解明

2014—2016年

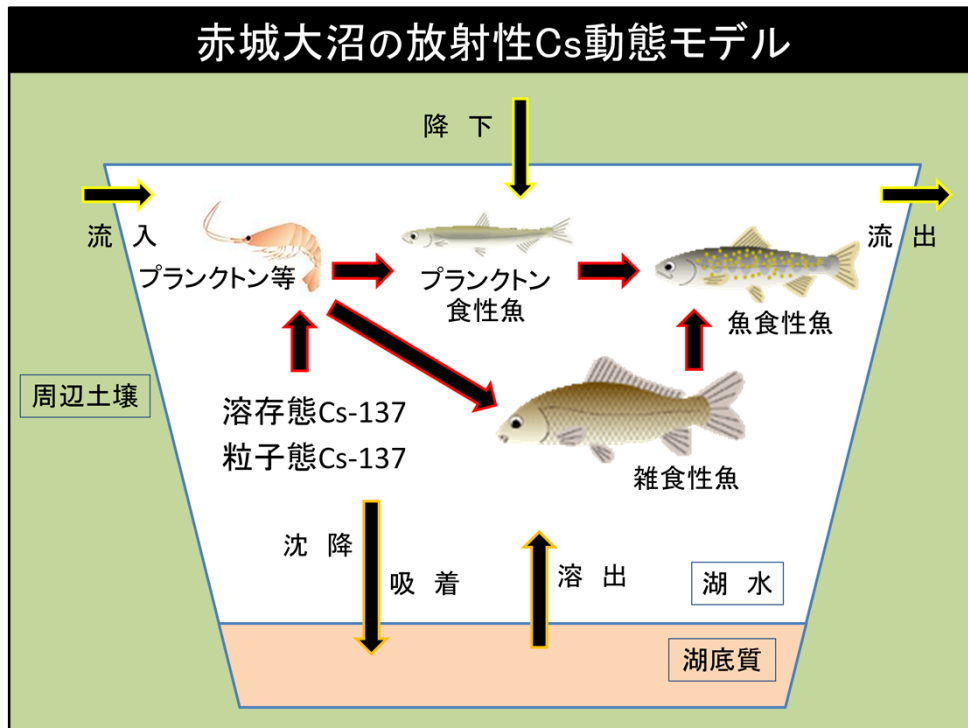
科研費 基盤研究B(文科省)、
近藤次郎グラント(旭硝子財団)

3 汚染の長期化現象を解析

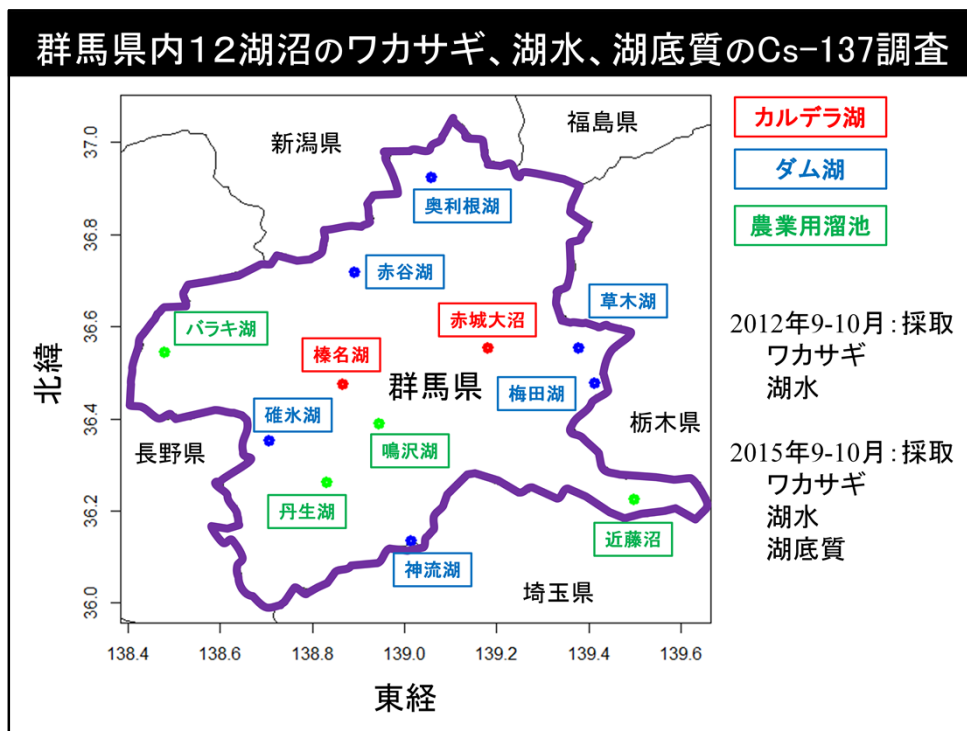
2017—2019年

科研費 基盤研究B・C(文科省)

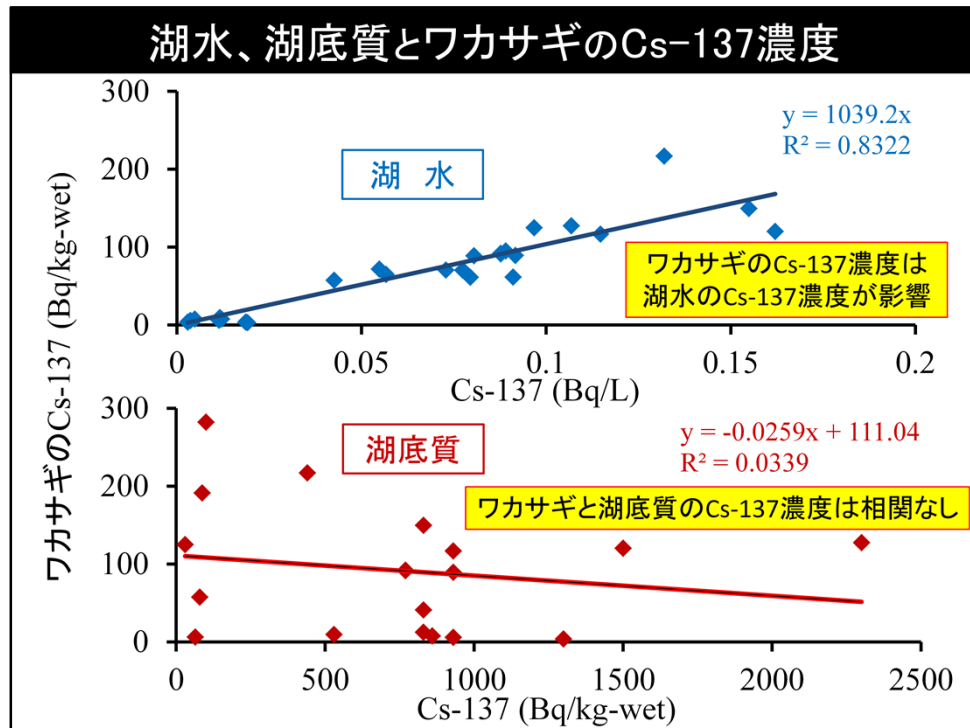
- ・そこで、科学的な現状把握と将来予測のため主に赤城大沼を調査フィールドとして、漁業被害対応の観点から現場に精通した水産試験場を中心に研究グループを立ち上げ、競争的研究資金の獲得を経て調査研究に着手しました。
- ・まずは【水圏生態系の汚染の現況を詳細に把握する】ため、環境省の環境研究総合推進費により2年間調査を行いました。
- ・その結果を基に【放射性Csの動態をより詳細に解明する】ため、文科省の科研費等により3年間調査を継続しました。
- ・その後、【汚染の長期化現象を解析するとともに、栃木県中禅寺湖や福島県沼沢湖にも当該結果を活用する】ための調査研究を科研費により取り組んでいます。



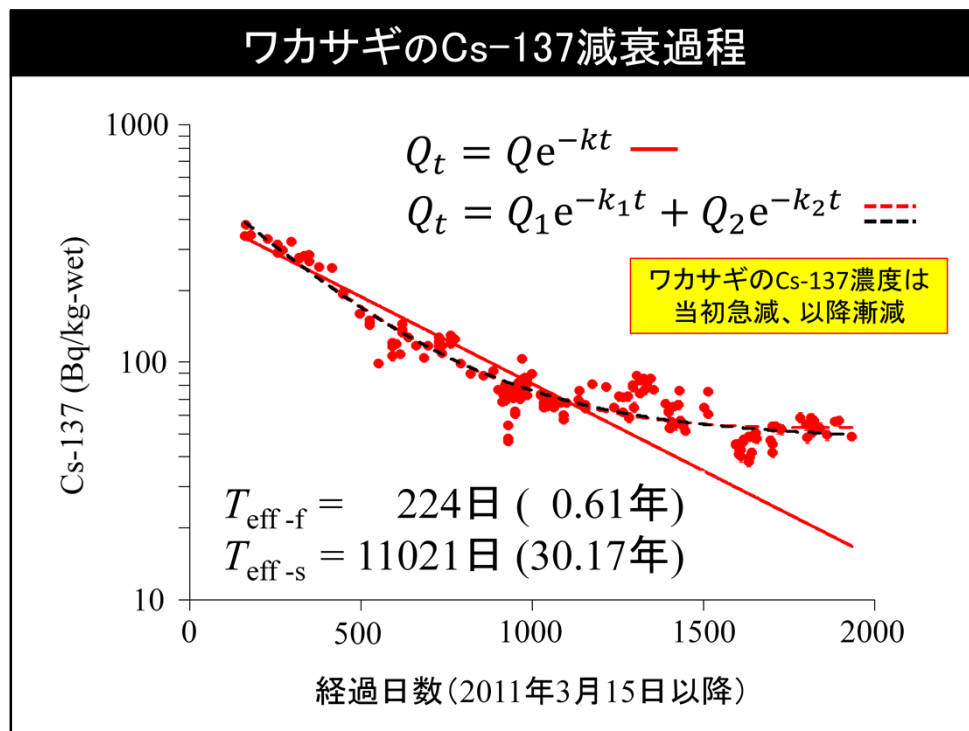
- ・当初、我々が想定した放射性Csの動態モデルで、湖内の放射性Csは大気から降下するとともに周辺土壌から流入し、湖底質へ沈降、吸着、そして溶出します。
- ・湖水には溶存態（溶存性）と粒子態（不溶性）の放射性Csが存在し、プランクトンから各栄養段階に位置する魚類へと取り込まれます。
- ・このような水圏生態系の食物連鎖に注目した放射性Csの挙動を、有機的あるいは無機的な側面から解明することとしました。
- ・魚類は群馬水試、プランクトンは国立環境研、湖底質は群馬大、湖水は東京都市大が分担し、武蔵大や金沢大とも相互連携を密にして取り組んでいます。
- ・特に調査手法の開発や調査結果の解析においては、この分野の前例が希有なことから試行錯誤しながら一丸となって推進してきました。
- ・これまでの主な研究成果を、魚類、プランクトン、湖水のそれぞれの関係に注目しながら順に概説していきます。



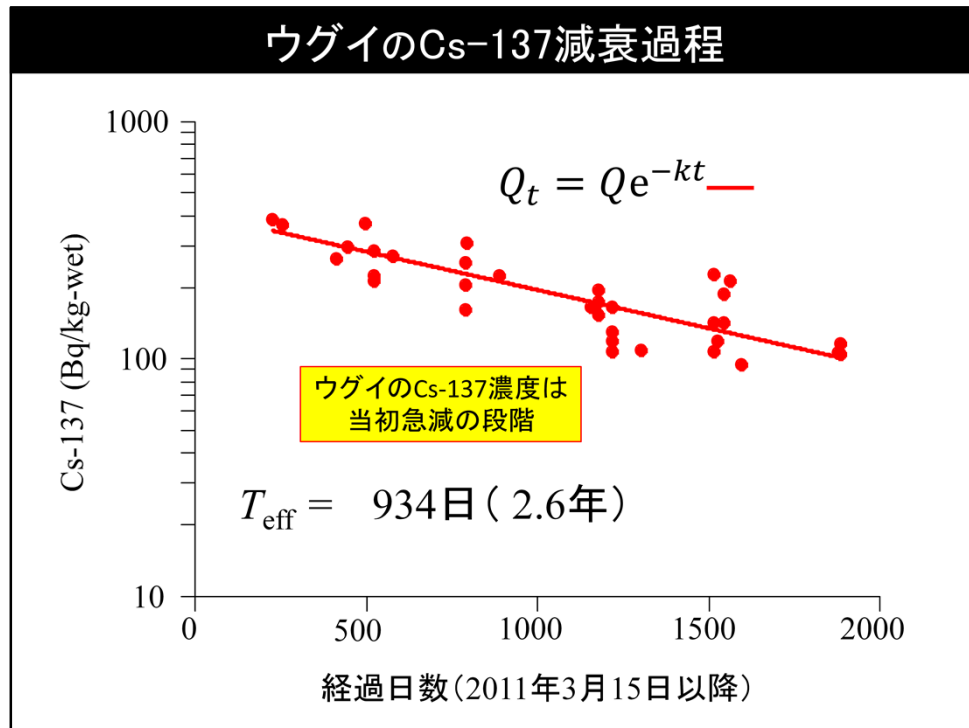
- ・本研究は赤城大沼のワカサギを中心に展開しますが、他のワカサギ漁場の汚染状況を把握するため、群馬県内湖沼のワカサギ、湖水、湖底質のCs-137濃度を調査しました。
- ・赤城大沼を含む12湖沼の形態は、標高1000m以上のカルデラにある天然湖が2カ所、ハイダム(堤高15m以上)による人工湖が6カ所、農業用溜池が4カ所です。
- ・事故翌年、湖水のCs-137濃度は、カルデラ湖である赤城大沼と榛名湖で0.14～0.16 Bq/kg、近傍のダム湖である草木湖や梅田湖で0.01 Bq/kgであり、1桁の違いがありました。
- ・このことから、湖水のCs-137濃度は、滞留時間の短いダム湖や農業用溜池では低く、滞留時間の長い、つまり、閉鎖性の強いカルデラ湖では高いことが分かりました。



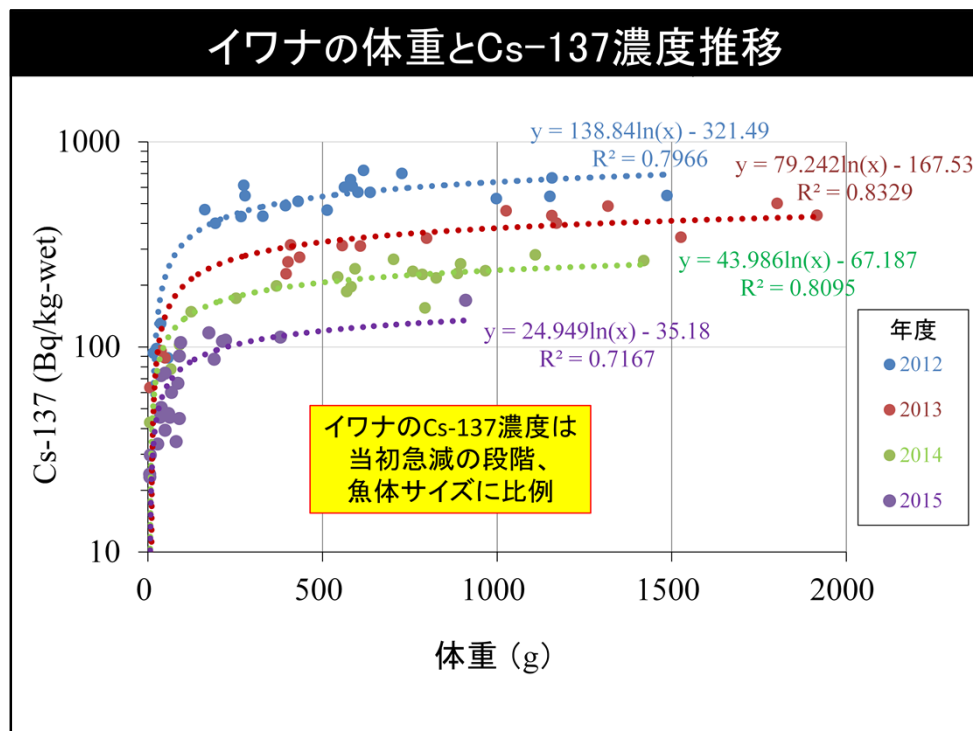
- ・上図が湖水とワカサギ、下図が湖底質とワカサギの関係で、それぞれの濃度との相関を解析しました。
- ・湖水とワカサギのCs-137濃度については、決定係数が0.8以上と高い相関があり、湖水の濃度が高ければワカサギの濃度も高いと言えます。
- ・一方、湖底質とワカサギのCs-137濃度については、相関が認められませんでした。
- ・よって、ワカサギ体内のCs-137濃度は環境水に大きく影響されていることが示唆されました。
- ・赤城大沼の研究成果の中でも、水生生物、主に魚類、特にプランクトン食性のワカサギを中心に今回は説明していきます。



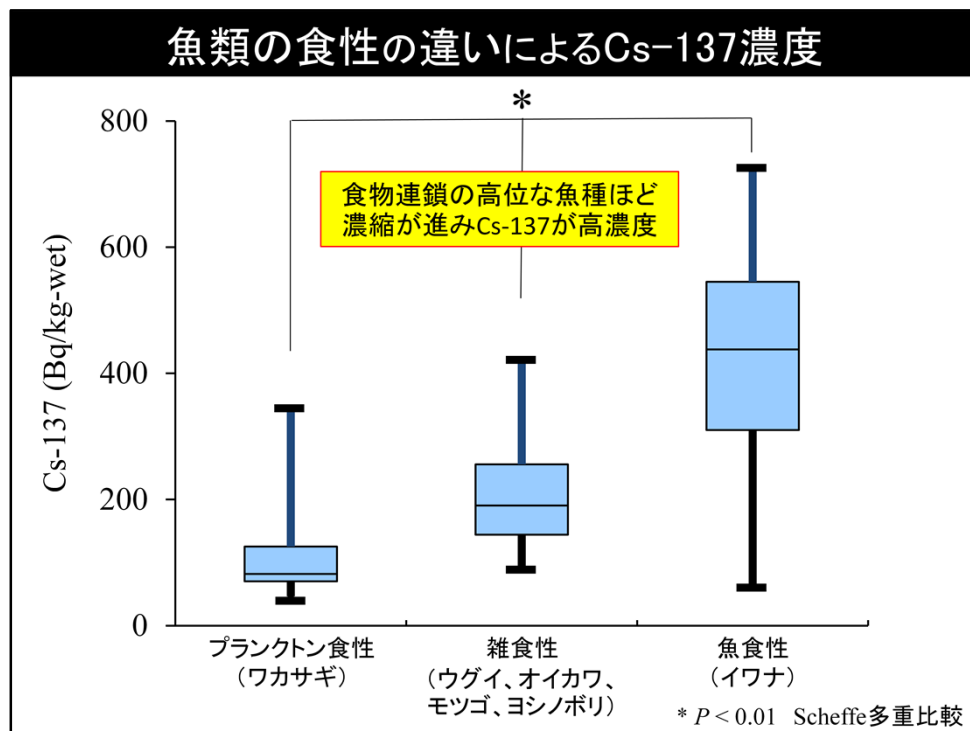
- ・赤城大沼で採捕したワカサギ魚体内のCs-137濃度の事故年8月から昨年9月までの推移です。
- ・自然環境中のCs-137の減衰は、1成分か2成分の指数関数モデルで表すことが可能です。
- ・ワカサギについては2成分モデルが最適合し、遅く減衰する実効生態学的半減期をCs-137の物理学的半減期である30.17年と仮定することで、早く減衰する成分のそれは0.61年と計算されました。
- ・当初は急速に低下して、時間とともに低下速度(傾き)は鈍くなってきています。
- ・微視的な変化として秋季全循環期に毎年のようにワカサギのCs-137濃度の上昇が確認されました。
- ・各パラメーターは以下のとおりです。
 - Q_t : t日における対象生物中のCs-137濃度
 - Q or Q_1 : (速く減衰する成分の)初期濃度
 - Q_2 : 遅く減衰する成分の初期濃度
 - k : 時間に伴うCs-137の指数関数的減衰の傾き
 - t : 2011年3月15日からの経過日数
- 実効生態学的半減期(T_{eff})の算出式: $T_{\text{eff}} = \ln 2 / k (k_1 \text{ or } k_2)$
- 速く減衰する成分: $T_{\text{eff-f}} = \ln 2 / k_1 = 0.61\text{年}$
- 遅く減衰する成分: $T_{\text{eff-s}} = \ln 2 / k_2 = 30.17\text{年}$
- $1/\text{実効生態学的半減期}(T_{\text{eff}}) = 1/\text{物理学的半減期}(T_{\text{phy}}) + 1/\text{生態学的半減期}(T_{\text{eco}}) \text{ or } 1/\text{環境半減期}(T_{\text{env}})$



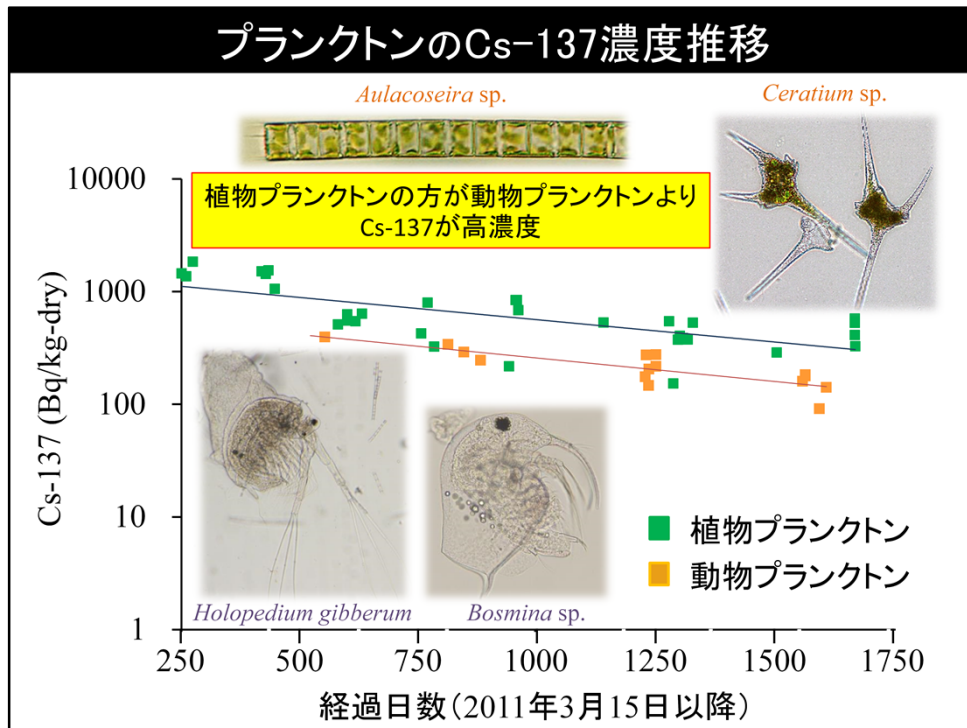
- ・未だ出荷自粛要請が継続されているウグイについては、ワカサギと異なり1成分モデルが最適合し、実効生態学的半減期は2.6年となりました。
- ・ウグイはワカサギに比べて寿命が長く、大型になる雑食性魚類であることから、今後、ワカサギのように遅く減衰する成分が効いてきて2成分モデルが適合してくるとともに下げ止まりが予測されます。
- ・なお、ウグイもワカサギ同様にホールボディ(全魚体)でCs-137濃度を測定しています。



- ・さらに、未だ出荷自粛要請が継続している魚食性のイワナについては、採捕年度別に魚体重と濃度との関係を求めました。
- ・イワナは年に一回、秋の産卵期に湖内から流入河川に遡上してきた個体群を採捕してホールボディのCs-137濃度を測定しています。
- ・年度が進むにつれてCs-137濃度が減少し、魚体重との正の相関(サイズ効果)も伺えます。
- ・なお、ワカサギにおけるCs-137のサイズ効果については、2012年から2015年までは正の相関が認められましたが、それ以降は認められなくなりました。

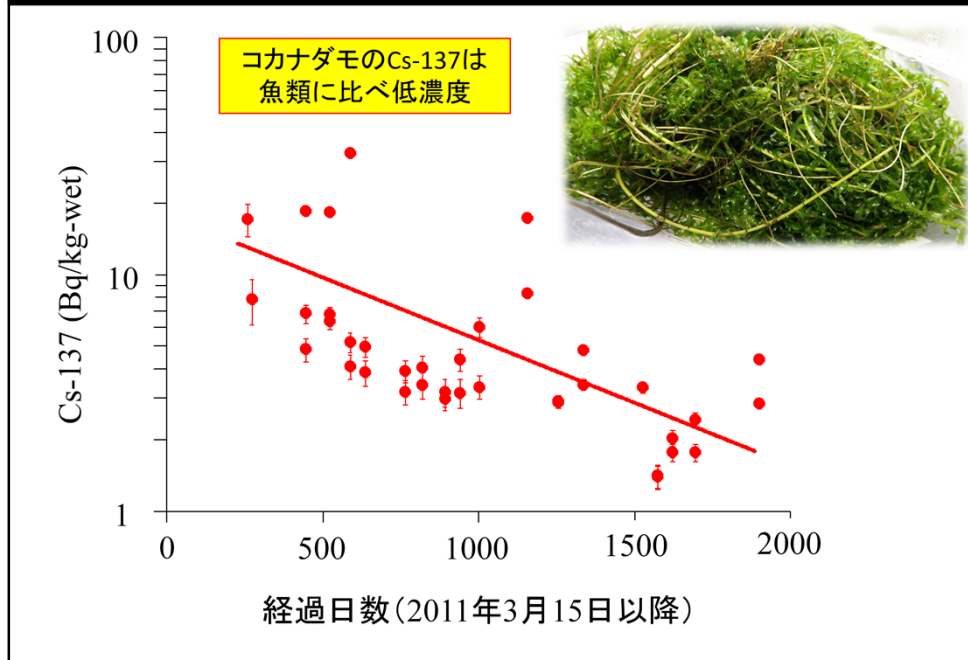


- ・魚類の食性別に2011年から2013年までのCs-137の測定値を示しました。
- ・縦線の上端は最大値で下端は最低値、縦棒の横線は中央値で上端と下端は第1四分位数と第3四分位数です。
- ・定説どおり食物連鎖で高位に位置する魚類程、濃度が高く(有意差有り)、生態濃縮が進んでいることが示唆されます。

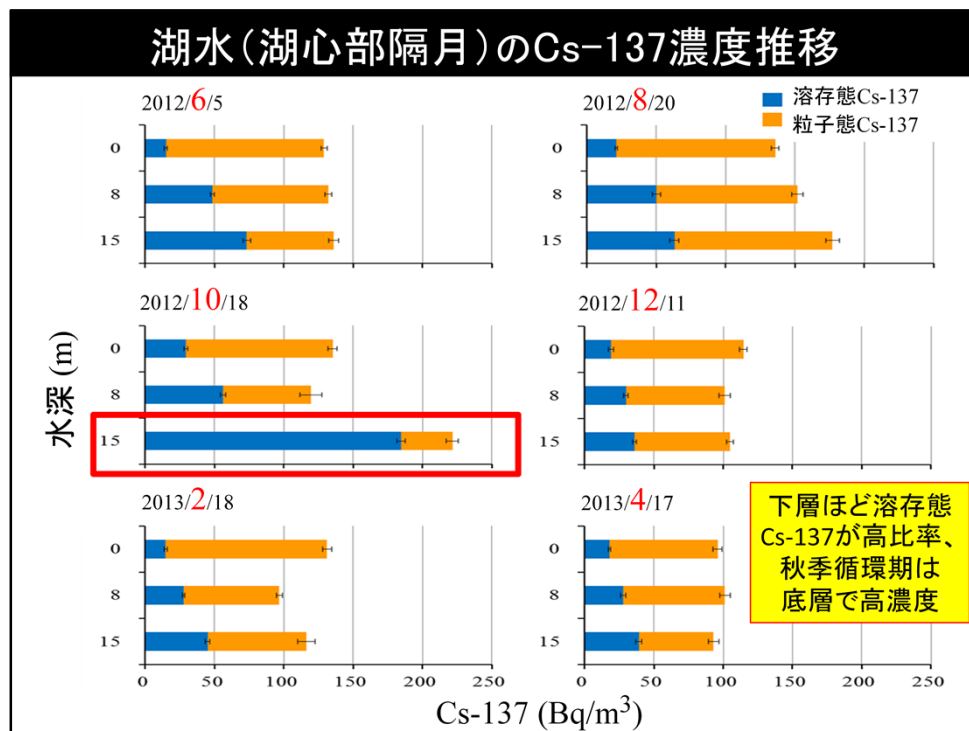


- ・プランクトンネットの水深1m層の水平曳きにて採集した植物プランクトンと動物プランクトンのCs-137濃度の推移は、時間とともに低下しています。
- ・春季(4～5月)と秋季(10～11月)の両全循環期においては植物プランクトンが、夏季(8～9月)においては動物プランクトンが優占します。
- ・このため、時期とネット目合い(NXX13、NXX7)によってセストンとして採集し、両プランクトンを分別採集しました。
- ・植物プランクトンは珪藻の *Aulacoseira sp.* や渦鞭毛藻 *Ceratium sp.* が優占しました。
- ・動物プランクトンは *Holopedium gibberum* や *Bosmina sp.* が優占しました。
- ・予想に反し、栄養段階の低い植物プランクトンの方が動物プランクトンよりCs-137濃度が高くなっていました。

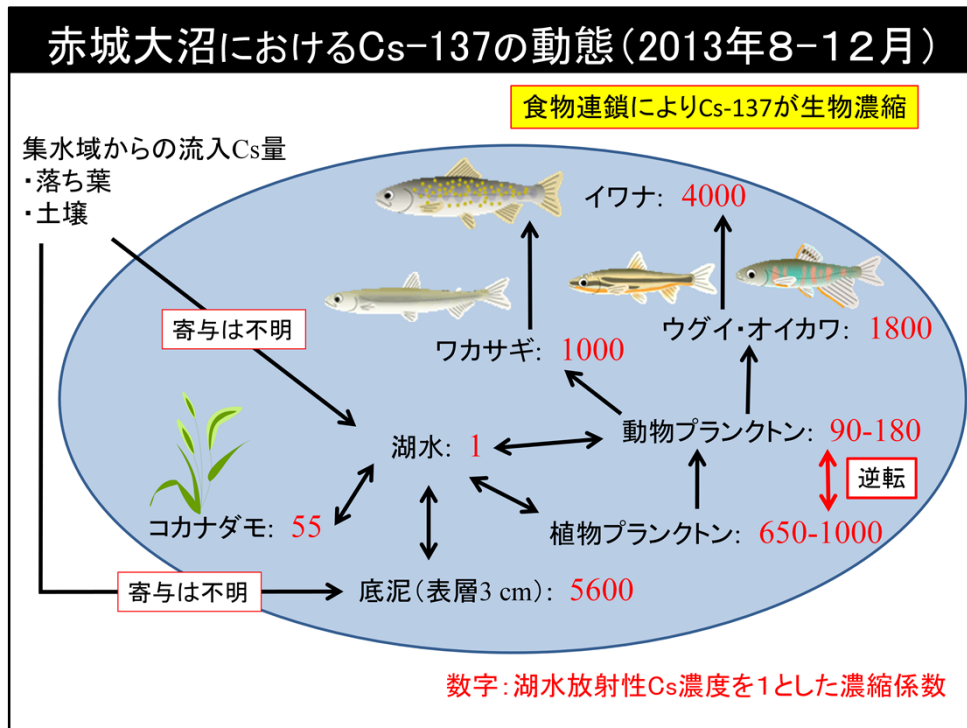
コカナダモのCs-137濃度推移



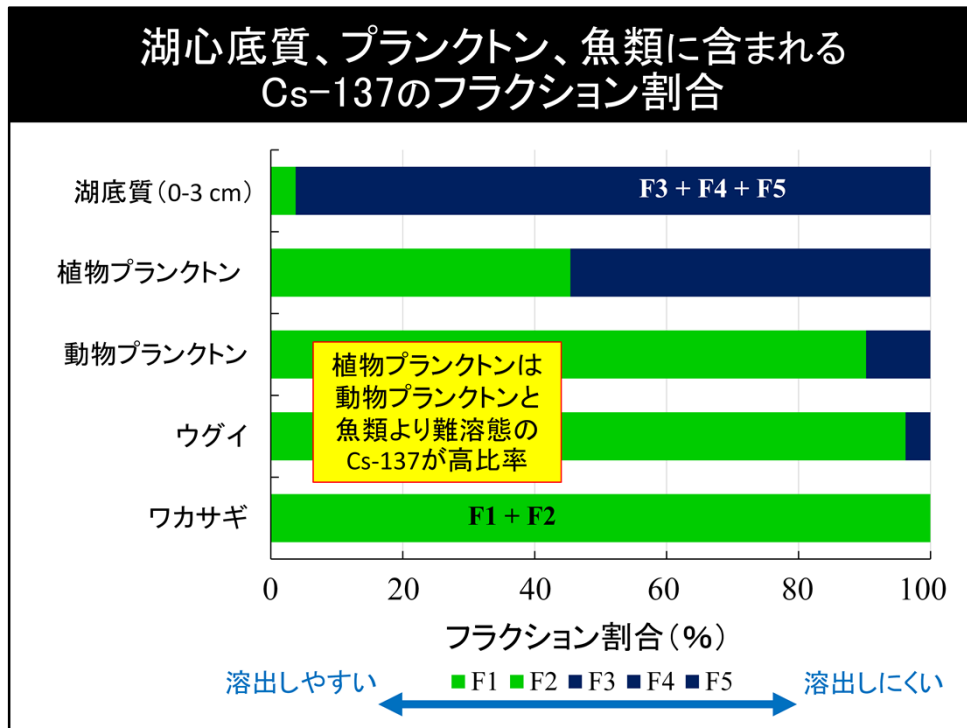
・沿岸部水深2～4mで採集したコカナダモのCs-137濃度は、魚類に比べて低濃度で、時間とともに低下しています。



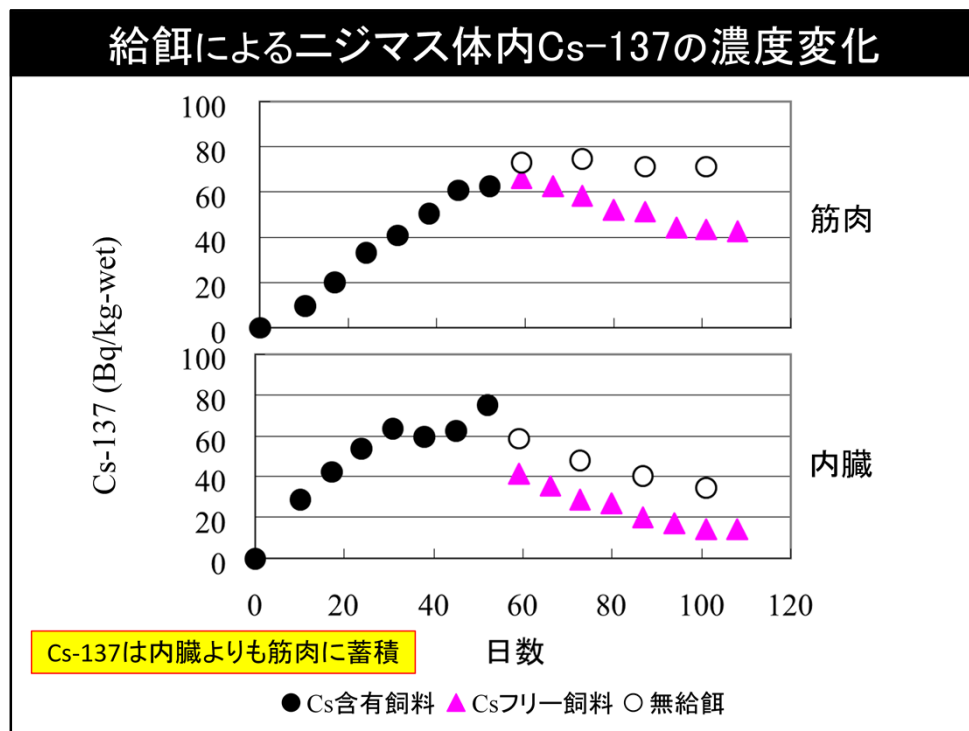
- ・湖水の表層、中層、底層における溶存態と粒子態のCs-137濃度の分布です。
- ・採水後8時間以内に0.45 μ mのカートリッジフィルターを通した湖水とそのまま測定した湖水のCs-137濃度の差から溶存態Cs-137と粒子態Cs-137濃度を求めました。
- ・通年隔月で測定し、全体的に底層では溶存態Cs-137濃度が高くなっています。
- ・特に秋季全循環期の10月時(赤枠)は、毎年、底層のCs-137が顕著に高濃度となり、溶存態が粒子態よりも多くを占めます。
- ・さらに、湖水のCs-137収支計算からも、湖底堆積物からCs-137が溶出している可能性が示唆されました。
- ・なお、湖水のCs-137の減衰は2成分の指数関数モデルと適合し、遅く減衰する成分の実効生態学的半減期を物理学的半減期と仮定すると、早く減衰する成分の実効生態学的半減期は、前述したワカサギのそれに近似した0.77年と計算されました。



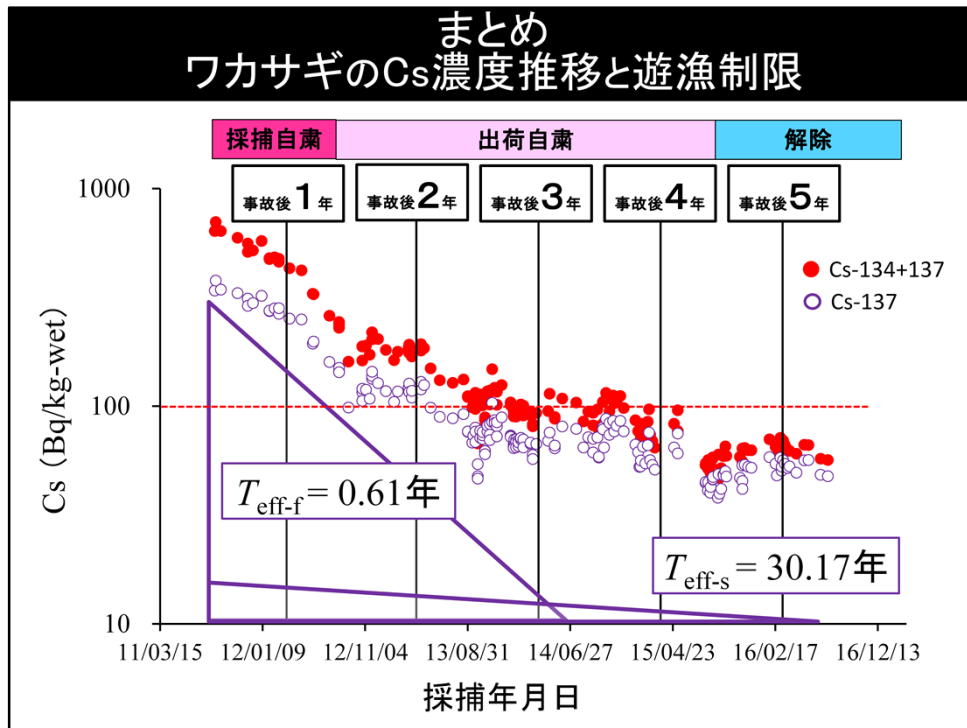
- ・これまでの測定値から、水生生物、湖水および湖底質のCs-137濃度の2013年8～12月における濃縮係数を算出しました。
- ・湖水濃度を1とすると、ワカサギは1000、ウグイとオイカワは1800、イワナは4000となり、食物連鎖に沿って濃縮が進んでいます。
- ・一方、前述したとおり植物プランクトンは650～1000で、動物プランクトンの90～180より高くなっており、その原因究明が新たな課題となりました。



- ・そこで、逐次抽出法によるCs-137の化学形態別分析を行いました。
- ・溶出のしやすさに着目して逐次抽出の段階をフラクション1～5の化学形態に分別しました。
- ・緑色のフラクション1と2が可溶態で、紺色のフラクション3～5が難溶態で、可溶態とは酸性雨でも溶出しやすい化学形態です。
- ・分析の結果、湖底質の表層は難溶態が95%以上を占めました。
- ・植物プランクトンは難溶態が55%でしたが、動物プランクトンや魚類は可溶態が殆どを占めました。
- ・このことから植物プランクトンの表面に懸濁物質等由来のCs-137が付着しているのではと推察され、それが動物プランクトンと濃縮係数が逆転していた原因と示唆されます。



- ・摂餌量の多寡と魚体中のCs-137濃度の関係を明らかにするため、ニジマスにCs-137含有の配合飼料を給餌し、個体別に取り込、蓄積および排出の状況を調べました。
- ・事故当初の放射性セシウムを含有するワカサギを原料にした配合飼料(Cs-137濃度: 202.5 Bq/kg)を自作し、7週間給餌した後、放射性Cs不検出の市販配合飼料に切り換えて給餌する区と、無給餌の区に2分し、それぞれ8週間と7週間飼育しました。
- ・グラフは筋肉部と内臓部に分割してCs-137濃度をゲルマニウム半導体検出器で測定したそれぞれの結果です。
- ・Cs含有飼料給餌により筋肉部と内臓部の個体別Cs-137濃度は不検出からそれぞれ約60 Bq/kgと約80 Bq/kgに達しました。
- ・しかし、その後、内臓部は速やかに低下に転じましたが、Csフリー飼料給餌の筋肉部は1～2週間程遅れて低下に転じ、無給餌の筋肉部は横ばいとなりました。
- ・このことから、Cs-137は内臓部よりも筋肉部に蓄積している傾向が確認されました。
- ・また、代謝を高めることにより魚体内濃度がより早く低下することが示唆されました。

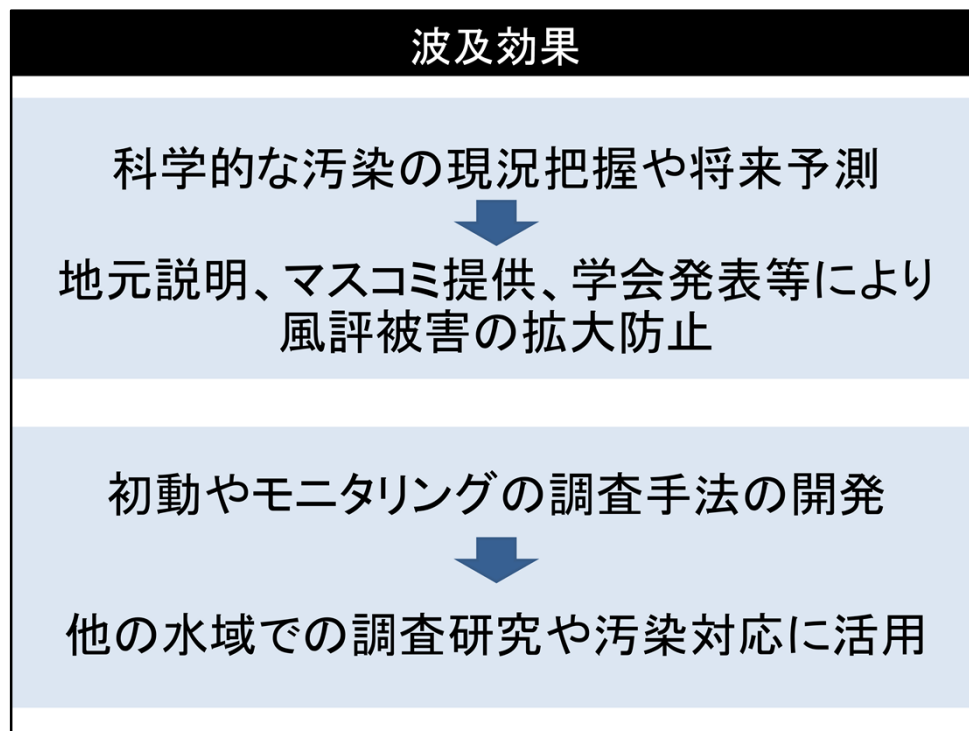


- ・ワカサギのCs134+137とCs-137の濃度推移グラフで、横軸を採捕年月日に変換し、事故後の経過年数も付記しました。
- ・実効生態学的半減期は、原発事故後3年以内では早く減衰する成分が、それ以降は遅く減衰する成分が効いています。
- ・遅く減衰する成分をCs-137の物理学的半減期と仮定したモデルが最も適していることから、今後の下げ止まりが大いに懸念されています。
- ・さらに、出荷自粛等の漁業制限の期間も上段に付記しました。
- ・食品基準値である100 Bq/kgを安定的に下回ったと判断して自粛要請が解除されたのは事故後4年過ぎでした。
- ・赤城大沼のワカサギは例年9月1日から翌年の3月31日まで楽しめます。
- ・事故の当年度の1シーズン(2011年度)は採捕自粛によりワカサギ釣りはできませんでした。
- ・事故の翌年度から3シーズン(2012～2014年度)は出荷自粛となり、ワカサギ釣りはできるようになりましたが釣獲魚の持ち出しはできず、現地で漁協組合員が釣獲魚を回収処分しました。
- ・食することができないこの4シーズンの間に、赤城大沼のワカサギ釣りの顧客の多くは他の漁場へ移ってしまいました。
- ・事故後4年を経過した2015年度によりやうく事故前のように釣獲魚を持ち出して食すことができるようになり、2シーズンが経過し以前のような賑わいを取り戻しつつあります。
- ・この間、水産分野外の大学等の研究者とともに、地元漁協等の生活の糧となるワカサギ汚染の実態解明に努め、その成果である放射性Cs濃度の今後の見通しを示した事は、地元の人達の気持ちの上で大きな支えとなっていることは間違いないと思っています。

まとめ 水圏生態系におけるワカサギに注目したCs-137の動態

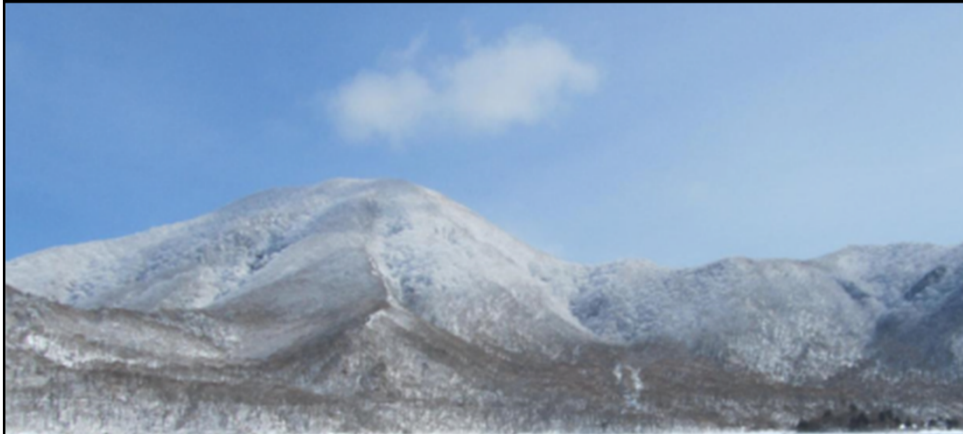
- ワカサギのCs-137濃度は湖水のCs-137濃度が影響する。
- Cs-137減衰過程はワカサギが2成分、ウグイが1成分の指数関数モデルに適合し、汚染の長期化が懸念される。
- Cs-137汚染には魚体サイズ効果が確認される。
- 食物連鎖の高位な魚種ほどCs-137の濃縮が進む。
- 植物プランクトンの方が動物プランクトンよりCs-137濃度が高い原因として、難溶態Cs-137の関与が示唆される。
- 湖水は下層ほど溶存態Cs-137が高比率で、秋季循環期は高濃度であることから、Cs-137の湖底質からの溶出が示唆される。
- ニジマスにおいてCs-137は内臓から筋肉に移行し蓄積され、摂餌により濃度低下が示唆される。

・ワカサギに注目した水圏生態系におけるCs-137の動態については、このような結果にまとめました。



- ・本業績の波及効果として、科学的な汚染の現況把握や将来予測を、地元説明会、マスコミ提供、学会発表、論文投稿を通じて公表することで、当事者の心理的不安の解消に役立てるとともに、風評被害の拡大防止が図られます。
- ・特にワカサギのCs-137の将来予測について、2成分モデルを用いて安定的に食品基準値を下回ることを科学的に証明し、遊漁制限解除に役立てました。
- ・さらに、汚染に対する初動やモニタリングの調査手法の確立により、国内外の他の水域での調査研究や汚染対策に活用することができます。
- ・なお、本研究は今後も研究機関や大学とともに取り組んでいきますが、水産試験場では漁業者のため、食の安全確保のため、モニタリングを継続していきたいと考えています。

謝 辞



本研究の実施に際し、赤城大沼漁業協同組合と前橋市にご配慮を賜りました。
放射性セシウムの測定は群馬県農業技術センターに、放射性セシウム含有の
飼料造粒は栃木県水産試験場にご協力頂きました。
本研究は、環境省の環境研究総合推進費(5ZB-1201)、JSPSの科研費(26292100)
および(公財)旭硝子財団(環境研究近藤次郎グラント)の助成を受けたもので、
ここに謝意を表します。

- ・本研究の実施に際し、赤城大沼漁業協同組合と前橋市にご配慮を賜りました。
- ・放射性セシウムの測定は群馬県農業技術センターに、放射性セシウム含有の飼料造粒は栃木県水産試験場にご協力頂きました。
- ・本研究は、環境省の環境研究総合推進費(5ZB-1201)、JSPSの科研費(26292100)および(公財)旭硝子財団(環境研究近藤次郎グラント)の助成を受けたもので、ここに謝意を表します。