

# 環境動態研究部門

## (2) 放射性セシウムの動きを知り予測する ー森林・ダム・河川を中心にー

---

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 福島研究開発拠点  
福島環境安全センター 環境動態研究グループ 飯島 和毅

福島県

環境創造センター 研究部

倉元 隆之

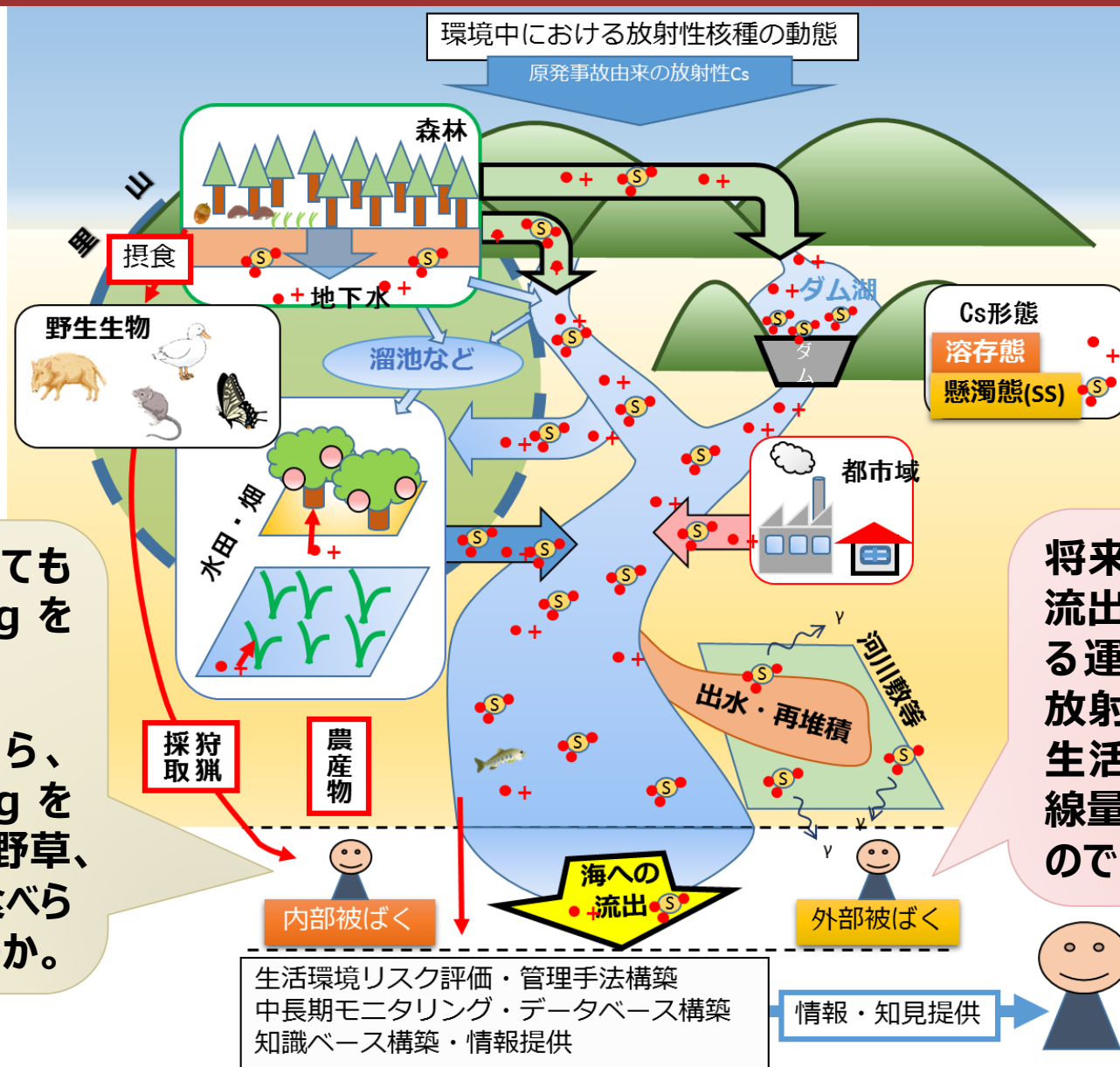
国立環境研究所

福島支部 環境影響評価研究室

林 誠二

# 環境動態研究とは

環境中での放射性セシウム（ $^{137}\text{Cs}$ ）の動きを知り（調査、実験）、予測する（シミュレーション）



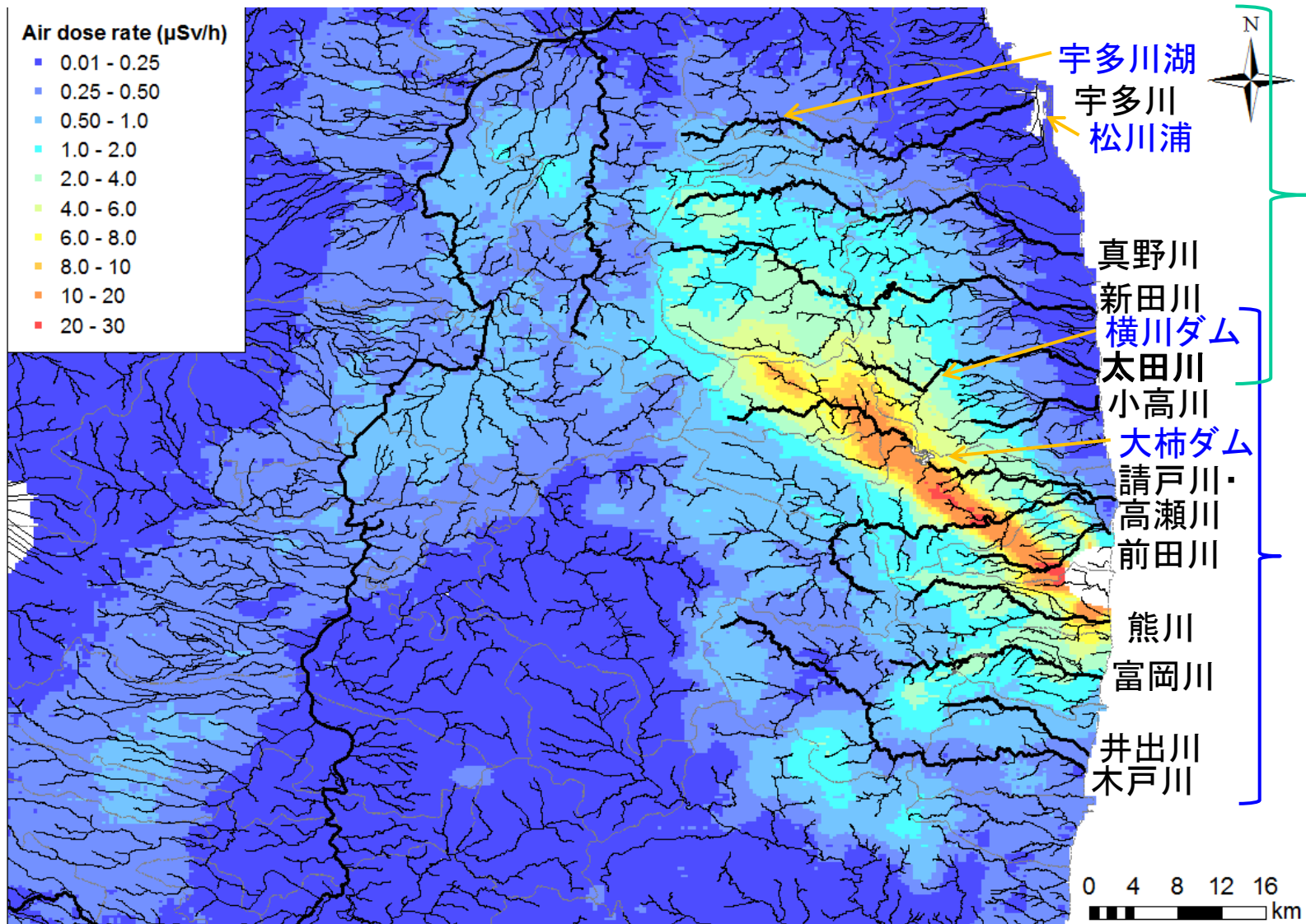
農作物を作っても 100 Bq/kg を超えるのでは。

いつになったら、100 Bq/kg を超えている山野草、淡水魚等を食べられようになるのか。

将来、森林からの流出や河川水による運搬によって、放射性セシウムが生活圏に堆積し、線量率が増加するのでは？

## 福島県

阿武隈川 広瀬川



国環研

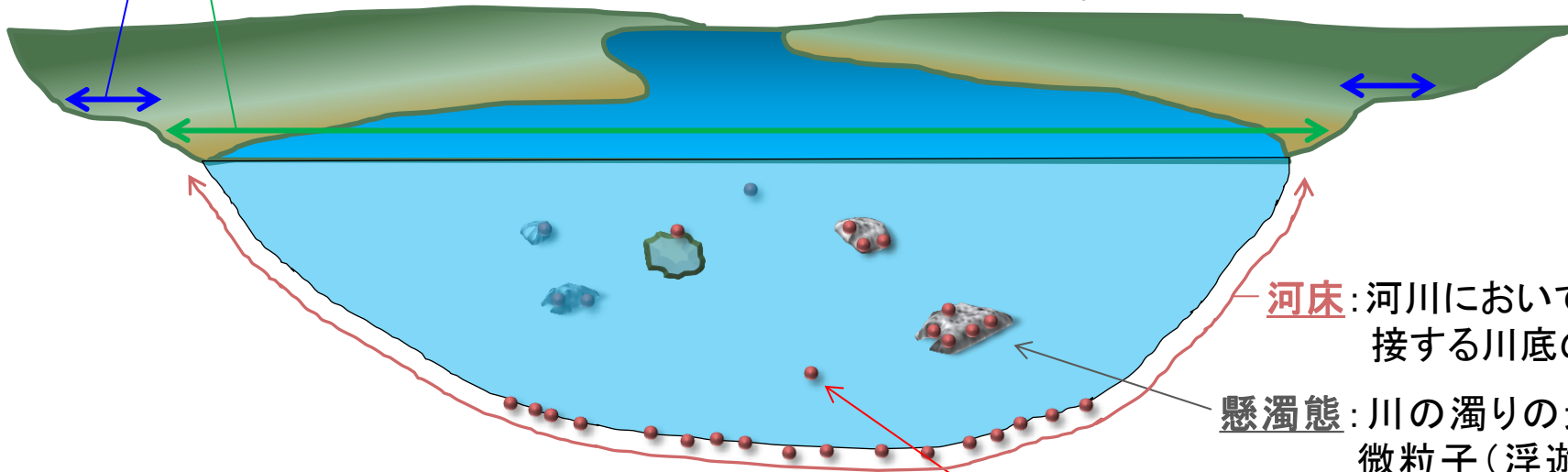
原子力  
機構

# 水中の放射性セシウムの様子(平水時)

**高水敷**: 河川敷の、低水路より一段高い部分の敷地。  
平常時には公園など様々な形で利用されるが、  
洪水時には水に浸かる。

**低水路**: 河川敷の、常に水が流れているところ。

**河道** 堤防とあわせて、**河川敷**と  
呼ぶこともある。



**河床**: 河川において流水に  
接する川底の部分。

**懸濁態**: 川の濁りの元となる  
微粒子(浮遊懸濁物  
質)や堆積物中の微  
細な土砂粒子等に吸  
着された状態。

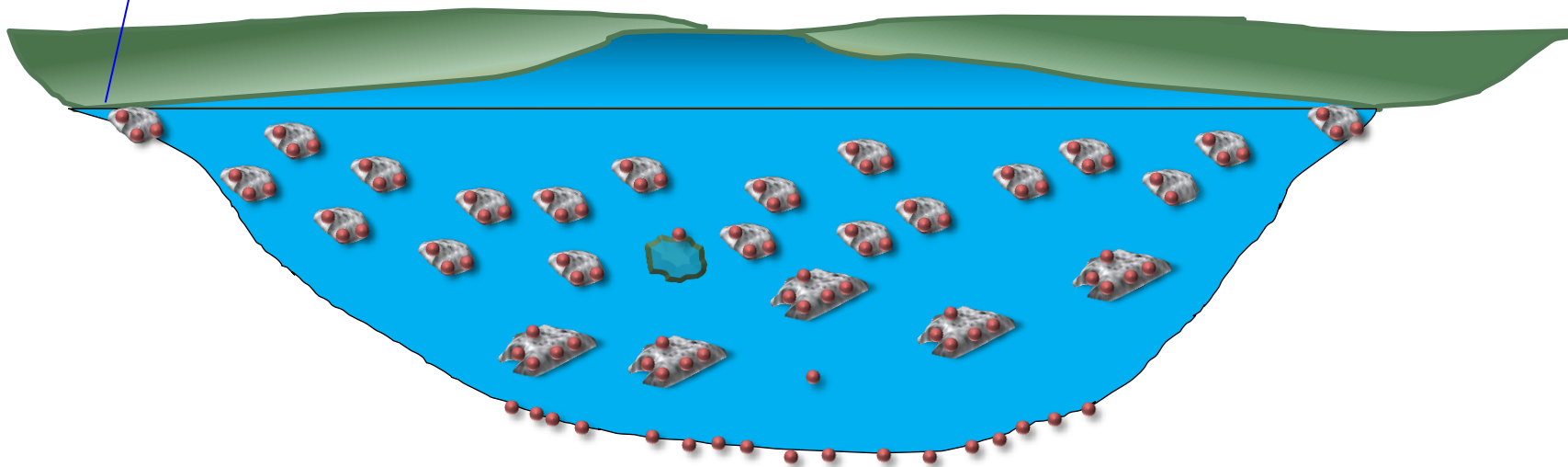
**溶存態**: イオンのように、水に  
溶けている状態。

平水時: 通常の状態。懸濁態は少ない。 高水時



# 水中の放射性セシウムの様子(高水時)

河川の流量が増え、流れも速くなり、**懸濁態セシウムが増加**する。  
**植物が繁茂している高水敷**も水に浸かり、**懸濁態セシウムが堆積**しやすくなる。



平水時



高水時:濁りが多く、大部分は懸濁態として存在。

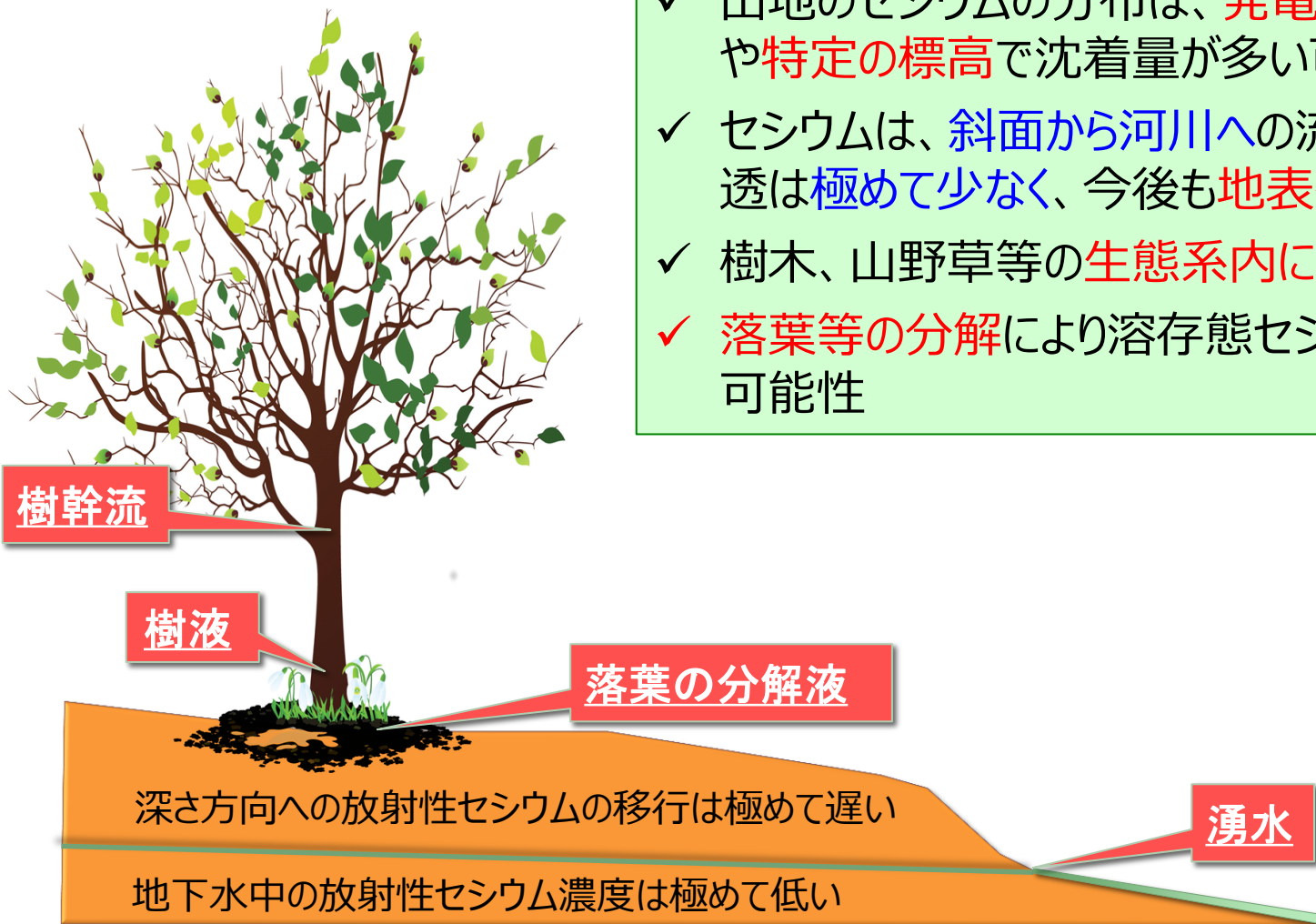


- **セシウムの動きについて、分かってきたこと**
  - **森林:セシウムは移動していくのか。**
  - **河川水系**
    - **溶存態:濃度はどうなるのか。魚などへの影響は。**
    - **懸濁態:どこに堆積するのか。線量率への影響は。**
- **移動挙動の解析ツールで何ができるか。何に使えるか。**

# セシウムの動き： 分かってきたこと(森林)

## 森林に残存する放射性セシウム：

- ✓ 山地のセシウムの分布は、**発電所方向**に面した斜面や**特定の標高**で沈着量が多い可能性
- ✓ セシウムは、**斜面から河川へ**の流出、**地下水へ**の浸透は**極めて少なく**、今後も**地表付近に滞留**
- ✓ 樹木、山野草等の**生態系内**に移行しつつある
- ✓ **落葉等の分解**により溶存態セシウムが生成している可能性



# 山域の線量率分布(大熊町日隠山)

発電所からの放射性物質の流れに面する登山道(稜線)の一部で、その前後と比較して相対的に線量率の高い地点がみられた。

標高602m



針葉樹林



針葉樹林

凡例 (マーカーの色  
の示す線量率)( $\mu\text{Sv/h}$ )

HSF

- > 5.0
- 4.0 ~ < 5.0
- 3.0 ~ < 4.0
- 2.0 ~ < 3.0
- 1.0 ~ < 2.0
- 0.0 ~ < 1.0

放射性プルーム  
の移動方向



坂下ダム

平均線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) : 1.1 (1m高), 1.9 (20cm高)

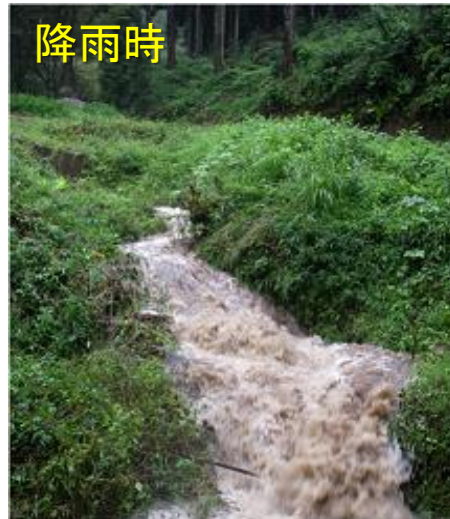
地上20 cmの線量率(2015年12月22日測定)

※線量率分布は20秒で集約平均



# 森林流域からの放射性セシウムの流出状況

## 森林溪流における土砂流出の様子



## 森林域を対象とした事故由来のセシウム<sup>137</sup>流出の実態

	太田川上流 (24か月間)	宇多川上流 (36か月間)
<sup>137</sup> Cs初期沈着量 (kBq/m <sup>2</sup> )	1,900	170
流出土砂由来 <sup>137</sup> Cs濃度 (kBq/kg)	61~130	6.8~9.3
流出土砂由来 <sup>137</sup> Cs流出量 (kBq/m <sup>2</sup> )	8.8	0.51
初期沈着量に対する年間流出量の割合(%)	0.08~0.38	0.04~0.16

観測期間:

宇多川上流:平成24年9月15日~平成27年9月15日

太田川上流:平成26年1月1日~平成27年12月31日

- 森林からのセシウム流出は、主に**土粒子に付着した状態(懸濁態)**で生じている。
- 放射性セシウムの流出は**雨の降り方に強く依存**している。
- ただし、汚染レベルに関わらず、台風等の**大規模降雨時を考慮してもセシウムはほとんど流出していない。**

# 放射性セシウムは**森林表土に滞留する**



# 山野草等への放射性セシウムの移行

種類	採取日	採取場所	植物体Cs-137 (Bq/kg-DW)	土壌Cs-137 (Bq/kg-DW)	移行 係数*
ウド	2015年 4月	川俣町 入久保	$1.5 \times 10^2$	$8.6 \times 10^3$	0.017
ワラビ	2015年 4月	川俣町 入久保	$1.6 \times 10^3$	$1.3 \times 10^5$	0.012
タケノコ	2015年 5月	川俣町 入久保	$9.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^4$	0.79
コゴミ	2015年 5月	川俣町 入久保	$1.8 \times 10^2$	$1.6 \times 10^4$	0.011
フキ(葉)	2015年 5月	川俣町 入久保	$2.0 \times 10^2$	$5.8 \times 10^3$	0.034
フキ(茎)	2015年 5月	川俣町 入久保	$8.8 \times 10$	$5.8 \times 10^3$	0.015
コシアブラ(葉)	2015年 5月	川俣町 入久保	$8.5 \times 10^3$	$1.8 \times 10^4$	0.48
コシアブラ(葉)	2015年 5月	川俣町 入久保	$1.1 \times 10^4$	$1.5 \times 10^4$	0.70
アケビ(可食部)	2015年 9月	川俣町 入久保	$4.0 \times 10$	$1.4 \times 10^4$	0.0029
ナツハゼ(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$2.0 \times 10^2$	$1.1 \times 10^4$	0.018
ナツハゼ(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$1.0 \times 10^2$	$3.8 \times 10^3$	0.026
ハナモモ(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$3.6 \times 10$	$1.6 \times 10^4$	0.0022
くり(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$1.1 \times 10^4$	$2.1 \times 10^4$	0.53
くり(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$1.5 \times 10^3$	$7.2 \times 10^3$	0.21
くり(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$1.1 \times 10^3$	$7.0 \times 10^4$	0.15
くり(果実)	2015年 9月	川俣町 入久保	$4.0 \times 10^3$	$3.6 \times 10^4$	0.11

山菜は、可食部を測定



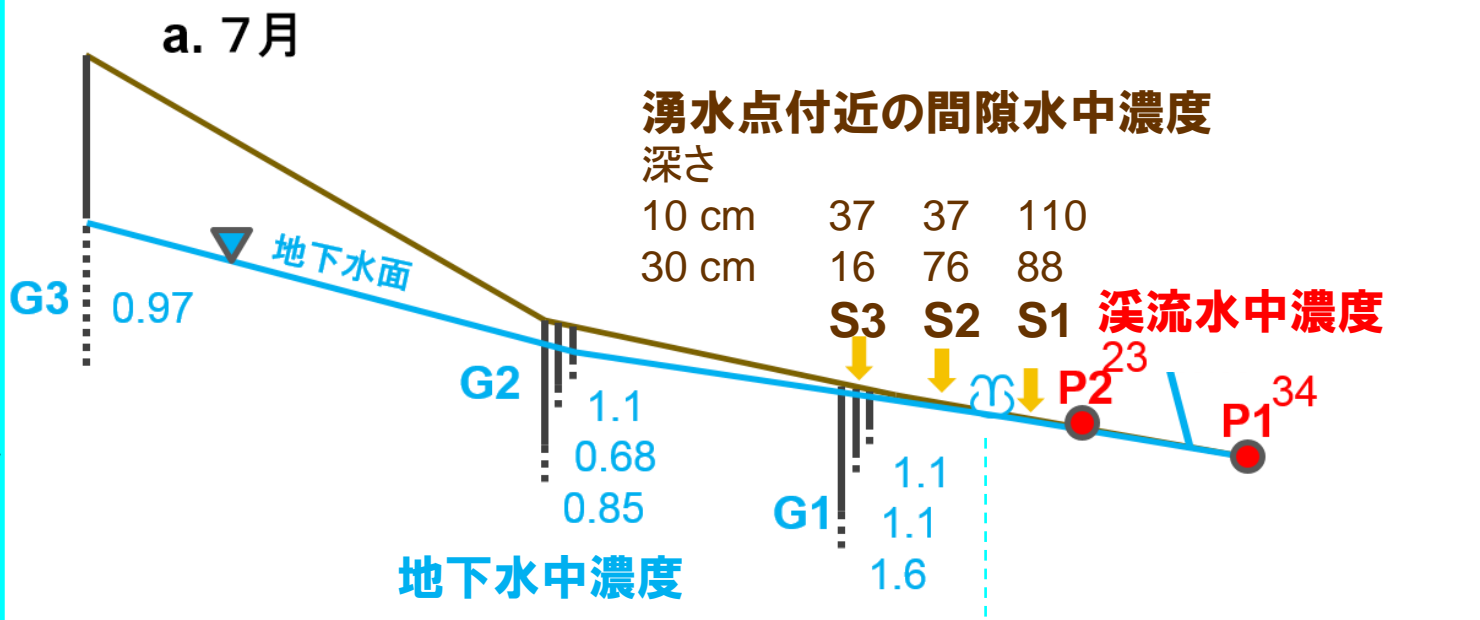
\*移行係数: 土壌中のセシウム濃度に対する植物体等の中のセシウム濃度の割合

種類	採取場所	採取時期	子実体Cs-137 (Bq/kg-DW)	土壌Cs-137 (Bq/kg-DW)	移行 係数*
カワラタケ	川俣町入久保	2015年 4月	$7.0 \times 10^3$	$1.3 \times 10^4$	0.56
クリタケ	川俣町入久保	2015年 10月	$1.2 \times 10^4$	$1.6 \times 10^4$	0.80
クリタケ	川俣町入久保	2015年 11月	$1.4 \times 10^4$	$7.1 \times 10^4$	0.20



- **コシアブラ、タケノコ、キノコ類**は移行係数が大きい。
- 同じ場所でなぜ移行係数が異なるのかを明らかにするため、この森林の**どの部分でどのように溶存態放射性セシウムが生成しているか**を明らかにしていく。

川俣町森林での観測例、単位：mBq/L



表層水の多くは地表から地下に浸透する。

その過程で、土壤に放射性セシウムは吸着される。

そのため、地下水中の放射性セシウム濃度は極めて低い。

湧水点付近で溶存態放射性セシウム濃度が増加

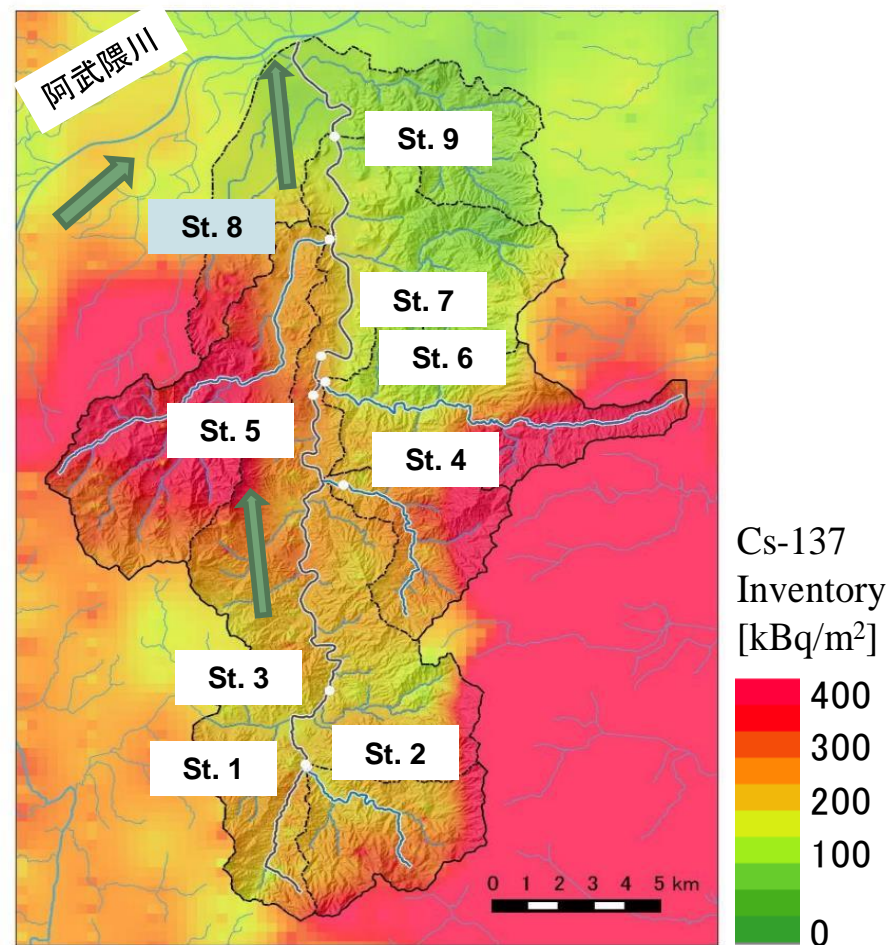


## 水系中の溶存態セシウム：植物や動物に取り込まれやすい

- ✓ 最も濃度が高い河川でも1 Bq/L未満で、源流域の沈着量が影響
- ✓ 高水時にやや濃度が高くなる傾向があるが、概ね一定
- ✓ 夏期に高く、冬期に低くなる傾向
- ✓ ダム湖では、**底層水の方が濃度が高い**が、春から秋にかけて、ダム湖から放出されるのは表層水で、**底層水は混ざらない**
- ✓ **淡水魚**の種類によっては依然100 Bq/kgを上回る**高い濃度**を検出

# 河川水系における形態別セシウム濃度の例

地点	懸濁態中の放射性セシウム濃度 Bq/kg	河川水中のセシウム濃度 mBq/L	
		懸濁態	溶存態
St. 1	4982	10.0	1.8
St. 2	2889	49.1	3.0
St. 3	5012	60.1	3.7
St. 4	4385	21.9	1.3
St. 5	3865	15.5	3.2
St. 6	3432	10.3	2.7
St. 7	5626	16.9	2.8
St. 8	11790	129.7	15.7
St. 9	3210	16.0	2.7



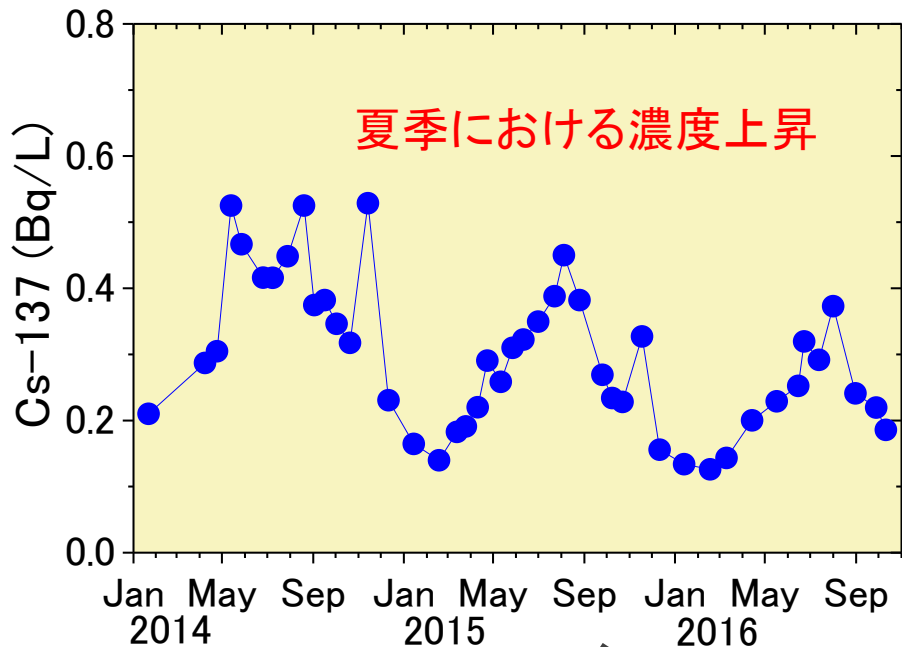
2016年4月の広瀬川での平水時採水調査結果

- 懸濁態中の放射性セシウム濃度や、河川水中の溶存態セシウム濃度は、**源流域の放射性セシウム沈着量**が影響

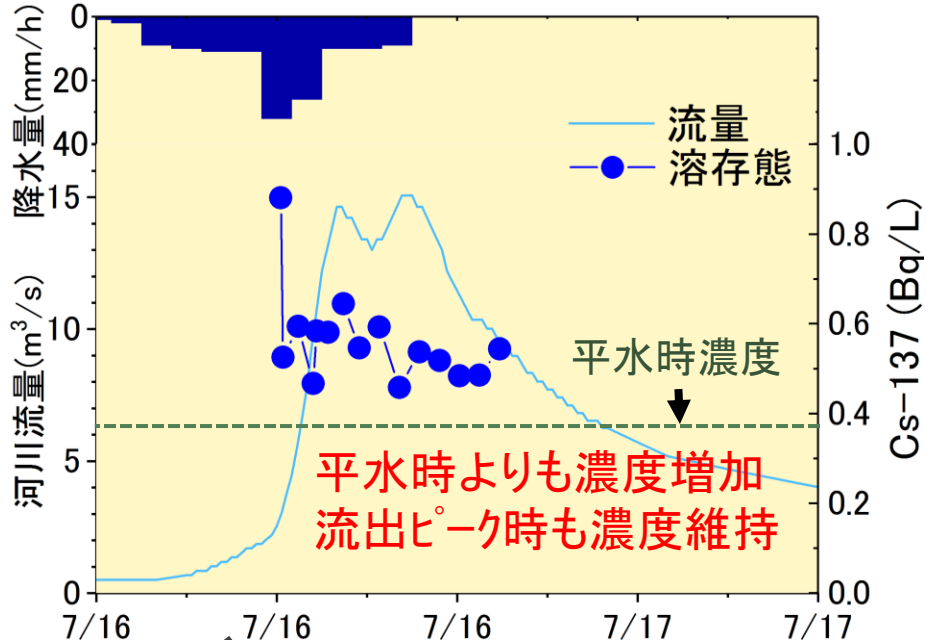
# 溶存態セシウムの森林域からの流出実態

—太田川上流での調査結果—

平水時の河川水中の  
溶存態セシウム濃度の経時変化



降雨流出時の河川水中の溶存態セシウム  
濃度変化の一例(対象:2015年7月16日)

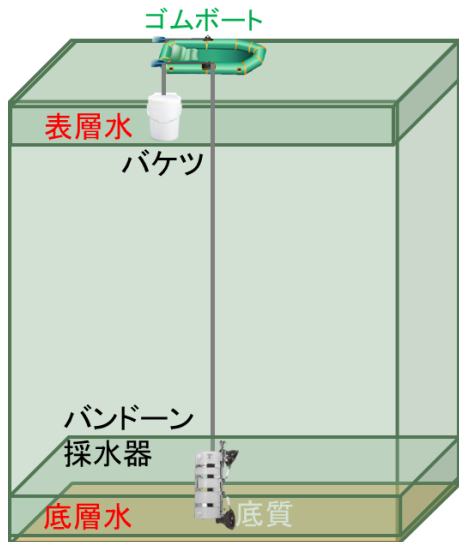


太田川では、放射性Cs年間総流出量の3割が溶存態  
沈着量の多い森林域では、総流出量に対する溶存態の寄与は無視できない

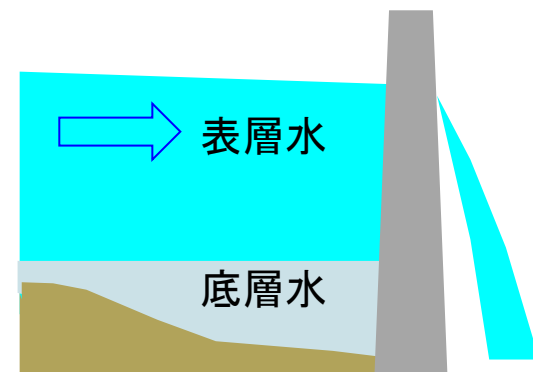
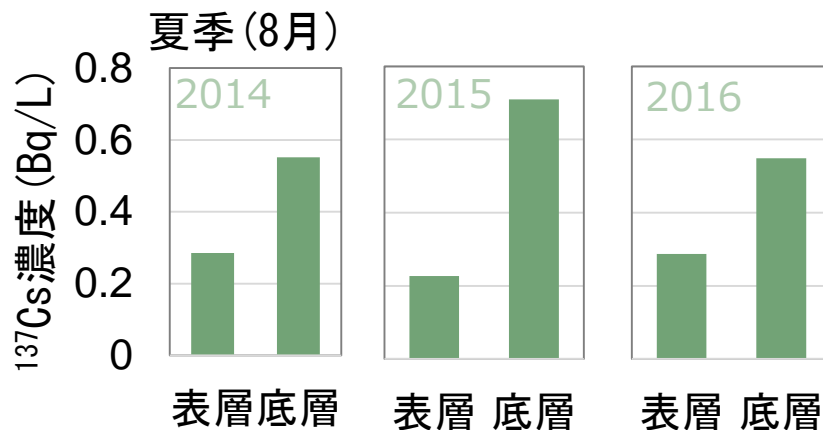
- 溶存態セシウムの形成に、**堆積有機物(リター)からの溶脱**が影響している可能性を強く示唆

# ダム湖水の溶存態放射性セシウム濃度

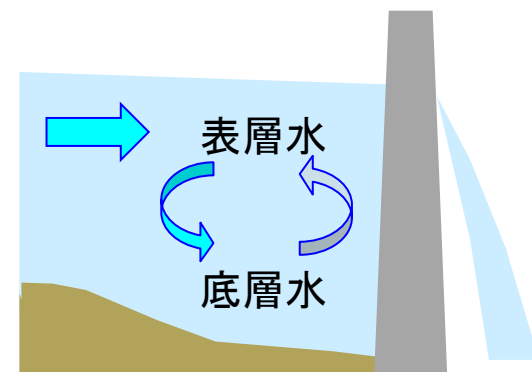
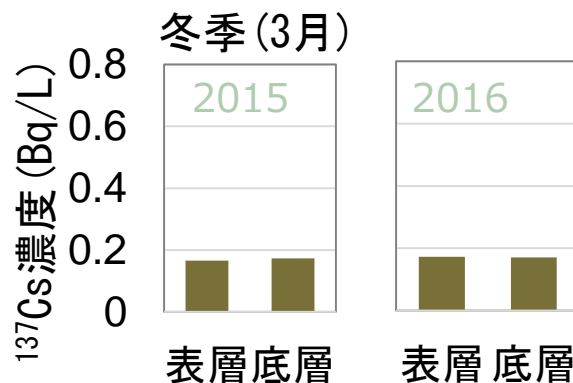
採水方法



横川ダム湖の中心における湖水中の溶存態セシウム濃度



- 夏季は表層より底層の方が濃度が高い ⇒ 底泥からの溶出が影響？  
ただし、夏季は水温が高い表層水のみが、取水口から下流に流れる。



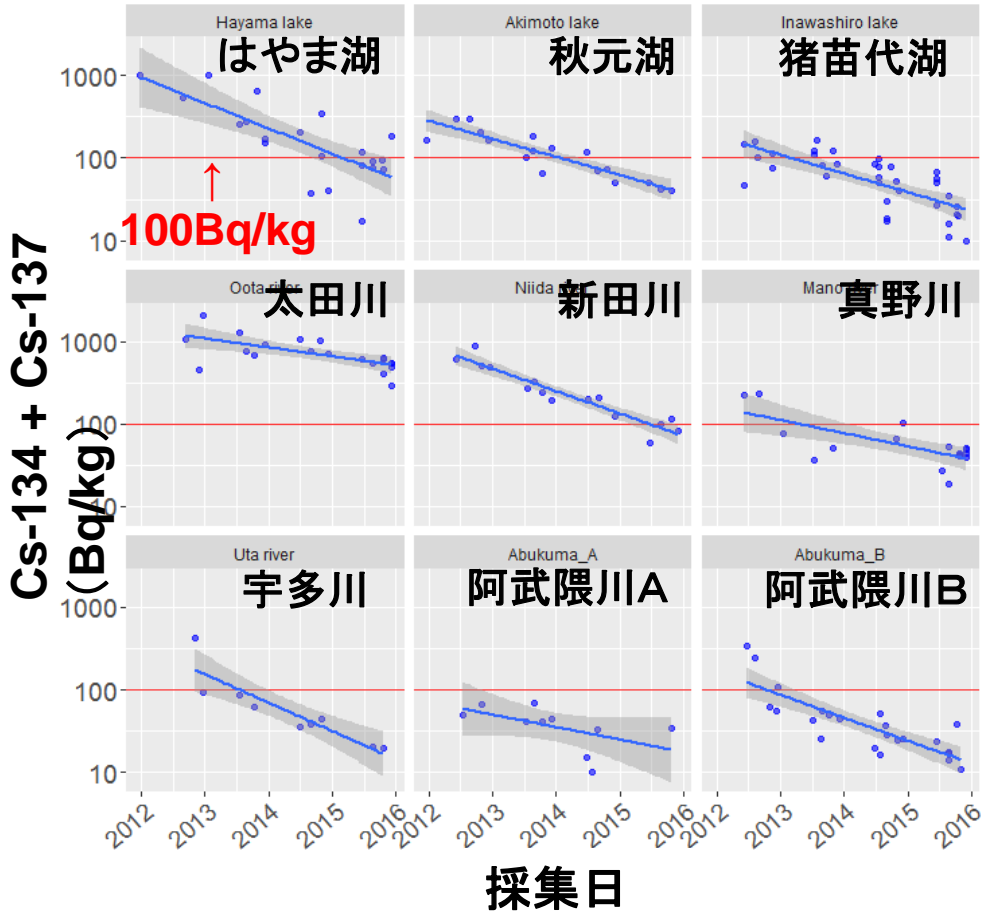
- 冬季は、表層水と底層水が循環するが、濃度は低い。



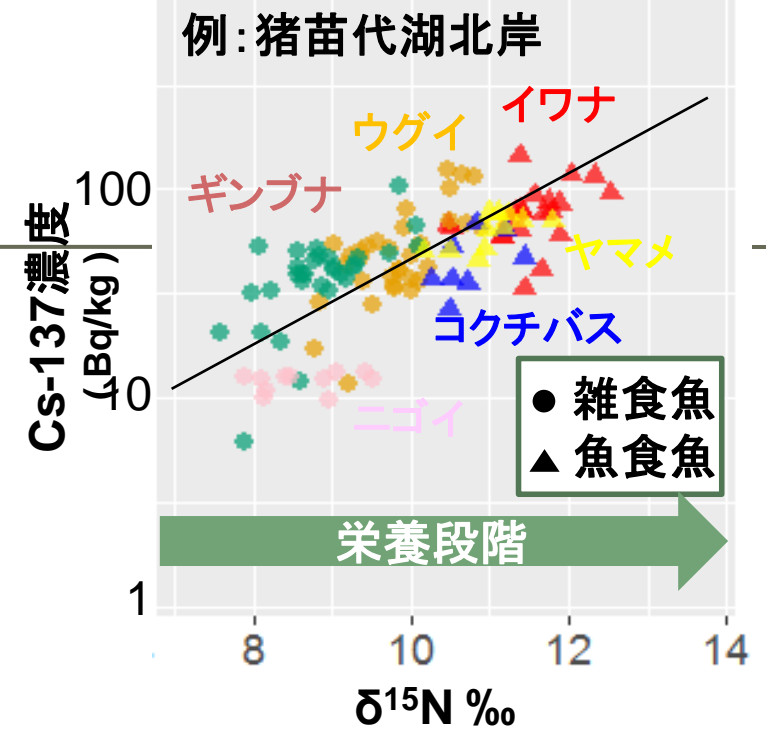
# 淡水魚への放射性セシウム移行実態と推移

- 環境省や国環研による水生生物調査結果を用いた解析
- 放射性セシウム濃度は時間とともに減衰しているが、  
一部の魚種・地域では未だに出荷規制値(100Bq/kg)を超えている。

## ウグイに含まれる放射性セシウム濃度



## 栄養段階と放射性Cs濃度

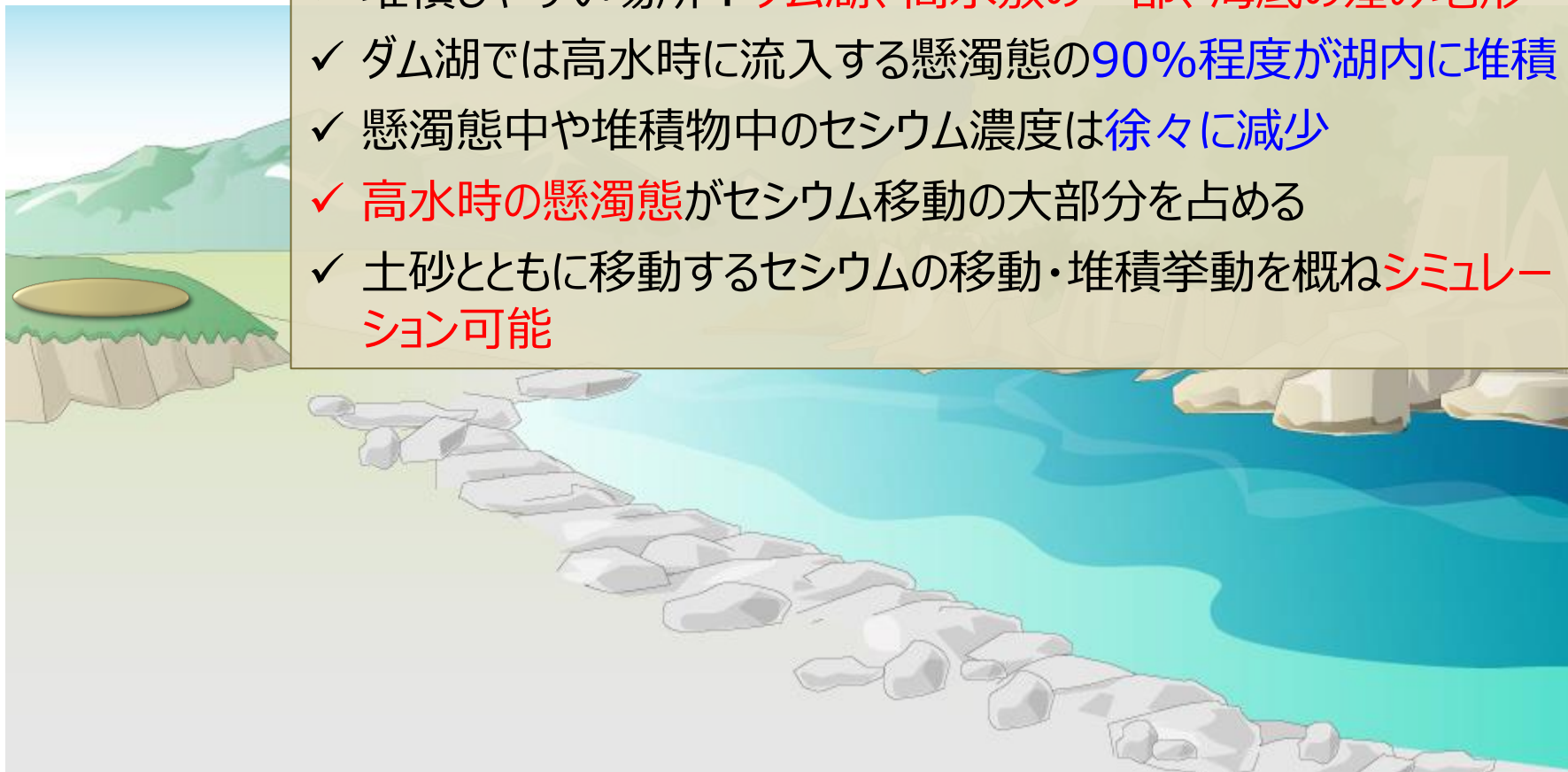


特に湖沼では、栄養段階が高い(食物網の上位種)ほど濃度が高くなる傾向にある

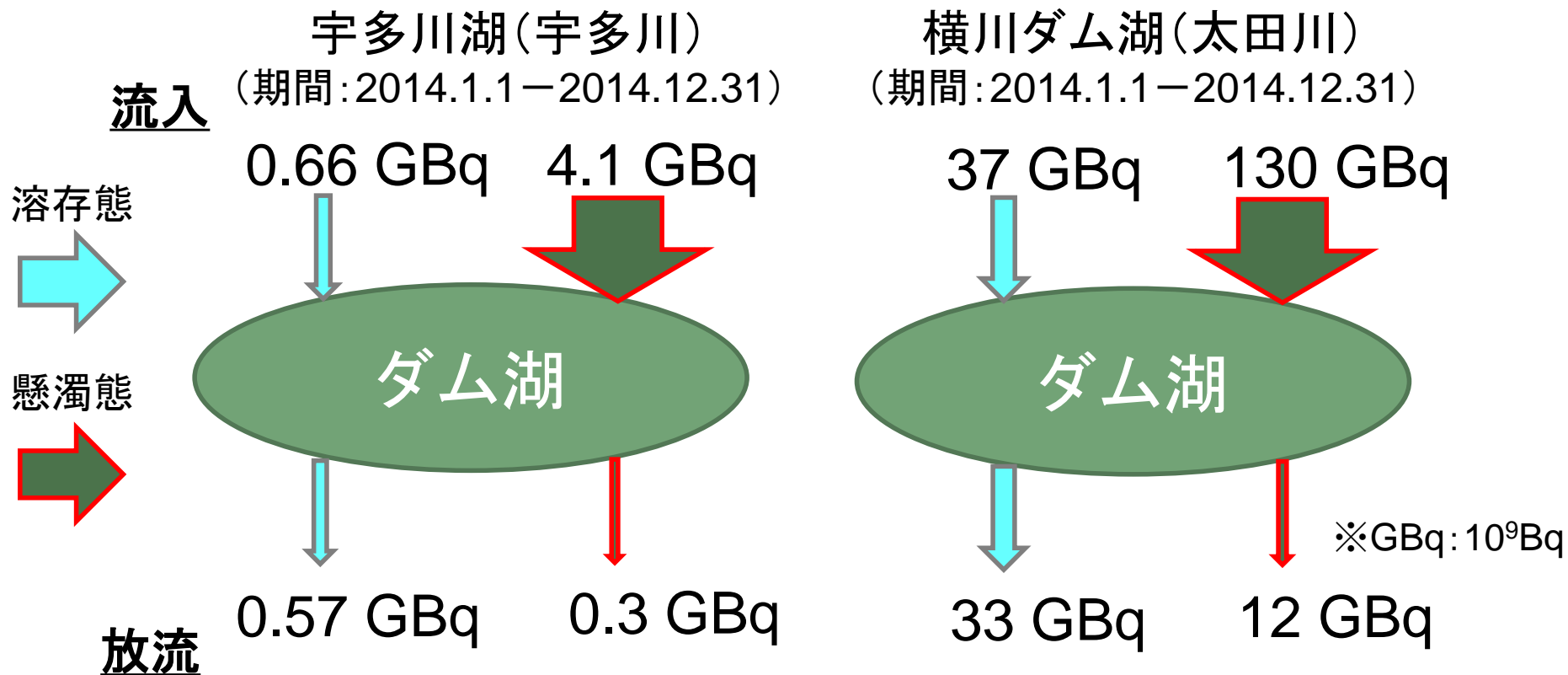
# セシウムの動き： 分かってきたこと(ダム・河川・河口域)

## 水系中の懸濁態セシウム：堆積すると線量率に影響する可能性

- ✓ 堆積しやすい場所：ダム湖、高水敷の一部、海底の窪み地形
- ✓ ダム湖では高水時に流入する懸濁態の90%程度が湖内に堆積
- ✓ 懸濁態中や堆積物中のセシウム濃度は徐々に減少
- ✓ 高水時の懸濁態がセシウム移動の大部分を占める
- ✓ 土砂とともに移動するセシウムの移動・堆積挙動を概ねシミュレーション可能

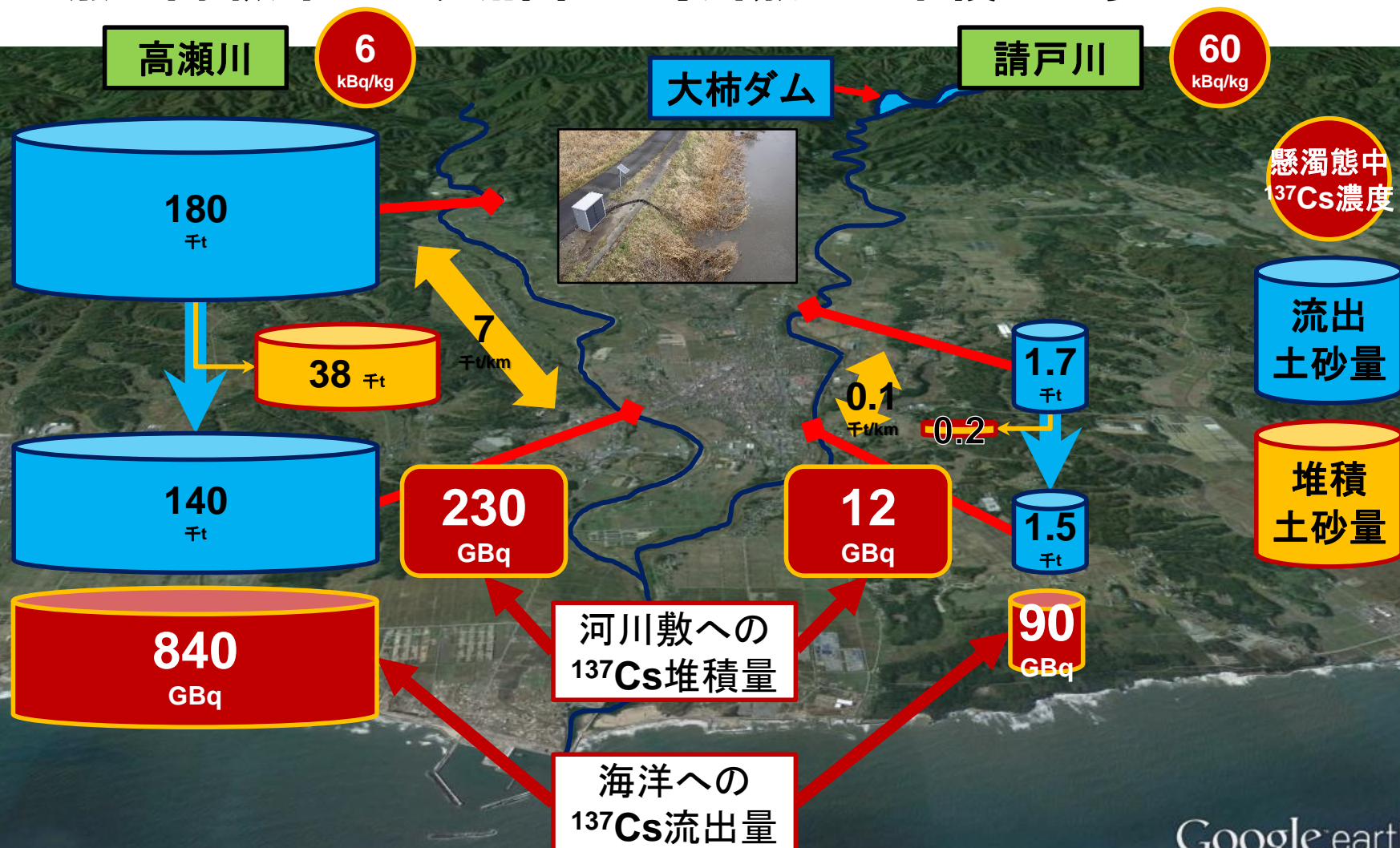


## ダム湖における放射性セシウムの年収支推定結果



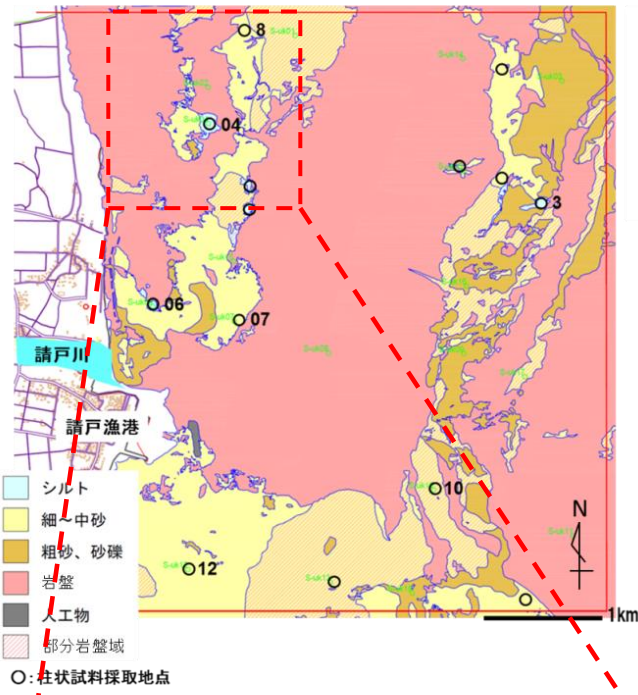
- 流入土砂に吸着したセシウムの大部分は湖底に沈降・堆積し、下流へ移動していない

流域から流出した $^{137}\text{Cs}$ の10~20%が河川敷に堆積(残りは海洋へ)  
ダムが無い高瀬川は土砂流出量・河川敷への堆積量が多い

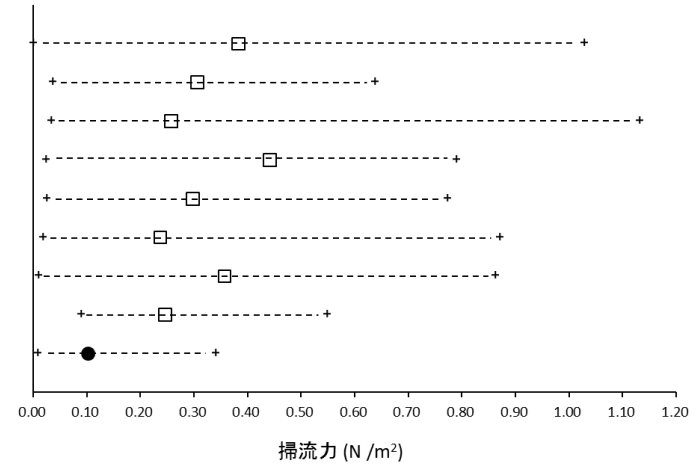
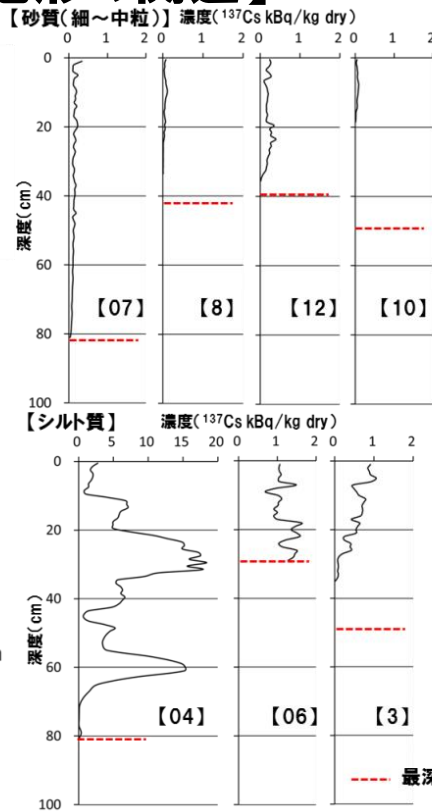


# 河口域では凹状窪地に堆積しやすい

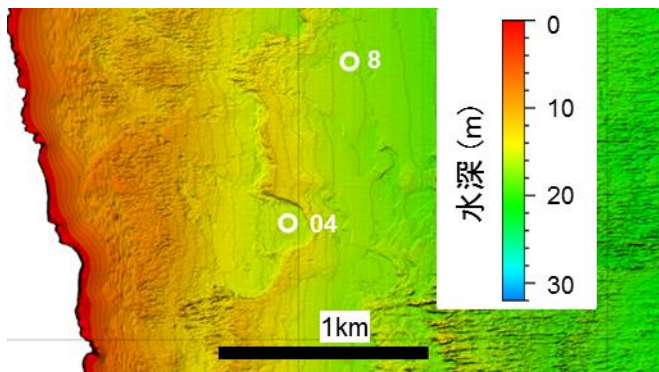
## 【海底土の放射性Csと海底地形の関連】



海底土の分布(左)及び放射性Cs (<sup>137</sup>)濃度プロフィール(右)



底層の掃討流  
(●は窪地、□はそれ以外地点)

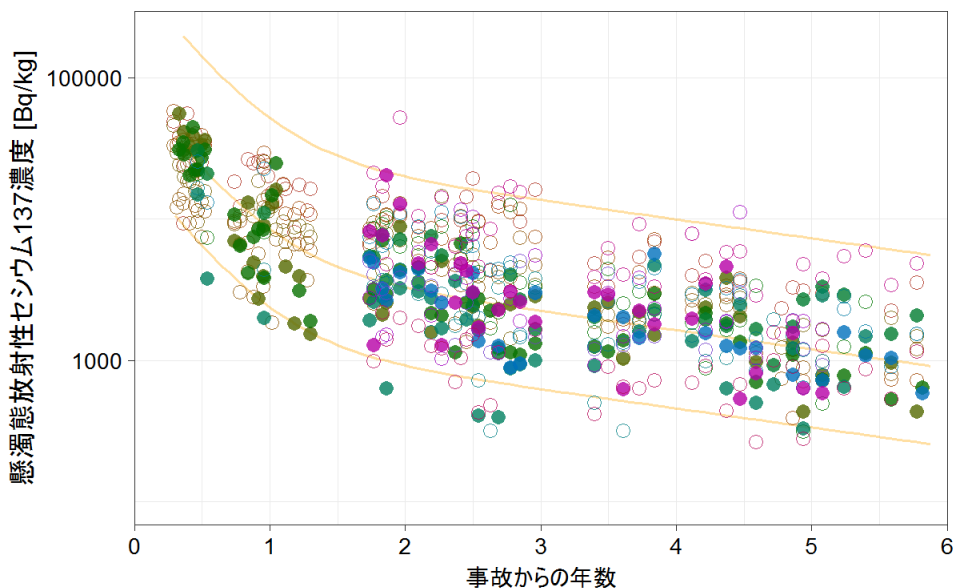


調査地点04の窪地周辺の水深図

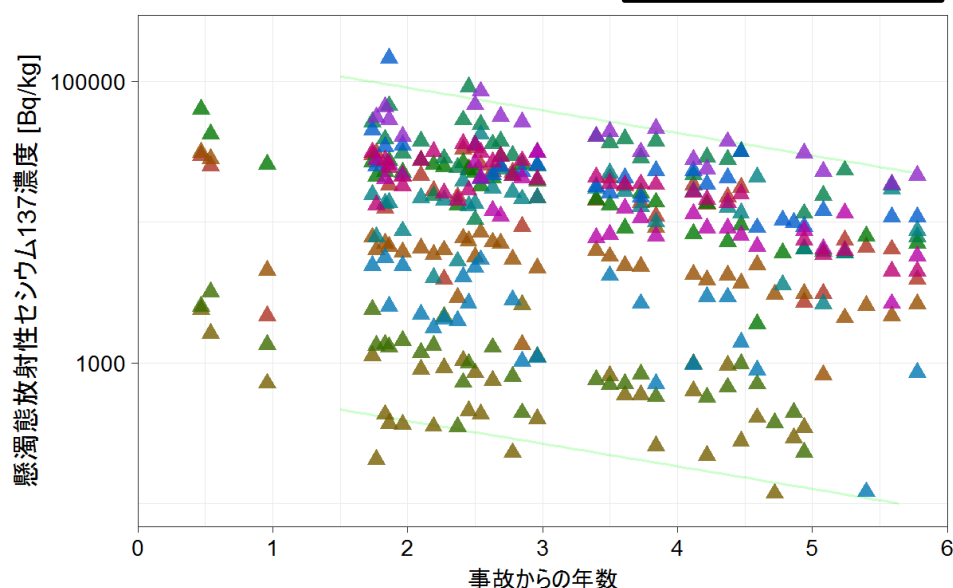
- 海底土に放射性セシウムが堆積しやすい地点は、**窪地**の海底地形。
- 窪地では流れが停滞。
- そのため、細粒な海底土が沈降しやすい環境。
- そのような**地点は限られており**、ほとんどの地点では、放射性セシウムは濃集しにくい状態。

# 懸濁態中のセシウム濃度の経時変化

## 阿武隈川水系



## 浜通りの河川



阿武隈本川 ● 5 ● 6 ● 12 ● 13 ● 17 ● 18 ● 21

阿武隈川支流 ○ 1 ○ 2 ○ 3 ○ 4 ○ 11 ○ 14 ○ 16 ○ 19 ○ 20 ○ 22 ○ 30

浜通りの河川 ▲ 7 ▲ 8 ▲ 9 ▲ 10 ▲ 15 ▲ 23 ▲ 24 ▲ 25 ▲ 26 ▲ 27 ▲ 28 ▲ 29

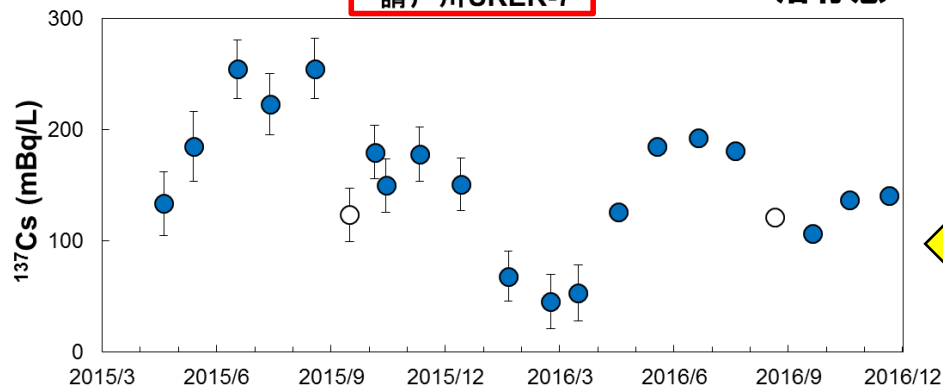
- 土地利用や、放射性セシウムの初期沈着量の違いにより、地点ごとのばらつきはあるが、いずれの観測点でも濃度が減少している。

# 請戸川水系における河川水中セシウム濃度の経時変化

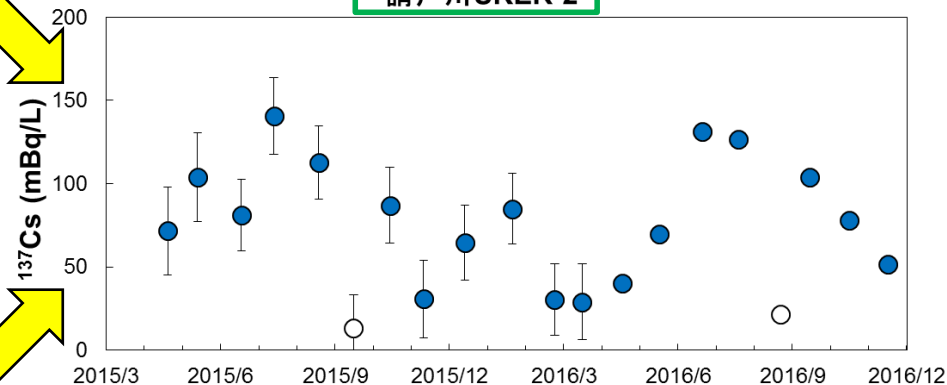
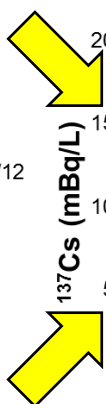
- ✓ 溶存態セシウム濃度は漸減傾向。
- ✓ 2016年時点で **0.3 Bq/L未滿**。
- ✓ 季節変化(夏:高い、冬:低い)

請戸川UKER-7

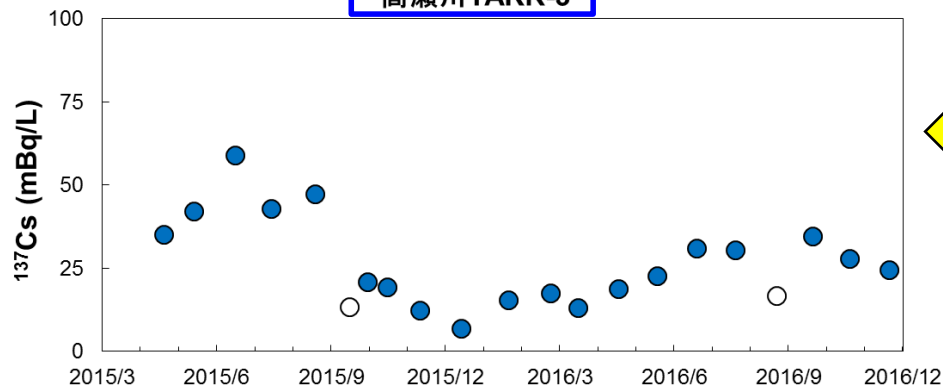
●: 溶存態



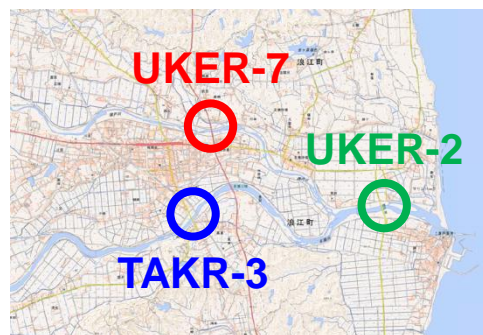
請戸川UKER-2



高瀬川TAKR-3

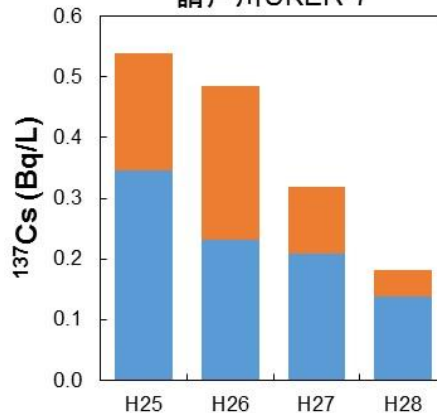


○: 出水の影響あり

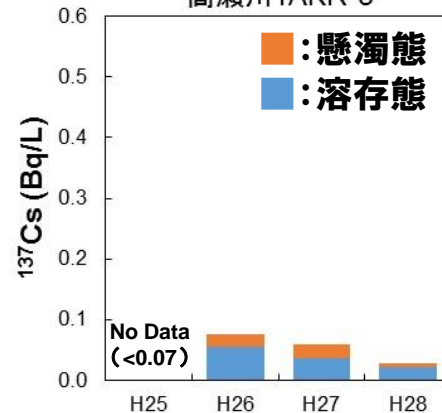


年平均値の推移

請戸川UKER-7



高瀬川TAKR-3



# いろいろな知見が得られてきましたが…

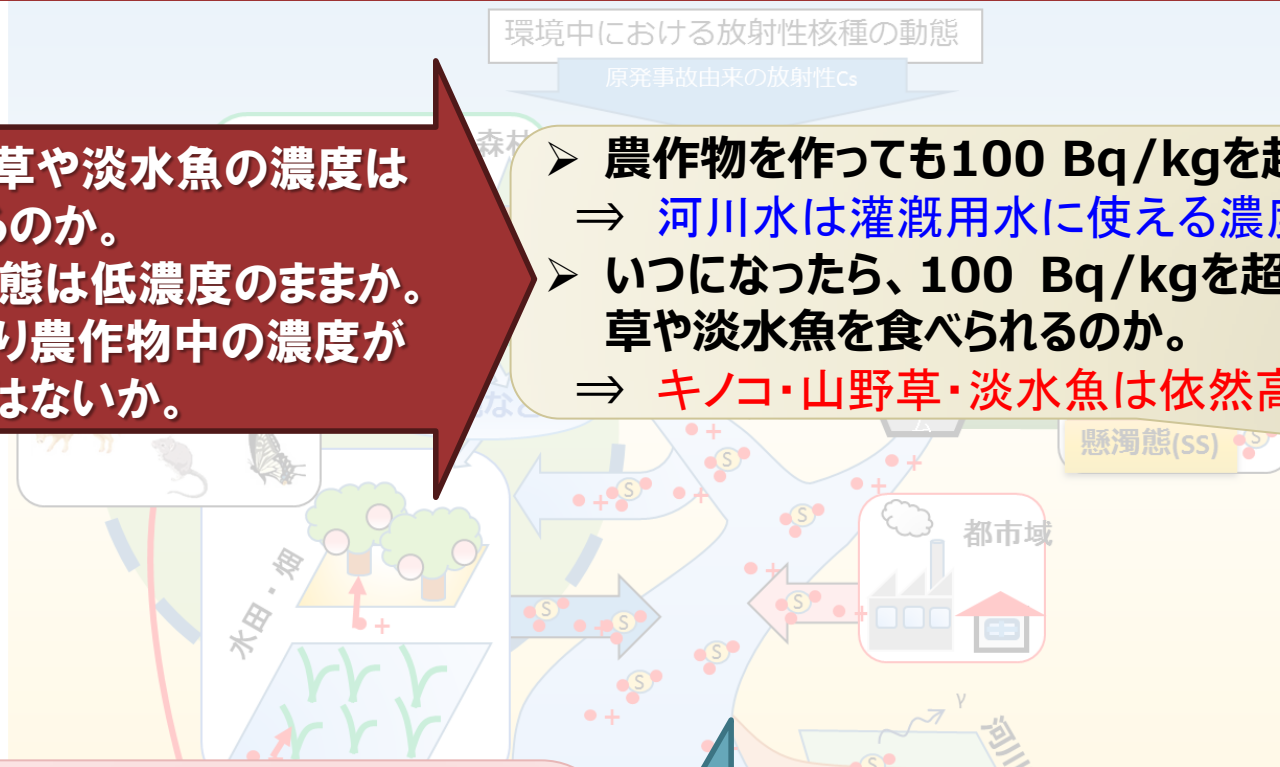
環境中での放射性セシウムの動きを知り(調査、実験)、予測する(シミュレーション)

環境中における放射性核種の動態

原発事故由来の放射性Cs

- 将来、山野草や淡水魚の濃度は下がってくるのか。
- 今後も溶存態は低濃度のままか。
- 飛散物により農作物中の濃度が上がるのではないか。

- 農作物を作っても100 Bq/kgを超えるのでは。  
⇒ 河川水は灌漑用水に使える濃度レベル
- いつになったら、100 Bq/kgを超えている山野草や淡水魚を食べられるのか。  
⇒ キノコ・山野草・淡水魚は依然高い濃度



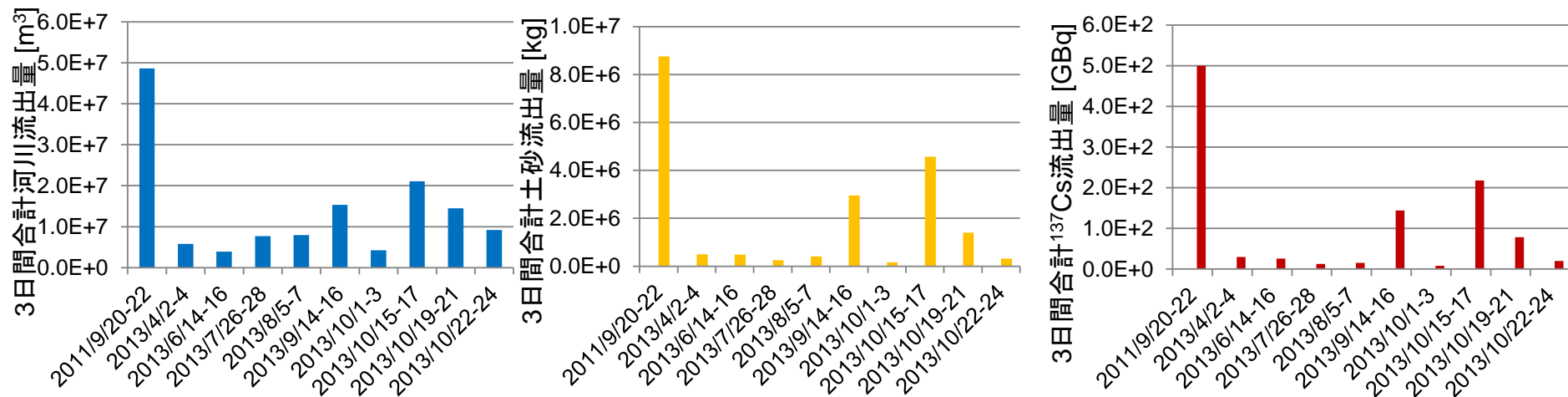
- 将来、森林からの流出や河川水による運搬によって放射性セシウムが生活圏に堆積し、線量率が増加するのでは。  
⇒ 森林からの流出はごくわずかで、河川水系で堆積する場所は限られる。上流の沈着量が少ない河川では、低濃度の土砂の堆積により線量率は低下。

- 高水時に田にセシウムが流入するのではないか。
- 河川補修時に高濃度の堆積物が現れ、被ばくするのではないか。
- 海では流出したセシウムが堆積し続けるのではないか。

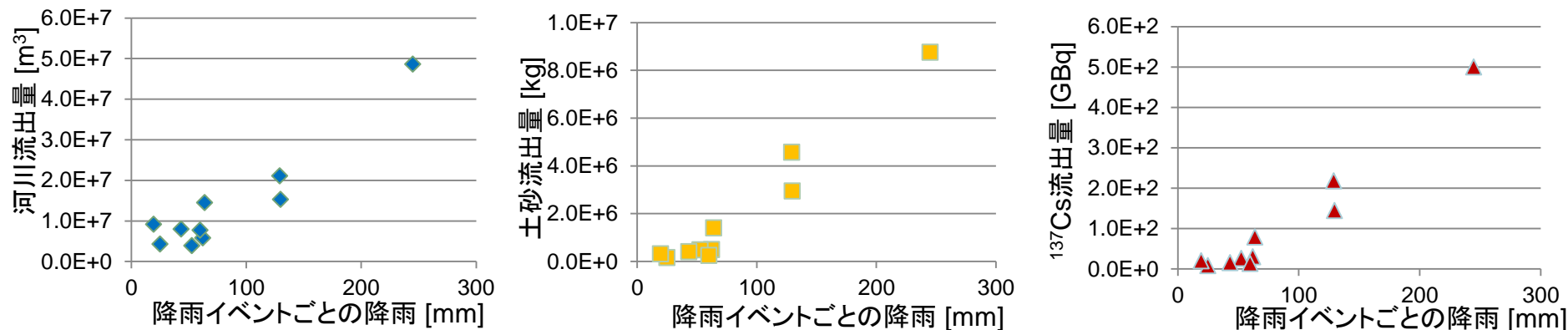


# 請戸川水系への放射性セシウムの流入・移動挙動の解析

2011・2013年の主要な降雨イベントにおける請戸川の土砂および放射性セシウム流出量(3日間合計)

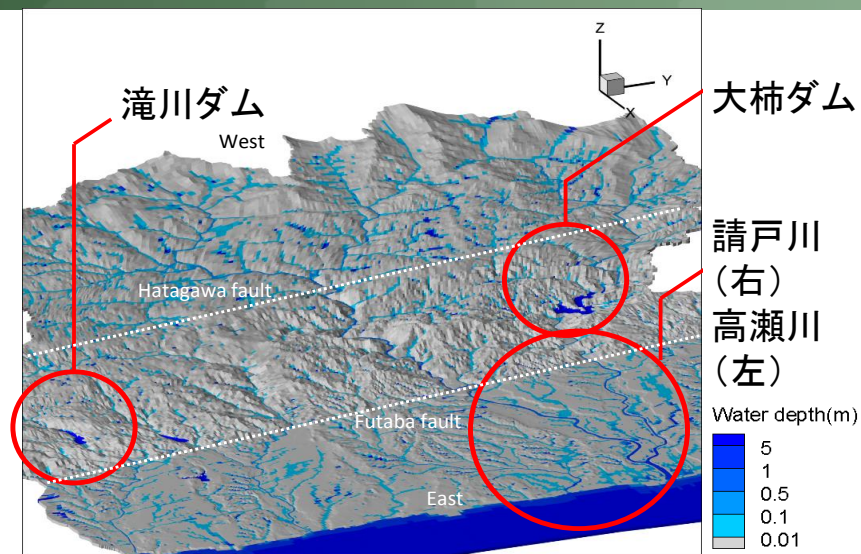


降水量と河川流量、土砂・放射性セシウム流出量の関係

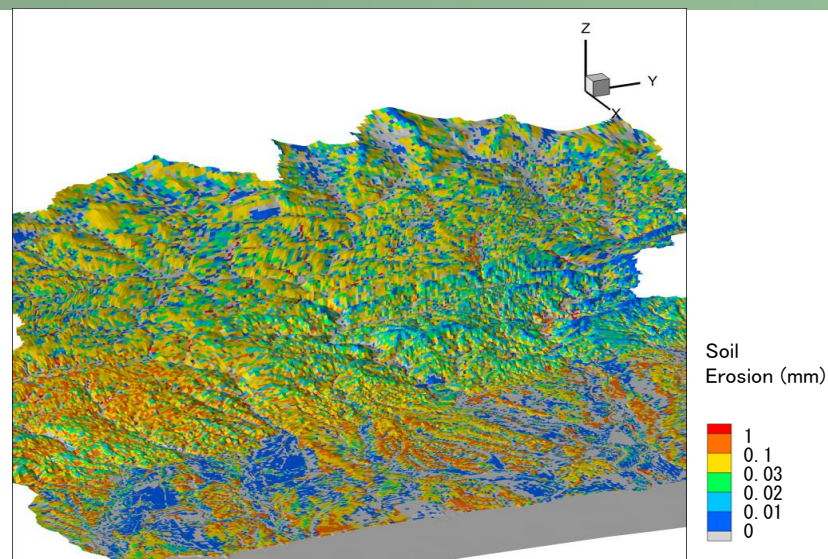


どれくらいの雨が降ると、どれくらい土砂やセシウムが流出するか、予測できる。

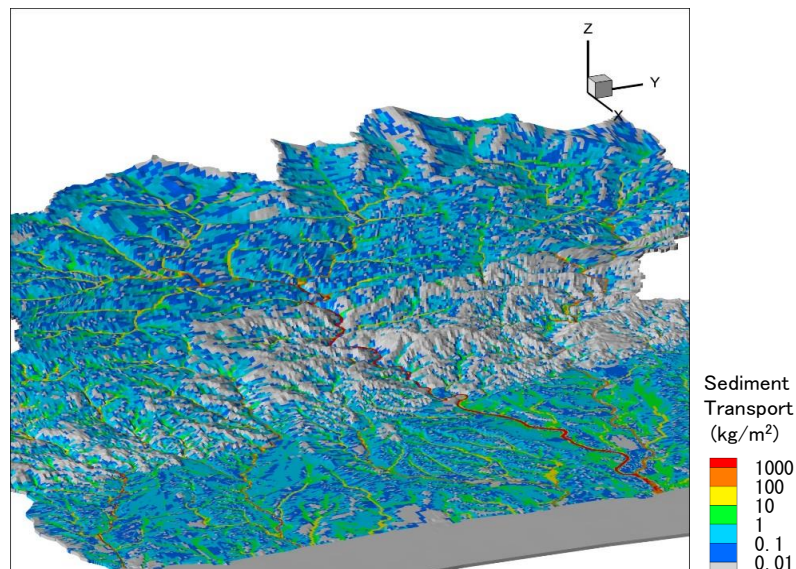
⇒ 頭首工や水門の管理に活用可能。



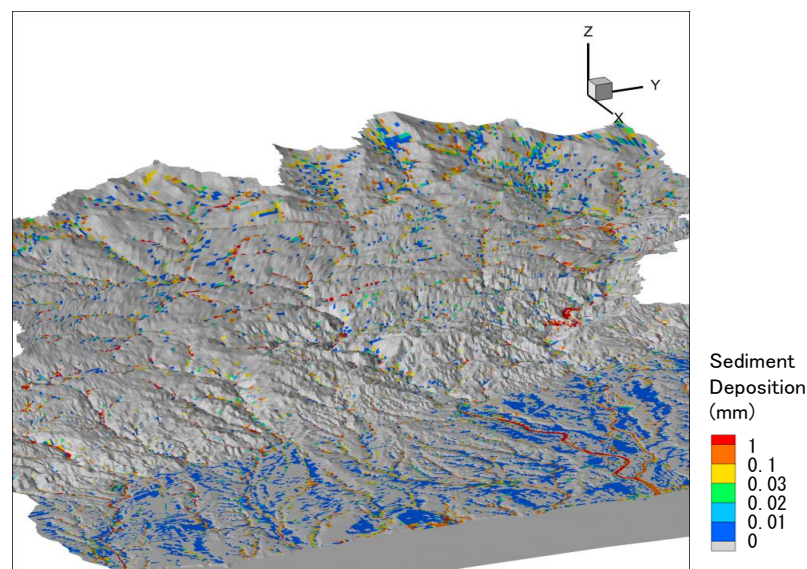
水の深さ



累積土壌侵食量



累積土砂通過量



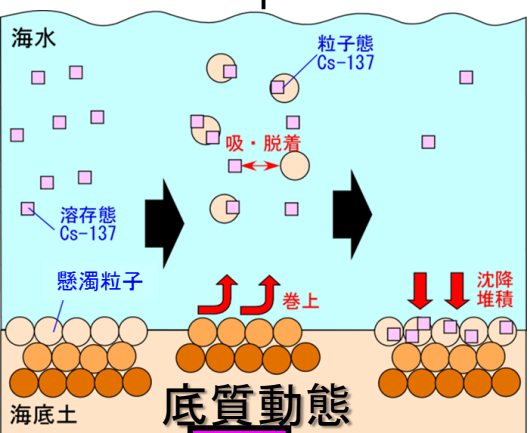
累積土砂堆積量

土砂やセシウムが堆積しやすい場所を予測できる。⇒ **堆積地点の管理**に活用可能。

# 松川浦におけるセシウム動態シミュレーション

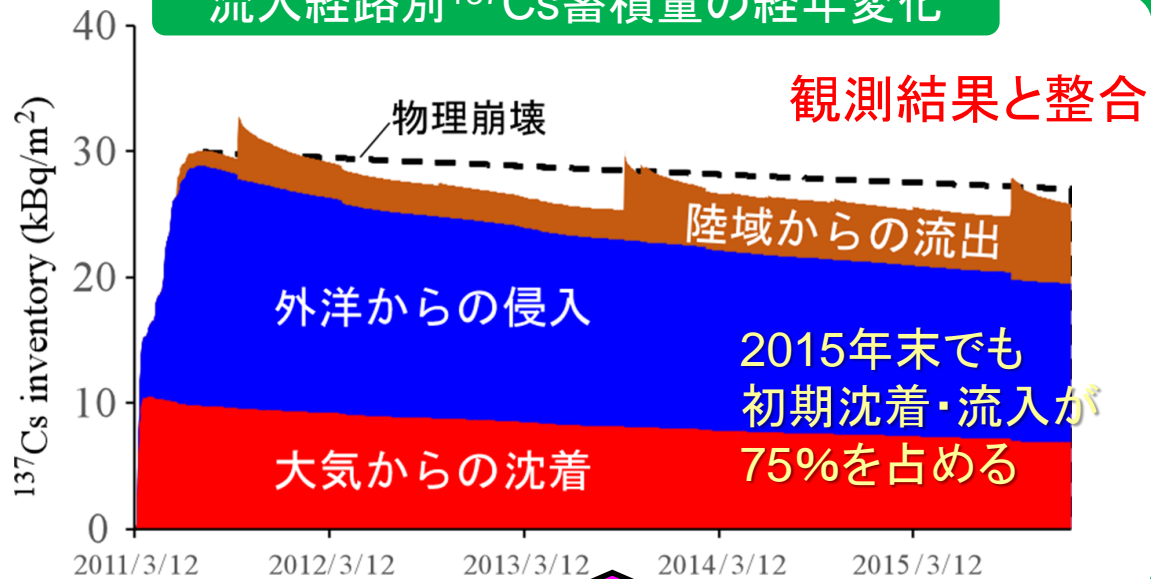
モデル

3次元流動



底質動態

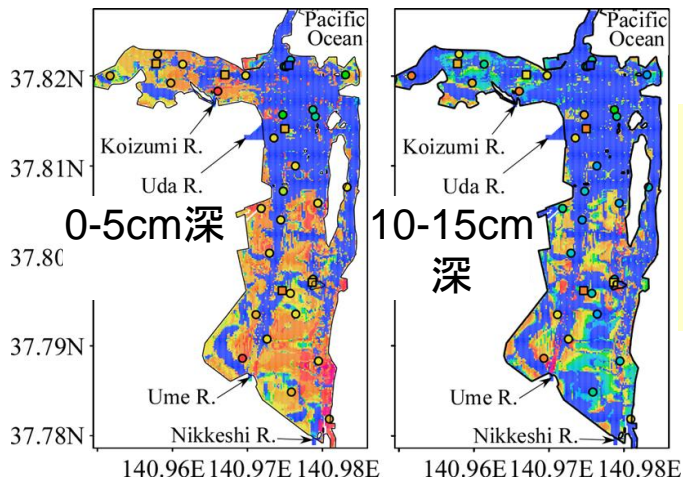
流入経路別<sup>137</sup>Cs蓄積量の経年変化



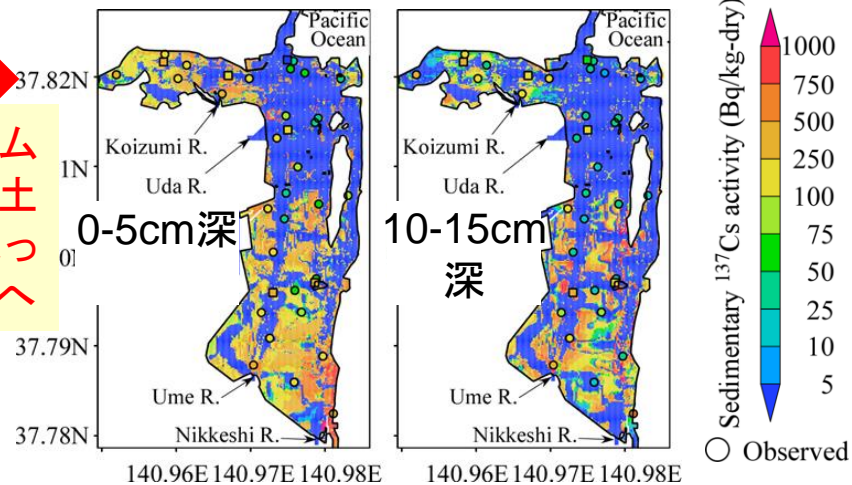
Cs-137動態シミュレーション

2013年7月

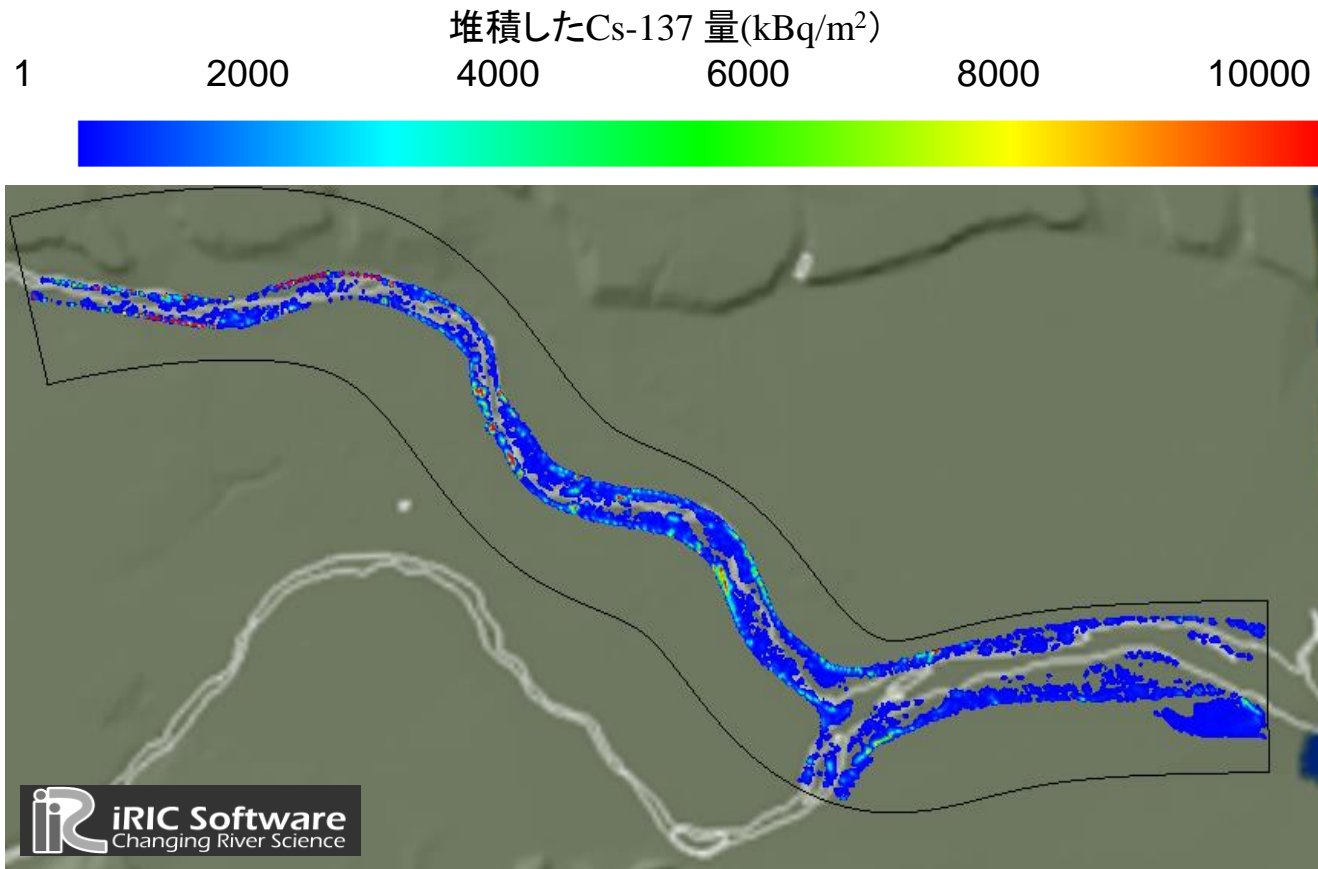
2015年9月



高濃度セシウムは、河川流入土砂の堆積によって徐々に下層へ



# 河川敷への堆積挙動の解析(請戸川河口付近)



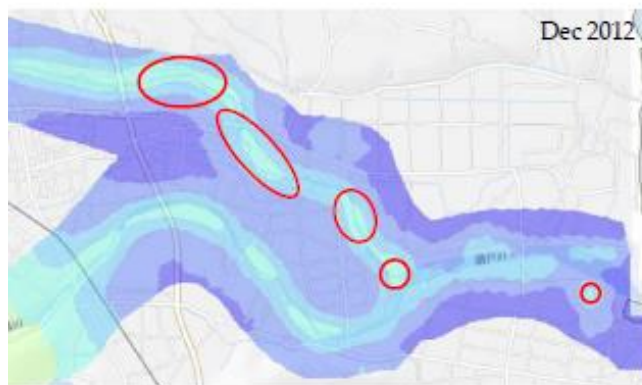
河川敷でセシウムが堆積しやすい場所を特定でき、堆積履歴を推測可能に。  
⇒ **河川敷の保守管理**をする場合の基本データとして活用。

シミュレーションによるCs濃度比率

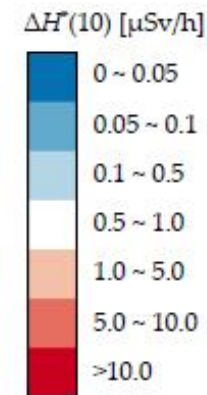
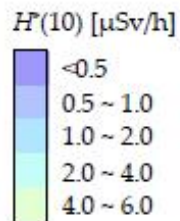
		堆積土砂量 (kg)	堆積 Cs-137 (kBq)	濃度 (kBq/kg)	左岸と右岸 の比率
河口 付近	左岸	4.86E+03	2.89E+05	59.5	5.5
	右岸	2.78E+05	2.99E+06	10.8	
請戸橋 付近	左岸	8.03E+03	2.55E+05	31.8	3.0
	右岸	6.99E+04	7.39E+05	10.6	

2014年12月の観測によるCs濃度比率

		濃度 (kBq/kg)	左岸と右岸の 比率
河口 付近	左岸	17±6	8.5
	右岸	2±2	
請戸橋 付近	左岸	37±12	3.4
	右岸	11±4	



Unmanned Helicopter Air Dose Rate Monitoring  
Y. Sanada et al. (2014)



## 2011年9月の台風時の解析

- ・土砂とともに河川に流入・移動する放射性セシウム量を流入・移動シミュレーションにより解析
- ・土砂とともに河川敷に堆積する放射性セシウムの分布を2次元シミュレーションにより解析
- ・その放射性セシウムの分布に基づき、河川敷の空間線量率分布を計算

河川敷の堆積量に基づき、線量率を評価できる。

⇒ **河川敷の保守管理**をする場合の基本データとして活用。

- 森林・ダム・河川・河口域に至る**放射性セシウムの移動挙動は明らかになりつつある。**
  - **森林:地表付近にセシウムが長く滞留する。**  
⇒(課題)森林生態系への移行挙動、溶存態生成メカニズム
  - **溶存態:いずれの河川水系でも濃度は1 Bq/L未満と低く、減少傾向。**  
⇒(課題)淡水生態系への移行挙動、溶存態生成メカニズム
  - **懸濁態:濃度は急激に減少、堆積しやすい場所も明らか。**  
⇒(課題)水系内における堆積履歴のデータベース整備
- 河川水系の放射性セシウムの**移動挙動はシミュレーションが可能になりつつある。**
  - **高水イベントの規模に応じた移動・堆積挙動、堆積履歴に基づく空間線量率予測が可能になった。**  
⇒(課題)メカニズムに基づく溶存態セシウム濃度の予測、山野草や淡水魚等への移行メカニズムに基づくセシウム濃度の予測

ご清聴ありがとうございました。

