



福島長期環境動態研究について

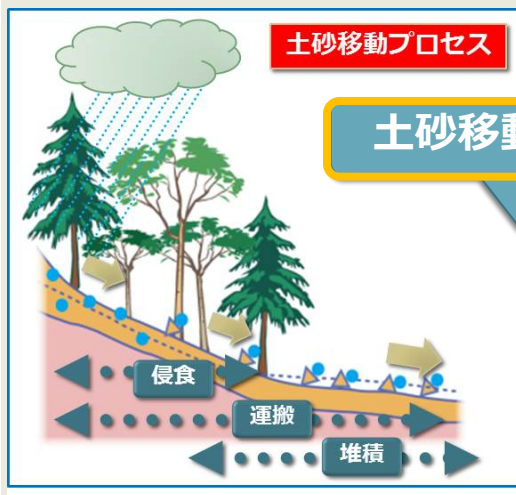
日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門 福島環境安全センター
環境動態研究グループ

飯島 和毅

福島長期環境動態プロジェクトの目的と反映先

- 森林から河川水系を通り生活圏・海に至る移動経路において、移動現象に着目したモデルを用いて、放射性物質の移動・堆積量を定量的に予測する。
- 放射性物質の移動による被ばく線量・放射性物質の堆積量の変化を推定する。
- 被ばく線量・放射性セシウム濃度低減に有効な移動抑制等の対策の提案。

放射性物質の移動現象と経路



モデルで予測する放射性物質の挙動と活用先

森林内での化学種毎の放射性物質流出・流入挙動予測

- 森林内での作業従事時の外部被ばく線量変化評価
- 森林内での放射性物質循環挙動評価に活用

環境水への化学種毎の放射性物質流入挙動予測

- 水の摂取による内部被ばく線量変化評価
- 作物・水産物中放射性物質濃度の評価に活用

生活圏・周辺への放射性物質流入挙動予測

- 生活圏における外部被ばく線量変化評価

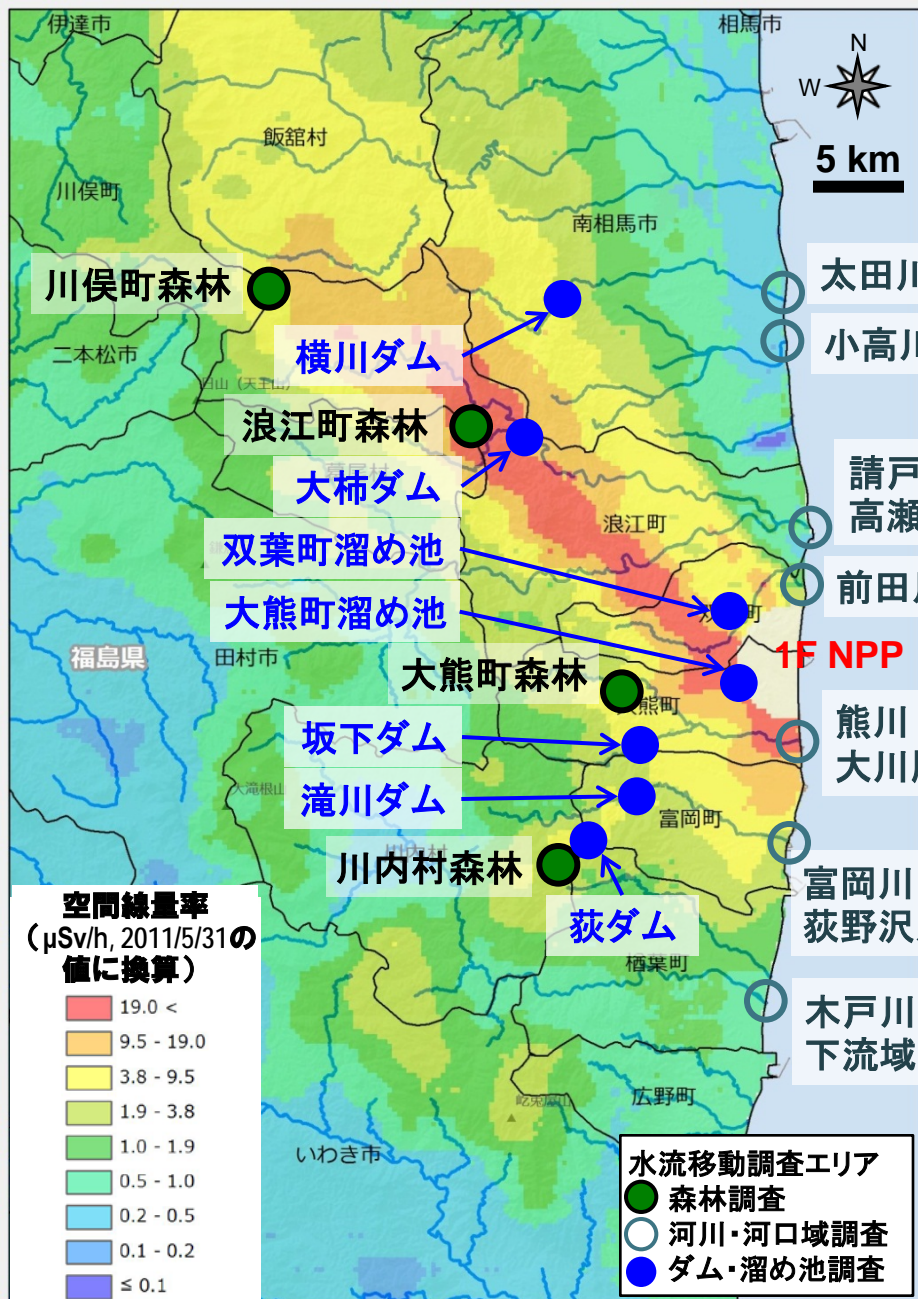
地下への移流

河川水流による移動

塩による脱離・凝集
海流による移動

- 福島県内の農業・林業・水産業等の復興促進
- 住民の方々の帰還支援

調査エリア



□ 森林

- ✓ 川俣町 (落葉樹)
- ✓ 浪江町 (常緑樹 / 落葉樹)
- ✓ 大熊町 (常緑樹)
- ✓ 川内村 (常緑樹 / 落葉樹)

□ 河川・河口域

- ✓ 太田川 (H26～, 流域のセシウム蓄積量高)
- ✓ 小高川 (ダム無, 河口付近で海水流入)
- ✓ 請戸川 (流域のセシウム蓄積量高)
- 高瀬川 (ダム無, 流域のセシウム蓄積量高)
- ✓ 前田川 (ダム無, 流域のセシウム蓄積量高)
- ✓ 熊川 (ダム無)
- 大川原川
- ✓ 富岡川
- 荻野沢川 (除染済みエリアを流れる)
- ✓ 木戸川下流域 (除染済みエリアを流れる)

□ ダム・ため池

- ✓ 横川ダム (H26～, 太田川水系)
- ✓ 大柿ダム (請戸川水系)
- ✓ 坂下ダム (H26～, 大川原川水系)
- ✓ 滝川ダム (富岡川水系)
- ✓ 荻ダム (荻野沢川水系)
- ✓ ため池 (大熊・双葉町内)

環境動態に関する理解を深めるためには

- 様々なプロジェクトの成果により、環境中における放射性セシウムの分布状況や移動挙動が明らかになりつつある。
- 環境中での放射性セシウムの挙動は、様々な調査で得られた一つ一つの事実を論理的に組み立て、説明する必要があるため、わかりにくい。



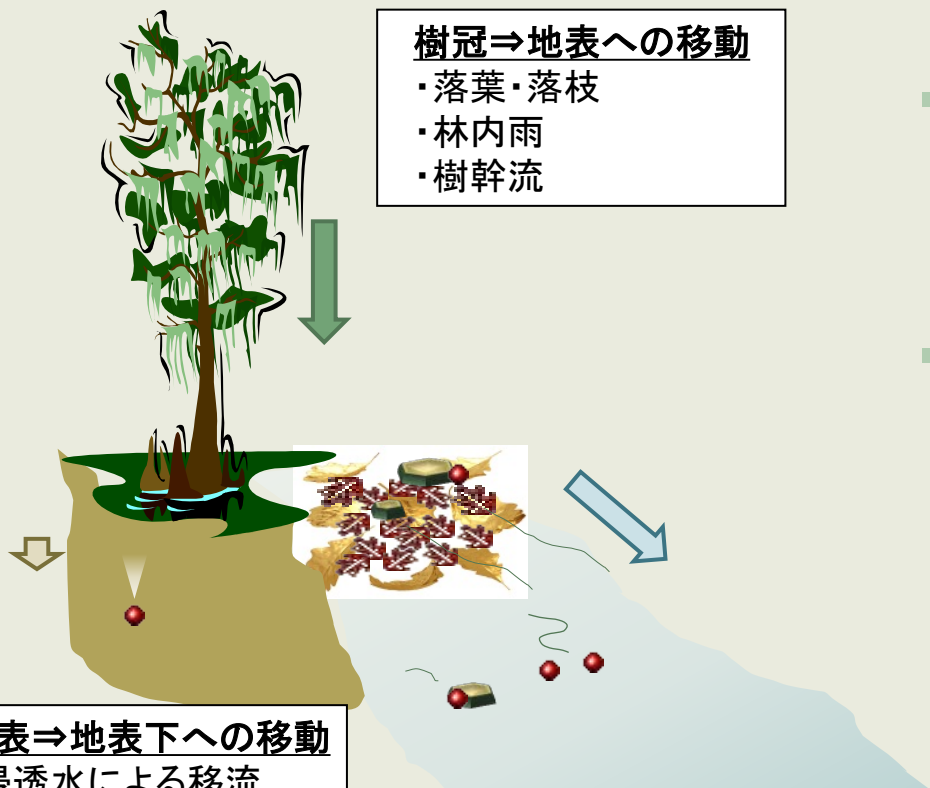
そこで、

- 河川水系における放射性セシウムの挙動に関する懸念事項を細分化し、
- 一つ一つの懸念事項に対し、データに基づき答えるとともに、
- それらの知見を組み合わせることで、河川水系全体でのセシウムの移動量等の評価を試みた。

これまでの成果概要： 森林

■ 森林

- 放射性セシウムの大部分は、地表面に移動した状態。
- 地表から5 cm以内の表土中に約90%の放射性セシウムがいまだに存在。わずかに深さ方向に移動している可能性。
- 土砂とともに斜面から流出する放射性セシウムは年平均0.1%前後。流出する土砂中の放射性セシウム濃度は減少傾向。



樹冠⇒地表への移動

- ・落葉・落枝
- ・林内雨
- ・樹幹流

地表⇒地表下への移動

- ・浸透水による移流
- ・生物活動による擾乱

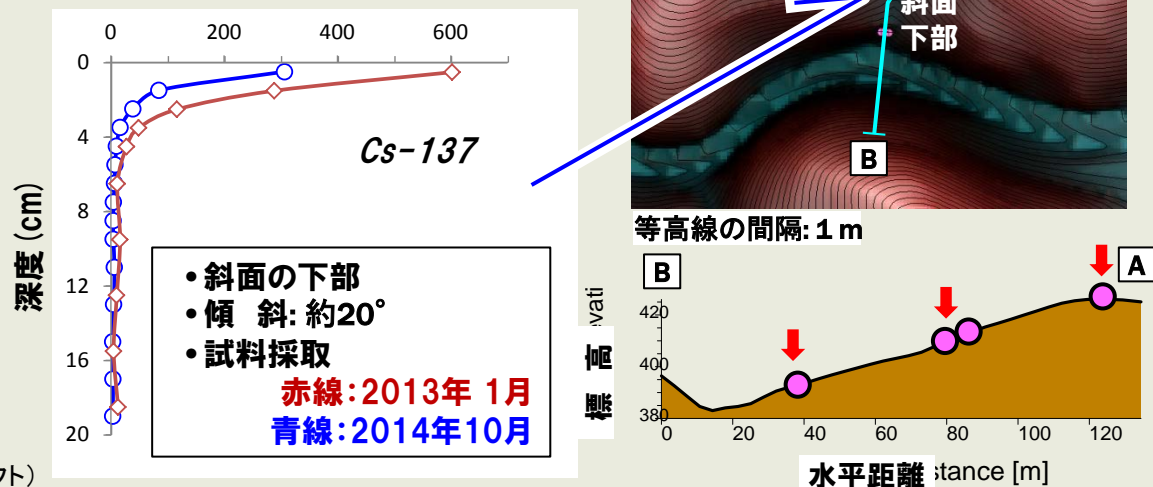
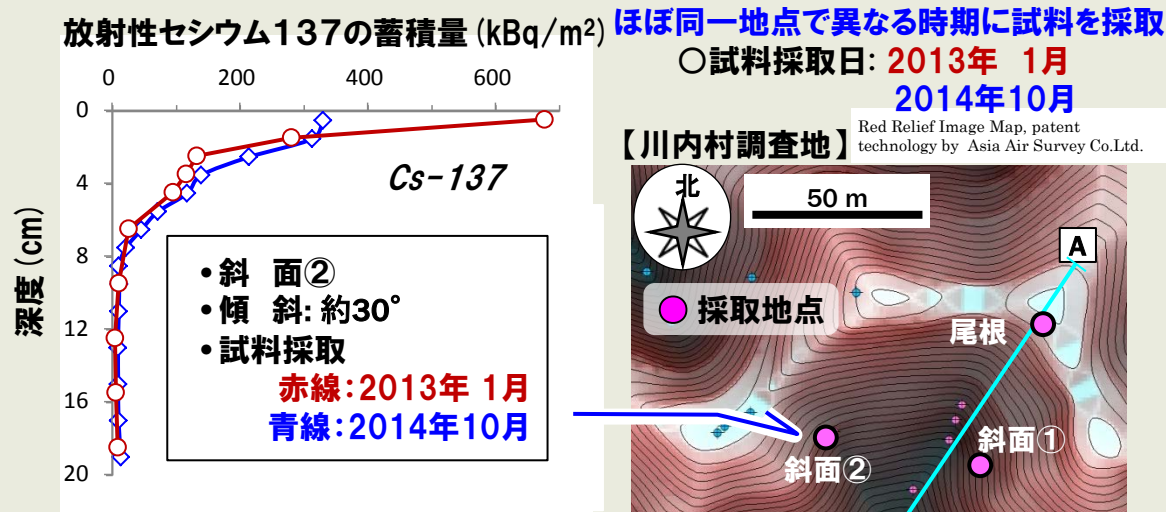
地表斜面上⇒下への移動

- ・セシウムを吸着した土壌粒子の流出
- ・落葉・落枝の分解に伴うセシウムの溶出
- ・流出した土壌粒子へのセシウムの吸脱着

放射性セシウムは、地表から地表下へ移動するの か。

■ 土壌の深さ方向への放射性セシウムの移動はわずかでした。

- 放射性セシウムの沈着量の経時変化は、一部を除き(斜面①)地表面付近で減少し、深度方向に分布が僅かに広がる傾向がみられています。
- 2014年10月時点において、深度5 cmまでにセシウム137の全沈着量のうち84~92%が存在していました。
- 地表面付近におけるセシウム137の減少量は、物理減衰よりも大きいため、セシウム137が土壌の深さ方向へ移動するとともに、斜面方向へ移動していると推定されます(経年変化の調査と解析を継続予定)。



雨が降ると、森林から放射性セシウムは土砂とともにどれくらい流出するのか。

- 斜面の放射性セシウムが、土砂とともに流出する割合は1年間に0.1%程度で、流域全体からの流出割合は、さらに少ない可能性があります。

川内村荻地区スギ林の急傾斜地観測プロット
における土砂・放射性セシウム流出量・流出率
(平成25年11月19日～平成26年10月20日)



観測プロットの概念図

A 土壌流出量(1年間、 1m ² あたり)	0.013 kg/m ² ・年間
B 流出土壌の放射性セシウム濃度(¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs)	28 kBq/kg
C 放射性セシウムの流出量(A×B)	0.36 kBq/m²・年間
放射性セシウムの流出率	0.032%・年間
(参考:平成25年度)	
放射性セシウムの流出量	1.6 kBq/m ² ・年間
放射性セシウムの流出率	0.15%・年間

川内村荻地区における小水系スケール
での流出土壌・放射性セシウム量
(平成26年6月27日～9月30日(3か月間))

A 土壌流出量(3か月間、 流域全体)	4.9 kg	
B 流出土壌の放射性セシウム濃度(¹³⁴ Cs+ ¹³⁷ Cs)	約 80 kBq/kg	
C 流域54,000m ² あたり(3か月間) [A×B]	約 392 kBq	
放射性セシウム 流出量	1 m ² あたり	D (3か月間) [C/54,000] 約0.0073 kBq/m ²
		E 年間 [D×4] 約 0.029 kBq/m²

左図:川内村荻地区小水系の河谷堆積物

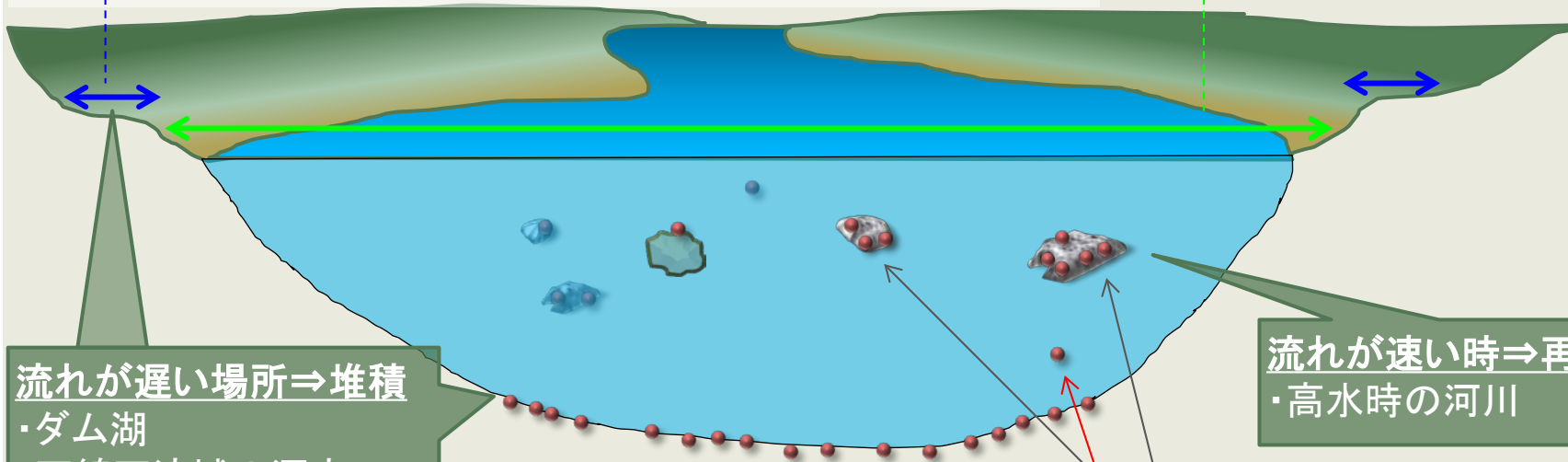


- 山地森林の斜面に設置した観測プロットから流出する放射性セシウム量と比較して、小水系(人が立った時に見渡せる程度の水系)から流出する放射性セシウム量は、1桁少ない値でした。

河川水系で予想される放射性セシウムの動き

高水敷: 河川敷で、低水路より一段高い部分の敷地。平常時にはグラウンドや公園など様々な形で利用されていますが、大きな洪水時には水に浸かってしまいます。

低水路: 河川の常に水が流れているところ。



流れが遅い場所⇒堆積

- ・ダム湖
- ・下線下流域の河床
- ・草が繁茂した高水敷

流れが速い時⇒再浮遊
・高水時の河川

放射性セシウムの形態

懸濁態: 川の濁りの元となる微粒子(浮遊懸濁物質)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。



➤ 平常時(左)では陸だった高水敷が、高水時(右)では水に浸かっています。また、高水時には川の濁りも増えていることが分かります。(小高川)

これまでの成果概要： 河川・ダム湖

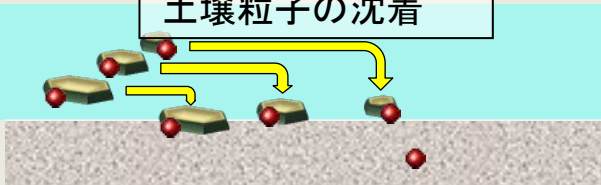
◆流れが速い場合：再浮遊

水流によるセシウムを吸着した土壌粒子の移動



◆流れが遅い場合：堆積

セシウムを吸着した土壌粒子の沈着



■河川

- 高水時に土砂とともに移動する放射性セシウムの移動量見積もりに必要なデータを取得した。その結果、請戸川で、**1年間に300 GBq程度(0.1%未満)**。
- **下流域の河川敷は、土砂の堆積により、全体として放射性セシウム濃度は減少しにくい**が、**物理減衰と同程度の速さで空間線量率は減少**。

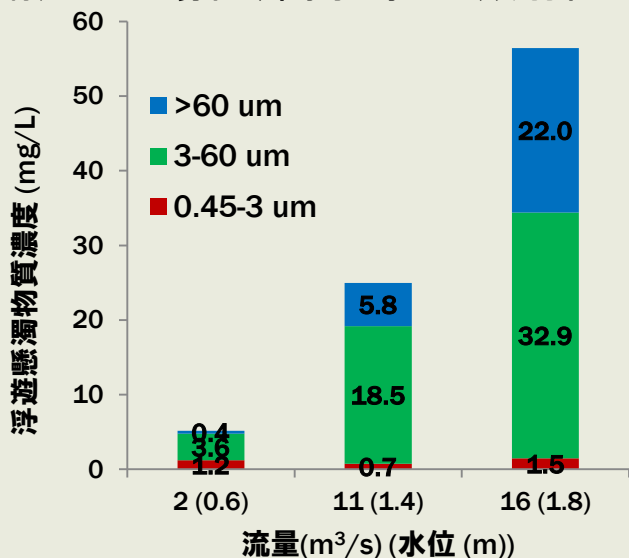
■ダム

- 大柿ダムの場合、高水時に土砂とともに流入した放射性セシウムの**90%以上がダムに堆積**しており、**土壌粒子吸着セシウムの移動抑制効果**を確認。
- 放射性セシウムの堆積速度は、大柿ダムで**1年間に流域沈着量の1%未満**。
- 放流水中の溶存態セシウム濃度は**1 Bq/L未満**。
- 高水時でも放流工付近の底層の流速は遅く、巻き上げは限定的。

雨が降ると、河川水中の放射性セシウム濃度はどれくらい増加するのか。

■ 大雨が降ると、河川水中の土砂粒子の増加とともに、懸濁態放射性セシウムの濃度は増加します。

- 河川の流量が少なく、濁りがほとんどない状態では、放射性セシウムは溶けた状態のもの（溶存態）が大部分ですが、その濃度は通常の放射能濃度測定の検出限界（約1 Bq/L）より低い濃度です。
- 河川の流量が増加すると、河川水中を浮遊する土砂粒子の濃度が高くなりますが、この粒子には放射性セシウムが強く吸着されています（懸濁態）。そのため、高水時には溶存態の放射性セシウム濃度はあまり変わらず、懸濁態の放射性セシウム濃度だけが高くなります。
- 請戸川の場合、高水時でも放射性セシウム濃度は飲料水基準値（10 Bq/L）を下回っています。



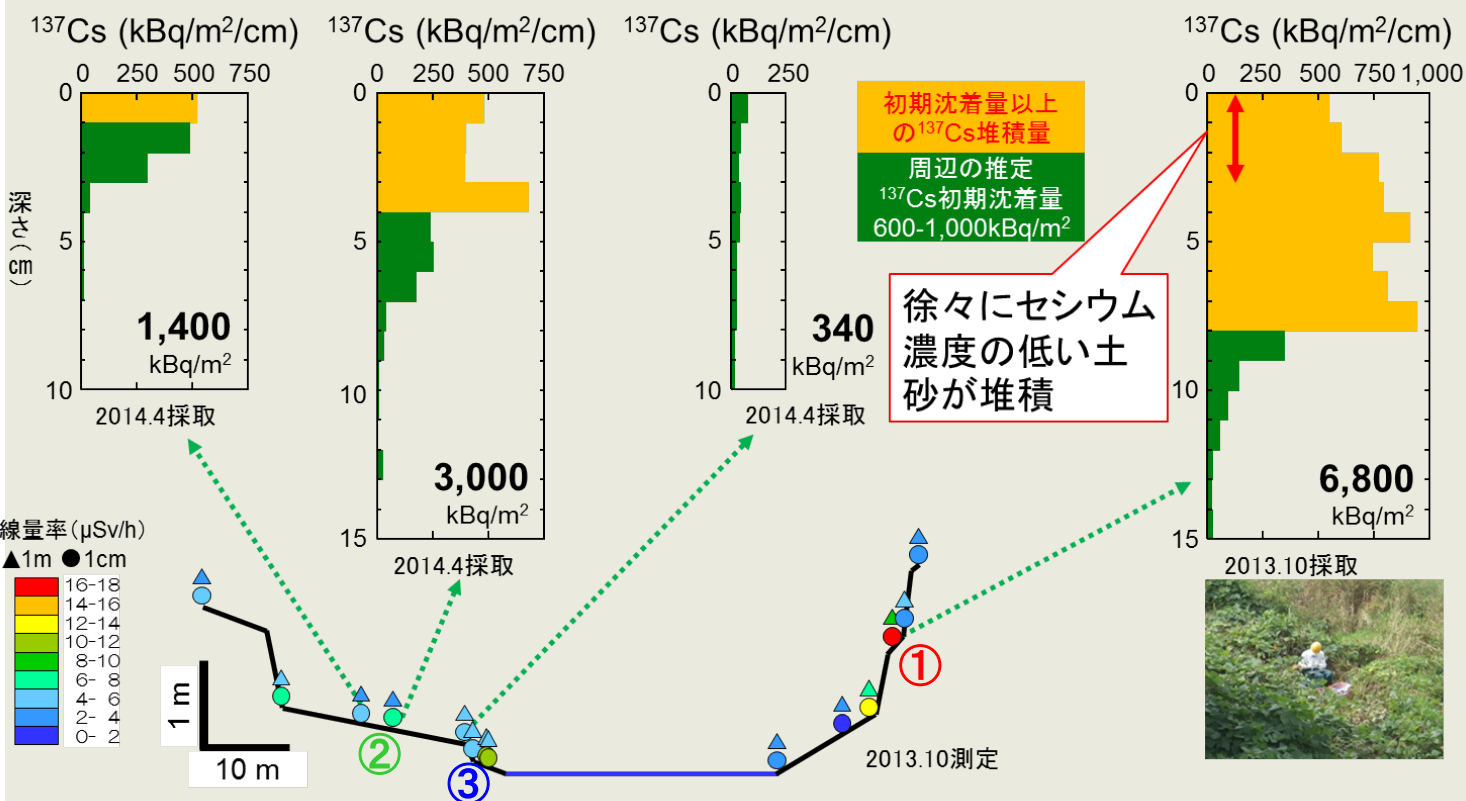
請戸川下流域（請戸川橋）における各流量時の河川水中の溶存態および懸濁態放射性セシウム濃度（平成26年）

	低水時	高水時
河川流量	2 m ³ /s	16 m ³ /s
溶存態 ¹³⁷ Cs濃度	0.3 Bq/L	0.3 Bq/L
懸濁態 ¹³⁷ Cs濃度	0.1 Bq/L	2.2 Bq/L
溶存態の割合	75%	12%
総 ¹³⁴⁺¹³⁷ Cs濃度	0.6 Bq/L	3.3 Bq/L

請戸川下流域（請戸川橋）における高水時の流量・水位と河川水中の浮遊懸濁物質濃度と粒径の関係

河川敷には高い濃度の放射性セシウムが蓄積し続けているのではないか。

- 放射性セシウムを含む土砂が堆積しやすい場所は植生が繁茂した高水敷に限られ、土砂中の放射性セシウム濃度も低下する傾向にあります。



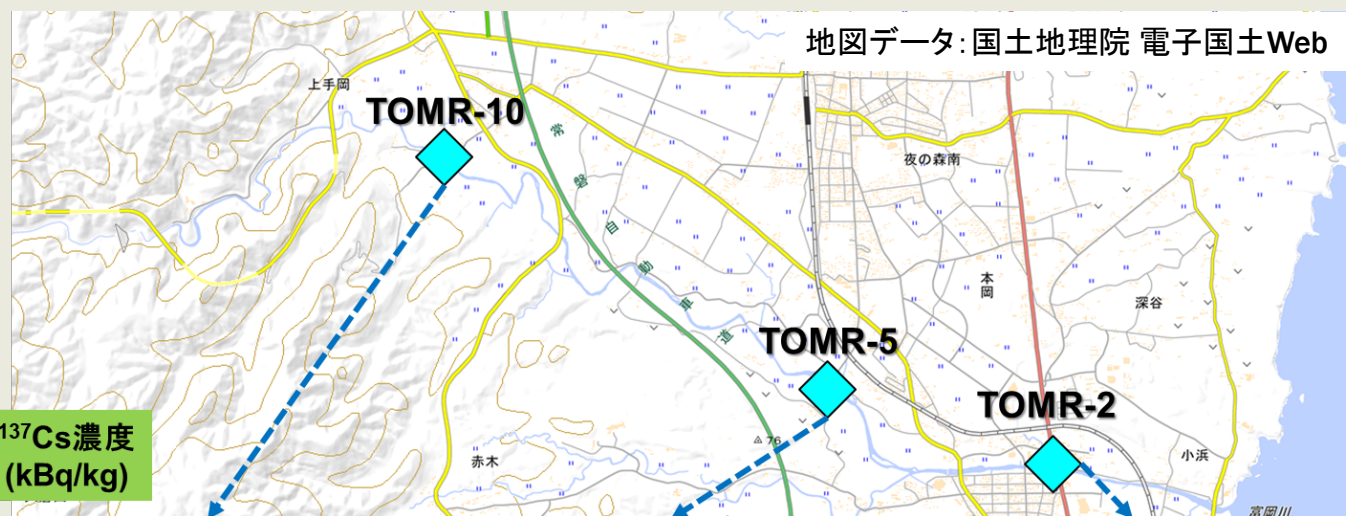
- ①台風のような高水時のみ水が到達する高水敷:** 放射性セシウムが堆積しやすい場所がありますが、ごく限られた場所です。
- ②年に数回水が到達する場所:** 放射性セシウムの堆積・浸食が繰り返されるため、放射性セシウムの堆積量はやや少なくなります。
- ③浸水しやすい場所:** 放射性セシウムはほとんど堆積しません。

請戸川の河川敷(常磐線鉄橋付近)における河川横断面方向の空間線量率分布と放射性セシウム濃度の深さ方向の分布

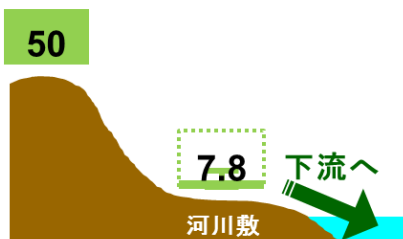
出典:原子力機構福島環境安全センター(F-TRACEプロジェクト)

河川敷には高い濃度の放射性セシウムが蓄積し続けているのではないか。

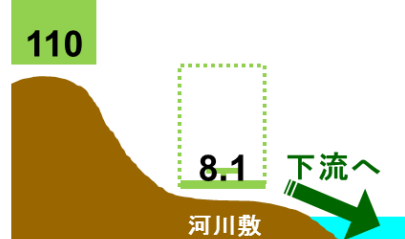
- 中流の河川敷では土砂とともに放射性セシウムは流出しやすく、下流の河川敷では流出・堆積を繰り返すためセシウム濃度が減少しにくいです。



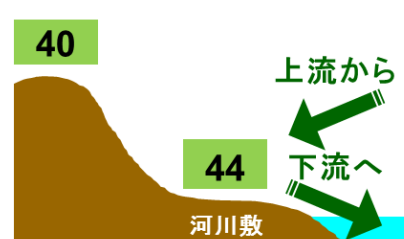
【中流域】 TOMR-10
河川敷外 ≫ 河川敷



【中流域】 TOMR-5
河川敷外 ≫ 河川敷



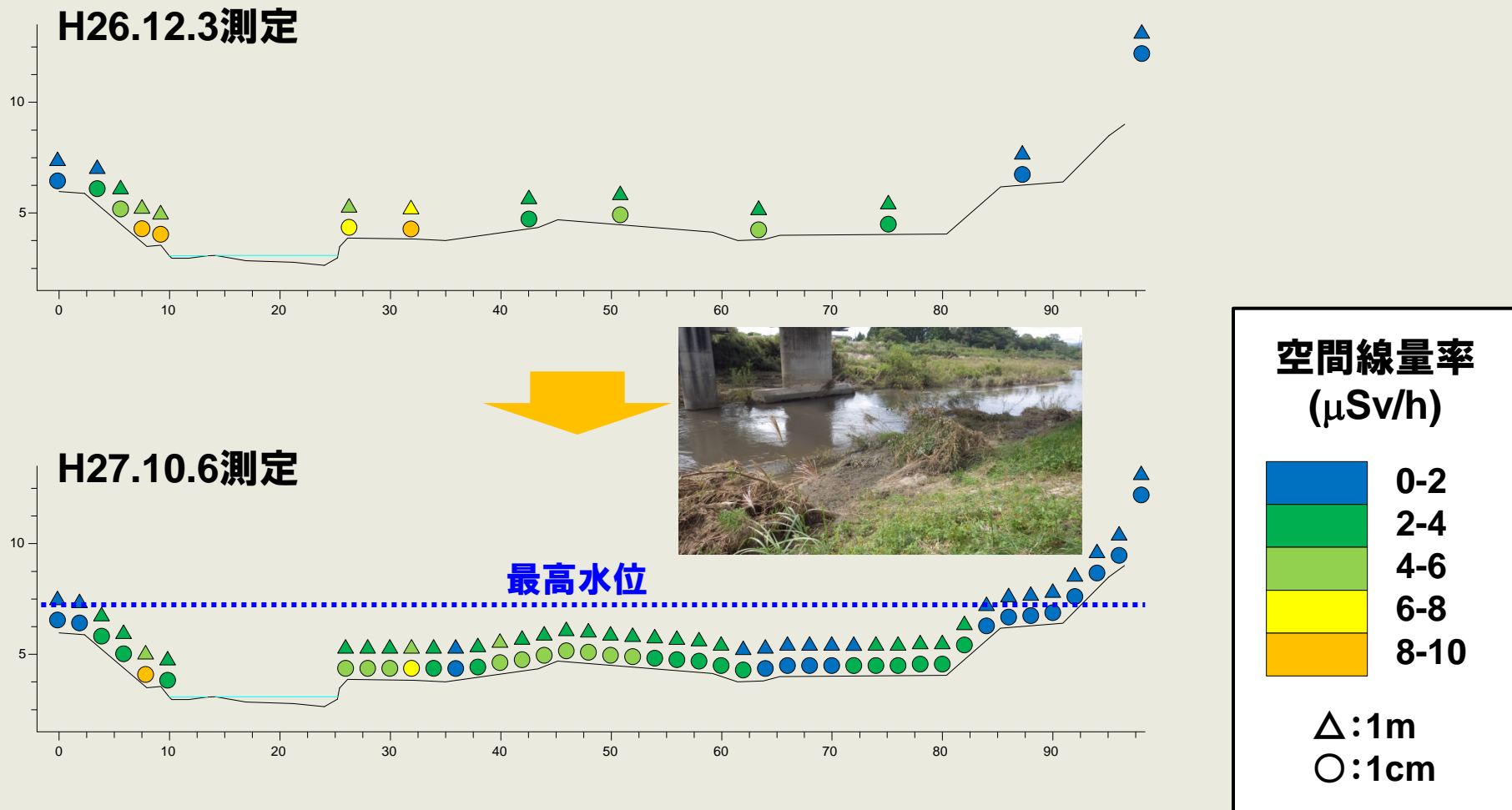
【下流域】 TOMR-2
河川敷外 ≒ 河川敷



- 中流域では、河川敷におけるセシウム濃度は、河川敷外の濃度より低くなっています。
- 下流域では、河川敷におけるセシウム濃度は、河川敷外と同程度です。
- そのため、下流域の河川敷のうちセシウムが堆積しやすい場所では、線量率が増減を繰り返す傾向がみられます。

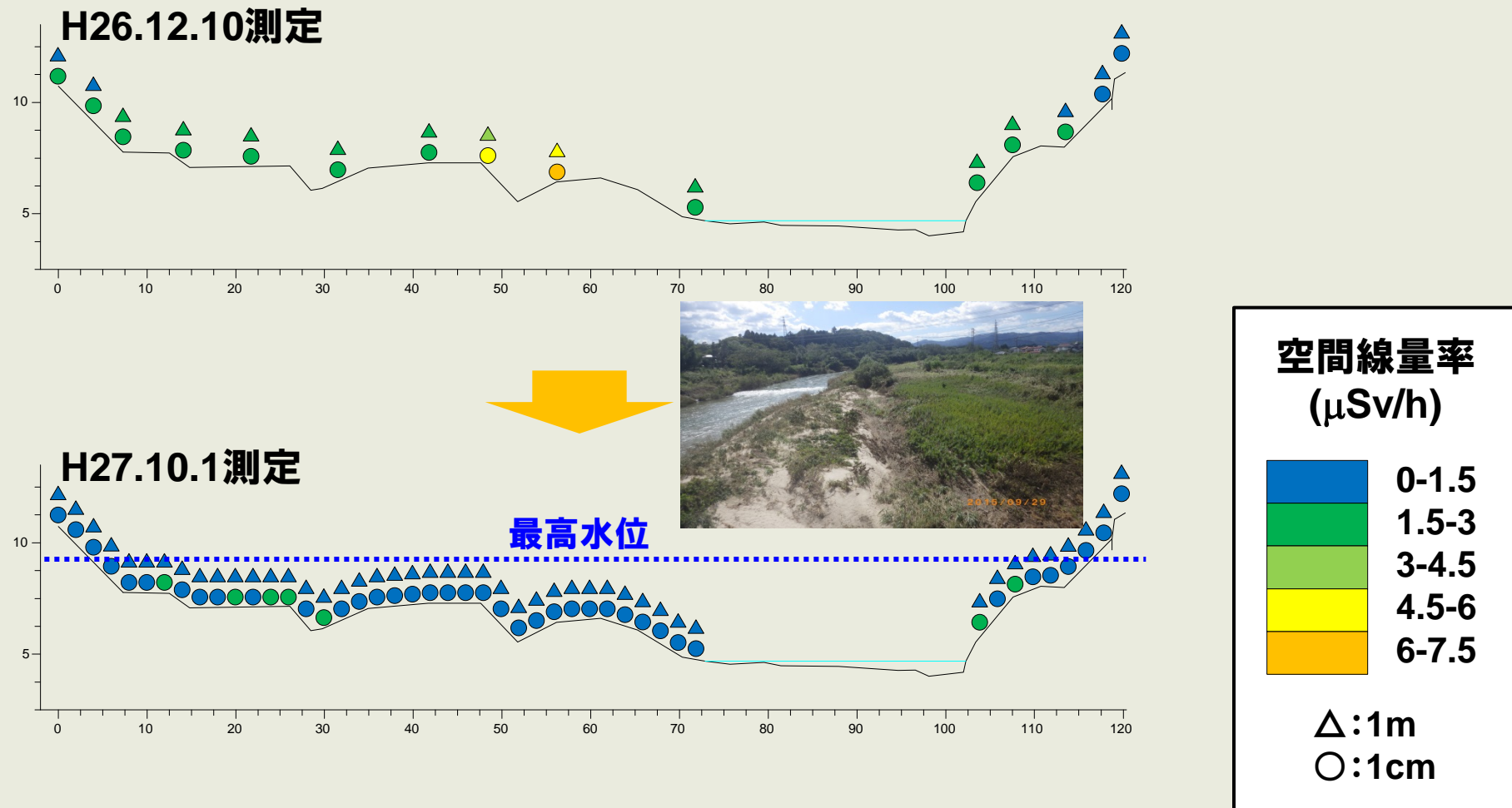
請戸川：請戸川橋直下河川敷の空間線量率変化

➤ 細粒土砂が堆積するも、線量率の増加は認められなかった



高瀬川：高瀬橋直下河川敷の空間線量率変化

➤河川敷の広範囲に砂が堆積し、線量率は大きく低下

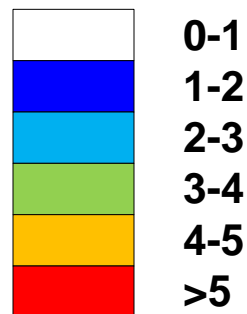




請戸川・高瀬川合流後の請戸橋直下河川敷の空間線量率の変化

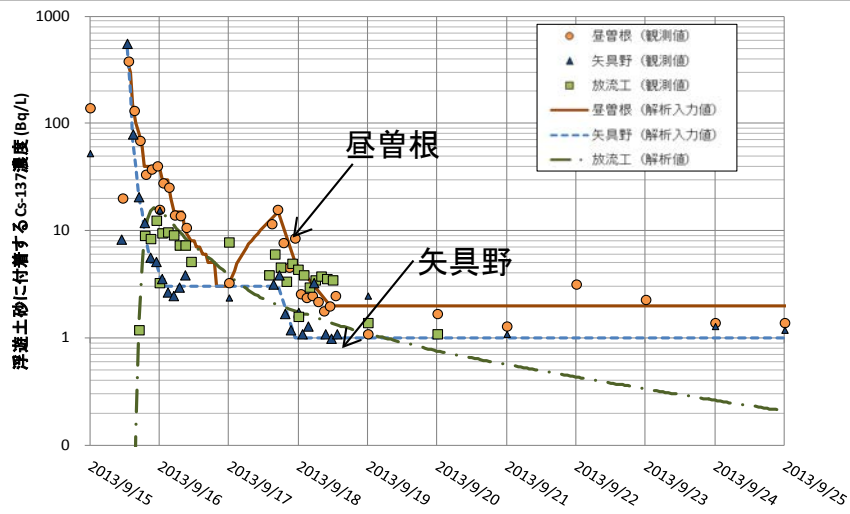
- 7月の台風12号後に線量率は低下
- 9月の記録的大雨後に線量率は大きく低下
- 高瀬川起源の砂が大量に堆積したためと考えられる

5cm空間線量率 ($\mu\text{Sv/h}$)

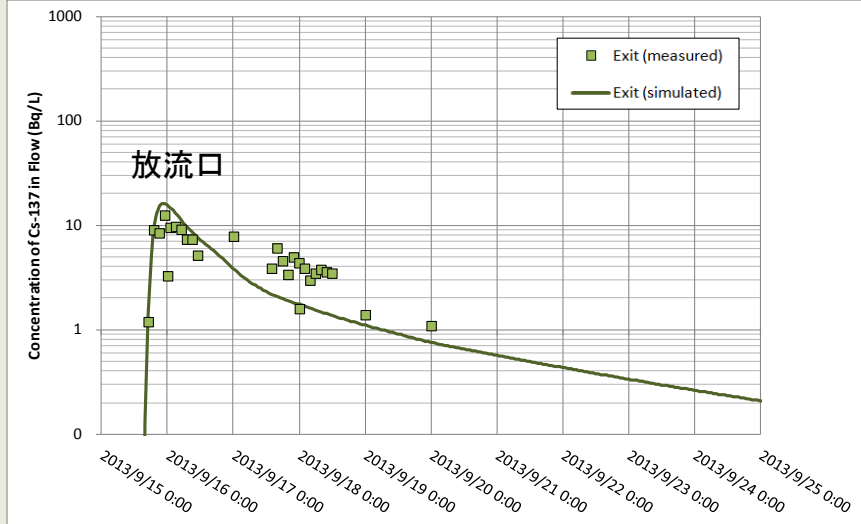


ダムに流入した放射性セシウムは、下流域にどれくらい流出するのか。

- 高水時に、ダム湖内に土砂粒子とともに上流から流れてくる放射性セシウムの挙動を、シミュレーションにより予測することができつつあります。



大柿ダムの上流における放射性セシウム濃度の経時変化の観測値(実線・点線:解析の入力データ)

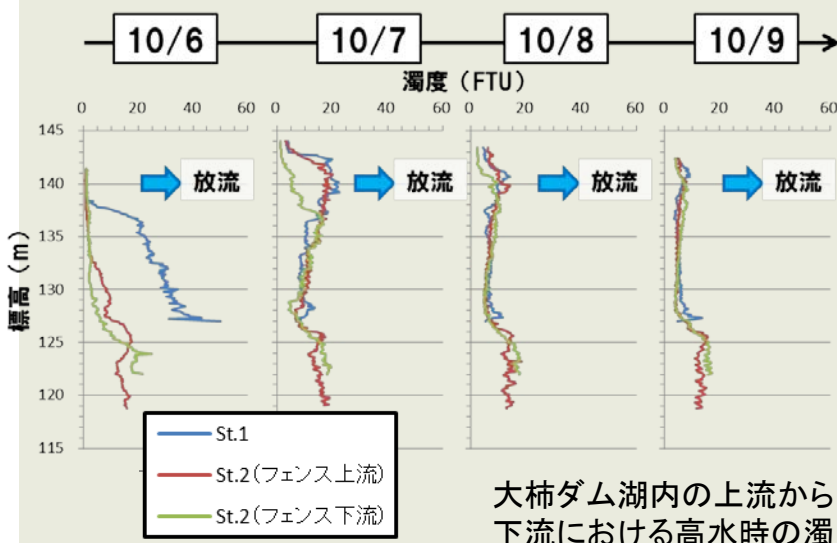


大柿ダムの放流工における放射性セシウム濃度の経時変化の観測値と解析結果(実線)の比較

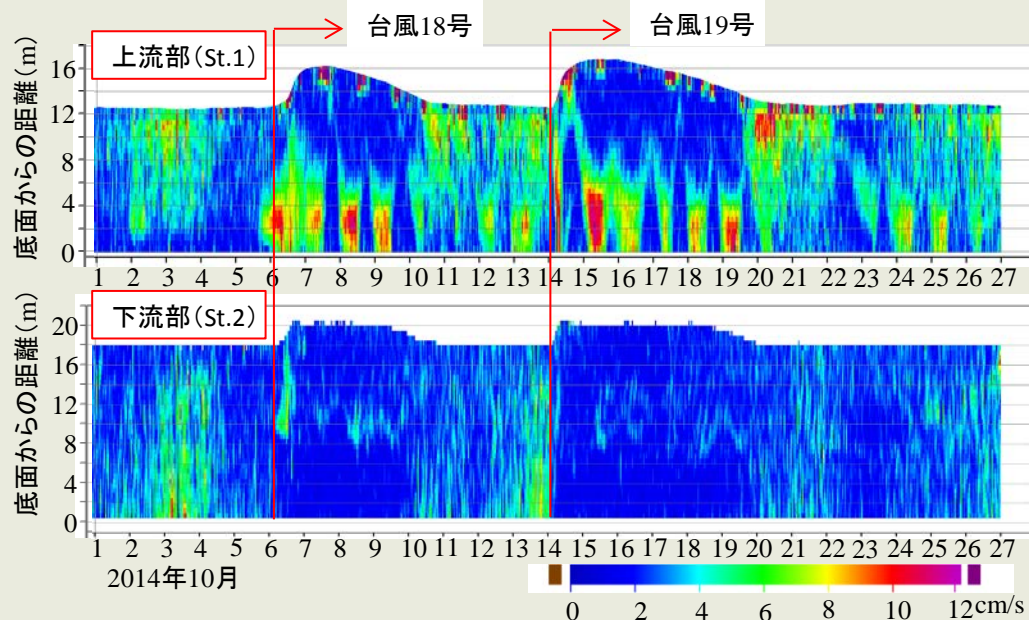
- 台風の際、大柿ダム上流の昼曽根(●)や矢具野(▲)において観測されていた放射性セシウム濃度の経時変化データを、シミュレーションの入力データとして設定しました(左図)。
- シミュレーション結果として得られた大柿ダムの放流口における放射性セシウム濃度(緑線)を観測値(■)と比較すると、非常によく再現できていることが分かります。
- この時には、流入した放射性セシウムの90%以上を湖内に留めることができたことが分かりました。

ダムでは、雨が降ると湖底の堆積物が舞い上がって、水中の放射性セシウム濃度が高くなるのではないか。

- 高水時でも、ダム湖の下流側の流速は非常に遅いため、堆積物は湖底から舞い上がりにくいと考えられます。また、湖水の表面付近の濁りは上流からの流入水によるものと考えられます。

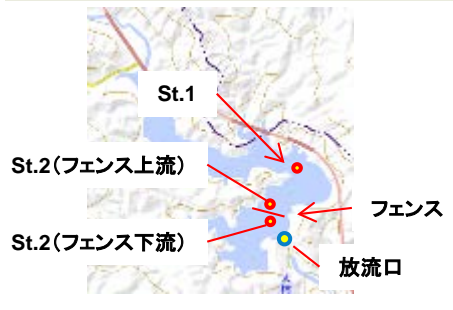


大柿ダム湖内の上流から下流における高水時の濁度および水温の鉛直方向分布



大柿ダム湖内の上流部と下流部における高水時の流速の鉛直方向分布

出典：原子力機構福島環境安全センター（F-TRACEプロジェクト）



- 上流部では高水時に底面の合成流速が10 cm/s前後となり、濁水が中層から下層に進入していることがわかりますが、下流部では出水時においても大きな流速の変化は認められませんでした。

セシウムを吸着した土壌粒子の 堆積・移動

- ・海流
- ・波浪等
- ・塩水/淡水混合流 等



塩濃度増加の影響

- ・土壌粒子からのセシウムの脱離
- ・土壌粒子の凝集・沈降

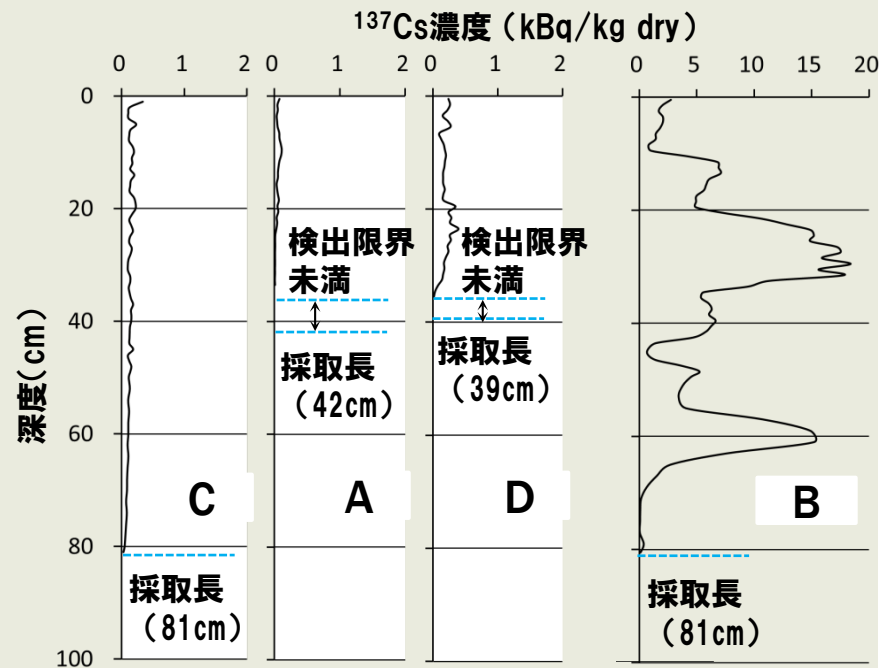
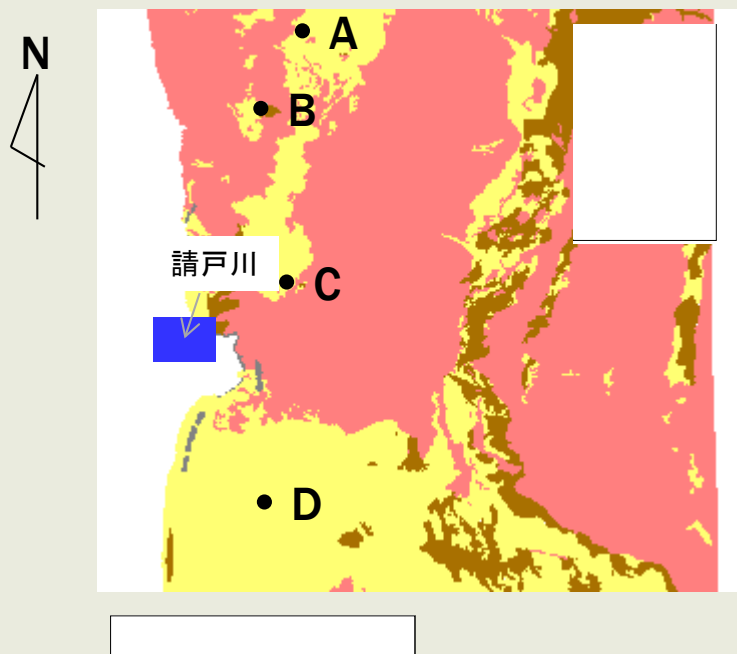
■ 河口域

- シルト質の堆積部で放射性セシウム濃度が比較的高く、**凹状の海底地形部に堆積しやすい。**
- 海水中の溶存態セシウム濃度は $0.01 \sim 0.001$ Bq/L のオーダーと極めて低い。
- 分配係数は 10^5 L/kg オーダーと河川の場合より小さい。
- 塩濃度増加により、大きな粒子に吸着されたセシウムの一部が脱離されるが、小さな粒子ではほとんど脱離されない。

河川から海に放射性セシウムが流入し続け、河口周辺は汚染が継続するのではないか。

■ 河口周辺では、土砂の細粒分(シルト)が堆積している限られた場所で、比較的高い濃度の放射性セシウムの堆積が認められています。

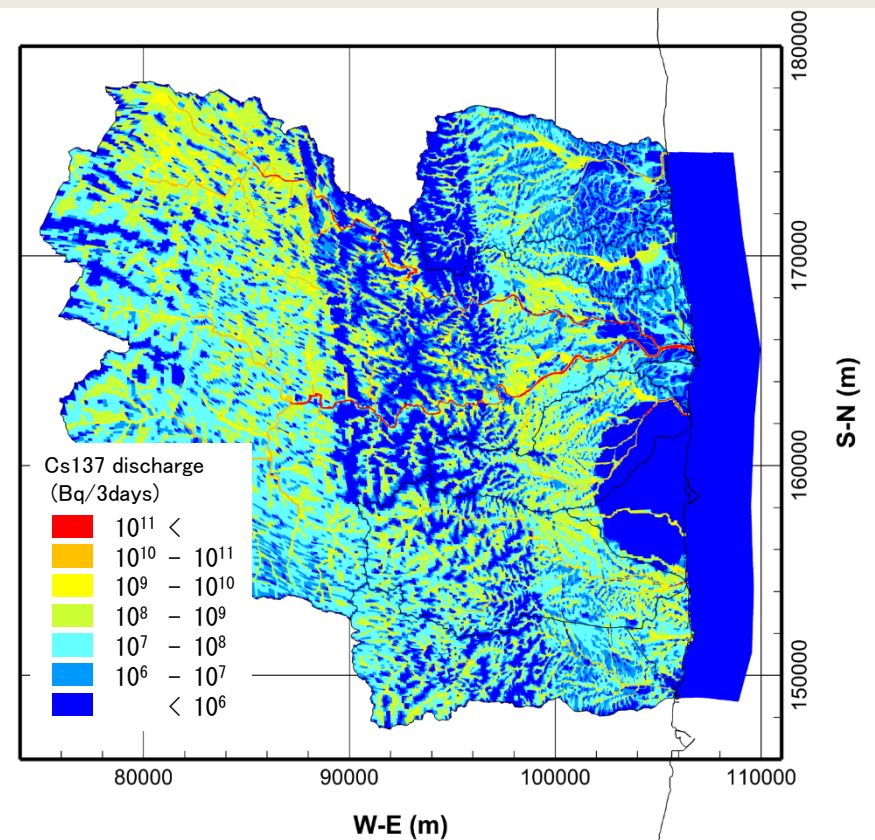
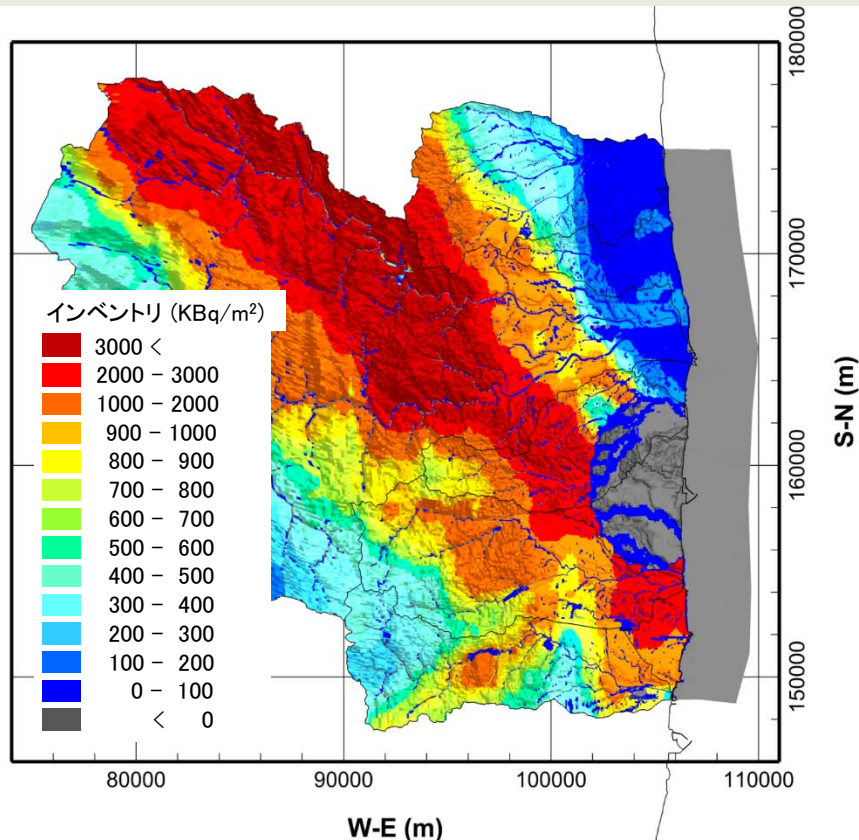
- シルトは、海側に窪んだ凹状地のような場所に堆積しやすい傾向があると推測されます。
- 堆積物中の放射性セシウム濃度は、シルト質の土砂で10 kBq/kg前後、砂質の土砂で0.1kBq/kg前後で、海砂の堆積等により、河床土より低くなっています。【砂質(細～中砂)の土砂】 【シルト質の土砂】



請戸川河口域底質の深さ方向の放射性セシウム分布
(試料採取: 2013年12月～2014年3月)

請戸川河口域の底質分布推定図と試料採取地点

放射性セシウムは、各河川水系からどのように移動しているのか。



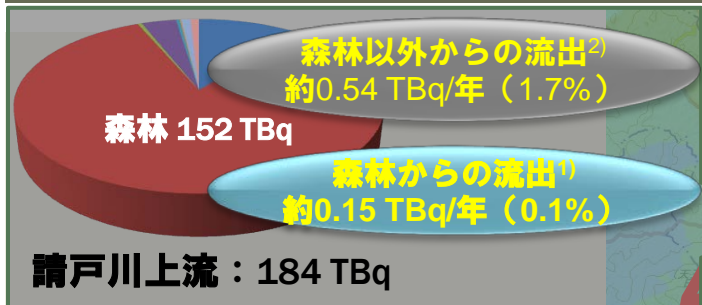
小高川、請戸川、前田川、熊川、富岡川流域のセシウム137初期沈着量

2011年9月の台風時の3日間におけるセシウム137流出量

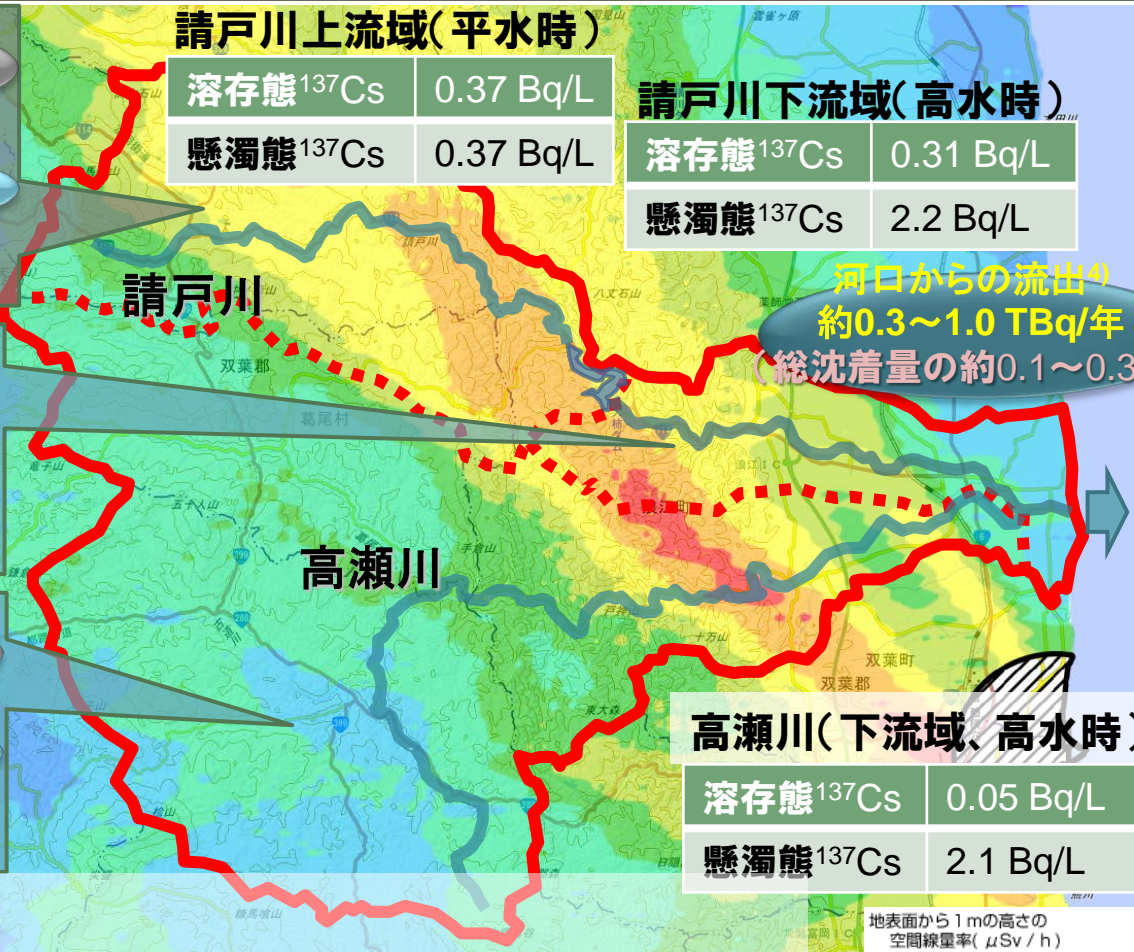
- 物理的流域解析モデルにより(GETFLOWS)により、2011年9月の台風時の浜通り側5河川におけるセシウム137流出量を解析。

⇒ 全体的に、ダム湖では堆積、河川下流で流出量が大きくなった。

放射性セシウムは、森林などからどれくらい放出されているのか。



総沈着量：371 TBq



- 畑(その他の農地)
- 森林
- 河川地
- 田
- 建物用
- その他
- 幹線交通用地
- 荒地

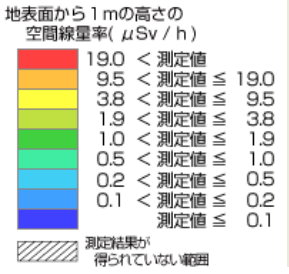
空間線量率マップ(平成26年11月7日時点)と請戸川集水域

【森林調査】¹⁾ 土砂と斜面から流出する放射性セシウムは年平均0.1%前後(マップ事業、国環研、F-TRACE)。

【河川水系移動挙動解析】³⁾ 高水時に大柿ダムから下流に流出する放射性セシウムは10%以下(農水省データ、F-TRACE)。

【土壌流亡解析】²⁾ SACTで算出(F-TRACE)。

【河川調査】⁴⁾ マップ事業観測値(H25)。



今後の展望

■ 森林

- 放射性セシウムは徐々に地表に移動し、森林からの流出も極めて少ないことから、**大部分が深さ0～10 cmの表土中に存在**するようになる。
- ⇒ 放射性セシウムの樹木内、キノコ、山野草等への移行が将来どう変わるか、山地での放射性セシウムの分布がどう変わるかを予測。→ 森林の管理方法に反映。

■ 河川水系(河川・ダム湖)

- 河川水系中の溶存態放射性セシウム濃度は、高いところでも1 Bq/L以下。
- 大雨時等の懸濁態放射性セシウムの増減も予測できつつある。
- 河川敷における空間線量率は、物理減衰相当あるいはそれより速い減衰傾向。

■ 河口域

- 海底地形に基づき、放射性セシウムの分布状況を予測できる可能性。
- ⇒ **モデルを用いた放射性セシウムの水中濃度・堆積状況の予測解析手法を整備。**
- ⇒ データベース、解析モデル、予測結果・知見をパッケージ化した**包括的評価システム**を整備し、予測結果等を分かりやすく提示、管理方法等の提案につなげていく。

ご清聴ありがとうございました。

