東京電力福島第一原子力発電所事故で放出された放射性物質の環境動態について

― 森林～河川～河口域調査の成果と課題 ―

令和7年7月1日

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
福島廃炉安全工学研究所
廃炉環境国際共同研究センター長
飯島 和毅

1F事故後、どんな情報が必要とされたか

事故直後　　現在

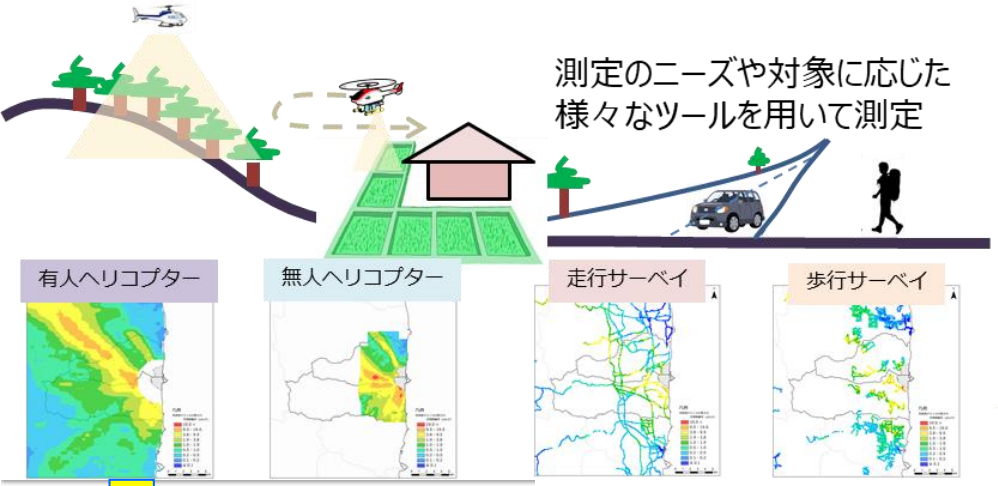
放射線の状況　身体汚染・内部被ばく　家に戻りたい　生業の再開

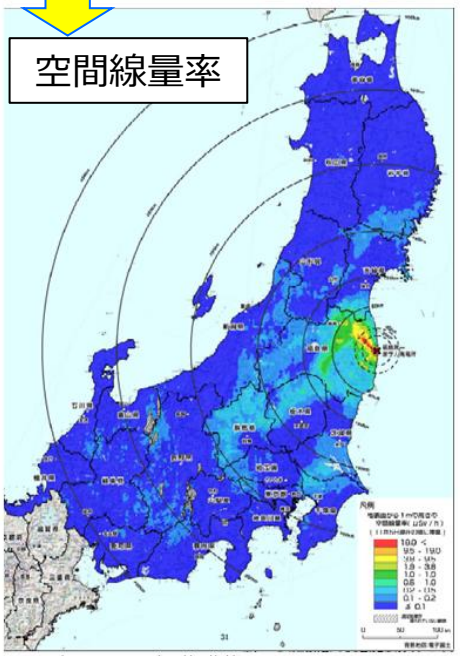
- 安全確保のための情報から、
  安心して生活を再開し、営むための情報へ、
  環境回復の進捗に応じた情報の提供が求められた。

福島県における環境回復研究の役割

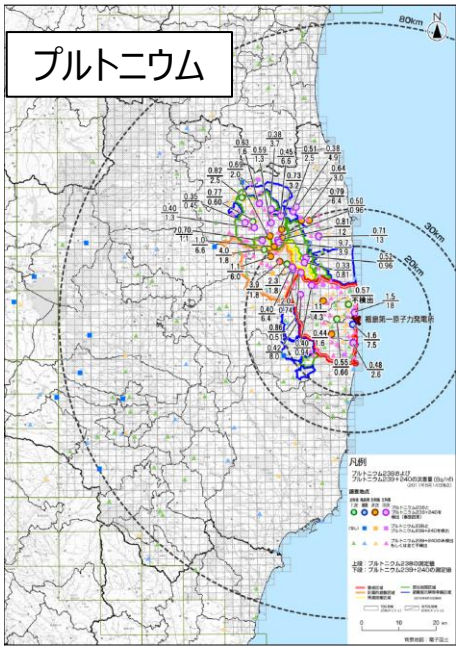
- **放射線状況の把握**
  - 従来のモニタリング（定点の観測）だけでなく、マッピング（面的な分布状況の観測）へ
- **現状の改善：大規模除染**
  - 除染方法、廃棄物の管理、除染作業の進め方等の構築
- **将来の予測：環境動態研究**
  - セシウムの環境中での動きを解明することにより、除染された生活圏へのセシウムの再流入、林産物等への移行の可能性など、将来の挙動を評価
- **分かりやすい情報提供**
  - 自治体や住民の方々に成果を活用いただくための工夫

放射線状況の把握：マップ事業





※2011年11月５日現在の値に換算



文部科学省発表 2011年12月16日

- 事故直後は、自治体・地区ごとの対策検討のため、**線量率や放射性物質の面的分布**の把握が必要。
  - **航空機**による空間線量率分布の測定手法の整備とマップ化
    - 地上測定値との比較による精度向上
  - 様々な放射性物質の沈着量の把握
    - 被ばく線量に寄与する主たる核種は**放射性セシウム**（外部被ばく）

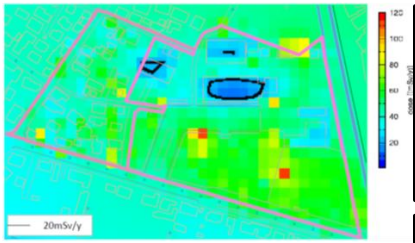
観測された各核種の最大沈着量を仮定したときに50年間に受ける実効線量

Radionuclide	Half-life period	Maximum deposition density level*1 (Bq/m^2)	Estimated effective dose over 50 years	
			Conversion factor ($mSv/kBq/m^2$)	Obtained results (mSv)
Cs-134	2.065 years	1.4×10^7	5.1×10^{-3}	71
Cs-137	30.167 years	1.5×10^7	1.3×10^{-1}	2000 (2.0Sv)
I-131	8.02 days	5.5×10^4	2.7×10^{-4}	0.015
Sr-89	50.53 days	2.2×10^4	2.8×10^{-5}	0.00061 (0.61μSv)
Sr-90	28.79 years	5.7×10^3	2.1×10^{-2}	0.12
Pu-238	87.7 years	4.0	6.6	0.027
Pu-239+240	2.411×10^4 years	15.0	8.5	0.12
Ag-110m	249.95 days	8.3×10^4	3.9×10^{-2}	3.2
Te-129m	33.6 days	2.7×10^6	2.2×10^{-4}	0.6

*1: Converted to radiation levels as of June 14, 2011

大規模除染に向けて：除染モデル実証事業

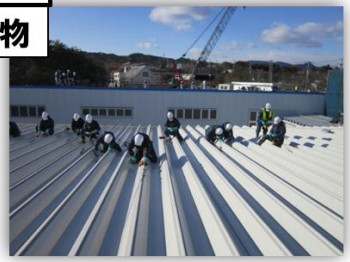
事前測定・計画立案



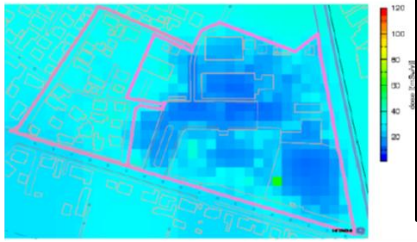
除染手法の適用を踏まえた除染カタログ等の更新

除染・効果の評価

建物



道路



国、自治体、住民、一般の事業者の方々等が行う除染の実施における具体的な参考事例（手引き等）として活用

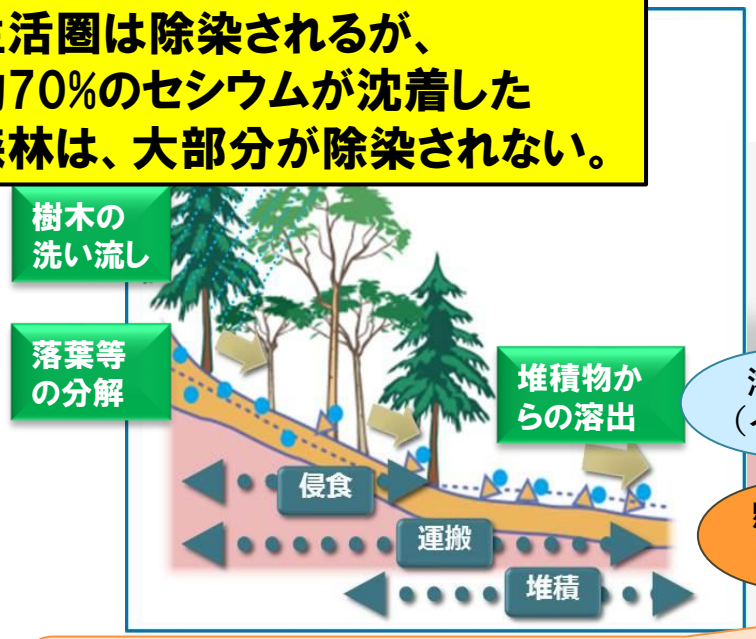
発生した除去土壌等の管理

- ✓ **土壌に強く吸着。表土除去は効果的。**
- ✓ **森林は除染しにくく、効果が小さい。**

- 大規模除染の実施に向けて、手法を選択する際に、実データに基づいた**定量的な情報**（低減効果、コスト、除去物発生量）が求められた。
  - 高線量域（約20 mSv/年超）の広域を対象として、適用した除染手法等の実データに基づき、除染方法や、作業員の放射線防護に係わる安全確保策等の選択肢を提示するためのモデル実証事業を実施した。

福島長期環境動態研究：研究の背景と進め方

生活圏は除染されるが、
約70%のセシウムが沈着した
森林は、大部分が除染されない。



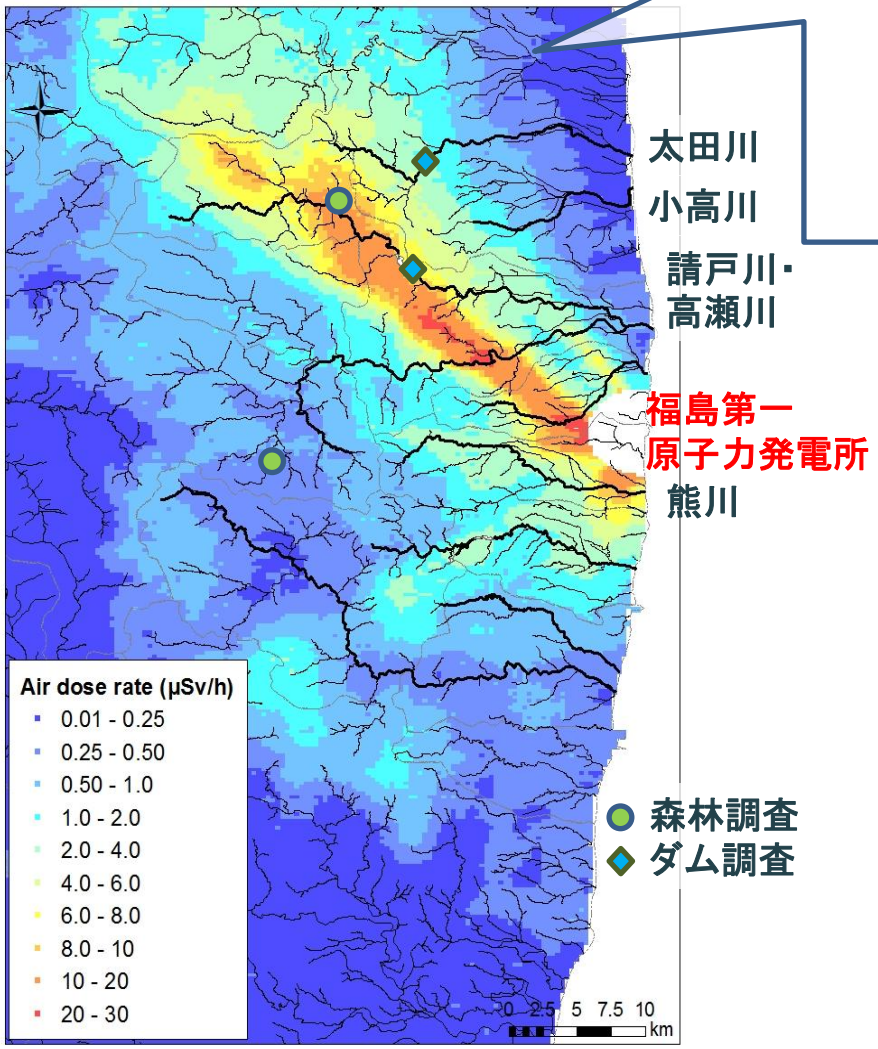
- 河川にセシウムが溶け出して、農業用水に使うと農作物中の濃度が100 Bq/kgを超えるのでは。
- 100 Bq/kgを超えている山野草や淡水魚は、いつになったら100 Bq/kgを下回るのか。

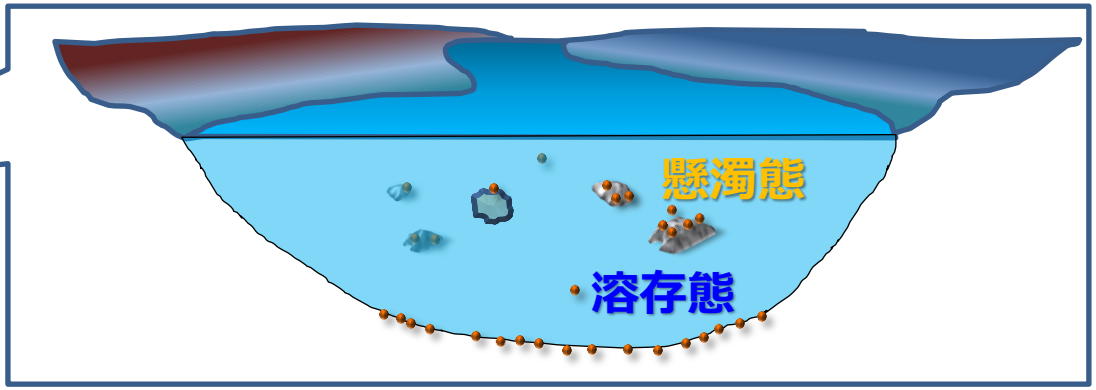
- 将来、森林から土砂とともにセシウムが流れ出し、河川によって運ばれて、生活圏近くに堆積すると、線量率が増加するのでは。

- **森林に残存する放射性セシウムが、将来、生活圏に流出**し、線量率や農林水産物中のセシウム濃度の増加などの影響を及ぼす可能性が懸念された。

  - 環境中でのセシウムの**動きのメカニズム**を明らかにし、その移行を表現できる**シミュレーション**を開発して、将来の影響を評価した。

福島長期環境動態研究：調査エリアとセシウムの形態





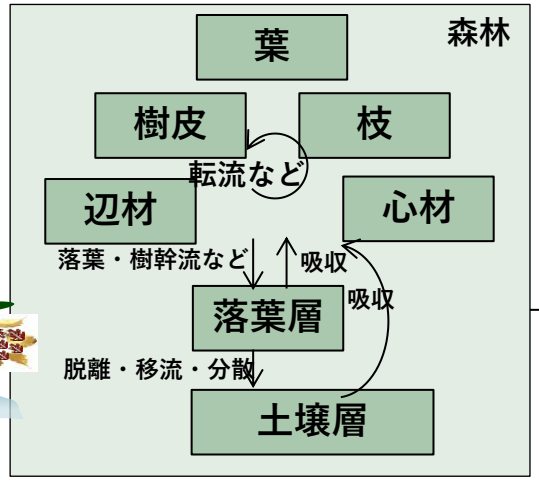
- 福島県内の森林、河川、ダム、河口域において、**溶存態**、**懸濁態**のそれぞれの挙動や濃度の経時変化を、系統的に調査した。

溶存態：イオンのように水に溶けている形態。生物に取り込まれやすい。どの河川でも1 Bq/L未満と濃度は低い。

懸濁態：川の濁りの元となる土砂粒子や植物片等（懸濁物質）に吸着された状態。環境中では、ほとんどがこの形態で存在するが、生物には取り込まれにくい。

福島長期環境動態研究：調査研究の進め方

- メカニズム解明とシミュレーションツール構築に向け、森林から近海まで系統的に調査を実施した。



森林土壌流亡調査

土壌・有機物とともに流出

渓流

ダム・湖沼

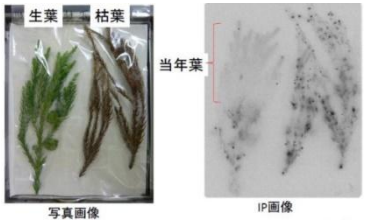
堆積・収着

侵食・脱離

湖底堆積物

魚・水

湖沼での沈降土砂サンプリング



森林生態系内の分布状況の観察

都市域からの流出調査

都市域

流出

河川

堆積・収着

侵食・脱離

河床・河川敷

魚・水

流出入

農地

流出・灌漑

農作物

河川水の自動観測・サンプリング

近海

堆積・収着

侵食・脱離

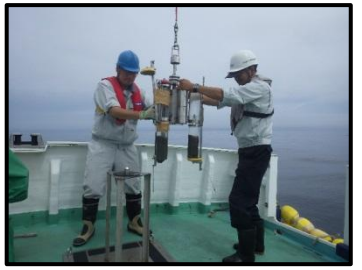
海底堆積物

魚介類

外洋

Cs吸着固相の同定

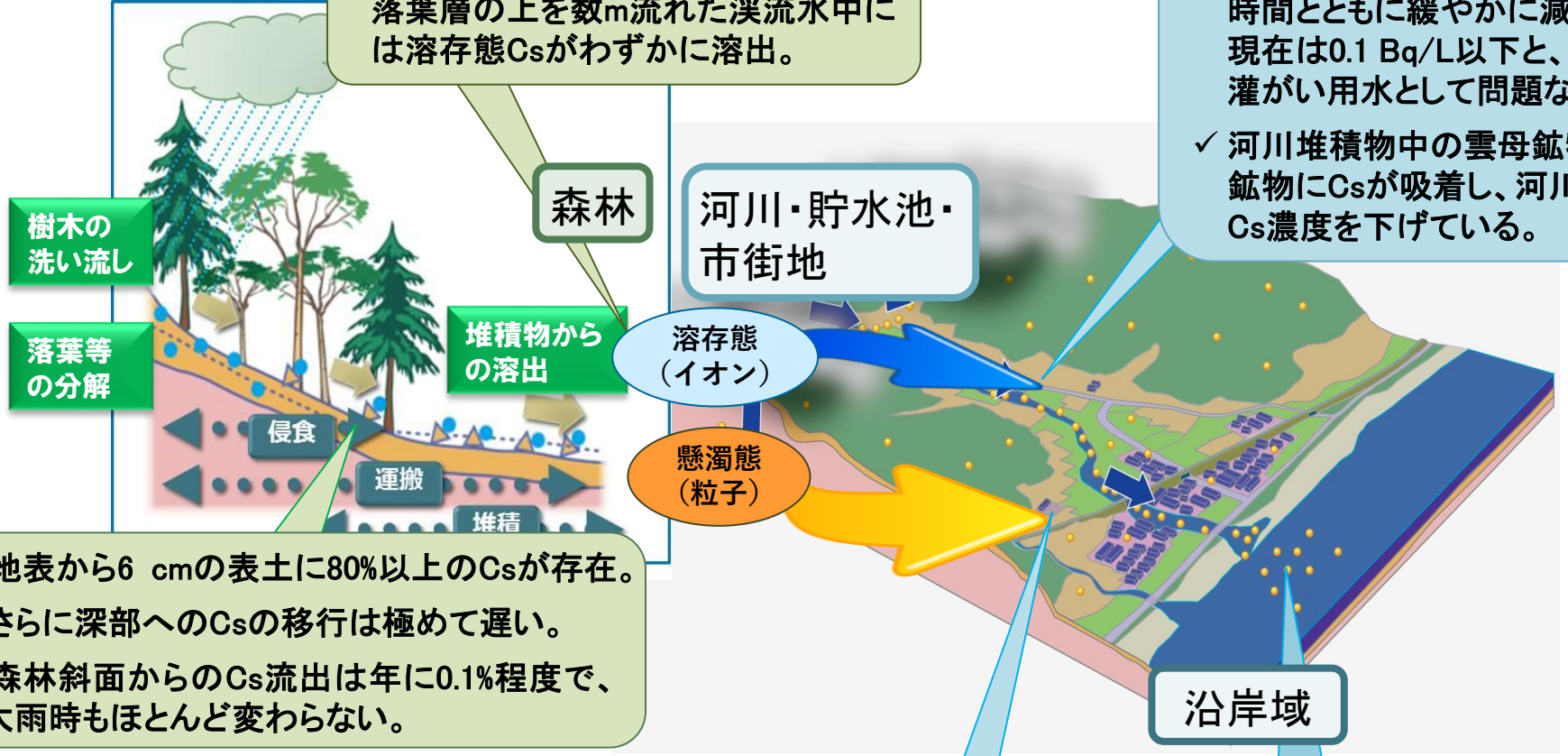
放射能濃度の測定



海底土のサンプリング

環境動態研究の成果：森林からの流出の影響は小さい

- **森林から流出するセシウムは少なく**、生活圏への影響はほとんどない。



✓湧水中に溶存態は検出されないが、落葉層の上を数m流れた渓流水中には溶存態Csがわずかに溶出。

✓地表から6 cmの表土に80%以上のCsが存在。
✓さらに深部へのCsの移行は極めて遅い。
✓森林斜面からのCs流出は年に0.1%程度で、大雨時もほとんど変わらない。

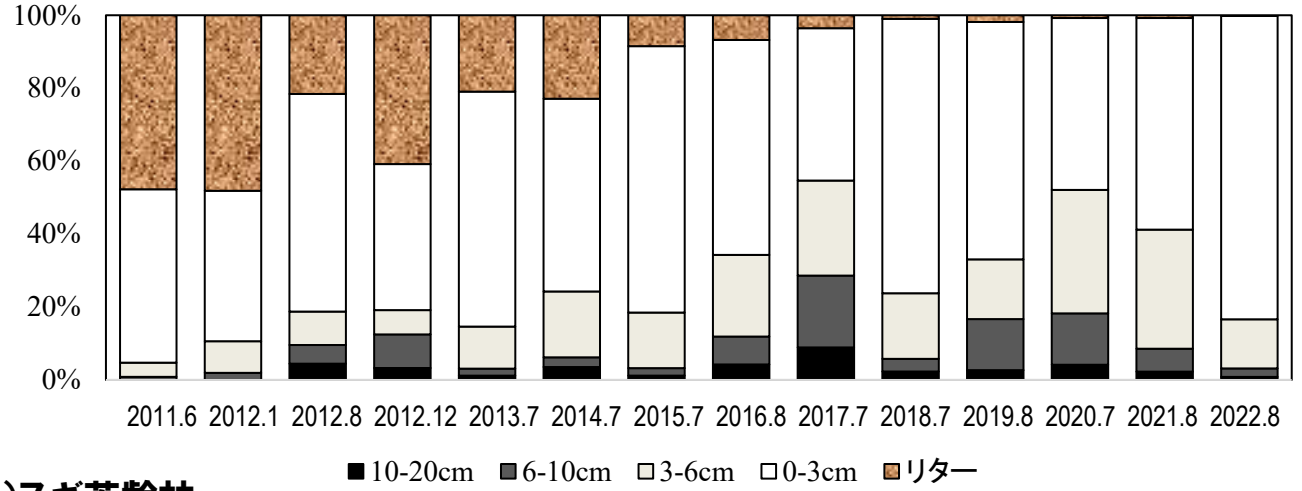
✓ 河川水中の溶存態Cs濃度は、時間とともに緩やかに減少。現在は0.1 Bq/L以下と、飲料水・灌がい用水として問題ないレベル。
✓ 河川堆積物中の雲母鉱物、有色鉱物にCsが吸着し、河川水中のCs濃度を下げている。

✓ 河川の懸濁態中Cs濃度は、時間とともに緩やかに減少。
✓ 大雨時に土砂が新たに堆積しても、その中のCs濃度は元の土砂より低いため、河川敷の線量率は低下。

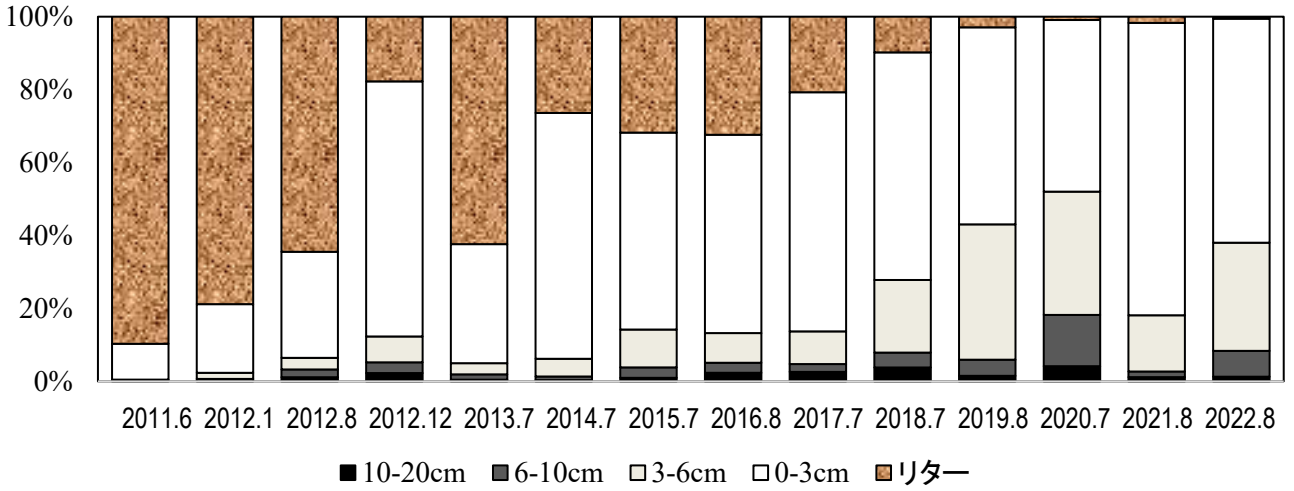
✓ 大雨時の沿岸域における比較的Cs濃度が高い土砂の堆積は、局所的であり、一時的。

森林： 土壌中の深さ方向の放射性セシウムの分布

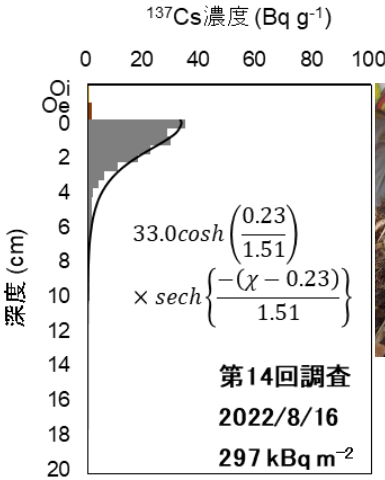
(a) スギ壮齢林



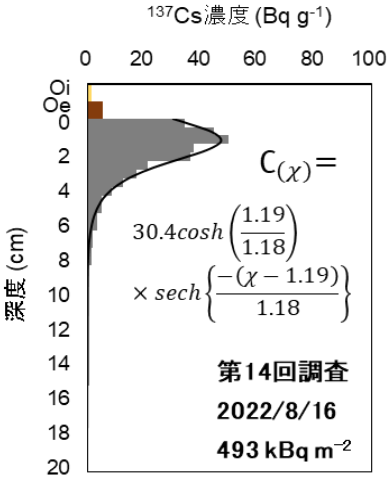
(b)スギ若齢林



森林土壌中の深さごとに存在する放射性セシウムの割合の時間変化



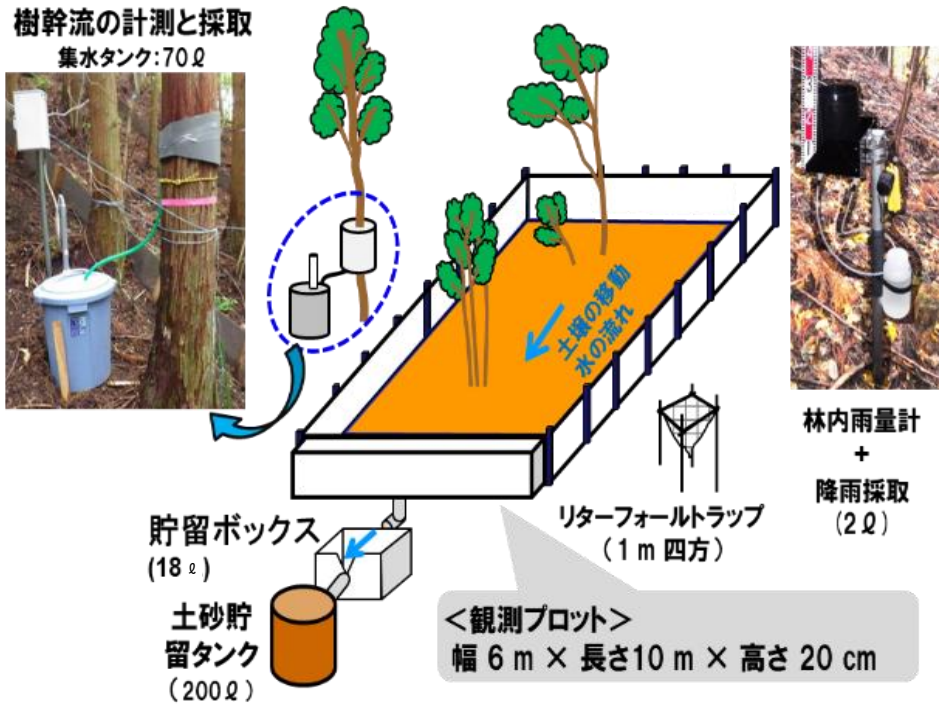
スクレイパープレート法による試料採取



2022年時の放射性セシウム濃度の深度分布

森林土壌では依然として表層6cmの土壌に80%以上の放射性セシウムが集積しており、深度とともに放射性セシウム濃度は減少した。落葉層中の存在割合は1%未満であった。

森林：　森林斜面からの放射性セシウムの流出



森林調査地における調査機器レイアウト例

人為的改変のない山林 ・コナラ林;川俣町山木屋地区 ・スギ林;川内村荻地区	コナラ林;0.18→0.07% (2013年→2018年) スギ林　;0.19→0.07% (2013年→2018年)
除染地 (除染翌年→3年後) ・川俣町山木屋地区	コナラ林;2.55→0.65% (2016年→2018年) ※被覆率;30→82%
林野火災の跡地 (火災当年→2年後) ・浪江町井出地区	スギ林　;2.60→0.16% (2017年→2019年) ※被覆率;10→95%

- **通常の森林斜面からの放射性セシウム流出率は、植生や傾斜によらず、その場所に分布するセシウム137量の0.1%/年程度であり、徐々に低下。**
- **除染や林野火災の影響を受けた斜面でも、流出率は2～3%/年程度と影響は限定的であり、流出率が徐々に回復していくことを示した。**

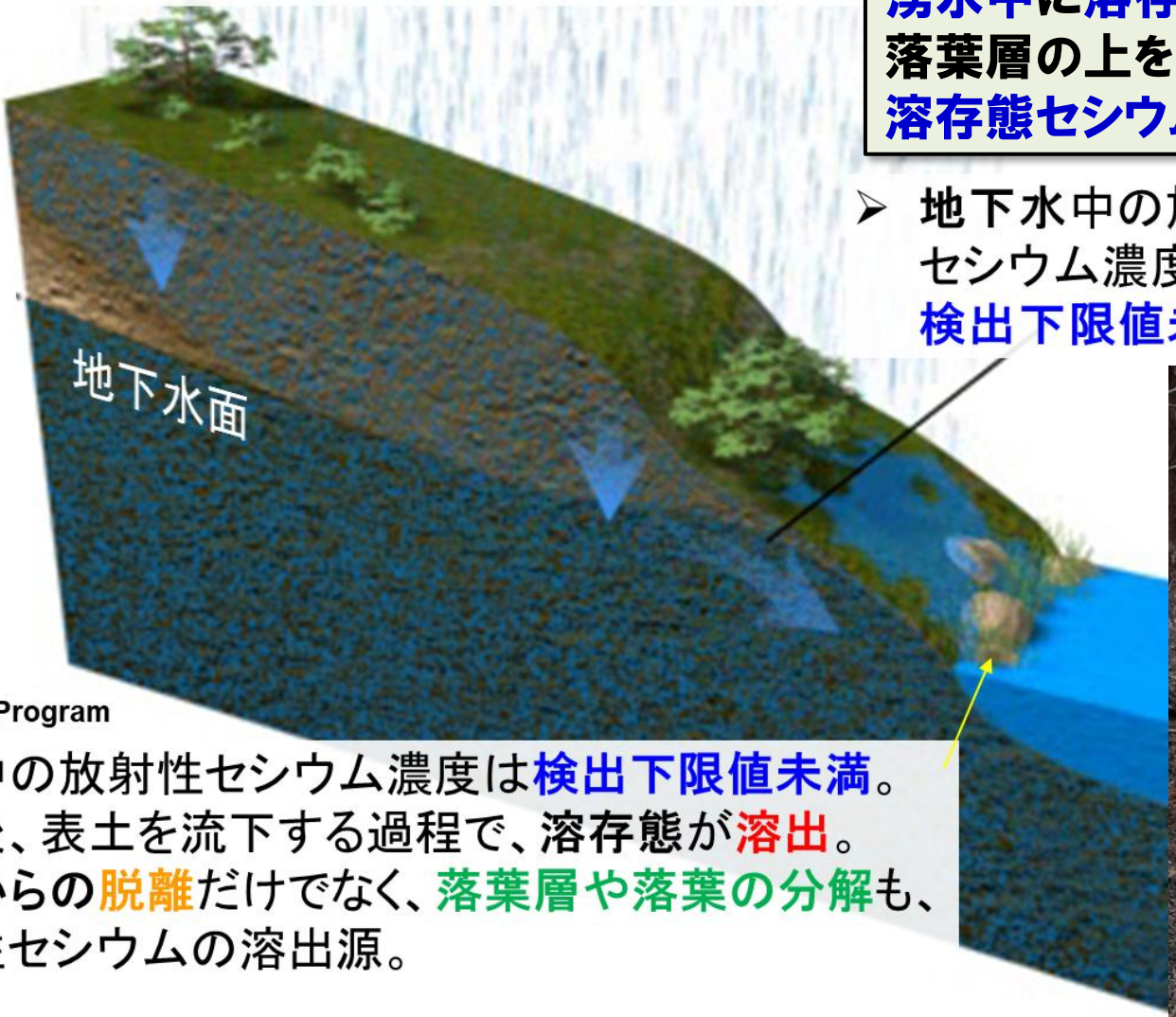
森林： 河川との境界における放射性セシウムの溶出

- 雨が降ると、大部分の雨水は、森林表土に浸透。
- その過程で放射性セシウムは表土に**吸着**。

⇒ 森林表土の大部分は**吸着フィルター**の機能。

湧水中に溶存態は検出されないが、落葉層の上を数m流れた渓流水中には溶存態セシウムがわずかに溶出した。

- 地下水中の放射性セシウム濃度は**検出下限値未満**。



©The COMET Program

- 湧水中の放射性セシウム濃度は**検出下限値未満**。
- 湧出後、表土を流下する過程で、溶存態が**溶出**。
- 土壌からの**脱離**だけでなく、**落葉層や落葉の分解**も、放射性セシウムの溶出源。

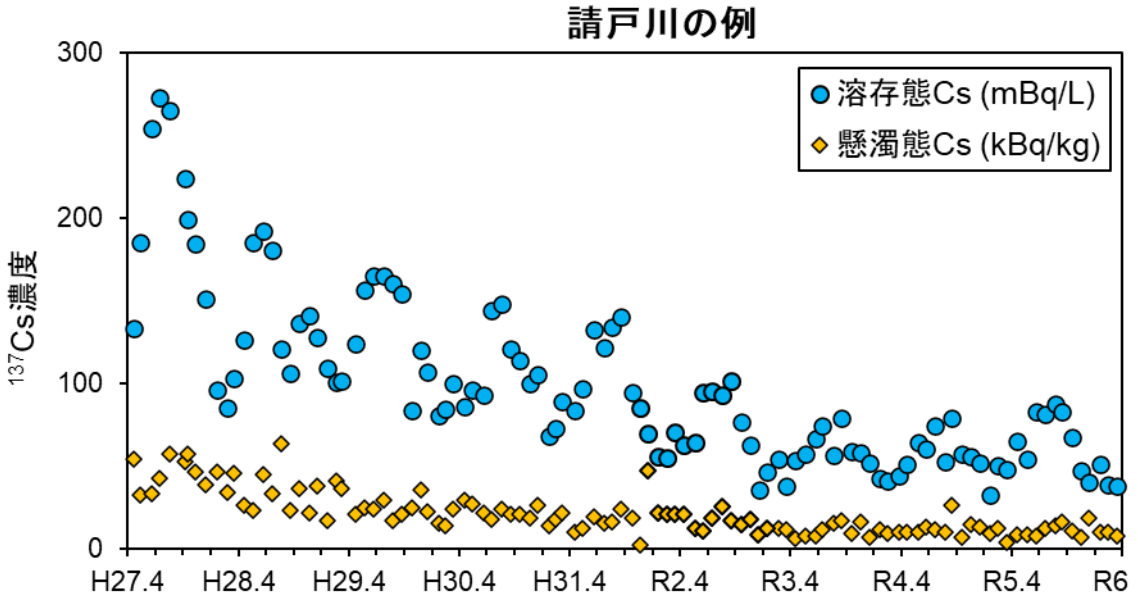
河川：溶存態・懸濁態セシウムの濃度

- **河川水中の放射性セシウム濃度は、現在は0.1 Bq/L以下。**
- **放射性セシウム濃度の低下速度は、物理的な半減期（30年）より速く、令和3年度までの観測結果と同程度の速さで低下している。**

平成27年度以降の河川水中^{137}Cs濃度の実効半減期（濃度が半分になる時間）

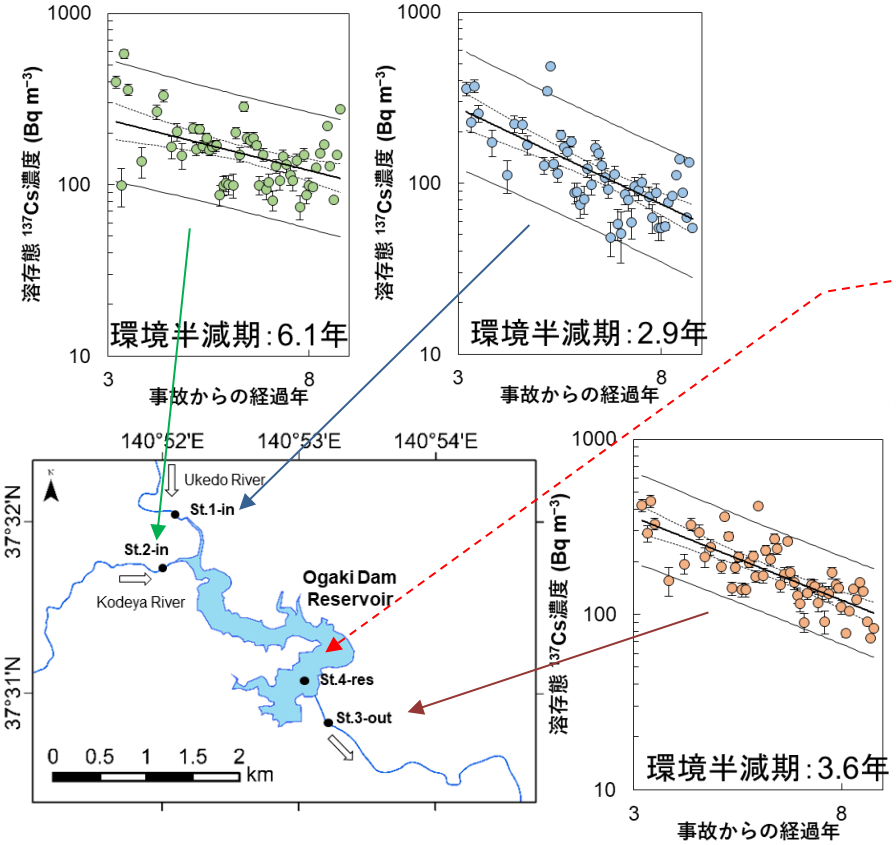
実効半減期	平均	太田川	小高川	請戸川	高瀬川	熊　川
溶存態^{137}Cs	4.5年（～R3年度：5.0年）	3.5年	3.9年	4.5年	6.7年	3.3年
懸濁態^{137}Cs	3.2年（～R3年度：2.6年）	1.8年	2.6年	3.7年	4.7年	2.8年

河川水の自動観測・サンプリング

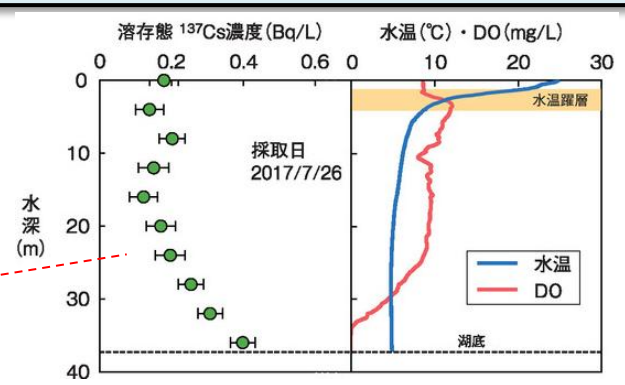


河川：ダム湖水中の溶存態・懸濁態セシウムの濃度

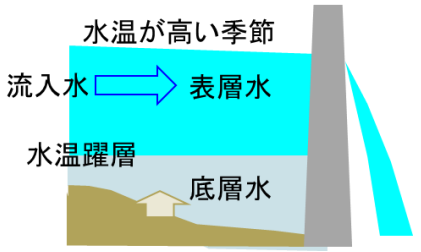
- ダム湖からの放流水中の溶存態放射性セシウム濃度は、現在は0.1 Bq/L以下。
- 放流水の溶存態濃度の方が、流入水より若干高い。
- 湖底付近では、溶存酸素濃度が低下し、還元的な環境が形成されて、溶存態濃度がわずかに高くなっており、底質からの溶出によるものと考えられる。



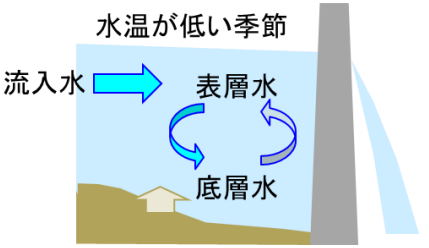
大柿ダム湖の流入・流出水中の溶存態濃度の変化



ダム湖水中の深さ方向の溶存態濃度分布（左）と水温・溶存酸素濃度（DO）分布（右）

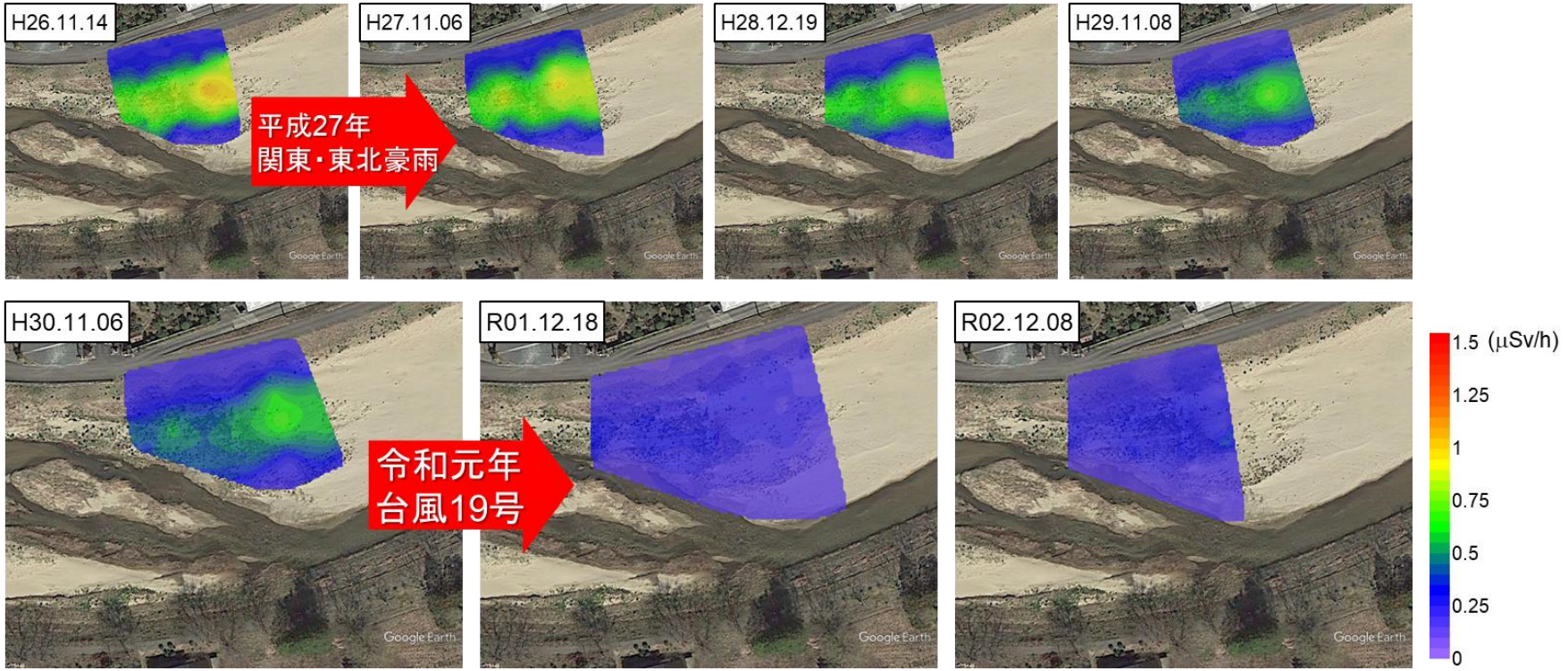


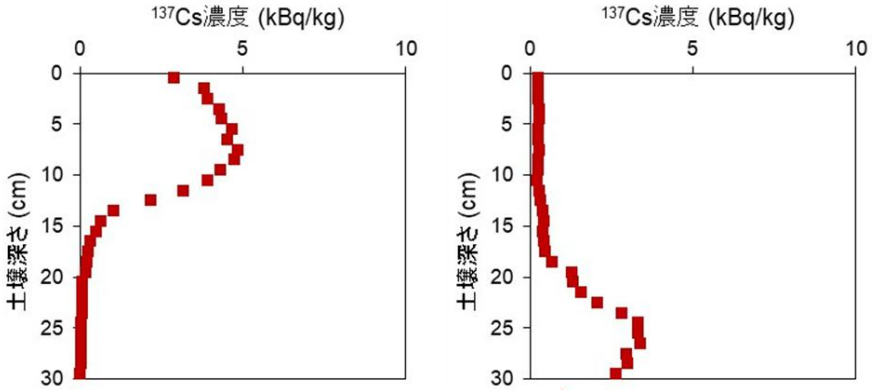
水温が高い季節は、水温躍層によって表層水と底層水（底質から溶存態が溶出）が分離され、表層水のみが下流に流出した。



水温が低い季節には、水が完全に循環し、底質からのセシウムの溶出により、流出水中の溶存態濃度がわずかに上昇した。

河川：河川敷の空間線量率の変化傾向



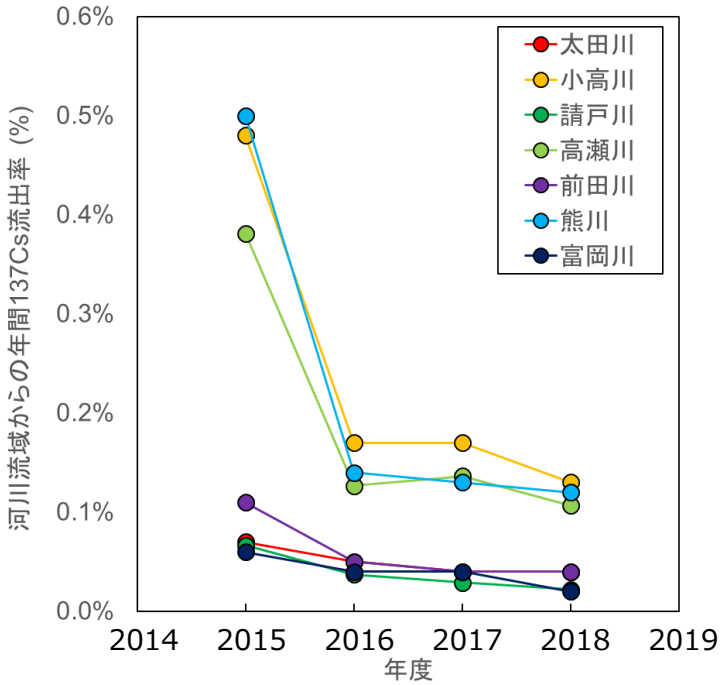


令和元年台風19号

- 河川敷の空間線量率は、**時間とともに低下する傾向にある。**
- **令和元年東日本台風等の大出水後は低下が顕著。**
- **時間とともに河川を流下する懸濁態セシウム濃度が低下傾向にあり、セシウム濃度が低い土砂が表面に積み重なっていくため。**

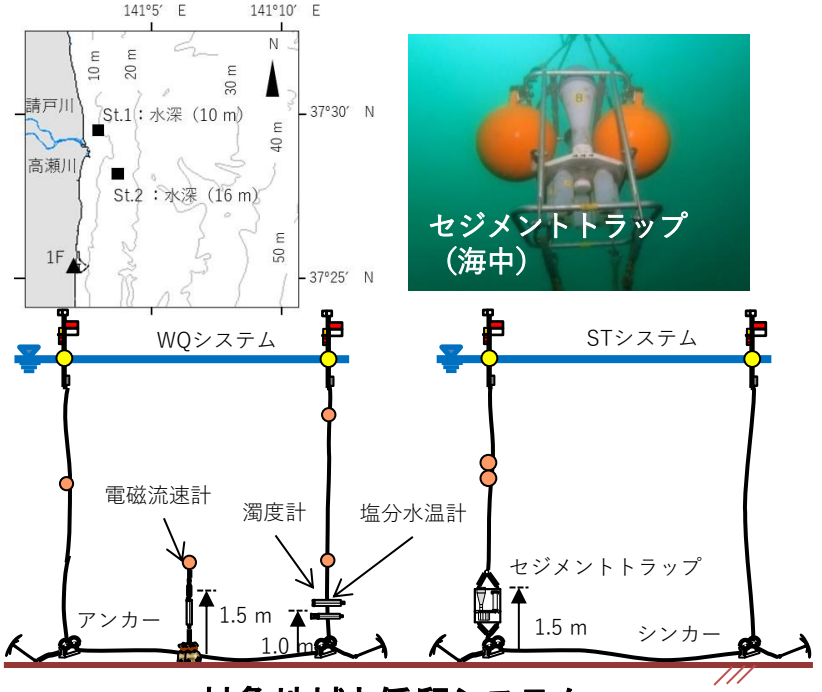
河口域：河川からの流出と河口域の懸濁粒子の起源

- 河川から海への流出率は**時間とともに低下**する傾向にある。
- 河口付近の沿岸で観測される懸濁物質は、**再懸濁による2次移動**が支配的であった。

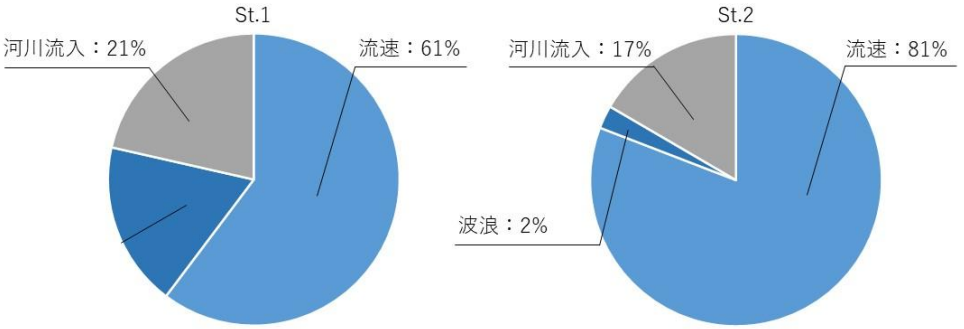


各河川から海への放射性セシウムの年間放出率

いずれの河川も、時間とともに流出率は低くなっていく。また、本流にダムがある河川は、ダムのない河川に比べて放出率は低く、ダムによって、土砂に伴う放射性セシウムの流出が抑制されていることが分かる。



対象地域と係留システム

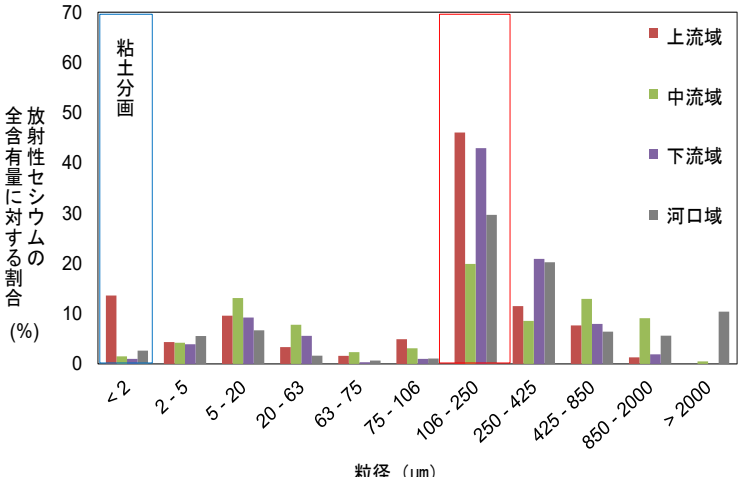


放射性セシウムの2次移動の割合

沿岸における濁度の変動は、「河川流入」によるものは20%程度であり、「流速」と「波浪」のせん断力（再懸濁）によるものが支配的であった。

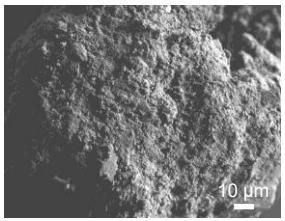
河川：河川堆積物中の鉱物へのセシウムの収着

様々な分析手法を組み合わせ、放射性セシウムが粘土鉱物以外の様々な鉱物にも有意な量が吸着している可能性があることを明らかにした。

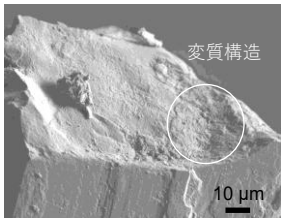


分画毎の放射性セシウム割合

河床土中の細粒砂分画（106–250 μm：図中赤枠）の放射性セシウムの含有割合が他の分画より大きく、吸着しやすい粘土分画以外にも吸着していた。



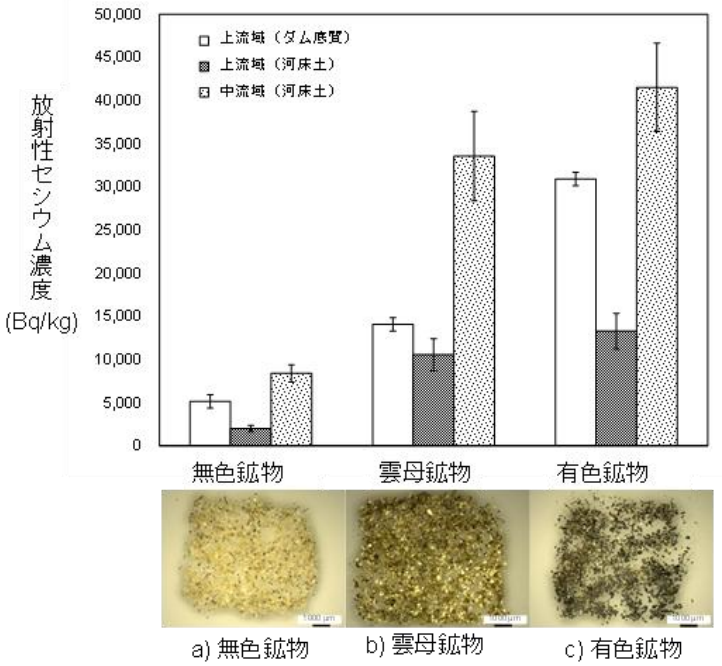
a） 無色鉱物中の長石



b） 有色鉱物中の角閃石

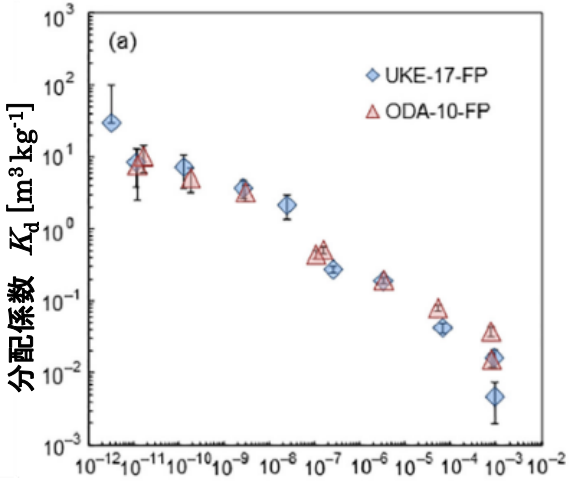
走査型電子顕微鏡(SEM)による鉱物表面観察

a)無色鉱物中の長石、b） 有色鉱物中の角閃石に風化変質を確認。これらの構造に、放射性セシウムが強く吸着されている可能性が示唆される。



河床土中の鉱物毎の放射性セシウム濃度および鉱物の分離

有色鉱物は雲母鉱物とともに放射性セシウム濃度が高く、これまで寄与が少ないとされていた無色鉱物にも放射性セシウムが有意に含まれていた。河川水中の放射性セシウム濃度の予測には、雲母鉱物だけでなく、有色鉱物や無色鉱物の寄与も考慮する必要があることが分かった。

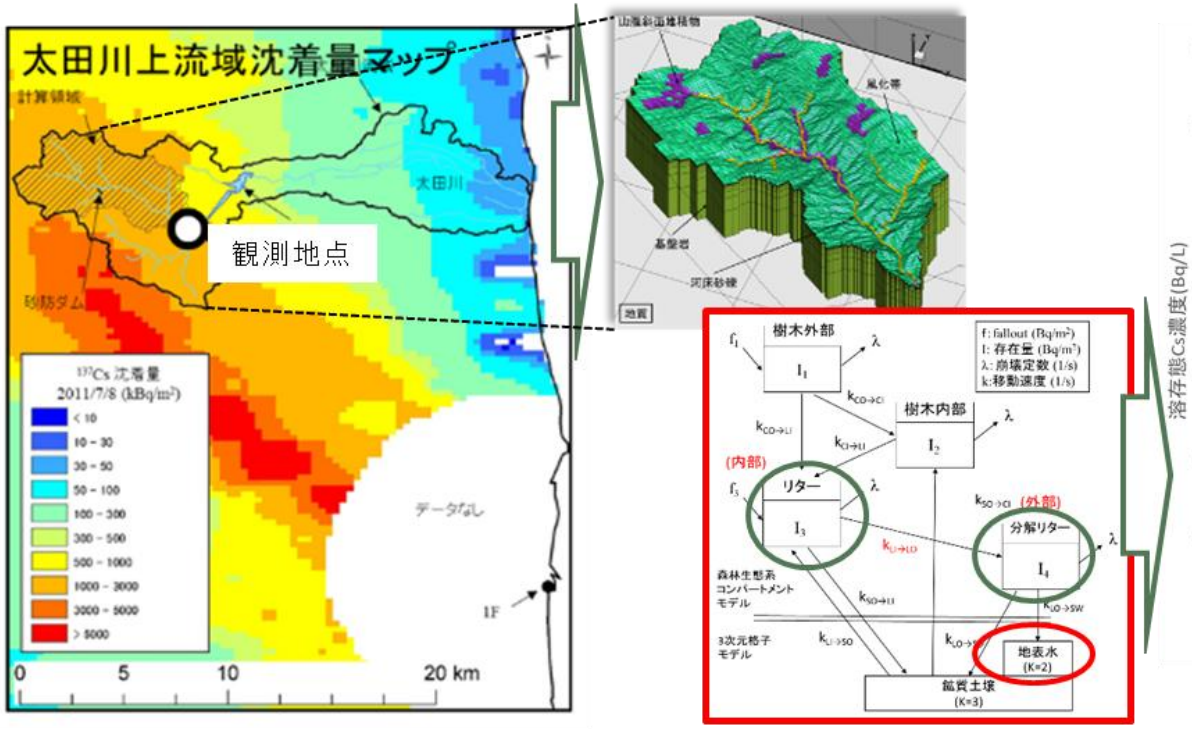


セシウムの河川堆積物への吸着分配係数

河川水中の濃度予測に必要な放射性セシウムの固液分配係数（溶液中セシウム濃度に対する堆積物に吸着されたセシウムの濃度の比、K_d）を調べた。溶液中のセシウムの濃度が低くなると、分配係数が段階的に大きくなった。これは、堆積物に含まれる複数の鉱物あるいは鉱物中の複数の吸着サイトが、セシウムの吸着に寄与していることを示している。

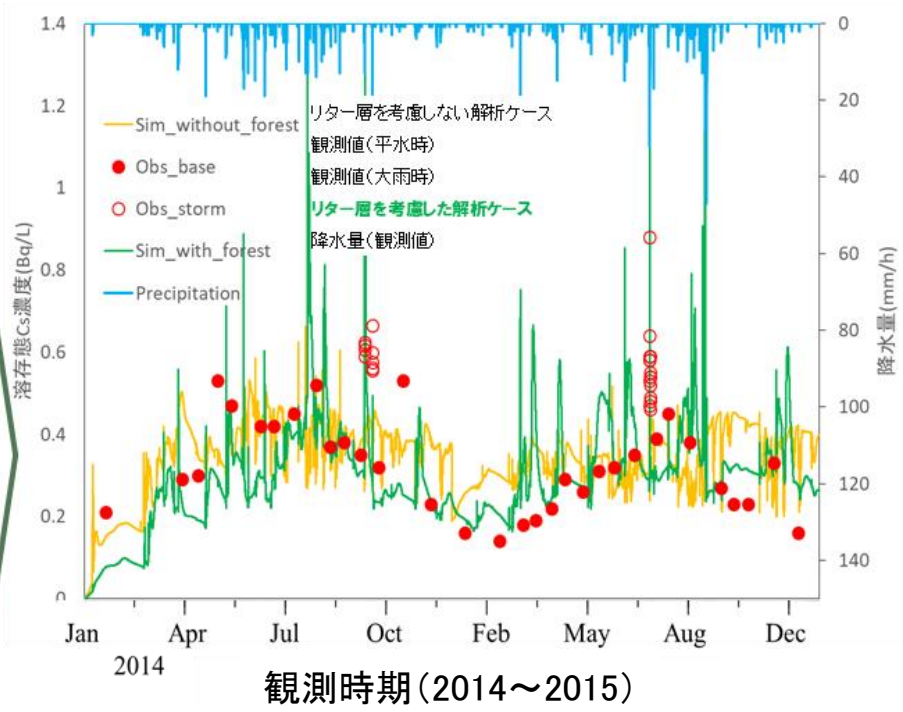
河川：河川水中のセシウム濃度予測モデル

- 河川水中のセシウム濃度を予測するモデルを確立した。
- 特に溶存態セシウムについては、新たに**落葉からのセシウムの溶出**とその**温度依存性**を考慮したモデルを追加したところ、これまで再現できなかった降雨直後の溶存態濃度の上昇や、季節変動（夏高く、冬低い）を再現することができた。



解析対象エリア： 太田川上流域
比較的放射性セシウムの沈着量が多く、生活圏が存在せず、流域の大部分を森林が占めている。

放射性セシウムの移行経路モデル
樹木からの落葉（リター）のうち、分解された部分から地表水への溶出経路を想定し、温度依存性があると仮定した。



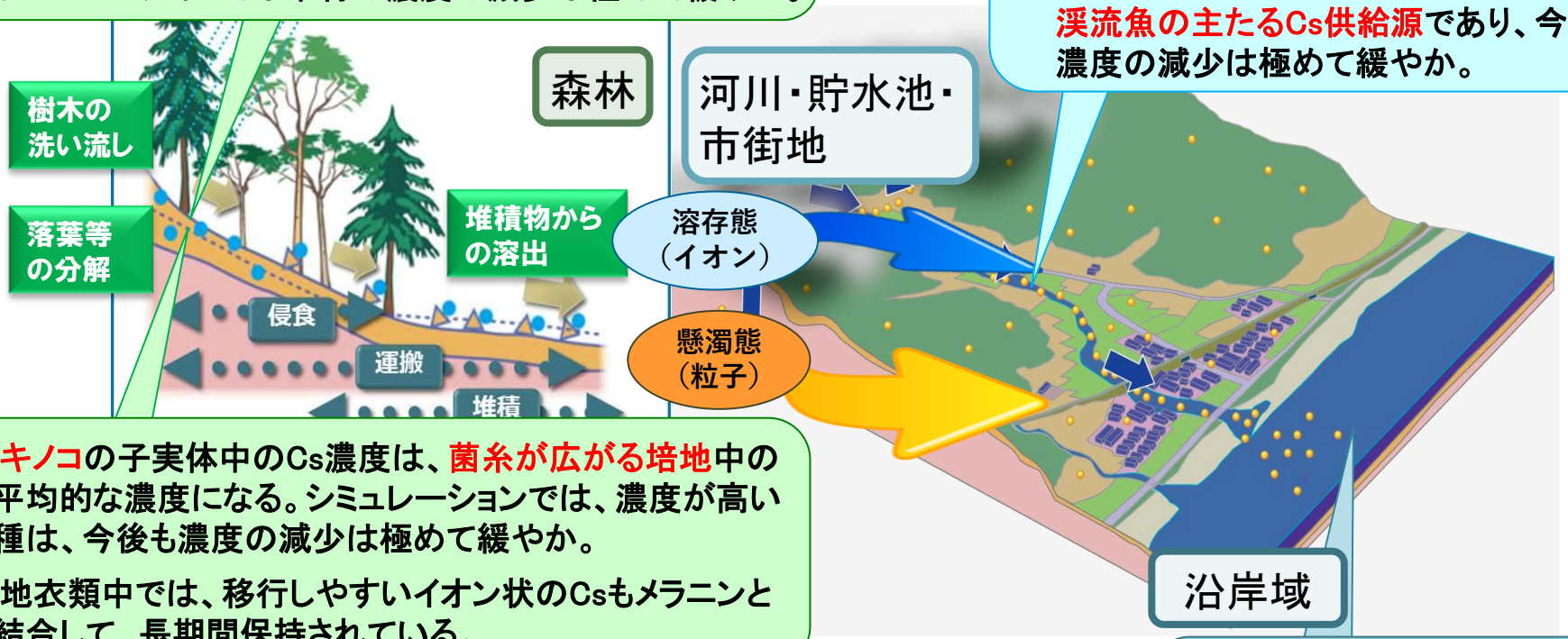
河川水中溶存態濃度の予測と観測結果の比較
落葉からの溶出を考慮したモデルの予測（緑）は、考慮していないモデル（オレンジ）に比べて、観測結果（赤丸）の季節変動や降雨時の急増などをよく再現できた。

環境動態研究の課題：森林近辺の生態系への影響は長期化

- **森林にセシウムが残存し、隣接する生態系に長期間影響を及ぼす。**

✓根から樹木に吸収・蓄積されているCsの量は、1年間に実質0.1%程度。落葉中のCs濃度は横ばい傾向で、樹木内をCsが循環し、ほぼ一定になっている可能性。

✓シミュレーションでは木材の濃度の減少は極めて緩やか。



✓ 濃度の高い河川の淡水魚（特に渓流魚）には、いまだにCs濃度が100 Bq/kgを超える個体が認められる。

✓ シミュレーションでは、最近は森林土壌が渓流魚の主たるCs供給源であり、今後も濃度の減少は極めて緩やか。

✓キノコの子実体中のCs濃度は、菌糸が広がる培地中の平均的な濃度になる。シミュレーションでは、濃度が高い種は、今後も濃度の減少は極めて緩やか。

✓地衣類中では、移行しやすいイオン状のCsもメラニンと結合して、長期間保持されている。

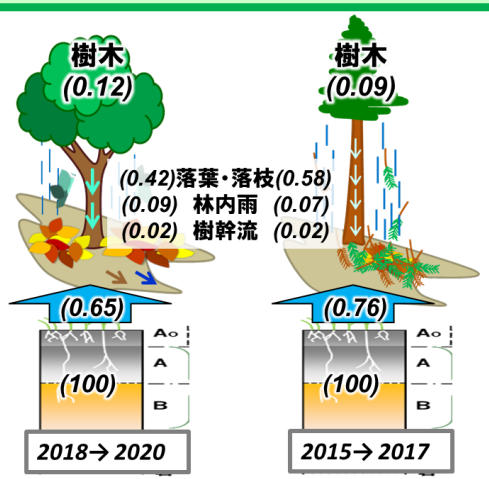
✓ 海水魚のCs濃度は100 Bq/kgを十分下回っており、これを超える個体は、種・数とも極めて限定的。

✓ 1F近海の底魚中のトリチウム・ストロンチウム90濃度は、検出限界未満。

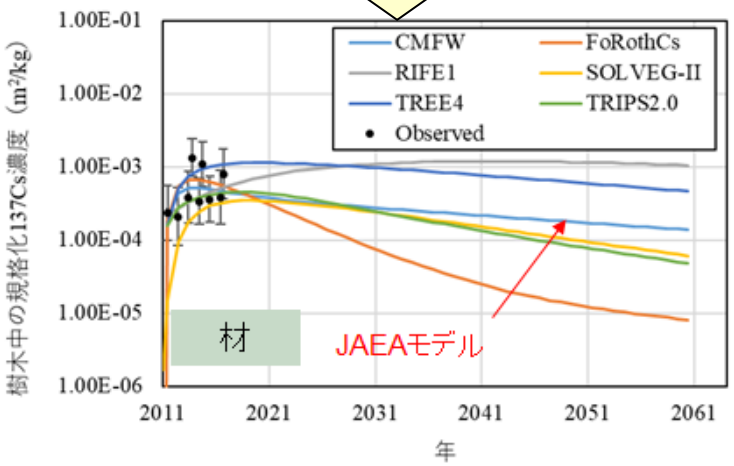
- **森林表土と生態系におけるセシウムの移行挙動を明らかにすることが課題。**

森林：樹木内のセシウム濃度予測モデル

森林内の樹木各部・土壌中の放射性セシウム分布の経時変化に基づき、樹木に含まれる将来の放射性セシウム濃度を予測するモデルを開発したが、不確実性は大きいと考えられる。

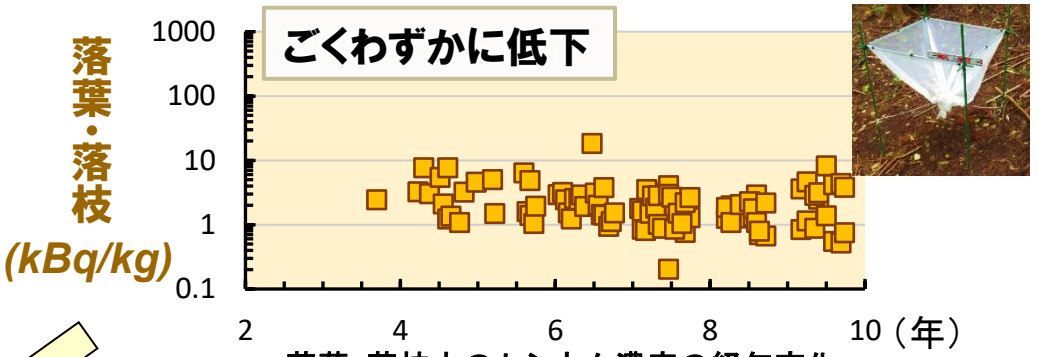


樹木のセシウム吸収量の推定



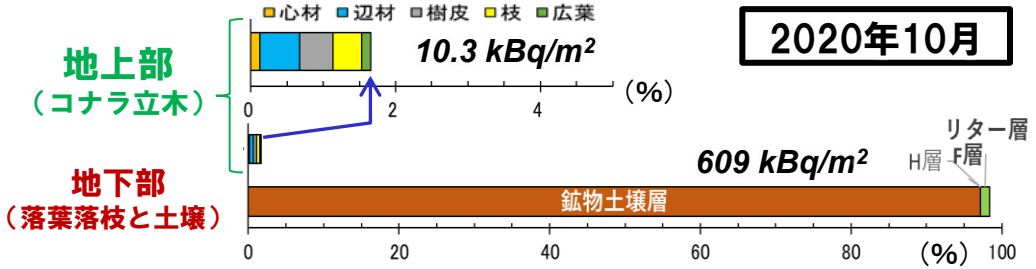
材のセシウム濃度のシミュレーション結果

(Hashimoto, S., *J. Environ. Radioact.*, 238-239 (2021) 106721.)



落葉・落枝中のセシウム濃度の経年変化

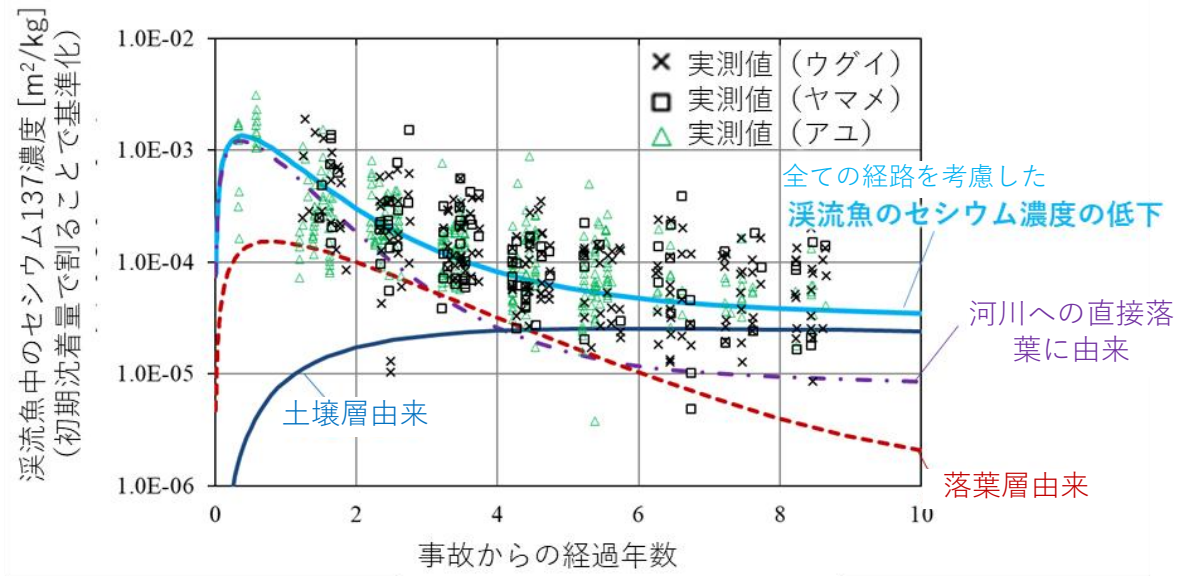
伐倒調査と試料採取の様子



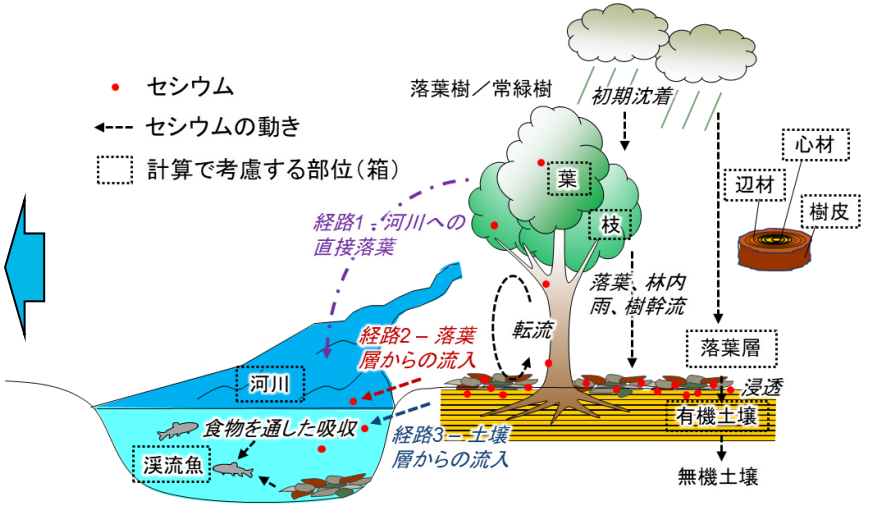
森林の地上部（樹木）と地下部（落葉・土壌）のセシウム分布

河川：淡水魚のセシウム濃度予測モデル

- 森林内の樹木各部・土壌中から、渓流魚などに移行する放射性セシウム濃度を予測するモデルを開発した。
- 放射性セシウム濃度の減少傾向から、事故直後は、河川への直接落葉、現在は土壌層の放射性セシウムの流入が、渓流魚への主たる移行経路と推測されるが、調査に基づく移行経路の解明が必要と考えられた。



森林からの流入を考慮した渓流魚中のセシウム濃度シミュレーション結果



モデルで想定した森林から河川へのセシウム流入経路

森林：樹木内のセシウム濃度予測モデル

- 様々な分析手法を組み合わせて、放射性セシウムが地衣類（菌類と藻類の共生体）の中でどのような状態で捕捉されているのかを明らかにした。
- 生態系内の移行を明らかにするには、セシウムの保持メカニズムの解明が必要と考えられた。

EPMA

デジタルマイクロスコープ

オートラジオグラフィ

固相分析に基づく地衣類の生体組織内でセシウムが保持される仕組みの推定

放射性セシウムを含む粒子は上部組織に物理的に保持され、イオン状の放射性セシウムは下皮層でメラニンと結合して保持されていると推定された。この成果は、キノコに放射性セシウムが長期間保持されるメカニズムの解明にも役立つことが期待される。

分かりやすい情報提供：階層型Q&A

- 成果情報の提供サイトでは、説明の詳細度が異なる複数の階層に分けて情報を示すことで、関心の高さが異なる読み手に分かりやすくなるようにした。

答えます！ みんなが知りたい福島の今
根拠情報 Q&A
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
English

https://fukushima.jaea.go.jp/QA/index.php
→**F-REIに移行** https://www.f-rei.go.jp/QA/

問いに対して、まず**簡潔な答**を示す。
（第1層）

スライドで説明する時と同様に、**根拠となるデータと簡単な解説を示す。**
（第2層）

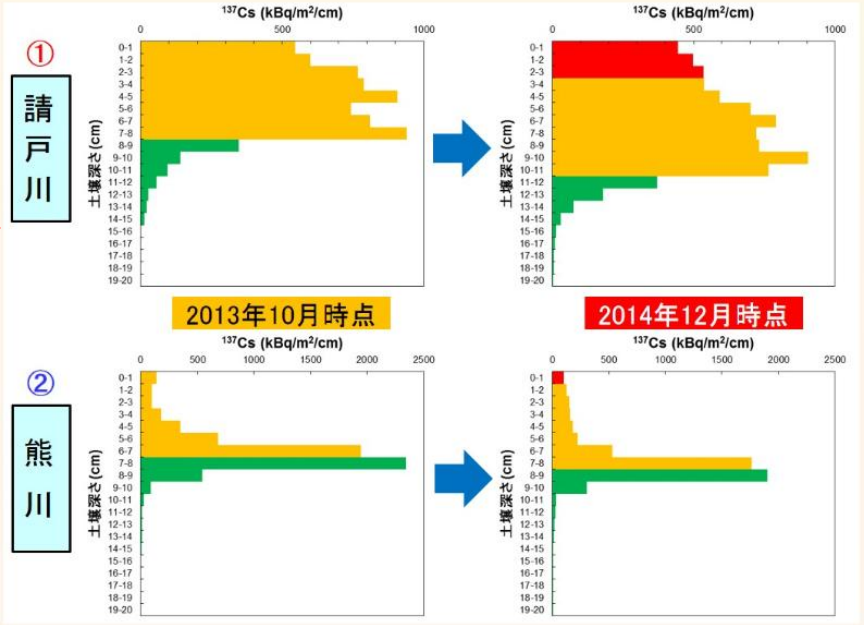
より詳細な根拠として、**技術資料**的な説明資料**（第3層）**や**論文等（第4層）**へのリンクを示す。

Q 川の付近は危なくないですか。川の水に溶けたセシウムがまだ流れているのですか。

A 環境省は、平成27年（2015年）に河川・湖沼における汚染状況のデータを整理し、その環境中において、水辺のレクリエーション活動を行った際に受ける被ばく線量について試算を行いました。
その結果、安全側に考えても、水辺のレクリエーション活動における被ばく線量は、20日間で最大0.03ミリシーベルトとなりました。これは、避難指示の基準である1年間20ミリシーベルトに比べて十分に低い値です。

河川敷には、上流から運ばれたセシウムが付着した土砂が堆積するため、セシウムが蓄積しやすい環境にあります。
私たちは、河川敷の土中のセシウム濃度の深さ方向の分布を、数年にわたって調査しました。

その結果、浅いところにはセシウム濃度が低い土砂がたまっていることがわかりました。これは、上流から運ばれる土砂の中のセシウム濃度が年々下がっていることを意味しています。
そして、濃度の低い土砂が上に覆いかぶさることで、放射線が遮られてむしろ線量は低下することがわかりました。



参考文献
1） 原子力規制委員会,“放射線量等分布マップの作成等に関する報告書（第1編）”.
2） 原子放射線の影響に関する国連科学委員会, 電離放射線の線源、影響およびリスク:UNSCEAR 2013年報告書, 第 I 巻 国連総会報告書 科学的附属書A: 2011年東日本大震災後の原子力事故による放射線被ばくのレベルと影響, United Nation, 2015, 306p.ed Nation, 2015, 306p.
3） 文部科学省,“放射線量等分布マップ拡大サイト”.

今後の取り組み：森林に残るセシウムの影響評価

- 地表付近に残存する放射性セシウムが、生態系へどのようなプロセスで影響を及ぼしているのか、それを明らかにすることが、対策検討の第一歩。
  - 地表付近でどのような形態で存在するのか。
  - 隣接する生態系にどのような過程を経て移行しているのか。
  - 生態系内でどのように保持・循環されているのか。

ご清聴ありがとうございました