



## 平成27年度福島研究開発部門 成果報告会

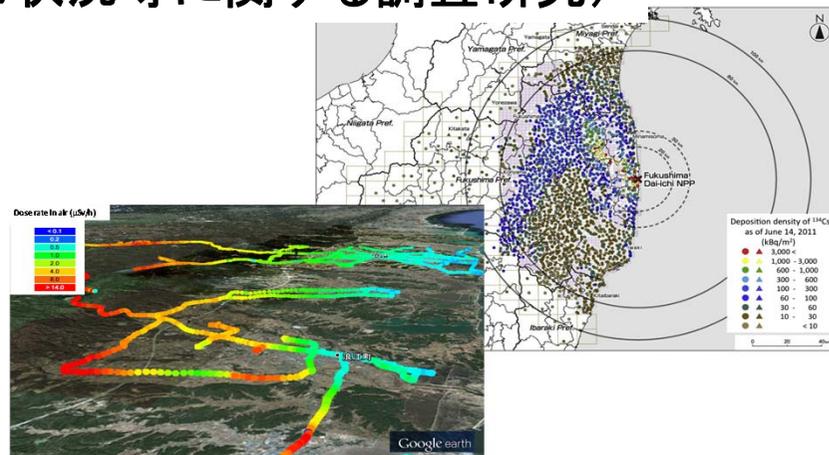
# 環境回復の課題と対応 -事故後約5年を振り返って-

平成28年1月27日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構  
福島環境安全センター 宮原 要

## マップ事業(放射性物質の分布状況等に関する調査研究)

- 事故後の放射線モニタリングの技術を標準化
- 空間線量率や沈着量のマップを作成
- 空間線量率の将来予測を行う手法を開発



## 除染モデル実証事業(2011年9月～2012年6月)

- 除染効果、施工速さ、費用、施工上の留意点等をデータシートとして整理
- 除染の実施にあたり、自治体や住民との良好な関係を構築
- 一連の除染に関わる手続きを整理



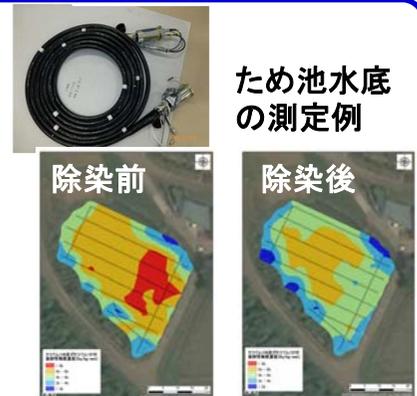
## 環境動態研究(福島長期環境動態研究; 2012年11月~)

- 森林から河川、ダム、河口域へと至るセシウムの移動と蓄積の調査・評価(請戸川、熊川、富岡川、木戸川等浜通りの8河川流域)



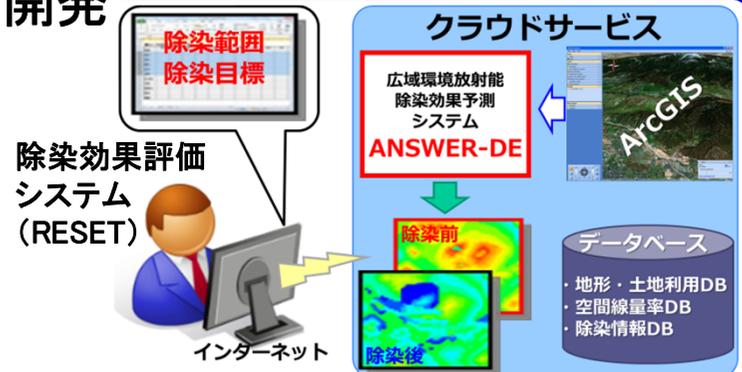
## 放射線計測技術開発

- 遠隔モニタリング技術の開発
  - 1F\*上空からの無人ヘリ測定による空間線量率分布の評価(国交省が飛行禁止区域を解除)
  - \*1F: 東京電力福島第一原子力発電所
  - 農業用ため池水底のセシウム分布測定技術\*\*  
開発と技術移転(水土里ネット福島と技術指導契約)
  - \*\*プラスチックシンチレーションファイバの活用



## 除染・減容化技術開発

- 除染効果評価システム(RESET)の開発
  - 国・自治体での除染効果の評価及び将来の空間線量率の低減予測に利用
- セシウムの粘土鉱物への吸脱着機構の解明



## 除染特別地域及び除染実施区域への協力・支援

### ①除染特別地域

環境省への協力・支援

- 除染作業の立会・技術指導
- 除染試験、フォローアップモニタリング等の実施及び評価支援等

### ②除染実施区域

各市町村への協力・支援

- 除染活動の支援・協力・技術相談等
- 仮置場設置に係る技術指導等

平成27年10月末現在：合計3,726件実施

## コミュニケーション・原子力人材育成活動

- 放射線に関するご質問に答える会
- 文部科学省国際原子力人材育成イニシアティブ
- 福島県除染推進のためのリスクコミュニケーション事業
- 連携協定による人材育成事業 等



平成27年10月末までに246ヶ所で開催、約20,000人参加

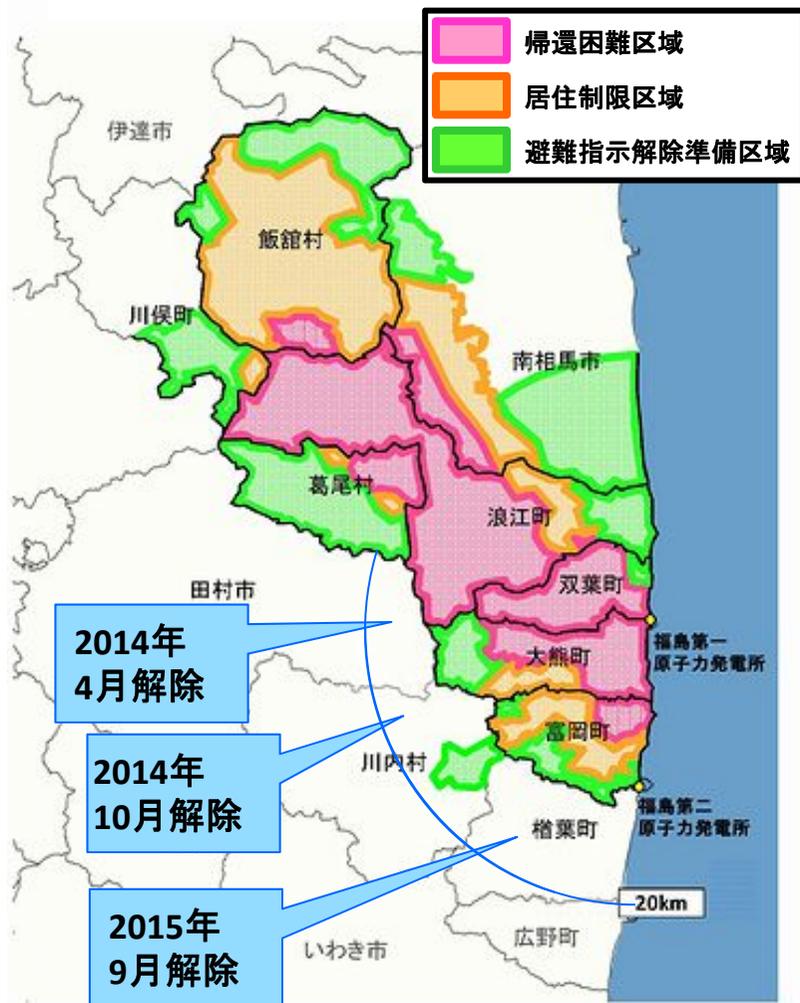
## 県民健康管理調査

- 県民健康管理調査(内部被ばく検査)の立案、検査と結果の評価、その他問い合わせ対応

平成23年7月11日～27年10月31日 までに、  
85,685人(子供67,859人、大人17,826人)測定

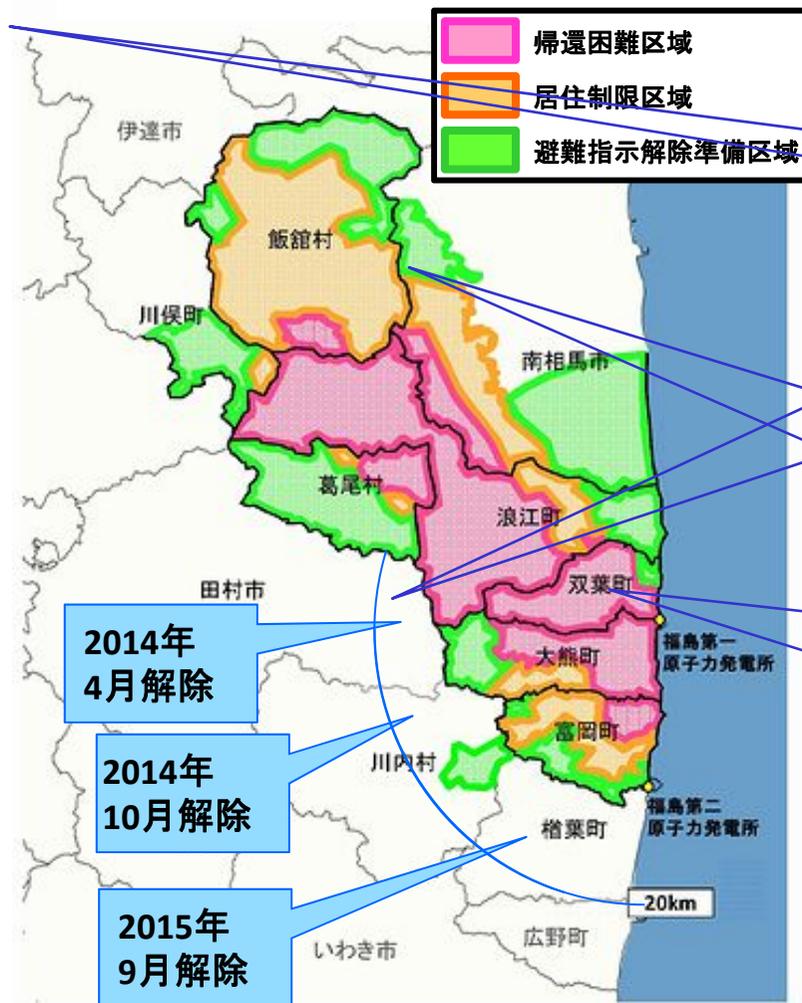


## 避難指示区域 (2015年9月5日)



- 避難指示の解除(2014年4月田村市、2014年10月川内村、2015年9月檜葉町)
- 特定避難勧奨地点(260地点・281世帯)がすべて解除
- 常磐自動車道の全線開通や国道6号の一般通行の再開が実現
- 除染実施計画に基づく除染等の措置等の着実な進捗
- 仮置場から中間貯蔵施設内の保管場への除去土壌等の搬入開始

## 避難指示区域 (2015年9月5日)



## 複数の状況が併存

- 平常状態へと回復されている地域
- 避難指示が解除された地域\*
- これから避難指示が解除されようとしている地域(避難指示解除準備区域、居住制限区域)
- 避難指示解除の見通しが得られていない地域(帰還困難区域)

\*避難指示解除の要件(空間線量率で推定された年間積算線量が20mSvを下回る)

- 福島の復興・再生は着実な進展が見られるものの、復興の進捗にはばらつきがあり、未だ復興に向けた道筋が見えないとの声が依然として地元中存在 [1]
- 原子力災害からの復興は、一朝一夕で実現されるものではなく、中長期的な見通しを持ちつつ、環境変化に応じた弾力的な見直しをしながら、継続的に取り組むことが必要 [2]
- 復興期間10年以内での一刻も早い復旧・復興事業の完了を目指す、他方、原子力事故災害被災地域においては、避難指示の影響等により長期の事業が予想されるので、10年以内の復興完了は難しい状況 [3]
- 遅くとも事故から6年後(平成29年3月)までに避難指示区域を解除(帰還困難区域を除く) [1]

[1]「原子力災害からの福島復興の加速に向けて」改訂 原子力災害対策本部(平成27年6月)

[2]福島・国際研究産業都市(イノベーション・コースト)構想研究報告書 福島・国際研究産業都市(イノベーション・コースト)構想研究会(平成26年6月)

[3]平成28年度以降の復旧・復興事業について 復興推進会議決定(平成27年6月)

- 帰還に向けた安全・安心対策(戻りたいと考えている住民の方々の帰還を可能にする) [1]
  - 住民の方々の要望等に応じた生活圏の空間線量率、食品、飲料水、土壌等のきめ細かなモニタリング [1]
    - ➡ ①広域の空間線量予測
    - ➡ ②流域圏でのセシウムの移動と蓄積(フロー・ストック)の評価
  - 個人線量水準の情報提供、個人線量の把握・管理、測定結果の丁寧な説明 [1]
    - ➡ ③個人線量評価
    - 復興の動きと連携した除染の推進等 [1]
      - ➡ ④除染除去物の減容化
- 帰還困難区域の今後の取扱い(避難の長期化が見込まれる地域であっても少しでも先行きの見通しを持てるようにする) [1]
  - 放射線量の見通しの提示(中長期的に放射線量がどの程度低減していくのかは求められる情報の1つ) [2]
    - ➡ ①広域の空間線量予測
    - ➡ ②流域圏でのセシウムの移動と蓄積(フロー・ストック)の評価

- ① 広域の空間線量予測
- ② 流域圏でのセシウムの移動と蓄積  
(フロー・ストック)の評価
- ③ 個人線量評価
- ④ 除染除去物の減容化



- ① 広域の空間線量予測
- ② 流域圏でのセシウムの移動と蓄積  
(フロー・ストック)の評価
- ③ 個人線量評価
- ④ 除染除去物の減容化

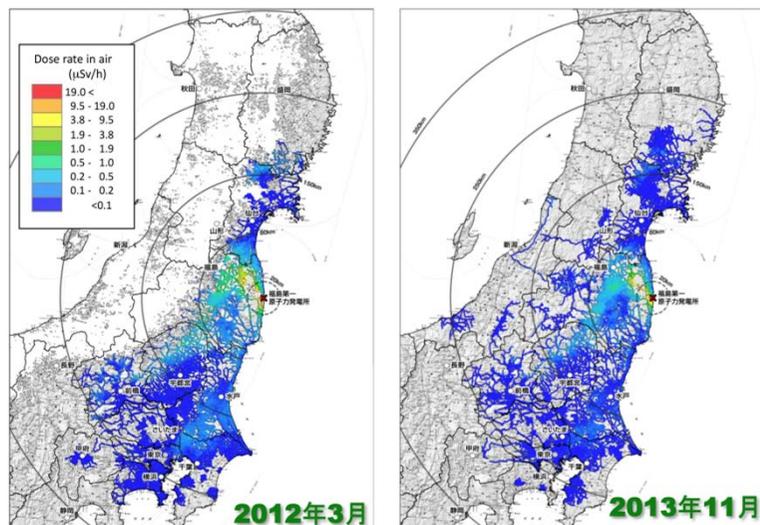
## ねらい

- 帰還に向けた判断に資する材料として、土地の利用状況や人間活動による変化傾向の違いを考慮し、30年後までの広域の空間線量率分布マップを作成する

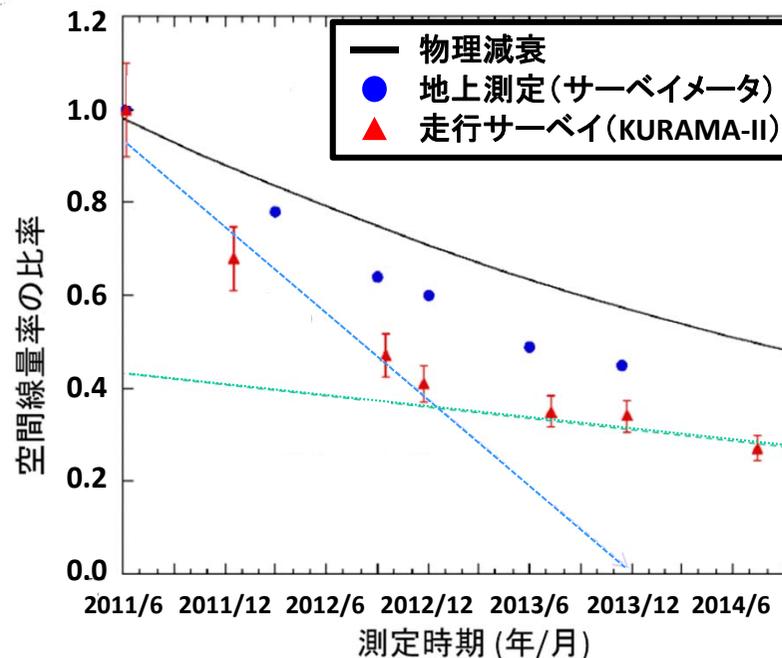
## アプローチ

- 走行サーベイ等で得られた膨大な数の経時変化データに基づき、過去の空間線量率変動の傾向から将来の空間線量率変動を外挿する手法
- チェルノビル事故等の知見を踏まえ、空間線量率の減衰傾向を2つの指数関数の組合せ(減衰の早い成分と遅い成分)で近似した経験式を使用
- 過去の空間線量率測定データの解析から土地利用の状況ごとに最適なパラメータを決定し、100 m メッシュ毎の予測を行う

- 空間線量率や土壌沈着量は時間とともに減少してきており、森林以外の地域では、空間線量率は物理減衰に比べて早く減少



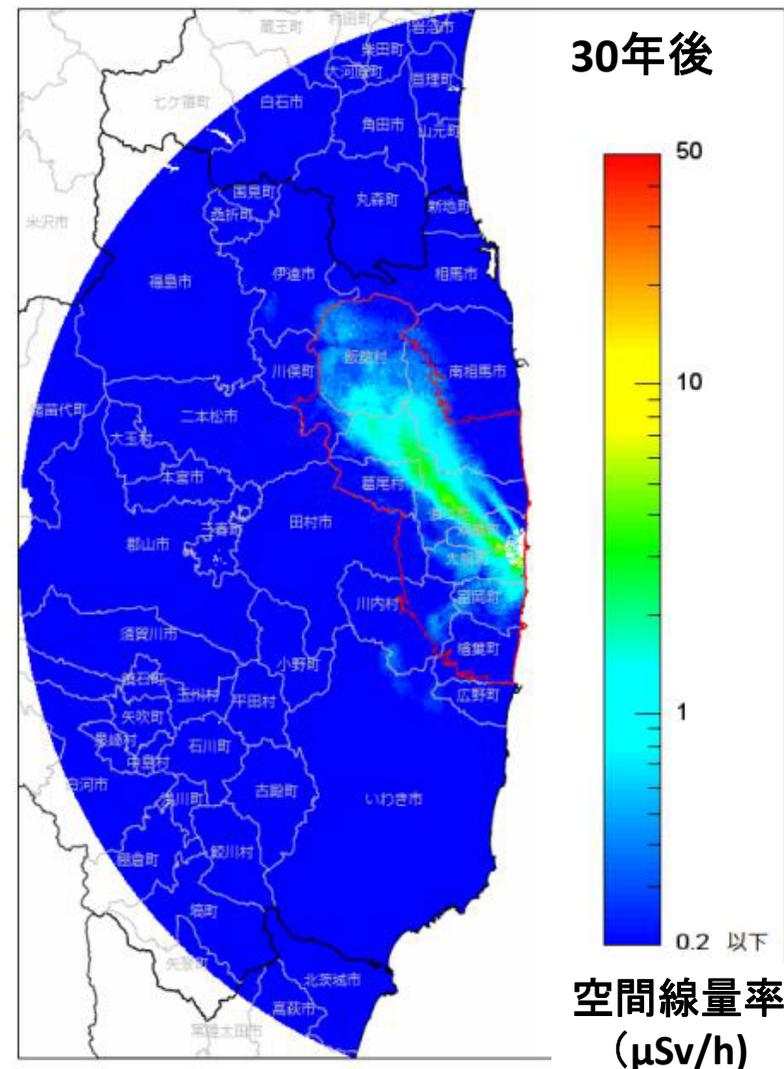
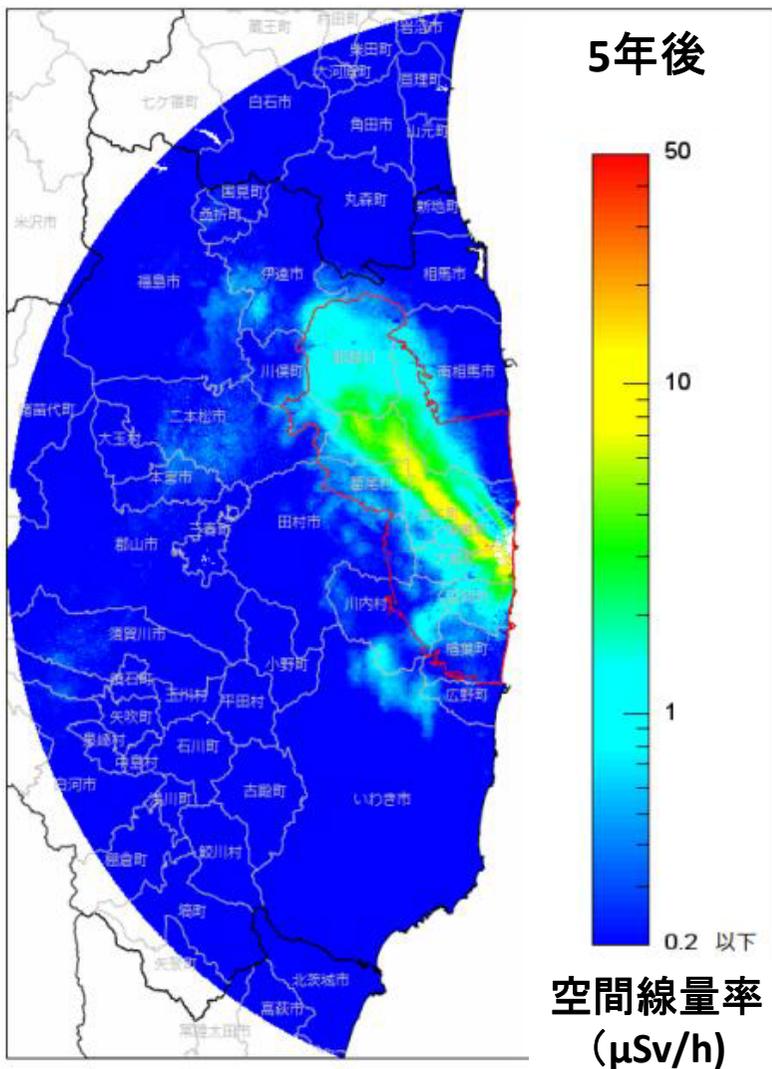
走行サーベイにより測定した空間線量率分布の変化



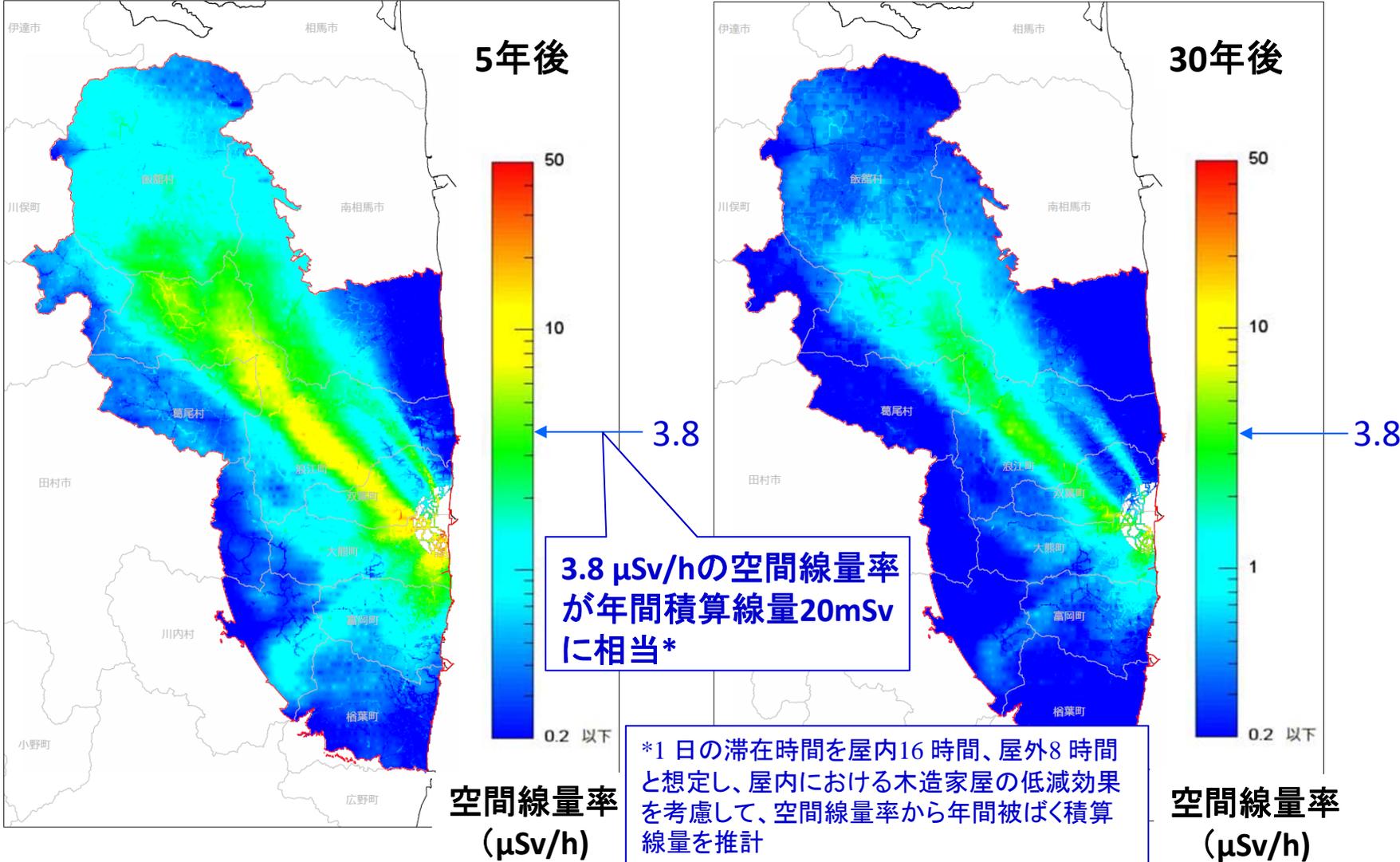
- 走行サーベイで測定した道路上の空間線量率は、開けた平坦地上の空間線量率に比べて早く減少
- 開けた平坦地では水平方向のセシウムの動きは遅いのに対し、道路やその周辺に沈着したセシウムは移動し易いことに起因

- 空間線量率の減衰は、放射性崩壊によるもののほか、環境により決まる要因によっても減衰するとする
- 減少が速い成分と遅い成分の和で表されると考えると、比較的よく合う

- 避難指示解除の要件(空間線量率で推定された年間積算線量が20mSvを下回る)を満たさない面積が5年後から30年後で約1/20に減少



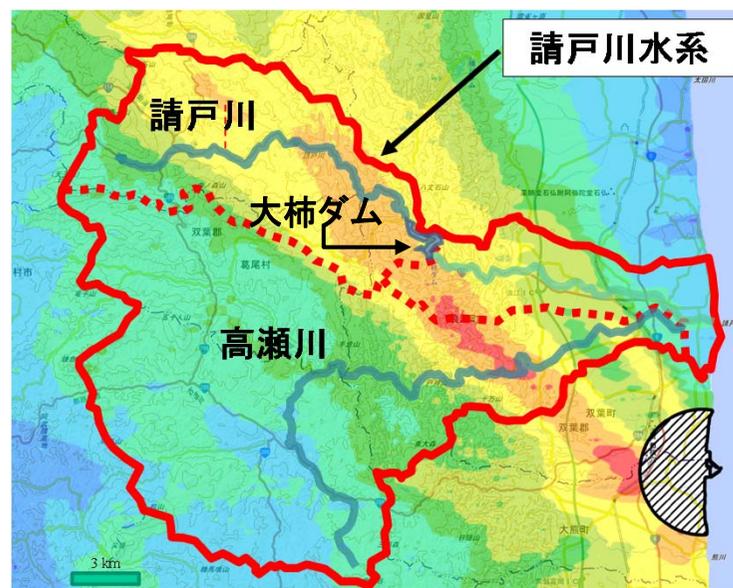
- 避難指示解除の要件(空間線量率で推定された年間積算線量が20mSvを下回る)を満たさない面積が5年後から30年後で約1/20に減少



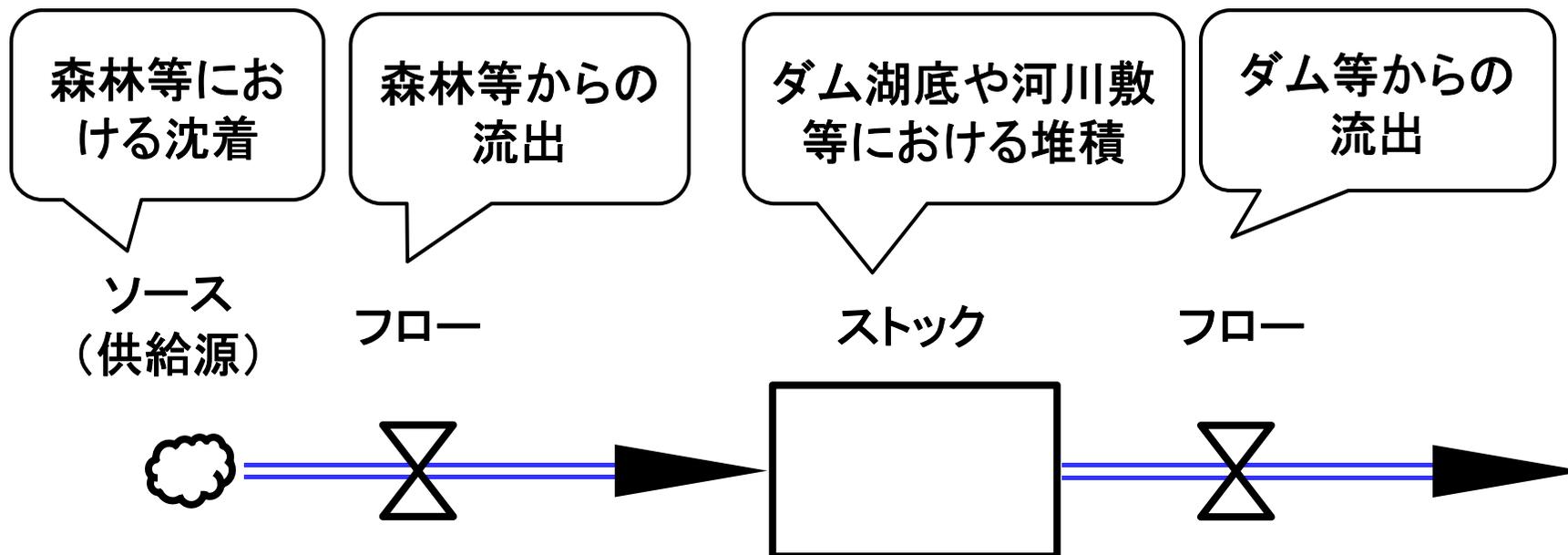
- ① 広域の空間線量予測
- ② 流域圏でのセシウムの移動と蓄積  
(フロー・ストック)の評価
- ③ 個人線量評価
- ④ 除染除去物の減容化

## ねらい

- 表層水によるセシウムの移動(フロー)と蓄積(ストック)の評価に基づく線量予測等により、住民の不安解消、林業・営農・水産業の再生の判断材料に資する



## フロー・ストックの概念図

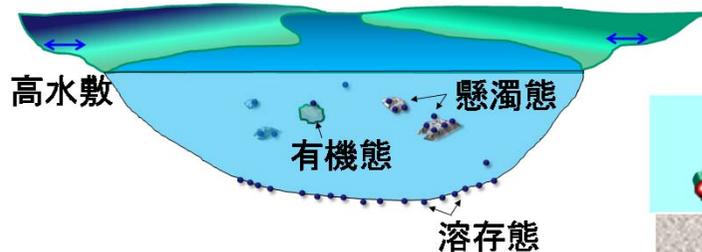


樹冠から地表  
への移動

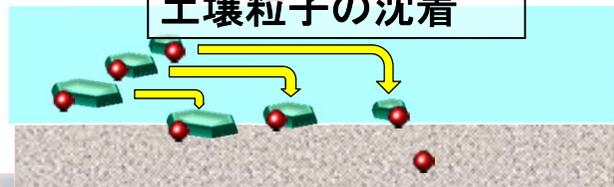


土砂・リターの  
侵食・運搬に  
よる移動

地表に沈着したセシウムが土壌粒子に強く取り込まれている



セシウムを吸着した  
土壌粒子の沈着

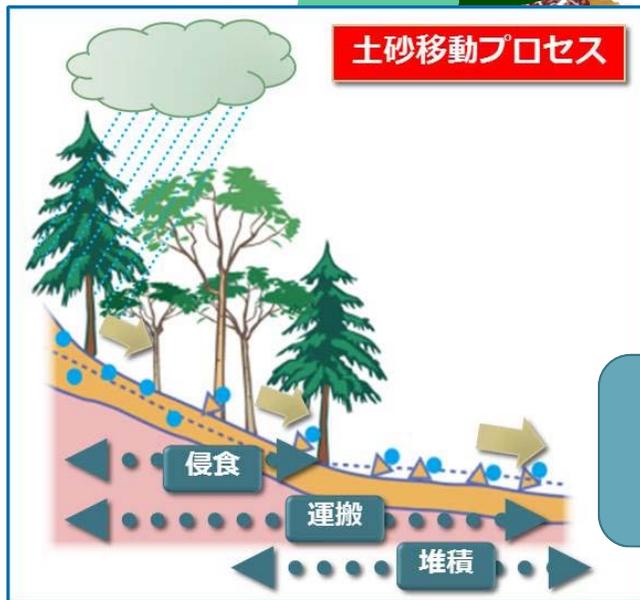


平常時

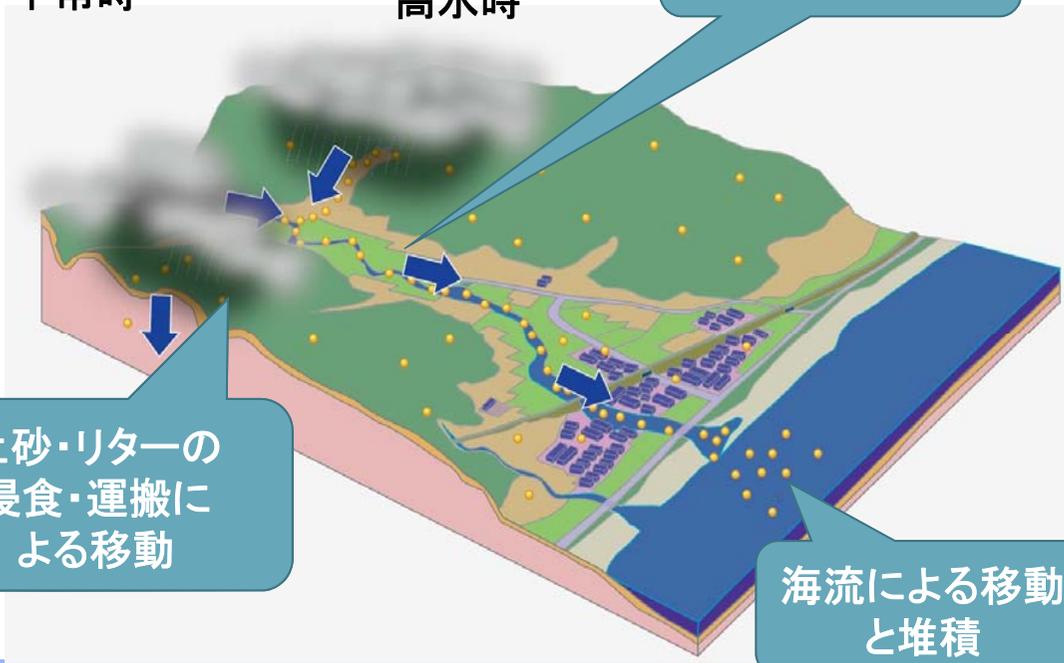


高水時

河川水流による  
移動と堆積



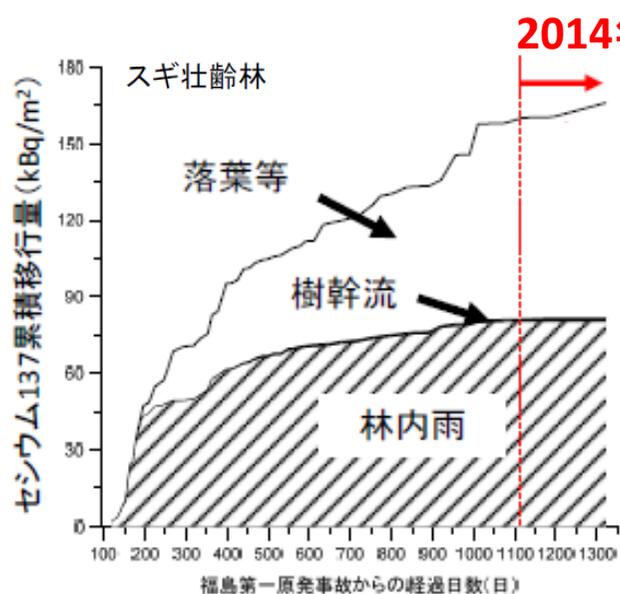
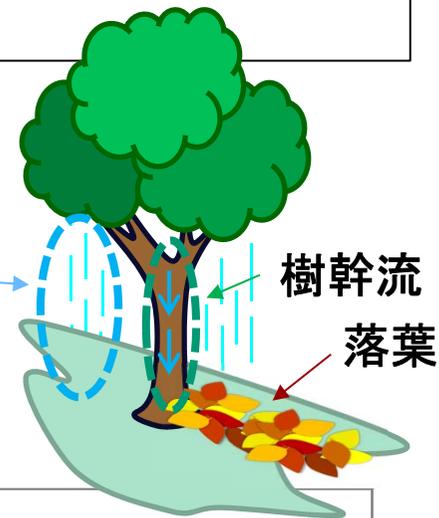
土砂・リターの  
侵食・運搬に  
よる移動



海流による移動  
と堆積

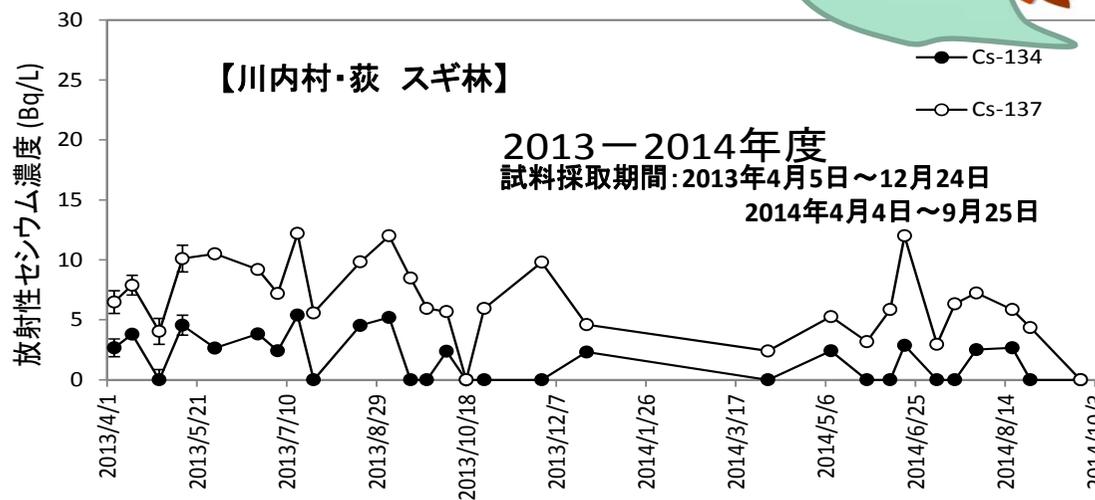
- 森林内のセシウムは、初期に林内雨、その後は落葉等によって樹冠から林床へ移動し、現在ではその大部分が林床に移動している

- 現在でも、樹幹流によりわずかな量が林床に移動している
- 樹幹流中のセシウム濃度は、減少傾向



樹冠から林床へ移動したセシウム137沈着量の時間変化

(林内雨、樹幹流、落葉等の移動プロセスに区分し、積上げ折れ線グラフで表した)



樹幹流中のセシウム濃度の時間変化 (Bq/L)

● セシウムの流域全体からの流出量は、斜面からの局所的な流出量と比較して、より少ない可能性がある

観測プロットにおける土砂・セシウム流出量・流出率：川内村荻地区スギ林の急傾斜地  
2013年11月19日～2014年10月20日

小水系スケールでの流出土壌・セシウム量：川内村荻地区  
2014年6月27日～9月30日(3か月間)

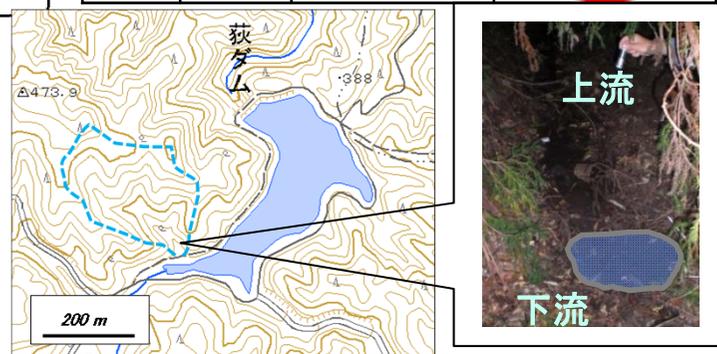


観測プロットのご概念図

A 土壌流出量(1年間、1m <sup>2</sup> あたり)	0.013 kg/m <sup>2</sup> ・年間
B 流出土壌のセシウム濃度( <sup>134</sup> Cs+ <sup>137</sup> Cs)	28 kBq/kg
C セシウムの流出量(A×B)	0.36 kBq/m <sup>2</sup> ・年間
セシウムの流出率	0.032%・年間
(参考：2013年度)	
セシウムの流出量	1.6 kBq/m <sup>2</sup> ・年間
セシウムの流出率	0.15%・年間

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

➤ 山地森林の斜面に設置した観測プロットから流出する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)から流出するセシウム量は1桁少ない

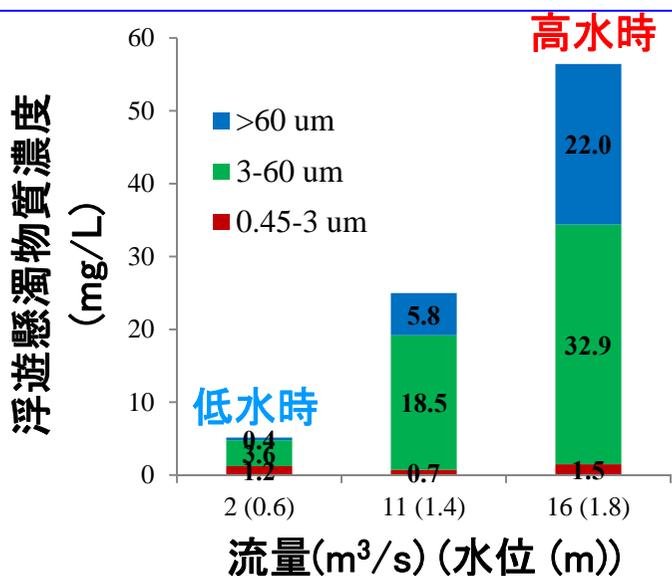


川内村荻地区小水系の河谷堆積物

● 大雨が降ると、河川水中の土砂粒子の増加とともに、懸濁態セシウムの濃度は増加する

- 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るが、この粒子にはセシウムが強く吸着されている(懸濁態)
- 高水時には溶存態のセシウム濃度はあまり変わらず、懸濁態のセシウム濃度だけが高くなる
- 請戸川の場合、高水時でもセシウム濃度は飲料水基準値(10 Bq/L)を下回っている。一方、低水時には、セシウムは溶存態が大部分であるが、その濃度は通常の検出限界(約1 Bq/L)より低い

## 請戸川下流域(請戸川橋)での観測結果(2014年)

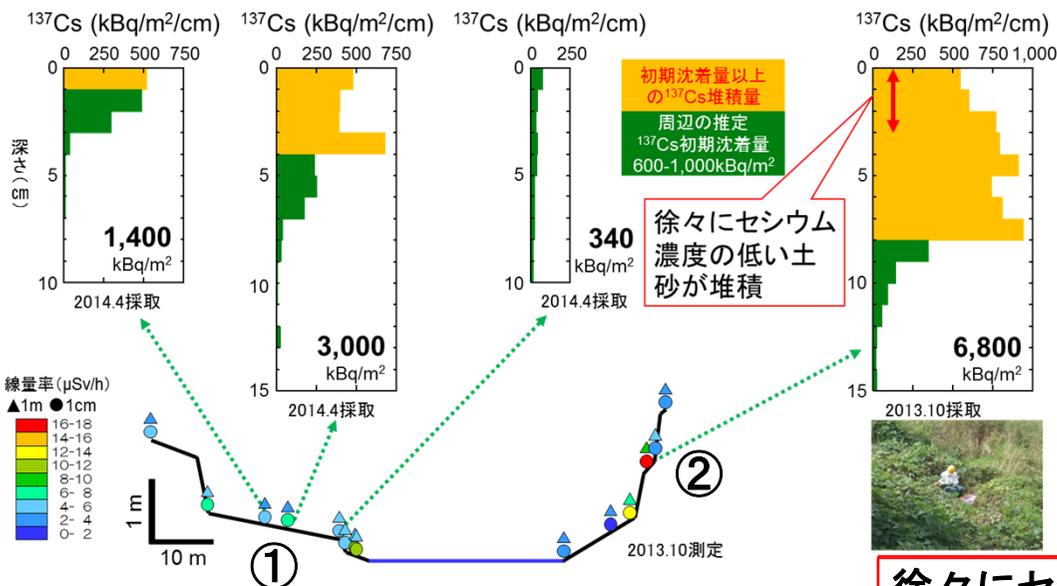


## 河川水中の溶存態および懸濁態セシウム濃度

河川流量	低水時	高水時
	2 m³/s	16 m³/s
溶存態 <sup>137</sup> Cs濃度	0.3 Bq/L	0.3 Bq/L
懸濁態 <sup>137</sup> Cs濃度	0.1 Bq/L	2.2 Bq/L
溶存態の割合	75%	12%
総 <sup>134+137</sup> Cs濃度	0.6 Bq/L	3.3 Bq/L

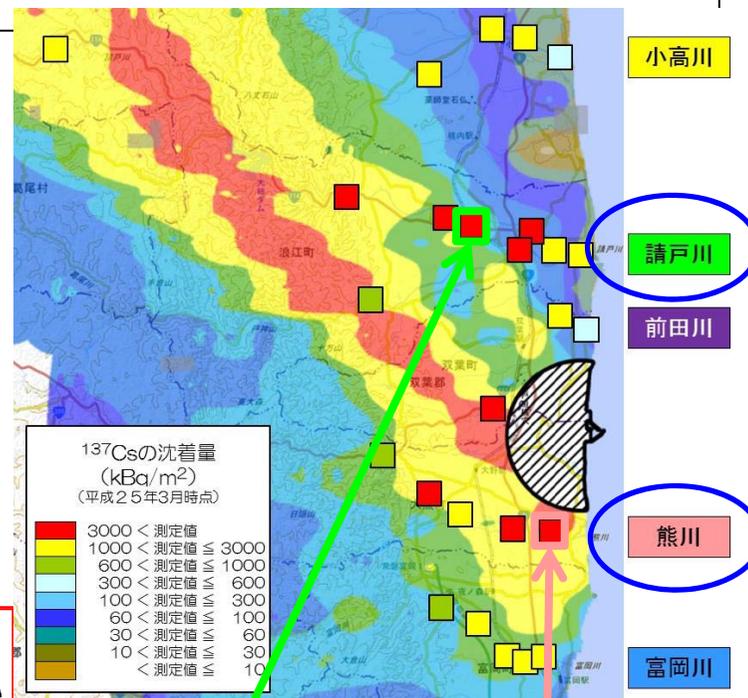
高水時の河川水中の浮遊懸濁物質濃度と粒径

●セシウムが堆積しやすい場所は植生が繁茂した高水敷に限られており、全体的に空間線量率は徐々に減少する傾向にある

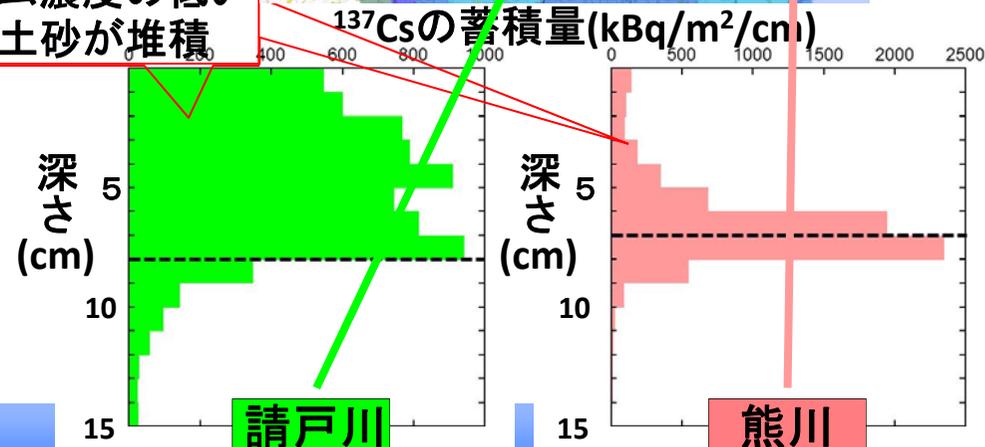


請戸川の河川敷(常磐線鉄橋付近)

- 年に数回水が到達する高水敷では、セシウムの堆積・浸食が繰り返される(①)
- 水がほとんど到達することのない高水敷に堆積したセシウムは、そのまま堆積し続けるが、場所は限られる(②)



徐々にセシウム濃度の低い土砂が堆積

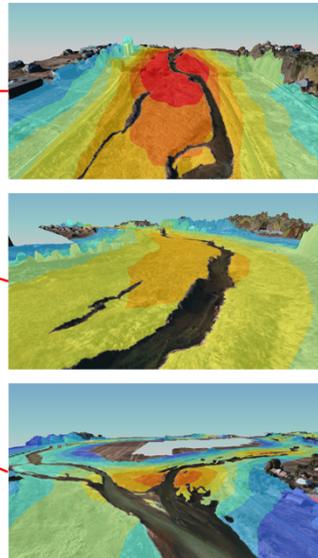
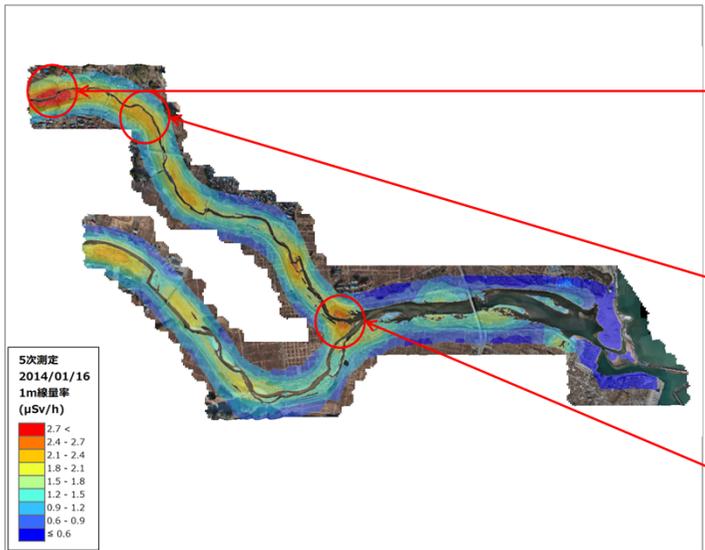


請戸川

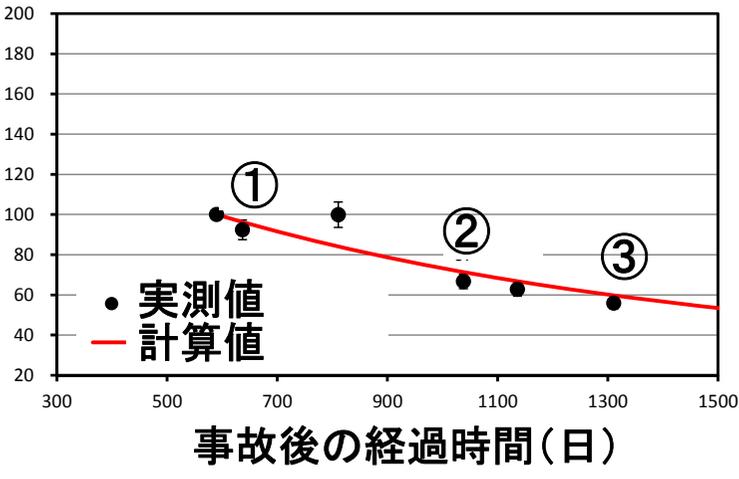
熊川



●無人ヘリによる継続的な調査でも河川敷の空間線量率は徐々に減少する傾向にある



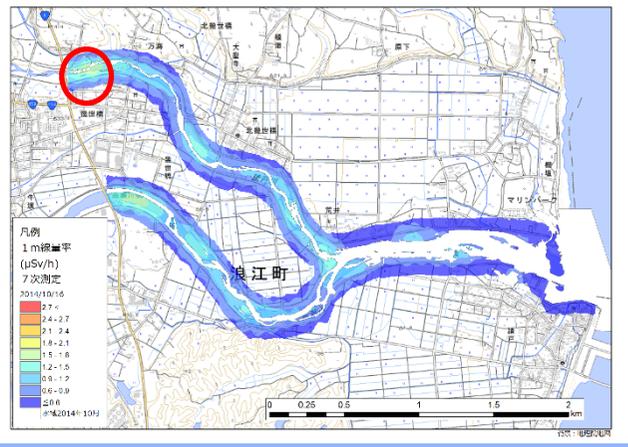
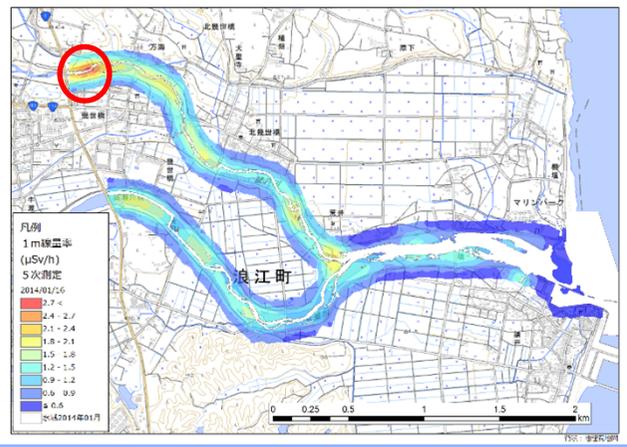
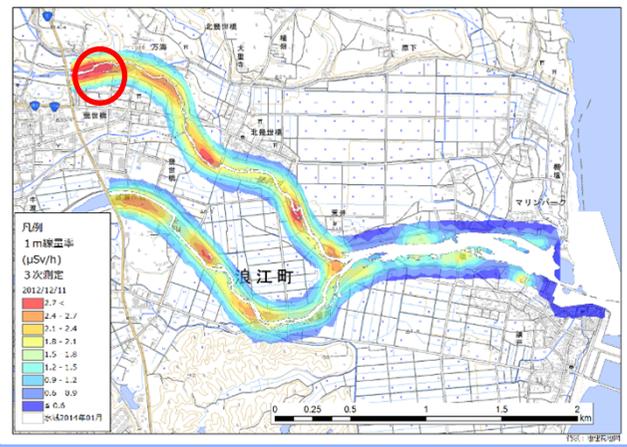
空間線量率(相対値)\*  
\*2012年10月25日の空間線量率との比



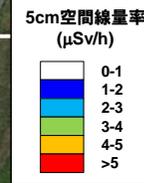
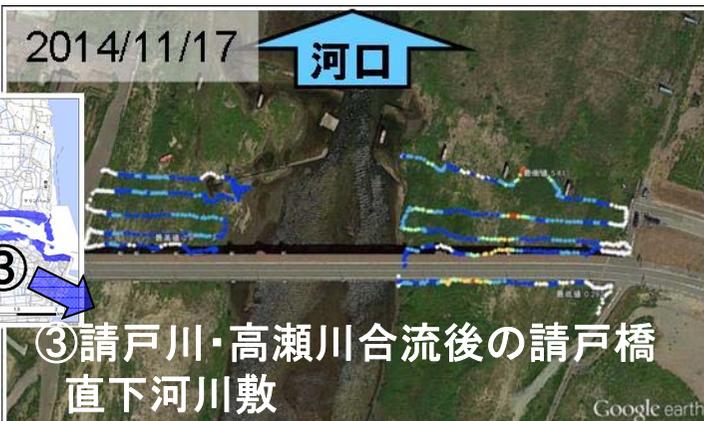
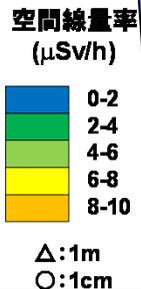
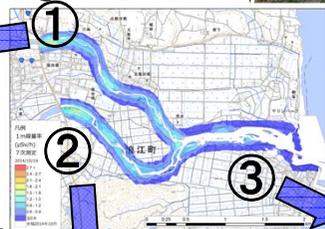
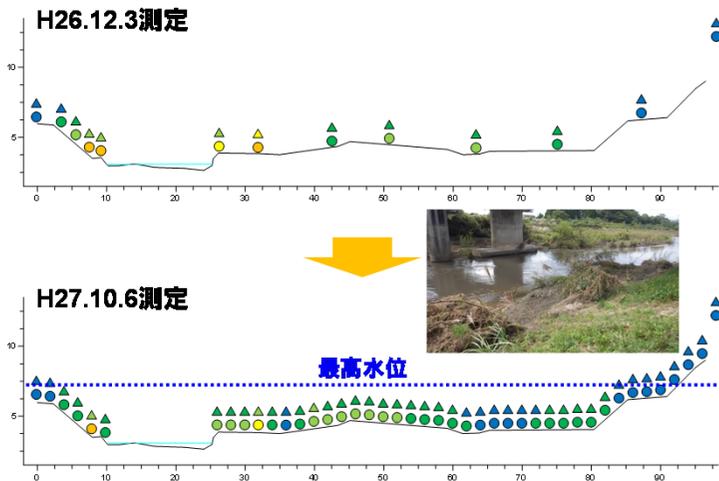
① 2012年12月11日

② 2014年1月16日

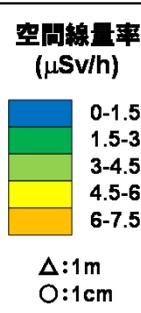
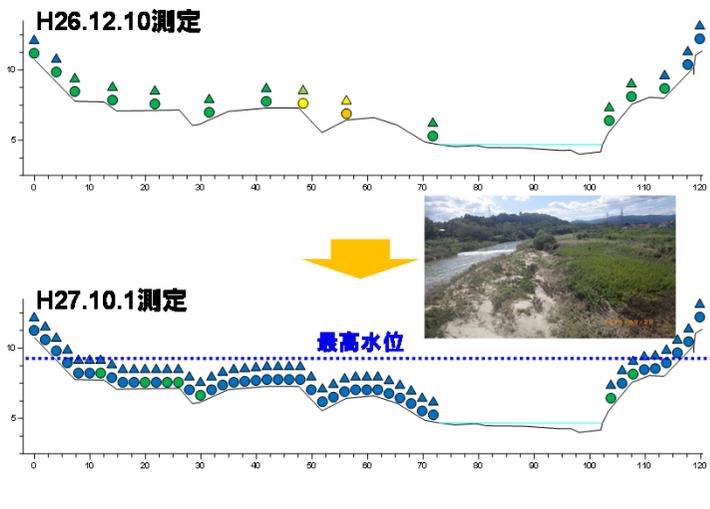
③ 2014年10月16日



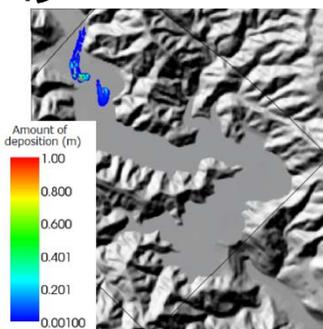
① 請戸川(請戸川橋直下河川敷): 上流にダムがあり、土砂の堆積量が少なかったため、線量率の増加は認められなかった



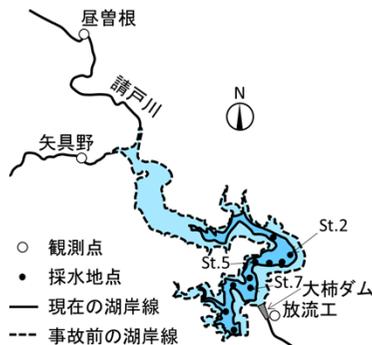
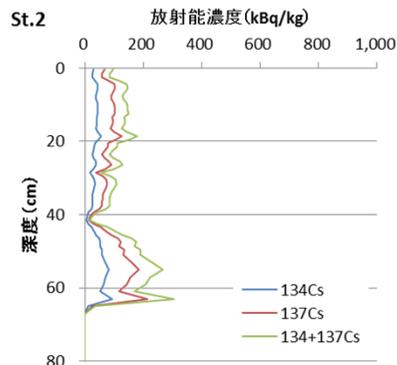
② 高瀬川(高瀬川橋直下河川敷): ダムがなく、セシウム濃度が低い上流の土砂が堆積したため、線量率は大きく低下



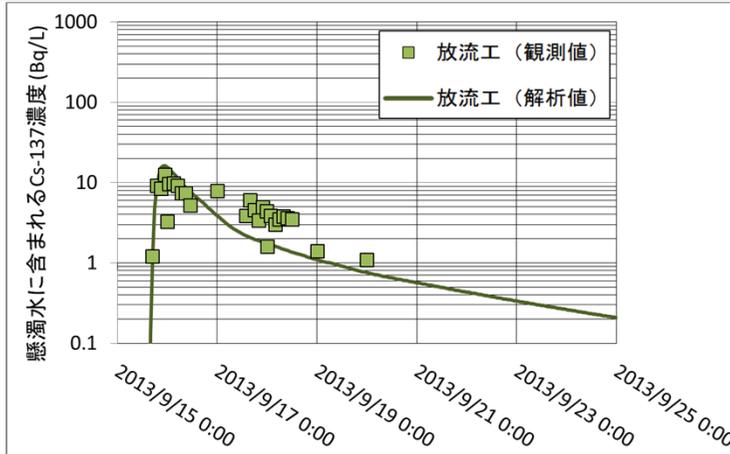
## 砂



## 底質深度分布(実測)

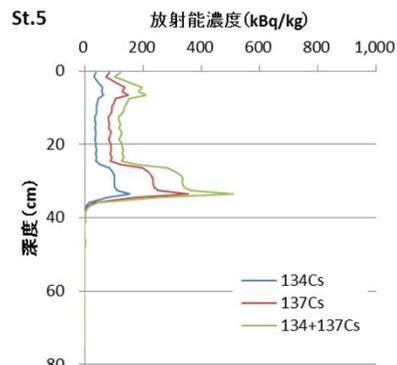
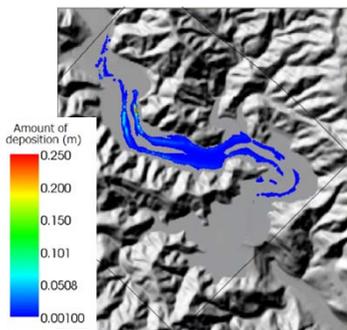


## 大柿ダム



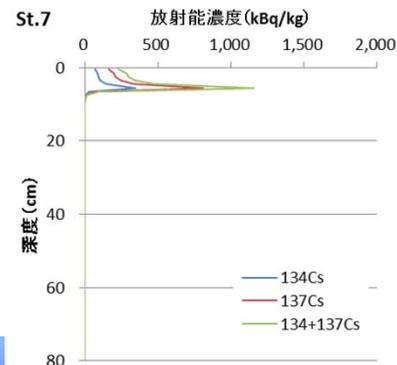
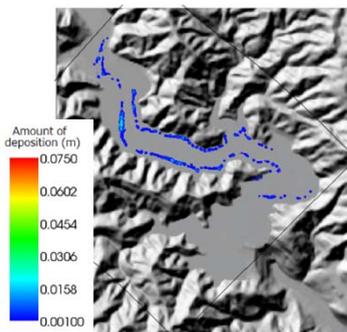
ダム出口における<sup>137</sup>Cs濃度(Bq/L)

## シルト



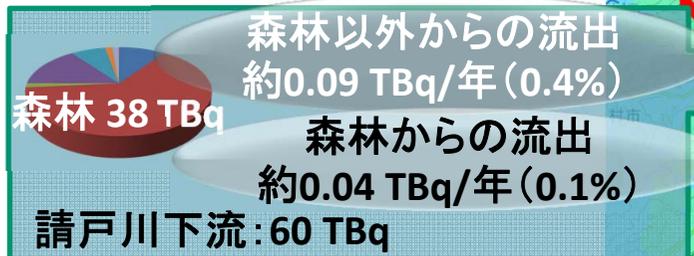
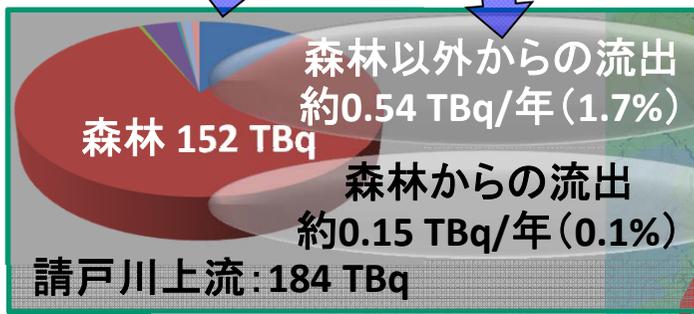
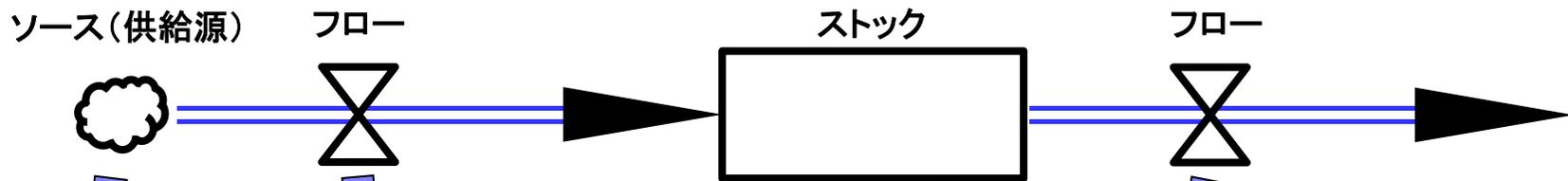
大雨時にダムに流入したセシウムの90%以上がダム湖底に堆積

## 粘土



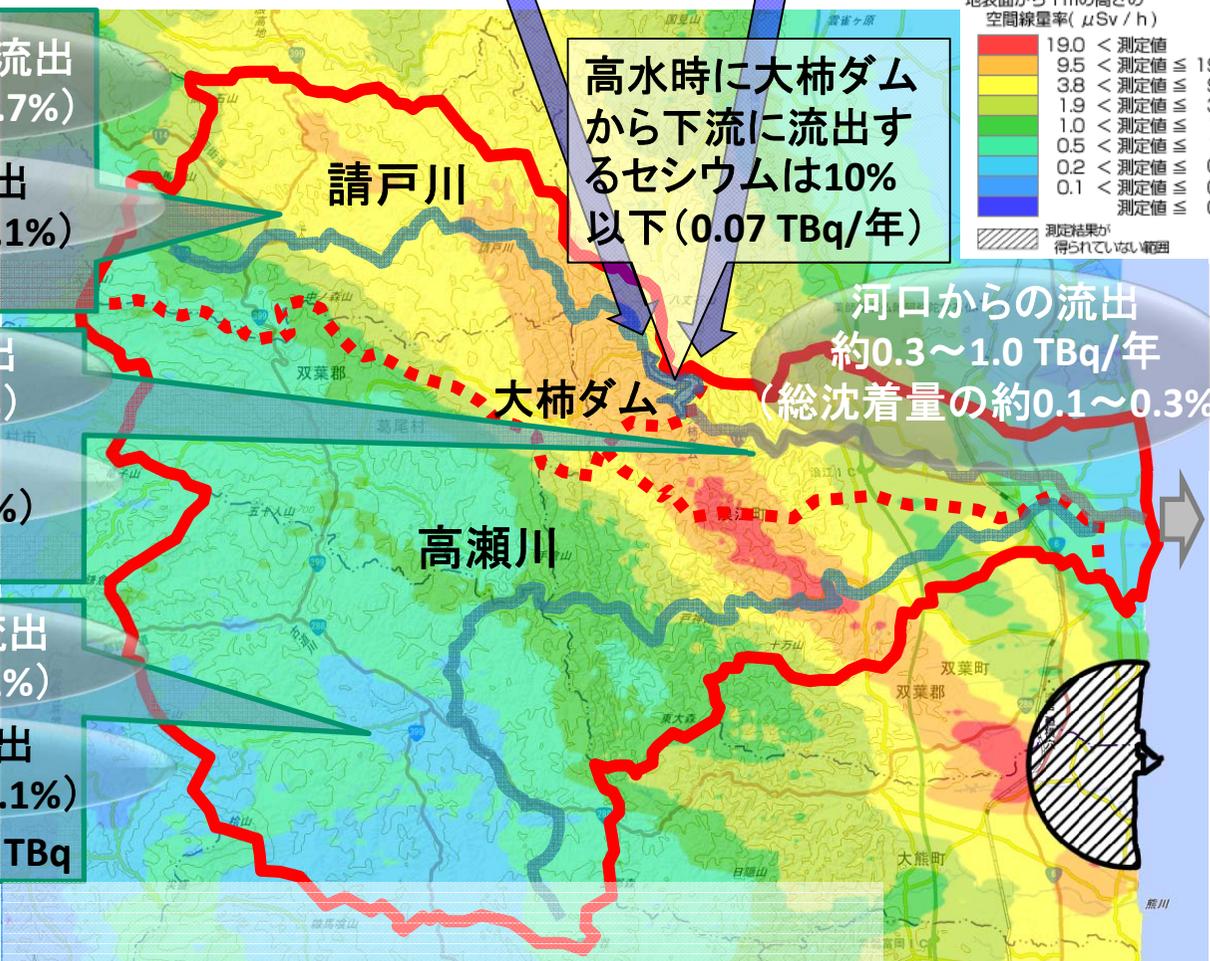
	低水位 (現在の状況)	高水位*
砂の流出率	0.0%	0.0%
シルトの流出率	4.5%	1.6%
クレイの流出率	54%	34%
<sup>137</sup> Csの流出率	9.0%	3.5%
シルト付着 <sup>137</sup> Csの割合	40%	18%
クレイ付着 <sup>137</sup> Csの割合	60%	82%

\*事故以前に管理していた水位



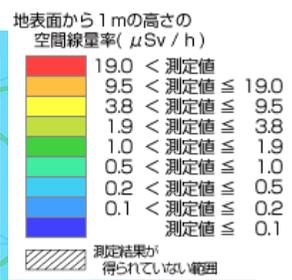
総沈着量: 371 TBq

- 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



高水時に大柿ダムから下流に流出するセシウムは10%以下 (0.07 TBq/年)

河口からの流出  
約0.3~1.0 TBq/年  
(総沈着量の約0.1~0.3%)

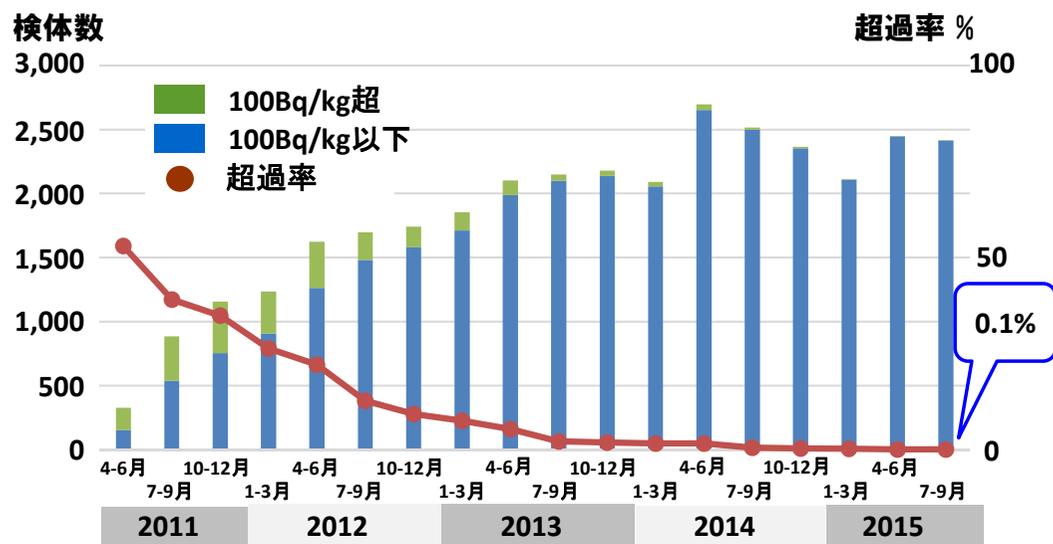


空間線量率マップ(2014年11月7日時点)

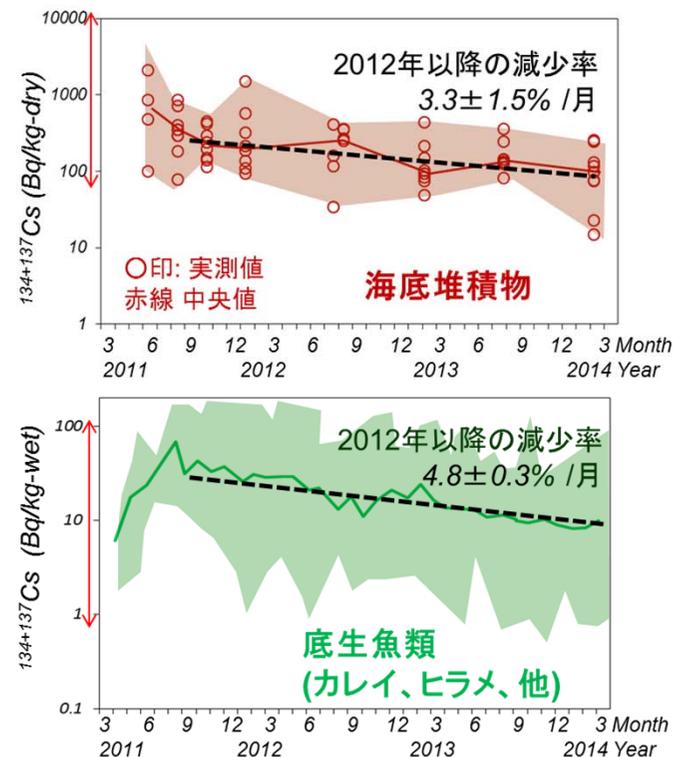


\*乾燥重量当たりのセシウム濃度

- 福島県の海産種については、時間の経過とともに濃度が低下
- 底生魚類中のセシウム濃度は、海底堆積物中のセシウム濃度と同様に時間とともに減少

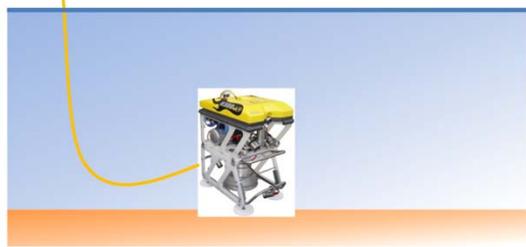


福島県の海産種の検査結果  
(3か月毎の100 Bq/kgを超える検体数と割合の推移)  
水産庁ホームページより



海底堆積物と底生魚類中のセシウム濃度の経時変化の比較  
Otosaka & Kobayashi, 2013+最新データ

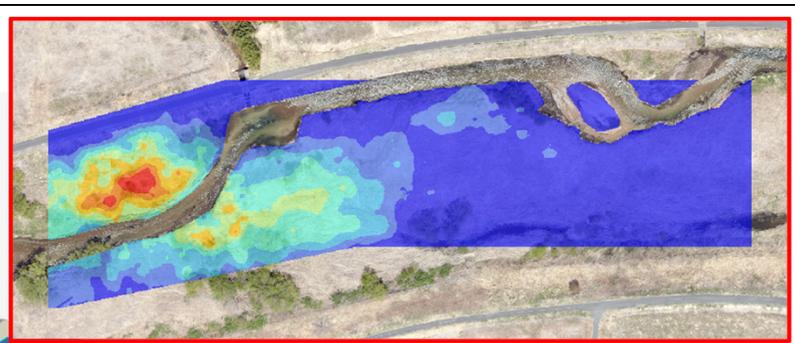
無人水中ロボット (ROV) による  
湖底堆積物濃度分布調査



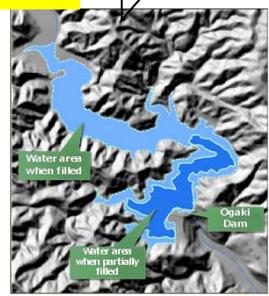
移動・蓄積の定量評価の信頼性確認



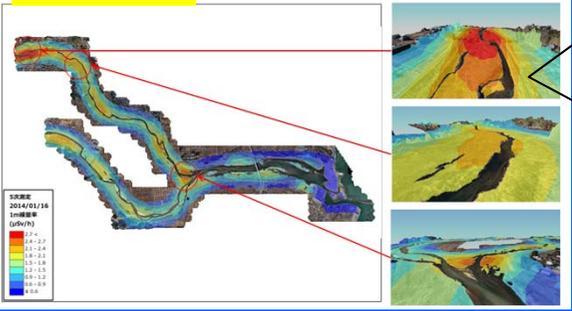
ドローン (μUAV) による  
河川敷や林床の濃度分布調査



ダム

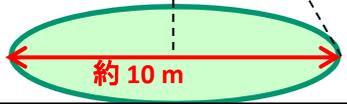


河川敷



速度: 1m/s

高度: 10m



約 10 m

ガンマカメラ搭載無人ヘリによる河川敷濃度分布調査

- ① 広域の空間線量予測
- ② 流域圏でのセシウムの移動と蓄積  
(フロー・ストック)の評価
- ③ 個人線量評価
- ④ 除染除去物の減容化

## ねらい

- 個人線量計等を用いて個々人の生活実態に即し、きめ細かい測定をすること
- 住民が帰還する前から、帰還後に想定される住民の個人線量の水準について把握しておくこと

参考)「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方(原子力規制委員会 平成25年11月20日)」

## アプローチ

$$E = \sum c \cdot D(p) \cdot t(p)$$

$E$ : 実効線量

$c$ : 空間の線量から実効線量への換算係数

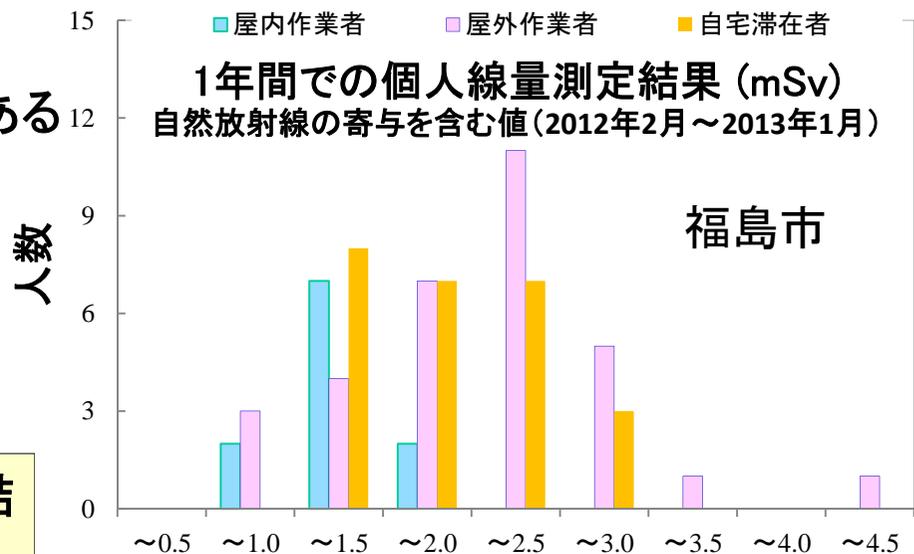
$D(p)$ : 地点 $p$ での空間の線量

$t(p)$ : 地点 $p$ での滞在時間

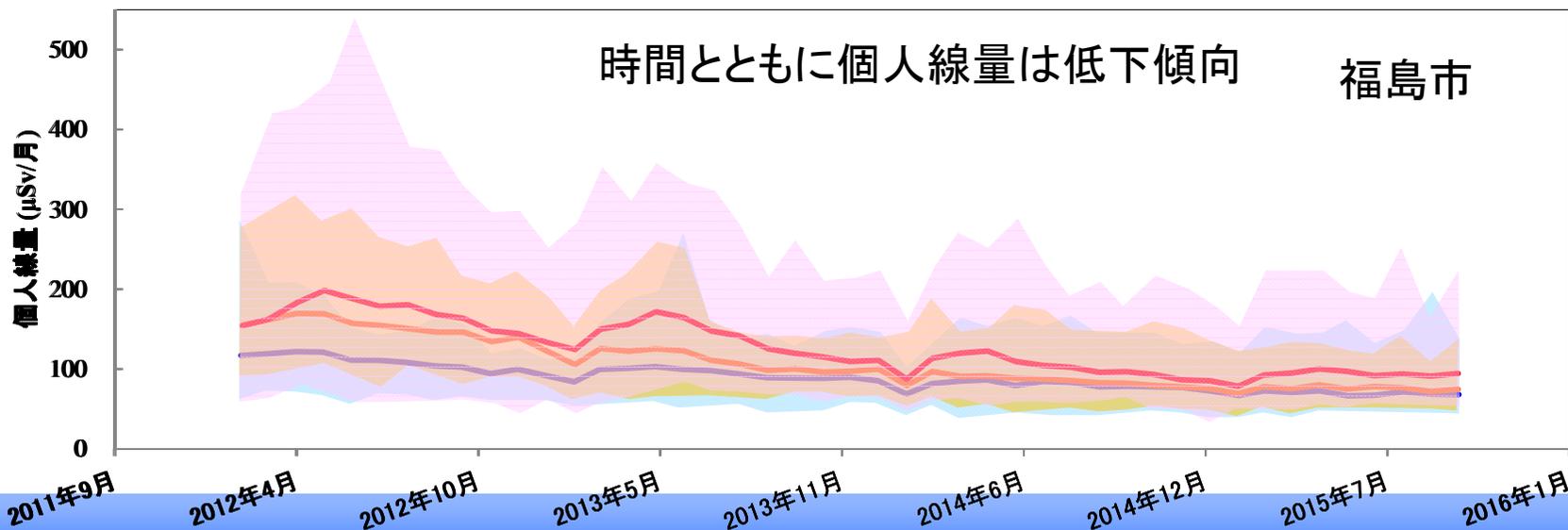
- 個人線量計による測定
- 空間線量率の測定による推定

- $\Sigma D(p) \cdot t(p)$ を小さな誤差で直接測定できる
- 居住してポケット線量計を携帯する必要がある
  - 2012年2月から開始(継続中)
    - 福島市、伊達市等の住民を対象に、屋内作業員、屋外作業員、自宅滞在者に分類し、ポケット線量計の値を記録

■ 個人線量の測定結果は国、自治体等に結果を提供、検証委員会等において活用



平均 → ■ 屋内作業員 ■ 自宅滞在者 ■ 屋外作業員



- 手順は簡易だが、不確実性が大きい
- 測定で得られた $D(p)$ が測定地点に依存し、広域では代表値を設定するのが困難
- 現実的な $t(p)$ の推定が必要
- $D(p)$ は時間にも依存する

## 現実的な $t(p)$ の推定が必要

### 生活習慣の違い



屋内作業者  
屋外作業者

- 職業に応じて、屋内外の滞在時間と滞在場所を考慮
- 作業内容による線量の変動

## $D(p)$ が測定地点に依存

### 屋内



- 屋内に滞在した場合、建屋による線量低減効果を考慮
  - 建屋在室、階層の違い

### 屋外



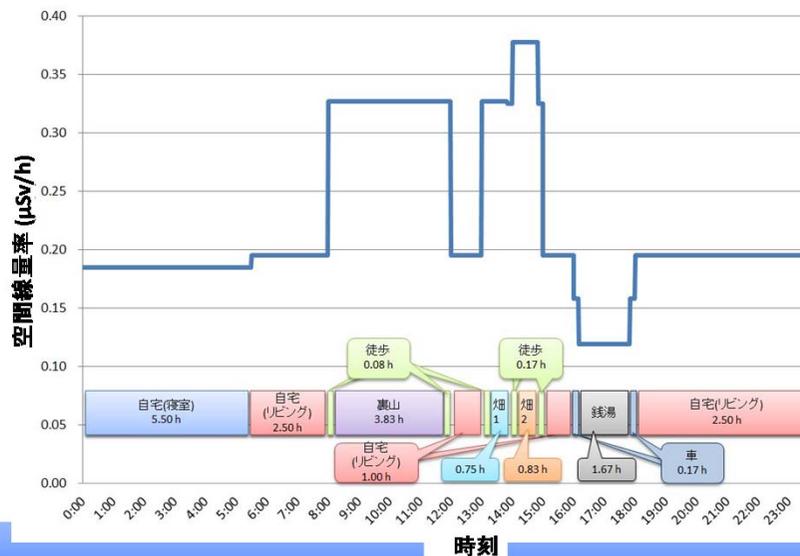
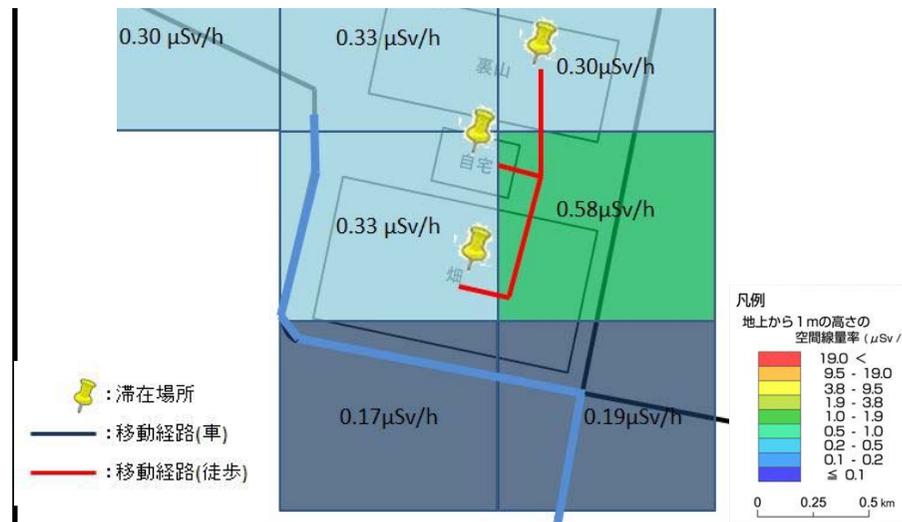
- 沈着表面による沈着量の違い
- ウェザリングによる洗浄効果の違い(ロケーションファクター)

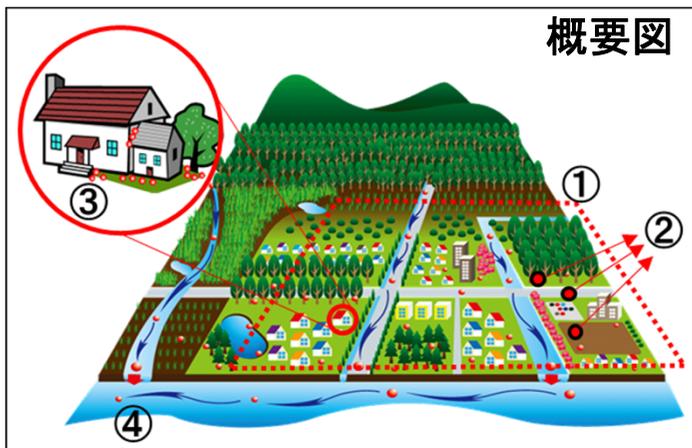
## ● 住民帰還に向けた参考情報として評価を実施し住民に説明

帰還後に予想される具体的な生活行動経路の聞き取り

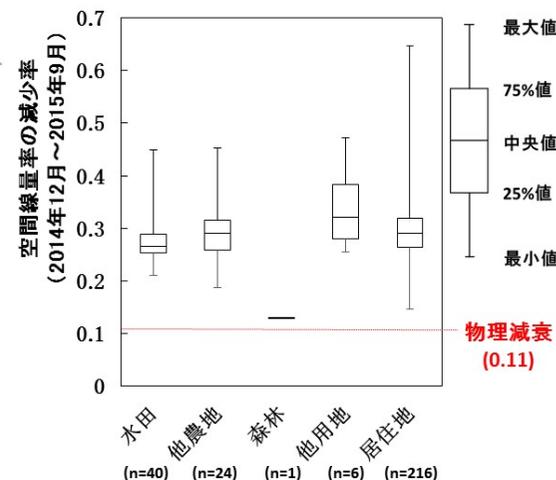
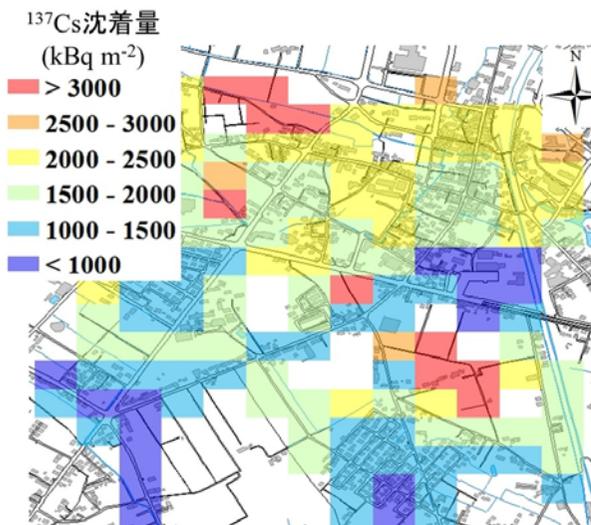
経路/場所ID	地点(部屋)	移動手段	開始時刻	終了時刻
1	自宅(寝室)		0:00	5:30
2	自宅(リビング)		5:30	8:00
3		徒歩	8:00	8:05
4	裏山		8:05	11:55
3		徒歩	11:55	12:00
2	自宅(リビング)		12:00	13:00
5		徒歩	13:00	13:05
6	畑		13:05	13:50
7		徒歩	13:50	14:00
8	畑		14:00	14:50
7		徒歩	14:50	15:00
2	自宅(リビング)		15:00	16:00
9		車	16:00	16:10
10	銭湯		16:10	17:50
9		車	17:50	18:00
2	自宅		18:00	0:00

行動経路に沿った詳細な空間線量率測定を実施(歩行サーベイ)

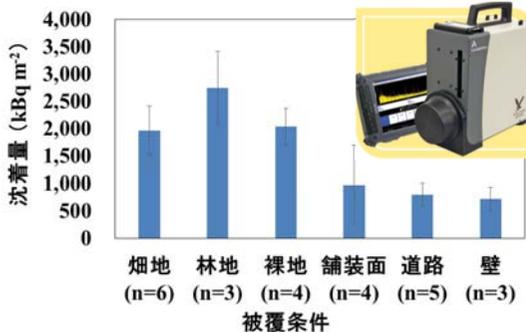




## ① 地域スケールでの空間線量率、<sup>137</sup>Cs沈着量の分布状況評価



## ② 被覆条件ごとの沈着状況評価

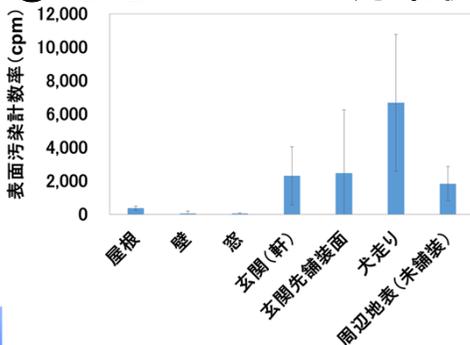


被覆条件と沈着・減少特性の評価

歩行サーベイによる分布評価と、土地利用ごとの空間線量率の減少

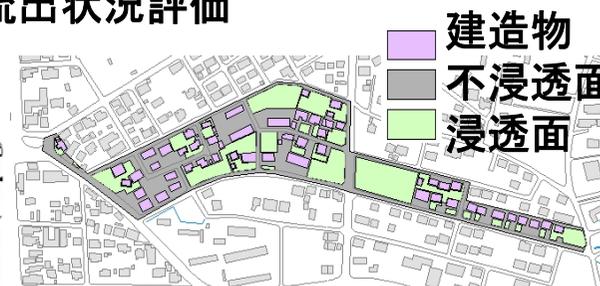
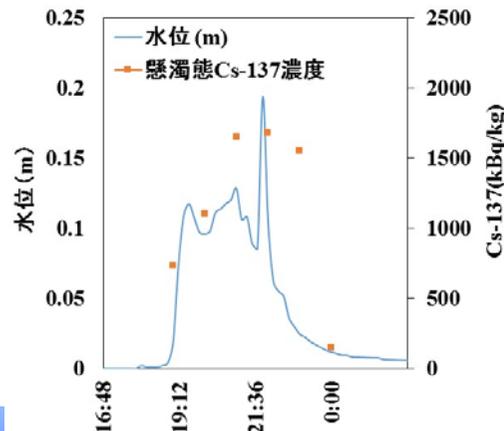
市街環境に適したサーベイ手法の検討、分布状況のマップ化、経時変化傾向の把握

## ③ 宅地レベルでの汚染状況評価



宅地構成要素ごとの汚染度の測定・定量化

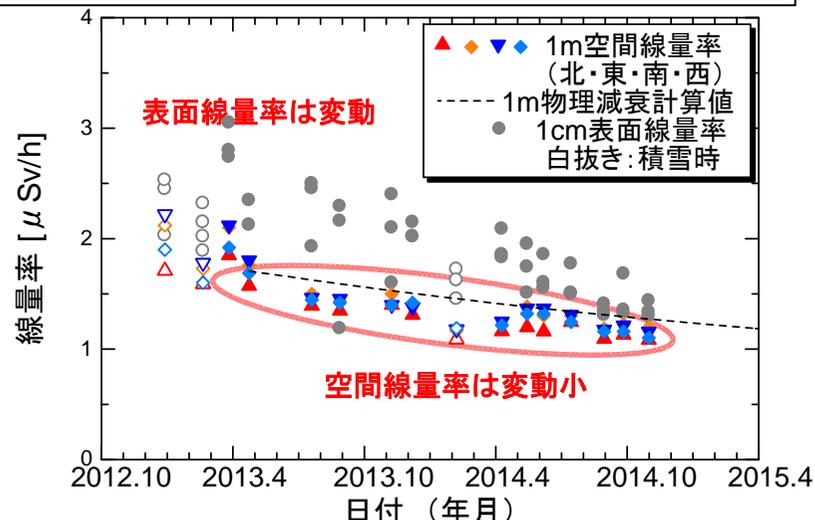
## ④ 雨水排水における核種流出状況評価



<sup>137</sup>Cs流出量・下流域への負荷量の評価(流出特性と土地利用の関係解析)

- 森林側からの土砂・枝葉等の流出によって、表面線量率が一時的に高くなる可能性はあるが、空間線量率には影響しない程度

- 表面線量率の変動は、側溝などに一時的に溜まった土砂や枝葉等に付着したセシウムが原因の一つ
- 一時的に表面線量率が高くなっても、空間線量率への影響は小さい
- 空間線量率、表面線量率とも、概ね物理減衰相当の減少傾向を示す

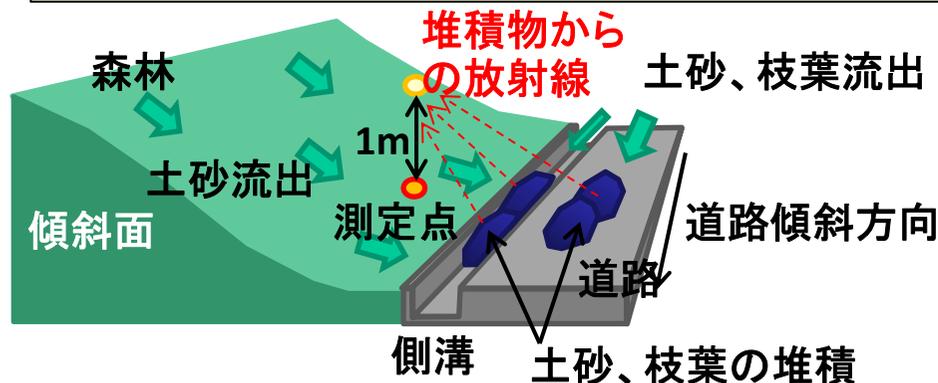


斜面下端付近での線量率の時間変化の例  
(除染モデル実証事業対象地区; 川内村貝の坂)

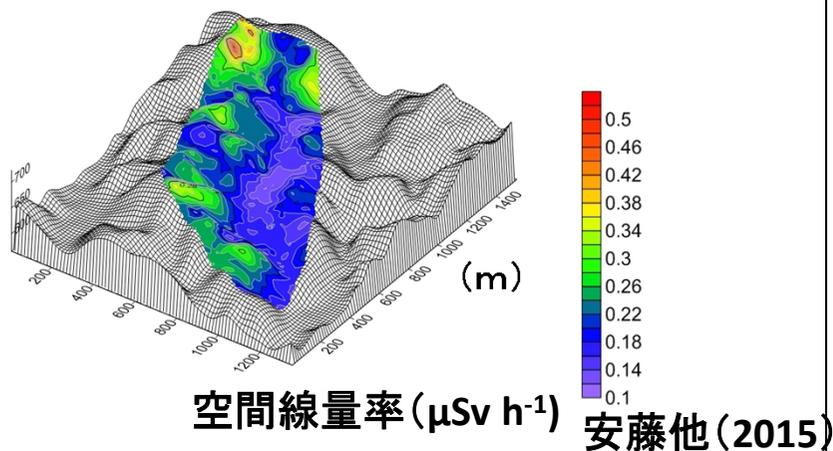
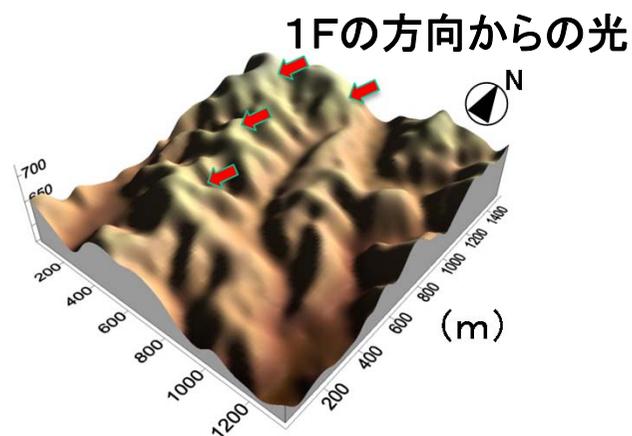


線量率測定の様子

土砂移動、堆積状況、放射線影響のイメージ(推測)

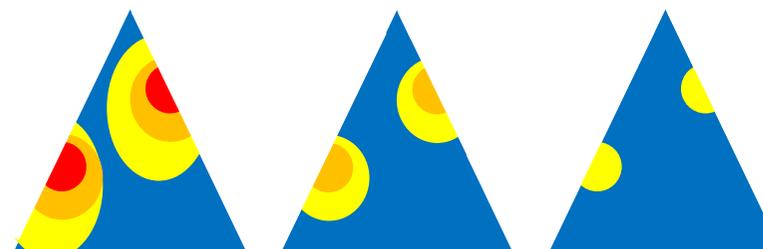


沈着時の風向きや降雨・降雪の有無も影響するものの、1Fからのプルームとの関係を理解しておくことは、森林を適切に管理するために役立つ



1Fからのプルームと沈着量分布との関係を踏まえたゾーニングに応じた維持管理方策\*の優先順位づけ

ゾーニングのイメージ



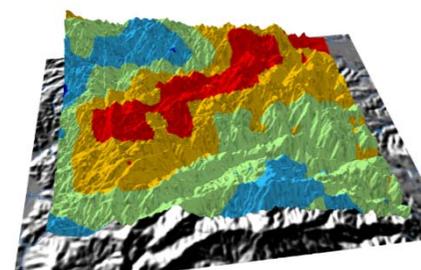
現在

10年後

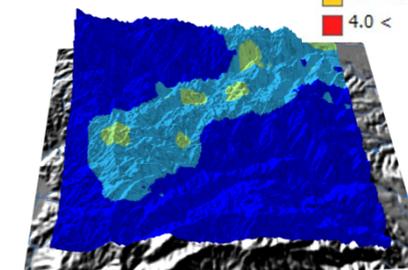
30年後

\*間伐等の森林整備と放射性物質に対処するための対策(空間線量率等の調査、枝葉処理、丸太柵工等による拡散抑制対策等)

航空機モニタリングデータの変化傾向を外挿し、将来を予測



2011年11月

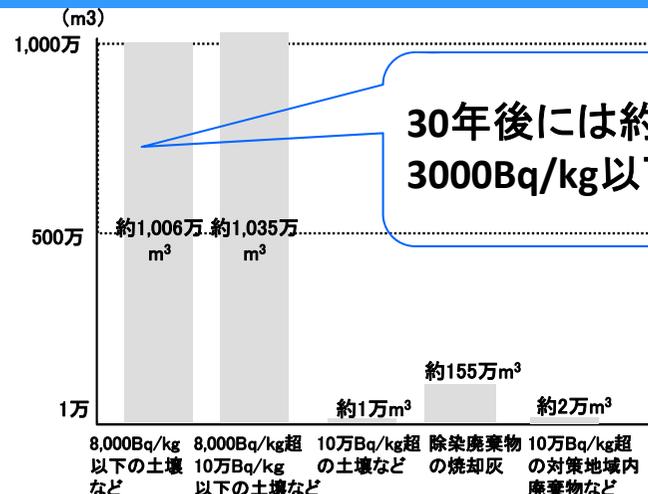


事故後5年経過時を推定

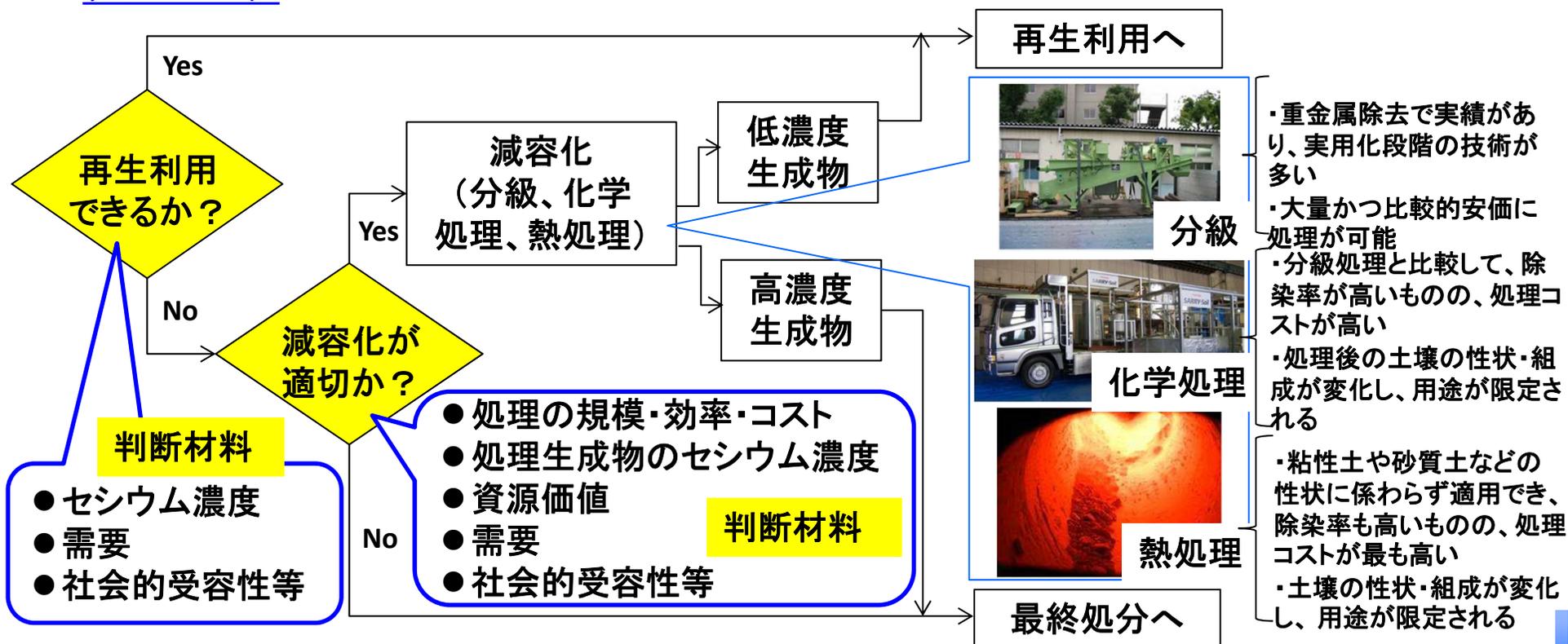
- ① 広域の空間線量予測
- ② 流域圏でのセシウムの移動と蓄積  
(フロー・ストック)の評価
- ③ 個人線量評価
- ④ 除染除去物の減容化

## ねらい

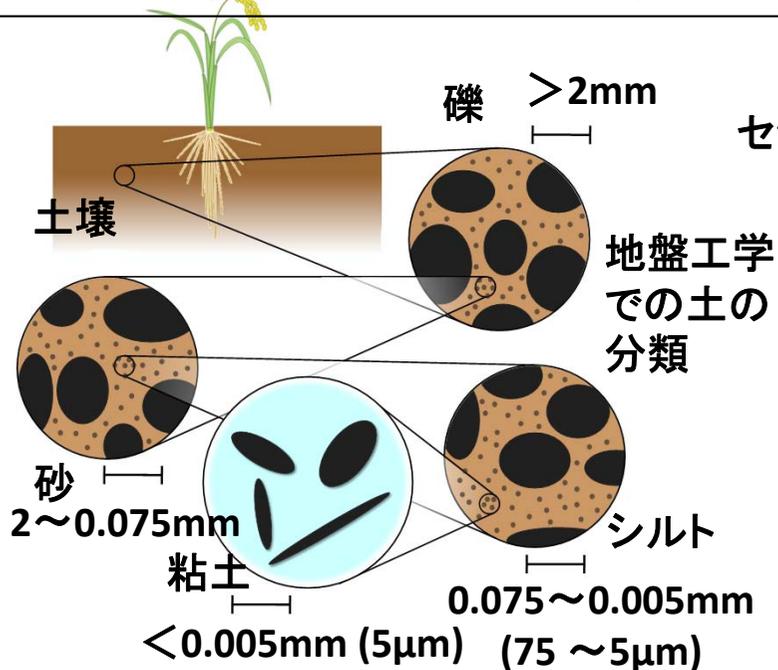
- 除去土壌及び焼却灰を対象に、各種の減容技術を用いて放射能濃度の低いものと高いものに分け、低いものを再生資源とすることで、最終処分すべき量を減らす



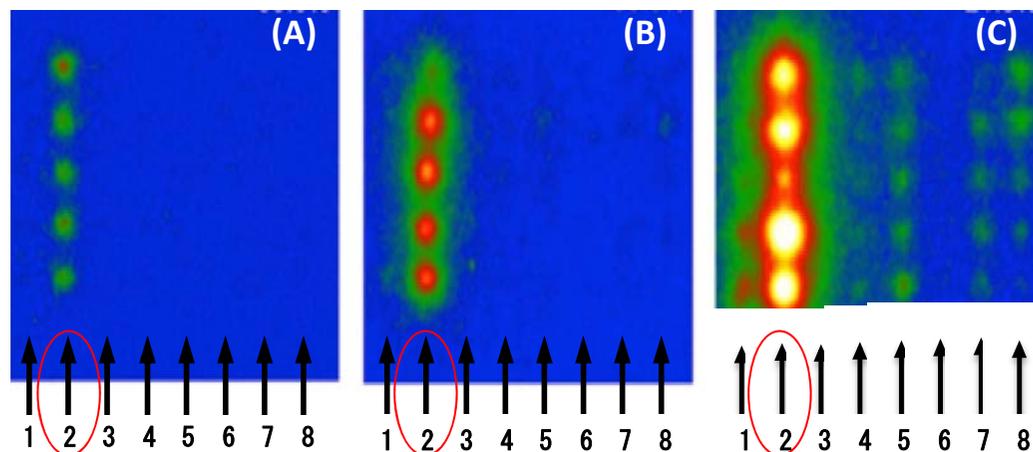
## アプローチ



土壌中のセシウムは、粘土鉱物、特に風化雲母類粘土鉱物に主に吸着している



セシウム水溶液中で土壌に含まれる鉱物\*\*を共存させた吸着実験(イメージングプレートで感光した状態); Mukai 他(2015)



粘土鉱物がセシウムを選択的に吸着

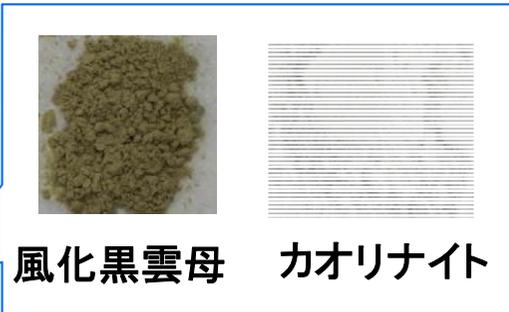
\*吸着実験に使用した溶液中の初期放射性セシウム量; (A)0.185Bq, (B)1.85Bq, (c)18.5Bq

\*\*1:黒雲母, 2:風化黒雲母, 3:カオリナイト, 4:ハロサイト, 5:イライト, 6:モンモリロナイト, 7:アロフェン, 8:イモゴライト

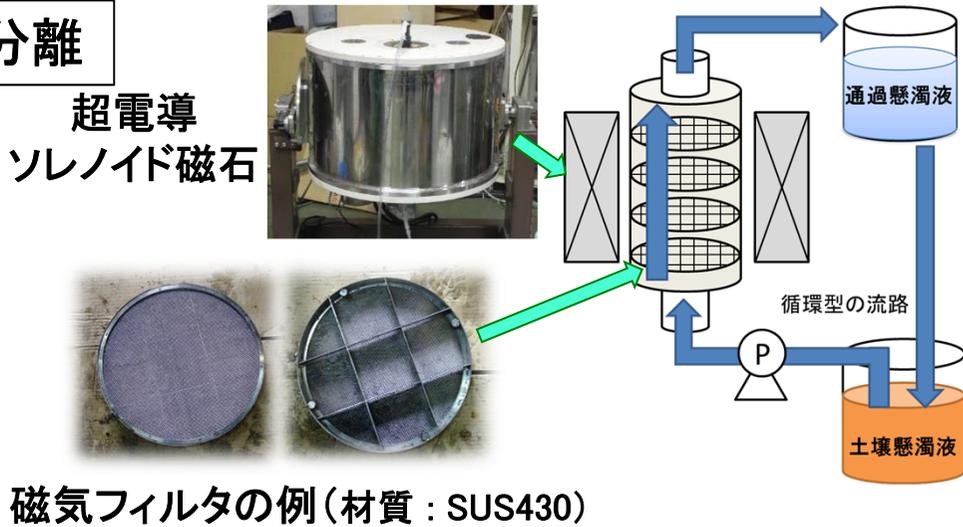
## 磁気力を用いて風化黒雲母を選択的分離



土壌懸濁液(分離前)

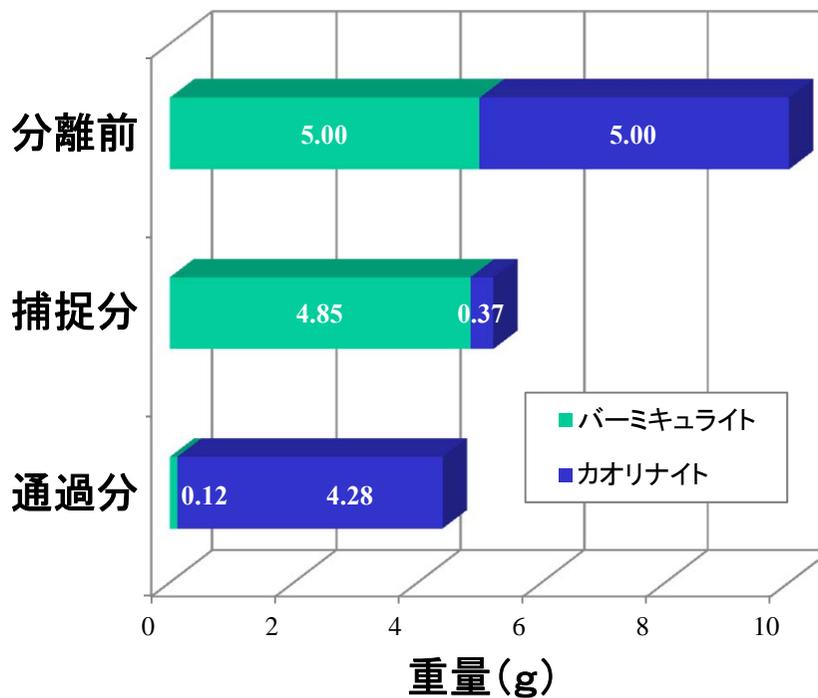


風化黒雲母    カオリナイト



通過液

捕捉液



フィルターに捕捉された風化黒雲母(バーミキュライト)は投入量の97%

- 走行サーベイ等のデータに基づき、過去の空間線量率変動の傾向から将来の空間線量率変動を外挿し、30年後までの広域の空間線量率分布マップを作成
- 浜通り8河川流域の調査を実施中。今回、請戸川水系を対象として、森林から河川、ダム、河口域へと至るセシウムの移動(フロー)と蓄積(ストック)を評価
- 個人線量計による測定と生活行動経路に沿った空間線量率測定による推定により、外部被ばくによる個人線量を評価
- 除染除去土壌中の粘土鉱物へのセシウムの吸着特性の理解を踏まえ、減容化技術の基礎研究として磁気分離による手法を例示

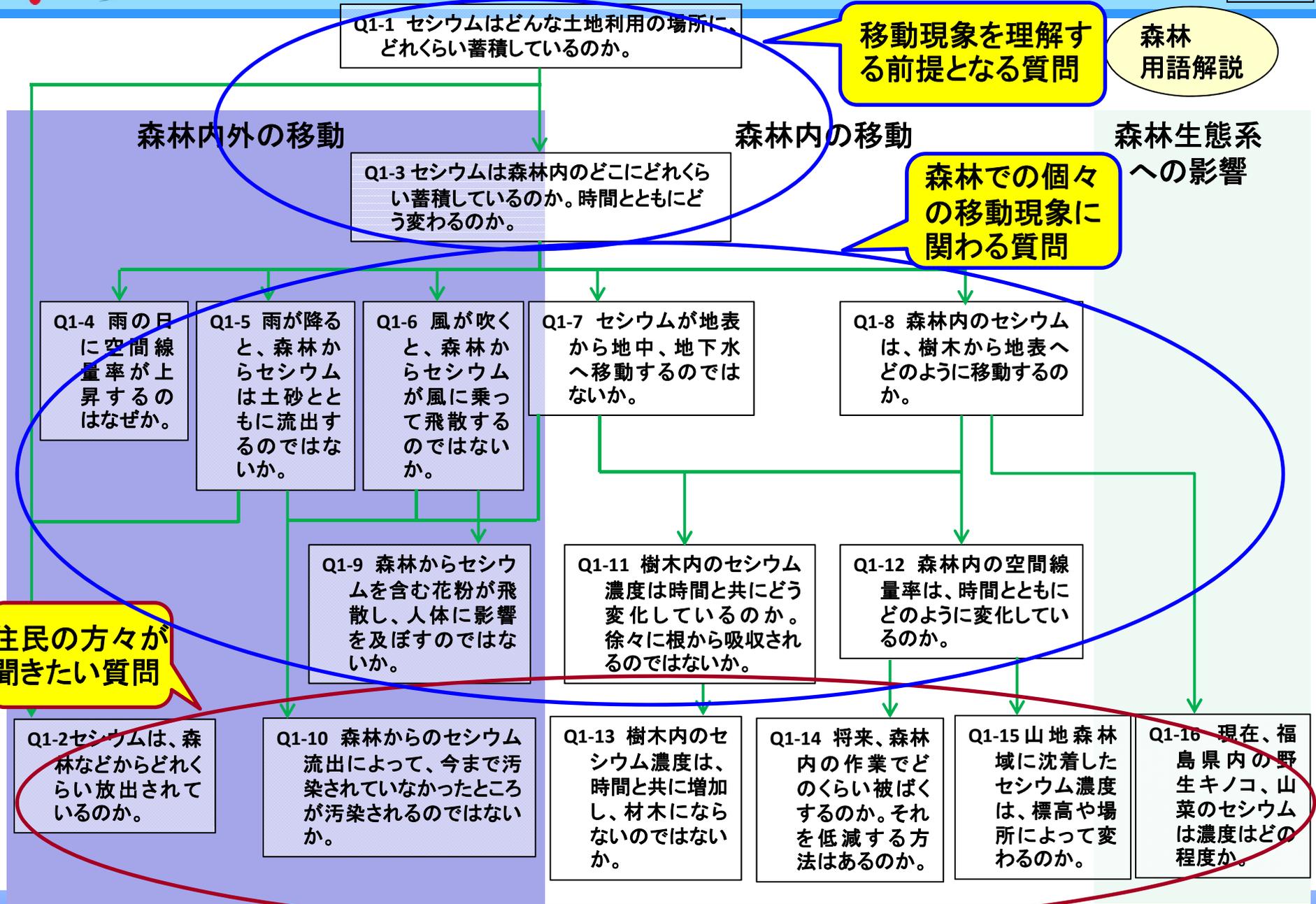
- 環境創造センターを中心とする環境回復研究の連携推進と調査研究成果の一元的整理
- 調査研究で得られた知識の構造化とわかりやすい提示を踏まえた理解促進
- 人材育成への活用と国際的な情報発信
- 環境回復の取り組みで得られた知見・開発した技術の廃炉推進への活用

森林用語解説

移動現象を理解する前提となる質問

森林での個々の移動現象に関わる質問

住民の方々が聞きたい質問





ご清聴ありがとうございました。