

福島県における放射性核種の環境中移動調査・研究 ～福島長期環境動態研究(F-TRACE)プロジェクト～



LONG-TERM ASSESSMENT OF TRANSPORT OF RADIOACTIVE
CONTAMINANT IN THE ENVIRONMENT OF FUKUSHIMA

福島長期環境動態研究プロジェクト



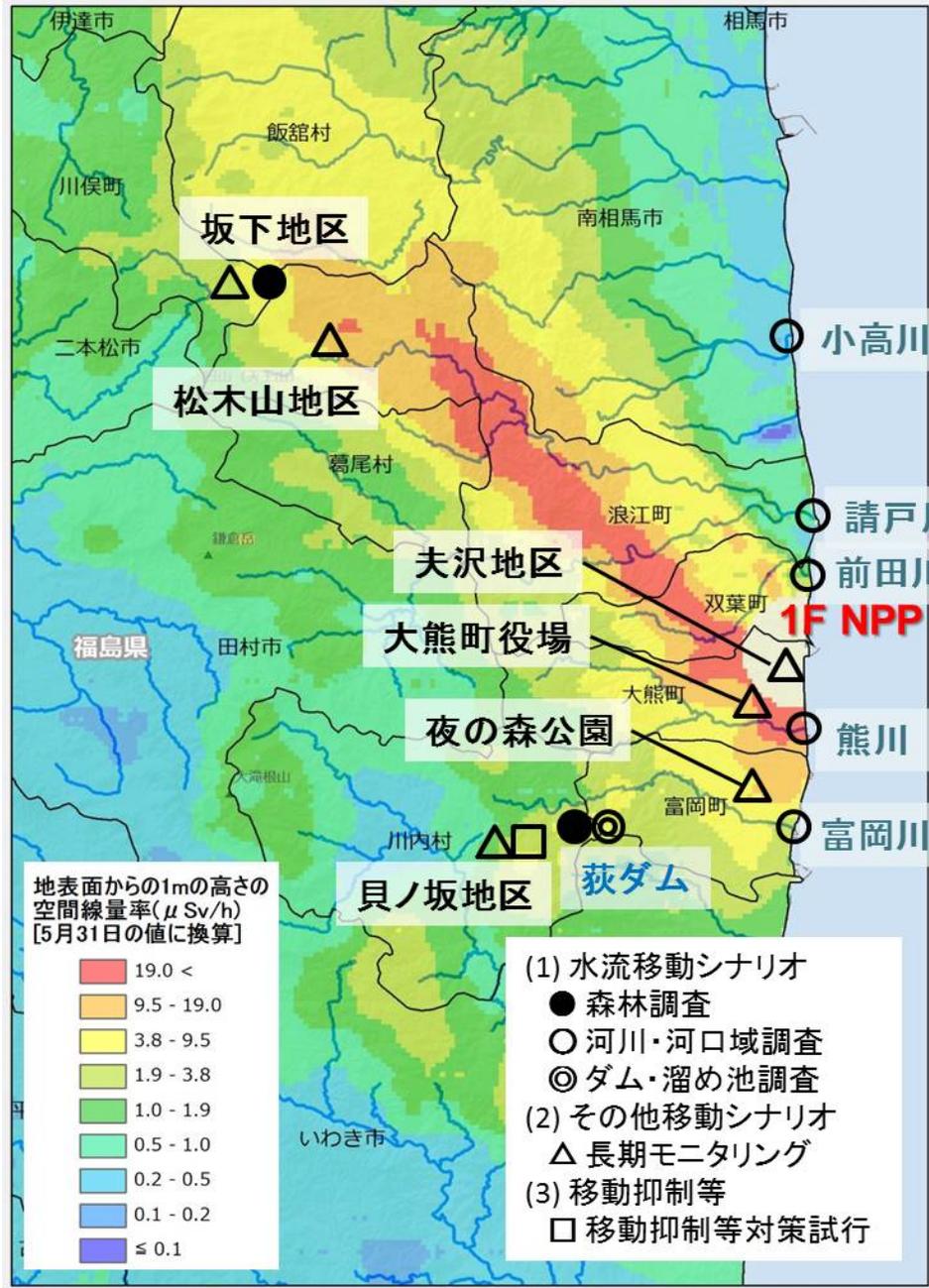
福島長期環境動態研究プロジェクトの概要

目的

- 生活圏等への放射性セシウムの移動挙動を明らかにし、移動予測モデルを開発する。
- 被ばく線量及び移動挙動評価結果を考慮した移動抑制等の対策を提案する。
- 長期調査データ、移動予測、線量評価、抑制対策を包括した評価システムを構築する。



当面の研究対象地域



水流による移動: 浜通り側5河川を中心

- ・請戸川(最重点河川, 高瀬川を含む)
- ・小高川
- ・前田川
- ・熊川
- ・富岡川(荻野沢川を含む)
- 高線量地域から低線量地域に流れる
⇒ 下流への放射性Csの動きを検知しやすい
- 規模が小さく, モデル化・検証が比較的容易

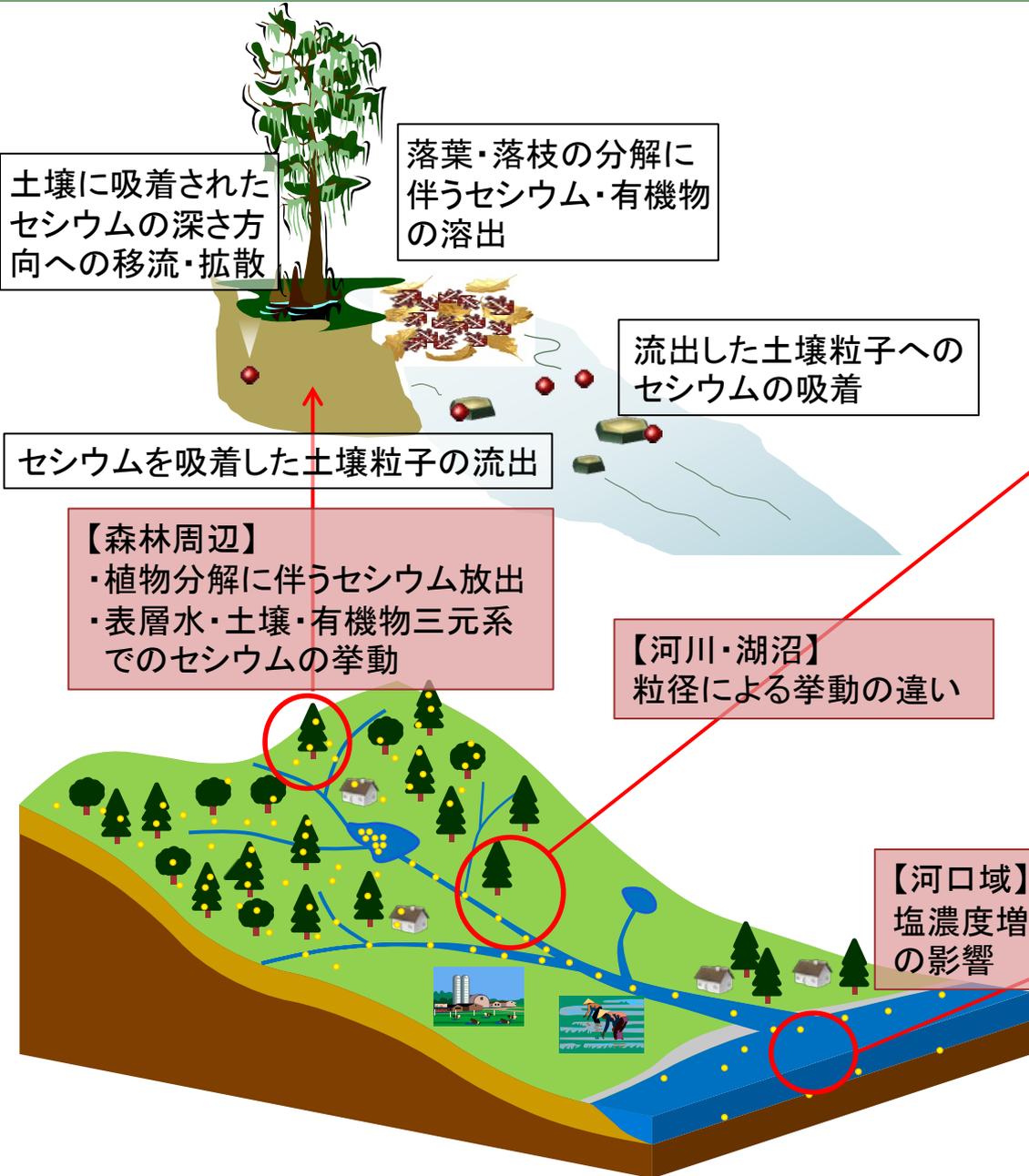
その他の移動: 除染モデル事業実施区域

- ・山地部: 川俣町(坂下地区)
川内村(貝ノ坂地区)
- ・平地部: 大熊町(役場, 夫沢地区)
富岡町(夜の森公園)
浪江町(松木山地区)
- 高線量地域の中に低線量地域が存在
⇒ 放射性Csの流入を検知しやすい

移動抑制等

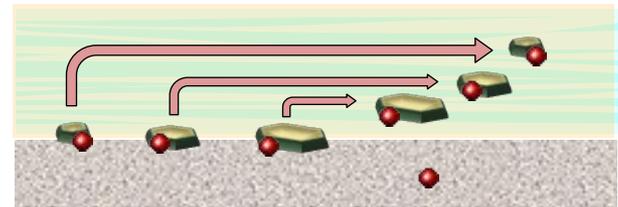
- ・重要な放射性Cs移動経路に着目
- ・固定・捕集・集積等の移動抑制を試行

水流によるセシウムの移動で想定される主な現象



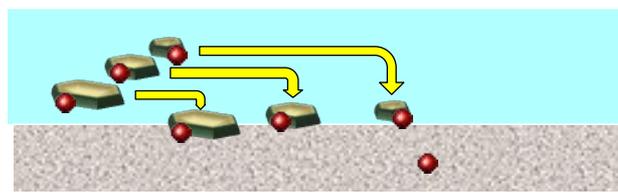
◆流れが速い場合:再浮遊が支配的

小さい粒子ほど再浮遊しやすい

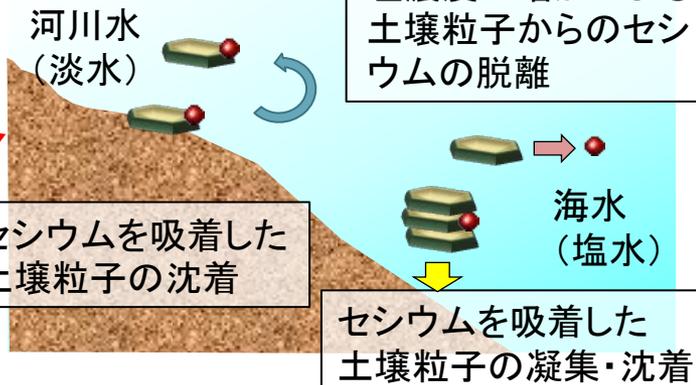


◆流れが遅い場合:沈着が支配的

大きい粒子ほど沈着しやすい



塩/淡水混合, 海流等によるセシウムを吸着した土壌粒子の移動



水流による移動に関する調査①：森林周辺

表層水観測



樹幹流・地表流量,
土壌水分量, 濁度

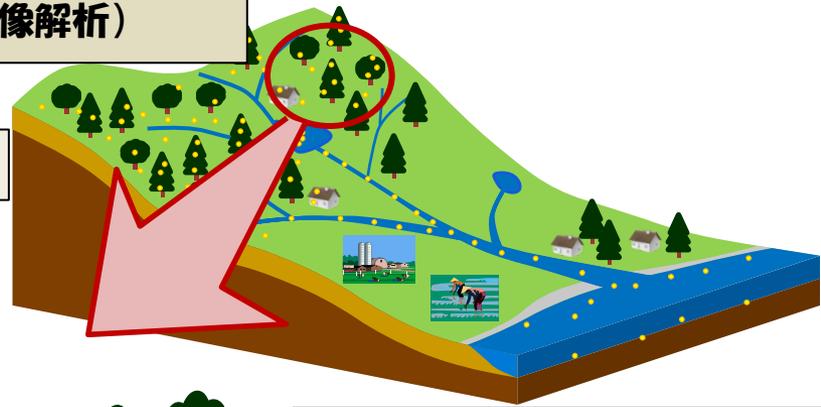
気象観測



降水量, 気温

基礎情報
地形分布, 表土分布, 植生分布等
(既存情報, 衛星画像解析)

予備的な調査

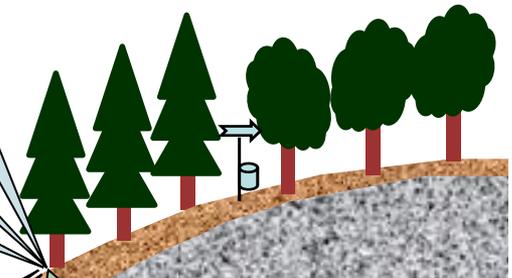


放射線モニタリング



線量率, 表面密度

定常的な観測



非定常的な事象前後での測定・採取

分析・室内実験

水試料

- セシウム・有機物の濃度・化学種の分析
- 浮遊懸濁物質の濃度・粒径分布・鉱物組成の分析
- 浮遊懸濁物質とセシウムの吸着・脱離実験

植物, リター層



厚さ・層構造
試料採取

表層水



流路観察
試料採取

土壌



厚さ・層構造
スクレイパープレートを用いた
深さ別の試料採取

土壌

- 粒径分布・鉱物組成の分析
- セシウムとの吸着・脱離実験

植物・リター層

- セシウム・有機物の濃度・化学種の分析
- 植物・リター層の分解とセシウム・有機物の溶出実験

水流による移動に関する調査②:河川・湖沼・河口

放射線モニタリング



線量率, 表面密度

気象観測



降水量, 気温

基礎情報

地形分布, 表土分布, 植生分布, 土地利用状況等(既存情報, 衛星画像解析)

地形調査



河口域水・堆積物

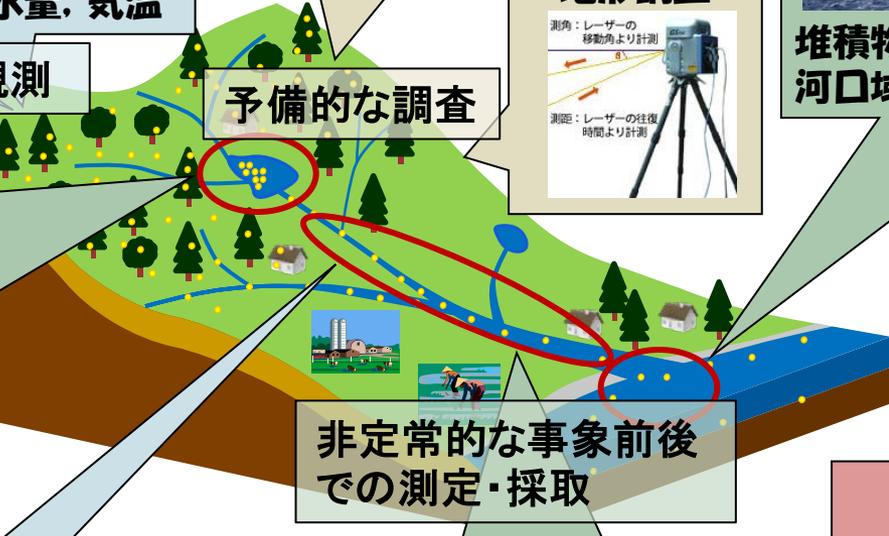


堆積物の厚さ・層構造
河口域水・海底堆積物の試料採取

湖沼水・湖底堆積物



湖底堆積物の厚さ・層構造
湖沼水・湖底堆積物の試料採取



定常的な観測

予備的な調査

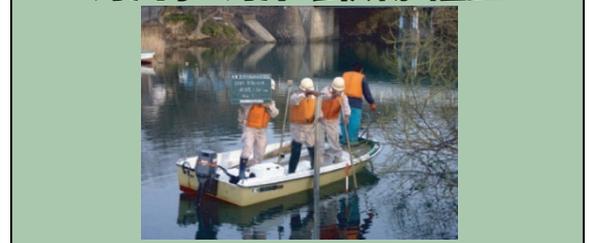
非定常的な事象前後での測定・採取

河川水観測



水位, 濁度

河川水・河床堆積物・陸土



河床堆積物の厚さ・層構造
河川水・河床堆積物の試料採取
スクレイパープレートによる陸土の深さ別試料採取

分析・室内実験

水試料

- セシウム・有機物の濃度・化学種の分析
- 浮遊懸濁物質の濃度・粒径分布・鉱物組成の分析
- 浮遊懸濁物質とセシウムの吸着・脱離実験

陸土・堆積物

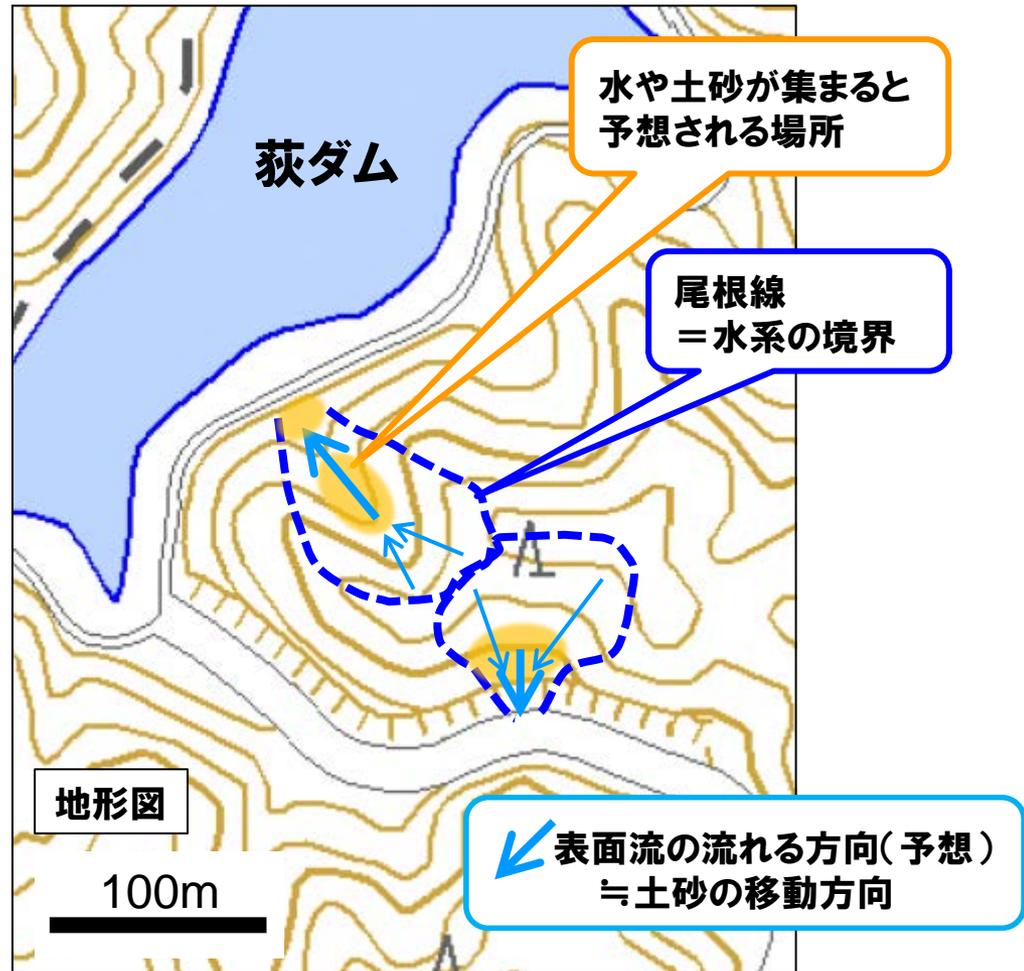
- 粒径分布・鉱物組成の分析
- セシウムとの吸着・脱離実験

現地調査の進め方:川内村荻野沢川の例

● 森林(水源)から河口までの河川水系に着目



森林調査①：調査場所の選定



- 表面流や土砂の移動に伴う放射性物質の移動挙動を把握。
- 移動に影響を及ぼす植生，地形，土壌の分布を把握し，その相関を調査。

森林調査②：調査場所の比較

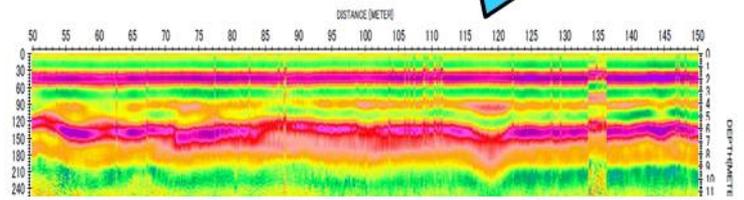
調査地点	植生	地形	土壌
川俣町 山木屋 坂下地区	<u>落葉広葉樹を主体</u> とし、 尾根や家屋付近に常緑 針葉樹が少量分布する	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 南向き斜面 ✓ 斜面の傾斜は緩傾斜から急傾斜まで幅広い ✓ 傾斜と方位の異なる斜面の組み合わせが複数あり、<u>複雑な地形</u> 	風化花崗岩、マサ、 赤色土壌 、褐色森林土（黒色土壌）
川内村 荻地区 （調査地点A）	<u>常緑針葉樹を主体</u> とし、 低木として落葉広葉樹が 少量分布する	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 北向き斜面 ✓ 谷と斜面の組み合わせからなる<u>比較的単純な地形</u> ✓ 谷の出口から尾根に向かい中から急傾斜になる 	マサ、褐色森林土 ※一部に赤色土壌
川内村 荻地区 （調査地点B）	<u>常緑針葉樹を主体</u> とし、 低木として落葉広葉樹が 少量分布する	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 南向き斜面 ✓ 谷と斜面の組み合わせからなる<u>比較的単純な地形</u> ✓ 全般的に急傾斜で傾斜の変化に乏しい 	マサ、褐色森林土 ※一部に赤色土壌

森林調査③：土壌の調査

- 森林とその周辺で深さ方向の柱状土壌試料を採取
- 土壌特性および放射性物質濃度の深さ方向の分布を調査



土壌分布の調査
(地中レーダー探査)



地中レーダー探査による観測例



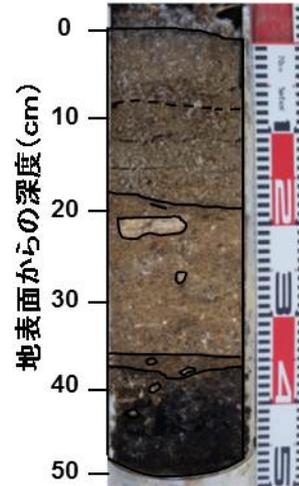
土壌の採取
(土壌サンプラー)



土壌の採取
(スクレーパープレート)



土壌記載の様子

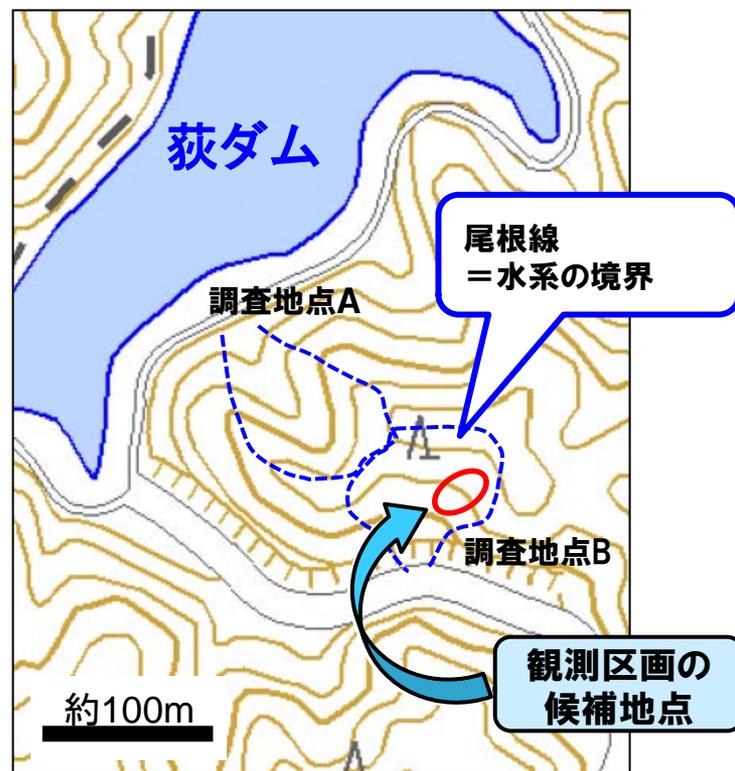
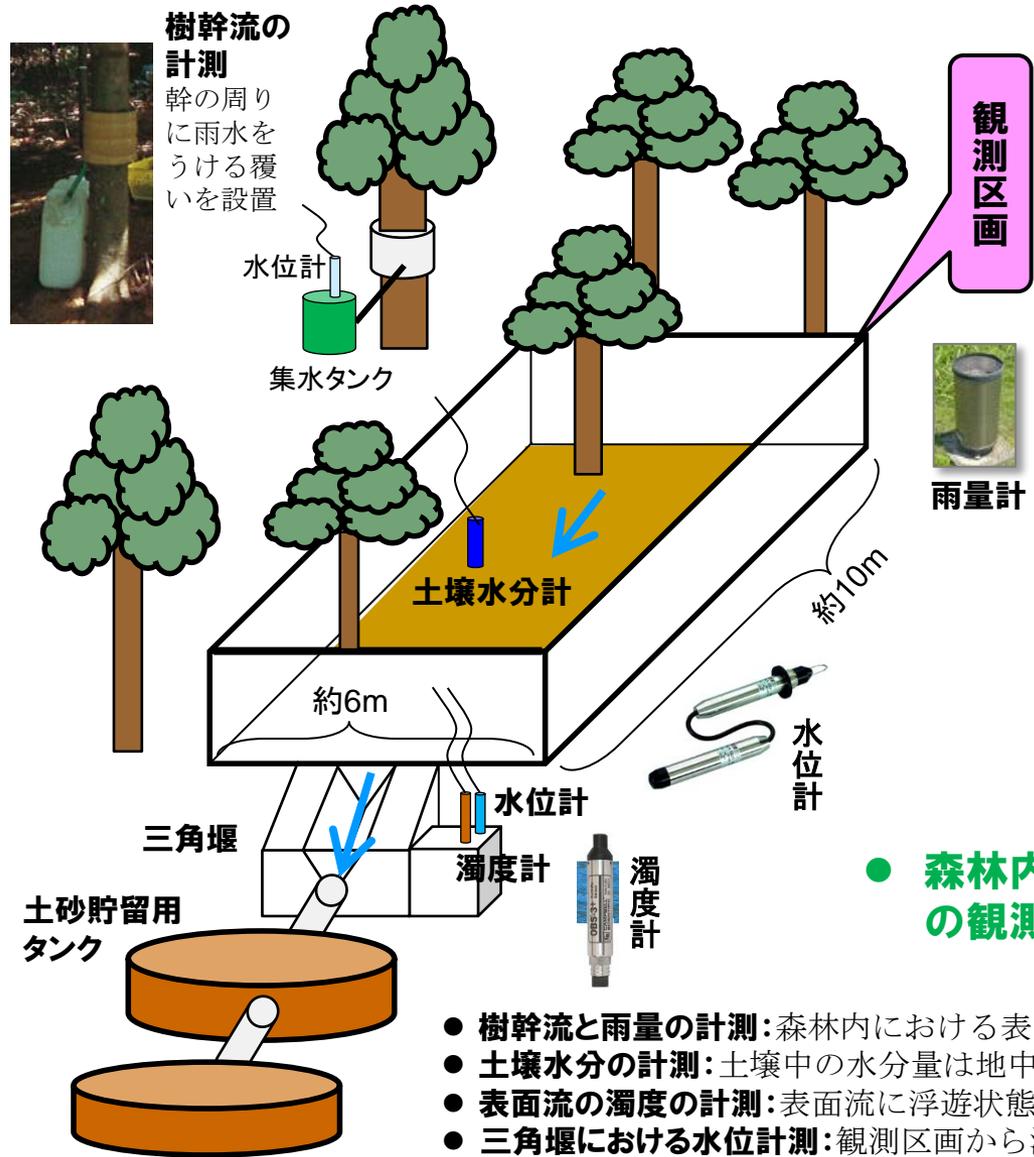


- 1) 有機質層
- 2) 粘土質褐色砂層
- 3) 粘土質褐色砂層
- 有機物薄層
- 4) 赤色砂層
- 5) 茶褐色土壌
- 6) 黒色土壌
- 風化花こう岩礫 (φ1cm程度)



土壌記載と放射性物質の分析結果の例

森林調査④：流水の調査



● 森林内外の降水量や森林内の表面流・土砂流出量の観測を、機器を設置し定常的に観測する。

- 樹幹流と雨量の計測：森林内における表面流のもと
- 土壌水分の計測：土壌中の水分量は地中に浸透する水の量に関連
- 表面流の濁度の計測：表面流に浮遊状態で含まれる土壌成分の量に関連（主に粘土サイズの粒子）
- 三角堰における水位計測：観測区画から流出する表面流の計測と採水、水の分析
- 土砂貯留用タンクによる流出土砂の採取：観測区画から移動する土砂量の計測、土砂に含まれる放射性セシウムの分析

森林調査⑤：影響因子の評価(植生・地形)

● 植生の調査

森林内の樹木や下草の種類と分布を、調査区※を設定して調査

- ✓ 立木調査：森林内の立木の配置、樹高、胸高での幹径、樹種 など
- ✓ 林床の調査：下草の分布、リターの厚さと分布 など

※調査区:コドラートとも呼ぶ。均質な植生の広がりに応じて、通常は正方形や長方形の形状を設定する。

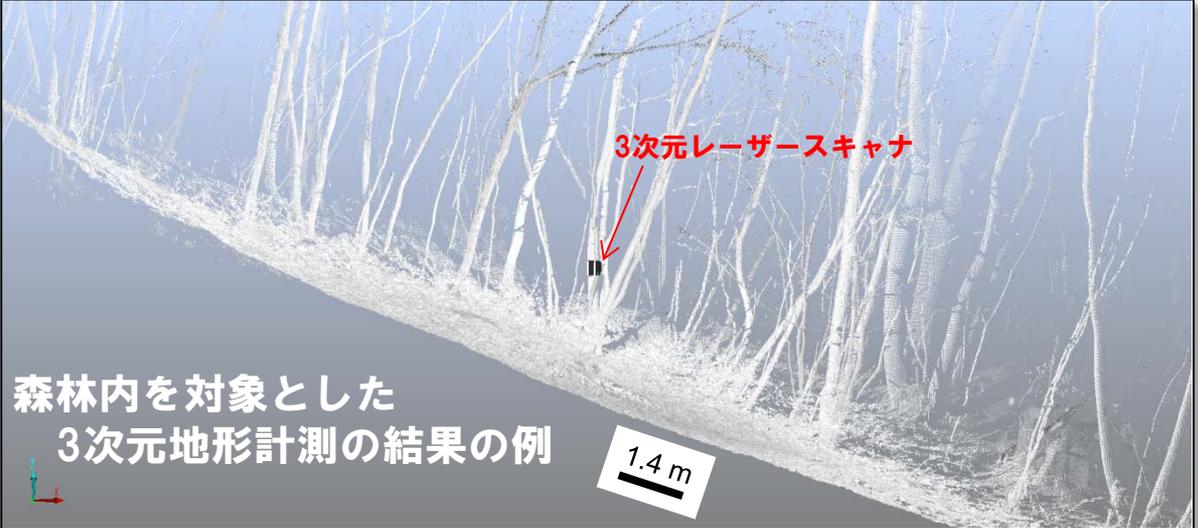
● 地形の調査

森林内とその周辺の地形を計測

- ✓ 簡易的な地形測量：機器による森林内の傾斜や高低差の計測 など
- ✓ 3次元レーザースキャナーによる地形計測：三次元的な地表面の凸凹の計測



樹高の計測の様子

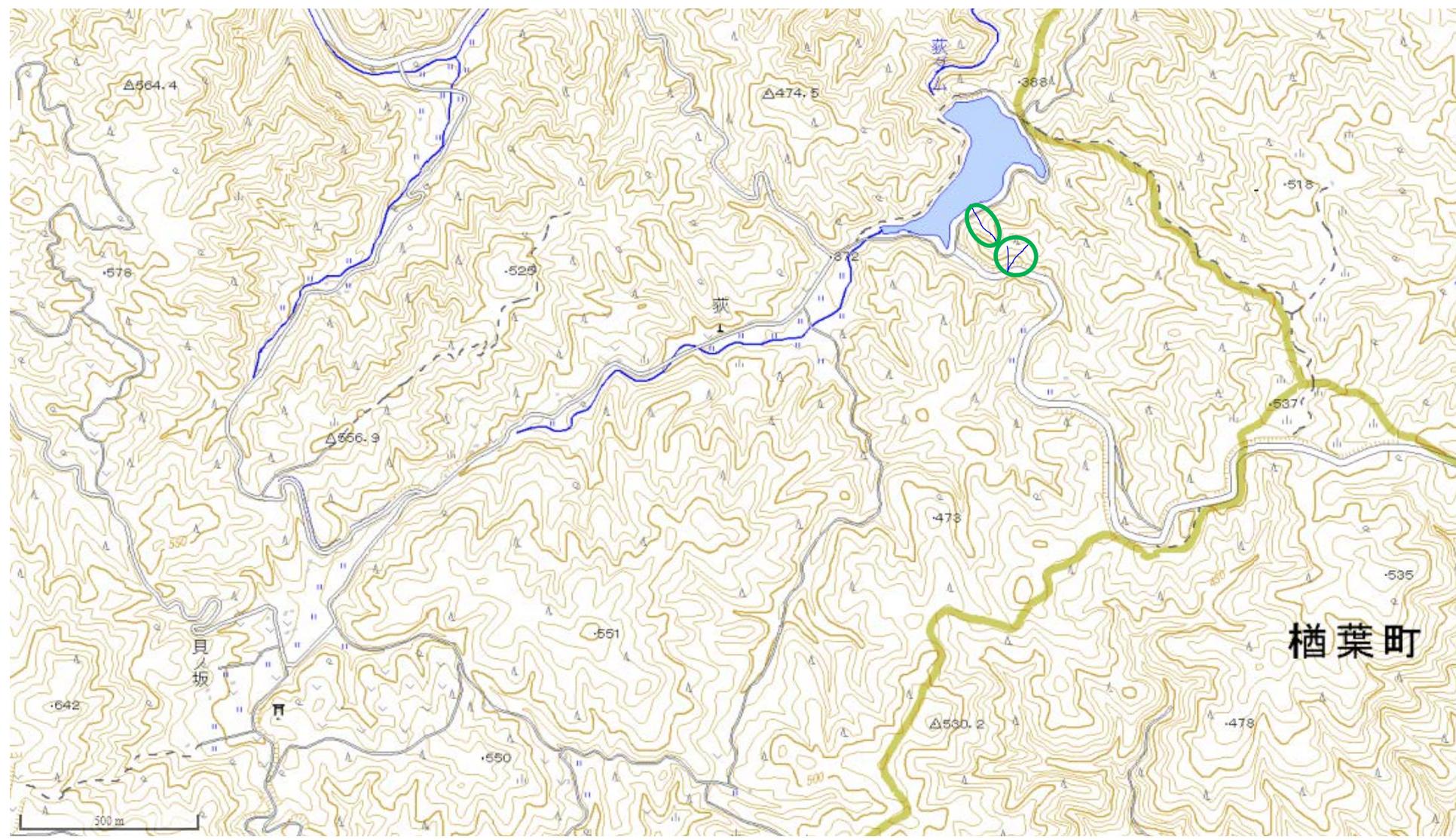


森林内を対象とした
3次元地形計測の結果の例

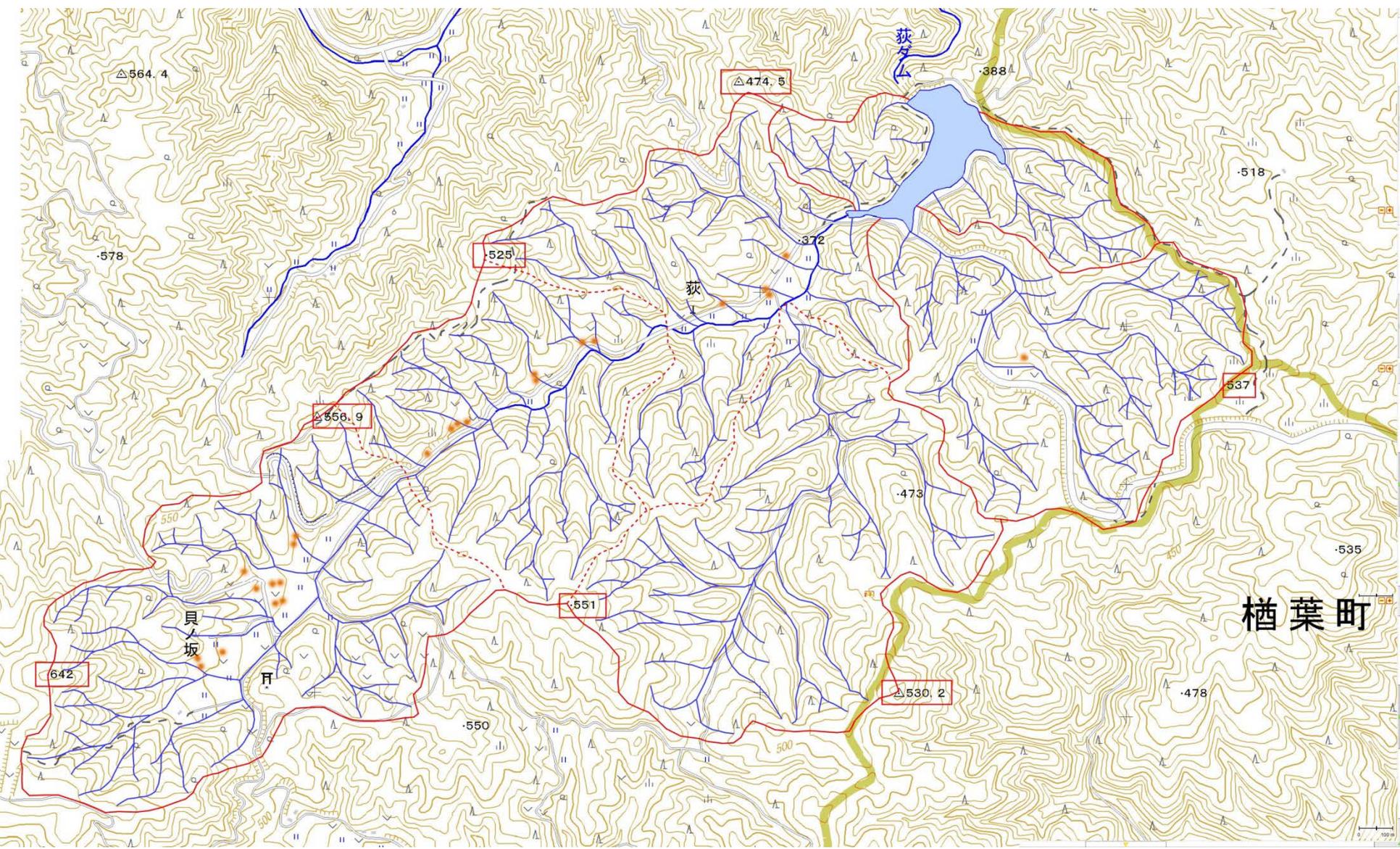


3次元レーザースキャナ
による地形計測の様子

- ✓測定範囲：0.6-120m程度
- ✓バッテリー電源にて連続5時間使用可
- ✓視野は水平360° 上下300° (スキャナー下方の60° はスキャン不能)



小水系の集合⇒河川



河川調査①：調査場所の選定



- 水流により土壌粒子とともに移動し、河川敷や河底に堆積する放射性物質の挙動を把握。
- 流量、地形、植生、塩濃度等の影響調査。



＜調査場所の選定例＞

- 橋：高水時でも流量観測・試料採取が可能
- 堰：堆積物が堆積しやすく、評価上重要
- その他：支流合流点、ダム出入口、河口付近 等

河川調査②：調査内容と調査地点

- 基礎情報調査
 - ✓ 衛星データ(ASTER)の解析により、地形、表土、植生及び土地利用状況等の情報を取得
- 形状調査(河川横断面測量)
- 河川調査(測定, 試料採取等)
- 流水の連続観測装置の設置

河川名	形状調査	河川調査	連続観測
小高川	31地点	13地点	0地点
請戸川	24地点	18地点	2地点
高瀬川	20地点	8地点	0地点
前田川	17地点	10地点	0地点
熊川	34地点	14地点	0地点
富岡川	14地点	11地点	0地点
荻野沢川	7地点	7地点	2地点



河川調査地点

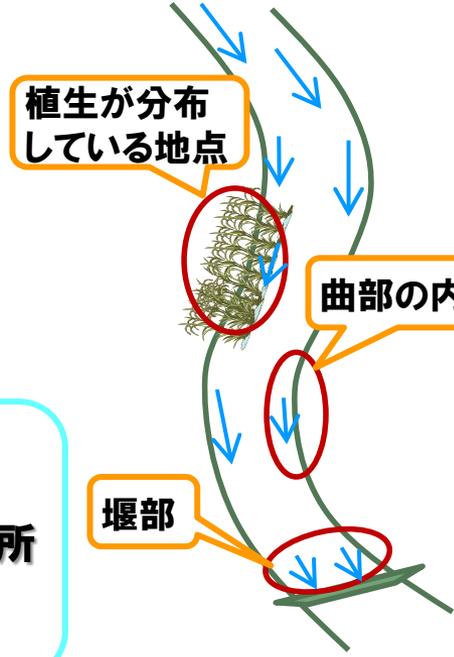
河川調査③：土壌・堆積物の調査



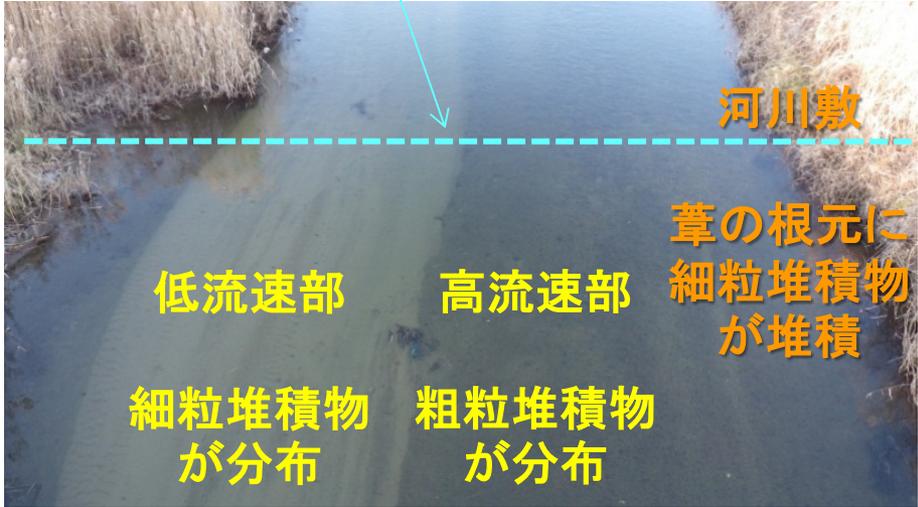
同一横断面上で

- ✓ 流速が異なる場所
- ✓ 堆積状況が異なる場所
- ✓ 線量率が異なる場所

で試料採取。



スクレイパープレートを用いた土壌試料の採取



- ・堆積構造 (鉱物組成, 粒径の深さ方向分布)
 - ・放射性セシウム濃度分布 (深さ方向・面的)
- ↓
- ・放射性セシウムの移動に寄与する鉱物, 堆積履歴 → 移動過程を推定



流量・濁度の測定

河川水の採取

形状調査
(河川横断面測量)



河川流速計



濁度計



自動観測機器(水位、濁度)

同一横断面上で

- ✓ 河川流量・濁度は、一定間隔ごとに測定
- ✓ 河川水は、流速の速いところと遅いところで採取

- 河川における流量，水中の濁度等，水の流れと水流による土壌粒子の動きを定常的に観測。
- 流量－濁度・土壌粒子の濃度－放射性物質の濃度等の相間を把握。

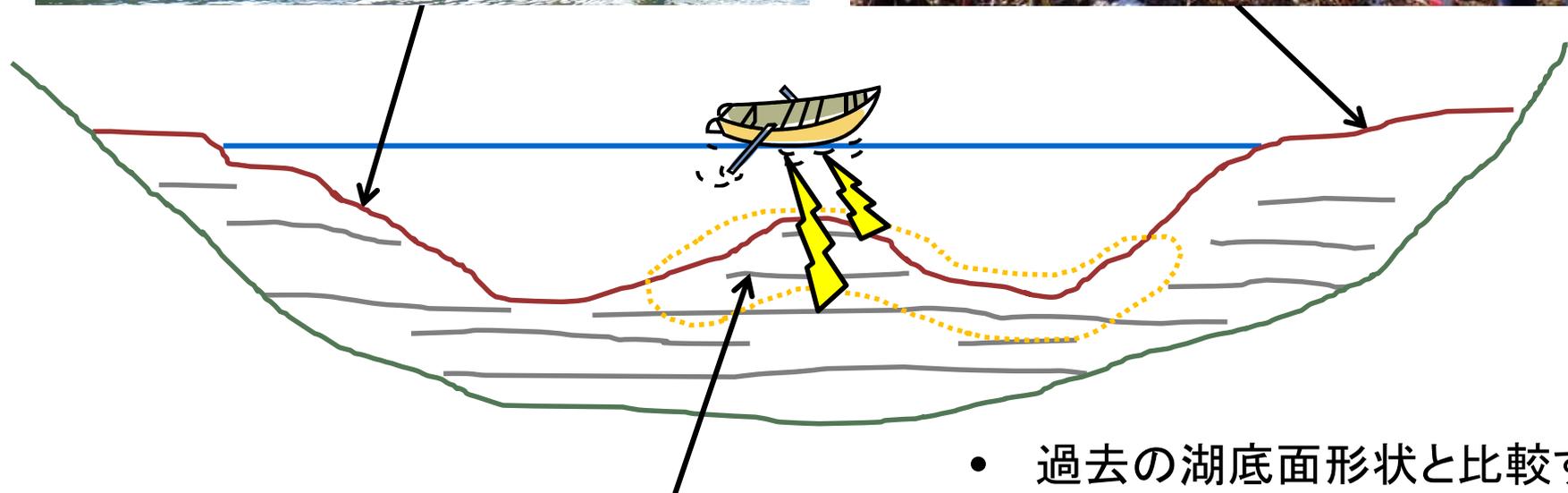


- 水流により土壌粒子と共に河川から流入し、湖底に堆積・河川に流出する放射性物質の挙動を把握。
- 移動・堆積に及ぼす流量，地形等の影響を調査。

3次元形状調査(湖底面)



3次元形状調査(干出面)



湖底面下の堆積相調査

- 過去の湖底面形状と比較することにより、湖底の堆積物の量、堆積速度、堆積挙動を把握。



水試料の採取
(船上からハイロート採水器による)



柱状堆積物試料の採取(不攪乱柱状採泥器)



湖底堆積物試料の採取(スミス・マッキンタイヤ採泥器)



柱状堆積物試料の採取(重錘型柱状採泥器)

セシウム移動現象評価のための室内実験・分析

- 【基礎的な特性の分析】**
- ・ 土壌・堆積物・浮遊懸濁物質試料
 - 元素組成 (XRF, TOC)
 - 鉱物組成 (XRD)
 - 放射性セシウム濃度
(上記特性を粒径ごとに評価)
 - 粒径分布 (粒度分布計)
 - ・ 水試料
 - 元素組成 (ICP-AES/MS, TOC)
 - イオン組成 (IC)
 - 有機物特性 (SEC, HPLC)
 - 放射性セシウム濃度・粒径分布

固相とセシウムとの吸着・脱着実験

- 土壌に吸着されたセシウムの深さ方向への移流・拡散
- 流出した土壌粒子へのセシウムの吸着

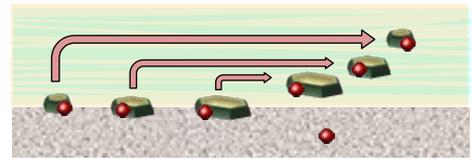


植物試料の分解・セシウム溶出実験

- 落葉・落枝の分解に伴うセシウム・有機物の溶出

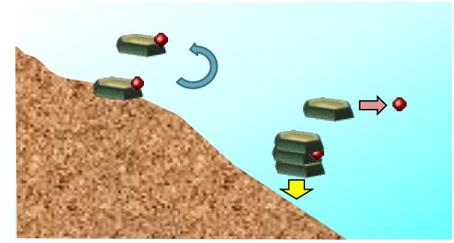
水流による土壌・堆積物の侵食実験

- セシウムを吸着した土壌粒子の再浮遊・沈着

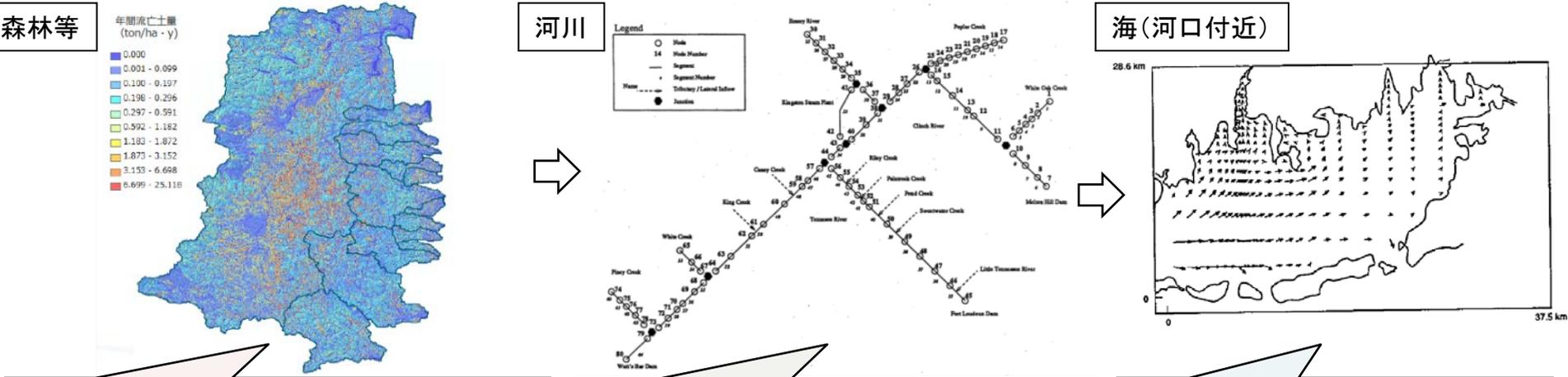


塩濃度の増加に伴う浮遊懸濁物質の重合・セシウム脱着実験

- セシウムを吸着した土壌粒子の凝集・沈着
- 塩濃度の増加による土壌粒子からのセシウムの脱離



水流による放射性セシウム移動のモデル化方針



森林流出モデル (USLE, Watershed)

表層水の化学特性(溶存イオン、有機物等)と流出形態の関係、地形・地質と流出形態の関係、汚染レベルと流出量の関係等に注目

- ・セシウムイオンの状態での流出
- ・土粒子・コロイド粒子に吸着された状態での流出(侵食)
- ・風等による移動(侵食、巻き上げ)

河川輸送モデル (TODAMベース)

主にマクロな輸送・堆積・再浮遊のメカニズムに注目

- ・土粒子へのセシウムイオンの吸着
- ・土粒子(浮遊物質)の移動
- ・堆積・再浮遊(河床変化)
- ・1次元

河口付近流動・輸送モデル (FLESCOTベース)

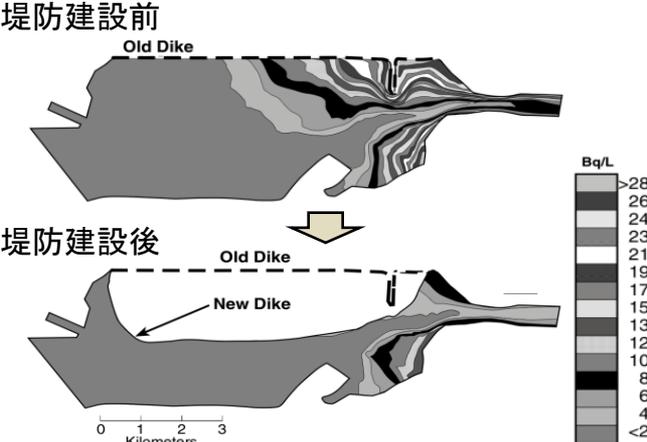
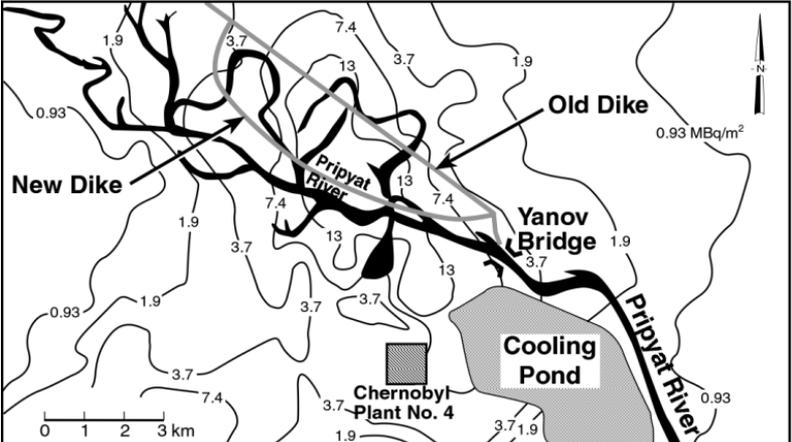
河口付近の詳細な移動に注目

- ・3次元
- ・潮汐、風を考慮
- ・塩水・淡水混合

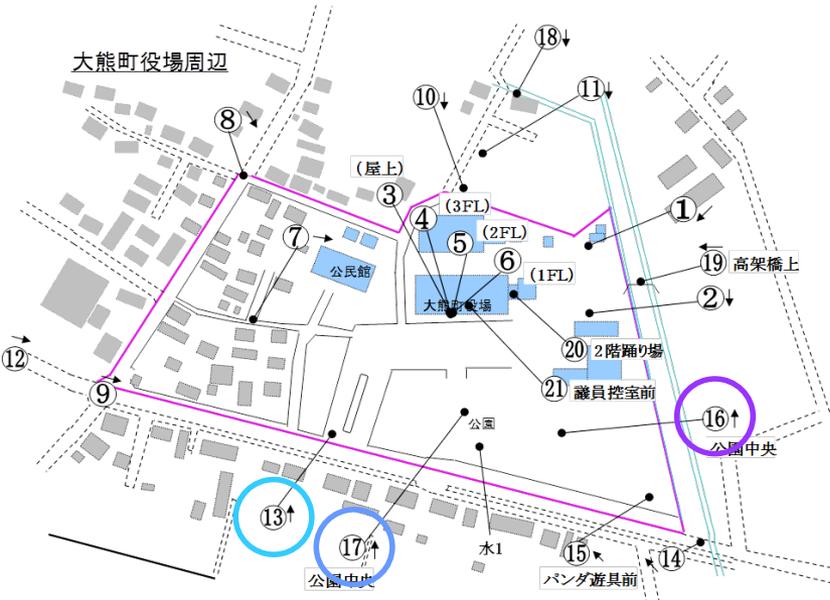
(チェルノブイリの解析事例)
汚染された土地からの放射性物質の河川への流入を防ぐために堤防が建設された。

↓

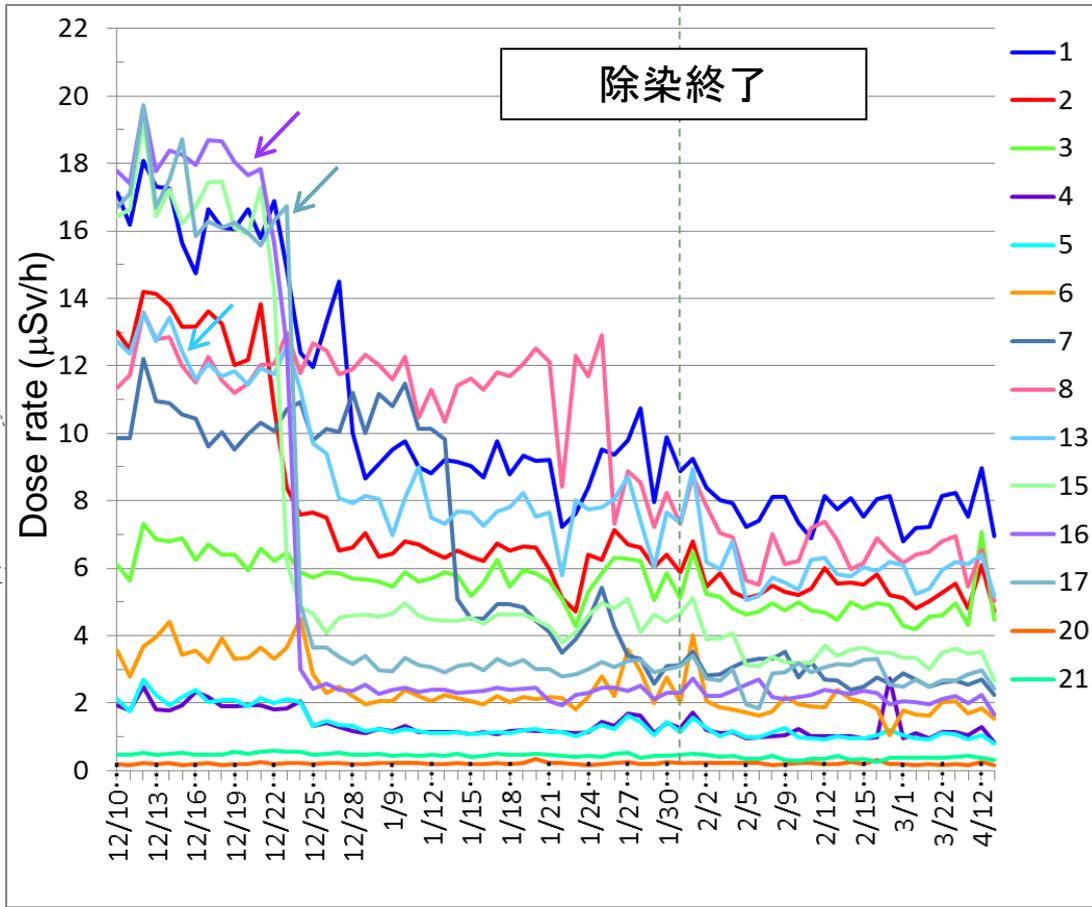
TODAMを含む複数のモデルにより、対策の有効性を評価した (Onishi et al., *J. Environ. Eng.*, pp.1015-1023, 2007.)



その他の移動に関する調査：除染実施区域の観測

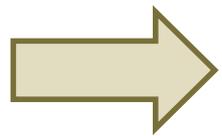


除染モデル実証事業時の大熊町役場周辺における定点観測点



大熊町役場周辺における除染中・後の空間線量率変化

・除染により空間線量率が大きく低減した点を中心に線量率変化を長期間観測



・線量率上昇(周囲からのセシウムの移動)の有無の確認
 ・ダストサンプリング等他の測定も組み合わせ、セシウム移動過程を推定

その他の移動に関する観測機器



気象観測装置
及びカメラ

ソーラーパネル

- 測定記録項目 (10分毎)
- 気温 (-40~60℃)
 - 相対湿度 (0~100%)
 - 気圧 (540~1100hPa)
 - 雨量 (0~999.98mm)
 - 風向 (8方位)
 - 風速 (0.9~67.1m/s)
 - 空間線量率 (0.01~99.99μSv/h)
 - カメラ静止画像 (日中のみ)

- ・空間線量率の変化と気象条件の相関を観測
 - ・空気中のダスト中に含まれる放射性セシウム濃度を測定。
- ↓
- ・周囲からの放射性セシウムの移動過程を推定。



空間線量率計測,
GPS, データ記録
及びデータ転送

気象観測・空間線量率
自動観測装置

ダストサンプリング



地衣類を利用した移動性の推定

地衣類とは

- ✓ 菌類と藻類の共生体である(菌類の仲間)
- ✓ 分布域が広く、様々な環境下で樹皮・岩石・土の上等に生育する
- ✓ 植物のような根を持たないため、水分等を体表面から吸収する
- ✓ 年間を通じて成長し、季節の影響を受けない
- ✓ 放射性セシウムを蓄積しやすいとの報告がある



- ↓
- 放射性セシウムを放出しにくい地衣類があれば、生育場所の初期の放射性セシウム濃度を推定できる可能性がある。
 - 地衣類中と生育場所の土壌等中の放射性セシウム濃度を比較することにより、その場所の放射性セシウムの移動性を評価できる可能性がある。

<地衣類の外形の特徴>

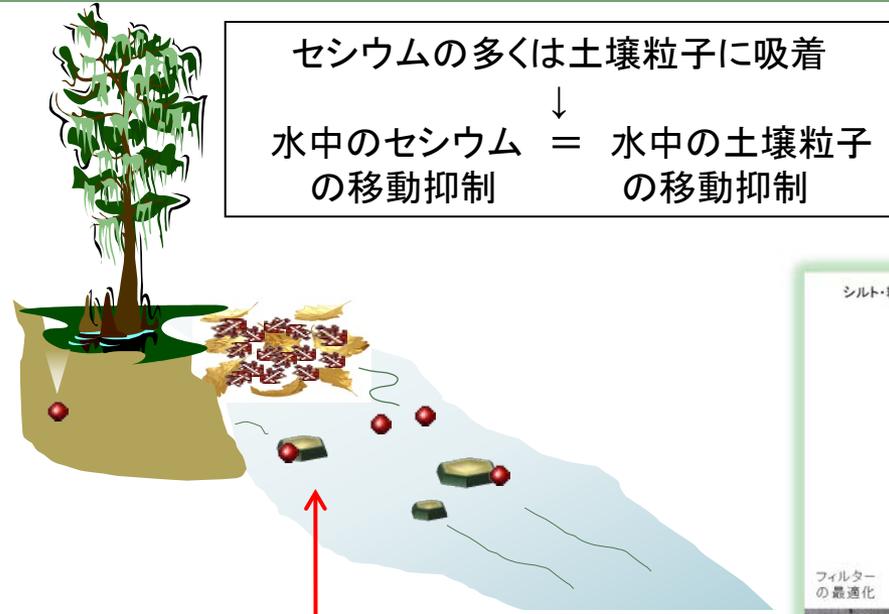


葉状地衣類

樹枝状地衣類

固着状地衣類

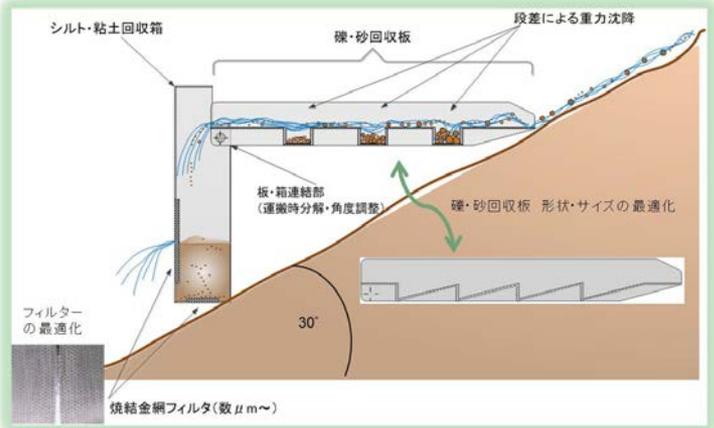
移動抑制等：水流移動の対策方針と実施例



◆土壌粒子の「固定」

- ・固化剤散布・植生等による傾斜地からの土壌粒子の流出抑制の検討

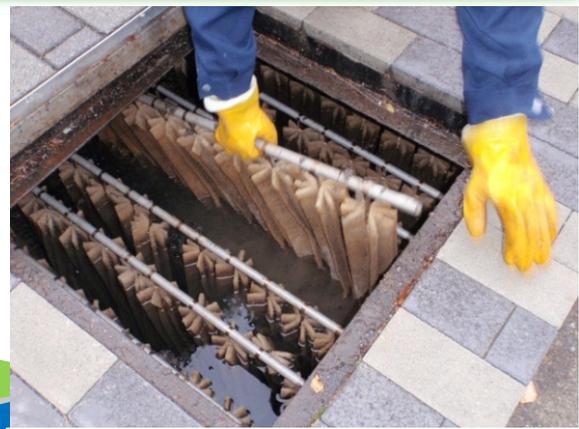
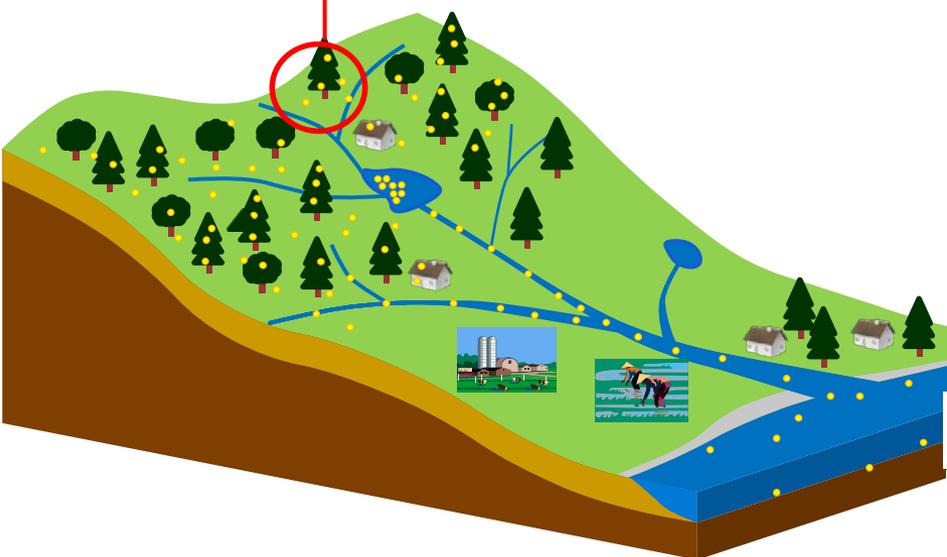
◆土壌粒子の「捕捉」



- ・フィルター等による土壌粒子の流出抑制

<試行例>

- ・傾斜地沢筋：
小型浮遊懸濁物質回収槽(左図に例)による土壌粒子の捕捉

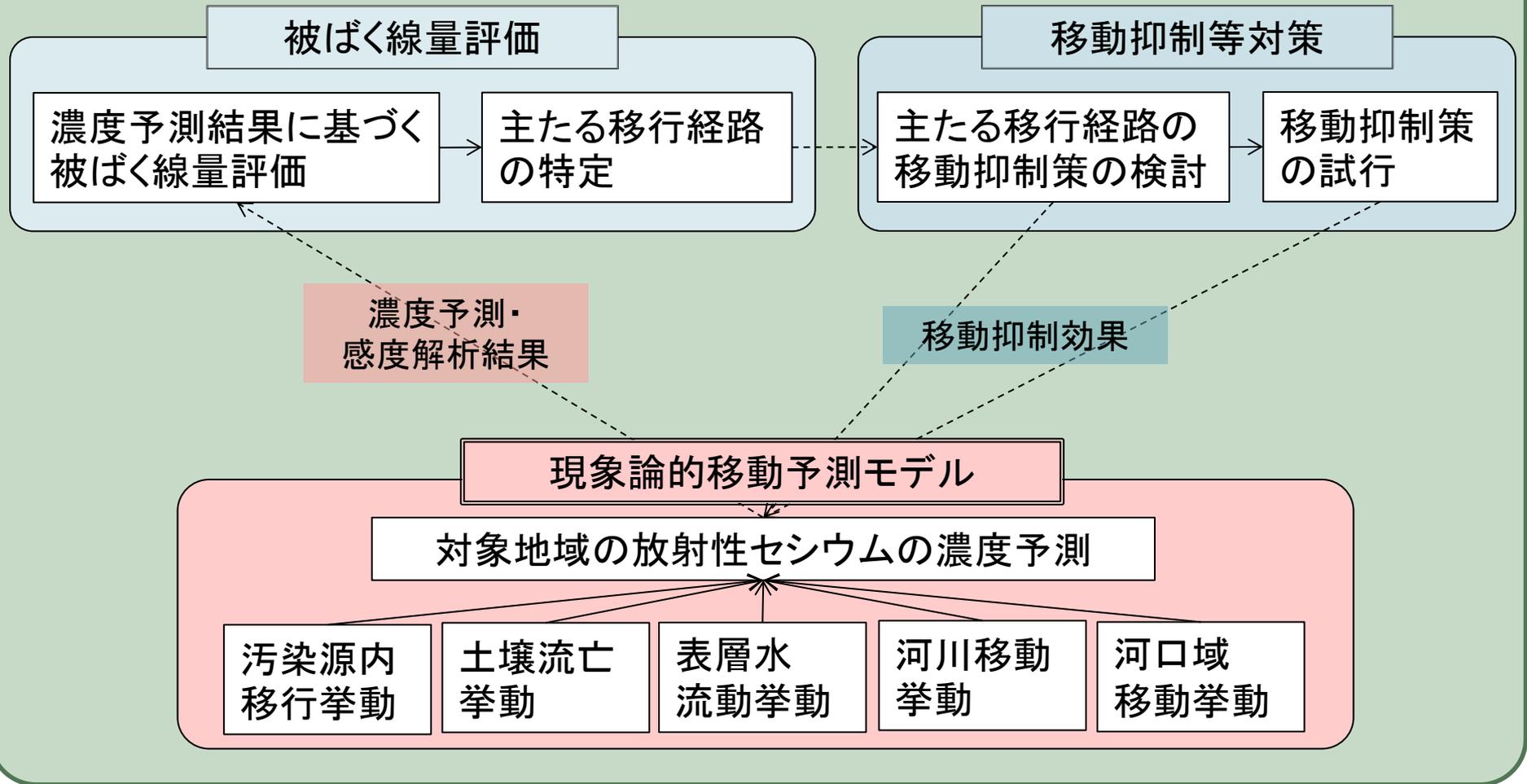


- ・河川上流域：
菊花断面棒状不織布接触材を用いた水質浄化槽(左図に例)による土壌粒子の捕捉

◆土壌粒子の「集積」

- ・ダム・溜め池等の土壌粒子が集積しやすい場所の把握と「捕捉」手法を併用した下流への流出抑制方法の検討

環境動態予測・移動抑制等対策システム



調査・研究スケジュール

	平成24～26年度	平成27～31年度	平成32年度～
放射性セシウム等の移動予測モデルの開発	河川系移動モデル開発・他の移動評価用データ取得(中小河川対象)	河川系移動モデル改良・他の移動モデル開発用データ取得(より広範な地域を対象)	セシウム分布データの継続的な取得
	河川系移動モデル開発	河川系移動モデル改良	移動モデルの改良
	その他の移動モデル検討	その他の移動モデル開発	*
被ばく線量評価	評価システム設計・試解析	評価システムの改良	評価システムの改良
移動抑制等対策の調査・研究・評価	対策案の基礎調査	中小河川での対策案の研究・評価(第一次対策案の提示)	
		広範囲での対策案の研究・評価(対策案の高度化等)	対策案の有効性向上検討
包括的な評価システムの開発	評価システム設計・試作	評価システムの開発	評価システムの改良
<期待される成果>	・セシウムの移動経路を特定することで、被ばく低減のため、将来の土地利用や立入り制限等について提案	・セシウムの主たる移動経路に対し、砂防ダム、溜池、土壌固化材等を活用した移動抑制等対策案の有効性を検討し、将来の活用方法等を提案	・セシウムの移動予測と被ばく線量評価の精度を向上させて、中・長期的な被ばく低減対策を提案
<調査対象地域(予定)>	浜通り側中小5河川 除染モデル実証事業6地区	浜通り側全河川 阿武隈川水系河川 その他必要に応じ地域を追加	