

環境動態研究で得られた知見 -平成26年度の成果概要-

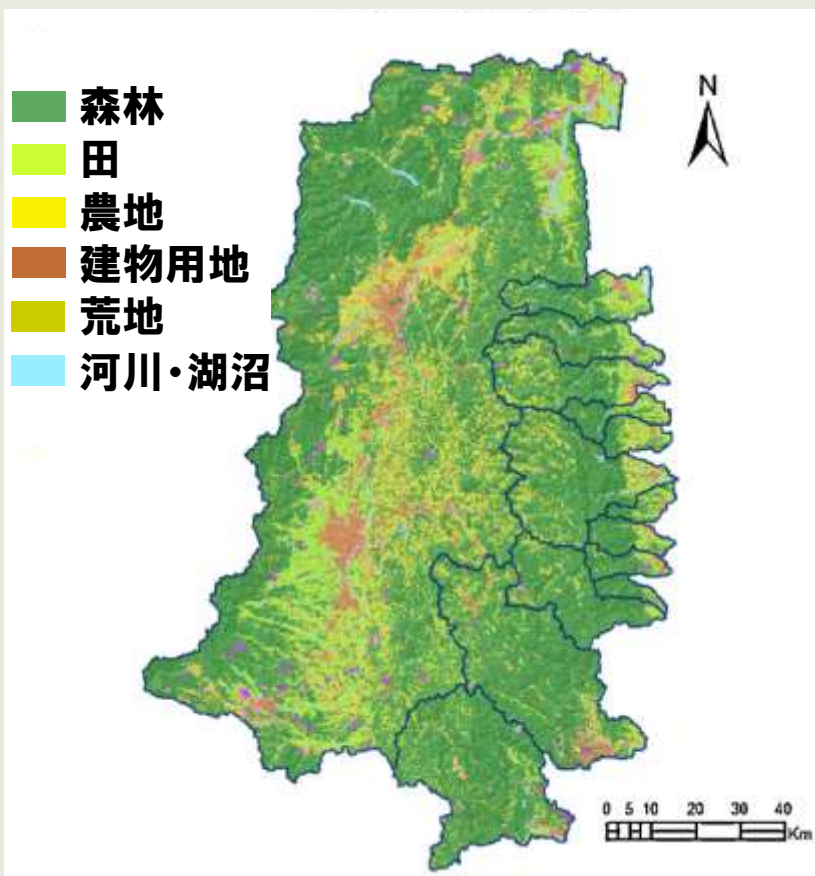
平成27年6月30日

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

森林や農地等への放射性セシウムの初期沈着量

- 阿武隈川および浜通り主要河川水系では、放射性セシウムの70%が森林に沈着しており、次いで田・その他の農地に多く沈着しました。

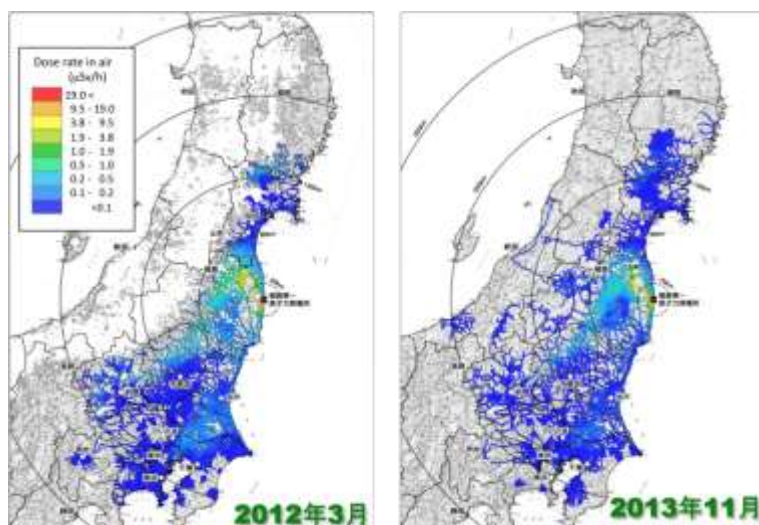


主な土地利用ごとの面積とセシウム137初期沈着量

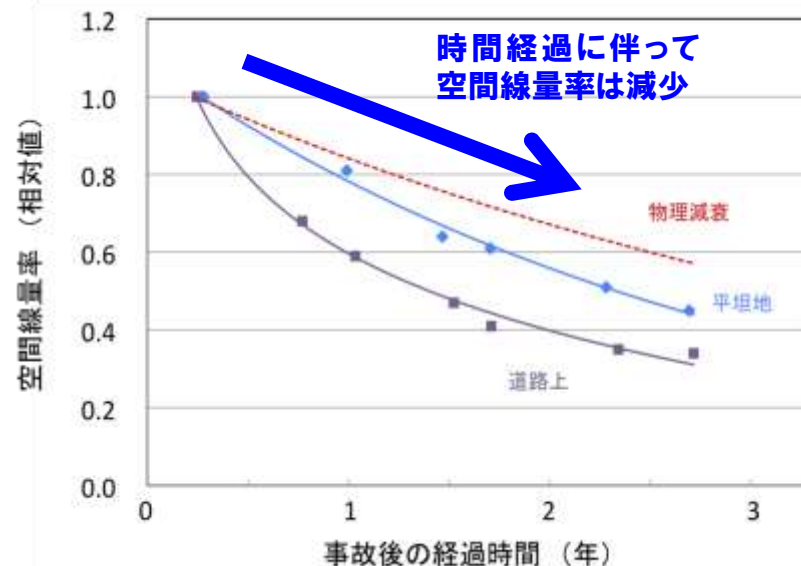
土地利用	面積 [km ² (%)]		セシウム137初期沈着量 [TBq (%)]	
森林	5,329	(63.7)	920	(70.8)
田	1,157	(13.8)	160	(12.3)
農地	852	(10.2)	130	(10.0)
建物用地	457	(5.5)	68	(5.2)
荒地	152	(1.8)	16	(1.2)
河川・湖沼	156	(1.9)	11	(0.8)
幹線交通用地	67	(0.8)	10	(0.8)
ゴルフ場	47	(0.6)	3.5	(0.3)
海浜	1	(0.01)	0.19	(0.01)
その他用地	147	(1.8)	17	(1.3)
合計	8,370		1,300	

空間線量率分布の時間変化

- 空間線量率や土壌沈着量は時間とともに減少してきました。森林以外の地域では、空間線量率は半減期による減衰に比べて早く減少してきています。



走行サーベイにより測定した空間線量率分布の変化

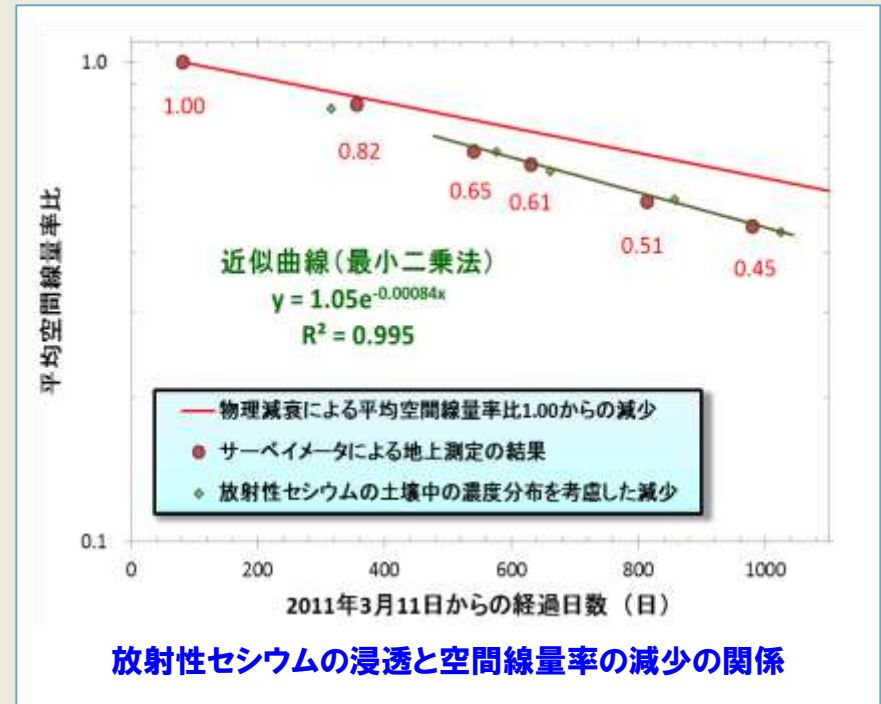
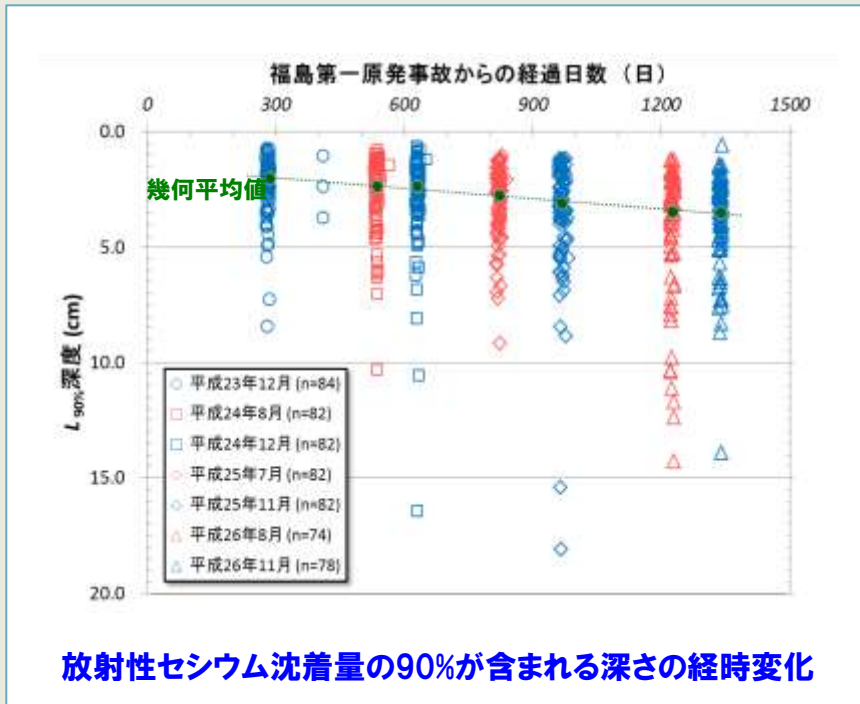


平均的な空間線量率の経時変化の様子

- 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してきました。
- 開けた平坦地では水平方向の放射性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放射性セシウムは移動し易いことが原因と考えられます。

平坦地での空間線量率の減少

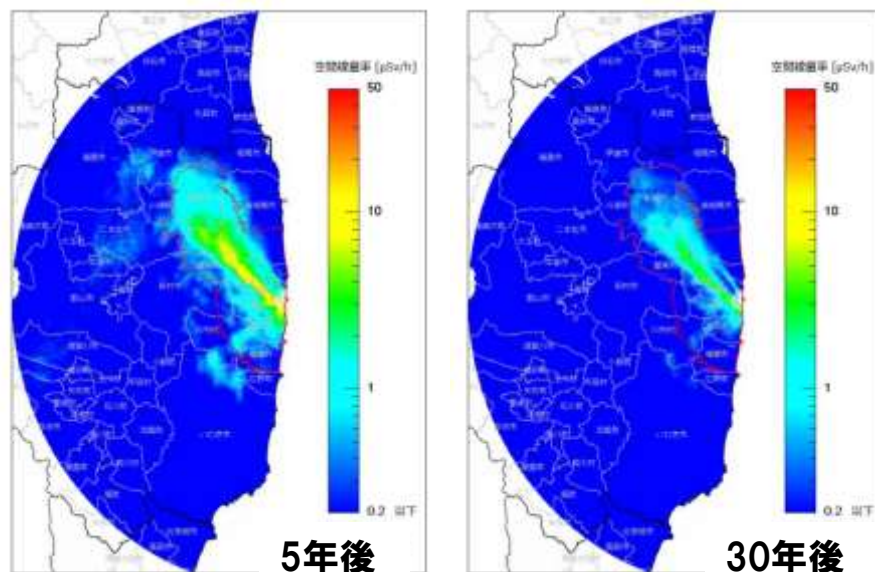
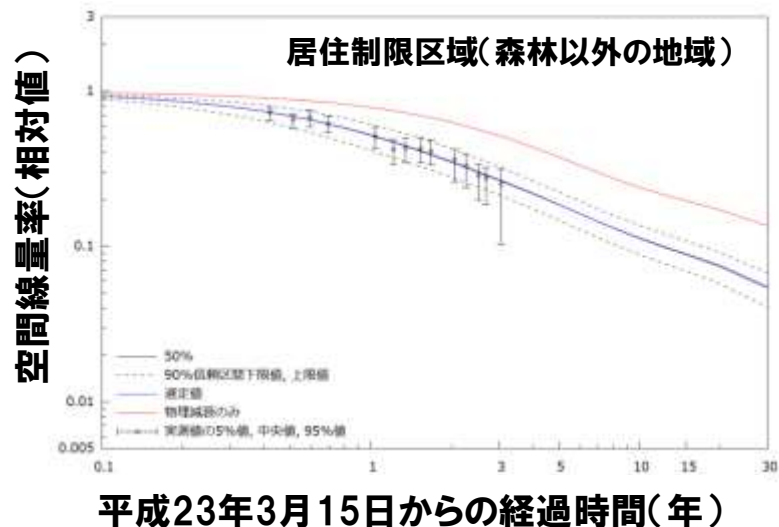
- 土壌中の放射性セシウムは時間とともに徐々に深さ方向に浸透していきます。地中に浸透すると、土によるガンマ線の遮蔽効果が大きくなるため、空間線量率が小さくなります。



- 放射性セシウムのかなりの部分はまだ地表面から5 cm 以内に存在しています。
- 土による遮蔽効果の増加により、平坦地での空間線量率の減少が説明できます。

将来の生活圏の空間線量率の予測

- 事故後に継続して取得してきた大量の空間線量率測定データを統計的に処理して変化傾向を明らかにし、その結果に基づいて将来予測を行ないます。



- チェルノブイル事故等の知見から得られた経験式を用いて予測を行います。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します。
- 過去の空間線量率測定データの解析から100 m メッシュ毎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ないます。
- 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年後までの空間線量率分布マップを作成します。*空間線量率の予測図は、原子力機構が平成26年度原子力規制庁の委託業務を実施する中で得た知見をもとに作成したものである。当該図は、50%値の予測。

事故進展に伴う放射性セシウムの沈着状況

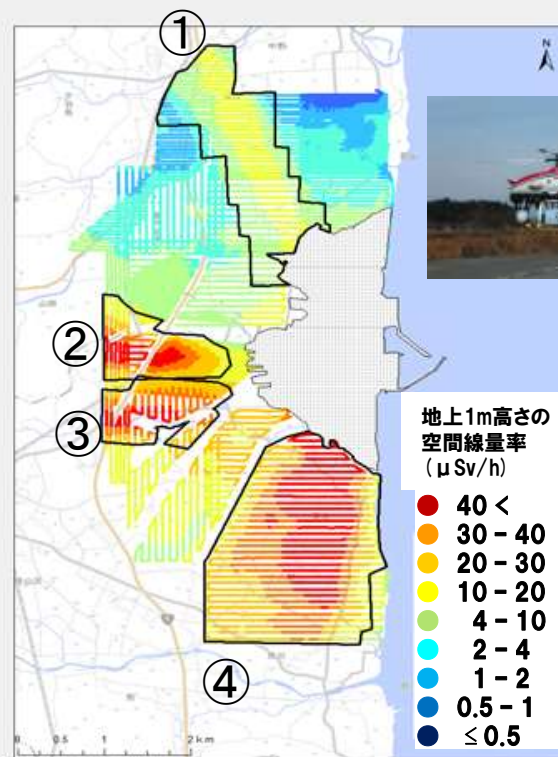
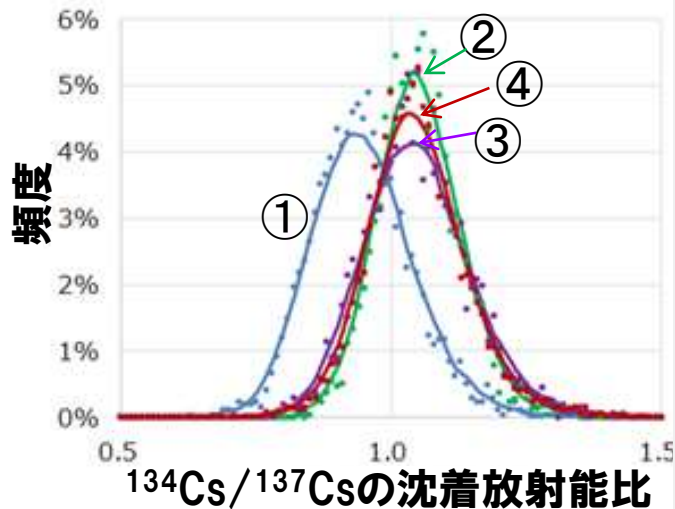
■ 福島第一から半径5km程度での無人ヘリのデータに基づき $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の沈着放射能比*を評価し、1号機からの放出による沈着を判別しました。

*運転履歴に違いがあるため、1号機は2、3号機に比べ $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の放射能比が10%程度小さい。

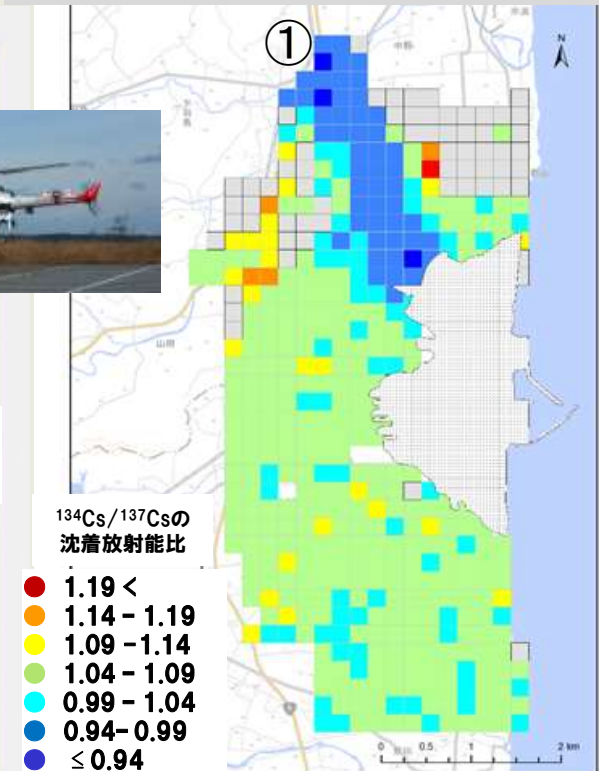
空間線量率(1m高さ)

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の沈着放射能比

$^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の沈着放射能比



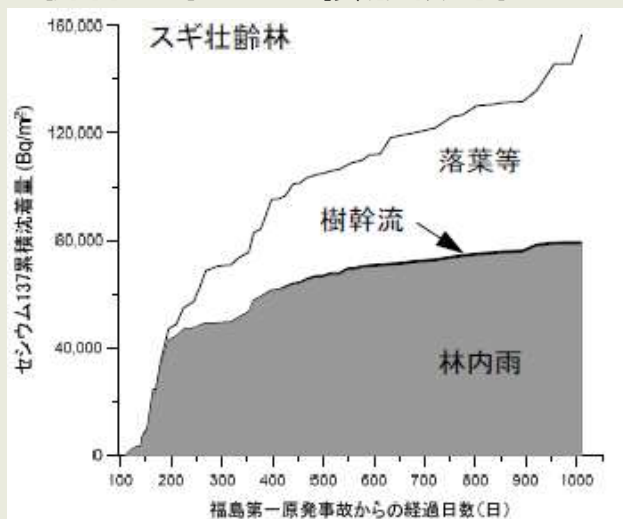
背景地図: 国土地理院の地図を使用



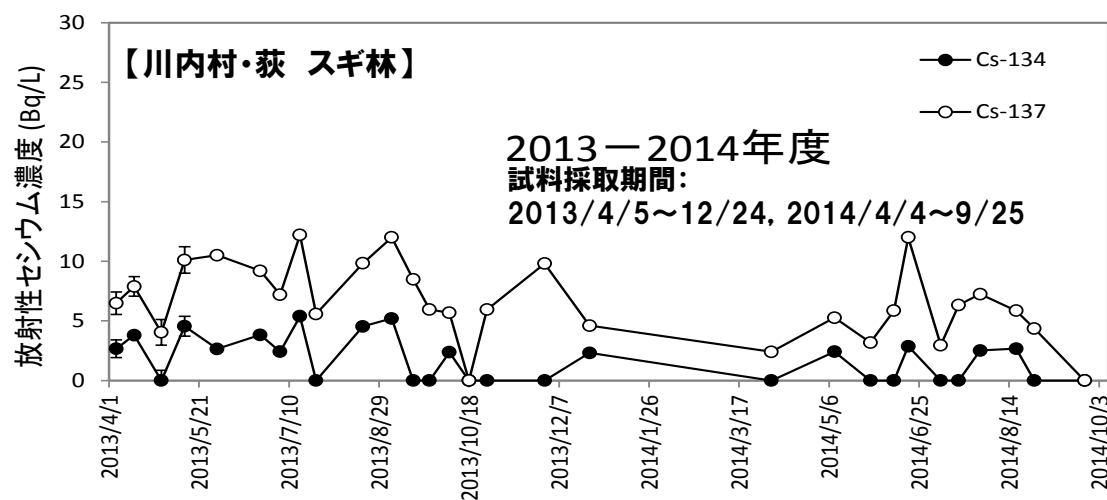
背景地図: 国土地理院の地図を使用

森林内の樹木から地表へ放射性セシウムの移動

- 樹木に沈着した放射性セシウムは、初期は主に林内雨、その後は主に落葉により樹木から地表へ移動しましたが、移動量は減少傾向にあります。現在も樹幹流による移動は、わずかながら認められます。
- 枝葉に沈着した放射性セシウムのうち、水で流されやすいものがまず林内雨により移動し、流されにくく枝葉に残ったものは落葉・落枝により移動していると考えられます。
- スギは3～4年で葉が生え変わるため、現時点で葉に沈着したものの多くは地表に移動したと考えられます。
- 樹幹流中には、依然放射性セシウムが検出されるものの、濃度には減少傾向が認められます。



樹冠から林床へのセシウム137沈着量の時間変化(林内雨、樹幹流、落葉等の成分別の移行量を積上げ折れ線グラフで表した)
(マップ事業成果)



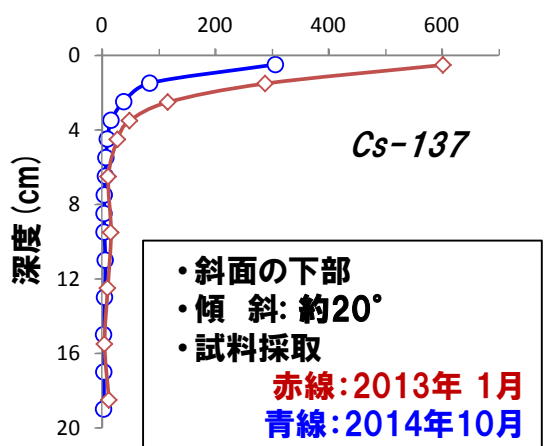
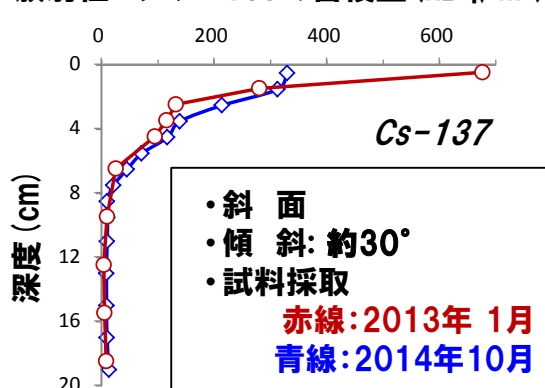
樹幹流中の放射性セシウム濃度の時間変化
(Bq/L)

森林土壌の深さ方向への放射性セシウムの移動

- 森林土壌中の放射性セシウムの分布は、時間とともに深さ方向に浸透していくような変化を示しましたが、変化の大きさはわずかでした。

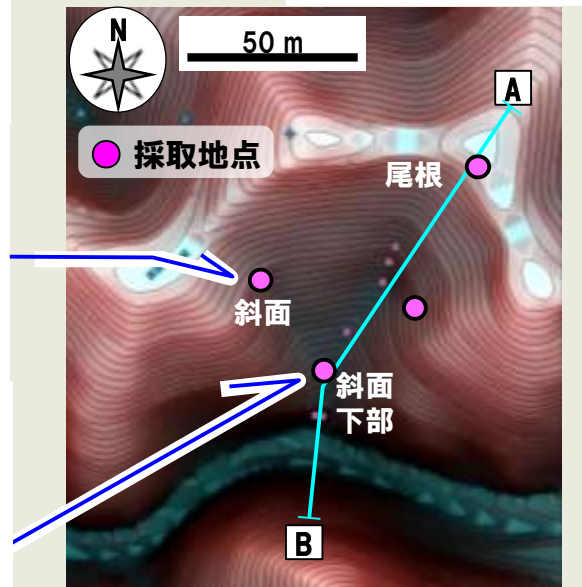
- 2014年10月で、深度5cmまでにセシウム137の全沈着量のうち84～92%が存在していました。
- 物理減衰よりも減少幅が大きいため、放射性セシウムの土壌内部への移行と斜面方向への移動が関与していると推測されます(経年変化の調査と解析を継続予定)。

放射性セシウム137の蓄積量 (kBq/m²)

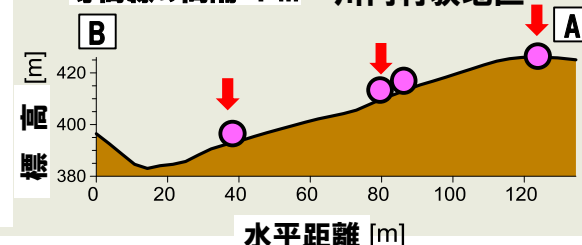


ほぼ同一地点で異なる時期に試料を採取
○試料採取日: 2013年1月, 2014年10月

Red Relief Image Map, patent technology
by Asia Air Survey Co.Ltd.



等高線の間隔: 1 m 川内村荻地区



森林での土壌浸食に伴う放射性セシウムの流出

- 小水系全体から1年間に流出する放射性セシウムの単位面積当たりの流出率は、従来の小水系の一部斜面に設置した観測プロットにおいて観測された流出率より、少ない可能性があります。

- 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、小水系から流出する放射性セシウム量は、1桁少ない値でした。

川内村荻地区の斜面観測プロットにおける流出土壌・放射性セシウム量

観測プロット (急傾斜地)	川内村荻地区 (常緑針葉樹林；スギ林)
観測期間 (約48週間)	平成25年11月19日 ～平成26年10月20日
土壌流出量	13 g/m ² ・年間
流出土壌の放射性セシウム濃度 (134Cs+137Cs)	28 kBq/kg
放射性セシウムの流出量	360 Bq/m ² ・年間 (平成25年度； 1,600 Bq/m ² ・年間)
放射性セシウムの流出率	0.032%・年間 (平成25年度； 0.15%・年間)



観測プロットでの観測の概念図

川内村荻地区の小水系における流出土壌・放射性セシウム量

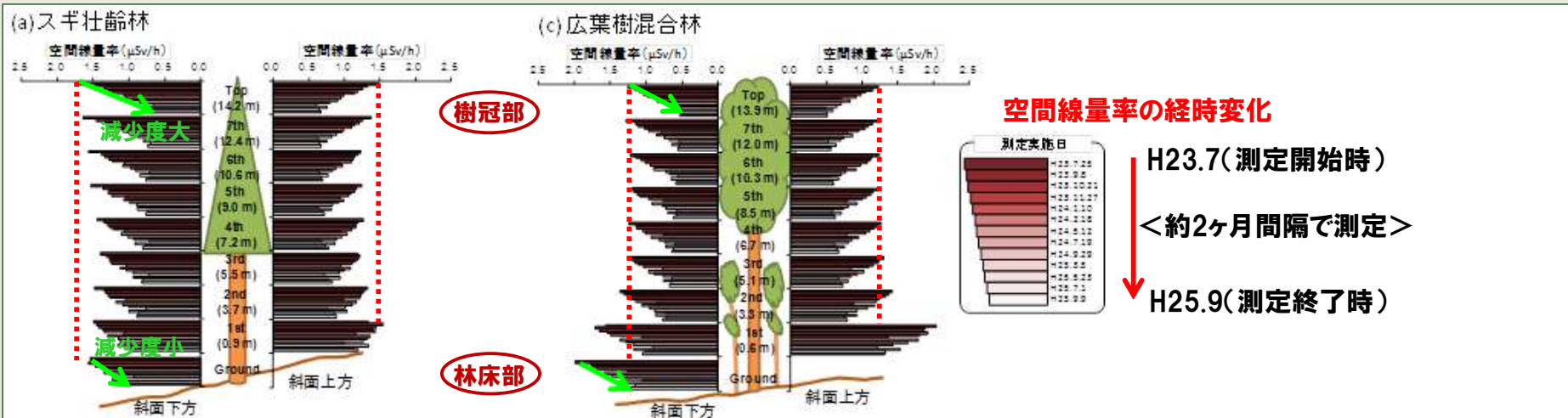
流出土壌の体積	4,932 cm ³	
流出土壌量	4.9 kg	
放射性セシウムの濃度 (134Cs+137Cs)	約 80 kBq/kg	
放射性セシウム流出量	流域54,000m ² あたり (夏～秋期3か月間)	約 392 kBq
	1 m ² あたり (夏～秋期3か月間)	約 7.3 Bq/m ²
	年間	約 29 Bq/m ²



川内村荻地区の小水系における河谷堆積物
平成26年6月27日～9月30日
(約3か月間)に堆積した土壌

森林内の空間線量率の変化

- 放射性セシウムが地表に移動する傾向が認められますが、森林内全体で空間線量率は、徐々に減少しています。
- 時間経過とともに、樹冠部の空間線量率は大きく減少しましたが、林床では樹冠部と比べて空間線量率の減少速度が遅く、樹冠部から林床への放射性セシウムの移動による影響と考えられます。
- 地表付近における空間線量率の減少速度は、放射性セシウムの物理減衰による減少率と同程度でした。

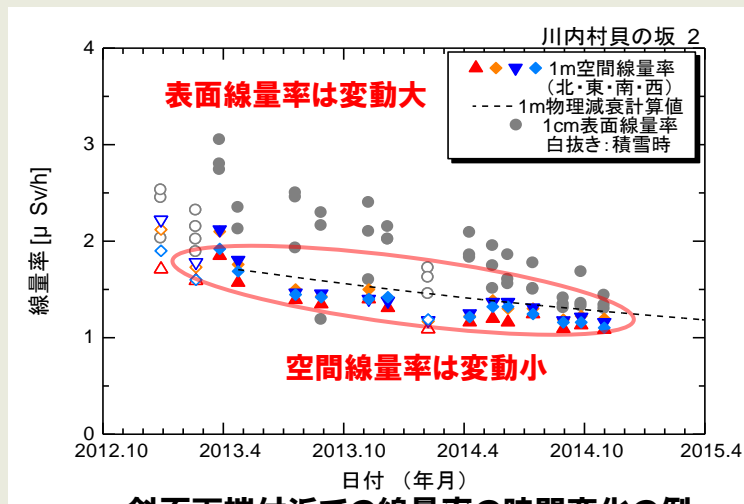


森林内空間線量率の垂直方向分布の時間変化(川俣町山木屋地区)

森林からの放射性セシウム流出による空間線量変化

- 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りますが、空間線量率には影響しない程度です。

- 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放射性セシウムが原因の一つと考えられます。
- 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です。
- 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しています。

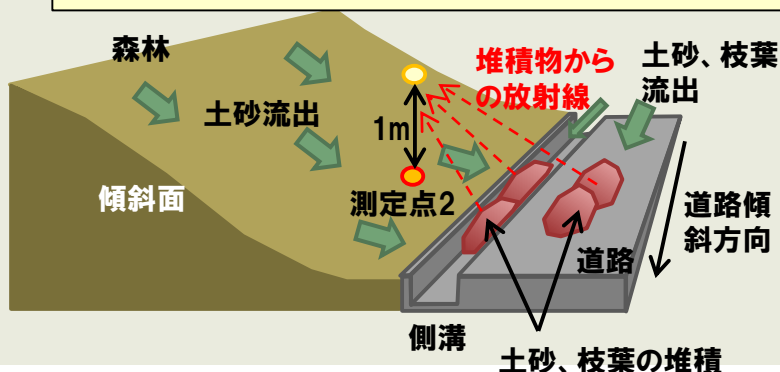


斜面下端付近での線量率の時間変化の例



線量率測定の様子

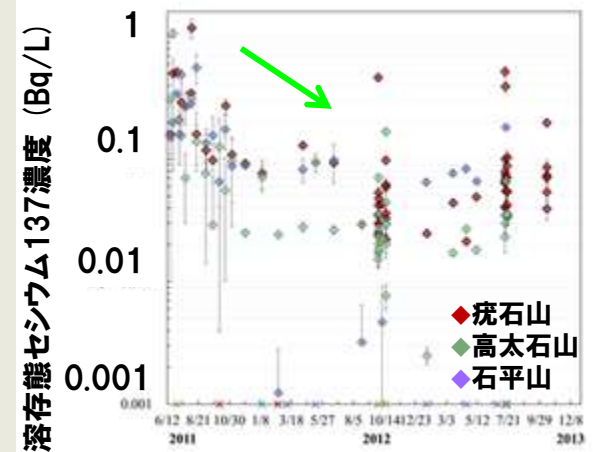
土砂移動、体積状況、放射線影響のイメージ(推測)



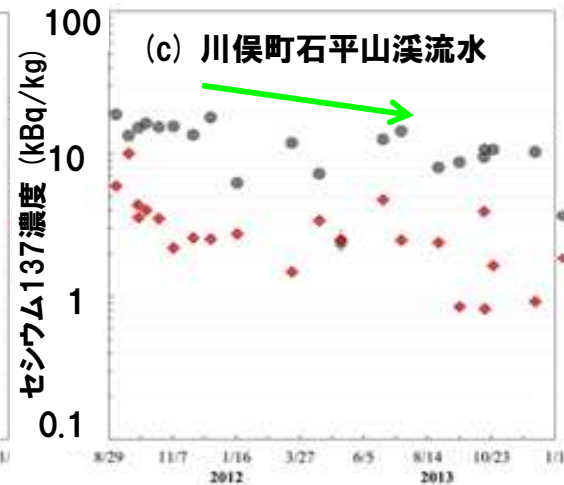
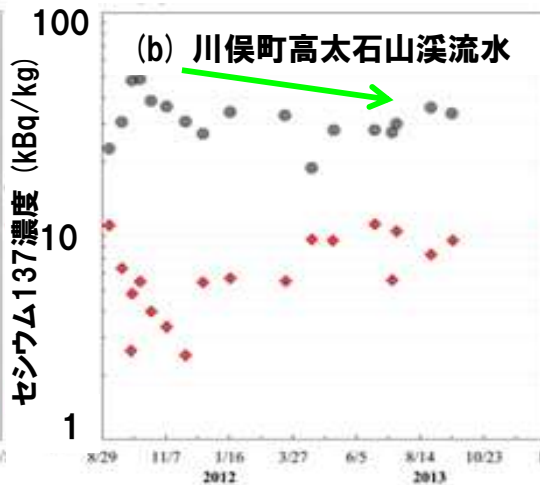
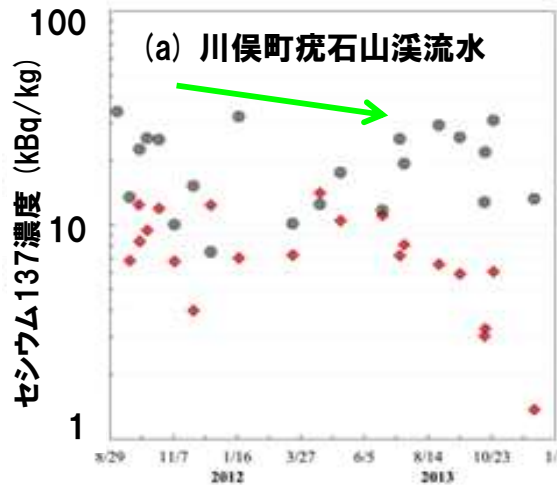
森林等から河川への放射性セシウム流入

■ 森林から溪流水に流入する放射性セシウムの濃度は、時間とともに減少する傾向にあります。

- 森林からの水が流入する溪流水において、大部分(90%以上)の放射性セシウムは、浮遊懸濁物質に吸着された形で存在します。
- 溶存態、浮遊懸濁物質・粗大有機物に吸着された形の放射性セシウムの濃度は、時間とともに減少する傾向にあります。



溪流水に含まれる溶存態放射性セシウム濃度の時間変化

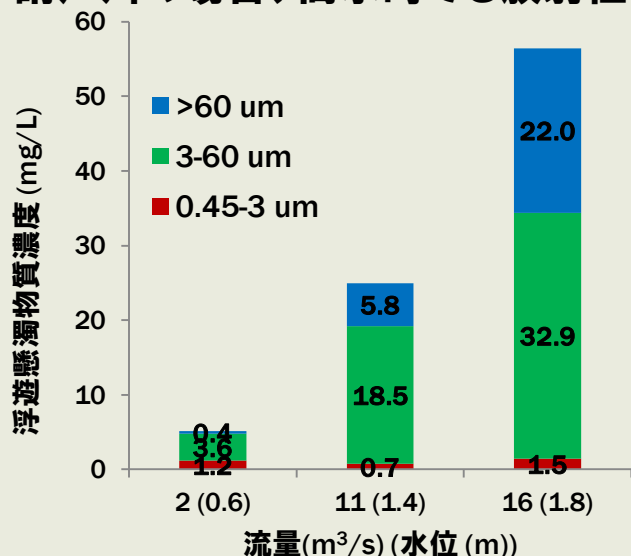


溪流水に含まれる浮遊懸濁物質および粗大有機物中放射性セシウム濃度の時間変化

降雨による河川水中の放射性セシウム濃度の変化

■ 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測定の実検出限界(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濃度はあまり変わらず、懸濁態の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。



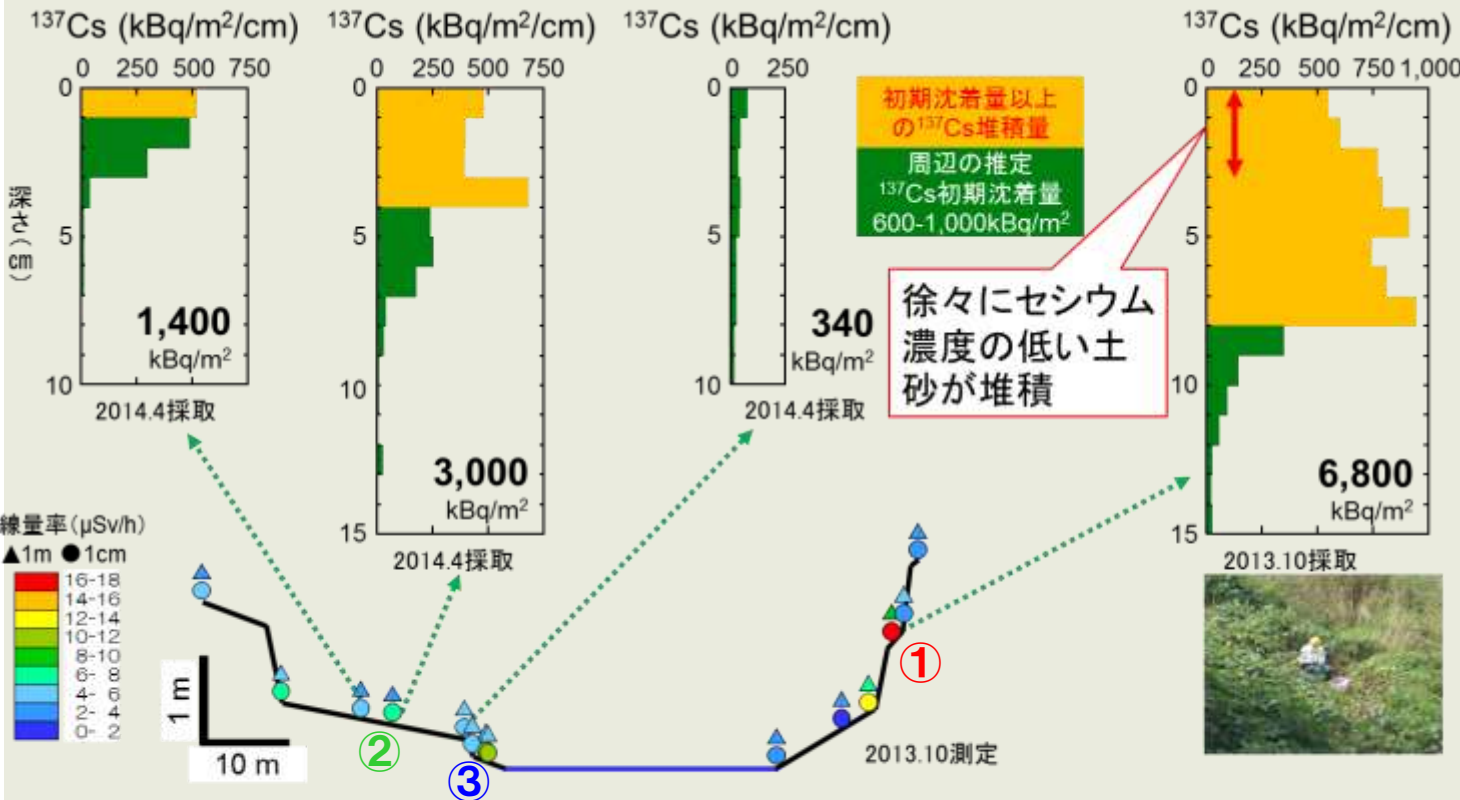
請戸川下流域(請戸川橋)における平成26年台風19号時の河川水中の溶存態および懸濁態放射性セシウム濃度

	請戸川下流域(請戸川橋)
溶存態 ¹³⁷ Cs濃度	0.31 ± 0.03 Bq/L
懸濁態 ¹³⁷ Cs濃度	2.2 ± 0.2 Bq/L
溶存態の割合	12%
総 ¹³⁴ + ¹³⁷ Cs濃度	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

河川敷への放射性セシウムの蓄積傾向

- 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。

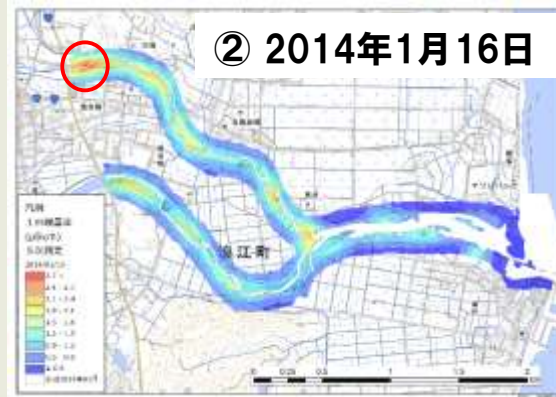
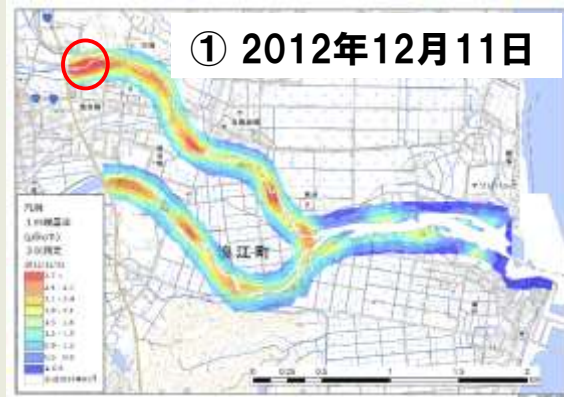
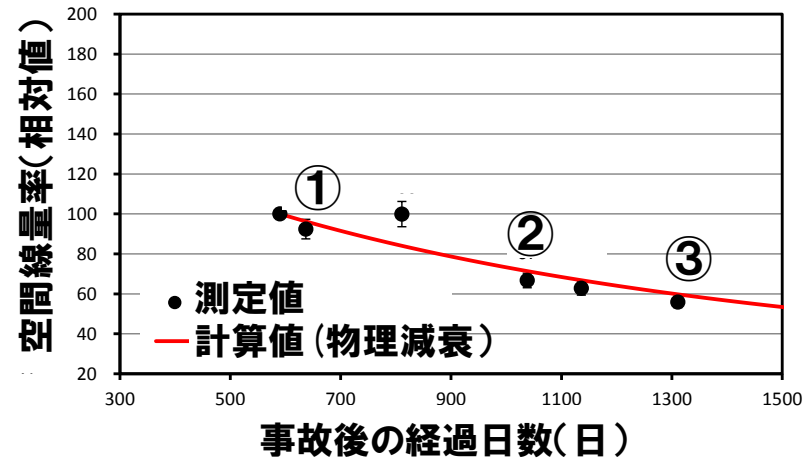
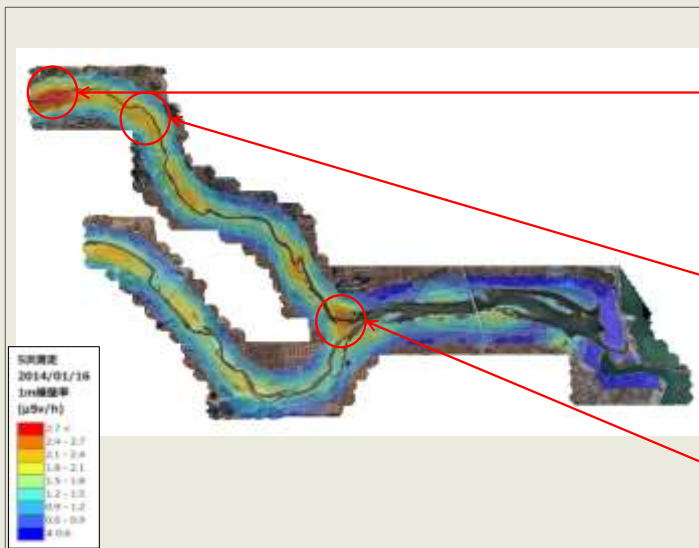


- ①台風のような高水時のみ水が到達する高水敷:** 放射性セシウムが堆積しやすい場所がありますが、ごく限られた場所です。
- ②年に数回水が到達する場所:** 放射性セシウムの堆積・浸食が繰り返されるため、放射性セシウムの堆積量はやや少なくなります。
- ③浸水しやすい場所:** 放射性セシウムはほとんど堆積しません。

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

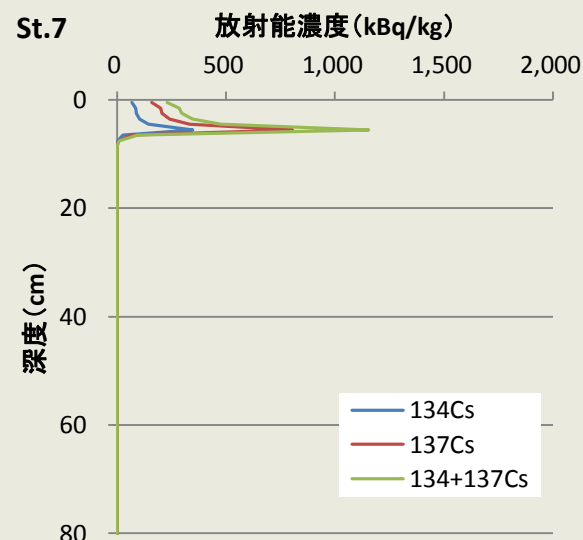
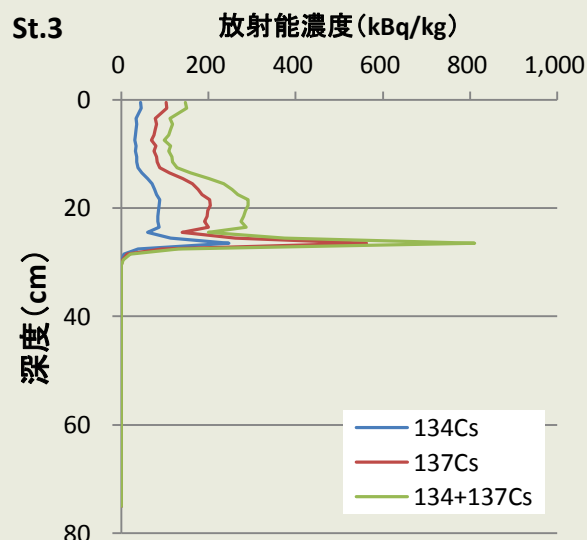
河川敷の線量率変化

- 放射性セシウムが堆積しやすい場所は、表面線量率が増減しやすいものの、全体的に空間線量率は徐々に減少する傾向にあります。



ダムへの放射性セシウムの蓄積傾向

- ダム湖底に堆積する土砂粒子中の放射性セシウム濃度は、時間とともに低下すると考えられます。
- ダム湖底の堆積物中における放射性セシウム濃度の深さ方向の分布をみると、比較的深いところに最大濃度(事故時の沈着に起因すると推測)があり、その上に徐々に濃度の低い堆積物が堆積していることが分かります。
- これは、森林から溪流水に流入する放射性セシウムの濃度が、時間とともに減少する傾向とも一致しています。



森林～河川水系における放射性セシウムの挙動 (請戸川水系の例)

請戸川上流域(平水時)

溶存態セシウム 0.37 Bq/L

懸濁態セシウム 0.37 Bq/L

【森林調査】

・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**(実際にはさらに割合は小さい可能性)

【河川水系移動挙動解析】

・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ダムへの流入量の**10%以下**

森林からの流出
約0.3 TBq/年

森林以外
からの流出
1.0 TBq/年

うち、森林
290 TBq

請戸川水系
全体
370 TBq

うち、
森林以外
80 TBq

請戸川下流域(高水時)

溶存態セシウム 0.31 Bq/L

懸濁態セシウム 2.2 Bq/L

請戸川河口域

溶存態セシウム 0.02 Bq/L

請戸川沖合10km

溶存態セシウム 0.007 Bq/L

河口からの流出
約0.3 TBq/年～
1.0 TBq/年

放射性セシウムの数値はCs-137によるもの。TBq=10¹²Bq。

参考

地衣類を用いた放射性セシウムの沈着挙動と移動性の評価

- 地衣類の放射性セシウム濃度は、事故初期の放射性セシウム土壌沈着量と相関がありました。地衣類中のセシウムの化学形態を明らかにし、その場所におけるセシウムの移動性への影響を調べていきます。

- 福島県内16地点(空間線量率: 0.2-20.8 $\mu\text{Sv/h}$)において、事故から約2年後に地衣類*1中の放射性セシウム*2濃度を調べたところ、事故から約3ヶ月後の土壌中の放射性セシウム*2沈着量(計算値)との間に良好な相関関係が示されました。

*1 ウメノキゴケ類9種類
*2 Cs-137



図1 樹皮に生育する地衣類の例

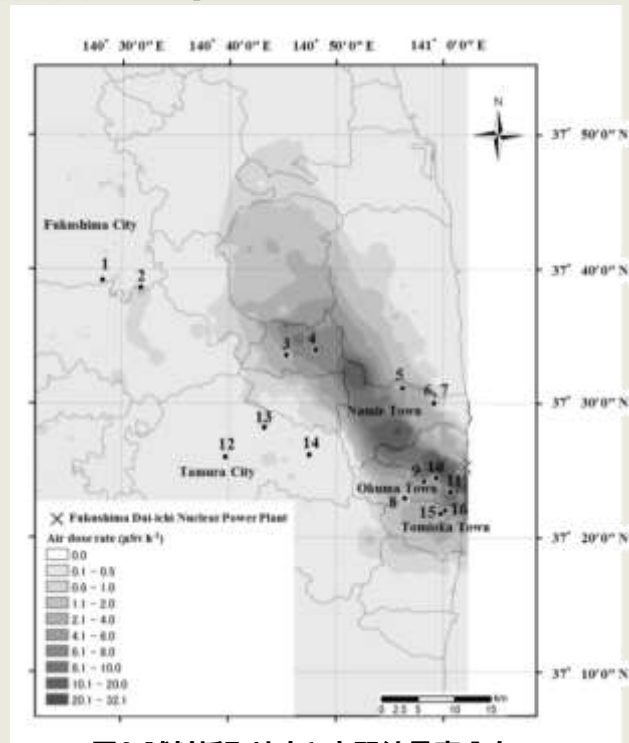


図2 試料採取地点と空間線量率分布

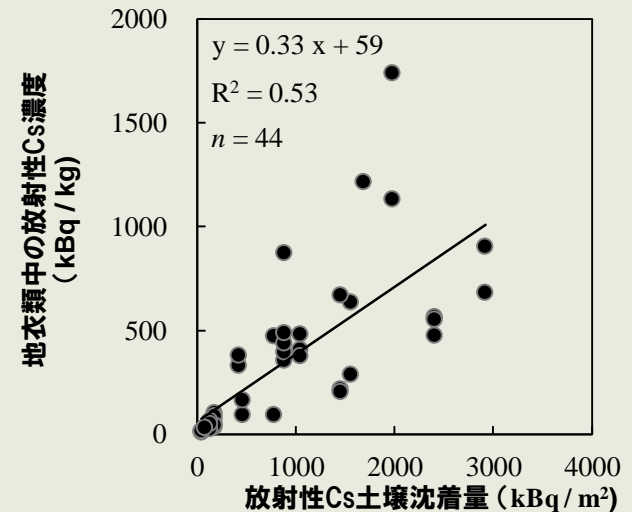


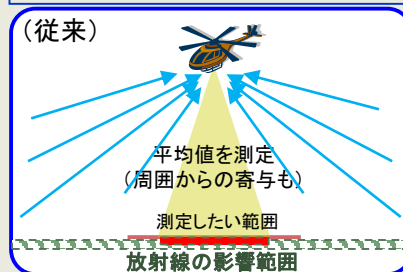
図3 地衣類中の放射性セシウム濃度と放射性セシウム土壌沈着量との関係

無人ヘリ搭載型ガンマカメラの開発

- コンプトンカメラ方式のガンマカメラのエネルギー選択により、周囲からの放射線の影響を除き、汚染状況の高精度なマッピングを可能にしました。

- 無人ヘリコプターにより上空から詳細なセシウム分布を測定
 - 高度10mの飛行により位置分解能約10mで迅速測定(60m×60m範囲(測線間隔5m)を20分間で測定が完了)
 - 山林や屋根など人の立ち入りが容易でない場所で活用

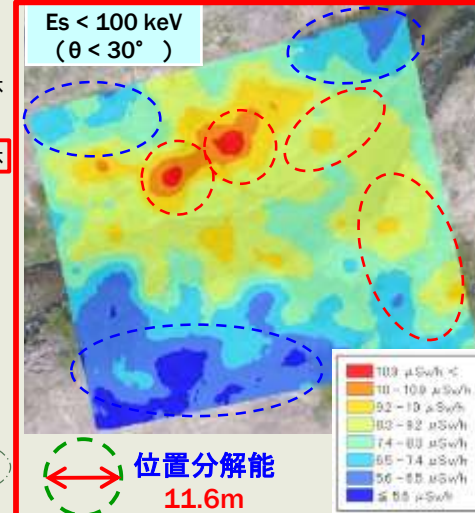
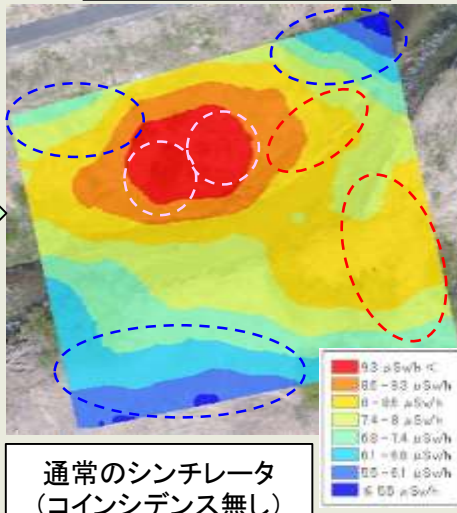
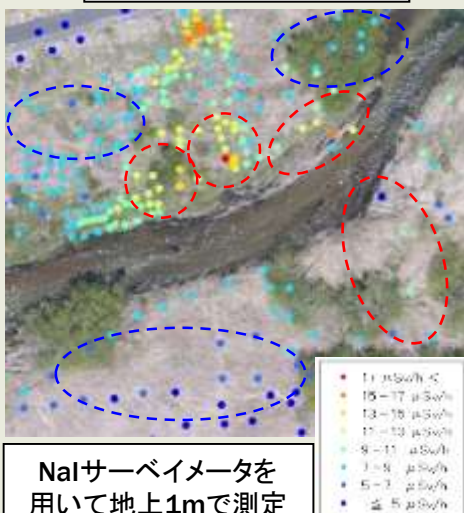
従来の検出器との違い - 真下方向の指向性で高位置分解能 -



(比較用) 地上測定値

従来方式

コンプトンカメラ方式



無人飛行機による広域モニタリング技術の開発

- 放射線検出器を搭載し、遠隔で長時間の滞空性能を満足する機体開発のため、北海道・大樹町での試験及び福島市内での試験を実施しました(JAXAとの共同研究)。

実用機開発



重量：約4.9 kg
(検出部+データ処理部)

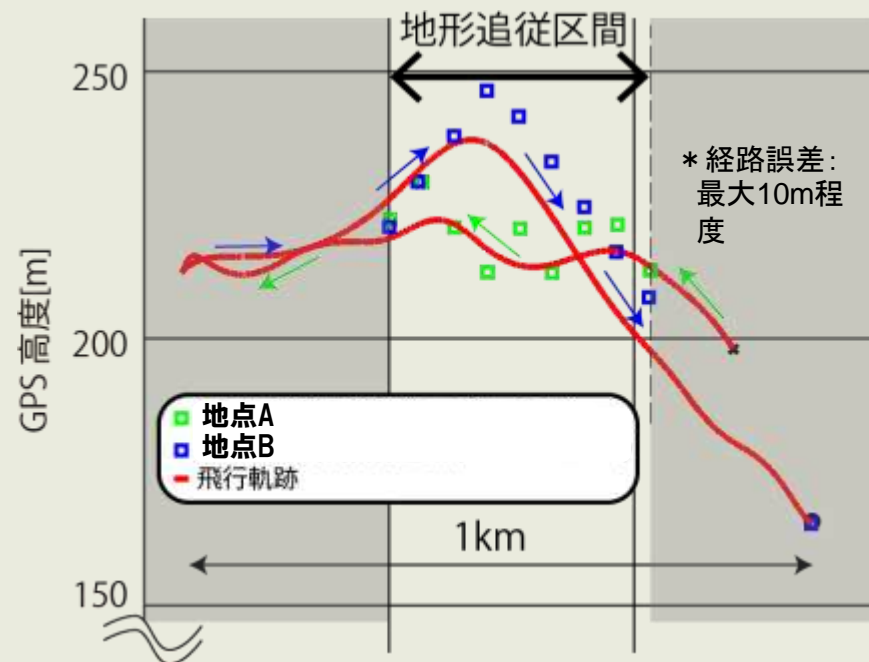
搭載検出器：

- ・プラスチックシンチレーション検出器
- ・NaI検出器γ線スペクトロメータ

データ処理器

- ・測定データは内部メモリに、設定された時間間隔毎に保存
- ・リアルタイムデータを無線モデムを介し地上PCに送信

地形追従機能



水モニタリング車の開発

- 沢水、ため池等の水中における放射性物質(^{137}Cs 、 ^{134}Cs)濃度を現地において短時間で高精度に連続測定ができる高感度水モニタリング車を開発しました。



遮へい体上部を開け、測定容器(通水しながら測定)を取り出した状態。⇒



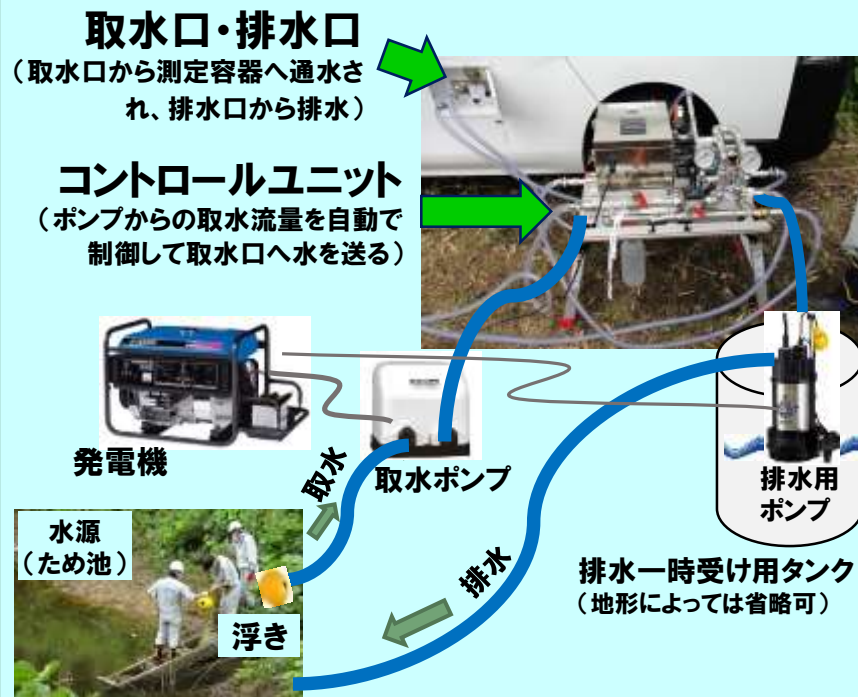
<可搬型システムの構成>
4WD車両にGe半導体検出器及び測定用資器材を搭載している。



<車外で使用する資器材>
ポンプ、発電機、ホース等を荷室の後部へ積載している。



<Ge半導体検出器>
荷室の前部に搭載し、資器材置き場とは隔壁で仕切られている(汚染防止)。



<現地測定の様況例>

γスペクトル



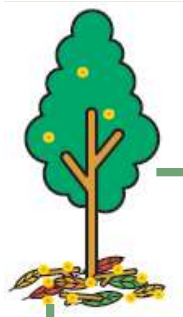
核種	放射性物質の濃度 (Bq/L)	検出下限値 (Bq/L)
Cs-134	N. D.	0.98
Cs-137	1.20	0.96

避難区域内(空間線量率約 $1\ \mu\text{Sv/h}$)の測定結果(例)

[仕様]

- 検出下限値: 約 1Bq/L (空間線量率が約 $1\ \mu\text{Sv/h}$ 、30分間測定の場合)
- 検出器: U型Ge半導体検出器(低重心用)
- 測定容器: Ge検出器周囲に専用のマリネリ型(容量は約 1L)を配置
- 通水量: 約 $5\ \text{L/min}$ (測定試料の代表性向上)
- ホース長さ: :40m

森林における放射性セシウムの移動を理解する際に出てくる用語



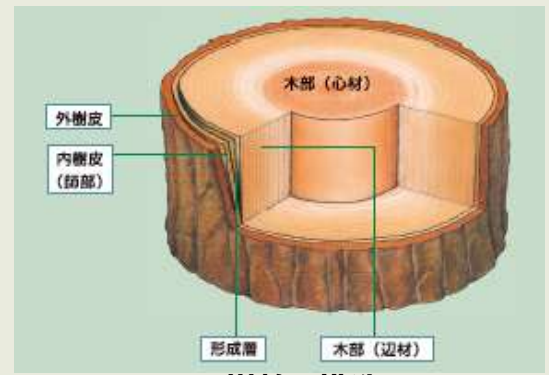
→ **樹冠**: 茎、葉、花等を含む、地上にある植物の部分

→ **樹幹**: 木の主要構造部分で、枝を支え、根に直接つながって支えられている

↓
木材: 様々な材料・原料として用いるために伐採された樹木の幹の部分指す呼称

【 **心材**: 樹幹横断面のうち、中央の着色した部分をいう。心材の木部細胞は全て死細胞。

【 **辺材**: 樹幹横断面のうち、心材周辺部の白っぽい部分をいう。生きている木部細胞が存在する部分。



樹幹の構造

資料: 一般社団法人全国林業改良普及協会「森林を知るデータ集 No.1」

林床: 森林の地表面

【 **リター層(L層)**: 新鮮な落葉などが堆積している層

【 **落葉層**: 土壌の上にある落葉や落枝とそれらの腐朽した腐植からなる堆積有機物層

樹幹流: 幹を伝う雨水

林内雨: 樹冠下の雨水

表面流: 降雨が継続した場合、土壌表面に浸透しきれない雨水によって形成される流れ



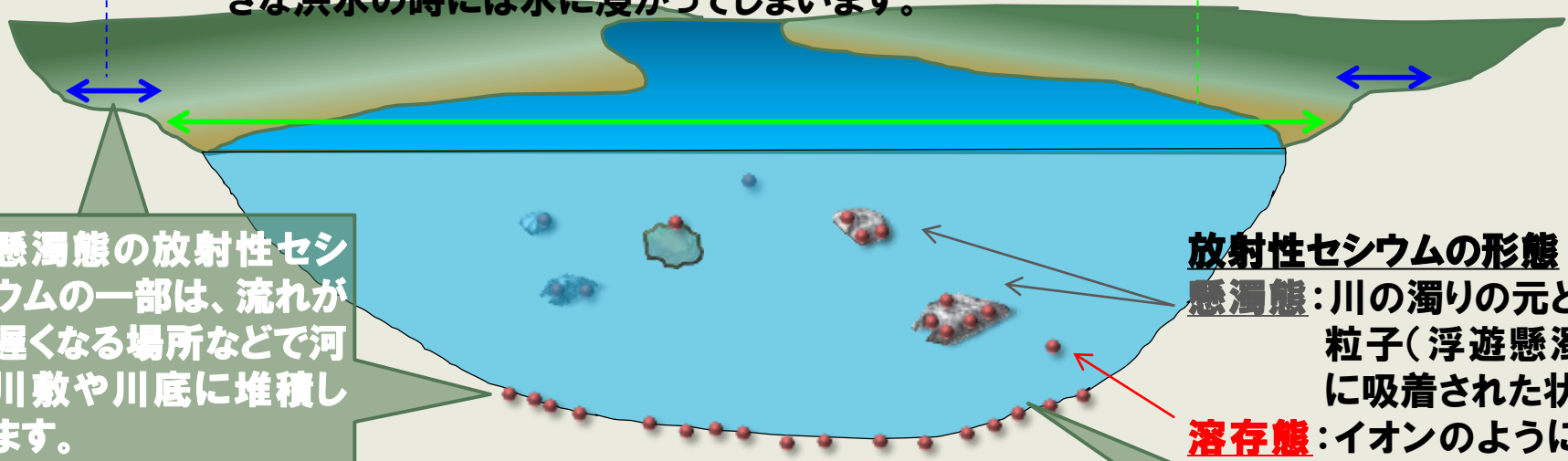
森林内での水の流れ

(参考・引用: 科学技術用語J-GLOBAL、テキスト版 森林・木材と放射性物質 (2014年 林野庁)、木質の形成 第2版(海青社)、森林水文学(森北出版株式会社)、家のそばの森はどうやって除染するの?(環境省)、森林内の放射性物質の分布状況調査結果について(平成25年3月29日農林水産省))

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、大きな洪水の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。



懸濁態の放射性セシウムの一部は、流れが遅くなる場所などで河川敷や川底に堆積します。

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。



川や湖の堆積物中の放射性セシウムは、微細な土砂粒子等に強く吸着されており、水に浸かった状態のままでも再び溶け出すことはほとんどありません。

➤ 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)