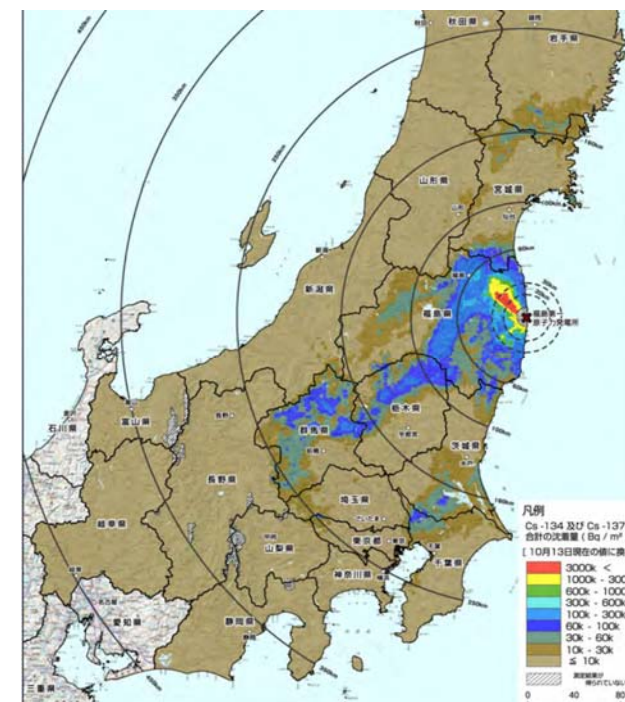


流域における水・土砂とセシウムの移行

総合研究棟A405
onda@geoenv.tsukuba.ac.jp

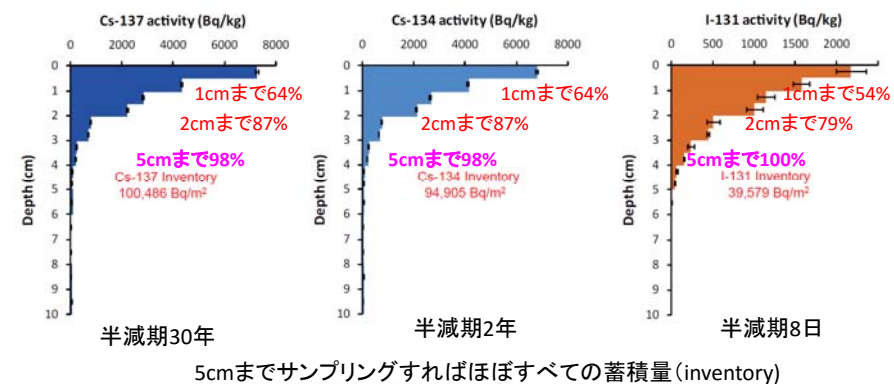
恩田裕一



スクレーパープレート



川俣町調査結果



重要なポイント

- ある地域の蓄積量を表す場合は, Bq/m^2
→ ある地域の蓄積量を表す場合は, こちら
(蓄積量; inventory)。
- ある物質の濃度を知りたい場合 Bq/kg
→ 濃度 (concentration)
深度分布があるので, 採取深さによっていかようにも変わります

環境中での放射性物質の移行 (2011/6-2015/3)

戦略推進費, 文科省委託, 原子力規制庁委託

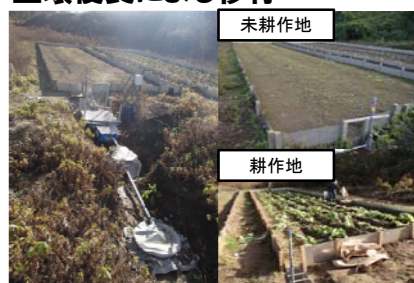


様々な土地利用からの放射性セシウムの流出

森林流域からの流出



土壌侵食による移行



水田を介した移行



放射性核種流出モニタリング

土壌の侵食量と放射性物質の流出量の関係を求めるため、

- ① 様々なプロットで土壌粒子の粒径毎の土壌流出量を測定
- ② 粒径の違いに伴う放射性セシウムの放射能濃度の関係を測定
- ①、②の結果を基に、土壌流出量と放射性セシウムの流出量の関係をモデル化する。

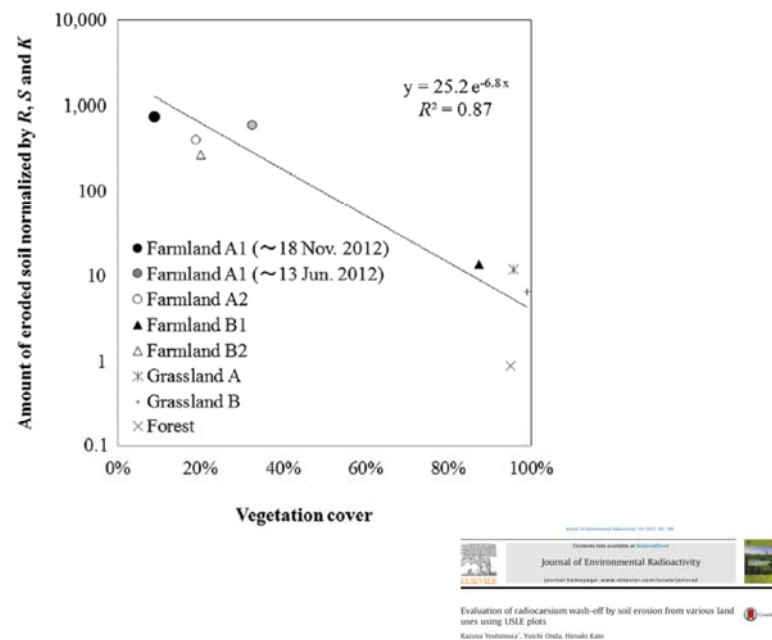
文部科学省委託研究



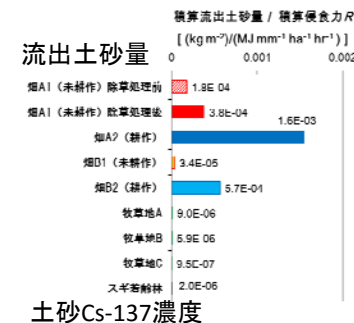
緩傾斜の畑地(裸地 A(左), 耕作された畑A2(右))



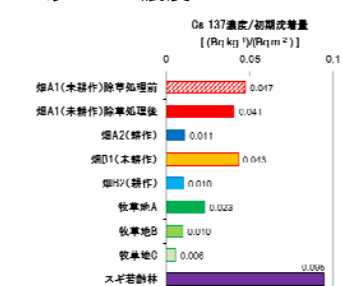
急傾斜の畑地(未耕作の畑B(左), 耕作された畑B2(右)) 採草地(牧草地A(左)) 放牧草地(牧草地B(右))



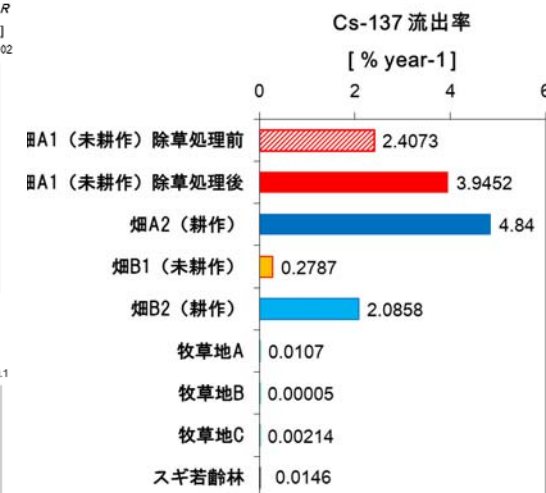
結果



土砂Cs-137濃度



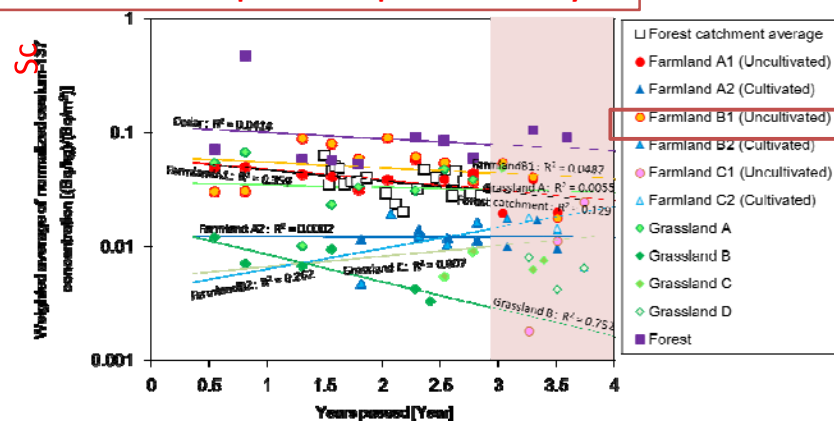
Cs-137流出率



http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10921/36/2-1_H26forest.pdf

10

沈着量で基準化した土砂中のセシウム濃度 (Sc): ^{137}Cs concentration per unit deposition density



Temporal change in normalized cesium-137 concentration in sediment discharge from each plot. Each point

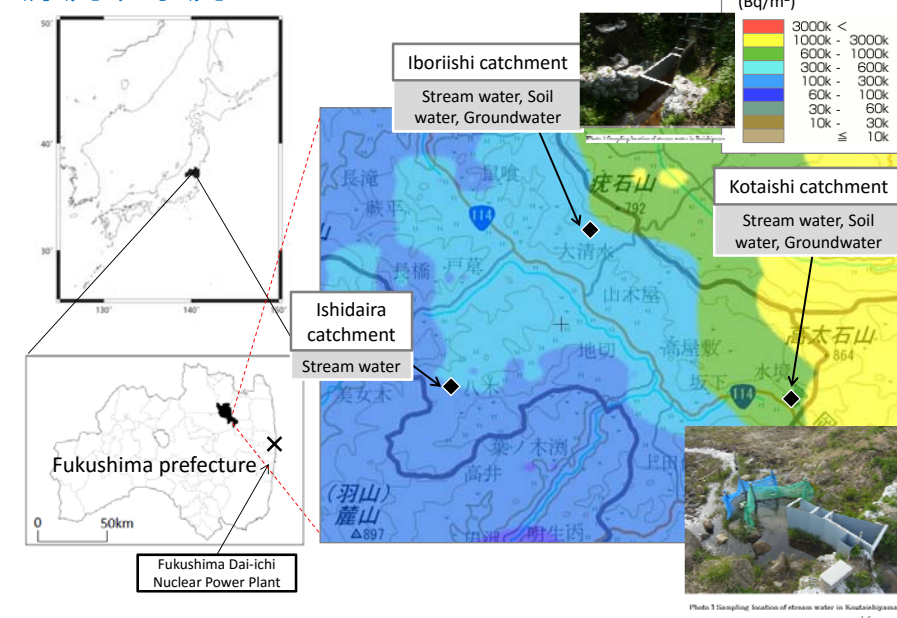
$$Sc_{\text{uncultivated}}(t) = 0.0619 \exp(-0.196t)$$

$$Sc_{\text{cultivated}} = 0.0137 \quad (\text{Averaged value of the 2 plots (A2, B2)})$$

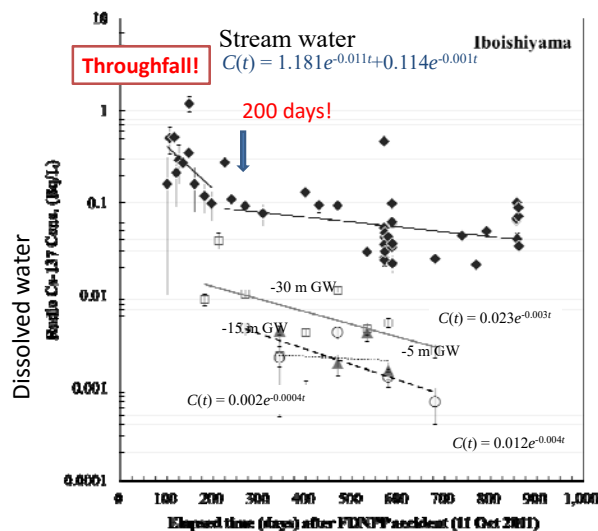
$$Sc_{\text{grassland}} = 0.0134 \quad (\text{average value of grassland A, B, C})$$

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10921/36/2-1_H26forest.pdf

源流域水流



源流水溶存態濃度



- Stream water
- 5 m Groundwater
- 15 m Groundwater
- 30 m Groundwater
- N.D.

Journal of Environmental Radioactivity
 Journal homepage: www.elsevier.com/locate/jenvrad

Temporal changes in dissolved ^{137}Cs concentrations in groundwater and stream water in Fukushima after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident

Sho Iwagami^{a,*}, Maki Tsujimura^a, Yuichi Onoda^a, Masataka Nishino^a, Ryohi Konuma^a, Yutaka Aoe^a, Masami Hada^a, Shinsuke Imai^a, Aya Sakaguchi^a, Hiroaki Kato^a, Masayoshi Yamamoto^a, Yoshiki Miyata^a, Yasuhito Igarashi^a



平成 23 年度科学研究費補助金 基盤研究 (B) 2020000000
 放射性物質による環境汚染への対策基礎の確立
 福島 陸域・水域モニタリング大学連合チーム
 FUKUSHIMA RADIATION MONITORING OF WATER, SOIL AND ENVIRONMENT

●試験水田にて、土壌はぎとりなど耕作手法の違い等による流出土砂内の放射性核種の移行を調査する。

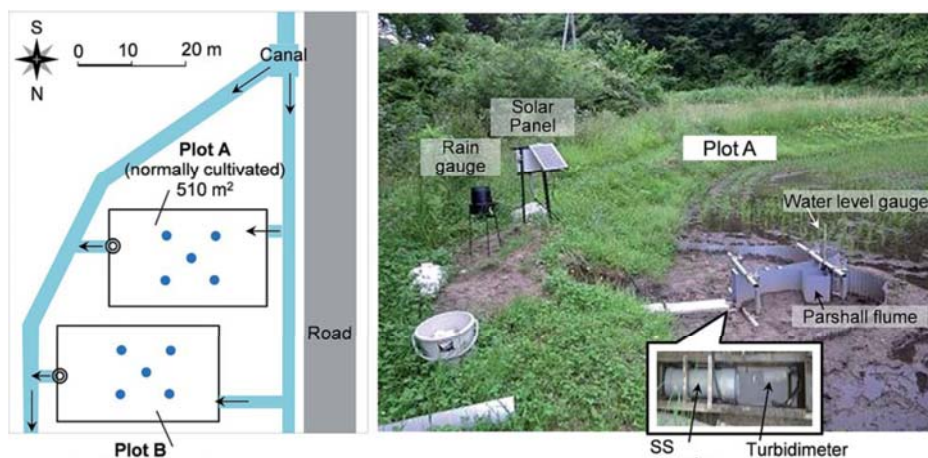


14

Outflow from paddy field

Experimental Paddy in Yamakiya

2011-2014



200kBq/m²

CRIED CENTER FOR RESEARCH IN FACTORIES AND ENVIRONMENTAL DYNAMICS

Table 3 Runoff, SS, Cs-137, and Cs-134 discharge over a given period

Study period	Rain (mm)	Runoff (L)	SS (g)	Ave. of SS (mg L ⁻¹)	SS (kg ha ⁻¹)	SS from Sampler (g)	D ₅₀ SS (μm)	Cs-137 ^b (Bq kg ⁻¹)
Plot A: normally cultivated								
2011/6/13 ^a	0.0	2440	11 000	4530	216	2.97	14.2	57 100 ± 1590
6/14-6/20	6.0	1.97	6.72	3420	0.13	0.33	16.7	11 300 ± 1280
6/21-7/3	72.0	1500	210	140	4.11	11.7	18.5	14 400 ± 401
7/4	17.2	50.8	172	3380	3.36	9.47	16.6	18 000 ± 418
7/5-7/15	64.2	7660	2840	371	55.8	23.4	18.1	12 700 ± 281
7/16-7/22	21.0	—	—	—	—	11.9	24.3	9270 ± 272
7/23-7/31	66.0	23 000	1050	45.5	20.5	4.72	19.3	13 500 ± 220
8/1-8/6	12.2	5780	327	56.7	6.42	1.82	26.1	10 600 ± 323
8/7-8/9	23.6	2750	430	156	8.42	3.62	18.5	9670 ± 394
8/10-8/18	15.6	3.95	4.25	1080	0.08	5.54	26.0	7590 ± 603
8/19	23.4	12.7	17.2	1350	0.34	2.35	20.4	12 000 ± 843
8/20-8/29	49.0	14 700	485	32.9	9.50	3.86	17.8	8920 ± 352
Total	370	57 900	16 500	—	325	81.7	—	—

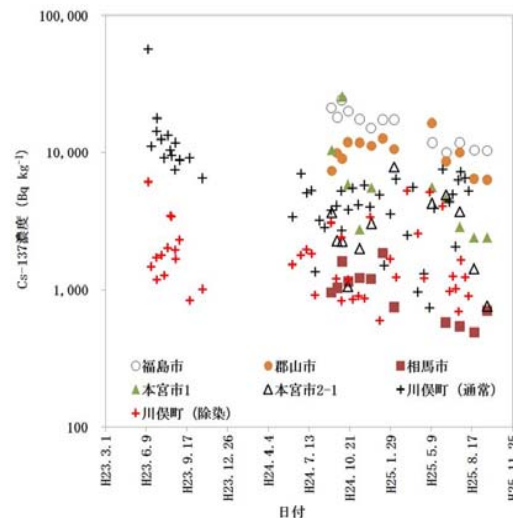
Environmental Science Processes & Impacts

PAPER

Radiocesium discharge from paddy fields with different initial scrapings for decontamination after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident

Taeko Wakahara^{a,*}, Yuichi Onoda^a, Hiroaki Kato^a, Aya Sakaguchi^a and Kazuya Yoshimura^a

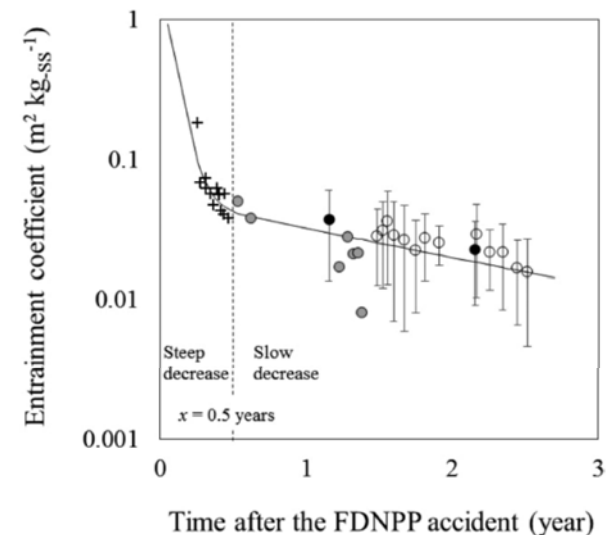
結果;流出土砂中のCs-137濃度経時変化



http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/10000/9735/38/2-2_forest.pdf

図5 Cs-137濃度の経時変化

17



ENVIRONMENTAL
Science & Technology

Time Dependence of the ^{137}Cs Concentration in Particles Discharged from Rice Paddies to Freshwater Bodies after the Fukushima Daiichi NPP Accident

Kazuya Yoshimura,^{1,2,3} Yusuke Oishi,² and Toshiro Wakabayashi²

放射性Csの移行経路としての河川

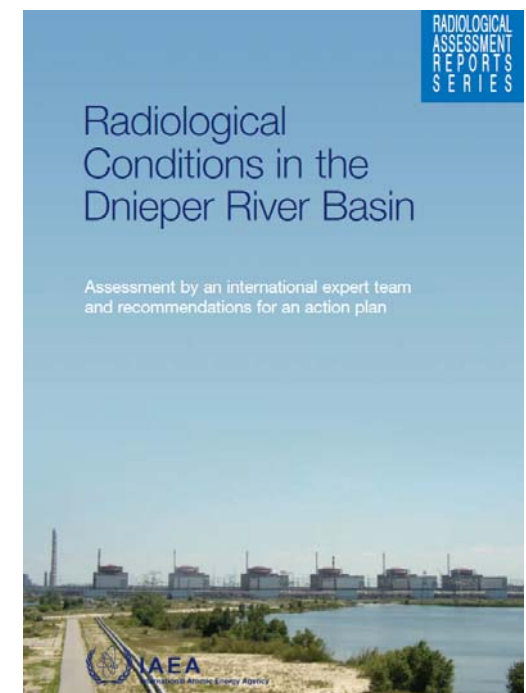
- 河川水系を介した放射性Csの移行は移行量・移行距離ともに大きい
- 放射性Csの移動形態
 - 1) 浮遊砂に吸着された「懸濁態」
 - 2) 河川水自体に溶融した状態で運ばれる「溶存態」
 - 固液分配係数 K_d (溶存態濃度/懸濁態濃度)



チェルノブイリの例

- チェルノブイリ原発事故のDnieper川への影響調査
- IAEAによる総括 (IAEA PUB-1230)

ベースは、旧ソ連による緊急モニタリング・モデリングデータ



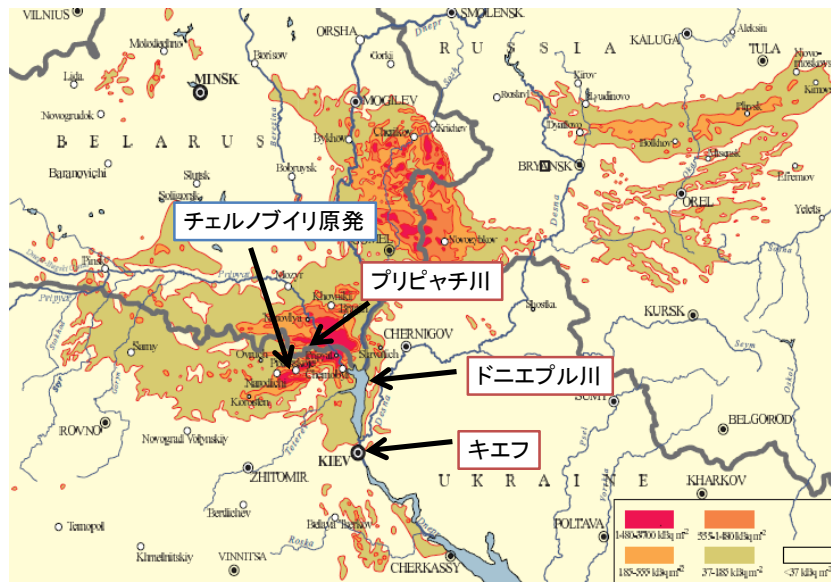


FIG. 4.4. Distribution of deposited ^{137}Cs in the most contaminated areas of the Dnieper River basin (December 1989)[4.1].

(IAEA PUB-1230)

ロシアで開発された原位置多段連続濾過システム



懸濁態と溶存態同時に測定可能
→チェルノブイリ事故後のモニタリングでの
スタンダードとして幅広く活用

(IAEA PUB-1230)

ウクライナでの測定例

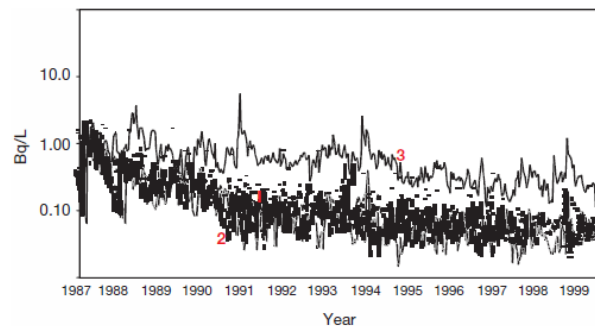


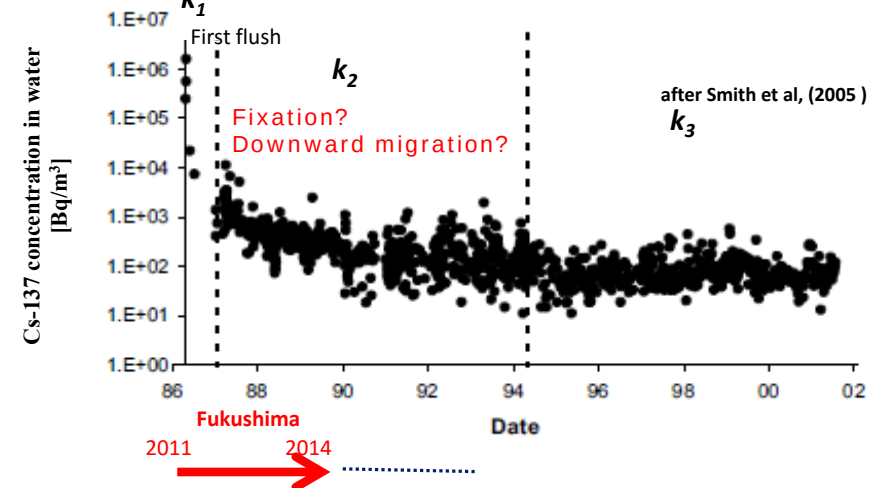
FIG. 4.18. Radionuclide concentration (10 day averages) in the Pripet River. 1: ^{137}Cs , dissolved; 2: ^{137}Cs , particulate phase; 3: ^{90}Sr .

- 溶存体, 粒子体のCs-137, Sr-90のモニタリング: 現在まで
- (プリピャチ川)

(IAEA PUB-1230)

Time Change of Cs-137 concentration in water in Ukraine
(溶存態) 1年, 8年で減衰傾向に変化がある

$$C_R(t) = D_c (ae^{-(\lambda+k_1)t} + be^{-(\lambda+k_2)t} + ce^{-(\lambda+k_3)t})$$



わが国の放射性物質モニタリングの現状

- モニタリング調整会議において各省庁が「安全・安心」に資するモニタリングを行っている



トップ > 政策について > 審議会情報 > 調査研究協力者会議等（科学技術・学術政策） > モニタリング調整会議 > モニタリング調整会議（第4回） 配付資料

モニタリング調整会議（第4回） 配付資料

- 日時
平成24年3月15日（木曜日） 18時00分～19時00分
- 場所
文部科学省3F1特別会議室
- 議題
1. 「総合モニタリング計画」の改定について
2. 各種モニタリング等の取組の進捗状況について
3. その他

- 基本的な考え方
① 平成24年3月1日時点の体制を前提として、計画の内容を改定
- 役割分担
① 役割分担に復興庁等を追加
② 関係機関間の連携強化を明記
- 実施計画
1. 環境一般（土壌、水、大気等）、航空、海域、学校、公共施設等のモニタリング計画
＜東京電力福島原子力発電所周辺を中心とした陸域モニタリング＞
【福島県全域等を対象とした広域モニタリング】

総合モニタリング計画（改定案）における主な変更点について

○：新規・追加

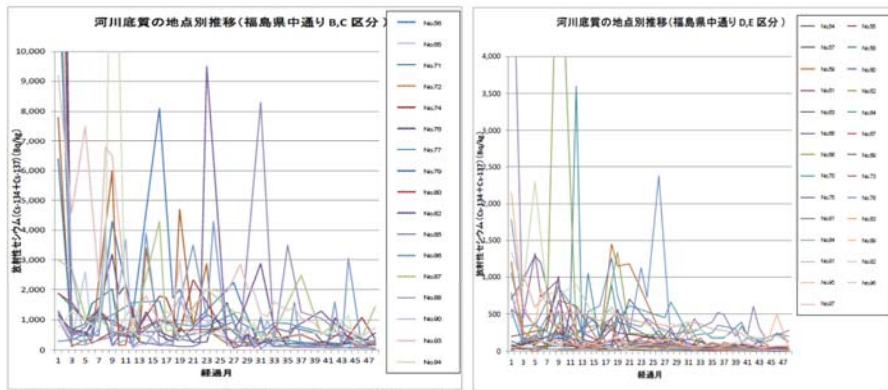
環境省水モニタリング例

環境省による河川中(未濾過試料)における放射性Cs-137の濃度

地域	河川	地点	検出限界値: 10Bq/L		検出下限値: 1Bq/L																	
			2011年 5月24日 29日	2011年 7月1日 30日	2011年 9月16日 30日	2011年 11月15日 27日	2012年 1月16日 29日	2012年 2月25日 1月30日	2012年 4月26日 2月24日	2012年 5月16日 2月24日	2012年 6月12日 2月24日	2012年 7月1日 2月24日	2012年 8月21日 2月24日	2012年 9月25日 2月24日	2012年 10月16日 2月24日	2012年 11月22日 2月24日	2012年 12月18日 2月24日	2013年 1月16日 2月24日	2013年 1月30日 2月24日	2013年 2月17日 2月24日		
上流区	荒瀬川	荒瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	小室川	小室川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	古河川	古河川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	高瀬川	高瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	荒瀬川	荒瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	新田川	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
中流区	荒瀬川	荒瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	小室川	小室川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	古河川	古河川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	高瀬川	高瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	荒瀬川	荒瀬川	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	新田川	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		
	大宮	大宮	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出	不検出		

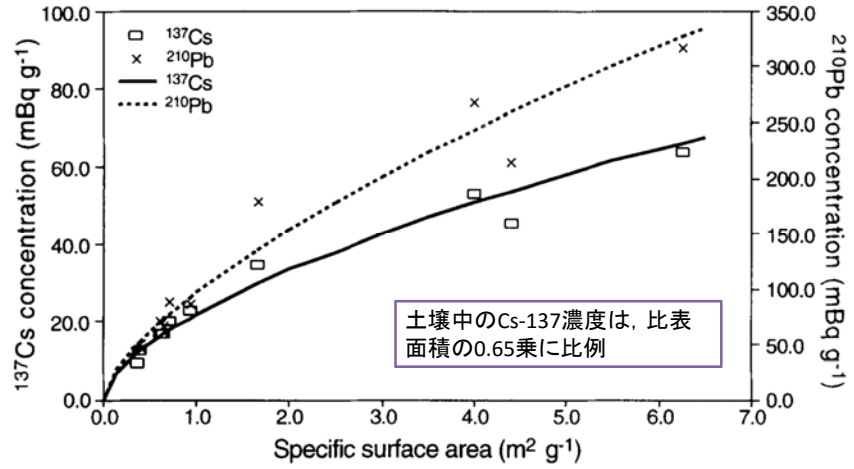
緊急時モニタリングをプロトコルとしているため(健康影響評価の把握)
ほとんどのデータが不検出

川底土



(※) 左右の2つのグラフで、縦軸のスケールが異なっている。

粒度組成(比表面積)と放射性物質濃度の関係



セシウムは細粒な土壌粒子に吸着されやすい

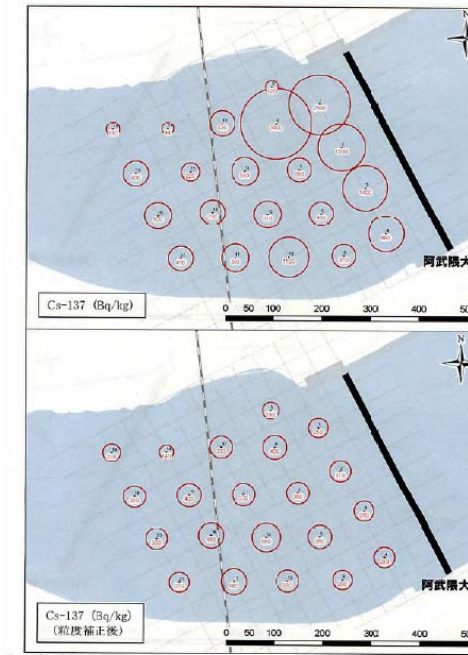
球形仮定の場合

幾何平均代表粒径(cm)	比表面積 (cm ² /g)	Cs-137濃度	
0.1000	23.1	1.00	砂
0.0100	230.8	4.46	砂
0.0010	2,307.7	19.93	シルト
0.0001	23,076.9	89.04	粘土

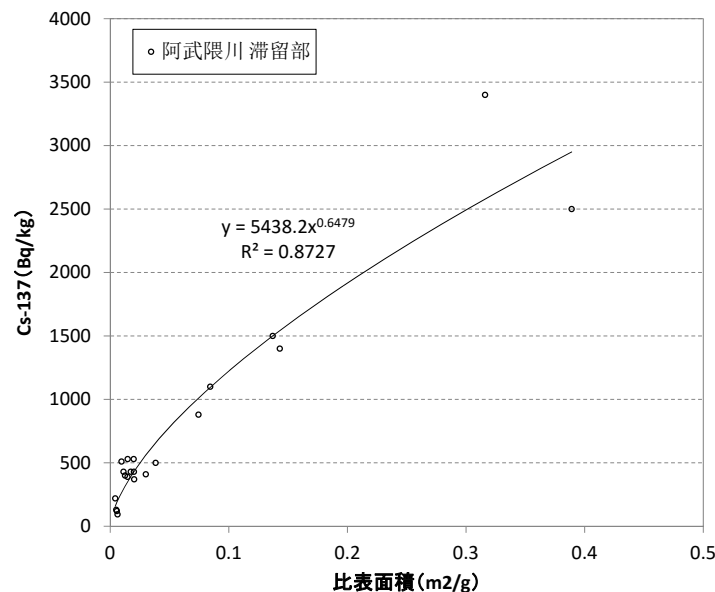
細粒粒子が集積するとCs-137濃度が飛躍的に上がる(場合によっては、100倍以上)→いわゆる“マイクロホットスポット?”の形成

高濃度のセシウム(Bq/kg)が検出されたことによって、“高濃度汚染地域”というのは間違った解釈。

位度補正の有効性



https://www.env.go.jp/jishin/monitoring/report_method-w_1303.pdf



https://www.env.go.jp/jishin/monitoring/report_method-w_1303.pdf

研究方法

- **放射性セシウム濃度の現地観測**
 - － 懸濁態放射性セシウム濃度
 - － 溶存態放射性セシウム濃度
 - － 放射性セシウムフラックス算出
 - － 流量・水位の現地観測
- **観測データをもとに、河川流量から放射性セシウムのフラックスを予測する経験式を提示する**
 - － 流域の初期沈着量あたりの懸濁態Cs-137濃度 $C'(t)$ の式
 - － 河川流量から浮遊砂フラックス Q_s を算出する $Q-Q_s$ 式を算出

調査地点(河川31地点)

観測始期の異なる3グループ・31の観測点

No.1-6: 平成23年6月より観測

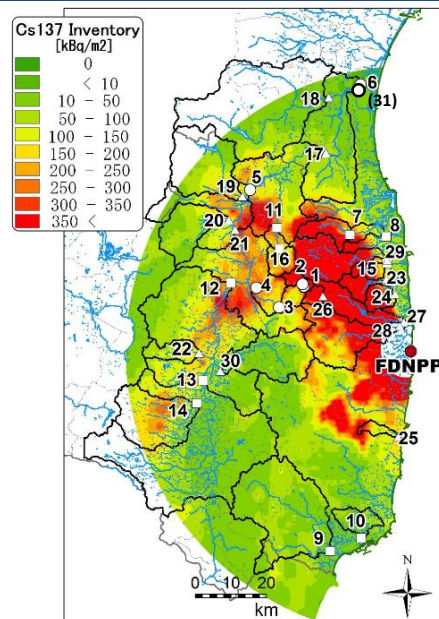
No.7-16: 平成24年末より観測

但し、平成23年8月~のCs濃度データあり

No.17-30: 平成24年度末より観測

No.31: 平成25年1月より。No.6のバックアップ

No.	地点名	No.	地点名	No.	地点名
1	水境川	11	月館	21	黒岩
2	口太川上流	12	二本松	22	富田橋
3	口太川中流	13	御代田	23	太田
4	口太川下流	14	西川	24	小高
5	伏黒	15	北町	25	浅見
6	岩沼	16	川俣	26	津島
7	真野	17	丸森	27	請戸
8	小島田堰	18	船岡大橋	28	高瀬
9	松原	19	瀬ノ上	29	原町
10	小名浜	20	八木田	30	赤沼
				31	亙理



観測項目

(1) 浮遊砂試料採取-懸濁態Cs濃度測定

- サンプラーによる浮遊砂試料採取(約1月毎)
 - 入り口がせまく、内部が広い構造=内部で流速が低下して浮遊粒子が沈降
 - 高流速時(=出水時)の浮遊砂が相対的に多く捕集される
- 観測後、ゲルマニウム半導体検出器で放射能濃度計測(筑波大)



浮遊砂サンプルの回収作業

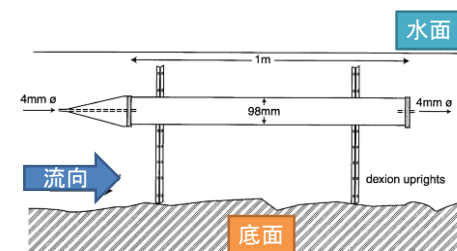


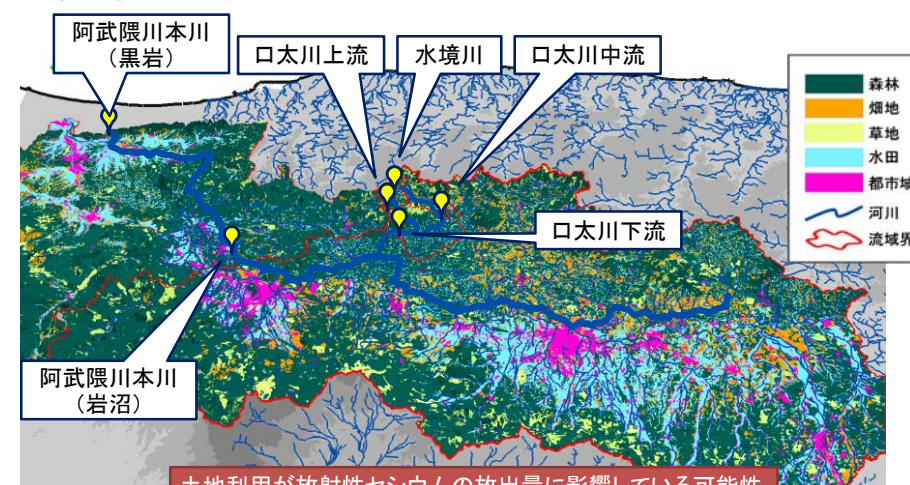
Figure 1. Cross-section of the suspended sediment sampler. Phillips et al. (2000)

手法;観測



図2 観測機器、浮遊砂サンプラー

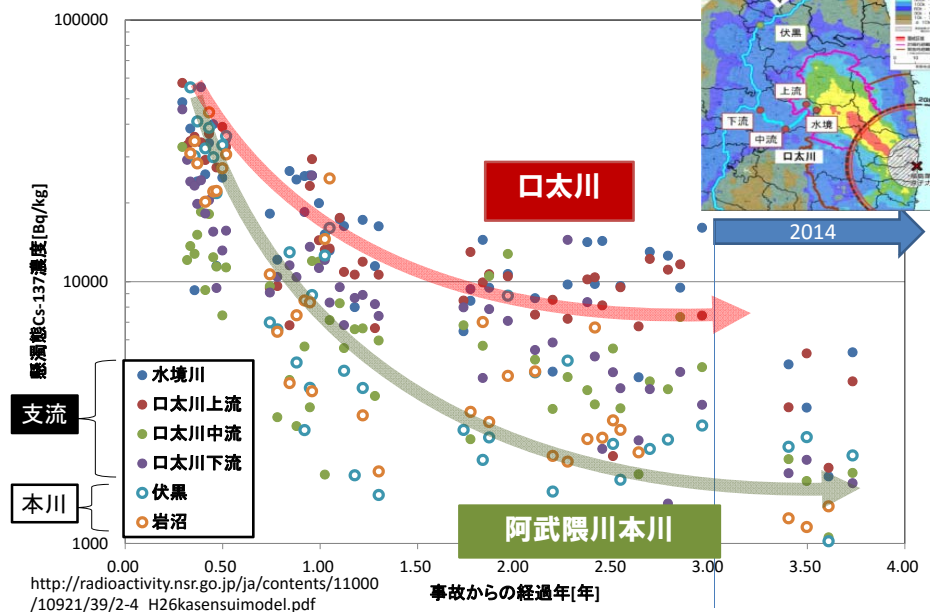
長期観測6地点(阿武隈川とその支流口太川)の土地利用



土地利用が放射性セシウムの放出量に影響している可能性

口太川(支流域)=森林・草地の被覆率が支配的・上流部は避難区域
阿武隈川本川=都市・水田などの割合が増加

長期観測6地点における懸濁態Cs-137濃度



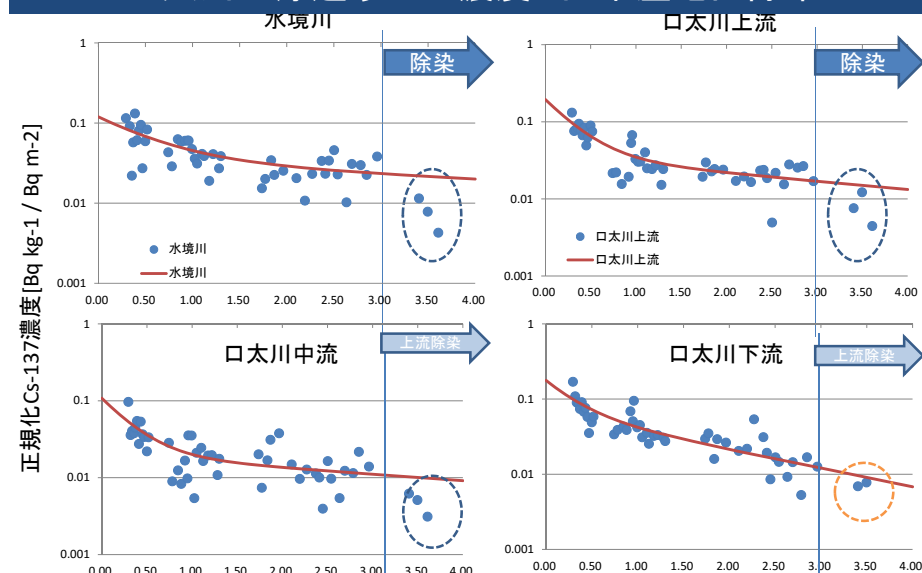
除染の影響 (山木屋地区)



除染の影響 (山木屋地区)



口太川の浮遊砂のCs濃度と山木屋地区除染



上流部:3年目までのデータから予測される値(赤線)より低い濃度

除染作業の進行状況について(疣石山)

2013/5/10



2013/12/3 除染開始直後

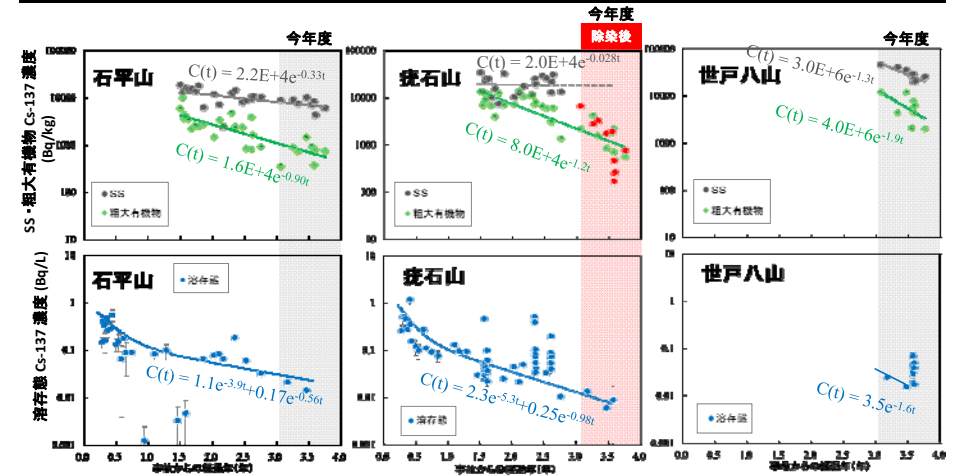


疣石山流域では、草地だった場所が除染され、除染で取り除いた土の仮置き場となっている。

2014/9/5
仮置き場化継続中



森林流域からのセシウム137流出観測(結果)



石平山流域では去年に引き続き溶存態・SS・粗大有機物の濃度低下がみられたのに対し、除染および仮置き場化開始後、疣石山流域ではSSのセシウム濃度が顕著に低下した。

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10921/36/2-1_H26forest.pdf

河川敷におけるセシウムの堆積



左岸堤防上から眺めた調査実施地点

実施地点(宮城県角田市:河口から25.6km付近)

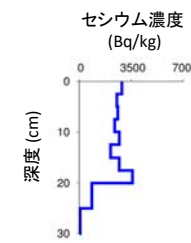
選定理由:

- 2) 2段の段丘上の高水敷=複数回洪水の履歴が残る可能性
- 3) 現在パークゴルフ場として使用されており、正確な浸水域や洪水後実施された対処(土砂の撤去等)について情報が得られる

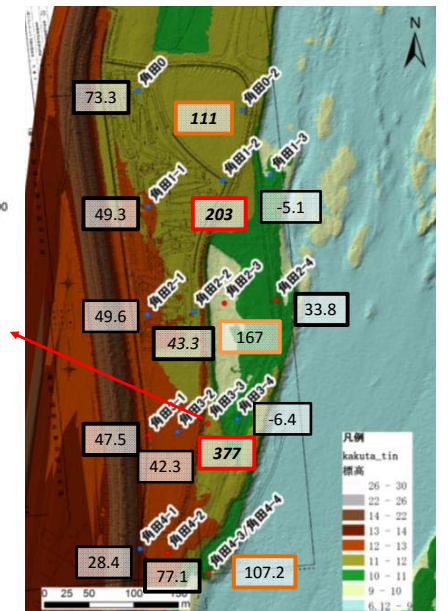


河川敷におけるセシウムの堆積

スクレーパープレート(筑波大)とコア(福島大)による土壌サンプルより、現在のセシウム137沈着量を測定

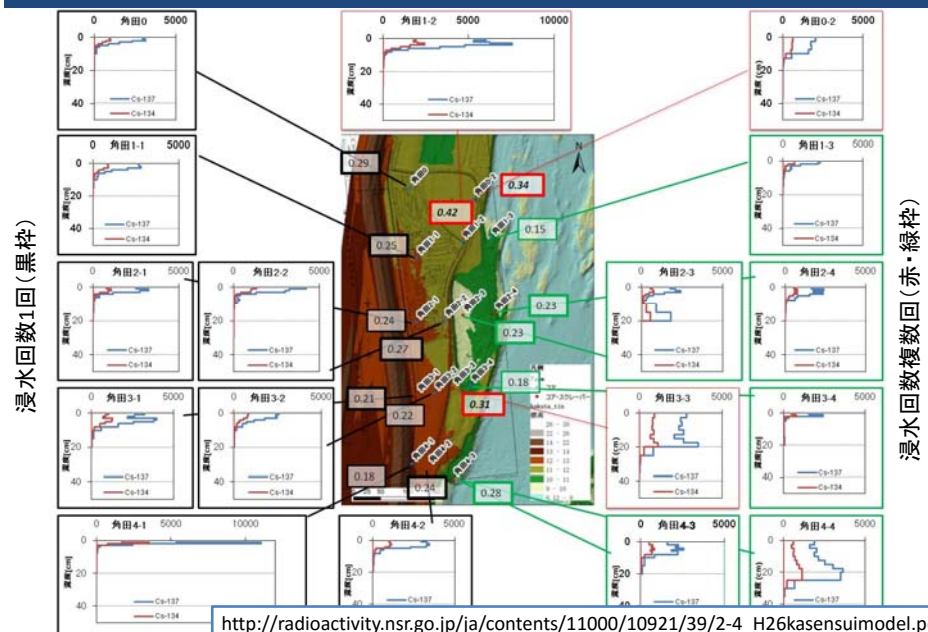


現在の沈着量から第三次航空機モニタリングによる沈着量(平成23年6月測定、洪水の影響を受けていない初期値)を差し引いても、沈着量は存在
→ 洪水時の土砂堆積により河川内に放射性セシウムが堆積している



浸水回数とCs-137沈着量の鉛直分布[Bq/kg]

45



計算モデルの概念 (北大・清水・岩崎)

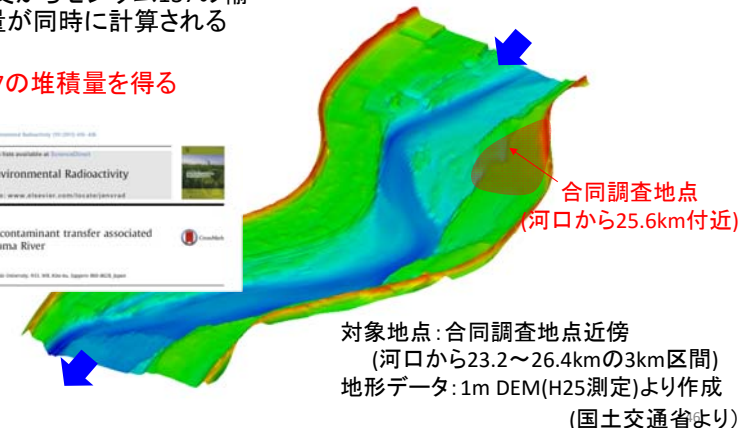
計算の流れ

1. 上流端に流量とあるセシウム濃度を持った浮遊砂濃度を与える
2. 計算される流速、水深から土砂移動量、堆積-浸食量を計算する
3. 土砂の収支からセシウム137の輸送、堆積量が同時に計算される

上流端への入力

- 流量 Q (水文水資源データベース)
- 浮遊砂濃度 SS
- 浮遊砂のセシウム137濃度 Cs

→ セシウム137の堆積量を得る



計算条件

調査地点へ影響のあった5洪水を対象 (笠松地点水位、聞き取り調査より推定)

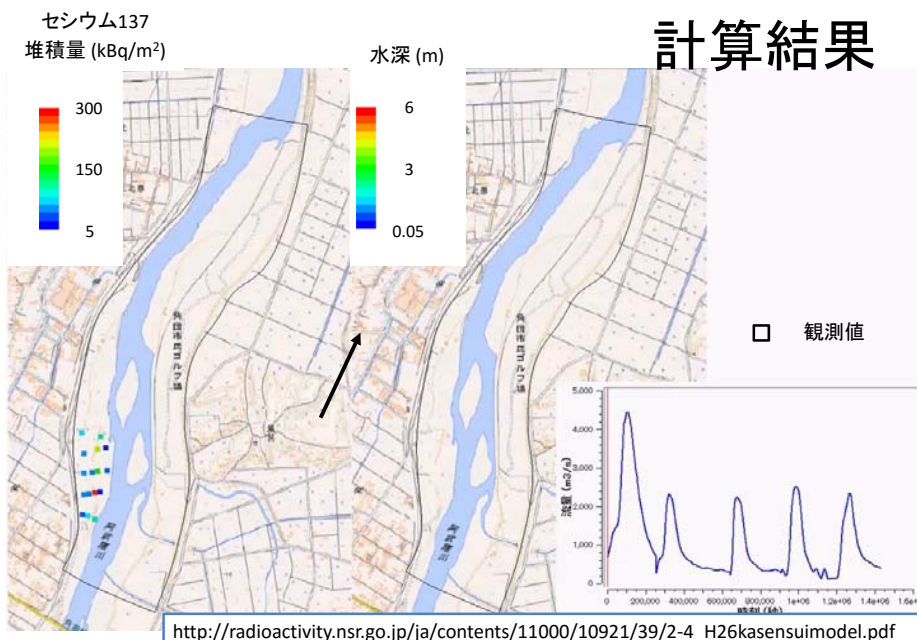


流量-SS関係式: $SS = 7.79 \times 10^{-8} Q^{1.02}$ (H23年洪水時観測値@丸森, 国土交通省より)
(丸森地点の観測値, 欠損の場合, 直近の値を使用, 筑波大より)

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10921/39/2-4_H26kasensuimodel.pdf

47

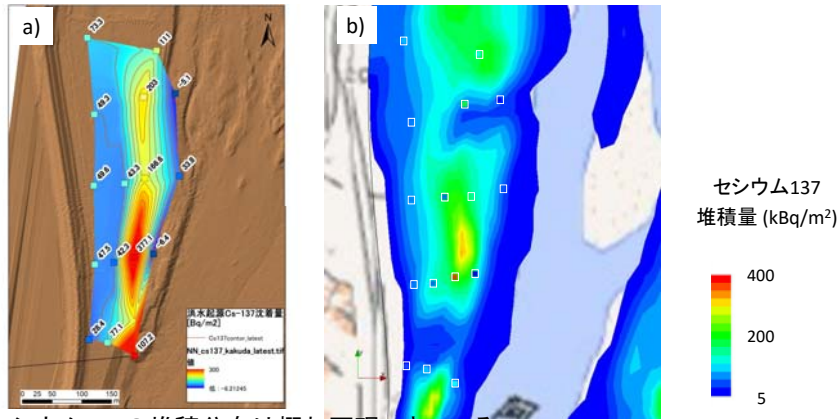
計算結果



セシウム137沈着量の比較

観測結果

計算結果



- セシウム137の堆積分布は概ね再現できている
- 高水敷へのセシウム137堆積量は、観測値6.3GBqに対して、計算値9.8GBqであり、十分な精度でセシウム137堆積量を再現できている

http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/11000/10921/39/2-4_H26kasensuimodel.pdf

まとめ

- 福島における陸域から、河川への放射性物質の移行実態を包括的に調査した結果、土地利用ごとに放射性物質の河川への流出特性の違いが実測された。
- 様々土地利用から、水系への放射性セシウム濃度、河川中の懸濁態・溶存態放射性セシウム濃度は減少を続けているが、その減少傾向には地域差が見られる。

現在は、水系への移行過程の初期段階にすぎず、今後の放射性セシウムの水系への移行の影響、除染の影響を評価するためにも、包括的・長期的なデータ取得とモデル化が望まれる。