

土地利用別の土壌侵食・放射性セシウム流出パラメータの時間変化推定

恩田 裕一、脇山 義史、羽田野 裕子、加藤 弘亮、高橋 純子（筑波大学）

1. 調査目的

各土地利用における土砂・セシウム 137 流出量の観測結果をもとに、USLE 式 (Universal Soil Loss Equation¹) をベースにした陸域からのセシウム 137 移行量の将来予測に必要なモデルパラメータを算出する。

2. 調査方法

(1) USLE モデルパラメータの推定

USLE モデルの基礎式は下記の式によって表される。

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

ここで、 A は年間土壌侵食量 [$\text{ton ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$]、 R は侵食力ファクタ [$\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ hour}^{-1} \text{ year}^{-1}$] (土砂を移動流出させるための雨のエネルギーの係数)、 K は土壌の受食性ファクタ [$\text{ton hour MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$] (土壌の侵食されやすさの係数)、 L は斜面長ファクタ [無次元] (斜面長の違いによる侵食量の差を補正するための係数)、 S は斜面勾配ファクタ [無次元] (斜面の違いによる侵食量の差を補正するための係数)、 C は被覆管理ファクタ [無次元] (植物などの被覆による侵食量低減効果を表す係数)、 P は保全対策ファクタ [無次元] (斜面にテラスなどの土壌保全対策による効果を反映させるための係数) を示している。

ここでは「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」における USLE 標準プロットによる流出土砂・セシウム 137 の観測結果に基づいて、USLE モデルパラメータを求めた。

(2) 侵食土砂濃度係数の算出方法

USLE モデルによって得られる土壌侵食量とセシウム 137 初期沈着量の値を用いて、土砂流出によるセシウム 137 の移行量を算出するための式は下記によって表される。

$$\text{セシウム 137 移行量 (Bq/m}^2\text{/year)} = \text{土壌侵食量 (ton/ha/year)} \div \text{侵食量の単位換算数} \\ ((\text{kg/m}^2) / (\text{ton/ha})) \times \text{侵食土砂濃度係数 } S_c ((\text{Bq/kg}) / (\text{Bq/m}^2)) \times \text{初期沈着量 (Bq/m}^2)$$

ここで、侵食量の単位換算数は $1,000 \text{ kg} = 1 \text{ ton}$ 、 $10,000 \text{ m}^2 = 1 \text{ ha}$ であることから $1,000 \div 10,000 = 0.1$ となる。また、侵食土砂濃度係数 S_c は土砂のセシウム 137 濃度を侵食量に換算するための係数であり、観測された土砂中セシウム 137 濃度を初期沈着量で割って標準化することで求めることができる。同様の係数はチェルノブイリ原発事故によって放出された放射性物質 (ストロンチウム 90、セシウム 134 を含む) の移行量を推定するため

¹ Wischmeyer, W.H., Smith, D.D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Agriculture Handbook, 537, USDA (1978).

に用いられた²。各土地利用における侵食土砂濃度係数は「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」(4)における USLE 標準プロットによる観測結果、水田に関しては(5)における観測結果をもとに算出を行った。

(3) 侵食土砂濃度係数の時間変化について

耕作などの人為的な攪乱のない未攪乱土壌では、表層に蓄積しているセシウム 137 は鉛直下方への浸透により、その表層土壌における濃度が減少することが予想されるため、将来予測のためにはそれらの経時的変化の予測が必要となる。本節では、土地利用別の侵食土砂濃度係数 $Sc(t)$ の経時的変化を土壌中のセシウム 137 の下方浸透モデルによって再現し、現地調査による実測値と比較を行った。

3. 結果と考察

(1) USLE モデルパラメータの設定

USLE 標準プロットによる観測結果から、耕作を行った畑（畑 A2、畑 B2）では未耕作の畑（畑 A1、畑 B1）に比べて、侵食力ファクタ R あたりの土壌侵食量が大きく、耕作によって土壌侵食量が増大することがわかった。この耕作の影響を USLE モデルパラメータに反映するために、被覆管理ファクタ C と植被率の関係をもとに、植被率と土壌侵食量の間に指数関数によって表現される関係が成り立つと仮定し、保全対策ファクタ P の調整を行った。平成 24 年度の調査では、土壌の受食性ファクタ K 及び被覆管理ファクタ C の設定を行ったが、本報告では保全対策ファクタ P の設定によって、モデルの精緻化が可能となった。表-1 に、本報告における観測結果を基に算出した土地利用ごとの USLE モデルパラメータを提示した。

(2) 侵食土砂濃度係数 Sc の算出

USLE 標準プロットによる観測結果では、侵食土砂濃度係数の算出根拠となる、初期沈着量で標準化した流出土砂セシウム 137 濃度に減少傾向は認められなかった（土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査）。そこで、現時点では、観測によって得られた、初期沈着量で標準化した流出土砂セシウム 137 濃度を流出土砂量で重みづけした加重平均値を侵食土砂濃度係数 Sc とし、移行モデルのパラメータとした。水田に関しては、初期沈着量－濃度の関係から求めた Sc の値に明確な減少傾向が見られたため、 t 年経過時の侵食土砂濃度係数を下記の式によって推定することとした。

$$Sc_{Paddy}(t) = 0.068e^{-0.526t} \quad (2)$$

以上の観測及び考察によって得られた侵食土砂濃度係数の値及び関数を表-2 にまとめた。

(3) 侵食土砂のセシウム 137 濃度の時間変化傾向の推定

現時点では流出土砂セシウム濃度には水田を除いて明瞭な変化傾向は認められず、暫定的に実測値に基づく値を用いることとした。しかし、前述のように、下方浸透及び放射性

² Garcia-sanchez, L.Konoplerv, A.V. (2009) Watershed wash-off of atmospherically deposited radionuclides: a review of normalized entrainment coefficients. Journal of Environmental Radioactivity, 100: 774-778.

壊変に伴う物理減衰により流出土砂のセシウム 137 濃度（すなわち、侵食土砂濃度係数）は減少していくと考えられる。そこで鉛直下方への浸透、土壌侵食量、放射性壊変を考慮して導出した下記の式を用いて、侵食土砂濃度係数の時間変化の推定を行った。

$$Sc(t) = \frac{e^{-R/H}}{\sqrt{D\pi t}} e^{-(V^2/4D)t - \lambda t} \quad (3)$$

ここで、 $Sc(t)$: t 年経過時の未攪乱土壌侵食土砂濃度係数、 H : 緩和深度 [kg m^{-2}]、 V : 移流速度 [$\text{kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$]、 D : 拡散係数 [$\text{kg}^2 \text{ m}^{-4} \text{ year}^{-1}$]、 R : 土壌侵食速度 [$\text{kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$]、 λ : 壊変定数 [year^{-1}]である。このうち、 D 、 V 、 H はセシウム 137 の下方浸透の速さを規定するパラメータである。スクレーパープレートを用いた土壌サンプリングによって得られたセシウム 137 深度分布（図 1）をもとに各地点の D 、 V 、 H を決定した（表-3）。また、 R には各土地利用の USLE 標準プロットで観測された土壌侵食量を代入した。図-2 では、一例として、牧草地 B における深度分布の実測値と計算値を示した。これらのパラメータに基づく $Sc(t)$ の計算値と Sc の実測値（図 3）とを比較した結果、畑 B1、スギ若齢林ではオーダー単位で一致が見られるものの、計算値の方が大きく、全体的に侵食土砂濃度係数が過大評価される結果となった。

表-1 各調査区画における USLE モデルパラメータ

	実測値			推定値					
	観測期間	年間土壌 侵食量 <i>A</i>	植被率	侵食力 ファクタ <i>R</i>	土壌の受食性 ファクタ <i>K</i>	斜面長 ファクタ <i>L</i>	斜面勾配 ファクタ <i>S</i>	被覆管理 ファクタ <i>C</i>	保全対策 ファクタ <i>P</i>
		[ton ha ⁻¹ year ⁻¹]	-	[MJ mm ha ⁻¹ hr ⁻¹ year ⁻¹]	[ton year ⁻¹ MJ ⁻¹ mm ⁻¹]	-	-	-	-
本報告までの観測結果 (H23-H25)									
畑A1(未耕作) 除草処理前	H23.7.17 ~ H24.6.13	4.6	0.32	2620	0.039	1.00	0.80	0.38	0.15
畑A1(未耕作) 除草処理後	H24.6.13 ~ H25.8.23	21	0.03	3480	0.039	1.00	0.80	0.85	0.23
畑A2(耕作)	H24.11.10 ~ H25.8.23	31	0.16	1760	0.039	1.00	0.70	0.65	1.0
畑B1(未耕作)	H23.7.17 ~ H25.8.23	0.85	0.84	6100	0.039	1.00	2.5	0.0095	0.15
畑B2(耕作)	H24.11.10 ~ H25.8.23	17	0.39	1760	0.039	1.00	2.9	0.083	1.0
牧草地A	H23.7.17 ~ H25.8.23	0.62	0.97	6520	0.039	1.00	2.6	0.047	0.020
牧草地B	H23.7.17 ~ H25.8.23	0.38	0.89	6480	0.039	1.00	2.7	0.028	0.020
スギ若齢林	H23.7.17 ~ H25.8.23	0.16	0.95	7070	0.020	1.00	15	0.0038	0.020
昨年度までの観測結果 (H23-H24)									
畑A1(未耕作) 除草処理前	H23.7.17 ~ H24.6.13	4.6	0.32	2620	0.039	1.00	0.80	0.057	1.0
畑A1(未耕作) 除草処理後	H24.6.13 ~ H24.11.18	7.6	0.090	2830	0.039	1.00	0.80	0.086	1.0
畑A2(耕作)	H24.9.30 ~ H24.11.18	0.38	0.19	445	0.039	1.00	0.70	0.032	1.0
畑B1(未耕作)	H23.7.17 ~ H24.11.18	0.44	0.89	6040	0.039	1.00	2.5	0.0010	1.0
畑B2(耕作)	H24.11.10 ~ H25.8.23	1.2	0.20	445	0.039	1.00	2.9	0.025	1.0
牧草地A	H23.7.17 ~ H24.11.18	0.70	0.95	6040	0.039	1.00	2.6	0.0057	0.020
牧草地B	H23.7.17 ~ H24.11.18	0.40	0.98	6040	0.039	1.00	2.7	0.0031	0.020
スギ若齢林	H23.7.17 ~ H24.11.18	0.15	0.95	6040	0.020	1.00	15	0.0040	0.020

表-2 各土地利用における侵食土砂濃度係数

	侵食土砂濃度係数 (Bq kg ⁻¹)/(Bq m ⁻²)
畑A1(未耕作) ※1	0.043
畑A2(耕作)※1	0.012
畑B1(未耕作) ※1	0.062
畑B2(耕作)※1	0.010
牧草地A※1	0.021
牧草地B※1	0.010
スギ若齢林※1	0.085
水田※2	$Sc(t) = 0.068 e^{-0.526t}$

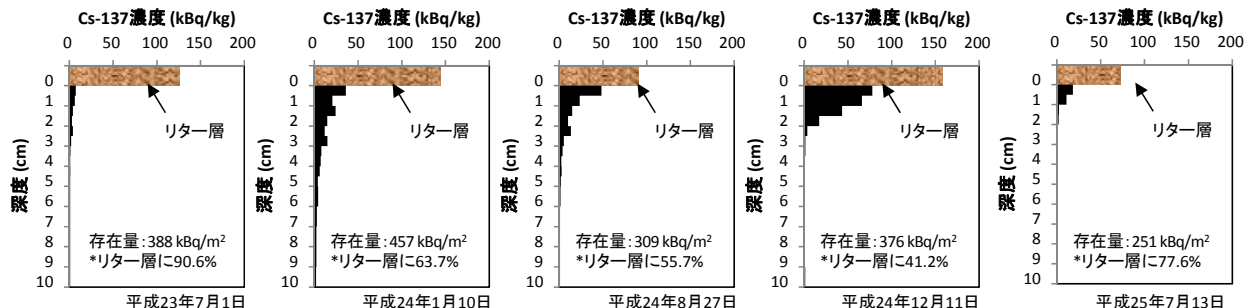
※1 「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」における沈着量で標準化した流出土砂セシウム濃度の加重平均値

※2 「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」における川俣町内での観測結果をもとに関数化

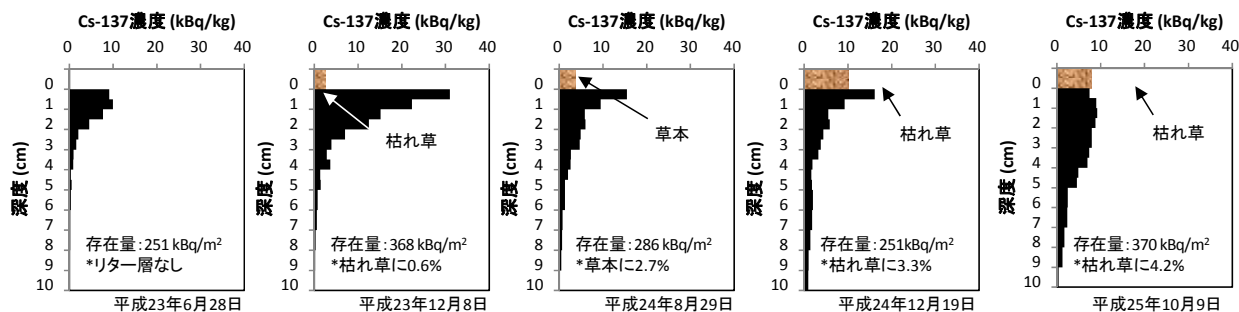
表-3 各土地利用における侵食土砂濃度係数 $Sc(t)$ に用いたパラメーター一覧

	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>V</i>	<i>D</i>
	kg m ⁻² year ⁻¹	kg m ⁻²	kg m ⁻² year ⁻¹	kg ² m ⁻⁴ year ⁻¹
畑A1	2.1	20.0	0.334	0.102
畑B1	0.085	10.7	0.00144	23.7
牧草地A	0.062	1.13	0.0151	0.427
牧草地B	0.038	5.87	0.334	0.102
スギ若齢林	0.016	2.68	0.785	0.200

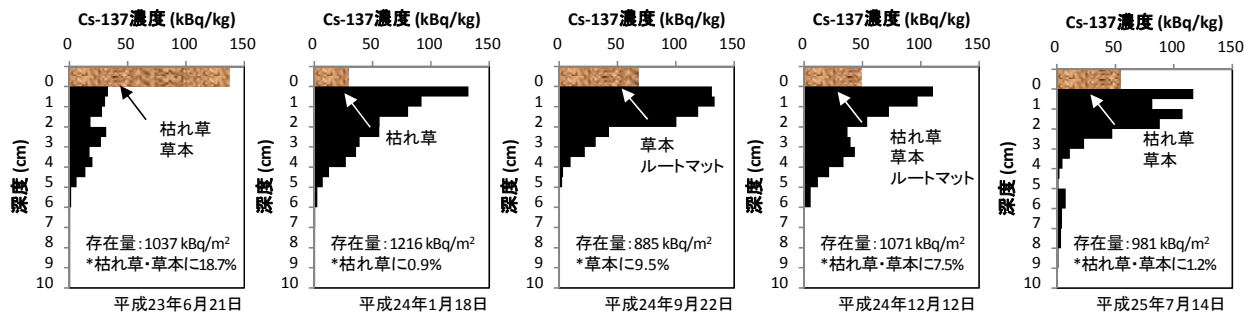
森林(広葉樹混合林)



水田



草地2(放牧地)



森林(スギ壮齢林)

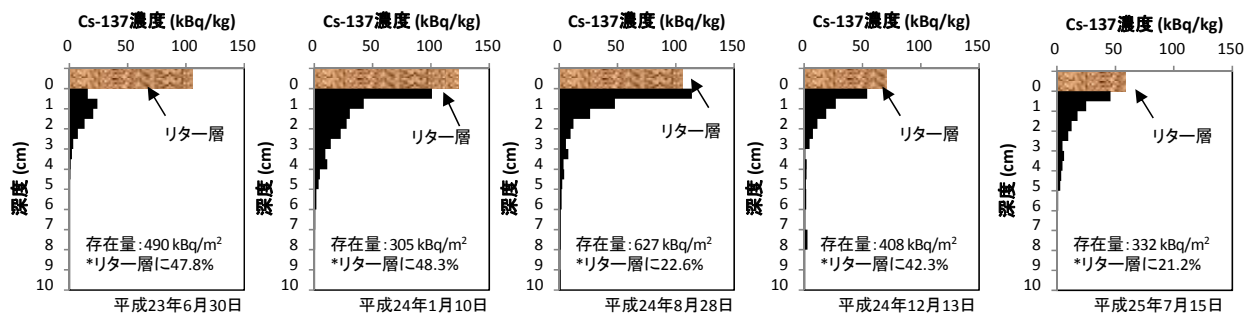
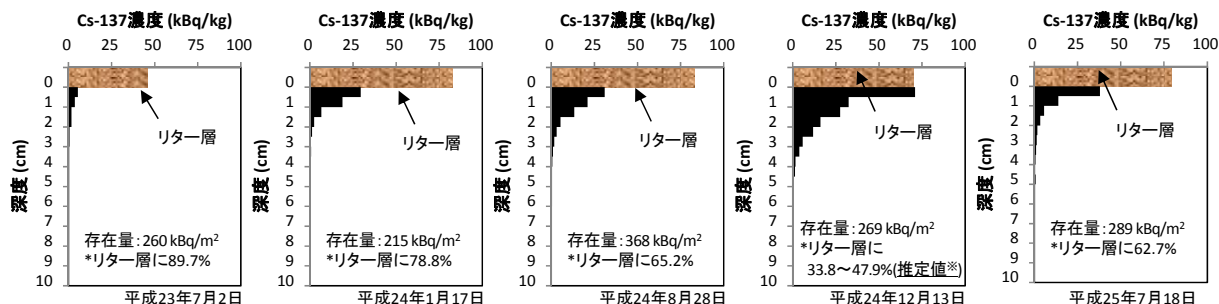
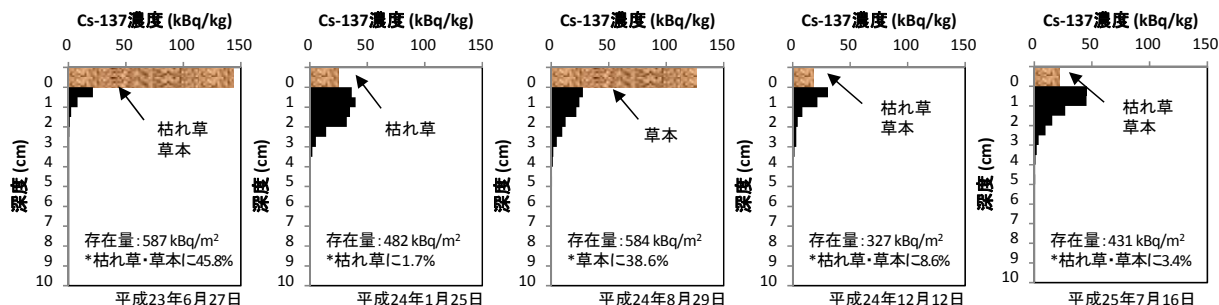


図-1 土地利用別のセシウム 137 深度分布と時間変化 (その 1)

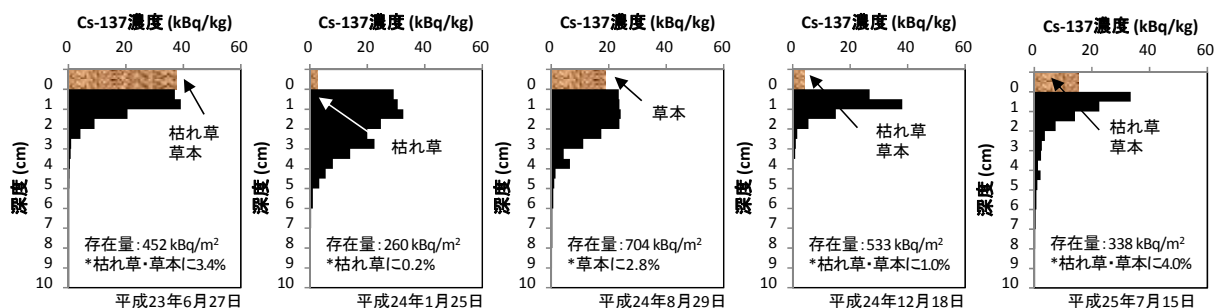
森林(スギ若齢林)



草地1(採草地)



未耕作地1(緩勾配)



未耕作地2(急勾配)

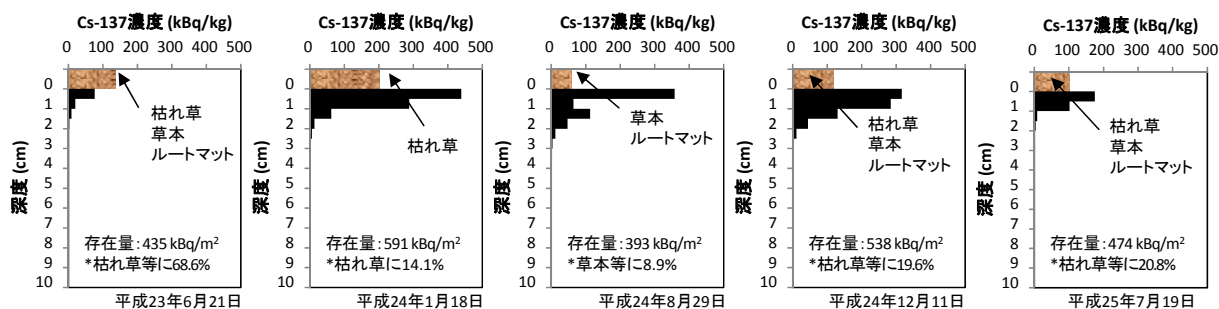


図-1 土地利用別のセシウム 137 深度分布と時間変化 (その2)

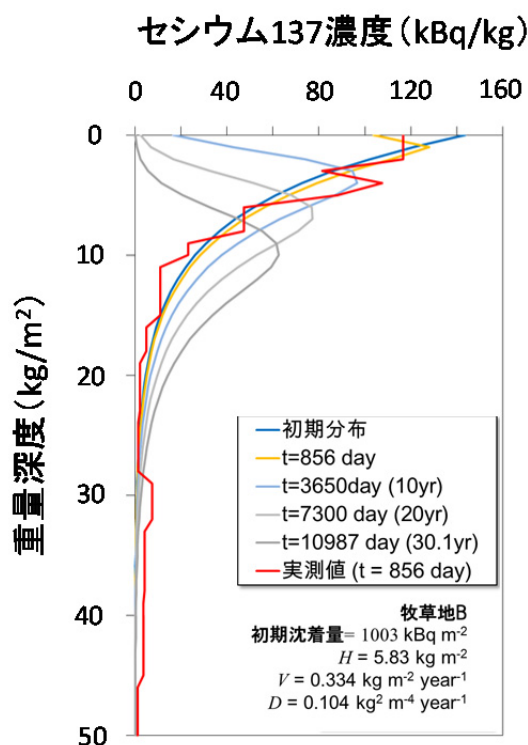


図-2 牧草地 B におけるセシウム 137 深度分布の実測値と計算値との比較

(赤線は、牧草地 B プロット近傍におけるスクレーパープレートでのサンプリング（平成 25 年 7 月 14 日）によって求めた実測の深度分布を示しており、そのほかの線は牧草地 B の H, D, V を代入して計算した任意の経過時間ごとの深度分布を示している。この計算では侵食による除去は考慮せず、下方浸透と崩壊によって深度分布が経時的に変化する様子を再現している。)

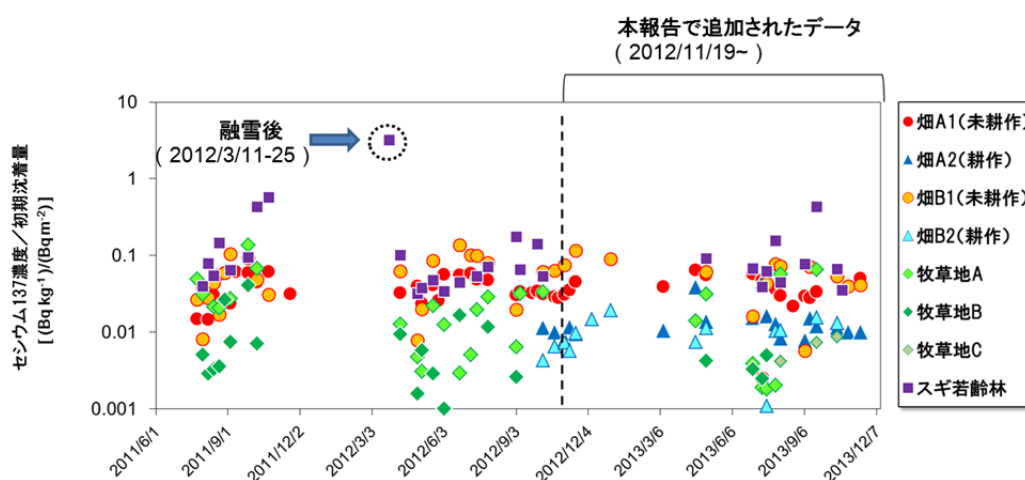


図-3 初期沈着量で標準化した流出土砂のセシウム 137 濃度の時系列変化