

放射性降下物 (^{137}Cs) による積算土壌侵食量の推定

柏木淳一・佐久間敏雄

Estimating the amount of soil losses using fallout radionuclide (^{137}Cs)Jun'ichi Kashiwagi and Toshio Sakuma
Faculty of Agriculture, Hokkaido University

Summary

In the hilly area, intensity of soil erosion mainly depends on topographical location, slope and slope type, i.e. convex and concave. Therefore, it is difficult to correctly estimate accumulated amount of soil loss and redeposition at each site and its special distribution pattern on the slopes. Recently ^{137}Cs is attracting attention as an effective tracer of soil material movement. ^{137}Cs is an artificial fallout radionuclide caused by nuclear experiments in atmosphere during 1960's. ^{137}Cs is evenly deposited on the soil surfaces and is strongly absorbed by soil solid particles.

To grasp the relation between soil erosion and topographical parameters, we conducted ^{137}Cs measurements for 26 sites of an undulating field in hilly area of central Hokkaido. About 60% of the survey sites showed the measured ^{137}Cs concentration (MCs $\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) less than 2, while its standard in Hokkaido (SCs) was $3.44\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$. Extremely severe soil erosion was recognized on interfluvial and convex creep slopes. At the upper margin of the field with steep convex slope, the minimum value of MCs ($0.16\text{kBq}\cdot\text{m}^{-2}$) was observed and average soil loss per year was estimated at about 12% (3 cm in depth). On the contrary, the MCs values at some sites alluvial toeslopes apparently exceeded the SCs, indicating the redeposition of ^{137}Cs enriched soil materials. The distribution patterns of MCs, Ap+Ab horizon thickness and total carbon content were comparable but showed somewhat different features. ^{137}Cs accumulation method proved to be more effective in estimating reliable values compared to the other methods utilizing Ap+Ab layer thickness and total carbon content. However, it is most important to obtain the local standard of ^{137}Cs accumulation in the nearby undisturbed slopes.

Key Words ; Erosion, Fallout radionuclide, Special variability, Key layer, Carbon content

(Soil Phys. Cond. Plant Growth, Jpn., 71, 57-62, 1995)

1. はじめに

これまでの土壌侵食量調査の問題点は、侵食作用の空間的・時間的変動が大きく、積算侵食量とその空間的分布が把握できなかったことである。そこで大気中の核爆発によって生じた人工放射性核種である ^{137}Cs をトレーサーに用いて、土壌侵食量を推定する試みが行われている。

北海道大学農学部 〒060 札幌市北区北9条西9丁目

キーワード：土壌侵食、放射性降下物、空間的変動、鍵層、全炭素含量

この ^{137}Cs は1945年からその存在が確認され、1952年後半から地球規模に広がった。1961年から1963年にかけて核実験が最も頻繁に行われたために、それに伴い ^{137}Cs の降下量が増加した。我国では1963年に顕著なピークが認められ、その後急減している(大貫ら, 1984; McCallan et al., 1980)。この大気中の ^{137}Cs は、降雨にともなっ

て落下し地表面に均一に蓄積される。 ^{137}Cs は土壌の微細粒子に特異吸着され、土壌中では容易に脱着しない。したがって、土壌溶液に溶けた状態で移動することはなく、ほとんどが吸着された微細粒子とともに移動する(大貫、和達,1983;大貫ら,1984)のために、未攪乱土壌ではその表面に著しい集積が見られる(Ritchie et al.,1970; McCallan et al.,1980;Squire and Middleton,1966)。札幌の未墾地の土壌では、 ^{137}Cs 含量は、表層で最も多く、深さ10cm以下では激減し、深さ40cmの土壌からは検出されなかったと報告されている(福田,1985)。このような吸着特性と水平沈着性から、 ^{137}Cs は1960年代中葉以降の土壌物質の移動・集積を追跡するためのトレーサーとして非常に有効である。

Rogowski and Tamura(1970)は、土壌表面状態の異なる条件での土壌侵食の枠試験に ^{137}Cs をトレーサーとして用いており、カナダの平原地帯(De Jong and Kachanoski,1988;Sutherland and De Jong,1990)やオーストラリアの傾斜地畑(McCallan et al.,1980; Longmore et al.,1983)においては、土壌侵食量を推定するのに適用できることが示されている。また堆積や沈殿によって累層した堆積様式を示す土壌の、 ^{137}Cs 含量分布からは、 ^{137}Cs 堆積層の上下に堆積する層の年代を推定できることが示されている(Ritchie and McHenry, 1974)。

本報告の目的は、この ^{137}Cs の特性に注目し、傾斜地畑における積算侵食量の空間的分布を推定する上での有効性を確かめるとともに、積算侵食量と地形因子の関係について検討することである。

2. 調査地および方法

(1) 調査地

調査地は、上川支庁上富良野町の熔結凝灰岩を基盤とする波状性丘陵地に位置し、土壌は中粒質の酸性褐色森林土(Typic Dystrachrepts)である。調査圃場は開墾以後調査時点まで80年以上連続して耕耘された古い傾斜地畑で、北東向きに平均22.7%の主傾斜を持ち、これにはほぼ直行する方向に3つの凸部と4つの凹部が連続する複合斜面からなる。本報告で対象としたのは、東側の斜面に位置する26地点である(図-1)。

(2) 調査法

1) 土壌断面調査および試料の採取

調査は14m間隔のメッシュ法により、深さ約80cmの試坑を設け土壌断面調査を行い、各層から攪乱および未攪乱土壌サンプルを採取した。なお調査およびサンプリングは1988年8月におこなった。

2) 調査地の地形解析

この調査地点の地形を評価するために、まず基図上で

Dalrymple et al.(1968)が、土壌カテナと斜面の形態・位置の関係から経験的に定義した5種類のモデル斜面に分類した。すなわち斜面上部から後縁部緩斜面

(Interfluve)、凸型クリープ斜面(Convex Creep Slope)、等斉輸送斜面(Transportational Midslope)、崩積性緩斜面(Colluvial Footslope)、沖積性緩斜面(Alluvial Toeslope)が連続して複合斜面を形成しているものと認められた(図-2)。加えて、7.5×7.5m単位のデジタルマップを作成し、調査地点の標高、斜面長、平均・最大勾配ならびに凹凸を算出した。

2) ^{137}Cs の比活性測定

表層部における土壌粒子の移動を定量的に評価するために、Ap層内の ^{137}Cs 含量を測定した。分析用試料は風乾後粉碎し、孔径2mmのふるいで乾式し別したのち、内径7cmのポリ容器に高さ9cmまで充填したものを測定試料とした。測定は北海道大学ラジオアイソトープ総合センターのGe-Li半導体検出装置付 γ 線スペクトロメータを用い、24時間計測によって ^{137}Cs の比活性を求めた。 γ 線の標準線源により、測定サンプルの検出器との幾何学的位置関係および自然崩壊速度を考慮して、計数効率を算出し補正した。測定された ^{137}Cs 含量(kBq/g乾土)を、Ap層全体の平均含有率を示すものと仮定して蓄積量に換算し面積濃度(kBq/m²)として表した。

またCNコーダーによる乾式燃焼法とチューリン法により、全炭素含量の測定を併せて行った。

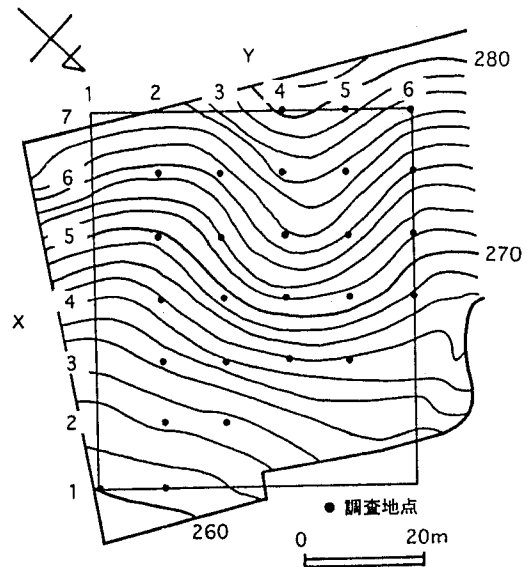


図-1 調査地の概要

Fig.1 Contour map of the study area showing the locations of the sampling points

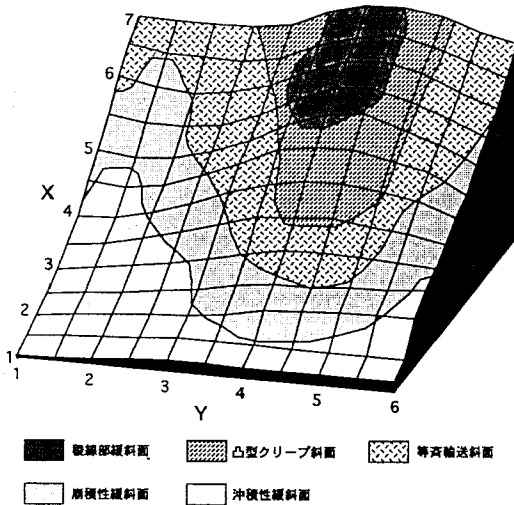


図-2 モデル斜面による調査地の地形分類
Fig.2 Distribution of landform elements in study site

3. 結果と考察

¹³⁷Cs含量を測定した地点は標高260~280mの低い稜線を含む斜面上に分布していた。調査地の地表面勾配は稜線部緩斜面では20%以下であったが、斜面下方に向かって増大し、等斉輸送斜面では30%以上と最も大きく、再び減少し、沖積性緩斜面では10%以下の緩勾配に移行する斜面構成を示していた。また東側の斜面では、崩積性緩斜面が深くまで入り込んでいるが、西側の斜面では地形変化が相対的に激しく、特に地点(6,6)~(4,6)にかけては強い凹型の地形を示していた。土壌断面調査からこの凹地には、深さ約75cmのガリーを埋設・復旧した痕跡が認められた。

¹³⁷Csの蓄積量は、その地域の気象条件や大気中での¹³⁷Csの量と存在する高度に関係しているために、地域間では差が認められる。したがって、調査地周辺で1960年以降に土壌侵食・堆積作用が生じていない土壌の¹³⁷Cs蓄積量を標準値として設定しなければならないが、本調査地周辺では、既壛地や1960年以降に植林されたと推定される二次林が多く未攪乱土壌を採るのが困難であり、また標準値として適当な値は報告されていなかった。そこで、Radioactivity Survey Data in Japan (1971~1984)から引用した1970~1984年における札幌市の平坦な未壛地の値(3.84kBq/m²)と、1984年に調査された道央の日本海側に位置する共和町の閉じた斜面から得られた¹³⁷Cs蓄積量の平均値(3.70kBq/m²) (Sakuma and Takeuchi, 1988)を比較し、自然崩壊を考慮して標準値を3.44kBq/m²と設定した。したがって実測値がこの標

表-1 ¹³⁷Cs蓄積量の基本統計量
Table 1 Statistical analysis of ¹³⁷Cs concentration

データ数	平均	最小値	最大値	標準偏差	変動係数
26	2.04	0.16	4.16	1.02	0.50

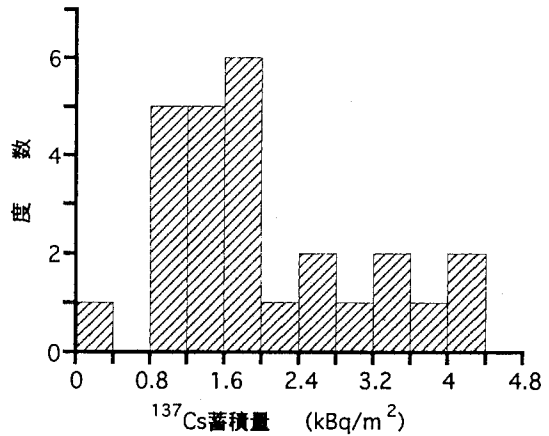


図-3 ¹³⁷Cs蓄積量の度数分布
Fig.3 Frequency distribution of ¹³⁷Cs concentration

準値よりも大きいほど堆積作用が優勢で、小さくなるほど侵食作用が優勢であることを示している。

表-1に表層(Ap層)の¹³⁷Cs蓄積量の基本統計量を示す。蓄積量のレンジは0.16~4.16kBq/m²、平均値は2.04kBq/m²であった。平均値は標準値のほぼ半分に相当し、この25年間に対象圃場外への表土流亡によって¹³⁷Csの蓄積量が半減したことを示している。

最大値は4.16kBq/m²で標準値をわずかに上回っていたにすぎず、ヒストグラム(図-3)からみると0.80~2.00kBq/m²の範囲に60%以上の地点が含まれており、激しい侵食が起こっていたと推定される地点が大半を占めていた。札幌での¹³⁷Csの降下量は、1963年をピークに1967年以降にはほとんど検出されないレベルに減少している。したがって、上部からの移送による¹³⁷Csの供給がない稜線部緩斜面について、1) 1963年に降下した¹³⁷Csが作土中に均一に攪拌・吸着され、2) それ以降、侵食によって流亡した分が、毎年の耕耘によって¹³⁷Csを含まない心土と混合、希釈され作土が形成される、と仮定して侵食土量を推定した。侵食土量の算出は以下の式による。

$$Cs_i = Cs_s \times (1 - L/100)^t$$

L: 侵食土量(%) Cs_s: ¹³⁷Cs含量の標準値(3.44kBq/m²)

Cs_i: 地点iでの¹³⁷Cs濃度(kBq/m²)

t: 1963年からの経過年数(25年)

稜線部緩斜面で得られた最低値の 0.16kBq/m^2 を ^{137}Cs 濃度として用いると、1963-1988の25年間について、稜線部緩斜面における年間の侵食土量は作土深の11.5% (2.9cm/年)と推定される。Wischmeier and Smith (1978)による許容侵食速度(Soil Loss Tolerance Limit)は、容積重を 1g/cm^3 とすれば約 $0.06-0.13\text{cm/年}$ であるから、稜線部緩斜面における侵食速度はその約30倍であったことになる。同様に計算すると、 ^{137}Cs の平均濃度 2.04kBq/m^2 に対しては侵食土量は2.1%となるが、稜線部緩斜面以外では仮定2)が成り立たないので、上記の推定値は実際の移動土量を過小評価していることになる。表層部を面状侵食によって移動する土壌は、同時に ^{137}Cs を輸送するのでその希釈率が低下すると考えら

れる。これを考慮した移動土量の精密な検討は別稿にゆずるが、 ^{137}Cs 濃度はそれ自身、侵食・削剥と堆積による作土成分の消長を示す指標になる。

図-4に ^{137}Cs 蓄積量の空間的な分布を示す。図から明らかのように 1.2kBq/m^2 以下を示す侵食相は稜線部緩斜面、凸型クリープ斜面に広がっており、その中心は凸型の強い稜線上部に見られ、最小値 0.16kBq/m^2 は耕耘による削剥が著しい隣接圃場との境界部にみられた。また地点(4,5)~(5,5)にかけての急勾配を示した凸型クリープ斜面から等斉輸送斜面の境界部でも 1.2kBq/m^2 以下の小さな値を示していた。等斉輸送斜面から崩積性緩斜面にかけては蓄積量の増加傾向が激しく、沖積性緩斜面ではほぼ標準値に近い値および標準値よりも大きな値を示していた。堆積相である 3.44kBq/m^2 以上の地点は沖積性緩斜面の部分に偏在していた。

デジタルマップから算出した地形因子と ^{137}Cs 蓄積量の関係は、勾配やUSLE式における地形関数とは有意な負の相関が、斜面長とは正の関係が認められた(表-2)。このことは、斜面長が短い稜線部緩斜面や勾配の大きな凸型クリープ斜面では、削剥作用が優勢であることを示唆している。

傾斜地畑では、表面流水水に起因する水食が侵食の主体である。表面流水水によって土壌表面の有機質に富む土壌が侵食部から堆積部に運搬されるため、有機物含量や腐植層(A層)厚のデータが侵食・堆積作用の強度を推定する指標になると考えられる。図-5、6に全炭素含量と(Ap+Ab)層厚の分布図を示す。全炭素は ^{137}Cs と非常に似た分布を示しており、 ^{137}Cs 蓄積量が 2.70kBq/m^2 以上の部分は全炭素含量の2.3%以上の部分に対応し

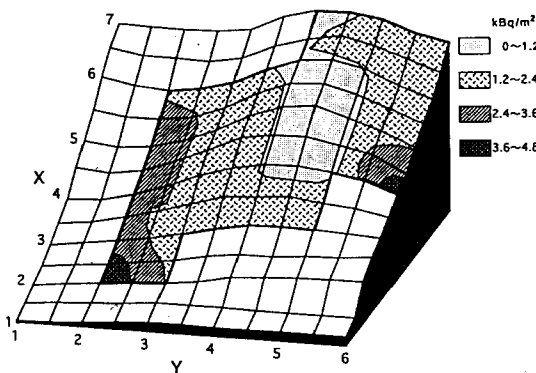


図-4 ^{137}Cs 蓄積量の空間的分布

Fig.4 Spacial distribution of ^{137}Cs concentration in study site

表-2 ^{137}Cs 蓄積量と微地形パラメータの相関係数

Table 2 Correlation coefficient of ^{137}Cs concentration vs. topographical parameter

標高	斜面長	平均勾配	最大勾配	#平均凹凸	#最大凹凸
-0.66**	0.64**	-0.64**	-0.59**	-0.32	-0.49*
L'	S'	L' S'			
-0.56*	-0.62**	-0.58*			

*、**；それぞれ95%、99%水準で有意

#凹凸は以下の式により算出し、平均凹凸は4方向の値の平均、最大凹凸は流線方向の値である。

$$\text{凹凸} = 100 \times (H - ((H1 - H2) / 2 + H2)) \times \text{Cos } \theta$$

H；測定地点の標高(m) H1, H2；隣接地点の標高(H1 ≥ H2)(m) θ；H1, H2間の傾斜角度

L' = (L/22.13)^p L；斜面長(m) p；0.3~0.6の値の指数

S' = (0.43 + 0.30I + 0.043I²) / 6.613 I；斜面勾配(%)

L' S' = Lp / 100(1.36 + 0.97I + 0.1385I²)

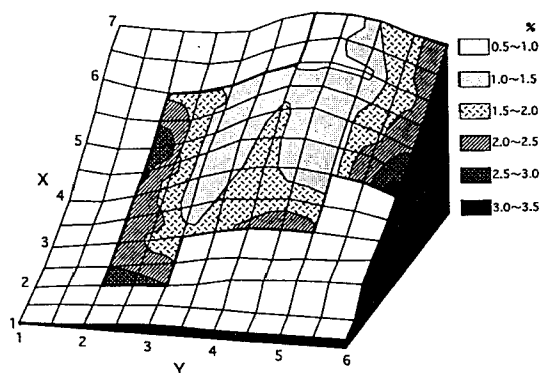


図-5 全炭素含量の空間的分布

Fig.5 Spatial distribution of total carbon content in study site

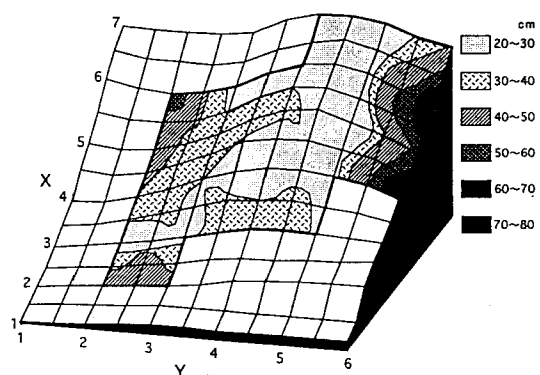


図-6 (Ap+Ab) 層厚の空間的分布

Fig.6 Spatial distribution of Ap+Ab horizon thickness

ていた。しかし侵食相と認められた稜線部緩斜面、凸型クリープ斜面では両者の分布には多少の違いが認められた。すなわち ^{137}Cs では稜線部緩斜面を中心に小さな値を示す地点が一様に広がっていたが、全炭素の小さな値は稜線部緩斜面と地点(5,3)付近に2極化しており、その中間の凸型クリープ斜面では1.5以上の値もみられた。

(Ap+Ab)層厚と ^{137}Cs の関係はそれぞれ稜線部緩斜面、凸型クリープ斜面で小さな値を、崩積性緩斜面、沖積性緩斜面で大きな値を持つといった基本的な分布傾向は一致していたが、 ^{137}Cs 蓄積量は高いが、(Ap+Ab)層は薄い地点、 ^{137}Cs 蓄積量は低い、(Ap+Ab)層は厚い地点が存在していた。この現象はガリーを修復した跡が見られた地点(地点(6,6)~(4,6))で特に顕著であった。

60cm以上の厚い(Ap+Ab)層を持つ地点のAb層からは ^{137}Cs がほとんど検出されなかった。したがってこのガリーは ^{137}Cs の蓄積が始まる1960年以前に生じたものと考えられ、厚い(Ap+Ab)層を持つ地点(6,6)では、1960年以降は削剝作用が優勢であったと推定される。また稜線部緩斜面、凸型クリープ斜面に分布する地点の土壌断面は、Ap/C型になっており、鍵層としてのAb層を欠くこと、毎年の耕耘によって25cm内外の層厚が維持されていることなどのために、断面構成と層厚から積算侵食量を推定することは不可能である。

傾斜畑における積算侵食量の空間的な分布を評価する場合、全炭素含量や(Ap+Ab)層厚は有効な指標となることが示された。しかし、前者は有機物の供給速度(作物残渣等の供給量)や消失速度(分解)が地点によって異なること、また後者では、前に指摘したように明瞭な鍵層を欠く場合は、侵食相での評価が難しいなどの問題が存在する。この点で ^{137}Cs 含量は分析に時間とコストがかかるが、吸着特性と水平堆積性から有効なトレーサーとして利用できることが示された。標準値との比較により、本調査地では稜線部や凸型クリープ斜面の急勾配部分では激しい侵食が、また堆積部分は沖積性緩斜面に遍在していることが明らかになった。なおここでは、標準値として札幌市の平坦な未墾地と共和町の閉じた斜面の実測値から得られた ^{137}Cs 蓄積量の平均値を採用したが、 ^{137}Cs の降下量は地域格差が認められているために、これについては再検討の余地がある。 ^{137}Cs 蓄積量から積算侵食深を求めるには、標準値を地域毎に決定する必要がある。

4. 要約

放射性降下物である ^{137}Cs をトレーサーとして、傾斜地畑における土壌物質移動の評価を行った。調査地は土壌物質の移動に対して開放系であり、過去25年間に表土の約40%が系外に流亡しているものと推定された。稜線部緩斜面と凸型クリープ斜面において激しい侵食が生じており、稜線部緩斜面に位置する隣接圃場との境界部分では年平均侵食量は作土層の11.5%と見積もられ、沖積性緩斜面においてのみ堆積相が認められた。特に、ガリーの修復により厚い(Ap+Ab)層をもつ地点は、 ^{137}Cs 蓄積量の測定結果から侵食相に分類された。

^{137}Cs による土壌物質移動の推定と比較して、有機物含量は地点間の供給・分解速度の差の影響を受けるため、また土壌断面形態による手法では継続的な農作業により一定の厚さを示す作土が保たれているため、正確な積算侵食量を推定することは困難である。したがって ^{137}Cs による侵食土量の推定はより精度の高い方法であると考えられるが、地域間により降下形態や量が異なるために対

象地域の標準値を設定することが重要となる。また ^{137}Cs 蓄積量から精度の高い積算侵食量の空間的な分布を推定するためには、斜面上部から流入する土壌物質の ^{137}Cs 含量をどのように評価するかが今後の課題である。

参考文献

- Dalrymple, J.B., Blong, R.J. and Conacher, A.J.: An Hypothetical Nine Unit Landsurface Model. *Zeit. Geomorph.*, 12: 60-76.
- De Jong, E. and Kachanoski, R.G. (1988): The Importance of Erosion in the Carbon Balance of Praire Soils. *Can. J. Soil Sci.*, 68: 111-119.
- 福田一義 (1985): 土壌中のセシウム-137および自然放射性核種について 道衛研所報, 第35集
- Longmore(McCallan), M.E., O'Leary, B.M., Rose, C.W. and A.L.Chandica (1983): Mapping Soil Erosion and Accumulation with the Fallout Isotope Caesium-137. *Aust. J. Soil Res.*, 21: 373-385.
- McCallan, M.E., O'Leary, B.M. and Rose, C.W. (1980): Redistribution of Caesium-137 by Erosion and Deposition on an Australian Soil. *Aust. J. Soil Res.*, 18: 119-128.
- National Institute of Radiological Sciences (1971, 1976, 1978, 1979, 1979, 1980, 1980, 1981, 1983, 1984): Radioactivity Survey Data in Japan :32, 41, 45, 49, 50, 52, 54, 59, 66, 70.
- 大貫敏彦、大塚芳郎、小川弘道 他 (1984): 帯水砂層中における放射性核種 (^{60}Co , ^{89}Sr および ^{137}Cs) の移動 保健物理, 19: 13-18.
- 大貫敏彦、和達嘉樹 (1983): 砂層中におけるCs-137の移動 日本原子力学会誌, 25(6): 74-81
- Ritchie, J.C., Clebsch, E.E.C. and Rudolph, W.K. (1970): Distribution of Fallout and Natural Gamma Radionuclides in Litter, Humus and Surface Mineral Soil Layers under Natural Vegetation in the Great Smoky Mountains, North Carolina Tennessee. *Health Physics Pergamon Press*, 18: 479-489.
- Ritchie, J.C. and McHenry, J.R. (1974): Estimating Soil Erosion from the Redistribution of Fallout ^{137}Cs . *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38: 137-139.
- Rogowski, A.S. and Tamura, T. (1970): Erosional Behavior of Cesium-137. *Health Physics Pergamon Press*, 18: 467-477.
- Sakuma, T. and Takeuchi, H. (1988): Spacial Variation of Soil due to Accelerated Erosion in the Hilly Areas of Hokkaido. *Japan. Proc. 5th Intern. Soil Conserv. Conf.*, S.Rimwanichled 1: 579-587.
- Squire, M.N. and Middleton, L.J. (1966): Behaviour of Cs137 in Soils and Pastures a Long Time Experiment. *Radiation Botany*, 6: 413-423.
- Sutherland, R.A. and De Jong, E. (1990): Estimation of Sediment Redistribution within Agricultural Fields Using Caesium-137, Crystal Springs, Saskatchewan Canada. *Applied Geography*, 10: 205-221.
- Wischmeir, W.H. and Smith, D.D. (1978): Predicting rainfall erosion losses, A guide to conservation planning, *Agri. Handbook 537*, Washington D.C., U.S.Department of Agriculture.

(受稿年月日 1994年8月10日)