文献 ID：13-12-009

1．基本情報

区分	土壌	担当者名	和田桂子、古米弘明、尾崎則篤
タイトル（英文）	Cesium-134 as a Tracer to Study Particle Transport Processes within a Small Catchment with a Buffer Zone		
タイトル（和文）	緩衝地帯を有する小集水域におけるセシウム134トレーサーを用いた土壌粒子の挙動に関する研究		
キーワード	記載なし		
著者	Nina Syversen, Lillian Øygarden, and Brit Salbu		
文献	J. Environ. Qual. 30:1771-1783 (2001).		

（1）対象地域

ノルウェイ、オスロから北東に 70 ㎞位置するパイロットスケール試験場
対象地点は平均斜角が 14%の斜面、5×50m のエリア内(Fig.1 参照)。
地面下 0~10cm 内の組成は、粘土 41%、シルト５1%、砂 5%、有機物 1.5%。
Fig.1 に示すように、5×45m エリアは Cs-134 を散布する耕作地(tilled area)、5×5m エリアは Cs-134 を散布していない非汚染区域で、非耕作の植生緩衝地帯(buffer zone)。緩衝地帯の植生はヒロハノコメススキ(*Deschampsiaces*et)、アザミの一種（*Cirsiumarvense*)、シバムギ(*Elytrigiarepens*)、オオワダガエリ（*Phleumpratense*L.),メドウフェスク種（*Festucapratensis*)が占めている

本研究では人為的に Cs-134(トレーサー)を散布しており，その汚染度はチェルノブイリ原発事故由来のファールアウトによって観察されたレベルである（88.4 kBq/m²)。散布地点、表面流出水、緩衝地帯におけるトレーサーの増減を測定し、土壌粒子の浸食、堆積現象を解析している。
土壌サンプルに関してはコアサンプルを 1cm 単位でスライスし，105℃で乾燥後，重量，Cs-134 濃度を測定している。植物検体は 70℃で乾燥後，粉砕して重量，Cs-134 濃度を測定している。水サンプルは 100L サンプリングタンクから 25L がポンプアップ，分取され Cs-134 濃度を測定している。測定機器は Miniaxi Auto-Gamm 5000 Series が用いられ，測定時間は 30 分～1 時間である。
試験期間は 1993 年 10 月 26 日から 1996 年 5 月 13 日である。
上記各地点および緩衝地帯に生息している植物内や散布土壌の地面中の Cs-134 線量も測定している。

（2）重要な図表

Fig. 2 には、Cs-134 トレーサー散布日における Cs-134 放射線量(26 Oct. 1993)が示されている。
放射線量は 5676 ～ 288 072 cpm。平均値 72 184 ±31 133 cpm。上方、下方、中間それぞれに高濃度の放射線量が観測され，不均一な散布状況となった。
ベクレル換算すると平均 20.1×10^{3}kBq、89.5kBqm^{-2}、緩衝地帯の上方 1.5m 地点では 0.3×10^{3}kBq、38.3kBqm^{-2} となった。ここから、本研究での散布方法で Cs-134 の大きな損失はないことが判った。

また、Fig. 3 には、試験開始(26 Oct.1993)時に対する試験終了(13 May.1996)時の Cs-134 濃度の変化の割合(%)が示される。
全体的に減少傾向が確認できる。平均減少率は 40－50%。これはトレーサーが吸着した粒子が移行、浸透していることを示している。一方、30m ボーダー、緩衝地帯の上部において増加傾向が確認でき、この地点で粒子の堆積が起こっていることを示している。
また試験終了時、土壌表面には雑草や苔が確認され、雨や流出水から粘土粒子が離脱するのを抑制する働きがあると考えられる。

Fig.4 には、緩衝地帯におけるバックグラウンドと比較した際の Cs-134 濃度の増加を示される。増加レベルは 1.0 倍～3.8 倍(平均 2.1 倍)だった。
上部は耕作地からの表面流出によって輸送された粒子がこの地点で比較的多く堆積し、Cs-134 濃度が上昇していると考えられる。これは流速の減少および表面粗度の増加が原因である。
濃度傾向から、図の右上方から左下方に勾配ができており、これは斜面の方向と一致する。

緩衝地帯の土粒子捕捉については、表面流出水の水深が浅く、生えている植物よりも低い位置を流出した場合、効果が高いとされている。この為、植物の硬さ(倒れにくさ)は重要と考えられる。
粒子の輸送については、耕したばかりの土地において高い割合を示すとされる。これは Fig.5 に表される結果と一致している。しかし、それに対応した Fig.6 におけるプロットが高い上昇を示していないことから、散布地点においてトレーサー物質は浸透していると考えられる。

耕作地（48-3、35-3、5.5-3、7-4）、緩衝地帯（3.5-4、3.5-1、2.0-4、0.5-1）のにおける Cs-134 の経時変化も示された(Fig.5、Fig.6)。最初の Cs 測定は散布直後に行っている。
2 日目の測定は試験開始から 23 日後の初めての降雨イベント後に行った。降雨は降水量 40 ㎜、表面流出 11 ㎜であった。降雨量に対する流出量の割合は 28%と低く、粘土粒子は土壌内部への浸透した可能性が高いと考えられる。なお、耕作後，間もない時期では土壌の間隙が大きいため，鉛直浸透が生じやすい。

3 回目の測定から 4 回目の測定にかけて(56-201 日目)、土壌が凍結していた。この間は土壌中への垂直輸送が抑制され､流出水中の SS 濃度は高い値を示した(2860-5050mg/L｡未凍結土壌では 333-757mg/L)。緩衝地帯下部では Cs-134 線量の増加が低く留まっている。これは上方の緩衝地帯でトレーサーが堆積しているためと考えられる。

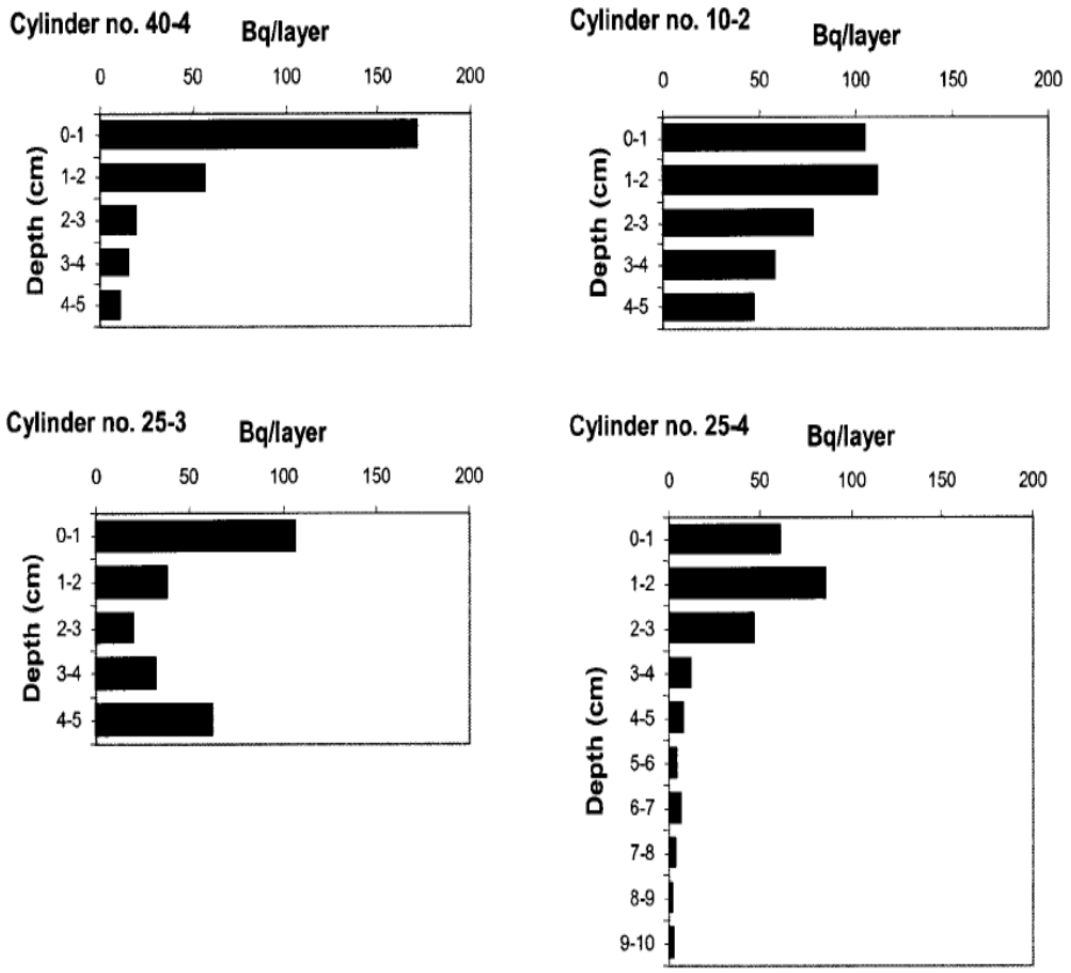

Fig. 7. Vertical distribution of ^{134}Cs in four selected soil cores. Cylinder 40-4 shows a typical vertical distribution of ^{134}Cs with most of the activity in the two upper layers. Cylinders 10-2 and 25-3 show high ^{134}Cs activities in the layers below 0 to 1 cm. Cylinder 25-4 illustrates the vertical distribution of ^{134}Cs to the depth of 10 cm.

Fig.7 には耕作地、数点における、Cs-134 の深度分布が、Table1 には各地点における深度ごとの単位面積あたりの放射性物質量の平均値が示されている(0～1cm、1～2cm、2～3cm)。全体の 52%は 0～1cm に存在していた。

この傾向は Fig.7 のシリンダーNo.40-4、No.25-3 で見られる。しかし No.25-3 では、3-4cm、4-5cm において線量の増加が見られるのに対して、No.40-4 では減少している。一方で、シリンダーNo,10-2 では 0-1、1-2cm において線量がほぼ等しく、その下層については減少傾向が見られるが、他のシリンダーよりも大きい値を示している。シリンダーNo.24-4 では 0～3cm までにほとんどのトレーサーが存在しており、それ以下、10cm までにはほとんど存在していない。

以上のように、各地点において浸透が確認されるものの、場所によってその傾向は異なっていることがわかるが，この原因については不明である。Fig.5、Fig.6 の部分で示したように、これらの浸透は試験開始から初めての降雨イベント(26 日目)で大部分が起こったと考えられる。

Fig. 8 には、表面流出水における Cs-134 濃度と SS 量の経時変化が示されている。
流出水イベントは試験期間中、全 58 回発生している。そのうち、雪解けが 51 回、秋季におけるものが 4 回、夏季が 2 回となっている（残り 1 回については記載なし)。雪解け時は土壌が凍結しており、浸透

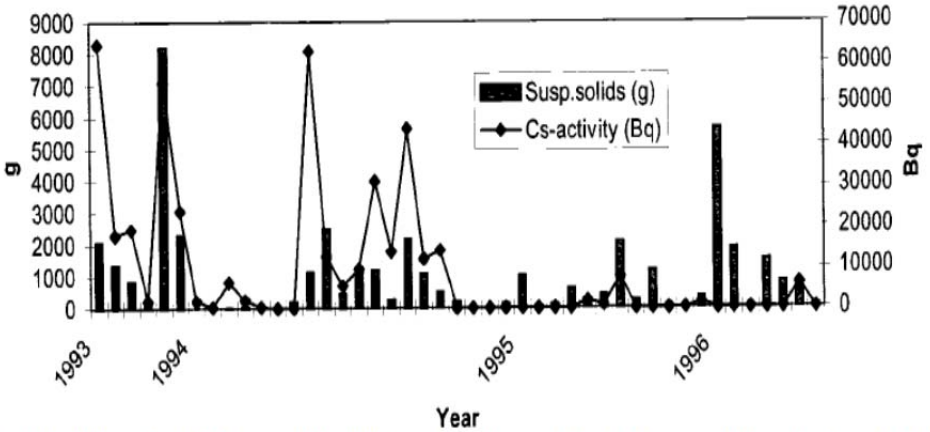

Fig. 8. The ^{134}Cs activity (Bq) and particles (suspended solids in g) in surface runoff water transported through a 5-m-wide buffer zone during the period October 1993 to April 1996.

はほとんど起きず、流出水量は大きくなる。そのため，融雪時期は他の時期より，表面流出から粒子が除去される効率は低くなると考えられる。

SS は 4.2～6.2kg/ha-1 の間で変動している。

Cs-134 濃度は 994 年の途中まで SS 量の増減に応答して変化している。しかしそれ以降は、SS 量が高い場合でも Cs-134 濃度が低く留まるっている。これは、耕作地における Cs-134 トレーサーが 1993－1994 の間にウォッシュアウトされてしまったためと考えられる。

植物による Cs-134 の経根吸収

植物への Cs-134 の取り込みは本試験においてはほとんど確認できなかった(図表なし)。植物の洗浄の有無にかかわらず、得られた線量に差がなかった。

緩衝地帯から採取サンプルは 2 つのみにとどまっているが、その根系(root system)における Cs-134 濃度は 329±139Bqkg^{-1}、744±93Bqkg^{-1} と土壌中の Cs-134 濃度と比べて低い。従って、粒子に吸着した Cs-134 は比較的、植物に吸着、吸収されにくいと考えられる。また根による吸収は、根が存在する土壌深度の汚染レベルに依存にしている。今回、緩衝地帯に優先していた tufted hair grass の根は地中深まで及んでいる。このことから、根からの吸収が最小限に抑制された可能性も考えられる。

Fig.10 には、Cs-134 の物質収支を示されている。

試験開始前に 19.9MBq 分の Cs-134 トレーサーを耕作地に散布。試験開始時に同エリアにおける放射線量が 20.4MBq であった。試験終了時における同エリアの放射線量は 10.7MBq(散布時の 54%)であり、46%のトレーサーが、表面土壌から移行したと考えられる。移行先としては緩衝地帯(ほとんどが、堆積、浸透。植物への吸着、吸収はほぼゼロ)、土壌中への浸透、表面流出水として流出を考慮した。

緩衝地帯の表面土壌における放射線量は、試験開始時(バックグランド)に 0.28MBq、終了時に 0.46MBq だった。この結果から堆積したトレーサーによる放射線量は 0.17MBq で全体の 1%が緩衝地帯における堆積物となった。また土壌中における分布を調べた結果、合計 11.7MBq(59%)もの放射線量を観測した。また残りは堆積、浸透もせず表面流出(0.42MBq、2%)したと考えられる。

文献 ID：13-12-009

土粒子の挙動に対するセシウム134の有用性

Cs-134 は土壌粒子によく吸着するため、表面流出、浸透、堆積といった粒子輸送の経路を解析する為によく利用される。

この研究では、この Cs-134 を耕作地に散布し粒子をラベリングし、隣接する緩衝地帯と共に Cs-134 トレーサーの経日変化を追うことで、粒子に動態を評価した。

対象エリアを格子で区切り、現場における深度分布、表面流出における濃度変化を解析した。

試験中は試験地の人為的攪乱は行っておらず，純粋に自然現象による粒子の動態について試験している。

試験中は主に表面浸食(sheet erosion)が観測されていた。

一方、この方法による土壌粒子の動態解析は、Cs-134 が土壌粒子、特に粘土質に強く吸着するという性質を利用していることから、実施前に適用する土壌の成分を考慮する必要がある。

また本研究では Cs-134 トレーサーを手動で散布している。そのため、プロット毎に不均質な線量を示している。この部分については改善の余地があると考えられる。

土壌サンプルの採取は、試験終了時に行った。これは、試験中の土壌の攪乱を防ぐためであるが、そのために試験中の深度分布のデータを得ることが出来なかった。

2. 提言につながる情報

（1）モニタリングへの活用

本試験における結果は、土壌に降り注いだフォールアウト(fall out)が降雨イベントなどにより、どのように集水域まで移動するのかをよく示している。特に試験中に土壌の攪乱を行わなかったため、より自然的な要因のみが関与した場合の輸送状況を示しているといえる。

（2）流出挙動・経路

Cs-134 は土壌粒子、特に粘土質の粒子に吸着し、吸着した状態で環境中を移動する。Cs-137 についても同様の性質があり、トレーサーとして用いられていると記載があったが、Cs-134 との挙動の違いについては示されていない。

Cs が土壌粒子に強く吸着するということと Fig.8 の結果から、表面流出水や河川中での Cs の挙動は SS 量と相関がある。また、粘土質土壌表面に降り注いだ放射性 Cs は、その約半分が降り注いだ土壌中に堆積、浸透し残存する。その為、移動は比較的短距離であり、近くに河川などない限り広域的に移動する割合は微小であるといえる。今回の試験では、試験中に散布土壌を攪乱しなかったが、攪乱していればより多くのトレーサーが地中に浸透していた可能性が高い。地中に浸透した Cs の分布については概ね減少傾向にあるが、特定の場所については深度が深い位置において高い線量を示している。本研究では、プロット毎に散布したトレーサー量が一定ではないため、どのような土壌でどのような深度分布を示すのかについては不明のままである(Fig.7 参照)。Cs は土壌粒子によく吸着する一方で、植物の表皮や根からの吸収はあまり起こらないという結果が得られた。

さらに、試験開始から約 2.5 年後以降においては、放射性 Cs 量と SS 量とは相関が小さかった。このことから、新たな放射性 Cs の追加がなかった場合、最初に降り注いだ放射性 C s はその場で浸透、もしくはウォッシュアウトされ、表面流出による移動には関与しないといえる。また浸透した放射性 Cs も流域移動には関与していないと考えられる。

（3）除染の際の留意点

特になし。

（4）担当者のコメント

本研究では，土粒子の挙動の解明を主としたものであるが，逆に言えば Cs と強力な結合を行う土粒子または河川では SS をモニタリングすることで，間接的に Cs の挙動を知る手がかりが得られる可能性がある。

ただし、放射性物質を野外かつ広範囲で散布することは，我が国の現状を勘案すると汚染の大小にかかわらず不可能に近い。

また本試験では緩衝地帯の土壌中の深度分布に関する記述はないが、散布から移動した放射性 Cs 粒子が、移動した土地においてどの程度浸透するのかは非常に興味深い。