

森林からの流出水に含まれる放射性物質の動態

篠宮佳樹, 玉井幸治, 小林政広, 大貫靖浩, 清水貴範, 飯田真一,
延廣竜彦, 澤野真治, 坪山良夫(森林総研), 蛭田利秀(福島林研セ)

要旨: 福島第一原発事故によりセシウム(Cs)などの放射性物質が放出された。森林は放射性 Cs を系内に保持する傾向が強いと考えられているが、地形が急峻で雨量の多い日本の場合、出水時に流出する懸念がある。そこで、福島県郡山市の森林流域で森林から流出する放射性 Cs の動態について調査した。本報では、主として 2012 年 5 月 3 日の総雨量 158mm の大雨出水時の結果について報告する。実測値では、 ^{137}Cs で 1.2Bq kg^{-1} が最高で、放射性 Cs は主に懸濁態として流出していた。この出水での ^{134}Cs ・ ^{137}Cs の合計流出量は多めに見積もって 146Bq m^{-2} と推定され、これは現地での ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 合計沈着量の約 0.1% であった。これらの結果から、単位面積あたりの放射性セシウムの流出は大雨であっても大きくない可能性が示唆された。

キーワード: 森林, 放射性セシウム, 流出, 大雨

Abstract: Radioactive material such as cesium (Cs) was released due to the accident at the Fukushima daiichi nuclear power plant. Although forest ecosystems are thought to have a tendency to maintain radioactive Cs, there is concern that radioactive Cs may flow out from forest ecosystems in steep areas subject to considerable rainfall, many of which exist in Japan. Accordingly, the behavior of radioactive Cs flowing out from a forest was investigated in a small catchment of Koriyama City, Fukushima Prefecture. In this report, we show mainly the result of a freshet of the total of 158 mm rainfall on May 3, 2012. The highest in ^{137}Cs was 1.2 Bq kg^{-1} in the observation and most of which flowed out as suspended materials. The total runoff of ^{134}Cs ・ ^{137}Cs in this freshet was presumed to be 146 Bq m^{-2} , externally estimated, which only comprised about 0.1 % of the total deposition of ^{134}Cs ・ ^{137}Cs in our research site. It was suggested that the potential for radioactive cesium to run off through stream water for each unit area was little, despite the freshet being followed by heavy rain.

Keywords : forest, radiocaesium, runoff, heavy rain

I はじめに

福島第一原発事故によりセシウム(Cs)などの放射性物質が放出された。福島県の森林率は 71% と高く、放射性 Cs の多くは森林に沈着したと考えられる。森林において放射性 Cs は樹冠や落葉層に多くとどまっている(4)。森林からの流出水は水道原水、農業用水として利用される他、河川・湖沼・海洋の各生態系との水・物質輸送において密接に関連している。森林は放射性 Cs を系内に保持する傾向が強いと考えられている(1,3)。その一方で、地形が急峻で雨量の多い日本の場合、出水時に流出する懸念が指摘されている(7,8)。大規模な出水であれば、流量も著しく増加

するため、出水時の放射性 Cs の流出量も多くなると考えられる。筆者らは、福島県の森林流域で渓流水を通じて流出する放射性 Cs の挙動の調査を開始した。本報では、2012 年 5 月 3 日における大雨出水時を中心として放射性 Cs の挙動について報告する。

II 研究方法

調査は、福島県郡山市の福島県林業研究センター多田野試験林内の小流域で行った(北緯 $37^{\circ}22'$, 東経 $140^{\circ}14'$)。年雨量は 1,163 mm, 平均気温 12.1°C である(アメダス; 郡山)。地質は堆積岩(砂岩・凝灰岩)である。植生はスギ・ヒ

Yoshiki SHINOMIYA, Koji TAMAI, Masahiro KOBAYASHI, Yasuhiro OHNUKI, Takanori SHIMIZU, Shin'ichi IIDA, Tatsuhiko NOBUHIRO, Shinji SAWANO, Yoshio TSUBOYAMA (For. and For. Prod. Res. Inst., Matsunosato 1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687, Japan) and Toshihide HIRUTA (Fukushima Prefectural Forestry Research Centre, Aza-Nishishimasaka 1, Narita, Asakamachi, Koriyama, 963-0112, Japan), The behavior of radioactive materials in stream water from a forested watershed

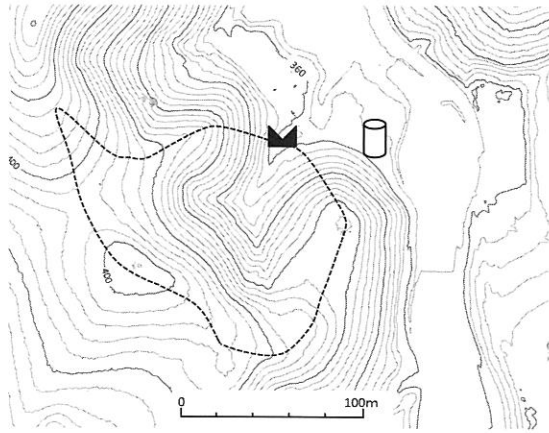


図-1. 試験地の地形図

Fig. 1 Location of research site

▲ 流量堰 Weir ☪ 雨量計 Rain gauge

ノキ人工林(約 48 年生)にコナラ等落葉広葉樹林とアカマツ林が混在する。流域面積は 1.2 ha, 標高は 358~409 m, 起伏比は 0.42 である。試験流域から約 50 m 離れた, 開けた地点で雨量を測定した(図-1)。三角堰(60°V ノッチ)と水位計(光進電気工業製 STS DL/N70 型)を流域末端に設置して流量を観測した。流量堰の直上に自動採水装置(ISCO 製 model6712)を設置し, 渓流水を1~12 時間間隔で約 2L ずつ採集した。放射性 Cs 濃度は渓流水を無処理のままマリネリ容器(容積2L)に入れて, ガンマスペクトロメトリ法(ORTEC 製 GEM40)で測定した。その後, 0.5 μm のガラス繊維ろ紙を用いて懸濁物質濃度(以降, SS と記す)を定法(6)に従い, 測定した。放射性 Cs が検出された試料については, ろ紙を通過した水を再測定した。自動採水装置に据付可能な濁度センサー(FTS 製 DTS-12)を設置し, 10 分間隔で濁度を自動記録した。観測は2012年1月より開始し, 月 2 回定期的に採水した。雨量及び流量観測, 自動採水器による採水は2012年3月1日より開始した。本報では, 2012年5月3日の出水を中心に同年5月までの観測結果を基に報告する。2012年1月~5月の雨量は419 mm(アメダス; 郡山)であった。この期間に出水サンプリングは3つの降雨で成功した。流量増加開始時からの基底流出の上昇率(0.55 L s⁻¹ km⁻² h⁻¹)を加算した流量と実際の流量が一致するまでの期間の積算流量を直接流出とし, 直接流出率は直接流出量の当該降雨の総雨量に対する比率とした(2)。現地の¹³⁴Cs・¹³⁷Cs 合計沈着量は146,901 Bq m⁻², 空間線量率(高さ1m)は0.6μSv h⁻¹と報告されている(5)。放射性 Cs 濃度は採水日に換算して表記した。5月3日の出水時に流量堰の漏れがあった形跡がみられたため, その期間の流量はタンクモデルを用いて再現した。

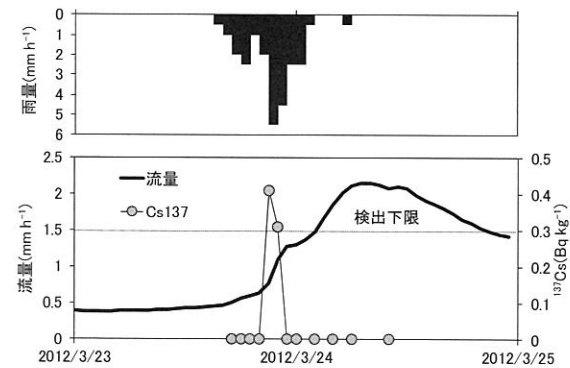
III 結果

1. 平水時の放射性 Cs 濃度 平水時(1月12日~5月24日の計11回)の放射性¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度はいずれも検出限界(いずれも0.5 Bq kg⁻¹)以下であった。5月24日の平水時サンプルは測定時間を長くしたが, 放射性¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度は検出限界(いずれも0.07 Bq kg⁻¹)以下であった。平水時のSS濃度は4月6日, 4月18日の2回しかないが, 2.3 mg L⁻¹であった。

2. 出水時の放射性 Cs 濃度 3月23日の降雨は, 総雨量25 mm, 最大降雨強度5.5 mm h⁻¹であった。最大降雨強度5~6 mm h⁻¹の際, ¹³⁷Cs濃度が0.3~0.4 Bq kg⁻¹程度検出された(図-2)。この出水時のサンプルの¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度の検出下限はいずれも0.3 Bq kg⁻¹であった。放射性 Cs が検出された時のSS濃度は約5 mg L⁻¹であった。

3月31日に総雨量10 mm, 最大降雨強度3 mm h⁻¹の小規模な降雨があり, 0.5 Bq kg⁻¹の¹³⁷Csが検出された(図-2)。この出水サンプルの¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs濃度の検出限界はいずれも0.2 Bq kg⁻¹であった。放射性 Cs が検出された時の

a) 3月23日



b) 3月31日

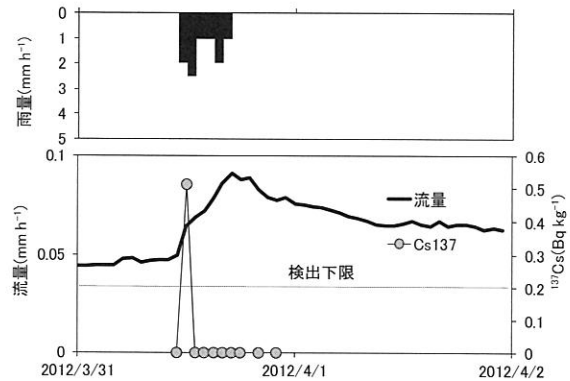


図-2. 出水時の放射性 Cs 濃度の変動

Fig. 2 The variations in ¹³⁷Cs concentration during freshet
*¹³⁷Cs濃度がNDの場合, 便宜的に0 (Bq kg⁻¹) と表示した

SS 濃度は 3.2 mg L^{-1} であった。

3. 大雨出水時の放射性 Cs 濃度 5月3日に総雨量 158 mm, 最大降雨強度 19 mm h^{-1} の降雨があった。この大雨出水での直接流出量は 114 mm で直接流出率は 72%となっていた。降雨前日と降雨初期の放射性 Cs 濃度は検出限界以下(いずれも 0.2 Bq kg^{-1})であったが、降雨に伴う流量増加とともに次第に放射性 Cs 濃度は上昇した。降雨強度 9 mm h^{-1} と比較的強い雨が降った(5月3日 13:00)直後に採水された渓流水(13:38採水)では ^{134}Cs 濃度が 1.0 Bq kg^{-1} , ^{137}Cs 濃度が 1.2 Bq kg^{-1} と、5月までの観測のうち、最も高い値を示した(図-3)。この時、SS 濃度は 35.6 mg L^{-1} , 濁度(時間平均)は 29.2 NTU と高い値を示した。降雨終了直後で、まだ比較的流量が多い、5月4日 5:38 のサンプルでは放射性 Cs は検出されなかった(検出限界は ^{134}Cs で 0.14 Bq kg^{-1} , ^{137}Cs で 0.13 Bq kg^{-1})。

4. 放射性 Cs 濃度と濁度, SS 濃度の関係 合計 3 出水の ^{134}Cs と ^{137}Cs の合計濃度($^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ 濃度)と濁度の関係をみると、データ数が多くなく (n=8), 高い濁度の時の $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ 濃度のデータが少ないなどの不十分な点があるが、概ね濁度が高いと $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ 濃度は高い傾向がみられた(図-4)。濁度と SS 濃度の相関は高かった ($r=0.976$, $n=15$)。

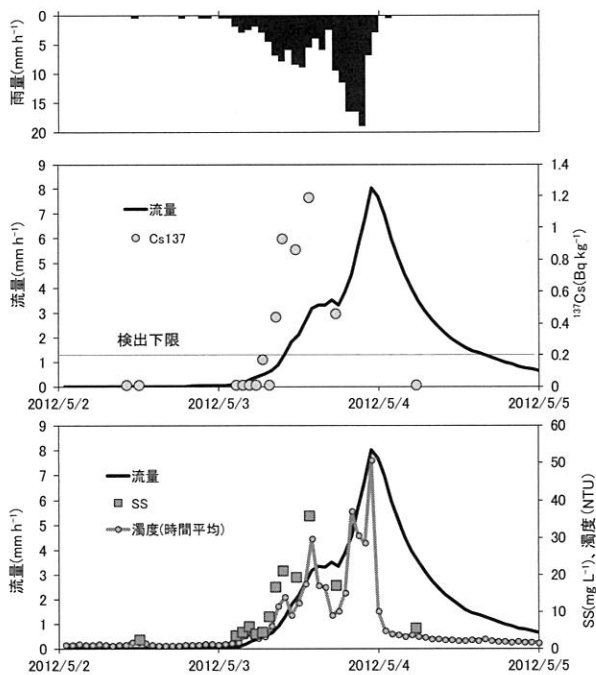


図-3. 2012年5月の出水時(総雨量 158 mm)における雨量, 流量及び放射性セシウム濃度の変化

Fig. 3 The variations in rainfall, discharge and ^{137}Cs concentration during freshet in May, 2012

* ^{137}Cs 濃度が ND の場合, 便宜的に $0 \text{ (Bq kg}^{-1}\text{)}$ と表示した

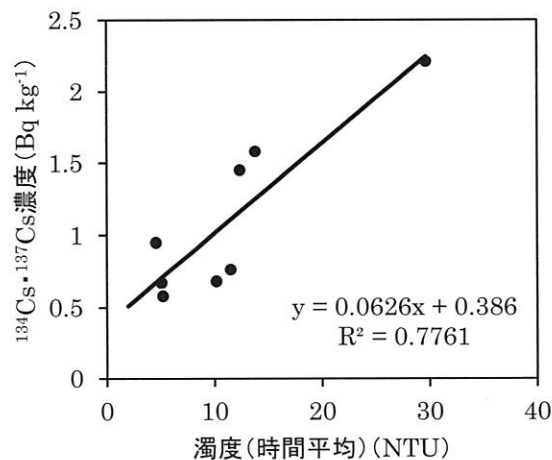


図-4. 出水時の濁度と $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ 濃度の関係

Fig. 4 The relationship between turbidity and $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ concentration

表-1. 濾過前後の放射性 Cs 濃度の比較

Table 1 Comparison of radiocaesium concentration before and after filtration

年月日	採水時刻	^{134}Cs 濃度(Bq kg^{-1})		^{137}Cs 濃度(Bq kg^{-1})	
		ろ過前	ろ過後	ろ過前	ろ過後
3/23	21:31	0.26	ND	0.41	ND
3/23	22:31	0.27	ND	0.31	ND
3/31	12:44	0.44	ND	0.51	ND
5/3	8:38	0.32	ND	0.44	0.055
5/3	11:38	0.59	ND	0.86	0.067
5/3	13:38	1.02	0.057	1.19	0.136
5/3	17:38	0.22	ND	0.46	0.091

放射性 Cs が検出された試料水をろ過後, 再測定したところ, 放射性 Cs 濃度が検出限界以下になったり, 低下したりなど, ろ過により懸濁態を取り除くことで放射性 Cs の減少がみられた(表-1)。

IV 考察

1. 放射性 Cs の流出特性 今回, 事例数は多くはないが, 小規模から大規模な出水まで観測できた。放射性 Cs が検出されたのは出水時の降雨強度が強まった際で, 流量増加過程でのみ見られた。SS 濃度や濁度が高い時, 放射性 Cs 濃度も高いが, ろ過後, 放射性 Cs 濃度は, 不検出になったり, ろ過前の濃度の 5~20%にまで低下したりした。これらのことから, 出水時の放射性 Cs は主として流量増加過程に懸濁態として流出する傾向がある。

2. 総沈着量に対する大雨出水での放射性 Cs 流出率 前述の大雨出水での放射性 Cs 流出量の算定を試みた。流量と $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ 濃度を乗じ, 直接流出発生期間の積

算値を当該出水における放射性 Cs 流出量とした。採水時刻との関係で、最大降雨強度 19 mm h^{-1} を示した、5月3日22時付近の採水ができず、放射性 Cs 濃度を実測することができなかった(5月3日17:38の次の採水は5月4日5:38)。しかし、5月3日19時以降、流量はさらに増加し、濁度も上昇した(図-3)。濁度、SS濃度が高くなると、放射性 Cs 濃度も上昇する傾向がみられていることから、5月3日22時付近の放射性 Cs 濃度は観察された最高値 (1.2 Bq kg^{-1}) よりも高濃度であった可能性がある。同様に濁度の変動から推察して、降雨終了直後の流量逓減過程においては放射性 Cs 濃度が急激に低下したとみられる(図-3)。流量逓減過程における SS 濃度の急激な低下はこれまで報告されている(9)。こうしたことから、測定の結果、検出下限値以下であった場合および実測値のない場合の ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 濃度は(1)式に基づいて濁度より推定した。

$$Y=0.0626X+0.386 \cdots (1) \quad (R^2=0.776)$$

ここで、Y、 ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 濃度 (Bq kg^{-1}) ; X、濁度 (NTU) である。回帰式は他に二次式、対数式、累乗式について作成したが、直線式の決定係数が最も高かったこと、外挿する際に最も高い ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 濃度を与えることから、直線式を採用した。積算の結果、この出水での ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 合計流出量は 146 Bq m^{-2} と推定された。今回の大雨出水における ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 合計流出量は現地の ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 合計沈着量(5月3日に再換算) $134,448 \text{ Bq m}^{-2}$ の 0.11% であった。推定された大雨出水での ^{134}Cs ・ ^{137}Cs 合計流出量は過大に見積もっていることも合わせて考えると、溪流を通じて流出する単位面積あたりの放射性 Cs 量は非常に小さい可能性が高く、溪流水に含まれる Cs の流出特性は既往の知見(1,3)と同調する傾向がみられた。なお、福島第一原発事故後の2011年7月に約100mm、同年9月に約250mmの大雨(アメダス;郡山)が東北南部に降ったが、その際の放射性 Cs の流出量は不明であり、留意する必要がある。

V 謝辞

本研究では、福島県林業研究センター多田野試験林を試験地として借用させていただいた。森林総合研究所 放射性物質影響評価監 赤間亮夫氏、研究コーディネーター 高橋正通氏、立地環境研究領域長 金子真司氏、環境影響評価担当チーム長 池田重人氏、土壌資源研究室長 三浦覚氏には、放射性物質の分析にあたって便宜を図っていただいた。本研究は農林水産省農林水産技術会議委

託プロジェクト研究費「森林内の放射性物質に由来する影響を低減させる技術の開発」によって行われた。ここに謝意を表す。

VI 引用文献

- (1) 林誠二, 渡邊未来, 渡邊圭司, 越川昌美 (2012) 筑波山森林集水域を対象とした放射性セシウムの動態について, 第46回水環境学会年会講演集: pp.245.
- (2) HEWLETT JD, HIBBERT AR. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. International Symposium on Forest Hydrology: pp.275-290.
- (3) IAEA (2006) Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience, Reports of the Chernobyl Forum Experts Group 'Environment', Radiological Assessment Reports Series (2006).
- (4) 金子真司・外崎真理雄・清野嘉之・池田重人・黒田克史・田中浩・川崎達郎・斉藤哲・梶本卓也・阿部真・杉田久志・矢崎健一・太田敬之・三浦覚・志知幸治・大貫靖浩・阪田匡司・篠宮佳樹 (2012) 東京電力福島第一原子力発電所事故による森林放射能汚染の実態調査, 関東森林研究, **63-1**: pp. 97-100.
- (5) 文部科学省 (2012) 文部科学省(米国エネルギー省との共同を含む)による航空機モニタリング結果, <http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/258/list-1.html>.
- (6) 那須淑子 (2005) 蒸発物質と蒸発残留物, 水の分析 (第5版), 化学同人, 京都: pp. 198-201.
- (7) 大久保達弘・金子真司・金子信博・田中浩・SERGIY ZIBTSEV・VALERII KASHPAROV・VASYL YOSCHENKO・吉田聡・恩田裕一 (2012) 福島原発事故の森林生態系への放射能汚染影響を考える, 森林科学, **65**: pp. 26-44.
- (8) 山口紀子・高田裕介・林健太郎・石川覚・倉俣正人・江口定夫・吉川省子・坂口敦・朝田景・和穎朗太・牧野知之・赤羽幾子・平舘俊太郎 (2012) 土壌-植物系における放射性セシウムの挙動とその変動要因, 農環研報, **31**: pp. 75-129.
- (9) ZHANG Z, FUKUSHIMA T, ONDA Y, MIZUGAKI S, GOMI T, KOSUGI K, HIRAMATSU S, KITAHARA H, KURAJI K, TERAJIMA T, MATSUSHIGE K, TAO F. (2008) Characterization of diffuse pollutions from forested watersheds in Japan during storm events—Its association with rainfall and watershed features. Science of the total environment, **390**: pp. 215-226.