

脱水汚泥中の Cs-137 の変動特性とモデリング*

福島大学共生システム理工学類 三浦 尚也
福島大学共生システム理工学類・福島大学環境放射能研究所 横尾 善之

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災による東京電力株式会社福島第一原子力発電所の一連の事故発生後、福島県内の下水処理場にて下水汚泥等から放射性物質が検出された。これは、事故により福島全域に拡散した放射性物質が市街地の土壤に付着、降雨によって下水管に土壤が流入、最終的に下水処理場に移行していることが原因であると考えられる。測定・公開されている放射性物質は I-131, Cs-134, Cs-137 の3種類である。また、放射性物質は脱水汚泥中の濃度 (Bq/kg) として公開されている。検出される放射性物質の値は降雨後に上昇し、時間の経過とともに徐々に減少する傾向がある。この減少の傾向は降雨後の河川流量の減少の傾向に似ている。そこで本研究は下水管に流入する放射性物質の動態を明らかにすることを目的として、日野・長谷部 (1985) の成分分離手法を用いて Cs-137 の時系列データを水文学的に解析した。

2. 方法

2.1 対象地点および使用データ

本研究では福島県内の2箇所の下水処理場 (処理場A, 処理場B) を対象とした。脱水汚泥中の放射性物質濃度 (Bq/kg) のデータを取得し、このデータに各処理場で発生している脱水汚泥量 (kg/d) の値を掛け合わせ、1日に発生する脱水汚泥中に含まれる放射性物質総量 (Bq/d) の値を算出し使用した。また、本研究ではデータが公開されている放射性物質のうち半減期が最長である Cs-137 について検討した。図-1, 図-2 には脱水汚泥中の放射性物質濃度と降雨の関係、図-3, 図-4 には放射性物質濃度総量と降雨の関係の図を記載する。

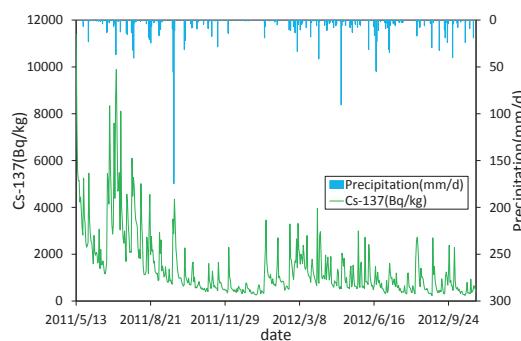


図-1 Cs-137 濃度と降雨の関係 (A 処理場)

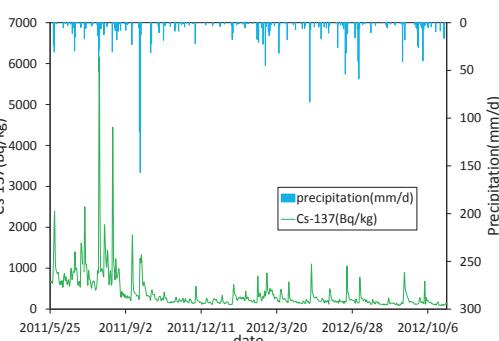


図-2 Cs-137 濃度と降雨の関係 (B 処理場)

* Variability and its modeling of Cs-137 concentration in the dehydrated sewage sludge in Fukushima by Naoya Miura, Yoshiyuki Yokoo.

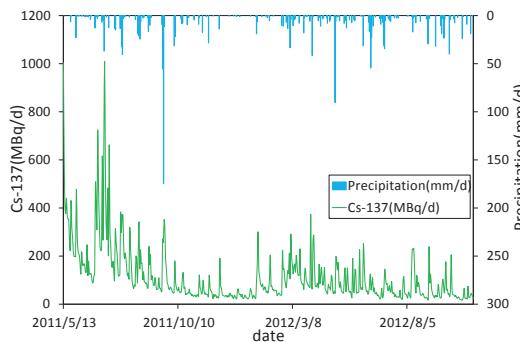


図-3 Cs-137 総量と降雨の関係 (A 処理場)

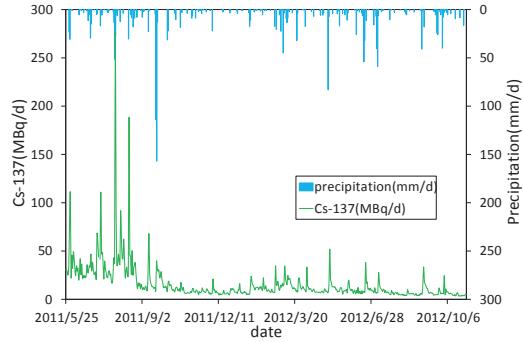


図-4 Cs-137 総量と降雨の関係 (B 処理場)

2.2 時定数 T_c の算出

時定数 T_c の算出では、放射性物質総量 (Bq/d) の対数プロットグラフを作成し、放射性物質総量の通減部分の勾配変化について直線を引いた。直線を引いた区間と対応する放射性物質総量の区間を抽出し指数近似を行った。指数近似で得られた式(1)の at からその逆数である時定数 T_c を求めた。 α は通減係数 ($/\text{d}$) であり、 t は時間間隔 (d) である。求められた時定数は表-1に示す。

$$Q = Q_0 \exp(-\alpha t) \quad \dots \quad (1)$$

$$T_c = 1/(\alpha t) \quad \dots \quad (2)$$

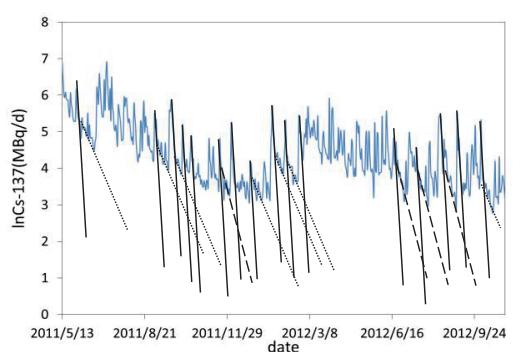


図-5 通減部分の勾配変化

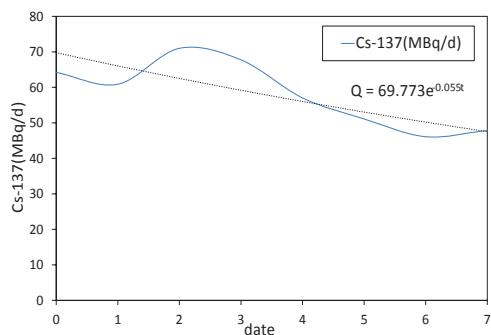


図-6 通減部分の抽出

表-1 算出した時定数 T_c

	処理場 A	処理場 B
時定数 T_c	$T_{c1}=18.2\text{d}$ $T_{c2}=8.3\text{d}$ $T_{c3}=2.5\text{d}$	$T_{c1}=27.0\text{d}$ $T_{c2}=11.2\text{d}$ $T_{c3}=2.7\text{d}$

2.3 成分分離方法

T_c を(5), (6)式に代入することで C_0 と C_1 を求め, C_0 と C_1 を(3)式に代入し数値フィルター $\omega(\tau)$ を求めた。そして、数値フィルター $\omega(\tau)$ を(4)式に代入することで Cs-137 総量 (MBq/d) の成分分離を行った。本来であれば日野・長谷部 (1985) の成分分離手法は河川流量に対して用いられる手法であるが、本研究では Cs-137 総量 (MBq/d) に対して行った。これは Cs-137 が付着した土壤が降水とともに移動していることや、Cs-137 総量の減少傾向が降水後の河川流量の減少傾向に類似していることに起因する。

$$\omega(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1 \tau}{2}\right) \sinh\left(\sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0 \tau}\right) / \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0} & (\tau > 0) \\ 0 & (\tau \leq 0) \end{cases} \quad \cdots (3)$$

$$Q(t) = \sum \omega(\tau) Q(t - \tau) \quad \cdots (4)$$

$$C_0 = \left(\frac{2.1}{t_c} \right)^2 \quad \cdots (5)$$

$$C_1 = \frac{2.1^2}{t_c} \quad \cdots (6)$$

3. 結果

3.1 Cs-137 総量の算出と時間経過

図-3, 図-4 に Cs-137 総量 (MBq/d) の算出結果を示した。脱水汚泥中の Cs-137 の濃度 (Bq/kg) のグラフ形状と Cs-137 総量 (MBq/d) のグラフ形状は似ていることが分かった。これは、処理場にて排出される脱水汚泥量が年間を通して一定の値を示しているからである。Cs-137 総量は原子力発電所の事故当初は高い値を示していたが、時間が経過するとともに減少し、現在は低い値を示していることが分かった。Cs-137 総量の値が高い期間は A 処理場・B 処理場共に 2011 年 6 月下旬から 8 月上旬にかけてであることが分かった。これは、Cs-137 が付着した土壤が 6 月下旬からの梅雨によって押し流されたことが原因であると言える。また、2012 年の梅雨の期間を見ると、両処理場共に前年度ほど高い値は検出されていない。これは、市街地に存在する事故由来の Cs-137 が降雨による河川や下水管への流出、または除染活動によって減少したことが原因であると言える。

3.2 脱水汚泥中の Cs-137 の成分分離

成分分離の結果を図-7, 図-8 に示す。ここで $Q1, Q2, Q3, Q4$ はそれぞれの基底流出、遅い中間流出、速い中間流出、表面流出である。 $Q1$ から順に流出変動が激しくなっていることが分かり、表面流出は降雨に敏感に反応していることが分かった。また、処理場 A, B の成分分離結果を比較すると、処理場 A の表面流出が処理場 B よりも激しいことが分かった。これは処理場の下水管の配管の違いからきているものであり、A 処理場の方が B 処理場よりも降雨の影響を大きく

受けていることが分かる。その他の成分 $Q1 \sim Q3$ は、時定数から考えると放射性物質が付着した土壤が下水管に流入し、処理場内で脱水汚泥として流出するまでに約 1~2 日かかることから、土壤が下水管に流入する以前の過程を表していると言える。

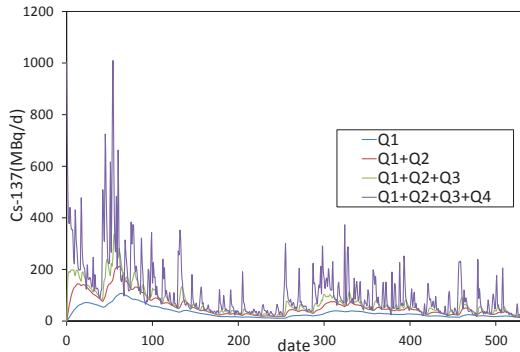


図-7 成分分離結果(A 処理場)

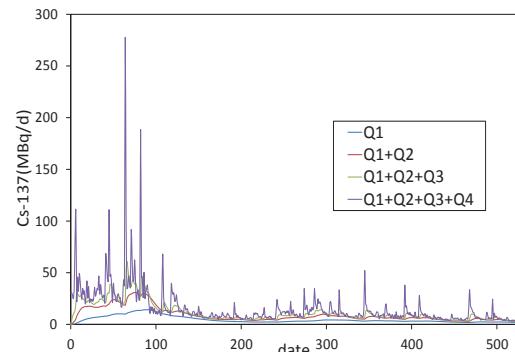


図-8 成分分離結果(B 処理場)

3.3 Cs-137 と降雨の関係

Cs-137 総量 Q (MBq/d) と降雨 P (mm/d) の関係を図-9、図-10 に示す。また、以下の図は土壤が降雨によって下水管に流入し脱水汚泥として流出するまでに約 1~2 日かかることから、検出される Cs-137 総量 (MBq/d) の値をその前日の降水量と対応させた図である。図-9、図-10 から Cs-137 総量 (MBq/d) と降雨との間には弱い相関があることが分かった。このことから、Cs-137 総量 (MBq/d) の流出成分の中に降雨との相関がある成分があることが分かった。また、成分分離して得られた表面流出 $Q4$ (MBq/d) と降雨 P (mm/d) の関係を図-11、図-12 に示す。表面流出 $Q4$ と降雨との相関は、A 処理場・B 処理場共に Cs-137 総量 (MBq/d) と降雨との相関に比べて高くなっていることが分かった。このことから、表面流出 $Q4$ は降雨の影響が大きいことが分かった。また、事故由来の Cs-137 は時間経過につれて着実のその存在量を減らしており、降雨に対する応答も小さくなっていることがわかった。また、 $Q1 \sim 3$ と降雨との

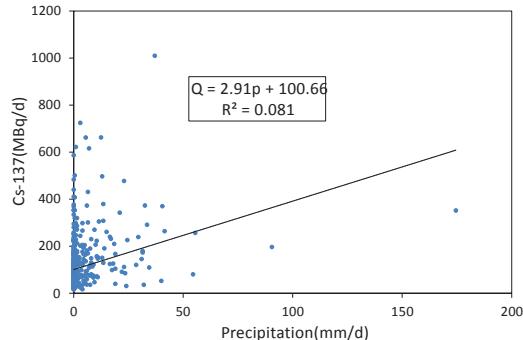


図-9 Cs-137 と降雨の関係(A 処理場)

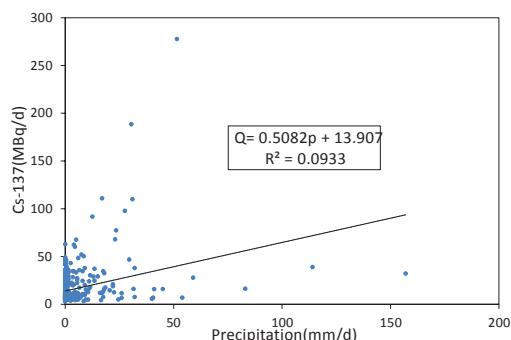


図-10 Cs-137 と降雨の関係(B 処理場)

相関は両処理場どちらからも確認できず, $Q1 \sim 3$ は降雨の影響が小さいことが分かった。時定数 T_c の値から考えても、この結果は正しいと言える。

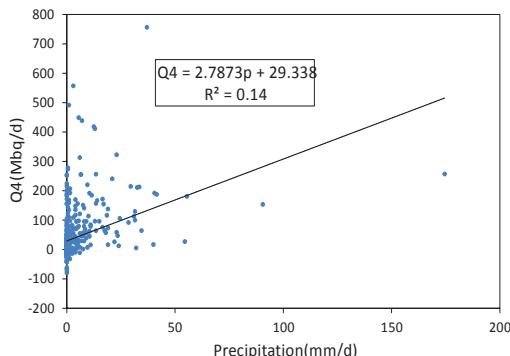


図-11 Q4 と降雨の関係(A 処理場)

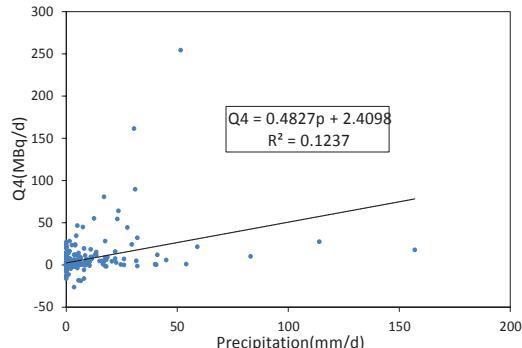


図-12 Q4 と降雨の関係(B 処理場)

4. 考察

本研究では日野・長谷部 (1985) の成分分離手法を用いて Cs-137 の時系列データを水文学的に解析した。本来であれば成分分離は河川流量を分離する場合に用いられるが、本研究では Cs-137 総量 (MBq/d) の流出成分を分離するために用いた。処理場 A・処理場 B ともに流出成分は 4 成分であると考え分離した。時定数 T_c や図-11, 図-12 から考えても、表面流出 $Q4$ は降雨による流出であると言える。 $Q1 \sim 3$ は規定流出や中間流出であると考えられるが、下水管内では土壤に付着した Cs-137 は地面に浸透せず、成分ごとの下水管内の流速に差異は生じないと考えられることや、時定数 T_c や脱水汚泥の処理工程を考慮しても、 $Q1 \sim 3$ は下水管内の Cs-137 の移行ではなく下水管に流入する以前の成分を表していると考えられる。このことから、土壤に付着した Cs-137 が市街地上を 3 つの成分に分かれて移動していると考えることができる。よって、時定数 T_c の算出で得られた速度で Cs-137 が市街地を移動していると考えられる。

現時点では、表面流出 $Q4$ が降雨による流出であることがわかっているが、 $Q1 \sim 3$ の流出が何に起因しているかが分かっていない。今後の展開としては、 $Q1 \sim 3$ がどのような流出経路を辿っているかを明らかにする必要がある。それに至って、本研究では日野・長谷部(1985)の成分分離手法だけではなく、表面流モデルである kinematic wave 法を用いることで $Q1 \sim 3$ の流出成分を明らかにする予定である。

5. 結論

本研究は下水管に流入する放射性物質の動態を明らかにすることを目的として、日野・長谷部 (1985) の成分分離手法を用いて Cs-137 の時系列データを水文学的に解析した。得られた結果を以下にまとめる。

- ① A 処理場・B 処理場とともに Cs-137 の流出成分は 4 成分である。
- ② 成分分離した結果によると、表面流出 $Q4$ は降雨と相関があるが、 $Q1 \sim 3$ は降雨と相関が

なく、日野・長谷部（1985）の成分分離手法だけでは Q1～3 の流出成分が何に起因しているかを特定することは難しい。

今後、本研究は kinematic wave 法を用いることで Cs-137 の動態に関する検討を進めることを検討している。

謝辞

本研究は、CREST 「安全で持続可能な水利用のための放射性物質移流拡散シミュレータの開発」および国立大学改革強化推進事業「環境放射能の動態と影響を解明する先端研究拠点の整備」の成果の一部である。

参考文献

日野幹雄・長谷部正彦（1985），水文流出解析，森北出版。