

下水処理場の集水域における Cs-137 の流出過程の推定*

福島大学共生システム理工学類 鹿野 雄大

福島大学共生システム理工学類 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。測定されている放射性物質は I-131, Cs-134, Cs-137 の3種類であり、脱水汚泥中の濃度 (Bq/kg) として公開されている。検出された放射性物質の変動傾向が河川流量の変動傾向と類似していることから、三浦・横尾 (2014) は日野・長谷部 (1985) の成分分離手法を用いて、測定されている放射性物質の中で半減期が最長である Cs-137 を水文学的に解析した。しかし、三浦・横尾 (2014) の研究では、日野・長谷部 (1985) の成分分離手法だけでは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とされている。本研究では、下水処理場の集水域における Cs-137 の流出過程を推定することを目的とし、使用するデータを2014年9月30日までに増やすとともに、新たに Kirchner (2009) の手法を加えることで貯留量の推定を行い、Cs-137 の時系列データを解析した。

2. 方法

2.1. 使用データ

本研究では、福島県内の下水処理場の脱水汚泥中の放射性物質濃度 (Bq/kg) と1日に発生する脱水汚泥量 (kg/d) を掛け合わせ、1日に発生する脱水汚泥に含まれる Cs-137 の放射性物質の量 (Bq/d) の値を算出し使用した。また、解析に用いたデータの期間は2011年5月13日から2014年9月30日までである。

2.2. 時定数 T_c の算出

放射性物質の総量 (Bq/d) の片対数グラフを作成し、逓減部分に直線を引いた。直線を引いた逓減部分の放射性物質の総量のデータを抽出し、指数近似を行った。指数近似で得られる式は式(1)のような形であり、式(2)のように指数の逆数をとることで時定数 T_c を算出した。

$$Q=Q_0\exp(-at) \quad (1)$$

$$T_c=1/a \quad (2)$$

2.3. 成分分離手法

*Estimating runoff processes of Cs-137 in catchment area of wastewater treatment plant in Fukushima prefecture by Yudai Shikano and Yoshiyuki Yokoo

算出した T_c を用いて式(3), (4)よりパラメータ c_0 , c_1 を求めた。

$$c_0 = (2.1/T_c)^2 \quad (3)$$

$$c_1 = 2.1^2/T_c \quad (4)$$

求めた c_0 , c_1 を式(5)に代入し数値フィルター $\omega(\tau)$ を求めた。

$$\omega(\tau) = \begin{cases} c_0 \exp\left(-\frac{c_1}{2}\tau\right) \frac{1}{\sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0}} \sinh\left(\tau \sqrt{\frac{c_1^2}{4} - c_0}\right) & (\tau \geq 0) \\ 0 & (\tau < 0) \end{cases} \quad (5)$$

求めた数値フィルター $\omega(\tau)$ を式(6)に代入し流出成分が遅い成分を分離した。

$$Q'(t) = \alpha \sum \omega(\tau) Q(t - \tau) \quad (6)$$

ここで α は $0.1 \leq \alpha \leq 1$ の範囲で調整した。求めた成分を全体の流量から引いて残流量を求め、次に傾きの小さい成分で分離した。最も流出成分が遅い成分は、残流量が負の値とならないように α の値を決めた。

2.4. 貯留量推定手法

式(7)で表される水収支式を式(8)のように代入し貯留量 S と流量 Q の関係を導いた。

$$dS/dt = P - ET - Q \quad (7)$$

$$\frac{dQ}{ds} = \frac{dQ/dt}{ds/dt} = \frac{dQ/dt}{P - ET - Q} \quad (8)$$

式(8)に夜間・無降雨条件を適用することで降雨 P と蒸発散量 ET が流量よりもはるかに小さいと仮定することができ、降雨と蒸発散量を無視できる。したがって、貯留量及び流量の関係は式(9)のように近似できる。

$$g(Q) = \frac{dQ}{ds} \approx \frac{dQ/dt}{-Q} \quad (9)$$

Kirchner (2009) は式(10)のようなモデルが対象流域に適用できる場合、式(9)と式(10)から式(11)の関係が導けるとしている。式(11)を積分すると式(12)のように貯留量を計算することができる。 S_0 は積分定数であるため、ある基準からの貯留量として表される。

$$dQ/dt = -aQ^b \quad (10)$$

$$\int dS = \int \frac{dQ}{g(Q)} = \int \frac{1}{a} Q^{1-b} dQ \quad (11)$$

$$S - S_0 = \frac{1}{a} \frac{1}{2-b} Q^{2-b} \quad (12)$$

本研究では、式(10)-(12)に $b=1$ を代入した式(13)の線形モデルを仮定する。これは、成分分離のもととなる式が式(1)のような指数関数モデルで表されるためである。

$$dQ/dt = -aQ \quad (13)$$

本研究において、 Q は放射性物質の量とする。したがって、式(7)を物質収支式にとらえ、放射性物質は蒸発しないので蒸発散量は0、降雨は降下物量とみなし、下水管に降下物が直接入ってくるとは考えにくいので無降雨条件のみを適用した。

3. 結果

3.1. 時定数の算出結果および Cs-137 総量の成分分離結果

算出した時定数 T_c は表-1 のようになった。

表-1 算出した時定数

時定数	$T_c 1$	$T_c 2$
	23 (day)	2.0 (day)

本研究では、時定数 T_c の5倍の値まで初期値の影響を受けるとしたため、本研究の解析は2011年9月以降のデータから行った。

Cs-137の総量と降下物量のグラフを図-1に示す。Cs-137の総量を見ると、事故後に比べ値は低くなっている。また、降下物量は事故後も観測されており、複数回にわたりピークが生じている。降下物量は2014年4月以降の観測回数が月1回と変更になったため、2014年3月31日までのデータを使用している。成分分離の結果を図-2に示す。成分 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 は、この順に流出速度が速くなる。流出速度が速いものほど変動が激しくなっている。

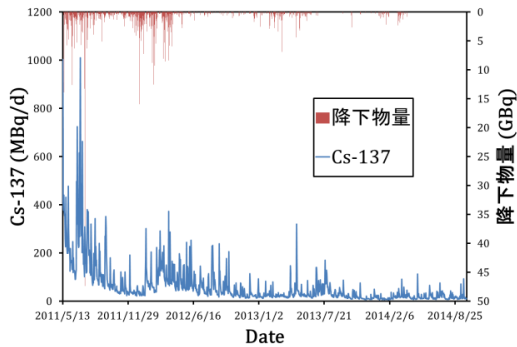


図-1 Cs-137の総量と降水物量

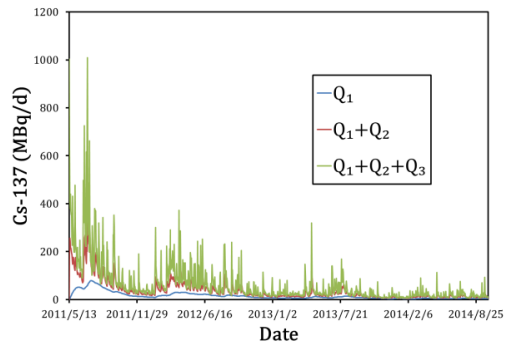


図-2 成分分離結果

3.2. 貯留量推定結果

各成分におけるCs-137の量と減少量の関係を図-3に示す。これにより算出されたパラメータ a を表-2に示す。パラメータ a により算出した貯留量とCs-137の総量の関係を図-4に示す。流出速度が遅い成分ほど貯留量が高いことがわかる。

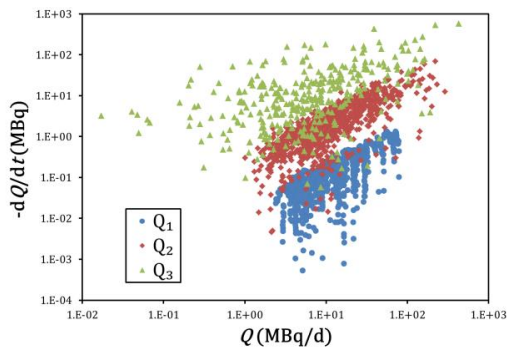


図-3 各成分におけるCs-137の量と減少量

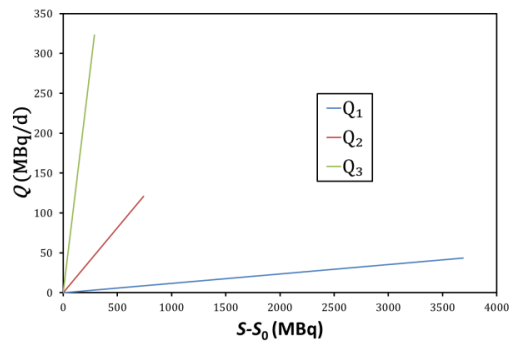


図-4 各成分におけるS-Q関係

表-2 算出されたパラメータ

	$Q1$	$Q2$	$Q3$
a	0.0118	0.1631	1.1206

各成分で求めた貯留量の時系列変化をそれぞれ図-5、図-6、図-7に示す。ここで貯留量が0となっているのは、成分分離の誤差により算出できない貯留量が生じるためである。また、 Q の添え字番号と S の添え字番号は対応している。図-8に各成分を合計した貯留量を示す。流出成分の速い成分ほど変動が激しくなっており、複数回ピークが生じていることがわかる。

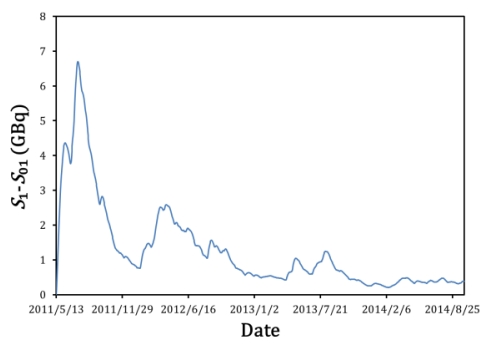


図-5 Q_1 成分における貯留量算出結果

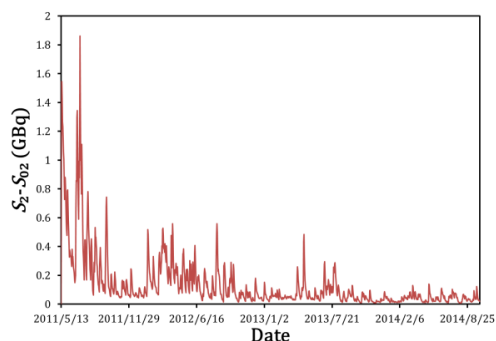


図-6 Q_2 成分における貯留量算出結果

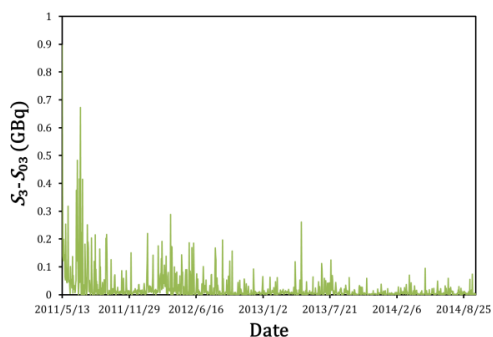


図-7 Q_3 成分における貯留量算出結果

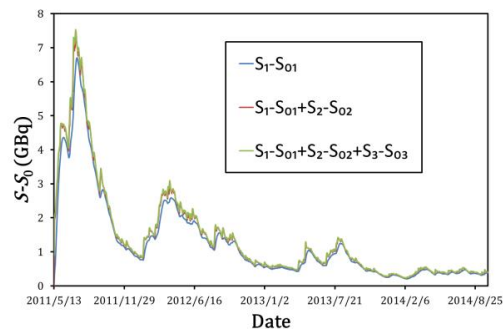


図-8 各成分における貯留量合計値

4. 考察

三浦・横尾 (2014) では Cs-137 の流出成分は 4 成分に分離されていたが、本研究では 3 成分に分離することができた。本研究では時定数の算出において逓減部分を細かく見ているのに対し、三浦・横尾 (2014) は大まかに見ている。このことが時定数の違いに影響を及ぼした。その結果、4 成分で成分分離を行っても流出特性に明確な違いが生じなかったため、本研究では 3 成分に分離された。對馬ら (2013) の研究で下水処理場に流入した放射性セシウムは SS と同様の挙動を示すことが示唆されていること、下水管内の流速に差異は生じないと考えられることから、各成分は下水管に流入する前の成分を表していると考えられる。最も流出速度が速い Q_3 の成分については、三浦・横尾 (2014) の研究から降雨による流出であると考えられる。貯留量の時系列変化において複数回のピークが生じているため、この要因について調べる必要がある。具体的には、ピークが生じているときに雨が降っているかどうか、下水処理場の集水域における降下物量はどうなっているのかについて調べることで要因がわかると考えている。また、脱水汚泥の処理工程での遅れ時間について調べるとともに、遅れ時間を反映したデータ解析に更新する必要がある。

5. 結論

本研究は下水処理場の集水域の Cs-137 の流出過程を推定することを目的として、日野・長谷部 (1985) の成分分離手法および Kirchner (2009) の手法を用いて 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この処理場における Cs-137 の流出成分は 3 成分である。

②貯留量時系列データを見ると複数回ピークが生じている。

今後は、降雨および降下物量と貯留量時系列データの関係性を調べるとともに、雨由来の Cs-137 について解析する予定である。また、対象とする処理場を 1 箇所追加し、同様の解析を行っていく。

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」、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」、科学研究費補助金（若手研究 B, 24760388）の成果の一部である。また、本研究では福島県土木部下水道課の愛川薫様、福島県下水道公社の方々にご協力いただき、データを提供していただくとともに、福島県ホームページの「流域下水道終末処理場における下水汚泥等の放射性物質濃度・空間線量結果について」および「降下物モニタリング結果情報」を使用した。ここに謝意を記す。

参考文献

Kirchner, J.W. (2009), Catchments as simple dynamical systems: Catchment characterization, rainfall-runoff modeling, and doing hydrology backward, *Water Resources Research*, Vol.45, W02429, doi:10.1029/2008WR006912.

對馬育夫・小越眞佐司・山下洋正・原田一郎 (2013), 下水処理場における放射性セシウムの挙動調査および溶出試験, *水環境学会誌*, Vol.36, No.1, pp23-28.

日野幹雄・長谷部正彦 (1985), FORTRAN と BASIC による 水文流出解析, 森北出版.

三浦尚也・横尾善之 (2014), 脱水汚泥中の Cs-137 の変動特性とモデリング, *東北地域災害科学研究*, 第 50 卷, pp.217-222.