

地下水中トリチウムを用いた水文学解析により 福島第一原発から港湾に流出する放射性セシウムの供給源と変動要因を解明

福島第一原発の排水路を通じて同原発の港湾へ流出する放射性セシウム (^{137}Cs) の供給源と変動要因を明らかにしました。タンク水漏洩由来の地下水中トリチウム (^3H) を水文トレーサとして活用した成果で、 ^{137}Cs の 5 割は原子炉建屋に降った雨水が起源の「屋根排水」由来と推定されました。

東京電力ホールディングス・福島第一原子力発電所では 2011 年 3 月の事故後、複数の汚染水対策が講じられてきました。その結果、放射性セシウム (^{137}Cs) の海洋流出は大幅に減少しましたが、現在もわずかながら続いており、2016 年以降は同原発港湾内の海水濃度に夏季上昇・冬季低下や降雨後に上昇するといった変動が見られていました。その主な原因は、2015 年に排水先を外洋から港湾内に付け替えた K 排水路からの流出の影響と考えられていますが、詳細は明らかになっていませんでした。

本研究では、2013 年および 2014 年のタンク水漏洩由来の地下水中のトリチウム (^3H) を水文トレーサとして活用し、K 排水路を介した発電所構内から海への ^{137}Cs の流出経路を明らかにしました。解析の結果、原子炉建屋の屋根に降った雨水が建屋の雨どいなどを經由して排出される「屋根排水」が主な ^{137}Cs の供給源であることが判明しました。また、地下水に由来する「基底流」は気温に応じて ^{137}Cs 濃度が変動しており、夏季に高くなる傾向が見られました。2016～2021 年における ^{137}Cs 年間流出量における寄与率は、屋根排水が 53%、雨水による地表流が 31%、基底流が 15%と推定されました。

本研究は、事故由来の ^3H を水文学的トレーサとして用いることで、発電所構内からの ^{137}Cs の流出経路と経路ごとの寄与割合を定量的に明らかにしたものです。従来不明瞭であった ^{137}Cs の流出経路と濃度変動要因の関係を解明したことにより、モニタリング体制の改善や汚染源対策の強化に貢献する重要な知見を提供しています。また、本手法を他施設や他の放射性核種に応用することで、今後の除染や廃炉作業に向けた環境管理の高度化に資することが期待されます。

研究代表者

筑波大学 生命環境系／放射線・アイソトープ地球システム研究センター (CRIES)

恩田 裕一 教授

研究の背景

福島第一原子力発電所では 2011 年 3 月の事故後、複数の汚染水対策が実施されてきました。これにより、汚染水が建屋から海へ流出する経路が遮断され、事故後環境中に放出された主な放射性核種である放射性セシウム (^{137}Cs)^{注1)} の海洋（港湾）中の濃度は 2015 年以降約 1 桁減少しました。しかし、 ^{137}Cs の海への流出はわずかながらも続いており、その量は 2016～2020 年までに年間 $10^{11}\sim 10^{12}\text{Bq}$ 程度（Machida et al. 2020、Tsumune et al. 2020）と推定されています。中でも発電所構内の排水路の一つである K 排水路は、1－4 号機周辺をはじめとする構内の雨水や湧水を集めて同発電所の港湾部に排出する主要な流出経路で、2015 年にその排水先が外洋から港湾内へ付け替えられました。他の排水路を含めた年間 ^{137}Cs 排出量の 8 割以上を K 排水路が占めています。また、 ^{137}Cs 流出量が大きく低減した 2015 年以降、海水中の ^{137}Cs 濃度には夏季（7～10 月）に上昇し冬季（12～3 月）に低下する季節変動がみられるようになったため、その原因の特定が課題となっていました。

本研究では、これらの課題解決のため、2013 年および 2014 年に汚染水貯蔵タンクから漏洩して地下水へ拡散したトリチウム (^3H)^{注2)} をトレーサ^{注3)} として活用し、K 排水路に流入する水の起源を解析しました。これにより、K 排水路流入水を、表面流（表層流出や建屋屋根からの雨水流入）と基底流（地下水）とに定量的に分離し、それぞれの流量と ^{137}Cs 濃度を推定しました。

研究内容と成果

本研究では、福島第一原子力発電所構内の K 排水路を対象に研究を行いました（図 1）。K 排水路は、1－4 号機原子炉建屋の西側から港湾まで敷設されています。主に原子炉建屋周辺の雨水や湧水を集めており、複数の枝管が K 排水路へ流入しています（図 1）。K 排水路の流量や流水中に含まれる ^{137}Cs 、 ^3H 濃度のデータ、地下水中の ^3H 濃度は東京電力ホールディングスの公表データを使用しています。気象データ（気温、降水）は東京電力ホールディングスから直接提供を受けました。

1. タンク水漏洩由来の ^3H を使用した流出解析

1960 年代の大気圏内核実験^{注4)} で放出された ^3H が地下水トレーサとして広く使われてきました。 ^3H は水に溶解しやすく吸着や沈着をほとんど伴わないため、流路解析に適した指標となるからです。本研究では、2013 年および 2014 年に K 排水路より西の T.P 標高 33.5m 高台（33.5m 盤）でタンクから漏洩した ^3H が、地下水経由で K 排水路に流入していると仮定してトレーサとしたところに従来研究との違いがあります（図 2）。実は、このように環境より濃度の高い ^3H の存在は、福島第一原子力発電所に限らず、事故が起きた原子力施設の滞留水では同様に生じる可能性があります。本研究では、K 排水路に流入する基底流の ^3H 濃度を、排水路上流に設置された地下水バイパス井戸の濃度を用いて推定しました（図 3）。この基底流の ^3H 濃度と既往研究からの推定した降水中の ^3H 濃度（0.33 Bq/L）を使用した ^3H 濃度混合モデル^{注5)} から、表面流と基底流の流量比を推定しました。本研究では、表面流をさらに二つの流出成分（地表流^{注6)} と屋根排水^{注7)}）に区別する必要があったため、有効降雨法（Rw 法）^{注8)} を併用してそれぞれの流量比を算出しました（図 4）。各流量比を明らかにすることにより、同じく混合モデルからそれぞれの流出成分の ^{137}Cs 濃度を求めることができます。

2. 排水路中の ^{137}Cs 濃度の季節変動要因と供給源の特定

上記の方法によって求められた各成分（基底流、地表流、屋根排水）の流量から推定した ^{137}Cs 濃度は、実測値と高い一致を示し、モデルの再現性および妥当性を確認できました（図 5b,c,d）。この推定 ^{137}Cs を使用して、K 排水路水中の ^{137}Cs 濃度の季節変動要因と主な供給源について考えました。

2.1. ^{137}Cs 濃度の季節変動

基底流と表面流では、異なる季節変動があることが推定されました。基底流では、 ^{137}Cs 濃度と気温との相関が良く、気温が高くなれば ^{137}Cs 濃度も上昇する傾向がみられました（図 5a）。東京電力の公表資料による ^{137}Cs 濃度と溶存態^{注 9)}・懸濁態^{注 10)}の割合の関係から、基底流中の ^{137}Cs が主に溶存態であることが理由であると考えられます。溶存態には、既往研究により温度依存性があることが示されています。一方、表面流は降雨による濃度上昇の影響が高いことが示されました（図 5e）。特に夏季（7～10 月）の ^{137}Cs 濃度増加は、降雨に伴う屋根排水の寄与増大と、基底流中の濃度上昇の組み合わせによるものであると考えられます。

2.2. ^{137}Cs の供給源

2016～2021 年のデータを用いて K 排水路からの年間 ^{137}Cs 流出量を推定したところ、表面流の屋根排水の寄与率は年間総排出量の 53%を占め、主な供給源であることを特定しました。その他の寄与率は、地表流 31%、基底流 15%と評価されました（図 5f）。これらの割合は、2016～2021 年で大きく変化しませんでした。K 排水路からの ^{137}Cs 流出量は、年間約 10^{10} Bq と推定されました。

今後の展開

本研究では降水中のトリチウム濃度を既往研究から推定しており、表面流のトリチウム濃度を過小評価している可能性もあります。したがって、表面流のトリチウム濃度の測定や ^{137}Cs の溶存態と懸濁態の分離評価を行い、推定結果の精度を高めることが必要です。一方で、本研究は、タンクから漏出した原発事故由来のトリチウムを活用したトレーサ水文学的手法により、原子力発電所構内の放射性物質移動経路を明確化した先駆的成果です。これにより、除染や汚染水対策等の効果検証、廃炉作業における環境影響評価に新たな指針を提供することができます。また、本手法は他の原子力施設での適用および汚染源特定への応用も期待されます。

参考図

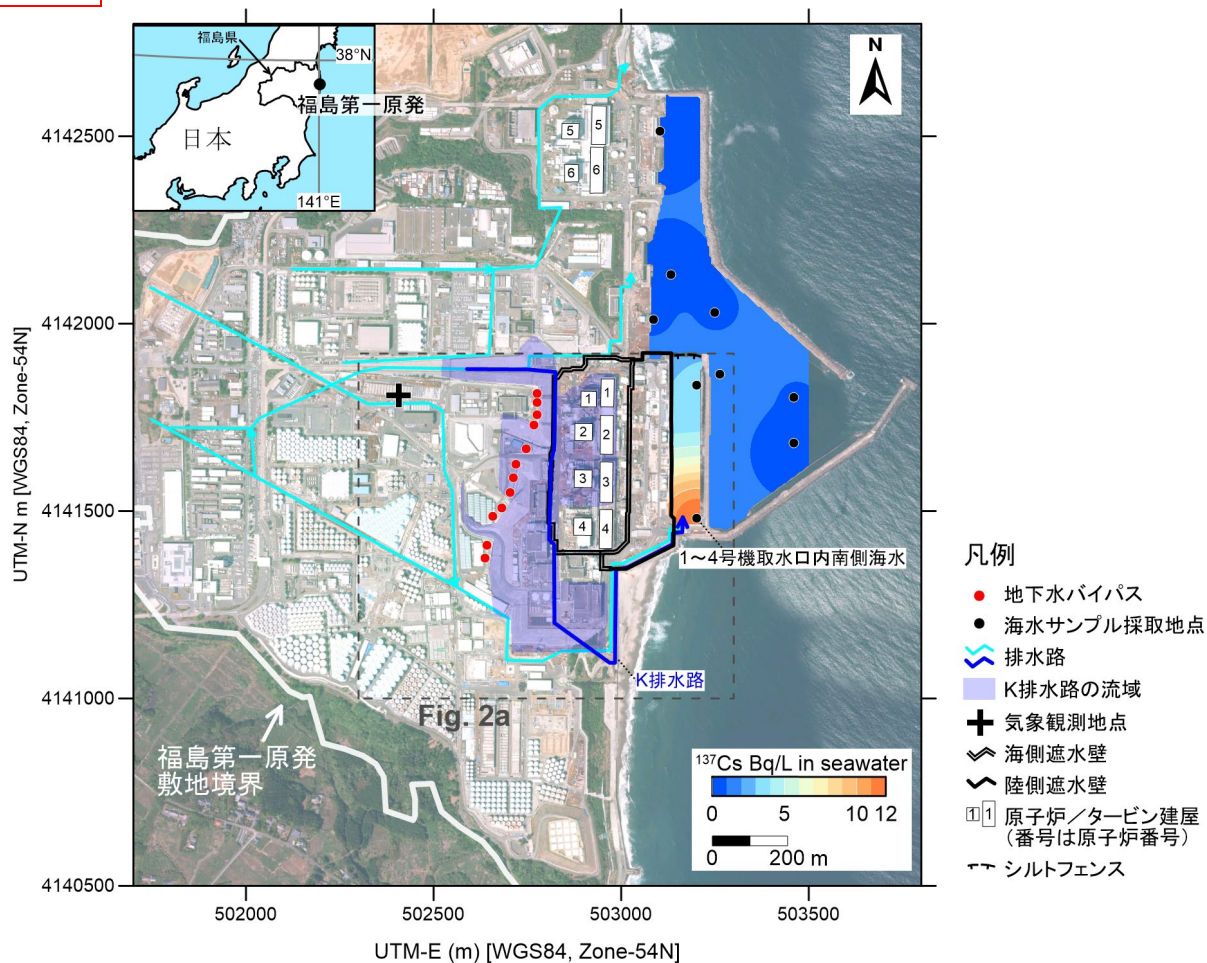


図1 福島第一原子力発電所における調査地点

港湾における海水中の ^{137}Cs 濃度の等高線図は 2021 年 9 月の平均値を使用した。データは東京電力ホールディングス (TEPCO) のウェブサイト (東京電力ホールディングス、2025 年) のものを使用。背景は、2018 年 4 月 28 日時点の航空写真、およびデジタル標高モデル DEM (5m メッシュ) による陰影レリーフであり、国土地理院のデータに基づく。

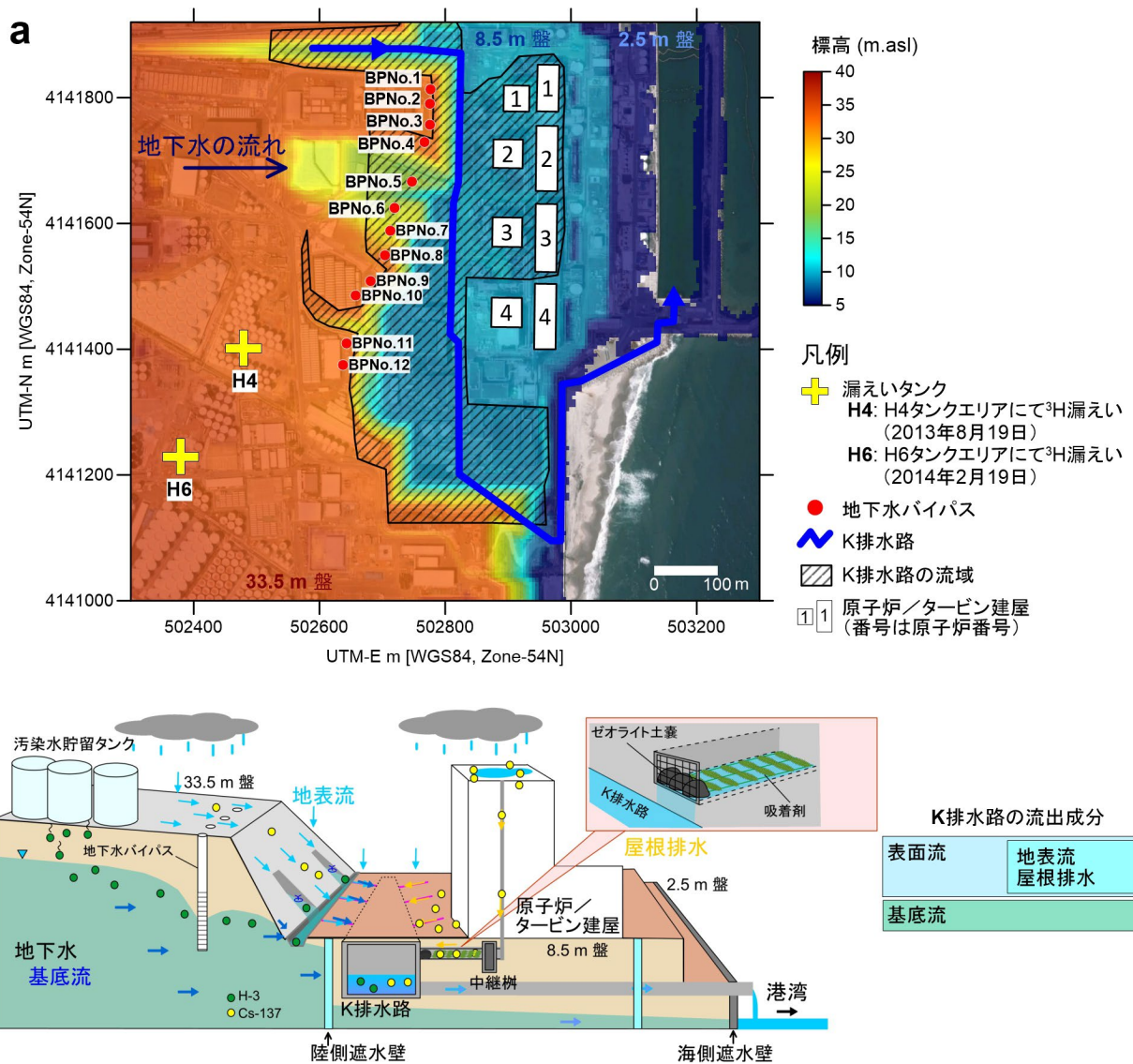


図2 K排水路の流域と経路、および放射性物質 ^3H と ^{137}Cs の流入概念図。

a: ^3H は、高台の地下水を介してK排水路に流入しており変動が少ない。2018年4月28日時点の5mメッシュDEMに基づく航空写真と標高図は、国土地理院の提供データを用いて作成した。

b: K排水路を介した発電所構内から海への ^{137}Cs の流出に寄与する三つの主要流出経路（屋根排水、基底流、地表流）。

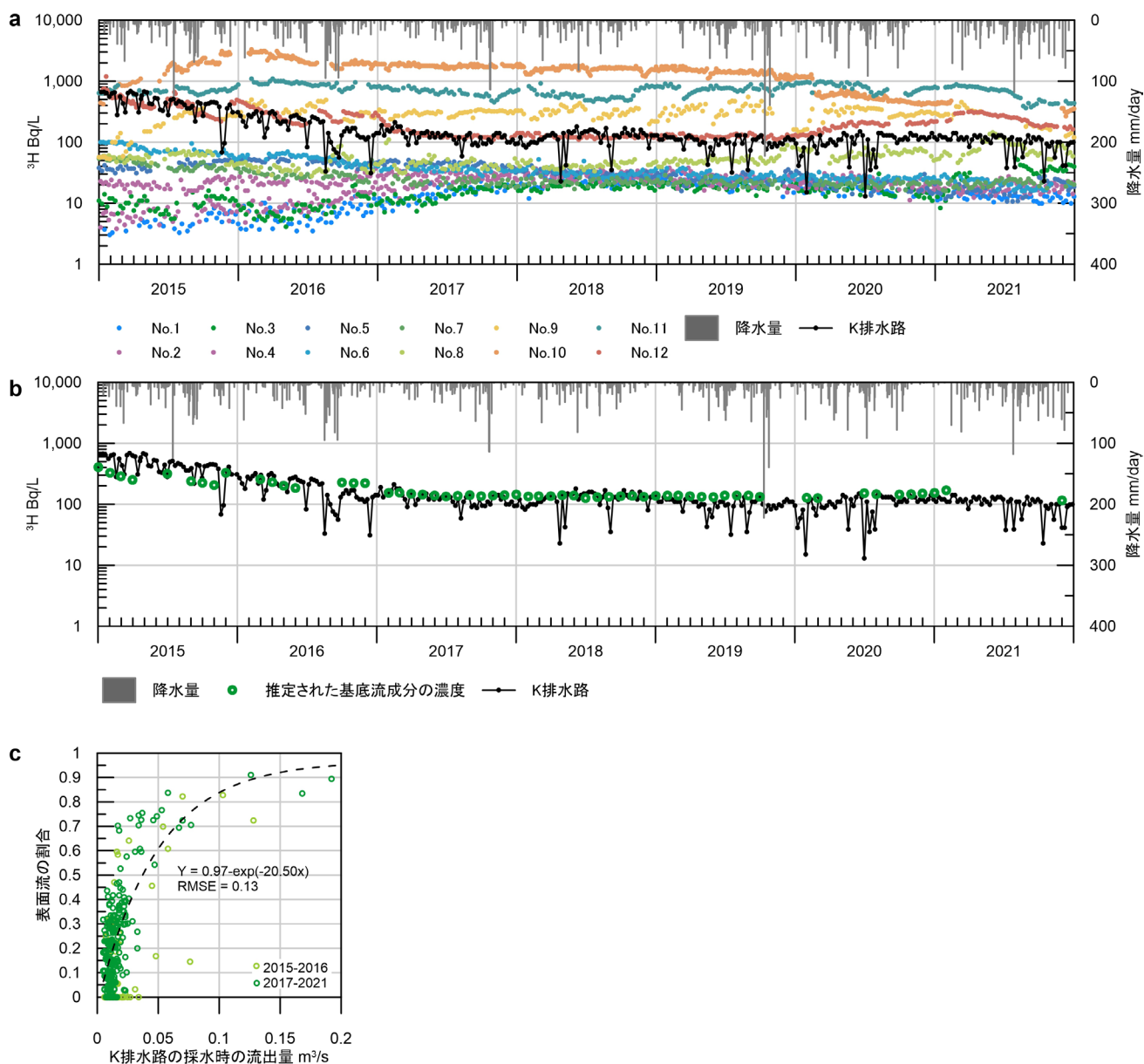


図3 K排水路に流入する地下水中の³H濃度の決定

a: 2015年から2021年までの地下水バイパス（No.1－12）およびK排水路の³H濃度。

b: 地下水バイパス中の³H濃度から推定される基底流中の³H濃度。

c: 混合モデルを用いて計算された表流水の割合と、K排水路におけるサンプリング時刻の瞬時流出量の関係。近似線は、2017年から2021年のデータを使用している。

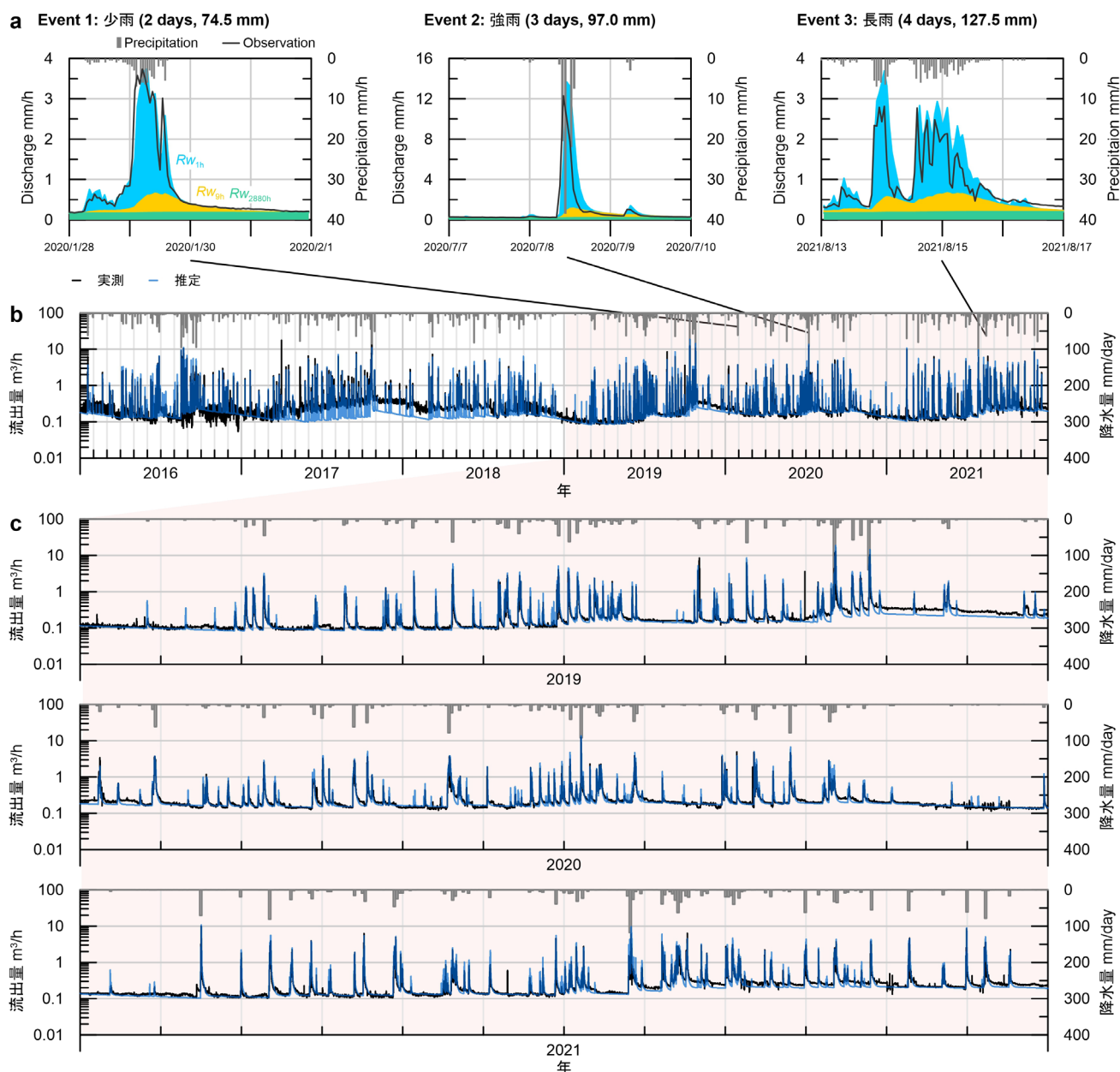


図4 Rw法によって推定されたK排水路の3成分流出量と観測流量の比較

- a: K排水路の流量は、半減期 $T_{1/2} = 2880$ 時間、9 時間、1 時間を仮定した 三つの R_w により説明可能である。これらの成分は、以下の降雨イベントで検証された：イベント1（2020年1月28日～2月1日）、イベント2（2020年7月7日～10日）、イベント3（2020年8月13日～17日）。
- b: 2016年～2021年のK排水路流出量を、 R_{w2880h} 、 R_{w9h} 、 R_{w1h} の3成分の組み合わせで再現。
- c: 図bに示した2019年以降の流出量の1年間の拡大図。

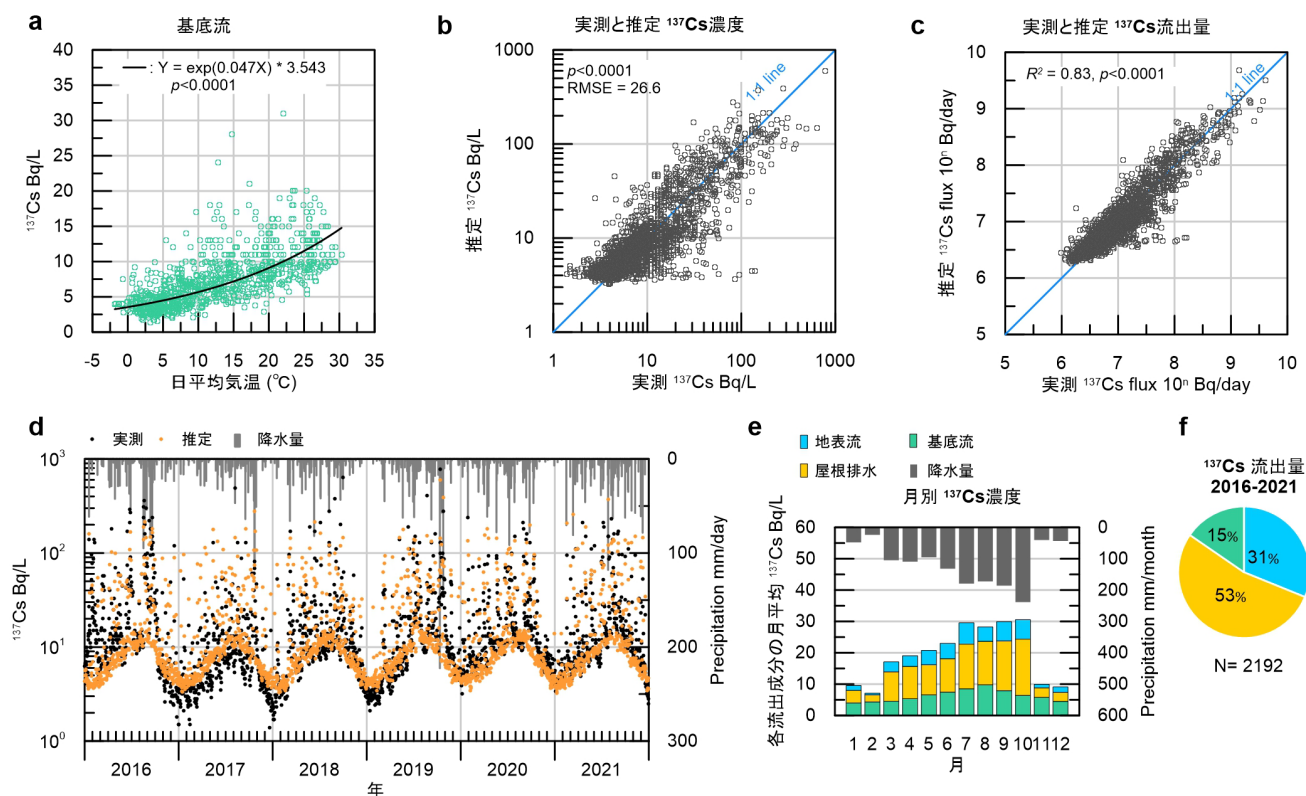


図 5. K 排水路における ^{137}Cs 濃度の推定値とその変動要因

a: 2017～2021 年の日平均気温と、基底流中の ^{137}Cs 濃度との関係。

b: 2016～2021 年の K 排水路における ^{137}Cs 濃度の実測値と推定値の比較。

c: 2016～2021 年の K 排水路における ^{137}Cs フラックスの実測値と推定値の比較。

d: 2016～2021 年の K 排水路における ^{137}Cs 濃度の実測値と推定値の時系列変化。

e: 2016～2021 年の K 排水路における、3 成分別 ^{137}Cs 月別濃度（各末端成分に流量比を乗じた値）。

f: 2016～2021 年の K 排水路における ^{137}Cs フラックスに対する各成分の寄与割合。

用語解説

注 1) 放射性セシウム

セシウム (Cs) はアルカリ金属で、ルビジウムやカリウムに似た物理的・化学的性質を持つ。天然のセシウムは安定同位体の ^{133}Cs で、環境中の低濃度の岩石、土壌、塵埃中に低濃度で存在するが、多数の放射性同位体が知られている。このうち、過去の原発事故と 1950 年代後半から 60 年代にかけての大気圏内核実験で生成された主なものが ^{137}Cs (半減期 30.2 年) と ^{134}Cs (半減期 2.1 年) である。

注 2) トリチウム (^3H)

水素の放射性同位体で、陽子 1 個と中性子 2 個から構成される軽元素。原子力施設では中性子反応によって人工的に生成されるが、自然界にも微量に存在する。放射線としては低エネルギーのベータ線 (最大 18.6 keV) を放出し、その生物学的影響は比較的低いとされている。化学的には通常の水素とほぼ同様にふるまい、水分子の形で水中を移動するため、環境中ではトリチウム水 (HTO) として広く分布する。また、土壌や岩石への吸着がほとんどなく、水の流れと同じ挙動を示す性質を持つため、水文学的トレーサとして非常に有用である。

注 3) トレーサ

自然界の物質の流れや移動経路を追跡・解析するために用いられる指標物質。水文学や環境科学の分野では、水や水に溶けた物質の動態を調べる目的で、自然に存在する成分 (自然起源トレーサ) や、人

為的に導入された物質（人工トレーサ）が利用される。対象とする環境中で安定して存在し、化学的または物理的に識別可能であり、かつ目的とする移動経路に対して忠実に追従する性質を持っている物質がトレーサに適している。特に放射性トレーサであるトリチウム（ ^3H ）は、水分子と同様にふるまうことでトレーサーに適していることから、地表水や地下水の移動経路や滞留時間を高精度で把握するために用いられる。

注 4) 大気圏内核実験

核爆発を大気圏内（地上・空中・海上）で実施する核兵器実験のこと。1945 年から 1963 年にかけて、米国、ソ連（当時）、英国などの核保有国によって多数行われ、特に 1950～60 年代には集中的に実施された。これらの実験により、大量の放射性物質が成層圏や対流圏に放出され、地球規模で拡散・沈着した。代表的な放射性核種には、セシウム-137（ ^{137}Cs ）、ストロンチウム-90（ ^{90}Sr ）、およびトリチウム（ ^3H ）などが含まれ、現在でも環境中のバックグラウンド濃度として検出されることがある。

注 5) 混合モデル（mixing model）

複数の水源が混合している観測点において、それぞれの流入量または含有物質が全体に占める割合（寄与率）を推定するための定量的手法のこと。環境科学や水文学では、河川や地下水、排水路などで観測される化学物質や放射性核種の濃度が、異なる起源からの流入によって構成されている場合に用いられる。

注 6) 地表流

降雨や融雪などによって地表面に降り注ぎ、土壌へ浸透せずに地表を流下するものを指す。舗装面や不透水性の地盤では、地表流量が増加しやすく、短時間で河川や排水路へ到達する特徴がある。

注 7) 屋根排水

本研究では、原子炉建屋の屋根から排水管を通して K 排水路に流入する、地表流出より時間をかけて流出する水と定義している。建屋の屋根には事故時の ^{137}Cs が残存しており、降雨によって洗い出される。

注 8) 有効降雨法（Rw 法）

降雨の影響を時間経過とともに減衰させて評価し、流出成分を定量化する手法。減衰の度合いは半減期で示され、地質構造や地盤特性に依存する。

注 9) 溶存態

ある物質（例えば金属イオンや放射性核種）が水中に分子またはイオンの形で溶け込んだ状態のこと。粒子や懸濁物に付着して存在する「懸濁態（particulate form）」とは異なり、フィルター（一般に $0.45\mu\text{m}$ 以下）を通過する成分として定義される。

注 10) 懸濁態

水中に浮遊している微小な固体粒子に物質（例：放射性核種など）が吸着・付着して存在している形態のこと。通常、 $0.45\mu\text{m}$ 以上の粒径を持つ粒子に結合している成分を懸濁態と定義する。洪水や大雨の際には、表層の土壌が侵食され、多量の懸濁粒子が河川に流入し、それに伴って懸濁態 ^{137}Cs の濃度も一時的に上昇する。

研究資金

本研究は、科学研究費補助金新学術領域研究（課題番号 24110005）、科学研究費補助金（基盤研究（A））22H00556、科学技術振興機構（JST）ベルモントフォーラム、環境放射能研究ネットワークセンター（ERAN）Y-24-01 および Y-25-02 の支援を受けて実施されました。

掲載論文

- 【題 名】 Leaked Tritium Reveals the Source of ^{137}Cs from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant to the Ocean
(流出したトリチウムが明らかにした福島第一原子力発電所から海洋への ^{137}Cs の放出源)
- 【著者名】 Hikaru Sato^{1,3*}, Yuichi Onda^{1*}, Daisuke Tsumune¹, Katsuhiko Kohata², Tomomi Okamura²
- 【所 属】 1. 筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センター (旧 筑波大学アイソトープ環境動態センター)、2. 東京電力ホールディングス株式会社、3. 株式会社笠原建設 (現所属)
- 【掲載誌】 *Water Research*
- 【掲載日】 2025 年 9 月 9 日 (正式版公開予定)
- 【DOI】 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.124464>

問い合わせ先

【研究に関すること】

恩田 裕一 (おんだ ゆういち)

筑波大学生命環境系 教授

筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センター センター長

URL: <https://www.ied.tsukuba.ac.jp/~onda/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp