



筑波大学
University of Tsukuba



2020年10月28日

国立大学法人筑波大学
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
国立大学法人福島大学
国立研究開発法人科学技術振興機構

福島第一原発事故で放出された放射性物質の陸域環境中での動き ～チェルノブイリより環境回復は大幅に速い～

東京電力福島第一原子力発電所での大規模な原子力事故では、半減期が比較的長い放射性セシウムを含む放射性物質が大量に放出されました。事故直後から多くの環境モニタリング研究がなされ、公表されてきましたが、それら一つ一つはある時期のある部分の結果にすぎません。福島環境汚染は刻々と回復傾向にあり、国際的な関心も極めて高いものがあります。このため、これまでの知見の集約が必要とされてきましたが、既存の研究を客観的に総括し、科学的に検証した論文はありませんでした。

本研究では、福島の陸域環境モニタリングに関する研究論文210本以上を網羅的に集約し、特に放射性のセシウム137（以下 ^{137}Cs ）による陸域汚染の実態と環境回復の全貌を明らかにしました。

◇森林に存在する ^{137}Cs のうち樹木への蓄積割合は、常緑針葉樹林では事故後8年間で70%から2%程度まで減る一方、落葉広葉樹林では23%から21%と、緩やかな減少が示されました。また、林床への ^{137}Cs 蓄積では、スギ林、落葉広葉樹林とも表層土壌2cm以内に初期値の5割以上がとどまります。水に溶けて森林から流出する ^{137}Cs は、チェルノブイリ事故影響地域より1、2桁低い濃度で推移しています。

◇森林以外の土地では、 ^{137}Cs の表層土中濃度が大きく減少しました。人間活動や土地活用、除染作業の影響で、 ^{137}Cs の土壌中での下方移行が速く進みました。耕作放棄水田における土壌表層2cmの ^{137}Cs 濃度は、事故後3年間で約7割減少し、その後の除染で事故直後の値の3%まで減少しました。耕作水田の表層土壌では、事故3年後に事故直後の値の10%になりました。下方移行や表層土中の濃度の低減はチェルノブイリよりも速く進み、空間線量率や河川水における放射能濃度低減の要因となりました。

◇阿武隈川を流下する懸濁態の ^{137}Cs 濃度は事故直後の数値の2%程度になっています。

これらにより、 ^{137}Cs は陸域に多く残っているものの、地面に露出した ^{137}Cs 濃度が劇的に低下したことで、河川へ流入する ^{137}Cs 濃度の低減をもたらすという因果関係が新たに解明されました。

世界的に原子力発電が普及する現在、福島第一原発事故直後より収集されたデータは、福島環境回復の実態解明のみならず、世界的にも記録として残すべきものです。情報公開を徹底し、世界の科学者が共有可能なシステムを構築するとともに、データの継続的な取得を進めていくことが重要であり、引き続き包括的な評価に取り組んでいきます。

研究代表者

筑波大学生命環境系／アイソトープ環境動態研究センター（CRIED）

恩田 裕一 教授

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 廃炉環境国際共同研究センター

吉村 和也 研究主幹

福島大学環境放射能研究所

脇山 義史 講師

研究の背景

2011年3月に起きた福島第一原発での大規模な原子力事故では、比較的長寿命の放射性セシウム^{注1)}を含む放射性核種が大気中に放出されました。事故直後から多くの環境モニタリング研究がなされ、公表されてきました。しかし、それら一つ一つは、ある時期のある部分の結果をとりまとめたものです。環境の回復状況は刻々と変わっており、これまでの知見の集約が必要とされていました。また、福島環境回復については国際的にも非常に関心が高いものがありますが、既存の研究を客観的に総括し、科学的に検証した論文はありませんでした。

研究内容と成果

本論文では、著者らの研究を中心に、これまで公表された放射性物質の福島の陸域（福島第一原発から80 km圏内と阿武隈川流域の計9862km²、¹³⁷Csの降下量は2.7PBq、図1参照）での移行に関する210本以上の論文を集約し、検証しました。特に、事故で放出された主要な放射性物質である¹³⁷Csの移行の実態については、▽森林や土壌を介した¹³⁷Csの下方移行▽丘陵地からの再移動▽水田からの河川への移行▽市街地・除染の影響▽河川を介した移行——など、陸域におけるさまざまな移行経路と要因を取りまとめ、総合的に検討しました（図1）。また、チェルノブイリでの研究成果と比較しました。

その結果、福島の陸域環境回復の実態とそのメカニズムの全貌が明らかになりました。福島環境回復を取りまとめた成果の決定版として、世界に幅広く発信することができたと考えています。

以下に、放出された放射性物質が、森林、土壌に蓄積し、下方へ移行し、また侵食によって除去され、河川によって海洋に運搬されるまでの、詳細な研究成果について取りまとめます。

・森林への蓄積と移行

陸域において福島第一原発事故による放射性セシウム（¹³⁷Cs）放出の影響を最も受けたのは森林域です。森林の面積は、影響を受けた地域全体の60%を占めています（図1）。森林では、林床への直接降下のほか、樹木の枝葉による一時的な捕捉とその後の林床への移行、樹種の違いなどを反映してさまざまなレベルの汚染をもたらしました。森林内での¹³⁷Csの移行状況や分布の時間変化は、樹種（常緑針葉樹や落葉広葉樹）や森林の特徴（木や枝葉の密度など）の違いが影響しており、これが雨水や落葉・落枝による林床への移行速度を支配していることが明らかになりました（図2）。

樹体（樹皮＋幹材＋枝葉を含む樹木全体）の¹³⁷Csの蓄積状況は、常緑針葉樹では事故後1年間で約60%低減しました。その後も低減を続け、事故後8年間で初期沈着時の2%程度まで減少しました（図2b）。落葉広葉樹では、事故後1年間で事故初期の約60%まで樹体での蓄積量が減少しましたが、その後は根からの吸収の影響によって特に幹材での蓄積量が再び増加する傾向を示し、事故から8年が経過しても初期値の91%にあたる¹³⁷Csが樹体に蓄積されていることが判明しました（図2f）。また、事故から8年後の林床の¹³⁷Cs蓄積量は、スギ林では表層土壌2cm以内に初期沈着量の54%がとどまり、落葉広葉樹林では同じく59%が保持されていることが分かりました。

継続的なモニタリングの結果、森林流域から河川水や土砂などを介して1年間に流出する¹³⁷Csの量は、流域の初期沈着量の0.3%以下で、森林生態系内にほとんどがとどまっていることが分かりました。

・土壌中の下方移行

¹³⁷Csは土壌粒子に非常に強く吸着する性質を持ちます。このため、事故直後には、土壌表層10cmより上部に、事故で沈着した¹³⁷Csの99%以上が存在していました。土壌自体が放射線を遮蔽する効果があるため、地上の空間線量率は表層10cmの中でどのように¹³⁷Csが分布し、移行しているかによって

大きく影響を受けます。 ^{137}Cs の土壌中での深度分布は指数関数式で近似することができ、その係数 β が大きいほど深くまで移行していることを示します。この β のことを重量緩衝深度^{注2)}と呼んでおり、事故からの時間とともに徐々に増加している、つまりは徐々に下方へ移行していることが分かりました (図3 d)。その下方移行速度は耕作放棄された水田で年間約 1.3cm と最も速く、降下後 3 年が経過した時点で土壌表層の ^{137}Cs 濃度は劇的に減少し、表層 10cm の範囲においてはほぼ均一でした (図3 b)。耕作された水田における表層 2cm の ^{137}Cs 濃度は 2012 年の時点で約 15% となり、著しい減少が見られました (図3 c)。一方、市街地の未攪乱土壌では毎年平均約 0.3 cm ずつ (土壌密度を考慮した重量深度換算で約 0.3 g cm⁻² ずつ) 下方への移行を続けており、空間線量率の低下に影響を与えていますが、10cm より深部(20 cm まで)へ移行した ^{137}Cs の割合は、2017 年時点で 10% 未満でした。森林では、落葉による ^{137}Cs の供給が継続しているために、土壌表層近辺に ^{137}Cs がとどまり続けることが分かりました (図3 a, d)。

・ 侵食による放射性物質の移行

水田・畑・草地・市街地及び森林から流出する放射性セシウムの観測結果から、土壌の侵食により懸濁態^{注3)}として河川に流入する ^{137}Cs の濃度は、土地利用の種類や事故後の時間経過によって変化することが分かりました (図4)。水田においては、事故直後の半年間には、正規化 ^{137}Cs 濃度 (S_0)^{注4)} が他の土地利用よりも 1 桁高かったものの、事故後 1 年目までに急激に減少し、他の土地利用と同じ桁になりました。耕作された農地では、耕起によって ^{137}Cs 濃度が高い表層の土壌と ^{137}Cs 濃度が低い深層の土壌が混合されることで、表層に露出した ^{137}Cs の濃度量が減少し、その状態が長く維持されるためと考えられます。また、市街地からの流出では、懸濁態の正規化 ^{137}Cs 濃度が事故から 1 年後時点で、森林流域の 2.4 倍でしたが、その後急激に減少し 4 年後には森林流域の 1.5 倍にまで低下しました (図4)。

一方、森林から流出する正規化 ^{137}Cs 濃度は、低減の進み方が遅い (低減速度が市街地の 60% 程度) ことが分かりました (図4)。

・ 河川からの ^{137}Cs の流出

福島第一原発事故後の河川を介した ^{137}Cs の輸送状況については、筑波大と福島県を中心に長期的かつ広範囲なモニタリングが行われてきました。その結果、河川を介して海へ放出された ^{137}Cs の総量が初めに陸域に沈着した量の 4.8% 程度 (2011 年 6 月から 2017 年 3 月まで、阿武隈川の場合) であること、そのうち 96.5% が懸濁態として輸送されていたことが分かりました (図1)。

また、河川を流下する ^{137}Cs 濃度の経時変化に、流域の土地利用が深く関係していることが分かりました。特に、生活圏 (水田・畑・市街地 = PFU^{注5)}) による流域の被覆率が高い河川において事故後 1 年間に、急激な濃度低下を示しました (図5 A)。この傾向は、水田及び市街地から河川に流入する ^{137}Cs 濃度の調査でも観測されたものです。その後も緩やかな低下傾向が続いた結果、事故から 6 年の間に、阿武隈川の懸濁態 ^{137}Cs 濃度は事故直後の数値の 2% にまで減少しました (図5 B)。

・ ^{137}Cs 以外の核種

福島第一原発事故では、放射性セシウム以外の核種も環境中に放出されました。放射性ストロンチウムやプルトニウムなどは、福島でも観測されていますが、その分布量はわずかです。例えば、福島第一原発から 50km 圏内の土壌中の ^{90}Sr の濃度は、 ^{137}Cs の 100 分の 1 ~ 10,000 分の 1 であることが分かっています。また、土壌中に存在する Pu のうち、福島第一原発由来のものは約 7% で、残りは過去の大気核実験由来のものであることが分かりました。

・チェルノブイリ原発事故との比較

福島とチェルノブイリでは、森林の特徴や土地利用の形態、地形および降水量などの自然条件が異なるため、陸域における¹³⁷Csの動態が異なることが研究者により予想されてきました。しかし、包括的なモニタリング調査の結果をもとに両地域での¹³⁷Csの動態を比較した研究はこれまでありませんでした。

今回の検証で、福島の森林では事故初期の雨水による樹冠から林床への¹³⁷Csの移行速度がチェルノブイリの森林と比べて速いことが分かりました。福島の降水量が多いため（福島県：1200 mm/年、チェルノブイリ：650 mm/年）と考えられます。一方で、わが国の高密度に植栽されたスギ人工林などは樹冠のバイオマス量が多いため、より長期的な視点では、移行速度がチェルノブイリと同程度かやや遅いことが分かりました。雨水や落葉によって林床に移行した¹³⁷Csは、時間経過とともに落葉層から下方に速やかに移行し土層に蓄積されるため、流出しにくく、河川水中の溶存態^{注6)}や懸濁態¹³⁷Cs濃度はヨーロッパ諸国の森林河川よりも一桁低いことが明らかになりました（図5 A, B）。また、急峻な地形からなる福島の山林では、¹³⁷Csを含む落葉の一部が斜面下方へ移動し、河川を通じて流出する場合がありますが、溪流部分からの流出が主であるために、前述のとおり年間の流出量は初期沈着量の0.3%以下と森林外へはわずかな量しか輸送されないことが分かりました（図5 C）。

福島においては、表層に露出した¹³⁷Cs量の低減がチェルノブイリよりも速く進んだことも明らかになりました。これは、福島は急峻な地形で降水量も多く、さらに水田や畑における耕作や市街地での人為的活動、除染などが行われましたが、チェルノブイリは、流域の大半が人為的な活動が限定的な森林と放棄された農地だったからです。

例えば、放射性核種の下方向浸透の度合いを示す¹³⁷Cs重量緩衝深度 β は、福島の耕作水田において、チェルノブイリ影響地の2～4倍の値を示しました（図3 d）。表層土壌は河川の浮遊粒子の供給源であるため、福島の河川における初期（事故後1年間）の懸濁態¹³⁷Cs濃度の低下速度も、チェルノブイリを流れるプリピャチ川よりも約1.6倍速くなりました（図5 B）。また、溶存態の正規化¹³⁷Cs濃度については、福島の河川の方がチェルノブイリ事故後の欧州の河川よりも2桁程度も低い値を取り続けています。これは、福島の河川水の¹³⁷Cs濃度の低下が非常に進んでいることを意味します（図5A）。現在、定期的なモニタリングではほとんどが基準値を下回るものの、規制基準を超える値が散見される淡水魚の¹³⁷Cs濃度は、溶存態¹³⁷Cs濃度と高い相関関係があることが知られています。本研究では、溶存態の濃度と同様に、チェルノブイリ事故後の欧州の淡水魚よりも福島の淡水魚では1、2桁低いレベルの汚染状況となっており、チェルノブイリの知見から予測されるよりも、早い回復が認められます。

流域内の土地利用が河川の懸濁態¹³⁷Cs濃度に直接影響していることと、河川における懸濁態と溶存態の¹³⁷Cs濃度の比率(K_d)が経時的に変化していないことから、従来チェルノブイリ事故後の欧州の河川で唱えられていた、溶存態¹³⁷Cs濃度の低下は、¹³⁷Csが次第に土壌粒子に強く吸着されるようになるためであるとする説が福島にはあてはまらないと判断されます。これらの知見を総合すると、少なくとも福島では、土砂供給源の放射性物質濃度の低下が懸濁態¹³⁷Cs濃度の低下をもたらし、溶存態¹³⁷Cs濃度の低下を引き起こしているという新しい知見が得られました。

今後の展開

本研究では、事故の影響を受けた地域の環境回復状況をチェルノブイリ事故後の状況と比較しました。福島第一原発事故後に得られた包括的なデータは、流域からの汚染物質などの移動についての理解を深める可能性を秘めています。また、今後の世界中の原発事故後の環境予測のためにも、情報公開を徹底し、モニタリングに協力している科学者だけでなく、世界中の科学者が福島第一原発事故初期からのデータを共有できるシステムを維持しつつより発展が重要になります。

福島はチェルノブイリに比べ降雨量が多く、森林や水田が密集するなど、チェルノブイリとは異なった地理的、水文学的な特性を有します。また、福島は山地が急峻なため、崩壊・土石流などで大規模な土砂流出を起こす可能性があり、それによる放射性物質移行を評価する必要があります。チェルノブイリの影響を受けた地域では、山火事などの環境事象による放射性核種のさらなる移行が発生しています。

これらのことを踏まえれば、福島第一原発事故の当事国であるわが国は、チェルノブイリの環境汚染の動向を把握しつつ、福島の長期モニタリングを実施し、放射性核種の移行を予測する研究を継続することが求められます。

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、環境中の低濃度の岩石、土壌、塵埃中に ^{133}Cs として安定に存在しているが、 ^{137}Cs (半減期 30.2 年) や ^{134}Cs (半減期 2.1 年) は人工放射性核種で、いずれも過去の原発事故と 1950 年代後半から 60 年代にかけての大気圏実験で生成されたものである。
- 注2) 重量緩衝深度：土粒子の密度は地点や深度によって異なることを考慮するため、土壌の深度をその深度までの重量で表す単位を重量深度という。放射性核種濃度が指数関数的な深度分布を示すとき、核種の濃度が地表面の $1/e$ ($\approx 1/2.7$) となる重量深度を重量緩衝深度という。
- 注3) 懸濁態：泥や砂などの粒子状の物質に吸着された状態の放射性セシウムのこと。
- 注4) 正規化 ^{137}Cs 濃度：沈着量の違いの影響を除いて、地点間の違いを評価するために、初期沈着量で正規化した ^{137}Cs 濃度のこと。 ^{137}Cs 濃度の値を単位面積当たりの ^{137}Cs 沈着量で割って算出する。
- 注5) P F U：水田、耕作地、市街地からなる生活圏を示す。(Paddy Fields、 Farmland、 Urban area) の頭文字から
- 注6) 溶存態：水中に、陽イオンの形で溶け込んでいる放射性セシウムのこと。実用上、孔径 $0.45\mu\text{m}$ のフィルターを通過したろ液に含まれる放射性セシウムを溶存態と取り扱う。

参考図



図1 陸域における¹³⁷Csの移行とモニタリングの模式図

地上に降下した2.7PBqの¹³⁷Csのうち67%が森林、10%が水田、7.4%が畑や草地、5%が市街地に沈着した。事故から6年間に地上から河川を通して海へ流出した¹³⁷Csはそのうち4.8%程度と算出された(2011年6月～2017年3月まで、阿武隈川の場合)。¹³⁷Csの物理減衰(同期間に13%)と合わせ阿武隈川流域に残存する¹³⁷Csの割合は約82%である。

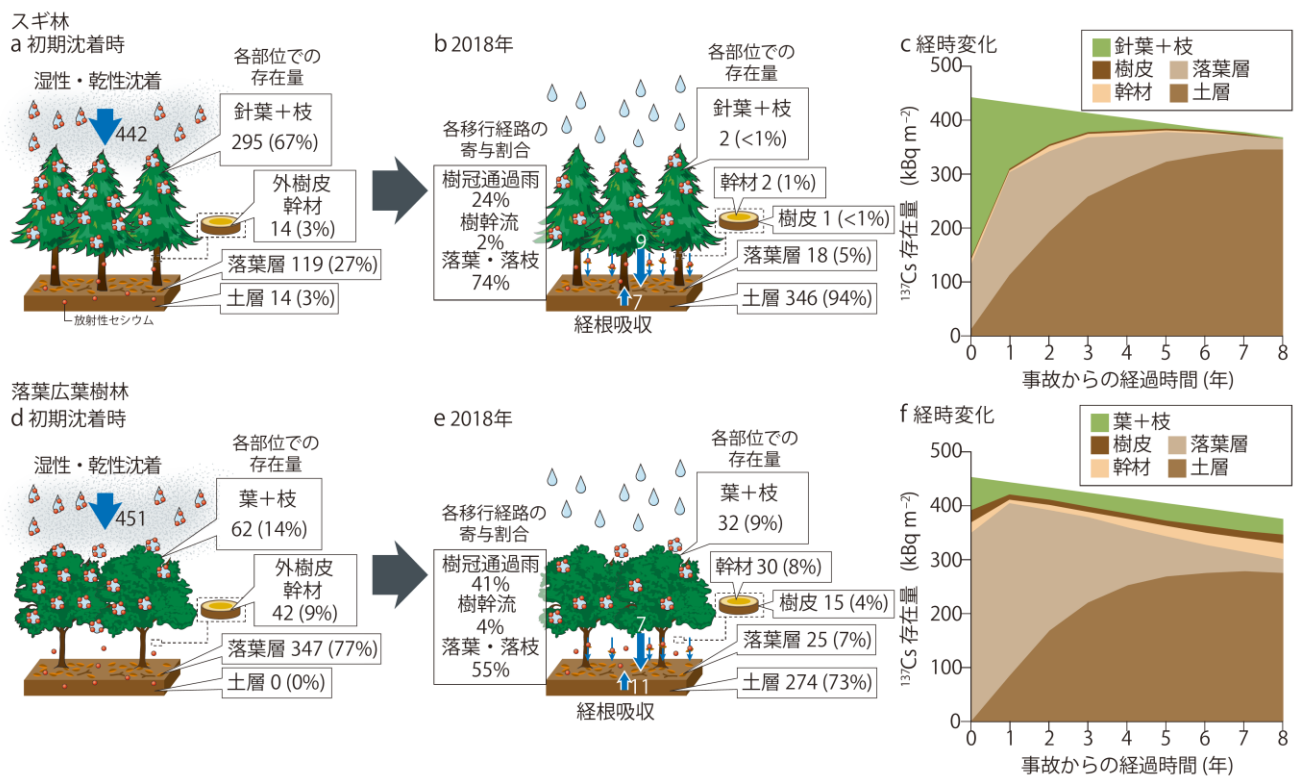
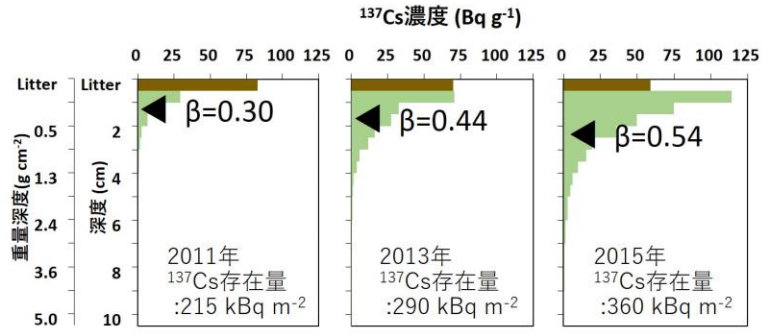


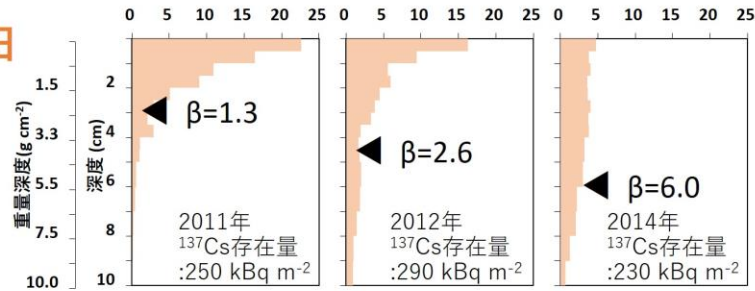
図2 森林における放射性セシウムの移行状況と分布の経時変化

「各部位での存在量」(単位はkBq m⁻²)のうち、括弧内の数字は各時期の全存在量に対する割合を表す。また、「各移行経路の寄与割合」は樹冠から林床への¹³⁷Cs移行量における各経路の寄与割合を表す。

a. スギ林



b. 耕作放棄水田



c. 耕作水田

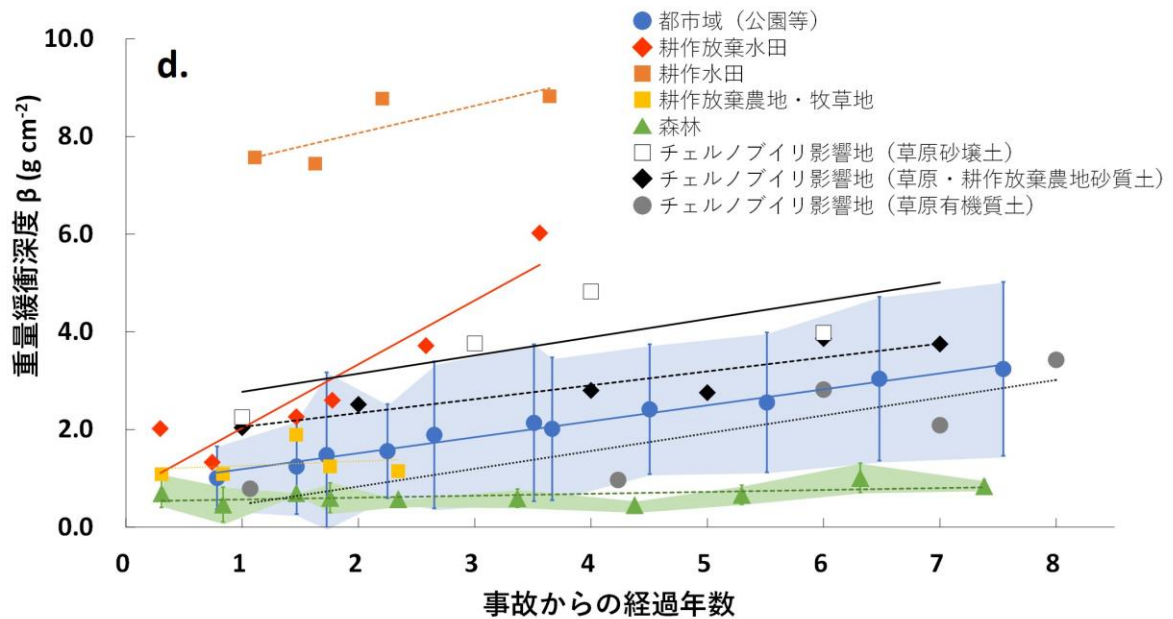
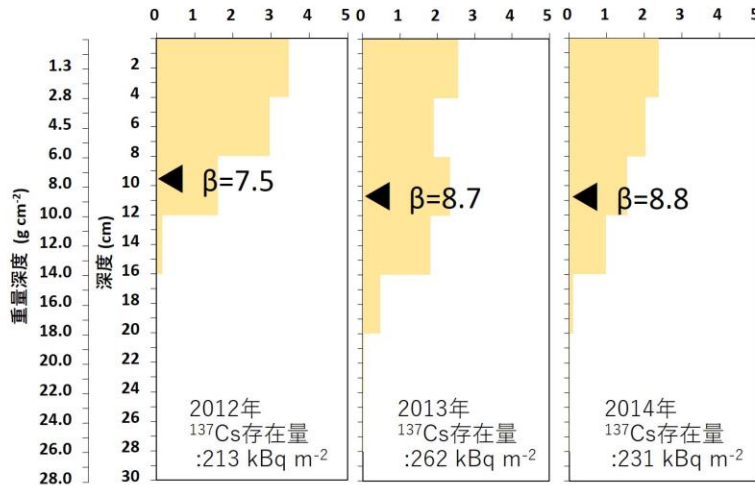


図3 さまざまな土壌における ^{137}Cs 濃度の深度分布と重量緩衝深度 β の経時変化

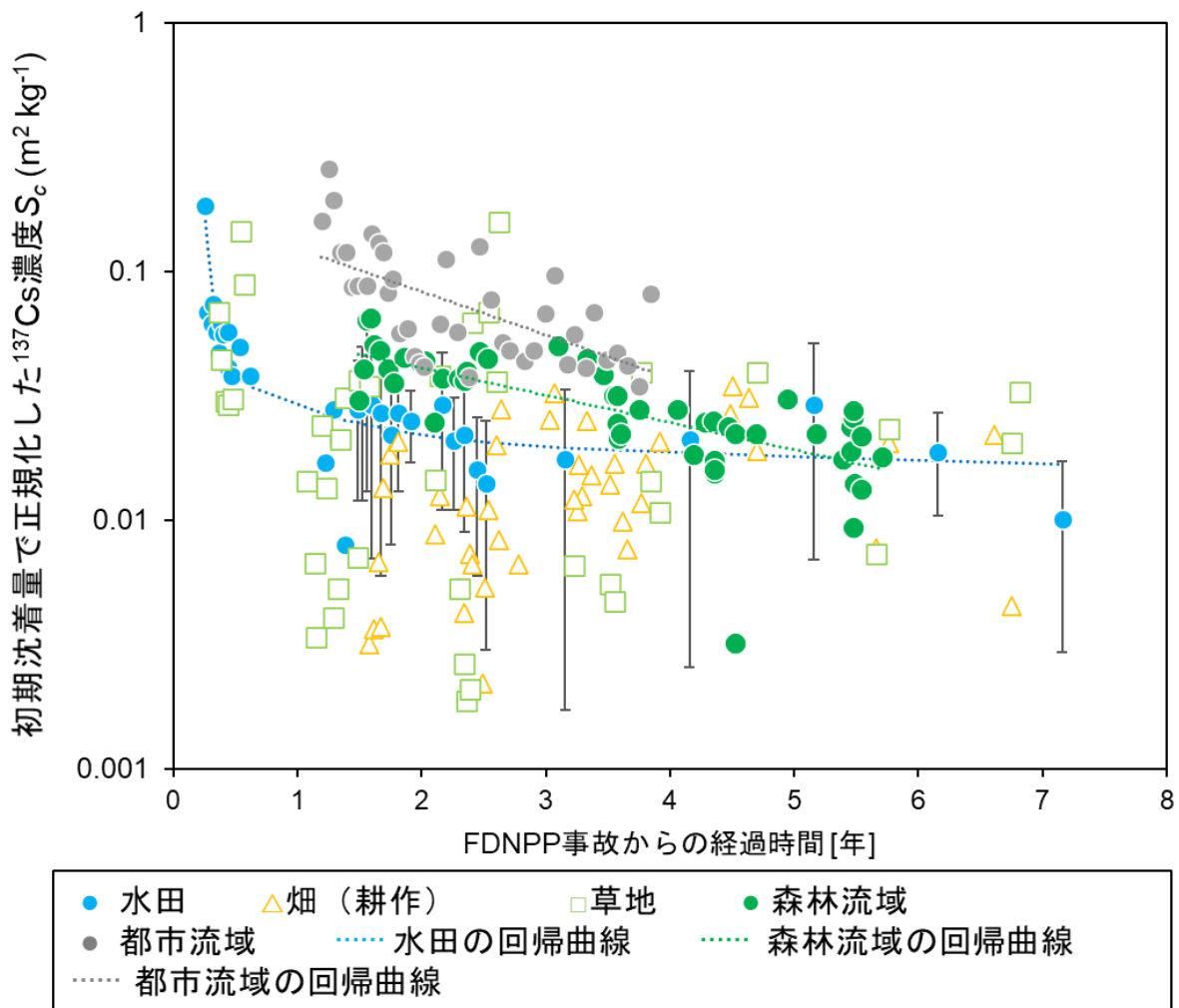


図4 土砂の生産源から流出する土砂に含まれる、正規化¹³⁷Cs濃度の福島第一原子力発電所（FDNPP）事故以降の経時変化

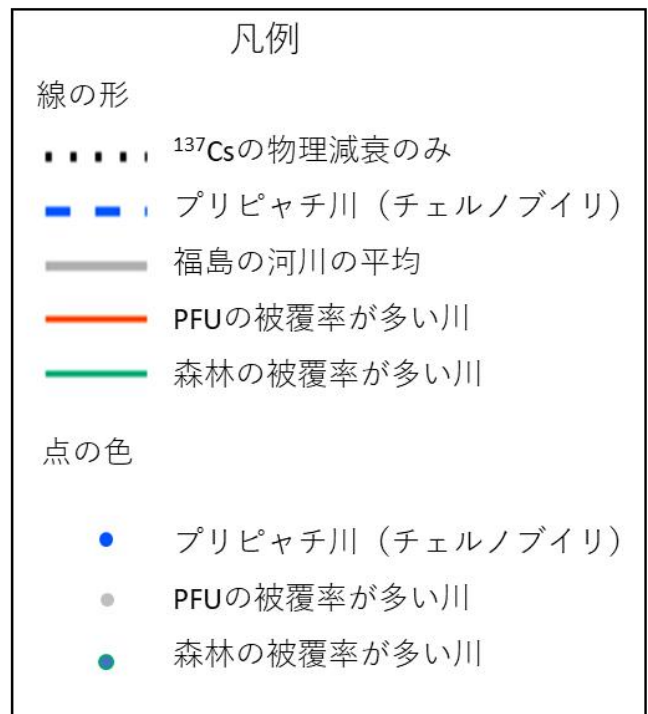
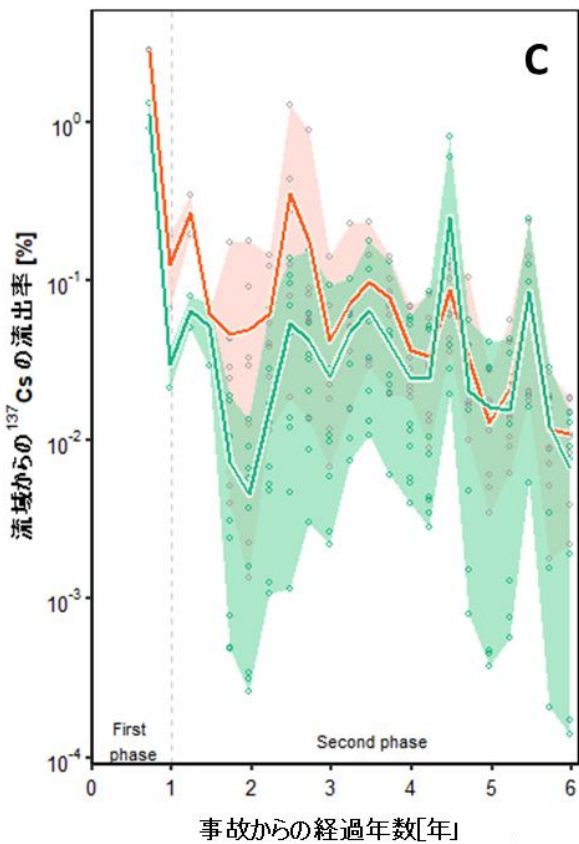
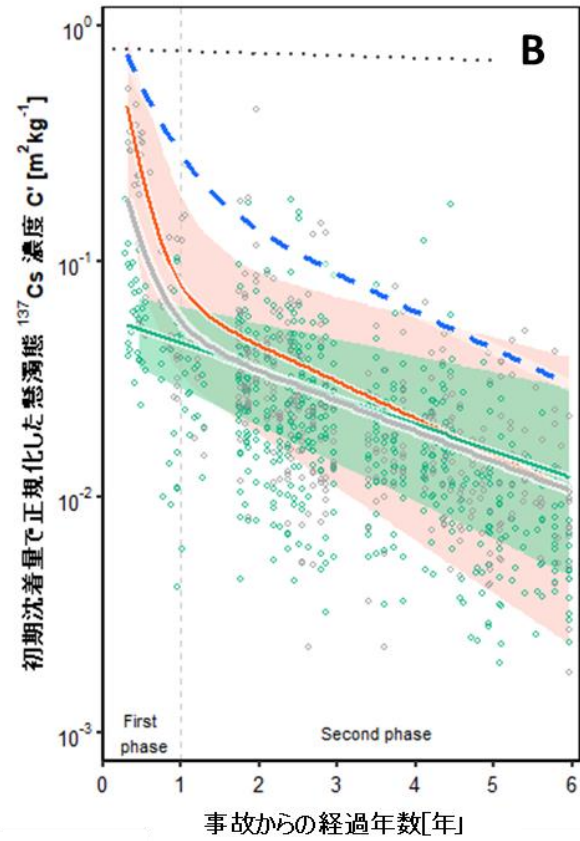
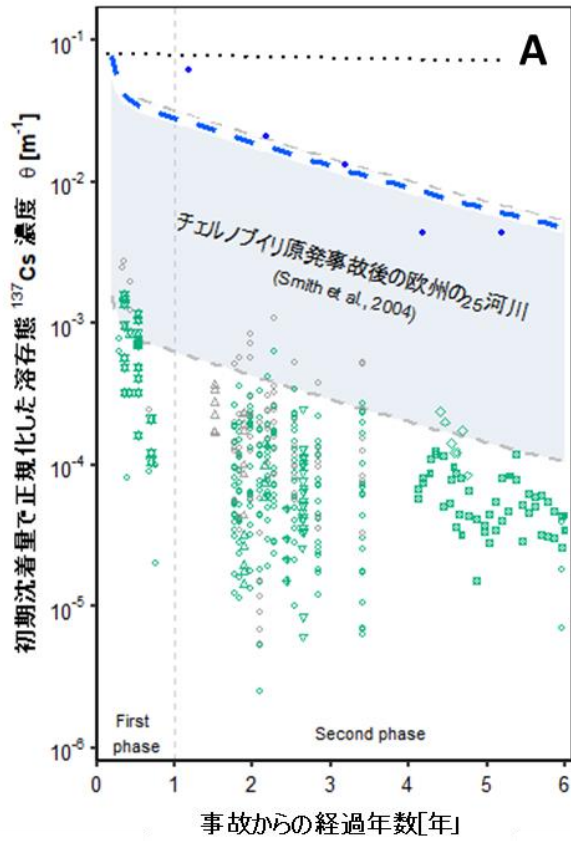


図5 福島第一原発事故後の、河川における ^{137}Cs 移行の経時変化を示すグラフ

A. 流域への初期沈着量で正規化した溶存態 ^{137}Cs 濃度. B. 流域への初期沈着量で正規化した懸濁態 ^{137}Cs 濃度. C. 流域からの ^{137}Cs の流出率 (4 カ月ごと)。

研究資金

本研究は、平成 23～24 年度文部科学省、平成 25～26 年度原子力規制庁、平成 27～令和 2 年度日本原子力研究開発機構の委託研究および科学研究費新学術領域研究 24110005、フランス国立研究機構 ANR-11-RSNR-0002、JST-JICA「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)」(JPMJSA1603)の支援を受けて実施されました。

掲載論文

【題名】：Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems
(陸域における福島第一原発由来の放射性核種の動態)

【著者名】：Yuichi Onda、Keisuke Taniguchi、Kazuya Yoshimura、Hiroaki Kato、Junko Takahashi、Yoshifumi Wakiyama、Frederic Coppin、Hugh Smith

恩田裕一¹：原稿のとりまとめ、執筆と改訂を主導

谷口圭輔^{1、4}：河川への輸送と河川輸送

吉村和也²：水田、市街地、河川輸送

加藤弘亮¹：森林地域

高橋純子¹：土壌を介した移動

脇山義史³：農地・草地、水田、河川への輸送

Frederic Coppin⁵：森林地域

Hugh Smith⁶：河川輸送

※¹筑波大学アイソトープ環境動態研究センターを中心に、²日本原子力研究開発機構廃炉環境国際共同研究センター、³福島大学環境放射能研究所、⁴福島県環境創造センター、⁵Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire、⁶Landcare Research らが取り組みました。

【掲載誌】 Nature Reviews Earth & Environment

【DOI】 <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0099-x>

問合わせ先

【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
アイソトープ環境動態研究センター センター長
〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1
E-mail:onda[at]geoenv.tsukuba.ac.jp
http://www.ied.tsukuba.ac.jp/~onda/
TEL:029-853-4226

吉村 和也（よしむら かずや）
日本原子力研究開発機構
福島研究開発部門廃炉環境国際共同研究センター 研究主幹
〒975-0036 福島県南相馬市原町区萱浜字巢掛場4-5-169
E-mail:yoshimura.kazuya[at]jaea.go.jp
TEL:0244-25-2072

脇山 義史（わきやま よしふみ）
福島大学環境放射能研究所 講師
〒960-1296 福島県福島市金谷川1番地
E-mail:wakiyama[at]ipc.fukushima-u.ac.jp
TEL:024-504-2114

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室
〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1
TEL:029-853-2040
E-mail:kohositu[at]un.tsukuba.ac.jp

科学技術振興機構広報課
〒102-8666 東京都千代田区四番町5番地3
TEL:03-5214-8404
E-mail:jstkoho[at]jst.go.jp

【JST事業に関すること】

科学技術振興機構国際部SATREPSグループ
〒102-0076 東京都千代田区五番町7 K's 五番町
TEL:03-5214-8085
E-mail:global[at]jst.go.jp