

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全貌

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。

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 講師の研究グループは、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 137Cs）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。

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 ㎞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。



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。

その結果、福島陸域の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。福島陸域の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。

・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 ^{137}Cs 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 2 b）。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 ^{137}Cs が樹体に蓄積されていることが判明しました（図 2 f）。また、事故から 8 年後の林床の ^{137}Cs 蓄積量は、スギ林では表層土壌 2 cm 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 ^{137}Cs 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。

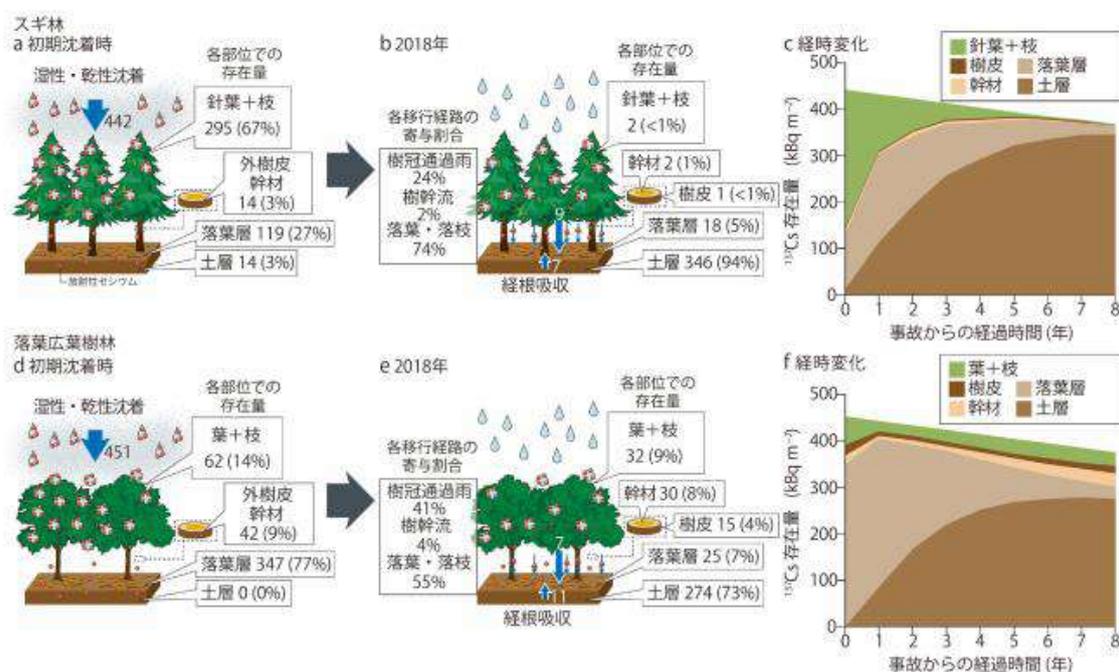


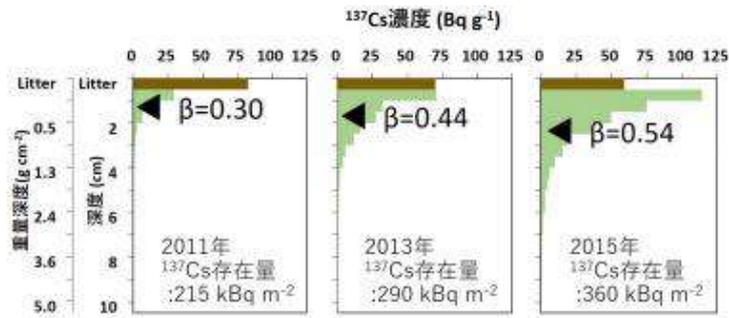
図2 森林における放射性セシウムの移行状況と分布の経時変化

「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 ^{137}Cs 移行量における各経路の寄与割合を表す。

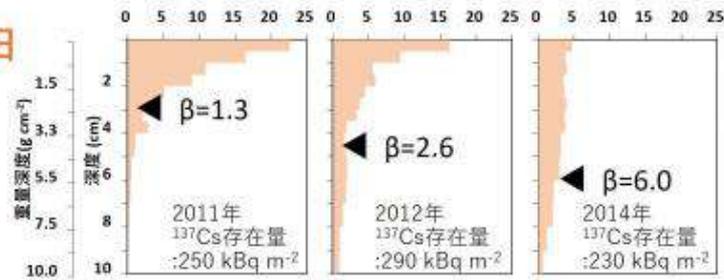
・ 土壌中の下方移行

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。**137Cs** 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 **137Cs** 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 **137Cs** 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 **137Cs** の割合は、**2017** 年時点で **10%**未満でした。森林では、落葉による **137Cs** の供給が継続しているために、土壌表層近辺に **137Cs** がとどまり続けることが分かりました (図3 a, d)。

a. スギ林



b. 耕作放棄水田



c. 耕作水田

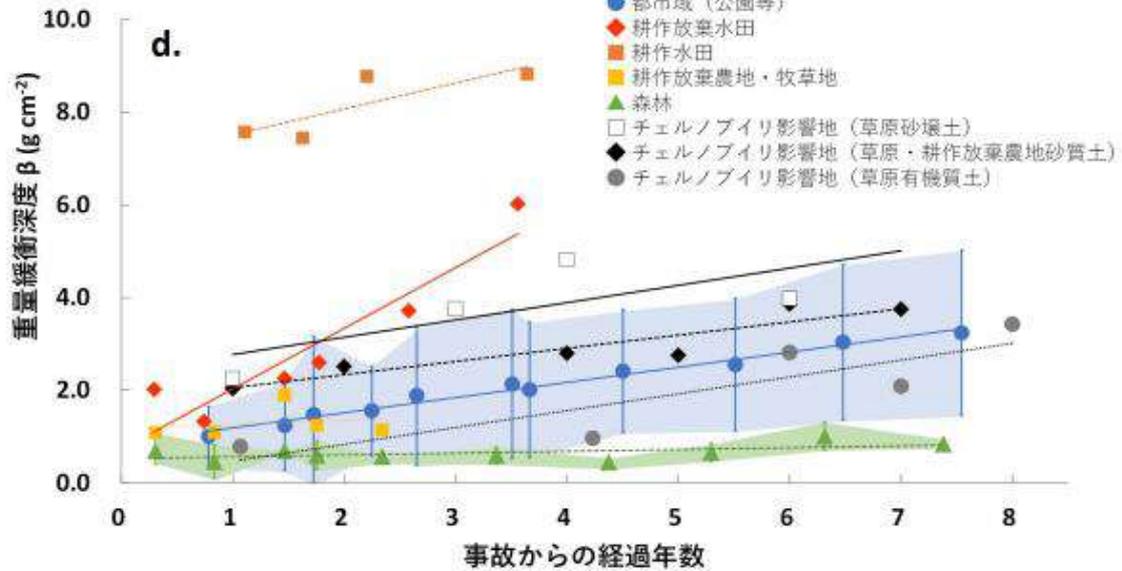
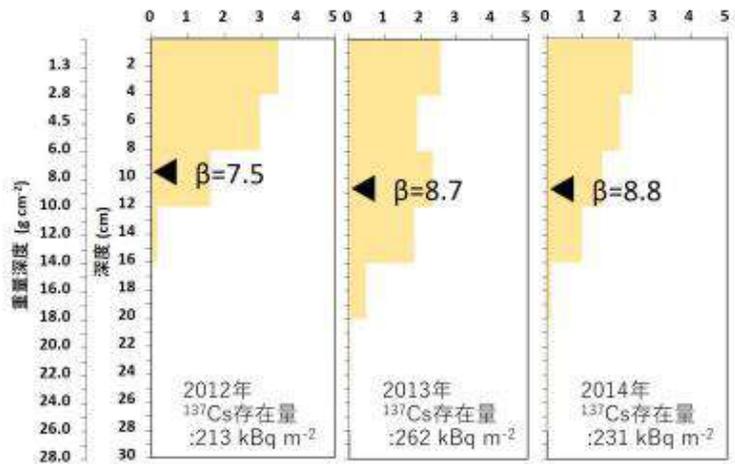


図 3 さまざまな土壌における ^{137}Cs 濃度の深度分布と重量緩衝深度 B の経時変化

・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（ Sc ）（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）。

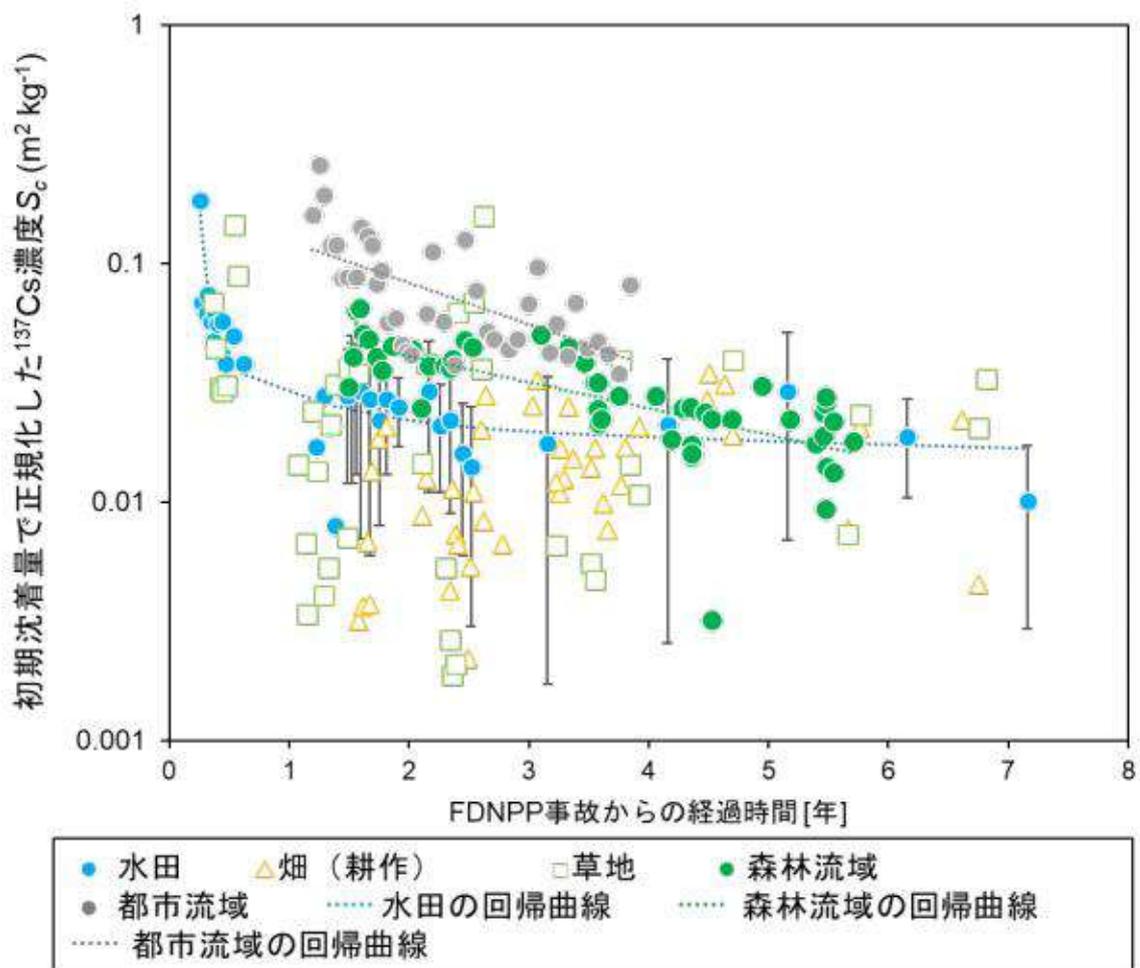


図 4 土砂の生産源から流出する土砂に含まれる、正規化 ¹³⁷Cs 濃度の福島第一原子力発電所 (FDNPP) 事故以降の経時変化

・河川からの ¹³⁷Cs の流出

福島第一原発事故後の河川を介した ¹³⁷Cs 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 ¹³⁷Cs 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 ¹³⁷Cs 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 **137Cs** 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 **137Cs** 濃度は事故直後の数値の 2%にまで減少しました（図 5 B）。

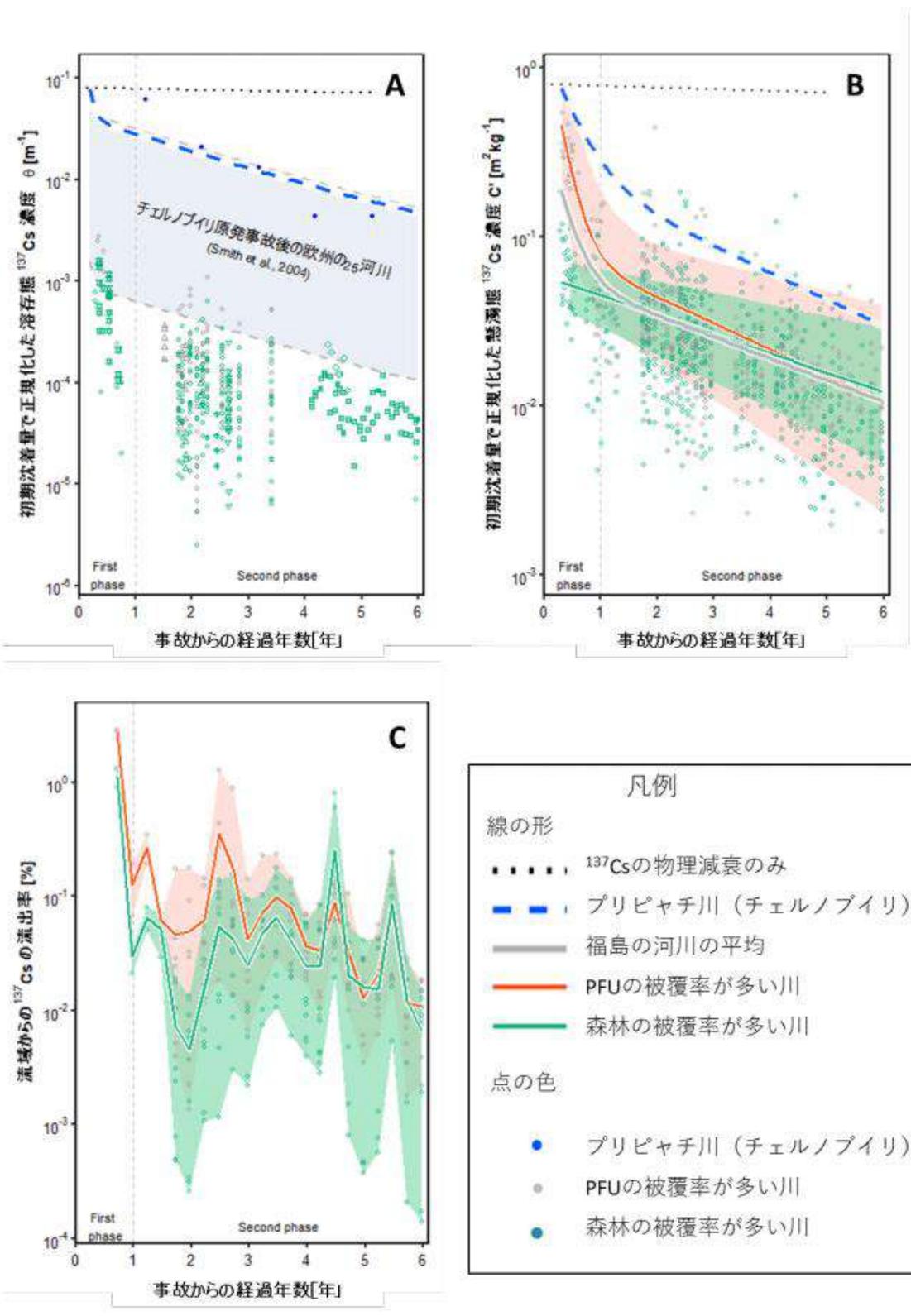


図 5 福島第一原発事故後の、河川における ^{137}Cs 移行の経時変化を示すグラフ
 A. 流域への初期沈着量で正規化した溶存態 ^{137}Cs 濃度. B. 流域への初期沈着量で正規化した懸濁態 ^{137}Cs 濃度. C. 流域からの ^{137}Cs の流出率(4 カ月ごと)。

・ **137Cs** 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 **90Sr** の濃度は、**137Cs** 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、放射性核種の下方浸透の度合いを示す ^{137}Cs 重量緩衝深度 β は、福島の前作水田において、チェルノブイリ影響地の2～4倍の値を示しました（図3d）。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 ^{137}Cs 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5B）。また、溶存態の正規化 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 濃度は、溶存態 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 濃度の低下は、 ^{137}Cs 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 ^{137}Cs 濃度の低下をもたらし、溶存態 ^{137}Cs 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。

【論文情報】

タイトル : Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems

雑誌 : Nature Reviews Earth & Environment

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

研究成果発表資料

<http://www.tsukuba.ac.jp/attention-research/p202010280100.html>

編訳 JST 客観日本編集部