

課題名 ZRFb-12T1 流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理

課題代表者名 古米弘明(公益社団法人日本水環境学会副会長、同ノンポイント汚染研究委員会委員／
／東京大学大学院工学系研究科 附属水環境制御研究センター・教授)

研究実施期間 平成24年度

累計予算額 1,200千円(うち24年度1,200千円)
予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード(5～10個
以下程度) 非特定汚染源、放射性物質、移動、消長、堆積、環境動態、文献調査

研究体制

流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理(日本水環境学会)

研究協力機関

日本原子力開発機構、東京大学、大阪工業大学、豊橋技術科学大学、岐阜大学、北海道大学、
広島大学、金沢大学、鳥取大学、福岡県保健環境研究所、滋賀県琵琶湖環境科学研究センター、琵琶湖・淀川水質保全機構

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

平成23年3月の東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所から放射性物質が多量に環境中に放出され、現在も汚染水の漏洩問題を抱えている。事故当初放出された放射性物質は、大気中を移動しながら乾性降水物や湿性降水物として地上に沈着した(図1)。地上に沈着した放射性物質は、環境中を移動しながら分解していく。現在、実施されているモニタリング調査によっておおその環境中での分布は把握できているものの、ホットスポットと呼ばれる高放射線が検出される場所も存在し、環境や人体へのリスク管理を考えた場合、これら放出された放射性物質の環境中での移動と消長を明らかにする必要がある。また、被ばく線量の高い地域においては、新たな特別措置法の枠組みの下で国が主体となった除染が進められようとしている。したがって、放出後の汚染実態の把握や環境動態の解明や効率的な除染を検討することが求められる。例えば、市街地や農地などで除染が実施されたあとの物理的な減衰や風雨などによる減衰などを評価したり、降雨に伴う放射性物質の流出や移動、さらにはその消長を推察するためには、モニタリング結果を解釈できるような科学的知見を整理することが重要である。チェルノブイリ原子力発電所事故、スリーマイル島原子力発電所事故等の他地域で放出された放射性物質の動態に関する研究成果は参考になるものの、森林が多く、急峻な地形が多い我が国とでは、環境中の挙動が異なるものと考えられる。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、環境中に放出され流域に沈着した放射性物質の環境中での挙動に関する文献調査を行い、放射性物質の環境中での移動及び消長についての科学的知見を集約・整理して提示することである。すわなち、森林、農地、市街地等における移動と消長に関する国内外のこれまでの調査研究の文献等情報を収集するとともに、収集した情報から、放射性物質の環境中での挙動に及ぼす影響因子を考慮しながら主要なプロセスを抽出し、長期および短期の両方の視点で時間経過に伴う挙動の変化等を整理することを目的とした。

研究の背景 (図)



図1 流域に沈着した放射性物質の移動と消長の概念図

3. 研究開発の方法

国内外の放射性物質の環境動態に関係する研究者からヒヤリング等を実施して重要な文献等の情報を収集するとともに、森林、農地、市街地の場所での動態、これらに共通する河川や土壌での移動や蓄積、モデルによる予測のそれぞれの観点で国内外の文献を検索した。検索にはインターネットで利用できる文献検索サービス(主に研究参加者がそれぞれ所属している機関で利用可能なもの)を利用した。

文献検索方法として、まず検索で用いるキーワードを、「対象物質」、「対象場」、「現象」の3つに大別し、それぞれに関連した語群を設けて網羅的に文献の絞り込みを行った。例えば、「対象物質」としては「セシウム」やそれに類似したキーワードを、「対象場」としては「流域」、「河川・湖沼」、「森林」、「農耕地」、「都市」などを設定し、「現象」としては「流出」、「吸着」、「移動」に関するキーワードを選択した。

以上の文献検索の結果、絞り込まれた文献について、研究協力者を含む研究参加者がアブストラクトや本文を読み込み、本研究で有用な知見や重要な示唆が含まれる文献を選抜した。選抜された文献は、文献の基本情報、内容、示唆されること等についてまとめ、重要な情報を整理する。さらに、モニタリングへの活用、流出挙動・流出経路、除染の際の留意点について提言できるように整理した。

4. 結果及び考察

(1) 文献検索による情報の収集と整理

対象放射性物質として「セシウム」を選定して、環境動態としての移動と消長の切り口から文献調査を行った。また文献情報等について専門家へのヒヤリング調査を実施した。その際、物性やミクロな現象としての「土壌」での移動や蓄積、マクロな現象としての「森林」、「農地」、「市街地」における動態、さらには、流域における移動や消長を評価するための「河川」における流出や移行、さらには挙動予測のための「モデル」化の、6つの分野に分けて『Scirus』『Scopus』『Web of Knowledge』『J-DreamII』『Science Direct』『INIS』によって文献検索を実施した(図2)。検索対象として抽出した文献のうち、タイトル、アブストラクトや引用回数を元に重要な知見や、具体的に記載されていると思われる文献を抽出した。さらにアドバイザーボード会議や専門家ヒヤリング等で得られた情報も考慮して精査する文献を選択した。その結果、国内外の雑誌論文を中心に125件の関連文献が抽出された。収集できた文献の情報一覧リストの例を表1に示す。

検索された文献ごとに抄録を作成することとして、環境動態の観点から有意義な情報を抜き出すとともに、「モニタリングへの活用」、「流出挙動・流出経路の理解」、「除染における留意点の提示」につながる情報を簡潔にまとめた。今回の知見整理が活用しやすいように、(1)モニタリングへの活用、(2)流出挙動・経路、(3)除染の際の留意点、(4)担当者のコメントを含む共通フォーマットに従って文献のリスト化と抄録のデータベース化を通じて成果統合を行った。

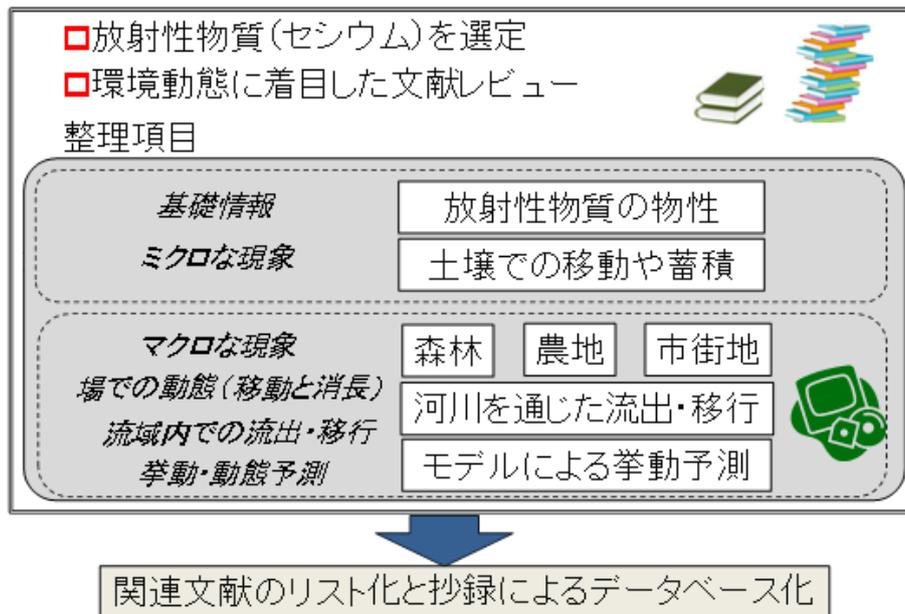


図2 関連文献のリスト化と抄録によるデータベース化

表 1 収集できた文献の情報一覧リストの例

分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年
市街地	Seleznev, AA., Yarmoshenko, IV, Ekidin, AA	Accumulation of Cs-137 in puddle sediments within urban ecosystem	Journal of Environmental Radioactivity	101	8	643-646	2010
	提言につながる情報	ロシア中ウラル地方におけるCs-137降下量をデータ収集により経年変化を推定。雨水のたまりやすい(降雨の度に水たまりができる)場所の土壌中には放射性物質が蓄積されやすいことを水たまり底泥中の溶存濃度をモデル式で示し、大気降下量との寄与率を推定した。すなわち、大気降下物として降下したCs-137は雨水に溶け出し水たまりへと流入し底泥中に集積されていく。					
農地	Shinonaga T., Schimmack W. and Gerzabe M.H.	Vertical migration of ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs and ²²⁶ Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation.	Journal of environmental radioactivity	79	2	93-106	2005
	提言につながる情報	オーストリアでの輪作下のライシメーターにおける農地土壌中の ⁶⁰ Co、 ¹³⁷ Cs、 ²²⁶ Raの垂直分布の調査。未かく乱土壌と同様に、かく乱土壌においても ¹³⁷ Csの移動速度は非常に小さいことが示されている。					
森林	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, and Takashi Gomi	Interception of the Fukushima reactor accident-derived ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I by coniferous forest canopies	Geophysical Research Letters	39		L20403	2012
	提言につながる情報	栃木県(福島第一原発から南西へ150km離れた場所)のヒノキ林(40年生、2,500本/ha)とスギ林(41年生、1,300本/ha)に設定された斜面プロット(傾斜>30度)での研究例である。原発事故から約6か月経過した時点にあっても針葉樹キャノピーによって多くの放射性セシウム(>60%)が保持されていることが示されている。一般に、森林流域からの汚濁負荷対策を検討する場合、流域でのインプットとアウトプットを把握するだけでは、汚濁負荷を左右する場(例えば、植生、土壌、地質)を特定できないため、問題解決のために効果的な対策が打てない。本研究の結果はこの点を再認識させるとともに、今後の森林政策や除染にとって流域内部での放射性セシウムの挙動を調べることの重要性が理解できる。放射性セシウムの今後の挙動、例えば樹体内への移動と蓄積、あるいは落葉・落枝としての林床への移動を評価することの重要性も本研究から理解できる。					
土壌	Almgren S., Isaksson M.	Vertical migration studies of ¹³⁷ Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident	Journal of Environmental Radioactivity	91	1-2	90-102	2006
	提言につながる情報	スウェーデン西部の33地点を対象として、核実験によるフォールアウトおよびチェルノブイル事故に起因する ¹³⁷ Csの表層土壌中での深度分布から、 ¹³⁷ Csの浸透速度、分散係数を測定した。その結果、浸透速度は0~0.35cm/y、0.06~2.63cm/yとなった。測定点の多さから、パラメータの変動範囲が明らかになった。					
河川	U. Sansone M. Belli, O.V. Voitsekovitch, V.V. Kanivets	Cs-137 and Sr-90 in water and suspended particulate matter of the Dnieper River reservoirs system (Ukraine)	Science of The Total Environment	186	3	257-271	1996
	提言につながる情報	チェルノブイル事故地域の河川(プリピャチ川)から、約500km下流の黒海までの経路。定期的・長期的モニタリングの成果が現れた報告であり、モニタリングの重要性が認識できる。内部被ばく、外部被ばくを含めた被ばく経路解析の下で、対策の優先度を考える必要がある。					
河川	T.Matsunaga, H.Amano, N.Yanase	Discharge of dissolved and particulate ¹³⁷ Cs in the Kuji River, Japan	Applied Geochemistry	6	2	159-167	1991
	提言につながる情報	久慈川において1987-1988年に観測を行い、放射性セシウムの流出挙動を検討し、モデルによる放射性セシウムの移行動態解析に必要なデータが報告された。・粒子態放射性セシウムの存在割合 高水量期>低水量期、・粒子態放射性セシウムの含有量は灰化減量と正の相関性有りー有機物との親和性を示唆。・分配係数 1.0 ± 0.6 × 10 ⁵ ml/g、・1987, 1988年の放射性セシウム流出量 蓄積量の0.04%/y% (壊変補正済み)					
モデル	Luigi Monte, John E. Brittain, Lars Håkanson, Jim T. Smith, Marcel van der Perk	Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides from catchments	Journal of Environmental Radioactivity	75	1	83-103	2004
	提言につながる情報	集水域における放射性核種の挙動を予測するモデルを広くレビューした論文である。集水域から流入する放射性物質のフラックスは、指数関数の組み合わせで記述される。すなわち、流出の早さに応じて分類し、それを足し合わせることで、経時的なフラックス(あるいは濃度)を理解することができる。一方、現象を詳細に記述する物理的なモデルについては、未知パラメータが多くなり必ずしも正確な予測ができるわけではない等の理由から本論文では批判的である。					

(2) 提言につながる内容のまとめ

各分野で行った文献のレビュー結果に基づき、土壌、森林、農地、市街地、河川流出、流域モデルの分野ごとに提言につながる内容を取りまとめた。

(3) 知見整理を通じた提言

福島第一原子力発電所から多量に放出された放射性物質は広域に拡散して、森林だけでなく、農地や市街地など様々な土地利用の地域に沈着した。流域に沈着した放射性物質の多くは、懸濁態として存在しており、降雨に伴う雨水流出現象により流域内を上流から下流へと移動して、最終的には河川を通じて沿岸域に到達して底泥として蓄積され、微粒子であれば海洋域と輸送されていると考えられる。

今回実施した文献調査と知見整理を通じて、次のような提言と今後の課題を示すことができる。

1) 提言1：環境中での挙動を明らかにするための「モニタリング」の実施

流域に沈着した放射性物質は降雨流出に伴い、河川を通じて湖沼や沿岸域などの水系へ流下・移動する。流域における放射性物質の将来の分布を予測するためには、流域単位での物質収支を考慮することが重要である。また、下記の点に留意した長期的かつ戦略的なモニタリングを実施する必要がある。

- a 森林、農地、市街地における放射性物質の沈着や保持状態、さらに流出・移行の挙動は異なる。たとえば、森林では落ち葉や土壌の層での保持や水の浸透にともなう流出、雨天時の土壌流出、落葉を含めた樹冠から樹体内あるいは林床への移動、農地では、水田における代かき時の落水、雨天時の土壌流亡、土壌から農作物への移行、刈り取りによる系外への搬出、市街地では、水道取水による移行や側溝も含めた下水道などの雨水排除システムにおける移動、さらには濁質除去による汚泥への濃縮などが重要な経路として考えられる。
- b 春先の雪解けや豪雨時は、懸濁態として急激に流出・移行量が増加する。
- c 河川水中では低濃度であっても、流量が多い場合は下流への移動する物質量は多くなる。
- d 半減期の長い放射性物質は、植物や水生生物への移行量や蓄積量が多くなる。

2) 提言2：時空間スケールを踏まえた「流出挙動・流出経路」の理解

半減期、土壌粒子への吸着性などの性質は、物質によって異なる。そのため、短期および長期の視点で、下記の点に留意した放射性物質の環境中での流出挙動や流出経路を理解する必要がある。

- a pHや有機物濃度などの環境要因によって、放射性物質は環境中において溶存態、懸濁態と存在する形態が異なる。
- b 陸域から河川への流出や流下する過程において、放射性物質の形態が変化する。その場合、固相と液相の間でのスケールの小さい移動現象と、陸域からの雨天時の河川への流出、河川中での流下過程における浮遊粒子と河床堆積物との間の交換や移行などのスケールの大きい現象があることに留意すべきである。

また、除染のための留意点として、放射性物質の残留性は、建物（屋根や外壁）、道路（アスファルト、コンクリート、敷石、砂利）、草地、樹木など地表面特性に依存します。また、雨水マスや側溝の窪みなど土砂が堆積しやすい場所では、放射性物質が高濃度に存在するホットスポットになる可能性が指摘される。

(4) 今後の課題

1) 今後の課題1：戦略的な知見の蓄積とモンスーン地域での動態評価

環境省や文部科学省などにより、放射性物質の環境モニタリングや環境動態に関する研究が実施されている。モニタリングデータは公開されているが、研究・調査結果は現段階では限られたものしか学術論文や報告書として公開されていない。今後もこれらの最新成果を体系立てて蓄積することが必要である。

2) 今後の課題2：経験的な式から移流拡散等のメカニズムを考慮したモデル化

流域レベルでの環境動態を予測する場合は、放射性物質の環境中での挙動を詳細に表現できるモデルが求められる。複雑なモデルには、必然的に未知パラメータが多くなることから、再現性を確認できるようなモニタリングデータ蓄積が必要となる。

また、対策効果の評価や、リスク管理等の目的に応じて、単純な経験式や詳細なモデル式から現場に即したものを選択する必要がある。

さらに、放射性物質の分配係数は環境条件によりオーダーレベルで変化することが報告されている。コンパートメントとして水相、底泥表層、底泥深層、生物といった区分と移流拡散等のメカニズムを考慮したモデル構築において、他のパラメータの精度とのバランスから分配係数の設定のあり方やモデルの再現性を議論する必要がある。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

放射性物質（放射性セシウム）の環境中での挙動に関する学術的な報告を収集し、森林、農地、市街地、河川等の対象場ごとに知見を整理し、それぞれの場所における放射性物質の移動や消長の特徴を文献に記載されている重要な関連情報とともにまとめることができた。

(2) 環境政策への貢献

環境省水・大気環境局水環境課と密接に連絡をとり、広域に拡散し沈着した放射性物質の流域内における移動と消長について理解する上で留意すべき知見や、今後のモニタリング時の注意点について情報提供することに貢献できた。

<行政が既に活用した成果>

関東地方環境事務所、福島再生事務所内除染情報プラザ等で啓発用資料として、当研究課題の報告書及びリーフレットを用いている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

当研究課題の報告書を送付した全国の自治体で、資料としての活用が見込まれる。また、市民への啓発用資料としてのリーフレットの活用が期待される。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表(学会等)

特に記載すべき事項はない。

(3) セミナー、成果発表会

- 1) 特別講演会「放射性物質の環境動態」の開催（平成24年10月23日、東京大学工学部141講義室、参加者70名）
- 2) 「流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理」成果発表会の開催（平成25年3月18日、東京大学工学部141講義室、参加者99名）

7. 研究者略歴

課題代表者：古米 弘明

東京大学工学部卒業、工学博士、現在、日本水環境学会副会長／東京大学大学院工学系研究科 附属水環境制御研究センター 教授

研究参画者

(1)：古米 弘明（同上）

(2)：駒井 幸雄

京都府立大学農学部卒業、学術博士、現在、日本水環境学会ノンポイント汚染研究委員会委員長／大阪工業大学工学部 教授

(3)：井上 隆信

北海道大学工学部卒業、工学博士、現在、日本水環境学会ノンポイント汚染研究委員会農地・林地部会長／豊橋技術科学大学大学院工学研究科 教授

(4)：山田 俊郎

北海道大学工学部卒業、工学博士、現在、日本水環境学会ノンポイント汚染研究委員会幹事長、岐阜大学工学部 准教授

ZRFb-12T1 流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理

(1) 流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理

公益社団法人日本水環境学会

副会長	古米弘明（東京大学大学院工学系研究科）
ノンポイント汚染研究委員会委員長	駒井幸雄（大阪工業大学工学部）
ノンポイント汚染研究委員会農地・林地部会長	井上隆信（豊橋技術科学大学大学院工学研究科）
ノンポイント汚染研究委員会幹事長	山田俊郎（岐阜大学工学部）

<研究協力者>

ノンポイント汚染研究委員会委員	五十嵐敏文（北海道大学大学院工学研究科）
ノンポイント汚染研究委員会委員	尾崎則篤（広島大学大学院工学研究科）
ノンポイント汚染研究委員会委員	熊谷博史（福岡県保健環境研究所）
ノンポイント汚染研究委員会委員	佐藤祐一（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）
ノンポイント汚染研究委員会委員	長尾誠也（金沢大学環日本海域環境センター）
ノンポイント汚染研究委員会委員	芳賀弘和（鳥取大学農学部）
ノンポイント汚染研究委員会委員	増田貴則（鳥取大学大学院工学研究科）
ノンポイント汚染研究委員会委員	松永 武（日本原子力開発機構）
ノンポイント汚染研究委員会委員	横田久里子（豊橋技術科学大学大学院工学研究科）
ノンポイント汚染研究委員会委員	和田桂子（琵琶湖・淀川水質保全機構 水質浄化研究所）

平成24年度予算額：12,000千円

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

2011年3月に福島第一原子力発電所から環境中に大量に放出され流域に沈着した放射性物質は、一部は土壌へ蓄積し、一部は降雨での洗い流しにより下流へ移動するが、これらの環境中での挙動に関する知見は十分整理されていない。そこで、放射性セシウムを対象として、森林、農地、市街地、河川、土壌等、それぞれの場所での放射性物質の移動と消長に関する国内外の学術論文を中心とした文献を収集し、文献情報をリスト化するとともに重要性の高い125件の文献の抄録を作成してデータベース化を行った。各文献から重要な情報を整理し、モニタリングへの活用、流出挙動・流出経路の解明、除染の際の留意点に関連する情報を抽出した。森林、農地、市街地などそれぞれの場における放射性物質の挙動の特徴を整理するとともに、環境中での挙動を明らかにするためのモニタリングを実施する時の留意点について整理した。また、短期および長期の視点で放射性物質の環境中での流出挙動や流出経路を理解する時に考慮すべき内容についても指摘した。

さらに、今後の課題として、アジアモンスーン地域における放射性物質の環境動態の評価解析

には、現在実施されているモニタリングや調査研究の最新成果を体系立てて戦略的に蓄積する必要があること、動態予測や対策効果をより定量的に評価するためには、分配係数を含む様々なパラメーターを適切に設定し、移流拡散等のメカニズムを考慮したモデルを構築する必要があることを指摘した。

[キーワード]

非特定汚染源、放射性物質、移動と消長、堆積

1. はじめに

2011年3月の東日本大震災に伴い、福島第一原子力発電所から放射性物質が多量に環境中に放出され、現在も汚染水の漏洩問題を抱えている。事故当初放出された放射性物質は、大気中を移動しながら乾性降下物や湿性降下物として地上に沈着した。地上に沈着した放射性物質は、環境中を移動しながら分解していく。現在、実施されているモニタリング調査によっておおよその環境中での分布は把握できているものの、ホットスポットと呼ばれる高放射線が検出される場所も存在し、環境や人体へのリスク管理を考えた場合、これら放出された放射性物質の環境中での移動と消長を明らかにする必要がある。また、被ばく線量の高い地域においては、新たな特別措置法の枠組みの下で国が主体となった除染が進められようとしている。したがって、放出後の汚染実態の把握や環境動態の解明や効率的な除染を検討することが求められる。例えば、市街地や農地などで除染が実施されたあとの物理的な減衰や風雨などによる減衰などを評価したり、降雨に伴う放射性物質の流出や移動、さらにはその消長を推察するためには、モニタリング結果を解釈できるような科学的知見を整理することが重要である。チェルノブイリ原子力発電所事故、スリーマイル島原子力発電所事故等の他地域で放出された放射性物質の動態に関する研究成果は参考になるものの、森林が多く、急峻な地形が多い我が国とでは、環境中の挙動が異なるものと考えられる。

2. 研究開発目的

本研究の目的は、環境中に放出され流域に沈着した放射性物質の環境中での挙動に関する文献調査を行い、放射性物質の環境中での移動及び消長についての科学的知見を集約・整理して提示することである。すなわち、森林、農地、市街地等における移動と消長に関する国内外のこれまでの調査研究の文献等情報を収集するとともに、収集した情報から、放射性物質の環境中での挙動に及ぼす影響因子を考慮しながら主要なプロセスを抽出し、長期および短期の両方の視点で時間経過に伴う挙動の変化等を整理することを目的とした。

研究の背景 (図)



図(1)-1 流域に沈着した放射性物質の移動と消長の概念図

3. 研究開発方法

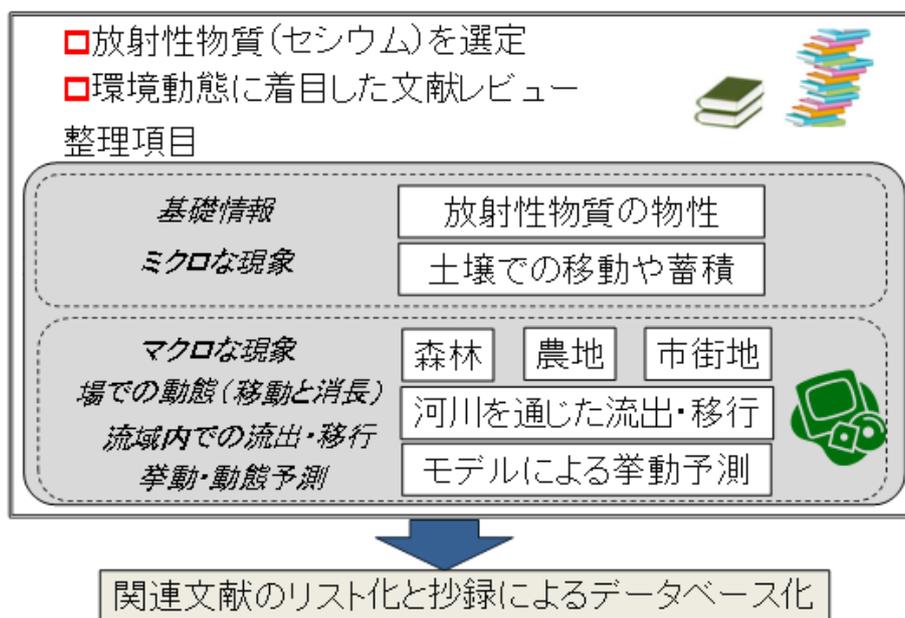
国内外の放射性物質の環境動態に関する研究者からヒヤリング等を実施して重要な文献等の情報を収集するとともに、森林、農地、市街地の場所での動態、これらに共通する河川や土壌での移動や蓄積、モデルによる予測のそれぞれの観点で国内外の文献を検索した。検索にはインターネットで利用できる文献検索サービス（主に研究参加者がそれぞれ所属している機関で利用可能なもの）を利用した。

文献検索方法として、まず検索で用いるキーワードを、「対象物質」、「対象場」、「現象」の3つに大別し、それぞれに関連した語群を設けて網羅的に文献の絞り込みを行った。例えば、「対象物質」としては「セシウム」やそれに類似したキーワードを、「対象場」としては「流域」、「河川・湖沼」、「森林」、「農耕地」、「都市」などを設定し、「現象」としては「流出」、「吸着」、「移動」に関するキーワードを選択した。

以上の文献検索の結果、絞り込まれた文献について、研究協力者を含む研究参加者がアブストラクトや本文を読み込み、本研究で有用な知見や重要な示唆が含まれる文献を選抜した。選抜された文献は、文献の基本情報、内容、示唆されること等についてまとめ、重要な情報を整理する。さらに、モニタリングへの活用、流出挙動・流出経路、除染の際の留意点について提言できるように整理した。

4. 結果及び考察

対象放射性物質として「セシウム」を選定して、環境動態としての移動と消長の切り口から文献調査を行った。また文献情報等について専門家へのヒヤリング調査を実施した。その際、物性やマイクロな現象としての「土壌」での移動や蓄積、マクロな現象としての「森林」、「農地」、「市街地」における動態、さらには、流域における移動や消長を評価するための「河川」における流出や移行、さらには挙動予測のための「モデル」化の、6つの分野に分けて文献検索を実施した（図(1)-1、図(1)-2）。その結果、国内外の雑誌論文を中心に125件の関連文献が抽出された。検索された文献ごとに抄録を作成することとして、環境動態の観点から有意義な情報を抜き出すとともに、「モニタリングへの活用」、「流出挙動・流出経路の理解」、「除染における留意点の提示」につながる情報を簡潔にまとめた。今回の知見整理が活用しやすいように、文献のリスト化と抄録のデータベース化を通じて成果統合を行った。



図(1)-2 関連文献のリスト化と抄録によるデータベース化

(1) ヒヤリング

筑波大学、日本原子力研究開発機構、Mark Zheleznyak氏（ウクライナ国立科学アカデミー）、(独)放射線医学総合研究所、環境科学技術研究所、京都大学、および国立保健医療科学院の専門家に対するヒヤリングを実施し、文献調査及び知見整理に関わる各種の情報を入手した。なお、Mark Zheleznyak氏へのヒヤリングは特別講演会後に行った。以下にヒヤリングの結果を示す。

1) 筑波大学（恩田裕一教授）

チェルノブイリ事故に関連した重要文献のいくつかを情報提供いただいた。そのうち、IAEAのレポート『ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE CHERNOBYL ACCIDENT AND THEIR REMEDIATION: TWENTY YEARS OF EXPERIENCE (Report of the Chernobyl Forum Expert Group, Environment)』や図書『Remediation of Contaminated Environment』などは特に研究に役に立つ。また、2012年3月につくばで開催されたIAEA ExpertのProf. Golosovの講演資料も環境中での放射性物質の挙動を理解する上で情報として有用である。

2) 日本原子力研究開発機構

a モデル研究の変遷やその内容について

歴史的潮流について、前半はStaticなモデル、後半はMark Zheleznyak氏らをはじめとするDynamicなモデル構築を行う研究者が出てきている。ただし、Dynamicなモデルはパラメーターが多く、その値により結果が変わるのがメリットでありデメリットであるとMark氏自身も認めている。状況に応じた使い分けが必要である。アメリカは原発が河川沿いにあるところが多く、1980年代にPacific Northwest National Laboratory (PNL) が陸水域の動態に関する研究を行っている。関連論文も多い。

解析目的（流域末端でのフラックスを見たいのか、濃度分布まで見たいのか等）に応じてモデルの構造も変化している。時間スケールについても、長期的な予測を行いたければ構造はシンプルに、また、短期的な予測であれば複雑になる。モデルで考えるコンパートメント自体も、目的に応じて物質の動きだけを見るモデルや、水の動きも合わせて見るモデルなど、多様である。物質収支は基本的に取りらないといけない。ただし、地下などに入ってしまうと実態が分からなくなるので、つじつまを合わせているものもある。ヨウ素は、ほとんど溶存態として移動するため、流域に沈着してから水と一緒に動くと考えればよい。大気中ではガスとして飛散するので遠方まで拡散する。地下水に行くと、土壌の種類や有機物などで動きが異なってくる。酸化還元の数値でも変わる。ヨウ素の解析についてはその目的をしっかりと確認しておく必要がある。ヨウ素による被ばくは大気吸引によるものが主である。したがって人へのリスクを考えると、水よりも大気が重要である。これらは同時にやらないと意味がない。今後事故が生じた際にどの程度の汚染が生じるかを予測し、浄水場への影響などを覚悟しておくという観点からは、水における動態の解析も必要と考えている。マクロなモデルで解析し、危険側に見積もっておけばよいかもしれない。

b 国際プロジェクトについて

IAEAではEMRAS IIの後、MODARIAというプロジェクトを進めている。福島の日データも含め、モデルやデータの比較実験を行っているが、立ち上がったところであり方向性はまだ定まっておらず、今年12月の会合で方向性等を決定する。VAMPは水圏がメイン、BIOMOVsは生態系がメインの研究を行ってきた。これら国際プロジェクトは、参加がボランティアベースであり、基本的には参加した研究者がやりたいことに基づき内容が検討されている。解析技術の向上に応じて内容も進んでいる。

c モデル関連について

L. Monte氏が2000年代前半に複数のレビュー論文を出していることについて、重要な点として、モデルはニーズありきで構築していくことが挙げられる。流域における放射性物質のFateに関して、Monte氏がまとめているもので参照可能である。L. Monte氏は集中型モデルを基本としたモデル式を多数提案しているが、その内容にマッチする精度のデータが偶然集まり、それで応答関数的な式を適用している。調査とモデルをそこまで連携させて実施しているというわけではない。現状として、モデラーと調査・実験中心の研究者とのリンクは不十分と認識している。モデリングのためには質の高いモニタリングデータが必要と推進費の中でも報告できるとよい。

d 森林関連について

森林における放射性物質の動態について、核種の種類が重要であり、化学特性や半減期の違い

で動態が変わるという結果になっている。

e 日本原子力研究開発機構で構築してきたモデルについて

i 陸域におけるシミュレーション

解析に汎用性を持たせるため、分布型多層モデルを構築中である。パラメーター数は全部で94であり、一番単純な系でも21ある。数ヶ月～1年くらいの解析期間を対象としている。したがって地下水については地表面から10m程度を対象としており、湧水は考えていない。伊自良川の森林域で計算を進めている。流量は同じでも、粒子ごとに挙動は大きく異なる。流量以外の観測値による同定検証が必要である。現在、同位体測定により、流量の分離（新しい水、古い水の割合）なども進めている。

モデルが複雑なら結果を合わせやすくなるが、意味のあるパラメーターであるかどうか重要である。

ii 大気・海洋におけるシミュレーション

海洋拡散シミュレーションモデルを構築している。ここでは施設から海洋への放流と、大気由来の沈着の両方を扱うことができる。大気拡散モデルとしてはWSPEEDI-IIを構築している。気象モデルとしてMM5を、大気拡散モデルとしてGEARNを用いている。福島第一原発事故への適用を実施。施設からの大気放出量を観測値から逆推定した。シミュレーションの結果、原発北西部や東日本域での空間線量率の時間変化を再現することができた。海洋拡散シミュレーションを行った結果、北茨城の高濃度のコウナゴについては、海洋放流だけではなく大気降下もないと説明できないことが分かった。海洋への放出量を推定したところ、イギリスの再処理施設からの年最大放出量よりは少ないが、旧ソ・ロシアの海洋投棄よりは多いことが分かった。

iii 大気・陸域・海洋結合シミュレーション

SPEEDI-MP (Multi-Model Package) を構築し、大気・陸面・陸水・海洋・波浪等の各種モデルをカップラーでつないだ複合環境の物質循環結合計算を行っている。結合モデルの大きな利点は、一旦沈着した放射性物質が蒸発してまた再沈着するなどのフィードバックプロセスが計算できることである。

3) Mark Zheleznyak氏 (ウクライナ国立アカデミー)

a モデルについて (分配係数Kdなど)

(質) Kdの内容について強調した講演であり、カリウムやアンモニアを使った式も提案されていたが、交換可能態 (exchangeable form) の意味について詳しく教えてほしい。

(答) Kdの検討は段階的に進めた。単純なものから複雑なものへという流れである。

まず全体のKdを推定するところから始めた。次は水中のKdと、底泥中におけるKdを区分して考えた。次のステップは3種類の土壌、クレイ、シルト、サンドについて、異なるKdを考えた。ただし、シンプルなモデルではすぐ平衡状態に至ると仮定している。さらに物理化学的なプロセスを考慮したモデルが提案された。底泥中における交換可能態 (exchangeable form) と交換不可能態 (non-exchangeable form) を考慮した。交換可能態のみが水中放射性物質に移行する。また交換可能態と不可能態の割合は場所により異なる。交換可能態のKdの推定には、アンモニアやカリウムの濃度を用いた。水中の放射性物質濃度は経年的に減少するが、植物プランクトンの増加等による影響により季節変動があり、時々刻々の濃度はそれによって影響される。WASPやUSEPAがこうした機構を考慮するモデルを構築した。素早く反応する部分と緩やかに反応する部分が区別して

考慮された。流域モデルの構築については、最初はボックスモデル、次に移流拡散モデル(1次元)、さらに土壌とのやりとりが考慮され、氾濫原を含む分布型へと発展していった。対象スケールも、最初は小さな流域から、その後のコンピュータの解析能力の向上により、大きな流域の解析へと発展した。河川濃度の変化には2段階あり、急減するものと、漸減するものの組み合わせで表現されていた。しかし1次元モデルでは正確に状況を予測できない。距離だけではなく、土壌とのやりとりにより濃度が増加する。RODOSではシンプルなモデル(ボックスモデル)から複雑なモデルまで扱っている。

(問) 複雑なモデルは地形や物質の存在形態などを考慮して水文・水質を精緻に再現できるという強みはあるが、一方で不確実性がある。それらのバランスをとることが必要ではないか。

(答) 実際的な予測にはシンプルなモデルの方が優れている。チェルノブイリ事故時はシンプルなモデルが主であったが、その後MIKEシリーズなどが商用パッケージとして販売されるなど、現在では複雑なモデルも主流になってきている。分布型モデルは土壌浸食や流量などを考慮することが可能という点で優れている。データが十分にある場合はそうしたモデルの適用がふさわしい。状況や目的に応じた使い分けが重要である。

(問) K_d は物質ごとに固有の値がある。しかしさまざまなサイトで溶存態・懸濁態成分を測れば、場所により異なる K_d が得られる。その現象を再現するために交換可能態と交換不可能態という概念を導入したという理解でよいか。

(答) その通りである。

(問) 交換可能態(exchangeable)の定義を教えてください。

(答) 底泥中の放射性物質のことを指しており、交換可能態であれば底泥から水中溶存態に溶出する。

b 放射性物質のモニタリングについて

(問) Zheleznyak氏はチェルノブイリ事故以降、継続してモニタリングを実施している。福島では今後どのようにモニタリングを実施していけばよいのかが課題となっている。

(答) モデル構築のチームには、モニタリングを行う機関のバックアップが必要不可欠である。気象・水文観測データは国や機関により分割されている。私たちのプロジェクトもデータを統合するところから始めた。事故後の観測値の経緯を把握すると、 Cs は河川でも溶存態は急速に減少するが、 Sr は Cs に比べて水中で高い濃度を維持することが分かった。海洋への影響を軽減するためには、ホットスポットに着目することが必要である。そのモニタリングはその地域に応じた分析が必要である。

c 今後の研究・対策の方向性について

(問) 海洋への影響を見るには、微粒子に吸着した放射性物質のfateの研究に注力すべきではないか。

(答) 場所により影響は様々であるが、福島でも海洋では底泥に多くが沈着していることが分かっている。もし海洋への影響を軽減したいのであれば、沿岸部に輸送される土壌を少なくすることが必要である。化学物質が専門のチームとも連携して研究を進めている。1996年に気象条件(河川流量)を変えた長期河川水質とそれによる人体への影響予測を行った。

(問) 流量が多ければ多量の放射性物質が下流へ流れるが、一方で少なければその場に堆積したままである。つまり条件によらず、総量で見れば同じであるということか。

(答) 河川システムに移行するか、底泥のシステムに残ったままかということである。

4) (独) 放射線医学総合研究所 (内田滋夫特別上席研究員)

a 市街地関連の文献について

市街地における文献は少ないが、IAEAのレポートが充実しているので検討して頂きたい。

とくに、IAEA-TECDOC-1678「Environmental Modelling for Radiation Safety (EMRAS)—A Summary Report of the Results of the EMRAS Programme (2003-2007)」Theme_2のWG2のレポートと付属の資料がUrban 関係を対象としているので参考にされたい。

5) 環境科学技術研究所

a 放射性物質動態モデルの文献検索について

環境科学技術研究所で構築しているモデルについても、Monte氏やホーカンソン氏らの文献を中心に参考にしている。モデルの文献レビューであれば、それらがやはり参考になる。モデルで重要となる分配係数Kdや濃縮係数については、IAEA Technical Reports Series No.472にまとめられている。「環境パラメータ・シリーズ」という文献に国内のKdもまとめられている。ただしKdは開きが大きく、モデルの感度も高いため、使用には注意が必要である。樹木がカリウムのかわりにCsを取り入れることについては、カリウムの代わりにCsというよりも、カリウムと一緒にCsを取り込むと考えるのが一般的である。選択的にCsを取り入れるということはキノコ以外ではあまりないと思われる。腐植したリターをまず吸収するのが地衣類であり、キノコへの影響は大きい。内部被曝などの検討のときには考慮が必要だが、物質の移行という面では考慮の必要はないのではないか。

b 環境科学技術研究所で構築してきたモデルについて

i 湖内におけるシミュレーション

日本原燃のサイクル施設から、微量の放射性物質が大気や海洋に放出されている。大気への放出のメインはクリプトン(希ガス)、海洋へはトリチウムである。双方、ごく微量のCsも含まれている。したがって、トリチウム、カーボン、ヨウ素、Csが解析対象のメインとなっている。尾駱沼を対象としてモデル化を行った。汽水域のモデルであり、塩分濃度が高く、内湾的魚種が多い。プロジェクトとしては終了している。放射性物質を対象としたモデルは、コンパートメントモデルが主である。IAEAのBIOMOVS(バイオムーブス)というプロジェクトで活発に検討された。VAMP, AQUASCOPE, MORIAなどが代表的なモデルである。一方で本研究のOBUCHIはハイドロダイナミックなモデルである。塩分躍層があるため、密度層が考慮できる多層レベルモデルを構築。湖内水平50mメッシュ、鉛直0.5~1mごとに7層に分割している。計算結果の検証について。塩分濃度については、計算の方が少ない傾向にあった。流動もスパイク的なものは再現できていない。しかしモデルの目的は中長期の予測なので、これで進めている。一次生産量については、春と秋の2山のブルームが観測されているが、水温が低くて春先のブルームが表現できていない。プランクトン種をケイソウだけにしているためと考えている。137Csも解析している(核実験フォールアウトが主)。福島事故の前は、湖水中のCs濃度は塩分濃度と正の相関があった。Csは淡水よりも海水に溶けやすく、淡水だと懸濁化して除去される一方、海水だといったん落ちたものが再び溶け出すためである。生物における放射性物質濃度は、モデルから現存量を算出し、濃縮係数(CF)で計算している。放射性壊変は考慮している。湖水中のCs濃度は、塩分濃度があえばよく合う。しかし湖内底泥中の鉛直プロファイルについてはなかなか合わない。気象研が観測して

いる降下物のプロファイルデータに直結する計算となっており、集水域の影響を考慮していないためと考えられる。そこで流域モデルの必要性が検討された。新しい尾駱沼モデルでは、集水域と湖水と海域をカップリングしたモデルとしている。海水より淡水の方がCFは10~100倍くらい高い。生物における放射性物質濃度を推定する方法としては、CFと動的手法の双方あるが、濃縮係数の方法がよく使われる。動的手法は、継続的な放出の予測に有効である。

ii 陸域におけるシミュレーション

尾駱沼への流入河川は1つであり、そこを対象とした流域モデルづくりを行っている。ベースはSWATである。水の流れはサブ流域ごとに計算し、土壌流出量についてはHRU (Hydrologic Response Unit) に基づくメッシュごとに計算する。ただしSWATは地下水をあまり考慮していないため、地下水のモデルを新たに加えている。Cs流出の推定には表面流出の寄与を正確に予測することが重要である。そこで同位体比の調査を行っている。降水と河川水の酸素同位体比の違いを利用してCN (Curve Number) のパラメーターに活用している。その結果を活用してモデルを改善したが、粒子負荷は実測の3倍程度になってしまっている。湖底堆積物の鉛直プロファイルは、計算上は高く見積もられる。堆積速度や表層土壌からの流出なども考慮したが、なかなか合わせ切れていない。溶出も考えられていない。一方でトリチウムは水の流れだけで決まるのでうまく合わせられている。

6) 京都大学 (米田 稔教授)

a 大気中核実験によりフォールアウトした放射性物質の動態について

1960~70年代に、京都大学の井上頼輝元教授らを中心に土壌中の挙動解明を目的とした多数の研究が実施されている。主に、帯水層、通気層中の動態を把握するための実験的検討がなされたもので、環境中の動態を直接研究したものではない。放射性廃棄物の地中処分の評価などの研究も行っており、土壌・地中での移行についてはかなり整理されている。例えば、「井上ら(1975), 放射性核種の土壌と水との分配係数値, 日本原子力学会誌」などがある。また、環境中の調査と予測に関する文献として「森澤眞輔, 井上ら(1983), フォールアウトSr-90の成層通気層内移動とその分布の予測, 日本原子力学会誌」, 「放射性物質による陸圏の汚染と線量推定の諸問題 報文集, NIRS-M-31, 放射線医学総合研究所, 1979, <http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/02.shtml>」が参考になるものと思われた。この他、放射線医学総合研究所が長期にわたるモニタリングデータを公表している。<http://www.nirs.go.jp/rd/db/index.shtml>, 1990年代に原子力環境整備センター(現:原子力環境整備促進・資金管理センター)から出版されている「環境パラメータ・シリーズ」に、日本および諸外国の土壌種別の分配係数, 農作物や淡水生物・海洋生物への移行係数・濃縮係数が整理されている。ホームページにも公開されている。恩田先生の書籍「人工林荒廃と水・土砂流出の実態, 2008」, 「水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—, 1996」にも大気中核実験を起源とした放射性物質の森林土壌中の深度分布, および, 土壌浸食による流出量推定, 起源推定などの方法や結果が紹介されている。広島・長崎の原爆フォールアウトの再評価に関する文献などもある。動態モデルも含め摂南大学の島田洋子准教授が詳しい。

b 森林環境中の動態について

森林域の放射性物質動態とそのモデル化について、「W.R.Schell *et al* (1996), A Dynamic model for evaluating radionuclide distribution in forests from nuclear accidents, Health Physics, vol.70, No.3, pp.318-335」, 書籍「I. Linkov and W. R. Schell (1999), Contaminated Forest」

をはじめいくつかの文献がある。この本の56-57ページに、チェルノブイリ事故後の、針葉樹および混合林における表面流出による放射性物質の流去率が斜面傾斜別に示されており、事故後3年ほどを経過したところでピークおよび平衡状態をむかえることが示されている。このことは林冠部に沈着した放射性物質は数年以上をかけて林床に落ちてくることを示唆していると思われる。山林部の除染方法を検討するための重要な知見と思われる。土壌中の挙動を予測するため、岩手大学の颯田先生などと協力して、岩手県の森林域、京都市吉田山などのフィールドで調査を行っている。134Csと137Csを測定すれば、福島の影響と大気中核実験の影響を分離できる。大気中核実験の頃のフォールアウトは岩手では表層下5-8cmにピーク、吉田山では10cm以深にピークが残っている。有機層、降雨・降雪、地形の違いが影響していると思われるがはっきりしたことはわからない。これらの調査結果をもとに、土壌中の挙動を予測するモデルを開発しているところである。モデルでざっと計算したところ、50年前のフォールアウトについては、ほとんど流出せずに土壌に残ると仮定しても、下層への移行と地中深度分布をほぼ再現できた。ただし、大気中核実験によるフォールアウト量の評価自体が正確とは言えないので結果の解釈には注意が必要である。

c 水環境中の動態，モデリングについて

土壌に収着した後のCsは土壌、粘土粒子への分配が高いので、一般に水とともに移動するのは粘土粒子とともにと考えられる。ざっくりと土砂流出を扱うモデルではなく、土壌や地形条件別に粘土粒子成分の流出を評価するような調査研究とモデリングが必要と思われる。貯水池やため池などに堆積していけるだろうが、人が近づいて常時利用するようなところでなければ被爆線量としては問題になりにくいのではないかと。ただし、泥上げ・浚渫、排砂などを実施する段階では大きな問題となる可能性がある。堆積量の評価と、対策の検討をしておく必要がある。底質中と土壌中とでは放射性物質の挙動は異なっているだろうと思う。底質における分配係数などについても知見整理しておくといよい。人への暴露という観点からは生態系を含め評価し、生物への移行・濃縮を評価することが重要である。粘土粒子とともにCsが取り込まれるのかどうか、取り込まれたCsはどの部位に濃縮されているかなどの調査が重要となると思われる。

d 動態全般について

IAEAのTecDocやIAEAが2006年に出した「Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience」という報告書も重要であり、¹³⁷Csや⁹⁰Srなどのaquatic systemsにおける動態に関する研究もサーベイされている。下水汚泥中のシリカ量に着目している。土壌粒子由来のものがどの程度入ってきているのかざっくりと評価する基準と成り得るかもしれない。

e モニタリング，除染について

環境動態モデルなどを用いて空間分布やクリティカルパスを把握したうえで集中的に監視を行うべきであろう。被爆線量やリスクを勘案したうえでモニタリングポイントやモニタリング方法を判断すべきと思う。例えば、フォールアウト後、年数が経過するにつれてモニタリングポストによるγ線空間線量の測定値が、航空機から測定した場合の値に比べて減少速度が大きいことがある。放射性物質が地面下に移行していくにつれ、土壌によってγ線が遮られ線量が減少するのだが、低い位置で測定しているモニタリングポストの方が遮られる割合が増えやすい（モニタリングポストから遠い地点になるほど、モニタリングポスト方向への土壌厚が大きくなる。そのため少し地下に移行するだけでも届かなくなる。航空機の場合は地面から垂直に飛んでくる成分を測定し

ているので、少々地下に移行したくらいでは減少しない)。このことは、被曝線量と環境中（土壌中）物質量は対応しないことを示しており、測定法の違いも念頭において評価せねばならないことを示している。土壌（環境）中の物質量を評価するために、地下何cmまでの土壌で評価することも重要な要素となり得る。地下への移行に伴い生活者の被曝線量は減少しているのに、深いところまでの物質量で評価していると土壌（環境）中濃度は減少しないという齟齬が起こる。除染については、現時点の空間線量の基準だけで行うのではなく、目標時期を定めることが重要だと思われる。2年後とおくのか5年後とおくのかで全然違ってくる可能性もある。環境中の動態や環境半減期を考慮したうえで、目標時期における線量を基準に除染方法や除染範囲を検討する必要がある。

7) 国立保健医療科学院

環境中に放出された放射性物質は水道施設にとっても重要な監視項目である。浄水処理過程における放射性物質の挙動について、国立保健医療科学院においてヒヤリングを行い、放射性物質の浄水処理による除去性に関する情報を提供いただいた。浄水処理において、粒子に吸着された懸濁態の放射性セシウムは凝集沈殿処理により大半が除去可能であるが、溶存態のものはほとんど除去されないことが指摘されている。

(2) 文献検索による情報の収集と整理

各分野の検索方法の詳細は以下の通りである。

1) 土壌

『Scirus』を用いて検索を行い、「放射性セシウム」、「農地」、「吸着」の組み合わせで得られた検索結果約14,000,000件の文献の中から土壌に関連性の高い文献を抽出し、さらに国内での調査結果が報告されている文献の中から代表的なものを抽出できた。

2) 森林

検索は『Scopus』および『Web of Knowledge』を用いて実施した。「対象物質」として“cesium-137”、“caesium-137”を、「対象場」として“forest”のキーワードを用いて検索を行った。また『J-DreamII』においても検索を実施し、「セシウム群」、「森林」、「吸着」、「移動」、「流出」のそれぞれに関するキーワードを用いて行った。以上の結果から、重複分を除いたのち重要な知見が示されていると考えられる文献をいくつか選択し、精読した上で内容の整理を行った。

その結果本研究推進費のアドバイザーから推薦頂いた文献を除き、被引用回数が多い文献20件を抽出することができた。なお、アドバイザーから放射性物質の動態に関する文献を多く紹介して頂き、その中から森林における放射性核種の挙動に関連する文献をかつ本調査の目的に見合うものを選抜し、計27件を対象とした。

3) 農地

検索には『Scirus』を用いて、放射性セシウムの農地での動態に関する文献を検索した。「対象物質」として“Cs”を、「対象場」として「農地」に関連する“Farm”、“Dry field”、“Paddy”、“Agriculture”を、「現象」として「流出」に関する“Runoff”、“Discharge”、“Leaching”、さらに「吸着」として“Sorption”、「移動」として“Migration”、“Transport”、“Transfer”、“Fate”をキーワードとして文献検索を行った。これらのキー

ワードを組み合わせ検索したところ、「放射性セシウム」、「農地」、「流出」のキーワードの組み合わせで約14,000,000件、「放射性セシウム」、「農地」、「吸収着」の組み合わせで約14,000,000件、「放射性セシウム」、「農地」、「移動」の組み合わせで約23,000,000件が検出された。これらの中には引用文献にキーワードが含まれているだけなど、実際には関連性が低いものが含まれたため、他の文献での引用回数が多いものや水田に関するものを中心に29の文献を抽出した。

4) 市街地

文献検索の方法は、国際学会誌のデータベース『Web of knowledge』を対象として、キーワード検索、検索対象文献のabstract等を確認し精読対象を定めることとした。

検索に用いたキーワードは、「対象物質」として「セシウム」に関する“cesium”、“caesium”、“Cs”、を選び、また「対象場」として「都市」、「道路」に関する“urban”、“runoff”、“road”を選び、さらに「放射性核種」として“radioactive”または“radionuclides”を用いて検索を実施した。

その結果、127件の文献が得られた。これらの主な発表国は、USA: 26件、日本: 12件、ロシア: 13件、ヨーロッパ諸国(6ヶ国合計60件)であった。また、主要な学術雑誌は、J. Environ. Radioactivity: 25件、Health Pys.: 9件、Hydrological Processes: 5件、Radiation Protection Dosimetry: 4件、Geomorphology: 3件などである。

検索対象として抽出した127件中のうち、タイトル、アブストラクトを元に都市への沈積、流出実態が具体的に記載されていると思われる文献を絞り込み精読対象として36件を選択した。今回検索結果では文献の発表年度に特に偏りはなかった。主たる論文誌にも特に傾向は見られなかった(J. Environ. Radioactivity: 13件、Health Pys.: 3件など)。

また、『J-stage』による日本語論文の検索も実施した。査読付の論文を対象とした上で、「対象物質」として、「セシウム」または「放射性」、「対象場」として「都市」または「地表面」、さらに「現象」として「流出」をキーワードにして検索した結果、377件の文献が得られた。そのうち、日本水環境学会誌とJournal of Computer Chemistry, Japanの論文2件の抄録作成することとした。また、国交省の下水道における放射性物質対策に関する検討会、および厚生労働省の水道水における放射性物質対策検討会における中間とりまとめに記載されている、市街地における放射性物質の挙動に関連する部分についても、別途整理した。

5) 河川環境

『Web of Science』、『Science Direct』、『INIS』を用いて初期検索を行った。

“Cs-137”と“river”、“catchment”など関連キーワードを組み合わせ検索の結果、対象論文は400~3000と検出された(範囲は、組み合わせるキーワードの違いによる)。検索結果が多数となり、これらの概要を把握するのは難しいため、この分野において引用回数の多い論文、さらに加えて総合的なレビュー論文や報告を、最新の論文等から定めることで、文献を抽出した。

6) 河川流出

『Science Direct』を用いて、“Cs-137”と“river”、“discharge”、“sediment”、“sorption”というキーワードを組み合わせ検索を行った結果、対象論文数はキーワードの組み合わせにより1000~4000となった。そのため、セシウム137の「放射能濃度の時系列変動」、「存在形態」、「再移動」、「収着形態」の4つの項目に整理し、チェルノブイリ事故ではヨーロッ

パを対象に実施された調査に関する論文、福島事故を考える基礎的情報として日本の河川の論文、さらにはアメリカの放射能汚染地域の調査等を考慮して代表的な論文を抽出した。

7) 流域モデル

『Science Direct』において、「対象物質」として「セシウム」(” Cs”、” cesium”、” caesium”)、
「対象場」として「流域・河川・湖沼」(” catchment”、” watershed”、” basin”、” waterbody”、
” river”、” stream”、” channel”、” lake”、” pond”)、
「現象」として「流出・移動」(” runoff”、” discharge”、” leaching”、” migration”、” transport”、” fate”)を選定し、
「対象物質」・「対象場」・「現象」に係る全てのワードが含まれる文献について検索を行った。
その結果、文献が126件得られた。またその他、アドバイザーボード会議や専門家ヒヤリング等
で得られた情報から、放射性物質の動態モデルとして特に重要と考えられた文献13編を抽出し、
これらを合わせた139文献の中から、アブストラクトや本文を参照の上で最終的に10文献を抽出し、
レビューの対象とした。

以上の結果、国内外の文献として46の学術雑誌等から125編が抽出され、レビューを行った上で、
それぞれの文献の基本情報と内容等が含まれるデータシートを作成した。最終的に抽出された文
献の出典とそれぞれの文献数を表(1)-1に示す。

収集できた文献の情報一覧リストの例を表(1)-2に示す。抽出した文献については、文献の基本
情報として、区分、タイトル(英文)、タイトル(和文)、キーワード、著者、出典(学術雑誌
名等)、対象地域、重要な図表、また、提言につながる情報として、モニタリングへの活用、流
出挙動・経路、除染の際の留意点、担当者のコメントを含む共通フォーマットに従って文献レビ
ューを行った。

表(1)-1 抽出できた出典雑誌ごとの文献数

出典No.	雑誌名	対象論文数
1	Analyst	1
2	Applied Geochemistry	4
3	Applied Radiation and Isotopes	3
4	Atmospheric Chemistry and Physics	1
5	Atmospheric Environment	1
6	CATENA	1
7	Clays and Clay Minerals	1
8	Ecological Modelling	3
9	Environment International	1
10	Environmental Pollution	1
11	Environmental Science & Technology	3
12	Estuaries	1
13	Geochimica et Cosmochimica Acta	2
14	Geochronometria	1
15	Geophysical Research Letters	1
16	Health Physics	1
17	Hydrological Processes	1
18	ISTC* Report	1
19	J. Contaminant Hydrol.	1
20	J. Radioanal. Nucl. Chem,	1
21	Journal of Environmental Quality	2
22	Journal of Environmental Radioactivity	44
23	Journal of Geophysical Research	1
24	Journal of Hydrology	1
25	Journal of Nuclear Science and Technology	3
26	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	2
27	Lieve Sweek	1
28	Nuclear Technology	1
29	Nuclear Technology	1
30	Organic Geochemistry	1
31	Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology	1
32	Physics and Chemistry of the Earth (A)	1
33	Radiation and Environmental Biophysics	3
34	Radiation Protection Dosimetry	2
35	Radioisotopes	1
36	Radiological Assessment Reports Series 7, STI/PUB/1230	1
37	Science of The Total Environment	18
38	Soil & Tillage Research	1
39	Springerreference, http://www.springerreference.com/docs/html/chapterdbid/226395.html	1
40	Water Research	1
41	Water, Air, and Soil Pollution	3
42	土木学会論文報告集	1
43	日本原子力学会誌	1
44	日本水環境学会誌	1
45	水道協会雑誌	1
46	土と基礎	1
計		125

表(1)-2 収集できた文献の情報一覧リストの例

分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年
市街地	Seleznev, A.A., Yarmoshenko, IV, Ekin, AA	Accumulation of Cs-137 in puddle sediments within urban ecosystem	Journal of Environmental Radioactivity	101	8	643-646	2010
	提言につながる情報	ロシア中ウラル地方におけるCs-137降下量をデータ収集により経年変化を推定。雨水のたまりやすい(降雨の度に水たまりができる)場所の土壌中には放射性物質が蓄積されやすいことを水たまり底泥中の溶存濃度をモデル式で示し、大気降水量との寄与率を推定した。すなわち、大気降下物として降下したCs-137は雨水に溶け出し水たまりへと流入し底泥中に蓄積されていく。					
農地	Shinonaga T., Schimmack W. and Gerzabe M.H.	Vertical migration of ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs and ²²⁶ Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation.	Journal of environmental radioactivity	79	2	93-106	2005
	提言につながる情報	オーストリアでの輪作下のライシメーターにおける農地土壌中の ⁶⁰ Co、 ¹³⁷ Cs、 ²²⁶ Raの垂直分布の調査。未かく乱土壌と同様に、かく乱土壌においても ¹³⁷ Csの移動速度は非常に小さいことが示されている。					
森林	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, and Takashi Gomi	Interception of the Fukushima reactor accident-derived ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I by coniferous forest canopies	Geophysical Research Letters	39		L20403	2012
	提言につながる情報	栃木県(福島第一原発から南西へ150km離れた場所)のヒノキ林(40年生、2,500本/ha)とスギ林(41年生、1,300本/ha)に設定された斜面プロット(傾斜>30度)での研究例である。原発事故から約6カ月経過した時点にあっても針葉樹キャノピーによって多くの放射性セシウム(>60%)が保持されていることが示されている。一般に、森林流域からの汚濁負荷対策を検討する場合、流域でのインプットとアウトプットを把握するだけでは、汚濁負荷を左右する場(例えば、植生、土壌、地質)を特定できないため、問題解決のために効果的な対策が打てない。本研究の結果はこの点を再認識させるとともに、今後の森林政策や除染にとって流域内部での放射性セシウムの挙動を調べることの重要性が理解できる。放射性セシウムの今後の挙動、例えば樹体内への移動と蓄積、あるいは落葉・落枝としての林床への移動を評価することの重要性も本研究から理解できる。					
土壌	Almgren S., Isaksson M.	Vertical migration studies of ¹³⁷ Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident	Journal of Environmental Radioactivity	91	1-2	90-102	2006
	提言につながる情報	スウェーデン西部の33地点を対象として、核実験によるフォールアウトおよびチェルノブイル事故に起因する ¹³⁷ Csの表層土壌中の深度分布から、 ¹³⁷ Csの浸透速度、分散係数を測定した。その結果、浸透速度は0~0.35cm/y、0.06~2.63cm/yとなった。測定点の多さから、パラメータの変動範囲が明らかになった。					
河川	U. Sansone M. Belli, O.V. Voitsekovitch, V.V. Kanivets	Cs-137 and Sr-90 in water and suspended particulate matter of the Dnieper River reservoirs system (Ukraine)	Science of The Total Environment	186	3	257-271	1996
	提言につながる情報	チェルノブイル事故地域の河川(プリピャチ川)から、約500km下流の黒海までの経路。定期的・長期的モニタリングの成果が現れた報告であり、モニタリングの重要性が認識できる。内部被ばくを含めた被ばく経路解析の下で、対策の優先度を考える必要がある。					
河川	T.Matsunaga, H.Amano, N.Yanase	Discharge of dissolved and particulate ¹³⁷ Cs in the Kuji River, Japan	Applied Geochemistry	6	2	159-167	1991
	提言につながる情報	久慈川において1987-1988年に観測を行い、放射性セシウムの流出挙動を検討し、モデルによる放射性セシウムの移行動態解析に必要なデータが報告された。・粒子態放射性セシウムの存在割合 高水量期>低水量期、・粒子態放射性セシウムの含有量は灰化減量と正の相関性有り(有機物との親和性を示唆)。・分配係数 $1.0 \pm 0.6 \times 10^5$ ml/g、・1987, 1988年の放射性セシウム流出量 蓄積量の0.04%/y(壊変補正済み)					
モデル	Luigi Monte, John E. Brittain, Lars Håkanson, Jim T. Smith, Marcel van der Perk	Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides from catchments	Journal of Environmental Radioactivity	75	1	83-103	2004
	提言につながる情報	集水域における放射性核種の挙動を予測するモデルを広範にレビューした論文である。集水域から流入する放射性物質のフラックスは、指数関数の組み合わせで記述される。すなわち、流出の早さに応じて分類し、それを足し合わせることで、経時的なフラックス(あるいは濃度)を理解することができる。一方、現象を詳細に記述する物理的なモデルについては、未知パラメータが多くなり必ずしも正確な予測ができるわけではない等の理由から本論文では批判的である。					

(3) 収集した文献リストおよび作成した文献レビュー (抜粋)

1) 文献リスト

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
1	土壌	福井正美, 桂山幸典	飽和砂層内におけるCsおよびSrイオンの吸着モデルに関する研究	土木学会論文報告集		254	37-48	1976	Cs-137の吸着試験をバッチ法と飽和カラム法によって実施した。その結果、Cs吸着には、イオン交換反応に基づく速い表面吸着と細孔内部への拡散・吸着の2つの機構があることが推定された。このモデルによって破過曲線のテーリング部分をうまく説明できた。本論文によって、国内ではじめての2段階吸着機構が提案された。しかし、モデルがあまりに複雑なため、本モデルはあまり活用されていない。	室内試験
2	土壌	Bachhuber H., Bunzl K., Schimmack W., Gans I.	The migration of ¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr in multilayered soils: Results from batch, column, and fallout investigation	Nuclear Technology		59	291-301	1982	3つの異なる方法で表層土壌の分配係数を測定した。一つ目は10 gの土壌と25 cm ³ のCs-137溶液とを混合したバッチ法、二つ目は直径30 cm、長さ1 mの不攪乱土壌を充填したカラムにCs-137溶液を滴下するカラム法、三つ目は過去の降水水中のCs-137の濃度変化とフィールドで採取した土壌中のフォールアウトCs-137の鉛直分布とを比較する方法である。その結果、カラム試験で得られた分配係数がフィールド観測結果とおおむね一致した。種々の異なる方法で分配係数を測定した例として意義があると考えられる。	ドイツゴアレーベン
3	土壌	五十嵐敏文, 馬原保典, 河西基, 藤原靖, 今村聡, 下茂道人	不飽和ローム層中の物質移行に関するフィールド試験, (II)自然降雨条件下の吸着性トレーサの降下浸透特性	日本原子力学会誌	33	2	180-193	1991	非放射性Csを用いた実フィールドでの降下浸透特性を調査した論文であり、放射性Csと比較して濃度は高いが、そのような条件でも分配係数が0.005-0.03 m ³ /kg程度に相当する遅延現象が認められ、主な吸着機構がローム層中の主要交換性イオンであるCaなどのイオン交換反応であることを指摘している。また、吸着された固相中のCsを水抽出、アンモニウムイオン交換態、アンモニウムイオン非交換態に区分して調査していることにも特徴がある。	千葉県内の不飽和関東ローム層
4	土壌	Ogawa H, Takebe S., Yamamoto T.	Evaluation of migration of cesium-137 adsorbed on fine soil particles through natural aerated soil layer	Journal of Nuclear Science and Technology	28	3	248-254	1991	不攪乱で採取した不飽和土を直径30 cm、長さ120 cmの塩ビ製の大型カラムに充填し、カラム試験を実施し、ろ過定数を評価した。ろ過定数は平均粒径に依存し、流入Csの0.15~6.5%がコロイド態として移動した。大型カラム試験でしか取得できないデータであることに意義がある。	東海村および六ヶ所村の不飽和土
5	土壌	Cornell R.M.	Adsorption of cesium on minerals: A review	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	171	2	483-500	1993	粘土によるCs吸着に関する有名なレビューペーパーである。既往文献を整理し、種々の粘土鉱物に対する陽イオン交換容量、比表面積、分配係数、pHを整理するとともに、分配係数やイオン交換選択係数のCs濃度やpHなどの依存性を整理している。主要吸着機構がイオン交換反応とし、異なるイオン間での選択係数やその自由エネルギーについて考察している。	レビューペーパー
6	土壌	Mahara Y.	Storage and migration of fallout strontium-90 and cesium-137 for over 40 years in the subsurface soil of Nagasaki	Journal of Environmental Quality	22	4	722-730	1993	長崎に投下されたプルトニウム型原爆の影響に関して40年後の不飽和土壌層中でのSr-90, Cs-137の鉛直分布を測定し、Cs-137の浸透速度が1 mm/yとなり、分配係数が1.2 m ³ /kgとなることを評価した。本結果は、長期にわたる現地での実測値であることに意義がある。また、同時に測定しているSr-90, Pu-239+Pu-240とも比較されている。	長崎県西山地区の土壌
7	土壌	Campbell L.S., Davies B.E.	Soil sorption of caesium modelled by the Langmuir and Freundlich isotherm equations	Applied Geochemistry	10	6	715-723	1995	英国内の表層土壌を対象として、非放射性のCsを用いた吸着実験を実施した。対象試料は、有機物含有量やpHが異なっている。その結果、吸着等温式としてLangmuirとFreundlichの両式とも適用できることがわかった。また、粘土や黒雲母の含有量とともに、吸着量が増加した。英国土壌の全般の吸着データが取得されていることに意義がある。	英国内の多数の表層土壌
8	土壌	Tanaka T., Ohnuki T.	Colloidal migration behavior of radionuclides sorbed on mobile fine soil particles through a sand layer	Journal of Nuclear Science and Technology	33	1	62-68	1996	径が5μm以下の微細粒子に吸着した放射性の ⁶⁰ Co, ⁸⁵ Sr, ¹³⁷ Csを異なる充填厚さのカラムに通水し、移行挙動を評価した。その結果、明瞭な破過は認められず、充填厚さとともに流出する放射エネルギーは減少することがわかった。 ¹³⁷ Csの流出量は流入量の80%に達し、微細粒子に吸着したコロイド態で移動することがわかった。	東海村の砂質土

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
9	土壌	Bostick B. C., Vairavamurthy M. A., Karthikeyan K. G., Chorover J.	Cesium adsorption on clay minerals: An EXAFS spectroscopic investigation	Environmental Science and Technology	36	12	2670-2676	2002	粘土鉱物へのCs吸着機構を明確化するために、安定Csを大量に吸着させた条件下でXAS(X線吸収分光法)とEXAFS(広域X線吸収微細構造分光法)によってCs-Oの距離を測定し、Csによる表面被覆率とともに、内圏錯体と外圏錯体との比率の変化を評価した。内圏錯体は層間あるいは端面で脱水して吸着していると推定された。最新の分析技術によってCsの吸着対象の元素やその部位を推定したことに意義がある。	ワイオミング産モンモリロナイト、シルバーヒル産イライト、市販のバークキュライトを使用
10	土壌	Staunton S., Dumat C., Zsolnay. A.	Possible role of organic matter in radiocaesium adsorption in soils	Journal of Environmental Radioactivity	58	2-3	163-173	2002	放射性Csの粘土鉱物への吸着に及ぼす有機物の影響に関するレビューペーパーである。Csでさえも、土壌有機物の共存によって分配係数が約1オーダー低下することが示されるとともに、有機物の除去によってCsの分配係数が上昇することが示されている。	レビューペーパー
11	土壌	Zachara J.M., Smith S.C., Liu C., McKinley J.P., Serne R. J., Gassman P.L.	Sorption of Cs+ to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA	Geochimica et Cosmochimica Acta	66	2	193-211	2002	広範なCs濃度領域(10 ⁻⁹ ~10 ⁻² mol/L)で吸着試験を実施した。その結果から、鉱物端面への吸着が主に作用し、親和性を2つに分けた2サイトイオン交換モデルが実験結果を表現できた。親和性が強いサイトは、黒雲母の楔状の部分に相当し、親和性が弱いサイトは膨潤性粘土の平地部に相当すると解釈された。広範な濃度領域に適用できる吸着モデルとして有用と考えられる。	米国ワシントン州Hanfordサイトの更新統洪水堆積物を対象
12	土壌	Almgren S., Isaksson M.	Vertical migration studies of 137 Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident	Journal of Environmental Radioactivity	91	1-2	90-102	2006	スウェーデン西部の33地点を対象として、核実験によるフォールアウトおよびチェルノブイル事故に起因する137Csの表層土壌中での深度分布から、137Csの浸透速度、分散係数を測定した。その結果、浸透速度は0~0.35cm/y、0.06~2.63cm ² /yとなった。測定点の多さから、パラメータの変動範囲が明らかになった。	スウェーデン西部の33地点の表層土壌
13	土壌	Chiang P.N., Wang M.K., Huang P.M., Wang J.J., Chiu C.Y.	Cesium and strontium sorption by selected tropical and subtropical soils around nuclear facilities	Journal of Environmental Radioactivity	101	6	472-481	2010	非放射性のCsやSr、放射性137Csを用いてバッチ吸着試験を実施し、ラングミュア吸着等温線を作成した。飽和吸着量はピロリン酸で溶出する鉄の量と対応した。また、吸着速度は濃度に関する二次反応式で表現され、水温をパラメータとした試験結果から活性化エネルギーを算出した。これらの値から、吸着速度は拡散律速であると推定された。亜熱帯地域の土壌の吸着データとして意義がある。	台湾の原子力発電所および放射性廃棄物貯蔵施設周辺の熱帯性および亜熱帯性の土壌
14	土壌	Kozai N., Ohnuki T., Arisaka M., Watanabe M., Sakamoto F., Yasmasaki S., Jiang M.	Chemical states of fallout radioactive Cs in the soils deposited at Fukushima Daiichi nuclear power plant accident	Journal of Nuclear Science and Technology	49	5	473-478	2012	福島第一原発事故後の飯館村における表土のCs吸着の実態を速報として紹介している。65%以上のCsは塩化アンモニウムや酢酸で抽出されない形態で保持されており、70%以上のCsは水ひ分以上の粒子に保持されていた。水ひ懸濁成分は黒雲母様鉱物であった。福島県の実データであることに意義がある。	福島第一原発事故後の福島県飯館村の表土
15	森林	Dorr, H., Munnich, K.O.	Lead and cesium transport in European forest soils	Water, Air, and Soil Pollution	57-58		809-818	1991	ベルギー東部(主に、Ardenne地方のLe Grand Bois de Vielsalm)のoakとspruceの森林において、降水と樹木の ¹³⁷ Csとカリウムを調査したところ、両者には良い相関関係が認められ、カリウムが137Csの挙動の良い指標になること、事故後4年で汚染樹木と ¹³⁷ Csには短期の平衡状態に達しており、主に林内雨を通して土壌に輸送されているように思われる。	

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
16	森林	Ronneau, C., Sombre, L., Myttenaere, C., Andre, P., Vanhouche, M., Cara, J.	Radiocaesium and potassium behaviour in forest trees	Journal of Environmental Radioactivity	14	3	259-268	1991	ベルギー東部(主に、Ardenne地方のLe Grand Bois de Vielsalm)の森林地域において、チェルノブイリ事故後にspruceとoakの下で採取された林内雨調査結果は、 ¹³⁷ Csはオークよりもトウヒの葉が高いこと、いずれの新芽はより汚染されていること、トウヒの古葉と枝は同じオーダーであること、放射性セシウムと安定カリウムの両方の沈着fluxの間には良い相関があり、カリウムは汚染された樹木の ¹³⁷ Csの挙動の指標として使われ得ること、事故後の4年間で、短期(1~3年)の平衡は汚染樹木で到達し、放射性セシウムは今日、林内雨を通して主に土壌へ樹木によって移行されていること、が示された。	チェルノブイリ事故直後から3年後の林内雨調査結果
17	森林	De Brouwer, S., Thiry, Y., Myttenaere, C.	Availability and fixation of radiocaesium in a forest brown acid soil	Science of the Total Environment	143		183-191	1994	森林土壌の層別に、酢酸アンモニウム、塩化カルシウムなどでCsを抽出した結果、層によって抽出量が大きく異なった。Csの流出挙動を検討する場合、土壌の層別に検討する必要がある。	室内実験
18	森林	Karavaeva, Ye.N.	Accumulation and distribution of long-living radionuclides in the forest ecosystems of the Kyshtym accident zone	Science of the Total Environment	157		147-151	1994	放射性物質のモニタリングについては、モニタリング地点の除染の有無、植生や周辺情報に十分注意する必要がある。本報告の ⁹⁰ Sr濃度の例によれば、その濃度や分布に大きな違いがみられる。また、周辺状況の違いによって放射性核種の濃度差や挙動に大きな違いが出てくる場合がある。本報告では ⁹⁰ Srと ¹³⁴ Csでは事故の寄与率に大きな差が出ている。	キシュテム核施設事故関連調査
19	森林	Mitchell T. Berg,Larry J. Shuman	A three-dimensional stochastic model of the behavior of radionuclides in forests I. Model structure	Ecological Modelling	83	3	359-372	1995	公開されていないモデルなので実用性には問題があるが、モデルに用いられたパラメータの出典は有用であると考えられる。針葉樹林に ¹³⁷ Csが沈着したとするシナリオでは、放射性セシウムの約14.5%が森林植生内に存在しているという結果になった。ただ、この結果は、確率論モデルのたった一回の計算結果でしかない。	森林の確率論的モデル(植生部分)
20	森林	Mitchell T. Berg,Larry J. Shuman	A three-dimensional stochastic model of the behavior of radionuclides in forests II. Cs-137 behavior in forest soils	Ecological Modelling	83	3	373-386	1995	公開されていないモデルなので実用性には問題があるが、モデルに用いられたパラメータの出典は有用であると考えられる。モデルの結果によれば、降り注いだ放射性物質は、約2年の短い初期遷移期間の後、大部分が森林土壌に存在する。 ・定常状態において活性放射性セシウムの85%が土壌中に存在する。 ・15cm以深には放射性セシウムは移動しないが、これは土壌が深くなると吸着特性が高いこと(=分配係数大)が原因である。	森林の確率論的モデル(土壌部分)
21	森林	Mitchell T. Berg,Larry J. Shuman	A three-dimensional stochastic model of the behavior of radionuclides in forests III. Cs-137 uptake and release by vegetation	Ecological Modelling	83	3	387-404	1995	特定の調査研究対象地域は無く、仮想の実験地と条件で確率論的モデルを用いてシミュレーションをしている。確率論的モデルは分散の恐れがないが、計算の負荷が大きいことが欠点。	森林の確率論的モデル(概要)
22	森林	B.D. Amiro, SC. Sheppard, F.L. Johnston, W.G. Evenden, D.R. Harris	Burning radionuclide question: What happens to iodine, cesium and chlorine in biomass fires?	Science of the Total Environment	187		93-103	1996	Straw, wood, peat, dulse, radishを燃やした結果、燃焼温度によって灰に含まれるI, Cs, Clの量(recovery)が異なることが示された。燃焼温度が高いほど、大気に放出される量が増え、recoveryが減っていた。実験室(マッフル炉内)での計測のみならず、strawとwoodを実際にfieldで燃やすことによりデータを得ている点が重要だと思われる。燃焼温度によって、灰への蓄積と大気への放出の割合が異なる点も、森林火災やガレキ焼却などのことを考えると重要と思われる。	燃焼に伴うCsの変化
23	森林	Ruhm, W., Kammerer, L., Hiersche, L., Wirth, E.	Migration of ¹³⁷ Cs and ¹³⁴ Cs in different forest soil layers	Journal of Environmental Radioactivity	33	1	63-75	1996	放射性セシウムは土壌表層の有機層を比較的速やかに通過し、鉱物層へ達する。	ドイツ森林土壌調査

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
24	森林	Nylen, T., Grip, H.	The origin and dynamics of ¹³⁷ Cs discharge from a coniferous forest catchment	Journal of Hydrology	192		338-354	1997	スウェーデン北部にある50haの針葉樹林地(流域の16%が湿地帯)を対象とした、河川等水中のセシウム ¹³⁷ の流出についてチェルノブイリ事故直後から継続した観測結果が示されている。流出の特性として河川流量との間に正の相関があること、事故で流域に降下したセシウム ¹³⁷ の7±3%のみが表面流出で、1年目の融雪で降水量の6.8%が流出し、その後の8年間では1.8%であり、流出事故直後の流出量が多いこと、初期流出は湿地帯からの流出の寄与が大きいことが示されている。	チェルノブイリ事故直後の1地点での連続モニタリング事例
25	森林	Mamikhin, S.V., Tikhomirov, F.A., Shcheglov, A.I.	Dynamics of ¹³⁷ Cs in the forests of the 30-km zone around the Chernobyl nuclear power plant	Science of the Total Environment	193	3	169-177	1997	ウクライナのチェルノブイリ原子力発電所(CPP)周辺30kmの範囲に存在するいくつかの森林生態系における、 ¹³⁷ Csの挙動についての調査結果であり、地形の湿潤性と土壌タイプは、土壌中での放射性核種の鉛直的な混合速度と放射性セシウムの生物学的な利用率を決めていた。 ¹³⁷ Csの移動は、有機物質に富む粘土鉱物が少ない湿潤地形のhydromorphic soil(水生土壌)で最大となっていることが示された。	
26	森林	Takenaka, C., Onda, Y., Hamajima, Y.	Distribution of cesium-137 in Japanese forest soils: Correlation with the contents of organic carbon	Science of the Total Environment	222	3	193-199	1998	日本の森林土壌における移動を考えるうえでは、日本特有の土壌環境(火山灰土壌の分布が広い、地形が急峻で狭い地域に多様な土壌が分布している、雨が多いなど)を考慮に入れなければならない。外国での研究情報をそのまま日本での ¹³⁷ Csの挙動に適用することには注意が必要であるが、本論文は日本の森林土壌についての知見であるため、データの処理方法など参考になると考えられる。	日本の森林土壌調査
27	森林	Thiessen, K.M., Thorne, M.C., Maul, P.R., Prohl, G., Wheater, H.S.	Modelling radionuclide distribution and transport in the environment	Environmental Pollution	100		151-177	1998	放射性核種の分布と移動の種類を多様に分類し、さまざまなモデルと文献を示している。陸と水中に大きく分類し、さらに陸上では、乾燥堆積物や湿潤堆積物、土壌-水の相関、植物の土壌からの吸収等についてのモデルをまとめている。水中も同様に細かく分類。さらに、放射性廃棄物処理の問題点やモデルの信頼性向上のための研究の歩みについて述べている。	総説
28	森林	Golosov V.N., Panin A.V., Markelov M.V.	Chernobyl ¹³⁷ Cs Redistribution in the Small Basin of the Lokna River, Central Russia	Physics and Chemistry of the Earth (A)	24		881-885	1999	表面流による面状侵食(sheet erosion)によって水平方向の土砂移動が起こると、表層土壌に吸着している放射性セシウムも移動し、その結果谷底に集積していることが示唆されている。土壌中の放射性セシウムをモニタリングする場合、その場所の侵食・堆積特性を把握しておくことは重要と思われる。また、モニタリングの対象とする場において卓越する水の流出経路の違い(表面流、地中流)が、移動する放射性セシウムの量に影響すると思われる。つまり、放射性セシウムの初期(降下直後)の空間分布が同様であったとしても、水の流出経路によってその後の分布が不均質になると思われる。このため、除染の対象となる土壌の深さは場所によって異なるかもしれない。ただし、本論文では、結果に対する詳細な記述や十分な検討がなされておらず、理解しづらい点があった。	緩傾斜である耕地と船底型地形である牧草地谷部での移動: 森林はリファレンスサイトとして調査
29	森林	Copplestone, D., Johnson, M.S., Jones, S.R., Toal, M.E., Jackson, D.	Radionuclide behaviour and transport in a coniferous woodland ecosystem: vegetation, invertebrates and wood mice, Apodemus sylvaticus	Science of the Total Environment	239		95-109	1999	動植物の放射性物質含有量が、食性のみならず季節によっても異なることから、動植物について調査する場合、季節変化についても考慮する必要がある。	英国核燃料再処理工場近隣の針葉樹林地の生態系調査

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
30	森林	Ipatyev, V., Bulavik, I., Baginsky, V., Goncharenko, G., Dvornik, A.	Forest and Chernobyl: Forest ecosystems after the Chernobyl nuclear power plant accident: 1986-1994	Journal of Environmental Radioactivity	42	1	9-38	1999	本論文は、チェルノブイリNPP直後からの放射性各種の影響を、発生地点からの距離と事故発生から時間を追って記録、分析している。森林への影響、昆虫や種子の発芽から調査した遺伝的影響、突然変異の分析(電気泳動法)、より清浄な植物を育てるための方法などが詳しく実用的に述べられている。放射性核種の移動に関するモデルについては、信頼性の高い幾つかのモデルを示している。	ベラルーシの森林でのチェルノブイリ事故影響調査
31	森林	Rafferty, B., Brennan, M., Dawson, D., Dowding, D.	Mechanisms of ¹³⁷ Cs migration in coniferous forest soils	Journal of Environmental Radioactivity	48	2	131-143	2000	アイルランドCounty WaterfordのKnockmealdoun山地の麓のサイト、National Grid Reference S 002 101において、35年生のマツ林で1993年1月～1994年12月にフィールド調査と、葉・土壌からの溶脱の室内実験を実施した。樹冠に捕捉された ¹³⁷ Cs移動の3段階モデルが提案されており、0層(腐植層)と表層0～5cmには高濃度に集積された第3段階では、 ¹³⁷ Csの下層へ溶脱、分解、埋没による移動速度は大きく減少することが示された。	
32	森林	S.V. Fesenko · N.V. Soukhovaa · N.I. Sanzharova, R. Avila, S.I. Spiridonov, D. Klein, E. Lucot, P.M. Badot	Identification of processes governing long-term accumulation of ¹³⁷ Cs by forest trees following the Chernobyl accident	Radiation and Environmental Biophysics	40		105-113	2001	チェルノブイリ事故後10-12年を経過した時点において、樹体内の放射性セシウム濃度は、当年葉、当年枝、根で顕著に高いことが示されている。幹内の濃度分布については、鉛直方向には大きな変動はなく、半径方向には非常に大きな変動があること、また、半径方向の分布は当年輪で最も高く、内側へ向かって対数的に減少することが示されている。このことから、木部での樹液流と師部での転流によるセシウムの移動の違いによって生じた可能性が指摘されている。樹木の部位によって、放射性セシウムの濃度が大きく異なることを示した点は重要と思われる。	樹木の幹内分布
33	森林	S.V. Fesenko, N.V. Soukhovaa, N.I. Sanzharova, R. Avila, S.I. Spiridonov, D. Klein, P.M. Badot	¹³⁷ Cs availability for soil to understory transfer in different types of forest ecosystems	Science of the Total Environment	269		87-103	2001	grass, shrub, moss, dwarfshrub, mushroomについて、凝集以降係数(aggregated transfer factor, Tag)と生物利用可能性係数(Bioavailability factor, BF)の間には強い正の相関があることが示されている。Mushroom以外は、その関係は原点を通る直線で表現されている。MushroomはBFがゼロでもTagが0.02m ² /kg程度あり、根と菌根の間において放射性セシウムの交換が起きていた可能性が示唆されている。森林における下層植生の凝集以降係数について、観測データを提示している点は重要と思われる。また、生物利用可能性係数との関係を示した点、つまり、下層植生の放射性セシウムの吸収に対して、セシウム放射能の土壌中の鉛直分布、リターと土層内での交換可能(exchangeable)な放射性セシウムの割合、及び土壌内での根と菌糸の分布が強く影響していること示唆している点も重要と思われる。	森林での土壌と植物体
34	森林	Golosov V	Application of Chernobyl-derived ¹³⁷ Cs for the assessment of soil redistribution within a cultivated field	Soil & Tillage Research	69		85-98	2003	ローム土壌を持つ斜面プロットにおいて、1986-1999年の間に起きた土壌の再分布が示されている。これは土壌の ¹³⁷ Cs蓄積量に基づいて評価されている。 ¹³⁷ Csはポータルタイプの検出器(Corad portable collimated spectrum sensitive NaI detector)を用いて斜面の多地点で現地測定されており、その結果、斜面での侵食と堆積は場所によって偏りがあることが示されている。放射性セシウムの蓄積量が現地で測定できるポータルタイプの検出器が利用可能であれば、点ではなく面的なモニタリングが可能となると思われる。長期的に考えると、複雑な地形をもつ日本の森林斜面では、本研究サイトよりも放射性セシウムの平面的な分布はより大きく偏るかもしれない。	耕地斜面での移動

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
35	森林	Johansen MP, Hakonson TE, Whicker FW, Breshears DD.	Pulsed redistribution of a contaminant following forest fire: Cesium-137 in runoff	Journal of Environmental Quality	32	6	2150-2157	2003	米国ニューメキシコ州ロスアラモスでの大森林火災を対象とした、セシウム137の再分散に関するシミュレーションをした結果、森林火災によりセシウム137濃度は沈着灰中で40倍、5cmの表土で3倍となった。火災のあった場所での再分配速度は非火災地と比べて1桁多く、表流水によるセシウム137の流出は火災により表土がもっとも広く現れた場所において最大となった。流出水中のセシウム137濃度は総降雨量が240mm以降に、火災前のレベルに低下した。森林火災によりセシウム137が濃縮され、降雨に伴う表面流出で流出することが示されている。	シミュレーションモデルによる森林火災による森林からのセシウム137の濃縮と移動に関する考察
36	森林	T. Wilflinger, H. Lettner, A.K. Hubner, W. Hofmann	Radiocaesium in flowing waters of highly contaminated Austrian alpine areas	Journal of Environmental Radioactivity	83		75-89	2005	チェルノブイリ事故後のオーストリア国ザルツブルグ南部の高山地帯での、森林6サイトを含む25サイトでの水中および土壌中のセシウム137の観測結果に基づく報告。水中のセシウム濃度は土壌沈着量とは関係がなく、また溶存セシウム濃度は水の電気伝導度と反比例の関係があった。沈着した放射性セシウムの、水の輸送に伴う流出はほとんどないことも示されている。	チェルノブイリ事故後の25サイトにおける水及び土壌中のセシウム137観測
37	森林	恩田裕一	森林の荒廃による表面流出の発生および細粒土砂の河川への流出	土と基礎	55	8	16-19	2007	高知県四万十町の荒廃した(間伐等の手入れが行われていない)ヒノキ人工林での研究例が紹介されている。大気中核実験生成物であるCs-137や天然放射性核種であるPb-210exは、大気から地表に降下すると素早く強固に地表面の粘土鉱物に吸着し、より深部に移動しにくいという特徴が解説されている。また、浸食も堆積も受けていない場所では、深くなるにつれCs-137は指数関数的に減少し、およそ20cmまで分布していることも説明されている。河川水中の浮遊砂に含まれるCs-137とPb-210ex濃度を定量するためのγ線スペクトロメトリに必要なサンプル量(10g以上の浮遊砂)をTime-integrated浮遊砂サンブラを用いて確保している。Cs-137とPb-210ex濃度に対する粒度と有機物による影響をHe and Walling (1996)の方法に従って補正している。作業道がある流域では、表層土壌のみならず作業道の侵食土砂も河川へかなり流出している可能性が示されている。森林においては表面流の発生を促してしまうような除染は避ける方が良いと思われる。この視点は、今後作業道の設置、維持、管理を考える上で十分に考慮される必要があると思われる。	森林斜面から河川水中への移動
38	森林	Taijiro Fukuyama, Yuichi Onda, Chisato Takenaka, and D.E. Walling	Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210ex measurements	Journal of Geophysical Research	113		F02007	2008	三重県の急傾斜ヒノキ人工林において流域内の各地点の侵食速度と表面流による土砂運搬能力の指標との関係を調べた結果が示されている。侵食速度は137Csの蓄積量に基づいて評価され、表面流による土砂運搬能力の指標は地形データ(DEM)から算出されている。侵食速度と土砂運搬能力の間に正の相関が認められ、ヒノキ林の土壌侵食に表面流が寄与していることが示されている。ヒノキ林において表面流によって土砂が侵食され、同時に放射性セシウムが運搬されることが示されている。森林斜面における土壌中の137Csを対象とした長期的なモニタリングでは、モニタリング地点における侵食と堆積の特徴を捉えておくことが観測結果を理解する上で重要であると思われる。	森林急斜面での移動

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
39	森林	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, and Takashi Gomi	Interception of the Fukushima reactor accident-derived ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ I by coniferous forest canopies	Geophysical Research Letters	39		L20403	2012	栃木県(福島第一原発から南西へ150km離れた場所)のヒノキ林(40年生, 2,500本/ha)とスギ林(41年生, 1,300本/ha)に設定された斜面プロット(傾斜>30度)での研究例である。原発事故から約6カ月経過した時点にあっても針葉樹キャノピーによって多くの放射性セシウム(>60%)が保持されていることが示されている。一般に、森林流域からの汚濁負荷対策を検討する場合、流域でのインプットとアウトプットを把握するだけでは、汚濁負荷を左右する場(例えば、植生、土壌、地質)を特定できないため、問題解決のために効果的な対策が打てない。本研究の結果はこの点を再認識させられるとともに、今後の森林政策や除染にとって流域内部での放射性セシウムの挙動を調べることの重要性が理解できる。放射性セシウムの今後の挙動、例えば樹体内への移動と蓄積、あるいは落葉・落枝としての林床への移動を評価することの重要性も本研究から理解できる。	針葉樹キャノピー(樹冠)での遮断
40	森林	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, and Mengistu Teramage	Depth distribution of ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, and ¹³¹ I in soil profile after Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident	Journal of Environmental Radioactivity	111		59-64	2012	福島県山木屋地区川俣町(福島第一原発から南西へ40km離れた場所)での研究例である。土壌中での ¹³⁷ Cs, ¹³⁴ Cs, ¹³¹ Iの濃度は最上部の層(0-0.5mm)で最も高いことが示されている。また、放射性セシウムについては、最上部から深さ1cm, 2cm, 5cmまでにそれぞれ全蓄積量の63%, 86%, 96%に相当する量が存在することが示されている。今後の土壌中セシウムに関するモニタリングデータを解析する上でリファレンスになる情報を含んでいると思われる。土壌中の鉛直プロファイルを把握するためには、深さごとに細かい間隔(<1cm)でサンプリングする方法が非常に重要であると思われ、本研究で用いられているサンプリング手法(スクレイパープレートの使用等)はモニタリングにとって有効と思われる。	福島第一原発事故直後における福島県内の家庭菜園土壌中のプロファイル
41	農地	Konoplev A.V. / Viktorova N.V. / Virchenko E.P. / Popov V.E. / Bulgakov A.A. / Desmet. G.M.	Influence of agricultural countermeasures on the ratio of different chemical forms of radionuclides in soil and soil solution.	Science of the Total Environment	137		147-162	1993	放射性物質の移動性を抑制するため、チェルノブイリ原発から30 km以内にある様々な土壌を対象に施肥や耕起などの農芸化学的対策を行い、形態の違いに着目してその効果を比較した論文。土壌中での放射性物質の形態を考慮して移行係数を求める必要性が示唆されている。実際に最も効果的であった対策は石灰とカリウムの使用であった。	吸収着
42	農地	Vidal M. / Roig M. / Rigol A. / Llauradó M. / Rauret G. / Wauters J. / Elsen A. / Cremers A.	Two approaches to the study of radiocaesium partitioning and mobility in agricultural soils from the Chernobyl area.	Analyst	120		1785-1791	1995	チェルノブイリ原発事故によって影響を受けたロシア、ベルラーシ、ウクライナの農地土壌を用いて、酸抽出実験と脱着実験による放射性セシウムの分配と移動性が比較された。 ¹³⁷ Csの移動性には土壌中の粘土が重要であることが示された。	吸収着
43	農地	Korobova E. / Ermakov A. / Linnik V.	¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr mobility in soils and transfer in soil-plant systems in the Novozybkov district affected by the Chernobyl accident.	Applied Geochemistry	13	7	803-814	1998	チェルノブイリ事故の放射性降下物によって最も影響を受けたロシア連邦ノボズィブコフ区域内のプリャンスクの西部で森林や農地における放射性物質の移動性と植物への移行性が調査された。 ¹³⁷ Csの約80%が土壌抽出残渣に存在したことから、移動性および植物への移行性は低いことが示されている。	移動
44	農地	Rosén K. / Haak E. / Eriksson A.	Transfer of radiocaesium in sensitive agricultural environments after the Chernobyl fallout in Sweden: III. County of Västernorrland.	Science of the Total Environment	209	2-3	91-105	1998	スウェーデンのベステルノルランド郡の農地にチェルノブイリ事故によって堆積した ¹³⁷ Csの植物への移行性を農作業と植物の成長段階に着目して求めた論文。農作業の時期、収穫時期や利用部位の変更によって ¹³⁷ Csの移行を減少させることが示された。	移動

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
45	農地	merešová J. / Wätjen U. / Altizoglou T.	Sorption and diffusion behavior of Cs and Sr on Jih-Hsing bentonite.	Applied radiation and isotopes : including data, instrumentation and methods for use in agriculture, industry and medicine	54	2	209-215	2001	台湾南東部の台東県の Cangyusn の Jin-Hsing ベントナイトを用いて放射性物質の拡散係数および遅滞係数が求められている。拡散実験の結果、低い拡散係数と高い遅滞係数が示され、Cs の放出を制限する効果的な障壁として Jin-Hsing ベントナイトを用いることを提案している。Jin-Hsing ベントナイトは自体は地方のものであるが、放射性核種の移動にとってベントナイトのような緩衝材を通じた吸着と拡散のプロセスは重要である。	吸着着
46	農地	Tsukada H. / Hasegawa H. / Hisamatsu S. / Yamasaki S.	Transfer of ¹³⁷ Cs and stable Cs from paddy soil to polished rice in Aomori, Japan.	Journal of Environmental Radioactivity	59	3	351-363	2002	青森県の20か所の水田を対象に、水田土壌から精米への ¹³⁷ Cs および安定Cs の移行係数が求められている。福島原発事故前の結果であるが、日本をはじめとしたアジアの主食であるコメへの移行係数が示されており、内部被曝の予測を行う上で重要である。	移動
47	農地	Camps M. / Rigol A. / Hillier S. / Vidal M. / Rauret G.	Quantitative assessment of the effects of agricultural practices designed to reduce ¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr soil-plant transfer in meadows.	Science of the Total Environment	332		23-38	2004	チェルノブイリ原発事故によって影響を受けたベルラーシ、ウクライナ、ロシアの牧草地で、牧草への放射性物質の移行性に農作業が与える影響の定量化が行われた。耕起と再播種と十分量のKの添加が放射性Csの植物への移行性に対してもっとも有効であったことが示されている。	吸着着
48	農地	Choi Y.H. / Lim K.M. / Choi H.J. / Choi G.S. / Lee H.S. / Lee C.W.	Plant uptake and downward migration of ⁸⁵ Sr and ¹³⁷ Cs after their deposition on to flooded rice fields: lysimeter experiments with and without the addition of KCl and lime.	Journal of Environmental Radioactivity	78	1	35-49	2004	湛水水田に堆積した ⁸⁵ Srと ¹³⁷ Csの植物への移行性と下方への移動性に対するKClと石灰の添加のメリットとデメリットが、韓国のライシメーター試験の結果によって示されている。植物の成長段階と放射性物質による汚染の時期を考慮した移行係数の算出方法は、より現実的な植物への移行性を反映するため役立つと考えられる。	移動
49	農地	Schimmack W. / Auerswald K.	The radiocaesium interception potential (RIP) at an agricultural site in Germany.	Journal of Environmental Radioactivity	77	2	143-157	2004	ドイツのミュンヘンから約40 km北に位置する調査地域において、土壌の浸食による違いが土壌中の放射性セシウムの移動性に与える影響が検討された。土壌の浸食の割合とRIPに相関が見られたことから、放射性セシウムの移動性は土壌の浸食に対して小さいことが示されている。	吸着着
50	農地	Shinonaga T. / Schimmack W. / Gerzabe M.H.	Vertical migration of ⁶⁰ Co, ¹³⁷ Cs and ²²⁶ Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation.	Journal of environmental radioactivity	79	2	93-106	2005	オーストリアでの輪作下のライシメーターにおける農地土壌中の ⁶⁰ Co、 ¹³⁷ Cs、 ²²⁶ Raの垂直分布の調査。未かく乱土壌と同様に、かく乱土壌においても ¹³⁷ Csの移動速度は非常に小さいことが示されている。	移動
51	農地	Van Pelt R.S. / Zobeck T.M. / Ritchie J.C. / Gill T.E.	Validating the use of ¹³⁷ Cs measurements to estimate rates of soil redistribution by wind.	CATENA	70	3	455-464	2007	風食による土壌の損失や再分配を ¹³⁷ Csの計測から予測するための研究であるが、 ¹³⁷ Cs濃度と土壌粒子サイズや深度との関係について示されている。放射性物質が降下した乾燥土壌は、風による侵食を受けて流出源となる可能性がある。	流出
52	農地	Tsukada H. / Takeda A. / Hisamatsu S. / Inaba J.	Concentration and specific activity of fallout ¹³⁷ Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils.	Journal of Environmental Radioactivity	99	6	875-881	2008	青森県内の11ヶ所の農耕地土壌を対象に、粒子サイズおよび抽出画分ごとの ¹³⁷ Csの濃度と比放射能が求められている。イオン交換で抽出される移動性の高い画分が ¹³⁷ Csの土壌からの流出や植物への移行に重要な役割を果たすことを示唆している。	移動
53	農地	Rao D.D. / Baburajan A. / Sudheendran V. / Verma P.C. / Hegde A.G.	Evaluation and assessment of 25 years of environmental radioactivity monitoring data at Tarapur (India) nuclear site.	Journal of Environmental Radioactivity	101	8	630-642	2010	インドのタラプール核施設から放出された放射性物質を25年間環境モニタリングした結果が示されている。結果から計算された土壌での ¹³⁷ Csの半減期は9.5年と算出され、放射性物質に汚染された地域のモニタリングや除染の期間の参考になりうる。	流出
54	農地	Chiang P.N. / Wang M.K. / Huang P.M. / Wang J.J.	Effects of low molecular weight organic acids on ¹³⁷ Cs release from contaminated soils.	Applied Radiation and Isotopes	69	6	844-851	2011	台湾のTa-Han 流域内の土壌を用いて、植物から分泌される低分子量有機酸による ¹³⁷ Csの脱着性が検討されている。低分子量有機酸を用いた ¹³⁷ Cs汚染土壌のファイトレメディエーションの提案がされている。	吸着着

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
55	農地	Choi Y.H. / Lim K.M. / Jun I. / Keum D.K. / Han M.H. / Kim I.G.	Transport behavior and rice uptake of radiostromium and radiocesium in flooded paddy soils contaminated in two contrasting ways.	Science of the Total Environment	412-413		248-256	2011	韓国内の核施設の近辺にある土壌を用いて、湛水水田土壌におけるイネによる放射性ストロンチウムと放射性セシウムの移行と吸収についてライシメーター試験が行われた。水田からの ¹³⁷ Csの流出に対する浸透水の寄与は小さく、イネの吸収による水田からの ¹³⁷ Csの損失への寄与の方が大きいことが示されており、水田からの ¹³⁷ Csの拡散防止にはイネへの移行対策が重要であると考えられる。	移動
56	農地	Harada N. / Nonaka M.	Soil radiocesium distribution in rice fields disturbed by farming process after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident.	Science of the Total Environment	438		242-247	2012	福島第一原子力発電所の事故後の新潟県南魚沼市と阿賀町の水田地域での放射性セシウムの分布。水田土壌は農耕プロセス(イネ移植前の耕起や湛水、代かき)によって攪乱されても、表層に堆積した放射性物質の分散には不十分である可能性が示唆されている。また、灌漑水によって土壌中の放射性物質の濃度が上昇したことから、灌漑水の汚染防止対策が必要であると考えられた。	吸着
57	農地	Hildegarde V.	Soil vulnerability for cesium transfer.	Lieve Sweeck	7	3	374-378	2011	レビューであるため調査対象地域はないが、チェルノブイリ事故後の土壌から植物への移行に関する知見について要約され、福島第一原発事故後の土壌汚染やその対策について議論されている。日本の土壌分布から食物への移行性が予測されている点で有用である。	移動
58	農地	Koarashi J. / Atarashi-Andoh M. / Matsunaga T. / Sato T. / Nagao S. / Nagai H.	Factors affecting vertical distribution of Fukushima accident-derived radiocesium in soil under different land-use conditions.	Science of The Total Environment	431		392-401	2012	福島第一原発の北西70 km内に位置する福島市の南西部の農耕地、草地、森林の土壌において、放射性セシウムの垂直分布に影響を与える要因が検討されている。事故から3ヶ月後の実態調査の結果を示している点で、今後のモニタリングや生物利用性の検討に有用である。	移動
59	農地	Qiao J. / Hansen V. / Hou X. / Aldahan A. / Possnert G.	Speciation analysis of 129 I, 137 Cs, 232 Th, 238 U, 239 Pu and 240 Pu in environmental soil and sediment.	Applied Radiation and Isotopes	70	8	1698-1708	2012	ロシアの集団農場の土壌、カナダの廃棄物管理地域にある湖の堆積物、ノルウェーの湖から採取した堆積物を対象に放射性物質の分析が行われている。 ¹³⁷ Csの環境中での移動性や生物利用性は低いことが示されている。	流出
60	農地	Vandebroek L. / Van Hees M. / Delvaux B. / Spaargaren O. / Thiry Y.	Relevance of Radiocesium Interception Potential (RIP) on a worldwide scale to assess soil vulnerability to 137 Cs contamination.	Journal of Environmental Radioactivity	104		87-93	2012	¹³⁷ Csの土壌濃度をRIPの計測よりも簡便に予測することを目的とした研究。新興国の農地土壌を含む88の土壌サンプルを対象に調査が行われ、土壌の酸抽出画分の放射性セシウムの対数値からRIPを求める経験式が示されている。	移動
61	市街地	MUECK, K; STEGER, F	WASH-OFF EFFECTS IN URBAN AREAS	Radiation Protection Dosimetry	37	3	189-194	1991	オーストリア3都市での地表面の「減少率」に関する実測値	市街地への沈降
62	市街地	JACOB, P; MULLER, H; PROHL, G; VOIGT, G; BERG, D; PARETZKE, HG; REGULLA, D	ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF RADIONUCLIDES DEPOSITED AFTER THE REACTOR ACCIDENT OF CHERNOBYL AND RELATED EXPOSURES	Radiation and Environmental Biophysics	32	3	193-207	1993	被爆直後の時点からミュンヘンにおける市民の体内のセシウム濃度に関する継続的な調査がある。事故後30-40日での路面の低減率のデータがある。	市街地への沈降、ヒトへの曝露
63	市街地	ALLOTT, RW; KELLY, M; HEWITT, CN	A MODEL OF ENVIRONMENTAL BEHAVIOR OF CONTAMINATED DUST AND ITS APPLICATION TO DETERMINING DUST FLUXES AND RESIDENCE TIMES	Atmospheric Environment	28	4	679-687	1994	UKのパロー・イン・ファーンズ市において屋外・屋内の複数の地表面にてチェルノブイリ後から地表面堆積物の ¹³⁷ Csを測定した。降下物の地表面での滞留時間を算定した。降下物の基本的な滞留時間が得られる点では重要。	市街地への沈降
64	市街地	ANDERSSON, KG; ROED, J	REMOVAL OF RADIOACTIVE FALLOUT FROM SURFACE OF SOIL AND GRASSED SURFACES USING PEELABLE COATINGS	Journal of Environmental Radioactivity	22	3	197-203	1994	塗膜はく離除染法	実験、除染

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
65	市街地	PIOCH, M; MADOZESCANDE, C	EFFECT OF RAINWATER ON THE REMOBILIZATION AND DISSOLUTION OF CS-134 AND SR-85 CONTAINED IN AEROSOLS SIMILAR TO THOSE DISCHARGED IN A NUCLEAR ACCIDENT AND DEPOSITED IN AN URBAN-ENVIRONMENT	Journal of Environmental Radioactivity	26	1	51-61	1995	この論文では室内実験条件のもとで、大気中の放射性エアロゾルに含まれていたセシウムやストロンチウムが都市の環境中への乾性沈着の後に雨水によってどのように再移動されるかを調べている。セシウムは主に溶解状態で再移動し、ストロンチウムは主に粒子状態で再移動することが分かった。	土壌やセメントタイル、室内実験
66	市街地	Rochedo, ERR; Conti, LFC; Paretzke, HG	PARATI - A dynamic model for radiological assessments in urban areas .1. Modelling of urban areas, their contamination and radiation fields	Radiation and Environmental Biophysics	35	4	243-261	1996	長文報告書に引用されていたモデルの一つ。	モデル
67	市街地	Comans, RNJ; Hilton, J; Voitsekovich, O; Laptev, G; Popov, V; Madruga, MJ; Bulgakov, A; Smith, JT; Movchan, N; Konoplev, A	A comparative study of radiocesium mobility measurements in soils and sediments from the catchment of a small upland oligotrophic lake (Devoke Water, UK)	Water Research	32	9	2846-2855	1998	イギリスの湖水地方のある小さな湖で底質のサンプリングを実施した(1992年)。放射性核種は鉱物質よりも有機質の底泥においてより移動度が大きい。移動度はイオン交換モデルにより説明可能であった。	土壌、湖沼底質
68	市街地	Amano, H; Matsunaga, T; Nagao, S; Hanzawa, Y; Watanabe, M; Ueno, T; Onuma, Y	The transfer capability of long-lived Chernobyl radionuclides from surface soil to river water in dissolved forms	ORGANIC GEOCHEMISTRY	30	6	437-442	1999	チェルノブイリ原子炉の半径30km圏内の松林地帯の土壌調査。Sr90は90%が水溶性、イオン交換性の形態。Cs137はほとんど不溶性成分である。しかしながら、本論文結果だけでは放射線核種の水系移行に関して統一的な見解は得ることができない。	土壌
69	市街地	Syversen, N; Oygarden, L; Salbu, B	Cesium-134 as a tracer to study particle transport processes within a small catchment with a buffer zone	Journal of Environmental Radioactivity	30	5	1771-1783	2001	ノルウェイの試験場における土壌へのfall outの移動実験。試験中に土壌攪乱を行わなかったため自然要因のみの関与の土壌輸送状況を示している。Csと強力な結合を行う土粒子または河川でのSSをモニタリングすることで、間接的にCsの挙動を知る手がかりが得られる可能性を示唆している。	耕作地
70	市街地	Brandt, J; Christensen, JH; Frohn, LM	Modelling transport and deposition of caesium and iodine from the Chernobyl accident using the DREAM model	Atmospheric Chemistry and Physics	2		397-417	2002	ヨーロッパにおけるチェルノブイリ原発事故による放射性物質の輸送沈着モデル計算(DREAMモデル)。全沈着量の大部分が湿性沈着からなると指摘、さらに“relative humidity”が“precipitation rates”よりも良い結果を示したことから、サブミクロンの微粒放射性物質については雲の中の掃気プロセスが雲の下での掃気プロセスに比べてより重要であることを示唆している。本論文のような大気シミュレーションを用いた放射性物質の挙動評価は、今後、中、長期的なモニタリングを実施する上で、放射性物質の拡散・汚染状況を予測反映でき、かつ最小限の観測地点を選定する際に有用と考える。	Csの輸送沈着モデル
71	市街地	Real, J; Persin, F; Camarasa-Claret, C	Mechanisms of desorption of Cs-134 and Sr-85 aerosols deposited on urban surfaces	Journal of Environmental Radioactivity	62	1	1-15	2002	市街地から採取したタイルとコンクリートを用い、人為的に処理した放射性核種の吸着試験、雨水と洗浄液による脱着試験の報告。CsやSrの吸着は被吸着物質の成分や多孔性などの性状が大きな因子となる。古い多孔性のタイルはCsの吸着が促進される。コンクリートに対してはCs、Sr共に80%以上吸着した。一方、脱着に関しては、雨水による割合は非常に低く、Csについてはタイル、コンクリートともほとんど脱着しない。洗浄液の違いによる脱着結果も記載されており、日本で同様の結果になるとは限らないが、吸着、脱着に関して多孔性やイオン交換など注目すべき項目の参考として利用可能と考え、これらによって放射性物質の市街地からの流域移動性を評価することができると考えられる。	

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
72	市街地	Swales, A; Williamson, RB; Van Dam, LF; Stroud, MJ; McGlone, MS	Reconstruction of urban stormwater contamination of an estuary using catchment history and sediment profile dating	Estuaries	25	1	43-56	2002	ニュージーランド都市表面流出水に含まれる物質と河口堆積物の年代解析(Cs137, C14, 花粉)による集水域と都市化の経緯の評価研究。データから集水域に堆積したCs137が河口に移行し、堆積、または海域へと移動する状況を確認できた。これらのCs137寄与源の多くは集水域に堆積したもの、もしくは集水域中の土壌粒子に吸着したものが流出、浸出したものであると推定。モニタリングでは降雨データとSr90、Cs137/Sr90堆積比から推定可能としている。Cs137の挙動は吸着している土壌粒子と概ね一致していると考えられるが、粒子サイズと放射線量の相関関係の確認は困難であった。	表面流出
73	市街地	Hakanson, L	A new generic sub-model for radionuclide fixation in large catchments from continuous and single-pulse fallouts, as used in a river model	Journal of Environmental Radioactivity	77	3	247-273	2004	モデルの有効性を評価するために27のヨーロッパ河川とその集水域の放射性核種量の実測値とモデル値との比較。河川モデルには集水域サブモデルの他に、河川上流部における輸送、浸食、再懸濁等の事象を捉えるサブモデルが含まれる。作成するにあたり、土壌タイプ、水文学的な条件を考慮している。集水域から河川にかけての放射性物質のモニタリングにこのモデルは役立つと考えられる。	モデル
74	市街地	Hakanson, L	Modelling the transport of radionuclides from land to water	Journal of Environmental Radioactivity	73	3	267-287	2004	ヨーロッパに点在する集水域での水系への物質流出モデルの構築と検証。モデル式は、放射性物質の輸送というより、放射性物質が吸着した土壌粒子の輸送を追っているように感じられるが、本モデルで実測データを良い精度で予測できており、特にCs137が土壌粒子に吸着し水系を移動していると考えられる。	モデル
75	市街地	Hakanson, L	A new general mechanistic river model for radionuclides from single pulse fallouts which can be run by readily accessible driving variables	Journal of Environmental Radioactivity	80	3	357-382	2005	ヨーロッパの13河川を対象に実測データとモデルによる予測値との比較による有効性を確認。13河川のうち3河川をもんでるの校正に用い、10河川でモデル評価を行っている月ごとの河川中放射線核種濃度の予測モデルを既存の湖沼モデルを改変し新規に構築。測定方法、状況についての明確な記述はなく、関連論文をまとめて示されている。	河川モデル
76	市街地	Erlandsson, B; Isaksson, M	Urban dose rates at Gavle, Goteborg and Lund	Journal of Environmental Radioactivity	85	2-3	241-246	2006	スウェーデンの3都市におけるチェルノブイリ原発事故由来のCs137沈着量に関して空間線量率測定によるヒトへの被曝の視点からの研究。異なる地表面(草地、アスファルト、コンクリート、敷石、砂利)の線量率の比較では、敷石が最も高かった。一方、アスファルトの覆いが取り替えられた箇所では10分の1に低減した。	
77	市街地	Likuku, AS; Branford, D; Fowler, D; Weston, KJ	Inventories of fallout Pb-210 and Cs-137 radionuclides in moorland and woodland soils around Edinburgh urban area (UK)	Journal of Environmental Radioactivity	90	1	37-47	2006	イギリスの森林と草地の土壌サンプルの比較調査。森林地帯のCs137の含有量が草地地帯より高い考察として、乱気流による影響や降雨による洗い出し、沈着、葉の枯死化によることを挙げている。また、既存報告において、沈着量と降水量との強い相関があることや、ほとんど攪乱されていない土壌では土壌深度の増加に伴いCs137が対数的に減少する報告も記載されていた。また、森林樹冠の果たす役割が重要な経路とされていた。	
78	市街地	Ramzaev V; Yonehara, H; Hille, R; Barkovsky, A; Mishine, A; Sahoo, SK; Kurotaki, K; Uchiyama, M	Gamma-dose rates from terrestrial and Chernobyl radionuclides inside and outside settlements in the Bryansk Region, Russia in 1996-2003	Journal of Environmental Radioactivity	85	2-3	205-227	2006	チェルノブイリ原発より約175-250km北東の住民の1年間の外部被曝量を調べるための土壌サンプリングと空間線量の測定	モニタリング

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
79	市街地	Schertz, M; Michel, H; Barci-Funel, G; Barci, V	Transuranic and fission product contamination in lake sediments from an alpine wetland, Boreon (France)	Journal of Environmental Radioactivity	85	2-3	380-388	2006	フランスの湖沼底泥から流域影響の推定調査。有機物が底泥中での放射性物質の保持と移動に重要な役割を果たし、底泥中の鉛直方向放射性物質濃度と有機物濃度の挙動が一致していた(放射性物質が共通して有機物に吸着することを示唆し、Cs137モニタリングの一部簡便化も可能かも知れない)。また、Sr90/Cs137など濃度比から各放射性物質の起源を推定する方法も考えられる。湖内底泥は小川より表面流出による影響が大きく、降雨に伴う斜面流など水文学的知見が必要である。鉛直方向プロフィールから底泥表層数10cmを除去すれば濃度を低減できると示唆される。	底泥モニタリング
80	市街地	Vukovic, Z; Sipka, V; Todorovic, D; Stankovic, S	Long lived radionuclides in the ecosystem of the Sava river	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	268	1	129-131	2006	Sava川での河川水中と底泥中の放射能濃度の測定から、分配係数を用いて考察が行われている。分配係数より河川水と底泥間の放射性元素の動態の考察を試みた。	河川と底泥
81	市街地	Sasina, NV; Smith, JT; Kudelsky, AV; Wright, SM	Blind testing of models for predicting the Sr-90 activity concentration in river systems using post-Chernobyl monitoring data	Journal of Environmental Radioactivity	92	2	63-71	2007	河川水中の放射能濃度(Sr90)の2つの予測モデルによるベラルーシ6河川の計算結果と観測結果の比較。流域内の土壌中に「有機分が多い」方が「ミネラル分が多い」土壌の場合よりもSr90は早く流出することがモデルでの重要な変数であることが示された。GISを使用した複雑なモデルと表計算ソフトを利用した単純モデルではほとんど制度は変わらなかった。着目する変数の重要性を示唆している。	河川モデル
82	市街地	Poreba, GJ; Bluszcz, A	INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF MODELS USED TO CALCULATE SOIL EROSION BASED ON Cs-137 TRACER	Geochronometria	32		21-27	2008	ポーランド南部Ujazdの60年以上農地として使われている黄土耕地。大気降下物を介したインプット、および鋤込みに伴う土壌流出ならびに放射性崩壊によるアウトプットに注目したCsの物質収支式から予測し、土壌流出量は、鋤込み深さ、土壌密度に依存しないことが示されている。土壌流出モデルは効率のよい除染を確立する上では重要になるかも知れない。	土壌浸食
83	市街地	Garcia-Sanchez, L; Konoplev, AV	Watershed wash-off of atmospherically deposited radionuclides: a review of normalized entrainment coefficients	Journal of Environmental Radioactivity	100	9	774-778	2009	チェルノブイリ原発事故後の大気降下由来の流域からの流出モデルの因子に関する研究。土壌中の雨水による流出減少が扱われていたが、これらの係数は場所や降雨による変動が大きい。放射性元素の流出は長期的、短期的とそれぞれの場合で必要な計算式が異なる。本論文は双方の計算式の数学的な比較が行われており、その計算式を使用するかに関して慎重に検討する必要があることを示唆。	流出モデル
84	市街地	Popovic, D; Todorovic, D; Ajtic, J; Nikolic, J	ACTIVE BIOMONITORING OF AIR RADIOACTIVITY IN URBAN AREAS	Nuclear Technology & Radiation Protection	24	2	100-103	2009	ベオグラード市内(セルビア)におけるロシアから輸入した苔を使用した大気中の放射能測定法の可能性の検討。もともと自生していた苔の放射能測定結果と比較。	モニタリング
85	市街地	Devereux, OH; Prestegaard, KL; Needelman, BA; Gellis, AC	Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland	Hydrological Processes	24	11	1391-1403	2010	メリーランドの都市流域を対象とした高台、氾濫原、川岸、道路塵埃の4つの主要な供給源由来の調査研究。Cs137の他に各元素も測定。川岸と高台の季節変化から葉による覆いや低水位は微細堆積物の浸食や降雨による浸食を防止することが示唆された。また、複数の供給源の把握とその時間的変動を明確にすることが効率の良い除染につながる。季節によって堆積物の供給源が変化するため、環境中挙動を定点観測する際、水文条件や土地利用も含めた包括的な通年のモニタリングを準備することが必要になる。	流域
86	市街地	Rosen, MR; Van Metre, PC	Assessment of multiple sources of anthropogenic and natural chemical inputs to a morphologically complex basin, Lake Mead, USA	Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology	294	1-2	30-43	2010	ネバダ州の各実験実施年と近隣湖沼底泥の年代推定である。水路を介した都市部から湖沼への表面流出の影響が見られた。規模の大きい湖沼を調査対象とする場合は、モニタリング地点を複数設定し、集水域毎の整理が有効であることが推察された。	底泥モニタリング

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
87	市街地	Seleznjev, AA; Yarmoshenko, IV; Ekidin, AA	Accumulation of Cs-137 in puddle sediments within urban ecosystem	Journal of Environmental Radioactivity	101	8	643-646	2010	ロシア中ウラル地方におけるCs137降下量をデータ収集により経年変化を推定。雨水のたまりやすい(降雨の度に水たまりができる)場所の土壌中には放射性物質が蓄積されやすいことを水たまり底底中の溶存濃度をモデル式で示し、大気降下量との寄与率を推定した。すなわち、大気降下物として降下したCs137は雨水に溶け出し水たまりへと流入し底底中に集積されていく。	
88	市街地	Todorovic, D; Popovic, D; Nikolic, J; Ajtic, J	RADIOACTIVITY MONITORING IN GROUND LEVEL AIR IN BELGRADE URBAN AREA	Radiation Protection Dosimetry	142	2-4	308-313	2010	セルビア、ベオグラードの2004年1月から2009年4月までの市街地放射性元素観測。Be7、Pb210、Cs137を対象。Be7は季節変動が見られたが、Pb210は自動車排ガスなどの人為由来もあり不明瞭。Cs137は検出限界以下で図表データなし。	
89	市街地	Ikuo TSUSHIMA , Masashi OGOSHI , Hiromasa YAMASHITA , Ichiro HARADA	Behavior of Radioactive Cesium in Wastewater Treatment Plants and Dissolution Test of Contaminated Sewage Sludge	水環境学会誌	36	1	23-28	2013	2011年7-9月の晴天時に、合流式および分流式関東・東北地方の4箇所の下水処理場を対象に、流入下水、初沈流入水、初沈流出水、活性汚泥、最終沈殿後水、生汚泥、余剰汚泥、濃縮汚泥、脱水汚泥、焼却灰、焼却炉等排ガス、返流水等を採取し、水質および放射性ヨウ素131、放射性セシウム134および137の濃度測定を試みている。下水処理施設は市街地から流入した放射性セシウムについては環境中へ拡散の抑制に役割を果たしているといえる。一方で合流式下水道越流水や分流式下水道雨水管路からの放流水の影響については今後調査すべき項目かもしれない。これに関連して合流管路内の管路内堆積物の影響についても濃縮され高濃度の放射性セシウムが流出している可能性があるため、より精査する必要が考えられる。	
90	河川環境	鎌田博,湯川雅枝,佐伯誠道	90Srの河川への流亡に関する研究	Radioisotopes	22	6	11-32	1972	核実験フォールアウトの影響の観点から、日本国内の江戸川、阿賀野川、淀川の水系が対象である。河川への核種の移動には水文過程が深く関わるので、表面水として、また地下水としての出入りを量的に、季節的に(あるいはより詳細に)把握しておくことが求められる。	河川流達
91	河川環境	U. Sansone M. Belli, O.V. Voitsekovitch, V.V. Kanivets	Cs-137 and Sr-90 in water and suspended particulate matter of the Dnieper River reservoirs system (Ukraine)	Science of The Total Environment	186	3	257 -271	1996	チェルノブイリ事故地域の河川(プリピャチ川)から、約500km下流の黒海までの経路。定期的・長期的モニタリングの成果が現れた報告であり、モニタリングの重要性が認識できる。内部被ばく、外部被ばくを含めた被ばく経路解析の下で、対策の優先度を考える必要がある。	河川輸送
92	河川環境	Y. V. Kuznetsov	ISTC #748 Project report, Annual Technical Report N1	ISTC* Report				1998	クラスノヤルスクに位置するロシア核施設からエニセイ川を経てカラ海に至る長距離の河川経路。核種に応じて河川の移動の様相が異なるので、空間的・時間的に、それらを考慮したモニタリングが必要になる。もちろん、手法はモニタリングの目的にも強く依存する。河床堆積物の汚染に関しては、河川の流れに応じてスポット状に核種の集積場ができることに留意。(汚染源からの距離に応じて単純に濃度が低下するとは限らない。)	河川輸送
93	河川環境	J.T. Smith, M.A. Cross, S.M. Wright	Temporal Change in Fallout 137Cs in Terrestrial and Aquatic Systems: A Whole Ecosystem Approach	Environmental Science and Technology	33	1	49-54	1999	チェルノブイリ事故で放射性汚染の影響を受けたドニエプル川水系・集水域。放射性核種の物理化学的な存在形態を長期に観察することは、生物利用度の監視の観点から重要である。環境媒体間の物質移動構造とタイムラグに留意して、濃度変動がどう伝播するかの知識をもって、介入を行うべきである。	生態圏
94	河川環境	J.T Smith, O.V Voitsekhovitch, L Håkanson, J Hilton	A critical review of measures to reduce radioactive doses from drinking water and consumption of freshwater foodstuffs	Journal of Environmental Radioactivity		SI, 1-2	11-32	2001	特定地域を対象としていない。チェルノブイリ事故で水産生物の汚染が生じた欧州各国での対策に関する知見のまとめ。最も有効な対策は、浄水プロセスや食品処理など、摂取する過程に関するものである。飲料水に関しては、地表面の汚染事故後、短時間で水源たる河川水の濃度の上昇、短時日での減衰が起こるので、即応的な監視と手立てが必須である。	生態圏

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
95	河川環境	T. Nagano, N. Yanase, K. Tsuduki, S. Nagao	Particulate and dissolved elemental loads in the Kuji River related to discharge rate	Environment International	28	7	649-658	2003	茨城県久慈川下流。懸濁物を採取してその核種濃度やフラックスを検討する場合に、懸濁物の起源を考慮するにあたり有用な情報が与えられている。たとえば、流量-懸濁物濃度の関係を季節的に分離すべき事が挙げられる。放射性セシウムは河川内で堆積することがあるが、放射性ストロンチウムは流下してしまう特性は、河川内の放射性ホットスポット形成と対応に関して、知っておくべき基本情報となる。	移動形態
96	河川環境	F. Eyrolle, S. Charmasson	Importance of colloids in the transport within the dissolved phase (<450 nm) of artificial radionuclides from the Rhône river towards the Gulf of Lions (Mediterranean Sea)	Journal of Environmental Radioactivity	72		273-286	2004	フランス ローヌ川。福島事故に関して、河川水中の放射性セシウムの形態弁別で、コロイド態弁別を行う必要性はないであろう(1-2回の確認は必要)。原子力燃料再処理施設の平常運転に伴う液体廃棄物放流に由来する河川中の放射性核種の移動形態を明らかにしている。河川水中の放射性セシウムの移動担体として、ローヌ川ではコロイド態(2-450nm)は重要ではないことが系統的なフィールド研究で確認された。最大でも溶存態の9%である。	移動形態
97	河川環境	A. Schulte-Rentrop, M. Costa-Cabral, R. Vink	Modelling the overland transport of lead deposited from the atmosphere in the elbe catchment over four decades (1958-1995)	Water, Air, and Soil Pollution	160	1-4	271-291	2005	ドイツ国内のエルベ川流域。本論文は、数十年にわたり大気中に継続的に放出されてきた人為使用の鉛の地表蓄積と河川流出を、数理モデルで解析したものである。研究の特徴は長期、そして広域を扱っている点である。数理モデル化に耐えるモニタリングデータセットが、人の健康に関わる重要な汚染物質に対しては殊に求められる	河川流達
98	河川環境	IAEA	Radiological Conditions in the Dnieper River Basin	Radiological Assessment Reports Series 7, STI/PUB/1230 (ISBN:92-0-104905-6)			185pp.	2006	チェルノブイリ事故で放射性汚染の影響を受けたドニエプル川水系・集水域。多国間の調整がさらに必要という指摘。越境汚染となったチェルノブイリ事故ならではの教訓が述べられている。地域ごとに主要な被ばく形態・経路が異なるので、それを十分に考慮した局地的な戦略と統一された基準が必要。	移動形態
99	河川環境	L. Håkanson	Nuclear Accidents: The Fate/Behavior of the Chernobyl Fallout in Scandinavian Watersheds	Springerreference, http://www.springerreference.com/docs/html/chapterbid/226395.html				2011	チェルノブイリ事故で放射性汚染の影響を受けたスキャンジナビアならびに欧州の湖沼・河川・沿岸域。観測を行うにあたり、事態の将来予測を前提にするならば、最も影響の大きな環境因子を推定して、それらに観測の重点を置くべきである。この推定の段階においても、生態圏モデルが有効である。	生態圏
100	河川流出	K.Hirose, M.Aoyama, Y.Sugimura	Plutonium and cesium isotopes in river waters in Japan	J. Radioanal. Nucl. Chem.	141	1	191-202	1990	石狩川、北上川、利根川、九頭竜川、木曾川、天竜川、富士川において、 ¹³⁷ Csの流出挙動を解析するため、みかけの分配係数が、河川水中の放射性核種の実測データを基に見積もられた： ¹³⁷ Cs: (1.0 ~ 32) x 104 ml/g。また、粒子態の ¹³⁷ Csの存在割合は10-35%、すべての試料を平均すると27 ± 20%であった。今後、モデルによる放射性核種のシミュレーションの必要性が高まり、信頼性の高い将来予測を行うことが重要である。この場合、IAEAのまとめた分配係数が1つの指標となるが、日本の河川水系に適用した場合の数値の妥当性を検討することが重要である。本論文で取得された現場でのみかけの分配係数はその妥当性を検討する重要な基礎データと位置づけることができる。	存在形態
101	河川流出	T.Matsunaga, H.Amano, N.Yanase	Discharge of dissolved and particulate ¹³⁷ Cs in the Kuji River, Japan	Applied Geochemistry	6	2	159-167	1991	久慈川において1987-1988年に観測を行い、放射性セシウムの流出挙動を検討し、モデルによる放射性セシウムの移行動態解析に必要なデータが報告された。 ・粒子態放射性セシウムの存在割合 高水量期>低水量期 ・粒子態放射性セシウムの含有量は灰化減量と正の相関性有り—有機物との親和性を示唆。 ・分配係数 1.0 ± 0.6 x10 ⁵ ml/g ・1987,1988年の放射性セシウム流出量 蓄積量の0.04%/y(壊変補正済み)	存在形態
102	河川流出	P.Spezzano, S. Bortoluzzi, R. Giacomelli, L. Massironi	Seasonal variations of ¹³⁷ Cs activities in the Dora Baltes River (Northwest Italy) after the Chernobyl accident	Journal of Environmental Radioactivity	22	1	77-88	1994	1986年チェルノブイリ事故後、イタリア北部のDora Baltea Riverの下流域、Po Riverとの合流点前8 kmの地点において、1987-1991年の5年間、河川水中の ¹³⁷ Csの放射能濃度を測定した。その結果、季節的な変動を繰り返し、夏場に高い濃度を示した。この原因は、上流域の山岳地帯での雪解けの影響であることが明らかとなった。表1には雪解け水に ¹³⁷ Csの放射能濃度が高い結果が示されている。	時系列変動: イタリア

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
103	河川流出	E.Korobova, A.Ermakov, V.Linnik	¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr mobility in soils and transfer in soil-plant systems in the Novozybkov district affected by the Chernobyl accident	Applied Geochemistry	13	7	803-814	1998	チェルノブイリ原発事故後のロシアのBryansk西方地域のポドゾル土壌における ¹³⁷ Csの存在量を見積もった結果、リター層には80%以上、その下層の腐植層を含む土壌表層には6.5-19.3%しか存在しなかった。つまり、リター層により、土壌への浸透が妨げられたことを示している。上記の点を考慮すると、リター層の除去は除染に大きく寄与する可能性が示唆される。なお、土壌から酢酸アンモニウムによる ¹³⁷ Csの抽出は、ほとんど期待できない。また、humic-gley soilでは土壌の深さ15-20 cmまで ¹³⁷ Csが浸透している。これらの結果は、腐植物質の存在により、土壌中のイライト、モンモリロナイトへの吸着性が減少すること調和的である。	存在形態
104	河川流出	T.Matsunaga, T.Ueno, H.Amano, Y.Tkatchenko, A.Kovalyov, M.Watanabe, Y.Onuma	Characteristics of Chernobyl-derived radionuclides in particulate form in surface waters in the exclusion zone around the Chernobyl Nuclear Power Plant	J. Contaminant Hydrol.	35	1-3	101-113	1998	チェルノブイリ事故から10年後にチェルノブイリ地域の事故原発30km圏内の河川を対象に ¹³⁷ Csの濃度レベルとともに、流出挙動の検討を行った。その結果、 ¹³⁷ Csの放射能濃度と懸濁相に存在する割合は変動し(2~50%)、河川水中の懸濁粒子濃度に依存していることが明らかとなった。また、河川における ¹³⁷ CsのKd値は他の河川の報告値の範囲内(0.63~4.5 x 10 ⁴ ml/g)である。河川流域の ¹³⁷ Cs蓄積状況に応じて河川水の ¹³⁷ Cs放射能濃度も変動している。	存在形態
105	河川流出	C.Dumat, S.Staunton	Reduced adsorption of caesium on clay minerals caused by various humic substances	Journal of Environmental Radioactivity	46	2	187-200	1999	放射性物質の流出挙動を理解するためには、流域の土壌における放射性セシウムの存在形態を把握することが必要である。本論文では、自然環境を想定して、放射性セシウムの土壌・堆積物への吸着性を理解するために、土壌に含まれる粘土鉱物のイライトとモンモリロナイトについてバッチ式の吸着実験を実施し、高分子有機物の腐植物質の存在による影響を評価した。その結果、土壌中に存在する腐植物質の濃度とともに、放射性セシウムの吸着性は減少し、特にイライトでその影響が顕著であった。このことは、イライトの放射性セシウムの吸着サイトと考えられているfrayed edgeサイトが腐植物質の吸着に影響を受けることを明らかにした。これらの知見は、大気からの沈着時、あるいは河川での移行時に粒子との吸着性を考慮する場合に、重要な知見になる。	粘土鉱物への吸着機構
106	河川流出	P. Rajec, V. Sucha, D.D.Eberl, J.Srodon, F.Elsass	effect of illite particle shape on cesium sorption	Clays and Clay Minerals	47	6	755-760	1999	土壌・堆積物に存在するイライト、イライト-スメクタイトへの放射性セシウムの吸着性における結晶構造の違い、つまり、粘土鉱物の表面積や吸着サイトを検討するためにバッチ試験によって実施した。結晶構造は、3つの形態のイライト、あるいはイライト-スメクタイトを選択した。その結果、各粘土鉱物試料の全表面積と放射性セシウムの吸着容量に正の相関関係が存在した。また、放射性セシウムの粘土鉱物に対する分配係数とKd値に相関性は乏しいが、frayed edge 表面積とは正の相関性を示した。このことは、イライト、スメクタイトの粘土鉱物への放射性セシウムの吸着には、frayed edgeサイトが重要な吸着サイトであることを示唆している。	粘土鉱物への吸着機構
107	河川流出	R. Saxén, E. Ilus	Discharge of ¹³⁷ Cs and ⁹⁰ Sr by Finnish rivers to the Baltic Sea in 1986-1996	Journal of Environmental Radioactivity	54	2	275-291	2001	チェルノブイリ事故後、フィンランドの5大河川において1986-1996年の期間、年4回採取し、 ¹³⁷ Cs放射能濃度を測定した。その結果、チェルノブイリ事故後の河川水の ¹³⁷ Cs放射能濃度は、0.1~3Bq/lまで増加し、その後、徐々に減少した。しかしながら、1996年の時点でも、事故前に比べて1~2桁高い能であった。また、河川流域から沿岸域へのフラックスも計算した。その結果、フィンランドから10年間に65 TBqの ¹³⁷ Csが流出した。これは、チェルノブイリ事故後、流域に沈着した ¹³⁷ Csの1.5-2.3%であり、沈着した ¹³⁷ Csの大部分は流域に留まっていることを示している。	時系列変動: フィンランド

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
108	河川流出	J.M.Zachara, S.C.Smith, C.Liu, J.P.McKinley, R.J.Serne, P.L.Gassman	Sorption of Cs ⁺ to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA	Geochimica et Cosmochimica Acta	66	2	193-211	2002	本論文は、高レベル放射性廃棄物が漏洩したアメリカのHanfordサイトで、流出した放射性セシウムの表層堆積物への収着性を室内実験により検討した。そのため、室内実験ではあるが、自然環境を模擬した実験系で実施された研究である。 酢酸アンモニウムによる炭酸塩除去堆積物と除去していない堆積物では、セシウムの収着に違いは認められなかった。また、収着性の特徴は、1.セシウムの濃度の増加とともにセシウムの吸着量は増加するが、Kd値としては減少。2.硝酸カリウムが存在する場合、同じ0.01MではNa ⁺ に比べてKd値は2桁低い。3.K ⁺ 、Na ⁺ とともに濃度の増加とともにセシウムのKd値は減少した。4.平衡定数の実測値と計算結果の比較より、K ⁺ 、Na ⁺ 共存系ではCs-K、Cs-Naとの2サイト(年同行物の層間、粘土鉱物末端のfrayed edge)でのイオン交換反応により収着していることが示唆された。電子顕微鏡観測の結果、堆積物でのセシウムの収着は、主に堆積物の雲母で生じていることが明らかとなった。	粘土鉱物への収着機構
109	河川流出	J.E.Pinder III, T.G.Hinton, F.W.Whicker	The influence of a whole-lake addition of stable cesium on the remobilization of aged ¹³⁷ Cs in a contaminated reservoir	Journal of Environmental Radioactivity	80	2	225-243	2005	本研究では、堆積物へ沈着した ¹³⁷ Csの安定性を調べるため、過去の原子力発電所の稼働により汚染されたアメリカ、サウスカロライナ州Savannah Riverサイトの調整池に安定セシウムの ¹³³ Csを4kg、CsClの形態で湖水157,000 m ³ に添加し、その後、湖水中の ¹³⁷ Cs放射能濃度を測定した。その結果、湖水中の ¹³⁷ Cs放射能の存在量は3倍(6.1 MBq)まで増加した。この増加は、水中植物の ¹³⁷ Cs放射能濃度が増加したこと、室内実験の結果とその増加率がほぼ一致したことから指示される結果である。	再移動: USA
110	河川流出	J.-P.Blenger, S.Staunton	Adsorption and desorption of ⁸⁵ Sr and ¹³⁷ Cs on reference minerals, with and without inorganic and organic surface coatings	Journal of Environmental Radioactivity	99	5	831-840	2008	土壌に含まれる鉱物の収着性を検討した。特に、有機物(土壌から抽出した腐植物質)、鉄酸化物、アルミニウム酸化物のコーティングの影響を評価した。その結果、炭酸カルシウム、石英、カオリナイトはコーティングの影響はほとんど認められなかった。粘土鉱物のイライトとモンモリロナイトでは、有機物のコーティングにより ¹³⁷ Csの収着性は減少した。また、イライトではアルミニウム酸化物のコーティングにより収着量は増加したが、モンモリロナイトではアルミニウム・鉄酸化物のコーティングにより収着量は減少した。脱着性実験結果では、非可逆的な収着が示された。これらの結果は、福島地域でも土壌環境により放射性セシウムの収着性とその安定性は異なる可能性が考えられる。	粘土鉱物への収着機構
111	流域モデル	Mark J. Zheleznyak, Raisa I. Demchenko, Sergey L. Khursin, Yuri I. Kuzmenko, Paul V. Tkalich, Nickolay Y. Vitiuk	Mathematical modeling of radionuclide dispersion in the Pripyat-Dnieper aquatic system after the Chernobyl accident	Science of The Total Environment	112	1	89-114	1992	チェルノブイリ事故後のプリピャチドニエプル川水系を対象として、複数のモデルにより放射性物質の移動を予測し、対策の検討を行った。90Srに関してはプリピャチ川左岸に高度に堆積した氾濫原からの流出の影響が大きいと考えられたため、これらの流出を防ぐ様々な対策の効果がモデルにより予測された。その結果、効果があると考えられたのは、高度に汚染された氾濫原にダムを造り、河川水に流出しないようにする対策であった。	
112	流域モデル	Lars Håkanson, John E. Brittain, Luigi Monte, Rudie Heling, Ulla Bergström, Vesa Suolanen	Modelling of radiocesium in lakes — the VAMP model	Journal of Environmental Radioactivity	33	3	255-308	1996	チェルノブイリ事故による湖沼への影響を予測するため、IAEAで「VAMPプロジェクト」が立ち上がり、中長期的な汚染状況を大まかに予測することが可能なVAMPモデルが構築された。モデルはヨーロッパ内7湖沼を対象として検討が進められた。観測が十分でない湖沼でも適用が可能のように工夫されているが、アジアモンスーン気候に位置する我が国の湖沼への適用については注意が必要である。	
113	流域モデル	Luigi Monte, John E Brittain, Lars Håkanson, Rudie Heling, Jim T Smith, Mark Zheleznyak	Review and assessment of models used to predict the fate of radionuclides in lakes	Journal of Environmental Radioactivity	69	3	177-205	2003	湖沼における放射性核種の挙動を予測するモデルを広範にレビューした論文である。湖沼内の非生物的要素については、水相、底泥表層、底泥深層の3つに分類し、それぞれの間の移行量を計算して濃度を予測するのが一般的である。それに加え、湖沼への流入、流出の収支を把握すれば、濃度等の状況はある程度予測可能である。湖沼のモニタリングにあたっては、収支を捉えることを前提に調査計画を立てることが望ましい。	レビュー論文(湖沼)

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
114	流域モデル	Jim T. Smith, Simon M. Wright, Matthew A. Cross, Luigi Monte, Anatoly V. Kudelsky, Ritva Saxén, Sergei M. Vakulovsky, and David N. Timms	Global Analysis of the Riverine Transport of 90Sr and 137Cs	Environmental Science and Technology	38	3	850-857	2004	ヨーロッパおよびロシアにおける複数の河川における観測結果より、河川における放射性核種の濃度変化を集水域の特性を用いてモデル化している。本論文のモデルでは、scaling factor(集水域の特徴に応じた放射性物質の流出のしやすさを示す指標)と呼ばれる指標が重要な役割を示し、これに大きく寄与する要因は"inland water"(水面の割合)などであることが分かった。	
115	流域モデル	Luigi Monte, John E. Brittain, Lars Håkanson, Jim T. Smith, Marcel van der Perk	Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides from catchments	Journal of Environmental Radioactivity	75	1	83-103	2004	集水域における放射性核種の挙動を予測するモデルを広範にレビューした論文である。集水域から流入する放射性物質のフラックスは、指数関数の組み合わせで記述される。すなわち、流出の早さに応じて分類し、それを足し合わせることで、経時的なフラックス(あるいは濃度)を理解することができる。一方、現象を詳細に記述する物理的なモデルについては、未知パラメータが多くなり必ずしも正確な予測ができるわけではない等の理由から本論文では批判的である。	レビュー論文(集水域)
116	流域モデル	Luigi Monte, Patrick Boyer, John E. Brittain, Lars Håkanson, Samuel Lepicard, Jim T. Smith	Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides through rivers	Journal of Environmental Radioactivity	79	3	273-296	2005	河川における放射性核種の挙動を予測するモデルを広範にレビューした論文である。モデル間の比較検証地域としてThe River Po (north Italy)が対象となっている。河川における放射性物質の挙動は、一般的な移流拡散によるもの、底泥とのやり取りによるもの、生物による取り込みによるものの組み合わせで考えられる。モデルにより予測結果にばらつきはあったが、概して河川水中濃度は初期から迅速に減少する一方、魚類中濃度は時間をかけて増加した後緩やかに減少するといった特徴が挙げられた。	レビュー論文(河川)
117	流域モデル	Smith JT, Belova NV, Bulgakov AA, Comans RN, Konoplev AV, Kudelsky AV, Madruga MJ, Voitsekhovitch OV, Zibold G.	The "AQUASCOPE" simplified model for predicting 89,90Sr, 131I, and 134,137Cs in surface waters after a large-scale radioactive fallout	Health Physics	89	6	628-44	2005	河川や湖沼、魚類中の放射性物質の濃度を簡易に予測するモデルを構築し、それをブラインドテスト(観測値を与えずに予測すること)により検証した論文である。モデルはシンプルな式と一般的なパラメータを採用しつつも、ダイナミックな予測が可能である。中長期的な影響予測を簡易に行うことが可能であるため、水中や魚類中の濃度がなかなか減少しない湖沼などに適用し、今後の大まかな予測を立てた上で規制や除染等の対策を検討することに役立つとされると考えられる。	
118	流域モデル	Luigi Monte, Raul Periañez, Sergey Kivva, Gennady Laptev, Giacomo Angeleli, Haydn Barros, Mark Zheleznyak	Assessment of state-of-the-art models for predicting the remobilisation of radionuclides following the flooding of heavily contaminated areas: the case of Pripjat River floodplain	Journal of Environmental Radioactivity	88	3	267-288	2006	河川(水相・底質)における濃度変化を予測するモデルを3つ選定し、プリピャチ川(ウクライナ)の氾濫原を対象として検証を行った結果についてまとめた論文である。ブラインドテスト(観測値を与えずに予測すること)を行った結果からは、90Srでは洪水による増加傾向を再現することができたが、137Csではいずれのモデルでも過大評価となった。このことから、氾濫原に堆積したCsには、河川・湖沼の底泥などよりも流出しにくくなる機構が働いていると考えられる。	レビュー論文(氾濫原)
119	流域モデル	Luigi Monte	Modelling multiple dispersion of radionuclides through the environment	Journal of Environmental Radioactivity	101	2	134-139	2010	環境中で放射性物質は、物理的・化学的・生物的に異なる多様なキャリアによって運ばれ、それが挙動を決定している。このように多媒体の関与を明示的に表現したモデルでは改善されるのかについて、土壌中濃度と流出水中濃度について検証している。結果、粒径や物性など様々なキャリアの形態・性状等により放射性物質の運搬の仕方は異なるが、流水中においては支配的な要因でないこと、一方で土壌中濃度を推定する場合にはいくつかのコンポーネントに分けて考える必要があることなどが分かった。	
120	流域モデル	吉本健太郎、古米弘明ら	簡易な流出解析モデルによる河川水中の放射性物質濃度の推定	水道協会雑誌	81	4	28-38	2012	本論文では、福島第一原発事故を受けた久慈川の水道取水地点における濃度が、簡易な流出解析モデルにより予測されている。ヨウ素やセシウムの物性に見合ったパラメータを設定することにより、それぞれの動態を予測することが可能となった。このようなモデルを利用することで、河川中の放射性物質濃度を予測しながら、水源からの取水制御などの判断ができる可能性が示されている。また、稼働中の原子力発電所について万一事故が発生した場合の水道水汚染リスクの評価にも利用できる。	

連番	分野	著者	論文名	雑誌名	巻	号	ページ	出版年	提言につながる情報	備考
121	森林	Myttenaere, C., Schell, W.R., Thiry, Y., Sombre, L., Ronneau, C., De Schriek, J.V.D.S.	Modelling of Cs-137 cycling in forests: Recent developments and research needed	Science of the Total Environment	136		77-91	1993	チェルノブイリ原発事故で放出された ¹³⁷ Csによって汚染された森林生態系におけるCs等のサイクルの理解のために、化学的性質が類似し森林生産性の栄養塩としてこれまで研究されてきたKの既存の見解と、森林の構成要素におけるKおよび ¹³⁷ Csの実験結果から、森林地帯の大気汚染後 ¹³⁷ Cs移動を説明する有益なモデルを構築するために必要な情報を提供している。	
122	森林	Barci-Funel, G., Dalmaso, J., Barci, V.L., Ardisson, G.	Study of the transfer of radionuclides in trees at a forest site	Science of the Total Environment	173-174		369-373	1995	チェルノブイリ原発事故後、高度に汚染されたフランス南東部のニースの北30kmのBoreon massifの森林地域において、土壌から樹(針葉樹)への ¹³⁷ Csや ⁹⁰ Srなどの放射性核種の移動についての研究であり、 ¹³⁷ Cs、 ⁹⁰ Sr、 ²³⁹⁺²⁴⁰ Puの植物に対する土壌の濃度因子が計算されている。	
123	森林	Avila, R., Moberg, L.	A systematic approach to the migration of ¹³⁷ Cs in forest ecosystems using interaction matrices	Journal of Environmental Radioactivity	45	3	271-282	1999	環境中の放射性核種の移行について、森林生態系における ¹³⁷ Csの移行の概念的モデル構築のために複数の生物・非生物的構成要素と相互関係を包括できるように、作業チャート使った系統的方法が適用され、主要な放射性核種の移行経路の導出方法が提案され、キノコによる ¹³⁷ Csの集積の経路解析など、因果関係の研究や既知知識を示したり研究の優先度を定めることも示されている。	
124	森林	Copplestone, D., Johnson, M.S., Jones, S.R.	Radionuclide behaviour and transport in a coniferous woodland ecosystem: The distribution of radionuclides in soil and leaf litter	Water, Air, and Soil Pollution	122		389-404	2000	英国CumbriaのSellafieldにある英国核燃料再処理プラントの近隣における針葉樹林地帯で、土壌と落葉の ¹³⁴ Cs、 ¹³⁷ Cs、 ²³⁸ Pu、 ²³⁹⁺²⁴⁰ Puおよび ²⁴¹ Amの空間的・時間的および深さ方向の分布を検討したもので、 ¹³⁴ Cs: ¹³⁷ Cs、 ²³⁸ Pu: ²³⁹⁺²⁴⁰ Puの同位体比の有意差はリター上の汚染は土壌のものよりもっと最近の1986年5月にCumbriaを覆ったチェルノブイリブルームの通過を通じた湿性降水物として運ばれたことを暗示している。	
125	森林	Saxén, R., Ilus, E.	Transfer and behaviour of ¹³⁷ Cs in two Finnish lakes and their catchments	Science of the Total Environment	394		349-360	2008	チェルノブイリ由来のフォールアウトによって負荷されたフィンランド南部の二つの淡水生態系において ¹³⁷ Csの長期的な挙動が研究され、魚類中の ¹³⁷ Csが高濃度が持続している理由として湖の貧栄養状態、低いpH、長い滞留時間に関係していること、陸上ではセシウムはキノコによって最も効率的に集積されていることが見出されている。	

2) 文献レビュー(抜粋)

a) 文献番号12

1. 基本情報

区分	土壌10	文献番号：12
タイトル (英文)	Vertical migration studies of ^{137}Cs from nuclear weapons fallout and the Chernobyl accident	
タイトル (和文)	核実験フォールアウトおよびチェルノブイル事故によるセシウム-137の降下移行に関する研究	
キーワード	セシウム, 深度分布, 移流, 拡散, 移流分散式, 原位置, 土壌試料	
著者	Almgren S., Isaksson M.	
文献	Journal of Environmental Radioactivity, Vol.91, No.1-2, pp.90-102, 2006	

(1) 対象地域

スウェーデン西部の33地点の表層土壌(チェルノブイル事故および核実験フォールアウトの影響評価のため)

(2) 重要な図表

Table 2

Transport parameters found in this and other studies

Study (reference)	v (cm/year) (range)	D (cm ² /year) (range)	v (cm/year) (mean \pm 1 SD) (median)	D (cm ² /year) (mean \pm 1 SD) (median)
Bossew and Kirchner (2004)	0–0.5	0.05–0.5		
Bossew and Strebl (2001)	0.09–0.16	0.68–1.02	0.14 \pm 0.09	0.79 \pm 0.49
Ivanov et al. (1997)	0.066–0.896	0.057–0.691		
Krstic et al. (2004)	0–0.26	0.34–1.47	0.068 \pm 0.10	0.76 \pm 0.32
Schuller et al. (2004)	0.03–0.11	0.015–0.18	0.056 median	0.048 median
Schuller et al. (2002)	–0.056–0.0014	0.0159–0.108	–0.012 median	0.043 median
Schuller et al. (1997)	0.001–0.047	0.253–3.807	0.019 median	1.24 median
Smith and Elder (1999)	0.32–1.073	0.118–2.253	0.68 \pm 0.26	0.22 \pm 0.076
Szerbin et al. (1999)			0.27 \pm 0.18	0.61 \pm 0.39
This study	0–0.35	0.06–2.63		

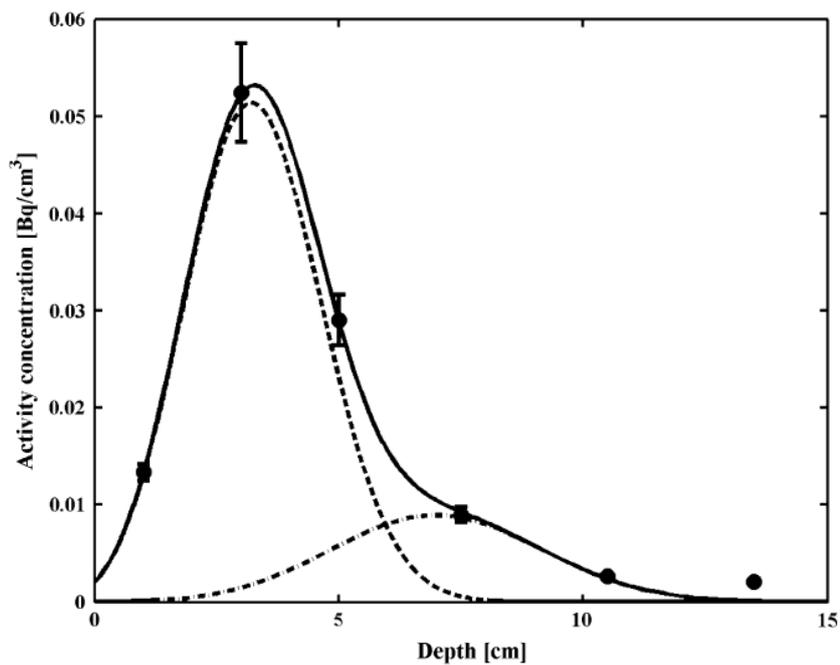


Fig. 3. An example of the total depth distribution (solid line) due to both Chernobyl and nuclear weapons fallout. The parameters from the fitting procedure were used to determine the distributions due to each source: Chernobyl (dashed line) and NWF (dash-dot line). The dots show measured values of the site Stenungsund.

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

(2) 流出挙動・経路

(3) 除染の際の留意点

(4) 担当者のコメント

スウェーデン西部の 33 地点を対象として、核実験によるフォールアウトおよびチェルノブイル事故に起因する ^{137}Cs の表層土壤中での深度分布から、 ^{137}Cs の浸透速度、分散係数を測定した。その結果、浸透速度は $0\sim 0.35\text{ cm/y}$ 、 $0.06\sim 2.63\text{ cm}^2/\text{y}$ となった。測定点の多さから、パラメーターの変動範囲が明らかになった。

b) 文献番号39

1. 基本情報

区分	森林での樹冠遮断	文献番号 39
タイトル	Interception of the Fukushima reactor accident-derived ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I by coniferous forest canopies	
著者	Hiroaki Kato, Yuichi Onda, and Takashi Gomi	
文献	Geophysical Research Letters, 39, L20403, doi:10.1029/2012GL052928, 2012	

(1) 対象地域

- ・ 栃木県（福島第一原発から南西へ 150km 離れた場所）
- ・ 福島第一原発から出た ^{137}Cs のトータルデポジションは $10,000 \text{ Bq m}^{-2}$ 未満の場所
- ・ ヒノキ林（40 年生, 2,500 本/ha）とスギ林（41 年生, 1,300 本/ha）に斜面プロット（傾斜>30 度）
- ・ 林外雨（1 地点）、林内雨（2L ボトル+直径 13cm ロート, 20 個）、樹幹流（5 本）を採取

(2) 重要な図表

Table 1 に、2011 年 3 月 11 日から 8 月 19 日までに林外雨、林内雨、樹幹流として林床に到達した雨量、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{131}I の量が示されている。最初の採水期間（3 月 11 日から 3 月 18 日）に雨として降下した量は全期間に降下した量の大部分を占めていた（ ^{137}Cs については 68%、 ^{131}I については 97%）。全期間における収支計算から、放射性セシウムはヒノキとスギのキャノピーにそれぞれ $62.3 \pm 15.8\%$ 、 $65.0 \pm 18.2\%$ が保持（遮断）されていた。これとは対照的に、 ^{131}I についてはヒノキとスギで遮断率が異なっており、それぞれ $25.1 \pm 2.7\%$ 、 $50.9 \pm 7.4\%$ であった。放射性セシウムについて、最初の採水期間における遮断率はヒノキで 92%、スギで 93% だった。また、4 月までは林外雨としての放射性セシウムのインプット量が林床到達量よりも多かったが、5 月以降はその関係が逆転し、キャノピーが放射性セシウムの 2 次的な供給源となっていることが示唆された。

Table 1. Amount of Rainfall, Throughfall, Stemflow, and Radionuclides Fallout at Forest Floor During Each Sampling Period^a

Sampling Period	Total Amount (mm)								^{137}Cs Deposition (Bq m^{-2})				^{134}Cs Deposition (Bq m^{-2})				^{131}I Deposition (Bq m^{-2})					
	Cypress				Cedar				Cypress		Cedar		Cypress		Cedar		Cypress		Cedar			
	RF	TF	SF	TF/RF	TF	SF	TF/RF	TF	SF	TF	SF	TF	SF	TF	SF	TF	SF	TF	SF			
2011/3/11-3/28	21.2	15.3	2.85	0.72	13.9	0.56	0.66	5420	434	18.5	389	12.5	5150	385	24.0	354	14.0	28400	19400	2470	13800	527
2011/3/28-4/1	9.24	7.42	0.73	0.80	5.67	-	0.61	1010	389	9.47	266	-	1010	327	5.34	231	-	821	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	-
2011/4/1-4/13	5.27	2.62	0.21	0.50	1.93	-	0.37	400	180	36.0	90.1	-	359	189	30.9	76.8	-	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	-
2011/4/13-4/27	24.9	14.9	2.29	0.60	12.7	0.10	0.51	328	265	6.64	280	0.24	328	242	7.27	262	0.49	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/4/27-5/20	54.2	34.5	7.38	0.64	36.1	0.99	0.67	345	483	<i>n.d.</i>	374	10.0	277	405	<i>n.d.</i>	370	4.68	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/5/20-5/28	43.7	29.6	5.92	0.68	29.7	0.52	0.68	111	200	7.88	146	2.32	121	175	5.93	117	2.42	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/5/28-5/30	64.6	44.0	7.65	0.68	45.5	1.28	0.70	71.2	137	<i>n.d.</i>	114	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	141	21.2	112	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/5/30-6/13	31.3	22.3	2.66	0.71	20.1	0.10	0.64	270	234	<i>n.d.</i>	329	0.85	195	216	<i>n.d.</i>	295	0.80	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/6/13-6/22	41.7	29.1	5.11	0.70	31.6	0.44	0.76	75.6	112	<i>n.d.</i>	202	1.89	68.6	92.2	<i>n.d.</i>	156	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/6/22-7/18	79.5	52.4	8.26	0.66	53.1	0.84	0.67	<i>n.d.</i>	328	40.7	414	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	270	<i>n.d.</i>	357	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/7/18-7/22	184	150	15.4	0.81	157	4.96	0.85	<i>n.d.</i>	52.9	<i>n.d.</i>	141	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	13.2	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
2011/7/22-8/19	159	112	11.2	0.70	131	5.68	0.83	<i>n.d.</i>	96.7	<i>n.d.</i>	32.5	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	47.1	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
Total	719	514	70	0.71	539	15	0.75	8030	2910	119	2780	28	7510	2460	95	2380	22	29200	19400	2470	13800	527

^aThe values in the table were Rainfall (RF), the mean of 20 measuring points for throughfall (TF), and the mean of 5 samplers for stemflow (SF); *n.d.* represents the deposition amount was below detection level.

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

本研究では、原発事故直後からのデータが得られており今後モニタリングデータを解析する上で非常に有用な結果を含んでいると思われる。

(2) 流出挙動・経路

降下した放射性セシウムは、針葉樹キャノピーの遮断によって林床への到達が遅れる。本研究期間（約6カ月）を通じて、林内雨と樹幹流によって林床への放射性セシウムの供給が続いていることから、その遅れの時間スケールは少なくとも数カ月のオーダーであると考えられる。

(3) 除染の際の留意点

本論文では次のことが指摘されている。

- ・針葉樹キャノピーは放射性セシウムを多く遮断するので、林床に対する二次的な放射能汚染源となりうる。
- ・このような汚染された樹木が焼失すること（例えば、森林火災）は、 ^{137}Cs と ^{134}Cs によって大気が汚染されうる。
- ・間伐は森林生態系の汚染を削減しうる一つの方法であると考えられるが、放射性廃棄物の貯蔵スペースがないことや森林に沈着した放射性核種の分布や移動に関する情報不足は除染政策を決める上で問題である。

このような状況では、本研究の結果は政策決定と除染対策で参考なるとと思われる。

(4) 担当者のコメント

原発事故から約6カ月経過した時点にあっても針葉樹キャノピーによって多くの放射性セシウム（>60%）が保持されていることに興味をもった。また、このこと示す観測データが得られていることを貴重に思う。一般に、森林流域からの汚濁負荷対策を検討する場合、流域でのインプットとアウトプットを把握するだけでは、汚濁負荷を左右する場（例えば、植生、土壌、地質）を特定できないため、問題解決のために効果的な対策がうてない。本研究での結果はこの点を再認識させられるとともに、今後の森林政策や除染にとって流域内部での放射性セシウムの挙動を調べることの重要性が理解できた。放射性セシウムの今後の挙動、例えば、樹体内への移動と蓄積、あるいは落葉・落枝としての林床への移動を評価することの重要性も本研究から理解できた。

1. 基本情報

区分	農地	文献番号：50
タイトル (英文)	Vertical migration of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{226}Ra in agricultural soils as observed in lysimeters under crop rotation.	
タイトル (和文)	輪作下のライシメーターにおける農地土壌中の ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{226}Ra の垂直分布	
キーワード	Migration; ^{60}Co ; ^{137}Cs ; ^{226}Ra ; Ploughed soil; Convection-dispersion model	
著者	Shinonaga T.; Schimmack W.; Gerzabe M.H.	
文献	Journal of environmental radioactivity, 79 (2), p.93-106, 2005	

(1) 対象地域

調査対象のライシメーターはオーストリアに位置し、夏は暑く、冬は湿度が高い半乾燥の気候である。ライシメーターのサイズは $1 \times 1 \times 0.75 \text{ m}$ であった。15 cm の砂利の排水層がそれぞれのライシメーターの底部に設置されている。4つのライシメーターには、1989年と1990年に採取された異なる土壌がそれぞれに入っている。各ライシメーターの Ap 層 (0-20 cm) の土壌の性質は Table 1 に示されている。

サンプリングはそれぞれのライシメーターから 3ヶ所ずつ行った。サンプリングした 3ヶ所はライシメーター内で正三角形になるように配置され、1ヶ所だけ深さが異なった。

(2) 重要な図表

放射性物質の垂直分布は、一次元の対流・分散輸送の微分方程式を用いて評価された (1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

ここで、 C は土壌溶液中の濃度 (Bq cm^{-3})、 t は時間 (a)、 x は土壌深度 (cm) である。溶質のみかけの輸送速度 v (cm a^{-1})、みかけの分散係数 D ($\text{cm}^2 \text{ a}^{-1}$) は一定である想定である。溶質の吸着等温線は、 $S = K_d C$ で表される想定である。ここで、 K_d は分配係数、 S は溶質の吸着画分の濃度である。この時、 v は浸透水の速度 v_w と遅延係数 R_D によって $v = v_w R_D$ で、 D は水の分散係数 D_w と R_D によって $D = D_w R_D$ で求められ、(2) 式が成り立つ。

$$R_D = 1 + \frac{\rho}{\Theta} K_d \quad (2)$$

ここで、 ρ はかさ密度、 Θ は土壌水分含量である。

Fig.2 には、1999年の土壌 I における ^{137}Cs 活性の深度分布を示した。ひとつのライシメーター内での空間的変化は大きかった。

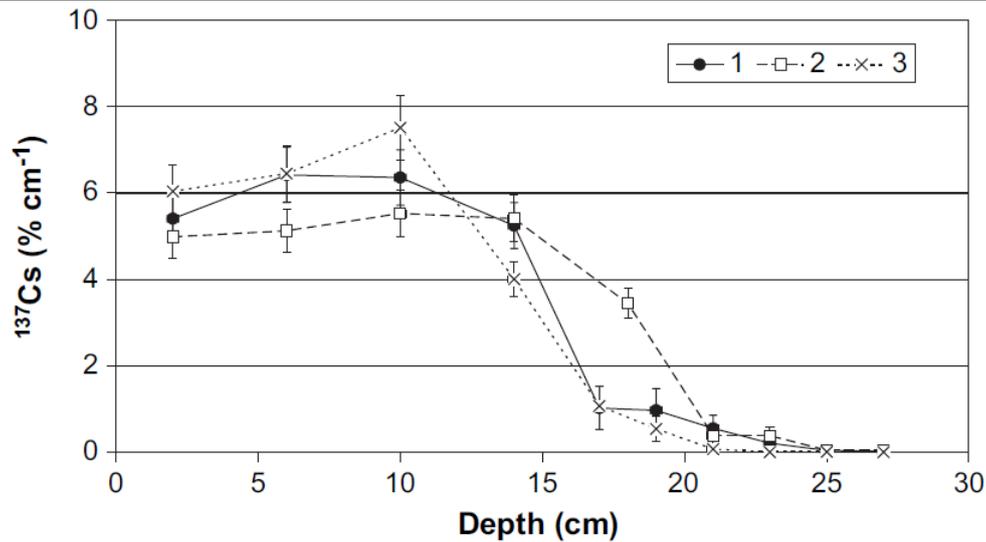


Fig. 2. Depth distribution of the activity of ^{137}Cs in the three pits (1–3) of soil I in 1999. The activity is given as percentage of the activity applied to the lysimeter in 1990 per cm soil layer.

Table 2には、1990-1999年の20 cmのAp層を想定して、対流分散モデルによって評価された4つのライシメーター土壌における各放射性物質のみかけの輸送速度 (v) と分散係数 (D) が示されている。 ^{137}Cs の輸送速度は最大で 0.3 cm a^{-1} で、0も見られた。一方で分散係数は大きく、 ^{137}Cs では最大で 3.1 cm a^{-1} であった。輸送速度と分散係数の間に関連性はなく、独立性を示した (ピアソンの相関係数 $r=0.03$ 、スピアマンの相関係数 $R=-0.08$ 、 $p>0.05$)。

蒸発散率が高く、浸透水の量も小さかったことにより、 v が小さくなったと考えられた。耕作期間中は下方への対流はないと考えられ、冬期期間中は浸透水が少なかったために浸透速度も小さかった。 v は土壌タイプによる有意な違いは見られなかったが ($p>0.05$)、 D はIVの土壌タイプで他の土壌よりも高くなった ($p<0.01$)。これは、土壌IVの不均一性が他の土壌より高かったためであると考えられた。

Table 2

Estimated apparent migration velocity v (cm a^{-1}) and apparent dispersion coefficient D ($\text{cm}^2 \text{a}^{-1}$) of ^{60}Co , ^{137}Cs and ^{226}Ra in the four soils (plough depth in cm) of the lysimeters evaluated by a convection–dispersion model, assuming a constant thickness of the Ap horizon of 20 cm during the migration period from 1990 to 1999

Soil/pit	^{60}Co			^{137}Cs			^{226}Ra		
	v	D	RSS	v	D	RSS	v	D	RSS
I/1	0.1	0.2	2.1	0.1	0.1	2.3	0.1	0.2	2.3
I/2	0.3	1.0	1.7	0.3	1.1	1.7	0.0	1.5	6.6
I/3	0.3	2.3	2.3	0.3	2.4	1.6	0.3	3.6	0.8
II/1	0.3	4.3	1.7	0.3	2.0	2.4	0.4	2.2	2.1
II/3	0.0	0.6	3.5	0.0	0.4	3.1	0.0	0.8	6.1
III/2	0.0	1.4	1.5	0.0	1.4	1.3	0.0	1.7	2.5
III/3	0.3	0.2	1.6	0.3	0.2	1.1	0.3	0.2	1.7
IV/1	0.2	5.0	0.9	0.0	3.1	2.3	0.2	4.9	1.0
IV/2	0.0	2.5	3.0	0.0	2.4	2.8	0.0	4.6	1.5
IV/3	0.0	2.2	1.1	0.0	2.0	1.2	0.0	3.6	1.6

RSS = residual sum of squares ($(\% \text{ cm}^{-1})^2$).

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

該当なし。

(2) 流出挙動・経路

Ap 層の厚さや Ap 層の境界線の位置は、耕作土壌での移行モデルにおいて重要なパラメータの一つである。

一般的に、溶質の輸送速度の小ささは、土壌への溶質の吸着性が高いことによる遅延の大きさを示す。本文献で求めたかく乱土壌での ^{137}Cs の移動速度を未かく乱土壌と比較した場合、熱帯雨林や永続的な牧草地のような異なる生態系においても非常に小さい移動速度であることが報告されている (Bossew and Strebl, 2001 ; Schuller et al., 1997 ; Szerbin et al., 1999 ; Bunzl et al., 2000)。その一方で、 ^{137}Cs の高い移動性を示す報告もある (e.g. Arapis et al., 1997 ; Hořlgýe and Maly, 2000 ; Ruřhm et al., 1996 ; Schimmack et al., 1997 ; Strebl et al., 1996 ; Velasco et al., 1997)。これは、放射性物質の移動が土性、水環境、有機物、植物根のような多くの土壌パラメータに依存するためである。

(3) 除染の際の留意点

該当なし。

(4) 担当者のコメント

未かく乱土壌ではなくより実際の農地に近いライシメーター土壌を用いて移動係数を求めている点で有用である。本文献は蒸発散量が高いため結果を一般化することは難しいが、条件の異なる土壌と同様に ^{137}Cs の移動速度が小さいとの結果が得られている点でも参考になりうる。

d) 文献番号87

1. 基本情報

区分	市街地	文献番号：87
タイトル (英文)	Accumulation of ^{137}Cs in puddle sediments within urban ecosystem	
タイトル (和文)	都市環境中での水たまりへの ^{137}Cs の集積	
キーワード	^{137}Cs , Activity concentration, Puddle sediments, Local migration, Urban ecosystem	
著者	Seleznev, AA; Yarmoshenko, IV; Ekin, AA	
文献	JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, Vol.101, 643-646, 2010	

(1) 対象地域

エカテリンブルグ、ロシア

(2) 重要な図表

Fig.3 は他の研究者による、表層年代ごとの、表層から深さ 15cm までの ^{137}Cs 土壌含有量。たとえば表層が 1980 年に生成された土壌であれば、表層から深さ 15cm までに約 24Bq/kg の ^{137}Cs が含まれているということになる。

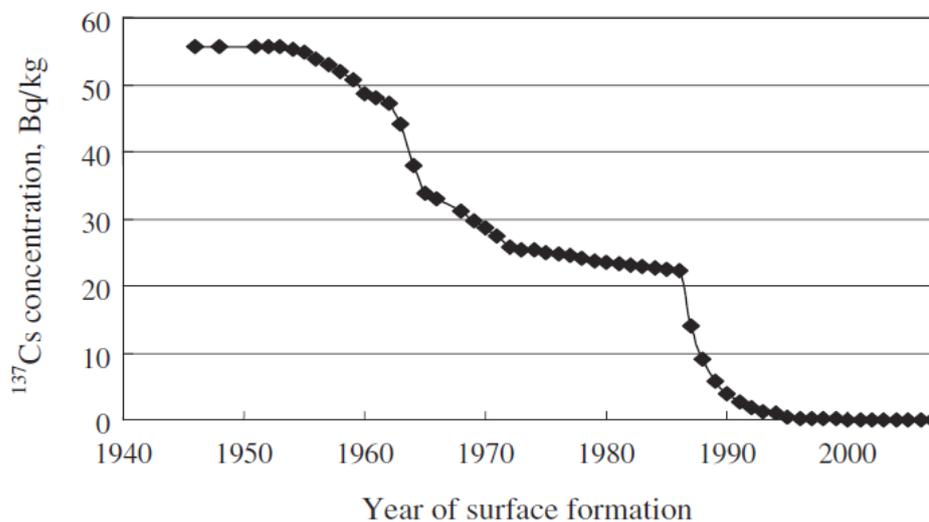


Fig. 3. Modeling concentration of ^{137}Cs in upper 15 cm layer of soil in 2007 in dependence on year of surface formation.

Table.1 はエカテリンブルグ市内の 8 区画（合計 109 か所）での土壌サンプルの ^{137}Cs 測定結果のまとめである。算術平均、幾何平均、100Bq/kg 以上が検出されたサンプリング場所の割合が示されている。サンプル数の記載は見当たらなかった。

Table 1

Arithmetic, geometric mean and portion of samples with ^{137}Cs concentration >100 Bq/kg by districts of Ekaterinburg city. Results based on gamma spectrometry measurements in samples of puddle sediments.

District	Arithmetic mean of ^{137}Cs concentration, Bq/kg	Geometric mean ^{137}Cs , concentration, Bq/kg	Portion of samples with ^{137}Cs concentration >100 Bq/kg
West	147	76	0.3
Center	88	71	0.25
East	73	48	0.23
South West	66	36	0.1
South	64	52	0.12
South East	51	49	0
Suburb			
North West	44	41	0
Suburb			
North East	12	7	0
Suburb			

また筆者らは水たまり底泥中の ^{137}Cs の溶存態への大気降下量の寄与率を推定した。水たまり底泥中の溶存態濃度 C_{water} (Bq/kg)は(1)式で与えられる。

$$C_{water} = I \cdot k \cdot \frac{S}{m}, \quad (1)$$

ここで、

I : 20年間の ^{137}Cs 大気降下量(Bq/m²)。約 1000Bq/m²。

k : 大気降下量のうち水たまりへ溶存態として流出した割合。

S : 水たまりの集水域面積(m²)。平均的な面積は 200m²。

m : 水たまりの底泥質量(kg)。平均的な質量は 400kg。

また、懸濁態濃度を C_{soil} とすると、底泥中の ^{137}Cs の濃度 C_{sed} は(2)式で表される。

$$C_{sed.} = I \cdot k \cdot \frac{S}{m} + C_{soil}, \quad (2)$$

ここで、Fig.3 より $C_{soil}=20$ Bq/kg、また測定値より $C_{sed}=80$ Bq/kg を(2)式に代入すると、(3)式のようになり、 $k=0.12$ と求めることが出来る。

$$C_{sed.} = \frac{1000 \cdot k}{2} + 20 = 80. \quad (3)$$

すなわち、20年間の大気降下量の12%が雨水に溶けて水たまりの底泥へと集積されているということになる。また $C_{water}=60 \text{ Bq/kg}$ であり、地表面に降下して雨水に溶けて集積された ^{137}Cs が水たまり底泥の ^{137}Cs 量の75%を占めていることが分かる。

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

特に雨水が溜まりやすい場所（降雨のたびに水たまりができる場所）の土壌中には放射性物質が蓄積されやすい。

(2) 流出挙動・経路

大気降下物として降下した ^{137}Cs は雨水に溶け出し、水たまりへと流入して底泥中に集積されていく。

(3) 除染の際の留意点

特になし

(4) 担当者のコメント

測定箇所が多く、エカテリンブルグの広い地域に調査が及んでいる。

e) 文献番号 91

1. 基本情報

区分	河川	文献番号：91
タイトル (英文)	^{137}Cs and ^{90}Sr in water and suspended particulate matter of the Dnieper River-Reservoirs System (Ukraine)	
タイトル (和文)	ドニエプル川水系に（ウクライナ）における水中と懸濁粒子中の ^{137}Cs ならびに ^{90}Sr	
キーワード	annual discharge, Dnieper River, river water, suspended particulate matter, ^{137}Cs , ^{90}Sr	
著者	Sansone, U., Bellia, M., Voitsekovitch, O. V., Kanivets V. V.	
文献	Science of the Total Environment 186 (1996) 257-271	

(2) 対象地域

チェルノブイリ事故地域の河川（プリピャチ川）から、約 500km 下流の黒海までの経路。

(2) 重要な図表

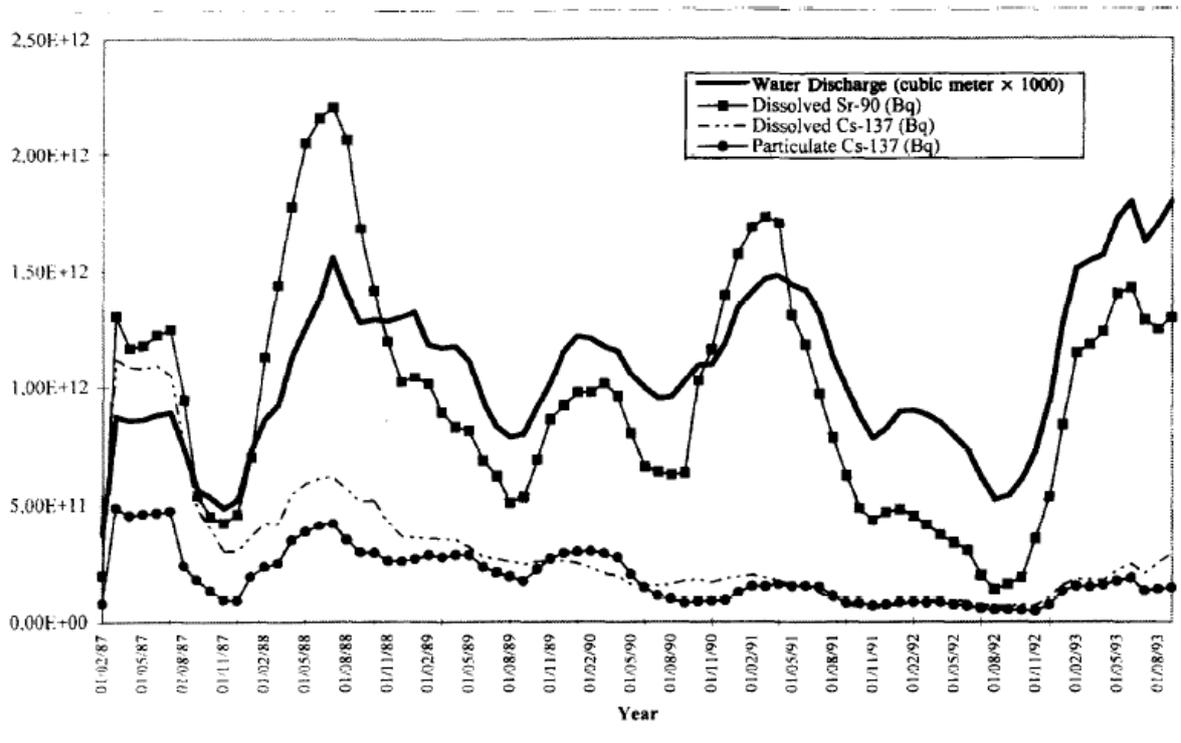


Fig. 3. Patterns of ^{137}Cs and ^{90}Sr and annual water discharge in the Pripyat river from 1987 to 1993. Experimental data were smoothed using a moving average procedure.

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

定期的・長期的モニタリングの成果が現れた報告であり、モニタリングの重要性が認識できる。

(2) 流出挙動・経路

Sr-90 の河川水中濃度は出水時の濃度増加が明確で流量との対応が強い。一方 Cs-137 では、流量との対応は弱い。また、Cs-137 は途中の人造湖での堆積物への沈降移行が顕著。

(3) 除染の際の留意点

内部被ばく、外部被ばくを含めた被ばく経路解析の下で、対策の優先度を考える必要がある。

(4) 担当者のコメント

チェルノブイリ事故で汚染を受けた近傍河川は、下流の首都キエフの水源であり、沿線の灌漑・内水漁業にも深く関わっている。福島事故と比較したとき、自然条件の違いによる挙動の違いのみならず、(むしろ出発点として)社会条件の共通点・相違点に着目して被ばく経路・被ばく線量の考察を行うべきである。

f) 文献番号 101

1. 基本情報

区分	河川、農地、森林	文献番号：101
タイトル (英文)	Discharge of dissolved and particulate ¹³⁷ Cs in the Kuji River, Japan	
タイトル (和文)	久慈川における溶存態と粒子態 ¹³⁷ Cs の流出	
キーワード	Kuji River; ¹³⁷ Cs; discharge; existence forms	
著者	T.Matsunaga, H.Amano, N.Yanase	
文献	Appl. Geochem., 6(2), 159-167, 1991.	

(3) 対象地域

The Kuji River has a watershed of - 1500 km² (Fig. 1). It originates from the Yamizo mountain area in the center of Japan, which area consists of steep hills, covered with forests. It runs downstream through an agricultural plain and flows into the Pacific Ocean. It travels -120 km with no artificial control structures. There are no nuclear facilities along the river except at its mouth.

(2) 重要な図表

Table 2. Hydrology, particulate material, radioactivity and discharge of ¹³⁷Cs under high flow conditions

Experiment	Sampling date	Hydrological condition		Particulate material		Radioactivity		Discharge	
		Preceding precipitation* (mm)	Flow rate (m ³ /s)	Concentration (mg/l)	IL‡ (%)	Dissolved (mBq/l)	Particulate (mBq/l)	Dissolved (Bq/d/km ²)	Particulate (Bq/d/km ²)
H1	14-04-1988	31.3†	75.4	96	15	0.23 (8)§	0.77 (7)	1188 (10)	4058 (8)
H2	15-04-1988	8.5	59.4	39.3	15	0.08 (14)	0.04 (15)	333 (16)	1325 (6)
H3	16-04-1988	0.2	39.3	18.7	22	0.07 (11)	0.06 (5)	237 (19)	603 (7)
H4	17-04-1988	0.0	27.5	9.8	19	0.07 (14)	0.02 (15)	285 (10)	216 (9)
H5	18-04-1988	0.0	23.1	9.5	22	0.10 (25)	0.08 (7)	313 (19)	176 (10)

* As preceding 1 day of the mean in the watershed, except for H1.

† As preceding 2 days of the mean in the watershed.

‡ Ignition loss.

§ Figure in parenthesis denotes error in %.

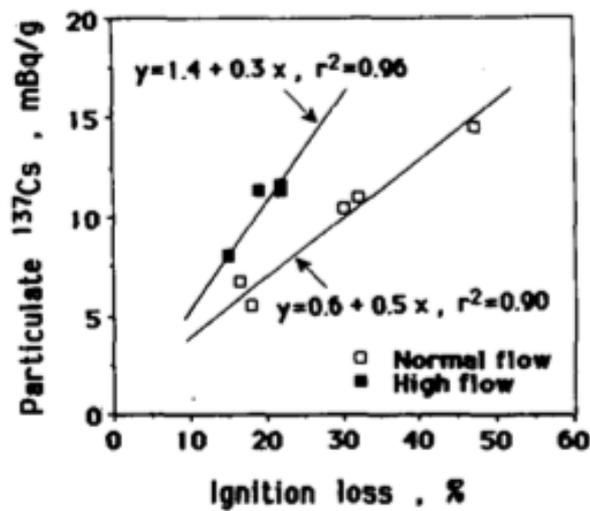


FIG. 6. Correlation between the particulate ¹³⁷Cs content and the ignition loss of the particulate material.

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

(2) 流出挙動・経路

モデルによる放射性セシウムの移行動態解析に必要なデータが報告されている。

- ・ 粒子態放射性セシウムの存在割合 高水量期 > 低水量期
- ・ 粒子態放射性セシウムの含有量は灰化減量と正の相関性有り—有機物との親和性を示唆。
- ・ 分配係数 $1.0 \pm 0.6 \times 10^5$ ml/g
- ・ 1987,1988 年の放射性セシウム流出量 蓄積量の 0.04%/y (壊変補正済み)

(3) 除染の際の留意点

(4) 担当者のコメント

放射性セシウムの移行に及ぼす降雨の影響を検討した観測とその結果は、今後の福島県内の河川における挙動を予測する上に置いて非常に重要な知見である。また、存在形態（溶存態 + 懸濁態 ¹³⁷Cs）や分配係数の見積もりは、今後、福島での河川における放射性セシウムの移行動態を解析する基礎データとして活用することが出来る。

g) 文献番号 116

1. 基本情報

区分	モデル	文献番号：116
タイトル (英文)	Review and assessment of models for predicting the migration of radionuclides through rivers	
タイトル (和文)	河川からの放射性核種の移行を予測するモデルのレビューと評価	
キーワード	Model, River, Contaminant, Decision making	
著者	Luigi Monte, Patrick Boyer, John E. Brittain, Lars Håkanson, Samuel Lepicard, Jim T. Smith	
文献	Journal of Environmental Radioactivity, Volume 79, Issue 3, Pages 273-296, 2005	

(1) 対象地域

The River Po (north Italy) : ただしモデル間の比較検証の対象地域として

(2) 重要な図表

河川水と底泥の放射性核種のやりとりは、以下の 3 つの式の組み合わせで表現される。

○河川水→底泥

$$F_{ws} = (v + v_s) C_w$$

ここで、

F_{ws} : 河川水から底泥へのフラックス

v : 溶存態成分の底泥への直接的な移行速度

v_s : 沈降による除去速度

C_w : 河川水中濃度

○底泥→河川水

$$F_{sw} = K_{sw} D_{ep}$$

ここで、

F_{sw} : 底泥から河川水へのフラックス

K_{sw} : 移行速度

D_{ep} : 底泥中濃度

○底泥表層→底泥深層

$$F_{ds} = K_{ds} D_{ep}$$

ここで、

F_{ds} : 底泥表層から深層へのフラックス (不可逆)

K_{ds} : 移行速度

D_{ep} : 底泥中濃度

各モデルにより河川水中および魚類中の ^{137}Cs の濃度の予測結果を以下の図に示す。

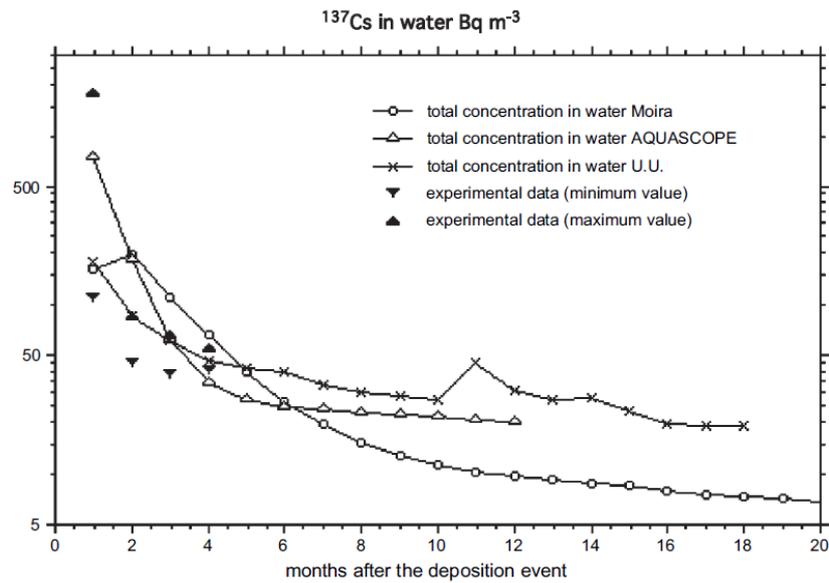


Fig. 1. Results of a model intercomparison exercise. The scenario of contamination assumes a pulse deposition of ^{137}Cs on the catchment of a river.

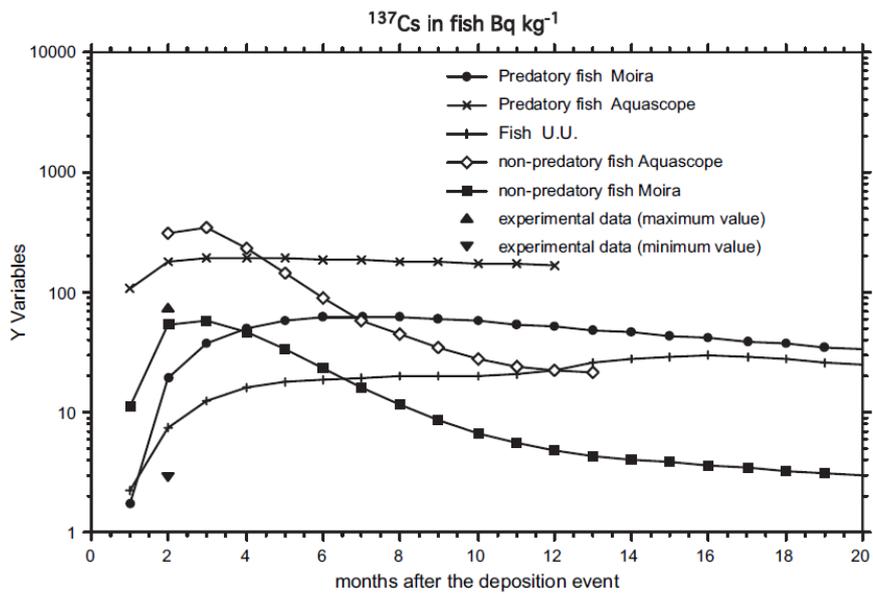


Fig. 2. Comparison of the models AQUASTAR, CASTEAUR and MOIRA for a scenario of contamination involving a pulse release of ^{137}Cs into river water. The output is the concentration of radionuclide in predatory fish species 100 km downstream the release point.

2. 提言につながる情報

(1) モニタリングへの活用

河川水中濃度は魚類中濃度に比べて迅速に減少し、また濃度レベルも小さいことが、モデル予測値ならびに観測値で明らかになっている。したがって、経時的な傾向を把握するためには検出下限値を 1Bq/L より引き下げてモニタリングを行っていく必要がある。

(2) 流出挙動・経路

河川における放射性物質の挙動は、一般的な移流拡散によるもの、底泥とのやり取りによるもの、生物による取り込みによるものの組み合わせで考えられる。

底泥とのやり取りについては、水相（溶存態・懸濁態）、底泥表層、底泥深層の 3 つに分けて考えられる。水相から底泥表層への移行プロセスとしては、沈殿、拡散、生物攪乱などがある。底泥表層から水相への移行プロセスとしては、浸食、拡散、生物攪乱などがある。底泥表層から深層への移行プロセスは、不可逆なものとして考慮されることがある。

(3) 除染の際の留意点

(4) 担当者のコメント

河川水中の濃度を予測する上で重要なのは、底泥とのやり取りの記述方法である。プロセスとしては複雑であるが、それらを一体のものとしてシンプルに扱うか、別々に扱うかは、モデルによりアプローチが異なる。複雑なモデルは詳細な予測ができるように見えるが、パラメーターが増加するため正確に予測できるとは限らない。

モデルにより予測結果にばらつきはあったが、概して河川水中濃度は初期から迅速に減少する一方、魚類中濃度は時間をかけて増加した後に緩やかに減少するといった特徴が挙げられた。

(4) 提言につながる内容のまとめ

各分野で行った文献のレビュー結果に基づき、提言につながる内容として以下にとりまとめた。

1) 土壌

セシウムなどの放射性物質と土壌との相互作用に関しては、1960年代以前は固液相間の濃度比である分配係数で吸着量を評価しているが、種々の環境条件、測定方法によって分配係数値のオーダーが異なっている。そのため、1970～1990年代は、バッチ法以外のカラムを用いた方法や原位置観測によってより精度の高い値を測定したり、線形吸着モデルより汎用性の高い非線形モデルや速度モデルの提案がなされたりしている。1990年代より錯形成モデルが提案されるようになると、分配係数のpHや共存イオンなどの依存性を合理的に説明できるようになり、吸着量が大きい鉄鉱物などを対象として安定度定数が求められるようになってきている。また、脱離しにくい内圏錯体と脱離しやすい外圏錯体とに区分し評価するモデルも構築された。2000年以降は分子動力学モデルも開発され、固相のどの部位に、どのように放射性核種が吸着するのかの説明も可能になっている。このように吸着機構を微視的に説明できるようになってきたが、鉱物と核種との安定度定数をそれぞれ測定する必要があるため、この成果を実フィールドに適用するまでには至っていない。また、セシウムは他の放射性核種と比較して、分配係数が高く、不可逆的吸着の割合が高いことが特徴であることから、種々の土壌でどれくらいのオーダーの分配係数になるのかを評価することが重要であると考えられる。諸外国でも、チェルノブイル事故の影響を評価するためのデータを取得していたり、各国の原子力発電所や放射性廃棄物処分施設周辺で分配係数値を取得していたりするので、それらの値を参考にして評価することが望まれる。

2) 森林

森林域に沈着した放射性セシウムの多くは樹冠で補足され、その後の降雨に伴って雨水と共に林床に至り、土壌上部の0層と土壌表層に保持される。根から吸収された放射性セシウムは樹体の葉、幹、樹皮、枝に移動し、落葉等により林床に至る循環をしている。従って、森林でのモニタリングでは、樹冠から樹体・林床への移動、土壌深さ方向の濃度と蓄積量のプロファイル、および移行過程を考慮すること、土壌調査は標準的な手法に従うことが示されている。また、汚染樹木の伐採や焼却に際しては、樹冠の処理に注意を払う必要があること、1950～1960年代の核実験やチェルノブイリ原発事故由来の放射性セシウムの多くは、土壌上部の腐植層と土壌表層部分に集積しており、土壌表層から下層への移動速度は非常に遅いこと、福島原発事故後の調査結果は、樹冠遮断と林床への到達、土壌表層への集積を示している。森林斜面から河川へ移動に関する重要な経路は、降雨時の地表流による表面侵食に伴う移動であることが示され、実際、降雨時流出時のSSと放射性セシウム濃度には高い相関が認められる。また、森林の放射性核種の挙動をモデル化する際は、気候・植生・地形の違いのため、海外のモニタリング結果を直接適用するのは難しく、今後も現地での継続調査が望まれる。

3) 農地

農地の放射性セシウム汚染は、ほとんどが大気から土壌へ降下することで起きている。農地に降下した放射性セシウムによって汚染された農作物が健康被害を引き起こす恐れがあるため、バッチ試験やライシメーター試験による放射性セシウムの土壌への吸脱着の特性やメカニズムの解明、およびライシメーター試験や実態調査による土壌から農作物への移行係数の算出がこの分野での主題となっている。さらにこれらの研究から、植物への移行防止や植物を用いた除染（ファ

イトレメディエーション)に関する研究へと発展している。

土壌への吸脱着の特性やメカニズムから、重度に汚染される可能性のある農地をある程度予測可能であると考えられるが、外的環境、農作物の種類、農地管理の方法などにも放射性セシウムの動態が左右される。浸透水中の濃度は低く、また、下層よりも表層の0-5cmで濃度が高いことから、下層への移行速度は小さいと考えられる。系外への移動は、土壌粒子に吸着した形で流出すると考えられ、特に粒径の小さい土壌で濃度が高くなる可能性がある。

4) 市街地

市街地は森林や農地と異なり、多様な建物(屋根や外壁)、道路(アスファルト、コンクリート、敷石、砂利など)、草地、樹木など複雑な地表面特性を有している。したがって、市街地における放射性物質の移動や消長の評価には、地表面材料の違いや水路などの雨水の流出経路の構造が影響すること、流出経路における窪みの有無が重要であることなどを考慮することが求められる。特に、窪みなど流出雨水が滞留しやすい場所などで土壌に一旦浸透すると、放射性物質は流出しにくく残留しやすいことなどに留意が必要である。地表面の放射線量率の低減を評価するために、実測に基づく物理モデル式や雨水流出移動から堆積や集積過程などを考慮したモデル式を提案している研究事例がある。したがって、市街地における挙動を定点観測する場合は、水文条件や土地利用も含めた包括的な通年のモニタリング計画を立案することが望まれる。また、市街地での移動や消長に関係するものとして、水道や下水道を介した移動や濁質除去過程で汚泥に濃縮されることも別途考慮する必要がある。

5) 河川環境

河川環境に関する放射性核種の移行研究を促してきたのは、i)大気圏内核実験による地球規模での放射性核種の拡散、ii)平和利用・軍事利用の原子炉からの河川への核種放出、そしてiii)チェルノブイリ事故である。前2者では、a)核種の移行動態がおもな焦点であり、b)河川水-浮遊粒子-堆積物間の核種分配・交換反応や、c)遠方への移動相が研究された。陸地土壌から河川等の表面水系への移動過程・移動率も、もっぱら実測手法で論じられている。チェルノブイリ事故を受けて、これらの研究課題は一層の重要度を増している。そしてさらに、d)水圏生態系内の核種移動研究、e)核種の河川移行に関わる人の被ばく線量の低減対策研究という2つの軸が新たに提起されている。これらの研究の結果、核種の種類・事故後の経過時間が、核種の河川移行動態の大きな決定因子になることが明らかになっている。対策に関しては、移行の阻止は困難であり、摂取に関わる対策が最も現実的・効果的であることが指摘されている。

6) 河川流出

河川水中の放射性セシウムの放射能濃度は、事故時からの時間の経過とともに減少する傾向にある。このことは、河川流域から河川への移行量が減少することを示唆している。ただし、チェルノブイリ原発事故前に比べてまだ高い濃度にある。また、春先の雪解けや降雨により放射性セシウムの移行量は急激に増加し、その大部分が粒子態として移行することが報告されている。そのため、河川流域からの放射性セシウムの移行量は今後、福島県内では減少する可能性が予想される。しかしながら、河川における放射性セシウムの移行挙動については、除染活動が実施され始めた森林域でのモニタリングとともに都市域でのモニタリングを継続し、放射性セシウムの存在形態とその保持能としての安定性を検討することが必要である。

7) 流域モデル

集水域や河川、湖沼を対象とした放射性物質の挙動を記述するモデルは、濃度低減の度合いを経験的な式で表現するものから、移流拡散モデルをベースに物理・化学・生物的作用を考慮する複雑なものまで、様々なタイプのもが存在している。しかしその多くは、コンパートメントとして水相、底泥表層、底泥深層、生物といった区分はしつつも、できるだけ単純な数式で表すものであり、複雑なモデルには批判的な文献が複数見られる。その理由としては、未知パラメーターが多くなること、複雑にしても再現性が向上しないことなどが挙げられている。

一方で、事故直後の濃度分布や特定地域における対策検討など、より詳細に現象を解明・予測したい場合には、やはり移流拡散等のメカニズムを考慮した詳細なモデルが必要とされる。結局のところ、モデルはその目的や課題に応じて選定されるべきであり、適切に活用することで今後の見通しや対策効果の予測、リスク管理等に用いることが可能となる。

モデルを用いて放射性物質の挙動をマクロに見た場合、モデルや流域によらず共通して、河川水中や湖沼水中の濃度は迅速に低減する一方、生物や底泥の濃度は時間遅れで上昇し、徐々に減少するといった傾向が見られる。実際、福島県やその周辺でも、水中の濃度はほぼN.D.（不検出）である一方で、生物や底泥中の濃度がなかなか減少しないといったことも観測されている。したがって、現在福島県やその周辺で生じている現象をよりよく理解し、今後の汚染状況を予測するためには、特に水中の濃度の検出下限値（現在1Bq/L）を限定した場所・時期でもよいので引き下げて、水中の濃度レベルを把握しておく必要がある。

（5）知見整理を通じた提言

福島第一原子力発電所から多量に放出された放射性物質は広域に拡散して、森林だけでなく、農地や市街地など様々な土地利用の地域に沈着した。流域に沈着した放射性物質の多くは、懸濁態として存在しており、降雨に伴う雨水流出現象により流域内を上流から下流へと移動して、最終的には河川を通じて沿岸域に到達して底泥として蓄積され、微粒子であれば海洋域と輸送されていると考えられる。

今回実施した文献調査と知見整理を通じて、次のような提言と今後の課題を示すことができる。

1) 提言1：環境中での挙動を明らかにするための「モニタリング」の実施

流域に沈着した放射性物質は降雨流出に伴い、河川を通じて湖沼や沿岸域などの水系へ流下・移動する。流域における放射性物質の将来の分布を予測するためには、流域単位での物質収支を考慮することが重要である。また、下記の点に留意した長期的かつ戦略的なモニタリングを実施する必要がある。

- a 森林、農地、市街地における放射性物質の沈着や保持状態、さらに流出・移行の挙動は異なる。たとえば、森林では落ち葉や土壌の層での保持や水の浸透にともなう流出、雨天時の土壌流出、落葉を含めた樹冠から樹体内あるいは林床への移動、農地では、水田における代かき時の落水、雨天時の土壌流亡、土壌から農作物への移行、刈り取りによる系外への搬出、市街地では、水道取水による移行や側溝も含めた下水道などの雨水排除システムにおける移動、さらには濁質除去による汚泥への濃縮などが重要な経路として考えられる。
- b 春先の雪解けや豪雨時は、懸濁態として急激に流出・移行量が増加する。
- c 河川水中では低濃度であっても、流量が多い場合は下流への移動する物質量は多くなる。
- d 半減期の長い放射性物質は、植物や水生生物への移行量や蓄積量が多くなる。

2) 提言2：時空間スケールを踏まえた「流出挙動・流出経路」の理解

半減期、土壌粒子への吸着性などの性質は、物質によって異なる。そのため、短期および長期の視点で、下記の点に留意した放射性物質の環境中での流出挙動や流出経路を理解する必要がある。

- a pHや有機物濃度などの環境要因によって、放射性物質は環境中において溶存態、懸濁態と存在する形態が異なる。
- b 陸域から河川への流出や流下する過程において、放射性物質の形態が変化する。その場合、固相と液相の間でのスケールの小さい移動現象と、陸域からの雨天時の河川への流出、河川中での流下過程における浮遊粒子と河床堆積物との間の交換や移行などのスケールの大きい現象があることに留意すべきである。

また、除染のための留意点として、放射性物質の残留性は、建物（屋根や外壁）、道路（アスファルト、コンクリート、敷石、砂利）、草地、樹木など地表面特性に依存します。また、雨水マスや側溝の窪みなど土砂が堆積しやすい場所では、放射性物質が高濃度に存在するホットスポットになる可能性が指摘される。

(6) 今後の課題

1) 今後の課題1：戦略的な知見の蓄積とモンスーン地域での動態評価

環境省や文部科学省などにより、放射性物質の環境モニタリングや環境動態に関する研究が実施されている。モニタリングデータは公開されているが、研究・調査結果は現段階では限られたものしか学術論文や報告書として公開されていない。今後もこれらの最新成果を体系立てて蓄積することが必要である。

2) 今後の課題2：経験的な式から移流拡散等のメカニズムを考慮したモデル化

流域レベルでの環境動態を予測する場合は、放射性物質の環境中での挙動を詳細に表現できるモデルが求められる。複雑なモデルには、必然的に未知パラメーターが多くなることから、再現性を確認できるようなモニタリングデータ蓄積が必要となる。

また、対策効果の評価や、リスク管理等の目的に応じて、単純な経験式や詳細なモデル式から現場に即したものを選択する必要がある。

さらに、放射性物質の分配係数は環境条件によりオーダーレベルで変化することが報告されている。コンパートメントとして水相、底泥表層、底泥深層、生物といった区分と移流拡散等のメカニズムを考慮したモデル構築において、他のパラメーターの精度とのバランスから分配係数の設定のあり方やモデルの再現性を議論する必要がある。



5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

放射性物質（放射性セシウム）の環境中での挙動に関する学術的な報告を収集し、森林、農地、市街地、河川等の対象場ごとに知見を整理し、それぞれの場所における放射性物質の移動や消長の特徴を文献に記載されている重要な関連情報とともにまとめることができた。

(2) 環境政策への貢献

環境省水・大気環境局水環境課と密接に連絡をとり、広域に拡散し沈着した放射性物質の流域内における移動と消長について理解する上で留意すべき知見や、今後のモニタリング時の注意点について情報提供することに貢献できた。

<行政が既に活用した成果>

関東地方環境事務所、福島再生事務所内除染情報プラザ等で啓発用資料として、当研究課題の報告書及びリーフレットを用いている。

<行政が活用することが見込まれる成果>

当研究課題の報告書を送付した全国の自治体で、資料としての活用が見込まれる。また、市民への啓発用資料としてのリーフレットの活用が期待される。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

1) 日本水環境学会特別講演会「放射性物質の環境動態～チェルノブイリ原発事故から学ぶ～」報告、水環境学会誌、35 (A) , 12, 414-415 (2012)

2) 平成24年度環境研究総合推進費【ZRFb-12T1】「流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理」成果発表会報告、水環境学会誌、36 (A) , 5, 173-174 (2013)

(2) 口頭発表（学会等）

特に記載すべき事項はない。

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナー等の開催（主催のもの）

1) 特別講演会「放射性物質の環境動態～チェルノブイリ原発事故から学ぶ～」および勉強会の開催(2012年10月23日、東京大学 工学部14号館141講義室、参加者70名)

1986年4月26日のチェルノブイリ原発事故後、ウクライナ国立科学アカデミー環境モニタリング課においてチェルノブイリで実際に放射性物質の環境動態の調査研究に携わっている Mark Zheleznyak 博士 (Head of Department of Environmental Modeling, Institute of Mathematical Machines and Systems, National Academy of Sciences of Ukraine) の来日を機会に、特別講演会及び勉強会を開催した。特別講演会では、「Models of aquatic radionuclide transport implemented for forecasting rivers, reservoirs, lakes and coastal waters contamination after the Chernobyl accident and justification of water protection measures」と題した Mark Zheleznyak 博士によるチェルノブイリ原発事故による汚染状況、放射性核種の輸送モデルの構築と対応策へのモデルの適用、リスクマネジメントについての講演のほか、「流出解析モデルによる河川水中の放射性物質濃度の推定」古米弘明氏 (東京大学大学院工学系研究科教授)、「福島原発事故由来放射性セシウムの河川水系での移行挙動」長尾誠也氏 (金沢大学環日本海研究センター教授) の講演が行われ、約70名の参加者との活発な質疑が行われた。

Mark Zheleznyak 博士は、チェルノブイリ原発事故を通して培ってきた経験と実績を、今回の日本においても活用・応用がなされることを切に願っており、多くの日本の科学者・研究者に声をかけていきたいとのコメントがあった。その後の勉強会では、モデルやモデリングについて、さらに具体的で詳細な討議が行われた。

2) 放射性物質の挙動と流出「流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理」【ZRFb-12T1】成果発表会の開催 (2013年3月18日、東京大学 工学部14号館141講義室、参加者100名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

(6) その他

- 1) 2013年3月に成果報告書「流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理」(約200ページ)を作成し、都道府県、政令都市、関東地方環境事務所、福島環境再生事務所、福島県の市町村等、約200カ所に配布した。
- 2) 2013年3月に研究の概要を記載したリーフレット「流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理」を作成し、関東地方環境事務所、福島環境再生事務所に提供したほか、希望者に配布している。
- 3) 日本水環境学会のホームページ上に「環境研究総合推進費研究成果」のページを設け、成果報告書、リーフレットのほか、特別講演会、成果発表会の講演資料等を公開している。

8. 引用文献等

特に記載すべき事項はない。

Literature Review on Transport and Fate of Deposited Radioactive Materials in a Watershed

Principal Investigator: Hiroaki FURUMAI

Institution: Japan Society on Water Environment /
Research Center for Water Environment Technology,
Department of Urban Engineering, Graduate School of
Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, JAPAN
Tel: +81-3-5841-6239 / Fax: +81-3-5841-8535
E-mail: furumai@env.t.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Osaka Institute of Technology, Toyohashi University of Technology, Gifu
University

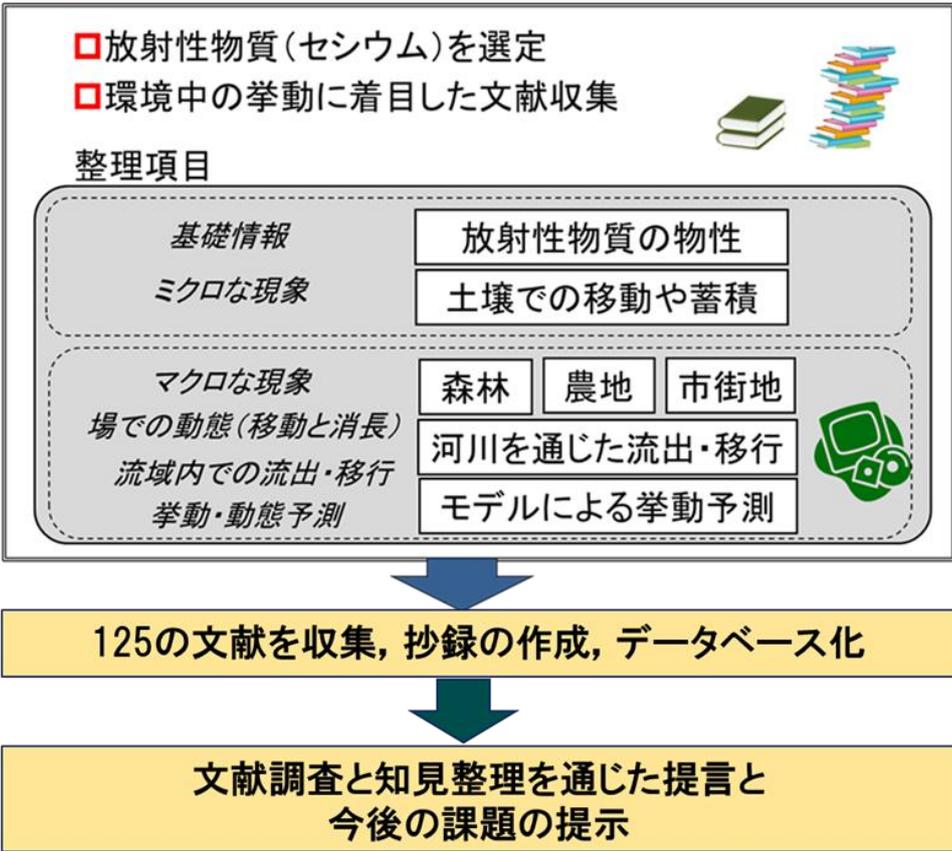
[Abstract]

Key Words: Non-point sources, Radioactive materials, Fate and transport, Deposition

A large quantity of radioactive materials was emitted to environment from Fukushima Daiichi Nuclear Power Station in March, 2011, and partially accumulated in soil. There is a lack of knowledge for understanding the behavior of radioactive materials which are washed out and transported to the downstream by runoff process. We selected cesium as targeted radioactive material and collected relevant papers on transport and fate of the radioactive material in forests, farmlands, urban areas, rivers and soils from domestic and international journals. Then we compiled 125 important papers into a database with short summaries. In making the database, we focused on useful findings and information for better understanding of runoff behavior and pathways and for effective monitoring and decontamination. We summarized characteristics of radioactive material behavior in forests, farmlands, urban areas, and picked out points to keep in mind for monitoring. There are many points taken up so that we could understand how radioactive materials are transported and accumulated in the environment from both of short- and long-term aspects. Finally, we presented the following future challenges: i) it is necessary to evaluate environmental dynamics of radioactive material in Asia monsoon area as the future challenge, ii) it is necessary to systematize and strategically accumulate the achievement of on-going monitoring research on dynamics of radioactive material and iii) it is also necessary to develop an advection-dispersion model with appropriate setting of parameters such as partition coefficient of the target radioactive material so that we could predict environmental dynamics and evaluate effective countermeasures.

【ZRFb-12T1】

流域に沈着した放射性物質の移動と消長に関する文献調査及び知見整理
 公益社団法人 日本水環境学会



研究成果の公表
 リーフレット配布: 日本水環境学会 ノンポイント汚染研究委員会 nonpoint@jswe.or.jp
 公開ホームページ: 日本水環境学会 http://www.jswe.or.jp/publications/envsuisihin/index.html