

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(A) (海外学術調査)

研究期間：2014～2017

課題番号：26257402

研究課題名(和文)ロシアにおける放射性核種の地下水の挙動解析と拡散予測シミュレーションモデルの構築

研究課題名(英文) Analysis on the behavior of radionuclides in groundwater in southern Ural, Russia and its simulation

研究代表者

加藤 憲二 (Kato, Kenji)

静岡大学・理学部・名誉教授

研究者番号：70169499

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,200,000円

研究成果の概要(和文)：南ウラル地方の核施設での中間レベル放射性液体廃棄物の湖への投棄が引き起こした地下水汚染は、50年に亘ってその実情が明らかにされてきた。しかし微生物の関与は未解明であるなど、なお学ぶべき極めて貴重な対象である。汚染地下水中には多数の原核生物が存在し、脱窒細菌も含まれることがDNA解析や直接培養法で明らかになった。脱窒反応が進行すると環境は還元化し、ある種の核種の粒子吸着を促進する可能性がある。現場の原核生物による核種吸着能や、ナノ粒子による吸着機構の詳細も明らかにされた。我が国で開発されたGETFLOWSによるシミュレーションモデルで汚染物質の20年後の拡散についての予測を試みた。

研究成果の概要(英文)：A critical groundwater contamination with radionuclides was caused by nuclear waster processing in Southern Ural. An intermediate level radioactive waste (million to ten billion Bq/kg with Russian standard 2000) was discarded to Lake Karachai from 1951, and it penetrated into groundwater. Observation using over 200 boreholes has been conducted and study focusing on nanoparticles was well done, but microbial function was not elucidated yet. We revealed (1) microbial abundance was significant in contaminated groundwater. (2) DNA analysis revealed denitrifying microbes. (3) Denitrifying may change redox potential leading adsorption of some radionuclides to particles. (4) Isolated microbes adsorbed radionuclides as  $^{239}\text{Pu(IV)}$ ,  $^{241}\text{Am(III)}$  and others. (5) Chemical property and function of nanoparticles changed by geology. (6) Simulation modeling of GETFLOWS estimates future distribution of contaminated groundwater. We extend our understanding on the behavior of radionuclides in groundwater.

研究分野：地球環境微生物学

キーワード：放射性核種移行 地下水 シミュレーションモデル 微生物 ナノ粒子

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は、H23 - 24 年度採択されたJSPS 二国間交流事業共同研究『微生物およびナノ粒子が地下水中の放射性核種の拡散に与える影響』によって日露間に形成された放射性核種による地下水汚染研究の微生物と化学の合同研究チームを基盤にして、現地環境の解析を格段に進め、さらに地下水流動のモデルに放射性核種の移行、拡散の予測機能を貴重な観測データを活用して導入し、信頼度の高い地下水汚染のシミュレーションモデルを構築することを目指した。これらの新しい視点を加え、福島における放射性核種による汚染の拡散予測に実際に役立つ事例を示すことを研究の大きな目標とした。

#### <なぜロシアか>

まず何より貴重な、福島の実例に先行する研究サイトはロシアにあり、現地におけるロシア側研究者との共同研究以外には研究推進の可能性がない。研究対象はロシア、マヤーク地域の40年に亘って進行する放射性核種が地下水を拡散する現場である。

### 2. 研究の目的

本研究は、地下水中に放出された放射性核種がどのような拡散挙動をとるのか、放射性物質に汚染され40年余にわたりその観測が続けられているロシア・マヤーク地域を対象に、【I】水中に多量に存在するナノ粒子や微生物粒子が果たす役割を明らかにし、【II】その機能をシミュレーションモデルに組み込むことであった。

### 3. 研究の方法

【1】現場環境への微生物活性の影響を酸化還元ポテンシャルに関わる脱窒活性から推定する。優占細菌による放射性元素の吸着現象を解明する。希土類元素(REE)をアクチノイド類のアナログとした分配パターンから細菌粒子の関与に関する情報を取得する。

【2】ナノ粒子 - 放射性核種作用系を原子レベルでの解析から明らかにする。

【3】GETFLOWSによる地層中での放射性核種の物理化学プロセス、地下水流による移流拡散を含むシミュレーションモデルを構築する。福島におけるセシウムやストロンチウムによる汚染の広がりに関する研究と本研究で構築されたモデルと突き合わせる。

実験手法の概要は以下の各項で触れるが詳細については個々の成果発表論文に記載されているため紙数の関係で割愛する。

### 4. 研究成果

#### 【研究対象の環境条件と経緯の整理】

主たる研究対象としたのは、ロシアシベリア地方、チェラピンスク州のオジョルスク(エカテリンブルグの南、約120km)近傍のマヤーク生産共同体(Mayak Production Association)内の放射性廃棄物が投棄され、現在は埋め立てが完了したカラチャイ湖(別名Reservoir-9)の地下圏に広がる放射性核種による地下水汚染である(図1)。

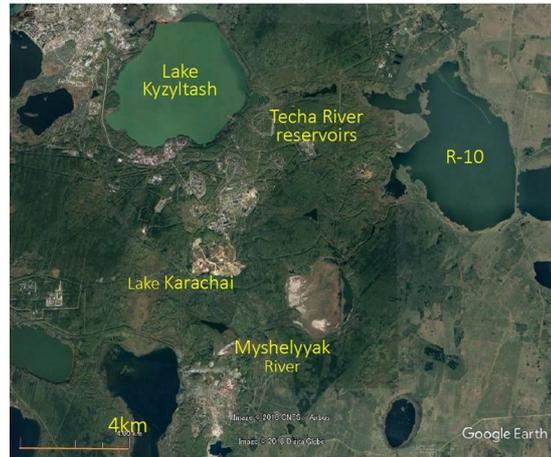


図1. 研究対象地域の Google 地図。

周囲一体は沼沢地であり、起伏の少ない地形構造が地下水流動にも影響を及ぼし、複雑な流動系を考えざるを得ない。得られた地質図から(図は省略)カラチャイ湖周辺の東西2km南北5kmほどの地域には、安山岩質～玄武岩質の火山岩が分布しており、火山岩は向斜構造をなす。この火山岩の分布は、西側と東側で部分的に南北方向の断層で限られている。南側は、おおむね北西-南東方向の断層で限られており、それはMishelyak faultと名付けられている。これらの情報はロシア語レポートの本研究の一環で行った英訳に基づく(Alexakhin et al. 2007)。

地下水汚染はおおよそ深度100mまでで、これは掘削孔を用いた割目(fractures)観察からも支持される。Fractureは表層より50mまでにその7割方が分布している。

この地域の年間降水量は500mmで、蒸発量は100mm程度と推定される。この地域の地形並びに地質環境から考えられる地下水の流動場は複雑であるが、カラチャイ湖北側に基盤岩の隆起があると考えられ、そのことによって地下水の流動方向は南に偏る可能性が強いと考えられている。

このような自然環境にある地域で、1987年にその操業が止められるまでおよそ40年間、マヤーク生産共同体では核兵器の生産とその過程で生じた放射性物質の廃棄が行われていた。とりわけ中-低レベル(ロシアの2000年標準で $1 \times 10^6$  to  $1 \times 10^{10}$  Bq/kg)の液体放射性廃棄物は、1951年からカラチャイ湖への貯留が開始された。当初、湖から系外への廃棄物の流出は想定されておらず、このことが湖底からの放射性物質の流動という大きな地下水汚染をもたらす主因となった。

#### 4-1.

【1】現場環境への微生物活性の影響を酸化還元ポテンシャルに関わる脱窒活性から推定する。

環境中に放出された放射性核種への原核生物の関わりについては、後述する微生物細胞

による核種の直接的な吸着反応や、微生物反応に伴う核種の酸化還元状態の移行とそれがもたらす核種の環境中での挙動の推定であった (Francis, 2012)。これに対して本研究ではまず、地下圏に優占する原核生物の代謝活動がもたらす地球化学的な変化が核種移行にどのような影響を及ぼすかという全く新しい視点での研究に取り組んだ。

研究の発端は2009年、それまでに成された国際共同研究の成果がロシア語文献として纏められたが、欠けていた原核生物による脱窒反応を考慮せずには汚染水拡散の解釈ができないことに気づいたことである (図2は Rumynin 2009より転載)。

核処理反応に用いられた大量の硝酸が1990年代まで放射性核種 (詳細な拡散のデータが入手できたのは  $^{90}\text{Sr}$ ) とほぼ同期して拡散する。高濃度の塩水が鉛直方向に拡散し、深度 140 m 付近に存在する難透水性層 (岩盤?) で水平方向へと拡散を広げ、濃度勾配の減少傾向が表層に向けて広がっている。 $^{90}\text{Sr}$  の分布も同様である。しかしながら、1990年代から2000年にかけて地下 140 m の難透水性層直上の高濃度硝酸域 (>50g/L) が明瞭に縮小している。掘削井による直接観測という、容易にデータを広範囲に収集できない汚染地域での現場観測であり、詳細な解析は難しいところであるが、次の濃度分布域

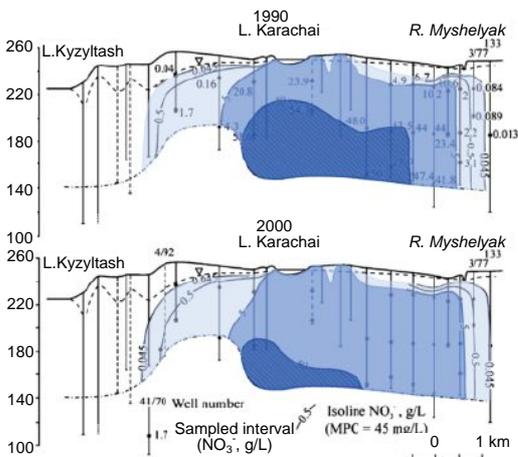


図2. カラチャイ湖から流出した硝酸の地下での拡散の経年変化. Rumynin (2009) より.

( $5 < x > 50 \text{ g/L}$ ) の広がりに1990年代との大きな差異がない。このことについて、関係した放射化学や原子力物理あるいは地質学研究者らから疑問が投げかけられた。安山岩質ないし玄武岩質の火山岩が主体の地質ではあるが、これだけの地下水浸透がある以上表層からの有機物供給も想定されるので、研究代表者は直ちに嫌気的環境下で脱窒反応 (硝酸還元) により硝酸の一部が窒素ガスへと変換、消失したと直感した。

【脱窒反応の可能性について】

旧知のロシア科学アカデミー微生物学研

究所の Nazina 博士並びにモスクワ連邦大学放射化学科の Kalmykov 教授との国際共同研究体制を作り、福島大学 Alexei Konoplev 教授の協力を得ることができ研究は進められたが、現場からのサンプル入手には大変な苦労があった。外国人研究者の対象地域へのアクセスは認められておらず、ロシアにおける中心的研究者である Kalmykov 教授もサンプリングに自由度は無い状態で、環境からの汚染を限りなく押さえたサンプルを入手し、微生物解析を行った。

観測対象とした掘削井を図3に示す。観測対象としては主たる地下水流の流下方向と考えられたカラチャイ湖から南へ向かう軸上に選定された。

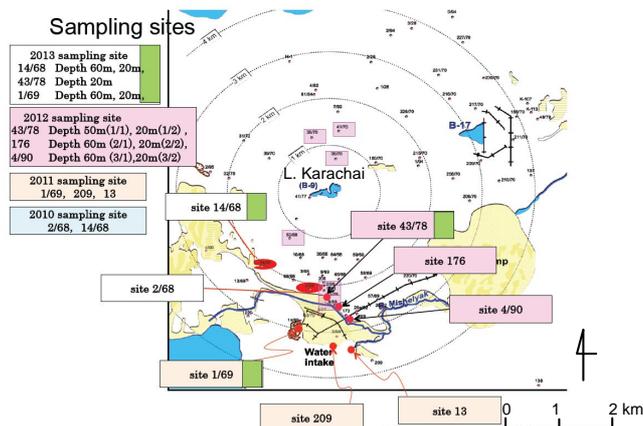


図3 観測井の分布.

対象とした掘削井から得られた地下水の物理化学分析の結果、図3でピンク色の網掛けをした掘削井、43/78、176、4/90の深部で2.1から6.9g/Lの高い硝酸濃度と高濃度の  $^{90}\text{Sr}$  (>290Bq/L) が認められた。

これら地下水中原核生物の密度は、最も細菌数が少ない2011年掘削井1/69で  $9.7 \times 10^3$  cells/ml、最も多い掘削井176の20mで  $7.2 \times 10^5$  cells/ml。前者は地下水中の細菌密度としては一般的な値であると考えられるが後者はこれに対して地下水中の細菌密度としては大きな値であるといえる。

また、FISH (Fluorescence in situ hybridization) 法によって観察された細胞中のRNA含量から全原核生物の20%から30%が活性を有するという高い微生物活性が対象とする地下水で確認された。

このような原核生物群集に対して脱窒 (硝酸還元) 反応を担っている原核生物数を定量PCR法によって推定した。脱窒反応の鍵となる硝酸を還元し亜硝酸とする反応を進める酵素をコードした機能遺伝子 *nirK* の存在量から推定を行った。

定量PCR法によって見積もられた脱窒細菌の数は決して多くはないがほとんどの地下水に脱窒活性を発揮している原核生物 (細菌) が存在すると示唆された。では、実際にど

のような脱窒細菌がいるのかを DNA クローン解析で明らかにした。解析した掘削井 2/68 は汚染のフロントよりやや上流の北西に位置する。極めて高濃度の硝酸環境中において多様な脱窒細菌を遺伝子レベルで検出することができた。

厳重に管理された放射性物質で汚染された管理区域で実際に微生物活性を測定することは不可能である。これに代わる手法として、特定の RNA 配列をターゲットとした顕微鏡観察 (FISH 法) や、nir 遺伝子の存在量を定量 PCR で見積もり、そこから脱窒細菌数を推定することができた。バイオマスとしては必ずしも大きな密度が推定されたわけではないが、詳細な遺伝子解析から多様なおそらく活性を有する脱窒細菌が高濃度硝酸汚染地下水で確認することができた。

では、汚染地下水中に脱窒細菌が有意に存在することが放射性核種の移行にどのような影響を及ぼすのであろうか？硝酸汚染が進んだ富士山麓茶畑周辺の井戸を用いて地下水の脱窒活性と、それが進行した場合の酸化還元電位の変化を調べた。硝酸態窒素を  $^{15}\text{N}$  でラベルしたトレーサーを地下水に添加し、 $\text{N}_2$  までの還元を測定した結果、嫌気条件で高い脱窒反応を認め、このとき培養系中の酸化還元電位は明らかに低下した。

アクチノイド族には還元化が進み、価数が小さくなることによってその溶解度が小さくなる傾向を持つことがウランウムやネプツニウムで知られている。溶解度が小さくなったことで地下水中の微小あるいはナノサイズの粒子やあるいは岩石そのものへの吸着がすすみ、拡散が遅くなる可能性も推定される。

またここで明らかにされたことは、核反応行程で大量に使用された硝酸は一定期間は地下環境の中で放射性核種の移行と同期するが、微生物反応を受けて還元されることから硝酸が長期に亘って核種の移行を示す指標とはなり得ないことを示している。

#### 4-2.

【1】 優占細菌による放射性元素の吸着現象を解明する。

ロシア側研究者は実際の培養法によってその構成を明らかにした。硝酸および  $^{90}\text{Sr}$  で代表される汚染が強い掘削井 (43/78, 176, 4/90) では直接計数された原核生物数の 1~10% が培養法によって検出されており、これら地下水中の原核生物群集は有意な活性を持つことが推定される。一方、観測された掘削井の中では最南端に位置する 1/69, 13, 209 では深度に依らず発酵細菌や通性嫌気性菌を含む従属栄養細菌が  $10^5$  cells/mL のオーダーと多数検出されている。これらの細菌の分類群を同じく培養法によって特定を試みたところ、主に alpha-, beta- と gammna-proteobacterian などに属する多様な細菌が検出された。これらの中から多数検出

された鉄還細菌の *Shewanella putrefaciens* 等を用いて放射性核種の吸着実験を行った。

実験条件下のことではあるが、添加されたプルトニウム  $^{239}\text{Pu}(\text{IV})$ , initial  $6 \times 10^{-4} \mu\text{M}$ , アメリシウム ( $^{241}\text{Am}(\text{III})$ ,  $1 \times 10^{-3} \mu\text{M}$ ), スロンチウム ( $^{90}\text{Sr}(\text{II})$ ,  $1 \times 10^{-4} \mu\text{M}$ ), ウランウム ( $^{233}\text{U}(\text{VI})$ ,  $0.1 \mu\text{M}$ ) およびネプツニウム ( $^{237}\text{Np}(\text{V})$ ,  $1.02 \mu\text{M}$ ) すべてに対して現場環境中に存在する原核生物のうちの細菌 (バクテリア) は核種の吸着能を有することが示された。短時間 (2 時間) の実験期間内に III 価のアメリシウムや IV 価のプルトニウム、あるいは VI 価のウランウムでは添加濃度のほとんどが細菌細胞に吸着した。実験した核種の内では II 価のストロンチウムへの細菌への吸着量は非常に少なかった。

#### 4-3.

【2】 ナノ粒子 - 放射性核種作用系の解析

Mayak 地域の地質環境中に放出され、有意に検出された放射性核種  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  と  $^{239}\text{Pu}$  のうち、Pu については最大 9 割が粒子サイズ 1~15 nm のナノコロイドに吸着していることが知られていた (Novikov et al. 2006)。また Pu は  $^3\text{H}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  等に比べコロイドによる輸送速度が大きいことが知られている。Nano SIMS 等を用いた詳細な観察の結果、Pu は地下水中では 4 価または 5 価で多くが存在することが知られており、鉄水酸化物が Pu (IV) 水酸化物あるいは炭酸塩を吸着することが見いだされているが、Mayak 地域での今回の研究から、

(1) 地下環境を構成する地質によってコロイドの化学特性が変わり、その結果アクチノイド類の吸着特性にも違いが生じることが分かった。

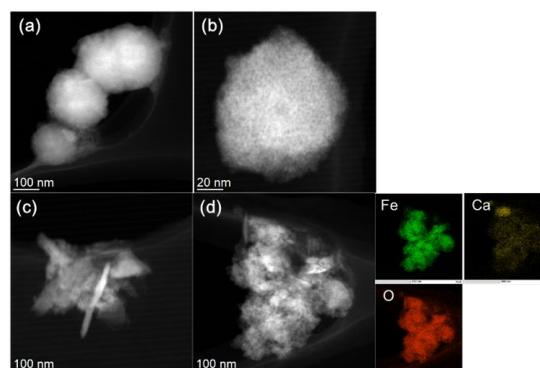


図 4. HAADF-STEM (高角環状暗視野走査一透過型電子顕微鏡) 観察による Mayak 地域の観測井 43/78 の地下水中に検出されコロイド粒子. (a)(b) 球状の複数あるいは単体の鉄水酸化ナノ粒子. (c) は針鉄鉱粒子. (d) は鉄水酸化物 - カルシウム炭酸塩に多数の針鉄鉱が凝集したもの.

(2) さらにこの吸着現象は 2~5 km という大きな水平距離の中でより有意になるこ

となどが見いだされた。また、顕微鏡観察から原核生物と考えられる粒子が金属の吸着を促す可能性が見いだされている。これらコロイド粒子への Pu の吸着、又脱離現象が核種輸送のどの程度を説明しうるのか、さらに他核種への知見の敷衍がどのような条件下で可能であるのか理解する手がかりを、ロシア Mayak 地域での研究から得ることができた。しかしながら研究全体としては、当初考えたその知見を解析モデルに組み込むところへは届いていない。

#### 4-4.

【3】 GETFLOWS による地層中での放射性核種の物理化学プロセス、地下水流による移流拡散を含むシミュレーションモデルを構築

表流水と地下水の相互交換を連成した陸域水循環モデルの一つである GETFLOWS(Tosaka et al. 2000)を用いてウラル南部の対象地域における放射性核種と硝酸の地下圏における拡散についてシミュレーションモデル作成を試みた。作業には現場環境の情報取得が大きな制限と成り、とりわけ地質構造について解析に十分なデータを得ることができなかったが、モデルは 50 年近くに亘る現場における掘削井を用いた観測データとの整合性を得ることに成功し、このことより地下水流動の観点から現場の地下環境を推測することができた。なお、本研究でモデル作成に用いた情報は、地形および地質構造、降水量と蒸散量、対象域 (Karachai 湖の地下周囲) 地質の間隙率と透水係数、現場の想定される地質環境での吸着係数、経年の硝酸並びに代表放射核種 ( $^{90}\text{Sr}$ ;ただし本稿では触れない) の漏洩量(対象の負荷量)、流体の粘性、密度、拡散係数などである。

対象とした空間は汚水源となる Karachai 湖を原点とした周囲 4km。これに対し、東西方向に 9 0 分割、南北方向に 1 0 4 分割、鉛直方向に 2 9 分割した格子を作り解析した。

地質構造を得られた情報から設定し、吸着係数と漏洩量を変動させて実際の硝酸濃度分布を計算 (シミュレート) すると 2000 年時点での分布について図 5 のような結果が得られる。図中に注意書きされているとおり、実測パターン(図 2) の特に 1990 年度分布状況には A-4 モデルが最も近いが、濃度が異なる。これを解消するためには、割れ目構造を考慮するなど地質情報等をさらに精緻にする必要があり、現在もこの作業を継続しているところである。

(1)シミュレーションモデル作成の重要な成果であるが、この A-4 パターンの 2000 年の分布推定図と実測との地下深部不透水層直上での濃度分布形状の差異は先述した微生物による脱窒反応の影響であると推察される。

### 解析結果 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度断面(2000年時点)

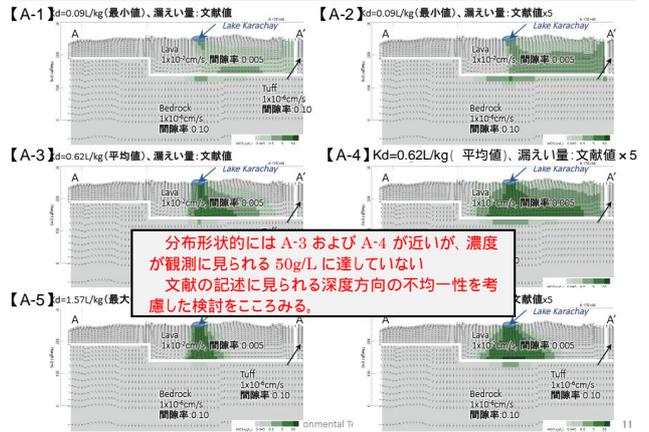


図 5 .GETFLOWS による硝酸汚染の地下水中への広がり の推測 . 異なったパラメータを用いた .

(2)修正作業中であるが、モデル A-4 によって 20 年後の硝酸濃度の対象地下圏での広がりを推定すると、図 6 のように予測された。

### 解析結果 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>濃度分布(2037年時点)

#### ケースA-4

Kd=0.62L/kg(平均値)、漏えい量:文献値x5

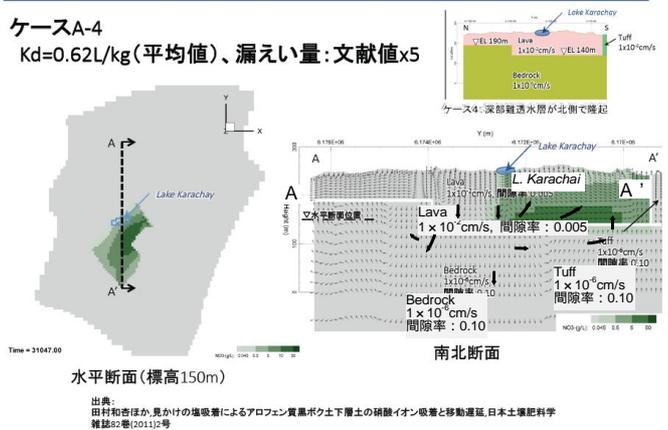


図 6 2000 年の硝酸拡大状況に最も近い推測モデルによる 2037 年予測 .

#### 4-5.

【3】 福島におけるセシウムやストロンチウムによる汚染の広がりに関する研究と本研究で構築されたモデルと突き合わせる - これに関連する並行研究の成果

現地アクセスがほとんど不可能な条件下の地下水への広大な放射能汚染が広がる特異な場を対象に、40 年近く続けられた国際共同研究の結果を受けるかたちで本研究の端緒となる JSPS の支援による二国間国際共同研究が日露で始められた。その間に、あるう事か我が国でも重大な放射能汚染事故が発生し、それは地下水へも広がり、今日もその実体解明研究が続けられている。本基盤研究は 2 国間国際共同研究を引き継ぐかたちで進めたが、Fukushima は当然ながら極めて大きなインパクトを私たちに与えた。地下水汚染の広がりを考える上で、既往の水文科学研

究を足場とするのは当然であるが、「どのような地下ルートを通して対象とする地下水は流れているのか」という私たちが今最も知りたい情報を得る手段が水文科学において確立されているとは言いがたい現状に直面する。本研究で対象としたロシアウラル地方の年間降水量が 500mm 程度の平地環境とは大きく異なりその成果を直ちにロシアでの事象の解釈に用いることはできないが、Fukushima へつながる研究として富士山麓に於いて降水量と地下水流動系について微生物をトレーサーとする全く新しい研究を進め、世界に先駆けた成果にたどり着いた。成果の要点は、(1) 300 mm を超える豪雨は、観測されたような地形や地質環境下では雨水は地下浸透することなく地表表面を下流側へ走ることが化学分析以上に土壌に特有の原核生物(バクテリア)の移動によって示された。(2) 水平距離 12 km、鉛直距離 550m(平均涵養標高からは 1500 m)下の富士山麓で豪雨 2~3 週間後には何ら物理化学指標に変化は認められなかったが、地下深部(550m)で原核生物のアーキアに明らかな構成種の変化が認められ、ピストン輸送があったことが示されたことである。この種の成果をどのように他の環境へ広げていけるかが今後の課題である。

#### 【引用文献】

英訳: Alexakhin et al. Reservoir-9- Strage of liquid radioactive waste and its impact on geological environment. ed by, Drozhko E.G. and Samsonov B.G. Moscow-Ozyorsk, 2007.

Francis, A.J. Impact of microorganisms on radionuclides in contaminated environments and waste materials. In, Radionuclides behaviour in the natural environment, Edited by C. Poinssot & H. Geckeis, Woodhead Publishing, 161-225, 2012.

Rumynin V. Subsurface solute transport models and case histories, Springer-Nature, ISBN 978-5-02-025140-3., 2009.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)すべて査読あり

(1) Yoshio Takahashi, Yasutaka Hayasaka, Koichi Morita, Teruhiko Kashiwabara, Ryoichi Nakada, Matthew A. Marcus, Kenji Kato, Kazuya Tanaka, Hiroshi Shimizu (2015) Transfer of rare earth elements (REE) from manganese oxides to phosphates during early diagenesis in pelagic sediments inferred from REE patterns, X-ray absorption spectroscopy, and chemical leaching method. *Geochemical Journal*, 49:653-674. doi: 10.2343/geochemi.2.0393. (オープンアクセス)  
(2) J. Imoto, A. Ochiai, G. Furuki, M. Suetake, R. Ikehara, K. Horie, M. Takehara, S. Yamasaki, K. Nanba, T. Ohnuki, G. T. W. Law, B. Grambow, R. C. Ewing, S. Utsunomiya (2017) Isotopic signature and nano-texture of -rich

micro-particles: Release of uranium and fission products from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Scientific Reports* 7: 5409, doi: 10.1038/s41598-017-05910-z. (オープンアクセス)

(3) S. Masaki, Y. Nakano, K. Ichiyoshi, K. Kawamoto, A. Takeda, T. Ohnuki, M. F. Hochella, S. Utsunomiya (2017) Adsorption of Extracellular Polymeric Substances Derived from *S. cerevisiae* to Ceria Nanoparticles and the Effects on Their Colloidal Stability. *Environments* 4: 48, doi: 10.3390/environments4030048. (オープンアクセス)

(4) A. Sugiyama, S. Masuda, K. Nagaosa, M. Tsujimura, K. Kato (2018) Tracking the direct impact of rainfall on groundwater at Mt. Fuji by multiple analyses including microbial DNA. *Biogeosciences* 15: 721-732, doi: 10.5194/bg-15-721-2018. (オープンアクセス)

〔学会発表〕(計 17 件)

(1) K. Kato, K. Nagaosa, T. N. Nazina, S. N. Kalmykov, T. Onuki, Y. Takahashi, S. Utsunomiya, K. Nanba, Microbial influence on the migration of radionuclide in groundwater; from laboratory experiment and in situ Observation, Conference of MODERN PROBLEMS OF GENETICS, RADIOBIOLOGY, RADIOECOLOGY, AND EVOLUTION, Saint Petersburg (Russia), 2015-06-02~06-06.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

加藤 憲二 (KATO, Kenji)  
静岡大学・理学部・名誉教授  
研究者番号: 70169499

##### (2) 研究分担者

矢永 誠人 (YANAGA, Makoto)  
静岡大学・理学部・准教授  
研究者番号: 10246449

宇都宮 聡 (UTSUNOMIYA, Satoshi)  
九州大学・理学系研究科・准教授  
研究者番号: 40452792

高橋 嘉夫 (TAKAHASHI, Yoshio)  
東京大学・理学研究院・教授  
研究者番号: 10304396

難波 謙二 (NANBA, Kenji)  
福島大学・共生システム理工学類・教授  
研究者番号: 70242162

##### (3) 連携研究者

大貫 敏彦 (OHNUKI, Toshihiko)  
東京工業大学・科学技術創成研究院・教授  
研究者番号: 20354904

登坂 博行 (TOSAKA, Hiroyuki)  
東京大学・工学系研究科・教授  
研究者番号: 90188748