

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：52101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20477

研究課題名(和文) 鉱物との内圏キレート反応に基づく汚染土壌中の陰イオン性有害元素の湿式洗浄

研究課題名(英文) Washing treatment of anionic toxic element contaminated soil based on chelating reaction at mineral surface

研究代表者

澤井 光 (Sawai, Hikaru)

茨城工業高等専門学校・国際創造工学科・助教

研究者番号：30784962

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、土壌鉱物-キレート剤-陰イオン性有害金属の相互作用を明らかにするとともに、陰イオン性有害元素を含む土壌に最適な洗浄条件を探索した。汚染土壌中のヒ素、フッ素などの陰イオン性有害成分は、炭酸塩、鉄酸化物などの溶解に伴って溶液中に放出されるが、酸性条件では鉱物表面が正の電荷を帯びているため、再吸着によって除去が制限された。一方塩基性条件や金属イオンとの錯生成定数の小さなキレート剤が共存する条件では、これらが形成する表面錯体が鉱物表面の電荷を負に大きくし、ヒ素、フッ素の再吸着を妨げる働きを示し、有利に洗浄除去できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、土壌環境基準の不適合が著しく多いヒ素、フッ素等の陰イオン性有害成分による土壌汚染リスクを根本的に解消する手法としてキレート洗浄を検討した。土壌中でキレート洗浄によって取り除かれやすい形態のヒ素、フッ素を特定するとともに、キレート剤水溶液中のヒ酸イオン、フッ化物イオンの吸脱着挙動を明らかにし、得られた成果を最適な洗浄条件の決定にフィードバックすることができた。本研究の成果は、発生量が膨大な自然由来陰イオン性有害成分による土壌汚染に対して、より効果的な洗浄処理プロセスの開発に繋がると期待される。

研究成果の概要(英文)：In the present study, the interaction among soil minerals-chelate reagent-anionic toxic components was partially clarified and the optimal decontamination process for anionic toxic components bearing soil was explored. Anionic toxic components such as arsenate and fluoride were released into the solution phase from the soil surface accompanied by the dissolving of carbonate and iron (hydro)oxide, but re-absorption occurred due to the mineral surface was covered by a positive charge, especially in the acidic solution. On the other hand, under basic conditions or in the presence of a chelate agent with small complexation constants with metal ions, the surface complexes formed by these agents negatively increase the charge on the mineral surface and prevent reabsorption of arsenate and fluoride, resulting in advantageous cleaning and removal.

研究分野：分析化学

キーワード：汚染土壌 ヒ素 フッ素 キレート剤 キレート洗浄

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、土壤汚染リスクに対する認識の高まりから土壤汚染対策法が改正され、従来対象外であった自然由来の有害元素に対する規制が強化された(環境省,2010)。このことに伴って、自然由来の有害元素による土壤汚染事例が多く報告されている。日本国土は自然由来の有害金属を含む地質が広く分布しており(梶座,岩鋳,1979; Faure, MacMillan Pub., 1991; Kokubu, Mem. Fac. Sci., 1956 島田, 応用地質技術年報, 2011), 土地利用に際して土壤汚染対策が必要となる。自然由来の土壤汚染事例では、重金属類の含有量は基準以下であるが、溶出量を基準超過する低レベル汚染土壤が大量に発生する点に特徴がある。特に陰イオン性有害元素であるフッ素, ヒ素, ホウ素による土壤汚染は基準不適合件数が多く(環境省,2018), 対策は急務である。一方で埋立容量の逼迫や不溶化処理の長期安定性への懸念から、土壤汚染対策として長期的な有害元素の溶出リスクを根本的に除去する土壤の浄化処理が望ましい。生分解性キレート剤(図1)を用いた固体中金属の化学的洗浄法(キレート洗浄)は、大量に生じる汚染土壤に対して有害元素を高除去率・低エネルギーのもとで分離可能な技術と期待される。

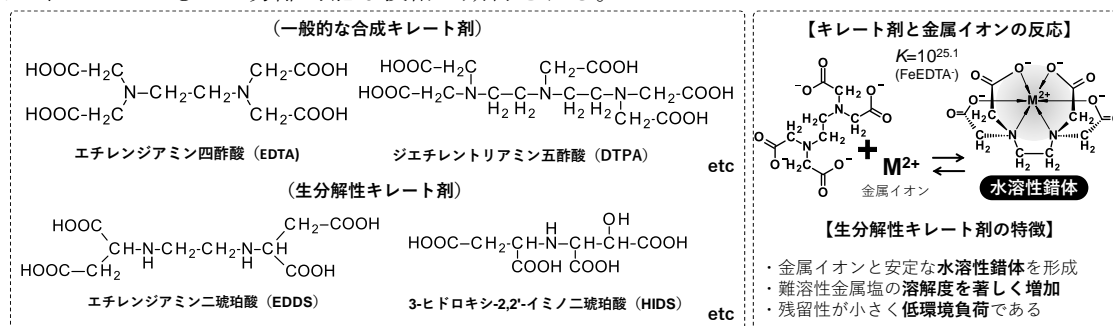


図1: 生分解性キレート剤の構造(左)と金属イオンとの反応(右)

陰イオン性有害元素(フッ化物イオン F⁻, ヒ酸イオン AsO₄³⁻など)は、鉱物の構成成分や鉱物表面の水和酸化鉄等の吸着質として存在する。一方でキレート剤は、陰イオン性有害元素と直接錯体を形成することは無いが、水溶性錯体の生成に基づき有害元素の担体鉱物の溶解度を飛躍的に増進させ、同時に陰イオンを溶離する働きが期待される。またキレート剤分子の N および O 配座は、粘土鉱物や酸化鉄等の鉱物表面で内圏錯体を形成することが知られており(B. Nowack, Environ. Sci. Technol., 1996), 鉱物表面の水酸基を置換している陰イオン性有害元素をイオン交換によって溶離するうえ、キレート剤上の酸性官能基が負の表面電位を發揮することで陰イオンの脱離を促進する可能性がある。このようにキレート洗浄は、キレート-金属錯体の生成を契機とする強力な化学的相互作用によって特徴付けられ、土壤中の陰イオン性有害金属の除去に有効である公算は大きい、その洗浄メカニズムの実態は不詳である。

2. 研究の目的

本研究では、従来明らかでなかった土壤鉱物-キレート剤-陰イオン性有害金属の相互作用を吸脱着解析や化学形態分析の手法から定量的に明らかにするとともに、自然由来の陰イオン性有害元素を含む土壤に最適な洗浄のプロセス条件を探索することで新しい湿式洗浄技術を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 自然由来汚染土壤中の有害成分の存在状態解析

キレート洗浄の効果を正確に評価するために、実汚染土壤およびモデル汚染土壤中の陰イオン性有害元素の汚染状況・化学形態を解析した。

① 土壤の主成分分析: 加熱酸分解-誘導結合プラズマ発光分析, X線回折, 蛍光X線分析, 電子顕微鏡観察に基づき, 土壤の主成分や鉱物組成を求めた。

② 化学的分画法による形態別分析: Tessier ら (Anal. Chem., 1979) の方法を改良し, 異なる抽出強度の溶媒を用いて土壤中の As, F を交換可能画分・炭酸塩画分・金属酸化物画分・有機物画分・アルミノケイ酸塩画分にそれぞれ分画した。

③ 放射光蛍光X線分析: 大型放射光施設 SPring-8 において, 放射光 X 線を光源に用いた X 線吸収端微細構造 (XAFS) 分析を実施し, 汚染土壤中の陰イオン性有害元素の化学種や隣接元素・結合環境に関する情報を取得するとともに, キレート洗浄前後の比較からキレート剤の効果が強く表れる化学形態を明らかにした。

(2) 土壤鉱物-キレート剤-陰イオン性有害元素間の相互作用の解明と反応モデルの構築

① 土壤中陰イオン性有害元素の担体として働く鉱物(水和酸化鉄, カルシウム塩類等)と合成/生分解性キレート剤(イミノ二酢酸, IDA; ニトリロ三酢酸, NTA; エチレンジアミン四酢酸, EDTA; ジエチレントリアミン五酢酸, DTPA; 3-ヒドロキシ-2,2'-イミノジコハク酸, HIDS, エチレンジアミン二コハク酸, EDDS; メチルグリシン二酢酸, MGDA; L-グルタミン二酢酸, GLDA)間で起こる吸脱着と pH などの溶液条件との関係を解析した。

② 等温吸着実験: 土壤鉱物へのキレート剤および陰イオンの吸着挙動を飽和吸着量や吸着定

数等の吸着パラメータから明らかにする。特に陰イオンの吸着がキレート剤の有無により受ける影響を見積った。

(3) キレート剤による陰イオン性有害元素類の洗浄剤の開発

自然由来の As, F を含む汚染土壌数グラムスケールに対して、キレート剤を主とする化学的洗浄剤による洗浄実験を行い、溶離液中の元素濃度を ICP 発光やイオン電極等で定量することでキレート洗浄効果を検討した。

4. 研究成果

(1) 自然由来汚染土壌に対するキレート洗浄と有害成分の存在状態

① ヒ素汚染土壌

中国地方及び関東地方で採集された 3 種類のヒ素汚染土壌を試料とした。試料をマイクロ波支援加熱熱分解 (HCl/HNO₃/HF-H₃BO₃ 処理, マイクロ波出力 1400 W, 1 h) によって溶解処理し、得られた分解物中のヒ素を誘導結合プラズマ発光分光 (ICP-AES) 法によって定量したところ、ヒ素濃度は 15~180 mg/kg であった。また環境省告示法に準拠した溶出量試験の結果、ヒ素溶出量は 0.01~0.47 mg/L であり、指定基準である 0.01 mg/L を超過した。土壌中有害元素の化学形態を、Tessier らの化学的逐次抽出法で調べたところ、土壌中のヒ素は、残渣態が 60%以上を占め、有機物態が 6~10%、鉄-マンガン酸化物態が 15~30%、炭酸塩態が <3%、交換態が 1%未満であった。

試料 0.5 g を 50 mM キレート剤 (EDTA, DTPA, NTA, HIDS) を含む化学的洗浄剤 5.0 mL (液固比 10 mL/g) と混合し、24 h 振盪することで洗浄試験を行った。ヒ素は、キレート洗浄によって弱酸 (pH 3) および弱塩基性 (pH 11) でもとも中性条件よりも除去率が大きくなる傾向があったが、キレート洗浄によって溶出率が大きかったのは、交換態及び炭酸塩態のヒ素であった。ヒ素の除去は、酸性において鉄マンガン酸化物態ヒ素の担体である鉄酸化物の溶解、塩基性においては交換態や炭酸塩態のヒ酸イオンとして溶液中で安定化し、よりヒ素の抽出が促進されたと考えられる。

② フッ素汚染土壌

関東地方で採集された砂質のフッ素汚染土壌を用いた。試料を底質調査法に基づいて過塩素酸により加熱分解し、得られた分解物に含まれるフッ素をランタン-アリザリンコンプレキソン吸光光度法によって定量した。土壌のフッ素濃度は 192 mg/kg であり、ヒ素汚染土壌と同様に溶出量試験に供したところ 0.16 mg/L であった。フッ素汚染土壌を Tessier らの化学的逐次抽出法で調べたところ、フッ素は有機物態と残渣態の割合が高く (43%, 42%)、ほか鉄マンガン酸化物態 (9%)、交換態 (5%)、炭酸塩態 (<1%) であった。

フッ素汚染土壌に対し、pH 7 のキレート剤 (EDTA, HIDS) 水溶液による洗浄 (液固比 10 mL/g, 振盪時間 24 h, 温度 25 °C) を施したところ、たとえば HIDS 洗浄において原土壌に比べ、イオン交換態で 5.3%から 1.51%、Fe-Mn 酸化物態で 9%から <1%、有機物態で 43%から 12%と変化し、特に有機物態の減少が著しかった。汚染土壌中のフッ素はヒ素と同様に、キレート洗浄によって弱酸 (pH 3) および弱塩基性 (pH 11) でもとも中性条件よりも除去率が大きくなる傾向があったが、このときのフッ素抽出量は、酸性条件下ではアルミニウム及び鉄の抽出量と、中性~塩基性条件下ではカルシウムの抽出量と正の相関関係を示した。フッ素は土壌表面において、カルシウムやアルミニウムと難溶性塩を形成したり、鉄酸化物等の表面に静電的に吸着して存在すると考えられるが、酸性では、これらの金属酸化物等の溶解が、中性~塩基性条件下では、カルシウムとキレート剤の錯形成反応とそれに伴うフッ素の溶出が起こったと考えられる。

また大型放射光施設 SPring-8, BL27SU において軟 X 線分光分析を実施し、土壌中のフッ素の示す X 線吸収端微細構造 (XAFS, 0.68~0.70 keV) を収集した (図 2)。洗浄前のフッ素含有土壌からは、CaF₂, NaF, MgF₂ などに帰属されると考えられる XAFS スペクトルが観測されたが、pH 3, 7 でキレート洗浄を実施した洗浄後土壌からはこれらが消失するとともに、比較的難溶性である MgF₂ や FeOOH を吸着担体とするフッ素の XAFS スペクトルが得られた。これに対して、塩基性 (pH 11) でのキレート洗浄後の土壌からは明瞭な XAFS スペクトルが得られなかった。塩基性条件では、酸~中性で除去できなかったフッ素が有効に除去されたと考えられる。以上から酸~中性条件のキレート洗浄はおもに NaF, CaF₂ に相当するフッ素に効果が高い可能性があるが、多くのフッ素は MgF₂ や FeOOH 吸着態として残存すると考えられる。難溶性である水和酸化鉄などの担体に吸着したフッ素の除去は中性の洗浄剤では困難であったが、塩基性に調製

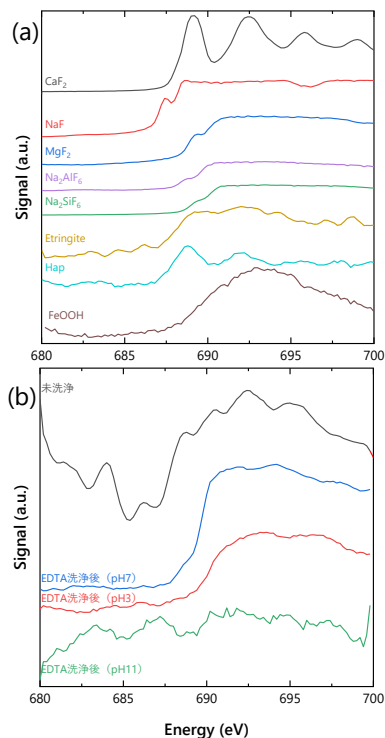


図 2: フッ素汚染土壌における F K 吸収端近傍の微細構造 (a)標準試料, (b)フッ素汚染土壌

した EDTA 水溶液は溶解性の小さなフッ素の除去に効果的であると考えられる。

(2) 土壌鉱物-キレート剤-陰イオン性有害元素間の相互作用の解明と反応モデルの構築

土壌中で陰イオン性有害元素の担体として働く鉱物（水和酸化鉄、水和酸化アルミニウム、炭酸カルシウム）にヒ素（280, 132, 800 mg/kg）、フッ素（900, 74, 54, mg/kg）をそれぞれ担持した汚染土壌モデルを作成し、合成/生分解性キレート剤(EDA, EDDS, MGDA, GLDA ; EDTA ; DTPA, NTA, HIDS)の水溶液中における溶出や吸脱着の挙動を調べた。

① 汚染土壌モデルに対するキレート洗浄効果（ヒ素）

50 mM のキレート剤水溶液によるキレート洗浄によって、吸着層を構成する鉄やアルミニウム、カルシウムは、一部が溶解した。鉄やアルミニウム酸化物からなる吸着層の溶解量は、化学平衡計算ソフト（HySS2009）により計算したキレート錯体の条件錯生成定数と正の相関を示したことから、バルク溶液中での水溶性錯体の形成が吸着層の溶解に寄与するものと考えられる。

炭酸カルシウムを吸着層とするモデル汚染土壌に対するキレート洗浄では、カルシウムの抽出量とヒ素の抽出量は相関した。カルシウムの溶解に随伴し、ヒ素が溶液相へと移行するものと考えられる。

一方で、水和酸化鉄、水和酸化アルミニウムからのヒ素抽出においては、吸着層を構成する鉄やアルミニウムの抽出量とヒ素の抽出量は相関せず、HIDS による洗浄を除き、一様に抽出率は 1%以下であった(図 3)。

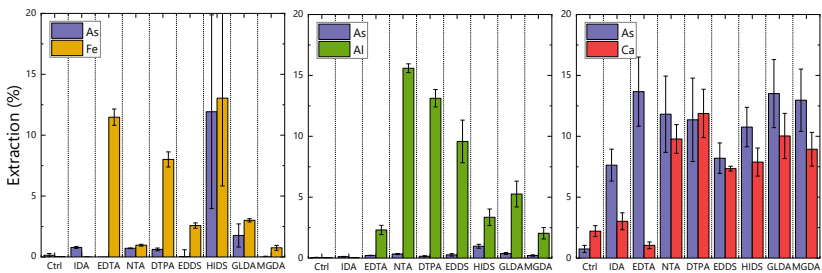
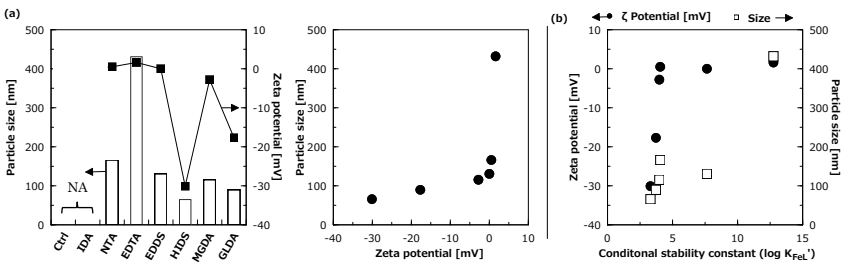


図 3 : FeOOH, AlOOH, CaCO₃ からなるヒ素汚染土壌モデルのキレート洗浄

吸着層の溶解に伴って

溶液相へと移行したヒ素は、固相へと再吸着された可能性がある。ただし HIDS 洗浄によるヒ素抽出率は、他のキレート剤に比べて 10 倍程度と特徴的に大きな値を示した。水和酸化鉄系モデル汚染土壌のキレート洗浄において、洗浄液に含まれるキレート剤の残存濃度を高速液体クロマトグラフィーを用いて調べたところ、初濃度 50 mM に対して、すべてのキレート剤で 10~40 mM 相当の濃度が減少した。減少したキレート剤がモデル試料表面に吸着したものと仮定した場合、吸着量は概ね HIDS > DTPA ≅ GLDA ≅ MGDA > EDDS > EDTA > NTA であった。そこで、水和酸化鉄系モデルに対するキレート洗浄後の溶液相 (0.45 μm メンブレンフィルター通過画分) を、ナノ粒子解析装置 (nano Partica SZ-100 シリーズ, HORIBA) に供し、含まれるコロイド粒子の粒径と表面電位を測定したところ、表面電位が負の方向に大きくなるにつれて、コロイドの粒径が小さくなる傾向が示された(図 4)。表面における負電荷の増大により、静電反発が強まったことで粒子の微細化、分散化が生じたと考えられる。Fe^{III}-キレート錯体の条件錯生成定数 (log β_{Fe^{III}L}) と表面電位・粒子径の相関を調べたところ、表面電位は log β_{Fe^{III}L} = 4 以下のキレート剤に対して急激に低下し、log β_{Fe^{III}L} と粒子径は強い負の相関を示した。バルク溶液中での錯生成定数が小さい場合、キレート剤分子内のカルボキシル基と水和酸化鉄表面の鉄原子間の化学吸着(表面錯体)がバルク溶液中での錯体生成以上に優勢となり、キレート剤分子の固液分配は固相側に偏ると予想される。この結果、表面に存在するキレート剤分子内の残余のカルボキシル基や水酸基によって表面電荷が負に大きくなると推察される。特に HIDS は上記の作用が強く、重金属の含まれる酸化物層をコロイドとして安定化させることで金属成分の溶液相への拡散を亢進すると考えられる。

図 4 : (a)水和酸化鉄コロイドの粒子径と表面電位 ; (b) Fe^{III}-キレート錯体の条件安定度定数と表面電位、粒子径の相関 (NA,測定困難)



② キレート剤水溶液におけるヒ素の吸着

合成した水和酸化鉄系モデルにキレート剤とヒ素の混合水溶液(それぞれ 5 mM)を添加し、ヒ素の吸着等温線を作成した。ヒ素は、キレート剤の存在の有無に拘わらず Langmuir 型の吸着等温線を与え (Langmuir プロットの決定係数: R²>0.9), As の吸着現象に対する Langmuir モデルが妥当であることが示された。吸着量は As^Vのみ ≃ As^V・EDTA 混合溶液 > As^V・HIDS 混合溶液であった。吸着した HIDS によってコロイド表面の

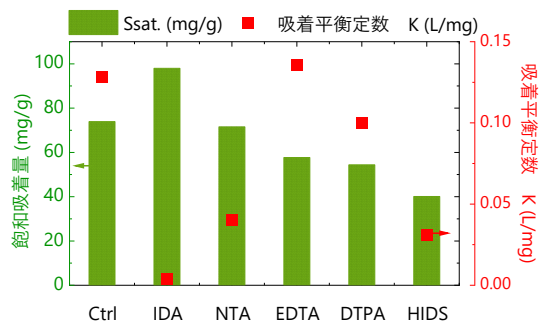


図 5 : キレート剤が共存する水和酸化鉄へのヒ素吸着パラメータ

電荷が負に偏り、アニオンであるヒ酸イオンのコロイドへの吸着が妨げられたものと考えられる。IDA, NTA, EDTA, DTPA, HIDS を含む溶液中の As^V の水和酸化鉄への吸着を Langmuir プロットによって解析し、吸着反応の吸着平衡定数 K 、飽和吸着量 s_{sat} を求めたところ、ヒ素の飽和吸着量は $IDA > \text{キレート剤無し} > NTA > EDTA > DTPA > HIDS$ であった (図 5)。一方で吸着平衡定数は $IDA, NTA, HIDS$ において小さく、これらの鉄イオンとの錯生成定数の小さなキレート剤が溶液相で錯体を形成せず、水和酸化鉄表面で表面錯体を形成し、ヒ素の吸着を妨げた可能性がある。以上のように、HIDS の存在により固相へ As^V 吸着が妨げられることを定量的に評価できた。

(3) 汚染土壌モデルに対するキレート洗浄効果 (フッ素)

水和酸化鉄、水和酸化アルミニウム、炭酸カルシウム系のモデル汚染土壌からのフッ素抽出量は、キレート配位子が存在しない条件と比較して概ね増大した。それぞれの汚染土壌モデルにおいては、吸着層を構成する金属イオンと条件錯生成定数の大きなキレート剤によってより多くのフッ素が抽出された。

たとえば、水和酸化アルミニウムモデルに対するキレート洗浄では、アルミニウムイオンと最も強く錯体を形成する DTPA によって最大のフッ素抽出量が得られた (図 6)。水溶性錯体の生成に伴って固相を構成するアルミニウムを強く溶解することで、大きなフッ素抽出量が得られたと考えられる。一方で、フッ素の吸着相を構成する鉄やアルミニウムの抽出量とフッ素の抽出量の相関は明瞭ではなく、一度溶解したフッ素の再吸着などの影響が示唆されるキレート洗浄においては、pH7 (水和酸化鉄系モデル)、pH11 (水和酸化アルミニウム、炭酸カルシウム) で洗浄した場合に最も高いフッ素抽出量が得られ、吸着層の形態によって異なる抽出傾向が得られた。吸着層表面の水酸基は、酸性条件下でプロトンに配位することで正の電荷を帯び、アニオンであるフッ化物イオンが静電相互作用によって強く固体表面に保持され、低 pH ではフッ素の抽出率が低下した可能性がある。また塩基性条件においては、キレート剤の作用によって吸着層が溶解し、同時にフッ化物イオンが溶液に移行すると考えられるが、塩基性では吸着層表面が負に帯電するため、フッ化物イオンが再吸着することなく溶液中に留まるため、フッ素の抽出量が大きかったと考えられる。

③ キレート剤水溶液におけるフッ素の吸着

土壌中のフッ素吸着層として鉄、アルミニウム、カルシウムの水和酸化物もしくは炭酸塩から構成される土壌モデルを作成し、キレート水溶液中におけるフッ化物イオンの吸着挙動を調べた (図 7)。

各土壌モデルに対するフッ化物イオン吸着は Langmuir モデルの適用が困難であったが、キレート剤として EDTA, DTPA, NTA, HIDS を用いたところ、土壌モデル表面へのフッ素吸着は、pH 3~11 においてキレート剤の共存によって制限された。たとえば pH 11 における水和酸化鉄へのフッ素の吸着率は、キレート剤が共存しない場合では 88% (溶液相への残存率 12%) であったが、HIDS が共存する場合は 46% (残存率 54%) であった。一方で吸着層を構成する金属塩は、アルミニウムを除きキレート剤の存在によって溶解したが、フッ素の吸着阻害効果と金属の溶解量との相関は認められなかった。キレート洗浄において、水和酸化物や炭酸塩表面はキレート剤やキレート錯体と内圏錯体を形成すると考えられるが、鉱物表面での錯形成がフッ素吸着を阻害している可能性がある。傾向を概観すると、キレート剤の共存によるフッ素の吸着阻害は、酸性で炭酸カルシウムに対して、また中~塩基性の領域では水和酸化アルミニウムと水和酸化鉄において強く認められた。各土壌モデル表面へのキレート剤の錯形成挙動を反映していると考えられる。

以上を概観すると、汚染土壌中のヒ素、フッ素などの陰イオン性有害成分は、炭酸塩、鉄酸化物などの溶解に伴って溶液中に放出されるが、酸性条件では鉱物表面が正の電荷を帯びているため、再吸着によって除去が制限された。一方塩基性条件や金属イオンとの錯生成定数の小さなキレート剤が共存する条件では、これらが形成する表面錯体が鉱物表面の電荷を負に大きくし、ヒ素、フッ素の再吸着を妨げる働きを示し、有利に洗浄除去できた。

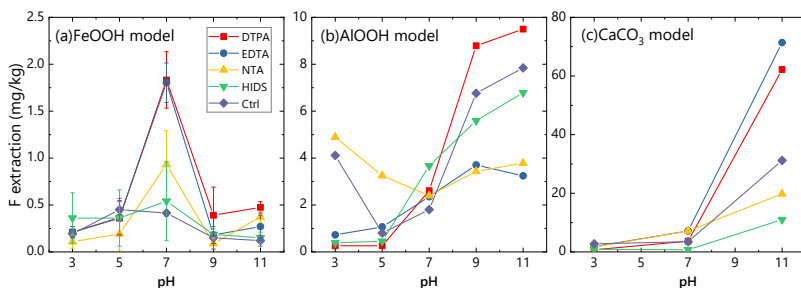


図 6 : (a)FeOOH, (b)AlOOH, (c)CaCO₃ からなるフッ素汚染土壌モデルのキレート洗浄

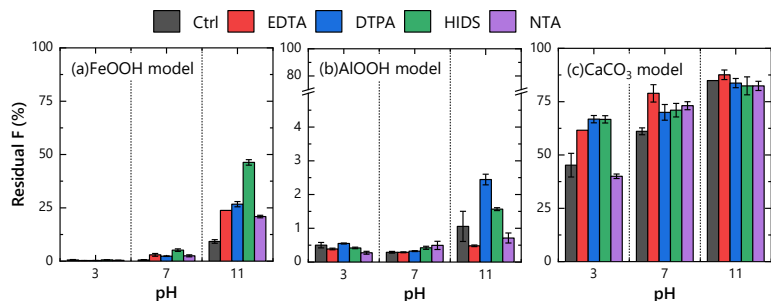


図 7 : 土壌モデルが共存するキレート剤水溶液における溶液相のフッ化物イオン残存率, (a) 水和酸化鉄, (b)水和酸化アルミニウム, (c)炭酸カルシウム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 村沢 直治, 澤井 光, イスマイル モハメド モフィズル ラハマン, 八田 珠郎	4. 巻 74
2. 論文標題 福島県内で生じた一般廃棄物焼却灰の基礎物性把握と粘土鉱物による長期的放射性Cs溶出抑制効果の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 都市清掃	6. 最初と最後の頁 363-374
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ismail M.M. Rahman, Yan Ye, M. Ferdous Alam, Hikaru Sawai, Zinnat A. Begum, Yoshiaki Furusho, Akio Ohta, Hiroshi Hasegawa	4. 巻 1654
2. 論文標題 Selective Separation of Radiocesium from Complex Aqueous Matrices Using Dual Solid-Phase Extraction Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Chromatography A	6. 最初と最後の頁 462476-462476
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chroma.2021.462476	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 岩崎 望, 長谷川 浩, 澤井 光, 為則 雄祐, 早川 慎二郎	4. 巻 9
2. 論文標題 宝石サンゴ骨軸中の微量元素を指標とした産地同定法の確立	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SPring-8/SACLA利用研究成果集	6. 最初と最後の頁 128 -132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18957/rr.9.2.128	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 村沢 直治, 澤井 光, Ismail Md, Mofizur Rahman, 八田 珠郎	4. 巻 48
2. 論文標題 一般廃棄物焼却灰からの放射性Cs溶出性と粘土鉱物による抑制	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 環境技術	6. 最初と最後の頁 44-49
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5956/jriet.48.156	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 村沢 直治 , 澤井 光 , Ismail Md , Mofizur Rahman , 八田 珠郎	4. 巻 58
2. 論文標題 一般廃棄物焼却灰等の放射性Cs溶出特性と安全対策	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 安全工学	6. 最初と最後の頁 179-189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18943/safety.58.3_179	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Hasegawa , M. Abdullah Al Mamun , Yoshinori Tsukagoshi , K. Ishii , Hikaru Sawai , Zinnat A. Begum , Mashio S. Asami , Teruya Maki , Ismail M.M. Rahman	4. 巻 109
2. 論文標題 Chelator-assisted washing for the extraction of lead, copper, and zinc from contaminated soils: A remediation approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Geochemistry	6. 最初と最後の頁 104397-104406
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.apgeochem.2019.	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Hikaru Sawai , Ismail M.M. Rahman , Naoyuki Jii , Yuji Egawa , Satoshi Mizutani , Hiroshi Hasegawa	4. 巻 27
2. 論文標題 Thermodynamic Study of the Acid-Induced Decontamination of Waste Green Sand Generated in a Brass Foundry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 20149-20159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11356-020-08512-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 澤井 光, 佐藤 稔
2. 発表標題 鉱物表面へのヒ素吸着に及ぼすキレート配位子の影響
3. 学会等名 特定非営利活動法人エコテクノロジー研究会 第 2 回エコテクノロジーフォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩下 彩夏, 澤井 光, 佐藤 稔, 岩崎 望, 長谷川 浩
2. 発表標題 宝石サンゴの化学成分に関する研究
3. 学会等名 特定非営利活動法人エコテクノロジー研究会第 2 回エコテクノロジーフォーラム, 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩下 彩夏, 澤井 光, 佐藤 稔, 岩崎 望, 長谷川 浩
2. 発表標題 宝石サンゴの化学成分に関する研究
3. 学会等名 日本分析化学会中部支部第21回高山フォーラム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三星かおり, 澤井光, 原田康弘, 吉岡翔司, Rahman Shafiqur, 黄国宏, 眞塩麻彩実, 長谷川浩
2. 発表標題 フッ素含有廃棄物に対するアミノカルボン酸系キレート剤を用いた化学洗浄処理の検討
3. 学会等名 第52回 中部化学関係学協会支部連合秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷本 篤彦, 澤井 光, 原田 康弘, 三星 かおり, Rahman Shafiqur, 眞塩 麻彩実, 長谷川 浩
2. 発表標題 フッ素汚染土壌に対するキレート剤を用いた化学洗浄処理
3. 学会等名 日本分析化学会第69年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤井 光, 大津 乃亜, 谷本 篤彦, 長谷川 浩
2. 発表標題 フッ素汚染土壌モデルに対するキレート洗浄の効果
3. 学会等名 日本分析化学会第80回分析化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷本篤彦、澤井光、石井健斗、真塩麻彩実、牧輝弥、長谷川浩
2. 発表標題 フッ素汚染土壌に対するキレート剤を用いた化学的洗浄法
3. 学会等名 日本分析化学会第79回分析化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井 健斗, 谷本 篤彦, 澤井 光, 地井 直行, 山崎 将義, 石渡 寛之, 太田 明雄, 真塩 麻彩実, 牧 輝弥, 長谷川 浩
2. 発表標題 土壌中ヒ素に対するキレート洗浄処理の効率化
3. 学会等名 日本化学会近畿支部2019年度北陸地区講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石井健斗, 谷本篤彦, 澤井光, 地井直行, 山崎将義, 石渡寛之, 真塩麻彩実, 牧輝弥, 長谷川浩
2. 発表標題 土壌中ヒ素に対するキレート洗浄処理の効率化
3. 学会等名 日本分析化学会第68年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 澤井 光 , 渡邊 安寿奈 , 大鋸谷 航平
2. 発表標題 コーヒー滓を用いた排水中ホウ素の除去に関する基礎検討
3. 学会等名 日本化学会関東支部第30回研究交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Takahashi, Hikaru Sawai, Masaki Nishimura
2. 発表標題 Study on Long-term Durability of the Polymeric Materials Used at Temporary Storage Site in Fukushima Prefecture
3. 学会等名 Geo-Environmental Engineering 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hikaru SAWAI, Mao KOIKE, Ismail M.M. RAHMAN, and Hiroshi HASEGAWA
2. 発表標題 Indium extraction from Non-ferrous smelting dust with the combination of the fine-bubble and chelant extractant
3. 学会等名 14th International Forum on Ecotechnology (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Ismail M. M. Rahman, Hikaru Sawai, M. Ferdous Alam, Zinnat A. Begum	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Springer Singapore	5. 総ページ数 IX, 510
3. 書名 An overview of Fukushima-derived strontium radioisotopes In: Nanba, K., Konoplev, A., Wada, T. (eds) Behavior of Radionuclides in the Environment III : Fukushima	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
バングラデシュ		Southern University	