

令和 4 年 6 月 18 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04601

研究課題名(和文)水/土壌比から求める重金属溶出評価モデルの開発

研究課題名(英文)Development of a heavy metal leaching assessment model based on liquid-solid ratios

研究代表者

伊藤 健一(Kenichi, Ito)

宮崎大学・国際連携センター・准教授

研究者番号：90524695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：水/土壌比を変えた液固比バッチ試験を複数土壌に適用し、堆積岩において土壌からの重金属溶出がヘンリーの吸着等温式でモデル化できることが示唆された。酸化に伴い変化する酸性硫酸塩土壌については、加速変質試験により変質土壌を作成して液固比バッチ試験に適用することを発案した。加速変質試験として、スレーキング等の物理影響を抑制しつつ土壌を加温加湿処理する酸化促進試験方法を考案した。検討の結果、60℃加湿処理では屋外曝露試験と比べて約16.7倍の酸化促進加速が推算された。以上から、「液固比バッチ試験+酸化促進試験」という土壌の長期溶出挙動の予測に対する新たなアプローチ手法を提供する成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果である簡易な液固比バッチ試験及び促進酸化試験との併用による重金属等の溶出パラメータ取得の試験手法は、自然由来重金属含有土壌及び経時変化で酸性化を伴う酸性硫酸塩土壌について、これまで屋外曝露試験やカラム試験による事象観察でしか把握できなかった重金属等の長期溶出挙動を予測するアプローチ手法である。この成果は広く土壌を扱う分野において土壌中の微量元素の放出挙動の評価手法の発展に貢献するものである。また、このアプローチ手法は汚染土壌の評価を進展させ、汚染土壌対策実務の安全性向上、合理化等に寄与する有益な知見を与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The batch test with differing liquid-solid ratios was applied to several soils, and it was suggested that heavy metal leaching from sedimentary rocks can be modeled by Henry's adsorption isotherm. For acid sulfate soils, which change with oxidation, it was proposed that the use of accelerated alteration methods to create altered soils for the evaluation by the batch test. As an accelerated alteration test, a new accelerated oxidation test method, in which the soil is heated and humidified, and suppresses physical effects such as slaking was devised. As a result, the new accelerated oxidation method was estimated to be about 16.7 times faster alteration in the 60°C and humidified treatment than in the outdoor exposure test. The fruits of this study provided a new approach, which is "the batch test with differing liquid-solid ratios with new accelerated oxidation test", for predicting the long-term leaching behavior of soil.

研究分野：環境地盤工学

キーワード：自然由来重金属 ひ素 溶出試験 溶出量 液固比 促進酸化試験

1. 研究開始当初の背景

(1) 土壌間隙水中の重金属濃度とそれを規定する要件への理解：建設現場で発生する自然由来重金属含有土砂リスク評価ではサイト概念モデル¹⁾が主流となっている。このモデルでは一般的に土壌溶出試験の溶出濃度から得られる平衡定数： K_d を化学パラメータとして移流・分散解析により重金属の拡散を評価するが、モデルと実現象が乖離することがある。例えば、基準値以下の重金属含有土壌を盛土に堆積した際、モデル計算では地下水は汚染されない。しかし、実際は盛土の鉛直方向への水の浸透過程で重金属濃度が上昇して地下水を汚染する場合がある²⁾。この要因の一つに化学パラメータがある。化学パラメータを導く土壌溶出試験は環境省告示第18号を準用した液固比10の短期溶出試験であるが、実土壤中では水は土壌より少なく、飽和時でも液固比はおよそ0.3以下となる。したがって土壌間隙水中の濃度は短期溶出試験より高いと推察される。筆者らはこの液固比を変化させた液固比バッチ試験を提案し、溶出濃度が水と土壌の液固比で変化すること、液固比と濃度には相関がありヘンリー型吸着等温式であらわされること(図1)を見出し、溶出量： M_L (mg/kg)、総溶出量： M_T (mg/kg)、溶出濃度： C (mg/L)、分配係数： K_d (L/kg)、最大溶出濃度： M_T/K_d 等の化学パラメータの取得が溶出挙動の予測に役立つ可能性を示した^{1,3,4)}。この手法を表1のような溶出傾向の異なる土壌に広く適用してモデル化することができれば、溶出挙動の理解をより深めることができると考えられる。

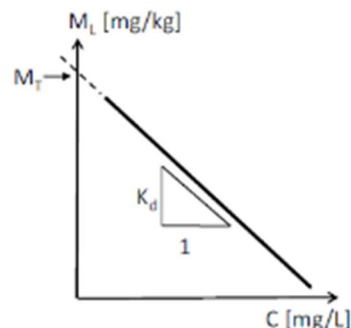


図1 ヘンリー型の固相・液相存在量、濃度の関係⁴⁾

表1 重金属の溶出傾向による土壌の種類別エラー1ブック

類型	I 類	II 類	III 類	IV 類
溶出傾向	スロープ型		スロープ-アーチ型	アーチ型
硫化物	無~少	少	少~多	多
酸化還元状態	酸化的		還元的	
pH	中性~アルカリ性	酸性	中性~アルカリ性	
酸化後のpH	—	—	低下	低下
溶出濃度	低	低~高	中	中~高
含有量	低	中~高	高	高

(2) 酸化による土壌の重金属溶出の経時的・定量的変化への理解：自然由来重金属含有土砂の中で酸化により酸性化と重金属等を溶出する酸性硫酸塩土壌について、従来は酸性化可能性試験⁵⁾で判定されているが、過酸化水素を用いた酸化処理は実現象とは作用が異なり、急激な強制酸化のため酸化過程の経時変化や所用時間等の定量的評価が難しい。筆者らは、土壌の水浸加温養生により酸化促進昇効果をj確認しており⁶⁾、これを発展されて、酸性硫酸塩土壌の酸化進行を定量的に把握する加速変質試験方法の開発が望まれる。

(3) 重金属溶出評価モデル：液固比バッチ試験はMethod 1316, USEPA⁷⁾等でも用いられるがまだモデル化されていない。

2. 研究の目的

土壌の重金属溶出の評価・予測の精緻化に貢献する新たな「重金属溶出評価モデル」の提案を目的として次の3点の目標を掲げた。

(1) 液固比バッチ試験の適応範囲の評価：液固比バッチ試験を化学特性の異なる複数の土壌種別に対して適用を検討し、その有効性を検証する。

(2) 加速変質試験の開発：酸性硫酸塩土壌の長期溶出挙動の把握に向けた経時変化後の土壌を模擬的に得られる汎用的な加速変質試験方法を開発する。

(3) 重金属溶出評価モデルに向けたアプローチ手法の提案：液固比バッチ試験から取得される化学パラメータを活用した溶出挙動の簡易予測手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 液固比バッチ試験の適応範囲の評価：溶出傾向等の異なる複数種の土壌に対して液固比バッチ試験を行い、併せてカラム通水試験や逐次抽出分析、鉍物分等との比較から、土壌からの重金属の溶出傾向の把握やモデルのための化学パラメータの取得に対する液固比バッチ試験の妥当性を検証した。

(2) 加速変質試験の開発：熱力学的に酸化の化学反応の要素である酸素、水、温度について種々の条件で比較検討を行い、処理に伴う土壌の細粒化等の物理変化を抑えつつ化学的な酸化促進効果を得られる汎用的な加速変質試験方法を開発した。併せて、土壌の経時変化の観察手法である土研式雨水曝露試験^{8,9)}等の実環境に近い試験と比較して酸化促進の効果を確認した。

(3) 重金属溶出評価モデルに向けたアプローチ手法の提案：地盤条件などの情報を要する移流・分散解析に対して、溶出量： M_L や最大溶出量： M_T 、分配係数： K_d 等から土壌からの重金属溶出濃度の傾向や拡散に伴う経時的な変化を評価する手法について、新たに単位土壌(セル)間を物質が移動する吸脱着モデルを検討した。

4. 研究成果

(1) 液固比バッチ試験の汎用性の検証

【研究結果】液固比バッチ試験で各種土壌の溶出傾向を比較評価し、総溶出量： M_T 、分配係数： K_d 、濃度： C や最大溶出量： M_T/K_d 等の吸着等温式に基づく化学パラメータを取得しモデル

化を検討した。

異なる土壌へのアーチ型とスロープ型の土壌への検討^{10,11)}：表2の種別で溶出傾向が類の変質角礫凝灰岩および または 類の貫入流紋岩について液固比バッチ試験とカラム通水試験¹²⁾を行い比較検討した。液固比バッチ試験の結果、各土壌は概ねヘンリー型の負の相関を示したが、高液固比では希釈効果による pH 中和が生じ、また M_T を放出しきることによって一定液固比以上では濃度低下が生じた。カラム通水試験の結果、変質角礫凝灰岩では硫酸、ひ素、カドミウムで高い初期濃度が通水で低下していくスロープ型を示したが、鉛では濃度上昇後に低下するアーチ型を示した。各最大溶出量はカラム通水試験 > 液固比バッチ試験、pH も常にカラム通水試験 > 液固比バッチ試験となり、カラム通水試験では強酸性化によりひ素濃度が上昇した。しかし、液固比 - C/Cmax (最大濃度比、液固比バッチ試験の Cmax は計算値) は、液固比バッチ試験とカラム通水試験の溶出量は類似の傾向を示した。貫入流紋岩でもカラム通水試験では酸性化に伴いひ素濃度が上昇してその後低下し、類のアーチ型の傾向を示した。液固比 - C/Cmax は2つの試験間で液固比 10 以下において類似のスロープ型の傾向を示し、カラム通水試験でのひ素の溶出傾向は液固比バッチ試験で比較的良好に再現された。以上の検討結果から土壌が酸性化など pH 変化する場合は重金属溶出に対してその影響への留意が必要であることが示された。

泥岩中のひ素の経時変化と液固比バッチ試験による評価の検討¹³⁾：掘削時のひ素溶出量が土壌環境基準 0.01mg/L 以下のアルカリ性泥岩について、屋外環境下で7年間曝露されたものについて、スレーキングの進んだ細粒分の多い A：上層、B：下層の土砂、および C：下層岩塊の酸化影響の異なる試料3種を比較検討した。エネルギー分散型蛍光 X 線分析 (EDX) と粉末 X 線回折分析 (XRD) の結果、成分として $As : C > B > A$ 、 $S : A > B > C$ 、 $Fe : A = B > C$ の傾向を示し、鉱物として黄鉄鉱のピーク強度が $C > B > A$ の順を示した。これらは土砂化した A、B は元の岩石である C に比べてひ素や硫黄を放出しており、A 上層 > B 下層 > C 岩塊の順に酸化・風化していることを示唆した。液固比バッチ試験の結果、A と B で弱アルカリ性、C で弱酸性を示し、EC は液固比が大きいほど低下した。また、硫酸イオン液固比によらずおよそ一定、ひ素は C で検出限界以下、A と B では、高液固比ほど濃度上昇し、ヘンリー型と逆の正の相関を示した。pH-ひ素濃度の関係からひ素はアルカリ性環境で溶出しやすいことから、酸化進行でひ素が鉄酸化物の表面等に分配されていることが示唆され、それらは逐次抽出分析により確認された。本検討から、pH 変化に依存するひ素の溶出挙動は、アルカリ環境条件下において液固比バッチ試験で取得することが困難であることが示唆された。

液固比バッチ試験の化学パラメータのモデル導入：液固比バッチ試験の化学パラメータをヘンリー型とラングミュア型の吸着等温式へ適用し、カラム通水試験と対比してその妥当性が検証された¹⁴⁾。検討の結果、液固比バッチ試験から化学パラメータとして得られたヘンリー型およびラングミュア型の定数とそれらの吸着等温式を適用した移流・分散モデルにおいて、ふっ素やひ素などでは、特により低い液固比において2試験間で不一致が認められた。これらは pH 依存性があることから、溶出液 pH の影響への留意の必要性が指摘された。一方、硫酸イオンやほう素の溶出挙動はカラム通水試験の結果とよく一致し、液固比バッチ試験が吸着等温式の定数の取得とモデルの化学パラメータを決定することができる手法であることが示唆された。

【結論】 以上の検証結果から、液固比バッチ試験は表1の4種類の土壌に広く適用可能であることが示された。一方、濃度：低液固比時に対象物質が高濃度で沈殿等により濃度低下が生じる場合、pH：対象物質に pH 依存性がありかつ液固比で液相 pH が対象物質の脱離しやすい pH 範囲にある場合、の2条件下では適用が困難であることも指摘された。ただし、これら条件は主に酸性硫酸塩土壌で生じることから、次に検討の加速変質試験等との組み合わせにより解決できることが期待される。

(2) 加速変質試験の開発

【研究結果】 酸化で変質する酸性硫酸塩土壌について、加湿加温による酸化促進試験方法を考案し、酸性化可能性試験や土研式雨水曝露試験との対比による検証、と加速度の評価を行った。

酸性化可能性試験の評価：既往評価法の酸性化可能性試験⁵⁾について、用いる過酸化水素濃度を段階的に振って、土壌の酸化過程の評価可能性を検証した¹⁵⁾。検討の結果、土壌種別毎にいずれかの過酸化水素濃度を境に急激に酸化してしまい、酸化過程の評価が困難であったことから、改良しても定量的な評価手法にはなりえないことが確認された。

酸化促進手法の検討：各種土壌に対して水、温度等の条件を変えて様々な検討を行った。その結果、水と土壌を遠沈管で液固比 2.5、80 で養生した、水の移動が少ない静的条件を模擬した水浸加温試験では、成分が液相中で酸化による鉄酸化物等の二次鉱物に再分配されて溶出が抑制される可能性が示された¹⁶⁾。他に、より大気と触れるよう平板バットで土壌を水浸して加温の違いを比較のために 60、80 で養生した水浸加温試験、スレーキング試験方法¹⁷⁾を参考にした乾湿繰り返し試験、酸素供給促進を目的に室温と 60 でバブリングした試験、またこれらの比較として水浸加温試験同様に平板バット上で室温にて1年間養生した室内曝露試験を行った¹⁸⁾。以上の検討の結果、1年間の室内曝露試験で pH は 3.3、EC は 320 mS/m に達し、これに対して乾湿繰り返し試験では約 10 日間、60 バブリング試験では 18 日間、80 水浸加温試験では約 1 か月で同程度に達して酸化促進の効果を示した。一方、室温のバブリングでは酸化が促進されず、加温の必要性が確認された。また室内曝露試験や乾湿繰り返し試験では乾湿の繰り返しで細粒化し、110 では土壌表面が焼けたことから、実現象の負荷を超える乾湿や温度は化学パラメータ取得を目論む加速変質試験としては適さないことが示唆された。

加湿加温試験： 以上の結果から、土壌は加水と加温で酸化促進されることから、水分は加湿程度とした加温が適当と考えられた¹⁸⁾。そこで、遠沈管内に 1/3 程度に水を入れた上に不織布で試料を吊り下げて通気性のあるシリコセンで蓋をして 60 で養生する吊り下げ試験を行った。検討の結果、短時間で室内曝露試験と同程度の酸性化と EC の上昇を得た。これを踏まえて、酸化後の液固比バッチ試験を想定して試料量 100 g が処理でき、かつ加湿時に試料内の透湿を考慮して敷設厚さ 1 cm 程度となり、養生中の状態を観察できるポリカーボネート製円筒と 100 μm のナイロンメッシュ、プラスチックシャーレで構成される試験器具を開発した^{18,19)}。この器具で 60 条件下、相対湿度は 84%程度により土壌の加湿加温試験を行った。処理後の土壌と酸性化可能性試験後の土壌を比較したところ、全ての土壌で酸性化、硫酸イオンの放出、XRD による黄鉄鉱の減少を確認し、また酸化程度は加湿加温試験 < 酸性化可能性試験、加湿加温試験内では時間経過に従いそれらの傾向が顕著となった。また、土壌細粒化に伴う溶出への影響について²⁰⁾、スレーキング試験¹⁷⁾により比較検討の結果、乾湿を繰り返すスレーキング試験では土壌は細粒化したが、加湿加温試験後の土壌で細粒化は見られなかった。以上から、加湿加温試験は酸性化可能性試験に比べて穏やかだが確実に酸化促進し、加えて酸化程度を調整でき、かつ細粒化の物理影響が小さい、化学パラメータの取得に適した加速変質試験であることが実証された。

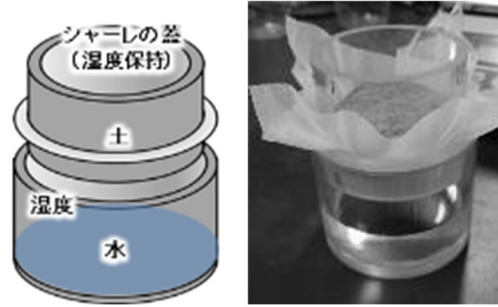


図2 試験器具概要図(左)と外観(右)^{18,19)}

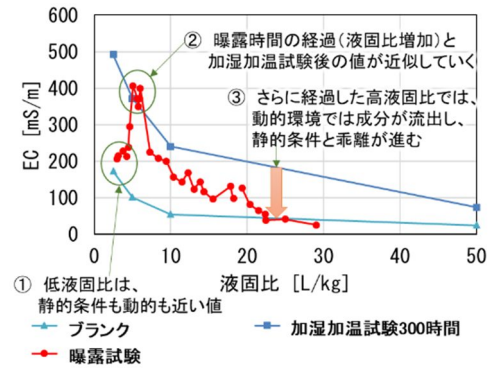


図3 ECにおける加速度の検討

実現象再現試験との比較と加速度の算定： 加湿加温試験後の試料の液固比バッチ試験と実現象再現試験である土研式雨水曝露試験(以下、曝露試験)の結果を比較した。傾向はおおよそ(1)液固比バッチ試験の検証に沿うものであり、加湿加温試験による酸化促進した土壌の液固比バッチ試験の値は曝露試験に近いことが確認された。そこで、加速度の評価を検討した。土壌から放出される成分の挙動を表し、以上の試験においてほぼ全ての土壌種別で曝露試験や液固比バッチ試験での液固比や時間経過に対して減衰する傾向が共通している電気伝導度(EC)を指標として、酸化の加速度を考察した。一例として図3に海成堆積岩(頁岩)の曝露試験と液固比バッチ試験(ブランク、加湿加温試験300時間後)の液固比とECの関係を示す。曝露試験とブランク(元の土壌)のECは図中 で近い値となり、ブランクの液固比バッチ試験の低液固比と曝露試験初期とはおおよそ同じ状態と考えられた。これを初期値とする。次に の液固比5では加湿加温試験300時間後と曝露試験が近い値を示した。 で曝露試験と加湿加温試験後の土壌の酸化が同程度と仮定する。酸化に要した時間は曝露試験:約5000時間、加湿加温試験:300時間であり、単純比較から曝露試験より加湿加温試験は約16.7倍速く酸化したと推算される。

【結論】 以上から、加湿加温試験と液固比バッチ試験の組み合わせにより、経時的な土壌変化を予測できる可能性が示唆された。また、酸化加速度を16倍と仮定すると約3年の溶出挙動が2~3か月の加湿加温試験で評価・予測でき、リスク評価で大いに役立つことが期待される。

(3) 重金属溶出評価モデルに向けたアプローチ手法の提案^{21,22)}

【研究結果】 サイト概念モデルで用いられる移流・分散解析に対して、土壌からの重金属溶出濃度の傾向や拡散に伴う経時的な変化をより簡易に評価する方法として、単位土壌(セル)間を物質が移動する吸脱着過程に液固比バッチ試験の結果を導入するモデルを提案・検討した。

ヘンリー型吸脱着モデル： 液固比バッチ試験結果で得られる固体質量あたりの液体中に存在量： M_L (mg/kg)と液相濃度： C (mg/L)の関係をヘンリー型吸着等温式と仮定すると、重金属等の放出成分の吸脱着関与総量： M_T (mg/kg)は、 $M_L = -K_d C + M_T$ の関係となり、分配係数： K_d (L/kg)が得られる。この M_T 、 K_d から液相濃度と液固比の関係を図3のセルモデルで表す²¹⁾。土壌の固相と液相の組合せを1つのセル(空間)とし、これが下降流で連なったものが縦方向のセル群であり、上からセル内に流入する液相が固相と接触して有害物質の吸脱着を行ったのち下

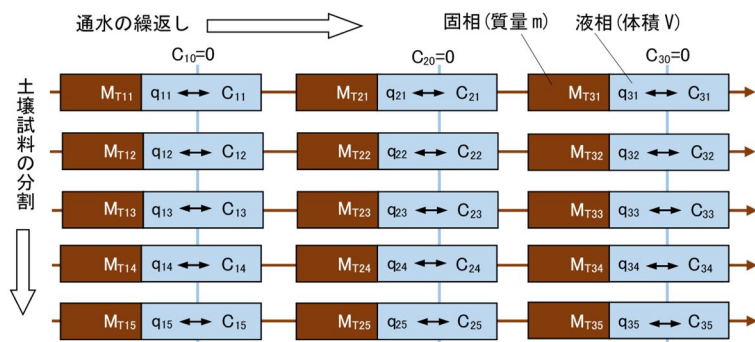


図32 土壌のセル群による物質の吸脱着過程検討モデル²¹⁾

方のセルへ流出・流入し、これが繰返されて下端で排出される様子を表している。また、横方向のセル群は通水された固相に新たな液相が繰返し流入する時間経過を表している。ここでは固体に吸着される対象物質の量： q (mg/kg) と表記する^{21,22)}。ここで、任意の i 列 j 段のセルについて吸脱着に關与する質量の収支を考えると $M_{Tij}m + C_{ij-1}V = q_{ij}m + C_{ij}V$ (固相質量： m 、液相体積： V 、 i 列 j 段のセルにおける吸脱着に關与総量： M_{Tij} 、固相吸着量： q_{ij} 、液相濃度： C_{ij}) と表される。この時ヘンリー型吸着等温式は $q_{ij} = K_d C_{ij}$ となり、液相の濃度： C_{ij} と液固比： V/m を関数とした $C_{ij} = [M_{Tij} + C_{ij-1}(V/m)] / [K_d + (V/m)]$ で表せられる。また、 M_{Tij} は $M_{Tij} = M_{T(i-1)j} + M_{L(i-1)j-1} - M_{L(i-1)j}$ と前のセルの値から計算され、液相中の対象物質の量は $M_{Lij} = (V/m)C_{ij}$ となる。最後に、各列の下端の C_{ij} を取り出し、液固比の累積値に対して曲線を描くと液相中の溶出濃度 - 液固比の關係が得られた。

ラングミュア型吸脱着モデル：ラングミュア型吸着等温式 $q_{ij} = \alpha \beta C_{ij} / (1 + \alpha C_{ij})$ を適用する場合、石森ら (2019)²³⁾ を参考に液固比バッチ試験からラングミュア型吸着等温式の定数 α 、 β を求めることで $M_{Tij}m + C_{ij-1}V = q_{ij}m + C_{ij}V$ と $q_{ij} = \alpha \beta C_{ij} / (1 + \alpha C_{ij})$ からヘンリー型と同様に溶出濃度 - 液固比の關係を示す式 $C_{ij} = [M_{Tij} + C_{ij-1}(V/m)] / [\alpha \beta / (1 + \alpha C_{ij}) + (V/m)]$ が得られた。

溶出濃度 - 液固比關係：岡本ら (2019)¹¹⁾ の液固比バッチ試験とカラム試験の結果を用いて液固比バッチ試験結果からヘンリー型とラングミュア型の各定数、溶出濃度 - 液固比の各關係式を推定してカラム通水試験の結果にフィッティングさせた結果、ラングミュア型はカラム通水試験における溶出挙動の特徴を模擬し、鉛とカドミウムの溶出挙動をよく表した。

【結論】以上の結果、土壌からの重金属などの成分溶出の評価について、溶出濃度 - 液固比の各關係式を用いる吸脱着モデルが適用できることが示された。また、カラム通水試験と液固比バッチ試験を対比した場合、吸脱着モデルにおいてはヘンリー型よりもラングミュア型でよりカラム通水試験における溶出挙動の特徴を捉えられることが確認された。

<研究協力・謝辞> 本研究では多数の協力、助言を受けた。特に、国立環境研究所：肴倉氏、石森氏、上島氏、基礎地盤コンサルタンツ(株)：細堀氏、岡本氏、野田氏、(株)大林組：三浦氏、森下氏、国際航業(株)：山田氏にはモデルの構築、試料・データの提供、試験検討などの協力、ならびに研究成果を公表いただき、また各機関より本科学研究費に加えて共同研究等の支援を受けた。研究作業は高橋氏、佐伯氏、小谷氏、伊藤氏の協力で実施された。深く感謝申し上げる。

<引用文献>

- 1) 伊藤, 高橋, 佐伯, 岡本, 野田 (2017) 第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 289-294.
- 2) 伊藤, 志渡澤, 三浦, 日笠山, 森川, 肴倉 (2017) 第 23 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会発表論文集, 424-429.
- 3) 伊藤, 平田, 北畠, 宮口, 河野, 横田 (2011) 第 9 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 181-188.
- 4) 肴倉, 伊藤 (2018) 第 53 回地盤工学研究発表会要旨集, 2167-2168.
- 5) 地盤工学会 (2020) : 地盤工学会基準: 酸性化可能性試験, JGS0271-2020.
- 6) 伊藤, 岡本, 野田, 高橋, 佐伯 (2018) 第 53 回地盤工学研究発表会, 第 53 回地盤工学研究発表会要旨集, 2331-2332.
- 7) US EPA. Method 1316 (2017)
- 8) 土木研究所, 他 (2007) 土木研究所共同研究報告書, No.358, p.89.
- 9) 品川, 佐々木 (2010) 土木技術資料, Vol.52(6), 10-13.
- 10) 岡本, 細堀, 野田, 伊藤 (2019) 第 25 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 79-83.
- 11) 岡本, 細堀, 野田, 伊藤 (2019) 第 13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 199-206.
- 12) ISO 21268-3:2019(E) (2019)
- 13) 山田, 伊藤, 平山, 中島 (2019) 第 13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 11-16.
- 14) H. Sakanakura, K. Ito, J. Tang, M. Nakagawa, and H. Ishimori (2021) Materials, 14(10), 2534-2549. DOI: 10.3390/ma14102534
- 15) 森下, 三浦, 伊藤 (2020) パイライトを含む掘削土からの重金属溶出特性, 第 55 回地盤工学研究発表会要旨集, 23-6-2-07.
- 16) 山田, 伊藤, 中島, 堀中, 鳥居 (2020) 第 55 回地盤工学研究発表会要旨集, 22-5-3-02.
- 17) 地盤工学会 (2020) : 地盤工学会基準, 岩石の促進スレーキング試験方法, JGS 2125-2020.
- 18) 伊藤, 小谷, 伊藤 (2022) 第 27 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 381-386.
- 19) 小谷, 森下, 三浦, 伊藤 (2021) 第 64 回粘土科学討論会講演要旨集, 55-56.
- 20) 木下, 野澤, 伊藤, 山本, 佐藤 (2019) 第 25 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集, 84-89.
- 21) 細堀, 岡本, 野田, 伊藤, 肴倉宏史 (2019) 第 54 回地盤工学研究発表会, No.1022.
- 22) 細堀, 岡本, 野田, 伊藤 (2020) 第 55 回地盤工学研究発表会要旨集, 22-5-3-03.
- 23) 石森, 唐, 肴倉 (2019) 第 13 回環境地盤工学シンポジウム, 207-214.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sakanakura Hirofumi, Ito Kenichi, Tang Jiajie, Nakagawa Mikako, Ishimori Hiroyuki	4. 巻 14
2. 論文標題 Determining Adsorption Parameters of Potentially Contaminant-Releasing Materials Using Batch Tests with Differing Liquid-Solid Ratios	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 2534 ~ 2534
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/ma14102534	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 山田優子, 伊藤健一, 平山利晶, 中島誠	4. 巻 13
2. 論文標題 建設発生土からの砒素溶出特性の比較検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 11-16
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 -

1. 著者名 岡本直人, 細堀建司, 野田典広, 伊藤健一	4. 巻 13
2. 論文標題 液固比バッチ試験の適用についての検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 環境地盤工学シンポジウム発表論文集	6. 最初と最後の頁 199-206.
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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 木下久美子, 伊藤 健一, 野澤 笑子, 山本 中一, 佐藤 努
2. 発表標題 吸着材・不溶化材等の収着 - 溶出試験とヒステリシス
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田優子, 伊藤健一, 中島誠, 堀中敏弘, 鳥居和樹
2. 発表標題 静的条件下における建設発生土からの砒素溶出挙動の検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 細堀建司, 岡本直人, 野田典広, 伊藤健一
2. 発表標題 液固比バッチ試験による浸出水濃度簡易予測手法の検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 森下智貴, 三浦俊彦, 伊藤健一
2. 発表標題 パイライトを含む掘削土からの重金属溶出特性
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本直人, 細堀建司, 野田典広, 伊藤健一
2. 発表標題 液固比バッチ試験の適用についての検討
3. 学会等名 第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田優子, 伊藤健一, 中島誠, 堀中敏弘, 鳥居和樹, 新谷広紀
2. 発表標題 建設発生土の泥岩中における砒素の存在形態の変化
3. 学会等名 第26回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤健一, 小谷護留, 伊藤華奈子
2. 発表標題 土壌の経時変化の予測に向けた酸化促進試験方法の検討
3. 学会等名 第27回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小谷護留, 森下智貴, 三浦俊彦, 伊藤健一
2. 発表標題 土壌の酸性化特性試験方法の開発
3. 学会等名 第64回粘土科学討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木下久美子, 野澤笑子, 伊藤健一, 山本中一, 佐藤努
2. 発表標題 溶出試験における土壌細粒化とほう素溶出の関係
3. 学会等名 第25回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細堀建司, 岡本直人, 野田典広, 伊藤健一, 肴倉宏史
2. 発表標題 液固比バッチ試験の利用方法についての検討
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 細堀建司, 岡本直人, 野田典広, 伊藤健一
2. 発表標題 液固比バッチ試験による浸出水濃度簡易予測手法の検討
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔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