

令和元年6月3日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K18151

研究課題名（和文）汚染物質動態と植物根の生長を考慮した環境配慮型地盤浄化シミュレーターの開発

研究課題名（英文）Development of Simulator on Phytoremediation integrating advection-diffusion of contaminant and growth of root

研究代表者

古川 全太郎（Furukawa, Zentaro）

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：70735985

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、効果的・効率的なファイトレメディエーションを行うための、植物根による汚染物質の吸収及び生長に伴う吸収量の変化を考慮した「環境配慮型地盤浄化シミュレーター」を開発し、浄化効果とその経時変化の定量化を行った。二次元座標系により構築したシミュレーターの精度の検証のため、「二次元型育苗装置」を開発し、六価クロム汚染模擬土を用いたコマツナ及びヒマワリの植生実験を行った。その結果、以下の成果を得た。六価クロム汚染地盤の浄化に最も寄与する植生の生長パラメータは、根の伸長速度であることを明らかにした。実験開始後1か月までの実測値と解析値が概ね一致するシミュレーターを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

「環境配慮型汚染地盤浄化シミュレーター」を開発したことで、化石燃料への依存が少なく、周辺環境に配慮できる汚染地盤浄化工法を提案する際の効果的・効率的な条件を提案することが可能となり、地盤・土壤汚染問題を解決するための一手法をなり得ることが期待される。工場跡地などの重金属汚染の対策を行う上で高度なツールとなり、地盤工学・土壤物理学に基づいた効果的な汚染物質浄化手法を提案することができる。

研究成果の概要（英文）：In order to propose an effective and efficient way of purifying contaminated ground, “eco-friendly simulator on phytoremediation” was developed. It can analyze effect of purification with time. Two-dimensional analytical field was assembled, and to inspect accuracy of the developed simulator, some cultural experiments were conducted with several concentrations of hexavalent chromium (Cr6+) on “Two-dimensional nursery apparatus”. Turnip leaf and sunflower were tried for the cultural experiment. Following outcomes were obtained from this study.

- 1) The most effective growth parameter of plants for phytoremediation was elongation speed of root.
- 2) An accurate simulator could be developed which corresponds to experimental results for 1 month.

研究分野：地盤工学，地盤環境工学

キーワード：ファイトレメディエーション 地盤内の物質輸送 不飽和地盤

## 1. 研究開始当初の背景

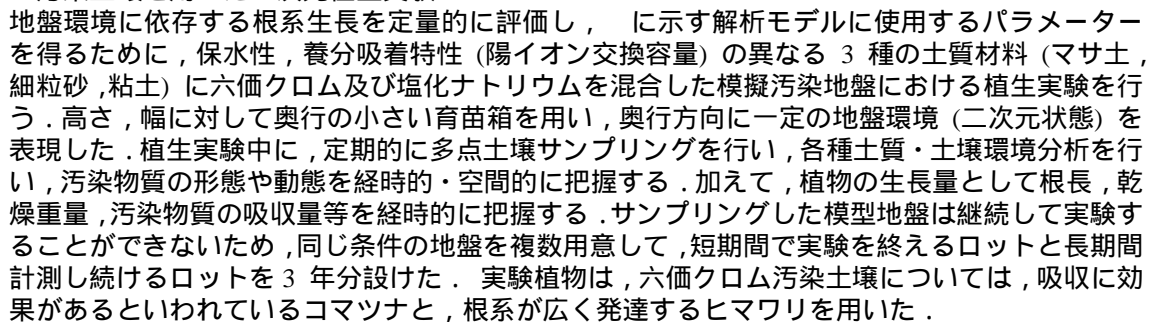
近年、安価で化石燃料への依存が少なく、周辺環境に配慮した地盤浄化技術として、植物根を活かしたファイトレメディエーションが注目されている。ファイトレメディエーションとは、地盤内の有害な重金属・揮発性有機物や塩分等を植物根に吸収させる技術であるが、その効果は汚染物質の形態、植物根系の生育量、降雨等の気象条件に依存し、その不確実性が懸念されている。そこで、時々刻々と変化する地盤内汚染物質の形態や移動状況を地盤工学・土壌物理学の観点から捉え、植生による長期的な浄化効果を高精度で把握できる評価手法が提案できれば、植物根が確実に、かつ効果的・効率的に地盤を浄化できる環境を創り出すことが可能となり、地盤・土壌汚染問題を解決するための一手法をなり得ることが期待される。

## 2. 研究の目的

本研究は、効果的・効率的なファイトレメディエーション(植物根による地盤内汚染物質の浄化)を行うために、地盤内の pH, ORP(酸化還元電位)、不飽和分散係数、陽イオン交換容量に依存する汚染物質の形態変化・移動メカニズムを、移流、分散、吸脱着特性に着目して明らかにすることを目的とする。加えて、汚染物質動態に基づいた植物根による吸水・汚染物質の吸着と、生長に伴うその変化を追うことができる環境配慮型地盤浄化シミュレーターを開発し、汚染物質除去時間、除去量と植生密度・生長量の関係を予測する。本シミュレーターを開発することができれば、日本の国土を脅かす重金属汚染・塩害の対策を行う上で高度なツールとなり、地盤工学・土壌物理学に基づいた効果的な汚染物質浄化手法を提案することができる。

## 3. 研究の方法

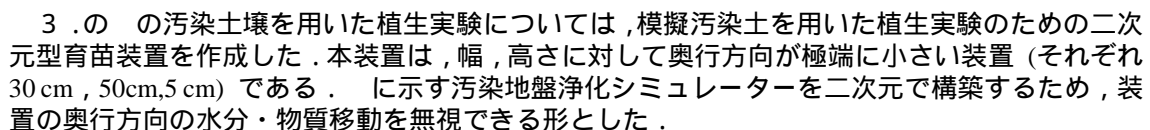
### 汚染土壌を用いた二次元植生実験

地盤環境に依存する根系生長を定量的に評価し、に示す解析モデルに使用するパラメーターを得るために、保水性、養分吸着特性(陽イオン交換容量)の異なる3種の土質材料(マサ土、細粒砂、粘土)に六価クロム及び塩化ナトリウムを混合した模擬汚染地盤における植生実験を行う。高さ、幅に対して奥行の小さい育苗箱を用い、奥行方向に一定の地盤環境(二次元状態)を表現した。植生実験中に、定期的に多点土壌サンプリングを行い、各種土質・土壌環境分析を行い、汚染物質の形態や動態を経時的・空間的に把握する。加えて、植物の生長量として根長、乾燥重量、汚染物質の吸収量等を経時的に把握する。サンプリングした模型地盤は継続して実験することができないため、同じ条件の地盤を複数用意して、短期間で実験を終えるロットと長期間計測し続けるロットを3年分設けた。実験植物は、六価クロム汚染土壌については、吸収に効果があるといわれているコマツナと、根系が広く発達するヒマワリを用いた。

### SPACモデルを応用した二次元根系生長-地盤環境シミュレーターの構築

不飽和地盤内のマトリックポテンシャルと植物根系の吸引ポテンシャルとの大小関係で、根系及び地盤内の水分移動を表現する「SPAC経路」に、不飽和分散係数を導入して、汚染物質の移動を表現した。併せて、間隙水中の水素イオンの移動も同様に表現し、地盤内の pH・ORP 分布を算定した。地盤内の pH と ORP に依存して、間隙水中の汚染物質の移動速度や濃度、形態が変化する様なモデルを構築した。また、植生の生長に伴う汚染物質の吸収速度や吸収量を変化させて、地盤内の汚染物質濃度の変化を経時的・空間的に追うことができるシミュレーターを構築した。

## 4. 研究成果

3. の 汚染土壌を用いた植生実験については、模擬汚染土を用いた植生実験のための二次元型育苗装置を作成した。本装置は、幅、高さに対して奥行方向が極端に小さい装置(それぞれ 30 cm, 50 cm, 5 cm)である。に示す汚染地盤浄化シミュレーターを二次元で構築するため、装置の奥行方向の水分・物質移動を無視できる形とした。

まさ土に堆肥を混合した材料に、汚染物質として六価クロムを 0~100 mg/kgdry 混合し、育苗装置に 1.3g/cm<sup>3</sup>、初期含水比 10%前後で充填した。それぞれの汚染物質濃度で植生の生育試験を行った。対象とした植生は 3. に示す通りであり、育苗装置一つにつき植生を 1 株定植させ、枯死するまでの期間実験を行い、経時的に体積含水率、六価クロム濃度、pH、ORP を測定した。その結果、下記のことが明らかとなった。

- 1) コマツナは、初期六価クロム濃度 75 mg/kgdry 以下の汚染環境で浄化効果を発揮し、濃度が薄くなるほど浄化率(初期濃度に対する一定期間経過後の濃度の割合)が高くなることが明らかとなった。生育期間 2 か月、初期六価クロム濃度 10 mg/kgdry の条件においては、浄化率が 20%以上となった。一方、枯死後に葉茎と根に含まれる六価クロム濃度を調査したところ、初期濃度が高い程、また生育期間が長い程植物体内に六価クロムが蓄積する傾向にあることが明らかとなった(図 1)。
- 2) ヒマワリにおいては、初期六価クロム濃度 50 mg/kgdry 以下の汚染環境で浄化効果を発揮し、

濃度が薄くなるほど浄化率が高くなることが明らかとなった。生育期間 2 か月、初期六価クロム濃度 25 mg/kgdry の条件においては、浄化率が 35 % 程度となった。(図 2)

- 2 か月間で浄化効率を 30 % 以上としたい場合は、ファイトレメディエーションを行うためには、土 7500 cm<sup>3</sup> に対してコマツナ、ヒマワリ共に 2 本以上定植させ、2 か月程度で植え替えることが好ましいことが示唆された。

3. の SPAC モデルを応用した二次元根系生長-地盤環境シミュレーターについては、平面座標系と円筒座標系において、植物根の水分・化学物質吸収を考慮した二次元解析場を構築した。不飽和状態の地盤内の水分移動式 (Richards 式) と不飽和の物質分散を考慮した移流-分散方程式に根による吸収項を付与して連立し、水分・汚染物質の吸収過程をパラメトリックに解析した。解析方法は、差分法のうち陽解法、有限体積法を用い、初期汚染物質濃度、根の成長パラメータ (根長密度、伸長速度、根の水ポテンシャル) をパラメータとして、シミュレーターの解析能力を把握した。加えて、の実験パラメータを入力し、実験値と解析値の比較を行い、シミュレーターの精度を検証した。

その結果、以下のことが明らかとなった。

- 植生生長パラメータとして、根の伸長速度が最も地盤内の水分・汚染物質の吸収に影響を及ぼしていることが示唆された。具体的には、伸長速度を 1.5 倍にすると、30 日間での水分吸収は 2.3 倍、汚染物質は 1.1 倍を吸収することが明らかとなった。(図 3)
- 根の生長パラメータを同じにした場合、土の有効水分量大きい (保水性が高い) 土壌では、根の水分吸収量が大きくなることが明らかとなった。具体的には、珪砂 7 号、畑土、まさ土の 3 種の水分特性曲線を用いて、同一の根の生長条件、初期水分量、汚染物質料にて解析を行った結果、30 日後の解析結果において、まさ土、畑土での水分吸収量は、珪砂 7 号での水分吸収量のそれぞれ約 60 倍、300 倍となった。一方で、汚染物質吸収率 (初期の汚染物質質量/任意の時間経過後の汚染物質質量×100) は 3 種の土質のうち珪砂 7 号が最も高く、まさ土、畑土のそれぞれ 8 倍、2.7 倍となった。根付近の珪砂 7 号の不飽和透水係数が他の土質より高いため、汚染物質の拡散速度も高くなり、このような結果になったと考えられる。(図 4)
3. のコマツナ、ヒマワリの生長パラメータ及び実験で用いた土質の保水性パラメータを用いて解析を行ったところ、15 日後、30 日後の深さ 30 cm 程度までは解析値と実測値が概ね一致し、高精度な浄化予測シミュレーターを構築することができた。(図 5)

## 5. 主な発表論文等

- 古賀泰史, 古川全太郎, 笠間清伸, 六価クロム汚染地盤のファイトレメディエーション効果の実験・解析的検討, 平成 30 年度 土木学会西部支部 研究発表会 講演概要集, 443-444, 2019.03.
- 森元友紀, 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一,

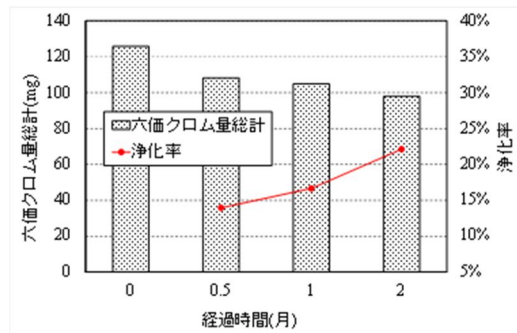


図 1 コマツナの六価クロム浄化効果

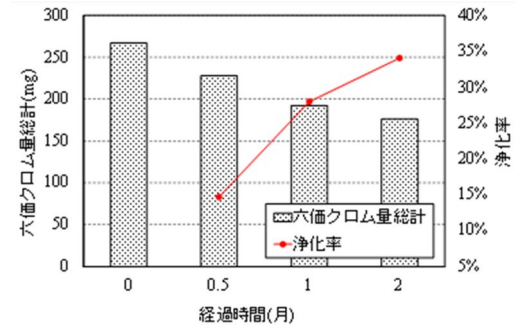


図 2 ヒマワリの六価クロム浄化効果

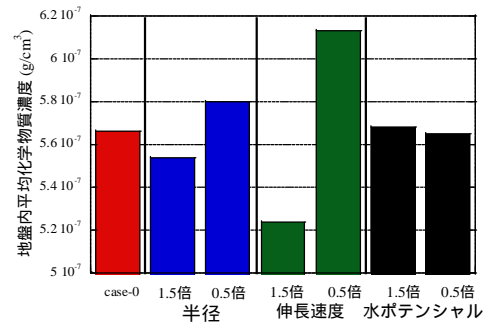


図 3 植生生長パラメータと浄化効率

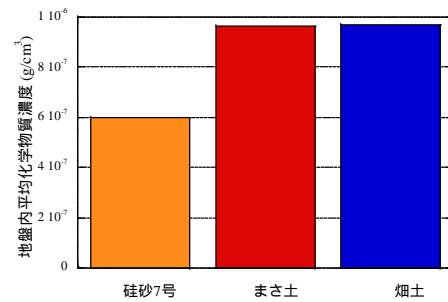


図 4 保水性と浄化率の関係

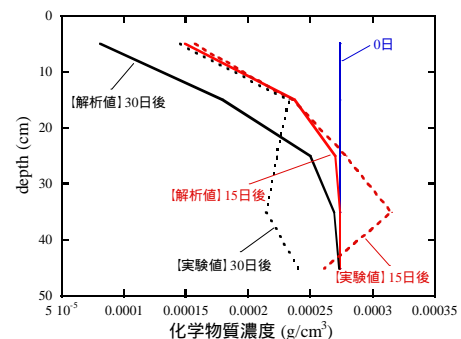


図 5 実験値と解析値の比較

- コマツナを用いた六価クロム汚染土壌浄化に関する二次元型植生実験, 平成 30 年度 土木学会西部支部 研究発表会 講演概要集, 447-448, 2019.03.
- 3) 古賀泰史, 古川全太郎, 笠間清伸, 地盤環境-植生生長シミュレーターにおける土壌水分特性の違いに関する基礎的検討, 土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会 講演概要集, 537-538, 2018.08.
  - 4) 森元友紀, 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一, 植生を有する六価クロム汚染地盤内の水溶性・交換性陽イオンと植生成長の関係, 土木学会全国大会 第 73 回年次学術講演会 講演概要集, 535-536, 2018.08.
  - 5) Furukawa, Z., Kasama, K., and Fujisawa, A., Solute Movement Analysis on Unsaturated Ground Using Advection-Diffusion Model Considering Growth of Plants, Proceeding of UNSAT 2018, 2, 1285-1290, 2018.08.
  - 6) 古賀泰史, 古川全太郎, 笠間清伸, 植物根の生長を考慮した地盤内水分及び水溶性物質の移動に関する円筒座標における数値解析, 第 53 回地盤工学研究発表会 講演概要集, 941-942, 2018.07.
  - 7) 森元友紀, 古川全太郎, 笠間清伸, 八尋裕一, コマツナを用いた六価クロム汚染地盤浄化に関する実験的検討, 第 53 回地盤工学研究発表会 講演概要集, 2197-2198, 2018.07.
  - 8) Taishi KOGA, Kiyonobu KASAMA, Zentaro FURUKAWA, A Numerical Analysis on Mass Transportation in Unsaturated Ground Considering Growth of Root, Proceedings of the 5th Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils, 1, 1, 65-70, 2018.05.
  - 9) Tomoki MORIMOTO, Kiyonobu KASAMA, and Zentaro FURUKAWA, Vegetation Experiment for Remedying Hexavalent Chromium(Cr6+)-Contaminated Unsaturated Soil by Utilizing Growth of Root, Proceedings of the 5th Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils, 1, 1, 131-136, 2018.05.
  - 10) 古賀 泰史, 笠間 清伸, 古川 全太郎, 八尋 裕一, 生長する根の吸収を考慮した不飽和地盤内水移動の数値解析, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会 講演概要集, 245-246, 2018.03
  - 11) 森元 友紀・笠間 清伸・古川 全太郎・八尋 裕一, コマツナを用いた二次元型植生実験による六価クロム汚染土壌浄化効果の検討, 平成 29 年度土木学会西部支部研究発表会, 249-250, 2018.03.
  - 12) 森元友紀・古川全太郎・笠間清伸・八尋裕一, 二次元型植生実験による効率的な六価クロム汚染土壌浄化に関する検討, 第 12 回環境地盤工学シンポジウム 論文集, 1, 1, 403-406, 2017.09
  - 13) 森元友紀・古川全太郎・笠間清伸・八尋裕一, コマツナとセイタカアワダチソウを活かした六価クロム汚染土壌浄化に関する植生実験, 第 52 回地盤工学研究発表会, 2017.07
  - 14) 古川全太郎・笠間清伸・藤澤朱音, 地盤環境-植物生長予測モデルの土壌水分特性に関する基礎的検討, 土木学会論文集 A2, 73, 2, 97-104, 2017.06.
  - 15) 森元友紀・古川全太郎・笠間清伸・八尋裕一, セイタカアワダチソウの適正発芽環境に関する検討, 平成 28 年度土木学会西部支部研究発表会, 707-708, 2017.03.
  - 16) Akane Fujisawa, Zentaro Furukawa, Kiyonobu KASAMA, A Numerical Study for Root Growth Considering Advection-Diffusion-Absorption of Solution in the Ground, The 8th Asian Joint Symposium on Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (JS-Tainan 2016), 2016.11.
  - 17) 古川 全太郎, 笠間 清伸, 藤澤 朱音, 八尋 裕一, 地盤環境-根系生長モデルにおける根の伸長速度が 地盤内水分と化学物質の移動に及ぼす影響 その (1) 根の半径について, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.09.
  - 18) 藤澤 朱音, 古川 全太郎, 笠間 清伸, 八尋 裕一, 地盤環境-根系生長モデルにおける根の伸長速度が 地盤内水分と化学物質の移動に及ぼす影響 討その(2)根長密度について, 土木学会第 71 回年次学術講演会, 2016.09.
  - 19) 藤澤 朱音, 古川 全太郎, 笠間 清伸, 八尋 裕一, 地盤環境-根系生長モデルにおける根の伸長速度が 地盤内水分と化学物質の移動に及ぼす影響, 第 51 回地盤工学研究発表会, 2016.09.

〔雑誌論文〕(計 2 件)

〔学会発表〕(計 19 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者:なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：藤澤朱音 (2016 年度)

ローマ字氏名：Akane Fujisawa

研究協力者氏名：森元友紀 (2016~2018 年度)

ローマ字氏名：Tomoki Morimoto

研究協力者氏名：古賀泰史 (2017~2018 年度)

ローマ字氏名：Taishi Koga

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。