

令和 3 年 5 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03395

研究課題名(和文) バイオセメントと木質バイオマスを利用した重金属汚染の統合バイオレメディエーション

研究課題名(英文) Consolidated bioremediation of heavy metal contamination using biocementation and biomass

研究代表者

中島 一紀 (Kazunori, Nakashima)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：50540358

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高濃度の重金属で汚染された土壌をバイオセメント技術により封じ込めを行い、そこから流出した低濃度の重金属汚染水を重金属結合性バイオマスにより完全浄化することが可能なシステムの開発を目的とする。尿素分解酵素を分泌する微生物を用いたCaCO₃析出により、モデル汚染土壌および実サンプルの固化と重金属の固定化に成功した。さらに、有機ポリマーを組み合わせたバイオセメントを開発し、さらなる強度の増大を達成した。また、タンパク質と天然高分子を用いた新規の重金属吸着剤を開発し、連続吸着システムを構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

各種インフラや鉱山の開発に伴い、土壌・地下水の重金属汚染が生じる。従来の高エネルギー・高コストの処理技術に変わる原位置での低エネルギー・低環境負荷の革新的な重金属処理法が開発されれば、日本のみならず大規模なインフラ整備が急速に進みつつある世界各国においても有用な汚染土壌対策となりうる。本研究では、肥料に用いられる尿素、融雪剤に用いられる塩化カルシウム、および環境中に存在する微生物を用いて、常温で固化することが可能なバイオセメントにより重金属イオン汚染土壌の固化に成功した。さらに、タンパク質と天然多糖からなる新たな重金属イオン吸着剤を開発した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study is to develop a system that can immobilize soil contaminated with high concentration of heavy metals using bio-cement technique, and completely remove a trace amount of heavy-metal ions in water using heavy-metal-binding biomass. Precipitation of CaCO₃ using urease-producing bacteria was successfully applied for solidification and immobilization of heavy metals in a model and actual contaminated soil samples. Furthermore, bio-cement combined with organic polymers was developed to increase the strength of biocemented sample. Novel heavy metal adsorbents based on protein and natural polymers were developed, and a continuous adsorption system was constructed.

研究分野：生物機能化学

キーワード：バイオセメント 重金属汚染 バイオレメディエーション 金属イオン吸着

1. 研究開始当初の背景

重金属(鉛、亜鉛、ヒ素など)はもともと天然地殻中に存在しており、各種インフラや鉱山の開発に伴ってこれらが暴露・流出することで、土壌・地下水汚染が生じる。このような土壌汚染の対策技術として、汚染土壌を掘削・除去し、洗浄剤を加えて汚染物質を浸出・除去した後、浄化システムで処理する浄化技術が主に用いられている。この方法は、除去効率が高く、比較的短時間で修復が可能であるため、工場跡地等の比較的狭い範囲の対策としては有効であるが、大規模なインフラ整備で生じる重金属汚染土壌の対策としては莫大な処理コストがかかるため現実的ではない。また、重金属汚染土壌の固化・不溶化を行った後に遮断工によって封じ込める方法も実施されているが、セメント固化を用いた場合には、セメント添加量の増加に伴って土壌 pH が上昇し、一部の重金属が溶出するという問題が生じたり、ガラス固化(熔融固化)を用いた場合には 1000°C という高温が必要であり、莫大なエネルギーコストがかかる、といった課題が残る。さらに、固化・封じ込めを行った場合でも、そこからの流出水に重金属が含まれる場合があり、それらを完全浄化するための対策が不可欠である。国内の状況を鑑みても、2031 年開業予定の北海道新幹線・新函館北斗-札幌間はその 8 割がトンネルであり、その工事に際して有害重金属を含む掘削土が大量に排出されると予想され、その対策は急務である。原位置での低エネルギー・低環境負荷の革新的な重金属処理法が開発されれば、日本に限らず、大規模なインフラ整備が急速に進みつつある世界各国においても有用な汚染土壌対策となりうる。

2. 研究の目的

我々はこれまでに、微生物の生体固化作用を用いた環境調和型のバイオセメント技術を開発している。また、炭素循環型社会を指向したバイオマスの有効利用に関する一連の研究を展開してきた。そこで本研究では、(A) 微生物を用いたバイオセメントにより汚染土壌の固化・封じ込めを行い、(B) 流出水に溶出した重金属に対して重金属吸着性バイオマスを用いて浄化する、というエコバイオ技術を組み合わせた環境調和型の統合バイオレメディエーションシステムを開発する(図 1)。

本研究では、我々がこれまでに確立してきたバイオセメントとバイオマス利用に関する知見と技術を集約し、重金属に汚染された土壌(固体)および汚染水(液体)の両方をターゲットとした全く新しい環境調和型統合バイオレメディエーション技術を開発する。以下に、その目標を達成するための要素技術(AおよびB)を以下に説明する。

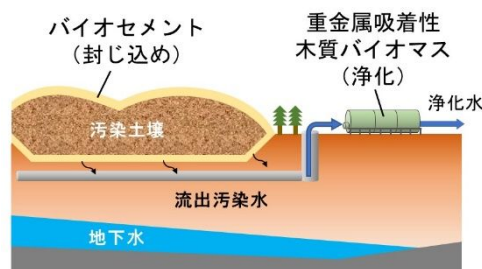


図 1 重金属の統合バイオレメディエーションシステムの概念図

【A】バイオセメントを用いた汚染土壌の固化・封じ込め

ウレアーゼ(urease)は尿素(urea)を加水分解して炭酸イオンとアンモニアを生成する酵素である。このとき系中に Ca^{2+} が存在すると CaCO_3 が析出する。析出した CaCO_3 がセメント物質として働き、砂粒子を結合させるため、様々な物質を固化させることが可能である。我々は、ウレアーゼ生産微生物を用いた CaCO_3 析出により、砂や土壌の固化するバイオセメントの研究開発を行ってきた。本研究では、このバイオセメント技術を用い、重金属で汚染された土壌の封じ込めを行う(図 2)。この手法では、物理的な封じ込めのみならず、炭酸塩や水酸化物塩としての沈殿・固化や、 CaCO_3 結晶内部への重金属の取り込みも期待される。この手法は、(1) 高温・高エネルギーを必要とせず、常温・低エネルギーで固化することが可能である、(2) 尿素や塩化カルシウムなどを用いるため環境負荷が小さい、(3) 原位置に生息する微生物を用いることにより、自然環境(微生物群集)に与える影響を最小限に抑制できる、(4) 固化による物理的な封じ込めに加え、化学的な要因による封じ込めの両方の効果が期待できる、という優れた特徴がある。

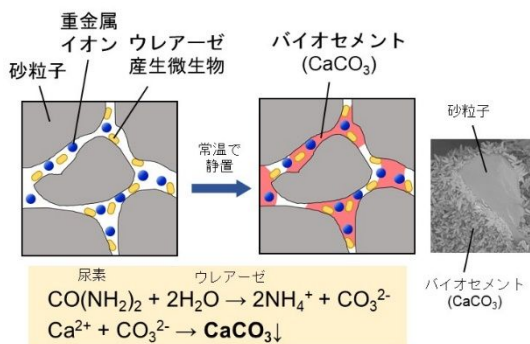


図 2 バイオセメントによる重金属汚染土壌の固化と封じ込め

【B】重金属結合性を付与したバイオマスによる汚染水の浄化

木質バイオマスは主にセルロース、ヘミセルロース、リグニンから構成されており、農林業を中心とした産業において大量に廃棄されている。木質バイオマスの主成分はセルロース

(40~50%)であり、物理的強度と化学的安定性が高いため、近年のセルロースナノファイバーの発展に見られるように様々な分野への応用が期待される非常に魅力的な新規材料である。セルロースはグルコース単位からなるポリマーであるため、金属イオンをはじめとする多くの化合物に対して不活性であり、吸着材としては期待できず、また化学修飾の足場としての利用も難しい。そこで本研究では、主成分であるセルロースを吸着材へと変換し、高効率重金属吸着材とするために、“二機能型タンパク質”を用いることを考案した。メタロチオネイン(MT)は1分子中に最大7個の重金属を結合することができる金属結合性のタンパク質である。一方、セルロース分解酵素などに含まれるセルロース結合モジュール(CBM)はセルロース表面に強固に結合するタンパク質である。そこで、MTとCBMを融合した二機能型タンパク質(MT-CBM)は、MTが重金属イオンを吸着し、CBMがセルロースに結合するため、MT-CBMを用いてセルロースを修飾することで新しい概念の重金属吸着材料が開発できると考えた(図3)。この新規吸着剤は生体関連物質(タンパク質と多糖)のみからなる環境負荷の小さい吸着剤である。

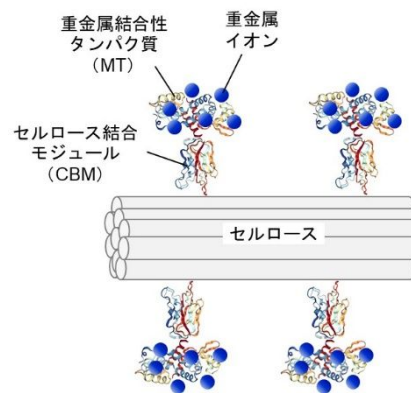


図3 タンパク質と多糖(セルロース)からなる新規重金属イオン吸着剤

【統合バイオレメディエーション】

高濃度の重金属で汚染された土壌をバイオセメントにより封じ込め、そこから流出した低濃度の重金属汚染水を重金属結合性バイオマスを用いて完全浄化する、低エネルギー・低環境負荷の統合バイオレメディエーションシステムの構築(図1)を最終的なゴールに見据え、本研究ではそれを達成するための要素技術(上述AおよびB)の確立を目指した。

3. 研究の方法

【A】バイオセメントを用いた汚染土壌の固化・封じ込め

重金属汚染モデル土壌を用いたバイオセメント固化

ウレアーゼによる尿素の加水分解反応によって析出した CaCO_3 を用いて、重金属で汚染された土壌(モデル土壌:珪砂,実サンプル:ザンビア鉱山跡地の土壌)のバイオ封じ込め実験を行った。14日間の固化反応を行った試験サンプルのSEM-EDX, XRD分析を行い、生成鉱物の同定と元素マッピングを行うことでサンプル中の CaCO_3 の存在箇所・形態を解析した。また、固化サンプルの一軸圧縮強度について十分な固化強度(5 MPa以上)を達成するための最適化検討(細胞濃度,固化溶液濃度,温度,バイオポリマーの添加)を行った。同時に、固化体からの重金属イオンの流出を確認し、封じ込め効果を評価した。

バイオセメントに適した重金属耐性微生物の探索

これまでの我々の知見によると、高ウレアーゼ活性が必ずしも高効率なバイオセメンテーションにつながるとは限らない。つまり、固化にはウレアーゼ活性だけでなく、微生物が産生する有機酸や高分子,炭酸脱水素酵素など様々な分子が影響していると考えている。さらに、バイオセメントに最適な微生物を獲得できる新たなスクリーニング手法を開発している。この方法に、重金属イオン耐性の選択圧を加えることで、高い固化能力をもち、かつ重金属への耐性を示す微生物の取得を目指した。系統解析(16S rRNAベース)により微生物種を同定し、バイオセーフティレベルを確認した上で、ウレアーゼの酵素機能解析と、特異的蛍光試薬および共焦点レーザー顕微鏡を用いて細胞内での重金属の局在を調査した。

バイオセメントの固化強度増大を目指した有機ポリマーとの複合化

酵素や微生物を用いた CaCO_3 析出において、様々な低分子および高分子化合物が結晶の生成や成長に影響を与えることが知られている。本研究では、バイオセメントの固化強度増大を目的として、カチオン性ポリペプチドであるポリリジンや天然高分子由来のカチオン性多糖であるキトサンの添加を検討した。さらに、天然のバイオミネラルの構造をモチーフとして、キチンと CaCO_3 からなる高強度のハイブリッド材料を作製するための人工タンパク質のデザインを行った。

【B】重金属結合性を付与したバイオマスによる汚染水の浄化

融合タンパク質の分子デザイン

高いセルロース結合能が知られている *Clostridium thermocellum* 由来のルロース結合タンパク質(CBM)を用い、Niイオンへの高い結合性を示す His-tag を融合した種々のCBMを作製した。His-tagの融合位置および融合数を変えることで、融合タンパク質のセルロースへの結合性、およびNiイオンの結合を調査し、最適なタンパク質デザインの指針とした。これらの情報をベースとして、メタロチオネイン(MT)を融合した二機能型タンパク質(MT-CBM)を創製した。

セルロースの機能化と汚染水浄化システム

作製した融合タンパク質 MT-CBM をセルロース（ろ紙）に修飾し、重金属吸着機能を強化したセルロースを作製した。重金属として Pb および Zn を選択し、MT-CBM で機能化したセルロースを用いてバッチ系での重金属回収実験を行い、吸着挙動の基礎的知見を収集した。さらに、カラムを用いた連続吸着システムを構築し、吸着挙動の変化および再利用性について検討を行った。

4. 研究成果

本研究では、高濃度の重金属で汚染された土壌をバイオセメント技術により封じ込めを行い、流出した低濃度の重金属汚染水を重金属結合性バイオマスにより完全浄化することが可能なバイオレメディエーションシステムを開発することを目的としている。

【A】バイオセメントを用いた汚染土壌の固化・封じ込め

重金属汚染モデル土壌を用いたバイオセメント固化

ザンビア共和国の Kabwe 地区は高濃度の鉛やカドミウムによる重金属汚染が広がる鉱山跡地であり、そこから採取した重金属汚染土壌のバイオセメント固化を検討した。これまでの研究において高い固化能力が確認されている *Pararhodobacter* sp. を用い、供試体を菌体と基質溶液に浸漬させる (immersed) 系と供試体に溶液を通水する (flow through) 系の 2 つのシステムで固化実験を行った。その結果、いずれの系でも微生物による固化が可能であることが示された。実際の現地で行う場合は、液体が土壌を通り抜ける flow through 系になると考えられるため、実用化に向けて有用な手法であることが示された。固化供試体を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察したところ、土壌微粒子の間に CaCO_3 が析出して固化していることが分かった。また、バイオセメント固化を行った供試体のサンプルの XRD 分析により CaCO_3 の結晶多型であるカルサイトが生成していることも示された。降雨を想定した浸漬実験においても固化体が破壊されないことと、供試体への送風下でも砂微粒子の飛散がないことが確認された (*Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26,15653)。

バイオセメントに適した重金属耐性微生物の探索

これまでに我々が開発したバイオセメントに利用可能な微生物のスクリーニング手法をベースとして、重金属耐性の選択圧をかけることでバイオセメントに適する重金属耐性微生物の探索を行った。前述のザンビア共和国の Kabwe 地区の重金属汚染土壌から高いウレアーゼ活性を示す菌体が単離され、16sRNA 解析によりグラム陽性バクテリア *Oceanobacillus profundus* であることが分かった。また、バクテリアの特性 (菌体増殖特性、ウレアーゼ活性) を Pb 共存下で評価したところ、このバクテリアは高濃度 Pb (50 mg/L) 中でも増殖可能で、Pb 非添加系と同等のウレアーゼ活性を示した。さらに、このバクテリアを用いて珪砂の固化試験を行ったところ、固化の基質として用いる尿素に対しても比較的高い耐性を示し、1 M 尿素の条件下でも尿素を分解し、 CaCO_3 を生成した。SEM 観察により、生成した CaCO_3 により砂粒子同士が固着していることが分かり、XRD 分析から主にカルサイトが生成していることが示された。また、この重金属耐性バクテリアを用いて珪砂の固化試験を行ったところ、5.5 MPa の一軸圧縮強度 (UCS) が得られ、これまでバイオセメントに用いてきた *Pararhodobacter* sp. と同程度の固化強度を示すことが明らかとなった (*Chemosphere*, 2019, 228, 17)。

前述の重金属汚染土壌から、重金属 (Pb, Zn) に応答して細胞外高分子物質 (EPS) を分泌するバクテリアを単離し、その機能解析を行った。重金属 (20 mg/L Pb) 共存下でバクテリアの培養を行ったところ、培養 24 時間後に 679 $\mu\text{g/L}$ の多糖類が分泌された。重金属の分布を確認したところ、吸着した Pb および Zn のいずれも約 90% が EPS に蓄積しており、Zn は細胞内にも取り込まれていることが分かった。さらに、バクテリア、EPS、および Pb をそれぞれ蛍光色素で染色し、共焦点レーザー顕微鏡にて観察を行ったところ、これら三者の蛍光像が一致したことから、バクテリア細胞の近傍に分泌した EPS に Pb が吸着していることが示された (*Scientific Reports*, 2020, 10:21189)。

バイオセメントの固化強度増大を目指した有機ポリマーとの複合化

これまでの研究において高いバイオセメント能力が確認されている *Pararhodobacter* sp. を用いて、固化における有機ポリマーの効果を検討した。

カチオン性のポリペプチドであるポリリジン (10 mg/L) を添加し、 CaCO_3 析出実験を行ったところ、 CaCO_3 の生成量に大きな違いは見られなかったが、 CaCO_3 のモルフォロジーが大きく変化することを見出した。これまでの研究で、バクテリアを用いた尿素の加水分解では CaCO_3 の結晶多型であるカルサイト (菱面体結晶) が主に生成することが分かっているが、ポリリジン共存下ではフットボール型のカルサイトが生成することが明らかとなった。このモルフォロジー変化の詳細な理由については不明であるが、ポリリジンの構造に由来するものではないかと考えられる。ポリリジンは中性条件下ではランダムコイル構造をとるが、アルカリ性ではヘリ

ックス構造に変化することが知られている。つまり、尿素の加水分解反応の進行とともに溶液の pH が上昇するとポリリジンが α ヘリックス構造に変化し、それを核にして CaCO_3 の結晶化が進んだためフットボール型の微粒子が得られたと考えた。さらに、ポリリジン共存下で固化試験を行い、砂粒子-バクテリア- CaCO_3 間のバインダーとしての機能を検討した。その結果、ポリリジン添加系では砂の一軸圧縮強度 (UCS) が 30% 近く増大することが分かった。ポリリジンの添加によるモルフォロジー変化が砂の固化強度に影響したことが考えられる (*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6, 10315)。

カチオン性バイオポリマーであるポリリジンがバイオセメントの固化強度を増大させることが示されたが、ポリリジンはアミノ酸のみからなる生体高分子であるものの、天然には存在しない人工合成生体高分子である。そこで、天然多糖類であるキチン由来のカチオン性多糖キトサンのバイオセメントへの効果を調査した。ウレアーゼを用いた CaCO_3 析出では、通常カルサイトが生成するが、キトサン添加系ではカルサイトの他に、バテライトも生成していることが分かった。また、砂の固化試験において、キトサンを添加することによりより高い UCS が得られ、増強効果があることを見出した (*International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 133, 867)。

ここで、自然界のバイオミネラル (生物による鉱物化) に着目すると、 CaCO_3 などの鉱物がキチンなどのタンパク質と複合化することによって高い靱性を獲得している。その CaCO_3 とキチンの間にはバインダーおよび鉱物化促進の役割を担うタンパク質が存在する。そこで、そのようなタンパク質を模倣した人工タンパク質をデザインし、バイオセメントへの添加効果を検討した。人工タンパク質は CaCO_3 の生成を促進し、鉱物粒子の結合を担うことが示された。さらに、キチンと人工タンパク質を組み合わせることで、バイオセメントの強度が飛躍的に向上することが示された (論文投稿済, リバイズ中)。

【B】重金属結合性を付与したバイオマスによる汚染水の浄化

融合タンパク質の分子デザイン

金属結合性セルロースの創製を目的として、重金属結合タンパク質とセルロース結合モジュールを融合した新規融合タンパク質分子をデザインし、発現ベクターの構築、およびタンパク質発現を行った。この新規融合タンパク質は大腸菌を用いて可溶性発現が可能であり、セルロースを用いたタンパク質精製が可能であった。

また、重金属結合性かつセルロース結合性の融合タンパク質のデザインと発現に成功し、セルロース結合性が確認された。一方、融合タンパク質の相対位置や数によっては、セルロース結合性が著しく低下することが分かり、セルロース結合における重要ファクターについての重要な情報となった。 (*Analytical Sciences*, 2020, 36, 459)

セルロースの機能化と汚染水浄化システム

重金属結合タンパク質であるメタロチオネイン (MT) とセルロース結合モジュール (CBM) を融合した新規融合タンパク質分子 (MT-CBM) を作製した。融合タンパク質 MT-CBM をセルロース (ろ紙) に吸着させた完全バイオベースの重金属吸着剤を開発した。バッチ吸着実験において、この吸着剤による Pb イオンおよび Zn イオンの吸着は Langmuir 型であることが推察され、それぞれ 39 mg/g および 29 mg/g の最大吸着量を示した。さらに、作製した吸着剤を用いたセミバッチ連続吸着実験システムを構築した。吸着した重金属イオンをキレート剤で除去することにより吸着剤が再利用可能であることを示し、さらに、吸着・脱着の繰り返しによって吸着力が低下した場合には、タンパク質を添加することで再活性化が可能であることが示された。 (*Chemosphere*, 2020, 246, 125733)。

【結論】

以上の研究により、高濃度の重金属で汚染された土壌をバイオセメント技術により封じ込め、そこから流出した低濃度の重金属汚染水を重金属結合性バイオマスにより完全浄化するシステムの構築が可能になると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Mwandira Wilson, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru, Ito Mayumi, Sato Tsutomu, Igarashi Toshifumi, Chirwa Meki, Banda Kawawa, Nyambe Imasiku, Nakayama Shouta, Nakata Hokuto, Ishizuka Mayumi	4. 巻 228
2. 論文標題 Solidification of sand by Pb(II)-tolerant bacteria for capping mine waste to control metallic dust: Case of the abandoned Kabwe Mine, Zambia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 17-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2019.04.107	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 Gowthaman Sivakumar, Mitsuyama Shumpei, Nakashima Kazunori, Komatsu Masahiro, Kawasaki Satoru	4. 巻 59
2. 論文標題 Biogeotechnical approach for slope soil stabilization using locally isolated bacteria and inexpensive low-grade chemicals: A feasibility study on Hokkaido expressway soil, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 484-499
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2018.12.010	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 Nawarathna Thiloththama Hiranya Kumari, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 133
2. 論文標題 Chitosan enhances calcium carbonate precipitation and solidification mediated by bacteria	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Biological Macromolecules	6. 最初と最後の頁 867-874
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijbiomac.2019.04.172	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 Sivakumar Gowthaman, Takashi Iki, Kazunori Nakashima, Koji Ebina, Satoru Kawasaki	4. 巻 1
2. 論文標題 Feasibility study for slope soil stabilization by microbial induced carbonate precipitation (MICP) using indigenous bacteria isolated from cold subarctic region	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 SN Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1480
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s4245-2-019-1508-y	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 Mwandira Wilson, Nakashima Kazunori, Togo Yuki, Sato Tsutomu, Kawasaki Satoru	4. 巻 246
2. 論文標題 Cellulose-metallothionein biosorbent for removal of Pb(II) and Zn(II) from polluted water	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 125733-125733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2019.125733	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 TOGO Yuki, NAKASHIMA Kazunori, MWANDIRA Wilson, KAWASAKI Satoru	4. 巻 36
2. 論文標題 A novel metal adsorbent composed of hexa-histidine tag and carbohydrate-binding module on cellulose	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Analytical Sciences	6. 最初と最後の頁 459-464
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2116/analsci.19P356	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 Nawarathna Thiloththama H. K., Nakashima Kazunori, Fujita Masahiro, Takatsu Momoko, Kawasaki Satoru	4. 巻 6
2. 論文標題 Effects of Cationic Polypeptide on CaCO ₃ Crystallization and Sand Solidification by Microbial-Induced Carbonate Precipitation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 10315-10322
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.8b01658	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 Dilrukshi R.A.N., Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 58
2. 論文標題 Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 894-~910
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2018.04.003	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 Gowthaman Sivakumar, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 A State-of-the-Art Review on Soil Reinforcement Technology Using Natural Plant Fiber Materials: Past Findings, Present Trends and Future Directions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 553-553
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma11040553	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 Mwandira Wilson, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru, Ito Mayumi, Sato Tsutomu, Igarashi Toshifumi, Banda Kawawa, Chirwa Meki, Nyambe Imasiku, Nakayama Shouta, Ishizuka Mayumi	4. 巻 26
2. 論文標題 Efficacy of biocementation of lead mine waste from the Kabwe Mine site evaluated using Pararhodobacter sp.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Science and Pollution Research	6. 最初と最後の頁 15653-15664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11356-019-04984-8	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 Godigamuwa Kasun, Nakashima Kazunori, Okamoto Junnosuke, Kawasaki Satoru	4. 巻 21
2. 論文標題 Biological Route to Fabricate Silica on Cellulose Using Immobilized Silicatein Fused with a Carbohydrate-Binding Module	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Biomacromolecules	6. 最初と最後の頁 2922-2928
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.biomac.0c00730	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 Mwandira Wilson, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru, Arabelo Allison, Banda Kawawa, Nyambe Imasiku, Chirwa Meki, Ito Mayumi, Sato Tsutomu, Igarashi Toshifumi, Nakata Hokuto, Nakayama Shouta, Ishizuka Mayumi	4. 巻 10
2. 論文標題 Biosorption of Pb (II) and Zn (II) from aqueous solution by Oceanobacillus profundus isolated from an abandoned mine	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 21189
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-78187-4	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 Godigamuwa Kasun、Nakashima Kazunori、Tsujiitani Sota、Kawasaki Satoru	4. 巻 -
2. 論文標題 Fabrication of silica on chitin in ambient conditions using silicatein fused with a chitin-binding domain	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bioprocess and Biosystems Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00449-021-02568-w	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 Gowthaman S.、Nakashima K.、Kawasaki S.	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13762-021-03306-1	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 Mohsenzadeh A.、Aflaki E.、Gowthaman S.、Nakashima K.、Kawasaki S.、Ebadi T.	4. 巻 -
2. 論文標題 A two-stage treatment process for the management of produced ammonium by-products in ureolytic bio-cementation process	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Science and Technology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s13762-021-03138-z	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 Pal Preeti、Pal Anjali、Nakashima Kazunori、Yadav Brijesh Kumar	4. 巻 266
2. 論文標題 Applications of chitosan in environmental remediation: A review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 128934-128934
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2020.128934	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 Gowthaman Sivakumar、Nakashima Kazunori、Kawasaki Satoru	4. 巻 60
2. 論文標題 Freeze-thaw durability and shear responses of cemented slope soil treated by microbial induced carbonate precipitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 840-855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sandf.2020.05.012	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19件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 川邊徹弥, 中島一紀, Hiranya Nawarathna, 川崎了
2. 発表標題 尿素分解菌の細胞抽出液を用いた炭酸カルシウム形成と砂の固化
3. 学会等名 2019年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東郷祐樹, 中島一紀, 川崎了
2. 発表標題 バイオベース材料で構成された環境に優しい金属吸着材の開発
3. 学会等名 日本生物工学会北日本支部2019札幌シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wilson Mwandira, Kazunori Nakashima, Satoru Kawasaki, Mayumi Ito, Tsutomu Sato, Toshifumi Igarashi, Meki Chirwa, Kawawa Banda, Imasiku Nyambe, Shouta Nakayama, Mayumi Ishizuka
2. 発表標題 Zinc and Lead Biosorption by <i>Oceanobacillus Profundus</i> Kbz 3-2: a Bacterial Strain Resistant to Metals Isolated from Metal polluted Soils in Kabwe, Zambia
3. 学会等名 The 14th Asian Congress on Biotechnology (ACB2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T.H.K. Nawarathna, K. Nakashima, S. Kawasaki
2. 発表標題 Microbially induced carbonate precipitation assisted by poly-L-lysine: ecofriendly approach inspired by nature.
3. 学会等名 ACS Fall 2019 National Meeting & Exposition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Togo, K. Nakashima, W. Mwandira, S. Kawasaki
2. 発表標題 Bio-based adsorbent composed of metal binding peptide and cellulose
3. 学会等名 23rd International Biohydrometallurgy Symposium (IBS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 菅原雄太, 八重櫻彩, 中島一紀, 川崎了
2. 発表標題 炭酸塩の析出能力に着目した新たな微生物スクリーニング法
3. 学会等名 資源・素材 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島一紀
2. 発表標題 バイオ-無機界面を考慮したタンパク質デザイン
3. 学会等名 資源・素材2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田至叡, 中島一紀, 川崎了
2. 発表標題 外膜表層に金属結合ペプチドを提示した微生物の無機固体表面に対する選択的な吸着特性
3. 学会等名 第70回日本生物工学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 東郷祐樹, 岩田至叡, 岡本知之, 中島一紀, 川崎了
2. 発表標題 セルロースをベースとした金属イオン吸着剤の開発
3. 学会等名 平成30年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 志賀敏英, 藤田賢大, 菅原雄太, 中島一紀, 川崎了
2. 発表標題 生物機能を用いた炭酸塩析出における炭酸脱水酵素の影響
3. 学会等名 平成30年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 W. Mwandira, S. K. Nakashima, S. Kawasaki, M. Ito, T. Igarashi, T. Sato, M. Chirwa, K. E. Banda, I. Nyambe, M. Ishizuka
2. 発表標題 The Strength and Microstructure of lead-contaminated mine waste materials stabilized by Pararhodobacter sp.
3. 学会等名 Bio-mediated and Bio-inspired Geotechnics (B2G-Atlanta 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T.H.K. Nawarathna, Kazunori Nakashima, Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Enzyme mediated CaCO ₃ crystallization in the presence of natural polysaccharides
3. 学会等名 14th International Chitin and Chitosan Conference (ICCC) & 12th Asia-Pacific Chitin and Chitosan Symposium (APCCS) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 W. Mwandira, K. Nakashima, S. Kawasaki, M. Ito, T. Sato, T. Igarashi, M. Chirwa, K. E. Banda, I. Nyambe, M. Ishizuka
2. 発表標題 Biocementation using ureolytic bacteria: an eco-friendly alternative for treatment of mine waste in Kabwe Mine site
3. 学会等名 2nd International KAMPAI Symposium & JST Mid-term Evaluation Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Nakashima, M. Fujita, T. H. K. Nawarathna, S. Kawasaki
2. 発表標題 Bio-based cementation using urease-producing bacteria: sand solidification and kinetics
3. 学会等名 European Congress on Biotechnology (ECB2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川邊徹弥, 中島一紀, Hiranya Nawarathna, 川崎了
2. 発表標題 無機-有機接着タンパク質のデザインとバイオセメントへの応用
3. 学会等名 生物工学若手研究者の集い第二回オンラインセミナー オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ゴディガムワ カスン, 中島 一紀, 辻谷 颯太, 川崎 了
2. 発表標題 Biological approach to form silica on chitin using a fusion silicatein
3. 学会等名 資源・素材 2020 (仙台) オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻谷 颯太, 中島 一紀, ゴディガムワ カスン, 川崎 了
2. 発表標題 機能性シリカ重合ペプチドを用いた無機材料の新たな作製法
3. 学会等名 資源・素材 2020 (仙台) オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川邊 徹弥, Nawarathna Hiranya, 中島 一紀, 川崎 了
2. 発表標題 炭酸カルシウムとバイオポリマーに結合する人工タンパク質の作製とバイオセメントへの影響
3. 学会等名 資源・素材 2020 (仙台) オンライン開催
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 辻谷 颯太, 中島 一紀, 川崎 了
2. 発表標題 シリカ重合酵素を用いた複合材料の作製
3. 学会等名 生物工学若手研究者の集い第三回オンラインセミナー オンライン開催
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

北海道大学・工学部・資源生物工学研究室HP
<https://bre.eng.hokudai.ac.jp/>

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
研究分担者	川崎 了 (Kawasaki Satoru) (00304022)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	

	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
研究協力者	上野 晃生 (Ueno Akio) (60466480)	公益財団法人北海道科学技術総合振興センター・幌延地圏環境研究所・主任研究員 (80128)	

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
---------	---------