

令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03627

研究課題名(和文)天然および人工の有機・無機接着界面から発想する新たなバイオベース固化技術の創出

研究課題名(英文)Development of novel bio-based solidification technique inspired by natural and artificial organic/inorganic interfaces

研究代表者

中島 一紀(Nakashima, Kazunori)

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、天然に存在する、あるいは人工的に創り出した無機物と有機物の接着界面に着目し、(1)有機-無機ハイブリッドを組み込んだ高強度バイオセメント、および(2)イガイ接着タンパク質とシリカ重合酵素を組み合わせたハイブリッドバイオ固化、の開発に取り組み、新しい概念のバイオ固化の基盤技術を構築した。具体的には、(1)では天然多糖(キチンやセルロースナノファイバー)とそれらの材料表面での炭酸カルシウム析出を促進する融合タンパク質を組み合わせたハイブリッドバイオセメントを開発し、(2)ではイガイ接着タンパク質の接着コントロールと材料界面でのバイオシリカ重合に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建造物やインフラなどの建設には固化材料としてセメントやコンクリートが用いられる。しかしながら、セメントクリンカーの製造プロセスでは、それに必要なエネルギー生産と石灰石からの脱炭酸により大量のCO₂が排出されることになる。CO₂排出を可能な限り削減すると同時に、従来のセメントに代わる革新的な固化材料および技術の開発が急務である。自然界および人工の接着界面のバイオ分子には無機固体に結合するための秘密が隠されている。本研究では、その界面に隠されたバイオ分子の秘密を解き明かし、従来法を凌駕する環境負荷の小さい次世代型固化技術の開発に挑戦することを目的とした。

研究成果の概要(英文)：We focused on the adhesive interface between natural or artificial inorganic and organic materials, and worked on the development of the following two fundamental techniques: (1) high-strength biocement incorporating organic-inorganic hybrids, and (2) hybrid solidification combining mussel adhesion protein and silica polymerizing enzyme, to develop a novel concept of bio-based solidification. In part 1, a hybrid biocement combining natural polysaccharides (chitin and cellulose nanofibers) and a fusion protein that promotes calcium carbonate deposition on the surface of these materials was developed. In part 2, adhesion control of mussel adhesion protein and biosilica formation at the material interface were successfully achieved.

研究分野：生物工学

キーワード：バイオセメント 天然高分子 イガイ接着タンパク質 刺激応答性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

建造物やインフラなどの建設には固化材料としてセメントやコンクリートが用いられるが、セメントクリンカーの製造プロセスでは大量の CO₂ が排出される。このような CO₂ 排出を可能な限り削減すると同時に、従来のセメントに代わる革新的な固化材料および技術の開発が急務である。

2. 研究の目的

自然界に目を向けると、天然の鉱物化・固化現象が見られる。ビーチロックは、海浜の砂礫が石灰質の物質によって自然に固化した岩の総称であり、国内外において人工岩盤のモデルとして注目されている。我々はビーチロックが微生物の作用により形成されたという仮定のもと、それを模倣した人工岩盤形成に関する

一連の研究を行ってきた。尿素分解酵素ウレアーゼは尿素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り、反応系中に Ca²⁺ が存在すると CaCO₃ が析出する。析出した CaCO₃ がセメント物質として働き、砂粒子どうしを結合させ固化するというシステムである。このような酵素や微生物を用いた炭酸塩析出技術はバイオセメントあるいは MICP/EICP (microbial/enzyme-induced carbonate precipitation) 法と呼ばれ、尿素、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できるため、環境調和型の次世代固化技術として期待されている(図1)。しかしながら、バイオセメントは現時点ですぐに実用化できる技術ではなく、固化強度、反応速度、ハンドリング、製造コストなど解決すべき課題が残る。

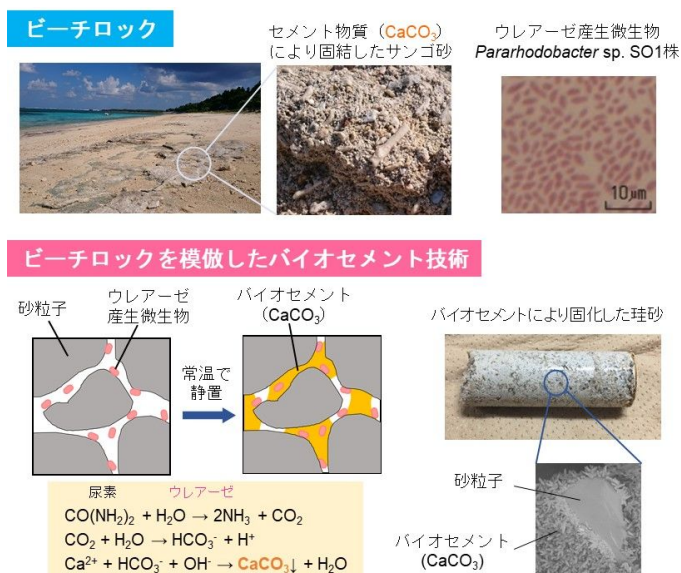


図1. ビーチロックとバイオセメント技術

一方、ムラサキイガイは自身の足糸により岩礁や船舶の底部に強固に付着しており、足糸を構成するタンパク質が接着に参与している。この接着タンパク質は、ガラス、金属、金属酸化物、さらにはプラスチックまで多種多様な材料に接着でき、しかも通常の接着剤とは異なり水中でも強固な接着ができるため、このイガイ接着タンパク質が新たな接着分子として応用研究が活発に進んでいる。このイガイ接着タンパク質により砂粒子を凝集し、そこを足場としてシリカ重合を行うことができれば、全く新しい概念の固化技術になると期待される。しかし、イガイ接着タンパク質はもともと接着性と凝集性が非常に高く、その取り扱いが難しいことが実用化の障壁になっている原因の一つと考えられる。

以上のように、バイオセメントやイガイ接着タンパク質は、低環境負荷の次世代型固化技術の基盤ツールになると期待されるが、バイオセメントではさらなる強度増大、イガイ接着タンパク質ではハンドリング性の改善と堅強な固化が求められる。天然に存在するタンパク質に新たな機能を付与することでこれらの問題が解決できれば、環境負荷の小さい生体分子をベースとした新たな固化技術の開発につながると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、天然に存在する、あるいは人工的に創り出した無機物と有機物の接着界面に着目し、下記の(1)および(2)に示す2つのアプローチにより新しい概念のバイオ固化技術を創出する。

(1) 有機-無機ハイブリッドを組み込んだ高強度バイオセメント

生物の作用により鉱物が形成されるバイオミネラルについて微視的かつ生化学的な観点から見ると、生体が作り出すバイオミネラルのほとんど全てにおいて有機物が含まれている。このように生物の骨格や構造を形成し、機械的強度が必要な部位においては、無機物と有機物のハイブリッド材料を形成することによって、材料の強度と靱性(粘り強さ)を獲得している。したがって、バイオセメントにおいても有機物を複合化することによって、その強度を飛躍的に向上させることができると考えた。

バイオセメントにおいて、通常、砂粒子同士を結合・固着させる物質は酵素反応で生成する CaCO₃ である。そこで、より強靱な固化を目的としてキチンやセルロースなどの生体由来高分子

をマトリックス多糖として CaCO_3 とハイブリッド化する。しかし、キチンなどの有機物とセメント物質となる CaCO_3 の間で強力な相互作用は見込めない。そこで、これら強力に接合させるため多糖に結合する多糖結合ドメインと CaCO_3 結合ペプチドからなる機能性タンパク質分子をデザインする。この機能性タンパク質分子をバイオセメント作製時に導入することにより、砂-有機分子- CaCO_3 からなるハイブリッド固化体を形成し、強靱な固化を達成する。

(2) イガイ接着タンパク質とシリカ重合酵素を組み合わせたハイブリッドバイオ固化

イガイ接着タンパク質の材料接着機能と界面でのシリカ重合機能を組み合わせることで新たな概念の固化技術になると期待される。そのシステムを構築するため、次の2つに取り組んだ。1つ目は、凝集性の高いイガイ接着タンパク質のハンドリングを向上させ、利用範囲を拡大するための可溶化および接着のコントロールである。2つ目は、シリカ重合酵素（シリカチン）の機能化と材料界面でのシリカ作製である。イガイ接着タンパク質とシリカ重合酵素を組み合わせたハイブリッドバイオ固化を最終的な目標に見据え、これらの基盤技術の構築を行った。

4. 研究成果

(1) 有機-無機ハイブリッドを組み込んだ高強度バイオセメント

キチン複合化バイオセメント

ファージディスプレイ法をはじめとする進化分子工学的手法により、様々な物質に対する結合ペプチドが報告されている。そこで、炭酸カルシウムに結合する 12 残基からなるペプチド（CaBP: calcium carbonate binding peptide, 配列: DVFSSFNLKHM R）を炭酸カルシウム結合分子として選択した。一方、キチン分解酵素（キチナーゼ）の分子中にはキチンと結合するドメイン（ChBD: chitin binding domain）が存在し、本研究では、*Bacillus circulans* 由来のキチナーゼ A1 のキチン結合ドメイン ChBD をキチン結合分子として選択した。これら CaBP と ChBD を組み合わせた融合タンパク質 CaBP-ChBD をデザインし、大腸菌 *E. coli* を宿主として融合タンパク質を作製した。

・バイオセメント生成（ CaCO_3 析出）

バイオセメント生成反応では、尿素、塩化カルシウム、ウレアーゼを 25°C 、160 rpm で 24 時間振とうすることで炭酸カルシウムの生成反応を行った。このとき、非添加系、融合タンパク質添加系、キチン添加系、キチン+融合タンパク質添加系で実験を行った。反応により生成した固体を SEM-EDS 分析および XRD 分析を行った。

図2に炭酸カルシウム析出後の SEM 像、EDS 分析による元素マッピング、重ね合わせ像をそれぞれ示す。非添加系の SEM 像ではカルサイトと思われる結晶が見られ、元素マッピングの結果から炭酸カルシウムが析出していることを確認した。融合タンパク質 CaBP-ChBD 添加系では、カリフラワー型の結晶が確認され、タンパク質添加により CaCO_3 のモルフォロジーが変化していることが明らかとなった。また、キチン添加系のオーバーレイに着目すると、キチン上に炭酸カルシウムが析出しており、キチンは CaCO_3 に対して親和性をもつことが示唆された。さらに、キチンと融合タンパク質を組み合わせた系では、キチンのみの系と比べてより効率的に CaCO_3 により覆われている。これは、キチン表面に吸着している融合タンパク質中のカルシウム結合ペプチドによって CaCO_3 の生成が促進され、多量の CaCO_3 がキチン上に析出したためだと考えられる。これらの結果から、融合タンパク質 CaBP-ChBD は酵素反応によって生成した CaCO_3 をキチン上に効率的に析出させる機能を有することが明らかとなり、バイオセメントにおけるバインダー分子として利用できることが示された。

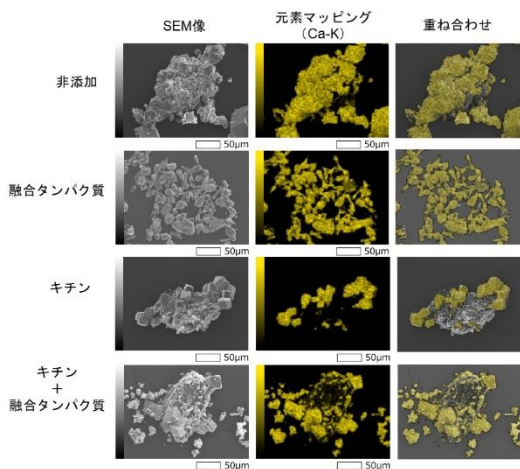


図2. キチン系でのバイオセメント生成
(CaCO_3 析出)

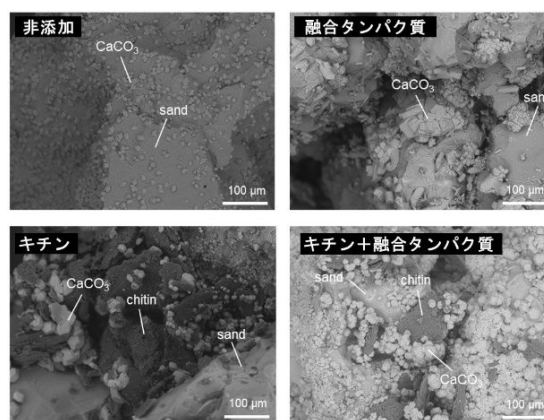


図3. キチン系での砂のバイオセメント固化

・砂のバイオセメント固化

ウレアーゼを用いたバイオセメントによる砂の固化実験において、添加物の影響を調査した(図3)。非添加系では、砂粒子上に多数の細かな CaCO_3 が生成していることが確認された。融合タンパク質を添加した系では結晶サイズが大きくなった。キチン添加系では砂粒子間にキチン粒子が確認され、 CaCO_3 結晶のサイズは非添加系よりも大きくなっていったが結晶の量は少なくまばらであった。一方、キチンと融合タンパク質を組み合わせた系では、砂粒子間に存在するキチン上に多数の CaCO_3 結晶が確認され、効率的な架橋が行われていると推察された。これらの固化体の一軸圧縮試験を行ったところ、キチンと融合タンパク質を組み合わせた系では一軸圧縮強度も破壊ひずみも最も大きくなっており、高い強度と靱性を兼ねそそえた材料になっていることが明らかとなった。

セルロースナノファイバー複合化バイオセメント

本研究では、極めて高い比表面積やナノ効果(ナノサイズの繊維系)がバイオセメントにおいて有効ではあると考え、セルロースナノファイバー(CNF)をマトリックス多糖として用いた。セルロースと炭酸カルシウムからなる有機-無機ハイブリッド材料の作製を達成するための新たな融合タンパク質のデザイン、およびセルロースベースの有機-無機ハイブリッド材料のバイオセメント技術への応用を検討した。ここで、効率的なバイオセメント固化を達成するために、前項(1)と同様に融合タンパク質をデザイン・作製するが、ここではキチン結合タンパク質 ChBD の代わりにセルロース結合性のタンパク質 cellulose binding module (CBM) を用いた。つまり、有機物であるセルロースと無機物である炭酸カルシウムの両者に結合する融合タンパク質 Cbap-CBM を作製し、その添加効果を検討した。

・バイオセメント生成 (CaCO_3 析出)

ウレアーゼを用いたバイオセメント生成における添加物の効果を調査した。図4に各系で生成した沈殿のSEM像を示す。非添加系では、カルサイトの一般的な形態である菱面体の結晶が得られたのに対し、融合タンパク質添加系では菱面体の他に球状の結晶が生成していることが観察された。XRD分析の結果、非添加系ではカルサイトのみが生成していたが、融合タンパク質系ではカルサイトに加え、バテライトも生成していた。融合タンパク質の存在により、準安定相であるバテライトが何らかの安定化により生成したと考えた。CNF添加系では、CNFのファイバーが観察され、そのファイバーの隙間に10 μm 程度の小さい菱面体の結晶が確認された。非添加系のカルサイトの結晶サイズと比較してかなり小さな結晶となっていたことから、セルロースナノファイバーの立体障害により結晶の成長が抑制されたことが推察された。一方、CNFと融合タンパク質を組み合わせた系では、より大きい40-60 μm のカルサイトが生成した。CNFのナノファイバー上に吸着した融合タンパク質により CaCO_3 の結晶成長が促進されたためだと考えた。

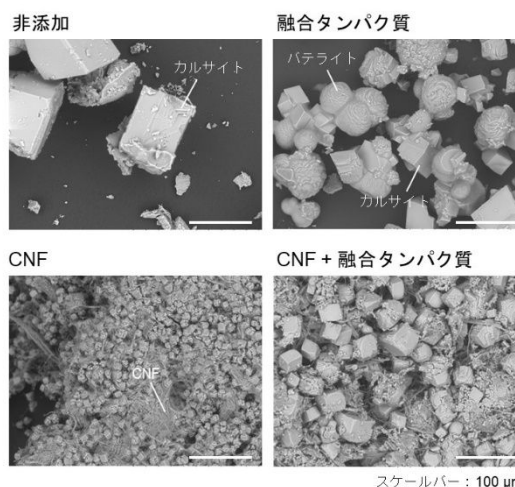


図4. CNF系でのバイオセメント生成

・砂のバイオセメント固化

ウレアーゼ産生微生物 *Sporosarcina* sp. を用いて砂粒子のバイオセメント固化(MICP)を行った。固化強度は、非添加系、融合タンパク質系、CNF添加系、CNF+融合タンパク質系の順に大きくなった。また、固化体のSEM観察において、非添加系では、 CaCO_3 は生成しているものの砂粒子間に十分な架橋が見られなかった。一方、CNF添加系では、砂粒子間にCNFのナノ繊維と思われるものと、それをマトリックスとした多量の CaCO_3 が生成しており、十分な架橋構造が形成されていることが確認された。

(2) イガイ接着タンパク質とシリカ重合酵素を組み合わせたハイブリッドバイオ固化

イガイ接着タンパク質の可溶化と接着制御

イガイ接着タンパク質(以下MAPs)は、環境負荷が小さく、水溶液中でも利用できるタンパク質性の新たな接着剤として期待されるが、自己凝集性が高いため、接着のコントロールが非常に難しい。本研究では、MAPsの一種である、ムラサキイガイ *Mytilus galloprovincialis* 由来のfp1のN末端側に可溶化タグとして氷核タンパク質 Inak のC末端部分である InakC を融合(以下 InakC-fp1) することで自己凝集性の抑制を検討した。また、融合した InakC を部位特異的プロテアーゼにより除去し、fp1の接着性の回復およびマグネタイト粒子の凝集を検討した。

InakC-fp1 は不溶性画分に発現したが、リフォールディングにより可溶性タンパク質となった。作製した InakC-fp1 を用いて磁鉄鉱（マグネタイト）の凝集実験の結果を図5に示す。タンパク質非添加系、および非接着タンパク質である BSA 添加系、InakC-fp1 添加系ではマグネタイトはほぼ分散した状態であった。一方、InakC-fp1 からプロテアーゼ処理により水溶性タンパク質 InaKC を切断・除去し、fp1 のみにした系では顕著なマグネタイトの凝集が見られた。これより、InaKC を融合することにより自己凝集性の fp1 を可溶化することでき、さらに任意のタイミングで InaKC を除去することにより fp1 の接着性を回復できることが示された。以上、タンパク質のみからなるイガイ接着タンパク質 fp1 の接着コントロールに初めて成功した。

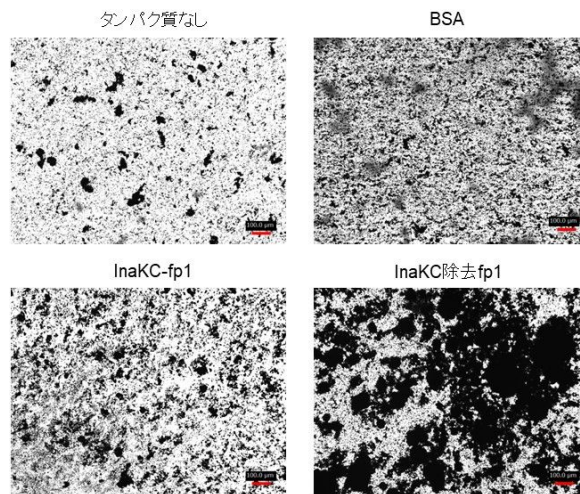


図5. タンパク質によるマグネタイトの凝集

キトサンゲル上での in situ シリカ生成

シリカ重合酵素（シリカチン）はタンパク質の融合により機能化することが可能である。そのため、様々な材料表面状でシリカを作ることができ、新たなバイオ固化のツールとして利用できると思われる。そこで本研究では、機能化したシリカチンを用いてキトサンゲル上でシリカ膜を形成したハイブリッド材料の作製を試みた。

キトサンゲルに吸着するタンパク質として前述の ChBD を選択し、シリカチンに融合した。また、シリカチンは水溶性が非常に低く凝集しやすいため、水溶性（安定性）を担保するために InaKC も組み込んだ 3 つのドメインからなる融合シリカチンを作製した（図6）。キトサンゲルをシリカ膜で被覆することで内包物の挙動（保持力、活性）を確認するため、ゲスト分子として西洋わさびペルオキシダーゼ（HRP）を用いた。まず、HRP を内包したキトサンゲルを定法により作製する。次いで、融合シリカチンを ChBD の機能を利用してキトサンゲル表面に固定化する。最後に、シリカ源として TEOS を添加し、シリカチンの触媒機能により、ゲル表面にシリカ膜を作製するというアプローチである。非添加系、融合シリカチン添加系で作製したハイブリッドゲルの SEM-EDS 分析により、融合シリカチン添加系では効率的にシリカ膜が形成されていることが確認された。

以上より、シリカチンを機能化・デザインすることにより、様々な材料表面・界面でシリカ形成が可能であり、新たなバイオ固化の開発につながる技術になることが示唆された。

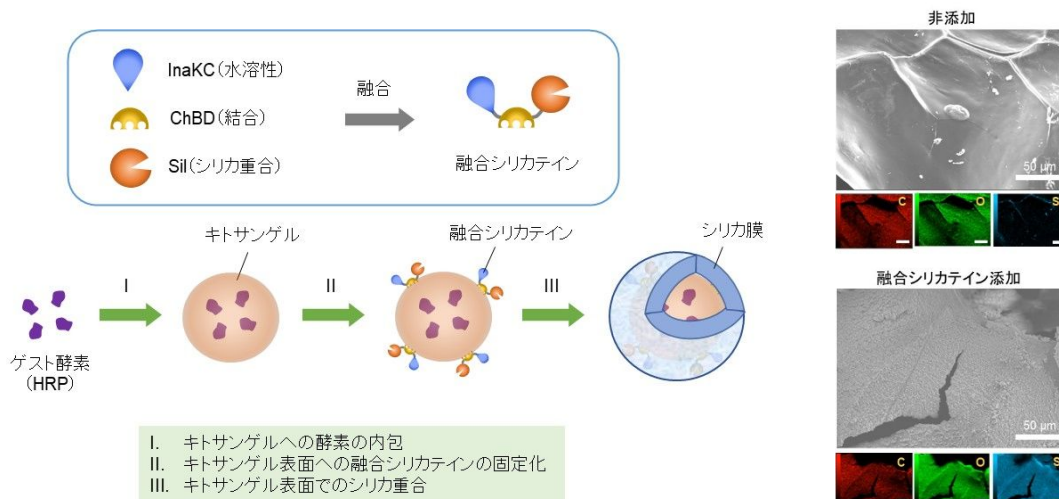


図6. 融合シリカチンを用いたキトサンゲル上でのシリカ作製

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計20件（うち査読付論文 19件／うち国際共著 9件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Gowthaman Sivakumar, Yamamoto Moeka, Chen Meiqi, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Baseline investigation on enzyme induced calcium phosphate precipitation for solidification of sand	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 1307650
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbuil.2023.1307650	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 Nawarathna Thiloththama Hiranya Kumari, Sakai Jin, Nakashima Kazunori, Kawabe Tetsuya, Shikama Miki, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Combination of cellulose nanofiber and artificial fusion protein for biocementation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 1305003
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbuil.2023.1305003	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 Avramenko Maksym, Nakashima Kazunori, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 900
2. 論文標題 Eco-friendly soil stabilization method using fish bone as cement material	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 165823 ~ 165823
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.scitotenv.2023.165823	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 Chen Meiqi, Gowthaman Sivakumar, Nakashima Kazunori, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 Baseline investigation on soil solidification through biocementation using airborne bacteria	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	6. 最初と最後の頁 1216171
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbioe.2023.1216171	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 Pilakka Veedu Anju, Nakashima Kazunori, Shiga Hayahide, Sato Takahiro, Godigamuwa Kasun, Hiroyoshi Naoki, Kawasaki Satoru	4. 巻 136
2. 論文標題 Functional modification of mussel adhesive protein to control solubility and adhesion property	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Bioscience and Bioengineering	6. 最初と最後の頁 87 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiosc.2023.05.002	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, Koizumi Hiromu, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 18
2. 論文標題 Field experimentation of bio-cementation using low-cost cementation media for preservation of slope surface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Case Studies in Construction Materials	6. 最初と最後の頁 e02086 ~ e02086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cscm.2023.e02086	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, Tsujitani Sota, Naota Ryo, Maulidin Ilham, Kawasaki Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 Interfacial biosilica coating of chitosan gel using fusion silicatein to fabricate robust hybrid material for biomolecular applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry B	6. 最初と最後の頁 1654 ~ 1658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2TB02581G	査読の有無 無
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, Yamamoto Moeka, Chen Meiqi, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Baseline investigation on enzyme induced calcium phosphate precipitation for solidification of sand	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	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) 10.3389/fbuil.2023.1307650	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 Nawarathna Thiloththama Hiranya Kumari, Sakai Jin, Nakashima Kazunori, Kawabe Tetsuya, Shikama Miki, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Combination of cellulose nanofiber and artificial fusion protein for biocementation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	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) 10.3389/fbuil.2023.1305003	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 Avramenko Maksym, Nakashima Kazunori, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 900
2. 論文標題 Eco-friendly soil stabilization method using fish bone as cement material	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 165823 ~ 165823
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2023.165823	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 Chen Meiqi, Gowthaman Sivakumar, Nakashima Kazunori, Takano Chikara, Kawasaki Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 Baseline investigation on soil solidification through biocementation using airborne bacteria	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Bioengineering and Biotechnology	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) 10.3389/fbioe.2023.1216171	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 Pilakka Veedu Anju, Nakashima Kazunori, Shiga Hayahide, Sato Takahiro, Godigamuwa Kasun, Hiroyoshi Naoki, Kawasaki Satoru	4. 巻 136
2. 論文標題 Functional modification of mussel adhesive protein to control solubility and adhesion property	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Bioscience and Bioengineering	6. 最初と最後の頁 87 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiosc.2023.05.002	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, Koizumi Hiromu, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 18
2. 論文標題 Field experimentation of bio-cementation using low-cost cementation media for preservation of slope surface	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Case Studies in Construction Materials	6. 最初と最後の頁 e02086 ~ e02086
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cscm.2023.e02086	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, Tsujitani Sota, Naota Ryo, Maulidin Ilham, Kawasaki Satoru	4. 巻 11
2. 論文標題 Interfacial biosilica coating of chitosan gel using fusion silicatein to fabricate robust hybrid material for biomolecular applications	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Materials Chemistry B	6. 最初と最後の頁 1654 ~ 1658
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2TB02581G	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 Sujiritha Parthasarathy Baskaran, Vikash Vijan Lal, Antony George Sebastian, Ponesakki Ganesan, Ayyadurai Niraikulam, Nakashima Kazunori, Kamini Numbi Ramudu	4. 巻 308
2. 論文標題 Valorization of tannery solid wastes for sustainable enzyme induced carbonate precipitation process	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemosphere	6. 最初と最後の頁 136533 ~ 136533
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemosphere.2022.136533	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 Oguri Hidetoshi, Nakashima Kazunori, Godigamuwa Kasun, Okamoto Junnosuke, Takeda Yudai, Okazaki Fumiyoshi, Sakono Masafumi, Kawasaki Satoru	4. 巻 133
2. 論文標題 Solubilization and aggregation control of silica-polymerizing enzyme fused with a removable soluble protein	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Bioscience and Bioengineering	6. 最初と最後の頁 222 ~ 228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jbiosc.2021.11.012	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 -

1. 著者名 Gowthaman Sivakumar, Mohsenzadeh Arash, Nakashima Kazunori, Kawasaki Satoru	4. 巻 61
2. 論文標題 Removal of ammonium by-products from the effluent of bio-cementation system through struvite precipitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Today: Proceedings	6. 最初と最後の頁 243 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.matpr.2021.09.013	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, Kawabe Tetsuya, Mwandira Wilson, Kurumisawa Kiyofumi, Kawasaki Satoru	4. 巻 9
2. 論文標題 Artificial Fusion Protein to Facilitate Calcium Carbonate Mineralization on Insoluble Polysaccharide for Efficient Biocementation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACS Sustainable Chemistry & Engineering	6. 最初と最後の頁 11493 ~ 11502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acssuschemeng.1c03730	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 Godigamuwa Kasun, Nakashima Kazunori, Tsujitani Sota, Kawasaki Satoru	4. 巻 44
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 1883 ~ 1890
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 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

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Ilham Maulidin, Kazunori Nakashima, Ryo Naota, Anju Pilakka Veedu, Chikara Takano, and Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Biological Immobilization of Oxidizing Enzyme for Enhanced Bioremediation of Toxic Contaminants
3. 学会等名 資源・素材2023（松山）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 志鎌海綺, 中島一紀, 鈴木啓太, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 酵素反応によって生成する炭酸カルシウム結晶形態への有機酸の影響
3. 学会等名 資源・素材2023（松山）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 今村沙弥香, 中島一紀, 菅原駿平, 石渡悠介, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 金属微粒子の選択的凝集を目的とした多機能タンパク質のデザインと機能評価
3. 学会等名 第75回日本生物工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 黒滝智子, 中島一紀, 直田亮, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 ポリスチレン基板上でのバイオシリカ生成
3. 学会等名 第75回日本生物工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中島一紀, Pilakka Veedu Anju, 佐藤岳大, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 接着性のコントロールが可能なイガイ由来タンパク質によるマイクロプラスチックの回収
3. 学会等名 第75回日本生物工学会大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 雀部杏美, 中島一紀, Anju Pilakka Veedu, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 材料表面の親水性・疎水性をコントロールできるタンパク質の開発
3. 学会等名 生物工学若手研究者の集い 夏のセミナー2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷文也, 中島一紀, 高野力, 川崎了, 中川原聡, 井野口康祐, 松浦大
2. 発表標題 生体分子を用いたジンクシリケート溶液からのシリカ分の除去
3. 学会等名 2023年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 雀部杏美, 中島一紀, Anju Pilakka Veedu, 直田亮, 黒滝智子, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 材料表面の親水性・疎水性の生物学的コントロール
3. 学会等名 2023年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 森川菜美, 中島一紀, 重政友貴, 高野力, 川崎了
2. 発表標題 融合タンパク質とセルロースナノファイバーを用いたパラジウムイオンの回収
3. 学会等名 2023年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anju Pilakka Veedu, Kazunori Nakashima, Takahiro Sato, Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Functional modification of mussel adhesive protein for the control of adhesion and aggregation property
3. 学会等名 European Federation of Biotechnology (EFB) Spring 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志鎌 海綺, 中島 一紀, 川崎 了
2. 発表標題 炭酸カルシウムのバイオミネラリゼーションにおける有機酸の影響
3. 学会等名 JpGU 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 志鎌 海綺, 中島 一紀, 酒井 仁, 川崎 了
2. 発表標題 酵素反応を用いた炭酸カルシウム析出における有機酸の影響
3. 学会等名 2022年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒滝 智子, 中島 一紀, 直田 亮, 川崎 了
2. 発表標題 機能性シリカ重合酵素を用いたシリカ-ポリスチレン複合材料の作製
3. 学会等名 2022年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今村 沙弥香, 菅原 駿平, 五十嵐 健輔, 中島 一紀, 川崎 了
2. 発表標題 ファージディスプレイ法を用いたカルサイト・アラゴナイト結合ペプチドの探索
3. 学会等名 2022年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Anju Pilakka Veedu, Kazunori Nakashima, Takahiro Sato, Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Control of Adhesion Property of Mussel Foot Protein by Fusing Soluble Protein.
3. 学会等名 19th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE) Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中島 一紀
2. 発表標題 有機-無機界面に着目した複合バイオ材料の創製に関する生物化学工学的研究
3. 学会等名 第74回日本生物工学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazunori Nakashima
2. 発表標題 Functional biocementation for environmentally friendly solidification
3. 学会等名 The 27th Symposium of Young Asian Biological Engineers' Community (YABEC2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kasun Godigamuwa, Kazunori Nakashima, Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Fabrication of chitosan gel-silica hybrid materials using fusion silicatein
3. 学会等名 Virtual conference organized by the European Federation of Biotechnology (EFB2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 直田亮, 中島一紀, 辻谷颯太, 川崎了
2. 発表標題 シリカ重合酵素を用いたバイオLayer-by-Layer法によるガラス基盤上への生体分子の固定化
3. 学会等名 2021年度資源・素材学会北海道支部春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 直田亮, 中島一紀, 辻谷颯太, 川崎了
2. 発表標題 シリカ重合酵素によるガラス基盤上へのシリカの積層と生体分子の固定化
3. 学会等名 生物工学若手研究者の集い夏のオンラインセミナー2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島一紀
2. 発表標題 資源・環境・土木分野での応用を指向したバイオベース材料の開発
3. 学会等名 生物工学会北日本支部2021年度第一回オンライン若手シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島一紀
2. 発表標題 無機物と有機物の界面に着目した人工タンパク質のデザインと資源・環境分野への応用
3. 学会等名 資源・素材2021（札幌）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤 岳大, 中島 一紀, 宮川 寛希, Anju Pilakka Veedu, 川崎 了
2. 発表標題 イガイ接着タンパク質を用いたマグネタイトの凝集コントロール
3. 学会等名 第73回日本生物工学会沖縄大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Anju Pilakka Veedu, Kazunori Nakashima, Hiroki Miyagawa, Satoru Kawasaki
2. 発表標題 Aggregation of magnetite particles by mussel adhesive protein triggered by protease
3. 学会等名 The 26th Symposium of Young Asian Biological Engineers' Community (YABEC2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中島一紀	4. 発行年 2023年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 336
3. 書名 「タンパク質と多糖をベースとした金属イオン吸着剤」(第21章) 脱炭素と環境浄化に向けた吸着剤・吸着技術の開発動向	

〔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
研究分担者	川崎 了 (Satoru Kawasaki) (00304022)	北海道大学・工学研究院・教授 (10101)	
研究分担者	五十嵐 健輔 (Kensuke Igarashi) (90759945)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・生命工学領域・主任 研究員 (82626)	

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