

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02239

研究課題名（和文）酵素触媒とテンペラ（展色材）の組み合わせによる1shot微生物固化技術の開発

研究課題名（英文）Development of the tempera assisted bio-based 1shot ground improvement technics.

研究代表者

畠 俊郎（Hata, Toshiro）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・教授

研究者番号：30435424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、新たな地盤改良技術として注目されている微生物（酵素）固化技術で課題とされている所定炭酸カルシウム析出量確保のための通水（注入）回数を削減し、1回施工に必要な強度を確保する1shot微生物固化技術の実用化を目指した検討を行った。具体的には、酵素触媒とテンペラ（展色材）の組み合わせにより従来術よりも結晶サイズを大きくさせることで効率的に骨格構造を作り出す手法の提案と室内試験による有効性評価を行った。試験の結果から、提案手法は従来技術と比較して少ない炭酸カルシウム析出量で高強度化が可能となった。展色材には食品廃棄物を利用する効果も確認でき、環境面・コスト面に優れた手法の提案ができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1990年代から検討が進められてきた微生物固化技術では、尿素の加水分解に伴い発生するアンモニアの処理、目標強度達成に必要な炭酸カルシウム析出量確保のために複数回の施工が必須である、といった課題が指摘されている。このような問題に対し、本研究では展色材（テンペラ）を組み合わせることで従来よりも大きなサイズの炭酸カルシウム結晶を砂粒子間に効率的に析出させることで従来よりも少ない固化剤添加量で必要な強度を得る新しい技術の有効性を示した。提案手法により従来技術の課題を解決できることはもちろん、展色材に食品廃棄物を活用することで農業資材と食品廃棄物を利用した新しい地盤改良技術の普及を目指す。

研究成果の概要（英文）：In this study, The one-shot microbial solidification technique focuses on reducing the number of injection times of the chemicals. The chemicals contain the urea, calcium chloride, and urease enzyme (purified enzyme or urease production microbes). The conventional method is to produce ammonia byproducts, which will change the nitrate or nitrite that are classified as toxic chemicals. The main object of this research will be to reduce the volume of these toxic chemicals to support the additional chemicals named tempera. The advantage point of additional chemicals named tempera can enhance the crystal sizes more than the conventional MICP/EICP method. The test results showed that the proposed method could produce higher strength with a smaller amount of calcium carbonate precipitation than the conventional technique. This phenomenon was confirmed with the SEM images and XAFS analysis. The tempera was made from the daily food waste that can promote the SDG's goals.

研究分野：地盤工学

キーワード：微生物固化 テンペラ 結晶サイズ

### 1. 研究開始当初の背景

1990年代より検討が進められてきた微生物(酵素)触媒を利用した地盤改良技術では、基本的有効性が示された後に、より高い酵素活性を持つ植物・微生物の探索、添加するカルシウム源に牡蠣殻などの廃棄物利用の可能性、析出した炭酸カルシウム量と地盤強度や透水性との関係等項目ごとに着目した検討が進められてきた。これら既往の研究を通じて得られた知見を統合し、大型土槽実験や小規模実証試験が実施され粗抽出の酵素や半開放系でのウレアーゼ活性陽性微生物を利用した条件においても、強度増進や透水性制御といった機能更新が期待できることが明らかとなってきた。このように実用化に向けた検討が進むにつれ、1) 尿素の加水分解時に発生するアンモニア対策、2) 効率的な結晶鉱物析出効果を得るためには1回に添加できる尿素およびカルシウム源に制限がある、等の課題が明らかとなってきた。これら課題の解決方法としては、生成されたアンモニアの原位置洗浄による除去(In-Situ Flushing)や、尿素、カルシウム源および酵素(もしくは微生物)を含む固化溶液の複数回注入による必要炭酸カルシウム量の確保、が提案されている。これら提案済の解決方法はいずれも一定の効果が認められているが、いずれも費用的な負担が生じ、実用化においては課題となる。このような問題に対し、本研究では1ショット(1回の施工)で必要となる強度を得る新たな微生物固化技術の提案を目指すこととし、炭酸カルシウムの析出と展色材を組み合わせた手法の適用性について検討することとした。ここでテンペラとは展色材(バインダー)として絵の具や塗料で利用されている物質の総称であり、本研究では接着効果や結晶成長効果を期待している。

### 2. 研究の目的

本研究で着目したテンペラ(展色材, バインダー)は絵画絵の具等で古くから利用されており、長期安定性に優れた材料であるといえる。本研究では、一般的に知られているテンペラとしては卵、カゼイン、膠がある。ここで、カゼインと膠については展色材にプラスして接着剤としての機能も期待できる。本研究課題では、特にカゼインに着目することとし、酵素触媒(EICP)もしくは微生物触媒(MICP)との組み合わせによる効果の検証について取り組むこととした。

### 3. 研究の方法

検討の流れを図-1に示す。はじめに砂重量に対する炭酸カルシウム量を一定とした条件でカゼインの添加が強度に与える影響の検証を行い、次に砂重量に対するカゼイン量を一定とした条件で炭酸カルシウム析出量の増加が強度に与える影響の検証を行った。これにより、砂地盤において目的とする強度を得るために必要となる最適な配合に関する知見を得ることとした。これまでの検討結果から炭酸カルシウムの析出量が少ない条件での一軸圧縮強度の関係が報告されている(図-2参照)<sup>1), 2), 3)</sup>。その中で本研究課題で着目したカゼインが含まれるスキムミルク併用 EICP<sup>3)</sup>との比較試験を行うこととし、強度発現メカニズムなどについて明らかにすることとした。

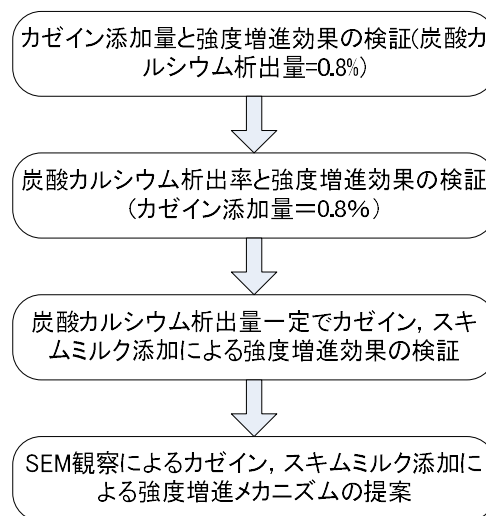


図-1 研究全体の流れ

#### 3.1 炭酸カルシウム析出量一定の条件でカゼイン

##### 添加量が一軸圧縮強度に与える影響の検証

砂重量に対する炭酸カルシウム析出量を 0.8%とした条件の下で、カゼイン添加量を 0, 7, 25, 39, 46, 60, 65g/L の 7 段階に変化させた試験を実施した。酵素添加量は 2.6g/L で一定にするとともに、供試体は試薬を粉体で添加し、最適含水比となるよう純水を加えた条件で十分に混合させ、その後に直径 5cm, 高さ 10cm のモールドにタンパーを用いて 3 層に分けて締め固める方法で作成した。作成後の供試体は 20℃の恒温槽で 72 時間、その後 40℃の恒温槽で養生する方法を用いた。

#### 3.2 カゼイン添加量一定の条件で炭酸カルシウム析出量が一軸圧縮強度に与える影響の検証

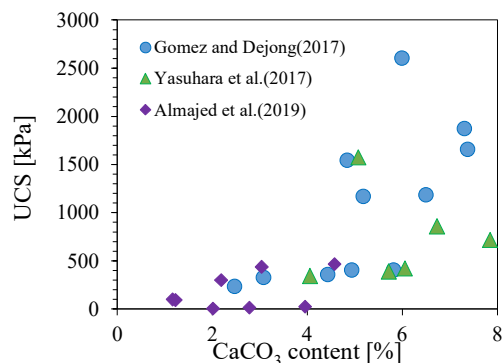


図-2 低炭酸カルシウム析出条件での UCS 試験結果

3.1の試験に続き、カゼイン添加量を39g/Lに固定した条件で砂重量に対する炭酸カルシウム析出量を0.4, 0.6, 0.8, 0.9%の4段階に変化させた試験を実施した。酵素添加量、供試体作成方法および養生状況は2.1試験と同様とした。

### 3.3 砂重量に対する炭酸カルシウム析出量を固定し、スキムミルクおよびカゼイン添加量を2段階とした比較試験

3.1および3.2の検討結果を踏まえ、砂重量に対する炭酸カルシウム量を0.8%とした条件の下でスキムミルクおよびカゼインを3.9g/Lおよび39g/Lの2段階とした条件での試験を実施した。酵素添加量ほか供試体作成状況、養生条件は3.1および3.2と同様とした。

### 3.4 SEM画像に基づくEICP, EICP+スキムミルク, EICP+カゼイン強度発現メカニズムの比較

3.1~3.3の検討を通じ、本研究で提案するカゼイン併用EICPは従来技術よりも高強度化が期待できることが明らかとなった。骨格構造の形成が期待される砂重量に対する炭酸カルシウム析出量と同じであるにもかかわらず強度特性が異なる原因について検討することとした。

なお、試験には1軸圧縮試験後の供試体を105°Cの条件で24時間乾燥させ、デシケーター内で徐冷した試験片を用いた。

## 4. 研究成果

以下、3.の研究の方法で述べた項目ごとに結果を示して考察する。

### 4.1 炭酸カルシウム析出量一定の条件でカゼイン添加量が一軸圧縮強度に与える影響について

砂重量に対する炭酸カルシウム析出量を0.8%とした条件でカゼイン添加量を0~65g/Lの範囲で7段階に調整して作成した供試体の1軸圧縮結果を図-3に示す。

なお、各試験ケースについて試験体は3本作製することとし、図中にはエラーバーもあわせて表示した。

試験の結果から、①カゼイン濃度が0~7g/Lでは顕著な強度増進効果が期待できない範囲、②7~46g/Lでカゼイン添加量の増加にあわせて1軸圧縮強度が増加する範囲、③46~65g/Lではほぼ横ばいとなる範囲の3つに区分される傾向が確認された。砂重量に対する炭酸カルシウム析出量と同じということで、尿素の加水分解作用によりカゼインの溶解を促進させるアンモニア水の生成量はすべての試験ケースについて同じ条件となる。そのため、強度増進には一定量のカゼインが必要であることと、生成されるアンモニア水の量により溶解できるカゼイン量が制約を受けるため、一定濃度以上の条件では強度増進効果が低下する傾向が明らかとなった。

### 4.2 カゼイン添加量一定の条件で炭酸カルシウム析出量が一軸圧縮強度に与える影響について

砂重量に対する炭酸カルシウム量が一定の条件において、顕著な強度増進効果が期待できるカゼイン添加量の範囲が存在することが明らかとなったため、砂重量に対するカゼイン添加量が直線的に増加している39g/Lに固定した条件の下で炭酸カルシウム析出量を0.4, 0.6, 0.8, 0.9%の4段階に変化させた場合の強度推移について検討した結果を図-4に示す。カゼイン濃度39g/Lの条件で炭酸カルシウム量を約半分とした条件では強度が1MPa弱まで低下する傾向が認められた。このことは、カゼインのみでも強度増進効果が期待できるものの、EICPと組み合わせた場合よりも低強度となる可能性を表している。

カゼインのみによる強度増進効果は砂粒子間の接着作用と考えられることから、EICPと組み合わせることで何らかの強度増進効果が発揮されていることが明らかとなった。

全体としては、カゼイン添加量を39g/Lとした条件では砂重量に対する炭酸カルシウム量が増えるにつれ強度増進効果が期待できる傾向が認められた。

炭酸カルシウム析出量の増加は、添加する尿素の増加つまりは発生するアンモニア量が増加することとなる。本研究では施工1回で所定

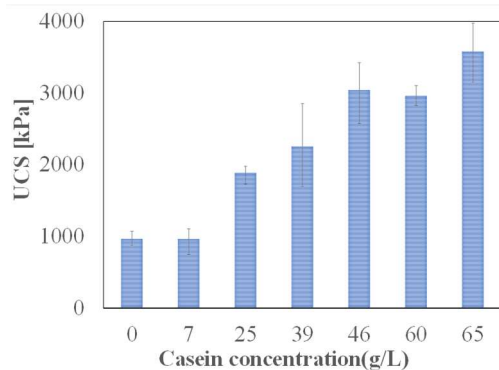


図-3 カゼイン濃度と一軸圧縮強度の関係

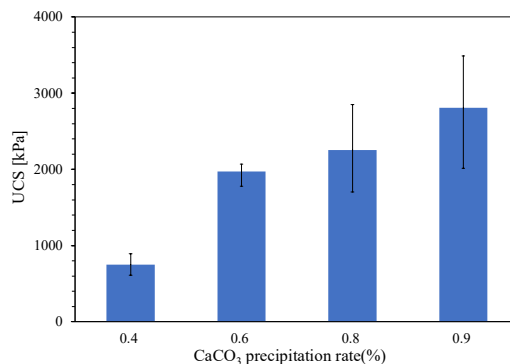


図-4 炭酸カルシウム析出率と一軸圧縮強度の関係



の強度を確保することに加え、生成されるアンモニア量を減らすことで In-situflusing といった環境対策が不要となる技術の提案を目指している。そのため、目標とする強度にあわせて砂重量に対する炭酸カルシウム析出率、カゼイン添加量を任意に設定可能かどうか検証することとした。

#### 4.3 砂重量に対する炭酸カルシウム析出量を固定し、スキムミルクおよびカゼイン添加量を2段階とした比較結果

4.1 および 4.2 で述べた通り、砂重量に対する炭酸カルシウム析出量、カゼイン添加量を任意に設定することで改良土の強度を任意に設定できる可能性が明らかとなった。そのため、カゼイン添加量を変えることで目標強度 1MPa および 2MPa 程度を満たすかどうかの検証を行うこととした。この試験では、既往の研究で高強度化が期待できることが明らかになっていることに加え、提案技術で着目したカゼインが含まれている材料であるスキムミルクとの強度発現特性の比較を行うこととした。

結果を図-5 に示す。カゼインおよびスキムミルク添加量を 3.9g/L とした条件では、カゼインが若干高強度となる傾向を示すものの、全体としてほぼ同程度の強度増進効果となった。

一方、カゼインおよびスキムミルク添加量を 39g/L とした条件では、カゼイン-EICP がスキムミルク-EICP と比較して 2 倍程度高強度となる傾向が明らかとなった。

カゼイン添加量が多い条件でスキムミルクと比較して高強度となる原因を明らかにすることを目的とし、SEM による表面観察を実施することとした。

#### 4.4 SEM 画像に基づく EICP, EICP+スキムミルク, EICP+カゼイン強度発現メカニズムの比較結果

スキムミルク-EICP およびカゼイン-EICP の強度発現メカニズムの違いを考察することを目的とし、試験後の供試体片を用いた SEM による表面観察を実施した。

結果を図-6 にそれぞれ示す。スキムミルク EICP では、こぶ状の炭酸カルシウムが形成されるとともに、部分的に砂粒子間を繋いでいる状況が確認された。これはスキムミルクパウダーが炭酸カルシウムの結晶サイズを大きくするという既往の報告と同様の傾向であると考えられる。

一方、カゼイン-EICP では砂粒子表面が全体的にコーティングされるとともに、砂粒子間の隙間を接着するような形で結合している傾向が明らかとなった。

結果的に、砂粒子間を繋ぐ部分がスキムミルク-EICP より広がっており、このことがより強度増進が進んだ理由であると考えられる。

SEM による表面観察結果を踏まえ、EICP、スキムミルク-EICP およびカゼイン-EICP の強度発現メカニズムを考察した結果を図-7 に示す。以下、それぞれについて想定される固化メカニズムについて説明する。EICP では、図中 a に示す通り間隙水に含まれるカルシウムイオ

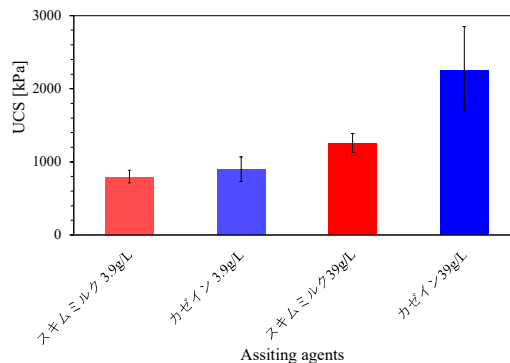


図-5 カゼイン-EICP とスキムミルク-EICP の比較結果

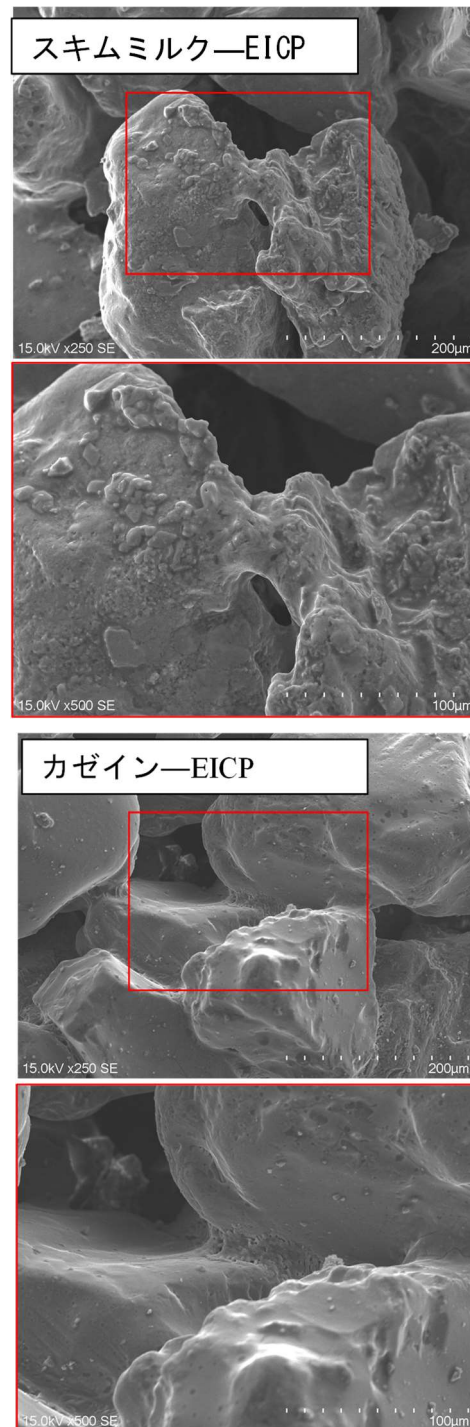


図-6 SEM 観察結果

ンが尿素の加水分解により生成された炭酸イオンと結合し、bに示す通り砂粒子表面に微小サイズの炭酸カルシウム結晶がランダムに析出していると考えられる。そのため、砂粒子間の結合ポイントが少なく、必要な強度を満たすためには間隙全体に炭酸カルシウムの結晶を析出させる必要があり結果的に砂重量に対する炭酸カルシウム析出率が高くなる傾向になると考えられる。

スキムミルク-EICP では、カルシウムイオンの析出ポイントをスキムミルクパウダー周辺に集中させることでEICPよりも効率的に炭酸カルシウム結晶を析出させる効果が付加され、結果的に砂重量に対する炭酸カルシウム析出量が同じであっても高強度化が可能になると考えられる。

本研究で新たに提案したカゼイン-EICP では、尿素の加水分解により生成されるアンモニアを利用してカゼインが溶解する際に溶液の粘度を上昇させる効果が期待される。この間隙水の粘度上昇により砂粒子表面が全体的にコーティングされ、さらに固化が進むにつれ粘度の高い間隙水中に含まれるカルシウムイオンが粒子間で効率的に析出することによりさらなる高強度化が期待できると考えられる。

以上より、微生物(酵素)固化にカゼインを併用することにより従来技術よりも効率的な結晶析出(粒子間の接着・結合)効果が期待できることが明らかとなった。

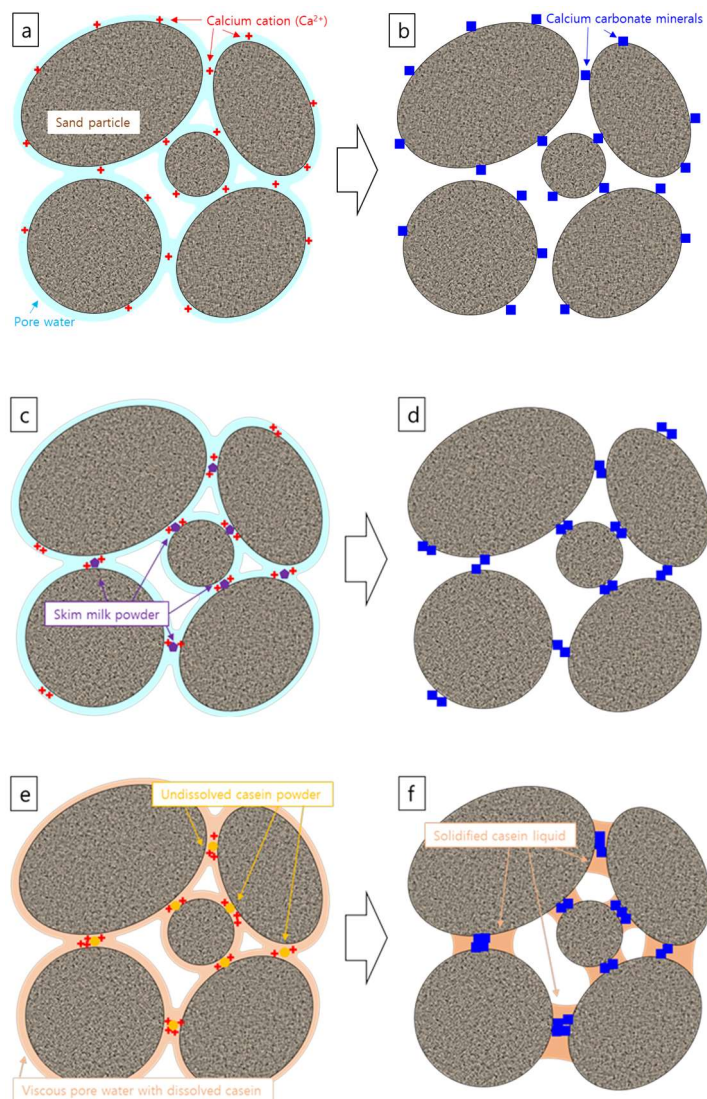


図-7 EICP,カゼイン-EICP およびスキムミルク-EICP の強度発現メカニズム

#### 4.5 本研究課題の実施で得られた知見と実用化に向けて解決すべき課題

微生物固化の課題であるアンモニアの処理と施工回数の削減を解決する手法として、新たにカゼイン-EICP (MICP) 法を提案した。提案手法は従来よりも添加する尿素量の削減が可能であり、結果的に生成されるアンモニア量の削減が可能となる。加えて、カゼインとEICPもしくはMICPを組み合わせることで間隙水の粘度を上昇させ、砂粒子間の結合効率を高めることで高強度化が期待できることが明らかとなった。本研究課題で着目したカゼインは牛乳中に含まれるタンパク質の一種であり、昨今話題となっている廃乳量の削減ひいては食品廃棄物の有効利用への貢献も期待される。一方、カゼインの溶解にはアルカリ条件(尿素の加水分解に伴い発生するアンモニア)が必須であることから、カゼイン溶解に必要な最低限のアンモニア量の確保および溶解後のアンモニア水の硝化・脱窒による無害化、もしくはアンモニア態窒素肥料としての有効利用などについて追加の検討が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) Yasuhara, H., Neupane, D., Hayashi, K. & Okamura, M. Experiments and Predictions of Physical Properties of Sand Cemented by Enzymatically-induced Carbonate Precipitation. *Soils and Foundations* 52, 539-549 (2012)
- 2) Gomez M.G, Dejong J.T. Engineering Properties of Bio-Cementation Improved Sandy Soils. *Grouting Grouting, Drilling, and Verification* . GSP 288 . (2017)
- 3) Almajed, A., Tirkolaei, H. K., Kavazanjian, E. & Hamdan, N. Enzyme induced Biocementated sand with high strength at low carbonate content. *Sci. Rep.* 9, 1135. 10.1038/s41598-018-38361-1, 30718723 (2019).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6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 生駒 聖、畠 俊郎、米田 純、山本 晃司	4. 巻 29
2. 論文標題 2-06 MICPを応用したメタンハイドレート由来のメタンガス回収支援手法に関する検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本エネルギー学会大会講演要旨集	6. 最初と最後の頁 24～25
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20550/jietaikaiyoushi.29.0_24	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 Hata Toshiro, Saracho Alexandra Clara, Haigh Stuart K., Yoneda Jun, Yamamoto Koji	4. 巻 81
2. 論文標題 Microbial-induced carbonate precipitation applicability with the methane hydrate-bearing layer microbe	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Natural Gas Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 103490～103490
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jngse.2020.103490	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 Clara Saracho Alexandra, Haigh Stuart K., Hata Toshiro, Soga Kenichi, Farsang Stefan, Redfern Simon A. T., Marek Ewa	4. 巻 10
2. 論文標題 Characterisation of CaCO <sub>3</sub> phases during strain-specific ureolytic precipitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-66831-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 該当する
1. 著者名 Ikoma S., Hata T., Yoneda J., Yamamoto K.	4. 巻 11
2. 論文標題 Effects of urease-producing bacteria on permeability and strength control for sands	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geotechnique Letters	6. 最初と最後の頁 1～7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jgele.20.00091	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 IKOMA Satoru, HATA Toshiro, YAGI Mitsuharu, SENJYU Tomoharu	4. 巻 76
2. 論文標題 APPLICABILITY OF DETERIORATION MITIGATION METHOD USING MICP FOR CEMENT-TREATED CLAY	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_618 ~ I_623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.76.2_I_618	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 Ning Jun Jiang, Chao Sheng Tang, Toshiro Hata, Benoit Courcelles, Osama Dawoud and Devendra N. Singh	4. 巻 36
2. 論文標題 Bio mediated soil improvement: The way forward	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soil Use and Management	6. 最初と最後の頁 185-188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/sum.12571	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 Joyce Nakayenga, Arlyn Aristo Cikmit, Takashi Tsuchida, Toshiro Hata	4. 巻 305
2. 論文標題 Influence of stone powder content and particle size on the strength of cement-treated clay	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Construction and Building Materials	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.conbuildmat.2021.124710	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 Nakayenga, Joyce, Mutsuko Inui, and Toshiro Hata	4. 巻 14
2. 論文標題 Study on the Effect of Amorphous Silica from Waste Granite Powder on the Strength Development of Cement-Treated Clay for Soft Ground Improvement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su14074073	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 西田志帆, 端昭彦, 畠俊郎, 米田純, 山本晃司
2. 発表標題 生物膜と微生物固化の併用による地盤透水制御技術の提案
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松井一馬, 端昭彦, 畠俊郎
2. 発表標題 高分子材料に着目した新しい地盤改良技術の提案
3. 学会等名 令和元年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 生駒聖, 畠俊郎, 八木光晴, 千手智晴
2. 発表標題 微生物機能を利用した粘性土セメント改良土の劣化抑制技術に関する検討
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 岩田悠介, 畠俊郎, 米田純, 山本晃司
2. 発表標題 出砂対策としての微生物固化技術の適用性評価
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 村田湧水, 畠俊郎, 鍵本慎太郎, 水谷崇亮
2. 発表標題 再懸濁抑制を目的とした機能性造粒砂による底泥表層固化技術の検討
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 三宅正人, 畠俊郎, 井出一貴
2. 発表標題 EICPとカゼインの併用による新しい地盤改良技術に関する検討
3. 学会等名 第56回地盤工学発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井出一貴, 三浦俊彦, 三宅正人, 畠俊郎
2. 発表標題 EICPとカゼインの併用による地盤改良技術の検討 -その2 アンモニアの固定による環境負荷低減について-
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大槇望未, 畠俊郎, 窪田幸一郎
2. 発表標題 製鋼スラグと食品廃棄物を組み合わせた新規地盤材料の提案
3. 学会等名 第74回土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

<p>1. 著者名 高島 義徳, 真田 和昭, 眞弓 皓一, 鮑 力民, 大塚 英幸, 原口 和敏, 吉田 昌弘, 畠 俊郎, 佐野 健一, 小泉 智, 山口 政之, 内田 幸明, 梶田 貴都, 吉田 絵里, 野呂 篤史, 杉原 伸治, 田丸 俊一, 寺島 崇矢, 宮島 大吾, 箕田 雅彦, 為末 真吾, 角五 彰, 林 幹大, 田中 賢, 玉手 亮多 ほか (計59名)</p>	<p>4. 発行年 2020年</p>
<p>2. 出版社 技術情報協会</p>	<p>5. 総ページ数 446</p>
<p>3. 書名 自己修復材料、自己組織化、形状記憶材料の開発と応用事例</p>	

〔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	笠間 清伸  (Kasama Kiyonobu)  (10315111)	九州大学・工学研究院・准教授    (17102)	
研究分担者	米田 純  (Yoneda Jun)  (40760187)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・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			
英国	University of Cambridge			
スイス	EPFL			
米国	University of Hawaii, Manoa			