

令和 元年 6 月 19 日現在

機関番号：23201

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2018

課題番号：16KK0133

研究課題名（和文）社会基盤施設の維持管理, 新エネルギー開発支援等を対象とした地盤微生物工学の体系化（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Systematization of the Biological soil mechanics focused on the maintenance of infrastructure and the support for newly energy resources(Fostering Joint International Research)

研究代表者

畠 俊郎 (Hata, Toshiro)

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：30435424

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,900,000円

渡航期間：12ヶ月

研究成果の概要（和文）：微生物固化に取り組む研究者の国際的なネットワーク構築を目的としてアメリカ アリゾナ州立大学 CBBG(Center for Bio-mediated and Bio-Inspired Geotechcs), イギリス ケンブリッジ大学 Scofield centreに滞在した。滞在期間は主に、アリゾナ州立大学では微生物固化で課題とされている通水回数改良を目的とした短期固化技術の開発、ケンブリッジ大学では微生物固化のエネルギー開発分野への応用について取り組んだ。これらの取り組みを通じて微生物固化に関する新たな国際的ネットワークを形成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

微生物固化に関しては国内でも研究開発が進められているものの室内試験規模にとどまっており、現場への応用に向けた検討までは進んでいないのが現状である。一方、北米やEUでは現場試験に向けた検討が進められており、実現現場への適用を視野に入れた検討が進められている。しかしながら酵素およびある特定の微生物に着目した検討が多く日本へ直接この成果を応用することは困難である。このような背景の元、多様な微生物の適用性に取り組んでいる日本の研究成果を紹介し、ともに新しい技術開発につなげる研究ネットワークが形成できたことと、定期的に彼らと情報交換できる環境を整えることができたため社会的にも意義のある成果だと考える。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this project was made international bio-soil research network include North American and EU areas. Arizona state university is organized the NSF founding research groups include New Mexico State Univ, Georgia Tech and U.C Davis that focused on the promotion of bio-soil technics about research and education. The development of Modified-EICP that can accelerate the soil strength only the one time injection of cementation solution was carried out with join the ASU's research group.

After that, I joined the new research group at the University of Cambridge. The University of Cambridge group is developing the mitigation of sand production with bio-treatment focused on the methane hydrate-bearing layer at the deep seabed. The three types of flow tests were carried out and evaluate the effectiveness of the proposed method.

研究分野：地盤工学

キーワード：深海環境 地盤工学 微生物 特殊環境

様式 F-19-2

1. 研究開始当初の背景

地盤工学分野において微生物が持つ代謝機能に着目した新しい地盤改良技術に関する検討が進められている。海外では 1990 年代より尿素の加水分解酵素であるウレアーゼに着目し、高いウレアーゼ活性を持つ *Sporosarcina pasteurii* を用いて砂地盤の間隙中に炭酸カルシウムを析出させることで強度増進効果を得る Microbially Induced Calcite Precipitation(MICP)や、微生物の代わりにナタマメ等由来のウレアーゼを用いて同様の効果を得る Enzyme Induced Carbonate Precipitation(EICP)に関する検討が始められている。その後、EU 諸国、アジア諸国において地盤工学分野の技術者が同様の研究をはじめ現在に至っている。

国内では、同じく尿素の加水分解に着目しつつ国内での実用化を視野に入れ原位置にすでに生息している微生物の機能を部分的に促進させて同様の効果を得る技術や、尿素の加水分解ではなく有機物の代謝により炭酸イオンを得ることで炭酸カルシウム析出を促進させる技術について検討が進められてきた。

このように、微生物機能による無期鉱物の析出促進に着目した地盤改良技術について世界的に開発が進められるとともに、オランダやカナダなどではフィールドテストを実施して実地盤でどの程度の効果が得られるのか、その際のコストは既存の地盤改良技術と比較してどの程度なのか等について評価が行われている。

しかしながら、既存の微生物固化技術はその多くが陸域もしくは沿岸域を対象にしており深海などの特殊環境への適用性が明らかになっていないことや、必要な量の炭酸カルシウムを得るために複数回の施工（注入）が必要となり結果としてコストアップにつながっている等、新しい地盤改良技術として商業ベースにのせるには解決すべき課題が少なくない。

また、地盤条件や地盤改良に微生物を用いる場合の基準など各国で状況が異なるため、各地域（各大学）の研究者それぞれで地元での実用化を目指した検討を通じてノウハウを蓄積しているに留まっており、共通の知識としての共有化が図れていない点も課題とされていた。

2. 研究の目的

これまで、有機物の代謝や尿素の加水分解反応で発生する炭酸イオンを用いて砂地盤の間隙内に炭酸カルシウムの結晶を析出させる地盤改良技術について取り組んできた。

本研究課題の実施においては、これまでに取り組んできた研究課題をベースとして国際的研究ネットワークの形成を目的に 1) 従来技術よりも少ない炭酸カルシウム析出量で高強度化が進むことを明らかにしたアリゾナ州立大学 CBBG との連携に基づく短期施工型微生物固化技術の開発、2) 微生物固化技術の新たな適用先の一つとされる深海底のメタンハイドレート胚胎層周辺での微生物固化技術の有効性について、出砂対策の有効性評価を目的に制作された高圧透水試験装置を持つケンブリッジ大学 Scofield Centre での模型実験による検証、について取り組むこととした。

なお、9 か月間の滞在予定であるアリゾナ州立大学においては、Center for Bio-mediated & Bio-inspired Geotechnics(CBBG)を滞在先として選定することとした。この CBBG は a)Hazard Mitigation, b)Environmental Protection and Restoration, c)Infrastructure Construction, d)Resource Development, の 4 部門について教育・研究活動を積極的に推し進めている。実際に、ASU の研究グループはスキムミルクを併用することで従来よりも高強度化させる新しいタイプの ECIP 技術を開発している。この改良型 ECIP 法は短期間で高強度化が得られる反面、固化メカニズムや長期安定性については未解明な点が多い。そのため、滞在期間中には改良型 EICP の強度発現メカニズムおよび同技術を MICP に応用する場合の課題抽出に取り組むこととした。

その後、ケンブリッジ大学に移動して微生物固化の新たな適用先の一つと考えられている日本近海のメタンハイドレート胚胎層周辺を対象として深海域由来の微生物を用いた場合にこれまでと同様の固化効果が期待できるかどうかの要素試験と、模型実験による有効性検証を行うことにした。

3. 研究の方法

以下、アリゾナ州立大学 CBBG, ケンブリッジ大学 Schofield Centre それぞれについて研究方法の概要を述べることとする。

(1)アリゾナ州立大学 CBBG

アリゾナ州立大学に設置されている CBBG は、アリゾナ州立大学、ジョージア工科大学、ニューメキシコ州立大学、カリフォルニア大学デービス校で構成されている。アリゾナ州立大学では主に改良型 EICP に関する研究開発に取り組んでおり、Ottawa(20-30) sand とナタマメ由来の酵素、尿素、塩化カルシウム及びスキムミルクを組み合わせることで従来技術よりも少ない炭酸カルシウム析出量で高強度を得る効果を明らかにしている。

このように、現状では酵素製剤を主な研究対象としているがオートクレーブなど微生物操作に必要な基本的な装置が利用可能な環境はすでに整えてある。そこで、滞在期間中はアリゾナ州立大学で開発済の改良型 EICP の日本国内への適用を視野に入れた検討と、酵素ではなく微生物を用いた場合に改良型 EICP が結晶析出にどのような効果が得られるかについて試験を行うこととした。

改良型 EICP の日本国内への適用を視野に入れた検討では、アリゾナ州立大学が Ottawa(20-30)sand を主な対象として開発した技術を電子会議等により日本にいる学生に説明して豊浦砂を用いた場合にも同様の効果が得られるかどうかや、スキムミルクと同じような効果が期待できるとともに安価かつ大量に入手可能となる代替物質の探索を行った。

改良型 MICP (酵素の代わりに微生物を用いる技術) に関する検討ではこれまでに CBBG が研究対象としてきた *Sporosarcina pasteurii* に加え、申請者らが同様の効果が期待できることを明らかにしている *Sporosarcina aquimarina* についても同様の試験を行い結果の比較等を行うこととした。

アリゾナ州立大学の改良型 EICP を豊浦砂向けに改良した試験の流れを図-1 に、顕微鏡観察試験に用いたマイクロ流体チップの写真-1 にそれぞれ示す。なお、試験では ASU が土壌間隙サイズにあわせてデザインしたカスタマイズチップを用いることとした。

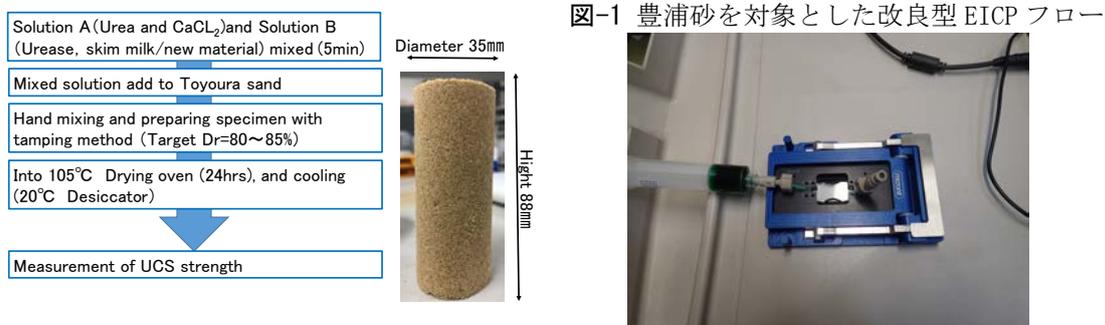


写真-1 顕微鏡観察試験用治具概要

(2)ケンブリッジ大学 Schofield Centre

アリゾナ州立大学の滞在期間中にあわせてケンブリッジ大で行う高圧透水実験の準備を進めた。具体的には、微生物毎に異なる尿素の加水分解および結晶析出速度にあわせる最適な通水速度の決定などである。この試験は日本およびケンブリッジの学生と共同で行った。ある程度の知見が得られた段階でケンブリッジ大に移動し、高圧透水試験装置を用いた微生物後化技術の出砂対策への適用性評価試験を行った。

高圧透水試験装置の全景を写真-2 に示す。試験では、無処理（微生物固化処理無）と、析出される炭酸カルシウム量を2段階に設定した計3ケースについて試験を行うこととした。固化処理後の通水試験期間中は定期的に土槽の状態を撮影するとともに、試験後は土槽の解体にあわせてサンプリングを行い、微生物機能による炭酸カルシウムの析出が目的とする砂層に集中的に析出しているか等の分析を行い提案技術の有効性を明らかにすることとした。



写真-2 高圧透水試験装置全景

4. 研究成果

(1)アリゾナ州立大学での試験結果

アリゾナ州立大学の手法を参考に豊浦砂に対して行った改良型 EICP 処理の配合一覧を表-1 に、一軸圧縮試験結果を図-2 にそれぞれ示す。

試験の結果から、アリゾナ州立大学と同じ配合 A では 1.5MPa 程度、強度促進効果を期待して新たに着目した材料を用いると 2MPa と従来技術よりもかなり高強度となることが明らかになった。尿素および塩化カルシウム量を減らした CASE B, C では強度の低下が認められることから強度発現の主体は炭酸カルシウムの結晶であり、助剤がその強度発現を促進する効果を有することが明らかとなった。次に結晶析出状況の比較結果を写真-3 に示す。

表-1 改良型 EICP 配合一覧

	A	A'	B	B'	C	C'
CaCl ₂ (g)	1.36		1.00		0.67	
Urea (g)	2.03		1.49		1.00	
Urease (g)	0.18					
New material (g)	0.24		0.24		0.24	
Skim milk (g)		0.24		0.24		0.24

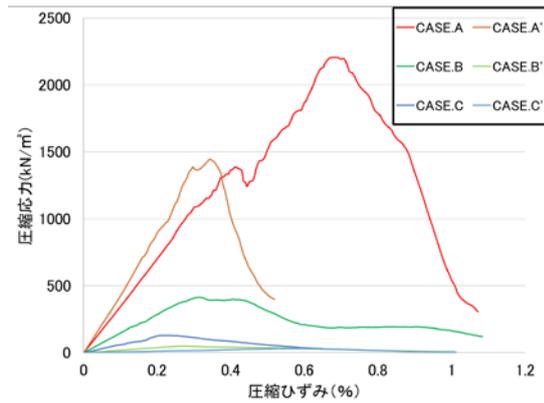


図-2 改良型 EICP 1 軸圧縮試験結果



写真-3 結晶析出状況比較結果

写真中の左が *Sporosarcina aquimarina* で右が *Sporosarcina pasteurii* となる。肉眼でも判別できる通り、*S.aquimarina* は *S.pasteurii* と比較して結晶サイズが大きくなる傾向が認められた。同じ溶液を用いて顕微鏡により詳細な結晶成長状況の比較も行っているが、滞在先との研究成果の取り扱いなどもありここでは省略させていただく。

(2) ケンブリッジ大学 Schofield Centre での試験結果

微生物固化処理後に行った通水試験前後の土槽表面撮影結果を写真-4 a), b) にそれぞれ示す。なお、試験ケースは標準的な濃度(0.3mol/Lの塩化カルシウムおよび尿素)の固化溶液を用いた場合を選定している。



a) 通水試験開始前

通水試験終了後

写真-4 通水試験前後の比較結果

写真の右側から左側に向かって段階的に流速を高めターゲットとしている砂層（図中央の黄土色）の流出状況の比較を行った。

別途実施した無処理（微生物固化処理無）の土槽ではターゲットとしている砂層の流出が確認されたが、微生物固化処理を行うことで部分的にはあるが抑制される傾向を確認することができた。

以上より、微生物固化処理を行うことでターゲットとする砂層内に優先的に炭酸カルシウムを析出させ、砂の流出を抑制する効果が明らかとなった。

その後の SEM による表面観察や熱分析による炭酸カルシウム析出状況の確認分析の結果からも、ターゲット層に優先的に炭酸カルシウムが析出する効果を確認することができた。

このアリゾナ州立大学およびケンブリッジ大学の滞在を通じ、アリゾナ州立大学の Leon van Paassen, ハワイ大学マノア校の Ningjun Jiang など微生物固化に取り組む多くの研究者との交流を深め新たな共同研究を始めることができた。

5. 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Toshiro HATA, Daisuke Suetsugu and Kiyonobu Kasama : A biomediated deterioration mitigation method for cement-treated soil, Environmental Geotechnics, 2018, <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00011>
- ② Toshiro HATA: A practical bio-based reversible permeability control for saturated sands, Environmental Geotechnics, 2018, <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00153>

[学会発表] (計 5 件)

- ① Yusui Murata and Toshiro HATA: Development of the modified EICP focused on the high strength under low calcite precipitation rate, GEOMATE2018 KL, 2018 November
- ② 岩田悠介, 梶俊郎, 米田純, 山本晃司: 微生物固化によるメタンハイドレートからのメタンガス回収支援手法の検討, 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会, 2019
- ③ 貫田圭佑, 梶俊郎, 米田純, 山本晃司: 日本海および太平洋海底地盤由来の原位置微生物を用いた固化処理土の強度特性比較に関する検討, 平成 30 年度土木学会中部支部研究発表会, 2019
- ④ 林祐斗, 梶俊郎: 減圧法による MH 生産時を想定した微生物固化による出砂対策としての有効性評価に関する検討, 平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会, 2018
- ⑤ 木谷龍平, 梶俊郎: 表層型メタンハイドレートの有無が微生物固化処理土の強度特性に与える影響に関する検討, 平成 29 年度土木学会中部支部研究発表会, 2018

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)

名称: 炭化水素回収方法および炭化水素回収システム

発明者: 山本晃司, 梶俊郎, 高橋裕里香

権利者: 山本晃司, 梶俊郎, 高橋裕里香

種類: 特許

番号: 特願 2017-128959

出願年: 2017

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 件)

[その他]

ホームページ等

<https://www.pu-toyama.ac.jp/EE/hatalab/index.htm>

6. 研究組織

研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名: Edward Kavazanjian, Jr.

ローマ字氏名: Edward Kavazanjian, Jr.

所属研究機関名: Arizona State University

部局名: Center for Bio-mediated and Bio-inspired Geotechnics

職名: Director

研究協力者氏名 : Stuart Haigh
ローマ字氏名 : Stuart Haigh
所属研究機関名 : University of Cambridge
部局名 : Schofield Centre
職名 : Senior Lecturer

[その他の研究協力者]

研究協力者氏名 : Leon van Paassen
ローマ字氏名 : Leon van Paassen
所属研究機関名 : Arizona State University
部局名 : School of Sustainable Engineering and the Built Environment (SSEBE)
職名 : Associate Professor

研究協力者氏名 : Ningjun Jiang
ローマ字氏名 : Ningjun Jiang
所属研究機関名 : University of Hawaii at Manoa
部局名 : Department of Civil and Environmental Engineering
職名 : Assistant Professor

※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。