

平成 30 年 6 月 20 日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289154

研究課題名(和文)生態系機能の活用により劣化抑制効果を付加した新しい地盤材料創出に関する研究

研究課題名(英文) Development of the deterioration mitigation methods based on the In-situ ecosystem

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) 8,800,000円

研究成果の概要(和文)：海水暴露環境下での劣化が危惧されているセメント改良土を対象とし、尿素および微生物を混合することで劣化時に溶出するカルシウムをセメント改良土内に再固定することで劣化を抑制する新しい地盤材料の提案を行った。  
砂質土および粘性土を対象とした室内試験の結果から、尿素と微生物を併用することにより海水暴露環境下でのセメント改良土の劣化抑制効果が期待できることと、提案手法により劣化抑制効果が期待できるセメント添加量および微生物由来の酵素活性を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：In this study, Authors proposed that the self deterioration mitigation functional cement treated soil was proposed based on the microbial functions. The advantage points of proposed methods are i) Urease producing bacterium from shallow and deep-sea sediments can support the deterioration mitigation techniques based on the In-situ calcite precipitation, ii) can applying the conventional construction machine such as deep mixing and jet grouting, iii) Proposed method can apply the sand and silt which can maintain the almost 20% reduction effect of deterioration depth

研究分野：地盤工学

キーワード：セメント改良土 劣化抑制 微生物機能

1. 研究開始当初の背景

我が国では、軟弱地盤の改良や建設発生土の有効利用を目的としてセメント安定処理工法が採用される事例が多い。このセメント安定処理工法は優れた遮水性と強固という特性を持つことから、建設廃棄物や産業廃棄物の処分場の遮水構造にも適用されている。

しかしながら、海水の浸入や周辺地盤からの暴露によりカルシウム分が溶出し、劣化が進行することが報告されている。このように劣化したセメント安定処理土(セメント改良土)が掘削・除去された場合、明確な利用基準や力学・溶出特性が明らかとなっていないため廃棄物として取り扱われているのが現状である。資源循環型社会の形成において、社会基盤施設の長寿命化や建設発生土のリサイクルに寄与する新しい技術が求められており、セメント安定処理土についても劣化抑制による長寿命化や、リサイクル可能とする支援技術を早急に開発する必要がある。

2. 研究の目的

セメント改良土の長期にわたる安定性確保においては、1)海水暴露環境下における砂質土・粘性土を対象とした劣化機構の解明、2)暴露環境が上記劣化機構に与える影響の解明、3)汎用性が高く、コスト面でも優れた対策技術の提案および各種試験による有効性評価、が求められる。

本研究では、3)に記した汎用性が高くコスト面でも優れたセメント改良土の劣化抑制技術として、原位置に既に生息している微生物の機能を活用する手法に着目した。具体的には、海水暴露環境下において溶出し劣化を進行させる要因と考えられるカルシウム分を、生物化学的反応を用いてセメント改良土内に再固定することで劣化を抑制する効果を期待している。

上記メカニズムの有効性評価および現場への適用性検討を目的とし、以下の4項目について検討することとした。

- 1)本研究で着目した機能を持つ微生物の実環境からの単離およびその能力評価
- 2)安全性が確認され、市場から入手可能な微生物を用いたセメント改良土内での生育可能性評価
- 3)温度条件がセメント改良土の劣化および微生物機能に基づく抑制効果に与える影響評価
- 4)各種土質(砂質土および粘性土)に対する提案技術の有効性評価

各項目に対する現状を以下に述べる。

1) について：

本研究で着目した尿素的加水分解酵素であるウレアーゼ産出能をもつ微生物は農地などにおいて緩効性窒素肥料として散布される尿素的分解を担う等、陸域においては広くその存在が知られているが、社会基盤整備分野において活用する事例についてはまだ多くの知見が得られているとは言えず、適用

が想定される場所でどの程度期待できるかについてはさらなる検討が必要と考えられる。

2) について

高 pH 条件となるセメント改良土内において、効果を期待している微生物がどの程度生存可能であり、劣化などにより水分が新たに供給された状況でどの程度増殖および期待している酵素活性を發揮できるかについて明らかにする必要がある。

3) について

温度条件が劣化進行速度や微生物の増殖に与える影響について検討した結果は多数報告されているものの、両者をくみあわせた場合にどのような影響がもたらされるかについては明らかになっていない。

4) について

既往の研究は主に粘性土を対象として劣化メカニズムや劣化進行速度について検討されたものが多く、各種土質(粘性土や砂質土)についての劣化および微生物機能による劣化抑制効果に関する検討は十分に行われていない。

3. 研究の方法

本課題で取り組んだ研究方法を2.研究の目的で示した研究項目ごとに示す。

1) 着目した機能を持つ微生物の実環境からの単離およびその能力評価

国内外の沿岸域および陸域において広く対象となる粘性土および砂質土のサンプリングを行い、各種培地を用いた培養および単離を行った。

単離後の微生物についてはウレアーゼ活性評価を行うとともに、アルカリ環境下での目的とする酵素生産能力および結晶析出力評価に関する室内試験を行った。

検討フローを図-1に示す。

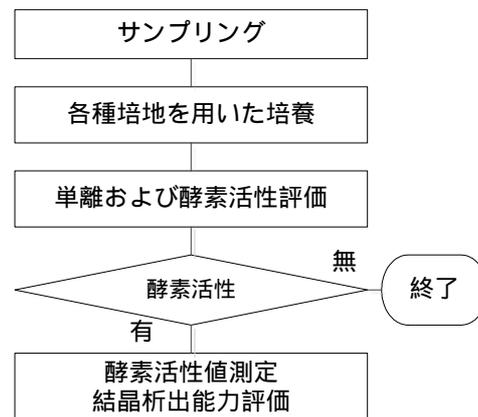


図-1 項目 1)の検討フロー

2) 安全性が確認され、市場から入手可能な微生物を用いたセメント改良土内での生育可能性評価

海域由来かつアルカリ環境下で炭酸カルシ

ウムの析出能力を持つことで知られる *Sporosarcina aquimarina* (JCM10887)を対象とし、砂質土を模した人工土中に栄養塩(尿素)とともに混合したセメント改良土を作成した。気中養生 28 日後に改良土の一部を用いた培養試験を実施し、培養液 1L あたりを対象とした酵素活性値(U/L)を求めてセメント改良土中での目的微生物の生長および提案するカルシウムイオンの再結晶化に寄与する可能性について評価を行った。

### 3) 温度条件がセメント改良土の劣化および微生物機能に基づく抑制効果に与える影響評価

試験の再現性などを考慮し、砂質土を模した人工土を対象とした提案技術に基づくセメント改良土を作成して温度条件および微生物機能による劣化抑制効果の有効性について検討した。検討フローを図-2 に示す。

人工海水に対する暴露温度は 20 と 30 の 2 ケースとし、暴露期間中はセメント改良土からのカルシウム溶出およびマグネシウム吸収量と針貫入試験に基づく劣化深さの測定を行った。

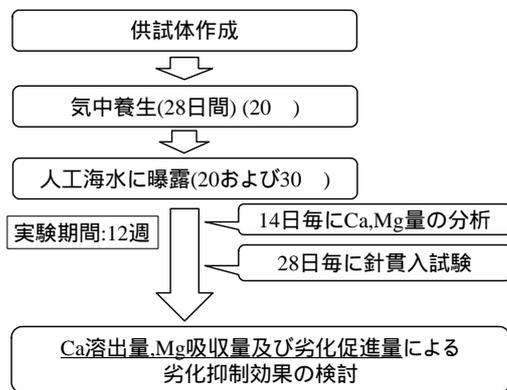


図-2 項目 3)の検討フロー

### 4) 各種土質(砂質土および粘性土)に対する提案技術の有効性評価

3)の検討結果を踏まえ、提案技術の粘性土に対する有効性を明らかにすることを目的とした検討を行った。対象の粘性土としては有明粘土を選定することとし、図-2 に示した検討フロー中の「人工海水暴露温度を 20 の 1 条件とする」、「実験期間を 12 週,24 週の 2 ケース」に変更して長期的な傾向についても知見を得ることを目的とした室内試験を実施した。

### 5)劣化および破壊後の供試体を対象とした早期復元技術についての検討(2017 年度追加事項)

上記 1)～4)の研究項目に取り組んでいく中で、有機性材料による接着効果に着目した新しい微生物固化処理手法に関する予備的な知見を得ることができたため、当技術の適

用性について追加で試験を行いその有効性を明らかにすることとした。具体的には、4)で作成した有明粘土供試体の一部について、1 軸圧縮試験により破壊したのちに破壊面に有機性材料を浸透させた。浸透後の供試体を所定期間養生し、再度 1 軸圧縮試験を行い破壊前後の強度から早期復元技術の有効性について検討した。

## 4. 研究成果

本検討課題の実施を通じて得られた研究成果を、3. に示した研究項目ごとにまとめる。

### 1) 着目した機能を持つ微生物の実環境からの単離およびその能力評価

陸域および海域の代表的なサンプリング地点を図-3 に示す。実際には国内 8 か所、海外 1 か所の計 9 地点にてサンプリングを行いウレアーゼ活性が陽性と判断された微生物について活性値の測定および結晶析出能力の評価を行った。

本項目の実施を通じて得られた知見としては、1)サンプリングを行った 9 地点すべてにおいてウレアーゼ活性陽性微生物が存在する、2)ウレアーゼ活性の値は数十～数百 U/L とかなりのばらつきがある、3)原位置微生物の中には微生物固化に関する研究で広く用いられている *Bacillus pateurii*(ATCC 11859)と同程度の酵素活性を示すものが存在する、4)尿素とカルシウムイオンが存在する条件では、析出率および析出速度に差があるものの、おおむね炭酸カルシウムの析出促進効果が期待できる、ことが明らかとなった。

なお、これら新規単離微生物を対象とした試験に加え、サンプル土壤に尿素および栄養塩類を与えて 1 か月程度静置ことにより土壤そのものの炭酸カルシウム析出能力が向上する傾向も確認された。単離・培養作業を伴わず栄養環境を整えるのみで目的とする微生物群を優先化させ効果が期待できることが明らかとなり、提案技術が広く実現場に応用可能であることを示唆する貴重な知見が得られたと考えている。



図-3 サンプリング地点(代表例)

2) 安全性が確認され、市場から入手可能な微生物を用いたセメント改良土内での生育可能性評価

海域由来でウレアーゼ活性を有するとともに、炭酸カルシウムの析出能力が報告されているバイオセーフティレベル(BSL 1)の微生物として選定した *S.aquimarina* (JCM10887) を用いたセメント改良土内での酵素活性維持能力評価試験の結果を表-1 に示す。本項目の実施により、高 pH 環境であるセメント改良土中においても尿素の加水分解酵素であるウレアーゼを生成する微生物が生息可能であるものの、その活性値は 1/5 程度に低下する傾向が認められた。別途行った検討結果から、間隙水中の尿素および塩化カルシウム濃度を 0.30mol/L と仮定した結晶析出試験において、初期状態の *S.aquimarina* はおおむね 3 日でほぼ 80% 以上のカルシウムイオンを結晶化する効果を有することが明らかとなっている。本研究課題では、セメント改良土中に浸透するマグネシウムイオンとのイオン交換により溶出するカルシウムイオンのセメント改良土中での再析出を想定しており、表-1 に示したウレアーゼ活性値においてもカルシウムイオンの再析出効果は十分に期待できると考えられる。

表-1 ウレアーゼ活性値の比較結果

	初期 (セメント改良土混合前)	混合後 (20 × 1 ヶ月気中養生後)
ウレアーゼ活性値(U/L)	110.08	22.02

3) 温度条件がセメント改良土の劣化および微生物機能に基づく抑制効果に与える影響評価

人工海水に暴露したセメント改良土からのカルシウムイオンの溶出およびマグネシウムイオンの吸着に関する養生温度の影響について検討した結果の一例を図-4 に示す。

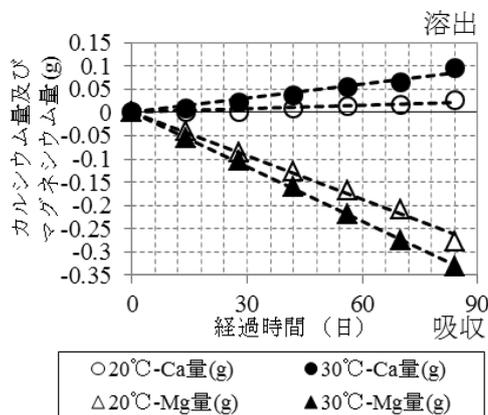


図-4 カルシウムおよびマグネシウムの収支

なお、本図は微生物機能を併用しない通常のセメント改良土に対して行った試験結果を示している。図より、温度条件が高いほどカルシウムの溶出およびマグネシウムの吸収が促進されることから養生温度が高いほど劣化が促進される可能性が示唆される結果となった。図-5 に示す針貫入試験による劣化深さの測定からも養生温度が高いほど劣化が進行する傾向が認められ、暴露温度と劣化進行速度には正の相関があることが明らかとなった。次に、標準微生物 (*S.aquimarina*) と陸域および海域由来で本研究課題において新たに単離した微生物を混合したセメント改良土からのカルシウム溶出量の比較を行った結果を図-6 に示す。なお、本実験は養生温度 30 °C の環境で実施している。

図より、通常のセメント改良土と比較して微生物を併用することによりセメント改良土からのカルシウム溶出量を低減させる効果が認められた。溶出したカルシウム量と劣化深さには正の相関が認められていることから、提案技術の適用によりセメント改良土の劣化抑制効果が期待できる結果となった。なお、微生物種により低減効果が異なっているが、これは各微生物が持つ耐アルカリ、耐塩性およびウレアーゼ活性値が関与しているものと推察され、今後遺伝子解析などを通じて原因を明らかにしていく必要がある。

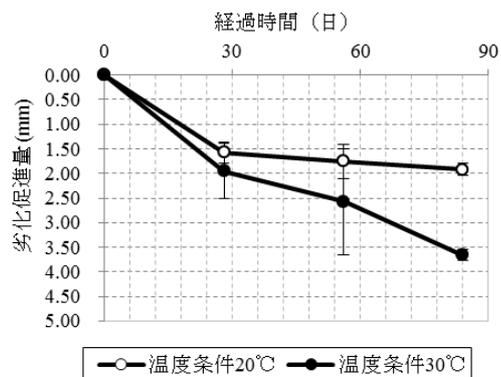


図-5 養生温度および暴露日数が劣化深さに与える影響 (砂質土)

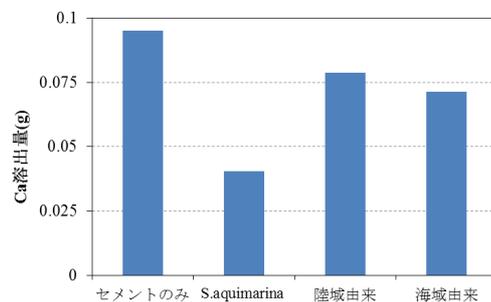


図-6 微生物種とセメント改良からのカルシウム溶出量の関係

#### 4) 各種土質（砂質土および粘性土）に対する提案技術の有効性評価

3)の検討課題実施を通じて得られた知見をもとに有明粘土に対して提案技術を適用した室内試験を実施した。結果の一例として長期養生試験期間中における微生物種と劣化深さの関係を図-7 に示す。海域由来の *S.aruimarina* は実施期間を通じて通常のセメント改良土よりも少ない劣化深さを示した。

陸域由来で高い酵素活性を持つ *S.pasteurii* については、途中一時的に高い劣化深さを示すものの、長期的にはもっとも劣化を抑制する効果が認められた。いずれのプロットも3供試体について行った試験結果の平均値であることから、*S.pasteurii* については溶出・再結晶いずれかが卓越する条件が暴露期間内に存在するものの、長期的には劣化を抑制する効果が期待できると考えている。

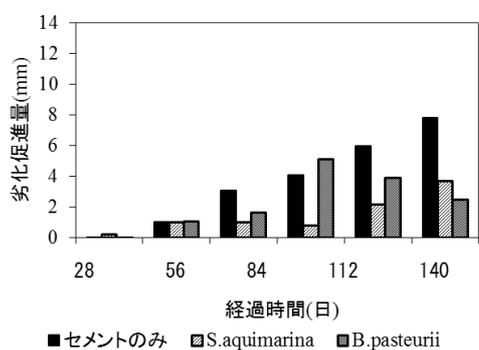


図-7 暴露日数と劣化深さの関係  
(粘性土)

#### 5)劣化および破壊後の供試体を対象とした早期復元技術についての検討(2017年度追加事項)

1)から4)に述べた検討課題を進める中で得られた有機性材料による接着技術を用いたセメント改良土の早期復元技術(ここでは1軸圧縮強度に着目)の有効性について、4)で用いた有明粘土を対象とした供試体を用いて行った試験結果を図-8 に示す。なお、case1 は標準濃度で1回処理を行った結果、case2 は標準濃度で2回処理を行った結果、case3 は2倍濃度で1回処理を行った結果をそれぞれ示している。いずれのケースにおいても注入後に数日養生することで初期強度程度までの強度復元効果が認められており、新しい天然材料と微生物機能の組み合わせによる社会基盤施設の維持管理・早期復旧技術としての発展が期待できる結果となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

R. Ito, T. Hata: A study on ground

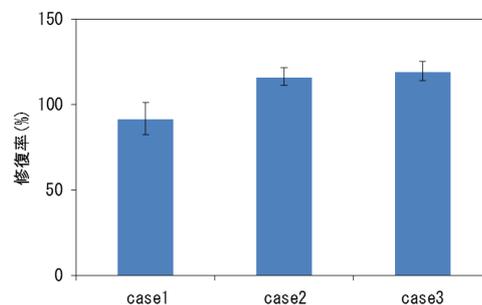


図-8 早期復元技術試験結果(粘性土)

improvement technique with in-situ microorganisms isolated from Japan. International Journal of GEOMATE, Vol.12,Issue32,pp.70-75,2017(査読有)

K.Mihara, T. Hata: A study of restraint techniques for cement treated soil's deterioration by microbial functions, International Journal of GEOMATE, Vol.12,Issue32,pp.88-93,2017(査読有)

皇俊郎, 高橋裕里香, 西田洋巳, 安田尚登: 日本近海のメタンハイドレート胚胎層から単離した微生物を用いた土の強度増進効果に関する実験的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.12, No.1, pp.151-160, 2017 (査読有)

三原一輝, 末次大輔, 笠間清伸, 皇俊郎: 微生物機能を活用したセメント改良土の劣化抑制技術に関する検討, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72, No.2, pp.414-419, 2016(査読有)

皇俊郎, 阿部廣史: 海底地盤の液状化対策としての微生物固化技術の有効性評価, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.72, No.2, pp.354-358, 2016(査読有)

T.Hata, K.Kaneda and T.Tanikawa: New microbial-function-based reinforcement method for embankment, International Journal of GEOMATE, Vol.10, No.21, pp.1834-1841, 2016(査読有)

皇俊郎, 佐藤厚子: 泥炭を対象とした地盤改良における酵素法の適用性評価, 材料, Vol.65, No.1, pp.80-83, 2016. (査読有)

[学会発表](計18件)

村田湧水, 皇俊郎: 大阪湾底泥を対象とした表層固化技術による巻きあがり抑制の検討, 平成29年度土木学会中部支部研究発表会(名古屋大学, 愛知), 2018.03.02.

澤田椿, 皇俊郎: 微生物機能を利用したセメント改良土の劣化抑制技術の検討, 平成29年度土木学会中部支部研究発表会(名古屋大学, 愛知), 2018.03.02.

松林達也, 皇俊郎, 中野晶子: 尿素分解菌と脱窒菌を組合せた微生物固化について, 第52回地盤工学研究発表会(名古屋

国際会議場, 愛知), 2017.07.12-15.  
伊藤留寿都, 皇俊郎: 微生物固化において析出する炭酸カルシウム結晶の特性に関する研究, 第 52 回地盤工学研究発表会 (名古屋国際会議場, 愛知), 2017.07.12-15.  
三原一輝, 皇俊郎: 砂質土及び粘性土を対象としたセメント改良土の劣化抑制技術の検討, 第 52 回地盤工学研究発表会 (名古屋国際会議場, 愛知), 2017.07.12-15.  
三原一輝, 皇俊郎: 原位置微生物を用いたセメント改良土の劣化抑制技術の検討, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会(金沢大学, 石川), 2017.03.03.  
伊藤留寿都, 皇俊郎: 微生物固化における供試体内の溶存酸素量の変化に関する研究, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会(金沢大学, 石川), 2017.03.03.  
大野紘輝, 皇俊郎: 各種微生物を用いた模擬堆積物の固化処理に伴う粒度および強度特性の変化に関する検討, 平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会(金沢大学, 石川), 2017.03.03.  
T.Hata,K.Kaneda: New mitigation techniques for prevention of soil liquefaction by using microbial functions, 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Seoul)(国際学会)  
伊藤留寿都, 皇俊郎: 富山県射水市由来の微生物を用いた地盤改良技術に関する研究, 平成 28 年度土木学会全国大会(東北大学, 宮城), 2016.09.07-09.  
三原一輝, 皇俊郎: *Bacillus pasteurii* を用いたセメント改良土の海水環境下における劣化抑制技術, 平成 28 年度土木学会全国大会(東北大学, 宮城), 2016.09.07-09.  
三原一輝, 皇俊郎: 微生物機能を用いたセメント改良土の海水環境下での劣化抑制技術, 平成 27 年度土木学会中部支部研究発表会 (豊田工業高等専門学校, 愛知), 2016.03.04.  
三原一輝, 皇俊郎: セメント改良土の微生物併用による劣化抑制に関する室内実験, 第 50 回地盤工学研究発表会 (北海道科学技術大学, 北海道), 2015.09.1-4.  
皇俊郎, 谷川友浩, 甲村雄一, 金田一広: セメント系地盤改良における尿素および微生物の併用効果に関する検討, 第 50 回地盤工学研究発表会 (北海道科学技術大学, 北海道), 2015.09.1-4.  
寺西健太, 皇俊郎: セメント固化処理土の劣化抑制技術に関する研究, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会 (豊橋技術科学大学, 愛知), 2015.03.06.

井上雄太, 皇俊郎: 微生物固化処理土の力学特性に関する研究, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会 (豊橋技術科学大学, 愛知), 2015.03.06.

伊藤留寿都, 皇俊郎: 微生物固化における固化溶液濃度が液状化強度へ与える影響について, 平成 26 年度土木学会中部支部研究発表会(豊橋技術科学大学, 愛知), 2015.03.06.

皇俊郎, 畠山正則, 阿部廣史: 微生物固化処理土を対象とした液状化強度改善効果に関する検討, 第 49 回地盤工学研究発表会 (北九州国際会議場他, 福岡), 2014.07.15-17.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 地盤改良用組成物, 地盤改良体, 地盤改良方法および地盤修復方法  
発明者: 甲村雄一, 谷川友浩, 金田一広, 皇俊郎, 水谷崇亮  
権利者: 株式会社 竹中工務店, 公立大学法人 富山県立大学, 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所  
種類: 特許  
番号: 特願 2014-133047  
出願年月日: 2014.06.27  
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/hatalab/index.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

皇 俊郎 (Hata Toshiro)  
富山県立大学・工学部・教授  
研究者番号: 30435424

### (2) 研究分担者

笠間 清伸 (Kasama Kiyonobu)  
九州大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号: 10315111

末次 大輔 (Suetsugu Daisuke)  
佐賀大学・理工学部・准教授  
研究者番号: 30423619