

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：12614

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04595

研究課題名(和文) 微生物機能を用いたコンクリート材の耐久性向上への挑戦

研究課題名(英文) The challenge of using microbial functions to improve the durability of concrete materials

研究代表者

牧田 寛子 (Makita, Hiroko)

東京海洋大学・学術研究院・准教授

研究者番号：40553219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、微生物機能が海洋環境中でのコンクリート材への耐久性向上に有効であるかについて、その場の微生物活動を活発にするために有機物を添加した試験体を用いて、室内および実際の海洋環境下での暴露・浸漬実験により明らかにすることを目的とした。研究期間内に、試験体を低温海水水槽および実際の海洋環境に設置し、それら試験体の物理化学的変化を明らかにするとともに、それぞれの試験体に繁茂した微生物叢を確認した。その結果、試験体(によって形成された環境)に好んで生育する微生物種を特定し、試験体への有機物添加の効果と微生物機能の有効性を示唆する知見を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、海洋環境の有効利用のために海底へのインフラ構築が検討されている。しかしながら、コンクリートなどのインフラ材料の海底(特に200m以深の深海環境)での挙動は、未だ未解明な点が多く、コンクリート材を海底で使用した際の生物学的影響については貝類や魚類などの大型生物などを対象とした僅かな情報しか得られていなかった。本研究は、海底でのコンクリート材の物理化学的挙動や生物学的な影響といった海底でのインフラ構築のために重要な基盤的かつ初となる知見を提供するものであり、その学術的および社会的意義は高いと言える。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to investigate the effectiveness of microbial functions in improving the durability of concrete materials in marine environments by means of exposure and immersion experiments in lab. and actual marine environments using test specimens to which organic matter was added to stimulate in-situ microbial activity. During the study period, the specimens were placed in a cold seawater tank and in marine environment to determine the physico-chemical changes in the specimens and to identify the microbial community that flourished in each specimen. As a result, this study was able to identify the microbial species that prefer to grow in the specimens, to show that the addition of organic matter to the specimens promotes the growth of specific microorganisms, and that the function of the microorganisms that prefer the specimens on the seafloor may be effective in controlling degradation.

研究分野：微生物生態学、地球化学、生物学、船舶海洋工学

キーワード：セメント系材料 コンクリート 海洋環境 微生物機能 劣化

## 1. 研究開始当初の背景

油田、メタンハイドレードや金属鉱床といった海底資源の回収・有効活用は、エネルギー政策において極めて重要な課題である。海底からの回収手段として、海底油田の開発に用いられるような洋上プラットフォームを建設することが検討されており、その基礎部材として使用されるコンクリート材の深海底での長期間の耐久性が求められている。橋梁や岸壁を含む建造物の基礎であるコンクリート材の劣化に伴う経済損失は、世界的に莫大な規模であり、コンクリート材の耐久性の向上は世界経済の持続的発展に向け喫緊の重要課題である。またコンクリート材の耐久性向上は、資源の確保やその加工に伴うエネルギー消費 (CO<sub>2</sub>) の削減に直結するため、環境面でも非常に重要である。

コンクリート材の劣化で最初に起こるのは、微細な亀裂 (マイクロクラック) である。これらは温湿度などの環境の変化による建材の伸縮やコンクリート自体の硬化に伴う収縮によって発生するため、防ぐことが難しい。マイクロクラックは時間が経つにつれて拡大し、建造物の倒壊に繋がる危険性も含んでいる。このようなマイクロクラックを速やかに修復することは非常に重要であるが、海底の場合はそれらの対処を迅速に行うことは困難である。

一方、「コンクリートの自己治癒 (自己修復作用)」が検討されている。コンクリートの自己治癒は古くから研究されてきたが、そのほとんどは、無機材料を扱ったものであった。近年、微生物機能を活用することがオランダの微生物学者ユンカースによって見出されたが、現在までの研究において、それらの全ては陸域環境を対象としており、海底 (特に深海環境) 中での検討はなされていない。さらに、コンクリート材の海底における生物学的影響や物理化学的挙動についてさえも未解明であった。

## 2. 研究の目的

本研究は、微生物機能が海洋環境中でのコンクリート材への耐久性向上に有効であるかについて、その場の微生物活動を活発にするために有機物を添加した試験体を用いて、室内および実際の海洋環境下での暴露・浸漬実験により明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

海洋環境、特に深海環境でのコンクリート材の物理化学的变化と、コンクリート材の存在によって構築される微生物生態系を調査した。具体的には、微生物の活動をより活発にするために、有機物を加えた試験体を作製し、それらを実環境 (水深約 3500m) および実験室内に設置した低温・暗環境の海水水槽に一定期間暴露・浸漬した。試験体を回収後、浸漬前後での試験体の物理化学的变化を電子顕微鏡観察、X 線 CT、そして X 線回折 (XRD) 分析や蛍光 X 線 (XRF) などにより調査した。また、そこに繁茂した微生物叢を 16S rRNA によるアンプリコン解析にて明らかにした。

## 4. 研究成果

微生物は地球環境のあらゆる場所に存在する。人間が住めないような極端な環境も、一部の微生物にとっては理想的な環境である。深海のような低温・高圧・暗黒の環境や、コンクリート内部の極めて高い pH 環境でも、一部の微生物は生息・増殖することができる。これらの微生物は、海底に露出しているコンクリート構造体にプラス (治癒や補強) またはマイナス (劣化等) の影響を与える可能性がある。

本研究では、深海に生息する微生物の能力により、海洋暴露により損傷したコンクリートのその場でのプラスの効果を期待した。そこでまずは、現場でコンクリート材に繁殖する微生物を調べるために、低温の自然海水条件下で、試験体への微生物の優先的な増殖と、有機物を含むコンクリート材の化学的特性の変化を測定した。

海底の条件での微生物活動を実験室規模でシミュレートするために、新鮮な海水を掛け流しできる低温海水水槽を作成した。水槽には、冷却装置、水中ポンプ、温度計付き pH メーターを設置した。海底の環境を想定して、水槽に供給する海水の量を調整することで海水の温度を 4°C に保つようにした。低温条件では微生物の活動が低下するため、有機物源として酵母エキス (YE) をセメントに添加し、微生物の活動を高めることを試みた。

水槽を用いた浸漬試験では、1 ヶ月毎に試験片を回収し、また実環境に設置した試験体は 1 年毎に回収した。それぞれ回収した試験体から析出した水和物の変化や化学組成を、XRD 分析と XRF 分析で求めた。微生物群は、試料から DNA を抽出し、16S rRNA 遺伝子の V4 領域に基づいて分子系統解析を行うことで同定した。また、比較のために海水中の微生物も同様に解析した。

暴露・浸漬後の試験体は、有機物の添加の有無に関わらず水セメント比によって表面の劣化が異なっており、いくつかの試料は泥化が顕著であった。マイクロフォーカス X 線 CT にて内部の状況を確認すると、表面部分での密度の低下がそれぞれ観察され、それらの密度低下の状況は目視での観察結果と整合した結果となった。水槽の試験体に関しても、有機物の有無に関係なく実環境と同様に水セメント比の違いによって表面の劣化状況が異なっていた。水和物の変化については、浸漬時間が長くなるにつれ、エトリンガイト等の生成が確認され、これらの水和物の生成により劣化が促進したと考えられる。これらの化学反応の速度は、低温・一定の海水置換条件下で加速される可能性がある。

16S rRNA 遺伝子による微生物群集解析の結果は、試験体と周辺海水との間で検出された微生物群集構造は決定的に異なっており、試験体に優占的に検出された微生物群は海中にはほとんど存在しなかった。これらの微生物は、セメント存在下の環境で良好に生息していると考えられる。その中には、炭酸塩形成菌として知られている微生物も確認され、これらの炭酸塩形成細菌の代謝活動は、硬化したセメントの微細構造を緻密化し、セメント系材料の耐久性を向上させる可能性がある。有機物を添加していない浸漬期間 3 ヶ月の試験体において検出された微生物群が、有機物を添加した試験体では 1 ヶ月間後に検出された。この結果は、有機物が特定の微生物の形成を促進することを示していると考えられる。また、硫黄の酸化や硫酸塩の還元代謝によってコンクリートの劣化に関与するとされている既知の硫黄利用微生物が、海水中には検出されたものの、試験体からは検出されなかった。

以上の結果から、本研究では、海底でのコンクリート材の物理化学的挙動を明らかにするとともに、コンクリート材によって形成された環境に好む微生物群を特定し、試験体への有機物添加による効果や微生物機能によるコンクリート材の耐久性向上への可能性を示唆する知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mari Kobayashi、Keisuke Takahashi、Toshiro Yamanaka、Hiroko Makita	4. 巻 72
2. 論文標題 CHANGES IN PHYSICAL PROPERTIES AND HYDRATES OF CEMENT-BASED MORTARS ON THE DEEP SEA FLOOR	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Cement Science and Concrete Technology	6. 最初と最後の頁 247 ~ 254
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14250/cement.72.247	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9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 三木良太郎、三平将貴、毛利諒子、坂本貴大、高橋恵輔、小林真理、杉村誠、高村岳樹、高井研、牧田寛子
2. 発表標題 海洋環境中のコンクリートに繁茂する微生物の解明
3. 学会等名 極限環境生物学会2019年度（第20回）年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 三平将貴、三木良太郎、毛利諒子、坂本貴大、高橋恵輔、小林真理、杉村誠、高村岳樹、高井研、牧田寛子
2. 発表標題 低温海水に浸漬したコンクリートの微生物叢解析
3. 学会等名 第56 回好塩微生物研究会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Takahashi, Mari Kobayashi, Toshiro Yamanaka, Hiroko Makita
2. 発表標題 Physicochemical properties and durability of cement-based materials on the deep sea floor
3. 学会等名 15th International Congress on the Chemistry of Cement（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林真理、高橋恵輔、山中寿朗、牧田寛子
2. 発表標題 深海底におけるセメントモルタルの物理的特性と水和物の変化
3. 学会等名 第73回セメント技術大会：第47回(2019年度)セメント協会論文賞受賞記念講演（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林真理、高橋恵輔、山中寿朗、牧田寛子
2. 発表標題 深海底に長期暴露したセメントモルタルの力学特性と水和物の変化
3. 学会等名 第72回セメント技術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林真理、高橋恵輔、川端雄一郎、山中寿朗、牧田寛子、岩波光保
2. 発表標題 深海底に長期暴露したセメント系材料の劣化挙動
3. 学会等名 ブルーアースサイエンス・テク2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川端雄一郎、高橋恵輔、野村瞬、牧田寛子
2. 発表標題 深海底3,515mに約1年間暴露したモルタルに生じた劣化・損傷の評価
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋恵輔、小林真理、川端雄一郎、牧田寛子
2. 発表標題 セメントペースト硬化体の深海域での劣化 - 海水温の影響
3. 学会等名 第74回セメント技術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroko Makita, Keisuke Takahashi, Mari Kobayashi, Makoto Sugimura
2. 発表標題 Microorganisms inhabiting concrete in the marine environment
3. 学会等名 Resilient Materials 4 Life 2020 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年～2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京海洋大学 News&amp;Topics NEWS (令和元(平成31)年度)  <a href="https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/news/201906111014.html">https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/news/201906111014.html</a></p> <p>東京海洋大学 News&amp;Topics NEWS (令和3年度)  <a href="https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/news/202103261101.html">https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/news/202103261101.html</a>  <a href="https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/img/26ae7afc2a26339bbb601b5e15cb8f93.pdf">https://www.kaiyodai.ac.jp/topics/img/26ae7afc2a26339bbb601b5e15cb8f93.pdf</a>  <a href="https://www.kaiyodai.ac.jp/english/topics/img/20210326_Research%20Group%20Initiates%20First-Ever%20In-Situ%20Measurement%20of%20Mechanical%20Properties%20of%20Hardened%20Cement%20Mortar%20in%20Deep%20Sea.pdf">https://www.kaiyodai.ac.jp/english/topics/img/20210326_Research%20Group%20Initiates%20First-Ever%20In-Situ%20Measurement%20of%20Mechanical%20Properties%20of%20Hardened%20Cement%20Mortar%20in%20Deep%20Sea.pdf</a></p>
---

#### 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
研究協力者	高橋 恵輔  (Takahashi Keisuke)	宇部興産株式会社・建設資材カンパニー技術開発研究所セメント開発部・主席研究員	

#### 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1件

国際研究集会 海洋環境で活性化し環境に負荷をかけないコンクリート構造物の開発	開催年 2018年～2020年
---	--------------------

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			
ドイツ	TU Bergakademie Freiberg			