

令和 5 年 6 月 29 日現在

機関番号：51601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05202

研究課題名（和文）廃棄物埋立処分施設の耐用期間を画的に延長する微生物代謝カルサイト晶析の促進法

研究課題名（英文）Acceleration method of microbially induced calcite precipitation for prolonging service life of landfill site facilities

研究代表者

車田 研一（Kurumada, Kenichi）

福島工業高等専門学校・化学・バイオ工学科・教授

研究者番号：80273473

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：過剰被溶解カルシウムイオン不溶塩化に微生物代謝由来炭酸塩晶析が有効なことが示された。この炭酸塩晶析は土壌粒子結着を促進し地盤強化に有効である。炭酸塩の晶析にはウレアーゼ活性型微生物が要る。ラボではウレアーゼ活性型微生物の購入が標準的だが大規模野外試験での購入微生物の使用には二つの問題がある。まず大規模実験での高価微生物の使用が難しい。更に野外自然環境での他微生物の自生のため人為撒布された微生物が選択的にウレアーゼ活性を発現する保証がない。そこで一般的自然環境中の遍在微生物を対象に炭酸塩晶析に効果発現する低リスク型菌株を選択的に増殖させた。最終的に完全自然状態砂の炭酸塩晶析安定固化法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

輸入等に依存する炭酸塩発生能具有型外来種導入ではなく自生種の利用方法を見い出し、微生物代謝由来の不溶性安定炭酸塩の晶析の応用可能性を拡大した。手法根幹は有用ウレアーゼ活性型細菌群を分率増大させるバイオマス材の介在に拠る二酸化炭素発生の人為的誘発にある。上記ウレアーゼ活性促進に遍在バイオマス類が活用可能である。廃バイオマス植物枯死体をウレアーゼ活性のブースター菌源として試用し系中細菌群の遺伝子解析を実施したところバイオセーフティ上の問題はなかった。それら細菌は全て遍在種であり、かつ適切な条件下において最も優れた炭酸塩晶析誘引能があるパステウリと比較して遜色がない誘引能を具える安全種群だった。

研究成果の概要（英文）：Microbially induced carbonate precipitation was shown effective for converting dissolved calcium ion to insoluble carbonate, which could be applied to enhancing the mechanical strength of soil due to the formation of the inter-particle bridging. Urease-active microbes are indispensable for generating carbon dioxide which resulting in the crystallization of the insoluble carbonate. Although in-lab experiments normally use purchased urease-active microbes, large-scale field tests never allows us to adopt them due to the expensive price of them and lack of the evidence that artificially induced microbes selectively contribute to the carbonate crystallization. To avoid the ambiguity of the efficacy of the artificially introduced microbes for forming the carbonate, high-biosafety microbes were propagated at by supplying dilute urea aqueous solution in advance. The preliminary propagation of the urease-active microbes from conglomerates of indigenous microbes in common natural environment.

研究分野：化学工学，工業単位操作

キーワード：不溶性炭酸塩晶析 微生物代謝起因 ウレアーゼ活性 一般自然環境自生型 野外環境 増殖ブースター バイオマス素材 選択的増殖工程

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

産業廃棄物などの埋立処分施設は巨大なため、その用地の確保は常に困難である。それゆえ、その使用可能期間の延長は社会的負担や自然環境への負荷の低減につながり、結果的に人類社会の持続性にも寄与できるひとつの方向性であるといえる。むしろ、上記の処分施設の使用可能期間に有意に影響するファクターは様々ある。そのなかでも、処分場から排出される、主として雨水由来の廃水を継続的に管理および処理する機能（機械設備系等・貯留設備系統）の長寿命化は、埋立処分施設にまつわる負荷の低減のための有効な方策のひとつである。少なくとも現在日本国内では上記の廃水が有害性の高い化学物質を含むために問題が発生する汚染公害的なケースはほとんどなく、むしろ、ごく普遍的なアルカリ土類金属イオンなどを1立方メートルあたり数キログラムほども溶解させている、等の、いわば「量的」な異常さが問題になることが多い。このような遍在種の制禦不可能な析出は、場合により有益にも有害にも作用しうる。

上記の析出は、多くの場合、遍在するアルカリ土類金属の不溶性炭酸塩の生成に起因している。炭酸塩の生成に必要な二酸化炭素は、環境中に遍在する微生物（バクテリア）の代謝活動により発生することがほとんどであり、この微生物代謝活動起因の炭酸塩の晶析現象を microbially induced carbonate precipitation という。あるいは、この炭酸塩は実質的には炭酸カルシウムの最安定晶である方解石（カルサイト、calcite）であるため、microbially induced calcite precipitation ともいわれる。また、いずれの場合も、MICP と略される。

本研究の当初の〈背景〉においては、MICP の生起をできるだけ抑制することが重要視されていた。しかし、MICP の過程自体は自然現象であり、抑制よりもむしろその人為的な調整により on-off 操作が可能になることがのぞましいことがわかってきた。そこで、研究の進行とともに、いかに容易な人為的操作により MICP を制禦された様式で発現できるかが中心的な研究課題として顕在化してきた。

MICP 現象を人為的に誘引したときに生じるカルサイト晶起因の固化作用や流動性遮断作用の地盤強化などへの応用は今世紀初頭より研究されており、その発生条件や実際の固化様態が報告されている。MICP の研究は通常ラボスケール実験でおこなわれることが多く、その場合は作用しているバクテリアの種類や株があるていど特定されていることが前提となっている。この特定性は研究結果の解釈や見通しをよくしているが、反面、実際にフィールドで発生する MICP の状況を反映しているわけではない。これは、野外環境には多くの種類の微生物が生息しており、そのなかのある特定の種や株だけが圧倒的な支配性をもって増殖するというわけではないからである。また、ラボ研究において有効な特性が認められるバクテリアを大量に増殖しフィールドへ撒布して使用することはコストはいうに及ばず外来種の移入という面で難しい問題を残す。そこで本研究においては、埋立処分地のような雑多な種類の物品が廃棄され様々な種類のバクテリアが生息する環境においても、我々の身の周りの自然環境に遍在する MICP 有効バクテリアがある程度の選択性や支配性をもって増殖し、有為な MICP 現象をもたらす条件を見出すための試行錯誤をおこなった。（そのうち3事例を報告する。）

2. 研究の目的(A)

〈研究①〉一般的な環境水からのカルサイト晶析有効菌種の実用的な粗分離方法の開発

【背景】ウレアーゼ活性を具えたバクテリア種はその周囲にある尿素を好気性条件下で加水分解し、生成物の二酸化炭素をその表面から放出する。その環境中にカルシウムイオンがある場合、結果として炭酸カルシウムの最安定晶であるカルサイトが析出する。この一連の作用には MICP（microbially induced calcite / carbonate precipitation）という名称が付されており、その化学的な過程そのものはごく単純なため、よく知られている。MICP により生成するカルサイトはごく安定な化合物で、これが構造物にできたひびやヴォイド内で固体として析出することに因る強度の増加や水などの浸透速度の縮小が優位に認められることが多いため、MICP を人為的に制御された様態で誘引することが MICP の実装化での最大の課題である。MICP 自体は自然界において決して稀な現象ではないが、ウレアーゼ活性がその代謝作用として優越的なバクテリア種が当該のスポットで優勢に増殖することは、MICP の人工的な誘引と制御の第一条件である。MICP を最も顕著に発現させるバクテリア種としては、低リスク性グラム陽性菌である *Sporsarcina pasteurii* がひろく知られている。このため、ラボスケールの MICP の応用研究では、ほとんどの場合は *Sporsarcina pasteurii* が使用されている。この菌株は現状では日本国内自生菌とは認定されていない。そのため、米国やドイツなどの菌バンクから輸入する必要がある。さらに、MICP 誘引を実装的に試みる屋外・野外の大規模なスケールの現場の土壌中などで、ある特定の菌株のみを選択的に増殖させることはほぼ不可能である。また、国内自生菌とは認定されていない菌株を野外で大量に注入するような菌株の使用は環境保全と実施コストの両面から著しく制限される。また、従来のベンチスケールもしくは大規模な人工的 MICP 誘引実験でも、*Sporsarcina pasteurii* が有効菌株として実験用の砂の層へ注入されている[1]。だが、この菌株だけの選択的増殖を期待できない実装を想定した場合、上記の菌株の大規模注入に代わる手法を考案する必要がある。ここでは、MICP がごく一般的な自然環境でも発生するという事実に着目し、一般的な河川水から MICP を発現する有効な菌株を粗分離する手法を探索し、また、その結果としてウレアーゼ活性種を分離できることをクリステンセン尿素培地呈色法および遺伝子解析により確認した。

3. 研究の方法(A)

【方法】<実験 (河川水と、ウレアーゼ活性型バクテリア種の選択的増殖のための処理)> 近隣の二級河川(滑津川, いわき市平)の水を2021年の夏季に採取した。この河川水1Lに100gの養分含有ゲル片を浸漬し、25°Cで2週間静置した(養分含有ゲル作製組成: 全量100g, 乾燥寒天2wt%, 乾燥酵母エキス0.1wt%, 尿素3wt%)。

<実験 (ウレアーゼ活性検出試験)> 上記の水を寒天培地(標準寒天培地およびクリステンセン尿素培地)表面へ塗抹し、好気性条件下、30°Cで72時間培養した。コロニー形成を目視確認後、目視によりブルーピングを実施した。ウレアーゼ活性の有無はクリステンセン尿素培地上の呈色により確認した。

<実験 (遺伝子解析によるバクテリア種の推測)> 16S rRNA 遺伝子の部分塩基配列(500配列)解析結果から帰属類群を推定をおこなった(標準寒天培地上, 好気性条件, 30°C, 21日間, BLAST 同源性検索)。



4. 研究成果(A)【結果, 考察】(i) 顕著なウレアーゼ活性を有するバクテリア種の生息が確認された(Fig. 1)。一般的な河川水中に生息する自生バクテリアの増殖によるウレアーゼ活性(MICP有効性)を確認できた。

◇ Fig. 1 Result of Christensen urease test. (The right magenta sample contains ammonia generated from hydrolyzed urea.)

(ii) 16S rRNA 遺伝子の代表500配列が、最も代表的とされるMICP有効菌株の既知・既登録(DDBJ/ENA/EMBL)/GenBank)の塩基配列と完全に一致した。一般的な国内の河川水中にも顕著なMICP作用を発現するバクテリアが生息していることが示唆される。

【参考文献】[1] M. K. Nassar, D. Gurung, M. Bastani, T. R. Ginn, B. Shafei, M. G. Gomez, C. M. R. Graddy, D. C. Nelson, J. T. DeJong “Large-Scale Experiments in Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP): Reactive Transport Model Development and Prediction” Water Resources Research, 2018, Vol. 54, pp. 480-500.等

2. 研究の目的(B)

<研究②> 微生物起因カルサイト晶析に際しての特定菌株使用回避

【背景】MICP (microbiologically induced calcium/carbonate precipitation) という自然発生過程自体は既に広く知られており、コンクリート構造物の補修に際してのセメントの大量消費を回避するための亀裂内での安定固体相発生等への応用は始まっている(https://basiliskconcrete.com/hoe-werker-t-het/等)。MICP過程を誘引する微生物は一般にウレアーゼ活性を具えたバクテリアで、これまでに様々な菌株が見い出されている(R. Kawasaki, Journal of MMIJ, 131, 155-163(2015)等)。そのなかでも *Sporosarcina pasteurii* は安定にMICPを誘引し、なおかつアンモニア自毒作用への耐性が高いため、MICPの応用研究では不可欠な菌株とされている。(実際にこれをフィールドテストで試用している例もある。(H. Menga, Y. Gaob, J. Heb, Y. Qia, L. Hang, Geoderma, 383, 114723(2021)))しかし、実際の自然環境には多種の菌株群が生息しており、外から人為的にもちこまれた株を選択的に増殖させるのは困難である。さらに、*Sporosarcina pasteurii* は日本国内の自然自生株とは認証されておらず、ラボ外での大量使用のハードルが高い。しかし、尿素的加水分解作用は国内のどこの土壌も具えていることから、ありふれた環境にもウレアーゼ活性型のMICP有効菌株は必ず生息しているはずである。そこで、それらを可能なかぎり容易かつ廉価に増殖させる方法が確立できれば、特定の菌株を購入したうえで増殖させ、そののちに土中へ注入・散布する必要はなくなる。そこで、代表的な一般環境水として、身近な河川の水、および、港湾の海洋水を採取し、それらに一般的な培養用の栄養分を尿素とともに徐放により供給した際に自然に増殖する菌株群のウレアーゼ活性の有無を、標準培地およびChristensen尿素培地下で検証した。後者の条件は、採取された菌株に顕著なウレアーゼ活性が具わっていた場合、ある程度の閉鎖環境においても自らが発するアンモニアによる自毒死滅に耐える株であるか否かを検証することを目的としている。さらに、ウレアーゼ活性が確認された菌株を支配的に含む一般環境水を原料水として用い、標準的な貧栄養性のシリカサンド層中でMICPが誘起されるか否かを検証した。

Table 1
Results of culture tests for urease activity in the sampled water (Shibukawa River, Iwaki). Both standard and Christensen culture tests showed the as-sampled river water contains urease-active bacterial strains.

検体名	分離培地	ウレアーゼ活性
渋川	標準寒天培地	+
		+
		-
		+
		-
		+w
		-
	Christensenの尿素寒天培地	+
		+
		+
		+
		+
		+
		+

+ : 陽性 - : 陰性 +w : 反応弱い

3. 研究の方法(B)

【実験 結果】①試料水の採取: 渋川下流河川水(いわき市植田町)、小浜漁港湾内水(同小浜町)を採取した。②上記双方のウレアーゼ活性の有無を検証した。Table 1に渋川採取水のウレアーゼ活性試験結果を示す。自然状態での渋川河川水は複数のウレアーゼ活性株を含

み,かつ,Christensen 尿素培地環境程度のアンモニア自毒環境では複数種の株が生息し続けることが判った。この結果は小浜漁港海水でも同様だった。

Table 2
Results of culture tests for urease activity in the sampled water (Shibukawa River, Iwaki) after the 2-week urea gel-release.

検体名	分離培地	ウレアーゼ活性
渋川 ※ 尿素含有ゲル2週間浸漬後	標準寒天培地	-
		+w
		+
		+
	Christensen の 尿素寒天培地	-
		-
		+

+ : 陽性 - : 陰性 +w : 反応弱い

のクリステンセン培地での赤色呈色を示す。今回の結果により,たとえばコンクリート構造物の亀裂のような閉鎖的な物理的環境下では,菌源としての環境水としては河川水のほうが海水よりも自毒作用への対抗性を呈する可能性が高いことが示された。(※ 当該菌株の同定は継続中。)



Fig. 2
The red coloration in the right sample shows the urease activity of the only strain that survived ammonia autotoxicity during the 2-week urea gel release.

【実験 , 結果】①上記の二種類の環境水 20kg 中にウレアーゼ活性菌株選択増殖のための栄養ゲル 1kg を浸漬し, 25°C で 2 週間静置した。(栄養ゲル組成: 全量 1kg, 乾燥寒天粉 20g, 乾燥酵母エキス 1.0g, 尿素 30g, 他は水) ②上記双方のウレアーゼ活性の有無を検証した。

Table 2 に渋川採取水(2 週間尿素ゲル徐放後)のウレアーゼ活性試験結果を示す。Christensen 培地を使用した場合,ウレアーゼ活性株が一種類のみ残った。この結果は,ウレアーゼ活性株が活発に作用しアンモニアが発生した場合,閉鎖的な環境下では限られた塩基性環境への耐性のある菌株のみが生き残ることを示す。なお,小浜漁港海水で同様の 2 週間尿素ゲル徐放を施した場合ウレアーゼ活性株はすべて死滅した。Fig. 2 に渋川河川水で唯一残ったウレアーゼ活性株

【実験 , 結果】実験 で尿素供給を二週間継続した渋川河川水には閉鎖環境下でもアンモニア塩基条件に耐久する菌株が生存することが確認されたので,この水を原料として実際にカルシウムイオン源と養分を加え,貧栄養環境であるシリカサンド層中へ混合し,室温 25°C で静置した。その結果, MICP は誘起され,炭酸カルシウムが形成され,シリカサンド層が固化した。

4. 研究の成果(B)

【小結言】一般的な環境水に生息する遍在菌株による MICP 誘起が可能なが判った。採取された環境水をウレアーゼ活性株が優先的に活動する栄養条件におくことにより,閉鎖環境でのアンモニア雰囲気中でも MICP 作用を発現する菌株をある程度選択的に生き残らせることが可能である。

2. 研究の目的(C)

<研究③> 脱ラボ型微生物由来炭酸塩晶析技法の確立

【背景/目的: 脱ラボ型技術への展開性の必要性】

微生物代謝活動由来の炭酸カルシウム晶析 (microbially induced carbonate/calcite precipitation, 以下 MICP) がエネルギー消費や環境負荷が相対的に小さな技術シーズであることは明らかだ。例えば,固化性汎用素材としてのポルトランドセメントの製造では,高温の必要反応条件に依存したギブスエネルギーの高い物質変換工程が必然的に大きな二酸化炭素の排出源である。近年国内でも実用化が徐々に始まった自己治癒コンクリート Basilisk®(<https://basilisk.co.jp/> browsed on 6/2/2023)が実現した局所的な堅牢固相の MICP 型晶析による構造物の長寿命化は,今後インフラストラクチャの維持管理において資源・エネルギー・人的労働の節約に寄与する可能性が大きい。MICP がその有用性を発揮しうる応用領域はコンクリート補修や地盤固化など,複数にわたるが,その原理は相互共通する。すなわち,それは微生物がその代謝活動に起因して生成する二酸化炭素と,その周囲に遍在するカルシウムイオンの化合に因る硬質の炭酸カルシウムの生成である。(炭酸カルシウム固体相のうち calcite は圧倒的に安定で,これは実質的には calcite 晶析を意味する。) MICP を誘引できる様々なバクテリアは既に多く知られている。とりわけ, *Sporosarcina pasteurii* はラボ研究用途では最もポピュラーな菌株である。これは安定した MICP 誘引能を示すうえに安全とされる。ラボ研究の成功の視点からは,確実に可視的 MICP を誘引できる *Sporosarcina pasteurii* の性能は,研究実施者がこれを選択・購入して使用するうえで最大インセンティブ因子である。だが同時にここには工学研究上の盲点がある。

MICP を強力に誘引する能力が具わるバクテリア菌株群が既に明らかにされており,なおかつそれらが市販品形態で利用できることは, MICP を有望技術化するうえでの有利条件ではある。だが, MICP がその特性上,土木技術のひとつとして実社会で有為に機能するためには,ある指定された菌株が屋外の(微生物を含めた未知物が無数に在る)物理的環境において土木構造物のスケールで増殖する必要がある,というのは,実技術としては要求が厳しすぎる。人工的にもちこまれた特定の菌株のみが増殖・作動する状況は自然環境下では有り得ない。よって,基礎的な知見のレベルでは MICP 誘引能を示す菌株の知識は必要だが,現実環境での MICP の大規模な誘引法は別問題として研究される必要がある。ちなみに,「研究」というレジームにおいては,フィールド試験のスケールであっても特定菌株のもちこみにより大規模に MICP を誘引した事例はある¹⁾が,この手法の技術としての優位性の確保は容易ではないだろう²⁾。より具体的な課題点として, MICP は<その特定の菌株の培養と移植>のような繊細な操作を経ず,一般的なマニ

ユアル操作のみにより思惑どおりに誘引できることが重要である。筆者が(地域企業との共同技術開発という極めて実用に近い状況下で)MICP 関連研究を開始した時点(2015年)では、MICP 自体は既に「現象」として広く認知され、また、その人為的誘発はラボレベルでは可能となっていた。現時点で残された最大の課題は、MICP を「どこでも」、「メガスケールで」、「安全に」誘引することである。

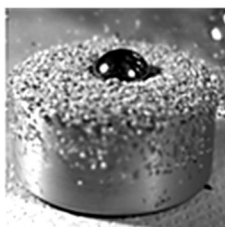
3. 研究の方法(C)

<< 実施事例 : 一般環境中からの ICP 誘引に有効な菌株の粗分離と増殖 >>

【実験と結果】近隣(いわき市内)の港湾・河川・湖沼等の遍在環境水を採取し、MICP 誘引能を具えた菌株のそれらの一般環境水群からの簡便粗分離法確立を企図した。採取された試料環境水に栄養物および尿素を供給すると尿素を加水分解するウレアーゼ活性型のバクテリアが増殖し、尿素の加水分解に起因するアンモニア由来の刺激臭が発生した。これをもって試料水中には



MICP treated



as-dried

Fig. 3 MICP treatment using propagated indigenous urease-active bacteria from river water was revealed to induce solidification of bulk sand as shown in the increase in the obvious mechanical strength observed on the 2m/s impingement of a SUS ball whose mass and diameter were 8.5g and 13mm, respectively.

は MICP の誘引に有効な候補たり得る菌株の自生の証拠とした。ごく一般的な自然河川の水中には高い確率でウレアーゼ活性型のバクテリアが自生することが示唆された。ただし、クリステンセン法によるウレアーゼ活性型バクテリアからのアンモニア放出下での候補菌株の生存試験の結果、ウレアーゼ活性起因の自毒作用下でも生き残る菌株は、元々の候補群と比較してはるかに限定された。また、上記の自毒条件下で生き残った菌株を含む水は、カルシウムイオン源共存下で明白な MICP 起因の諸現象を呈した (Fig. 3)。

<< 実施事例 : MICP 有効菌株を容易に、かつ、選択的に増殖させる手法 >>

MICP 有効菌株はほとんどの場合はウレアーゼ活性型の菌株に属するため、尿素の供給によりこれを選択的に増殖させる方法が一見妥当である。この方法は原理的には正当だが、一般的な自然環境下でウレアーゼ活性型の菌株を支配的に増殖させるためには、単に栄養物質や尿素を流入させても上述のウレアーゼ活性型菌株の支配性を確保できないことが判った。とくに、自生菌株群には広い幅があり、菌の代謝に全般に寄与しうる万能型の栄養物質の供給は増殖する菌株を目的に合わせ絞り込むには完全に逆効果であった。多くの試行錯誤の後、実用スケールへの拡張はのぞめない通例のラボ研究のような既知の MICP 有効菌株の直接導入が、ある種の廃棄物の活用により回避可能なことが判った。

References

- 1) H. Meng, Y. Gao, J. He, Y. Qi, L. Hang "Microbially induced carbonate precipitation for wind erosion control of desert soil: Field-scale tests" *Geoderma*, 383, 2021, 114723.
- 2) 川崎 了「微生物機能を利用した地盤改良技術」公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集地盤と建設 29, (1), 2011.

4. 研究成果(現段階迄)

本研究の目標は、結果的には、特定の既知の有効微生物を人為的に純粋な状態で導入し MICP を誘起させるというラボ型の MICP 誘起法を採らずに済む手法の見出しが主となった。これは一般的な環境中に遍在する微生物をその一般的な環境を高度に選択的な特定微生物の生存環境へと変化させることなく、実用レベルの MICP を誘起する条件を見出すことに相当する。

河川水は一定期間尿素を徐放するゲル等の媒体と接触させることにより、そのなかでウレアーゼ活性有効株が増殖でき、この株を含んだ水で MICP を人為的に誘引することができた。遺伝子解析による有効株の推定結果によれば、この手法で増殖する株は *Sporsarcina pasteurii* であり、よって、誘引された MICP は通常の実験において発生する MICP と実質的に差異はない。

河川水に自生するウレアーゼ活性株は海洋水中のそれと比較すると人工的な増殖が容易であることが判った。一定期間尿素を徐放するゲル等の媒体と接触させることにより、そのなかでウレアーゼ活性有効株が増殖できることは共通であるが、最も支配的に増殖する株は上記の *Sporsarcina pasteurii* とは限らず、その確実な同定は困難だった。しかし、この手法によりウレアーゼ活性株を確実に筆頭増殖株とすることは可能である。海洋水中の株の種類は河川水と比較して圧倒的に多く、尿素徐放性ゲルとの接触によりある程度の支配性でウレアーゼ活性株が増殖することは変わらないが、ウレアーゼ活性の発現は河川水を用いた場合と比較すると弱い傾向があった。よって、ウレアーゼ活性をひきだすための菌源としては、海洋水よりも河川水のほうが有利である。

上記の方法によりある程度の選択性を確保して殖やした菌株を加熱処理済の砂に乳酸カルシウム・水とともに混合した場合、24 時間から一週間間に砂層の流動性は喪失した。すなわち、MICP による有意な砂層固化が可能であることが示され、一般的な環境水に比較的単純な弱い尿素バイアスを一定期間印加することにより、可視的な MICP を誘起するのに十分なウレアーゼ活性を誘導可能であることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ogata Makoto, Sakamoto Mao, Yamauchi Noriko, Nakazawa Masato, Koizumi Ami, Anazawa Remi, Kurumada Kenichi, Hidari Kazuya I.P.J., Kono Hiroyuki	4. 巻 519
2. 論文標題 Optimization of the conditions for the immobilization of glycopolypeptides on hydrophobic silica particulates and simple purification of lectin using glycopolypeptide-immobilized particulates	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Carbohydrate Research	6. 最初と最後の頁 108624 ~ 108624
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carres.2022.108624	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 Kurumada Kenichi	4. 巻 54
2. 論文標題 Unintended Conversion of Imaginary Representation to Real Object in Actual Scientific Studies:	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Kagaku tetsugaku	6. 最初と最後の頁 113 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4216/jpssj.54.2_113	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一・ 山内 喬矢
2. 発表標題 一般的な環境水からのカルサイト晶析有効菌種の実用的粗分離
3. 学会等名 公益財団法人化学工学会第52回秋季大会 LG214
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山内喬矢, 車田研一
2. 発表標題 環境水中での尿素代謝に関わる諸因子の解明 -微生物種の視点から-
3. 学会等名 公益社団法人化学工学会 東北支部協賛 / 第11回 福島地区CEセミナー (2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一
2. 発表標題 プロセス技術視点での流動の半可視性の問題
3. 学会等名 化学工学会第87年会0224
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一・太田 俊平・大榎 旺杜・三浦 雄之・北山 友香
2. 発表標題 微生物起因カルサイト晶析での特定菌株使用の回避
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会D1202
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一・植 英規
2. 発表標題 半可視的速流の目視観察での時系列性知覚の信頼性基準
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会DG103
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Kurumada, H. Ue and J. Sato
2. 発表標題 Direct Observation of Transient Flow Kinematics of Environment-friendly Silica-based Alcolgel at Instantaneous Gelation
3. 学会等名 Kosen Research International Symposium 2023, D-0-3-2
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomoko Takaara, Takafumi Yamamoto, Kenichi Kurumada
2. 発表標題 Optimum Condition for Enhancing Chitosan-assisted Aggregation
3. 学会等名 Kosen Research International Symposium 2023, E-0-4-2
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一・三浦 雄之
2. 発表標題 バイオポリマペースト浸透による砂状地盤強化の発生条件
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 (福島高専) (正)車田 研一
2. 発表標題 流動ソフトマターの観察の有意性判定-位置相関は可視的か？-
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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