

微生物機能を利用した地盤改良技術

Ground Improvement Technologies Using Microbial Functions

川崎 了 Satoru KAWASAKI (北海道大学大学院工学研究院)



本論文では、微生物の機能を利用した地盤改良技術に関する現状と今後の展望について述べる。最初に、生物学と地盤工学が連携した研究集会の開催状況について紹介する。続いて、微生物が地盤改良技術に用いられるようになった理由について述べた後に、微生物を用いた地盤のセメンテーション技術に関する研究事例について紹介する。ここでは、微生物を使って地盤に炭酸カルシウムを析出させる技術に関する研究開発が室内試験を中心に実施されていること、その技術は実用化の一手前であること、などについて述べる。最後に、今後の展望として、廃棄物を利用した方法および施工現場の微生物を利用する方法について紹介する。この技術を含め、微生物学と地盤工学の連携がさらに進むことで、これまでになかった新しい理解、発見、展開などに繋がる可能性がある。

キーワード：微生物，地盤改良，炭酸カルシウム，セメンテーション (IGC : D-2, D-10)

1. はじめに

地盤工学の発展の歴史を、その基礎および関連する学問との関係に着目して簡単に振り返ってみよう。18世紀および19世紀に活躍したCoulombおよびRankineは、土質力学の基礎となる土圧論を数学と物理学を用いて説明した。20世紀の初期に圧密理論を提案したTerzaghiは、土質材料の分布や挙動を理解する上で地質学の重要性について指摘した。20世紀の中期に入ると、クイッククレイの溶脱や粘土の膨潤などを理解するため、あるいは土壌・地下水汚染や廃棄物処分などの地盤環境に関する諸問題に対応するために、化学や鉱物学の重要性が認識されるようになり、今日に至っている。しかし、地盤工学が対象とする自然の地盤は、その物性、分布性状などがサイトに依存するだけでなく、不均質、複雑である場合が多い。また、人類の活動範囲は、より広く、より深くなっていくことが予想される。さらに、地球規模での環境問題が顕在化していることから、現在の地盤工学では十分に対応できない新たな問題が将来的に生じる可能性がある。これからも地盤工学が持続的に発展していく過程において、必要に応じて新たな学問と連携していくものと思われる。

一方、地盤工学で対象とする地盤中には、非常に多くの生物(特に微生物)が生息している。また、それらの代謝副産物は、地盤環境に対して化学的な影響を与えているが、これまでほとんど考慮されていなかった。しかし、地盤工学においても生物学や微生物学に関する知識を考慮し、連携させることができれば、地盤工学における新しい解釈、発見、展開などに繋がる可能性があり、期待されている。このため、地盤工学においても生物学や微生物学に関する知識の必要性や重要性について指摘¹⁾されるようになってきた。また、通常土の中には、1gあたり $10^7\sim 10^9$ の微生物が含まれ、地盤中の微生物は未利用資源の1つである

と考えられる³⁾が、これまで地盤工学および地盤環境工学の分野において、ほとんど利用されていなかった。

このような背景の中、微生物を利用した新しい地盤改良技術が国内外で注目を集めており、その研究開発が活発化している。微生物を用いた改良技術は、例えば石油の増進回収法⁴⁾として微生物の圧入および増殖により高浸透性領域をクロッキング(clogging)させる地下の油層や、耐久性、耐水性、自己修復性などの改良を目的とした岩石(石灰岩)⁵⁾⁶⁾、モルタル⁵⁾⁸⁾、コンクリート⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾などの建設材料に対して適用されているが、本論文では地盤材料(土質材料)に限定し、微生物を利用した地盤改良技術の現状について概説する。なお、ここでは対象とする地盤改良の原理として、化学的安定処理あるいは地盤注入によって地盤の強度を増加させるセメンテーション(cementation)に焦点を絞って述べる。

2. 生物学と地盤工学が連携した研究集会の概要

技術の現状を知る1つの手段として、研究者や技術者が集まる研究集会の動向を調べる方法がある。ここでは、過去5年間における海外および国内で開催された生物学と地盤工学が連携した研究集会について紹介する。

2.1 海外における開催概況

新しい試みとして、これまでの伝統的な学問領域である地盤工学、環境工学、地球科学、微生物学、土壌学、生物学などの専門家で、これらの境界領域にある創造的かつ革新的な研究に対して高い関心と問題意識を持つリーダーが集まり、議論することを目的としたワークショップ“Bio-Soils Interdisciplinary Science & Engineering Initiative”が、2007年4月1~4日にボストンで開催された。ワーク

ワークショップの開催に際しては、US (United States) の NSF (National Science Foundation) および UK (United Kingdom) の EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) より共同で資金提供を受けている。US 側および UK 側の代表者は、それぞれ Jason DeJong (University of California, Davis), Kenichi Soga (University of Cambridge) である。参加者数は約 50 名で、その内訳は約 50% が US、残りの約 50% が UK およびその他の世界各国である。ワークショップは、講演、口頭発表、ポスター発表で構成され、研究と教育の両面に踏み込んだ議論が行われた。ワークショップは、結論を求めるよりも将来展望に主眼がおかれ、その詳細についてはワークショップの NSF 最終レポートを参照¹²⁾していただきたい。次回の“The International Bio-Soils Workshop”は、2011 年 9 月 18~20 日にケンブリッジ大学で開催される。

上記 US-UK のワークショップに引き続き、翌年の 2008 年 6 月 23~25 日にはオランダのデルフトにおいて“The 1st International Conference on BioGeoCivil Engineering”が、オランダの研究機関である Deltares (旧 GeoDelft) と Delft University of Technology の共同主催により開催された。この国際会議の主な目的は、個々の専門分野である生物工学、地盤工学、土木工学の 3 つを機能的にリンクさせ、まったく新しい学際的な研究領域を創造することにある。参加者数¹³⁾は合計 73 名であり、その国別の上位 5 カ国は順にオランダ (29 名)、US (8 名)、UK (7 名)、スウェーデン (4 名)、ベルギー (4 名) となっている。参加者リストの中には、前記した Jason DeJong も名前を連ねている。会議は、基調講演、口頭発表、ポスター発表で構成され、最終日にはパネルディスカッションが行われた。

最近の研究集会としては、2011 年 3 月 13~16 日に US のダラスで開催された ASCE (American Society of Civil Engineers) の Geo Institute が主催する“GEO-FRONTIERS 2011: ADVANCES IN GEOTECHNICAL ENGINEERING”の中で、“Bio-Improved Soils”の主題で始まる 3 セッションに合計 19 編の論文発表があった。筆者は、参加者数についての情報を持っていないため、各論文の第一著者(発表者)を国別に整理してみると、開催国である US が 8 名で一番多く、これに日本と中国が同数の 3 名で続いている。

以上は、生物学と地盤工学の連携を試みた海外における研究集会の概況であるが、新しい学際的な学問領域あるいは研究領域を開拓、創造しようとする研究者および技術者の動きは、ここ 4~5 年前から始まったことが推察される。また、その動きの中心は、US、UK、オランダなどの欧米諸国となっている。

2.1 国内における開催概況

毎年、地盤工学会が主催する地盤工学研究発表会は、国内を代表する地盤工学に関する研究集会である。2011 年度から過去 5 年間における地盤工学研究発表会を対象として、「微生物」というキーワードを含む講演論文の数について調べてみると、2007 年度 (第 42 回) 0 編、2008 年

度 (第 43 回) 2 編、2009 年度 (第 44 回) 3 編、2010 年度 (第 45 回) 7 編、2011 年度 (第 46 回) 7 編という結果となり、発表件数が年々増加傾向にあることがわかる。また、2010 年度 (第 45 回) からは、大分類「地盤環境」の小分類「微生物機能」などの名称で 1 つのセッションを 2 年連続で割り当てられており、国内の地盤工学分野においても微生物への関心が高まりつつあることが伺える。

一方、微生物機能を利用した次世代の地盤改良技術に関する情報交換を目的として、第 1 回の次世代地盤改良技術に関するワークショップ (NGIT 2010: New Ground Improvement Technique 2010) が 2010 年 5 月 24 日につくばで開催された。土木研究所が主催するこのワークショップには、前記した曾我健一教授を含む合計 36 名が参加し、ケンブリッジ大学、東京大学、長野高専、北海道大学、愛媛大学、土木研究所における研究状況についての発表、講演会「ケンブリッジ大学の工学教育」、所内の施設見学が行われた。第 2 回の同ワークショップは、土木研究所寒地土木研究所の主催により 2011 年 6 月 28 日に札幌で開催された。参加者数は合計 84 名であり、第 1 回のワークショップ開催時よりも大きく増えている。ワークショップでは、産官学の 3 者から合計 10 件の発表があり、その内訳は、産 (3 件)、官 (1 件)、学 (6 件) であった。次回の第 3 回の同ワークショップは、2012 年 6 月に開催予定である。

3. 微生物を地盤改良に用いる理由

微生物を地盤改良に用いる主な理由 (またはメリット) としては、(1) 地球環境問題、(2) 地盤環境問題、(3) 固化・ゲル化時間の調整、(4) 資産価値問題、(5) コスト低減、(6) 小さい目詰まりで大きい強度、などが挙げられる。具体的には、以下のとおりである。

最初の(1)は、地球規模で CO₂ の排出量の削減を進めていく中で、製造時に CO₂ を多く排出する地盤改良資材の使用を減らし、より環境負荷が少ない新技術を適材適所で利用することを意味する。例えば、地盤改良工事の化学的安定処理あるいは地盤注入などで使用するセメントは、一般の土木建築工事において必要不可欠な建設資材であるが、製造時に大量の CO₂ を排出することが知られており、1000 kg のポルトランドセメントを製造する際に 840 kg の CO₂ を排出する¹⁴⁾。地盤改良におけるセメントの使用量を減らすことによって、CO₂ の排出量の削減に資することを理由としている。なお、微生物を使った地盤改良に関する最近の論文は、以上のような理由を「はじめに」、「Introduction」などの書き出し部分に使用しているケースが目立つ。一方、自然界では生物によって、例えば炭酸カルシウム、シリカ、リン酸カルシウムなどの多種多様な鉱物が生成されており、これらのバイオミネラルを新たな地盤改良材として使用すれば、製造時および製造後も安全で低環境負荷であることも理由の 1 つであると考えられる。

次の(2)は、地下水汚染の問題である。例えば、地盤改

良にセメント系固化材を使用する場合には、有害な六価クロムが溶出する可能性があり、六価クロム溶出試験を実施して環境基準値を満足することを確認する必要がある。また、六価クロム以外にも、一般のセメントは pH 値が約 12~13 と非常に高いため、地下水汚染に注意する必要がある。さらに、日本では使用が禁止されている水ガラス系以外の薬液を現在も使用している海外の国々では、地下水汚染に対する配慮が必要となっている。すなわち、地下水汚染の問題を生じない地盤改良材を使用することが理由となっている。

(3) に関しては、微生物が持つ特徴を最大限に活用しようとする理由である。すなわち、詳細については後の 4.2 で述べるが、一般的に化学反応は速度が速く、時間調整が難しいのに対し、微生物の働きは比較的緩慢であることから、微生物を利用すればシリカ系注入材の化学反応であるゲル化を比較的ゆっくり進めることができる。そして、注入材を全量反応させることでゲルが安定化し、十分な強度を得ることができる。このように、微生物を利用することにより、ゲル化の開始時間を調整するためのタイマー機能、ゲルの強化・均質化のための化学反応制御機能および安定化機能などのメリットが期待できる。

(4) は、地盤改良を実施した地盤中に土壌汚染、産業廃棄物、埋設物などが存在すれば、土壌汚染の浄化費用、産業廃棄物および埋設物の撤去費用が発生して土地評価の際にマイナス評価されるため、これを避けることが理由となる。また、前述した(2)とも密接に関連している。例えば、セメント系固化材で地盤改良を実施すれば、地盤中に産業廃棄物を埋設することになり、産業廃棄物の撤去費用が資産価値から減額されることになる。これに関しては、リン酸カルシウム化合物を用いた地盤改良材に関する最近の研究¹⁵⁾において、地盤注入後に生成されるセメント物質のリン酸カルシウム化合物は安全で無害であること、改良後の地盤の再掘削によるズリは農業用肥料としてリサイクル可能であること、などのメリットが述べられている。

(5) については、微生物を使用したグラウトおよび既存のグラウトについて、それぞれ原価材料費の概算コストを比較した論文¹⁶⁾があり、既存のグラウトが土 1 m³あたり \$2~\$72 の範囲にあるのに対し、微生物を使用したグラウトでは土 1 m³あたり \$0.5~\$9.0 と記している。

最後の(6)は、微生物を使って炭酸カルシウムを実際に析出させた砂供試体を詳しく調べた結果¹⁷⁾が理由となっている。すなわち、微生物を用いて改良した砂供試体には、一軸圧縮強さが数 MPa まで大きく増加しているのに対し、透水係数の低下は限られている(小さい)という特性があることが明らかになっている。また、微生物を用いた注入材の粘性は、従来のものと同等以下である。よって、この特性を利用すれば、地盤注入による注入孔の目詰まりや改良地盤の目詰まりを小さく抑えることができるため、低い注入圧で地盤を乱すことなく浸透距離および改良範囲を大きくすることができ、かつ、大きい地盤強度を得ることが期待できる。

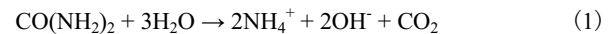
4. セメンテーションに関する研究事例

微生物による地盤のセメンテーション技術は、現時点では研究段階にあり、実用化の一手手前にあると思われる。この技術が実際の建設工事に適用されたのは、2010年の夏にオランダで試験施工された1例¹⁷⁾のみであり、それ以外は微生物による炭酸カルシウム析出 MICP (Microbially Induced Carbonate Precipitation) による砂供試体の作製あるいは作製した砂供試体を用いた基礎的な室内試験に関する研究¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾が中心となっている。炭酸カルシウムによるセメンテーションの効果は、砂供試体で最大 30 MPa の一軸圧縮強さが報告²²⁾されている。炭酸カルシウム以外のセメント成分としては、自然界に存在する鉱物であるシリカ²³⁾²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾、リン酸カルシウム¹⁵⁾を用いた研究が報告されている。以下に、炭酸カルシウム、シリカ、リン酸カルシウムの順番に、それぞれの研究事例について紹介する。

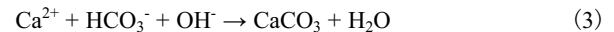
4.1 炭酸カルシウムを用いた技術

現在、微生物を用いて炭酸カルシウムを析出させることにより地盤を固化させる最も有力な方法は、尿素の加水分解作用を利用する方法¹⁸⁾¹⁹⁾である。その原理は、以下のような化学反応式で示される。

【尿素加水分解】



【炭酸カルシウム析出】



式(1)は、尿素の加水分解作用によって炭酸カルシウムが析出しやすい弱アルカリ性の環境下に整える pH 上昇と、炭酸カルシウムの析出に必要な CO₂ 供給を同時に行う反応である。上記の炭酸カルシウム析出機構に加え、微生物の体表面が一般的に負の電荷を帯びているために Ca²⁺ が体表面を覆い、Ca²⁺ の核となって炭酸カルシウムが析出する機構もあり、その化学反応式は次のとおりである。



式(1)の反応に最も有効な微生物として、*Sporosarcina pasteurii* が使用¹⁷⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾されている。この菌株は、US の ATCC (American Type Culture Collection) などの生物資源バンクから日本の代理店を経由して購入できる。

供試体の作製方法については、図-1 に示す稲垣ら²¹⁾の研究事例を用いて説明する。モールド内に投入した豊浦砂を下部から浸水させて飽和させた後、上部から *Sporosarcina pasteurii* の培養液を注入する。なお、培養液は、表-1 の培養基中に *Sporosarcina pasteurii* を植え付けた溶液型のものである。培養液の注入後は、表-2 に示す栄養塩を 1 日 1 回注入する。培養液と栄養塩の注入量は、供試体の間隙を置換するのに十分な量としている。また、培養基の組成、栄養塩の組成、注入の間隔、向き、時間、回数などの試験条件については、国内外の研究グループ間で少し異なっており、試行錯誤による工夫が施されている。

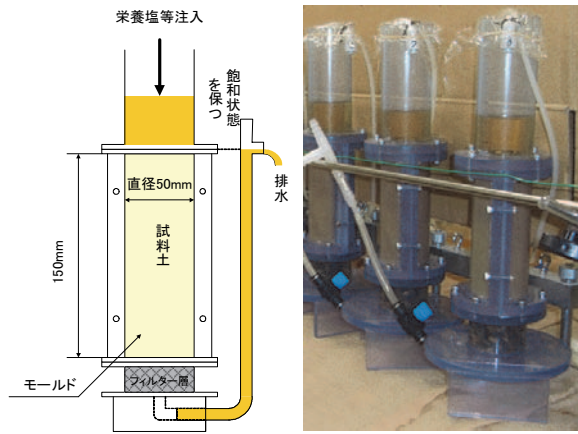


図-1 供試体の作製状況²¹⁾

表-1 培養基の組成 (蒸留水 1 L 当り)²¹⁾

成分	分量
トリスバッファー (pH 調整剤)	0.13 mol = 15.75 g
硫酸アンモニウム ((NH ₄) ₂ SO ₄)	10 g
Yeast extract (酵母エキス)	20 g

表-2 栄養塩の組成 (蒸留水 1 L 当り)²¹⁾

成分	分量
塩化カルシウム (CaCl ₂)	0.5 mol = 55.49 g
尿素 (CO(NH ₂) ₂)	0.5 mol = 30.03 g
ニュートリエントプロス	3 g
塩化アンモニウム (NH ₄ Cl)	10 g
炭酸水素ナトリウム (NaHCO ₃)	2.12 g

砂を用いた多くの室内試験 (要素, カラム, シリンジ) では, 炭酸カルシウム析出によるセメンテーションの効果を供試体の力学的特性を調べることで評価を行っている. 一般に用いられている力学的指標は一軸圧縮強さであり, 供試体中に析出した炭酸カルシウム量と関連付けて報告されている. 例えば, 供試体 1 kg 当り 30 g および 600 g の炭酸カルシウムが析出した場合には, それぞれ 200 kPa および 30 MPa の一軸圧縮強さが得られている²²⁾.

DeJong ら¹⁹⁾は, ベンダーエレメントを用いた供試体のせん断波伝播速度測定を実施し, 時間の経過に伴うセメンテーション効果の変化, 等方圧密非排水三軸圧縮試験で得られた軸ひずみ～軸差応力の関係, 軸ひずみ～せん断波伝播速度の関係などについて考察している.

稲垣ら²¹⁾は, 微生物代謝による液状化対策の有効性を確認するため, 圧密排水三軸圧縮試験および動的遠心模型実験を実施している. 得られた主な結論として, 三軸圧縮試験では, 固化した供試体の強度向上が確認された (図-2 参照). また, 動的遠心模型実験では, 加振中の模型地盤の間隙水圧, 応答加速度の変化, 残留変形などから, 液状化対策としての有効性が確認されている. さらに, 模型地盤の固化前後の透水係数に大きな変化はなく, 地下水流動を大幅に阻害せずに液状化対策を実施できる可能性があることを示した (図-3 参照).

Paassen ら²⁰⁾は, 2008 年に大規模な地盤改良試験を実施

し, 43 m³の改良体を作製することに成功している. この結果を踏まえ, 2010 年の夏にオランダ国内で最初の試験施工が大口径のパイプライン建設工事で行われた. この工事は, 大口径の水平掘削工事であったが, 工事のルート上にある礫層を通過した際にボアホールの崩壊が生じるリスクがあった. これに対処するため, 事前検討として 3 m³のコンテナに礫を入れて微生物固化させ, その後に水平掘削試験を行い, ボアホールの安定性を確認した. 地盤改良工事は, 深さ 3~20 m に分布する 1000 m³を対象とし, (1) 微生物を含んだ培養液 200 m³の調製, (2) 300~600 m³の栄養塩の注入, (3) 地下水の電気伝導度およびアンモニア濃度が初期値に回復するまで排水, が実施された. 工事では多くの現場計測が実施され, 地盤注入材の移動状況と分布状況は, 電気比抵抗測定, 採水中の電気伝導度とアンモニア濃度の測定が有効であった. 地盤改良後は, 大口径の水平掘削工事が行われ, パイプラインは無事に敷設された.

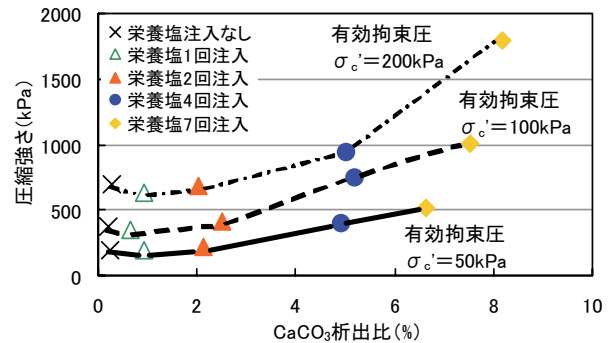


図-2 炭酸カルシウム析出比と圧縮強さの関係²¹⁾

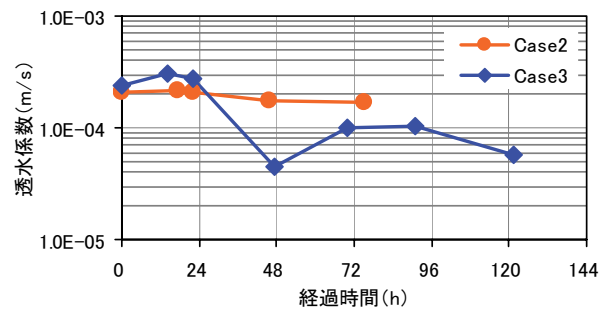


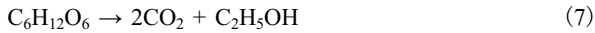
図-3 固化させた模型地盤の透水係数の変化²¹⁾

4.2 シリカを用いた技術

寺島ら²³⁾²⁴⁾は, 微生物代謝を利用した環境に優しい新たな地盤注入材に関する基礎的な研究を行い, シリカ溶液, 微生物, 栄養源, pH 調整剤を適切に組み合わせることで, 注入材に添加する pH 調整剤の量を少なくしても従来の注入材と同程度の固化時間と強度を持つ地盤改良効果のある注入材を開発した.

シリカコロイドのゲル化は, 好気条件下で式(6), 嫌気条件下で式(7)により表される栄養源 C₆H₁₂O₆ の微生物代謝が起きると, 副産物として CO₂ が発生する.

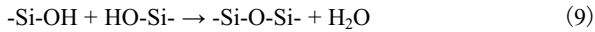




CO₂ がシリカコロイド溶液中に溶解すると、式(8)のように H⁺ の濃度が増加し、溶液中の pH が低下する。



これに伴い、シリカコロイドの粒子表面の電位が変化し、凝集し始める。すなわち、粒子同士が近づくと、それぞれの粒子表面にあるシラノール基 (-Si-OH) の間で脱水反応であるシロキサン結合 (-Si-O-Si-) が生じる。



こうして、シリカコロイドの網目状構造が形成される。

シリカ溶液の pH 変化とゲル化時間の関係²⁷⁾を図-4に示す。同図より、シリカ溶液のゲル化時間は pH が 7~8 付近で最も短く、pH が 9 以上と 4 以下では長くなる。地盤注入により広範囲の地盤に対して十分な改良効果を得るためには、注入材を地盤に十分浸透させて全量を反応させる必要があり、数時間から十数時間のゲル化時間が必要となる。水ガラス系シリカ溶液はアルカリ領域で反応が急速に進み、pH の変化によりゲル化時間が大きく変化する。このため、アルカリ領域で長いゲル化時間を得ようとすると、溶液が全量反応せず、ゲルが不安定になり十分な強度が得られない。そのため、酸性領域で注入することになるが、pH を下げるために多くの pH 調整剤を必要とする。

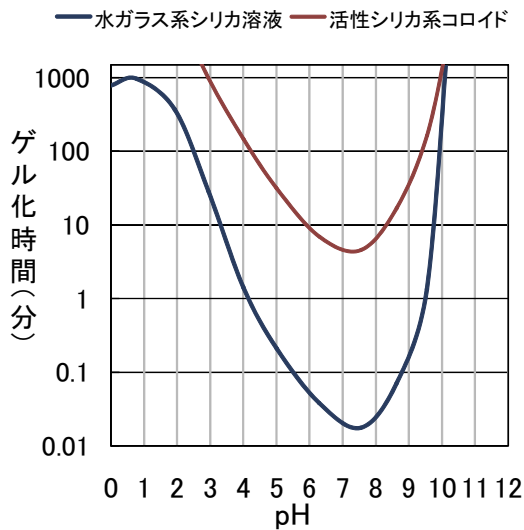


図-4 シリカ溶液の pH 変化とゲル化時間の関係²⁷⁾

一方、微生物の代謝速度は比較的ゆっくりであるため、微生物を利用すればゲル化をゆっくり進めることで未反応のシリカがなくなり、ゲルが安定化して十分な強度を得ることができる。また、使用する pH 調整剤の量が減らせる、あるいは不要となることから、コスト面で有利となる。さらに、シリカは動植物の体内に広く存在し、食品添加物としても認可されているだけでなく、製造時に CO₂ を排出する注入材の使用量の削減、注入後も地盤中に残存する未反応シリカ (塩基) および pH 調整剤 (酸) の減少、などが期待できるため、地盤環境に優しい材料である。

酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) の代謝により、シリカ

溶液がゲル化した豊浦砂供試体による湿潤状態の一軸圧縮強さの経時変化²³⁾を図-5に示す。また、別途実施された液状化強度試験によれば、ゲル化した豊浦砂供試体の液状化強度が大きくなっていることが報告²³⁾されている。さらに、実際の薬液注入工事に用いられている注入管を使用した土槽実験も実施されており、0.1 MPa の低注入圧による施工性と直径約 60~90 cm、高さ約 90 cm の改良体が確認²⁴⁾されている (図-6 参照)。

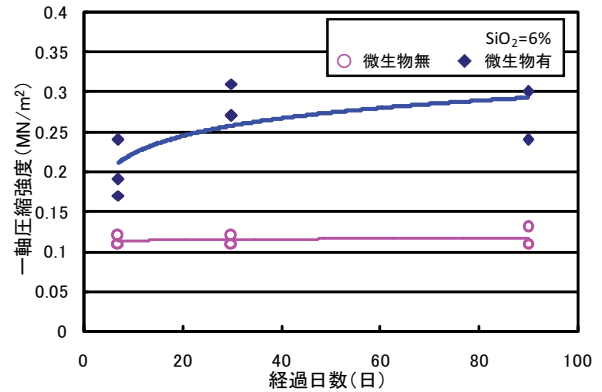


図-5 一軸圧縮強度の経時変化²³⁾



図-6 改良体側面²⁴⁾

清田ら²⁵⁾は、香川県内の農業用ため池の底泥を対象にして、環境に配慮しながら底泥を処理し再利用する手段を新たに開発するために、シリカ溶液と微生物代謝を利用したバイオ固化処理に関する基礎的な室内試験を実施した。その結果、シリカ溶液、イースト、グルコースを用いた固化材により底泥の固化が可能であること、また自然の底泥中の微生物および有機栄養源がバイオ固化処理に利用できること、さらにフォールコーン試験によりバイオ固化処理により底泥が硬化すること、などを報告している。

海外では、オランダで研究事例²⁶⁾がある。対象とする地盤は泥炭であり、陽イオン界面活性剤、メタケイ酸ナトリウム溶液、モラセス (蔗糖蜜) を添加することで、泥炭の繊維表面をシリカ層でコーティングする方法が報告されている。微生物が生成する有機酸によって、界面活性剤とメタケイ酸ナトリウム溶液からなる高分子ゲルを硬化さ

せる。試験に用いた泥炭の含水状態が不明であるが、3週間養生後の一軸圧縮強さが640 kPaと報告されている。

4.3 リン酸カルシウムを用いた技術

秋山・川崎¹⁵⁾は、低環境負荷でリサイクル可能な新しい地盤注入材を開発することを目的として、バイオミネラルの中でもセメント物質として骨や歯の主成分であるリン酸カルシウム化合物に着目し、リン酸カルシウム化合物の最適な析出条件について検討した。また、得られた最適な析出条件を用いて、リン酸カルシウム化合物と豊浦砂を用いて作製した供試体の一軸圧縮試験、電子顕微鏡観察、元素分析を実施した。主な結論として、リン酸カルシウム化合物を地盤注入材に用いて、自己硬化性を利用したケミカルグラウトおよび結晶析出体積のpH依存性を利用したバイオグラウトという、2つの新しい地盤注入材の可能性について示した。

リン酸カルシウム化合物は、リン鉱石として天然にも存在し、生物にとっても主要な無機塩（主にハイドロキシアパタイト）として生体内に存在する。種々のカルシウムCaとリンPの比（Ca/P比）で結合することにより、11種類の化合物が存在する²⁸⁾²⁹⁾。また、図-7³⁰⁾に示すとおり、リン酸カルシウム化合物の溶解度はpH依存性を有することから、前記4.2のシリカと同様に微生物によるpH調整機構を応用することが可能である。さらに、図-8³⁰⁾に示すとおり、ゲル状あるいは非晶質のリン酸カルシウム化合物は、時間の経過に伴って結晶形態をゲル状から強度の大きいハイドロキシアパタイトに自己変化させることから、地盤注入後の固化および強度増加が期待できる。

リン酸二アンモニウムDAPと酢酸カルシウムCAの配合比DAP/CAを1.5 mol/L/0.75 mol/Lで調製したリン酸カルシウム化合物を豊浦砂と混合し、作製した供試体の一軸圧縮強さUCSの経時変化¹⁵⁾を図-9に示す。供試体の作製から84日後のUCSは、湿潤状態で最大87.6 kPaとなった。また、図-10に示す供試体片の電子顕微鏡画像¹⁵⁾および元素マッピングの結果より、砂供試体に十分な強度を発現させるためには、適切な配合を用いて砂粒子間にリン酸カルシウム化合物の結晶をウイスキー状に析出させることが必要条件の1つであることを示した。

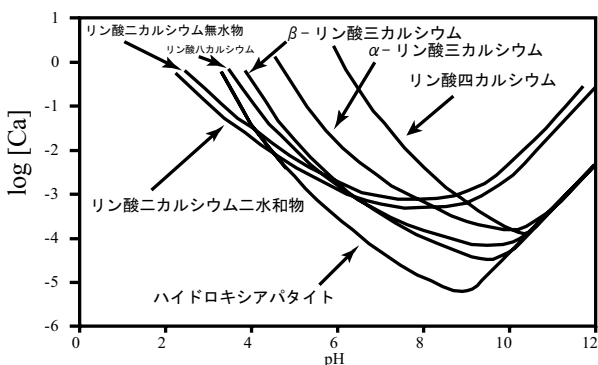


図-7 リン酸カルシウム化合物の溶解度³⁰⁾

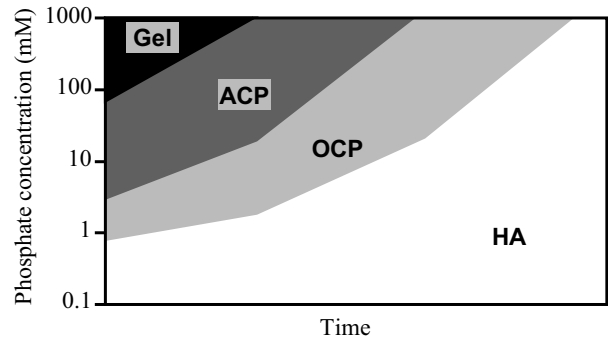


図-8 リン酸カルシウム化合物の結晶形態に及ぼす時間およびリン酸濃度の影響 (Gel: ゲル状, ACP: 非晶質リン酸カルシウム, OCP: リン酸八カルシウム, HA: ハイドロキシアパタイト)³⁰⁾

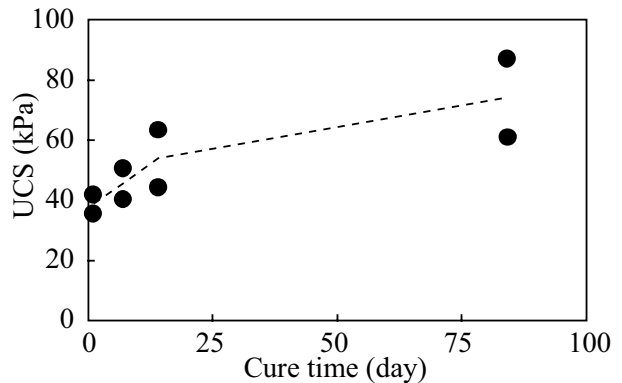


図-9 リン酸カルシウム化合物と豊浦砂で作製した供試体の一軸圧縮強さ (UCS) に見られる経時変化¹⁵⁾

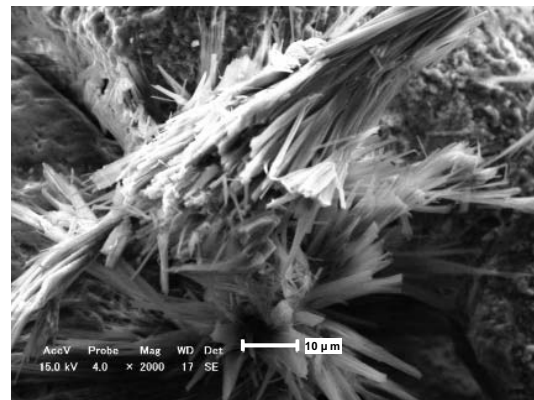


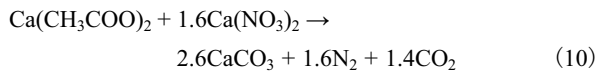
図-10 供試体片の電子顕微鏡画像 (×2,000)¹⁵⁾

5. 今後の展望

前の4.1で述べたように、尿素の加水分解作用を利用して地盤中に炭酸カルシウムを析出させる地盤改良に関しては、既に試験施工がオランダで成功している。しかし、地盤中から塩化アンモニウムを除去しなければならないこと、また炭酸カルシウムの析出に最も適した特定の細菌である *Sporosarcina pasteurii* を使用しなければならないこと、などの理由から、コストが依然として比較的高いことが課題となっている¹⁷⁾。この他にも、外来微生物を使用す

ることによる地盤の微生物汚染および社会的受容性の問題について、解決しておく必要がある。

新たに研究が進められている別の方法として、これまでのウレアーゼ加水分解反応に代わって脱窒素反応を利用した方法²²⁾が提案されている。ここで、脱窒素反応とは、地盤中の硝酸 NO₃⁻が嫌気条件下において微生物活動を受けて還元され、最終的に N₂ ガスとなって大気中に放出される反応である。この方法では、現場の地盤中に生息する硝酸還元菌（脱窒菌）を利用し、脂肪酸のカルシウム塩および硝酸カルシウムから炭酸カルシウムの結晶を析出させる。地盤中のような嫌気条件下における細菌の脱窒素反応には、脂肪酸のような有機物が必要となり、脂肪酸のカルシウム塩が酢酸カルシウムの場合には、化学反応式は以下のとおりとなる。



上式(10)の反応が完全に進んだ場合には、最終的に生成される副産物は N₂ のみであり、大気中に放出される。また、硝酸還元菌には多くの種類があり、自然界の地盤中に広く分布している。しかし、この反応により生成したガスや増殖したバイオマスが地盤の透水性や炭酸カルシウムの分布に影響を与えること、また脱窒素反応はウレアーゼ加水分解反応に比べて反応速度が非常に遅いこと、さらに不完全な脱窒素反応により NO₃⁻ から N₂ まで還元される途中過程の NO₂⁻、NO、N₂O が副産物として放出されること（N₂O は CO₂ の約 300 倍の温室効果ガス）、などの課題が報告¹⁷⁾されている。なお、脱窒素反応を利用する方法の決定的なメリットは、必要な原材料として各種の廃棄物が利用できる点にある。具体的には、硝酸カルシウムの材料として窒素を多量に含む家畜糞などの窒素廃棄物を、また脂肪酸のカルシウム塩の材料としてモラセス（廃糖蜜）などの有機廃棄物を利用する方法が提案²²⁾されており、今後の研究成果に期待したい。

一方、外来微生物を使用しない別の方法として、北海道の泥炭を対象とした野本ら³¹⁾の報告がある。これは、微生物を用いた泥炭の固化処理技術を新たに開発するために、固化処理の対象となる泥炭中から尿素の加水分解作用に有効な微生物を探索して利用しようとする試みであり、微生物汚染の問題を解決する 1 つの方向性を示している。

6. おわりに

本論文では、生物学と地盤工学が連携した研究集会の概要、微生物を地盤改良に用いる理由、セメンテーションに関する研究事例、について紹介した。特に、セメンテーションに関する研究事例の中では、微生物を用いた地盤のセメンテーション技術は、(1) *Sporosarcina pasteurii* を使った炭酸カルシウム析出が主流であること、(2) その研究開発は室内試験が中心であること、(3) その技術で既に現場の試験施工の実績があること、(4) 新たな別の地盤改良技術

として廃棄物および施工現場の地盤中に生息する微生物を利用した方法が提案されていること、などについて述べた。微生物およびその利用に関する研究開発は、理学、農学、医学、歯学、工学などの科学の広い分野で、それぞれ個別に行われている。また、個々の分野における技術の進歩は著しいが、分野間の連携については、ほとんど進んでいない。微生物学と地盤工学の連携が進むことで、これまでにない新しい理解、発見、展開などに繋がる可能性がある。さらに、連携が進んだ新しい境界分野の研究開発は、創造的、魅力的であり、期待できると考えている。

参考文献

- 1) Castanier, S., Le Métayer-Levrel, G., and Perthuisot, J. P.: Ca-carbonates precipitation and limestone genesis—the microbiogeologist point of view, *Sedimentary Geology*, Vol.126, Issues 1-4, pp.9-23, 1999.
- 2) Mitchell, J. K., and Santamarina, J. C.: Biological considerations in geotechnical engineering, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.131, No.10, pp.1222-1233, 2005.
- 3) 川崎 了, 村尾彰了, 広吉直樹, 恒川昌美, 金子勝比古: 微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究, 応用地質, 第 47 巻, 第 1 号, pp.2-12, 2006.
- 4) 藤原和弘, 菅井裕一, 榎本兵治: 微生物攻法 (MEOR) 研究の現状と展望—その概要と有用微生物について—, 石油技術協会誌, 第 73 巻, 第 3 号, pp.244-253, 2008.
- 5) Le Métayer-Level, G., Castanier, S., Oriol, G., Loubiere, J. F., and Perthuisot, J. P.: Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony, *Sedimentary Geology*, Vol.126, Issues 1-4, pp.25-34, 1999.
- 6) Tiano, P., Biagiotti, L., and Mastromei, G.: Bacterial bio-mediated calcite precipitation for monumental stones conservation: methods of evaluation, *Journal of Microbiological Methods*, Vol.36, Issues 1-2, pp.139-145, 1999.
- 7) Dick, J., De Windt, W., De Graef, B., Saveyn, H., Van der Meer, P., De Belin, N., and Verstraete, W.: Bio-deposition of a calcium carbonate layer on degraded limestone by *Bacillus* species, *Biodegradation*, Vol.17, No.4, pp.357-367, 2006.
- 8) De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., and Verstraete, W.: Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials, *Cement Concrete Research*, Vol.38, Issues 7, pp.1005-1014, 2008.

- 9) Bang, S. S., Galinat, J. K., and Ramakrishnan, V.: Calcite precipitation induced by polyurethane-immobilized *Bacillus pasteurii*, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol.28, Issues 4-5, pp.404-409, 2001.
- 10) Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., and Bang, S. S.: Remediation of concrete using micro-organisms, *ACI Materials Journal*, Vol.98, Issue 1, pp.3-9, 2001.
- 11) Jonkers, H. M., Thijssen A., Muyzer, G., Copuroglu, O., and Schlangen, E.: Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete, *Ecological Engineering*, Vol.36, Issue 2, pp.230-235, 2010.
- 12) <http://www.sil.ucdavis.edu/biosoil-initiative.htm>, 2011年8月18日.
- 13) http://www.smartsoils.nl/files/Abstracts_BGCE-2008.pdf, 2011年8月18日.
- 14) 国土交通省：建設施工分野における地球温暖化対策について，平成19年2月，社会資本整備審議会第6回環境部会資料4，2007.
- 15) 秋山 克，川崎 了：リン酸カルシウム化合物を用いた新しい地盤注入材に関する基礎的研究－結晶析出試験と砂供試体の一軸圧縮試験－，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.2, pp.341-350, 2011.
- 16) Ivanov, V., and Chu, J.: Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol.7, No.2, pp.139-153, 2008.
- 17) Van Paassen, L. A.: Bio-mediate ground improvement: From laboratory experiment to pilot application, *Geo-Frontiers 2011*, ASCE, pp.4099-4108, 2011.
- 18) Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., and Harkes, M. P.: Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, Vol.24, No.5, pp.417-423, 2007.
- 19) DeJong, J. T., Fritzges, M. B., and Nüsslein, K.: Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.132, No.11, pp.1381-1392, 2006.
- 20) Van Paassen, L. A., Ghose, R., Van der Linden, T. J. M., Van der Star, W. R. L., and Van Loosdrecht, M. C. M.: Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis large-scale biogROUT experiment, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.136, No.12, pp.1721-1728, 2010.
- 21) 稲垣由紀子，塚本将康，森 啓年，中島 進，佐々木哲也，川崎 了：微生物代謝による液状化対策に関する動的遠心模型実験，地盤工学ジャーナル，Vol.6, No.2, pp.157-167, 2011.
- 22) Van der Star, W. R. L., Taher, E., Harkes, M. P., Blauw, M., Van Loosdrecht, M. C. M., and Van Paassen, L. A.: Use of wastestreams and microbes for in situ transformation of sand into sandstone, *International Symposium on Ground Improvement Technologies and Case Histories (ISGI2009)*, C. F. Leung, J. Chu, and R. F. Shen (Eds.), pp.177-182, 2009.
- 23) 寺島 麗，島田俊介，小山忠雄，川崎 了：微生物代謝により固化するシリカ系地盤注入材バイオグラウトの基礎研究，土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.120-130, 2009.
- 24) 寺島 麗，小山忠雄，佐々木隆光，島田俊介，川崎了，広吉直樹：微生物代謝を用いた地盤改良材バイオグラウトの土槽実験，第44回地盤工学研究発表会，pp.761-762, 2009.
- 25) 清田佳奈，村上 章，川崎 了：農業用ため池底泥のバイオ固化処理に関する基礎的研究，応用地質，第50巻，第2号，pp.70-78, 2009.
- 26) Den Hamer, D. A., Venmans, A. A. M., Van der Zon, W. H., and Olie, J. J.: Stabilization of peat by silica based solidification, *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.2224-2227, 2009.
- 27) 米倉亮三，島田俊介，大野康年：恒久グラウト・本設注入工法，理工図書，pp.7-12, 2008.
- 28) Dorozhkin, S. V. and Epple, M.: Biological and medical significance of calcium phosphates, *Angewandte Chemie International Edition*, Vol.41, Issue 17, pp.3130-3146, 2002.
- 29) 須田立雄，小澤英浩，高橋榮明，田中 栄，中村浩彰，森 諭史（編著）：第6章 石灰化の機構，新・骨の化学，医歯薬出版株式会社，pp.145-174, 2007.
- 30) Tung, M. S.: Calcium phosphates: structure, composition, solubility, and stability, in: Zahid, A. (Eds.), *Calcium phosphates in biological and industrial systems*, Kluwer Academic Publishers, Norwell, pp.1-19, 1998.
- 31) 野本侑里，畠 俊郎，川崎 了，佐藤厚子：泥炭由来の土壤微生物を用いた炭酸カルシウム析出に関する検討，平成22年度土木学会中部支部研究発表会，pp.623-624, 2010.

(2011年8月18日 受付)