

# 微生物固化処理土

## Soil Solidification based on Microbiological Precipitation

畠 俊 郎 (はた としろう)  
富山県立大学 准教授 工学部環境工学科

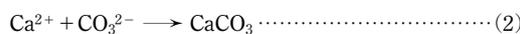
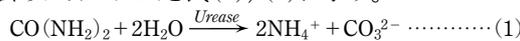
### 1. はじめに

人間活動の活発化が主な要因とされる地球温暖化問題などに関連し、従来よりも環境負荷が小さい微生物の持つ代謝機能の工学的応用について社会的関心が高まっている。ここでは、土壌微生物の持つ多様な機能の中で、特に鉱物の析出促進効果を利用した強度増進に着目した技術について述べることにする。我々が専門とする地盤工学分野において主要な材料の一つとされる土壌であるが、この土壌 1 g あたりに 10 億匹程度の微生物が既に生息していることをご存じだろうか？ また、土壌微生物の中で人類が単離できているものの割合は低く、その多くは遺伝子配列などから間接的に存在が知られている程度である。このような土壌中に既に生息している微生物に着目し、地盤改良分野に応用する技術は 1960 年代には既に提案されている<sup>1)</sup>。この時に着目された微生物は鉄バクテリアであり、鉄の水酸化物によって粒子を膠結させることで液状化強度を増進させる技術を提案している。その後も、バイオフィームやシリカ化合物等に着目した研究が精力的に進められてきた。しかしながら、微生物固化という点でもっとも大きな影響を与えたのは、1990 年代後半のウレアーゼ産出微生物を用いて土壌の間隙中に炭酸カルシウム（おもにカルサイト）を析出させることで強度増進効果を得る MCP (Microbial Carbonate Precipitation) 若しくは MICP (Microbial Induced Carbonate Precipitation) だと考えられる<sup>2)</sup>。現在は、有機物の好気・嫌気代謝により得られる炭酸ガスを利用して炭酸カルシウムを得る技術が提案されるなど拡がりをみせている。

ここでは、国内外で広く研究が進められている尿素に着目した MCP (若しくは MICP) のメカニズム及び地盤強度の増進効果について述べることにする。

### 2. 炭酸カルシウム析出法の概要

微生物固化において現在主流とされる炭酸カルシウム析出法のメカニズムを式 (1), (2) に示す。



窒素肥料として容易に入手可能な尿素を用い、尿素の加水分解酵素であるウレアーゼを微生物の代謝活動により得る。このウレアーゼを用いて尿素の加水分解により発生したアンモニアで土壌 pH の上昇効果を、同じく発

生する炭酸イオンと別途添加するカルシウムイオンを結合させることで原位置に炭酸カルシウムを析出させ強度増進効果を得る点に特徴がある。

### 3. 電気伝導度に着目した尿素分解速度の推定

微生物固化処理土の研究において国内外で広く利用されている微生物として *Bacillus pasteurii* (ATCC11859) が知られている。この微生物は、耐アルカリ性、耐塩性に優れるとともに、尿素の加水分解速度が速いことから室内試験において広く用いられている。この *Bacillus pasteurii* の尿素加水分解速度を基準とし、電気伝導度計を用いて短時間に尿素の加水分解速度を評価する手法が提案されている<sup>3)</sup>。評価フローを図-1 に、提案手法により 2 種類の微生物について行った試験結果を図-2 にそれぞれ示す。なお、図-2 中に示した *Sporosarcina aquimarina* (JCM10887) とは海域由来でウレアーゼ活性を持ち、微生物固化への応用が期待されている微生物

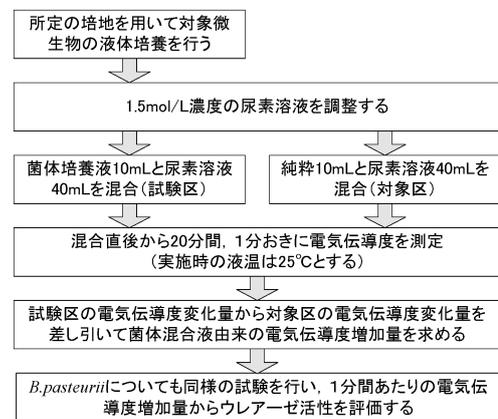


図-1 尿素加水分解速度測定手順

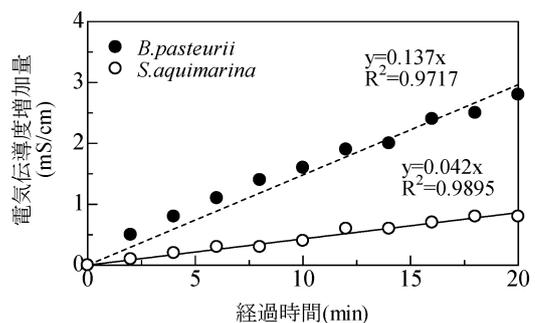


図-2 尿素加水分解速度比較結果 (*B. pasteurii* 及び *S. aquimarina*)

である。試験結果から、20分程度で尿素加水分解活性を簡易的に把握できる効果が明らかとなっている。

#### 4. 海砂を用いた人工ビーチロック形成促進

ビーチロックとは、「砂浜の潮間帯に生ずる非常に新しい固結した石灰質岩」とされる<sup>4)</sup>。ビーチロックが存在する日本海側の北限は石川県輪島市曾々木海岸である(口絵写真—2<sup>3)</sup>([https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1555%3A2009-01-07-08-26-28&catid=101%3A2008-09-18-06-24-51&Itemid=72](https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com_content&view=article&id=1555%3A2009-01-07-08-26-28&catid=101%3A2008-09-18-06-24-51&Itemid=72))参照)。小笠原原<sup>5)</sup>が行った調査の結果は、曾々木海岸のビーチロックはその間隙の10%程度がセメント物質により充填されており、一軸圧縮強さ( $q_u$ )は6010 kN/m<sup>2</sup>まで増加することを明らかにした。この曾々木海岸にて採取した海砂を対象とし、尿素の加水分解速度が異なる2種類の微生物を用いた人工ビーチロック形成促進試験結果が島ら<sup>3)</sup>によって報告されている。

固化処理後の供試体について炭酸カルシウム析出量と圧密排水(CD)三軸圧縮試験により求めた破壊時の軸差応力の関係を図—3に示す。微生物種が異なると同じ炭酸カルシウム析出率であっても、破壊時の軸差応力(せん断強度)が異なる傾向が見てとれる。この原因について考察するため、試験後の曾々木海岸海砂の表面を電子顕微鏡(SEM)によって観察した結果を写真—1に示す。表面観察結果より、微生物種により析出したカルサイトの結晶形状が異なることが明らかとなった。この原因としては、図—2に示した尿素の加水分解に伴い発生する炭酸ガスの供給速度差が考えられる。尿素の加水分解が早い*B. pasteurii*については粒状、遅い*S. aquimarinina*については膜状の結晶が認められている。以上の結果は、微生物固化処理土の施工においては、事前に適用する微生物の尿素加水分解速度を把握し、目標強度に応じて適切な炭酸カルシウム析出率を設定する必要があることを表している。

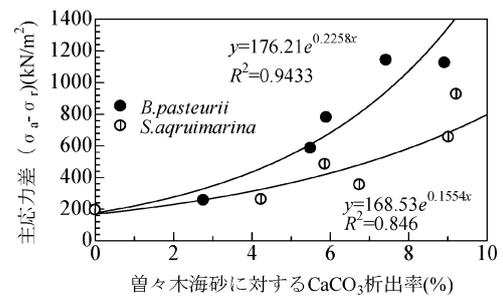
#### 5. 砂地盤を対象とした液状化強度増進<sup>6)</sup>

微生物固化処理土の適用先として砂地盤の液状化強度増進に着目し、*B. pasteurii*を用いて豊浦砂を対象とした繰返し非排水三軸試験が実施されている。

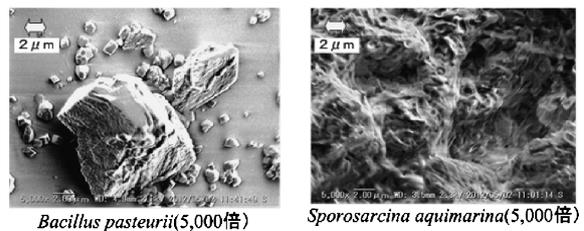
炭酸カルシウム析出率を0, 2及び3%の3段階とした供試体について行った有効拘束圧50 kPaでの繰返し非排水三軸試験の結果を図—4に示す。豊浦砂重量に対する炭酸カルシウム析出率の増加に伴い、液状化強度が増進する効果が確認されている。圧密排水(CD)三軸圧縮試験結果では顕著な強度増進効果が認められなかった低析出率(炭酸カルシウム析出率3%以下程度)においても液状化強度増進効果が認められていることから、微生物固化処理土の新たな適用先として期待される。

#### 6. まとめ

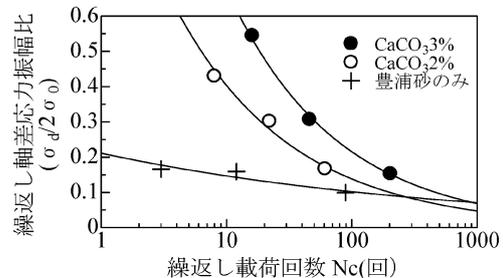
微生物固化処理土のなかで尿素の加水分解酵素(ウレアーゼ)に着目した技術について述べた。電気伝導度計



図—3 炭酸カルシウム析出率と圧縮強さの関係<sup>3)</sup>



写真—1 試験後の海砂を対象とした表面観察結果<sup>3)</sup>



図—4 微生物固化処理土の液状化強度曲線(DA=5%)

を利用した尿素の加水分解速度評価手法が提案されるとともに、室内試験の結果から海砂の固化促進効果及び砂地盤の液状化強度増進効果が期待できることが明らかとなってきている。今後は、尿素の加水分解速度が強度増進効果(結晶形状)に与える影響等について応用微生物学など他分野の知見を取り入れながら検討を進める必要があると考えられる。将来的には、原地盤に既に生息している微生物のみを用いて強度増進効果を得る新しい地盤改良技術として実用化されることを期待する。

#### 参考文献

- 1) ゲ・デ・チュウブルウノフ：地盤改良法，産業図書，pp. 52～53, 1968.
- 2) Stocks-Fischer, S., Galinat, JK. and Bang, S. S.: Microbiological precipitation of CaCO<sub>3</sub>, Soil Biology and Biochemistry, No. 31, pp. 1563-1571, 1999.
- 3) 島 俊郎・横山珠美・阿部廣史：尿素加水分解速度に基づく微生物固化技術の沿岸域への適用性評価，地盤工学ジャーナル，Vol. 8, No. 4, pp. 505～515, 2013.
- 4) 地学団体研究会編：新版地学辞典，pp. 1083～1084，平凡社，2005.
- 5) 小笠原洋・吉富健一・次重克敏：能登半島，輪島市曾々木海岸のビーチロック，日本応用地質学会中国四国支部平成16年度研究発表会，pp. 91～101, 1983.
- 6) 島 俊郎・島山正則・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(投稿中)

(原稿受理 2014.2.11)