

微生物の種類による土の固化効果の違いに関する実験的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○稲垣 由紀子 佐々木 哲也
北海道大学 正会員 川崎 了

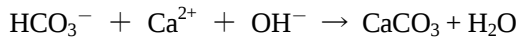
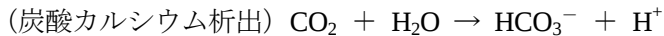
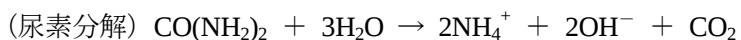
1. はじめに

微生物代謝による二酸化炭素と土の間隙中のカルシウム源から炭酸カルシウムを析出させて地盤を固化する技術（炭酸カルシウム法）は、地下水流動を妨げずに土の強度向上や液状化対策が可能な技術として期待される¹⁾。しかし、この技術に関する既往研究の多くは我が国にとって外来種の微生物である“*Sporosarcina Pasteurii*”の尿素分解作用による二酸化炭素を用いたものであり^{例えば 2)}、日本国内での地盤改良には、外来種でない微生物を利用の方が望ましい。そこで、微生物資源に関する国内のデータベースに登録があり、尿素分解作用を有する微生物を用いた場合の炭酸カルシウム析出の可能性を確認した。

2. 実験方法

2. 1 対象とした微生物

本研究では、独立行政法人製品評価技術基盤機構バイオテクノロジーセンター（NBRC）のデータベースに登録されている微生物の中から、以下の化学反応式に示すような尿素分解作用を有し、一般に想定される地中温度下でも生息可能で、それ自体に有害性のない微生物として、“*Sporosarcina Ureae*”（NBRC12699、以下 *Ureae*）および“*Sporosarcina Saromensis*”（NBRC103571、以下 *Saromensis*）を対象とした。これらの微生物の炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）析出効果について、2. 2に示すシリンジを用いた注入固化試験により“*Sporosarcina Pasteurii*”（ATCC11859、以下 *Pasteurii*）と比較した。各微生物の主な性質は表-1に示すとおりである。



2. 2 シリンジを用いた試験

実験では、容量 60mL のシリンジに蒸留水 25mL と試料土の豊浦砂 60g を投入し、微生物の培養液を通水後、栄養塩を注入した。栄養塩の注入は 1 回当たり 25mL ずつ、1 日または 2 日に 1 回、所定回数繰り返した（図-1）。新たに栄養塩が注入されると、前回までに注入されて間隙中に存在していた栄養塩等が押し出され、排水されるしくみとした（図-2）。栄養塩の注入期間中、この排水の pH についても調べた。栄養塩は、塩化カルシウム (CaCl_2) と尿素を同じモル数ずつ蒸留水に溶かしたものを用いた。栄養塩注入の終了後、シリンジ内の試料土の間隙中に析出した炭酸カルシウム (CaCO_3) の量を塩酸での分解により調べた。

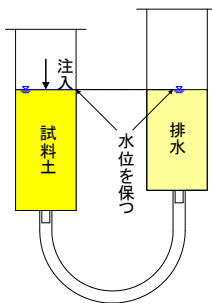


図-2 シリンジを用いた試験のしくみ

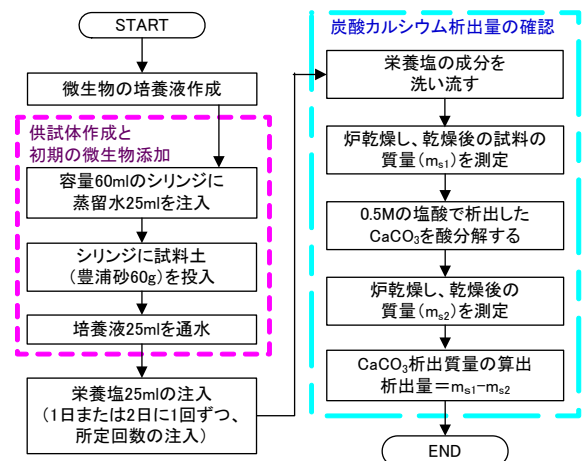


図-1 実験手順

表-2 実験条件

微生物の種類	栄養塩濃度	栄養塩の注入条件	
		注入頻度	注入回数
<i>Ureae</i>	栄養塩の各成分 (CaCl ₂ および尿素) の濃度を 0.1mol/L, 0.2mol/L, 0.5mol/L ずつ	1回/1日	4回
			8回
			16回
<i>Saromensis</i>		1回/2日	2回
			4回
<i>Pasteurii</i>			8回

キーワード：地盤改良，微生物，炭酸カルシウム法

連絡先：〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 (独) 土木研究所土質・振動チーム TEL：029-879-6771

件の組合せ毎に2本の供試体を作成した。

3. 実験結果および考察

実験結果は、 CaCO_3 析出比（豊浦砂のみの質量に対する CaCO_3 析出質量の百分率）と CaCO_3 析出効率（栄養塩の成分として注入された CaCl_2 のモル数に対する析出した CaCO_3 のモル数の百分率）で比較・考察した。これらの値は、実験条件毎に2本の供試体の平均値を取った。

栄養塩濃度（栄養塩の各成分（ CaCl_2 および尿素）の濃度）と CaCO_3 析出状況の関係について、栄養塩を1回/1日の頻度で8回注入したケースを例に図-3に示す。*Ureae*や*Saromensis*の CaCO_3 析出比や CaCO_3 析出効率は*Pasteurii*の10分の1から数分の1程度となった。栄養塩濃度に伴い CaCO_3 析出比は*Pasteurii*で増加、*Ureae*および*Saromensis*では横ばいとなったが、 CaCO_3 析出効率は、いずれの微生物を用いた場合も、栄養塩濃度0.1mol/Lの時が最も高く、注入された栄養塩が最も有効利用される結果となった。表-2に示す他の注入条件においても同様の傾向が見られた。

次に、注入頻度や注入回数と CaCO_3 析出状況の関係について、栄養塩濃度を0.2mol/Lとした場合を例に図-4に示す。 CaCO_3 析出比は注入回数の増加に伴い*Pasteurii*では増加したが、*Ureae*と*Saromensis*では顕著な増加が見られず横ばいであった。 CaCO_3 析出効率は微生物の種類、注入頻度によらず、注入回数の増加に伴って低下した。特に*Ureae*と*Saromensis*では、注入回数8回以下において注入回数の増加に伴う CaCO_3 析出効率の低下の割合が大きかった。他の栄養塩濃度でも同様の傾向が見られた。注入頻度による比較では、いずれの微生物を用いた場合も、1回/1日と1回/2日では CaCO_3 析出効率に顕著な差は見られなかった。*Ureae*や*Saromensis*を用い、栄養塩濃度0.1mol/Lとした際、注入回数4回における1回/2日での CaCO_3 析出効率が1回/1日の場合の1.5倍程度になった例外は除き、他の栄養塩濃度でも概ね同様の傾向が見られた。

栄養塩濃度0.2mol/Lの場合を例に、栄養塩注入開始時から排水のpHを調べた結果を図-5に示す。尿素分解によると考えられるpHの上昇は、注入頻度に関係なく、*Ureae*では栄養塩注入開始から6日程度、*Saromensis*では3日程度を経過した時点でピークとなり、その後は培養液を注入した直後と同程度まで下がった。*Pasteurii*については、16日経過時においてもpHが8付近の状態が続いた。尿素分解により二酸化炭素が出される効果が*Ureae*や*Saromensis*では低く、かつ数日間現れたのみであるのに対し、*Pasteurii*では継続的に見られ、このことは CaCO_3 析出状況の違いと整合している。

以上より、*Ureae*や*Saromensis*を用いても、*Pasteurii*と比べると10分の1ないし数分の1程度の量ではあるが、 CaCO_3 を析出させることは可能と考えられる。ただし、過去の実験¹⁾で強度向上や液状化対策効果を得るのに必要と考えられた CaCO_3 析出比2%には及ばず、固化状況を目視で確認しても、*Pasteurii*を用いた場合に比べて砂の固化も部分的で固化した塊の大きさも小さかった。尿素分解作用が活発で CaCO_3 析出効率の良い期間に限られることも考慮した、より効果的な注入方法について検討が必要と考えられる。

<参考文献> 1) 稲垣, 塚本, 森, 中島, 佐々木: 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, 地盤工学会, 2011. 2) Jason T. Dejong, Michael B. Fritzges and Klaus Nusslein: Microbially Induced Cementation to Control Sand Response to Undrained Shear, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, pp.1381-1392, ASCE, 2006.

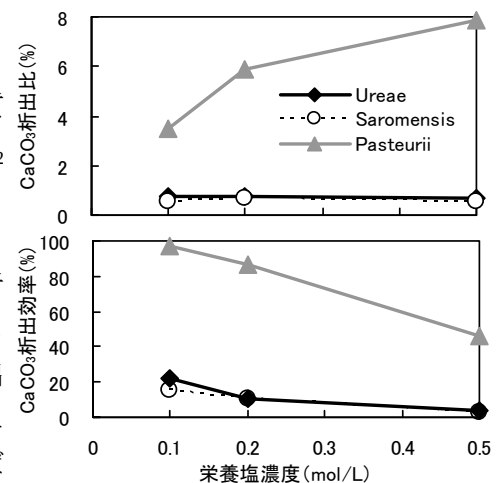


図-3 栄養塩濃度と CaCO_3 析出状況
(1回/1日・8回注入)

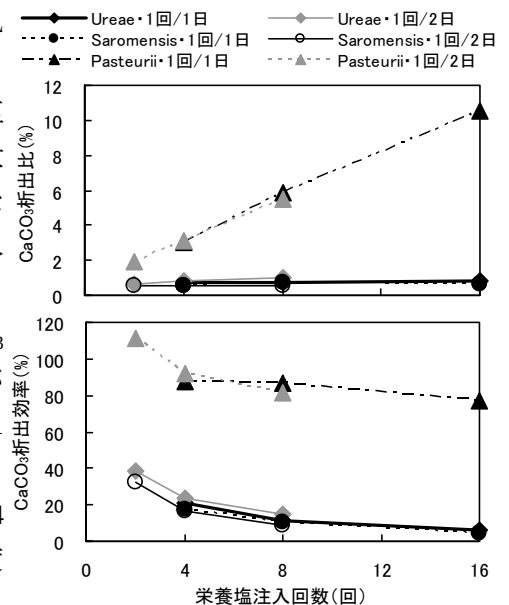


図-4 CaCO_3 析出状況
(栄養塩濃度0.2mol/L)

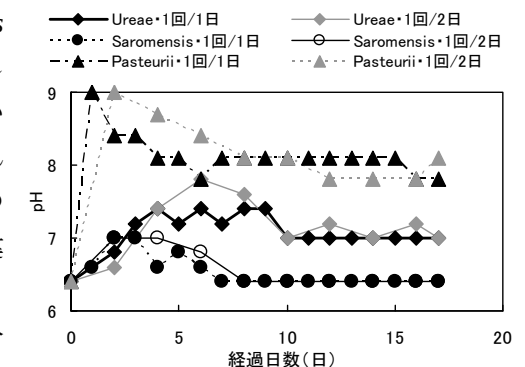


図-5 間隙内のpHの推移
(栄養塩濃度0.2mol/L)