

微生物による泥炭固化の試み

Trial of the peat solidification by microbial

寒地土木研究所
北海道大学
富山県立大学
寒地土木研究所
北見工業大学名誉教授

○ 正 員
正 員
正 員
正 員
正 員

佐藤厚子 (Atsuko Sato)
川崎 了 (Satoru Kawasaki)
畠 俊郎 (Toshiro Hata)
山梨高裕 (Takahiro Yamanashi)
鈴木輝之 (Teruyuki Suzuki)

1. はじめに

北海道の平野部面積の約 6%が泥炭で覆われている¹⁾。泥炭は、高有機質土で軟弱な土質であるため、そのままでは、盛土材料として使用できない材料である。しかし、泥炭は、固化材で改良することにより有効利用が可能である。一方で、高含水比な泥炭を固化するためには、多量な固化材が必要となり、効率的な改良方法の開発が望まれている。

近年、微生物の代謝により発生する二酸化炭素を利用した固化処理技術の研究開発が国内外で進められている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。筆者らは、これまでの検討により泥炭由来の微生物の固化実験において、泥炭改良の可能性を見出した⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。そこで、新たに数種類の泥炭について微生物の有無を確認し、その中の 1 種類の泥炭について、固化実験を行った。

本報告は、微生物による泥炭固化の実験結果をまとめたものである。

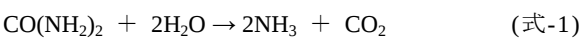
2. 微生物の代謝を利用した固化

微生物は、生命維持していくために無機物や有機物を取り入れて、二酸化炭素を排出する。この二酸化炭素と土の間隙中のカルシウム源とが反応することにより、炭酸カルシウムが析出する。微生物の代謝を利用して地盤を固化させる方法（炭酸カルシウム法）は、この反応を利用したものである。改良した地盤の力学特性はCaCO₃の析出量と相関があり¹⁰⁾、析出した炭酸カルシウムが土粒子同士を結ぶことで地盤が固化する。

泥炭のような酸性土壌に適用可能な微生物固化技術のひとつとして、尿素系の改良がある。これは、微生物のウレアーゼ活性により、尿素が加水分解され炭酸カルシウムが生成されることを利用したものである。この改良技術の反応メカニズムを以下に示す。

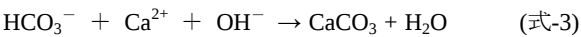
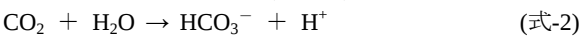
(1) 尿素の加水分解

ウレアーゼ活性を有する微生物は、尿素(CO(NH₂)₂)を加水分解して、アンモニア(NH₃)と二酸化炭素(CO₂)を生成する。



(2) 炭酸カルシウムの析出

間隙水中のカルシウムイオン(Ca²⁺)と二酸化炭素(CO₂)の反応から炭酸カルシウム(CaCO₃)が析出される。



3. ウレアーゼ活性の有無

北海道の泥炭について、ウレアーゼ活性を有する微生物がすでに生息しているかを確認した。ウレアーゼ活性試験の条件を表-1に示す。表-2に、迅速に尿素を分解する細菌の鑑別に用いられるクリステンゼン培地の組成を示す。

表-1 ウレアーゼ活性試験の条件

培地	クリステンゼンの尿素寒天(表-2)
培養温度	30℃
培養時間	7日
希釈液	生理食塩水
希釈倍率	現液(検体1gを9mlの生理食塩水で懸濁)
分離方法	0.1ml表面塗抹
塗抹枚数	同一希釈を各2枚
その他条件	好気
判定	培地が赤変したものを陽性と判定

表-2 クリステンゼン培地の組成

培地成分	含有量
ペプトン	1.0g
塩化ナトリウム	5.0g
グルコース	1.0g
リン酸2水素カリウム	2.0g
フェノールレッド	0.012g
尿素	20.0 g
寒天	15.0g
超純水	1000ml
pH	6.8に調整

図-1に示す、岩見沢1・2、岩内1・2、富川、北島、北広島、江別太の8試料について、ウレアーゼ活性の有無を調べた。ウレアーゼ活性試験の結果を写真-1に示す。試験を行った8試料すべてで培地が赤変しており、ウレアーゼ活性を持つ微生物が泥炭内に生息していることが確認できた。



図-1 ウレアーゼ活性試験の泥炭採取箇所

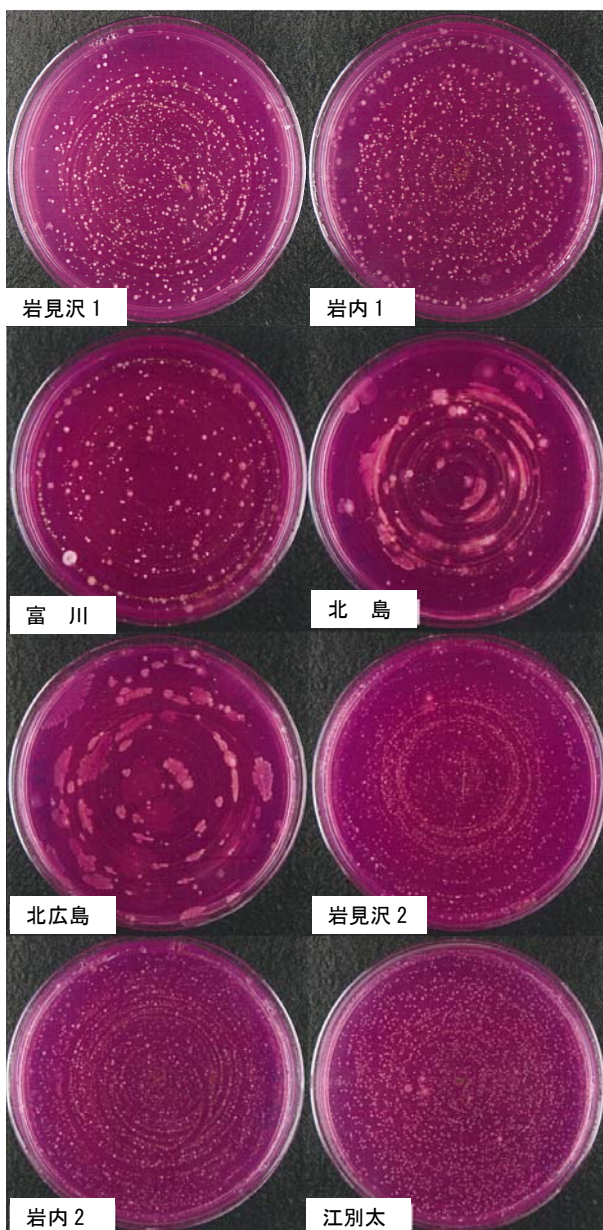


写真-1 ウレアーゼ活性試験平板像

4. 試験条件

北海道の泥炭には、ウレアーゼ活性があることが確認できたので、確認できた泥炭について微生物による固化実験を行うこととした。これまでの固化実験では、泥炭の含水比が高かったため発現強度が小さかったので、含水比を低下させた泥炭について炭酸カルシウム法により固化を試みることとした。試験に用いた泥炭は表-3に示す江別太である。北海道の泥炭の中では比較的分解が進んでいる¹¹⁾(写真-2)。

表-3 泥炭の基本物性値

物性値	江別太
含水比 (%)	545.92
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	1.895
強熱減量 L_d (%)	56.653
pH	4~5



写真-2 泥炭(江別太)

2 週間の自然乾燥により、江別太泥炭の含水比は336%となった。この状態で固化実験をすることとした。塩化カルシウムの混合量が多くなることにより、pH が酸性となることから、pH を中性に調整するため、重曹または、消石灰を混合した。また、尿素分解をより促進するために、ナマタメ由来のウレアーゼを混合した。

尿素と塩化カルシウムの混合量は、泥炭の含水比を336%として、次の計算によった。1.5kg の泥炭を改良するとした場合、泥炭中の乾燥土量は、

$$1500\text{g} \div (1 + 336\% / 100) = 344\text{g}$$

泥炭中の水分量は

$$1500\text{g} - 344\text{g} = 1156\text{g}$$

尿素混合量は、水分量の 1/10 として、116g

塩化カルシウム混合量は、尿素混合量の 2 倍とし、233g とした。

泥炭は酸性土壌であり、今回試験に使用した江別太の pH も 4~5 であった。また、これまでの試験では、固化の程度が小さかったので、本検討では、これまでよりも多くの尿素と塩化カルシウムを混合することとした。微生物による固化では、pH が中性域の場合にその効果が良好であるといわれている。酸性な泥炭に塩化カルシ

ウムを加えると、より酸性化すると考えられたので、pH を調整するために、アルカリを示す重曹もしくは消石灰を用いることとした。尿素と塩化カルシウムを混合した泥炭 1.5kg に対して、重曹 20g または、消石灰 50g を混合したときの、混合からの時間と pH の変化を図-2 に示す。泥炭に尿素と塩化カルシウムを混合すると pH が3程度まで低下している。これに、重曹または消石灰を混合すると、時間の経過とともに徐々に pH が増加している。この傾向から、重曹 20g、消石灰 50g の混合は、材料土の中性化が可能な量であると判断し固化実験を行った。固化実験の配合を表-4 に示す。

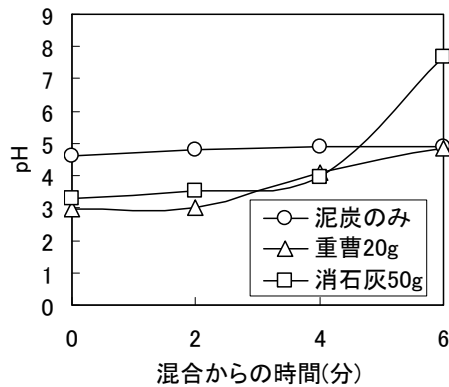


図-2 混合からの時間と pH の変化

表-4 固化実験の配合(g)

	尿素 CO(NH ₂) ₂	塩化カルシウム CaCl ₂	重曹 NaHCO ₃	消石灰 Ca(OH) ₂	ウレアゼ*
①	116	232	-	-	-
②	116	232	20	-	-
③	116	232	20	-	3.5
④	116	232	-	50	3.5
⑤	116	232	-	50	-

さらに、土の炭酸塩含有量を簡易的に測定した。ここでは式-4 に示すように、炭酸塩が酸によって溶解して、塩化カルシウムと二酸化炭素ガスを発生することを利用し、二酸化炭素のガス圧を測定することにより、炭酸カルシウムの含有量を測定する¹³⁾。



図-3 に示す透水試験用モールドを改良した簡易測定器によりガス圧を測定した。測定は、一軸圧縮試験終了後の供試体を用いた。塩酸 10cc と蒸留水 100cc を混合した希塩酸と、10g の供試体を簡易ガス測定器に入れ、密封した後、簡易ガス測定器ごと振って、容器内で試料と希塩酸を混合したときの圧力計の目盛りを読んだ。圧力計の最低読み値は 0.002MPa である。

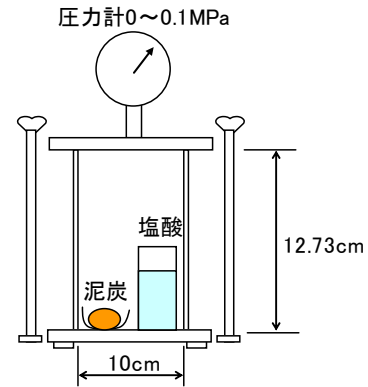


図-3 簡易ガス圧測定器

5. 試験結果

5.1 一軸圧縮強さ

地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」¹²⁾により直径 5cm、高さ 10cm の供試体を作製し、1 か月養生後に一軸圧縮強さを求めた。

各供試体の一軸圧縮強さを表-5 に示す。どの供試体も作製したときは、軟弱で自立できなかった。しかし、1 か月後には、③、④のウレアゼを混合した供試体に、若干の強度発現が認められた。これより、泥炭中の微生物が活性化して尿素を分解できれば、泥炭を固化できる可能性があるといえる。②③と④⑤では、pH が異なっていた。pH が中性域の③で強度発現が大きかった。消石灰 50g 混合では、アルカリとなったため、強度発現が低かったことが考えられる。今後、中性化に適した混合量を求め、強度発現を確認したい。

なお、各配合について、供試体作製時と 1 か月後の含水比を調べた。1 か月後の含水比は作製時よりも 15%~50%程度低下していた。⑤では、作製時と 1 か月後では、含水比に 50%程度の差があったが、強度の変化はほとんどなかった。このことより、今回の試験では、含水比が低下しても強度発現にはほとんど影響を与えていないと言えることから、③、④の強度発現は、含水比の影響を受けていないと判断できる。

表-5 一軸圧縮試験結果

	一軸圧縮強さ qu(kN/m ²)	pH	含水比w(%)	
			作製時	1か月後
①	6.9	5.03	332.33	312.44
②	6.5	5.44	175.07	162.03
③	25.2	6.11	186.74	168.92
④	13	10.82	182.73	138.86
⑤	6.5	11.07	201.37	149.59

5.2 炭酸カルシウム量

微生物の反応で発生したガス圧を測定した結果を表-6 に示す。すべての供試体で、圧力計の最低読み値よりも圧力は大きくなっており、炭酸カルシウムが存在してい

ることを示している。①の場合も 0.003MPa のガス圧が発生していた。②、⑤のガス圧は、①よりも、少しだけ高かった。①、②、⑤は一軸圧縮強さがほぼ同じであり、ガス圧の違いも誤差の範囲とも考えられる。しかし、強度には表れないようにごく少量の炭酸カルシウムが析出した可能性もある。これまでの実験では強度発現まで、6 か月以上を要しており、今後さらに時間経過による強度発現を確認していきたい。

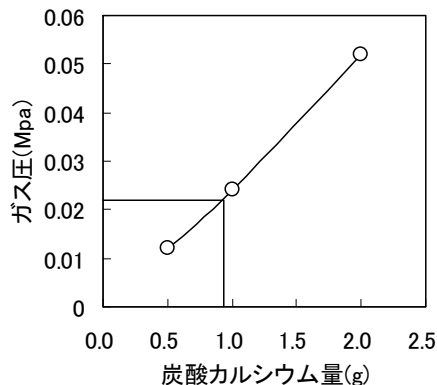
表-6 ガス圧の測定結果

	ガス圧(MPa)
①	0.0030
②	0.0040
③	0.0220
④	0.0042
⑤	0.0034

一軸圧縮強さで明らかに強度発現が確認できた③については、ガス圧が大きく、炭酸カルシウムが析出されたといえる。

そこで、どの程度の炭酸カルシウムが析出されたかを確認するため、図-4 は、塩酸 10cc と蒸留水 100cc に 0.5、1.0、2.0g の炭酸カルシウムを混合したときのガス圧を測定し、図-4 に整理した。炭酸カルシウム量とガス圧は比例関係にある。③は、10g の改良体で 0.022MPa のガス圧であったので、約 0.9g の炭酸カルシウムが析出されたといえる。

図-4 炭酸カルシウム量とガス圧の関係



6. まとめ

今回の実験により、調査した泥炭のすべてでウレアーゼ活性を示す微生物の確認ができた。また、ウレアーゼの混入により、強度発現を確認した。さらに、改良体のガス圧を測定することにより、炭酸カルシウムの析出が確認できた。これらのことから、泥炭に存在する微生物により、泥炭を固化できる可能性があることがわかった。

7. おわりに

本検討では、改良 1 か月後の強度発現、炭酸カルシウムの析出を確認した。しかし、添加した塩化カルシウムの 60～80%程度、炭酸カルシウムに変化していると考えられることから、今後さらに継続して計測を行い、固化能力を確認する予定である。また、泥炭中に存在する微生物の量が少ないことから、固化に必要な微生物を活性化させる方法についても検討したい。さらに、微生物により改良した材料を固化材により改良したときの固化材のみの改良との経済性の比較も行いたいと考える。

参考文献

- 1) 能登繁幸：泥炭地盤工学、pp.4-7、技報堂出版 1991.
- 2) Victoria S. Wiffen, Leon A. van Paassen and Marien P. Harkes : Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique, Geomicrobiology Journal, 24, pp.417-423, 2007.
- 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、Vol.47、No.1、pp.2-12、2006.
- 4) 畠俊郎、桑野玲子、阿部廣史：微生物機能を用いた原位置透水性制御手法に関する基礎的研究、土木学会論文集 G、Vol.64、No.1、pp.168-176、2008.
- 5) 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、157-167、2011.7.
- 6) 有山萌奈、川崎 了、佐藤厚子、畠 俊郎：泥炭のバイオ固化処理に関する基礎的研究、資源・素材学会北海道支部平成 23 年度春季講演会、2011.6.
- 7) 野本侑里、畠 俊郎、川崎 了、佐藤厚子：泥炭由来の土壌微生物を用いた炭酸カルシウム析出に関する検討、平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 CD-ROM、文番号VII-26、pp.623-624、2011
- 8) 畠 俊郎、佐藤 厚子、川崎 了、阿部 廣史：高有機質土（泥炭）由来の土壌微生物による炭酸カルシウム析出技術に関する実験的研究、土木学会論文集 C、Vol. 68、No. 1、2012.
- 9) 佐藤厚子、西本 聡、川崎 了、畠 俊郎：微生物を利用した泥炭固化の試み、第 10 回地盤改良シンポジウム論文集、pp.311-314、2012.10.
- 10) 稲垣由紀子、塚本将康、森 啓年、中島 進、佐々木哲也：微生物代謝による液状化対策効果に関する動的遠心模型実験、第 55 回地盤工学シンポジウム 平成 22 年度論文集、pp.221-228、2010.
- 11) 土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、p.4、2011.3.
- 12) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、2000.
- 13) 福江正治、加藤義久、中村隆昭、森山 登：土の炭酸塩含有量の測定方法と結果の解釈、土と基礎、Vol.49-2、2001.2.