

微生物機能を活用した次世代地盤改良技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 25

担当チーム：寒地地盤チーム

研究担当者：山梨高裕、福島宏文、佐藤厚子

【要旨】

微生物の代謝により発生する二酸化炭素を利用した地盤の固化処理技術の研究開発が国内外で進められている。寒地地盤チームでは、微生物機能を活用した地盤改良技術を泥炭に適用するための検討を行った。泥炭は、高含水比で極めて軟弱であることから、周辺の副産物の混合または乾燥により含水比を一定程度まで低下させた泥炭について、微生物による固化実験を行うこととした。その結果、含水比を低下させた泥炭を、泥炭に含まれる微生物により、運搬可能な強度まで改良できる可能性があることなどがわかった。

キーワード：泥炭、微生物、固化、シリカ法、炭酸カルシウム法

1. はじめに

泥炭は高有機質土であるため、泥炭を材料として盛土を施工した場合には、時間経過にともない腐食が進み、沈下、強度低下などが懸念される。したがって、そのままの状態では、盛土材として使用することができない材料である。このため、泥炭を盛土材として改良する技術としては、固化材による改良が一般的な方法である。しかし、泥炭は高含水比であるため、固化材により改良する場合には、多量の固化材が必要となる。近年、二酸化炭素の排出削減が求められる中、地盤改良分野においてもより環境負荷の少ない技術が求められており、例えば、製造時に二酸化炭素を多量に排出する固化材による地盤改良では、固化材の使用量の低減が求められている。

一方、微生物の代謝にともない発生する二酸化炭素を利用した地盤の固化技術に関する研究が、最近の国内外で進んでいる。そこで、泥炭中に含まれる微生物、あるいは、少量の微生物添加などにより泥炭の固化が可能となれば、固化材による改良を行う場合、使用する固化材量を低減できることが期待される。これまでの研究により、泥炭そのものに含まれる微生物を用いて、炭酸カルシウム法による固化実験¹⁾およびイースト菌とシリカを用いたシリカ法による固化実験²⁾により、発現強度は小さいものの泥炭固化の可能性が明らかになった。

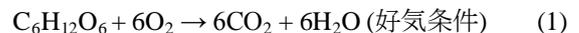
本課題は、地盤中の微生物を利用して泥炭を固化することを目的として、シリカ法および炭酸カルシウム法による固化を行ったものである。

2. 微生物を利用した地盤改良技術

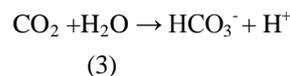
微生物を利用した地盤改良技術のうち、シリカ法および炭酸カルシウム法による固化の反応メカニズムを以下に示す

2.1 シリカ法²⁾

微生物の代謝により式(1)、式(2)のように二酸化炭素が発生する。



次に発生した二酸化炭素により式(3)の反応が起こる。



この反応によりpHが低下し、式(4)に示す反応が起こり、コロイダルシリカの粒子同士の凝集が始まる。さらに、シロキサン結合が生じてゲル化し、粒子の間隙を埋める。

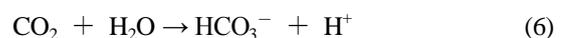


2.2 炭酸カルシウム法³⁾⁴⁾

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。



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。



炭酸カルシウムは、土粒子同士を結合させる働きがあり、土の強度が増加する。

3. 試験方法

3.1 ウレアーゼ活性試験

図-1に採取箇所を示す。北海道の泥炭(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、ウレアーゼ活性を有する微生物がすでに生息しているかを確認するための試験をした。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。



図-1 ウレアーゼ活性試験の泥炭採取箇所

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

3.2 含水比低下泥炭に対する改良

泥炭は高含水比で極めて軟弱であるため、そのままの状態では運搬できない材料である。また、曝気乾燥により運搬可能な強度(一軸圧縮強さ $q_u=50\text{kN/m}^2$)⁵⁾となるまで含水比を低下するには、かなりの時間を要する⁶⁾。

微生物機能を活用した地盤改良技術においても、含水比を低下させることが強度発現可能となると考えた。その方法として、泥炭に、周辺で発生する副産物を重量比で50%混合(以降、副産物混合泥炭と称する)して含水比を低下させ微生物固化改良実験を行った。副産物は、燐炭(もみガラを焼いて炭にしたもの)、珪藻土、ベントナイト、ライムケーキ(ビールから砂糖を精製する際に排出される副産物)である。これらの材料に対して、シリカ法および炭酸カルシウム法により微生物固化改良を行った。なお、シリカ法では、泥炭固化の実験成果のある⁷⁾イースト菌を使用した。

また、乾燥により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微生物固化改良を行った。

3.2.1 副産物混合による含水比低下泥炭に対する固化改良

微生物固化実験に用いた泥炭の基本物性値を表-3に示す。北海道の泥炭の中では比較的分解が進んでいる⁸⁾(写真-1)。

表-3 泥炭の基本物性値

	岩見沢
含水比(%)	292.89
土粒子密度(t/m^3)	2.176
強熱減量(%)	31.961
pH	4.98



写真-1 岩見沢の泥炭

シリカ法による固化として、副産物混合泥炭 600g に対して、コロイダルシリカ溶液 50ml、イースト菌 50g を混合した。

シリカ法では、ライムケーキを混合した副産物混合泥炭では、試験を行わなかった。

炭酸カルシウム法による固化として、副産物混合泥炭600gについて、塩化カルシウム80g、尿素40gを添加した。

それぞれの材料を直径5cm、高さ10cmモールドに詰め、シリカゲル法では20℃、炭酸カルシウム法では5℃と20℃で養生し、供試体作製時、約1か月後、5～6か月後、7～8か月後に一軸圧縮強さを求めた。同様に直径6cm、高さ3cmの供試体を作製しフォールコーン貫入量を求めた。

3.2.2 含水比低下泥炭にウレアーゼを混合した固化改良

泥炭中に含まれる微生物の量が少ないため、泥炭に尿素および塩化カルシウムを添加した場合には、固化効果が得られるまで相当期間必要になると考えられる。そのため、施工直後は酵素製剤による短期強度増進を期待し、長期強度として現地に既に生息しているウレアーゼ産出微生物を用いる新しい地盤改良技術の適用性について検討することとした。酵素製剤は試薬として販売されているウレアーゼ（なた豆製）で、酵素活性は2970U/gである。

試験に用いた泥炭は表-4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⁸⁾(写真-2)。

表-4 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 _t (%)	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%となり、この状態で炭酸カルシウム法により、固化実験をすることとした。

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、

$$1500g \div (1 + 336/100) = 344g$$

泥炭中の水分量は

$$1500g - 344g = 1156g$$

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、232g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、副産物混合による含水比低下泥炭に対する固化改良試験では、固化の程度が小さかったので、本検討では、より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⁹⁾。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と判断し固化実験を行った。

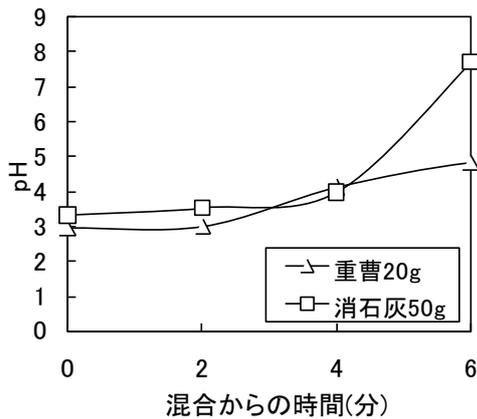


図-2 混合からの時間と pH の変化

固化実験の配合を表-5に示す。各配合において、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」¹⁰⁾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。

表-5 固化実験の配合(g)(炭酸カルシウム法)

	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	ウレアーゼ ^a
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、土の炭酸カルシウムの含有量を簡易的に測定した。ここでは式(8)に示すように、炭酸カルシウム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¹¹⁾。

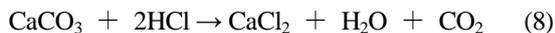
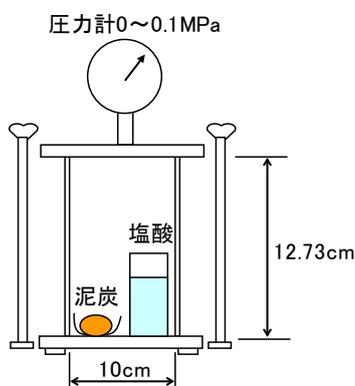


図-3に示す透水試験用モールドを改良した簡易測定器によりガス圧を測定した。測定は、一軸圧縮試験終了後の供試体を用いた。塩酸10ccと蒸留水100ccを混合した希塩酸と、10gの供試体を簡易ガス



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

4. 試験結果

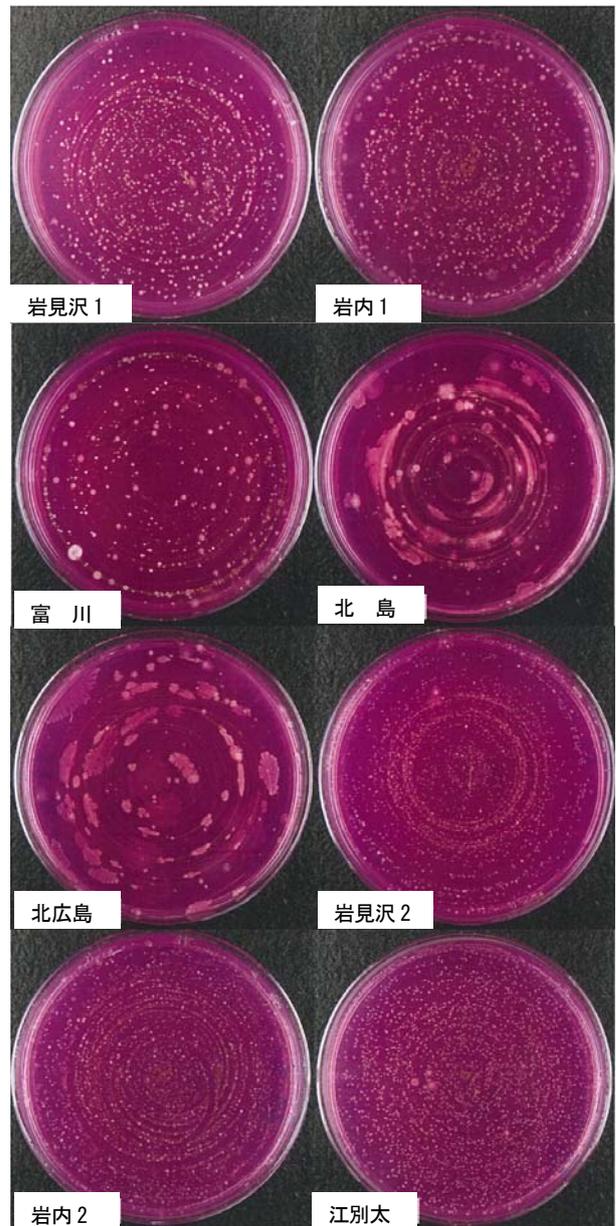
4.1 泥炭のウレアーゼ活性の有無

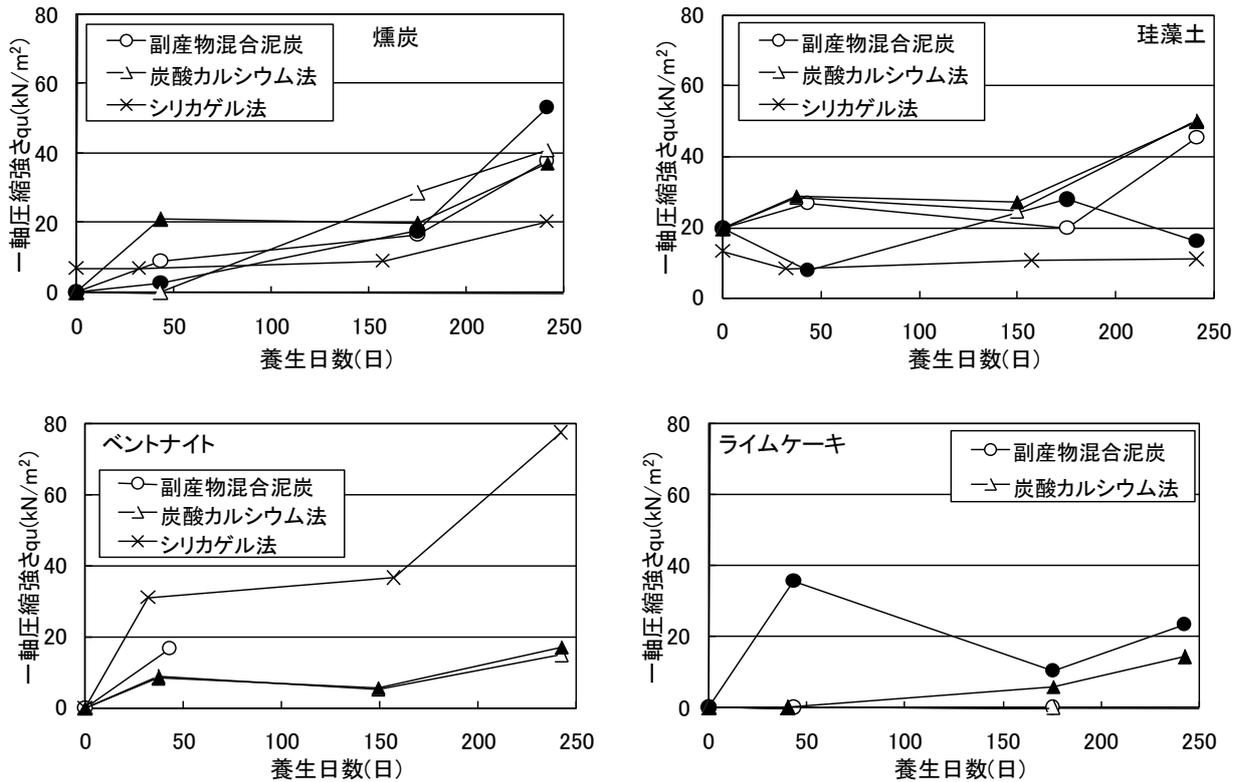
ウレアーゼ活性試験の結果を写真-3に示す。試験を行った8試料すべてで培地が赤変しており、ウレアーゼ活性を持つ微生物が泥炭内に生息していることが確認できた。

写真-3 ウレアーゼ活性試験平板像

4.2 含水比低下泥炭に対する固化改良結果

4.2.1 副産物混合による含水比低下泥炭に対する固化改良結果





白抜き：5°C養生 黒塗り：20°C養生

図-4 養生日数と一軸圧縮強さ

含水比低下泥炭をシリカ法、炭酸カルシウム法により改良した材料の養生時間と一軸圧縮強さの関係を図-4に示す。泥炭のみでも自立不可能な材料であったが、含水比低下材料を混合しても、ほとんどの材料で供試体作製直後は自立しなかった。しかし、一部の供試体を除いて、ほとんどの材料で、養生時間が長くなると供試体は自立するとともに一軸圧縮強さが大きくなった。燻炭と珪藻土では、炭酸カルシウム法がシリカ法よりも大きな強度となった。ベントナイトでは、シリカ法が炭酸カルシウム法よりも大きな強度となった。燻炭、珪藻土、ベントナイトでは、養生温度と強度には、明確な関係は見受けられなかったが、ライムケーキでは含水比低下泥炭と炭酸カルシウム法で、養生温度が20°Cの方が大きな強度となった。養生期間3~4か月では、材料運搬に必要な一軸圧縮強さ50kN/m²を得ることができなかったが、養生期間7~8か月では、燻炭では含水比低下泥炭20°C養生、珪藻土では炭酸カルシウム法5、20°C養生、ベントナイトではシリカ法で一軸圧縮強さ50kN/m²を得ることができ、運搬可能な材料とな

った。ライムケーキを除いて、養生期間3~4か月から、養生期間7~8か月にかけて一軸圧縮強さが、急激に大きくなる傾向が見られた。含水比低下材料、固化の方法、養生時間、養生温度により、泥炭を固化できる可能性がある。なお、泥炭のpHは5程度であったが、一軸圧縮試験時のpHは7程度であった。

4.2.2 乾燥による含水比低下泥炭に対する固化改良結果

(1) 一軸圧縮強さ

各供試体の一軸圧縮強さを表-6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のウレアー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。

表一 6 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	13.0	10.82	182.73	138.86
⑤	6.5	11.07	201.37	149.59

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。

(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一 7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。

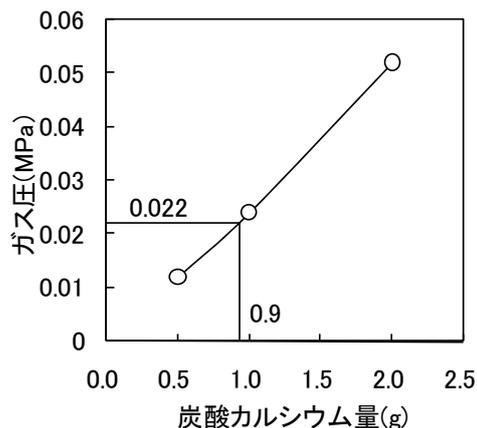
表一 7 ガス圧の測定結果

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

泥炭のみの①の場合でも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する必要がある。

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、炭酸カルシウムを混合したときのガス圧を測定した(図一 5)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。



図一 5 炭酸カルシウム量とガス圧の関係

5. まとめ

本研究では、微生物を利用した固化実験として、シリカ法および炭酸カルシウム法により泥炭の固化を行った。その結果、以下のことがわかった。

1) 泥炭に燻炭、珪藻土、ベントナイト、ライムケーキなどの副産物を混合し、シリカ法および泥炭に含まれる微生物による炭酸カルシウム法で泥炭を改良すると、時間の経過とともに、強度が増加する傾向が見られ、養生期間を7~8か月とすれば、混合する材料の種類、養生温度、改良の方法によっては、運搬可能な材料となることがある。

2) 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、強度発現が少ない場合でも、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。

今後、北海道各地の泥炭に含まれる微生物の種類を調べるとともに、固化前と固化後での微生物の種類や数の違いを把握し、泥炭の改良に適した微生物を確認する。また、微生物により改良した材料をさらに固化材で改良することにより、経済性の比較も

行う必要がある。さらに、現位置に生息する固化能力を持った微生物の活性を高める地盤条件、長期間の養生による固化能力などについても検討を進めたい。

参考文献

- 1) 島 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に関する実験的研究、土木学会論文集C、Vol.68、No.1、31-40、2012.
- 2) 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.
- 3) Victoria S. Whiffin, Leon A. van Paassen, Marien P. Harkes: Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, Geomicrobiology Journal, Volume 24, Issue 5, pp.417-423, 2007.
- 4) 福江正治、小野信一、佐藤義夫、坂本泉：ウレアーゼ産生微生物による炭酸塩粒子の成長、地盤工学ジャーナル、Vol.6、No.3、pp.455-464、2011.
- 5) 北海道開発局事業振興部技術管理課：北海道開発局における建設副産物適正処理の手引き、2008.6.
- 6) 佐藤厚子、西川純一、山澤文雄：泥炭の盛土材利用に関する検討、第34回地盤工学研究発表会、1999.7.
- 7) 有山萌奈、川崎了、佐藤厚子、島俊郎：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年度春季講演会講演要旨集、pp.53-54、2011.
- 8) 土質工学会高有機質土の力学的性質および試験方法に関する研究委員会：高有機質土の工学、1990.3
- 9) 椋木俊文、吉永智昭、川崎了：異なるpH および有機栄養源がバイオグラウトの生成に及ぼす影響評価に関する基礎的研究、地盤工学ジャーナル Vol. 5, No. 1, 69-80, 2010.
- 10) 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.
- 11) 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.

STUDIES ON NEW SOIL IMPROVEMENT BY MICROBIAL FUNCTIONS

Budgeted : Grants for operating expenses General account

Research Period : FY2011-2013

Research Team : Cold-Region Construction Engineering Research Group
(Geotechnical)

Author : YAMANASHI Takahiro

FUKUSHIMA Hirofumi

SATO Atsuko

Abstract : R&D on land solidification treatment technology using carbon dioxide generated by the metabolism of microbes has proceeded within and beyond Japan. The Geotechnical Research Team conducted a land-improvement technology study on using microbial activity to improve peaty soil. Since peaty soil has high moisture content and is extremely soft, we used such soil for solidification tests using microbes. The moisture content of the soil was lowered to a certain level by mixing with peripheral byproducts or by drying. The results confirmed that the strength of low-moisture peaty soil could be improved by microbial action toward enabling the soil to be transported.

Key words : peat, microbial, colloidal silica solution, calcite