

微生物による泥炭固化に関する研究

共同研究報告書

令和 3 年 3 月

国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所
公立大学法人富山県立大学大学院

Copyright © (2021) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、国立研究開発法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、国立研究開発法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

微生物による泥炭固化に関する研究

共同研究報告書

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ 寒地地盤チーム

上席研究員 山梨 高裕^{※1} (平成26年7月～平成27年3月)

上席研究員 林 憲裕^{※2} (平成27年4月～平成29年3月)

総括主任研究員 福島 宏文^{※3} (平成26年7月～平成27年3月)

総括主任研究員 林 宏親 (平成27年4月～平成29年3月)

主任研究員 佐藤 厚子 (平成26年7月～平成29年3月)

公立大学法人富山県立大学大学院工学部 環境工学科

准教授 畠 俊郎

※1：現 北海道開発局札幌開発建設部札幌道路事務所所長

※2：現 北海道開発局開発監理部開発連携推進課長

※3：現 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所特別研究監付技術調査室長

要旨

土木構造物建設のコスト縮減、材料製造時の温室効果ガス削減などが求められている中、低コストで環境負荷の少ない地盤改良技術の確立が必要とされている。

そこで、セメントを使用した泥炭の固化処理に代わる新しい固化処理の方法として、微生物機能を利用して泥炭を固化する技術の実用化に向けて、微生物の施工条件や環境条件等の違いが固化した土の力学特性に与える影響を把握することを目的として、国内外の情報収集、微生物による泥炭の固化実験、微生物により固化した泥炭の化学的な反応の検証を行った。

その結果、炭酸カルシウム法により、泥炭を固化できる可能性を見いだした。

キーワード：泥炭、微生物、固化、炭酸カルシウム法、ウレアーゼ活性

目 次

1. はじめに	1
2. 研究内容	1
3. 国内外の情報収集	1
3.1 論文	1
3.2 情報交換	2
4. 微生物による泥炭の固化実験および泥炭固化の化学的な反応の検証	3
4.1 泥炭固化の目的	3
4.2 微生物の代謝活動を利用した固化の方法	4
4.3 北海道の泥炭の性質	5
4.4 微生物による泥炭の固化	8
4.5 微生物による泥炭の固化改良結果	12
4.6 ウレアーゼ活性の評価	20
5. まとめ	21
【参考文献】	22

1. はじめに

土木構造物の建設コスト縮減、材料製造時の温室効果ガス削減などが求められている中、低コストで環境負荷の少ない地盤改良技術の確立が必要とされている。本研究は、セメントを使用した泥炭の固化処理に代わる新しい固化処理の方法として、微生物機能を利用して泥炭を固化する技術の実用化に向けて、微生物の施工条件や環境条件等の違いが固化した土の力学特性に与える影響を把握することを目的としている。これらを達成するためには、国内外の情報収集、微生物による泥炭の固化実験、泥炭固化の化学的な反応の検証を行う必要がある。

富山県立大学は、微生物固化に関する専門知識を有している研究者・技術者が所属しており、土に含まれている微生物に関する豊富な知見を有している。当研究所は、泥炭固化に関する研究を共同研究に先がけ5年間（平成21年度～平成25年度）実施しており、微生物機能を利用した固化技術についての研究実績を有している。本報告書は、当研究所と富山県立大学が共同研究（平成26年度～平成28年度）を行った結果をまとめたものである。

2. 研究内容

微生物固化の方法として、炭酸カルシウムによる方法を中心として、室内試験を行い、盛土などへの適用性について検討を行う。

- ①国内外の情報収集
- ②微生物による泥炭の固化実験
- ③泥炭固化の化学的な反応の検証

3. 国内外の情報収集

3.1 論文

国内外で報告されている微生物固化に関するおもな論文は次のとおりである。

- 1) 坂崎利一、吉崎悦郎、三木寛二：新 細菌培地学講座・下I、近代出版、1988.
- 2) R. Y. スタニエ、E. A. エーデルバーグ、J. L. イングラム、M. L. ウィーリス著、高橋甫、斎藤日向、手塚泰彦、水島昭二、山口英世訳：微生物学入門編、pp. 67-74、培風館、1980.9.
- 3) 福江正治、中村隆昭：炭酸カルシウムによるセメンテーション効果の定量方法、土木学会第53回年次学術講演会、III-A45、pp.88-89、1998.
- 4) 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- No.2、pp.9-12、2001.2.
- 5) 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.

- 6) Whiffen, V. S., van Paassen, L. A. and Harkes, M. P. : Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiology Journal*, Vol. 24, pp. 417-423, 2007.
- 7) 藤本敏幸：微生物の醗酵特性に及ぼす微粒子の作用に関する研究、高知工科大学修士論文、2007.
- 8) 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. 2、pp. 168-176、2008.
- 9) 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.
- 10) 川崎了、小瀧暁、広吉直樹、恒川昌美、金子勝比古、寺島麗：土壌微生物による炭酸カルシウム析出に及ぼす温度の影響、応用地質、Vol. 51、No. 1、pp. 10-18、2010.
- 11) 椋木俊文、吉永智昭、川崎了：溶媒のpHおよび有機栄養源がバイオカバーソイルの生成と特性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、pp. 69-80、2010.
- 12) 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、2011.7.
- 13) 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.
- 14) 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、pp.53-54、2011.6.
- 15) 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、pp.31-40、2012
- 16) 畠 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、2013.10.
- 17) 佐藤厚子、川崎 了、畠 俊郎、山梨高裕、鈴木輝之：微生物による泥炭固化の試み、土木学会北海道支部平成25年度論文報告集、第70号、C-06、2014.2.
- 18) 佐藤厚子、川崎 了、畠 俊郎、山梨高裕：微生物を利用した泥炭の固化実験、第69回土木学会年次学術講演会講演概要集、III-116、pp.231-232、2014.7.

3.2 情報交換

国内外の研究者によるセミナーやワークショップを開催した。その概略は次のとおりである。

①微生物を用いた地盤改良に関するショートセミナー

平成27年12月8日、寒地土木研究所において、日本学術振興会の外国人招へい研究者（招へい機関：北海道大学（川崎了教授））として来日中の Varennyam ACHAL 博士（中国上海・華東師範大学・准教授）により、「バイオセメントを用いたエコシティのための自然に学ぶ持続可能な解決策」と題してショートセミナーが開催された。

②第6回次世代地盤改良技術に関するワークショップ

平成27年10月20日、富山国際会議場 大手町フォーラムにおいて、富山県立大学工学

部の中島範行教授による「微生物の機能を活用した環境に優しい凍結防止剤の開発」と題した基調講演、7課題によるワークショップが土木研究所と富山県立大学の主催、その他学協会の後援で開催された。

③第7回次世代地盤改良技術に関するワークショップ

平成29年1月19日、寒地土木研究所において、北海道大学大学院工学研究院川崎了教授による「ビーチロックに学ぶ国土修復保全技術の開発」、富山県立大学工学部の畠俊郎准教授による「深海域などの特殊環境を対象とした微生物固化技術の新たな試みについて」と題した基調講演、8課題によるワークショップが土木研究所と富山県立大学の主催、その他学協会の後援で開催された。

4. 微生物による泥炭の固化実験および泥炭固化の化学的な反応の検証

4.1 泥炭固化の目的

北海道の平野部面積のうち、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²⁾。泥炭は汚泥に分類されることから管理型最終処分場で処分しなければならず³⁾、その費用は安くない。この泥炭を土木材料として安価に有効利用できれば、処分費を低減できるだけでなく、現場に必要な材料の購入費が不要となる。これにより、工事に要するコストを縮減でき、かつ、資源の有効活用や環境への負担の軽減となる。

泥炭の地盤改良技術の方法として、圧密を促進させる方法と固化材により改良する方法がある⁴⁾⁵⁾。しかし、高有機質、高含水比の泥炭を固化するためには、一般的な不良土を改良する場合と比較して、多量の固化材が必要である。過去の検討では、泥炭そのものを固化する方法として、セメントや石灰を用いる検討を実施したところ⁶⁾、泥炭を固化材で改良するためには、重量の70%以上の固化材が必要であることが判明し、環境への高負荷、高コストが懸念される。このため、より効率的な改良方法の開発が望まれている。

一方、近年、土壌中に含まれる微生物の代謝活動を利用した地盤の固化改良技術が注目され、国内外において研究開発が進められている⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。泥炭中に生息している微生物により運搬可能な強度まで泥炭を固化した後、固化材による改良を行えば、使用する固化材量が低減でき、低環境負荷、低コストな改良が可能になると考えられる。

微生物の代謝活動を利用した固化に関する既往の研究では、透水性の良好な砂質土を対象として、固化が確認されている微生物を購入して用いている場合が多い。本研究で注目している泥炭のような高有機質、高含水比の土質を施工現場由来の微生物により固化した事例は存在しない。そこで、北海道の泥炭を対象として、泥炭中に生息する微生物の代謝活動を利用した泥炭の固化実験を行うこととした。

本検討では泥炭から微生物を単離することなく、泥炭に自然に生息している微生物のみを用いて固化する実験を行うこととした。固化の目標を運搬可能な強度¹¹⁾である一軸圧縮強さ50kN/m²とした。

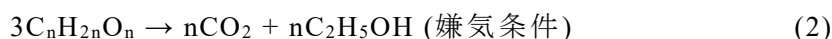
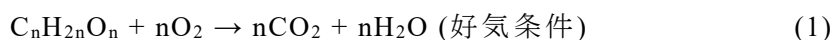
4.2 微生物の代謝活動を利用した固化の方法

微生物の代謝活動を利用した固化改良技術としては、シリカ法¹²⁾、炭酸カルシウム法¹⁰⁾などがある。本研究では、シリカ法および炭酸カルシウム法による微生物固化技術に関する実験を行った。以下、実験を行った二つの地盤改良について固化メカニズムを示す。

(1) シリカ法

シリカ法は、地盤中にシリカ化合物を注入して微生物代謝によってゲル化することにより地盤を改良するものである。シリカ化合物は、中性領域を中心にして弱アルカリ～弱酸性の範囲でゲル化が進む。シリカ化合物がアルカリ性であるとゲル化しないが、微生物の代謝によりシリカ化合物の中和反応が進むとゲル化する。このため、pH調整剤の使用量を少なくできる。その反応メカニズムは、次のとおりである。

微生物の代謝活動により式(1)、式(2)のように二酸化炭素が発生する。



代謝により発生した二酸化炭素は、水に溶解し、重炭素イオンと水素イオンとなり、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。



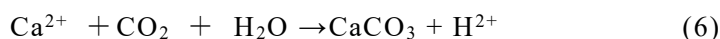
さらに、シロキサン結合が生じてゲル化し、土粒子の間隙を埋める。

(2) 炭酸カルシウム法

炭酸カルシウム法は、微生物の代謝により発生する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析出する炭酸カルシウムにより、地盤を固化させるものである。ウレアーゼは、尿素を加水分解して二酸化炭素とアンモニアに分解する酵素である。すなわち、式(5)に示す反応により、ウレアーゼ活性を有する微生物が、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)を生成させる。アンモニアの生成により、CaCO₃の析出に適した弱アルカリ条件となる。炭酸カルシウム法の反応メカニズムは、次のとおりである。



次に、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¹³⁾。

4.3 北海道の泥炭の性質

北海道には、泥炭が広範囲にわたって分布している。本研究では、表-1および図-1に示す泥炭について調査し、その中のいくつかについて固化実験を行った。調査した泥炭は、一般土砂と比較して自然含水比が非常に高く、土粒子密度が小さい¹⁴⁾。加え

て、泥炭の特性であるpHが低く⁴⁾、酸性を示している。

表-1 泥炭の基本物性値

試料名	釧路	岩見沢 1	岩見沢 2	岩内 1	北島	北広島	富川	江別太
含水比 w_n (%)	299.85	292.89	344.45	1028.64	109.89	402.58	119.55	545.92
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	1.537	2.176	2.136	1.557	2.421	2.093	2.206	1.895
強熱減量 $L_i(\%)$	45.488	31.961	40.393	93.813	18.611	43.333	39.007	56.653
pH	6.5	4.3	3.9	4.5	3.3	4.5	2.5	4.1

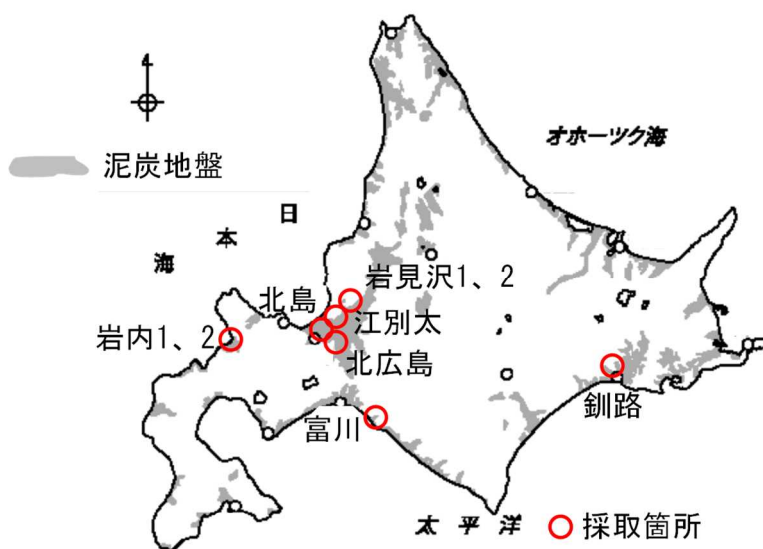


図-1 泥炭の分布と採取箇所

(参考文献4)に加筆)

(1) 泥炭に生息する微生物

表-1に示す泥炭の中で、岩内1、岩見沢1、釧路の3種類の泥炭について、生息している微生物数を調べた。細菌の含有状況の例として岩見沢1を写真-1に示す。また、表-2に、一般細菌および放線菌の数を示す。泥炭中には、微生物がほぼ生息していないと考えられたが、試験したどの泥炭からも一般細菌や放線菌などの微生物の存在が確認できた。通常、一般の土壌には1gあたり $10^7 \sim 10^9$ の微生物が存在しており¹⁵⁾、これと比較して少ないが、泥炭中にも微生物が生息していることから、これらの微生物により泥炭を固化できる可能性があると考えられる。

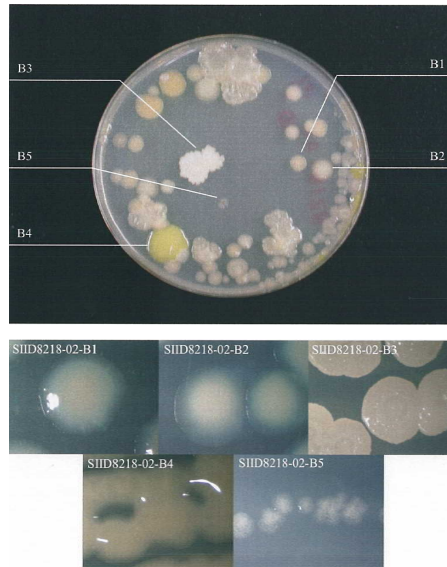


写真-1 岩見沢1の泥炭に含まれる細菌

(2) 微生物のウレアーゼ活性

表-2 泥炭に含まれる細菌・放線菌の数

試料名	釧路		岩見沢1		岩内1	
	菌の種類	菌数(cfu/g)	菌の種類	菌数(cfu/g)	菌の種類	菌数(cfu/g)
一般細菌	7	1.1×10^6	5	2.8×10^5	3	3.3×10^4
放線菌	3	3.7×10^4	1	1.7×10^2	-	-

cfu : colony forming unit(コロニーを形成する能力のある単位数)

泥炭中に微生物の生息を確認できたことから、これらの微生物が尿素の加水分解が可能なウレアーゼ活性を有する微生物であるかを、釧路を除く7箇所について調査した。なお、岩内については同じ採取箇所でも性状が異なっていたため、2箇所から採取してウレアーゼ活性を求めた。試験条件を表-3に、また、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、表-4にそれぞれ示す¹⁶⁾。クリステンゼン培地による方法は、培地中の尿素がウレアーゼ活性を有する微生物により加水分解されると、二酸化炭素とアンモニアが生成されることを利用したものである。アンモニアはアルカリ性であり、クリステンゼン培地中のフェノールレッドはアルカリ性になると赤変することから、培地が赤変すればウレアーゼ活性があることを示す。

ウレアーゼ活性試験の結果を写真-2に示す。試験を行った8箇所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北海道の泥炭内に広く生息していることが確認できた。

表-3 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-4参照)
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-4 Christensen(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

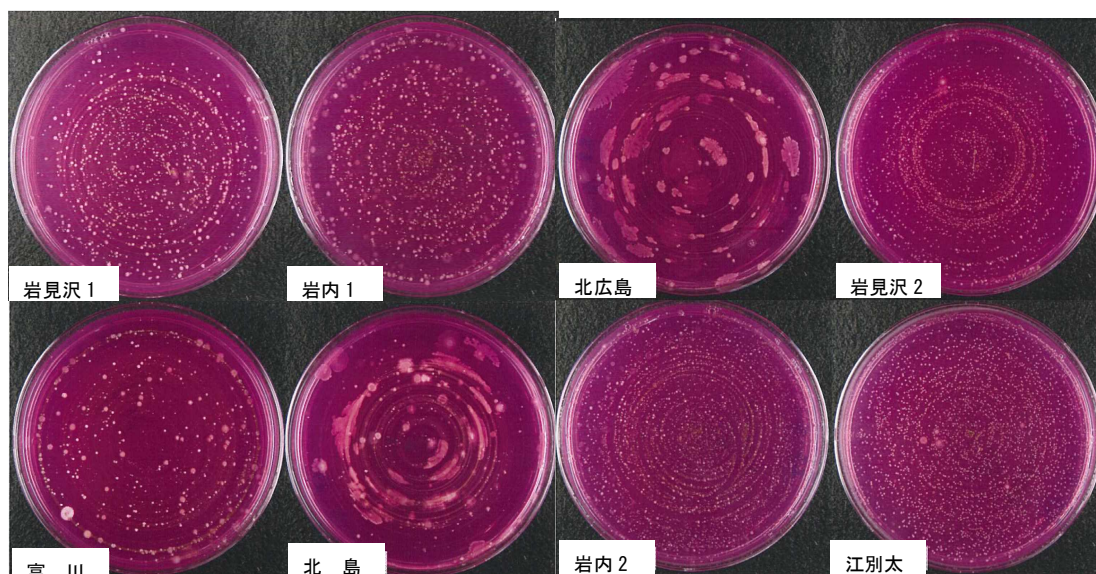


写真-2 ウレアーゼ活性試験結果

4.4 微生物による泥炭の固化

泥炭は高含水比であり、微生物の代謝活動のみで改良することが困難と考えられたことから、本研究では、ある程度含水比を低下させた後に、泥炭を微生物の代謝活動により固化することとした。泥炭の含水比を低下させる方法として2つの方法を試みた。一つは、様々な混合材を用いる方法であり、これにより含水比を低下させた後、シリカ法、炭酸カルシウム法による実験を行った。もう一つは、泥炭を自然乾燥する方法で、含水比を低下させた後、炭酸カルシウム法による実験を行った。なお、泥炭の含水比を300%程度に低下させることを目標とした。

(1) 混合材を用いた泥炭を固化する方法

岩見沢1（写真-3）と、混合材として燐炭（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（ビートから砂糖を精製する際に排出される副産物）の4種類を混合した。



写真-3 岩見沢1の泥炭

泥炭の湿潤重量に対して、各混合材を10、20、30、40、50%混合して、フォールコーン貫入量、コーン指数、一軸圧縮強さを求めた。フォールコーン貫入量は、一軸圧縮強さを求めることができないような軟らかい供試体の強度変化を求めるために求めた。

各混合材と混合材を用いた泥炭の含水比を表-5に示す。泥炭の含水比は約300%、pHは約4.3であったが、混合材を混合することにより、含水比は150%以下、pHは7以上となった。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固化

表-5 混合材および混合材を用いた混合泥炭の含水比、pH

	混合材のみ		混合材を用いた泥炭 (混合率 50%)	
	含水比(%)	pH	含水比(%)	pH
燐炭	28.67	9.5	141.4	9.5
珪藻土	32.74	4.7	115.8	4.7
ベントナイト	18.24	9.0	133.9	7.5
ライムケーキ	42.71	7.6	143.9	7.0

実験を行った。

シリカ法による固化では、燠炭、珪藻土、ベントナイトによる混合材を用いた泥炭 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。一方、炭酸カルシウム法による固化では、混合材を用いた泥炭 600g に対して塩化カルシウム 80g、尿素 40g を混合した。それぞれの材料について、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」¹⁴⁾にしたがい、直径 5cm、高さ 10cm の供試体を作製し 20°C で養生した。また、炭酸カルシウム法では微生物の活動が休止する温度に近い 5°C¹⁷⁾でも養生した。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。また、シリカ法、炭酸カルシウム法の試験開始時と 8 か月後に、微生物の生菌数として一般細菌数を測定した。

試験の流れと測定項目を図-2に示す。

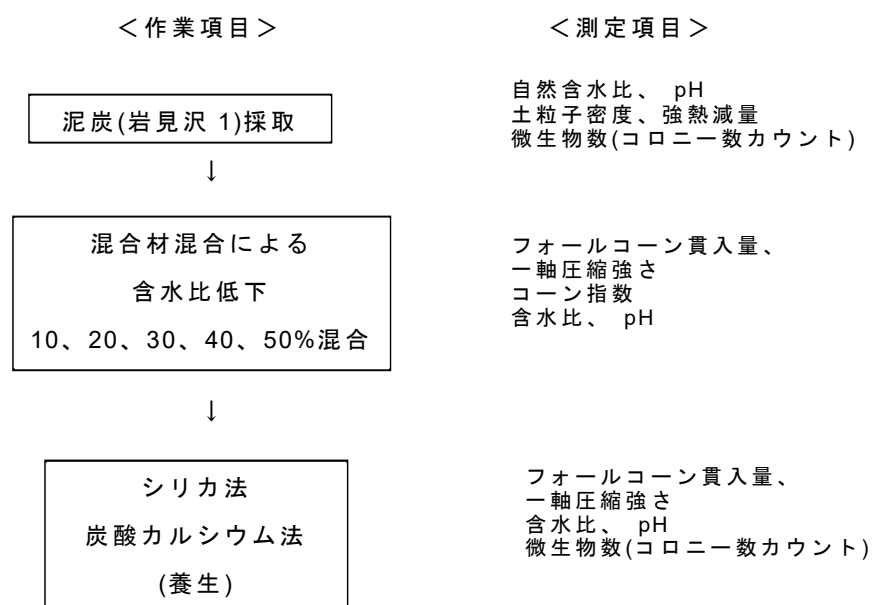


図-2 混合材を用いた泥炭を固化する試験の流れ

(2) 自然乾燥させた泥炭を固化する方法

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は、固化効果が得られるまでに相当期間が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り、尿素の加水分解を促進すること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による代謝活動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（なた豆由来）であり、酵素活性は2970U/gである。

試験に用いた泥炭は、分解の程度として中間的な江別太（写真-4）である。江別太をある程度含水比を低下させた後、微生物による固化実験を行うこととした。2週間の自然乾燥により、江別太泥炭の含水比は546%から336%となり、この状態を初期状態と



写真-4 江別太の泥炭

して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の泥炭を改良することした場合、泥炭中の乾燥土量は、

$$1500\text{g} \div (1 + 336 / 100) = 344\text{g} \quad (7)$$

泥炭中の水分量は

$$1500\text{g} - 344\text{g} = 1156\text{g} \quad (8)$$

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、一般的に酸性土壌であり、今回試験に使用した江別太の pH も 4.1 であった。また、固化の程度を高めるために、より多くの尿素と塩化カルシウムを混合した。

微生物による固化では、pH が中性域～弱アルカリ性域の場合にその効果が良好である¹⁸⁾。酸性の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 を測定した。泥炭は pH4.6 であったが、尿素と塩化カルシウムを混合すると 3 程度まで低下した。そこで、pH を調整するためにアルカリ性を示す重曹または消石灰を用いることとした。微生物固化の実験例¹⁰⁾を参考として、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。

微生物による固化実験の配合を表-6 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」¹⁴⁾により、直径 5cm、高さ 10cm の供試体を作製し、20°Cで養生した。

供試体を作製してから 1 か月後に、[1]～[6]についてアンモニア性窒素量を測定した。また、すべての供試体について、1 か月後と 4 か月後に一軸圧縮強さと土の炭酸カルシウム含有量を簡易的に測定した。これは、式(9)に示すように、炭酸カルシウムが酸によって溶解した場合に、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たものであり、二酸化炭素のガス圧（以降ガス圧と称する）を測定する²⁴⁾ことにより、炭酸カルシウムの含有量を推定するものである。



ガス圧は、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測定した。

一軸圧縮試験終了後の供試体片を用い、塩酸 10mL と蒸留水 100mL を混合した希塩酸と、10g の供試体片を簡易ガス圧測定器に入れ、密封した後に簡易ガス圧測定器ごと振り、容器内で試料と塩酸を混合して炭酸カルシウムが分解して発生するガス量を圧力計の目盛りを読むことで求めた。圧力計の最低読み値は 0.002MPa である。この簡

表-6 固化実験の配合 (g) (炭酸カルシウム法)

供試体	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
[1]	-	-	-	-	-
[2]	116	232	20	-	-
[3]	116	232	20	-	3.5
[4]	116	232	-	50	3.5
[5]	116	232	-	50	-
[6]	116	232	-	-	-
[7]	116	232	20	-	7
[8]	116	232	-	20	-
[9]	116	232	-	20	3.5
[10]	116	232	-	20	7
[11]	232	464	20	-	3.5
[12]	232	464	-	20	3.5

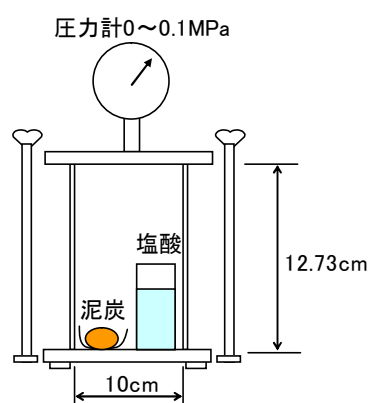


図-3 簡易ガス圧測定器

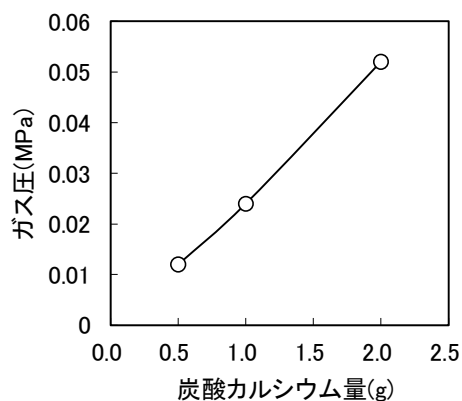


図-4 炭酸カルシウム量とガス圧の検量線

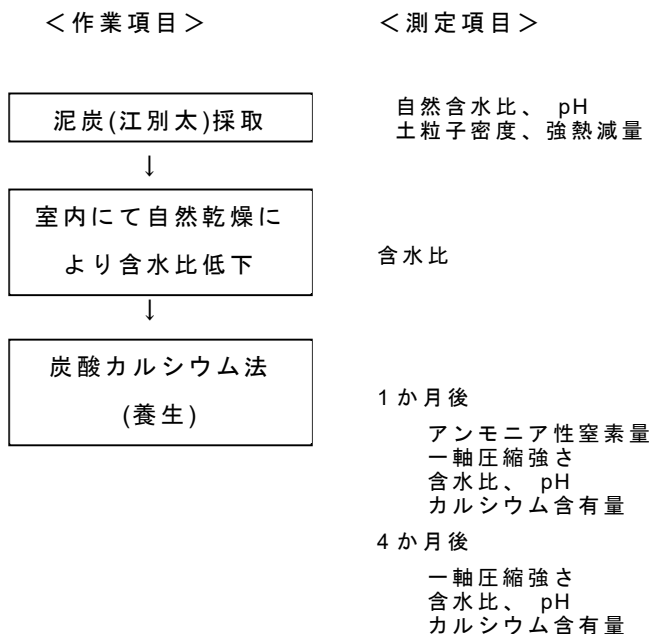


図-5 自然乾燥させた泥炭の固化試験の流れ

易ガス圧測定器により、試薬の炭酸カルシウム量とガス圧の関係から、図-4 に示す検量線を求めた。試験の流れと測定項目を図-5 に示す。

4.5 微生物による泥炭の固化改良結果

(1) 混合材を用いた泥炭を固化する方法

a) 混合材を用いた泥炭の強度変化

泥炭に各混合材を混合した時の混合材の混合率とフォールコーン貫入量の間関係を図-6 に示す。

ベントナイトと珪藻土を混合した泥炭は、混合材の混合率が高くなるとフォールコーン貫入量は小さくなり、これらを混入することにより、強度増加が見られた。しかし、燻炭とライムケーキは混合率を大きくしても、フォールコーン貫入量はほとんど小さくならなかった。

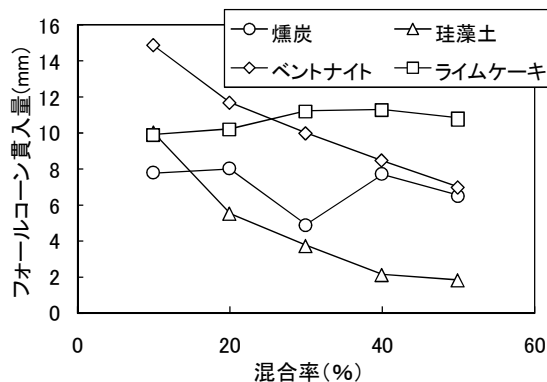


図-6 混合材の混合率とフォールコーン貫入量

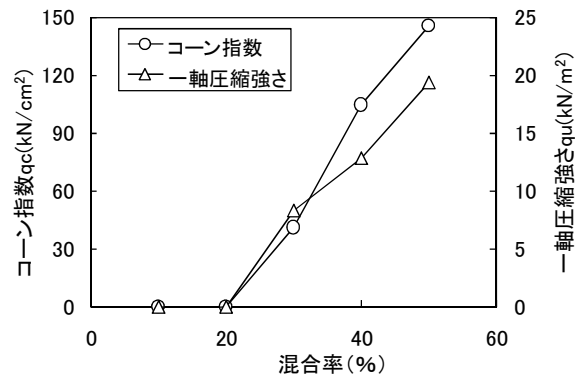


図-7 珪藻土混合率とコーン指数および一軸圧縮強さ

次に、混合材を混合したときの泥炭のコーン指数と一軸圧縮強さを求めた。混合材を燐炭、ベントナイト、ライムケーキとした場合、混合率を 50%としても軟弱であることからコーン指数は測定不能であり、一軸圧縮試験用の供試体は自立しなかった。一方、混合材を珪藻土としたときの混合材混合率とコーン指数、一軸圧縮強さの関係を図-7に示す。コーン指数は測定した3点の平均値、一軸圧縮強さは3供試体の平均値である。いずれも大きなばらつきはなかった。混合率 20%までは計測不能であったが、混合率を 20%より大きくした場合は、混合率が大きくなるにつれてコーン指数、一軸圧縮強さが大きくなった。しかし、泥炭の重量に対して、50%の混合材を混合しても運搬可能な強度である一軸圧縮強さ 50kN/m²を得ることができず、湿地ブルドーザの走行性を確保できるコーン指数 300kN/m²を満足できなかった¹⁹⁾。これより、泥炭に様々な混合材を混合するだけでは、土工事に必要な強度にまで改良することは難しいと考えられる。

b) 混合材を用いた泥炭の微生物固化

(i) 微生物固化した混合材を用いた泥炭のフォールコーン貫入量

混合材を用いた泥炭とそれを炭酸カルシウム法、シリカ法により改良した材料について、養生日数とフォールコーン貫入量を図-8に示す。全体の傾向として、フォールコーン貫入量は時間の経過とともに小さくなっている。また、養生温度の影響はほとんど見られなかった。

混合材に燐炭を用いた泥炭と混合材に珪藻土を用いた泥炭では、炭酸カルシウム法により改良しても混合材を用いた泥炭とフォールコーン貫入量の違いは見られなかった。混合材をベントナイトとしたときのフォールコーン貫入量は、シリカ法が混合材を用いた泥炭や炭酸カルシウム法よりも小さい。ライムケーキは、他の混合材よりもフォールコーン貫入量が大きいが、8か月後のフォールコーン貫入量は他とほぼ同じであった。

すべての混合材を用いた泥炭について同様な試験を行ってはいないが、固化の程度、含水比を低下させる材料や固化の方法（シリカ法、炭酸カルシウム法）により強度が異なると考えられる。

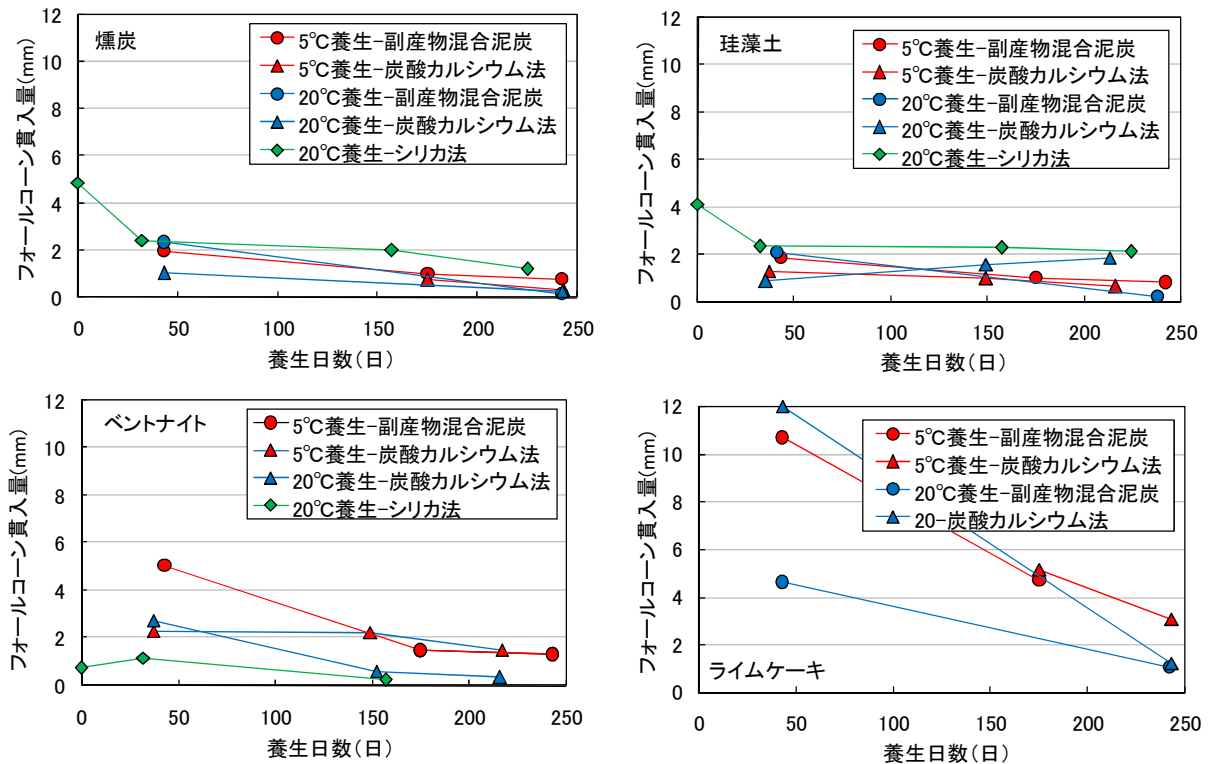


図-8 養生日数とフォールコーン貫入量

(ii) 微生物固化した混合材を用いた泥炭の一軸圧縮強さ

混合材を用いた泥炭と、それをシリカ法、炭酸カルシウム法により改良した材料の養生日数と一軸圧縮強さの関係を図-9に示す。泥炭のみおよび混合材を用いた泥炭は、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、養生日数が長くなると供試体が自立するとともに一軸圧縮強さが大きくなった。

混合材を燧炭または珪藻土とした場合の混合材を用いた泥炭を炭酸カルシウム法により改良した場合、養生日数の経過と強度の発現傾向はほぼ同じであり、シリカ法により改良したときよりも大きな強度となった。混合材をベントナイトとした場合の混合材を用いた泥炭では、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。混合材を用いた泥炭の5か月、8か月のデータがないが、混合材をベントナイトとした混合材を用いた泥炭については、シリカ法で8か月後の一軸圧縮強さが約78kN/m²となり、微生物固化の可能性はある。混合材をライムケーキとした混合材を用いた泥炭では養生日数が長くなっても強度増加の程度は小さかったが、混合材を用いた泥炭と炭酸カルシウム法のいずれも、養生温度が20°Cの方が5°Cよりも大きな強度となった。なお、固形物の存在が微生物の発酵特性に影響を与えるとの研究²⁰⁾もあり、イースト菌の発酵がベントナイト粒子により、促進されたこともありうる。泥炭には土粒子がほとんど含まれていないことから、固形物の影響を今後調べたい。以上より、シリカ法では時間を要するものの、混合する混合材の種類によっては、運搬可能な材料となる可能性がある。

試験後の供試体について、養生前と8か月養生後のpH、計測した細菌数を表-7に示す。初期の泥炭のpHは6程度であったが、混合材を混合すると8か月養生後にはpH=7程

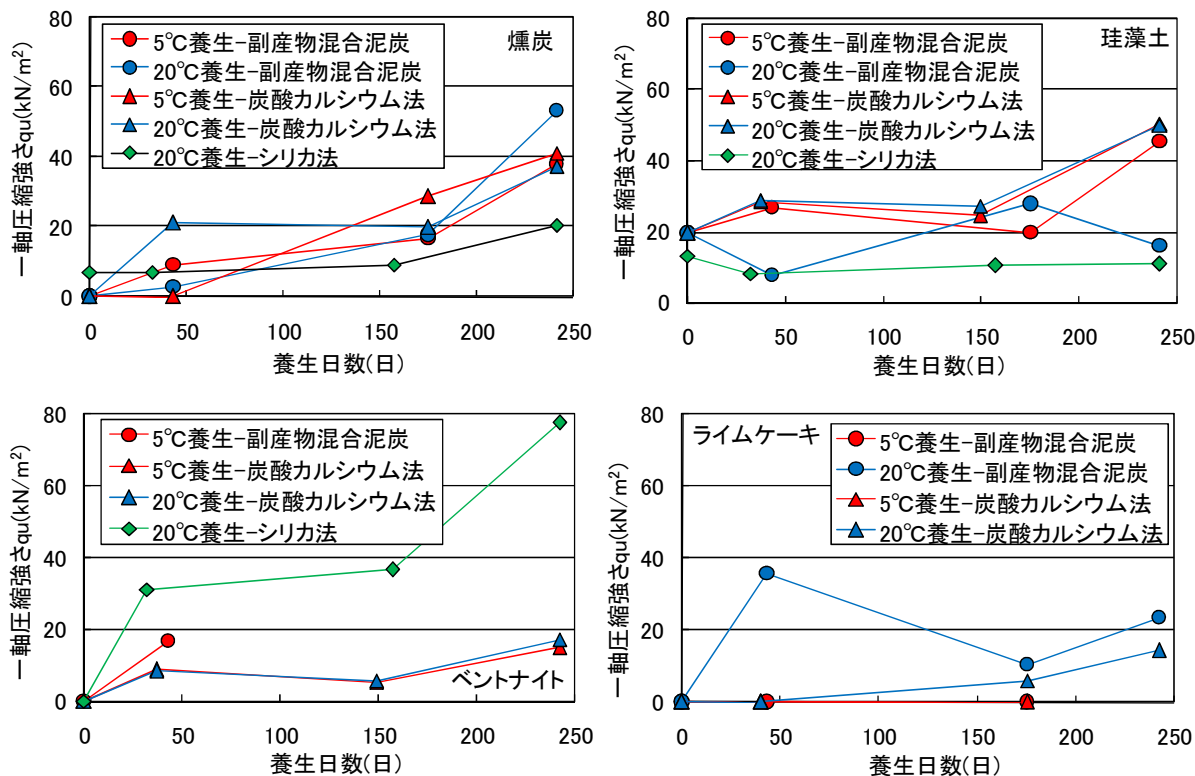


図-9 養生日数と一軸圧縮強さ

表-7 養生前と8カ月養生後の混合材を用いた泥炭のpH、細菌数(cfu/g)

混合材		混合材を用いた泥炭			シリカ法			炭酸カルシウム法		
		カビ酵母菌	細菌	pH	カビ酵母菌	細菌	pH	カビ酵母菌	細菌	pH
泥炭	養生前	7.3×10^2	3.0×10^5	5.7	-	-	-	-	-	-
燧炭	養生前	3.7×10^5	1.6×10^8	9.5	7.3×10^8	8.6×10^6	-	-	-	-
	養生温度(°C)	5	3.3×10^4	5.1×10^7	-	-	-	1.0×10^2	1.1×10^8	-
		20	-	-	0.3×10^4	5.2×10^8	5.5	-	-	7.0
珪藻土	養生前	3.5×10^3	8.9×10^6	4.7	1.6×10^9	1.2×10^5	-	-	-	-
	養生温度(°C)	5	2.7×10^2	7.2×10^7	-	-	-	1.7×10^2	1.4×10^8	-
		20	-	-	0	1.1×10^8	-	4.7×10^4	9.2×10^7	-
ベントナイト	養生前	1.7×10^3	2.4×10^7	7.5	1.5×10^9	3.7×10^5	-	-	-	-
	養生温度(°C)	5	1.0×10^3	1.2×10^7	-	-	-	1.5×10^3	7.0×10^8	7.0
		20	-	-	8.8×10^3	1.3×10^9	-	2.3×10^4	6.7×10^7	7.0
ライムケーキ	養生前	1.8×10^4	7.6×10^7	7.0	-	-	-	-	-	-
	養生温度(°C)	5	4.4×10^5	6.3×10^7	-	-	-	3.4×10^3	6.6×10^7	-
		20	-	-	-	-	-	-	-	7.0

度までの改良効果が見られた。これより、カルサイト（主に炭酸カルシウム）の析出に適した環境になったといえる。混合材を用いた泥炭は、日数が経過してもカビ・酵

母、細菌ともにほとんど変化がない。

シリカ法では、8 か月後のカビ・酵母菌が養生前よりも多い。これは、シリカ法での固化の際、酵母菌であるイースト菌を混入するためと考えられる。8 か月後には、カビ・酵母の数は減少し、細菌数が増えている。

炭酸カルシウム法は、8 か月後のカビ酵母菌数、細菌数は養生前の混合材を用いた泥炭とほぼ同じであった。微生物による代謝活動が発生していた場合、炭酸カルシウム法では、施工現場で生息している菌の数を増やすことなく改良の可能性がある、環境負荷が少ない方法である。

(2) 自然乾燥させた泥炭を固化する方法

a) アンモニア性窒素量

供試体[1]～[6]のアンモニア性窒素量およびpHを図-10に示す。同図中の[3]はウレアーゼを混合しており、尿素の加水分解が進んだことからアンモニア性窒素濃度が上昇している。[4]もウレアーゼを混合しており、他の配合よりはアンモニア性窒素量が多いが、[3]と比較するとかなり少ない。[3]のpHは6程度で中性に近い状態であるが、[4]のpHは11程度で強アルカリ性であることから、微生物が生育しにくいpHであったため尿素の加水分解が[3]ほど進まなかったと考えられる。[2]、[5]は、アンモニア性窒素が[4]に次いで大きく、微生物による加水分解が若干進んだと考えられる。[1]、[6]ではアンモニア性窒素がほとんど検出されず、尿素の加水分解がほとんど発生しなかったと考えられる。このことは、尿素および塩化カルシウムの添加をしても泥炭内の微生物のみで尿素の加水分解が困難であることを示している。

微生物の生育困難な環境であれば、尿素の加水分解は進みづらいが、微生物が生育しやすい環境にするためのpH剤の混合や、ウレアーゼの混合により、微生物の加水分解が進み微生物の代謝による固化が期待できる。

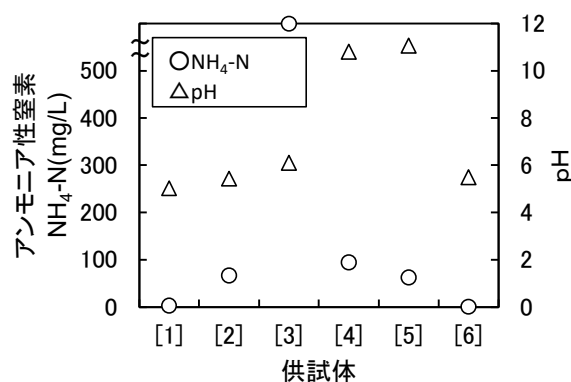


図-10 供試体のアンモニア性窒素量と pH

b) 一軸圧縮強さ

各供試体の一軸圧縮強さを図-11に示す。一軸圧縮強さは2供試体の平均値であり2供試体はほぼ同じであった。また、試験後のpHと含水比を表-8に示す。なお、どの供試体も作製したときは、軟弱で自立できなかった。1か月後と4か月後について、

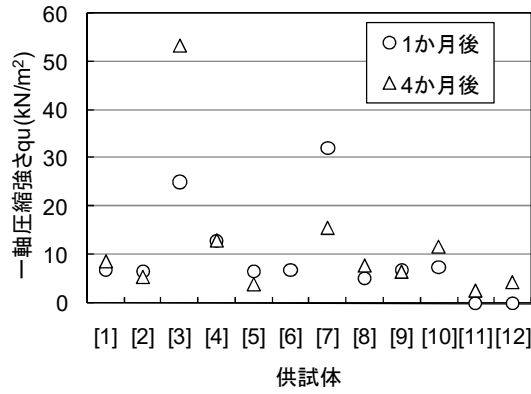


図-11 供試体の一軸圧縮強さ

表-8 一軸圧縮試験結果

供試体	一軸圧縮強さ q_u (kN/m ²)		pH			含水比 w(%)			炭酸カルシウム 量(g)*	
	1か月後	4か月後	作製時	1か月後	4か月後	作製時	1か月後	4か月後	1か月後	4か月後
[1]	6.9	8.7	4.9	5.0	5.1	332.33	312.44	315.85	0.17	0.13
[2]	6.5	5.4	-	5.4	5.4	175.07	162.03	134.23	0.83	0.09
[3]	25.2	53.3	-	6.1	6.3	186.74	168.92	128.70	0.17	1.07
[4]	13	13.0	-	10.8	11.3	182.73	138.86	121.97	0.13	0.00
[5]	6.5	3.9	11.0	11.1	11.5	201.37	149.59	147.04	0.29	0.00
[6]	6.9	-	-	5.5	-	356.24	156.78	-	0.96	-
[7]	32.2	15.6	5.9	6.3	7.8	267.19	230.10	168.11	0.00	1.13
[8]	5.2	7.8	5.3	8.6	8.8	296.71	236.39	157.40	0.00	0.00
[9]	6.9	6.5	5.0	8.4	8.5	286.47	254.60	155.28	0.29	0.00
[10]	7.4	11.7	9.0	8.2	7.2	269.53	265.09	169.27	0.00	1.13
[11]	0.0	2.6	4.0	4.3	4.3	229.09	215.18	105.99	0.00	0.13
[12]	0.0	4.3	5.3	7.7	7.6	-	223.05	92.99	0.17	0.00

* 供試体10g当たり

含水比の差と強度増加の程度に関係がなかったことから、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いえる。

試験結果から次のことがわかった。

- ・試験を行った中で[3]の4か月後の一軸圧縮強さが最も強度発現し、53kN/m²となり[3]のみが目標値である一軸圧縮強さを満足した。[3]はウレアーゼ 3.5g を混合しており、尿素の加水分解が進んだものと考えられる。
- ・[3]に対し、ウレアーゼの量を2倍とした[7]は、2番目の強度であった。pHは4か月後で7.79と若干アルカリ性であった。固化に適したウレアーゼの混合量が存在すると考えられる。

- ・ [3]に対し、尿素、塩化カルシウムの量を2倍とした[11]は、ほとんど強度発現がなかった。[11]の pH は 4.25 の酸性であり、微生物の生育に適していなかったと考えられる。
- ・ [3]に対し、pH 調整剤を消石灰とした[4]、[9]は、[3]の強度の 1/4 以下であった。[4]は[9]よりも消石灰の混合量が多いので pH は高くアルカリ性であったが、[9]よりも大きな強度であった。このことから消石灰で強度が出なかったのは pH 以外にも要因があると思われる。
- ・ [1]は泥炭のみであったが、若干の強度発現があったことより、泥炭のシキソトロピーが働いたものと考えられる。同程度の強度の発現があった[2]、[5]、[6]、[8]、[9]、[11]、[12]は強度発現のない配合と考えられる。これらの pH は 6 よりも小さく 7 よりも大きかった。

pH と一軸圧縮強さの関係を図-12 に示す。pH が 6 から 7 の範囲で一軸圧縮強さが大きい傾向が見られる。pH が低くても高くても一軸圧縮強さは小さく、強度が発現しやすい pH の範囲があるといえ、既往の研究¹⁸⁾とも合致している。本研究では、pH6～7程度が炭酸カルシウム法による固化に適した範囲といえる。

[3]の配合で、目標値である $q_u=50\text{kN/m}^2$ を得ることができた。この条件として、微生物の生育環境として pH が 6～7 の中性域であること、ウレアーゼによる微生物の活性化を図ることがあげられる。これらの条件を満足するためには、適切な尿素、塩化カルシウム、pH 調整剤、ウレアーゼの混合量がある。

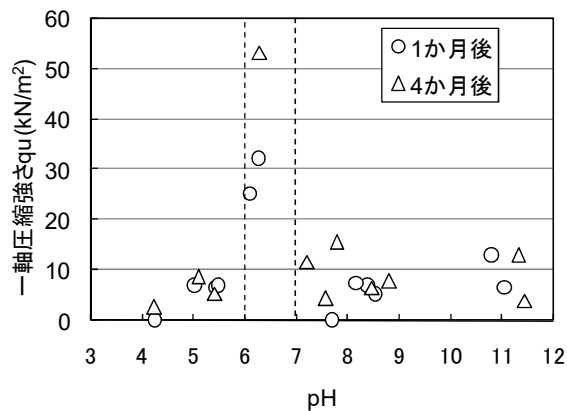


図-12 pH と一軸圧縮強さ

c) 炭酸カルシウム量

一軸圧縮試験終了後の供試体について、微生物の代謝で発生したガス圧を測定した。その結果を図-13に示す。すべての供試体で、供試体作製時にはガス圧はゼロであった。図-11の一軸圧縮強さと比較すると、一軸圧縮強さが 10kN/m^2 を超えた[4]でガス圧が低かったものの、一軸圧縮強さが 10kN/m^2 程度以上であった[3]、[7]、[10]において、比較的大きなガス圧が確認できた。また、これらは1か月後よりも4か月後の方でガス圧が大きくなっており、時間経過によりガス圧が大きくなっていくことがわかった。

以上より、微生物代謝により炭酸カルシウムが泥炭供試体中に析出していると考えられる。そこで、あらかじめガス圧と炭酸カルシウム量の関係を求めた図-4より、微

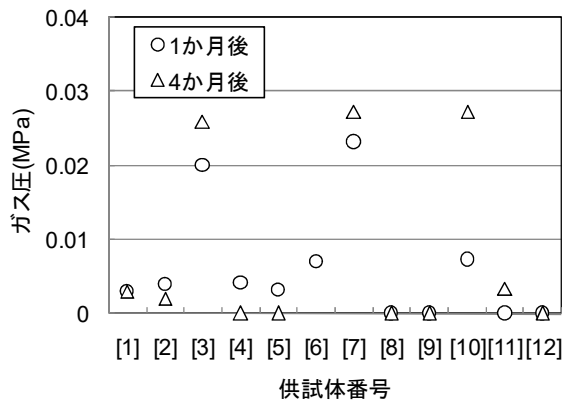


図-13 各供試体のガス圧

生物代謝で析出した炭酸カルシウム量を求めた。

ガス圧を測定した試料は 10g であり、前述した[3]、[7]、[10]では約 0.025MPa のガス圧が発生していた。このガス圧では、約 1g の炭酸カルシウムが析出されたと推定される。すなわち、10g の試料中に投入されたカルシウムの量がすべて炭酸カルシウムになったとすれば、1.13g の炭酸カルシウムが析出されると計算され、ほぼ炭酸カルシウムとなったと考えられる。表-7 より、施工現場由来の微生物が固化終了後も生息していると考えられるので、条件を整えば、さらなる微生物による泥炭固化が期待できる。長期的に固化効果を得るためには、尿素やカルシウム源を投入することにより可能と思われるが、引き続き、今後の課題である。

次に、ガス圧から推定した炭酸カルシウム量と一軸圧縮強さの関係を図-14に示す。ばらつきが大きいものの、ガス圧から推定した炭酸カルシウム量が多くなると一軸圧縮強さも大きくなる傾向がある。一部の例外があるものの、対象とした含水比336%の泥炭を炭酸カルシウム法により固化した場合、10gの試料に対して析出した炭酸カルシウム量が1gを超えると一軸圧縮強さが大きくなった。

以上より、炭酸カルシウム法による微生物の代謝を利用した固化では、1gを超える炭酸カルシウムを析出できれば、目標とした一軸圧縮強さ $q_u=50\text{kN/m}^2$ を確保できる可能性がある。なお、強度発現が小さい材料では、微生物の代謝を利用した固化よりは、セメントや石灰などの固化材による改良による方がよいと考えられる。

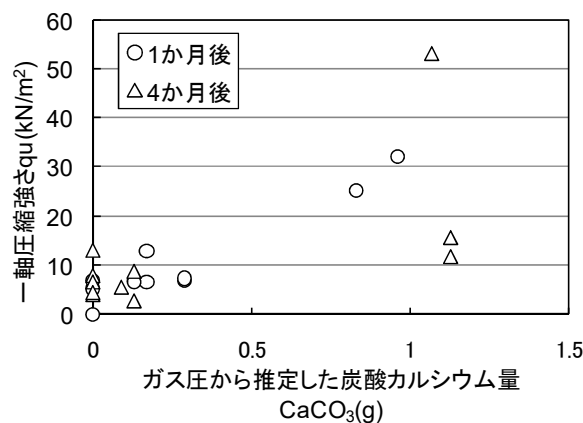


図-14 ガス圧から推定した炭酸カルシウム量と一軸圧縮強さ

4.6 ウレアーゼ活性の評価

泥炭中の微生物のウレアーゼ活性を電気伝導度に着目して調べた。

(1) 調査方法

泥炭のウレアーゼ活性の程度として、尿素加水分解速度を評価する方法²¹⁾に着目した。この方法は、所定の培地により微生物を液体培養して、これに尿素溶液を混合した液体の電気伝導度を測定することにより、微生物の尿素加水分解速度を求めるものである。しかし、泥炭の中から固化が可能な微生物を単離することは、専門的な知識と技術が必要であり、土木材料として固化改良するための作業としては、あまり実用的ではない。本実験でも、自然の泥炭を検体とした。また、畠ら²¹⁾は菌体の培養液 10mL と尿素溶液 40mL を混合しているが、泥炭の含水比が非常に高いことから、泥炭 10g と尿素溶液 40mL と混合して懸濁状態にして電気伝導度を測定した。図-15 に尿素加水分解速度の測定手順を示す。岩内、江別太、富川の試料について試験を行った。

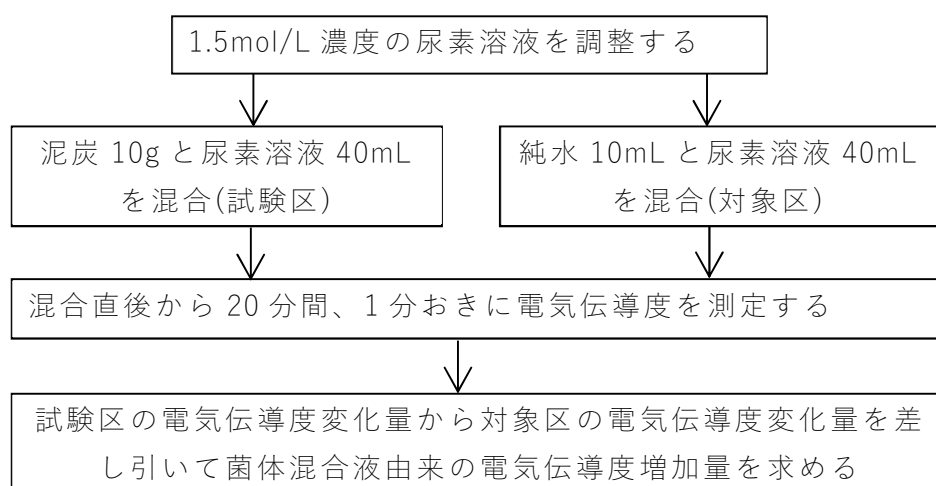


図-15 尿素加水分解速度の測定手順
文献 20)の一部を修正簡略化

(2) 試験結果

尿素溶液混合後の経過時間と電気伝導度の増加量の関係を図-16 に示す。経過時間に対する電気伝導度の増加量が大きいと、ウレアーゼ活性が大きい。経過時間に対する電気伝導度の増加量は、岩内、江別太では小さく、ウレアーゼ活性が小さい。しかし、富川ではこれらよりは大きく、泥炭の種類によってウレアーゼ活性の程度が異なっていた。

次に、3 種類の泥炭について、尿素溶液を混合したときの経過時間と電気伝導度を表-9 に示す。岩内、江別太、富川の泥炭は、それぞれ電気伝導度が異なっている。岩内、江別太では、短時間では電気伝導度の増加が比較的小さかったので、3 日後の電気伝導度を調べた。江別太では、若干の電気伝導度の増加が見られた。岩内では、3 日間で 340 μ S/cm 電気伝導度が増加し、時間を大きく設定することができれば、微生物の代謝を利用した固化が可能であると考えられる。

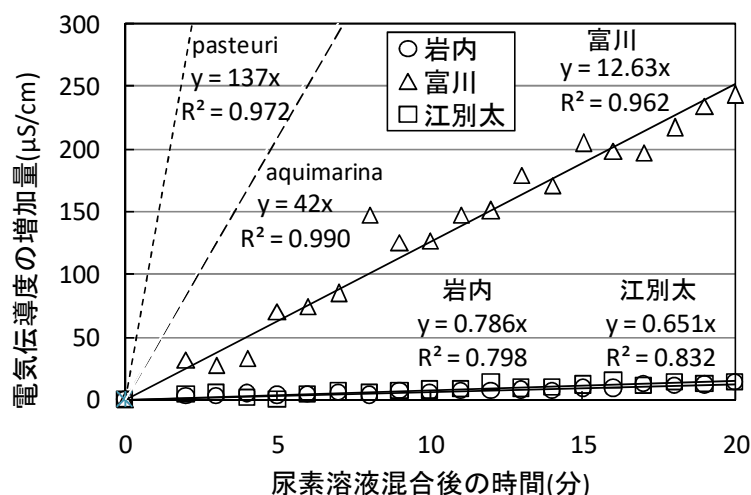


図-16 尿素混合後の時間と電気伝導度の増加量

表-9 混合後の時間と電気伝導度 (μS/cm)

試料名	岩内	江別太	富川
直後	348	29	832
1時間後	388	42	-
3日後	686	85	-

5. まとめ

本研究では、微生物を利用した泥炭の固化実験として、含水比を低下させた後に、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、微生物の代謝活動を促進する材料を泥炭と混合して養生することにより、運搬可能な一軸圧縮強さである $q_u=50\text{kN/m}^2$ を得ることができた。得られた知見をまとめると以下の通りである。

- 1) 泥炭に燐炭、珪藻土、ベントナイト、ライムケーキなどの混合材を混合し、シリカ法および炭酸カルシウム法による改良を試みた。その結果、時間を要するものの、シリカ法では混合する混合材の種類によっては、運搬可能な材料となる可能性がある。
- 2) 調査した泥炭のすべてにおいて、ウレアーゼ活性を示す微生物の存在が確認できた。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、泥炭中に元来存在する微生物により、泥炭を固化できる可能性がある。
- 3) 炭酸カルシウム法による微生物固化で強度発現する条件として、泥炭の pH が 6~7 の中性域であること、ウレアーゼによる微生物の活性化を図ることがあげられる。そのために、混合する尿素、塩化カルシウム、pH 調整剤について、適切な組み合わせを考える必要がある。
- 4) 電気伝導度を測定することにより、ウレアーゼ活性の程度を評価できる。

【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) 土木研究所：建設発生土利用技術マニュアル第4版、2013.
- 3) 内閣提出法律案：廃棄物の処理及び清掃に関する法律、1970.
- 4) 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、2017.
- 5) 土木研究所寒地土木研究所寒地地盤チーム：北海道における不良土対策マニュアル、2013.
- 6) Sato, A., Nishimoto, S. and Suzuki, T. : Effective use of peat, The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, CD-ROM, 2011.
- 7) Whiffen, V. S., van Paassen, L. A. and Harkes, M. P. : Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, Geomicrobiology Journal, Vol. 24, pp. 417-423, 2007.
- 8) 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.
- 9) 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. 2、 pp. 168-176、 2008.
- 10) 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.
- 11) 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、p. 20、 2008.
- 12) 寺島麗、島田俊介、小山忠雄、川崎了：微生物に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.
- 13) 福江正治、中村隆昭：炭酸カルシウムによるセメンテーション効果の定量方法、土木学会第53回年次学術講演会、III-A45、pp. 88-89、 1998.
- 14) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説、2009.
- 15) R. Y. スタニエ、E. A. エーデルバーグ、J. L. イングラム、M. L. ウィーリス 著、高橋甫、斎藤日向、手塚泰彦、水島昭二、山口英世 訳：微生物学入門編、pp. 67-74、 培風館、1980.
- 16) 坂崎利一、吉崎悦郎、三木寛二 著：新 細菌培地学講座・下I、近代出版、1988.
- 17) 川崎了、小瀧暁、広吉直樹、恒川昌美、金子勝比古、寺島麗：土壌微生物による炭酸カルシウム析出に及ぼす温度の影響、応用地質、Vol. 51、 No. 1、 pp. 10-18、 2010.
- 18) 椋木俊文、吉永智昭、川崎了：溶媒のpHおよび有機栄養源がバイオカバーソイルの生成と特性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、 pp. 69-80、 2010.
- 19) 日本道路協会：道路土工要綱、p.287、2009.
- 20) 藤本敏幸：微生物の醗酵特性に及ぼす微粒子の作用に関する研究、高知工科大学修

士論文、2007.

- 21) 畠 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、2013.10

共同研究報告書
COOPERATIVE RESEARCH REPORT of P.W.R.I.
No.539 March 2021

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所 寒地技術推進室

〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 電話 011-590-4046