チュニジア国Joumine貯水池底泥を活用したイシュケウル湖の湖底環境復元技術の適用性評価

畠 俊郎¹・入江 光輝²

¹正会員 富山県立大学准教授 工学部環境工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

E-mail: t-hata@pu-toyama.ac.jp

²正会員 筑波大学准教授 生命環境系 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台1-1-1)

E-mail: irie.mitsuteru.fu@u.tsukuba.ac.jp

イシュケウル国立公園の環境復元を目的とし、流入河川の一つであるJoumine川の貯水池の浚渫底泥を活用したイシュケウル湖底の強度増進技術の有効性を室内実験により明らかにした。具体的には、貯水池底泥内に生息している微生物の機能を活用し、底生生物として着目した環形動物の潜砂限界強度まで底泥を固化する技術の有効性について検討した。その結果、1) Joumine貯水池底泥には窒素サイクルを利用して底泥を固化する能力を持つ微生物が生息している、2) 尿素と塩化カルシウムを添加することで炭酸カルシウムの結晶析出を促進させ、底泥の強度増加が期待できる、3) 2週間程度の施工により底泥の強度を環形動物であるチロリの平均的な住活動可能範囲まで高める効果が期待できる、ことが明らかとなった。

Key Words : sediment, environmental remediation, in-situ microorganisms, MCP, vane shear strength

1. はじめに

チュニジアは1956年のフランスからの独立以降、農産物の生産高が大幅な伸びを示しており水資源の積極的な利用に関する社会基盤施設の整備が進められてきた。本研究で着目しているチュニジア北部は、地中海に面するとともに標高1000m前後のテル・アトラス山脈に受け止められた湿気によって年600mm以上の降雨がもたらされる地域である。この恵まれた自然条件のもと、豊かな森林および湖を含むイシュケウル国立公園は1980年にユネスコの世界自然遺産に登録され観光資源としての役割を担ってきた¹⁾。一方、同地域の振興を目的とした開発も進められ、1983年から1994年にかけて、イシュケウル湖流入河川において農業用水の確保などを目的にダム(貯水池)整備が行われた。その結果、流入河川から湖への淡水流入量が減少し、結果としてTinja運河を通じて海水が絶えず流入する状態となり湖水の塩分濃度が上昇することとなった。このような環境変化に伴い世界自然遺産としての機能が低下し、1996年に「危機にさらされている世界遺産リスト(危機遺産リスト)」に登録されることとなった。その後Tinja運河への堰の設置や、貯水池運用方法の改善などの対策が評価され、2006年に同リストから除外されたが、現在も世界自然遺産登録時の環境復元を目的とした対策が検討・実施されている状況にある。

著者らはチュニジア北部に建設された貯水池の堆砂状況について調査を進め、イシュケウル湖流入河川についても貯水池の堆砂が大きく進行していることを明らかにした²⁾。すなわち、流入河川から湖への土砂供給も貯水池によって抑制されていると考えられその量は貯水池が建設されたJoumineとSejnaneの2つの河川で17.8百万m³に及ぶ。一方、流入先であるイシュケウル湖は非常に浅い湖で流入した土砂が一旦沈降しても、風による擾乱で再懸濁しビゼルト湾との湖水交換の過程で外部に輸送されていると考えられる。河川からの流入土砂量と再懸濁し湖水交換により外部へ流出する量が貯水池建設前には平衡していたと仮定し、貯水池建設後に流入がなくなり外部流出量のみが保存されたとすると湖底高は河川からの土砂供給量停止分低下したこととなる。イシュケウル湖表面積が約88km²であるので堆砂体積をそれで除すと平均で20cm低下したこととなる。この土砂流入量減少に伴う湖底高の低下は湖水位絶対標高の低下とも等価であることから、土砂流入量低下によってもTinja運河からの塩水流入量が増加し、世界自然遺産としての機能低下がもたらされたと筆者らは考えている。以上の仮説を含めたイシュケウル湖の環境変化メカニズムを図-1に示す。実際の湖底浸食の進行については別途調査が必要であるが、特に土砂供給が豊富な河川流入部において侵食・深水化が懸念され底生生物や植生の変化に影響を与えている可

図-1 土砂バランスに着目した環境変化メカニズム

図-2 イシュケウル湖の水域生態系モデル³⁾

図-3 本研究の位置付け

能性が高いと考えられる。ダム（貯水池）の建設前後で植生が大きく変化したとの調査結果も報告されている³⁾が、これは淡水流入量の減少による湖水位低下および湖底高低下に伴う塩分条件の変化とともに底床環境の変化も少なからず寄与しているものと思われる。したがって河川から流入した土砂を適度に固定化(巻き上げは起こりにくい)が生物の生息には支障がない程度に)できれば、湖底高の低下すなわち塩水流入を緩和できるとともに底床環境が復元され総合的な植生回復が期待される。このような背景のもと、イシュケウル湖流入河川の一つであ

るJoumine川に着目し、上流部に建設された貯水池底泥を原位置微生物機能の活用による炭酸塩鉱物析出プロセスにより底生生物・抽水植物が生息可能な範囲で固定し、巻き上げ再懸濁による移動を抑制する技術の可能性について検討を行った。将来的には湖内で底床の固定化を進め、水理・底床環境を改善して世界自然遺産としての機能を復元することを目指す。本研究ではその大前提として現地の底泥および原位置微生物の機能を活用して強度増進効果を得る技術の可能性について検討を行った。

2. 本研究の位置づけおよび底泥を対象とした固化技術の概要

既往の研究により提案されている世界自然遺産イシュケウル湖水域生態系モデルを図-2に示す³⁾。図中に示した栄養塩類である窒素およびリンは流入河川およびTinja運河を通じてビゼルト湾から供給されている。既往の研究から、リンについてはビゼルト湾、窒素については河川（貯水池）が主要な供給源とされている⁴⁾。

Joumine貯水池で課題とされている貯水容量の回復を目的として浚渫を行う場合、搬出先の確保が課題となる。一方、イシュケウル湖の環境復元では湖底水深の回復が必要となる。Joumine貯水池建設前にはJoumine川から土砂がイシュケウル湖に供給されていたことから、図-3に示すJoumine貯水池の浚渫底泥をイシュケウル湖の湖底環境回復に活用する手法について検討することとした。この、底泥の固定化手法としてJoumine川（流入河川）から供給されている窒素と、河川水（地下水）に200～400ppmの濃度で含まれているカルシウムイオンと、さらに現地に生息している生物機能を組み合わせることで固化効果を得る技術として尿素的加水分解酵素を利用するMicrobial Carbonate Precipitation (MCP)技術に着目した。この窒素源（尿素）を利用したMCP技術における炭酸カルシウム結晶析出メカニズムを式(1)、(2)に示す。

微生物由来の酵素（ウレアーゼ）を用い、尿素的加水分解に伴い発生する炭酸イオンを利用してカルサイトを地盤間隙中に析出させることで強度増進効果を得る効果が期待される。MCPについては砂地盤の強度増加や透水性低下（止水）に活用する技術が報告されている^{5), 6)}。一方、本研究で対象としている底泥のような細粒分（粒径0.075mm以下のシルト・粘土分）を多く含む土壌についてはあまり検討が進められていないのが現状である。以上の状況を踏まえ、流入河川貯水池底泥の物理特性を明らかにするとともに、現地に既に生息している微生物機能を用いることで強度増進効果を得る技術の有効性について検討することとした。

図4 サンプル採取地点の概要

表-1 Joumine貯水池底泥物性一覧

物性項目	値	化学物質分量 (%)	値
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.699	SiO_2	30.63
液性限界 $w_L(\%)$	82.3	Al_2O_3	12.17
組成限界 $w_P(\%)$	22.6	Fe_2O_3	5.28
塑性指数 I_P	59.7	CaO	18.68
地盤材料の分類名	粘土	MgO	3.50

図5 示差熱(DTA)分析結果

3. Joumine貯水池底泥の物理・化学特性

(1) 現地調査の概要

イシュケウル湖流入河川の一つであるJoumine川に設置された貯水池底泥を、世界自然遺産であるイシュケウル国立公園の環境復元に役立てることを目的とした検討を進めることとした。現地において底泥の採取を行い物理特性を把握することとした。調査地点の概要を図-4に示す。事前調査の結果から湖内堆積物はほぼ均質であることが明らかとなっているため、代表として湖中心部でエックマンバージを用いて採泥することとした⁷⁾。採取時期は2014年3月とし、採取後の底泥は現地に滅菌済の容器に保管し、所定の手続き（指令書番号：農林水産省指令25名植第709号）を経て国内輸入後に用いた。

(2) 現地底泥の物理・化学特性

国内輸入後に、底泥の物理・化学試験を行った。物理試験として土粒子の密度、液性限界・塑性限界、および粒度の各試験を実施した。化学特性については、ポータブルXRF (Bruker S1-Turbo SD-LE)を用い、主要な元素組成を明らかにした。結果を表-1に示す。なお、表中の化学物質分量は同一試料について5回測定した平均値を示している。また、粒度試験の結果から得られた50%粒径(D_{50})は0.00123mmとなった。

物理試験の結果から、Joumine貯水池底泥は微生物の代謝活動を利用した地盤強度増進技術として検討が進められている砂質土ではなく、細粒分が主体の粘土であることが明らかとなった。化学分析の結果からは、結晶物質として着目している炭酸カルシウムの主成分であるカルシウムが20%弱含まれていることが明らかとなった。このカルシウムの存在形態同定を目的とし、示差熱分析(DTA)を行うこととした。測定はSII製EXSTAR7000を用い、10°C/minの昇温条件、200mL/minの窒素ガス雰囲気で行った。結果を図-5に示す。なお、図中には炭酸カルシウムおよび水酸化カルシウムの試薬を同条件で測定した結果もあわせて示した。試験の結果から、Joumine貯水池底泥中に含まれるカルシウムは炭酸カルシウムとして存在していることが明らかとなった。Joumine川流域は小麦の生産が盛んな農業地域であることから、窒素源として供給されている尿素と現地土壤中に含まれているカルシウム分を利用することで固化効果が期待できると判断し、ウレアーゼ活性を有する微生物の優占化効果検証を目的とした集積培養を実施することとした。

4. Joumine貯水池底泥を対象とした集積培養

(1) 集積培養試験の概要

2014年3月に、Joumine貯水池内でボートとエックマンバージを用いた採泥を行い、底泥サンプルを採取した。採取においては、滅菌済の容器に採取するとともに、消毒用エタノールで事前に採取器具を滅菌する等の処理を行い環境中からの微生物混入を可能な限り避けることとした。採取後の土壌を所定の手続きを経て日本国内へ輸入（指令書番号：農林水産省指令25名植第709号）後に、実験室内で質量比=1:5の割合で生理食塩水を加えて抽出した微生物含有液を対象にWhiffinの方法に準拠してウレアーゼ活性を求めた結果はほぼ0に近い状態であった⁸⁾。そのため、機能遺伝子(Ure C)を対象としたPCR (Polymerase Chain Reaction : PCR増幅法)を行ったところ、目的遺伝子が検出される結果となった。以上の結果より、底泥そのものにウレアーゼ活性陽性微生物が生息しているものの、短期間でのカルサイト結晶化が期待できるほどの活性値を示すまでではないことが明らかとなった。その

ため、ウレアーゼ活性陽性微生物の優占化を目的とし、現地で容易に入手可能な資材である尿素と酵母エキスを加えた集積培養を行うこととした。集積培養条件を表-2に示す。培養液の作成手順は尿素および酵母エキスを所定の濃度に調整した溶液30mLに0.3gの土壌サンプルを添加して、ボルテックスミキサーで混合後に、20℃の条件で2カ月静置培養することとした。集積培養期間中は定期的にクリーンベンチ内で培養液を採取し、pH、アンモニウムイオン濃度を測定することとした。また、集積培養後のサンプルについてPCR-DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis: 変性剤濃度勾配ゲル電気泳動法)を行い、微生物群集構造を把握することとした。

(2) 集積培養試験の結果および得られた知見

UreaおよびUrea+酵母エキスを添加した集積培養期間中のpHおよびアンモニウムイオン濃度の推移を図-6に示す。なお、何も添加しないControlについては、pH、アンモニウムイオン濃度ともに変化が認められなかった。pHについては、Ureaと比較してUrea+酵母エキスについて低い値で推移する傾向が認められた。この原因としては、酵母エキに含まれる有機物由来の有機酸生成が考えられる。アンモニウムイオンについては、Urea、Urea+酵母エキスともに上昇する傾向が認められた。特にUrea+酵母エキスでアンモニウムイオンの上昇が顕著であったが、試験開始30日程度でそのアンモニウムイオンの上昇が認められなくなったため、酵母エキスのみを再添加

表-2 Joumine 貯水池集積培養条件一覧

培養条件	尿素濃度	酵母エキス濃度*	培養温度
Control	—	—	20℃
Urea	0.15mol/L	—	
Urea+酵母エキス		6.6g/L	

*酵母エキスとしては YP-21CM (富士薬品工業製) を使用

図-6 集積培養試験の結果

(6.6g/L濃度)したところ濃度上昇が継続した。

Ureaと比較した場合、Urea+酵母エキスの条件で行った集積培養により20倍程度アンモニウムイオン生成量が増加することとなった。アンモニウムイオン生成量が多いことはウレアーゼ活性が高まったことと同意であるため、Whiffinの方法に準拠して集積培養系が持つ酵素活性を測定することとした⁸⁾。得られた酵素活性の値はUreaについて1.3U/L、Urea+酵母エキスについて15.0U/Lとなり、約10倍の活性を示すことが明らかとなった。ここでウレアーゼ加水分解活性1U/Lとは、1分間に1μmolの尿素を加水分解する活性を示す菌体培養液(菌体濃度として1.0E+08cells/mL程度)1Lを示している。集積培養系を用いた炭酸カルシウム析出試験により結晶化が確認されている既往の研究成果から明らかとなっている酵素活性値(50U/L)程度よりは低いものの、微生物由来による尿素の加水分解効果が期待できる40mg/L以上を大幅に上回るアンモニア生成が認められた⁹⁾。試験前後におけるPCR-DGGE法の結果を図-7に示す。なお、PCR-DGGE法の解析手順は環境水を対象として同様の解析を実施している既往の文献を参考とし、ゲル濃度を30から60%に変更し、泳動槽としてバイオ・ラッド社製のD-codeを用いる条件で実施した¹⁰⁾。UreaおよびUrea+酵母エキスともに培養初期ではバンドが検出されない状態であったが、培養日数を経るにつれUrea+酵母エキスを添加した試験区について多くのバンドが検出される結果となった。Urea試験区についてバンドパターンの増加が認められなかったことから、今回用いた底泥では酵母エキスの添加が必須であると考えられる。底泥のみを対象とした初期状態とは異なるバンドパターンを示していることから、現地底泥由来で尿素の加水分解に適した菌を含む集積培養系が得られたと考えられる。以上の結果を踏まえ、細粒分を多く含むJoumine貯水池底泥由来の微生物による炭酸塩鉱物析出プロセスによる固化効果が期待できるUrea+酵母エキスの条件で得られた集積培養系を用いた固化実験を

図-7 PCR-DGGEによる菌叢解析結果

実施することとした。固化実験においては、固化溶液の濃度勾配のみにより底泥表層から深部に向かって固化を進行させる効果を期待したバッチ試験（濃度勾配固化）と底泥表層から下層に向けての流れに沿って固化溶液を浸透させることで深部まで固化させる効果を期待したカラム試験（浸透固化）の2種類について試験を行うこととした。

5. バッチ試験による底泥の強度増進効果

(1) バッチ試験の概要

4.の検討からJoumine貯水池底泥由来の微生物による炭酸カルシウム析出促進効果が期待できる結果が得られた。そのため、強度増進効果の評価を目的として実際の底泥を用いた固化実験を行うこととした。輸入した底泥の量に限りがあるため、少量の底泥で強度増進効果を明らかにすることとした。試験の流れを図-8に、試験ケース一覧を表-3にそれぞれ示す。なお、添加した菌体濃度は $1.0E+08\text{cells/mL}$ とした。また、強度増進効果はベーンセン断試験で評価することとした。

図-8 バッチ試験フロー

表-3 試験ケース一覧（バッチ試験）

名称	組成
CASE1	底泥のみ
CASE2	底泥+菌体+固化溶液 (尿素, 酵母エキス)
CASE3	底泥+菌体+固化溶液 (尿素, 酵母エキス, 塩化カルシウム)

※CASE2における尿素濃度は 0.6mol/L 、酵母エキス濃度は 6.6g/L 、

CASE3における尿素、塩化カルシウム濃度は 0.6mol/L 、酵母エキス濃度は 6.6g/L (CASE2,3ともに酵母エキスはYP-21CM)

(2) バッチ試験期間中の分析結果

バッチ試験期間中における溶液のpH、アンモニウムイオン濃度およびカルシウムイオン濃度の推移を図-9に示す。なお、固化溶液の交換はアンモニウムイオンおよびカルシウムイオンの分析結果を踏まえて培養開始から10,14,38,56,78,105日目に実施した。以下、項目ごとに考察する。pHについては塩化カルシウムの有無により底泥のみを用いたCASE1と異なる傾向が認められた。CASE2についてはpHが上昇していることよりアンモニウムイオンの生成が期待されるが、CASE3についてはCASE1よりも低い値で推移する結果となった。アンモニウムイオンを測定した結果、底泥のみを用いたCASE1よりも微生物による固化効果を期待したCASE2および3が高い値で推移する傾向が認められたことから、塩化カルシウムの有無によりpHが影響を受けることが明らかとなった。固化溶液の交換基準として定めた $20,000\text{mg/L}$ 濃度を上回るアンモニウムイオンの生成も2回ほど認められており、尿素的加水分解が継続的に進んでいることが明らかとなった。カルシウムイオン濃度については、塩化カルシウムを添加したCASE3が最も高く、CASE1および2はほぼ一定の値で推移する傾向が認められた。本検討で用いたJoumine貯水池底泥はXRFおよびDTAの結果から炭酸カルシウムを多く含んでいることが明らかとなっているが、

図-9 バッチ試験における濃度推移

炭酸カルシウムの更なる結晶化には可溶性のカルシウム源の添加が有効であることを示唆する結果となった。実際に、カルシウム源を人為的に添加したCASE 3については0.6mol/L濃度で添加した塩化カルシウム由来のカルシウムイオン濃度が低下する傾向が維持され、結晶化に伴う強度増進効果が期待できる結果となった。

(3) バッチ試験における強度増進効果

試験開始から120日経過後に行ったベーンせん断試験の結果を図-10に示す。なお、ベーンブレードの形状は固化試験に用いた50mLの遠沈管内に挿入可能な幅2cm×高さ4cmとした。また、ベーンせん断装置の回転速度は6°/minとし、荷重は10Nのロードセルで連続的に記録する条件で実施した。試験の結果から、微生物による底泥の固化効果を期待したCASE 2および3でせん断強さが高まる傾向が明らかとなった。特に、カルシウム源として塩化カルシウムを添加したCASE 3について顕著な強度増進効果が期待される結果となった。強度増進効果が明らかとなったため、CASE 1とCASE 3についてポータブルXRF (Bruker S1-Turbo SD-LE)を用いた元素分析を実施することとした。結果を図-11に示す。解析の結果からCASE 1について16.9%, CASE 3について22.5%とカルシ

図-10 ベーンせん断試験結果 (バッチ試験)

図-11 固化前後の元素組成比較 (バッチ試験)

ウムの割合が高まる傾向が確認されるとともに、添加した塩化カルシウム由来と考えられる塩素がCASE 3についてのみ2.4%検出される結果となった。

微生物固化によるベーンせん断強度増加にカルシウムが寄与している可能性が高いと判断されたため、CASE 3について示差熱分析(DTA)を行うこととした。測定は2.と同じくSII製EXSTAR7000を用い、10°C/minの昇温条件、200mL/minの窒素ガス雰囲気で行った。結果を図-12に示す。なお、図中には図-5に示したJoumine貯水池底泥の測定結果もあわせて示した。微生物固化処理後のCASE 3については、200°Cおよび700°C付近で吸熱ピークが認められる結果となった。200°C付近については酵母エキスを、700°C付近は炭酸カルシウムと考えられる。以上の結果は微生物固化による強度増進に本研究で着目している炭酸カルシウムが寄与していることを表しており、提案技術の基本的有効性を明らかにすることができた。

6. カラム試験による底泥の強度増進効果

5.の試験結果から、従来あまり検討されていなかった粘土についても微生物機能による炭酸カルシウム析出促進に基づく強度増進効果が明らかとなった。しかしながら、供試体サイズが小さいこと等から鉛直方向の強度分布や、本研究の最終的な目標である底生生物の中で着目した環形動物が生育可能な範囲での固化効果などについては明らかとなっていない。加えて、実際の底泥中では鉛直方向に固化溶液の流れが発生すると考えられることからカラム試験を行い検討することとした。

(1) カラム試験の概要

本研究では、イシュケウル湖流入河川上流に建設されたJoumine貯水池底泥を活用し、底生生物・抽出植物が生息可能な範囲で干潟の土砂流出を抑制するまでの固化効果を付加することで世界自然遺産としての機能回復効

図-12 バッチ試験後の DTA 測定結果

果を得ることを目的としている。カラム試験の実施に先立ち、目標とする底泥の強度について検討することとした。浚渫土を対象とした固化処理土の耐浸食性を確保する目標強度について検討した既往の研究では、湾口部等大きな流速が発生する場所で高炉セメントB種を用いた場合に 1.5kN/m^2 程度、石膏系固化剤を用いた場合に 1.2kN/m^2 程度以上のせん断強度が必要とされている¹¹⁾。一方、干潟底生生物の中で環形動物に着目した検討結果からは、ゴカイで $0.35\sim 1.7\text{kN/m}^2$ 程度、チロリで $0.25\sim 0.70\text{kN/m}^2$ 程度に底泥強度を維持することが必要であるとされている¹²⁾。世界自然遺産としての機能回復には干潟底生生物の保護が優先されると判断し、表層部でチロリの活動限界強度である 0.7kN/m^2 程度まで、深度5cm程度で耐浸食効果が期待できる 1.2kN/m^2 程度の固化を目標としてカラム試験を行うこととした。

カラム試験のフローおよび試験ケース一覧を図-13および表-4にそれぞれ示す。バッチ試験の結果を踏まえ、尿素、酵母エキスとあわせてカルシウム源として塩化カルシウムを添加することとした。底泥に対する炭酸カルシウムの析出量として2%を目標値とし、尿素および塩化カルシウムの濃度を 0.15mol/L とした固化溶液を計3回通水させることとした。浸透液についてはpHおよびカルシウムイオン濃度、アンモニウムイオン濃度を測定した。また、試験後の底泥については鉛直方向の強度分布把握を目的として幅4cm×高さ1cmのベーンブレードを用いて表層から深度5cmまでのベーンせん断強度を求め

ることとした。なお、回転速度は $6^\circ/\text{min}$ とし、荷重は10Nのロードセルで連続的に記録する条件で実施した。ベーンせん断試験終了後に深度別に採泥を行い、含水比の鉛直分布を求めるとともに、PCR-DGGE法により添加した培養液由来の微生物の鉛直方向の分布について検討することとした。

(2) カラム試験期間中の分析結果

カラム試験におけるpH、アンモニウムイオン濃度およびカルサイト生成量の推移を図-14に示す。なお、カルサイト生成量は既発表の論文に基づき浸透前後の固化溶液に含まれるカルシウムイオン濃度差から求めた¹²⁾。以下、項目ごとに考察する。pHについてはバッチ実験と同じく塩化カルシウムの添加由来と考えられるpH低下が認められた。一方、アンモニウムイオンについては上昇が認められていることから、Joumine貯水池由来の底泥を用いた微生物固化においては、固化効果の有無判定にはpHではなくアンモニウムイオン濃度を用いる必要があると考えられる。底泥中に生成されるカルサイト量については、固化溶液の添加回数に伴い増加する傾向が認められた。菌体培養液の添加は固化溶液通水前の1回のみであることから、カラム試験実施期間中は添加した微生物が生存し、ウレアーゼ活性を維持していた効果が期待される。

(3) カラム試験における強度増進効果

カラム試験後のベーンせん断強度の鉛直分布を図-15

図-13 カラム試験フロー

表-4 試験ケース一覧 (カラム試験)

名称	組成
CASE A	底泥のみ
CASE B	底泥+菌体+固化溶液 (尿素, 酵母エキス, 塩化カルシウム)

※固化溶液の尿素、塩化カルシウム濃度は 0.15mol/L 、酵母エキス濃度は 6.6g/L (酵母エキスはYP-21CM)

図-14 カラム試験における濃度推移

に、含水率の鉛直分布を図-16にそれぞれ示す。CASE A,Bともに深度が深くなるにつれてベーンせん断強度が高くなる傾向が明らかとなった。また、CASE Bでは現位置由来のウレアーゼ活性陽性微生物により本研究で目的とした表層で 0.7kN/m^2 程度までの強度増進効果を得られることが明らかとなった。含水率についてはCASE Aについては表層下2cmで最も高い値を示したが、CASE Bについては深くなるにつれて含水率が低下する傾向を示した。いずれも深部で含水率が低下した原因としては、カラム下部からの排水による影響と考えている。

深度に関係なく強度増進効果が認められたため、PCR-DGGE法を用いて集積培養系由来の微生物の鉛直分布比較を行った。なお、泳動槽にはD-Code (Bio-RAD社製)を用い、泳動条件は $130\text{V} \times 5\text{hrs}$ とした。結果を図-17に示す。なお、図中には純水のみを通水したCASE Aと集積後の培養液(集積培養液)の結果もあわせて示した。

CASE Bについては複数個所で集積培養後の混合培養液と同じ位置にバンドが認められる結果となった。以上のことは、菌体培養液もしくは固化溶液とともに菌体が底泥中に浸透していることを表していると考えられる。

次に、ベーンせん断強度の増加が底泥の物理特性に与える影響を明らかにするために、試験後の底泥について土粒子の密度、液性限界・塑性限界、および粒度の各試験を実施した。試験前後の物理試験結果を表-5および図-18に示す。微生物固化処理前後でJoumine貯水池底泥の密度に大きな変化は認められなかったが、粒度分布に

については微生物固化処理によりシルト分が増加する傾向が明らかとなった。この原因としては、底泥の粘土粒子をカルサイトが結合させることで結晶サイズが大きくなったことが考えられる。粒度分布の変化と強度増進の関連性については今後検討を進めていきたい。いずれにしても、Joumine貯水池底泥由来の微生物を用いることで、固化剤を用いることなく表層については環形動物であるチロリの生育可能な 0.7kN/m^2 程度まで、深度5cmでは石膏系固化剤を用いた場合において耐浸食性が期待される 1.2kN/m^2 程度まで炭酸カルシウムの析出促進に基づく強度増進効果が期待できることが明らかとなった。

図-17 PCR-DGGE 解析結果 (カラム試験)

表-5 物理試験結果一覧

項目	固化処理前	固化処理後
土粒子の密度 ρ (g/cm^3)	2.699	2.681
液性限界 w_L (%)	82.3	88.6
塑性限界 w_P (%)	22.6	35.4
塑性指数 I_P	59.7	53.2
地盤材料の分類名	粘土	粘土

図-15 ベーンせん断試験結果 (カラム試験)

図-16 含水率の鉛直分布 (カラム試験)

図-18 カラム試験後の粒径加積曲線

7. まとめ

著者らは世界自然遺産であるイシュケウル国立公園の環境復元に流入河川上流に建設された貯水池の底泥を活用する新しい環境復元技術の開発を目標とした検討を進めている。現地にて採取した底泥を対象とし、原位置にすでに生息している微生物を活用して固化効果を得る技術の有効性を室内試験により検証した。その結果、2ヶ月程度の集積培養により目的としたウレアーゼ活性を有する微生物を含む集積培養系を得ることが可能であるとともに、2週間程度の施工で底生生物が育成可能かつ耐浸食効果が期待できる強度までの改善効果が期待できることが明らかとなった。今後は、他の流入河川貯水池底泥を対象とした菌叢解析を通じた微生物資源評価や、模型実験による耐浸食性の定量的評価等を通じてイシュケウル国立公園の環境修復に寄与する新しい環境保全技術の実用化に向けた検討を進めていく計画である。

謝辞：本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤(A)(課題番号15H02634, 研究代表者：畠俊郎)の支援を受けて実施した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 鷹木恵子編：チュニジアを知るための60章, pp. 262-268, 明石書店, 2010.
- 2) Irie M., Kashiwagi, K., Ujji, K., Nsiri, I., Bouguerra, S. and Tarhouni, J.: Feasibility of exploitation of the sediment in the reservoirs for the sustainability of surface water resource in Tunisia, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G*, Vol. 68, No. 6, pp. II_41-II_46, 2012.
- 3) Tamisier, A. and Boudouresque, C.: Aquatic bird populations as possible indicators of seasonal nutrient flow at Ichkeul Lake, Tunisia, *Hydrobiologia*, Vol. 279, No. 280, pp. 149-156, 1994.
- 4) Casagrande, C., Boudouresque, C. and Francour, P.: Trophic flows in the macroinvertebrate community of a Mediterranean brackish lagoon, Lake Ichkeul (Tunisia), using a functional model, *International Workshop on "The Protection of Coastal and Environment" Proceedings*, pp. 153-162, 2005.
- 5) Al-Thawadi, S. M.: Ureolytic bacteria and calcium carbonate formation as a mechanism of strength enhancement of sand, *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, Vol. 1, pp. 98-114, 2011.
- 6) Guo, H.-X., Cheng, X.-H. and Li, M.: Experimental analysis of bio-stimulated sealing process in environmental geotechnical engineering, *Science China Technological Sciences*, Vol. 56, No. 3, pp. 732-738, 2013.
- 7) Irie, M., Kawachi, A., Tarhouni, J. and Ghrabi, A.: Development of sedimentation and characteristics of sediment on the reservoir in Tunisia, *Journal of Japan Society of Civil Engineering, Ser. B1*, Vol. 67, No. 4, pp. 163-168, 2011.
- 8) Whiffin, V. S.: Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement, Sc. D. thesis, School of Biological Sciences and Biotechnology, Murdoch Univ., 2004.
- 9) 中澤聡美, 畠俊郎：微生物機能の活用による新しい表土保護・土地の緑化技術に関する研究, 平成23年度土木学会中部支部研究発表会, CD-ROM, 論文番号 VI-003, 2012.
- 10) McIver, R. D.: Role of naturally occurring gas hydrates in sediment transport, *AAPG Bull.*, Vol. 66, pp. 789-792, 1982.
- 11) 北詰昌樹, 松本英雄, 岡本伸城, 森田真治：浚渫土砂の有効活用策に関する室内実験, 第39回地盤工学研究発表講演要旨集, pp. 779-780, 2004.
- 12) 佐々真志, 渡部要一, 梁順晋：多種多様な干潟底生生物の住活動性能と適合・限界場の相互関係, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. B2-65, No. 1, pp. 1226-1230, 2009.
- 13) 畠俊郎, 立野菜緒, 阿部廣史：ウレアーゼ活性を有する微生物による沿岸域を対象とした微生物固化の適用性評価, 地盤工学ジャーナル, Vol. 6, No. 2, pp. 305-315, 2011.

(2015. 5. 25 受付)

FEASIBILITY STUDY OF THE ICHKEUL LAKE ENVIRONMENTAL REMEDIATION TECHNOLOGY BY USING THE JOUMINE WATER RESERVOIR SEDIMENTS

Toshiro HATA and Mitsuteru IRIE

In this paper, the effect of recycling Joumine water reservoir sludge for strength improvement of the bottom of the Ichkeul lake sediment using the natural ecosystem is evaluated, with a focus on the remediation of National Heritage Ichkeul National Park in Tunisia. The goals of strength improvements are to minimize erosion from sea waves and enable marine organism growth. The main conclusions of this study are as follows. 1) The Joumine water reservoir sludge ecosystem can be enhanced by improving sludge strength. 2) A crystallization of the calcite in the Joumine water reservoir ecosystem is promoted by adding urea and calcium chloride. 3) The proposed techniques can be implemented to improve the benthos growth.