東南大学（中国）　研修報告書
MICP による短期固化に関する研究

先進理工系科学研究科　社会基盤環境プログラム　高安　隼登

1. はじめに

2025 年 9 月 16 日から同年 10 月 20 日の間，東南大学において研究を行った．以下に結果を報告する．

2. 研修/共同研究課題の決定

新たなエネルギー資源として，メタンハイドレート（以下 MH）が注目されている．MH はガスハイドレートの一種で，かご状の水分子の内部にメタン分子が閉じ込められている氷のような結晶であり，日本の領海内の深海底に多く賦存していることが知られている．MH をメタンガスに分離して回収する手法として，減圧法の適用が検討されている．しかし，減圧法では生産中に坑井内にガスと同時に砂交じりの泥が多量に入り込む出砂と呼ばれる現象に伴う生産効率の低下が懸念されている．既往の研究では微生物による尿素の加水分解作用を利用して地盤の間隙中に炭酸カルシウムを析出させ地盤改良を行う技術である，Microbial Induced Carbonate Precipitation（以下 MICP）の適用について検討されるとともに，出砂対策としての基本的有効性が明らかになっている．しかしながら，これまでに検討された MICP による出砂対策では坑井下部の周辺地盤が集中的に固化されることによる効果の不均質性が課題とされ，解決に向けた検討が必要とされている．この課題解決を目的とし，①出砂の発生が危惧される領域のみを対象に均一な固化が可能であること，②メタンガスが回収可能な一定の透水係数を維持すること，③低環境負荷であること，の条件を満たす補助剤として増粘剤の適用について検討することとした．海底地盤に供給する溶液の粘度を地盤条件に合わせて適切に設定し，海底地盤環境を模した飽和状態の供試体を作成，強度発現を検証した．

3. 研修/共同研究スケジュール

9 月 16 日　出国
9 月 17 日～10 月 19 日 研究
10 月 20 日　帰国

4. 研修先/共同研究派遣先の概要

大学名：Southeast University
所在地：中国 南京市
指導教官：Prof. Ning Jun Jiang

5. 研修/共同研究の内容

5.1　研究背景

地球温暖化が懸念される中で，燃焼時の二酸化炭素排出量が石油よりも少ない天然ガスは，世界的にも需要が伸びているエネルギー資源である．その天然ガスを生産する資源として， MH が注目されている．MH はガスハイドレートの一種で，カゴ状の水分子の内部にメタン分子が閉じ込められている，氷のような結晶固体である．また，MH は高圧低温条件下でのみ安定し，日本近海では豊富に確認されている．

地層内に固体として存在する MH そのものはエネルギーとして利用できず，ガスと水に分解し回収する必要がある．その生産方法として分解促進剤注入工法，加熱法，減圧法が検討されてい

るが，分解促進剤注入工法は高価な薬剤を用いるためコストが増大することや，薬剤による環境影響が懸念されているため，主に加熱法と減圧法が検討されている．また加熱法と減圧法を比較すると，熱水等を地下に送り込んで温度を上げる加熱法に比べ，MH 胚胎層を MH が存在できない圧力まで減圧しガスを回収する減圧法は，設備やエネルギー効率の観点から優れていると考えられている．

しかし減圧法には，減圧することにより生産坑井内にガスと同時に砂交じりの泥が多量に入り込む「出砂」の発生とそれによる生産効率の低下，ガスとして回収することによる間隙の発生，圧密が起こることによる海底地盤の沈下や地盤変形などの地盤災害リスクがあると懸念されている).

このような背景のもと，減圧法による MH 生産において，出砂による生産阻害を防ぐ対策として，MH 胚胎層内の微生物機能による炭酸カルシウム析出を活用した地盤改良技術である，MICP に着目した．MICP は，地盤の強度を向上させるバイオセメンテーション効果や，地盤の透水性を低下させるバイオクロッキング効果を有する代表的な地盤改良技術の一つであり，実地盤ではウレアーゼ活性を有する微生物と，肥料として散布される尿素や塩化カルシウムを注入して炭酸カルシウムを析出させる．

この技術を MH 胚胎層に適用することで,海底地盤内の土粒子間に炭酸カルシウムを析出させ,土粒子間の結合がより強固なものとなることで出砂の抑制，強度向上が期待できる．一方で現状の MICP による出砂対策では，坑井下部の周辺地盤が集中的に固化されることから，目的とする場所のみを効率的に固化する手法の開発が求められており，目標範囲に正確に微生物と固化成分を供給して，効率的に固化する補助技術が必要であると考えられる．

そこで本研究では，MICP を目標範囲に適用させるため、出砂が発生する範囲のみを均一に固化を行うこと，メタンガスが回収可能な一定の透水係数を維持することが可能な補助剤として，増粘剤の適用について検討することとした．

さらに，海洋での産出になるため， MICP 処理回数を少なくすることでコストを抑える必要がある．そこで，MICP の反応を促進させる Skim milk を添加し，増粘剤を併用した供試体を一度の MICP 処理で作製した．また，海底地盤環境を模した飽和状態での一軸圧縮強度を測定し，一度の MICP 処理での強度発現を検証した．

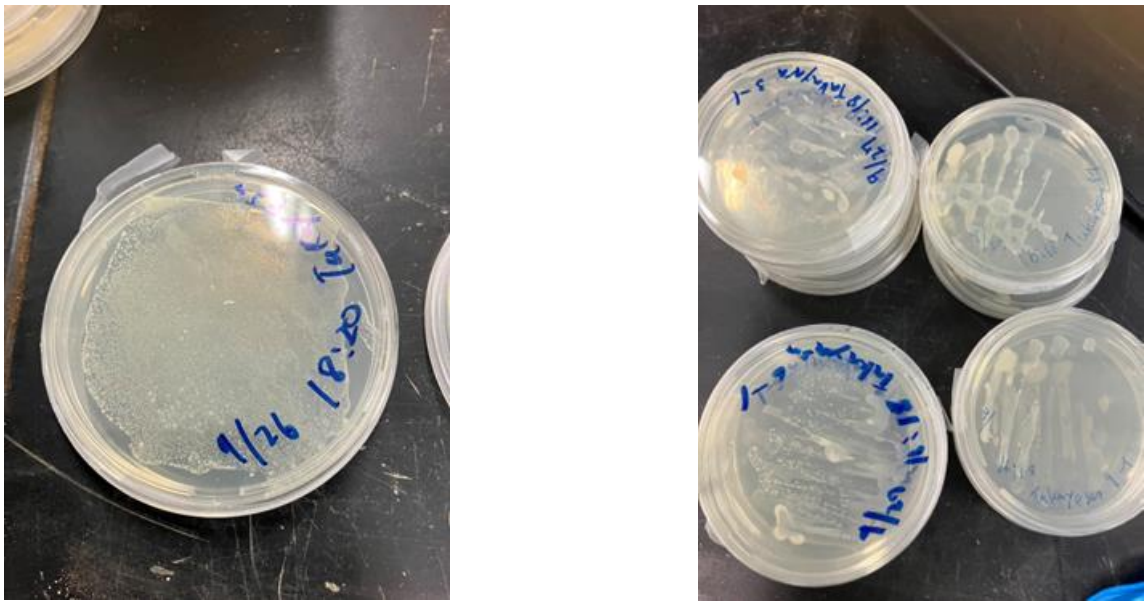
5.2 実験概要

まず，プレートによる巴氏芽孢杆菌（*S.pasteurii*）の培養を行う．その際，微生物の培養回数により，尿素が加水分解する指標であるウレアーゼ活性に影響があるか確かめることを目的に，Fig.1 に示す，1 回培養と 2 回培養のプレートを作成し，ウレアーゼ活性の測定を行った．

また本研究では, Skim milk の添加による一度の MICP 処理で強度発現を検証することを目的とし，尿素および塩化カルシウムを用いた固化試料や菌体量を一定に保ちつつ， Skim milk の有無によりケース分けを行い，供試体を作製した．使用した配合条件の詳細については，Table 1 に示す．

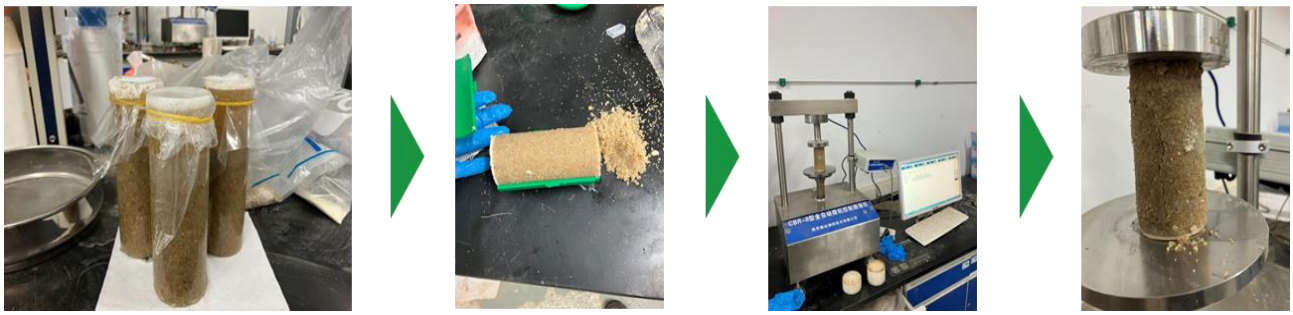
供試体の作製に際しては，中国標準砂を使用し，相対密度は 50 %に設定した．微生物培養液に

尿素，塩化カルシウムそれぞれ 1 mol/L，Skim milk 3 g を溶解させ，この溶液を砂試料に混合するプレミックス法を採用した．カラム（直径 φ=5.0 cm，高さ H=14.0 cm）に混合した砂試料を投入し，20 ℃の室内で 168 時間養生した．養生中は飽和状態を保つため，カラム上面をラップで蓋をした．養生後はパン切包丁で供試体を高さ 10 cm になるよう削り，一軸圧縮試験を行った．その過程を Fig.2 に示す．



Culture once　　Culture twice

Fig.2　Microbial culture



Cure（168h）　Molding　Test　Crack

Fig.2　Uniaxial compression test process

Table 1　Experimental condition

Case	Microbe	Cure (h)	xanthan gum (%)	Skim milk (g/L)	Solidified soltion (mol/L)	Urease Activity (mM/hr)
Case1	*S.pasteurii*	168	0.1	0.0	1.0	26.71
Case2				3.0		24.02

5.3　結果・考察

巴氏芽孢杆菌（*S.pasteurii*）のプレートへの培養回数により，1 回培養（Culture once），2 回培養（Culture twice）とケース分けを行い，それぞれウレアーゼ活性の測定を行った．その測定結果を Table 2 に示す．測定の結果，微生物の培養回数を増やすと，ウレアーゼ活性が増加することがわかった．これは，微生物の培養を繰り返すことで，繁殖しやすく菌数の多いコロニーが選択的に増殖したためであると考えられる．

次に Skim milk を加えた供試体の一軸圧縮試験の結果を Table 3 に示す．Skim milk を添加しなかった Case 1 は，日本での実験結果と同様に，この条件では供試体脱型時に供試体が崩れてしまい, 一軸圧縮試験を行うことができなかった. それに対し Skim milk を添加した Case 2 は,平均 102 kPa の強度を確認することができた．これらの結果から，Skim milk の添加により，飽和状態の供試体でも強度発現を期待できることがわかった. Skim milk を添加することにより強度発現が見られた要因として，Skim milk により Ca^{2+} がキレート結合を形成する能力があり、これがカルシウムイオンの即時反応を抑制し、炭酸カルシウムの析出速度を低下させる結果，結晶の成長速度が低下、より大きく安定した結晶が形成されたことによると考えられる．また，これらの供試体は増粘剤を添加した条件であったことから，増粘剤併用条件でも強度発現が期待でき，MICP による地盤改良に増粘剤併用が可能であることも確認できた．

Case	Urease Activity(mM/hr)
Culture once	15.94
Culture twice	24.58

Table 2　Urease activity measurement results

T

Case	UCS(kPa)	Ave.(kPa)
Case 1		
Case 2	74.00	102.05
	102.23	
	129.93	

Table 3　UCS results

6．まとめ

今回の海外共同研究は，日本語の通じない環境での共同研究という，大きな挑戦の機会となった．約 1 ヶ月間の滞在中，慣れない環境ではあったが，現地の研究室の皆様の温かいサポートのおかげで，生活面での不安なく研究に専念することができた．研究においては，言語の壁を乗り越えるため，積極的なコミュニケーションを徹底した．理解できないときは何度も尋ね，自分の考えを伝える際は，図や翻訳機を駆使して粘り強く説明することを心がけた．この積極的な取り組みの結果，問題なく研究を進めることができ，帰国後も交流を重ねている．現在は，定期的にコンタクトを取りながら，さらなる成果を目指して研究を進めている．また，大学で出会った学生たちの高い研究意欲は，私に大きな刺激を与えてくれた．この貴重な経験を活かし，今後もより質の高い研究成果が得られるよう，努力を重ねていきたい．

7．謝辞

本研究の遂行にあたり，貴重なご意見と温かいご指導を賜りました Ning Jun Jiang 教授，受け入れ期間中，現地での生活や研究活動を支えてくださった研究室の皆様に深く感謝いたします．また，このような貴重な機会を与えてくださった，広島大学先進理工系科学研究科の畠俊郎教授に厚くお礼申し上げます．最後に，海外共同研究プログラムをサポートしてくださった実行委員会の諸先生方，学生支援グループ国際事業担当の皆様に，重ねて御礼申し上げます．