

国際科学技術共同研究推進事業
地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）

研究領域「環境・エネルギー研究分野」

研究課題名「インドネシア中部ジャワ州グンディガス田における二酸化炭素
の地中貯留及びモニタリングに関する先導的研究」

採択年度：平成 23 年度/研究期間：5 年/相手国名：インドネシア

終了報告書

国際共同研究期間^{*1}

平成 24 年 9 月 9 日から平成 29 年 9 月 8 日まで

JST 側研究期間^{*2}

平成 23 年 6 月 1 日から平成 29 年 3 月 31 日まで

（正式契約移行日 平成 24 年 4 月 1 日）

*1 R/D に記載の協力期間（JICA ナレッジサイト等参照）

*2 開始日=暫定契約開始日、終了日=R/D に記載の協力期間終了日又は当該年度末

研究代表者： 松岡俊文

京都大学学際融合教育研究推進センター 特任教授

I. 国際共同研究の内容（公開）

1. 当初の研究計画に対する進捗状況

(1) 研究の主なスケジュール(実績)

研究進捗状況(平成28年3月末時点)				当初全体計画 進捗平成28年度末(プロジェクト終了)時点																PS Preliminary survey BLS Baseline Survey MS Monitoring Survey			TS Test survey ▲ Injection		
研究項目				年度	平成24年度				平成25年度				平成26年度				平成27年度				平成28年度				
大項目	中項目	小項目		四半期	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
1. 事前調査と計画	研究計画の作成・更新	1.1 研究体制の構築																							
		1.2 研究計画の策定及び更新 1.3 関係諸機関との調整や文書																							
	シンポジウム・技術交流会等	1.4 技術交流会、シンポジウムの開催				●●	●●	●●		●●	●●	●●		●●	●●	●●		●●	●●	●●		●●	●●	●●	
		1.5 インドネシアにおけるCCSプロジェクトの事前調査 1.6 グンディガス田での圧入・モニタリングのための事前調査																							
2. 貯留層のモデリングとシミュレーション	地質モデル構築	2.1 既往データベースの整備・更新																							
		2.2 既往データの補完データ調査・解析																							
		2.3 地質モデル構築																							
	室内試験(準備と実施)	2.4 岩石資料の収集・整備																							
2.5 室内試験装置の構築完成 2.6 室内試験実施																									
3. グンディガス田でのCCSIに関する各種の可能性評価と費用評価	地質モデル/貯留層モデリング/シミュレーション	2.7 地質モデル/貯留層モデル構築																							
		2.8 貯留層シミュレーション																							
		2.9 シミュレーション結果の地上設備構築へのフィードバック																							
	コスト評価とCO2圧入、モニタリングの基本計画		3.1~3.2 グンディガス田におけるCO2圧入及びモニタリング計画																						
4. 調査実施(ベースライン・モニタリング調査)データ取得、処理、解析	4 モニタリングのための調査方法、装置に関する研究	地上設備の概念検討(F/S)(ADB)																							
		(含環境影響評価)社会受容性検討(ADB)																							
		モニタリング手法の検討・実施企画																							
		地震探査																							
		電磁探査																							
		重力探査																							
		InSAR及びGPS観測解析																							
		微小地震観測解析																							
		トモグラフィ																							
		地震波干渉法																							
		環境影響評価の検討と適用																							
5. SOP作成	CO2圧入、モニタリングの総合評価		(注:圧入開始時期は平成30年度第1四半期を見込む)																						
	SOP作成																								
	SOPの普及活動		(注:SOPIに基づく啓蒙普及活動は初版完成以降開始予定)																						

当初計画からこれまでの進捗についてのコメント

上記の表にプロジェクトの進捗状況を示す。各研究項目のプロジェクト開始時点での予定を上段行(灰色)に、実際の進捗を濃い緑色にて示した。圧入作業に必要な、地上設備構築に関わるインドネシア側への ADB(アジア開発銀行)の研究資金供与の事務手続き上の理由により、CO2 圧入開始時期が当初予定(平成 26 年度第4 四半期)から、平成 30 年度第1四半期の時期へ遅延した。しかしながら、圧入後のデータを必要しない多くの研究事項(圧入後の現場調査)に関しては、当初計画したとおり順調に研究期間内に達成することが出来た。一方、当初の計画にはなかった研究開発事項に関しても、ADB の資金提供や NEDO の支援を受けて Gundih CCS プロジェクト内で進める事が可能となった。本 SATREPS 事業での中心的テーマである各種の物理探査モニタリングに関しては、バイプロサイズ震源を用いた反射法探査、新しい電磁探査法の開発や、重力探査法の適用を始め、インドネシア側には ITB(バンドン工科大学)を経由して Pertamina 石油へも技術移転は終了した。これらの成果として、モニタリング手法に係わるベースライン調査も終了している。今後は移転された技術を用いて、インドネシア技術者による圧入後の調査が計画されている。また最終成果品である SOP(Standard Operation Procedure)に関しては、日本チームで担当する項目の執筆は完了し、第 14 回 CCS シンポジウム(インドネシア国 Blora 県 Cepu 市で 2017 年 8 月 5 日に開催)において、インドネシア国に提出された。

【終了報告書】【170331】

(2) 中間評価での指摘事項への対応

要望事項 1：プロジェクトに更なる遅延が発生しないようリスク管理を徹底する必要がある。関係者間で工程について十分確認合意しておくべきである。

対応：ADB 予算による地上設備構築には、ADB 内部の諸手続きとインドネシア国内（行政組織内）での諸手続きがあり、双方の担当者に SATREPS プロジェクトの担当者を介して直接の接触が行われ、状況把握と処理推進を行ってきた。その進捗に関しては、常に ITB を通じてウォッチングを行っており、現時点で確認されている設備完成（圧入開始準備完了）の時期が最速の時期と考えている。

要望事項 2：SOP に記載する項目は設定されているが、そのベースとなる技術についての定量的な目標設定がなされていない。最終評価に向けて何らかの定量的指標による目標設定があった方がよい。

対応：プロジェクトを進め、SOP の文書構造を検討していく中で、採用する公開参考資料から定量的指標を取り込むこととする。

要望事項 3：モニタリング手法の開発を進め、CO₂-EOR 実証試験を実施していくことが重要であるが、CO₂-EOR のエネルギーおよびマスバランスを解析し、CO₂ 削減ポテンシャルを明らかにするとともに、コスト分析を十分に行之、技術の導入可能性を示すことが必要である。

対応：本プロジェクトを対象とした（Gundih CPP で CO₂ を改修し Jepon-1 で圧入する）を使った JCM（二国間クレジット（CO₂ 削減量）取引（Joint Credit Mechanism））における MRV 検証を NEDO プロジェクトで実施した。Gundih プロジェクトでは帯水層への CO₂ 圧入であるが、この MRV 手法はほとんど同様の解析手法が、中間評価で受けた要望 3 への対応に適用できる。

(3) プロジェクト開始時の構想からの変更点

プロジェクト開始時点では、平成 26 年度末に Pertamina 石油を実施者として CO₂ 圧入を目指していたが、ADB が本プロジェクトに対して 16M\$ の研究資金提供を申し出たため、圧入時期に関して変更となった。圧入のための地上設備に関しては、ADB 予算を使って地上設備の構築のための概念設計を含むフィジビリティスタディ（F/S）を行い、その結果に基づき設備構築を行うこととなった。F/S の結果、設備構築を実施することとなったものの、本予算執行に当たってのインドネシア国内の諸手続きに予想以上の時間を要し、当初予定していた圧入開始は平成 30 年度第 1 四半期の予測となった。また本プロジェクトは JICA と JST の SATREPS プロジェクトとして発足したが、ADB の資金援助、さらに圧入に伴う Pertamina 石油の法的責任などにより、本プロジェクトはインドネシア国エネルギー・鉱物資源省の直轄事業となり、平成 29 年 8 月に SATREPS プロジェクト終了後は、ADB プロジェクトとして引き続き実施されることになった。

2. プロジェクト成果の達成状況とインパクト (公開)

(1) プロジェクト全体

(ねらい)

温暖化ガスである CO₂ に対して、その大規模排出源で分離回収し、CO₂ の地下貯留地点まで輸送し、地下の帯水層に貯留する CCS(Carbon Capture and Storage)技術は、大量の CO₂ を一度に直接的に大気中から削減できるため、経済的な温暖化対策として期待されている。既に米国やヨーロッパなどでは、年間 100 万トンの CO₂ を地中貯留しているプロジェクトもあるが、いまだ世界各地で実用化を目指した研究が進められている。注入された CO₂ が地表や浅部地下水層に漏洩することなく、長期間にわたって安定的に地下に貯留出来る地質条件に関する研究や、地下に圧入した CO₂ に対する監視を目的とし、物理探査手法を利用した経済的なモニタリング技術開発等に関しては、現在も活発な研究が進められている。

このような背景の下で、東南アジア圏は今後 CCS 事業の急増が予想される地域でありながら、それに対応できる技術ノウハウの共有、技術者の育成、CCS 実施の際の技術指針の作成、CCS の社会受容性などに対する考え方などに関しての研究はほとんどなされていない。本プロジェクトでは、インドネシア国の中部ジャワ州にあるガス田(Gundih ガス田)において、CO₂ の地中貯留の実証試験を行い、CO₂ 地中貯留のための最適な貯留層評価技術およびモニタリング技術の研究開発、さらに技術の具体的な利用者であるインドネシア国の石油会社への技術移転を目的とした。インドネシアのガス田は、その貯留層が炭酸塩岩の場合が多く CO₂ の含有濃度が高いことが知られている。本プロジェクトの Gundih ガス田においても天然ガス生産時に約 20%の CO₂ が随伴ガスとして生産され、現在は大気放散されている。

本プロジェクトは、生産中のガス田を対象にした東南アジア圏で最初の実証的研究プロジェクトであり、技術開発のみならず、CO₂ の安全な地中貯留実施のための技術指針(Standard Operation Procedure)を作成し、石油会社、関連省庁を中心にその普及拡大を図ることである。無論この成果は、インドネシアだけでなく同様な状況にあるアジアの発展途上国においてエネルギー増産と、地球温暖化抑制の両立を可能にすることに大きく寄与出来る。一方本プロジェクトを協同で推進してきた我国の民間石油会社、コントラクター会社にとっても、多くの技術の適用の場所を提供すると共に、CDM メカニズムを活用した地球温暖化事業の足がかりになる。

CCS 事業において重要なのは、CO₂ を安全に貯留出来る場所を見つけ出し、CCS 事業に必要な多くの事項に関して総合的に評価検討を進めることである。この課題に対して本プロジェクトでは Pertamina 石油が所有する Gundih ガス田地域を、インドネシア研究者と協同で再評価し、以下のような広範囲の事項について技術開発を進めてきた。具体的には、サイト選定の為の地表地質調査、ボーリング調査、既存反射法物理探査データの再評価、地質モデルの作成、貯留層数値モデルの構築、圧入シミュレーションスタディ、近傍断層の再活動の評価、圧入井の安全性評価、圧入井に対するワークオーバー計画の立案、地表での環境調査の検討、重力や電気探査の適用、InSAR データを利用したモニタリング手法の検討、等を行った。ここではこれらのサイト選定に関連する技術事項、モニタリング技術を中心に、5 年間の研究成果をこの終了報告書としてまとめる。

一方、プロジェクトの開始時には予定されていなかった ADB(アジア開発銀行)による研究資金の提供があり、これらの資金を利用して、圧入地域の住民に対する社会受容性に対する調査、Gundih ガス田での CO₂ 分離回収技術の検討、CO₂ の輸送に関する検討、圧入に伴う地表設備の検討、CCS 実施上の法規制に関する検討などを進めた。さらに NEDO の資金を利用して、Gundih での CCS 事業を例題に、カーボンオフセットである JCM に対する調査を進めた。これらの技術開発事項に関しては本報告書では必要な場合以外は触れないが、SOP(最終版)に、これらの技術事項も記載する予定である。

【終了報告書】【170331】

本研究を実施するにあたり、以下の表に示すような研究項目を設定した。当初、シミュレーション関連の研究は、チームメンバーであった秋田大学が担当してきたが、平成27年度より研究項目を項目1（主担当京都大学）に合体して、以下の表の通り、4つの分野の研究題目とした。

機関・部署・役職名	氏名	「研究題目」及び「研究の目的及び内容」
京都大学大学院 工学研究科 教授	松岡俊文	研究題目：貯留層評価及び数値シミュレーションを含めたモニタリング技術の最適化に関する研究 研究の目的及び内容： CO ₂ を注入する貯留層の特性を評価する手法及びCO ₂ の貯留層内での挙動をモニタリングする手法の最適化に関する研究を行い、手法と手順に関する規準化案を作成する。さらに数値シミュレーションによる安定的貯留の検討を行う。重力探査によるモニタリング手法の研究開発と適用を九州大学と共に行う。本プロジェクトに関わる地上設備構築、CCS関連法整備、社会受容に関わる検討をバンドン工科大学と共に行う。併せて研究代表機関として、プロジェクト全体の統括、技術管理、啓蒙活動、成果公表の企画運営を行う。
早稲田大学理工学術院 環境資源工学科 特任教授	齋藤章	研究題目：電気・電磁法を利用したモニタリング技術の研究 研究の目的及び内容： 圧入したCO ₂ の貯留層内での動態をモニタリングする新しい手法として時間領域電磁探査法の研究開発と実際の適用をおこなう。
公益財団法人 深田地質研究所 理事	高橋亨	研究題目：探査データの総合解釈・評価技術の研究 研究の目的及び内容： 各種探査で得られた物性値からCO ₂ の飽和度等の変化を推定するための手法及びCO ₂ 貯留層の評価技術について研究を行う。また、地表地震探査と坑井内地震計を用いたモニタリング手法の研究開発も行う。
九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 准教授	辻健	研究題目：貯留層評価及びモニタリング手法の研究 研究の目的及び内容： 地震探査・重力探査・干渉SAR解析・地震波干渉法解析などの物理探査や、室内試験を実施して、貯留層の特性を評価する。また、CO ₂ 圧入サイトに適したモニタリング手法を確立し、実施する。さらに物理探査モニタリングで得られた物理特性（弾性波速度など）から、CO ₂ の状態（CO ₂ 飽和度など）を定量的に評価するための研究を行う。

（年次毎の進捗状況）

平成 23 年度は、本格的な研究開始のための準備として、インドネシアおよび東京において、関係研究機関の研究者ならびに一般参加者を集めた CCS に関するシンポジウムを開催し、インドネシア/日本両国のみならず世界各国における CCS に関わる政府や研究機関の動向や技術開発の状況、また本研究で実施する予定の研究計画などについての紹介を行った。

平成 24 年度は、5 年計画のプロジェクトの初年度として、CO₂ 貯留層の評価技術の開発を目的に、グンディガス田周辺で取得された既往データを再解析し、貯留層候補地層の地質学的、地球物理学の特性を明らかにするとともに、予備的な貯留層シミュレーションを行い貯留性能の検討も行った。その結果、サイト北部により適した貯留層候補地層が存在する可能性が明らかとなったため、新たに必要なデータを入手・再解析を行うことを決めた。モニタリング技術の開発については、電磁法探査装置、地震探査装置、微小地震観測装置の導入準備を行った。CCSの普及拡大を目的としたシンポジウムを東京とインドネシアで開催、

【終了報告書】【170331】

東京では 70 名を超える参加者、インドネシアではプロジェクト遂行上重要なインドネシア関係諸機関からの参加者を得た。

平成 25 年度は、サイト北部のデータの再解析を行い、構築した地質モデル及び貯留層モデルに基づき、貯留層シミュレーションを行い、圧入サイトとして問題がないことを確認した。以上の結果からサイト北部に位置する Pertamina 社の廃止坑井である Jepon-1 を用いた圧入の検討を開始した。さらに、ITB にて地上設備構築や法規制、社会受容性に関するフィジビリティスタディ(F/S)を実施した。本 F/S のために、日本の関連企業への技術ヒアリングを行った。Gundih の北部地域において、貯留層露頭および掘削による貯留層層準の岩石資料を回収・分析し、物理探査モニタリングの際のシミュレーションの基礎的な地層情報を得た。平成 24 年度に調達した、地震探査装置、坑井内地震計及び電磁探査装置、また、本年度に調達した重力計(gPhoneX および CG5)の輸出を完了した。前者3装置に関しては、現地(ITB Jatiningor キャンパス)において、ITB 技術者へ操作方法の研修を兼ねた小規模観測実験を行った。重力探査の予備調査を行った。また、平成 26 年度に実施する一部のベースライン調査の仕様の検討を行った。アウトリーチ活動として、CCS シンポジウムを日本(11 月福岡市)とインドネシア(3 月デンパサール)で開催した。福岡市では 55 名を超える参加者、インドネシアではプロジェクト遂行上重要な関係諸機関からの参加者を得た。インドネシアでのシンポジウムの際には JCC 会議を開催した。

平成 26 年度は貯留層シミュレーションの総合的な解析を行い、圧入地域周辺に存在する断層を通じた CO₂ 漏洩リスクや岩石力学的検討による CO₂ の安全な圧入が基本的に可能であることを確認した。また、CO₂ の地層水への溶解プロセスのシミュレーションへの組み込みに関わる基礎的検討を行った。モニタリング手法の開発に関しては、重力探査はベースライン調査の一環として平成 25 年度に輸出供与した重力計(CG-5)や日本から持参した絶対重力計 A10 を用いた広域調査を実施した。電磁探査に関しては、TDEM 装置の MI センサーを4式と電磁探査データ解析ソフトウェアを供与し、6 月に Jepon-1 周辺地域の地表予察と使用機器準備他のロジスティックス検討を行い、8 月には ITB 研究者チームと共にベースライン調査を実施した。地震探査関係では、坑井内微小地震計(平成 25 年度調達)を用いて平成 26 年 11 月から平成 27 年 2 月にかけて予備調査を実施し、坑井内地震計 5 式を追加調達して供与した。また、平成 24 年度、26 年度に調達した地表地震探査装置を用いたベースライン調査に関して、ITB 研究者と予備的な協議を開始した。更に、新型震源機器による CO₂ の漏洩監視への適用可能性に関する基礎研究を行った。収集した岩石資料を用いた実験のまとめも行った。CO₂ 回収・輸送・圧入に関わる地上設備の F/S(平成 25 年度実施)の成果をまとめ、これまでの SATREPS 研究(地質学・地球物理学・貯留層研究(GGR と呼称))と併せて本年度 ADB へ研究報告を行った。CCS 実施に当たっての大きなリスク要因である圧入 CO₂ の漏洩問題に対し、各種漏洩の可能性を考えたシミュレーションによって評価されている。今回はこれらのリスク要因に関して、インドネシア側のカウンターパートである ITB がノルウェーの DNV 社の研究者と共に検討を行った。その結果、既存坑井を利用した二酸化炭素の圧入に関して腐食に関連したリスクのあることが解ったため、本年度、二酸化炭素に対する坑井のケーシング評価プログラムを導入し、検討を行った。定期的に実施している Gundih CCS シンポジウムの第 8 回シンポジウムを秋田県大潟村で開催し、50 名を超える参加者があった。また、シンポ期間中に来日中の ITB 学長 Professor Dr. Akhmaloka のシンポジウムへの参加があった。第 9 回 Gundih CCS シンポジウムを 3 月 6-7 日にインドネシア国スラバヤで開催した。更に、ADB から ITB が受託した地上設備構築に関わる F/S の結果を広くアピールするための ADB ワークショップと謳った報告会を 8 月にバンドン(ITB)にて、また、9 月に東京(早稲田大学)にて開催した。JICA

【終了報告書】【170331】

の短期招聘プログラムを利用して2名のITB研究者(Dr. Eko Januari, Mr. Fernando Hutapea)を招聘し、日本研究者との共同研究や研修を行った。

平成27年度は、地表地震探査の予備調査とベースライン調査の各種準備、重力探査、広域ジオメカニクス、圧入坑井の健全性評価、InSAR解析の予備を中心に研究を進めた。以下に概要を記し、詳細は各組織からの報告として後述する。CO₂を圧入した際の地層安定性を担保するための広域ジオメカニズムの研究を日本・インドネシアが連携して実施した。Pertamina石油の所有する情報の公開性の制限のため、追加情報の入手困難があったが、今後もインドネシアと連携して研究を進める。重力探査に関しては、これまで行ってきた絶対重力計A-10での基準データ観測は行わず、既に供与した重力計(CG-5)を用いた広域調査を実施した。電磁探査に関しては、平成27年度は平成26年8月に実施したベースライン調査で取得したデータの処理解析をインドネシアチームと連携して継続した。その中間成果は平成27年11月に東京で開催されたSEGJ国際シンポジウムで発表を行った。微小地震計測では、調達供与した坑井内微小地震計の試験運用の一環として、これら機器を用いて平成26年11月以降継続して地熱地帯でのテスト計測を行っている。地表地震探査では、これまで供与した機材(計48Ch)を用いた予備実験を2回、実際の現場にて実施した。尚、地震探査機器に関しては、本年度に48CHの地震探査装置を追加供与し、計画通り総計96CHのシステムの供与を完了している。二回の予備調査の結果を基に、ベースライン調査(平成28年度前半期に実施予定)の仕様決定や既存データからは解明されていない浅部地質構造の解明を進めた。圧入坑井候補であるJEPON-1坑井の健全性評価を日本・インドネシア共同で実施した。インドネシア坑井研究者2名をITBとPertaminaから日本へ招聘し、京大共同研究組織である石油資源開発(株)の坑井技術の協力の下に集中的なスタディも実施した。InSAR技術のCCS適用に関しては、JEPON-1周辺の衛星データを取得して予備的解析を実施した。

定期的に実施しているGundih CCSシンポジウムの第10回シンポジウムを日本(9/28 於京都府精華町)で開催し、60名を超える参加者があった。また、シンポジウム期間中、日本のCCS研究の最先端研究組織であるRITEの訪問見学を実施した。第11回Gundih CCSシンポジウムをインドネシア(3月18-19日 於ジョクジャカルタ)にて開催した。平成28年2月には東京にて「CCS国際シンポジウム」のタイトルで、川口順子元環境相・外相ほか、米国DOE、豪州GCCSIから著名な研究者を招聘して講演するとともに、Gundih CCSプロジェクトの成果報告も行った。JICAの短期招聘プログラムにて2名のITB研究者(Dr. Warsa, Mr. Harya Danio)を招聘し、日本側研究者(早稲田大学および九州大学)との共同研究および研修を行った。

平成28年度は、圧入CO₂の挙動モニタリングに最も適しているとされる弾性波探査によりベースライン調査を軸にして研究を進めた。本調査は当該地域において、石油ガス探鉱開発を目的とした調査においても実施された経験のない強力な機械振動を利用する人工震源と、高精度、高分解能探査仕様をもって実施された。これによりこれまで十分に把握されてこなかった詳細な地質構造が明確になった。その他のモニタリング手法は、微小地震観測を除き終了しており、CO₂の圧入を待って、適切な時期にベースライン調査に準じた仕様にて調査を実施することとなる。圧入坑井に関しては、坑井の健全性検討が入念に行われており、これらの結果を判定した後に、最終的に圧入坑井の仕様を決定する。SOPに関しては、ベースライン調査を終了した時点までの成果と、公開情報やADBなど他の研究資金によって行われた事項に関してもまとめた。SOPの日本チーム担当部分の執筆は完了し、平成29年8月に開催された第14回CCSシンポジウムにおいて、インドネシアチームに提出した。未実施項目については、今後、インドネシアで進めるプロジェクトの中で追記が行われる。

【終了報告書】【170331】

(当初目標の達成状況)

研究計画立案当初においては、CO₂ の圧入は研究期間終了時までには可能であると計画していたが、計画になかった ADB による資金提供の申し出があり、前述のとおりインドネシア国内の各種手続き、ADB の内部手続き等に時間がかかり、CO₂ の圧入時期が遅延した。このため、研究期間内での圧入実施は不可能となったが、フェーズ 1 に関する技術開発事項に関しては、全て達成された。また SATREPS プロジェクトの目的の一つである技術移転に関しては、ITB に対して各種モニタリングに必要となる機器の提供と教育を実施してきた。さらに、これらを利用して Gundih 地域において Pertamina 石油と共同で、フィールドでの実証観測を行い、技術移転に関する目標も充分達成された。

「サイト及び貯留層の評価」に関しては、既存反射法物理探査データの再解釈や、現地でのボーリング調査、地表地質調査などを実施し、地質モデルの作成、それを利用した貯留層数値モデルの構築、さらに圧入シミュレーションをおこない、圧入サイトの精密な評価と、貯留層の特性評価を実施した。また圧入に伴う貯留層での孔隙圧の変化に着目し、近傍断層の再活動の可能性を評価した。これは本プロジェクトによって新しく開発された技術であり、今後広範な利用が期待されている。グンディガス田での CCS 圧入に伴う諸設備に関しては、概略設計は終了している。今後これらを元に ADB の資金によって順次建設が始まる予定である。計画が遅延したことで CO₂ の圧入には至っていないが、CCS 技術指針である SOP に関しては、今まで世界各地で実施された CCS に係わる文献、また RITE によって実施された長岡市岩野原での CCCS 実証実験、さらに苫小牧で実施中の CCS 事業の成果などを取り込み、SOP を完成させた。これらの状況を踏まえて、本研究項目に対する達成度は 90%程度であると判断した。

「CO₂ 挙動モニタリング及び評価技術」に関しては、時間領域電磁探査法や、バイブロサイズ震源による反射法物理探査、InSAR による地表変形測定法など、今までインドネシアにおいては利用されることがない新しいモニタリング法の適用と技術開発を進め、多くの成果をえた。また初期計画通り、8 つの異なったモニタリング技術に関しては観測機器の準備、手法の検討を行い、主要なモニタリング手法によるベースライン調査は終了している。しかしながら、計画された手法を用いて、地下における CO₂ 挙動の評価までには至っていない。しかしながらこの課題に関しては、既に技術移転を終了している ITB を中心とするインドネシア技術者によって、今後圧入後に進められる計画である。このため、Gundih ガス田での圧入後の調査実例を取り込んだ SOP の作成には至っていない。圧入後における物理探査手法の適用事例に関しては、プロジェクト開始後 5 年の年月がたち、他の CCS 実証事業での適用例も増えてきており、これらの事例を取り込んで日本チームとしての最終版 SOP を完成させた。このような意味において、本研究テーマの達成度は 80%程度であると判断している。

「CCS 実施基盤の構築」に関しては、本プロジェクト発足後一貫して日本で年に 1 回、インドネシアで年に 1 回の国際シンポジウムを開催してきており、多くの参加者を得ている。特に日本で開催されたシンポジウムにおいては、インドネシア国の経済担当調整省の次官、エネルギー・鉱物資源省の総局長、研究技術高等教育省の総局長、ITB の歴代学長、圧入予定地であるブローラ県の県知事、Pertamina 石油の副社長、SKK MIGAS の副社長など、研究実施者ばかりで無く、CCS 実施に必須の政府の担当省の事務次官など、多くの参加者を得てきた。インドネシアでの CCS 実施は今回が最初であり、多くの法律的な観点の議論、各省庁間での調整、実施主体である石油会社と許認可機関との調整など多くの実施上の課題を解決する必要上、関係担当者の日本への招聘とシンポジウム参加は必須であった。その結果、Gundih CCS プロジェクトは最終的にエネルギー・鉱物資源省の大臣決裁による国家プロジェクトへと格上げされ、実施者として正式

【終了報告書】【170331】

に国政石油会社の Pertamina 石油がアサインされた。これは今回の SATREPS プロジェクトにおける最大の成果と言える。

一方、CO₂ の圧入は遅延したが、逆に ADB のプロジェクト参加と予算を利用して、社会受容性や規制上の検討、CCS リスクに関する検討、実施に当たっての法律的な事項に関する検討等、当初は計画されていなかった CCS 実施上のソフト面に関しての技術開発を進めることが出来た。また NEDO の支援を受けて、GuindihCCS プロジェクトを例として、日本が進めている炭素クレジットの二国間取引である JCM の F/S も実施出来た。この意味では初期の計画になかった多くの関連事項に関して研究を進めることが出来たと考えている。この様にプロジェクトが遅延はしたが、総合的な技術体系としてエンジニアリング部門のみならず、社会学者や、法律家の協力・支援を得て、より発展的に実施されてきた。当初、SOP の記述内容は CO₂ 圧入とモニタリングに係わる技術項目のみとされていたが、これらの成果を取り込み、本プロジェクトの最終的な成果としての SOP は、CCS 全体にわたる基準書として作成を行うこととなった。以上の背景から、日本チームとしての SOP 最終版は平成 29 年 8 月に開催された第14回 CCS シンポジウムにおいてインドネシア国に提出された。

また本プロジェクト発足時に設定した幾つかの付随的な成果についても、当初の計画を充分満足する成果が得られたと考えている。これらの中で特記すべき事項として、「日本政府、社会、産業への貢献」さらに「技術および人的ネットワークの構築」においては、特に著しい成果を上げたと考えている。前述したように本プロジェクトはインドネシアの国家プロジェクトへ格上げされたことに伴い、多くの関連省庁の関係者が日本を訪れ、経済産業省始め関連省庁や民間企業との交流が積極的に行われ始めた。特に経済産業省で CCS を担当している産業技術環境局環境政策課とは、担当者レベルでの交流が始まっている。また ITB の受け皿となっている Pertamina 石油、さらにエネルギー・鉱物資源省の担当者、経済担当調整省の次官等が訪日した際には、石油天然ガス・金属鉱物資源機構(JOGMEC)、国内石油会社である石油資源開発(株)(JAPEX)、国際石油帝石(株)(INPEX)等を訪問し、CCS のみならず、インドネシアの石油ガス開発に関する意見交換なども活発に行われた。このような交流をきっかけに、JOGMEC が進めている CO₂ 分離膜の開発事業の現地実証テストサイトとして Pertamina 石油が所有する油田が候補として上がり、現在検討が進められている。この事業の受け皿は、我々と本プロジェクトを推進してきた ITB の CCS チームが担っている。また我が国における CCS 技術開発を牽引してきた地球環境産業技術研究機構(RITE)とは、本プロジェクトがスタートして以来、常に交流を持っており、インドネシア人技術者の 2 週間程度の研修や、研究者のインドネシアでの講演などをお願いしてきた。またエネルギー・鉱物資源省が始めた CCS の COE(Center of Excellent)事業に対して、実験機材の寄附なども行ってもらった。また日本 CCS 調査(株)が苫小牧で実施中の CCS 事業に関しては、多くのインドネシア要人がサイトを訪問すると同時に、インドネシアにおいては CCS 実証場所として広く認識されるに至った。

(成果の科学・技術的な概要とその意義)

CCS 実施に必要な要素技術は、石油業界で利用されている要素技術と同じものが多い。分離回収技術については、天然ガスの生産に際して随伴してくる CO₂ の分離技術は古くから利用されてきた。また長距離のパイプライン技術は石油業界では必須の技術である。さらに CCS での圧入サイトの調査、評価、貯留層の特性評価などに必要となる技術は、ほぼ全て油田開発で必要な為に開発されてきた技術である。しかしながら、CCS の場合は石油ガスの生産とは異なり、流体を地下に圧入する作業である。このため、地下に

【終了報告書】【170331】

CO₂ を圧入することによって、地下環境に対してどのような影響を与えるかについての考察は、CCS 技術が提案されて、始めて真剣に議論され始めた。本プロジェクトでもこのような視点から幾つかの新しい科学・技術的な成果を得ることが出来た。

岩石中のナノメートルスケールの微少な孔隙内での CO₂ の流動の振る舞いは、超臨界 CO₂ と地層水(通常塩水)と岩石を構成している鉱物の性質によって規定されてくる。また CCS 技術の延長である CO₂-EOR の適用に際しては、さらに貯留層内の油の性状が問題になってくる、特に圧入された CO₂ の流れの振る舞いを規定しているのは、浮力と毛細管圧力であるが、毛細管圧力は鉱物表面での超臨界 CO₂ が示す濡れ性に起因している。そこで本プロジェクトでは、これらの事項に関して議論を進めるに当たって必要になる学問分野として、NanoGeoscience と呼ばれる学問分野と、微細孔隙内に存在している油の性状を理解するために、Digital Oil と呼ばれる概念の構築を、京都大学が中心となって進めてきた。NanoGeoscience とはナノスケールにおいて超臨界 CO₂、地層水、油や岩石鉱物の相互関係を議論する新しい地球科学分野である。利用した手法としては、Spring-8 等の放射光計測や、AFM、ラマン散乱計測、NMR 計測などの分子レベルを対象とした観測技術と、第一原理計算や分子動力学などの計算化学手法である。これらの手法を利用しながら、本プロジェクトでは超臨界 CO₂ と地層水が岩石鉱物表面で示す濡れ性に関して、温度圧力依存性や、地層水の塩分濃度の影響、鉱物の種類による影響、油分子の鉱物表面での振る舞いなどに関して研究を進めてきた。これらのナノスケール現象はスケールアップを行い、マイクロメートルスケールにおいて格子ボルツマン手法を利用した流動シミュレーション技術を九州大学が中心となって開発して来た。これらの成果を取り込む形で、数メートルスケールでの貯留層内での CO₂ の流動シミュレーション技術の開発を秋田大学が中心となって進めて来た。これら一連の成果に関しては、Scientific Reports (Nature Publisher)、Physical Review、J. Chem. Phys、Langmuir、Int. J. Quantum Chem、Transport in Porous Media、Water Resour. Res、Advances in Water Resources、Energy & Fuels、International Journal of Greenhouse Gas Control 等の国際誌に掲載されてきた。京都大学が始めた NanoGeoscience や Digital Oil の一連の概念は、本プロジェクト期間を通して研究開発を進めることによって、新しい学問分野として市民権を得たと評価している。

CCS の実施に当たっては地質学的、地球物理学的な手法を用いて、圧入貯留層の選定と評価が必要になる。さらに貯留層からの漏洩や、地表への CO₂ の漏出に関連しては石油工学で利用されてきたシミュレーション手法などの利用が必須である。また圧入による誘発地震の可能性等の検討や、断層の再活動に関する評価などが必要になってくる。さらに圧入後の CO₂ の流動に関するモニタリング技術には多くの物理探査技術が必要になった。

これら CO₂ の地下への貯留と、そのモニタリングに係わる一連の技術に関しては、新しく開発された要素技術もあり、これらに関する科学・技術的な成果は、SPE Journal、Exploration Geophysics、Geophysics、Bull. Seism. Soc. Am.、Earth and Planetary Science Letters、Tectonophysics、Journal of Geophysical Research、Geophysical Journal International、Geophysical Prospecting、Environmental Science & Technology、Remote Sensing Letters、IEEE Tr. Geoscience and Remote Sensing、等の国際誌に掲載されてきた。特に CO₂ の地下圧入によって岩石孔隙内の圧力が上昇することによる既存断層の再活動に対する影響の評価法の確立は、今後多くの場所で CCS が適用される際に必須となる技術であり、本プロジェクトの大きな成果の一つと言える。

(インドネシア国内の CCS 関連企業への成果波及)

インドネシアは COP21 パリ協定において、2030 年までに 29%の CO₂ 削減、さらに国際的な援助があれば、41%の削減を宣言している。しかしながら削減方法としては地熱エネルギーの拡大や、植林など森林での CO₂ 削減を掲げている。CCS 技術に関しては、本プロジェクトがインドネシアで最初の試みであり、無論、民間企業として取り組んで来た組織はない。CO₂ を多量に随伴する石油・ガス田がインドネシアには非常に多く、この CO₂ を処理(地中貯留)することなく石油・ガス開発を進めることは、今後は極めて困難で有る。特にインドネシア最大の天然ガス田であるナツナガス田は 70%の CO₂ を含んでおり、このガス田の開発を考えているインドネシアにおいては、CCS 技術の確立は必須である。これらの情勢を勘案すると、インドネシアにおける石油業界は CCS の実施を避けて通れない。

本プロジェクトでは ITB を受け皿として、エネルギー・鉱物資源省、さらに国有石油会社である Pertamina 石油との密接な関係を築きながら進めて来た。CO₂ の排出源である Gundih ガス田、さらに圧入井である Japon-1 は両者とも Pertamina 石油の所有である。このように、我々のプロジェクトは将来の CCS 事業主体となると想定されるインドネシアにおける石油会社と共に、技術開発を進めて来ており、CCS 事業の重要性、その技術の全体像などを Pertamina 石油が学び、実際に Gundih ガス田に適用したことは、インドネシアの将来を考えると非常に大きな波及効果があったと思われる。

(わが国における他活動との連携やインパクト)

インドネシアは、昔からわが国の多くの石油会社が油田開発の為に活動してきた地域である。本プログラムにおいてもインドネシアで油田開発を続けている石油資源開発(株)と研究を進めることが出来たのは、本プロジェクトへのフィードバックも多かった一方、インドネシアで活動している企業への人的交流の範囲を拡げたと考えている。また本プロジェクトを契機として、石油天然ガス・金属鉱物資源機構がインドネシアでの新しい事業を発足することが出来たのは、受け皿となっている ITB の仲介があったからである。さらに、本プロジェクトを進める中で、炭素クレジットの二国間取引である JCM メカニズムに関連したフィジビリティスタディを、NED が本プロジェクトの Gundih CPP サイトを対象として実施した。我が国にとって将来必要となるであろう JCM メカニズム促進への足がかりが出来たと考える。

(日本側の若手人材育成)

前述したように、我が国の若手研究者による、衛星データを使用した InSAR 技術を ITB の研究者への講義による技術移転を行った。これは対象国への技術移転に寄与するとともに、我が国の若手研究者の育成に寄与できたと考えている。また、本プロジェクトの関連組織の大学院生をインドネシア国内でのデータ取得調査へ派遣すると共に、博士課程の学生を ITB に 3 ヶ月滞在させ、海外での共同研究作業の経験を得たことは、大きな成果と考える。

(日本・インドネシアの分担協力で実施した研究の要素技術と主たる研究者)

本プロジェクトでは研究を4項目に分け、それらに含まれる要素技術を表にまとめた。ADB 他予算による研究項目以外の全ての研究は日本・インドネシアの研究者の協力の下に実施された。

要素技術（目的と現状）	日本/インドネシアの主たる担当研究者
① 高分解能地震探査を利用したモニタリング	羽藤正実（早大）、高橋 亨（深田）、相澤隆生（サンコー）
高分解能反射法地震探査の繰り返し探査を実施し、貯留層やその周辺地層の構造・物性探査ならびにモニタリングへの適用性を研究する。探査計画・予察・テストデータ取得、データ取得の全てを日本・インドネシア共同で実施し、取得データは日本・インドネシアを目的を分担して実施した。	Awali Priyono (ITB), Alfian Bahar (ITB), Rachmat Sule (ITB), Fatkhan (ITB)、Sri Widiyantoro (ITB)、Andri D. Nugraha (ITB), Aresti Retna (ITB)
② 電気・電磁法を利用したモニタリング	斎藤章、中山圭子（早稲田大）
電磁探査法、特にTDEM（時間領域電磁探査法）やMT（地磁気地電流法）を利用した新しいモニタリング技術の研究開発と実証試験を行う。本プロジェクトに最も適すると判断されたTDEM法を日本・インドネシア共同で実施した。探査計画は日本チームで策定し、予察、データ取得は日本・インドネシア合同チームで実施した。日方の監督・支援のもとITBチームでデータ解析を行った。	Wahyu Srigutomo (ITB), Warsa (ITB), Djedi S. Widart (ITB), Erwin Dasapta (ITB)
③ 重力探査を利用したモニタリング	福田洋一（京大G）、西島潤（九大）
3次元重力探査の繰り返し適用によるCO2の挙動モニタリング法の研究と実証試験を行う。日本チームの監督の下、日本・インドネシア合同チームで毎年度、ベースライン調査を実施した。常設固定観測小屋が完成後は、固定点における連続観測を実施する。	Wawan G.A.Kadir (ITB), Eko Januari (ITB), Susanti Alawiyah (ITB)
④ 人工衛星干渉SARを利用したモニタリング	石塚師也（深田）、辻健（京大G）
人工衛星干渉SARの繰り返し適用による地表変形から貯留層のCO2の挙動を推定する技術の開発研究を行う。先端的ノウハウを持つ日本チームの主導の下、集中ワークショップなどを行い、技術移転を実施した。当該対象地に対するベースラインInSAR解析を実施した。	Rachmat Sule (ITB), Alfian Bahar (ITB), Setianingsih (ITB)、
⑤ 微小地震を利用したモニタリング	高橋 亨（深田）、相澤隆生（サンコー）、手塚和彦（京大G）
CO2の圧入により発生する微小地震を利用してCO2の挙動をモニタリングする技術の研究と実証試験を行う。日本・インドネシア合同で供与機器の操作・データ取得法の習熟のため地熱発電所周辺地域でのデータ取得実験（予備試験）を実施した。実稼働は圧入坑井周辺に設置予定の固定観測点建設後に開始する。	Andrei Nugraha (ITB), Rachmat Sule (ITB)
⑥ 自然地震トモグラフィ及び地震波干渉法によるモニタリング	辻健（九大）、尾西恭亮（土研）
自然地震をトモグラフィや地震波干渉法により解析し、CO2貯留層の動的变化をモニタリングする技術の研究と実証試験を行う。インドネシアの自然地震記録の収集を行い、日本・インドネシア合同で方針を策定した。	Sri Widianoro (ITB), Alfian Bahar (ITB)
⑦ 地球化学及び水理学的手法によるモニタリング	高橋 亨（深田）、上田晃（京大G）
地下水の地球化学的特性の変化を利用したモニタリング技術の研究と実証試験を行う。広域水理情報を連続的に取得するための固定観測点の調査を実施し、併せて、固定観測点設営のための現地調査を行った。今後は日本チームで提供した観測小屋設営後に連続観測を実施する。	Rachmat Sule (ITB), Syaiful Bahri (ITB), Hendra Grandis (ITB)
⑧ 探査データの総合解釈・評価技術の研究	高橋 亨（深田）、田中 荘一(深田)
各種探査で得られた物性値からCO2の飽和度等の変化を推定するための手法及びCO2貯留層の評価技術について研究を行う。日本・インドネシア合同で本プロジェクトの初期段階から、地表調査をサイト選定およびサイト特性評価を実施した。また、ベースライン調査で取得したデータの解析は前述の通り、日本・インドネシア合同で行うとともに、相互に情報交換を行いつつ解釈作業を行った。今後、モニタリング調査で得られるデータの解析・解釈についてはインドネシアが主体的に実施するが、適宜、日本チームからの支援を行うこととする。	Tutuka Ariadji (ITB), Benjamin Sapiie (ITB)

【終了報告書】【170331】

(2) 研究題目1:貯留層評価及び数値シミュレーションを含めたモニタリング技術の最適化に関する研究

(京都大学、九州大学、早稲田大学、深田地質研究所、秋田大学(平成 27 年度まで))

① 研究題目 1 のねらい

CO₂ を注入する貯留層の特性を評価する手法及び CO₂ の貯留層内での挙動をモニタリングする手法の最適化に関する研究を行う。また、CO₂ を貯留層に最も効率的、経済的に且つ安全に注入するための諸条件ならびに最適なモニタリング手法を検討するために、実際の貯留層をモデル化して注入シミュレーション(流動計算)を行い、対象層に CO₂ を圧入した際の安全性の確認を行う。流動計算時間を 1000 年に延ばし、圧入 CO₂ の状態変化を明らかにする。また、圧入された CO₂ がモニタリング可能か条件を評価する。マイクロサイズの粒子の岩石内における流動可能性を分析し、重要点を明らかにする。

本プロジェクトの終了時まで、全研究題目をまとめることで、CCS 実施に係る手法と手順に関する作業規準書(SOP)を作成する。

② 研究題目 1 の実施方法

CO₂ の貯留層内での流動に関して、ナノスケールからマクロスケールまでの検討を行うために、分子動力学的手法を用いて、鉱物表面における CO₂ の濡れ性の評価を行い、これを基に LBM を使って孔隙内で CO₂ の流動を検討する。モニタリング技術については各手法の探査結果を基に適用性を評価する。重力探査に関しては、九州大学と共同で調査を実施している。調査に必要な各種の観測機器の調達を行い、カウンターパートであるインドネシア国バンドン工科大学へ供与する。供与機器を使った操作手法の技術移転を行い、ベースライン調査並びにモニタリング調査を行う。衛星データを使った InSAR 解析を行い、圧入に伴う地表地盤変化抽出のための技術開発を行う。

休止坑井 JEPON-1 の圧入井としての健全性の評価検討を日本・インドネシア合同で行う。

貯留層シミュレータ GEM を利用したシミュレーションにより最適な注入のための諸条件を検討する。シミュレータへの入力物性を得るために、および岩石中の CO₂ の挙動を把握するために、現地で採取した岩石サンプルを用いて室内試験を行う。モニタリング技術の研究としては、自然地震を利用したトモグラフィ法や地震波干渉法の適用性を検討し、モニタリングのための観測仕様を決定する。

シミュレータ ECLIPSE による数値流動計算の高精度化を図る。また、残留 CO₂ 量、溶解 CO₂ 量、鉱物固定 CO₂ 量の変化を詳細分析するために、GEM による長期計算を行う。計算結果が予測する CO₂ 分布に弾性定数を与え、地震波伝播シミュレーションを行い、地震波によるモニタリング可能性を評価する。また、岩石試料にマイクロサイズ粒子を流動させ、流動条件を評価する。

項目 1 : CO₂ 挙動予測への分子動力学の適用可能性検討

項目 2 : 弾性波の減衰現象の CO₂ 地下貯留モニタリングへの利用の検討

項目 3 : 貯留層内の CO₂ 挙動モニタリング手法開発

項目 4 : 重力探査技術の開発とモニタリング

項目 5 : 圧入 CO₂ の流体挙動の数値シミュレーション(秋田大学)

項目 6 : 地震探査技術開発とモニタリング (ベースライン調査)

項目 7 : 圧入坑井健全性検討支援作業

項目 8 : ナノスケール CO₂ 挙動の理論解析

項目 9 : 二酸化炭素-塩水-鉱物の三相界面の濡れ性の変化に対する検討

【終了報告書】【170331】

③ 当初の計画（全体計画）に対する各研究項目の成果の達成状況とインパクト

項目1:CO2 挙動予測への分子動力学の適用可能性検討

CO₂ の挙動予測のために実施した分子動力学の解析により、実験結果とも一致するシリカ(岩石の主成分)表面におけるCO₂ の濡れ性に関する諸特性を得た。

Pertamina から提供されたグンディガス田の既往データ(地震探査、検層データ)の再解析を行い、貯留層の候補地層としてサイト周辺の深度 1000m 程度に広く分布する Ngrayong 砂岩層を選定し、地質モデルおよび貯留層モデルを構築して予備的な CO₂ 注入シミュレーションを行った。Fig. I-2-(2)-1 に構築した地質モデルから抽出した Ngrayong 砂岩層の上面分布を示す。解析の結果、サイト北部により貯留層に適した構造がある可能性が示唆されたため、新たに北部の既往データを入手して解析を進めることとした。

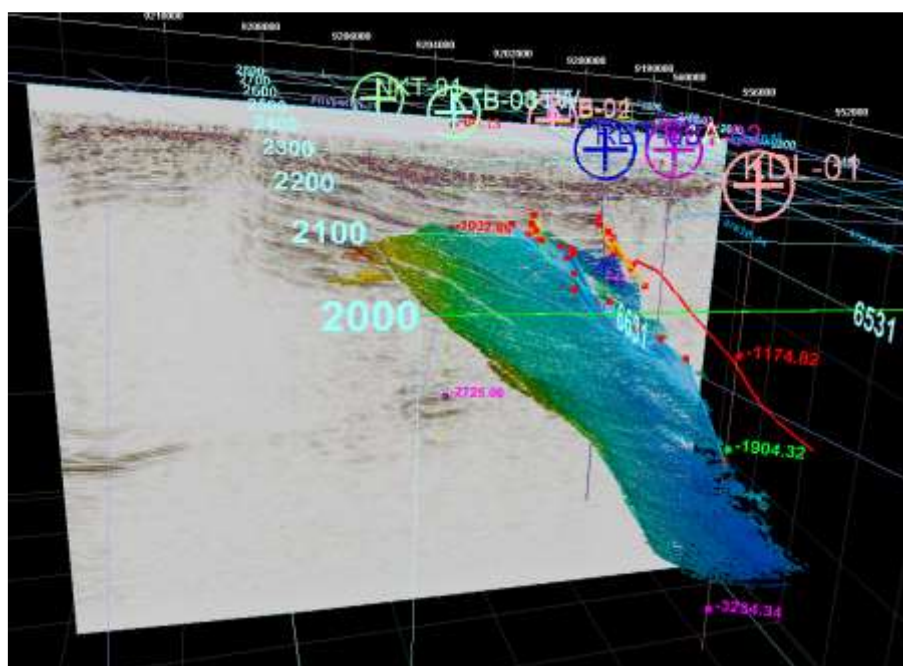


Fig. I-2-(2)-1 CO₂ 貯留層候補の Ngrayong 砂岩層の上面分布推定図

項目2:弾性波の減衰現象の CO₂ 地下貯留モニタリングへの利用の検討

CO₂ 地中貯留プロジェクトにおいて、CO₂ の地下における挙動モニタリングは、プロジェクトの安全性を評価する上で特に重要である。弾性波を用いる手法は反射法弾性波探査、弾性波トモグラフィ、音波検層など、モニタリング手法の中で最も信頼される手法として、これまでのプロジェクトでは実証試験ベース、商業ベース共に、よく用いられてきている。しかし、これまでの弾性波を用いたモニタリングでは、速度を用いたものは多くの実績があるが、弾性波のもう一つの重要な属性である減衰現象を用いた例は多くない。これは速度決定に使う走時に比べて、振幅を測定するにはより大きな SN 比が必要なため、測定が難しいことに大きな原因があると考えられるが、その他に、減衰現象と CO₂ 飽和度の定量的関係が明確に示されてこなかったことにも原因があると考えられる。近年、CO₂ の挙動モニタリングが分布範囲の把握だけでなく、将来の CO₂ 排出権取引などのために、地下における CO₂ の量を求めることも要求されてきていることから、CO₂ 飽和度と弾性波速度の関係に加えて減衰現象との関係が得られれば、これらの 2 つの情報から CO₂ 飽和度の値を確認でき、その信頼度を高めることができる。

【終了報告書】【170331】

岩石中の弾性波の減衰は一般的に内部減衰と散乱減衰に分けられる。散乱減衰は媒質の音響インピーダンスの不均質性によって波動場が散乱されることによって弾性エネルギーが見かけ上、減衰する現象である。一方、内部減衰は媒質内で弾性エネルギーが非弾性エネルギー（たとえば熱）に変換して、減衰する現象のことである。そのメカニズムとして粒子間の湿性、粘性によるせん断緩和、粒子同士の摩擦などが指摘されている。

内部減衰は上記メカニズムの他に、流体を含む岩石の場合は、弾性波によって岩石内に誘起される流れ（波動誘起流、Wave induced flow）によって起きるものが支配的であり、減衰メカニズムの対象スケールによって、巨視的(Biot)、微視的(Squirt)、中視的(Patchy)現象に分類されている。このうち、CO₂ 地中貯留のモニタリングにおいて重要な現象は中視的現象であり、部分飽和(Patchy saturation)に関するものである。この現象は CO₂ が岩石間隙中に偏って部分的に存在し、その CO₂ 部分と水部分との間で弾性波によって間隙水圧の不均衡が起こり、局所的な流れが生じて弾性波が減衰する現象である。CO₂ は岩石の中に比較的大きな圧力で注入されることと超臨界状態の CO₂ は低い粘性を有するため、圧入された CO₂ は岩石の間隙中に均等に分布せず、部分的に偏って存在すると予想され、実際に検層結果の解析によって長岡での CCS 実験プロジェクトでは音波検層の周波数では部分飽和になっていることが示されている。

ここではまず波動誘起流によっておこる弾性波速度の分散(周波数変化)と減衰について検討し、CO₂ 地中貯留に重要な中視的な現象について考える。次に、CO₂ 圧入実証プロジェクトである長岡サイトの検層結果による弾性波速度と CO₂ 飽和度の関係を示し、次に波動誘起流に基づくモデルを仮定してその時の弾性波の減衰の予想を行った。最後に、既往の室内実験のデータセットを用いて、弾性波速度の分散からモデルを用いて Q 値の計算を行い、別に行われた Q 値の実測結果と比較してモデルと計算方法の妥当性について検討した。

流体を含む岩石の弾性波による応答は弾性波の周波数によって変化する。周波数が高くなると弾性波動によって岩石内に流体の流動が誘起されるためである。この流動は波動誘起流と呼ばれて、弾性波の分散と減衰の原因となる。

巨視的な応答による現象は Biot (1962) によるものである。非常に高い周波数の弾性波を用いると間隙以外の基質部の動きに間隙中の流体がついていけず両者の位相がずれて、見かけ上、流動が生ずる現象である。遷移周波数 f_{Biot} は下記の式で記述できる。岩石内部の微視的間隙構造によらず、岩石全体の巨視的浸透率によって遷移する現象であるため、巨視的応答に分類される。

$$f_{Biot} \cong \frac{\phi \eta}{2\pi \rho_f \kappa}$$

ここで ϕ は孔隙率、 η は流体の粘性、 ρ_f は流体の密度、 κ は浸透率を示す。微視的な応答は Squirt flow (スカートフロー) と呼ばれるものである。岩石の間隙間で間隙水圧の不均衡が生じて流体の流動が起こる現象である。間隙の形状によって外力に対して間隙の硬軟が生ずることにより起こる現象である。球に近いものは硬く、扁平なものは軟らかい。そのため、弾性波という外力によって硬軟の間隙間で間隙水圧の不均衡が起こり、岩石内部に流動が生ずる。遷移周波数 f_{squirt} は下記の式で記述される。岩石の構成鉱物の体積弾性率に加えて間隙のアスペクト比が寄与する。ミクロな間隙の形状が遷移に寄与する現象であるため、微視的応答に分類される。

$$f_{squirt} \cong \frac{\kappa_0 \alpha^3}{\eta}$$

【終了報告書】【170331】

ここで κ_0 は岩石の鉱物の体積弾性率、 α は間隙のアスペクト比、 η は流体の粘性係数を示す。
中視的応答は間隙水圧の不均衡が複数の流体が分布する個々の間隙よりはるかに大きい部分間で起きる現象で、部分飽和 (Patchy saturation) に伴う現象である。遷移周波数 f_{patchy} は下記の式で記述される。部分飽和している部分の大きさ (パッチサイズ) が寄与する。

$$f_{patchy} \cong \frac{\kappa K_f}{L^2 \phi \eta}$$

ここで κ は浸透率、 K_f は流体の体積弾性率、 L はパッチサイズ、 ϕ は孔隙率、 η は粘性の大きい方の流体の粘性係数を示す。以下の図は、上記の 3 現象について、それぞれの遷移周波数が影響するパラメータを変化させたときの分布範囲を示す (Fig. I-2-(2)-2)。

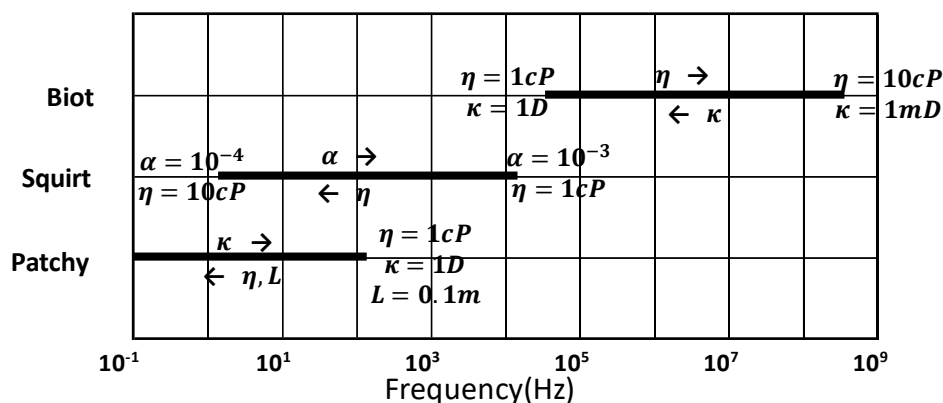


Fig. I-2-(2)-2 CO₂ 飽和モデルと遷移周波数の影響

我が国初の CO₂ 圧入実証試験が新潟県長岡市で行われ、CO₂ の地下での挙動モニタリングのために観測坑井が圧入抗井の周辺に掘削されて、そこで物理検層が複数回実施されている。その中で、音波検層結果と中性子検層結果を用いて、CO₂ 飽和度と P 波速度の関係を求めた。この場合の減衰を Standard linear solid モデルを用いて予測を行った。CO₂ 飽和度と Q 値の関係を以下に示す (Fig. I-2-(2)-3)。減衰は CO₂ 飽和度によって変化し、CO₂ 飽和度が小さいところで最大になり、Q-inverse は 0.16 程度となった。

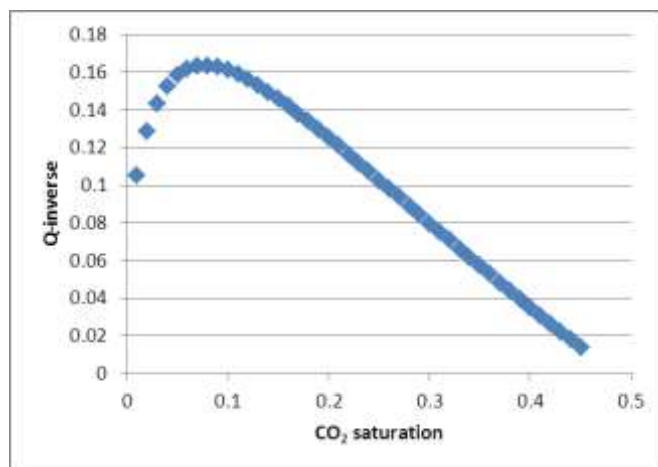


Fig. I-2-(2)-3 CO₂ 飽和度と減衰 Q 値の関係

ここで得られた CO₂ 飽和度と減衰の関係によれば、CO₂ 飽和度が小さいところで、大きな減衰が起きる。このことは、CO₂ 地中貯留プロジェクトのモニタリングにおいて有用な事象となりうる。モニタリングの重要な役割のひとつに漏洩の監視がある。貯留層は CO₂ が通過しないような遮蔽層に覆われていて、それによって浮力による上部への流動が妨げられ、CO₂ を安全に包含できる。しかしながら、遮蔽層の広範囲な遮蔽性能を完全に把握することができないことや、圧入抗井近傍における抗井沿いの漏洩の可能性も否定できないことから CO₂ 貯留プロジェクトにおいて漏洩の監視が必要といわれている。弾性波の大きな減衰が微小な CO₂ 飽和度によって起きることから、減衰によって少量の CO₂ を検知できる。そのことは漏洩の初期段階での発見に有利である。また弾性波速度が到達走時の同定と計算を必要とすることに比べて、減衰は取得波形の監視だけで検知可能なことも漏洩の初期段階での発見のために有利な点である。

項目3：貯留層内の CO₂ 挙動モニタリング手法開発

平成 25 年度は新潟県長岡市で行われた CO₂ 圧入実証試験で取得された検層データを元に、CO₂ 飽和度と弾性波速度の関係に関して検討を進めた。平成 26 年度はこれらの結果を踏まえ、二酸化炭素の地下貯留において重要となる多孔質媒体中における多相流体流動への理解、ならびに地震波速度へ多相流体流動が与える影響の詳細な理解を目的とし、シミュレータの開発と岩石モデルを用いた数値シミュレーションによる検討を行った。

流体シミュレーションを行う際には格子ボルツマン法を用いた。3 次元シミュレーションを行う為、D3Q19 モデルを採用し、境界条件としては通常の nonslip 条件とし、地層水と二酸化炭素の 2 相流を取り扱うために、色付き粒子モデルを採用した。この手法は Shan-Chen モデルや自由エネルギーモデルと比較して、界面を少ないグリッドで再現可能であり、界面張力・粘性等のパラメータを独立に調整可能である利点を有している。また二酸化炭素と水の置換が岩石の地震波速度へ及ぼす影響を検討するに、波動シミュレータの開発を進めた。支配方程式となる応力-粒子速度の式はスタガード格子法を採用したが、一般的なスタガード格子では、対象となる媒質に強い不均質性がある際に数値誤差・発散が生じてしまうことが知られているため、回転スタガード格子 (Rotated Staggered Grid) を用いた。

岩石モデルとしては、堆積岩の形状を模した粒子充填モデルを採用し、鉱物粒子サイズソーティングはガウス分布し、岩石モデルは個別要素法を用いて作成した。以下に作成された粒子充填モデルを示す。

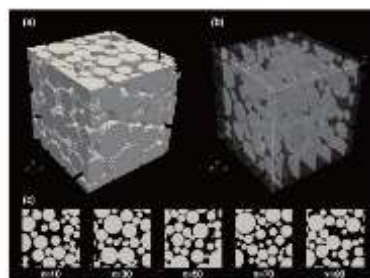


Fig. 1-2-(2)-4 シミュレーションに用いた粒子充填モデル

この岩石モデルに対して二酸化炭素圧入に伴う流体置換のシミュレーションを行なった。この際、粘性力と毛管圧力の比であるキャピラリ数と呼ばれる無次元数に着目し、これを 10^{-5} から 10^{-3} のオーダーで変化させケーススタディを行い、置換メカニズムとして高いキャピラリ数の領域では Viscous Fingering が、低いキャピラリ数の領域では Viscous Fingering と Capillary Fingering のクロスオーバーが観察された。更に、低キャピラリ

【終了報告書】【170331】

数の領域においては、間隙スケールでの現象として知られる Haines ジャンプが観察された。結果の一部を以下に図示する。

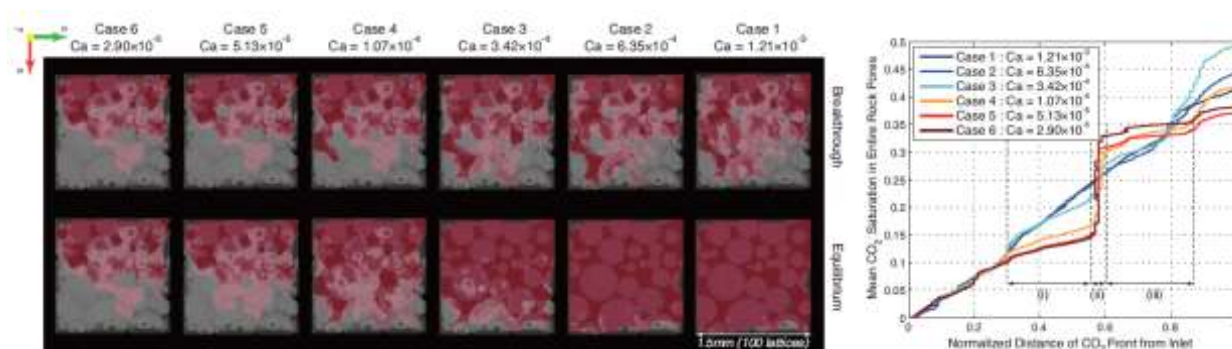


Fig. I-2-(2)-5 (右)地層水が上から圧入される二酸化炭素(赤)によって置換される様子。

(左) 二酸化炭素が岩石を通り抜けるまでの飽和率の変化の様子

ここでは、二酸化炭素地下貯留における貯留層評価や圧入効率において最も重要となる二酸化炭素の平衡飽和度に対し、Haines ジャンプが及ぼす影響について議論を行なった。観察された Haines ジャンプは前進型（方向が圧入方向と同方向であるもの）と後進型（方向が圧入方向と逆方向であるもの）の二種類に分類され、二酸化炭素の飽和度は前進型の Haines ジャンプが発生するときに非常に低い値を示すことがわかった。

格子ボルツマンシミュレーションにより得られた間隙中の二酸化炭素と水の分布をもとに、有限差分による波動シミュレーションを用いて地震波速度の変化を評価した。二酸化炭素圧入に伴う地震波速度の線型な速度の減少が観察された。一方、岩石モデル中に二酸化炭素と水をランダムに配置し、二酸化炭素と水の流体分布が地震波速度に及ぼす影響を検討した結果、二酸化炭素の飽和度に対する地震波速度の関係は格子ボルツマンシミュレーションにより求められた分布状態とランダム配置した状態とで大きく差があることが確認された。この差は部分飽和 (Patchy saturation) と均質飽和であることが解った。その結果を以下に示す。図中の白丸点は流れの、また赤十字点はランダムに地層水が置換された場合に対応する弾性波速度である。両者は大きく異なっており、二酸化炭素は部分飽和 (Patchy saturation) で有ることが解った。

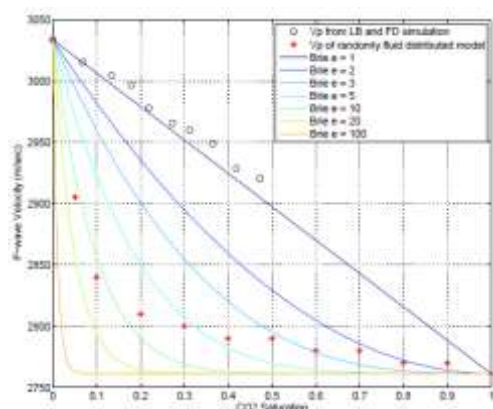


Fig. I-2-(2)-6 置換後のモデルに対する飽和度と弾性波速度の関係

またこれらの結果は、有限差分波動シミュレーションによる地震波速度の評価が妥当であることをも示しており、今回作成した格子ボルツマン法及び有限差分法による波動シミュレーションを組み合わせるこ

【終了報告書】【170331】

とで、間隙というマイクロなスケールでの多相流体分布を考慮に入れた地震波速度の定量的な評価を行うことに成功した。これらの成果は、今後現場での二酸化炭素圧入に伴う地震波を用いたモニタリングにおいて取得されたデータの解釈において基本となる事項であり、この成果を元に、今後観測データの解析を進める事にする。

項目4: 重力探査技術開発とモニタリング(京大+九大)

絶対重力計 A-10 を使った予備調査

4D 重力モニタリングとして計画されているgPhone 重力計 3 台による連続観測ならびに Scintrex CG-5 相対重力計と A10 絶対重力計のハイブリッド重力測定を念頭に置き、現地での A10 による測定手順の確認、gPhone の設置場所の選定、ノイズレベルの確認などを主な目的とした予備調査を実施した(平成 25 年度)。A10 は日本から輸送したため、測定に先立ち、落下槽の真空引きなどの調整作業が必要である。これらの作業は、7月15日～19日の間にジャカルタの BMKG(インドネシア気象庁)の重力計室を借り実施した。その後、A10 測定専用のレンタカーを使用し、7月20日～22日に、陸路、スマラン経由グンディ地域に移動した。この際、スマランのディポネゴロ大学で最終的な調整ならびにテスト測定を実施した。

グンディ地区での調査は7月23日～26日に実施した。生産井 KTB01、RBT02、KDL01、RBT01 地点および CO₂ 注入井候補地で実施した。候補地での測定は、井戸への車両でのアクセスが困難であったため断念し、その近辺の NGLOBO、TVtower の2点で測定を実施した。この他、Cepu の市街域に位置する Pertamina Office ならびに、市街域のはずれに位置し宿泊に使用した GrandMega ホテルでも測定を実施した。GrandMega では、測定精度の検証のため、同一点で複数回の測定を実施したが、何れの測定値も±10 μ gal 以内で一致しており、良好な結果であった。

今回の測定点の周辺は、いずれもほとんどが農地であり軟弱な地盤が予想されたが、ノイズレベルはそれほど高くはなく、測定結果はいずれも良好であった。A10 重力計は夜間、ホテルの車庫内で車両に搭載した状態で、AC 電源を使用し通電状態で保管したが、特に問題はなかった。しかし、重力計の調整等を行うのは困難な状況であり、今後も、あらかじめ設備の整った実験室等で調整を行うことが望ましい。

A10 による絶対重力測定と並行し、絶対重力点を基準に CG5 重力計を使用し、ITB チームが生産井地域ならびに Jepon-1 から Sembrani に至る路線の一部で相対重力測定を実施した。これらのデータは、今後、地下構造推定に使用される予定である。

インドネシアのように多雨地域での重力モニタリングに際して、重力変化のノイズ源としては降雨、地下水等の影響が最も大きく、これら、環境要因の測定・補正が不可欠になると考えられる。このため、基礎的な水理情報の収集と測定方法の検討を目的として、生産井地域にテスト的に土壤水分計を設置し連続測定を開始した。このデータは来年度回収後、周辺の降雨データなどと合わせて解析する予定である。

供与機器を用いた予備観測とベースライン調査

平成 26 年度には、平成 25 年度末に導入された gPhone 重力計 3 台および Scintrex CG-5 相対重力計の初期性能確認ならびに gPhone のバンドンでの連続観測テスト、また、昨年に引き続きグンディ地区での A10 絶対重力計による予備調査ならびに CO₂ 注入井候補地の JEPON-1 坑井地域での CG-5 重力計を用いたベースライン調査を実施した。また、CO₂ 注入に伴う重力変化のモデリングにも着手した。

gPhone 重力計については、平成 25 年 1 月に京都大学に納入され、1 月 23 日から 2 月 27 日までの約 1 カ月、初期性能確認後、3 月にインドネシアに移送した。その後、4月上旬に ITB のジャティナンゴール・

【終了報告書】【170331】

キャンパス内で連続テスト観測を開始した。その後、当初設置した建物の改築のため、9月に同キャンパス内の約 500m 離れた別の場所に移設、観測を継続している。Fig. I-2-(2)-7 (A,B,C) に、それぞれの観測点での重力計の設置状況を示す。



Fig. I-2-(2)-7A gPhone テスト状況京大

Fig. I-2- (2)-7B gPhone テスト状況 ITB (2014.04-09)



Fig. I-2- (2)-7C C gPhone テスト状況 (C) ITB (2014.09-)

同様の観測は、グンディ地域において、観測室の整備など観測条件が整うまで継続予定である。この間にインドネシア側研究者に連続重力観測やそのデータ解析等についての技術移転を行う目的で、ITB 研究者1名を JICA 研修員として九州大学および京都大学で受け入れ、これまでに得られた連続重力データを用いた地球潮汐解析、重力計のドリフト特性や環境の影響等についての評価を実施した。これらの結果、重力計間のドリフト特性やノイズレベルに差異があることなどが判明した。ただし、9月に重力計を移設していることから、長期の特性等、引き続きテストを継続することとし、これらの情報は、グンディ地域での本観測における条件設定や解析にも生かす予定である。

【終了報告書】【170331】

グンディ地区での A10 による絶対重力測定は、ほぼ昨年度と同様の手順で、ジャカルタで調整およびテスト測定を実施したのち、スマランを経由して、9月19日～20日の両日に実施した。測定を実施した測定点の内、KTB01 および RBT02 は生産井の近傍に位置しており、RBT02 は生産に向けた準備中、KTB01 では既に生産が開始されている。昨年度と比較したこれらの測定点での重力変化については、暫定的な結果であるが、KTB01 で有意な重力の減少、それ以外の点では、測定誤差を考慮すると有意な変化は認められなかった。KTB01 での重力変化の原因については、生産井の稼働開始による可能性の他、平成 26 年に比べ平成 25 年の同時期の降雨が明らかに多かったことから、地下水位変化の影響も考えられる。KTB01 点では、これらのことも考慮し、平成25年度、テスト的に土壌水分計を設置しており、この観測については、通年のデータを得ることはできなかったが、約2ヵ月程度の良いデータは取得できている。今後、このデータを用いた降雨や地下水の影響についての検討を行う予定である。

Jepon および ITB-1, ITB-2 の3点は、CO₂ 注入井候補地周辺の重力のベースライン値を得る目的で、今年度新たに設置した重力点である。また、同時期にITBグループは、これらの点は重力基準点として、CG-5 重力計を用いた約 400 点のグリッドサーベイを実施している。Fig. 1-2-(2)-8 にグリッドサーベイの測定点および A10 ならびに CG-5 での測定状況を示す。これらの測定結果については、現在、ITB で解析が進められており、今後の重力変化の基準となるほか、地下密度構造の精密な決定も行われる予定である。

以上の観測・測定研究に加え、今年度は、CO₂ 注入開始に伴う重力変化のモデリングについても着手した。モデリングについては Jepon を対象に行われている CO₂ 注入シミュレーション結果(密度変化)に基づき、重力フォワード計算を行った。計算方法は CO₂ 注入シミュレーションと同様に地下をブロックの集合体で表現し、各ブロック内での密度変化による重力変化を角柱の厳密解である Okabe(1979)の方法で計算し、これらの総和を地表での観測点における重力変化としている。また、注入量の条件としては予定されているものに加えていくつかのパターンについても試算を行う予定である。

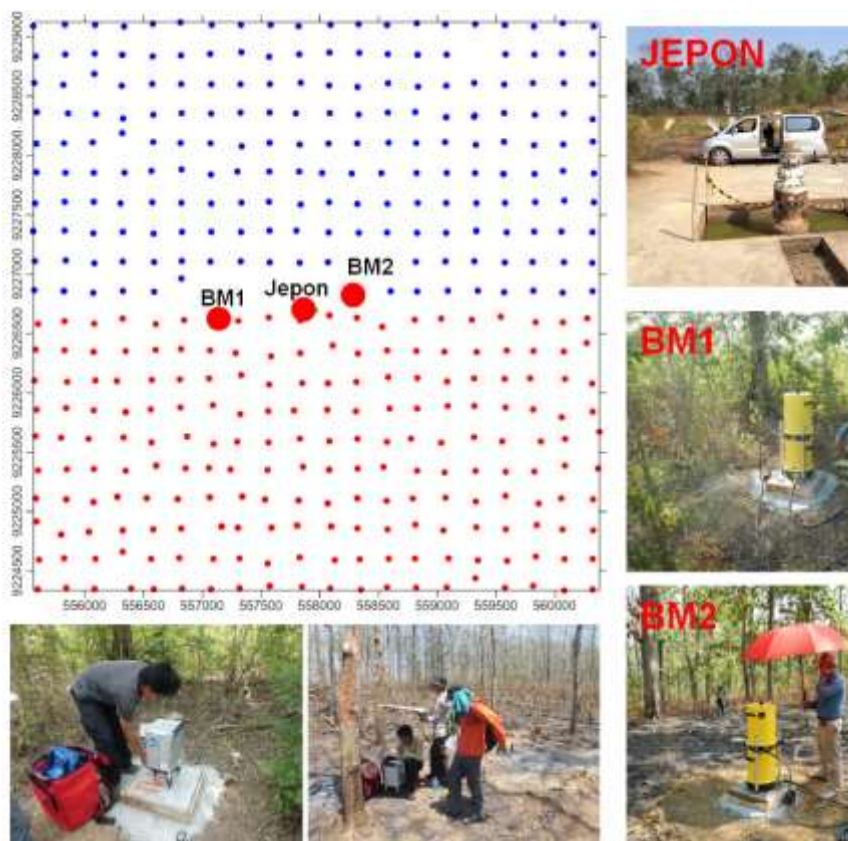


Fig. I-2-(2)-8 A10 による重力基準点と CG-5 によるグリッドサーベイの重力点
(写真は基準点での A10 の測定および CG-5 での測定の状況)

重力モニタリング観測方針検討

4D 重力探査による CO₂ 貯留層モニタリング手法では、絶対重力測定と相対測定を用いた繰り返し精密重力測定と、現地での複数観測点での連続重力観測を組み合わせることにより、空間的・時間的に CO₂ 変動に伴う重力変化を検出する手法の開発を目指している。このため、これまで現地での予備調査として、平成25年度、平成26年度には、グンディ地区に野外用の絶対重力計 A10 を持ちこみ、将来的な重力基準点の選点も含め、繰り返し絶対重力測定を実施した。また、平成25年度末には、インドネシアへの提供機材として、重力連続観測用の相対重力計 gPhone 3台ならびに野外測定用の Scintrex CG-5 相対重力計が導入され、平成26年度のベースライン調査では、A10 による測定とともに、提供された CG-5 相対重力計を用いたグリッドサーベイも実施されている。これらを受け、平成27年度には、当初、A10 と CG-5 相対重力計を用いたベースライン調査を継続実施予定であったが、使用予定であった A10 絶対重力計に機器の不調が生じ、平成27年度のグンディ地区での調査実施を見送った。その後の検討の結果、A10 絶対重力計の使用がしばらく見込めないことから、グンディ地区でのベースライン調査としては、平成28年度に CG-5 相対重力計を用いたグリッドサーベイを実施し、平成26年度の結果との比較から、重力の時空間変化についての検討を行うこととした。なお、その際、絶対重力測定は実施できないが、これまでに実施した2度の絶対測定から、比較的安定な重力基準点の候補が得られており、平成28年度の測定では、これらの測定点を相対重力測定の基準点として使用することで、實際上、問題は生じないものとする。

【終了報告書】【170331】

重力値の固定点連続観測に関する検討

重力値の時間変化の連続的なモニタリングを行う gPhone 重力計については、グンディ地域での観測開始に先立ち、平成 26 年 4 月に ITB のジャティナンゴール・キャンパス内でテスト観測を開始、その後、平成 26 年 9 月に同キャンパス内で重力計の設置場所を移設、観測を継続していた。この間、平成 26 年度中に、gPhone の 1 台 (gPhone#123) が、おそらく近辺での落雷または雷の誘導電流が原因と思われる故障が生じ、米国での修理が必要な状況となった。また、残りの 2 台についてのデータを検討した結果、重力計の傾斜補正についての調整が必要であることが判明し、平成 27 年 9 月にこれらの調整を行った。

Fig. I-2-(2)-9-1 その際、降雨や陸水の重力変化への影響を調べるため、重力計が設置された建物のすぐ近くに、降雨計ならびに土壌水分計 (10、30、50cm 深度の 3 成分) を設置し観測を開始した (Fig. I-2-(2)-9-2)。しかし、これらの観測の開始後、約 2 週間の平成 27 年 10 月 3 日に、残っていた 2 台の内の gPhone#127 にも、雷・誘導電流の影響と思われる故障が生じた。先の gPhone#123 の故障後、AC 電源に電圧安定器を挿入するなど、雷サージ対策を施していたが、残念ながら十分な効果は得られなかった。インドネシアでの観測では、雷の影響を完全に防ぐことは極めて困難と思われるが、グンディ地区での設置に際しては、避雷針の設置やより強固なサージ対策などが必要と考えられる。

2 週間程度ではあるが、傾斜補正調整後の 2 台の gPhone (#126, #127) で得られたデータを解析したところ、傾斜補正の調整前に比べ、両者のデータは良い一致を示すことが確認できた。Fig. I-2-(2)-9-3 は、これらの結果を示したもので、(a) が潮汐成分、(b) が潮汐成分を除いた長周期変動成分、(c) が長周期成分の関数近似、(d) が (b) から (c) を引いた残差を示す。gPhone#126、#127 で、(b) の長周期成分に約 $10 \mu \text{gal}$ 程度の違いが生じているが、これは機械的なドリフト成分の差と思われ、観測開始後約 2 週間程度で、それぞれの重力計がまだ十分に安定していないことによるものと思われる。ただし、その残差成分である数日より短い成分に対しては、変動が $\pm 1 \mu \text{gal}$ 程度に収まっていることが確認できた。なお今回設置した降雨計のデータから、同期間中に 2 回の降雨が観測されているが、9～10 月は乾季で降雨量はわずかであり、降雨の直接的な重力変化への影響は認められなかった。



Fig. I-2-(2)-9-1 gPhone の傾斜補正調整の状況 (平成 27 年 9 月、ITB ジャティナンゴール・キャンパス)



Fig. I-2-(2)-9-2 降雨計・土壌水分計の設置(平成 27 年 9 月、ITB Jatiningor キャンパス)

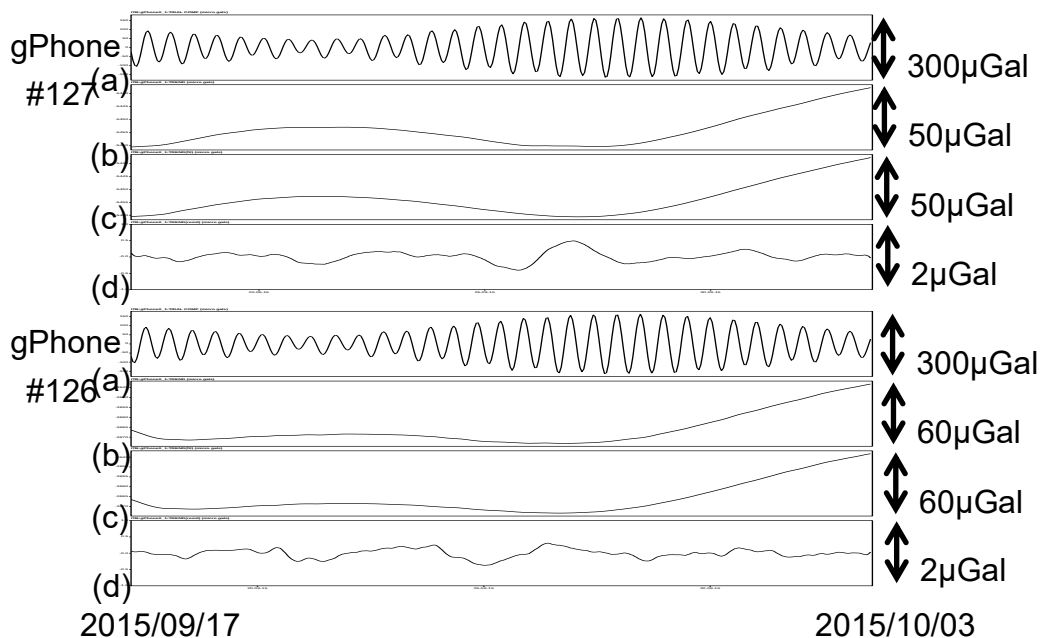


Fig. I-2-(2)-9-3 傾斜補正調整後の gPhone#126 および #127 のデータ比較

CG-5 重力計によるグリッドサーベイ

平成 28 年度には、平成 26 年度に引き続き、CO₂ 注入井候補地の JEPON-1 坑井地域での CG-5 重力計を用いた 2 回目のベースライン調査を実施した。これにより、相対重力計を用いた TLM (Time-Lapse Microgravity) 調査の精度や実施上の問題点等について検討を行った。測定は、ITB チームにより、2016 年 5 月 18 日～29 日に、2 台の Scintrex 社製 CG-5(#822, #1092)を用いて実施された。測定点は、平成 26 年度と全く同じである。なお、今回は、A10 絶対重力計での絶対重力測定は実施していないが、これまでの 2 回の絶対重力測定より、基準点での重力変化は大きくとも 10 μ gal 程度と推定されるため、下に述べる重力変化と比較して無視することが可能である。

測定データには、ドリフト等の補正を行い、複数回の測定を行った基準点での測定精度の検証をおこ

【終了報告書】【170331】

なった。その結果、平成 26 年、28 年の測定とも、測定値の再現性は、60%以上の測定点で $10 \mu\text{gal}$ 以内であり、CG-5 による重力測定として、妥当なものと評価できる。

Fig. I-2-(2)-9-4 は、平成 26 年と平成 28 年の TLM の結果から得られた重力変化図である。変化の大きさは、大きいところでは $50 \mu\text{gal}$ を超えており、以下に議論する降雨・地下水の影響を考えるとやや大きすぎるように思われる。右図にはこの地域の土地利用の様子を重ねて示したものである。この地域では、主に東側に森林が広がり、西側が水田や村が広がった平坦地となっている。全般として、森林地域で増加、平野部で減少の傾向があるようにも思われるが、必ずしも明瞭でない。もし土地利用との相関があるとする、最も考えられる理由は地下水変動であり、地下水の連続観測や重力の連続観測によるモニタリングが重要と考えられる。一方、今回の測定では、各測定点での高さや位置の測定は実施しておらず、これらの影響も考慮する必要がある。そのために、TLM 測定の際には GNSS を併用し、位置や高さの測定を実施することも必要である。

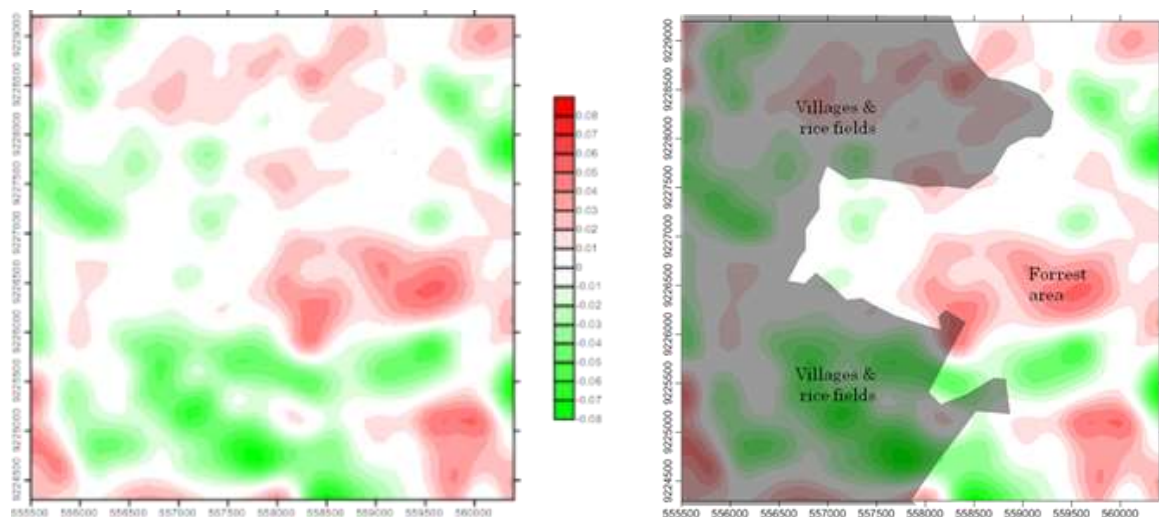


Fig. I-2-(2)- 9-4 平成 26、28 年の TLM グリッドサーベイデータの比較

重力モニタリングに向けた今後の戦略および課題

これまでに本プロジェクトで実施した研究成果をまとめ、また、さまざまな文献ならびに他の CCS 関連プロジェクトの成果なども参考に、CCS 重力モニタリングを実施するための今後や戦略や課題について考える。CCS 重力モニタリングの基本的なアイデアは、CO₂ 注入による地下での質量変化を重力の繰返し測定(TLM)あるいは連測観測で検出し、貯留層モデリングから期待される重力変化と比較することで CO₂ の挙動を推定・監視するというものである。このための繰返し測定には CG-5 に代表される小型のバネ式相対重力計が、また、連測観測には据置き型の gPhone あるいはより高性能な超伝導重力計(iGrav)が利用される。また、繰返し測定の基準点での測定や連測観測用重力計の校正のため絶対重力計の併用が望まれる。さらに、陸水変動や地盤変動による重力変化への影響を補正するため、降雨・土壌水分・地下水位測定や、前述のとおり TLM と併用した GNSS 測定も必要である。グンディ地区では、上述のとおり、これまで平成 25 年と平成 26 年に野外用絶対重力計 A10 を用いた試験観測と、平成 26 年と平成 28 年に CG-5 による繰返し測定を実施している。また、gPhone を用いた連測観測はグンディ地域ではまだ実施されていないが、バンドンの ITB 構内でのテスト観

【終了報告書】【170331】

測を実施した。さらに、グンディ地域での土壌水分の試験観測や降雨データを基にしたモデル計算から、グンディ地域での陸水変動の影響を見積もった (Fig. I-2-(2)-9-5)。

これらの結果をまとめると、A10 の精度は数 μgal に達しており、また CG-5 の測定精度も $10\mu\text{gal}$ より良いことから、繰返し測定精度そのものは $10\mu\text{gal}$ より良いことが期待できる。gPhone については、日変動程度の短期間の感度としては $1\mu\text{gal}$ より良いものの、1 週間より長期の精度は、機械的なドリフトなど安定性の劣化により $10\mu\text{gal}$ より悪いようである (Fig. I-2-(2)-9-3)。一方、陸水変動は長期的には $15\mu\text{gal}$ 以上、降雨直後など短期的には $25\mu\text{gal}$ 以上の影響があり (Fig. I-2-(2)-9-5)、これらは適当なモデルで補正したとしても数 μgal 程度の誤差が残る可能性が高い。これらから、重力手法により確実に監視可能な重力シグナルは $10\mu\text{gal}$ より大きいことが必要で、検出可能限界は数 μgal 程度と推定される。

CCS による重力変化は、貯留層の状況や水理パラメータなどにより異なり、グンディ地域における本プロジェクトで想定されている 10,000 トンの注入量を想定したシミュレーションでは、予想される重力変化量は $0.1\mu\text{gal}$ オーダーに留まる (Dahrin et al., 2016)。また、貯留層の深さを 1000m 程度とすると 1 メガトンの注入量に対して期待される変化量が数 μgal 程度である (例えば、Sugihara et al., 2013)。従って、現状の重力モニタリングの精度を考慮すると、グンディ地域に限らず、1 メガトン以下の注入量に対するモニタリングは極めて困難である。一方、最近になって原子干渉計を応用した全く新しい原理に基づく絶対重力計が実用に供され始めており、将来的には、ボアホール型重力計の開発も期待される。それが実現した際には、CCS の信号源の極近くでの測定が可能になることから、同じ注入量に対して桁違いに大きな信号が得られることになり、検出限界もはるかに高まる。また、データ解析においても、ICA(Independent Component Analysis)のような新しい手法の適用も検討されており、TLM と重力連続観測データを有機的に結合した新しい解析方法も期待できる。これらが実現すれば、CCS 重力モニタリングは大変有望な手法となることが期待される。

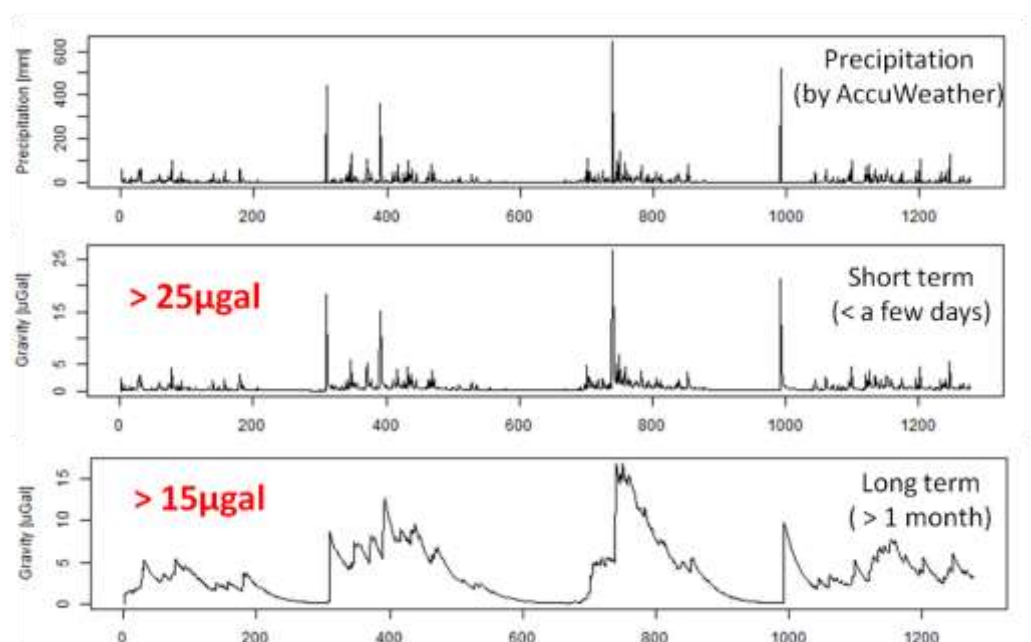


Fig. I-2-(2)-9-5 降水量データから推定しグンディ地域での陸水変動への影響。

【終了報告書】【170331】

項目5: 圧入 CO₂ の流体挙動の数値シミュレーション

予備的シミュレーション

既往データの解析により明らかとなった CO₂ 貯留層候補地層の形態、物性を想定して予備的な CO₂ の注入シミュレーションを行い、CO₂ の貯留性能や漏洩リスクについて検討を行った。その結果、20ton/day 程度の注入では漏洩リスクはないが、貯留層内最上部を流動経路として予想以上に CO₂ の移動速度が大きくなる可能性があることがわかった (Fig. I-2-(2)-10)。

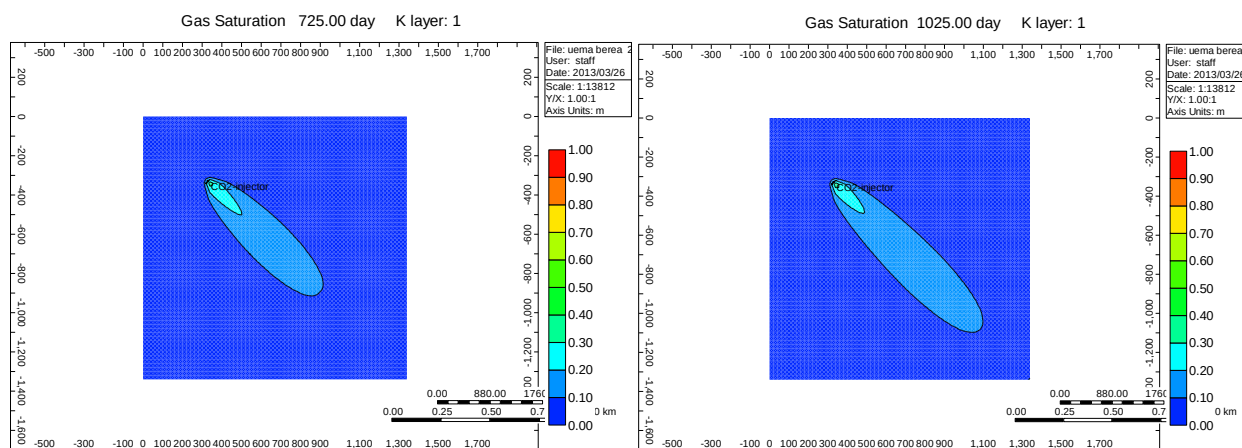


Fig. I-2-(2)-10 貯留層シミュレーション結果例
(CO₂ 飽和率分布: 左: 最上部層 725 日後、右: 同 1025 日後)

貯留層シミュレーション(1)

CO₂ の圧入対象層は、十分な貯留量が存在し、地上への漏洩危険性が低いことが不可欠である。そこで、圧入地点の選定に必要な貯留岩物性の取得と圧入 CO₂ の流動挙動の推定を目的に研究を進めた。Jepon-1 サイトの深度 1000m 付近の地層は背斜構造が卓越しているが、断層が確認されることから、圧入量の決定には貯留層流動計算が不可欠となる。

はじめに、物理探査断面や既存坑井記録から選定された圧入対象層の候補地点に対し、数値計算により貯留量と漏洩危険性の概略評価を行った。数値計算はコンポジショナルシミュレータ ECLIPSE300 を用いた。地層モデルは、プルタミナが提供した地下データを基に、ITB および九大で調整された数値構造に対し、プルタミナ提供の検層記録より Ngrayong 層に 4 層の砂岩層を設定して用意した。パラメータの詳細を表 3-2-1-(2) に示す。計算の結果、1 万トン を 1 年間で圧入した場合に、流動範囲は 100m 前後となることが示された (Fig. I-2-(2)-11)。

浸透率の影響は限定的であった。本計算結果は断層には到達しないことを示している。水平方向の浸透率が 200md の場合の、各砂岩層における CO₂ の水平流動分布を Fig. I-2-(2)-12 に示す。浅部砂岩層の方が圧入される CO₂ の量が多いことがわかる。モニタリングを容易にするためには、複雑な流動分布となることを防ぐために、圧入対象層は最も浅部の砂岩層に限定することを検討してもよい。また、最も浅部の砂岩層における CO₂ の水平流動分布を Fig. I-2-(2)-13 に示す。右列には圧入井の位置を明示しており、砂岩層の浸透率が 1000md の場合は、密度差により CO₂ が背斜軸に向かって移動し、圧入井位置の CO₂ 飽和度が低下する傾向を示している。

【終了報告書】【170331】

また、電磁探査の探査記録の推定および解釈のため、圧入対象層の露頭付近を 70m ほど掘削した坑井において、比抵抗検層を行った。Fig. I-2-(2)-14 に比抵抗検層記録を示す。深度 18～30m 付近は鋼管が残留し、正確な地層比抵抗が測定できなかった区間となる。砂岩やライムストーンでは比抵抗が高い傾向を示しており、構成地層と関係性の高い記録が得られていることがわかる。

Table I-2-(2)-1 計算パラメータ

パラメータ項目	設定値
貯留層サイズ	10800m×9600m×1800m (z)
グリッド分割数	200×200×10 (z)
孔隙率	0.28
水平浸透率(砂岩)	50md、200md、1000md
水平浸透率(泥岩)	0.01md
鉛直浸透率	水平浸透率の 1/10
温度	60℃
境界条件	No flow
圧入時間	1 年
CO ₂ 圧入レート	27.4ton/day (10、000ton/year)
初期圧力	1500bar
初期水飽和率(Sw)	1

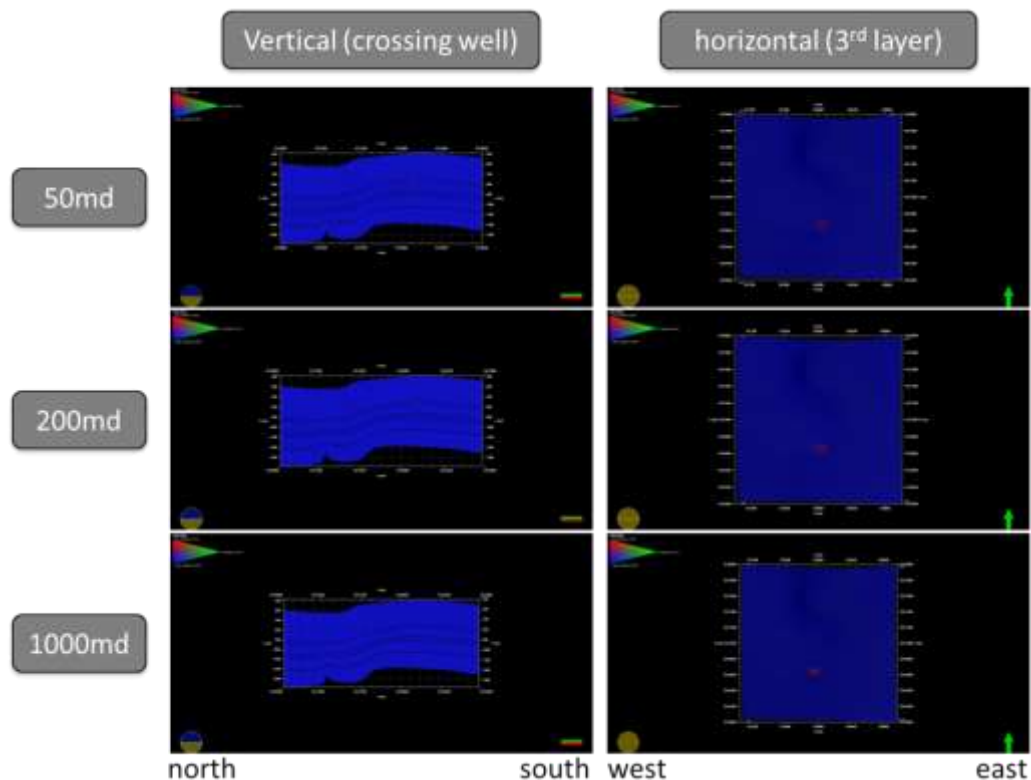


Fig. I-2-(2)-11 圧入した CO₂ の 1 年後の流動分布

【終了報告書】【170331】

(左列は圧入井を横切る垂直断面で、右列は第 1 砂岩層 (最浅部) の水平断面)

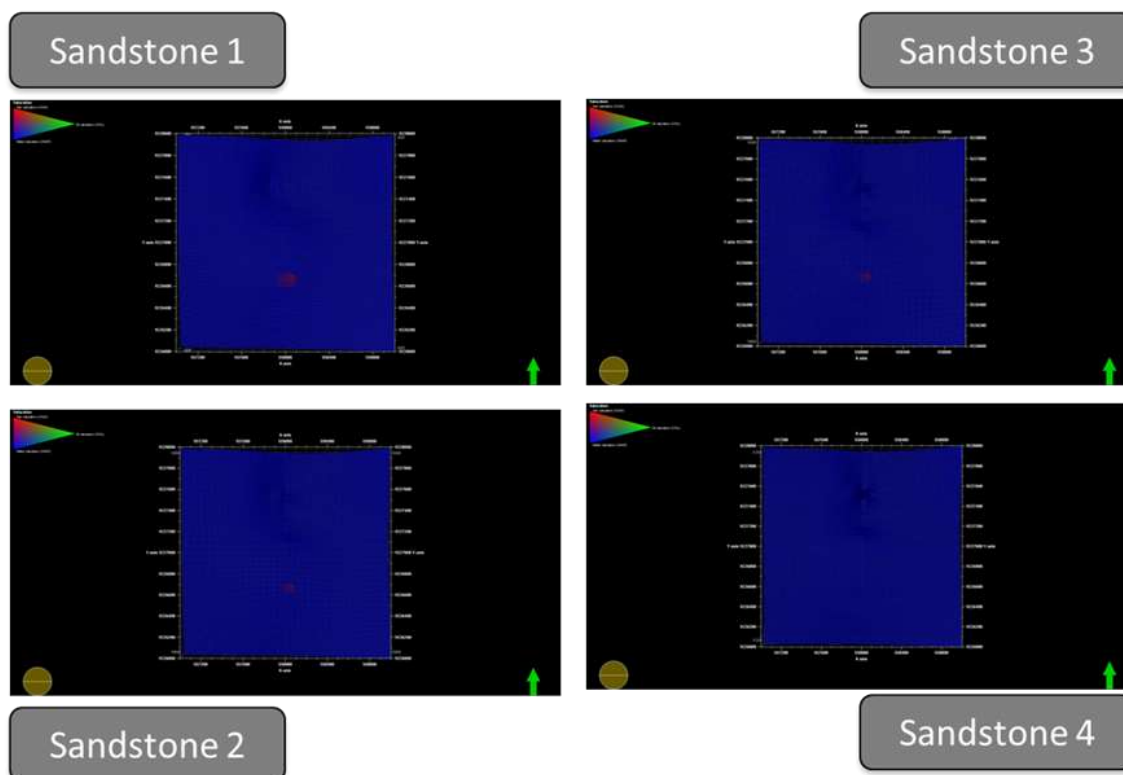


Fig. I-2-(2)-12 各砂岩層における CO₂ の水平流動分布
(砂岩層の水平方向の浸透率は 200md。浅部砂岩層の方が圧入される CO₂ の量が多いことがわかる。)

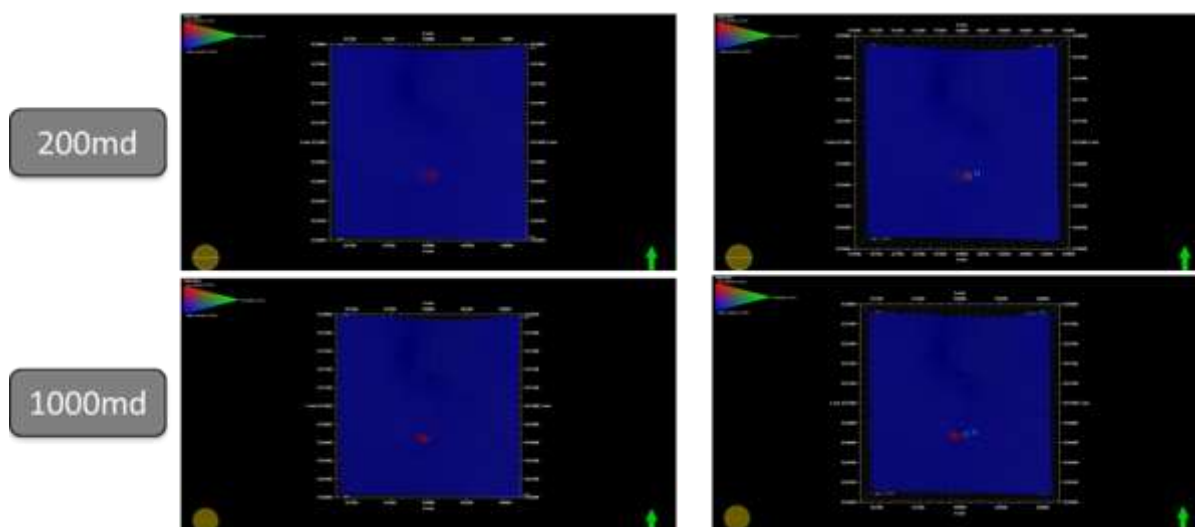


Fig. I-2-(2)-13 第 1 砂岩層における CO₂ の水平流動分布
(右列には圧入井の位置を明示。砂岩層の浸透率が 1000md の場合は、密度差により CO₂ が背斜軸に向かって移動し、圧入井位置の CO₂ 飽和度が低下する傾向を示している。)

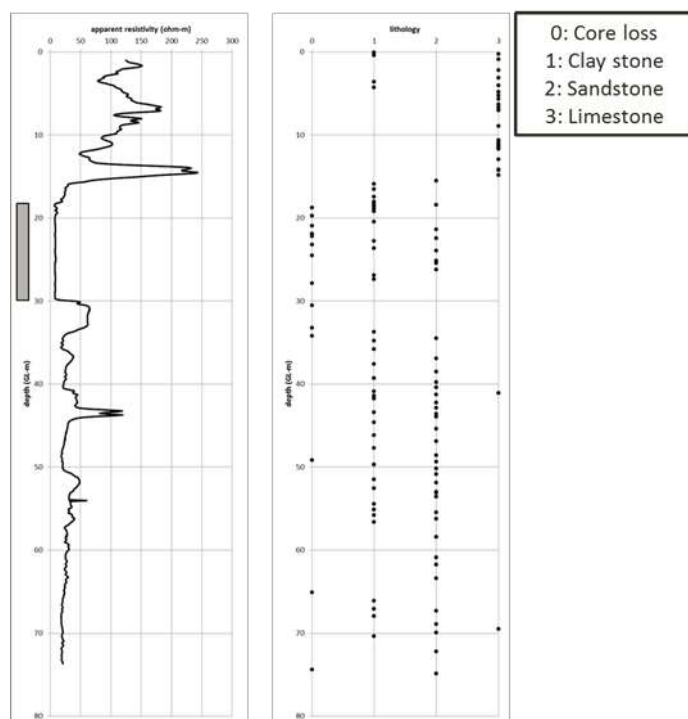


Fig. I-2-(2)-14 比抵抗検層記録(深度 18～30m 付近は鋼管が残留し、正確な地層比抵抗が測定できなかった区間となる。構成地層と関係性の高い記録が得られている)

貯留層シミュレーション(2)

平成 25 年度に引き続き、パラメータを変化させ (Table I-2-(2)-2)、貯留層シミュレーションを継続し、シミュレーションの高精度化を目指した。

Table I-2-(2)-2 平成 26 年度の計算パラメータ

平成26年度シミュレーションパラメータ	
パラメータ項目	設定値
貯留層サイズ	13300 m x 12300 m / 445 m x 445 m
グリッド分割数	133 x 123 x 10 / 89 x 89 x 9
圧入層	第1層、第2層、全4層
孔隙率	0.13, 0.18, 0.23 0.28
水平浸透率(砂岩)	50, 100, 200, 400, 800 (md)
水平浸透率(泥岩)	0 md
鉛直浸透率	水平浸透率の1/10
温度	55, 60, 65, 70, 75 (°C)
境界条件	No Flow
圧入期間	1, 2, 5, 10, 20 年
CO2圧入レート	10, 20, 100 (Kton/年)
初期圧力	1500 bar
初期水飽和率	1

広域モデルに加えて圧入井(Jepon-1)周囲のみの詳細モデルを準備し、地層モデルパラメータを変化させ、シミュレータを使って CO2 流動範囲の推定を継続して行った。計算の結果、1 年間で 1 万トン圧入した場合、地層の浸透率により流動方向に相違が生じることがわかった。Fig. I-2-(2)-15 に浸透率が異なる場合の 1 年後の CO2 貯留状態の計算結果を示す。また、第 2 層にのみ圧入した場合の結果を Fig. I-2-(2)-16 に示す。浸透

【終了報告書】【170331】

率が低い場合は圧入井周囲に広がるのに対し、浸透率が高い場合は、背斜軸に沿って流動することが示された。一方、どのような浸透率であっても、断層までは到達しないこともわかった (Fig. I-2-(2)-17)。

また、CO₂ が到達しない場所であっても、地層圧は変化する。断層付近の地層圧の変化を推定した結果を Fig. I-2-(2)-18 に示す。計算の結果、断層付近の地層圧の変化は 1MPa 以下を示し、断層の状態を不安定にさせる程の影響はないことがわかった。

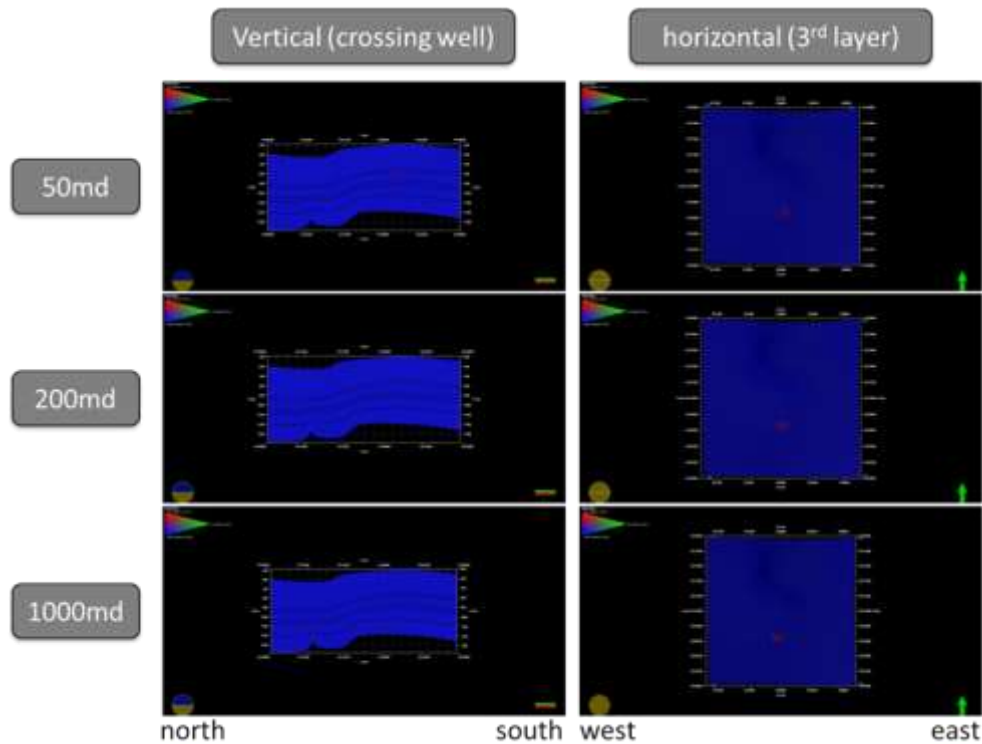


Fig. I-2-(2)-15 圧入した CO₂ の 1 年後の流動分布
(左列は圧入井を横切る垂直断面で、右列は第 1 砂岩層 (最浅部) の水平断面)

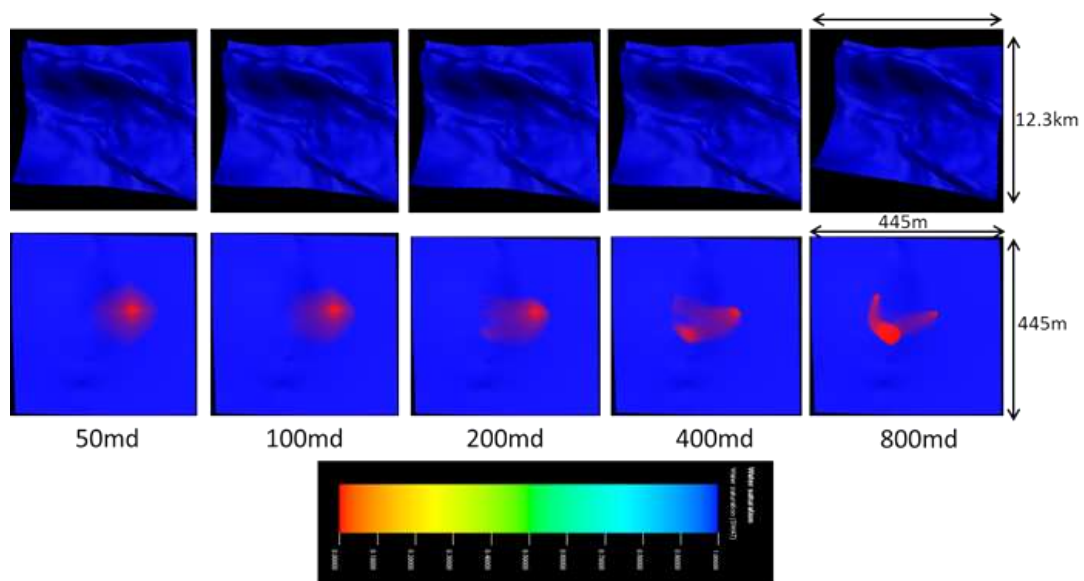


Fig. I-2-(2)-16 第二層のみに圧入した場合の浸透率の相違による CO₂ 流動範囲の相違

【終了報告書】【170331】

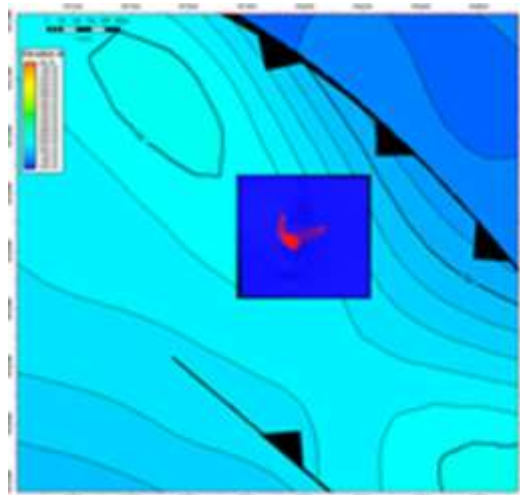


Fig. I-2-(2)-17 年間 1 万 t で 1 年間圧入した場合の CO₂ の流動範囲



Fig. I-2-(2)-18 年間 1 万 t で 1 年間圧入した場合の地層圧分布

超長期シミュレーション(平成 27 年度実施)

断層周辺の二酸化炭素の飽和度や地層圧の変化を詳細に評価するために、断層に沿ったグリッド配置に変更し、数値流動計算の高精度化を図った。得られた計算結果は、これまで報告してきた結果と大きな変更点はないが、信頼性が向上した(Fig. I-2-(2)-19)。

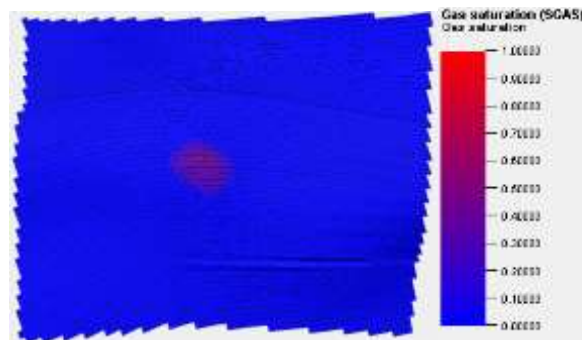


Fig. I-2-(2)-19 圧入 2 年後の CO₂ 飽和率分布

次に、鉱物固定化を含む長期間の流動形態を評価するために、GEM に貯留層モデルを移行し、評価計算を行った。浸透率が高いと、圧入期間の CO₂ 溶解量が最も高くなるのに対し、その後の減少率も高いことがわかった (Fig. I-2-(2)-20)。これは、浸透率が高いため、流動範囲が広くなり、CO₂ が地層水と接触する面積が増えることと、溶解濃度が低い方が、カルシウムの析出反応が早く進行するためであると考えられる。鉱物固定過程では、CO₂ 圧入直後にはカルサイトが溶出し、その後、アノーサイトの溶解により Ca イオンの供給量が増えると析出量が増加する (Fig. I-2-(2)-21)。流動範囲が広くなる高い浸透率の貯留層の方が、鉱物固定量が高くなる (Fig. I-2-(2)-22))

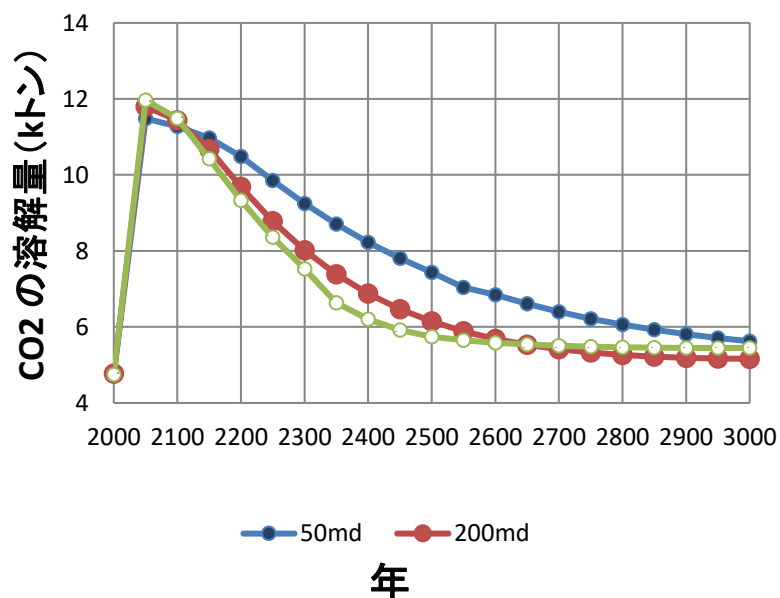


Fig. I-2-(2)-20 浸透率が異なる場合の CO₂ 溶解量の変化

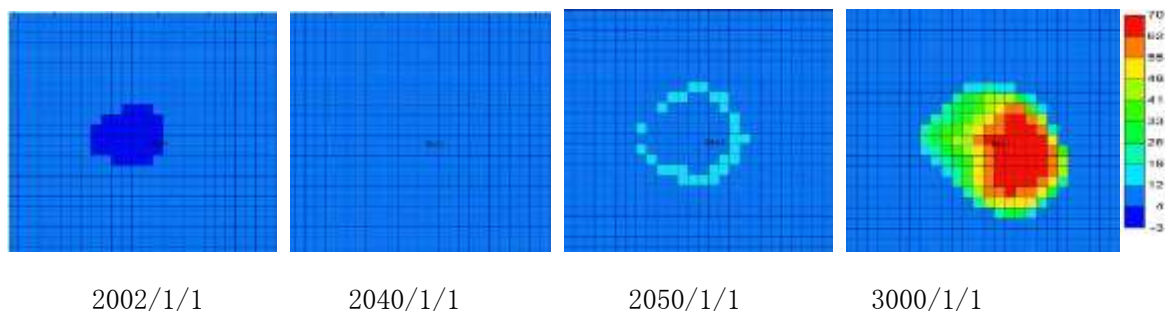


Fig. I-2-(2)-21 カルサイトのイオン化と鉱物固定過程の分布 (単位は mol/L)

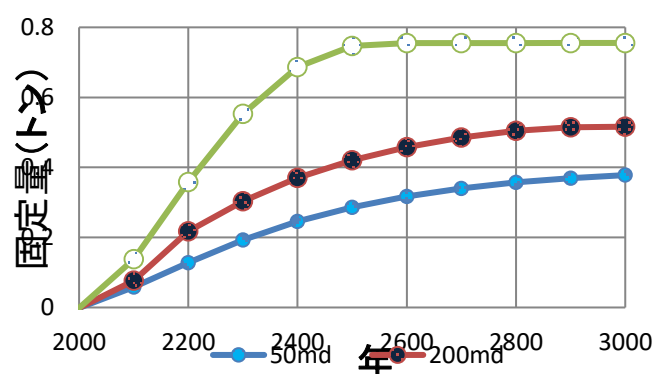


Fig. I-2-(2)-22 浸透率が異なる場合のカルサイトによる固定量の変化

数値流動計算により得られた CO₂ 流動分布から、弾性波速度モデルを作成し、地震探査記録を推定した (Fig. I-2-(2)-23)。この結果、CO₂ 圧入層の次の地層からの反射波の往復走時が変化し、CO₂ 流動域の推定が可能であることが示唆された。

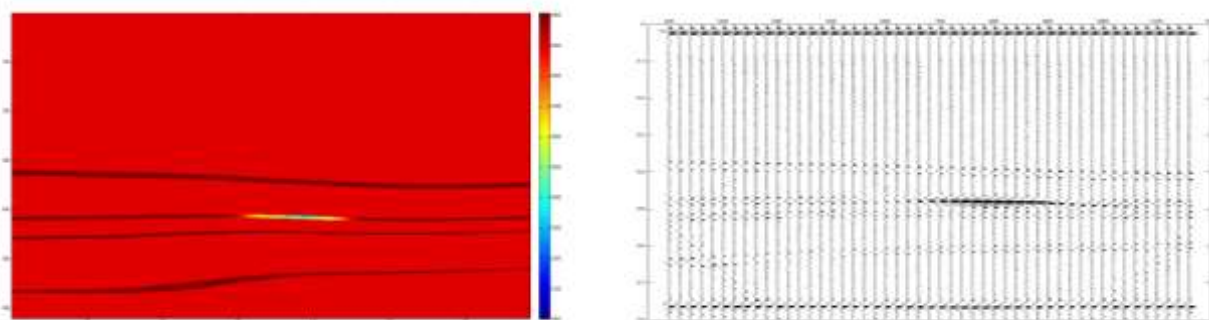


Fig. I-2-(2)-23 20kt 圧入時の弾性波速度モデル(左)と推定される地震探査記録(右)

マイクロサイズ粒子の岩石中への流動試験を行った結果、非ナトリウム型の表面を有するシリカ粒子が最も閉塞を生じなかった (Table I-2-(2)-3)。一方、カチオン型の表面に変更したシリカ粒子は、岩石表面への吸着が生じ、閉塞作用が強くなった結果と考えられる。

Table I-2-(2)-3 塩水中の各ナノ粒子の岩石試料中への流動試験前後の水浸透率の変化

粒子種類	流動前水浸透率[md]	流動後水浸透率[md]	水浸透率変化量[md]
ナトリウム型	3.8	2.3	-1.5
非ナトリウム型	8.2	7.6	-0.6
カチオン型	7.6	4.7	-2.9

項目6:地震探査技術開発とモニタリング(ベースライン調査)

本研究項目では、圧入 CO₂ の挙動把握のための主要な物理探査技術である地表における弾性波探査(以後地震探査)の供与機器による技術開発の経緯と、供与機器を用いたモニタリング調査について記述する。

【終了報告書】【170331】

供与機器によるテスト調査

供与機器(DSS-12)を用いた、モニタリング調査のための動作確認、操作技術の技術移転も含めた、テスト調査を、平成 27 年 8 月 19 日～21 日の日程で行った。目的としては、測線設定、データ取得およびデータ処理までの反射法地震探査に関するスキルやノウハウの確認、技術移転、および、ベースライン調査に向けての表層地質の詳細構造の把握である。

反射法地震探査の探査測線は、ベースラインサーベイ計画測線の一部である林道および山林にほぼ直線的に 595m を設定した。ここでは既供与分として 48 成分の記録システムを用いているため、0～235m、120m～355m、240～475m、355～595m の 4 回に分けて受振器を重複させるかたちで展開し、起震点は重複しない測定方式とした。

地震探査測線は、林道の JEPON-1 打側に 5m 間隔で観測点(受振点)を示す竹の杭を設置し、そこに受振器を設置した。震源には ITB が所有する重錘落下型の震源を用い、受振点から 1.5～2m 程度オフセットした林道中央において、起振を行った。測定中の写真および測定記録を Fig.I-2-(2)-24 に示す。

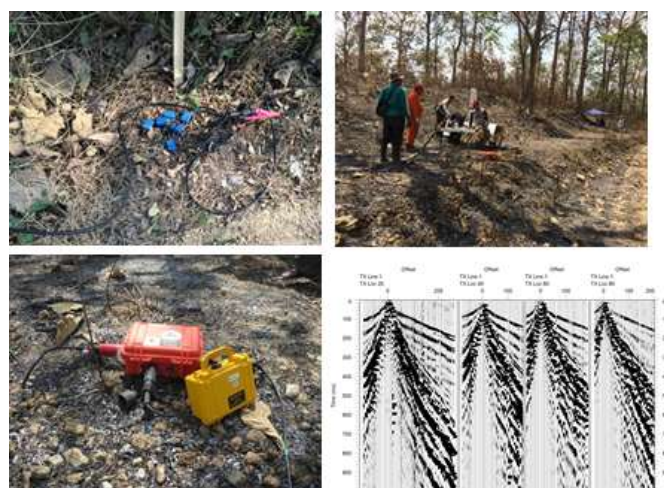


Fig. I-2-(2)-24 測定作業風景(上左:受振器、上右:震源、下左:地震探査装置、下右:測定記録)

ベースラインサーベイを見据えた測定上の課題としては、頻度は少ないもののトラックとの離合、頻繁にバイクが走行すること、測点を測量しやすい路肩に設置しがちなこと、測点周囲のみ草刈りをするためケーブル展開作業がしづらいこと、乾期は地表が硬いため受振箇所には事前の水まきで軟質化することなどがあることなどが課題として挙げられた。現地状況写真を下図(Fig. I-2-(2)-25)に示す。



Fig. I-2-(2)-25 現地状況写真(左:トラックと離合、中:測点位置、右:林道の路肩の植生)

地震探査のデータ処理は、日・伊双方で実施した。データ処理の流れ図を Fig. I-2-(2)-26 に示す。使用した重錘落下震源ではトリガーずれが頻繁に発生したため、受振点・起震点の静補正量を別々に求めてデータ処理を実施した。その結果深度断面 (Fig. I-2-(2)-27) として、標高 60～80m 付近、および標高 20～30m 付近に連続性の良い反射面が得られた。

- Geometry definition
- Static correction
- Bandpass filter (20/60 – 200/250)
- AGC (150ms)
- FK filter (400-1600m/s)
- Bandpass filter (40/50 – 200/250)
- CMP sort
- Velocity analysis
- NMO (stretch mute 30%)
- CMP stack
- Residual statics (3 times)
- Migration (stolt)
- Depth conversion

Fig. I-2-(2)-26 データ処理フロー

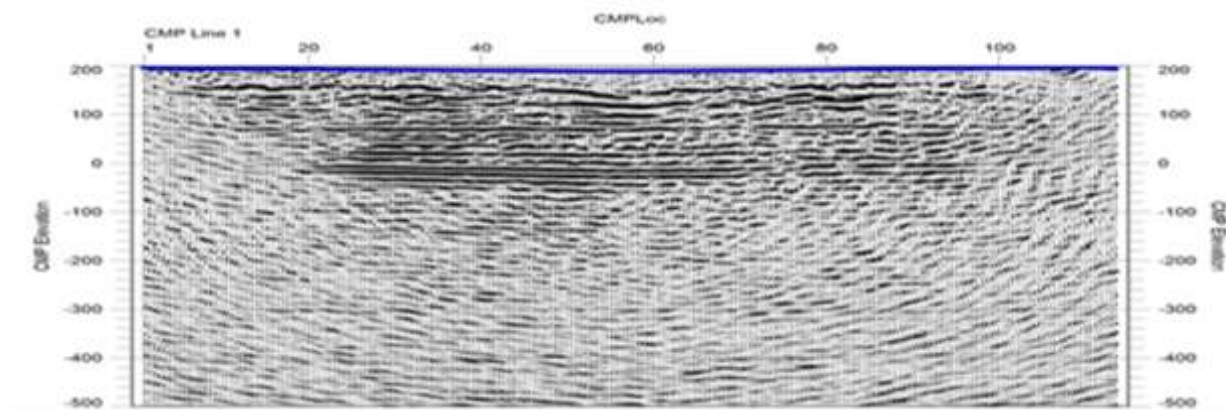


Fig. I-2-(2)-27 反射法地震探査 深度断面

日・インドネシアの双方で実施された解析結果を対比 (Fig. I-2-(2)-28) すると、日側の反射面では連続性が優れているため、データ処理プロセスやパラメータ等に関してさらに協議を行うこととした。

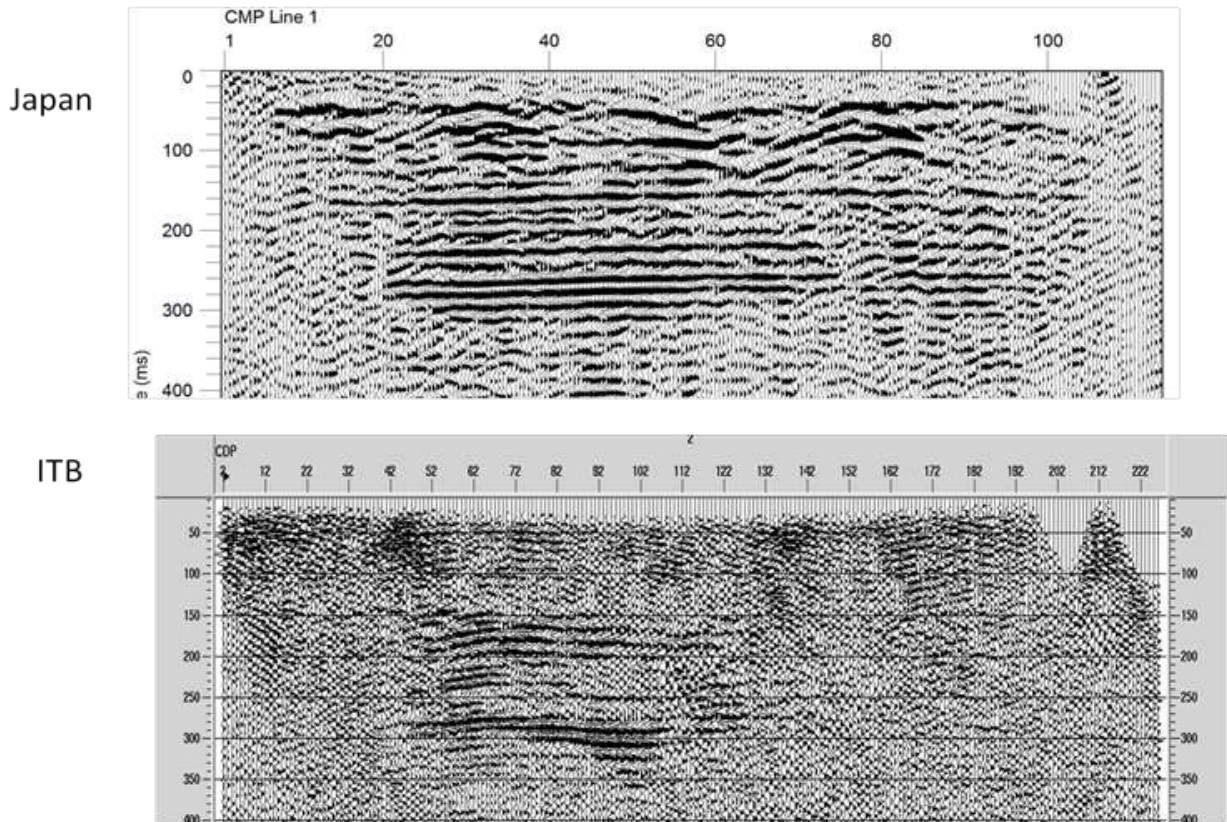


Fig. I-2-(2)-28 ITBと日本での処理結果

ベースライン調査の準備作業(予察、仕様検討)

平成 27 年度に 2 回(第一回目東西測線(8 月期)、第二回目南北測線(11 月期))の予備調査を実施した。予備調査で用いた機材は、受振器(探鉱器)が供与機器 DSS であり、震源は ITB が所有する重錘落下型震源を用いた。第一回目の予備調査には日本チームが参画しており、その内容は本報告書に記述した。また平成 28 年 1 月には日本・インドネシア合同で調査地域の予察と機材調達を含む事前協議を実施した。その後、シミュレーションスタディを行い、ベースライン調査の基本仕様をほぼ決定した。以下に予察結果と事前協議の内容を述べ、モニタリング(ベースライン)調査の基本仕様を示す。

予察結果

現場の予察は平成 28 年 1 月 12 日～13 日の二日間実施した。日本からは、羽藤・高橋・相澤の JICA 研究者に加えて、震源(バイブレータ)および地震探査現場作業関係の日本人技術者3名が参加した。インドネシア側からはバンドン工科大学の地震探査担当 Dr. Awali Priyono、Dr. Alfian Bahar、Dr. Rachmat Sule 他、大学院学生らが参加した。予察の目的は、バンドン工科大学で主体的に計画中の地震探査作業の可能性を以下の視点から現地で確認する事である。

- 1) 大型震源であるバイブレータの使用可能性(伐開作業や道路の拡幅の必要性確認)
- 2) CCS のための地震探査調査の最適仕様(測線計画)の決定
- 3) 調査のためのロジスティックス(許認可、資材調達・保管、現地対策、人材雇用など)

予察の結果、以下の諸点を確認した。

- 東西・南北のアクセス道にて予定している大型震源であるバイブレータの使用が可能である事

【終了報告書】【170331】

- 供与機器に加えて、調査用に受振器を増強することで 2 次元地震探査 (Full 2D) に加え、擬似 3 次元 (Pseudo 3D) 調査が可能であること
- 東西・南北発震測線で一部拡幅が必要であり、また可能であること
- 拡幅や作業効率のために一部の植栽を伐開する必要がある事 (現地の森林公社管理官からは伐開許諾を得ている)



写真(a) 発震位置確認



写真(b) 震源進入可能性チェック

Fig. I-2-(2)-29 予察風景

予察と追加調達可能な機材の検討結果からベースライン調査の基本仕様は以下の通りとなった。

- ・震源は大型のバイブレータ震源 (Y-2400) とし発震総数は 720 ショットを目指す。
- ・記録長は探鉱器の制約を含めて検討中
- ・各発震でのスタック数は最大 6。
- ・受振器は供与機材 96CH に加えて、インドネシア国内でのレンタルと日本からの一時輸出をする機材を併せて総計 700 CH を用いる。
- ・発震測線は東西および南北の主要道路を用い、さらに予察にて確認できた主要道路から進入可能な測線もちい、極力、多数の発信源を確保する。
- ・(東西・南北) 発震測線上に配置する受振器で Full 2D データを取得する。
- ・主要測線上での発震時に 3 次元的に配置した受振器で同時受振し、Pseudo 3D データを取得。
- ・Full 2D データを優先的に取得するように発震順序に配慮する。

尚、上記の仕様で実施したミュレーション結果を以下に示す。シミュレーションの結果、JEPON-1 を中心とした CCS モニタリングに最重要となる範囲で平均重合数 (ビンサイズ 15 x 15m) は 100 以上を確保できる。図中、左側に重合数を示すカラーバーをおく。青～薄青で重合数は 100~140、紫色で 30~70 の重合数を示す。

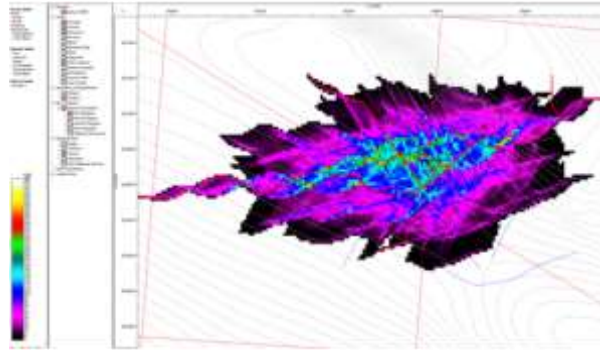


Fig. I-2-(2)-30 シミュレーションによる反射点分布(15x15m ビンサイズ内の反射トレース数)

実際の調査は 7/25 に全機材の現場到着から、2 日間のウォームアップとテストを行い、発震期間は 7/28~8/3 の 7 日間を計画した。

地震探査ベースライン調査(平成 28 年度実施)

概要: 地表地震探査を使った CO₂ 圧入前モニタリング(=ベースライン)調査を 2016 年 8 月に実施した。地震探査は圧入 CO₂ の挙動を把握する物理探査として最も期待されるモニタリング手法であり、重錘落下震源を使った 3 回の事前調査に加え、入念な現地踏査を行い、測定仕様を決定し調査計画を策定した。使用した機器は JICA 供与機器である DSS-12(96CH)に加え、サンコーコンサルタント(以後「Suncoh」)より、約 200CH の機器を無償にて借り受け、また、GSI 社(ジャカルタ)より GSR400 CH の学術使用価格にてレンタルした。震源は CCS 貯留層以深の深部までの発震エネルギーの透過が期待できるバイブレータ(Y-2400)を GSI 社より学術使用価格にてレンタルした。7/25 に第一陣メンバーが入場し、8/11 までに全クルーが離場した。実際の調査(震源の発震期間)は、8/4 から 8/9 までの 7 日間であった。ITB の調査クルーの主体的な計測作業を行ったが、日本から延べ 5 名の研究者が参加し、震源操作監督のために、2 名の日本人技術者がジャカルタ(ECI-JGI 社)より調査に参加した。調査期間中、Pertamina EP および UTC などからの多数の見学者が来訪した。

調査詳細の詳細:

1) 調査コンセプト

Gundih CCS プロジェクトにおける CO₂ 圧入対象地域(貯留層)として、圧入坑井の最有力候補である Japon-1 周辺における深度約 1100m 前後の Ngrayong 層が選択されている。これまでの地表調査を含む既存情報を使った地質・地球物理的手法(G-G 調査)により選定された。G-G 調査では Pertamina から借用した数本の二次元地震探査データが用いられたが、浅部の正確な断層配置や地質構造をさらに詳細に把握する必要があり、CCS 対象層のみならず上記の目的を達成できる調査仕様が必要である。今回の調査は、圧入した CO₂ の挙動のモニタリングのための事前データ(ベースラインデータ)を取得することが大きな目的であることから、より大きなエネルギーをもつ震源、浅部の三次元的地質構造や可能な限り CO₂ の三次元的な流動把握が可能な測線配置での調査を実施することとした。

2) 基本調査仕様

前述の調査コンセプトに適合する基本仕様として以下の仕様・パラメータを決定した。

震源: バイブレータ (IVI Y-2400)

【終了報告書】【170331】

測線:東西および南北の主要なアクセス道路を用いた二次元発震を行い、東西・南北のアクセス道路に受振器を配置した二次元観測および、Jepon-1 を中心にして受振器を二次元配置した疑似(Pseudo) 三次元観測とする

発震間隔:20m

受振器間隔:10m (二次元測線)、20m(疑似三次元用受振器配置測線)

使用受振器:(JICA 供与機器)DSS-12(96 CH)、Suncoh 追加受振器 200 CH
および GSR(レンタル)400 CH (総計約 700 CH)

3) 測線計画(シミュレーション)

基本仕様を基に、シミュレーションを行った結果、以下のような反射点分布を得た。Bin サイズを 15x15m とした場合、Jepon-1 を中心として重合数の平均 100 以上(黄色～赤色部分)を得て、十分な反射点の確保が可能なが確認できた。

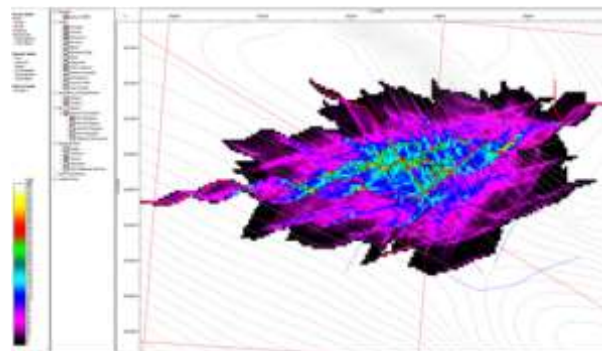


Fig. I-2-(2)-31 シミュレーションによる反射点分布

4) 測量作業

5 月に予備調査を実施した時期に、ITB の測量専門家が現場にはいり、基点測量作業を開始したが、諸事情で中断。その後、測量専門会社に ITB から外注することとなった。

5) 発震・受振計画・最終データ収録仕様

シミュレーションの結果、最終的に以下のような調査仕様を決定した。

発震:バイブロサイズ震源

発震間隔:10 m

スタック数:平均 6 スタック(フィールドテストにて決定)

ムーブアップか固定位置発震かは地表条件、データ品質、作業能率を勘案しつつ
随時決定する。

探鉱機:DSS-12

受振器:DSS-12(GS-20DM+SM-4)(計 300 CH) + GSR(400 CH)

サンプリング間隔:2ms

Sweep/記録長:21/26 秒

Sweep 周波数:6-90 HZ(フィールドテストにて決定)

リスニング時間:5 秒

【終了報告書】【170331】

プリアンプゲイン:24 dB(DSS)/12 dB(GSR)

6) ロジスティックス

調査実施に関連し、資材置き場、クルーの宿泊、観測ベース、警備等は以下のような対応を行った。

観測本部(探鉱機やクルー常駐場所):Jepon-1 坑井周辺の空き地(テントをレンタル)

GSI クルーの宿泊と資材置き場:Blora 県 Jiken にレンタル

ITB で調達した資材置き場(バッテリーチャージ場所):森林公社キャビン2棟を借用

バイブレータ駐車場:Jepon-1 周辺の空き地

警備:地元警察、地元住民



GSI クルーのベース(宿所+資材保管)



ITB 機器の保管倉庫(森林公社倉庫)



現地の調査本部(Jepon-1 入口)



バイブレータ(IVI 製 Y-2400)

Fig. I-2-(2)-32 現場作業のスナップ写真(1)



DSS-12 受振器設置の様子



GSR 受振器設置の様子



DSS-12 受振器充電中



GSR の充電と整備中



資材搬送用ピックアップ



測量基点(100m おき)

Fig. I-2-(2)-33 現場作業のスナップ写真(2)

7) フィールドテスト

バイブレータの仕様を含む、フィールドパラメータ決定のためのフィールドテストを発震に先んじて行った。
以下にテスト仕様を記す。

プリアンプゲインテスト:12/24 dB

スイープ回数テスト:1~16 回

スイープ周波数テスト:4/6/8~60/80/90 Hz

Force out テスト:30/50/90

ムーブアップテスト:0.5m 移動(±2.25 m)、1m 移動(±4.5m)、1.5m 移動(±6.75m)

8) データ取得(発震)作業(調査概要)

GSI クルー、ITB メンバー、日方メンバーは 7/25 頃より現場入場し、8/13 には全員が離場した。発震作業は 8/3 から 7 日間行い、総計 492 発震を行った。調査概要(日程)と毎日の発震作業能率グラフを以下に示す。

Table I-2-(2)-4 (主要作業)調査概要(7/28~8/11, 2016)

調査概要(7/28-8/11)						
月日	天気	調査項目	詳細	発震数	累積発震数	備考
7月28日	晴れ	ITBクルー入場				
7月29日	晴れ					
7月30日	晴れ	日方クルー入場	測量最終チェック／測線計画最終協議			
7月31日	晴れ	受振器設置	DSS(300CH)設置			バイブレータジャカルタ発
8月1日	晴れ	受振器設置	GSR受振器設置・Boxチェック			
8月2日	晴れ	フィールドテスト	発電機搬入、探鉱機チェック、バイブレータ現場到着(深夜)			
8月3日	晴れ	テスト+データ取得	発震作業	6	6	バイブレータ動作テスト、フィールドテスト
8月4日	晴れ	データ取得	発震作業	70	76	
8月5日	晴れ	データ取得	発震作業	71	147	
8月6日	晴れ	データ取得	発震作業	85	232	
8月7日	晴れ	データ取得	発震作業	81	313	
8月8日	晴れ	データ取得	発震作業	85	398	
8月9日	晴れ	データ取得	発震作業	94	492	
8月10日	晴れ	撤収作業	取得データ整理			
8月11日	晴れ	作業クルー離場				バイブレータ現場離場

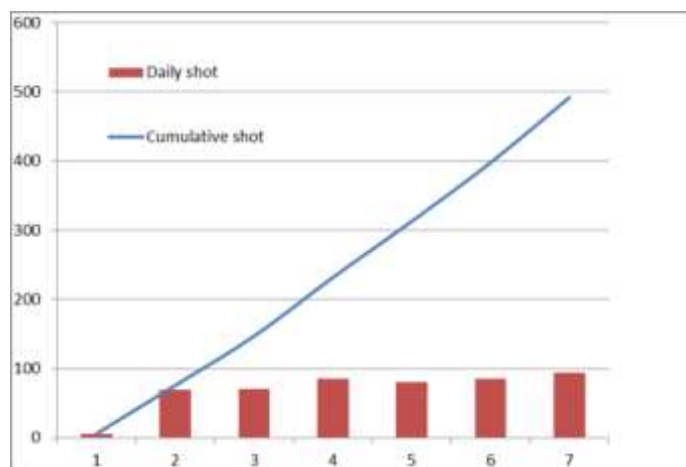


Fig. I-2-(2)-34 発震作業能率(8/3~8/9)

【終了報告書】【170331】

9) 取得データ

以下に Raw データの一部を示す。

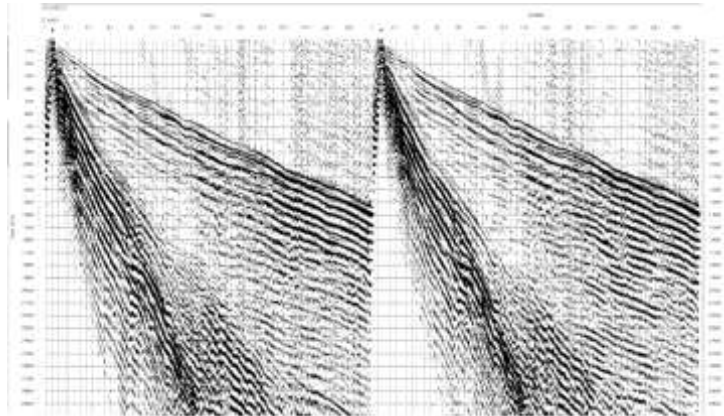


Fig. I-2-(2)-35 発震記録例 (DSS-12)

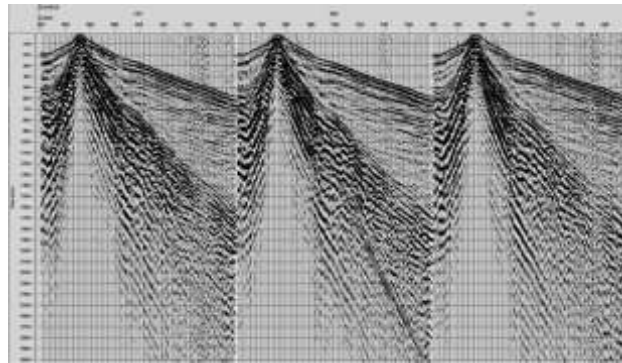


Fig. I-2-(2)-36 発信記録例 (GSR)

10) 簡易重合データ

調査後の簡易データ処理を行った重合処理断面を以下に示す。本断面は東西方向の二次元地震探査データ処理断面である。

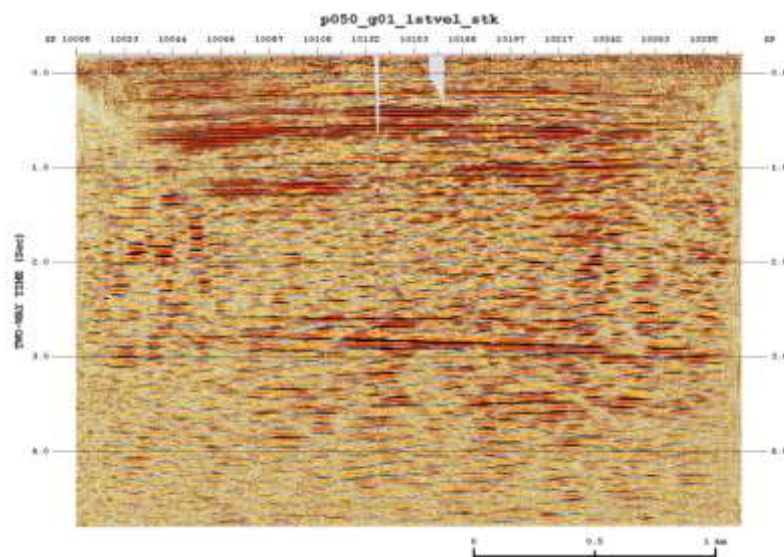


Fig. I-2-(2)-37 重合断面 (JGI 処理)

【終了報告書】【170331】

取得データは今後、インドネシア/日本でデータをシェアして、処理解析を進める。

モニタリング調査に向けて:

今回のベースライン調査は Suncoch および ECI-JGI の協力を得て、極めて効率的に作業を実施できた。今後、ITB がモニタリング調査を実施する際には、今回の得たノウハウを生かして調査策定、観測作業を行うことが必要である。特に重要な点を以下に列記する。

1. 測量作業の効率とベースライン測量の復元性
2. 調査時期の選定(地表条件の同一性)
3. 仕様の同一性
4. 仕様や条件が同一にならなかった場合の同一化の事前検討
5. 調査への地元の理解・支援協力を確保

項目7:坑井健全性検討支援業務

CO₂ 圧入対象井の候補である JEPON-1 (プルタミナが 2007-8 年に試掘後、仮廃坑)に関し、2015 年 1 月に ITB による坑井健全性 (CO₂ による坑井鋼材の腐食) 調査が行われ、ADB-FS レポートにも記載された。この結果を踏まえ、2016 年 1 月に ITB、プルタミナの坑井技術専門家を各 1 名日本に招聘し、石油資源開発(株)の関係者と同井の圧入井転用(改修)の可否に係る協議を実施した。協議ではプルタミナ所有の坑井データも使用し、坑井のセメントボンド状況の確認や CO₂ によるケーシング腐食、およびセメントの CO₂ による劣化に関する問題を中心に、以下の検討を行った。

- 1) セメントボンド状況の確認とスクイズセメンチングによる坑井補修方法

CO₂ 圧入対象区間付近のセメントボンド状況は不良で、対象層 (Ngrayong 層 Sand B) への単独圧入を計画する場合、対象区間の上下でスクイズセメンチング等の補修が必要であることが分かった。なお Sand B を含む Ngrayong 層上部及び下部のセメントボンド状況は良好で、圧入した CO₂ の同層からの漏洩の懸念はないことが推察された。

- 2) ケーシング材質と CO₂ による腐食

前記 ITB 調査結果から、圧入対象区間にセットされたケーシング (7", 炭素鋼 N-80 グレード) の CO₂ による腐食が懸念された。一方 API ガイドラインに示された米国 CO₂-EOR (増油回収法) における事例からは、JEPON-1 の深度 (1,517m、API ガイドラインでは 10,000ft 以浅) の場合、同グレードが通常使用されることが分かった。

- 3) セメント材質と CO₂ による劣化

CO₂ による既存セメントの劣化が懸念されることから、セメントボンド不良箇所の補修には耐 CO₂ セメントを用いることが合意された。

- 4) 改修作業に要する日数と費用

JEPON-1 の実績およびプルタミナ社が所有するデータを使用し、作業日数 (21 日)、費用 (2.7MM\$) を試算した。

- 5) 坑井新掘に要する日数と費用 (改修が不可な場合)

改修が不可能な場合を想定し、坑井新掘に要する作業日数 (22 日)、費用 (5.7MM\$) を試算した。なお JEPON-1 からのサイドトラックは、坑井が浅いため層間の導通のある元孔との距離を確保できないことから、

【終了報告書】【170331】

検討を見合わせた。

6) 坑井作業全体スケジュール

上記作業日数に環境影響評価と承認、予算承認および掘削資機材やサービスに係る期間を加味し、全体スケジュールを検討した。この結果、坑井作業と施設タイイン終了まで、約2年を要することが推察された。改修と比較し、新掘の場合は費用の増加に加え、掘削用地交渉の困難さがプルタミナから指摘された。坑井補修で健全性を改善し、改修で対応することが妥当と思慮される。

項目8: ナノスケール CO₂ 挙動の理論解析

CCS では、圧入した CO₂ の貯留層内での確実なトラップが貯留安全性の視点から必須となる。トラップの安全性は毛管圧力に依存し、毛管圧力は地層を構成する固体層(貯留層の岩石部分)と圧入 CO₂ 及び地層水の三相界面の「接触角」に影響される。Arif ほか(2015))が行った、粘土と超臨界 CO₂ および塩水を使った実験で、塩水の塩分濃度が増加することで接触角が増加し、粘土(シール層相当)の CO₂ 遮蔽能力の低下を招くことが示された。これらの結果は実証実験に大きく影響することから、京都大学では、分子動力学(MD)を基にした分子サイズレベルでのシミュレーションを白雲母表面に対して実施し、塩分濃度の接触角への影響を検討した。

シミュレーションでの条件・家庭は以下の通りである。

- CO₂/塩水/白雲母の三相モデル(白雲母劈開面(001)へ塩水/超臨界 CO₂ の接触)
- CO₂ の超臨界温度圧力条件(10,16,20 MPa、313K)
- 塩分濃度は4パターン(0, 1, 3, 5 (mol/L))

計算結果を以下の図(Fig. I-2-(2)-38)に示す。図(右)に分子の平均密度分布から求めた接触角(°)を横軸を塩分濃度(mol)として示す。この結果、塩分濃度が増加すると接触角が増加することが分かる。またその傾向は圧力が高いほど(20MPa)、強いことが分かった。これらの結果は、先行実験の結果に一致している。今後、条件を変えてシミュレーションなどを行い、CCS の安全貯留のための研究を継続する。

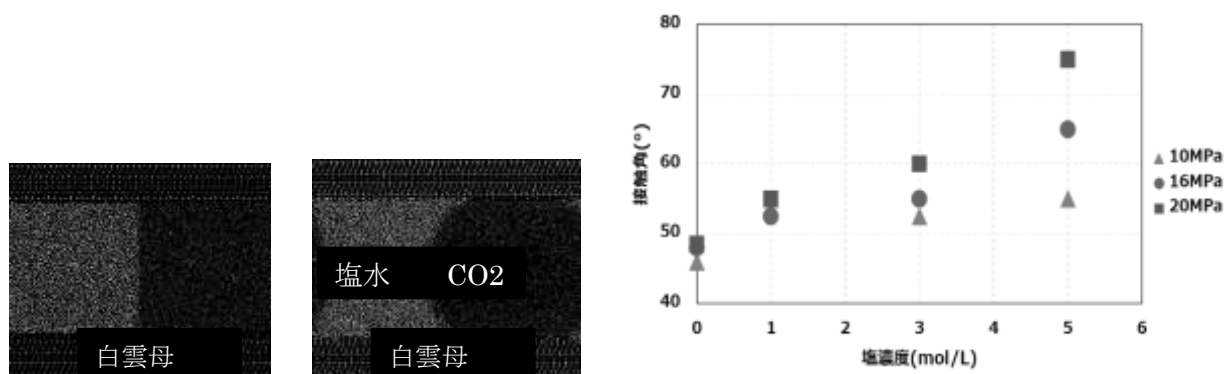


Fig. I-2-(2)-38 シミュレーション((左)初期モデル、(中)計算結果、(右)接触角の値)

項目9：二酸化炭素-塩水-鉱物の三相界面の濡れ性の変化に対する検討

貯留層の鉱物表面の濡れ性は、圧入された二酸化炭素の流動や遮蔽性能に影響する重要な因子である。Arif ら(2015)による実験では、圧力と塩水濃度の増加が濡れ性に対して大きく影響し、CCS の安全性の低下を引き起こす場合があると報告されている。しかし、濡れ性のデータに関しては測定者によって大きく異なる場合も

【終了報告書】【170331】

見られるため、理想的な環境を設定し実験と同様に二酸化炭素－塩水－白雲母の三相からなる系で分子動力学計算を行い、接触角の変化の検討を行った。その結果、圧力増加と塩分濃度増加に伴って、接触角が増加するという傾向が確認されたが、温度に関しては明確な傾向は見られなかった。

(3) 研究題目2:電気・電磁法を利用したモニタリング技術の研究

(早稲田大学、京都大学、深田地質)

① 研究題目2の研究のねらい

注入した CO₂ の貯留層内での動態をモニタリングする手法の1つとして電気・電磁法の適用性を研究、評価する。

② 研究題目2の研究実施方法

時間領域電磁法探査 (TDEM) の最新の測定機を導入し、その現地適用を通じて、従来の周波数領域電磁法では必ずしも明確になっていない電磁法探査の CO₂ 挙動モニタリングへの適用性を明らかにする。

- 項目1:電磁探査装置の開発と調達
- 項目2:電磁探査装置の動作テスト
- 項目3:探査計画立案
- 項目4:ベースライン調査のための予察
- 項目5:ベースライン調査
- 項目6:解析の中間結果

③ 研究題目2の当初の計画(全体計画)に対する各研究項目の成果の達成状況とインパクト

項目1:電磁探査装置の開発と調達

時間領域電磁法探査 (TDEM) の最新の測定器として、MI 磁気センサーを使用した探査装置を導入することを目的に、室内において簡単な要素試験を実施し、機器仕様の検討を行った。想定される貯留層の深度や物性(比抵抗)を念頭に、最終的な機器仕様を決定し、導入手続きを実施した。導入するシステムは研究のための基本システムであり、送信機1式、受信機2式である。Fig. I-2-(3)-1 に導入する予定の時間領域電磁法探査装置の送信機と受信機の写真を示す。また、電磁探査の有効性の検証のために、日本国内で CO₂ の地中貯留を実施した長岡および実施予定の苫小牧のサイトをモデルとした電磁法探査の数値シミュレーションを実施している。

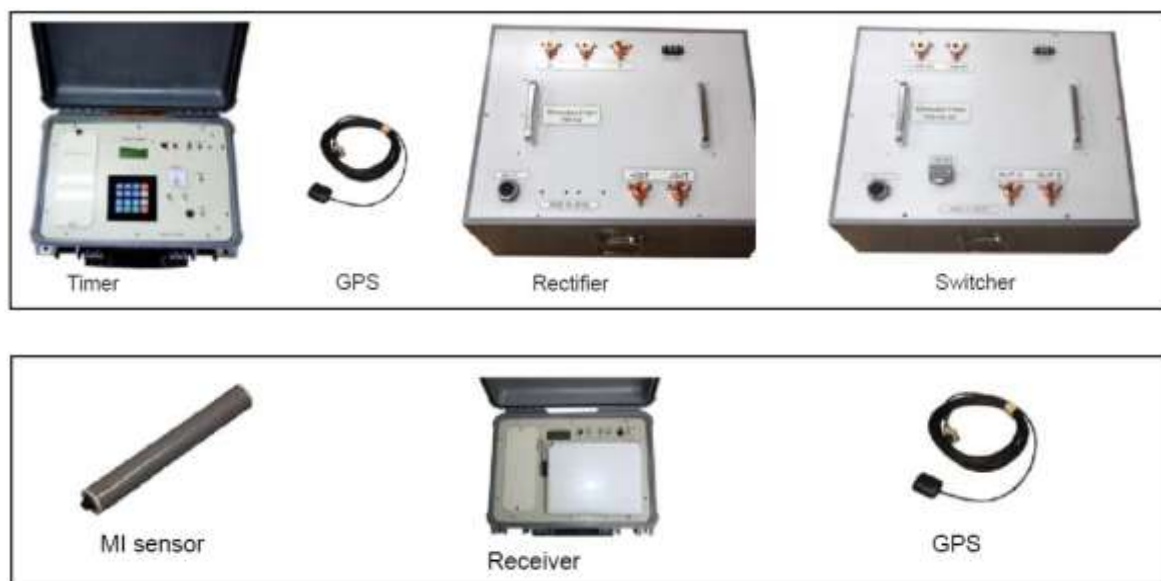


Fig. I-2-(3)-1 時間領域電磁法探査装置(上:送信機、下:受信機)

項目2:電磁探査装置の動作テスト

実施日:2013 年 12 月 21 日 ～ 12 月 23 日

実施場所:バンドン工科大学 第2(Jatinangor)キャンパス

使用機材: 送信器(TRM-402-SW、TRM-402-RC、TRM-402-TC) 、受信器(TDREC-28A、2 式)、センサー部(SE5J001、SE5J002)、発電機^(*)、電線^(*)、接地極^(*)、岩塩^(*)、ベントナイト^(*)(※)は ITB 側で用意
結果 :12 月 21 日に、JICA から納入された機材の確認を行い、翌日からの動作テストの準備を行った。

22 日と 23 日には、用意された発電機を使って、実際の送受信テストを行った。22 日には 220V の電圧 をかけたテスト、23 日には 3 相 440V をかけた送信を行い、送信電流は約 120A であった。受信機や、GPS を使った送受信の同期にも全く問題がなく、装置はすべて当初の仕様通りに動作した。



Fig. I-2-(3)-2 バンドンでの機材の動作確認の様子(左:送信部、右:受信部)

技術移転研修

12 月 21 日～23 日の JICA 納入機材の動作確認において、大学構内で約 200m の送信電極間隔であったが、実際の送受信を行い、ITB 側研究者への時間領域電磁探査の測定技術の研修を行った。ITB から

【終了報告書】【170331】

の参加者は、Wahyu、Warsa 両講師、Dedi(技官)、Dona(アシスタント)、Rocky、Atiko(学生)他であった。24日にはWahyu 講師と今後の計画についての打ち合わせをもち、実際の CCS のモニタリングにおいて、数 km の送信電線を使い、かつ接地抵抗を下げるための技術、安全確保などの実用レベルでの研修については、次回のベースライン測定か、地熱地帯などのある程度地下構造がわかっているところでの予備試験などを検討することとした。



Fig. I-2-(3)-3 ITB での研修(左:研修の様子、右:受信波形モニタ画面)

項目3:探査計画立案

ベースライン探査では、CO₂ 圧入後に実際にモニタリングを行う同一地点で測定を行うことが重要である。送信には線電流 100A 以上、電極間隔 1~2km で、一つの電極を圧入地点に置く。受信の範囲と間隔は貯留層の深さや厚さ、想定される CO₂ の広がり範囲によるため、今後の圧入地点や圧入量の決定に伴い、対象地点の検層結果や地質情報も含めたモデルから決定する。効率的で効果的な測定の為に、受信間隔を圧入地点から遠くになるにつれて、20m~100m で変化させて測定を行う。現在のインドネシアへの納入機材は受信 1 チャンネル 2 セットのため、受信 3 チャンネル 2 セットとするために、4 つのセンサーと 100m の延長ケーブルおよびバッファアンプの追加が必要である。2014 年 8 月に予定しているベースライン測定では、数 km の送信電線を使い、かつ接地抵抗を下げるための技術、安全確保などの実用レベルの技術が必要となる。6 月には現地視察を実施し、その地理・地形より送信電極の設置位置、伐採や測定の必要性、受信位置や測定密度を検討することとした。

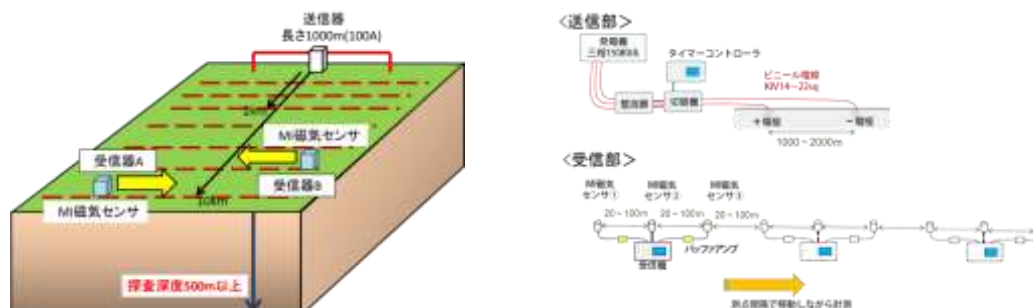


Fig. I-2-(3)-4 ベースライン探査の概念図(左:線電流送信のイメージ、右:受信部移動のイメージ)

項目4:電磁探査(TDEM)ベースライン調査のための予察(平成 26 年 6 月実施)

CO2 圧入サイトの地理・地勢・地形を確認し、送受信位置の候補地を選定し、必要な機材の数量や仕様を確定した。また、8 月に実施するベースライン測定の実施期間や準備作業について、ITB 研究者らと綿密な準備協議を行った。送信電極設置の候補地では設置抵抗を計測し、大電流送信の為に設置電極に 1.5m のアース棒を複数使うこととし、日本側で準備した。



Fig. I-2-(3)-5 予察の様子(左:Jepon-1 周辺、右:送信電極設置候補地での接地抵抗測定)

項目5:ベースライン調査(H26/8 月実施)

平成 26 年の 8 月 20 日～8/29 の日程で TEM 法によるモニタリング調査(CO2 圧入前のベースライン測定)を行った。測定点は Fig. I-2-(3)-6 に示すレイアウトにて、総計で 66 地点とした。日本側からも受信器、センサー、送信電極用アース棒などを持ち込み、インドネシア側(ITB)の機材と合わせて、測定を実施した。約 1.6 km の長さの送信電線を接続して送信テストを行い、調査に十分な送信電流 140A を確認した。受信側では日本側とインドネシア側の混成で 3 チームを構成し、同時測定で高効率を計った結果、5 日間で 66 ポイントの測定を行うことができた。調査後は、CO2 圧入後のモニタリング調査で同じ位置を再現する為に、送信電極は地中に埋設し、全受信点に木製のタグを設置した。

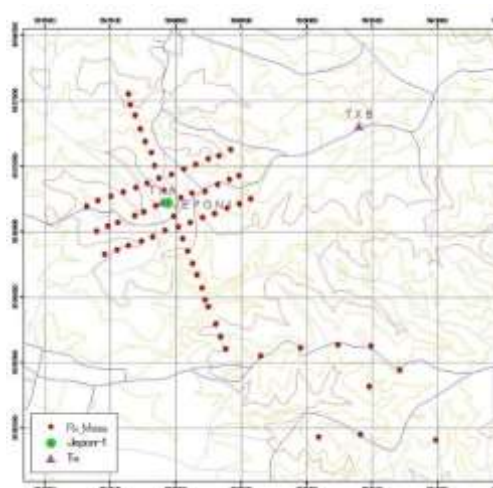


Fig. I-2-(3)-6 ベースライン測定結果(送信受信位置図、測定の概要)

機材撤収と梱包が完了した調査最終日には、インドネシア側と日本側でそれぞれのデータを交換、統合し参加メンバー全員でミーティングを行って、調査の反省と解析に向けての打ち合わせを行った。現在、日

【終了報告書】【170331】

本・インドネシア双方にて取得データの処理を実施中である。尚、ITB でのデータ処理は日本側から供与した電磁法解析ソフトウェアで実施している。



Fig. I-2-(3)-7 調査の様子(左:送信電極の打ち込み、中:信号受信中の様子)

項目6:データ取得とデータの解析

CCS では圧入された高比抵抗流体が貯留層内の高導電率の塩水と置換される。電磁探査は対象とする地層の比抵抗の増加を検知する有効な手段として広く用いられている。貯留層内の CO₂ の飽和率の変化と圧入 CO₂ の広がりによって比抵抗は変化する。比抵抗の変化は、初期値の 0.2 倍から 10 倍程度と考えられる。CO₂ は 1000m もの深度の地層に注入されるため、地上の測定でその変化を捉えるためには高感度でかつ高 S/N 比の探査手法および測定機器が必要となる。今回想定しているような、CO₂ が地層内で比較的狭い範囲に拡散している状態でのモニタリングでは、送信源と受信センサーの間隔をできるだけ短くして探査の感度を上げることが効果的である。平成 26 年度に実施したベースライン調査では、Fig. I-2-(3)-8 に示すような波形の電流を使用した。受信は磁性アモルファス合金を使った MI 素子センサーを用いた高感度・広帯域の磁力計を使用した。24bit の A/D コンバータで、50kHz のサンプリングレートでデータを取得した。送信・受信の時刻同期には GPS を使用して、衛星からの信号が受信できる時には内部の水晶時計を自動的に校正し、長時間の精度を維持している。また時間とともに測定点の緯度・経度も記録している。

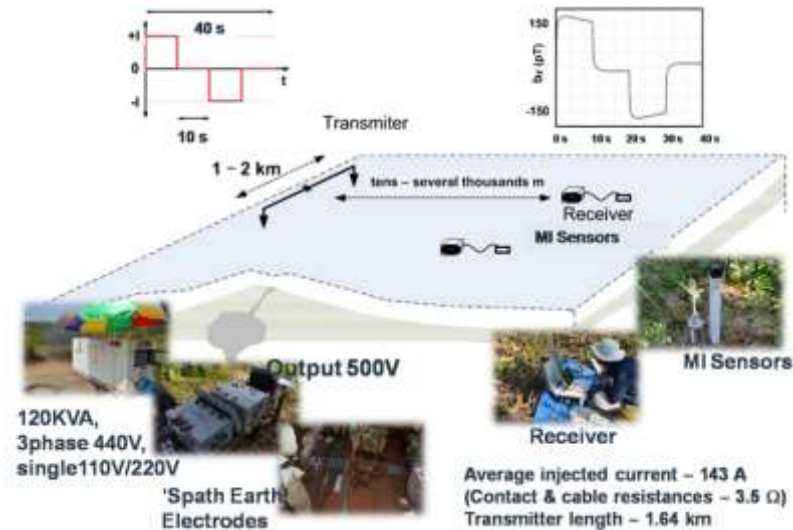


Fig. I-2-(3)-8 TDEM 法の概念と Gundih での観測の様子

送信電流は平均 140A と十分な電流を確保し、総計 66 地点での MI 磁力計による観測を行った。送信源から遠方での受信の状況を確認することを目的として、66 受信点のうち 9 地点は南東に広げて配置した (Fig. I-2-(3)-9)。

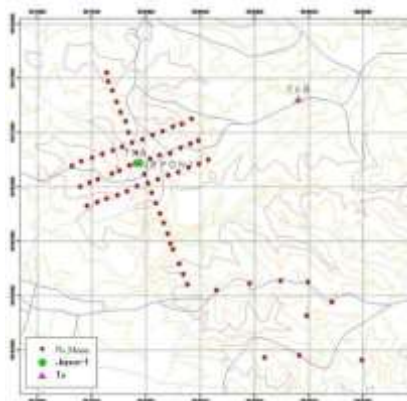


Fig. I-2-(3)-9 ベースライン測定の測定点配置

Fig. I-2-(3)-10 に示すように、約 40-50 トレースの過渡現象データが取得され、空電ノイズなどの不規則なノイズの抑制と S/N 比の改善のために、中央値を用いる選択的スタッキングを行った。正負の電流を交互に送信し、後続の逆極性のデータサイクルを正極性のデータサイクルから引き算し 2 で割ることで周期的な信号強度を増大させ、ランダムノイズや秒単位で繰り返される商用周波ノイズなどを抑制した。観測データは 50kHz のリニアサンプリングのデータであるが、インバージョンの前に三次スプライン関数による内挿法によって、対数時間系にリサンプルした。

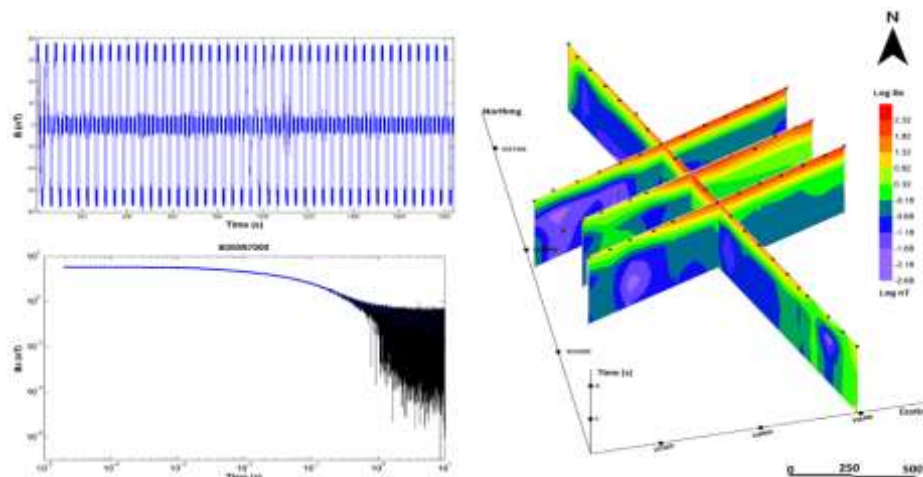


Fig. I-2-(3)-10 (左上) 測定されたデータ、(左下) 測定データの周期的なデータをスタッキング処理した結果 (黒い線) (右図) 磁場を下向きを正の時間として 2 次元表示して組み合わせた。

観測データから深度を関数とする比抵抗へのインバージョン処理には、非線形平滑化インバージョン法を適用した。ノイズの多いレイトタイム域を除き、インバージョン結果のフォワード計算値は観測値に大体フィットした。インバージョンで求めた深度に対する比抵抗構造を Fig. I-2-(3)-11 に示す。いくつかの受信位置で地表から 200m までの浅部に非常に高い比抵抗がみられ、CO₂ 貯留ターゲットである NgRayong 層の上面に対応する 800m より以深に低比抵抗構造がみられ、図で黄色のゾーンで示した。この低比抵抗構造は深度約 900m から以深に存在するシェール優勢な NgRayong 層に対応していると考えられる。

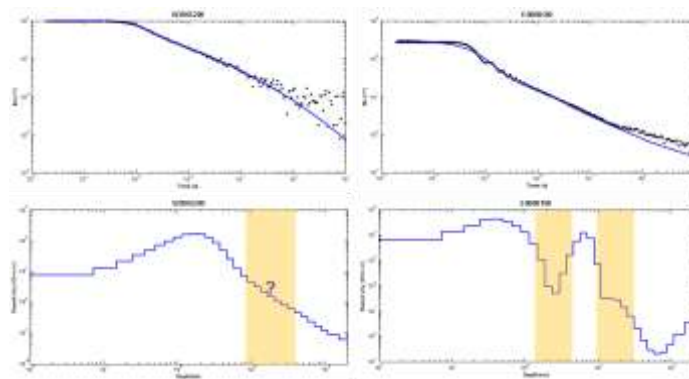


Fig. I-2-(3)-11 インバージョン結果(比抵抗構造)

(4) 研究題目3:探査データの総合解釈・評価技術の研究

(深田地質研究所、京都大学)

① 研究題目3のねらい

CO₂ を地下に貯留する上で、貯留層およびその上位の遮蔽層の力学的、水理学特性の把握が重要である。広範囲に広がる貯留層や遮蔽層の特性を把握するためには、広域の地下の構造や物性を把握できる物理探査の適用が有効である。そこで、本研究では、物理探査データから貯留層、遮蔽層の力学的、水理

【終了報告書】【170331】

学的特性の把握、加えて貯留層内の CO₂ の飽和度などの特性を評価手法について研究を行う。

また、貯留層や遮蔽層の特性や健全性を把握、モニタリングする手法として、サイト周辺で観測される微小地震データを利用する手法が考えられる。そこで、本研究では、微小地震観測に必要な孔内微小地震観測システムを導入し、実験サイトでの性能評価を経たうえで、実際の CO₂ 圧入サイト周辺に設置し、観測を行う。

更には、CO₂ の圧入に伴う貯留層や遮蔽層の変化をモニタリングする手法として、人工衛星によるマイクロ波を利用した干渉 SAR (InSAR) 技術の適用が考えられる。そこで、本研究では、InSAR 技術の基礎的な研究を行うとともに、圧入サイト周辺の衛星データを収集、解析し、CO₂ 圧入前後の地表変動の検知可能性について検討する。

② 研究題目 3 の実施方法

CO₂ 貯留層およびその遮蔽層の特性や健全性を把握するための研究として、上述のねらいに従い、以下のように研究を実施する。

項目 1：岩石物理学的手法による CO₂ 貯留層および遮蔽層の評価技術の研究

最近、石油・ガス開発等の資源探査分野では、貯留層の評価や管理を目的に物理探査データへの岩石物理学の適用が進んでいる。そこで、本研究でも最新の岩石物理モデルを物理探査データに適用し、地下の力学的、水理学的特性を把握する手法について研究する。

項目 2：微小地震観測システムの導入とモニタリング使用のための予備試験

CCS サイトでの微小地震観測データの観測、解析法の研究を目的に、最適な微小地震観測システムについて検討した上で、必要な数量を導入し、テストサイトに設置してその性能を評価する。

項目 3：InSAR 解析のためのデータ収集と予備解析

CCS サイトでの InSAR 手法の利用に必要な基礎的な解析手法の研究を行うとともに、実際の候補サイト周辺の衛星データを入手して、CO₂ 圧入のモニタリング法としての適用性について検討する。

③ 当初の計画（全体計画）に対する各研究項目の成果の達成状況とインパクト

項目 1：岩石物理学的手法による CO₂ 貯留層および遮蔽層の評価技術の研究

貯留層や遮蔽層の力学的特性、特に変形特性と強度は、圧入される CO₂ に対する貯留層の変形や遮蔽層の強度を把握する上で重要である。本研究では、広域的な貯留層や遮蔽層の力学特性を推定するために、地震探査で得られる地震波速度（P 波速度、S 波速度）から推定する手法について研究を行った。具体的には、地震波速度と間隙率および変形係数や強度間隙率の関係を岩石物理モデルの 1 つとして利用されている砂質頁岩あるいは頁岩質砂岩モデルでそれぞれ表し、それら 2 種類のモデルを組み合わせることによって地震波速度と変形係数や強度との関係をモデル化した。

そのモデルを、CO₂ の貯留層として実際の CCS サイトで利用されている堆積性軟岩（砂質泥岩）および硬質砂岩で得られたデータに適用し、評価を行った。地震波速度と強度の関係をモデル化した例を Fig. I-2-(4)-1 と Fig. I-2-(4)-2 に示す。Fig. I-2-(4)-1 には、堆積性軟岩での速度検層で得られた S 波速度と同じボーリング孔で採取された岩石コアを用いた室内三軸圧縮試験で得られた圧縮強度との関係をモデル化した結果を、実データとともに示す。Fig. I-2-(4)-2 には、硬質砂岩への適用例として、室内試験で得られた P 波速度と一軸圧縮強度との関係をモデル化した結果を、実データとともに示す。いずれのモデルも、実データをよく説明できていることがわかる。

【終了報告書】【170331】

このモデル化では、地震波速度に加えて間隙率が必要である。間隙率は、上記の例のように、ボーリング孔から採取された岩石コアの室内試験やボーリング孔内での検層データから推定することができるが、広域の間隙率分布を求めることはできない。そこで、本研究では、電気探査から得られる比抵抗と間隙率の関係を表す岩石物理モデルを用いて広域の間隙率分布を求める手法について研究を行った。Fig. 3 は、岩盤サイトで実施された地震探査による P 波速度と電気探査による比抵抗値との関係において、間隙率を推定して、P 波速度と間隙率の関係を求めた結果である。この関係を上記のモデル化に使用することにより、物理探査で得られる地震波速度と比抵抗から、広域的に分布する貯留層や遮蔽層の強度分布を推定することが可能となると考える。

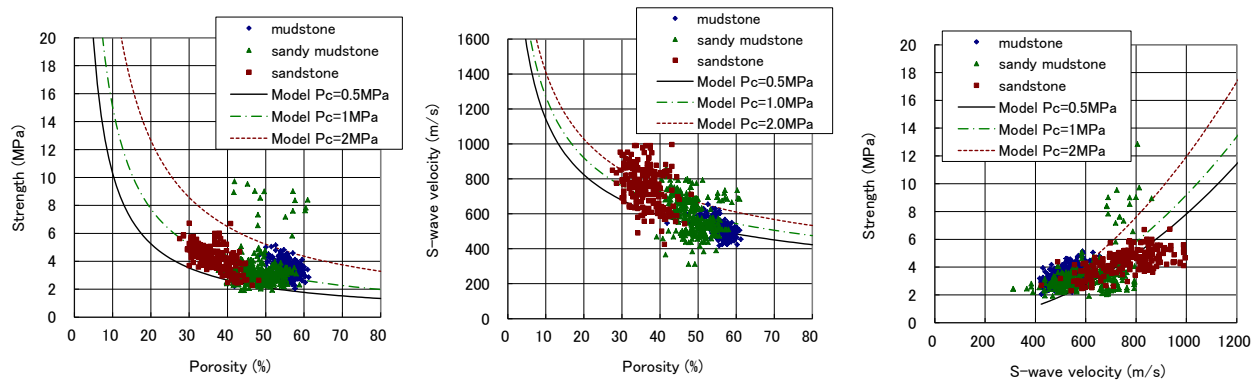


Fig. I-2-(4)-1 圧縮強度と S 波速度の関係のモデル化例

(左：圧縮強度と間隙率、中：S 波速度と間隙率、右：圧縮強度と S 波速度の関係)

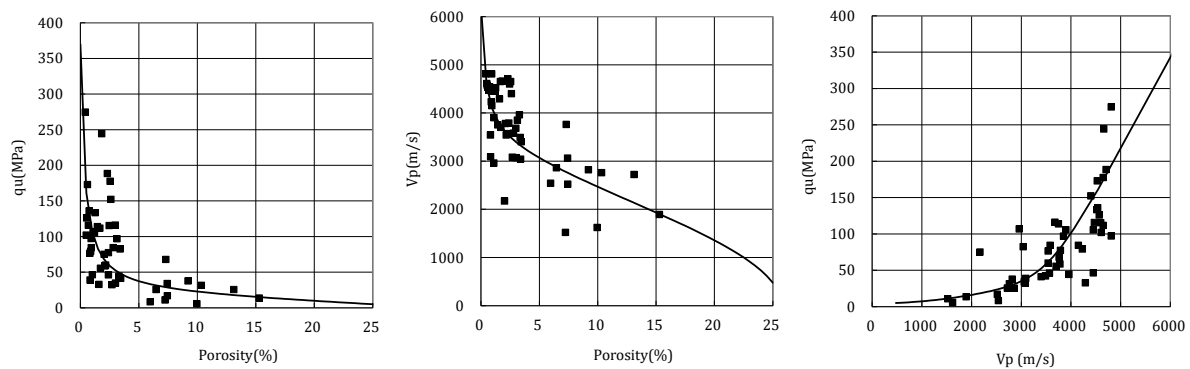


Fig. I-2-(4)-2 一軸圧縮強度と弾性波速度のモデル化例

(左：一軸圧縮強度と間隙率、中：P 波速度と間隙率、右：一軸圧縮強度と P 波速度の関係)

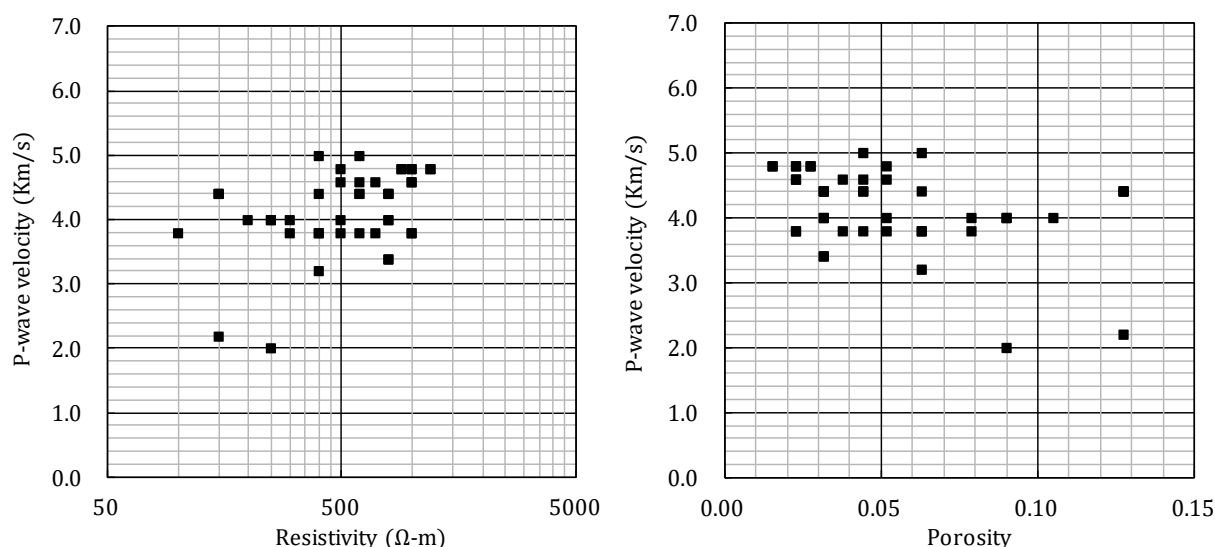


Fig. I-2-(4)-3 物理探査で得られた P 波速度と比抵抗の関係（左）と比抵抗から推定した間隙率と P 波速度の関係（右）

力学的特性同様、貯留層と遮蔽層の水理学的特性も CO₂ の貯留にとって不可欠である。そこで、物理探査で得られる地震波速度と比抵抗分布から透水係数を推定する手法について検討を行った。ここでは、砂質土や砂質岩の透水係数を推定する手法として広く利用されている Kozeny-Carman 式を利用する。この式では、材料の間隙率と粒径を与えると透水係数が得られる。そこで、ここでは、岩石物理モデルを用いて物理探査データから対象とする岩石や土の間隙率と平均粒径を求め、それらを Kozeny-Carman 式に代入することにより透水係数を推定する方法の適用性を評価した。

具体的には、まず、地震波速度と比抵抗に力学的特性のモデル化同様、粘土含有率を 1 つのパラメータとして、砂質頁岩あるいは頁岩質砂岩モデルを地震波速度と間隙率の関係に、Glover' s モデルを比抵抗と間隙率の関係に適用し、この 2 つのモデルを組み合わせることにより、地震波速度と比抵抗の関係をモデル化する。このモデルを用いると、地震波速度と比抵抗値を与えると、対象とする材料の粘土含有率、つまり粒度分布、粒径が推定できる。次に、地震波速度と間隙率または比抵抗と間隙率のモデルを用いて、間隙率を推定する。最後に、推定した粒径と間隙率を Kozeny-Carman 式に代入し、透水係数を推定するという方法である。

Fig. I-2-(4)-4 と Fig. I-2-(4)-5 に実データへの適用結果を示す。Fig. I-2-(4)-4 は、頁岩質砂岩の岩石コアの室内試験で得られた超音波速度、比抵抗、間隙率を用いてモデル化を行った結果である。モデルによって推定される粘土含有率は実測データともよく一致しており、透水係数も 1 桁以内の精度で推定できることが確かめられた。Fig. I-2-(4)-5 は、土質地盤での音波検層による S 波速度とインダクション検層による比抵抗データを用いてモデル化を行い、原位置透水試験で実測された値と比較した結果である。この例でも、実測データと 1 桁以内の精度で推定されていることがわかる。

以上のように、本研究では、当初計画通り、岩石物理学的手法を用いることにより、物理探査データから広範囲に及ぶ貯留層と遮蔽層の力学的、水理学的特性を推定する手法を開発することができた。

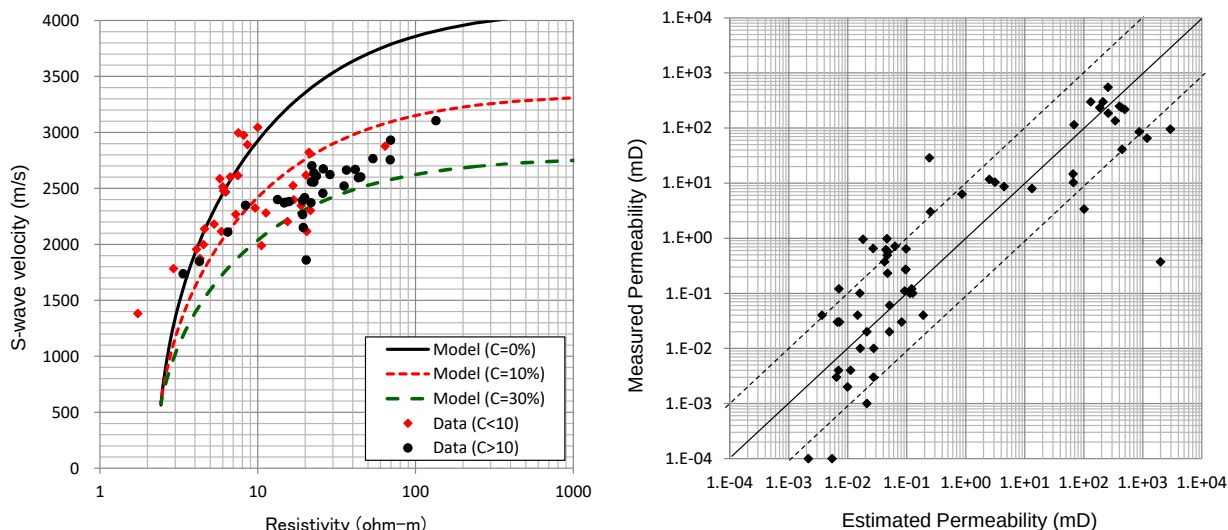


Fig. I-2-(4)-4 砂岩コア試料の室内試験データを用いたモデル化による透水係数の推定結果例
(左：S波速度と比抵抗の関係における粘土含有率・粒度、右：推定透水係数と実測値との比較図)

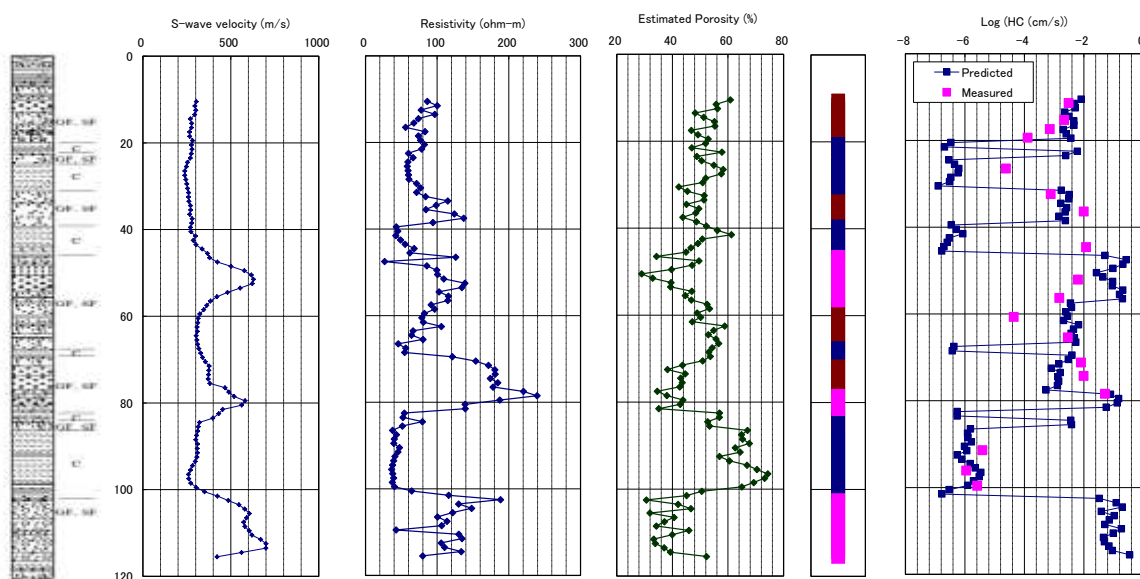


Fig. I-2-(4)-5 検層データと解析結果 (a：柱状図，b：S波速度，c：比抵抗，d：比抵抗から推定した間隙率，e：推定土質分類図(赤：砂礫，茶：砂，青：粘土)，f：推定透水係数(線：推定値，点：実測値))

項目 2：微小地震観測システムの導入とモニタリング使用のための予備試験

微小地震観測システムは、平成 24 年度予算で購入し、平成 25 年 10 月 4 日に早稲田大学本庄キャンパスにて動作確認を行った上で、インドネシアに輸出、平成 25 年 12 月 23 日、24 日の両日、インドネシアのカウンターパートであるバンドン工科大学の研究者への取扱い説明も兼ねて同大学キャンパスにてデータ収録テストを行った。Fig. I-2-(4)-6 に導入した微小地震観測システム 4 式の写真を示す。収

【終了報告書】【170331】

録テストは、キャンパス内にあるボーリング孔を使って孔内受振器を 10m 程度の深さに降下、設置して、地表のノイズを受振する方法により行った。テストの結果、問題なく動作することが確認された。なお、微小地震観測システムは、平成 24 年度に 4 式、平成 26 年度に 5 式、合計 9 式導入した。



Fig. I-2-(4)-6 平成 24 年度に導入した微小地震観測システム（4 式）

導入した微小地震観測システムの実フィールドでの試験を目的に、平成 26 年度から、カウンターパートであるバンドン工科大学が共同研究を進めている Star Energy 社が所有するインドネシア西部ジャワ州の Wayang Windu 地熱発電所サイトで試験観測を開始した。このサイトでは、地熱開発に必要な地下の地熱貯留層の評価を目的に、電磁法探査や重力探査も実施されており、Gundih ガス田における CO2 貯留層評価に必要な基礎的な技術の研究が可能と考え、実証試験を計画した。このサイトでは、新しい生産井の掘削も行われており、生産に伴う貯留層の動態変化を自然地震や生産時に発生する振動等を観測することによって把握可能かどうかを評価することを試験の目的とした。

平成 26 年 11 月 3 日～6 日に現地を下見した上で、平成 27 年 1 月 9 日～14 日に予備テストとして微小地震観測システム 1 式をサイト内の既存孔に設置し、1 月 13 日から連続観測を開始した。この既存孔はサイト内の地下水観測井であるが、使用頻度は高くないため、本実証試験に借用、使用することとした。予備テストでの観測機器の設置状況を Fig. 7 に示す。



Fig. I-2-(4)-7 観測機器の設置状況(左:機器準備状況、右:観測井に設置後の機器)

平成 27 年度も引き続き同サイトで観測システムの長期観測上の課題を抽出すべく、連続観測を続けた。その結果、長期観測上問題となるバッテリー電源およびデータストレージの実観測条件での使用限界を把握することができた。また、同サイトには、別に自然地震観測用の地表型の高帯域地震計(ドイツの GFZ 所有)が設置されていたため、その観測データとの比較を通じて、導入した微小地震観測システムの性能を評価することができた。その結果、導入した微小地震観測システムは当初計画通り高周波特性に優れた記録を収録できることが確

【終了報告書】【170331】

認できた。絶対感度においても高帯域地震計には及ばないものの、CO2 貯留層の評価に必要な規模の微小地震を観測可能であることが確認できた。Fig. I-2-(4)-8 に、微小地震観測システム(JICA)とGFZ の高帯域地震計(GFZ)の観測点位置、Fig. I-2-(4)-9 に観測装置、Fig. I-2-(4)-10 に観測記録、Fig. I-2-(4)-11 に観測記録の解析によって推定されたサイト周辺の微小地震の震源分布を示す。

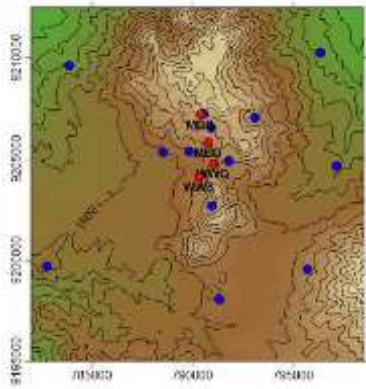


Fig. I-2-(4)-8 観測地点(赤:JICA、青:GFZ)

Fig. I-2-(4)-9 地震計(左:GFZ、右:JICA)

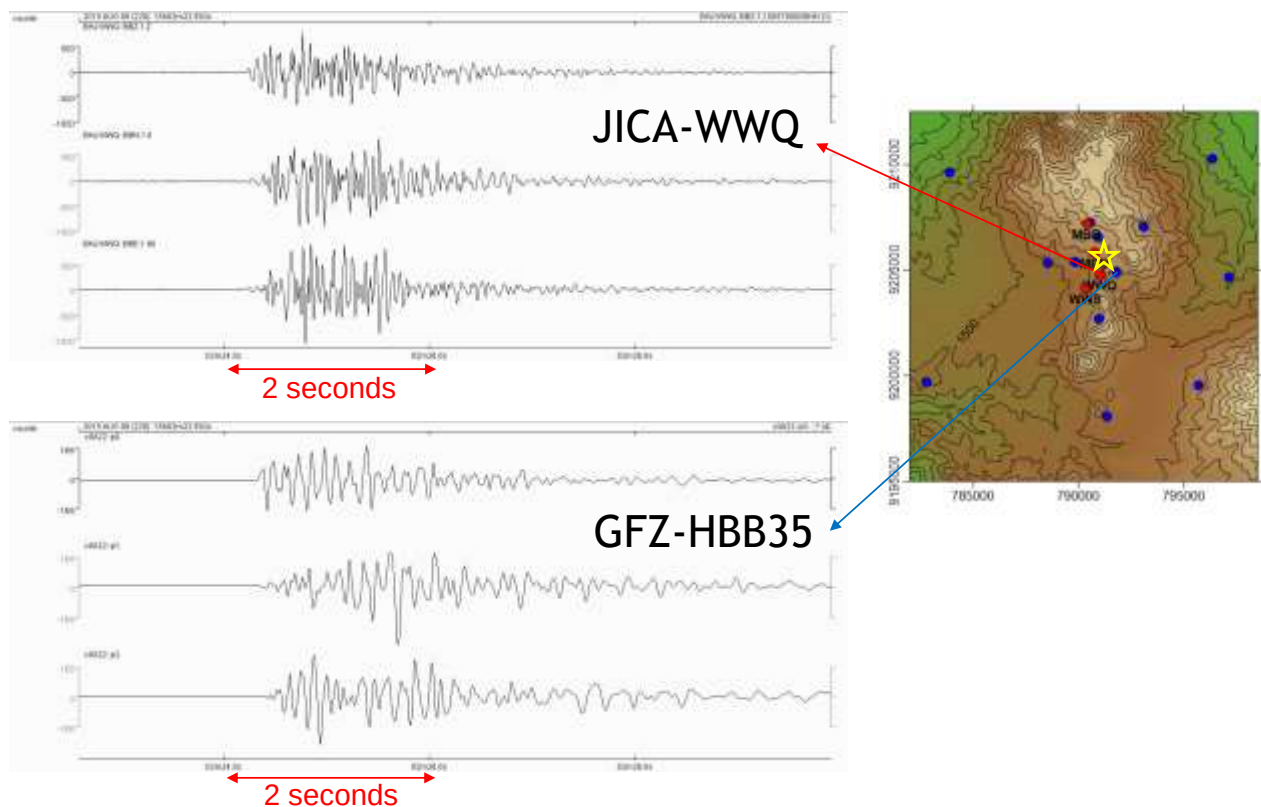


Fig. I-2-(4)-10 観測記録の比較例(JICA システムの方が、高周波成分が卓越していることがわかる)

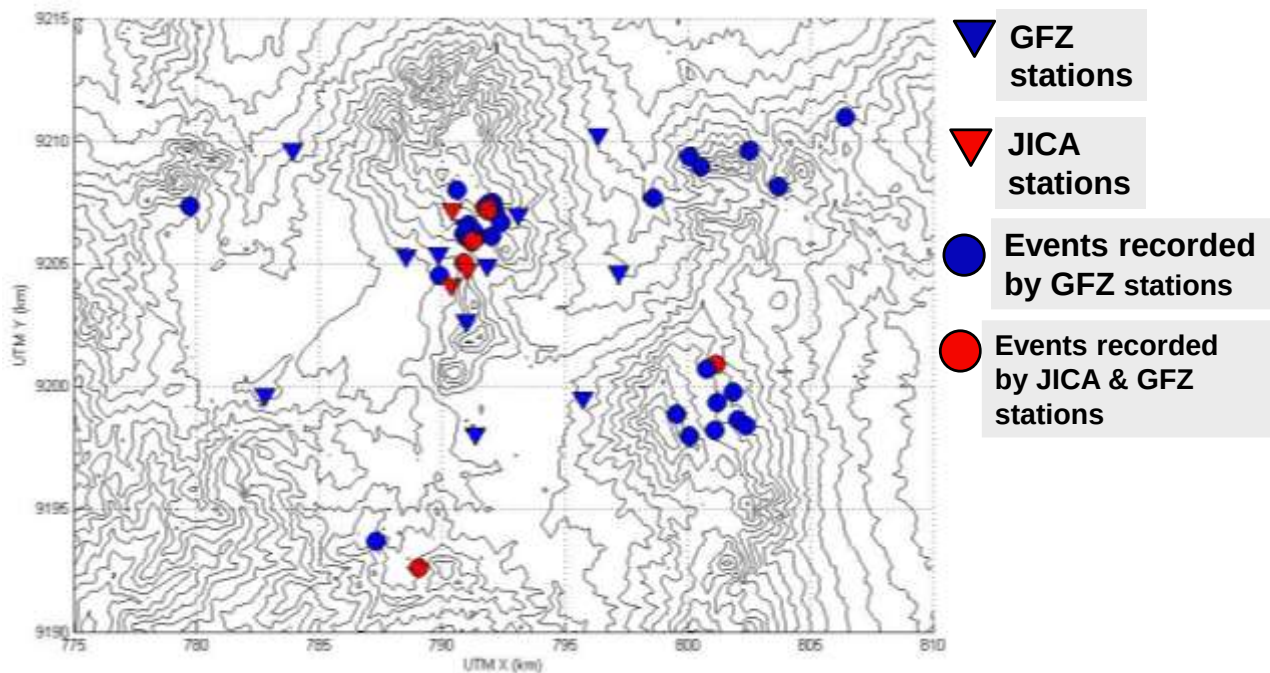


Fig. I-2-(4)-11 観測記録から推定された微小地震の震央位置

本サイトでの試験観測は平成 28 年度も継続している。システムの不具合はなく長期観測にも問題なく使用可能であることが確かめられた。今後、Gundih サイトの適切な観測地点を選定し、CO₂ 圧入前のベースラインの観測を開始する予定である。

項目 3 : InSAR 解析のためのデータ収集と予備解析

CO₂ 圧入後の地表変動から地下の CO₂ の挙動を予測する手法として衛星データを利用した InSAR(干渉合成開口レーダ)解析が期待されている。アルジェリアの In Salah サイトでは、その有効性が確認されており、本プロジェクトにおいてもその可能性について検討を行う。平成 27 年度は、ベースライン解析の準備として、Gundih ガス田周辺の衛星データを 2007 年 6 月 20 日から 2010 年 12 月 29 日までの間に 20 シーン収集し、予備的な解析を行った。Fig. I-2-(4)-12 に、解析の対象とした範囲と予備解析結果を示す。ベースラインの情報として、この期間の有意な変動はないと判断される結果が得られた。

InSAR 解析では、大気の影響等、解析結果に影響を及ぼす様々なノイズ源がある。そこで、本研究では、基本的な解析手法の検討も行っている。Fig. I-2-(4)-13 はその一環として解析手法の適用性の評価を目的に実施した地下水等の変動による地表変位の検出例である。ここでは、関東平野を対象に実施している。

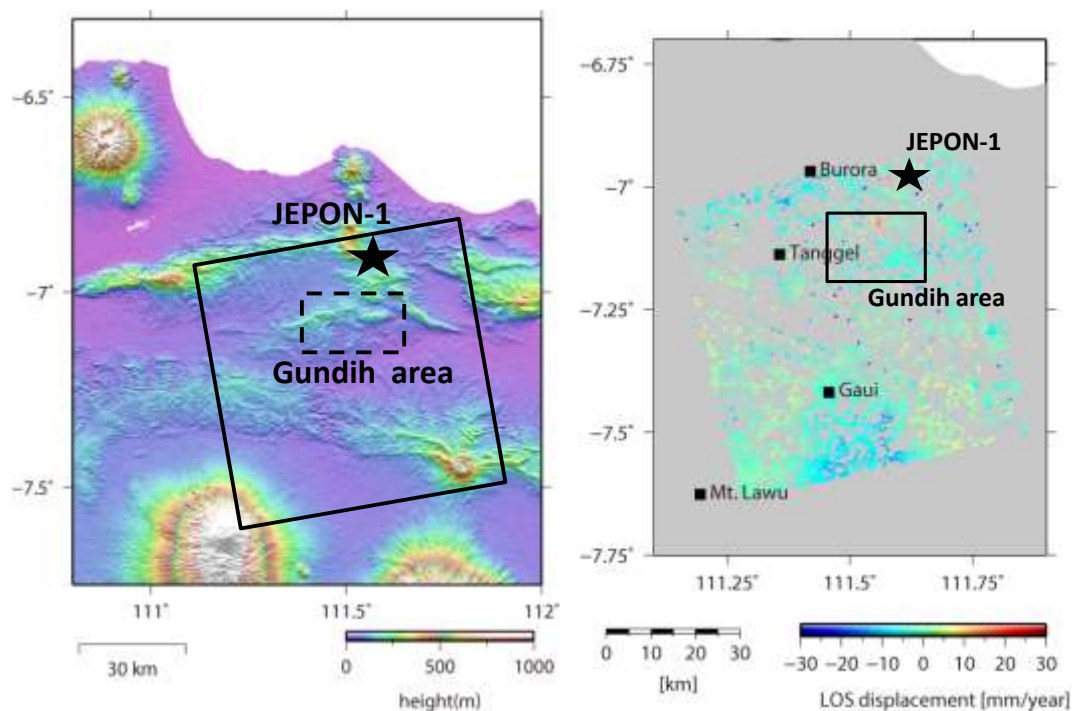


Fig. I-2-(4)-12 InSAR 解析を用いた Gundih サイト周辺の地表変動解析結果
(解析期間：2007 年 6 月 20 日から 2010 年 12 月 29 日)

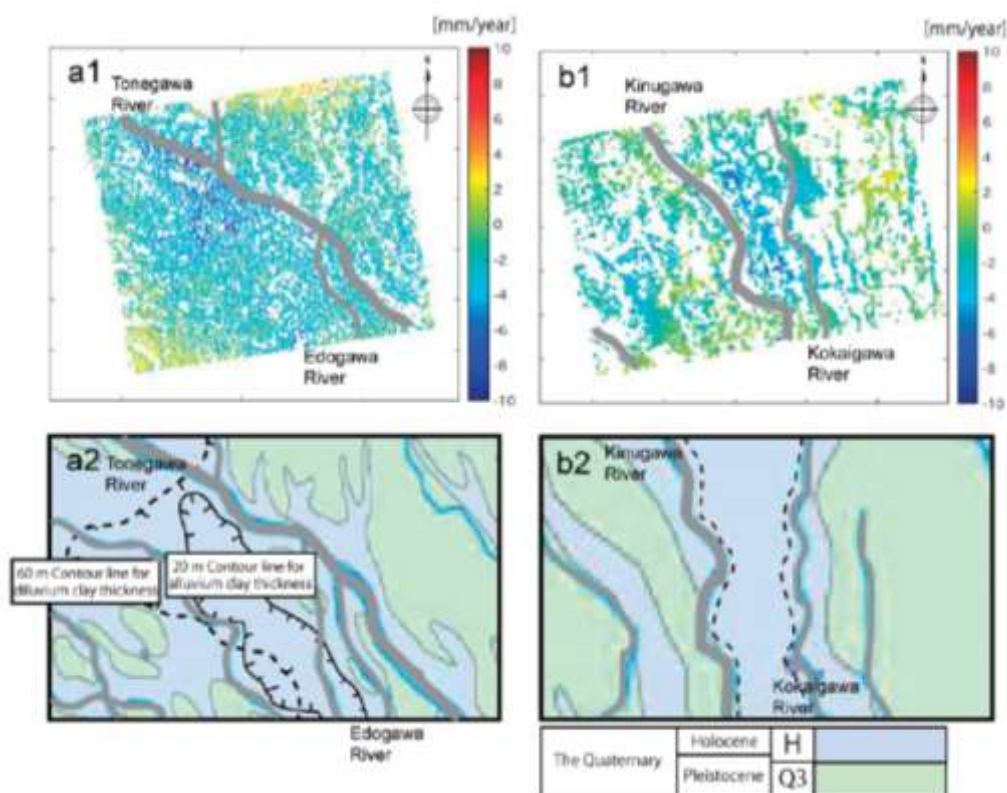


Fig. I-2-(4)-13 関東平野における地表変動検出例（上：InSAR 解析結果、下：解析対象範囲の地形）

(5) 研究題目4:貯留層評価及びモニタリング手法の研究

(九州大学、秋田大学、京都大学、深田地質)

① 研究題目4の研究のねらい

グンディガス田の既往データの解析によりサイトの地質モデル及びCO₂貯留層モデルを構築し、CO₂圧入シミュレーションによって貯留性能の評価とCO₂の圧入が断層へ与える影響を評価する。またインドネシアといったテクトニクス活動の強い場所で、高い精度で貯留層モデルを構築し、圧入したCO₂をモニタリングする手法の開発を実施する。

② 研究題目4の実施方法

既往の適用事例を調査し、複数の物理探査データから貯留層、帽岩及び貯留層内のCO₂の評価手法について整理し、課題を抽出する。物理探査データから帽岩の力学的、水理学的特性を評価する手法について研究する。グンディガス田の既往データの解析によって貯留サイトの地質モデル及びCO₂貯留層モデルを構築し、CO₂圧入シミュレーションによって貯留性能の評価を行う。また現地で取得した岩石試料に対して実験を行い、貯留層の弾性特性や水理特性を測定し、貯留層シミュレーションに組み込む。現地で重力探査等を実施し、圧入CO₂のモニタリングの有効性について検討を行う。さらに、圧入CO₂のモニタリングの新規手法に関する研究も実施する。既往の適用事例を調査し、複数の物理探査データから貯留層、遮蔽層及び貯留層内のCO₂の評価手法について整理し、課題を抽出する。物理探査データから帽岩の力学的、水理学的特性を評価する手法について研究する。

項目1：貯留層シミュレーションに向けた地質モデル構築

項目2：貯留対象層の掘削によるコア取得と基礎物性測定

項目3：アクロス震源を用いたCCSモニタリングシステムの構築

項目4：貯留層シミュレーションでのCO₂溶解プロセス検討

項目5：三軸圧縮試験による貯留層と遮蔽層の破壊強度の推定

項目6：地中に貯留したCO₂を連続的にモニタリングする手法の開発

項目7：効率的にCO₂を圧入できる貯留層条件を調べる手法の開発

項目8：CO₂の圧入による石油の増進回収(EOR)で必要となる3相の相対浸透率を計算で推定する手法の開発

項目9：微動を用いた連続モニタリング手法の開発

項目10：不均質な貯留層の地質モデルを構築する手法の開発

③ 当初の計画（全体計画）に対する各研究項目の成果の達成状況とインパクト

項目1: 貯留層シミュレーションに向けた地質モデル構築（平成25年度実施）

CO₂圧入の前には、物理探査データを用いて、貯留層の特徴を正確に把握し、地層のCO₂の貯留能力(長期間CO₂を貯留する能力)を評価する必要がある。さらに物理探査データから得られる地質モデルに対して、貯留層シミュレーションを実施し、CO₂圧入した場合の安全性、また圧入CO₂の圧入レートなどを決定する必要がある。我々は、グンディガス田周辺で取得された2次元反射法地震探査データと、3次元反射法地震探査データを用いて、地層のCO₂貯留能力の評価と、貯留層シミュレーションに向けた地質モデルの構築を試みた。これまでの研究によって、CO₂圧入地点は(1)グンディガスフィールド、(2)北部グンディフィールド、(3)北

【終了報告書】【170331】

西部グンディフィールドの3つに絞られている。このうち(2)北部グンディフィールドと(3)北西部グンディフィールドに関しては、それぞれ Jepon-1、SEMBRANI-1 とよばれる井戸を CO₂ 圧入に用いることができる。これらの井戸はプルトミナによって掘削されたが、生産は行われていない。グンディガスフィールドに CO₂ を圧入する場合には、圧入井を掘削する必要がある。一方で、CO₂ を圧入する Ngrayong 層(砂岩層)は、SEMBRANI-1 では深度が浅く(<800m)、CO₂ 圧入には適当でないことが分かった。そのため本研究では、(1) グンディガスフィールドと、(2) 北部グンディフィールド(Jepon-1)に対して、貯留層の評価を実施した。なお、ここに示す反射法地震探査データを用いた解析は、バンドン工科大学との共同で実施したものである。

(1) グンディガスフィールド

三次元反射法地震探査データから、Ngrayong 層の地層の形状を抽出したところ、探査領域の北側では、南傾斜の地層が変形を受けずに発達していることが分かった(Fig. I-2-(5)-1)。しかし構造トラッピングは期待できず、残留トラッピングを用いて CO₂ を貯留する必要があることが分かった。また 3 次元反射法地震探査領域の北側には横ずれ断層が発達し、圧入した CO₂ が北側へ数 km 移動した場合には、断層に到達することが分かった。しかし貯留層シミュレーションの結果からは、商業規模の CO₂ を圧入した場合でも、断層には到達しないことが示された。

(2) 北部グンディ域(Jepon-1 サイト)

反射断面図(南北断面図)で、褶曲構造の軸に位置していることが分かった(Fig. I-2-(5)-2)。しかし、Jepon-1 サイトの約 700m 北側には横ずれ断層が発達することも明らかとなった。そのため圧入した CO₂ の挙動を、貯留層シミュレーションによって、正確に把握する必要がある。貯留層シミュレーションを正確に実施するために、反射法地震探査データに対して音響インピーダンス・インバージョンを実施し、精度良い地質モデルを構築した(Fig. I-2-(5)-3)。さらに、ガンマ線検層結果を参照し、砂岩と泥岩にクラス分けを実施した(Fig. I-2-(5)-4)。

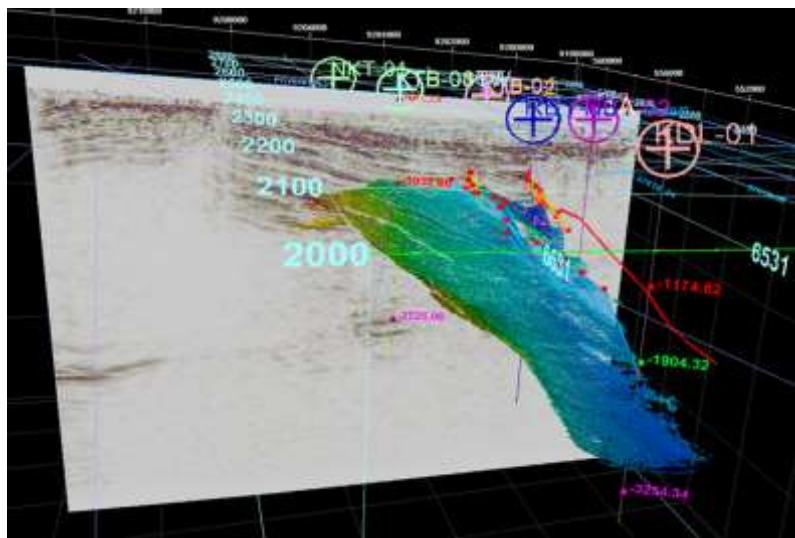


Fig. I-2-(5)-1 グンディガスフィールドで取得された三次元反射法地震探査データから抽出した Ngrayong 層上面の形状

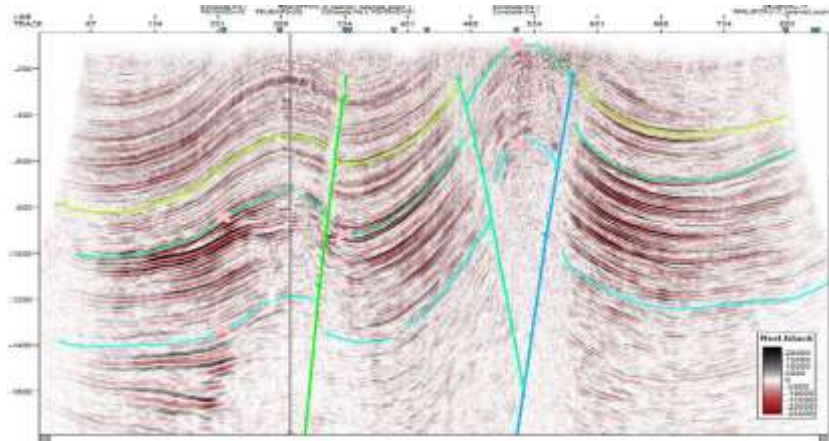


Fig. I-2-(5)-2 北部グンディ域 Jepon-1 サイトを横切る反射断面図
(左側の褶曲構造の軸(黒線)が Jepon-1 サイト。図中の線は地層境界や断層の位置を示す)

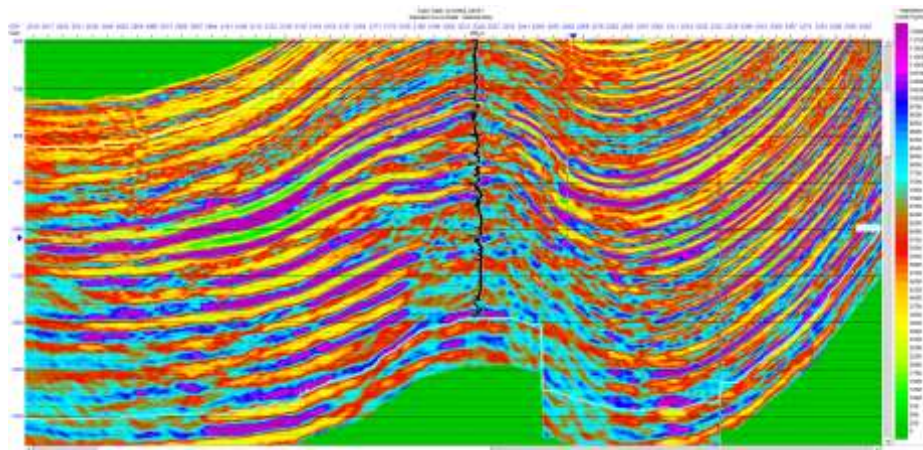


Fig. I-2-(5)-3 音響インピーダンス・インバージョン断面図
(音響インピーダンスの値をカラーリングした。解析範囲は Jepon-1 周辺の Ngrayong 層のみを対象とする)

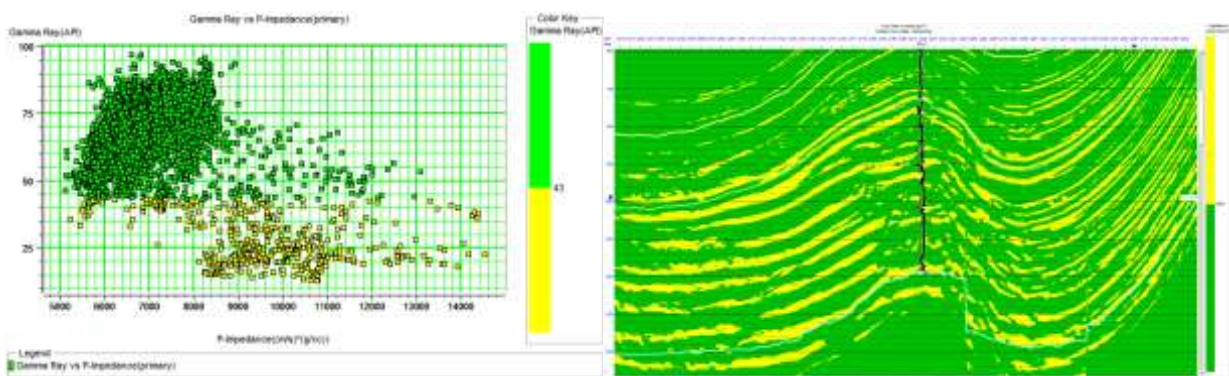


Fig. I-2-(5)-4 (左) 音響インピーダンスとガンマ線のクロスプロット(閾値の設定による砂岩(黄色)と泥岩(緑色)を区分した)(右) 音響インピーダンスプロファイルから砂岩(黄色)と泥岩(緑色)をクラス分けした断面図

項目2: 貯留対象層の掘削によるコア取得と基礎物性測定 (平成 25 年度)

本研究では本プロジェクトにおける貯留対象層である Ngrayong 層の CO₂ 貯留性能を評価することを目的と

【終了報告書】【170331】

し、Ngrayong 層および遮蔽層として期待される Bulu 層、Wonocolo 層を構成する岩石を地表からの掘削により採取し、岩石の基礎物性の測定を行った。Java 島の Central Java 州の Tuban 市近郊の丘陵地において 2013 年 9 月 15 日より 25 日まで Well-A の掘削が、9 月 30 日から 10 月 9 日まで Well-B の掘削が実施され、それぞれ 75m、70m の深度に達している。それぞれ Well-A コアからは 068 個、Well-B コアからは 37 個の物性測定用のプラグ(φ=2.5cm、L=2.0-4.0cm)を作成し、物性測定を行った。岩石試料プラグの作成はバンドン工科大のコアラボにおいて実施した。

Ngrayong 層は中期中新世の海成堆積層で典型的な海進・海退による周期的な岩相変化を示す。岩相は下位から上位にかけて粗粒の砂岩から細粒砂岩に変化し、最上部では石灰岩層となる。Ngrayong 層の下位には主に炭酸塩岩から構成される Tuban 層が存在し、上位では同じく炭酸塩岩を主とする Bulu 層と接する。Tuban 層のさらに下位には、Gundih ガス田の天然ガス貯留層である炭酸塩岩を主とする Kujung 層が存在する。Ngrayong 層は Java 島に広く分布し、大きく 3 つのユニットに区分される。Unit-I は陸棚からスロープにかけての堆積物であり、砂岩、泥岩と石灰岩から構成される。

Unit-II は遠洋性のタービダイト砂岩と泥岩および半遠洋性の泥岩からなる。Unit-I および Unit-II は Ngrayong 層の下部を構成する。Unit-III は Unit-I および Unit-II の上位に存在する浅海～漸深海の堆積物である。岩相は炭酸塩岩、半遠洋性の泥岩、タービダイト砂岩およびコンターライトで構成される。

岩石試料の採取について

Tuban 市近郊の 2 地点で Ngrayong 層および Wonocolo 層、Bulu 層の採取を目的とした掘削を実施した。Well-A では Bulu 層の上部を構成する炭酸塩岩および中～下部の泥岩と Ngrayong 層の Unit-III を構成する砂泥互層試料が採取された。Well-A の掘削深度は 75m である。一方、Well-B では Ngrayong 層 Unit-III の砂泥互層が得られた(掘削深度 70m)。今回実施した掘削では、Ngrayong 層下部を構成する Unit-II もしくは Unit-III は採取されなかった。掘削作業風景や回収した岩石資料を Fig. I-2-(5)-5 に示す。



掘削風景と回収した岩石資料の写真(一部)

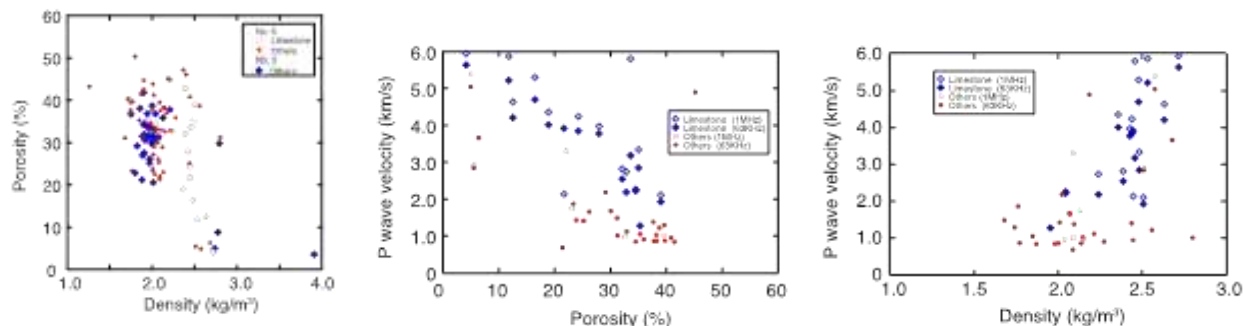
Fig. I-2-(5)-5 現場の風景および回収した岩石資料の一部

測定結果について

掘削コアはバンドン工科大において、弾性波速度(V_p 、 V_s)および密度、孔隙率の測定を行った。孔隙率と密度の関係では Well-A および Well-B の堆積岩は大きく間隙率が 20%を越え、密度が 2.0kg/m^3 のグループ(G1)と間隙率が 10%以下で密度が 2.5kg/m^3 となるグループ(G2)の二つに分類できた(Fig. I-2-(5)-6A)。こ

【終了報告書】【170331】

れらは岩相の違いを反映していると考えられ、前者が砂泥互層、後者が泥岩だと考えられる。一方、Well-A で採取された炭酸塩岩では密度の増加に対し間隙率が減少する負の相関が確認できた。次に弾性波速度と孔隙率および密度との関係を調べた。その結果を Fig. I-2-(5)-6B, C で示す。炭酸塩岩と G2 の堆積岩の P 波速度と孔隙率との間に負の相関、密度との間では正の関係があることが確認された。



A: 孔隙率－密度

B: P 波速度－孔隙率

C: P 波速度－密度

Fig. I-2-(5)-6 コア測定の結果 (A: 孔隙率-密度、B: P 波速度-孔隙率、C: P 波速度-密度の関係)

これらの結果は先行研究と調和的である。一方、G1タイプの堆積岩において孔隙率が35%を越えるサンプルでは孔隙率及び密度の変化に対して P 波速度の変化がほとんど見られないことが明らかになった。P 波速度と密度の関係においても 2.5kg/m^3 を越える大きな密度を持っているにもかかわらず 1.0km/s 以下の速度を示すサンプルが見られた。変化に対して顕著な速度変化を示さないサンプルが存在する事が確認できた。また P 波速度が 1km/s 程度の値を示すサンプルはそれぞれ孔隙率や密度との間に顕著な相関が見られないことも明らかになった。

最後に Well-A のサンプルの音響的インピーダンス ($AI: V_p \times \text{密度}$) を測定結果から計算し、深度方向に対して、密度および孔隙率、 V_p 、 V_s と併せてプロットした (Fig. I-2-(5)-7)。Wonocolo 層と Bulu 層および Bulu 層と Ngrayong 層の境界近傍で物性が大きく変化することが明らかになった。特に AI では大きな変化が確認できた。この結果はこれらの岩相境界が地震波反射面として検出できる可能性を示している。また Ngrayong 層内部でも AI が著しく大きいサンプルが存在していることが明らかになった。これは Ngrayong 層内部の地質不均質に起因すると考えられる。

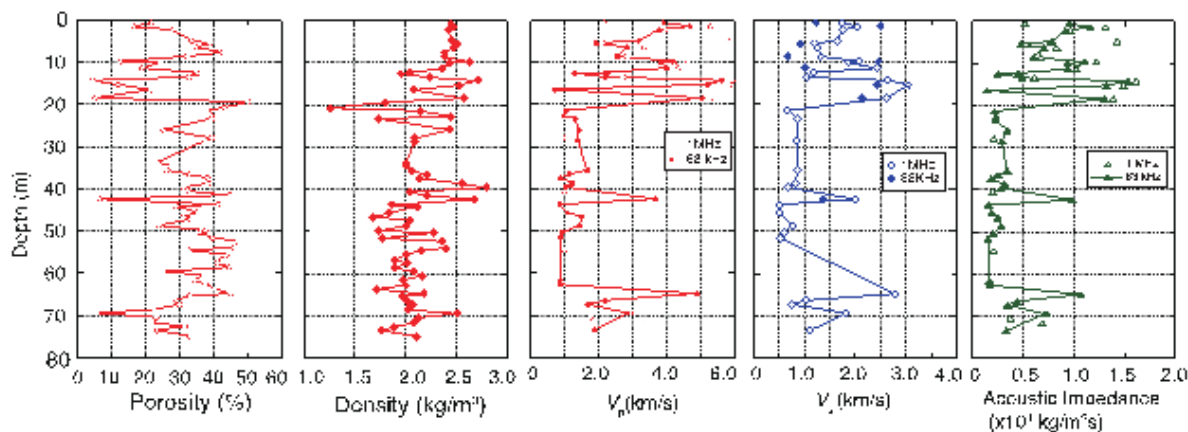


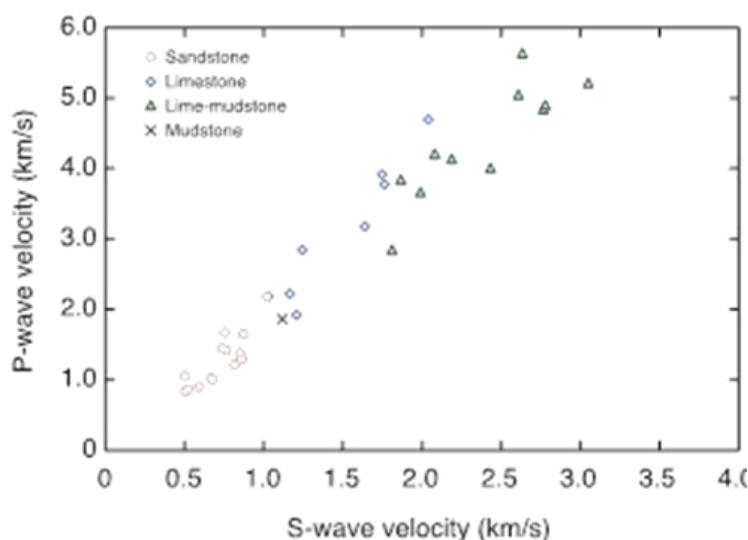
Fig. I-2-(5)-7 Well-A における孔隙率、密度、 V_p 、 V_s および AI の分布

【終了報告書】【170331】

結論

掘削コアを用いた基礎物性測定結果から、Ngrayong 層の Unit-III の砂泥互層と Bulu 層の泥岩、炭酸塩岩の物性値はそれぞれ大きく異なり、物性値によりこれらの分布を確認できる事が分かった。また同様に Ngrayong 層の Unit-III 内部の小規模な不均質構造も物性値分布から把握できる可能性が示唆された。

平成 26 年度は、これまで得られた成果を 10 月に米国テキサス州オースティン市で開催され Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-12)においてポスター形式で発表した。発表では前年度までの研究成果を基に、本プロジェクトの貯留対象層である Ngrayong 層の貯留性能および Bulu 層の遮蔽性能について議論した。まず掘削コアの岩相解析を鏡下において行い、砂岩、石灰岩、石灰質泥岩および泥岩に大きく分類した。掘削コアの物性測定結果と岩相解析結果を併せて議論した結果、岩石試料の物性値は石灰質泥岩とそれ以外の岩相との間に大きな差異が存在することが明らかになった(Fig. I-2-(5)-8)。Bulu 層と Ngrayong 層に見られる石灰質泥岩は、著しく低い孔隙率を示していることから、石灰質泥岩は Bulu 層下部の主要な構成岩石であることから、Bulu 層は遮蔽層として十分な性能を有している可能性は大きい。



練ることが重要である。弾性波アクロス(精密制御定常信号システム)は、定常的に地下に信号を発信できるため、連続して地震波データを取得することができる。そのため、従来の人工的な震源を用いた地震探査に比べて時間方向の解像度が高く、CO₂ 地中貯留などの地下構造モニタリングに適していると考えられる。本研究では弾性波アクロス震源を用いた地震波解析の時間的安定性を評価するために、名古屋大学の山岡教授と東京大学の渡辺教授と共同で、愛知県豊橋市にある三河地殻変動観測所に設置された小型アクロスを用いたモニタリング手法の開発を行った。特に、表面波解析によるモニタリングの安定性を検証した。アクロスによるモニタリング手法が有効であることが明らかになれば、このモニタリング手法をグンディ CCS プロジェクトに適用することも選択肢の一つとして考えられる。弾性波アクロスは、錘を周波数変調(FM)方式で回転させることによって、地盤に力を加える。錘の回転方向として、時計回りと反時計回りの回転の両方についてデータを取得することで、任意の方向に加振した震源関数を合成することができる。

解析に用いたアクロスデータは2014年8月5日19時から8月6日9時の間(14時間)に取得されたデータである。地震計の測線長はおよそ70mであり、地震波データは10m間隔で設置された8個のジオフォンにより取得した。データ取得時のアクロスの周波数は5-15 Hzであり、アクロスは1時間おきに反転させた。よって本研究で用いたデータの場合、2時間のデータごとにアクロスの伝達関数を計算することができる。

観測されたマルチチャンネル地震波データから、表面波マルチチャンネル解析(Park et al., 1999)により面波分散曲線を推定した (Fig. I-2-(5)-9 (a))。また観測された地震波の振幅値を Foti(2003)の方法により解析することで、表面波減衰係数を推定した。表面波分散曲線および減衰係数を異なる2時間のデータごとに推定した結果を Fig. I-2-(5)-9(b),(c)にそれぞれ示す。推定した分散曲線および減衰係数をみると、異なる時間においてもほぼ同じ推定値が得られていることがわかる。今回データを取得した期間には降雨もなく、浅部構造に変化が生じている可能性は低い。本研究で得られた結果は、アクロス震源を用いたデータに表面波解析することによって、時間的に安定して浅部構造をモニタリングすることが可能であることを示している。

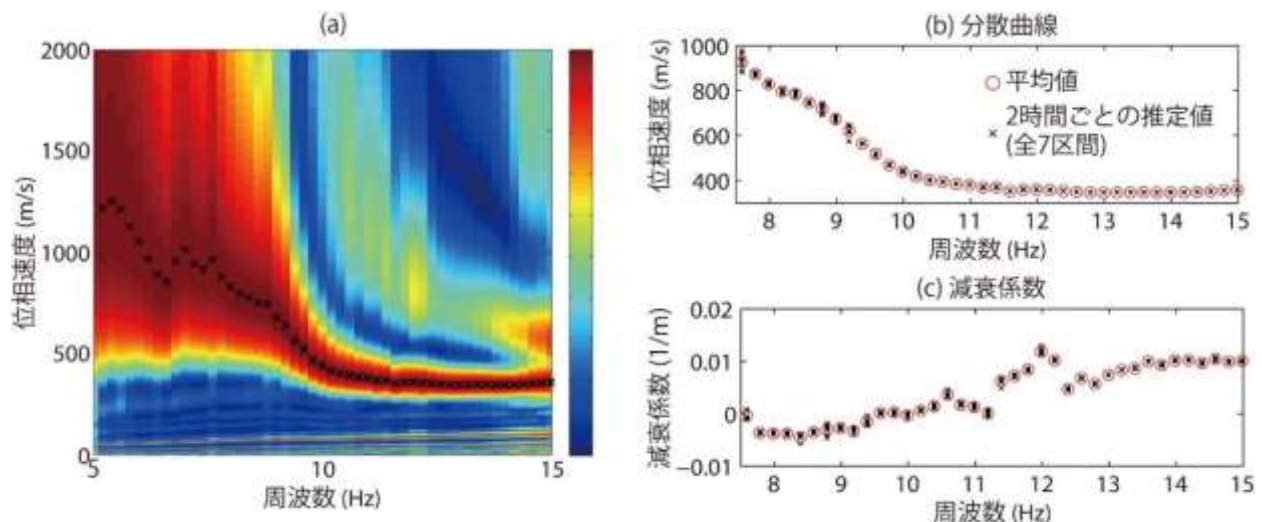


Fig. I-2-(5)-9 (a) 8月5日19-21時のデータから計算した位相速度スペクトル。黒は推定した位相速度を表す。

(b)および(c) 8月5日19時-8月6日9時に取得された2時間ごとのデータからそれぞれ推定した分散曲線と減衰係数(黒)とその平均値(赤)。分散曲線がほとんど時間変化していないため、分散曲線(黒)が重なって見える。

項目4: 貯留層シミュレーションでの CO2 溶解プロセス検討

貯留層では、多孔質岩石の隙間は間隙水で満たされている。圧入初期では、CO₂ は間隙水内のバブルとして存在するが、やがて間隙水に吸収される。その溶解速度は、地層水の特性和 CO₂ バブルの径などに依存すると考えられている。この溶解速度は、安全で効率的な CO₂ 貯留を可能にするが、現在の貯留層シミュレーションでは、この溶解の影響を経験的に与えることが多い。我々は、CO₂ の溶解プロセスを検討し、貯留層シミュレーションに組み込むことを目指した。

岩石間隙の大きさは数マイクロメートルであり、このような小さなスケールでは全エネルギーに対する界面エネルギーの割合が相対的に大きくなり、その影響が大きくなる。例えば、常温常圧下での水中にある CO₂ の気泡径が 0.25cm 未満の場合は、界面張力の影響を受けて、その溶解速度が Higbie の浸透説によるモデルとは異なる挙動を示すことが知られている。界面張力の影響を考慮した溶解の時間発展を記述する一般的な方法として、ヘルムホルツの自由エネルギー減少法則に基づいた様々な Phase field model が提案されている。グンディ CCS プロジェクトで CO₂ を貯留する帯水層は、深度が 1000m (圧力 10MPa)、温度は 30 度を超える。このような条件下では、CO₂ は超臨界流体となる。臨界点近くの CO₂ は、熱伝導率が極大になり、溶解熱や界面を横切る熱流の影響を受けやすい。したがって、間隙水内の超臨界 CO₂ の溶解を考える場合には、界面張力の影響に加えて熱の影響も考慮する必要がある。しかしながら、上に述べた Phase field model では界面張力の影響を考慮できるものの、熱の影響を組み込むことが難しい。その理由は、ヘルムホルツの自由エネルギーが減少するのは、温度が一樣かつ定数とみなせるときに限るからである。したがって、熱の影響を考える場合は、経験的に Phase field model を補正する必要がある。我々は、そのような経験的な補正を用いるのではなく、非ホロノミック拘束における変分原理に基づいて、非一樣温度下での溶解過程を記述する運動方程式を導出する新たな方法を提案し、溶解プロセスにおける熱の影響を調べた。

溶解プロセスの定式化と結果

流体の運動を知るには、動力学 (kinematics) を与える保存則と熱力学 (thermodynamics) を与えるエントピーの式の具体的な形を知る必要がある。多成分系について、これらの式を現象論から得ることは難しい。我々はこの問題に対応するため、変分原理を用いた定式化を開発した。このアプローチを用いれば、対称性や作用に極小値を与える解が存在するための必要条件を使うことができ、動力学と熱力学との矛盾のない運動方程式を経験則に頼ることなく導出できる。我々が導出した熱力学を考慮した運動方程式により、CO₂ 吸収過程において、次の 2 つのことが明らかとなった。

① 泡収縮に伴う気泡界面の温度上昇

界面エネルギーに由来したエントロピー流束が界面付近で発生し、これにより界面の温度が上昇することがわかった。気泡が溶解し収縮しているときは、エントロピー流束は界面を超えて気泡から水中に流れて気泡は冷える。ミクロにみれば、界面付近ではエネルギーの高い CO₂ 分子から界面を超えて水側に移動していることを表している。これにより気泡内にある界面付近の CO₂ の温度が下がり、界面及び界面付近の水の温度は上昇する。つまり、気泡の溶解によって界面に垂直な方向に非一樣な温度場が発生することがわかった。気泡径が小さければ小さいほど、体積に対する表面積の割合が大きくなり、気泡はエントロピー流束によって冷えやすくなり、より非一樣な温度場が発生しやすくなると考えられる。

② 泡界面の温度上昇による溶解速度の低下

非一樣な温度場を考慮しない場合には、界面エネルギーは気泡の表面積を小さくする方向、つまり、気泡の

【終了報告書】【170331】

収縮を促進することが知られている。この効果はCO₂の質量分率 ϕ の勾配 $\nabla \phi$ で決まるとされていた。今回、我々は温度を考慮した場合には、これが $(\nabla \phi)/T$ の分布で決まることを新たに見出した。 $\nabla \phi$ の絶対値は界面で極大となるが、気泡が収縮している際には温度 T も界面で極大になる。したがって、気泡収縮によって発生する非一様な温度場は気泡の収縮の効果を妨げる方向に働く。温度場が定常であるという仮定の下では、気泡が小さいほど溶解速度は速くなる。しかし気泡径が小さいほど、非一様な温度場による溶解を妨げる効果が大きくなる場合には、ある気泡径以下での気泡の溶解速度が逆に遅くなることがありえる。この場合、溶解にはある程度の気泡の大きさが必要であり、小さくなった気泡はいくつかが合わさることで再び大きな気泡を作り、そして溶解するという過程を経て溶けていくと考えられる。このように溶解によって生じる非一様温度場の影響を考えることによって、非自明な溶解の過程が明らかになった。

結論と展望

気泡界面ではCO₂吸収に伴いエントロピー流が発生し、これにより気泡界面温度が上昇することがわかった。気泡径が、あるサイズよりも小さいと気泡が溶けにくくなる可能性があることが分かった。これを具体的に評価し、貯留層シミュレーションに組み込むのは今後の課題である。本定式化で得られた運動方程式は、流れ場があるときも考慮することができる。本研究で実施した本定式化によりCO₂、水、温度場についての方程式系を得ることができた。また間隙水内のCO₂の溶解過程を制御するには、圧入する際の圧力、圧入気体の半径、温度を調整する必要があることが分かった。



Fig. I-2-(5)-10 CO₂と水の溶解と熱の関係の模式図

項目5：三軸圧縮試験による貯留層と遮蔽層の破壊強度の推定

CO₂の圧入に伴う間隙水圧の上昇は、誘発地震を引き起こす可能性がある。そこでCO₂の圧入で許容される間隙水圧の上昇量を調べるために、貯留層(Lower Ngrayong formation)と、遮蔽層(Bulu formation)の破壊強度を三軸圧縮試験により測定した。岩石試料は圧入サイト(JEPON-1)周辺の露頭からドリルで取り出し、連続的に岩石が取得されている箇所を選んで試験を実施した。地層の破壊強度や摩擦係数を測定する場合には、少なくとも3つの試料に対して3軸圧破壊試験を実施してモールの応力円を書く必要がある。本研究では、遮蔽層(Bulu formation)から3試料、貯留層(Lower Ngrayong formation)から3試料を取得し、ミニコア型に整形した後、それらの試料に対して異なった応力場で3軸圧破壊試験を実施した。モールの応力円を描いた結果(Fig. I-2-

【終了報告書】【170331】

(5)-12)、遮蔽層は強度(摩擦係数 μ)が大きく、間隙水圧の上昇が生じて岩石が破壊しにくいことがわかった。これはシール層としては有利な特性である。一方、貯留層のほうは、強度は遮蔽層ほど大きくないものの、これまでに推定されていた仮定されていた値よりは少し高い値となった。今回の試験で得られた値をジオメカニカルモデリング(Slip tendency の計算)に用いることにより、CO₂の圧入に伴って上昇する間隙水圧の許容範囲を知ることができる。なお本研究は、九州大学に3ヶ月間滞在した Harya Danio 博士学生と共に実施したものである。

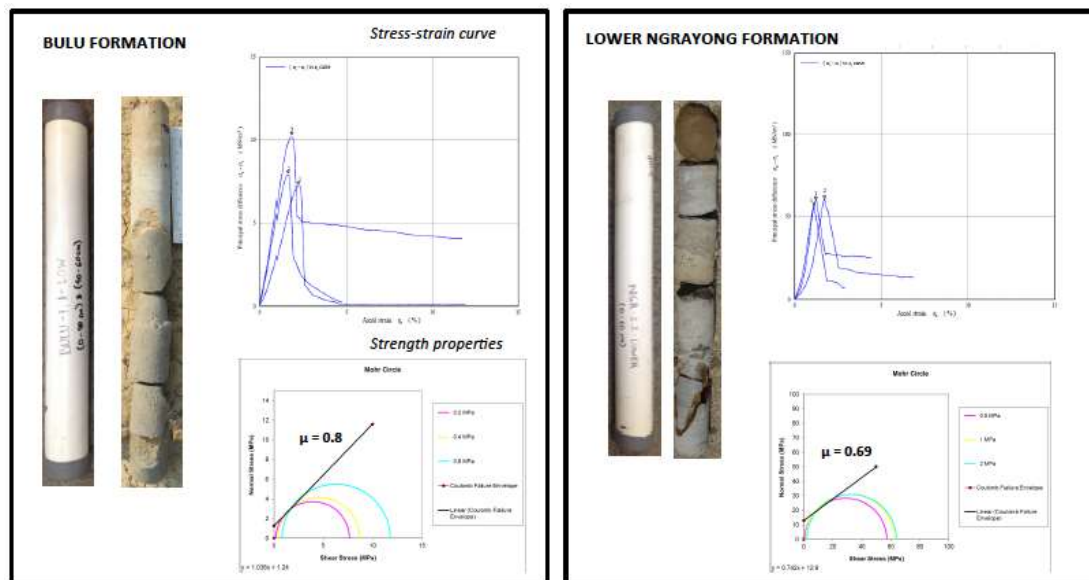


Fig. I-2-(5)-11 岩石破壊試験で得られた岩石強度の結果. (左)シール層と考えられている Blue formation の結果. (右)貯留層の Lower Ngrayong formation の結果.

項目6：地中に貯留した CO₂を連続的にモニタリングする手法の開発

CO₂のモニタリングでは、地震探査を繰り返し実施するのが有効であるとされている。しかし地震探査によるモニタリングは高価であるため、貯留層に圧入した CO₂を連続的に(短い時間間隔で)モニタリングするのは難しいのが現状である。本研究では、貯留した CO₂を精度良く、また連続的にモニタリングするため、微小な振動を発振し続ける装置(精密制御定常信号システム;アクロス)を用いた解析手法を開発した。この装置では、偏心したおもりを回転させることによって連続的に広い周波数レンジの信号を発信するもので、これまで自然地震断層や火山のモニタリングに使われてきた。本研究では、このアクロス装置を貯留 CO₂のモニタリングに応用した。

アクロスによって連続に発振された波を地震計で観測し、特に表面波と呼ばれる地震波に注目した解析を行うことで、地下で生じた変化を高い精度でモニタリングすることが明らかとなった(Fig. I-2-(5)-12)。今回開発した方法では、1時間ごとに表面波の伝わる速度の変化をモニタリングできるため、突発的に発生した地下の変動(例えば、突然の CO₂の漏洩)を早急に検出することができる。また今回開発した手法を使えば、地震波の伝わる速度変化を1%より高い精度で検出できる。この検出精度があれば、亀裂に沿って漏洩した CO₂を検出できることが、数値シミュレーションにより明らかとなった。このアプローチは、グンディ域といった断層などが存在する場所での CO₂地中貯留において、有効なモニタリング手法となると考えられます。

本研究は、平成26年度から継続している。なお、本研究成果は論文に発表され、その成果は新聞やニュースで取り上げられた。

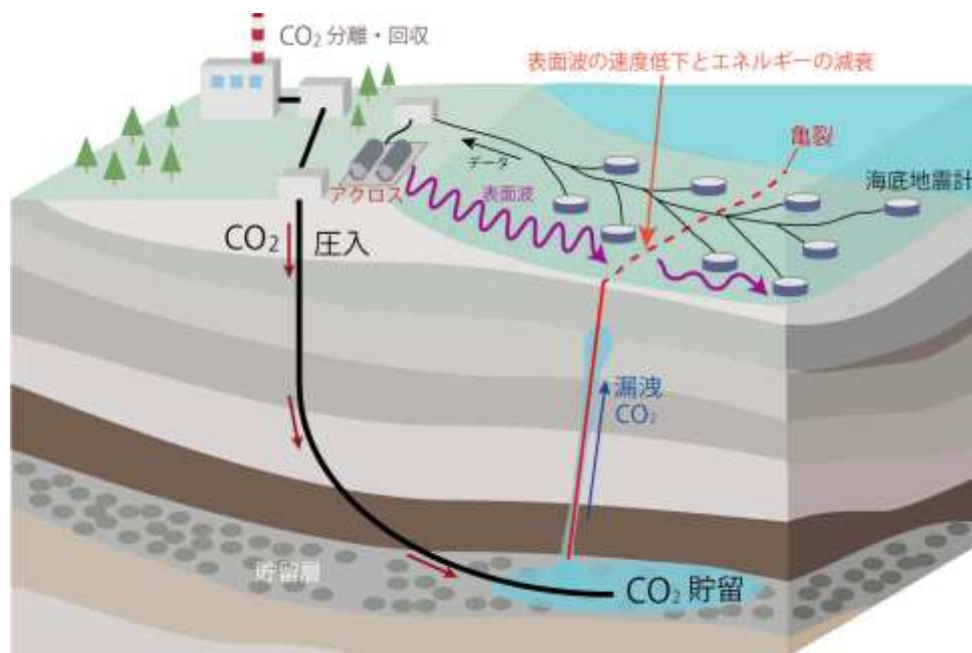


Fig. I-2-(5)-12 貯留した CO₂ をアクロスと地震計を利用して連続的にモニタリングし、漏洩した CO₂ を検出

項目7: 効率的に CO₂ を圧入できる貯留層条件を調べる手法の開発

自然の岩石の中にある微細な間隙の構造 (Fig. I-2-(5)-13 (a)) を、高解像度 CT 装置を用いて抽出し、その間隙内を流れる CO₂ と水の挙動を格子ボルツマン法 (LBM) というシミュレーション手法を用いることで正確に計算した。Graphics Processing Unit (GPU) を用いた並列計算を行うことによって、世界最大サイズの岩石間隙モデルに対して LBM シミュレーションを行うことが可能となった。本研究では、このシミュレーション手法を用いて、様々な貯留層の条件で岩石間隙内の CO₂ の挙動を計算し、CO₂ がどれくらい岩石間隙の中に貯留できるか (貯留層条件に依存した CO₂ の飽和度) を調べた。Fig. I-2-(5)-13 の (b) および (c) に、貯留層の条件 (CO₂ を圧入するレート) の違いが、岩石間隙内部を流れる CO₂ の挙動に与える影響を調べた例を示す。以上の結果から、CO₂ を圧入するレートが小さい場合のほうが、最終的な CO₂ の飽和度は大きくなるのが分かる。本研究では、50 以上の異なった貯留層条件で CO₂ の挙動を計算し、CO₂ (非濡れ性流体) の飽和度がキャピラリー数 (Ca) と、CO₂ と水の粘性比 (M) の2つのパラメータで決定できることが明らかにした (Fig. I-2-(5)-13 (d) および (e))。貯留層の岩石に対して、このアプローチを適用すれば、貯留層条件に依存した CO₂ の貯留量や、CO₂ の流れやすさを、CO₂ の圧入前に定量的に推定することが可能となる。

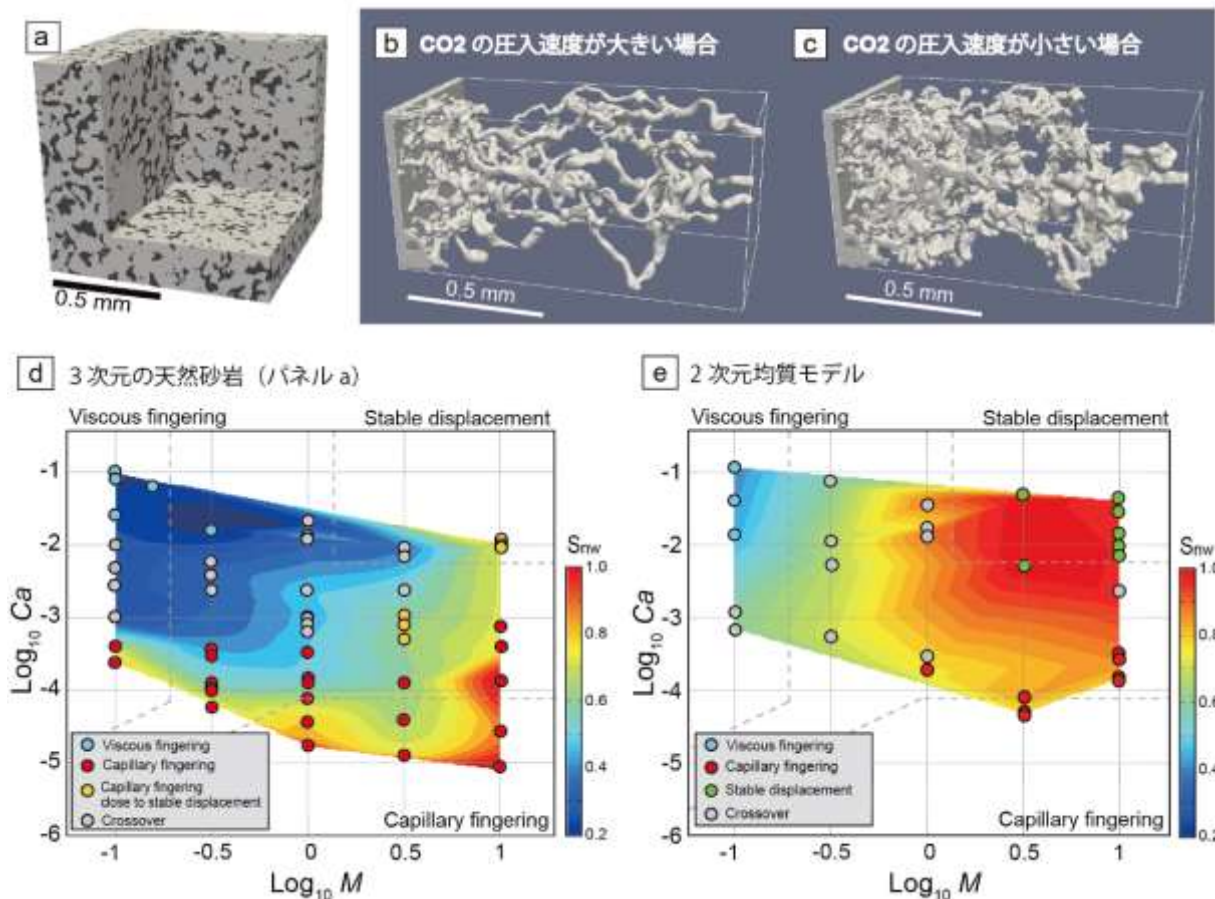


Fig. I-2-(5)-13 (a)天然砂岩内部の間隙構造. 黒い部分が間隙部分、灰色の部分が岩石の構成粒子. (b) CO_2 の圧入速度が大きい場合のデジタル岩石間隙モデル(パネル a)の中を流れる CO_2 の挙動. (c) CO_2 の圧入速度が小さい場合の CO_2 の挙動. (d) キャピラリー数(Ca)と、 CO_2 (非濡れ性流体)と水の粘性比(M)のダイアグラム上で示された天然砂岩内の CO_2 (非濡れ性流体)の飽和度. (e) Ca と M のダイアグラム上で示された2次元均質モデル内の CO_2 (非濡れ性流体)の飽和度.

項目8: CO_2 の圧入による石油の増進回収(EOR)で必要となる3相の相対浸透率を計算で推定する手法の開発

CO_2 圧入による石油の増進回収率技術(CO_2 -EOR; Enhanced Oil Recovery)は CCS と EOR 技術を併用することによって、石油回収率を向上するだけではなく CO_2 排出量削減にも貢献できると考えられている。インドネシア・グンディでも将来的に、CCS と EOR を組み合わせることも議論されている。しかし、油-水- CO_2 三相流システムは非常に複雑である。また薄膜流動現象をモデリングすることが、回収率を評価する上で重要とされている。これは水濡れ性媒体中に取り残された油滴が、ある界面張力条件下で水と CO_2 の間で薄膜化し、再び連続性を持つことで流動性を回復する現象で、その石油増進効果は既に確認されている。本研究では、格子ボルツマン法のシミュレータを三相流モデルへ拡張し、岩石間隙内の油-水- CO_2 三相システムの挙動を正確に評価できるシミュレーション手法を開発した。その手法を用いて、薄膜流動現象を表現できる界面モデルを作成し、 CO_2 -EOR における原油の生産排出過程のシミュレーションを行った(Fig. I-2-(5)-14)。この計算結果から、 CO_2 の圧入有効性及び残留石油クラスターの形状、表面積などの評価指標を定量化し、回収率との関係を調

【終了報告書】【170331】

べた。さらに、3相の相対浸透率を精度良く推定できることも検証できた。実験による3相の相対浸透率の測定は難しく、数値計算で推定できることの意義は大きいと考えられる。

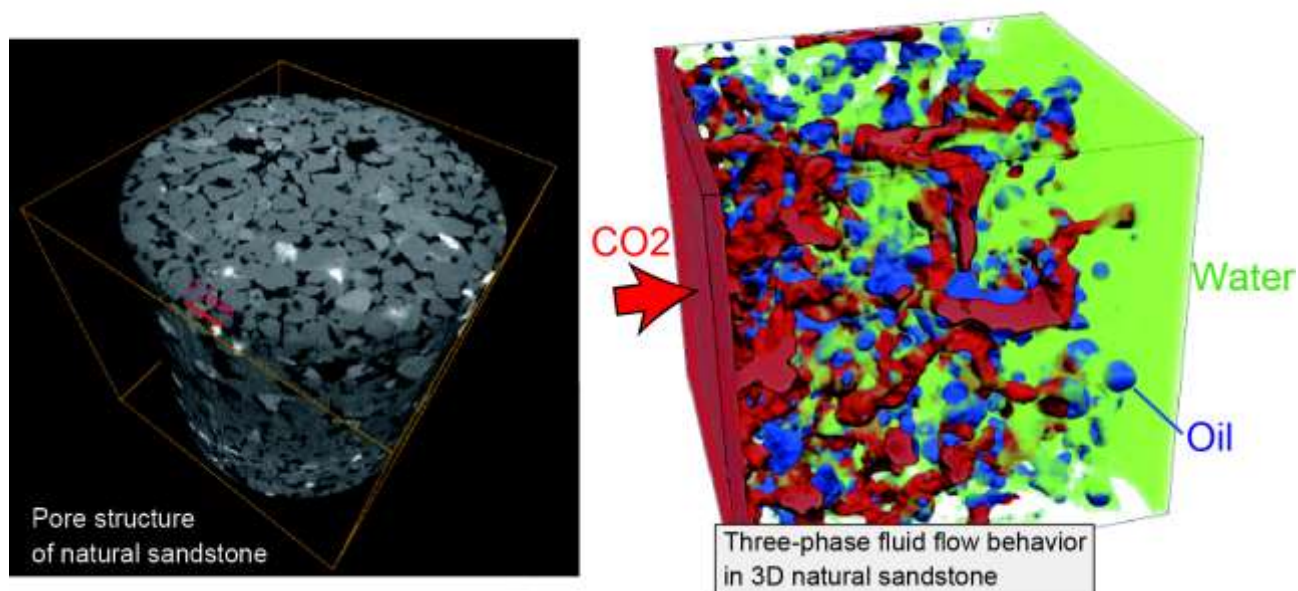


Fig. I-2-(5)-14 デジタル岩石(左)と、2層流体シミュレーションの結果(右).

項目9：微動を用いた連続モニタリング手法の開発

CO₂ 地中貯留では、モニタリングで貯留した CO₂ の挙動を把握する必要がある。そのモニタリングでは、「繰り返し地震探査」が一般的に用いられている。この方法では、地震探査を繰り返して実施し、CO₂ 圧入前と圧入後の結果を比較することにより、貯留層内の CO₂ の分布を知るものである。この繰り返し地震探査は有効であるが、億円単位のコストが必要となる。それが故に不連続的に(数年間隔に)繰り返し地震探査を実施するのが現実的であり、突然の CO₂ の漏洩や誘発地震に対応できない可能性がある。本研究では、微動ノイズを使って、貯留した CO₂ を連続的にモニタリングする手法の開発を行った。ベルゲン大学の協力のもと、ノルウェーのスピッツベルゲン島で取得された微動データを用いて解析を行った。この島では将来の CO₂ 地中貯留に向けて流体の圧入試験が実施され、その時に取得された微動ノイズを使った。この微動ノイズに対して、地震波干渉法という解析を適用した。その結果、微動ノイズだけを使って、人工震源を用いた高価な地震探査データと同等のデータを構築できることが分かった (Fig. I-2-(5)-15)。一方で、この手法の欠点も明らかとなった。それは微動ノイズに時間変化があると、その変化がモニタリングの結果に影響を与えることである。つまり、微動ノイズを用いたモニタリングでは、ノイズ源が安定的に存在している必要がある。そのため、別の研究項目で記述した連続モニタリング震源装置が、連続モニタリングには有効であることも示された。

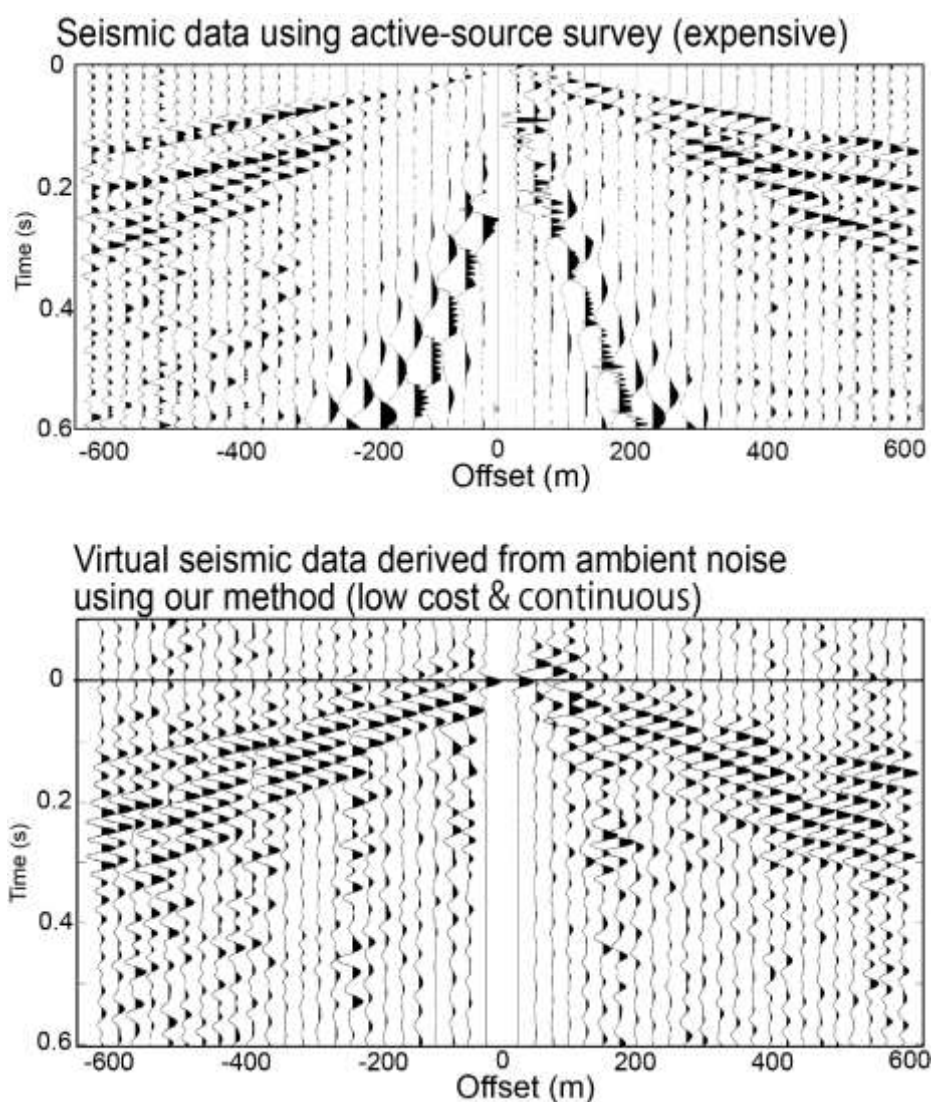


Fig. I-2-(5)-15(上) 高価な人工震源を用いて得られた地震探査データ(Shot ギャザー)と、(下)微動ノイズを用いて Virtual に構築した地震探査データ. 同様のシグナルが得られていることが分かる.

項目10:不均質な貯留層の地質モデルを構築する手法の開発

CO₂ 地中貯留において、貯留層の不均質性は、圧入した CO₂ の挙動に大きな影響を与える。特に、日本やインドネシアなどのプレート沈み込み域では地質の不均質性が強いとされる。本研究では、CO₂ 貯留サイトの不均質構造を推定するため、表面波と呼ばれる地震波を利用した新たな手法を開発した。我々が開発した手法を用いれば、表面波の伝播速度と減衰特性から、地質境界や割れ目といった不均質構造を特定することが可能となる。我々の手法を、北海道の苫小牧 CO₂ 貯留サイトで取得されたデータ(Fig. I-2-(5)-16)に適用した結果、S 波速度の分布を3次元的に推定することに成功した(Fig. I-2-(5)-17)。さらに減衰特性を調べることで、これまで知られていなかった北西-南東方向の地質境界を検出することができた。この研究成果は、表面波を利用して CO₂ 貯留サイトの 3 次元不均質構造を推定した初めての例である。本手法で推定された貯留層スケールの不均質構造は、CO₂ の漏えい経路の評価、CO₂ 挙動の評価に必要な浸透率の不均質性の評価、CO₂ 圧入による誘発地震を防ぐための岩層強度評価など、安全な CO₂ 地中貯留のために重要な情報となる。この研究成果は、日本に代表される不均質性の高い地層における安全な CO₂ 地中貯留の実現に貢献すると考えられる。

【終了報告書】【170331】

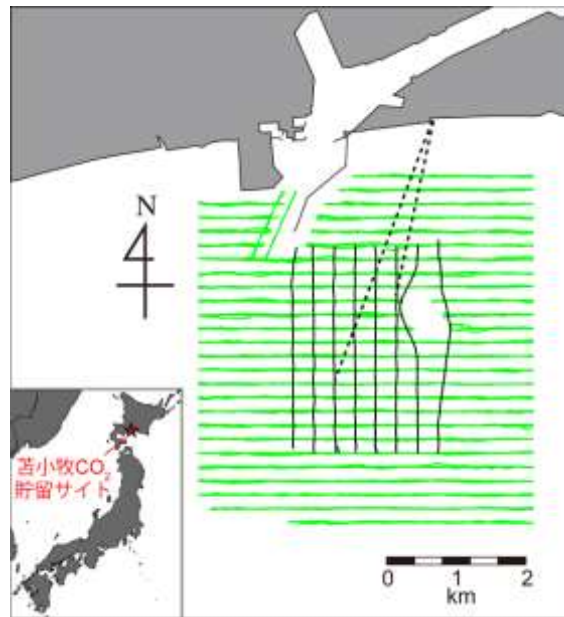


Fig. I-2-(5)-16 北海道苫小牧 CCS プロジェクトで取得された地震探査の測線。震源 (緑)、受振器(黒実線) および CO2 圧入井(黒破線)。

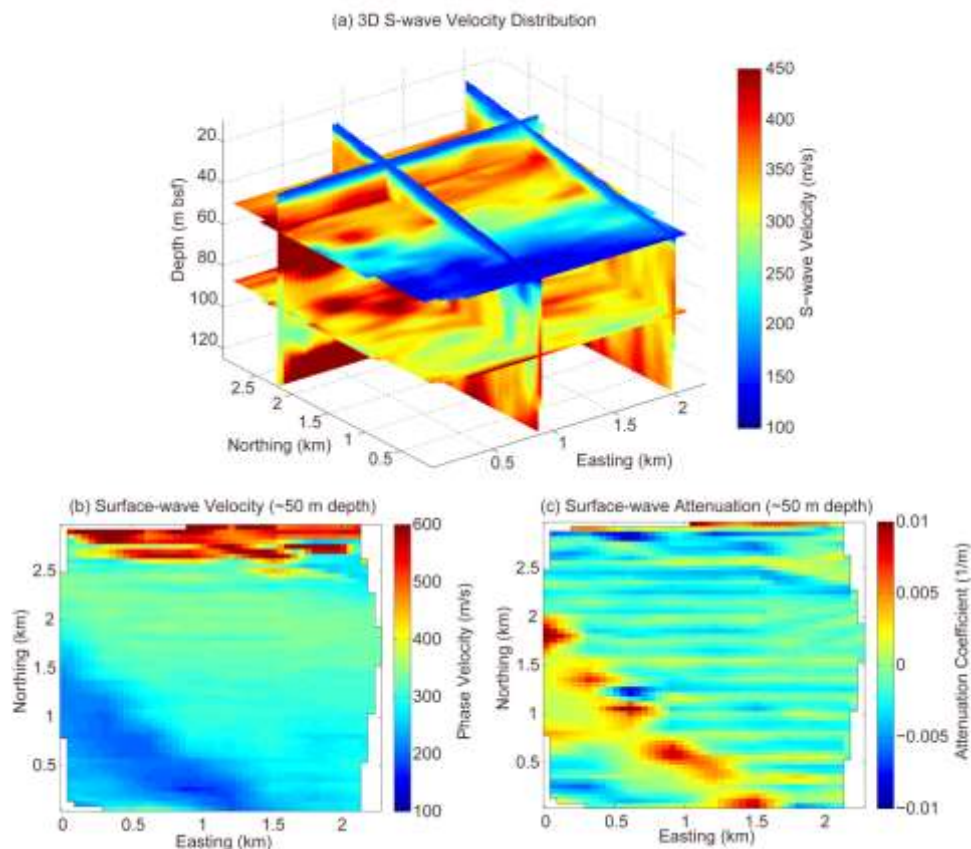


Fig. I-2-(5)-17 我々の手法を用いて推定した苫小牧 CO₂ 貯留サイトにおける 3 次元 S 波速度構造。海底下約 50 m における(b)表面波速度と(c)減衰係数の水平断面図。北西-南東方向の境界は地質境界であると考えられる。

【終了報告書】【170331】

II. 国際共同研究実施上の課題とそれを克服するための工夫、教訓など(公開)

(1) プロジェクト全体

プロジェクト全体の現状と課題、相手国側研究機関の状況と問題点、プロジェクト関連分野の現状と課題

本プロジェクト開始時期には、決定していなかった地上設備構築の方針が ADB の参画により可能となったが、インドネシア大統領選挙及びこれらに影響を受けて諸手続きが遅れたため、CO2 圧入時期は最終的にプロジェクト終了以降となった。しかしながら、地上設備構築が可能となったこと自体、インドネシアの関係組織、特に、バンドン工科大学の大きな努力の成果といえる。計画したベースライン調査は予定通り完了したことにより、基準書の初版の作成が可能となった。

研究プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・インパクト・持続性を高めるために実際に行った工夫

本プロジェクトではプロジェクト開始から継続的に Gundih CCS シンポジウムと銘うった、成果のアウトリーチ活動を年二回、日本とインドネシアで相互に実施した。平成 28 年度は 8 月にバリ島にて第 12 回シンポジウムを第一回東南アジア地球物理学カンファレンスと共同企画で実施した。平成 29 年 1 月に第 13 回シンポジウムを東京(早稲田大学)で実施する。また、JST の支援による「CCS 国際シンポジウム」を平成 28 年 2 月に実施した。さらに平成 28 年度には JST フェアに出展し、多くの参観者を得た。

プロジェクトの自立発展性向上のために今後相手国(研究機関・研究者)が取り組む必要のある事項

プロジェクトマネジメントについてはこれまでの共同研究を通して、既に ITB に技術移転がなされ、ノウハウをもっている。また、電磁探査や坑井内微小地震計測に関しては、バンドン工科大学のみならず Pertamina、地熱発電がこれまでも供与機器を使った計測をバンドン工科大学の主導で実施するなど、自立発展・向上が行われ、技術移転は予定を越えた成果を得ている。

諸手続の遅延や実施に関する交渉の難航など、進捗の遅れた事例があれば、その内容、解決プロセス、結果

これまで述べてきたとおり、地上設備構築の確定、予算執行までの国内諸手続きが大きく遅れた。

大統領選やそれに関連した行政組織の改組や異動が原因と想定されるが、プロジェクトにとっては不可抗力に近い原因とも考えられる。しかしながら、バンドン工科大学を中心としたインドネシア国内関係者の弛まぬ努力で進捗遅れを最小限に留めたともいえる。

(2) 研究題目1 (主担当:京都大学)

本プロジェクトを始める以前より、京都大学と ITB(バンドン工科大学)の間には大学間交流協定など長い交流実績があり、また多くの留学生が来日している。本プログラムにおいてもこれらの交流実績の上に進められてプロジェクトであり、特に ITB サイドのプロジェクトマネージャは京都大学に 1 年間の滞在経験者であり、互いの気質を十分理解しあった点などは、細かな意見調整の場面で大いに役立った。プロジェクトを通じて、インドネシア国の若手研究者の招聘(配属は共同研究機関)を行い技術トレーニングを行うことで、日本チームが主導して行う現地での作業に大変な戦力になった。日本・インドネシア間での特に若手技術者の相互交流はプロジェクト推進には必須と考える。

(3) 研究題目2 (主担当:早稲田大学)

本プロジェクトを通じて、供与機器(TDEM 法装置)によるベースライン調査により、機器操作を含む探査手法の技術移転はほぼ完了したと考えている。技術移転がスムーズに進んだ原因として、バンドン工科大学の電磁探査チームの指導者(教員)の深い経験と知識、さらに学生他を統率する力量が挙げられる。教員の一名は日本の大学を卒業し学位を得ている。また一方の一名は本プロジェクトの短期研修プログラムで日本での研修を経験している。これらの付随的要素も技術移転を促進できた要因と考える。

(4) 研究題目3 (主担当:深田地質研究所)

探査データの総合解釈技術として、岩石物理学(ロックフィジックス)を利用した方法が現在注目を集めている。そこで、本研究でも CO₂ の貯留層や遮蔽層の特性評価やモニタリングの際に実施する物理探査データの解釈手法としてその適用性を検討した。カウンターパートであるバンドン工科大学でも、その1つのアプローチであるデジタルロックという手法を用いて、露頭やボーリングで得られた貯留層の岩石サンプルから間隙率や透水性係数等 CO₂ のシミュレーションに必要な貯留層特性の推定を試みるなどの研究を行った。研究実施の際には、アプリケーションソフト等の基盤となるツールの共通化が課題となったが、CCS シンポジウムの際にこの研究に関する技術交流会などを行うことによってお互いの成果や方向性の確認を行いながら進めた。

微小地震観測の研究については、導入した観測システムの地熱サイトでの試験観測を通じて、インドネシア・日本双方の研究者が共同して機器の設置からデータの回収・解析を行うことにより、技術移転も順調に進んだ。実証サイトを管理する機関(民間会社)との関係で、解析結果の検討に必要な関連データの入手が難しいという問題はあったが、カウンターパートのバンドン工科大学が別途その機関と進めている共同研究の中に観測成果を位置づけ、協議・報告を重ねるなどして、制約はあったが、関連データも入手することができた。カウンターパートがその機関と進める共同研究のおかげで、同じサイトで使用されている広帯域地震計の観測記録との比較も行うことができ、本プロジェクトで導入した地震計の性能評価に大いに役立った。今回は幸運であったが、今後はカウンターパートが他の機関と進めている研究等についても事前に把握しておき、プロジェクトを計画していくことが重要であるとの教訓を得た。

InSAR 解析法の研究では、カウンターパートへの技術移転の方法として、日本側研究者(石塚師也)による集中セミナー開くという方法を用いた。セミナーは、バンドン工科大学でこの分野に関心を持つ研究者 5、6 名を主な対象に、約 1 週間にわたり、InSAR 解析の基礎から解析実技までを行った。大学は研究者の出入りが多いため、特定の研究者 1 名に対する技術移転では技術の継続性に懸念があるが、このようなセミナーを開催することにより複数の研究者に技術移転ができるので大変有効である。セミナーの風景写真を以下に示す。



写真 セミナーの開催風景(立っているのが講師の石塚師也氏)

【終了報告書】【170331】

(5) 研究題目4（主担当:九州大学）

インドネシア側が取得した物理探査データを、日本に持ち込むことが出来なかったため、日本側研究者が物理探査データの解析を主導することが難しかった。このような状況の中で、平成 27 年度にはバンドン工科大学の博士学生 (Hartya Danio) が、九州大学に3ヶ月滞在したことは、インドネシア側とデータ解析を進める上で大変有益であった。

III. 社会実装(研究成果の社会還元) (公開)

(1)成果展開事例

本プログラムでは、自然地震の観測を通して CO2 貯留層の特性の変化を評価する目的と、圧入による地震発生モニタリングを行う為に微小地震観測システムを導入した。ITB は、わが国より移転されたこの技術を地熱開発地域に適用し、地熱貯留層の特性評価に利用し、多くの成果を挙げている。これは本プロジェクトの成果の、インドネシア国における社会還元と言える。

(2)社会実装に向けた取り組み

本プロジェクトはわが国で実証されている CO2 の地下への貯留技術である CCS に対して、インドネシアの Pertamina 石油が所有するガス田と、掘削坑井を利用した社会実装に向けたプロジェクトであった。その意味において、プロジェクト自体が社会実装に向けたパイロットプロジェクトであると考えられる。また、現在インドネシア国においては、CCS, CCUS に対してエネルギー・鉱物資源省が COE (Center of Excellence) の立ち上げを計画している。このプロジェクトにたいして、SATREPS チームは全面的な協力を行い、インドネシア側の代表研究者はこのプロジェクトの代表に指名された。また日本側の代表研究者も海外の有識者としてプロジェクトへの参加が決まった。これらは、今まで行ってきたシンポジウムなどを通じて研究成果の公表が認められ、より明確な形での社会実装に向けた取り組みに対する寄与と言える。

(3)インドネシアでの社会実装に向けた考慮事項

今回のプロジェクトでは、Gundih (具体的には圧入坑井候補 Jupon-1 周辺地域) というインドネシアでは一般的にみられる山地の石油ガス開発フィールドでの研究であり、そのベースライン調査 (特に地震探査、電磁探査) の際、現地の地質・地表・アクセスの状況を十分反映した資機材調達、測定仕様を決定した。一方で、研究的要素も多くあり、オーバスペックで対応した探査もある。以下に特にサイト選定/貯留層特性評価、供与機器、ベースライン調査に焦点を当てて、インドネシアの特徴を勘案した諸点を列記する。

サイト選定/貯留層特性評価

- ・コアサンプルの特性測定などは、現地パートナー (バンドン工科大学) で所有する測定機器の仕様に合わせたコア採取や保管手法を当初から採用すること。
- ・圧入 CO2 の挙動の動的シミュレーションはベースライン調査以降も繰り返し実施する可能性もあり、SATREPS 終了後も同一条件で実施すること想定して、現地パートナーが所有しているシミュレータを含む各種ソフトウェアを使用すること。あるいは、供与機器に含めて習熟するまで技術移転を行うこと。
- ・上記の環境が整った場合でも、ライセンスの継続が可能になるような配慮を行うこと。

供与機器

- ・現地パートナーが継続的に供与機器を使用できるような十分な技術移転(実施済み)。
- ・供与機器の不具合の際にメーカーに戻さず補修できる軽微な不具合の場合、機器を現地で保守・補修できる体制を整えること。
- ・機器の保管環境を良好にすることを当初より現地パートナーに伝えて実行してもらうこと。

ベースライン調査(共通事項)

- ・燃料補給、資材調達、機器レンタルなどのロジスティックスの重要性を認識してもらい、調査中断などが発生しないような体制を事前に構築するノウハウを伝授すること。

地震探査(ベースライン調査)

- ・研究といえども、通常の探鉱作業に近いレベルの調査となる。このため今後の作業には地質・物理探査コンサルタントから協力を得て実施することが望ましい。
- ・特に震源に関しては、大エネルギー震源の使用が必要となり、今回のベースライン調査で協力を得た、国内物理探査コンサルタントとの継続的な関係を維持すること。

電磁探査(ベースライン調査)

- ・非常に大きな電流を地中に発信するため、使用方法に習熟すると共に、HSE に配慮した調査を常に心がける必要がある(実際の調査で技術移転とともにノウハウを伝えた)。
- ・これまで実施した例がほとんどない TDEM 法は特殊な資機材(電極、掘削機器、導電性向上薬剤など)を必要とする場合もあり、資機材調達がスムーズに入手できるような体制を今後も維持すること。

IV. 日本のプレゼンスの向上(公開)

プロジェクト開始以来、年間 2 回の CCS シンポジウムを開催する際には、エネルギー・鉱山資源省の総局長や、経済調整担当省の次官など、インドネシア要人の招聘を実施して講演などを依頼してきた。また、平成 28 年 2 月には JST サポートによる CCS 国際シンポジウムを開催することで、CCS 技術開発での日本のプレゼンス向上に大いに貢献したと考える。さらにエネルギー・鉱山省が CCS、CCUS の COE 構築を開始するにあたって、Gundih をインドネシアで最初の CCS プロジェクトと位置付け、その成果を取り込んだ形で COE の構築を進めている。これらは日本のプレゼンスの向上に大きく寄与している。

V. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】(公開)

別紙参照

VI. 投入実績【研究開始～現在の全期間】(非公開)

VII. その他(非公開)

VI. 成果発表等

(1)論文発表等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①原著論文(相手国側研究チームとの共著)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ～おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2014	Tsuji, T., Kitamura, K., Matsuoka, T., Yamada, Y., Kadir, W.G.A, Rachmat Sule, M., Priyonom, A., Ariadji, T., Sapiie, B., Hato, M., Takahashi, T., Onishi, K., Widarto, D.S., Sebayang, R.I., Prasetyo, A., Pertamina, and Gundih CCS Project Team (2014), Reservoir characterization for site selection in the Gundih CCS Project, Indonesia, Energy Procedia, 63, 6335-6343.	10.1016/j.egypro.2014.11.580	国際誌	出版済み	
2014	Kitamura, K., Yamada, Y., Onishi, K., Tsuji, T., Chiyonobu, S., Sapiie, B., bahar, A., Danio, H., Muhammad, A., Erdi, A., Sari, V.M., Matsuoka, T,m Kadir, W.G.A., and Gundih CCS project team. (2014), Potential evaluation of CO2 reservoir using the measured petrophysical parameter of rock samples in the Gundih CCS Project, Indonesia, Enregy Procedia, 63, 4965-4970	10.1016/j.egypro.2014.11.525	国際誌	出版済み	
2015	Jiang, F., and Tsuji, T., Numerical investigations on the effect of initial state CO2 topology on capillary trapping efficiency, International Journal of Greenhouse Gas Control.		国際誌	accepted	
2015	Tsuji, T., Jiang, F., Christensen, K., Characterization of immiscible fluid displacement processes with various capillary numbers and viscosity ratios in 3D natural sandstone, Advances in Water Resources		国際誌	accepted	
2015	Yamabe, H., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2016), Influence of fluid displacement patterns on seismic velocity during supercritical CO ₂ injection: Simulation study for evaluation of the relationship between seismic velocity and CO ₂ saturation, <i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i> , 46, 197-204	10.1016/j.ijggc.2016.01.011	国際誌	発表済	
2015	Jia, J., Tsuji, T., Matsuoka, T. (2016), Gas hydrate saturation and distribution in the Kumano Forearc Basin of the Nankai Trough, <i>Exploration Geophysics</i> ,	10.1071/E15127	国際誌	発表済	

2015	Ikeda, T., Tsuji, T., Watanabe, T., and Yamaoka, K.(2016), Development of surface-wave monitoring system for leaked CO2 using a continuous and controlled seismic source, International Journal of Greenhouse Gas Control, 45, 94-105	10.1016/j.jggc.2015.11.030	国際誌	発表済	
2015	Tsuji, T., Ashi, J., Strasser, M., and Kimura, G. (2015), Identification of the static backstop and its influence on the evolution of the accretionary prism in the Nankai Trough, Earth and Planetary Science Letters, 431, 15-25	10.1016/j.epsl.2015.09.011	国際誌	発表済	
2015	Ishitsuka, K., Tsuji, T., Matsuoka, T., Nishijima J., and Fujimitsu, Y. (2015), Heterogeneous Surface Displacement Pattern at the Hatchobaru Geothermal Field Inferred from SAR Interferometry Time-Series, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 44, 95–103	10.1016/j.jag.2015.07.006	国際誌	発表済	
2015	辻 健, 日本周辺でのCO2地中貯留に向けたモニタリングとモデリング技術, ふえらむ, 20, 7, 6-11		国内誌	発表済	
2015	Lin, W., Byrne, T.B., Kinoshita, M., McNeill, L.C., Chang, C., Lewis, J.C., Yamamoto, Y., Saffer, D.M., Moore, J.C., Wu, H-Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Conin, M., Saito, S., Ito, T., Tobin, H.J., Kimura, G., Kanagawa, K., Ashi, J., Underwood, M.B., Kanamatsu, T.(2015), Distribution of stress state in the Nankai subduction zone, southwest Japan and a comparison with Japan Trench, Tectonophysics	10.1016/j.tecto.2015.05.008	国際誌	in press	
2015	Ikeda, T., and Tsuji, T. (2015), Advanced surface-wave analysis for 3D ocean bottom cable data to detect localized heterogeneity in shallow geological formation of a CO2 storage site, International Journal of Greenhouse Gas Control, 39, 107-118	10.1016/j.jggc.2015.04.020	国際誌	発表済	

論文数	12	件
うち国内誌	1	件
うち国際誌	11	件
公開すべきでない論文	0	件

②原著論文(上記①以外)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ—おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2012	Tsuji, T., Dvorkin, J., Mavko, G., Nakata, N., Matsuoka, T., Nakanishi, A., Kodaira, S., and Nishizawa, O. (2011), Vp/Vs ratio and shear-wave splitting in the Nankai Trough seismogenic zone: Insights into effective stress, pore pressure and sediment consolidation, Geophysics, 76, No.3, WA71-WA82		国際誌	出版済み	
2012	Nakata, N., Snieder, R., Tsuji, T., Lerner, K., and Matsuoka, T. (2011), Shear-wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence, Geophysics, 76, No. 6, SA97-SA106		国際誌	出版済み	
2012	Yamada, Y., McNeill, L., Moore, J.C., Nakamura, Y., (2011), Structural styles across the Nankai accretionary prism revealed from LWD borehole images and their correlation with seismic profile and core data: Results from NanTroSEIZE Stage 1 expeditions, Geochem. Geophys. Geosyst., 12, Q0AD15,	10.1029/2010GC003365.	国際誌	出版済み	
2012	Kamei, R., Pratt, R.G., and Tsuji, T. (2012), Waveform Tomography Imaging of a Megasplay Fault System in the Seismogenic Nankai Subduction Zone, Earth and Planetary Science Letters, 317-318, 343-353.		国際誌	出版済み	
2012	Matsuoka, T., and Xue, Z. (2012), Geophysical Monitoring for Carbon Dioxide Capture and Storage – Case of Nagaoka CO2 Injection Site in Japan, The Contribution of Geosciences to Human Security, Logos Verlag Berlin, pp87-102, ISBN 978-3-8325-3113-3.		国際誌	出版済み	
2012	Ledyastuti, M., Liang, Y., Miranda, C. R., and Matsuoka, T. (2012), Comparison of thermodynamic stabilities and mechanical properties of CO2, SiO2, and GeO2 polymorphs by first-principles calculations, Journal of Chemical Physics, 137, 034703.		国際誌	出版済み	
2012	Ledyastuti, M., Liang, Y., Kunieda, M., and Matsuoka, T. (2012), Asymmetric orientation of toluene molecules at oil-silica interface, Journal of Chemical Physics, 137, 064703.		国際誌	出版済み	

2012	Ikeda、T.、Matsuoka、T.、Tsuji、T.、and Hayashi、K. (2012)、Multimode inversion with amplitude response of surface waves in the spatial autocorrelation method、Geophys. J. Int.、190 (1)、541-552.		国際誌	出版済み	
2012	Khakim、M. Y. N.、Tsuji、T.、and Matsuoka、T. (2012)、Geomechanical modeling for InSAR-derived surface deformation at steam-injection oil sand fields、J. Petrol. Sci. Eng.、96-97、152-161.		国際誌	出版済み	
2012	Minato、S.、Tsuji、T.、Matsuoka、T.、and Obana、K. (2012)、Crosscorrelation of earthquake data using stationary phase evaluation: Insight into reflection structures of oceanic crust surface in the Nankai Trough、International Journal of Geophysics、8 pages、Article ID 101545.		国際誌	出版済み	
2012	池田達紀、松岡俊文、辻 健、林宏一 (2011)、SPAC法における異なる相関距離を考慮したマルチモード解析、物理探査、64、No.2、127-138.		国内誌	出版済み	
2012	柳 丞烈、上田 晃、水戸 義忠、松岡俊文 (2012)、高温下CO2地中貯留を模擬したカラム試験における炭酸塩鉱物の付着速度評価、材料、61、No.3、253-258.		国内誌	出版済み	
2012	山邊浩立、松岡俊文 (2012)、格子ボルツマン法による地震波の水油2相流体に及ぼす影響の兼用、地学雑誌、121、No.1、53-67		国内誌	出版済み	
2012	國枝真、上田晃、松岡俊文、岡津弘明、福中康博 (2012)、油-鉱物-水システムにおける濡れ性に関する研究—ミクロスケールでの接触角測定—、地学雑誌、31-38		国内誌	出版済み	
2013	Khakim, M. Y. N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2013), Detection of Localized Surface Heave at Oil Sands Field by Differential SAR Interferometry, <i>IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing</i> , 6 (6), 2344-2354.		国際誌	出版済み	
2013	Kim, J., Nam, M. J., and Matsuoka, T. (2013), Estimation of CO2 saturation during CO2 drainage and imbibition processes based on both seismic velocity and electrical resistivity measurements, <i>Geophysical Journal International</i> , 195 , 292-300.		国際誌	出版済み	

2013	Ikeda, T., and Matsuoka, T. (2013), Computation of Rayleigh waves on transversely isotropic media by the reduced delta matrix method, <i>Bull. Seism. Soc. Am.</i> , 103 (3), 2083-2093.		国際誌	出版済み	
2013	Ikeda, T., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2013), Window-controlled CMP crosscorrelation analysis for surface waves in laterally heterogeneous media, <i>Geophysics</i> , 78 (6), EN95-EN105.		国際誌	出版済み	
2013	Minato, S., Matsuoka, T., and Tsuji, T. (2013), Singular-value decomposition analysis of source illumination in seismic interferometry by multidimensional deconvolution, <i>Geophysics</i> , 78 , Q25-Q34.		国際誌	出版済み	
2013	Mikami, Y., Liang, Y., Matsuoka, T., and Boek, E. S. (2013) Molecular dynamics simulations of asphaltenes at the oil-water interface: From nanoaggregation to thin-film formation. <i>Energy & Fuels</i> , 27 , 1838-1845.		国際誌	出版済み	
2013	Yoo, S., Kuroda, Y., Mito, Y., Matsuoka, T., Nakagawa, M., Ozawa, A., Sugiyama, K., and Ueda, A. (2013), A geochemical clogging model with carbonate precipitation rates under hydrothermal conditions, <i>Applied geochemistry</i> , 30 , 67-74.		国際誌	出版済み	
2013	Ledyastuti, M., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2013), The first principles molecular dynamics study of quartz-water interface, <i>Int. J. Quantum Chem.</i> , 113 , 401-412.		国際誌	出版済み	
2013	Makimura, D., Kunieda, M., Liang, Y., Takahashi, S., Okabe, H., and Matsuoka, T. (2013), Application of molecular simulations to CO ₂ -EOR: Phase equilibria and interfacial phenomena. <i>SPE Journal</i> , 18 , 319-330.		国際誌	出版済み	
2013	Yamabe, H., Nakaoka, K., Xue, Z., Matsuoka, T., Kameyama, H., and Nishio, S. (2013), Simulation Study of CO ₂ Micro-bubble Generation Through Porous Media, <i>Energy Procedia</i> , 37 , 4635-4646.		国際誌	出版済み	

2013	Tsuji, S., Liang, Y., Kunieda, M., Takahashi, S., and Matsuoka, T. (2013), Molecular dynamics simulations of the CO ₂ -Water-Silica interfacial systems. <i>Energy Procedia</i> 37 , 5435-5442.		国際誌	出版済み	
2013	Yoo, S., Mito, Y., Ueda, A., and Matsuoka, T. (2013), Geochemical clogging in fracture and porous rock for CO ₂ mineral trapping. <i>Energy Procedia</i> 37 , 5612-5619.		国際誌	出版済み	
2013	K. Becker, A.T. Fisher, and T. Tsuji, New Packer Experiments and Borehole Logs in Upper Oceanic Crust: Evidence for Ridge-parallel Continuity in Crustal Hydrogeological Properties, <i>Geochemistry, Geophysics, Geosystems</i> , 14 , 2013.		国際誌	出版済み	
2013	R. Kamei, G. Pratt, and T. Tsuji, On acoustic waveform tomography of wide-angle OBS data - Strategies for preconditioning and inversion, <i>Geophysical Journal International</i> , 194 , 1250-1280, 2013.		国際誌	出版済み	
2013	M.Y.N. Khakim, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Detection of Localized Surface Uplift by Differential SAR Interferometry at the Hangingstone Oil Sand Field, Alberta, Canada, <i>IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing</i> , 99 , 1-11, 2013.		国際誌	出版済み	
2013	S. Chiyonobu, T. Nakajima, Y. Zhang, T. Tsuji, and Z. Xue, Effect of reservoir heterogeneity of Haizume Formation, Nagaoka Pilot Site, based on high-resolution sedimentological analysis, <i>Energy Procedia</i> , 37 , 3546-3553, 2013.		国際誌	出版済み	
2013	本田博巳 (2013), デルタ: 陸現成碎屑物の運搬御中継基地としての機能, <i>石油技術協会誌</i> , 78 (4), 307-308.		国内誌	出版済み	
2014	K. Kobayashi, Y. Liang, and T. Matsuoka, Molecular dynamics study of aqueous NaCl solution: Flash crystallization caused by solution phase change. <i>J. Solution Chemistry</i> 43 , 1799-1809 (2014).		国際誌	出版済み	
2014	K. Kobayashi, Y. Liang, T. Sakka, and T. Matsuoka, Molecular dynamics study of salt-solution interface: Solubility and surface charge of salt in water. <i>J. Chem. Phys.</i> 140 , 144705 (2014).		国際誌	出版済み	

2014	Jiang, F., and Tsuji, T. (2014), Changes in pore geometry and relative permeability caused by carbonate precipitation in porous media, Physical Review E 90, 053306.	10.1103/PhysRevE.90.053306.	国際誌	出版済み	
2014	Kitamura, K., Jiang, F., Valocchi, A.J., Chiyonobu, S., Tsuji, T., and Christensen, K.T. (2014), The study of heterogeneous two-phase flow around small-scale heterogeneity in porous sandstone by measured elastic wave velocities and lattice Boltzmann method simulation, Journal of Geophysical Research (Solid Earth), 119, No.10, 7564-7577.	10.1002/2014JB011281.	国際誌	出版済み	
2014	Jiang, F., and Tsuji, T. (2014), Interfacial Tension Effect on Cluster Size Distributions for Residual Trapping of CO2 in Sandstones, Energy Procedia, 63, 5483-5489.		国際誌	出版済み	
2014	Ikeda, I., Matsuoka, T., Tsuji, T., and Nakayama, T. (2014), Characteristics of the horizontal component of Rayleigh waves in multimode analysis of surface waves, Geophysics, 80, No.1, EN1-EN11.		国際誌	出版済み	
2014	Kimura, S., Honda, K., Kitamura, K., Taniguchi, I., Shitashima, K., Tsuji, T., and Fujikawa, S. (2014), Preliminary feasibility study for on-site hydrogen station with distributed CO2 capture and storage system, Energy Procedia, 63, 4575-4584.	10.1016/j.egypro.2014.11.490.	国際誌	出版済み	
2014	Tsuji, T., Ashi, J., and Ikeda, Y. (2014), Strike-slip motion of a mega-splay fault system in the Nankai oblique subduction zone, Earth, Planets and Space, 66, 120.	10.1186/1880-5981-66-120.	国際誌	出版済み	
2014	Khakim, M.Y.N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2014), Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 32, 199-207.	10.1016/j.ag.2014.04.012.	国際誌	出版済み	

2014	Tsuji, T., Kamei, R., and Pratt, G. (2014), Pore pressure distribution of a mega-splay fault system in the Nankai Trough subduction zone: Insight into up-dip extent of the seismogenic zone, Earth and Planetary Science Letters, 396, 165-178.	10.1016/j.epsl.2014.04.011.	国際誌	出版済み	
2014	Miyakawa, A., Saito, S., Yamada, Y., Tomaru, H., Kinoshita, M., and Tsuji, T. (2014), Gas hydrate saturation at Site C0002 of IODP Expeditions 314 and 315 in the Kumano Basin, Nankai Trough, Island Arc, 23,142-156.	10.1111/ia.r.12064.	国際誌	出版済み	
2014	Kamei, R., Pratt, G., and Tsuji, T. (2014), Misfit functionals in Laplace-Fourier domain waveform inversion, with application to wide-angle ocean bottom seismograph data, Geophysical Prospecting, 62, No.5, 1054-1074.	10.1111/1365-2478.12127.	国際誌	出版済み	
2014	Ishitsuka, K., Fukushima, Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Matsuoka, T., and Gao, P.H. (2014), Natural surface rebound of the Bangkok plain and aquifer characterization by persistent scatterer interferometry, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15, No.4, 965-974.	10.1002/2013GC005154.	国際誌	出版済み	
2014	Jiang, F., Tsuji, T., and Hu, C. (2014), Elucidating the role of interfacial tension for hydrological properties of two-phase flow in natural sandstone by an improved lattice Boltzmann method, Transport in Porous Media, 104, No.1, 205-229.	10.1007/s11242-014-0329-0.	国際誌	出版済み	
2014	Yamabe, Y., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2015), Lattice Boltzmann simulations of supercritical CO2-water drainage displacement in porous media: CO2 saturation and displacement mechanism, Environmental Science & Technology, 49, No. 1, 537-543.	10.1021/es504510y.	国際誌	出版済み	
2014	Jiang, F. and Tsuji, T. (2015), Impact of interfacial tension on residual CO2 clusters in porous sandstone. Water Resour. Res.	10.1002/2014WR016070	国際誌	accept	
2015	高橋亨・相澤隆生・村田和則・西尾英貴・松岡俊文(2015): 統合物理探査データを用いた河川堤防の浸透性プロファイリング、物理探査、68, 167-175		国内誌	発表済	

2015	Takahashi, T. and Tanaka S. (2015): Compressive strength and seismic velocity relationship for sedimentary rocks, in Chapter 1, Rock Mechanics and Engineering, ISRM Book Series		国際誌	in press	
2015	Ishitsuka, K., Tsuji, T., Matsuoka, T., Nishijima, J., Fujimitsu, Y. (2016): Heterogeneous surface displacement pattern at the Hatchobaru geothermal field inferred from SAR interferometry time-series, Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 44, 95-103		国際誌	発表済	
2015	石塚師也、松岡俊文、高橋亨、相澤隆生 (2016): PS干渉SAR解析を用いた関東平野北部の地盤沈下域の推定、材料、65(5)		国内誌	発表済	
2015	Jiang, F., and Tsuji, T., Numerical investigations on the effect of initial state CO ₂ topology on capillary trapping efficiency, International Journal of Greenhouse Gas Control.		国際誌	accepted	
2015	Tsuji, T., Jiang, F., Christensen, K., Characterization of immiscible fluid displacement processes with various capillary numbers and viscosity ratios in 3D natural sandstone, Advances in Water Resources		国際誌	accepted	
2015	Yamabe, H., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2016), Influence of fluid displacement patterns on seismic velocity during supercritical CO ₂ injection: Simulation study for evaluation of the relationship between seismic velocity and CO ₂ saturation, <i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i> , 46, 197-204	10.1016/j.ijggc.2016.01.011	国際誌	発表済	
2015	Jia, J., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2016), Gas hydrate saturation and distribution in the Kumano Forearc Basin of the Nankai Trough. <i>Exploration Geophysics</i> , 47.	10.1071/EG15127	国際誌	発表済	
2015	Ikeda, T., Tsuji, T., Watanabe, T., and Yamaoka, K.(2016), Development of surface-wave monitoring system for leaked CO ₂ using a continuous and controlled seismic source, <i>International Journal of Greenhouse Gas Control</i> , 45, 94-105	10.1016/j.ijggc.2015.11.030	国際誌	発表済	
2015	Tsuji, T., Ashi, J., Strasser, M., and Kimura, G. (2015), Identification of the static backstop and its influence on the evolution of the accretionary prism in the Nankai Trough, <i>Earth and Planetary Science Letters</i> , 431, 15-25	10.1016/j.epsl.2015.09.011	国際誌	発表済	

2015	Ishitsuka, K., Tsuji, T., Matsuoka, T., Nishijima J., and Fujimitsu, Y. (2015), Heterogeneous Surface Displacement Pattern at the Hatchobaru Geothermal Field Inferred from SAR Interferometry Time-Series, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 44, 95–103	10.1016/j.jag.2015.07.006	国際誌	発表済	
2015	辻 健, 日本周辺でのCO2地中貯留に向けたモニタリングとモデリング技術, ふえらむ, 20, 7, 6-11		国内誌	発表済	
2015	Lin, W., Byrne, T.B., Kinoshita, M., McNeill, L.C., Chang, C., Lewis, J.C., Yamamoto, Y., Saffer, D.M., Moore, J.C., Wu, H-Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Conin, M., Saito, S., Ito, T., Tobin, H.J., Kimura, G., Kanagawa, K., Ashi, J., Underwood, M.B., Kanamatsu, T. (2015), Distribution of stress state in the Nankai subduction zone, southwest Japan and a comparison with Japan Trench, Tectonophysics	10.1016/j.tecto.2015.05.008	国際誌	in press	
2015	Ikeda, T., and Tsuji, T. (2015), Advanced surface-wave analysis for 3D ocean bottom cable data to detect localized heterogeneity in shallow geological formation of a CO2 storage site, International Journal of Greenhouse Gas Control, 39, 107-118	10.1016/j.jggc.2015.04.020	国際誌	発表済	
2015	Hino, R., Tsuji, T., Bangs, N.L., Sanada, Y., Park, J-O. vonHuene, R., Moore, G., Araki, E., and Kinoshita, M. (2015), Qp structure of the accretionary wedge in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, revealed by long-offset walk-away VSP, Earth, Planets and Space, 67:7	10.1186/s40623-014-0175-x	国際誌	発表済	
2015	Katasho, Y., Liang, Y., Murata, S., Fukunaka, Y., Matsuoka, T. and Takahashi, S. (2015), Mechanisms for Enhanced Hydrophobicity by Atomic-Scale Roughness. Scientific Reports, 5, 13790		国際誌	発表済	
2015	Yamabe, H., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka T. (2015), Lattice Boltzmann Simulations of Supercritical CO2-Water Drainage Displacement in Porous Media: CO2 saturation and Displacement mechanism. Environ. Sci. & Tech. 49, 537-543		国際誌	発表済	
2015	Liang, Y., Miranda C. R. and Scandolo S. (2015), Atomistic pathways of the pressure-induced densification of quartz. Phys. Rev. B, 92, 134102.		国際誌	発表済	

2015	Dotare, T., Yamada, Y., Adam, J., Hori, T., and Sakaguchi, H. (2016), Initiation of a thrust fault revealed by analog experiments. Tectonophysics, in press.		国際誌	in press	
2015	Liu, W., Xu, Y., Li, X., Wu, X., Liu, C. S., Liang, Y., and Wang, Z. (2015), First-principles study on stability of transition metal solutes in aluminum by analyzing the underlining forces. J. Appl. Phys., 117, 175901.		国際誌	発表済	
2015	Uetani, T., Matsuoka, T., and Honda, H. (2016) Investigation of the Conditions Required for Improved Oil Recovery by an Earthquake. SPE Production & Operations, SPE-168137-PA, 9., preprint.		国際誌	in press	
2015	石塚師也, 松岡俊文, 高橋 亨, 相澤隆生 (2016), PS干渉SAR解析を用いた関東平野北部の地盤沈下域の推定, 材料, 印刷中.		国内誌	in press	
2015	Hino, R., Tsuji, T., Bangs, N.L., Sanada, Y., Park, J-O. vonHuene, R. , Moore, G., Araki, E., and Kinoshita, M. (2015), Qp structure of the accretionary wedge in the Kumano Basin, Nankai Trough, Japan, revealed by long-offset walk-away VSP, Earth, Planets and Space, 67:7	10.1186/s40623-014-0175-x	国際誌	発表済	
2016	Ishitsukaa, K., Tsuji, T, Matsuoka,T., Nishijima, J. and Fujimitsu, Y., Heterogeneous surface displacement pattern at the Hatchobarugeothermal field inferred from SAR interferometry time-series, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 44, 95-103.	http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.07.006	国際誌	発表済	
2016	石塚師也・辻健・松岡俊文, 2016 年熊本地震に伴う江津湖・水前寺周辺の局所的な地表変動, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 36, 3.		国内誌	発表済	
2016	石塚師也・松岡俊文, ALOS/PALSAR データを用いたPS 干渉SAR 解析の精度評価 ―千葉県九十九里地域の地表変動を例として, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, 36, 4.		国内誌	発表済	
2016	Ishitsuka,K., Matsuoka,T. andTamura, M., Persistent Scatterer Selection Incorporating Polarimetric SAR Interferograms Based on Maximum Likelihood Theory, IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, 55, 1, 38-50.		国際誌	発表済	
2016	石塚師也, 松岡俊文, 高橋亨, 相澤隆夫, PS干渉SAR解析を用いた関東平野北部の地盤沈下域の推定, 材料, 65, 5, 384-390.		国内誌	発表済	

2016	石塚師也・藤井幸泰・金子誠・高橋亨・松岡俊文, 干渉SAR解析によって推定した地表変動と地すべりブロックとの関連: 白山基之助谷周辺の地すべりを例に, 応用地質.		国内誌	in press	
2016	K. Ishitsuka, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Pixel-based interferometric pair selection in InSAR time series analysis with baseline criteria, Remote Sensing Letters, Vol.7, Issue 7, 711-720,2016.	doi:10.1080/2150704X.2016.1182660	国際誌	発表済	
2016	J. Jia, Y. Liang, S. Murata, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Microscopic origin of strain hardening in methane hydrate. Scientific Reports (Nature Publisher) 6, 23548 (2016)	10.1038/srep23548	国際誌	発表済	
2016	H. Yamabe, T. Tsuji, Y. Liang, and T. Matsuoka, Influence of fluid displacement patterns on seismic velocity during supercritical CO2 injection: Simulation study for evaluation of the relationship between seismic velocity and CO2 saturation. Int. J. Greenhouse Gas Control 46, 197 (2016)	10.1016/j.ijggc.2016.01.011	国際誌	発表済	
2016	K. Kobayashi, Y. Liang, K. Amano, S. Murata, T. Matsuoka, S. Takahashi, N. Nishi, and T. Sakka. Molecular dynamics simulation of atomic force microscopy at water-muscovite interface: Hydration layer structure and force analysis. Langmuir 32, 3608–3616 (2016).	10.1021/acs.langmuir.5b04277	国際誌	発表済	
2016	F. Jiang and T. Tsuji, Estimation of three-phase relative permeability by simulating fluid dynamics directly on rock-microstructure images, Water Resources Research, 2016.	doi:10.1002/2016WR019098	国際誌	発表済	
2016	T. Ikeda, and T. Tsuji, Surface wave attenuation in the shallow subsurface from multichannel-multishot seismic data: a new approach for detecting fractures and lithological discontinuities, Earth, Planets and Space, 68:111,2016.	doi:10.1186/s40623-016-0487-0	国際誌	発表済	
2016	T. Tsuji, T. Ikeda, T.A. Johansen, and B.O. Ruud, Using seismic noise derived from fluid injection well for continuous reservoir monitoring, Interpretation, 4(4), SQ1-SQ11,2016.	doi:10.1190/INT-2016-0019.1	国際誌	発表済	Selected as featured article

論文数	83	件
うち国内誌	13	件
うち国際誌	70	件
公開すべきでない論文	0	件

③その他の著作物(相手国側研究チームとの共著)(総説、書籍など)

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の 種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項
著作物数			0	件	
公開すべきでない著作物			0	件	

④その他の著作物(上記③以外)(総説、書籍など)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ—おわりのページ		出版物の 種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項
2012	Yamada, Y., Oshima, Y., Matsuoka, T. (2011), Slope failures in analogue model experiments of accretionary wedges In: Yamada Y. et al (Eds), Submarine Mass Movements and Their Consequences. Advances in Natural and Technological Hazards Research Series, Springer. p.343-354. ISBN 9789400721616.		書籍	出版済み	
2012	Miyakawa, A., Tsuji, T., Yamada, Y., and Matsuoka, T. (2011), Analysis of the results of a DEM simulation using self-organizing maps. In: Sainsbury, Hart, Detournay & Nelson (eds.), Continuum and Distinct Element Numerical Modeling in Geomechanics. Itasca International Inc. , Minneapolis , pp. 633-640. ISBN 978-0-9767577-2-6.		書籍	出版済み	
2013	高橋 亨・田中 荘一(2013b): 地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究(その7)ー物理探査データによる透水係数の推定ー、深田地質研究所年報、No.14.		年報	出版済み	
2014	高橋 亨・田中 荘一(2014): 地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究(その8)ー物理探査データによる透水係数の推定(2)ー、深田地質研究所年報、No.15.		年報	出版済み	
2015	高橋 亨・田中 荘一(2015): 地盤工学における物理探査データのロックフィジックスをベースにした解釈技術に関する研究(その9)ー軸圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化、深田地質研究所年報、No.16		年報	出版済み	

2016	Takahashi, T. and Tanaka, S., Compressive strength - seismic velocity relationship for sedimentary rocks, in ISRM Rock Mechanics and Engineering.		著書(部分執筆)	in press	
2016	石塚師也, 干渉SAR解析を用いた地表変動量のモニタリングと地下の可視化, 地盤工学会誌, 1月号		雑誌	in press	

著作物数 7 件
 公開すべきでない著作物 0 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項

VI. 成果発表等

(2) 学会発表【研究開始～現在の全期間】(公開)

① 学会発表(相手国側研究チームと連名)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2012	国際学会	Wawan G. A. K., R. Sule, S. Alawiyah, Setianingsih D. Santoso, D. S. Widarto, R. Tamba, D. Sasongko, E. Widiyanto, T. Matsuoka (2012), First Pilot Study of CO2-Sequestration in Indonesia, 37th HAGI Annual Convention & Exhibition, Palembang.	口頭発表
2012	国際学会	Benyamin, S. (2012), CCS in Indonesia: Preliminary results of CCS Pilot Study in Gundhi Field, Central Java, Workshop: Evaluation of CO2 storage potential, ITB.	口頭発表
2013	国際学会	T. Tsuji, T. Matsuoka, T. Takahashi, K. Kitamura, K. Onishi, Y. Yamada, M. R. Sule, Wawan. G. A. K., D. S. Widarto, R. I. Sebayang, A. Prasetyo, A. Priyono, E. Widiyanto, B. Sapiie (2013), Pilot CCS project in Indonesia “Gundih CCS project”: Geological and geophysical surveys for site selection and monitoring, EGU Meetings (submitted).	口頭発表
2013	国内学会	松岡俊文、Wawan Kadir、羽藤正実、高橋亨、グンディCCS研究プロジェクトチーム(2013): インドネシア・グンディガス田におけるCCS研究プロジェクトーインドネシアにおける研究の意義ー、物理探査学会第129回学術講演会論文集、233-235.	口頭発表
2013	国内学会	辻健、M. Yusup Nur Khakim、北村圭吾、山田泰広、松岡俊文、尾西恭亮、Ariesty R. Asikin、Tustuka Ariadji、Wawan Kadir(2013): グンディCCS研究プロジェクトチーム(2013): インドネシア・グンディガス田におけるCCS研究プロジェクト(その2)ー圧入層周辺の地質モデルとシミュレーションー、物理探査学会第129回学術講演会論文集、236-239.	口頭発表
2013	国内学会	北村圭吾、辻健、山田泰広、尾西恭亮、Benyamin Sapiie、Aurio Erdi、I Gde Basten、松岡俊文、Wawan Kadir、グンディCC研究プロジェクトチーム(2013): インドネシア・グンディガス田におけるCCS研究プロジェクト(その3)ー岩石物性測定結果に基づく貯留層性能評価ー、物理探査学会第129回学術講演会論文集、240-241.	口頭発表
2014	国内学会	1) 羽藤正実、松岡俊文、高橋亨、Wawan Kadir、Sule Rachmat、グンディCCS研究プロジェクトチーム(2014): インドネシア中部ジャワ州Gundihガス田における先導的CCS研究-背景と研究の現状ー、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)	口頭発表

2014	国内学会	1) 北村圭吾、山田泰宏、尾西恭亮、辻 健、Benyamin Sapiie ⁴ 、Alfian Bahar ⁴ 、松岡俊文、Wawan Kadir (2014)、グンディCCS研究プロジェクトチーム インドネシア中部ジャワ州Gundihガス田における先導的CCS研究－岩石物性測定結果に基づく貯留層評価－、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)	口頭発表
2014	国内学会	1) 辻 健、松岡俊文、北村圭吾、山田泰広、尾西恭亮、Tutuka Ariadji、Wawan Gunawan Kadir (2014)、グンディCCSプロジェクトチーム、"Pilot Study on CCS in Gundih Gas Field in Central Java, Indonesia - Reservoir characterization and simulation for site selection"、資源素材学会(平成26年3月28日)	口頭発表
2014	国内学会	北村圭吾、千代延俊、山田康広、尾西恭介、辻健、Benyamin Sapii, Alfian Bahar, Rachmat Sule, 松岡俊文、Wawan Gunawan a. Kadir (2014)、インドネシア中部ジャワ州グンディガス田における先導的CCS研究-岩石物性測定に基づく貯留性能評価、日本地質学会代121年学術大会(平成26年9月12日)	ポスター発表
2014	国際学会	Fukuda, Y., SATREPS CCS Project (GravityTeam) (2014): Gravity Monitoring of CCS in Gundhi, Indonesia, Pannel Discussion, The 39th HAGI Annual Convention & Exhibition, Solo Paragon Hotel, Indonesia October 14, 2014.	口頭発表
2014	国際学会	Kitamura, K., Yamada, Y., Onishi, K., Tsuji, T., Chiyonobu, S., Sapiie, B., bahar, A., Danio, H., Muhammad, A., Erdi, A., Sari, V.M., Matsuoka, T,m Kadir, W.G.A., and Gundih CCS project team. (2014)、Potential evaluation of CO2 reservoir using the measured petrophysical parameter of rock samples in the Gundih CCS Project, Indonesia、GHGT-12、October 6-9、Austin、USA.	ポスター発表
2015	国内学会	西島 潤、福田洋一、Sofyan Yayan, 板倉 統、Wahyudi Eko, 松岡俊文(2015): A10 絶対重力計を用いたインドネシア グンディガス田における二酸化炭素地下貯留モニタリング、日本地球惑星科学連合2015年大会(2015年5月27日)	口頭発表
2015	国内学会	板倉 統、福田洋一、Wahyudi Eko Januari, 風間卓仁 (2015): 重力データの独立成分分析: gPhone観測データへの適用例、日本地球惑星科学連合2015年大会(2015年5月27日)	口頭発表
2015	国際学会	Eko Januari Wahyudi, Yoichi Fukuda, Jun Nishijima and Matomu Itakura (2015): Performance Test of gPhone (#123, #126, and #127) during Preparation Stage of Gundih CCS Injection, The 6th Asian Physics Symposium (2015年8月19日)	口頭発表
2015	国際学会	Jun Nishijima, Yoichi Fukuda, Yayan Sofyan, Matomu Itakura, Eko Wahyudi, Toshifumi Matsuoka: (2015) Repeat micro-gravity measurements using A10 absolute gravimeter for CO2 injection monitoring in Gundih gas field, Central Java, Indonesia, the 12th SEGJ International Symposium (2015年11月19日)	ポスター発表

2015	国際学会	Sule, R., Asikin, A., Priyono, A., Tsuji, T., Raharjo, S., "Simulation of time lapse seismic for CO2-injection monitoring: preliminary result", The 12th SEGJ International Symposium, S6-4, Tokyo, 19 November, 2015	口頭発表
2015	国際学会	Onishi, K., Nguyen, D. T., Fujii, H., Tsuji, T., Hato, M., Takahashi, T., Matsuoka, T., Sule, M. R., Kadir, W. G. A., "Fluid flow simulations for the safety injection of carbon dioxide in Gundih CCS site, Indonesia", The 12th SEGJ International Symposium, S6-2, Tokyo, 19 November, 2015	口頭発表
2015	国際学会	Sapiie, B., Danio, H., Priyono, A., Asikin, A. R., Widarto, D. S., Widiyanto, E., Tsuji, T., "Geological characteristic and fault stability of the Gundih CCS pilot project at Central Java, Indonesia", The 12th SEGJ International Symposium, S6-5, Tokyo, 19 November, 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Kyosuke Onishi, Duc Tam Nguyen, Hikari Fujii, Takeshi Tsuji, Masami Hato, Toru Takahashi, Toshifumi Matsuoka, Mohammad Rachmat Sule, Wawan Gunawan A. Kadir (2015): Fluid flow simulations for the safety injection of carbon dioxide in Gundih CCS site, Indonesia, the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, 18-20 November 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Wahyu Srigutomo, Warsa, M. Rachmat Sule, Alira Saito, Keiko Nakayama, Masami Hato, Trimadona, Donney Prasetyo, Djedi S Widarto: (2015) Time-domain electromagnetic (TDEM) baseline survey for CC in Gundih area, Central Java, Indonesia, the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, 18-20 November 2015.	口頭発表
2015	国内学会	西島 潤, 福田洋一, Sofyan Yayan, 板倉 統, Wahyudi Eko, 松岡俊文 (2015): A10 絶対重力計を用いたインドネシア グンディガス田における二酸化炭素地下貯留モニタリング, 日本地球惑星科学連合 2015年大会 (2015年5月27日)	口頭発表
2015	国内学会	板倉 統, 福田洋一, Wahyudi Eko Januari, 風間卓仁 (2015): 重力データの独立成分分析: gPhone 観測データへの適用例, 日本地球惑星科学連合 2015年大会 (2015年5月27日)	口頭発表
2015	国際学会	Eko Januari Wahyudi, Yoichi Fukuda, Jun Nishijima and Matomu Itakura (2015): Performance Test of gPhone (#123, #126, and #127) during Preparation Stage of Gundih CCS Injection, The 6th Asian Physics Symposium (2015年8月19日)	口頭発表
2015	国際学会	Jun Nishijima, Yoichi Fukuda, Yayan Sofyan, Matomu Itakura, Eko Wahyudi, Toshifumi Matsuoka: (2015) Repeat micro-gravity measurements using A10 absolute gravimeter for CO2 injection monitoring in Gundih gas field, Central Java, Indonesia, the 12th SEGJ International Symposium (2015年11月19日)	ポスター発表
2016	国内学会	板倉 統(京都大学)、福田 洋一(京都大学)、風間 卓仁(京都大学)、WAHYUDI Eko januari(ITB)、重力観測データの独立成分分析解析とその応用、日本地球惑星科学連合2016年大会、千葉県千葉市、幕張メッセ国際会議場、2016年5月22日	口頭発表

2016	国際学会	Yoichi Fukuda (Kyoto Univ.), Jun Nishijima (Kyusyu Univ.), Matomu Itakura (Kyoto Univ.), Eko Januari Wahyudi (ITB), Toshifumi Matsuoka (Kyoto Univ.), "A Strategy for Gravity Monitoring of CO2 Injection in Gundih Gas Field, Central Java, Indonesia", The 1st Southeast Asian Conference on Geophysics, Mercure Bali Harvestland Kuta,Jl. By Pass Ngurah Rai No. 8 Simpang Siur, Kuta, Bali, Indonesia 80361, Sep. 2nd, 2016	口頭発表
2016	国際学会	Eko Januari Wahyudi, Vanya Wilhelmina, Sidiq Vidyasto, Yoichi Fukuda, Jun Nishijima, Darharta Dahrin, Susanti Alawiyah, Indra Gunawan, Dadi Abdurrahman, Dedi Sukmayadi, Uzil Pratama, dan Yusup Nurali, "Time-lapse microgravity data acquisition in baseline stage of CO2 injection in Gundih Area", The 1st Southeast Asian Conference on Geophysics, Mercure Bali Harvestland Kuta,Jl. By Pass Ngurah Rai No. 8 Simpang Siur, Kuta, Bali, Indonesia 80361, Sep. 1st, 2016	口頭発表
2016	国際学会	A. Miyakawa, K. Onishi, T. Tsuji, T. Takahashi, T. Matsuoka, A. Priyono, B. Sapiie, R. Sule, W.G.A. Kadir, "Case study of fault stability analysis in Indonesia "Gundih CCS project" on the basis of the fault orientation and stress state", Southeast Asian Conference on Geophysics (SEACG), Fr R3 01, Mercure Bali Harvestland Kuta, Bali, Indonesia, 2 September, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	Hato, M., Bahar, A., Takahashi, T., Aizawa, T., Kozawa, T., Silban, S. ,Preliminary report on Seismic baseline Survey for CCS monitoring in Gundih Area, 1st Southeast Asian Coference on Geophysics, Bali, Indonesia, Sep., 2016.	口頭発表

招待講演	0	件
口頭発表	26	件
ポスター発表	4	件

②学会発表(上記①以外)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2011	国際学会	Satoh, T. (2011)、Strategy and Technology for Implementing CCS、Kyoto University – Institut Teknologi Bandung International Joint Workshop on Technology Implementation of Carbon Sequestration and Monitoring in Gundih Area、Central Java Province、Indonesia、Bandung、16 May 2011	口頭発表

2011	国際学会	Takahashi, T. (2011)、Rock Physics Model for Interpreting Dynamic and Static Module of Mudstones as Cap Rock for CO2 Sequestration、Kyoto University – Institut Teknologi Bandung International Joint Workshop on Technology Implementation of Carbon Sequestration and Monitoring in Gundih Area、Central Java Province、Indonesia、Bandung、16 May 2011	口頭発表
2011	国際学会	Mikami, J. (2011)、Reservoir Simulation at Tomakomai CCC Site、Kyoto University – Institut Teknologi Bandung International Joint Workshop on Technology Implementation of Carbon Sequestration and Monitoring in Gundih Area、Central Java Province、Indonesia、Bandung、16 May 2011	口頭発表
2011	国際学会	Saito, A. (2011)、CCS Monitoring by Electromagnetic Method、The 3rd Symposium on CCS in Gundih Area、Java、Indonesia、Jakarta Indonesia、21 Sept. 2011	口頭発表
2011	国際学会	Onishi, K. (2011)、CCS Monitoring by Seismic Tomography、The 3rd Symposium on CCS in Gundih Area、Java、Indonesia、Jakarta Indonesia、21 Sept. 2011	口頭発表
2011	国際学会	Kitamura, K. (2011)、Rock Physics for CCS Monitoring、The 3rd Symposium on CCS in Gundih Area、Java、Indonesia、Jakarta Indonesia、21 Sept. 2011	口頭発表
2011	国際学会	Yoo, S.Y., Kuroda, Y., Mito, Y., Ueda, A., and Matsuoka, T. (2011)、Physical clogging model using stick rate of calcite on CO2 mineral trapping、12th ISRM International Congress on Rock Mechanics、October 18-21、2011、Beijing、China、1385-1388.	口頭発表
2011	国際学会	Tsuji, T., Johansen, T. A., Ruud, B. O., Ikeda, T., and Matsuoka, T. (2011)、Surface wave analysis for studying elastic properties of glacier bed sediments、SEG Technical Program Expanded Abstracts、30、1358-1362.	口頭発表
2011	国際学会	Nakata, N., Snieder, R., Larner, K., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2011)、Shear-wave imaging from traffic noise using seismic interferometry by cross-coherence、81th SEG annual meeting、1580-1585、San Antonio、Texas、USA.	口頭発表
2011	国際学会	Ikeda, T., Matsuoka, T., Tsuji, T., and Hayashi, K. (2011)、Evaluation of vibration characteristics at improved soft ground by surface wave method、SAGEEP 2011 Expanded Abstracts、207-216.	口頭発表
2012	国際学会	Makimura, D., Kunieda, M., Liang, Y., Takahashi, S., Okabe, H., and Matsuoka, T. (2012)、Application of molecular simulations to CO2-EOR: Phase equilibria and interfacial phenomena、11th International Petroleum Technology Conference、February 7-9、2012、Bangkok、Thailand	口頭発表
2011	国際学会	Kadono, H., Matsuoka, T., Liang, Y., Ueda, A., Satoh, H., Fukunaka, Y., Takahashi, S., and Okabe, H. (2011)、Nano- and Micro-Scale Contact Angle Measurement Under Pressure by Vertical Shift Interferometry、2011 AIChE Annual Meeting.	口頭発表

2011	国際学会	Tsuji, S., Liang, Y., Takahashi, S., and Matsuoka, T. (2011), Molecular Dynamics Simulations of the CO ₂ /Water/Silica Wettability at Different Pressures, 32nd Annual Symposium and Workshop of International Energy Agency-Enhanced Oil Recovery, October 16-20, 2011, Vienna, Austria.	口頭発表
2011	国際学会	Mikami, Y., Kunieda, M., Yunfeng, L., Matsuoka, T. (2011), Structural origin of methane recovery from gas hydrate by CO ₂ , 7th International Conference on Gas Hydrates, July 17-21, 2011, Edingburgh, UK	口頭発表
2011	国際学会	Kunieda, M., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2011), Oil on water: wetting transition induced by its compositions, Petrophase 2011, July 10-14, 2011, London, UK.	口頭発表
2011	国際学会	Tsuji, S., Liang, Y., and Matsuoka, T. (2011), Pressure-induced wettability alternation of the CO ₂ /water/silica systems. 2011 CECAM Workshop on "Microscopic-Scale View of CO ₂ Sequestration", June 22-24, 2011, Lausanne, Switzerland	口頭発表
2011	国際学会	Iwasaki, S., Liang, Y., Matsuoka, T., Takahashi, S., and Okuno, R. (2013), Application of Gibbs Ensemble Monte Carlo to Phase Equilibria of CO ₂ /Hydrocarbon Mixtures, The 6th International Petroleum Technology Conference.	口頭発表
2011	国際学会	Yamabe, Y., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2011), The Relationship between Permeability and Elastic Modulus of Ellipsoidally-Cracked Rock Model, The 10th SEGJ International Symposium, 437-440.	口頭発表
2011	国際学会	Masui, R., Yamada, Y., Tsuji, T., (2011), The interpretation for structure of three-dimensional Splay Fault in Nankai trough, The 10th SEGJ International Symposium, 493-496.	口頭発表
2011	国際学会	Minato, S., Matsuoka, T., and Tsuji, T. (2011), Interpretation of the effect of source-receiver configuration for seismic interferometry by multidimensional deconvolution using singular-value decomposition, The 10th SEGJ International Symposium, 72-75.	口頭発表
2011	国際学会	Khakim, M.Y.N., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2011), The proposed inversion technique of remote sensing data for reservoir monitoring, The 10th SEGJ International Symposium, 471-474.	口頭発表
2011	国際学会	Sanada, Y., Hino, R., Kinoshita, M., Park, J-O., Araki, E., Tsuji, T., Moore, G., Bangs, N., and von Huene, R. (2011), Long offset VSP and well logging analysis in Nankai trough offshore Kumanonada, The 10th SEGJ International Symposium, 489-492.	口頭発表
2011	国際学会	Yamabe, H., and Matsuoka, T. (2011), Lattice Boltzmann simulation of seismic stimulation for mobilization of water oil two-phase flow, The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表

2011	国際学会	Kadono、H.、Ueda、A.、Fukunaka、Y.、and Matsuoka、T. (2011)、The contact angle measurement of micro-drop under pressure by vertical shift interferometry、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国際学会	Tsuji、S.、Liang、Y. and Matsuoka、T. (2011)、CO2/water/silica wettability at different pressures and the changes with salt concentrations、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011)	口頭発表
2011	国際学会	Xue、Z.、Yamada、T.、Matsuoka、T.、Kameyama、H.、and Nishio、S. (2011)、Carbon Dioxide Microbubble Injection – Enhanced Dissolution in Geological Sequestration、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国際学会	Mikami、Y.、Yunfeng、L.、Edo、S.B.、and Matsuoka、T. (2011)、Molecular Dynamics Simulation on Asphaltene at the Oil-Water Interface、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国際学会	Kunieda、M.、Liang、Y.、and Matsuoka、T. (2011)、Pressure profile and determination of line tension of single and multicomponent-oil-water interface、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国際学会	Kobayashi、K.、Yunfeng、L.、and Matsuoka、T. (2011)、Molecular Dynamics Study of Aqueous Solution of Ions: Interfacial Properties of Salt-Water and Free Energy Evaluation、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国際学会	Ledyastuti、M.、Liang、Y. and Matsuoka、T. (2011)、The interfacial structure of toluene and heptane at binary solution-silica interfaces: a molecular dynamics study、The First International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2011).	口頭発表
2011	国内学会	三上陽平、Yunfeng Liang、松岡俊文 (2011)、分子動力学法によるハイドレートのケージ占有率と温度圧力条件に関する研究、石油技術協会春季講演会、2011年6月7日～9日、東京	口頭発表
2011	国内学会	國枝真、Yunfeng Liang、松岡俊文 (2011)、水面上での油の拡散性および揮発性に関する検討、石油技術協会春季講演会、2011年6月7日～9日、東京	口頭発表
2011	国内学会	柳 丞烈、上田 晃、小澤晃子、杉山和稔、水戸義忠、松岡俊文 (2011)、高温下カラム試験における炭酸塩鉱物の透水性評価、日本地球化学会第58回年会、2011年9月14日～16日、札幌	口頭発表

2011	国際学会	Minato、S.、Matsuoka、T.、and Tsuji、T. (2011)、Singular-value decomposition analysis for seismic interferometry by multidimensional deconvolution、SEG Technical Program Expanded Abstracts、30、2694-2699.	ポスター発表
2012	国際学会	Takahashi、T. and S. Tanaka (2012)、Rock physics model for static Young ' s modulus and compressive strength of soft sedimentary rocks、SEG2012 Expanded Abstract.	口頭発表
2012	国際学会	Yamabe、H.、Tsuji、T.、and Matsuoka、T. (2012)、Permeability Estimation from Seismic Velocity based on Crack and Grain Models、46th U.S. Rock Mechanics Geomechanics Symposium、American Rock Mechanics Association (ARMA)、ARMA 12-481.	口頭発表
2012	国際学会	Puttiwongrak、P.、and Matsuoka、T. (2012)、Geomechanical Simulation of Deformation by CO2 Injection into Homogeneous Sandstone、The 6th International Conference on Applied Geophysics.	口頭発表
2012	国際学会	Yoo、S.Y.、Mito、Y.、Ueda、A.、and Matsuoka、T. (2012)、Geochemical clogging in fracture and porous rock for CO2 mineral trapping、GHGT-11.	口頭発表
2012	国際学会	Yamabe、H.、Nakaoka、K.、Xue、Z.、Matsuoka、T.、Kameyama、H.、and Nishio、S. (2012)、Simulation Study of CO2 Micro-bubble Generation through Porous Media、GHGT-11.	口頭発表
2012	国際学会	Tsuji、S.、Liang、Y.、Kunieda、M.、Takahashi、S.、Matsuoka、T. (2012)、Molecular dynamics simulations of the CO2-Water-Silica interfacial systems、GHGT-11.	口頭発表
2012	国際学会	Makimura、D.、Kunieda、M.、Liang、Y.、Takahashi、S.、Okabe、H.、and Matsuoka、T. (2012) Application of Molecular Simulations to CO2-EOR: Phase-Equilibria and Interfacial Phenomena、The 5th International Petroleum Technology Conference.	口頭発表
2012	国際学会	Liang、Y.、Mikami、Y.、and Matsuoka、T. (2012)、Phase Equilibrium、Cage Occupancy and Optical Spectra of CO2-hydrate、The 8th International Workshop on Methane Hydrate Research & Development (2012 Fiery Ice).	口頭発表
2012	国際学会	Azuma、H.、and Matsuoka、T. (2012)、The modified patchy saturation model for estimation of CO2 saturation from seismic velocity、The EIT-JSCE Joint International Symposium on International Human Resource Development for Disaster-Resilient Countries 2012.	口頭発表

2012	国際学会	Yamabe, H., Liang, Y., Matsuoka, T., and Tsuji, T. (2012), Two-phase lattice Boltzmann simulation study on flow pattern in a silty sand model, The Second International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2012).	口頭発表
2012	国際学会	Tsuji, T., Yamabe, H., and Matsuoka, T. (2012), Migration of supercritical CO2 in porous media under several PT conditions: Insight into CO2 saturation monitoring from elastic velocity and resistivity, The Second International Symposium on Application of Nano-Geoscience in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2012).	口頭発表
2012	国内学会	岩崎哲士、Liang, Y., 松岡俊文 (2012)、ギブスアンサンブルモンテカルロ法を用いたCO2/Hydrocarbon系の相平衡シミュレーション、石油技術協会春季講演会。	口頭発表
2012	国内学会	辻 真也、薛 自求、西尾 晋、亀山寛達、松岡俊文 (2012)、X 線CT 可視化による多孔質砂岩内CO2 流動特性の解析、資源・素材2012、講演資料、185-188.	口頭発表
2012	国際学会	Ikeda, T., Matsuoka, T., Tsuji, T., and Hayashi, K. (2012), Multimodal direct fitting of SPAC coefficients using amplitude response, 22nd International Geophysical Conference and Exhibition, February 26-29, 2012, Queensland, Australia.	ポスター発表
2012	国際学会	Yamabe, H., Nakaoka, K., Xue, Z., Matsuoka, T., Kameyama, H., and Nishio, S. (2012), Simulation Study of CO2 Micro-bubble Generation through Porous Media, GHGT-11.	ポスター発表
2012	国際学会	Yamabe, H., Tsuji, T., Liang, Y., and Matsuoka, T., (2012), Two-phase lattice Boltzmann simulation study on flow pattern in a silty sand model, Eos Trans. AGU, Fall. Meet., Suppl.	ポスター発表
2012	国際学会	Tsuji, T., Yamabe, H., and Matsuoka, T., (2012), LBM simulation for CO2 saturation monitoring from elastic velocity and resistivity: Migration of supercritical CO2 in porous media under several PT conditions, Eos Trans. AGU, Fall. Meet., Suppl. Abstract GC51A-1176-.	ポスター発表
2013	国際学会	Tsuji, T. (2013) Current research status of Gundih CCS pilot project – Progress report from Japanese Team, The 6th Symposium on CCS in Gundih Area, Java, Indonesia, Fukuoka, Japan, 22 Nov. 2013	口頭発表
2013	国際学会	Takahashi, T. (2013), Pilot Study for Carbon Sequestration and Monitoring in Gundih Area, Central Java Province, Indonesia, GFZ, Germany.	口頭発表
2013	国際学会	Chanrithyrouth, M., Yamada, Y., and Matsuoka, T. (2013), The Opportunities of Sedimentary Basins for CO2 Geological Storage in Cambodia, 5th AUN/SEED-Net Regional Conference on Geological Engineering.	口頭発表

2013	国際学会	T. Tsuji, T. Matsuoka, T. Takahashi, K. Kitamura, K. Onishi, Y. Yamada, M.R. Sule, W.G.A. Kadir, D. S. Widarto, R. I. Sebayang, A. Prasetyo, A. Priyono, E. Widiyanto, and B. Sapiie, Pilot CCS project in Indonesia "Gundih CCS project": Geological and geophysical surveys for site selection and monitoring, EGU General Assembly, Vienna, Austria, April 7-12, 2013	口頭発表
2013	国際学会	M.Y.N. Khakim, T. Tsuji, and T. Matsuoka, Monitoring and characterization of land subsidence in the Bandung basin, West Java, Indonesia using InSAR, SEG annual meeting 2013, Houston, September 22-27, 2013.	口頭発表
2013	国際学会	Ikeda, T., Matsuoka, T. Tsuji, T., and Nakayama, T. (2013), Multimode inversion of Rayleigh waves using vertical and horizontal component data, <i>SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013</i> , 1782-1787.	口頭発表
2013	国際学会	Yamabe, H., Tsuji, T., and Matsuoka, T. (2013), Patchy saturation and seismic velocity: Simulation study for migration of supercritical CO ₂ in porous media, <i>SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013</i> , 2637-2641.	口頭発表
2013	国内学会	福田洋一、板倉統、西島潤、Yayan Sofyan、松岡俊文(2013)、インドネシア・グンディガス田でのCCS重力モニタリング計画、日本測地学会第120回講演会、2013年10月29日、東京	口頭発表
2013	国際学会	Takahashi, T. and Tanaka, S. (2013): Rock physical interpretation of seismic properties of the excavation disturbed zone, Proceedings of EUROCK 2013, 161-164.	口頭発表
2013	国際学会	Takahashi, T. (2013): Quantitative interpretation of seismic velocity reduction in the excavation disturbed zone with rock physics, Proceedings of 11 th SEGJ International Symposium.	口頭発表
2013	国内学会	西山巡・中山圭子・斎藤章(2013): 簡便な電気探査装置の開発、物理探査学会第128回学術講演会論文集、197-198.	口頭発表
2013	国内学会	高橋亨、田中莊一(2013a): 物理探査データを用いた河川堤防の浸透性の推定について、物理探査学会第128回学術講演会講演論文集、166-169.	口頭発表
2013	国内学会	小川大輝、中山圭子、斎藤章(2013): CCSにおけるCO ₂ 挙動のTDEM法を用いたモニタリング、物理探査学会第129回学術講演会論文集、242-245.	口頭発表
2013	国内学会	陶葉・小川大輝・中山圭子・斎藤章(2013): 新潟県十日町市における泥火山を対象とした物理探査、物理探査学会第129回学術講演会論文集、279-282.	口頭発表

2013	国内学会	持地真平・中山圭子・斎藤章(2013): 海底油田を対象とした実用化されている海洋CSEM法技術の比較検討、第129回学術講演会論文集、215-218.	口頭発表
2013	国内学会	本居正幸・中山圭子・斎藤章(2013): ROVを用いた小笠原海域でのTEM法による海底熱水鉱床の調査、ブルーアースシンポジウム(平成25年3月14日)	口頭発表
2014	国際学会	Tsuji, T. (2014)、Reservoir characterization and monitoring in CCS projects in geological formations typical in Japan (e.g., Indonesia)、CCOP/PETRAD-PVN/VPI VIGMR Seminar on Carbon Capture and Storage of CO2 and EOR、March 18、2014.	口頭発表
2014	国際学会	Tsuji, T. (2014) Digital rock physics for CO2 dynamic modeling and monitoring, The 8th Symposium on CCS in Gundih Area、Java、Indonesia、Oogata, Akita Japan、26 Sept. 2014.	招待講演
2014	国際学会	Onishi, K. (2014) Current research status of Geology and Geophysics (Japan team), The 8th Symposium on CCS in Gundih Area、Java、Indonesia、Oogata, Akita Japan、26 Sept. 2014.	口頭発表
2014	国際学会	Saito, A. (2014) Quick report: Baseline survey of Electro-magnetic method and gravity survey, The seminar of Gundih CCS pilot project, Tokyo Japan, 30 Sep. 2014.	口頭発表
2014	国内学会	高橋亨(2014): インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの研究開発動向と展望、CCSセミナー、CCS(分散型CCS含む)とCO2輸送・貯留(EOR含む)に関する研究開発及び装置・材料・技術などの動向、(株)技術情報センター依頼講演、東京.	招待講演
2014	国内学会	高橋亨(2014): インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの現状と今後の計画、GCCSI勉強会における依頼講演、東京	招待講演
2014	国内学会	1) 辻健・蔣飛(2014): CO2の鉱物化に伴う水理特性と弾性特性の変化、資源・素材学会平成26年度春季大会(平成26年3月28日)	招待講演
2014	国内学会	永黒 友貴・中山 圭子・羽藤 正実・斎藤 章(2014): 線電流送信源を用いたTDEM法によるCCSモニタリング、物理探査学会 第130回学術講演会論文集、231-234.	口頭発表
2014	国際学会	K. Umeda, R. Li, Y. Sawa, H. Yamabe, Y. Liang, H. Honda, S. Murata, T. Matsuoka, T. Akai, and S. Takagi, Multiscale simulations of fluid flow in nanopores for shale gas. IPTC-17949 (2014).	口頭発表
2014	国際学会	R. Hibi, K. Tagami, K. Kobayashi, Y. Liang, H. Honda, S. Murata, T. Matsuoka, M. Morimoto, T. Uetani, and E. S. Boek, Investigation of asphaltene-asphaltene association and aggregation for compositional reservoir simulators by quantitative molecular representations. IPTC-18097 (2014).	口頭発表

2014	国際学会	Fukuda, Y. (2014): Applications of a portable absolute gravimeter, for gravity monitoring, The 39th HAGI Annual Convention & Exhibition, Solo Paragon Hotel, Indonesia October 15, 2014.	口頭発表
2014	国内学会	Sofyan Y., 西島 潤, 藤光康宏 (2014) Application of A10 Absolute gravimeter for precise monitoring in Kamojang Geothermal Field, Indonesia, 日本地熱学会平成26年学術講演会, 2014年10月30日, 弘前市	口頭発表
2014	国内学会	板倉統、風間卓仁, 福田洋一 (2014)、独立成分分析による時系列重力データの分析、日本測地学会第122回講演会、2014年11月7日、つくば。	口頭発表
2014	国際学会	Sofyan Y., Nishijima J. and Fujimitsu Y. (2014) Sustainable energy development and water supply security in Kamojang Geothermal Field: The Energy-Water Nexus, American Geophysical Union 2014 Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., December 17, 2014	口頭発表
2014	国際学会	Takahashi, T. (2014): Soil permeability profiling using multiple geophysical data, Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-PREVIEW, 2014, EGU General Assembly 2014	口頭発表
2014	国際学会	Takahashi, T. and Tanaka, S. (2014): Permeability profiling with integrated geophysical data, 10 th International Workshop on the Application of Geophysics to Rock Engineering, Sapporo, Japan.	口頭発表
2014	国際学会	Takahashi, T., Aizawa, T., Murata, K., Nishio, H. and Matsuoka, T. (2014): Soil permeability profiling on a river embankment using integrated geophysical data, Expanded Abstract, SEG2014.	口頭発表
2014	国内学会	高橋亨 (2014): 複合物理探査データを利用した土質地盤の透水係数の推定、第49回地盤工学研究発表会、福岡。	口頭発表
2014	国内学会	橋 直人・中山 圭子・齋藤 章 (2014): フィードバック回路を用いた広ダイナミックレンジMI磁力計の開発, 物理探査学会第131回学術講演会論文集、135-138	口頭発表
2015	国内学会	辻 健 (九州大学), “環境資源システム工学におけるデジタル岩石物理”, シンポジウム「環境資源システムを支えるジオサイエンス」, 早稲田大学, 2015年5月8日	口頭発表
2015	国内学会	池田 達紀 (九州大学), 辻 健, 渡辺 俊樹, 山岡 耕春, “弾性波アクロスによる浅部構造モニタリングのための表面波解析”, 物理探査学会 第132回 (平成27年度春季)学術講演会, 早稲田大学, 2015年5月11日	口頭発表
2015	国内学会	辻 健 (九州大学), 池田 達紀, 蔣 飛, “地中貯留されたCO2のモニタリングに向けたデジタル岩石物理の導入”, 物理探査学会 第132回 (平成27年度春季)学術講演会, 早稲田大学, 2015年5月12日	口頭発表

2015	国際学会	Tsuji, T.(Kyushu University), Jiang, F., and Christensen, K., "Influence of reservoir conditions upon multiphase fluid displacement patterns within natural sandstone", 7th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, Padova, Italy, 20 May, 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Jiang, F.(Kyushu University), and Tsuji, T., "Investigations on Relationship between Initial and Residual Saturation by Lattice Boltzmann Simulations", 7th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, Padova, Italy, 21 May, 2015.	口頭発表
2015	国内学会	辻 健(九州大学), "デジタル岩石物理を用いた新しいアプローチによる地質・水理特性の定量化への試み: 実験とシミュレーションの融合に向けて", 日本地質学会 主催講演会「日本の地質学: 最近の発見と応用 2015」, 北とぴあ(東京都北区), 2015年5月23日	招待講演
2015	国内学会	辻 健(九州大学), 蔣 飛, Christensen Kenneth, "二相格子ボルツマン法を巨大デジタルロックに適用して明らかとなった貯留層特性が間隙内CO2の挙動に与える影響", 日本地球惑星科学連合2015年大会, HRE28-13, 2015年5月25日	口頭発表
2015	国内学会	辻 健(九州大学), 蔣 飛, "HPCを用いた巨大デジタル岩石内の2相間隙流体シミュレーション", 日本地球惑星科学連合2015年大会, STT55-06, 2015年5月27日	口頭発表
2015	国内学会	辻 健(九州大学), "沈み込み帯の間隙流体圧と津波地震", 東京大学 地震研究所共同利用研究集会:「沈み込み帯」, 東京大学地震研究所, 2015年5月29日	招待講演
2015	国際学会	Tsuji, T. (Kyushu University), "Continuous monitoring of injected CO2 using ambient noise and controlled seismic source", IEA Greenhouse Gas R&D 10th Monitoring Network Meeting, Berkeley, USA, 10 June, 2015.	招待講演
2015	国内学会	辻 健(九州大学), "地球温暖化防止に貢献するCO2地中貯留技術", 第21回公開講演会「緑の地球と共に生きる」, 京都工芸繊維大学, 2015年6月19日	招待講演
2015	国内学会	辻 健(九州大学), "デジタルロックテクノロジーとCCS/U", 第3回シンポジウム 海洋科学技術が切り拓く地球環境とエネルギーの未来, 一橋大学, 2015年6月24日	招待講演
2015	国際学会	Tsuji, T.(Kyushu University), Jiang, F., and Christensen, K., "Elucidating the Influence of Reservoir Conditions on CO2-Brine Behavior in Natural Sandstone via Lattice Boltzmann Simulation", AOGS 2015, IG08-A008, Singapore, 3 August, 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Ikeda, T. (Kyushu University), Tsuji, T., "Characterization of Localized Heterogeneity in Shallow Formation by the Advanced Surface-Wave Analysis", AOGS 2015, IG08-A009, Singapore, 3 August, 2015.	口頭発表

2015	国際学会	Jiang, F. (Kyushu University), Tsuji, T., “Residual Non-Wetting Phase Saturation in Porous Media Controlled by Its Initial Distribution”, AOGS 2015, IG08-A011, Singapore, 3 August, 2015.	ポスター発表
2015	国際学会	Tsuji, T. (Kyushu University), “Digital rock physics for identification of suitable reservoir conditions in CO2 storage”, The Third International Symposium on “Application of Nano-geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015)”, Campus Plaza Kyoto, 5 September, 2015.	招待講演
2015	国際学会	Tsuji, T. (Kyushu University), Ikeda, T., Johansen, T. A., Ruud, B. O., “Time-lapse seismic profiles derived from passive seismic interferometry in fluid-injection experiments”, SEG 85th Annual Meeting, PSC 1.1, New Orleans, USA, 19 October, 2015.	口頭発表
2015	国内学会	辻 健(九州大学), “海域における地震波構造調査データの解析に基づくプレート境界断層の全体像の解明”, 日本地震学会2015年度秋季大会 若手学術奨励賞記念講演、神戸国際会議場、2015年10月26日	招待講演
2015	国内学会	池田 達紀(九州大学), 辻 健, “雑微動を用いたS波スプリッティング解析”, 日本地震学会2015年度秋季大会、S01-06、神戸国際会議場、2015年10月27日	口頭発表
2015	国内学会	辻 健(九州大学), “沈み込む海洋性地殻内部の断層群と、それがプレート境界断層に与える影響”, 東京大学 地震研究所共同利用研究集会:「海溝の海側で生じる過程を探る: 沈み込み帯へのインプット」, 東京大学地震研究所, 2015年11月11日	招待講演
2015	国際学会	Ikeda, T.(Kyushu University), and Tsuji, T., “Characterization of near-surface heterogeneity by integrating surface-wave phase velocity and attenuation”, The 12th SEGJ International Symposium, S3-1, Tokyo, 18 November, 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Tsuji, T. (Kyushu University), Jiang, F., Christensen, K., “Influence of reservoir conditions on multiphase flow in natural sandstone using lattice Boltzmann simulation: Investigation of suitable conditions in CCS and EOR”, AGU Fall Meeting 2015, H43L-06, San Francisco, USA, 17 December, 2015	口頭発表
2015	国際学会	Tsuji, T. (Kyushu University), “Fluid flow from the pore-scale to the field-scale”, I2CNER Annual Symposium 2016, “Computational Solutions to Fundamental Problems in Carbon Neutral Energy Research”, Kyushu University, 2 February, 2016.	招待講演
2015	国際学会	辻 健(九州大学), “Pore pressure and stress state in the Nankai seismogenic fault: Insight from digital rock physics approach”, Symposium on Subduction zone earthquakes in Nankai Trough & Japan Trench, The University of Tokyo, Tokyo, 12 February, 2016.	招待講演

2015	国際学会	Ikeda, T.(Kyushu University), and Tsuji, T., “Spatial and temporal variation of stress state in east Japan during the 2011 Tohoku-oki earthquake: Insights from S-wave splitting analysis from ambient noise records”, Symposium on Subduction zone earthquakes in Nankai Trough & Japan Trench, The University of Tokyo, Tokyo, 12-13 February, 2016.	ポスター発表
2015	国際学会	Tsuji, T.(Kyushu University), “Digital rock physics: Influence of mineral precipitation on interrelations among hydrological and elastic properties”, 13th International Workshop on WATER DYNAMICS, Hydrogen in the Earth and Fluid Behaviors, Tohoku University, Sendai, 16 March, 2016.	招待講演
2015	国内学会	井上 涼平・篠村 史隆・陶 茉・齋藤 章(早大・理工), “カナダオイルサンドフィールドにおける時間領域電磁探査法の適用性の検討”, 物理探査学会 第132回(平成27年度春季)学術講演会, 早稲田大学, 2015年5月11日	口頭発表
2015	国内学会	黒川 誠弘・中山 圭子・齋藤 章(早大理工) ‘海底熱水鉱床を対象としたTDEM法探査におけるROVによる影響の除去’物理探査学会 第133回(平成27年度晶季)学術講演会, 石川県文教会館 2015年9月24-26日	口頭発表
2015	国内学会	笹谷 勇登・中山 圭子・齋藤 章(早稲田大学),鉄村 光太郎・毛内 也之((株)エスイーシー水産海洋PJ) ‘樹脂封入型MI素子磁力計の開発’, 物理探査学会 第133回(平成27年度晶季)学術講演会, 石川県文教会館 2015年9月24-26日	ポスター発表
2015	国際学会	Jia, J., Liang, Y., Tsuji, T., Murata, S., and Matsuoka, T. (2015), Mechanical Properties of Methane Hydrate, CO2 Hydrate, and Ice for Gas Hydrate Exploration and Development. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015)	口頭発表
2015	国際学会	Kobayashi, K., Liang, Y., Amano, K., Takahashi, S., Murata, S., Matsuoka, T., Nishi, N., and Sakka, T. (2015), Theoretical Study of Atomic Force Microscopy on Muscovite: Hydration Structure and Measured Force. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表
2015	国際学会	Sawa, Y., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Akai, T., and Takagi, S. (2015), Investigation of CH4 Adsorption Behavior in Kerogen Nanopores under Supercritical Conditions: A Molecular View Based on a Full-Atom Kerogen Models. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表
2015	国際学会	Hibi, R., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Morimoto, M., Uetani, T., Nakajima, A., Hirayama, T., and Boek, E. S. (2015), Application of Digital Oil for Investigations of Asphaltene Inhibitors. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表

2015	国際学会	Kusanagi, K., Murata, S., Matsuoka, T., Liang, Y., Goi, Y., Sabi, M., Zinno, K., Kato, Y., and Togashi, N. (2015), Application of Cellulose Nanofiber as Environment Friendly Polymer for Enhanced Oil Recovery. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表
2015	国際学会	Sugiyama, S., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Morimoto, M., Nakano, M., and Boek, E. S. (2015), Static and Dynamic Properties of a Full Molecular Model of Crude Oil. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表
2015	国際学会	Okamoto, N., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Akai, T., and Takagi, S. (2015), Molecular Dynamics Simulations of Gas Flow in Nanopores for Shale Gas Development. The Third International Symposium on Application of Nano-Geosciences in Petroleum Engineering (NanoGeoscience 2015).	口頭発表
2015	国際学会	Kobayashi, K., Liang, Y., Amano, K., Murata, S., Matsuoka, T., Nishi, N., Sakka, T., and Takahashi, S. (2015), Theoretical simulation of atomic force microscopy at water-mineral interface: Towards an improved description of low-salinity EOR. IEA Collaborative Project 36th EOR Workshop & Symposium.	口頭発表
2015	国際学会	Kusanagi, K., Murata, S., Goi, Y., Sabi, M., Zinno, K., Kato, Y., and Togashi, N. (2015), Application of cellulose nanofiber as environment-friendly polymer for oil development. IEA Collaborative Project 36th EOR Workshop & Symposium.	口頭発表
2015	国際学会	Hibi, R., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Morimoto, M., Uetani, T., Nakajima, A., Hirayama, T., and Boek, E. S. (2015) Application of digital oil to asphaltene problems in oil production. IEA Collaborative Project 36th EOR Workshop & Symposium.	口頭発表
2015	国際学会	Kusanagi, K., Murata, S., Goi, Y., Sabi, M., Zinno, K., Kato, Y., Togashi, N., Matsuoka, T., and Liang, Y. (2015), Application of Cellulose Nanofiber as Environment-Friendly Polymer for Oil Development. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition.	口頭発表
2015	国際学会	Tateyama, Y. (2015), Structure Analysis of Adsorption on Solid/Liquid Interfaces for Enhanced Oil Recovery, SPE Asia Pacific Regional Student Paper Contest.	口頭発表
2015	国際学会	Sawa, Y., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Akai, T., and Takagi, S. (2015), Pore-Filling Nature of CH ₄ Adsorption Behavior in Kerogen Nanopores: A Molecular View Based on Full-Atom Kerogen Models. SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition.	口頭発表
2015	国際学会	Okamoto, N., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Akai, T., and Takagi, S. (2015), Slip Velocity and Permeability of Gas Flow in Nanopores for Shale Gas Development. SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition.	口頭発表

2015	国際学会	Tateyama, Y. (2015), Structure Analysis of Adsorption on Solid/Liquid Interfaces for Enhanced Oil Recovery, Oil and Gas Festival 2015.	口頭発表
2015	国際学会	Sugiyama, S. (2015), Construction of Digital Oil for Investigation of Crude Oil Properties, Oil and Gas Festival 2015.	口頭発表
2015	国内学会	小林和弥, 梁 云峰, 松岡俊文, 西 直哉, 作花哲夫 (2015), 分子動力学シミュレーションによる白雲母 NaCl水溶液界面での油滴の濡れ性の検討, 日本地球惑星科学連合2015年大会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	本田博巳, 澤 侑乃輔, 堂垂達也, 松岡俊文, 横井 悟, 辻 隆司 (2015), 秋田県矢島地域の女川層のシリカ鉱物岩石結構と孔隙の消長, 平成27 年石油技術協会春季講演会予稿集(個人講演).	口頭発表
2015	国内学会	尾島亮誠, 千歳翔大, 村田澄彦 (2015), 単一フラクチャー内における原油掃攻撃動の圧力依存性について, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	澤侑乃輔, Yunfeng Liang, 本田博巳, 村田澄彦, 松岡俊文, 赤井崇嗣, 高木 是 (2015), ケロジェン中のナノポアにおけるCH ₄ の吸着現象の分子動力学的検討, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	草薙和也, 村田澄彦, 後居洋介, 神野和人, 佐飛峯雄, 加藤是威, 富樫嗣彦 (2015), セルロースナノファイバーの石油開発用増粘剤への適用性について, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	日比隆太郎, 梁 云峰, 村田澄彦, 松岡俊文, 中嶋 秋 (2015), 分子動力学法によるアスファルテン除去剤選択について, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	杉山俊平, 梁 云峰, 森本正人, 中野正則, 村田澄彦, 松岡俊文 (2015), 原油物性値の把握を目的とした Digital Oil の作成, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	岡本直樹, Yunfeng Liang, 本田博巳, 村田澄彦, 赤井崇嗣, 高木 是, 松岡俊文 (2015), シェールガス開発のためのナノ空隙内ガス流動の分子動力学シミュレーション, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	立山 優, 片所優宇美, 村田澄彦, 梁 云峰, 松岡俊文, 蜂谷 寛, 福中康博, 三野泰之, 下河原麻衣, 石油増進回収技術への応用を目的とした固液界面における吸着構造解析, 平成27年石油技術協会春季講演会予稿集.	口頭発表
2015	国内学会	村松玲奈, 村田澄彦, 薛 自求, 松岡俊文 (2015), 分布式光ファイバ計測を用いた地層変形モニタリングに関する基礎的研究, 平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会講演集.	口頭発表
2015	国内学会	石塚師也, 松岡俊文, 田村正行 (2015), 多偏波SARデータを用いたPS干渉SAR解析手法の開発, 日本リモートセンシング学会第59回学術講演会.	口頭発表

2015	国内学会	Yunfeng Liang, October 2015, Committee Meeting of Rock Mechanics in the Society of Materials Science, Japan.	招待講演
2015	国内学会	Yunfeng Liang, February 2016, International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I2CNER), Kyushu University, Fukuoka, Japan.	招待講演
2016	国際学会	Ishitsuka, K., Matsuoka, T. and Takahashi, T., Recent ground displacement around Tokyo using persistent scatterer SAR interferometry, 1st Southeast Asian Conference on Geophysics, Bali, Indonesia, Sep., 2016.	口頭発表
2016	国際学会	Takahashi, T., Model-based permeability estimation of shaly sandstone using seismic and resistivity data, 1st Southeast Asian Conference on Geophysics, Bali, Indonesia, Sep., 2016.	口頭発表
2016	国際学会	Takahashi, T., Model-based estimation of rock strength, from seismic velocity, EAGE2016, Vienna, Austria, June, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	Takahashi, T. and Tanaka, S., Model-based permeability estimation of shaly sands using seismic velocity and resistivity data, AGU2016, San Francisco, USA, Dec., 2016.	ポスター発表
2016	国際学会	K. Ishitsuka, T. Tsuji, T. Matsuoka, “A pixel-based baseline criteria selection for InSAR time-series analysis based on the estimation accuracy of surface displacement”, CEOS(The Committee on Earth Observation Satellites) Calibration and Validation Workshop 2016, Tokyo Denki University, Tokyo, 9 September, 2016.	口頭発表
2016	国内学会	石塚師也・高橋亨・松岡俊文・相澤隆夫, ALOSおよびALOS-2データを用いた斜面崩壊地域の検出ー富士山を例として, JpGU2016, 千葉, 5月, 2016年	口頭発表
2016	国内学会	石塚師也・高橋亨・松岡俊文・相澤隆夫, 干渉SAR解析を用いた富士山における斜面崩壊モニタリング, 地盤工学研究発表会, 岡山, 9月, 2016年	口頭発表
2016	国内学会	高橋亨, 複合物理探査データを利用した土質地盤の透水係数の推定(その2), 地盤工学研究発表会, 岡山, 9月, 2016年	口頭発表
2016	国内学会	石塚 師也・辻 健・松岡 俊文, PS干渉SAR解析を用いた非都市域の地表変動モニタリングーニュージーランド・オハアキ地熱開発地域への適用、物理探査学会 第134回学術講演会、早稲田大学、2016年5月16日	口頭発表
2016	国内学会	高橋亨, 岩石の一軸圧縮強度と弾性波速度の関係のモデル化, 物理探査学会第134回学術講演会, 東京, 5月, 2016年	口頭発表

2016	国内学会	石塚 師也・辻 健・松岡 俊文、InSAR時系列解析における推定精度を考慮したピクセル毎の基線長閾値の選定法、日本リモートセンシング学会 第60回(平成28年度春季)学術講演会、B08, 日本大学、千葉、2016年5月12日	口頭発表
2016	国際学会	Matsuoka, T. Why Nano-Geosciences are Necessary for Petroleum Engineering, Goldschmidt2016, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	招待講演
2016	国際学会	Kobayashi, K., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Takahashi, S. Amano, K., Nishi, N., and Sakka. T. Cation specific bridging of acid oil on muscovite surface: Improved description of low-salinity EOR, Goldschmidt2016.	口頭発表
2016	国際学会	Tateyama, Y., Kobayashi, K., Murata, S., Liang, Y., Mino, Y., Takahashi, S., and Matsuoka, T. Structure Analysis on Oil-Mineral Interface for Application to Enhanced Oil Recovery, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	口頭発表
2016	国際学会	Matsuoka, T. Why Nano-Geosciences are Necessary for Petroleum Engineering, Goldschmidt2016, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	招待講演
2016	国際学会	Kobayashi, K., Liang, Y., Murata, S., Matsuoka, T., Takahashi, S. Amano, K., Nishi, N., and Sakka. T. Cation specific bridging of acid oil on muscovite surface: Improved description of low-salinity EOR, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	口頭発表
2016	国際学会	Tateyama, Y., Kobayashi, K., Murata, S., Liang, Y., Mino, Y., Takahashi, S., and Matsuoka, T. Structure Analysis on Oil-Mineral Interface for Application to Enhanced Oil Recovery, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	口頭発表
2016	国際学会	Jia, J., Liang, Y., Tsuji, T., Murata, S., and Matsuoka, T. (2016) P-T Diagram of Elastic Moduli of CH ₄ and CO ₂ Hydrate, Goldschmidt2016, June 26 - July 1, 2016, Yokohama, Japan	口頭発表
2016	国内学会	杉本達洋, Yunfeng Liang, 村田澄彦, 松岡俊文, 高橋悟, 下河原麻衣, (2016), 分子動力学法を用いた孔隙形状がNMR緩和時間に与える影響に関する研究, 平成28年石油技術協会春季講演会予稿集, 石油技術協会春季講演会, 2016年 6月8日～9日, 秋田市	口頭発表
2016	国内学会	志賀正茂, Yunfeng Liang, 小林和弥, 村田澄彦, 松岡俊文, 二酸化炭素/ 塩水/ 白雲母の三相界面系における接触角の塩水濃度による影響, 平成28年石油技術協会春季講演会予稿集, 石油技術協会春季講演会, 2016年 6月8日～9日, 秋田市	口頭発表

2016	国内学会	小林和弥, Yunfeng Liang, 村田澄彦, 松岡俊文, 高橋悟, 下河原麻衣, 天野健一, 西直哉, 作花哲夫 (2016), 低濃度塩水EORに向けた分子動力学法による粘土鉱物表面での濡れ性変化の検討, 第46回石油・石油化学討論会予稿集, 第46回石油・石油化学討論会, 2016年 11月17日～18日, 京都市	口頭発表
2016	国内学会	志賀正茂, 梁云峰, 村田澄彦, 林為人, 松岡俊文 (2016), 二酸化炭素-塩水-鉱物三相界面の濡れ性変化に対する分子動力学的検討, 資源・素材学会: 低炭素社会構築のためのCCS, 2016年9月13日,	口頭発表
2016	国際学会	Toshifumi Matsuoka State of the Art and Current Situation of CCS, I2CNER INTERNATIONAL WORKSHOP CO2 STORAGE DIVISION, Kyuusyuu Univ., 2016年2月4日	招待講演
2016	国際学会	Yunfeng Liang, Injected CO2 behavior using molecular dynamics, I2CNER INTERNATIONAL WORKSHOP CO2 STORAGE DIVISION, Kyuusyuu Univ., 2016年2月4日	招待講演
2016	国際学会	T. Matsuoka, CCS Research and Development in Japan, Developing CCS through a Center for Excellence in Indonesia, Jakarta, 2016年2月9日	招待講演
2016	国内学会	村松玲奈, CO2圧入に伴う坑井近傍変動のジオメカ連成解析, 平成27年度環境資源システム工学研究室成果報告会, 東京, 2016年3月9日	口頭発表
2016	国際学会	S. Minato, R. Ghose, T. Tsuji, M. Ikeda, and K. Onishi, Imaging hydraulic fractures at Median Tectonic Line, Japan using multiply generated and scattered tube waves in a shallow VSP experiment, EGU General Assembly 2016, EGU2016-15876, Austria, Vienna, 20 April 2016.	口頭発表
2016	国際学会	T. Tsuji, and F. Jiang, "Immiscible fluid displacement patterns under various reservoir conditions and their influence on geophysical properties", 8th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, 1291, Cincinnati, USA, 12 May, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	F. Jiang, and T. Tsuji, "Numerical Simulations of Three-Phase Relative Permeability in Berea Sandstone using Lattice Boltzmann Method", 8th International Conference on Porous Media & Annual Meeting, 1114, Cincinnati, USA, 12 May, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	J. Jia, Y. Liang, S. Murata, T. Tsuji, T. Matsuoka, "Diagram of Elastic Moduli of CH4 and CO2 Hydrate", Goldschmidt2016, Pacifico Yokohama, 1 July, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	F. Jiang, X. Li, T. Tsuji, "A parallel implementation of three-phase LB model for CO2-EOR", 25th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics (DSFD) 2016, International Meeting Hall at Southern University of Science and Technology, Shenzhen. China, 5 July, 2016.	口頭発表

2016	国際学会	T. Tsuji, "Digitization of Natural Rocks for Estimation of The Hydrologic and Elastic Properties.", SEG-AGU Workshop: Upper Crust Physics of Rocks, Hilo Hawaiian Hotel, Hilo, Hawaii, USA, 13 July, 2016.	招待講演
2016	国際学会	T. Tsuji, T. Ikeda, F. Jiang, "Hydrologic and elastic modeling for time-evolved digital rock models : Insight into rock and fault evolution process", Crustal Dynamics 2016: Unified Understanding of Geodynamic Processes at Different Time and Length Scales, A10, Takayama, Gifu, 22 July, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	T. Tsuji, "Description of heterogeneous rock pore structures using mathematical methods", Study Group Workshop 2016, Institute of Mathematics for Industry, Kyushu University, 27 July, 2016.	招待講演
2016	国内学会	辻 健, "次世代の貯留層モデリングとモニタリングに向けたデジタル岩石物理", 講演会"資源開発工学の展望～探査工学・海底資源開発の最前線", 早稲田大学, 2016年7月28日	招待講演
2016	国際学会	F. Jiang, T. Tsuji, "A Three Phase Numerical Simulation Method for CCS-EOR", AOGS 2016 13th Annual Meeting, IG12-A008, Beijing, China, 2 August, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	T. Ikeda, F. Jiang, T. Tsuji, "Digital Rock Physics for Evaluating Effects of CO2 Saturation on Seismic Velocity in Natural Sandstone", AOGS 2016 13th Annual Meeting, IG12-A007, Beijing, China, 2 August, 2016.	口頭発表
2016	国内学会	辻 健, "天然岩石の間隙形状の数学的な記述方法", 日本数学会 数学連携ワークショップ ---物質材料科学に潜む『数理』を探る---, 関西大学, 大阪府, 2016年9月16日	招待講演
2016	国際学会	C. Eng, T. Ikeda, T. Tsuji, "ELASTIC PROPERTIES OF FAULT CORE SAMPLES USING DIGITAL ROCK PHYSICS: INSIGHT INTO SEISMOGENIC FAULT CHARACTERIZATION", The 22nd Formation Evaluation Symposium of Japan, JOGMEC-TRC, Chiba, 29 September, 2016.	口頭発表
2016	国内学会	辻 健, "貯留層の連続モニタリングに向けた試み", JOGMEC-TRC ウィーク 2016「未来に向けて～リソース&テクノロジー～」, JOGMEC TRC, 千葉県, 2016年10月13日	招待講演
2016	国内学会	山田勝之、磯真一郎、斎藤章"TDEM法を用いた海底熱水鉱床探査における耐圧容器の影響の除去", 第135回(平成28年度秋季)物理探査学会学術講演会、(論文54)、北海道、2016年10月28日	口頭発表

2016	国際学会	T. Ikeda, T. Tsuji, M. Takanashi, I. Kurosawa, M. Nakatsukasa, K. Worth, and D.J. White, "Time-lapse monitoring of shallow subsurface in the Aquistore CO2 storage site from surface-wave analysis using a continuous and controlled seismic source", Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Kay Bailey Hutchison Convention Center, USA, 18 October, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	S.Minato, R. Ghose, T. Tsuji, M.Ikeda, K.Onishi, "Modeling and imaging multiply generated and scattered tube waves due to multiple hydraulic fractures", Society of Exploration Geophysicists Annual Meeting, Kay Bailey Hutchison Convention Center, USA, 19 October, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	S. Singh, F. Jiang and T. Tsuji, "Influence of slip flow at fluid-solid interface upon permeability of natural rock", GHGT-13, The SwissTech Convention Center, Lausanne, Swiss, 17 November, 2016.	ポスター発表
2016	国際学会	T. Ikeda, and T. Tsuji, "Robust subsurface monitoring using a continuous and controlled seismic source", GHGT-13, The SwissTech Convention Center, Lausanne, Swiss, 17 November, 2016.	ポスター発表
2016	国際学会	T. Tsuji, T. Ikeda, and F. Jiang, "Hydrologic and elastic properties of CO2 injected rock at various reservoir conditions: Insights into quantitative monitoring of injected CO2", GHGT-13, The SwissTech Convention Center, Lausanne, Swiss, 17 November, 2016.	ポスター発表
2016	国際学会	T. Tsuji, "Mathematical descriptions of rock pore geometry and its evolution", Forum "Math-for-Industry" 2016, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, November 23, 2016.	招待講演
2016	国際学会	T. Tsuji, "Fault displacement and fluid in the earth", Hungary-Japan (HAS-JSPS) Workshop on Physics of Rheology and Fracture, Kyushu University, December 5, 2016.	招待講演
2016	国際学会	C. Eng, T. Ikeda, and T. Tsuji, "Effect of Crack-Filling Materials on Seismic Velocity Using Digital Rock Physics", International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST) 2016, Kyushu University, 8 December, 2016.	口頭発表
2016	国際学会	C. Cao, and T. Tsuji, "The application of neural network for mineral classification", International Symposium on Earth Science and Technology (CINEST) 2016, Kyushu University, 8 December, 2016.	口頭発表
2016	国内学会	辻 健, "数学を用いた岩石の間隙形状と鉱物化プロセスのモデル化", A3 foresight program 勉強会, 北海道大学, 2017年1月14日	招待講演
2016	国内学会	辻 健, "デジタルロックを利用した地盤のモデル化と探査データの解釈", 物理探査学会・深田地質研究所共催シンポジウム「物理探査の評価と解釈の最前線」, 東京大学, 2017年1月26日	招待講演

2016	国際学会	Tezuka, K., Tamagawa, T., Yokoi, S., Microseismic traffic system for the environmental risk control in the Fukumezawa shale oil fracturing pilot in Akita, Japan, 1st Southeast Asian Coference on Geophysics, Bali, Indonesia, Sep., 2016.	口頭発表

招待講演	31	件
口頭発表	154	件
ポスター発表	12	件
総数	197	件

VI. 成果発表等

(3) 特許出願【研究開始～現在の全期間】(公開)

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	その他 (出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい)	関連する論文のDOI	発明者	発明者 所属機関	関連する外国出願 ※
No.1											
No.2											
No.3											

国内特許出願数 0 件
公開すべきでない特許出願数 0 件

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	その他 (出願取り下げ等についても、こちらに記載して下さい)	関連する論文のDOI	発明者	発明者 所属機関	関連する国内出願 ※
No.1											
No.2											
No.3											

外国特許出願数 0 件
公開すべきでない特許出願数 0 件

成果発表等

(4)受賞等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①受賞

年度	受賞日	賞の名称	業績名等 (「〇〇の開発」など)	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2014	2014/6/23	ITB Gansesha賞	Gundih CCSプロジェクトを含む 長年のバンドン工科大学への貢	松岡俊文	バンドン工科大学	本プロジェクト立ち上げ、運営 を含むITBとの長年の連携研	
2015	2015/3/9	日本地震学会 若手学術奨励賞	「海域における地震波構造調査 データの解析に基づくプレート 境界断層の全体像の解明」	辻 健	日本地震学会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2015	2015/6/29	日本地質学会 小澤儀明賞	「地震探査データ解析の高精度 化によるプレート境界断層の形 態と応力分布に関する研究」	辻 健	日本地質学会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	
2015	2015/7/19	日本物理探査学会 第132 回学術講演会優秀発表賞	「地中貯留されたCO2のモニタリ ングに向けたデジタル岩石物理 の導入」	辻 健	日本物理探査学会	1.当課題研究の成果である	
2015	2015/7/19	日本物理探査学会 第132 回学術講演会優秀発表賞	「弾性波アクロスによる浅部構 造モニタリングのための表面波 解析」	池田 達紀	日本物理探査学会	1.当課題研究の成果である	
2015	2015/6/10	石油技術協会平成27年度春 季講演会「優秀発表賞」	ケロジェン中のナノポアにおけ るCH4の吸着現象の分子動力 学的検討	澤侑乃輔	石油技術協会	3.一部当課題研究の成果が含まれる	

6 件

(新聞・TV等)報道

年度	掲載日	掲載媒体名	タイトル/見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項

0 件

VI. 成果発表等

(5) ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等の活動【研究開始～現在の全期間】(公開)

① ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	概要
2011	2011/5/16	第1回CCSシンポジウム	バンドン	70名(60名)	(第一回シンポはworkshopと称して一般向けに実施) インドネシアにおけるCCSの重要性やグンディガス田について講演し、当該プロジェクトについて理解してもらう。
2011	2011/7/27	第2回CCSシンポジウム	東京	107名(15名)	インドネシアにおけるCCSの重要性やグンディガス田の地質等について講演し、当該プロジェクトについて、多くの日本側研究者に理解してもらう。
2012	2011/9/21	第3回CCSシンポジウム	ジャカルタ	113名(105名)	インドネシアにおけるCCSの重要性やCCSモニタリング技術について講演し、当該プロジェクトを多くのインドネシア側研究者に理解してもらう。
2012	2012/12/4	第4回CCSシンポジウム	東京	76名(51名)	CCSにおける最近のトピック2件と本研究の成果4件の発表)
2012	2013/3/16	第5回CCSシンポジウム	デンパサール	40名(15名)	関係代表機関の発表5件、基調講演4件、本プロジェクトの成果4件の発表を行う。1国関係諸機関から主担当者が参加。JCCMは非開催。
2013	2013/11/8	ADB Inception Workshop	ジャカルタ	25名(24名)	ADB 資金によるITBの地上設備・法整備関係FSのMOU締結の際のワークショップ
2013	2013/11/22	第6回CCSシンポジウム	福岡	55名(22名)	Gundih CCSプロジェクトのsocializationの一環として一般向け普及啓蒙の実施
2013	2014/03/14	ADBワークショップ	バンドン	39名(30名)	ADB 委託によるITBの地上設備・法整備関係FSの検討ワークショップ
2013	2014/03/15	第7回CCSシンポジウム	デンパサール	60名(48名)	Gundih CCSプロジェクトのsocializationの一環として一般向け普及啓蒙の実施。第2回JCCM開催。
2014	2014/04/18	招待講演(CCSセミナー)	東京	30名	「インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの研究開発動向と展望」と題して講演を行った。(後援者は高橋亨)((株)技術情報センターからの依頼講演)
2014	2014/5/16	Gundih CCS ワークショップ	オスロ	50名(6名)	ノルウェー政府からの研究資金獲得のためのCCSワークショップをITB研究者と共に実施(松岡教授参加)
2014	2014/8/22	ADB F/S Workshop	バンドン	50人(46人)	ITB受託研究(地上設備、法規制、社会受容)にSATREPS研究を含めた一般向けワークショップを開催
2014	2014/9/26	第8回CCSシンポジウム	秋田県大潟村	51人(34人)	定例のGundih CCSシンポジウム。ITB学長、経済調整担当省高官の参加を得た。
2014	2014/9/29	ADB F/S Workshop	東京	108人(30人)	バンドンで開催(8/22)したワークショップとほぼ同様の内容で日本人向けのワークショップを開催し、本プロジェクトの状況を一般公開
2014	2014/12/12	招待講演(GCCSI勉強会)	東京	40人(-)	「インドネシア・グンディガス田におけるCCSパイロットプロジェクトの現状と今後の計画」と題して講演を行った。(講演者は高橋亨)(GCCSI日本事務局からの依頼講演)
2014	2015/2/26	招待講演(GCCSI勉強会)	東京	40人(-)	「日本周辺でのCO2地中貯留のポテンシャルと課題:FCNERの取り組み」と題して講演を行った。(講演者は辻健)(GCCSI日本事務局からの依頼講演)

2014	2015/3/7	第9回CCSシンポジウム	スラバヤ	60人(51人)	定例のCCSシンポジウムに加えて、ADB F/S研究内容を網羅する一般向け報告を行った。第3回JCCM開催。
2015	2015/9/29	第10回CCSシンポジウム	京都	60人(33人)	定例のCCSシンポジウムに加えて、RITEの施設訪問を実施した。
2015	2016/2/18	CCS国際シンポジウム	東京	120人(7人)	JSTサポートによる国際シンポジウムを開催。国内外よりCCSのキーパソンおよびインドネシアGundih関係者を招聘しCCSの内外の情報を発信した。
2015	2016/3/19	第11回CCSシンポジウム	ジョクジャカルタ	50人(40人)	Gundihプロジェクト状況報告、地上設備構築MOC署名式を行った。3/18には第4回JCC会議を開催
2016	2016/9/2	第12回CCSシンポジウム	デンパサール	80人(70人)	ITB主催の第一回東南アジア地球物理会議と合体してシンポジウムを開催したことから、技術成果の公開、活動の紹介の全てに亘り、効果的なアウトリーチができた。
2016	2017/1/20	第13回シンポジウム	東京 (早稲田大学)	100人(30人)	パネルディスカッションスタイルで、Gundihプロジェクトの現況、インドネシアでの今後のクリーンエネルギー資源開発、研究機関のCCSへの貢献について討議を行った。また、内部会議において、地上設備、坑井改修での課題克服、ポストGundihプロジェクト立ち上げ、SOPの内容に関して活発な議論が行われた。次回、シンポジウムは本年5・6月にインドネシアにて、JCC会議と併せて開
2016 (第五期)	2017/8/5	第14回(最終)シンポジウム	インドネシア (Blora県Cepu市)	300人(293人)	本プロジェクト期間中に年2回のペースで開催してきたCCSシンポジウムの最終シンポジウム。今回はCO2の圧入予定サイトを管轄するブローラ県にて開催。現地の石油開発技術を教える大学校(STEM AKAMIGAS)を会場としたこともあり、多くの学生の参加も得た。

19 件

②合同調整委員会(JCC)開催記録(開催日、議題、出席人数、協議概要等)

年度	開催日	議題	出席人数	概要	備考
2012	2012/9/10	Gundih CCSプロジェクトにおける最初の合同委員会であり、本プロジェクトを推進する際の課題についての協議	20	第1回JCCM 本研究の計画のプレゼンが行われ、研究を推進するに当たって、日本・インドネシアの関係諸機関が解決すべき課題を抽出し、検討を行った。	(主たる参加者) Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachmat Sule, Mr. Doddy Sasongko, Dr. Djedi Widarto, Dr. Eko Widiyanto, Dr. Awali Priyono 松岡俊文、高橋亨、福田洋一、辻健、村田卓弥、小原基文 (開催地:ジャカルタ(文部省高等教育総局))
2013	2014/3/15	2013年度研究成果概要報告 2014年度研究計画の説明	25	第2回JCCM Dr. Djoko Santoso高等教育総局長を議長として会議を進めた。日本・インドネシア双方のプロジェクトリーダーから現況の説明を行った後、羽藤より2013年度の研究成果概要と2014年度研究計画の説明を行い、次年度研究体制を含めて承認された。	(主たる参加者) Dr. Djoko Santoso, Prof. Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachamat Sule, Dr. Tutuka Ariadi, Dr. Benjamin Sapiie, Dr. Djidi Widarto 荒津有紀、村瀬憲昭、山地憲治、中村牧夫、松岡俊文、羽藤正実、高橋亨、辻健、齋藤草、山本純治、佐藤徹、 (開催地:バリ島)
2015	2015/4/29	中間評価結果の日本・インドネシアによる内容確認と合意	20	第3回JCCM 本プロジェクトの中間期における評価を行った。日本側研究者への事前ヒアリングを基にJICA/JSTの評価団によるインドネシアの関係諸組織へのヒアリングを行った。この結果、遅延傾向にあった圧入開始時期が本プロジェクトの終了までに実施不可能と判断され、5年間のプロジェクトの延期は断念された。	(主たる参加者) Dr. Djoko Santoso, Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachmat Sule, Dr. Tutuka Ariadi, Dr. Pardono Suwignjo, Dr. Narayatno Wagimin, 森尚樹、大塚高弘、松岡俊文、高橋亨 (開催地:ジャカルタ)

2014	2015/3/6	2014年度研究成果概要報告 2015年度研究計画の説明 2015年度以降のファンディング 中間評価対応	30	第4回JCCM Dr. Djoko Santosoを議長として会議を進めた。JICAジャカルタ事務所壽楽氏の挨拶の後、Dr. Wawan Kadirインドネシアプロジェクトリーダーから現況の説明を行った。羽藤より2014年度の研究成果概要と2015年度研究計画の説明を行い、研究体制を含めて承認された。Dr. SuleからADB次期ファンディングに関わる事務手続き進捗状況の説明を行った。	(主たる参加者) Dr. Djoko Santoso, Prof. Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachamat Sule, Dr. Tutuka Ariadi, Dr. Benjamin Sapiie, Dr. Djidi Widarto 壽楽正浩、松岡俊文、羽藤正実、尾西恭亮、高橋亨、辻健、山本純治、福田洋一、村田澄彦 (開催地：スラバヤ)
2015	2016/3/18	2016年度研究成果概要報告 2015年度研究計画の説明 ADB第二次予算(地上設構築関係) MOC COE設立関係報告 JICA研究者名簿(MOU)更新	20	第5回JCCM Dr. Djoko Santosoの急用により、文部省総局長Dr. Dimiyatiが議長となり議事が進行した。壽楽氏(JICAジャカルタ事務所)よりSATREPS終了後にもJICAとして支援をしたい旨のコメントがあった。これに対応して、Dr. Dimiyatiより早急にインドネシア側としての対応を考えるとの発言あり。Dr. Wawan KadirよりGundih プロジェクトの進捗状況の説明があり、続いて、羽藤より2015年度研究の概要と2016年度の研究計画を説明した。	(主たる参加者) Dr. Dimiyati, Prof. Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachamat Sule, Dr. Benjamin Sapiie, Dr. Harris Prabowo, Dr. Gusti Sideman 壽楽正浩、松岡俊文、羽藤正実、高橋亨、辻健、山本純治、福田洋一、村田澄彦 (開催地：ジョクジャカルタ)
2016	2017/3/24	終了評価結果の日本・インドネシアによる内容確認と合意	20	第6回JCCM 本プロジェクトの終了期における評価を行った。日本側研究者への事前ヒアリングを基にJICA/JSTの評価団によるインドネシアの関係諸組織へのヒアリングを行い、プロジェクト終了時の総合評価を行った。日本・インドネシア双方の評価代表(伊藤民平、Hotmatua Daulay)による合意署名を行った。また、双方のプロジェクトリーダー(松岡俊文、Dr. Wawan Kadir)によるウィットネス署名を行った。	(主たる参加者) Dr. Djoko Santoso, Dr. Wawan Kadir, Dr. Rachmat Sule, Dr. Tutuka Ariadi, Dr. Benjamin Sapiie, Dr. Hotmatua Daulay, 伊藤民平、谷口光太郎、山地憲治、上阪圭介、松岡俊文、高橋亨、羽藤正実 (開催地：ジャカルタ)
6	件				

成果目標シート

研究課題名	インドネシア中部ジャワ州グンディガス田における二酸化炭素の地中貯留及びモニタリングに関する先導的研究
研究代表者名 (所属機関)	松岡俊文 (京都大学学際融合教育研究推進センター)
研究期間	平成23年採択(平成24年4月1日～平成29年3月31日)
相手国名／主要相手国研究機関	インドネシア共和国/バンドン工科大学、Pertamina国営石油、トリサクティ大学

付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	日本人研究者による東南アジア初のCCSパイロット研究の推進による関連日本企業のインドネシアへの投資推進、並びに、国際競争力向上
科学技術の発展	・岩石表面の濡れ性、孔隙内CO2流動のミクロスケールな基礎研究を取り込んだモニタリング技術開発(CO2飽和度推定技術) ・研究対象地域の特徴を考慮したモニタリング技術(電磁探査手法)の開発によるCCS技術の向上
知財の獲得、国際標準化の推進等	ISO等、世界におけるCCS技術標準化への貢献
世界で活躍できる日本人人材の育成	・インドネシアでの技術供与(供与機器を使った現地でのCCS実験)への参加を通じた指導的人材の育成 ・現地でのワークショップへの講師派遣による世界で活躍できる人材の育成
技術および人的ネットワークの構築	本プロジェクト推進による、インドネシア石油産業界、担当省庁、関連大学との広範囲な人的ネットワークの構築
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	・東南アジアで初のCCS作業基準書作成(これらを基にしたインドネシア国内でのCCS事業のデファクト標準を目指す) ・CO2挙動把握の新手法を含む先進技術と周辺基盤技術の開発とその成果公表の継続

上位目標

インドネシアでのCCS技術指針の普及(当該指針に基づくCCS計画の策定)

インドネシアでのCCS技術指針の認知(関連組織における当該指針の採用)

プロジェクト目標

インドネシアでのCCS技術指針を20以上の関連組織に対して提言

