

地下エネルギー資源の消費がともなう排熱の地球温暖化におよぼす影響 Influence on the global warming of the exhaust heat the consumption of mining energy resources accompanies

今清水 雄二^{1*}

IMASHIMIZU, Yuji^{1*}

¹ 秋田大学鉱業博物館

¹ Mining Museum of Akita University

出版された学術書¹⁾によれば、排熱の放出を伴う地下エネルギー資源の消費の増加が気候変動をもたらす可能性について検討すべきである。にもかかわらず、IPCC第4次評価報告では排熱の放出の地球温暖化におよぼす影響はあまりよく議論されていないように思われる。この理由はおそらく半地球または地球スケールの観測によるならば、部分的に排熱に起因する都市ヒートアイランドは地球温暖化にほとんど影響しないという推定によるのだろう。しかしながら、現代世界において行われる工業生産、輸送、コミュニケーションおよび家の生活など人類の活動は、様々の熱機関を運転するさいに化石燃料の燃焼によって生ずる膨大な量の熱エネルギーを消費する。全世界のそれら熱機関による膨大な量の熱エネルギーを消費するプロセスにおいて発生する排熱は、都市地域の近くの空気にだけでなく、地球環境のより大きな領域の空気、川と海にも放出されると考えられる。

本研究では、全世界のエネルギーの消費を通して発生する排熱の総量が世界エネルギー統計から推定され、大気中のCO₂濃度の増加によって誘導される放射強制力と比較される。結論として、CO₂放射強制力と比較して小さいかもしれないが、排熱の地球温暖化におよぼす影響は無視されないと推測される。また、単位質量のCO₂ガスの発生を伴う燃焼熱が化石燃料に含まれる化合物の種類に従い異なることが示される。これらのことは地球温暖化の制限の基準としてCO₂の量だけでなく排熱の量も検討されなければならないことを示唆する。

統計²⁾によれば、世界のエネルギー消費量 Q_{WF} は年々単調に増加し、2000年の総計は $Q_{WF}(2000) = 8075$ [Mtoe yr⁻¹] = $1.072/10^{-13}$ [W]である。環境に放出される排熱量 Q_{WE} は $Q_{WE} = Q_{WF}(1 - h)$ 、ただし $h(0.4)$ は平均熱効率、によってほぼ表されるとし、また、 A_{glob} を地球の表面積とすると、地球温暖化におよぼす排熱の影響は $F_{EH} = Q_{WE}/$

CO₂ 秘中貯留にともなう貯留システムの力学的応答評価手法の研究：産総研における取組の紹介

Assessing the geomechanical responses of storage system in geological CO₂ storage: An introduction of research program i

奥山 康子^{1*}, 船津 貴弘¹, 雷 興林¹, 上原 真一², 中島 善人¹, 藤井孝志¹, 中尾 信典¹

OKUYAMA, Yasuko^{1*}, FUNATSU, Takahiro¹, LEI, Xinglin¹, UEHARA, Shin-ichi², NAKASHIMA, Yoshito¹, Takashi Fujii¹, NAKAO, Shinsuke¹

¹ 産総研地圏資源環境研究部門, ² 東邦大学理学部

¹Institute for Geo-Resources and Environment, AIST, ²Faculty of Science, Toho University

CO₂ 地中貯留では、地下に CO₂ を圧入するため、貯留システム（貯留層 + シール層）を構成する岩盤およびその周囲で地層間隙圧の上昇が避けられない。日本列島は地質学的変動帯であり、地下でのこのような変化は力学的な不安定を招くおそれを排除できない。したがって CO₂ 地中貯留に伴う地下地層間隙圧の上昇や、貯留システムの力学的応答を事前評価することは、技術的にクリアすべき重要な課題である。CO₂ 圧入に伴う力学的な不安定は、基本的には地層間隙圧が上昇することで有効封圧が減少することによるが、不安定化の程度はサイト特性に依存する。CO₂ 地中貯留の貯留サイトは大規模断層を避けて新生代の地層から成る堆積盆に設置することとなるが、日本列島全体が変動帯であることで、若い地質時代の堆積岩についても、反射法探査で事前に把握できない小規模な亀裂系が存在する可能性をあらかじめ排除することは難しい。くわえて、新生代の地層を構成する堆積岩類はいわゆる「軟岩」から構成され、間隙圧上昇にともなう変形様式、その波及による流体浸透率の変化は、単純ではない。以上の背景を考慮し、産総研では経済産業省からの委託研究として、CO₂ 地中貯留にともなう亀裂性岩盤の力学的応答を評価する手法を確立する研究開発を行っている。技術開発の中心は、地下での流体流動とそれが引き起こす岩盤の力学的変化（すなわち、空隙率・浸透率の変化）をシミュレートする「流体流動 力学応答連成解析」手法を、わが国の地質に対して適応可能とするものである。流体流動 力学応答連成解析手法開発にあたっては、天然で CO₂ 質深部流体が活動した結果地表に達する亀裂が生じ流体の流出を見た、1965-1967 年の「松代事例」を、CO₂ 地中貯留にて懸念される漏洩および岩盤変形事例のナチュラルアナログとして、研究対象とする。わが国の地質条件にて上記手法を適用可能とするために、軟岩の力学的パラメータ（変形特性と浸透率変化）を取得する実験的研究および、間隙圧上昇に伴う軟岩の変形を岩石組織学的に解析する研究も、重要な要素である。以上の研究開発の全体像とこれまでに得られた成果について、ポスターで紹介する。

キーワード: CO₂ 地中貯留, 地層間隙圧, 力学的応答, 連成解析, 軟岩, ナチュラル・アナログ

Keywords: geological CO₂ storage, pore pressure, geomechanical response, coupled simulation, soft rock, natural analogue

淡路島野地下への空気の注入試験における地震波アクロスを用いたタイムラプス実証試験(その2) Time-lapse field experiment using seismic ACROSS at the air injection into the shallow ground in Awaji Island-II

鶴我 佳代子^{1*}, 笠原 順三², 伊藤 慎司³, 山岡 耕春⁴, 生田 領野², 藤井 直之², 伊藤 潔⁵, 西上 欽也⁵, 山崎 文人⁴, 本城 泰樹¹

TSURUGA, Kayoko^{1*}, KASAHARA, Junzo², Shinji Ito³, YAMAOKA, Koshun⁴, IKUTA, Ryoya², FUJII, Naoyuki², ITO, Kiyoshi⁵, NISHIGAMI, Kin'ya⁵, YAMAZAKI, Fumihito⁴, Taiki Honjo¹

¹ 東京海洋大学, ² 静岡大学, ³ NTT データ CCS, ⁴ 名古屋大学, ⁵ 京都大学

¹ Tokyo Univ. Marine Sci. Tech., ² Shizuoka Univ., ³ NTT-DATA CCS, ⁴ Nagoya Univ., ⁵ Kyoto Univ.

1. はじめに

アクロス (ACROSS) は、地下の地層物性の時間変化を検知・監視するために開発されたタイムラプス (4 D) 技術の1つである (Kumazawa et al., 2000; Kasahara et al., 2010)。タイムラプス技術は、地下の石油・ガスや二酸化炭素の貯留域の監視や火山下のマグマ溜の活動監視などに有効である。本発表では、地震波アクロスを用い、地下空間への空気注入に伴う地層物性の時間変化の監視におけるアクロスの有効性を明らかにするための実証試験について報告する。

2. 空気注入とアクロス観測の概要

観測は、2011年2月11日~3月10日(28日間) 兵庫県淡路市の野島断層周辺で実施した。2月26日~3月3日(5日間) 野島断層東側に位置する空気注入井より、大阪層群地下の深さ100mに、合計80トン(注入圧21気圧)の空気を注入した(笠原他、本学会、2012)。地震波の送信は、南東部に設置された縦置型アクロス震源A(名古屋大学所有)と北東部の横置型アクロス震源Bを用い、期間中異なる周波数成分の地震波をスイープ送信した。震源Aでは、周波数10~30Hz帯域で水平面内での加震を行い、縦置型震源Bでは、周波数10~35Hz帯域で鉛直面および水平面内の回転加震を行った。受振は、地表32地点に設置した3成分ジオフォンと、800-mポアホール観測点(京都大防災研)によって行った。

3. 結果

地震波アクロスでは、回転型震源の正回転時と逆回転時の地震波記録の位相を調整し合成することで、任意方向に直線的に力を与えた場合の震源-観測点間の伝達関数 \mathbf{H} を得ることができる (Kunitomo and Kumazawa, 2004)。3方向成分をもつ力 \mathbf{F} に対して、3方向成分の観測変位 \mathbf{U} が得られた場合、得られる伝達関数 \mathbf{H} は9つの要素をもつ2階テンソル H_{ij} で表現される (i および j は方向成分で、震源から空気注入井に向かう方向を radial (r) 方向、直交する方向を transverse (t) 方向、鉛直方向を vertical (z) と記述)。

本発表では、縦置型震源Aに対する解析について主に報告する。鉛直面内の振動を表す伝達関数 H_{zr} の時間波形記録には、比較的小振幅のP波および大振幅のS波が観察され、水平面内の振動を表す H_{tt} の記録ではP波は不明瞭で、主としてS波が観察された。P波初動の見かけ伝播速度は $V_p \sim 2.3$ km/s、S波は $V_s \sim 0.7$ km/s であった。これらは、北東部の横置型震源Bに対する見かけ速度 $V_p = 1.6, 2.5, 4.5$ km/s、 $V_s \sim 0.5$ km/s (笠原他, 2011) と調和的で、本地域の地下構造に起因すると予想される。

地下への空気注入に伴う地震波記録の変化は、震源AおよびBのいずれに対しても、主に注入井東側の地域で顕著に見られた。注入井と震源Aのほぼ中間に位置する観測点#7付近では、走時0.2秒付近に小振幅のP波初動、0.4秒付近以降にS波と後続の波群が続く。波形の時間変化を明瞭にするため、空気注入前の2月24日0時の波形を基準として、以降の波形から差し引いた差分波形を調査した。その結果、空気注入開始に伴う波形変化が、主としてS波相に明瞭に確認でき、 H_{zr} 成分においては、空気注入開始より1日程度遅れて、S波および後続波群の波形に顕著な変化が確認できた。その影響は後続波群で長期に持続し、注入終了後に小さくなった。 H_{zt} 成分でも注入開始後に変化が認められた。注入井直近の観測点#14では空気注入直後より変化が出現し、#5観測点、800mポアホール地震計においても、絶対量は大きくはないが、明瞭な変化が観測された。一方、野島断層西側の観測点では波形の変化が不明瞭になる傾向が見られ、断層の影響も示唆された。

4. 結論

縦置型アクロス震源を用いて、地下への空気の注入に伴う伝達関数の変化を調べる実験を行った。その結果、地下への空気注入に際し、アクロスによる精密制御観測を適用することで、地下の変化に伴う極めて明瞭な変化を検出できた。縦置型および横置型震源のいずれの解析結果でも、空気注入の開始に伴い、波形残差の変化が多数の地表地震計で観測された。観測点#7では空気注入から1日ほど遅れて変化が開始し、原波形上でも明瞭にその変化を見る事もできた。更

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



HRE27-P03

会場:コンベンションホール

時間:5月20日 15:30-17:00

なる詳細解析は必要であるが、これらの成果は、今後地下へのCO₂の注入等による地下状態の変化を刻々モニタリングするタイムラプス観測において、アクロスが非常に有用な手段となり得ることを示している。

謝辞 本研究はJCCPプロジェクトの一環として行われた。本プロジェクトに対するJCCPの方々のご理解と御支援に深く感謝を表す。

キーワード: CCS, タイムラプス, アクロス

Keywords: CCS, time lapse, ACROSS

地中貯留リスクアセスメントツールの開発 GERAS CO2-GS Development of risk assessment tool, GERAS CO2-GS

田中 敦子¹, 坂本 靖英¹, 駒井 武^{1*}

TANAKA, Atsuko¹, Yasuhide Sakamoto¹, KOMAI, Takeshi^{1*}

¹ (独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

¹National Institute of Industrial Science and Technology (AIST)

CO₂ 地中貯留のリスクアセスメント用ツールとして開発した『GERAS-CO₂GS』について紹介する。

GERAS-CO₂GS は、CO₂ 地中貯留のリスクマネジメントを支援することを目的に開発したプログラムである。その主な機能は、地中の貯留層に注入された CO₂ の地層内の移動予測に基づき、上方に向かった場合のリスクの大きさを評価することにある。

新たな産業施設のリスク・アセスメントを考える場合、一般的には必要な施設・設備の全てについてリスク評価を行う必要がある。すなわちリスク・アセスメントの考慮の対象として、貯留層、キャップロック、上層、CO₂ 注入井、注入プラント、CO₂ 輸送用設備の全てがカバーされる。これらの施設・設備のリスク・アセスメント作業の中で、注入 CO₂ の漏洩の可能性とリスクの見積もりが最も重要である。その理由は、第 1 に、CO₂ の地中保持率の算定が、CO₂ 地中貯留の目的である温暖化ガス排出抑制の効率の把握に不可欠であるためである。第 2 として、CO₂ の地中保持率は、注入サイト周辺のリスクを理解する鍵となるからである。

我々がプロトタイプとして開発したリスクアセスメントツール GERAS-CO₂GS は、CO₂ 注入対象の地層を幾つかのセグメントに分割してそれぞれに CO₂ 保持率を与え、地層中の断層やクラックのような潜在的な経路を介した漏洩量を算定するものである。

GERAS-CO₂GS の主な機能は次の 4 項目である。

- (a) CO₂ の保持と漏洩の計算 (保持率、漏洩率、保持量、漏洩量)
- (b) CO₂ の地表拡散についてのデータ処理
- (c) リスクデータの定義と編集
- (d) リスク評価

GERAS-CO₂GS が扱う CO₂ 注入サイトモデルは、次のセグメントで構成されている：注入井、注入地層 (リザーバー、キャップロック、上層、地表、断層、海底、海中、海面)。

CO₂ 注入サイトモデルの各セグメントの CO₂ 保持率としては、別途実施中の断層を介した注入 CO₂ の移動に関する実験およびシミュレーションを用いた検討結果を利用する。GERAS-CO₂GS は与えられた CO₂ 注入量に対して、各セグメントの CO₂ の保持量と漏洩量を算出して表示する。また GERAS-CO₂GS は地表面上に CO₂ が漏出した場合の地表面上のリスクを判定する機能を持つ。地表の CO₂ の拡散と濃度分布は、既存の大気拡散曝露リスクアセスメントプログラム (ADMER) を利用して計算する。GERAS-CO₂GS は、ADMER の計算結果を読み込んで多様なリスク判定を行う。ADMER は、気象庁の過去の観測データを組み込んで物質の拡散計算が出来る。

GERAS-CO₂GS は開発中のプログラムであり、現状はプロトタイプである。今後は GERAS-CO₂GS をさらに拡張して、さまざまなリスクシナリオの分析が可能にしたいと考えている。GERAS-CO₂GS 扱えるリスクを充実して、より広範なリスクを評価できることを目指している。現状では、海底面・海中・海面のルートについて、特に充足が必要な状態である。

これらの研究を通じて CO₂ 地中貯留に対する基準や法制化の研究に寄与できるものと考えている。

キーワード: CO₂ 地中貯留, リスクアセスメント, CO₂ 漏出, 地表, インパクト評価

Keywords: CO₂ geological storage, risk assessment, CO₂ migration, the surface of the earth, impact analysis

分散型 CCS における二酸化炭素圧入シミュレーション A numerical simulation Study for the Distributed CCS

當舎 利行^{1*}

TOSHA, Toshiyuki^{1*}

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

水素エネルギーは、低炭素社会の実現の為に導入が期待されており、分散型電源である定置型燃料電池発電システムなどへの利用が検討されている。この水素エネルギーの普及の為に、安価で安定的にかついかに環境負荷を低減して水素を製造するかが課題となる。現状、大規模に水素を製造しているのは石油精製産業であり、製油所内のプロセス等にて使用されている。製油所では水蒸気と製油所オフガス等から高純度水素を製造しており、大きな水素供給ポテンシャルを有する。また、水素精製工程の中で高純度のCO₂が副生されている。水素社会実現に向けて、製油所における水素製造に CCS としてのCO₂地中貯留を組み合わせる方法が提唱・検討されている。水素製造設備において吸収法にて水素精製された後、副次的に生み出されるCO₂純度が98%以上と高いことに着目し、水素製造に伴うCO₂の地中貯留に関して検討を行った。水素製造装置当たりのCO₂排出量が年間10万トン程度であることから、分散型CCSとしての適用規模に一致することにも合理性があると考えた。

本研究において、いくつかの課題を設けて検討を行った。地中貯留設備は、大きく地表設備と地下構造に分かれるが、それらを束ねて、一つのモデルを作成することを目的とした。今回検討した課題としては、水素製造方法の調査、少量のCO₂を地中に圧入する方法の検討(方法と設備)、水素製造近傍の地質的な条件の抽出・評価、モデル地点での地質概念モデルの創設、およびCO₂圧入のシミュレーションである。シミュレーションは、設定したモデルフィールドにて年間10万トン規模のCO₂を注入するモデルにて、解析コードとしてTOUGH2によって実施をした。また、CO₂は浅部帯水層に圧入することとしている。臨界状態でのCO₂圧入は、深部(800m以深)の貯留層に圧入を行うが、深部になれば坑井の掘削などにおいてより高価格となる。小規模貯留では、大規模圧入によるスケールメリットが望めないため、シミュレーションの目的は、浅い層(200~600m)の中で少量のCO₂が安全に貯留されることを確認することである。

CO₂の微小バブルは、浅い貯蔵所にCO₂を注入する最も適切な方法であると考えられる。しかし、CO₂の微小バブルの特性を含むシミュレーション・コードは、まだ開発されていないことから、TOUGH2コードを使用することし、CO₂は気体としてとり扱った。このため、CO₂には浮力がかかりCO₂は上方に移動する。しかし、この条件でも安定した貯留が認められるのであれば、微小バブルについても貯留可能性はより大きい結論できる。シミュレーション結果から、ガス状態のCO₂がモデル分野での浅い貯蔵所に格納され、漏出が20年の圧入期間中には検知されないと推論された。

CO₂地中貯留では、超臨界CO₂による年間1Mtを超える大規模貯留が多くの国で商業規模として検討されている。しかし、大規模になるとコストもかかるのみならず、適応できる場所も限られ地域住民の合意形成も難しくなる。アジア諸国では、大規模な貯留層を見つけれない地域も多く、コストの負担が少ない方法をとって浅部に分散をして貯留する方法も開発すべきと考える。

本研究は経済産業省の補助金により一般財団法人石油エネルギー技術センターが実施している技術開発事業の一環として行われた。

キーワード: 分散型 CCS, 地中貯留, シミュレーション, 石油精製, 水素エネルギー

Keywords: Distributed CCS, Geological Storage, Simulation, Petroleum refining industry, Hydrogen energy

玄武岩を用いた水 - 岩石 - CO₂ 反応の解析と応用 Analysis and Application of Water-Rock-CO₂ Reaction Using Basalt

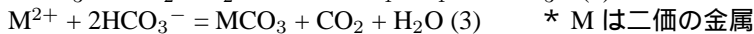
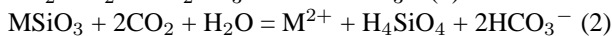
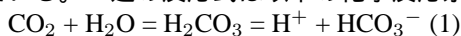
片山 智弘^{1*}, 鹿園 直建¹, 高谷 雄太郎², 加藤 泰浩²

KATAYAMA, Tomohiro^{1*}, SHIKAZONO, Naotatsu¹, TAKAYA, Yutaro², KATO, Yasuhiro²

¹慶應義塾大学大学院, ²東京大学大学院

¹Graduate School, Keio University, ²Graduate School, University of Tokyo

反応系内に水と岩石と二酸化炭素が存在している反応(以下、水-岩石-CO₂反応と呼ぶ。)の重要性が非常に増している。一連の反応式は以下の化学反応系列で表せる。



(1)は水への二酸化炭素の溶解反応、(2)は水、岩石、二酸化炭素が反応し、炭酸水素イオンと金属イオンが生成する反応である。そして、系内でそれらが過飽和になり(3)が起こり、炭酸塩が生成する。これらの反応は溶解メカニズム、反応速度、活性化エネルギーなど不明な点が多い。

一方で近年の地球化学的な諸課題はこの水-岩石-CO₂反応の解析が非常に重要である。二酸化炭素地中貯留の固定までの貯留時間や、始生代において暗い太陽のパラドックスの原因が、高二酸化炭素分圧がどうか検討できる。さらに、素早く安定的にミネラルを供給してミネラルウォーターを生成させようと試みる先行研究(五味, 2009)の統計学的な見地からの再現性検討、水圏、岩石圏、大気圏の物質循環におけるフラックスの実験に基づいた正確な推定など様々な分野に役立てることが出来ると考えられる。

そこで、本研究では溶解実験を炭酸塩の生成に重要な二価の金属イオン(Fe, Mg, Ca)を豊富に含んでいることや中央海嶺の大部分を構成している玄武岩を用いて、水-岩石-CO₂反応の溶解反応速度と溶解メカニズムを解析し、必要に応じて実際を想定した反応シミュレーションを行った。

二酸化炭素地中貯留時間推定の為に地下水を用いて溶解実験も行った。結果、溶解反応メカニズムが温度や溶媒の差異、岩石の空隙率によらないことがわかった。

また、溶解反応速度定数の算出方法によって値に差が出ることや、多成分系の算出方法や近似を用いない計算方法を用いることで従来の計算値よりも速い溶解反応速度定数が算出された。

速度論に基づくシミュレーションにより、二酸化炭素地中貯留においては貯留開始が約8~50年で99%程度貯留できることが推定できることがわかり、従来よりも速い結果になった。実際の地下水を用いても過去の先行研究と同様のスケールで推定できることが分かった。今後拡散や物理的な挙動を合わせることでさらに正確な貯留時間推定が出来ると考えられる。

キーワード: 玄武岩, 水, 岩石反応, 二酸化炭素地中貯留

Keywords: Basalt, Water-Rock Reaction, CO₂ Sequestration

ユタ州のクリスタル (CO₂) 間欠泉での重力連続測定 Continuous gravity measurements at Crystal (CO₂) Geysers, Utah

杉原 光彦^{1*}, 相馬宣和¹

SUGIHARA, Mituhiko^{1*}, Nobukazu Soma¹

¹ 産業技術総合研究所

¹ AIST

米国ユタ州のクリスタルガイザーで CG5 重力計による連続測定を 2011 年 12 月に行った。クリスタルガイザーは過飽和の炭酸ガスが泡立って吹き上がる沸騰を伴わない間欠泉である。調査の目的は 2 つある。(1) 既存坑井による CO₂ 漏洩の天然類似現象を調査すること, (2) クリスタルガイザーで地表近くの地層と同じ地層が深部にある場所で CO₂ 地中貯留を行う計画があり, そこで重力連続観測によるモニタリングを計画している。同じ地層内での CO₂ 移動に関わる現象に関わる重力変化を地表近くなれば CG5 重力計でも連続測定で検出できることを期待した。

観測期間の間欠泉活動は Gouveia 他が 2005 年に 76 日間にわたって行った観察記録とは全く異なっていた。当時は短期間の活動と長期間の活動の二種類が明確だったのだが, 今回は当時の短期間活動 (継続時間が 7-32 分) よりもはるかに短い (60-90 秒) 活動が約 10 分間隔で発生していた。

自動重力計 CG5 は指定した時間間隔で計測を繰り返すので連続的な重力観測を容易に行える。また, 6 Hz の 4 成分 (重力, 傾斜 2 成分, 内部温度) 内部信号も記録することができる。この機能を使った連続観測により, 間欠泉活動と関連付けられる特有の信号が重力に加えて傾斜 2 成分にも見出された。間欠泉活動は水・CO₂・熱の移動に関わる不安定現象であるが, 流体の貯留層や経路の深度・体積等に関して連続重力記録から情報が得られることは, これまでにも広河原 CO₂ 間欠泉やニュージーランドの間欠泉で行ってきた。可搬型重力計 CG5 は数時間程度の時間変化の現象ならば動力的現象の解明に適用できる。

尚, 本研究は, 経済産業省からの委託研究「平成 23 年度二酸化炭素回収・貯蔵安全性評価技術開発事業 (弾性波探査を補完する CO₂ 挙動評価技術の開発)」の一部として実施した。

キーワード: 間欠泉, 炭酸ガス, 重力

Keywords: Crystal Geysers, CO₂, gravity