

研究成果報告書

研 究 題 目		カンラン岩への二酸化炭素固定に関する基礎的研究	実 施 年 度
			2025 年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学大学院・先進理工系科学研究科	
	氏 名	片山郁夫	印
1. 研究の目的・背景			
カーボンニュートラル社会の実現には、二酸化炭素の排出を抑制する方策はもちろんのこと、大気中へ排出された二酸化炭素を処分することも必要である。そのネガティブエミッションの一つとして挙げられるのが、二酸化炭素を分離回収し地中へと貯留する技術（CCS）である。しかし、従来の CCS では、堆積層の空隙に超臨界状態の二酸化炭素を圧入する手法が中心であり、日本のような地震が活発な地域では、断層運動による炭素流体の漏洩が問題視される。そこで現在注目されているのが、カンラン岩への炭素固定プロセスである。なぜなら、カンラン岩と炭素流体の反応では、炭素は鉱物中にトラップされ、安定的かつ長期的に二酸化炭素を地下に貯留することが可能になるからである。そこで本研究では、カンラン岩の透水係数を室内実験によって測定するとともに、岩石を通過した流体の化学分析を行うことで、カンラン岩と炭素流体の反応速度を実験的に検証する。また、我々は北海道南端部に位置する幌満カンラン岩体での原位置試験を国際陸上掘削計画（ICDP）に申請中であり、実験室の結果をフィールドスケールにどのように応用するかを検討する。これら一連の研究は、二酸化炭素地中処分の新技術の開発に貢献するものであり、将来的なカーボンニュートラル社会の実現に必須な技術と言える。 カンラン岩への炭素固定技術の開発は、大気中の二酸化炭素を安全にそして大量に地中に処分すること可能とする。世界各地に露出するカンラン岩体の量から、炭素貯蔵ポテンシャルは 10 兆から 100 兆トンほどであるとの見積もりがあり、それは世界全体の二酸化炭素排出量の千年から一万年分に相当する（Kelemen et al. 2019 <i>Frontiers in Climate</i>）。しかし、カンラン岩と炭素流体の反応に関する実験的な研究は十分でなく、二酸化炭素の地下注入の原位置試験を実施する前に、様々な側面から実験室での検証が必要である。そこで本研究では、カンラン岩中に炭素流体を浸透させる実験的研究を二つのテーマに絞って行う。テーマ A の破壊実験中のカンラン岩の透水係数の測定では、三軸圧縮試験機を用いてカンラン岩の破壊実験中の透水係数の測定を行った。テーマ B のカンラン岩を通過する炭素流体の化学分析では、カンラン岩と炭素流体の反応実験中の溶存イオンや pH の経時変化を計測した。さらに、地下で進行するカンラン岩と炭素流体との反応をモニタリングすることを目的に、反応実験後のカンラン岩の地震波速度を波形解析オシロスコープによって計測した。			

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

テーマ A：破壊実験中のカンラン岩の透水係数の測定

緻密な岩石であるカンラン岩の透水係数は 10^{-9} cm/sec ほどであり，一般的な動水勾配では同岩石中を流体が通過するには地質学的な時間が必要となる。しかし，差応力下におかれた岩石では破壊が進行し多数の割れ目が形成されることで，透水係数が著しく上昇することが知られている。そこで，カンラン岩の三軸変形試験中に浸透率を連続的に測定することで，割れ目の発達による透水係数の変化を計測した。その結果，変形序盤では浸透率はほぼ変化しないが，岩石の破壊直前に浸透率が急激に上昇し，透水係数が 2 桁ほど上昇することがわかった。そのため，緻密な岩石であるカンラン岩体においても，差応力のもと割れ目系が発達することで流体移動が可能となり，その割れ目を通じた炭素流体の移動により炭素固定反応が選択的に進むことが期待される。本テーマはほぼ計画通りに進んでおり，追加データを加え論文準備中であり，達成度合いは 80% 程度である。

テーマ B：カンラン岩を通過する炭素流体の化学分析

カンラン岩と炭素流体の反応カイネティクスは非常に速く，流体中の二酸化炭素分圧が高ければ室温下でも反応が進行することが指摘されているが，これらの研究は粉末試料を用いたものであり，実際の岩石でどのような時間スケールで炭素固定反応が進むかは定かでない。そこで，カンラン岩と蛇紋岩（カンラン岩が水質変成を受けた岩石）を用い炭素流体との反応実験を実施した。圧力容器内に投入した岩石と炭素流体（ $P_{CO_2}=1$ MPa）との反応に関して，日数ごとに流体の pH と溶存イオンを計測した。その結果，pH は時間経過とともに上昇し，ほぼ 20 日経過後にはほぼ一定の値となった。流体中の溶存イオンは，Si や Mg が時間とともに増加するが，溶出量はカンラン岩に比べ蛇紋岩の方が 2 桁程度高い傾向を示した。これは，蛇紋岩の方が空隙率が高く被表面積が大きいことが一因であると考えられる。また，Mg と Si の比は両岩石で異なり，カンラン岩ではカンラン石の溶脱が蛇紋岩ではブルース石の溶脱が起きていることが示唆される。本実験は室温下で行ったため反応速度が遅く炭酸塩鉱物の形成は見られなかった。今後は高温下での実験などより反応を促進する工夫が必要であり，達成程度としては 70% 程度である。

テーマ C：カンラン岩の炭素固定反応による地震波速度計測

カンラン岩と炭素流体との反応では，溶脱による空隙率の増加や反応生成物の沈澱による地震波速度の変化が予想され，そのような変化は地下での炭酸塩化反応の指標として活用することが期待される。そこで，上記反応実験後の岩石試料について新規購入した波形解析オシロスコープを用いて地震波速度を計測した。その結果，岩石の空隙率が増加しているにもかかわらず，反応前後で地震波速度の系統的な変化は見られなかった。その原因としては，空隙率の変化が局所的に限定されること，炭酸塩鉱物の沈澱によって空隙率の形状が変化することなどが挙げられる。今後は組織観察が必要であり，達成は 60% 程度である。

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

申請時は2年間の計画であったが、想定よりも実験が順調に進み、1年間でほぼ計画していた研究内容を進めることができた。2026年7月に実施した北海道幌満カンラン岩体の調査では、実験試料のサンプリングに加え、露頭スケールでのフラクチャー解析を行い現位置での浸透率およびその方向依存性を解析した。その成果は、大学院生が筆頭著者となり日本鉱物科学会の和文誌で公表済みであり。また、変形実験や炭酸塩化反応実験の透水係数や地震波速度の測定では、本研究で新規購入したデジタル微小流量計および波形解析オシロスコープによって研究効率が劇的に向上した。これらの成果については、現在論文を準備中である。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

カンラン岩の鉱物反応による炭素地中処分は、そのポテンシャルは非常に高いことが認識されつつも、実現可能性については未だ不明な部分が多く残る。今回の研究では、岩石の炭酸塩化に必要な流体経路および低温下での反応実験に取り組んだ。その結果、緻密な岩石であるカンラン岩体でも差応力のもとではフラクチャーの発達による透水性の向上がみられ、そのようなフラクチャーは現地の調査でも観察された。また、反応速度は温度に敏感であるが、室温下においてもカンラン岩の溶脱反応が進み、長時間の反応実験では炭酸塩鉱物の晶出も期待される。しかし、その反応速度はカンラン岩体への炭素地中処分を実現するに十分なものは現段階ではいえない。一方、玄武岩体に炭素注入を行った CarbFix などのプロジェクトでは天然系での反応速度は実験室のデータよりも数桁速いとの報告もあり、カンラン岩体においてもフィールドでのパイロットテストが必要であると認識されている。本研究はそのような実証試験を実施する上で貴重な基礎データを提供したといえる。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

公表論文（査読あり）

- ・成瀬雄一郎, 赤松祐哉, 伊藤禎宏, 中川嵩斗, 片山郁夫 2026. フラクチャーマッピングによる幌満カンラン岩体の浸透率テンソルの推定, *岩鉱*, doi.org/10.2465/gkk.251016.

学会発表

- ・Ikuo Katayama Importance of Mantle Carbonation in the Global Carbon Budget, Serpentine Days (online webinar), 年月：2025/12/2（招待講演）
- ・成瀬雄一郎, 片山郁夫 カンラン岩の浸透率から推測するアウターライズ断層に沿った海水の浸透速度 日本鉱物科学会（山口大学）年月：2025/9/11（研究発表優秀賞）
- ・中川嵩斗, 片山郁夫, 伊藤禎宏, 横山正 炭素流体と超塩基性岩の反応による物性と流体組成の変化 日本鉱物科学会（山口大学）年月：2025/9/12（研究発表優秀賞）
- ・成瀬雄一郎, 片山郁夫 アウターライズ断層に沿った海水の浸透速度に関する実験的検証 地球惑星科学連合大会（幕張），年月：2025/5/25
- ・伊藤禎宏, 片山郁夫, 森下亮佑, 松山和樹, 藤井昌和, 沖野郷子 Marie Celeste トランスフォーム断層から採取されたドレッジ試料の物性測定に基づく海洋地殻の変質 地球惑星科学連合大会（幕張），年月：2025/5/28（研究発表優秀賞）
- ・中川嵩斗, 片山郁夫, 伊藤禎宏, 横山正 CO₂流体と幌満カンラン岩および嶺岡蛇紋岩の反応による物理化学特性の変化 地球惑星科学連合大会（幕張），年月：2025/5/30
- ・片山郁夫, 石丸聡子, 市原寛, 桑谷立, 額額佑衣, 西山直毅, 諸野祐樹, 道林克禎, 森下知晃 幌満かんらん岩体での掘削と炭素注入プロジェクト計画 地球惑星科学連合大会（幕張），年月：2025/5/27

アウトリーチ活動

- ・片山郁夫, どうして地球は水にあふれ生命が宿る惑星になったのだろうか 広島こども文化科学館大人の科学談話室（広島），年月：2025/12/7（依頼講演）
- ・片山郁夫, 幌満マントル掘削と炭素注入プロジェクト：グローバル炭素循環の理解に向けて J-DESC シンポジウム「新たな ICDP 掘削提案に向けて—成功を共有し、次の挑戦へ!—」（みらい科学館），年月：2025/11/29（招待講演）
- ・片山郁夫, 水の惑星「地球」の未来のすがた フォッサマグナミュージアム「ナウマン博士来日 150 周年特別展記念講演会」（糸魚川），年月：2025/6/8（依頼講演）