

CO₂地中貯留における水理/力学的 視点からの軟岩の特性評価

国立研究開発法人産業技術総合研究所
地圏資源環境研究部門 CO₂地中貯留研究グループ
藤井 孝志

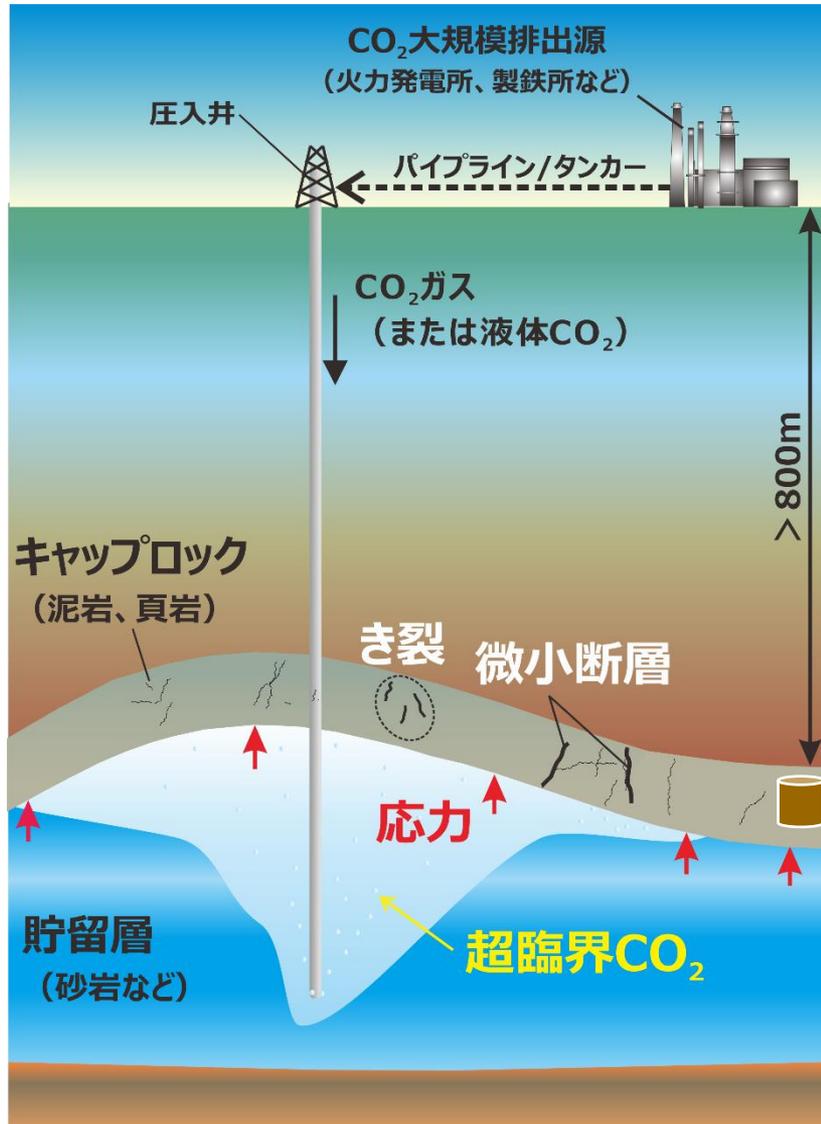
発表内容

- 背景と目的
- 実験手法
- 実験の結果と考察
- 軟岩の力学と水理の関係における
体系化について
- まとめ

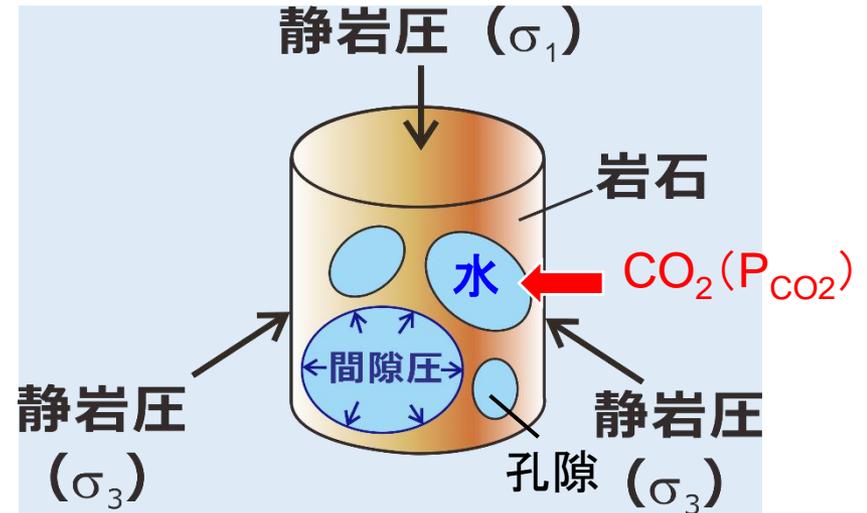


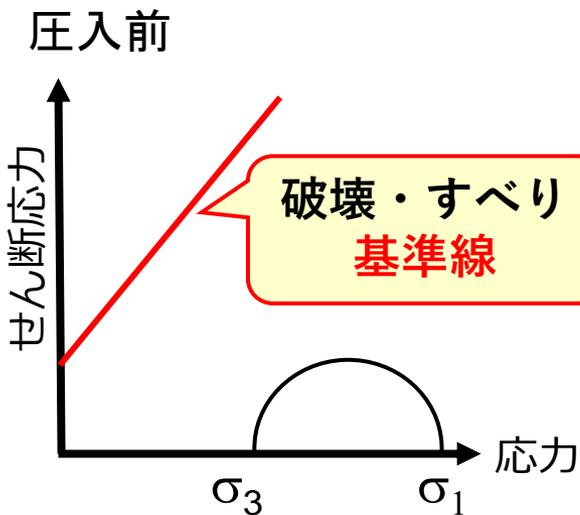
我が国のCO₂地中貯留サイトは、若い堆積岩 (軟質な岩石) で構成されている。

貯留層へのCO₂圧入過程



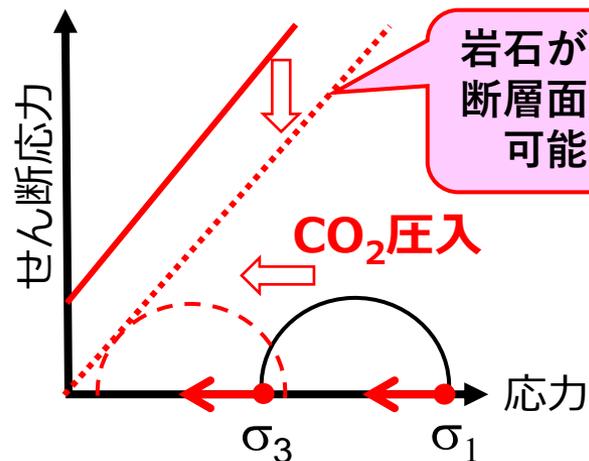
地中の岩盤にかかる力





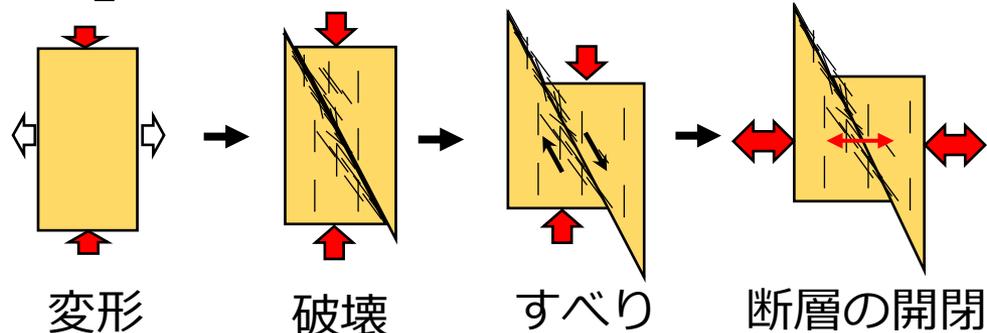
岩盤安定

CO₂を圧入すると。。。



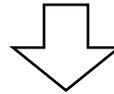
岩盤不安定

地中へのCO₂圧入で予想される岩盤の挙動



断層の形成による岩盤の浸透率の変化は、どの程度？
→貯留層からのCO₂漏出量（程度）の目安

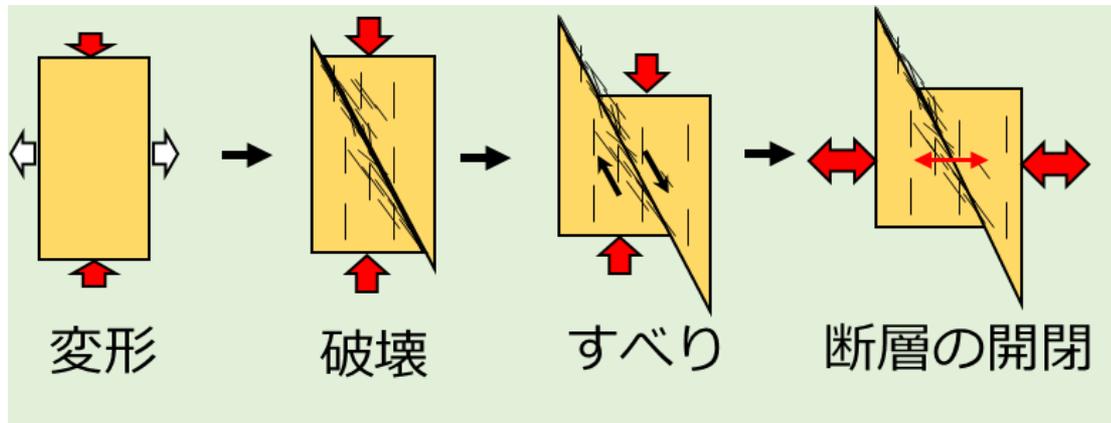
CO₂地中貯留のための安全な地下利用には、岩石の変形・破壊とすべりが、浸透率に及ぼす影響（力学と水理の関係）を調べる必要がある。



力学－水理の関係について

- 断層の形成（変形・破壊）の間の浸透率変化
- 断層のすべり過程と浸透率
- 断層の開閉挙動に伴う浸透率

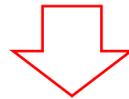
個々の現象
（素過程）に
着目した研究



断層形成の連続過程の間の浸透率変化に対する知見が乏しい

研究目的

- 様々な**軟岩**を対象に、貯留層へのCO₂圧入で想定される岩盤挙動に伴う浸透率の変化を調べる。
- 実験で得られた水理と力学の関係に関するデータの**体系化**を行う。



我が国でのCO₂地中貯留の実施に必要な、CO₂地中貯留条件下での軟岩の水理－力学の関係解明のための知見の提供をめざす。

発表内容

- 背景と目的
- 実験手法
- 実験の結果と考察
- 軟岩の力学と水理の関係における体系化について
- まとめ

岩石試料

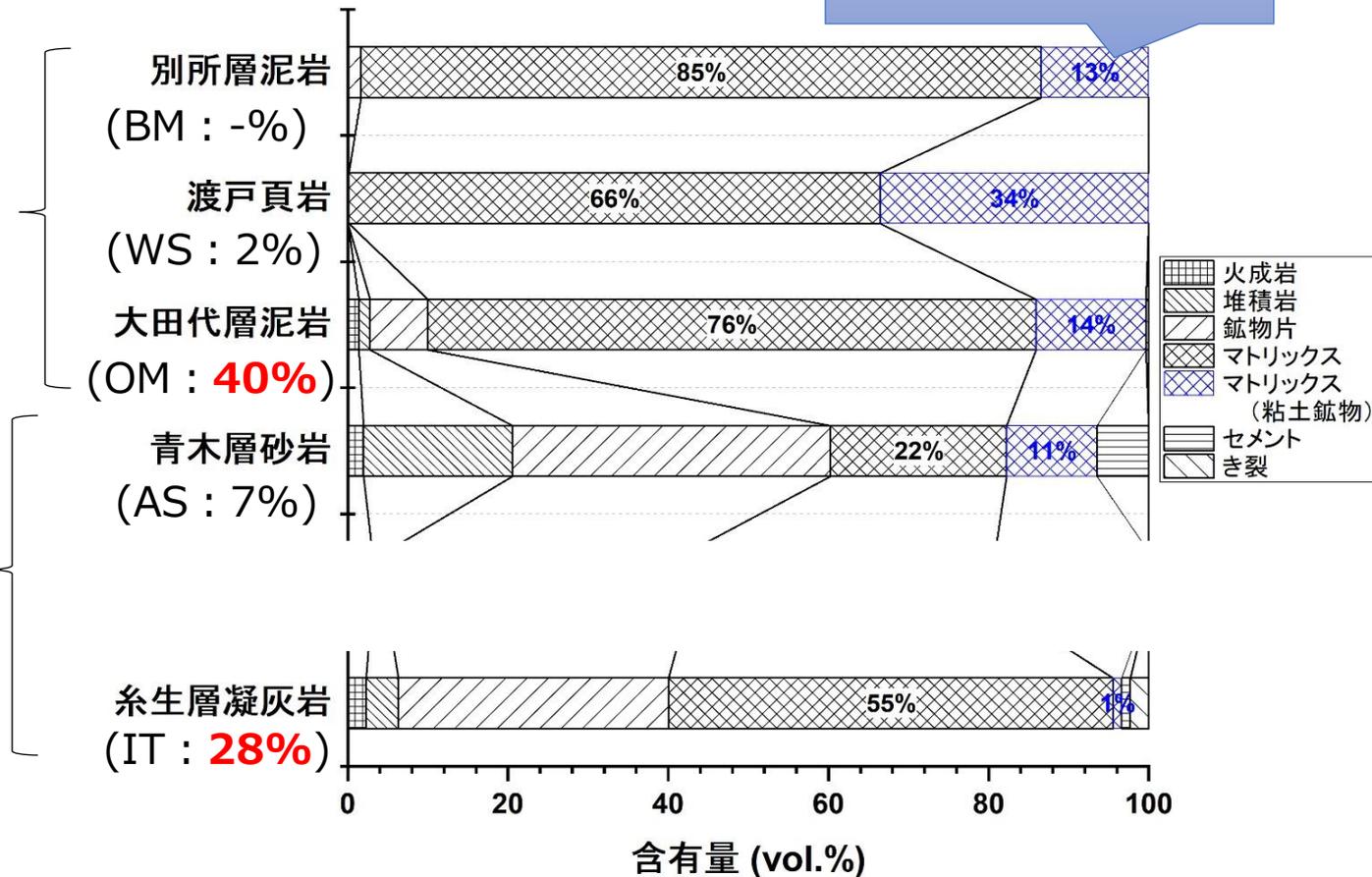
CO₂地中貯留のモデル岩石として、泥岩、頁岩をキャップロック、砂岩、凝灰岩を貯留岩として使用した。

各種岩石の鉱物組成

マトリックス中の粘土鉱物の割合

泥岩、頁岩→
キャップロック

砂岩、凝灰岩→
貯留岩



実験方法（せん断・透水実験）

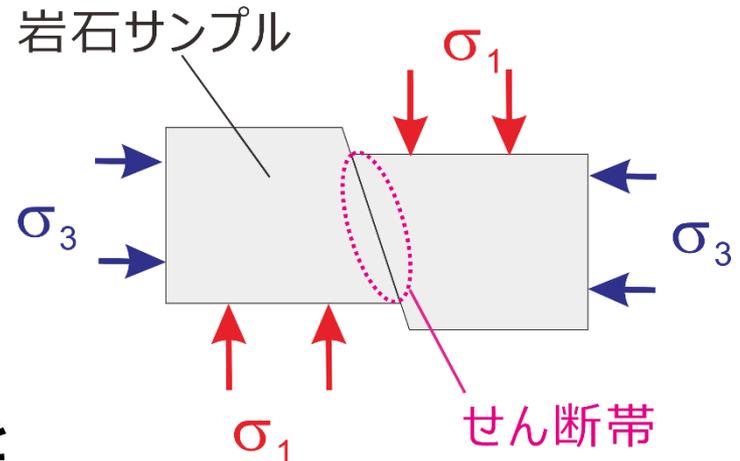
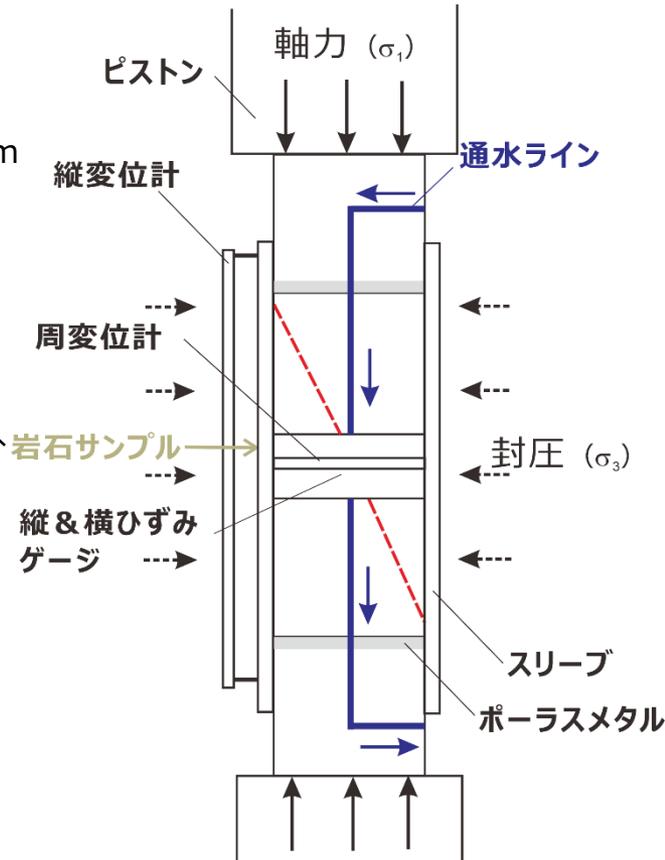
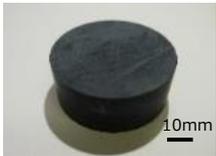
模擬CO₂地中貯留条件下で、せん断・透水実験を行うため、**特殊せん断・透水用治具**を用いて、三軸圧縮試験と同時に浸透率測定試験を行った。

地下1kmの貯留層へのCO₂圧入条件

実験条件：

- 温度：40 °C
- 封圧（静岩圧） σ_3 （油）：25-12MPa
- 間隙圧（水）：10MPa
- 載荷速度：0.3-0.4 mm/hours
- 最大変位：3から4 mm

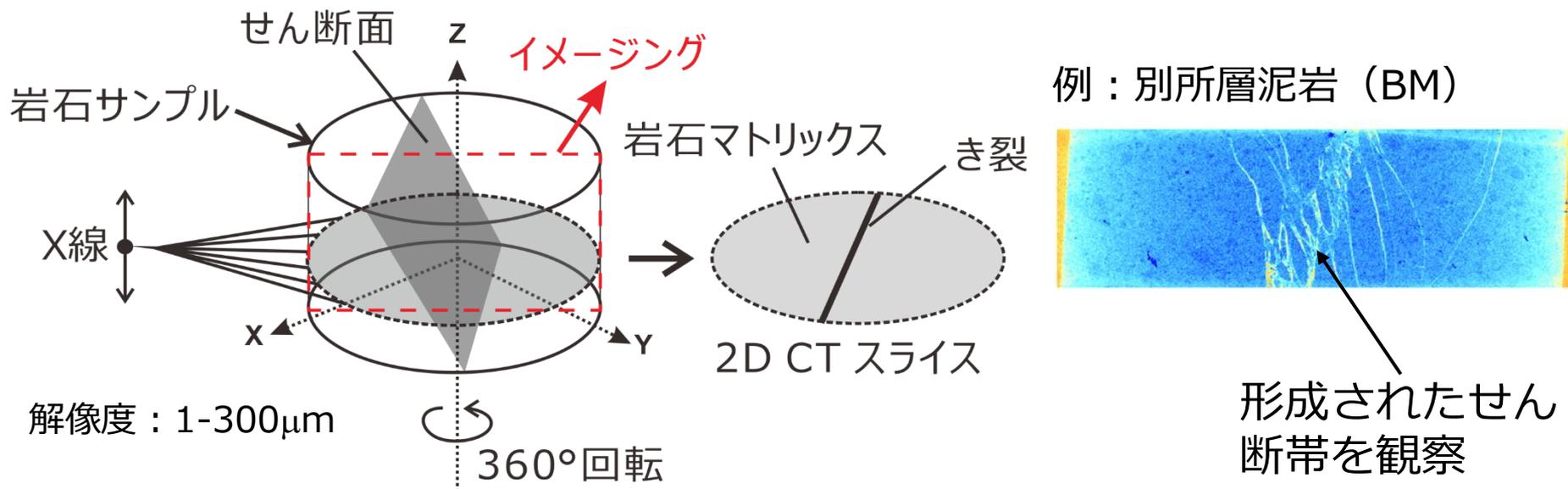
試料サイズ：
Φ50 mm×20 mm



ピストンで変位を与える（全体を圧縮する）→岩石を変形させる

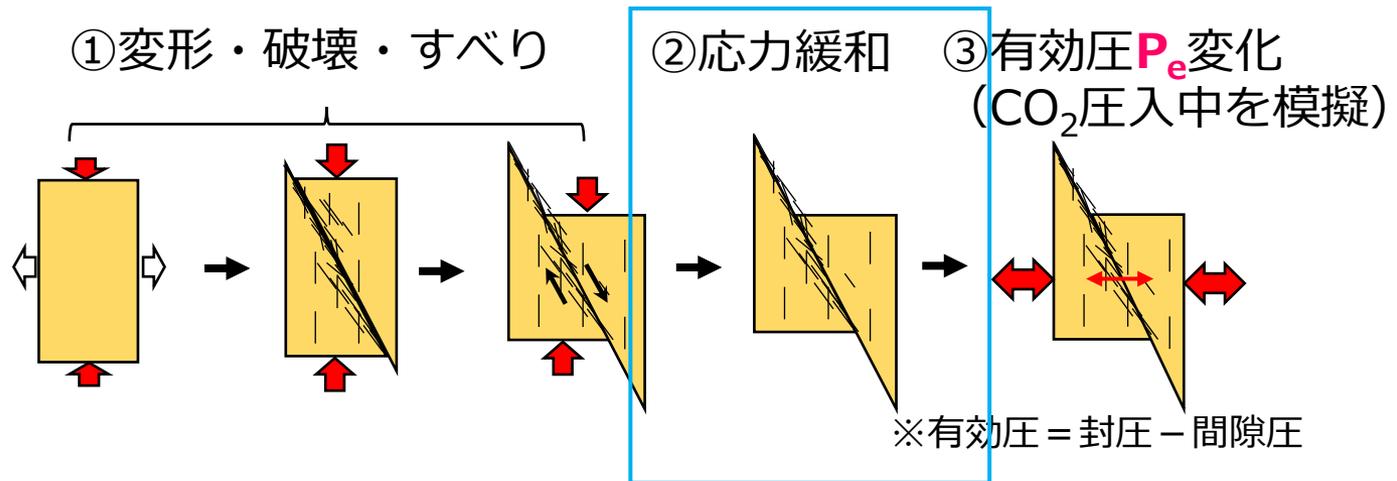
X線CTによるせん断帯の形状観察 (実験後試料の内部観察)

サンプル観察の様子と画像解析の例

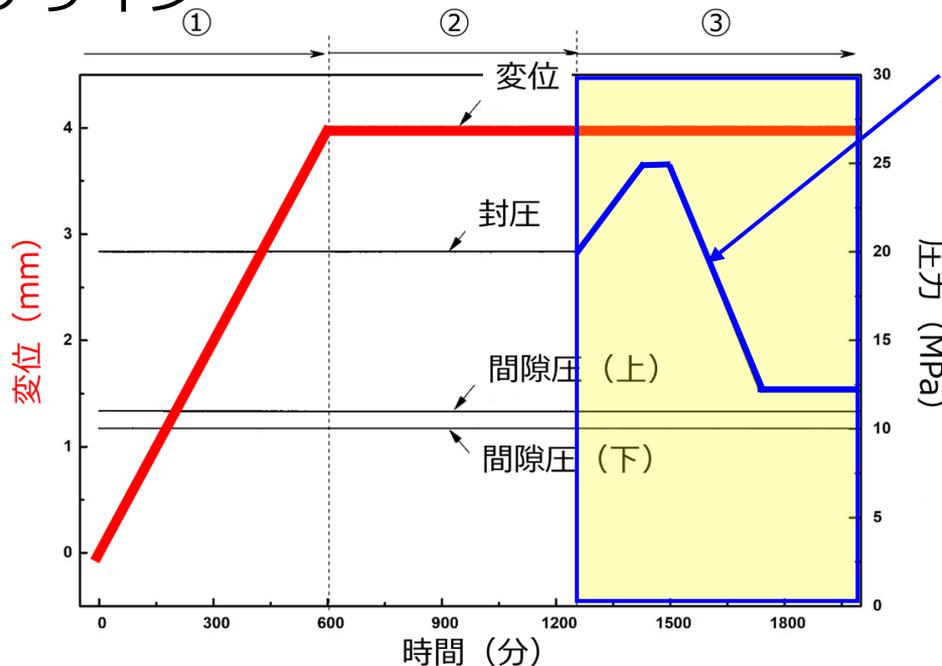


X線CT測定は、常温・常圧の大気圧下で実施。

実験プロセス



実験デザイン



CO₂圧入を想定：
有効圧 = 封圧 - 間隙圧
変化 一定

浸透率 (k) : ダルシー則

$$k = \frac{Q \cdot \mu \cdot L}{A \cdot \Delta P}$$

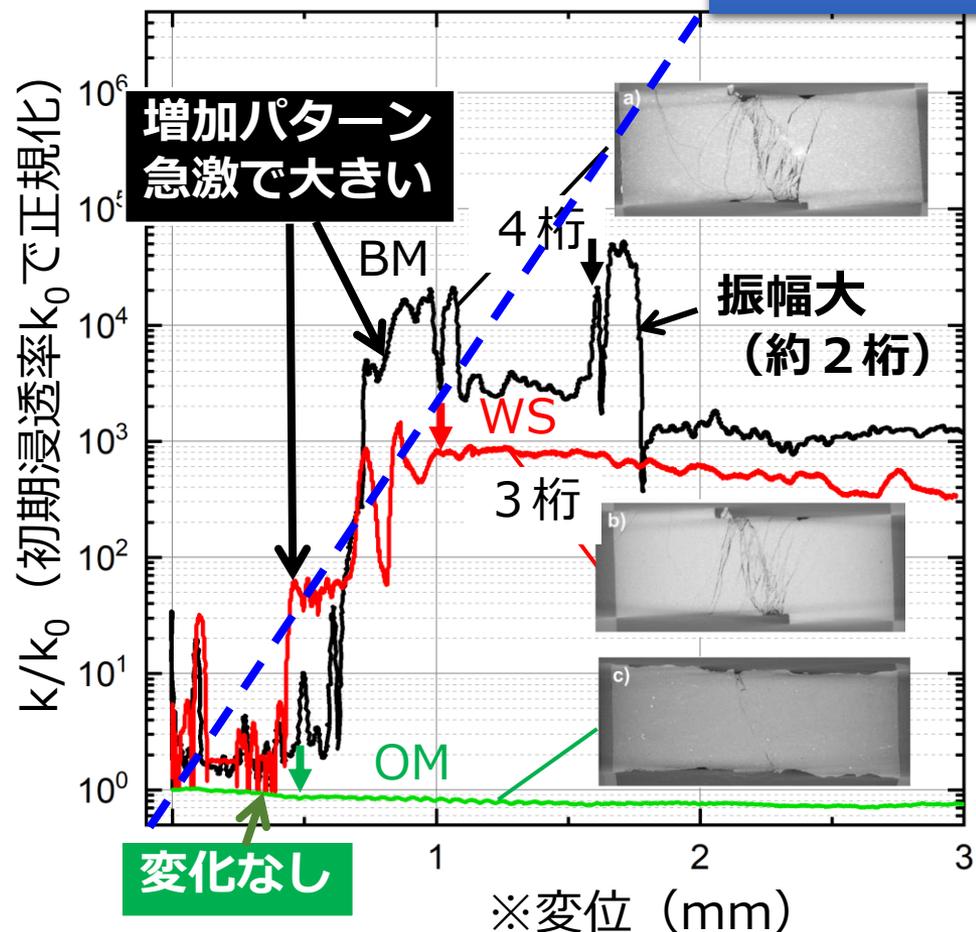
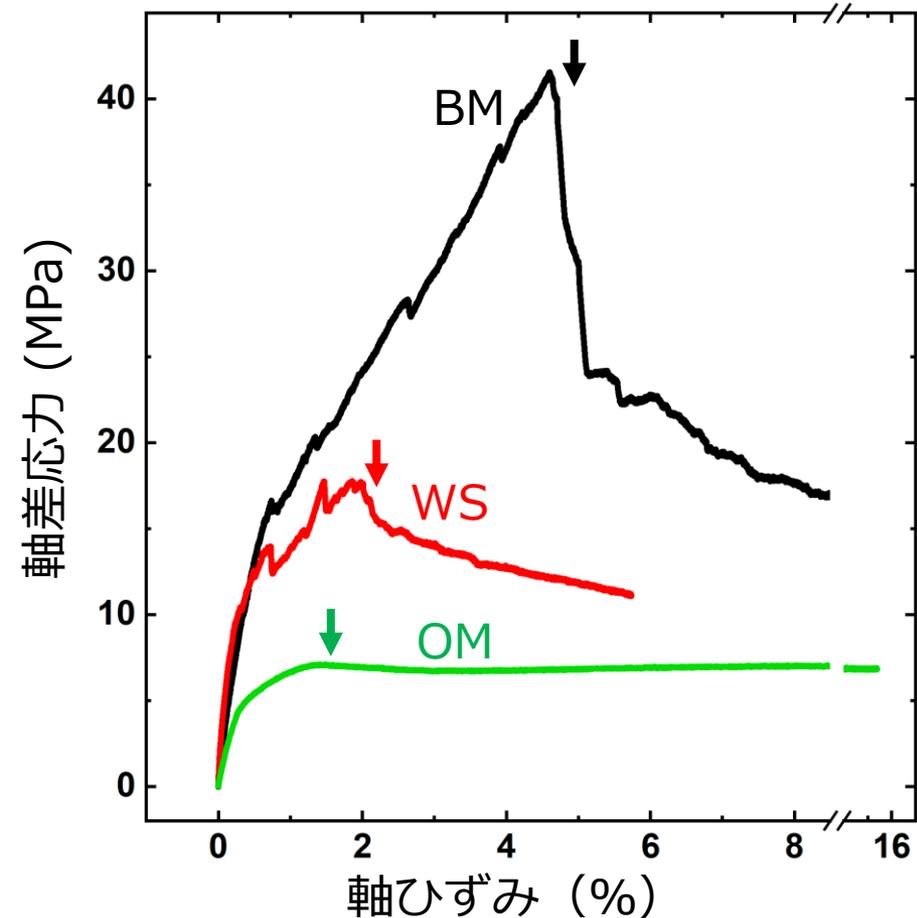
流量 粘性 長さ
断面面積 差圧

発表内容

- 背景と目的
- 実験手法
- **実験の結果と考察**
- 軟岩の力学と水理の関係における
体系化について
- まとめ

キャップロック

数値モデル
での予測

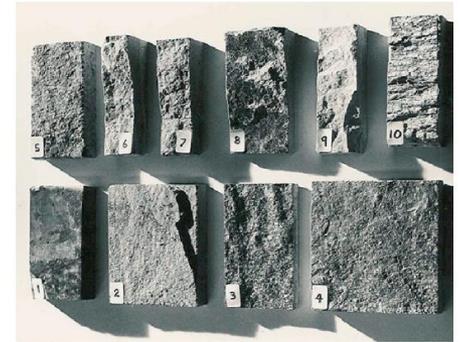
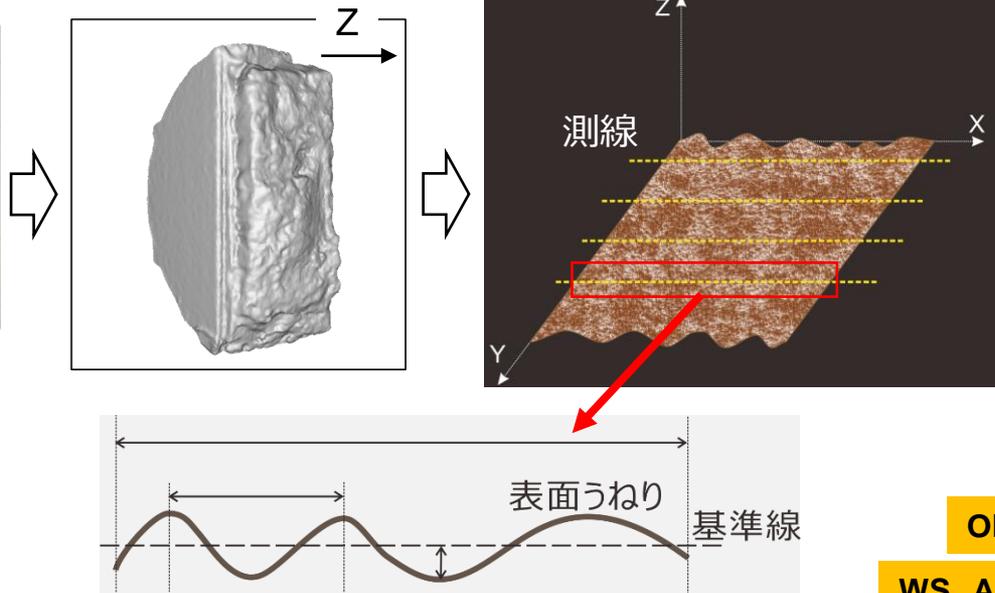


※変位の増加→岩石の圧縮→ひずみ増加

破断面の粗さ解析

破断面の粗さ解析

(JRC: Joint Roughness Coefficient)



TYPICAL ROUGHNESS PROFILES for JRC range:

1		0 - 2
2		2 - 4
3		4 - 6
4		6 - 8
5		8 - 10
6		10 - 12
7		12 - 14
8		14 - 16
9		16 - 18
10		18 - 20

0 50 100 mm SCALE

OM
WS、AS

IT

BM

計算結果(JRC値):

BM	WS	OM	AS	IT
19.6	10.8	9.1	10.4	14.0

キャップロック

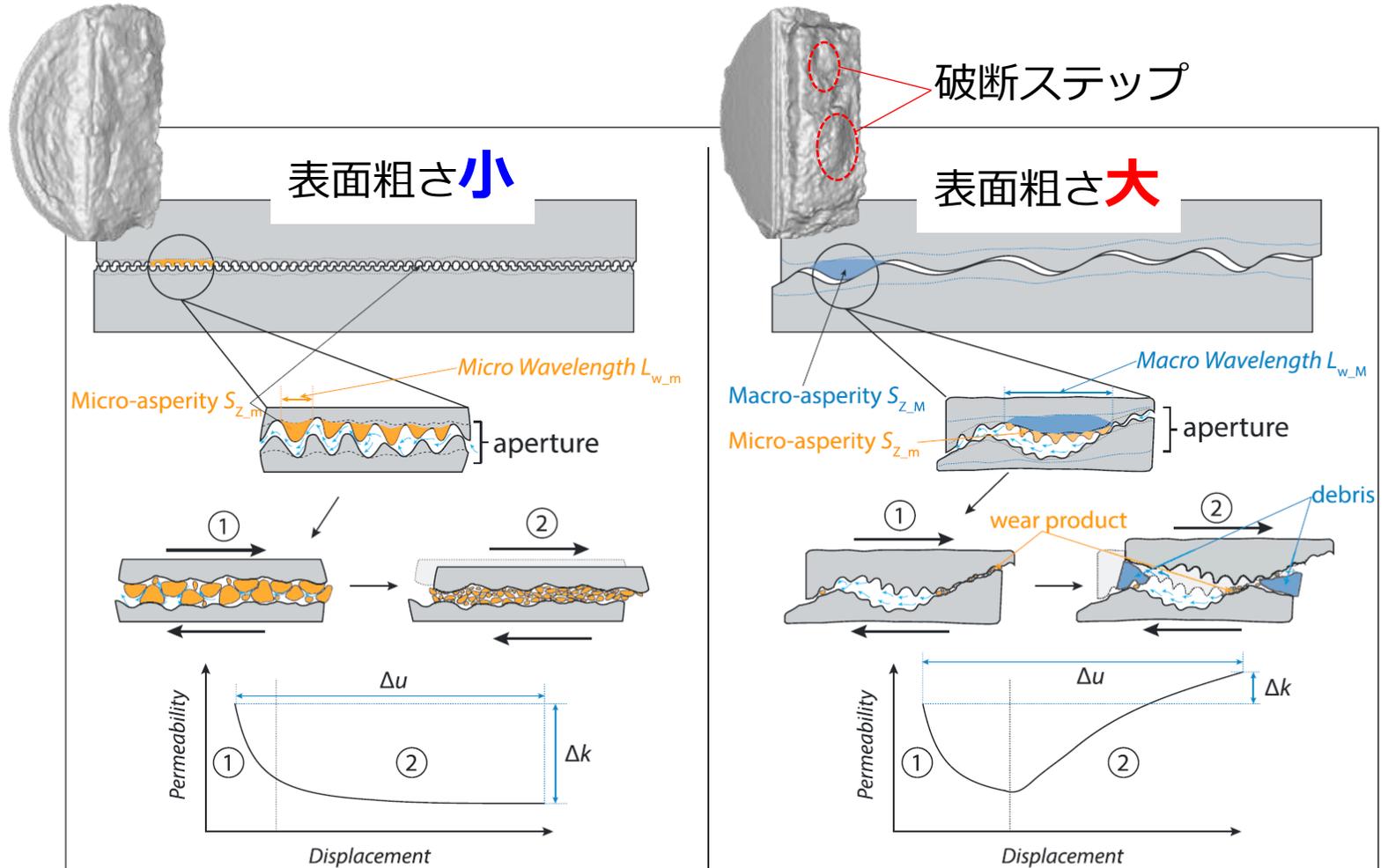
貯留岩

Barton and Choubey (1977)

浸透率変化の違いについての考察

OM : 9.1

BM : 19.6



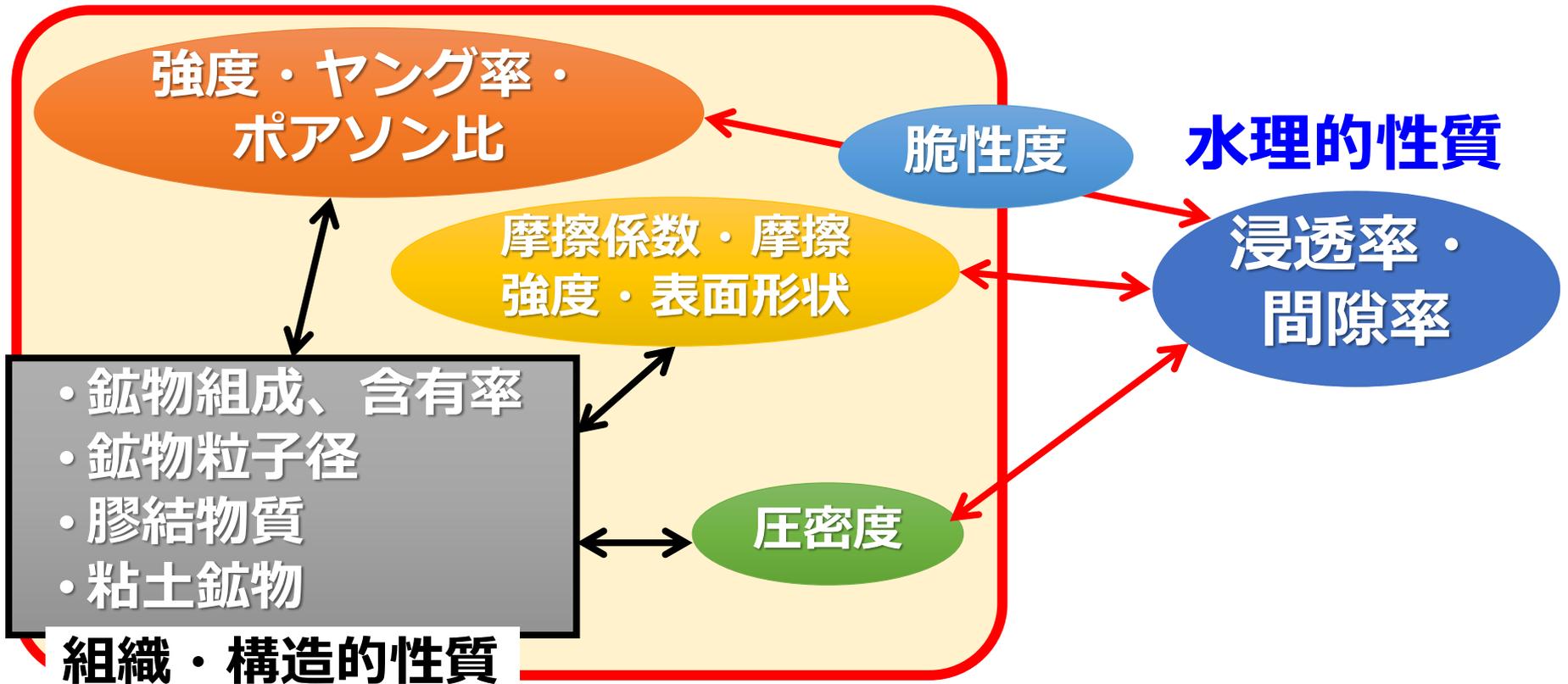
表面の凹凸が削れる→断層間隔が狭まる→流路が狭まる (Fang et al., 2018)

発表内容

- 背景と目的
- 実験手法
- 実験の結果と考察
- 軟岩の力学と水理の関係における
体系化について
- まとめ

岩石の組織・構造 - 力学 - 水理の体系図

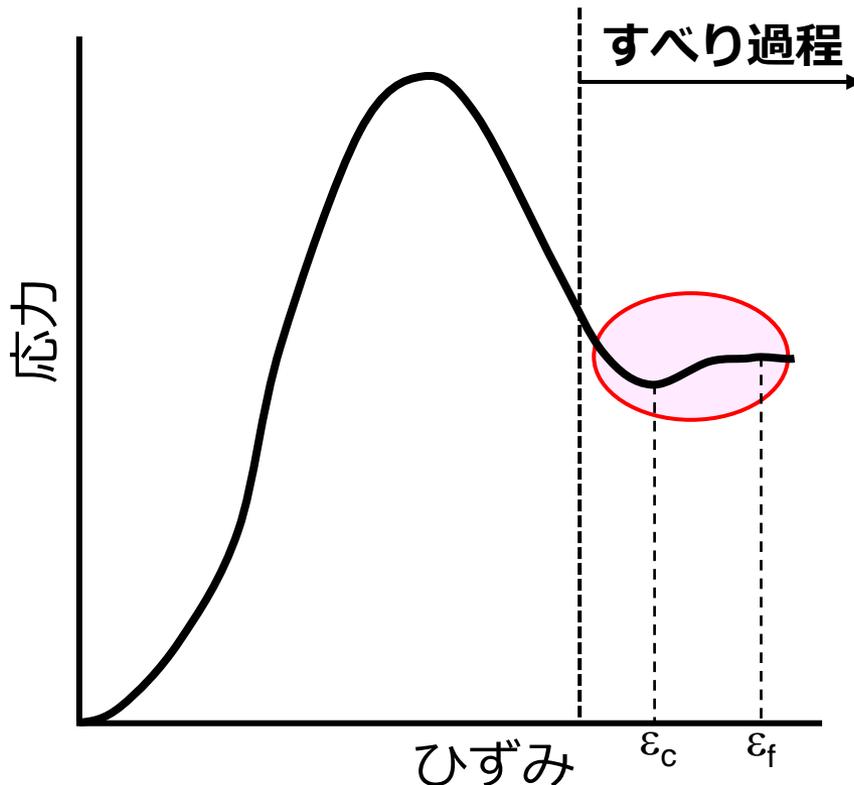
力学的性質



脆性度の評価方法

脆性度：岩石の脆性の度合いを決めるパラメータ

応力-ひずみ曲線からBI値を算出



$$BI = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_c}{\varepsilon_c}$$

ε_f : 最大摩擦力

ε_c : 最小粘着力

ε_f および ε_c が複数にわたり見られる際には、該当するすべての範囲を対象に算出。

まとめ

- 本実験において、せん断帯の形成に伴う浸透率変化は、最小で**-1.8桁から、最大で+4桁**までと、軟岩の種類により様々な変化を示すことが明らかとなった。
- CO₂圧入を想定した有効圧減少過程では、すべての岩石において、**おおよそせん断帯形成条件（有効圧10MPa）を下回ることで、浸透率が大きく変化**することが明らかとなった。
- 大田代層泥岩は、すべての過程を通じて、浸透率に及ぼす影響が小さかったことから、力学的・水理的観点から**キャップロックとしてシール性能が高い岩石の一つ**であると考えられる。
- 応力-ひずみ曲線から得られた脆性度と、せん断破壊に伴う最大の浸透率変化量との間には、**直線の相関関係が成り立つ**ことが示された。

軟岩は、硬岩に比べ、大田代層泥岩の例でもみられたように、CO₂圧入に伴う岩盤の変形に与える影響が**小さく**、同時に浸透率の変化も**小さい**→我が国のような軟岩地質は、水理・力学的視点からみて、**CO₂地中貯留に適した地質構造である**。