圧縮率の高い非濡れ性流体の浸入に伴う岩石の連続的な破壊

— 破壊条件に近い応力条件下での帽岩の シール能力の急激な低下の可能性 —

後 藤 宏 樹* 徳 永 朋 祥* 山 本 肇**
小 川 豊 和** 青 木 智 幸**

Progressive Failure of Rock due to Infiltration of Compressible Non-wetting Phase Fluid: Implications for Rapid Deterioration of Sealing Capacity of Cap Rock under Critically Stressed Condition

Hiroki GOTO*, Tomochika TOKUNAGA*, Hajime YAMAMOTO**,
Toyokazu OGAWA** and Tomoyuki AOKI**

[Received 10 August, 2012; Accepted 27 May, 2013]

Abstract

The possibility of dynamic failure and deterioration of the sealing capacity of critically stressed rock due to the infiltration of a compressible non-wetting phase fluid is examined through laboratory experiments. Rock samples were regarded as critically stressed under normal faulting conditions, and was set up to mimic the conditions of the cap rock just above a reservoir layer. Two kinds of external stress conditions were applied to the sample, i.e., close to an isotropic stress condition and close to a critical condition for failure. Air in a gas accumulator was infiltrated into the sample from the bottom end. Axial and circumferential strains of the sample and air pressure at the inlet were monitored during the experiment. Experimental results showed that the sample under stress conditions close to the critical condition became more deformable, resulting in failure, while that under a hydrostatic condition did not deform significantly and behaved elastically. An increase in the permeability of the critically stressed sample was also suggested. Understanding an in-situ stress state and considering a possible progressive failure of the cap rock are considered to be important when evaluating sealing capacity.

Key words : geological sequestration of CO₂, sealing capacity, effective stress, shear failure, multi-phase fluid flow

キーワード : 二酸化炭素地中貯留, シール能力, 有効応力, セン断破壊, 多相流体流動

* 東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻

** 大成建設株式会社技術センター

* Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences, University of Tokyo, Kashiwa, 277-8563, Japan

** Technology Center, Taisei Corporation, Yokohama, 245-0051, Japan

I. はじめに

二酸化炭素 (CO₂) 回収貯留 (CCS: Carbon dioxide Capture and Storage) は CO₂ の大気中への排出量を削減するため、主要な地球温暖化緩和技術の 1 つであるとされている。CO₂ の貯留サイトとしては、いくつかの選択肢が検討されているが、現在とはくに地下への貯留 (地中貯留) と海洋への貯留が有力であると考えられており、CO₂ 地中貯留の対象層としては、おもに枯渇油ガス田、石炭層、塩水性帯水層があげられている (IPCC, 2005)。なかでも塩水性帯水層は、世界各地に分布し、量的に最も大きなポテンシャルをもっているため、貯留サイトとして有望であると考えられている (IPCC, 2005)。帯水層での CO₂ 地中貯留の実施事例としては、ノルウェーの Sleipner での帯水層貯留 (例えば, Torp and Gale, 2004) や、国内の南長岡での圧入実証試験 (例えば, 薛・松岡, 2008) などがある。また、最近では苫小牧沖での実証試験も予定されている (経済産業省産業技術環境局 CCS 実証試験実施に向けた専門検討会, 2011)。

IPCC (2005) のとりまとめによると、CO₂ 地中貯留の実施にあたっては、圧入した CO₂ の地中での挙動を理解することが重要とされている。なぜなら、圧入した CO₂ が地中を移動した後、最終的に大気中に漏出する可能性や、CO₂ が地下水中に溶解し、地下水とともに移動した結果、人類や生態系に悪影響を及ぼす可能性があるからである。したがって、CO₂ 地中貯留を実施するにあたっては、CO₂ を長期にわたり安定的に貯留するメカニズム (トラップメカニズム) を科学的に理解し、それに基づき貯留サイトを適切に評価した上で、事業の長期安定性を示す必要があると考えられる。圧入した CO₂ のトラップメカニズムとしては、構造・層序トラップ (structural & stratigraphic trapping)、残留 CO₂ トラップ (residual CO₂ trapping)、溶解トラップ (solubility trapping)、鉱物化トラップ (mineral trapping) の 4 つがあげられており、CO₂ の圧入直後は構造・層序トラップによる寄与が大きい、時間の

経過とともに残りの 3 つのトラップの寄与が増大し、最終的に 4 つのトラップが作用することによって、より強固なトラップメカニズムが形成されていくと考えられている (IPCC, 2005)。4 つのトラップメカニズムのうち、構造・層序トラップとは、浸透性の低い遮蔽層による CO₂ の地表面に向かう移動を妨げるトラップであり、圧入直後に最も重要なトラップメカニズムであるとされる (IPCC, 2005)。とくに背斜構造をもつ遮蔽層を帽岩 (キャップロック) といい、構造・層序トラップの有効性を評価するためには、帽岩がもつ CO₂ の移動を妨げる性質 (帽岩のシール能力) を正しく理解する必要がある。

一般に、帽岩のシール能力は、帽岩の毛管特性と多相 Darcy 流れに基づき評価される。この評価方法では、帽岩と貯留層の境界において、濡れ性流体と非濡れ性流体の圧力差が毛細管圧力の閾値 (閾圧力, threshold pressure) を上回る場合に、非濡れ性流体が帽岩の上下端にわたって連続的な流路を形成するとされている (Thomas *et al.*, 1968)。なお、圧力差が閾圧力未満であり、かつ最大間隙径をもつ間隙に非濡れ性流体が浸入するために必要な圧力 (浸入圧力, entry pressure) 以上である場合は、非濡れ性流体は帽岩内に浸入するが、より小さい間隙径をもつ間隙において浸入が妨げられる (Hildenbrand *et al.*, 2002) ため、結果としてシール能力は低下しないと考えられる。本研究では、濡れ性流体と非濡れ性流体の圧力差が閾圧力を上回った状態で、非濡れ性流体が帽岩に浸入する場合を、非濡れ性流体が帽岩に浸入するということとする。帽岩に浸入した後の非濡れ性流体の流動と漏出は多相 Darcy 流れに基づき理解される (例えば, Schlömer and Krooss, 1997)。一般に帽岩の浸透率は低い、帽岩が十分な厚さをもつ場合は、非濡れ性流体の漏出には長期間を要することが予想される。

ところで、最近の研究からは、地球上には破壊条件に近い応力状態をもつ堆積盆地が数多く存在するとされている (Zoback, 2007)。その根拠となる事例としては、(1) 貯留層内への流体圧入による地震発生の事例 (Healy *et al.*, 1968), (2)

図 1 破壊条件に近い応力状態をもつ帽岩に圧縮率の高い非濡れ性流体が浸入した場合に発生することが想定される断層の進展。(1) 非濡れ性流体の浸入前、(2) 非濡れ性流体の浸入後、(3) 亀裂の発生、(4) 断層の進展。詳細は本文を参照のこと。ここに、Mohr 円は有効応力表示である。

Fig. 1 Fault development in critically stressed cap rock due to the infiltration of compressible non-wetting phase fluid. (1) Before infiltration, (2) After infiltration, (3) Fracture occurrence, (4) Fault development. See text for details. Mohr circles represent effective stress state.

地震の発生によって、周囲の応力状態がわずかに変化した結果、新たな地震が誘発された事例 (Stein *et al.*, 1992)、(3) 原位置応力推定の結果、堆積盆地の応力状態が破壊条件に近いことが示された事例 (例えば, Zoback and Healy, 1992; Binh *et al.*, 2011) があげられる。帯水層での CO₂ 地中貯留の対象深度は約 1 ~ 3 km とされている (Michael *et al.*, 2010) が、その深度に対応する地点における原位置応力推定の事例としてはアメリカの Cajon Pass の事例 (Zoback and Healy, 1992) があげられる。Zoback and Healy (1992) は、アメリカの Cajon Pass の深度 0.9 ~ 3.5 km の複数の観測点において原位置応力推定を行い、応力状態が破壊条件に近いという結果を得た。すなわち、帯水層を対象とした CO₂ 地中貯留を実施するサイトの応力状態は破壊条件に近い場合があるといえる。このような破壊条件に近い応力状態をもつ帽岩に圧縮率の高い非濡れ性流体 (例えば、超臨界 CO₂) が浸入すると、以下のメカニ

ズムで帽岩に連続的な破壊が発生し、シール能力

が急激に低下する可能性が考えられる。

図 1 に、圧縮率の高い非濡れ性流体の浸入によって発生することが想定される帽岩内での断層の進展の様子、貯留層と帽岩の境界における非濡れ性流体浸入前後の間隙流体の状態の概念図、および帽岩の応力状態と Mohr-Coulomb の破壊規準の関係を示す。ここに、Mohr 円は有効応力表示であり、帽岩の応力状態を示す。帽岩の応力状態が破壊条件に近い場合、帽岩に非濡れ性流体が浸入する前の Mohr 円は破壊規準の近傍に位置する (図 1-1)。ここで、非濡れ性流体の圧入や集積によって非濡れ性流体の圧力が上昇し、濡れ性流体 (地層水) と非濡れ性流体の圧力差が閾圧力を上回ると、非濡れ性流体が帽岩間隙に浸入する (図 1-2)。このとき、非濡れ性流体は閾圧力分だけ濡れ性流体よりも高い圧力をもつため、非濡れ性流体が浸入した間隙において間隙圧が急激に上昇し (図 2)、帽岩の有効応力が急激に低下すると考えられる。その結果、Mohr 円が Mohr-Coulomb の破壊規準に達し、非濡れ性流体が浸

入した領域において局所的な破壊が発生し、亀裂が生じる（図 1-3）。さらに、非濡れ性流体は発生した亀裂を通じて帽岩内に速やかに浸入すると考えられるため、非濡れ性流体の体積が増加する。ここで非濡れ性流体が圧縮性流体である場合には、帽岩に浸入した後の非濡れ性流体の圧力低下は小さいと考えられる。なぜなら、等温条件下において、流体の圧力 P 、体積 V 、圧縮率 β の関係は式（1）のように表され（例えば、Bear, 1988）、圧縮性流体は非圧縮性流体と比較して体積増加 dV に対する圧力低下 dP が小さいためである。

$$dP = -\frac{1}{\beta} \frac{dV}{V} \quad (1)$$

したがって、引き続き高い間隙圧が保たれることにより破壊条件が満たされ続けるため、帽岩に連続的な破壊が発生し、最終的には帽岩全体にわたる断層が生じると考えられる（図 1-4）。断層は岩石の浸透性を上昇させる場合がある（例えば、Hickman *et al.*, 1995; Zhu and Wong, 1997; Ingram and Urai, 1999）ため、このプロセスは、帽岩のシール能力の急激な低下につながる可能性があると考えられる。

以上の背景を踏まえ、本研究では、破壊条件に近い応力状態をもつ帽岩に圧縮率の高い非濡れ性流体が浸入した場合に発生することが想定される帽岩の連続的な破壊と、その結果としてのシール能力の急激な低下の可能性について、室内実験により検討を行う。

II. 実験方法

1) 実験のコンセプト

図 3 に実験のコンセプトを示す。岩石試料は、正断層を発生させる破壊条件に近い応力状態（最大主応力 σ_1 が鉛直応力 σ_v であり、かつ破壊条件に近い応力状態）をもつ帽岩の、貯留層との境界付近の領域の状態を示すものとして位置づけられる。実験では、破壊条件に近い応力状態を与えた試料に非濡れ性流体を浸入させた場合に、試料の連続的な破壊と浸透性の上昇が発生しうるかを

図 2 非濡れ性流体の浸入による間隙圧の上昇。

Fig. 2 Increase in pore pressure due to the infiltration of non-wetting phase fluid.

図 3 実験のコンセプト。

Fig. 3 Schematic diagram showing the concept of the experiment.

図 4 非濡れ性流体の浸入前後の Mohr 円の位置。

Fig. 4 Changes in positions of Mohr circle prior and subsequent to the infiltration of non-wetting phase fluid.

調べた。具体的には、試料に与える応力状態を変えて 2 種類の実験（実験 A：等方応力条件に近い応力状態；実験 B：破壊条件に近い応力状態）を行った。実験 A では、非濡れ性流体が浸入しても試料は破壊せず弾性変形すると予想される（図 4）。一方、実験 B では、非濡れ性流体が浸入し

図 5 実験装置の概要.

Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus.

た領域で局所的な破壊が発生し、それが連続することにより、試料が破壊する、もしくは大きく変形することが予想される (図 4)。なお、実験 A と似通った実験条件で行われた実験として、Xue and Ohsumi (2004) が行った実験がある。Xue and Ohsumi (2004) は、多胡砂岩を用いて、静水圧応力状態を与えた飽和岩石試料に、気相、液相、超臨界状態の CO_2 を試料下端から圧入する実験を行い、試料の異なる高さにおける軸ひずみと周ひずみを計測している。

2) 実験装置および岩石試料

実験装置として、三軸圧縮試験機を用いた (図 5)。実験装置の载荷能力は、軸応力の最大値が 250 MPa、側圧の最大値が 50 MPa である。試料の上下端には、それぞれ 1 本の通水ラインが設けてあり、水や空気などの流体を試料内に圧入することが可能である。

岩石試料は、来待砂岩を用いた。なお、来待砂岩の物性等については、例えば里 (1994) および沢田 (2000) を参照されたい。試料は、直径約 50 mm、高さ約 100 mm の円柱形に成型した。なお、実験結果に対する異方性の影響を最小化するために、すべての試料は長軸が層理面に直交する方向にコア抜きした。来待砂岩を選定した理由は、既往文献 (里, 1994) から想定される来待砂

岩の破壊強度が試験装置の载荷能力の範囲内であること、閾圧力が本研究で用いることができる空気の圧力の最大値 (0.76 MPa) 以下であること、比較的均質な岩石であること (沢田, 2000) である。なお、本研究においては、流体の圧力値はゲージ圧で表す。実際のフィールドにおいては、砂岩は帽岩になりにくいと考えられるが、本研究においては、おもに実験装置のとり得る条件、とくに閾圧力の観点から、泥岩等本来帽岩として想定される岩石を用いることができず、砂岩を用いることとした。なお、岩石試料として帽岩となるような岩石 (泥岩や頁岩など) ではなく砂岩を用いることは、以下に述べる理由から、本研究で検討する岩石の破壊の発生条件には大きく影響しないと考えている。まず、本研究で用いる岩石の破壊発生の判定規準である Mohr-Coulomb の破壊規準は、岩石のマクロな破壊発生の規準として一般的に用いられるものである (例えば, Jaeger *et al.*, 2007; Zoback, 2007) ため、岩石の種類によらず適用可能であると考えられる。また、帽岩に限らず岩石は I 章で述べたような毛管特性をもつため、岩石に非濡れ性流体が浸入すると、非濡れ性流体が浸入した間隙において間隙圧が上昇することが予想される。したがって、Mohr-Coulomb の破壊規準から決定される破壊条件に近い応力状

表 1 来待砂岩の物性値.

Table 1 Physical properties of Kimachi sandstone.

Physical property	Experiment A	Experiment B
Measured properties		
Diameter (mm)	49.72	49.76
Height (mm)	99.54	99.96
Parallelism (mm)	0.014	0.017
Weight (dried sample) (g)	370.59	380.49
Weight (saturated sample) (g)	419.30	428.42
P-wave velocity (dried sample) (km/s)	2.51	2.44
P-wave velocity (saturated sample) (km/s)	2.86	2.92
S-wave velocity (dried sample) (km/s)	1.68	1.52
S-wave velocity (saturated sample) (km/s)	1.45	1.24
Hydraulic conductivity (m/s)	3.08×10^{-10}	5.22×10^{-11}
Calculated properties		
Volume (cm ³) ^a	193.24	194.40
Porosity (%) ^b	25.21	24.65
Density (dried sample) (g/cm ³) ^b	1.92	1.96
Density (saturated sample) (g/cm ³) ^b	2.17	2.20
Young's modulus (dried sample) (GPa) ^c	11.83	10.72
Young's modulus (saturated sample) (GPa) ^c	12.16	9.42
Shear modulus (dried sample) (GPa) ^c	5.43	4.54
Shear modulus (saturated sample) (GPa) ^c	4.59	3.39
Bulk modulus (dried sample) (GPa) ^c	4.79	5.57
Bulk modulus (saturated sample) (GPa) ^c	11.64	14.23
Poisson's ratio (dried sample) ^c	0.09	0.18
Poisson's ratio (saturated sample) ^c	0.33	0.39

^a Calculated from diameter and height.^b Calculated from weight and volume.^c Calculated from density and elastic wave velocities.

態をもつ岩石に、非濡れ性流体が浸入することにより破壊が発生するという、本研究で検討する岩石の破壊発生メカニズムは、砂岩に対しても適用可能であると考えられる。一方で、岩石内部での亀裂の進展に関しては、岩石の種類によってその挙動が異なる場合がある（例えば、Ingram and Urai, 1999; Nygård *et al.*, 2006）。さらに、泥岩や頁岩と砂岩の違いである構成粒子の種類や粒径の違いは、岩石の破壊強度、浸透率、間隙率等に影響する。これらの点に関しては今後さらに検討する必要がある。

実験に先立ち、成型した試料の直径、高さ、平

行度、乾燥・湿潤状態での質量、弾性波（P 波・S 波）速度の計測を行った。さらに、それらの計測結果をもとに、体積、間隙率、乾燥・湿潤状態での密度、ヤング率、せん断弾性係数、体積弾性率、ポアソン比を算出した。また、定水位透水試験を行い、試料の透水係数を求めた。表 1 に、実験 A および B で用いた試料の物性値を示す。試料の飽和は、試料を蒸留水に浸した状態で 0.1 MPa の負圧を与えて、試料内の空気を水で置換することにより行った。また、試料の乾燥は、110℃に設定した乾燥炉での炉乾燥により行った。試料の飽和および乾燥を行う際は、1 日

ごとに試料の質量を計測し、質量に変化がなくなったら、試料が飽和および乾燥したと判断した。試料は合計 45 本成型し、実験で用いる試料としては、平行度が 0.020 mm 以内の試料のなかから、比較的近い物性値をもつ試料を選択した。

3) Mohr-Coulomb の破壊規準

実験 B を行うにあたっては、試料に破壊条件に近い応力状態を与える必要があるため、来待砂岩に対する Mohr-Coulomb の破壊規準を決定する必要がある。ここでは、排水条件下で飽和試料の三軸圧縮試験を 4 回行い、破壊時の有効主応力を求め、それをもとに Mohr-Coulomb の破壊規準を決定した (図 6)。本研究では、実験装置の能力から、非濡れ性流体を浸入させる実験においては非濡れ性流体の圧力と間隙水圧の差を 0.66 MPa に設定する。したがって、実験 B で与える応力状態は、0.66 MPa 以下の間隙圧の上昇によってせん断破壊が発生すると想定されるような応力状態とする必要がある。決定した Mohr-Coulomb の破壊規準 (τ (MPa) = $0.5 \sigma' \text{ (MPa)} + 3.7$) から求められる破壊時の平均有効主応力と、実際に三軸圧縮試験で計測された破壊時の平均有効主応力の差の最大値は 0.5 MPa であったため、実験で用いるのに十分な精度をもつ破壊規準が求められていると判断した。

4) 閾圧力

水銀圧入法により、来待砂岩の閾圧力を決定した。水銀ポロシメータによる計測から得られた水銀-空気系の毛細管圧力と水の飽和度の関係を、式 (2) (例えば, Schowalter, 1979) を用いて水-空気系の毛細管圧力と水の飽和度の関係 (図 7) に変換した。

$$\frac{P_{cm}}{P_{cw}} = \frac{\sigma_m \cos \theta_m}{\sigma_w \cos \theta_w} \quad (2)$$

ここに、 P_{cm} と P_{cw} はそれぞれ水銀-空気系と水-空気系の毛細管圧力、 σ_m と σ_w はそれぞれ水銀と水の表面張力、 θ_m と θ_w はそれぞれ水銀-空気系における岩石に対する水銀の接触角と水-空気系における岩石に対する水の接触角である。今回実施した実験条件は常温常圧であり、このような

図 6 来待砂岩に対する Mohr-Coulomb の破壊規準 (τ (MPa) = $0.5 \sigma' \text{ (MPa)} + 3.7$).

Fig. 6 Mohr-Coulomb failure criterion of Kimachi sandstone (τ (MPa) = $0.5 \sigma' \text{ (MPa)} + 3.7$).

図 7 来待砂岩に対する水-空気系の毛細管圧力と水の飽和度の関係。

Fig. 7 Relationship between water-air capillary pressure and water saturation of Kimachi sandstone.

場合は、 $\sigma_m = 480 \text{ mN/m}$, $\sigma_w = 70 \text{ mN/m}$, $\theta_m = 140^\circ$, $\theta_w = 0^\circ$ とされることが多い (例えば, Purcell, 1949) ため、ここではこれらの値を採用した。閾圧力は、毛管圧曲線の変曲点における圧力であるとされる (Katz and Thompson, 1987) ため、図 7 より、その値を 0.1 MPa とした。

5) 実験の手順

図8に実験条件の概念図を示す。実験の手順は以下の通りとした。まず脱気水の圧入により試料の飽和を行った。次に、試料に所定の応力(σ_1 , σ_3)と間隙水圧 P_w を与え、これらを一定に保った。ここに、実験Aでは、 $\sigma_1 = 2.0 \sim 2.1$ MPa, $\sigma_3 = 2.0$ MPa, $P_w = 0.10$ MPa, 実験Bでは、 $\sigma_1 = 16.6$ MPa, $\sigma_3 = 2.0$ MPa, $P_w = 0.10$ MPaとした。図9に來待砂岩に対するMohr-Coulombの破壊規準と実験AおよびBで与えた応力状態の関係を示す。最後に、バルブを閉鎖した状態で、圧力 $P_g = 0.76$ MPaの空気をアキュムレータに封入した後、バルブを開放して試料下端から空気を浸入させた。なお、間隙水圧と空気の圧力の差は0.66 MPaであり、これは閾圧力を上回るため、空気は試料間隙に浸入すると考えられる。間隙水圧と空気の圧力の差を閾圧力よりも大きく設定した理由は、Mohr-Coulombの破壊規準および実験装置の精度を考慮した場合、岩石に連続的な破壊が発生する条件を確実に満たすためには、可能な限り間隙水圧と空気の圧力の差を大きくする必要があったからである。なお、この設定においては、空気の圧力は σ_3 の値を下回っており、水压破碎の発生条件は満たされていないため、水压破碎は起こり得ない。したがって、この設定を行うことにより本研究で検討する岩石の破壊のメカニズムは変化しないと考えられる。計測項目は、軸ひずみ、周ひずみおよび空気の圧力である。ひずみは、クロスゲージ(株式会社共和電業製KFG-10-120-D16-11)を試料の中央の高さに2枚貼付して10秒ごとに計測した(図5)。実験は、温度変化の影響を最小化するために、室温を一定に保った状態でを行った。

III. 実験結果と考察

1) 実験A

図10に実験Aの軸ひずみおよび周ひずみの時間変化を示す。ここに、ひずみは伸びが正である。図10において空気の浸入は0秒のところに对应する。0秒でのひずみは、軸ひずみ、周ひずみともに0である。軸ひずみは一時的に縮んだ後、

図8 実験条件の概念図。

Fig. 8 Schematic diagram of experimental conditions.

図9 來待砂岩に対するMohr-Coulombの破壊規準と実験で与えた応力状態の関係。

Fig. 9 Relationship between the Mohr-Coulomb failure criterion and applied stress conditions of Kimachi sandstone in the experiments.

単調に伸びた。また、周ひずみは単調に伸びた。

ところで、Tokunaga *et al.* (2002)は諫早砂岩を用いて、飽和試料に非排水条件下で拘束圧を与えて間隙水圧を上昇させた後、試料上部エンドキャップ内に備え付けたバルブを開放し、間隙水圧と試料の変形を計測する実験を行った(図11)。その結果、軸ひずみはバルブを開放後およそ10秒間は伸び、その後単調に縮んだ。また、

図 10 実験 A の軸ひずみおよび周ひずみの時間変化。ひずみは伸びが正である。空気の浸入は 0 秒で開始した。0 秒でのひずみは軸ひずみ、周ひずみともに 0 である。

Fig. 10 Temporal changes of axial and circumferential strains during experiment A. Strain is positive for extension. Air infiltration started at 0 seconds. Both axial and circumferential strains at 0 seconds are 0.

図 11 Tokunaga *et al.* (2002) の実験結果。ひずみは伸びが正である。バルブは 0 秒で開放した。詳細は本文を参照のこと。

Fig. 11 Experimental results of Tokunaga *et al.* (2002). Strain is positive for extension. The valve was opened at 0 seconds. See text for details.

図 12 実験 B の軸ひずみ、周ひずみおよび体積ひずみの時間変化。ひずみは伸びが正である。空気の浸入は 0 時間のところに対応する。0 時間でのひずみは 0 である。

Fig. 12 Temporal changes of axial, circumferential, and volumetric strains during experiment B. Strain is positive for extension. Air infiltration started at 0 hours. Strains at 0 hours are 0.

周ひずみはバルブを開放した後単調に縮んだ。この変形挙動について、Tokunaga *et al.* (2002) は以下のように考察している。バルブを開放した直後、間隙水圧が急激に低下した試料上部では有効応力が急激に上昇するため、その領域は収縮する。一方、このとき試料中央部のひずみゲージ貼付部分では、ひずみの適合条件を保つために、軸方向に伸びる。その後、試料中央部のひずみゲージ貼付部分の間隙水圧が低下し、有効応力が上昇すると、試料中央部のひずみは、軸方向、周方向ともに縮む。また、Tokunaga *et al.* (2002) は、この変形挙動について、多孔質弾性論による記述が可能であるとしている。実験 A の結果と Tokunaga *et al.* (2002) の実験結果は、ひずみの伸びと縮みが逆であるが、よく似た変形挙動を示しており、実験 A の試料は弾性的に変形したと推測される。今後、多孔質弾性体中の二相流体流動と変形を連成させた数値計算を行うことによって、実験結果を定量的に評価する必要がある。

2) 実験 B

図 12 に実験 B の軸ひずみ、周ひずみおよび体

図 13 実験前後の試料の写真 (実験 B)。

Fig. 13 Photographs of sample before and after experiment (Experiment B).

積ひずみの時間変化を示す。ここに、ひずみは伸びが正である。空気の浸入は 0 時間のところに対応する。0 時間でのひずみを、軸ひずみ、周ひずみ、体積ひずみともに 0 とした。空気の浸入開始後のひずみ挙動は、クリープ変形において観察されるひずみ挙動と似通っており、軸ひずみは単調に縮み、周ひずみは単調に伸びた。また、ひずみの絶対値の時間変化率は時間の経過とともに増大し、最終的に 4.5 時間付近で試料が破壊した (図 13)。

ところで、Masuda *et al.* (1990) は、稲田花崗岩を用いて、乾燥した円柱形試料に拘束圧 40 MPa、軸応力 410 MPa (乾燥した状態の試料の破壊強度の約 70% に相当する) を与え、下端から水を圧入する実験を行った。水の圧力は 17 MPa に設定され、試料が破壊するまで一定に保たれた。実験では、試料のひずみ、acoustic emission (AE) および P 波速度の計測が行われた。試料の複数の高さで計測されたひずみの平均値は、三次クリープにおいて観察されるひずみの挙動と似通った挙動を示し、軸ひずみは単調に縮み、周ひずみは単調に伸びた。さらに、ひずみの絶対値の時間変化率は時間の経過とともに増大し、水の圧入開始から 3.6 時間後に試料が破壊した。Masuda *et al.* (1990) は、試料の変形・破壊挙動について、AE および P 波速度計測の結果に基づき以下のように考察している。破壊条件に

近い応力を受けている岩石内部においては、すでに多くの微小亀裂が存在している。水の圧入を開始すると、水はすでに存在していた微小亀裂に選択的に浸入しつつ、試料内部を上方に向かって流動する。このとき、水が浸入した微小亀裂においては、間隙水圧が上昇し、有効応力が低下するため、さらなる微小亀裂が発生する。その後、水は新たに発生した微小亀裂を通じて流動する。このような水の流動と微小亀裂の発生に対して正のフィードバックが働く。試料の複数の高さで計測された周ひずみと P 波速度の時間変化の比較からは、各地点において周ひずみが伸びはじめる時間は、その周辺の P 波速度が上昇しはじめる時間とよく一致していることが明らかとなった。また、AE の発生数が増加しはじめる時間はひずみが大きく変化しはじめる時間とよく一致していた。このことから、水の流動とそれに伴う微小亀裂の発生により、ひずみが増大したと考えられる。その後、微小亀裂の発生領域が局所化し、最終的には試料が破壊した。実験 B では、Masuda *et al.* (1990) の実験と同様に、試料がクリープ変形に似た変形挙動を示した後、試料が破壊するという実験結果が得られており、実験 B においても Masuda *et al.* (1990) の実験と同様のプロセスで試料が変形および破壊した可能性がある。すなわち、実験 B では次のプロセスが発生したと考えられる。まず、試料底部に空気が浸入すると、空気はすでに存在していた微小亀裂に選択的に浸入しつつ、試料内部を上方に向かって流動する。このとき、空気が浸入した領域において、間隙圧の急激な上昇により有効応力が低下し、微小亀裂が発生する。その後、発生した微小亀裂を通じて試料内にさらに空気が浸入していき、それに伴いさらなる微小亀裂が発生する。このような空気の浸入と微小亀裂の発生が連続することにより、微小亀裂の発生領域が拡大し、時間の経過とともに試料が変形しやすくなる。最終的に、微小亀裂がせん断面付近に集中的に発生し、せん断破壊が発生する。

一方で、実験 B の実験条件は、試料に浸入させた流体の圧力が一定に保持されていない点と、そ

の流体が非濡れ性流体である点において、Masuda *et al.* (1990) の実験条件とは異なる。試料に浸入させる流体の圧力を一定に保持しない場合、とくに圧縮率の低い流体においては、試料内への流体の浸入に伴い流体の圧力が低下し、岩石の破壊条件が満たされなくなる可能性がある。実験 B においては、空気圧縮率が高く圧力低下が小さいため、Masuda *et al.* (1990) の実験と同様に、試料の破壊が観察されたと考えられる。また、試料に浸入させる流体の濡れ性が異なる場合、一般に濡れ性流体と非濡れ性流体では岩石に対する浸透の過程が異なる（例えば、Bear, 1988）ため、試料の変形・破壊挙動が異なるものとなる可能性がある。例えば、濡れ性流体で満たされた岩石に非濡れ性流体が浸入していくプロセスにおいては、浸入圧力（entry pressure）が濡れ性流体と非濡れ性流体の圧力差より大きい間隙に対しては、非濡れ性流体は浸入することができない。また、このプロセスにおいては、非濡れ性流体は、浸入が可能な間隙のなかでより大きい間隙径をもつ間隙に対して浸入しやすいという特徴をもつ。一方で、非濡れ性流体で満たされた岩石に濡れ性流体が浸入していくプロセスにおいては、濡れ性流体の分子の大きさ以上の間隙径をもつ間隙であれば、間隙径の大きさに関わらず濡れ性流体は間隙へと浸入することが可能である。このプロセスにおいては、濡れ性流体は、小さい間隙径をもつ間隙に対して浸入しやすいという特徴をもつ。実験 B において設定した濡れ性流体と非濡れ性流体の圧力差 0.66 MPa は、実験前の試料の間隙体積のおよそ 40% に相当する間隙に非濡れ性流体が浸入するような設定であることを意味する（図 7）。空気を浸入させる直前の間隙径分布は、水銀圧入法により計測した間隙径分布とは異なるものの、空気が浸入しなかった間隙が存在した可能性があるといえる。これらの点において、実験 B では Masuda *et al.* (1990) の実験とは異なるプロセスが発生した可能性があるため、今後さらなる検討が必要である。今後、実験時の試料の弾性波速度や AE の計測および複数の高さでのひずみの計測等を行い、試料内部における空気の浸入状

況、微小亀裂の発生数と震源、および試料の局所的な変形を調べることによって、より詳細に破壊の機構について検討を行う必要がある。

3) 実験 A と実験 B の比較

図 14 に実験 A, B の軸ひずみ、周ひずみおよび空気の圧力の時間変化を示す。実験 B では、実験 A と比較して試料が大きく変形した（図 14a, b）。また、実験 B では試料が破壊したが、実験 A では試料は破壊しなかった。実験 A と実験 B の実験条件は試料に与えた σ_I の値以外はすべて同一であるため、応力状態が破壊条件に近い場合には、空気の浸入によって試料の破壊が発生する一方、応力状態が等方応力条件に近い場合には、試料の破壊が発生しないことが実験的に示されたといえる。さらに、実験 A では、試料の破壊を引き起こすような連続的な微小亀裂も発生しなかったと考えられ、空気を浸入させる前の試料の応力状態は、試料の変形・破壊挙動に大きく影響すると思われる。

また、実験 B では、実験 A と比較して、空気の圧力低下の速度が大きく、試料の破壊発生時（4.5 時間）には、空気の圧力が急激に 0.03 MPa 低下した（図 14c）。ところで、一般に等温条件下において、理想気体の体積はその圧力に反比例することが知られている。ここで、空気が理想気体であると仮定し、実験 A および B における空気の浸入開始以降の、実験系内（アキュムレータ、配管、試料）の空気の体積の時間変化を求めた。図 15 に、実験 A および B における空気の体積の時間変化を示す。ここに、0 時間における値は 0 であり、体積増加が正である。図中の破線は、実験を開始する前の実験 B の試料の間隙体積を示す。実験 B では、実験 A と比較して空気の体積増加の速度が大きかった。実験で用いたアキュムレータはステンレス製であり、その変形は非常に小さいと考えられるため、空気の体積増加は試料内部に浸入した空気の体積に相当すると考えられる。実験を行う前の実験 A および B の試料の透水係数は同程度であった（表 1）ことを考慮すると、実験 B では、実験 A と比較して空気の浸入開始後の試料の浸透率が高かったといえる。

図 14 実験 A, B における (a) 軸ひずみ, (b) 周ひずみ, (c) 空気の圧力の時間変化. ひずみは伸びが正である. 空気の浸入は 0 時間のところに対応する.

Fig. 14 Temporal changes of (a) axial strain, (b) circumferential strain, and (c) air pressure of experiments A and B. Strain is positive for extension. Air infiltration started at 0 hours.

ただし、実験 B の試料の浸透率が高かったのは、空気の浸入開始前にすでに存在していた微小亀裂の影響によるものであるのか、もしくは空気の浸入に伴い発生した微小亀裂の影響によるものであるのかは明らかになっていない。また、実験 B では、空気の浸入後約 1 時間で試料に浸入した空気の体積が実験開始前の間隙体積を上回った。さらに、試料の破壊時（4.5 時間）には空気の体積は大きく増加した。試料の破壊が発生する直前の試料の体積ひずみより求めた実験開始後の試料の体積増加は約 1.5 cm^3 であり、空気の体積増加と比較して十分に小さいため、空気は試料への浸

入後約 1 時間にはブレイクスルーしていた可能性がある。したがって、試料の破壊が発生したのは、空気のブレイクスルーが発生した後であると考えられる。また、試料の破壊時に空気の体積が大きく増加したのは、破断面周辺に存在した空気が試料の破壊時に試料外部（圧力セル）へと排出されたためである可能性がある。なお、空気の圧力は、温度変化の影響を大きく受けるため、空気の圧力変化から空気の体積変化を求めるためには、空気の温度の保持および計測が必要であるが、本研究ではそれらを行っていない。今後、空気の温度の保持および計測を行うとともに、空気

図 15 実験 A, B における空気 の 体 積 の 時 間 変 化. 0 時 間 に お け る 値 は 0 で あ り, 体 積 増 加 が 正 で あ る. 図 中 の 破 線 は, 実 験 を 開 始 す る 前 の 実 験 B の 試 料 の 間 隙 体 積 を 示 す.

Fig. 15 Temporal changes of volume of air during experiments A and B. Changes of volume are 0 at 0 hours and positive for the increase. The dashed line indicates pore volume of sample of experiment B before starting experiment.

の浸入開始後の試料上端からの排水量を計測し、試料内部の流体の流れに関して定量的な評価を行う必要がある。

以上をまとめると、破壊条件に近い応力状態をもつ岩石試料に空気が浸入した場合は、空気の浸入によって、試料が変形しやすくなるとともに、試料の浸透性が上昇し、最終的に試料が破壊することが実験的に示されたといえる。この実験結果は、帽岩の応力状態が破壊条件に近い場合には、圧縮率の高い非濡れ性流体の流動によって帽岩の破壊が引き起こされ、帽岩の浸透性が急激に上昇する可能性があることを示唆している。したがって、帽岩のシール能力を評価する際には、帽岩の応力状態の評価と、非濡れ性流体の流動に伴う帽岩の変形・破壊挙動に関する評価が重要になるといえる。一方、非濡れ性流体の浸入が引き起こす亀裂の発生機構や亀裂の進展の機構については明らかになっていない。また、本研究においては岩石試料として砂岩を用いているため、本研究で

検討した岩石のシール能力低下のメカニズムが帽岩となるような岩石（泥岩や頁岩など）に対しても直接適用可能であるかについてはさらなる検討が必要である。なぜなら、一般に泥岩は岩石の性質や有効拘束圧の大きさによっては延性的に破壊することが知られており、さらにその場合には岩石の浸透率が低下する場合があるからである (Ingram and Urai, 1999; Nygård *et al.*, 2006)。したがって、本研究で検討した破壊のメカニズムによって帽岩に破壊が発生した場合でも、浸透性が上昇しない可能性がある。今後、帽岩のシール能力に関してより現実的な検討を行うために、帽岩となるような岩石を用いて、同様の実験的な検討を行う必要がある。

IV. ま と め

飽和した岩石試料の応力状態を変えて 2 種類の実験を行い、空気の浸入に伴う試料の変形・破壊挙動と空気の圧力変化の違いを調べた。その結果、破壊条件に近い応力状態をもつ試料に空気が浸入した場合は、時間の経過とともに試料の変形が大きくなり、最終的に試料が破壊することが実験的に明らかとなった。また、試料の破壊は、試料内部の微小亀裂への空気の浸入とそれに伴う微小亀裂の発生とが連続することによるものであることが示唆され、試料の浸透性の上昇を示唆する結果も得られた。これらの実験結果は、帽岩のシール能力の評価を行う際には、帽岩の応力状態によっては、圧縮率の高い非濡れ性流体の流動に伴う変形・破壊挙動を考慮する必要があることを示唆しているといえる。今後、試料内部の空気の浸入状況や局所的な破壊が発生した領域を調べることによって、より詳細に破壊のメカニズムについて検討を行う必要がある。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京大学大学院工学系研究科の茂木勝郎氏と大成有楽不動産株式会社テクノセンターの横山正利氏には、実験において多大なるご協力をいただきました。東邦大学の上原真一博士と一名の匿名の査読者の方からいただいた貴重なご意見によ

り、本論文は大きく改善されました。ここに記して感謝いたします。この論文は、科学研究費新学術領域研究「地殻流体：その実態と沈み込み変動への役割」によって行われた研究成果の一部である。

文 献

- Bear, J. (1988): *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications.
- Binh, N.T.T., Tokunaga, T., Goult, N.R., Son, H.P. and Binh, M.V. (2011): Stress state in the Cuu Long and Nam Con Son basins, offshore Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, **28**, 973–979.
- Healy, J.H., Rubey, W.W., Griggs, D.T. and Raleigh, C.B. (1968): The Denver earthquakes. *Science*, **161**, 1301–1310.
- Hickman, S., Sibson, R. and Bruhn, R. (1995): Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research*, **100**, 12831–12840.
- Hildenbrand, A., Schlömer, S. and Krooss, B.M. (2002): Gas breakthrough experiments on fine-grained sedimentary rocks. *Geofluids*, **2**, 3–23.
- Ingram, G.M. and Urai, J.L. (1999): Top-seal leakage through faults and fractures: the role of mudrock properties. in *Muds and Mudstones: Physical and Fluid Flow Properties* edited by Aplin, A.C., Fleet, A.J. and Macquaker, J.H.S., Geological Society, London, Special Publications, **158**, 125–135.
- IPCC (2005): Special report on carbon dioxide capture and storage. <http://www.ipcc-wg3.de/publications/special-reports/special-report-on-carbon-dioxide-capture-and-storage> [Cited 2012/8/9].
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W. and Zimmerman, R.W. (2007): *Fundamentals of Rock Mechanics*, 4th edition. Blackwell Publishing.
- Katz, A.J. and Thompson, A.H. (1987): Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements. *Journal of Geophysical Research*, **92**, 599–607.
- 経済産業省産業技術環境局 CCS 実証試験実施に向けた専門検討会 (2011): 苫小牧地点における「貯留層総合評価」及び「実証試験計画(案)」に係る評価。[Special investigative commission toward implementation of the pilot project of CCS, Industrial science and technology policy and environment bureau, Ministry of economy, trade, and industry (Keizai Sangyosho Sangyo Gijutsu Kankyokyo CCS Jissho Shiken Jisshi Ni Muketa Senmon Kentokai) (2011): Assessment of “The Comprehensive Evaluation of the Reservoir” and “The Plan of the Pilot Project” at Tomakomai (Tomakomai Chiten Ni Okeru “Choryuso Sogo Hyoka” Oyobi “Jissho Shiken Keikaku (An)” Ni Kakawaru Hyoka). (in Japanese)*]
- http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/ccs/report_001_00.pdf [Cited 2012/8/9].
- Masuda, K., Nishizawa, O., Kusunose, K., Satoh, T., Takahashi, M. and Kranz, R.L. (1990): Positive feedback fracture process induced by nonuniform high-pressure water flow in dilatant granite. *Journal of Geophysical Research*, **95**, 21583–21592.
- Michael, K., Golab, A., Shulakova, V., Ennis-King, J., Allinson, G., Sharma, S. and Aiken, T. (2010): Geological storage of CO₂ in saline aquifers: A review of the experience from existing storage operations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, **4**, 659–667.
- Nygård, R., Gutierrez, M., Bratli, R.K. and Høeg, K. (2006): Brittle-ductile transition, shear failure and leakage in shales and mudrocks. *Marine and Petroleum Geology*, **23**, 201–212.
- Purcell, W.R. (1949): Capillary pressures—Their measurement using mercury and the calculation of permeability therefrom. *AIME Petroleum Transactions*, **186**, 39–48.
- 里 優 (1994): 岩石のダイラタンシーに関する基礎研究。北海道大学博士論文。[Sato, M. (1994): *Fundamental Study Related to Rock Dilatancy*. PhD Thesis, Hokkaido University. (in Japanese)*]
- 沢田順弘 (2000): 顕微鏡で覗いた来待石。来待ストーン研究, **2**, 15–42. [Sawada, Y. (2000): “Kimachi stone” as seen under the microscope. *Studies on Kimachi Stone*, **2**, 15–42. (in Japanese)]
- Schlömer, S. and Krooss, B.M. (1997): Experimental characterisation of the hydrocarbon sealing efficiency of cap rocks. *Marine and Petroleum Geology*, **14**, 565–580.
- Schowalter, T.T. (1979): Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment. *AAPG Bulletin*, **63**, 723–760.
- Stein, R.S., King, G.C.P. and Lin, J. (1992): Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake. *Science*, **258**, 1328–1332.
- Thomas, L.K., Katz, D.L. and Tek, M.R. (1968): Threshold pressure phenomena in porous media. *SPE Journal*, **8**, 174–184.
- Tokunaga, T., Kameya, H., Mogi, K. and Aoyagi, R. (2002): A new method to determine hydraulic conductivity and storage coefficient through simultaneous measurements of fluid pressure and strains. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, **76**, 443–453.
- Torp, T.A. and Gale, J. (2004): Demonstrating storage of CO₂ in geological reservoirs: The Sleipner and SACS projects. *Energy*, **29**, 1361–1369.
- 薛 自求・松岡俊文 (2008): 長岡プロジェクトからみた二酸化炭素地中貯留技術の現状と課題。地学雑誌, **117**, 734–752. [Xue, Z. and Matsuoka, T. (2008): Lessons from the first Japanese pilot project on saline aquifer CO₂ storage. *Journal of Geography*

- (*Chigaku Zasshi*), **117**, 734–752. (in Japanese with English abstract)]
- Xue, Z. and Ohsumi, T. (2004): Seismic monitoring of CO₂ migration in water-saturated porous sandstone. *Exploration Geophysics*, **35**, 25–32.
- Zhu, W. and Wong, T.-f. (1997): The transition from brittle faulting to cataclastic flow: Permeability evolution. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 3027–3041.
- Zoback, M.D. (2007): *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.
- Zoback, M.D. and Healy, J.H. (1992): In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting. *Journal of Geophysical Research*, **97**, 5039–5057.
- * Title etc. translated by H.G.