

## 水銀圧入法による岩石の空隙寸法分布測定

林 為人\*・高橋 学\*\*・佐東大作\*\*\*・葉 恩肇\*\*\*\*・橋本善孝\*\*\*\*\*・谷川 亘\*\*\*\*\*

### 要 旨

岩石の空隙構造は透水係数等の物性値を大きく左右するため, その代表的なパラメータである有効空隙率および空隙寸法の分布特性を定量的に評価することが重要である。世界各地から採取された15種類の岩石の計108個の試料について, 水銀圧入法によりそれらの有効空隙率と空隙寸法分布を測定したデータを取りまとめ, 各種岩石の空隙構造の特徴を報告する。岩石の種類, 年代と産地の違いによって, 有効空隙率と空隙の寸法分布特性が大きく異なり, かつ, その空隙寸法分布の特性は空隙率との相関性が必ずしもあるとは限らないことが明らかになった。岩石の空隙寸法分布を測定する手段として, 水銀圧入式ポロシメータは比較的实施簡便で, 測定データの信頼性と再現性も本研究により確認された。ただし, 有効空隙率の小さい(例えば, 1%未満)緻密な深成岩の場合は, 空隙半径の大きい範囲における測定結果が誤差を含む可能性がある。

**Key words** : 岩石 rock, 空隙率 porosity, 空隙寸法分布 pore size distribution, 水銀圧入法 mercury intrusion porosimetry

### 1. はじめに

岩石等の地質材料を構成要素から見ると斑晶やマトリクスなどの固体(鉱物)部分と空隙部分とに大きく分けられる。この空隙部分の量や連続性, 大きさなどが岩石の浸透率等の物性を大きく左右することは誰しもが認めるところである。岩石内部空隙の定量的な把握は種々のアプローチがあるが, 筆者らは長年, 水銀圧入式ポロシメータを用い

て, 様々な岩石試料の空隙率とともに, その空隙の寸法分布をも測定してきた。水銀圧入式ポロシメータのもっとも重要な特徴は, 比較的簡易に空隙の寸法分布を測定し得ることである。それが故に, 材料科学分野などにおいて多用されてきたほか, 岩石などの地質材料を対象とする地球工学・地球科学の分野においても, 頻繁に用いられてきた。当該水銀圧入式ポロシメータによる空隙寸法分布の測定手法は, 米国のASTM (American Society for Testing and Materials) により基準化されている<sup>1)</sup>。

筆者らは, 2000年頃までにカルロ・エルバ社のポロシメータを用いた数種類の岩石試料の測定から, それらの内部空隙構造を代表するパラメータである空隙率と空隙寸法分布特性を実験的に評価してきた(例えば, 林ほか<sup>2)</sup>, 高橋ほか<sup>3)</sup>, 林・高橋<sup>4)</sup>, Lin<sup>5)</sup>)。また, その空隙率と空隙寸法分布データを用いて, 等価管路モデルによる岩石の透水係数の推定を試みた(林ほか<sup>6)~8)</sup>)。その後, 産業技術総合研究所において新規に米国マイクロメリティックス(Micromeritics Instrument Corporation)社のポロシメータAutopore IV 9520が導入された。それ以降, この新規装置は測定の圧力範囲がより広い等の利点を有するため, 筆者らは主としてこれを用いて, 各種岩石試料の空隙寸法分布を測定してきた。これらのデータの一部は, 学会の研究発表会等で発表・公表されている(例えば, 林ほか<sup>9)</sup>, Lin et al.<sup>10)</sup>)。が, 系統的に取りまとめられることがなかった。本稿では, 世界各地から採取された15種類の岩石の計108個の試料について, 水銀圧入式ポロシメータAutopore IV

\* 京都大学大学院工学研究科 Graduate School of Engineering, Kyoto University 兼 海洋研究開発機構高知コア研究所 Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (会員)  
 E-mail : lin@kumst.kyoto-u.ac.jp

\*\* 産業技術総合研究所 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) (会員)

\*\*\* Graduate School of International and Area Studies, Hankuk University of Foreign Studies, Seoul, Korea

\*\*\*\* 国立台湾師範大学 地球科学系 Department of Earth Sciences, National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan

\*\*\*\*\* 高知大学大学院総合人間自然科学研究科 Graduate School of Integrated Arts and Sciences, Kochi University

\*\*\*\*\* 海洋研究開発機構高知コア研究所 Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) (会員)

9520を用いて、それらの空隙率と空隙寸法分布を測定したデータを取りまとめ、各岩種の空隙構造の特徴を報告する。

## 2. 水銀圧入式ポロシメータの測定原理と装置

### 2.1 水銀圧入による空隙寸法の測定原理

水などの液体を岩石に浸潤させる場合は、真空引きによる減圧を行いながら飽和させたり、空隙と液体の毛細管現象によって浸透させることができる。しかし、接触角（濡れ角, contact angle）が $90^\circ$ 以上ある液体は、表面張力のために自分自身では小さな空隙へは入っていくことができない。

比重が13.546（ $20^\circ\text{C}$ ）の水銀は、その融点が $-38.86^\circ\text{C}$ であり、常温環境で液状を呈する唯一の金属である。水銀の接触角は、接触する物質によって $125^\circ$ から $150^\circ$ 前後までの範囲において変化し、 $90^\circ$ を大幅に上回る値を示す。また、水銀の表面張力は接触する気体および温度に依存するが、約 $480\text{dyn/cm}$ （ $1\text{dyn}=10^{-5}\text{N}$ ）である。この値は、水の表面張力（約 $73\text{dyn/cm}$ ）と比べると、大きな値であることが分かる。

水銀が有するこのような特性から、岩石試料中の空隙に水銀を入れるためには外部から圧力を加える必要がある。水銀を試料の空隙に浸入させる条件は、圧入圧力 $P$ が水銀の表面張力 $\sigma$ による抵抗を超えることである（図-1を参照）。Washburnは1921年に水銀圧入式ポロシメータによる多孔質材料の空隙寸法の測定原理および測定手順を提案した。Washburn（1921）<sup>11)</sup>によれば、空隙の形状を円筒形とした場合、その半径 $R$ と圧入圧力 $P$ との関係は次式で表される。

$$R = -2\sigma \cos \theta / P \quad (1)$$

ここで、 $\sigma$ は水銀の表面張力、 $\theta$ は水銀の接触角である。

岩石中の空隙の形状は不規則ではあるが、堆積岩の場合、内部空隙のほとんどは直交する3つの寸法がオーダー的に異なることがなく、球形に近似できると考えられるので、(1)式を用いることが妥当と考えられる。一方、花崗岩な

どの深成岩の場合は、内部空隙がほとんどき裂であるため、空隙の形状は円筒形よりむしろ平行板状のものとして仮定するほうが実状に近い。ここで、き裂状の空隙の断面形状を長方形とし、き裂の幅がその長さに比べてはるかに小さいと仮定すると、き裂幅 $W$ と圧入圧力 $P$ との関係は次式で近似的に表すことができる<sup>2)</sup>。

$$W = -2\sigma \cos \theta / P \quad (2)$$

水銀圧入式ポロシメータはこの原理を利用して、圧入圧力と水銀の圧入量を測定することにより、試料内部の空隙率およびそれらの寸法分布を得ることができる。ポロシメータで測定される空隙の寸法は、その形状により幾何学的パラメータの意味が異なるが、(1)式と(2)式との右辺が等しいので、本稿では円筒形空隙の半径 $R$ およびき裂状空隙の開口幅 $W$ の両者とも空隙半径と称する。

平均的な値として、水銀の表面張力 $\sigma$ を $480\text{dyn/cm}$ 、接触角 $\theta$ を $141.3^\circ$ とすると、(1)式から次の近似式が得られる。

$$R = 0.749 / P \quad (3)$$

ここで、 $P$ の単位はMPa、 $R$ の単位は $\mu\text{m}$ （ $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ）である。例えば、圧入圧力を $P=414\text{MPa}$ と仮定すると、このとき水銀を圧入した空隙の半径は(3)式より $R=1.8 \times 10^{-3}\mu\text{m}$ と求められる。

また、Rootare and Prenzlöw（1967）<sup>12)</sup>によれば、内部空隙の幾何学形状についての仮定をせずに、ポロシメータによる水銀圧入の圧力～圧入量の関係から内部空隙の比表面積を求めることができるとされている。具体的には、圧力 $P$ が水銀を圧入する仕事量と、空隙の内部表面を水銀で濡れさせるために水銀の表面張力による抵抗を克服する仕事量とが等しいとして、次式に示す比表面積 $S_v$ （単位質量あたりの表面積、次元は $[\text{L}^2/\text{M}]$ ）の算出式を導いた。

$$S_v = -\frac{1}{M\sigma \cos \theta} \int_0^{V_{\max}} P dV \quad (4)$$

比表面積 $S_v$ は水銀圧入全過程（圧入圧力： $0 \sim 414\text{MPa}$ 、圧入量： $0 \sim V_{\max}$ ）における $PdV$ の積分、水銀の定数 $\sigma$ 、 $\theta$ および試料の質量 $M$ から求められる。

### 2.2 測定装置、試料と基本的な測定手順

本稿で報告する測定データは、すべて産業技術総合研究所地質調査総合センターが保有している水銀圧入式ポロシメータ Autopore IV 9520を用いて測定したものである。この装置の基本的な構成は写真（図-2）と模式図（図-3）に示すとおりである。ポロシメータは非常に広範囲にわたって圧入圧力を精度よく測定する必要があるために、現存の各メーカーの装置は一般的に低圧部と高圧部に分けて測定を行っている。ポロシメータ Autopore IV 9520も、低圧部と高圧部からなり、低圧部では、試料の真空脱気および試料セルへの水銀注入などの準備作業と、低圧領域における水銀の圧入量と圧入圧力の測定を行う。この低圧領域での測定は、真空～1大気圧の圧力範囲においてはバルブの解

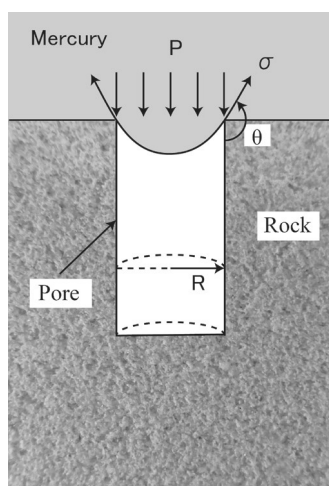


図-1 水銀圧入法原理の模式図

放により行われるが、1大気圧～345kPa（約3.5大気圧、ただし本研究では約200kPaとした）の圧力範囲では窒素またはヘリウムガスポンプを用いて加圧して行われる。図-2と図-3に示したように、低圧部では試料セルがほぼ水平に設置してある。これは、試料セルのキャピラリー内の水銀柱の高さにより、試料に加えられる圧力負荷を避けるためである。すなわち、測定はなるべく真空状態に近い低い圧力から行うための工夫である。したがって、ポロシメータAutopore IV 9520で測定できる空隙半径の上限は約500 $\mu\text{m}$ である。一方、低圧部で測定される空隙半径の下限値は、圧力上限の345kPaに対応して、約2.2 $\mu\text{m}$ となる。ポロシメータAutopore IV 9520の高圧部では、1大気圧～414MPaの



図-2 本研究で使用した水銀圧入式ポロシメータAutopore IV 9520の写真

圧力範囲において水銀の圧入を行い、空隙半径の測定範囲は約 $1.8 \times 10^{-3} \sim 7.4 \mu\text{m}$ である。

水銀そのものは圧入圧力を受けると体積が収縮するため、岩石試料に圧入した水銀の体積量の測定結果は、水銀のみを満たした試料セルで取得したブランクデータで補正しなければならない。本研究では、すべての試料セルの水銀ブランクデータを取得して、圧力による体積の補正に実測と同一試料セルのブランクデータを用いた。また、本研究では解析に用いた水銀の表面張力を $\sigma = 480 \text{ dyn/cm}$ 、接触角を $\theta = 141.3^\circ$ とした。

ポロシメータ測定は、試料の空隙に水銀を圧入するので、間隙水が含まれない状態の乾燥試料を使用する。本研究では比較的軟らかくて、粘土鉱物が富む試料（南海トラフ掘削の試料）について凍結乾燥、比較的硬い岩石試料（上記以外の試料）は、110 $^\circ\text{C}$ で24時間の炉乾燥とした。凍結乾燥法の詳細としては、tert-ブチルアルコール（融点25度）を45度の恒温器内でサンプルに浸透（交換しながら1週間程度）させた後、25 $^\circ\text{C}$ 以下をキープしたやや低圧のデシケーター内でtert-ブチルアルコールを昇華させることによって乾燥した。測定試料の形状は、基本的に1 $\text{cm}^3$ ほどの不定形のものとし、表面の凹凸が測定結果に影響を及ぼす恐れもあるため、岩石切断機等でカットして作製する。試料の大きさは、装置の測定できる空隙量と試料の空隙率との兼ね合いから決める。例えば、空隙率の大きい試料の測定はサイズの小さいものを、空隙率の小さい試料は大きいものを用いる。

ポロシメータを用いた岩石の内部空隙の寸法分布測定手順は次のとおりとした。

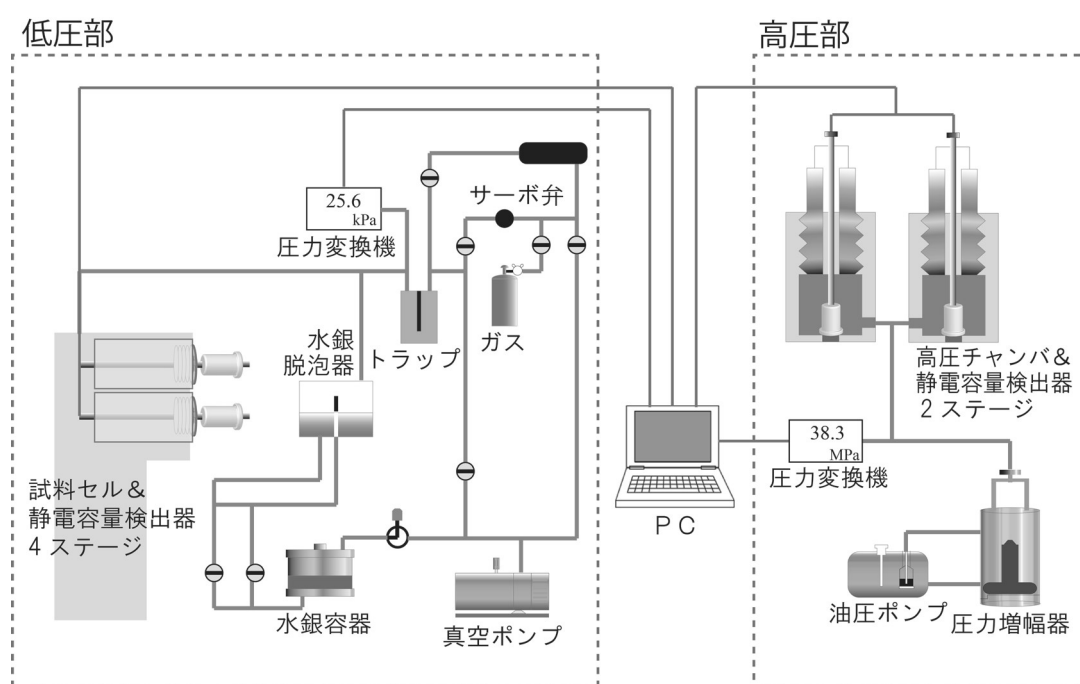


図-3 本研究で使用した水銀圧入式ポロシメータAutopore IV 9520の構成模式図

- 1) 乾燥状態の岩石試料を入れた試料セルを低圧測定部にセットし、真空脱気を行う。試料の透気特性により、脱気時間が異なるが、一定の真空度になったら、自動的に脱気が終了する。実績としては、5分～24時間程度であった。
- 2) 試料セルに水銀を満たす。
- 3) 真空から徐々に大気圧まで開放して、そして窒素またはヘリウムガスを段階的に注入し、セル内の圧力を真空状態から約200kPaまで上昇させながら、水銀の圧入量と圧入圧力を測定する。この低圧部での測定には10分程度を要する（測定条件の設定による）。
- 4) 試料セルを低圧部から高圧部に移設する。油圧ポンプと圧力増幅器により、一定の昇圧速度で大気圧から最高圧力414MPaまで上昇させながら、水銀の圧入量と圧入圧力を測定する。この昇圧過程の所用時間は、設定の昇圧速度および試料の空隙量によって異なるが、1～2時間程度である。
- 5) データ解析を行う。試料の空隙率の算出に必要な試料の体積（かさ体積）は、ポロシメータAutopore IV 9520により同時に測定される。

水銀圧入式ポロシメータ測定結果の一例として、ベレア砂岩の低圧部と高圧部の測定結果を統合した水銀の累積圧入量と圧入圧力の関係、ならびに圧入量と空隙半径との関係を図-4に示す。圧入圧力と空隙半径が式（1）に示すように対応しているので、圧入量～圧入圧力曲線と圧入量～空隙半径曲線は、完全に重なる。また、圧入量～空隙半径のデータから、各空隙半径における圧入量、すなわち各々のサイズにおける空隙の絶対量ならびに相対比率（%）が求められる（図-5<sup>13)</sup>。

水銀圧入式ポロシメータは、試料の空隙（体積と寸法）が圧入過程において変形しないという基本仮定を持って成り立っている。実際には、ある圧力において水銀が圧入された空隙が、有効応力の原理により、当該圧力による変形

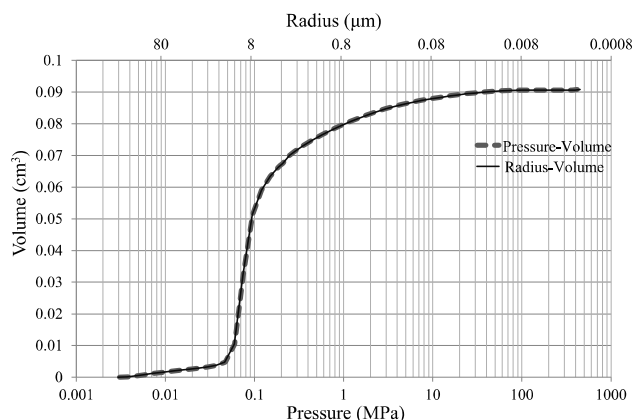


図-4 ベレア砂岩（試料名：Be-1）の低圧部と高圧部による測定データを統合した水銀の累積圧入量と圧入圧力の関係、ならびに圧入量と空隙半径との関係

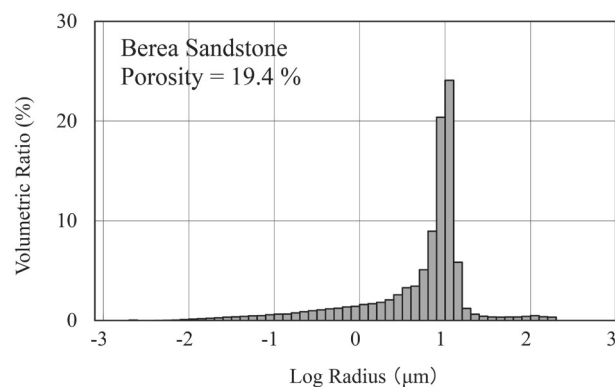


図-5 図-4に示したベレア砂岩の水銀の累積圧入量と空隙半径の関係から求めた空隙半径の寸法分布（Lin et al., 2011<sup>13)</sup>）

がないと考えられるが、水銀が圧入されていないより小さい空隙は当該圧力により、容積が小さくなると共に、空隙の寸法も小さくなることがあり得ると考えられる。したがって、水銀ポロシメータによる測定は、変形しやすい空隙（例えば、結晶質岩試料の閉じやすいき裂および変形しやすい軟質な堆積岩試料の空隙）を過小評価することがある。一方、岩石試料の固体部分（鉱物など）は、水銀注入圧力により圧縮変形が生じるとされるため、水銀の圧縮変形データ（ブランクデータ）を用いてこれを補正している。したがって、ポロシメータによる空隙の測定は、水銀を圧入する圧力による空隙の変形と、固体部分の変形の補正誤差（固体の圧縮変形量とこれの補正に使用する水銀の変形データとの差）をすべて空隙の量として扱っている。この影響については、水銀ポロシメータによる岩石試料の有効空隙率が、試料の含水飽和状態と乾燥状態の質量差から求められる有効空隙率よりも若干過小評価されているとの報告（林ほか、1998<sup>14)</sup>）があるが、系統的な研究がなされていない現状である。

### 3. TCDPの試料とその測定結果

#### 3.1 試料

1999年9月21日に発生したマグニチュードMw7.6の台湾集々地震の震源断層をボーリングで調査する「台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト（Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project, TCDP）」が行われた。このプロジェクトでは、Hole-A、Hole-Bと呼ばれる2本のボーリングを実施した。TCDPのボーリングサイト付近の地質構造の概要を図-6<sup>15)</sup>に示す。メインボーリング孔のHole-Aでは約2,000mまでボーリングを行い、コアリングの試験区間を含めて、深度約450mから孔底まで連続的にボーリングコアを採取した<sup>15)</sup>。

TCDPプロジェクトの一環として行われた地下深部の微生物に関する研究では、微生物個体のサイズと空隙寸法との関係による微生物の移動・起源に関する検討が行われる

ため、岩石の空隙寸法測定がキーポイントになるとされていた<sup>16)</sup>。そこで、本研究では、Hole-Aで得られたすべての岩種のコア試料からサブサンプリングを行い、水銀圧入式ポロシメータAutopore IV 9520を用いて空隙率ならびに空隙半径の寸法分布などを測定した。

ボーリングHole-Aの概略柱状は、図-6 (b) の地質断面図にも示したように、地表から順に、更新統～鮮新統上部の卓蘭 (Cholan) 層 (0～1,027m)、鮮新統下部の錦水 (Chinshui) 層 (1,027～1,268m)、鮮新統下部～中新統上部の桂竹林 (Kueichulin) 層 (1,268～1,712m)、と卓蘭層 (1,712m～孔底) からなる<sup>17)</sup>。浅部と深部に卓蘭層が2度出現しているのは、三義 (Sanyi) 断層などの断層すべり

による極めて大きな累積変位のためである。本研究では、約460～1,980mの深度区間において、合計32深度分の測定試料をサンプリングした。原則として一つの深度につき、それぞれ2試料を採取したが、試料中に含まれるき裂等により妥当性に欠ける測定の失敗例があったため、有効なデータは61個である。測定した試料の岩質分類は、頁岩、シルト岩、砂岩および生物擾乱を受けた砂岩・シルト岩であり、すべて堆積岩である (表-1)。

3.2 測定結果

水銀圧入式ポロシメータAutopore IV 9520により測定されるパラメータは、乾燥状態のバルク密度、粒子密度、有効空隙率、空隙半径のメジアンおよび空隙半径のヒスト

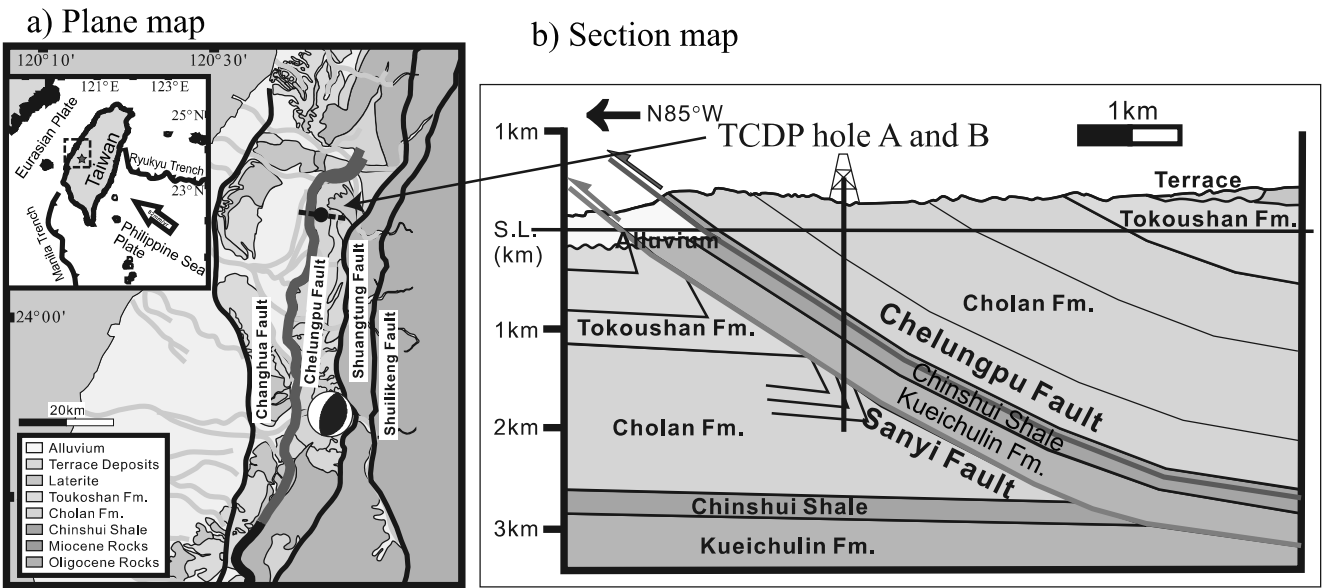


図-6 (a) 地上で確認された台湾集々地震の震源断層であるチェルンブ断層 (Chelungpu Fault)、地質分布およびTCDPボーリングサイトの位置●と、(b) ボーリングサイトの地質予想断面図 (N85°W方向)<sup>15)</sup>

表-1 各種試料の岩種、採取地、測定個数、乾燥状態のバルク密度、粒子密度、有効空隙率、空隙半径のメジアン

| Sedimentary / Crystalline Rocks | Sample Locations       |             | Lithology                   | Number of specimens | Bulk density, dry (g/cm <sup>3</sup> ) |         |           | Grain density (g/cm <sup>3</sup> ) |         |           | Porosity (%) |         |           | Median pore radius (μm) |         |           |
|---------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------------|---------------------|----------------------------------------|---------|-----------|------------------------------------|---------|-----------|--------------|---------|-----------|-------------------------|---------|-----------|
|                                 | Region                 | Site / Hole |                             |                     | Min value                              | Average | Max value | Min value                          | Average | Max value | Min value    | Average | Max value | Min value               | Average | Max value |
| Sedimentary Rocks               | TCDP, Taiwan           | Hole-A      | Shale                       | 17                  | 2.52                                   | 2.57    | 2.63      | 2.65                               | 2.68    | 2.73      | 3.13         | 3.98    | 4.95      | 0.0058                  | 0.0105  | 0.179     |
|                                 |                        |             | Siltstone                   | 20                  | 2.46                                   | 2.54    | 2.61      | 2.64                               | 2.67    | 2.71      | 3.37         | 4.88    | 7.40      | 0.0124                  | 0.0228  | 0.0369    |
|                                 |                        |             | Sandstone with bioturbation | 10                  | 2.31                                   | 2.46    | 2.59      | 2.61                               | 2.65    | 2.69      | 3.73         | 7.32    | 11.64     | 0.014                   | 0.133   | 0.477     |
|                                 |                        |             | Sandstone                   | 14                  | 1.98                                   | 2.16    | 2.26      | 2.58                               | 2.62    | 2.67      | 14.4         | 17.8    | 24.9      | 1.61                    | 3.15    | 4.97      |
|                                 | NanTroSEIZE, Japan     | C0001       | Silty Clay                  | 23                  | 1.03                                   | 1.33    | 1.38      | 2.36                               | 2.55    | 2.69      | 46.6         | 47.6    | 59.4      | 0.040                   | 0.059   | 0.317     |
|                                 |                        | C0006       | Silty Clay                  | 2                   | 1.42                                   | 1.45    | 1.47      | 2.65                               | 2.66    | 2.67      | 42.9         | 43.3    | 43.7      | 0.038                   | 0.039   | 0.040     |
|                                 | Wakayama, Japan        |             | Shirahama Sandstone         | 2                   | 2.29                                   | 2.29    | 2.29      | 2.65                               | 2.66    | 2.67      | 13.8         | 14.0    | 14.1      | 0.215                   | 0.263   | 0.31      |
|                                 | Ohio, US               |             | Berea Sandstone             | 2                   | 2.13                                   | 2.13    | 2.14      | 2.65                               | 2.67    | 2.68      | 19.4         | 20.0    | 20.6      | 8.38                    | 8.44    | 8.51      |
|                                 | Rajasthan, India       |             | Rajasthan Sandstone         | 2                   | 2.34                                   | 2.34    | 2.35      | 2.61                               | 2.62    | 2.63      | 10.5         | 10.5    | 10.5      | 2.97                    | 2.99    | 3.02      |
|                                 | Tochigi, Japan         |             | Tage Welded Tuff            | 2                   | 1.73                                   | 1.74    | 1.75      | 2.39                               | 2.42    | 2.45      | 27.7         | 28.1    | 28.6      | 0.123                   | 0.130   | 0.135     |
| Crystalline Rocks               | Java Island, Indonesia | UKF*        | Limestone                   | 4                   | 1.43                                   | 1.47    | 1.51      | 2.60                               | 2.71    | 2.83      | 44.3         | 45.9    | 48.2      | 3.02                    | 3.67    | 4.31      |
|                                 |                        | LKF*        | Limestone                   | 2                   | 2.23                                   | 2.29    | 2.35      | 2.74                               | 2.74    | 2.74      | 14.4         | 16.5    | 18.6      | 0.182                   | 0.354   | 0.525     |
|                                 | Kagawa, Japan          |             | Aji Granite                 | 2                   | 2.63                                   | 2.63    | 2.63      | 2.65                               | 2.65    | 2.65      | 0.66         | 0.66    | 0.66      | 8.1                     | 14.5    | 20.1      |
|                                 | Fukuoka, Japan         |             | Karatsu Basalt              | 2                   | 2.74                                   | 2.74    | 2.75      | 2.97                               | 2.97    | 2.97      | 7.48         | 7.71    | 7.94      | 0.83                    | 1.16    | 1.49      |
|                                 | Carrara, Italy         |             | Carrara Marble              | 2                   | 2.69                                   | 2.69    | 2.69      | 2.71                               | 2.71    | 2.71      | 0.61         | 0.66    | 0.71      | 1.82                    | 2.39    | 3.00      |
|                                 | Belfast, South Africa  |             | Belfast Gabbro              | 2                   | 2.93                                   | 2.94    | 2.94      | 2.95                               | 2.95    | 2.95      | 0.35         | 0.35    | 0.35      | 62.1                    | 64.6    | 67.0      |
|                                 |                        |             |                             |                     |                                        |         |           |                                    |         |           |              |         |           |                         |         |           |
|                                 |                        |             |                             |                     |                                        |         |           |                                    |         |           |              |         |           |                         |         |           |

UKF: Upper part of Kujung formation; LKF: Lower part of Kujung formation

グラム（頻度分布）である（表-1, 図-5）。前述の通り、空隙の半径とは、本来不規則な岩石の内部空隙の形状を円筒形と仮定した場合の半径である。これは真の形状における寸法パラメータではなく、一種の等価寸法である。また、空隙半径のメジアンは、水銀の圧入体積の中央値における圧入圧力から算出される空隙半径である。

TCDPのHole-Aから採取した試料で測定した有効空隙率と試料の採取深度との関係は図-7に示したとおりである。同図から、有効空隙率には深度との相関が認められず、地層とも明瞭な対応関係が認められなかった。データの個数

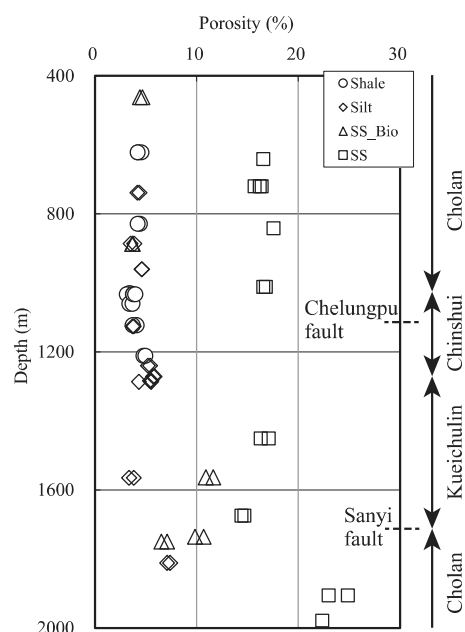


図-7 TCDP試料の有効空隙率の深度プロファイル

はやや不十分ではあるが、深度範囲1,712-2,000mの卓蘭層の砂岩とシルト岩の有効空隙率は、400-1,027mの卓蘭層の同じ岩種と比べると、やや高い傾向があるように思われる。これは、1,712-2,000mの部分が卓蘭層の上部、400-1,027mが卓蘭層の下部に相当するための可能性があると考えられる。

4つの岩質区分における各パラメータの平均値、その岩質区分におけるパラメータの最大値・最小値を表-1にまとめた。これらのパラメータには岩質と明確な対応関係が認められ、砂岩、シルト岩、頁岩の順で岩種が細粒になるほど、乾燥バルク密度が高く、有効空隙率が低く、空隙半径のメジアンが小さくなり、すなわち、緻密な岩石の特性を示すことが判明した。一方、粒子サイズの大きい砂岩は、ルーズな特性を示した。生物擾乱を受けた砂岩の場合は、生物擾乱を受けない同種の岩石より、有効空隙率が小さくなり、乾燥バルク密度が高くなった。

図-8では、上記4岩種の空隙寸法分布において一般性を有する代表的な試料の空隙半径のヒストグラムを示した。それぞれの岩種はそれぞれの分布特徴を有しており、特に、頁岩と砂岩の空隙半径ヒストグラムが対照的であり、最頻値（図-8のaとd、ピークにおける空隙半径）やメジアン（表-1）が約二桁異なっていることが確認された。

測定結果に及ぼすサンプルの不均質性の影響を検討するために、図-9（a）の写真に示した砂岩・シルト岩互層のサンプルを測定してみた。その空隙半径のヒストグラムは同図の（b）右に示した。その形状から、図-8中に示した砂岩（d）とシルト岩（b）の重ね合わせであると理解す

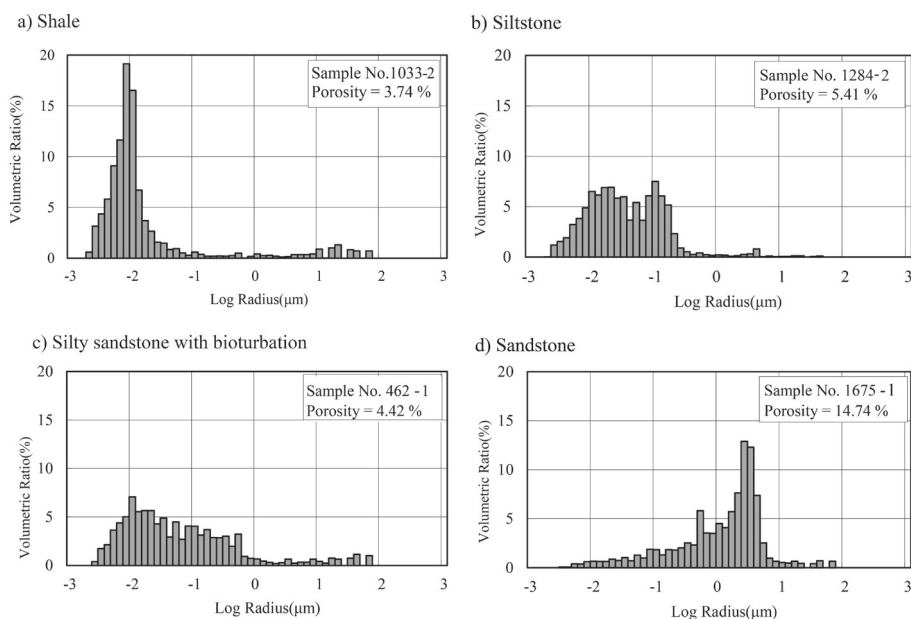


図-8 TCDPのHole-Aで認められた4種類の岩石の空隙半径の寸法分布ヒストグラム：(a) 頁岩、(b) シルト岩、(c) 生物擾乱を受けたシルト質砂岩、(d) 砂岩；なお、試料番号のつけ方について、たとえばa)のSample No. 1033-2は深度1,033mから採取された2個目の試料という意味である

ることができる。この図からも、ポロシメータによる空隙寸法分布の測定には十分な再現性があると判断することができる。無論、このデータはどの岩質区分にも対応して居らず、表-1のまとめには使用していない。

なお、同一深度（同一岩質）で採取した2試料の測定結果は、各パラメータの数値にしても、空隙半径のヒストグラムにしても非常に良く一致した。したがって、この測定の実現性は高いと言える。

#### 4. NanTroSEIZEの堆積軟岩試料とその測定結果

##### 4.1 試料

西南日本沖合にある南海トラフでは、ユーラシアプレートの下にフィリピン海プレートが沈み込んでいる。そのプレ

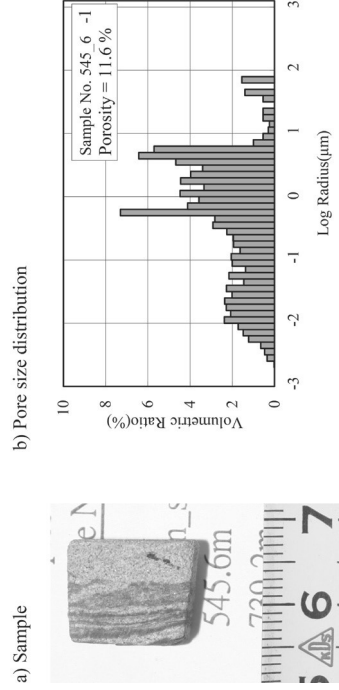


図-9 (a) TCDPから採取された砂岩とシルト岩の互層試料の測定前の写真と、(b) その内部空隙半径の寸法分布ヒストグラム

ト境界断層では、100～200年の間隔でM8クラスの巨大地震が発生している。その震源断層の特性を解明するために、地球深部探査船「ちきゅう」を用いた海洋科学掘削プロジェクト：南海トラフ地震発生帯掘削計画 (Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment, 略称NanTroSEIZE) が、統合国際深海掘削計画 (IODP) の一環として、2007年から開始され、現在まで断続的に実施されている。これまでに、NanTroSEIZEは紀伊半島沖において、10数本の掘削を行ってきた<sup>18)</sup>。本研究では半遠洋性堆積軟岩の空隙構造の基本的特徴を調べるために、巨大分岐断層を掘り抜いた掘削サイトC0001<sup>19)</sup>の海底下深度約67～447mbsf (meters below seafloor) の範囲内において10深度で計22個の試料を、プレート境界断層を掘り抜いた掘削サイトC0006<sup>20)</sup>の海底下深度約476mから2試料を採取した (図-10)。これらはすべて堆積軟岩 (シルト岩またはシルト質泥岩) である。

##### 4.2 測定結果

南海トラフ掘削のサイトC0001とC0006から採取された試料の有効空隙率は、試料の採取深度が深くなるにつれ、海底下深度約67m付近の60%弱から約476m付近の40%強までほぼ単調的に低下した (図-11)。この有効空隙率の深度変化は堆積物の埋没深度による圧密の効果であると考えられる。また、海底下深度207m付近は地層境界 (不整合) であり、それ以上が海溝斜面堆積物で、それ以上が付加体

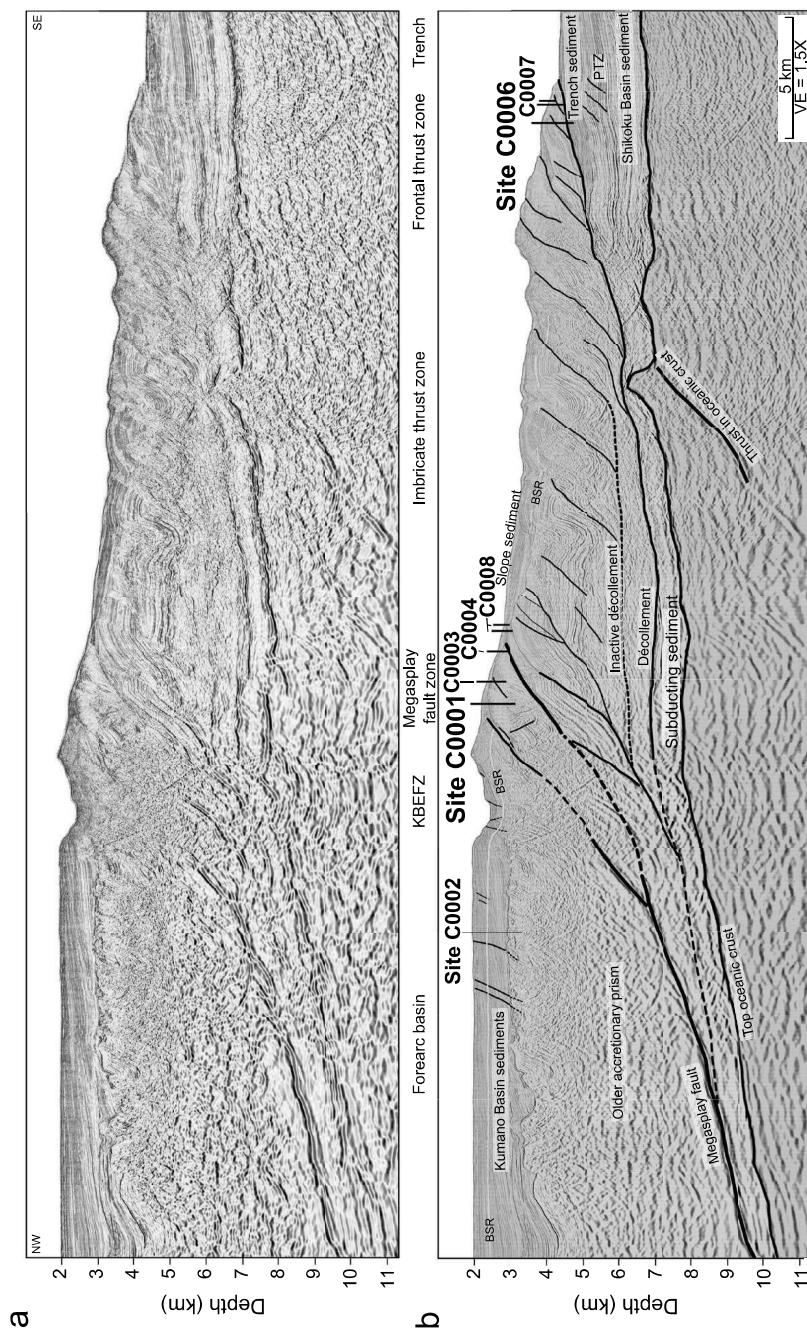


図-10 NanTroSEIZEの北西～南東方向におけるサイスミック反射断面図<sup>21)</sup> (a：解釈なし、b：解釈あり)；KBEFZ=Kumano Basin edge fault zone, PTZ=proto thrust zone, BSR=bottom-simulating reflector, VE=vertical exaggeration

である<sup>19)</sup>。そのため、海底下深度200m付近では有効空隙率の急変が認められた(図-11)。

図-12にサイトC0001のいくつかの深度から採取された堆積物の空隙寸法分布の結果を示す。すべての試料の空隙寸法分布は、よく似通った形状の分布を呈しているが、空隙半径の最頻値やメジアンが深度の増加に伴い、徐々に小さくなる傾向が確認された。埋没深度の増加に伴って、圧密による堆積物の有効空隙率の減少とともに、空隙半径も小さくなることが確認された。なお、南海トラフの試料も、

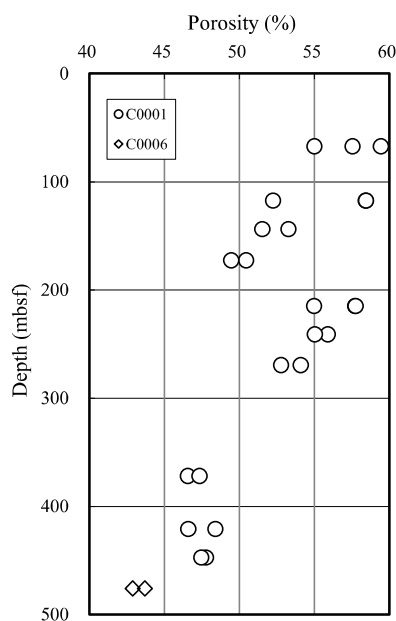


図-11 NanTroSEIZEの堆積軟岩試料の有効空隙率の深度プロファイル

TCDP試料と同様に同一深度(同一岩質)で2試料を測定しており、各パラメータの数値、空隙半径のヒストグラムともに良く一致した。

## 5. その他の岩石試料とその測定結果

### 5.1 試料

TCDPおよびNanTroSEIZEで得られた掘削コア試料以外では、陸上露頭や採石場等から各種岩石試料を採取して、それらの有効空隙率と空隙寸法分布を測定した。堆積岩類としては、これまでも研究用試料として多用されてきた和歌山県産の白浜砂岩(例えば、林ほか<sup>22)</sup>)、米国オハイオ州産のベレア砂岩(例えば、藤井・高橋<sup>23)</sup>)、インド産のラジャスターン砂岩(例えば、Lin et al.<sup>13)</sup>)、栃木県産の田下熔結凝灰岩(例えば、長田<sup>24)</sup>)、インドネシアジャバ島産の石灰岩を用いた。ジャバ島の石灰岩は、Tanikawa et al.<sup>25)</sup>と同じ試料で、Kujung Formationの上部と下部の地質露頭よりそれぞれ採取した(それぞれUKF, LKFと略記する)。上部の試料は多孔質で、下部の試料は比較的緻密である(図-13のX線CTイメージ<sup>25)</sup>を参照)。

本研究に用いた結晶質岩類としては、香川県産の細粒庵治花崗岩(例えば、工藤ほか<sup>26)</sup>)、福岡県産の唐津玄武岩(例えば、青山<sup>27)</sup>)、イタリア産のカララ大理石(例えば、Herz and Dean<sup>28)</sup>)、南アフリカ産のベルファスト斑縞岩(例えば、Togo et al.<sup>29)</sup>)がある。

### 5.2 測定結果

白浜砂岩、ベレア砂岩とラジャスターン砂岩は、約10～20%の有効空隙率を有しており、また似通っている形状の

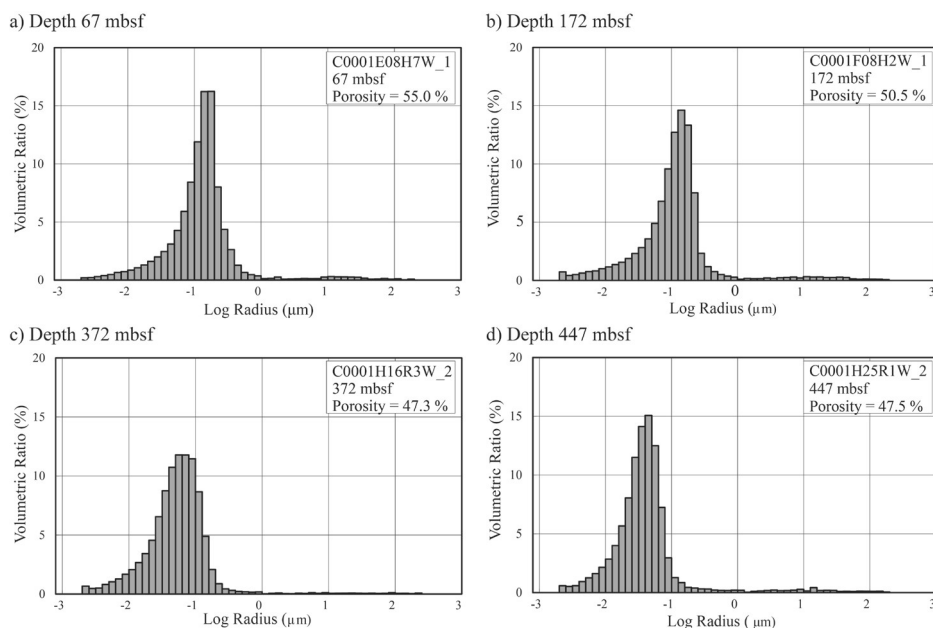


図-12 NanTroSEIZEの堆積軟岩試料(シルト質泥岩)の異なる海底下深度(mbsf)から採取された試料[a) 67mbsf, b) 172mbsf, c) 372mbsf, d) 447mbsf]の空隙半径分布ヒストグラム

寸法分布ヒストグラムを呈している（図-14）。空隙半径の最頻値でみれば、ベレア砂岩はもっとも大きくて約 $13\mu\text{m}$ 、もっとも小さい白浜砂岩の約 $0.6\mu\text{m}$ の20倍以上であった。

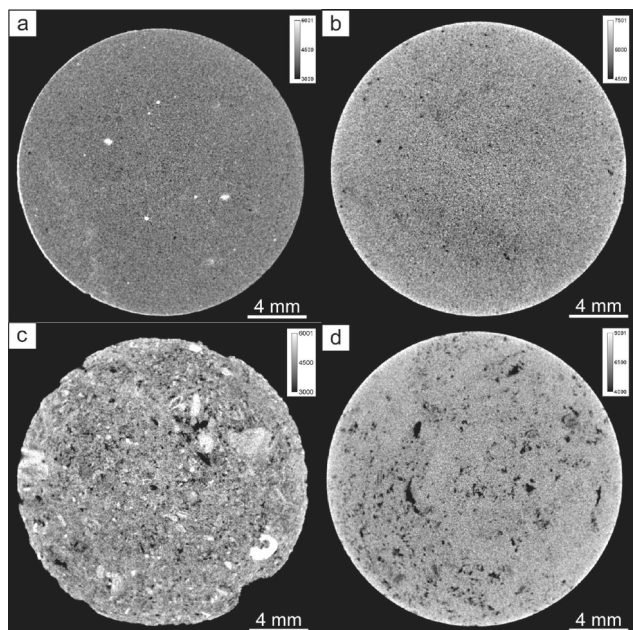


図-13 インドネシアJAVA島のKujung Formationの下部 (a, b) と上部 (c, d) の地質露頭より採取した試料のX線-CTイメージ (Tanikawa et al.<sup>25)</sup>；空隙の部分（密度がゼロに近い空気）は、X線CTバリューが大きく、イメージでは黒色の斑点となっている

また、メジアンも同様な岩種間の大小関係であった（表-1を参照）。田下熔結凝灰岩の有効空隙率がこの3種類の砂岩より大きい、空隙半径のメジアンはこの3種類の砂岩より小さい結果であった。したがって、岩石の有効空隙率と空隙の寸法分布は、必ずしも相関関係があるとは限らない。上記の3種類の砂岩だけで見ても、同様なことがいえる。インドネシアジャバ島のKujung層石灰岩の空隙寸法は図-14 (eとf) に示す通りである。上部の試料は、有効空隙率が大きく、特に空隙半径 $10\mu\text{m}$ 付近の大きな空隙が多い。一方、下部の試料は、有効空隙率が比較的小さく、半径が $1\mu\text{m}$ 以下の空隙が多い。これらの空隙半径寸法分布の特徴はX線CTイメージとよく一致した。

4種類の結晶質岩試料のポロシメータによる空隙寸法の測定を行った（図-15）。そのうち、庵治花崗岩、カララ大理石とベルファスト斑レイ岩は有効空隙率が1%未満で、非常に緻密な岩石である。これら測定結果は、いずれもバイモダル (Bimodal) な空隙半径分布のヒストグラムとなった。しかし、このような岩石には非常に微細なマイクロクラックのような空隙があるが、寸法の大きな空隙（例えば、 $100\mu\text{m}$ ）は考えにくい。したがって、 $100\mu\text{m}$ 付近の測定結果は、試料表面の凹凸などによる影響の可能性が高く、真の空隙ではないと考えられる。この表面の凹凸による影響は、有効空隙率の大きい岩石試料の測定結果にも含まれて

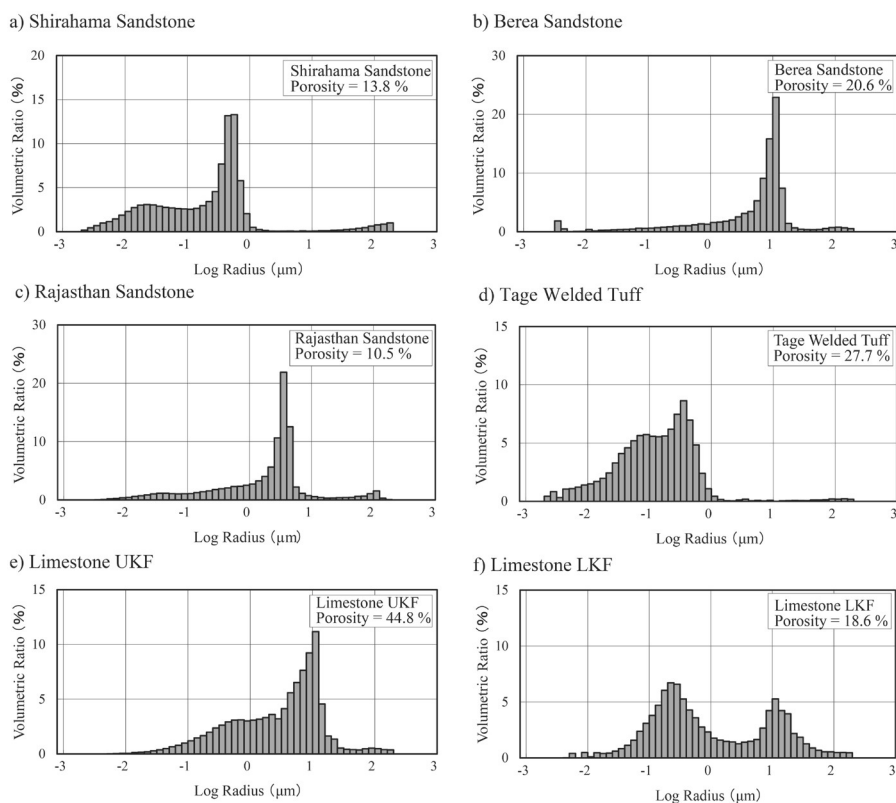


図-14 代表的な堆積岩試料 [a) 白浜砂岩, b) ベレア砂岩, c) ラジャスターン砂岩, d) 田下凝灰岩, インドネシアJAVA島のKujung Formationの e) 上部の石灰岩と f) 下部の石灰岩] の空隙半径分布のヒストグラム

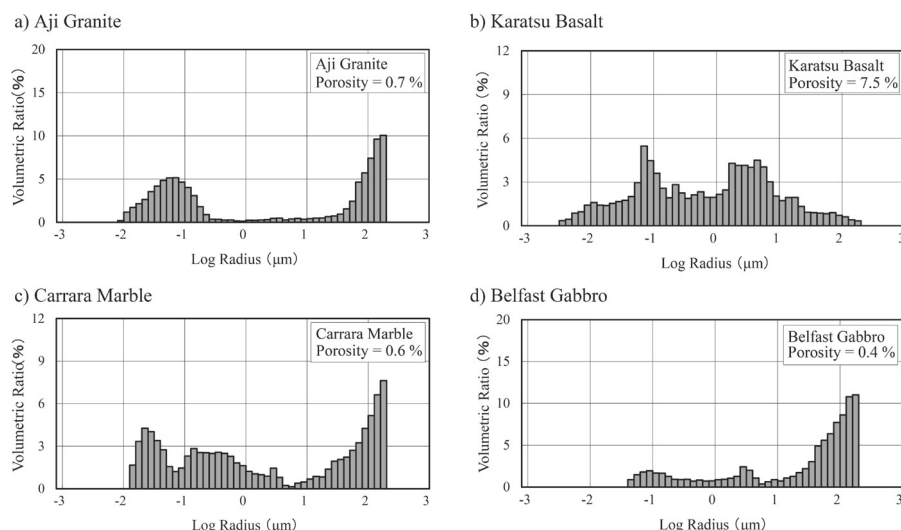


図-15 代表的な結晶質岩試料 [a) 庵治花崗岩, b) 唐津玄武岩, c) カララ大理石, d) ベルファースト斑レイ岩] の空隙半径分布のヒストグラム

いるが、相対的には小さい。すなわち比較的大きな水銀の圧入量に対して小さいので無視できる。しかし、試料表面の凹凸による影響は、空隙率の小さい岩石の場合では顕在化したと考えられる。これらの緻密岩石試料の場合、寸法の小さい方の分布 ( $<10\mu\text{m}$ ) が真の空隙の寸法であると推測される。唐津玄武岩は約 8 % の有効空隙率を有し、空隙半径の寸法分布は比較的全くブロードで、バイモダルの特徴を呈した (図-15-b)。なお、この章で述べた各種岩石試料も、他の試料と同様に同一岩質で 2 試料の測定を行っており、両試料の結果は良く一致していた。

林ほか (1999)<sup>30)</sup> は、稲田花崗岩と白浜砂岩の 2 種類の岩石試料を用いて、それぞれ 5 種類の方法で整形した (ハンマーで分割、ダイヤモンドカッターで切断、切断後にそれぞれ 120 #, 600 #, 2,000 # 研磨紙で仕上げ) 試料のポロシメータ測定を実施した。その結果、有効空隙率の小さい花崗岩に整形方法の影響が比較的全く顕著に認められ、その影響の度合いは表面仕上げが良くなるにつれ、小さくなる事が判明した。また、白浜砂岩の場合でも、ハンマー分割による影響が若干認められたが、カッター切断以上の仕上げの場合は表面仕上げの影響がほとんど無視できるレベルとなった。

## 6. ま と め

岩石の空隙構造は、透水係数等の流体移動特性や圧縮強度・変形係数等の力学特性を大きく左右するので、その代表的なパラメータである有効空隙率および空隙寸法の分布特性を評価することが重要である。本稿では、まず水銀圧入式ポロシメータを用いて岩石の空隙率および空隙の寸法分布を測定する手法の原理、装置の概要、測定手順などを紹介した。次いで、世界各地から採取された 15 種類の岩石の計 108 個の試料について、水銀圧入式ポロシメータ

Autopore IV 9520 を用いて、それらの有効空隙率と空隙半径の寸法分布を測定したデータを取りまとめ、各岩種の空隙構造の特徴を報告した。

岩石の種類、地質年代と産地の違いによって、有効空隙率と空隙の寸法分布特性が大きく異なり、かつ、その空隙寸法分布の特性は空隙率との相関性が必ずしもあるとは限らないことが明らかになった。岩石の透水性などの物性値と内部空隙との関連性を検討する際、空隙の寸法分布は有効空隙率とともに重要な情報となる。空隙半径の寸法分布を測定する手段として、水銀圧入式ポロシメータは比較的全く実施簡便で、データの信頼性と再現性が確認されたので、大いに活用することが望まれる。ただし、有効空隙率の小さい (例えば、1 % 未満) 緻密な深成岩の場合は、試料の表面凹凸と思われる影響で、空隙半径の大きい範囲における測定結果が誤差を含む可能性があることや、変形しやすい堆積軟岩の場合は水銀圧入圧力によって空隙が変形することがあることに注意が必要である。

**謝辞** 本研究に用いた岩石試料について、台湾チェルンブ断層掘削プロジェクト (TCDP) と統合国際深海掘削計画 (IODP) の南海トラフ掘削プロジェクト (NanTroSEIZE) より提供を受けた。測定試料の準備について株式会社マリンワークジャパンの多田井修博士より多大な協力をいただいた。執筆の段階においては財団法人深田地質研究所の藤井幸泰博士と日本大学の竹村貴人博士から貴重な助言をいただいた。また、2 名の査読者の丁寧な査読と貴重な意見により本稿は大いに改善された。なお、本研究の一部は JSPS 科研費 25287134 と 16H04065 の助成をうけて実施した。以上の関係者各位に感謝の意を申し上げる。

## 引用文献

- 1) American Society for Testing and Materials (1999) : Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry, Designation D 4404-84 (Reapproved 1992), Annual Book of ASTM Standards, Vol.04.08, pp.588-592.
- 2) 林 為人・高橋 学・杉田信隆 (1995) : 稲田花崗岩の温度上昇に伴ったマイクロクラックの開口幅について, 応用地質, Vol.36, pp.300-304.
- 3) 高橋 学・林 為人・西田 薫・養由紀夫 (1999) : 水銀圧入式ポロシメーターによる岩石の内部空隙の寸法分布測定, 土と基礎, Vol.47, No.4, pp.30-32.
- 4) 林 為人・高橋 学 (2000) : 水銀圧入式ポロシメーターおよび岩石の内部空隙寸法分布の測定への適用, 地質ニュース, No.549, pp.61-68.
- 5) Lin, W. (2002) : Permanent strain of thermal expansion and thermally induced microcracking in Inada granite, *J. Geophysical Res.*, Vol.107, No.B10, 2215, doi : 10.1029/2001JB000648.
- 6) 林 為人・高橋 学・西田 薫・張 銘 (1999) : 透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例, 応用地質, Vol.39, pp.534-540.
- 7) 林 為人・高橋 学 (1999) : 高温履歴を有する稲田花崗岩の透水係数と等価管路モデルに基づく評価, 応用地質, Vol.40, No.1, pp.25-35.
- 8) 林 為人・廣野哲朗・高橋 学 (2003) : 水の粘性係数変化を考慮した等価動水半径モデルによる花崗岩の透水係数の推定, 土と基礎, Vol.51, No.4, pp.29-31.
- 9) 林 為人・高橋 学・佐東大作・漆松雪彦・葉 恩肇・林立虹 (2007) : 台湾チェルンブ断層掘削から得られた更新世～中新世堆積岩の空隙分布特性, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.357-360.
- 10) Lin, W., Tadaï, O., Takahashi, M., Sato, D., Hirose, T., Tanikawa, W. (2010) : Comparison of bulk densities and porosities of various rock samples measured by different techniques, Geologically Active (Proceedings of the 11th International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG) Congress), Eds: A. L. Williams, G. M. Pinches, C. Y. Chin, T. J. McMorran & C. I. Massey : Taylor & Francis Group, ISBN 978-0-415-60034-7, pp.2081-2086.
- 11) Washburn, E. W., (1921) : Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous material, *Proc. National Academy Science*, Vol.7, pp.115-116.
- 12) Rootare, H. M. and Prenzlöw, C. F. (1967) : Surface areas from mercury porosimeter measurements, *J. Physical Chemistry*, Vol.71, pp.2733-2736.
- 13) Lin, W., Tadaï, O., Hirose, T., Tanikawa, W., Takahashi, M., Mukoyoshi, H. and Kinoshita M. (2011) : Thermal conductivities under high pressure in core samples from IODP NanTroSEIZE drilling site C0001, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q0AD14, doi : 10.1029/2010GC003449.
- 14) 林 為人・高橋 学・西田 薫・友田雅展 (1998) : 岩石の有効空隙率測定について, 日本応用地質学会平成10年度研究発表会講演論文集, pp.249-252.
- 15) Yeh, E-C, Sone, H., Nakaya, T., Ian, K-H., Song, S-R., Hung, J-H., Lin, W., Hirono, T., Wang, C-Y., Ma, K-F., Soh, W. and Kinoshita, M. (2007) : Preliminary Results of Core Description from the Hole-A of the Taiwan Chelungpu-Fault Drilling Project, *Terrestrial Atmospheric and Ocean Sciences*, Vol.18, pp.327-357, doi: 10.3319/TAO.2007.18.2.327 (TCDP).
- 16) Wang, P-L., Lin, L-H., Yu, H-T., Cheng, T-W., Song, S-R., Kuo, L-W., Yeh, E-C., Lin W. and Wang, C-Y. (2007) : Cultivation-based characterization of microbial communities associated with deep sedimentary rocks from the Taiwan Chelungpu Drilling Project drilled cores, *Terrestrial Atmospheric and Ocean Sciences*, Vol.18, pp.395-412, doi: 10.3319/TAO.2007.18.2.395 (TCDP).
- 17) Lin, W., Yeh, E-C., Hung, J-H., Haimson, B. and Hirono, T. (2010) : Localized rotation of principal stress around faults and fractures determined from borehole breakouts in hole B of the Taiwan Chelungpu-fault Drilling Project (TCDP), *Tectonophysics*, Vol.482, pp.82-91, doi: 10.1016/j.tecto.2009.06.020.
- 18) Lin, W., Byrne, T., Kinoshita, M., McNeill, L., Chang, C., Lewis, J., Yamamoto, Y., Saffer, D., Moore, J.C., Wu, H.-Y., Tsuji, T., Yamada, Y., Conin, M., Saito, S., Ito, T., Tobin, H., Kimura, G., Kanagawa, K., Ashi, J., Underwood, M. and Kanamatsu, T. (2016) : Distribution of stress state in the Nankai subduction zone, southwest Japan and a comparison with Japan Trench, in-press, available on line now, *Tectonophysics*, in-press, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.05.008>.
- 19) Expedition 315 Scientists (2009) : Expedition 315 Site C0001. In Kinoshita, M., Tobin, H., Ashi, J., Kimura, G., Lallemant, S., Sreaton, E. J., Curewitz, D., Masago, H., Moe, K. T., and the Expedition 314/315/316 Scientists, Proc. IODP, 314/315/316: Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.314315316.123.2009.
- 20) Expedition 316 Scientists (2009) : Expedition 316 Site C0006. In Kinoshita, M., Tobin, H., Ashi, J., Kimura, G., Lallemant, S., Sreaton, E. J., Curewitz, D., Masago, H., Moe, K. T., and the Expedition 314/315/316 Scientists, Proc. IODP, 314/315/316: Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.314315316.134.2009.
- 21) Moore, G. F., Park, J.-O., Bangs, S. P., Gulick, S. P., Tobin, H. J., Nakamura, Y., Sato, S., Tsuji, T., Yoro, T., Tanaka, H., Uraki, S., Kido, Y., Sanada, Y., Kuramoto, S. and Taira, A. (2009) : Structural and seismic stratigraphic framework of the NanTroSEIZE Stage 1 transect Expedition 316. In Kinoshita, M., Tobin, H., Ashi, J., Kimura, G., Lallemant, S., Sreaton, E. J., Curewitz, D., Masago, H., Moe, K. T., and the Expedition 314/315/316 Scientists, Proc. IODP, 314/315/316: Washington, DC (Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc.). doi:10.2204/iodp.proc.314315316.102.2009.
- 22) 林 為人・高橋 学・李 小春・鈴木清史 (1999) : 異なる方法で被覆した白浜砂岩供試体の透水係数測定結果の比較, 応用地質, Vol.40, No.5, pp.299-305, doi.org/10.5110/jjseg.40.299.
- 23) 藤井幸泰・高橋 学 (2015) : ベレア砂岩の地質・堆積環境・物性について, 応用地質, Vol.56, No.3, pp.105-109, doi.

- org/10.5110/jjseg.56.105.
- 24) 長田昌彦 (2012) : 田下凝灰岩の力学的異方性と飽和度の変化に伴う弾性波速度および変形の変化傾向, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.300-304.
- 25) Tanikawa, W., Sakaguchi, M., Wibowo, H. T., Shimamoto, T. and Tadai, O. (2010) : Fluid transport properties and estimation of overpressure at the Lusi mud volcano, East Java Basin, *Engineering Geology*, Vol.116, pp.73-85, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.07.008.
- 26) 工藤洋三・橋本堅一・佐野 修・中川浩二 (1991) : 花崗岩内に発生するクラックと鉱物粒の関係, 資源と素材, Vol.107, No.7, pp.423-427, doi.org/10.2473/shigentosozai.107.423.
- 27) 青山信雄 (1942) : 唐津高島産玄武岩中の巨晶輝石に就て, 地質學雜誌, Vol.49, pp.206-207.
- 28) Herz, N. and Dean, N. E. (1986) : Stable isotopes and archaeological geology: the Carrara marble, northern Italy, *Applied Geochemistry*, Vol.1, pp.139-151. doi: 10.1016/0883-2927 (86) 90045-4.
- 29) Togo, T., Shimamoto, T., Ma, S. and Hirose, T. (2011) : High-velocity frictional behavior of Longmenshan fault gouge from Hongkou outcrop and its implications for dynamic weakening of fault during the 2008 Wenchuan earthquake, *Earthquake Science*, Vol.24, pp.267-281.
- 30) 林 為人・高橋 学・李 小春・西田 薫・小松原琢 (1999) : 水銀圧入式ポロシメーターによる岩石の空隙寸法測定について, 資源・素材学会1999年春季大会講演集, (I) 資源編, pp.68-69.

(2016年2月25日受付, 2016年7月28日受理)

*Jour. Japan Soc. Eng. Geol.*, Vol.57, No.5 pp.201-212, 2016

## Pore Size Distribution of Rocks Determined by Mercury Intrusion Porosimetry

Weiren LIN, Manabu TAKAHASHI, Daisaku SATO, En-Chao YEH,  
Yoshitaka HASHIMOTO and Wataru TANIKAWA

### Abstract

Pore structure of rocks strongly influences permeability and other physical properties, therefore quantitative measurements of porosity and pore size distribution of rock samples are necessary and important in engineering geology. We collected total 108 rock samples of 15 rock types and measured their porosity and pore size distribution by the mercury intrusion porosimetry method and report the data and characterize the pore size distribution in this paper. Porosity and pore size distribution of rocks significantly vary with rock type, geological age and their locality. Moreover, the characteristics of pore size distribution did not show a unique correlation with the porosity of the same rock sample. Therefore, to evaluate pore size distribution of rocks is essential and useful for discussing fluid transportation related with rock pore structure. Mercury intrusion porosimetry is a useful method for pore size distribution measurements, and its reliability and repeatability were confirmed through this experimental study. For low-porosity (e.g. <1 %) rocks, however, measured results of pore size distribution in large-size range (e.g. around 100  $\mu\text{m}$ ) might have some error probably due to roughness of rock sample surfaces.

**Key words** : rock, porosity, pore size distribution, mercury intrusion porosimetry