



# X線CTによる岩石の透水係数の測定\*

菅原 勝彦<sup>1</sup> 佐藤 晃<sup>2</sup>  
尾原 祐三<sup>3</sup> 柳 迫 将 秀<sup>4</sup>

## Measurement of Permeability of Rock by Means of X-Ray CT

by Katsuhiko SUGAWARA<sup>1</sup>, Akira SATO<sup>1</sup>, Yuzo OBARA<sup>1</sup>  
and Masahide YANAGISAKO<sup>2</sup>

1. Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kurokami, Kumamoto 860-8555
2. Graduate school of Science and Technology, Kumamoto University

X-ray Computed Tomography (CT) is utilized to measure the permeability of rock and to visualize the migration of fluid fronts. The X-ray CT makes it possible to evaluate the attenuation of X-ray at each point within rock, by digitizing shadow pictures taken from various directions and subsequent image reconstruction, and the subtraction of CT images provides successfully the time-dependent distribution of the water ratio within rock. A percolation experiment using a disc specimen is proposed to measure the coefficient of permeability. Apparatus, operation procedure and necessary data processing are described along with the theory for interpreting the experimental results. Thus, it is stated how the coefficient of permeability is determined by means of the X-ray CT. The proposed measurement is supported by case study.

**KEY WORDS** : X-ray CT, Rock, Permeability, Image Processing, Visualization

### 1. 緒 言

X線CT (X-ray Computed Tomography) は有用な医療検査技術の1つとして広く知られている。これは様々な方向から測定した投影にデジタル処理を施すことにより、人体内部の各点のX線吸収係数の再構成を可能にしている。この技術を地盤材料に適用した初期の論文としては、Arthur<sup>1)</sup>が挙げられる。その後、多くの研究が発表されているが、岩石および空隙体の透水に関しては、Cromwellら<sup>2)</sup>、Colesら<sup>3)</sup>、Sugawaraら<sup>4)</sup>などの研究が挙げられる。Cromwellらは空隙体中の透水フロントを可視化し、ColesらおよびSugawaraらは透水プロセスの分析に画像間差分を適用した。これらの研究により、X線CTが岩石に対しても有用であることが次第に明らかになされてきたが、岩盤力学の多くの場面で利用できるようにするには、大型試験片に適用可能なより高いエネルギーレベルのスキヤナの開発や画像解析のノウハウの蓄積、定量的分析に必要なデータ処理技術の確立などが必要であると考えられる。

さて、本論文では透水現象の可視化と定量へのX線CTの適応性について論じる。とくに、円板試験片内の透水現象をX線CTにより観測し、試験片の透水係数を測定する方法について詳論する。具体的には、X線CTで再構成される線吸収係数から試験片内部の各点の体積含水率(浸透した水の容積率)を評価する

ための画像間差分法、体積含水率を用いて浸透水量を算定する方法、および浸透水量から透水フロントを評価し、その経時変化から透水係数を求める理論と実際などについて詳述する。さらに、透水フロントの可視化の方法、および岩石の透水機構について考察する。

### 2. X線CTの概要

強度 $i_0$ のX線ビームがFig. 1に示すように物体に入射したとき、透過X線の強度 $i$ は次式で与えられる。

$$i = i_0 \exp \left\{ - \int f ds \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $s$ は光路の直線座標である。また、 $f$ はX線の波長、媒質の密度と状態に依存する線吸収係数であり、X線が単色の場合、 $f$ は媒質の密度に正比例する。X線CTにおいては、式(1)の対数を取り、投影 $p$ が次式で定義される。

$$p = \ln \{ i_0 / i \} = \int f dx \dots\dots\dots (2)$$

また、多数の方向の投影が断層撮影法により計測され、撮影された断層内の線吸収係数の2次元分布がフィルタ補正逆投影法により再構成される<sup>5)6)</sup>。

本研究に用いた実験システムの構成をFig. 2に示す。X線管

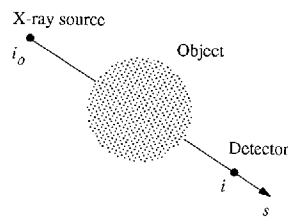


Fig. 1 Schematic view of one-dimensional X-ray attenuation.

\* 1999年5月28日受付 7月27日受理

1. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科  
 2. 正会員 工博 熊本大学助手 工学部環境システム工学科  
 3. 正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科  
 4. 学生会員 熊本大学大学院生 自然科学研究科 博士前期課程1年  
 [著者連絡先] TEL & FAX 096-342-3585 (熊本大学ダイヤルイン)  
 キーワード: X線CT, 岩石, 透水, 画像解析, 可視化

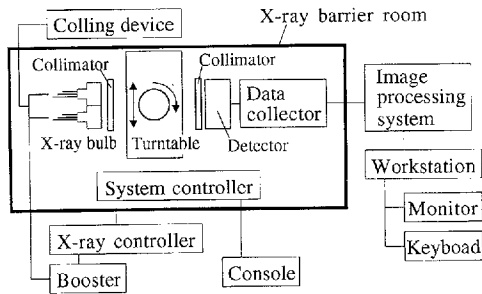


Fig. 2 Composition of X-ray CT Scanner employed.

(300 kV/2 MA) と 176 個の検出器は同一水平面上に固定され、上下に可動である。被検体はターンテーブルの上に設置され、必要な並進と回転を行う。断層撮影法により撮影される断層の厚さ  $\delta$  は視準儀により 0.5 mm, 1 mm, および 2 mm の 3 通りに可変である。撮影領域は 15 cm  $\times$  15 cm と 40 cm  $\times$  40 cm の 2 通りが選択できるが、表示画素数はどちらの場合も 512  $\times$  512 である。今回の実験で採用された断層の厚さ  $\delta$  は 2 mm であり、撮影領域は 15 cm  $\times$  15 cm、画素の辺長  $\Delta$  は 0.293 mm である。

線吸収係数  $f$  は撮影される断層の厚さ当たりの平均値に相当し、その表示には  $f$  の値を線形なスケールを用いて変換した CT 値が用いられる。本論文では、空気を 0、水を 1,000 と表示したものを CT 値と呼ぶ。

乾燥状態の岩石に水が浸透する場合、浸透の程度に応じて岩石の見かけ密度が増加する。X 線 CT では、この変化が CT 値の増加として表示される。したがって、間隙率、飽和度、体積含水率など透水に関する物理量の分析には、時系列画像に対する演算、すなわち画像間演算が必要になる。岩石の骨格および間隙が浸透により変化しない場合、画素の間隙率  $\phi$  は次式で与えられる。

$$\phi = |CT_s - CT_d|/1,000 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $CT_s$  は画素領域が飽和した段階の CT 値、 $CT_d$  は乾燥状態の CT 値である。また、体積含水率  $\phi_w$  は次式で与えられる。

$$\phi_w = |CT - CT_d|/1,000 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $CT$  は任意の時刻における画素の CT 値である。したがって、間隙率  $\phi$  を求めるには、飽和段階の画像と乾燥状態のそれとの差分が必要になる。また、体積含水率  $\phi_w$  を求めるには、任意の時刻の画像と乾燥状態のそれとの差分が必要になる。

式(3)は間隙率  $\phi$  の減少とともに観測される CT 値の変化が減少することを示している。したがって、間隙率  $\phi$  が小さい岩石については、飽和に伴う CT 値の変化を増加させるために、水よりも密度の大きい流体を用いるなどの造影技術の適用が不可欠であると考えられる。この造影の問題はつぎの機会に論じることとして、本論文では、間隙率  $\phi$  の大きい岩石を対象として、X 線 CT の適応性を検討する。

### 3. 透水実験の方法

透水実験の様子を Fig. 3 に示す。厚さ  $B = 10$  mm、半径  $R = 34.5$  mm の円板試験片は室内乾燥後、両端面を不透水樹脂でシールされ、片側の中央に空気抜きパイプが取り付けられている。すなわち、試験片を水槽に浸けると、円板の外周面から水が浸透し、試験片内部の間隙を満たしていた空気が中央の空気抜きパイプから排出される仕組みである。X 線 CT の断層面は一定の水深  $H$  に設定され、撮影は実験開始から一定の時間間隔で繰り返し実施される。そして、前述の画像間差分により間隙率  $\phi$ 、体積含水率  $\phi_w$ 、および飽和度  $\eta = 100 \phi_w / \phi$  が分析される。

本実験は外周面から中心に向かう水の浸透を観測の対象とする

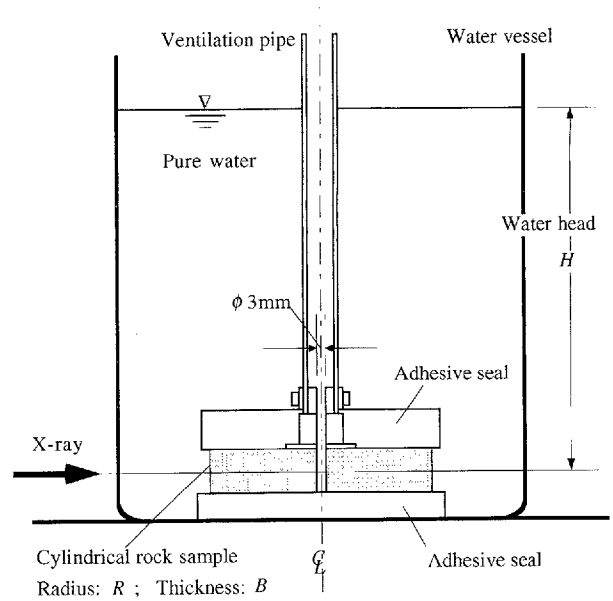


Fig. 3 Percolation experiment using a disc specimen, proposed to measure the coefficient of permeability.

から、試験片が均質・等方性であれば、当然に、軸対称問題であり、透水フロントは真円で、その半径は時間とともに減少するはずである。そこで、Fig. 4 のように円板の中心を原点とする極座標  $(r, \theta)$  を定め、実験開始からの経過時間を  $t$  と表記する。また、試験片が外側の飽和領域と内側の未浸透領域に分解できるものと仮定し、この 2 つの領域の境界を透水フロントと定義する。ここで、透水フロントの半径を  $R_F$  (以下、下添字  $F$  で透水フロントを表す) とすると、透水領域の断面積は  $\pi \{R^2 - R_F^2\}$  で与えられ、任意の時刻  $t$  における浸透水量  $Q(t)$  は、

$$Q(t) = \pi \{R^2 - R_F^2\} \phi B \quad \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。ここに、 $\phi$  は間隙率、 $B$  は試験片の厚さである。

また、浸透水量  $Q(t)$  は各画素の体積含水率  $\theta_w(r, \theta, t)$  を試験片全体に渡って積分した値に一致する。すなわち、

$$Q(t) = \iint \phi_w(r, \theta, t) r d\theta dr B \quad \dots\dots\dots (6)$$

が成立する。したがって、式(5)と式(6)と連立させると、つぎの関係式が得られる。

$$\pi \{R^2 - R_F^2\} \phi = \iint \phi_w(r, \theta, t) r d\theta dr = 2\pi \cdot \int \phi_w(r, t) r dr \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $\phi_w(r, t)$  は回転方向の平均体積含水率であり、

$$\phi_w(r, t) = \{1/(2\pi)\} \cdot \int \phi_w(r, \theta, t) d\theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

で定義される。したがって、

$$R_F/R = \sqrt{1 - \{2/\phi\} \cdot [\int \phi_w(r, t) r dr] / R^2} \quad \dots\dots\dots (9)$$

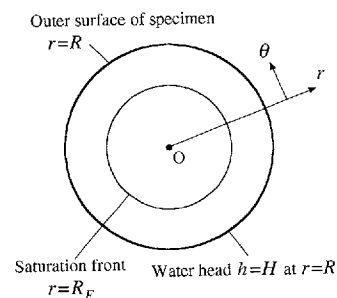


Fig. 4 Saturation front and the co-ordinates.

が得られる。式(9)はCTデータから透水フロントの無次元半径  $R_F/R$  を評価するための基礎式である。

#### 4. 透水フロントの解析

式(9)で求められる透水フロントの半径  $R_F$  の経時変化を用いて試験片の透水係数  $K$  を評価するために、均質・等方な媒質中の軸対称水平流れを解析する。このために、 $r$  方向の流量速度(試験片の単位断面積当たりの流量)を  $u$ 、圧力を  $p$ 、水の密度を  $\rho$ 、重力加速度を  $g$ 、水頭を  $h = p/(\rho g)$  と表記する。このとき、Darcy 則は、

$$u = -K \frac{dh}{dr} \quad \dots\dots\dots (10)$$

で表される。この関係は間隙中の流れに関して慣性力が粘性力に比較して無視できるほど小さい場合に成立し、間隙中の平均的な流速  $u^*$  と式(10)の流量速度  $u$  との関係は、

$$u^* = u/\phi \quad \dots\dots\dots (11)$$

で表される。上式の  $\phi$  は間隙率である。

透水フロント ( $r = R_F$ ) における間隙中の流速  $u^*_F$  はフロントの移動速度  $dR_F/dt$  にほかならない。これは式(10)と式(11)より、

$$dR_F/dt = -\{K/\phi\} \cdot \{dh/dr\}_F \quad \dots\dots\dots (12)$$

と表される。なお、透水フロントより内側 ( $r < R_F$ ) の間隙を満たしている空気の流れに対しても Darcy 則を適用できるが、空気は水より容易に透過できるので、本論文では空気の影響を無視する。

透水係数  $K$  は間隙の幾何学的構造、流体の性質などによって定まるものであるから、これらを単純理想化すれば、透水係数を解析的に表示することが可能である<sup>7)</sup>。いま、水の粘性係数を  $\mu$  とし、水を Newton 流体であると仮定する。また、透水経路を理想化して、Fig. 5 (a)のように透水経路が多数の平行割れ目で構成される場合(扁平経路モデル)と、(b)のように互いに平行な多数の円孔で構成される場合(円筒経路モデル)を考える。まず、透水経路を幅  $w$  の平行な割れ目とし、割れ目の方向に  $r$  軸を定める。また、流れに直角な断面を一辺  $a$  の正方形とし、 $m$  本の平行な割れ目があるとすると、このとき、間隙率  $\phi = mw/a$  であり、流量速度  $u$  は、

$$u = -\{\phi/(12\mu)\} \cdot \{dp/dr\} \cdot w^2 \quad \dots\dots\dots (13)$$

で与えられ、透水係数  $K$  は次式で表される。

$$K = \{\phi/(12\mu)\} \cdot \rho g \cdot w^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

つぎに、透水経路を半径  $r_0$  の円孔とし、孔軸方向に  $r$  軸を定める。また、流れに直角な断面を一辺  $a$  の正方形とし、 $m$  本の平行な円孔があるとすると、間隙率  $\phi = m\pi r_0^2/a^2$  であり、流量速度  $u$  は、

$$u = -\{\phi/(8\mu)\} \cdot \{dp/dr\} \cdot r_0^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

で与えられ、透水係数  $K$  は、

$$K = \{\phi/(8\mu)\} \cdot \rho g \cdot r_0^2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

と表される。

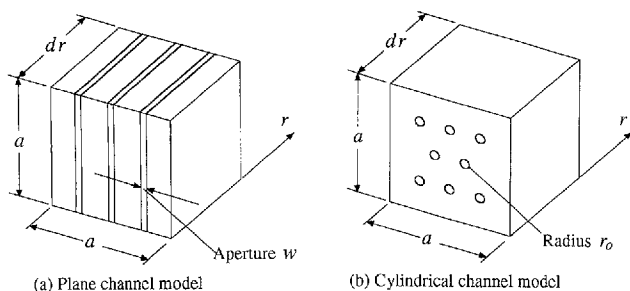


Fig. 5 Plane channel model and cylindrical channel model.

さて、飽和領域 ( $R > r > R_F$ ) における保存則は、流量  $2\pi rBu$  一定の式から求められるつぎの関係式、すなわち、

$$r \cdot \{dh/dr\}_{r=r} = \{r+dr\} \cdot \{dh/dr\}_{r=r+dr} \quad \dots (17)$$

で与えられる。したがって、水頭  $h$  は微分方程式:

$$r \cdot d^2h/dr^2 + dh/dr = 0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

を満たさねばならない。上式の解は、円板の外周面 ( $r = R$ ) の水頭を一定値  $h = H$ 、透水フロントの水頭を  $h = 0$  とおくと、

$$h = -H \ln \{r/R_F\} / \ln \{R/R_F\} \quad \dots\dots\dots (19)$$

で与えられる。この水頭  $h$  を式(12)に代入すると、

$$dR_F/dt = \{K/\phi\} \cdot \{H/R_F\} / \ln \{R/R_F\} \quad \dots\dots (20)$$

が得られ、上式を変数分離して積分すると、最終的に、

$$\bar{t} = KtH/R^2 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\bar{t} = \{\phi/4\} \cdot [2 \{R_F/R\}^2 \ln \{R_F/R\} + 1 - \{R_F/R\}^2] \quad \dots\dots\dots (22)$$

が得られる。式(21)は無次元時間  $\bar{t}$  の定義式であり、式(22)は透水フロントが半径  $R_F$  に至るまでに要する無次元時間  $\bar{t}$  を与える。

式(22)の関係を Fig. 6 に示す。式(22)から明らかなように、透水フロントが中心に至るまでの無次元時間は  $\phi/4$  である。また、透水フロントの移動速度が浸透開始時に最大であること、領域  $0.7 > R_F/R > 0.2$  において移動速度がほぼ一定値を示すことなどが読みとれる。したがって、上式を用いて透水係数  $K$  を評価する場合、間隙率  $\phi$  は事前に評価すべき重要なパラメータである。

#### 5. 実験結果の分析と考察

来待砂岩を用いた浸透実験の結果を示し、前章までに述べた軸対称モデルの適応性について検討する。

##### 5・1 CT 原画像の特徴

来待砂岩を用いた実験から得られた CT 原画像の擬似濃淡画像を Fig. 7 に例示する。浸透開始から 1 時間後、3 時間後、5 時間後、および 7 時間後の画像を比較してわかるように、水の浸透域は外側の白いリングで表示され、水がまだ浸透していない領域が中央に黒く表示されている。すなわち、ほぼ軸対称の現象が観測され、来待砂岩が巨視的に均質・等方であることが示されている。

したがって、4. までに述べた軸対称モデルによって透水係数などの定量が可能であると考えられる。しかしながら、擬似濃淡画像に明らかなように、実際の浸透の前面には解析で考慮されていない不飽和領域が発生している。これを概念的に描くと、Fig. 8 のようである。すなわち、外周面から中心軸に向かって順に、

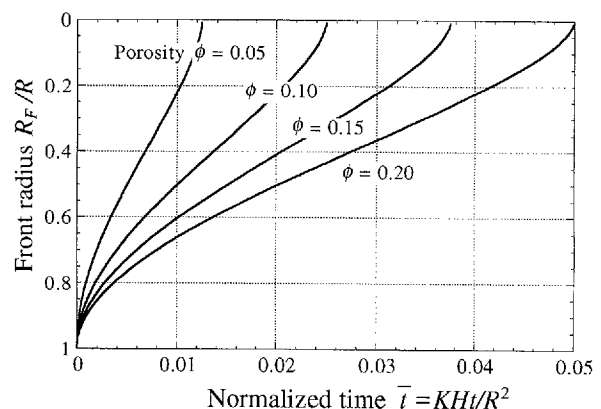


Fig. 6 Theoretical relations between the normalized radius  $R_F/R$  of saturation front and the normalized time  $\bar{t} = KtH/R^2$  (where  $K$ : the coefficient of permeability,  $t$ : the elapsed time), depending upon the porosity  $\phi$ .

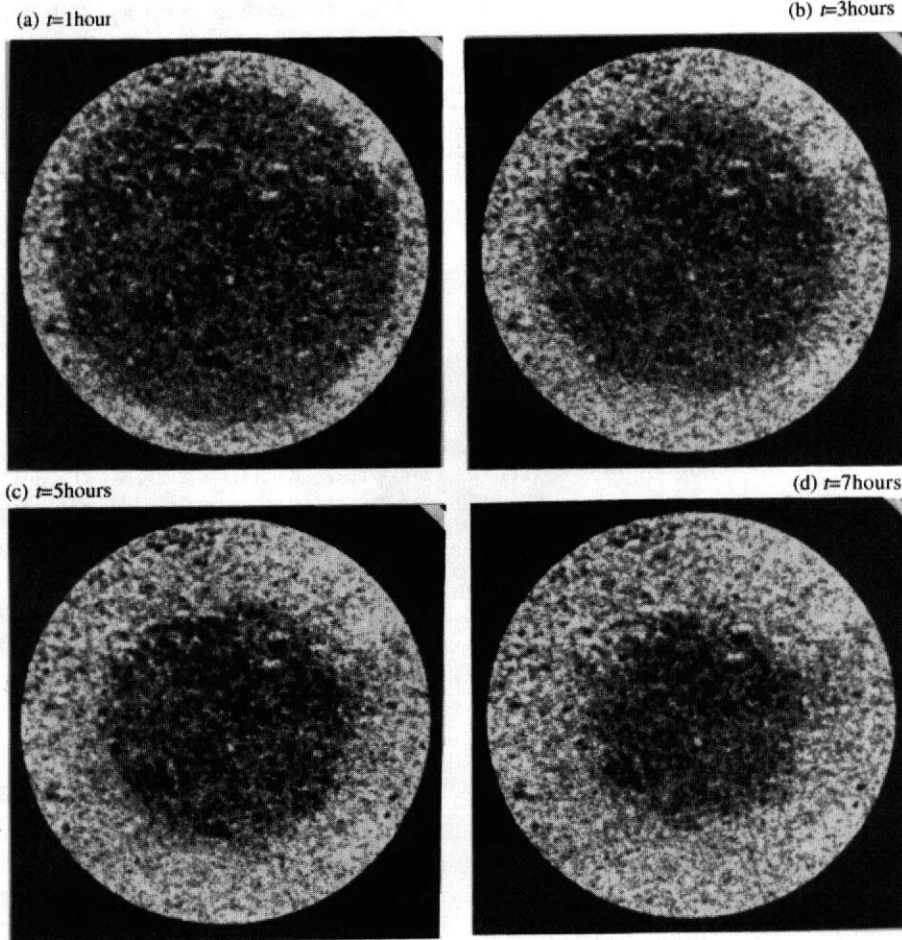


Fig. 7 Cross-sectional pseudo colour images of Kimachi sandstone, reconstructed by the X-ray CT ; (a)  $t = 1$  hour; (b)  $t = 3$  hours; (c)  $t = 5$  hours; (d)  $t = 7$  hours.

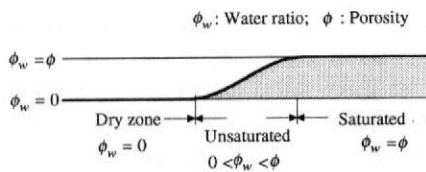


Fig. 8 Schematic diagram of saturated, unsaturated and dry zones.

間隙が水で飽和されている領域（飽和領域）、間隙の1部が水で満たされ、残りの間隙には空気が残っている領域（不飽和領域）、および水がまだ浸透していない領域（乾燥領域）の3領域が形成され、飽和領域のフロントと不飽和領域のフロントが存在すると考えられる。前者は体積含水率  $\phi_w$  が空隙率  $\phi$  に等しく、飽和度 100% の領域の前縁、後者は体積含水率  $\phi_w$  が零、飽和度が零% の領域の後縁である。時間が経過すると、これらのフロントが中心軸に向かって移動し、不飽和領域では体積含水率  $\phi_w$  の値が増加する。したがって、2つのフロントの間には飽和度の等値線を描くことができる。この飽和度の等値線を用いる透水フロントの可視化についてはつぎの章で検討する。

### 5・2 体積含水率の分析

来待砂岩の透水実験を20分ごとにX線CTにより観測して得られた平均体積含水率  $\phi_w(r, t)$  の経時変化を Fig. 9 に示す。ただし、図中の平均体積含水率  $\phi_w(r, t)$  はリング要素を用いて

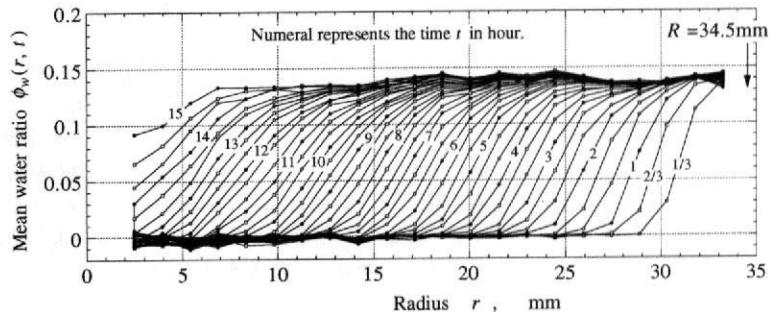


Fig. 9 The mean water ratio  $\phi_w(r, t)$  versus radius  $r$ .

求められた。すなわち、画像をリング要素によって分割し、各要素内に中心をもつ画素の体積含水率  $\phi_w(r, \theta, t)$  の平均値を要素中心半径  $r$  に割り当てる方法を採用して求められた。

不飽和領域のフロントは  $\phi_w - r$  線図における  $\phi_w$  の立ち上がり点、飽和領域のフロントは  $\phi_w$  が一定値（間隙率  $\phi$ ）に収束する点にそれぞれ対応する。したがって、図中の曲線群からは、不飽和領域のフロントの進行の方が飽和領域のフロントのそれより速く、このために時間が経過するに従い不飽和領域の幅が増加する傾向が読みとれる。また、平均体積含水率  $\phi_w(r, t)$  の収束値から間隙率  $\phi$  は大略 0.14 と見積もられる。

### 5・3 間隙率の分析

間隙率  $\phi$  の評価には、飽和領域の各画素の体積含水率を用いる統計的評価法が有効であると考えられる。一例を Fig. 10 に示す。

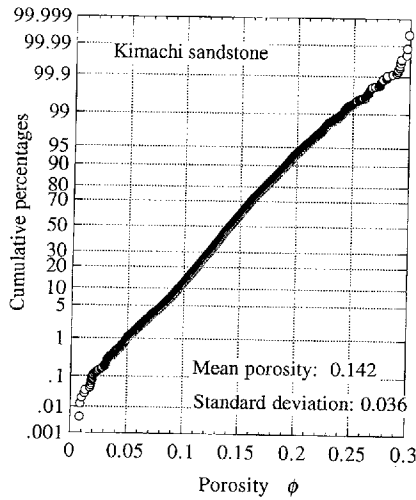


Fig. 10 Distribution of local porosity  $\phi$ , evaluated by a local region simple averaging of water ratio within the saturated zone (the normal probability paper).

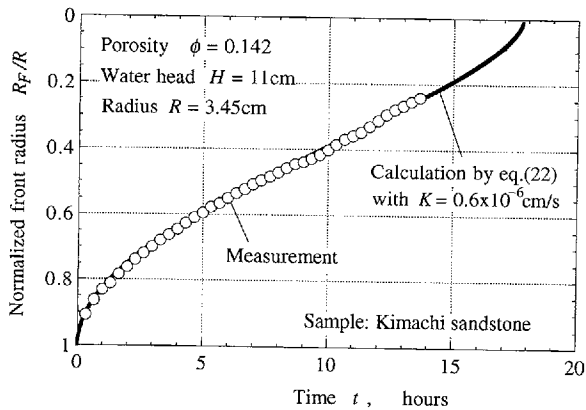


Fig. 11 Normalized front radius  $R_F/R$  versus the time elapsed  $t$ , showing the measurement (white circles) well agrees with the theoretical solution (solid curve).

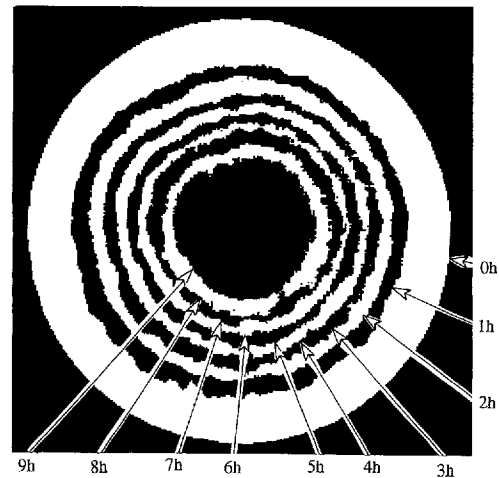


Fig. 12 A compound image of saturation front, obtained by means of the local region simple averaging, the subtraction of images and the gray-level thresholding. Uneven boundaries of white rings represent contour of 50% saturation at each elapsed time.

中心画素の値とする。当然に、局所領域の大きさによって平滑化の度合いが異なり、局所領域を広げるとノイズ以外の濃淡変化も滑らかにされるから、この画像処理では局所領域の設定が重要である。

Fig. 12には5つの白いリング状領域があり、これらを取りまく10個の輪郭が1時間ごとの透水フロントである。ただし、最も外側の輪郭は試験片の外周面であり、実験開始時のフロントである。白いリングと黒いリングの半径方向の幅はそれぞれ1時間当たりのフロントの移動速度、言い換えるとフロントにおける間隙中の流速  $u^*_F$  に対応する。図から明らかなように、飽和度の等値線はCTデータを自動的に処理して透水フロントの輪郭を可視化する上で有用であると考えられる。

ここで、実験開始から1時間までを除き、1時間目から9時間目までのフロントに注目すると、この間のフロントが大略  $0.7 > R_F/R > 0.2$  の範囲にあること、4.で述べたようにこの範囲内でフロントの移動速度が巨視的に一定であることなどが見出せる。しかし、微視的にみると、フロントの移動速度、言い換えるとフロントにおける間隙中の流速  $u^*_F$  は明らかに場所によりバ

ここでは、縦6画素、横6画素の局所正方形領域の平均値を間隙率  $\phi$  の測定値とする。測定値の累積が Fig. 10 の正規確率紙上で線形分布することから、来待砂岩の局所間隙率は正規分布に従うと結論できる。また、間隙率の平均値は  $\phi = 0.142$  である。

#### 5・4 透水係数の評価

間隙率  $\phi = 0.142$  として式(9)で計算される透水フロントの無次元半径  $R_F/R$  を測定値とし、これを式(22)の理論解で最小二乗近似して、透水係数  $K$  が評価された。得られた来待砂岩の透水係数の値は  $K = 0.6 \times 10^{-6}$  cm/s である。この場合の理論曲線と測定値の関係は Fig. 11 に示すようである。理論曲線と測定値の間には良好な一致が認められ、4.に述べた軸対称モデルの有効性が示されている。

#### 6. 透水フロントの可視化

飽和度  $\eta$  の等値線を利用した透水フロントの可視化について述べる。一例として、体積含水率  $\phi_w = 0.5 \phi$  (飽和度  $\eta = 50\%$ ) を閾値とした場合の透水フロントを Fig. 12 に例示する。これは差画像処理を施し、結果を合成2値化画像として表示したものである。この画像処理では、はじめに体積含水率  $\phi_w$  の画像に局所オペレータを用いて平滑化を行っている。フィルタは局所平均フィルタであり、縦11画素、横11画素の局所正方形領域の平均値を

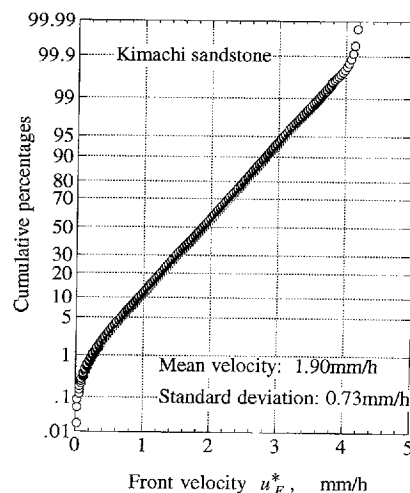


Fig. 13 Distribution of front velocity, in the range of from  $t = 1$  hour to  $t = 9$  hours, plotted on the normal probability paper.

ラツキを有している。

間隙中の流速のバラツキを分析するために、フロントの合成2値化画像を用いて1時間目から9時間目までのフロントの移動速度を1度間隔の放射線上で求めた。このようにして求められた2,880個の移動速度を正規確率紙上にプロットすると、Fig. 13のようである。移動速度の累積は正規確率紙上で線形分布し、間隙中の流速が正規分布に従うことを示唆している。したがって、来待砂岩の場合、間隙中の流速は間隙率と同様に正規分布に従うと推論できる。このような統計的特徴は透水のメカニズムを考え、透水モデルを構築する際に重要なものと考えられる。

### 7. 透水機構に関する考察

透水フロントの場所による揺らぎは透水経路の幾何学的構造、間隙率の場所によるバラツキなどに関係すると考えられる。そこで、Fig. 5に示した2種類の透水経路を仮定して、揺らぎのメカニズムについて考察を加える。(a)の扁平経路モデルでは、流量速度  $u$  が式(13)で与えられるから、透水フロントの移動速度  $u^*_F$  は、

$$u^*_F = -1/(12\mu) \cdot \{dp/dr\}_F \cdot w^2 \quad \dots\dots\dots (23)$$

と表される。式(23)によると、移動速度  $u^*_F$  は圧力勾配  $\{dp/dr\}_F$  と割れ目幅の二乗  $w^2$  の積に正比例する。この関係は、フロントの圧力勾配が一定である場合、割れ目幅の場所によるバラツキに依存して透水フロントに揺らぎが生じることを示唆している。間隙率  $\phi = mw/a$  であるから、割れ目の線密度  $m/a$  が一定であれば、割れ目幅  $w$  と間隙率  $\phi$  は一対一で対応する。したがって、フロントの圧力勾配と割れ目の線密度がともに巨視的に一定であれば、移動速度  $u^*_F$  の確率密度関数は間隙率の二乗  $\phi^2$  の確率密度関数に対応すると予想される。

一方、(b)の円筒経路モデルでは、流量速度  $u$  が式(15)で与えられるから、透水フロントの移動速度  $u^*_F$  は、

$$u^*_F = -1/(8\pi\mu) \cdot \{dp/dr\}_F \cdot \pi r_0^2 \quad \dots\dots (24)$$

である。式(24)によると、透水フロントの移動速度  $u^*_F$  は圧力勾配  $\{dp/dr\}_F$  と円孔の断面積  $\pi r_0^2$  の積に正比例する。この関係は、フロントの圧力勾配が一定である場合、円孔の断面積の場所によるバラツキに従って透水フロントに揺らぎが生じることを示唆している。間隙率  $\phi = m\pi r_0^2/a^2$  であるから、円孔の数の面積密度  $m/a^2$  が一定であれば、円孔の断面積  $\pi r_0^2$  と間隙率  $\phi$  が一対一で対応する。したがって、フロントの圧力勾配と円孔の数の面積密度がともに巨視的に一定であれば、移動速度  $u^*_F$  の分布形は間隙率  $\phi$  の分布形に等しくなると予想される。

以上の考察と推論に基づくと、実験結果、すなわち、局所間隙率と透水フロントの移動速度がともに正規分布に従ったことは、円筒経路モデルと調和的であると思われる。しかし、試験片の内部に単純な平行円孔は存在しない。肉眼的には、小空洞と扁平な微小亀裂が多数存在し、これらが亀裂ネットワークを構成している。この事実を考慮すると、亀裂内の流れは扁平経路モデルで仮定されたような一様流れではなく、チャネリングフローであった

と想像できる。つまり、扁平な微小亀裂内のチャネリングフローが小空洞に至り、さらに隣接する亀裂に入ってチャネリングフローを形成するというように、全体として、浸透は亀裂内部に存在するトンネル状の空間を選択して進行したのであろう。これが透水フロントに揺らぎが生じた一つの原因であると思われる。

### 8. 結 言

間隙率が比較的大きい来待砂岩を例として取り上げ、X線CTによる透水係数の測定と透水フロントの可視化について考察した。とくに、円板試験片を用いて岩石の透水係数を測定する方法を提案し、来待砂岩を用いた実験によりその実用性を明らかにした。具体的には、X線の線吸収係数による体積含水率の算定式(4)とこれに基づく画像間差分、体積含水率による浸透水量の算定式(6)、浸透水量による透水フロントの無次元半径の算定式(9)、および無次元半径と無次元時間に関する理論式(22)を誘導し、X線CTデータを用いて透水係数を評価する理論と実際について詳述した。

また、飽和度の等高線を利用する透水フロントの自動可視化を提案し、必要なデータ処理法を明らかにした。また、画像解析から間隙率、ならびに透水フロントの移動速度が定量可能であることを明らかにした。来待砂岩においては、画像解析から間隙中の流速と間隙率がともに正規分布に従うと推論し、このような統計的特徴は透水モデルを構築する際に重要であると論じた。さらに、透水フロントに揺らぎが生じるメカニズムについて考察し、亀裂内のチャネリングフローが揺らぎが生じる原因であると論じた。

以上より、X線CTが岩石内部における透水現象の可視化と定量に有用であるとの結論が得られた。しかし、間隙率が小さい岩石については、観測されるCT値の変化が僅かであり、有意な結果を得ることが難しい。このような場合には、水よりも密度の大きい流体を用いる造影技術の適用が必要である。岩石に有用な造影法の開発は今後の課題である。

### 引 用 文 献

- 1) Arthur, J. R. E. : New techniques to measure new parameters, Proc. of Roscoe Material Symp. on Stress-Strain Behaviour of Soils, Cambridge, p. 340-346, (1971)
- 2) Coles, M. E., Muegge, E. L. and Sprunt, E. S. : Application of CAT scanning for oil and gas production research, IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 38, p. 510-515, (1991)
- 3) Cromwell, V., Kortum, D. J. and Bradley, D. J. : The use of a medical computer tomography (CT) system to observe multiphase flow in porous media, Soc. of Petroleum Eng., Paper no. 13098, Soc. Petroleum Eng., Richardson, TX, (1984)
- 4) Sugawara, K., Obara, Y., Kaneko, K., Koike, K., Ohmi, M. and Aoi, T. : Visualization of three-dimensional structure of rocks using X-ray CT method. Proc. of 1st ARMS, Seoul, Korea, Vol. 2, p. 769-774, (1997)
- 5) 高木幹雄・下田陽久監修：画像解析ハンドブック、東京大学出版会、p. 356-371, (1991)
- 6) 岩井喜典編：CTスキャナー X線コンピュータ断層撮影装置、コロナ社、p. 35-37, (1982)
- 7) たとえば、土木学会編：土木技術者のための岩盤力学、p. 240, (1975)