

微小な火山噴出物・実験生成物試料の  
浸透率測定のための透気試験装置

竹内 晋吾\*・中嶋 悟\*\*

(2004年7月26日受付, 2004年12月10日受理)

A New Simple Gas Permeameter for Permeability Measurement of Small Samples  
of Volcanic Eruptive Materials and Experimental Run Products

Shingo TAKEUCHI\* and Satoru NAKASHIMA\*\*

In order to measure permeabilities of small volcanic eruptive materials and experimental run products, we developed a new simple permeameter to measure gas permeabilities of millimeter-size samples. This permeameter can measure permeability in the wide range from  $10^{-17}$  to  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>, with the precision within one order of magnitude. Nitrogen gas is used as a working gas. The permeability is calculated by using Darcy's law applied to results of steady state gas flow measurement at fixed pressure differences up to  $1.5 \times 10^4$  Pa (ca. 0.15 atm). The pressure difference is measured with the precision of 10 Pa by a water column manometer. Gas flow rate is converted to water flow rate in an acrylic container and the water flow dripping from the container through the tube into a flask is monitored by an electric balance.

We confirmed the accuracy in permeability measurement by measuring gas flow in a stainless capillary tube (15 mm in length and 100 μm in inner diameter). We carried out flow measurement with the pressure difference of  $1.2 \times 10^2$  to  $1.4 \times 10^4$  Pa at the flow rate of  $3.5 \times 10^{-10}$  to  $3.9 \times 10^{-8}$  m<sup>3</sup>/s. Measured gas flow rate was compared with calculated flow rate, assuming that the gas flow in the capillary tube is Poiseuille flow. Although the difference between them becomes large for smaller flow rate than  $10^{-9}$  m<sup>3</sup>/s, the discrepancy is within 0.25 log unit for the flow rate larger than  $10^{-10}$  m<sup>3</sup>/s. Permeabilities of centimeter-size, four air-fall pumice and scoria measured by this permeameter are consistent with the permeability-vesicularity relationship obtained from pyroclastic materials by Klug and Cashman (1996).

We measured permeabilities of nine samples of porous ceramics with varying dimensions from 1.3 to 8.3 mm in length and from 5 to 78 mm<sup>2</sup> in cross sectional area, which were cut from a homogeneous ceramic rod. Permeabilities of millimeter-size samples are consistent with those of ca. 1 centimeter-size samples, indicating that this permeameter can determine permeability for the millimeter-size samples.

The permeameter can be easily assembled with commercially available components at a very low cost, and will be a useful tool to measure permeabilities of small volcanic eruptive materials and experimental run products.

**Key words:** gas permeameter, permeability measurement, degassing, vesiculation

## 1. はじめに

発泡したマグマ中の連結した気泡を通じて、マグマ中をガスがどの程度通りやすいかは、マグマの浸透率という物性によって表される。浸透率は、マグマの減圧発泡過

程において桁の大きさで変化し、噴火過程における脱ガス現象を支配する重要な物性である(例えば Eichelberger *et al.*, 1986; Klug and Cashman, 1996; Melnik and Sparks, 1999)。しかし、マグマがどのような発泡状態になったと

\* 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
東京工業大学大学院理工学研究科地球惑星科学専攻  
Department of Earth and Planetary Sciences, Tokyo  
Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Tokyo  
152-8551, Japan.

\*\* 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
東京工業大学大学院理工学研究科広域理学講座

Interactive Research Center of Science, Tokyo  
Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Tokyo  
152-8551, Japan.

Corresponding author: Shingo Takeuchi  
e-mail: takeuchi@geo.titech.ac.jp

きに浸透性を持ち始めるか、そして発泡組織の変化とともに浸透率がどのように発展していくかなど、マグマの上昇・減圧過程におけるマグマの浸透性の発展については未解明な問題が残されている。

これまでマグマの浸透性については、天然試料の浸透率測定に基づいて研究が行われてきた (Eichelberger *et al.*, 1986; Klug and Cashman, 1996; Melnik and Sparks, 2002; Saar and Manga, 1999)。しかし、天然試料はマグマが大気圧まで減圧され、常温まで冷却される過程で、マグマ流動による気泡の変形や脱ガスによる気泡の崩壊を被った後の発泡構造を反映したものである可能性がある。それ故、天然試料に基づいて地下深くから地表に出るまでのマグマの浸透性の進化を議論することには限界がある。また、Blower (2001) は数値モデルを用いてマグマ中の発泡組織と浸透率の関係を推定しているものの、その数値モデルの妥当性を検証するための実験的データはこれまで全く存在しない。

今後、マグマの浸透率に関するより実証的なデータの取得のためには、高温高压発生装置を用いたマグマ物質の発泡実験に基づきマグマの浸透性の発展を解明していく必要がある。実際のマグマ物質を高温高压下で発泡させ、その場透気実験によって浸透率を求めるのが理想であるが、そのような実験を行なうのは現時点では技術的に難しい。そこで、実験によって高温高压下での発泡状態を再現したマグマ物質を急冷し、発泡組織を保存した実験生成物について浸透率を測定することが研究手法の一つとして有効である。しかし、実験生成物のサイズは一般に1-10 mm程度であり、多くの既製の透気試験装置で測定できる試料のサイズ (25.4 mm 以上) に比べて小さすぎる。また、既製品の多くは質量流量計やフロート式流量計をもちいた瞬間的な流量計測を採用しているため、流量の計測範囲が狭く、測定可能な浸透率の範囲も狭い場合がある。過去に行われた天然試料の浸透率測定 (Eichelberger *et al.*, 1986; Klug and Cashman, 1996; Melnik and Sparks, 2002; Saar and Manga, 1999) からは、発泡度が数 vol.% から 90 vol.% に変化するのに対して、浸透率は  $10^{-17} \text{ m}^2$  から  $10^{-11} \text{ m}^2$  まで6桁も変化することが知られている。このように広範囲にわたって浸透率が変化する火山噴出物の浸透率測定を、一台の既製品で行なうのは困難な場合がある。さらに既製品は決して安価なものではない。

このようなことを踏まえ、本研究では、誰でも入手可能な安価な材料を用いて、天然試料だけでなく実験生成物のような微小試料の浸透率を、幅広い範囲にわたって測定が可能な透気試験装置を開発した。

## 2. 浸透率測定の基本原則

本透気試験装置では、過去の火山噴出物の浸透率研究 (Eichelberger *et al.*, 1986; Klug and Cashman, 1996; Melnik and Sparks, 2002; Saar and Manga, 1999) と同様に定差圧流量法 (山口・西松, 1991, p19-22) によって浸透率を測定する。高压のガスボンベから試料を通じ、低压の大気へと窒素ガスを流す。ガスの流れが定常状態に達した後、ガス流量 ( $Q$ ) とガスが試料を通過する前後での差圧 ( $\Delta P$ ) を測定し、それらの測定値と試料サイズをダルシーの法則に当てはめ、試料中でのガスの通りやすさを表す“浸透率 ( $K$ )”を求める (山口・西松, 1991, p19-22)。試料を通過させる流体として水などの圧縮性を無視できる液体を用いた場合には、

$$K = \mu_{\text{liquid}} \frac{L}{\Delta P} \frac{Q}{A} \quad (1)$$

と表されたダルシーの法則により浸透率が求められる。 $\mu_{\text{liquid}}$  は液体の粘性、 $L$  は試料の長さ、 $A$  は試料の断面積である。一方、圧縮性を無視できない気体を流体として用いた場合には、圧力による流体の体積の変化が補正された下記の式が用いられる (山口・西松, 1991, p19-22)。

$$K = \frac{2\mu_{\text{gas}}LP_0Q}{(P_1^2 - P_2^2)A} \quad (2)$$

$P_0, P_1, P_2$  はそれぞれ、ガス流量を測定する時の圧力、試料通過前のガス圧力、試料通過後のガス圧力である。本研究では式 (2) によって浸透率を計算する。本透気試験装置では  $P_0$  と  $P_2$  は大気圧にほぼ等しく、 $P_1$  は大気圧と測定された差圧 ( $\Delta P = P_1 - P_2$ ) の和に等しい。本装置では、試料にかかる差圧 ( $\Delta P$ ) は最大で約  $1.5 \times 10^4 \text{ Pa}$  であり、式 (1) と式 (2) で計算される浸透率の違いは最大でも 7% にとどまり、気体の圧縮性による影響はさほど大きくない。

## 3. 本透気試験装置の構成

本透気試験装置は高压ガスリザーバー (high pressure gas reservoir)・圧力安定化部 (pressure stabilizer)・透気セル (permeable cell)・差圧計測部 (water column manometer)・流量交換器 (flow rate converter)・電子天秤 (electric balance) からなる (Fig. 1)。各部分は内径 5 mm と 6 mm のビニールチューブによって連結されている。以下の節では各部分について簡単に記述していく。

### 3-1 高压ガスリザーバー

高压ガスのリザーバーとして窒素ガスボンベを用いている。窒素ガスボンベには2次圧目盛りが6気圧まで備

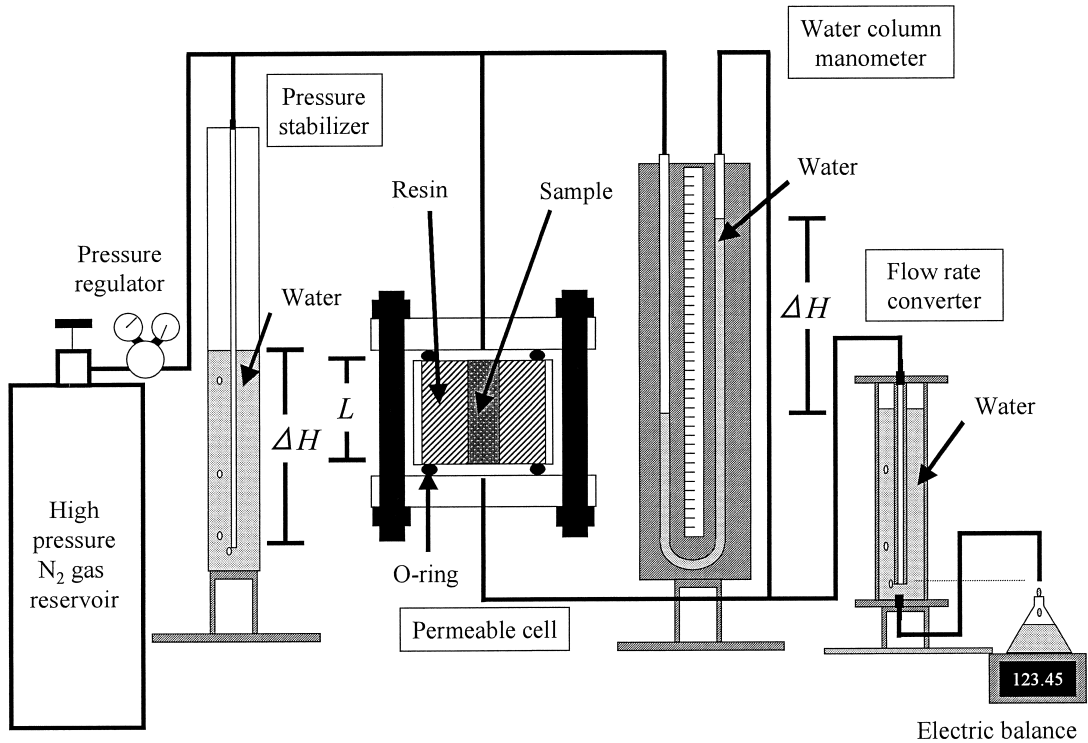


Fig. 1. Schematic configuration of the newly developed simple gas permeameter.

えられている圧力調整器を取り付けている。

### 3-2 圧力安定化部

圧力安定化部は、幹線チューブから分岐したチューブを内径 11 mm・肉厚 2 mm・長さ 160 cm のアクリルパイプと連結し、上端を開放した内径 30 mm・肉厚 2 mm・長さ 162 cm のアクリルパイプの中に設置したものである。アクリルの接着にはアクリル専用の溶着剤を用い、接着部にはシリコンシーラント（セメダイン社製超多用途シール）を十分に塗布してガスや水の漏れを防いでいる。

あらかじめ外側パイプの中にある量の水を注ぎ、内側パイプの先から少量の気泡が常に出る条件に圧力調整器の 2 次圧を設定することにより、試料から上流側のガス圧力は内側パイプの口と外側パイプ内の水面との水位差によって生まれる水圧に保たれる。この圧力安定化部によって大気圧から大気圧 + 約  $1.5 \times 10^4$  Pa (150 cm の水位差) 程度の範囲で上流のガス圧力の調節が可能である。圧力安定化部は、圧力調整器内の機械的摩擦などによって生じる差圧の不安定を取り除く役割を果たしている。また試料の通過前後のガスの両方を水を介して大気へと連結させることにより、大気圧が変動しても両方のガス圧が同じだけ変動するために差圧の不安定を生じな

い、この仕組みによって透気試験中は数 10 Pa 以内（数 mm 以内の水位差変動）の差圧安定性を確保している。

### 3-3 透気セル

試料は、チューブプラグを取り付けた 2 枚のアクリル板 (100 mm × 100 mm × 10 mm) の間にゴム製の O リングを挟み、4 本のボルトで上下に締めることで透気セルに設置される。

### 3-4 差圧計測部

差圧の計測は、水柱マンメーターを用いて行なっている。本装置では最大約  $1.5 \times 10^4$  Pa の差圧（約 150 cm の水位差）まで測定可能である。水柱マンメーターは U 字型に曲げられた内径 6 mm のビニールチューブを垂直に立てた板に固定したものである。板の中心には水位差の読み取りのために市販のスケールテープを貼り付けている。mm 単位で水位差を読むことによって、10 Pa の精度で差圧を読むことが出来る。

### 3-5 ガス流量計測部

ガス流量の計測は、流出ガスの体積流量を直接測定するのではなく、密閉容器へのガスの流入によって容器から押し出される水の質量を電子天秤で計測することにより行なっている。容器は、内径 80 mm・肉厚 2 mm・長さ 300 mm のアクリルパイプの上下に肉厚 3 mm のアク

リル板を接着することによって製作した。圧力安定化部と同様に、アクリル溶着剤とシーラントによりガスや水漏れが防止されている。Fig. 1にあるように透気セルから導かれたガスは内側パイプで容器の底近くまで導かれる構造になっている。この構造は「マリオット給水」と呼ばれる仕組み（佐藤・岩佐, 2002, p76）で、容器内の水面の降下による差圧変動を取り除く。容器へのガスの流入により水面が低下していくが、内側パイプの口の高さよりも上に水面がある限り、ガスの出口圧力は一定に保たれ、差圧の安定性が確保される。

容器から流出する水は三角フラスコに注がれ、その重量変化を電子天秤で計測し、常温での水の密度を使って質量流量を体積流量に換算し、ガスの体積流量を求めている。チューブの排水口をアクリル容器内部の内側パイプの口と高さを合わせた場合には、透気セルの下流側圧力は大気圧と等しくなる。電子天秤はRS232Cケーブルによってパソコンと連結し、計測値をパソコンに出力している。

本装置ではある透気実験時間に流出した積算ガス流量を透気時間で割ることで単位時間のガス流量を求めているため、流量に応じて透気時間を調節することによって、幅広い範囲での流量測定ができる。またガス体積を水の質量に変換するために、微小な体積の精密な測定が可能になっている。これら二点が非常に幅広いガス流量の計測を可能にし、本装置の浸透率測定範囲の幅を広げている。

#### 4. 本透気試験装置の精度と定量範囲

本装置の差圧や流量の定量性を確認するため、長さ約15 mm・内径100  $\mu\text{m}$  のステンレス製金属細管を樹脂に埋め込んで試料を作成し透気試験を行なった。その際、差圧が  $1.2 \times 10^2 - 1.4 \times 10^4$  Pa、ガス流量が  $3.5 \times 10^{-10} - 3.9 \times 10^{-8}$   $\text{m}^3/\text{s}$  の条件で透気させた。この条件で実験を行なった場合、金属細管内の流れのレイノルズ数 ( $Re = \rho VR/\mu$ , ここで  $\rho$ , 窒素ガス密度;  $V$ , ガス流速;  $R$ , 管半径;  $\mu$ , 窒素ガス粘性率) はおよそ  $10^{-2} - 10^0$  の桁である。それ故、金属細管内の流れはポアズイユ流れを仮定できる。金属細管内のポアズイユ流れを仮定し、与えられた差圧に対する流量の計算値と実測値との比較を行なった (Fig. 2)。差圧、すなわちガス流量が小さくなるにつれて、計算値からのずれが大きくなる。この原因は低流量の場合には電子天秤の不安定性によって生まれる誤差が大きくなるためであると考えられる。この誤差を軽減するためには、電子天秤の設置環境の改善や性能のより高い電子天秤の使用などが対策として考えられるが、現状でもガス流量が  $10^{-10}$   $\text{m}^3/\text{s}$  の以上の実験条件の範囲で

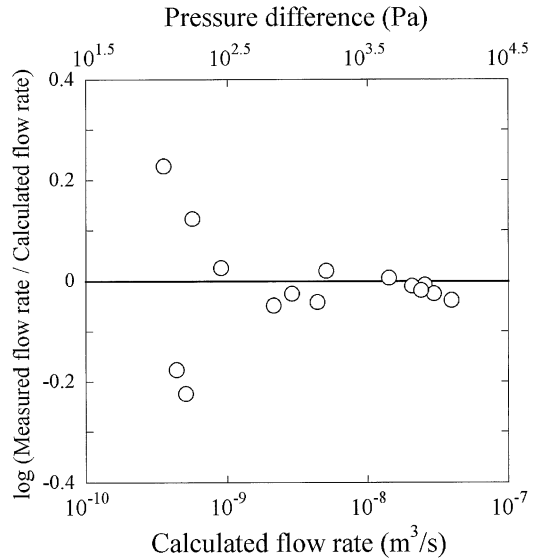


Fig. 2. Comparison between measured and calculated  $\text{N}_2$  gas flow rates through a stainless capillary tube with 100  $\mu\text{m}$  inner diameter at various pressure differences. In the calculation, the flow in the stainless capillary tube was assumed to be Poiseuille flow.

は、実測値の計算値に対する比は対数スケールで0.25より小さい (Fig. 2)。それ故、この実験条件の範囲ならば、桁の範囲内の精度で流量を測定できるので、発泡度が数 vol.% から 90 vol.% まで変化するのに対して、浸透率が6桁変化する火山噴出物試料の測定には十分に有用である。

本装置では、ガス流量を水の流量に変換し、水を三角フラスコに滴下して、重量を測定している。フラスコが大気中に開放されているため、ガス流量がフラスコからの水の蒸発速度を下回った場合にはガス流量が検出できない。室温 25°C・湿度 60-70%・気圧 1,010 hPa の環境下では、約  $0.5 \times 10^{-10}$   $\text{m}^3/\text{s}$  のガス流量に相当する水が三角フラスコから蒸発する。本装置の浸透率の検出限界は、この水の蒸発速度と試料の長さ・断面積によって決まっている。

本装置によって測定可能な計測量の範囲は、差圧が  $1.0 \times 10^2 - 1.5 \times 10^4$  Pa、ガス流量が  $10^{-10} - 10^{-5}$   $\text{m}^3/\text{s}$  である。この計測範囲では、1 mm から数 cm サイズの試料の場合には  $10^{-17} - 10^{-10}$   $\text{m}^2$  の範囲の浸透率を測定することができる。

Table 1. Results of permeability measurements for pyroclastic fall samples.

Sample	Length (mm)	Diameter (mm)	Bulk density ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Solid density ( $10^3 \text{ kg/m}^3$ )	Vesicularity* (vol.%)	Permeability ** ( $\log \text{ m}^2$ )	n***
Mt. Takatsuka red scoria	14.0	9.9	2.30	2.9	21	-14.3	2
Mt. Takatsuka black scoria	12.7	9.9	1.67	2.9	42	-12.9	2
Mt. Usu 1977 pumice	14.2	9.9	1.13	2.5	54	-13.5	5
Komagatake 1929 pumice	7.8	9.9	0.84	2.6	68	-11.6	2

\* Including +/- 2 vol.% error due to uncertainty of solid density (+/-  $100 \text{ kg/m}^3$ ).

\*\*Average values in replicate measurements. Standard deviations ( $1\sigma$ ) of replicate measurements are within 25% of the average values.

\*\*\* Numbers of replicate measurements.

## 5. 透気試験の実際

### 5-1 透気試験のための試料の準備

天然試料について予察的な透気試験を行なうため、4つの降下火砕物試料（有珠山 1977 年噴火のデイサイト質軽石（曾屋・他, 1981）、北海道駒ヶ岳 1929 年噴火の安山岩質軽石（Takeuchi and Nakamura, 2001）、伊豆東部単成火山群の一つである高塚山スコリア丘の玄武岩質黒色スコリアと、それらが高温酸化されることによって出来た赤色スコリア（山野井・他, 2004））について透気試験のための試料を作成した。岩石磁気学分野などで広く使用されている据付型コアサンプラーを用いて直径約 10 mm の円筒形試料を軽石・スコリア粒からくりぬき、上下面を平らに研磨し、整った円筒形試料を作成した。整形後に円筒試料の直径・長さをノギスで測定した。直径は後に試料断面積 ( $A$ ) を求めるために必要である。

この時点で、円筒試料の体積を求め、重量を秤量することによって、かさ密度を見積り、さらに固相密度を用いることによって試料の発泡度を計算した（整形法による発泡度見積り）。かさ密度・固相密度・発泡度の測定値を Table 1 に示す。整形法により求めたかさ密度の妥当性を検証するために、気泡を含まない和田峠の黒曜石について密度測定を行った結果、 $2.32 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  となった。アルキメデスの原理によって求めた和田峠の黒曜石の密度は  $2.320 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  と報告されており（Okumura *et al.*, 2003）、この一致から整形法によるかさ密度測定が十分な精度を持っていることが確認できた。

固相密度は、火砕物試料を粉末にしたものについて水を用いたピクノメーター法（山口・西松, 1991, p17-18）によって求めた。ピクノメーター法では、一定の体積を持ったピクノメーターの中に試料粉末を入れて秤量し、試料粉末の入ったピクノメーターを水で満たした後にさらに秤量を行い、質量の増加分から注いだ水の体積を求め、試料粉末が入っていないピクノメーターの体積と注いだ水の体積との差をとることで粉末の体積が計算される。なお、気泡を含まない和田峠の黒曜石の粉末につい

て、ピクノメーター法を用いて密度を求めたところ、 $2.372 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  となり、整形法やアルキメデスの原理を用いて求めた値とほぼ一致する。このことから、ピクノメーター法では大きく見積っても  $\pm 100 \text{ kg/m}^3$  の誤差で固相密度を測定できていると考えられる。

整形された円筒試料の周りを 10 分程度で完全に固化する樹脂（Kulzer 社製テクノビット 4004 番）で固め、側面のシールを行った。この樹脂の粘性は十分に高く、反射顕微鏡で確認する限りにおいては試料空隙への樹脂の顕著な侵入は無かった。樹脂で固めた後に、1000 番までの耐水研磨紙で順次研磨し、試料の上下面を再び平滑に整えた。その後、水とエタノールによって超音波洗浄を行い、空隙内の汚れを除去した。超音波洗浄した試料を数時間温風ヒーターの前に置き、乾燥を行なった。その後、真空デシケーターの中で 1 日保管し、さらに乾燥させた。側面のシール処理後の再研磨によって試料長さが若干短くなっているため、乾燥後に、研磨後の試料の長さ ( $L$ ) をノギスで測定した。

### 5-2 透気試験の操作

試料の上下面の樹脂部分と O リングが接する状態で上下からアクリル板で試料を挟み、ボルトで十分に締めることによってアクリル板・O リング・試料の間のシールを完全に行う。試料を透気セルに設置した後に、求める差圧条件に合う量の水を圧力安定化部に注ぎ、高圧ガスボンベのバルブを開放する。水柱マノメーターの水位が安定し、ガス流量計測部での水の排出が定常状態に達したら、水柱マノメーターの水位差を記録し、電子天秤の重量データの取得を開始する。一定時間データを取得し、得られた積算ガス流量を透気させた時間で割ることによって単位時間のガス流量 ( $Q$ ) を計算する。また計測した水位差から差圧 ( $\Delta P$ ) を計算する。このようにして求めた  $A$ ,  $L$ ,  $Q$ ,  $\Delta P$  と室温での窒素ガスの粘性率 ( $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pas}$ ) から、式 (2) を用いて浸透率 ( $K$ ) を計算する。なお大気圧は、すべてにおいて  $1,013 \text{ hPa}$  を仮定した。

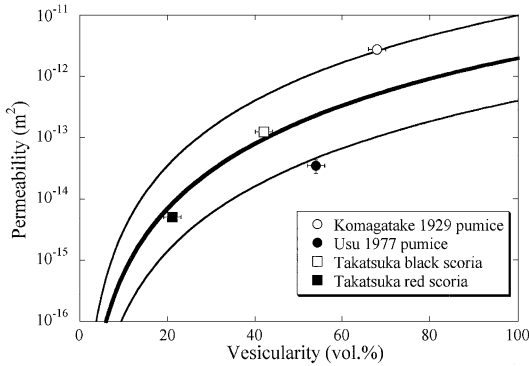


Fig. 3. Measured permeabilities of several pyroclastic falls plotted against their vesicularities. Error bars for vesicularities are  $\pm 2$  vol.% due to uncertainty of solid density ( $\pm 100$  kg/m<sup>3</sup>) of rock samples. Error bars for permeabilities are standard deviation ( $2\sigma$ ) of replicate measurements. Bold solid curve indicates the relationship obtained by Klug and Cashman (1996) from 73 samples of pyroclastic materials. Two fine solid curves indicate the upper and lower limit of the scattered permeability data for these 73 samples.

### 5-3 降下火砕物試料の透気試験結果

4つの降下火砕物試料について、試料サイズ・発泡度および浸透率測定結果をTable 1にまとめる。有珠山1977年噴火の軽石試料については、同一の試料の上下を測定毎にひっくり返し、差圧を $2.7 \times 10^3 - 1.4 \times 10^4$  Paの範囲で変化させ、5回の繰り返し測定を行なった。この差圧条件での単位時間当たりのガスの流量は $2.7 \times 10^{-8} - 1.5 \times 10^{-7}$  m<sup>3</sup>/sであった。5回の浸透率測定による有珠山1977年噴火軽石の浸透率の平均値は $3.2 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-13.5}$  m<sup>2</sup>)、5回の測定データのばらつきは平均値に対して9%の範囲におさまった。このことから浸透率測定が十分な再現性を持っていることが確認できた。その他の試料は2回の透気試験結果を平均することによって浸透率を求めた。

4種類の降下火砕物についての浸透率と発泡度の関係をFig. 3に示す。4つの試料の発泡度は20–70 vol.%の範囲にわたっている。4つの降下火砕物試料の浸透率と発泡度の関係は、同じく降下火砕物の浸透率を多く含むデータ群に基づき提案されたKlug and Cashman (1996)の関係とおおむね一致した。天然試料に関する過去の研究との整合性からも、本透気試験装置が十分な測定の定量性を持っていることがわかる。

Table 2. Results of permeability measurements for small porous ceramic.

Sample	Length (mm)	Diameter (mm)	Area* (mm <sup>2</sup> )	Permeability** (log m <sup>2</sup> )	n***
Alsimag L	7.7	9.9	77	-13.4	2
Alsimag 1	8.3	10.0	78	-13.4	2
Alsimag 2	7.2	9.9	76	-13.3	2
Alsimag 3	3.3	9.9	76	-13.2	2
Alsimag 4	2.1	9.9	77	-13.1	2
Alsimag 6	2.0	irregular	25	-13.3	2
Alsimag 7	1.5	irregular	11	-13.4	2
Alsimag 8	1.6	irregular	15	-13.5	2
Alsimag 9	1.3	irregular	5	-13.3	2

\*Average cross sectional area of upper and lower end surfaces of the samples. Standard deviations ( $1\sigma$ ) of the areas of upper and lower surfaces are within 4% of the average values.

\*\*Average values in replicate measurements. Standard deviations ( $1\sigma$ ) of replicate measurements are within 37% of the average values.

\*\*\*Numbers of replicate measurements.

### 6. 微小試料の透気試験

実験生成物のようなmmサイズの微小試料の浸透率が測定可能かどうか検討するために、高圧実験で使用されている比較的均質に焼成された多孔質セラミックスから切り出したサイズの異なる試料について透気試験を行なった。各試料のサイズと浸透率測定結果をTable 2にまとめ、試料長さや断面積と浸透率の関係をFig. 4に示した。

まず、長さ約100 mm・直径9.9 mmの多孔質セラミックスの棒から、長さ2.1–8.3 mm、直径約10 mmの5つの円筒試料(Alsimag L, 1–4)を任意の位置から切り出して天然試料と同様に試料を作成し、セラミック棒の浸透率の均一性を確認するための透気試験を行なった。その結果、このセラミック棒の位置の違いによる浸透率のばらつきは、 $4.4 - 7.4 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-13.4} - 10^{-13.1}$  m<sup>2</sup>)の範囲で、平均値は $5.6 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup> ( $10^{-13.3}$  m<sup>2</sup>)、標準偏差 ( $1\sigma$ ) は $1.4 \times 10^{-14}$  m<sup>2</sup>であった。

続いて、同じセラミック棒から、長さ1.3–2.0 mm、断面積5–25 mm<sup>2</sup>の4つの不定形の微小試料(Alsimag 6–9)を製作し、透気試験を行なった。試料は、上面と下面の断面が合同になるように製作した。試料断面積はフラットベットスキャナーにより1,200 dpiの条件で試料断面の画像を取得した後、画像解析ソフトNIH imageを用いてそれら画像を二値化し、試料断面のピクセル数を計測した。1ピクセルの面積は、 $4.5 \times 10^{-4}$  mm<sup>2</sup>なので、これをピクセル数に乗じることによって試料断面積が求められる。なお、同じ手法によって計測した直径9.9 mmの円筒断面積の測定値と、円を仮定した場合の計算値との違いは0.4%程度であり、画像解析による断面積計測

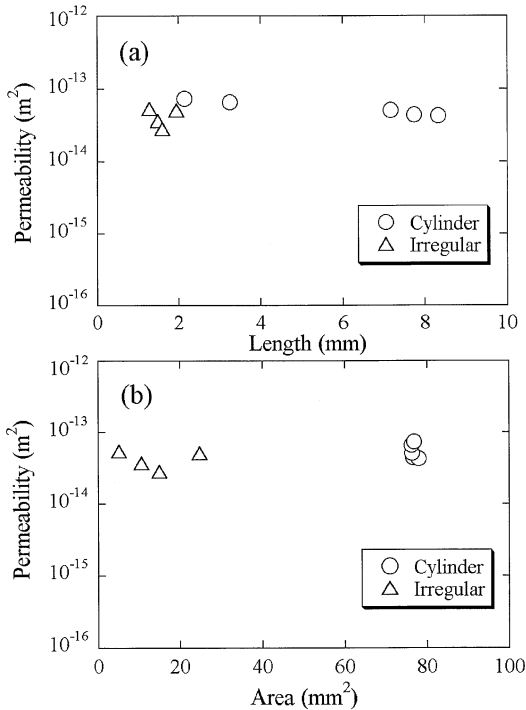


Fig. 4. Measured permeabilities for small porous ceramic samples with varying dimensions shown in Table 2. (a) Permeability vs. length of the porous ceramics. (b) Permeability vs. cross sectional area of the porous ceramics.

の精度には全く問題はない。また各試料の上面と下面の断面積の違いは最大で平均値の4%であった。

4つの不定形微小試料の浸透率は  $2.8 - 5.4 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  ( $10^{-13.5} - 10^{-13.3} \text{ m}^2$ ) の範囲にあり、平均は  $4.3 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  ( $10^{-13.4} \text{ m}^2$ )、標準偏差 ( $1\sigma$ ) は  $1.2 \times 10^{-14} \text{ m}^2$  で、円筒試料の浸透率と標準偏差の範囲内で一致している (Fig. 4)。従って、数 mm サイズの微小試料であっても、桁の精度での浸透率の定量的測定が本装置によって十分可能である。

## 7. まとめ

本研究で製作した透気試験装置は、誰にでも手に入る安価な材料を使用して手作りしたものであるにも関わらず、mm サイズの微小試料を、十分な定量性を持って浸透率を測定することができる。今後は、温度圧力条件を調節した発泡実験を系統的に行い、実験生成物の浸透率を本装置によって測定し、噴火過程におけるマグマの浸透性の発展を実験的に解明することを目指していく。本装置は実験生成物の透気試験を目指して製作されたものであるが、天然の試料の透気試験ももちろん可能であ

る。低コストで誰でも手軽に製作できる本装置が、火山噴出物や実験生成物のガス浸透性を定量化する一つのツールとして今後、普及していくことを期待したい。

## 謝 辞

本研究を始めるにあたって、帝国石油株式会社には透気試験装置の見学を許可して頂き、いくつかの試料の試し測定を行なって頂いた。その際、林 嘉久氏、佐々木道子氏、飯田真司氏にお世話になり、多くの価値あるご助言を頂いた。また、応用地質株式会社の中山栄樹氏からは、金属細管をご提供頂き、装置製作に関する多くのご助言を頂いた。東京工業大学地球惑星科学専攻の綱川秀夫氏にはコアサンプラーの使用を許可して頂いた。また同専攻の高橋栄一氏、鈴木敏弘氏、丹下慶範氏、奥村聡氏、山野井勇太氏には製作の全般に関して様々な助言や支援をして頂いた。査読者の斎藤元治氏、山下 茂氏には丁寧な査読と貴重なご指摘を頂き、本論を改善するのにとても役立った。以上の皆様に深く感謝する。

## 引用文献

- Blower, J.D. (2001) Factors controlling permeability-porosity relationships in magma. *Bull. Volcanol.*, **63**, 497-504.
- Eichelberger, J.C., Carrigan, C.R., Westrich, H.R. and Price, R.H. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323**, 598-602.
- Klug, C. and Cashman, K.V. (1996) Permeability development in vesiculating magmas: implications for fragmentation. *Bull. Volcanol.*, **58**, 87-100.
- Melnik, O. and Sparks, R.S.J. (1999) Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, **402**, 37-41.
- Melnik, O. and Sparks, R.S.J. (2002) Dynamics of magma ascent and lava extrusion at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. In *The eruption of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, from 1995 to 1999* (Druitt, T.H. and Kokelaar, B.P. eds), 153-171, Geological Society of London, London.
- Okumura, S., Nakamura, M. and Nakashima, S. (2003) Determination of molar absorptivity of IR fundamental OH-stretching vibration in rhyolitic glasses. *American Mineralogist*, **88**, 1657-1662.
- Saar, M.O. and Manga, M. (1999) Permeability-porosity relationship in vesicular basalts. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 111-114.
- 佐藤邦明・岩佐義朗 (2002) 地下水理学. 丸善, 東京, 319 p.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・堺 幾久子 (1981) 有珠山火山地質図. 地質調査所.
- Takeuchi, S. and Nakamura, M. (2001) Role of precursory less-viscous mixed magma in the eruption of phenocryst-rich magma: evidence from the Hokkaido-Komagatake 1929 eruption. *Bull. Volcanol.*, **63**, 365-376.

山口梅太郎・西松裕一 (1991) 岩石力学入門. 東京大学  
出版会, 331 p.  
山野井勇太・中嶋 悟・奥村 聡・竹内晋吾 (2004) 分

光測色法によるスコリアの色変化測定と加熱再現実  
験, 火山, 49, (一).

(編集担当 津久井雅志)