

II-10

乾燥多孔媒体中の水分移行・吸湿メカニズムの研究

埼玉大学工学部 佐藤 邦明
 " " N. V. Hoang
 千葉県水道局 ○大西 敬彰

はじめに

一般に論じられてきたような多孔媒体中の飽和・不飽和浸透流に比べ、非常に含水率の低い水分移動に関する力学的研究は乏しい。しかし、技術が拡張しつつある今日、低水分の多孔媒体中の移行はその応用が広く、乾燥地帯の気候への影響・地下空間の居住性・都市環境の保全といったことに関連して、その研究が望まれる。本研究は、そういった科学・技術の要望にそって、乾燥多孔媒体の吸湿メカニズムを明らかにするために、特別に設計された装置を用い、いくつかの多孔媒体試料（粒状多孔媒体や岩石等）に一定の湿気を供給し、その分散（拡散）係数を決定したものである。

キーワード：多孔媒体、吸湿、水文素過程、低含水率

1. 実験装置と実験ケース

実験装置は湿気水分のように低い水を対象とするため、水分コントロールと多孔媒体の吸湿水分を高精度で計量 (10^{-4} g) するにある。図-1には実験装置の各部とシステムを示している。その基本構造は、飽和湿度発生容器、試料格納容器、温湿度及び重量自動記録レコーダーからなり、絶えず飽和湿度が発生容器から多孔媒体の上面に導かれ吸湿される（図-1参照）。

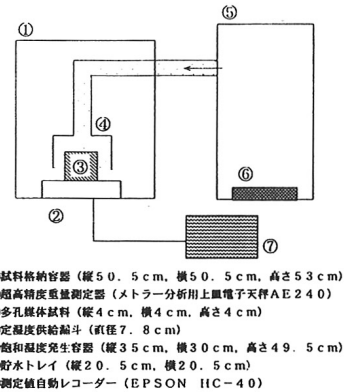
実験手順は以下の通り。

まず、110℃で炉乾燥された岩石試料及び粒状多孔媒体（立方体： $0.04\text{m} \times 0.04\text{m} \times 0.04\text{m}$ ）の上面を除いた5面にアルミ薄を接着した後、①試料格納容器内の②超高精度重量測定器にのせ、④定湿度供給漏斗を所定の位置に設定する。しかる後に、⑥貯水トレイから発生し⑤飽和湿度発生容器と④定湿度供給漏斗とを結ぶ透明パイプの解放コックを開く。ついで、⑦測定値自動レコーダーを作動させ、試料格納容器と飽和湿度発生容器内の温度及び湿度、加えて岩石試料の重量を経時的に記録する。この一連の実験を表-1に示されたような粒状多孔媒体4種類、及びモルタル岩石4種類、合計8種類の試料について環境シミュレーション室（温度20℃、相対湿度60%）の中で行う。

なお、粒状多孔媒体試料は上面を解放した $0.04\text{m} \times 0.04\text{m} \times 0.04\text{m}$ のアルミ製容器に充填してある。

2. 実験結果とその理論的検討

乾燥状態から始まり、一定飽和水分から吸湿して時間と共に試料が重量を増すプロセスが図-3に実験結果の2例として示されている。図中、標準砂の場合は初期20時間ぐらいの範囲で岩石は急に水分を吸湿し、その後、吸湿時間率は急に小さくなり、ゆっくり飽和状態に移っている。この性質はガラス球や珪砂の場合にも共通していたが、粒径によって初期の吸湿率や吸湿量が違っていた。一方、岩石の場合（凝灰岩）は吸湿プロセスが非常にゆっくりし、ほぼ飽和状態に至るまでの時間が約50時間～400時間もかかっていた。この粒状多孔媒体と岩石の吸湿速度の違いは顕著であった。その差異が空隙形態のみな



①試料格納容器（縦50.5cm、横50.5cm、高さ53cm）
 ②超高精度重量測定器（メトラー分析用微量電子天秤AE240）
 ③多孔媒体試料（縦4cm、横4cm、高さ4cm）
 ④定湿度供給漏斗（直径7.8cm）
 ⑤飽和湿度発生容器（縦35cm、横30cm、高さ49.5cm）
 ⑥貯水トレイ（縦20.5cm、横20.5cm）
 ⑦測定値自動レコーダー（EPSON HIC-40）

図-1 実験装置とシステム

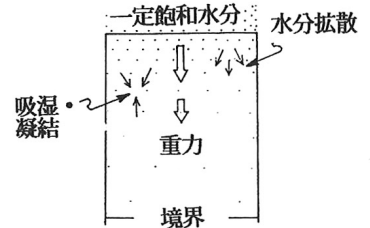


図-2 水分移動モデル

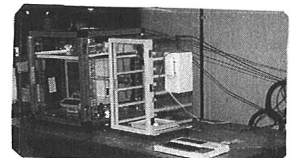


写真-1 実験装置の全景

らず鉱物成分にあることは明かであろう。

ここで、上述した多孔媒体への吸湿メカニズムを数量化するため、以下のような水分移行モデルを考えた。

いま、図-2で示すように吸湿、水分移行は大別して4つの素過程に分けられよう。つまり、①含水空気の重力移流、②空隙中の水分拡散、③多孔媒体固体表面への凝結・付着、及び④固体鉱物への吸湿、である。前3者は力学的性格の水分移行・拘束であるが、後者はむしろ化学的性質や鉱物の膨潤をも伴うものである。

従って、水分移行は吸湿や付着成分を含む次の移流拡散方程式で記述できる。

$$f' \frac{\partial C'}{\partial t} + f'' \frac{\partial C''}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (u' C') = f' D_x \frac{\partial^2 C'}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここに、 f' ：湿気空隙率、 f'' ：吸湿・凝結空隙率、 C' ：体積間隙水分濃度、 C'' ：吸湿・凝結水分濃度、 u' ：移流速度（重力による）、 D_x ：湿気水分拡散係数、 t ：時間、 x ：座標。

式(1)において、実質的に $f'' = 0$ 、 $f' = f$ 、 $C'' = 0$ とおき、 $C' = C$ （水分体積濃度）とおいても大過ないことが判明。

さらに、重力による湿気を含む空気移流速度 u' は、

$$u' = f \frac{dx_0}{dt} = -(h_k + x_0 + H) / x_0 \quad (2)$$

で表される。ここに、 x_0 ：湿気を含む空気移流フロントの距離、 k ：透気係数、 h_k ：湿気空気毛管水頭、 H ：定湿分相当圧力水頭である。

式(2)による移流速度は粒径の大きい多孔媒体については考慮する必要があるが、今回のような砂や岩の場合にはほとんど効かず、ほとんど拡散による吸湿が支配的であることがいろいろ検討した結果分かってきた。従って、式(1)の左辺第2項と3項は無視して、 D_x を固定した。その値は時間に依存したが、初期の値から多孔媒体中の C/C_0 の時間変化は図-4のようになる。

むすび

多孔媒体の吸湿メカニズムとその力学的取扱いを中心に実験と理論によって研究した。その結果は以下のように要約される。

①本研究で採用した実験装置は乾燥多孔媒体の水分吸湿の解明に有効であった。②積算水分吸湿量は時間の経過と共に増加するが、吸湿時間率は減少し、飽和に近づく。水分拡散係数は $10^{-3} \sim 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{h}$ であった。

参考文献

- 1) V. I. Aravin & S. N. Numevov: Theory of Fluid Flow in Undeformable rous Media, Israel Trans., Jerusalem 1965
- 2) 佐藤邦明、福原輝幸、S. ボリス、武田聖司：飽和砂・岩石塊の乾燥プロセスに関する基礎的研究、土木学会論文集、NO. 469/Ⅲ-23, PP. 65-72, 1993. 6

表-1 試料の物性値と実験ケース

Soil	Density G_s (g/cm^3)	Porosity f (%)	Permeability k (10^{-6}) (cm/s)	Effective Diameter d_e (mm)	Capillary Height h_k (cm)
Standard Sand	2.64	42.9	9.8×10^{-3}	0.11	54.5
Silica Sand	2.66	42.4	5.7×10^{-2}	0.32	19.1
Glass Sphere A	2.34	36.0	3.7×10^{-0}	2.15	3.72
Glass Sphere B	2.48	36.0	2.4×10^{-1}	0.55	14.5
Cement Mortar	1.83	23.6	1×10^{-6}		
Granite	2.70	0.72	1.2×10^{-8}		
Tuff	2.04	21.2	4.5×10^{-6}		
Ande-site	2.63	3.58	4×10^{-11}		

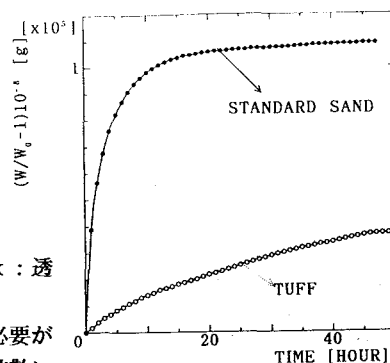


図-3 水分吸湿量の経時変化例

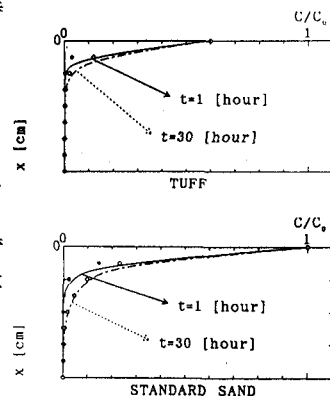


図-4 試料中の比水分濃度の経時変化