

# 飽和砂・岩石塊の乾燥プロセスに関する基礎的研究

佐藤邦明\*・福原輝幸\*\*・S.ボリス\*\*\*・  
武田聖司\*\*\*\*

人工的に制御された環境条件下で飽和砂及び岩石塊からの蒸発過程が実験と理論の両面より研究された。立方体サンプルの開放面からの蒸発も高精度で計測され、間隙毛管水の蒸発による減衰プロセスがマイクروسコープ写真により経時的に撮影された。実験結果によって蒸発が3つの段階を経て発生・継続し、その変遷レヂームが間隙の含水形態の変化によることが明らかとなった。さらに、この蒸発プロセスは熱・マスの連成輸送方程式の数値解によって統一して説明できることが判明した。

**Key Words** : drying, evaporation, sand and rock samples

## 1. はじめに

多孔体の乾燥はいろいろな工学分野においてのみならず、純粋科学においても基本となる現象である。土や岩石の蒸発・乾燥は水文学における水循環の一端を担うが、土質工学においては土構造物自体とそれらの構築プロセスで重要となる。

一般に、含水している多孔質の材料(土、岩、木材、コンクリート等)が蒸発・乾燥するプロセスは、間隙中の蒸気水と液状水を含む水相、及び間隙内の空気(気体)の混在した、いわゆる流体の移動(mass transfer)現象、加えて蒸気水と液状水の相互に生じる相変化に伴う熱移動(heat transfer)が同時に起こる。その観点から力学(流体力学および熱力学)的には、マスと熱の連成移行現象と見れる。

従来、このマス・熱の連成移行現象の力学モデルは、Philip & De Vries (1957)<sup>1)</sup>による研究及びLuikov (1966)<sup>2)</sup>の研究によってその基礎理論が確立されたことにより力学的基礎を得た。それ以前にも温度こう配をもつ不飽和浸透流については、土壌物理学や農業土学の分野でいくつか実験が行われ<sup>3-5)</sup>、メカニズムの把握と現象解明への努力は繰り返されたけれど、論拠の明快な拠り所がなかった。そこにPhilip & De Vriesの理論が世にでて、関連の研究に活気が満たされ、すべてがこの理論で説明がつくかの勢いで議論が勧められた。しかし、現実的には、次の4点からPhilip & De Vriesの理論はあくまで限定的な場合でしか成立しないということが明らかとなった。つまり、①間隙中の液状水の濃度(含

水率)があまり低くない(後述)。②間隙中の蒸気水濃度により空気(気体)自体に重力の影響が支配的でない(つまり、蒸気水が間隙中で対流を誘導しない)。③水相と熱自体及びそれらの輸送に伴うパラメータのオーダーと相関が複雑とならない。

これらの理由から、Philip & De Vriesの理論によって現象を説明しようとした研究は行き詰まりを見せ、それらの行き詰まりを解消しようと修正・補正のための研究が進むことになった。その目覚ましい研究の一つは、開放系における温度こう配の大きい場合のガス圧力勾配による質量輸送方程式の導入<sup>6)</sup>、及び熱・水分移動に物質・溶質輸送を組み入れたことである<sup>7)-9)</sup>。

本研究は、建設塊材料の乾燥と蒸発に注目して砂、岩、モルタル、ガラス球を用いて、温度と湿度が制御された環境シミュレーション室で実験を行い、その力学的メカニズムを理論的に究明したものである。

## 2. 実験とその方法

本研究の実験は、温度と湿度が同時にコントロールできる環境シミュレーション室において、試料が $10^{-4}$ gまで正確に計量できる高精度重量計による蒸発量測定である。実験装置の概略がFig.1に示されている。まず、環境シミュレーション室(埼玉大学工学部地盤水理実験施設内に設備)は周囲が断熱材でおおわれた床面積(5m×4m=20m<sup>2</sup>)、天井高さ1.8mの室であり、室内は温度-5°C~40°C、湿度(相対)30%~100%まで任意に制御でき、いろいろな温湿度の変化をプログラム入力できる操作盤を備えている。

今回の実験はFig.1のように、環境シミュレーション室の中で行った。試料は寸法40mm×40mm×40mmの薄肉アルミ版よりなる立方体容器に砂、標準砂、及びガラス球を充填した試料、さらに、岩石(火山岩、砂岩、花崗岩)、赤レンガ、モルタル試料は岩石カッターで40

\* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部地盤水理実験施設 (〒338 浦和市中大久保 255)

\*\* 正会員 工博 福井大学助教授 工学部環境設計工学科

\*\*\* Directeur de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique, Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse

\*\*\*\* 学生員 埼玉大学工学部大学院工学研究科

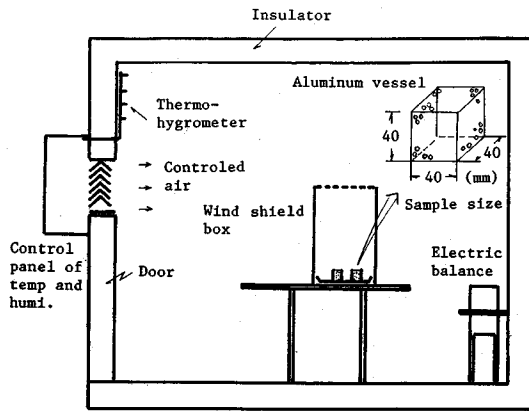


Fig.1 Environmental room and experimental facilities

Table 1 Experimental conditions and properties of porous materials

EXP. NO	Porous material	Mean Temp (°C)	Mean hum. (%)	Dry hum. density (g/cm <sup>3</sup> )	Unit weight (g/cm <sup>3</sup> )	Specific weight	Porosity	Initial V.W.C.	Mean pore size (μm)	Effective pore size (μm)
G-1	Glass sphere	19.5	40.4	1.54	1.65	2.48	0.379	0.379	0.63	-
G-2	Glass sphere	19.5	40.4	1.30	1.65	2.52	0.399	0.399	0.18	-
G-3	Glass sphere	18.8	45.0	1.52	1.91	2.51	0.392	0.392	0.33	-
G-4	Glass sphere	18.7	45.0	1.47	1.84	2.34	0.370	0.370	2.25	-
G-5	Glass sphere	19.5	65.0	1.48	1.85	2.34	0.363	0.363	2.25	-
G-6	Glass sphere	19.5	65.0	1.32	1.63	2.48	0.363	0.363	0.63	-
G-7	Glass sphere	19.5	65.0	1.58	1.95	2.51	0.368	0.368	0.33	-
G-8	Glass sphere	19.5	65.0	1.58	1.95	2.52	0.372	0.372	0.18	-
S-1	Standard sand	19.5	65.0	1.57	1.98	2.64	0.404	0.404	-	0.11
S-2	Silica sand	19.5	65.0	1.57	1.98	2.64	0.404	0.404	-	0.11
R-1	Volcanic rock	19.5	65.0	1.53	1.65	1.63	0.470	0.103	-	-
R-2	Sand stone	19.5	65.0	2.45	1.65	2.51	0.065	0.057	-	-
R-3	Granite	19.5	65.0	2.53	1.91	2.54	0.020	0.014	-	-
R-4	Bed brick	19.5	65.0	1.90	1.84	1.90	0.240	0.228	-	-
R-5	Cement mortar	19.5	65.0	1.81	1.85	1.81	0.260	0.243	-	-

mm×40 mm×40 mm の寸法に切断して、立方体の1面のみを開放した形で他5面は薄肉アルミ版で接着して覆った。試料の上端開放は現象の単純化である。これらの試料はまず実験する前に完全に水で飽和しておくが、それは純水タンクの中に浸し、1週間脱気し続けて飽和にする。特に、岩石のように空隙率が小さい場合には10日間脱気しつづける。

実験手順は次の通り。まず、完全に純水で飽和した試料は上面開放面に家庭用ビニール膜で覆い、Fig.1のように静穏箱に安置し、環境シミュレーション室の温度、湿度を所定の値に設定する。その後ビニール膜を取り除き、30分ごとに超高精度重量測定機(メトラー AT 天びん AT 250)で10秒間で重量を測定する。すべての試料についてこの手順で実験を進めるわけで、約10<sup>4</sup>分程度継続する。

本実験で用いた試料の寸法を小さくした理由は、①超高精度重量測定機の最大計測重量が200gである。②大きい試料を用いると、蒸発・乾燥に伴って試料にひび割れが発生する、③試料が正確に作りやすいこと、による。この実験の最大の特徴は、環境シミュレーション室に

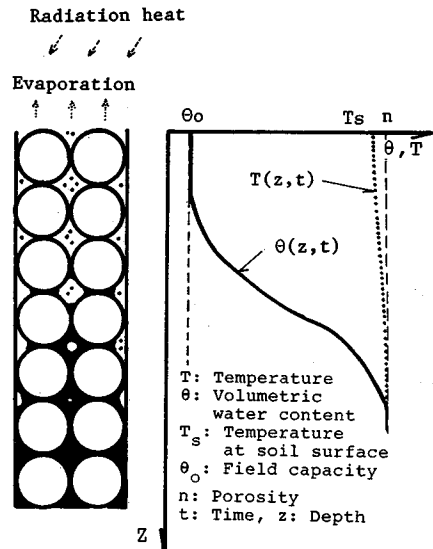


Fig.2 Temperature and water content profiles in porous material

よって温度、湿度が長期に亘って安定して管理できたこと、及び蒸発量が極めて正確に測定できたことである。このように正確な蒸発量が計測できることによって、蒸発・乾燥メカニズムが含水量や毛管水の形態で変わること把握できるものと考えられる。実験に用いた試料の物性はTable 1に示した通りである。

なお、本論文では人工多孔媒体(後述)によって乾燥・蒸発過程と含水形態の変化をマイクロSCOPEを用いて撮影することに成功したので、それらの結果も示した。

### 3. 上面開放多孔媒体塊の乾燥・蒸発メカニズム

本論で対象としたように、立方多孔媒体の上面が大気に開放され、他からの水の供給を断った場合の蒸発・乾燥は基本的に非定常現象である。Fig.2にはある時刻における含水状態、含水率及び温度分布を概念的に描いたものである。初期、完全に水で飽和した状態から始めて、少しずつ開放上面から蒸発が発生し、間隙水が減り、蒸気水と液状水が共存したゾーンが形成される。それに伴って右図のように、含水量分布が乾燥帯から毛管帯を経て飽和帯に至る。一方、温度分布は蒸発潜熱によって上面付近で温度が低下しつつ下部で一定値に近づく。

ここで、具体的に蒸発・乾燥プロセスを知るために、Fig.3及びPhoto.1(a, b, c)が示された。まず、飽和した多孔媒体の上面は初期に直接液体から気体(蒸気水)で放出され、少しずつ表面張力によって気泡が空隙中に形成される。ついで、上部の気泡が成長し、さらに下側に気泡ができ、順次成長しつつ上部含水率は減少してゆく。気泡が成長すると、いわゆる液島(liquid water

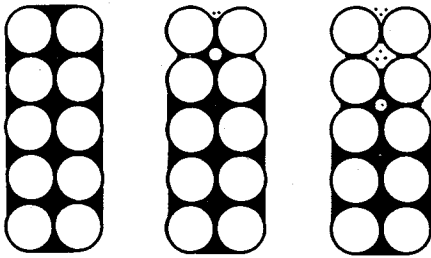
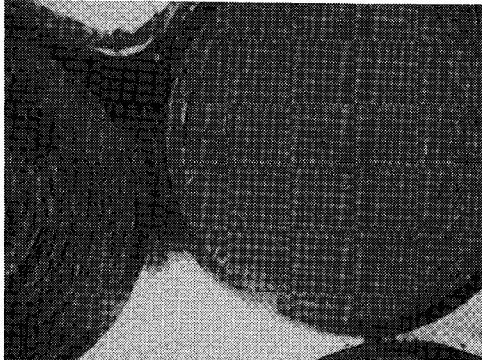


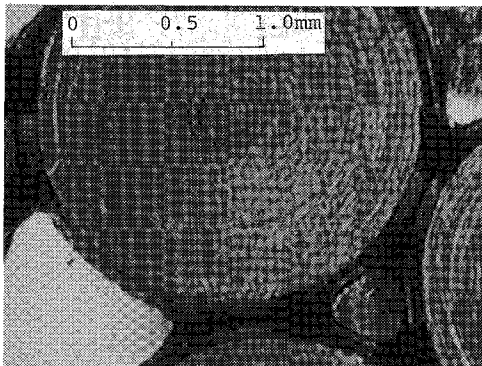
Fig.3 Concept of evaporation and drying process in porous material



(a)



(b)



(c)

Photo.1 Evaporation and drying process in porous material by radiation

island)<sup>1)</sup>ができ、蒸気水と毛管流動によって水は上方に輸送されることになる。ここで、現象的に特に注目したいのは、①含水率が高い飽和状態では間隙水は直接大気に蒸気水の形で蒸発する、②間隙に気泡が形成され、それが間隙空間に内接するほど成長すると、表面張力により水は上方に輸送される、③多孔媒体固体の接触点に液島が出来ると、蒸発した蒸気水による輸送が卓越する、という3つの異なった輸送メカニズムである。Photo.1 (a, b, c) はこれらを実際に示したものである。

蒸発に伴う多孔媒体中の乾燥過程を定性的に調べるために、マイクロSCOPE ((株) キーエンス製、倍率100倍)による可視化実験を行った。多孔媒体には直径1.8 mm、長さ0.03 mのステンレス棒を、カラムは幅0.03 m、高さ0.06 m、奥行0.04 mのアクリル樹脂(厚さ5 mm)を使用した。カラム上方からランプで蒸発を促進させ、乾燥過程をビデオカメラに収録した。結果の一部を時間的に並べて示したものがPhoto.1である。まず、写真上部左の水面が蒸発によって低下し、メニスカスが形成される(Photo (a))。奥行方向の蒸発の不均一性によって、2つの多孔媒体が接する部分の下側で気泡が発生する(Photo (b))。気泡が発達し、最終的には多孔媒体が接する部分すべてに、メニスカスが形成される(Photo (c))。

#### 4. 理 論

上面開放による間隙水量分布、温度の経時変化及び蒸発量を力学的に知り、質量と熱輸送現象メカニズムを明らかにするため、次のような定式化を行う。そうすれば、測定が困難な蒸発量、含水分布及び温度の遷移プロセスを理論的に究明することが可能となる。

##### (1) 蒸発・乾燥過程における多孔媒体の熱エネルギーおよび質量輸送方程式

蒸発・乾燥過程における熱エネルギーおよび質量輸送方程式の一般形は次式で表現される<sup>10)</sup>。

##### a) 熱輸送方程式

$$J \frac{\partial \psi}{\partial t} + C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{vw} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) + (c_l q_l + c_v q_v) \frac{\partial T}{\partial z} + I_s + S \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $I_s$  : 境界を通じて多孔媒体中を出入りする熱エネルギー、 $S$  : 多孔媒体中の熱エネルギーの sink または source、 $D_{vw}$  : 等温水蒸気拡散係数、 $c_l$  : 液状水の比熱、 $q_l$  : 液状水マスフラックス密度、 $c_v$  : 水蒸気の比熱、 $q_v$  : 水蒸気マスフラックス密度、 $T$  : 温度、 $\psi$  : 吸引圧、 $z$  : 鉛直方向座標、 $\lambda$  : 熱伝導率、を表す。

時間項にかかる係数は

$$\left. \begin{aligned} J &= \Delta h_v \rho_1 \left[ a \rho_0 h g / \rho_1 R T \right. \\ &\quad \left. - \rho_v / \rho_1 (\partial \theta_1 / \partial \phi) \right] \\ C &= C_a + \Delta h_{va} \beta h (\beta = d\rho_0 / dT) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、 $a$ ：含空率、 $\rho_1$ ：液状水密度、 $\rho_v$ ：水蒸気密度、 $\Delta h_v$ ：蒸発潜熱、 $R$ ：ガス定数、 $g$ ：重力加速度、 $\theta_1$ ：液状水の体積含水率、 $\rho_0$ ：飽和水蒸気密度、 $h$ ：相対湿度、 $C_a$ ：見かけの体積熱容量、 $C$ ：蒸気移動を考慮した多孔媒体の体積熱容量、を示す。

b) 水分輸送方程式

$$F \frac{\partial \phi}{\partial t} + G \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} - E_s \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $E_s$ ：境界を通しての蒸発・凝縮速度、 $D_T$ ：熱水分拡散係数、 $D_\phi$ ：等温水分拡散係数、 $K$ ：透水係数、であり、時間項にかかる係数は

$$\left. \begin{aligned} F &= \partial \theta / \partial \phi |_{\tau} \\ G &= a h \beta / \rho_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

となる。なお、式(1)～(4)の誘導および式中に含まれる諸係数およびパラメーターの詳しい内容は参考文献10)を参照して頂きたい。

本研究で対象とするような温度勾配下の多孔媒体中の熱・水分輸送方程式は式(1)および(3)の $E_s$ 、 $I_s$ および $S$ を落とすことにより与えられる。すなわち、

$$J \frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{vv} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + (c_1 q_1 + c_v q_v) \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots (5)$$

$$F \frac{\partial \phi}{\partial t} + G \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_\phi \frac{\partial \phi}{\partial z} + K \right) \dots\dots\dots (6)$$

(2) 多孔媒体表面における熱エネルギーおよび質量収支

多孔媒体表面(地表面)における熱エネルギーおよび質量収支は多孔媒体中の温度・水分分布のみならず、外部(気象)条件に左右され、蒸発量も規定するので説明を加える。

a) 熱エネルギー収支

多孔媒体表面(厚さ： $\Delta z_s = \Delta z / 2$ の表面要素)における熱エネルギー収支式は実験条件上、輻射熱(短波放射)を無視することができるので、次のように表される。

$$Q_s = H_s + \Delta h_v M_v \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 $Q_s$ ：多孔媒体中への伝達エネルギー(上向き正)、 $H_s$ ：空気流(自然対流)による顕熱(上向き正)、 $M_v$ ：蒸発マスフラックス密度(上向き正)、である。

多孔媒体中への伝達エネルギー $Q_s$ は次式のように離散化される。

$$Q_s = q_h + (\rho c) (T_s - T_s^0) \Delta z_s / \Delta t + J_s (\phi_s - \phi_s^0) \Delta z_s / \Delta t \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$(\rho c)$ ：多孔媒体の体積熱容量(=C)、 $T_s$ ：表面温度、 $T_s^0$ ：1つ前の時間ステップにおける $T_s$ 、 $\phi_s$ ：表面吸引圧、 $\phi_s^0$ ：1つ前の時間ステップにおける $\phi_s$ 、 $J_s$ ：表面要素における時間項の係数 $J$ 、 $\Delta t$ ：時間間隔、 $q_h$ ：表面下 $\Delta z_s$ の面を出入りする熱エネルギーフラックスである。

$q_h$ は熱伝導、顕熱および潜熱の和として、

$$q_h = -\lambda (T_s - T_2) / \Delta z + (c_1 q_1 + c_v q_v) (T_s - T_0) + \Delta h_v q_v \dots\dots\dots (9)$$

となる。ここに、 $T_2$ ：表面下 $\Delta z_s$ の温度、 $T_0$ ：基準温度である。式(1)と比較すれば、 $I_s = Q_s / \Delta z_s$ となることが判る。ただし、式(8)の $T_s$ は地表面下 $\Delta z_s / 2$ での熱容量と熱エネルギーの時間変化で近似されている。

次に、蒸発マスフラックス密度 $E$ は水表面蒸発理論に従って式(10)を提案する。

$$E = P_0 \cdot D_{atm} \xi \cdot \ln(P_{vs} / P_{va}) / (D T_s R_v) \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 $D_{atm}$ ：水蒸気拡散係数、 $\xi$ ：境界表面の屈曲による蒸発面積の補正係数、 $P_{vs}$ ：境界表面の蒸気圧、 $P_{va}$ ：空気蒸気圧、 $D$ ：境界層厚、 $P_0$ ：大気圧、 $R_v$ ：水蒸気のガス定数、である。ここで、境界層厚 $D$ は本来、蒸気圧の境界層厚とすべきであるが、蒸気圧が温度の関数であることから、佐藤・中山の実験結果<sup>11)</sup>を基に温度境界層を用いて $D = 0.5 \text{ cm}$ とし、 $\xi$ は実験結果に適合するように $\xi = 1.9$ を与えた(本実験の空率 $\epsilon = 0.42$ に近い単純立方型では幾何形的に $\xi = 1.79$ )。

最後に、自然対流による顕熱は表面温度と空気温度との差に比例するとして、以下の式で表現される。

$$H_s = h_s (T_s - T_a) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、

$h_s$ ：自然対流による熱伝達率、 $T_a$ ：空気の温度、を表す。 $h_s$ は建築環境工学<sup>12)</sup>に従って、 $h_s = 3.49 (\text{W}/\text{m}^2\text{K})$ とする。

b) 質量収支

多孔媒体表面における質量保存式は蒸発量を考慮して式(3)を解くことになり、次のようになる。

$$\theta_s = \theta_s^0 - G_s (T_s - T_s^0) + (v_{w2} - v_e) \Delta t / \Delta z_s \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $v_e$ ：蒸発速度(=  $M_v / \rho_1$ ) (上向き正)、 $\theta_s$ ：表面要素の体積含水率、 $\theta_s^0$ ：1つ前の時間ステップにおける $\theta_s$ 、 $v_{w2}$ ：表面下 $\Delta z_s$ における水分(液状水+蒸気水)の移動速度(上向き正)、 $G_s$ ：表面要素における時間項の係数 $G$ である。

従って式(3)との比較により、 $E_s = v_e / \Delta z_s$ となる。

(4) 計算手順

計算の手順を以下に列挙する。

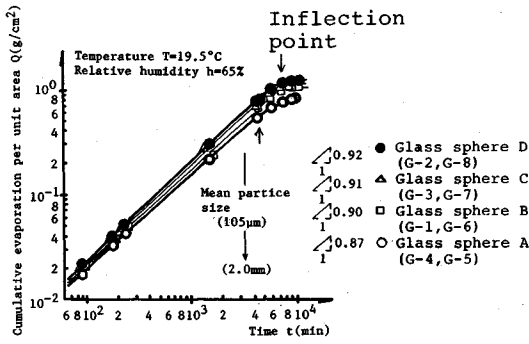


Fig. 4 Time change of cumulative evaporation (Glass sphere A ~Glass sphere D)

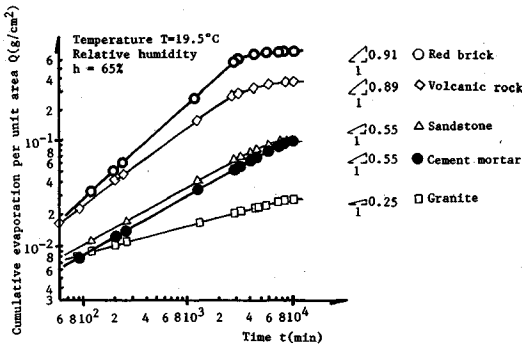


Fig. 5 Time change of cumulative evaporation (Reds brick, Volcanic rock, Sandstone, Cement mortar, Granite)

(1) 多孔媒体表面要素に関する熱エネルギー収支式(式(7)および式(8))と質量保存式(式(12))を連立させ、収束した時点で任意時間ステップにおける  $\theta_s$  と  $T_s$  を求める。

(2) この両者の値を境界値とし、多孔媒体中の熱・水分輸送方程式(式(5)と(6))を解くことにより、多孔媒体中の温度・水分分布が同時に得られる。

(3) 上記(1)と(2)を繰り返すことにより、蒸発量・温度分布・水分分布の経時変化が求まる。

計算には有限要素法を用いたが、温度および水分勾配の影響は小さいので風上重み付き残差法<sup>10)</sup>によらずガラキン法を採用した。

なお、計算結果の妥当性は(十分条件ではないが)表面蒸発が多孔媒体中の水分量の減少量に等しいことから評価できる。

### 5. 実験結果及び理論との比較

多孔媒体の蒸発・乾燥過程が進み、完全に乾燥してしまうまで、実験を続け蒸発が終了する。Fig. 4及びFig. 5はすべての蒸発・乾燥実験による上面の単位面積当りの積算蒸発量の経時変化を示したものである。いずれの積算蒸発量も一定の割合で増加するが、ある時点に

なると、増加率が減少している。また、Fig. 4に示されたガラス球粒状多孔媒体の場合、粒径が小さいほど、蒸発量が大きく、蒸発速度は粒径が大きいほど、小さくなっている。しかし、ある程度時間が経過すると、すべての多孔媒体について、蒸発率が減少している。しかも、ガラス球の場合、粒径が大きいほど、早期に蒸発率の減少点が現れている。図中、粒径の最も小さいガラス球の減少点は↓で、最も大きいその点は↑で示しており、その差はおよそ  $2 \times 10^4$  minである。これらの積算蒸発量の経時変化はすでに述べたFig. 3、及びPhoto.1(a, b, c)の間隙水の含水形態と水の輸送メカニズムと深い関係をもつものである。つまり、蒸発開始からある期間は粒径が小さい(つまり毛管ポテンシャル  $\psi$  が大きい)場合、上面の含水率の低下に伴う上方への水分輸送はほとんど表面張力による液状水輸送によることになる。すなわち、Fig. 4におけるガラス球多孔媒体の積算蒸発量は粒径が小さいほど、蒸発量も蒸発率も大きいのは、液状水による表面張力(マトリックスポテンシャル)による水分輸送に支配されることを明快に示している。このことは多孔媒体の乾燥を考える場合に極めて大切であり、その力学モデルと定式化を行う際に基本となる現象と受け止める必要がある。

つぎに、多孔媒体の蒸発・乾燥メカニズムをさらに詳細に知るため、Fig. 6には珪砂、ガラス球、及び砂岩について蒸発率の経時変化を表している。これらによると、粒径(間隙規模)が大きいと、蒸発率の経時変化が急激となっている。蒸発率は一定で進み、急激に低下し、さらに減少しつつやがてゼロ(つまり、乾燥)に至る。このことは後述するように蒸発・乾燥による間隙水の形態変化と液状水、蒸気水による水分輸送プロセスを的確に説明していることになる。

さらに、Fig. 7は蒸発率と空隙率の関係をすべての実験結果についてまとめたものである。明らかに、空隙率が増すにつれ、蒸発率は大きくなっている。

上述した実験結果をもっと科学的に知るためにはすでに示した理論の力を借りる必要がある。

砂に関してのみ不飽和特性(水分保水曲線・不飽和透水係数と体積含水率の関係)が判っているので<sup>10)</sup>、計算結果と実験結果の比較は砂について行う。蒸発量の経時変化は測定されているから、最初に積算蒸発量の時間変化に関する計算と実験結果の比較を行う。それがFig. 8である。両者の関係は両対数グラフで表される。計算結果は表面蒸発および砂中内水分分布から求めたものであるが、両者は互いに良い一致をみており、連続条件は満たされている。全般に計算値は実験値よりも小さめではあるが、時間に伴う蒸発量の通減は良好に再現されている。Fig. 6、およびFig. 9より、恒率蒸発期間(乾燥の第1段階)、十分な時間経過後の緩やかな減率蒸発期間

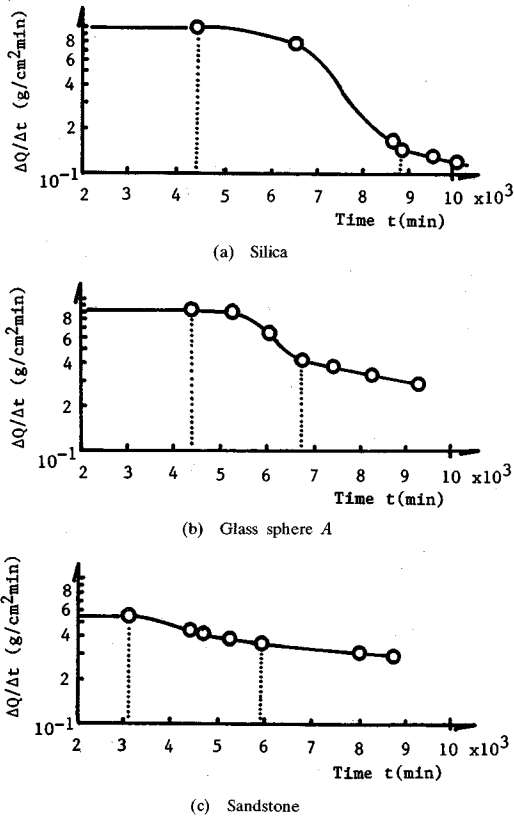


Fig.6 Time change of evaporation rate (Silica sand, Glass sphere, Sand stone)

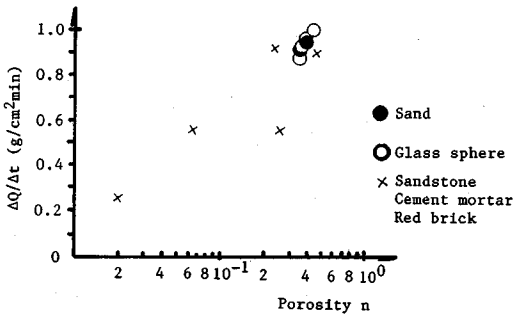


Fig.7 Relationship between evaporation rate and porosity

(乾燥の第3段階), およびその間の急な減率蒸発期間(遷移期間であり乾燥の第2段階)は明瞭である. さらに蒸発速度と時間との関係を図9に表す. この場合, 一定蒸発期間(約80時間)の蒸発速度がポテンシャル蒸発速度に対応する. 低蒸発量期間である180~200時間以降の蒸発速度はポテンシャル蒸発速度の約1/20まで減少する.

蒸発・乾燥過程のメカニズム解明のために, 計算による砂カラムに沿った温度分布および水分分布の経時変化を図10およびFig.11に示す. 温度分布は砂カラムの

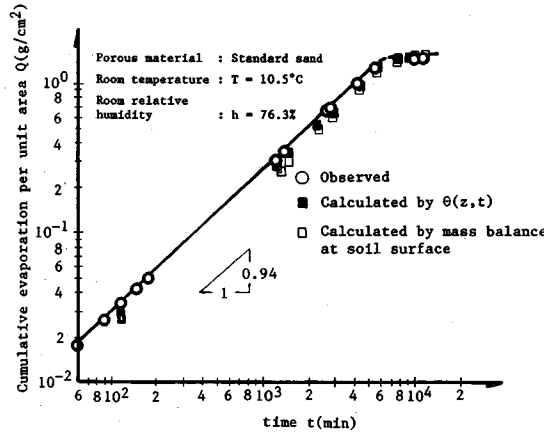


Fig.8 Comparison of experimental and calculated values on cumulative evaporation

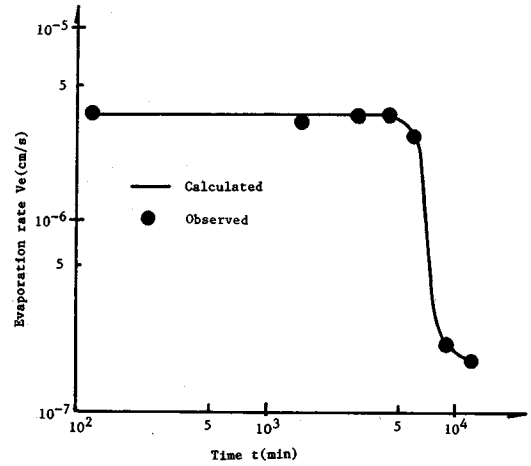


Fig.9 Comparison of experimental and calculated values on evaporation rate

内部, 外部とも人為的な熱源が無いから, 蒸発による潜熱効果によって蒸発開始後すぐにカラム内温度は下がり, その後周囲温度に漸近していく. また, 温度はサンプルの厚さが薄いのでどの時間をとっても温度勾配は小さく, 質量や熱エネルギー輸送に及ぼす温度勾配の影響は無視できる. 興味深いのは水分分布である. 蒸発の初期, 乾燥は地表付近に集中するために, 大きな水分勾配が地表付近に形成される. その後, 乾燥は砂カラム深くまで進行して, やがて水分勾配は消失する. ただし, 変曲点を持つような水分分布は現われない. 水分分布と蒸発率の時間変化を比較すれば, 砂層上部の体積含水率が低下するために水分勾配の大きな水分分布が構成される期間が, 恒率蒸発期間に対応している. すなわち, この水分(吸引圧)勾配がポテンシャル蒸発能に相当する水分の補給を可能にさせる. その後, カラム低部の体積含水率が減少して(表面付近の体積含水率も徐々に減少),

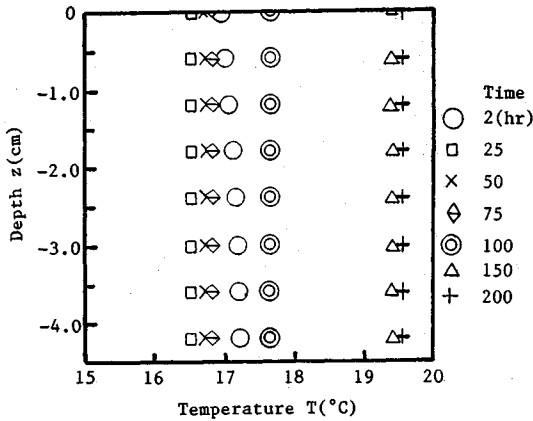


Fig.10 Time change of temperature profiles

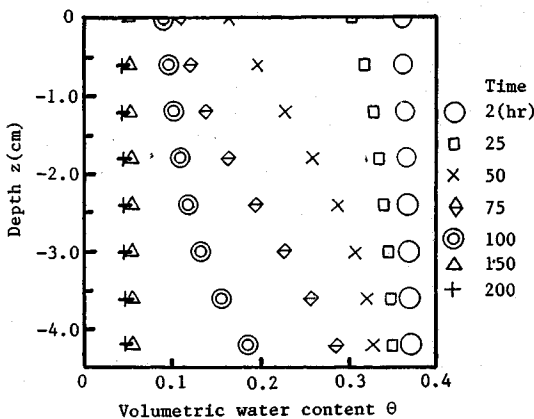


Fig.11 Time change of volumetric water content

水分勾配が観察されなくなるまでの間がほぼ遷移期間とみなせる。それ以降は緩やかな減率蒸発期間に属する。このように、水分分布と蒸発率は密接に関係している。

以上の現象は Pearse et al.<sup>13)</sup> や Gardner & Hillel<sup>14)</sup> により指摘されているが、本モデルにより乾燥の第1段階から第2段階までの過程が連続的に再現できた。また、Gardnerの積算蒸発量の経時変化を解析するモデル<sup>15)</sup> (乾燥第2段階の積算蒸発量が時間の1/2乗に比例する)は限られた条件においてのみ使えることが本研究で判明した。本解析によれば、多孔物質の不飽和特性が知れば、その特有の蒸発乾燥過程および蒸発速度の推量可能と考える。

## 6. 結 論

有限な大きさの砂カラムからの蒸発・乾燥過程が蒸発開始から十分な時間にわたって計算された結果、蒸発率と多孔媒体中の水分分布との関係が具体的に示された。さらに、解析と可視化実験によるミクロ的な観察を含めて乾燥過程のメカニズムが明らかとなった。得られた結

論を以下に列挙する。

- (1) 地表面が毛管帯にあるとき、蒸発・乾燥過程は3つの段階(一定の蒸発段階、遷移段階(急な蒸発量減段階)、緩やかな蒸発量減段階)を経る。
- (2) 温度勾配の影響が無いとき、乾燥過程の段階的变化すなわち蒸発率の時間的变化は水分分布と密接に関連しており、表面乾燥に伴う水分勾配でポテンシャル蒸発能が規定されることが、本解析により明示された。換言すれば、蒸発率に及ぼす外部環境条件の影響は大きい。
- (3) 遷移段階は水分勾配の減少と共に始まり、水分勾配の無くなる時点で緩やかな減率蒸発段階へと移行する。
- (4) 従来用いられてきた多孔媒体中の水分移動則(間隙水が連続して移動するとして導入されたマトリックスポテンシャルに比例した水分移動則)はPendular状態の低含水率の場合には適用できないため、新たな蒸気移動のモデルが必要となる。

なお、本研究を進めるに当たって埼玉大学工学部地盤水理実験施設東貴司氏より実験協力を得たことを記して、心よりお礼を申し上げます。また、本研究は著者の一人、トゥールズ工科大学、流体力学研究所(CNRS, Centre National de Reserch Scientifique)ボリス所長が、日本学術振興会外国人招聘研究者として平成3年9月25日~10月30日まで埼玉大学工学部地盤水理実験施設に共同研究のために滞在した時に進めた研究の一部である。ここに記して日本学術振興会と招聘協力研究者:堀川清司(埼玉大学長)、林 泰造(中央大学名誉教授)、玉井信行(東京大学教授)、日野幹雄(東京工業大学教授)、中川博次(京都大学工学部長)の各先生に心よりお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) Philip, J.R. and De Vries, D. A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Trans. Amer. Geophy. Union, Vol.38, pp.222~232, 1957.
- 2) Luikov, A.V. : Heat and mass transport in capillary porous bodies, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- 3) Fisher, A. E. : Some factors affecting the evaporation of water from soil, J. Agric. Sci., Vol.8, pp.121~143, 1923.
- 4) Smith, W. O. : The thermal transfer of moisture in soils, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol.24, pp.511~523, 1943.
- 5) Jones, H.E. and Konke, H. : The influence of soil moisture tension on vapor movement of soil water, Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol.16, pp.245~248, 1952.
- 6) Bories, S.A. : Fundamentals of drying of capillary porous bodies, convective heat and mass transfer in porous media, Kluwer.
- 7) Sato, K., Fukuhara, T. and Bories, S. : Dynamic analysis of heat, mass and solute transfer due to evaporation from a bare soil, Proc. Heat Transfer 1990, Jerusalem, Vol.4,

- 1990.
- 8) 中野政詩・宮崎 毅・前田志伸：蒸発に伴う土壌の水分、塩分、熱の移動、土壌の物理性，pp.30～39, 1988.
  - 9) 中野政詩：土の物質移動学，東大出版会，pp.87～118, 1991.
  - 10) 福原輝幸・Pinder, J. F.・佐藤邦明：表面乾燥過程における飽和一不飽和多孔媒体中の熱・水分完全連成移行解析へのアプローチ，土木学会論文集，第423号／Ⅱ-14，pp.111～120, 1990.
  - 11) 佐藤邦明・中山浩一：乾燥過程における飽和一不飽和多孔媒体中の蒸発に関する研究，土木学会 第45回年次学術講演会概要集，Ⅱ-78，pp.208～209, 1990.
  - 12) 最新建築環境工学，田中俊六，井上書院.
  - 13) Pearse, J.F., Oliver, T.R. and Newitt, D.M. : The mechanism of the drying of soil : Part 1, The force giving rise to movement of water in granular beds during drying, Trans. Inst. Chem. Eng. (London), Vol.27, pp.1～8, 1949.
  - 14) Gardner, W.R. and Hillel, D. : The relation of external evaporative conditions to the drying of soils, J. Geophys. Res., Vol.67, pp.4319～4325, 1962.
  - 15) Gardner, W.R. : Solutions of the flow equation for the drying of soils and other porous media, Soil Sci. Soc. Am. Proc. Vol.23, pp.183～187, 1959.

(1992.7.2 受付)

## FUNDAMENTAL STUDY ON DRYING PROCESS OF SATURATED GRANULAR POROUS MEDIA AND ROCKS

Kuniaki SATO, Teruyuki FUKUHARA, Serge BORIES and Seiji TAKEDA

Evaporation process from granular porous media and rocks under artificially regulated conditions is studied experimentally and theoretically. Evaporation volume from opening surface of cubic samples is measured in high accuracy, and the decay process of void water by evaporation with elapsed time is visualized by means of a microscope apparatus. It is disclosed experimentally that evaporation occurs through three different steps of water content in voids, and the evaporation process can be explained by numerical solution of coupled heat and mass equations.