

不飽和多孔媒体の乾燥過程における毛管流動と伝熱に関する実験的研究
Experimental Study on Unsaturated Flow and Heat Transfer for Drying Process

埼玉大学 工学部 正員 佐藤 邦明
 榑大林組 技術研究所 " 西林 清茂
 榑大林組 技術研究所(埼玉大学研究生) " 須藤 賢

はじめに

水分の移動現象における多孔媒体の乾燥・湿润過程や伝熱は、基本的に水と熱の相互作用に根ざす興味深いものである。この現象について従来いくつかの研究が知られている。^{1),2),3)}これらは広義には熱を伴う不飽和流の現象と見ることができる。しかし、現象に係わる係数やパラメーターが多いためまだ十分究明されているとは言えない。そこで、本研究は風と熱による標準砂とシルト質細砂の不飽和水分移動の現象に注目して乾燥メカニズムを究明することを目的に室内実験を試みた。いくつか有用な成果を得られたと思われるのでここに報告する。

1. 実験装置と実験方法

(1) 実験装置

本研究に使用した実験装置は、図-1、写真-1、写真-2に示すように、装置本体と中性子源と検出装置とから構成されている。

実験装置の詳細について説明すると、図-1中、装置の各部は番号で対応し、①試料モールドは透明板の柱状容器(縦0.1m、横0.1m、高さ0.6m)で、断熱のために②の断熱材(発泡スチロール)で覆っている。試料モールドの上端部には試料上面に熱風が送れるように⑪の風洞円筒管を設置しており、下端部には金網とステンレス多孔板を設置し、その下部に下端水槽がある。風洞円筒には風を送る⑬の冷・温風機を設置し、その風洞内の温度・湿度を測定するために⑫の温・湿度センサーを設置し、その経時変化を⑬の検出器、⑭の記録器により測定する。また、試料モールドの両側面には③の温度センサーと⑤の圧力変換器を取り付ける孔がそれぞれ0.05m間隔にあってあり、各々が任意の位置に設置できるようにしている。経時的な温度と圧力水頭は④の温度自動測定記録装置と⑥の圧力自動測定記録装置で測定する。さらに、圧力変換器の取り付け部の先端にはセラミックディスクを取り付け、測定時には水で飽和させた状態で設置を行う。試料内の体積含水率の測定は、低レベルの⑦の中性子源

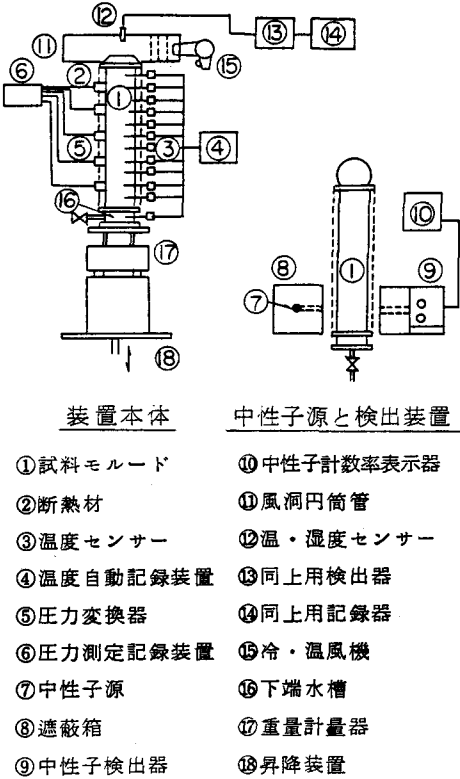
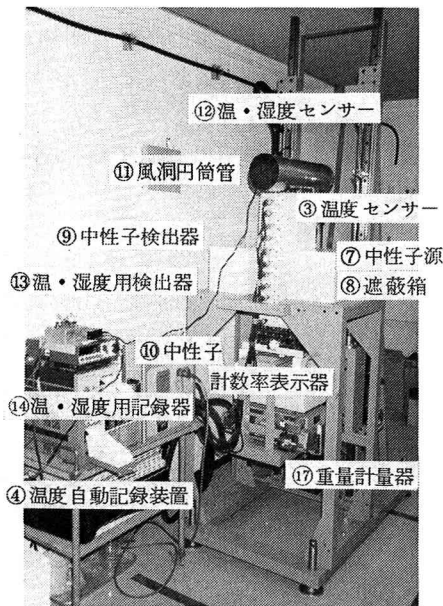
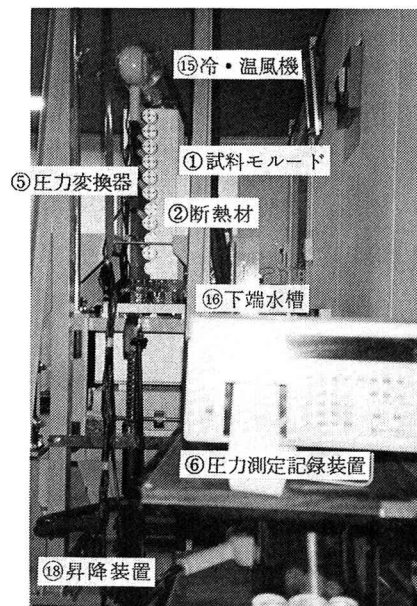


図-1 実験装置の概略

(Cf-252, 100μCi以下)を使用し、測定位置において正確に測定できるように⑧の減速材により中性子を絞る、⑨と⑩の検出装置により中性子計数率を測定することにより等価含水量に変換して求める。各測定位置において経時的な体積含水率の変化を測定するために、中性子測定装置の間を試料モールドが上下移動可



写真－１ 実験装置の正面



写真－２ 実験装置の裏面

能のように⑬の昇降装置を設置している。また、試験中の蒸発量を知るために、⑭の重量計量器で試料重量を定時的に測定できる。

(2) 実験試料

実験に使用した試料は、豊浦標準砂と埼玉県戸田産のシルト質細砂である。これらの試料の物理的性質を表－１に示す。シルト質細砂については、試料モールド内に均一に充填できるように 420 μ フルイ通過分を実験試料とした。

試料の作製方法は、試料モールドに乾燥した試料を少しずつ入れ、密度が均等になるように突き棒で約 0.01m ごとに突き固めて作製した。その後、試験試料を脱気により水で飽和させた。試料作製後の乾燥密度および湿潤密度も表－１に示している。

(3) 実験方法

本実験は完全に飽和させた試料の上端部に温風を送り続ける乾燥実験である。

実験方法は、気乾試料を試料モールドに充填後、試料下部から水を給水し脱気により完全に試料を飽和させる。その時の試料温度は 23.0℃であった。その後、定水位透水試験を行い試料の飽和透水係数を求める。その結果は表－１に示した。定水位試験終了後、下排水槽のバルブを閉めて試料モールド上端に風洞円筒管を設置し、冷・温風機により温風を試料上面に送風する。

測定項目としては、試料の深さ方向の温度と圧力、試料の水分量、試料全体の重量および風洞円筒管内の

表－１ 試料の物理的性質

試験項目	豊浦標準砂	シルト質細砂
比重	2.642	2.723
4.76 mm以上の粒子	—	2.36 %
粒細砂分 4.76～2.00 mm	—	0.25 %
度粗砂分 2.00～0.42 mm	0.05 %	0.93 %
組細砂分 0.42～0.074 mm	99.27 %	52.98 %
成シルト分 0.074～0.005 mm	0.68 %	28.00 %
粘土分 0.005 mm以下	—	15.48 %
乾燥密度	case 1 1554 kg/m ³ case 2 1574 kg/m ³	1378 kg/m ³ —
湿潤密度	case 1 1955 kg/m ³ case 2 1996 kg/m ³	1826 kg/m ³ —
飽和透水係数	case 1 1.92×10^{-4} m/s case 2 1.94×10^{-4} m/s	5.85×10^{-7} m/s —

温度と湿度である。

試料上面に送風した温風については、標準砂試料は平均風速 2.09m/s で温度 55.0°C 、湿度 6.5% の case1 と平均風速 2.73m/s で温度 69.0°C 、湿度 8.0% の case2 の2種類であり、シルト質細砂は平均風速 2.20m/s で温度 57.5°C 、湿度 6.5% の1種類である。なお、実験は 23.0°C の恒温室で行った。

2. 実験結果とその性質

(1) 蒸発量と乾燥前線

図-2は試料重量の変化量を断面積で割って求めた積算蒸発量と時間の関係を示したものである。標準砂について見ると、初期時点から蒸発量は大きくなり、蒸発強度（蒸発量/時間）は温度、風速の大きい case2 のほうが大きい。また、ある時間経過すると蒸発強度は小さくなり、その変化点の経過時間は、case1 で約100時間～120時間程度、case2 で約40時間～50時間程度と温度、風速の大きいほうが早く生じている。次に、シルト質細砂について見ると、初期においては標準砂より積算蒸発量は小さく、経過時間150時間においては標準砂試料の積算蒸発量より大きくなっている。この要因の一つは経過時間72時間で試料下部の下端水槽に空気が混入し始めたことによる。

図-3は乾燥前線の移動距離と時間の関係を示したものである。乾燥前線は試料モールド側面から試料の湿潤状態を肉眼によって観察したものである。シルト質細砂については乾燥前線は観察し得なかった。図-3より、標準砂の乾燥前線は、温風条件で温度・風速の大きい case2 のほうが大きく低下していることがわかる。この傾向は積算蒸発量で述べた傾向と類似している。

(2) 試料内の温度分布

各試料の温度と経過時間の関係を図-4に、深度と温度の関係を図-5に示す。図-4(a)、図-5(a)は標準砂 case1 の場合で両図より温度の変化過程を見ると、次のようである。試験開始とともに深度 0.25m を境にしてそれ以浅は温度が上昇し、それ以深は温度が低下する。そして、約10時間経過後、温度変化は緩やかになり、経過時間約100～120時間において急激に上昇する。その後、各深度の温度変化は緩やかになり一定値に近づく。標準砂 case2 の場合については図-4(b)、図-5(b)より、温度の変化過程は標準砂 case1 と類似している。しかし、温風の温度、速度が大きいため、標準砂 case2 の場合は標準砂 case1 に比べて温度が変化する時間は早く、温度の変化量も大きくなっている。例えば、標準砂 case2 が急激な温度変化をする経過時間は約40～50時間である。次に、図-4(c)、図-5(c)のシルト質細砂の場合について見ると、初期の温度の変化過程は標準砂と同様の傾向にある。しかし、シルト質細砂は標準砂のように急激な温度上昇の現象

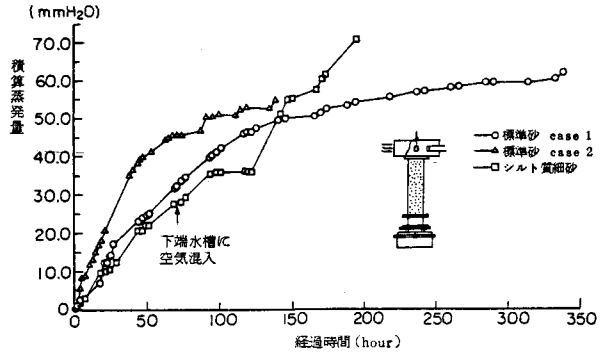


図-2 積算蒸発量の経時変化

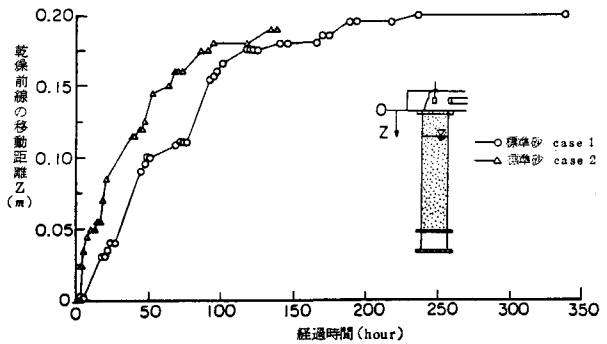
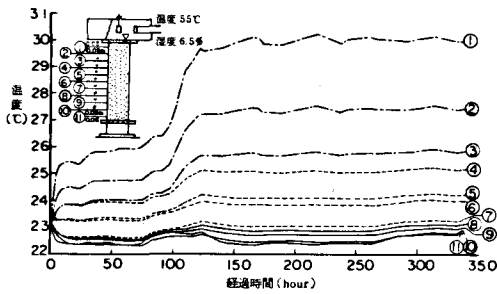
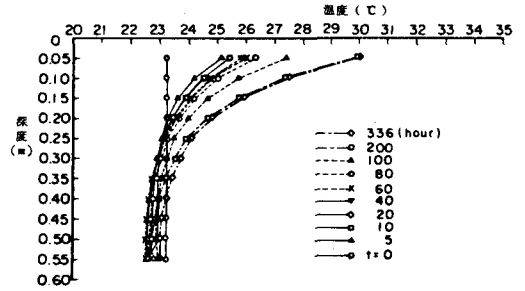


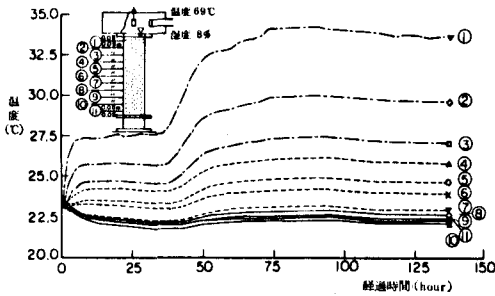
図-3 乾燥前線と経過時間の関係



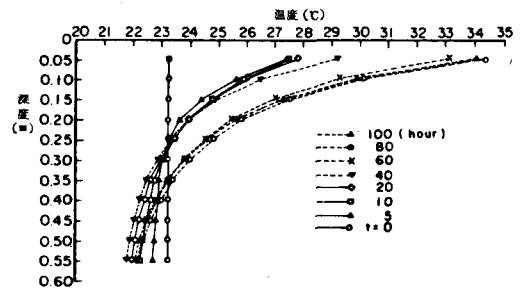
(a) 標準砂 (case 1) の場合



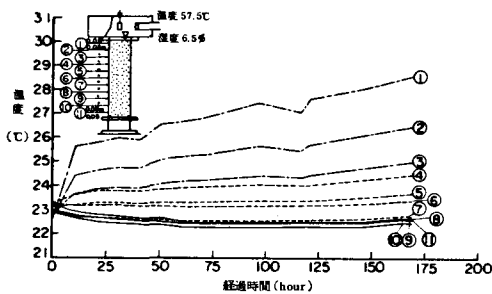
(a) 標準砂 (case 1) の場合



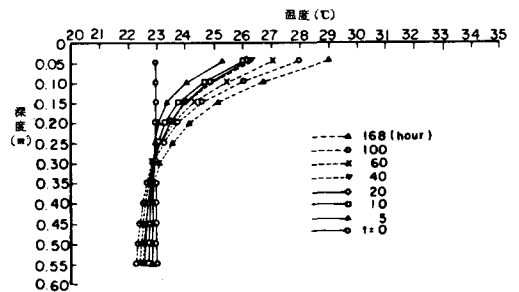
(b) 標準砂 (case 2) の場合



(b) 標準砂 (case 2) の場合



(c) シルト質細砂の場合



(c) シルト質細砂の場合

図-4 温度と経過時間の関係

図-5 深度と温度の関係

は見られず、温度変化は徐々に上昇する傾向にある。このように温度が複雑に変化するの蒸発に伴う気化熱により温度が下がるためと考えられる。特に、標準砂の急激な温度変化時点は、図-2からの蒸発強度が変化する時点と同じである。

(3) 試料内の圧力分布

図-6は標準砂 case1の場合の圧力水頭と経過時間の関係の一例を示したものである。また、図-7は各試料における深度方向の圧力水頭を示している。標準砂 case1についての圧力水頭の変化過程を図-6と図

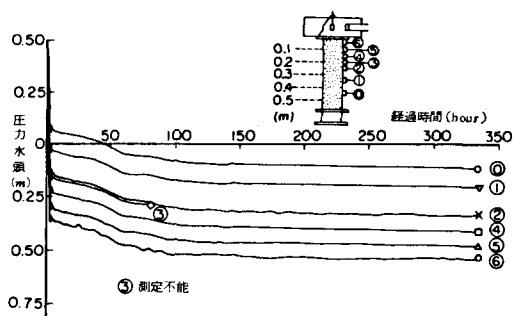
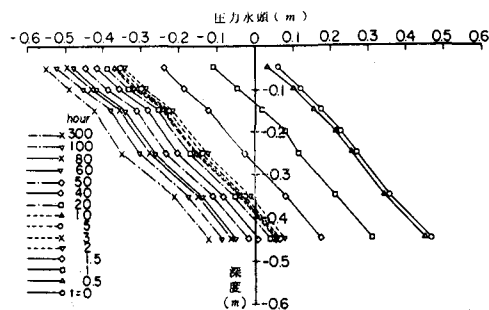


図-6 圧力水頭と経過時間の関係(標準砂 case1の場合)

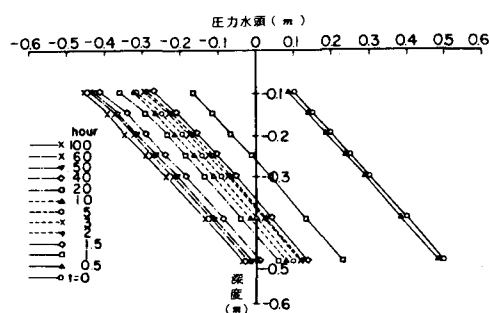
一 7(a)により見ると次のようである。試験前の圧力水頭は静水圧分布している。温風を送風開始後約30分程度までは、圧力水頭はほぼ静水圧分布に近い状態になっている。その後、圧力水頭は2時間経過後まで急激に低下し、その変化が落ちつく経過時間4.5時間で圧力水頭は若干上昇する。それから、約60時間経過程度まで圧力水頭は減少し、その後、緩やかな減少過程となる。また、深度方向の圧力水頭の分布はほぼ直線分布を示しており、経時的な変化は静水圧分布の勾配でほぼそのまま負の側へ移行している。そして、最終時点では試料下端部における圧力水頭は0程度と推定される。

また、図-7 (b)より標準砂 case2 について見ると、圧力水頭の変化過程は標準砂 case1 と同様である。ただし、標準砂 case2 は標準砂 case1 に比べて風速条件の温度が高く、風速も大きいために、初期時点での圧力水頭が若干上昇する時間およびその後の緩やかな減少過程となる時間が早い傾向にある。

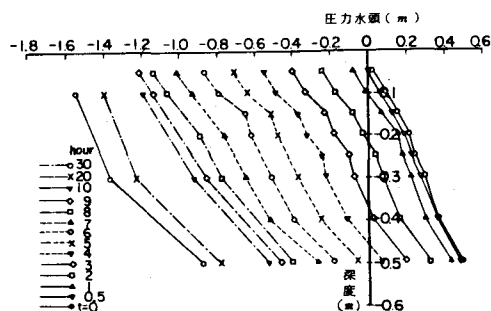
次に、図-7(c)のシルト質細砂について見ると、シルト質細砂の圧力水頭の変化過程は上述した標準砂の圧力水頭の初期の変化過程とは同様の傾向であるが、その後は異なる。シルト質細砂の圧力水頭の変化は経過時間とともに負の側へほぼ直線分布で緩やかに移行している。また、シルト質細砂の負の圧力水頭は、測定結果が少ないためにまだ進行過程中的のデータと思われるが、それでも標準砂に比べて大きく、図-7(c)の経過時間7時間以降の圧力水頭の深度分布から推定すると、毛管力によって試料下部の貯留部に負圧が働いているものと考えられる。



(a) 標準砂 (case 1) の場合



(b) 標準砂 (case 2) の場合



(c) シルト質細砂の場合

図-7 深度と圧力水頭の関係

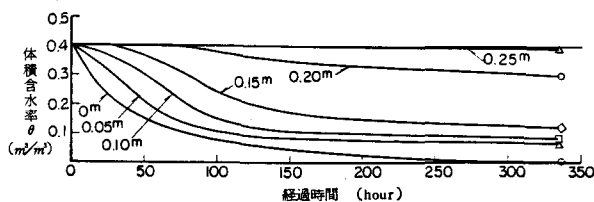


図-8 体積含水率と経過時間の関係(標準砂 case1 の場合)

(4) 試料内の体積含水率の分布

図-8 は体積含水率と時間の関係の一例とし

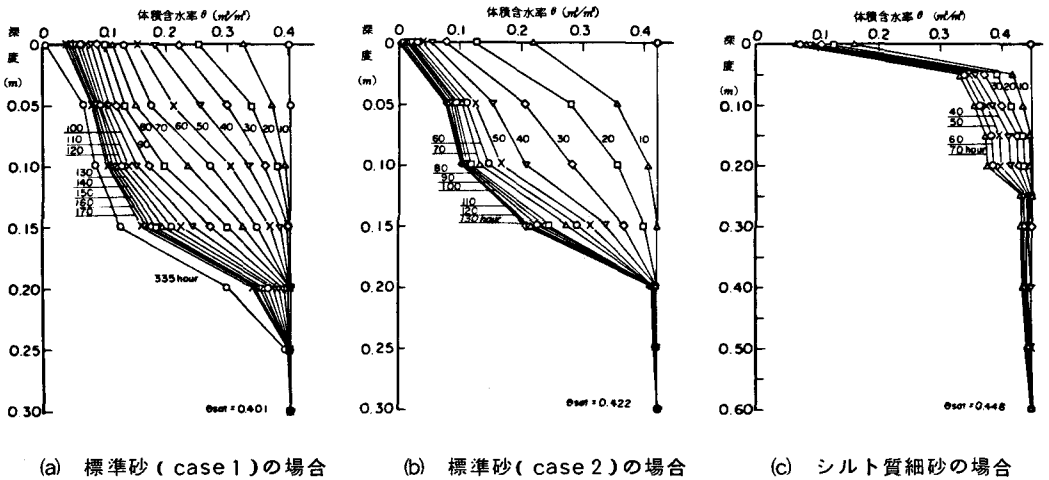


図-9 各試料における体積含水率の分布

て標準砂 case1 の場合を示したものである。また、図-9 は各試料における体積含水量の分布について示したものである。

各試料における蒸発過程としては、図-8、図-9 より最上端から水分が蒸発し、試料内の水分が上方に移行している現象が見られる。蒸発によって体積含水率が深度方向に減少している。

標準砂 case1 と case2 について図-9 (a) と図-9 (b) より比較してみると、試料表面の体積含水率の変化は標準砂 case1 については比較的緩やかに減少しているのに比べて標準砂 case2 は急激に減少している。また、体積含水率の時間的な低下傾向を見ると、標準砂 case1 では 120 時間経過以降の体積含水率の時間的な減少量は少なく、標準砂 case2 では経過時間 50 時間以降になると体積含水率の時間的な減少量が少なくなっている。このことは、それらの経過時間以降ではそれ以前に比べて蒸発量が少ないことを表わしている。この性質は、積算蒸発量と時間の関係 (図-2 参照) で述べたことと同様である。さらに、体積含水率の変化深度は約 0.2m~0.25m であり、標準砂の常温状態で 45 時間経過後の毛管上昇高さが約 0.27m 程度⁴⁾ であることを考えると、水分移動がその範囲で生じていることがわかる。

次に、シルト質細砂の図-9 (c) を見ると体積含水率の変化は標準砂に比べて小さいが、変化する深度は試料下部の 0.6m 付近まで達しており、試料の毛管流動の影響範囲がかなり広範囲におよんでいることになる。

今回、標準砂とシルト質細砂の 2 つの試料を用い、飽和状態にある試料が上端面から温風をうけて乾燥する現象を究明することを目的に、温度、圧力、体積含水率を測定する実験を試みた。それについて 2、3 の興味深い結果を得たと思われるが、数量的な解析についてはこういった結果をふまえて検討していくつもりである。最後に、本実験を進めるに際し協力していただいた埼玉大学工学部建設工学科学生新井正巳君にお礼申し上げる。

参考文献

- 1) Philip. J. R and D. A. De Vries : Moisture movement in porous materials under temperature gradients., Trans. Am. Geoph. Union., Vol. 38, No. 2, pp 222~232, 1957
- 2) 下島、石原、葛葉 : 砂地からの蒸発に関する実験的研究、第 40 回年講概要集、Ⅱ-16, pp 31~32, 1985.9
- 3) 宮崎 毅 : 円柱型砂コラム内の熱移動解析、農土論集、No. 70, pp 20~26, 1977
- 4) 佐藤、西林、須藤 : 熱を伴う不飽和浸透流の基礎的研究、第 29 回水講論文集、pp 863~868, 1985.2