

砂栽培に関する基礎的研究 第2報

| | |
|-------|------------|
| 誌名 | 園藝學會雜誌 |
| ISSN | 00137626 |
| 著者 | 遠山, 柁雄 |
| 巻/号 | 42巻3号 |
| 掲載ページ | p. 251-258 |
| 発行年月 | 1973年12月 |

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council
Secretariat



砂栽培に関する基礎的研究(第2報)

砂の粒径組成と蒸発量との関係

遠 山 柁 雄*

(九州大学農学部)

Fundamental Research on the *Suna Saibai* (a type of sand culture)

II. Relationship between the Physical Composition of the Sand and its Evaporation

Masao TOYAMA*

Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka

Summary

To get a clearcut insight into the evaporation features of sand beds when we use them for crop raising, experiments on the evaporation procedure of sand beds and the relationship between the water contents of the bed under full saturation and under field capacity conditions were performed. In addition, some mechanical properties of particles composing sand beds were investigated.

1. At bed depth of 10 cm, two kinds of sands, *Very coarse sand* (the particle size was ca. 2~1 mm in diameter) and *Fine sand* (ca. 0.2~0.02 mm), attained to similar high evaporation ratios, ranging from 95 to 65% as their surface were drier. In the bed of larger sand particles (*Very coarse*), the surface dried more rapidly than that of the bed of smaller particles (*Fine*). The water content at that occasion was about 60% in the *Very coarse* and about 20% in the *Fine sand*.

2. When sand beds were set at 2 cm in depth, there were no differences in the evaporation ratio, the time of surface drying, and the water content among *Very coarse*, *Coarse* (1~0.5 mm), *Medium* (0.5~0.2 mm) and *Fine*.

3. The relationship between the evaporation ratio (Y) and the water content (X) at the commencement of drying on the surface of the sand bed of 10 cm in depth were as follows :

| | | |
|---|-------|-------------------|
| <i>Very coarse</i> 100% | | $Y=1.56 X-32.7$ |
| <i>Coarse</i> 100% | | $Y=1.15 X-2.99$ |
| <i>Medium</i> 100% | | $Y=0.498 X+48.6$ |
| <i>Fine</i> 100% | | $Y=0.06 X+89.48$ |
| <i>Very coarse</i> 20%+ <i>Fine</i> 80% | | $Y=0.113 X+98.52$ |
| <i>Very coarse</i> 80%+ <i>Fine</i> 20% | | $Y=1.028 X+4.33$ |

4. In the case of *Very coarse sand*, the water content from the upper to lower layer of the sand bed showed a remarkable difference ; while in the case of *Fine sand* bed ; it showed only a small change. When the average water content was ca. 60%, the surface layer of *Very coarse sand* bed was quite dry and the layer below 6 cm from the surface was saturated with water. On the other hand, in a similar water content, ca. 60%, *Fine sand* bed retained ca. 25% of the water on its surface and almost 100% in the layer situating under 8 cm or more in depth. Furthermore, when the average water content in the beds was close to 30%, the amount of water contained in sand layers showed a definitely decreasing pattern from upper to lower. In the bed of *Very coarse sand* the layer below 9 cm from the surface was quite saturated, while in that of the *Fine sand*, drying occurred at first in the near surface layer, and in the layer at 10 cm deep from the surface the water content was ca. 50% at the highest.

1972年9月13日受理

* 現在, 鳥取大学農学部

緒言

砂は一般の畑地土壤にくらべてその組織はあらく、容水量はいちじるしく少ないのが普通である。そのために、熱容量は小さく、熱伝導率は大きい。しかし、空気孔げきが多いため、表層部の地温は上昇しやすく、日中はいちじるしく高温になり、夏期では 60°C にも達するといわれている(6)。このため、土壌表面からの水の蒸発は一段と促される。その結果、表層に乾燥砂層を生じ、その後の水の蒸発はこの乾燥砂層がマルチとしての役割を果たすようになる。ところが、乾燥砂層の形成は一般に水の毛管移動の有無、およびその速度によつて左右されるので、砂層からの水分蒸発は毛管孔げきの大小、すなわち、砂の粒径組成のいかんによつて相違するものと考えられる。このことは、砂を培地として作物栽培を行なうにさいして砂の粒径組成、孔げきの大小、および分布をまず考へやすべきことを示している。以上のような観点から、本章では砂の粒径組成と蒸発量との関係について調査し、その結果をまとめたものである。

実験材料および方法

実験に用いた砂は前報(11)と同様に、粗砂大 (*Very coarse sand*, 2~1 mm), 粗砂中 (*Coarse sand*, 1~0.5 mm), 粗砂小 (*Medium sand*, 0.5~0.2 mm) および細砂 (*Fine sand*, 0.2~0.02 mm) の 4 群にふるい別したもので、じゆうぶんに水洗して粒土分を除去し、それらの砂を直径が 12 cm, 深さ 11 cm, および 3 cm の 2 種のポリ容器にそれぞれ 10 cm および 2 cm の深さに密の状態にてん充した。これに水分を加えて飽和状態にしたもの、およびポット上部よりの砂表面蒸発を防ぎながら、夜間 10 時間ポット下部より自然排水させたもの (以下ポット容水量と呼ぶ) を供試し、白色ファイロン被覆ハウス中央部の地上 1 m の台上に放置し、24 時間ごとに午前 8 時に上皿天びんを用いてひよう量し、蒸発量を求めた。容水量の垂直分布の測定は、1 cm ごとに砂を採取し、ただちにひよう量したあと、110°C で 24 時間乾燥し水分量を求めた。

実験結果

1. 蒸発比および含水量の経時変化

第 1 図は粗砂大 (2~1 mm) と細砂 (0.2~0.02 mm) の 2 種の砂について、砂層の厚さ 10 cm, 土壌水分が飽和水分状態の場合の蒸発比 = (土壌面蒸発量 ÷ 自由水面蒸発量) × 100 の経時変化を示したものである。その結果、粗砂大では最初の 4 日間の蒸発比は 85% から 65% へ、細砂は最初の 6 日間が 90% から 70% へといずれもその減少率は少ない値であつた。しかし、それ以降の蒸発比は数日間に粗砂大で 40% からさらには 20% へ

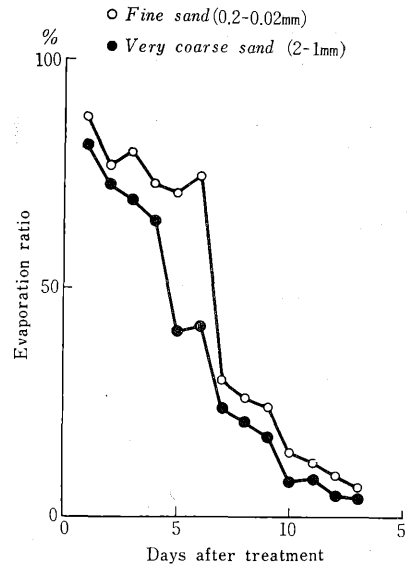


Fig. 1. Changing behavior in evaporation ratio. (The sand bed is set at 10 cm in depth and saturated with water.)

Evaporation ratio

$$= \frac{\text{Evaporation from surface of sand}}{\text{Evaporation from water surface}} \times 100$$

と急激に減少し、とくに、細砂では 3 日間に一挙に 25% まで激減した。この時期はちょうど砂表面に乾燥砂層を生じた時期であつた。

第 1 図は第 2 図にしめした実験結果を含水量の変化について、経時的に見たものである。含水量が一定速度で、直線的に減少する恒率乾燥期間は、粗砂大で 4 日間、細砂で 6 日間であり、それ以降の含水量の減少速度は、いちじるしく低下して減率乾燥期間へと移行した。この恒率から減率乾燥期間への変換期が蒸発比の激減期、す

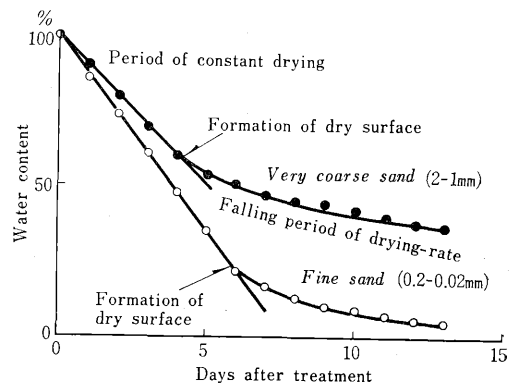


Fig. 2. Changing behavior in water content. (The sand bed is set at 10 cm deep and saturated with water.)

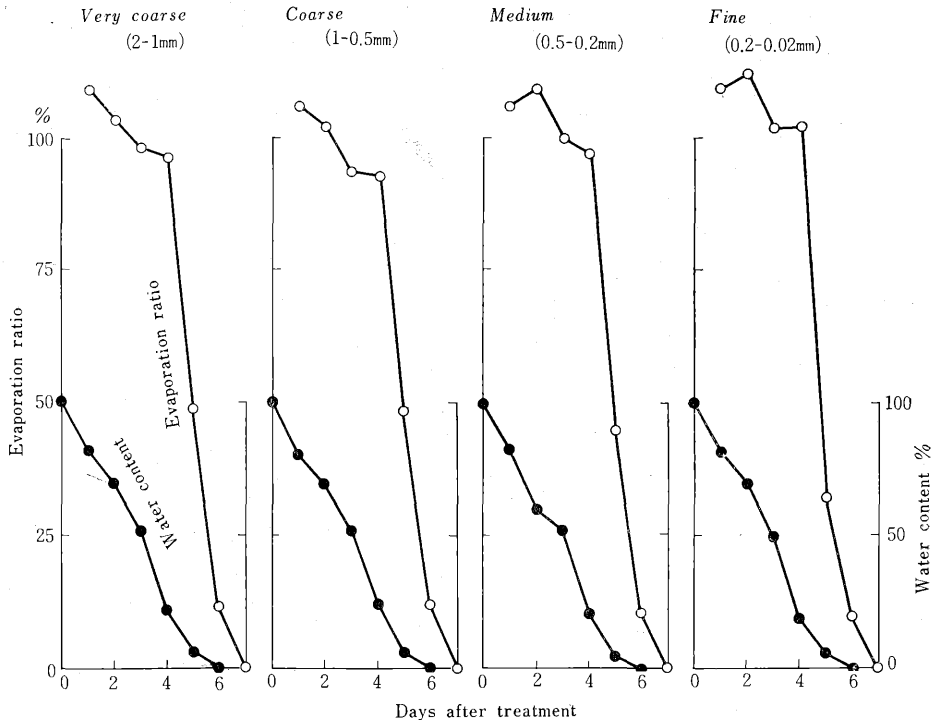


Fig. 3. Changing behavior in evaporation ratio and water content. (The sand bed is set at 2 cm deep and saturated with water.)

なわち、乾燥砂層の形成期にあたり、そのときの含水量は粗砂大で60%、細砂で20%であった。以上の結果から明らかなように、10 cmの深さの砂層では両粒径砂からの蒸発量の推移はいちじるしく相異しており、粗砂大では砂中に十分な水分を保持しながら蒸発比が減少するのに対して、細砂では蒸発比の減少はむしろ土壌水分不足のため生じたものと判断される。

第3図は砂層の深さ2 cm、飽和水分状態の場合の蒸発比および含水量の経時変化を示したものである。まず、蒸発比は4種の粒径砂とも4日目までは100%前後の高い値を示したが、5日目には急激に減少し、6日目には約10%、7日目には0%となり、10 cmの深さの場合と異なり、2 cmの深さでは4種の粒径間には全く差は見られなかった。一方、含水量の変化も4種の粒径砂の間には差は全くなく、それぞれの粒径砂は同様の傾向を示し、6日目で等しく含水量は0%となった。

2. 蒸発比と含水量の関係

飽和水分状態の場合 第4図は砂層の厚さ10 cmの場合の蒸発比(Y)と含水量(X)の関係を、4種の単独粒径砂について比較したものである。

粗砂大単独の場合、最初のうちの蒸発比は100%以上の非常に高い値を示しながら、含水量は60%まで減

少したが、その後は含水量の低下とともに蒸発比が80%から50%へ急速に減少し、砂表面には乾燥砂層が形成された。さらに、含水量が40%に低下すると、蒸発比は20%まで減少し、砂表面からの蒸発は極度に抑制された。恒率乾燥期間の回帰直線は $Y=1.56X-32.7$ であらわされ、ほかの粒径砂に比べてこう配はもつとも急であった。

粗砂中単独の場合含水量が40%になるまでは、蒸発比は100%から70%までの比較的高い値を示しながら低下し、その後、砂表面に乾燥砂層が形成され、しかも含水量が30%以下になるとともに蒸発比も20%以下に低下した。恒率乾燥期間の回帰直線は $Y=1.15X-2.99$ となり、粗砂大に比べてこう配はゆるやかとなった。

粗砂小単独の場合、含水量が35%になるまでは、蒸発比は100%から75%までの高い値を示しながらゆるやかに減少してゆくが、含水量が40%から20%のときは蒸発比は55%から50%、含水量が20%以下になると蒸発比は一段と減少して25%以下に低下した。恒率乾燥期間の回帰直線は $Y=0.50X+48.6$ と粗砂大、粗砂中に比べてさらにこう配はゆるやかとなった。

細砂単独の場合、含水量が25%になるまで蒸発比

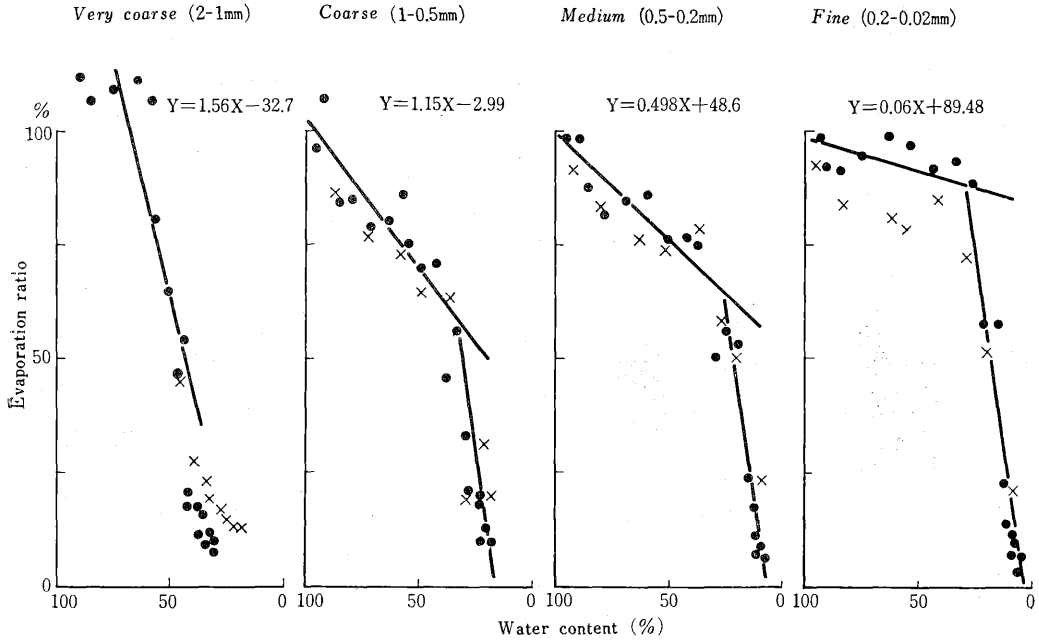


Fig. 4. Relationship between water content and evaporation ratio in 4 different sands having single fraction system.

● : Water saturation × : Near field capacity (10 hours after drainage)
 The linear regression was derived from the case of water saturation.

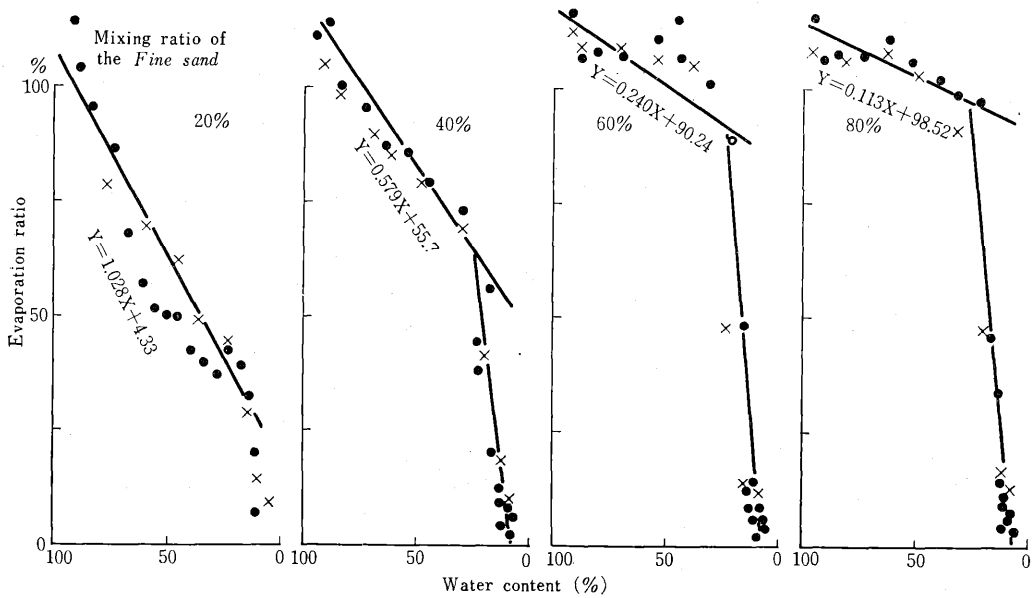


Fig. 5. Relationship between water content and evaporation ratio in the mixed sand of 2 fraction systems composed of *Very coarse* and *Fine sand*.

● : Water saturation × : Near field capacity (10 hours after drainage)
 The linear regression was derived from the case of water saturation.

100% から 90% までの高い値を持続した。その後、砂表面に乾燥砂層が形成され、蒸発比は急激に減少し15%以下となった。恒率乾燥期間中の回帰直線はさらにゆるやかとなり、ほかの3種の粗砂に比べてもつとも小さく、その回帰直線は $Y=0.06 X+89.48$ であつた。

以上の結果から、上記4種の単独粒径砂については、砂層の厚さ 10 cm, 飽和水分状態での蒸発比と含水量の関係をみると恒率乾燥期間中における、回帰直線のこう配は粒径が小さくなるにともなつてゆるやかとなること、また、粗砂大ではほかの粒径砂に比べて乾燥砂層形成前後の2本の直線によつて表わされる回帰係数の差は不明確であるのに対して残りの3種の粒径砂では2本の直線を明確に区分することができることなどが明らかになつた。

第5図は粗砂大と細砂を重量比によつて、20% ごとに混合した場合の蒸発比と含水量の関係をみたものである。粗砂大に細砂を20% 混合した場合には、蒸発比と含水量の関係は粗砂大単独の場合にかなり近い傾向を示している。すなわち、細砂20%の混合では粗砂大単独と同様に、乾燥砂層形成前後の2本の直線の区分は不明確である。恒率乾燥期間中の回帰直線は $Y=1.03 X+4.33$ となり、粗砂大単独の場合よりも直線のこう配はわずかにゆるやかになつてきているにすぎない。

さらに、細砂の混合割合を増加してゆくと、蒸発比と含水量の関係は細砂単独の場合に近づく。すなわち、恒

率乾燥期間中の回帰直線は細砂の混合割合が40% では、 $Y=0.58 X+55.6$ である。細砂の混合割合60% では $Y=0.24 X+90.2$ となる。さらに、細砂を80% 混合すると、 $Y=0.11 X+98.5$ となり、恒率乾燥期間中の回帰直線のこう配は一段とゆるやかとなり、細砂単独の場合に近づいてゆく。

つぎに、第6図は粗砂大に粗砂小を重量割合で20% ごとに混合した場合、蒸発比と含水量の関係をしめた。まず、粗砂小20% では、粗砂大単独あるいは粗砂大80% に細砂20% 混合の場合と同様に、乾燥砂層形成前後の直線の変曲部を明瞭に区別できない。恒率減少期間中の回帰直線のこう配は $Y=1.03 X+4.93$ となり、細砂20%の混合の場合とはほぼ同じである。

粗砂小の混合割合が40% に増加すると、回帰直線は $Y=0.42 X+54.9$ となり、混合割合20% に比べてわずかにこう配はゆるやかになるとともに、恒率と減率乾燥期間中の2本の回帰直線は明瞭に区別出来るようになる。さらに、粗砂小の混合割合を60%、80% と増加しても恒率乾燥期間中の回帰直線のこう配はほとんど変わらない。なお、回帰直線は粗砂小60% 混合で $Y=0.68 X+31.7$ 、粗砂小80%の混合で $Y=0.67 X+33.5$ である。

ポット容水量の場合 ポット容水量の場合の蒸発比と含水量の関係は第4、5および6図の×印で示したが、前記飽和水分状態の場合と全く同じ傾向にあつた。

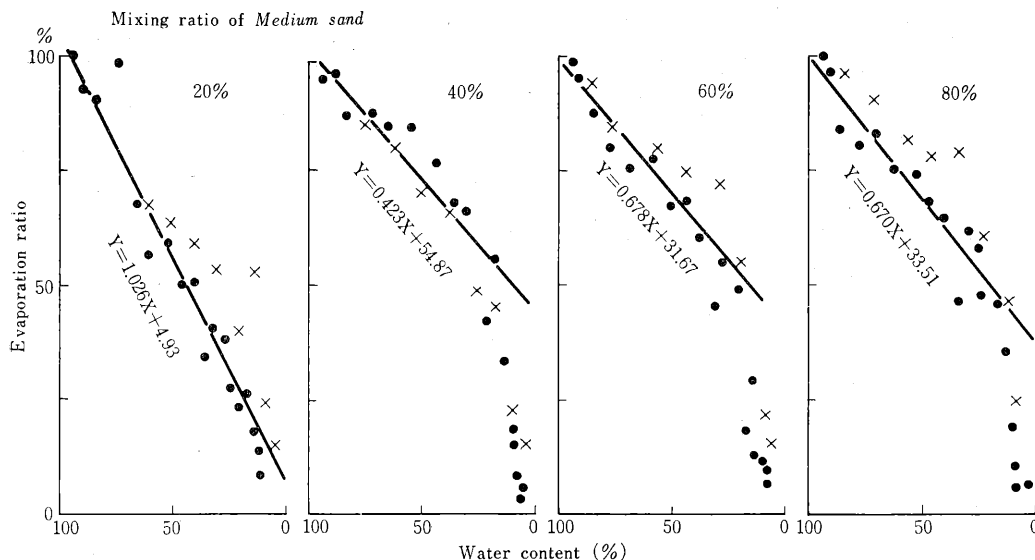


Fig. 6. Relationship between water content and evaporation ratio in the mixed sand of 2 fraction systems (composed of *Very coarse* and *Medium sand*).

● : Water saturation × : Near field capacity (10 hours after drainage)

The linear regression was derived from the case of water saturation.

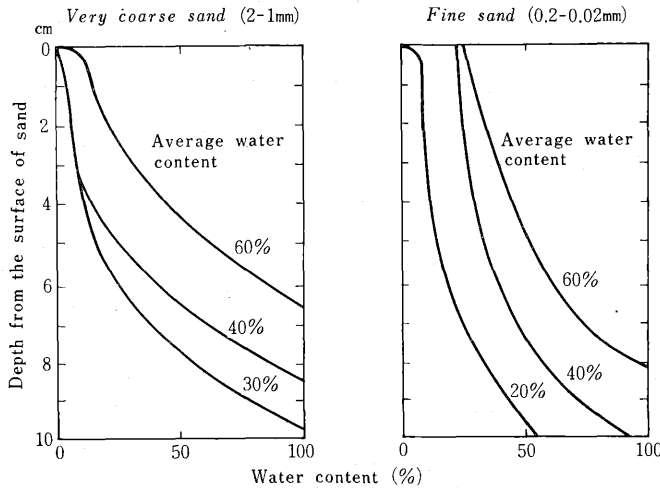


Fig. 7. Pattern of vertical changes of the average water content in sand.

すなわち、飽和水分状態の砂表面からの蒸発によつて水分が減少し、含水量が低下してポット容水量と含水量が同量となると、それ以後の蒸発比と含水量の関係は飽和水分状態の場合と、ポット容水量の場合は全く一致した結果が得られた。

3. 含水量の垂直分布

以上の結果から明らかなように、粗砂大では含水量が充分あるにもかかわらず、土壌面蒸発はいちじるしく抑制されるが、一方、細砂の土壌面蒸発は含水量が充分にある範囲では抑制されない。このことをさらに明確にするために、ポット内の含水量の垂直分布を調べた。

第7図は粗砂大および細砂が単独の場合の含水量の垂直分布を図示したものである。粗砂大では、ポット内の平均含水量が60%の場合に、砂表面に乾燥砂層が形成され、表面の含水量は0%となつた。しかし、表面下約7cm以上の深さでは、水分飽和状態のままであり、表層部と下層部の水分量は、いちじるしい差を示した。さらに、平均水分量が40%、30%と減少しても、下層部には水分飽和の部分があり、上下層の水分量の差はきわめていちじるしい。

一方、細砂では平均含水量60%の場合の垂直分布は、表層部で約25%の水分量があり、また、水分の飽和状態は8.5cm以上の深さにおいて見られた。さらに、平均含水量が40%に減少しても、表面付近では含水量は20%以上もあり、粗砂大に比較してきわめて多くなつた。しかし、水分で飽和された部分はなくなつた。さらに、平均水分量が20%に減少すると砂表面に乾燥砂層が形成され、砂表面の水分量は0%であつたが、表面下

5cm程度までは約10%であつた。この場合でも最下層の水分量は約50%となつており、砂層全体を通じての含水量の差は粗砂大に比べて少ないことが注目される。

以上の結果から、粗砂大では表層部と下層部の含水量の変化はいちじるしいが、一方、細砂ではその変化は比較的少ないことが明らかとなつた。

考 察

土壌表面蒸発に影響を与える諸要因については古くから多数の報告があり、温度および湿度(2)、風速(1,8)などの気象因子および土壌の色(3,12)、土性(10)、土壌水分(4,5,7,9,10)など各種の土壌要因についてその影響が明らかにされている。しかし、土壌の物理性、とくに砂の粒径組成との関係において土壌面蒸発を調べたものはまだ

見あたらない。

土壌面からの蒸発による水分損失は作物の栽培を考慮に入れる場合、もつとも重要な問題点と考えられる。前報(11)で明らかにしたように、砂はその粒径組成によつて、砂中の水分量がいちじるしく異なる。また、砂は他の土壌に比較して、一般に保水力はきわめて弱い。このため、蒸発による水分の損失を明らかにする必要があると考えられる。

本実験の結果から見て、粗砂大は細砂と比較すると、砂層の厚さ10cmの場合は砂表面の乾燥砂層の形成が早く、乾燥砂層形成時の含水量もきわめて多量となつている。このことは、前報(11)で明らかにされたように、砂の粒径組成のいかんによつて孔径が変化することから、粗砂大では約90%の孔径がpF 1.0以下の大孔径からなつていることによつても説明できよう。一方、細砂ではそれらの孔径がいちじるしく少なくなり、約70%がpF 1.7以上の小孔径からなるために、毛管上昇の高さは第1表で見られるように、粗砂大で約5cmに対して、細砂では約40cmとなつている。また、

Table 1. Height of capillary rise of water through sand columns of varying diameter (cf. Dolgov, 1948)

| Particle size | | Height of capillary water rise | |
|---------------|---------|--------------------------------|------------|
| Limits | Average | Observed | Calculated |
| mm | mm | cm | cm |
| 2~1 | 1.5 | 5.0 | 4.9 |
| 1~0.5 | 0.75 | 10.8 | 9.8 |
| 0.5~0.2 | 0.35 | 16.3 | 19.6 |
| 0.2~0.02 | 0.11 | 41.0 | 42.0 |

第7図に見られるように、粗砂大では上下の水分差は極めて大きいに対して、細砂ではその差は小さい。このため、粗砂大（深さ10cm）では砂中に平均約60%の水分を含みながら、孔げき径が大きく、毛管上昇の高さが低いために、砂表面の乾燥砂層の形成は早く、蒸発比は他の粒径砂の場合と比較して、きわめて早く減少するものと考えられる。

一方、細砂では毛管上昇の値は約40cmと高く、砂層の厚さ10cm程度では毛管上昇高の範囲内に含まれるため、蒸発比の激減をもたらす乾燥砂層の形成は、砂中の含水量がほとんど無くなるまで生じない。このことから、乾燥砂層形成前の回帰直線のこう配は孔げきの大小に関係し、砂の粒径が小さくなるにしたがつてゆるやかになったものと推察される。

一方、砂層が2cmと浅い場合では、蒸発比および含水量の経時的変化が各粒径の間には全く差がない。これは各粒径砂とも毛管上昇高の範囲内にあるためと考えられる。

2種混合系の場合の蒸発において見られるように、乾燥砂層形成前の蒸発比と含水比との回帰直線のこう配は、2種の単独粒径の中間的な値をとる。このことは、前報(11)に示されたように、2種の混合系の場合の孔げき径のしめす傾向とよく一致し、砂の蒸発に孔げき径がきわめていちじるしく影響を与えていると考えることができる。

以上、砂表面からの蒸発について、砂の粒径組成との関係について明らかにしたが、砂を培地として作物栽培を行なうにさいしては、砂表面の乾燥のみで判断することによつてしばしばおこる過剰かん水に充分注意する必要がある。すなわち、粒径の大きい砂の使用、ならびに砂層の厚い場合のかん水は上下層の水分不均一を生じやすいことを考慮に入れるべきであると考えられる。

摘 要

砂栽培に関する基礎的実験として、砂表面からの水分蒸発について、砂層の厚さおよび含水量と砂の粒径組成との関係を調査した。その結果を要約するとつぎのとおりである。

1. 砂層の厚さ10cmの場合の乾燥砂層形成時の蒸発比は、粗砂大、細砂ともに高く、約90%から65%であつた。乾燥砂層の形成は粗砂大のほうが早く、そのときの含水量は粗砂大で約60%、細砂で約20%である。
2. 砂層の厚さ2cmの場合、蒸発比、乾燥砂層の形成、形成時の含水量はともに粒径間の差が全く見られない。

3. 砂層の厚さ10cmの場合、蒸発比(Y)と含水量(X)の関係を見ると、単独粒径組成の場合では粒径の小さいものほど、また混合粒径では小粒子の混合割合が増加するほど、乾燥砂層の形成前の回帰直線のこう配はゆるやかになつた。すなわち、回帰直線は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{粗砂大 } 100\% & \quad Y=1.56 X-32.7 \\ \text{細砂 } 100\% & \quad Y=0.06 X+89.48 \\ \text{粗砂大 } 80\%, \text{ 細砂 } 20\% & \quad Y=1.028 X+4.33 \\ \text{粗砂大 } 20\%, \text{ 細砂 } 80\% & \quad Y=0.113 X+98.52 \end{aligned}$$

4. 表層と下層における含水量の差は、粗砂大でいちじるしく大きく、細砂では小さい。含水量の垂直分布は10cmの厚さの平均含水量60%のとき、粗砂大の表層は乾燥しているが、表面下6cm以下で飽和水分状態となつている。一方、細砂では表面の含水量は25%のとき、8cm以下の層で飽和水分状態となつている。平均30%の含水量では粗砂大は9cm以上の深さのみが飽和水分状態であるのに対して、細砂は表層がほぼ乾燥し、10cmの深さでは約50%の水分しか含んでいない。

謝 辞 本研究の遂行に当たつては九州大学名誉教授福島栄二博士に終始懇篤な指導と適切な助言をいただき、さらには報文校閲の労をわずらわした。ここに記して衷心より謝意を表する。また研究途上種々の便宜と助言をいただいた九州大学農学部青峰重範教授、同じく上本俊平教授に対して厚く感謝の意を表する。

引用文献

1. 秋葉満寿次. 1933. 砂面蒸発と風速との関係, 農土研究. 5: 285—306.
2. BAYER, L. D. 1956. Soil physics. 3rd ed. pp. 275—283. John Wiley & Sons, New York.
3. ESER, C. 1884. Untersuchungen über den Einfluss der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Bodens auf dessen Verdünnungsvermögen. Forsh. Gebiete Agri.-Phys. 4: 327—365.
4. FISHER, E. A. 1923. Some factors affecting the evaporation of water from soil. Jour. Agri. Sci. 13: 9—143.
5. 福田仁志. 1931. 種々の含水量を有する土壌よりの蒸発に就て. 農土研究. 3: 177—183.
6. 原 勝. 1932. 砂丘造林に関する研究. 鳥取農学術報. 1: 103—185.
7. ———. 田中一夫. 1955. 林学領域における砂丘地の水分経済について. 砂丘研究. 1(2): 1—9.
8. 桂山幸典. 1951. 土壌蒸発に対する風の影響. 農土研究. 19: 9—12.
9. KEEN, B. A., and E. M. CROWTHER, 1926. The evaporation of water from soil. III. A critical study of the technique. Jour. Agri. Sci. 16:

- 105—122.
10. 太田更一. 1950. 土壌面蒸発と土壌水分との関係について. 農土研究. 18 : 18—25.
 11. 遠山征雄. 1973. 砂栽培に関する基礎的研究 (第1報) 砂の粒径組成と孔隙量および容水量との関係. 園学雑. 42(3) : 241—250.
 12. WOLLNY, E. 1881. Untersuchungen über den Einfluss der Fröhe des Bodens auf dessen Erwärmung. Forsch. Gebiete Agr.-Phys. 4 : 327—365.