

砂丘畑の通気性に関する研究 (2)

—土壌の間隙構造との関係—

小谷佳人*・矢野友久*・大深正徳*

Air Permeability through Sand Dune Soil Field (2) —Relation between Air Permeability and Soil Pore Structure—

Yoshihito KODANI*, Tomohisa YANO* and Masanori OFUKA*

Summary

In this study, the relation between the mechanism of gas flow through sand dune soil and three phases (solid, liquid, and air phase), and pore distribution of the soil was examined.

On carrying out measurements of air permeability (k_a), the method of Tanner & Wengel was used in situ and that of Nagata in the laboratory. The set of measurement data of k_a and P_a (the air ratio) was applied to a linear equation ($k_a = a \cdot P_a + b$) and to Nagata's empirical equation : $\log(k_a) = a \cdot P_a + b$, in which a , b were empirical constants. The coefficients of regression (r) were low in value and it was considered that k_a was not a function of only P_a . Then, through closer examination of the pore distribution with P_a , air permeability was expressed more precisely and the correlation between k_a and P_a became higher. On studying air permeability of soil, it was concluded that investigations should deal not only with air ratio but also with soil pore structure.

1. ま え が き

砂丘畑は一般に通気性であると言われており、土壌物理性の特色の1つに挙げられている。砂丘地の土壌構造は大きさの比較的均一な砂粒子の充填によるのみ、その固相分を変える単粒構造であり、固相

の大きさはほぼ一定である。空気の移動は間隙を通して行なわれると考えるならば、通気性は間隙の多少はもとより、間隙径分布、間隙中の水分と空気の割合などにより大きく影響されることが考えられる。特に、降雨、あるいは、かん水後の三相分布は著しく変化する。そのために通気性も大きく変わるよう

* 砂丘利用研究施設水文かんがい部門

* *Division of Hydrology and Irrigation, Sand Dune Research Institute.*

ある。すなわち、空気の土壤中を流れる難易度を把握することは、実際の土壌状態を把握していくための1つの指標となる。また、通気性の測定では土壌状態との関係を見る場合、テンシオメーター法のようなタイムラグをなくすことができ、非常に有用な方法と考えられる。しかし、通気性の研究は透水性の研究に比べて極めて少ない。

本研究は、砂丘畑の通気機構を、土壌の間隙径分布とその構造との関係のもとに検討、考察したものである。

2. 実験方法^{3,4,8,9)}

砂丘畑における通気性の良否の判定は、通気係数の大きさによって行なった。測定法としては、圃場測定にはTannerとWengelの測定法(1957)、室内測定には長田の測定法(1949)を用いた。

この2つの方法によって測定した通気係数をもって砂丘畑の通気性を検討考察するが、測定した通気係数に関しては次に示す点を留意した⁹⁾

通気係数は測定時の気温によって変化するので、20°Cに相当する値に補正した。

$$K_a(20^\circ\text{C}) = K_a(t^\circ\text{C}) \times \left\{ \eta(t^\circ\text{C}) / \eta(20^\circ\text{C}) \right\}$$

但し、 K_a ：通気係数 ($\mu \text{ m}^2$)

η ：粘性係数 ($\text{Pa} \cdot \text{sec}$)

$t^\circ\text{C}$ ：測定時の気温 ($^\circ\text{C}$)

また、長田の測定法では通気係数を [$\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$] の単

位で表すが、ここでは、TannerとWengelの測定法で表す [L^2] の単位に統一するため次のようにした。

$$K_{a1} = K_{a2} \times \eta / g$$

但し、 K_{a1} ： [L^2] の単位で表す通気係数

K_{a2} ： [$\text{L} \cdot \text{T}^{-1}$] の単位で表す通気係数

g ：重力加速度 ($\text{m} \cdot \text{sec}^{-2}$)

測定圃場は、鳥取大学農学部砂丘利用研究施設内の防風林、大型ガラスのハウス、その他3か所の圃場の計5か所で地表面から深さ5cmまでの層を対象とした。3か所の圃場を圃場A、圃場B、圃場Cとし、各測定地の土壌物理性を表-1に示した。表には参考のため日本の代表的砂丘の物理性を示した。これを見ると、測定圃場における土壌物理性の差はみられないようである。

3. 実験結果及び考察

(1) 砂丘畑の通気性

通気係数の変化は、土壌中の空気で占められている間隙と関係が深いと考えられる。土壌に多量の水をかん水し、自然乾燥にまかせて気相率を変化させ、そのときの通気係数を測定した。通気係数と気相率との関係は図-1~6に示した。このうち、図-1~5はTannerとWengelの測定法による圃場測定の結果であり、図-6は長田の測定法による室内測定の結果である。

長田は^{3,4)} 試料をあらかじめ水で飽和させ、そのの

表-1 土壌物理特性

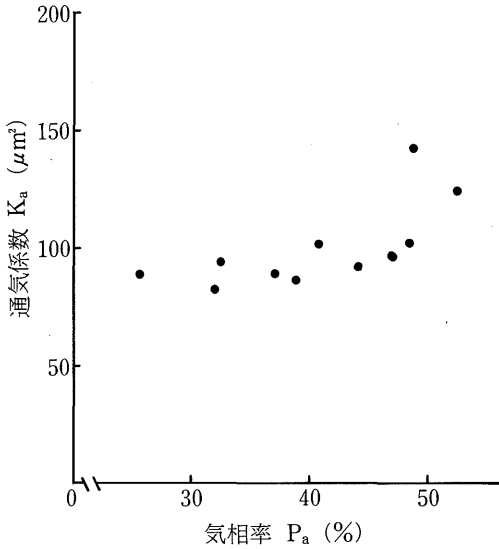
測定地	深さ(cm)	真比重	仮比重	間隙率	固相率
防風林	0~5	2.671	1.459	45.4	54.6
大型ハウス	0~5	2.674	1.507	43.7	56.3
圃場A(ラッキョ被植)	0~5	2.674	1.243	53.5	46.5
圃場B(裸地)	0~5	2.674	1.184	55.7	44.3
圃場C(裸地)	0~5	2.674	1.240	53.6	46.4
鳥取砂丘(1964)*)	5	2.603	-----	48.4	51.6
屏風山砂丘(1976)*)	0~15	2.710	1.450	46.5	53.5
三里浜砂丘(1976)*)	0~18	2.643	1.179	55.4	44.6

*) 農業土木学会：土の理工学性実験ガイド p.199 (1983)

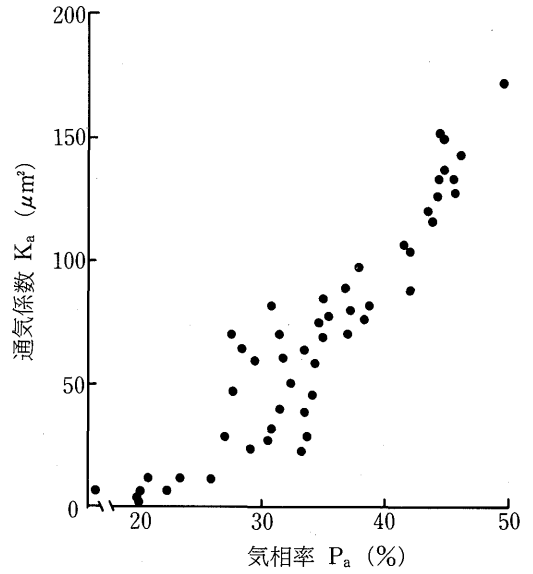
ち、徐々に水分を減少させて気相率を変化させた場合、通気係数 K_a と気相率 P_a とは、

$$\log_{10} K_a = a P_a + b \dots\dots\dots(1)$$

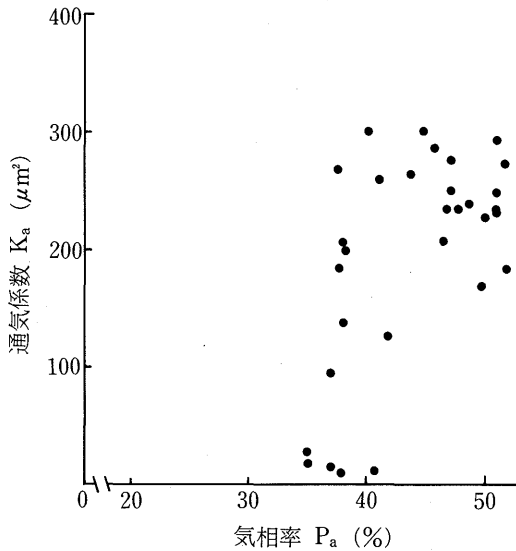
但し、 a 、 b は定数の関係にあり、試料によっては、ある P_a の大きさ(変異点)において折れ線になることを示している。こ



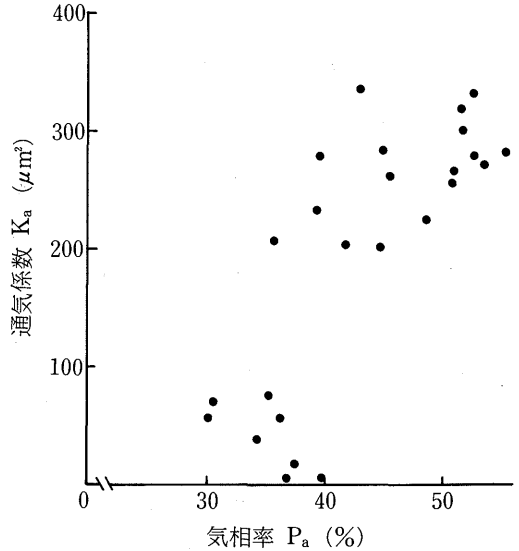
図一 通気係数と気相率との関係 (圃場測定—防風林)



図二 通気係数と気相率との関係 (圃場測定—大型ハウス)



図三 通気係数と気相率との関係 (圃場測定—圃場A)

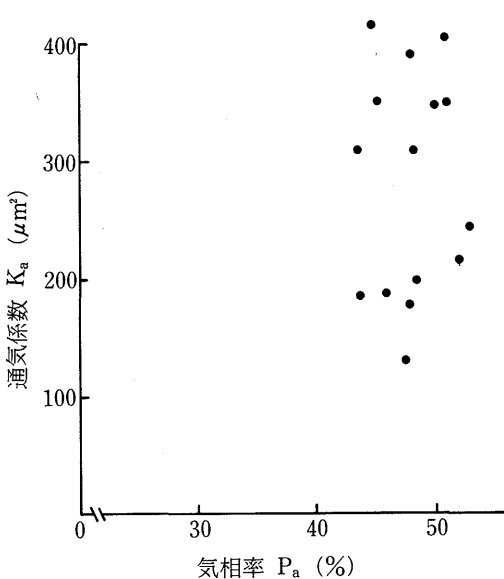


図四 通気係数と気相率との関係 (圃場測定—圃場B)

の変異点の生じる原因については、変異点までの土壌の間隙径と変異点よりも大きいところの土壌の間隙径に著しい差があるためとしている。

実験結果を上式により整理してみたが、変異点は確認し得なかった。そこで、本研究では、間隙はpF1.8を境にして毛管間隙と非毛管間隙とに区分され、性質を異にすると考えて、土壌がpF1.8で安定した時の気相率をもって変異点とすることにした。その値は次のようであった。

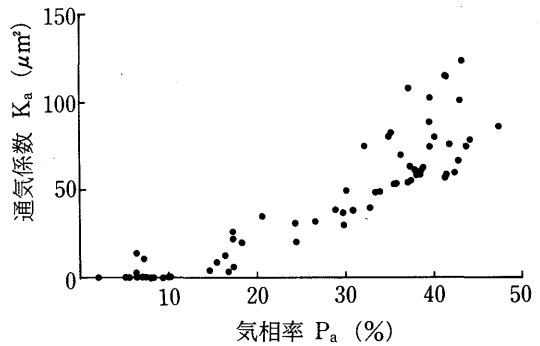
$$P_a (pF1.8) = 37.41 (\%)$$



図一五 通気係数と気相率との関係 (圃場測定—圃場C)

また、変異点によって区分しないで、 $\log_{10} K_a$ を表す長田の関係式である(1)式と K_a を表す直線式をあてはめてみた。あてはめた関係式の適合度は相関係数の大きさにより評価し、表一2に示した。

これらの図、表よりみると、砂丘畑では気相率の増加に伴い、通気係数の値も大きくなるようである。しかし、同じ気相率であっても通気係数の大きさにはかなりの差が生じており、相関が低くなっている。即ち、通気係数は、単に気相率の大きさのみでは説明できないことを示している。このことは、気相率が土壌中の気相容積の割合を示すものであり、気相の状態までも表わすものではないことを示すもので、気相は固相と液相の存在状態によって複雑な質的变化をするものである。したがって、通気性は閉鎖間隙の存在、間隙の連続性やねじれなどを示す土壌の間隙系構造の性質との関連について検討することが必要と思われる。



図一六 通気係数と気相率との関係 (室内測定—大型ハウス)

表一2 通気係数と気相率との関係

測定地	方法	$\log K_a = a P_a + b$ (変異点あり)	
		非毛管間隙	毛管間隙
防風林	Tanner & Wengel	$2.83 \times 10^{-4} P_a + 1.94$ (0.06)	$1.10 \times 10^{-2} P_a + 1.51$ (0.70)
大型ハウス	Tanner & Wengel	$6.57 \times 10^{-2} P_a - 0.45$ (0.88)	$0.03 \times P_a + 0.84$ (0.89)
圃場A(被)	Tanner & Wengel	$0.11 \times P_a - 2.56$ (0.36)	$2.55 \times 10^{-2} P_a + 1.11$ (0.37)
圃場B(裸)	Tanner & Wengel	$-3.32 \times 10^{-2} P_a + 2.83$ (0.20)	$3.84 \times 10^{-2} P_a + 0.45$ (0.54)
圃場C(裸)	Tanner & Wengel	$3.85 \times 10^{-3} P_a + 2.24$ (0.07)
大型ハウス	長田	$0.59 \times P_a - 16.17$ (0.76)	$1.93 \times 10^{-2} P_a + 1.07$ (0.47)

測定地	方法	$\log K_a = a P_a + b$ (変異点なし)	$K_a = a P_a + b$
防風林	Tanner & Wengel	$5.89 \times 10^{-3} P_a + 1.75$ (0.70)	$1.44 P_a + 41.20$ (0.68)
大型ハウス	Tanner & Wengel	$4.76 \times 10^{-2} P_a + 0.06$ (0.89)	$5.11 P_a - 105.31$ (0.93)
圃場A(被)	Tanner & Wengel	$4.36 \times 10^{-2} P_a + 0.24$ (0.56)	$9.47 P_a - 221.11$ (0.58)
圃場B(裸)	Tanner & Wengel	$3.89 \times 10^{-2} P_a + 0.42$ (0.63)	$10.85 P_a - 277.33$ (0.79)
圃場C(裸)	Tanner & Wengel	$3.85 \times 10^{-3} P_a + 2.24$ (0.07)	$1.56 P_a + 206.24$ (0.05)
大型ハウス	長田	$0.44 P_a - 14.30$ (0.76)	$2.21 P_a - 17.19$ (0.90)

()内は相関係数

(2) 三相構造と通気性

砂丘畑の通気性を一般の土壤にみられるように気相率の関数として整理してみたが、十分な成果は得られなかった。そこで、同一試料の土壤構造をこわさずに、そこに存在する水分量を変化させるのみで気相率を変化させ、通気係数に影響を及ぼす因子はどのようなものか検討してみた。

測定は、大型ガラスのハウスで採取した砂丘砂を均一に1/2000 aのポットにつめ、一旦飽和させた試料にTannerとWengelの測定装置を用いて通気性を測定した。また、同じ場所より定容積採土した試料

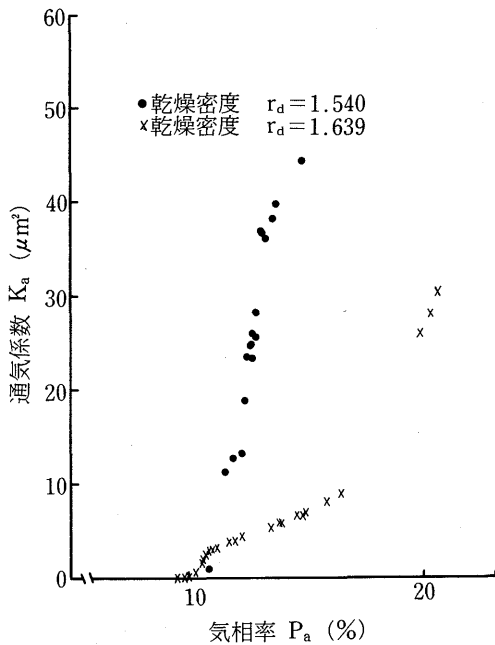


図-7 含水量により気相率を変えた場合の通気係数の変化 (Tanner & Wengelの測定法—砂丘砂)

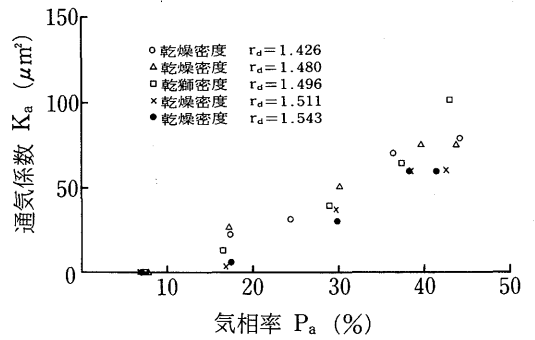


図-8 含水量により気相率を変えた場合の通気係数の変化 (長田の測定法—砂丘砂)

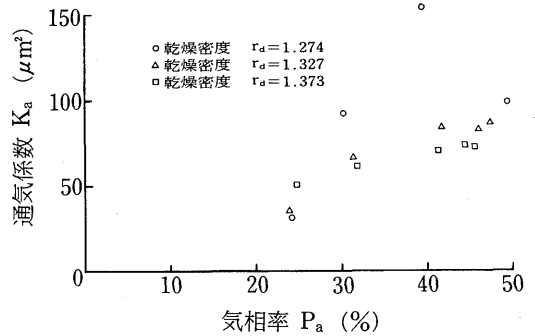


図-9 含水量により気相率を変えた場合の通気係数の変化 (長田の測定法—マサ土)

を用いて、室内でも長田の測定法により同じく測定した。長田の測定法では砂丘砂以外にマサ土をも用いて測定した。

図-7にはTannerとWengelの測定法よりの結果を、図-8には砂丘砂の、図-9にはマサ土の長田の測定法により得られた結果をそれぞれ示している。

TannerとWengelの測定法よりの結果をみると、土壌の密度が小さいと、即ち、間隙率が大きいと僅かの水分変化も通気係数には大きく影響して急激に増加するが、密度が大きく間隙率が小さくなると緩かに増加している。長田の測定法より得られた結果についても、TannerとWengelの測定法の結果ほどには、はっきりはしないが、密度が小さいと同じ気相率に対しても通気係数が大きくなる傾向がみられる。これらのことは、たとえ空気で占められている間隙が量的に同じであっても、密度の違いにより質的には異なり、そのために空気の流れやすさに差が生じたものと考えられる。

砂丘畑は、その構造はほぼ均一な径からなる砂分を主成分とする単粒構造であるため、密度が大きくなるにつれて土粒子相互が接触し、大間隙の量が減っていく。水分は、間隙中の保水力の弱い大間隙から排除されていくと考えると、同じ気相率であっても、密度の小さいものは比較的大きな間隙から成り、密度の大きいものは小さい間隙から成ると考えられる。したがって、密度が小さく、大間隙を多く含む場合、大間隙の影響により気相率の小さい段階でも急激に通気係数が増加し、同じ気相率であっても通気係数が大きくなるものと考えられる。

この間隙に、Hagen-Poiseuilleの法則を適用して、以上の関係を考察すると次のようである。

Hagen-Poiseuilleの法則によると、半径 r の毛細管内を流れる空気の流量 Q は、(2)式となる。

$$Q = \frac{\pi r^4}{8 \eta} \times \frac{dP}{dx} \dots\dots\dots(2)$$

但し、 η : 粘性係数 (Pa · sec)
 dP/dx : 圧力勾配 (Pa · m⁻¹)

(2)式によると毛細管内の流量は半径 r の 4 乗に比例することになり、流量は、同じ断面積であっても半径の大きい方が多くなる。

(3) 間隙構造と通気性²⁷⁾

以上により、気相の量の多少と通気性との関係は密接な関係にあることが明らかにされた。しかし、同じ気相率であっても通気性には大きな相異がみられる。

この関係を明らかにするために間隙径の分布を考慮して、次のように考察した。

いま、土壌中の間隙は径の異なる多数の毛細管の集合であると考えて、毛管上昇高を求める Laplace の式により、その間隙径 r を吸引圧 h の関数として求める⁷⁾

$$r = 2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha / \rho \cdot g \cdot h \dots\dots\dots(3)$$

但し、r : 間隙径 (m)
 σ : 水の表面張力 (N · m⁻¹)
 ρ : 水の密度 (kg · m⁻³)
g : 重力加速度 (m · sec⁻²)
 α : 接触角
h : 毛管上昇高 [吸引圧] (m)

水と土壌の場合、 $\sigma = 73.5$ (dynes · cm⁻¹)、 $\rho \doteq 1$ (g · m⁻³)、 $g = 980.7$ (cm · sec⁻²)、 $\alpha \doteq 0$ であるとする、(3)式は次のようになる。

$$r \text{ (cm)} = 0.15 / h \text{ (cm)} \dots\dots\dots(4)$$

ある吸引圧 h で安定している土壌に保持されている水分は、吸引圧 h に相当する間隙径 r より小さい間隙部分に存在していると考えられる。つまり、吸引圧を $h_1, h_2, h_3 \dots h_4$ と徐々に大きくすれば、飽和されている土壌の水分は、 r_1 以上の大きさの間隙から、次に r_1 と r_2, r_2 と $r_3 \dots r_{n-1}$ と r_n の間の大きさにある大きい間隙から、次々と排除されていく。そして、空気はその水の排除された間隙から次々と流れるものと考えられる。吸引圧 h_n で水分が安定している土壌を流れる空気量は、間隙径 r_1 以上の大きさの間隙を流れる空気量から始まり、最小の間隙径 r_{n-1} と r_n の間の大きさの間隙を流れる空気量の総和として求められる。

この Hagen-Poiseuille の法則を空気の流れに適用してみる。吸引圧 h_n で安定している試料の両端に圧力差 P を生じさせると試料を流れる単位時間当たりの流量は次のようになる。

$$Q = (\text{間隙径 } r_1 \text{ 以上の間隙を流れる空気量}) + (\text{間隙径 } r_1 \text{ と } r_2 \text{ の間の大きさの間隙を流れる空気量}) + \dots\dots\dots$$

+ (間隙径 r_{n-1} と r_n の間の大きさの間隙を流れる空気量)

$$\begin{aligned} \therefore Q &= c_0 + c_1 \cdot a_1 \frac{\bar{r}_1^2}{8\eta} \cdot \frac{P}{L} + c_2 \cdot a_2 \frac{\bar{r}_2^2}{8\eta} \cdot \frac{P}{L} + \dots \\ &\quad + c_n \cdot a_n \frac{\bar{r}_n^2}{8\eta} \cdot \frac{P}{L} \\ &= c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot a_i \frac{\bar{r}_i^2}{8\eta} \cdot \frac{P}{L} \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

但し、 \bar{r}_i : 間隙径 r_i と r_{i+1} の間の大きさに相当する間隙の平均半径

c_i : 間隙径 \bar{r}_i の間隙に関する定数

a_i : 間隙径 \bar{r}_i の間隙の断面積

(5)式にDarcy則を連立させると、(6)式になる。

$$\begin{aligned} Q &= (K_a/\eta) \cdot (P/L) \cdot A \\ K_{a_i} &= c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \frac{\bar{r}_i^2}{8} \cdot \frac{a_i}{A} \\ &= c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \frac{\bar{r}_i^2}{8\eta} P_{a_i} \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

但し、 P_{a_i} : 間隙径 r_i と r_{i+1} の間の大きさに相当する間隙の間隙率、水で満たされると考えられる場合はゼロとする。

以上により間隙構造を考慮した通気係数算出式を導いた。そこで、間隙分布を考慮し、(6)式により通気係数と気相率との関係をみた場合と単に通気係数と気相率との関係をみた場合とを比較してみた。

100cc 定容積採土した試料を一旦水で飽和させて、そののち吸引法により徐々に含水量を減らしていく。pF値が 0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 の大きさで安定した時の通気係数を長田の測定装置を用いて測定した。試料は砂丘砂とマサ土について行なった。

吸引圧 h_i と h_{i+1} の間の大きさに相当する間隙の平均半径 \bar{r}_i は(8)式によって算出した。

$$\bar{r}_i = \frac{\int_{h_i}^{h_{i+1}} r dr}{h_{i+1} - h_i} = \frac{0.15}{h_{i+1} - h_i} \ln \frac{h_{i+1}}{h_i} \dots\dots(8)$$

pF 0 以上に存在する間隙の間隙径は(8)式で算出できないので、定数 c_0 に含めて解析した。

図-10に砂丘砂の、図-11にマサ土の通気係数と気相率との関係を示した。また、表-3、表-4に長田の示す関係式、直線式、間隙分布を考慮した関係式をそれぞれ示し、その相関係数も同表にまとめ

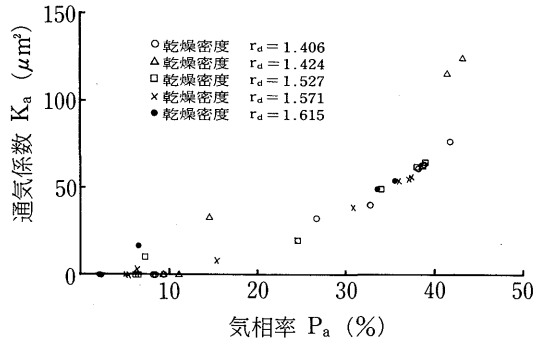


図-10 吸引法によって含水量を変えた場合の通気係数の変化 (長田の測定法—砂丘砂)

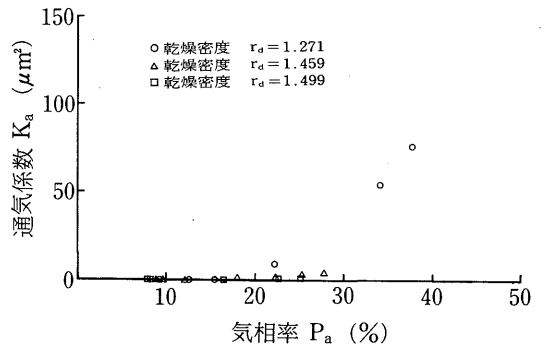


図-11 吸引法によって含水量を変えた場合の通気係数の変化 (長田の測定法—マサ土)

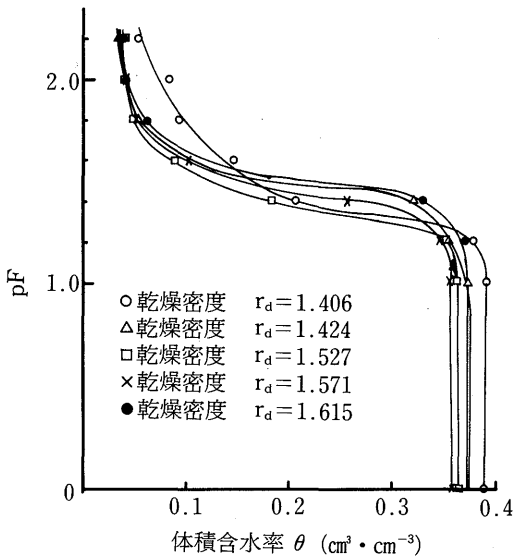
て示した。砂丘砂については、図-1~8に示したほどには同一気相率に対する通気係数の差がみとめられない。これは、頻繁に通気係数の測定を行なったため、土壌構造が変化し、大間隙がなくなったためと考えられる。しかし、間隙径を考慮した場合、通気係数の関係式のあてはめ精度は、かなり良くなっている。通気係数によって通気性の良否を判定する場合、気相率の大小のみでは把握できなかったものが、土壌中の間隙径分布を考慮することにより、より一層正確に把握できることがわかった。本研究では、間隙の性質として間隙径の大きさを用いて検討したが、算出した重回帰式の係数をみると、単に間隙径が大きいというのみでは通気しやすいとは言えないようである。間隙の連続性や空気の温度による影響など、他に多くの要因について検討する必要がある

表一 含水量により気相率を変えた場合の通気係数の関数 (砂丘砂)

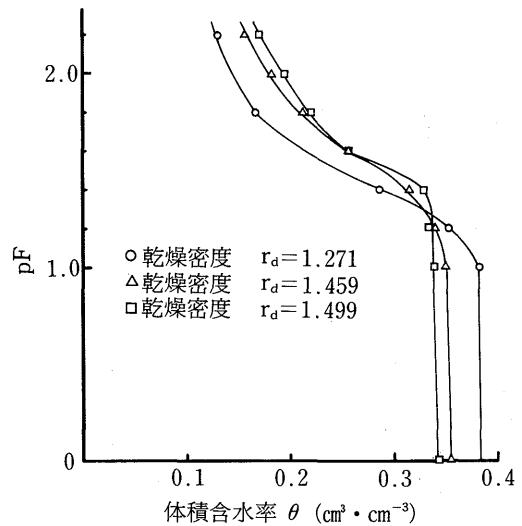
	関 係	式	相関係数
logK _a = a P _a + b (変異点あり)	非毛管間隙	0.64P _a - 17.63	0.72
	毛管間隙	0.04P _a + 0.20	0.92
logK _a = a P _a + b (変異点なし)		0.50P _a - 16.24	0.79
K _a = a P _a + b		2.19P _a - 14.69	0.90
重 回 帰 式		4.83 + 0.18P _{a1} + 21.00P _{a2} + 5.80P _{a3} + 2.31P _{a4} + 2.21P _{a5} + 2.65P _{a6} + 4.97P _{a7}	0.94

表一 含水量により気相率を変えた場合の通気係数の関数 (マサ土)

	関 係	式	相関係数
logK _a = a P _a + b (変異差あり)	非毛管間隙	1.33P _a - 30.51	0.91
	毛管間隙	0.10P _a - 1.80	0.84
logK _a = a P _a + b (変異点なし)		0.87P _a - 24.35	0.87
K _a = a P _a + b		1.87P _a - 24.81	0.79
重 回 帰 式		-0.84 - 40.91P _{a1} + 1.25P _{a2} + 5.11P _{a3} - 0.22P _{a4} + 2.95P _{a5} + 1.49P _{a6} - 3.62P _{a7}	0.89



図一12 土壌水分特性曲線 (砂丘砂)



図一13 土壌水分特性曲線 (マサ土)

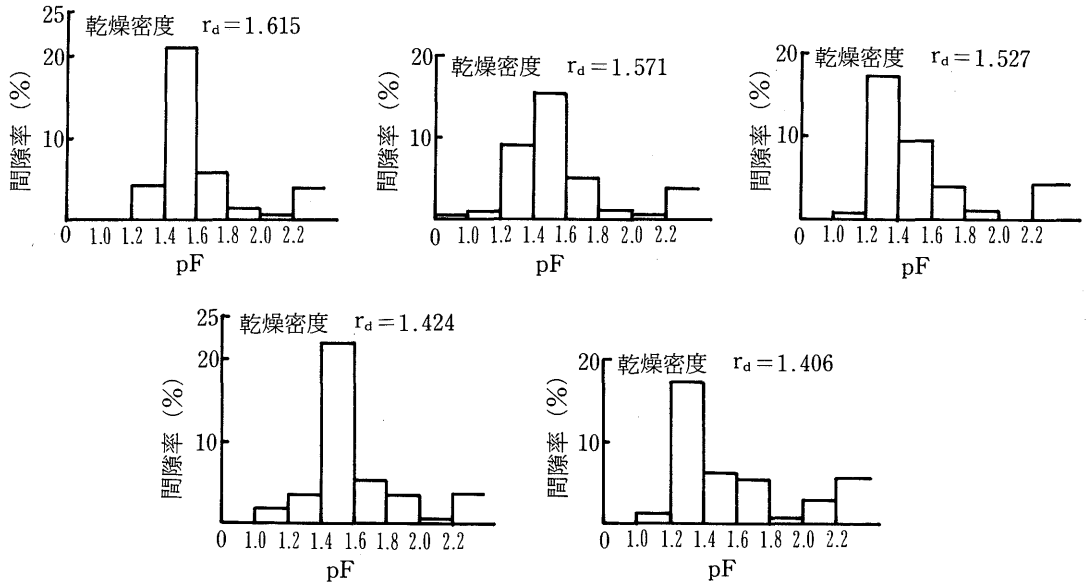


図-14 吸引圧-間隙分布 (砂丘砂)

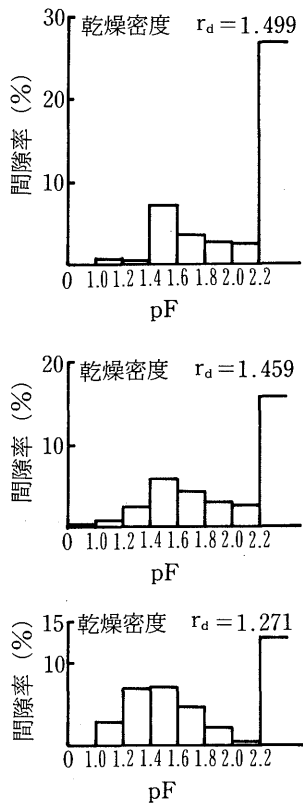


図-15 吸引圧-間隙分布 (マサ土)

と考えられる。

また、間隙径分布は、土壌水分特性曲線の解析により得られるが、このことは、土壌水分特性曲線を解析すれば、それによって通気性を高い相関をもって評価できることを示している。図-12に砂丘砂の、図-13にマサ土の土壌水分特性曲線を、図-14に砂丘砂の、図-15にマサ土の間隙径分布を示している。土壌状態により間隙径の分布状態が異なることが理解できる。砂丘畑の特色として、土壌間隙の多くが pF1.2~pF1.8の大きさに相当する間隙径から構成されており、そこに存在する間隙に通気性が大きく影響されるようである。

4. あとがき

砂丘畑の三相構造、間隙系構造と通気性との関係を実験により明らかにしてきた。主として、単純な砂粒子から成る砂丘畑であっても、三相構造、間隙系構造は環境はもとより、存在状態により種々異なり、流体の透過性には複雑な結果をもたらす。したがって、透過性の評価には、単粒構造の砂丘畑であっても、間隙の量のみの把握ではなく、大小間隙径の分布などを量的に把握し、それらを考慮した評価

が必要である。

文 献

- 1) Glinski, J. and Stepniewski, W., 1985. Soil Aeration and Its Role, CRC Press, 39—45
- 2) Marshall, J., 1959. Relations between Water and Soil, Commonwealth Agricultural Bureaux Farnham Royal Bucks England, 25—38
- 3) 長田昇, 1963. 土壌の通気性に関する実験的研究 (I) 土壌の通気性について, 農業土木研究別冊 第7号, 37—42
- 4) 長田昇, 1963. 土壌の通気性に関する実験的研究 (II) 通気間隙の変異点について, 農業土木研究別冊 第7号, 43—48
- 5) 安田環, 大崎亥佐雄, 1972. 土壌空気に関する研究 第2報 武豊土壌の通気性について, 東海近畿農試研報 第24号, 94—104
- 6) 安田環, 1976. 土壌の通気性測定の評価, 土壌の物理性 第33号, 43—48
- 7) 八幡敏雄, 1975. 土壌の物理, 東京大学出版会, 8—22, 71—123
- 8) 土壌物理性測定法委員会編, 1972. 土壌物理性測定法, 養賢堂, 1—52, 83—87, 141—145, 255—277
- 9) Tanner, C. B. and Wengel, R. W. 1957. An air permeameter for field and laboratory use, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21, 663—664