

砂丘畑の通気性に関する研究 (1)

—測定法とその適応性—

小谷 佳人*・矢野 友久*・大深 正徳*

Air Permeability through Sand Dune Soil Fields (1) —Air Permeability Measuring Methods and Their Applicability to Sand Dune Soil Fields—

Yoshihito KODANI*, Tomohisa YANO* and Masanori OFUKA*

Summary

In this report, three methods for the measurement of air permeability through soil were tested for the possibility of application to sand dune soil fields. The three methods were those of Tanner & Wengel, Evans & Kirkham, and Nagata.

The results obtained were as follows :

With the method of Tanner & Wengel, a linear relation was observed between the quantity of gas flow and the measuring time which elapsed after applied air started to flow through the soil, although the soil condition was so dry that the flow of gas was rapid.

With the method of Evans & Kirkham, it was found that the logarithmic value of pressure in the air tank did not change lineally with the elapse of measuring time after applied air started to flow through the soil. This method seemed to be applicable during only short measuring times, in which a linear relation was obtained between the logarithmic value of pressure and the elapsed measuring time. However, air permeability was changed by initial pressure in the air tank.

With the method of Nagata, a linear relation was observed between the average gas flow and the gradient of applied pressure. But it was necessary that the pressure difference between the two ends of the soil sample be less than $2 \text{ (cmH}_2\text{O} \cdot \text{cm}^{-1})$.

As a result of our examination, it was found that the two methods of Tanner & Wengel and Nagata were applicable to measure the air permeability in sand dune soil fields.

* 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.*

1. ま え が き

土壌ガスと大気とのガス交換の過程は、土壌の通気とよばれ、大きく分けて2つの過程によって行なわれる。1つは空気交換 (Mass flow of air) であり、湿度差、気圧差、風、土壌含水量などの気象要因、土壌状態などが影響する場合である。他方はガス拡散 (Gaseous diffusion) であり、土壌空気と大気との間に生じる濃度差、あるいは分圧差が影響する場合である。これらの過程に基づく土壌通気性の問題は、多くの研究者に取り上げられ、それぞれの過程における通気性の良否を判定する方法、ならびに、測定装置が紹介されてきた¹⁻⁶⁾

砂丘畑における通気性は一般に良好と言われており、土壌物理性の1つの特性である。この通気性は、かんがい、排水による土壌水分状態の変化、即ち、三相分布が異なれば、それにつれて変化する。したがって、通気性は土壌状態と密接な関係にあり、土壌構造を表わす1つの指標として用いることもできる。本研究は、砂丘畑における通気性と土壌の三相、土壌構造との関係を明らかにする目的で行なったものであるが、ここでは、空気交換の立場より通気性の良否を判定する方法として、測定方法を代表すると思われる Tanner と Wengel (1957), Evans と Kirkham (1949), 長田 (1963) の3種類の通気性測定法を取り上げ、これらの砂丘畑での通気性測定への適応性について検討、考察した。

2. 測 定 原 理^{1,6)}

土壌中の空気の流れは、下記の制限条件のもとに Darcy 則に従い、次のように成り立つものとして行うことができる。

$$v = - (K_a / \eta) \cdot (dp / dx) \dots\dots\dots(1)$$

但し、 v : フラックス ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot sec^{-1}$)

K_a : 通気係数 ($\mu m^2 = 10^{-12} m^2$)

η : 粘性係数 ($P_a \cdot sec$)

dp/dx : 圧力勾配 ($P_a \cdot m^{-1}$)

水のような非圧縮性流体の場合は微小距離 dx に対して、フラックス v は一定であり、(1)式を積分することも可能であるが、空気の場合は圧縮性を考慮しなければならない。そこで、次のような制限条件を

加えることにした。

[制限条件]

- ①流れは粘性流であり、層流である。
- ②流れは定常状態であり、質量保存則に従う。
- ③等温変化を行なう。

以上の条件を考慮して、理論的に誘導された各測定法の通気係数算出式を示すと次のようである。

[Tanner と Wengel の測定法]

$$Q = (K_a / \eta) \cdot (P_e / L) \cdot A \cdot t \dots\dots(2)$$

但し、 Q : 通気量 (m^3)

K_a : 通気係数 (μm^2)

η : 粘性係数 ($P_a \cdot sec$)

P_e : 試料端での圧力差 (P_a)

L : 試料長 (m)

A : 試料断面積 (m^2)

t : 通気時間 (sec)

[Evans と Kirkham の測定法]

$$\log_e(y_0 / y_1) = \frac{(K_a \cdot A \cdot P_a) \cdot t}{(\eta \cdot L \cdot V)} \dots\dots\dots(3)$$

但し、 y_0, y_1 : 通気開始時、及び終了時のタンク内部圧 ($cm H_2O$)

P_a : 大気圧 (P_a)

V : タンク容量 (m^3)

[長田の測定法]

$$q = (K_a / \eta) \cdot (P_e / L) \cdot A \dots\dots\dots(4)$$

但し、 q : 平均容積流量 (m^3 / sec)

長田の測定法における通気係数と Tanner と Wengel の測定法、Evans と Kirkham の測定法における通気係数とが比較できるように通気係数の単位を統一したため、(4)式には粘性係数の項目が加えられた。そのため、(4)式は長田の示している通気係数算出式と多少異なっている。

これらの式が砂丘畑における空気の流れに適応するかどうか検討した。最初に、Tanner と Wengel の測定法の(2)式において、通気係数測定の間は、

$$(K_a / \eta) \cdot (P_e / L) \cdot A = const.$$

であるので、

$$S_1 = (K_a / \eta) \cdot (P_e / L) \cdot A$$

とおく。すると、

$$Q = S_1 \cdot t \dots\dots\dots(5)$$

となり、通気量と通気時間とが比例関係にあること

が導かれる。すなわち、TannerとWengelの測定装置を用いた場合、一定の割合で空気が流れるので、測定時間を任意に変えても通気係数を求めることには何らさしつかえない。

EvansとKirkhamの測定法、長田の測定法についても同様に(3)式、(4)式において一定となるものを S_2 、 S_3 とおき、適応性を検討する式を導くと、次のようになる。

[EvansとKirkhamの測定法]

(3)式において、

$$(K_a \cdot A \cdot P\alpha) / (\eta \cdot L \cdot V) = \text{const.}$$

$$\therefore S_2 = (K_a \cdot A \cdot P\alpha) / (\eta \cdot L \cdot V)$$

$$\therefore \log_e (y_0 / y_1) = S_2 \cdot t$$

$$\therefore \log_e y_1 = -S_2 \cdot t + \log_e y_0 \dots\dots\dots(6)$$

[長田の測定法]

(4)式において、

$$(K_a / \eta) \cdot A = \text{const.}$$

$$\therefore S_3 = (K_a / \eta) \cdot A$$

$$\therefore q = S_3 \cdot (P_e / L) \dots\dots\dots(7)$$

以上の各式が土壌内を流れる空気について成り立つかどうか実験により検討した。

3. 実験方法

TannerとWengelの測定法、EvansとKirkhamの測定法は圃場測定、長田の測定法は室内測定である。測定はそれぞれの測定法の研究者によって示された方法に従って行なった。測定は、鳥取大学農学部砂丘利用研究施設内の砂丘圃場とその場所より採取した砂丘砂について行なった。

[TannerとWengelの測定法]

TannerとWengelの測定装置の概略図は図-1に示す。フロート内の空気はフロート自重により圧縮される。通気バルブを開くと同時にフロートは降下し、フロート内の圧縮空気はゴム連結管、シリンダーを通過して土壌へと流れ込む。この時の通気量と通気時間を測定した。シリンダーの埋設深さは5cmとし、シリンダー内、及び、その付近の含水量はできるだけ均一になるようにした。

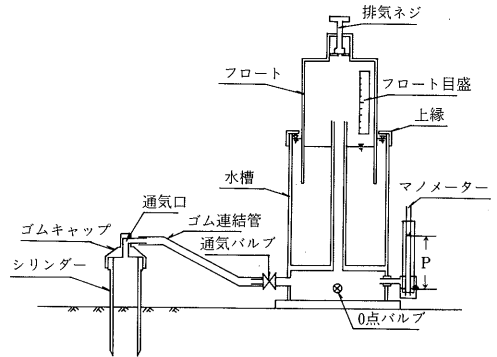


図-1 TannerとWengelの測定装置

[EvansとKirkhamの測定法]

EvansとKirkhamの測定装置の概略図は図-2に示す。ポンプによりエアータンク内の圧力を高め、一旦静止させる。ついで、通気バルブを開くことにより、圧縮空気を土壌へ送り込む。この時、通気時間に伴い、タンクの内部圧は徐々に下がるので、通気時間に対する内部圧を測定した。シリンダー埋設深さは5cmとし、シリンダー内、及び、その付近の含水量はできるだけ均一になるようにした。

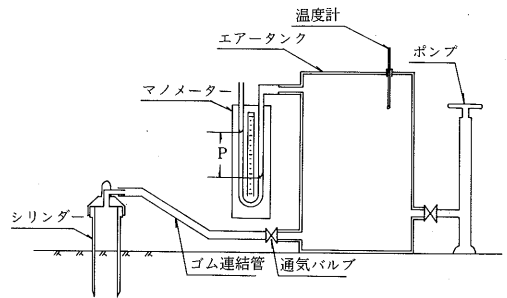


図-2 EvansとKirkhamの測定装置

[長田の測定法]

長田の測定装置の概略図は図-3に示す。吸引ポンプにより吸引していくと、調圧タンク内が減圧され、試料室も減圧される。したがって、試料室は大気圧以下となり、試料の両端に圧力差が生じる。ガスマーターを通して空気が入り込み、試料を透過していく。調圧ポンプを操作することにより圧力勾配

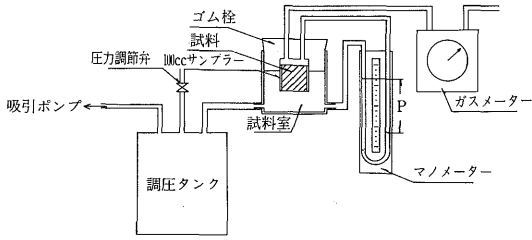


図-3 長田の測定装置

の大きさを変化させ、その時のフラックスを測定した。試料は100cc定容積サンプリャーにより採土したものを使用した。長田の測定法では、流速が非常に速く、肉眼によるフラックスの測定が困難だったためビデオカメラを利用した。

4. 実験結果及び考察

(イ) TannerとWengelの測定法

通気量と通気時間との関係を図-4に示した。この時の土壤状態は、気相率が38.3%、体積含水率が0.37%、仮比重が1.64、土壤温度が49.8°Cであった。非常に乾燥した状態であり、間隙はほとんど気相で占められている。土壤中の空気の流れやすさは気相の大きさにより影響されると考えられるならば、このような土壤状態は、最も空気の流れに影響しない、

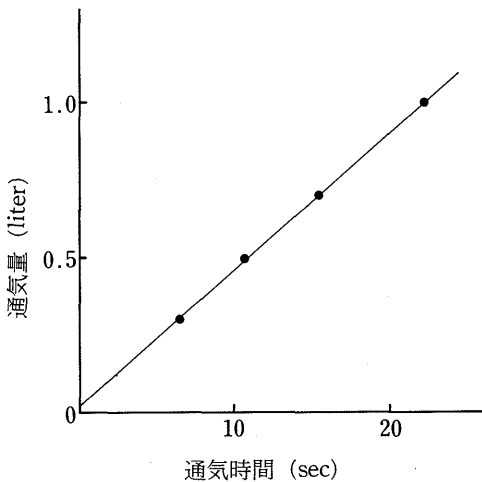


図-4 TannerとWengelの測定法の砂丘畑における適応性

流速が最も速くなる状態と考えられる。このような土壤状態であっても、図-4にみられるように通気量と通気時間との関係に直線関係が認められるで、他の状態でも同様に直線関係が認められるであろう。したがって、砂丘畑でのTannerとWengelの測定法による通気係数の測定が可能であると考えられる。

(ロ) EvansとKirkhamの測定法

気相率が、28.9%、26.2%、24.9%の土壤状態のときに、測定開始時のタンク内部圧と大気圧との差を水頭で示し、それを39.2cm、19.2cm、9.2cmに変えて(6)式が成り立つかどうか検討した。その結果を図-5~7に示した。

通気時間とタンク内部圧の対数値との関係は、ゆるやかな曲線となり、(6)式のような直線関係にならない。このことは、タンクより流出される空気量が一定でないことを示している。すなわち、土壤中を流れる空気は定常状態であるという仮定(制限条件)が満足されていないということになる。したがって、

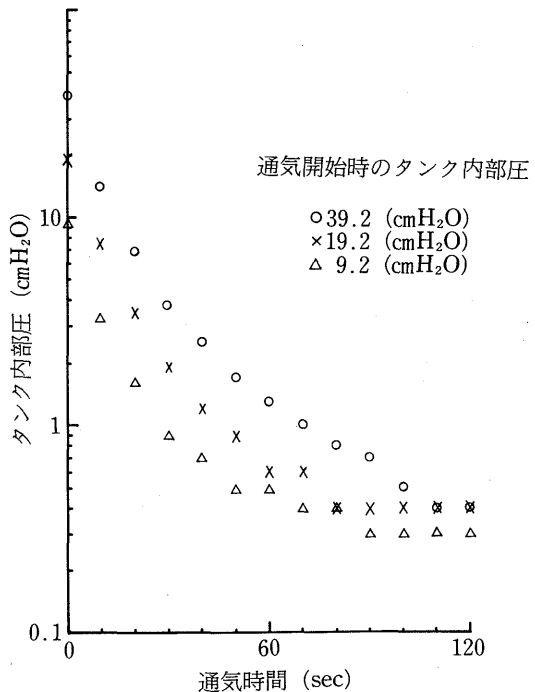


図-5 EvansとKirkhamの測定法の砂丘畑における適応性 (気相率=28.9%)

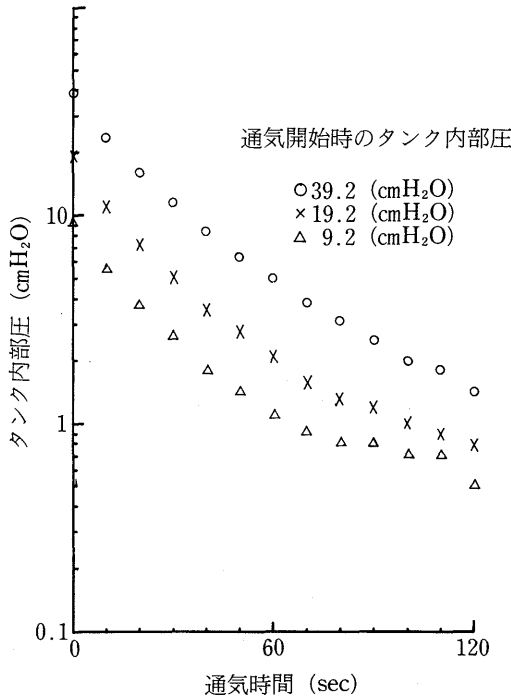


図-6 EvansとKirkhamの測定法の砂丘畑における適応性 (気相率=26.2%)

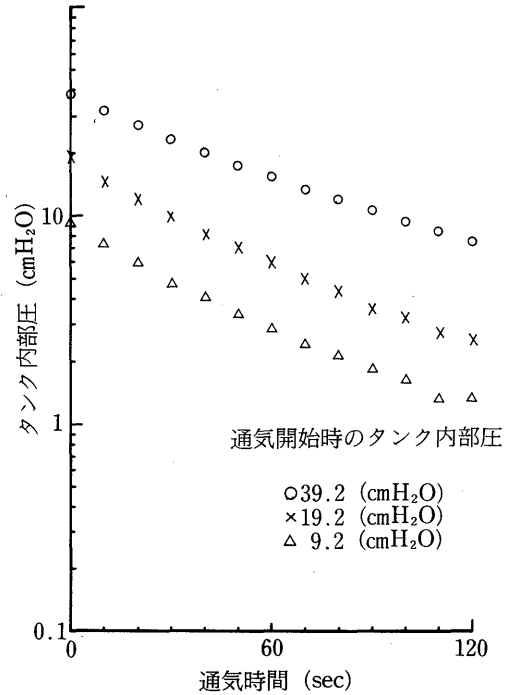


図-7 EvansとKirkhamの測定法の砂丘畑における適応性 (気相率=24.9%)

砂丘畑での通気性の測定には, EvansとKirkhamの測定法は, その適用に問題があるようである。

仮に, 通気時間の短い範囲では直線関係が認められるとしても, 通気開始時のタンク内部圧の大きさにより, タンク内部圧の変化の仕方が異なる。また, 直線とみなしてもさしつかえない測定時間が気相率の大きさによって異なるので測定操作が難しい。

今, 気相率が24.9%の状態において通気時間を0~60secとし, 通気開始時のタンク内部圧を39.2cmと9.2cmとした場合での通気係数を算出してみると,

$$K_a (39.2\text{cm}) = 8.58 (\mu\text{m}^2)$$

$$K_a (9.2\text{cm}) = 10.78 (\mu\text{m}^2)$$

と異なる。また, 通気開始時のタンク内部圧を39.2cmとし, 測定時間を通気開始時より0~10secと0~120secとした場合について比較しても通気係数が次のように異なる。

$$K_a (0 \sim 10\text{sec}) = 11.20 (\mu\text{m}^2)$$

$$K_a (0 \sim 120\text{sec}) = 7.55 (\mu\text{m}^2)$$

タンクより流出される空気量と土壌状態との関係, 温度による空気の流れに対する影響などを考え, EvansとKirkhamの測定法の砂丘畑での適用には, さらに検討していく必要がある。

(イ) 長田の測定法

同一試料の両端での圧力差を徐々に大きくしていき, フラックスと圧力勾配との関係が直線関係にあるか検討した。その結果の一例を図-8に示した。

比較的気相率が大きい試料では, 圧力勾配のわずかな変化に対してもフラックスが急激に, 気相率が小さい試料ではゆるやかに反応したが, どのような試料であっても圧力勾配が2以下の範囲にあれば, フラックスと圧力勾配の間には直線関係が認められた。

Lindquist¹⁰⁾によると, 地下水運動の Reynolds 数は, 土砂の平均径を d , 地下水速度を v とした場合,

$$Re = v \cdot d / \nu$$

但し, Re : Reynolds数

ν : 動粘性係数

と表され, $Re < 4$ において, 流れは層流状態であり, Darcy則が適用できることが示されている。本研究で長田の測定法によって得られたデータのうち, 圧力勾配が2の時に最もフラックスが大きかった場合の Reynolds数を計算してみると

$$Re = 15.2$$

となり, Darcy則が適用できないことになる。圧力勾配が2以下の部分では, 相関係数が0.98以上の直線関係が認められるにもかかわらず, Reynolds数より判断すると空気の流れが乱流状態になっているのは, 流体が空気と水と異なっているためと考えられる。この点については, さらに検討していく必要がある。但し, この計算には砂丘砂の粒径 (d) を最大と考えられる 2 mmとして計算したため若干 Reynolds数が大きくなったと考えられる。

したがって, 圧力勾配を十分に小さくして2以下にして測定すれば, 砂丘畑での長田の測定法による通気係数測定が可能と考えられる。

長田の測定法による砂丘砂での通気係数測定結果の一例をマサ土の測定結果とともに表-1に示した。この結果は, 一旦水で飽和させた砂丘砂, マサ土を

表-1 長田の測定法により測定された通気係数

pF	1.0	1.2	1.4	1.8	2.2
砂丘砂	0.0	0.0	32.4	113.7	122.6
マサ土	0.0	0.0	8.9	53.1	74.7

(μm^2)

吸引することにより徐々に脱水させていき, pF1.0, 1.2, 1.4, 1.8, 2.2と土壌が安定した状態の時に測定した通気係数を示したものである。土壌水分状態, 即ち, 気相の大きさにより倍率は異なるが, 砂丘砂の方がマサ土に比べてはるかに通気性の土壌状態にある。

5. あ と が き

以上, 通気性測定法を代表するとみられる3つの方法により砂丘畑での適応性を検討した。その結果, TannerとWengelの測定法, 長田の測定法が砂丘畑での測定に適用できることがわかった。但し, 長田の測定法においては, 圧力勾配を2以下になるように小さくし, 空気の流速を小さくしなければならない。

今後, これらの測定法により得られる通気係数と土壌三相, 土壌構造との関係を明らかにしていくつもりである。

(要旨は第41回農業土木学会中国四国支部講演会(昭和61年)にて発表)

文 献

- 1) Evans, D. D., and Kirkham, Don., 1949. Measurement of air permeability of soil in situ., Soil Sci. Soc. Am. Proc. 14, 65-73
- 2) Kirkham, Don., 1946. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 11, 93-99.
- 3) Tanner, C. B., and Wengel, R. W., 1957. An air permeameter for field and laboratory use, Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21, 663-664.
- 4) Black, C. A., 1965. Methods for Soil Analysis, Part 1.

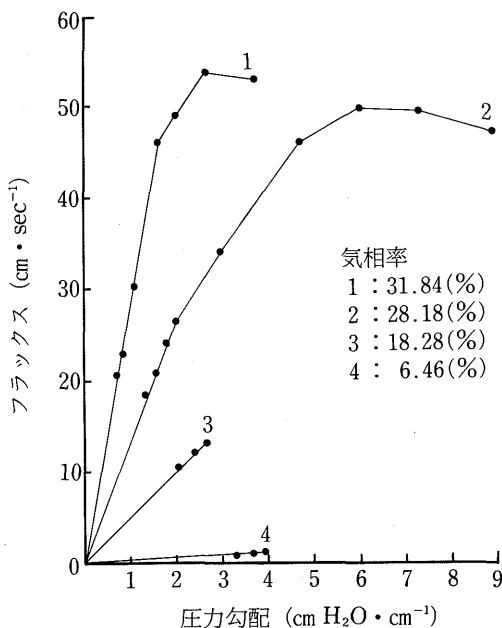


図-8 長田の測定法の砂丘畑における適応性

- Physical and Mineralogical properties, Including Statics of Measurement and Sampling. American Society of Agronomy, Inc. Publisher. U. S. A., 319—330.
- 5) 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
 - 6) 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
 - 7) 安田環, 大崎玄佐雄, 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
 - 8) 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
 - 9) 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
 - 10) 本間仁, 安芸皎一編, 1962. 物部水理学, 岩波書店, 532