

砂丘畑における土壌水分測定のための テンシオメータ法と温度の関係

小谷佳人*・矢野友久*・坂本捷典*

Effect of Air- and Soil-Temperature on Using Tensiometer in Sand Dune Soil Field

Yoshihito KODANI*, Tomohisa YANO* and Katunori SAKAMOTO*

Summary

In sand dune soil fields, it is difficult to estimate the exact soil water content by using tensiometers, because the value of soil water suction which tensiometers in situ indicate do not seem to be correct.

In this paper, a modified method is proposed which gives the actual value of soil water suction from the tensiometer's read value by using observed values of air and soil temperature. This was examined by observing the total head and soil water profiles and the relation between hydraulic conductivity and soil water content, which were obtained from the modified soil water suctions and the estimated soil water content.

The results obtained were as follows :

- 1) The relationship between soil water suction (h) and soil water content (θ) was not sufficiently estimated from in situ measurements.
- 2) By carrying out laboratory experiments an empirical equation of the h - θ relation was made : $\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / \{1 + (0.05h)^{8.62}\}^{0.32}$, where θ_s was the saturated water content and θ_r was the residual water content.
- 3) By using simultaneous data from a tensiometer, air temperature (t_a) and soil temperature (t_b) in the same depth where the tensiometer was set, two modified equations for h were obtained.

$$A) h' = h - 23.04 + 0.297t_a + 1.86t_b + 0.864h - 0.0626t_b, h \dots\dots\dots \text{eq. (4)}$$

$$B) h' = h + 18.53 + 1.49t_a - 1.98t_b, \dots\dots\dots \text{eq. (5)}$$

where h' was modified soil water suction.

- 4) As a result of examining these two equations, it was found that eq. (4) was better than eq. (5).

* 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

畑地の土壌水分吸引圧、土壌水分量の測定には一般にテンシオメータが用いられる。砂丘畑の場合も例外ではない。しかし、砂丘畑での場合は土壌が砂質であり、それに伴う物理性が他の土壌とは非常に異なるために測定上に考えねばならない問題が生じる。例えば、降雨もなく、灌がいてもなくて土壌水分の変化がみられない時でも、テンシオメータには変化がみられ、前日の値よりも低い値が生じるなどである。

本研究は、砂丘畑においてテンシオメータを利用し土壌水分吸引圧、土壌水分量の正確な値を求める場合に考慮せねばならない気温、地温との関係を研究したものであり、これら関数とした補正式を検討、提案した。

なお、この検証は全水頭と土壌水分量のプロフィールを描くことによって行ない、次いでこの土壌水分吸引圧と土壌水分量を用いて不飽和透水係数の算出も試みた。

II 実 験 方 法

測定は鳥取大学農学部附属砂丘利用研究施設にある大型ハウス内の砂丘畑にて行なった。吸引圧は土壌深さ5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 50cm, 70cm, 90cmの各深さにテンシオメータ(水銀柱式)を2本ずつ埋設して測定し、気温、地温は地上1.5mと深さ5cm, 15cm, 25cm, 35cmの土壌中とに白金測温抵抗体を設置して測定した。

測定は昭和61年5月中旬から6月下旬の期間に行ない、かん水は計3回、1回に約100mmの水を量水器付き散水器で約1時間かん水した。かん水後直ちに地表面をビニール・カバーで被覆して、かん水直後、15分後、30分後、1時間後、2時間後、4時間後、8時間後、1日後、それから毎日一定時刻に7日後までの時間にわたって、pF値、気温、地温を測定した。また、それと同時刻に、深さ5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 50cm, 70cm, 90cmの土壌含水比の測定を直接採土法で行なった。同時に、上記各深さの仮比重を定容積100ccサンプラーで採土、測定(各深さ毎に6つの試料を採土)し、含水比に仮比重を乗じること

により、土壌水分量を体積含水率で表わした。

一方、室内測定として、仮比重が砂丘畑の仮比重の範囲内(1.42~1.49)に収まるように充填した試料を用いて、土柱法(pF0~pF1.63), 加圧板法(pF1.75~pF3.00), 遠心法(pF2.64~pF4.19)の各試験を行ない、砂丘砂の脱水過程における土壌水分特性曲線を測定した。

III 結果と考察

III-1 土壌水分特性曲線

土柱法、加圧板法、遠心法にはそれぞれ3つの試料を用いて測定を行なった。その平均値を使って、Van Genuchten⁽¹⁾の式へのあてはめを行ない、土壌水分量と吸引圧との関係を示す次のような実験式を得た。

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\{1 + (0.05h)^{8.62}\}^{0.32}} \dots\dots(1)$$

ここで、 θ : 土壌水分量 (cm³/cm³)

θ_s : 飽和水分量 (cm³/cm³)

θ_r : 残留水分量 (cm³/cm³)

h : 吸引圧 (cm H₂O)

なお、飽和水分量としては土柱法における測定値の中で最大の水分量を示す値($\theta_s=0.356$)を、残留水分量としてはpF=4.2の時の水分量($\theta_r=0.026$)を採用した。また、土柱法、加圧板法、遠心法による各測定pFの測定精度が異なるため、あてはめの際

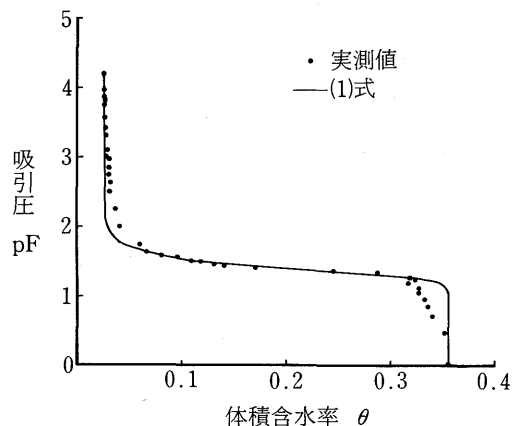


Fig. 1 室内測定による吸引圧 (pF) と体積含水率 (θ) の関係

には重み付き最小自乗法を使用せねばならないが、測定試料の個数が3つと少ないこと、圃場でのpF値が1.0から2.0までの範囲に集中していることから、各測定pFでの測定精度が一定であるとみなして計算した。実験定数0.05, 8.62, 0.32に対するt値はそれぞれ16.8, 3.57, 2.57であり、確率値はそれぞれ0.001以下, 0.001以下, 0.02以下となり、非常に有意である。

各測定pFの測定結果(平均値)と(1)式との関係をFig. 1に示した。土壌水分量が0.30以上と0.05以下では測定結果と(1)式との適合度が悪くなっているが、圃場で測定した土壌水分量の大部分を占める0.05から0.25の範囲では可成り良く適合している。

(1)式を呼引圧hについて解くと、

$$h = \{[(\theta_s - \theta_r) / (\theta - \theta_r)]^{(1/0.32)} - 1\}^{(1/8.62)} / 0.05 \dots\dots\dots(2)$$

となる。この式は土壌水分量 θ が既知のときにそれに対応する吸引圧hを計算する場合に用いられる。

III-2 テンシオメータの読み(目盛)に与える 気温、地温の影響

Fig. 2は、5月20日から5月26日までの1週間における土壌深さ70cm(地温の変化が比較的少ないと思われる深さ)の体積含水率とそのときのpF値、および気温の変化を示したものである。

体積含水率の日変化は、やや漸減しているように見えるが、ほとんどないと言ってよいほどの変化である。したがって、pF値の変化もほとんどないと考

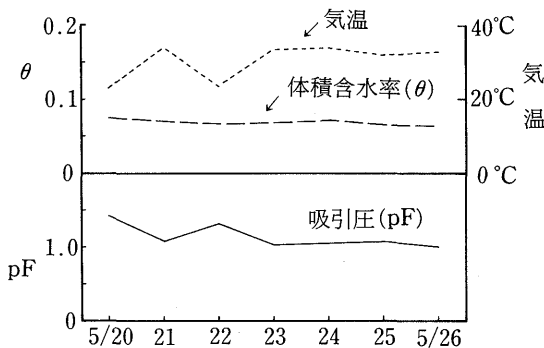


Fig. 2 気温と土壌深さ70cmの体積含水率、吸引圧の日変化

えられるが、実際にはpF値の変化は大きくなっており、その変化の仕方は気温の変化の仕方と丁度相反する傾向を示している。このことは、pF値すなわちテンシオメータの読みが明らかに気温と何らかの相関関係にあることを示唆しているものとみることが出来る。

温度の関係についての報告では、地温が土壌水分特性曲線に対して影響を与えているという報告^{(2),(3),(4)}もある。

そこで、気温、地温がどのようにテンシオメータの読みに影響を与えるかを考察する。

(1) 気温の影響について

気温の場合は、テンシオメータのポーラスカップ部分とマンオメータ部分を結ぶ管の中の水の体積及びエア溜めの空気の体積に対する影響が主たるものであろう。

この体積変化量は、気温を t_a °Cと表わせば、 t_a に比例した形でテンシオメータの読みに増減される。すなわち、 $a'(t_a - t_{a0})$ をテンシオメータの読みに加えればその影響が表わされる。ここで a' は定数、 t_{a0} は基準となる気温である。

(2) 地温の影響について

地温の場合には、次の2つが考えられる。まず、一つの場合は、テンシオメータのポーラスカップ部分の中の水の体積に影響するものである。この影響の仕方は、気温のそれと同じで、今、地温を t_b °Cとすると、テンシオメータの読みに $b'(t_b - t_{b0})$ (b' は定数、 t_{b0} は基準となる地温)を加える形となる。

次に、もう一つの場合は、土壌中の土壌水の表面張力等の土壌物理的現象に対する影響が考えられる。この場合その影響は直接吸引圧hにかかるものであり、影響の度合いは(吸引圧×温度)の形を採るものと思われる。すなわち、 $c'(t_b - t_{b0}) \cdot h$ (c' は定数)をテンシオメータの読みに加えれば良い。

以上によりテンシオメータの読みに対する温度の影響を補正する式は、補正される吸引圧を h' で示すと次のように書き表わすことが出来る。

$$h' = h + a' \cdot (t_a - t_{a0}) + b' \cdot (t_b - t_{b0}) + c' \cdot h \cdot (t_b - t_{b0}) \dots\dots\dots(3)$$

この式の右辺を展開して、 $-(a' \cdot t_{a0} + b' \cdot t_{b0})$ をaに、 a' をb、 b' をc、 $-c' \cdot t_{b0}$ をd、 c' をeにそれぞれ

置きかえれば、この式は次のような形に書くことが出来る。

$$h' = h + a + b \cdot t_a + c \cdot t_b + d \cdot h + e \cdot h \cdot t_b \dots\dots\dots(4)$$

- ここで、 h' ：補正された吸引圧 (cm H₂O)
- h ：圃場で測定されるテンシオメータの読みによる吸引圧 (cm H₂O)
- t_a ：気温 (°C)
- t_b ：地温 (°C)
- a, b, c, d, e ：定数

上式の a, b, c, d, e の決定には次の2つの方法が考えられる。

一つは、水、空気、水銀の熱膨張率、テンシオメータのポーラスカップ部とマノメータ部及びその2つを結ぶ管の部分の材質の熱膨張率、土壤中の土壤水の表面張力等の熱による変化率をそれぞれ室内測定等で測定し、テンシオメータの各部材の寸法を現地で計測して定数 a, b, c, d, e を推定する方法である。この方法は帰納的方法と言えるものかもしれない。この方法は一見、合理的のようであるが、上に述べたそれぞれを求める室内試験だけで十分であるという保障はないし、表面張力等の土壤物理性の熱による変化率等は土壤構造にも左右されるものなので恒常的な値を得ることも困難であろう。また、これら室内試験及び現地計測は繁雑すぎて実際の応用には適していないと思われる。

もう一つの方法は演繹的方法とも言えるもので、次のような手順で行なう。

- ① 圃場の土壤状態での吸引圧と土壤水分量との一価関係を何らかの方法で測定し定める。本研究の場合は、室内測定で得られた(1)式がそのまま圃場でも成り立つと仮定して、これを用いた。
- ② 圃場での土壤水分量を直接採土法で測定してその時の吸引圧を(2)式で求める。
- ③ ②の土壤水分量の測定と同じ時刻にテンシオメータの読み、気温、地温を測定して(4)式の独立変数 h, t_a, t_b とする。
- ④ ②で求めた吸引圧と③のデータを基にした(4)式の a, b, c, d, e を決定する。

この方法は、①の仮定が正しいかどうかの疑問があるものの、②、③の測定が比較的容易で④の計算

もコンピュータを使用すれば迅速に解が得られるので実際の応用に適していると思われる。そこで、本研究ではこの方法によるテンシオメータの読みに対する温度補正の方法を検討してゆく。

なお、土壤水の土壤物理的現象に対する温度の影響の度合いをみるために次のような簡易な補正を2番目の方法として行なってみた。

$$h' = h + a + b \cdot t_a + c \cdot t_b \dots\dots\dots(5)$$

III-3 温度補正の結果

土壤深さ 5 cm, 15cm, 25cm, 35cmにおけるテンシオメータの読みからの吸引圧 (pF) とそのときの土壤水分量 (体積含水率) との全てのデータ (脱水過程) を Fig. 3 に示す。Fig. 1 と較べると、砂丘畑での圃場データのバラツキが大きいこと、同じ pF 値に対する体積含水率の値の変化が大きいことが目につく。したがって、このデータを基にして吸引圧と土壤水分量との一価関係を求め、その関数によって吸引圧の大きさから土壤水分量を推定しても相当大きな誤差が生じる。よって温度補正が必要である。

これらのデータと、これと同時に測った気温、地温のデータを使って、III-2 で述べた方法による補正を行なった。(5)式によるもの、(4)式によるもの

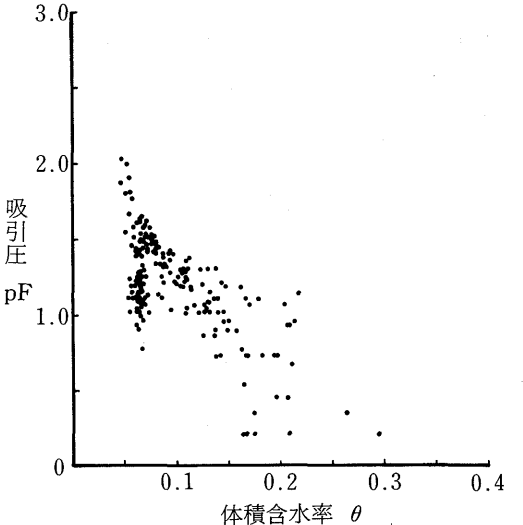


Fig. 3 圃場測定による吸引圧 (pF) と体積含水率 (θ) の関係

表一1 (5)式及び(4)式の回帰定数の統計諸値

	回 帰 定 数	標 準 偏 差	t 値	確 率 値	
(5)式	a	18.5275	3.9677	4.6696	<0.1%
	b	1.4930	0.1749	8.5346	<0.1
	c	- 1.9788	0.3122	6.3387	<0.1
(4)式	a	-23.0425	7.7582	2.9701	<0.5
	b	0.2973	0.1060	2.8036	<0.5
	c	1.8612	0.3073	6.0563	<0.1
	d	0.8638	0.3282	2.6317	<0.5
	e	- 0.0626	0.0126	4.9884	<0.1

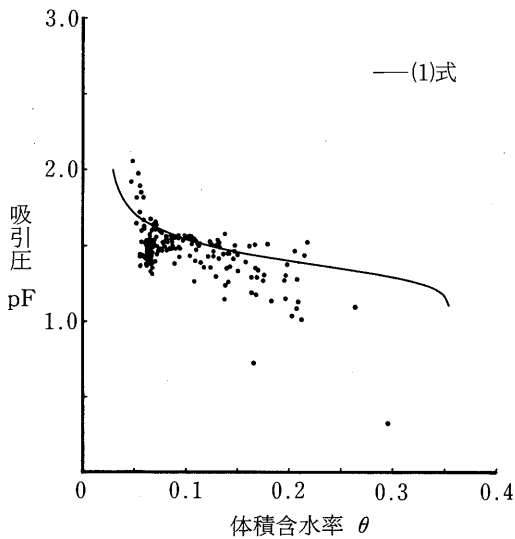


Fig.一4 温度を考慮した(5)式による吸引圧 (pF) と体積含水率 (θ) の関係

のそれぞれの結果を表一1とFig.一4, Fig.一5に示した。

吸引圧に対する標準誤差を見ると、(5)式によるものは10.52、(4)式によるものは5.42(補正を行わないままでは、(1)式を基準とした吸引圧に対する標準誤差は21.32)となっており、(4)式による補正は(5)式による補正の約2倍の精度がある。このことはFig.一4とFig.一5をみれば理解できる。土壌水の土壌物理的現象に対する温度の影響とその補正の必要性は砂丘畑ではとくに重要である。また、(5)式による補正式、(4)式による補正式ともに、その各定数の持つ確率値をみると、各変数 (h, t_a , t_b , $h \cdot t_b$) とも、

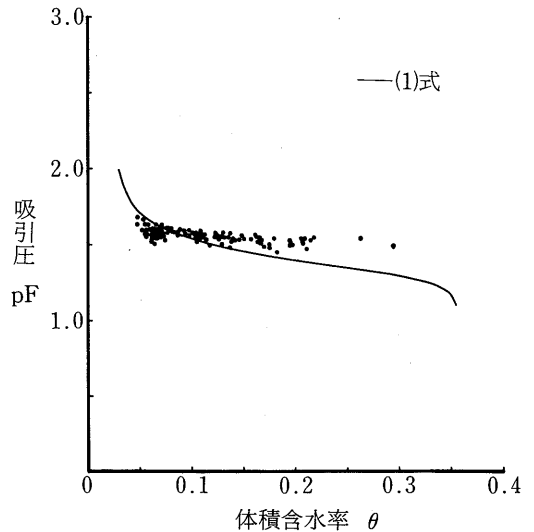


Fig.一5 温度を考慮した(4)式による吸引圧 (pF) と体積含水率 (θ) の関係

可成り高い有意性を持っていることが理解される。これは、この方法の妥当性を示す一つの証明である。

III-4 補正法の検証

次に、この補正法の検証を行なってみよう。これ以後、吸引圧が与えられてその吸引圧から(1)式によって計算される体積含水率を推定体積含水率 (θ') とし、実測によって得られた体積含水率を測定体積含水率 (θ) とする。また、補正式によって補正される吸引圧を補正吸引圧 (h')、補正しない吸引圧を測定吸引圧 (h) とする。

圃場の土壌中の水分量やその水の動きの様子は、その土壌の全水頭プロファイル及び土壌水分プロファイルを求めることによって検討することが出来る。もし、推定された土壌水分量が正しくないならば、これをもとにして描かれたプロファイルも実際とは異なった間違った形として表わされる。従って、描かれるプロファイルを考察することにより、土壌水分の推定の良否、ひいては上記吸引圧の補正の良否が検証出来ることになる。この手法により検証を行なった。

5月28日と6月4日の土壌水分量とそのときの全水頭のプロファイルを以下に示す4つの方法で図示

してそれぞれを比較してみる。なお、土壌深さ50cm, 70cm, 90cmの地温は測定していないので、従来よりの地温の実測結果⁽⁵⁾を参考に、50cmの深さは35cmと同じく、70cmは35cmの地温より0.5°C低く、90cmはそれよりもさらに0.5°C低いと仮定した。

① 土壌水分量としては測定体積含水率(θ)を用い、また、それに対応する全水頭としてその θ をもとにして(2)式によって算定した吸引圧に土壌深さを加えて求めたものである。室内測定での土壌水分特性曲線が圃場でも成り立っているとの仮定のもとでは、この図が1つの正しいモデルとなるべきものである(Fig. 6)。

② 全水頭には測定吸引圧 (h) に土壌深さを加え

たものを、また、それに対応する土壌水分量には、実測したものを使わないで、推定含水率(θ_0')を使って示したもの (Fig. 7)。

③ 全水頭には(5)式の補正による補正吸引圧に土壌深さを加えたものを、また、それに対応する土壌水分量にはその補正吸引圧を使った推定含水率(θ_1')を使って示したもの (Fig. 8)。

④ 全水頭には(4)式の補正による補正吸引圧に土壌深さを加えたものを、また、それに対応する土壌水分量にはその補正吸引圧を使った推定含水率(θ_2')を用いて示したもの (Fig. 9)。

Fig. 7 から Fig. 9 にゆくに従いがい、正しいモデルである Fig. 6 に近づいてゆく様子が良く判る。Fig

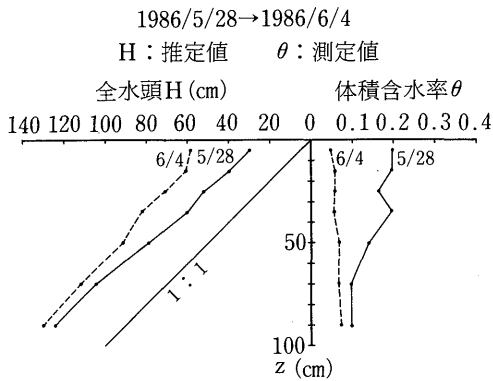


Fig. 6 測定体積含水率と(2)式を用いての推定吸引圧とによる全水頭と体積含水率のプロファイル

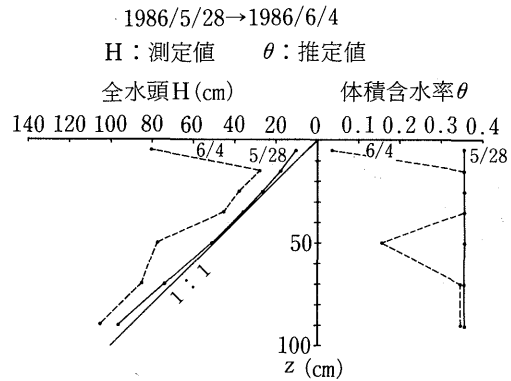


Fig. 7 測定吸引圧と推定体積含水率とによる全水頭と体積含水率のプロファイル

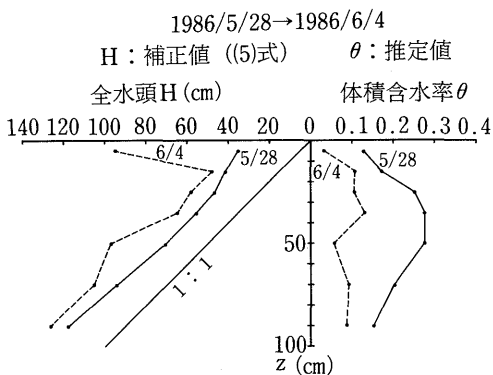


Fig. 8 (5)式による補正吸引圧と推定体積含水率とによる全水頭と体積含水率のプロファイル

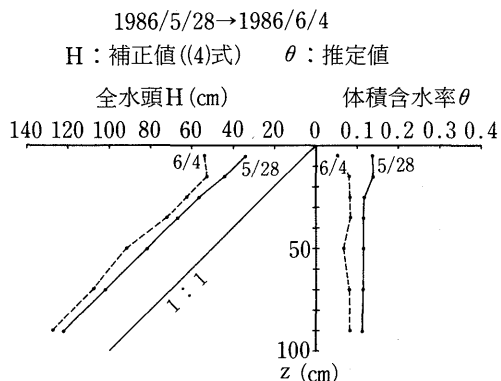


Fig. 9 (4)式による補正吸引圧と推定体積含水率とによる全水頭と体積含水率のプロファイル

一7の補正なしのものでは実際と大きくかけ離れた結果になっているのに対し、(4)式の補正によるFig-9では実際にかなり近いプロファイルになっている。

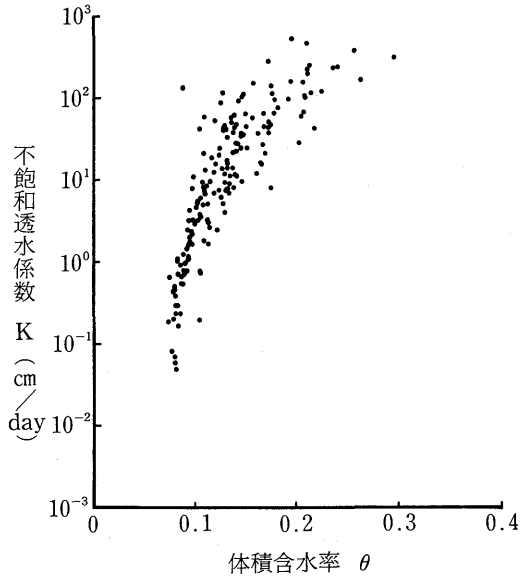


Fig-10 測定体積含水率と(2)式を用いての推定吸引圧とによる不飽和透水係数と体積含水率との関係

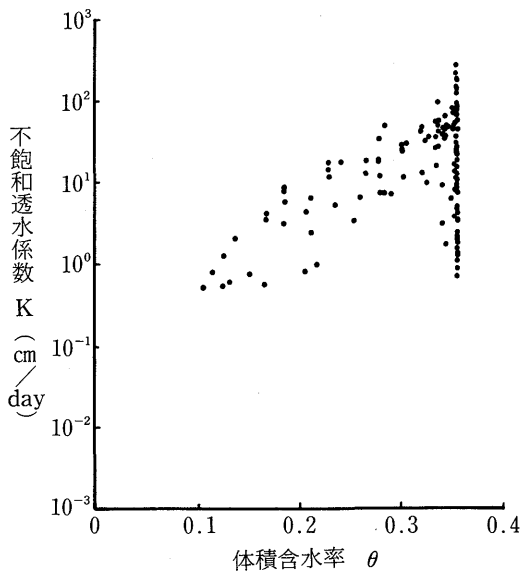


Fig-11 測定吸引圧と推定体積含水率とによる不飽和透水係数と体積含水率との関係

すなわち、オンシオメータの読みに対するこの温度補正は、完全とは言えないまでも、かなり有効なものである。しかしながら、(5)式による方法ではその効果は不十分である。

次に、かん水直後から、15分後、30分後、1時間後、2時間後、4時間後、8時間後、1日後、それから毎日一定時刻に7日後までの各時刻に測定したテンシオメータの読み、気温、地温、それと体積含水率のデータから、前の4つのデータの組み合わせ、すなわち、① 測定体積含水率 (θ) と算定吸引圧、② 測定吸引圧 (h) と推定体積含水率 (θ_0)、③ (5)式の補正による補正吸引圧 (h_1) と推定体積含水率 (θ_1)、④ (4)式による補正吸引圧 (h_2) と推定体積含水率 (θ_2)、を作り、これら4つのそれぞれに対し、現場測定による不飽和透水係数の測定法⁽⁶⁾を使って不飽和透水係数を計算し、それを不飽和透水係数に対する土壤水分量の形でプロットして、Fig-10からFig-13に示す。また、参考のために、Jackson法によって、飽和透水係数と土壤水分特性曲線とから算定した^{(7),(8)}不飽和透水係数の土壤水分量との関係を示してみる (Fig-14)。

①のグループ (Fig-10) は、プロットの状態がま

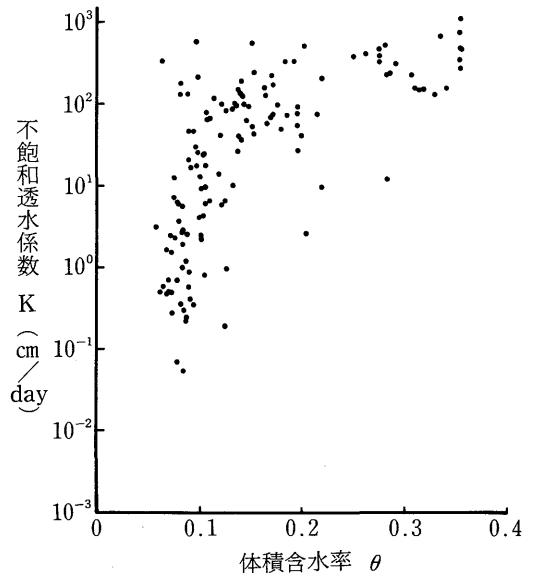


Fig-12 (5)式による補正吸引圧と推定体積含水率とによる不飽和透水係数と体積含水率の関係

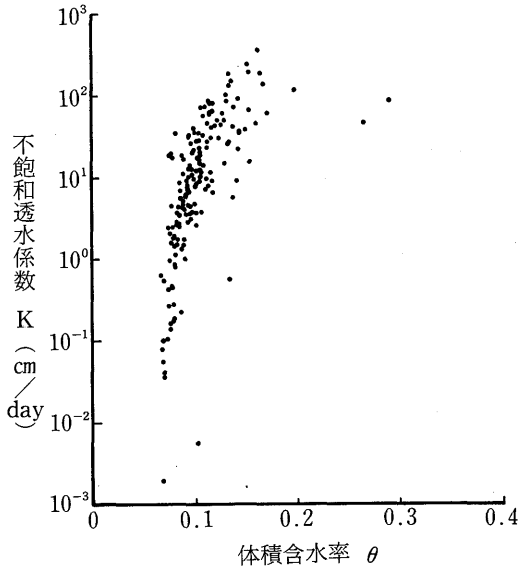


Fig. 13 (4)式による補正吸引圧と推定体積含水率とによる不飽和透水係数と体積含水率の関係

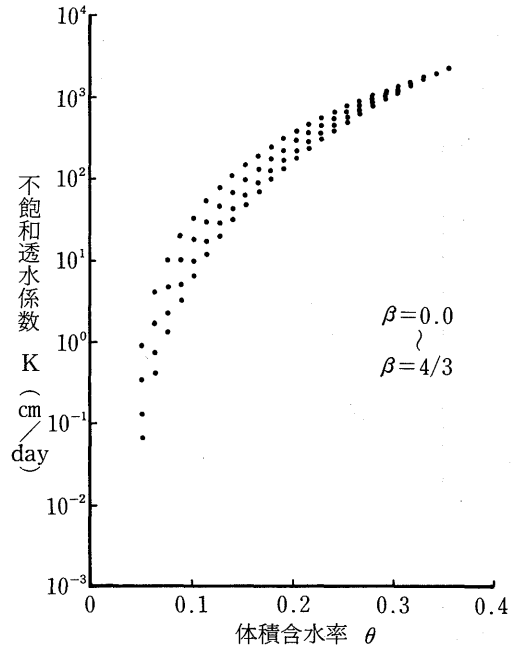


Fig. 14 Jackson法による不飽和透水係数と体積含水率の関係

ばらである部分もあるが、全体的には1つのまとまった $K-\theta$ 関係を示すゾーンを表現しており、また、そのゾーンはFig-14の計算によるものと良く一致している。このことは、①のグループのデータが実際に近いものであることを示唆しており、室内測定での土壌水分特性曲線が圃場でも有効であるとする仮定の妥当性を検証するものである。

②のグループの図 (Fig-11) をみると、このデータではほとんど不飽和透水係数の推定が出来ないと言える。すなわち、砂丘畑では、テンシオメータの読みを補正なしでそのままの値を使うと間違っただけの結果を招くこともある。

③と④のグループ (Fig-12, Fig-13) では両方とも、ある程度不飽和透水係数の推定が可能のようにみえるが、④の方が不飽和透水係数—土壌水分量の関係を示すゾーンの中が狭くなっているし、実際に近い姿になっている。このことは、テンシオメータの読みに温度補正を加えることの必要性を示すと共に、(4)式による補正の方が(5)式による補正よりも優れていることの証明でもある。

以上、2つの方法による検証でもって、砂丘畑で

のテンシオメータの読みから土壌水分量を推定する場合には、気温と地温も同時に測定して、測定吸引圧に温度補正を加える必要があり、その方法もテンシオメータそのものに対してだけではなく、土壌中の水分の土壌物理的現象への温度の影響をも考慮した(4)式に基づく方法が有効であると結論されよう。

IV あとがき

砂丘畑では、テンシオメータの読みから正しい土壌水分量の推定は困難である。そこで本研究では、テンシオメータの読みから少しでも実際に近い土壌水分量を推定出来るような応用的な方法を提唱した。その方法を要約すると次の通りである。

① テンシオメータの読みと同時に、テンシオメータを埋設した深さの土壌水分量と地温及びその時の気温を測定する。これらデータの組の数は、土壌水分量の幅を広くとれば、50~100組ほどで十分ではないかと思われる。

② 圃場の砂を実験室に持ち帰りその砂の土壌水分特性曲線を室内測定で作る。

③ ①の土壤水分量から②の土壤水分特性曲線を使って吸引圧を算定する。その算定した吸引圧とエンシオメータの読みに(4)式で補正した吸引圧とを用いて、その差の2乗の和が最小になるように(4)式の定数を決定する。

④ このようにして定数が決定された(4)式で補正した吸引圧から②の土壤水分特性曲線を使って土壤水分量を推定する。

以上、今後、補正式(4)の定数の持つ意味をより深く研究し、考察を進めてゆく積りである

(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) Van Genuchten, M. Th. 1980. A closedform Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44 : 892—898
- (2) 矢野友久・井上光弘・小谷佳人. 1983. 砂質土
壤の土壤水分特性曲線とその温度依存性について. 鳥取大砂丘研報22号 : 1—8
- (3) Chahal, R. S. 1964. Effect of Temperature and Trapped Air on the Energy Status of Water in Porous Media. Soil Science 98 : 107—112
- (4) Chahal, R. S. 1965. Effect of Temperature and Trapped Air on Matric Suction. Soil Science 100 : 262—266
- (5) 川口桂二郎等. 1974. 改訂新版 土壤学. 朝倉書店. 144—145
- (6) 井上光弘・野村安治. 1978. 砂丘地圃場の透水係数と水分拡散係数について. 鳥取大砂丘研報 17 : 25—30
- (7) Jackson, R. D. 1972. On the Calculation of Hydraulic Conductivity. Soil Sci. Soc. Am. P. 36 : 380—382
- (8) 井上光弘・矢野友久・吉田勲・山本太平・築紫二郎. 1982. 土壤水分特性曲線に基づく不飽和透水係数の計算. 土壤の物理性46 : 21—29.