

熱伝導率による土壤水分測定装置の特性と 利用上の留意点

森川 俊次* 太田 寛彰**

はじめに

現在、北海道における畑地かんがい技術の確立が課題となっているが、その中で、圃場レベルの問題点として畑地かんがいにおける最適かん水技術の確立の問題がある。そのためには、土壤水分状態を正確に把握することが不可欠である。現在、圃場の土壤水分状態を測定する方法としてテンシオメーター法が用いられる場合が多い。テンシオメーターは、取扱いが簡便なことなどから、現場圃場での観測に適した方法である。その反面同法では、pF 3.0 以上の低水分状態では原理上測定が不可能であること、土壤の水分ポテンシャルを測定する方法であるが、ヒステリシス現象のため土壤水分量と水分ポテンシャルとが必ずしも1対1に対応しないことから測定した水分量に誤差が生じるなどの問題点がある。また、圃場での微気象観測によって蒸発散量を求める方法もあり、圃場単位での蒸発散量測定などに有利であるが、一方現地に設置する観測装置が高価であること、データの解析が煩雑で専門的な知識を必要とすることなどの問題もある。

今回、熱伝導率と土壤水分の間に密接な関係のあることを利用した土壤水分測定装置を使用する機会を得た。本報では、この装置の特性について、土壤の熱伝導率の性質と今回行った実験結果を基に述べる。また、圃場で利用する場合の留意点などについて気がついた点を2,3紹介する。

1. 測定装置の原理

今回使用した測定装置は、ヒートプローブ法によって土壤の熱伝導率を測定し、土壤の熱伝導率～水分量の関係によって、熱伝導率から土壤水分量に変換する方法をとっている。

ヒートプローブ法による熱伝導率測定原理については、参考文献を参照されたい¹⁾

熱伝導率と土壤水分の関係については、土壤水分量が多いほど熱伝導率が大きくなることが知られている。また、McInnes (1981)は、土壤の熱伝導率と体積含水率の

間の関係を表わす式を示している²⁾

熱伝導率の値から土壤水分量を求める方法では、あらかじめ熱伝導率～土壤水分量のキャリブレーションをとっておく必要がある。

2. 実験内容

今回は土壤水分計の性質を調べるため、次のような実験を行った。

(1) プラスチック製の容器にかんてんを作り、センサーを挿入して熱伝導率を測定した。かんてんの温度を変化させながら熱伝導率の測定を行い、温度変化に対する熱伝導率の変化を調べた。

(2) 乾燥状態にある石英砂(粒径 80～150 μm)をプラスチック製の容器に静かに詰め、センサーを埋設した後、徐々に振動を与えてなん段階かに締固めながら各締固め段階での熱伝導率を測定し、密度による熱伝導率の変化を調べた。

(3) 容器に飽和状態に湿潤させた石英砂を入れ、自然乾燥させながら熱伝導率と水分を測定した。石英砂を密に充填した場合と、粗に充填した場合の2とおりについて実験を行った。

(4) 自然含水状態にある3種類の土について、その温度を変化させた場合の熱伝導率の変化を調べた。この実験に使用した土はA、Bが畑の表土で、Cは改良山成畑造成中の表土を採取したものである。各々の土の物理的性質などを表-1に示す。

表-1 使用した土の物理的性質

	比重 (Mg/m^3)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	粒度組成 (%)		
				砂	シルト	粘土
A	2.55	57.2	33.1	15	31	54
B	2.76	—	—	79	5	13
C	2.44	70.6	50.3	23	35	42

(5) 屋外において、上記の3種類の土について約2カ月間、地下20 cm地点の熱伝導率とpFの自然状態での値を連続的に測定した。

*農業土木研究室主任研究員 **同室員

3. 実験結果および考察

(1) かんてんの温度と熱伝導率を測定した結果を、図-1に示す。ここに示したのは、徐々に温度を変えながら連続的に15分に1回の測定を約4日間行った結果をグラフにプロットしたものである。熱伝導率を利用した測定装置では、原理上液体の水のような流動体は測定できないため、かんてんを水の代わりに基準的な物質として使用する場合が多い。ここでは、水の熱伝導率³⁾も同時にグラフに示した。このグラフを見てわかるとおり、温度による熱伝導率の変化を正確に測定している。

(2) 石英砂の固相率と熱伝導率の関係を、図-2に示す。固相率が大きくなるに従って熱伝導率が大きくなっ

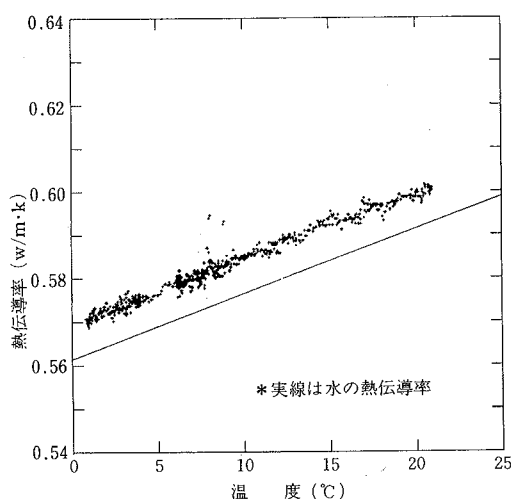


図-1 かんてんの温度と熱伝導率の関係

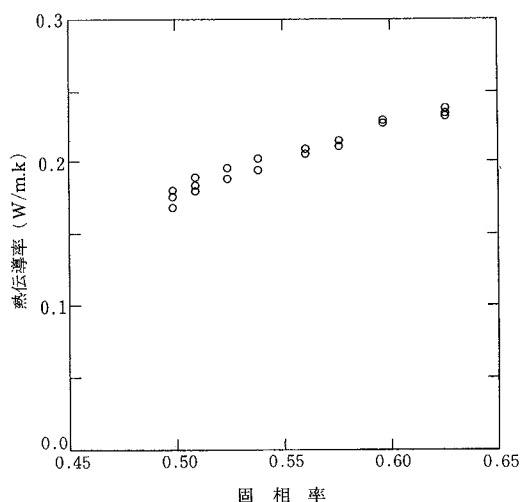


図-2 乾燥した石英砂の固相率と熱伝導率の関係

ている。この結果は、これまでにわかっている土壌の熱伝導率の性質に一致するものである。

(3) 石英砂の水分(体積含水率)と熱伝導率の関係を、図-3に示す。含水率5%以下で熱伝導率が急激に変化している。水分が飽和状態に近い状態では、熱伝導率があまり変化していないが、それ以下の範囲では含水率の変化に対応して熱伝導率が変化しているのがわかる。固相率は、密充填の場合(a)が0.59、粗充填の場合(b)が0.48である。また、(b)の方が(a)よりも測定値のばらつきが大きいことがわかる。この点については、石英砂を充填する際にセンサーと試料の接触が不完全であったことが原因とも考えられる。

(4) 土の温度と熱伝導率の関係を、図-4に示す。温度によって熱伝導率が変化しているのがわかる。1次相関式を求めた場合の傾きを見ると、温度1℃当たりの熱伝導率の変化は、0.0031~0.0044 W/mk となっている。

(5) 屋外において、土の熱伝導率とpFを測った結果を、図-5に示す。この実験では、3種類の土を各々約90cm四方、深さ約50cmの枠の中に入れ、それぞれに熱伝導率式の土壌水分計センサー2、テンシオメーター1を設置した。測定は60分に1回、1988年9月12日から11月4日まで連続的に行った。図-5は、全測定時のpFと熱伝導率の関係をグラフにプロットしたものである。ここで、熱伝導率のデータは2つの土壌水分センサーの平均値をとっている。このとき、2つのセンサー間での熱伝導率の差は0.05~0.1 W/mk程度あったが、pFとの相対的な関係は一致した。これを、(4)で求めた温度補正係数を使って補正したものを図-6に示す。これを見てわかるように、

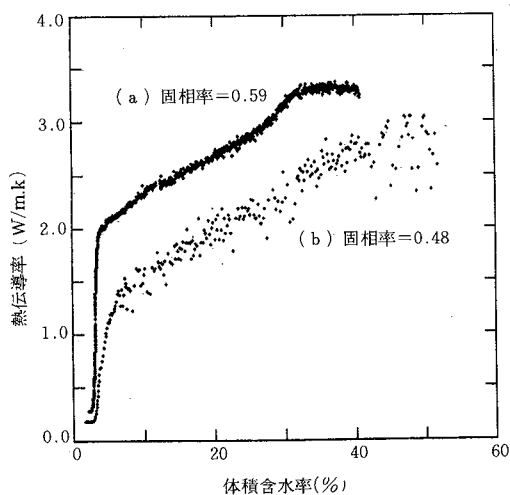


図-3 石英砂の体積含水率と熱伝導率の関係

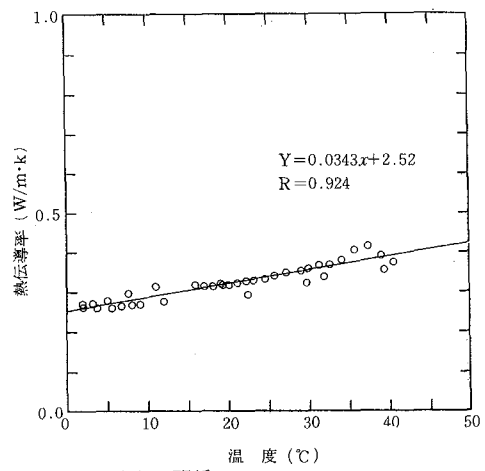
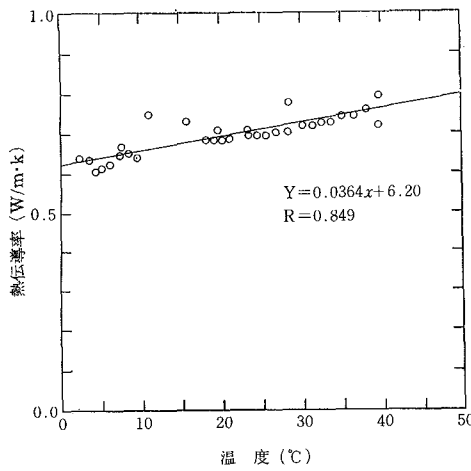


図-4(a) 土(A)の温度と熱伝導率の関係

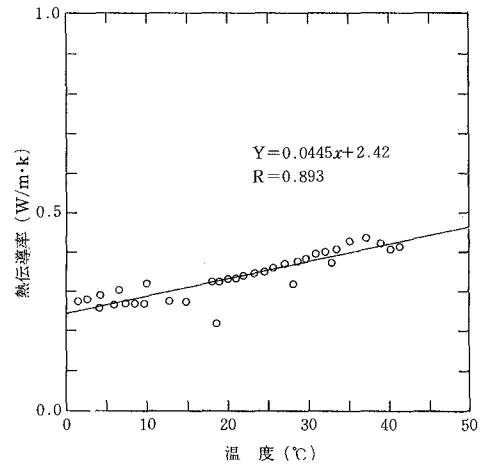
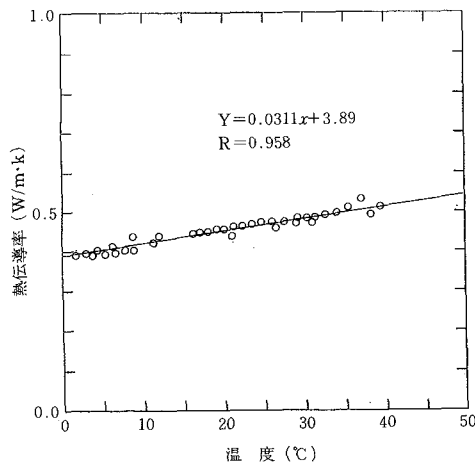


図-4(b) 土(B)の温度と熱伝導率の関係

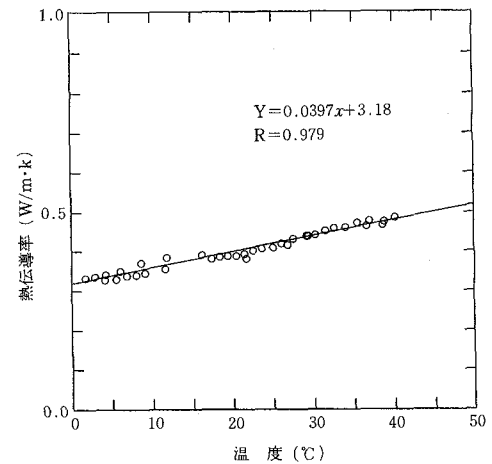
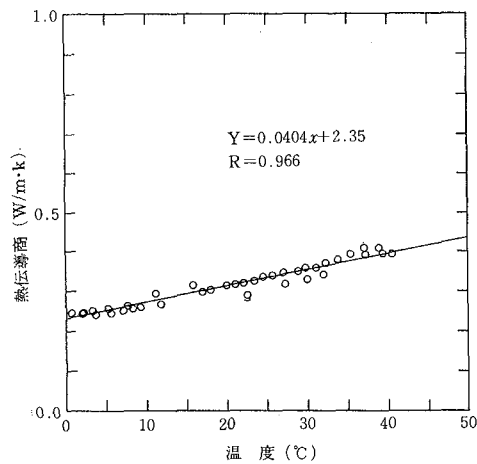


図-4(c) 土(C)の温度と熱伝導率の関係

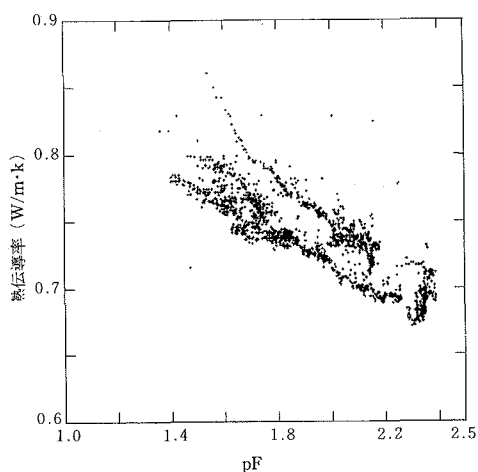


図-5(a) 土(A)のpFと熱伝導率の関係

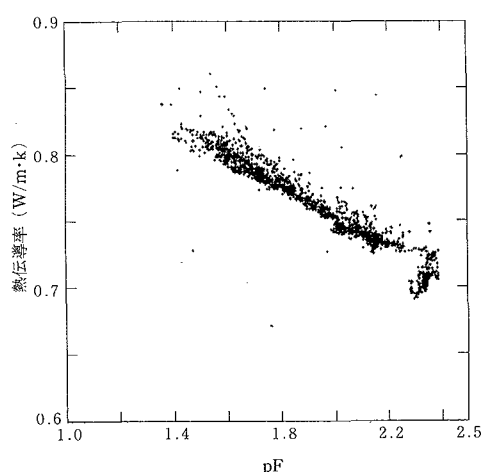


図-6(a) 土(A)のpFと温度補正した熱伝導率の関係

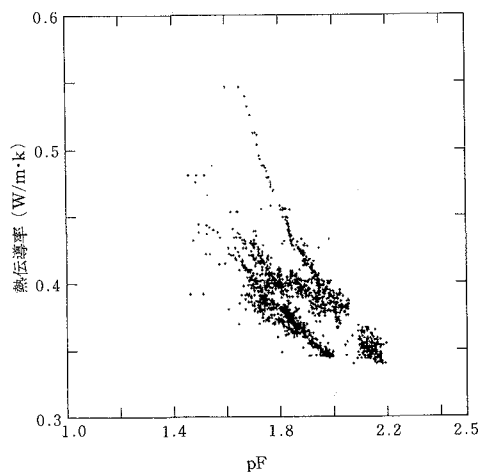


図-5(b) 土(B)のpFと熱伝導率の関係

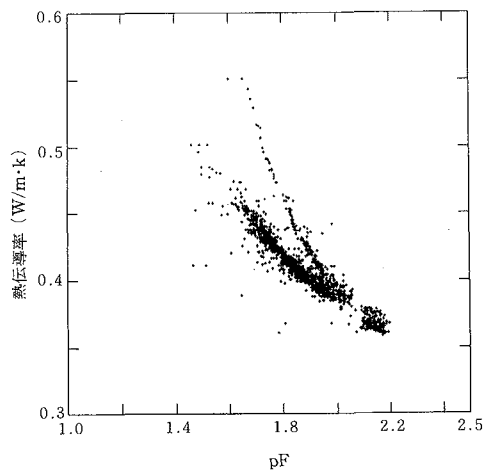


図-6(b) 土(B)のpFと温度補正した熱伝導率の関係

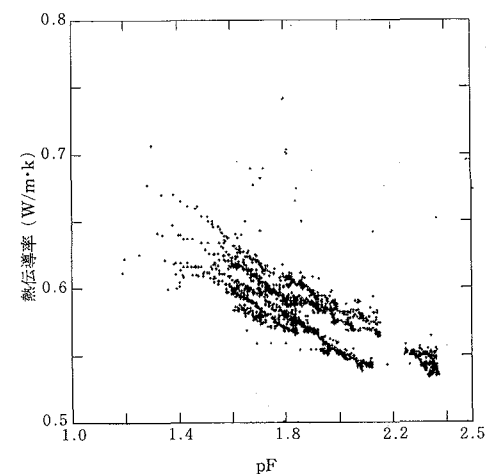


図-5(c) 土(C)のpFと熱伝導率の関係

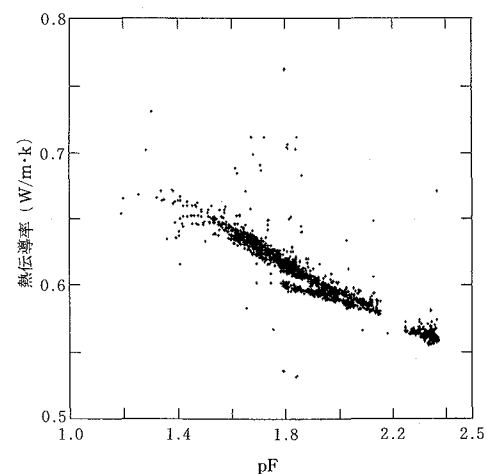


図-6(c) 土(C)のpFと温度補正した熱伝導率の関係

今回の実験の土壌水分においては、(4)で求めた温度補正係数がよく適合することがわかる。また、同時に熱伝導率とpFが必ずしも1対1に対応していないことがわかる。これは、pF～土壌水分量関係のヒステリシス現象によるものと考えられる。なお、グラフで一部データが飛び離れているのは欠測によるものである。

今回の測定中は降雨量が多かったこともあって、土壌水分状態の変化の幅が小さく、特に乾燥状態のデータが得られなかったためほとんどのデータがpF 1.2～2.5の間にあった。このため、低水分状態でこの温度補正係数が適用できるかどうかは判断できないが、一般に毛管水分状態では熱伝導率の温度依存性が高いことが知られている。これは、土中で熱が移動する場合、物質の移動を伴わないで熱が移動する場合に、土の熱伝導率の温度依存率は土の構成物質の熱伝導率の温度依存率によって決定されるが、水蒸気の移動を伴って熱が移動するときの熱伝導率はより土の温度に依存するためと考えられる⁹⁾。

ここで求めた補正係数は、3種類の土に対してそれぞれ0.0035, 0.0038, 0.0040 (W/mk²)で、今回実験を行った3種類の土では、10℃の温度の変化があった場合の熱伝導率の変化は、pFにして約0.2～0.35変化した場合の熱伝導率の変化に相当することがわかった。これは、体積含水率に換算すると約2～3%程度に相当した。

4. 圃場で使用する場合の留意点など

今回、熱伝導率型の土壌水分計を使用して気がついた点、圃場での測定を考えた場合の留意すべき点および本水分計の一般的特性などをまとめて掲げる。

(1) テンシオメータと異なり、pF 3付近およびそれ以上の低水分状態にも対応できる。また、pFのヒステリシス現象の影響を受けない。

(2) いったん埋設したセンサーについては、保守管理などの手間はかからない。ただし、センサーと土の接触状態に変化があった場合、キャリブレーションに影響を与えるので、圃場での振動やひび割れの発生等には注意が必要である。

(3) 本センサーによって測定した熱伝導率の値は、土壌の性質とともに密度および土とセンサーの接触状態も影響を与えるため、キャリブレーションをとる場合にはセンサーを埋設した圃場で異なる水分状態のときに、数回資料を採取して土壌水分状態測定を行う必要がある。

(4) 土壌の熱伝導率には、温度依存性がある。温度補正の係数を定めるには、室内実習を行う方法が最も確実であると考えられる。

(5) 本機の精度は、土壌水分～熱伝導率のキャリブレーションの精度によるところが大きい。

おわりに

今回は、熱伝導率を利用した土壌水分計測装置の紹介とともに、いくつかの実験を行うことによって測定装置の基本的特性を示した。この中で、土壌の熱伝導率の特性として温度依存性をもつこと、センサーの特性として、土との接触状態に影響を受けやすいことなどを示した。また、テンシオメータによる水分状態の測定は、pFのヒステリシス現象によって誤差を生じやすいことを示した。

今回紹介した熱伝導率を利用した土壌水分計測装置を圃場において使用することを考えた場合、キャリブレーションの作成が最も重要で、作業も繁雑になるものと考えられる。しかし、室内実験による温度補正係数の決定などと現地での土壌水分調査を組み合わせるなどにより、かなりの精度で圃場の土壌水分量を連続的に把握することができるものと考えられる。

参考文献

- 1) 粕淵辰昭：移動現象, pp. 83-107, 日本土壌肥科学会編, 昭和62年8月。
- 2) ゲイロン S. キャンベル：パソコンで学ぶ土の物理学, pp. 31-33, 鹿島出版会, 昭和62年4月。
- 3) 国立天文台編：理科年表, 丸善, 昭和64年。
- 4) 例えば, 粕淵辰昭：土壌の熱伝導に関する研究, 農技研報 B33, pp. 1-54, 昭57年。