

# 双円筒ヒーターからのパルス状発熱を利用した熱特性測定 プローブについて

## A Twin-cylinder Heat-pulse Probe to Measure Thermal Characteristics

○原 道宏<sup>\*</sup>, 室谷朝子<sup>\*+</sup>

○Michihiro Hara<sup>\*</sup>, Tomoko Muroya<sup>\*+</sup>

<sup>\*</sup>岩手大学, <sup>+</sup>現、福島県

<sup>\*</sup>Iwate University, <sup>+</sup>Presently Fukushima Prefecture

キーワード: ヒートプローブ(heat probe), ピーク値法(peak value method), 最急勾配法  
(steepest gradient method), 体積熱容量(volumetric heat capacity), 土壌水分測定  
(measurement of soil water content)

連絡先: 〒020 盛岡市上田3-18-8 岩手大学 農学部 農林生産学科 生産環境学講座 農業環境制御工学研  
究室 原 道宏, Tel.0196-21-6125, Fax.0196-21-6125, Email: mrhara@msv.cc.iwate-u.ac.jp

### 1. はじめに

熱特性のうち、熱伝導率を測定するプローブ型センサーは開発が進んでいるが<sup>1-5)</sup>、物体の体積熱容量は、通常、サンプルを測定室に持ち帰って測定しており<sup>5)</sup>、体積熱容量および温度伝導率を測定するプローブ型センサーの開発は遅れて始まった<sup>6-11)</sup>。

体積熱容量が現場でプローブで測定できれば、その恩恵は大きい。その一例は土壌水分の推定である。固相成分が変化しない状態で体積熱容量の変化が知れば、単位体積土壌中の水分量の変化を知

ることができる。それは、体積熱容量の変化が単位体積土壌中の水分量の変化に比例するからである。しかも、その比例係数は水の比熱であるので、よく知られた値であり、校正の手間が省ける。

体積熱容量を測定できるプローブ型センサー<sup>6-11)</sup>は最近になって開発が始められたが、その基礎となる理論はヒーターの太さが無限小など、理想化された条件に対するものであり、実状に合う理論の開発が遅れている。また、そのためヒーターの太さや長さをそのような理想的条件に合わせようとするため、ヒーター温度が過度に高温になるなど好ましくない

状況を生じている。

本研究の目的は、従来の理想的条件に対する理論をより実状に合うように拡張し、土壌や生体など農業分野において用いることのできるプローブ型熱特性センサーを開発すること、また、それを水分量などの組成測定に応用することである。

## 2. 理想条件に対する測定理論

温度が一定で無限の広がりを持つ等方性均質物体内の1点（以下、熱源）で瞬時に一定熱量（ $Q_m$ ）を発生し、熱源から距離 $r_0$ だけ離れた位置で温度を測定すると、温度は初めほとんど変化がなく、しばらくしてから徐々に温度上昇してピークに達し、その後は温度が下降し、初期温度に収束する。初めの温度からの温度上昇を $f_m$ とすれば、それは式(1)のように書ける。点熱源では $m$ は3である。

このことは、熱源となる点が物体中に任意に分布している場合であっても同様であり、その効果は各点熱源からの効果の和で表される。特に、熱源が直線である場合にはその結果はやはり式(1)で書き表されるが、 $m$ は2、 $r_0$ は熱源直線から温度測定点までの距離、 $Q_m$ は熱源単位長さ当たりの発生熱量である。熱源が平面である場合も結果はやはり式(1)で書き表され、 $m$ は1、 $r_0$ は熱源平面から温度測定点までの距離、 $Q_m$ は熱源単位面積当たりの発生熱量である。

このように、熱源形状が点（ $m=3$ ）、直線（ $m=2$ ）、または、平面（ $m=1$ ）の

場合には、上述の関係は次のように表される。

$$f_m = (Q_m / C_0) (4 \pi D_0 t)^{-m/2} \exp(-r_0^2 / 4D_0 t) \quad (1)$$

$$f_{m,\text{peak}} = (m/2 \pi e)^{m/2} (Q_m / C_0 r_0^m) \quad (2)$$

$$t_{m,\text{peak}} = r_0^2 / 2mD_0 \quad (3)$$

$$f_{m,\text{peak}} t_{m,\text{peak}} = (m/2 \pi e)^{m/2} (Q_m r_0^{2-m} / 2mK_0) \quad (4)$$

さて、式(2)、(3)、(4)を逆に解き、熱源の形状が、点、直線、平面である場合に発熱量、ピーク温度差、ピーク時刻から、体積熱容量、温度伝導率、熱伝導率を求める関係式が(5)、(6)、(7)のように与えられる。

$$C_0 = (m/2 \pi e)^{m/2} (Q_m / f_{m,\text{peak}} r_0^m) \quad (5)$$

$$D_0 = r_0^2 / 2m t_{m,\text{peak}} \quad (6)$$

$$K_0 = (m/2 \pi e)^{m/2} (Q_m r_0^{2-m} / 2m f_{m,\text{peak}} t_{m,\text{peak}}) \quad (7)$$

### 記号とS I単位

$$f_m = \text{初期温度との温度差} \quad [\text{K}]$$

$$f_{m,\text{peak}} = \text{ピーク温度差} \quad [\text{K}]$$

$$t_{m,\text{peak}} = \text{ピーク時刻} \quad [\text{s}]$$

$$m = \text{熱源の形状による定数} \quad [1]$$

(点熱源：3、直線熱源：2、平面熱源：1)

$$C_0 = \text{体積熱容量} \quad [\text{J K}^{-1} \text{m}^{-3}]$$

$$D_0 = \text{温度伝導率} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$$

$$K_0 = \text{熱伝導率} \quad [\text{J K}^{-1} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}]$$

$$Q_m = \text{発熱量} \quad [\text{J m}^{-3}]$$

$$r_0 = \text{ヒーターセンサー間距離} \quad [\text{m}]$$

$$t = \text{発熱開始後の経過時間} \quad [\text{s}]$$

$$\pi = 3.14159 \dots \text{ (円周率)}$$

$$e = 2.71828 \dots \text{ (ネピアの数)}$$

### 3. 実用条件に対する測定理論

#### 一 双円筒ヒーターからパルス状発熱する場合の測定理論 一

直線は長さ無限大、太さゼロであり直線熱源は実現できないので、実用的なヒーター形状として有限長の円筒を検討した。 $m=2$ であれば式(7)より、熱伝導率の測定にはヒーターセンサー間距離が無関係になるが、その他は2乗に比例ないし反比例する。これを緩和するためにヒーター2本を対称の位置に配置する双円筒ヒーターを検討した。また、瞬間発熱も実現できないので、矩形波パルスによる発熱を検討した。

図1は当該プローブの概略図である。プローブは、2本の円筒形ヒーター、円周上に配置された温度センサーおよび枠とからなる。円筒形ヒーターは、いずれも、半径

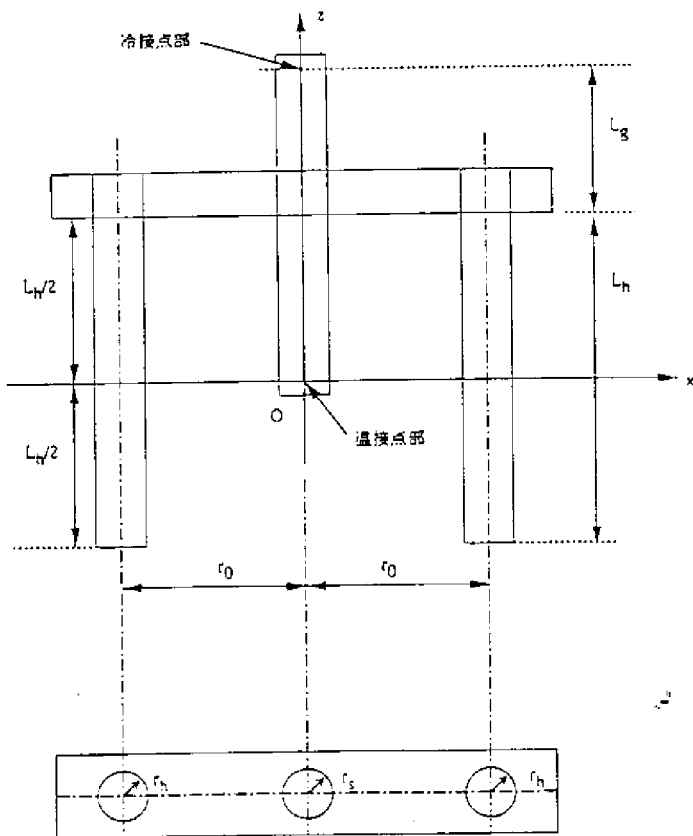


図1 2本の円筒形ヒーターを有するプローブ型熱特性測定器のプローブの概要

$r_h$ 、長さ $L_h$ 、両者の中心軸は平行、軸間距離は $2r_0$ で、両端をそろえて配置されている。2本の円筒形ヒーターの対称の中心を原点 $O$ とする。温度センサーは原点を中心とする半径 $r_s$ の円周上に配置される。

図2は当該測定器を使用する際の回路図である。発熱体となる抵抗器 $H_1$ 、 $H_2$ は同形同大等抵抗とする。

2本の円筒形ヒーターを有するヒートパルス方式プローブ型熱特性測定器の理論

前項4.3の熱特性測定器は、2本の平行直線ヒーターを有する瞬時加熱方式プローブ型熱特性測定器に対する近似であるが、原型は1本の直線ヒーターを有する瞬時加熱方式プローブ型熱特性測定器であるので、それとの比較において理論を述べる。

両者の違いを表1に比較して示す。

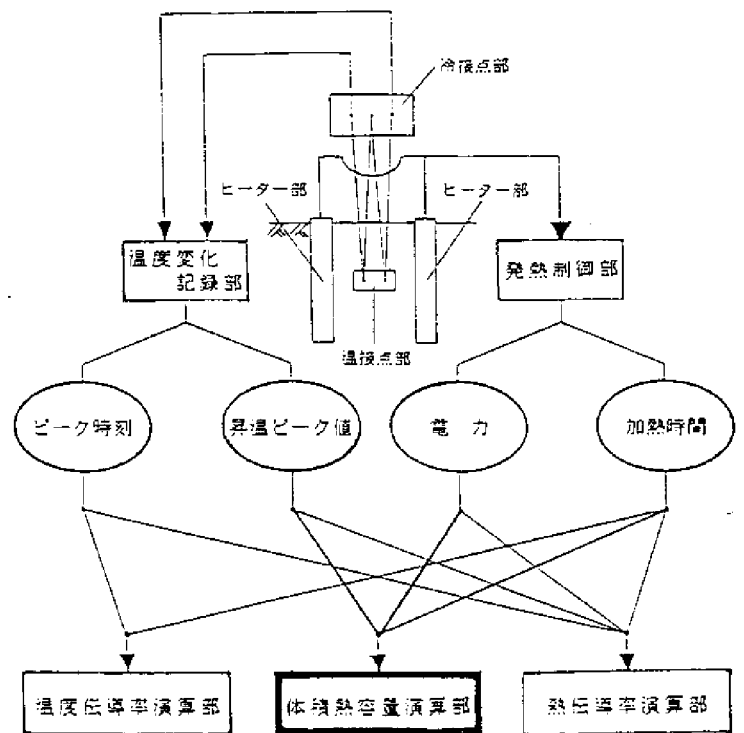


図2 2本の円筒形ヒーターを有するプローブ型熱特性測定器の回路図

表1 1本の直線ヒーターを有する瞬時加熱方式プローブ型熱特性測定器と2本の円筒形ヒーターを有するヒートパルス方式プローブ型熱特性測定器の比較

項番	比較事項	1本の直線ヒーターを有する瞬時加熱方式プローブ型熱特性測定器	2本の円筒形ヒーターを有するヒートパルス方式プローブ型熱特性測定器
1	ヒーターの形状	直線	円筒
2	ヒーターの太さ	0	半径 $r_h$ (有限 $> 0$ )
3	ヒーターの長さ	無限大	長さ $L_h$ (有限 $< \infty$ )
4	発熱様式	瞬時	矩形波状ヒートパルス
5	ヒーターの個数	1	2
6	温度センサーの形状	点	円 (半径 $r_s$ ) 周上に分布

項目1、2、3はヒーター形状を、また項目4は発熱様式を、それぞれ実現可能なものとするためのもの。項目5は測定の精度と信頼性を維持するための、また項目6は測定の感度を上げるための工夫である。

### 3. 1 矩形波状ヒートパルスとすることの影響評価

矩形波状ヒートパルスの発熱強度を  $P_2$  [W/m]、発熱時間を  $t_{heat}$  [s] とする。このとき、発熱量  $Q_2$  [J/m] は、

$$Q_2 = P_2 t_{heat} \quad (8)$$

である。そこで、1本の直線ヒーターを有するプローブ型熱特性測定器が熱量  $Q_2$  を瞬時に発熱したときと、強度  $P_2$  で時間  $t_{heat}$  の

矩形波状に発熱したときとを比較する。

瞬時発熱方式測定器の場合は、前述の式(1)~(7)において  $m=2$  とおけば得られる。

$$f_2 = (Q_2/4 \pi K_0 t) \exp(-r_0^2/4D_0 t) \quad (9)$$

$$C_0 = Q_2/\pi e f_{2,peak} r_0^2 \quad (10)$$

$$D_0 = r_0^2/4t_{2,peak} \quad (11)$$

$$K_0 = Q_2/4 \pi e f_{2,peak} t_{2,peak} \quad (12)$$

一方、矩形波状発熱における温度上昇  $f_{2,puls}$  は次のようになる。

$$f_{2,puls} = (P_2/4 \pi K_0) \{E_1[r_0^2/4D_0 t] - E_1[r_0^2/4D_0(t-t_{heat})]\} \quad (13)$$

ここで関数  $E_1[x]$  は次式で定義される積分指数関数である。

$$E_1[x] = \int_x^\infty e^{-u}/u du \quad (\text{積分指数関数}) \quad (14)$$

この温度上昇のピーク温度差およびピーク時刻を陽に表すことは出来ないが、ピーク時刻  $t_{2,puls,peak}$  と発熱時間  $t_{heat}$  の比  $v$ 、およびピーク温度差  $f_{2,puls,peak}$  との間には次の関係がある。

$$v = t_{2,puls,peak} / t_{heat} \quad (15)$$

$$T_{2,puls,peak} \equiv 4D_0 t_{2,puls,peak} / r_0^2 = f_{2,puls,peak} / v \quad (16)$$

$$T_{heat} \equiv 4D_0 t_{heat} / r_0^2 = T_{2,puls,peak} / v \quad (17)$$

$$f_{2,puls,peak} = (P_2 t_{heat} / \pi e C_0 r_0^2) \times f[T_{heat}, T_{2,puls,peak}] \quad (18)$$

$$f[T_{heat}, T_{2,puls,peak}] \equiv (e/T_{heat}) \times \{E_1[1/T_{2,puls,peak}] - E_1[1/(T_{2,puls,peak} - T_{heat})]\} = f_C[v] = ev(v-1) \ln[v/(v-1)] \times \{E_1[(v-1) \ln[v/(v-1)]] - E_1[v \ln[v/(v-1)]]\} \quad (19)$$

$$f_K[v] = f_C[v] f_D[v] \quad (20)$$

以上より、次式が導かれる。

$$C_0 = (Q_2 / \pi e f_{2,\text{puls.peak}} r_0^2) f_C[v] \quad (21)$$

$$D_0 = (r_0^2 / 4 t_{2,\text{puls.peak}}) f_D[v] \quad (22)$$

$$K_0 = (Q_2 / 4 \pi e f_{2,\text{puls.peak}} t_{2,\text{puls.peak}}) f_K[v] \quad (23)$$

これらは、瞬時発熱式測定器に対する式 (10)、(11)、(12) に下のように係数を乗じた形になっている。

$$C_0: \text{式 (21)} = \text{式 (10)} \times f_C[v]$$

$$D_0: \text{式 (22)} = \text{式 (11)} \times f_D[v]$$

$$K_0: \text{式 (23)} = \text{式 (12)} \times f_K[v]$$

係数の値は表 2 のようになる。

比  $v$  の値は、測定においては発熱時間  $t_{\text{heat}}$  は測定者が決め、ピーク時刻  $t_{2,\text{puls.peak}}$  は測定されるのであるから、 $v$  の値はそれらの比として計算できる。したがって、上記の関係式 (21) ~ (23) から体積熱容量  $C_0$ 、温度伝導率  $D_0$ 、熱伝導率  $K_0 (=C_0 D_0)$  を求めることが出来る。

表 2 ヒートパルス方式による熱特性測定のための係数値

u= 1/v	v	f <sub>C</sub> [v]	f <sub>D</sub> [v]	f <sub>K</sub> [v]
0.05	20.00	0.99989	1.02609	1.02598
0.10	10.00	0.99954	1.05458	1.05409
0.15	6.667	0.99890	1.08585	1.08465
0.20	5.000	0.99792	1.12036	1.11803
0.25	4.000	0.99655	1.15869	1.15468
0.30	3.333	0.99469	1.20157	1.19519
0.35	2.857	0.99224	1.24996	1.24026
0.40	2.500	0.98907	1.30508	1.29081
0.45	2.222	0.98501	1.36857	1.34805
0.50	2.000	0.97980	1.44270	1.41356
0.55	1.818	0.97313	1.53063	1.48950
0.60	1.667	0.96452	1.63704	1.57894
0.65	1.538	0.95327	1.76901	1.68634
0.70	1.429	0.93832	1.93803	1.81849
0.75	1.333	0.91794	2.16404	1.98647
0.80	1.250	0.88911	2.48534	2.20974
0.85	1.176	0.84597	2.98698	2.52689
0.90	1.111	0.77525	3.90865	3.03019
0.95	1.053	0.63655	6.34236	4.03724

### 3. 2 ヒーターが円筒形であり温度センサーが円形であることの効果と影響の評価

ヒーターを円筒形にするための効果は、

第1に、作りやすいこと、

第2に、発熱面が中心軸から離れ、発熱面積が大きくなるので発熱面の温度上昇がそれだけ低く抑えられること、

である。

温度センサーを円周上に均一に配置することの効果は、

第1に、検出端を置く場所が増え、設置しやすいこと、

第2に、検出端の個数が増やせるので、温度検出の感度を高められること、

である。

ヒーターが円筒形になり、温度センサーが円周上の平均温度を測定することの測定結果への影響は、発熱部と検温部の距離が様々になることにより、ヒーター温度センサー間距離が単一でなくなることである。この点について、ヒーター円筒の半径( $r_h$ )と温度センサー円の半径( $r_s$ )を様々に変えて数値計算した結果をまとめると次のようになる。

まず、1本の直線ヒーターを有するプローブ型熱特性測定器が熱量 $Q_2$ を瞬時に発熱したときの温度上昇 $f_2$ および、そのピーク温度差 $f_{2,peak}$ 、ピーク時刻 $t_{2,peak}$ と熱特性

( $C_0$ 、 $D_0$ 、 $K_0=C_0 D_0$ )との関係は次のように書ける。 $F_2$ と $T$ は、それぞれ、 $f_2$ と $t$ を無次元化したもので、ピーク時におけるそれら $F_{2,peak}$ と $T_{2,peak}$ の値は1である。

$$f_2 = (Q_2/4 \pi K_0 t) \exp(-r_0^2/4D_0t) \quad (24)$$

$$F_{2,peak} \equiv \pi e C_0 r_0^2 f_{2,peak} / Q_2 = 1 \quad (25)$$

$$T_{2,peak} \equiv 4D_0 t_{2,peak} / r_0^2 = 1 \quad (26)$$

$$F_{2,peak} T_{2,peak} = 4 \pi e K_0 f_{2,peak} t_{2,peak} / Q_2 = 1 \quad (27)$$

これに対し、ヒーターが半径 $r_h$ の円筒、温度センサーが半径 $r_s$ の円であるプローブ型熱特性測定器が熱量 $Q_2$ を瞬時に発熱したときの温度上昇のピーク温度差 $f_{c,peak}$ 、ピーク時刻 $t_{c,peak}$ は、半径 $r_h$ と $r_s$ がいずれもヒーターと温度センサーの中心間距離 $r_0$ の0.3倍以下の場合の数値計算結果より、それを式(28)、(29)の無次元数 $F_{c,peak}$ 、 $T_{c,peak}$ に直し、その等値線を図3、4に示す。この結果は、この範囲( $0 \leq r_h/r_0 \leq 0.3$ 、 $0 \leq r_s/r_0 \leq 0.3$ )内では、次式で近似される。

$$\begin{aligned} F_{c,peak} &\equiv \pi e C_0 r_0^2 f_{c,peak} / Q_2 \\ &= 1 + 0.3(r_h^4 + r_s^4) / r_0^4 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} T_{c,peak} &\equiv 4D_0 t_{c,peak} / r_0^2 \\ &= 1 - 2(r_h^2 + r_s^2) / r_0^2 \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} F_{c,peak} T_{c,peak} &= 4 \pi e K_0 f_{c,peak} t_{c,peak} / Q_2 \\ &= \{1 + 0.3(r_h^4 + r_s^4) / r_0^4\} \{1 - 2(r_h^2 + r_s^2) / r_0^2\} \end{aligned} \quad (30)$$

この計算結果から分かるように、ヒーターが円筒形になり温度センサーが円形になると、ピーク時刻は明らかに早くなるが、ピーク温度差は大きくはなるもののその程度はごくわずかである。すなわち、ヒータ

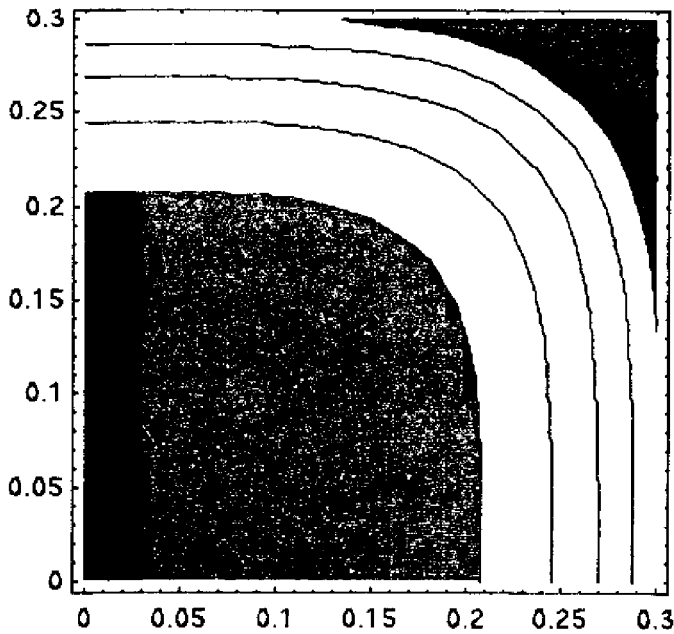


図3 温度上昇極値の標準値に対する比  
(座標軸は、 $r_h/r_0$ と $r_s/r_0$ )

原点では $F_{c,peak} = 1$ 。原点から等値線  
1本離れると $F_{c,peak}$ の値が0.0005増す。

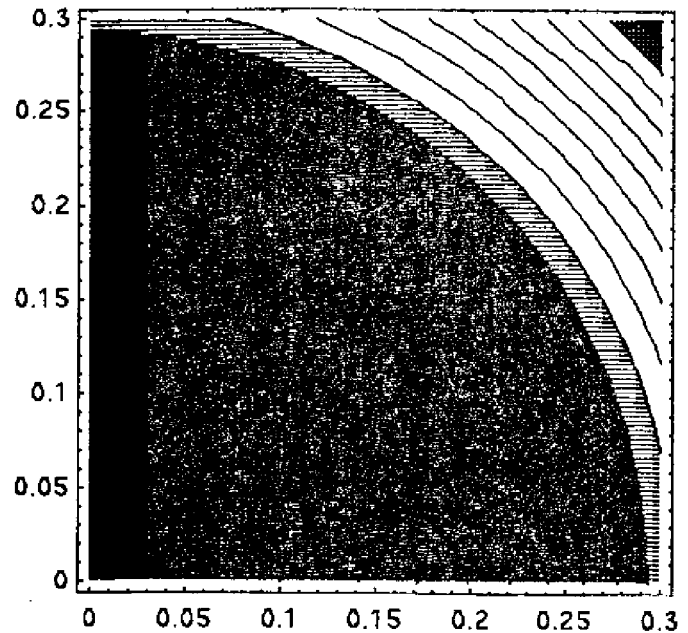


図4 極値の出現時刻の標準値に対する比  
(座標軸は、 $r_h/r_0$ と $r_s/r_0$ )

原点では $T_{c,peak} = 1$ 。原点から等値線  
1本離れると $T_{c,peak}$ の値が0.02減ずる。

一が円筒形になり温度センサーが円形になることの影響は、ピーク時刻に強く現れる。

したがって、これらの半径比 ( $r_h/r_0$ と $r_s/r_0$ ) が変更になる場合には、式 (28) から求められる体積熱容量の校正係数はその影響を受けにくい。式 (29) および (30) から求められる温度伝導率および熱伝導率の校正係数はその影響を受けやすい。

### 3.3 ヒーターの長さが有限であることの影響の評価

ヒーターを長さ $L_h$ の線分 (太さがゼロ) とし、温度センサーをヒーターの中央からヒーターと直角に距離 $r_0$ 隔てたところに置いた場合、ヒーターが直線 (太さがゼロ、長さが無限大) である場合とどのように変

わるかを検討した。まず、長さ $L_h$ の線分ヒーターが単位長さあたり $Q_L$ の熱量を瞬時に発熱した場合、ヒーターの中央からヒーターと直角に距離 $r_0$ 隔てた点における温度上昇 $f_L$ は式 (31) のように表される。

$$f_L = (Q_L / 4 \pi K_0 t) \exp[-r_0^2 / 4D_0 t] \operatorname{erf}[(L_h / 2r_0)(4D_0 t / r_0^2)^{1/2}] \quad (31)$$

このように、ヒーターが線分である場合の温度上昇は、ヒーターが直線である場合の温度上昇に誤差関数を乗じて表される。

そこで、ヒーターが線分である場合のピーク温度差およびピーク時刻が、ヒーターが直線である場合とどのように異なるかを数値として調べた。その結果を、図5にグラフとして示す。

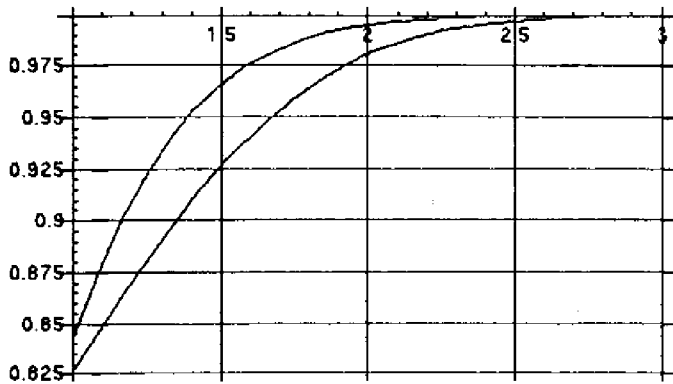


図5 線分ヒーターの場合と直線ヒーターの場合のピーク温度差とピーク時刻の比  
横軸は、ヒーターセンサー間距離に対する半ヒーター長の比 $L_h/2r_0$ 。縦軸は、ピーク時刻およびピーク温度差が、ヒーター長が無限である場合のそれにくらべた比。

上の曲線がピーク温度差における比 $g[L_h/2r_0]$ 、下の曲線がピーク時刻における比 $h[L_h/2r_0]$ 。

図5に見るように、半ヒーター長がヒーターセンサー間距離の2倍以上であればピーク温度差が、また、2.4倍以上であればピーク時刻が、ヒーター長が無限大の場合の99%以上の値となる。さらにこの比 $(L_h/2r_0)$ が、2.8以上であれば、実質的にヒーター長が無限大の場合と変わらない。

### 3.4 ヒーターが2本あることの効果

ヒーターが1本である場合にはヒーターと温度センサーの中心間距離が変化するとそれは直ちにピーク温度差およびピーク時刻を変化させる。したがって、正確な測定のためには、ヒーターと温度センサーの中心間距離を正確に保つ必要がある。

ヒーターを温度センサーに対して対称の

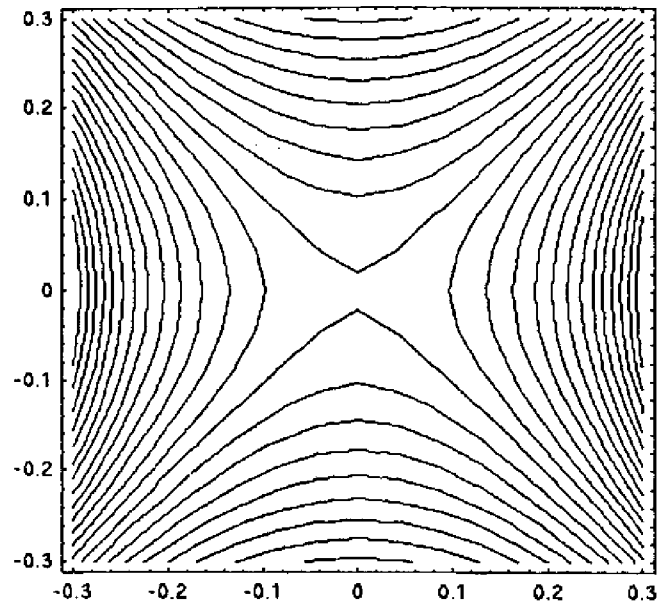


図6  $(-1,0)$ と $(1,0)$ に半径0.2の円筒ヒーターがあり、瞬時発熱した場合のピーク温度差の標準値に対する比

原点に最も近い等値線が値1、原点から左右に遠ざかるにつれて値が0.01ずつ増し、上下に遠ざかるにつれて値が0.01ずつ減ずる。

位置に2本置けば、ピーク温度差は原点付近では図6のようになり、原点は鞍点になる。したがって、原点に温度センサーを置くことにすれば、測定位置のわずかな変化に対しては測定値がほとんど変わらず、ピーク温度差もピーク時刻も測定位置のわずかな誤差に影響されることなく正しい値を得やすい。

## 4. プローブの試作、較正と測定

試作した双円筒ヒータープローブの諸元を表2に示す。較正をジェランガム0.3%の水ゲルでおこない、沼山鑄物砂を水分飽和度0~100%の種々の含水比に調製し、またNaClを加え、熱特性を測定した。



#### 4. プロープの試作、校正と測定

試作した双円筒ヒータープローブの諸元を表2に示す。校正をジェランガム0.3%の水ゲルでおこない、沼山鑄物砂を水分飽和度0~100%の種々の含水比に調製し、またNaClを加え、熱特性を測定した。加熱時間は10~60s、電流は約0.5Aとし、加熱

前10分間、加熱中、加熱終了までの計30分間の温度変化を5秒間隔で測定し、メモリに記憶させた。まず、基準温度に含まれる高周波ノイズを除去し、温度上昇の値がピーク値の80%以上であるデータを4次多項式で近似し、それを微分してピークを検出した。データ処理の例を図7に示す。

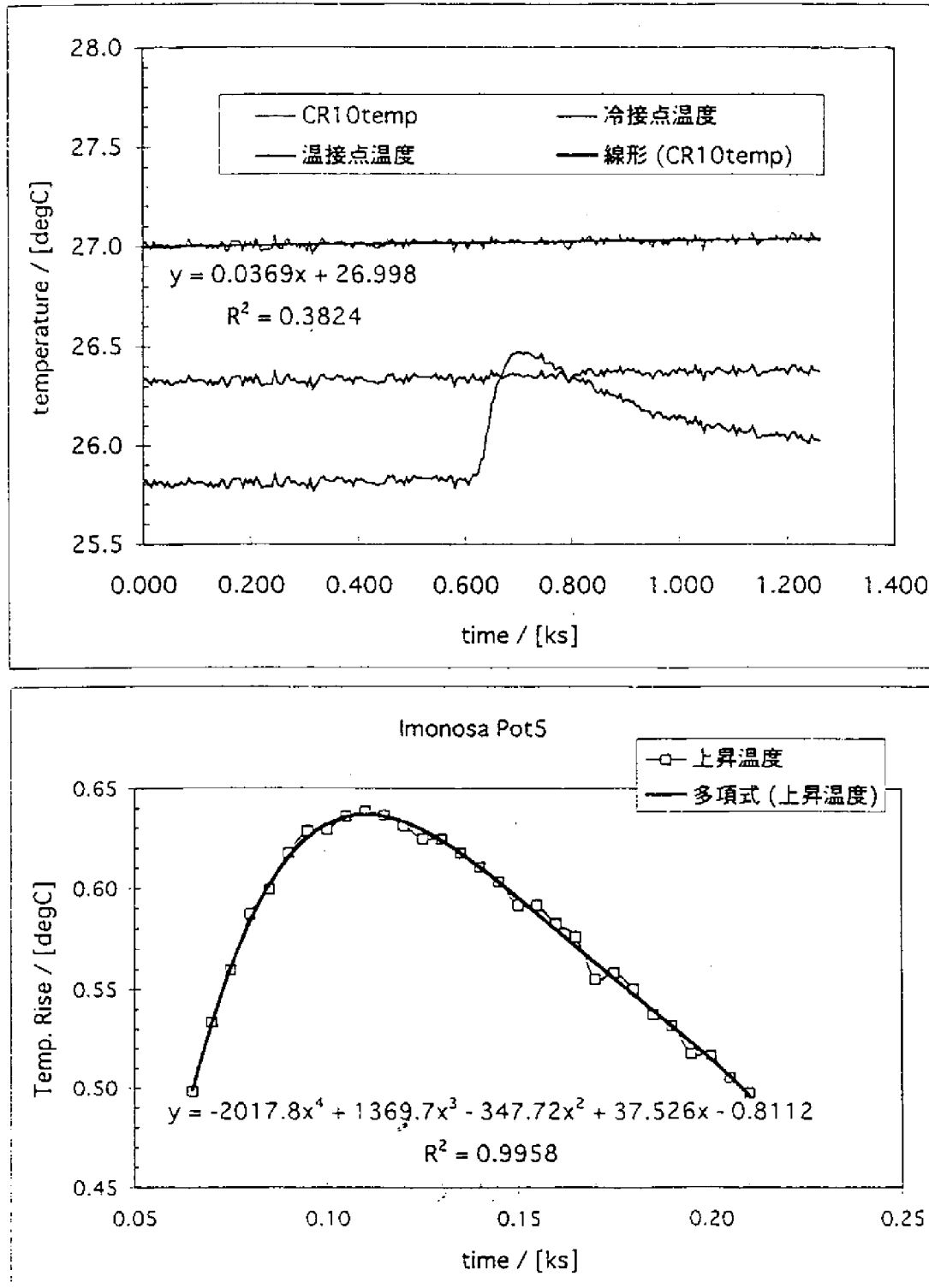


図7 測定値とその処理の例

## 5. 結果と考察

ジェランガム水ゲルの熱特性を同温度の水と同じと仮定して測定値と比較したところ、体積熱容量は11%低め、温度伝導率は13%高め、熱伝導率は0.7%高めに測定された。これは、ヒーターセンサー間の平均距離(15.0 mm)を6%小さくする(14.1 mm)ことにより、体積熱容量、温度伝導率ともに誤差を0.37%と小さくすることができる。これは、ヒーターセンサー間距離の作製誤差によるものかもしれない。

沼山鑄物砂を対象とした測定結果は体積熱容量と水分率の間の直線性は10%程度の誤差を含み、必ずしも満足いくものでなく、さらに改良の余地があるものと考えられた。改良点としては、ヒーターセンサー間距離を正確に保つ工夫をすることが考えられる。また、3%NaCl水溶液を混入しても熱特性の測定値はほとんど変化せず、このセンサーは塩分の混入の影響を受けずに測定できることが示唆された。

## 謝辞

本研究は一部、財団法人ソルト・サイエンス研究財団からの研究助成金を得て行われた。また、測定とデータ整理に岩手大学農学部卒論専攻生竹田良成君の補助を得た。記して各位に感謝する。

## 参考文献

- 1) D. A. de Vries: A nonstationary method for determining thermal conductivity of soil in situ, *Soil Sci.*, **73**, 83/89 (1952)
- 2) D. A. de Vries and A. J. Peck: On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils I. Extension of theory and discussion of probe characteristics, *Aust. J. Phys.*, **11**, 255/271 (1958)
- 3) D. A. de Vries and A. J. Peck: On the cylindrical probe method of measuring thermal conductivity with special reference to soils II. Analysis of moisture effects, *Aust. J. Phys.*, **11-3**, 409/423 (1958)
- 4) T. Kasubuchi: Twin transient-state cylindrical-probe method for the determination of the thermal conductivity of soil, *Soil Sci.*, **124-5**, 255/258 (1977)
- 5) 粕渕辰昭: 土壌の熱伝導に関する研究, *農技研報*, **B33**, 1/54 (1982)
- 6) G. S. Campbell, C. Calissendorff and J. H. Williams: Probe for measuring soil specific heat using a heat-pulse method, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **55**, 291/293 (1991)
- 7) L. L. Bristow, G. S. Campbell and K. Calissendorff: Test of a heat-pulse probe for measuring changes in soil water content, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57-4**, 930/934 (1993)
- 8) G. L. Kluitenberg, J. M. Ham and K. L. Bristow: Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **57**, 1445/1451 (1993)
- 9) K. L. Bristow, G. J. Kluitenberg and R. Horton: Measurement of soil thermal properties with a dual-probe heat-pulse technique, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58-5**, 1288/1294 (1994)
- 10) K. L. Bristow, R. D. White and G. J. Kluitenberg: Comparison of single and dual probes for measuring soil thermal properties with transient heating, *Aust. J. Soil Res.*, **32**, 447/464 (1994)
- 11) K. L. Bristow, J. R. Bilskie, G. J. Kluitenberg and R. Horton: Comparison of techniques for extracting soil thermal properties from dual-probe heat-pulse data, *Soil Sci.*, **160-1**, 1/7 (1995)