

非定常熱源法（サーマルプローブ法）による凍土の熱伝導率測定の問題点

張 津生（中国科学院蘭州水河凍土研究所）・福田 正己（北大低温研）

1 はじめに 凍土の熱伝導率測定法として、非定常熱源法が広く用いられている。円柱形の凍土試料の中心に細い線状の熱源（ヒーター）を入れておく。これに電流を流すと発熱が生じて中心部ではその温度が上昇する。加熱後の経過時間毎の中心部の温度上昇を測定することで、凍土の熱伝導率が推定できる。推定のための式は  $\lambda = Q \cdot \ln(t_2/t_1) / (4\pi \cdot \Delta T)$  (1) であるが、ここで  $\lambda$  は熱伝導率 ( $W/cm \cdot K$ )、 $Q$  は加熱量 ( $W/cm$ )、 $t_1$  と  $t_2$  は加熱開始後の温度計測開始と終了時間 (sec)、そして  $\Delta T$  は時間  $t_1$  から  $t_2$  までの上昇温度 ( $^{\circ}C$ ) である。実験には直径 10 cm、高さ 12 cm の円柱形の凍土を用い、さらに線状熱源と温度計（プローブ）としては、直径 2 mm 長さ 10 cm のものを用いた。今回の実験の主な目的は、中心部の温度上昇をどれだけ小さく抑えることができるか、計測の時間  $t_1$  と  $t_2$  はどの程度が適当かを判定することにある。凍土の中心での温度上昇があまり大きいと、凍土内に発生する温度勾配に沿って、不凍水の拡散による移動が生じ、また水→氷の相変化も発生する。その結果、熱の伝達に潜熱と顕熱の輸送分がつけ加わる。このために、凍土の熱伝導率を大きく見積る事になる。一方温度上昇が少ないと、測定の誤差が大きくなる。そこで、誤差の影響を受けない最小の温度上昇を決定する必要がある。

2 実験結果と解析

まず測定装置全体の精度を検定するために、1%濃度の寒天溶液による水の熱伝導率を得た。寒天溶液を用いるのは、温度上昇に伴う対流の効果を防止するためである。その結果、 $5.83mW/cm \cdot K$  の値が得られた。理科年表による値は 5.82 であり、測定結果とはほぼ一致した。次に、加熱 10 分間後の温度上昇を  $0.1^{\circ}C$  から  $10^{\circ}C$  まで変化させながら、同一条件で 7 回測定した。7 データの内平均値から最も外れた値によって、最大相対誤差を算出し、図 1 にその結果を示す。たて軸の右側にある相関係数は、加熱後 2 分から 10 分までの 10 秒おきの温度上昇と時間の対数との 1 次回帰直線を計算した時の値である。1 に近い程相対誤差は減少する。最大相対誤差の変動曲線に着目すると、温度上昇が  $0.3^{\circ}C$  を超えると、急減している。一方、相関係数は  $0.3^{\circ}C$  以上では、急に 1 に近づく。この結果から、凍土の中心部の加熱による温度上昇が、10 分後で  $0.3^{\circ}C$  以上でない、熱伝導率の測定誤差が大きくなることがわかった。

次に(1)式で  $\ln(t_2/t_1)$  と温度上昇  $\Delta T$  との 1 次直線回帰を計算する場合の、時間範囲 ( $t_1, t_2$ ) の取り方による、計算誤差を決める必要がある。加熱直後では、プローブと凍土との熱接触が充分でないと、温度上昇はプローブ周辺の空気を加熱してから、凍土に熱伝達される。このため、経過時間にたいする温度上昇は遅れてしまう。この遅延の影響は、おおよそ加熱 10 秒後あたりまでである。次に加熱を長時間継続させていると、凍土試料の有限の大きさが影響してくる。すなわち、(1)式は加熱される試料が、半無限の大きさをもつことを仮定して成り立っている。加熱時間が長くなると、円柱形試料の外側部分にまで温度上昇が達する。すると、その外側にある空気を加熱させることになるが、凍土と空気の熱伝導率の大きな相違によって、凍土部分の昇温が大きくなり、(1)式の適用が出来なくなる。直径 10 cm 程度の凍土試料では、10 分を超えるとこの影響が無視できなくなる。そこで、初期の温度変化の遅延の生じない時間を 2 分とし、その後 10 分までの間の 10 秒毎の温度上昇と経過時間の対数との間で、1 次回帰直線を推定する相関係数が最大となる（すなわち、最も 1 に近くなる）組合せを選び出す必要がある。

その結果を図 2 に示す。横軸は  $t_1$  を 2 分とした時の、 $t_2$  の時間である。たとえば、 $t_2 = 3$  分の場合にはこの間の 7 個のデータについての直線回帰式を計算することになる。同一の温度と温度上昇の条件で 64 回の測定を行い、 $t_2$  を 3 分から 10 分まで変えたとき、相関係数が最大となる出現頻度を縦軸に表す。図でも明かなように、10 分までを取る場合が最も出現頻度が高くなり、いいかえると計算の誤差が小さくなることを示唆している。

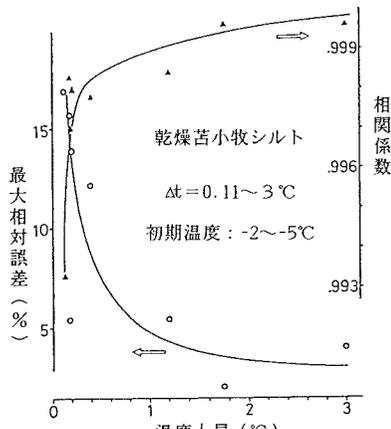


図 1. 誤差と相関係数の変化

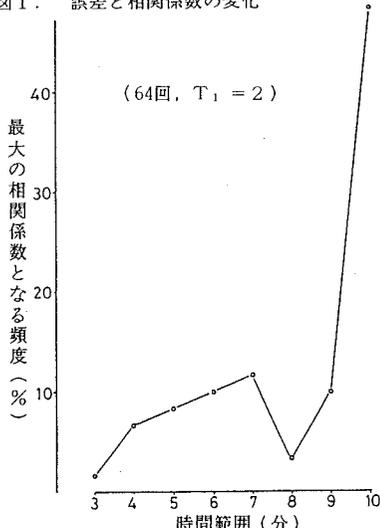


図 2. 最大相関係数の頻度