

3.5 地温・地中熱流量

Soil temperature and soil heat flux

3.5.1 地温

概要

地表面近傍の地温は、日射の影響を受けて昼に高くなり夜に低くなるサインカーブ状の日変化を示す。測定深度が深くなるにつれ、日変化のサインカーブは、振幅が小さくなり、位相も後ろにずれる。森林では地表面を覆う落葉層は寒冷気候であるほど多い傾向にあり、落葉層と土壌の境界は不明瞭となるため、測定深度には注意を要する。

測器の種類

一般に地温測定に用いられる温度センサには、熱電対、サーミスタ（Photo 3.5-1）、白金抵抗体（Photo3.5-2）の3種類がある。詳しくは、3.3「気温」を参照されたい。土壌は空気に比べると時定数が大きいため、感部が小さい必要はない。むしろ含有水分が大きいため、感部を大きくしてでも防水性を高めたものの方が適している。



Photo 3.5-1 サーミスタ温度計 107-L
(Campbell)。(写真：クリマテック株式会社提供)



Photo 3.5-2 白金抵抗体温度センサ
C-HPT-5-JM (クリマテック)。(写真：クリマテック株式会社提供)

熱電対は自作することもできる。地温観測には、Tタイプと呼ばれる銅-コンスタンタンのものを使うのが一般的である。銅とコンスタンタンの導線から成る補償導線を購入し、一端を結合させれば、熱電対となる。結合は、電気溶接、銀ろう溶接やはんだ付けで行われる。冷接点回路を内蔵しているデータロガーで、熱電対による温度を測定することができる。補償導線には様々な径のものがあるが、土壌の時定数は大きいので、数 mm 程度と太めのもののほうが丈夫で使いやすい。熱電対よりも少し太い金属パイプなどに挿入し、樹脂（シーラント）を挿入すれば、耐水性は高くなる。

サーミスタは電導物の温度と、その物の電気抵抗の間の比例関係を利用した温度センサである。比例定数は電導物によって異なる。そのためサーミスタとそれを接続するデータロガーは、セットで販売さ

れていることが多い。

白金抵抗体は、一般に 3 線式と 4 線式がある。経年変化が小さいため、頻繁に交換することが難しい地温測定に適している。

そのほか、地表面温度にはしばしば放射温度計 (Photo 3.5-3) が用いられる。物体の表面からは、その表面温度に対応した波長の長波がでてくる。この長波をとらえ温度に変換してものの表面温度を表示するのが放射温度計である。非接触で観測を行えるメリットはあるものの、精度は 2°C 程度と、接触型に比べると劣る。



Photo 3.5-3 放射温度計 IR-SA。右側はテレスコープ付。(写真：(株)チノー提供)

測定方法

土壌の浅い部分ほど地温 T_s [K] の時間変化、垂直変化は大きいので、浅い部分ほど密になるように温度センサを設置する。設置方法は、穴を掘って非攪乱断面に温度センサを差込み (Photo 3.5-4)、その後穴を埋め戻す。あるいは細い穴を鉛直に開け、穴に温度センサを差し込み、その後穴を同じ土で埋める。前者は周辺の土壌を攪乱するので注意して埋め戻す。後者は深くなると土壌との接触を確認できないので、浅層の地温測定の場合に行なう。いずれの場合にも、センサやケーブルの防水には注意を払う。

フラックス測定では、地表面など、熱・物質交換面の表面温度が重要である。そのため表面温度の測定方法について特に説明する。表面温度を測定するためには表面温度計を使用するのが最も簡便で正確である。接触型温度センサで表面温度を測るには、できるだけ感部の小さなセンサを、できるだけ表面近くに設置しなければならない。設置したセンサ感部には、直接日射が当たらないようにするのが一般的である。



Photo 3.5-4 熱電対温度センサ (棒の左側) と土壌水分計 (棒の右側) の埋設断面。(カンボジア国クラティエ州の季節林)

 Tips!

1ヶ所で複数の深度の地温を測定する場合、センサを埋設した後は、どのケーブルがどの深度のセンサのものか解らなくなる。そのため地表面付近やロガー結線部などに、測定深度を記したタグをつけておくと、その後のメンテナンス時に便利である。

Tips 3.5-1

 Tips!

スパイラルチューブあるいは樹脂製の保護管でケーブルを保護することにより、ネズミなどに噛み切られることを防ぐことが出来る。

Tips 3.5-2

 Tips!

温度センサと一体となった防水型のデータロガーの内部にシリカゲルを入れてしっかりと密閉すると、基盤の結露による不具合を防ぐことが出来る。シリカゲルは適時、交換する。

Tips 3.5-3

3.5.2 地中熱流量

概要

地表面における地中熱流量は、土壌と大気の間における熱交換の大きさを表し、 Wm^{-2} の単位で表示される。地中熱流量はその深さでの温度勾配に比例するため、地温の鉛直プロファイルから計算することも可能である。しかし熱流板によって測定するほうが簡便なため一般的である。

測器

熱流板（Photo 3.5-5, 3.5-6）は、薄い一定の熱伝導率を持つ板（熱抵抗板）の表裏の温度差が通過熱量に比例するという原理に基づいて作られている。熱流量は、熱流板の出力値 $[\text{mV}]$ を感度常数 $[\text{mV}(\text{Wm}^{-2})^{-1}]$ で除して求める。

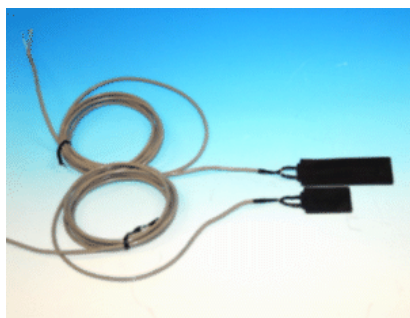


Photo 3.5-5 熱流板 PHF-100。(写真：(株)ブリード提供)

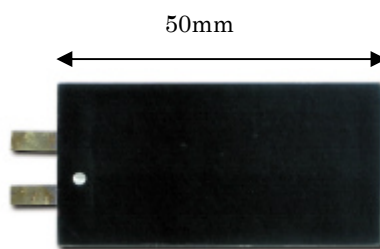


Photo 3.5-6 熱流板 MF-180M。(写真：英弘精機(株)提供)

測定

平たい面が水平方向になるように、熱流板を埋設する (Photo 3.5-7)。地表面の熱流量を測定したい場合、熱流板より浅い土壌による熱貯留量が無視することになるので、埋設する深度は浅いほど良い。しかし浅すぎると、水分移動を熱流板が遮断することによる誤差や日射の影響を受けることになる。定説は無いが、1～3cm の深度に埋設することが多い。土壌と密着させるように十分注意することが必要である。



Photo 3.5-7 熱流板埋設の様子。(川越森林気象試験地)

(3.5-1)式のように、各土層の地温変化と熱容量から熱流量を算出する方法を温度積分法 (Fig. 3.5-1) という。

$$Q = \sum_n^{i=1} Q_i + Q_b = \sum C_{v_i} \Delta z_{d_i} \Delta T_{s_i} + Q_b \quad (3.5-1)$$

ここで Q は地中熱流量 [Wm^{-2}]、 C_v は土壌の体積熱容量 [$\text{Jm}^{-3}\text{°C}^{-1}$]、 Δz_d は各土層の厚さ [m]、 T_s は地温、 Q_b は最下層土層の下面における地中熱流量、添字 i は各層 i を表す。体積熱容量は、土壌の構成成分のほかに土壌水分の影響も強く受ける。そのため土壌水分の測定も必要となる。

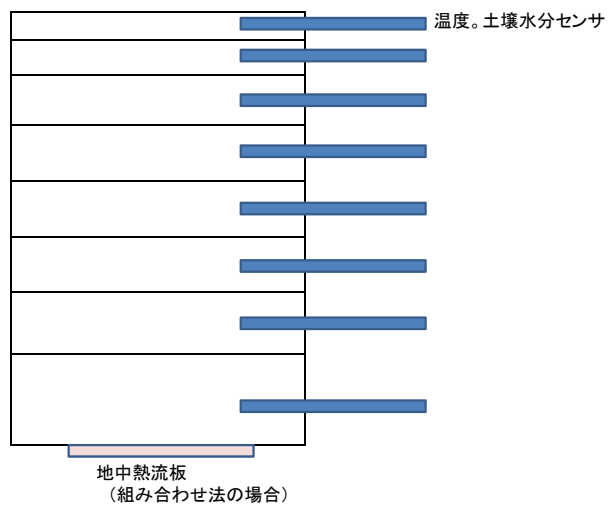


Fig.3.5-1 温度積算法と組み合わせ法の概念図。