水文・水資源学会誌
J. Japan Soc. Hydrol. & Water Resour.
Vol. 6, No. 2 (1993) PP. 12-16

棒状温度計による地表面温度観測の誤差

三枝信子*・山崎 剛*・加藤内蔵進**

Errors in Land Surface Temperature Measurements from Stem Thermometer

Nobuko SAIGUSA・Takeshi YAMAZAKI and Kuranoshin KATO

Errors are examined in land surface temperature measurements from stem thermometer. The purpose here is to estimate the errors in the temperature data observed at meteorological stations of China. One stem thermometer is only put on the soil surface, and the other stem thermometer is half buried in the soil. The actual soil surface temperature is measured by using a thermocouple.

The temperature of stem thermometer is almost equivalent to the soil surface temperature if the under half of the stem thermometer is buried. However, the temperature by the stem thermometer is slightly lower when the soil surface temperature is extremely high.

If the stem thermometer is only put on the soil surface, the temperature by the stem thermometer is almost always lower than the soil surface temperature (sometimes 7—8°C lower). This temperature difference is explicable by the heat budget of the stem thermometer. That is, the effect of heating by the solar radiation is less than that of cooling by the sensible heat transport from the thermometer to the air.

These results give the possibility of using the stem thermometer data for various quantitative analyses.

Key words : land surface temperature, stem thermometer, observational error

中国気象局で観測している地表面温度の誤差範囲を評価する目的で、ガラス製棒状温度計による裸地面温度観測の誤差について検討した。棒状温度計を半分土に埋めた場合（中国での観測方法）と、土の上に置くだけの場合を想定し、熱電対で測った地表面温度と棒状温度計の示度を比較した。

その結果、棒状温度計の下半分を土に埋めた場合には、温度計示度は土の表面温度とほぼ等しいことがわかった。ただし、地表面温度が特に高温になると、棒状温度計の示度は地表面温度よりやや低温を示す傾向がある。

次に、温度計を土の上に置くだけの場合には、温度計示度は地表面温度よりも一般に低く、7～8°C低温になることもあった。これは、放射によって温度計が加熱される効果より大気との熱交換のために冷却される効果の方が大きいためであることが、温度計の熱収支の考察により示された。また、気温・放射等の気象条件が得られれば、真の地表面温度に補正し得ることも示された。

以上のことから、棒状温度計による地表面温度データは、観測方法に注意して用いれば、蒸発散量の評価などの定量的な解析に使用できる。

キーワード：地表面温度、棒状温度計、観測誤差

I. はじめに

地表面温度は大気圏と陸水圏の境界面の温度であり、その値の違いは、大気・地表面間のエネルギー交換のさまざまな過程の違いを反映している。例え

ば、地表面温度と気温の差、あるいは地表面温度の日較差などは、大気や地中の熱輸送過程を直接反映している。また陸面では、蒸発が盛んな時の地表面温度は気温に近く、地表面が乾燥するにつれて地表面温度は高温になる。ここから、地表面の水分条件

*東北大学理学部 Geophysical Institute, Tohoku University

**名古屋大学水圏科学研究所 Water Research Institute, Nagoya University

の違いを理解することができる。

従って、地表面温度の時空間変動のデータは、単に地表付近の物理過程の研究にとって重要であるだけでなく、メソスケールからグローバルスケール(例えば数十km~数百km以上)に至るさまざまな大気中の気象現象や水循環に関して、それらの陸面過程を理解する上で重要な情報を与える。

例えば、Kato (1985) や加藤ほか (1992) は中国の気象官署における地表面温度データを用いて解析を行い、前者は、中国大陸の地面加熱が、梅雨前線帯の熱力学的構造の変化や中国乾燥域(およびその周辺域)の大気状態と水循環に与える影響について述べている。後者ではさらに、中国の6~7月の華北・東地区の半乾燥地域や真夏の華中に、日変化を伴う積乱雲群が頻出しており、ここに大陸の地面加熱の影響が見られることについて述べている。Masuda *et al.* (1991) は、中国地面気象記録月報(中華人民共和国中央気象局)をもとに、1979年の中国国内の187地点の地上気象観測データをグラフ集にまとめ、これは加藤ほか (1992) にも引用されている。

また、地表面温度のルーチン観測資料を用いた熱収支の計算がいくつか行われている。近藤・中國 (1993) は日本の気象官署の過去の地表面温度を用いて芝生地の蒸発散量の季節変化を推定しており、また、近藤 (1992) は、中国の裸地の地表面温度を用いて、熱収支の日変化を評価する試みをしている。

中国気象局では、現在、気象観測所で地表面温度と地中温度の観測を行っている。日本では、最近では観測データが十分に蓄積されたという理由で廃止されているが、1970年以前には気象官署の芝生の観測露場で地表面温度観測が行われていた。従って、日本や中国などの地表面温度のデータを用いた研究がなされる機会は多いと思われる。

中国での地表面温度の観測方法は、裸地面にガラス製棒状温度計を置いて温度を読みとるものである。この方法では、温度計は気温や日射・大気放射の影響を受け、本来の地表面温度とはいくらか異なるのではないかと予想される。しかしながら、これまでのところ誤差範囲は明らかではなかった。この地表面温度データを定量的な解析に用いる場合や、リモートセンシング観測による地表面温度との比較に用いる場合には、その示度がどの程度地表面温度を示すのかを詳しく知っておく必要がある。そこで著者らは、実際に棒状温度計を裸地面に置いて地表面温度を測定し、温度計の埋め方や気象条件によって、

温度計の示度が熱電対で測った裸地面温度とどのように違うかを調べてみた。

中国の乾燥地域では、暖候期に地表面温度の観測値が60°Cに達する地点も少なくない(Masuda *et al.*, 1991)。しかし、本研究では中国や日本における暖候期の地表面温度の変化範囲の少なからぬ部分をカバーするよう、20~50°Cの範囲について実験を行った。

II. 中国での地表面温度の観測方法

本研究では、実験条件の設定の際、中国での地表面温度の観測方法で得られた値が、どの程度真値に近いかを念頭に置いた。そこで本論に先立ち、まず中国でのルーチン観測法の概要を紹介する。

中国国内の気象観測所で標準として定められている観測方法によれば、地表面温度は地中温度(深さ5, 10, 15, 20, 40, 80, 160, 320cm)とともに、1日に4回(北京時で2, 8, 14, 20時)観測される。1日の地表面最高・最低温度は、最高・最低温度計によって原則的に20時に観測される。地表面最低温度はアルコール温度計により、地表面最高温度と地表面および地中温度は水銀温度計により測定される。観測場所は、観測露場の一角にある広さ2m×4mの裸地面である。地表面温度と地表面最高・最低温度は、やわらかくした土に棒状温度計の下半分を埋めた状態で測定する。放射をさえぎるものはない。雪が積もった場合は、温度計を雪面に移して雪面温度を測定する。

III. 棒状温度計による裸地面温度の測定実験

実験は、1991年10月と1992年8~9月に行った。土壌は、砂と田圃の土を用い、温度計は2通りの埋め方を採用した(図-1)。片方は、温度計の下半分を土に埋める(A)。もう一方は、温度計を埋めず、地面の上に置くだけである(B)。二本の温度計には、水銀温度計(全長29cm, センサ部の直径0.5cm)を用いた。また、センサ部の小さい熱電対を土壌表面にごく浅く埋めて放射の影響を受けないようにし、この温度を地表面温度の真値とした。水銀温度計と熱電対の精度は、誤差0.1°C以下である。さらに、日射量、大気放射量、土壌面上200cmの風速、90cmの気温を測定した。

IV. 実験結果

図-2(a), (b)に、熱電対による地表面温度 T_s と棒

図一 実験装置の模式図。温度計Aは土に半分埋め、温度計Bは土の上に置くだけである。熱電対センサ部は、ごく浅く土に埋める。

棒状温度計の示度 T の関係を示す。図一2(a)の T は土に半分埋めた温度計の示度、(b)は裸地面に置いただけの温度計の示度である。(a)を見ると、温度計の下半分を土に埋めていれば、土壌種類や含水率によらず、温度計の示度はほぼ地表面温度に等しいことがわかる。ただし、地表面温度が非常に高温になる真夏の日中には、温度計示度は地表面温度よりも2～3℃低くなる傾向がある。これは、温度計センサ部が地表面よりもいくらか突出しているので、平らな地表面よりも熱の輸送効率が良く、温度計の温度が気温に近づいていたためと予想できる。実験を行った仙台では、自然状態で地表面温度が50℃を超えることはまれであり、これ以上高温になる場合については検証することができなかった。また、図中の温度は瞬間値と10分間平均値の両方を含むが、両者の違いは小さかった。

温度計を土の上に置くだけの場合は(図一2 b)、一般に温度計のセンサ部は地表面にかすかに触れる程度である。しかし上から温度計を押しつけて、よく土壌に接するようにした例も示す(図一2 bの点線内)。すなわち温度計が自重で埋もれていった場合など、センサ部が地表面によく接していると温度計示度は地表面温度に近い。しかし温度計が地表面にかすかに接する程度では、示度は地表面温度よりも一般に低く、その差は真夏の日中では7～8℃にもなった。次の節で、温度計を裸地面に置いただけの

図二 熱電対による地表面温度 T_s と、棒状温度計の示度 T の関係。(a)は温度計の下半分を土に埋めた場合、(b)は地面にそのまま置いた場合。白丸は乾燥した砂、白三角は乾燥した田の土、黒三角は湿った田の土を示す。

場合について、この差を生み出す原因について考察する。

V. 温度計の熱収支

地表面に置かれた温度計のセンサ部は、日射と大気放射にさらされる。また、温度計が地表面上に突出しているために大気との熱の輸送効率がよく、土壌面よりも多くの顕熱が奪われる。ここでは、温度計が地表面からごくわずかに離れて地面からの伝導

熱がない場合を考え、温度計示度を予測する式を導く。

まず、温度計の熱輸送に対する交換係数 $C_H U$ には、室内実験により次の関係式が得られている(近藤, 1982)。

$$C_H U = \frac{\alpha}{d} Nu \quad (1)$$

$$Nu = C_1 + C_2 Re^{0.5} \quad (10^{-1} < Re < 10^4) \quad (2)$$

$$Re = \frac{dU}{\nu} \quad (3)$$

ただし、 U は風速、 α は空気分子温度拡散係数、 d はセンサの直径、 Nu はヌッセルト数、 C_1 、 C_2 は物体の形状によって異なる定数で、円柱状の物体では $C_1=0.4$ 、 $C_2=0.45$ が用いられる。 Re はレイノルズ数、 ν は空気動粘性係数である。(1)–(3)式で表す $C_H U$ は、地面から離れた大気中にある円柱状のセンサに垂直に風が当たる場合の交換係数を表す。

次に温度計の熱収支を考えるが、ここでは温度計センサ部を直径 d 、長さ l の円柱と考え、円柱の側面で熱交換が起きるとする。すると図-3に示すように、温度計の上面には日射 $S^\downarrow$ と大気放射 $L^\downarrow$ が入射し、下面には、温度 T_s の地表面から σT_s^4 の長波放射が入射する。 T を温度計の温度とすると、円柱側面からは σT^4 の長波放射が射出され、顕熱 H が奪われる。

$$ld(R^\downarrow + \sigma T_s^4) - \pi ld(H + \sigma T^4) = 0 \quad (4)$$

となる。ただし、

$$R^\downarrow = (1-a)S^\downarrow + L^\downarrow \quad (5)$$

であり、 a はセンサ部のアルベードである。単位面積あたりの顕熱輸送量は、

$$H = \gamma c_p \rho C_H U (T - T_a) \quad (6)$$

と表す。 c_p は空気の比熱、 ρ は空気の密度、 T_a は気温

図-3 棒状温度計の熱収支。 T は温度計の温度、 T_s は裸地表面の温度を表す。

である。 $\gamma (\leq 1)$ は、センサの直下に地面があるためにセンサの周りの風が弱まり、顕熱の交換係数が(1)式の値より小さくなる効果を表す。もし地面に近いための影響が小さければ $\gamma \sim 1$ である。

さて、(1)–(6)式を T について解き、 $\sigma T^4 \simeq \sigma T_s^4 + 4 \sigma T_s^3 (T - T_s)$ の近似を用いると、

$$T - T_s = \frac{R^\downarrow + (1-\gamma)\sigma T_s^4 - \gamma \gamma c_p \rho C_H U (T_s - T_a)}{4\pi \sigma T_s^3 + \gamma \gamma c_p \rho C_H U} \quad (7)$$

となる。

図-4は、 $a=0.2$ 、 $\gamma=1$ を仮定した場合に(7)式から計算される温度計の温度と、観測された温度計示度の比較である。ただし温度計は地表面にかすかに接する場合だけを示す。

ここで、(3)式と(7)式の U と T_a には、温度計上1cmの風速と気温をそれぞれ推定して用いた。まず、あらかじめ熱線風速計によって測定した温度計上1cmの風速 U_{1cm} と、軽量三杯式風速計(牧野応用測器製)による高度200cmの風速 U_{200cm} の関係を求めた。その結果、約1日のデータから、土壌面直上の風速と高度200cmの風速の典型的な関係(実験装置による風の乱れの影響も含む)として、 $U_{1cm} \simeq 0.25 U_{200cm}$ を得た。次に、高度1cmから200cmの間で風速と気温が対数分布であることを仮定し、高度90cmの気温と地表面温度から、温度計上1cmの気温を推定した。このとき、土壌面の(実験装置の影響も含む)運動量に対する粗度 $z_0 (=0.17cm)$ と熱に対する粗度 z_T が等しい

図-4 棒状温度計を地面にそのまま置いた場合の示度と、(7)式から計算される温度計温度の関係。土壌は乾いた砂である。

ことを仮定した。

図-4によれば、放射量や気温などの気象条件が得られれば、(7)式によっておよそ $\pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で温度計の温度を推定できることがわかる。言い替えれば、裸地面上に置かれた温度計による観測値から、(7)式を T_s について解くことにより、この精度で真の地表面温度を推定することができる。

ただし、(7)式は温度計と地表面の間に熱伝導がない場合を想定している。そこで、実際の観測で温度計がどの程度地表面に接しているかわからない場合には、温度計示度は熱伝導が十分にある場合の示度($T=T_s$)と、熱伝導を無視した場合の示度(7式による T)の間にあることになる。

(7)式で計算される T は、アルベド a や γ にはあまり敏感ではない(a を0.1, γ を0.2変化させても、 T の変化は平均 0.5°C 以下である)。また、本実験では $T-T_s < 0$ となる場合が多かったが、これは、(7)式の右辺分子において $C_H U(T_s - T_a)$ の項の寄与がその他の項に比べて大きいことによる(本実験の棒状温度計では、 $3.1 \times 10^{-2} < C_H U < 4.9 \times 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ であった)。これらの結果から、裸地面上に置かれた棒状温度計は、放射で加熱されて温度が上昇する効果よりも、大気との熱交換の結果、温度が気温に近づく効果の方が大きいことがわかる。

温度計を土に半分埋めた図-2(a)の場合にも、 T_s が高温となった時には T は T_s に対して $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 低くなったが、この原因も、棒状温度計と大気との熱交換が大きいと推定できる。

VI. まとめ

中国地表面温度観測データの誤差範囲を評価する目的で、これまで不明であった棒状温度計による地表面温度観測の誤差を調べた。その結果、現在中国の気象観測所で行われているように、温度計センサ部の下半分が土に埋められた状態であれば、放射や気温の影響は顕著には現れないことがわかった。ただし夏の日中など、地表面温度が気温に対して非常

に高温になる場合、今回の結果では棒状温度計は地表面温度より $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 程度低温になる傾向があることに注意する必要がある。

棒状温度計を地表面に置くだけの場合は、温度計示度は地表面温度よりも一般に低くなる(今回の結果では、 $2 \sim 8^\circ\text{C}$ 程度)。この原因は、真の地表面温度、気温、放射量などの気象条件を用いて温度計の熱収支を求めた結果、裸地面に置かれた棒状温度計が、放射により加熱される影響よりも、大気との熱交換により冷却される影響を強く受けるためであることがわかった。

この結果は、棒状温度計を地表面に置くだけの方法で測定された地表面温度のデータも、棒状温度計の熱収支を気温・放射等の気象条件から得られれば、真の地表面温度に補正しうることを示唆している。

参考文献

- 加藤内蔵進・岩崎博之・松本 淳 (1992): 東アジア乾燥地域周辺の水循環, 天気, **39**, pp. 408-413
 Kato, K. (1985): On the abrupt change in the structure of the Baiu front over the China Continent in late May of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, pp. 20-36
 近藤純正 (1982): 大気境界層の科学, 東京堂出版
 近藤純正 (1992): 地表面温度と熱収支の周期解及びその応用, 農業気象, **48**, pp. 265-275
 近藤純正・中園 信 (1993): 日本の水文気象(4): 地域代表風速, 熱収支の季節変化, 舗装地と芝生地の蒸発散量, 水文水資源学会誌, **6** (1), pp. 9-18
 Masuda, K., Ouchi, A., and Kato, K. (1991): An annual cycle of surface meteorological variables at stations of China, *Meteor., Rep. University of Tokyo*, **91**, pp. 187 (東京都立大学地理学教室 増田耕一または名大水圏研 加藤内蔵進より入手可能。)

(受付1993年3月15日 受理1993年3月16日)