

簡易通風乾湿温度計の製作とその性能テスト

The Handmade Economical Ventilated Psychrometer

小島 豊盛*・古藤田一雄*・寄崎 哲弘**

Toyomori KOJIMA, Kazuo KOTODA and Akihiro YORISAKI

I ま え が き

水収支や熱収支の研究において、大気中の気温や湿度の観測は、重要な項目の一つである。これらの観測は、1~2点程度の観測であるならば、市販の測器を購入することによって簡単に測定することができる。しかし、異った場所で、多数の点を同時に測定しようとする場合には、高い測器の経費のねん出に苦慮させられる。そこで、簡単に自作できる通風式乾湿温度計を試作し、その性能をテストした。

II 測器の概要

温度を正確に測定するためには、一般に次の条件が満たされなければならない。①温度計のセンサー（受感部）の熱容量が、被测温体の熱容量に比べて十分に小さいこと。②測定対象とセンサーとの間の熱交換が十分に行なわれて、他の熱源との交換がないこと。

本測器は、大気温度すなわち、乾球温度と湿球温度を測定することを目的としているため、センサーとして、銅コンスタンタン熱電対（記号CCまたはT）を用いている。CCは、直径0.32mm、ビニール被覆のものを用い、先端の温接点の部分は、外径3.2mm長さ70mmのステンレスの保護管に納められている。保護管内には酸化マグネシウムがセンサーとともに封入されており、センサーは直接保護管の金属（ステンレス）に接し

ない非接地型となっている。これは、外部からのノイズを拾わないように考慮したためである。

熱電対によって温度を測定するには、冷接点の温度を基準として、温接点の温度を測定しようとするものであるから、冷接点の温度（基準温度）が既知でなければならない。また、熱起電力と温度との関係は、正確には、直線関係を示さないもので、これを直線関係に補正すること（リニアライズ）が必要である。最近では、これら両者の機能を備えた記録計が数多く市販されている。本報告では、電子式基準温度設定装置とリニアライザーを内蔵するデーターロガーを使用した。

III 測定原理

地表面付近の気温分布は、わずかな高さでも著しく変化するので、正しい温度分布を測定するには細心の注意を必要とする。前述したように、気温の正確な測定はセンサーが、空気とは十分に熱交換を行なうが、これ以外の熱源とは熱交換をしないことが重要な条件である。地表面付近の自然環境下では、空気以外の熱源として放射による熱交換が気温測定に大きな影響を与える。したがって、野外の気温観測では、放射除けの工夫が必要である。また、センサーとつながっている導線や支持部品などを伝導によって交換される熱量もあるが、ここでは伝導による交換熱量は無視し得るものとして取扱う。

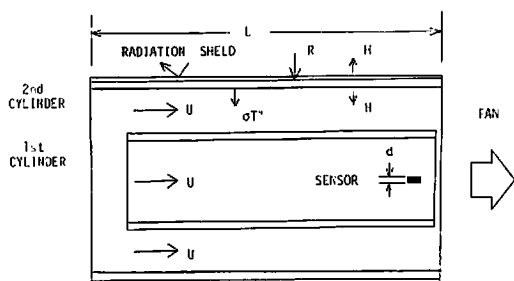
(1) 通風筒

* 筑波大学水理実験センター **筑波大学院環境科学研究科（現日本気象協会）

（1983年4月15日受理）

野外観測における太陽からの日射の影響をさけるための方法が、種々考えられている。本測器では、一番外側の通風筒（第2通風筒）は加工に便利なアルミパイプを利用したが、その外側に反射率の高いアルミ箔を貼付けて、放射除けとした。アルミ箔を貼付けない場合は、後述するように温度測定に大きな誤差が生じることがわかった。すなわち、日中の直達日射のもとで、温度を測定するような場合には、放射による影響をさけるための、日除け対策をすることが重要となる。

第1図は、通風筒とセンサーの熱収支を説明す



第1図 通風温度計の模式図

るために示した模式図である。いま第2通風筒は、日除けによって太陽直射の影響が完全にさえぎられ、通風筒の外側及び内側からは、顕熱が等しい量で、空気中に失なわれるものとして、定常状態での熱収支を考えると、筒の熱収支は、次のように表わすことができる。

$$R = \epsilon \sigma T_2^4 + 2h(T_2 - T) \quad (1)$$

ここで、 R は、物体（筒）に入った放射熱量、 $\epsilon \sigma T_2^4$ は、筒の表面から射出される長波放射熱量で、 ϵ は物体の射出率、 σ は、Stefan-Boltzmanの定数（ $=5.670 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ）、 T_2 は物体表面の温度（°K）である。 T は、物体周囲の気温で、 h は総括熱伝達係数である。なお、 h は次のような関係で示すことができる。

$$\frac{h}{C_p \rho} = (C_h \cdot U) = \frac{aN}{L} \quad (2)$$

ここで C_p 、 ρ はそれぞれ空気の定圧比熱、および密度、 C_h はバルク係数、 U は風速、 a は空気の分子温度拡散係数、 N は、熱輸送係数を無次

元化したヌッセルト数、 L は物体の代表長である。 $C_h \cdot U$ は、熱輸送係数とも呼ばれる。

(1)式右辺の第1項は、級数展開し、次のように近似することができる。

$$\sigma T_2^4 \approx \sigma T^4 + 4\sigma T^3 (T_2 - T) \quad (3)$$

簡単のため、 $\beta = 4\sigma T^3$ 、 $\Delta T_2 = T_2 - T$ 、 $\epsilon = 1$ とおくと、(2)、(3)式を用いて、(1)式は、次のように書直すことができる。

$$\Delta T_2 = \frac{R - \epsilon \sigma T^4}{\beta + 2C_p \rho (aN/L)} \quad (4)$$

上式は、日射を完全にさえぎった場合の通風筒の温度上昇度を示し、通風速度が、十分であるならば、 β は他の項に比べて無視することができる。 N の関数形は、強制対流と自然対流では異なり、また、物体の形状によっても異なる。近藤(1981)は、両者の効果を共に考慮した近似式として次式を与えている。

$$N = C_1 + C_2 Re^{*1/2} \quad (5)$$

$$Re^* = \{Re^2 + (C_3/C_2)^4 \cdot Gr\}^{1/2} \quad (6)$$

ここで $Re (=LU/\nu)$ はレイノルズ数、 $Gr (=g\Delta T L^3/(T\nu^2))$ は、グラスホッフ数で、 ν は動粘性係数、 g は重力の加速度、 C_1 、 C_2 、 C_3 は、物体の形状、流れの中での配置関係や流れの状態によって決まる常数である。流れに平行に置かれた水平板では、 $C_1=0.8$ 、 $C_2=0.6$ 、 $C_3=0.6$ が与えられている。

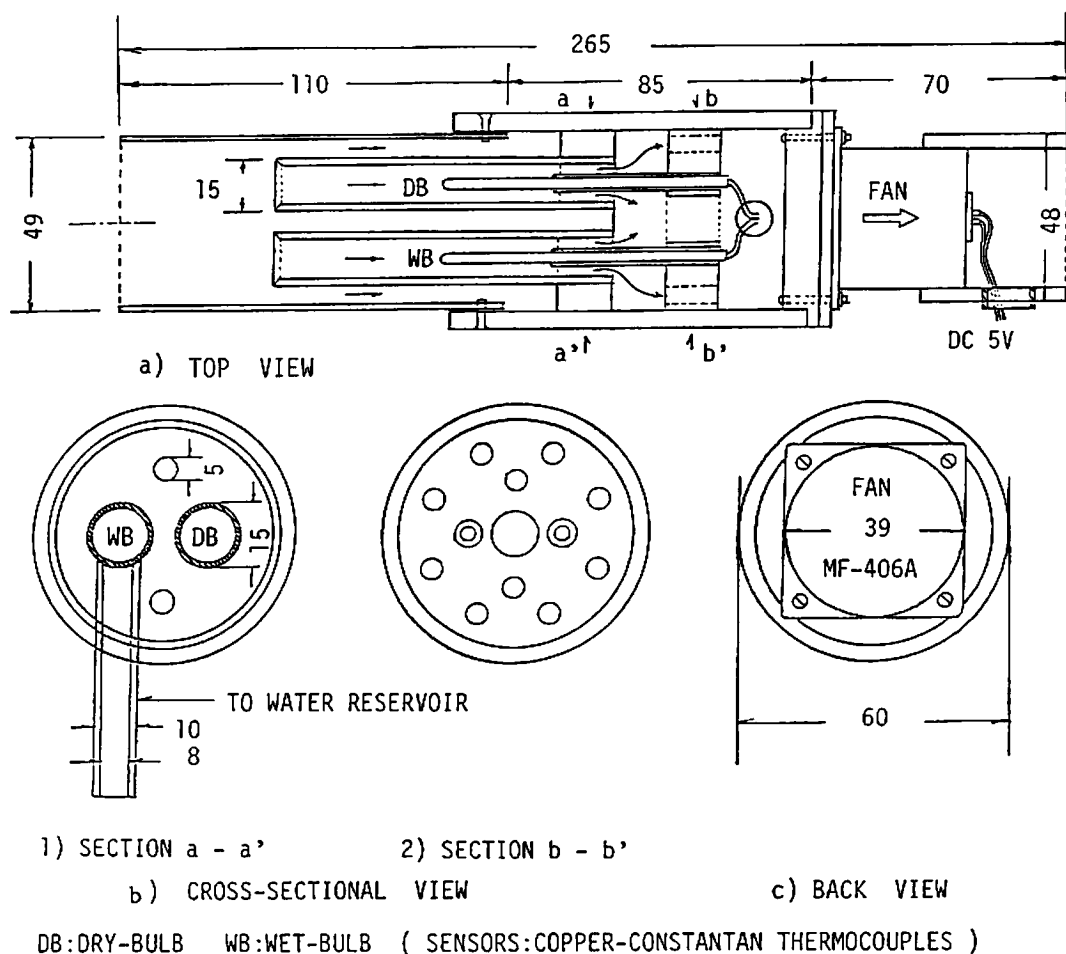
(5)、(6)式を整理すると、 N は次のように表わすことができる。

$$N = C_1 + C_2 \left(\frac{L}{\nu} \right)^{1/2} \left[U^2 + \left(\frac{C_3}{C_2} \right)^4 \frac{gL\Delta T}{T} \right]^{1/4} \quad (7)$$

通風速度が十分に大きければ、(7)式の[]内の第2項は省略できる。いま、通風筒を平板と仮定し、通風速度が大で、 $\nu=0.153 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (20°C) が与えられると、(7)式は次のように近似できる。

$$N = 0.8 + 1.53 (UL)^{1/2} \quad (8)$$

通風筒の温度変化は、(7)式と(8)式によって、推定することができる。本測器は、第2通風筒の内側に、さらに透明塩ビパイプで第1通風筒を2本設けた。筒の中にはそれぞれ乾球・湿球用の温度計が別々にセットされる。第1通風筒は、内径が



第 2 図 通風乾湿計の構造

10mmで、上述の第2通風筒と同じように、平板として取扱うには、若干の問題もあるが、入射する熱量は、 JT_2 による長波放射によるものとして第2通風筒と同じような方法によって、温度変化を評価することができる。

(2) 温度センサー

温度センサーに対する他の熱源の影響も、(4)式で示された基本式によって評価することができる。ただし、 N および L は、センサーの形状などが異なるので、通風筒とは異なる値を使用しなければならない。近藤(1982)は、(4)、(5)および(6)式を整理して、次式を与えている。

$$\Delta T = \frac{286(R - \epsilon \sigma T_4)L}{C_1 + C_4 L^{1/2} (U^2 + C_3 L \Delta T)^{1/4}} \quad (9)$$

ただし、上式は、通風筒内の風速は十分なものとして、 β は省略されている。近藤は、流れに垂直でかつ水平に置かれた円柱に対して、係数の値を、 $C_1=0.4$ 、 $C_4=1.22$ 、 $C_3=11.4$ として与えている。

いま、通風筒の長さを $L=10\text{cm}$ 、温度センサーは、円柱で近似できるものとし、第2通風筒は太陽の短波放射を完全に防除し、晴天日夜間の放射量にほぼ等しい($R - \epsilon \sigma T_4 = 0.1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ($= 70 \text{ W m}^{-2}$))が入り、筒内の気温は通風によっ

て外気の温度に等しいと仮定した理想的な条件を考えたときの、筒およびセンサーの昇温を計算した結果を第1表に示す。

第1表 理想的通風筒モデルにおける通風筒・センサーの昇温度

	U m/sec	1	3
$L=10\text{cm}$	N	49.2	84.6
2nd CYLINDER	$\Delta T_2(^{\circ}\text{C})$	2.7	1.6
1st CYLINDER	$\Delta T_1(^{\circ}\text{C})$	0.49	0.17
SENSOR	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$		
	$d=1\text{ cm}$	0.072	0.023
	$d=0.4\text{cm}$	0.045	0.013

N : ユッザルト数 L : 筒の代表長
 d : 円柱センサーの直径 ΔT : 昇温度

IV 通風筒の作製

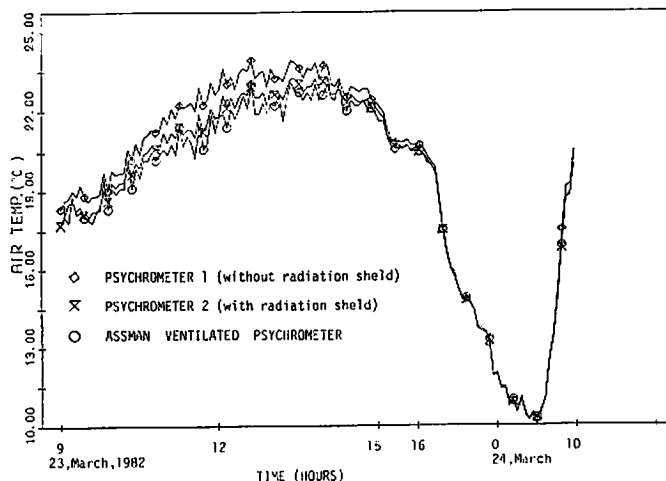
通風筒は、容易に手に入る材料を用いることにしたため、材質およびサイズ等は、部品の大さきなどに制約され、必ずしも理論通りにはなっていない。第2図、(a)、(b)、(c)は、製作した通風筒の構造を示したものである。

乾湿温度計の一番外側の通風筒(第2通風筒)は、後部のマイクロ・ファンを除いて全長195mmで、前端部は、外径49mm、肉厚2mmのアルミパイプを加工して作り、後端部は、このアルミパイプを挿入することのできる内径50mm、肉厚4mmの塩ビパイプとした。筒の先端から温度センサーまでの筒の長さは、100mmとしたが、取はずしが可能なので、更に長くすることもできる。

第1通風筒は、筒の断熱を考慮して、透明塩ビパイプで作製した。筒の外径は15mm、内径は約10mmである。雨天観測時に雨の吹込み等を避けるため、筒の長さは、第2通風筒より短かくした。センサーの先端から、この第1通風筒の先端までの長さは50mmとしたが、センサーは、筒の先端から形成された内部境界層の外に出ていると考えられる。第1通風筒も長さの違うものと取替えることが出来るようになっている。

センサーは、前述したように、銅コンスタンタンの熱電対(0.3級)を使用し、湿球センサーは、ガーゼをかぶせ、その末端は、通風筒の外に取りつけた容量50ccの水タンクにみちびかれ、毛管上昇を利用して、水分が補給されるようになっている。

ブローアは市販の吸込式マイクロファン(日本ブローア社製マイクロファン, MF-406A型)を使用した。モータは直流で駆動し、入力電圧DC 5V、入力電流660mAで風量は240ℓ/minである。寸法は41×41×35mmで全重量は50gである。軽量小型であるため、持運びに便利で、実際



第3図 アスマン通風乾湿計と試作測器により観測した気温の比較

に運転した結果、1年以上の連続使用にも耐えることがわかった。電源として、乾電池またはバッテリーが使えるので、山地などの無電源地域でも観測することができる。固定した場所で長期間観測する場合には、近くの家庭用AC 100V 電源を直流変換器によってDC 5 Vに変換して使用した方が、手間がかからない。

V 検 定 結 果

第3図は、1982年3月23日9時から24日10時にかけて、水理実験センター屋上で、アスマン乾湿温度計によって測定した気温と、試作通風筒に銅

第2表 試作測器とアスマン通風乾湿計による
気温観測結果の比較
(1982年3月23日11時～12時50分)

項 目	アスマン	熱 電 対	
		日除けあり	日除けなし
平 均 値	21.3 °C	21.7 °C	22.6 °C
アスマンとの差	0.0	0.4	1.3
標 準 偏 差	0.76	0.63	0.72
共 分 散	—	0.488	0.517
相 関 係 数	—	0.952	0.940
測 定 回 数	24	24	24

コンスタンタン熱電対をセットして測定した気温を比較して示したものである。なお、熱電対はあらかじめ、室内で検定し、 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内におさまることを確認した。また通風筒は、日除けのアルミ箔を貼付けたものと、貼付けない2の場合について比較観測した。記録は三栄測器社製のデータロガー（7 V07）型を用い、23日の9時から15日までの日中は、5分ごとに、23日の16時から翌24日の10時までの夜間は30分ごとに測定値をカセット自記テープに自記させた。図（日中と夜間では、時間のスケールを変えているので注意されたい）を見て、直ちにわかることは、夜間は、3測器とも、殆んど同じ値を示しているのに対して、日中は日除けのない通風筒では、日射の影響を受けて気温が、アスマンや日除けのある測器に比べて、高めに観測されている。

3測器の観測値で最も大きな差を生じた、日中11時から12時50分までの約2時間の気温観測値を統計処理した結果を第2表に示す。この表からわかるように、アスマンに比べて、日除けをつけた測器では、約 0.4°C 高めに気温が観測されている。しかし、日除けのない場合は、 1.3°C も高めに気温が観測されている。したがって、正しい気温を測定するためには、反射率の良い日除けによって太陽直達放射や反射光をできるだけ除去することが必要であることがわかる。この実験では、第2通風筒に日除けのアルミ箔をはったものでも、なお、日中はアスマン温度計よりも、 0.4°C 高く測定された。これは、第1通風筒に透明塩ビ管を使用したためと思われ、この塩ビ管の外側にも、アルミ箔を貼り付けてシールドすれば、より完全に放射は防げると考えられる。

VI あ と が き

容易に入手できる市販の材料を使って、通風乾湿温度計を試作し、これをアスマン通風乾湿温度計による観測値と比較検討した。この結果、通風筒の外側に日射除けのシールドをほどこさないものは、通風が十分でも、日中の日射の強いときはアスマンに比べて、 1.3°C ほど高い温度で測定された。日除けをほどこさないものは、約 0.4°C 高めに測定された。これは、内側通風筒に、放射除けのシールドをしていなかったことに起因していると考えられる。より正確な気温の観測値を得るには、これらの値に適当な補正をほどこす必要がある。さらに改良すべき点としては、放射除けをより完全なものにすること、熱電対のセンサーを何個か直列にして出力を上げることなどがあげられる。

文 献

- 近藤純正 (1982) : 大気境界層の科学, 東京堂出版, 219p.
 Lourence, F. J. and Pruitt W. O. (1969) : A psychrometer system for micrometeorology profile determination. *Jour. Appl. Meteor.*, 8, 492-498.