

# 放射収支計キャリブレーション装置の製作と その運用結果について\*

新 井 重 男\*\*

## 要 旨

放射収支計の長波キャリブレーション装置を製作し、試験を行い、現在実用に供している。構造は Funk 型の黒体炉であるが、精度の高いキャリブレーションをするためには、炉壁の温度測定精度を高くしなければならぬ。しかしその精度には限界があるので、後述の傾斜法を適用することにより、精度よく器械定数を決定できることが分かった。

## 1. はじめに

放射収支計は、黒色塗料を塗った2枚の受熱板の間に熱電対をはさみ込んだ構造のもので、両受熱板面の温度差は放射収支量に比例する。放射収支計のキャリブレーションとは、この比例係数を求めることである。

この種のキャリブレーション装置としては Funk (1959) の装置がある。また、わが国には別のタイプのものであり (Kano *et al.*, 1973), ユニークなものであるが、かなり大きな構造をしている。今回製作したものは、基本的には Funk 型の黒体炉である。

Funk 型のキャリブレーション装置は、温度をコントロールできる低温炉と高温炉で構成されている。キャリブレーションの対象となる放射収支計を低温炉にいれ、高温炉からの放射を低温炉に開けた小窓から取り入れて、放射収支計に与える。低温炉内壁の温度が完全に均一なら、窓からの高温炉放射と、窓と対称位置にある、窓と同じ立体角で切り取られる低温炉壁からの放射の差が、正味の収支量となり、その他の壁からの放射は相殺される。しかし壁温度が均一でないときは、相殺されない部分が残る (暗収支量) 誤差となる。したがって炉壁の温度測定精度ならびに各壁面の温度分布の均一さがキ

ャリブレーションの精度を左右する。

ただし、Funk の製作した装置は、低温炉の温度コントローラーがないので、その温度は室温に関係する。

後述するように、今回製作した装置によるキャリブレーションの精度は2%と算定されるが、精度を示した文献が見あたらないので、他の装置と精度上の比較はできない。

## 2. 構 造

今回製作した黒体炉装置の概要を第1図に、内壁の寸法を第1表に示す。

低温炉は銅板製の箱型で、その内壁には射出率の大きい黒色塗料 (パーソンズ・オプティカル・ブラック・ラッカー) が塗られている。銅板の外壁には恒温水槽からの水を循環させるパイプを巡らし、更に厚い断熱材で覆われている。高温炉の内壁はコーン状で、開口部から奥行き約半分は円筒形、残り半分は円錐形になっている。その他は低温炉と同様の構造になっている。

低温炉の中央にセットした放射収支計から窓を通した

第1表 黒体炉内壁の寸法 (単位mm)。

低温炉
高さ 440, 幅と奥行き 310, 窓の半径 27.8
高温炉
コーン奥行き 303 (円筒部 130, 円錐部 173)
コーン頂角 60° 開口部の直径 200

\* On the calibration equipment of the net pyroradiometer and the results of the operational use.

\*\* Shigeo Arai, 日本気象協会.

—1989年6月8日受領—

—1990年6月18日受理—

視野は、高温炉の円錐部分に限られるように、両炉の配置を適当に取ってある。用いた恒温水槽の温度コントロール精度は $0.02^{\circ}\text{C}$ である。低温炉壁には8個（窓側とその反対側の壁に各2個，その他の壁に各1個），また高温炉円錐壁には6個の板状白金抵抗温度計（モールドの厚さ $0.8\text{mm}$ ）を張り付け，その出力および放射収支計の出力を，データロガーを介してパソコンに取り入れている。温度の測定誤差と分解能は $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ と $0.01^{\circ}\text{C}$ ，出力電圧の測定誤差と分解能は $\pm 3\mu\text{V}$ と $1\mu\text{V}$ である。低温炉底部には，内部の気温を一様にするためのファンがある。また高低両炉の開口部にはシャッターがあり，外部から低温炉内への入射を遮断することができる。

これらの装置は事務机二台分の面積に収容できる。

### 3. 炉内の温度分布と安定性

低温炉の有効開口係数（開口部から入射する放射と，入射立体角 $2\pi$ から入射する放射の比）は約 $0.03$ と非常に小さいので，高温炉の温度測定精度はそれほど高くなくてもよい。実際に放射収支計が受け取る高温炉からの放射量の測定許容誤差を仮に $1\%$ としたとき，それに相当した温度測定の必要精度は，運用炉温で約 $0.8^{\circ}\text{C}$ となる。

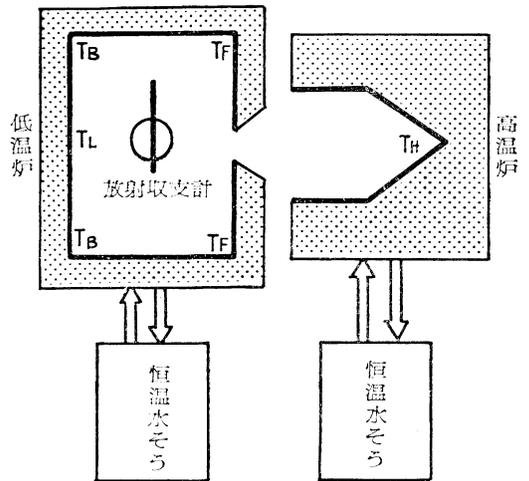
一方，低温炉内部からの放射は，有効開口係数がほぼ $1$ と大きいので，おなじ $1\%$ 誤差に対する必要精度は約 $0.03^{\circ}\text{C}$ となるが，この精度は満たされていない。

炉壁の温度は，完全に一様であることが理想であるが，場所によりわずかの差を生ずる。設定した温度と室温との差が大きければ差も大きい。これは恒温水槽からの冷（暖）水が各壁面を循環している間に暖められる（冷やされる）からであろう。

例えば低温炉の窓を閉じて，室温より約 $20^{\circ}\text{C}$ 低下させ，十分安定させた後に調べた例では，冷水の入口の壁面と出口の壁面との温度差は $0.2^{\circ}\text{C}$ 程度になり，暗収支量による出力を生ずる。壁面温度分布が安定してからの変動は各壁とも $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 程度である。

高温炉は，運転のとき室温より $50^{\circ}\text{C}$ 程度上昇させる。高温炉は開口面積が広く，外気との流通が自由であるため，開口部に近いところでは外気の影響で冷却され，また奥の天井部では対流影響もあり加熱が大きい。このため円錐壁内の最高最低温度差は $1^{\circ}\text{C}$ 近くになる。

高温炉の場合は，この温度の不均一はそのまま誤差を生ずるわけではない。それぞれの温度に応じた射出が放



第1図 キャリブレーション装置の概要

$T_L$ 、 $T_H$  などの記号は4に説明する炉壁の温度。

放射収支計に入射するので，円錐部分の平均温度をとれば，全体の放射発散度を代表させられる。かつ，平均温度が $0.8^{\circ}\text{C}$ 以下の精度で測定できれば，誤差 $1\%$ 以下の入射照度が得られるからである。一方，低温炉では，測定精度を仮に $0.03^{\circ}\text{C}$ としても $1\%$ 誤差となるが，実際にはこの数倍のかなり大きな誤差となり得る。これを避けるため後述の傾斜法を採用した。

### 4. 傾斜法

記号を次の通り定義する（第1図参照）。

$T_H$ ：高温炉壁の平均温度

$T_L$ ：放射収支計に対して，窓と対称位置にある同じ立体角で切り取られる低温炉壁の温度

$T_F$ ：第1図で放射収支計の右半球に面する，立体角 $2\pi$ から窓を除いた壁の平均温度

$T_B$ ：同様に左半球に面する，立体角 $2\pi$ から $T_L$ 部分を除いた壁の平均温度

$V$ ：放射収支計の出力電圧

$f$ ：窓の有効開口係数

$k$ ：放射収支計の器械定数

$M^*$ ： $T_H$ と $T_L$ による収支量

$m^*$ ： $T_F$ と $T_B$ による収支量（暗収支量）

$\sigma$ ：ステファン・ボルツマン定数

次の式が成り立つ。

$$M^* = f\sigma (T_H^4 - T_L^4) \quad (1)$$

$$m^* = (1-f)\sigma (T_F^4 - T_B^4) \quad (2)$$

$$M^* + m^* = kV \quad (3)$$

理想的な場合は  $T_F = T_B = T_L$  であるから、式 (2) から  $m^* = 0$  となり、式 (3) から、 $M^*$  と  $V$  を測定して容易に器械定数  $k$  を求めることができる。通常は暗収支量を見捨て、この方法がとられている。

低温炉の窓シャッターを閉じて、暗収支量による出力電圧を測定し、シャッターを開いたときの出力にこれを補正すれば、暗収支量の影響を簡単に除去できる。しかしシャッターの開閉で暗収支量に変化する恐れがあること、また出力電圧の測定は、シャッターを開いてから放射収支計時定数の5倍以上(1~2分間)の時間経過後となるが、その間に高温炉放射にさらされた、低温炉窓付近の温度が上昇し、出力電圧はわずかながら増加して、一定値に収束しないなどの欠点がある。

いま低温炉の設定温度を一定に保持したまま、高温炉の温度を変化させる場合を考える。式 (3) を  $V$  で微分して

$$dM^*/dV + dm^*/dV = k \quad (4)$$

測定中に  $T_F$ ,  $T_B$ ,  $T_L$  に変化がなければ上式の第1項は  $T_H$  のみの関数となり、第2項はゼロとなるから、低温炉内の温度値に無関係に  $k$  を求めることができる。 $k$  は  $M^*$  と  $V$  の回帰直線の傾斜なので、この方法を傾斜法と名付ける。

## 5. 運用の結果

はじめ、高低両炉とも露点以上ないし室温程度に設定し、炉内の温度が十分安定した後、高温炉を  $70 \sim 80^\circ\text{C}$  にセットし、キャリブレーションを開始する。高温炉の温度は、室温付近では10分間当り約  $9^\circ\text{C}$ 、室温プラス  $50^\circ\text{C}$  で約  $7^\circ\text{C}$  の割合で上昇する。高温炉がセット温度に近づくまで、20~30回のサンプリングをした。低温炉は一定温度で運用するが、高温炉にさらされる窓付近は断熱材も薄いためか、 $0.04^\circ\text{C}$  程度上昇する。その他の部分は  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  以下である。

窓付近の壁温度上昇は暗収支量を増加させる。この温度上昇部分を2次的な放射源と考え、その他の壁面は温度変化が殆ど無いので、放射源としては無視する。窓付近の温度は実測されているが、この2次放射源の立体角は不明である。従って、有効開口係数も不明であるが、後述の理由により有効開口係数を0.5と仮定して、窓側温度計の温度に応じた放射をサンプリング毎に求め、 $M^*$  に補正した。このため  $M^*$  の値は大きくなるが、傾斜法では補正量の変化分だけが回帰直線の傾斜に影響

するので、器械定数の補正ができる。また変化量は温度計の分解能  $0.01^\circ\text{C}$  の精度で算出でき、温度計の精度には殆ど影響されない。このようにして実施した結果は、100例以上で、収支量と出力との相関係数の2乗は0.9999以上となった。

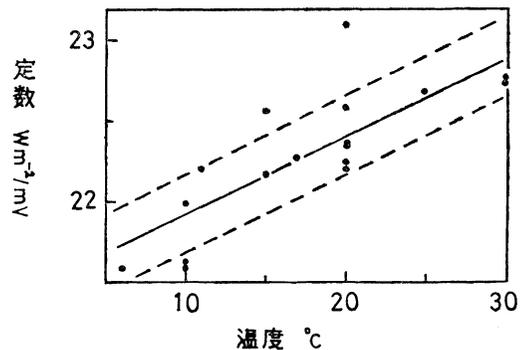
補正をしない場合と比較すると、器械定数は約1%高くなる。開口係数を0.5と仮定したのは、開口係数の両極端値の0と1の中間を取ったまでであるが、極端値になることはないから、補正值の誤差は定数の  $\pm 0.5\%$  以下であろう。

なお、この補正の検証を次のようにした。低温炉窓付近の壁温度が上昇したところで、窓のシャッターを閉じ、高温炉からの入射を遮断する。そして窓温度の下降と、暗収支量減少による放射収支計の出力の下降を調べた。結果は上述の補正を定性的には満足するが、測定精度の関係で、数量的な検証はできなかった。

ある特定の放射収支計について、20カ月の間に、低温炉の温度を変えて繰り返し18回キャリブレーションを実施した。得られた器械定数の平均は  $22.3 \pm 0.4 (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} / \text{mV})$  であった。低温炉の温度と定数の関係を第2図に示す。この結果は、放射収支計の温度特性を含む誤差とキャリブレーション誤差(固定誤差を除く)が合成された、総合精度を示すものと思われる。定数  $k$  と低温炉温度  $t^\circ\text{C}$  に回帰直線を当てはめてみると、

$$k = 21.4 + 0.05 t \quad (5)$$

となり、定数  $k$  は  $10^\circ\text{C}$  について約2%の温度係数を持っていることになる。温度係数は計器毎に異なるのかも知れない。他の放射収支計で、同様に13回キャリブレーションを実施した例では、1.5%となったが、統計的に



第2図 放射収支計の温度特性。  
実線は回帰直線、点線は縦軸の標準誤差範囲。

はバラツキが大きかった。青島らは別の方法で測定し、 $10^{\circ}\text{C}$ について約1%の結果を得た(青島ほか, 1975)。

なお定数 $k$ のキャリブレーションから求めた値と、式(5)による推定値の差の標準偏差は $0.25\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}/\text{mV}$ で定数の約1%となる。同じ放射収支計をほぼ同じ条件で数日以内にキャリブレーションを実施してその差をみた場合も、10例で1%以下であった。このことから黒体炉を傾斜法で運用した場合の分解能はほぼ1%と考えられる。

放射収支計には15秒程度の遅れがある。高温炉の温度上昇率は前述のように室温付近で大きく、高温になると小さくなるが、放射収支計受感面の照度に換算すると、10分間当たり室温付近で $1.7\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ 付近で $1.9\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ と、上昇率は小さく、かつほとんど一定である。このため放射収支計の遅れの影響は小さく、さらに傾斜法によって相殺されるので、無視できる。

放射収支計の出力は、ドーム周辺の風速に影響されることが知られている(Kano, 前出およびWMO, 1983)。われわれの場合、低温炉内のファンによるドーム周辺の風速は $1\text{ m/s}$ であるが、これを停止してキャリブレーションをすると、定数は約1%低下する。この現象は熱伝導など放射以外のエネルギーの出入もからむので、解析は困難である。

## 6. キャリブレーションの精度

キャリブレーションの精度には、装置の工作精度ないし製造後の寸法測定精度によるものと、上述のキャリブレーションの方法によるものがある。

製作上の精度としては、メーカーの資料を元にして、器械定数に対する誤差を%で示すと

- (1) 窓の直径誤差  $0.2\text{ mm}$  .....1.4%
- (2) 窓から収支計までの距離誤差  $1\text{ mm}$  .....1.3%
- (3) 収支計受感面の辺の長さ誤差  $0.5\text{ mm}$  ...0.1%

上述のキャリブレーションの方法による誤差を要約すると

- (4) 高温炉平均温度誤差  $0.2^{\circ}\text{C}$  として.....0.3%
- (5) 低温炉窓温度変化による補正誤差 .....0.5%

同一放射収支計を同一条件で繰り返しキャリブレーションを行ったときの標準偏差は、前述のように約1%で、これは(4)と(5)および、考慮しなかった出力電圧測定誤差など、他の要因による誤差を含んだものと考えられる。

- (1)と(2)は装置の固定誤差であり、(3)も異質の

ものであるなど、誤差の性質は同じではないが、これらとこの1%の2乗和の平方を取ると2.2%となる。

従来、財団法人気象協会では、快晴の夜に準器との比較でキャリブレーションを行ってきた。1~2年間現地で使用後再びキャリブレーションを実施して、定数が何%変化したかを、100例で調べた結果では、標準偏差は4%で、10%を越えるものも3例あった。

黒体炉を運用してから日が浅いが、同様に現地で1年程度使用後、黒体炉で再びキャリブレーションを行った結果は、標準偏差は2%(34例)で、差の最大は5%(1例)と、比較方式に比べ半減した。この最大差5%も、式(5)の温度係数を適用すると3%になった。実使用後に生ずるこれらの差は、放射収支計の特性の変化が主な原因と思われるが、キャリブレーションの精度も一因である。黒体炉方式の方が差が少ないことは、黒体炉によるキャリブレーションの精度が比較方式に比べ高いことを示す。

以上述べたことは長波放射に限ったことである。経験的ではあるが短波放射では、放射収支計の受感面に褪色が認められると特性も変化するが、長波では影響が少ない。

## 7. まとめ

Funk型のコンパクトな放射収支計キャリブレーション装置を製作した。

Funk型で通常用いられる測定方法では、低温炉内の温度測定精度および炉内壁の温度分布の不均一のため、キャリブレーションに誤差を生ずるが、傾斜法を適用することによって、この誤差を除くことができる。キャリブレーション中に低温炉窓付近の壁温度が上昇して、新たな誤差を発生するが、傾斜法を適用すれば、温度計の分解能( $1/100^{\circ}\text{C}$ )を使用して、ある程度の補正も可能である。

今後は本装置により、よりよい精度のキャリブレーションができるので、放射収支計の信頼性も向上するものと思われる。

残された問題は、キャリブレーションを行う温度を放射収支計の使用環境の温度に近付けて、放射収支計の温度係数の影響を軽減することであろう。また放射収支計の出力に対する風速の影響も調査する必要がある。

## 謝 辞

このキャリブレーション装置の仕様は、嘉納宗靖氏

(元気象研究所)を委員長とする、気象協会内に設けられた委員会で審議されて作られた。池田弘氏(英弘精機株式会社技術顧問)には多くの御教示を頂いた。本装置の製作は日本自転車振興会からの補助金によるものである。両氏ならびに同会に対して厚く御礼を述べる。

### 文 献

Funk, J.P, 1959 : Improved polythene-shielded net radiometer, J. Scientific Instruments, 36, 53-

56.

Kano, M., M. Suzuki and A. Yata, 1973 : On the Calibration of the Radiometer for Long-wave Radiation ( I ), Papers in Meteorology and Geophysics, 24, 249-261.

WMO, 1983 : GUIDE TO METEOROLOGICAL INSTRUMENT AND OBSERVING PRACTICES, WMO, 9. 32-9. 34.

青島 武, 矢崎利昭, 三宅行美, 1975 : 放射収支計の改造とその特性, 日本農業気象学会秋期大会講演要旨, 日本農業気象学会, 32.



## 自然災害の影響に関する UCLA 国際会議論文募集

期 日 : 1991年7月10日~12日

場 所 : カリフォルニア大学ロスアンゼルス分校

自然災害をテーマにした国際会議がカリフォルニア大学ロスアンゼルス分校(UCLA)で開催されます。この会議は、ULCAの国際研究・海外プログラム(ISOP)の主催で、ラテンアメリカセンターと環太平洋研究センターが支援しております。共催機関には、アメリカ国際グループ(AIG)、カリフォルニア地震安全委員会、ロスアンゼルス市、ラテンアメリカ・カリブ海経済委員会(ECLAC)、連邦緊急管理局(FEMA)、アメリカ海外災害援助室(OFDA)、国際連合地域開発センター(名古屋)(UNCRD)、国際連合教育科学文化機関(UNESCO)およびアメリカ地質調査所(USGS)であり、汎アメリカ保健機関(PHAO)と世界保健機関(WHO)が協力しております。

会議は、自然災害の多くの事例からアイデアを抽出し、局地的なレベルや、国内外および国際的レベルでの重大な災害が及ぼす影響について、総合的な研究方法の確立を目的としております。ここでいう災害は、地震、暴風雨、洪水、火山爆発、大規模な山火事、早魃および環境的な問題をも含む広範にわたるものを対象としております。会議は、学際的な学術団体、政府および民間企業の専門家を参集して、調査研究および過去の経験を発表し、必要とされる調査研究、軽減活動および適切な政策の将来にわたる協議事項を議論するものです。

論文発表を考えている方は、1,000語程度の要約と、簡単な略歴を1990年12月15日までに提出して下さい。本

論文の締切は、1991年4月15日までです。論文執筆などの詳細については、予定の論文執筆者に受理の通知の時に送付します。論文集については、後日出版することを考えています。

主要テーマは、以下の通りです。

—以下の側面での自然災害の影響

- ・経済的
- ・環境的
- ・法律的
- ・医療および保健の側面
- ・物理的および技術的
- ・政治的
- ・社会的側面

—自然災害の保険の側面

—将来的・国際的・学際的協力

要約の送付および詳細については、以下にお願いします。

Prof. Samuel Aroni

Conference Chair

GSAUP, UCLA

Los Angeles, Cal. 90024

TEL : (213) 825-7430

FAX : (213) 206-5566

問合せ : 国際連合地域開発センター地域防災ユニット

和泉 潤

TEL : (052) 561-9377, FAX : (052) 561-9375