

長波長放射計 CG4 の特性調査(第一報)

長沼 弘*・長井 勝栄*

On the Characteristics of CG4 Pyrgeometer (Part I)

Hiroshi NAGANUMA and Katsue NAGAI

要旨

Kipp & Zonen 社製の長波長放射計 CG4 は、これまで広く用いられてきた Eppley 社製長波長放射計 PIR に比べて、直達日射からの遮蔽やドーム温度の測定が不要といった長所を持ち、今後の利用増が予想される。

一方その特性把握や校正手段の確立はこれからの課題である。現時点では、CG4 は直接の校正装置がないため、基準となる測器との比較観測により校正係数を求めることとなる。

今回、3 台の CG4 について特性把握の調査も兼ねて PIR との比較観測を行ったところ、天候に依存する形で日中に PIR に対して値が大きくなる傾向があることがわかった。日中の増加については、一見すると、フィルターで遮断しきれない日射の影響を受けているように見えるが、検討の結果、日射そのものが直接の原因ではなく、日射に曝されることで測器の熱平衡に偏りが生じ誤差の要因となっている可能性が高いと考えられる。

1. はじめに

地球大気系は、可視光領域に主なエネルギー範囲を持つ太陽放射により暖められ、赤外領域を主とする地球放射により冷却して、エネルギー収支がほぼ一定に保たれている。地球温暖化等の気候問題の研究においては、地表面における放射収支の把握のため、高品質の地上放射観測データが欠かせない。

高層気象台では、世界気象機関(WMO)が推進している観測網計画である基準地上放射観測網(BSRN)に参加し、精密な日射・放射観測を総合的に 24 時間連続して実施している。

天空から地表へ向かう大気放射(下向き長波長放射)および地表から天空へ向かう地球放射(上向き長波長放射)を測定する測器として、Eppley 社の精密赤外放射計(PIR)が世界的に広く用いられており、高層気象台では PIR を、下向き放射観測に 1993 年から、上向き放射観測に 1994 年からそれぞれ使用している。

PIR による測定では、センサーを覆うシリコンドームが日射により加熱されることに伴う二次放射の影響(ドーム効果)を考慮する必要がある。BSRN では、正確な観測を行うため、ドームを直達日射から遮蔽し、且つドームの

温度を測定してドーム効果を補正するよう勧告している(WCRP : 1998)。

さらに、ドームの温度分布の偏りによる誤差をなくするため、3 カ所でのドーム温度測定を求めている(Philipona *et al.* : 1995)。これに対し近年 Kipp & Zonen 社が開発した CG4 は、ドームとボディとの熱的結合を高めることで両者の温度差をなくし、実用上ドーム効果を考慮しなくて良いという特徴を持つ(柴田・廣瀬 : 2001)。また干渉フィルターの特性が良く、太陽放射の影響をほとんど受けないため、PIR のような直達日射からの遮蔽も不要とされている(Kipp & Zonen : 2000)。

PIR ではセンサー出力に加えボディ温度の測定を含め 5 チャンネル必要であるが、CG4 による測定では、センサー出力とボディ温度の 2 チャンネルだけで済むため、配線の手間や収録ファイルの容量が少ないという利点があり、放射量への計算式も単純なため、今後 CG4 は PIR に代わって広く用いられていくと思われるが、その特性や校正方法にはまだ研究すべき点が多い。

PIR の校正に関しては、高層気象台で円錐黒体炉を用いた校正技術が開発されている(廣瀬・柴田 : 2000, 2001, 2002)が、CG4 については、直接校正する手段がない。このため、他の赤外放射計との比較観測により測器定数を求める方法が、現実的な対応となる。

* 高層気象台 観測第三課

メーカーである Kipp & Zonen 社の社検値も同様に、同社の基準器との屋外比較により感度が求められている。

今回、気象庁南極観測事務室の依頼で南極観測用 CG4 の校正を行う機会があり、特性把握の目的を兼ねて、高層気象台の CG4 とともに屋外での比較観測を行った。

2. 比較について

2004 年 6 月から 9 月にかけて、高層気象台の屋上において下向き長波長放射の比較観測を行った。測定は BSRN データ収録装置(廣瀬ほか：1988)により行い、比較には 1 秒測定値を用いた。使用した測器は以下の通り。

CG4/010567(高層気象台: #1)
CG4/010582(高層気象台: #2)
CG4/990001(南極観測用: #3)
PIR/31714F3(高層気象台: PIR)

PIR は太陽追尾式の遮蔽装置(ASTX-200S：以降トラッカーと呼ぶ)により直達日射から遮蔽し、CG4 については遮蔽した場合と遮蔽しない場合の両条件で測定を試みた。

なお、収録装置の空きチャンネルの制約と、南極 CG4 を温度センサー改造のため途中でメーカーへ預ける必要があったこと等から、天候条件が良い日で 3 台同時に比較を行うことができた例は少なかった。

センサー受光面は下向き長波長放射(DL)エネルギーを受けるとともに、上向きにその温度に対応した放射エネルギーを射出しており、その差がセンサーの出力となる。

つまり測器の受光面における正味放射(NET)とセンサー出力が対応することになる。よって測器の校正は、DL ではなく NET で比較を行う必要がある。

校正に使用する長波長放射照度 $F(W/m^2)$ の計算式は次の通り。

PIR の場合は、出力を $U(\mu V)$ 、ボディー温度を $T_b(K)$ 、ドーム温度を $T_d(K)$ とすると、放射照度 $F(W/m^2)$ は

$$F=U/C(1+k_1 \sigma T_b^3)+k_2 \sigma T_b^4 -k_3 \sigma (T_d^4 - T_b^4) \quad (1)$$

である(WCRP：1998)。

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数($5.67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)、 C, k_1, k_2, k_3 は校正係数である。

一方、CG4 の場合は以下の通り PIR と異なり校正係数はセンサーの感度である C のみの簡単な式となっている(Kipp & Zonen：2000)。

$$F = U/C + \sigma T_b^4 \quad (2)$$

なお、基準として用いる PIR は、長波長放射計校正装置(廣瀬・柴田：2002)により、設置前の半年間に 5 回校正を行っており、校正係数に問題がないことを確認している。

3. 比較結果

図 1 は、校正係数にメーカーの社検値をそのまま用いた場合の DL の値と、基準との差を示した例である。

基準器 PIR との偏差は 3 台とも BSRN が精度目標としている $10 W/m^2$ 以内(WCRP:1998)に収まっていて実用上差し支えないものの、DL の変動に対応して PIR との差が変動しており、その変動幅は各測器で異なっている。

特に DL の変動時に偏差の傾向が大きく変わっていることから、その特性の調査を行った。DL の変動との対応は感度のズレを示唆することから、はじめに各測器の校正を行った。

CG4 の校正係数、つまり感度 C は、(2)式から

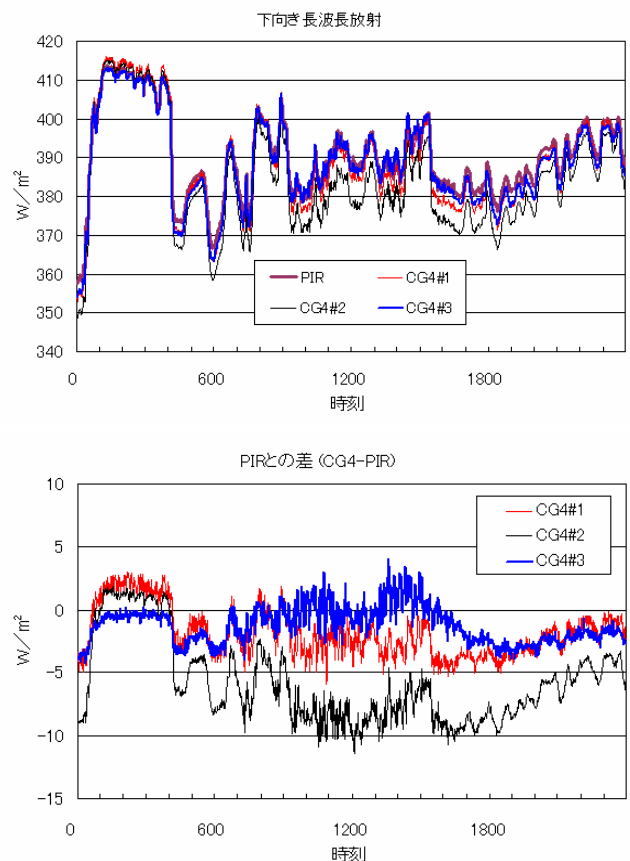


図 1 校正前(2004 年 6 月 18 日)の PIR と被検査器 3 台との測定値比較

上段は社検値による係数を用いて計算した放射量、
下段は基準器 PIR と被検査器との放射量の差。

$$C=U/(F-\sigma Tb^4) \quad (3)$$

であるから、F には(1)式で求めた PIR の値を用い、CG4 の出力 U と $F-\sigma Tb^4$ との回帰により求めれば良い。

図 2 は図 1 と同日の夜間(0h-6h)の時間帯における CG4 の出力と NET の相関を示す。

図 2 の中に示した 2 種類の回帰式で求めた校正係数を用いて再計算した DL についての PIR との差を、図 2 に示す。本来、図 2 の回帰式は原点を通るべき性質のものであるが、それでは DL の変動に伴う偏差の不自然な変化が解消せず、

$$y = mx + b \quad (4)$$

のように、定数項の追加が必要であった。

それが PIR と CG4 のどちらに起因するものかはわからないが、両測器の特性の違いによると考え、本調査では回帰式に(4)式を用いることとした。

全日(0h-24h)や日中(9h-15h)の時間帯についても同様の回帰を行い、PIR との差を比較してみたが、いずれも前述の、DL の変動に伴う偏差の不自然な変化が解消しなかった。このため校正は夜間(0h-6h)の時間帯の比較結果で行うこととした。

つまり、校正は夜間に行い、校正後の CG4 による放射量の計算式としては、

$$F = U/C + b + \sigma Tb^4 \quad (5)$$

を使用する。

このときの 3 台の CG4 と PIR の差は、標準偏差で各々 1.9, 3.2, 2.8W/m²、回帰を行った夜間の時間帯に限れば、0.5, 0.5, 0.4 W/m² と非常に良く一致している。

なお、南極観測向けの測器 (CG4#3) の校正そのものに関しては、本稿をまとめる以前であったため、比較は夜間のデータで行ったが、校正式には定数項を含まない式(2)を用いている。

各測器について、校正係数に社検値をそのまま用いた場合、および夜間比較の結果を期間中平均し新たな校正係数として適用した場合の、PIR との放射量偏差(以下、偏差と呼ぶ)を表 1 に示す。

夜間校正で夜間の偏差が縮まるのは当然であるが、全日で見た場合、#2 でやや改善しているものの、#1 や#3 では、社検値と比較して校正後もトータルとしての偏差はそれほど変わっていない。

しかし両者の質的な意味合いは異なる。即ち、社検値

では後述する日射を起源とする何らかの影響も含めて校正係数に取り込んでいるため、その影響のない夜間には偏差が増えることとなる。

一方、本調査における校正方式では、夜間や曇天では良いが、日中は日射の影響を受け偏差が大きくなっている。

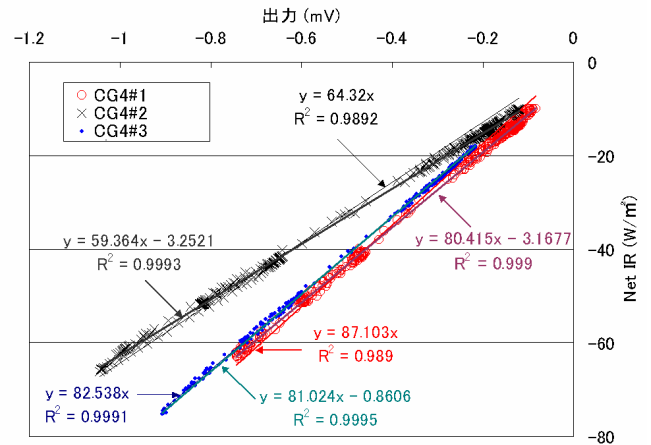


図 2 CG4 出力と正味放射との相関(2004 年 6 月 18 日)

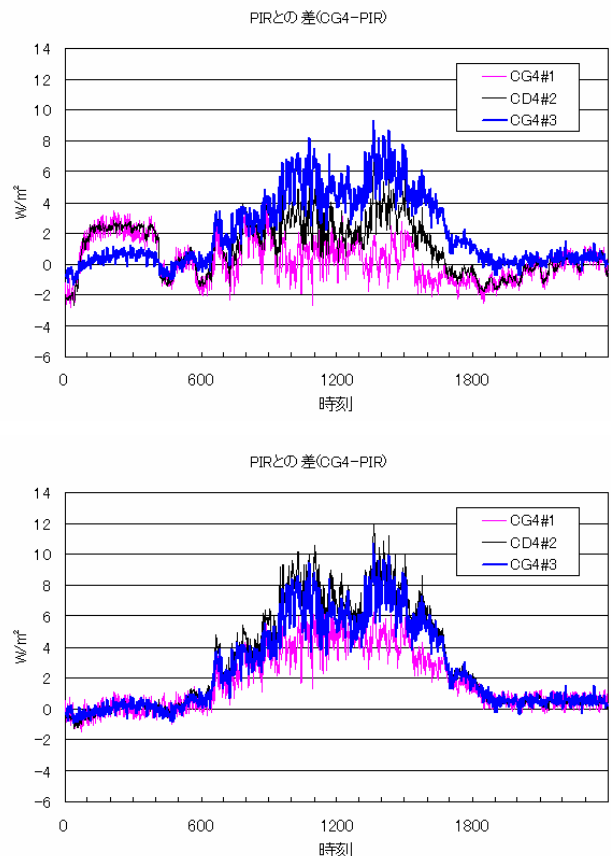


図 3 校正後(2004 年 6 月 18 日)の PIR と被検査器の放射量偏差

上段は校正係数を求める回帰式において定数項なし、下段は定数項ありの場合。

表 1 校正式別に求めた PIR との放射量偏差の標準偏差(W/m²)

CG4#1	全日	夜間
社検値 (2)式	2.3	2.0
夜間校正 (2)式	2.1	1.6
夜間校正 (5)式	2.5	0.4
CG4#2	全日	夜間
社検値 (2)式	3.6	3.6
夜間校正 (2)式	1.9	1.3
夜間校正 (5)式	1.4	0.5
CG4#3	全日	夜間
社検値 (2)式	2.2	1.2
夜間校正 (2)式	2.0	0.5
夜間校正 (5)式	2.6	0.4

こうした影響は、本来の測定対象である放射量とは別の要因と考えられるため、直接校正係数に取り込むのは好ましくない。従って本稿では、夜間の比較により校正した結果を用いて、日中の影響の調査を行う。

図 3 から、CG4 は日中の時間帯に何らかの影響を受けて値が大きくなっていると考えられる。

この日は CG4#1 を PIR と同じトラッカーに搭載して直達日射から遮蔽し、#2 と #3 は遮蔽をしていない。

遮蔽をした #1 と他の 2 台では偏差の傾向が異なり、それらは図 4 に示す全天日射(GL)と散乱日射(DF)の推移とパターンがよく似ている。

図 5 に曇天の場合の例を示す。この日は一日中雲が厚く直達日射はほとんどない。これに対応するように PIR との偏差も少ない。こうした状況から、日射の影響である可能性が強く疑われる。

太陽放射は、そのほとんどが短波長領域に存在し、3 μ m 以上の長波長領域は 1%程度であるが、太陽高度の高いこの時期であれば、3-5 μ m の範囲にも 10W/m²程度が見込まれる。

メーカー資料によれば、CG4 のドームは 4.5 μ m 以下を通さないフィルターのため太陽放射の影響は非常に少ない(0-3W/m²)とされているが、それでも数 W/m²であればフィルターを透過したためと考えられなくもない。

しかし、それでは説明がつかない事例を紹介する。

図 6 は快晴の日に直達日射から遮蔽した CG4 と遮蔽しない CG4 の違いを比較した例である。

2004 年 6 月 16 日は #1 を遮蔽し #3 は遮蔽なし、2004 年 9 月 12 日は #3 を遮蔽し #1 は遮蔽なしで測定している。

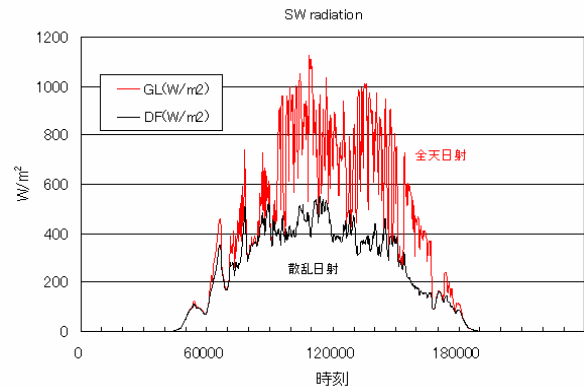
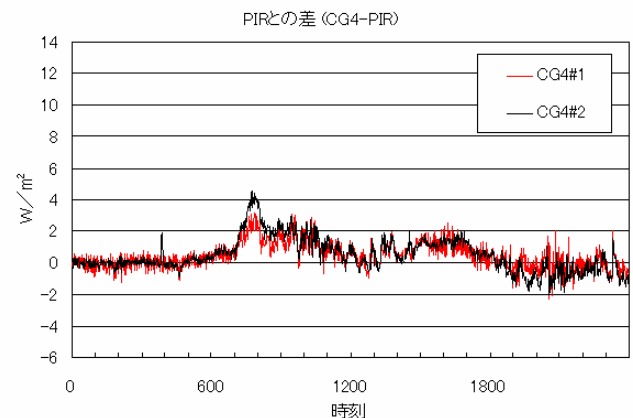


図 4 全天日射と散乱日射 (2004 年 6 月 18 日 薄曇)

図 5 曇天時の被検査器と PIR との比較例
(2004 年 6 月 25 日 曇/雨)

快晴の場合、散乱成分は全天日射の 2 割程度しかない(図 7a, 7b)ため、もし、太陽放射が原因となっているのであれば、#1 と #3 の偏差の値には 5 倍程度の開きがあっても良いはずである。しかし、図 6a での #1 の偏差は、#3 の偏差の半分近くに達している。

一方で、図 6b においては、#1 と #3 の偏差は全天日射と散乱日射の比に近くなっているが、遮蔽しない測器の偏差を比べると、2004 年 9 月 12 日の #1 は、2004 年 6 月 16 日の #3 よりも、当日の全天日射が少ないにもかかわらず、偏差量が多いという矛盾がある。

これらのことから、太陽放射が直接の影響(受光面に届く)を与えているのではないと考えられる。

4. 遮蔽と測器温度の影響

日中に CG4 の偏差が全天日射に対応する形で現れ、しかも #1 と #3 でその度合いが異なる理由を考察する。

写真 1 に示すように、#1 と #3 ではファンの形状が異なっている。#1 と #2 は PREDE 社製、#3 は Kipp & Zonen 社製のファンを使用しており、送風用のファン自体は同じ AC ファンであるが、カバーの形状が異なるため、測器の

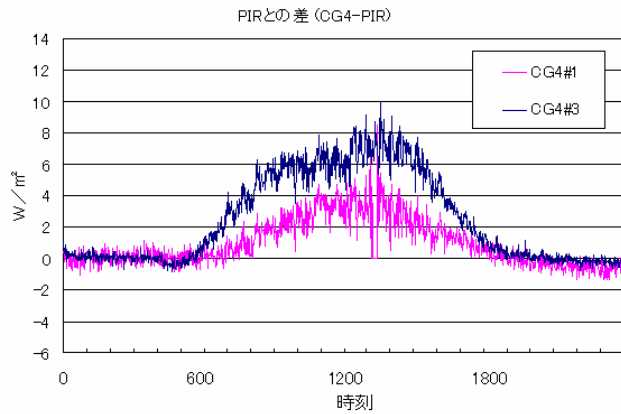


図 6a 遮蔽の有無による被検査器の PIR との差の推移
(2004 年 6 月 16 日)
CG4#1 : 遮蔽あり, CG4#3 : 遮蔽なし.

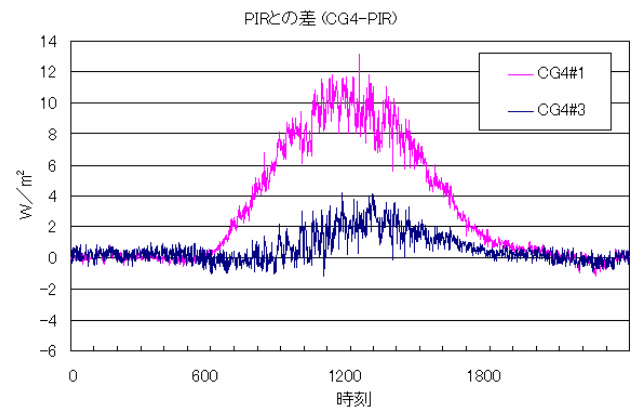


図 6b 遮蔽の有無による被検査器の PIR との差の推移
(2004 年 9 月 12 日)
CG4#1 : 遮蔽なし, CG4#3 : 遮蔽あり.

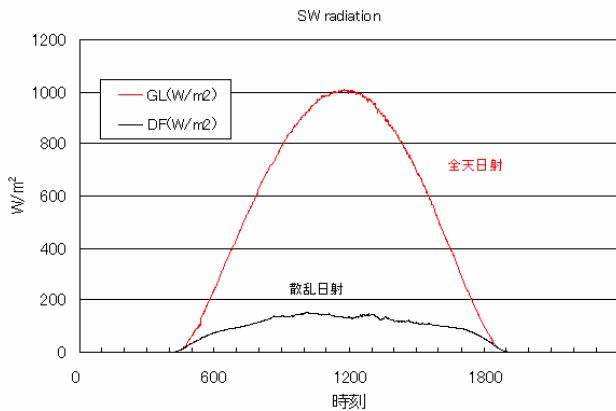


図 7a 全天日射と散乱日射 (2004 年 6 月 16 日 快晴)

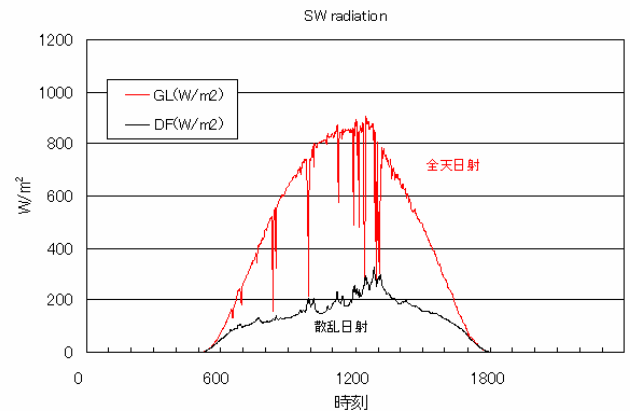


図 7b 全天日射と散乱日射 (2004 年 9 月 12 日 ほぼ快晴)

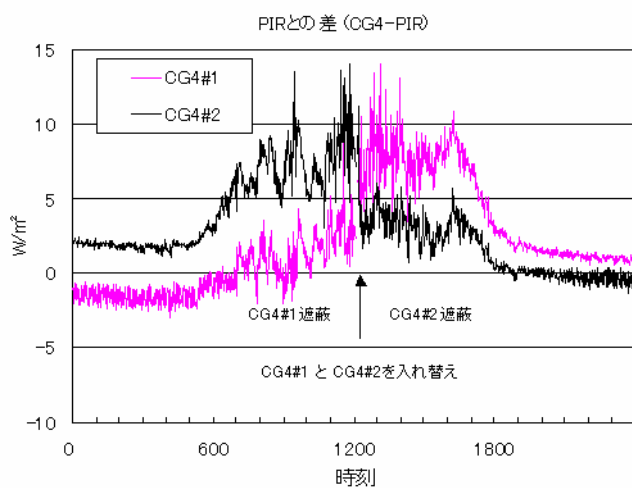


図 8a 遮蔽測器を入れ替えた時の PIR との差の推移
(2004 年 8 月 4 日 晴れ)

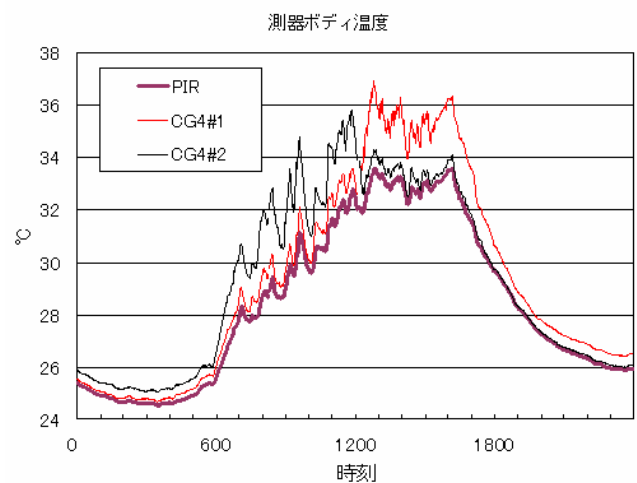


図 8b 遮蔽測器を入れ替えた時の測器温度の推移
(2004 年 8 月 4 日 晴れ)



写真1 CG4 付属ファン形状の違い
左：PREDE 社製，右：Kipp & Zonen 社製。

露出部分の口径が異なっている。

開口部の大きい#1の方が，開口部の小さい#3より偏差の現れ方が大きい。このことは，日射に曝される面積の大小が偏差の大小に関係している可能性を示唆するものである。

遮蔽の有無による偏差の現れ方が，測器に依存するものではないことを確認するため，遮蔽したCG4と遮蔽していないCG4を，日中に入れ替えてみた(図8a)。

なお，#1と#2はどちらも同じPREDE社製ファンを使用しているので，前述の開口部の違いによる影響の可能性はない。

両CG4の偏差のグラフが，その前後できれいに入れ替わってつながることから，測器の特性や校正値の違いによるものではないことがわかる。このとき，測器温度も同様に入れ替わっている(図8b)。日中だけでなく夜間にまで差が続いているが，これは，同じくトラックに載せている散乱日射計と，日射計架台の上に設置している全天日射計の測器温度にも同様の差がみられることから，設置場所の違いによる温度差であろう。

では，この測器温度の違いがPIRとの偏差の要因となっているのであろうか。

測器温度の違いは原理的に測定値には影響しない性格のものである。放射照度が変わらず，ボディ温度，すなわちセンサー部分の温度が変われば，その温度差に見合う分だけセンサー出力も増減し，その増減分は放射量を算出する(2)式における σT_b^4 の増減量に等しい。従って測器温度の違いそのものがPIRとの偏差の原因とはなり得ない。

次に，遮蔽の有無でPIRとの偏差に違いが現れる原因を探るため，遮蔽している測器に一時的に直達日射をあて，出力の変化の様子をみた。

図9は，トラックの電源を切って遮蔽アームを手で支えながら手動で動かし，一定時間直達日射に曝したときのセンサー出力の様子である。

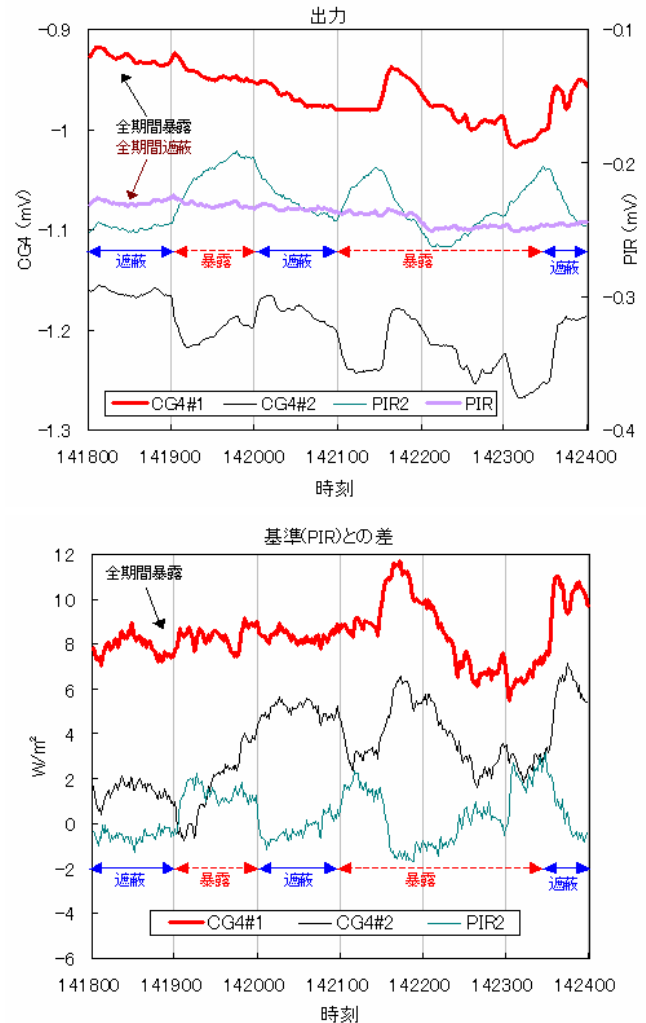


図9 遮蔽アームを手動で移動した時のセンサー出力の推移 (2004年8月4日 晴れ)

上段: センサー出力，下段: 放射照度の基準との差。

#1はずっと遮蔽なし，PIRはずっと遮蔽したまま，そして同じトラックに載せてある#2と，基準のPIRとは別のPIR(PIR2)について，遮蔽ありとなしを繰り返した。トラックは2連の連動した遮蔽機構を持つため，遮蔽の有無は2台同時に変更される。

天候は快晴に近く直達日射が強い状態であった。14時19分に遮蔽を外し，14時20分に戻し，14時21分に再び遮蔽を外した。14時21分30秒から22分20秒にかけて，Cuが太陽面にかかった。その後14時23分30秒に遮蔽を戻した。

PIR2では，遮蔽を外した途端に放射照度が 2W/m^2 程度増え，遮蔽するとすぐに元に戻る。出力電圧の変化はそれより長く続いているが，これはドーム温度(図は省略)の変化に対応したものである。

従って，PIRに対しては，ドームを通過する太陽放射の



写真2 ボディ加温試験

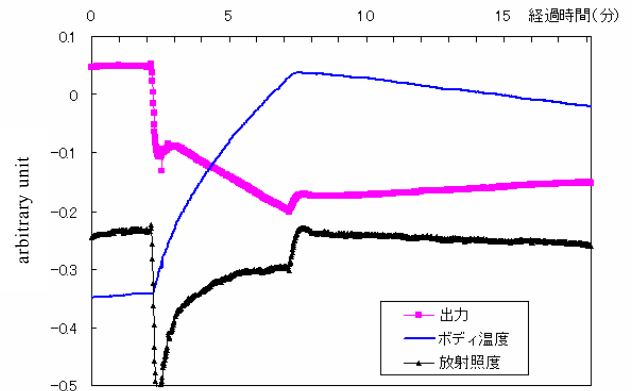


図10 ボディ加温試験

影響が 2W/m^2 程度あったものと推定される。

一方、CG4 の変化をみると、#2 の遮蔽を外すと一旦出力が減少した後徐々に戻っていき、遮蔽を戻すと逆に一旦出力が増加した後徐々に戻っていく。

太陽面に Cu がかった際には、#1 の出力も、#2 において遮蔽を戻した時と同様の、一旦増加した後戻するという変動を示している。遮蔽を外した際に出力が減少する原因は不明であるが、少なくとも CG4 は太陽放射の影響を直接受けることはないと考えられる。

CG4 の筐体に温度変化を与えた場合の影響を確認するため簡単なテストを行った。

空調を止めた屋内に CG4 を上向きに設置し、しばらく放置した後、手を触れて強制的に筐体を暖めた(写真2)。

センサー出力とボディ温度、および算出される放射照度の経過を図10に示す。

定量的な再現性はないので、スケールは無視して傾向だけを見ると、センサー出力は筐体に手が触れた直後に急激に下がり(マイナスが増える)、その後は徐々に下がりを続ける。この間ボディ温度は、ほぼ一定に上がり続けている。

これに対応して放射照度も一旦急激に減少するがその後徐々に戻り、一定の値に近づいて安定する。

こうしたことから、測器全体が暖まるより先に、まずサーモパイルセンサーの冷接点側に熱が伝わることでセンサー出力を減少させ、その後測器全体が暖まり平衡状態に近づいていくものと推定される。

先の遮蔽アームを動かす実験において、遮蔽を外した直後に見られる出力の減少も、日射による加熱により、手で暖めたのと同様の状況が起きていると考えれば説明がつく。

5. まとめ

長波長放射計 CG4 の特性把握の一環として PIR を基準とした比較観測を行った。

夜間の比較結果はよい一致をみるが、日中には日射に対応する形の正偏差がみられる。

原因の特定には至らないが、直接日射が受光面に届くのではないこと、日射の有無や遮蔽の有無、ファンカバー開口部の大小によって影響の度合いが異なること、測器内部に熱が伝わりやすい構造であることなどから、日射に曝されることで測器内部の温度分布に偏りが生じ、或いは熱平衡が崩れ、出力に影響を与えている可能性が高いと考えられる。

こうした日射による測器加熱の影響に関する調査を進めるため、今後は、通風ファンカバーの形状変更や、露場で下向きに設置し、上向き放射の比較観測による試験等を行うことを予定している。

謝 辞

PIR 長波長放射計の校正装置および校正技術の開発は、前観測第三課廣瀬保雄主任研究官および前観測部環境気象課本田耕平輻射係長のご尽力によるものです。また、本稿をまとめるに際しては、気象研究所物理気象研究部の斎藤篤思研究官に有益な助言やご指摘をいただきました。これらに対して、この場を借りて厚くお礼申し上げます。

引用文献

廣瀬保雄・宮川幸治・田森俊彦・能登美之(1998): BSRN のための放射観測データ取得・処理システムの開発。高層気象台彙報, **58**, 11 - 24。

廣瀬保雄・柴田誠司(2000): 円錐空洞黒体を用いた PIR 長波長放射計の校正 第一報: 理論的考察. 高層気象台彙報, **60**, 25 - 34.

廣瀬保雄・柴田誠司(2001): 円錐空洞黒体を用いた PIR 長波長放射計の校正 第二報: 理論的考察 その 2. 高層気象台彙報, **61**, 43 - 48.

廣瀬保雄・柴田誠司(2002): 円錐空洞黒体を用いた PIR 長波長放射計の校正 第三報: 校正と屋外比較の結果. 高層気象台彙報, **62**, 67 - 78.

Kipp & Zonen (2000): Instruction manual CG4 pyrgeometer. *Kipp & Zonen Inc., Netherlands*, 60pp.

Philipona, R., Frohlich, C., and Ch. Betz (1995): Characterization of pyrgeometers and the accuracy of atmospheric long-wave radiation measurements. *Appl. Opt.*, 34, 1598 - 1605.

柴田誠司・廣瀬保雄(2001): 新型長波長放射計(CG4)について. 高層気象台彙報, **61**, 1 - 4.

WCRP(1998): Baseline Surface Radiation Network(BSRN), Operations Manual. *WMO/TD*, **No.879**, 148pp.