

熱収支・水収支観測圃場に設置した 4成分放射計の概要について

Overview of the four components radiometer at TERC

新村典子*・飯田真一**・浅沼 順***

Noriko NIIMURA*, Shin-ichi IIDA** and Jun ASANUMA***

1 はじめに

地表面の熱収支は、局所的な気象だけでなく地球規模の気候変動にも影響を与えることから世界各地のさまざまな地域で集中観測が行われている。地表面の種類や状態により、直接大気を加熱する顕熱、水蒸気として大気を加熱する潜熱との分配比は異なり大気への影響も異なる。この分配比の違いにより風の循環が変化することもあり、熱収支の特徴を調べることは、局地循環を理解する上でも重要である。

以上のような地表面熱収支を考える場合に、もっとも大きな量になるのは、太陽からの放射量（日射量）であり、これらを含めた短波・長波（赤外ともいう）それぞれの下向き・上向きの放射量が合計として放射収支量（正味放射量）を決定している。

陸域環境研究センターの観測圃場では、正味放射量の観測には放射収支計（EKO CN11）を用いており、この放射収支計では、短波・長波の各下向き・上向き放射量の収支量が直接観測

されている。

一方、近年、長波放射の測定が独立に行える測器が開発され、ここ10年程度の間改良がなされ研究用としても用いられるようになってきた。この長波放射計と日射計を上下に水平に組み合わせ、それぞれの放射量を独立に測定し、それらの収支を正味放射量として算出する方法も、近年各地の熱収支観測点で行われてきている（Tanaka *et al.*, 2001など）。これを用いると正味放射量だけではなく、地表面における日射量の反射を表すアルベドや地表面の温度の4乗に比例して放出される長波放射量の測定も可能である。

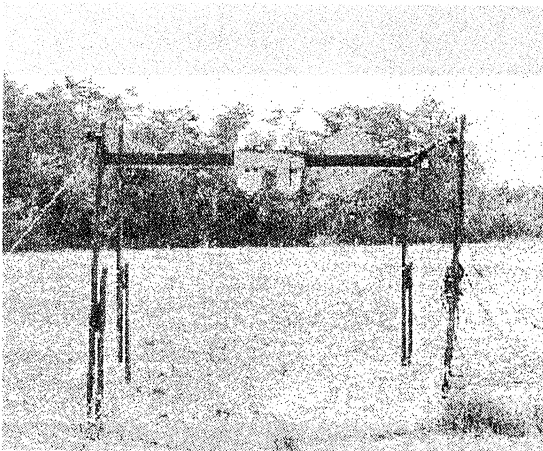
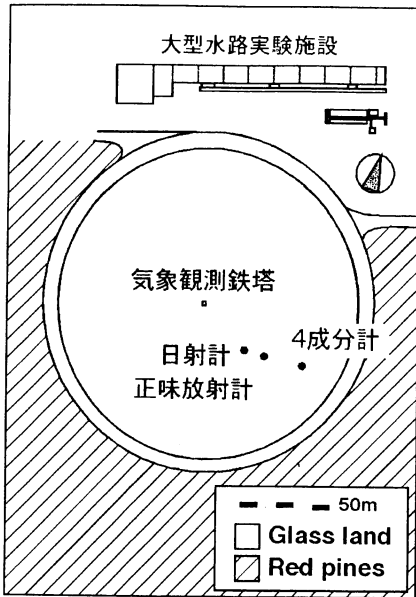
これまで当センターでは、先に述べたように正味放射量の測定には放射収支計を用いてきたため、例えば、熱収支各項の経年変化（約10年間）の解析を行った新村ほか（2000）では、経年変化の原因のひとつとして地表面状態の変化が示唆されているが、アルベドや地表面温度に関する観測が行われていなかったことから定量的な議論がなされていない。

そこで、本センターにおいても、2001年2月

* 筑波大学陸域環境研究センター（現：東京理科大学理学部）

** 筑波大学大学院地球科学研究科

*** 筑波大学陸域環境研究センター



第1図 4成分放射計の設置場所(上)と設置状況(下)

から、熱収支水収支観測圃場に4成分(下向き短波放射量, 上向き短波放射量, 下向き長波放射量, 上向き長波放射量)を独立に測定することができる放射計(以下, 4成分放射計という)を設置したので, その概要について説明し, 得られた結果の一部を報告する。

II 4成分放射計

4成分放射計の各成分の具体的な測定装置を以下に示す。

下向きおよび上向き短波放射量は, 全天日射計であるKipp & Zonen社のCM21型(除湿ファン付)を使用している。これらの測器を上下に組み合わせて水平に設置しており, 下向き, 上向きの日射量を同時に測定することができ, その比を取ることによってアルベドが求められる。短波放射測定については, 廣瀬・下道(1996)や塚本(2001)が詳しい。

下向きおよび上向き長波放射量の測定には, Eppley社のPIR(Precision Infrared Radiometer)(除湿ファン付)を用いている。長波放射と日射の境界波長はおよそ $3\mu\text{m}$ であり, この長波放射計では波長 $3\mu\text{m}$ 以上の電磁波のみを投下するようにシリコンドーム内に干渉フィルターが蒸着されている。その測定可能な波長範囲は, $3\sim 50\mu\text{m}$ である。測定原理の詳細については塚本(2001)などを参照して頂きたい。長波放射計が日射計など通常の放射計測器と大きく異なっているのは, 必要とする長波放射量が直接電圧出力として得られるわけではないことである。このため, 長波放射量を得るためには次節で示す式を用い計算する必要がある。この4成分放射計の設置場所は熱収支・水収支観測圃場の南東側であり, 設置高度は2.0mである(第1図)。この設置場所は, ルーチン観測用の日射計および放射収支計の東約20mに位置し, これまでのルーチン観測データとの比較を考慮し, できる限り地表面状態が同様の場所を選定した。

III データ形式とデータの取得について

4成分放射計で観測されたデータは, 特別観測用データ収録システム(樋口ほか, 1999)を紹介し, センター研究棟で収録されている。

各放射観測データのサンプリングは1秒間隔で行っており, 2通りの形式(①10分間平均値データ(rad4.dat)と②生データ(rad42.dat))で保存されている。4成分放射観測データ形式を第1表に示す。

データ①, ②とも, カンマ区切りのデータで,

第1表 ファイル名とデータ形式について

ファイル名	Rad4.dat	Rad42.dat
データ種類	10分間平均値	1秒サンプリングデータ
データ形式 (カンマ区切り)	以下の順, *a,b,c,d,e,f, g,h,i,j,k,l,m, n	以下の順, *a,b,c,d,o,e,f, g,h,i,j,k,l

- *a: logger ID
- b: Year
- c: DOY (Day of Year)
- d: Hour/Min
- e: Downward short wave radiation (W/m²)
- f: Upward short wave radiation (W/m²)
- g: Thermopile output of Downward long wave radiation (W/m²)
- h: Thermopile output of Upward long wave radiation (W/m²)
- i: Body temperature of Downward infrared radiometer (degree C)
- j: Dome temperature of Downward infrared radiometer (degree C)
- k: Body temperature of Upward infrared radiometer (degree C)
- l: Dome temperature of Upward infrared radiometer (degree C)
- m: Internal temperature of CR10
- n: Batt voltage
- o: second

日付は通算日 (DOY: 1月1日を1とし12月31日を365, うるう年のときは12月31日は366となる。) で示してある。PIRより長波放射量 (L) は次式によって求められる。以上のデータ ($Thermopile$ の出力値 (上向き g , 下向き h) から長波放射量 (L) を得るためには, 以下の変換を行う必要がある。ただし, ドームの補正を行わない場合である。

$$L = \Delta E / S + \sigma T_b^4 \quad (1)$$

ここで, ΔE は熱電堆の出力電力 (mV), S は熱電堆の検定値 (mV/(kW/m²)), σ はステファン・ボルツマン定数 (W/m² K⁴), T_b は熱電堆零接点の温度 (K) である。具体的には, 観測されたデータ ($Thermopile$ の出力値 (上向き g , 下向き h)) は, 熱電堆の出力から各熱電堆の検定値による変換を施した放射量となっているので, (1) を用い, これらのデータから長波放

射量 (L) を得るためには, 以下の変換を行えばよい。

$$L = Thermopile + \sigma (T_Body + 273.15)^4 \quad (2)$$

ここで, T_Body は第1表の (i) または (k) を表し, σ はステファン・ボルツマン定数で 5.67×10^{-8} とした場合である。より精密な長波放射量が必要な場合は, 2次補正を行う必要がある。2次補正については飯田ほか (2002) に詳細に述べられている。この4成分の放射計データは, 原則的に公開であるが, これまでのルーチン観測データとは異なる扱いをしている。10分間平均値データは, センターのホームページからダウンロードすることができる。また, 1秒間隔の生データも一部の期間 (平成13年度分) に限り保存している。いずれのデータも利用に当たっては圃場管理者に連絡頂きたい。

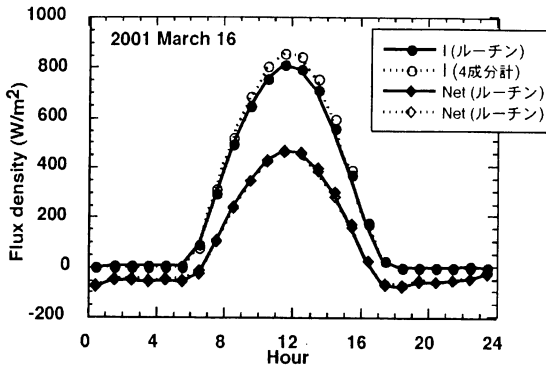
IV 4成分放射計から得られた放射量とルーチン観測の放射量との比較

4成分放射計から見積もられた日射量とルーチン観測による日射量および4成分放射計からの正味放射量とルーチン観測の正味放射量との比較を行う。

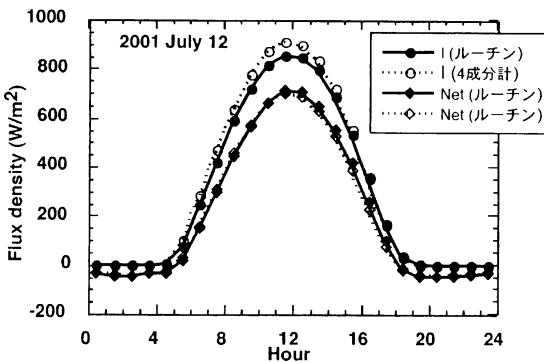
日射量の比較には, 4成分放射計の下向き短波放射量とルーチン観測の全天日射計 (EKO MS-43F) の日射量を用いる。また, ルーチン観測の正味放射量との比較には, 4成分放射計の各センサーからの観測値から以下の手順で求めた正味放射量を用いる。

$$Net = S\downarrow - S\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (3)$$

ここで Net は正味放射量, $S\downarrow$ および $L\downarrow$ はそれぞれ下向き短波および長波放射量, $S\uparrow$ および $L\uparrow$ は上向き短波および長波放射量を示し, 単位はすべてW/m²である。ここで用いた長波放射量 (L) は, 先の章で述べた式 (1) から求める。



第2図 2001年3月16日の4成分放射計およびルーチン観測から得られた正味放射量と日射量の時間平均値の日変化の比較。実線がルーチン観測から、点線が4成分放射計から得られた値を表し、●および○が日射量、◆および◇が正味放射量を表す。



第3図 第2図と同じ。ただし、2001年7月12日。

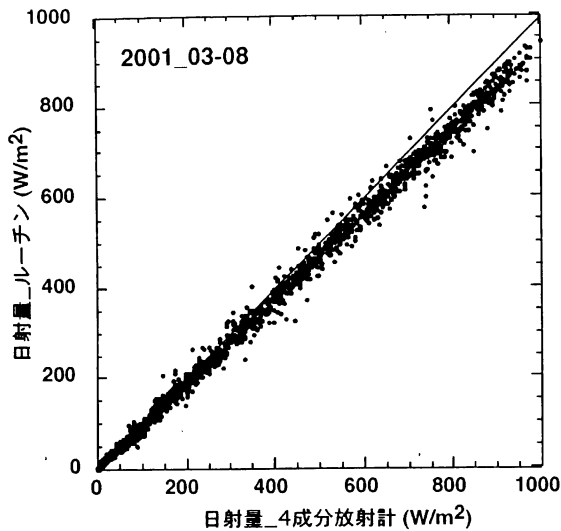
第2図および第3図は、4成分放射計およびルーチン観測から得られた正味放射量と日射量の時間平均値の日変化を比較したものである。実線がルーチン観測から、点線が4成分放射計から得られた値を表し、●および○が日射量を、◆および◇が正味放射量を表す。第2図は、植

生がほとんど見られない春先（2001年3月16日）の日変化を示しており、第3図は夏季の晴天日（2001年7月12日）のものである。第2図の正味放射量をみると昼夜を問わずほぼ同程度の値を示しているが、日射量をみると4成分放射計の日射量がルーチン観測の値に比べ若干高い傾向がみられる。また、夏季の晴天日（2001年7月12日）（第3図）においても、正味放射量の結果は先に示した春先の結果とはほぼ同様であるが、日射量は4成分放射計から得られた値がルーチン観測による値より若干高くなっている。以上の比較から、正味放射量に関しては、この期間においては季節によらずほぼ同程度であるが、日射量は4成分放射計から得られた値がルーチン観測の値に比べ若干高い傾向があり、この傾向は日射量が多い場合にやや強いことがわかる。

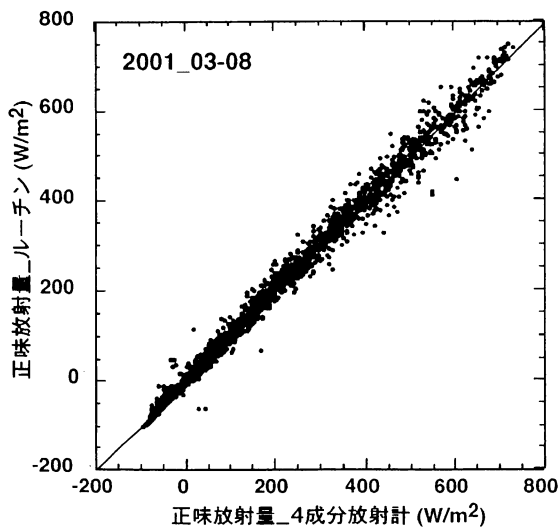
次に、これまで得られた6ヶ月間（3～8月）の結果を用い、4成分放射計から得られた日射量とルーチン観測から得られた日射量との比較および4成分放射計から得られた正味放射量とルーチン観測の正味放射量との比較を行う。観測は現在も連続的に行われており、データは蓄積させているが、今年は9月ごろからセイタカアワダチソウやススキなどの草丈が高くなったことにより、地表面状態が双方の観測点でこれまで以上に異なっている可能性が考えられるため、解析期間は8月までとする。

第4図および第5図は、それぞれから得られた日射量および正味放射量の時間平均値を比較したものである。各図の横軸は4成分放射計から得られた放射量を、縦軸はルーチン観測から得られた放射量を示す。メンテナンスや日報放置の不具合等による欠測を除く全データをプロットしてある（サンプル数3406）。

まず、第4図の日射量の比較をみると、0～900 w/m^2 と広い範囲に分布していることがわかり、概ね値の小さいところは夜間、大きいところは日中に相当する。図中の点線は、 $Y=X$ を示しており、データはほぼこの線を中心に分布してい



第4図 4成分放射計から得られた日射量（時間平均値）とルーチン観測から得られた日射量（時間平均値）との比較。比較期間は2001年の3月8日である。サンプル数は3406。図中の実線は $y=x$ の直線を表す。



第5図 4成分放射計から得られた正味放射量（時間平均値）とルーチン観測の正味放射量（時間平均値）との比較。比較期間などは、第4図と同様。

ることがわかる。このことから、双方の値にはほぼ1対1の対応がみとめられる。ルーチン観測の日射量に対する4成分放射計による日射量のRMS偏差は 25.3 w/m^2 であり相関係数は 0.999 である（回帰直線 $Y=0.93X+2.26$ 、ここで X は4成分放射計の日射量、 Y はルーチン観測値を表す）。正味放射量の比較の結果（第5図）をみると、 $-100 \sim 800 \text{ w/m}^2$ と広い範囲に分布しており、日射量と同じく、概ね値の小さいところは夜間、大きいところは日中に相当する。ルーチン観測の正味放射量に対する4成分放射計による正味放射量のRMS偏差は 16.8 w/m^2 であり相関係数は 0.996 である（回帰直線 $Y=0.99X+1.66$ 、ここで X は4成分放射計からの正味放射量、 Y はルーチン観測値を表す）。ルーチン観測値と4成分放射計からの観測値の日変化の比較にもみられたように、正味放射量については双方はほぼ一致しているが、日射量は4成分放射計からの値がルーチン観測値よりも若干高い傾向がみられる。この違いについては、双方の測器の製造業者が異なることによるセンサー感度の違い、センサーを覆っているガラスドームの透過特性の違い、センサーの経年劣化などが考えられる。センサーの経年劣化について調査した遠藤ほか（1995）によると、設置から6年間経過した場合、約29%の季節変化を伴う感度低下が報告されている。ルーチン日射計のセンサーは、2000年9月29日に交換されており、経年劣化による感度低下はそれほど大きくないと考えられる。このため、これらの違いは経年劣化以外の可能性が考えられるが、今後の課題としたい。

また、長波放射量についても、メーカーの違いによるセンサー感度の違いやセンサードームを覆っている透過特性の違いもあるものの系統的な差はみとめられなかった。しかし、ドーム温度の補正を施す必要があることが報告されている（塚本，2001）。ドーム補正の方法や補正を施した結果及び補正の感度分析については飯田ほか（2002）を参照していただきたい。

2001年2月から、4成分（下向き短波放射量、上向き短波放射量、下向き長波放射量、上向き長波放射量）を独立に測定することができる4成分放射計を熱収支・水収支観測圃場に設置した。

2001年3月から8月を対象に、4成分放射計によって得られた日射量および正味放射量をルーチン観測データと比較した。日変化の比較を植生のない時期の晴天日と夏季の晴天日を選び4成分放射計から得られた放射量とルーチン観測による放射量を比較すると、正味放射量については昼夜を問わず同程度であったが、日射量は4成分放射計から得られる値の方がルーチンの値に比べ若干高い傾向がみられた。また、解析期間の全データを用い、4成分放射計から得られた放射量とルーチン観測の放射量をそれぞれ比較するとほぼ $X=Y$ の周りに分布し、ほぼ1対1に対応していることがわかった。また、これらの相関係数は正味放射量が0.996、日射量が0.999であった。

4成分放射計から得られた日射量については若干の課題はあるものの、4成分放射計から得られた正味放射量は、これまでのルーチン観測の値とほぼ同程度であることがわかった。このため、4成分放射計の設置によりアルベドや正味放射に対する各成分の影響を独立に評価することができるようになったので、今後の詳細な解析が期待される。

飯田真一・新村典子・浅沼 順（2002）：筑波大学陸域環境研究センター熱収支・水収支観測圃場における短波および長波放射量の測定に基づく放射4成分収支量の評価。筑波大学陸域環境研究センター報告，**3**，1-10.

遠藤伸彦・檜山哲哉・杉田倫明・田 少奮（1995）：水理実験センターの全天日射計の感度について。筑波大学水理実験センター報告，**20**，85-91.

塚本 修（2001）：放射量。気象研究ノート，**199**，9-18.

新村典子・桜 久美子・木村富士男（2000）：長期データを用いた草地の熱収支の変動について。第2回水文過程のリモートセンシングとその応用に関するワークショップ，111-115.

樋口篤志・杉田倫明・飯田真一（1999）：筑波大学水理実験センター熱収支・水収支観測圃場における、新・特別観測用データ収録システムについて。筑波大学水理実験センター報告，**24**，135-141.

廣瀬保雄・下道正則（1996）：日射計。気象研究ノート，**185**，73-104.

Tanaka, K., Ishikawa, H., Hayashi, T., Tamagawa, I. and Ma, Y. (2001) : Surface energy budget at Amdo on the Tibetan plateau using GAME/Tibet IOP98 Data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 505-517.