

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 個別測定に基づく放射4成分収支の評価

The Evaluation of Four Components for Radiation Balance
Based on the Measurement of Shortwave and Longwave Radiation
in the Meteorological and Hydrological Observation Field,
Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba

飯田 真一*・新村 典子**・浅沼 順***

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

This paper applies the two previously proposed methods for correcting the infrared radiometer measurements, and investigates their effects on the net radiation estimates by using the observations at the grassland in the terrestrial environment research center (TERC), University of Tsukuba. The results show that the corrections to the longwave radiation are needed for precise measurement. It was turned out, however, that the correction did not improve the comparison between net radiations measured by net radiometer and by measurement system of four radiation components. This is probably due to the heterogeneity of vegetation and the poor accuracy of net radiometer used for TERC routine observation. In addition, the shortwave radiations released as TERC routine data was revealed to be less than those observed by this four components system. This may be explained by deteriorate of the pyranometer.

1 はじめに

地表面における上向きおよび下向きの短波放射量と長波放射量（以下、放射4成分と呼ぶ）を実測することは、植生を含む地表面状態を把握する上で重要である。また、これら4成分の収支

から求められる正味放射量は、熱収支を評価する場合に必要な物理量である。

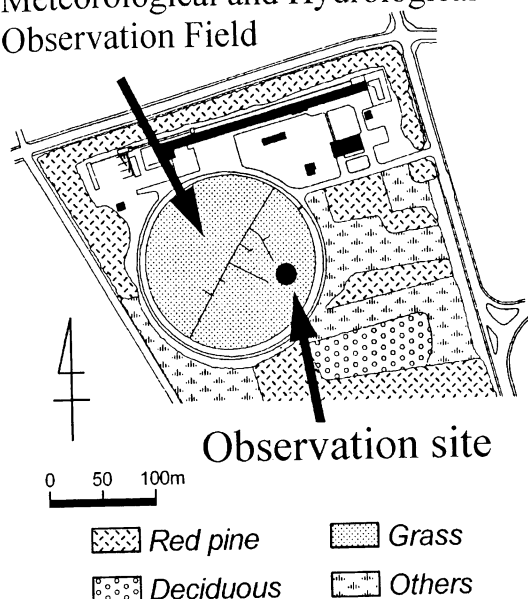
これまで、筑波大学陸域環境研究センター（以下、TERCと呼ぶ）の熱収支・水収支観測圃場（以下、圃場と呼ぶ）では、正味放射計による正味放射量の測定が継続されてきた。一方、熱収支のインバランスが問題視されるように、

* 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（現：東京理科大学理学部）

*** 筑波大学陸域環境研究センター

Meteorological and Hydrological Observation Field

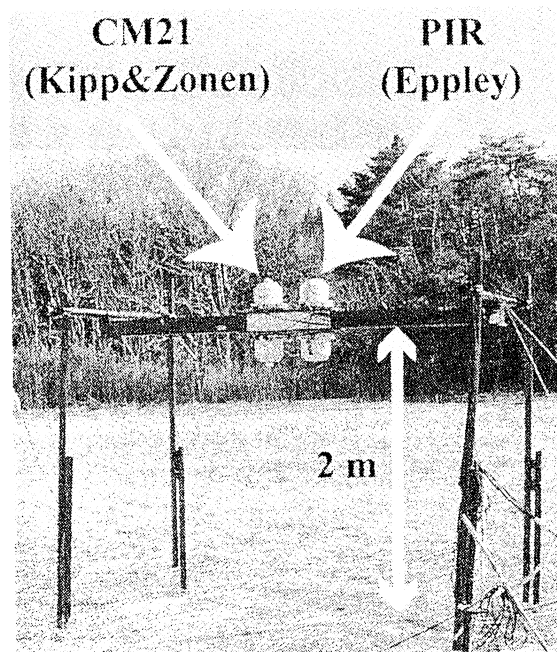


第1図 観測サイトの概要

近年における観測では、熱収支の各項目を精度良く評価することが求められ、放射4成分の測定を行う観測例が増加している。このような背景を踏まえ、本研究では、正味放射計と放射4成分の測定を同時に行い、両者の比較検討を行うと同時に、長波放射計に対する各種補正法が正味放射量に及ぼす影響を評価することを目的とする。

II 観測システム

本研究で用いた短波放射計はKipp&Zonen製のCM21、長波放射計はEppley製のPIR(Precision Infrared Radiometer)である。これらを圃場中央の観測塔から南東方向に設置した(第1図)。これらの放射計は高度2mに位置している(第2図)。観測は、2001年2月3日から開始した。観測データは、データロガー(Campbell, CR10X)を用いて、1秒間隔でサンプリングすると同時に、10分



第2図 上向きおよび下向き短波放射計 (CM21) と長波放射計 (PIR) の設置状況

平均値を記録した。なお、取得されたデータは、樋口ほか(1999)により設置されたネットワークを用いて、陸域環境研究センターデータ収録室内のPCへ転送されている。データの形式、取得方法等についての詳細は新村ほか(2002)を参照のこと。

圃場にはセイタカアワダチソウ、ヨモギ等のC3植物ならびに、チガヤ、ススキをはじめとするC4植物が見られる(詳細は、横山・及川, 2000; 西田・樋口, 2000を参照のこと)。横山・及川(2000)によれば、1999年における圃場の草丈は標準誤差を含めると9月中旬以降に200cmを超えることが報告されている。このことを考慮し、本研究では2001年8月31日までのデータを解析対象とした。

Ⅲ 長波放射計の補正法と放射4成分収支に及ぼす効果

(1) 長波放射量の算出と補正法

補正を行わない場合のPIRによる長波放射量は次式で求められる。

$$LR_{NC} = \frac{\Delta E}{S} + \sigma T_b^4 \quad (1)$$

ここで、 LR_{NC} は未補正の長波放射量 (W/m^2)、 ΔE は長波放射計の熱電堆の出力電圧 (mV)、 S は熱電堆の検定値 (mV/ (W/m^2))、 σ はステファン・ボルツマン定数、 T_b は熱電堆冷接点 (ケース) の温度 (K) である。

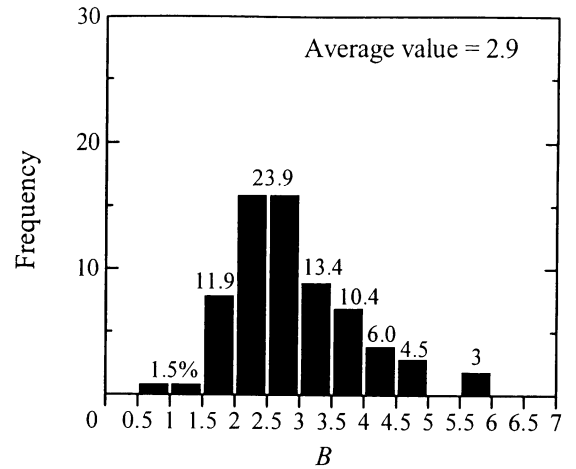
しかしながら、長波放射量を評価する場合には、長波放射計のドームの加熱による二次放射を考慮しなければならない (例えば、塩原・浅野, 1992)。PIRは、ドーム温度出力が標準装備されているため、比較的容易に二次放射の補正を行うことができる。

二次放射の補正法として Albrecht *et al.* (1974) の方法が広く用いられている。

$$LR_A = \frac{\Delta E}{S} + \sigma T_b^4 - B\sigma(T_d^4 - T_b^4) \quad (2)$$

ここで、 LR_A は Albrecht *et al.* (1974) による補正を施した長波放射量 (W/m^2)、 B はドーム係数、 T_d はドーム温度 (K) である。(2) 式の右辺のうち、第3項が補正項であり、ドーム温度が高くなるほど二次放射が増大することが分かる。Fairall *et al.* (1998) は、Albrecht *et al.* (1974) の補正を改良した方法を提案しているものの、両者の差は $1W/m^2$ に満たない (Pascal and Josey, 2000)。

一方、Pascal and Josey (2000) は、Dickey *et al.* (1994) の指摘を踏まえ、PIRのドームを通過する短波放射の補正を含めた次式を提案した。



第3図 67個体のPIRで得られたドーム係数 (B) のヒストグラム (Payne and Anderson (1999) のデータを引用)

$$LR_p = \frac{\Delta E}{S} + \sigma T_b^4 - B\sigma(T_d^4 - T_b^4) - \lambda SR \quad (3)$$

ここで、 LR_p はPascal and Josey (2000) による補正を施した長波放射量 (W/m^2)、 λ は短波放射補正係数、 SR (W/m^2) は短波放射量である。本研究では、(2) 式および (3) 式を用いて長波放射計の補正を行った。

(2) 二次放射補正

二次放射補正を行う場合、ドーム係数 (B) が必要となる。厳密には、この値は個々のPIRによって異なるため、個別に黒体炉を用いた検定を行わない限り真値を得ることはできない。Payne and Anderson (1999) は67個体のPIRに対して検定を行い B の値を報告している (第3図)。彼らの結果によれば、 B は $0.64 \sim 5.88$ の値を示しており、個体間の差が比較的大きい事が分かる。そこで、 B の値を $1 \sim 6$ まで 1 刻みで変化させ感度分析を行い、下向きおよび上向きの LR_{NC} と LR_A の差異を次式で定義するRMS値、ならびに原点を通る両者の線形回帰直線の傾きから評価した。

第1表 ドーム係数 (B) を1~6まで1刻みで変化させた場合の二次放射補正の感度分析結果 (記号の詳細は本文中を参照のこと)

Coefficient for the dome-body temperature difference correction; B						
Factors	$B=1$	$B=2$	$B=3$	$B=4$	$B=5$	$B=6$
$\text{RMS}_A \downarrow (\text{W/m}^2)$	2.85	5.71	8.56	11.41	14.27	17.12
$\alpha_A \downarrow$	0.996	0.993	0.989	0.986	0.982	0.979
$\text{RMS}_A \uparrow (\text{W/m}^2)$	1.02	2.03	3.05	4.07	5.08	6.10
$\alpha_A \uparrow$	0.999	0.998	0.998	0.997	0.996	0.995

$$\text{RMS}_A \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (\text{LR}_{\text{NC}} \downarrow - \text{LR}_A \downarrow)^2} \quad (4-1)$$

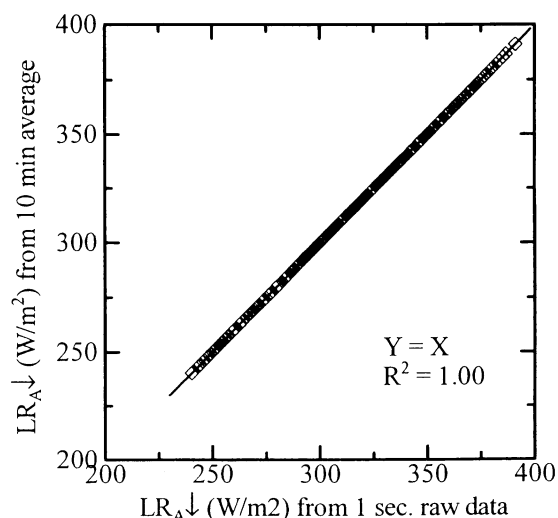
$$\text{RMS}_A \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (\text{LR}_{\text{NC}} \uparrow - \text{LR}_A \uparrow)^2} \quad (4-2)$$

$$\text{LR}_A \downarrow = \alpha_A \downarrow \cdot \text{LR}_{\text{NC}} \downarrow \quad (5-1)$$

$$\text{LR}_A \uparrow = \alpha_A \uparrow \cdot \text{LR}_{\text{NC}} \uparrow \quad (5-2)$$

ここで, α_A は未補正の長波放射量と Albrecht *et al.* (1974) の補正を施した長波放射量の線形回帰直線の傾き, n はデータ数である. なお, 矢印 $\downarrow \cdot \uparrow$ はそれぞれ放射が下向きあるいは上向きであることを表す.

第1表に B による感度分析の結果を示す. B の増加に伴い, $\text{RMS}_A \downarrow$ と $\text{RMS}_A \uparrow$ は大きくなり, 二次放射補正量が増大した. 一方, 実際の大小関係は, (5-1) と (5-2) 式の傾きから, 放射の向きによらず二次放射補正を受けた長波放射量が小さくなるのが分かる. 放射の向きを考慮すると当然ながら下向き短波放射量が大きく, その結果ドームの加熱が下向き長波放射計で顕著になることから, $\text{RMS}_A \downarrow$ は $\text{RMS}_A \uparrow$ よりも大きくなった. Fairall *et al.* (1998) によれば, Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (COARE) の目的を達成させるためには,



第4図 1秒間隔で取得された下向き長波放射量の生データとその10分平均値それぞれに対して二次放射補正を行った場合の比較

$\pm 5 \text{ W/m}^2$ の測定精度が長波放射計に必要であることを指摘している. この指摘から $\text{RMS}_A \downarrow$ あるいは $\text{RMS}_A \uparrow = 5 \text{ W/m}^2$ を許容基準とすると, $\text{RMS}_A \downarrow$ は $B=2$ の場合で 5.71 W/m^2 , また $\text{RMS}_A \uparrow$ は $B=5$ で 5.08 W/m^2 である. B のヒストグラム (第3図) から, B が2を超える長波放射計は全体の約85%であることを考えると, 下向きの長波放射計で正確な二次放射補正を行うためには, 検定により B を求める必要があると判断される.

一方, 第4図から, 1秒間隔のPIRデータを対象

第2表 ドーム係数 (B) を1～6まで1刻みで変化させた場合の二次放射補正+短波放射補正の感度分析結果 (記号の詳細は本文を参照のこと)

Factors	Coefficient for the dome-body temperature difference correction; B					
	$B=1$	$B=2$	$B=3$	$B=4$	$B=5$	$B=6$
$\text{RMS}_p \downarrow (\text{W/m}^2)$	6.16	9.00	11.84	14.69	17.54	20.39
$\alpha_p \downarrow$	0.991	0.987	0.984	0.980	0.977	0.973
$\text{RMS}_p \uparrow (\text{W/m}^2)$	1.71	2.72	3.74	4.75	5.77	6.78
$\alpha_p \uparrow$	0.998	0.997	0.996	0.996	0.995	0.994

に二次放射補正を行い1時間平均した結果は、10分平均値に対して補正を行い1時間平均した値と一致した。したがって、二次放射補正を施した1時間平均値を求めるためには、10分間平均値を記録すれば十分であることが明らかとなった。

(3) 短波放射補正

Pascal and Josey (2000) により提案された (3) 式において、右辺第4項がドームを通過し長波放射計の受光面に到達する短波放射による測定誤差を補正する。彼らによれば、この補正に必要な λ は個体差があるものの、比較的新しい放射計では約0.01であることを報告している。本研究ではこの値を用いて (3) 式による補正を行い、下向きおよび上向きの LR_{NC} と LR_p の差異を、次式で定義するRMS値、ならびに原点を通る両者の線形回帰直線の傾きから評価した (第2表)。

$$\text{RMS}_p \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (\text{LR}_{\text{NC}} \downarrow - \text{LR}_p \downarrow)^2} \quad (6-1)$$

$$\text{RMS}_p \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (\text{LR}_{\text{NC}} \uparrow - \text{LR}_p \uparrow)^2} \quad (6-2)$$

$$\text{LR}_p \downarrow = \alpha_p \downarrow \cdot \text{LR}_{\text{NC}} \downarrow \quad (7-1)$$

$$\text{LR}_p \uparrow = \alpha_p \uparrow \cdot \text{LR}_{\text{NC}} \uparrow \quad (7-2)$$

ここで、 α_p は未補正の長波放射量とPascal and Josey (2000) の補正を施した長波放射量の線形回帰直線の傾き、 n はデータ数である。なお、矢印 \downarrow ・ \uparrow はそれぞれ放射が下向きあるいは上向きであることを表す。

Pascal and Josey (2000) による補正では、Albrecht *et al.* (1974) の補正に短波放射量によって一意的に定まる補正量、すなわち (3) 式右辺第4項を付加したものである。全解析対象期間における (3) 式右辺第4項による補正量は下向き長波放射計で約 3.3 W/m^2 、上向き長波放射計で約 0.7 W/m^2 であった。このことから前節で述べた許容基準を元に判断すると、上向きの短波放射量による測定誤差はほぼ無視できると言える。しかしながら、下向きの短波放射による寄与は全期間で 3.3 W/m^2 と見積もられたものの、晴天日において1時間平均値を扱う場合にはこの影響は 10 W/m^2 に達し、二次放射と共に無視できない要素である。なお、この解析では B を変化させ、 λ を一定値としたが、実際は B が増加すると λ は減少することが報告されている (Pascal and Josey, 2000)。彼らはこの原因として、 λ が小さいドームは短波放射を遮断する能力が高く、その結果ドームが加熱されやすくなる可能性を指摘している。

第3表 放射4成分収支に対する長波放射計補正の影響の評価（記号の詳細は本文を参照のこと）

Factors	Coefficient for the dome-body temperature difference correction; B					
	$B=1$	$B=2$	$B=3$	$B=4$	$B=5$	$B=6$
$RMS_A (W/m^2)$	1.95	3.89	5.84	7.78	9.73	11.67
α_A	0.991	0.983	0.974	0.966	0.957	0.948
$RMS_p (W/m^2)$	4.54	6.47	8.40	10.34	12.28	14.23
α_p	0.979	0.971	0.962	0.954	0.945	0.937

(4) 長波放射計における補正が放射4成分収支に及ぼす影響

本章2節および3節で行った長波放射計における二次放射補正，並びに短波放射補正が，放射4成分の収支から求めた正味放射量に対して及ぼす影響を評価する．

$$Rn_{NC} = (SR \downarrow - SR \uparrow) + (LR_{NC} \downarrow - LR_{NC} \uparrow) \quad (8-1)$$

$$Rn_A = (SR \downarrow - SR \uparrow) + (LR_A \downarrow - LR_A \uparrow) \quad (8-2)$$

$$Rn_p = (SR \downarrow - SR \uparrow) + (LR_p \downarrow - LR_p \uparrow) \quad (8-3)$$

ここで， Rn_{NC} は長波放射計に対して補正を行わない場合の放射4成分収支， Rn_A は長波放射計に対して二次放射補正を行った場合の放射4成分収支， Rn_p は二次放射補正に加えて短波放射補正を行った場合の放射4成分収支である．また以下のように，RMS値および線形回帰直線を定義する．

$$RMS_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (Rn_{NC} - Rn_A)^2} \quad (9-1)$$

$$RMS_p = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (Rn_{NC} - Rn_p)^2} \quad (9-2)$$

$$Rn_A = \alpha_A \cdot Rn_{NC} \quad (10-1)$$

$$Rn_p = \alpha_p \cdot Rn_{NC} \quad (10-2)$$

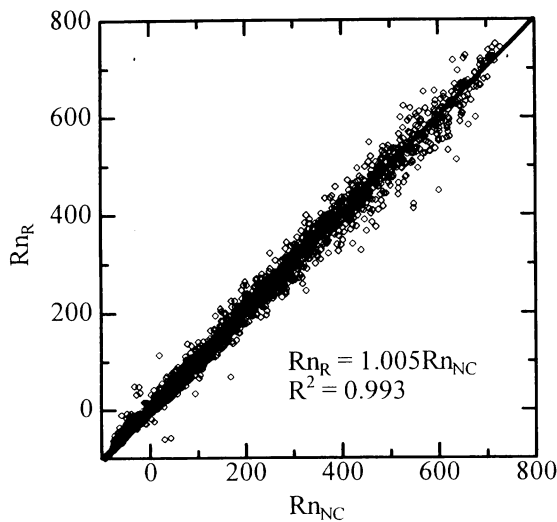
第3表に長波放射計に対して二次放射のみを行った場合，および短波放射補正も含めて行った場合における放射4成分収支に対する影響をまとめた． B の増加に伴い RMS_A は大きくなり， Rn_A は Rn_{NC} に比べて小さく評価される．その度合いは B に依存し， Rn_{NC} に対して0.9～5.2%の幅を持つことが分かる．一方，短波放射補正も含む Rn_p は， Rn_A に比べさらに1%程度小さい．なお，前節で述べたように，Pascal and Josey (2000)による補正は短波放射量で一意的に定まるため， RMS_p と RMS_A の差は B によらず一定となる．

(5) 正味放射計による正味放射量と補正を施した長波放射量を含む放射4成分収支から求めた正味放射量の比較

前節で行った比較は，同一の短波放射計および長波放射計で得られた放射4成分収支であり，それぞれの相対的な比較でしかない．そこで，圃場に設置されているTERCルーチン観測用正味放射計による正味放射量（ Rn_R ）と Rn_{NC} ， Rn_A および Rn_p の比較を行う．以下のように，RMS値と線形回帰直線を定義する．

第4表 正味放射計による正味放射量と長波放射計の補正を含む放射4成分収支の比較結果（記号の詳細は本文を参照のこと）

Factors	Coefficient for the dome-body temperature difference correction; B						
	$B=0$	$B=1$	$B=2$	$B=3$	$B=4$	$B=5$	$B=6$
$RMS_{AR} (W/m^2)$	15.68	15.12	15.57	17.08	17.93	18.92	20.05
α_{AR}	1.005	1.013	1.022	1.031	1.040	1.049	1.059
$RMS_{PR} (W/m^2)$	16.11	16.64	17.37	18.27	19.30	20.46	21.73
α_{PR}	1.017	1.026	1.035	1.044	1.053	1.063	1.072



第5図 TERCルーチン観測用正味放射計で観測された正味放射量（ Rn_R ）と長波放射計の補正を施さない放射4成分収支（ Rn_{NC} ）の関係

て補正を行わない場合の放射4成分収支は、 Rn_R よりも0.5%小さいが、各放射計の測定精度を考慮すればほぼ一致しているものと判断できる。

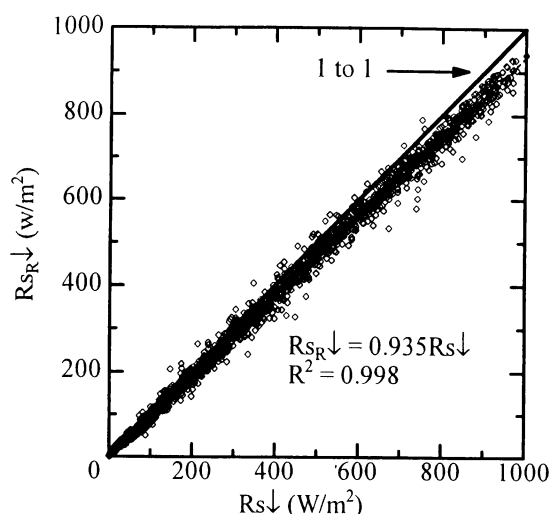
一方、前節で述べたように長波放射計に補正を行った場合、放射4成分収支は小さくなるため、 Rn_R に比べ Rn_A および Rn_p は過小評価されることが分かる（第4表）。また、 RMS_{AR} および RMS_{PR} は B の増加にしたがって大きくなるが、 RMS_{AR} と RMS_{PR} における最大値と最小値の差はそれぞれ4.37、5.62W/m²に過ぎない。したがって、放射4成分収支と Rn_R の差は、上記の長波放射計の補正を行っても解決されなかった。 Rn_R を測定するルーチン観測用正味放射計は劣化のため測定精度に若干の問題があること、そして圃場内の植生は完全に均一ではないことから、 Rn_R を比較対象として扱うことに問題がある可能性もあり、本研究ではこれ以上の考察はできなかった。

Ⅳ 新設した短波放射計と既存の短波放射計の比較およびアルベドの季節変化

（1）新設した短波放射計と既存の短波放射計の比較

陸域環境研究センターで公開されているルーチンデータに含まれる下向き短波放射量（ $SR_R \downarrow$ ）と、本研究で新たに設置した短波放射計により得られた値（ $SR \downarrow$ ）を比較した（第6図）。両者には非常に高い相関があることが分かるが、そのデータは一對一上に必ずしもプロットされず、 $SR \downarrow$ に比べて $SR_R \downarrow$ は6.5%小さい。下向きの短波放射量が、圃場内において不均質に入射

第5図に、 Rn_R に対する Rn_{NC} の関係を示す。回帰直線の傾きは1.005であり、長波放射計に対し

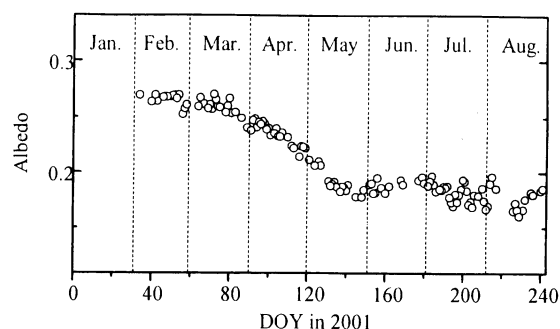


第6図 TERCルーチン観測用短波放射計で観測された下向き短波放射量 ($SR_R\downarrow$) と新設した短波放射計で得られた値 ($SR\downarrow$) の関係

していることは考えにくく、どちらかの短波放射計において観測誤差が存在しているものと考えられる。 $SR_R\downarrow$ を測定している既存の短波放射計(MS-43F型全天日射計；英弘精機製)は、数年毎にメーカーによる検定を受けているものの、老朽化が進み除湿ファンが故障していたため結露が確認される場合があった。また、同短波放射計の受光部の経年劣化は0.5%と見積もられている(遠藤ほか, 1995)ため、短波放射量を過小評価していた可能性が考えられる。なお、 $SR_R\downarrow$ 測定用の短波放射計は、2002年4月中に新品のものに換装されたため、これ以降の測定精度は保たれている。

(2) 2001年2月～8月におけるアルベドの変化

新設した下向きおよび上向き短波放射計の値からアルベドを算出し、その時系列を第7図に示す。なお、アルベドは日中(9時～15時)平均 $SR\downarrow$ および $SR\uparrow$ から算出し、そのうち日中平均 $SR\downarrow$ が 500W/m^2 を上回った場合のみをプロットした。この期間におけるアルベドはおおよそDOY=80(3月20日)前後からDOY140～150(5月20日～



第7図 2001年2月3日～8月31日におけるアルベドの時系列

30日)にかけて減少し、その後多少の上下変動を示すことが分かる。

樋口ほか(2000a)では、同圃場内において植生におけるPAR(Photosynthesis Active Radiation, 光合成有効放射量)領域および近赤外領域の反射特性を測定し、1999年に観測されたアルベドの季節変化に関する考察を行っている。この報告によれば、2001年4～5月に見られたアルベドの減少は草の出芽および成長によるPARの吸収が原因と考えられる。一方、2001年6月中のアルベドの増加は、近赤外領域の反射が増加したためであると考えられる。この原因は、樋口ほか(2000b)によって以下のように考察されている。すなわち、“近赤外領域の反射率は植物体に依存するが、個葉では約40～60%であり、残りの大部分は透過して地面に吸収される。ところが、植生がある程度成長し、葉が重なりキャノピー内での多重散乱がおこるようになると、地面に到達し、吸収される近赤外光は減り、近赤外領域の反射が多くなる”ためである。2001年7～8月におけるアルベドを見ると、ほかの期間に比べ、データのばらつきが大きくなっていることが分かる。この原因については、本圃場において植生の蒸散活動に対する水ストレスが発生していたため(Shimoda, 2002)、PAR領域の反射率が変動した可能性が考えられる。

V まとめ

本研究では、筑波大学陸域環境研究センター（TERC）の熱収支・水収支観測圃場（圃場）において、上向きおよび下向きの短波放射計（Kipp&Zonen 製，CM21）と長波放射計（Eppley 製，PIR（Precision Infrared Radiometer））を設置し観測を行い、長波放射計の補正が放射4成分収支に及ぼす影響を評価すると同時に、TERC公開データの正味放射量および短波放射量との比較を行った。

下向き長波放射計における二次放射補正量は、ドーム係数 B の増大に伴って大きくなり、 B が2を超えると 5W/m^2 を上回ることが明らかとなった。なお、文献値を参照すると、 B が2を超えるPIRは、全体数の85%以上を占める。したがって、下向きの長波放射量に対して、既存の研究例で採用される 5W/m^2 の測定精度が求められる場合には、大多数のPIRにおいて固有の B を得る必要がある。一方、全観測期間における下向きの長波放射計に対する短波放射補正量はおよそ 3.3W/m^2 であったが、晴天日における1時間平均値を扱う場合、その補正量は 10W/m^2 に達し、無視できない要素である。なお、1秒間隔で取得された生データに対して補正を行った場合と、10分平均値に対して補正を行った場合の差は認められなかったことから、観測では10分平均値の採取を行えば必要十分であることが確認された。

放射4成分収支に及ぼす長波放射計の二次放射補正による影響は B の増加に伴い増大したが、短波放射補正による影響はおよそ 2.6W/m^2 で一定であった。一方、TERCルーチンデータの正味放射量に最も近似するのは、長波放射計に対して補正を行わない場合の放射4成分収支による正味放射量である。すなわち、長波放射計に対して補正を行った場合、放射4成分収支による正味放射量は過小評価されることが示された。しかしながら、TERCルーチン観測用正味放射計の劣化や、圃場内の植生に見られる不均質性を考慮した上で、この比較結果を解釈する必要がある。した

がって、本研究の比較結果から長波放射計に対する補正の有無が正味放射量の評価精度に及ぼす影響を結論付けることはできない。

TERCルーチンデータの下向き短波放射量は、新設した短波放射計の値に比べ6.5%小さい。ルーチン観測用短波放射計の劣化のため短波放射量が過小評価されていた可能性がある。一方、解析期間におけるアルベドを評価し、その季節変化の要因について考察した。その結果、2001年4月～5月に見られたアルベドの減少は植生の成長に伴うPARの吸収に起因し、6月に見られた増加はキャノピーの成熟による近赤外光の反射によるものである。そして2002年7・8月に見られた変動は植生が水ストレス下にあったことが原因の可能性の一つとして考えられた。

本研究は、2001・2002年度陸域環境研究センターリサーチ・アシスタントの成果である。

文献

- 遠藤伸彦・桧山哲哉・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。
- 塩原匡貴・浅野正二（1992）：シリコン製ドーム付赤外放射計のドーム効果の定量化と測定誤差について。気象研究所報告，43，17-31。
- 新村典子・飯田真一・浅沼 順（2002）：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。筑波大学陸域環境研究センター報告，3，11-16。
- 西田顕郎・樋口篤志（2000）：リモートセンシング実験でみられた、水理実験センターの圃場の草地植生の季節変化。筑波大学陸域環境研究センター報告，1，1-10。
- 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.
- 樋口篤志・西田顕郎・飯田真一・新村典子・近藤昭彦(2000a)：PGLIERC(Preliminary Global Imager experiment at Environmental Research Center)：その概要について．日本水文科学会誌，**30**，81-91.
- 樋口篤志・近藤昭彦・池田正一・黒子裕史(2000b)：草地・水田・雑木林での地表面フラックスと衛星より得られる可視・近赤外波長域の分光反射特性及び植生指標との関係 I．各土地被覆での地表面フラックスの季節変化．水文・水資源学会誌，**13**，124-136.
- 横山智子・及川武久(2000)：水理実験センター圃場における1999年のC3/C4混生草原のLAIとバイオマスの季節変化．筑波大学陸域環境研究センター報告，**1**，67-71.
- Albrecht, B., Poellot, M. and Cox, S. K. (1974): Pyrgeometer measurements from Aircraft. *Rev. Sci. Instrum.*, **45**, 33-38.
- Dickey, T. D., Manov, D. V., Weller, R. A. and Siegel, D. A. (1994): Determination of longwave heat flux at air-sea interface using measurements from buoy platforms. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**, 1057-1078.
- Fairall, C. W., Persson, P. O. G., Bradley, E. F., Payne, R. E. and Anderson, S. P. (1998): A new look at calibration and use of Eppley precision infrared radiometers. Part 1: Theory and application. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1229-1242.
- Pascal, R. W. and Josey, S. A. (2000): Accurate radiometric measurement of atmospheric longwave flux at the sea surface. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 1271-1283.
- Payne, R. E. and Anderson, S. (1999): A new look at calibration and use of Eppley precision infrared radiometers. Part 2: calibration and use of Woods Hole Oceanographic Institution improved meteorology precision infrared radiometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **16**, 739-751.
- Shimoda, S. (2002): Analysis of CO₂ and H₂O fluxes of grassland on the basis of canopy surface temperature obtained by an infrared thermal imager. *Master Thesis of Environmental Sciences, University of Tsukuba*, 70p.