

昼間の大気輻射量を測定する方法*

齋 藤 隆 幸**

要旨: Beckman-Whitley 社の hemispherical radiometer を使用した場合昼間の大気輻射をどのようにして求めることができるかを考えてみた。

1. ま え が き

地表面に於ける熱収支の測定には夜間のみならず昼間の大気輻射量を知る必要がある。Beckman-Whitley 社の大気輻射計を使用する場合、夜間に於ては専ら水蒸気や CO² 及び雲等からの長波輻射が測定されるのに対して、昼間に於てはこの輻射計の受感部は太陽からの直射光や大気からの散乱光等の短波長輻射をも同時に、長波輻射と同程度によく吸収するために、長波及び短波の総和（これは全輻射量と呼ばれている）の測定に使用されている。そのような場合下向き全輻射量を算出するのに、今輻射計の温度を T (°K), その輻射によってひき起された起電力を V (mV), 輻射計の常数を k とすると、全輻射量 R (cal. min⁻¹cm⁻²) は次のような式を用いて求めるようになっている。

$$R = \sigma T^4 + k \cdot V \dots\dots\dots(1)$$

夜間の R は下向き輻射量となるが、昼間に於ては長波及び短波の総和をあらわすものとされているから、それより全日射量を差引いた残りは昼間の大気輻射量とみなされるはずである。しかしながら実際このような操作を行って昼間の大気輻射量を求めてみると、昼間の大気輻射量が夜間のものよりもはるかに小さいものになったり、又特に日出や日没時に非常に小さな値が出たりするものである。

1957~1958年の国際地球観測年には日本の数箇所にて大気輻射量の観測が行われたが、観測は専ら夜間に限られていた。これは昼間の大気輻射量を算出することが良く出来ないためであろう。

このように夜間に於て大量気輻射量が正しく測定出来るのに、昼間に於ては全輻射又は大気輻射量が正しく測定出来ないということは、長波及び短波に対する受感部の吸収率が異り、長波に対する輻射計の常数が短波に対

しては使用出来なくなるためと思われる。

Beckman 輻射計も新しい中は長波及び短波に対する吸収率が等しく、且つ吸収率が輻射の入射角によらず一定 (Lambert の法則が成立) であると言われているので、(1)の R は全輻射量をあらわすであろうが、受感部が汚れてくると(1)の R は全輻射量をあらわすことは出来なくなってしまう。おそらくは長い間輻射計を使用するには、又塗料をぬりかえたりすれば矢張りそのような状態におちいり、これを避けることは出来なくなるものと思われる。そのような状態になっている輻射計を使用して、昼間の大気輻射量又は全輻射量を求めるのにはどうしたらよいかについて述べたいと思う。

2. 昼間の大気輻射量の求め方

Beckman の hemispherical radiometer を使用して、昼間の下向き大気輻射量を測定する方法について議論をすすめる事にする。

昼間の上方からの輻射の内、長波輻射量のみ注目した場合、その長波 (大気) 輻射量を R_1 とし、それによって引きおこされた起電力を V_1 それに対する輻射計の常数を k_1 とすると、夜間に於けると同じ式が成立する。

$$R_1 = \sigma T^4 + k_1 \cdot V_1 \dots\dots\dots(2)$$

次に短波長の中、太陽の直射光のみに注目したとき、その水平面に垂直成分を S_1 , 又それによつておこされる起電力を V_2 , 又それに対する輻射計の常数を k_2 とする。ここに塗料面が汚れていれば長波及び短波に対する吸収率が異なることが考えられるので、 $k_1 \neq k_2$ である。(2)と同様に

$$S_1 = k_2 V_2 \dots\dots\dots(3)$$

(2)と比べて σT^4 が無いのは感部より短波長の輻射は放出していないからである。又(2)の k_1 は夜間の大気輻射量の測定に使用される常数と同じものである。

短波の内、空気分子や塵埃等による全天からの散乱光を S_2 とすると、同様にして

$$S_2 = k_3 V_3 \dots\dots\dots(4)$$

しかし実際の測定には $V_1 V_2 V_3$ を別々に測定している

* On Measurement of Atmospheric Radiation in the Daytime

** Takayuki Saito, 農業技術研究所気象科

—1961年4月19日受理—

わけではなく、その総和 V を測定しているのである。

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \dots \dots \dots (5)$$

従つて V より V_2, V_3 を差引き V_1 を求めることが出来れば(2)を用いて長波輻射量 R_1 を算出することが出来るわけである。以下この線に沿って R_1 を求めることを考える。(3), (4)よりそれぞれ

$$V_2 = \frac{1}{k_2} S_1, \quad V_3 = \frac{1}{k_3} S_2 \dots \dots \dots (6)$$

$$\therefore V_1 = V - \frac{1}{k_2} S_1 - \frac{1}{k_3} S_2 \dots \dots \dots (7)$$

(7)を(2)に入れて

$$R_1 = \sigma T^4 + k_1 V - \frac{k_1}{k_2} S_1 - \frac{k_1}{k_3} S_2 \dots \dots \dots (8)$$

ところで、例えば(3)(4)等から分るように k_1, k_2, k_3 等は、受感部の吸収がよい程その値は小さくなる。つまり、夫々の輻射に対する吸収率に反比例する。従つて感部の長波、太陽直射光及び短波散乱光に対する吸収率を夫々 a, b, c とすると、

$$k_1 = \frac{\kappa}{a}, \quad k_2 = \frac{\kappa}{b}, \quad k_3 = \frac{\kappa}{c}$$

となる。ここに κ は輻射計に内蔵する起電対の特性等に関係する機械固有の定数である。それ故(8)の S_1, S_2 の係数は

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{b}{a}, \quad \frac{k_1}{k_3} = \frac{c}{a} \dots \dots \dots (9)$$

となり、これを(8)に代入して結局次式のようなになる。

$$R_1 = \sigma T^4 + k_1 V - \frac{b}{a} S_1 - \frac{c}{a} S_2 \dots \dots \dots (9)$$

この式を用いて R_1 を求める事が出来る。

まえがきのところで述べたように、もし(A)輻射計が新しく長波及び短波共その吸収率が等しく、且つ(B)その吸収率が輻射の入射角によらず一定なものであるならば、太陽高度の如何にかかわらず $b/a=1, c/a=1$ となり、(10)の $(\sigma T^4 + k_1 V_1)$ はたしかに全輻射量をあらわし、従つて $(\sigma T^4 + k_1 V_1)$ より日射計による日射量 $(S_1 + S_2)$ をそのまま差引けば、昼間の長波輻射量が求められるわけである。しかし一般には $a=b=c$ は成立しないため、 $(\sigma T^4 + k_1 V)$ より全日射量を差引いても昼間の大気輻射量を得ることは出来ない。(A), (B) つの条件を満す塗料は最も理想的なものといえる。

(10)で T, V, S_1, S_2 はすべて測定可能の量であり、又 k_1 は夜間の大気輻射量を求めるのに使用される輻射計の常数である。それで(10)より R_1 を求めるためには $b/a, c/a$ なる2つの量が分らなければならない。

3. $b/a, c/a$ の値について

今、輻射計を野外に置いた時平衡状態に於ては(10)が成立する。(10)の k_1 を k で書きかえ

$$R_1 = \sigma T^4 + kV - \frac{b}{a} S_1 - \frac{c}{a} S_2 \dots \dots \dots (10')$$

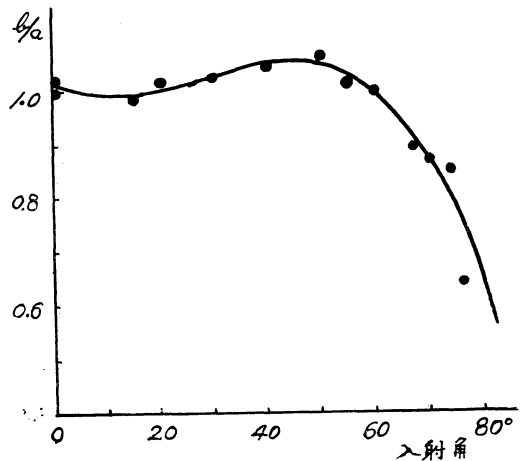
先ず b/a の求め方について述べる。長い棒の先に小さい板をつけたものを輻射計より約は2~3mなれた所に置き、直射光 S_1 が輻射計に当らぬようにした。この時の輻射計の温度及び起電力を T', V' とすると、 R_1 及び S_2 は変らないから

$$R_1 = \sigma T'^4 + kV' - \frac{c}{a} S_2 \dots \dots \dots (11)$$

(10)~(11)より

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{S_1} \{ (\sigma T^4 - \sigma T'^4) + k \cdot (V - V') \} \dots \dots (12)$$

(12)より b/a なる量を求めることが出来る。著者は b/a の値が太陽の入射角(天頂距離)に対してどの程度一定のものであるかどうかをしらべる為に、輻射計をいろいろの角度に傾けて b/a の値を求めた。ここに S_1 は受感面に垂直な成分であつて、実際には日射計を直射光に直角に向けその直射光に入射角の \cos をかけて求めることにした。



第1図 太陽直射光の入射角に対する b/a の値

第1図はその結果であつて、明らかに b/a の値は入射角が 60° よりも大きくなると急激に小さくなつてゆくことが分る。即ち Lambert の法則が成立しないわけである。ここに注意しておきたいことは、 S_1 の測定値に誤差が含まれるならば、上に求めた b/a の値は必ずしも直射光及び長波輻射のそれぞれの吸収率の真の比を表わしているとは限らず、従つてこの値が1になつたからといって $b=a$ とは限らない。しかし a は一定故、第1図の

b/a の値はそれぞれの入射角に対する吸収率 b の相対値は十分に示していると思われる。

次に c/a を求めてみる。輻射計を水平におき、直射光をさえぎったまま受感部にガラス半球をかぶせる。ここに使用したガラス半球は丸底で直径約 24cm のプラスチックを切断したものであるが、出来ればもう少し大きいものの方が良いと思う。今ガラスの面の出す長波輻射を R_g 、又ガラス球を通る散乱光の透過率を t とすると、 ω' より $S_1=0$ とおき

$$R_g = \sigma T^4 + kV - \frac{c}{a} \cdot t S_2 \dots\dots\dots (13)$$

次にその半球を暗幕でガラス球に直接ふれないようにおいて S_2 をさえぎる。この場合 R_g は不変であり又 T も変らなかった。又この時の起電力を V' とすると

$$R_g = \sigma T^4 + kV' \dots\dots\dots (14)$$

$$(13)-(14) \text{ より } \frac{c}{a} = \frac{1}{t \cdot S_2} k(V - V') \dots\dots\dots (15)$$

(15)より c/a を求めることが出来る。 S_2 は日射計を矢張り水平に置き直射光をさえぎって求める。 t は直射光をさえぎったまま日射計をこのガラス球でおおった時と、そうでない時の日射量より求めた。 t の値は大体 0.94であった。著者の求めた c/a の値は次のようである。

$c/a=0.73$ 雲量 0

$c/a=0.91$ 全天層雲

この測定の最中、煤煙等による日射量の変動多く安定した測定を行うことは出来なかった。 c/a の値が上の如く異なるのは散乱光が比較的高いところからくるものが多いか、それとも水平に近い方向からのものが多いかに起因するものと思われる。 c/a の値が0.91程度であることは全散乱光を一つ方向から来る光とみなした場合、その方向は天頂距離にして 70° 位であることや、又それ故に散乱光の方向分布が日によって僅かに異っても、 c/a の変り方が大きくなることも第1図より知ることが出来る。又正確には雲量 0 であっても空気分子による散乱光の分布も亦太陽高度によって幾分変るであろうから、その c/a も亦多少太陽高度によって変るかもしれない。しかし太陽直射光の入射角による b/a の変り方に比べたら c/a の変り方は極めて小さく、又 S_2 の値は小さいから実際問題としてはこれを一定とみなしてもよいかもしれない。

(晴天時 c/a が1日の中、太陽高度によりどのように変るかは測定しなかつたが、一応それを測る必要があるように思われる。) しかし上に示したように c/a の値は全天雲、青空、煙霧等によっては異ると思われるので、

それぞれの天気に応じた値を求めておく方がよい。

以上 b/a 、 c/a の値を求める方法を述べた。明らかに b/a と c/a は等しくはなく、又一般には1とはならぬ、このことより現在我々の使用している輻射計では、矢張り $(\sigma T^4 + k \cdot V)$ なる量より日射量をそのまま差引いただけでは、正しい大気輻射量を求めることは出来ないものと考えてよい。

4. 具体的方法に対する 2・3 の注意

以上のようにして b/a 、 c/a が求められたので、 S_1 、 S_2 を何らかの方法で求めて ω' より R_1 を求めることが出来る。

(1) b/a 、 c/a を求める際、もしそれに使用した S_1 、 S_2 の値が正しくなく多少の誤差を有している場合には、その日射計を使用している限りその b/a 、 c/a の値は使用出来るが、特性の異なる他の日射計を用いる場合には、その日射計による b/a 、 c/a を求めなければならない。更に又、前に b/a を求める場合には日射計を太陽方向に直角に向けて使用した。しかし実際には ω' より R_1 を求める場合には輻射計及び日射計を共に水平にしているわけであって、この場合その日射計は必ずしも Lambert の法則が成立するものとは限らず、従つてこのような場合に矢張り3のところ求めた b/a の値はそのまま使用することは出来なくなる。実際使用する b/a は両輻射計を共に水平にしたままで、太陽高度の異なるいろいろの時刻に前の方法によつて b/a に相当する値を求め、それを使用すべきである。

(2) b/a は太陽高度により異なる。このことは例えば冬季太陽高度が日中でさえ 35° 程度の場合には、 S_1 を差引くのが非常にやつかいになってくる。このような場合はむしろはじめから何らかの方法で輻射計に直射光が当らぬようにしておけば

$$R_1 = \sigma T^4 + k \cdot V - \frac{c}{a} \cdot S_2$$

より R_1 が求め得る。この場合 S_2 は小さく c/a は一定とみなしてもよいのではないかと思う。

$(\sigma T^4 + k \cdot V)$ より従来の如く日射計によつて得られた値 $(S_1 + S_2)$ をそのまま差引いて得られたものと $(\frac{b}{a} S_1 + \frac{c}{a} S_2)$ を差引いて得られたものとの差は

$$S_1 \left(1 - \frac{b}{a} \right) + S_2 \left(1 - \frac{c}{a} \right) \equiv \Delta R_1$$

である。この極く大きつばな値を求めてみると大体次のようになる。例えば晴天時太陽高度が大体 30° 以上の場合 $1 - \frac{b}{a} \approx 0$ 、 $1 - \frac{c}{a} \approx 0.3$ 、又一応 $S_2 \approx \frac{1}{4} (S_1 +$

$S_2 \approx 0.25 \text{ cal} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ とすると、 $\Delta R_1 = 0.075 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ 、次に例えば太陽高度が低く 20° 位だと $(1 - \frac{b}{a}) \approx 0.10$ 、 $1 - \frac{c}{a} \approx 0.3$ 、 $S_1 = 0.40$ 、 $S_2 = 0.20$ 位とした場合には $\Delta R_1 \approx 0.100 \text{ cal} / \text{min} \cdot \text{cm}^2$ となる。

以上 Beckman-Hemi. radiometer を用いて昼間の大気輻射量を求める一つの方法について述べた。Net flux radiometer については下からの日射の反射光も加わるが、これについても b/a 、……等に相当する係数を上の方法で求めておけばよいと思う。

尚上にのべてきた b/a 、 c/a の値を出す前に現在使用

している輻射計の常数 k の値が、果してどの程度正しいものであるかを、どうしても一度調べる必要があるように思われる。そのために筆者は簡単な大気輻射計検定装置を試作した。(詳細は農業気象17巻1号に発表) 使用した。Hemi radiometer は輸入したから5年近くたっており、その機械製作番号は MDL 188-33. Ser 154 となつている。日射計は農試電試型日射計を使用した。

最後にこの研究にご協力下さった物理第2研究室長井上栄一博士に感謝するものである。

理 事 会 便 り (II)

第19回 常任理事会議事録

日 時 昭和36年9月8日(金) 17.00~19.00

場 所 神田学士会館

出席者 岸保, 根本, 有住, 吉武, 松本, 畠山, 正野
神山, 淵 各理事(順序不同)

決 議

1. 大会におけるシンポジウムとして「台風に関するもの」と「大気海洋間エネルギー交換に関するもの」(日本海洋学会と共催)を開く。
2. 大会で北川信一郎氏に帰朝談をお願いする。

3. 日中学術交流に関し国際学術交流委員会として正式に文書を出し、日中友好協会を依頼する。
4. 天気 の1号を梅雨を主としたものとし、原稿を1月末締切で募集する。編集には交流委員会が協力する。
5. 気象学会のマークを12月31日締切で募集し、せんこう方式については常任理事会において決定する。

第20回 常任理事会議事録

日 時 昭和36年10月2日(月) 16.30~21.00

場 所 神田学士会館

出席者 正野, 桜庭, 松本, 根本, 藤田, 今井, 有住
神山, 淵の各理事(順序不同)

決 議

1. ソ米の原爆実験再開に関し、どのような処置をとるかについて慎重審議したが、まとまった結論に達しなかったので、秋季大会で常任理事会としては臨時総会を開かないことにする。
なおこの問題についてさらに検討する。
2. 秋季大会の行事日程を次のとおりとする。
大 会(研究発表) 両会場
11月7日 9~12, 13~15時
岡田賞授賞式(渡辺貫太郎氏) 第1会場
受賞記念講演 11月7日 15~16時
帰 朝 談(北川信一郎氏) 第1会場

11月7日 16~17時

懇 親 会

家の光会館

11月7日 18時~

大 会(研究発表)

両会場

11月8日 9~12時

台風シンポジウム

第1会場

11月8日 13~17時

大 会(研究発表)

両会場

11月9日 9~12, 13~17時

大気海洋間エネルギー
交換シンポジウム

国際文化会館

11月9日 18~21時

3. 大会の各座長については講演企画委員会の原案通りお願いする。
4. 朝日賞に関しては、10月7日までに推せん者を正野理事長まで申出の上、同理事長と畠山理事で推せん者を決定する。