農業気象 (*J. Agr. Met.*) 43 (1): 45–51, 1987

正味放射量の季節変化とその推定

朱 超 群^{*}・鳥谷 均^{**}・古藤田一雄^{***}・吉野正敏^{****}

(^{*} 南京大学大気科学系, 中華人民共和国南京市
^{**} 筑波大学地球科学研究科
^{***} 筑波大学水理実験センター
^{****} 筑波大学地球科学系)

Estimation of Net Radiation and Its Seasonal Variation

Chaogun SHU^{*}, Hitoshi TORITANI^{**}, Kazuo KOTODA^{***},
 and Masatoshi YOSHINO^{****}

(^{*} Institute of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing, China)
^{**} Doctoral Program in Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 305
^{***} Environmental Research Center, University of Tsukuba, Ibaraki 305
^{****} Institute of Geoscience, University of Tsukuba, Ibaraki 305)

I. はじめに

正味放射量は熱収支システムを支配する主要素の一つである。しかしながら、観測精度を維持するための観測装置の保守管理が難しいこと、また正味放射量は地表状態の影響を強く受け、その値は観測地点に近い地域にしか適用できないことなどの理由から、長期間にわたる正味放射量の観測値は極めて少ない。したがって、正味放射量を算出するためには他の気象要素から推定することが必要となる。

これまでに、正味放射量を推定するモデルが、多くの研究者によって報告されてきた。そして、これらのモデルはつぎの2種類に分けることができる。そのうちの一つは、日射量と正味放射量との関係を直線回帰式で表すものである。たとえば、Monteith and Szeicz (1962), Fritschen (1967), Davies and Buttymor (1969), 古藤田 (1984) などがある。もう一つのモデルは、放射収支を基礎にして作られたもので、Linacre (1968), Chang (1970), 中山ら (1983) の研究にみられる。とくに後者は、日射量だけでなく、その他の気象要素、例えば気温、日照時間、湿度などを考慮しており、適用範囲が広いという点で前者よりすぐれている。しかし古

藤田 (1984) は、日射量と正味放射量の関係は、その季節変化に著しいヒステリシスが認められること、したがって、直線回帰式を用いて日射量から正味放射量を推定すると、冬季から春季にかけては過大評価され、夏季から秋季にかけては過小評価されることを指摘している。

そこで本研究では、まず後者に属する三つのモデルの精度を実測値を用いて比較検討する。つぎに季節変化を考慮した月平均正味放射量の推定方法の一つとして、日射量と正味放射量の関係を楕円曲線によって表す式を提示し、正味放射量の季節変化に影響を及ぼす気象要素について考察する。

II. 日積算正味放射量の推定式および解析資料

本研究では正味放射量の日積算値を推定するために、つぎの三つのモデルを用いた。すなわち、

Linacre (1968) :

$$Rn_L = (1 - \alpha) Rs - 1.11 \{0.2 + 0.8 (n/N)\} (100 - T) \quad (1)$$

Chang (1970) :

$$Rn_C = (1 - \alpha) Rs - \sigma T a^4 \{286.18 + 202.6 (Rs/Ra) - 45.24 \sqrt{e_d} - 10.92 \sqrt{e_d} (Rs/Ra)\} \quad (2)$$

昭和 61 年 5 月 30 日 全国大会にて発表

昭和 61 年 11 月 6 日 受理

中山ら(1983) :

$$Rn_N = (1 - \alpha) R_s - (0.245 - 0.158 \times 10^{-10} T_a^4) \{ 1.509 (R_s / R_a) - 0.117 \} \quad (3)$$

ここで、 Rn は正味放射量 (単位は(1)式では W/m^2 , (2)式では ly/day , (3)式では ly/min), 添字の L , C , N はそれぞれ, 研究者の名前, α は地表面のアルベド, R_s は日射量, n は日照時間, N は昼の長さ(時間), T は気温($^{\circ}C$), σ はステファン・ボルツマンの定数($8.17 \times 10^{-11} ly/min \cdot K^4$), e_d は水蒸気圧(mb)である。また R_a は大気上限の日射量, T_a は絶対温度で示した気温(K)である。

解析資料のうち日射量と正味放射量, 気温に関しては, 筑波大学水理実験センターにおける熱収支・水収支観測システム(古藤田ほか, 1978)に付属する気象日報作成装置(古藤田ほか, 1983)によって処理された日積算値を用いた。また気象庁館野高層気象台における気温, 絶対湿度, 相対湿度の日平均値および, 日照時間の資料も解析に用いた。解析の対象とした観測時間は, 1981年12月から1982年11月, 1983年1月から同年12月までの2年間である。このなかで晴れ指数(Clearness index, 以下 C_i で表す。ただし $C_i = R_s / R_a$)が30%より小さい日, さらに降水があった日は除外した。そのため, 利用できる資料の解析日数は, 2年間で372日となった。各月における解析日数をTable 1に示す。資料が利用し得た, 最も多い日数の月は1983年12月(26日), 最も少ない月は同年7月(7日)であった。

また地表面のアルベド α の実測値は, 7月から翌年の月に関しては, 中川(1981)の報告によって与えられた値を用い, その他の月については, 池田(1977)の実験式で計算した α の年変化と, 中川(1981)の結果を比較考察することによって推定した。Table 2に本研究で用いた α の値を示す。この表から α は夏季に小さく, 冬季

に大きいことがわかる。 α の季節変化は, 主に地表面の植被(牧草)の変化によって生じる。11月下旬に α の値が大きくなったのは, 圃場の牧草を刈り取り, 草丈が5 cm になったためと考えられる。

Ⅲ. 日積算値の計算結果および解析

前節で述べた三つのモデルと, 各気象要素の日平均値または日積算値を用いて計算した正味放射量の推定値と実測値, またその月平均値をFig.1に示す。ここで, 実測値に対する推定値の絶対偏差 d と相対偏差 r_d をTable 3に示す。ただし, d および r_d は下式によって求めた。

$$d = \sum_{i=1}^{N_d} |Rn_{est} - Rn_{obs}| / N_d \quad (4)$$

Fig. 1 Comparison of monthly observed net radiation ($\bar{Rn}$) with estimated radiation by eqs. (1), (2) and (3).

Table 1 Number of days used in the analysis.

MONTH	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.	TOTAL
DEC., 1981 ~NOV., 1982	19	18	13	9	24	13	10	17	9	15	10	21	178
1983	24	20	15	12	19	11	7	16	9	14	21	26	194

Table 2 Monthly average albedo of the ground surface (α).

MONTH	JAN.	FEB.	MAR.	APR.	MAY	JUN.	JUL.	AUG.	SEP.	OCT.	NOV.	DEC.
$C_i \geq 0.50$	0.235	0.228	0.212	0.196	0.168	0.172	0.172	0.172	0.175	0.184	0.200	0.230
$C_i < 0.50$	0.215	0.208	0.192	0.176	0.150	0.152	0.152	0.152	0.155	0.164	0.180	0.210

Table 3 Absolute deviation (d) and relative deviation (r_d) of the estimated net radiation by eqs. (1), (2) and (3) (unit of d is in ly/day).

Equation	(1)		(2)		(3)	
	d_1	r_{d1}	d_2	r_{d2}	d_3	r_{d3}
JAN.	32.36	1.27	40.52	1.59	17.62	0.69
FEB.	14.18	0.27	70.13	1.32	26.05	0.49
MAR.	30.74	0.25	76.99	0.62	42.83	0.35
APR.	42.74	0.24	80.24	0.45	53.53	0.30
MAY	59.59	0.27	107.16	0.48	74.71	0.34
JUN.	41.95	0.17	76.38	0.30	47.98	0.19
JUL.	28.72	0.12	48.97	0.20	29.23	0.12
AUG.	19.56	0.08	37.24	0.15	9.97	0.04
SEP.	20.42	0.10	32.50	0.15	14.03	0.07
OCT.	37.20	0.29	22.40	0.18	18.96	0.15
NOV.	58.04	0.79	27.93	0.38	30.03	0.41
DEC.	33.86	10.84	39.91	10.71	16.43	5.30
ANNUAL MEAN	33.58	0.34	55.66	0.43	31.62	0.24

$$r_d = d / \overline{Rn_{obs}} \quad (5)$$

ここで、 Rn_{est} 、 Rn_{obs} はそれぞれ正味放射量の日積算値の推定値と実測値、 N_d はその月の C_i が 0.3 より大きい日数を示す。また $\overline{Rn_{obs}}$ はその月平均値 (サンプリング平均) である。Table 3 から絶対偏差 d と相対偏差 r_d の値は、式 (3) で最も小さく、式 (2) で最も大きい。また、 d と r_d は月によって異なる。 d は 5 月と 11 月に大きく、12 月から 2 月の寒候季に小さい。これに対して、 r_d は寒候季に大きい。このことは、正味放射量の推定値が 12 月、1 月、2 月においてそれぞれ 3.15, 25.57, 53.27 (ly/day) と小さいことに起因している。また、式 (1) と式 (3) で求めた推定値は、8~12 月および 1 月では実測値と比較して小さく、他の月では大きい (Fig. 1)。これに対して、式 (2) による推定値は、11 月をのぞき、いずれも実測値よりも大きい。これは、式 (2) がアルベド α と晴れ指数 C_i の季節変化を考慮しないためである。

つぎに、気象要素の日平均値および日積算値の実測値を用いて、上述の各式の定数と係数を、最小自乗法近似により定め直した。新しい定数と係数を入れた推定モデルは、それぞれ次のようになった。

$$\begin{aligned} Rn_L' &= (1 - \alpha) R_s \\ &- \{36.374 + 60.209 (n/N) - 0.699 T \\ &+ 0.508 T (n/N)\} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Rn_C' &= (1 - \alpha) R_s \\ &- \sigma T a^4 \{239.789 + 393.631 (R_s/R_a) \\ &- 86.706 \sqrt{e_d} - 94.311 \sqrt{e_d} (R_s/R_a)\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Rn_N' &= (1 - \alpha) R_s \\ &- \{0.0028 + 0.2274 (R_s/R_a) - 0.0748 \times 10^{-10} T a^4 \\ &+ 0.123 \times 10^{-10} T a^4 (R_s/R_a)\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで符号は式 (1), (2) および (3) とすべて同じである。式 (6), (8) は式 (1), (3) と比べると式の型が少し異なる。式 (6), (7), (8) によって求めた正味放射量の推定値と実測値を Fig. 2 に示す。Fig. 1 と Fig. 2 を比較すると、式 (6), (7), (8) を用いて求めた推定値は、式 (1), (2), (3) を用いて求めた推定値より実測値に近いことがわかる。Table 4 に式 (6), (7), (8) によって求めた推定値の、実測値に対する絶対偏差 d と相対偏差 r_d を示す。Table 3 と Table 4 からわかるように、式 (6), (7), (8) を用いて求めた推定値の d と r_d はそれぞれ式 (1), (2), (3) の値より小さい。このことはもとの式と比較して、式 (6), (7), (8) の方が精度が高いことを示している。また式 (7) の d は最小であり、式 (6) の d は最大となる。このことは、物体の表面が射出するエネルギーはステファン・ボルツマンの法則に従って絶対温度の 4 乗に比例するが、式 (6) ではこれを摂氏温度の 1 乗に比例すると近似していることに関係があると考えられる。また、式 (7) によって求めた値に関する d と r_d の年平均値は式 (8) によって求めた値のものとほぼ等しい。これは式 (7) と (8) の精度に優劣の差がほとんどないことを示している。さらに、Fig. 2

Fig. 2 Comparison of monthly observed net radiation (Rn) with estimated radiation by eqs. (6), (7) and (8).

Table 4 Absolute deviation (d) and relative deviation (r_d) of the estimated net radiation by eqs. (6), (7) and (8) (unit of d is in ly/day).

Equation	(6)		(7)		(8)	
	d_1	r_{d1}	d_2	r_{d2}	d_3	r_{d3}
JAN.	23.09	0.86	20.47	0.80	22.93	0.90
FEB.	22.39	0.42	18.81	0.35	17.03	0.32
MAR.	37.96	0.31	29.54	0.24	29.61	0.24
APR.	39.96	0.23	27.94	0.16	33.43	0.19
MAY	51.40	0.23	40.01	0.18	44.66	0.20
JUN.	32.94	0.13	23.83	0.10	24.58	0.10
JUL.	26.01	0.11	25.59	0.11	24.02	0.10
AUG.	31.23	0.12	23.04	0.09	28.35	0.11
SEP.	30.86	0.15	29.94	0.14	31.63	0.15
OCT.	40.04	0.32	33.24	0.26	29.87	0.24
NOV.	54.88	0.75	45.61	0.62	38.62	0.53
DEC.	25.90	8.78	18.54	6.29	16.76	5.68
ANNUAL MEAN	33.44	0.27	27.66	0.21	28.07	0.22

から、式(6)、(7)、(8)によって求めた推定値は、8～12月および1月について実測値に対して過小評価しているのに対して、2～7月では実測値に対して過大評価している。これは、これらの推定モデルにはまだ不備な点があることを示している。以下、正味放射量の月平均値を推定することについて述べる。

Ⅳ. 月平均日射量と正味放射量との関係および解析

3階級に区別した晴れ指数値($C_i \geq 0.30$, $C_i \geq 0.50$, $0.30 \leq C_i \leq 0.50$)のそれぞれについて、月平均日射量と正味放射量との関係を、1983年を例に、Fig. 3に示す。他の年についても同じような傾向を示した。また、図中の黒丸の脇の数字はそれぞれの月を示す。日射量と正味放射量との関係について、多くの研究者は直線回帰式を提案している。本研究では、晴れ指数を3階級に区別して、月平均日射量と正味放射量との関係について、それぞれ次のような直線回帰式と相関係数 r を得た。

$$C_i \geq 0.30 \quad \overline{Rn} = 0.733 \overline{Rs} - 118.83 \quad (r = 0.876) \quad (9.1)$$

$$C_i \geq 0.50 \quad \overline{Rn} = 0.770 \overline{Rs} - 149.73 \quad (r = 0.896) \quad (9.2)$$

$$0.30 \leq C_i \leq 0.50 \quad \overline{Rn} = 0.784 \overline{Rs} - 106.37 \quad (r = 0.897) \quad (9.3)$$

ここで、 $\overline{Rn}$ と $\overline{Rs}$ はそれぞれ月平均正味放射量と日射量

Fig. 3 Relationship between monthly global radiation ($\overline{Rs}$) and net radiation ($\overline{Rn}$) observed at E. R. C.

(ly/day)である。しかし古藤田(1984)が指摘したように、式(9.1)～(9.3)を用いて、月平均正味放射量を推定すると、7～11月では過小評価、1～5月では過大評価される。

Fig. 4は館野高層気象台で観測した $\overline{Rs}$ と $\overline{Rn}$ の関係を示したものである。Fig. 4とFig. 3を比較すると、両者の季節変化にみられる差異の傾向はよく類似している。このことは、 $\overline{Rs}$ と $\overline{Rn}$ と関係を楕円曲線近似によって一

Fig. 4 Relationship between monthly global radiation ($\overline{Rs}$) and net radiation ($\overline{Rn}$) observed at Tateno Aerological Observatory.

般化し得ることを示すもので、熱収支の過程からも肯定される。

Fig. 3 に示した $\overline{R_s}$ に対する $\overline{R_n}$ の関係を楕円曲線で近似した結果、次式を得る。

$$Ci \geq 0.30$$

$$\overline{R_n} = 0.7155 \overline{R_s} - 111.196 \pm \sqrt{(-0.1047 \overline{R_s}^2 + 75.2274 \overline{R_s} - 10242.7)} \quad (10.1)$$

$$Ci \geq 0.50$$

$$\overline{R_n} = 0.7316 \overline{R_s} - 115.710 \pm \sqrt{(-0.0727 \overline{R_s}^2 + 57.4583 \overline{R_s} - 7785.3)} \quad (10.2)$$

$$0.30 \leq Ci \leq 0.50$$

$$\overline{R_n} = 0.8044 \overline{R_s} - 112.909 \pm \sqrt{(-0.0750 \overline{R_s}^2 + 44.9655 \overline{R_s} - 4889.0)} \quad (10.3)$$

式(10.1)～(10.3)と式(9.1)～(9.3)を比べると、対応する右辺の第1項の係数はそれぞれほぼ等しい値である。Table 5 に式(10.1)～(10.3)を用いて得た推定値の、実測値に対する平均偏差 $\overline{d}$ と最大偏差 d_{max} を示す。この表から、式(10.1)～(10.3)における $\overline{d}$ と d_{max} は、式(9.1)～(9.3)における $\overline{d}$ と d_{max} より小さく、前者は後者の約 1/2 となっている。

なお、式(10.1)～(10.3)の右辺の第3項につける正・負符号をどのようにとるかについては、Fig. 3 から 11 月における正味放射量 $\overline{R_n}$ の値はその楕円の長軸の上の方にあり、1～5 月における $\overline{R_n}$ の値はこの長軸の下の方にある。したがって、1～5 月では負符号をとり、7～11 月では正符号をとることとする。12月と6月に関しては、それぞれ楕円曲線の左右両端点に近いので、 $\overline{R_n}$ を計算するときは、式(10.1)～(10.3)の第3項を省略する。また、式(10.1)～(10.3)では、日射量 $\overline{R_s}$ はそれぞれある範囲内でのみ成り立つことに注意したい。例えば、式(10.1)に対しては、 $\overline{R_s}$ は 182.5～535.9 (ly/day) の値の範囲内でしか使用することができない。

V. 正味放射量の季節変化についての考察

最後に、正味放射量の季節変化に影響を及ぼす気象要素について検討する。地表面における正味放射量 R_n は、次式のように表される。

$$R_n = (1 - \alpha) R_s + L^* \quad (11)$$

上式により、正味放射量 R_n は正味の短波放射量 $(1 - \alpha) R_s$ と正味の長波放射量 L^* によって示されることがわかる。前者は主に地表面のアルベド α による。また、後者は一般に気温、地表面温度、可降水量、雲量などの関数である。 α の季節変化によって生じる正味の短波放射量の差 ΔR_s を次式で計算することにする。

$$\Delta R_s = R_{s_i} \alpha_i + R_{s_j} \alpha_j \quad (12)$$

ここで、添え字 i, j は月を示す(日射量の値が互いに近い月、1982 年 2 月と 10 月、3 月と 9 月、1983 年 3 月と 9 月、4 月と 8 月のそれぞれ前者を i の月として、後者を j の月として選ぶ)。上に示した月の $R_s, \alpha, \Delta R_s, L^*$ (R_s, R_n と α の実測値を用いて式(11)で算出したもの)を Table 6 に示す。また i の月と j の月の正味の長波放射量の差 ΔL^* と、この値の正味の短波放射量の差 ΔR_s に対する比も Table 6 に示す。Table 6 から、 ΔR_s は 9.87～19.63 (ly/day) となる。また ΔL^* は 63.39～94.92 (ly/day) であり、 ΔL^* と ΔR_s との比は、4.17～7.43 となる。すなわち、 i の月と j の月における R_n の差は、 α の差 (ΔR_s) によるよりも ΔL^* によっておもに生じるのである。

以上のように、正味放射量の季節変化はおもに L^* の季節変化に左右される。つきに、 L^* の季節変化に影響を及ぼす気象要素についてのべる。先に述べたように、 L^* はいくつかの気象要素の関数として示される。Fig. 5 に絶対湿度 e 、気温 T 、日照率 S 、正味の長波放射量 L^* と晴れ指数 Ci の季節変化を示す。この図から、 L^* の季節変化は T, e の季節変化とほぼ等しい。しかし、 Ci と S の季節変化と比較すると、ほぼ逆になっている。Fig. 6 はそれぞれ L^* と Ci, S の関係を示したものである。この図から、 L^* と Ci との相関 ($r = -0.800$) は、 L^* と S との相関 ($r = -0.528$) より著しく良いことがわか

Table 5 Mean deviation ($\overline{d}$) and maximum deviation (d_{max}) of eqs. (9.1)～(9.3) and (10.1)～(10.3).

Equation	(9.1)	(10.1)	(9.2)	(10.2)	(9.3)	(10.3)
$\overline{d}$ (ly/day)	40.58	18.24	38.53	19.79	30.16	16.21
$\overline{d}_9 / \overline{d}_{10}$	2.22		1.95		1.86	
d_{max} (ly/day)	80.76	42.40	84.47	47.82	65.87	36.79
$d_{max 9} / d_{max 10}$	1.90		1.77		1.79	

Table 6 Global radiation (R_s), albedo (α), difference of R_s induced by the seasonal variation (ΔR_s), net long-wave radiation (L^*) and net radiation (R_n).

Year	1982		1982		1983		1984	
Month	Feb.	Oct.	Mar.	Sep.	Mar.	Sep.	Apr.	Aug.
R_s (ly/day)	315.35	299.39	431.12	412.94	376.98	342.57	408.49	408.09
α	0.218	0.174	0.202	0.165	0.202	0.165	0.186	0.162
ΔR_s (ly/day)	16.65		18.95		19.63		9.87	
L^* (ly/day)	-201.23	-131.85	-223.82	-128.90	-168.54	-79.49	-162.36	-89.07
ΔL^* (ly/day)	69.38		94.92		89.05		73.29	
$\Delta L^*/\Delta R_s$	4.17		5.01		4.54		7.43	
R_n (ly/day)	43.42	114.40	116.37	214.57	130.02	208.99	170.29	255.88

Fig. 5 Seasonal variation of air temperature (T), absolute humidity (e), net longwave radiation (L^*), clearness index (Ci) and rate of sunshine (S).

る。また、 Ci は、雲量の他に、可降水量や塵などの影響を受ける。したがって、 L^* の季節変化の特徴には、これらの気象要素(おもに温度、湿度、晴れ指数など)の季節変化も関係していることが考えられる。

VI. 結 語

晴れ指数が0.30より大きい日における正味放射量と日射量を解析した結果、つぎのようなことがわかった。

1. 正味放射量の日積算値を推定する三つのモデルでは、Chang の式と中山らの式の精度は高く、両者の精度はほぼ同じである。

2. 月例の日平均値で、日射量に対する正味放射量の

Fig. 6 Relationship between net longwave radiation (L^*) and clearness index (Ci) (Fig. 6(a)) or rate of sunshine (S) (Fig. 6(b)).

関係を調べた。この両者の関係は、楕円曲線で近似する方が直線回帰式よりよい。前者の最大偏差と平均偏差は後者のそれぞれ約 50% である。

3. 正味放射量の季節変化には、地表面のアルベドの影響が草地の場合では弱く、主に気温、湿度および晴れ指数の及ぼす影響が強い。つまり、正味放射量の季節変化はこれらの気候要素の季節変化と関係していることが考えられる。

謝 辞

本研究は、南京大学の研究費による筑波大学滞在中に筑波大学水理実験センターの施設を利用して行ったもので、筑波大学水理実験センターには、資料など種々の便宜を得た。また、館野高層気象台の観測第一課から気象資料を借用させて頂きました。ここに記して厚く感謝します。

文 献

- Chang, J. H., 1970: Global distribution of net radiation according to a new formula. *Ann. Assoc. Amer. Geogr.*, **6**, 340–351.
- Davis, J. A. and Buttner, P. H., 1969: Reflection coefficients, heating coefficients and net radiation at Simcoe, Southern Ontario. *Agr. Meteor.*, **6**, 373–386.
- Fritschen, L. T., 1967: Net and solar radiation relations over irrigated field crops. *Agr. Meteor.*, **4**, 55–62.
- 池田 宏・一木明紀, 1977: 晴れ指数と全天、散乱、地面反射との関係. 研究時報, **29**, 117–125.
- 古藤田一雄, 1984: 草地の熱収支と蒸発散. 地理学評論, **57** (9), 611–627.
- 樫根 勇, 1980: 水文学. 大明堂, 272 P.
- Linacre, E. T., 1968: Estimating the net radiation flux. *Agr. Meteor.*, **5**, 49–63.
- Monteith, J. L. and Szeiz, G., 1961: The radiation balance of bare soil and vegetation. *Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc.*, **87**, 159–170.
- 中山敬一・羽生寿郎・今 久, 1983: 日射量による純放射量の推定. 農業気象, **38** (4), 415–418.
- 中川慎治, 1981: 牧草におけるアルベドの季節変化と日変化. ハイドロロジー, **11**, 7–11.