BSRNデータを用いた 下向き長波放射量推定式の検証

VERIFICATION OF DOWNWARD LONGWAVE RADIATION EQUATION USING BASELINE SURFACE RADIATION NETWORK (BSRN) DATA

松井宏之¹・大澤和敏¹

Hiroyuki MATSUI, Kazutoshi OSAWA

¹正会員 博（農） 宇都宮大学准教授 農学部農業環境工学科（〒321-8505 栃木県宇都宮市峰町350）

We verified the validity of the downward longwave radiation equation by Kondo et al.(1991) using the high-accurate BSRN radiation data observed at the five meteorological stations in Japan. The following facts were noted. 1)The original downward longwave radiation equation shows a root mean square error of 8.8 W/m² at the five BSRN stations and tends to underestimate all the year round at the Tateno station. 2)The downward longwave radiation equation with recalibrated parameters gives a root mean square error of 8.3 W/m². 3)Because the recalibration effect is limited, it is likely that parameters of the original longwave radiation equation are widely applicable except a winter season at Tateno station.

Key Words : Downward longwave radiation, BSRN, recalibration, energy balance analysis

1. はじめに

流域や広域における長期の水収支を検討するためには、入力となる降水量、出力となる地表や地下を通じた流出量、地表から大気への水移動である蒸発散量を把握する必要がある。降水量や流出量の観測と比べて、蒸発散量は観測が容易ではなく、正確に求めるには、蒸発散量が地表面熱収支の潜熱フラックスに相当することから、地表面での熱収支を考える必要がある。

地表面での熱収支を検討するためには、上向き短波放射量が下向き短波放射量の一定比と扱って差し支えないことから、下向き短波放射量および下向き長波放射量が必要となる。下向き短波放射量は観測地点が多く、日照率からも比較的精度よく推定できるのに対して、下向き長波放射量は高精度の観測が容易ではなく、何らかの推定式に頼らざるを得ない。

松井ら¹⁾は館野を対象として、既存のいくつかの下向き長波放射量推定式の再現性を比較し、近藤らの式²⁾が最適であったことを示している。近藤ら²⁾が提案した下向き長波放射量推定式は、首都圏でのヒートアイランドに関する研究³⁾、チベットでの積雪・融雪に関する研究⁴⁾、

熊本県阿蘇山周辺流域⁵⁾、八代平野でのイグサ水田⁶⁾での蒸発散量の推定、秋田県での表層雪崩の研究⁷⁾など、国内外で広く活用されている。

下向き長波放射量は気温や温室効果ガスに影響され、館野では放射量の変化に対して両者が同程度の寄与であったことが指摘されている⁸⁾。幅広く活用されている近藤らの式²⁾は主として1980年代の仙台、秋田での観測に基づき同定されているが、気温や温室効果ガス濃度の上昇が認められる現在においてその再現性について改めて検討した事例はない。この理由としては、高精度の長波放射量の観測体制が整備されていなかったことが挙げられるが、2010年にこれまでの館野に加えて、札幌、福岡、南鳥島、石垣島の5観測所がWMOのBaseline Surface Radiation Network (BSRN)に登録され、高精度の長波放射量の観測記録が公開されている。

そこで、本研究では、近藤ら²⁾の下向き長波放射量推定式を対象として、BSRNに登録されている国内5観測所での観測結果（BSRNデータ）に対する推定式の精度について検討するとともに、推定式に含まれる係数の再同定を通じて、近藤ら²⁾の下向き長波放射量推定式の妥当性について検証した。

2. BSRN観測所における検証方法

(1) 既存式の概要

近藤ら²⁾により提案された下向き長波放射量推定式(式(1))は、快晴日の下向き長波放射量の推定値に雲に起因する下向き長波放射量を考慮した式である。

$$L_d = \sigma \cdot T_a^4 \cdot \varepsilon_a = \sigma \cdot T_a^4 (1 - (1 - D) \cdot C) \quad (1)$$

$$D = \frac{L_{df}}{\sigma T_a^4} = 0.74 + 0.19x + 0.07x^2 \quad (2)$$

$$x = \log_{10} \omega_{top} = 0.0315 T_d - 0.1836 \quad (3)$$

$$C = \begin{cases} 0.826h^3 - 1.234h^2 + 1.135h + 0.298 & (0 < h \leq 1) \\ 0.2235 & (h = 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 L_d ：下向き長波放射量 ($W m^{-2}$)， σ ：Stefan-Boltzmann定数 ($W m^{-2} K^{-4}$)， T_a ：平均気温 (K)， D ：快晴時の大気の射出率を表す係数 (－)， L_{df} ：下向き長波放射量 ($W m^{-2}$)， ω_{top} ：有効水蒸気量の全量 (cm)， C ：雲の効果を現す係数 (－)， h ：日照率 (－)。

快晴日の下向き長波放射量は、快晴日のラジオゾンデデータを用いて算出した値を観測値とし、その推定式としては、Stefan-Boltzmann定数に気温の4乗および係数 D (式(2))を乗じた式となっている。

(2) 検証地点および検証データ

日本に5つあるBSRN観測所のうち、雲量の観測記録を入手できる福岡、石垣島、札幌、館野の4つの観測所では快晴日の下向き長波放射量推定式(式(2))を、これら4つの観測所に南鳥島を加えた計5つの観測所には曇天日も含めた全条件での下向き長波放射量推定式(式(1))を適用し、それぞれの長波放射量を推定した。

検証データには、BSRNのwebサイトで公開されている1分ごとの短波放射量、長波放射量、各種気象データを日単位のデータに集計したものをを用いた。この際、データ数を確保するため、連続しない1分の欠測がある場合は、前後1分のデータを平均して補完した。快晴日の判断について、福岡、石垣島、札幌では1日7回の雲量観測が実施されており、雲量の平均が1.5未満の日を快晴日とした。館野については、雲量の観測が1日2回であることから、館野より50km程度離れた位置にあり1日7回の雲量の観測を行っている東京と水戸の雲量の平均値および館野での2回の平均値が1.5未満である日を快晴日とした。検証期間は、福岡、石垣島、札幌については快晴日および全条件の推定式ともに2010/4/1より2013/3/31までの3年間、館野については、快晴日の推定式は館野での雲量の観測記録を入手できる2010/4/1より2012/3/31/

の2年間、全条件の推定式は2010/4/1より2013/3/31までの3年間、南鳥島については全条件の推定式のみで2010/4/1より2013/3/31までの3年間とした。

(3) 評価関数

推定式による推定結果の検証には、二乗平均平方根誤差RMSE (Root Mean Square Error, 式(5)) およびバイアス誤差BE (Bias Error, 式(6)) を用いた。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Est_i - Obs_i)^2} \quad (5)$$

$$BE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Est_i - Obs_i) \quad (6)$$

ここで、 Obs_i ：観測値 ($W m^{-2}$)， Est_i ：推定値 ($W m^{-2}$)， i ：通し番号， N ：データ数。

3. 既存式による推定結果と考察

(1) 快晴日の下向き長波放射量

福岡、石垣島、札幌、館野の4観測所における快晴時の下向き長波放射量の推定結果を図-1に示す。各地点でのRMSE ($W m^{-2}$) は、福岡で7.2、石垣島で27.5、札幌で9.0、館野で11.0となり、同じくBE ($W m^{-2}$) は福岡で-3.6、石垣島で+27.6、札幌で-3.2、館野で-9.2となった。石垣島で過大推定、館野で過小推定する傾向があることがわかる。RMSEの観測所間の平均は13.6、同じくBEの絶対値の平均は10.9となる。

(2) 全条件での下向き長波放射量

福岡、石垣島、南鳥島、札幌、館野の5観測所におけ

図-1 快晴時の下向き長波放射量

図-2 下向き長波放射量

図-3 既存式による月別RMSE, BE

図-4 係数Dと有効水蒸気量の全量 ω_{top} の関係

る曇天日も含めた全条件での下向き長波放射量の推定結果を図-2に示す。各地点でのRMSE (W m^{-2}) は、福岡で8.3、石垣島で6.8、南鳥島で6.3、札幌で10.2、館野で10.1となり、同じくBE (W m^{-2}) は、福岡で+1.2、石垣島で+1.6、南鳥島で+1.1、札幌で-2.5、館野で-5.8となった。快晴時の下向き長波放射量の推定を行っていない南鳥島を除き、RMSEおよびBEの絶対値の観測所間の平均を求めると、それぞれ8.8、2.8となる。近藤⁹⁾は、日本の夏、冬の積雪地、熱帯海洋上での観測結果に基づき、式(1)による推定値の推定誤差が 10 W m^{-2} 程度であると述べており、上記の推定結果と合致している。快晴日の下向き長波放射量の推定値のRMSEと比較すると、データ数が大きく異なるものの、石垣島では大きく改善されていることがわかる。

全条件での下向き長波放射量の観測値と推定値を月ごとに整理し、地点毎に月別のRMSE、BEを求めた結果を図-3に示す。RMSEに注目し、月別RMSEの標準偏差を求めると、福岡で2.5、石垣島で0.3、南鳥島で0.8、札幌で4.5、館野で5.4となっており、石垣島、南鳥島で月別RMSEの変動幅が小さく、札幌および館野で月別RMSEの変動幅が大きいことがわかる。次に、BEに注目すると、いずれの観測所においても、冬季から夏季(秋季)にかけてBEが大きくなり、夏季(秋季)から冬季にかけてBEが小さくなる傾向があることがわかる。館野では一年を通して、BEが負であることから、下向き長波放射量を過小推定する傾向があり、福岡、石垣島、南鳥島では3月あるいは4月から11月にかけて過大する推定する傾向、札幌では8~10月を除いて過小推定する傾向がある。

4. 係数の再同定

式(1)に含まれる係数のうち、本研究では式(2)および式(4)に含まれる係数を対象として、観測所共通の係数を導出することを主たる目的として係数の再同定を行った。

(1) 快晴日の下向き長波放射量推定式に関わる係数

a) 再同定の方法

快晴日の下向き長波放射量推定式に関わる係数は、係数Dと有効水蒸気量の全量 ω_{top} の1次回帰式の係数である。ここで、快晴日と判断された日が多い福岡(計67日)および館野(計42日)を対象として、係数Dと有効水蒸気量の全量 ω_{top} の関係を便宜的に2ヶ月毎に整理した結果を図-4に示す。いずれの観測点においても、冬季から夏季にかけてD、 ω_{top} ともに増加し、その後冬季にかけてともに減少する傾向が認められる。ここで、図-4に記した2ヶ月毎の有効データ数は、福岡では1・2月に6、3・4月に25、5・6月に8、7・8月に9、9・10月に16、11・12月に6と推移し、館野では1・2月が12、順に8、6、1、2、

14と推移している．福岡では3・4月および9・10月に快晴日が多く，館野では冬季に当たる1・2月および11・12月に快晴が多くなっている．福岡，館野ともに快晴日に季節的な偏在があり，再同定に際し，対象となるデータを一律に扱うとデータの季節的な偏在が係数に影響を与える可能性がある．対象4観測所における2ヶ月毎の有効データ数を整理すると，1・2月が25，順に39，22，8，30，25となり，7・8月のデータ数が極端に少なくなっている．また，対象4観測所の有効データ数を整理すると，福岡で67，石垣島で12，札幌で27，館野で43となり，石垣島の快晴日が少なさが顕著である．そこで，本研究では，非線形最小自乗法を用いて，全有効データに対してRMSEを最小化するように観測所共通の係数を同定する手法（手法Ⅰ），②観測所間の有効データ数の多寡，季節的な偏在を考慮するためRMSE_{ind}（式(7)）を最小化するように観測所共通の係数を同定する手法（手法Ⅱ）の2つの手法を採用した．

$$RMSE_{ind} = \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} \frac{1}{N_{j,mo}} \sum_{k=1}^{12} \sqrt{\frac{1}{N_{j,k,n'}} \sum_{l=1}^{N_{j,k,n'}} err_{j,k,l}^2} \quad (7)$$

$$err_{j,k,l} = Est_{j,k,l} - Obs_{j,k,l} \quad (8)$$

ここで， N_w ：観測所の数（-）， $N_{j,mo}$ ：観測所 j において有効データのある月数（-）， $N_{j,k,n'}$ ：観測所 j における k 月の有効データ数（-）．

b) 再同定結果および考察

図-5 再同定した係数(式(10))を用いたときの快晴日の下向き長波放射量

図-6 係数Dの比較

手法Ⅰおよび手法Ⅱにより同定した係数をそれぞれ式(9)，式(10)に，例として式(10)を用いたときの全有効データに対する推定結果を図-5に示す．

$$D_1 = 0.755 + 0.159x + 0.085x^2 \quad (9)$$

$$D_2 = 0.759 + 0.162x + 0.059x^2 \quad (10)$$

式(9)による下向き長波放射量推定値のRMSE ($W m^{-2}$) は，福岡で7.5，石垣島で3.7，札幌で4.9，館野で4.7となり，4観測所の平均で5.2，同じく式(10)を用いたときのRMSE ($W m^{-2}$) は，福岡で7.7，石垣島で4.2，札幌で4.9，館野で4.3となり，4観測所の平均で5.3となった．式(9)，式(10)ともに，石垣島，札幌，館野では式(2)による推定結果（図-1）よりRMSEが小さくなり，推定結果が改善される一方，福岡ではRMSEが大きくなり，改善には至らなかった．

ここで，各観測所の有効データのみを用いて観測所毎に係数の再同定を行うと，RMSE ($W m^{-2}$) は福岡で5.3，石垣島で3.1，札幌で4.3，館野で3.7となり，平均で4.1となる．上述した結果とこの結果を比較すると，他の観測所の有効データを利用することにより，石垣島，札幌，館野では $1.0 W m^{-2}$ 前後のRMSEの低下に留まるのに対し，福岡では $2.0 W m^{-2}$ 超の低下となる．この理由としては，福岡では有効データが多く，他の観測所と比較して，他の観測所での有効データの利用が効果的でないことを示している．

次に，対象4地点における有効水蒸気量の全量 ω_{top} の値域における式(2)，式(9)および式(10)を用いたときの係数 D と有効水蒸気量の全量 ω_{top} の関係を図-6に示す．まず，有効水蒸気量の全量 ω_{top} が3cm未満となるあたりから，本研究で求めた式(9)および式(10)の算出値が式(2)の算出値より大きくなり， ω_{top} が小さくなるに連れて乖離していることがわかる．

図-6から，再同定により求めた式(9)と式(10)の差は有効水蒸気量の全量 ω_{top} が0.3未満のときに認めることができる． ω_{top} は，石垣島での下限が0.89 cm，福岡が0.30 cm，館野が0.26 cm，札幌が0.19 cm前後であることから，石垣島や福岡では式(9)，式(10)の差違は少ない一方，館野や札幌では有効水蒸気量の全量 ω_{top} が低下する冬季に係数の差違が推定結果に影響する可能性がある．

(2) 全条件での下向き長波放射量推定式に関わる係数

a) 再同定の方法

快晴日の下向き長波放射量の算出に式(9)あるいは式(10)を用い，RMSEを最小化するように，式(4)の係数の再同定を行った．その際，図-2が示すように，観測所間の有効データ数に大差はないことから，式(5)に示す一般的なRMSEを評価関数として用いた．BSRN観測所の1つである南鳥島については，雲量の観測記録がなく快晴日の下向き長波放射量の推定ができないことから，再同

定した全条件での係数の検証データとして扱った。

b) 再同定結果および考察

係数 C の再同定に際して、式(4)と同様に、日照率 h が0のときの値を定数扱いするものとし、日照率 h が0でないときに係数 C を日照率 h の3次関数とするケースA、日照率 h の2次関数とするケースB、日照率 h の1次関数とするケースCの計3つのパターンについて検討した。全有効データ ($N=4251$) の観測記録に対して、快晴日の推定式の係数に D_1 を用いたときのRMSE (W m^{-2}) はケースAで8.42、ケースBで8.45、ケースCで8.61となり、同じく D_2 を用いたときのRMSEはケースAで8.38、ケースBで8.42、ケースCで8.43となった。式(6)を評価関数として

同定した D_2 を用いたとき、ケースAとケースCのRMSEの差は 0.05 W m^{-2} と大きくないことから、本研究では係数 C を求める関数を日照率 h の3次関数ではなく、1次関数 (式(11)) とすることにした。

$$C = \begin{cases} E \times h + F & (h > 0) \\ G & (h = 0) \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 E , F , G : 係数。

快晴日の下向き長波放射量の推定式に D_1 を用いたときの係数 C の式を式(12)、同じく D_2 を用いたときの係数 C の式を式(13)に、例として式(13)を用いたときの推定結果を図-7に示す。

$$C_1 = \begin{cases} 0.654h + 0.348 & (h > 0) \\ 0.240 & (h = 0) \end{cases} \quad (12)$$

$$C_2 = \begin{cases} 0.655h + 0.351 & (h > 0) \\ 0.243 & (h = 0) \end{cases} \quad (13)$$

D_1 および C_1 を用いたときの観測所毎のRMSE (W m^{-2}) は、福岡で8.5、石垣島で6.7、札幌で9.7、館野で8.6となり、4観測所の平均では8.4となった。 D_2 および C_2 を用いたときの観測所毎のRMSE (W m^{-2}) は、福岡で8.6、石垣島で6.5、札幌で9.7、館野で8.6となり、4観測所の平均では8.3となった。南鳥島については、 D_1 および C_1 を用いたときのRMSEが6.2、同じく D_2 および C_2 を用いたときのRMSEが6.1となった。両者を比較すると、差はわずかではあるが、 D_2 および C_2 を用いたときにより推定結果を示している。この結果と3. (2)で示した近藤の式を用いたときのRMSE (W m^{-2}) を比較すると、福岡で0.3の再現性の低下、石垣島で0.3の向上、札幌で0.5の向上、館野で1.6の向上、南鳥島で0.2の向上となっており、なかでも館野で推定精度が向上していることがわかる。各観測所でのBE (W m^{-2}) は、福岡で+2.6、石垣島で+0.9、南鳥島で+0.7、札幌で-0.3、館野で-3.6となる。近藤の式とBE (W m^{-2}) を比較すると、福岡では-1.4低下しているものの、石垣島+0.6、札幌で+2.2、館野で+2.2向上している。

地点毎に月別のRMSE, BEを求めた結果を図-8に示す。福岡では、3, 4, 5月にRMSE, BEともに大きくなり、この時期の再現性の低下が式(13)のRMSEやBEの低下を招いている。石垣島では、6, 7, 8月にRMSE, BEともに再現性が向上していることがわかる。札幌では1, 2月にRMSEが小さくなり、1年を通じて概ねBEが改善されている。館野では1, 2, 3月および11, 12月にRMSE, BEともに改善していることがわかる。しかしながら、再同定後も福岡では過大推定、館野では過小推定する傾向がある。

c) 推定結果向上の可能性

福岡や館野での過小推定、過大推定は 3 W m^{-2} 前後であり、下向き長波放射量全体からすればその影響は軽微

図-7 再同定した係数(式(10), 式(13))を用いた下向き長波放射量

図-8 再同定した係数(式(10), 式(13))を用いたときの月別RMSE, BE

図-9 日照率別の下向き長波放射量の誤差

である。しかしながら、推定式の評価や利用に際して、過小（過大）推定の傾向は好ましくない。そこで、観測所間で可能な限り共通した値を用いつつ、過小（過大）推定を改善することが可能かどうかについて検討した。具体的には、係数 D には式(10)を適用した上で、式(11)に含まれる係数を福岡、館野それぞれで同定したときの推定値を目標値として、式(12)の係数の値を可能な限り適用する方法について検討した。ここで、観測所ごとに式(11)の係数を同定したところ、福岡でのRMSEは8.6、BEは-0.2、館野でのRMSEは7.8、BEは-0.2であった。検討した結果、式(11)中の係数 F を観測所ごとに定めることができれば、福岡（係数 $F=0.385$ ）でのRMSEが8.6、BEは+0.2、館野（同0.313）でのRMSEは8.0、BEは-0.8となり、RMSE、BEともに改善できることがわかった。図-9に、日照率 h を0.1間隔で区分したときの各区分での二乗誤差の合計値を示す。福岡、館野ともに、日照率が0である日を除けば、係数 F のみを同定したケースと観測所ごとに係数を同定したケースで誤差がほぼ一致していることがわかる。

以上のことから、係数 E 、 G は式(13)の値を適用しつつ、係数 F を推定できれば、推定結果の改善が可能であることがわかった。係数 F の推定については今後検討したい。

5. おわりに

本研究では、精度の高い長波放射量の観測が行われている国内のBSRN観測所での観測結果を用いて、広く使用されている近藤ら²⁾の下向き長波放射量推定式の妥当性について検証した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 近藤らの式は、いずれの地点においても下向き長波放射量を 10 W m^{-2} 程度の誤差で推定が可能である。ただし、館野では1年を通して過小推定があり、札幌では8～10月を除いて過小推定する傾向があることがわかった。

- (2) 再同定した係数を用いることで、RMSEを 0.5 W m^{-2} 改善することができる。
- (3) 日本のBSRN観測所における下向き長波放射量の最小値が1月の札幌で 190 W m^{-2} 弱であることから、館野の冬季を除き、係数の再同定による推定精度の向上は限定的であり、近藤の式の係数は一定の汎用性を有しているとみなすことができる。

謝辞：本研究は科学研究費補助金挑戦的萌芽研究（課題番号：24658198）の成果の一部である。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松井宏之，大澤和敏：地表面温度推定値を用いた関東地方における有効長波放射量推定式の比較，応用水文，25，pp.15-24，2013。
- 2) 近藤純正，中村 亘，山崎 剛：日射量および下向き長波放射量の推定，天気，Vol.38 No.11，pp.41-48，1991。
- 3) Kusaka, H., Kimura, F., Hirakuchi, H., and Mizutori M.: The Effects of Land-Use Alteration on the Sea Breeze and Daytime Heat Island in the Tokyo Metropolitan Area, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.78 No.4, pp.405-420, 2000。
- 4) Takayabu, I., Takata, K., Yamazaki T., Ueno, K., Yabuki, and H., Haginoya S.: Comparison of the Four Land Surface Models Driven by a Common Forcing Data Prepared from GAME/Tibet POP'97 Products -Snow Accumulation and Soil Freezing Processes-, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol.79 No. 1B, pp.535-554, 2001。
- 5) 松山 洋，泉 岳樹：水文・気象・衛星データを用いた阿蘇山周辺の流域水収支の再検討，水文・水資源学会誌，Vol.15 No.4，pp.413-427，2002。
- 6) MARUYAMA, A., OHBA, K., KUROSE, Y., MIYAMOTO, T.: Seasonal Variation in Evapotranspiration from Mat Rush Grown in Paddy Field, Journal of Agricultural Meteorology, Vol.60 No.1, pp.1-15, 2004。
- 7) 佐藤 威，平島寛行，根本征樹，望月重人，阿部 修，LEHNING Michael, 佐藤篤司，花岡正明，秋山一弥，村上茂樹，大丸裕武：秋田県乳頭温泉鶴の湯で発生した乾雪表層雪崩について，雪氷，Vol.69 No.4，pp.445-456，2007。
- 8) 大河原望，高野松美：館野における下向き長波放射の長期変化の特徴と気温や温室効果ガスの寄与について，高層気象台彙報，69，pp.1-8，2011。
- 9) 近藤純正：水環境の気象学 ―地表面の水収支・熱収支―，朝倉書店，1994。

(2013. 9. 30受付)