

## 日単位の有効長波放射推定式の係数とアルベドの分析 Analysis of Coefficients for Net Long Wave Radiation Formula and Albedo

藤井三志郎・伊藤浩三・丸山利輔

石川県立大学 (〒921-8836 石川県野々市市末松 1-308)

FUJII Sanshiro, ITO Kouzo, MARUYAMA Toshisuke

\*Ishikawa Prefectural University (1-308 Suematsu, Nonoichi-shi, Ishikawa, 921-8836)

(Received 4 December 2020)

### Abstract

For a region with no direct measurements of net radiation, net longwave radiation is estimated using air temperature, relative humidity, sunshine duration by FAO's or Penman's formula, and net shortwave radiation is estimated using solar radiation and albedo. However, the coefficients of these formulas were determined by foreign meteorological data, not the Japanese ones. This paper describes that the coefficients are determined on daily data based on the three national research institutes in Japan. The coefficients are determined by optimization procedure from measured longwave radiation at the three sites as possible as reproducing the longwave radiation by the formula. As a result, the coefficients have a difference in region by region; therefore, the coefficients should be determined principally for an individual region. By limiting the period to the crop growing season (April to October) that has a snowfall region, the estimation accuracy of the formula was remarkably improved. In the analysis of albedo based on the above materials, the effect of the hourly changes of the albedo on shortwave radiation shows about 0.20 during the crop growing season, excluding the snow season.

**Key words:** heat balance, sunlight ratio, optimization, net long wave radiation formula, hourly change of albedo

### 要 旨

これまで純放射が測定されていない場合は気温・相対湿度・日照時間から有効長波放射を、日射・アルベドから有効短波放射を求めていた。しかし、有効長波放射推定式の係数は、外国の資料に基づき決定されたもので、我が国の資料によったものではなかった。本研究は、国立研究機関 3 試験地の時間単位の気象資料に基づき、日単位で推定式の係数を決定し、実用に供し易い形式でまとめた。係数は、これまでの推定式の型を基本とし、実測値を再現するよう最適同定した。この結果、係数には地域性があり、地域毎に決定することが原則であること、積雪の影響が考えられる地域では作物生育期（4 月～10 月）に限定することにより、係数の推定精度が向上することを示した。また、アルベドの時間変化の影響は小さく、月別では積雪期を除くと約 0.20 であることを示した。

**キーワード:** 熱収支, 日照率, 最適同定, 有効長波放射推定式, アルベドの時間変化

### 1. はじめに

地上での熱収支の研究を行うためには、純放射が必要となる場合が多い。純放射は、短波放射の上向きと下向き、長波放射の上向きと下向きから構成される。しかし、一般の気象観測では日射（下向き短波放射）と日照時間を観測している場合が多く、純放射は短波放射と長波放射の推定により求める場合がある。前者は日射とアルベドによって求められ、後者は、後述する FAO やペンマンが提唱した推定式によって求められている。しかし、これらの式に使われている係数は、外国の気象資料によって求められたものでわが国の資料によって求められたものではない。したがって、本研究は、わが国の気象資料に基づいて有効長波放射推定のための実用式に使用されている係数の提案と長期資料によるアルベドの分析を目的として行うものである。

本研究に関連する研究の現状は次の通りである。長波放射に関する研究には、地球温暖化に伴う積雪融雪と関連した研究、建築物の冷暖房に関連した研究が極めて多く、本研究のように森林や農地の熱収

支に関連して行われた研究は多くない．特に，本研究のように，純放射を推定する目的で長波放射を研究した事例は限られている．

近藤ら（1991）は日射量と下向き大気放射量の推定について研究し，快晴日の値を気温と有効水蒸気量から推定する式と雲の効果を表す式を提案している．松井（2010）は本研究に関連して，重要な研究を展開している．まず，ペンマンが提唱した式と FAO の式を取り上げ，館野の資料を用いて有効長波放射を推定し，ペンマン型の推定式が良いことを明らかにしている．しかし，この式に使用されている係数は，地域によって異なり，外国で決定された係数が我が国に適用可能とは限らないとしている．続いて松井・勝元（2013）は，ペンマン式で用いられる有効長波放射量推定式の係数について，世界 18 ケ国の資料を用いその適合度を評価している．さらに，松井・大澤（2013）は WMO の BSRN 資料を用い，下向き長波放射量の検証を行い，近藤らの研究と対比して考察している．

アルベドに関する研究は，長波放射の場合と同様，積雪面や建築物の反射特性に関する研究が圧倒的に多く，農地や森林に関する研究は限られている．

手計ら（2010）は保水性人工芝システムの環境特性に関する基礎的研究の中で，室内実験により，人工芝のアルベドとこれまで研究されてきた各種の土地利用に対するアルベドを比較している．Gu et al.（2001）は鳥取砂丘における地表面のアルベドの日変化を実測し，アルベドに関する要因の分析を行っている．Baten and Kon（1997）は作条作物の畝の方向とアルベドとの関係について研究し，アルベドの日変化について研究を展開している．しかし，本研究に直接活用できる時間単位のアベドの研究はなされていない．

以上の先行事例から明らかなように，本研究の目的に合致した研究はこれまで行われていない．

本研究の目的，すなわち，有効長波放射推定式の係数決定には，長期の精度の高い気温，日射，日照時間及び長波放射の実測値が必要である．近年，この問題を検討するに十分な気象資料が農研機構・農業研究センター，同・農村工学研究部門を中心に整備されつつあり，この研究が行える時期が到来したと考える．

## 2. 研究方法

### 2.1 有効放射の推定式

純放射は，日射（下向き短波放射）と長波放射によって次のように表せる．

$$R_n = S_D - S_U + L_D - L_U = S_D(1 - \alpha) - L_n \quad (1)$$

ここに， $R_n$  は純放射， $S_D$  は下向き短波放射（全天日射量）， $S_U$  は上向き短波放射， $L_D$  は下向き長波放射， $L_U$  は上向き長波放射， $\alpha$  はアルベド， $L_n$  は有効長波放射．

ペンマンや FAO は有効長波放射を次のような形式で推定することを提唱している（Doorenbos and Pruitt, 1977 ; Allen et al., 1998 ; Penman, 1948）．

$$L_n = \sigma \left\{ \frac{T_{k,max}^4 + T_{k,min}^4}{2} \right\} (a_1 - a_2 \sqrt{e_a}) \left\{ a_3 \frac{n}{N} + a_4 \right\} \quad (2)$$

ここに， $L_n$ ：有効長波放射（ $L_n = L_U - L_D$ ）， $\sigma$ ：ステファン・ボルツマン定数， $T_{k,max}$ ：日最高気温， $T_{k,min}$ ：日最低気温， $e_a$ ：蒸気圧， $n$ ：日照時間， $N$ ：日照時間．

本研究は、この形式を採用し、この式の中の係数 ( $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ) をわが国で実測されている気象資料によって定めることを目的とする。

## 2.2 気象資料

本研究を行うには、日射、上向き短波放射および上向き・下向きの長波放射の測定値が必要である。これにより純放射とアルベドが求められる。この条件を満足する気象資料は、前述のように、北海道農業研究センター（札幌）、東北農業研究センター（盛岡）、農村工学研究部門（つくば）において長期に渡り測定されており、この資料を使用した。

これらの研究機関の所在地、標高、観測露場の広さ、風速計の高さなどの諸元および資料の分析期間を **Table 1** に、観測項目、観測機器の種類、形式などを **Table 2** に示した。なお、使用した資料は、時間単位の資料をまとめて日単位資料とした。また、資料の具体的な取り扱い方は以下の通りである。

**Table 1** 観測機関の所在地、諸元、分析期間  
Location, specification of observation sites and analysis period

項目	札幌	盛岡	つくば
緯度	43.04"	39.49'10"	36.01'
経度	141.247"	141.08'18"	140.05'
標高m	70m	175.5m	26m
観測露場	20×30m(芝)	— (芝)	43×56(芝)
風測計高	10m	6.5m	10.0m
分析期間	2001～2009	2009～2018	2011～2019

**Table 2** 各試験地の観測項目および観測機器

Observation items, devices specification and name of company for the three test sites

計測項目	札幌	盛岡	つくば
気温 (温度計)	白金測温抵抗体 横河電子機器社製 E7061	白金測温抵抗体 クリマテック社製 C-HPT-10-JM	白金測温抵抗体 クリマテック社製 C-HPT
湿度 (温湿度センサ)	静電容量式薄膜センサ 横河電子機器社製 E7062	静電容量式 クリマテック社製 CVS-HMT-333-JM	温湿度センサ Vaisala社製 HMP-155D
気圧 (気圧計)	シリコン振動子式 横河電子機器社製 F4711-10-10	シリコン静電容量式 クリマテック社製 CVS-PTB220-JM	シリコン製静電容量式 Vaisala社製 PTB210
日照時間 (日照計)	太陽電池式 横河電子機器社製 H0621-10	回転式 クリマテック社製 CEK-MS-093F	太陽電池式 石川産業社製 S-162
日射 (日射計)	熱電堆式 横河電子機器社製 H2122-00	熱電堆式 クリマテック社製 CPR-CMP11F-JM	熱電堆式 Kipp and Zonen社製 CMP21
長短波放射 (日射計・赤外放射計)	熱電堆式 英弘精機 MR-40	熱電堆式 クリマテック社製 CHF-RA01	熱電堆式 kipp and Zonen社製 CGR4

### 2.2.1 有効長波放射分析に対する資料

- ① 蒸気圧は、札幌では実測値がなく、気温から飽和水蒸気圧を求め、相対湿度を乗じて求めた。盛岡とつくばは実測値を使用した。
- ② 最高・最低気温は札幌と盛岡は実測値を使用した。つくばでは記載がなく、平均気温で代用した。
- ③ 気温、相対湿度または水蒸気圧、日照時間、長波放射、短波放射のいずれかが欠測となっている場

合，その時間単位で分析から除外した。

- ④ 観測機器等の不具合と思われる実測値を検出するため，全資料の標準偏差を算定し，標準偏差の 5 倍以上となる実測値を異常値とし，その資料を時間単位で分析から除外した。
- ⑤ 長期間欠測のある盛岡 2012 及び 2016 年の資料，つくば 2016 年及び 2018 年の資料を除外した。

## 2.2.2 アルベドの分析に対する資料

- ① アルベド 1.0 以上のものを異常値として削除した。
- ② 日射ゼロの時に記録されている上向き短波放射をゼロとした。
- ③ 季節別・地域別変化を消去するため，時間ごとの日射（下向き短波）と反射（上向き短波）の比（アルベド）を求め，その平均値で除してアルベドを基準化した。
- ④ この資料のゼロを除く平均値と標準偏差を算定し，標準偏差の 3 倍以上を異常値と定義し分析から除外した。

## 2.3 有効長波放射推定式係数の最適決定方法

有効長波放射の推定式 (2) 式には実験的に定める 4 係数 ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ) がある。これを最適化手法により決定した。最適化計算には EXCEL SOLVER (GRG : General Reduced Gradient) を用いた。目的関数は，(3) 式に示すように，実測値と推定値の差の絶対値の和が最小になるようにした。また，拘束条件は日照時間と非日照時間の和は一定という条件から (4) 式とした。

$$\text{目的関数} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |L_{n,obs} - L_{n,est}| \quad (3)$$

$$\text{拘束条件} \quad a_3 + a_4 = 1.0 \quad (4)$$

ここに， $L_{n,obs}$ ：有効長波放射の実測値， $L_{n,est}$ ：有効長波放射の推定値， $N$ ：資料数， $a_3, a_4$ ：(2) 式に示す係数。

上記の方針に従い，FAO の式の係数  $a_1=0.34, a_2=0.14, a_3=0.9, a_4=0.1$  を初期値として 4 係数 ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ) を最適同定した。

## 3. 分析結果

### 3.1 有効長波放射推定式係数の分析

通常，長波放射が問題になるのは，日単位の資料で決定した係数の場合が多い。FAO の分析も日単位の分析である。

まず，日単位の分析を行うにあたって，係数を決める期間を定めなければならない。ここでは資料をできるだけ長く一括して求める場合（連続），通年（1 月～12 月），作物生育期（4 月～10 月）の 3 期間について検討した。作物生育期を設定した理由は，主として蒸発散が問題となるのは夏季であり，冬季は積雪の影響を考慮する必要があるためである。

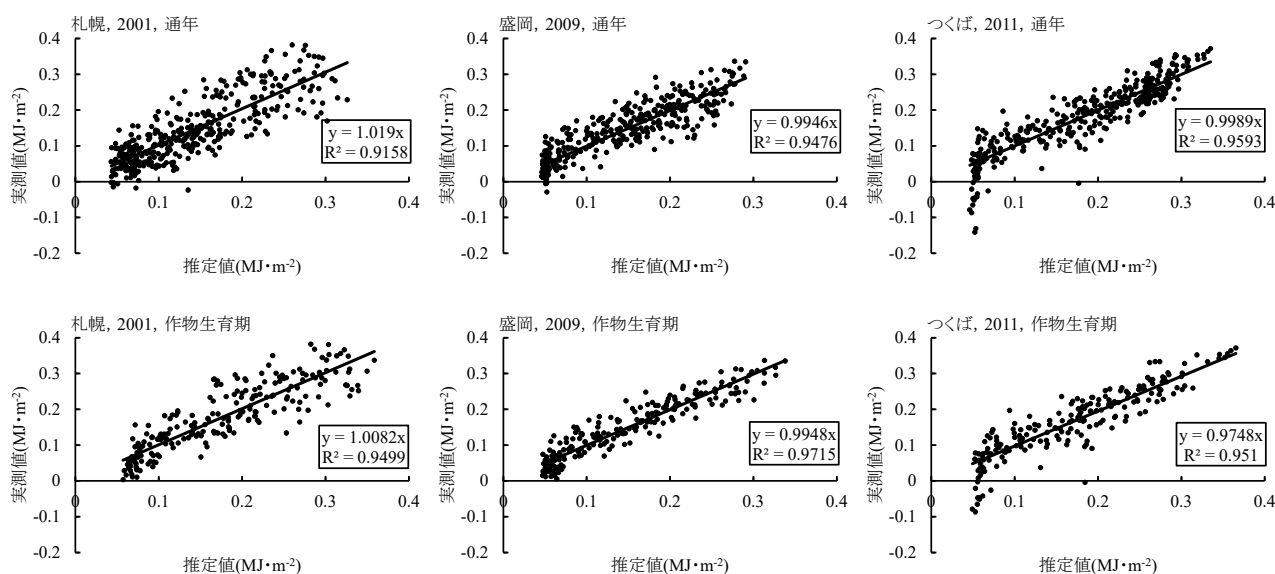
「連続」の場合は年次を超えて連続な資料を作成し、前述の 4 係数を一括して求めた。したがってこの係数は、いわば母集団の性質を表現していると理解できる。「連続」の場合の係数を **Table 3** の連続のレコードに示した。また、通年、作物生育期間の 4 係数は気象資料を年別に分割して決定した。その場合の年平均と標準偏差を同じく **Table 3** に示した。

**Table 3** 通年と作物生育期における日単位の有効長波放射推定式 (2) 式の最適係数  
Optimum coefficients of the formula eq. (2) for net long wave radiation during all year and crop growing season in daily base

試験地	項目	通年				作物生育期			
		a1	a2	a3	a4	a1	a2	a3	a4
札幌	連続	0.19	-0.02	0.79	0.21	0.36	0.12	0.75	0.25
	平均値	0.19	-0.02	0.79	0.21	0.36	0.12	0.76	0.24
	標準偏差	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
盛岡	連続	0.29	0.09	0.80	0.20	0.38	0.15	0.77	0.23
	平均値	0.29	0.08	0.80	0.20	0.38	0.15	0.77	0.23
	標準偏差	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
つくば	連続	0.36	0.12	0.78	0.22	0.42	0.16	0.76	0.24
	平均値	0.36	0.11	0.81	0.19	0.42	0.15	0.80	0.20
	標準偏差	0.03	0.06	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.02
FAO		0.34	0.14	0.90	0.10				
	Penman	0.56	0.25	0.90	0.10				

この結果から、通年で決定した 4 係数の平均は「連続」で一括して決定した値と殆ど差が見られなかった。しかし、通年と作物生育期との差は明確で、目的により使い分ける必要性が明らかとなった。また、係数は、場所が一定であれば年度による変化は小さいが、場所が異なると係数は大きく変わることが示された。

次に、通年と作物生育期の違いを具体的に示すために、各試験地の初年度の推定値と実測値の関係を **Fig. 1** に示した。上図は通年の値であり、下図は、作物生育期間の値である。札幌と盛岡では、期間を通年から作物生育期に限定することにより決定係数が大きくなり、推定精度が向上した。



**Fig. 1** 日単位における有効長波放射の実測値と推定値の通年及び作物生育期の比較  
Comparison of estimated and observed of net long wave radiation for year and crop growing season in daily base

また、その場合の実測値と推定値の勾配と決定係数 ( $R^2$ ) を **Table 4** に示した。推定値と実測値の勾配は約 1.0 を示し、決定係数も 0.9 以上と大きい。したがって、決定した係数は適切であることが分かる。この表から **Table 3** に示した係数を用いれば **Table 4** に示すように高い精度で長波放射の推定が可能であることが分かる。

**Table 4** 有効長波放射実測値と推定値に対する勾配と決定係数の比較  
Comparison of estimated and observed for net long wave radiation of slope and  $R^2$  for all year and crop growing season

試験地	項目	日単位			
		通年		作物生育期	
		勾配	$R^2$	勾配	$R^2$
札幌	連続	1.011	0.928	1.007	0.963
	平均値	1.006	0.933	0.993	0.961
	標準偏差	0.007	0.007	0.016	0.019
盛岡	連続	0.999	0.946	1.003	0.969
	平均値	0.999	0.946	1.000	0.969
	標準偏差	0.010	0.011	0.006	0.015
つくば	連続	1.010	0.923	1.006	0.913
	平均値	1.001	0.936	0.990	0.933
	標準偏差	0.007	0.028	0.009	0.031

**Table 5** 試験地における年間のアルベドの実測結果  
Observation results of albedo in year for 3 test sites

地域	下向き短波(Sd) $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$		上向き短波(Su) $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{year}^{-1}$		アルベド	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
札幌	4215	319	1390	139	0.42	0.04
盛岡	4653	157	1343	99	0.34	0.02
つくば	4865	267	984	65	0.21	0.01

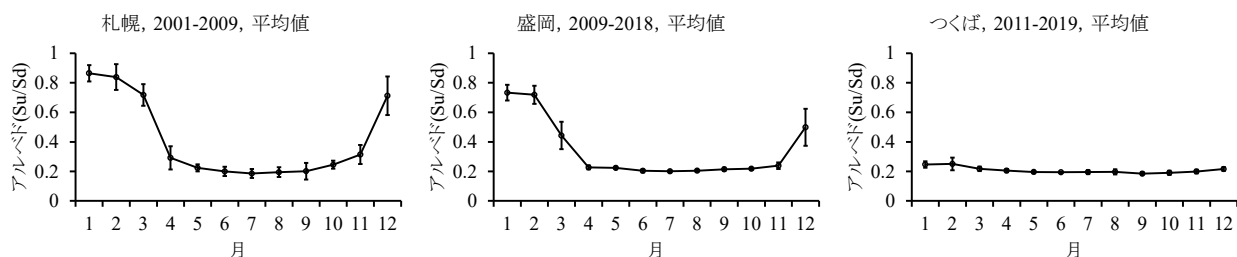
### 3.2 アルベドの分析

#### 3.2.1 年単位の分析

年単位の分析結果を **Table 5** にまとめた。この表から明らかなように、札幌では9年間の平均で0.42、盛岡では8年間平均で0.34、つくばでは同じく7年間平均で0.21となり、北方に位置する試験地ほど年単位のアルベドが大きい。この理由は積雪面の反射が大きく、積雪期間のアルベドが大きく算定されたことによる。

#### 3.2.2 月単位の分析

**Fig. 2** に試験地ごとに月別変化を示した。札幌と盛岡は、冬季に大きなアルベドを示しているが、これは前述のとおり、積雪によるものと考えられる。つくばではこのような傾向はみられない。他の期間は、約0.20とほぼ一定の傾向を示すが、わずかに下向きに凸な傾向を示している。



**Fig. 2** 試験地におけるアルベドの月別変化 (標準偏差)

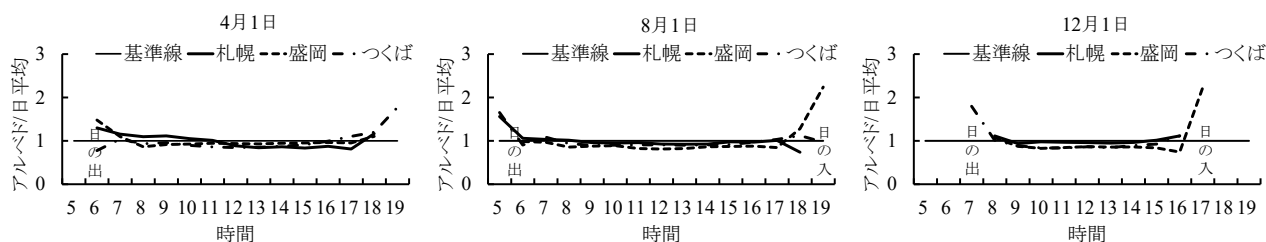
Monthly change of albedo for 3 tested sites (Standard deviation error bar)

#### 3.2.3 時間単位の分析

日中、太陽高度によって、アルベドがどのように変化するか検討する。検討に使用した資料は各試験地の初年度、すなわち札幌は2001年、盛岡は2009年、つくばは2011年である。アルベドの時間依存性を明確にするために、時間ごとのアルベドを算定し、この平均値で各時間のアルベドを除して基準化し

分析に供した。

分析の結果、平均値は当然 1.0 であるが、標準偏差は、札幌では 0.16、盛岡では 0.19、つくばでは 0.16 とつくばと地域差はなかった。この値の時間的変化の一例を **Fig. 3** に示した。この例からも明らかなように、日の出、日の入には若干変動の大きいアルベドを示し、他の時間は上向きのやや凹の形状を示すが、時間的な変動は大きなものではなかった。したがって、日単位のアアルベドを時間単位に使う場合には、この図に示した程度の時間変動を無視したことになる。なお、日の出、日の入にみられる大きな変化は、この時間の実測値と観測値の有効数字が小さく、アルベドが大きく変動することによる。しかし、短波放射の絶対量が小さいので、全体に及ぼす影響は少ない。



**Fig. 3** 時間平均基準によるアルベドの時間的変化

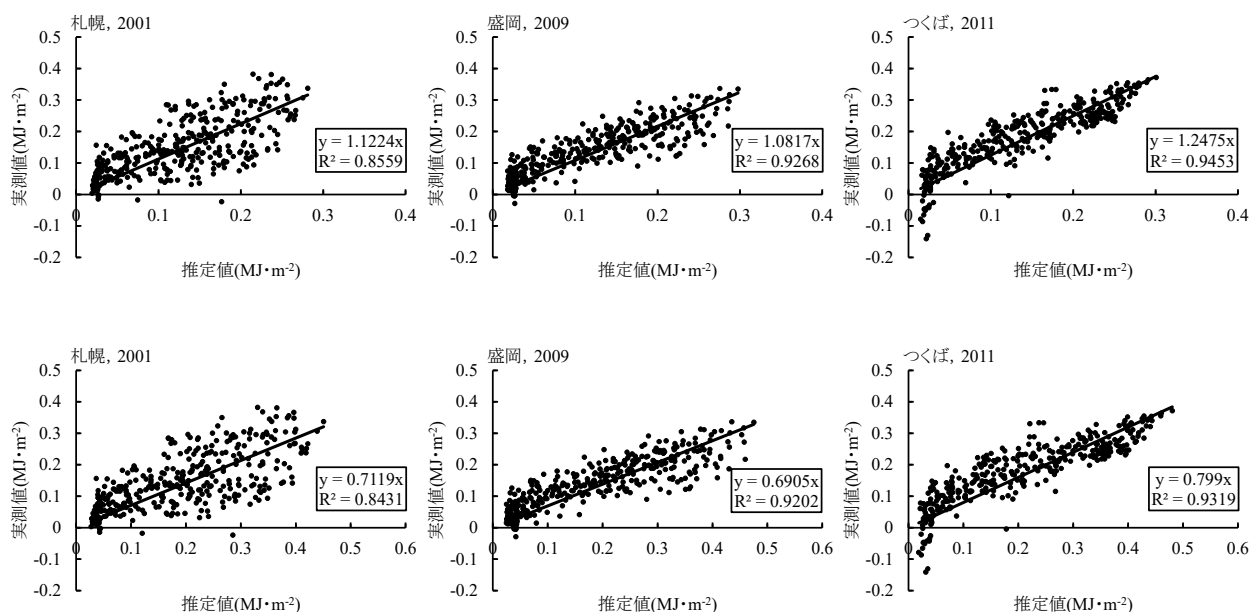
Hourly change of albedo by hourly mean value standard

## 4. 考察

### 4.1 FAO とペンマンの式による推定値と実測値の比較

外国の資料に基づいて決定された係数 (**Table 3** FAO, ペンマンの係数参照) を我が国に適用した場合の推定精度について考察する。

**Fig. 4** は札幌、盛岡、つくばの分析初年度の気象資料を使って FAO とペンマンの式によって求めた推定値と当該試験地における実測値を比較したものである。この例によると両者の勾配より、FAO の式に



**Fig. 4** 日単位における有効長波放射の実測値と FAO の式 (上図)、ペンマンの式 (下図) による推定値の比較

Comparison of estimated by FAO's, Penman's formula and observed net long wave radiation in hourly base

よる推定値よりも実測値が約 8~25%多い，一方ペンマンの式では 20~31%小さいことが示されており，どちらも直接わが国に適用すれば推定誤差が大きいことが分かる．

#### 4.2 有効長波放射に与える係数の影響

ある地域の有効長波放射を推定する場合，その地域の気象資料で推定式の係数を決定するのが原則であるが，異なる地域で決定した係数を用いた場合，その推定誤差が問題である．この問題を考察するために，係数の差異が，推定された有効長波放射にどのように影響するか，日単位の資料を分析し年単位にまとめて **Table 6** に示した．左半分が通年，右半分が作物生育期である．この表のカラム 1 には地域と使用した気象資料の試験地名を示し，カラム 3 には実測の有効長波放射 ( $L_n$ ) を示している．カラム 4~8 には  $L_n$  推定式の試験地名を示し，この試験地で求めた係数（連続）を使って，推定値を求めた．

例えば，FAO の  $0.119\text{MJ/m}^2$  は FAO で推奨されている  $a_1=0.34$ ,  $a_2=0.14$ ,  $a_3=0.9$ ,  $a_4=0.1$  を (2) 式に代入し，札幌の 9 年間の日単位のデータを年ごとにインプットして求めた平均値である．この値をこの期間の札幌の実測値  $0.142\text{MJ/m}^2$  と比較すれば推定式の適合度（推定  $L_n$ /実測  $L_n$ ）を判定できる．

この表から明らかなように，例えば札幌の有効長波放射を推定するために FAO の係数を使用すれば 84%（すなわち 16%の過小評価）になることを示している．この様に，使用する係数によって，大きな推定誤差が発生する．当然，札幌の有効長波放射を推定するために札幌のデータによって定めた係数を使えば，99%の精度で推定出来る．

同一試験地でも推定誤差があり，ある程度の誤差を許容すれば，特定の試験地で求めた係数が他の試験地でも使えると判断する目安になる．ここでは仮に 10%を許容範囲として考察する．

通年の場合，例えば札幌の気象資料で盛岡の係数を使って算定した有効長波放射は，97%となり，10%以内の差であるから，盛岡の係数を使っても良いと判断される．しかし他の地区の係数は 10%以上の差を生ずるので使えないことになる．

一方，作物生育期では札幌において，ペンマンの係数を使った場合が 106%，盛岡が 91%，つくばが 106%となり，これらの地区の係数は許容範囲に入る．したがって，札幌では，FAO 以外の係数が使えると判断できる．同様に盛岡では，札幌は 10%となるが，その他の地区の比率は 10%以上となるため適用できない．つくばを中心に考えるとペンマンと札幌は許容範囲入る．

この様に一方から見ると許容範囲に入っても逆は成立しないこともある．

**Table 6** (2) 式の係数 ( $a_1\sim a_4$ ) が有効長波放射に与える影響  
Effects of the coefficients ( $a_1\sim a_4$ ) in eq. (2) on net long wave radiation

試験地	項目	通年						作物生育期						備考
		実測 $L_n$ (MJ/m <sup>2</sup> )	推定 $L_n$ (MJ/m <sup>2</sup> )					実測 $L_n$ (MJ/m <sup>2</sup> )	推定 $L_n$ (MJ/m <sup>2</sup> )					
			FAO	$\overset{\sim}{\text{ペン}}\text{マン}$	札幌	盛岡	つくば		FAO	$\overset{\sim}{\text{ペン}}\text{マン}$	札幌	盛岡	つくば	
札幌	平均値	0.142	0.119	0.186	0.140	0.138	0.164	0.174	0.120	0.184	0.172	0.158	0.183	9年平均
	(3) 式の平均値		0.050	0.066	0.035	0.039	0.044		0.056	0.044	0.029	0.032	0.031	
	推定 $L_n$ /実測 $L_n$		0.84	1.31	0.99	0.97	1.16		0.69	1.06	0.99	0.91	1.06	
盛岡	平均値	0.138	0.117	0.181	0.145	0.138	0.163	0.147	0.109	0.165	0.162	0.146	0.170	8年平均
	(3) 式の平均値		0.037	0.060	0.036	0.028	0.036		0.040	0.041	0.027	0.022	0.031	
	推定 $L_n$ /実測 $L_n$		0.85	1.31	1.05	1.00	1.18		0.74	1.12	1.10	0.99	1.16	
つくば	平均値	0.174	0.125	0.191	0.165	0.149	0.173	0.162	0.103	0.151	0.158	0.139	0.162	7年平均
	(3) 式の平均値		0.061	0.061	0.060	0.049	0.041		0.070	0.050	0.043	0.048	0.042	
	推定 $L_n$ /実測 $L_n$		0.72	1.09	0.95	0.85	1.00		0.64	0.94	0.98	0.86	1.00	



## 5. 討論

### 5.1 マイナスの有効長波放射

Fig. 1 のつくばの原点付近に特徴的にみられるように、実測値がマイナスになっているにも関わらず推定値はマイナスを示していない。このマイナス値は、日照がゼロの時、すなわち夜間に集中的に現れる。この理由は次のように推定される。

夜間には地温が下がり上向きの長波が小さくなるのに対し、昼間に蓄熱された暖かい雲などからの熱による、下向きの長波放射が卓越する。したがって、実測値はマイナスとなる。この現象は、場所によって程度が異なり、札幌や盛岡では、つくばほど顕著ではない。

この現象に対し、現在検討している推定式 (2) 式ではこのマイナスの有効長波放射は表現できない。本モデルの限界と考える。将来の検討課題として今後新たなモデルの提案が期待される。

### 5.2 既往の研究との関係

本研究と類似の研究は、わが国では少ないが、日単位の分析では松井 (2010) の研究及び松井・勝元 (2013) の研究が見られる。松井・勝元 (2013) は世界の 18 観測所の観測結果をもとに、有効長波放射推定式の係数の気候依存性と雲の効果に対する妥当性を検討している。この視点から見れば本研究は湿潤気候の日本に限定された結果と位置づけられる。また、館野において  $a_1=0.37$ ,  $a_2=0.16$  を最適値としているが、本研究では館野に近いつくばの値は  $a_1=0.42$ ,  $a_2=0.16$  となっている。加えて、晴天日を選んで雲の効果とは別に係数  $a_1$ ,  $a_2$  を決定しているのに対し、本研究は、これに日照に関する係数  $a_3$ ,  $a_4$  ((4) 式の拘束条件により実質 1 変数) も同時に決定している。晴天日の定義と決定が困難なことに加え、雲量と湿度には関係があると思われるので、この 4 変数を同時に決定するのが合理的と考える。今日では、EXCEL SOLVER が開発されているので、この問題は容易に解決される。

## 6. 結言

本研究の目的は、有効長波放射推定式に使用されている係数の提案と長期資料によるアルベドの分析である。現在では、純放射を実測している気象観測所が増加しているが、これまでは、日射と日照時間を測定している場合が多かった。特に、農業関係では、現在でもこの方法で観測している場合が多いと思われる。本研究では、札幌、盛岡、つくばの気象資料を使用して純放射推定に必要な有効長波放射とアルベドの分析を行った。

有効長波放射については、3 試験地の長期にわたる実測値に基づき、有効長波放射推定式の各係数  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  の同定を行い、実用に供せられるようにした。この場合、使用目的によって、より適切な係数が使えるように、分析期間を通年と作物生育期 (4 月～10 月) に分けて検討した。有効長波放射の推定には、これまで使われてきた (2) 式を基本とし、EXCEL SOLVER を使って、係数を最適同定した。この結果、

- 係数には地域性があり、地域ごとに適切な係数を選択することが重要である。
- 作物生育期に限定することにより、積雪の影響が考えられる札幌と盛岡では係数の推定精度が向上する。

アルベドについては、3 試験地の長期にわたる実測値から年単位、月単位、時間単位で分析を行った。この結果、

- 年間平均では北に位置するほど高い値を示し、月別では積雪期を除くといずれの地域も約 0.20 を示し、夏季にはやや小さい値を示す。

- アルベドの時間変化の影響（時間依存性）は大きくない。

本研究は、日本全体をカバーする気象項目によって分析を試みたいと希望していたが、西日本及び九州沖縄農業研究センターでは観測資料に課題があり採用していない。つくば以北の地域の分析にとどまっている。該当する資料が入手できれば是非とも捕足したいと考えている。

以上の成果は、限られた3試験地の気象観測露場の資料によるものであり、今後多くの条件で同様な分析が行われ、資料の蓄積が図られることが望ましい。

**謝辞：**本研究にあたって貴重な気象資料を提供下さった農研機構・北海道農業研究センター羊ヶ丘気象観測部門，同東北農業研究センター厨川気象観測部門，同農村工学研究部門の関係各位に深甚の謝意を表す。この研究の主要な部分は、長年の貴重な気象資料の蓄積によるものであることを改めて強調しておきたい。

#### 引用文献

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998) : Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) , FAO irrigation and drainage paper, 56, 50-53.
- Baten, M.A. and Kon, H. (1997) : Comparisons of Solar Radiation Interception, Albedo and Net Radiation as Influenced by Row Orientations of Crops, J.Agric.Meteorol, 53, (1) , 29-39.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977) : Crop water requirements, FAO irrigation and drainage paper, 24, 15-29.
- Gu, S., Otsuki, K. and Kamichika, M. (2001) : Estimation of Daily Albedo on Tottori Sand Surface, J.Agric.Meteorol, 57 (1) , 1-10.
- 近藤純正，中村亘，山崎剛（1991）：日射量及び下向き大気放射量の推定，天気，38 (1) ， 41-48.
- Maruyama, T., Ito, K. and Takimoto, H. (2019) : Abnormal data rejection range in the Bowen ratio and inverse analysis method for estimating evapotranspiration, Agricultural and forest meteorology 2019 , 269-270, 323-334.
- 松井宏之 (2010) : ペンマン型蒸発散量推定式における有効長波放射量推定式の比較，農業農村工学会論文集，270， 95-100.
- 松井宏之，勝元修平（2013）：Penman 式で用いられる有効長波放射量推定式の係数に関する考察，農業農村工学会論文集，283， 75-80.
- 松井宏之，大澤和敏（2013）：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， 15-24.
- Penman, H.L. (1948) : Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass, Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 193, 120-145.
- 手計太一，丸山達也，乾真寛（2010）：保水性人工芝システムの熱環境特性に関する基礎的研究，水文・水資源学会誌，23， 18-31.