

逆解析による推定実蒸発散量と補完法による蒸発散量との比較  
— 北海道，東北，西日本農業研究センター及び農村工学研究部門の気象資料による —  
Comparison of Actual Evapotranspiration estimated by Inverse Analysis and  
complementary relationship Evapotranspiration

— Using the data of Hokkaido, Tohoku, Kanto and Shikoku National Agricultural Research Institute —

丸山利輔・藤井三志郎・伊藤浩三

石川県立大学 (〒921-8836 石川県野々市市末松 1-308)

MARUYAMA Toshisuke, FUJII Sanshiro and ITO Kouzo

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

(Received 4 December 2020)

**Abstract**

This paper describes that a comparison between actual evapotranspiration ( $ETa$ ) estimated by inverse analysis, recently proposed method by authors, and the complementary relationship evapotranspiration ( $Eac$ ) using above four sites climate data during about ten years. Comparison of the daily and monthly change of  $ETa$  and  $Eac$  using energy load coefficient 1.26, the relationship exhibits the slope of 0.78~0.90 and the monthly change is almost coincided each other. After following this analysis, we conducted the optimum determination of the coefficient by comparing the daily  $ETa$  and  $Eac$  data, resulting in the coefficients 1.08~1.23, which were a little smaller than the present coefficient of 1.26. The slope between  $ETa$  and  $Eac$  relationship shows 0.93~0.97 which were a little larger than optimization before. From these results we concluded that the complementary relationship ( $Eac$ ) is strongly supported by the inverse analysis.

**Key words:** complementary relationship actual evapotranspiration, penman equation, Bowen ratio, energy load coefficient heat balance

**要 旨**

本研究は、近年公表した逆解析による推定実蒸発散量 ( $ETa$ ) と補完法による実蒸発散量 ( $Eac$ ) を標記の試験地における気象資料を利用して分析し、比較検討した内容である。日単位及び月単位の  $ETa$  と  $Eac$  を直接比較し、両者の日別変化、月別変化から両者には密接な関係があり、逆解析法が補完法を強く支持することを確認した。さらに、 $ETa$  が正しいものとして  $ETa$  と  $Eac$  の差が最小となる条件で荷重係数を最適決定し、わが国では 1.26 より若干小さい値 1.08~1.23 である可能性が高いことを明らかにした。

**キーワード:** 補完法, 実蒸発散量, ペンマン式, ボーエン比, エネルギー荷重係数, 熱収支

**1. はじめに**

地球上の水循環は降水、流出、蒸発の過程を経て行われる。このため、水循環過程の中で、蒸発散は極めて重要な位置を占めており、古くから様々な形で研究が行われ、その大要を大槻 (1989) がまとめている。その中で、各種の方法が紹介されているが、いずれも長所と短所があって、問題点が残されており、現在でも蒸発散を確実に把握できる方法が開発されているとは言えない。

本研究は、このうち、広域の実蒸発散に注目し、近年開発されたボーエン比に基づく逆解析法と補完法による実蒸発散量との関係を比較検討し、その特徴を明らかにすることを目的とした。この目的に関するこれまでの蒸発散研究の概要は次のようである。

水収支法は、一定の流域における降水、流出、蒸発散の代数和はゼロであることを前提に、降水と流出量を測定して蒸発散を求める方法である。自然界では降水量、流出量ともに精度よく測定することが困難であり、湿潤地帯であるわが国では十分な精度で蒸発散を推定するに至っていない。

流域蒸発散量を推定できる代表的な方法の一つは補完法である。Priestley and Taylor (1972) が提案し、その後 Morton (1978) によって改良が加えられ、Brutsaert and Stricker (1979) によって、通常的气象資料を用いて算定できる使いやすいう方法が提案されている。補完法は、ペンマン蒸発量と実蒸発散量の和は一定 (式 (10)) であると仮定した方法であり、実態をよく表現しているとして、大槻 (1988)、大槻ら (1984)、Hobbins et al. (2001)、Szilagyi et al. (2016) により流域蒸発散推定に使われている。しかし、その中で使われているエネルギー荷重係数 1.26 (後述) が検討課題である。

補完法の正当性と問題点を明らかにするためには、基準となる実蒸発散量の推定が必要となる。本研究では丸山らが近年公表している逆解析法 (Maruyama and Segawa, 2017) を使う。逆解析法は次のような理由によって新しく開発された方法である。

実蒸発散の実測法として信頼できる方法は、渦相関法と熱収支ボーエン比法である。渦相関法は、原理的には正しいが、気温と湿度の乱れを測定して顕熱と潜熱輸送を求めるため、この乱れを正確に測定することは困難である。特に潜熱フラックスの測定精度はよくないといわれている (Wilson et al., 2002)。熱収支ボーエン比法は、2 高度の気温と湿度を測定してその比率によって潜熱と顕熱に分配する方法であるが、ボーエン比法の対象となる植被上では 2 高度の気温差、湿度差が小さく、信頼できるボーエン比の測定困難なことが多い。

逆解析法は、これまでのボーエン比法が 2 高度の気温と湿度の測定値を必要としたのに対し、1 高度の気温と湿度の測定値を利用し、もう一つの高度には地表、あるいは植被上を選び、熱収支を満足させるように、この高度の気温と湿度を最適化手法により決定し、ボーエン比法により蒸発散を求める新しい方法である。逆解析法の利点は、1 高度の温度・湿度など通常的气象観測資料によって蒸発散が推定でき、利用範囲の飛躍的な拡大が期待出来る点にある。

この逆解析法の正当性を立証するためには、蒸発散の実測値がなければならない。丸山らはこの実測値を世界各国で観測されている FLUXNET に求めた。しかし、この資料は熱収支がクローズせず、純放射量が潜熱と顕熱の和より約 20% 多い (Foken, 2008 ; Wilson et al., 2002)。丸山らはこのアンバランスを潜熱と顕熱に比例配分した資料を正しいと仮定して論文を発表した。この論文は森林を対象とした研究 (Maruyama and Segawa, 2016a)、湿潤地を対象とした研究 (Maruyama and Segawa, 2016b) 及び乾燥地を対象とした研究 (Maruyama and Segawa, 2017) に分かれる。その後、ボーエン比法によって推定した実蒸発散を正しいとして、逆解析法の妥当性の立証を試みた (Maruyama et al., 2019 ; 丸山・伊藤, 2019)。

本研究の目的、すなわち逆解析法とペンマン蒸発量及び補完法による実蒸発散量との関係を明らかにするためには長期の精度の高い気象資料が不可欠である。近年、この条件を満たす気象資料が国立研究機関を中心に公表されている。本研究では農研機構・北海道農業研究センター (北海道・羊ヶ丘)、同・東北農業研究センター (東北・厨川)、同・農村工学研究部門 (関東・つくば)、および同・西日本農業研究センター (四国・善通寺) を選び、これらの研究機関で観測されている気象資料を研究に供した。

## 2. 研究方法

### 2.1 逆解析による実蒸発散推定法の概要

この方法は、純放射  $R_n$ 、と地中熱フラックス  $G$  を使って、1 高度の気温 ( $T_z$ )、湿度 ( $rehz$ ) から顕熱  $H$ 、潜熱  $IE$  を分離し、実蒸発散量  $ETa$  を推定する方法である。熱収支式 (1) を基本とし、式 (2) の潜熱 ( $IE$ )、顕熱 ( $H$ ) 分配比を仮定して、最適化手法により、初期値 (地表面近傍の実測温度 ( $T_0$ ) とそれに対する比湿  $q$  ( $T_0$ ) を更新しながら、未知の地表面または下層温度  $T_s$  と湿度  $rehs$  を推定する。

この計算を式 (8) が収束するまで繰り返し、式 (2) の解が収束した時点の  $B_{app}$  をボーエン比 ( $Bo$ ) とする。この  $Bo$  を用いて潜熱、顕熱を分離する。未知数が  $Ts$ ,  $rehs$  の 2 個なので、式 (4)、式 (5) を連立に解き、未知数  $Ts$ ,  $rehs$  を確定する (Maruyama and Segawa, 2017 ; Maruyama et al., 2019)。

$$Rn = H + lE + G \quad (1)$$

$$B_{app} = \frac{H_{est}}{lE_{est}} = \frac{Cp(Ts - Tz)}{l[q(Ts) - q(Tz)]} \quad (2)$$

$$q(Ts) = rehs \times q_{sat}(Ts) \quad (3)$$

$$Rn^j - G^j - H_{est,i}^j - lE_{est,i}^j = \varepsilon_i^j \quad (4)$$

$$Rn^{j+1} - G^{j+1} - H_{est,i}^{j+1} - lE_{est,i}^{j+1} = \varepsilon_i^{j+1} \quad (5)$$

ただし、 $Cp$  : 水の定圧比熱 ( $J \cdot kg \cdot K^{-1}$ )、 $q$  : 比湿 ( $kg \cdot kg^{-1}$ )、 $l$  : 気化潜熱 ( $MJ \cdot kg^{-1}$ )、 $i$  : 時間、 $j$  : 繰り返し回数。

また、顕熱の推定値  $H_{est}$  及び潜熱の推定値  $lE_{est}$  は次式によって求める。

$$H_{est} = Bo \times lE_{est} \quad (6)$$

$$lE_{est} = \frac{Rn - G}{1 + Bo} \quad (7)$$

最適化の目的関数は、式 (4) と式 (5) の絶対値の和が最小になるように計算する。

$$ABS[\varepsilon_i^j] + ABS[\varepsilon_i^{j+1}] \rightarrow (min) \quad (8)$$

ただし、計算の過程で、 $lE$  の値が過大に変動するのを防ぐために  $lE$  に対して、次の拘束を加える。

$$[ABS(lE^j) + ABS(lE^{j+1})] < \alpha \times [ABS(Rn^j - G^j) + ABS(Rn^{j+1} - G^{j+1})] \quad (9)$$

式 (9) の拘束は、 $H$  に対しても同様に適用する。

この方法の重要な点は、最適化計算に当たって地表面の温度と湿度の初期値を如何に設定するかである。この方法は、誤差面 [ $\varepsilon = F(Ts, rehs)$ ] が単一ではなく、極値が複数存在するため、初期値を変えて計算する必要がある。したがって、初期値を出来る限り収束値に近く設定することが肝要である。

また、この方法はボーエン比法 ( $Bo$  法) に属するため、 $Bo = -1$  近傍の異常値を削除しなければならない。伊藤らの方法 (伊藤ら, 2018 ; 伊藤・丸山 2019 ; Maruyama et al., 2019) により、 $\alpha = 1.5$  の基準によって 2 時間単位で異常値を削除した。その上で熱収支がバランスするよう、 $-3 < Bo < -1$  に対して  $Bo = -3$  を、 $-1 < Bo < -0.333$  に対して  $Bo = -0.333$  を適用した。なお、この計算には、日単位ではなく時間単位の資料が必要である。

## 2.2 補完法の概要

Brutsaert and Stricker (1979) の提案した補完法は式 (10) のように表わされる。すなわち、式 (10) が示すように、実蒸発散量  $Eac$  とペンマン蒸発量  $Ep$  の和は式 (11) の  $Epp$  の 2 倍に等しいという考え方である。 $Epp$  は平衡蒸発量と呼ばれ、ペンマン式の第 1 項 (風速関数の項以外) にエネルギー荷重係

数 (1.26) を乗じたものである。検討すべき問題は、式 (11) に使われている係数 1.26 である。この係数は外国の資料に基づいて定められたものである (Brutsaert and Stricker, 1979)。これまで比較すべき実蒸発散量がないために、わが国では、直接検討した例はない。但し、流域水収支の方法によって間接的に検討されている (大槻, 1988 ; 大槻ら, 1984)。

$$Eac = 2Epp - Ep \quad (10)$$

$$Epp = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(Rn - G)}{l} \quad (11)$$

$$Ep = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(Rn - G)}{l} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u)(e_{sat}(Ts) - e_a(Tz)) \quad (12)$$

$$f(u) = 0.26(1 + 0.537Uz)(e_{sat}(Tz) - e(Tz)) \quad (13)$$

なお、 $Eac$  には次の条件を付けている (大槻ら, 1984)

$$Eac \leq Ep \quad (14)$$

ここに、 $Eac$ : 実蒸発散量 ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $Epp$ : Priestley-Taylor 式による可能蒸発量 ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $Ep$ : ペンマン蒸発量 ( $\text{mm} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $\gamma$ : 乾湿計定数 ( $\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}$ )、 $\Delta$ : 飽和水蒸気圧曲線の勾配 ( $\text{hPa} \cdot \text{K}^{-1}$ )、 $l$ : 水の蒸発潜熱 ( $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ )、 $f(u)$ : 風速関数 ( $\text{mm} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ )、 $e_{sat}$ : 飽和水蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $e$ : 大気の蒸気圧 ( $\text{hPa}$ )、 $Uz$ : 高度 2m の風速 ( $\text{m} \cdot \text{sec}^{-1}$ )。

## 2.3 純放射量の計算

北海道・羊ヶ丘、東北・厨川、関東・つくばでは純放射量を実測しているが、四国・善通寺では一部の期間純放射量を実測していない。そこで気温と湿度、および全天日射の実測値から純放射量を算定する。純放射量は日射及び長波放射量により次の式で表される。

$$Rn = Sn(1 - \alpha) + L_D - L_U \quad (15)$$

ここに、 $Rn$  は純放射量、 $Sn$  は全天日射量 (短波)、 $\alpha$  はアルベド、 $L_D$  は下向き長波放射量、 $L_U$  は上向き長波放射量。

また、有効 (正味) 長波放射量 ( $Rnl = L_D - L_U$ ) は FAO 等によって次の式で表されている (松井, 2010 ; Allen et al., 1998 ; Penman, 1948)。

$$Rnl = -\sigma \left\{ \frac{T_{k,max}^4 + T_{k,min}^4}{2} \right\} (a_1 - a_2 \sqrt{e_{sat}}) \left( a_3 \frac{n}{N} + a_4 \right) \quad (16)$$

ここに、 $\sigma$ : ステファンボルツマン定数 ( $5.670 \times 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )、 $T_{k,max}$ : 最高気温 (K)、 $T_{k,min}$ : 最低気温 (K)、 $e_{sat}$ : 飽和蒸気圧 (hPa)、 $n$ : 日照時間 (hr)、 $N$ : 可照時間 (hr)、 $n/N$ : 日照率、 $a_1, a_2, a_3, a_4$ : 実験定数。

## 2.4 最適化計算によるエネルギー荷重係数の最適化

エネルギー荷重係数は Priestley and Taylor (1972) により 1.26 と提案されているが、先述のように、この値は検討の余地が残されている。このために、逆解析法による  $ETa$  と補完法による  $Eac$  が一致するよう、すなわち式 (17) の目的関数が最小になるよう最適同定を試みた。同定すべき係数の初期値は式 (11)

の 1.26 を選び、同定には EXCEL SOLVER を使用した。

$$\text{目的関数} = \sum_{i=1}^N |ETa - Eac| \quad (17)$$

## 2.5 純放射量の推定

四国・善通寺では、前述のように 2016 年 12 月以降、純放射量は測定していない。このため、日射と日照時間から式 (15)、式 (16) を使って純放射量を求めた。式 (15) のアルベド、式 (16) の定数  $a_1, a_2, a_3, a_4$  は、本地域に最も近い関東・つくばの気象資料を使って、最適同定した（善通寺では純放射を測定している期間はあるが、長波、短波の 4 要素は測定していない）。この場合定数はそれぞれ、0.49, 0.19, 0.66, 0.34 であった。また、式 (15) のアルベド  $\alpha$  は、四国・善通寺では 2010～2016 年は純放射量の測定が行われており、この実測資料を使って実測値と計算値が一致するよう最適決定し ( $\alpha=0.26$ )、実測した日射と日照率を使って 2017～2019 年の純放射量を求めた。

なお、関東・つくばを除いて、地中熱フラックス  $G$  は測定されていないためゼロとして扱った。この妥当性を検証するために、関東・つくばの資料を用いて  $G=0$  とした場合と  $G$  の実測値を用いた場合とを比較し、 $Rn$  に対する比率で表わした。検討した 7 年間 (2011-2017) の平均は -0.87% (-2.94%～0.62%) と僅少であった。また、潜熱フラックス  $IE$  は  $100W \cdot m^{-2}$  当たり  $3.53mm \cdot day^{-1}$  の割合で換算した (近藤, 1994)

## 2.6 気象観測露場の概要

関係する各研究所の気象観測露場の緯度・経度、標高、観測露場の大きさ、風速計の高さ、温度、湿度の測定高、地温の測定深、および分析期間を **Table 1** に示した。分析期間は、10 年程度を目途とし、公表されている資料はできるだけ最近のものを使用した。また、各試験地の観測項目ごとの器具の型式、製造会社または販売会社などを **Table 2** に示した。

**Table 1** 各試験地の観測露場の位置、標高、風速計高、温湿度測定高、地温測定深さ及び分析期間

Location, elevation, wind speed observation, temperature and humidity height, ground temperature observation depth and period of analysis				
項目	北海道 羊ヶ丘	東北 厨川	関東 つくば	四国 善通寺
緯度	43.0°4"	39.49°10"	36.01°	34.13°37"
経度	141.24°7"	141.08°18"	140.05°	133.46°39"
標高	70m	175.5m	26m	28m
観測露場	20×30m	30×30m	43×56m	9×15m
風速計高	10m	6.5m	10.0m	8.4m
温・湿度測定高	1.5m	1.5m	2.2m	1.5m
地温測定深	5cm	5cm	5cm	10cm
分析期間	2000～2010	2009～2018	2011～2019	2010～2019

なお、純放射量およびペンマン蒸発量の算定に必要な気象資料に欠測のあった場合には該当する項目は算定不能とした。この資料を日単位、または月単位にまとめる場合には、欠測値が少ないので、欠測時間または欠測日を除いた平均値を求め、これに該当時間または該当月の日数を乗じて求めた。また、補完法の計算に際しては、マイナスの蒸発散量はゼロとして扱った。

## 3. 分析結果

### 3.1 補完法 ( $Eac$ ) と実蒸発散量 ( $ETa$ ) の比較

補完法は、上述の蒸発散比法とは異なり、蒸発散比を使わないで広域の蒸発散を求める方法である (大槻ら, 1984)。しかし、この方法は主として乾燥地を対象に、経験的事実に基づいて提案された方法である。そのため、根拠についての研究が現在でも継続されている (Ramirez et al., 2005 ; Brutsaert, 2015)。

**Table 2** 各試験地における気象観測器具の概要  
Outline of climate elements measurement devises of the test sites

計測項目	北海道・羊ヶ丘	東北・厨川	関東・つくば	四国・善通寺
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	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	高分子薄膜センサ クリマテック社製 CVS-HMP-155D
風速 (風向風速センサ)	飛行機型 横河電子機器社製 A7401-20	風車型 クリマテック社製 CYG-5103-JM	•—ZÖE^ クリマテック社製 CYG-5103-JM	•—ZÖE^ クリマテック社製 CYG-5103-JM
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	不明 不明 不明
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	回転式 クリマテック社製 CEK-MS-093
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	熱電堆式 クリマテック社製 CEK-MS-092
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 kip and Zonen社製 CGR4	不明 不明 不明
地中温度	白金測温抵抗体 横河電子機器社製 E-736	白金測温抵抗体 クリマテック社製 C-PTG-10	白金測温抵抗体 クリマテック社製 C-PTG	白金測温抵抗体 不明 不明
地中熱流	— — —	— — —	熱電堆式熱流版 Hukseflex社製 HFP-01	— — —

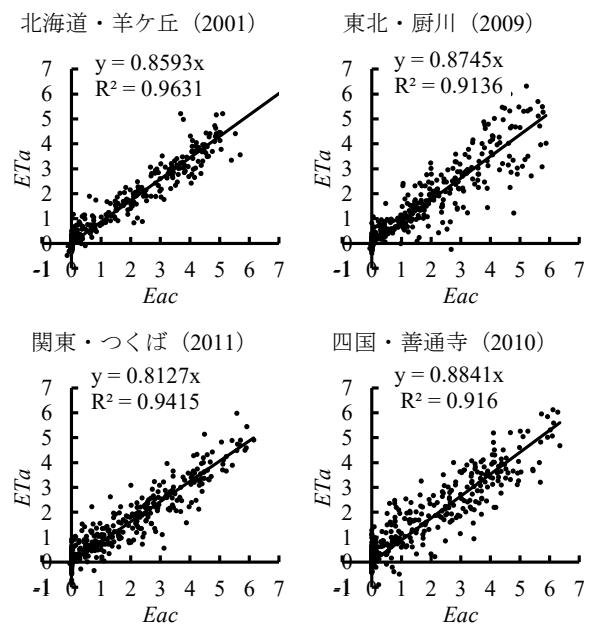
注) 観測機関からの情報を基に、試験地間の記載内容を統一し整理したものを示す。

したがって、新しく提案した逆解析法と補完法による実蒸発散量の推定結果を比較検討することは重要な研究課題の一つである。また、式(11)にみられるエネルギー荷重係数1.26が果たして我が国に適用できるか否かも前述の通り検討課題である。

本研究では、 $E_{ac}$ と $ET_a$ 日単位、月単位及び年単位で比較することにより、逆解析法と補完法の関係を明らかにすると共に、この係数の妥当性評価を試みる。評価の方法として、これまでの方法で求めた $E_{ac}$ と $ET_a$ をまず直接比較する。つぎに、 $E_{ac}$ と $ET_a$ とが一致するように最適化手法を使ってこの係数を同定する。

### 3.2 補完法 ( $E_{ac}$ ) と実蒸発散法 ( $ET_a$ ) の日単位の比較

逆解析法による $ET_a$ と補完法による $E_{ac}$ (エネルギー荷重係数1.26を使用した場合)を直接比較した。まず、4試験地の初年度の分析結果をFig.2に示した。 $E_{ac}$ に対する $ET_a$ の勾配は約0.81~0.88、決定係数0.91~0.96を示し、両者間には高い相関が認められた。他の試験年の同様な項目に対する



**Fig. 2** 補完法と逆解析法の各試験地における日単位の蒸発散量の比較 (最適化前)  
Comparison of daily  $E_{ac}$  and  $ET_a$  at the test sites before optimization

**Table 3** 最適化前後の各試験地における試験期間の補完法と逆解析法関係直線の勾配と決定係数の平均  
Mean values of the slope and  $R^2$  between complementary relationship and the inverse analysis method before and after optimization

項目	調査年次	北海道・羊ヶ丘		東北・厨川		関東・つくば		四国・善通寺	
		勾配	決定係数	勾配	決定係数	勾配	決定係数	勾配	決定係数
最適化前	平均	0.883	0.789	0.873	0.858	0.783	0.831	0.896	0.840
	標準偏差	0.028	0.174	0.046	0.026	0.068	0.035	0.031	0.033
最適化後	平均	0.929	0.819	0.970	0.866	0.972	0.814	0.960	0.826
	標準偏差	0.031	0.157	0.014	0.018	0.006	0.035	0.023	0.037
試験年数		9		10		9		10	

結果は、Table 3 の最適化前の欄に示した。

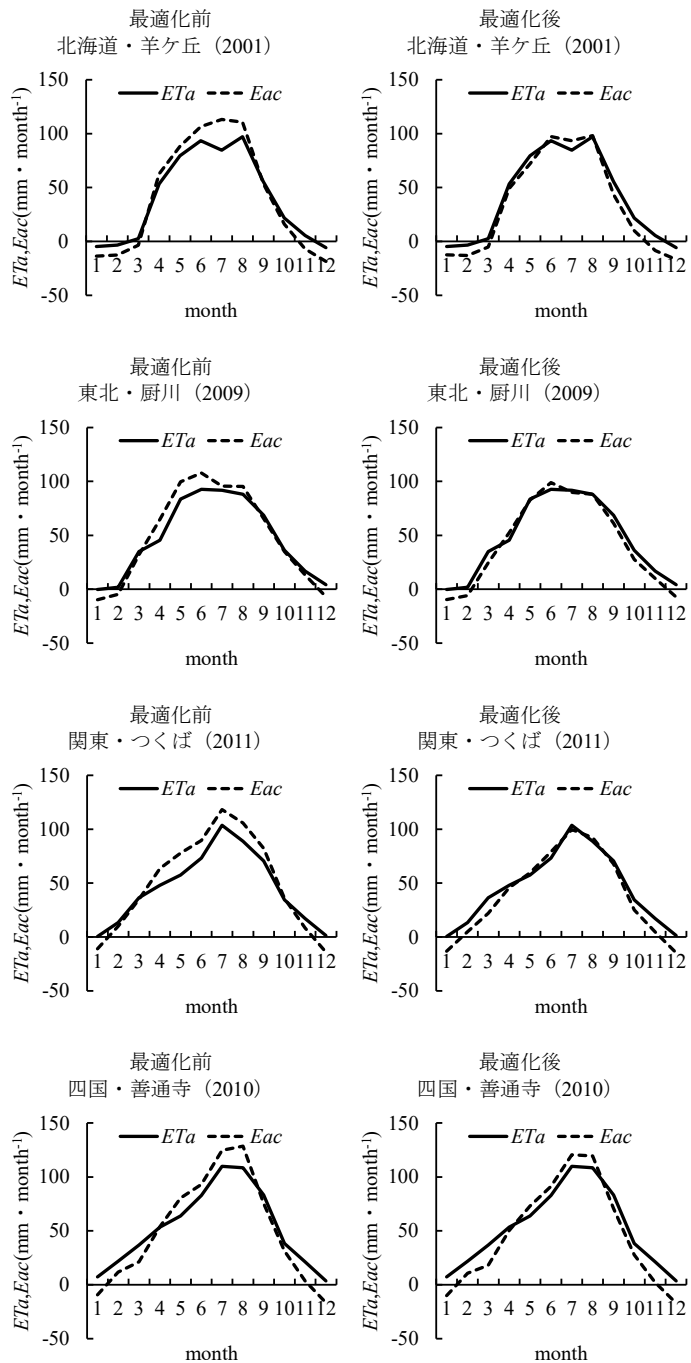
この結果も Fig. 2 とほぼ同様に勾配は約 0.78~0.90, 決定係数は 0.79~0.86 であった。このように,  $Eac$  と  $ETa$  は直接比較した時点で, すでに, かなり高い相関を示した。しかし, 両者の勾配が 0.78~0.90 程度であり, さらに改良の余地があることを示した。

### 3.3 補完法 ( $Eac$ ) と実蒸発散法 ( $ETa$ ) の月単位の比較

日単位で分析した  $Eac$  と  $ETa$  の資料を月単位にまとめ, Fig. 3 に示した。この図から明らかなように両者の月別変化は極めてよく一致した。このことから, 逆解析法は補完法を強く支持していることが示された。しかし, 補完法では 11 月~翌年の 2 月にわたってマイナスの  $Eac$  が推定されており, この期間は  $ETa$  と一致しなかった。

### 3.4 補完法 ( $Eac$ ) と実蒸発散法 ( $ETa$ ) の年間の比較

$Eac$  と  $ETa$  の荷重係数最適化前後の年間蒸発散量を算定し Table 4 に示した。この表に示されるように, 各試験地共に最適化によって年間蒸発散は減少しているが, その程度は地区によって変わっている。北海道・羊ヶ丘は, 差が  $9.5\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$  と小さいが, 関東・つくばでは  $141.0\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$  と大きい。東北・厨川では  $67.0\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$ , 四国・善通寺では  $44.5\text{mm} \cdot \text{year}^{-1}$  と



**Fig. 3**  $ETa$  と  $Eac$  の最適化前後の月単位の比較  
Comparison of onthly change of  $ETa$  and  $Eac$  before and after optimization

**Table 4** 補完法と逆解析法による最適化前後の年間蒸発散量比較(mm/year<sup>-1</sup>)  
Annual evapotranspiration at the sites for complementary relationship and the inverse analysis method before and after optimization

項目		北海道・羊ヶ丘		東北・厨川		関東・つくば		四国・普通寺	
		<i>Eac</i>	<i>ETa</i>	<i>Eac</i>	<i>ETa</i>	<i>Eac</i>	<i>ETa</i>	<i>Eac</i>	<i>ETa</i>
最適化前	平均	490.8	478.4	633.9	573.6	653.0	552.6	659.1	652.2
	標準偏差	58.3	40.5	32.6	43.5	21.1	55.2	34.6	24.1
最適化後	平均	481.3	478.4	566.9	573.6	512.0	552.6	614.6	652.2
	標準偏差	41.4	40.5	52.9	43.5	55.2	55.2	30.0	24.1

試験年数はTable 3に同じ

両者の中間である。

#### 4. 考察

##### 4.1 補完法と逆解析法の最適化前後の蒸発散量の比較

Fig. 2 と同じ資料を用いて荷重係数を最適同定した結果を Fig. 4 に示した。勾配が約 0.94~0.98 と最適化前より改善されていることが分かる。試験地ごとの試験年全体の *Eac* に対する *ETa* の勾配の平均値と標準偏差は Table 3 の最適化後の欄に示した。勾配は約 0.93~0.97 となり、各試験地とも勾配は大きくなり 1.0 に近づいている。

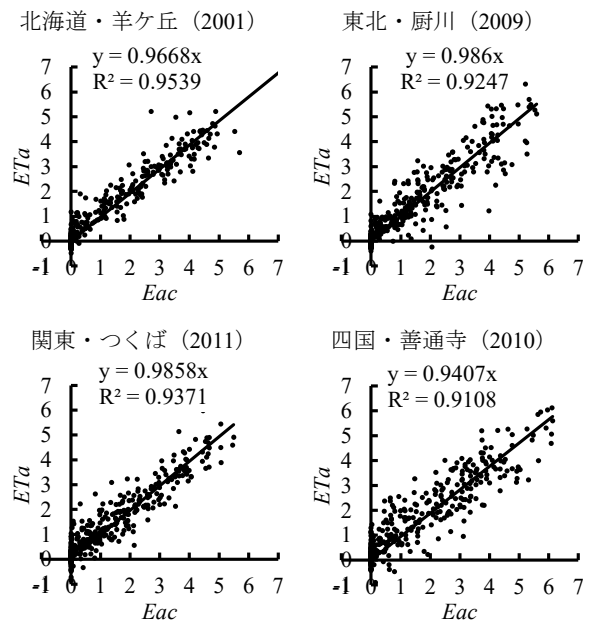
式 (9) の係数 1.26 が最適化によってどのように変わったかをまとめて、平均値と標準偏差を Table 5 に示した。この表から明らかなように、いずれの試験地も現在使われている 1.26 よりも小さく、その値は 1.08~1.23 と地域によって異なることが示された。

補完法と逆解析法による年間蒸発散量は Table 4 に示したように、最適化前ではいずれの地区も  $Eac > ETa$  となった。その差は地区により異なることはすでに指摘した。最適化後は北海道がわずかに  $Eac > ETa$  となったが、それ以外の地区は反対に  $Eac < ETa$  となりその差も大幅に縮小している。

#### 5. 討議

##### 5.1 補完法と逆解析法による流域蒸発散の関係

補完法は経験的方法に属するが、概念も明確で係数も唯一とつ (1.26) と少なく、使いやすい。このために流域蒸発散推定法として大槻ら (1984) によって使われてきた。しかし、その正当性を主張するために水収支法以外に適切な方法はなかった。水収支法は、観測流量を対象にし、わが国では流域貯留量がゼロとなる期間を選ぶ必要があるため、検証の対象となる蒸発散推定に精度上の限界があった。今回、逆解析法により推定ではあるが流域実蒸発散が求められたので直接比較が可能となった。その結果、これまで提案されてきた係数 1.26 よりも新たに同定した係数 (Table 5) を使えば、さらに高い精度で流



**Fig.4** 補完法と逆解析法の各試験地における日単位の蒸発散量の比較 (最適化後)  
Comparison of daily *Eac* and *ETa* at the test sites after optimization

**Table 5** 各試験地のエネルギー荷重係数  
Energy load coefficient for test sides

項目	北海道	東北	関東	四国
	羊ヶ丘	厨川	つくば	普通寺
平均	1.23	1.14	1.08	1.20
標準偏差	0.09	0.04	0.05	0.03

試験年数はTable 3に同じ



域蒸発散が推定可能なことが示された (Table 4). なお, このエネルギー荷重係数 1.26 は, Priestley and Taylor (1972) によって提案された係数であるが, その妥当性は国際的にもとりあげられ, 1.08~1.28 の数値が議論されている (Brutsaert and Striker, 1979).

今後の検討課題としては, 式(14)に示される  $E_{ac} < E_p$  の条件, また主として冬期に見られる  $E_{ac} < 0$  条件, 初期値と解の関係及び収束状況などの検討が必要となろう.

## 6. おわりに

本研究は, 新しく提案した 1 高度の温度と湿度を使って地表面の温度と湿度を推定し, ボーエン比法に基づく逆解析により蒸発散を求め, ペンマン蒸発量及び補完法による実蒸発散量と比較検討した内容である. 北海道・羊ヶ丘, 東北・厨川, 関東・つくば, および四国・善通寺の約 10 年間の時間単位の気象資料を分析に供した.

補完法は経験的事実に基づいて提案された方法であるため, 現在でもその根拠について研究が行われている. 本研究では逆解析法に基づいて推定した実蒸発散量と補完法に基づいて推定された実蒸発散量を直接比較し両者がかなり高い精度で一致することを両者の日別変化及び月別変化の比較で確認した.

補完法にはエネルギー荷重係数と呼ばれる経験定数 1.26 が含まれており, これを地域の特性に合わせて決定する必要があった. 本研究ではまずこの係数 1.26 を使った場合の実蒸発散推定値  $E_{ac}$  と逆解析法の推定値  $ETa$  とを比較した. 両者はかなり良く一致し, 関係直線の勾配も 0.78~0.90 程度を示した.

次に,  $ETa$  と  $E_{ac}$  が一致するようにこのエネルギー荷重係数を最適同定した. この分析した範囲では, わが国ではこの荷重係数は 1.26 より小さく 1.08~1.23 程度であることが示された. 補完法は, 本来乾燥地を対象に考案された方法であるが, 日本のような湿潤地にも適用可能なことを示すことができた. 今後, 補完法を使う場合の参考になろう.

本研究は全国的に展開する農業研究センターの資料を使用した結果である. また, 日本という湿潤地帯に属する地域での結果である. このことに留意して今後さらに一般的な条件での研究が望まれる.

**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村上喜一氏, 同・東北農業研究センター厨川気象観測部門川方俊和氏, 同・農村工学研究部門の気象観測部門吉田武郎氏, 同・西日本農業研究センター気象部門園芸環境グループ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ことは強調するまでもない. また, 本研究を推進するにあたって, 九州大学教授, 大槻恭一氏に有益な助言をたまわった. 併せて深謝の意を表す.

## 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.
- Brutsaert, W. and Stricker, H. (1979) : An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration, Water Resources Research, 15, 443-450.
- Brutsaert, W. (2015) : A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation, Water Resources Research, 51, 8087-8093.
- Foken, T. (2008) : The energy balance closure problem : an overview, Ecological Applications, 18 (6), 1351-1367.
- 伊藤浩三, 丸山利輔, 瀧本裕士 (2018) : 熱収支ボーエン比法における異常値の定義とその適用例, 応用水文, 31, 41-50.
- 伊藤浩三, 丸山利輔 (2019) : 蒸発散推定における異常値の定義と熱収支ボーエン比法への適用, 農業農村工学会論文集, 309 (87-2), I-159~I-167.
- 近藤純正 (1994) : 水環境の気象学, 7. 水面の熱収支, 朝倉書店, p161.

- Maruyama, T. and Segawa, M. (2016a) : Reciprocal analysis of sensible and latent heat fluxes in a forest region using single height temperature and humidity based on the Bowen ratio concept, *Journal of Water Resource and Protection* 2016, 8, 724-742.
- Maruyama, T. and Segawa, M. (2016b) : Application of the reciprocal analysis for sensible and latent heat fluxes with evapotranspiration at a humid region, *Open Journal of Modern Hydrology* 2016, 6, 230-252.
- Maruyama, T. and Segawa, M. (2017) : Estimation of the sensible and latent heat fluxes by reciprocal analysis at an arid and semi-arid region, *Open Journal of Modern Hydrology* 2017, 7, 38-64.
- 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.
- Morton, F.I. (1978) : Estimating evapotranspiration from potential evaporation : practicality of an iconoclastic approach, *Journal of Hydrology*, 38, 1-32.
- 丸山利輔, 伊藤浩三 (2019) : 蒸発散推定のための逆解析法とボーエン比法及び渦相関法との比較－異常値を処理した場合の事例－, *農業農村工学会論文集*, 309 (87-2), I\_169-I\_178.
- 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.
- Hobbins, M.T., Ramirez, J.A. and Brown, T.C. (2001) : The complementary relationship in estimation of regional evapotranspiration: An enhanced advection-aridity model, *Water Resources Research*, 37 (5), 1389-1403.
- 大槻恭一 (1988) : 補完関係を利用した流域蒸発散量の推定, *水文・水資源学会誌*, 1 (1), 83-93.
- 大槻恭一 (1989) : 蒸発散 (その 8) - 蒸発散量の推定法 -, *農業土木学会誌*, 57 (11), 1065-1071.
- 大槻恭一, 三野徹, 丸山利輔 (1984) : 水収支と補完関係式による流域蒸発散量の比較－実蒸発散量推定に関する研究 (II) -, *農業土木学会論文集*, 112, 17-23.
- Penman, H.L. (1948) : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceeding of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193 (1032), 120-145.
- Priestley, C.H.B. and Taylor, R.J. (1972) : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters, *Monthly Weather Review*, 100 (2), 81-92.
- Ramirez, J.A., Hobbins, M.T. and Brown, T.C. (2005) : Observational evidence of the complementary relationship in regional evaporation lends strong support for Bouchet's hypothesis, *Geophysical Research Letters*, 32, L15401, doi:10.1029/2005GL023549.
- Szilagyi, J., Crago, R. and Qualls, R. (2016) : A calibration-free formulation of the complementary relationship of evaporation for continental-scale hydrology, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 264-278.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, W., Tenhunen, J., Valentini, R. and Verma, S. (2002) : Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113 (1-4), 223-243.