

逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発散量の比較
—手取川流域の林業試験場および石川県立大学農場での適用事例—
Comparison of Actual Evapotranspiration estimated by Inverse Analysis
and Penman Potential Evaporation
—Case Study of Forest Experimental Station and Experimental Farm
in Ishikawa Prefectural University—

丸山利輔*・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*, ITO Kouzo*

*Ishikawa Prefectural University (1-308 Nonoichi City Ishikawa)

Abstract

This paper describes a comparison between actual evapotranspiration (ETa) estimated by inverse analysis, recently proposed by the authors, and the Penman potential evaporation (Ep). To confirm the reasonability of the inverse method, ETa was estimated using climate data for seven years at an experimental farm (flat area) and an experimental forest (mountainous area). To confirm the reasonableness of the inverse method, estimations of yearly and monthly ETa were conducted over seven years and resulted in reasonable results. Then, comparisons between daily Ep and ETa resulted in both items being closely correlated; Ep was 0.805 times that of ETa at the farm and 0.654 at the forest in terms of mean values. Finally, the ratios of ETa versus Ep were calculated. At the forest station, the ratio increased from 0.4 in March to 0.8 in July and was maintained at 0.8 after July for the year, whereas at the farm site, the ratio remained at ~0.7-0.8 throughout the year. The result for the forest was thus quite different from empirical results to date that showed a ratio of ~0.7-0.8 throughout the year. The reason of this difference was considered from aspect of net radiation, wind velocity and soil characteristics.

Key Words: inverse analysis, Penman equation, evaporation ratio, heat balance, single height temperature and humidity

要 旨

本研究は、近年公表した新しい逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発散量を比較検討した内容である。まず、逆解析法により正常に蒸発散量が算定できるか否かを検討するため、石川県立大学農場及び石川県林業試験場（林試）の7年間の気象資料を活用して検討した。この結果、この方法で蒸発散が正常に算定できることを日単位の資料の比較によって確認した。次に、月別のペンマン蒸発量との逆解析法による実蒸発量の比について検討した。その結果、林試においては、3月から7月にかけて、この比率が0.4から0.8程度に漸増し、それ以降は0.8程度で推移することが示された。農場においてはこの比率が年間を通じて0.7~0.8で推移することが示された。林試の傾向はこれまで経験的に使われていた年間0.7~0.8と異なるものであった。この理由について純放射、風速、土壌の違いの視点から考察した。

キーワード: 逆解析法、ペンマン式、蒸発散比率、熱収支、1高度の気温と湿度

1. はじめに

蒸発散の研究は、古くから今日まで継続して行われてきているが、その意義は次の3点に要約される。①灌漑、特に畑地灌漑の用水量の基礎になる。②地球上の水循環の一要因をなす。③地球温暖化の原因となる炭酸ガスの評価と深い拘わりを持つ。前2要因はこれまでも多くの研究者によって指摘されているので、説明を要しないが、第3の要因について若干の説明を加える。

地球温暖化の原因とされる炭酸ガスのエミッションは渦相関法によって測定されているが、蒸発散も全く同様の原理によって測定されている。しかし、蒸発散の測定結果は、現時点での研究では、熱収支の原則を満足していない。純放射が潜熱と顕熱の和より約20%多く、潜熱と顕熱が正確に測定されていない可能性が高い (FLUXNET)。一方、炭酸ガスには蒸発散のように収支の判定基準 (熱収支関係) がないので、このような判定はできない。このことは、地球温暖化の原因となる炭酸ガスの排出量の評価に疑問を呈することに他ならない。このために、世界中の多くの研究者が、蒸発散の研究に大きな関心を持っている (Foken et al.2008, Wilson et al.2002)。

近年、筆者らは、逆解析法による蒸発散の推定法を提案している (Maruyama and Segawa, 2016a, 2016b, 2017, Maruyama et al.2019)。この方法は、これまでのポーエン比法は2高度の気温と湿度の測定値を必要としたのに対し、1高度の気温と湿度を利用し、もう一つの高度には地表を選び、この気温と湿度は、熱収支を満足させるように、最適化手法を使って決定し、蒸発散を求めようとする新しい方法である。この方法は、提案されて間もないためにも適用事例がほとんどなく、今後多くの適用事例が待たれるところである。

また、これまで、蒸発散の推定法の一つとして、ペンマンの蒸発散ポテンシャルに特定の係数を乗じて実蒸発散を推定する方法が使われてきている。しかし、その係数に確たる根拠がなく、問題が残されている。今回、逆解析法によって実蒸発散が推定できることとなったので、改めてこの係数について研究することとした。すなわち、本研究の目的は次の2点に要約される。

- ① 新しく提案された逆解析法による蒸発散推定法の実用可能性を確認すること
- ② 逆解析法による実蒸発散量とペンマン蒸発量との関係を明らかにすること

2. 研究の方法

2.1 逆解析法による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、蒸発散量 ET を推定する新しい方法である。熱収支式 (1) を基本とし、(2) 式の H 、 IE 分配比を仮定して、最適化手法により、未知の地表面温度 T_s と地表面湿度 $rehs$ を推定する。

この計算を (1) 式が収束するまで繰り返し、解が収束した時点の B_{app} (2) 式を B_0 とする。この B_0 を用いて H 、 IE を求める。未知数が T_s 、 $rehs$ の2個なので、(4)、(5) の2式を連立に解き未知数 T_s 、 $rehs$ を確定する (Maruyama and Segawa 2017, Maruyama et al.2019)。

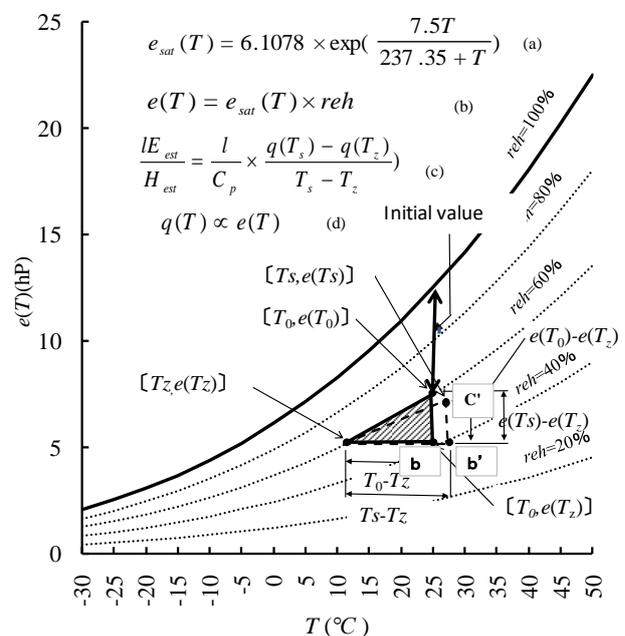


図1 逆解析法における初期値の説明

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

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

$$q(T_s) = reh_s \times q_{sat}(T_s) \quad (3)$$

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

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

ただし, i :時間, j :繰り返し回数。

最適化の目的関数は、(4)式と(5)式の絶対値の和(6)式を選び、この値が最小になるように最適計算する。

$$ABS[\varepsilon_i^j] + ABS[\varepsilon_i^{j+1}] \rightarrow \min \quad (6)$$

ただし、計算の過程で、 H と lE の値が過大に変動するのを防ぐために次の制約を加える。

$$\begin{aligned} [ABS(H^j) + ABS(H^{j+1})] < \alpha \times [ABS(Rn^j - G^j) + ABS(Rn^{j+1} - G^{j+1})] \cdots \cdots H \text{ に対して} \\ [ABS(lE^j) + ABS(lE^{j+1})] < \alpha \times [ABS(Rn^j - G^j) + ABS(Rn^{j+1} - G^{j+1})] \cdots \cdots lE \text{ に対して} \end{aligned} \quad (7)$$

この方法の重要な点は、最適化計算に当たっての初期値の設定である。すなわち、**図1**の $T \sim e(T)$ ダイアグラム上で実測値 $T_z, q(T_z)$ により1点 a を定め、地表面近傍で測定した地温 $T_0(b)$ を T_s の近似値と仮定する。さらに、 T_0 に対応する湿度 $q(T_0)(c)$ を求め、(異常が仮定した B_{app})熱収支(1)式を満足するように、EXCELLに内蔵されている SOLVER により最適化計算を行う。実際の計算では数回の試行で収束する場合が多い。この方法は、誤差面が複雑で、極値が複数存在するため、初期値を変えて計算を行う必要がある。とくに、 H と lE 分配比を探索するために、解に対する感度が敏感でなく、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、この方法は基本的にはボーエン比 (Bo) 法に属するため、異常値を削除しなければならない。筆者らの方法(伊藤・丸山、2019)により、 $\alpha = 1.5$ の基準によって異常値を削除した。その上で、 $-3 < Bo < +1$ に対して $Bo = -3$ を、 $-1 < Bo < -0.333$ に対して $Bo = -0.333$ を適用して、熱収支 ($Rn - G = H + lE$)が満足されるようにした。

2.2 ペンマン法の概要

この方法はよく知られているので簡単に式のみ示す。

$$lE = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(u) \quad (8)$$

$$f(u) = 0.26 \times (1 + 0.537 \times U_z) \times [e_{sat}(T_a) - e_a] \quad (9)$$

ここに、 U_z は2.0mの高度の風速、 Δ は飽和水蒸気圧曲線の傾き (hPa/°C)、 λ は気化潜熱、 γ は乾湿計定数、 reh は相対湿度、 e_{sat} は飽和水蒸気圧、 q は比湿。

2.3 R_n の計算

林業試験場では R_n を実測しているが、石川県立大学農場ではこれを実測していない。そこで気温と湿度、および全天日射量の実測値から R_n を算定することとした。

$$R_n = S_n(1-a) + L_D - L_U \quad (10)$$

ここに、 S_n は全天日射量(短波)、 a はアルベド (0.05)、 L_D は下向き長波放射、 L_U は上向き長波放射。

$$L_n = -1 \times \sigma (T_a + 273.16)^4 \times (0.34 - 0.14 \times \text{SQRT}(e_a)) \times (0.1 + 0.9 \times a/b) \quad (11)$$

この式で、 $L_n = L_D - L_U$ 、 σ はステファンボルツマン定数 ($5.670 \times 10^{-08} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)、 a/b : 日照率 (松井、2010)。

2.4 石川県林業試験場 (林試) での気象観測

林試は、白山市三の宮 (東経 $36^\circ 25'52.64''$ 、北緯 $36^\circ 38'25.21''$ 、標高 139m) に立地し、気象観測露場はこの試験所内にある (写真参照)。純放射 (NR-LITE, プリュード社)、気・湿度 (高さ 2.0m)

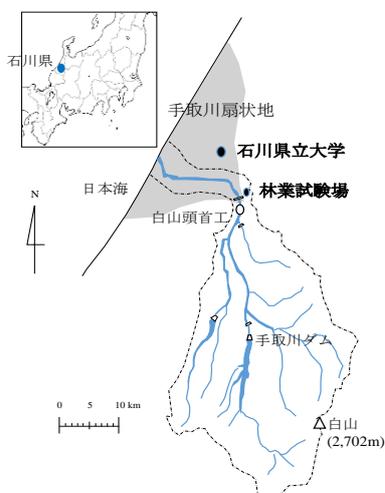


図2 試験地の位置



図3 林試における気象観測

地温 (深さ 10 cm) HMP45C, クリマテック社) 風速 (KDC-SO4-05103, タマヤ社)、日照 (CIS-162, クリマテック社)、日射 (LI200X, クリマテック)、地中熱フラックス (HFP01, クリマテック) を測定した。風速は 10m の高さで測定しているので、ペンマン蒸発量を算定する際には、2.0m の高さに換算した。

2.5 農場における気象観測

石川県立大学は石川県野々市市末松 (東経 $36^\circ 30'43.39''$ 、標高 44m) に立地し、農場は行内に設置され、農場で気象観測が行われている (写真参照)。気象観測機器はすべて Campbell 社製で、温湿度 (CS-500-L6)、風速 (03001-L11) 日射 (LI200X-L11)、地温 (107-L25)、気圧 (CS105)、日照時間、



図4 農場における気象観測

地温(107-L25)を(5cm)測定している。風速は6mの高さで測定しているので、ペンマン蒸発量を算定する際には、2.0mの高さに換算した。

3. 研究結果

3.1 林試資料による分析結果

3.1.1 年間の熱収支

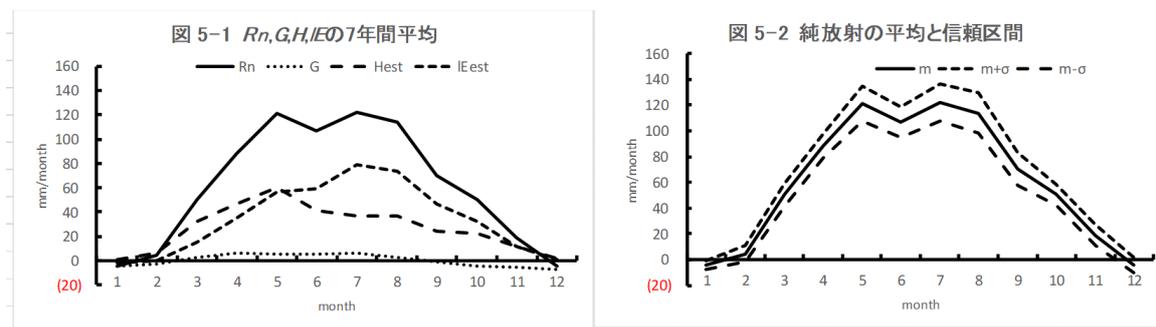
林試において、2012年から2018年までの7年間の時間単位の資料に基づき、逆解析法により、潜熱と顕熱を算定し、月単位にまとめたのが表1である。この表によると、本試験地では、 Rn は平均で739.8mm/y、 H は318.5mm/y、 IE は416.1mm/yで、それぞれ Rn の43.8%、56.2%を占める。本試験地は山間部に立地し日照は平旦部よりかなりすくない。なお、放射フラックスは100W/m²当たり3.53mm/dayの割合で換算した(近藤2015)。

表1 林試における熱収支の解析結果

Year	Rn	G	H	IE	Inbalance
2012	668.3	9.6	281.1	377.6	0.0
2013	725.8	5.8	319.1	400.9	0.0
2014	760.3	8.0	325.0	427.4	0.0
2015	760.5	11.3	308.7	440.4	0.0
2016	744.7	5.4	303.7	435.6	0.0
2017	738.1	-11.6	334.8	414.9	0.0
2018	780.9	7.9	357.4	415.6	0.0
Mean	739.8	5.2	318.5	416.1	0.0

3.1.2 熱収支の季節別変化

次に熱収支の季節別変化に注目する。図5-1は Rn 、 H 、 IE の7年間の平均値の月別変化を示したものである。冬季(12-3月)には H が IE を上回っていることが注目される。これはこの期間の特徴および積雪による影響と考えられる。図5-2は Rn 、図5-3は H 、図5-4は IE の月別変化と7年間の変動範囲(標準偏差)を示したものである。新しく提案した逆解析法によって、各項目とも正常な推定が出来ていると判断される。



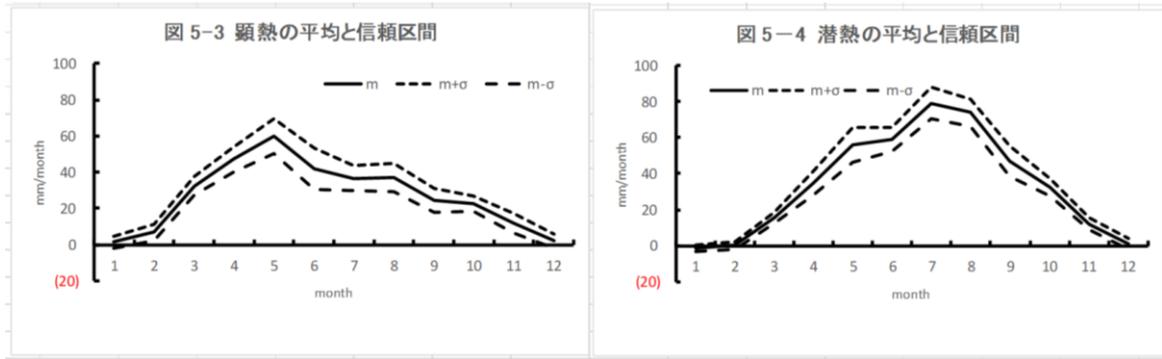


図5 林試における熱収支の月別変化（7年間の資料）

3.2 農場資料による結果

表2 農場における熱収支の解析結果

3.2.1 年間の熱収支

農場において、2012年から2018年までの7年間の時間単位の資料に基づき、逆解析法により、 IE と H を算定し、月単位にまとめた(表2)。この表によると、本試験地では、 Rn は平均で927.5mm/y、 H は329.6mm/y、 IE は597.9mm/yで、それぞれ Rn の35.5%および64.5%を占める。本試験地は平坦部に立地し日照時間は林試よりかなり多く、 Rn に占める IE の割合も高い。

年	Rn	G	H	IE	差
2012	1065.7	0.0	340.6	725.1	0.0
2013	1059.9	0.0	344.6	715.4	0.0
2014	941.8	0.0	368.8	573.1	0.0
2015	891.5	0.0	349.4	542.1	0.0
2016	855.3	0.0	311.3	544.0	0.0
2017	842.8	0.0	273.2	569.6	0.0
2018	835.7	0.0	319.7	516.0	0.0
平均	927.5	0.0	329.6	597.9	0.0

3.2.2 熱収支の季節別変化

次に熱収支の季節別変化に注目する。図6-1は Rn 、 H 、 IE の7年間の平均値の月別変化を示したものである。冬季(12-3月)には H が IE を上回っていることが注目される。

これはこの期間の特徴と考えられる。図6-2は Rn 、図6-3は H 、図6-4は IE の月別変化と7年間の変動範囲(標準偏差)を示したものである。新しく提案した逆解析法によって、各項目とも正常な推定が出来ていること判断される。

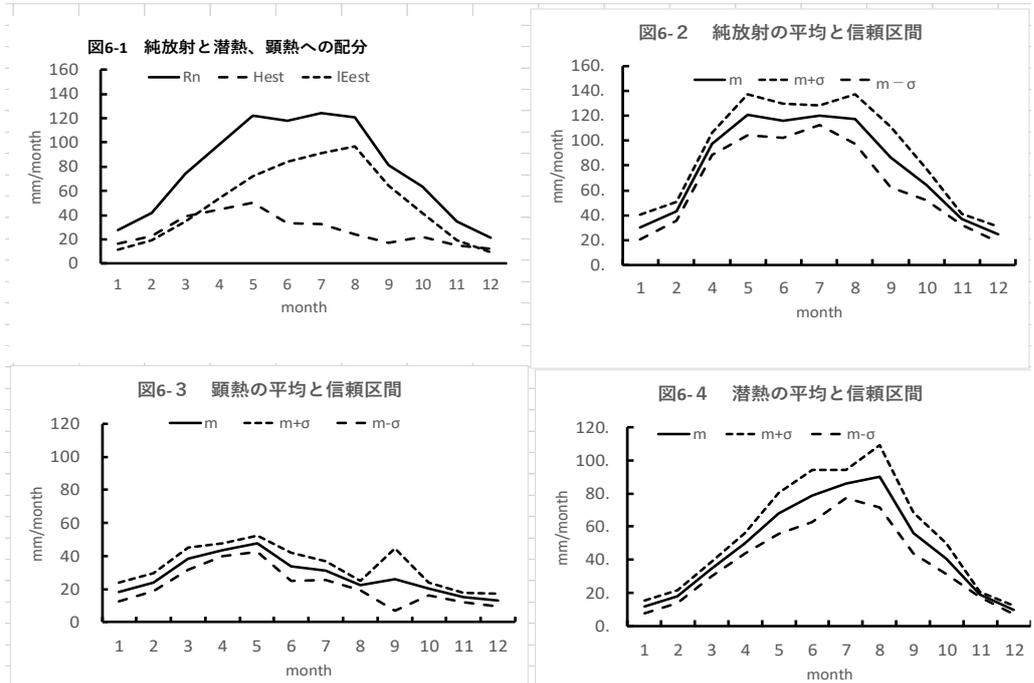


図6 農場における熱収支の月別変化（7年間の資料）

4. 考察

4.1 E_p と ETa の比較

4.1.1 逆解析法の正当性

逆解析法(ETa)の正当性を確認するために、この方法とペンマン法(E_p)の解析結果を比較した(表3)この表に示されるように、係数(ETa/E_p)は、農場では平均0.810、林試では0.664となった。これまで、実蒸発散の算定が困難であったため、このような資料は提示されなかったが、逆解析によって実蒸発散が推定可能となったため、得られた資料といえる。勿論これまで、実験的に実蒸発散量の算定が行われていたが、これらの値と算定結果は矛盾するものではなく、むしろ追認した結果となっている。

表3 逆解析法(ETa)とペンマン法(E_p)の比較

Year	Forest site		Farm site	
	ETa/E_p	R^2	ETa/E_p	R^2
2012	0.645	0.861	0.914	0.733
2013	0.637	0.863	0.885	0.788
2014	0.650	0.810	0.779	0.706
2015	0.689	0.818	0.764	0.721
2016	0.693	0.706	0.787	0.740
2017	0.697	0.746	0.783	0.519
2018	0.637	0.842	0.757	0.733
Mean	0.664	0.807	0.810	0.706
σ	0.028	0.060	0.063	0.086

4.1.2 農場と林試の実蒸発散量 (ETa) とペンマン法 (E_p) の比較

図7に農場と林試の実蒸発散量 (ETa) とペンマン法 (E_p) の関係を2012年の日単位の資料について比較した。林試では、 E_p に対して ETa は約0.645倍の値を示したのに対し、農場では0.914倍と農場の方がやや大きい値を示した。

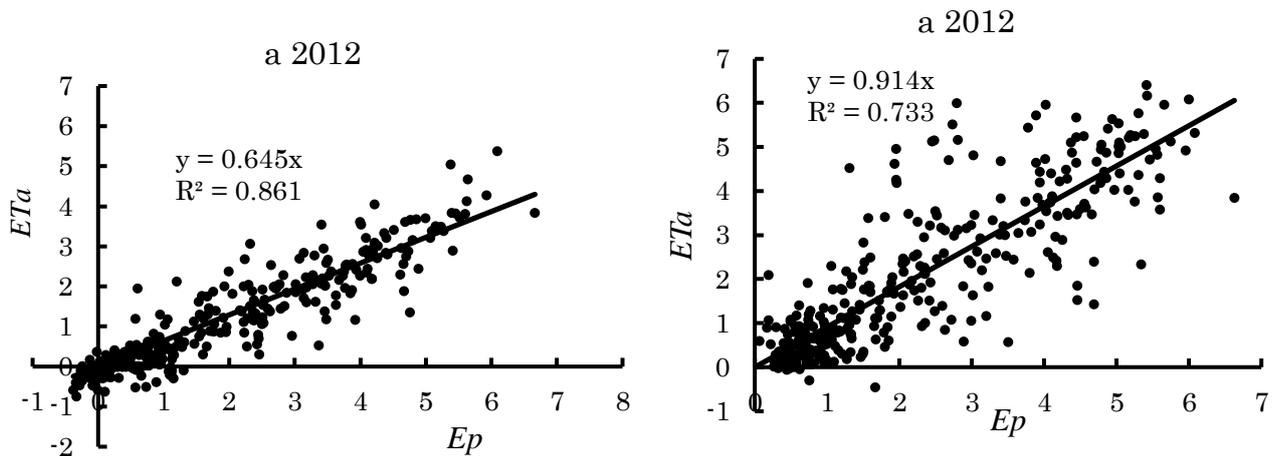


図7 逆解析法とペンマン法の比較

図7-aは林試における E_p と ETa (2012年)の両者を比較したもので、良い相関を示しており、実蒸発散量(逆解析法)が正しく求められていることがわかる。この図は1年の例であるが、解析に供した2013~2018年でもほぼ同様な結果が得られた。

図7-bは農場における E_p と ETa (2012年)の両者を直接比較したもので、 R^2 は林試より小さく分散は大きいですが、良い相関を示しており、実蒸発散量(逆解析法)が正しく求められていることがわかる。この図は林試同様1年の例であるが、解析に供した2013~2018年でもほぼ同様な結果が得られた。

4.2 林試における ETa と Ep の比較

これまで、流域実蒸発散量を推定するのに、しばしば Ep と ETa の比率で推定する場合があった。しかし、この比率は経験的に定めたもので確たる根拠に基づいた係数とは言い難い面があった。本研究で、逆解析法によって、実蒸発散が推定できたのでこの比率を算定し、信頼区間(標準偏差)と共に示した。ただし、冬期(11~2月)は積雪のため除外した。この図から明らかなように、3月から7月にかけて、約0.4から0.8へと漸増する傾向を示し、これまで経験的に使われてきた値と大きく異なる結果となった。この理由は地表面の温度と湿度が農場に比較して大きく変動し、地表がより乾燥したためと考えられる。

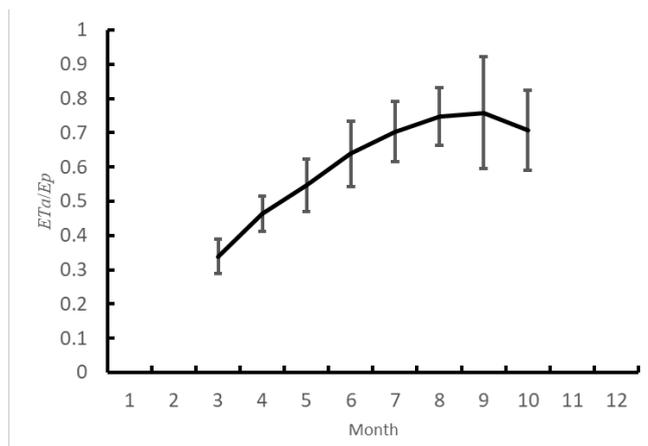


図8 実蒸発散量とペンマン蒸発量の比較 (林試)

4.3 農場における ETa と Ep の比較

同様な目的で、農場における ETa と Ep の月別変化とその信頼区間を図9に示した。この場合は、2月から9月までは0.8程度の値を示し、これまで経験的に使われていた値と大きな差は見られなかった。冬季(11月~1月)にはこの係数が小さくなった。

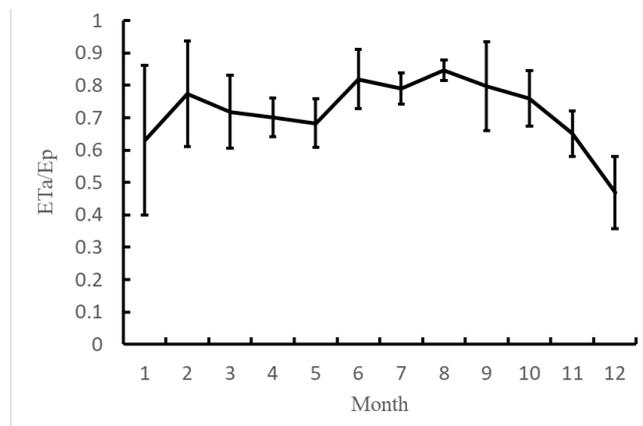


図9 実蒸発散量とペンマン蒸発量の比較 (農場)

4.4 農場と林試の ETa/Ep が大きく異なる理由

この理由を要約すると次の3点にまとめられる。

1. 農場の Rn は林試の Rn より大きいことは当然として、潜熱と顕熱の配分率も前者が大きい
2. 風速の蒸発散に及ぼす影響をペンマン式の第2項により検討したところ、農場の方が林試より風速の影響が大きいことが示された。
3. 最適化計算の結果、湿度及び地表面温度の初期値と収束値の変化を検討した結果、林試の方が農場より大きく、林試では土壌水の流動抵抗の方が大きいことが示された。このことは林試の方がより乾燥しており、減率蒸発の程度が農場より大きいことが推定された。

5. 討論

5.1 収束状況

純放射を実測している林試の逆解析では、最適化計算前の段階ですでに約33%が収束しており、第1段階最適化(初期値 $rehs=rehz$)で約80%の収束、第2段階最適化(初期値 $rehs=0.9rehz+0.1$)で約95%の収束を見ている。これに対し、農場での逆解析では最適化計算前の段階で28%、第1段階最適化(初期値 $rehs=rehz$)で約68%の収束、第2段階最適化(初期値 $rehs=0.9rehz+0.1$)78%、第3段階最適化(初期値 $rehs=0.8rehz+0.2$)で約78%の収束、第4段階最適化(初期値 $rehs=0.95rehz+0.05$)

ようやく 85%の収束に到達した。この原因は明確ではないが、林試では実測純放射を使用しているのに対し、農場では全天日射と計算による長波放射を使用したためではないかと推察している。(但し、 reh_s は仮定した地表面の湿度、 reh_z は実測湿度)

なお、この逆解析法は、仮定した reh_s, Ts による熱収支の残差(式 6)は初期値の設定段階で極めて小さな値となり、 W/m^2 の単位で 10^{-12} オーダーまではゼロに等しい。本研究では 10^{15} を乗じて最適化計算を行った。

5.2 実蒸発散量の計算に際しての注意事項

Bo 法には、2 高度間の潜熱のバルク計数 C_E と顕熱のバルク計数 C_H が等しいという前提がある。したがって、本法もこのバルク計数が等しくなるよう解析領域(同定する未知の下層の温度と湿度の高度)を選定しなければならない。露場の場合は芝であるから、下層の高さは地表面をとって問題ないが、森林の場合は、樹冠直上または樹冠よりやや内部に入った高度、作物や草地の場合は、作物直上または作物高の上から少なくとも 3 分の一程度の高さを想定する必要がある。但し、 Bo 法では 2 高度の温度差と湿度差の比率だけが問題となるので実際の距離は解析結果には関係ない。

6. 結びと今後の課題

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、 Bo 法の考え方による逆解析により蒸発散を求め、 Bo 法と比較検討した内容である。

実験サイトとしては石川県手取川流域の山地部林試を、平坦地として石川県立大学農場を選定した。両地点の 2012 年から 2018 年までの 7 年間の時間単位の資料を解析に供した。逆解析法により、両地点の蒸発散量は正常に算定され、月別変化も同様に正常に求めることができた。これによって、新しく提案した蒸発散の逆解析法は、正常に機能することが確認できた。

以上の資料を用いて、これまで経験的に使われていた ETa と Ep の比率について検討した。その結果、林試の資料では、これまで経験的に使われていた比率と大きく異なる値、すなわち春先には 0.4 と小さな値が得られ、7 月に向かって 0.8 と漸増することがわかった。平坦地の農場では 2 月から 9 月までは 0.7~0.9 とこれまで経験的に得られた値と大きな差は認められなかった、しかし 11 月~2 月の冬期には小さくなった。これによって、 ETa を Ep との比によって推定することの問題点と合理的な点が確認できた。なお、 ETa については、最適化にあたっての初期値の選定に検討の余地があることを付け加える。本研究は手取川流域に限定された地域の解析例であり、一般的の傾向を知るには、資料が少ない、今後の条件の異なる地域で同様な解析を行い、資料の蓄積を待つて一般的な傾向が明らかになることを期待したい。

謝辞： 本研究で使用した石川県立大学農場の気象資料については石川県立大学高居恵愛講師および石川県林業試験場の各位にお世話になった。また、応用水分・水環境研究部会シンポジウム第 32 回 (2019.11.29) において、アルベドを改良すべき指摘があり、今後の改正の予定である。記して深謝の意を表したい。

引用文献

Foken, T., 2008. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications*. 18(6), 1351-1367. Ecological Society of America

- 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例、農業農村工学会論文集 309 (87-2) 1-159~1-167
- 近藤純正, 1996.: 水環境の気象学, 5. 地表面付近の風と乱流, 6 地表面の熱収支の基礎, 99-159, 朝倉書店 東京.
- 近藤純正, 2015. 地表面の熱収支, [http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1999/1999_11_0769.pdf\(ref.2018.6.7\)](http://www.metsoc.jp/tenki/pdf/1999/1999_11_0769.pdf(ref.2018.6.7))
- Maruyama, T., 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 Resources and Protection*, 8 724-742. doi:org/10.4326/jwarp.2016.87059
- Maruyama, T., Segawa, M., 2016b. : Application of reciprocal analysis of sensible and latent heat fluxes with evapotranspiration at a humid region. *Journal of Modern Hydrology* , 6, 230-252, doi:10.4236/ojmh 2016.64019
- Maruyama,T., Segawa, M., 2017. : Estimation of the sensible and latent heat fluxes by reciprocal analysis at an arid and semi-arid region. *Journal of Modern Hydrology*, 7, 38-64, doi:10.4236/ojmh 2017.71003 .
- Maruyama,T., Ito,K.,Takimoto,H.,(2018)Abnormal data rejection range in the Bowen Ratio and inverse analysis method for estimating evapotranspiration, *Agricultural and Forest Meteorology*,269-270.323-334
- Toshisuke Maruyama, Kouzo Ito, and Hiroshi Takimoto (2019) : Abnormal Data Rejection Range in the Bowen Ratio and Inverse Analysis Methods for Estimating Evapotranspiration, *Agricultural and forest meteorology* 269-270、323-334
- 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、農業農村工学会論文集 309 (87-2) 1-169~1-178
- 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 (78-6) 95-100
- Wilson, K., Allen,G., Eva,F., Marc,A.,Dennis,B.,Paul,B., Christian, B.,Reinhart,C., Han,D., Chris.F., Achim,G., Andreas,I., Law, B. E., Andy,K., Tilden,M., John,M.,Russ,M., Walter,O., John,T., Shashi, V. and Riccardo,V., 2002: Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1), 223-243, doi: 10.1016/s0168-1923(02)00109-0.