

# FLUX 2015 森林資料を利用した逆解析法による蒸発散量推定法の評価

## Evaluation of the Inverse Analysis of Evapotranspiration Estimation Using FLUXNET 2015 Forest Data

丸山利輔 藤井三志郎

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 Kouzou

Ishikawa Prefectural University, 1-308, Suematsu, Nonoiichi, Ishikawa Prefecture

### Abstract

Using data spanning 71 years from eight forest sites in FLUXNET2015, this study compares evapotranspiration observed by FLUXNET which corrected by the Bowen ratio concept with an inverse analysis that uses the recently proposed method which also based on the Bowen ratio concept. The study was conducted from the aspect of daily, monthly, and yearly evapotranspiration, resulting in well coincided the observed value with the estimated by the inverse analysis. The reasonability of estimating evapotranspiration by the inverse analysis method was validated indirectly using the observed evapotranspiration in FLUXNET2015 through daily, monthly, and yearly analyses.

**Key Words:** actual evapotranspiration, Heat balance, Latent heat flux, Data correction. penman equation, Bowen ratio

### 要 旨

本論文は、USA 及びフランス国内の森林8試験地の気象資料(FLUXNET2015)を使用して、通算 71 年間の蒸発散量を分析し、近年提案しているが逆解析法(ボーエン比法の一つ)の妥当性を評価した内容である。逆解析法による推定蒸発散量とFLUXNET2015 による日単位、月単位及び年単位の実測蒸発散量を比較し、逆解析法によって妥当な蒸発散量が推定でできる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

### 1.1 研究の目的とこれまでの研究経過

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(Penman,1948:Morton,1978:大槻ら, 1984)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いえない。また、FLUXNET が公表され、世界的に関係研究者によって活用されているが、熱収支関係が満足されていないという大きな課題が残されていた(Forken,2008:Wilson,et.al.,2002:Maruyama and Segawa,2016a.,b)。

最近、公表された FLUXNET2015(Pastorello, G.et al. 2020)は世界の 212 地点において通算約 1500 地点・年の気象資料であり、従来の FLUXNET の問題点であった、熱収支の不均衡の解消を試みた資料である。筆者らは近年公表した逆解析法による蒸発散量推定法の妥当性評価に、信頼できる蒸発散量の実測値を求めていたが、国内では適切な資料を得ることができず、世界的にその資料を探策していた。今回、上述のように FLUXNET2015 が公表されたので、早速この資料を活用して、逆解析法による蒸発散量推定法の妥当性を検証することとした。

FLUXNET2015の資料は、ボーエン比法の考え方にに基づき、 $(Rn-G)/(H+LE) = EBC-CF$  を実測され

た  $H$ ,  $IE$  に乗じて  $H$ ,  $IE$  を修正する方法であるが、単純にこの係数を乗ずるのではなく次のような工夫をしている。30 分間隔の資料につき 22:00-02:30 及び 10:00-14:30 の資料に対して、プラスマイナス 15 日間の移動平均を適用しその結果算定された値を修正値として採用している。これは日の出、日没の熱貯留の大きな時間帯を排除したものであが、結果として熱収支がクロ-ズしていない。また、日単位の資料についてはプラスマイナス 7 日間の移動平均を適用し、時間単位と異なる方法で修正しているので、時間単位の観測値とは一致していない。また、年単位の資料は、時間単位の資料を基礎としているが、単純に時間単位の資料を年単位に集計していないので、時間単位の単純集計となっていない。詳細には Pastorello, et.al., 2020. を参照されたい。

## 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、蒸発散量  $ET$  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、顕熱分配比を仮定して、最適化手法により、 $T_s$  と  $q(T_s)$  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 (6) 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 ( $B_0$ ) とする。この  $B_0$  を用いて潜熱、顕熱を分離する。未知数が  $T_s$ ,  $rehs$  の 2 個なので、式 (4)、式 (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)。

$$R_n = H + IE + G \quad (1)$$

$$B_{app} = \frac{H_{est}}{IE_{est}} = \frac{C_p(T_s - T_z)}{\lambda[q(T_s) - q(T_z)]} \quad (2)$$

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

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

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

ただし、 $C_p$ : 水の定圧比熱 ( $J \cdot kg \cdot kg^{-1}$ )、 $q$ : 比湿 ( $kg \cdot kg^{-1}$ )、 $i$ : 時間、 $j$ : 繰り返し回数

最適化の目的関数は、式 (4) と式 (5) の絶対値の和

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

が最小になるように計算する。ただし、計算の過程で、 $IE$  の値が過大に変動するのを防ぐために  $IE$  に対して、次の拘束を加える。

$$[ABS(IE) + ABS(IE^{j+1})] < \alpha \times [ABS(R_n^j - G^j) + ABS(R_n^{j+1} - G^{j+1})] \quad (7)$$

式(7)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。仮定した初期値 ( $T_s, q(T_s)$ ) に対して熱収支式(1)式を満足するように、最適化計算を行う。実際の計算では数回の繰り返して収束する場合が多い。この方法は、誤差面 [ $\varepsilon = F(T_s, rehs)$ ] 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, 2019; 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。具体的には、 $-3 < Bo < -1$  に対して  $Bo = -3$  を、 $-1 < Bo < -0.333$  に対して  $Bo = -0.333$  を適用して、熱収支がバランスするようにした。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 気象観測地点の概要

本研究で使用した気象資料の観測点は、USA 国内において 7 地点、フランス国内において 1 地点の合計 8 地点である。各地点の緯度・経度・標高・平均

Table 1 Outline of tested sites

Site name	Latitude	Longitude	Elevation (m)	Temp. (°C)	Prec. (mm)	Tested year	Remarks
US-MMS	39.3232	-86.4131	275	10.85	1032	14	Indiana University
US-NR1	40.0329	-105.5464	3050	1.5	800	10	University of Colorado
US-Blo	38.8953	-120.6328	1315	11.09	1226	6	University of California, Berkeley
US-UMB	45.5598	-84.7138	234	5.83	803	8	Virginia Commonwealth University
US-WCr	45.8059	-90.0799	520	4.02	787	5	University of Wisconsin
FR-Pue	43.7413	3.5957	270	13.5	883	7	Centre d'Ecologie Fonctionnelle
US-Oho	41.5545	-83.8438	230	10.1	849	9	University of Michigan
US-Me2	44.4523	-121.5574	1253	6.28	523	12	Oregon State University

気温・年降水量・資料利用年数・管理機関は Table 1 に示す通りであり、多くの地点の管理は州立大学の教育部門が担当している。

US-MMS は、インディアナ州に立地し、広葉樹林帯である。US-NR1 は、コロラドに立地し、落葉性広葉樹林帯で標高が 3050m と高地である。US-Blo は、カリフォルニアシェラネバダ山脈内に立地し、常緑樹林帯である。US-UMB は、バージニア州、5 大湖の南に立地し、落葉性広葉樹林帯である。US-WCr

は、ウイソコンシン州に立地し、落葉性広葉樹、特に、サトウカエデが卓越し、なだらかな丘陵である。FR-Pue は、フランス南部、スペイン国境近くに立地し、常緑樹林帯である。US-Oho は、オハイ

Table 2 Accuracy of hourly based data correction by FLUXNET2015 ( $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$ ).

Site name	$R_n$	$G$	$H_{obs}$	$LE_{obs}$	Imbalance	Imb.SD
US-MMS	1179.3	0.4	514.3	771.7	-107.2	63.0
US-NR1	1355.5	-3.3	701.3	790.6	-133.0	81.4
US-Blo	1445.5	12.6	734.7	838.6	-140.3	45.7
US-WCr	811.1	86.3	506.3	512.2	-293.6	37.9
FR-Pue	1011.7	-0.5	547.6	534.9	-70.2	47.9
US-Me2	1182.5	7.2	721.4	693.8	-239.9	116.9
US-Oho	1094.7	-11.5	483.5	916.1	-293.4	60.7
US-UMB	984.6	0.0	388.6	487.4	108.6	84.4

オ州に立地し、樅の樹林帯・サバンナ・草原の混交林である。US-Me2 は、オレゴン州に立地し、

平均樹齢 71 年の老木樹林帯である。

### 2.3 気象資料の特徴と取り扱い

FLUXNET2015 は、先述のように、時間単位の修正法と日単位の修正法とは異なっている。したがって修正された結果も当然異なるものとなる。

**Table 2** は時間単位の修正結果の熱収支バランスを調査年間の平均で示したものである。熱収支バランスは  $Rn-G-Hobs-IEobs$  により求められている。したがって  $Rn-G$  が正確に観測されていることを前提としていることになる。この値がマイナスになれば、 $Hobs+IEobs$  が過大評価されていることになり、反対にプラスになれば過少評価されていることになる。いずれにしても修正された値がゼロになっていないので依然として観測誤差は修正できていない。

**Table 2** には時間単位の修正資料の熱収支バランス、**Table 3** には、日単位の修正資料を、**Table 4** には年単位の修正資料を示した。なお、熱収支誤差 ( $= 1-(IEobs+Hobs)/(Rn-G)$ ) が 30% 以上資料は、採用しないことと

Table 3 Accuracy of daily based data correction by FLUXNET2015 ( $mm \cdot y^{-1}$ ).

Site name	$Rn$	$G$	$Hobs$	$IEobs$	Imbalance	Imb.SD
US-MMS	1181.2	0.3	433.5	674.0	73.5	19.5
US-NR1	1350.1	-3.5	657.4	741.3	-45.0	51.5
US-Blo	1451.0	12.5	621.6	714.8	102.1	21.1
US-WCr	833.5	86.3	393.6	417.8	-64.2	37.0
FR-Pue	1013.9	-6.4	495.7	462.8	61.8	44.7
US-Me2	1184.7	7.2	615.2	572.4	-10.0	55.9
US-Oho	1101.3	-11.5	372.5	763.7	-23.4	55.1
US-UMB	989.0	0.0	390.2	488.3	110.6	22.7

Table 4 Accuracy of yearly based data correction by FLUXNET2015 ( $mm \cdot y^{-1}$ ).

Site name	$Rn$	$G$	$Hobs$	$IEobs$	Imbalance	Imb.SD
US-MMs	1178.5	0.3	717.7	477.6	-17.1	56.9
US-NR1	1343.5	-3.5	719.0	627.1	0.9	5.2
US-Blo	1478.5	13.0	761.3	662.3	41.8	28.0
US-WCr	996.3	86.2	439.2	411.1	59.7	48.4
FR-Pue	1036.3	-11.4	527.8	499.4	20.6	71.5
US-Me2	1256.0	7.2	597.0	611.8	39.9	45.2
US-Oho	1161.9	-11.5	756.5	391.5	25.3	97.2
US-UMB	989.3	0.0	487.9	389.8	111.6	40.5

Table 5 Amount of missing data and convergence ratio in the inverse analysis.

Site name	No. of data	No. of missing	Available data	missing ratio	No. of no convergence	Convergence ratio
US-MMs	8765.1	78.8	8689.2	0.009	334.0	0.962
US-NR1	8764.8	88.4	8678.9	0.010	524.2	0.940
US-Blo	8768.0	325.2	8442.8	0.037	131.8	0.984
US-UMB	8769.0	93.3	8679.1	0.011	402.9	0.954
US-WCr	8769.6	1493.6	7275.2	0.170	196.0	0.973
FR-Pue	8763.4	207.7	8553.4	0.024	248.3	0.971
US-Me2	8766.0	494.8	8343.6	0.056	338.3	0.959
US-Oho	8765.3	478.4	8286.2	0.055	208.2	0.975

Table 6 Initial values for optimization in the inverse analysis.

Site name	Initial value for all season	Initial value for summer season	Summer season period (month)
US-MMS	$rehs=1.0 \times rehz$	$rehs=0.2 \times rehz$	5,6~8,9
US-NR1	$rehs=0.6 \times rehz$	$rehs=0.2 \times rehz$	4~8
US-Blo	$rehs=0.9 \times rehz$		
US-UMB	$rehs=1.0 \times rehz$		
US-WCr	$rehs=1.0 \times rehz$	$rehs=0.2 \times rehz$	6~8
FR-Pue	$rehs=1.0 \times rehz$		
US-Oho	$rehs=1.0 \times rehz$	$rehs=0.2 \times rehz$	6~9
US-Me2	$rehs=1.0 \times rehz$		

した。

## 2.4 気象資料の欠測状況と収束状況

本研究で採用した気象資料の年平均資料数(平年と閏年)、欠測数、使用数、欠測率を **Table5** にまとめて示した。また、逆解析法で最適化計算を行った結果、年平均の収束数(式(6)の  $\varepsilon$  がゼロになった場合)及びその割合を同じく

**Table5** に示した。

## 2.5 最適化計算にあたっての初期値の設定

逆解析法の大きな問題の一つは、解の一意性の問題である。式(6)を満足する解が複数存在し、どれが正しいか判別できない。換言すれば、解の収束は必要条件であっても十分条件ではないことになる。したがって、初期値は最適値の近傍に設定することが肝要である。本研究の場合は、最適決定すべき変数は、下層の気温  $T_s$  と湿度  $rehs$  である。 $T_s$  の近似値としては地表面近傍で測定した  $T_o$  を採用することとし、湿度の初期値は実測湿度  $rehz$  の関数として、次のように数値実験的に決定した。

観測した湿度  $rehz$  を 10 等分し、 $rehs=A \times rehz$  とおき、通年については、 $A$  を **Table6** に示した値を選択し、最適化計算を行った。次に収束しない時間帯の資料を集め、 $A$  を 0.1 だけ増加させて同様に最適化計算を行った。この手順を繰り返し、収束率(全資料に対する収束した資料の割合)が 94% に達した段階で最適化計算が終了したものとした。なお、本計算は、初期値を設定した時点で、すでに約 30% の資料は収束していた。また、この目的関数  $\varepsilon$  は極めて小さく  $W \cdot m^{-2}$  単位で  $10^{-12}$  までゼロに等し

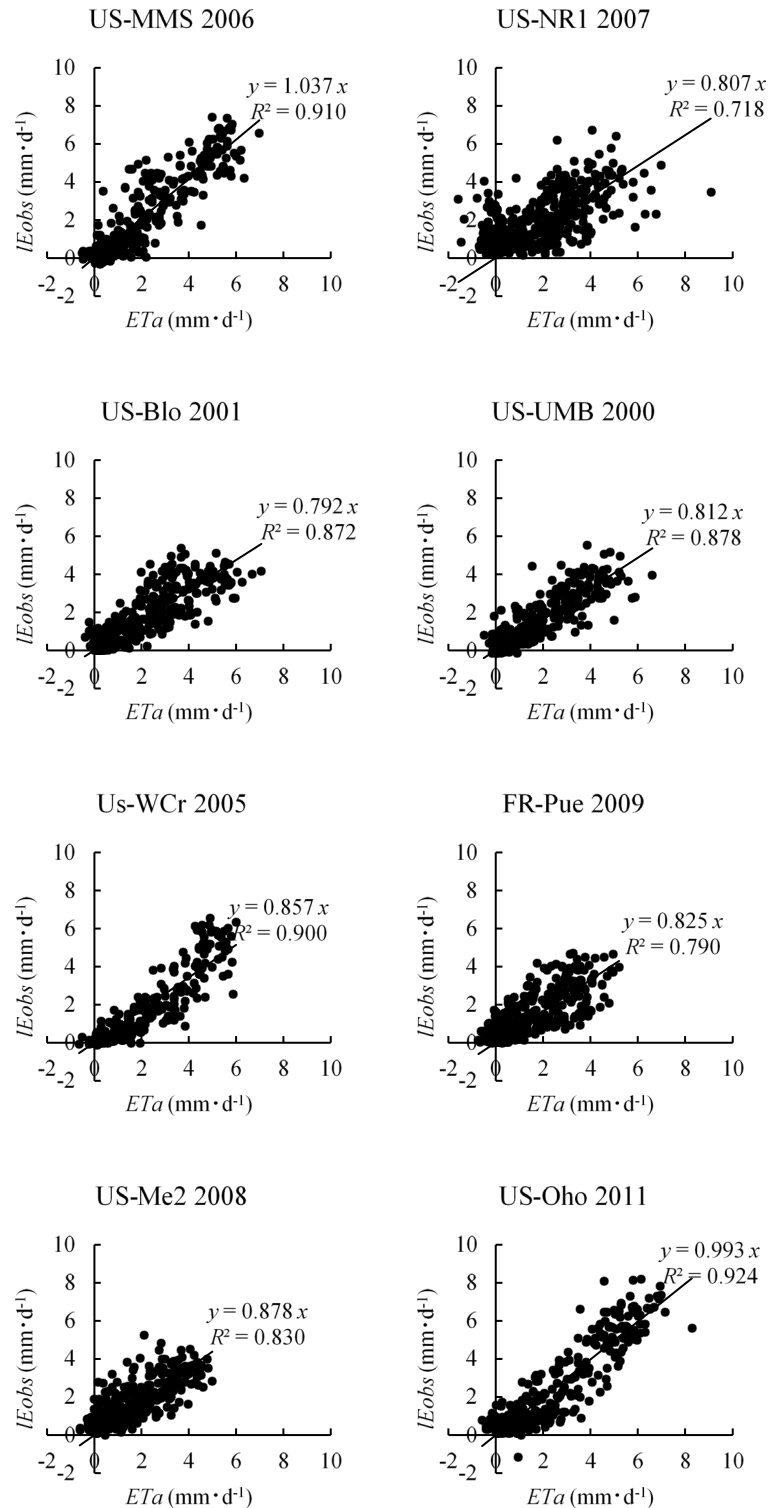


Fig. 1 Comparison of the  $ETa$  versus  $lEobs$  for the eight sites.

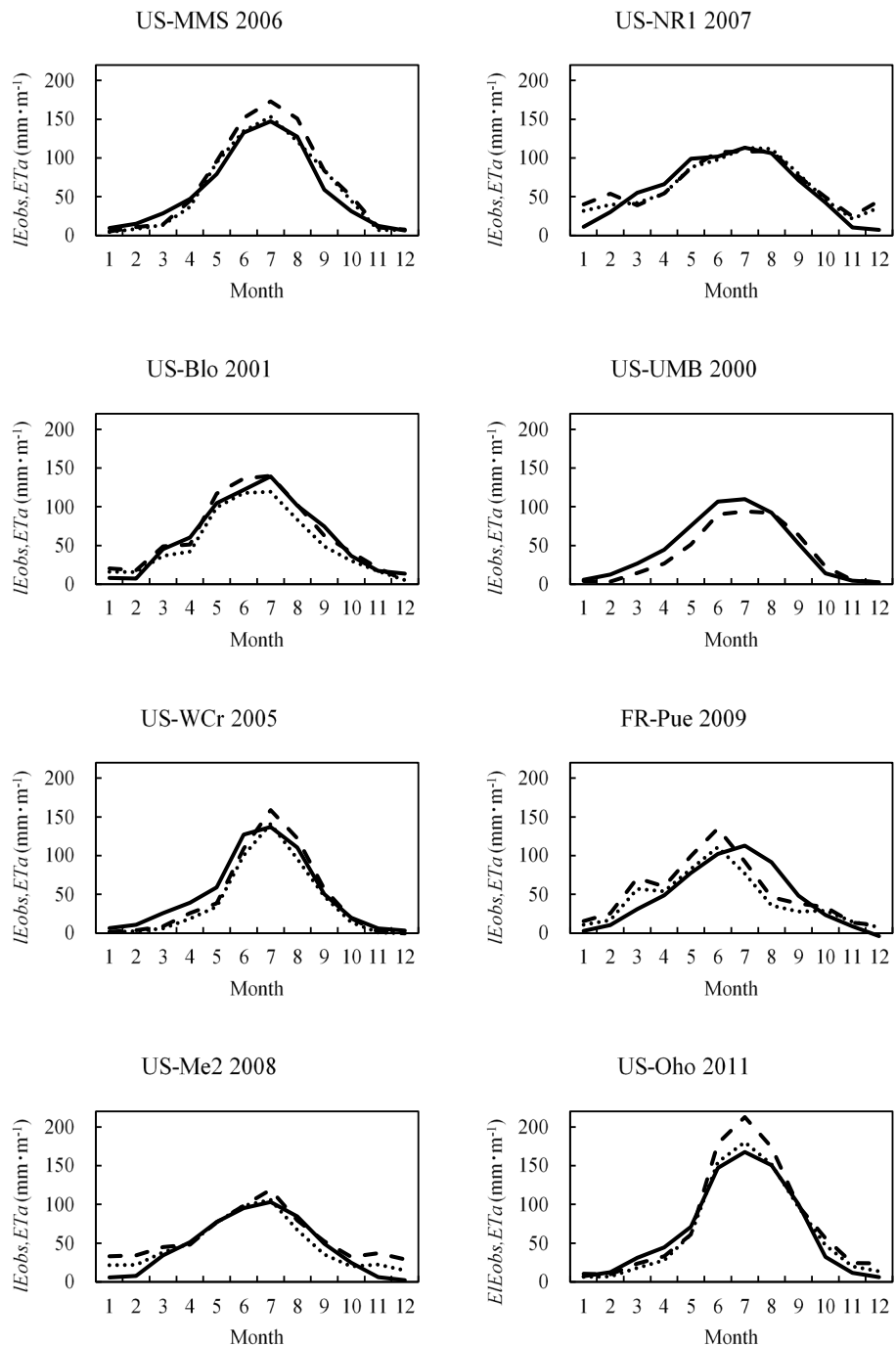
く、 $10^{-15}$  になってようやく3桁の有効数字が表れた。したがって熱収支残に  $10^{15}$  をかけて残差を可視化し、収束状況を見ながら最適化計算を行った。

また、夏期に他の季節と異なる大きな蒸発散を実測した場合は、この期間を抽出して初期値  $A$  を変更し、最適化計算を行った。本研究で採用した夏期の初期値は **Table6** に示した通りである。

### 3. 分析結果と考察

#### 3.1 日単位の資料による実測蒸発散量 ( $IEobs$ ) と逆解析法による推定蒸発散量 ( $ETa$ ) の比較

日単位の資料について、各試験地の実測蒸発散量 ( $IEobs$ ) と逆解析法による推定蒸発散量 ( $ETa$ ) の比較の一例を **Figure1** に示した。この図に示されるように、勾配は 0.792 (US-Blo) から 1.037 (US-MMS) まで変化し、決定係数  $R^2$  は 0.370 (FR-Pue) から 0.878 (US-UMB) まで変化した。試験した資料全体については **Table7** に各試験地の  $IEobs$  と  $ETa$  関係の勾配と  $R^2$  の平均を示した。US-Oho は勾配 0.966,  $R^2$  0.912 を示し両者はよく一致することを示した。これに対して、FR-Pue は勾配 0.682,  $R^2$  0.734 を示し、両者にあまり良い一致が期待できないことが示された。他の試験地はこの中間の値を示した。



**Fig.2** An example of monthly change of the  $ETa$  and  $IEobs$  at the eight sites

Note: Solid line= $ETa$ , Dotted line= $IEobs$ -daily, Dashed line= $IEobs$ -hourly

**Table7** *IEobs*-yearly vs. *ETa* annual average slopes and  $R^2$  at eight sites

Item	US-MMS		US-NR1		US-Blo		US-WCr	
	slope	$R^2$	slope	$R^2$	slope	$R^2$	slope	$R^2$
Average	0.948	0.891	0.708	0.618	0.828	0.533	0.796	0.421
SD	0.062	0.022	0.048	0.089	0.058	0.180	0.116	0.174

Item	FR-Pue		US-Me2		US-Oho		US-UMB	
	slope	$R^2$	slope	$R^2$	slope	$R^2$	slope	$R^2$
Average	0.682	0.734	0.821	0.754	0.966	0.912	0.902	0.841
SD	0.183	0.078	0.090	0.069	0.103	0.028	0.096	0.053

### 3.2 月単位の資料による実測蒸発散量 (*IEobs*) と逆解析法による推定蒸発散量 (*ETa*) の比較

月単位の実測蒸発散量と逆解析法による推定蒸発散量の比較を **Figure2** に示した. 実蒸発散量には時間単位の実測値からまとめたものと日単位の実測値からまとめたものの2種類がある. 一般に時間単位の実測蒸発散量は日単位のそれよりも大きい. この理由は, 原資料の修正方法の違いによる. 全般的に見れば, 逆解析法の推定蒸発散量は, 夏期には実測蒸発散量をよく再現しているが, 冬期には再現性はやや劣る. 試験地ごとにみると, US-NR1 と US--Me2 は夏期3者が比較定よく一致しており, US-MMS と US-Oho は *IEobs*-daily と *ETa* がよく一致している. US-Blo と US-WCr はあまり良い一致とは言えない. FR-Pue は実測値の精度に問題があると思われる. US-UMB は基礎資料の修正が行われていないので, *IEobs* と *ETa* のみの資料である.

**Table 8** Comparison of the *IEobs*-yearly and *ETa* annual average ( $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$ ).

te name	US-MMS		US-NR1		US-Blo		US-WCr	
	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ET</i>
verage	717.7	741.2	719.0	710.8	761.3	750.1	439.2	520
SD	60.5	42.5	35.1	22.7	59.6	15.4	77.2	17.

te name	FR-Pue		US-Me2		US-Oho		US-UMB	
	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ETa</i>	<i>IEobs</i>	<i>ET</i>
verage	527.8	582.2	597.0	565.9	756.5	757.0	487.9	517
SD	95.3	57.3	50.5	71.2	58.3	18.5	43.8	19.

### 3.3 年単位の資料による実測蒸発散量 (*IEobs*) と逆解析法による推定蒸発散量 (*ETa*) の比較

Table8 は年単位の資料を集計した *IEobs*-yearly の年平均値と日単位の資料を集計した *ETa* を比較したものである. 両者は標準偏差の範囲内で一致している. したがって, *ETa* の推定値は, ほぼ妥当であると判断してよいと考える. ただし, *IEobs*-yearly 自身が Table4 に示したように, 観測誤差を含んでいるのでさらに考察を加える必要がある.

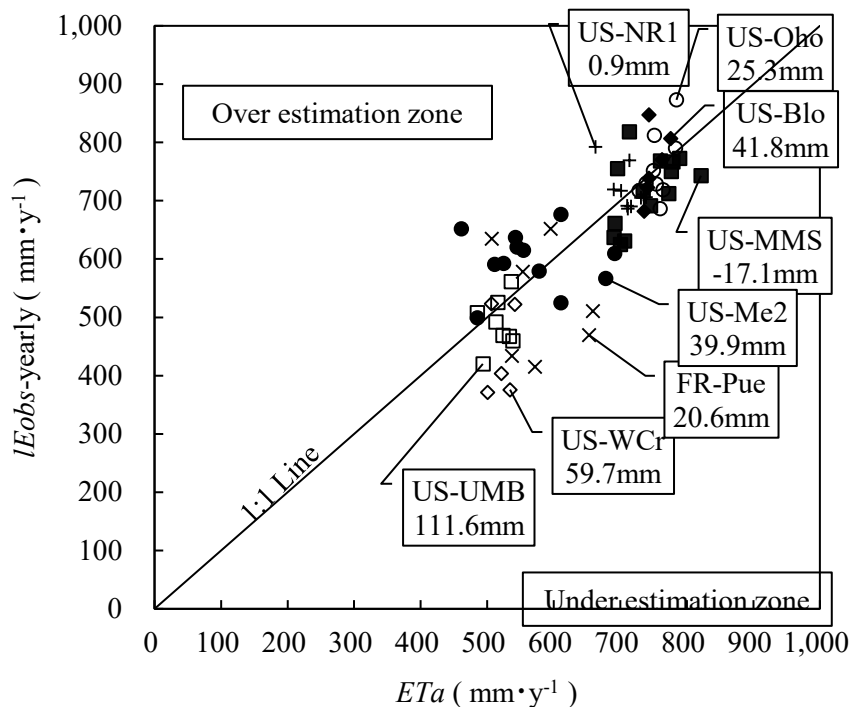


Fig.3  $ETa$  vs.  $lEobs$ -yearly

Figure3 は  $ETa$  と  $lEobs$ -Yearly の観測年ごとの関係を全観測値についてプロットしたものである。図中の試験地ごとの枠内には、Table4 に示したインバランスを記している。US-MMS 地区を除いてすべてプラスの値を示しているが、これは観測値自身が過少推定であることを意味している。この事実は、間接的ではあるが、 $ETa$  の推定値が妥当である可能性を示していると理解できる。

### 3.4. インバランスを修正した $lEobs$ -yearly の年平均値と $ETa$ の比較

著者らは、これまでの FLUXNET が熱収支関係を満足していない欠点を改め、FLUXNET2015 では熱収支関係が満足されていることを期待して本研究を計画した。しかし実際には、Table2, Table3, Table4 に示したように、熱収支は完全には満足されていなかった。そこで、やや大胆ではあるが、各年のインバランスを修正した  $lEobs'$ -yearly と  $ETa$  を比較することとした。修正方法はインバランスが潜熱と顕熱の両者に対するものであることを考慮し、 $lEobs'$ -yearly =  $lEobs$ -yearly + インバランス  $\times$   $lEobs$ -yearly / ( $lEobs$ -yearly +  $Hobs$ -yearly) によった。この結果を示したのが、Figure.4 であり、両者 ( $lEobs'$ -yearly と  $ETa$ ) は見事に一致した。これによって、逆解析法の蒸発散推定値  $ETa$  は妥当であることが証明できた。

## 4. まとめ

本研究は、著者らが近年提案した蒸発散量の逆解析法の妥当性を検証するために行った研究である。逆解析法は提案してから数年を経過しているが、この妥当性を検証するための信頼できる実蒸発散量の長期にわたる実証的な資料が国内はもとより国際的にも見当たらなかった。ところが近年 FLUXNET2015 が公表された (Pastorello et. al. . 2020) .

著者らは、この資料に熱収支が均衡していることを期待したが、残念ながらこの方法でも熱



収支は完全には均衡しておらず、間接的にしかこの方法を活用することはできなかった。この研究成果の概要は、次の通りである。

FLUXNET2015 の蒸発散量に関する熱収支要素の修正法がボーエン比法の考え方に基づくこと、その修正法が時間単位の資料と日単位の資料、さらに年単位とは異なることを確認したうえ、時間単位、日単位、年単位熱収支状況を整理した。使用した資料は、US-MMS, US-NR1, US-Blo, US-UMB, US-WCr, FR-Pue, US-Oho, US-Me2 の 8 試験地のもので通算 71 年間の長きにわたる資料である。

以上の資料を利用して、まず時間単位で修正した実測蒸発散量 ( $IEobs$ -hourly) を日単位にまとめた

蒸発散量  $IEobs$  と逆解析による蒸発散推定量 ( $ETa$ ) とを比較し、両者が密接な関係を有することを確認した。次に、月単位の蒸発散量について、時間単位の資料をまとめた蒸発散量 ( $IEobs$ -hourly) 及び日単位の資料をまとめた蒸発散量 ( $IEobs$ -daily) と逆解析による推定蒸発散量 ( $ETa$ ) とを比較し、試験地によって多少の相違はありものの概要両者は一致していることを確認した。

つづいて、年単位の資料について、実測蒸発散量 ( $IEobs$ -yearly) と逆解析による蒸発散量 ( $ETa$ ) を比較した。両者の試験地ごとの平均値で比較した結果では、両者は標準偏差の範囲内ではよく一致した。さらに、年ごとの平均値で両者を比較したが、これもかなりの精度で一致した。しかし、この実測資料には熱収支のインバランスが含まれているため、これを除去することを考えた。この方法は、インバランスには潜熱由来のものと顕熱由来のものが含まれていることを考慮し、このインバランスは実測の潜熱と潜熱に比例するものと仮定して行った。このインバランスを考慮して、実測の蒸発散量 ( $IEobs$ '-yearly) を修正すると  $IEobs$ -yearly と  $ETa$  は年平均では極めてよく一致した。したがって、逆解析による推定蒸発散量 ( $ETa$ ) は蒸発散量を忠実に再現していると結論付けた。

謝辞：貴重な気象資料を提供いただきました US-MMS, US-NR1, US-Blo, US-UMB, US-WCr, FR-Pue, US-Me2, and US-Oho の各機関及び関係の皆様へ深甚の謝意を表します。この資料がなかったならば、本研究を行うことはできませんでした。また、九州大学大槻教授及び石川県立大学の関係者には本論文作成にあたって貴重な助言をいただきました。併せて厚く御礼を申し上げます。

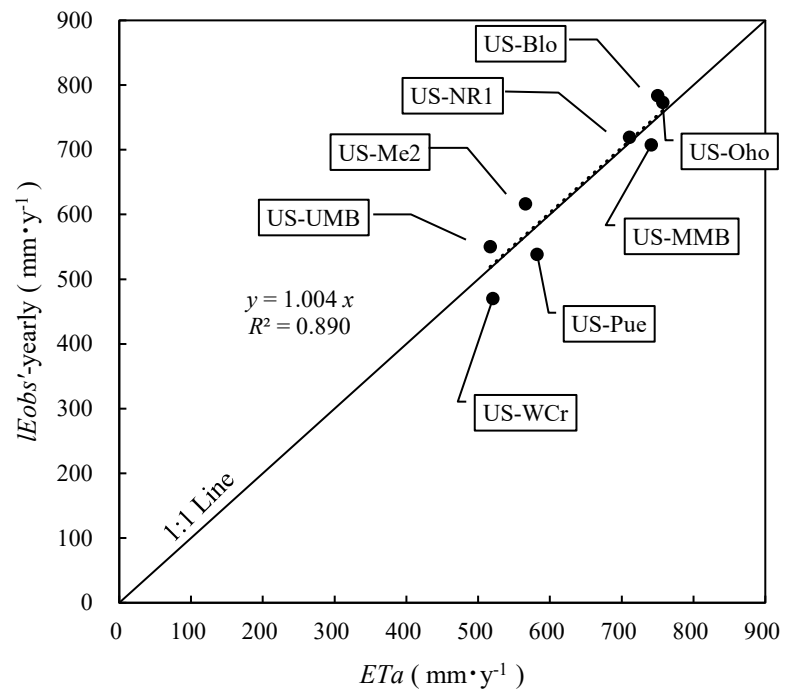


Fig.4  $IEobs$ '-yearly vs.  $ETa$

## 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, 瀧本裕士, 丸山利輔 (2019) : 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, No.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-159~1-167
- 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 Resources and Protection*, 8 724-742. doi:org/10.4326/jwarp.2016.87059
- Maruyama, T. and 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. and 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. (2019) : Abnormal data rejection range in the Bowen Ratio and inverse analysis method for estimating evapotranspiration, *Agriculture and Forest Meteorology* 323-334
- Morton, F., I. (1978) Estimating evapotranspiration from potential evaporation-practicality of an iconoclastic approach-, *J. Hydrol.*38 pp1~32
- 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, 農業農村工学会論文集 309 (87-2) I\_169~I\_178
- 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, 一実蒸発散量推定に関する研究 (II) 一, 農業土木論文集, 第 112 号, 17-23
- 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), 65-71
- Pastorello, G. et al. 2020. The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data, *Scientific Data*, 7, article number 225, doi:10.1038/s41597-020-0534-3.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proceedings of the Royal Society A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 193, 120-145, doi:10.1098/rspa.1948.0037
- .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, *Agriculture and Forest Meteorology*, 113 (1) , 223-243, doi: 10.1016/s0168