

平成 17 年度 卒業論文

モンゴル半乾燥地における
夜間蒸発量の評価と推定

筑波大学第一学群自然学類

地球科学主専攻

200200301

阪口かなえ

2006 年 1 月

目次

Abstract	ii
表目次	iii
図目次	iv
1. はじめに	1
2. 研究方法	
2-1 研究対象地域	1
2-2 観測データ	2
3. 結果	
3-1 データ精度	6
3-2 観測データの代表性	6
3-3 潜熱フラックスの季節変化	7
3-4 潜熱フラックスの時間変化	7
3-5 潜熱フラックスの推定	8
4. まとめ	9
謝辞	9
参考文献	10

The Evaluation and Estimation of Night Time Evaporation in Semi-arid Area, Mongolia.

Kanae SAKAGUCHI

Abstract

During the day, the surface air is mixed vertically by heated ground. The mixed layer has been studied very well and equations to estimate evaporation have been established. However, the stable layer is not fully understood and not easily characterized by unique time and space scale. It is an object of this research to make clear the interaction between the air and the surface layer. The data were measured by automatic observation station established in Mongolia. As this routine data were measured at one fixed place, net radiation and heat flux in the soil of the area around the automatic station were additionally measured in order to improve their representation. The measured data were corrected based on this measurement. The components of wind velocity, H_2O flux and CO_2 flux were also measured at 50Hz. Their quality was tested by spectral analysis, steady-state test and integral turbulence characteristics. It was found that the quality of the data at night was as high as that of the day. The evaporation of the day and that of the night were evaluated respectively with good quality data. It was certain that water evaporation occurred when $Rn - G$ was less than 0. The time changes of the meteorological elements during the period when night evaporation took place were examined. There were varieties of cases when water evaporated in the night. The estimated evaporation by existing models, by van Bavel(1966), by Slatyer and McIlroy(1961), by Denmead and McIlroy(1970), by Priestlyey and Taylor(1972) and by Kojima(2004), were compared with measured values. Evaporations of night were weakly correlated with estimated values. The estimate equations of night evaporation seem to be very complex and we must further look into mechanism of it to make better equation.

Keyword: Night time evaporation, quality of data, existing models

表目次

表 1	観測項目(地上)	．．．．．	1 2
表 2	観測項目(地下)	．．．．．	1 3
表 3	観測データ	．．．．．	1 4
表 4	積分乱流特性テストにおけるパラメタリゼーション	．．．．．	1 6
表 5	データ精度の分類	．．．．．	1 7
表 6	2003 年の粗度長	．．．．．	1 8

図目次

図 1	モンゴルと研究地域概略図	1 9
図 2	研究対象地域(KBU)	2 0
図 3	観測ステーション周辺(research area 拡大図)	2 1
図 4	観測ステーション	2 2
図 5	50Hz 観測の模式図	2 3
図 6	10Hz 観測の移動図	2 4
図 7	熱流板設置図	2 5
図 8	スペクトル解析結果($z/L \leq 0$, u , v , w)	2 6
図 9	スペクトル解析結果($z/L \leq 0$, T , H_2O , CO_2)	2 7
図 10	スペクトル解析結果($z/L > 0$, u , v , w)	2 8
図 11	スペクトル解析結果($z/L > 0$, T , H_2O , CO_2)	2 9
図 12	定常性テスト結果(顕熱 $H \geq 10$ かつ $u_* > 0.1$)	3 0
図 13	定常性テスト結果(顕熱 $H < 10$ かつ $u_* > 0.1$)	3 1
図 14	積分乱流特性による精度分類結果(顕熱 $H \geq 10$ かつ $u_* > 0.1$)	3 2
図 15	積分乱流特性による精度分類結果(顕熱 $H < 0$ かつ $u_* > 0.1$)	3 3
図 16	正味放射量のルーチン観測値とステーション周辺観測値の関係	3 4
図 17	4 月に埋設した熱流板とルーチン観測値との関係および 7 月に埋設した熱流板の平均値との関係(Apr.-June)	3 5
図 18	ルーチン観測値と 7 月に埋設した熱流板の平均値との関係(July-Aug.)	3 6
図 19	ルーチン観測値と 7 月に埋設した熱流板の平均値との関係(Sep.-Oct.)	3 7
図 20	2003 年の蒸発量・凝結量の月別日平均	3 8
図 21	2003 年の蒸発量・凝結量・正味蒸発量の月別日平均	3 9
図 22	昼間凝結時(2003 年 5 月 5 日)の各要素の時間変化	4 0
図 23	昼間蒸発時(2003 年 4 月 13 日)の各要素の時間変化	4 1
図 24	夜間蒸発時(2003 年 7 月 4~5 日)の各要素の時間変化	4 2
図 25	夜間蒸発時(2003 年 4 月 10~11 日)の各要素の時間変化	4 3

図 26	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, Apr.-June)	・ ・ ・ ・ ・ 4 4
図 27	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, July-Aug.)	・ ・ ・ ・ ・ 4 5
図 28	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, Sep.-Oct.)	・ ・ ・ ・ ・ 4 6
図 29	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, Apr.-June)	・ ・ ・ ・ ・ 4 7
図 30	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, July-Aug.)	・ ・ ・ ・ ・ 4 8
図 31	van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, Sep.-Oct.)	・ ・ ・ ・ ・ 4 9
図 32	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較(L による場合分け, Apr.-June)	5 0
図 33	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較(L による場合分け, July-Aug.)	5 1
図 34	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較(L による場合分け, Sep.-Oct.)	5 2
図 35	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による平衡蒸発量 の推定値と実測値の比較($Rn-G$ による場合分け, Apr.-June)	・ ・ 5 3
図 36	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による平衡蒸発量 の推定値と実測値の比較($Rn-G$ による場合分け, July-Aug.)	・ ・ 5 4
図 37	Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による平衡蒸発量 の推定値と実測値の比較($Rn-G$ による場合分け, Sep.-Oct.)	・ ・ 5 5
図 38	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, Apr.-June)	・ ・ ・ ・ ・ 5 6
図 39	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, July-Aug.)	・ ・ ・ ・ ・ 5 7

図 40	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 (L による場合分け, Sep.-Oct.)	5 8
図 41	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, Apr.-June)	5 9
図 42	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, July-Aug.)	6 0
図 43	Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較 ($Rn-G$ による場合分け, Sep.-Oct.)	6 1
図 44	小島(2004) による土壌水分の関係としての蒸発量推定値と 実測値の比較(Apr.-June)	6 2
図 45	小島(2004) による土壌水分の関係としての蒸発量推定値と 実測値の比較(July-Aug.)	6 3
図 46	小島(2004) による土壌水分の関係としての蒸発量推定値と 実測値の比較(Sep.-Oct.)	6 4

1. はじめに

日中の鉛直方向の混合は、自由大気中の汚染物質を表層へ下降させ、夜間土壌表面に沈下させるため、都市の高速道路や空港では重要な環境問題となっており、解明が求められている(Nappo and Johansson, 1999). また、水収支構成要素の一つである夜間の蒸発散量あるいは、凝結量を確定する式も確立されていない. 例えば、Sugita and Brutsaert (1992)による日蒸発量の推定結果は、観測値と $r = 0.97$ という良い相関を見せたものの、観測値を平均で約 5%(最大で 15%)過小評価していることを明らかにした. この過小評価は夜間の蒸発量の推定が行われていなかったためである. これらに共通している問題は、夜間における乱流の振る舞いについて不明確な点が多いことである. その理由として夜間に現れる安定な大気条件における乱流構造の観測・モデル化が行われていないことが挙げられる(Nappo and Johansson, 1999).

そこで本研究では、夜間の安定境界層の特性を明らかにすることで、夜間の蒸発量・凝結量の推定を行うことを目的とする. 誤差の多いとされる夜間データ精度のチェックを行い、潜熱フラックスの季節変化・時間変化から夜間蒸発の特徴を考察し、既存モデルによる推定を行った.

2. 研究方法

2-1 研究対象地域

対象地域はモンゴル県のヘンティ県のヘルレン川流域 Kherlenbayan-Ulaan(以降 KBU)の草原($47^{\circ}12'50.3''\text{N}$, $108^{\circ}44'14.4''$)である(図 1, 2). この地域は標高約 1235m, 年平均気温は 2°C , 年平均降水量は 181mm(1993~2003)と低温で乾燥しているが、夏季には日中の最高気温が 30°C を超え、降水量の 99%が 5 月から 9 月に集中している. そのため、気候は乾季と雨季に分かれており、植物の生育も雨季の期間に集中している(浦野, 2005).

KBU の村から西へ約 500m離れた草原内にフラックス観測ステーションが設置されている(図 3). 観測ステーションは測器保護のためにフェンスで囲われており、付近は水平数 km にわたって一様な広がりが続いている.

観測ステーションでは地上部と地下部でそれぞれの観測を行っており、各項目の値は 30 分間の平均値として自動でロガーに記録している(図 4). 観測している項目については表 1, 2 に示す(Sugita *et al.*, 2006). 自動観測は 2003 年 3 月 25 日より開始しており、現在も継続中である(2006 年 1 月現在).

研究対象地域の観測ステーションで観測されたデータのうち、今回使用したものと、その使用目的を表 3 に示す. また、全てのデータは観測ステーション内での測器同士による影響を避けるため、風向を WNW~NE のものになっている.

2-2 観測データ

①2005 年夏データ

2005 年 7 月 31 日から 8 月 6 日に対象地域において、観測ステーションの 30 分平均データの精度を確認するために、風速水平成分、風速鉛直成分、CO₂ フラックス、H₂O フラックス、気温について 50Hz で測定した(図 5). このデータを用いてスペクトル解析を行った. スペクトル解析には以下の式を用いた(Stull, 1988).

$$F_A(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cos(2\pi nk / N) - \frac{i}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \sin(2\pi nk / N) \quad (1)$$

$$E_A(n) = |F_A(n)|^2 = |F_{real \ part}(n)|^2 + |F_{imag \ part}(n)|^2 \quad (2)$$

$$E_A(f) = E_A(n) \times \Delta t \quad (3)$$

ここで、 $F_A(n)$ はフーリエ変換されたデータ ($n = 0, \dots, N-1$), $A(k)$ はもとの時系列データ ($k = 0, \dots, N-1$), N はデータ数, f [Hz] は周波数, Δt [sec] はサンプリング周期である. 結果は f を横軸, $E_A(f)$ を縦軸にプロットした.

さらに、50Hz で測定したデータを用いて定常性テスト(Steady-state test)を行った(Foken *et al.*, 2004). 定常性テストは、ある時間での共分散とその時間をいくつかに分割したときのそれぞれの共分散を比較するものである. 例えば、風速鉛直成分を w 、観測された風速水平成分もしくはあるスカラー量を x としたとき、50Hz で 30 分間の観測を行い、30 分を 6 つの間隔に等分すると、各間隔で総数 $M = 15000$ 、30 分間で総数 $N = 90000$ の観測値を得ることができ各間隔における共分散は以下ようになる.

$$(\overline{x'w'})_i = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x}_i)(w_j - \bar{w}_i) \quad (4)$$

すると、各間隔により求めた 30 分間の共分散は、

$$\overline{x'w'} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 (\overline{x'w'})_i \quad (5)$$

となり、30 分間全体での共分散は、

$$(\overline{x'w'})_o = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_k - \bar{x}_o)(w_k - \bar{w}_o) \quad (6)$$

である。この二つの値の差を以下の式によって定義できる(Foken *et al.*, 2004).

$$RN_{\text{cov}} = \left| \frac{(\overline{x'w'}) - (\overline{x'w'})_o}{(\overline{x'w'})_o} \right| \quad (7)$$

この RN_{cov} を風速鉛直成分 w と気温 T 、 w と潜熱フラックス H_2O 、 w と CO_2 フラックスの 3 つの組み合わせについて算出し、それぞれを以下のように定義した。

$$RN_{\text{cov}}(\overline{w'T'}) = \left| \frac{(\overline{w'T'}) - (\overline{w'T'})_o}{(\overline{w'T'})_o} \right| \quad (8)$$

$$RN_{\text{cov}}(\overline{w'H_2O'}) = \left| \frac{(\overline{w'H_2O'}) - (\overline{w'H_2O'})_o}{(\overline{w'H_2O'})_o} \right| \quad (9)$$

$$RN_{\text{cov}}(\overline{w'CO_2'}) = \left| \frac{(\overline{w'CO_2'}) - (\overline{w'CO_2'})_o}{(\overline{w'CO_2'})_o} \right| \quad (10)$$

(8), (9), (10)式のそれぞれについて昼間と夜間の場合分けを以下の式に従って行った。

$$\text{昼(day)} \quad \cdots \cdots Rn - G \geq 0 \quad (11)$$

$$\text{夜(night)} \quad \cdots \cdots Rn - G < 0 \quad (12)$$

Rn は正味放射 [W/m^2], G は地中熱流量 [W/m^2] である。

さらに、2005 年の 4 月 1 日から 10 月 29 日までのルーチン観測値を用いて積分乱流特性(ITC)による精度テストも行った。乱流パラメーターの標準偏差とその乱流フラックス比は定数、もしくは安定度の関数であることが知られている。これが積分乱流特性(Integral Turbulence Characteristic)と言われるものである。ITC は安定度により異なるので、各安定度におけるパラメタリゼーションを Foken *et al.* (1997)および Thomas and Foken (2002)に基づき表 4 にまとめた。ただし、本研究では安定度が-0.2 より大きく $z/L < 0.4$ 未満時のパラメタリゼーションを安定度が正のときのみ引用した。これらをモデル値として実測値との差を以下の式により定義した(Foken *et al.*, 2004).

$$ITC_{\sigma} = \left| \frac{(\sigma_w / u_*)_{\text{model}} - (\sigma_w / u_*)_{\text{measurement}}}{(\sigma_w / u_*)_{\text{model}}} \right| \quad (13)$$

定常性テストおよびITCは安定な条件下でも良い結果が得られたという報告がある(Foken and Wichura, 1996)ことから、今回は(8), (9), (10)式および(13)式の結果を Foken *et al.* (2004)の flag system に従いその精度を表 5 のように分類した. なお, 両テストは誤差が少ないとされている「顕熱 $H \geq 10$ かつ $u_* > 0.1$ 」の場合と誤差が多いとされている「顕熱 $H < 10$ かつ $u_* > 0.1$ 」の場合について分けて行った.

安定度については, オブコフ長 L [m]と観測高度 z [m]で分類した. L は以下の式で求めることができる.

$$L = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T} \frac{H}{\rho C_p}} \quad (14)$$

ここで, u_* [m/s]は摩擦速度, k はカルマン定数(=0.4), g [m/s²]は重力加速度, H [W/m²]は顕熱, T [K]は気温, ρ [kg/m³]は空気密度, C_p [J/(kgK)]は空気の定圧比熱(=1005)である.

また, 2005 年 8 月 1 日から 5 日にかけて観測ステーションの正味放射の代表性の確認のため, ステーションに設置しているものと同じ型の四成分放射計を用い, ステーションの周りを 10Hz で測定しながら 30 分間移動した(図 6). このとき移動して測定した値を真の値として, ルーチン観測データの補正式を求めた. また, 今回観測ステーション周辺での移動観測に用いた放射計とルーチン観測の放射計の測器同士の差を無くするため, 同じ時刻の同じ場所で同時に観測を行い補正を行った.

さらに, 2005 年の 4 月に 1 つ, 7 月には 8 つの熱流板を観測ステーションの周囲に埋設した(図 7)ので, それらの値が地中熱流量の代表となるようにルーチン観測の地中熱流量の補正を行った.

②2003 年データ

観測ステーションより得られた 2003 年 3 月 25 日～2004 年 3 月 24 日までの 30 分平均データを用い, 2003 年の蒸発量, 及び凝結量の月別日平均を算出した. 気化に必要な潜熱については, 以下の式を用いた(近藤, 1994).

$$l = 2.50025 \times 10^6 - 2.365 \times 10^3 T \quad (T \geq 0) \quad (15)$$

$$l_s = 0.334 \times 10^6 + 2500T \quad (T < 0) \quad (16)$$

ここで l は水の気化の潜熱[J/kg], l_s は氷の融解の潜熱[J/kg] であり T は気温[°C] である.
 $T < 0$ 時における潜熱を(15)式および(16)式の和として扱った. また, 昼と夜の区別については, (8)式および(9)式に従った.

さらに, 昼間において凝結しているときおよび, 夜間について蒸発しているときの時間変化から, そのプロセスを考察した.

続いて既存モデルによる蒸発量推定についての検証を行った. 既存モデルは以下の3つである.

(i) 可能蒸発量(van Bavel, 1966)

$$\lambda E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) + \lambda \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{\rho \varepsilon k^2}{P} \frac{u(e_a^* - e_a)}{\left\{ \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \right\}^2} \quad (17)$$

(ii) 平衡蒸発量(Slatyer and McIlroy, 1961), (Denmead and McIlroy, 1970)

$$\lambda E_{eq} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (18)$$

(iii) 可能蒸発量(Priestley and Taylor, 1972)

$$\lambda E = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) = \alpha \lambda E_{eq} \quad (19)$$

ここで, E [kg/(m²s)] は蒸発散量, λ [J/kg] は潜熱, R_n [W/m²] は正味放射, G [W/m²] は地中熱流量, P [hPa] は気圧, u [m/s] は風速, z [m] は観測している高度, z_0 [m] は粗度長, d [m] は地面修正量(=0), k はカルマン定数(=0.4), ε は空気分子量に対する水蒸気分子量の比(=0.622), ρ [kg/m³] は空気密度, $\alpha = 1.26$ である. Δ および γ は以下の式で与えられる.

$$\Delta = \frac{6.1078(2500 - 2.4T)}{0.4615(273.15 + T)^2} \times 10^{7.5/(237.3 + T)} \quad (20)$$

$$\gamma = \frac{C_p P}{0.622l} \quad (21)$$

ここで, T [°C] は気温, C_p [J/(kgK)] は定圧比熱, P [hPa] は気圧, l [J/kg] は潜熱である.

これら3つの既存式について, G の補正を行った2003年のルーチン観測データを用いて推定を行った. 推定は, (8)式および(9)式による場合分けと, L による場合分けの

2 種類をそれぞれについて行い、データは全て顕熱 $H \geq 0$ かつ $u_* > 0.1$ のものである。2003 年の粗度長は表 6 による。

次に、(10)による平衡蒸発量と土壌水分の関係式(小島, 2004)から推定した蒸発量と実測の蒸発量の比較を行った。推定式は以下のようである。

$$Evwc = aEe(1 - \exp(-(vwc + c(\ln 2)^{1/d} - b)/c)^d)) \quad (22)$$

$Evwc$ は土壌水分の関数としての推定蒸発量, Ee は(10)による推定平衡蒸発量, vwc [%] は土壌水分量(深さ 0.1m), $a = 1.236$, $b = 15.022$, $c = 45.674$, $e = 12.803$ である。この推定についても、(11), (12)式による場合分けを行い、実測値と推定値の日蒸発量を比較した。

3. 結果

3-1 データ精度

スペクトル解析の結果を図 8~11 に示した。図 8, 9 は $z/L \leq 0$ のときのスペクトルを平均したものであり、図 10, 11 は $z/L > 0$ のときを平均したものである。軸は両対数である。データ精度として理想とされる $-5/3$ の傾きを各グラフ上方にプロットした。風速水平成分(u , v), 風速鉛直成分(w), CO_2 フラックス(CO_2), H_2O フラックス(H_2O), 気温(T)の各グラフを見てもわかるように、傾き $-5/3$ の形をしており、観測が良く成されていることが言える。

次に、定常性テストの結果を(8), (9), (10)式と表 5 に基づき、各 class におけるデータ含有率を図 12, 13 に示した。誤差が多いとされる顕熱 $H < 0$ かつ $u_* > 0.1$ のときと、誤差が少ないとされる顕熱 $H \geq 0$ かつ $u_* > 0.1$ のときでは、定常性の違いはあまり見られないことがわかる。同様に昼間と夜間での違いもあまり見られない。

定常性テストと同様に、(13)式に基づき ITC の精度を表 5 に従い各 class におけるデータ含有率を図 11, 12 に示した。顕熱による場合分けを行ったのだが、やはり違いはそれほど見られなかった。

定常性テストおよび積分乱流特性の結果から、精度が悪いとされている $H < 0$ のデータ精度は $H \geq 0$ のものとそれほど変わらないと言える。

3-2 観測データの代表性

Rn (正味放射)のルーチン観測値とステーション周辺での移動観測値の関係を図 16 に示した。観測ステーションで使用している測器とステーション周辺の観測に用いた測器の同時観測の結果から両者の回帰式を求め(図 16 上), 移動観測に使用した測器の値をステーションでの値に補正した。図 16 下における移動観測の値はこの補正を行ったものである。相関が高く, 観測ステーションでは周辺の正味放射を良く観測できていると言えるので, 今回はこの補正式を用いないことにした。

また G (地中熱流量)のルーチン観測値とステーション周辺の 8 つの熱流版の平均値との関係を図 17, 18, 19 に示した。4 - 6 月は観測ステーションの周りに一つだけ熱流板が埋設してあったので, その一つの熱流板の値を 7 - 8 月の 8 つの熱流板の平均値に補正をした。この補正式を用いて潜熱フラックスの時間変化, 定常性テストの昼間・夜間の場合分け, 既存モデルの昼間・夜間の場合分けを行っている。

3-3 潜熱フラックスの季節変化

図 20 に 2003 年の蒸発量, 及び凝結量の月別日平均を示した。さらに図 21 では一日の蒸発量から凝結量を差し引いた正味の蒸発量がわかるようにした。わずかではあるが, 夜間の蒸発が確認できる。また昼間の凝結も確認できる。そこで, どのようなときに夜間蒸発が起き, どのようなときに昼間凝結が起きるのか, 潜熱フラックスおよび各要素の時間変化を考察した。

3-4 潜熱フラックスの時間変化

図 22, 23, 24, 25 に潜熱フラックスと各要素の時間変化を示した。図 22 では 8:30 から 9:30 にかけての凝結と 14:00, 18:00 の凝結が確認できる。8:30-9:30 の凝結は, 日射が強くなる時間帯に起こっており, H および G が上昇し $Rn - G - H$ が小さくなると考えられ, 典型的な明け方の凝結と言える。しかし, グラフ上では潜熱が負であるのに $Rn - G - H > 0$ であり, 熱収支の式が閉じておらず, 説明ができない凝結である。

次に, 18:00 の凝結について注目すると, この時間帯の凝結は日没前であり, 日射が弱くなり Rn が小さくなるので $Rn - G - H < 0$ となり凝結が起きていると言える。

14:00 の凝結の特徴は日射が一時的に弱くなっているところである。日射が一時的に弱くなったので R_n が小さくなり、すぐに H は下がらず $R_n - G - H < 0$ となり凝結が起きたと考えられる。

図 23 では図 22 でも取り上げたように、9:00 から 11:00 にかけて明け方の典型的な凝結が起こっているのだが、図 22 と同様 $R_n - G - H > 0$ であり、熱収支だけでは説明ができない例である。

図 24 では典型的な夜の蒸発を示している。日没後、 R_n が小さくなり $R_n - G - H > 0$ となり蒸発が起きている。図 25 では 0:30 と 6:00 に夜間蒸発が起きており、いずれも風速が小さくなることで H が小さくなり潜熱が正となり蒸発していると言える。しかし、同じように風速が低下し H が減少するのにも関わらず 3:30 の潜熱は負であり、 $R_n - G - H > 0$ であるので熱収支でも説明ができない。同じプロセスであるのに蒸発が起きている場合と起こっていない場合があり、夜間蒸発のプロセスを一概に言えないことが示された。

3-5 潜熱フラックスの推定

図 26～43 で(17), (18), (19)式による可能蒸発量・平衡蒸発量の推定値と実測値を比較している。 L による場合分けと $R_n - G$ による場合分けの違いはほとんどなく、いずれの推定式においても昼間もしくは不安定時のほうが相関が高いと言える。

図 44, 45, 46 では(18)式, (22)式を用いて、土壌水分の関数としての実蒸発量の推定値と実測の蒸発量を比較した。横軸が推定値、縦軸は実測値である。夜間の相関が明らかに低いことがはっきりとわかる。データの精度はこれまでにチェックしてきたとおりであるのに、夜間ではやはり相関が低く、何かが関係しているようだ。3-4 で夜間蒸発時の例をいくつか取り上げたが、それらのプロセスを一概に説明できなかったように、(18), (22)式だけでは夜間の蒸発を推定できないようである。

4. まとめ

データの精度を確認したところ、スペクトル解析・定常性テスト・積分乱流特性の 3 種では「 $H < 0$ かつ $u_* > 0.1$ 」の場合と「 $H \geq 0$ かつ $u_* > 0.1$ 」の場合でデータの精度差はそれほどなかった。精度のあるデータを用いても夜間の蒸発を確認でき、そのプロセスは説明できるときとできないときがあった。

観測ステーションでの値がその周辺を代表させるように補正を行ったものの、やはり夜間の蒸発量は推定値と低い相関を見せた。夜間の蒸発は既存式に加えて何かを考慮しなくてははいけないと考えられる。

今後は、その何かを明らかにするためにより多くの事例を観る必要があり、そのことが夜間蒸発の推定式確立につながると考えられる。

謝辞

本論作成にあたり、筑波大学生命環境科学研究科 杉田倫明先生には研究全般にわたり始終ご指導を頂きました。深く感謝の意を表します。筑波大学生命環境科学研究科水文学の諸先生方、ならびに生命環境科学研究科の院生の方々にもご指導・ご助言を頂きました。御礼申し上げます。

また、深夜にも関わらず質問に答えていただいた小谷亜由美先輩、加藤秀和先輩にも感謝致します。さらに、パソコン復旧に全力を尽くして頂いた皆様には言葉では言い尽くせないほどの感謝をしています。

そして、本研究プロジェクト RAISE の全ての関係者の皆様、互いに励ましてきた 4 年生の皆様にもご協力頂きました。心から感謝致します。

最後に、以上の方々と母親に感謝を記して、謝辞といたします。

参考文献

- 浦野忠朗, モンゴル半乾燥草原における放牧区及び禁牧区での地上部バイオマスと CO₂ フラックスの季節変化, 筑波大学大学院環境科学研究科学学位論文, 45p, 2005.
- 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, 348p, 1994.
- 小島透, モンゴル・ヘルレン川流域における蒸発散を支配する要因の解明, 筑波大学大学院環境科学研究科修士(環境科学)学位論文, 85p, 2004.
- Denmead, O.T. and I.C. McIlroy, Measurements of non-potential evaporation from wheat, *Agr. Meteorology*, **7**: 285-302, 1970.
- Foken, T., O. O. Jegede, U. Weisensee, S. H. Richter, D. Handorf, U. Gösdorf, G. Vogel, U. Schubert, H.-J. Kirzel, V. Thiermann, Results of the LINEX-96/2 Experiment, *Deutscher Wetterdienst, Forschung und Entwicklung*, **48**: 75pp, 1997.
- Foken, T., M. Göckede, M. Mauder, L. Mahrt, B. Amiro, W. Munger, Post-Field data quality control, *Handbook of Micrometeorology*, 181-208, 2004.
- Foken, T., B. Wichura, Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agric. Forest Meteorol.* **78**: 83-105, 1996.
- Kato, H., The influence of the grazing on vegetation and heat balance over the Mongolian step, Master's Thesis, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, 2007.(発表予定)
- Nappo, C.J., and P-E. Johansson, Summary of the Lövånger international workshop on turbulence and diffusion in the stable planetary boundary layer, *Boundary-Layer Meteorology*, **90**: 345-374, 1999.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, **100**: 81-92, 1961.
- Slatyer, R.O. and I.C. McIlroy, *Practical Microclimatology*. CSIRO, Melbourne, Australia, 310p, 1961.
- Stull, R. B., An introduction to boundary layer meteorology, *Atmospheric Sciences Library*, 666p, 1988.
- Sugita, M., J. Asanuma, M. Tsujimura, A. Mariko, M. Lu, F. Kimura, D. Azzaya, Ts. Addyasuren,

- An Overview of the rangelands atmosphere-hydrosphere-biosphere interaction study experiment(RAISE) in Northeastern Asia, *J. Hydrol.*, 2006.(印刷中)
- Sugita, M. and W. Brutsaert, Daily evaporation over a region from lower boundary layer profiles measured with radiosondes, *Water Resources Research*, **27**: 747-752, 1991.
- Thomas, C., T. Foken, Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterizations, *15th Confence on Turbulence and Boundary Layers*, Am. Meteorol.Soc., 129-132, 2002.
- van Bavel, C.H.M., Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification, *Water Resources Research*, **2**: 455-467, 1966.

表 1 觀測項目(地上部)

Item	Instrument	Height(m)	Sampling interval	Recording interval	Averaging time
Downward short-wave radiation	Net radiometer (Kipp & Zonen, CNR1)	2.5	5 sec	30 min	30 min
Upward short-wave radiation	”	2.5	5 sec	30 min	30 min
Downward long-wave radiation	”	2.5	5 sec	30 min	30 min
Upward long-wave radiation	”	2.5	5 sec	30 min	30 min
Sensible heat flux	Sonic anemometer (Kaijo, SAT550)	3.5	10Hz	30 min	30 min
Latent heat flux	Sonic anemometer (kaijo, SAT550) and CO2/H2O analyzer (LI-COR, LI7500)	3.5	10Hz	30 min	30 min
CO2 flux	”	3.5	10Hz	30 min	30 min
Friction velocity	Sonic anemometer (Kaijo, SAT550)	3.5	10Hz	30 min	30 min
Wind speed	”	2.5	10Hz	30 min	30 min
Wind direction	”	2.5	10Hz	30 min	30 min
Air temperature	Humidity and temperature probe (Vaisala, HMD45D) in a ventilated radiation shield	2.5	5 sec	30 min	30 min
Relative humidity	”	2.5	5 sec	30 min	30 min
Surface temperature	Infrared radiation thermometer (Climatec, CML303F)		5 sec	30 min	30 min
Air pressure	Barometer (Vaisala, PTB101)	1.3	30 min	30 min	0

表 2 觀測項目(地下部)

Item	Instrument	Height(m)	Sampling interval	Recording interval	Averaging time
Heat flux in the soil	Heat flux plate (REBS, HF-1.1)	-2	10 sec	30 min	30 min
”	”	-10	10 sec	30 min	30 min
Soil temperature	Platinum resistance thermometer (Climatec, C-PTG)	-0.05	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.1	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.2	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.3	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.5	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.7	10 sec	30 min	30 min
”	”	-1	10 sec	30 min	30 min
”	”	-1.5	10 sec	30 min	30 min
Volumetric water content	TDR sensor (Cambell, CS616)	-0.1	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.2	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.3	10 sec	30 min	30 min
”	”	-0.7	10 sec	30 min	30 min
”	”	-1	10 sec	30 min	30 min
”	”	-1.5	10 sec	30 min	30 min
”	TDR sensor (Irrrometer, RA24LT)	-0.05	30min	30min	0
”	”	-0.5			
Precipitation	Tipping bucket rain gauge (R.M. Young, 52202)	0	30 min	30 min	0

表 3 観測データ

項目	使用データ	安定度, 昼夜 の場合分け	顕熱による 選別	摩擦速度 による選別	Rn補正	G補正	図
スペクトル解析	2005/7/31 0:00 ~ 8/6 9:00 の50Hz観測データ	$z/L \leq 0$	なし	なし	なし	なし	8, 9
		$z/L > 0$	なし	なし	なし	なし	10, 11
定常性テスト	2005/7/31 0:00 ~ 8/6 9:00 の50Hz観測データ および, ルーチン観測データ	$Rn-G \geq 0$	$H \geq 10$	$u_* > 0.1$	なし	あり	12
		$Rn-G < 0$	$H < 10$		なし	あり	13
積分乱流特性	2005/4/1 0:00 ~ 10/29 13:30 のルーチン観測データ	$z/L \leq 0$	$H \geq 10$	$u_* > 0.1$	なし	なし	14
		$z/L > 0$	$H < 10$		なし	なし	15
Rn補正	2005/8/1 11:00-11:30, 17:30-18:00 22:30-23:00 2005/8/2 10:00-10:30, 14:30-15:00 15:30-16:00 2005/8/3 7:00 - 7:30, 15:00-15:30 19:00-19:30 2005/8/4 14:30-15:00, 19:30-20:00 20:30-21:00 2005/8/5 14:30-15:00, 17:30-18:00 18:00-18:30, 19:00-19:30 の10Hz観測データおよびルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	なし	16
G補正	2005/4/23 0:00 ~ 7/5 24:00 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	なし	17(上)
	2005/7/6 0:00 ~ 10/29 13:30 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	なし	17(下)

表3 観測データ(続き)

蒸発量・凝結量 (風向による選別なし)	2003/3/25 0:00 ~ 2004/3/24 24:00 のルーチン観測データ	Rn-Gによる場合分け	なし	なし	なし	なし	20, 21
潜熱フラックスの 時間変化(凝結時)	2003/5/5 6:00 ~ 20:00 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	あり	22
	2003/4/13 2:00 ~ 17:30 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	あり	23
潜熱フラックスの 時間変化(蒸発時)	2003/7/4 20:30 ~ 7/5 2:00 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	あり	24
	2003/4/10 21:30 ~ 4/11 8:30 のルーチン観測データ	なし	なし	なし	なし	あり	25
既存モデルによる推定	2003/4/1 0:00 ~ 6/30 24:00 のルーチン観測データ	z/Lによる場合分け	H ≥ 10	$u_* > 0.1$	なし	あり	26, 32, 38
		Rn-Gによる場合分け			なし	あり	29, 35, 41
	2003/7/1 0:00 ~ 8/31 24:00 のルーチン観測データ	z/Lによる場合分け	H ≥ 10	$u_* > 0.1$	なし	あり	27, 33, 39
		Rn-Gによる場合分け			なし	あり	30, 36, 42
	2003/9/1 0:00 ~ 10/29 13:30 のルーチン観測データ	z/Lによる場合分け	H ≥ 10	$u_* > 0.1$	なし	あり	28, 34, 40
		Rn-Gによる場合分け			なし	あり	31, 37, 43
土壌水分の関係 としての推定 (風向による選別なし)	2003/4/1 0:00 ~ 6/30 24:00 のルーチン観測データ		なし	なし	なし	なし	44
	2003/7/1 0:00 ~ 8/31 24:00 のルーチン観測データ	Rn-Gによる場合分け	なし	なし	なし	なし	45
	2003/9/1 0:00 ~ 10/29 13:30 のルーチン観測データ		なし	なし	なし	なし	46

表 4 積分乱流特性テストにおけるパラメタリゼーション
(Foken et al. 1997, Foken et al.1991, Thomas and Foken 2002.)

安定度	σ_w / u_*
$z/L < -0.032$	$2.0(z/L)^{1/8}$
$-0.032 < z/L < 0$	$1.3(z/L)^0$
$-0.2 < z/L < 0.4$	$0.21(z_+ f / u_*) + 3.1$

f はコリオリパラメーター,

z_+ は次元合わせのパラメーター(= 1m)

L はオブコフ長, z は観測高度

表 5 データ精度の分類

Steady-state test		ITC	
class	RN_{cov}	class	ITC_{σ}
1	0-15 %	1	0-15 %
2	16-30 %	2	16-30 %
3	31-50 %	3	31-50 %
4	51-75 %	4	51-75 %
5	76-100 %	5	76-100 %
6	101-250 %	6	101-250 %
7	251-500 %	7	251-500 %
8	501-1000 %	8	501-1000 %
9	> 1000 %	9	> 1000 %

RN_{cov} および ITC_{σ} は, (7)式および(13)式によって定義される

表 6 2003 年の粗度長 z_0 (Kato, 2007)

Month	z_0 [m]
Apr.–June	4.97×10^{-3}
July–Aug.	3.50×10^{-4}
Sep.–Oct.	1.30×10^{-3}

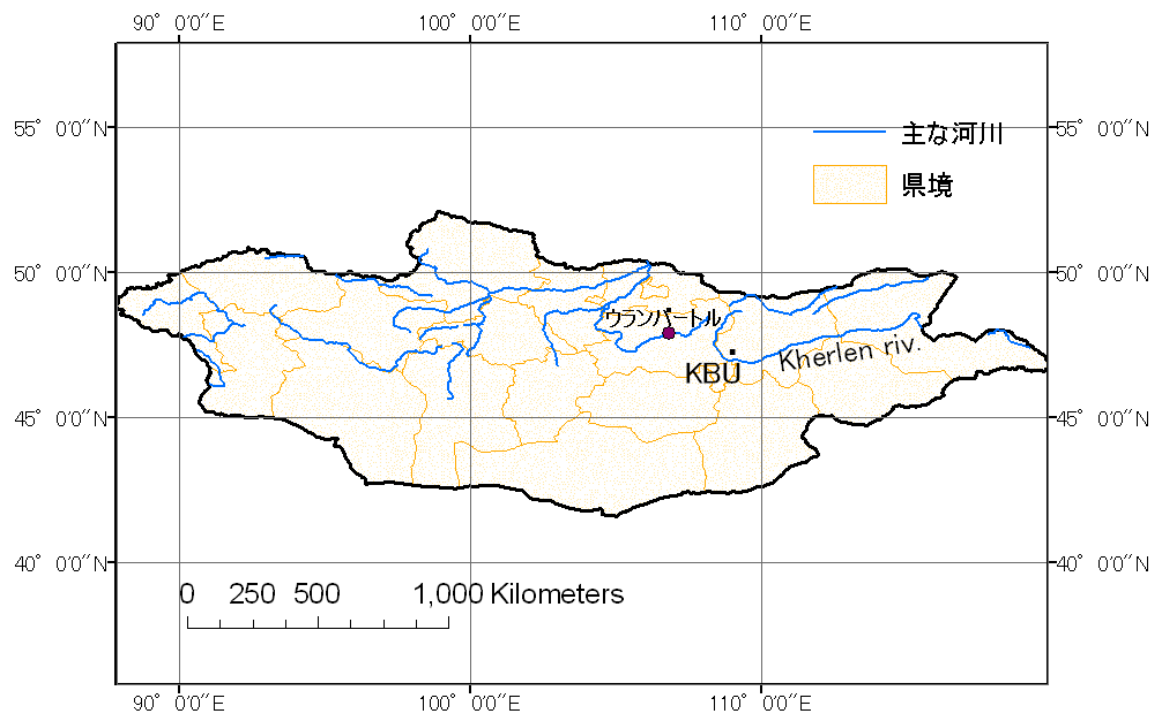


図1 モンゴル国と研究対象地域(KBU)概略図

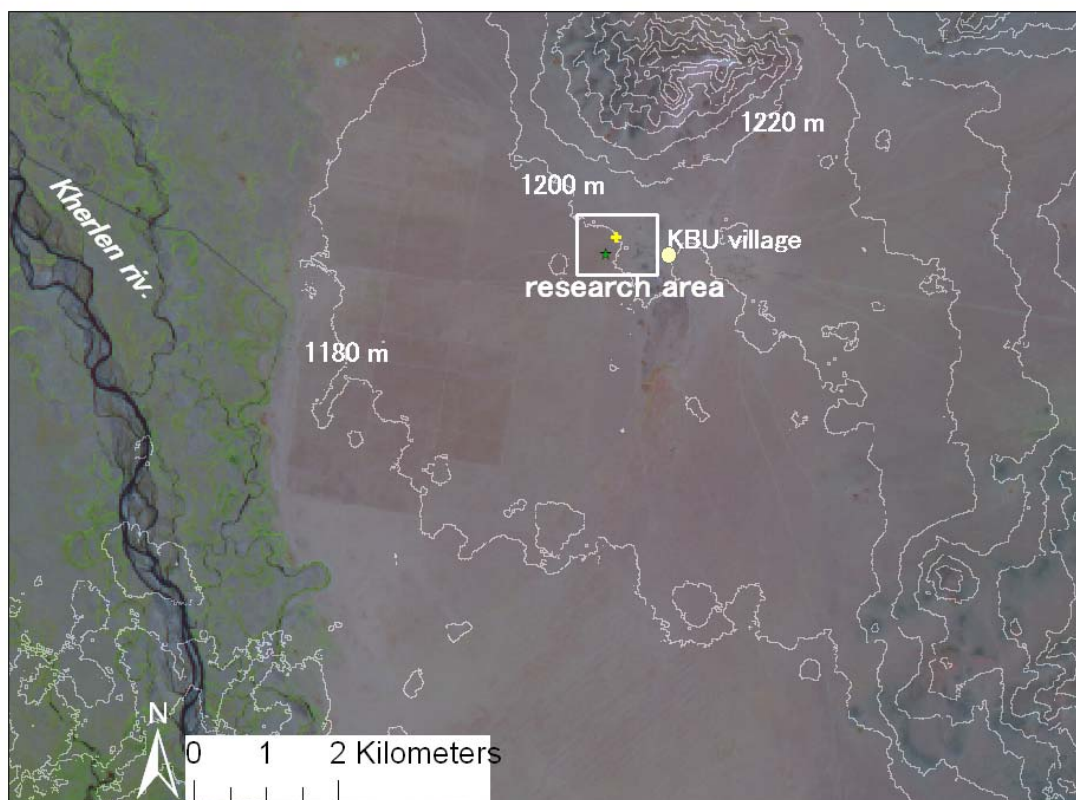


图2 研究对象地域(KBU)

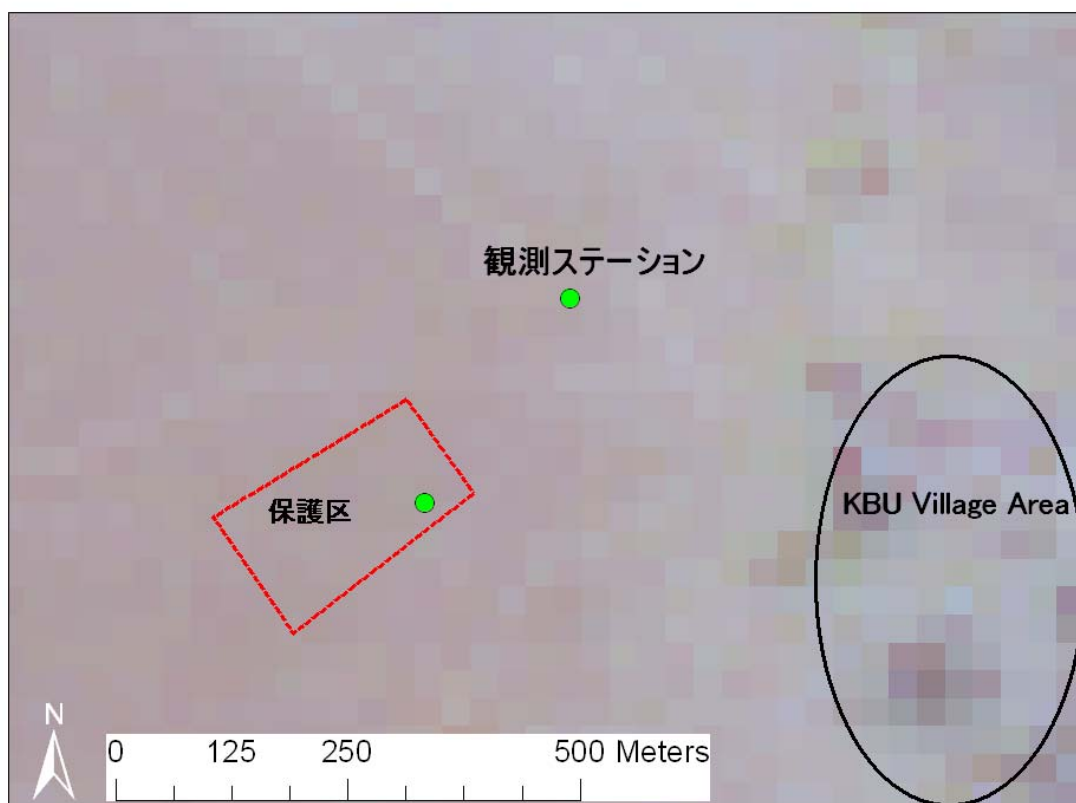


図3 観測ステーション周辺(research area 拡大図)



図4 観測ステーション

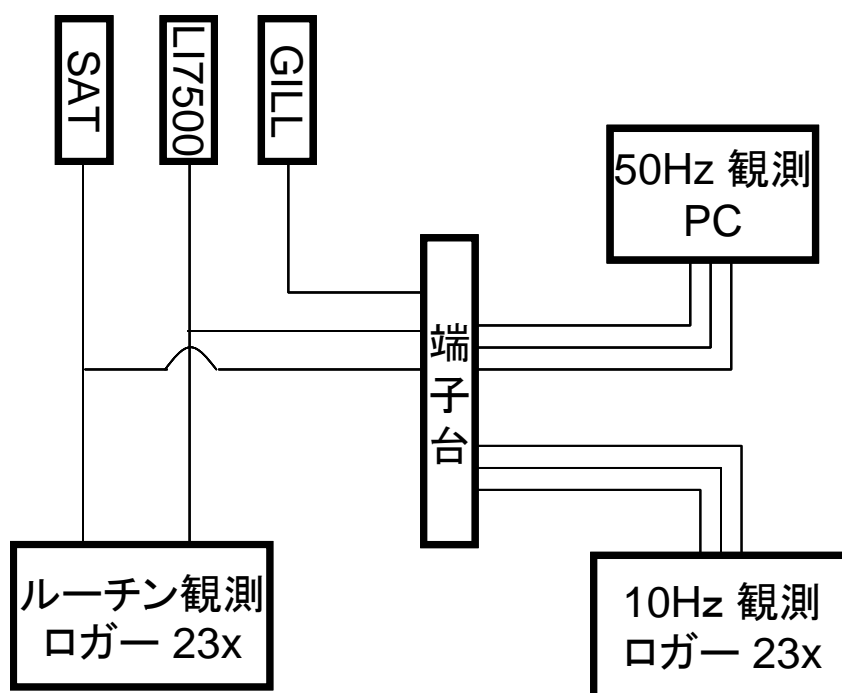


図 5 50Hz 観測の模式図

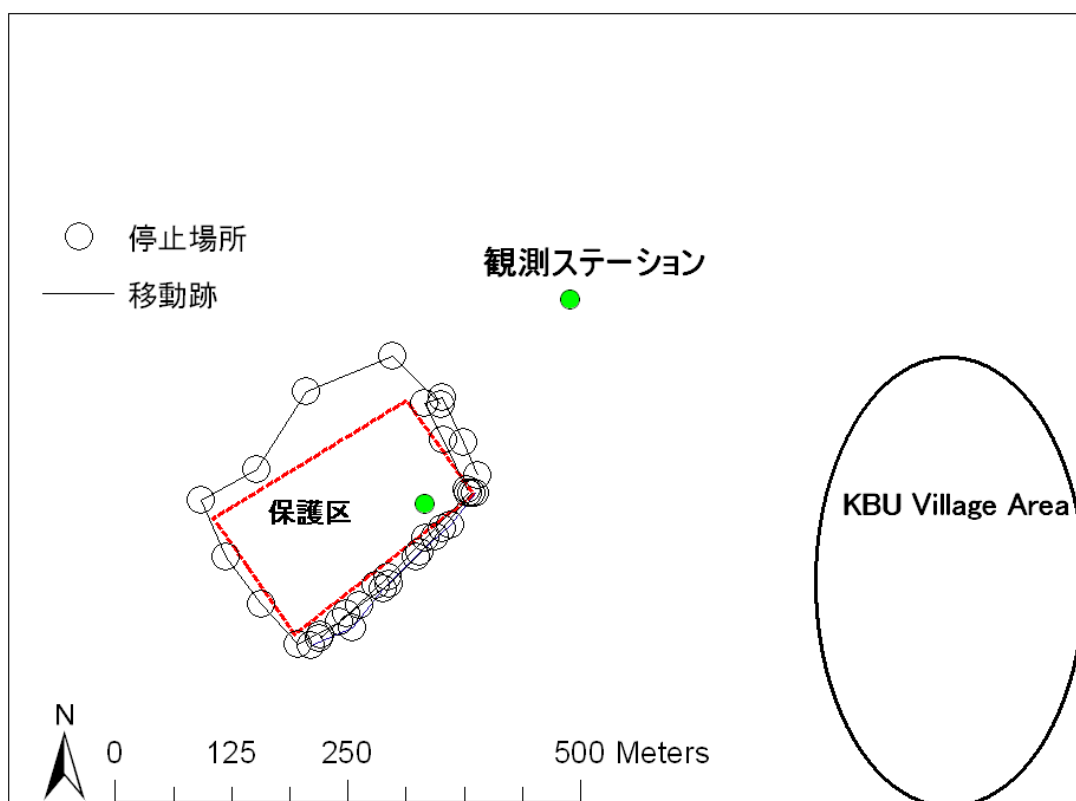


図 6 10Hz 観測の移動図

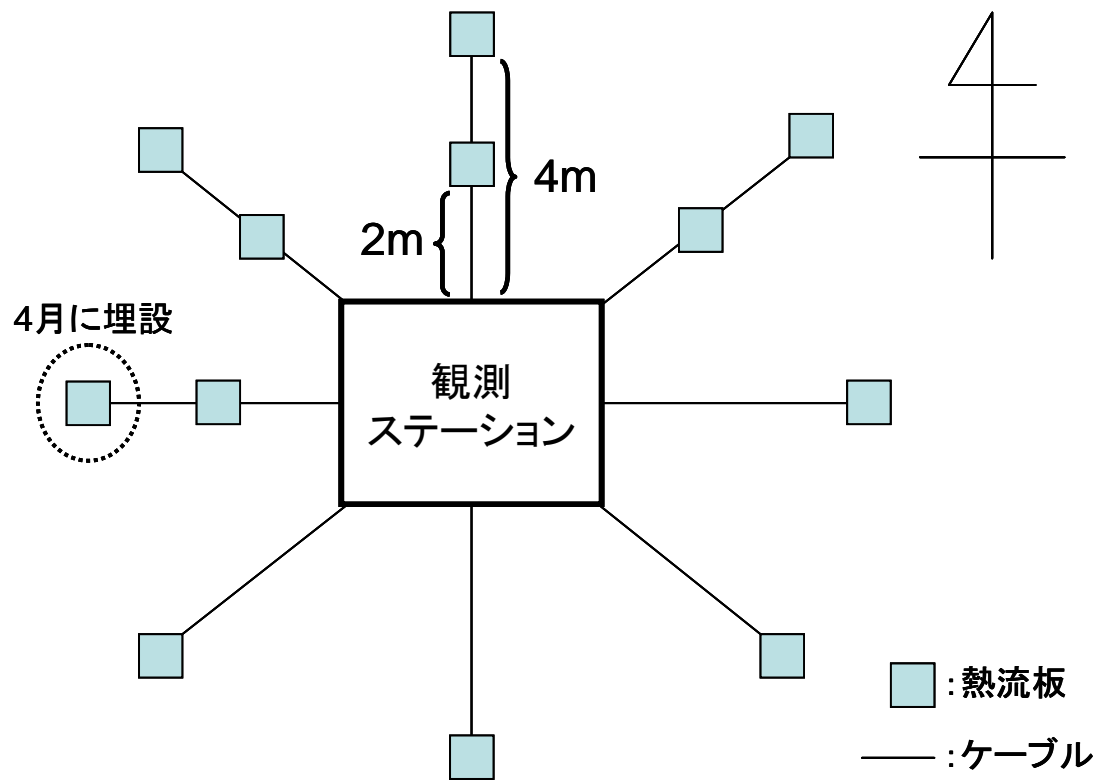


図 7 熱流板設置図

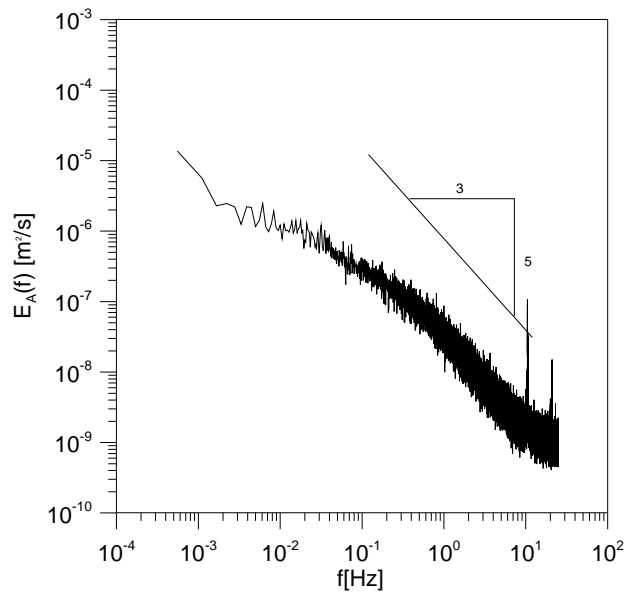
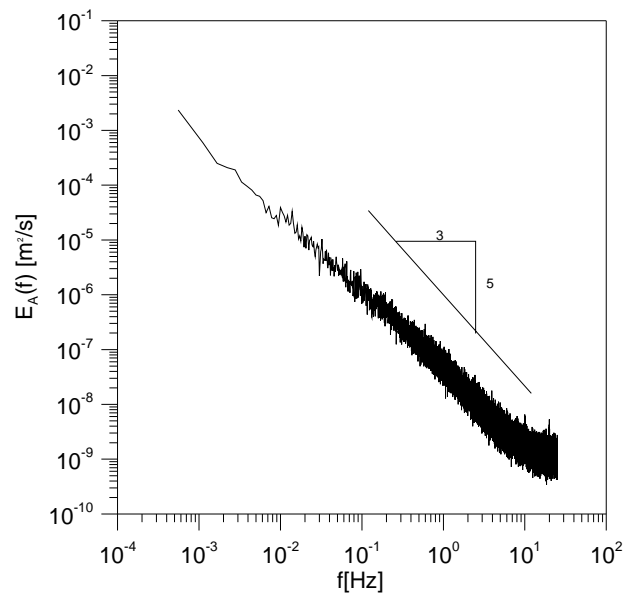
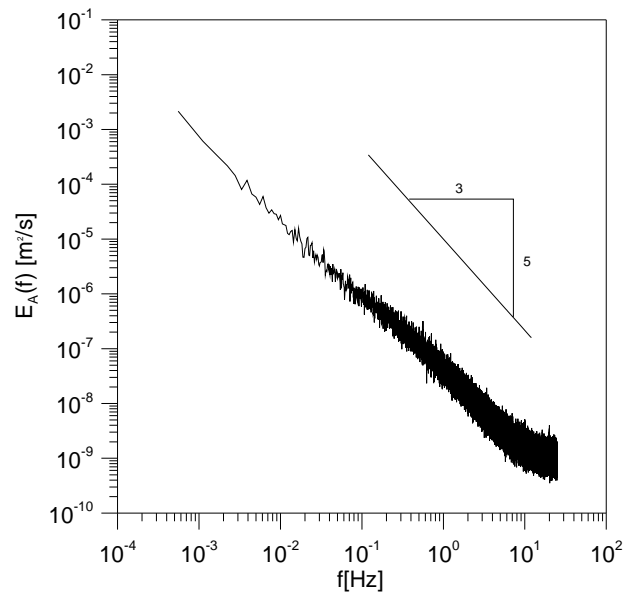


図 8 スペクトル解析結果($z/L \leq 0$)
上から u , v , w

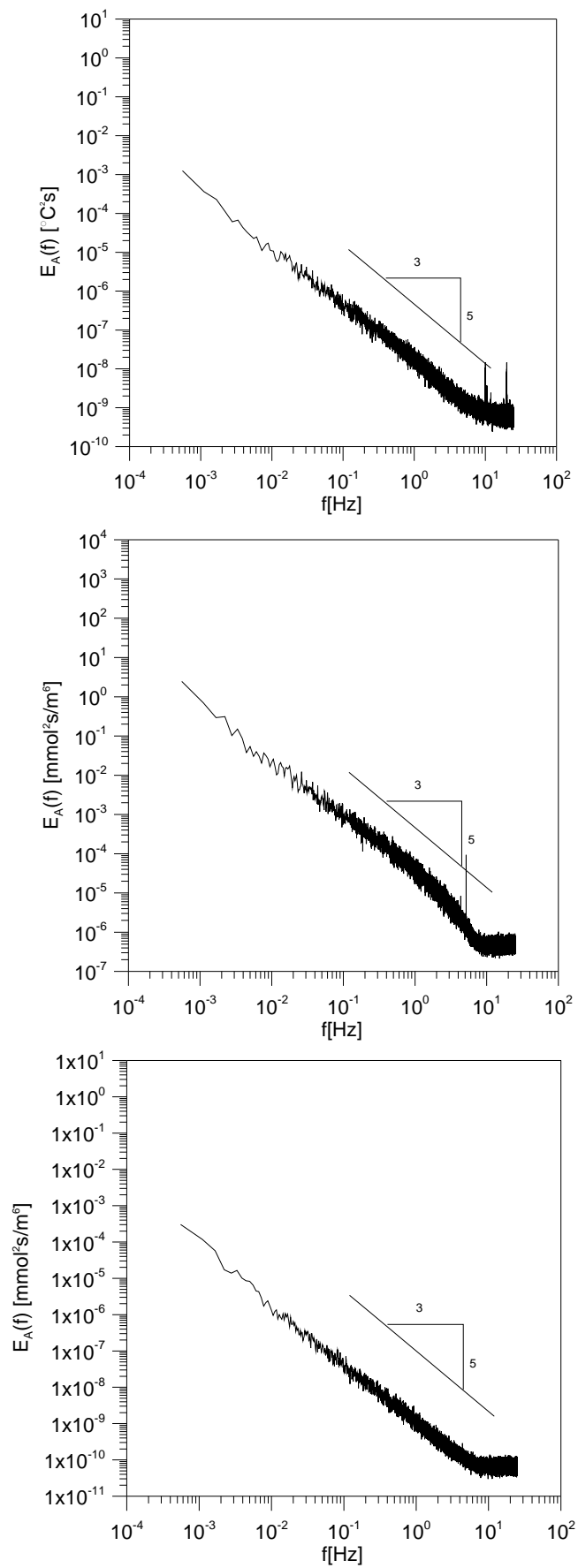


図 9 スペクトル解析結果($z/L \leq 0$)
上から T , H_2O , CO_2

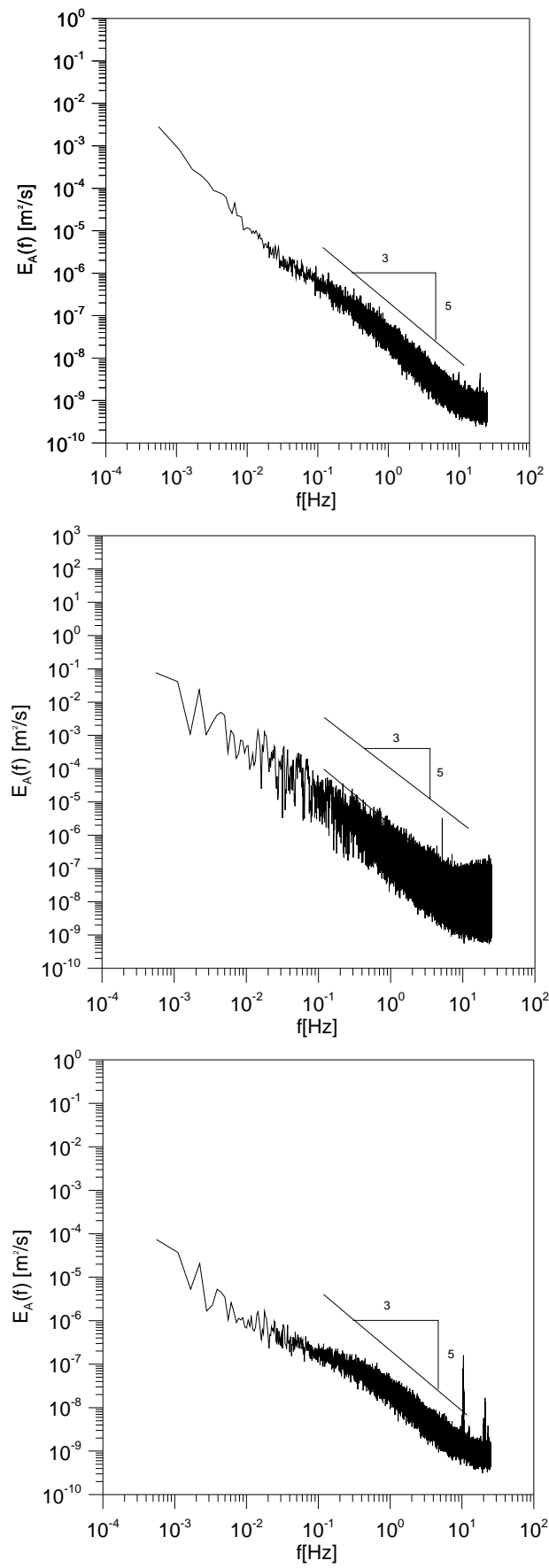


図 10 スペクトル解析結果($z/L > 0$)
上から u , v , w

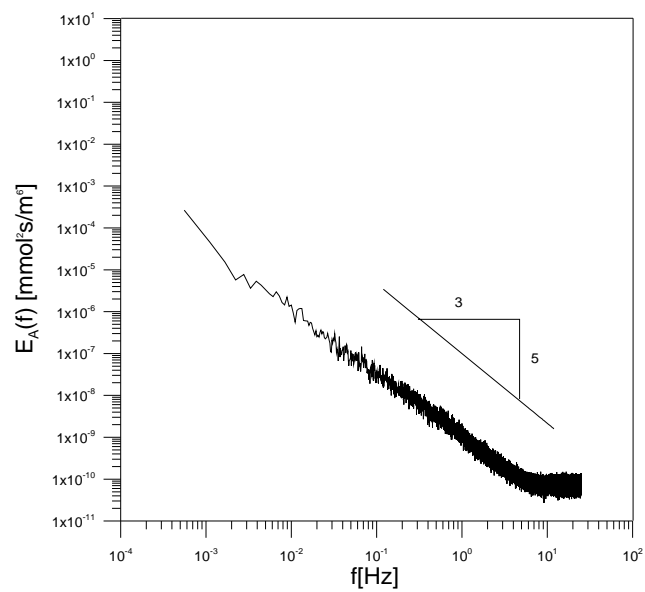
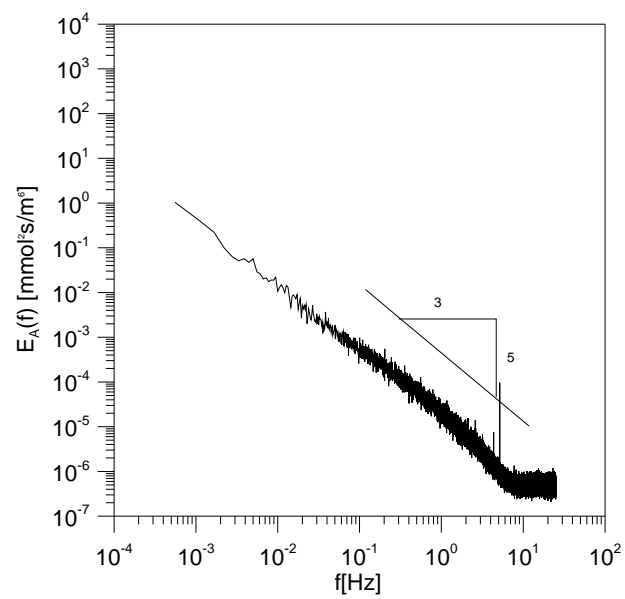
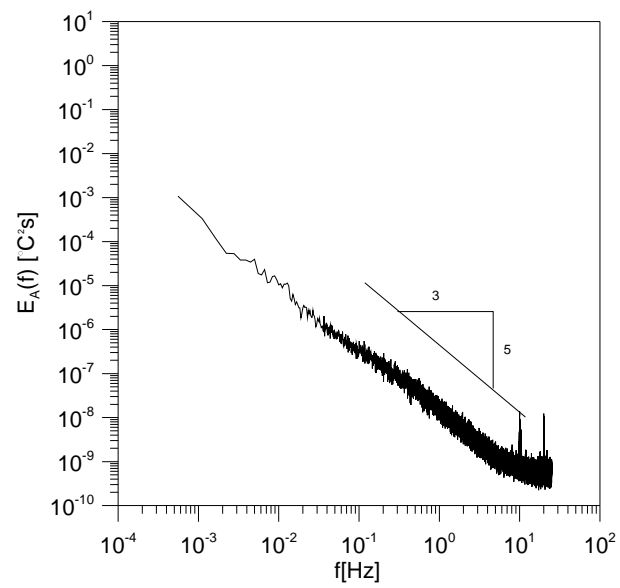


図 11 スペクトル解析結果($z/L > 0$)
上から T , H_2O , CO_2

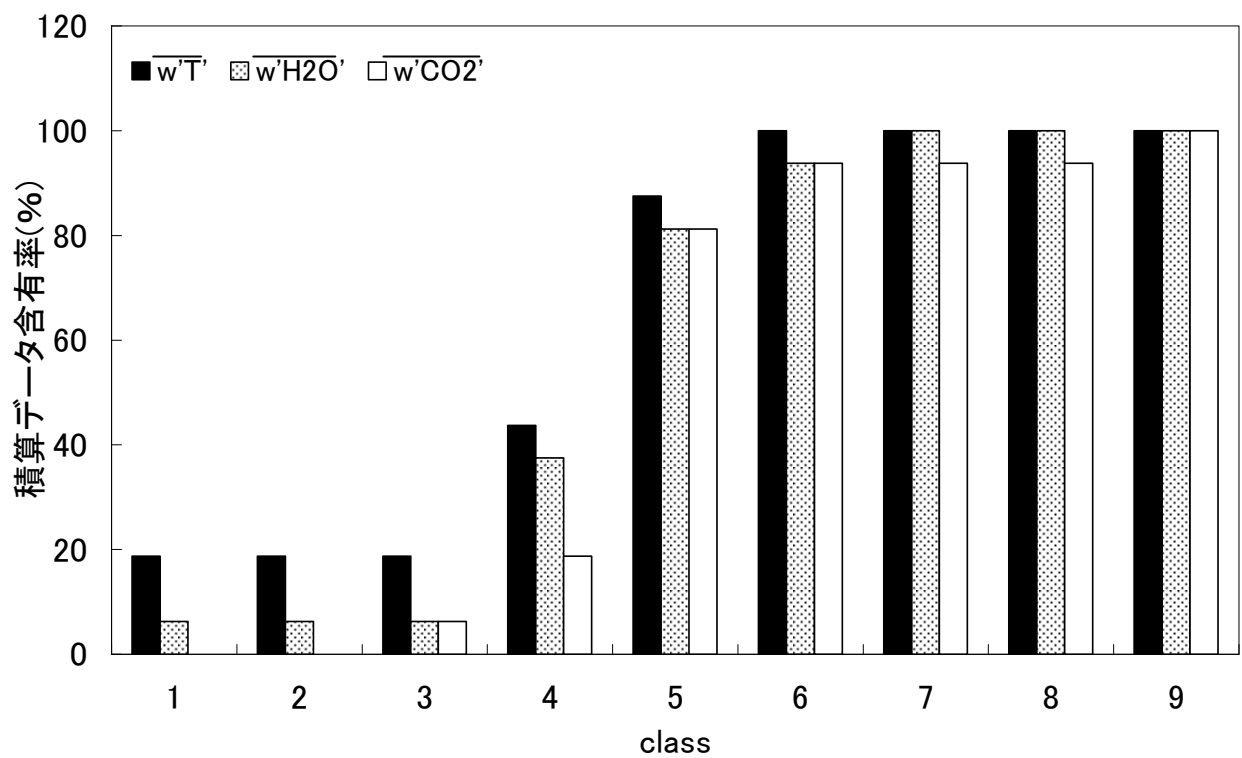
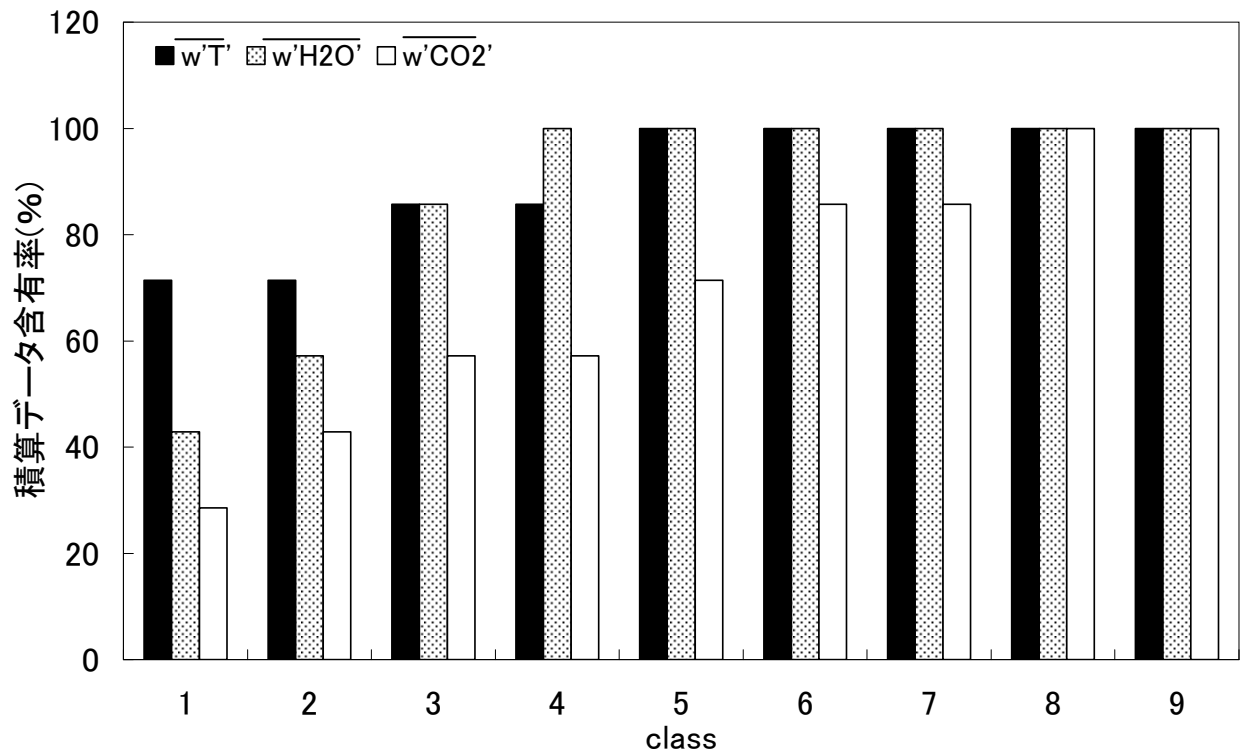


図 12 定常性テスト結果(顕熱 $H \geq 10$ かつ $u_s > 0.1$)
 各 class におけるデータ含有率を示す
 (8)(9)(10)式に基づき各共分散から class を決定している(表 5)
 上：昼間(day), 下：夜間(night)

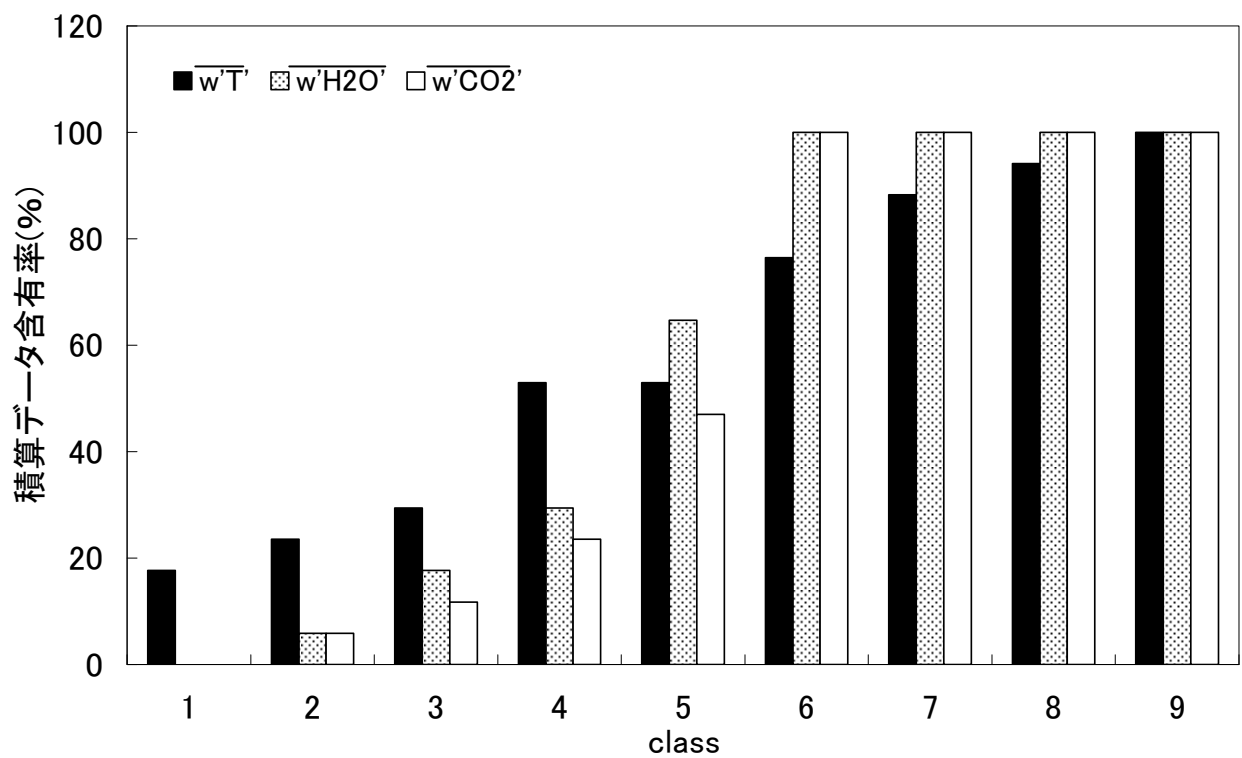
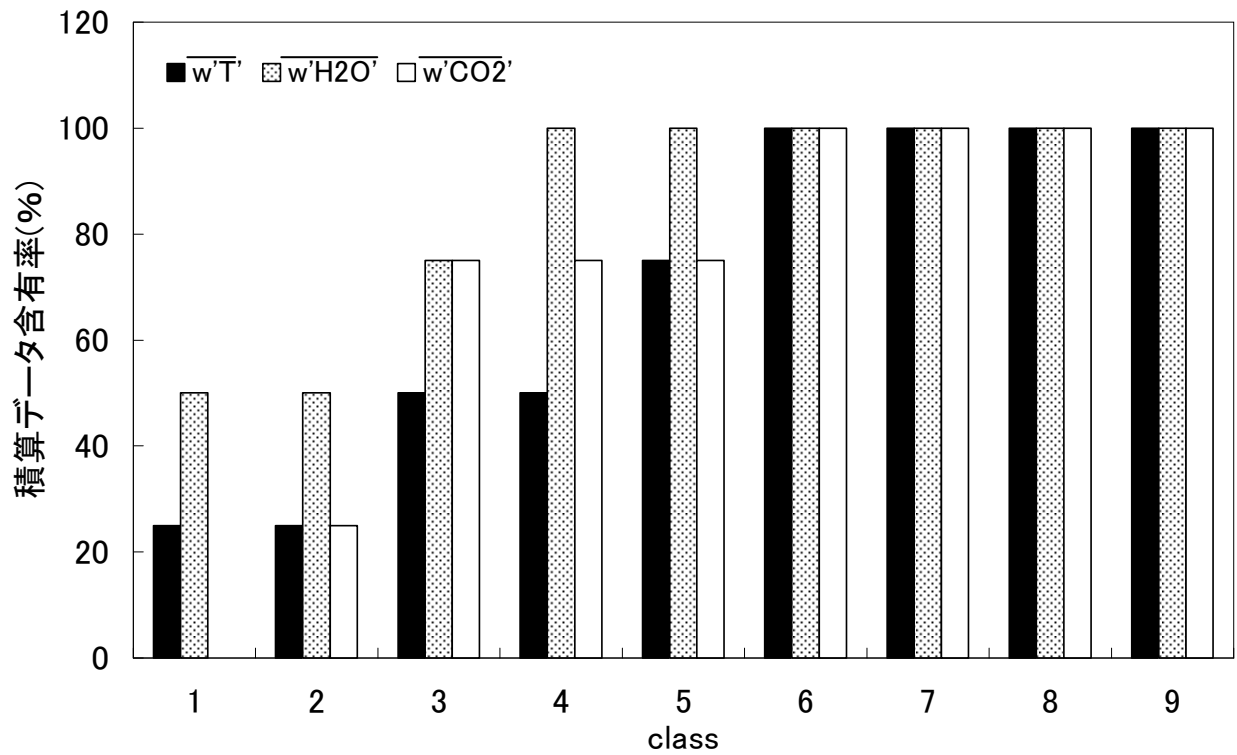


図 13 定常性テスト結果(顕熱 $H < 10$ かつ $u_s > 0.1$)
 各 class におけるデータ含有率を示す
 (8)(9)(10)式に基づき各共分散から class を決定している(表 5)
 上: 昼間(day), 下: 夜間(night)

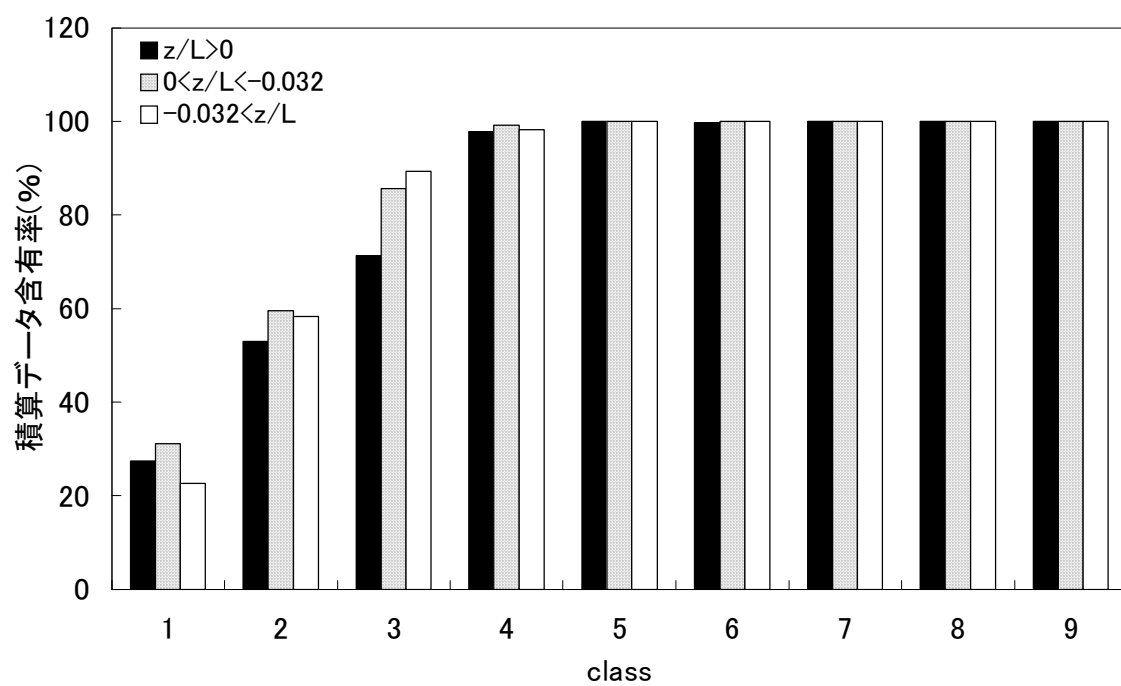


図 14 積分乱流特性による精度分類結果(顕熱 $H \geq 10$ かつ $u_* > 0.1$)

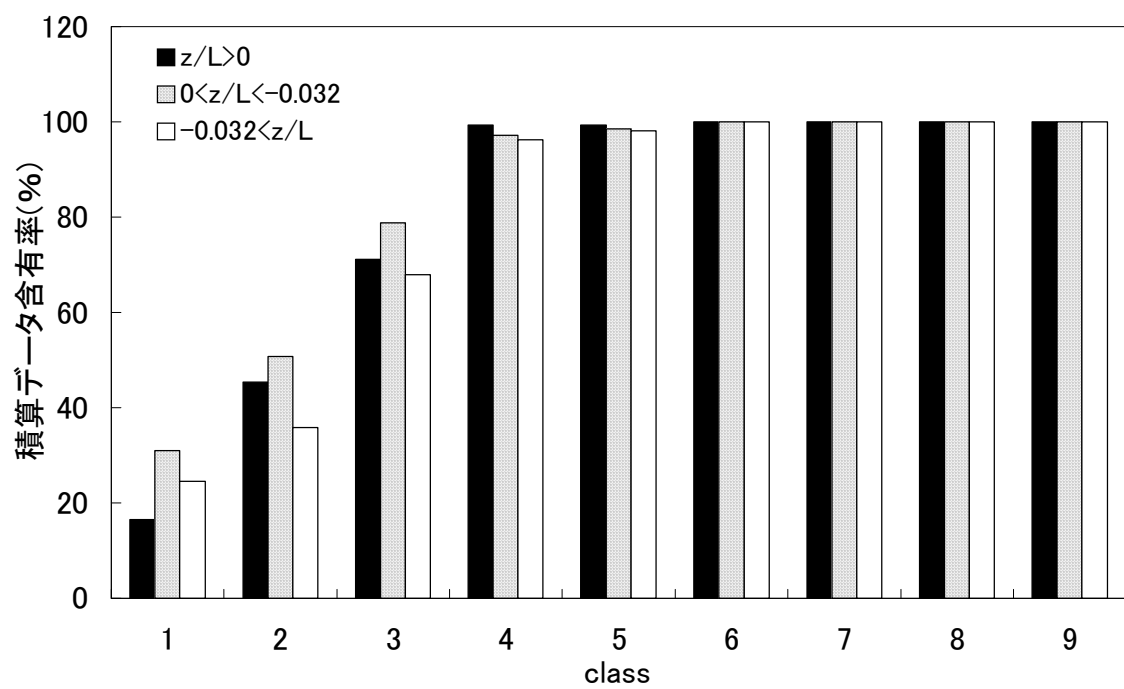


図 15 積分乱流特性による精度分類結果(顕熱 $H < 10$ かつ $u_* > 0.1$)

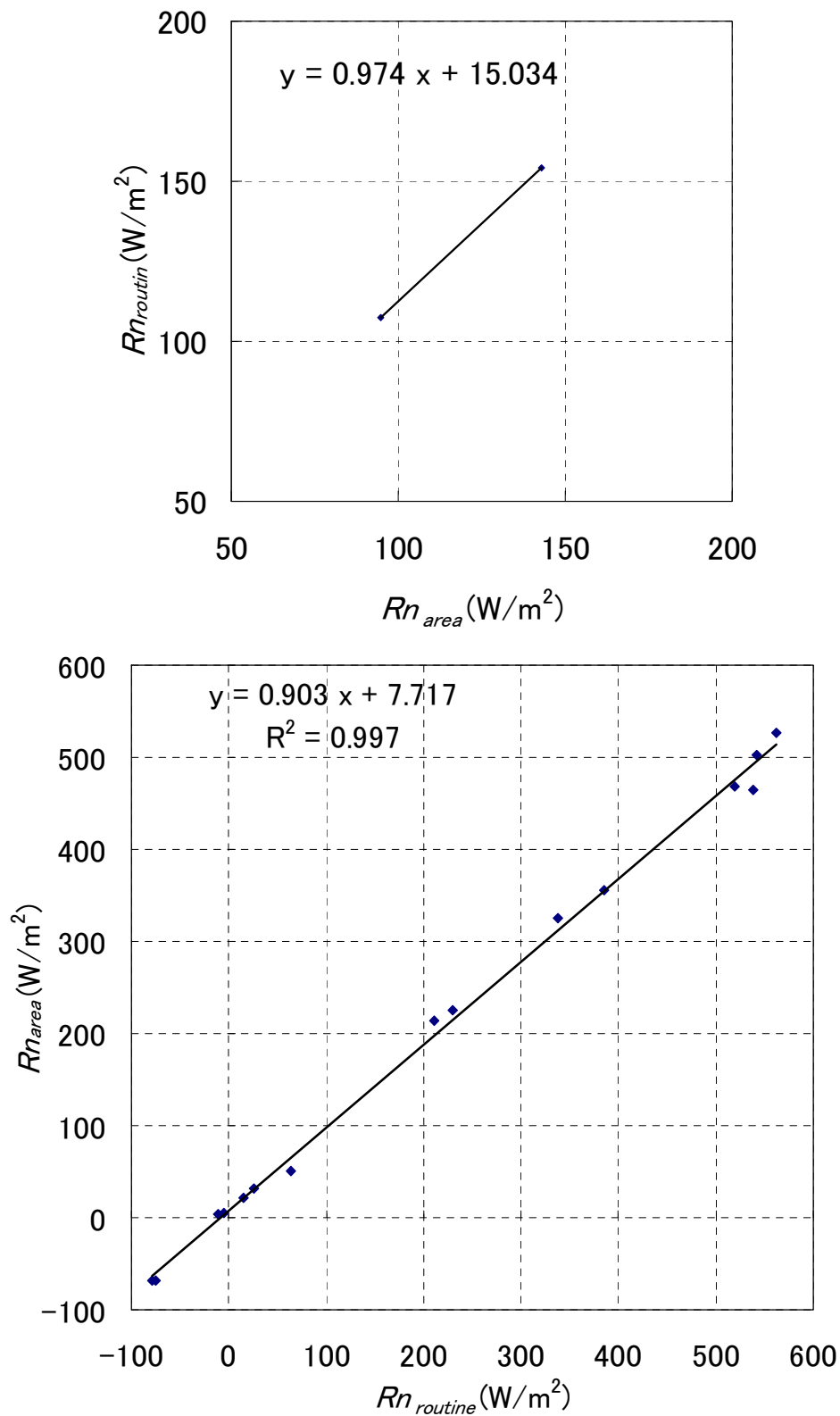


図 16 正味放射量のルーチン観測値($Rn_{routine}$)と移動観測用測器の観測値(Rn_{area})の関係(上)
ルーチン観測値($Rn_{routine}$)とステーション周辺観測値(Rn_{area})の関係(下)

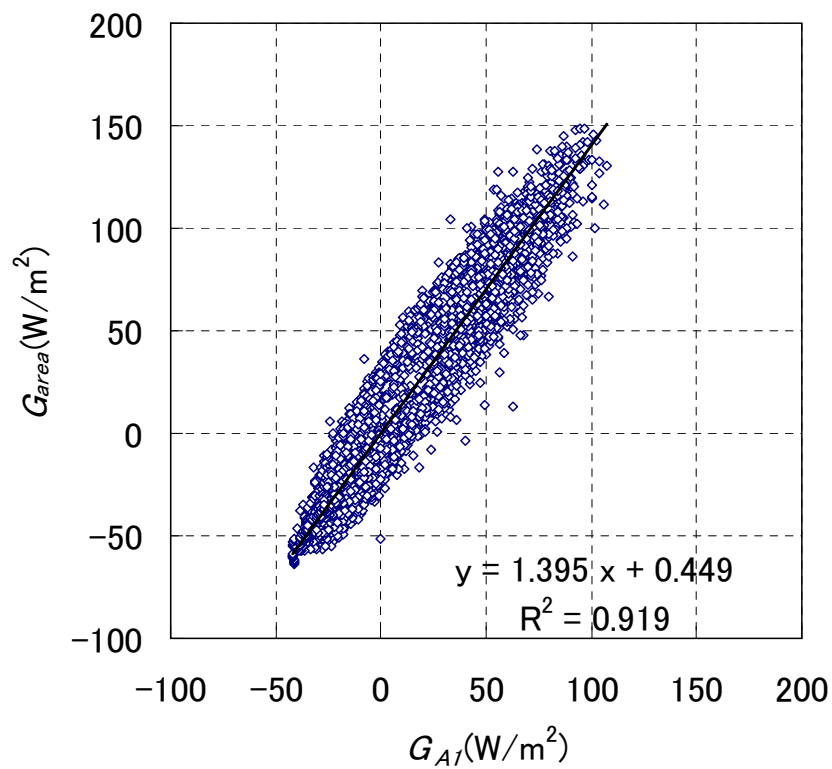
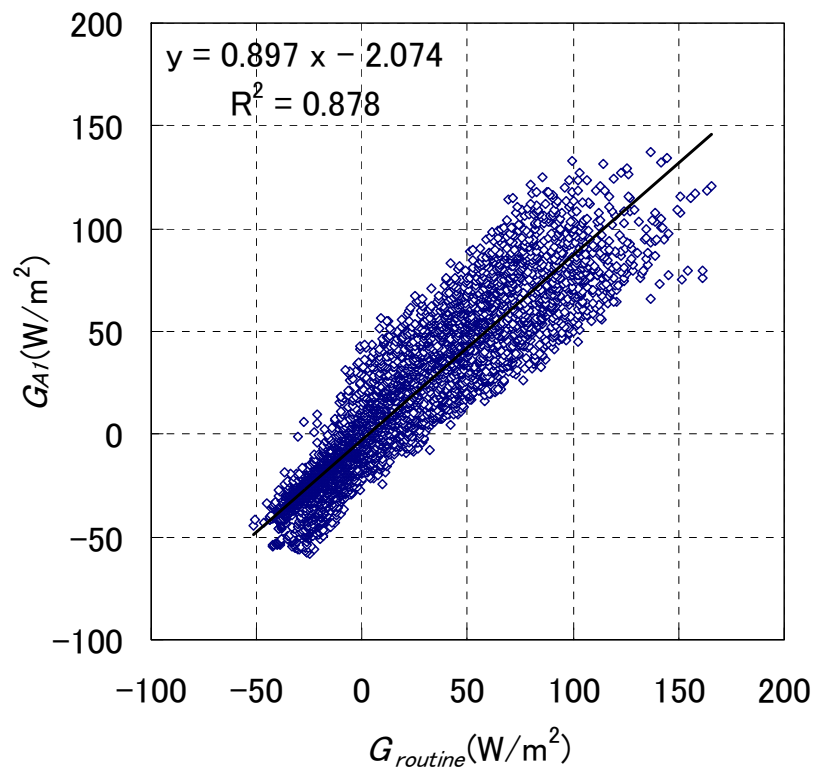


図 17 4月に埋設した熱流板(G_{A1})とルーチン観測値($G_{routine}$)との関係 (上)
 4月に埋設した熱流板(G_{A1})と7月に埋設した熱流板(G_{area})の平均値との関係(下)
 (Apr.-June)

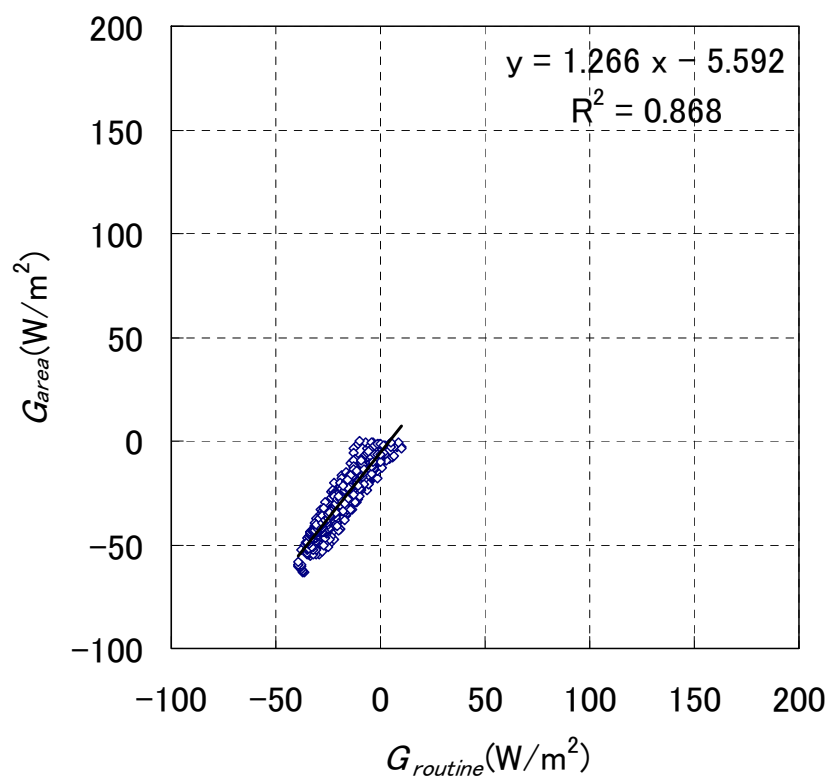
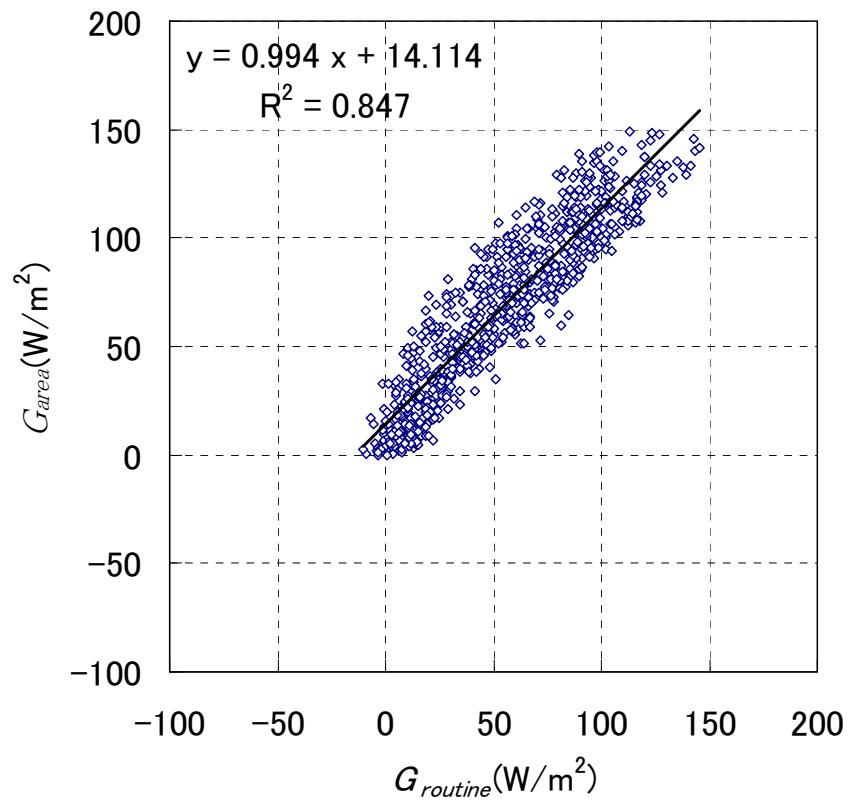


図 18 ルーチン観測値($G_{routine}$)と 7 月に埋設した熱流板の平均値(G_{area})との関係
 上 : $G_{area} \geq 0$, 下 : $G_{area} < 0$
 (July-Aug.)

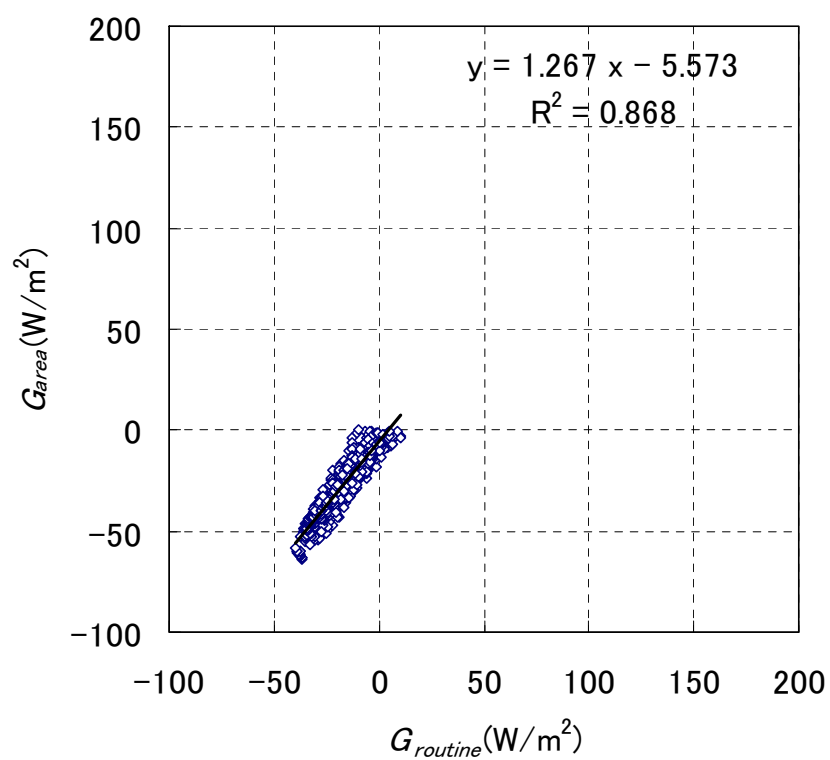
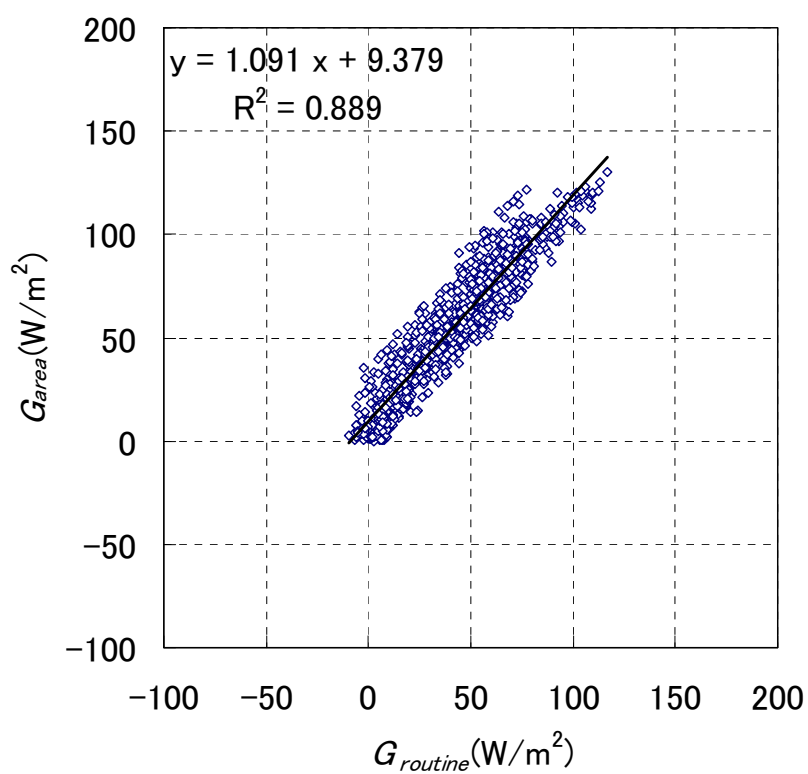


図 19 ルーチン観測値($G_{routine}$)と 7 月に埋設した熱流板の平均値(G_{area})との関係
 上 : $G_{area} \geq 0$, 下 : $G_{area} < 0$
 (Sep.-Oct.)

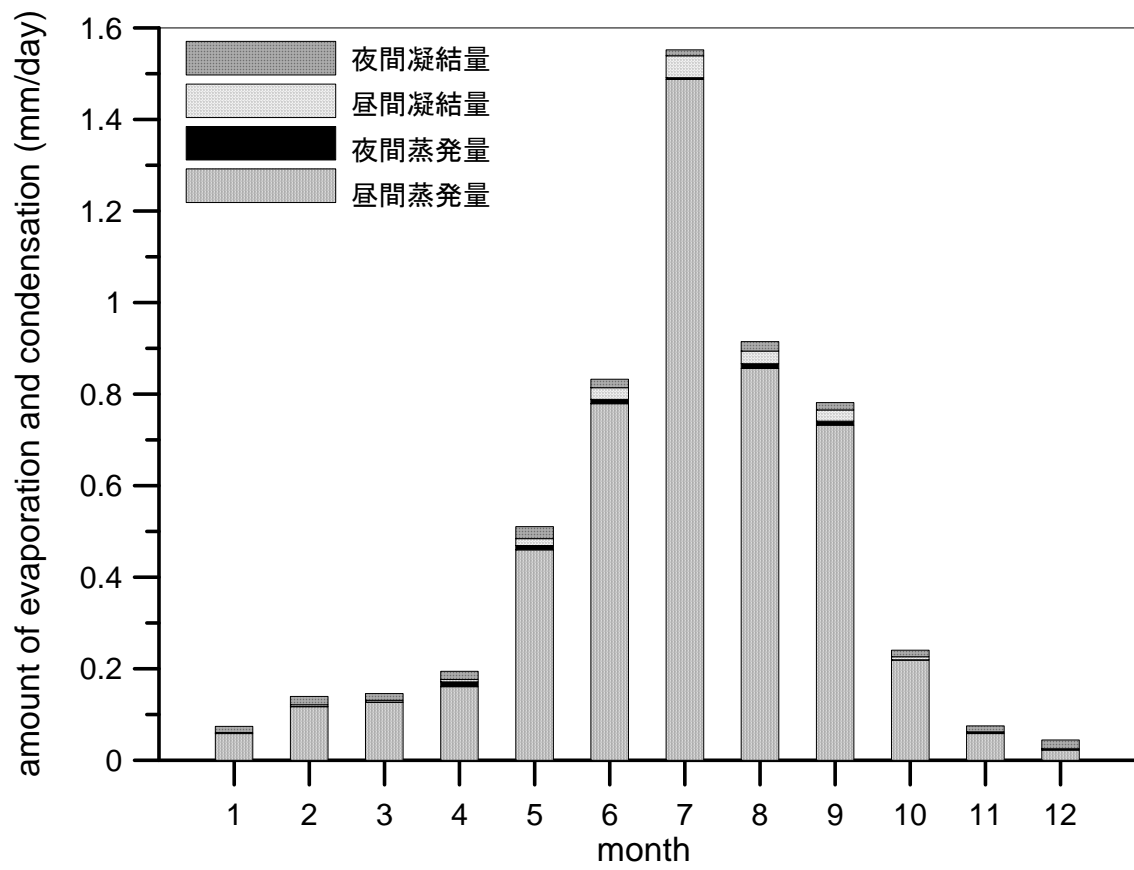


図 20 2003 年の蒸発量・凝結量の月別日平均

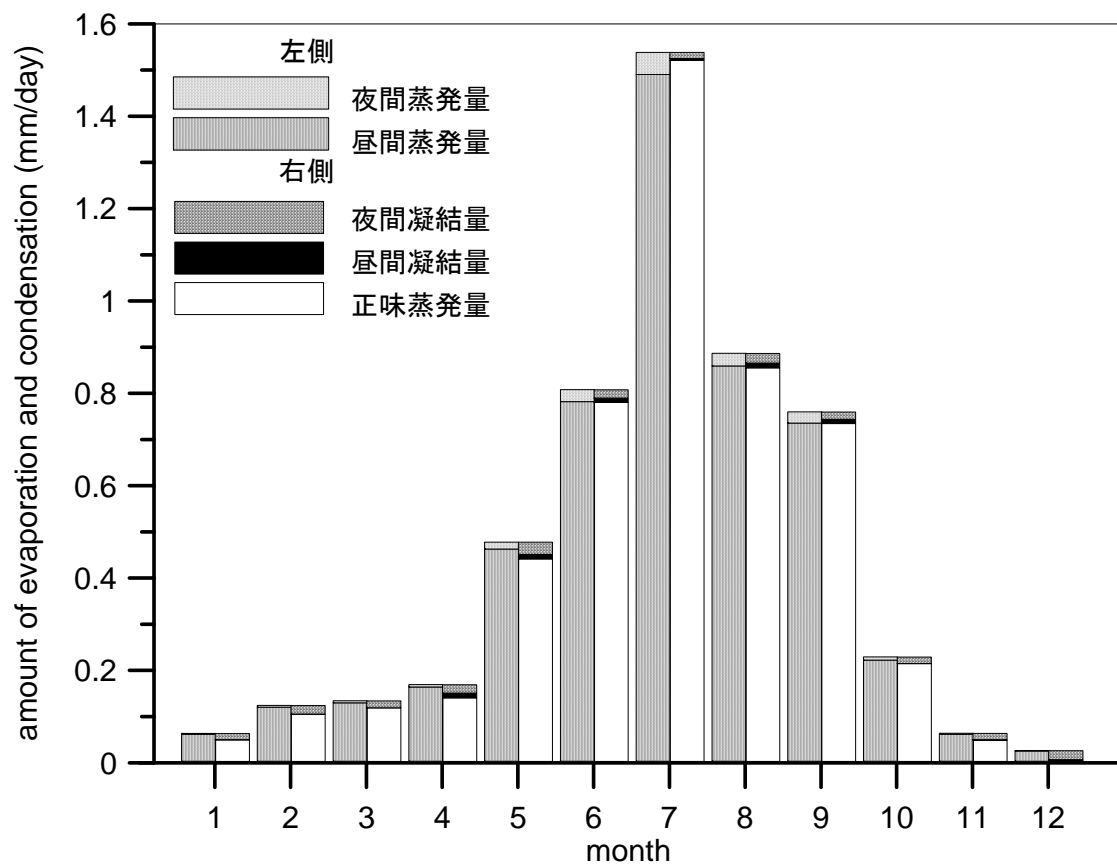


図 21 2003 年の蒸発量・凝結量・正味蒸発量の月別日平均

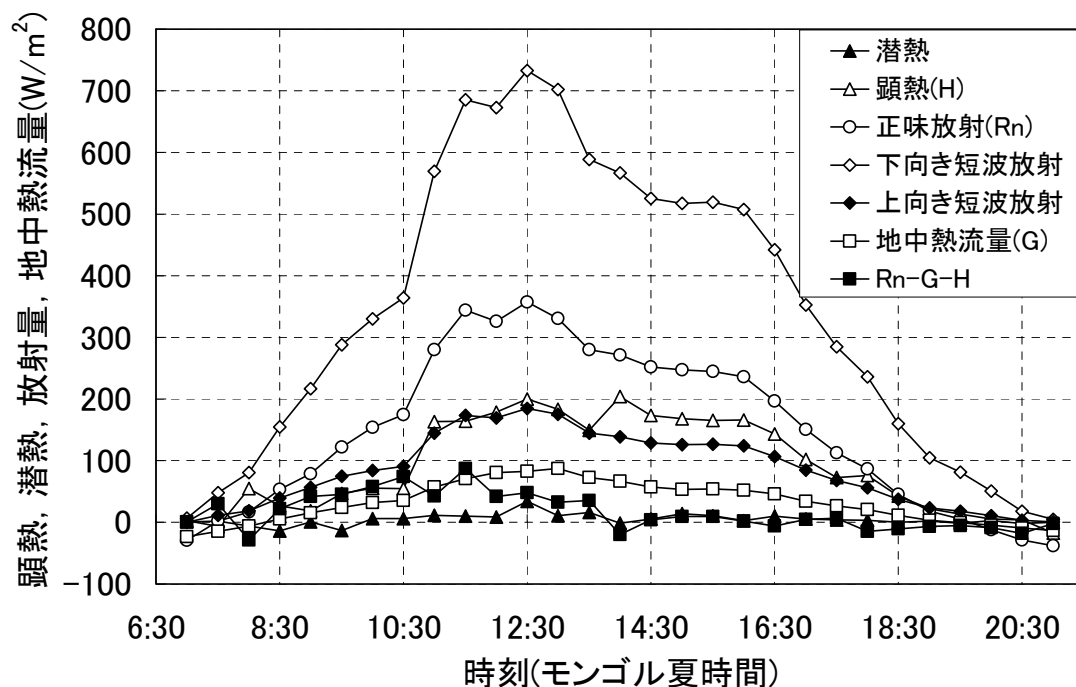
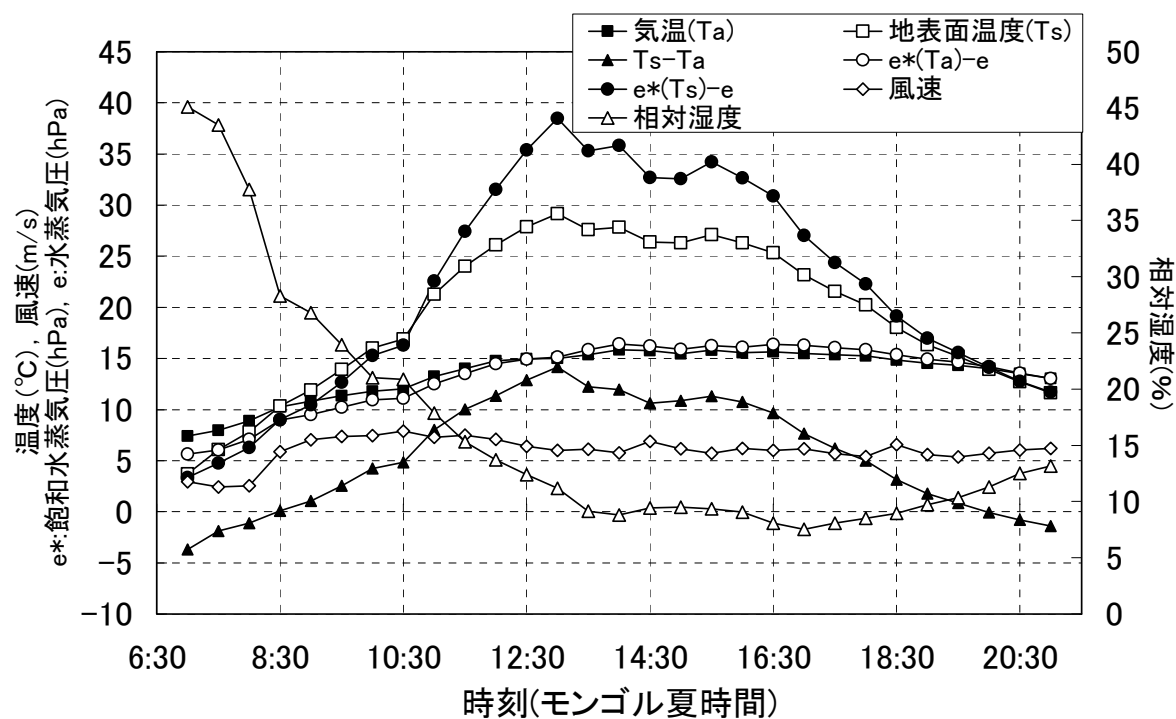


図 22 昼間凝結時(2003 年 5 月 5 日)の潜熱フラックスと各要素の時間変化

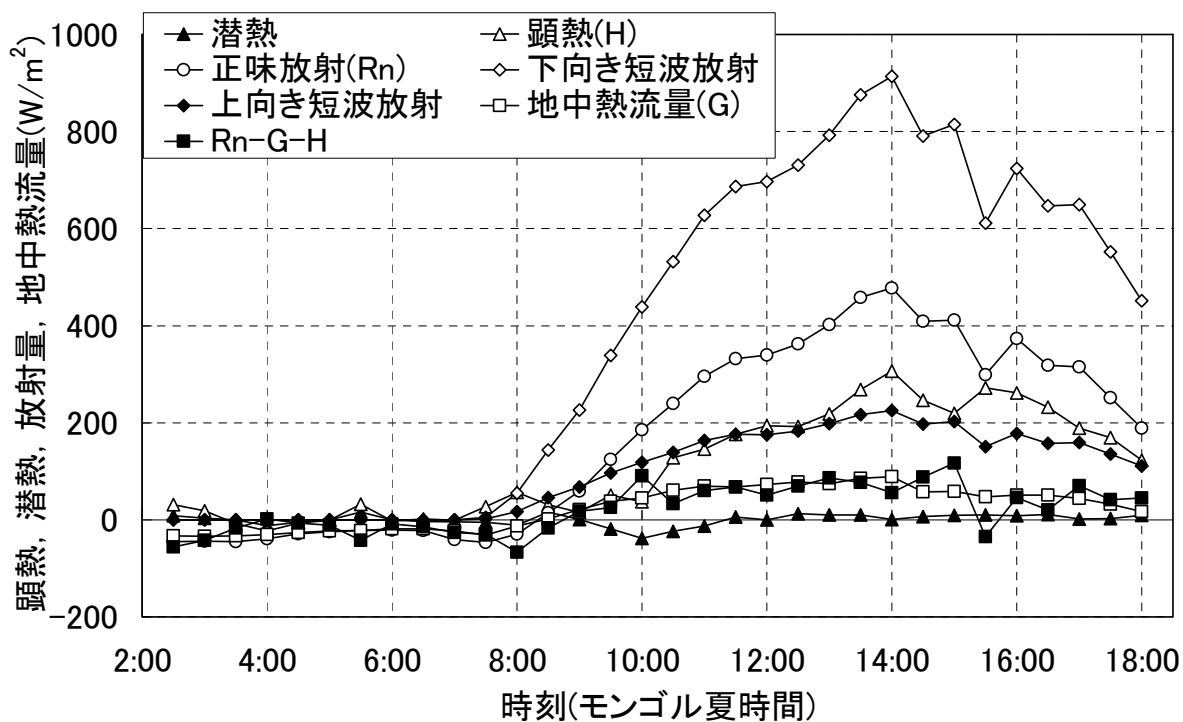
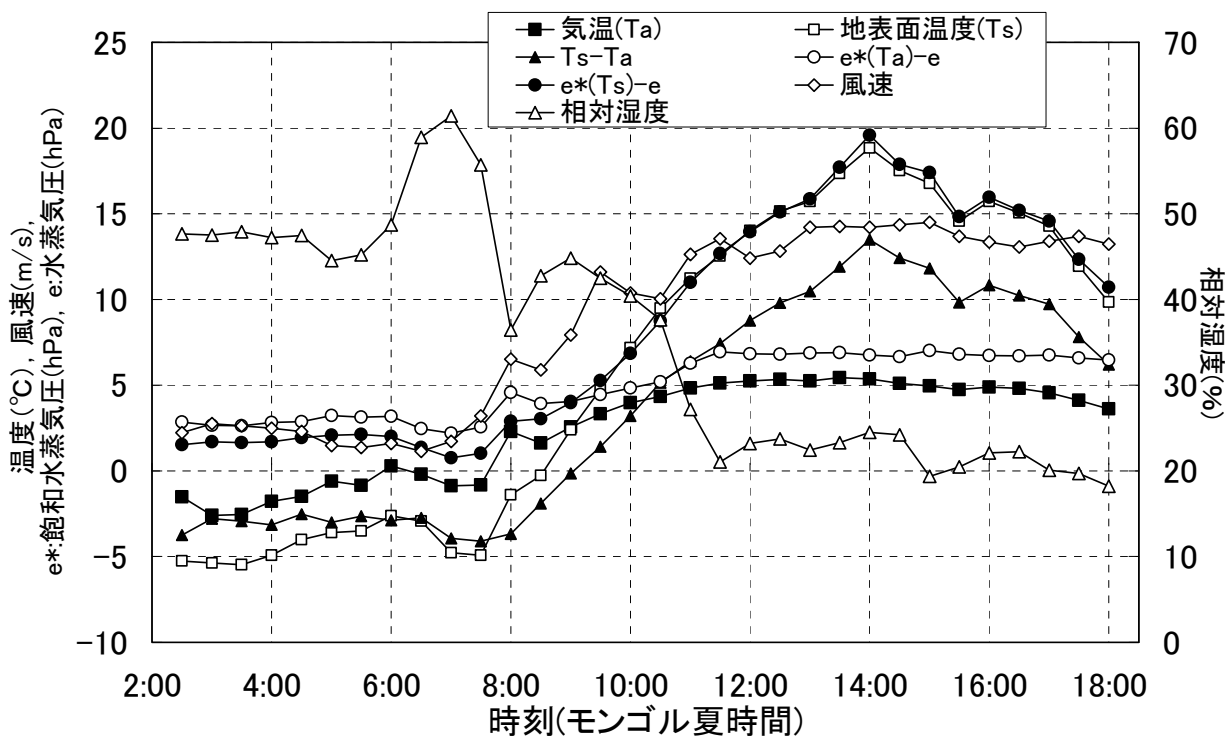


図 23 昼間凝結時(2003 年 4 月 13 日)の潜熱フラックスと各要素の時間変化

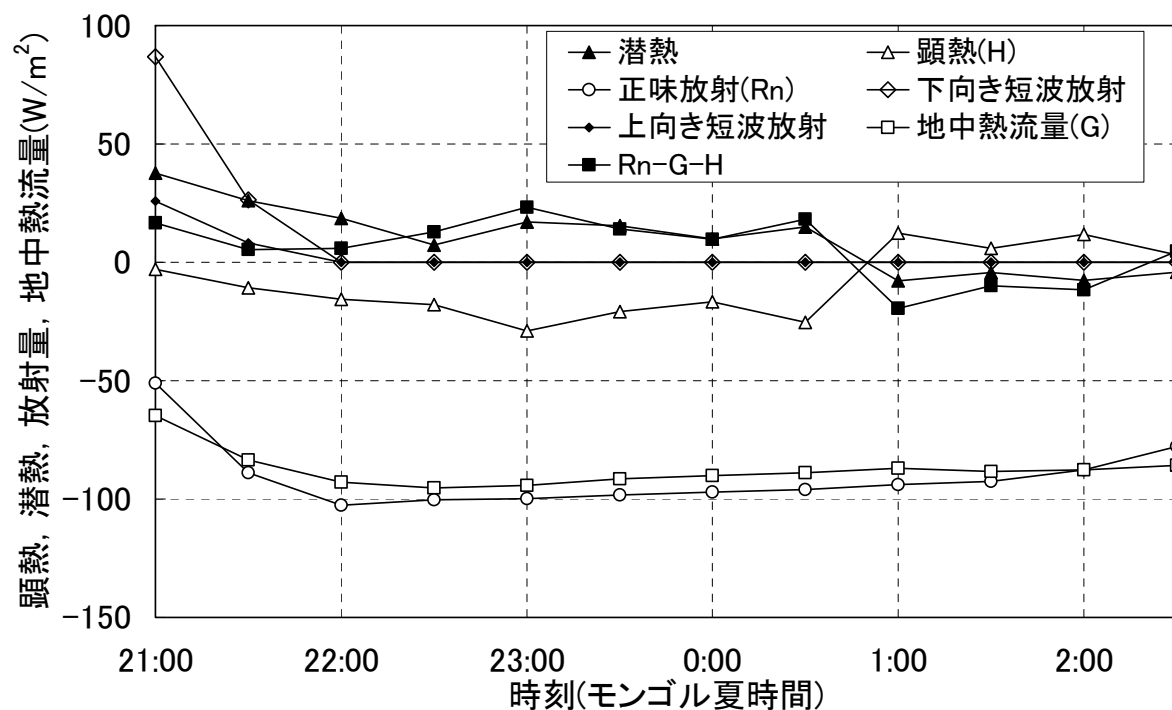
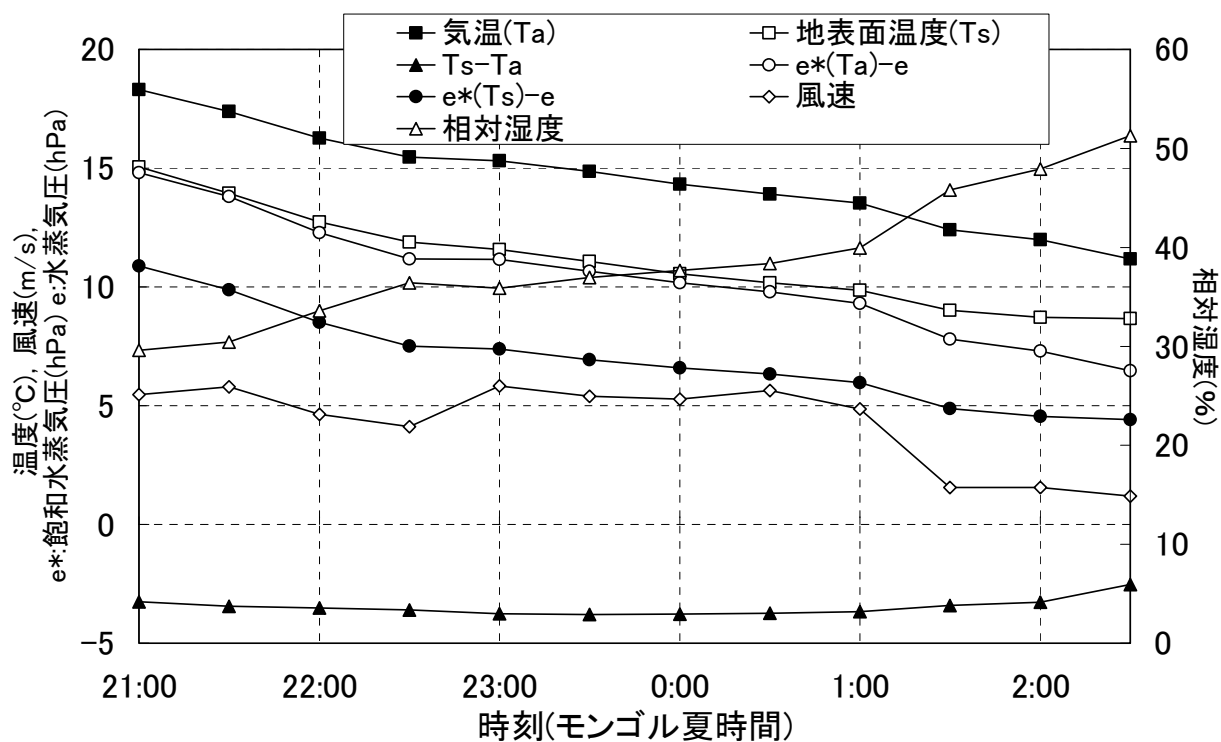


図 24 夜間蒸発時(2003 年 7 月 4~5 日)の潜熱フラックスと各要素の時間変化

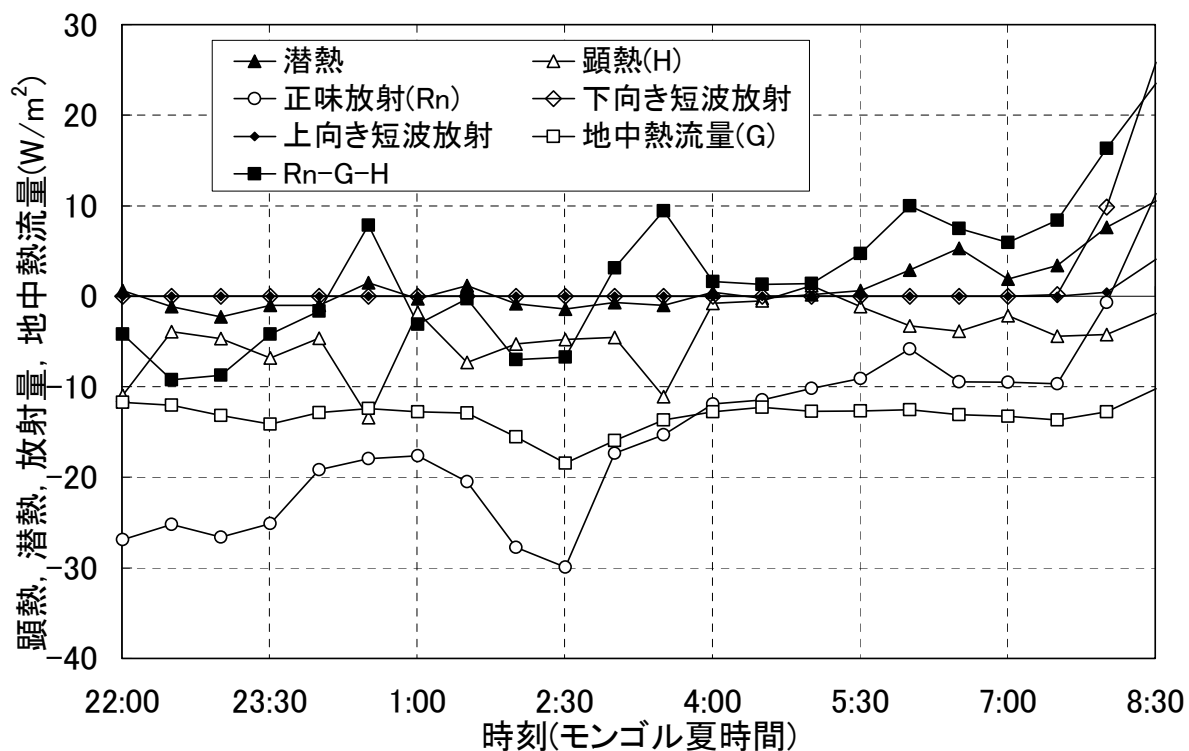
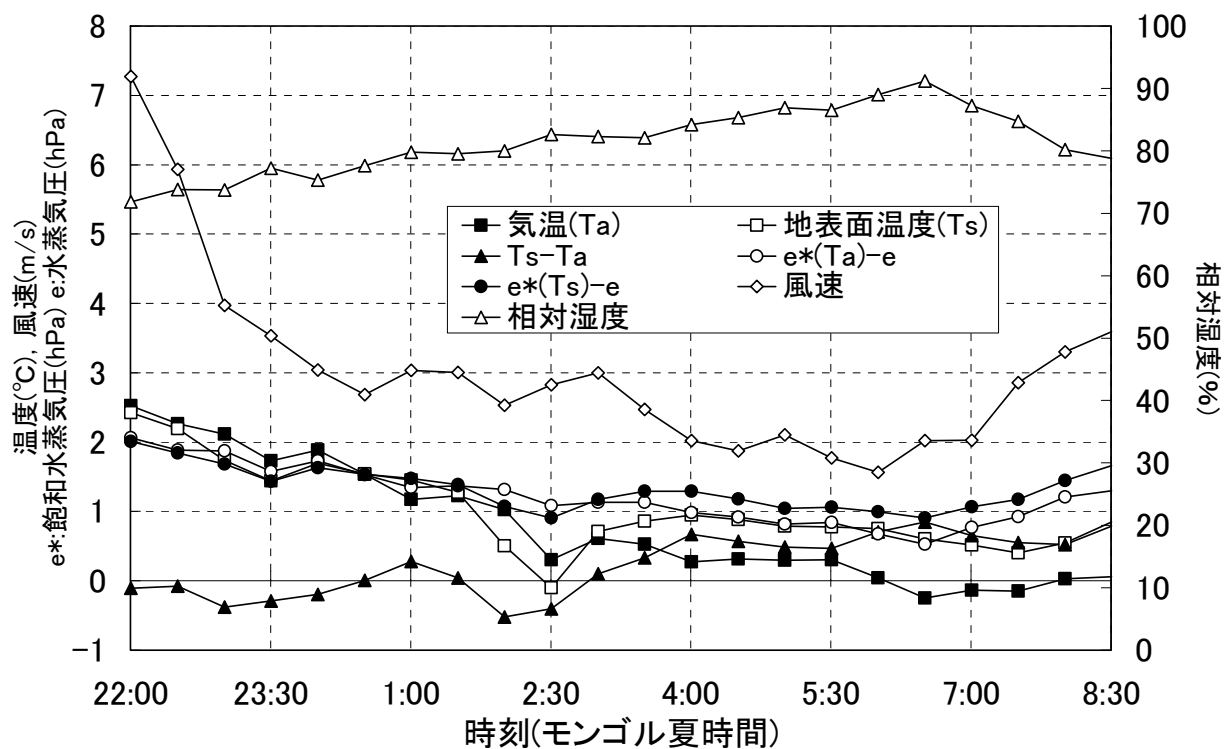


図 25 夜間蒸発時(2003 年 4 月 10~11 日)の潜熱フラックスと各要素の時間変化

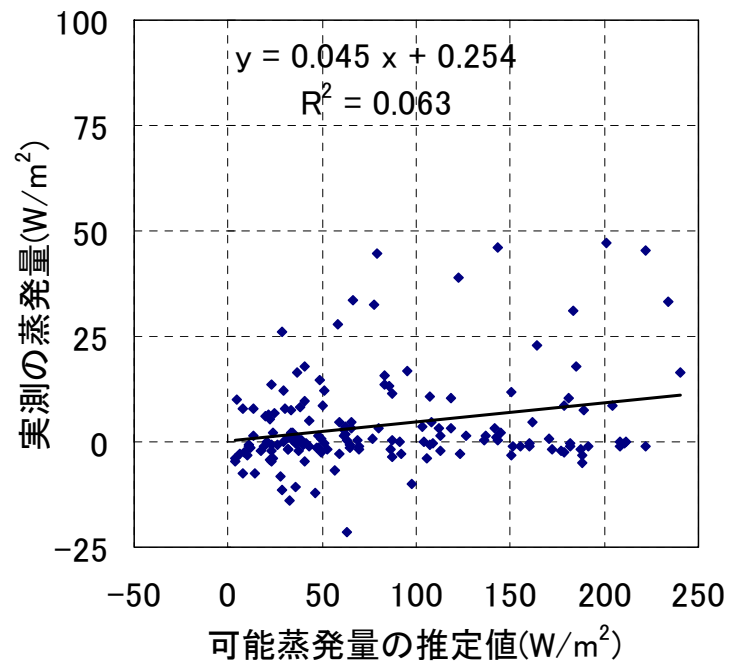
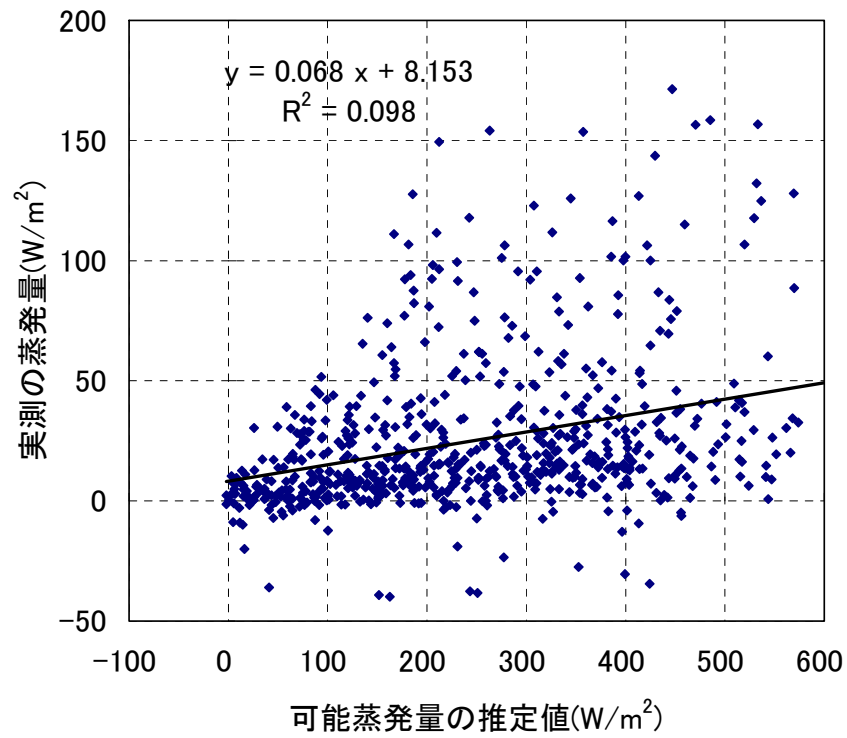


図 26 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(Apr.-June)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

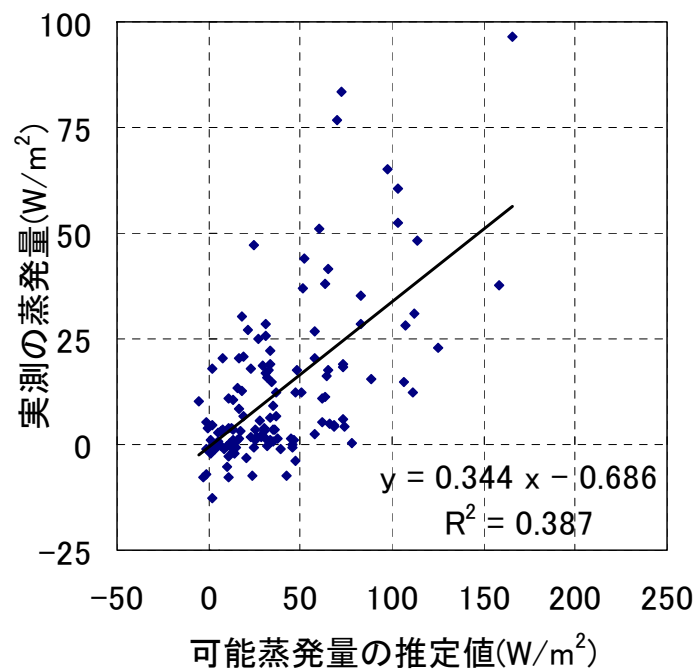
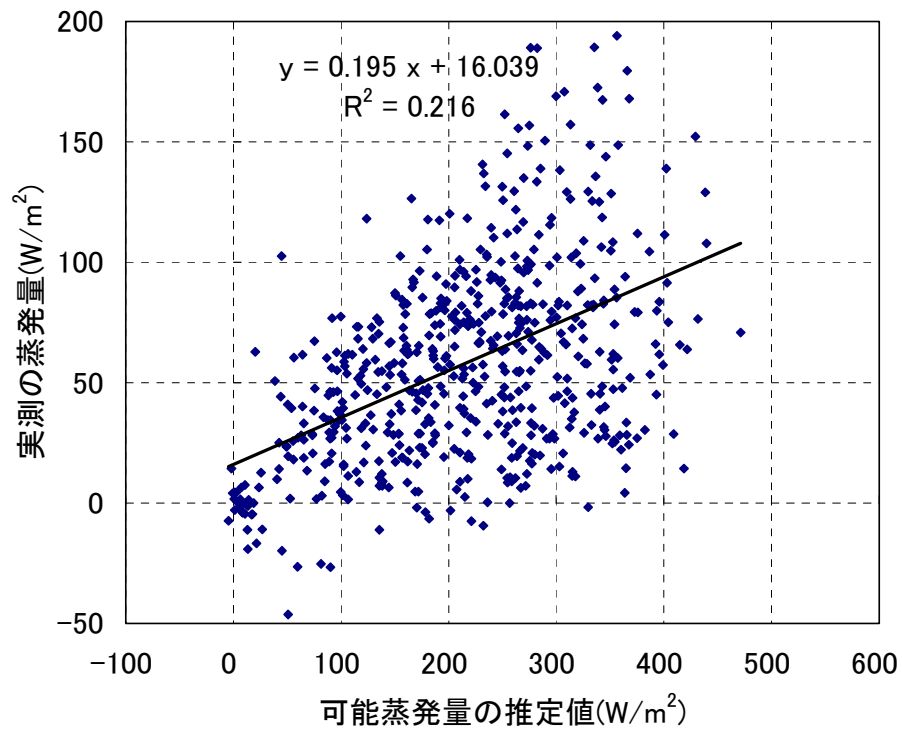


図 27 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(July-Aug.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

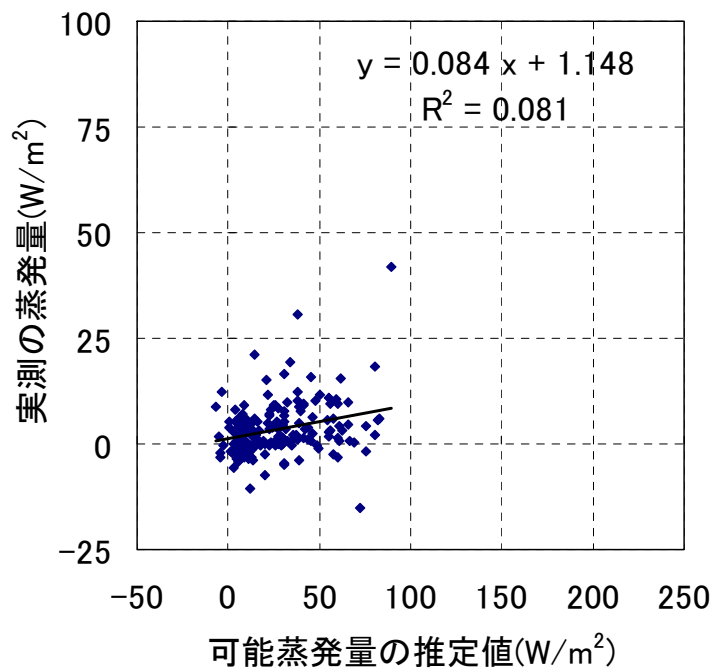
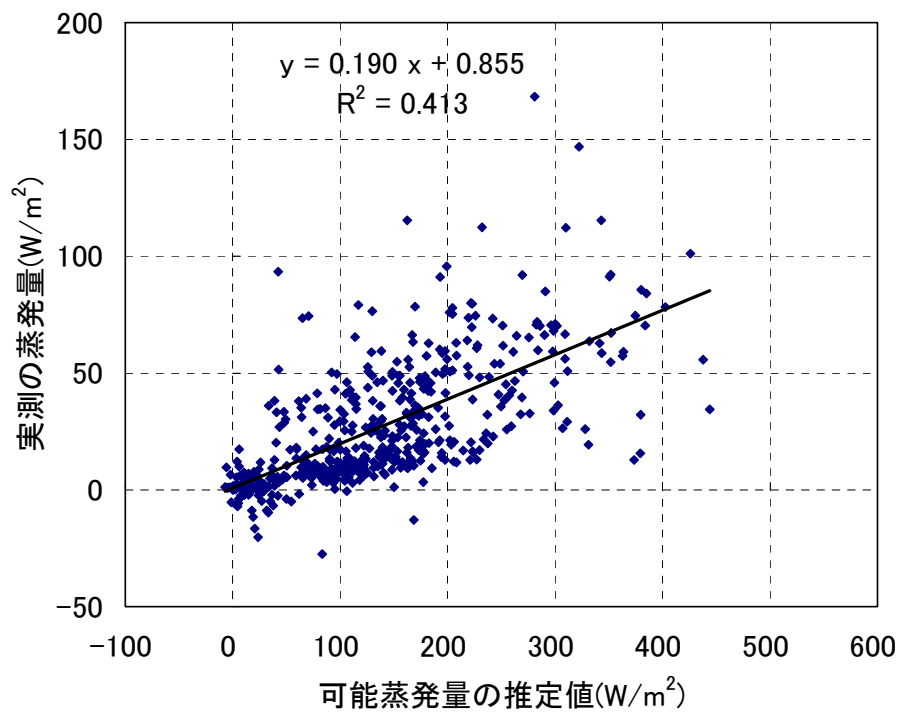


図 28 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(Sep.-Oct.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

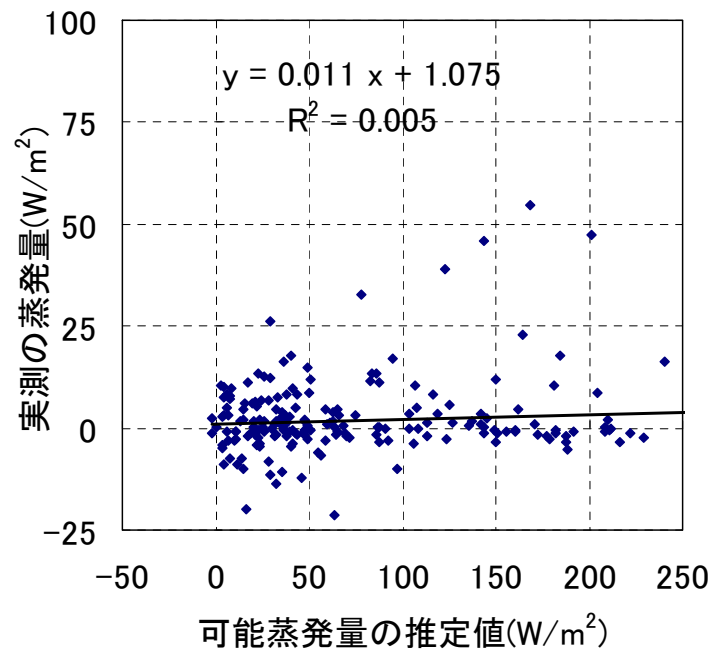
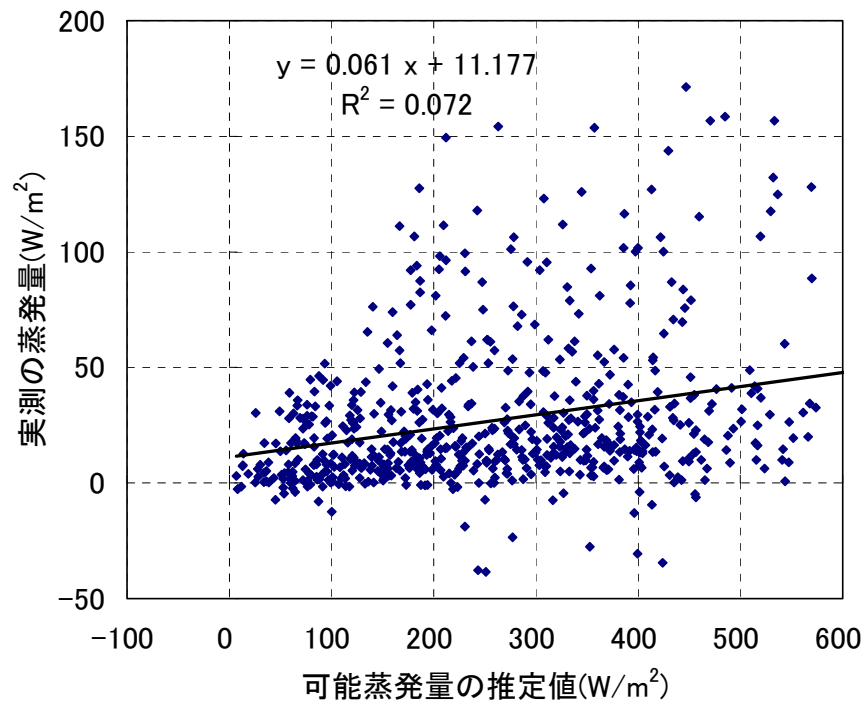


図 29 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(Apr.-June)
上 : $R_n - G \geq 0$, 下 : $R_n - G < 0$

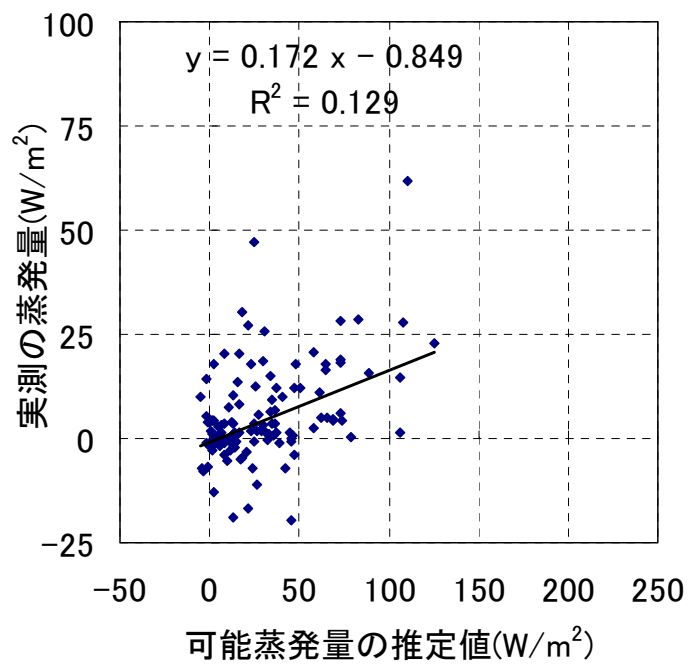
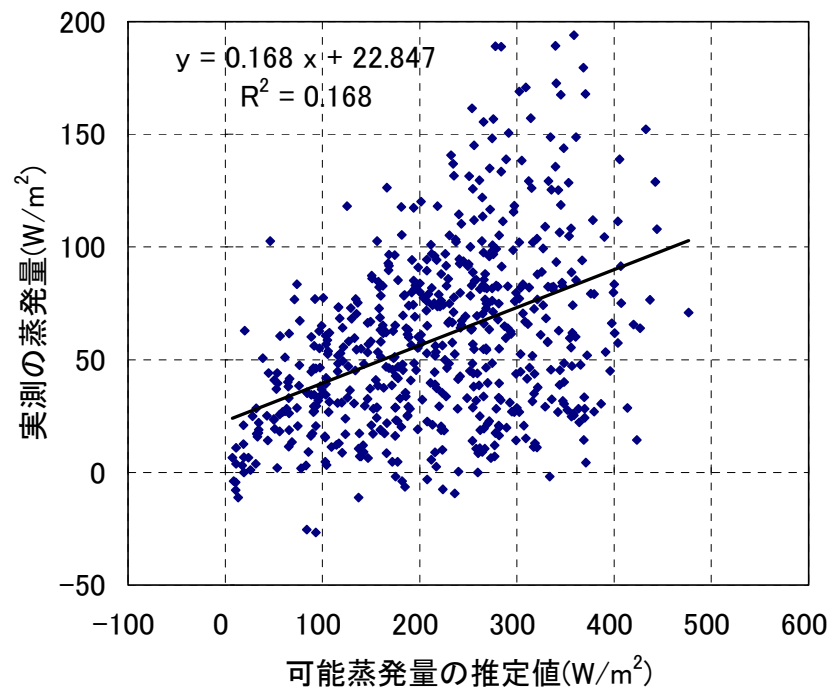


図 30 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(July-Aug.)
上 : $R_n - G \geq 0$, 下 : $R_n - G < 0$

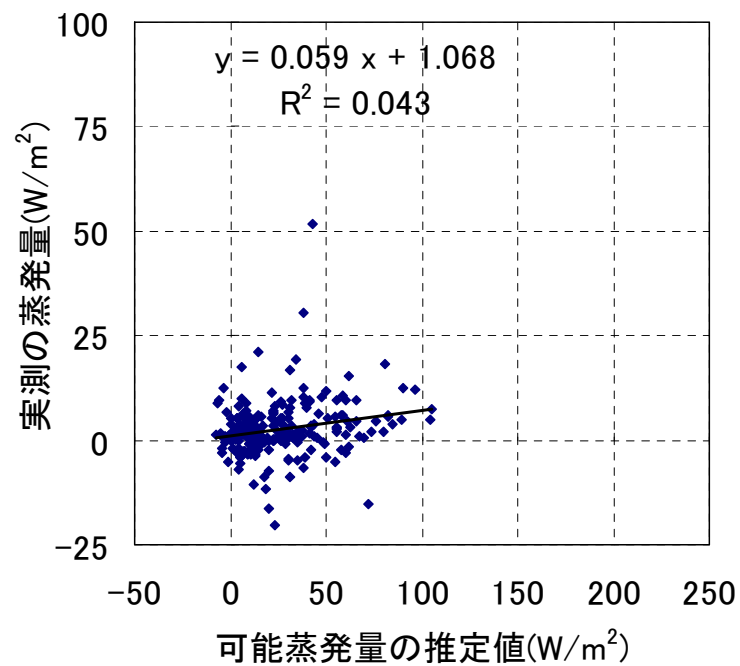
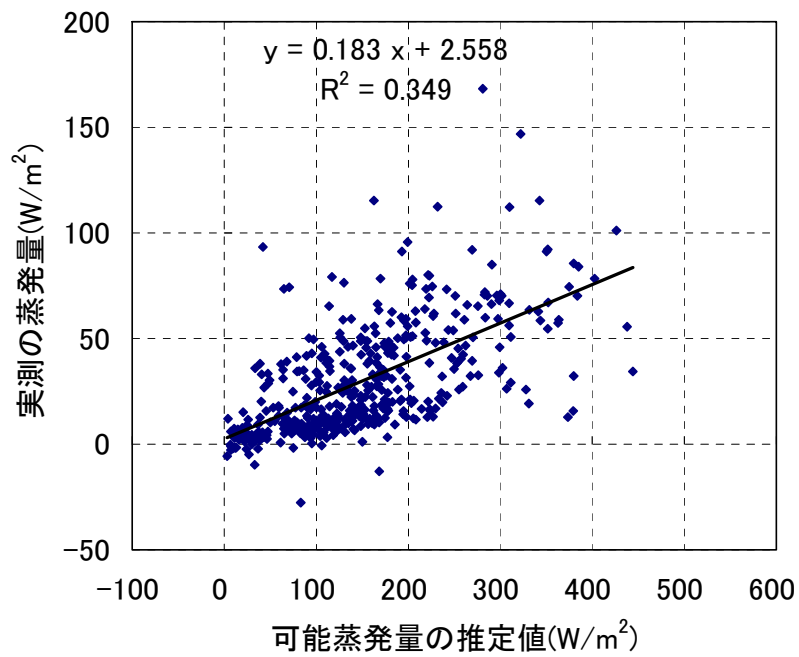


図 31 van Bavel (1966) による可能蒸発量の推定値と実測値の比較
(Sep.-Oct.)
上 : $R_n - G \geq 0$, 下 : $R_n - G < 0$

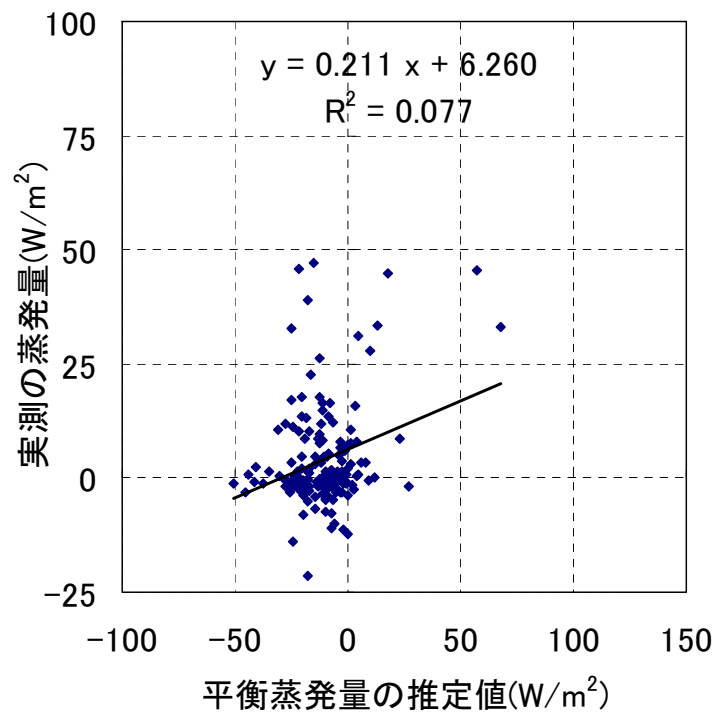
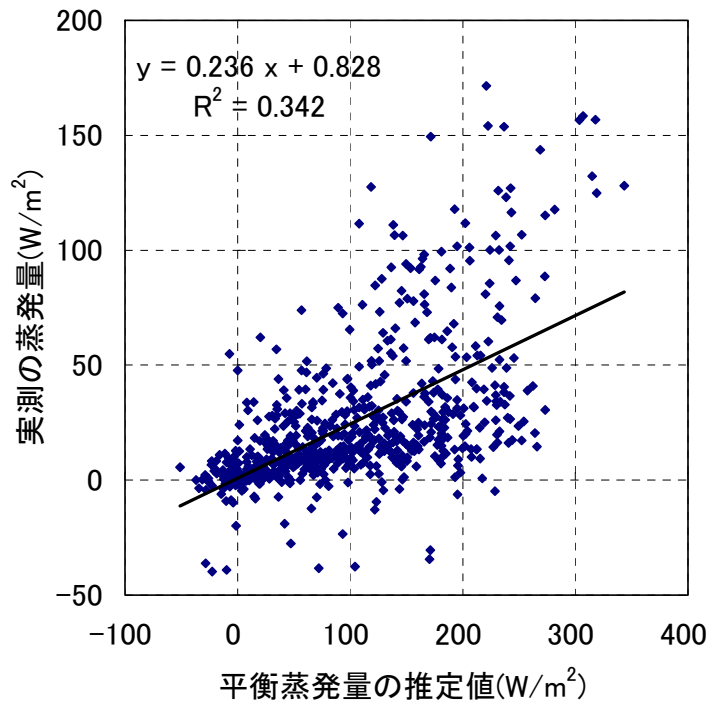


図 32 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
 (Apr.-June)
 上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

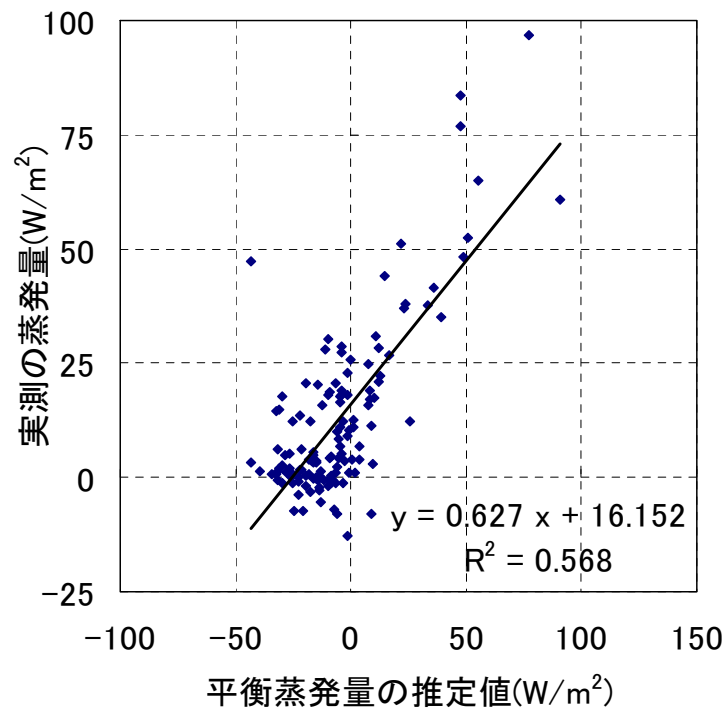
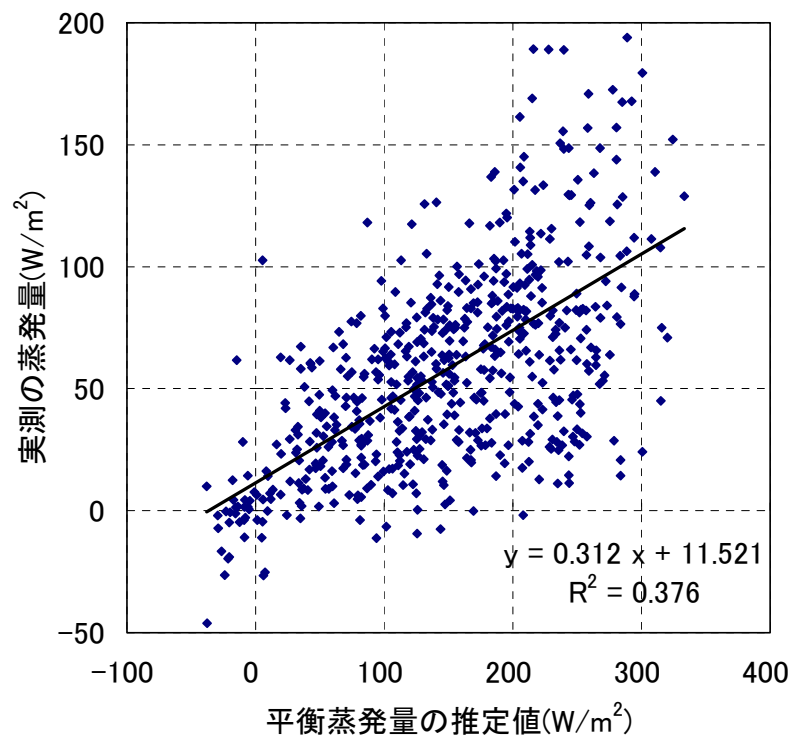


図 33 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
(July-Aug.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

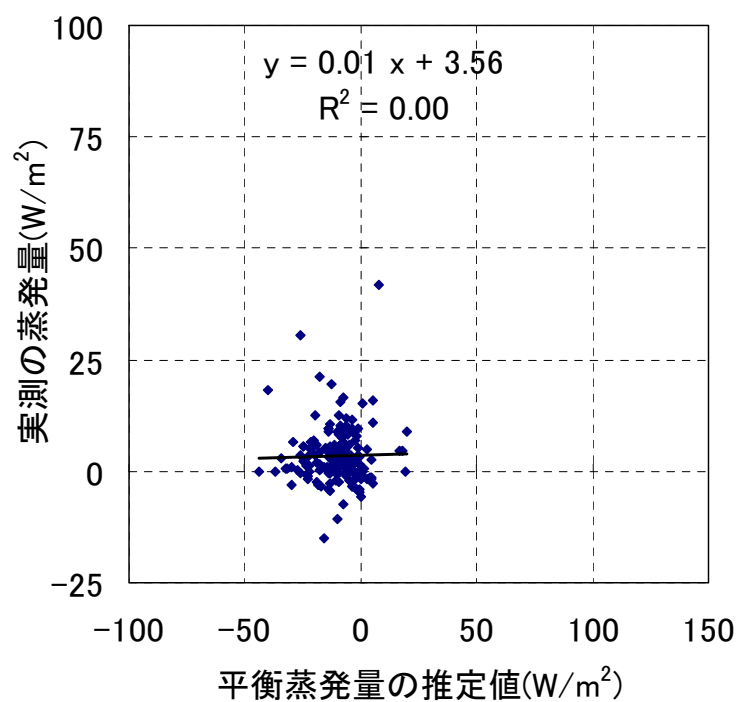
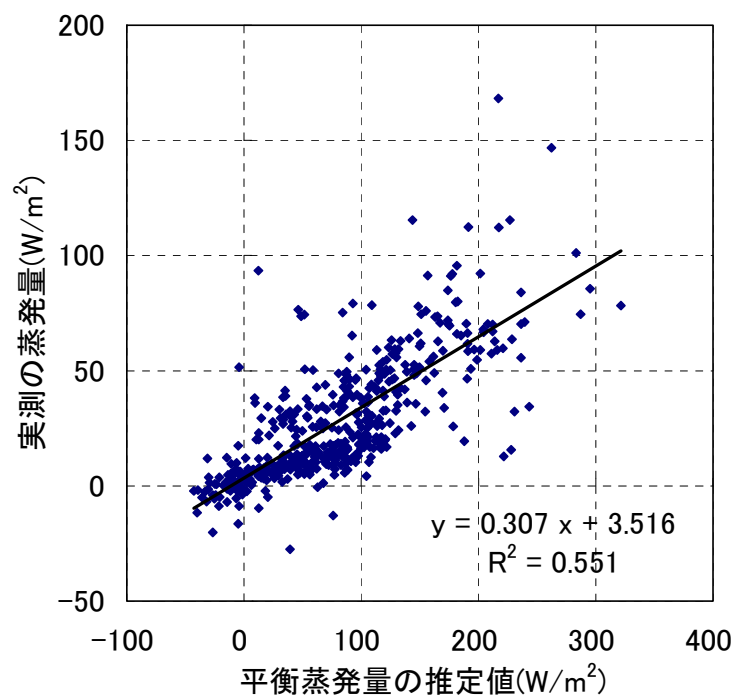


図 34 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
(Sep.-Oct.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

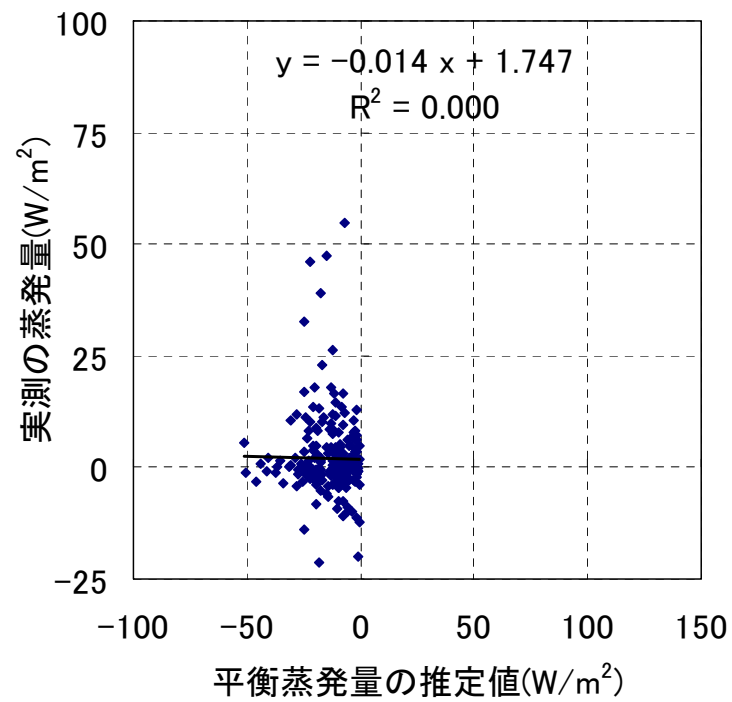
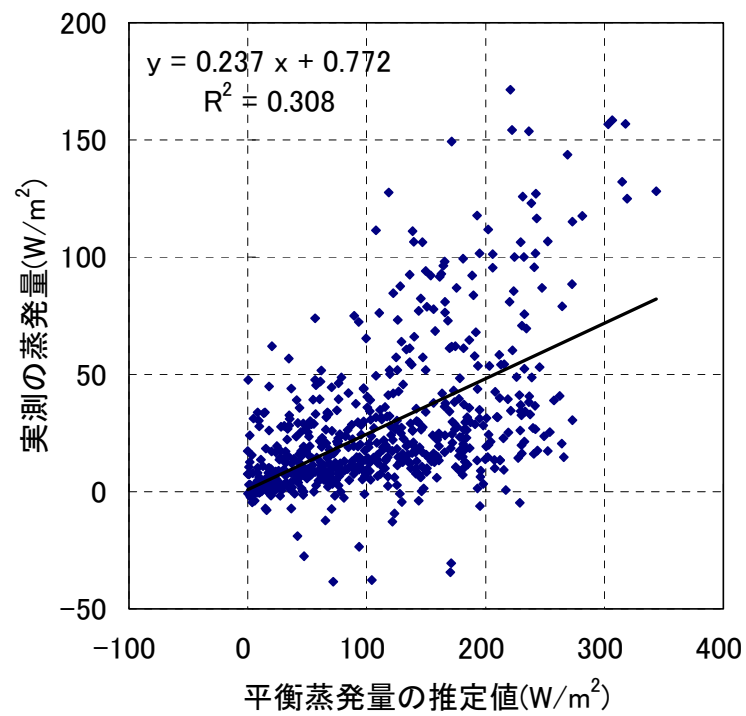


図 35 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
(Apr.-June)
上 : $R_n - G \geq 0$, 下 : $R_n - G < 0$

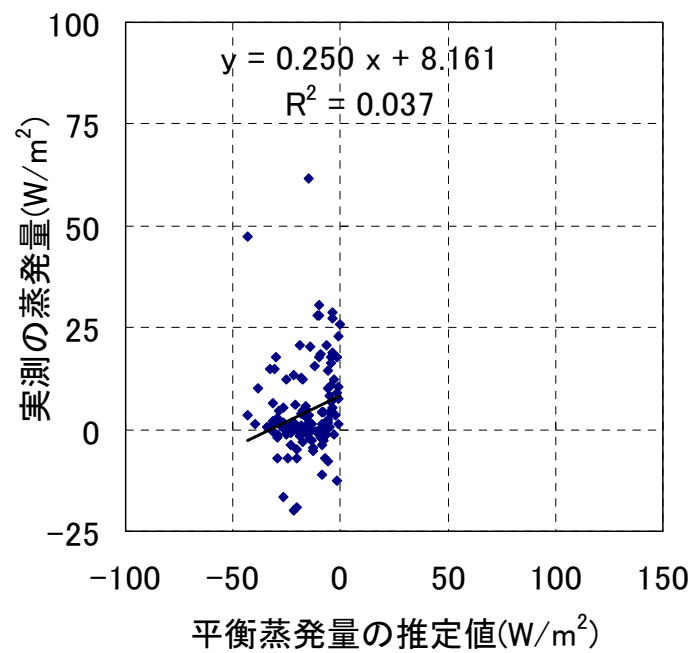
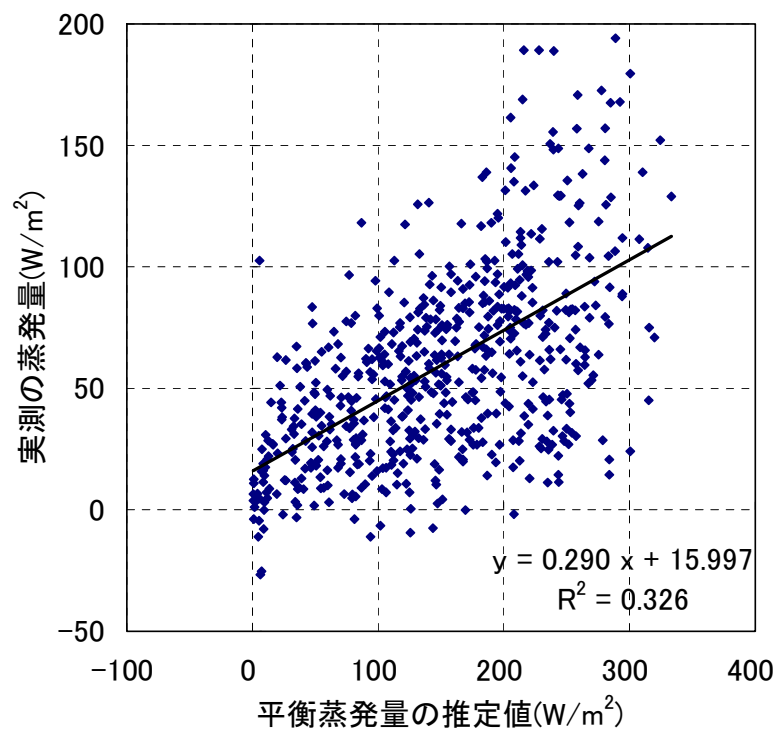


図 36 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
 (July-Aug.)
 上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

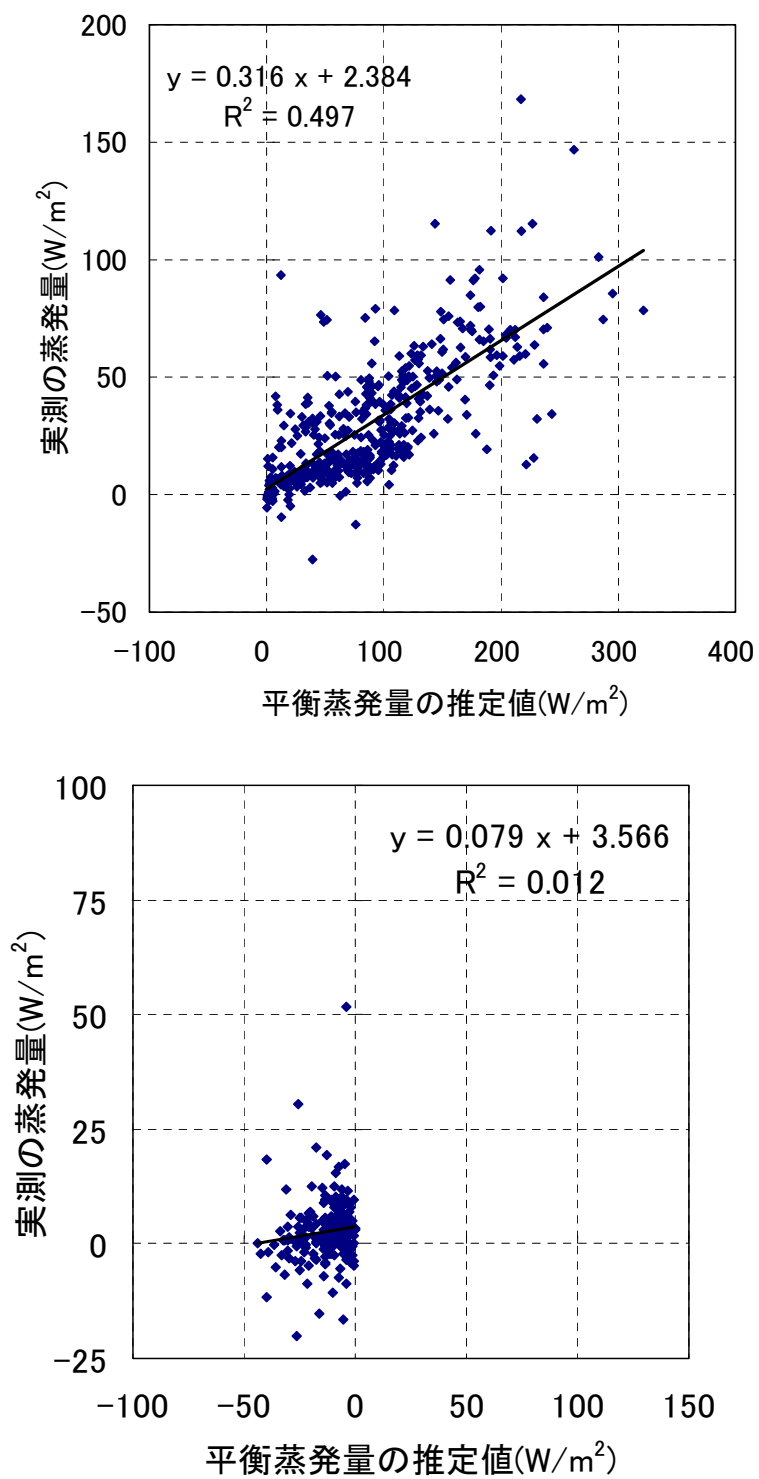


図 37 Slatyer and McIlroy (1961), Denmead and McIlroy (1970) による
 平衡蒸発量の推定値と実測値の比較
 (Sep.-Oct.)
 上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

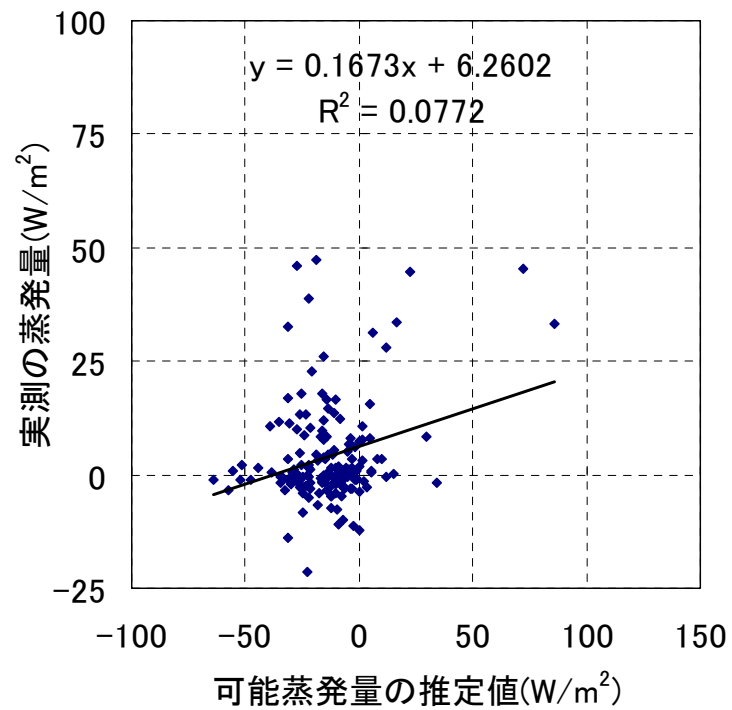
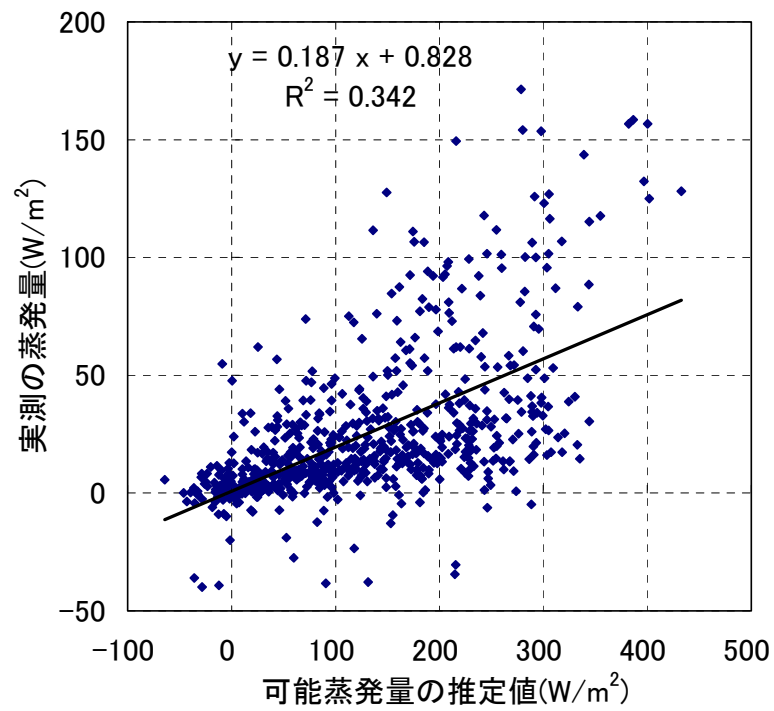


図 38 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(Apr.-June)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

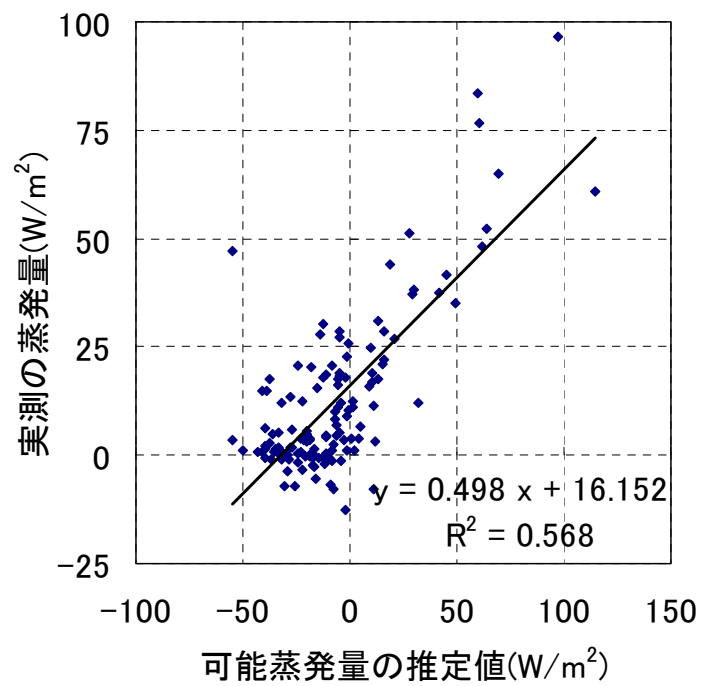
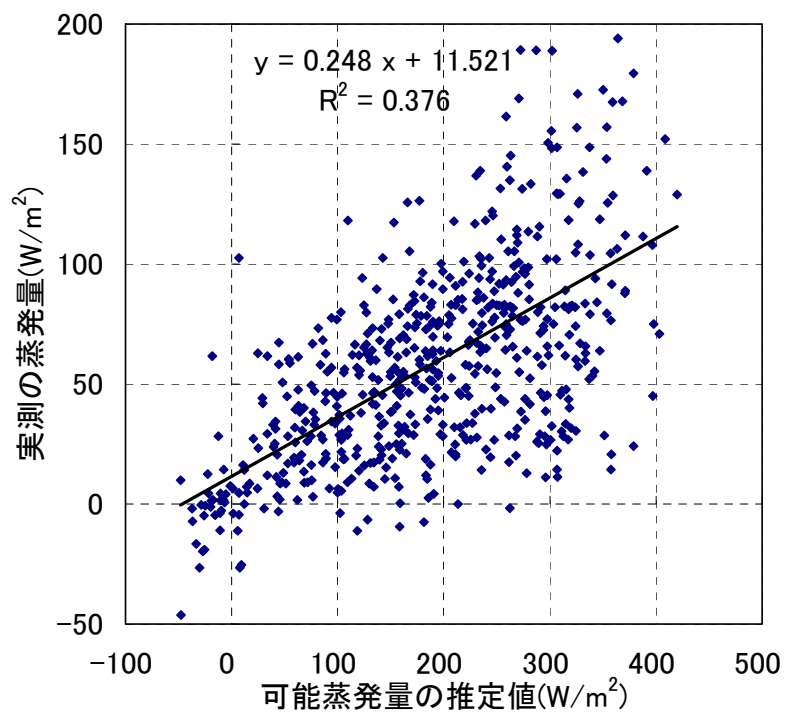


図 39 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(July-Aug.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

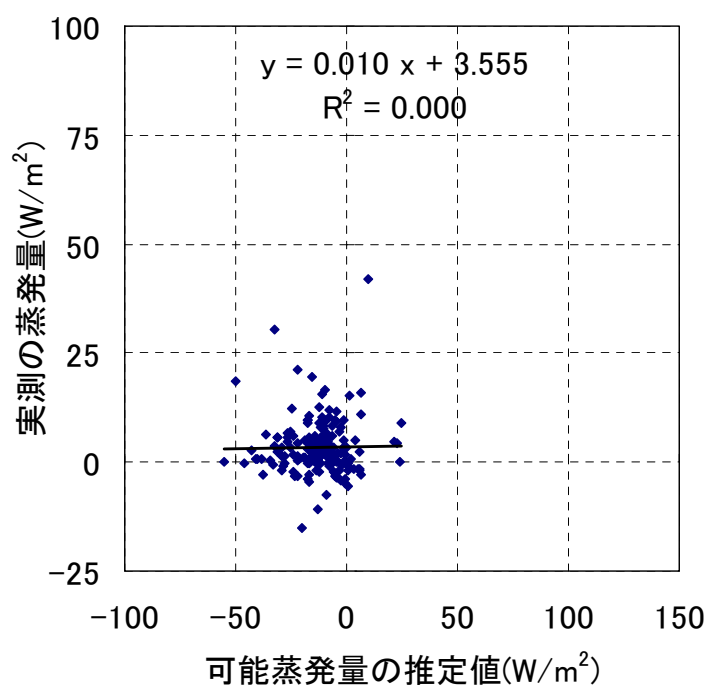
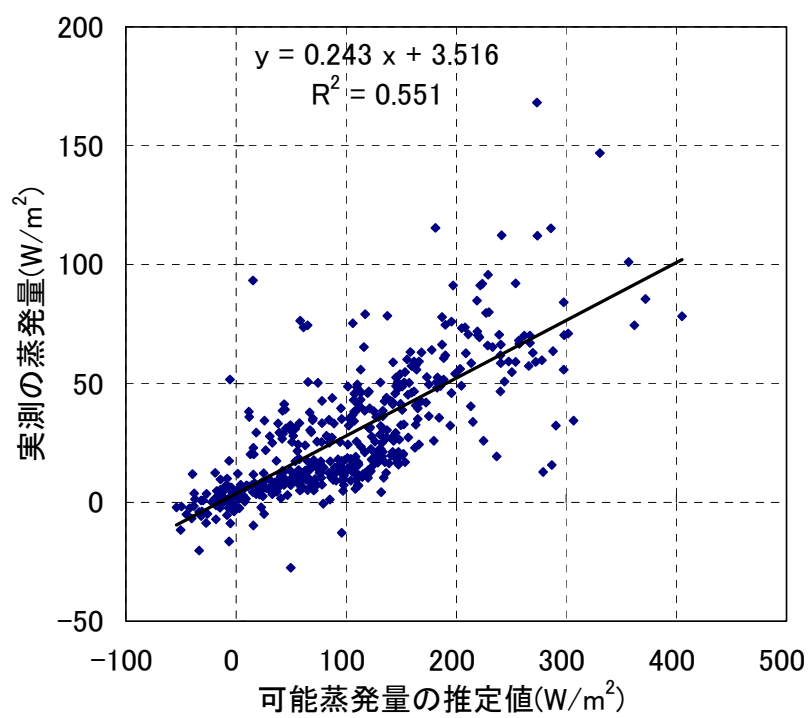


図 40 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(Sep.-Oct.)
上 : $L \leq 0$, 下 : $L > 0$

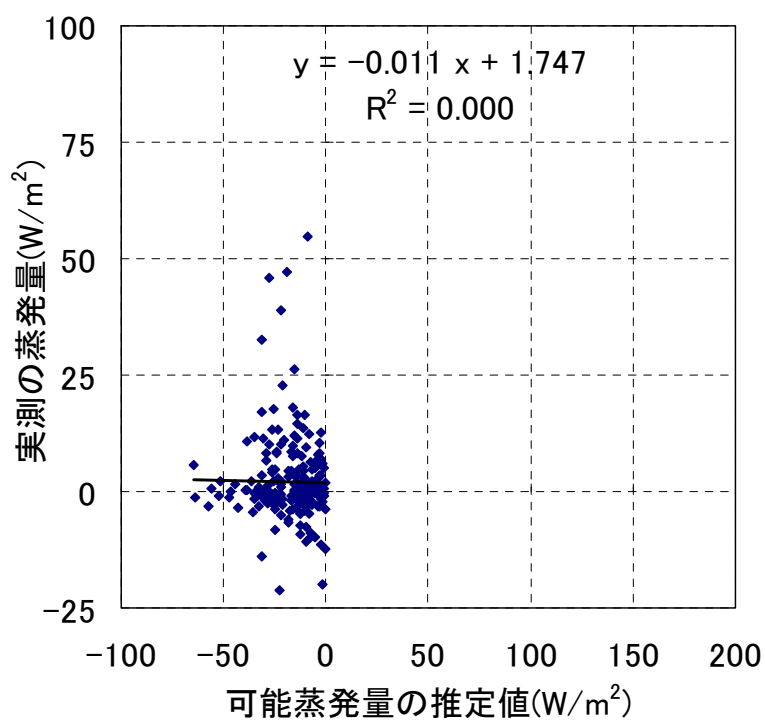
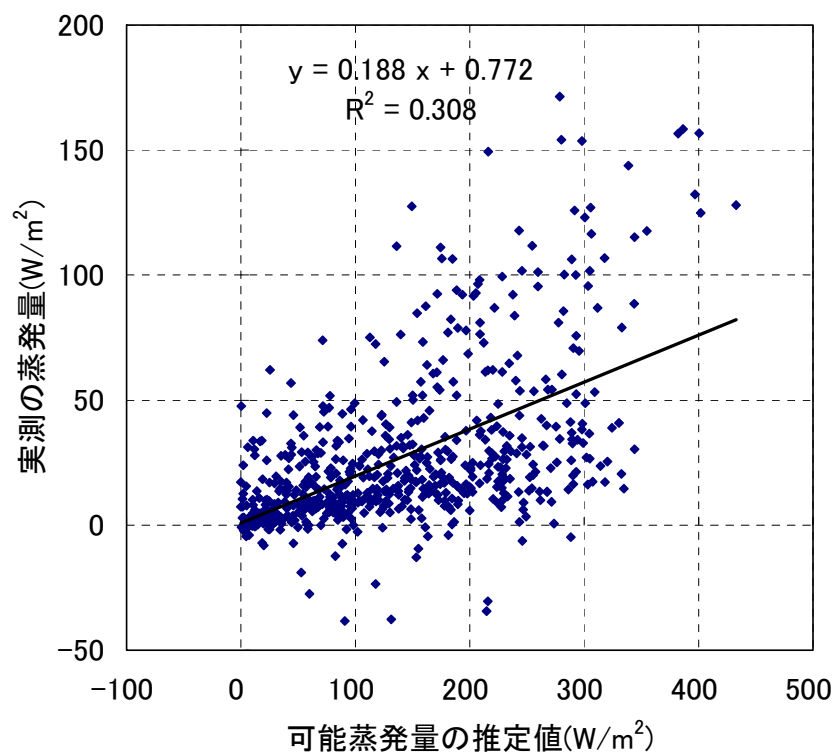


図 41 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(Apr.-June)
 上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

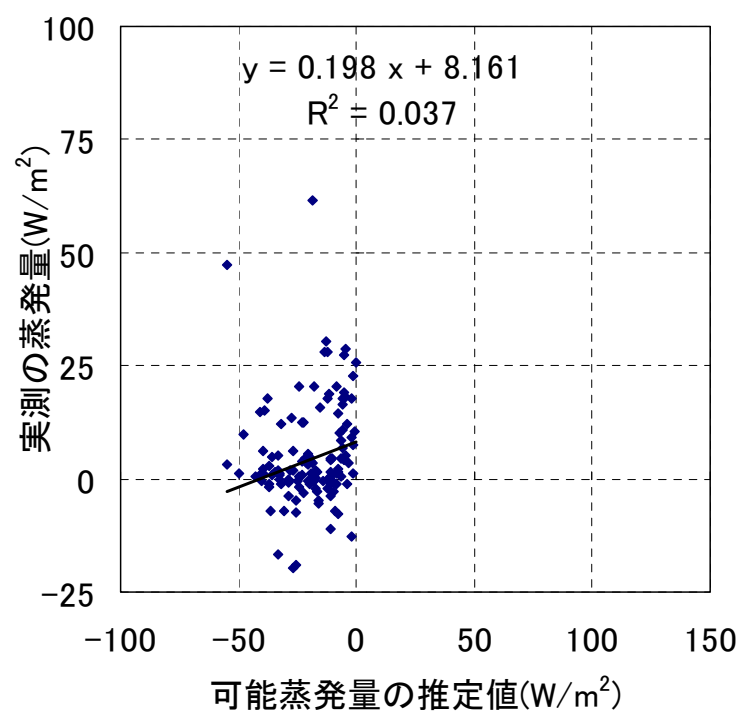
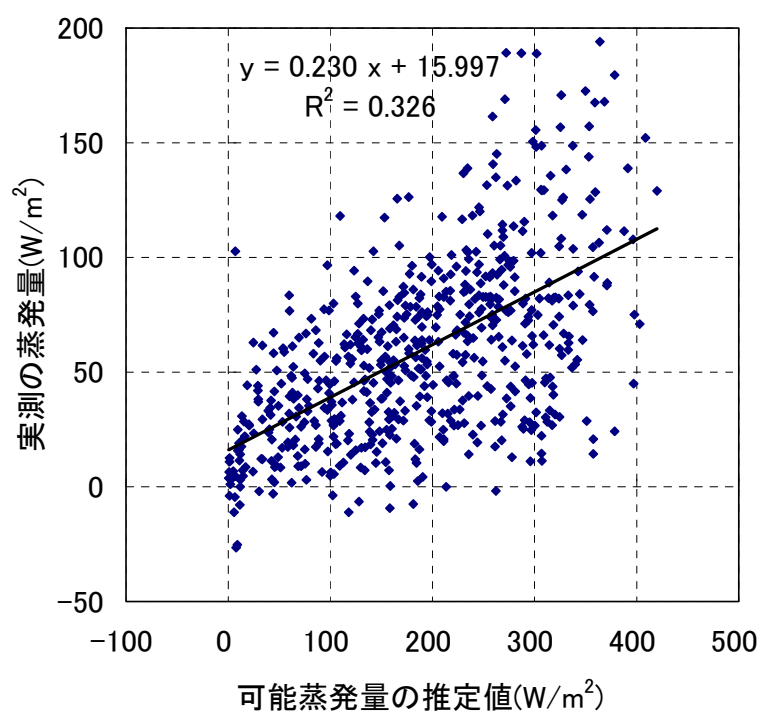


図 42 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(July-Aug.)
上 : $R_n - G \geq 0$, 下 : $R_n - G < 0$

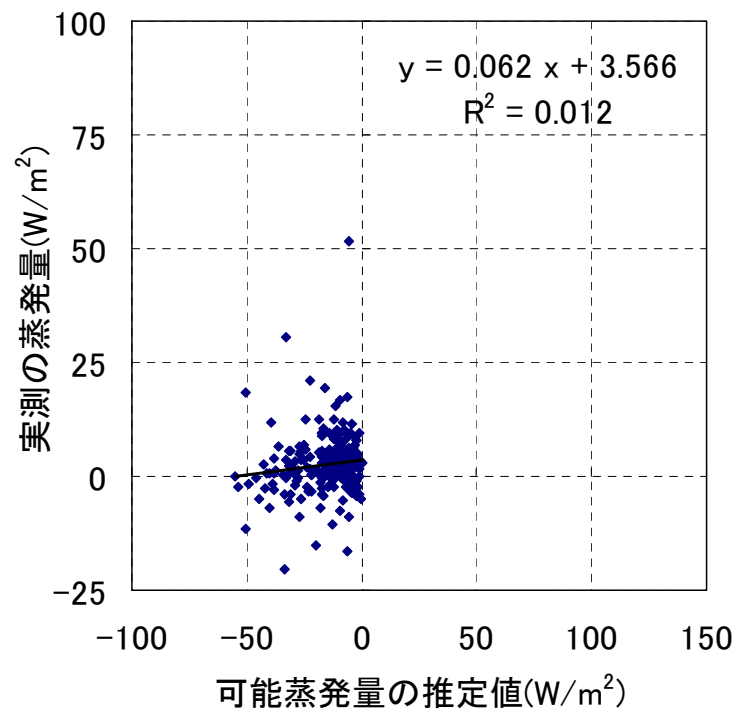
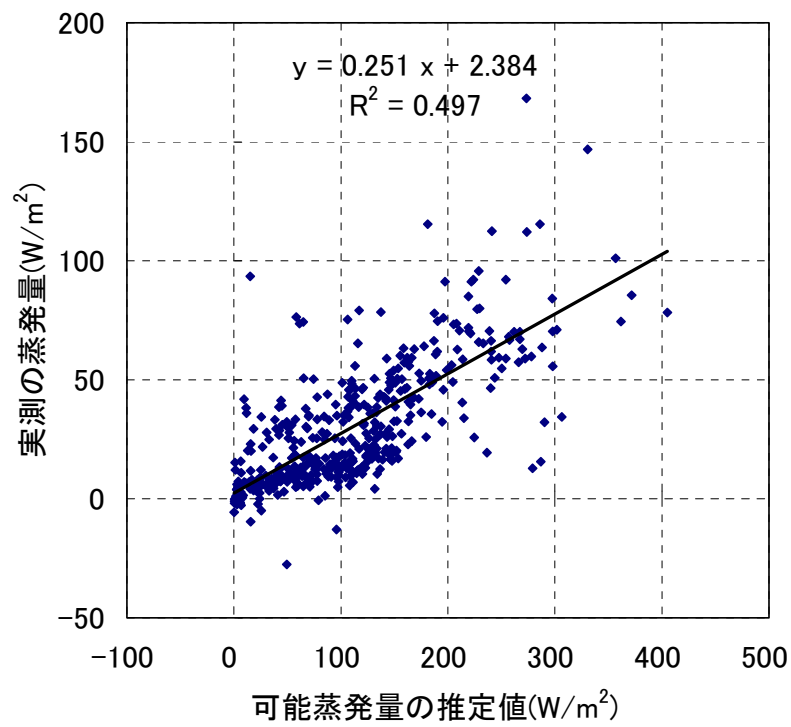


図 43 Priestlyey and Taylor (1972) による可能蒸発量と実測値の比較(Sep.-Oct.)
 上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

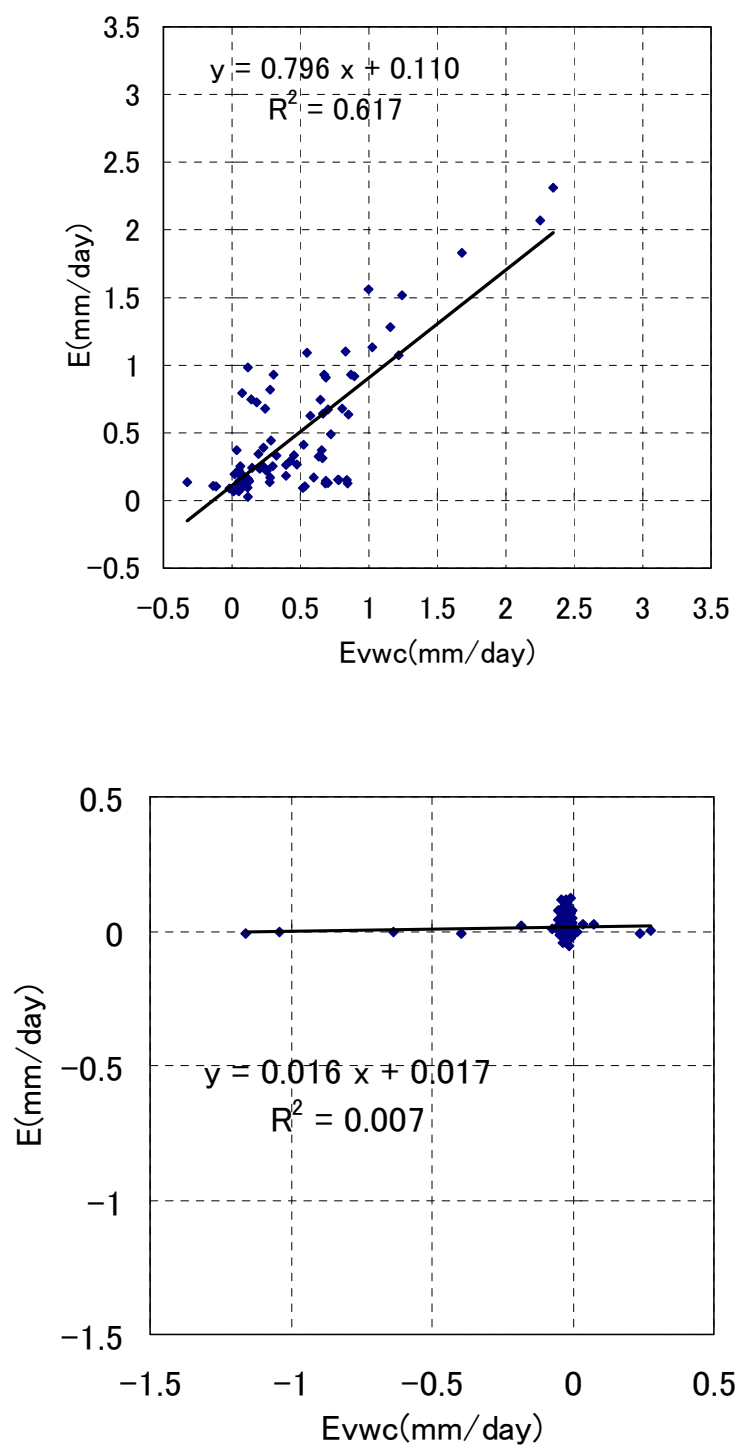


図 44 小島(2004)による土壌水分の関係としての蒸発量推定値(E_{vwc})と
実測値(E)との比較
(Apr.-June)
上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

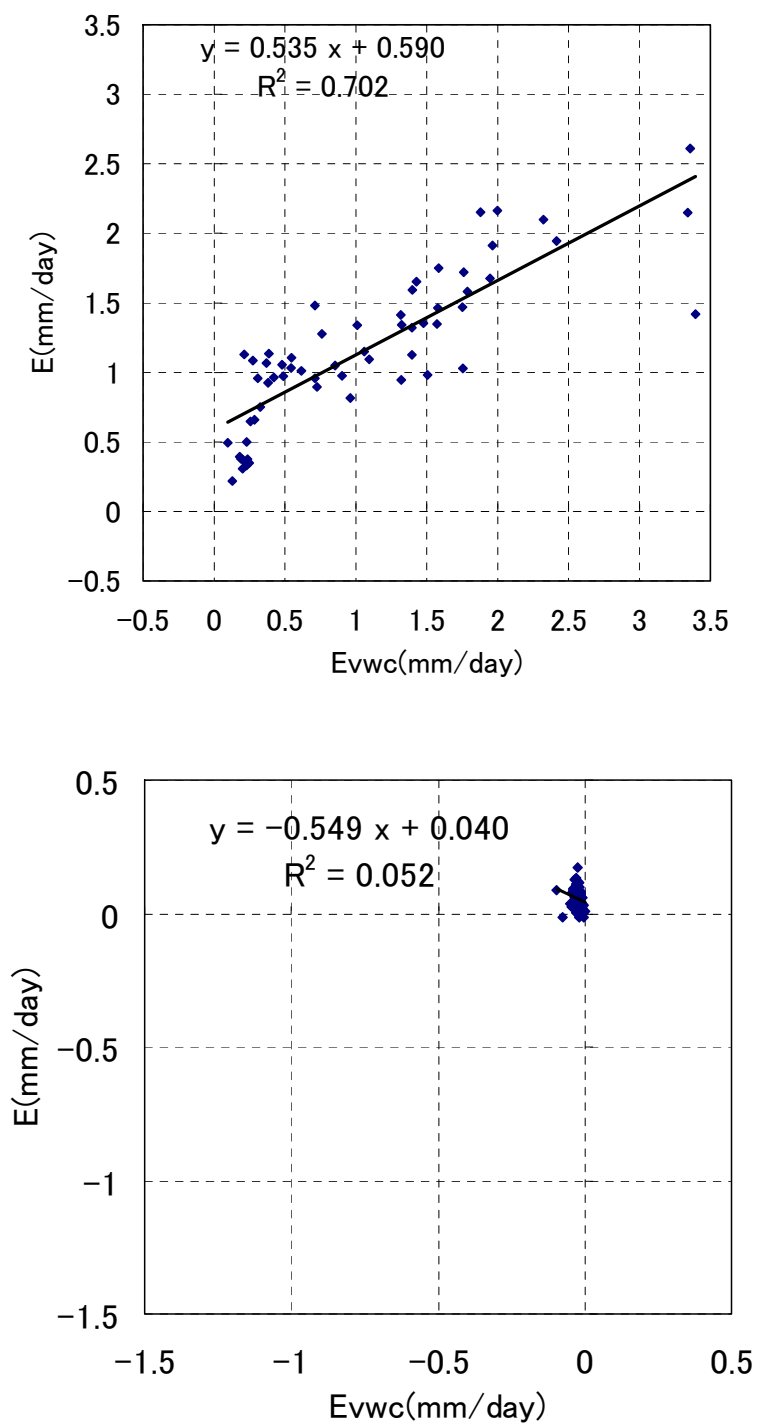


図 45 小島(2004)による土壌水分の関係としての蒸発量推定値(E_{vwc})と
実測値(E)との比較
(July-Aug.)
上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$

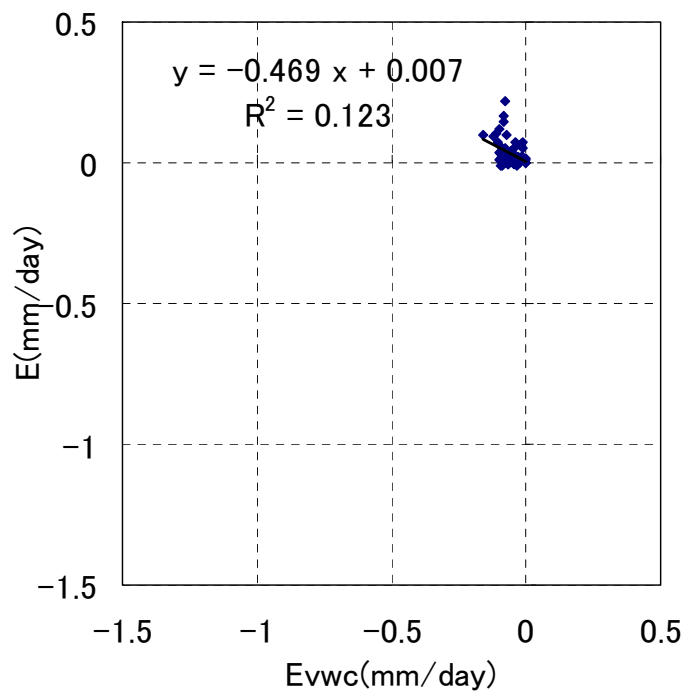
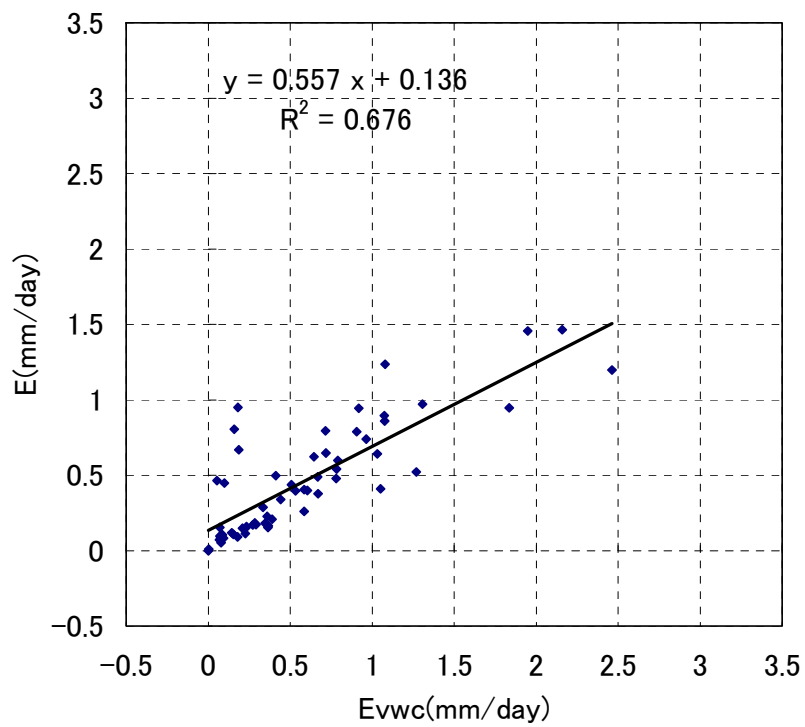


図 46 小島(2004)による土壌水分の関係としての蒸発量推定値(E_{vwc})と
実測値(E)との比較
(Sep.-Oct.)
上 : $Rn - G \geq 0$, 下 : $Rn - G < 0$