

# 芦原北潟湖周辺における地表面熱・水収支特性に関する研究

宇治橋 康 行\*

## Energy and water balance at near the lake Kitagata, Awara City Fukui Prefecture

Yasuyuki Ujihashi

**Abstract:** Bowen ratio method is one of the popular methods for flux measurement. The meteorological conditions and /or the assumptions to apply the method are not necessary satisfied at some observation sites. Therefore, the estimated latent and sensible heat fluxes do not agree with each other when measurement heights differ, and sometimes it is not easy to estimate fluxes accurately.

In this paper, the author conducted the experiment to observe the evaporation from ground surface at near the Lake Kitagata, Awara City. Comparing estimated and observed evaporation, it shows that evaporation rates can be estimated within plus or minus 10 to 20% by using the data measured at 2m and 4m.

### 1. はじめに

地球規模から地域規模、局所規模に至る種々の空間規模での水文・気象環境は陸域-大気間の大気、熱（エネルギー）、水循環に支配され、大気、水の移動に伴い陸域-大気間の物質移動も生じている。このような大気、水、熱、物質の循環過程において対象領域の風の場の特性や地表面熱・水収支特性が大きな影響を持つ。したがって、水文・気象環境の現状、変動・形成過程の把握や将来予測とそれに基づく環境保全対策を講じる上で地表面熱・水収支特性を把握することは重要である。また、地表面熱収支を明らかにし、地表面における顕熱および潜熱の鉛直輸送量を推定することにより蒸発量が求められ、水資源賦存量の算定が可能となる。このことは水資源計画上も極めて重要である。

地表面の顕熱および潜熱の鉛直輸送量を推定する方法は種々提案されているが<sup>1)</sup>、熱収支ボーエン比法は比較的簡便で有力な方法として広く用いられている。この方法は、いわゆるフラックス一定の気層としての接地気層に適用されるものであり、このためには、観測場所において吹送距離が確保され境界層が十分発達している必要がある。また、ボーエン比の推定において顕熱と潜熱の鉛直輸送に関する乱流拡散係数が等しいと仮定されているが、この条件は大気が安定のときには満たされないことが知られている<sup>2)</sup>。この方法を適用するための条件が全ての観測場所でも満足されているわけではない。熱収支ボーエン比法は有力な方法であるが観測の行われている場

\* 建設工学科 土木環境工学専攻

所の条件によってはその適用に十分注意が必用である。

本研究では、福井工業大学芦原学舎の観測露場に設置された AWS (自動気象観測システム) による観測データを用いた熱収支ボーエン比法による潜熱輸送量の推定値から得られた蒸発量と露場周辺で行った蒸発量測定結果を比較検討した。その結果、数種類の異なる 2 高度のデータから推定された蒸発量の比較から、適切な 2 高度のデータを用いれば実測値の概ね 20% 以内の誤差で蒸発量推定できることが明らかになったので、その結果について述べる。

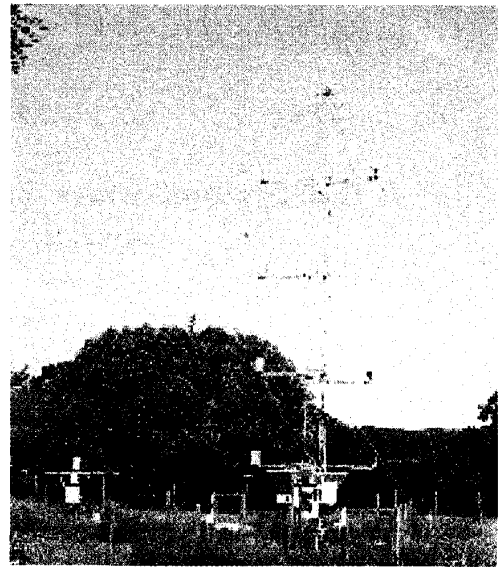


写真-1 観測露場および観測システム

## 2. 気象観測および蒸発量観測

### 2.1 気象観測システムと熱収支ボーエン比推定式

気象観測露場と観測システムは写真-1 に示すようであり、ボーエン比の推定に必要な気象因子である放射収支量および地中熱流束は、それぞれ Kipp & Zonen 社製の 4 成分放射計 CNR1, Hukseflux 社製の UT03 を用いて測定し、温湿度はヴァイサラ社製 HMP45D を用いて 2 m, 4 m, 6 m, 8 m の 4 高度で測定している。測定時間間隔および記録時間間隔は、それぞれ 1 秒, 5 分であり、ボーエン比の計算のための平均化時間は 30 分とした。

蓄熱量を無視できるようなごく薄い層を考えると地表面の熱収支は、

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

で表される。ここに、 $H$  : 顕熱輸送量,  $lE$  : 潜熱輸送量 ( $l$  : 蒸発潜熱,  $E$  : 蒸発量),  $G$  : 地中熱流束であり、 $R_n$  は地表面が受ける正味放射量であり次式で定義される。

$$R_n = (1 - Alb) S \downarrow - \varepsilon (\sigma T_s^4 - L \downarrow) \quad (2)$$

ここに、 $Alb$  : 地表面のアルベド,  $S \downarrow$  : 日射量,  $\varepsilon$  : 射出率,  $T_s$  : 地表面温度,  $L \downarrow$  : 下向き大気放射,  $\sigma$  : Stefan-Boltzmann 定数 ( $5.6698 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ) である。

ボーエン比は、顕熱輸送量と潜熱輸送量の比として式(3)で定義される。

$$B \equiv \frac{H}{lE} \quad (3)$$

大気の安定度が中立で顕熱と潜熱に関する乱流輸送係数が等しいと仮定でき、現象が定常とみなせるような短い時間ではボーエン比は次式で求めることができる。

$$B = \frac{c_p (T_2 - T_1)}{l(q_2 - q_1)} \quad (4)$$

ここに、 $c_p$  : 空気の定圧比熱,  $T, q$  : それぞれ 2 高度における気温および比湿である。比湿は、

温度、湿度から Goff-Gratch の式を用いて求めた。ボーエン比が求められれば、熱収支式(1)式から顕熱、潜熱輸送量はそれぞれ

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + B} \quad (5) \quad , \quad H = B \cdot LE \quad (6)$$

のように求められる。

### 2. 2 実蒸発量観測

土壌面からの実蒸発量は、図-1 に示す 2 重円筒式のカラムを用いて重量法により測定した。すなわち、図に示すように、長さ 50 cm、内径 6.7 cm の内部円筒に周辺土壌と同じ土壌を充填し、土壌カラムの重量減少量を蒸発量として測定した。なお、底部は透過とし、下層土壌との連続性が保たれるようにした。円筒カラムを用いた蒸発量観測は簡便である反面、通常、設置場所ごとに蒸発量が異なることが知られている。このため、観測露場内に 5 本、周辺に 3 本の計 8 本のカラムを埋設した。ただし、カラム No. 8 は木陰に設置したため他のカラムと著しく異なる値を示した。また、カラム No. 6 は下層土壌の透水性が悪くカラム内の土壌が飽和し、内部円筒を引き抜いたときカラムから土壌水が流失することがあったのでこの 2 本のカラムは検討から除外した。カラムの埋設状況の例を写真-2 に示す。実験は、2006 年 8 月 7 日～11 日、9 月 15 日、22 日、26 日、30 日、10 月 18 日の 10 日間行った。観測は、午前 9 時から午後 5 時までの 8 時間、1 時間間隔で蒸発量の測定を行った。ただし、8 月の観測については、AWS のロガーの故障のため熱収支ボーエン比法による潜熱フラックスの算定と蒸発量の算定ができなかったため 9 月、10 月の観測結果について考察する。

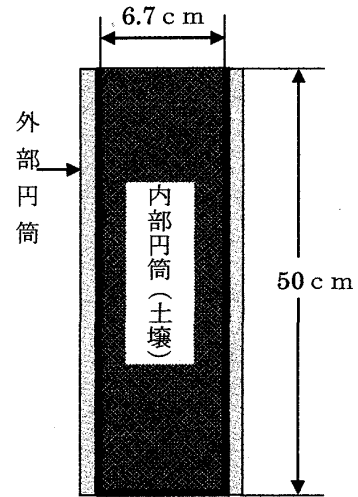


図-1 2重円筒重量式蒸発量測定カラム

くカラム内の土壌が飽和し、内部円筒を引き抜いたときカラムから土壌水が流失することがあったのでこの 2 本のカラムは検討から除外した。カラムの埋設状況の例を写真-2 に示す。実験は、2006 年 8 月 7 日～11 日、9 月 15 日、22 日、26 日、30 日、10 月 18 日の 10 日間行った。観測は、午前 9 時から午後 5 時までの 8 時間、1 時間間隔で蒸発量の測定を行った。ただし、8 月の観測については、AWS のロガーの故障のため熱収支ボーエン比法による潜熱フラックスの算定と蒸発量の算定ができなかったため 9 月、10 月の観測結果について考察する。



(a) カラム No. 1

(b) カラム No. 3

(c) カラム No. 7

写真-2 2重円筒式蒸発量測定用土壌カラム埋設状況

## 3. 結果と考察

### 3. 1 Bowen 比

図-2 は、土壌面蒸発量の観測を行った 5 日間の異なる 2 高度の温湿度データを用いて求めた

表-1 高さ 2m, 4m および 2m, 8m のデータを用いた 9時から 17時の Bowen 比の平均値と 30分平均値の最大差

		9月15日	9月22日	9月26日	9月30日	10月18日
Bowen 比の計算に 用いた 2 高度	2m-4m	0.331	0.394	0.301	0.292	0.380
	2m-8m	0.412	0.406	0.301	0.355	0.397
30分平均値の最大差		0.175	0.103	0.112	0.254	0.186

Bowen 比の日変化を示したものである。図から分かるように異なる 2 高度のデータを用いて求めた Bowen 比はそれぞれかなり異なっている。しかし、最下層の 2m と 4m の 2 高度のデータを用いて計算した Bowen 比と高度さの最も大きい 2m と 8m のデータを用いて求めた Bowen 比が 5 日間ともかなり近い値を示している。特に、9月22日、26日および10月18日では表-1にも示すように平均値もほぼ等しい。表にも示すように30分値で見るとこの3日でも最大で0.18の差があるが、ほぼ Bowen 比が一定の仮定を満たしているものと考えてよいと思われる。他の2高度のデータの組み合わせから求めた Bowen 比はいずれもこれら2つの値とかなり異なり Bowen 比一定の条件を満たしていない。そこで、以後の解析では、主に、この2つの Bowen 比を用いて熱輸送量および蒸発量の評価・検討を行うこととした。

### 3. 2 潜熱, 顕熱輸送量

図-3 (a) は、2m, 4m の 2 高度のデータを用いて求めた潜熱輸送量と 2m, 8m のデータを用いて求めた潜熱輸送量の関係を示したものである。図から分かるように、5日間のデータはすべて誤差 20%以下であり、約 80%は誤差 10%以内である。誤差が 10%を超えているのは、前に述べた Bowen 比の差が大きかった 9月30日の結果であり、その他の日ではほぼ 10%程度の誤差である。

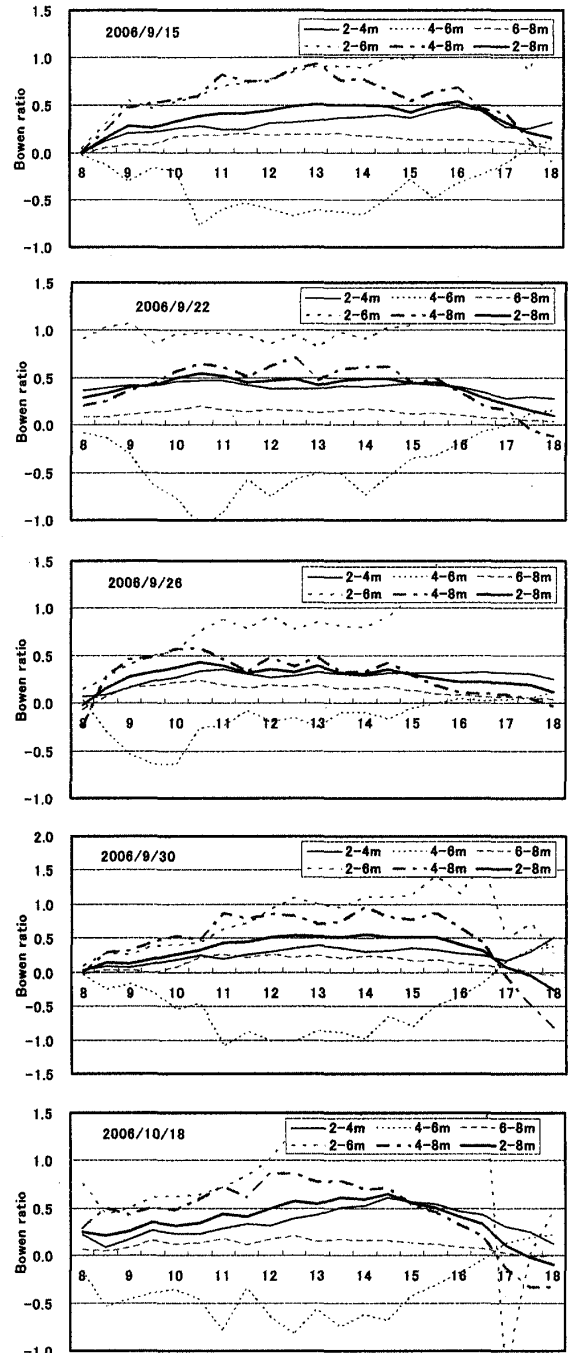


図-2 異なる 2 高度のデータを用いて求めた Bowen 比の日変化の比較

また、詳細に見ると、全体に2 m, 8 mのデータを用いて推定した値がやや過小傾向にあり、特に潜熱輸送量が  $300 \text{ W/m}^2$  以上ではその傾向が強い。

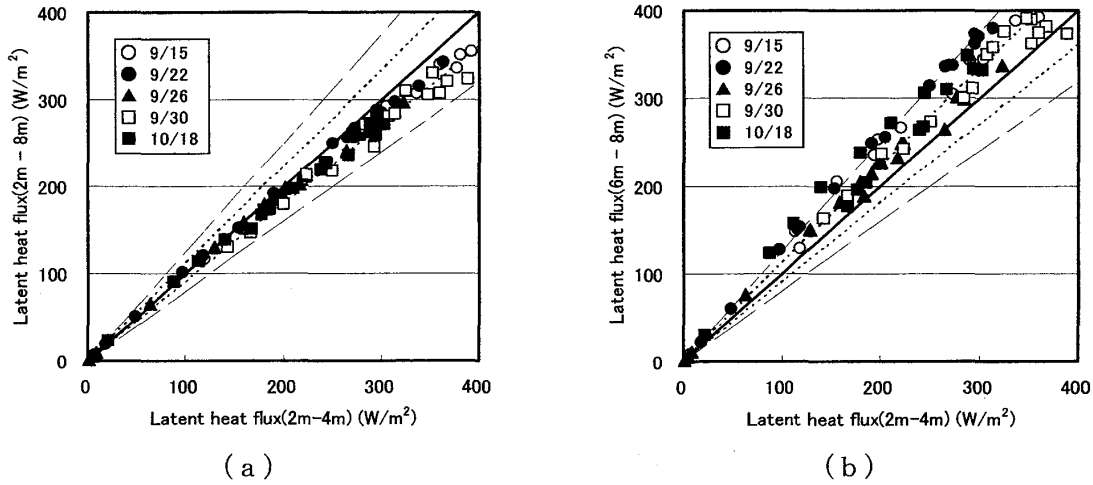


図-3 30分平均潜熱輸送量の比較。(a) 高さ2, 4 mおよび高さ2, 8 mのデータを用いた計算値の比較, (b) 高さ2, 4 mおよび高さ6, 8 mのデータを用いた計算値の比較 (実線は1:1の線を, 点線および破線はそれぞれ相対差±10%, 20%の線を示す)。

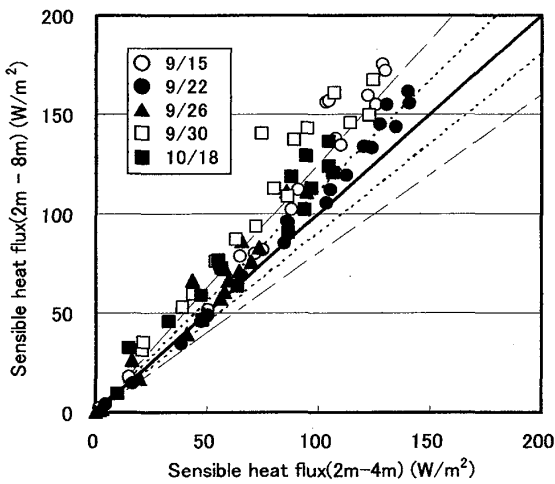


図-4 2 m, 4 m および 2 m, 8 m のデータを用いて推定した30分平均顕熱輸送量の比較

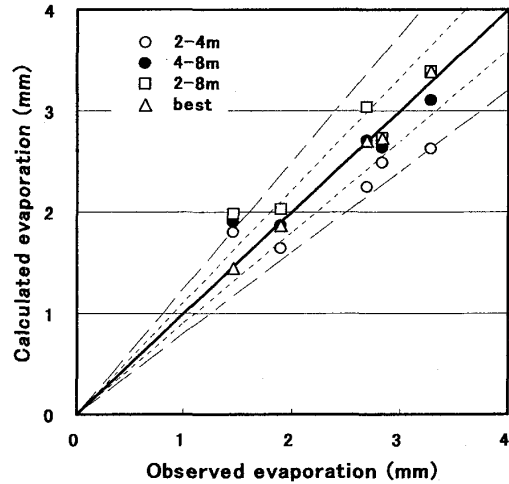


図-5 9時から17時の蒸発量の実測値と推定値の比較

図 (b) は6 m, 8 mのデータを用いて求めた潜熱輸送量との比較を示したものであるが、逆に過大推定の傾向にあり誤差も2 m, 8 mのデータを用いた場合より大きい。

以上のことから、今回対象とした実蒸発量の観測日では、誤差約10%で鉛直方向に潜熱輸送量が一定であるという仮定が成立している。

図-4は、図-3 (a) の場合と同様、高さ2, 4 mおよび高さ2, 8 mのデータを用いて推定した30分平均顕熱輸送量の関係を示したものである。図を見ると、顕熱輸送量に関しては潜熱輸送量の場合よりやや2つの推定値の差が大きく、潜熱輸送量の場合と逆に過大推定になっている。これは、後述するように地中伝導熱は無視できるほど小さいので潜熱輸送量が過小推定されれば、逆に顕熱輸送量は過大推定されることは熱収支から当然である。顕熱輸送量の場合もBowen比の差の大きかった9月、15日30日を除くと10%前後の誤差で鉛直方向に輸送量一定の近似が成り立っていると考えてよい。

### 3. 3 蒸発量

図-5は、5日間の9時~17時までの蒸発量の観測値と計算値の比較を示したものである。図中観測値は、露場内の5本のカラムとカラムNo.7の平均値である。凡例のbestは異なる2高度のデータを用いた計算値の最も実測値に近いものを意味する。図から分かるように、2 m, 4 mおよび2m, 8mデータを用いた推定値がそれぞれ2日ずつ最も良い推定値となっていることが分かる。蒸発量の小さかった10月18日はやや誤差が大きくなっているが、残る4日間はいずれも10%以内の推定誤差である。全体としては、2 m, 8 mのデータを用いた場合の推定精度が良い。

図-6は時間蒸発量の実測値と推定値の比較を示したものである。図を見ると、2 m, 8 mのデータから推定した時間蒸発量が2 m, 4 mのデータからの推定値より推定精度が悪く、両方の推定値とも日中の累加蒸発量の推定値の精度より悪くなっている。蒸発量の推定値と実測値の時間変化を示した図-7を見ると、日の出から午後2時から3時頃までは計算値が過大傾向にあり、その後逆に過小傾向にある。このため9時~17時の累加蒸発量の推定値は地表面が過熱される時期と冷却されている時期の誤差が打ち消しあって誤差が小さくなっているが、時間単位で見ると誤差が大きい原因である。この原因としては、地表面が加熱される時期と冷却されていく時期とでは気温、風速の鉛直分布、大気安定度が異なることが考えられる。

図-8は9月15日と10月18日の地表面フラックスの日変化を示したものである。両日とも晴天日であった。図から分かるように長波放射量（大気放射量及び地表面赤外放射）は日変化が

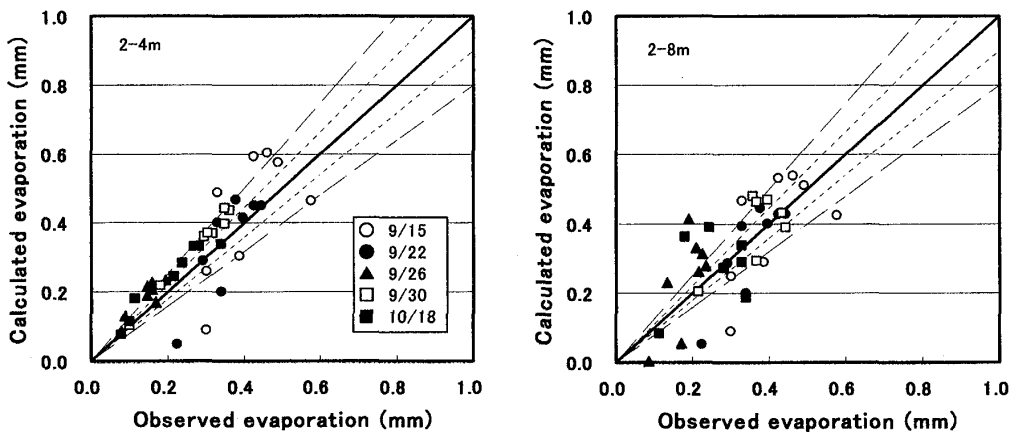


図-6 時間蒸発量の実測値と推定値の比較

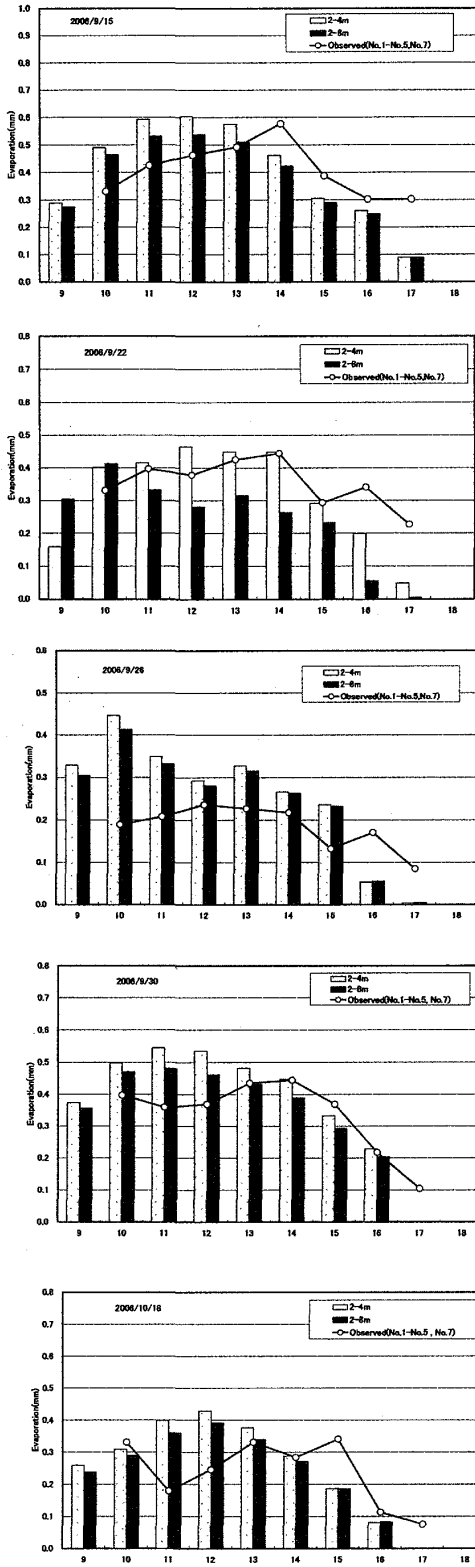
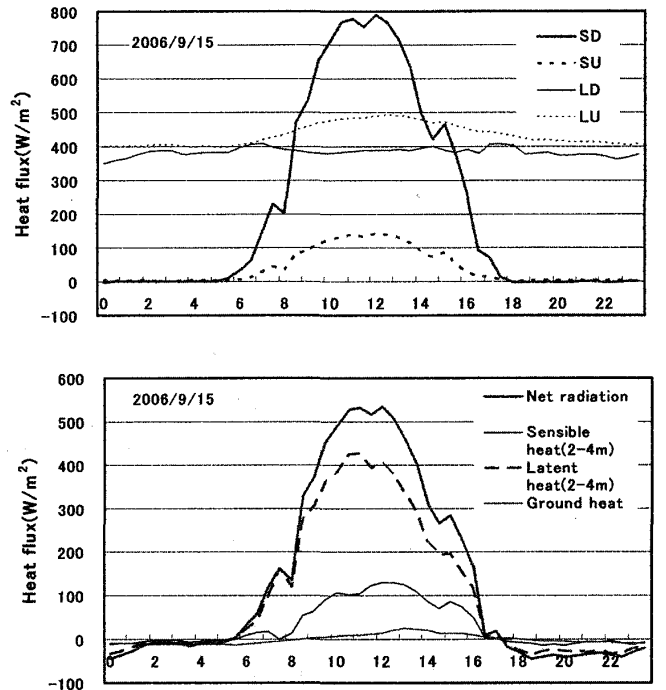
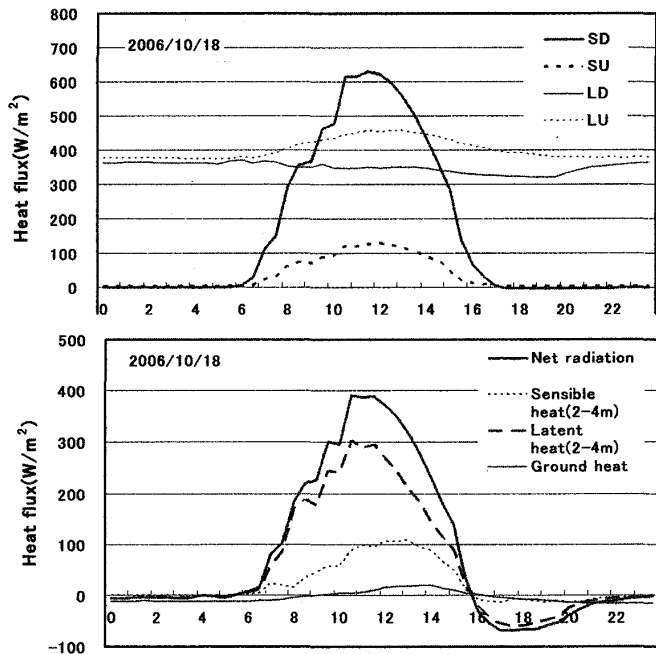


図-7 蒸発量の推定値と実測値の時間変化の比較



(a) 9月15日



(b) 10月18日

図-8 地表面フラックスの日変化例 (上段は放射収支成分, 下段は熱収支成分の日変化を示す。)(SD: 日射量, SU: 反射日射量, LD: 大気放射量, LU: 地表面赤外放射量)

ほとんどない。日射量，正味放射量の最大値は9月15日と10月18日でそれぞれ，およそ800 W/m<sup>2</sup>，700W/m<sup>2</sup>，630W/m<sup>2</sup>，400W/m<sup>2</sup>であり，10月では太陽高度が低くなっているため約100W/m<sup>2</sup>小さくなっている。地表面アルベドは0.18，0.22であった。地中伝導熱は日中の最大で約20W/m<sup>2</sup>程度であり，他の熱収支成分に対し無視できる大きさであり9月15日と1ヵ月後の10月18日で大きな差は見られない。9月15日，10月18日の正味放射量の潜熱輸送量への配分率はそれぞれ70.2%および68.7%であり，両日とも正味放射量の約70%が潜熱，すなわち，地表面での蒸発に使われている。この比率は，他の3日でもほぼ同じであった。

図-9は，高さ2 m，8 mのデータを用いて推定した4月1日～12月31日までの日蒸発量と累加蒸発量を示したものである。途中46日の欠測期間を除いた232日の蒸発量は444mmであった。この間の気象庁 AMeDAS 三国及び春江観測所での降水量はそれぞれ1735mm，1655mmであり，欠測期間の蒸発量を100mm程度と推測しても浸透，流出量が1000mmを超えることになり，蒸発量の推定値がやや過小であると思われる。

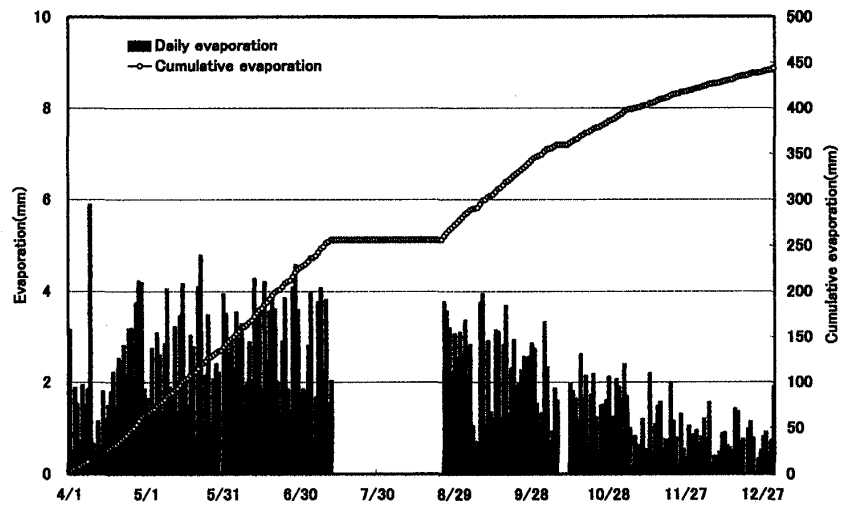


図-9 日蒸発量と累加蒸発量の季節変化

と推測しても浸透，流出量が1000mmを超えることになり，蒸発量の推定値がやや過小であると思われる。

#### 4. 結語

本研究では2006年に行った地表面蒸発量の観測結果とAWS観測データを用いた熱収支Bowen比法による蒸発量の推定値の比較検討を行い，Bowen比法の適用性及び得られた結果から地表面熱収支特性について検討を行った。得られた結果は次のようである。

- 1) Bowen比の推定には高さ2mと4mあるいは高さ2mと8mの温湿度データを用いると誤差およそ10%の精度でフラックス一定と仮定できる。
- 2) 推定された蒸発量と実測値は日累加値でおよそ10%程度の精度で推定できた。
- 3) 時間蒸発量の推定値は，地表面加熱期で過大，冷却気で過小推定の傾向があった。
- 4) 欠測期間を除く232日の累加蒸発量は444mmと推定され，周辺の降水量から見てやや過小推定と思われる。

#### 参考文献

- 1) 竹内清秀，近藤純正：大気科学講座1 地表に近い大気，東京大学出版会，1988。
- 2) 杉田倫明他：傾度法によるフラックス測定と水分測定による蒸発量評価，気象研究ノート第199号，2001。

(平成19年3月30日受理)