

あわら学舎における 2007 年のフラックス観測と蒸発量評価

宇治橋 康 行 *

Measurements of heat fluxes and evaluation of evaporation at Awara campus in 2007

Ujihashi Yasuyuki

Abstract : The author examined whether the meteorological data measured at Awara observation site was suitable for applying to evaluate heat fluxes and evapotranspiration based on the Bowen ration method. The obtained results as follows: 1) the calculated heat fluxes by using different sets of data are not agree with each others, and the errors are in the range of 4.1 to 11.6%, 2) the mean estimated error of daily evaporation by using the Bowen ratio is about 12%, 3) the estimated annual evaporation and water resources are 776mm and 996mm respectively.

1. はじめに

地表面からの蒸発量を評価することは水循環機構の解明, 水資源開発, 灌漑などの工学的実用面で極めて重要であるばかりでなく, 蒸発にともない潜熱が輸送されることから気象環境特性の把握・解明上も重要である。

蒸発量の推定法としては, 1) 水収支法, 2) 渦相関法, 3) 熱収支 Bowen 比法, 4) 組合せ法などがある。水収支法は計量式と非計量式があり, 計量式の場合は通常ライシメータと呼ばれ土壌を充填した容器の重量の変化を計測することによって蒸発量を求めるものであり, 本研究で用いている 2 重円筒式土壌カラムを用いた蒸発量計測法はこれに属する。この方法では土壌水分等の空間的変動を考慮する必要があり, 対象域の数箇所で計測する必要がある。後述のように本研究でも 9 本の土壌カラムを埋設して蒸発量を計測した。非計量式の水収支法は短期, 狭い範囲の蒸発測定には適さない。渦相関法は応答の早い測器を用いて 10~20 Hz のサンプリングを行い, 直接鉛直方向の水蒸気の乱流輸送量を測定するものであり最も優れた方法であるとされている。しかしながら, 測器の据付やデータの処理に難しさがある²⁾。熱収支 Bowen 比法はフラックス一定気層である接地気層に適用されるもので, 比較的簡便で測定が容易で精度もよいことから放射収支量が観測されている場所では有用な方法として広く用いられている。しかし, Bowen 比法の適用³⁾にもいくつかの条件がある。すなわち, 1) 観測地点の地表面が平らで広く, 風上に空気層を乱すものがなく境界層が十分発達し, 2) 顕熱と潜熱の乱流輸送係数が等しく, 3) 大気の安定度が中立であるという条件である。福井工業大学あわら学舎内に設けた接地気層内微気象現象観測露場は写真-1 に示すように周辺の地形は複雑で, 南北方向に樹木や校舎などの障害物があり, 東西方向には 1.5m 前後の起伏および樹木があり, 前述の Bowen 比法の適用条件が十分に満たされていない可能性がある。本研究では, 2007 年の気象観測データおよび 6 月から 10 月に実施した露場およびその周辺での実蒸発量観測結果をもとに Bowen 比法による観測露場での潜熱フラックス, すなわち蒸発量の推定の妥当性, 精度を検証し, その結果に基づいて年間の水資源賦存量の評価を行う

* 建設工学科土木環境工学専攻

た結果について述べる。

2. 気象観測, 蒸発量測定および蒸発量算定

あわら学舎における気象観測システムについてはこれまでに報告している⁴⁾のでここでは省略する。また, 2重円筒式土壌カラムを用いた実蒸発量の計測は, 写真-2に示す観測露場内に5本のカラムを, 露場東側の約1.5m高い平坦地に4本のカラムを埋設し, 1時間おきにカラム重量を測定することにより蒸発量を求めた。9本のカラムを埋設したのは前述のように土壌水分等の空間分布の影響による蒸発量の空間変動の影響を取り除くためである。実蒸発量の観測は6月7日, 6月13日, 6月20日, 7月7日, 7月19日, 7月28日, 8月6日, 8月7日, 9月26日, 10月3日および10月31日の合計11日主に午前9時~5時まで行った。

顕熱フラックスと潜熱フラックスの比である Bowen 比は式(1)で定義され, 前述の条件が満たされるとき式(2)で求められる。熱収支式と式(2)から潜熱フラックスおよび顕熱フラックスはそれぞれ(3), (4)のように求められる。

$$B \equiv \frac{H}{lE} \quad (1), \quad B = \frac{c_p}{l} \frac{p}{0.622} \frac{T_1 - T_2}{e_1 - e_2} \quad (2)$$

$$lE = \frac{R_n - G}{1 + B} \quad (3), \quad H = B \cdot lE \quad (4)$$

ここに, B : Bowen 比, lE, H : 蒸発および潜熱フラックス, l : 蒸発の潜熱, c_p : 空気の定圧比熱, p : 大気圧, T : 気温, e : 蒸気圧, R_n : 正味放射量, G : 地中伝導熱, 添え字 1, 2 はそれぞれ観測 2 高度を示す。式(2)に示すように Bowen 比は異なる 2 高度のデータを用いて求めることが出来る。あわらの AWS では 2, 4, 6, 8 m の 4 高度で温湿度を測定しているのので 6 通りのデータの組合せで Bowen 比, 潜熱フラックスを求めることが出来る。以下では潜熱フラックスを計算に用いた 2 高度を添え字で表して L_{2-4} のように記す。この場合は, 高さ 2 m および 4 m のデータを用いて求めた潜熱フラックスであることを示す。

3. 結果と考察

3. 1 潜熱フラックス算定値の評価

図-2 は異なる組合せの 2 高度のデータを用いて求めた潜熱フラックスの比較を示したものである。図中細かい実線は 1:1 の線を表し, 点線および破線はそれぞれ $\pm 10\%$, 20% の線を表す。また, 太い実線は最小二乗法で求めた原点を通る近似曲線を表す。計算では潜熱に負の値も出るが, 図では蒸発に寄与する正の部分だけを表示している。最小二乗法で求めた線は負の部分も含めて求めているためプロットとややずれて見える場合がある。表-1 に異なる 2 高度のデータの組み合わせで求めた潜熱フラックスの比較結果を示す。平均誤差は, 図に見られる異常値と思われる値およびフラックスの負の部分は除いて求めた。図および表から異なる

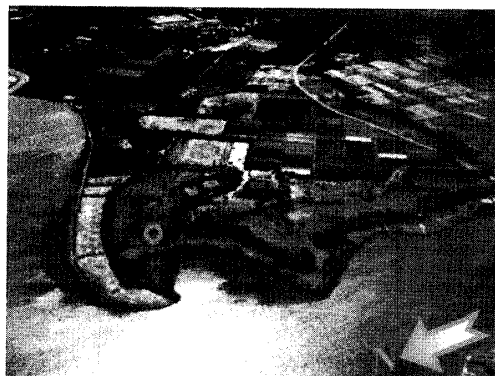
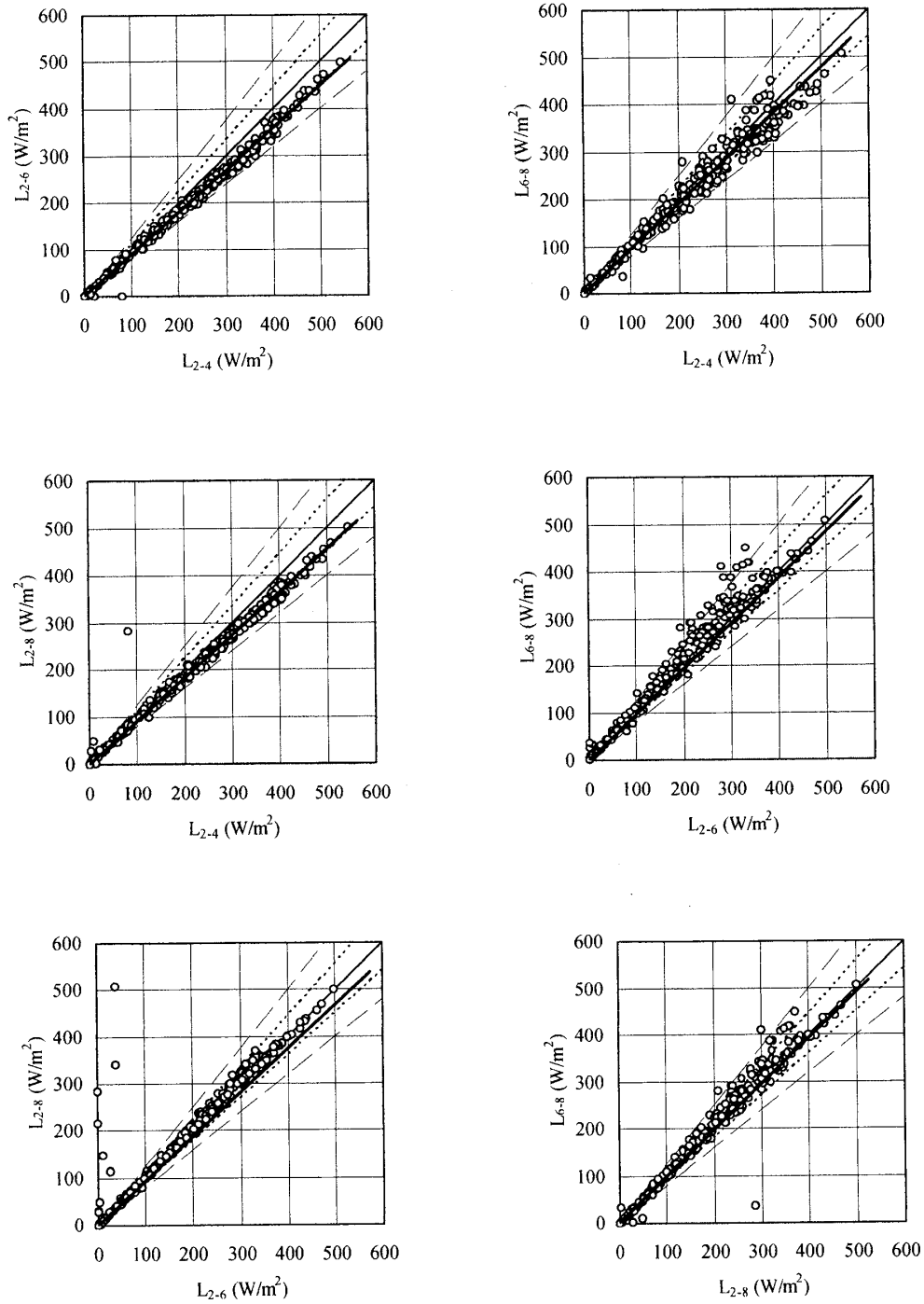


写真-1 あわら学舎観測露場周辺写真
(丸が観測露場の位置)



写真-2 東側の起伏上から見た観測露場全景 (左の端から右に AWS, 蒸発パン, 雨雪量計, 放射収支計, ドップラーソーダ)



図－1 異なる組合せの 2 高度のデータを用いて求めた潜熱フラックスの比較

表－1 異なるデータを用いた潜熱フラックスの比較

比較データ	L_{2-4}, L_{6-8}	L_{2-4}, L_{2-6}	L_{6-8}, L_{2-6}	L_{2-4}, L_{2-8}	L_{6-8}, L_{2-8}	L_{2-6}, L_{2-8}
平均誤差	9.6%	10.4%	11.5%	8.1%	6.9%	4.1%

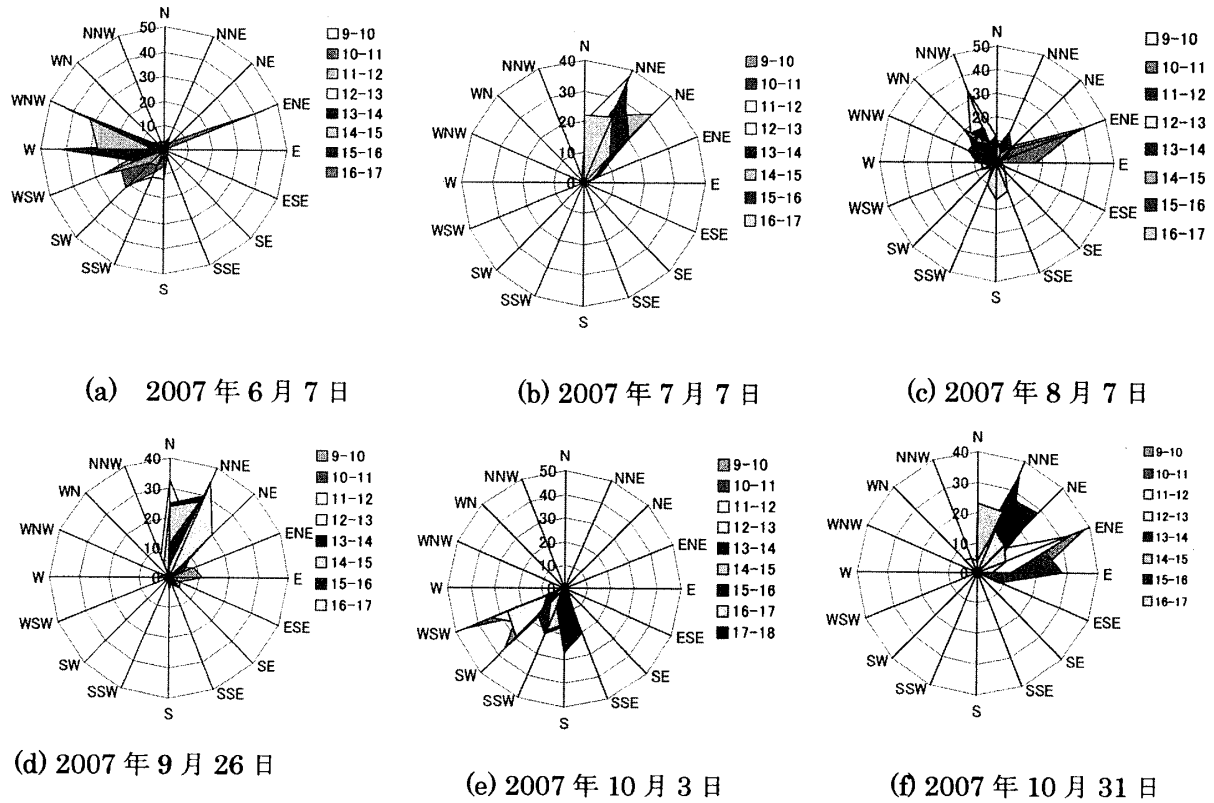


図-2 蒸発量観測を行った日の風向分布の日変化

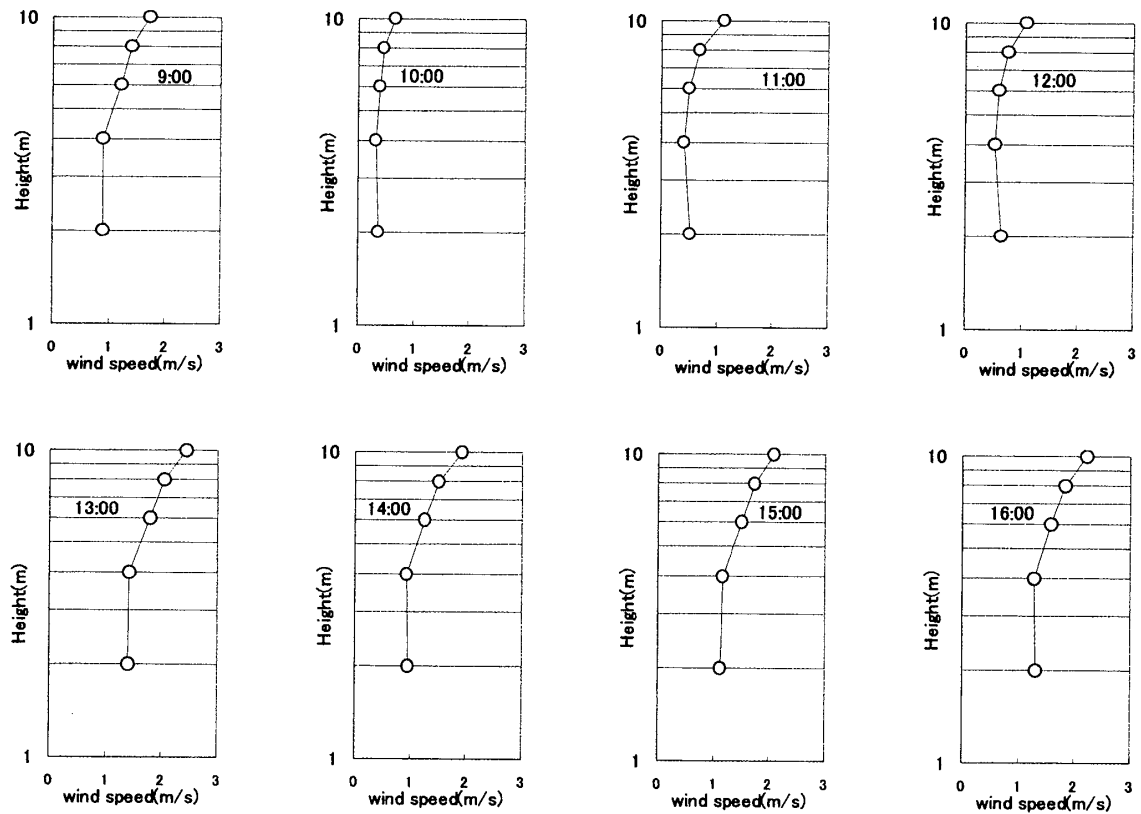


図-3 実蒸発量観測日の鉛直風速分布の日変化例 (2007年7月28日)

2 高度のデータから求めた潜熱フラックスは、一致していないがその平均誤差は 4.1%~11.5%である。観測露場での温湿度の測定高度は前述のように 2 m から 2 m 間隔で 8 m までであり、最も大きい高度差でも 6 m に過ぎない。この程度の高度差の場合、温湿度の差は小さく、測器の精度もかなり影響する。したがって、この結果だけでは **Bowen** 比法の適用条件を満たしているかどうかを判断することは難しい。そこで、次に風の影響について検討する。図-2 は 6 月から 10 月の蒸発量観測を行った日の日中の風向の変化を示したものである。図を見ると、7 月 7 日、9 月 26 日は比較的風向が安定しているが、他の観測日には時間の経過とともに風向がかなり変化している。全体を見ると東南東から南南東の風を除いたほとんどすべての向きの風が吹いている。図-1 では風向と誤差の関係は明らかではないが、日別に検討した結果、風向と誤差の大小は関係がないことが分かり、風向の影響は直接見られない。すなわち、風上側の地物の影響は必ずしも明確ではない。

図-3 は蒸発量観測日の典型的な風速の鉛直分布の日変化示したものである。図を見るといずれの時刻においても鉛直分布はやや上に凸、すなわち、大気の状態は中立ではなく安定であることを示しているが、4 m から上の高度では風速分布は対数分布側に従うと近似できる時刻が多いことが分かる。しかし、2 m と 4 m では風速の差はどの時刻でも小さくこの傾向は他の観測日でも同様であった。この原因としては、露場の東側に約 1.5 m の起伏があり、南北、東西方向とも樹木や建物があり、さらに露場内の植生が周辺よりも高いなどの理由により風速が小さくなっているものと思われる。このように、風速分布には周辺の地形や地物の影響が現れていることおよび大気の状態が中立より安定に近いことが前述の誤差の原因となっていると思われる。

3. 2 蒸発量評価

3. 1 の結果から、誤差が小さかったのは L_{2-6} と L_{2-8} 、 L_{6-8} 、 L_{2-8} 、 L_{2-4} 、 L_{2-8} の順であり、その大きさは 4.1%、6.9% および 8.1% であった。これらの結果と、測器の精度から高度差は大きくとることが望ましいと考えられるのでここでは L_{2-8} を用いて蒸発量を算定し、観測蒸発量と比較した。図-4 および図-5 は、それぞれ時間蒸発量および日中の総蒸発量の計算値と実

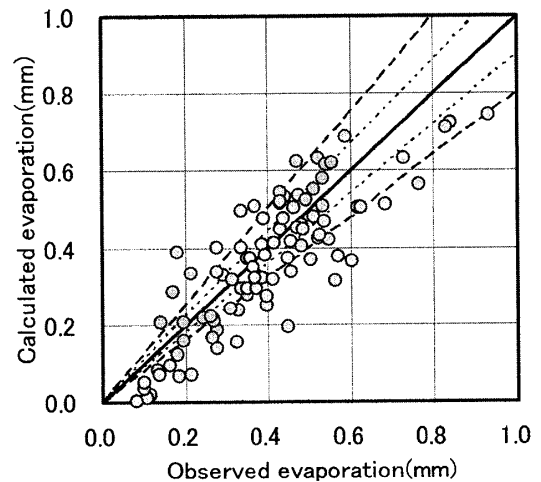


図-4 時間蒸発量の計算値と実測値の比較

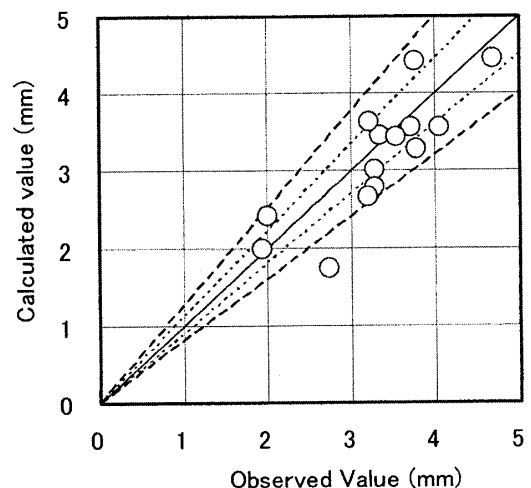


図-5 日中の蒸発量の計算値と実測値の比較

測値を比較したものである。図中実線は 1 : 1 の線を、点線および破線はそれぞれ $\pm 10\%$ 、 20% の線を表す。図-4 を見ると計算値はやや過小評価の傾向にあり、平均誤差は約 26% とフラックスの推定値に比べ大きい。図-5 の日中の総蒸発量では時間蒸発量の場合に比べて誤差は小さく、平均 12.2% であった。このように時

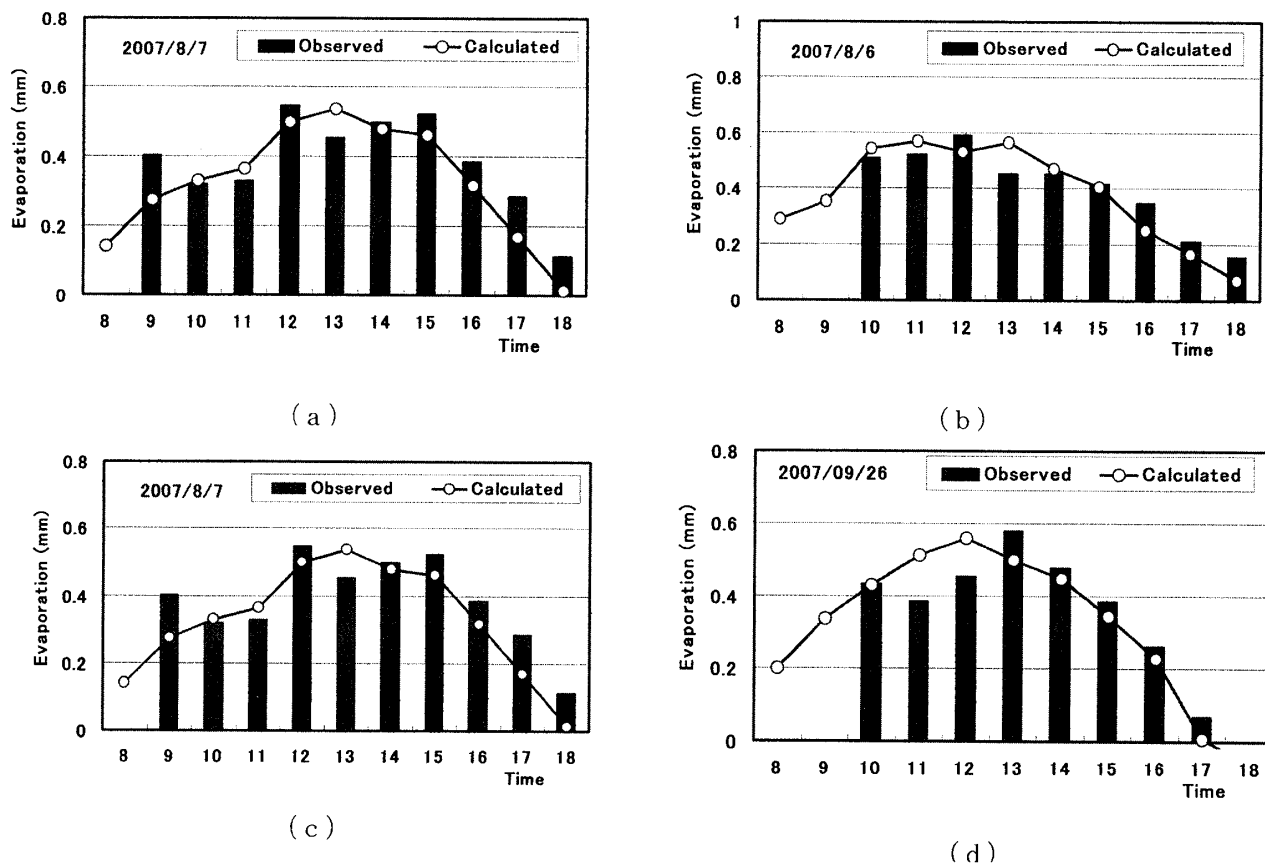


図-6 時間蒸発量の計算値と実測値の比較

間蒸発量に比べ日中の総蒸発量の推定精度が良いのは次の理由による。図-6 は時間蒸発量の実測値と推定値の時間変化の例を示したものである。図に示すように蒸発量の日変化の傾向は十分再現されている。ここで、図-6 (a), (c)で9時の時間蒸発量の実測値が計算値に比べ大きいのは、前日の観測終了後から当日の最初の観測までの蒸発量がすべて含まれたデータとなっているからである。ここに示した4日の例から分かるように計算値には過大評価になるところと過小評価になっているところがある。日中の総量で見るとこれらの誤差が相殺されることになり、時間蒸発量の推定精度に比べ日中の総蒸発量の推定精度が小さくなっている。フラックスの精度に比べ蒸発量の誤差が大きい一因としては、蒸発量の測定の精度の問題がある。すなわち、1) カラム内の土壌の密度が必ずしも一様ではない、2) カラム内の植生の状態がカラムごとに異なる、3) カラム周辺の植生の状態にも差がある、4) 露場内と露場外の気象条件に差があることなどが理由として考えられる。このため各カラムの蒸発量は一様ではなく、平均値で露場周辺の蒸発量としたが今後蒸発量の測定精度の向上を図る必要がある。

3. 3 水資源賦存量の評価

L_{2-8} を用いて推定した蒸発量から2007年1月1日～12月13日までの日蒸発量、累加蒸発量および累加雨量と累加蒸発量の差である水資源賦存量の変化を示したものが図-7および表-2である。図-7から日蒸発量は、日射の増加と気温の上昇にともなって増加していき、大気中の水分量が増加する梅雨時に減少した後、

日射が強く、気温も高く降水量も少ない夏の 7 月下旬から 8 月に掛けて再び上昇し、日射、気温の減少にとも

表-2 月蒸発量, 月平均蒸発量, 月降水量および水資源賦存量の変化 (単位: mm)

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	合計
月 蒸 発 量	21.9	34.3	49.3	83.5	111.7	94.1	79.7	116.8	83.5	58.9	31.2	11.6	776.5
月 平 均 蒸 発 量	0.71	1.23	1.64	2.78	3.60	3.14	2.75	3.77	2.88	1.90	1.04	0.89	
月 降 水 量	120.0	102.5	153.0	44.5	102.0	198.0	210.5	264.5	78.5	137.0	136.0	166.0	1712.5
水 資 源 賦 存 量	98.1	166.2	269.9	230.9	221.2	325.2	455.9	603.7	598.7	676.8	781.6	936.0	

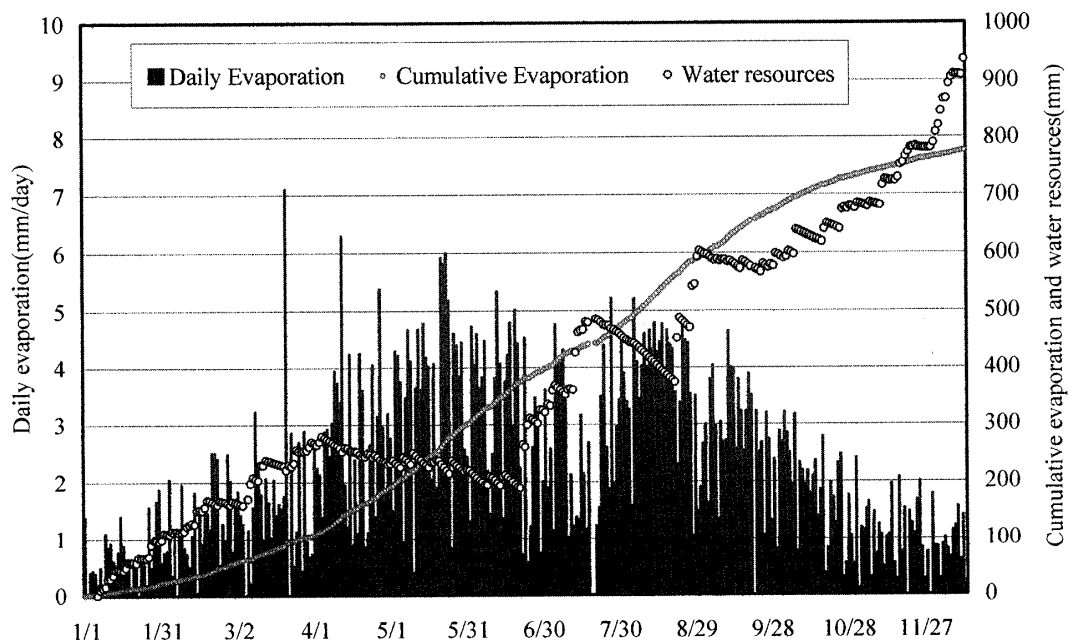


図-7 日蒸発量, 累加蒸発量および水資源賦存量の変化 (2007 年 1 月 1 日-12 月 13 日)

ない 9 月下旬から減少する年変化を示し、総蒸発量は 776.5mm と推定された。水資源賦存量は、蒸発が少なく降水量も多い 4 月初めまで増加するが、降水量が少なく晴天で蒸発量が多いため 4 月下旬から 5 月には一旦減少し、その後入梅とともに増加し、夏の晴天時に再び減少に転じ 9 月から 12 月に掛けて増加する季節変動を示し、12 月 13 日で 936mm と推定された。

4. 結 語

本研究では 2007 年の観測結果をもとにあわら学舎内に設けられた観測露場での微気象観測およびその露場とその周辺での 2 重円筒式土壌カラムを用いた蒸発観測結果に基づき熱収支 Bowen 比法の適用性と蒸発量評価およびその結果に基づく水資源賦存量の評価を行った。得られた結果は次のようである。

- 1) 異なる 2 高度のデータを用いた潜熱フラックスの値は一致していなかったが、誤差の範囲は 4.1%～11.5%であり、実用上はフラックス一定層であると見なすことが出来る。
- 2) フラックス推定値の誤差に風向の明確な影響は見られなかった。
- 3) 地表面から高さ 4m より上では近似的に風速分布は対数分布とみなせるが 4m より下では対数分布から外れており、観測範囲内の気層の大気安定度は中立よりやや安定に近い。

4) 高さ2 mと8 mのデータを用いて求めた潜熱フラックスを用いて蒸発量を推定した結果, 時間蒸発量の誤差は26%と大きく, 日中の総蒸発量の推定精度は時間蒸発量の過大推定と過小推定が相殺され12.2%と半分以下であった。

5) 2007年1月1日～12月13日の総蒸発量はおよそ776mm, 水資源賦存量は996mmと推定された。

今後は, さらに微気象現象の観測・解析を継続するとともに地表面実蒸発量の観測精度を向上させ, あわら学舎におけるBowen比法の適用性と適用条件を明らかにし, 北潟湖流域の水・熱さらには物質収支の解明とモデル化を行う予定である。

参考文献

- 1) 矢野友久: 蒸発散量の測定法, 講座 蒸発散 (その4), 農業土木学会誌 57巻7号, pp.63-68, 1989.
- 2) 塚本修, 文字信貴, 伊藤芳樹: 乱流変動法による運動量・顕熱・潜熱(水蒸気)のフラックス測定, 気象研究ノート, 第199号, pp.19-56, 2001.
- 3) 杉田倫明, 青木正敏, 塚本修, 開発一郎, 林陽生: 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, pp.77-83, 2001.
- 4) 宇治橋康行: 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, 福井工業大学研究紀要, 第37号, pp.205-212, 2007.

(平成20年3月31日受理)