

Bowen比法による畑地の蒸発散量の推定に関する考察

伊藤祐二・初井和朗^{*}・吉満由佳・面高みさき・中川 啓・竹内真一^{*}

(利水工学研究室)

平成19年8月10日 受理

要 約

畑地からの蒸発散量をBowen比法に基づいて推定する場合、観測機器の誤差などにより適切な推定値が得られない問題が生じる。本研究では、この問題に対してイタリアンライグラス飼料畑を対象に、現地観測データと潜熱フラックスの評価基準を用いて、Bowen比法による蒸発散量の推定について検討を加えた。その結果、適用した評価基準によって、潜熱フラックスの異常値を客観的に取り除くことができることを確認した。削除したデータは、正味放射フラックスが負または極めて小さく、上向きの地中伝導熱フラックスが生じている夜間から早朝の時間帯に集中していた。またBowen比法による蒸発散量の推定値は、牧草が生長した無降雨日において、Penman法およびFAO Penman-Monteith法による結果と近い値を示した。

キーワード：蒸発散量，Bowen比法，畑地，評価基準

緒 言

畑地からの蒸発散量の定量的評価は、作物の消費水量の決定、圃場の水管理、さらに水資源の有効利用において極めて重要である。蒸発散量の推定法の一つであるBowen比法は、対象とする植表面上での2高度の気温と湿度からBowen比を算出し、これと正味放射フラックスおよび地中伝導熱フラックスのデータから熱収支式に基づいて実蒸発散量を推定する方法である。しかし、Bowen比法の適用においては、従来より観測機器に含まれる誤差などにより適切な推定値が得られない場合が報告[2,4]されており、得られた結果を実際の水利計画などで用いることは困難である。

著者らは、2006年11月3日から2007年2月26日(116日間)において鹿児島県立農業大学校のイタリアンライグラス飼料畑を対象に現地観測を実施した。本研究では得られた現地観測データに基づいて、Bowen比法の適用上の問題を解決するためにOhmura[4]が提案した潜熱フラックスの評価基準を適用し、

Bowen比法による畑地からの蒸発散量の推定について検討を加える。

材料および方法

1. 現地および観測概要

Fig. 1は、研究対象地の概要を示している。観測は、2006年11月3日から2007年2月26日の116日間において、鹿児島県立農業大学校のイタリアンライグラス飼料畑で行った。観測初期の2006年11月3日から同11月8日において、地表面は裸地状態であったが、11月8日の播種以降、対象飼料畑の平均草丈は、11月29日に約12cm、12月27日に約21cm、2007年1月24日に約30cm、2月27日に約51cmとなった。また対象飼料畑では、灌漑は行われていない。

Fig. 2には観測機器の設置概要、Fig. 3には2007年1月24日の観測状況を示す。現地での気象観測について、地表面からの高度0.23mおよび2mの位置に6葉タイプの温湿度計(CS215, Campbell Scientific)、高度0.6mおよび1mの位置に12葉タイプの温湿度計

^{*}：連絡責任者：初井和朗（鹿児島大学農学部 利水工学研究室）

Tel：099-285-8692, E-mail：momii@agri.kagoshima-u.ac.jp

^{*} 〒884-0003 宮崎県児湯郡高鍋町南高鍋11609 南九州大学環境造園学部

Faculty of Environment Landscape, Minamikyusyu University, 11609 Minamitanabe, Takanabe-cho, Koyu-gun, Miyazaki 884-0003, JAPAN

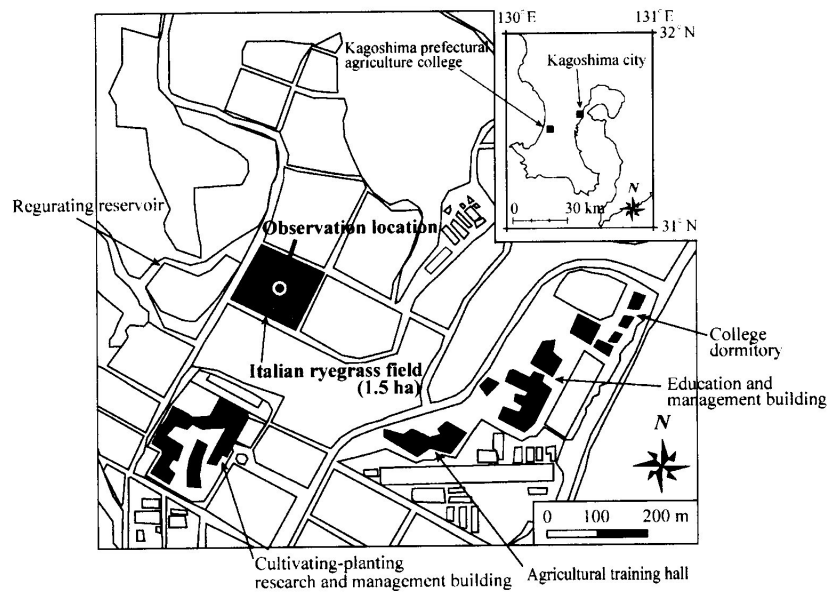


Fig. 1 Study site

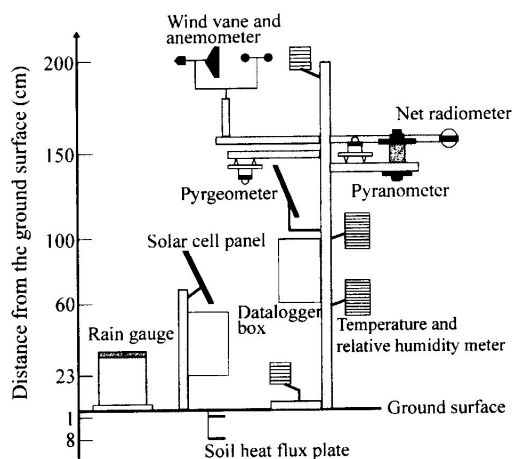


Fig. 2 Outline of field observation

(CS500, Campbell Scientific) を設置し、各高度での気温および相対湿度を観測した。地表面から0.23mの位置の温湿度計に関しては、草丈の生長に応じて2007年1月24日に0.35mに高度を変更した。風向風速(03001, Campbell Scientific)および正味放射フラックス(Q7.1, Campbell Scientific)は、高度2mおよび1.5mの位置で観測した。また、高度1.5mの位置に日射計(LI-200SA, LI-COR)と大気放射計(MS-202, 英弘精機)を鉛直方向上向きおよび下向きに設置し、日射フラックス、大気放射フラックス、

地表面からの反射日射フラックスと長波放射フラックスをそれぞれ測定した。本研究では、これら4つの放射計から計算される収支を、正味放射計による実測値の妥当性の確認のために使用した。降水量は、1mm単位で測定可能な転倒ます型雨量計(1400-106, JAREK Manufacturing)を用いて観測した。さらに土壌観測として、地表面下1cmおよび8cmの位置に地中熱流板(HFT3, Campbell Scientific)を設置し、地中伝導熱フラックスを測定した。各々の観測時間間隔は、降水量は30秒毎にサンプリングし30分間の積算値、その他の観測項目については30秒毎にサンプリングし30分間の平均値としてデータロガー(CR10X, Campbell Scientific; CR1000, Campbell Scientific; THERMIC 2300A, 江藤電気; LI-1400, LI-COR)に記録した。

2. Bowen比法

畑地における熱収支は、次式[5]で表される。

$$R_n + H + IET + G = 0 \quad (1)$$

ここに、 R_n : 正味放射フラックス (W m^{-2})、 H : 顕熱フラックス (W m^{-2})、 I : 水の気化潜熱 (J kg^{-1})、 ET : 蒸発散量 ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)、 IET : 潜熱フラックス (W m^{-2})、 G : 地中伝導熱フラックス (W m^{-2})である。

Fig. 4には、式(1)に対応する各フラックスの向きを示している。フラックスの符号の取り方として、

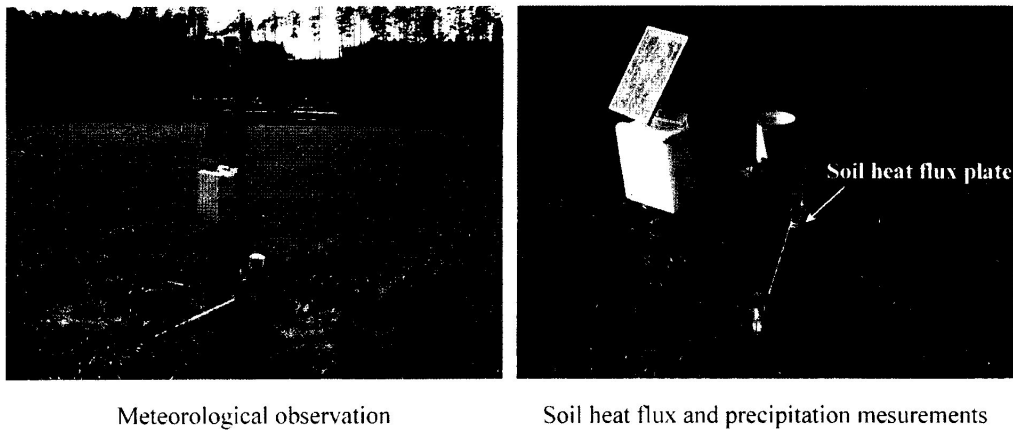


Fig. 3 Field observation on 24 January, 2007

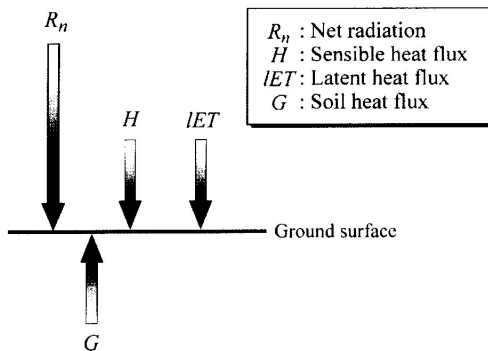


Fig. 4 Energy flux directions corresponding to positive sign

本研究では蒸発散の生じる基準表面に対して入射するフラックスを正、射出するフラックスを負としている。

また、Bowen比は次式で表される。

$$\beta = \frac{H}{IET} = \gamma \frac{\delta T}{\delta e} \quad (2)$$

ここに、 β : Bowen比, γ : 乾湿計定数 ($\text{hPa}^\circ\text{C}^{-1}$), δT : 2点間の気温差 ($^\circ\text{C}$), δe : 2点間の水蒸気圧差 (hPa) であり, $\delta T = T_1 - T_2$, $\delta e = e_1 - e_2$, また水蒸気圧 e は, 気温 T および相対湿度 RH に基づいて計算される。なお本研究では, 鉛直下向きを正とする座標軸 $z(\text{m})$ における位置 z_1 および z_2 での気温を T_1, T_2 , 水蒸気圧を e_1, e_2 とし, 基準表面に近い側を z_1 とする。

式(1)および式(2)より, 蒸発散量 ET は次式で表される。

$$ET = -\frac{R_n + G}{1 + \beta} \quad (3)$$

正味放射フラックス R_n , 地中伝導熱フラックス G , 2点間における気温 T および相対湿度 RH のデータが得られれば, 蒸発散量 ET は式(3)によって計算可能である。なお, 本研究における蒸発散量の計算では, 地中伝導熱フラックス G に地表面下1 cmで得られたデータを使用し, 2点間の気温および相対湿度には, 2006年11月3日から2007年1月23日においては高度0.23 mと2 m, 2007年1月24日から2月26日においては高度0.35 mと2 mのデータを使用した。

3. Bowen比法における潜熱フラックスの評価基準

Bowen比法の適用においては, 観測機器の測定誤差により, 算定した潜熱フラックスの向きと実際の向きが一致しない場合, およびBowen比 $\beta \approx -1$ の条件下では, 潜熱フラックスが異常値となる問題が生じる[4]。Bowen比法により潜熱フラックスを適切に評価するために, まず式(3)により算定した潜熱フラックスの向きが実際の向きと一致しない問題について検討する。式(1)および式(2)より, 以下の式が得られる。

$$R_n + G = -\left(\gamma \frac{\delta T}{\delta e} + 1\right) IET \quad (4)$$

さらに, 式(4)を整理すると

$$\frac{\delta e}{IET} = -\frac{\gamma \delta T + \delta e}{R_n + G} \quad (5)$$

式(5)において潜熱の輸送は, 水蒸気圧勾配と反対の向きに生じるので左辺は常に負となる。したがって式(5)の左辺が正となる場合, すなわち式(5)の右

辺の計算値が正となる場合には、潜熱フラックスの向きが実際の向きと一致しないことを意味し、このときの潜熱フラックスの算定値を以下の判別式に基づいて除去する。

式(5)の右辺が正となる場合、 $R_n + G > 0$ のとき $\gamma\delta T + \delta e < 0$ であるため、

$$R_n + G > 0 \text{ および } \delta T < -\frac{\delta e}{\gamma} \quad (6)$$

また、 $R_n + G < 0$ のとき $\gamma\delta T + \delta e > 0$ であるため、

$$R_n + G < 0 \text{ および } \delta T > -\frac{\delta e}{\gamma} \quad (7)$$

気温 T および相対湿度 RH の観測データに基づいて気温差 δT および水蒸気圧差 δe を求め、式(6)および式(7)が成立する場合には潜熱フラックスの算定値を削除する。

次にBowen比 $\beta = -1$ の条件下における潜熱フラックスの異常値の問題について検討する。使用する温湿度計の温度および湿度センサーの分解能を用いれば、2点間の温湿度計から求めた温度差 δT とその真値 $\delta T'$ および水蒸気圧差 δe とその真値 $\delta e'$ の間には、それぞれ以下の関係が成り立つ。

$$\delta T - 2\varepsilon_T < \delta T' < \delta T + 2\varepsilon_T \quad (8)$$

$$\delta e - 2\varepsilon_e < \delta e' < \delta e + 2\varepsilon_e \quad (9)$$

ここに、 ε_T : 温度センサーの分解能(°C)、 ε_e : 水蒸気圧の分解能(hPa)である。本研究では、温度および湿度センサーの分解能に0.03°Cおよび0.5%を使用し、水蒸気圧の分解能には温度および湿度センサーの分解能に基づいて0.07hPaを用いた。

式(8)および式(9)より、次式が得られる。

$$\gamma(\delta T - 2\varepsilon_T) + \delta e - 2\varepsilon_e < \gamma\delta T' + \delta e' < \gamma(\delta T + 2\varepsilon_T) + \delta e + 2\varepsilon_e \quad (10)$$

またBowen比 $\beta = -1$ の条件下では、 $\gamma\delta T' + \delta e' = 0$ であるので、式(10)は次式のように書き換えられる。

$$-\frac{1}{\gamma}\delta e - 2\left(\varepsilon_T + \frac{1}{\gamma}\varepsilon_e\right) < \delta T < -\frac{1}{\gamma}\delta e + 2\left(\varepsilon_T + \frac{1}{\gamma}\varepsilon_e\right) \quad (11)$$

観測に用いたセンサー分解能に対して、式(11)を満たす場合の潜熱フラックスの算定値は異常値となると考え、蒸発散量の推定値から削除する。

結果と考察

Fig. 5は、判別式(6)、(7)および(11)に基づく評価基準を適用した場合と適用しない場合の潜熱フラックスの日変化を示している。Fig. 5によれば、評価基準を適用しない場合の潜熱フラックスは、その変動が大きく場合によっては異常値を示す。一方、評価基準を適用した場合の潜熱フラックスは、異常値が除去され変動幅も比較的小さくなっている。

Fig. 6は、2006年12月4日から2006年12月6日の30分単位の正味放射フラックス R_n 、地中伝導熱フラックス G および潜熱フラックス IET を示している。正味放射フラックス R_n の実測値については、Fig. 2で示した日射計や大気放射計など4つの放射計による放射収支の計算値と一致したことを確認した。潜熱フラックスについては、算定値として適用するデータおよび算定値として適用しない場合にどの判別式によってデータを除去したのかをマーカーの種類によって分別している。Fig. 6より、判別式(7)($R_n + G < 0$ の場合)によって除去した潜熱フラックスは、対象期間内で1点であったのに対し、判別式(6)($R_n + G > 0$ の場合)によって除去した潜熱フラックスは19点と比較的多かった。式(6)および式(7)の両判別式によって除去したデータは、潜熱エネルギー

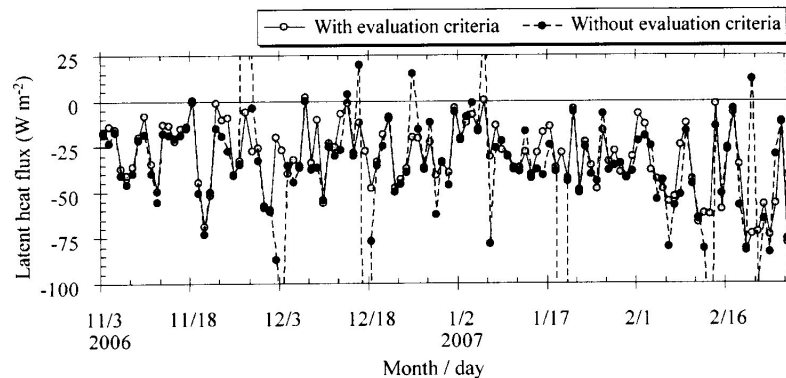


Fig. 5 Comparison of latent heat fluxes with and without evaluation criteria

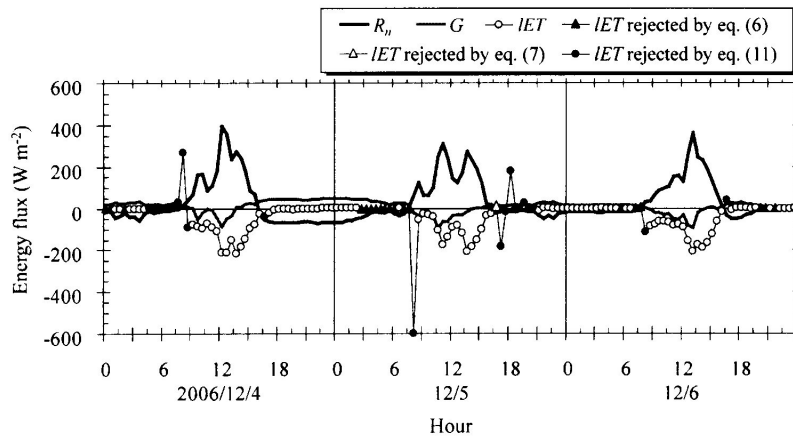


Fig. 6 Energy fluxes on every 30 minutes basis in the Italian ryegrass field

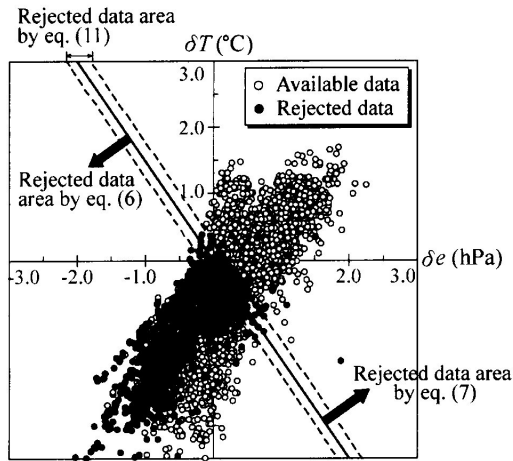


Fig. 7 Relation between air temperature difference (ΔT) and vapor pressure difference (Δe) on every 30 minutes evaluated by three criteria of eqs. (6), (7), and (11)

の供給源となる正味放射フラックスが負または極めて小さい夜間や早朝の時間帯に集中していた。一方、潜熱フラックスの異常値は、主に正味放射フラックスがゼロ付近から正に転じる時間帯または正からゼロ付近に低下する時間帯において生じていた。特に12月4日の8時30分、12月5日の8時30分、17時30分および18時30分の潜熱フラックスの異常値においては、Bowen比が -1 に極めて近い状況下であり、それらは何れも判別式(11)によって除去されていた。

Fig. 7は、判別式(6)、(7)および(11)によって評価した30分単位の気温差 ΔT および水蒸気圧差 Δe の関係を示している。Fig. 7における除去データ数は、対象期間内で得た30分単位の全データ数の約50%に

相当した。特にFig. 6でも示したように、除去データの多くは式(6) ($R_n + G > 0$ の場合)によるデータの除去領域に偏って分布しており、その割合は全除去データ数の63%を占めていた。また観測データによれば、式(6)に対応する条件は、夜間から早朝にかけての正味放射フラックスが負または極めて小さく、上向きの地中伝導熱フラックスが生じている状況下で多く認められた。なお、式(7)および式(11)による除去データ数の割合は、全除去データ数のそれぞれ1%および36%であった。

Fig. 8は、現地観測データと潜熱フラックスに対する評価基準を適用したBowen比法に基づくイタリアンライグラス飼料畑における日単位の熱収支を示している。顕熱フラックス H は、2006年11月3日から11月18日において平均 -31 W m^{-2} と大気への放熱が比較的大きかったが、それ以降、大気への放熱は -8 W m^{-2} と小さかった。牧草が繁茂するにしたがって、正味放射フラックス R_n の多くは潜熱として利用され、地中伝導熱フラックス G は、その絶対量において減少傾向を示した。

Fig. 9は、2006年12月4日から12月8日における地表面下1 cmと8 cmに埋設した地中伝導熱フラックス G の30分単位および日単位の時間変化を示している。30分単位のデータについては、無降雨日においては、両深度での地中伝導熱フラックスに明瞭な時間変化がみられ、両フラックスの値の間には大きな相違が認められる。また降雨日における地中伝導熱フラックスは、無降雨日と比べ変動が小さく、両フラックスの値の相違も比較的小さい。一方、日単位でみると両フラックスの値の間に大きな相違は認め

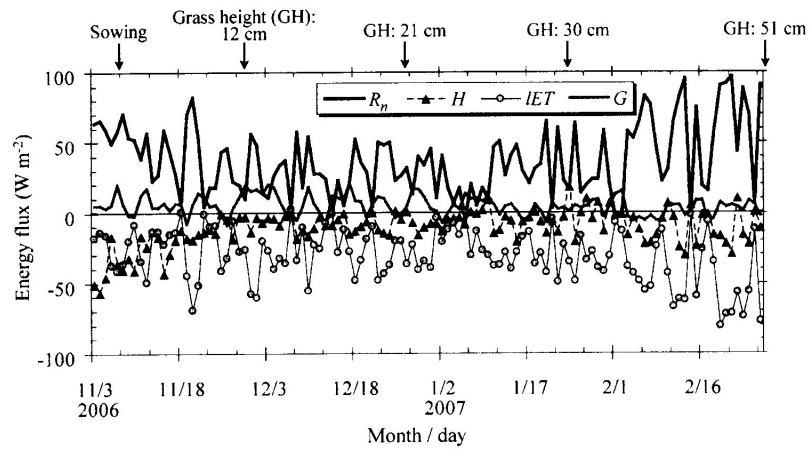


Fig. 8 Daily energy budget in the Italian ryegrass field

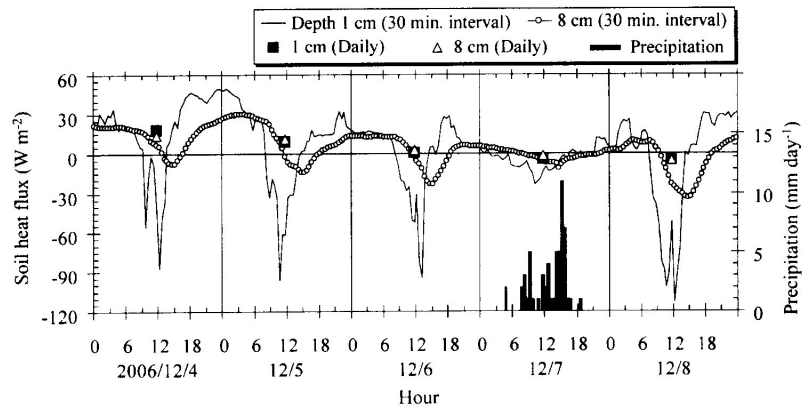
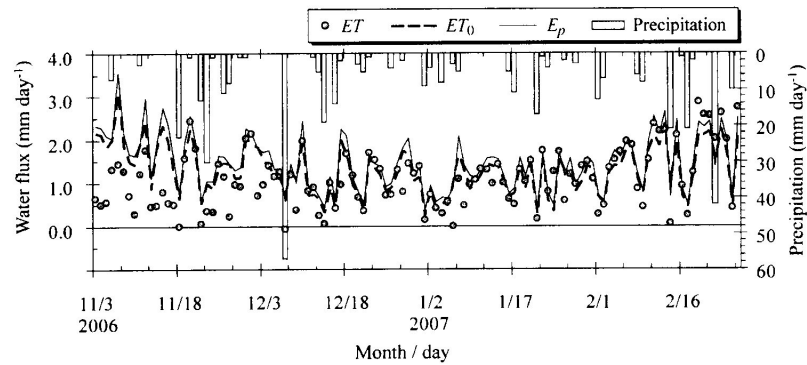


Fig. 9 Comparison of soil heat fluxes at 1 and 8 cm below ground surface

Fig. 10 Daily changes in evapotranspiration (ET) by the Bowen ratio method, potential ET (ET_0) by the FAO-PM method, potential evaporation (E_p) by the Penman method, and precipitation

られず、本研究の対象期間の116日間における最大誤差は、たかだか 9 W m^{-2} (水深換算値で 0.3 mm day^{-1}) 程度であった。なお、地中熱流板の埋設深および適切な地中伝導熱フラックスを得るための方法については、今後検討が必要である。

Fig. 10は、Bowen比法による蒸発散量 ET と比較のためにPenman法[3]による蒸発位 E_p 、FAO Penman-Monteith法[1, 6] (以下、FAO-PM法と記す) による蒸発散位 ET_0 および降水量の日変化を示している。なお、ここでの蒸発位 E_p および蒸発散位 ET_0 の算定における正味放射フラックス R_n には実測値を用いている。Fig. 10より、蒸発位 E_p および蒸発散位 ET_0 は、ほぼ同様の値および変動パターンを示しており、この両者に対してBowen比法による蒸発散量 ET は、播種前後で大きな差が認められたが、牧草が生長するにしたがって比較的近い値を示した。また、草丈12cm以上となった11月29日以降の無降雨日に対しては、3つの推定法による値に大きな差異は認められなかった。さらに、草丈が12cm以上となった11月29日から期間最終日の2月26日までの蒸発散量 ET は104mm、蒸発散位 ET_0 は109mm、蒸発位 E_p は124mm、総降水量は318mmであったことから、本対象期間においては、灌漑を行っていないイタリアンライグラス飼料畑での消費水量は、降水および土壤水分によって十分賄われている。

以上の結果から、地中伝導熱フラックスの観測については、30分単位で解析を行う場合には地表面に可能な限り近い位置での測定が望ましい。一方、日単位で解析を行う場合には、地表面下1cmと8cmの地中伝導熱フラックスの観測値の間に大きな相違は認められず、本研究の対象期間における116日間での両者の差異はたかだか 9 W m^{-2} (水深換算値で 0.3 mm day^{-1}) 程度であった。対象圃場での実蒸発散量の推定は、正味放射フラックス、地中伝導熱フラックス、2高度での気温および相対湿度の現地データに基づいてBowen比法から推定可能であるが、

今回検討した評価基準(式(6), (7), (11))によって、潜熱フラックスの異常値を客観的に取り除くことができることを確認した。蒸発散量の推定値については、今回対象とした解析期間(秋冬季)では $0 \sim 3 \text{ mm day}^{-1}$ と比較的小さく、草丈12cm以上となった11月29日以降の無降雨日に対して、Penman蒸発位およびFAO-PM法による蒸発散位の計算値との間に大きな差異は認められなかった。

謝 辞

本研究を行うにあたって、鹿児島県立農業大学校畜産学部吉永健一郎先生には、現地圃場での観測に関し種々ご協力をお願いした。ここに記して感謝の意を表す。また、懇切丁寧な本原稿を校閲いただいた鹿児島大学農学部教授高木東先生に感謝致します。

文 献

- [1] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M.: Crop evapotranspiration; Guidelined for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome (1998)
- [2] 堀野治彦: 農地における「環境フラックス」総合測定評価システムの開発に関する研究. 平成7年度~平成9年度科学研究費補助金(基盤研究(A)(2)) 研究成果報告書, 77-83 (1998)
- [3] 農林水産省構造改善局: 土地改良事業計画設計基準 計画「農業用水(畑)」。農業土木学会, 東京 (1997)
- [4] Ohmura, A.: Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 21, 595-598 (1982)
- [5] ten Berge, H. F. M. 著(九州地下水研究会訳): 裸地表面と低大気層における熱と水分の輸送. p.10, 森北出版, 東京 (1996)
- [6] 辻 多聞, 大槻恭一: FAOの作物消費水量算定ガイドライン(1998)の概要(その1) —FAO基準蒸発散量 ET_0 の算定—。畑地農業, 521, 2-9 (2002)

Estimation of Evapotranspiration from Upland Field by Bowen Ratio Method

Yuji ITO, Kazuro MOMII^{*}, Yuka YOSHIMITSU, Misaki OMODAKA,
Kei NAKAGAWA and Shin-ichi TAKEUCHI
(*Laboratory of Water Use Engineering*)

Summary

In estimating evapotranspiration from upland field using the Bowen ratio method, unacceptable values of evapotranspiration are often obtained due to observation errors caused by resolution limit and observation accuracy with measurement devices. In this study, estimation of evapotranspiration based on the Bowen ratio method was examined using field observation data and evaluation criteria for latent heat flux in an Italian ryegrass field. The results showed that the undesirable latent heat fluxes can be removed by the evaluation criteria. Most of the removed fluxes occurred under the condition of negative or small net radiation and upward soil heat fluxes during night or early morning. Estimated evapotranspiration by the Bowen ratio method agreed with the results of the Penman method and the FAO Penman-Monteith method under no rainfall conditions for grass heights over 12 cm.

Key words : Evapotranspiration, Bowen ratio method, Upland field, Evaluation criterion

^{*}: Correspondence to: Kazuro MOMII (Laboratory of Water Use Engineering)
Tel: 099-285-8692, E-mail: momii@agri.kagoshima-u.ac.jp