放射温度による無次元蒸発散量の評価について

山田 優^{*†}・木村玲二^{**}・杉村芙美子^{***}・神近牧男^{****}

* 株式会社三祐コンサルタンツ
 ** 鳥取大学乾燥地研究センター
 *** 沖縄日立ネットワークシステムズ株式会社
 **** 鳥取環境大学

Evaluation for Non-Dimensional Evapotranspiration with Radiometric Surface Temperature

Yu YAMADA^{*†}, Reiji KIMURA^{**}, Fumiko SUGIMURA^{***}, and Makio KAMICHIKA^{****}

*Sanyu Consultants Inc., Naka-ku Nishiki 2-15-22, Nagoya 451-0003 Japan
 **Arid Land Research Center, Tottori University, Hamasaka 1390, Tottori 680-0001 Japan
 ***Okinawa Hitachi Network Systems Ltd., Nishi 1-19-7, Okinawa 900-0036 Japan
 ****Tottori University of Environmental Studies, Wakabadai Kita1-1-1, Tottori 689-1111 Japan

Abstract

Relationship between the index with radiometric surface temperature and ratio of actual evapotranspiration (ET) to potential evaporation E_p (=non-dimensional evapotranspiration) was examined in the indoor and field experiment. Index corresponded to the change of ET/E_p . Also, index was related to the leaf water potential and volumetric soil water content within the root zone.

Key words: Evapotranspiration, Radiometric surface temperature, Water potential

キーワード: 蒸発散量, 放射温度, 水ポテンシャル

1. はじめに

近年, リモートセンシング技術は蒸発散量や土壌表層の水分量の推定, 水分ストレスの同定等に幅広く使用されている。特に作物栽培において, リモートセンシング技術は病虫害や水分不足などによるストレスの早期発見, または灌水計画に必要な蒸発散量の評価に対して有効であると考えられる。

本研究では, 群落面で計測した放射温度とバルク式で推定した空気力学的温度を組み合わせた指標を提示し, 指標と無次元蒸発散量 (実蒸発散量とポテンシャル蒸発量の比) の関係, および指標と葉内水ポテンシャル, 土壌体積含水率の関係について検討した。

2. 研究方法

2.1 指標の概要

群落面の温度変化に影響を与える要因として, 植物の生理的要因である気孔の開閉, 外的要因である葉面の放射収支・熱収支, 土壌水分, 植被率などが挙げられる。本研究では放射収支や熱収支の影響を除去するために, Idso *et al.* (1981) による Crop Water Stress Index (CWSI) を参考に以下以下の指標を提示する。

$$I_s = \frac{T_L - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

ここに, T_L は群落面温度 (K) である。 T_{min} は蒸発散が盛んな時の群落面温度 (K), T_{max} は蒸発散が停止した状態における群落面温度 (K) と仮定する。

I_s の算定に必要な T_{max} , T_{min} は, 以下のように推定した。まず, 植物群落における熱収支式は次式で表される。

$$R^{\downarrow} - G = \epsilon \sigma T_s^4 + IE + H \quad (2)$$

2006年4月19日 受付, 2006年6月8日 受理

[†] Corresponding Author: E-mail: rkimura@alrc.tottori-u.ac.jp

$$R^{\downarrow} = (1 - \text{ref})S^{\downarrow} + L^{\downarrow} \quad (3)$$

ここに、 $R^{\downarrow}$ は有効入力放射量 (Wm^{-2}), G は地中伝導熱フラックス (Wm^{-2}), ε は射出率 (本研究では 0.98 と仮定), σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$), T_s は群落面温度 (K), H は顕熱フラックス (Wm^{-2}), IE は潜熱フラックス (Wm^{-2}), ref はアルベド, $S^{\downarrow}$ は全天日射量 (Wm^{-2}), $L^{\downarrow}$ は下向き長波放射量 (Wm^{-2})である。

H , IE は次のバルク式で表される。

$$IE = c_p \rho C_H U (T_s - T) \quad (4)$$

$$IE = l \rho \beta C_H U \{q_{\text{sat}}(T_s) - q\} \quad (5)$$

ここに、 c_p は定圧比熱 ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), ρ は空気密度 (kgm^{-3}), C_H はバルク係数, U は風速 (ms^{-1}), T は気温 (K), l は蒸発潜熱 ($\text{Jkg}^{-1}\text{m}^{-3}$), β は蒸発散効率, $q_{\text{sat}}(T_s)$ は表面温度 T_s に対する飽和比湿 (kgkg^{-1}), q は比湿 (kgkg^{-1})である。

G は, Allen *et al.* (1998) による次式を用いて算定した。

$$G = 0.1(R^{\downarrow} - \varepsilon \sigma T_s^4) \quad (6)$$

式 (2) ~ (6) より次式が得られる。

$$R^{\downarrow} - G - \varepsilon \sigma T_s^4 - c_p \rho C_H U (T_s - T) - l \rho \beta C_H U \{q_{\text{sat}}(T_s) - q\} = 0 \quad (7)$$

β が1のときは群落面が十分に湿っている状態を示し、0は完全に乾燥している状態を示すと仮定される。したがって、式 (7) において、 $\beta=1$, 0 の場合の左辺が0に収束する T_s を逐次近似によって算定し、 $T_{\min}$, $T_{\max}$ を求めた。

本研究では、式 (1) で算定された I_s と無次元蒸発散量 ET/E_p (実蒸発散量とポテンシャル蒸発量の比) の比較を室内実験および屋外実験にて行った。ポテンシャル蒸発散量 E_p は, Kondo and Xu (1997) で提示されたもので、仮想的な地表面からの蒸発量と定義される。また、屋外実験では I_s を蒸発散量と関わりの深い葉内水ポテンシャルや土壌体積含水率とも比較した。

2.2 室内実験の概要

鳥取大学乾燥地研究センター内の人工気象室とビニルハウスにおいて、供試植物にコウシュンシバ (*Zoysia matrella*) を用い、1/2000 a のワグネルポットに栽植して室内実験を行った。人工気象室での観測は、2005 年 6 月 24 日から 7 月 20 日までの 27 日間行い、ビニルハウスでの観測は、2005 年 10 月 16 日から 11 月 15 日までの 31 日間行った。

ワグネルポットには鳥取砂丘砂を乾燥密度 1.4 gcm^{-3}

程度になるように詰め、土壌水分量は、圃場容水量 (体積含水率 $\theta (\text{m}^3\text{m}^{-3}) = 0.08$), 初期しおれ点含水率 ($\theta = 0.03$) となるように調製した。以降、日々の観測開始時の土壌水分量を圃場容水量としたポットを灌水区、初期しおれ点含水率としたポットをストレス区と称する。人工気象室の実験では灌水区、ストレス区を各 2 ポットずつ、計 4 ポットを用いた。ビニルハウスでの観測では、灌水区、ストレス区を各 3 ポットずつ、計 6 ポットを用いた。水分欠乏によるストレスのみをシバに与えるために、各ポットの蒸発散によって減少した水分量を日々の測定後に灌水し補充した。

測定項目は、群落面温度 (本研究では、ポット内のシバの平均葉面温度を群落面温度と仮定した)、蒸発散量、気温、相対湿度、正味放射量である。群落面温度の測定は放射温度計 (日本電子; JTG-5700) で天底角 70° 、視野角 30° に設定して行った。天底角を 70° にした理由として、この角度で測定された放射温度が空気力学的温度にほぼ等しくなるという結果に基づいているためである (Matsushima and Kondo, 1997)。蒸発散量は観測開始直前と直後でポットの重量を測定することによって求めた。人工気象室内の気象条件は、風速 1.0 ms^{-1} 、気温 28°C 、相対湿度 50%、照度 80,000 lux となるように設定した。人工気象室の実験では、気象要素、群落面温度の測定はシバの蒸散が盛んとなる時間帯の 10 時から 16 時まで (ビニルハウスの実験では 10 時から 14 時まで) 10 分ごとに行った。観測時間帯には常に風速は 1.0 ms^{-1} となるように市販の扇風機を用いた送風を行った。

2.3 屋外実験の概要

観測は、乾燥地研究センター内砂丘砂圃場で、2005 年 8 月 20 日から 8 月 31 日までのうち晴天日 9 日間に行った。圃場内には、実験区を二つ設定した。測定期間中の毎日朝夕に灌水を行う灌水区 (1.92 ha) と、灌水を行わないストレス区 (0.5 a) を設定した。供試植物には、青刈り用ダイズ (*Glycine max* (L.) Merrill) を用いた。各処理区のダイズの栽植密度は 1 m^2 あたり灌水区で 46.8 本、水ストレス区で 54.8 本であった。観測期間の植被高は 40 cm から 45 cm, LAI (葉面積指数) は 2 から 3 に変化した。測定項目は気温、相対湿度、放射量、風速、群落面温度、土壌水分量、葉内水ポテンシャルである。群落面温度は、室内実験と同様の測器を用い、天底角、視野角も同じように設定した。土壌水分量は、各実験区 2 点ずつ TDR 土壌水分計 (Campbell; CS615) を鉛直に地面に挿入して深度 0 ~ 30 cm の土層の平均体積含水率 θ を測定した。なお、この深度の土層では根の密集が確認された。気象要素、群落面温度、土壌体積含水率の測定は 10 時から 14 時まで 10 分ごとに行った。葉内水

ポテンシャルはプレッシャーチャンバー (PMS Instrument Company; PMS Model 1000) で、14 時に測定した。灌水区の蒸発散量にはボーエン比法によって測定した値を用い、ストレス区では土壌水分量の減少量から算出した。

2.4 バルク係数の設定

本研究では顕熱・潜熱フラックスを表わす際にバルク式を用いているが、式中にあるバルク係数 C_H またはバルク輸送係数 $C_H U$ を知ることが必要である。室内実験では以下のようにバルク係数の算定を行った。まず、式 (5) に示される潜熱フラックス IE の式に蒸発散量の観測値および気象データを代入する。 $C_H U$ を算出する際の条件として、灌水区、ストレス区ともに霧吹きで、群落面を十分に湿らせ、遮断蒸発を起こすことにより、蒸発散効率 β を 1 とした状態でを行った。

屋外実験では次のようにしてバルク係数の算定を行った。一般的に C_H は大気安定度を考慮して算定するが、今回は大気安定度を中立と仮定し、次の式によって求めた。

$$C_H = \frac{k^2}{\ln \left\{ (z - d) / z_0 \right\} \ln \left\{ (z - d) / z_T \right\}} \quad (8)$$

ここに、 k はカルマン定数 (≈ 0.4)、 z は風速と気温の測定高度 (m)、 d は地面修正量 (m)、 z_0 、 z_T はそれぞれ風速、気温に対する粗度長 (m) である。 d 、 z_0 、 z_T については、経験的に以下のように表わすことができる (Allen *et al.*, 1998)。

$$d = 2/3h \quad (9)$$

$$z_0 = 0.123h \quad (10)$$

$$z_T = 0.1z_0 \quad (11)$$

ここに、 h は植被高 (m) である。

3. 結果および考察

Fig. 1 に人工気象室での I_s と無次元蒸発散量 ET/E_p との関係を示す。Fig. 2 にビニルハウスでの I_s と ET/E_p との関係を示す。一般に植物は水分欠乏などのストレスを受けると体内の水分を保持するために蒸散を抑制する。したがってストレスを受けた植物の蒸発散量は、十分に水を与えられて生育した植物よりも少なくなる。このことは Fig. 1 の灌水区では ET/E_p が大きく、 I_s は小さな値を示し、逆にストレス区では ET/E_p が小さく、 I_s が大きな値を示した様子から判断できる。Fig. 2 においても、灌水区のプロットはストレス区に比べ、 ET/E_p が大きく、 I_s は小さくなるように分布した。また Fig. 1、2 ともに、 I_s と ET/E_p との関係は負の相関を示した (Fig. 1 では相関係数 $R = -0.81$ 、

Fig. 2 では $R = -0.72$)。なお、人工気象室、ビニルハウスの実験では、同じ植物を用いたにも関わらず、 I_s と ET/E_p との間の勾配が異なっている。人工気象室ではほぼ気象条件が一定、ビニルハウスでは気象条件が変化するため、同じ芝を用いても異なる生理状態を示したと考えられる。たとえば、人工光と自然光に対する気孔抵抗や蒸散速度の違いなどが考えられる。Fig. 3 にダイズ圃場での I_s と ET/E_p との関係を示す。屋外圃場の測定においても灌水区の ET/E_p はストレス区のものに比べ大きく、 I_s は小さな値をとるように分布した。加えて、 I_s と ET/E_p の間には有意な負の相関が認められた。

Fig. 4 にダイズ圃場での I_s と Ψ_L (葉内水ポテンシャル) との関係を示す。水ストレスを受けた植物の Ψ_L は、健康な状態よりも値が低下する。両区の I_s と Ψ_L との関係には負の相関関係が見られた。ダイズは Ψ_L が -1.0 MPa 以下になると蒸散速度が低下することが知られている (Boyer, 1970)。図より、 Ψ_L の低下が、蒸散抑制による

Fig. 1. Relationship between I_s and ET/E_p in the chamber experiment.

Fig. 2. Relationship between I_s and ET/E_p in the greenhouse experiment.

Fig. 3. Relationship between I_s and ET/E_p in the soybean field.

Fig. 4. Relationship between I_s and leaf water potential in the soybean field.

Fig. 5. Relationship between I_s and soil moisture content in the soybean field.

群落面温度の上昇とほぼ同時に検出されたことが理解できる。

Fig. 5 にダイズ圃場での I_s と θ との関係を示す。観測

期間後半には晴天日が続き、鳥取砂丘砂の初期しおれ点含水率である 0.028 (Inoue and Nomura, 1983) 付近まで θ が低下する日が見られた。これらの日の I_s は高い値を示したことから、土壌水分量が低下した場合には、植物は吸水を十分に行うことができず、ストレスを受け、そのため蒸散を抑制し、それに伴う群落面の温度上昇が見られたと考えられる。一方、十分な土壌水分量があった圃場容水量以上の場合、 I_s は低い値を示した。 I_s は土壌水分量の減少に伴う吸水不足による群落面温度の上昇も検出していたことが分かる。

4. まとめ

本研究では、放射温度計から得られる群落面温度とバルク式で推定した空気力学的温度を組み合わせた指標を提示し、指標と無次元蒸発散量の関係、および指標と葉内水分ポテンシャル、土壌体積含水率の関係について検討した。

室内実験において、本研究で提示した指標 I_s と無次元蒸発散量 ET/E_p とを比較した結果、 I_s と ET/E_p の間には負の相関が見られた。屋外圃場での観測においても、 I_s と ET/E_p との間に有意な負の相関が認められた。他にも I_s と葉の水ポテンシャル Ψ_L 、土壌体積含水率 θ と優位な相関が認められた。

今後の展望として、人工衛星から得られる地表面温度と、地上の気象観測所などから得られる気象観測データから I_s を算出し、より広域な植物群落のストレス評価を行うことが期待される。現在、中国黄土高原の小流域 (約 10 km²) に本指標を適用している段階であり、草地における I_s と ET/E_p との間の決定係数は 0.874、標準誤差は 0.103 となっている。

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO, Rome, 300pp.
- Boyer, J. S., 1970: Differing sensitivity of photosynthesis to low leaf water potentials in corn and soybean. *Plant Physiol.*, **46**, 236–239.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., and Hatfield, J. L., 1981: Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.*, **24**, 45–55.
- Inoue, M., and Nomura, Y., 1983: Laboratory determination of dune sand water constants and soil water characteristic curve during the drying

- process, *Sand Dune Research*, **30**, 15–25.
- Kondo, J., and Xu, J., 1997: Potential evaporation and climatological wetness index. *Tenki*, **44**, 875–883.
- Matsushima, D., and Kondo J., 1997: A proper method for estimating sensible heat flux above a horizontal-homogeneous vegetation canopy using radiometric surface observations. *J. Appl. Meteorol.*, **36**, 1696–1711.