

熱力学的平衡近似を用いた土壌面蒸発速度予測の信頼性検討

Validity of Thermodynamic Equilibrium Assumption for Prediction of Evaporation Rate from Soil Surfaces

齊藤 忠臣*・藤巻 晴行**・安部 征雄**・井上 光弘*

Tadaomi SAITO*, Haruyuki FUJIMAKI**, Yukuo ABE** and Mitsuhiro INOUE*

1. はじめに

現在までに多くの土壌面蒸発速度予測モデルが提唱されてきたが、モデルに不可欠な土壌面水蒸気濃度 ρ_{vs} の与え方には、大別して二種の異なる考え方が存在している。一方は比較的古くから用いられている方法 (EQ 法) であり、バルク輸送式 (式(1)) の ρ_{vs} に、土壌面の水ポテンシャルから求められる熱力学的平衡近似水蒸気濃度を与える (式(2)(3))。

$$E = \frac{\rho_{vs} - \rho_{va}}{r_a} \quad (1) \quad \rho_{vs} \approx \rho_{vse} = \rho_{vsat} h_{re} \quad (2) \quad h_{re} = \exp\left(\frac{\psi_w}{R_v T}\right) \quad (3)$$

ここで、 E : 蒸発速度 ($\text{g}/\text{cm}^2\text{s}$)、 ρ_{vs} : 土壌面水蒸気濃度 (g/cm^3)、 ρ_{va} : 基準高度の空気中の水蒸気濃度 (g/cm^3)、 r_a : 空気力学的抵抗 (s/cm)、 ρ_{vse} : 土壌面平衡水蒸気濃度 (g/cm^3)、 ρ_{vsat} : 飽和水蒸気濃度 (g/cm^3)、 h_{re} : 平衡相対湿度、 ψ_w : 水ポテンシャル (cm)、 R_v : 水蒸気気体定数 ($4697\text{cm}/\text{K}$)、 T : 温度 (K) である。他方の考え方は、近年多くの研究に用いられている表面抵抗法であり、(2)式は成り立たず $\rho_{vs} \ll \rho_{vse}$ となるため、法は蒸発速度を過大評価するという説があるが、両法の妥当性に関してはまだ十分な実証データが積み上げられていない。そこで本研究では、平衡近似を用いた法の有効性を、複数の土壌を用いた蒸発実験と数値解析から検討した。各土壌について水分移動特性を測定するとともに、気温・地温・湿度・風速を一定とした厳密条件下での蒸発実験を行い、実験結果を法を用いた数値解結果と比較した。

2. 実験・解析方法

水分移動特性: 実験にはマサ土および豊浦標準砂を用いた。蒸発実験に先立ち、各土壌の飽和から低水分領域までの水分移動特性を実測した。水分保持特性 ψ () は、高水分領域を吸引法、低水分領域をサイクロメータ法により測定し、不飽和透水係数 K () は、高水分領域を定常浸透法、低水分領域を定常蒸発法により測定した。各々の実測値と当てはめ曲線を Fig.1 に示す。

蒸発実験: Fig.2 に蒸発実験の模式図を示す。温度 25 湿度 30% もしくは 40% に設定した恒温恒湿槽内に、断熱材を縦 5cm 横 5cm 深さ 1cm でくり抜いた土壌容器を用意し、十分に溶質を洗脱した土壌を所定の密度で充填した後、土壌を純水で飽和させた。土壌容器には、地表面を通過する風の攪乱を軽減

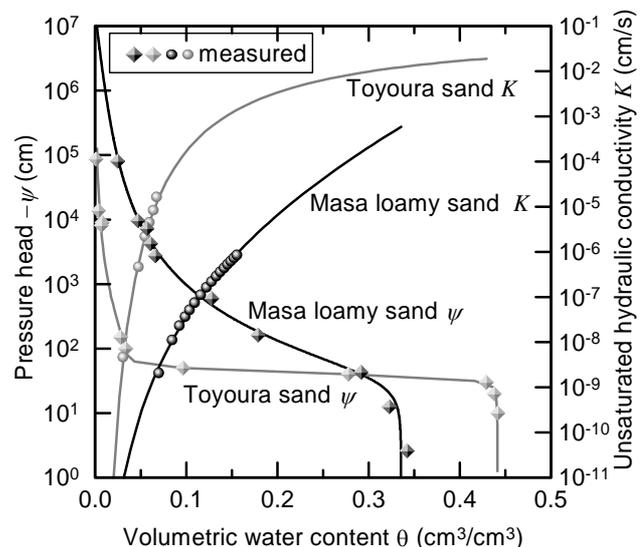


Fig.1 Hydraulic properties for the soil samples.

するための助走区間を設け，重量変化から蒸発量が算出できるように電子天秤上に設置した．また地表面下 0.1cm には白熱灯温度制御装置に接続した熱電対を設置し，地表面温度を常に 25.0 ± 0.5 に保った．土壤容器に対し一定速の送風を開始して実験開始時刻 $t=0$ とした．15 分毎に 20 秒間送風を停止して蒸発量を測定し，蒸発速度が低下して恒率乾燥時の 10 分の 1 程度となった後に採土し，実験を終了した．

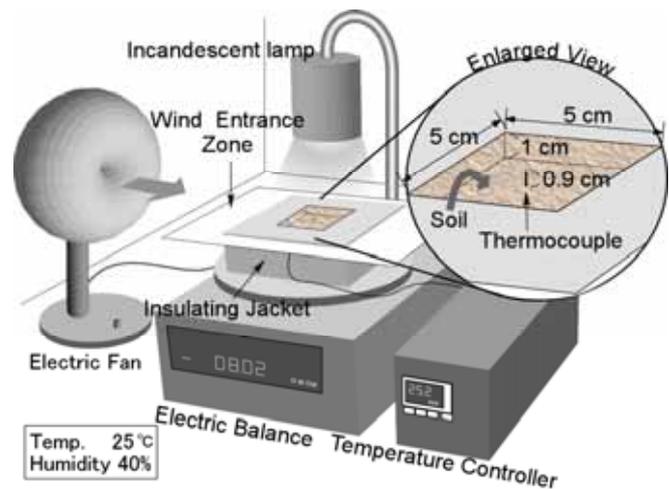


Fig.2 Schematic diagram of the evaporation experiment.

）数値解析： 法を用いた蒸発速度予測と実験結果の比較から，法の信頼性を検討した．本研究の数値解析では，土壤中の熱移動とこれに伴う水移動を考慮する必要がないため，水移動の基礎式（液状フラックス+等温水蒸気フラックス）のみを陰解型差分法により解いた．バルク輸送式(1)の空気力学的抵抗 r_a は，恒率乾燥段階中の蒸発速度，温湿度の平均値を元に算出した．空間増分 z については，十分に細かいと考えられる 0.025cm と，内部での水移動計算を行わない 1cm の 2 種を用い，結果を比較した．

3 . 結果・考察

Fig.3 にマサ土，豊浦標準砂それぞれの蒸発量の実測値と予測値の比較を示す．マサ土においては， $z=0.025\text{cm}$ の予測値が実測値と良好に一致した．一方， $z=1.0\text{cm}$ では $t>3\text{h}$ （減率乾燥段階）において予測値が実測値を大きく上回った．豊浦標準砂については， $z=0.025\text{cm}$ の場合予測値が実測値を下回ったのに対し， $z=1.0\text{cm}$ では予測値が実測値を上回った．これらから，空間増分を十分に小さくした場合には，蒸発速度が過大評価されず，

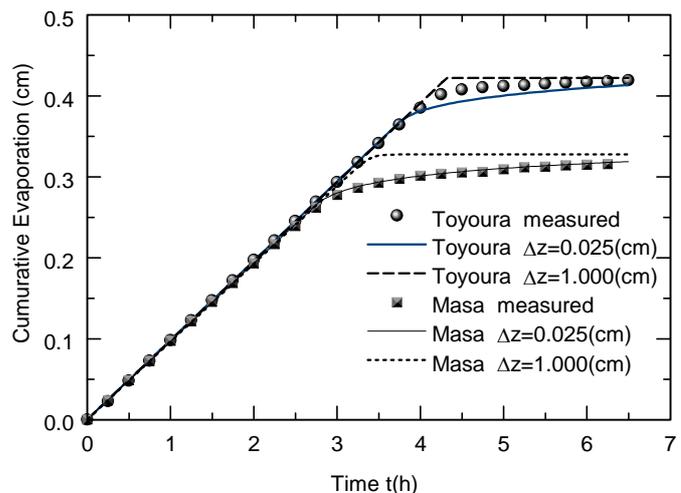


Fig.3 Comparison of measured and predicted cumulative evaporation.

法による蒸発速度予測の信頼性が高いことが明らかとなった． $z=1.0\text{cm}$ において予測値が過大評価された原因は，実際には地表面直下で急激に低下する水ポテンシャル ψ_w 分布が表現されず， ρ_{vse} が過大評価されたためであると考えられる．既往のモデル研究では 1.0cmより大きい空間増分が用いられることが多く，これが要因となって法が蒸発速度を過大評価するとの誤解が生じたと考えられる．以上のように，法による蒸発速度予測の信頼性の高さが示されたことにより，式(2)の成立，すなわち土壤面における水蒸気濃度 ρ_{vs} は，水ポテンシャル ψ_w から求められる熱力学的平衡水蒸気濃度で近似することの妥当性が示された．ただし，マサ土，標準砂は，共に比較的粒径の大きい砂質土であり，土性が異なると土壤面における水の存在形態が変化する可能性も考えられるため，今後とも様々な粒径の土壤を用いた検討を重ねる必要があると考えられる．