

顕熱収支法による二次元地中蒸発量の定量化

Quantifying Two-Dimensional Subsurface Evaporation Rates by Sensible Heat Balance

○小島 悠揮¹, 齋藤 広隆²

Yuki Kojima¹, and Hirotaka Saito²

1. はじめに

土中水の蒸発現象は、地表面と大気との境界における水と熱の交換過程に大きな影響を持つため、その定量化は重要課題である。地表面下の蒸発は地表面から鉛直一次的に進行するとして扱われることが多く、地中蒸発量の鉛直分布の時間変化を定量化する取り組みがされている（例えば Deol et al., 2012）。しかし、粗度などの地表面状態や日射量のばらつき、土壌中の不均質な熱物質移動特性などにより、地表面下の蒸発機構はより複雑になると考えられる。よって本研究では、Heitman et al. (2008)が提案した土壌中の顕熱収支に基づく地中蒸発量推定法を応用し、二次元での地中蒸発量の定量化を試みた。

2. 理論

顕熱収支による地中蒸発量推定法について解説する。ある単位体積 ΔV を持つ領域の二次元熱収支は以下の式で表される。

$$(H_{x1} - H_{x2} + H_{y1} - H_{y2})\Delta A = \left(\frac{\Delta S}{\Delta t} + LE\right)\Delta V \quad (1)$$

ここで、 H は伝導熱流量 (W m^{-2})、 ΔA は領域の単位断面積 (m^2)、 $\Delta S/\Delta t$ は顕熱の貯蓄量変化 (W m^{-3})、 LE は蒸発による潜熱量 (W m^{-3}) である。下付きの $x1, x2, y1, y2$ はそれぞれ水平方向の流入、流出熱フラックス、鉛直方向の流入、流出フラックスを表す。土中の熱移動は伝導と対流によるものがあるが、伝導に比べて対流による熱移動は小さいため無視する。各 H 項は、2 地点の地温とその 2 点間の熱伝導率 λ を測定することでフーリエの法則によって計算できる。また、 $\Delta S/\Delta t$ は地温の時間変化と体積熱容量 C の積として計

算できる。Deol et al. (2012)は、鉛直方向に温度計およびヒーター線を複数本配列したヒートパルスプローブ(HPP)を用いて地温と熱伝導率、体積熱容量の分布を測定し、 H_{y1} と H_{y2} を除いた式(1)によって未知項目である LE を求めた。そして LE を水の蒸発潜熱 L (2442 MJ m^{-3}) で除すことで蒸発量 E の鉛直分布を決定した。本研究では鉛直・水平方向に複数本の温度計およびヒーター線を配列したヒートパルスプローブを開発し、地温、 λ 、 C 分布の測定および地中蒸発量分布の推定を行う。

3. 実験方法

図 1 (a)に本研究で用いた HPP の写真を示す。HPP は長さ 40mm のステンレスチューブ 32 本で構成されており、チューブには熱電対のみ、もしくは熱電対とヒーター線両方が内装されている。チューブの配置とヒーター線の有無を図 1(b)に示した。これより、2 次元的な温度分布を測定でき、さらに各チューブ間の λ と C もヒートパルス法によって測定できる。よって式(1)から二次元での地中蒸発量が推定できる。

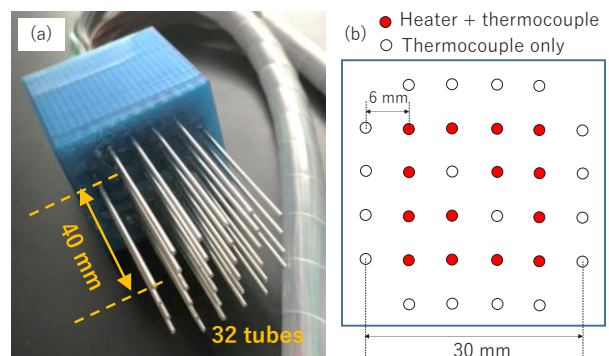


図 1 開発したヒートパルスプローブの写真(a)と熱電対およびヒーター線の配置図(b)

1) 岐阜大学工学部, Faculty of Engineering, Gifu University

2) 東京農工大学農学部, Faculty of Agriculture, Tokyo University of Agriculture and Technology

キーワード：地中蒸発量, 顕熱収支

二次元地中蒸発量推定のデモンストレーションとして簡易的な蒸発実験を行った。幅 42 mm、奥行 50 mm、高さ 60 mm の容積を持つ容器に左半分に黒ボク土を、右半分に豊浦砂を充填した (図 2)。容器側面から HPP を挿入し、容器底部から注水し土壌を飽和させた。その後、容器上端を白熱電球で照射し、5 日間乾燥させた。乾燥期間中各チューブの温度を 15 分毎に、ヒートパルス法によりチューブ間の λ と C を 4 時間ごとに測定した。得られた温度と熱特性分布より、式(1)を用いて図 2 中の白線で囲まれた 16 領域について地中蒸発量を計算した。

4. 結果と考察

図 3 に推定した地中蒸発量分布を選抜した時間毎に示した。開始 0.5 日経過時では、目立った蒸発は確認できなかったが、1.5 日経過時では鉛直方向一段目 ($y=9\sim 15$ mm)、水平方向 4 列目 ($x=27\sim 33$ mm) の領域で 6×10^{-7} g / 15min 以上の蒸発が生じた。1.8 日経過時では蒸発領域は 1 段 3 列目と 2 段 4 列目に拡大した。蒸発前線が豊浦砂側でのみ深層に発達していることが分かる。2 日経過時では 2 段目 4 列目で激しい蒸発が起こり、1 段目では値が低下していることから、1 段目での蒸発現象は土中水の減少により収束したと考えられる。更に 3 日経過時には蒸発領域は豊浦砂の 3 段目に、4.5 日経過時には 4 段目に遷移し、蒸発前線が下降していると判断できる。その一方で明瞭な蒸発現象は 1 列目と 2 列目の黒ボク土側 ($x=9\sim 21$ mm) では見られなかった。これは、間隙径の大きな豊浦砂側から急激な蒸発が生じ、黒ボク土側から豊浦砂側へ土中水が供給され、そのために黒ボク土側の蒸発量が抑えられた可能性が考えられる。以上のことから、土壌中での二次元的な蒸発量を顕熱収支法によって定量化できた。今後は推定精度の検証が求められる。

5. おわりに

本研究では新たに開発した HPP による測定と顕熱収支法によって地中蒸発量の二次元的な定量化できることを示した。また、土壌中の蒸発前線が時間と共に下方へ発達してゆく様子や、間

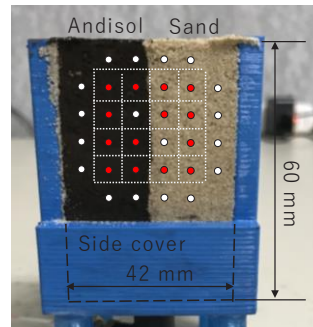


図 2 容器に充填した黒ボク土と豊浦砂 (ヒートパルスプローブ挿入前の断面)。チューブの挿入位置と蒸発量計算領域も共に示した。

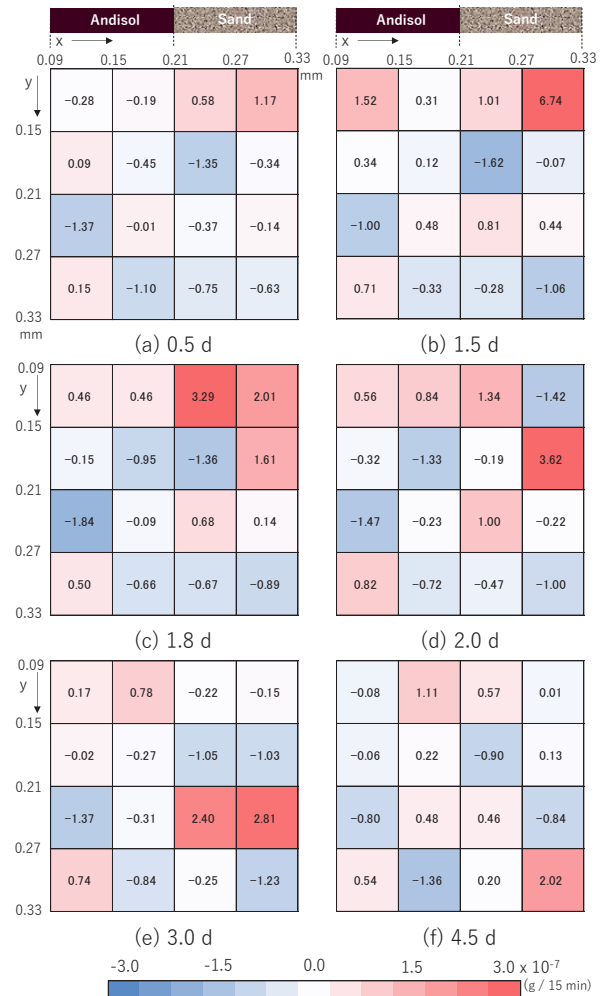


図 3 各領域からの蒸発量の推移。0.5 日後(a)、1.5 日後(b)、1.8 日後(c)、2 日後(d)、3 日後(e)、4.5 日後(f)の分布をヒートマップで示した。x 軸はカラム左端からの距離、y 軸は上端からの距離を表す。

隙径の大きな豊浦砂から支配的に蒸発現象が起きる様子が確認できた。推定精度の検証が必要だが、今後様々な土壌条件、地表面条件下での測定により、二次元的な地中蒸発現象の理解、モデルの開発等に貢献できると考えられる。

【引用】 Deol et al., 2012, Water Resour. Res. 48:W11503; Heitman et al., 2008, Water Resour. Res. 44:W00D05

【謝辞】 本研究は JSPS 科研費 JP17H03885 の助成を受けた。