

ライシメータによる土中水移動の研究 (I)

——減水過程のシミュレーション——

芝野博文*・西尾邦彦*・川辺 洋*・諸戸清一**

The Study of the Hydrological Processes in the Soil by Lysimeter (I)

—The Simulation of Recession Process—

Hirofumi SHIBANO, Kunihiko NISHIO, Hiroshi KAWABE, and Kiyokazu MOROTO

緒 言

山腹斜面での水循環はその微地的条件の複雑さゆえに、分析には限界が存在する。いずれは微地形的条件を加味したモデルと、対象地に関する詳細な物理的情報を基礎に、この限界は克服されていくと思われる。

この研究は、ライシメータという斜面内に区画された平行六面体を対象に、その内部と境界で生起する水と熱の移動を数値的に再現することを通じて、蒸発・流出現象と土体の物理的特性・微気象的条件との関係を考察することを最終的な目的としている。その手始めとして現象としては単純な、飽和・均一温度分布状態からの無降雨期間中の減水過程のシミュレーションを行なう。

ただし、今回は解析手法を開発する意味で、数値シミュレーションを主として行ない、野外実験で得られた数値は補助的に使用した。

蒸発量の推定は従来、微気象的な手法か、あるいは量水試験の長期観測をもとに、降雨から流量を差し引くという方法によって行なわれてきた。ライシメータの区画された領域内では、その内部の貯留状況を観測することが可能であり、降雨と流出と貯留の変化の収支関係から蒸発量を推定することが理論的には可能である。しかし貯留の高精度の観測には未だに課題が多く、土体内の含水量の変化をシミュレートすることによって観測値を補足する必要がある。このように蒸発に関しては水循環のモデルを通して収支を考慮すれば、その時間的変化を高精度に推定する道が開けているといえよう。

この報告では飽和状態から出発して、2.5日間の減水に伴う土体内の温度と圧力の変化、蒸発をシミュレートし、モデルの性質に言及した。今後は土体内の水ポテンシャルや温度の観測結果と照合し、モデルのパラメータを妥当なものに定めていく必要がある。さらに浸透の過程を導入すれば、いろいろな地被状態における、降雨に対する土体内の水や温度分布の反応、蒸発散や浸出の変化などを詳細に分析していくことが可能になるとと思われる。

資料の収集に際しては、東京大学愛知演習林技官 渡部 賢氏、技能補佐員 小島 宏氏に多

* 東京大学農学部林学科
Department of Forestry, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

** 東京大学農学部附属愛知演習林
University Forest in Aichi, Faculty of Agriculture, University of Tokyo.

大の御援助を戴いた。ここに記して深甚の謝意を表す。また、資料の整理には大学院生 李憲浩、執印康裕、学生原 勝、三上幸三の諸氏の労をわずらわせた。あわせてここに謝意を表す次第である。

I. 水分流動と熱の伝達に関する基礎方程式

1. 土体内における水分流動と熱の伝達

土体内におけるマトリックポテンシャルすなわち水圧 ψ [cm] と温度 T [°K] の空間分布と時間変化を決定していく方法を以下に提示する。

まず座標を次のように定める。原点を図 1-1 の C 点にとる。CD を Z 軸として下向きを正、x 軸をこれと直交する方向にとり、谷方向を正とする。また、上方境界（地表面）での水分と熱の動きに関しても土体内に入る方向（下向き）を正する。飽和と不飽和の如何を問わず、土体内の水分流動と熱の伝達は拡散係数を導入することによって、水分のフラックス q_θ [cm·min⁻¹] と熱のフラックス q_h [cal·cm⁻²·min⁻¹] は水分傾度 $\nabla\theta$ [cm⁻¹]、温度傾度 ∇T [°K·cm⁻¹] の一次結合として次のように表現される (PHILIP and DE VRIES, 1957)。

$$q_\theta = -D_\theta \nabla\theta - D_T \nabla T + K j \quad (1-1)$$

$$q_h = -\lambda \nabla T - L \cdot D_\theta \cdot \text{vap} \nabla\theta \quad (1-2)$$

ただし、 j は鉛直下向きの単位ベクトルとする。

ここで、 K : 透水係数 [cm·min⁻¹]、 λ : 熱伝導率 [cal·cm⁻¹·min⁻¹·°K⁻¹]、 L : 水の蒸発潜熱 [587 cal·g⁻¹] である。

D_θ は水と水蒸気に関する水分の拡散係数 $D_{\theta, \text{liq}}$; $D_{\theta, \text{vap}}$ [cm²·min⁻¹] の和であり

$$D_\theta = D_{\theta, \text{liq}} + D_{\theta, \text{vap}} \quad (1-3)$$

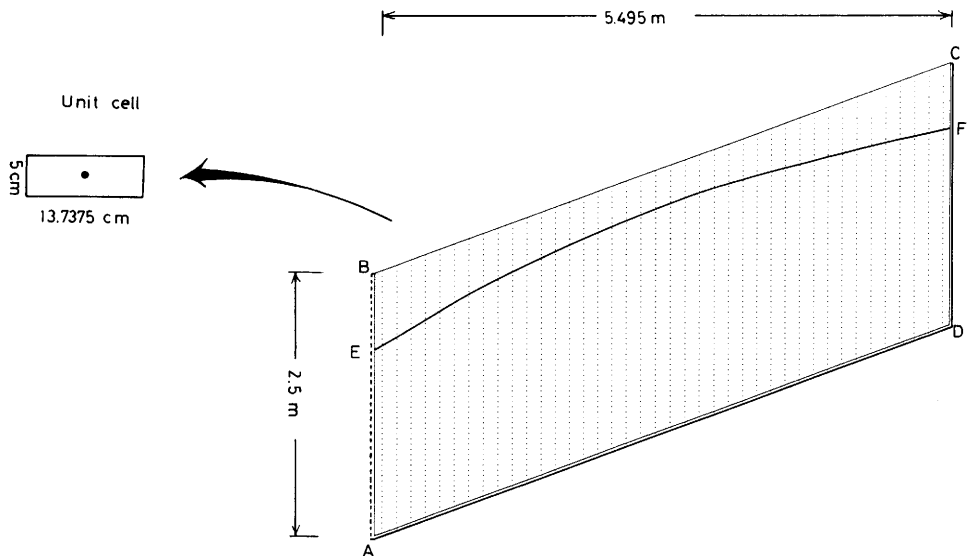


図 1-1 ライシメータ縦断面と差分格子点

注) AB: 浸出面, BC: 地表, CD, DA: コンクリート壁, EF: 飽和領域と不飽和領域の界面.

Fig. 1-1. Computational grids in the lysimeter profile.

と分解できる。

D_T [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$] も同様に熱に関する拡散係数であるが、その内の水に関する拡散係数 D_T, liq は無視し得るので、

$$D_T = D_T, \text{liq} + D_T, \text{vap} \approx D_T, \text{vap} \quad (1-4)$$

これらの拡散係数は含水率 θ と温度 T の関数であり、以下の式によって決定される。ただし、 g は重力の加速度である。

$$D_{\theta, \text{liq}} = K(\partial\psi/\partial\theta) \quad (1-5)$$

$$D_{\theta, \text{vap}} = D_{\text{atm}} f(\theta) \rho_0 g h (\partial\psi/\partial\theta) / RT \quad (1-6)$$

$$D_T, \text{vap} = D_{\text{atm}} f(\theta) h (d\rho_0/dT) \quad (1-7)$$

D_{atm} は大気中の水蒸気の拡散係数であり、温度により次のように計算される (KIMBALL et al., 1976)。

$$D_{\text{atm}}(T) = D_0 (T/273.16)^{1.75} \quad (1-8)$$

ただし、 $D_0 = 13.74 \text{ cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ とする。

$f(\theta)$ は間隙率に関する関数で、次式で表わされる。

$$f(\theta) = \varepsilon - \theta \quad (1-9)$$

ただし、 ε は土壌の間隙率である。

水蒸気の飽和密度 ρ_0 [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] は温度に依存し次式で表わされる (KIMBALL, et al., 1976)。

$$\rho_0(T) \approx \exp(R_0 - R_1/T) \quad (1-10)$$

ただし、 $R_0 = 6.0035$, $R_1 = 4975.9^\circ\text{K}$ とする。

土中の水蒸気の相対湿度 h は EDLEFSEN と ANDERSON (1943) による土壌中の水蒸気圧と湿度の関係式から次式により求める。

$$h \approx \exp(\phi g / RT) \quad (1-11)$$

これらを (1-1), (1-2) に代入すると、水分と熱量のフラックスは次のようにマトリックポテンシャルと温度の関数へと変形される。

$$\mathbf{q}_\theta = -K \nabla \psi - D_{\theta, \text{vap}}^* \nabla \psi - D_T \nabla T + K \mathbf{j} \quad (1-12)$$

$$\mathbf{q}_h = -\lambda \nabla T - LD_{\theta, \text{vap}}^* \nabla \psi \quad (1-13)$$

ただし、 $D_{\theta, \text{vap}}^* \equiv D_{\theta, \text{vap}} (\partial\theta/\partial\psi)$ である。

不飽和領域においては体積含水率 θ とマトリックポテンシャル ψ との間に、次のような実験式を仮定する (KLAPP and HORNBERGER, 1978)。

$$\psi = \phi_s (\theta/\theta_s)^{-b} \quad (0 < \theta \leq \theta_s) \quad (1-14)$$

ただし、 ϕ_s は飽和時の体積含水率 θ_s のもとでのマトリックポテンシャルである。また、透水係数 K も含水率に応じて変化する量であり、その関係を次式で表わす (KLAPP and HORNBERGER, 1978)。

$$K = K_s (\theta/\theta_s)^{2b+3} \quad (0 < \theta \leq \theta_s) \quad (1-15)$$

これに (1-14) 式を代入して、水圧と透水係数の関係を求めると次式が得られる。

$$K = \begin{cases} K (\phi/\phi_s)^{-(2b+3)/b} & (\phi \leq \phi_s) \\ K_s & (\phi_s < \phi) \end{cases} \quad (1-16)$$

ただし、 K_s [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$] は飽和状態での透水係数。

(1-12), (1-13) 式中に現われる 2 つの拡散係数も ψ と T の関数として次式で表わされる。

$$D_{\theta}^*, \text{vap} = \begin{cases} D_{\text{atm}}(T)\theta_s \{1 - (\phi/\phi_s)^{-1/b}\} \rho_0(T) \cdot gh(\phi, T)/RT & (\phi \leq \phi_s) \\ 0 & (\phi_s < \phi) \end{cases} \quad (1-17)$$

$$D_{T, \text{vap}} = \begin{cases} D_{\text{atm}}(T)\theta_s \{1 - (\phi/\phi_s)^{-1/b}\} \cdot (d\rho_0(T)/dT)h(\phi, T) & (\phi \leq \phi_s) \\ 0 & (\phi_s < \phi) \end{cases} \quad (1-18)$$

飽和領域 ($\phi_s < \phi$) では水と熱のフラックスは次のように簡潔に表わされる。

$$\mathbf{q}_{\theta} = -K_s \nabla \phi + K_s \mathbf{j} \quad (1-19)$$

$$\mathbf{q}_h = -\lambda \nabla T \quad (1-20)$$

質量とエネルギーに関する次の保存則から、不飽和領域における水分と温度の時間に関する変化が決定される。

$$\partial \theta / \partial t = -\nabla \cdot \mathbf{q}_{\theta} \quad (1-21)$$

$$\partial T / \partial t = -(1/C) \nabla \cdot \mathbf{q}_h \quad (1-22)$$

ここで C は熱容量 [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$]。ただし、飽和領域では含水率の時間的変化は零であるから

$$\nabla \cdot \mathbf{q}_{\theta} = 0$$

$$\therefore \nabla^2 \phi = 0 \quad (1-23)$$

2. 地表面における水分と熱の収支式

無降雨日を対象とする場合には、地表面で発生する現象は水に関しては蒸発、熱に関しては日射、地表面からの長波放射、潜熱と顕熱の流れを考慮する必要がある。

潜熱流束 E [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$] は大気の中立状態を仮定して次式で求める。

$$LE = -BU(e_s - e_a) \quad (1-24)$$

ここで、 e_a は地上 1.5 m の大気中の水蒸気圧、 e_s は地表面の水蒸気圧、 U [$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$] は風速、 B [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{mbar}^{-1}$] はバルク拡散係数である。同様に顕熱流束 H [$\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$] は次式で求める。

$$H = -\gamma BU(T_s - T_a) \quad (1-25)$$

ここで γ は乾湿計定数 [$0.61808 \text{ mbar} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$]、 T_s [$^\circ\text{K}$] は地表面温度、 T_a [$^\circ\text{K}$] は地上 1.5 m での気温である。

正味放射 R [$\text{ly} \cdot \text{min}^{-1}$] は短波放射 R_s [$\text{ly} \cdot \text{min}^{-1}$] と長波放射 R_l [$\text{ly} \cdot \text{min}^{-1}$] より成り、観測値を用いる。ただし、この報告では、水平面上に置かれるロビッチ日射計から求めた値をライシメータの設置された方位と傾斜に対する補正 (岡上, 1957) を行なって短波放射を求め、長波放射はプラント型のモデル (権根, 1980) から求めた。アルベドは 0.1 と仮定する。

表 1-1 シミュレーションに用いたモデルのパラメータ

Table 1-1. Model parameters used in simulation

| 記号 | 値 | 単位 |
|------------|-----------------------|---|
| ϕ_s | -10 | cm |
| θ_s | 0.38 | [less] |
| K_s | 5.0×10^{-4} | $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ |
| b | 4.0 | [less] |
| L | 587 | $\text{cal} \cdot \text{g}^{-1}$ |
| λ | 0.15 | $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ |
| C | 0.5 | $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$ |
| B | 0.15×10^{-5} | $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{mbar}^{-1}$ |

3. モデルのパラメータ

表 1-1 にモデルのパラメータを示した。いずれも標準的な数値であり、モデルによる推算値も標準的な状況を再現するものと予想さ

れる。なお、透水係数 $5 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ は微粒砂、有機質および無機質シルト、砂・シルト・粘土の混合物等に相当する。

4. 境界条件と初期条件

マトリックポテンシャル ϕ と温度 T に関する分布の時間的変化を求めるには、4つの連立方程式 (1-12), (1-13), (1-21), (1-22) を解かなければならない。その初期条件は、水に関しては土体が飽和した状態、温度に関しては気象観測を行なった4月末における地中温度の鉛直方向の分布が最も平均化される 20:00 の温度分布の平均値 15.3°C を与える。長雨の続いた後には、このような状態が現実には生起することは十分に期待し得る。

境界条件は5つ存在する。それぞれを上方境界 Bu (地表)、下方境界 Bd、尾根側境界 Br、谷側境界 Bv、飽和帯と不飽和帯の界面 Bs と呼ぶことにする。

1) 上方境界 Bu

熱や水の出入りが最も活発に生起する境界が地表面である。地表で吸収された熱を $S [\text{ly} \cdot \text{min}^{-1}]$ とすると、

$$S = R + LE + H \quad (1-26)$$

である。正味放射 R 、潜熱流束 E 、顕熱流束 H は全て地表温度 $T_s [^\circ\text{K}]$ の関数であり、この報告で採用した土壤大気境界層モデル (CAMILLO et al., 1983) では逆にこの収支式に従うように地表温度を決定していく。上方境界直下での熱の流束 S は

$$S = -\lambda(T_1 - T_s)/z_1 \quad (1-27)$$

と書ける。ここでは考慮する地表面の薄層の法線方向の厚さを $z_1 [\text{cm}]$ とし、その下部での地中温度を $T_1 [^\circ\text{K}]$ とする。一方、日中は地表面温度 T_s の上昇に伴い、蒸発によってまずこの薄層から水が奪われるために、水収支に従った貯留量の変化が表層のポテンシャルを決定するという演算を行なうのであるが、その量は水収支計算にとって無視できない。

顕熱流束と潜熱流束、正味放射という上方境界 Bu とかかわる熱収支式 (1-26) の成分は地表面の温度やマトリックポテンシャルだけでなく、地上の気象と深くかかわっている。今回の報告ではシミュレーションで用いた上方境界 Bu と関わる気象条件としては昭和62年4月29日20時から1日分の観測を周期的に連結して、2.5日を与えることにした。24時間分の変化を30分ごとに求めた結果を表1-2に示す。このうち長波放射は前述のように日本に於ける標準的な数値として推定したものを示した。

2) 谷側境界 Bv

ここには浸出面があり、これを通して土体内の水が排水される。浸出面では大気と接触するためにマトリックポテンシャルは零である。土体内には飽和領域と不飽和領域が形成されるが、谷側境界の内、飽和領域と接する部分はマトリックポテンシャルは零であるが不飽和領域と接する部分に関しては水の流れが発生しないという条件を与える。熱に関しては、斜面と平行な方向の流れがないという条件とする。

表 1-2 シミュレーションで地表面の境界条件に関する地上の気象
 Table 1-2. Microclimatological conditions on the lysimeter surface in simulation

| No. | 時刻 | TA (°C) | HA (%) | RK (ly/min) | RL (ly/min) | W (m/sec) |
|-----|-------|------------|-----------|----------------|----------------|--------------|
| 1 | 20:00 | 13.0 | 79.6 | 0.0 | -0.17 | 0.1 |
| 2 | | 11.9 | 85.1 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 3 | | 11.2 | 89.6 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 4 | | 11.0 | 92.7 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 5 | | 10.9 | 93.4 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 6 | | 10.4 | 93.9 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 7 | | 10.2 | 95.6 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 8 | | 10.0 | 95.7 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 9 | 0:00 | 9.7 | 94.8 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 10 | | 9.0 | 94.3 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 11 | | 9.0 | 95.2 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 12 | | 9.0 | 97.0 | 0.0 | -0.16 | 0.1 |
| 13 | | 8.9 | 97.1 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 14 | | 8.4 | 96.8 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 15 | | 8.2 | 96.9 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 16 | | 8.2 | 97.9 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 17 | 4:00 | 8.0 | 98.0 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 18 | | 8.0 | 97.6 | 0.0 | -0.15 | 0.1 |
| 19 | | 7.8 | 97.5 | 0.0 | -0.15 | 0.2 |
| 20 | | 8.4 | 97.8 | 0.30 | -0.15 | 0.3 |
| 21 | | 9.0 | 93.8 | 0.20 | -0.15 | 0.3 |
| 22 | | 9.6 | 94.2 | 0.46 | -0.16 | 0.4 |
| 23 | | 10.1 | 93.7 | 0.95 | -0.16 | 0.4 |
| 24 | | 11.4 | 89.5 | 1.06 | -0.16 | 0.4 |
| 25 | 8:00 | 13.2 | 77.7 | 1.07 | -0.16 | 0.5 |
| 26 | | 15.0 | 71.7 | 11.1 | -0.17 | 0.6 |
| 27 | | 16.9 | 66.8 | 1.10 | -0.17 | 0.7 |
| 28 | | 17.9 | 62.7 | 1.09 | -0.18 | 0.8 |
| 29 | | 19.2 | 57.7 | 1.04 | -0.18 | 0.9 |
| 30 | | 20.1 | 53.4 | 0.99 | -0.18 | 0.8 |
| 31 | | 21.2 | 49.1 | 0.93 | -0.19 | 0.9 |
| 32 | | 22.2 | 42.4 | 0.81 | -0.19 | 0.8 |
| 33 | 12:00 | 22.8 | 42.4 | 0.77 | -0.19 | 1.1 |
| 34 | | 23.8 | 40.6 | 0.66 | -0.19 | 1.0 |
| 35 | | 24.1 | 37.8 | 0.53 | -0.20 | 1.0 |
| 36 | | 24.1 | 34.1 | 0.42 | -0.20 | 1.0 |
| 37 | | 24.1 | 33.1 | 0.33 | -0.20 | 0.9 |
| 38 | | 24.6 | 33.1 | 0.39 | -0.20 | 0.6 |
| 39 | | 24.4 | 34.5 | 0.29 | -0.20 | 0.7 |
| 40 | | 23.8 | 32.5 | 0.32 | -0.20 | 0.8 |
| 41 | 16:00 | 23.0 | 33.4 | 0.15 | -0.20 | 0.9 |
| 42 | | 22.5 | 35.2 | 0.08 | -0.20 | 1.1 |
| 43 | | 21.2 | 37.9 | 0.04 | -0.20 | 1.1 |
| 44 | | 20.3 | 44.0 | 0.03 | -0.19 | 1.0 |
| 45 | | 19.6 | 52.2 | 0.01 | -0.19 | 0.6 |
| 46 | | 18.0 | 55.7 | 0.01 | -0.18 | 0.5 |
| 47 | | 16.2 | 64.4 | 0.0 | -0.18 | 0.2 |
| 48 | | 14.9 | 71.6 | 0.0 | -0.17 | 0.1 |
| 49 | 20:00 | 13.0 | 80.4 | 0.0 | -0.17 | 0.1 |

注) TA: 地上 1.5 m の気温 RL: 長波放射
 HA: 地上 1.5 m の相対湿度 W: 地上 1.5 m の風速
 RK: 短波放射

3) 下方境界 Bd と尾根側境界 Br

いずれもコンクリートで仕切られて水の流れは生じない。すなわち境界面に対して法線方向の流れはないとする。

温度に関しては下方境界では一律に 288.5°K を与え、尾根側境界では谷側境界と同様に斜面と平行な方向への熱の流れがないと仮定した。

4) 飽和帯と不飽和帯の界面 Bs

不飽和帯では含水量によってマトリックポテンシャルが規定されるが、飽和帯では不飽和帯との界面の形状に応じて内部のポテンシャル分布が定まる。この界面ではポテンシャルが ϕ_s に等しく、自由地下水面 ($\phi=0$) は減水過程の場合にはその下方に位置する。しかし飽和領域では例え負圧を持つ部分でも (1-23) 式に従うと仮定することができる。

II. 数値解析法

ライシメータを対象とした数値解法については既に報告したが(山口ら, 1987) 境界条件に若干の変更もあるので改めて以下に述べることとする。

土体を図 1-1 に示したような差分格子に分割する。マトリックポテンシャル ϕ (あるいは体積含水率 θ) と温度 T 、飽和領域では圧力 ϕ と温度 T の分布を図中の黒のドットで示した格子点上で、しかも時間的には離散的な時刻において決定していく。前述の基礎方程式中のフラックスは格子点間でさし渡される量であり、その収支が次の時刻における θ 、 T の増分となる。また、この関係は特定の規制を持つ境界条件を満足しなければならない。

空間上 ($x-z$ 平面) の位置と時間とによって各格子点での値 (ここで j は下方を正とする) が決定される。格子点 (i, j) における時刻 k 分後の ϕ 、 θ と T の値を次のように略記する。

$$\phi_{i,j,k} \equiv \phi(x, z, t) \quad (2-1-a)$$

$$\theta_{i,j,k} \equiv \theta(x, z, t) \quad (2-1-b)$$

$$T_{i,j,k} \equiv T(x, z, t) \quad (2-2)$$

ただし、 $1 \leq i \leq 40, i \leq j \leq 50+i, 0 \leq k \leq 3600$ である。

初期条件と境界条件から各格子点における ϕ 、 θ 、 T が定められ、同時にこれに依存するパラメータの $K, D_T, D_\theta^*, \text{vap}$ がただちに定まる。図 2-1 中の 1 に示したように内部格子点 (i, j) は 4 つの境界面, ab, bc, cd, da に囲まれている。この境界面上にフラックスを考える。そこで例えば bc 面, cd 面の 2 つを考えてみよう。座標 (i, j) と $(i+1, j)$ の境界面 bc 上で $K, D_T, D_\theta^*, \text{vap}$ は、両格子点の平均値を用いる。それを $K_{i+1/2,j}, D_{T,i+1/2,j}, D_{\theta^*,i+1/2,j}, \text{vap}_{i+1/2,j}$ とおく。またこの境界面上での圧力勾配と温度勾配は、

$$(\partial\phi/\partial x)_{i+1/2,j} = (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j}) / \Delta x \quad (2-3)$$

$$(\partial T/\partial x)_{i+1/2,j} = (T_{i+1,j} - T_{i,j}) / \Delta x \quad (2-4)$$

同様に座標 (i, j) と $(i, j+1)$ の境界 cd 上で $K_{i,j+1/2}, D_{T,i,j+1/2}, D_{\theta^*,i,j+1/2}, \text{vap}_{i,j+1/2}$ が導入され、ここで

$$(\partial\phi/\partial z)_{i,j+1/2} = (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j}) / \Delta z \quad (2-5)$$

$$(\partial T/\partial z)_{i,j+1/2} = (T_{i,j+1} - T_{i,j}) / \Delta z \quad (2-6)$$

となる。さらに界面 bc 上のフラックスは各々、

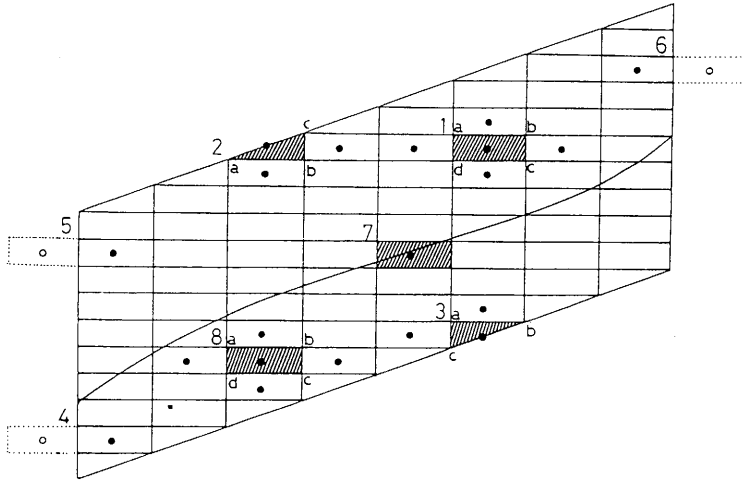


図2-1 土体内部のフラックスを考える場合の差分格子の例
 注) 図は説明のため格子点の数を縦横とも 1/5 に減らして示した。
 Fig. 2-1. Examples of computational grids in considering fluxes.

$$q_{\theta i+1/2,j} = -(K_{i+1/2,j} + D_{\theta}^*, \text{vap}_{i+1/2,j}) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1/2,j} - D_{T i+1/2,j} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+1/2,j} \quad (2-7)$$

$$q_{h i+1/2,j} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i+1/2,j} - LD_{\theta}^*, \text{vap}_{i+1/2,j} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{i+1/2,j} \quad (2-8)$$

そして界面 cd 上のフラックスは各々、

$$q_{\theta i,j+1/2} = -(K_{i,j+1/2} + D_{\theta}^*, \text{vap}_{i,j+1/2}) \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j+1/2} - D_{T i,j+1/2} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{i,j+1/2} - K_{i,j+1/2} \quad (2-9)$$

$$q_{h i,j+1/2} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)_{i,j+1/2} - LD_{\theta}^*, \text{vap}_{i,j+1/2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{i,j+1/2} \quad (2-10)$$

となる。残りの ab 面, da 面のフラックスを集計して、格子点 (i, j) での水分と熱の収支が求まる。

さて、上方境界 Bu においては、熱収支式を成立させるのに適当な T_s を定めなければならない。そのためには前節の収支式 (1-26) を変形して、

$$\xi \equiv D_z/D_x + D_x/D_z \quad (2-11a)$$

$$\eta \equiv T_{i,i+1} D_x/D_z + T_{i-1,i} D_z/D_x \quad (2-11b)$$

$$T_{s,i,i} = (S + \lambda \eta) / \lambda \xi \quad (2-12)$$

(ただし、 D_x は差分格子の x 軸方向の長さで D_z は z 軸方向の長さ)

を得る。(2-12) 式を成立させる逐次近似法により $T_{s,i,i}$ を求めることができる。

下方境界に関しては、図 2-1 の 3 に示した三角形の格子で収支を考える。温度に関しては

$$T_{i,i+50} = T_b \quad (2-13)$$

で、前述のとおり底面の温度を一定値 T_b とする。水分に関しては ab をとおるフラックスと ca

を通るフラックスの和が零である。これは、下方境界では常に飽和状態を仮定していることになるが、無理な仮定ではない。即ち、

$$q_{\theta i, j-1/2} + q_{\theta i-1/2, j} = 0 \quad (2-14)$$

(ただし、 $j=i+50$)

谷側境界 Bv では浸出面が存在する。浸出面では $\phi=0$ の条件が与えられる。図 2-1 の 4 で示すと、土体側の格子点の圧力を ϕ_L とするとダミーの格子点に $-\phi_L$ を与えれば、条件は満たされる。また、浸出面より上では水分の流れはないからダミーの格子点 (図 2-1 の 5) に土体内と同じ ϕ_L を与えればよい。熱に関しては斜面に平行な方向の流れがないと仮定する。

尾根側境界 Br (図 2-1 の 6) でも水平方向のフラックスがないので谷側境界の非浸出面と同様の取り扱いをする。熱に関しても同様である。

最後に、土体内部での水の挙動に伴って変動する境界である飽和・不飽和領域の界面 Bs について考える。ある時点での ϕ の分布はわかっているとすると ϕ と ϕ_s の大小関係によって土体内各点で不飽和領域とその下部の飽和領域とに分けることができる。飽和領域の最上部が境界 Bs であり (図 2-1 の 7)、ここでは次式が成り立つ。

$$\phi = \phi_s \quad (2-15)$$

飽和領域内部 (図 2-1 の 8) では格子点を囲む 4 つの界面でのフラックスの総和が零に等しい。これについては、 ϕ に関するラプラスの方程式を解いて (SOR 法, REMSON et al., 1971), 各点での ϕ を求めることができる。

これまでの過程で、各格子点での $\phi, T, \theta, D_s, D_T, K$ が求まり、各格子点間に流れるフラックス (熱量と水分) が求められた。時間に関する積分には前進差分法を用いた。ただし、時間間隔を 1 min とし、差分格子の大きさを十分に小さくしたため結果的には合理的なシミュレーションに成功した。水収支に関しては間げき率を超過して水が特定のセルの中に流入することは許されないが、この計算に関してはそのような状況が発生することはなかった。

III. 減水過程のシミュレーション

1. 土中水移動の様相の変化

図 3-1, a, b に浸出が始まって以降 360 分後と 1080 分後の土体内での水圧 (マトリックポテンシャル ϕ) の分布を示した。 $\phi = -10$ cm 線が飽和領域と不飽和領域の界面 Bs である。また、 $\phi = 0$ cm の線が自由地下水面であり、その左端は谷側境界 Bv (図の左端) につながり鉛直下方へと伸びている。シミュレーションの開始時として 20:00 を想定しているので 360 分後は翌日の 2:00 に相当する。夜間でもあるので、360 分間で蒸発はほとんど起こっていない。後述するようにシミュレーションによる蒸発もこの時刻では無視できるほど小さい。しかし、わずか 360 分間で不飽和領域が 50 cm 程度降下している。この下降の速さは透水係数に応じて規定されるものと思われる。また、谷側境界 Bv の付近で等ポテンシャル線が曲げられはするものの、残りの部分では斜面にほぼ平行な線となり、谷側境界の影響はほぼ無視し得るといえよう。

さらに 1080 分後には、不飽和領域はますます拡大し、当初より 120 cm 下降している。これは翌日の 14:00 に相当し、蒸発も激しく起こり、地表面近くには $\phi = -20$ cm の線が平行に形成されている。

図 3-2 a, b, c, d には時間の経過とともに土体内での水の動きが変化していく様子を示した。こ

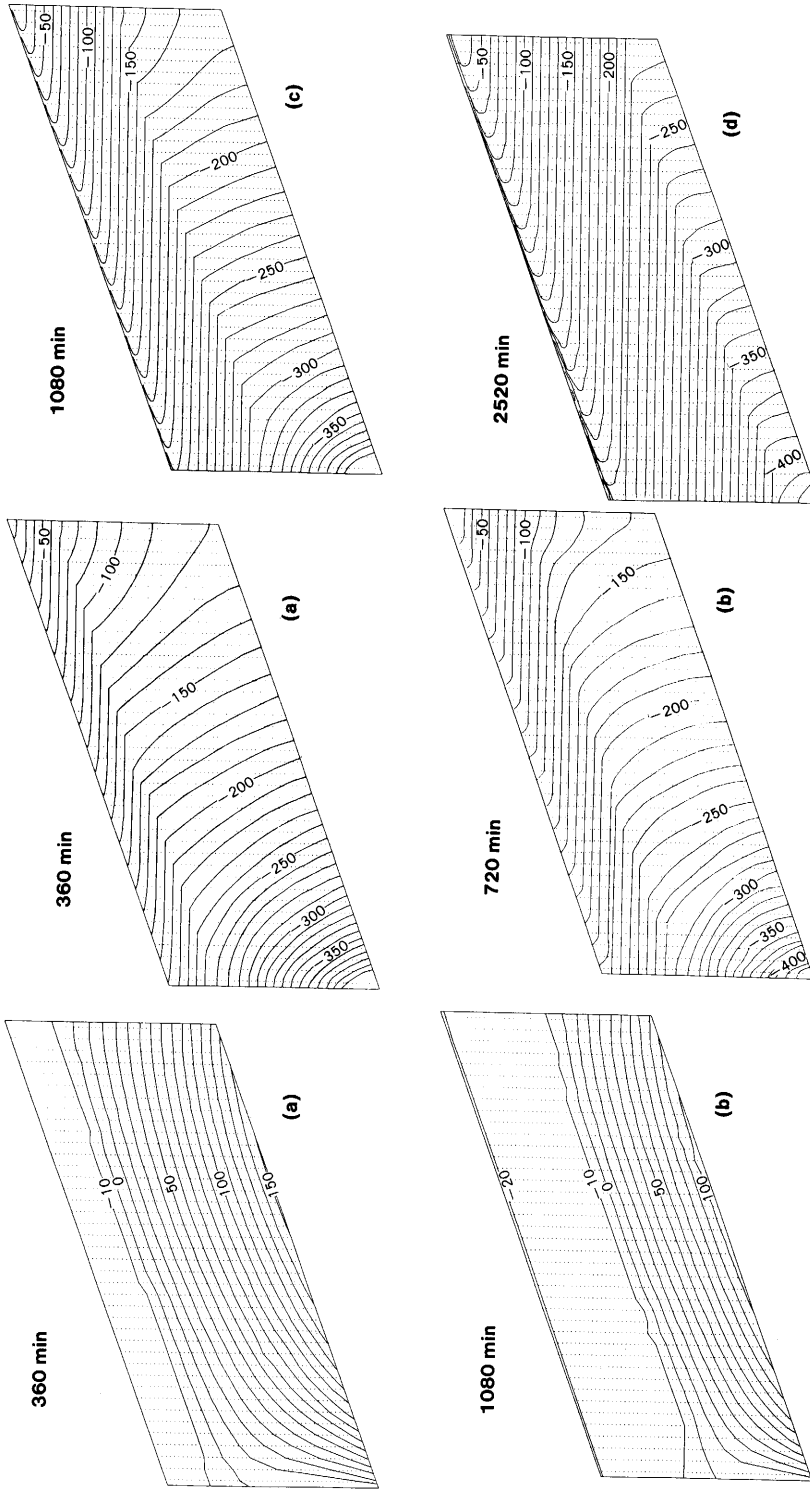


図 3-2 土体内の水利ポテンシャル分布
 注) 図中左上の数値は経過時間 (分)
 Fig. 3-2. Hydraulic potential distribution
 in the lysimeter profile

図 3-1 土体内の水圧分布
 注) 図中左上の数値は経過時間 (分)
 Fig. 3-1. Matrix potential distribution in
 the lysimeter profile.

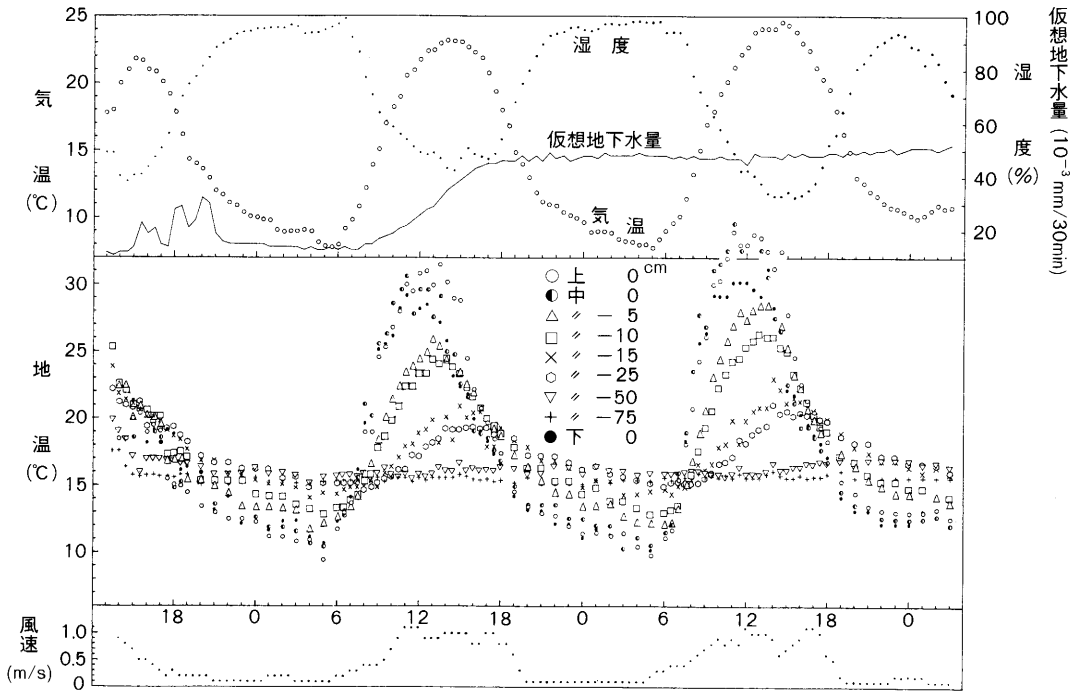


図 3-3 気象観測結果

Fig. 3-3. The meteorological data.

これはマトリックポテンシャル ϕ (水圧) に位置のエネルギーを加味した水理ポテンシャル ϕ [cm] によってよく表現される。尾根側境界 Br の最上端の格子点の標高を 0 cm とした場合の各格子点の座標を z [cm] とすると、水理ポテンシャル ϕ は

$$\phi = \phi + z \tag{3-1}$$

と表わされる。

水は水理ポテンシャルに直交するように流れるので、その分布を見れば水分の動きを推察することができる。飽和領域に対する部分は斜面方向下向きの流れ（側方浸透流）が顕著であり、逆に不飽和領域では鉛直方向の流れ（鉛直不飽和流）が卓越することが理解できる。

1080 分後 (c), 2520 分後 (b) の地表付近の状況を見ると、地表面の比較的浅いところ（約 10 cm 深）より上では地表面に向かう水の流れが見られ、その方向は斜面の法線方向であると推察される。また、この位置では重力排水にともなう下方への水の流れもあり、水の流れは複雑である。

2520 分後の水理ポテンシャル分布をみると表面ではそのポテンシャル線の密度が高く、強い乾燥化が進展していることがうなずける。その過程に深くかかわるのが温度勾配によって引き起される土中の水蒸気の流れである。2520 分後には図からも明らかのようにほとんどが不飽和領域で占められ、鉛直方向の流れが主流となる。浸出量と不飽和領域からの供給が平衡状態を保つようになると、不飽和領域の拡大は頭打ちの状況になり、減水も急に緩和されて来ると予想される。即ち減水曲線に屈曲点の存在することが予想される。

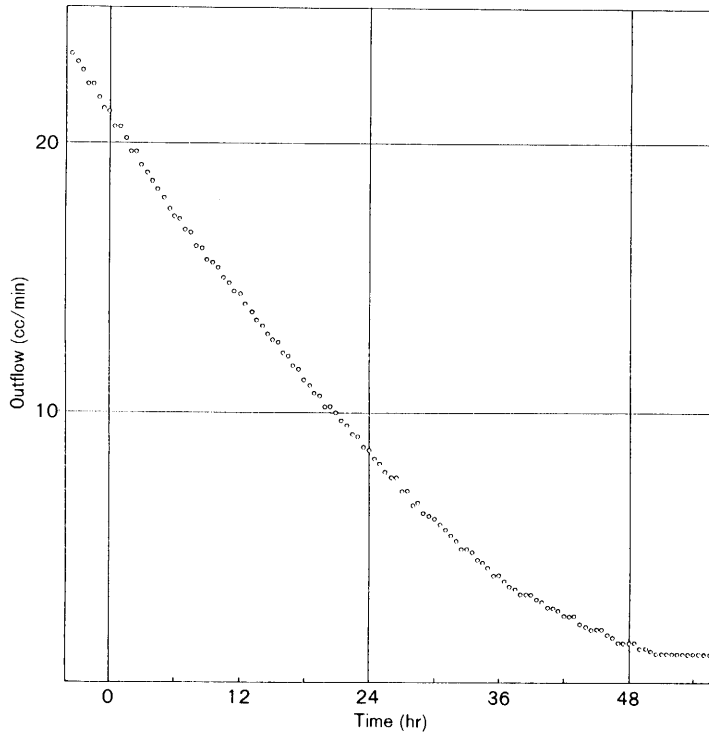


図3-4 モデルによって算出されたライシメータからの流出の遁減
 Fig. 3-4. Calculated recession curve of discharge from lysimeter.

2. 減水曲線

1987年4月末(4月28日13:00~5月1日3:00)の気象観測結果を図3-3にまとめて示した。期間中は快晴であり、気温、地中温度、風速に典型的な日周変化が見られる。観測当初の13:00から18:00までは土体に散水を行なった。図中の仮想地下水とはライシメータの浸出面(谷側境界Bv)を通過して捉えられた量であり、地表流を含まない。また、散水直後から土体の飽和が達成され、減水がそれに続いて発生するという予想のもとに観測を続けたが、地下水は観測期間中にむしろ増大する傾向を示して、モデルによる計算値との照合には至らなかった。

図中の地中温度は斜面の上端から188 cmの位置(地表面温度は図中に「中」で示した。)に深さ別に設定した。また地表面温度はこの位置の他に斜面上端から107 cm, 382 cmの2点でも測定した。(それぞれ図中の「上」、「下」)。斜面の下側の表面温度の方が日中の上昇が若干緩和されるらしい。

モデルによって算出されたライシメータからの浸出量の減水曲線を図3-4に示す。

前項での存在が予測された減水曲線の屈曲点を図中で確認することができる。すなわち、3日目の午前2時付近である。これ以降は減水曲線が極めて緩やかに遁減することになるであろう。また、この屈曲点までの減水の様子をみると、山地流域からの流出と異なり、減水が極めて速いようにみえる。日本の山地流域からの基底流量の標準値は1 mm/dayとみてよいが、それはこの減水曲線上では11.3 cc/minに相当する。ライシメータを対象とした場合、前項の考察結果か

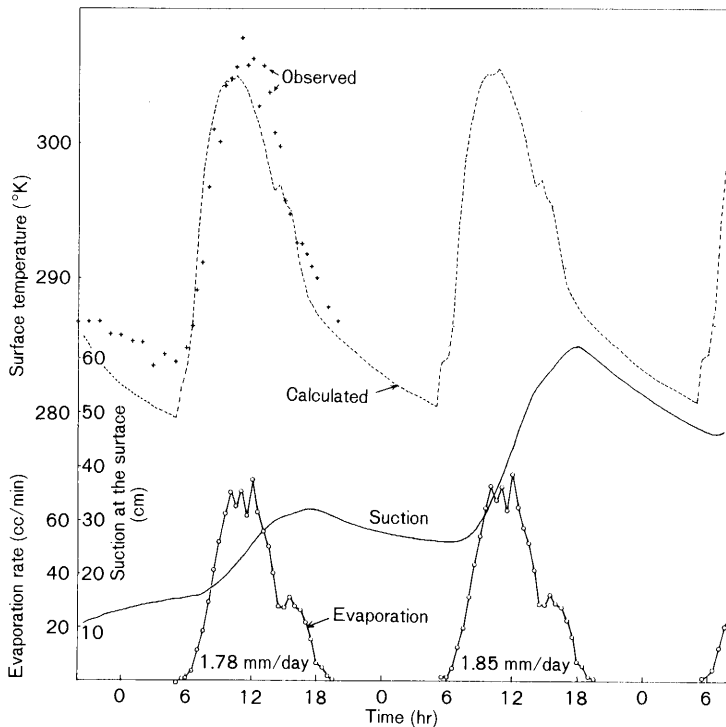


図3-5 地表面における蒸発, 温度, 圧力

Fig. 3-5. Calculated evaporation, temperature, and suction at the soil surface.

ら、基底流出に対応する状況が生ずるとすれば、土体が不飽和領域で大部分が占められる時（減水曲線の屈曲点以降に対応する状況）と予想される。

ところで、今回与えた透水係数 [5.0×10^{-4} cm/min] では基底流量は 1 cc/min 程度であり、標準的な基底流量をもたらすためには、透水係数を 10 倍以上に与えなければならないという判断に到達する。今後、実測値との照合により結論が得られるであろう。

減水の急激な部分は飽和領域の存在によって出現したのであるが、短期流出の解析にとって中間流出成分との対応とも関連して注目に値する部分であると考えられる。一方、長期流出を考察する場合は不飽和浸透流でかなりの部分が説明されると予想される。

3. 地表面で生起する現象

モデルによって算出された、地表面での蒸発レート・温度・マトリックポテンシャルの変化を図3-5に掲げた。蒸発は 1.8 mm/day 前後の値となり、晴天時における日本の平均的な消失量が 2~3 mm/day (金丸・高棹, 1975) であることを考えると、多少、少なめの値と思われる。蒸発パンで実測した結果は、6.5 mm/day であった。東京大学愛知演習林で試験流域からの日消失量を推定する場合、パンによる実測値の 0.6 倍を用いた例 (芝野, 1985) がある。それによって日蒸発量を補正すると、3.8 mm/day となる。

また、モデルの構造上、蒸発量と風速は比例関係にあるので無風時には蒸発は零、強風時には

表 3-1 シミュレーションによる地中温度変化
Table 3-1. Simulated soil temperature

| 時間 (min) | 表層 (°K) | 15 cm (°K) | 75 cm (°K) |
|-------------|------------|---------------|---------------|
| 60 | 284.82 | 287.94 | 288.49 |
| 120 | 283.68 | 287.15 | 288.47 |
| 180 | 282.79 | 286.44 | 288.45 |
| 240 | 282.04 | 285.79 | 288.43 |
| 300 | 281.37 | 285.19 | 288.41 |
| 360 | 280.89 | 284.65 | 288.37 |
| 420 | 280.44 | 284.17 | 288.32 |
| 480 | 279.99 | 283.73 | 288.27 |
| 540 | 279.55 | 283.31 | 288.20 |
| 600 | 283.22 | 283.43 | 288.12 |
| 660 | 293.44 | 284.48 | 288.04 |
| 720 | 300.84 | 287.65 | 287.95 |
| 780 | 304.03 | 290.89 | 287.86 |
| 840 | 304.62 | 293.34 | 287.77 |
| 900 | 304.48 | 294.98 | 287.70 |
| 960 | 302.50 | 295.90 | 287.67 |
| 1020 | 299.85 | 296.06 | 287.68 |
| 1080 | 296.54 | 295.55 | 287.73 |
| 1140 | 295.59 | 294.87 | 287.82 |
| 1200 | 292.61 | 294.18 | 287.93 |
| 1260 | 288.88 | 292.90 | 288.05 |
| 1320 | 287.35 | 291.46 | 288.18 |
| 1380 | 286.29 | 290.30 | 288.30 |
| 1440 | 285.49 | 289.36 | 288.41 |
| 1500 | 284.82 | 288.56 | 288.50 |
| 1560 | 284.11 | 287.87 | 288.56 |
| 1620 | 283.42 | 287.23 | 288.60 |
| 1680 | 282.78 | 286.62 | 288.62 |
| 1740 | 282.17 | 286.05 | 288.62 |
| 1800 | 281.74 | 285.52 | 288.60 |
| 1860 | 281.30 | 285.04 | 288.56 |
| 1920 | 280.85 | 284.60 | 288.51 |
| 1980 | 280.41 | 284.17 | 288.44 |
| 2040 | 284.02 | 284.27 | 288.37 |
| 2100 | 294.17 | 285.30 | 288.28 |
| 2160 | 301.48 | 288.43 | 288.19 |
| 2220 | 304.57 | 291.61 | 288.10 |
| 2280 | 305.06 | 294.01 | 288.01 |
| 2340 | 304.88 | 295.59 | 287.95 |
| 2400 | 302.86 | 296.46 | 287.91 |
| 2460 | 300.19 | 296.58 | 287.92 |
| 2520 | 296.89 | 296.03 | 287.97 |
| 2580 | 295.96 | 295.34 | 288.06 |
| 2640 | 292.97 | 294.63 | 288.16 |
| 2700 | 289.23 | 293.34 | 288.28 |
| 2760 | 287.71 | 291.88 | 288.40 |
| 2820 | 286.68 | 290.71 | 288.52 |
| 2880 | 285.88 | 289.77 | 288.62 |
| 2940 | 285.22 | 288.98 | 288.71 |
| 3000 | 284.50 | 288.28 | 288.76 |
| 3060 | 283.81 | 287.63 | 288.80 |
| 3120 | 283.17 | 287.02 | 288.81 |
| 3180 | 282.55 | 286.45 | 288.81 |
| 3240 | 282.12 | 285.90 | 288.79 |
| 3300 | 281.67 | 285.42 | 288.74 |
| 3360 | 281.22 | 284.97 | 288.69 |
| 3420 | 280.78 | 284.54 | 288.62 |
| 3480 | 284.36 | 284.63 | 288.55 |
| 3540 | 294.48 | 285.65 | 288.46 |
| 3600 | 301.76 | 288.76 | 288.37 |

過大な蒸発量が計算されることになり今後、潜熱流束の式には検討を加える必要がある。

次に地表面温度を見ると、計算値は実測値を比較的良好に再現している。敢て、その相違を指摘するならば、夜間の冷却が計算上大きくなったことであろうが、これは、長波放射を大きく見積ったためか、あるいは初期条件として与えた地中温度が3°K程低かったためと考えられる。温度は周期的な変化を繰り返しつつ次第に上昇している。

地表面のサクション（マトリックポテンシャル）の変化を見ると、地表面の乾燥化が急速に進んではいるが、夜間は湿潤化によって緩和されるといった機構がよく再現されている。夜間、地表面が湿潤化するの、モデルの機構上、地表面とその下層との間の温度傾度の逆転による土体深部からの水分の供給によるものである。

4. 地中温度の変化

シミュレーションによって深度 250 cm まで、5 cm の毎の温度分布が求められた。また、斜面方向での相違は、この減水過程では出現しなかった。

参考までに、表層、深さ 15 cm、75 cm の 3 点でのシミュレーションの結果を表 3-1 に示す。表層の変化は図 3-2 にも掲げたとおり 25°K 程度の振幅をもち、深度 15 cm では 12°K 程度、75 cm では、0.9°K 程度に減衰している。

実測値の温度変化の振幅は表面で 22°K、深度 15 cm で 9°K、深度 75 cm で 0.5°K 程度であり、全体的に計算値が大きい。しかしその減衰の状況を比較的良好に再現しているといえよう。

5. 減水過程の水収支

この項はあくまでシミュレーションについての論議であり、実際的な意味が薄い、今

表3-2 シミュレーションによるライシメータの水収支
Table 3-2. Simulated water budget in the lysimeter

| 時 間 (min) | 浸出量 (cc/min) | 蒸発量 (cc/min) | 浸出累加 (Liter) | 蒸発累加 (Litre) | 排水量累加 (Litre) | 排水量累加 (%) |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|
| 1 | 25.38 | 0.88 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.00 |
| 30 | 23.31 | 0.60 | 0.703 | 0.022 | 0.753 | 0.01 |
| 60 | 22.95 | 0.42 | 1.424 | 0.038 | 1.462 | 0.01 |
| 90 | 22.69 | 0.22 | 2.109 | 0.047 | 2.159 | 0.01 |
| 120 | 22.23 | 0.12 | 2.783 | 0.052 | 2.835 | 0.02 |
| 150 | 22.19 | 0.10 | 3.449 | 0.056 | 3.504 | 0.02 |
| 180 | 21.70 | 0.01 | 4.106 | 0.057 | 4.164 | 0.03 |
| 210 | 21.30 | 0.00 | 4.751 | 0.057 | 4.809 | 0.03 |
| 240 | 21.17 | 0.00 | 5.388 | 0.057 | 5.446 | 0.04 |
| 270 | 20.63 | 0.06 | 6.015 | 0.058 | 6.074 | 0.04 |
| 300 | 20.61 | 0.00 | 6.634 | 0.059 | 6.693 | 0.05 |
| 330 | 20.22 | 0.00 | 7.247 | 0.059 | 7.306 | 0.05 |
| 360 | 19.76 | 0.00 | 7.846 | 0.056 | 7.905 | 0.05 |
| 390 | 19.69 | 0.00 | 8.438 | 0.059 | 8.497 | 0.06 |
| 420 | 19.18 | 0.00 | 9.021 | 0.059 | 9.080 | 0.06 |
| 450 | 18.88 | 0.00 | 9.592 | 0.059 | 9.651 | 0.07 |
| 480 | 18.61 | 0.00 | 10.154 | 0.059 | 10.213 | 0.07 |
| 510 | 18.30 | 0.00 | 10.708 | 0.059 | 10.767 | 0.07 |
| 540 | 18.02 | 0.00 | 11.253 | 0.059 | 11.312 | 0.08 |
| 570 | 17.76 | 0.88 | 11.789 | 0.072 | 11.862 | 0.08 |
| 600 | 17.33 | 1.08 | 12.316 | 0.102 | 12.417 | 0.08 |
| 630 | 17.20 | 3.65 | 12.834 | 0.173 | 13.006 | 0.09 |
| 660 | 16.79 | 11.47 | 13.334 | 0.399 | 13.743 | 0.09 |
| 690 | 16.65 | 18.49 | 13.845 | 0.849 | 14.694 | 0.10 |
| 720 | 16.21 | 29.51 | 14.338 | 1.569 | 15.907 | 0.11 |
| 750 | 16.12 | 41.23 | 14.823 | 2.630 | 17.453 | 0.12 |
| 780 | 15.71 | 51.96 | 15.301 | 4.028 | 19.328 | 0.13 |
| 810 | 15.58 | 62.24 | 15.770 | 5.741 | 21.511 | 0.15 |
| 840 | 15.40 | 70.10 | 16.235 | 7.726 | 23.960 | 0.16 |
| 870 | 15.04 | 65.06 | 16.691 | 9.753 | 26.444 | 0.18 |
| 900 | 14.83 | 70.31 | 17.139 | 11.784 | 28.293 | 0.20 |
| 930 | 14.48 | 61.49 | 17.579 | 13.761 | 31.340 | 0.21 |
| 960 | 14.37 | 74.53 | 18.012 | 15.801 | 33.813 | 0.23 |
| 990 | 13.95 | 62.81 | 18.436 | 17.861 | 36.298 | 0.25 |
| 1020 | 13.74 | 55.55 | 18.852 | 19.637 | 38.488 | 0.26 |
| 1050 | 13.42 | 49.92 | 19.259 | 21.219 | 40.478 | 0.28 |
| 1080 | 13.15 | 39.91 | 19.658 | 22.566 | 42.224 | 0.29 |
| 1110 | 12.89 | 27.42 | 20.048 | 23.576 | 43.624 | 0.30 |
| 1140 | 12.72 | 27.18 | 20.432 | 24.365 | 44.828 | 0.31 |
| 1170 | 12.60 | 30.94 | 20.812 | 25.268 | 46.080 | 0.32 |
| 1200 | 12.19 | 27.84 | 21.184 | 26.150 | 47.334 | 0.32 |
| 1230 | 12.07 | 26.20 | 21.548 | 26.960 | 48.508 | 0.33 |
| 1260 | 11.67 | 21.48 | 21.904 | 27.676 | 49.580 | 0.34 |
| 1290 | 11.56 | 15.13 | 22.253 | 28.225 | 50.477 | 0.35 |
| 1320 | 11.24 | 6.20 | 22.595 | 28.545 | 51.139 | 0.35 |
| 1350 | 11.03 | 4.87 | 22.929 | 28.711 | 51.639 | 0.35 |
| 1380 | 10.74 | 1.60 | 23.255 | 28.808 | 52.093 | 0.36 |
| 1410 | 10.64 | 0.63 | 23.576 | 28.841 | 52.417 | 0.36 |
| 1440 | 10.20 | 0.54 | 23.888 | 28.859 | 52.748 | 0.36 |
| 1470 | 10.16 | 0.51 | 24.194 | 28.875 | 53.096 | 0.36 |
| 1500 | 9.99 | 0.42 | 24.496 | 28.889 | 53.385 | 0.37 |
| 1530 | 9.70 | 0.28 | 24.791 | 28.900 | 53.691 | 0.37 |
| 1560 | 9.52 | 0.20 | 25.080 | 28.907 | 53.987 | 0.37 |
| 1590 | 9.17 | 0.21 | 25.360 | 28.913 | 54.273 | 0.37 |
| 1620 | 9.13 | 0.13 | 25.635 | 28.918 | 54.553 | 0.37 |
| 1650 | 8.68 | 0.10 | 25.902 | 28.922 | 54.823 | 0.38 |
| 1680 | 8.63 | 0.12 | 26.161 | 28.925 | 55.086 | 0.38 |
| 1710 | 8.32 | 0.20 | 26.416 | 28.930 | 55.345 | 0.38 |
| 1740 | 8.13 | 0.13 | 26.662 | 28.935 | 55.597 | 0.38 |
| 1770 | 7.85 | 0.03 | 26.902 | 28.937 | 55.839 | 0.38 |
| 1800 | 7.62 | 0.01 | 27.134 | 28.938 | 56.072 | 0.38 |

表3-2 つ づ き
Table 3-2. Continued

| 時 間 (min) | 浸出量 (cc/min) | 蒸発量 (cc/min) | 浸出累加 (Liter) | 蒸発累加 (Litre) | 排水量累加 (Litre) | 排水量累加 (%) |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------|
| 1830 | 7.58 | 0.07 | 27.362 | 28.939 | 56.301 | 0.39 |
| 1860 | 7.10 | 0.06 | 27.582 | 28.941 | 56.523 | 0.39 |
| 1890 | 7.07 | 0.00 | 27.795 | 28.942 | 56.737 | 0.39 |
| 1920 | 6.60 | 0.00 | 28.000 | 28.942 | 56.942 | 0.39 |
| 1950 | 6.66 | 0.00 | 28.199 | 28.942 | 57.140 | 0.39 |
| 1980 | 6.28 | 0.00 | 28.393 | 28.942 | 57.335 | 0.39 |
| 2010 | 6.16 | 1.35 | 28.580 | 28.962 | 57.541 | 0.39 |
| 2040 | 6.10 | 1.56 | 28.763 | 29.006 | 57.769 | 0.40 |
| 2070 | 5.94 | 4.37 | 28.944 | 29.095 | 58.038 | 0.40 |
| 2100 | 5.73 | 12.50 | 29.119 | 29.348 | 58.467 | 0.40 |
| 2130 | 5.46 | 19.75 | 29.287 | 29.831 | 59.118 | 0.40 |
| 2160 | 5.25 | 31.17 | 29.448 | 30.595 | 60.043 | 0.41 |
| 2190 | 5.02 | 43.24 | 29.602 | 31.711 | 61.313 | 0.42 |
| 2220 | 5.00 | 54.22 | 29.752 | 33.173 | 62.925 | 0.43 |
| 2250 | 4.86 | 64.65 | 29.900 | 34.956 | 64.856 | 0.44 |
| 2280 | 4.62 | 72.56 | 30.042 | 37.014 | 67.056 | 0.46 |
| 2310 | 4.50 | 67.22 | 30.179 | 39.111 | 69.290 | 0.47 |
| 2340 | 4.32 | 72.50 | 30.311 | 41.207 | 71.518 | 0.49 |
| 2370 | 4.01 | 63.36 | 30.436 | 43.245 | 73.681 | 0.50 |
| 2400 | 4.01 | 76.68 | 30.556 | 45.345 | 75.902 | 0.52 |
| 2430 | 3.78 | 64.64 | 30.673 | 47.465 | 78.138 | 0.53 |
| 2460 | 3.64 | 57.19 | 30.785 | 49.293 | 80.077 | 0.55 |
| 2490 | 3.49 | 51.39 | 30.892 | 50.921 | 81.813 | 0.56 |
| 2520 | 3.31 | 41.22 | 30.993 | 52.310 | 83.304 | 0.57 |
| 2550 | 3.30 | 28.37 | 31.093 | 53.354 | 84.447 | 0.58 |
| 2580 | 3.27 | 28.19 | 31.191 | 54.203 | 85.394 | 0.58 |
| 2610 | 3.05 | 32.08 | 31.286 | 55.107 | 86.393 | 0.59 |
| 2640 | 2.99 | 28.91 | 31.377 | 56.022 | 87.398 | 0.60 |
| 2670 | 2.78 | 27.33 | 31.463 | 56.865 | 88.328 | 0.60 |
| 2700 | 2.77 | 22.51 | 31.546 | 57.613 | 89.159 | 0.61 |
| 2730 | 2.70 | 16.03 | 31.628 | 58.191 | 89.819 | 0.61 |
| 2760 | 2.51 | 6.75 | 31.707 | 58.533 | 90.239 | 0.62 |
| 2790 | 2.50 | 5.31 | 31.782 | 58.714 | 90.495 | 0.62 |
| 2820 | 2.50 | 1.78 | 31.857 | 58.820 | 90.677 | 0.62 |
| 2850 | 2.25 | 0.72 | 31.928 | 58.857 | 90.785 | 0.62 |
| 2880 | 2.15 | 0.65 | 31.994 | 58.878 | 90.872 | 0.62 |
| 2910 | 2.02 | 0.59 | 32.057 | 58.897 | 90.953 | 0.62 |
| 2940 | 2.02 | 0.50 | 32.117 | 58.913 | 91.030 | 0.62 |
| 2970 | 2.02 | 0.37 | 32.178 | 58.926 | 91.104 | 0.62 |
| 3000 | 1.78 | 0.29 | 32.235 | 58.936 | 91.171 | 0.62 |
| 3030 | 1.73 | 0.29 | 32.287 | 58.945 | 91.232 | 0.62 |
| 3060 | 1.55 | 7.21 | 32.337 | 58.952 | 91.289 | 0.62 |
| 3090 | 1.54 | 0.18 | 32.383 | 58.958 | 91.341 | 0.62 |
| 3120 | 1.54 | 0.20 | 32.429 | 58.964 | 91.393 | 0.63 |
| 3150 | 1.54 | 0.27 | 32.475 | 58.971 | 91.446 | 0.63 |
| 3180 | 1.28 | 0.20 | 32.518 | 58.978 | 91.495 | 0.63 |
| 3210 | 1.13 | 0.10 | 32.554 | 58.982 | 91.536 | 0.63 |
| 3240 | 1.22 | 0.08 | 32.589 | 58.985 | 91.574 | 0.63 |
| 3270 | 1.10 | 0.13 | 32.624 | 58.988 | 91.612 | 0.63 |
| 3300 | 1.10 | 0.13 | 32.657 | 58.992 | 91.649 | 0.63 |
| 3330 | 1.10 | 0.06 | 32.690 | 58.995 | 91.685 | 0.63 |
| 3360 | 1.10 | 0.05 | 32.723 | 58.996 | 91.719 | 0.63 |
| 3390 | 0.83 | 0.03 | 32.752 | 58.998 | 91.794 | 0.63 |
| 3420 | 1.10 | 0.05 | 32.781 | 58.999 | 91.780 | 0.63 |
| 3450 | 1.10 | 1.56 | 32.814 | 59.023 | 91.837 | 0.63 |
| 3480 | 1.10 | 1.77 | 32.847 | 59.037 | 91.920 | 0.63 |
| 3510 | 1.10 | 4.69 | 32.880 | 59.170 | 92.050 | 0.63 |
| 3540 | 1.10 | 12.95 | 32.913 | 59.434 | 92.347 | 0.63 |
| 3570 | 1.10 | 20.29 | 32.946 | 59.933 | 92.879 | 0.64 |
| 3600 | 1.10 | 31.88 | 32.979 | 60.716 | 93.694 | 0.64 |

後の研究を推進するにあたっての参考とするために水収支の一例を考えてみる。

モデルに与えたパラメータは、いずれも物理的な観点から標準的な値である。ただし浸出に関して決定的な支配力をもつ透水係数が事例に応じて大きく変化することに注意しなければならない。

表 3-2 に、完全な飽和状態から、浸出と蒸発により排水されていくときの収支を 30 分毎に提示した。誤差は 24 時間で 1 cc 程度であり考慮する必要はない。

さて、初期貯留量 M [m^3] は土体の容積を V [m^3] とすると、 $5.495 m \times 2.5 m \times 2.8 m$ であるから、

$$M = V \cdot \varepsilon = 14.6167 m^3 \quad (3-2)$$

である。

初めの 24 時間で、浸出により 24 litre、蒸発により 29 litre が排水されているが、これは M に対する比率でいうとわずかに 0.36% である。この排水量は、土壌含水量の低下と等量であり、流出・蒸発・土壌含水量の変化のうち 2 つを求めれば他の 1 つを特定できる。これは、このようなモデルによって初めて可能になったといえる。

結 び

ある一定期間を対象として、ライシメータによって測定し得る項目のうち、降雨と流出量は正確に把握できる。それに準ずる項目として挙げられるのは、かなり精度は下がるであろうが土体の貯留量の変化（土壌含水量の変化）であり、最後に、蒸発散はこれらの収支関係から求める以外には、現在の段階では正確な測定は困難であると思われる。したがって、測定の重点は土壌含水量の変化を求めることにかかっているが、ここに述べたようなモデルを通して、空間的・時間的な土壌含水量の分布状況を補い、その測定精度の向上に資することが可能になると思われる。さらに蒸発散量の推定にたいしては、ライシメータ内部での水収支式に取り込むことにより、微気象的推定手法とあわせて精度を向上させることが可能になると考えられる。

摘 要

愛知演習林に設置されたライシメータを対象に、土中水移動に関する数値モデルを適用した結果を報告する。モデルは温度傾度と水分傾度の一次結合によって水と熱の流れを表現する構造を持つ。また、地表面では先ず熱収支を考慮して地表面温度を決定し、地表面と地上 1.5 m の微気象条件に従い、この地表面における温度と水分の状態を境界条件として土体内の水の温度の分布が決定され、これに応じて浸出量が決定される。同地区における 4 月末の気象条件を入力として、土体の飽和状態から出発して 60 時間の圧力分布、温度分布、浸出量、蒸発量が求められた。得られた結果は現象を良く説明していると判断される。今回は実験値が必ずしも十分でなく、モデルのパラメータにはいずれも標準的な数値を用いたが、今後、実験あるいは実測値との照合を行なって最適な値を求めれば、蒸発量の時間的な変化を高い精度で求め得ると考えられる。

キーワード：ライシメータ、蒸発、熱収支

引用文献

CAMILLO, P. J., R. J. GURNEY, and T. J. SCHMUGGE: A soil and atmospheric boundary layer model for

- evapotranspiration and soil moisture studies. *Water Resour. Res.*, **19** (2): 371-380, 1983.
- EDLEFSEN, N. E. and A. B. C. ANDERSON: Thermodynamics of soil moisture. *Hilgardia*, **15**: 31-298, 1943.
- 金丸昭治・高棹琢馬: 水文学 (朝倉土木工学講座 4), 223p., 朝倉書店, 東京, 1975.
- 樫根 勇: 水文学 (自然地理学講座 3), 272p., 大明堂, 東京, 1980.
- KIMBALL, B. A., R. D. JACKSON, F. S. NAKAYAMA, S. B. IDSO, and R. J. REGINATO: Soil heat flux determination: Temperature gradient method with computed thermal conductivities. *J. Soil Sci. Soc. Am.*, **40**: 25-28, 1976.
- 岡上正夫: 斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法. *日林誌*, **39**(11): 435-437, 1957.
- PHILIP, J. R. and D. A. DE VRIES: Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Eos Trans. AGU*, **38**: 222-228, 1957.
- REMSON, I., G. M. HORNBERGER, and F. J. MOLZ: Numerical methods in subsurface hydrology. 389pp., Wiley-Interscience, New York, London, Sydney, Toronto, 1971.
- 芝野博文: タンクモデルによる流出特性の経年変動の追跡. 昭和 61 年度砂防学会研究発表会概要集, 322-325, 1986.
- 山口伊佐夫, 西尾邦彦, 川辺 洋, 芝野博文, 諸戸清一: ライシメータによる土中水分移動の観測と蒸発量推定法に関する研究. (東京大学) 演習林, **25**: 261-281, 1987.

(1987 年 10 月 30 日受理)

Summary

The numerical model on the hydrological processes in the soil was applied to the lysimeter in the Tokyo University Forest in Aichi, Inuyama Area. The model expressed flow of water and heat by the linear combination between temperature and moisture gradient. Further, the ground surface temperature was determined with due regard to the heat balance, and the evaporation was calculated according to the micrometeorological conditions among the ground surface and 1.5 m above ground. The distribution of water and temperature in the soil was determined by regarding the condition of temperature and moisture on the ground as the boundary conditions, and according to that, oozing was determined.

By inputting the meteorological conditions at the end of April in this area, the distribution of pressure and temperature, the oozing, and the evaporation were simulated during sixty hours after the soil had become saturated.

According to the results, it was judged for the model to be able to explain the phenomena very well. Here, standard values were used as the parameters of the model. If the optimum values of them are obtained by calibration between the measured and calculated values, it is expected that the change of evaporation with time can be obtained with high accuracy.

Keyword: lysimeter, evaporation, energy balance