

大気中の移流と地下水移動を考慮した 裸地蒸発のモデル化について

Modeling of Evaporation from Bare Land including advection and ground water flow

葛葉泰久*・池淵周一**・島田潤一***

By Yasuhisa KUZUHA, Shuichi IKEBUCHI and Junichi SHIMADA

For estimation of evaporation rate from large area including a lot of fields which have different characters, for example roughness and wetness, the way how to average evaporation in each fields must be known. In order to estimate the effect of difference of ground surface, the effects of advection and development of internal boundary layer must be investigated.

In this paper, a numerical simulation by a two-dimensional model has been undertaken. In this model, the advection in atmosphere and the ground water flow are included. And some results by this simulation model have been given.

keywords: evaporation, advection, ground water flow, internal boundary layer

1. はじめに

広域場からの蒸発散量を推定する場合、適切な時間的・空間的平均化作業が必要である。前者は時間（または日・月、等）蒸発散量を推定するための諸変数のサンプリングタイムを、後者はそのサンプリングスケールを決定するために慎重に決定されるべきものである。

蒸発散の生起場としては、裸地・植生地・水面等種々のものがあるが、例えば裸地に限ってみても含水量・粗度等により蒸発に対する性格が大きく異なる。広域場における空間的平均化は、それらの様々な蒸発散生起場を含み、advectionの影響を考慮する必要があるため、大変困難な問題となっている。

このような問題を取り扱うためには、一般的に数値シミュレーションが用いられる。Kimura¹⁾は、地中から大気への熱移動の空間的平均化に焦点をあてた研究を行った。そこでは、土地の種別ごとの諸変量の代表値を用いて、広域な地表面から大気への熱移動を簡単に表現する手法が提案されている。また、神田ら²⁾は、植生の影響を調べるために、2次元モデルによるシミュレーションを行った。その他、特に advection が蒸発に与える影響については、Brutsaert³⁾に詳細に記述されている。

本研究は、基礎的研究として、前述の空間的平均化を意識しつつ、大気の気流流下方向に土地条件が急に

* 正会員 工修 京都大学研修員 防災研究所

** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

(〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

*** 学生会員 京都大学大学院工学研究科

変化する場合の蒸発現象について、数値シミュレーションによる検討を行うことを目的としている。以下に、シミュレーションモデルの構築に関する概要と、含水量が急変する場合についての計算結果を示す。

2. モデルの概要

葛葉ら⁴⁾は、鉛直1次元で裸地からの蒸発をモデル化した。そこでは、地中は詳細な方程式系を用いているが、大気に関しては安定度を用いてはいるものの、地中と比較すると簡単なモデルであった。また、Kimura¹⁾は、気象学からのアプローチであるため、地表面で収支式を用い、地中での水分・熱移動については考慮されていない。我々は、水文学からのアプローチとして、双方に重点をおき、お互いの相互作用を適切に表現できるモデル構築をめざしている。

2・1 大気の方程式系 (参照: 文献1))

基本的には、Kimura¹⁾の中の、2次元詳細モデルを参考にした。ただし補足的に、安定度に関する普遍関数については Brutsaert³⁾の該当箇所を、渦拡散係数に関しては Mellorら⁵⁾を参考にした。

運動量・温位・比湿の基礎式は、次式(1)～(4)である。ただし、ここで、簡単のため風速場は慣性力のみによって形成されることとし、コリオリ力項・圧力項は無視した。主な変数・定数の単位、定数値等は、表1にまとめた。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1) \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_h \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (3) \quad \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_q \frac{\partial q}{\partial z} \right) \quad (4)$$

ここで、気流流下方向をx軸、鉛直上方をz軸にとった。また風速ベクトルを(u, w)、温位をθ、比湿をqとした。またK_m、K_h、K_qは渦拡散係数で、サフィックスm、h、qは、それぞれ運動量、熱、水蒸気に関するものであることを表す。

差分計算を行う際に、地表面直上と地表面の間では、熱・水蒸気フラックスは、一定値として計算することになる。そこで、その領域を constant flux layer (CFL)と仮定した。advection の蒸発現象に与える効果を表現するためには、内部境界層(ABL)を適切に表現する必要がある。そこで、CFLで仮定できる部分がABLの内側に入る様、できるだけCFLを短くとった。CFL内の運動量、熱、水蒸気のフラックス(それぞれ、τ、H、E)は、次式(5)～(7)のようになる。

$$\tau = -\rho \frac{\kappa^2 u_*^2}{\{\log(z/z_{0m}) - \Psi_m(\zeta)\}^2} \quad (5) \quad H = -\rho C_p (\theta - \theta_0) \frac{\kappa u_*}{\{\log(z/z_{0h}) - \Psi_h(\zeta)\}} \quad (6)$$

$$E = -\rho (q - q_0) \frac{\kappa u_*}{\{\log(z/z_{0e}) - \Psi_e(\zeta)\}} \quad (7)$$

ただし、摩擦速度 $u_* = (-\tau/\rho)^{1/2}$ である。ここで、ρ、C_p、κ、z₀、Ψはそれぞれ空気密度、定圧比熱、カルマン定数(=0.4)、粗度、安定度に係わる普遍関数である。サフィックス0は、地表面での値であることを表す。さらに、ζは安定度による変数で、Monin-Obukhov's length Lとの関係において、次式で表せる。

$$\zeta = z/L \quad (8) \quad L = -\frac{\rho C_p \theta u_*^3}{\kappa g H} \quad (9)$$

ここで、 g は重力加速度である。普遍関数、粗度について、水蒸気に関するものは近似的に熱に関するものと同じであると仮定できる。そこで、以下、両方をサフィックス h で表示する。

大気が不安定の場合 ($\zeta < 0$)、弱安定の場合 ($0 < \zeta \leq 1$)、強安定の場合 ($\zeta > 1$) について、それぞれ普遍関数 Ψ_m 、 Ψ_h は次式で表せる。

$$\left. \begin{aligned} \zeta < 0 \\ \Psi_m &= 2 \log \left[\frac{(1 + \chi)}{2} \right] + \log \left[\frac{(1 + \chi^2)}{2} \right] - 2 \arctan(\chi) + \frac{\pi}{2} \\ \Psi_h &= 2 \log \left[\frac{(1 + \chi^2)}{2} \right] \end{aligned} \right\} \quad \text{ここで、} \chi = (1 - 16 \zeta)^{1/4} \quad (10)$$

$$0 < \zeta \leq 1 \quad \left\{ \begin{array}{ll} \Psi_m = -5 (\zeta - \zeta_{om}) & \zeta > 1 \\ \Psi_h = -5 (\zeta - \zeta_{oh}) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{ll} \Psi_m = -5 (1 - \zeta_{om}) - 5 \log \zeta \\ \Psi_h = -5 (1 - \zeta_{oh}) - 5 \log \zeta \end{array} \right.$$

ただし、 $\zeta_{om} = z_{om}/L$ 、 $\zeta_{oh} = z_{oh}/L$ である。

つぎに、CFL 以外での渦拡散係数だが、これは Kimura と同様、Mellor らの Planetary Boundary Layers Model (Level 2) を用いた。

ここでも、 $K_q = K_h$ とした。渦拡散係数は、それぞれ次式で与えられる。

$$K_m = \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| S_m \quad (11)$$

$$K_h = \ell^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right| S_h \quad (12)$$

混合距離 ℓ は、本研究では高くても数百メートル以下の部分を対象とするので、簡単に $\ell = \kappa z$ で与えた。また S_m 、 S_h は、フラックス・リチャードソン数の関数である (詳細は、文献5) 参照)。

2・2 地中の方程式系

地中での水分の連続式は次式のようにになる。

$$\frac{\partial (\rho_L \cdot \theta_L)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_v \cdot (\theta_s - \theta_L))}{\partial t} = - \frac{\partial (J_{Lx} + J_{vx})}{\partial x} - \frac{\partial (J_{Lz} + J_{vz})}{\partial z} \quad (13)$$

ここで、 x 軸は大気と同方向にとったが、 z 軸は大気と逆に鉛直下方を正とした。 ρ_L 、 ρ_v は液水・水蒸気の密度、 θ_L は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 J_{Lx} 、 J_{Lz} 、 J_{vx} 、 J_{vz} はそれぞれ x 方向、 z 方向の液水フラックス、同じく水蒸気フラックスである。次式(14)~(17)の様に、液水の運動についてはダルシー則が、水蒸気の運動についてはフィック則が成立すると考える。ただし、式(7)による地表面からの水蒸気フラックスは、地表面における J_{vz} で考慮するものとする。

$$J_{Lx} = -\rho_L \cdot K \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (14)$$

$$J_{Lz} = -\rho_L \cdot K \left(-1 + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \quad (15)$$

$$J_{vx} = -En \cdot Dve \cdot h \cdot \Delta \frac{\partial T}{\partial x} - Dve \cdot e_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (16)$$

$$J_{vz} = -En \cdot Dve \cdot h \cdot \Delta \frac{\partial T}{\partial z} - Dve \cdot e_s \frac{\partial h}{\partial z} \quad (17)$$

ここで、 K は、不飽和領域に拡張された透水係数、 ϕ は水頭で表された圧力ポテンシャル、 T は温度、 Dve は水蒸気の有効拡散係数、 e_s は飽和水蒸気圧、 h は相対湿度、 Δ は温度に対する飽和水蒸気圧曲線の勾配、 En はenhancementである。enhancementは、温度勾配下の水蒸気移動量の実測値が、これに乗じない（理論的に求めた）値より、5～10倍程度大きいために用いる無次元の重み因子である。

同様に、地中での熱の連続式は次式のようになる。

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial J_{hx}}{\partial x} - \frac{\partial J_{hz}}{\partial z} \quad (18)$$

ここで、 C は体積比熱、 J_{hx} 、 J_{hz} はそれぞれ x 、 z 方向の熱フラックスである。熱のフラックスは、式(19)、(20)の様に、Fourier typeの熱伝導と水蒸気移動に伴う熱移動の和として表せるものとする。ただし、式(6)、(7)による地表面からの顕熱フラックス、潜熱フラックス、短波放射・長波放射による熱フラックスは、すべて地表面において J_{hz} に含めて考えるものとした。

$$J_{hx} = - (KT + \lambda \cdot En \cdot Dve \cdot h \cdot \Delta) \frac{\partial T}{\partial x} - \lambda \cdot Dve \cdot e_s \frac{\partial h}{\partial x} \quad (19)$$

$$J_{hz} = - (KT + \lambda \cdot En \cdot Dve \cdot h \cdot \Delta) \frac{\partial T}{\partial z} - \lambda \cdot Dve \cdot e_s \frac{\partial h}{\partial z} \quad (20)$$

ここで、 KT は土壌の熱伝導率、 λ は蒸発潜熱である。

以上が地中の水分・熱移動をモデル化するのに用いた主な式であるが、各式中で用いたパラメータ、水分特性曲線等の関数形等については、参考文献4)に詳細に記述されているので、参照されたい。ただし、次の2点については、文献4)のモデルと異なったものとなっている。すなわち、①水分移動式においてマトリックフラックスポテンシャルでなく、圧力ポテンシャル（マトリックポテンシャル）を用いた、②透水係数、圧力ポテンシャルを温度の関数としなかった、の2点である。

表1 主な変数・定数

$H : (W/m^2)$	$K_m, K_h : (m^2/s)$	$\lambda : (J/kg)$	$g : 9.8 (m/s^2)$	$Dve : (kg/m/s/mb)$
$u, w : (m/s)$	$z_{om}, z_{oh} : (m)$	$u_* : (m/s)$	$\rho L : 1000 (kg/m^3)$	$\Delta : (mb/K)$
$\rho : (kg/m^3)$	$\tau : (kg/m^2/s^2)$	$C : (kg/m^3/K)$	$\rho v : (kg/m^3)$	$e_s : (mb)$
$Cp : (m^2/s^2/K)$	$E : (kg/m^2/s)$	$K : (m/s)$		

3. 計算方法と設定条件

大気と地中を同時にモデル化することの困難さは、その時・空間スケールの違いに起因するところが大きい。すなわち拡散係数のオーダーの違いから現象の進行速度が大きく異なるために、例えば差分法を用いるとすれば、それぞれの最適時・空間メッシュ長が異なるために、両方の結合に工夫が必要となる。本研究では差分法を用いたが、大気と地中の空間メッシュを z 方向はもちろん x 方向に関しても異なるものを用いた（図1）。また時間メッシュに関しては、大気と地中の諸式を同時に解かず、適当な回数大気のみを計算を行い、その後地中の諸式を解く、という手順を繰り返した（図2）。時・空間両メッシュのいずれも、計算機の記憶容量と計算時間、計算精度を考慮にいれて決定したものである。大気と地中の相互作用は、それぞれの計算結果のうち、地表面での湿度・温度・水蒸気フラックス・顕熱フラックスを互いに受け渡すことによって表現されるが、そこでは図2に示したような方法をとった。また計算方法は、大気、地中とも、時間的にはルンゲ・クッタ法を、空間的には中心差分を用いた。解析領域は図1に、初期条件・境界条件等は図3

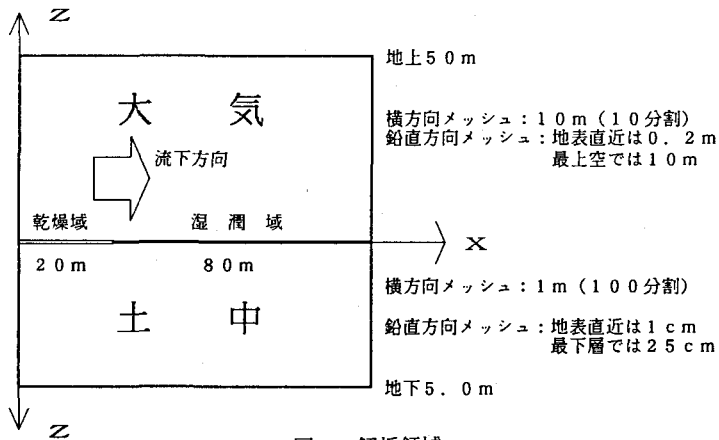


図1 解析領域

に示したとおりである。

4. 計算結果

シミュレーションは、 $t = 24(\text{hour})$ まで行った。得られた結果と考察を以下に述べる。

①風速の境界条件を横一様で中立な状態で成立する対数分布で与えたので、解析領域中の風速場はか

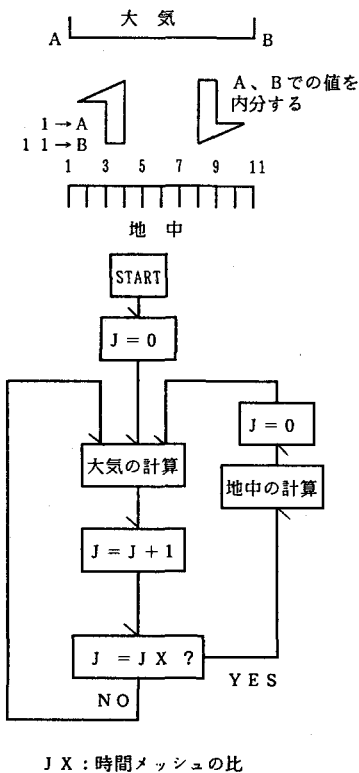


図2 計算手順

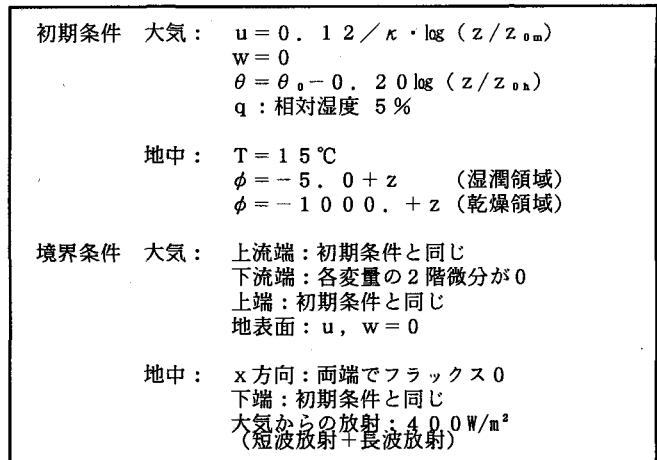


図3 初期条件・境界条件

なり安定したものを得られ、風速の鉛直方向の成分は十分小さかった。

②図4は蒸発強度、図5は地表面温度、図6は地表面体積含水率の時間変化を示した図である。図中に示した数字は、上流端からの距離である。いずれの図においても、0m地点と10m地点（乾燥領域）の間、また30m、70m、90m地点（湿潤領域）の間で、多少のタイムラグはあるものの、変化形状に大きな差異がないことがわかった。

- ③すなわち、含水量が急変する場合、少なくとも急変地点近傍でない限り、蒸発強度はフェッチ長が大きくなっても顕著な違いを示さないことがわかった。
- ④湿潤領域全体の蒸発強度の面積平均値と、領域中央部での蒸発強度の時間変化を比較した結果、2つの曲線はほぼ一致し、中央部での蒸発強度は領域代表値として十分な精度を持ったものであることがわかった。
- ⑤乾燥領域についても同様の結果が得られた。すなわち、解析領域全体の蒸発強度の平均値は、同一条件の領域の中央での値を代表値とし、領域面積に応じたそれらの加重平均で評価することが可能であることが

わかった(図7)。

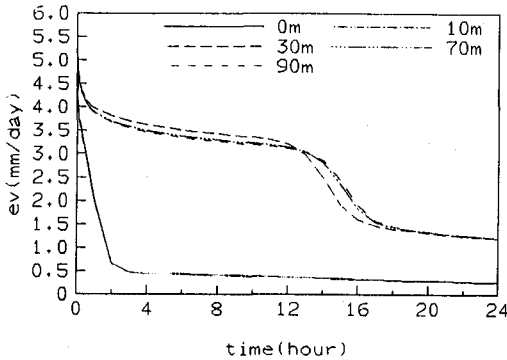


図4 蒸発強度

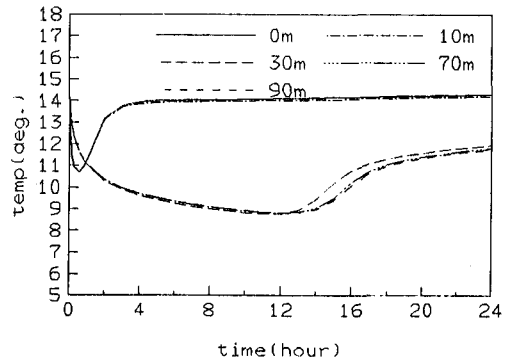


図5 地表面温度

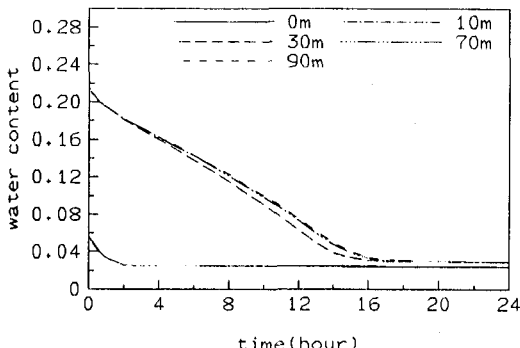


図6 地表面体積含水率

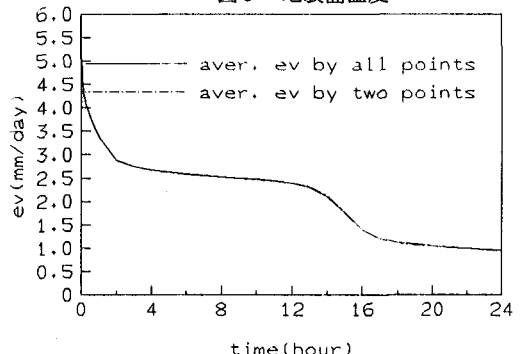


図7 蒸発強度の平均値

5. おわりに

大気-土地系を一貫して表現したシミュレーションモデルの構築を行い、地表面含水率が急変する場合についての計算結果を示した。本モデルでは、含水量だけでなく、表面粗度や種々の環境条件の変化が与える影響に関するシミュレーションを行うことが可能である。今回は、含水量の急変によるIBLの発達に焦点をあてた研究を行ったが、今後は様々な条件で、またさらに広域な場でのシミュレーションを行い、複合的に利用された広域場からの蒸発強度の平均化手法の時・空間的平均化手法の開発を目指すつもりである。

謝辞

本研究を進めるにあたり、御自身の研究成果を快く提供して下さった東北大学木村富士男助教授、数々の貴重な御意見をくださった京都大学山田道夫助教授に、深く感謝致します。

参考文献

- 1) Kimura, F.: Heat Flux on Mixtures of Different Land-use Surface: Test of a New Parameterization Scheme, Journal of the Meteorological Society of Japan, Vol. 67, No. 3, pp. 401-409, 1989.
- 2) 神田学・日野幹雄: 大気-植生-土壌系モデル(NEO SPAM)によるシミュレーション (2) 植生の気候緩和効果の数値実験, 水文・水資源学会誌, 第3巻3号, PP. 47-55, 1990.
- 3) Brutsaert, W.: Evaporation into the Atmosphere, D. Reidel Publishing Company, 1982.
- 4) 葛葉泰久・石原安雄・下島栄一: 数値シミュレーションによる裸地蒸発に関する研究, 京都大学防災研究所年報, 第31号 B-2, pp. 255-274, 1988.
- 5) Mellor, G.L. and T. Yamada: A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 31, pp. 1791-1806, 1974.