

数値シミュレーションによる裸地蒸発に関する研究 (2)

—蒸発に及ぼす風速変化の影響—

石原 安雄・葛葉 泰久・下島 栄一

A NUMERICAL SIMULATION ON THE EVAPORATION IN BARE LAND (2)

—EFFECT OF TIME-VARIATION OF WIND SPEED ON THE EVAPORATION—

By *Yasuo* ISHIHARA, *Yasuhisa* KUZUHA and *Eiichi* SHIMOJIMA

Synopsis

Wind speed in turbulent boundary layer developed above ground surface usually changes with time in various scales. It is well known that the wind speed plays a key role in the evaporation from bare land. In practice, it is important to clarify the effect of variation of wind speed with a relatively long periodicity on the evaporation, because we often need a mean evaporation rate as diurnally averaged.

In order to investigate the effect of the time variation of wind speed in a relatively long time-scale on the evaporation from bare land, a numerical simulation has been undertaken. In the simulation, assuming that a land condition is uniform and a meteorological condition is horizontally uniform, one-dimensional fundamental equations of water and heat in the evaporation field as an atmosphere-land continuum were set. Water table was in particular set to be located at a decided depth under the ground surface. Through the calculation it is stressed on that, when the wind speed changes periodically and randomly with time, the average evaporation rate can be given by evaporation rate at the averaged wind speed.

1. はじめに

地面からの蒸発は、降水によって地上にもたらされた(液)水が水蒸気の形で直接大気中に還元される現象である。従って、この蒸発は水文循環において重要な境界条件となり、また水資源の観点からは損失という意味で重要な現象となる。

裸地面上に風が吹くと、そこでの蒸発は促進されるが、この風速はいつも一定ではなく、時間的にもいろいろなスケールの大きさで変化する。特に、比較的長時間スケールの風速の変化がある場合の平均的な蒸発強度を推定しようとするとき、この風速変化を、実際上、どの様に取り扱えば簡単かという問題がある。また、ある程度の大きさの面積をもつ裸地からの蒸発を捉えようとする場合、どの程度の大きさの時間スケールや面積スケールで観測・解析すればよいかは、実際問題として極めて重要である¹⁾。なお、既存の各種の蒸発(散)量推定法とそれが対象としている面積・時間スケールの大きさとの関係は例えば Stewart²⁾によってまとめられているが、瞬間値と平均値との関係については必ずしも明確ではない。

裸地蒸発量の評価法を確立するためには、上記した種々の平均化の問題を解決しなければならないが、

本研究では、その第一歩として、時間平均の問題、即ち、裸地上に吹く風が比較的長時間のスケールの速度変化をするときのこの変化と蒸発との係わりを検討する。具体的には、風速の変化によって蒸発強度やそれに関わり地表面の水分量がどの様に変化するのか、変化する風速の時間平均と蒸発強度の時間平均とはどのような関係があるのかを、できるだけ簡単な蒸発場の条件（例えば、地表面下の一定の深さに地下水が存在する）を設定して、数値計算的に調べる。数値計算法は参考文献3）に従い、また計算結果の検討でこの研究結果が時折引用されるので、以下では表現の簡略化のために、参考文献3）を前報と記す。

2. 基礎式

本研究では、風速変化の蒸発に及ぼす影響の明確化と数値計算の簡略化のため、前述のように、気象条件は水平方向に一様で、また土地の土壌の分布は水平・鉛直方向に対して一様であるとする。蒸発はこのような条件下で生起しているものとするが、その解析は地中、大気中とも鉛直方向一次元でなされうとした。

数値計算で用いる基礎式は、①地中での水分の移動に関するもの、②地中での熱の移動に関するもの、③大気中での運動量、水分及び熱の移動に関するものの3つのグループに大別できる。以下ではこれらの諸式の概略を示すが、その詳細は前報を参照されたい。

2.1 地中での水分移動に関する諸式

地中の水分（液水と水蒸気）の移動に関する基礎式は連続式、液水と水蒸気の運動式及び状態方程式の4式によって構成される。その際、以下で与える風速の周期的変化条件に対して、本来土壌の履歴現象を考慮せねばならないが、計算の簡略化のため、本研究ではこの現象を除外することにする。

水分の連続式は次式で与えられる。

$$\partial \rho_L \theta_L / \partial t + \partial \rho_v (\theta_s - \theta_L) / \partial t = -\partial (J_L + J_v) / \partial z \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ρ_L 、 ρ_v は液水と水蒸気の質量密度、 θ_L は体積含水率、 θ_s は飽和時の θ_L 、 J_L 、 J_v は液水と水蒸気の質量フラックス、 t は時間、 z は地表面を原点に鉛直下向きを正とした位置座標である。式（1）では、source や sink の項はないものとしている。

液水の質量フラックスについてはダルシー則、水蒸気の質量フラックスについてはフィック則に従うとする。従って、液水と水蒸気の質量フラックスはそれぞれつぎのように表せる。

$$J_L = -\rho_L \cdot K \cdot (-1 + \partial \psi / \partial z) \dots\dots\dots (2)$$

$$J_v = -D_{ve} \cdot h \cdot \Delta \cdot \partial T / \partial z - D_{ve} \cdot e_s \cdot \partial h / \partial z \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 K は体積含水率と温度の関数として与えられる透水係数、 ψ は水頭で表される土壌水の圧力ポテンシャル（マトリック・ポテンシャル）、 T は絶対温度、 D_{ve} は水蒸気の有効拡散係数、 e_s は飽和蒸気圧で温度の関数、 h は相対湿度、 Δ は温度に対する飽和蒸気圧曲線の勾配である。

状態方程式は、土中での相対湿度、マトリック・ポテンシャル、温度の間の関係を与えるものであって、いわゆる平衡状態下で成立するケルビンの式である。

$$h = \rho_v / \rho_{vs} = \exp(g\psi / RT) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ρ_{vs} は飽和時の ρ_v で温度 T のみの関数、 g は重力加速度、 R は気体定数である。

さて、式（2）、式（4）中に含まれるマトリック・ポテンシャル ψ は、温度が影響する表面張力の関数と液水の含水率の関数の積で与えられ、また式（2）中の透水係数 K は、温度に依存する粘性の関数 K_2 と土壌構造で決まる関数 K_1 との積で与えられる。以上の諸式で、 ψ と T を従属変数にとることができるが、実際の計算では、計算の安定化のため従属変数 ψ の代わりに以下で定義する ϕ を用いる。

$$\phi = \int_{-\infty}^{\psi} K_1 d\psi \dots\dots\dots (5)$$

2.2 地中での熱移動に関する諸式

地中での熱に関する基礎式は、その連続式と移動の式で構成される。連続式は次式で与えられる。

$$C \cdot \partial T / \partial t = -\partial J_h / \partial z \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 J_h は熱のフラックス、 C は体積熱容量である。

ついで、熱のフラックスは Fourier type の熱伝導と水蒸気の移動 (J_v) に伴う熱移動の和として表せるので、そのフラックスは次式で与えられる。

$$J_h = -(K_T + \lambda \cdot E_n \cdot D_{ve} \cdot h \cdot \Delta) \partial T / \partial z - \lambda D_{ve} \cdot e_s \cdot \partial h / \partial z \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 K_T は土壌の熱伝導率、 λ は蒸発潜熱、 E_n は enhancement と呼ばれるもので θ_L の関数である。

2.3 大気中での諸式

地表面上の接地境界層での温度、湿度及び風速の分布は対数則に従うとする。この条件下でそこでの顕熱フラックス (J_h)、水蒸気質量フラックス (蒸発量 E_v に対応) 及び摩擦速度 (u_*) はそれぞれ次のように表すことができる。

$$J_h = -\rho_a \cdot C_p (T_o - T_a) / r_h \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$E_v = -\{\rho_a \cdot C_p / (\gamma \lambda)\} (e_o - e_a) / r_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$u_* = \kappa \cdot u_a / [\ln \{(z_a - d + z_m) / z_m\} + \phi_m] \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 C_p は定圧比熱、 d は zero plane displacement、 κ はカルマン定数、 z_m は運動量に関する粗度パラメータ、 γ は乾湿計定数、 e は水蒸気圧、添字 "a" は境界層のある高さ z_a での値を、添字 "o" は地表面 ($z = 0$) での値を表す。また、 ϕ_m は風速分布の大気安定度に関わる (中立状態からの) 補正項であり、 r_h 、 r_a はそれぞれ顕熱移動、水蒸気移動に対する抵抗であって、次式で与えられる。

$$r_h = [\ln \{(z_a - d + z_h) / z_h\} + \phi_h] / \kappa u_* \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$r_a = [\ln \{(z_a - d + z_v) / z_v\} + \phi_v] / \kappa u_* \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 z_h と z_v はそれぞれ顕熱と水蒸気の移動に関する粗度パラメータである。さらに、 ϕ_h 、 ϕ_v は、大気安定度に関わる ϕ_m と類似な補正項で、それぞれ温度分布、湿度分布に関わるものである。 $\phi_m \approx \phi_v$ と考えることができるので、以下では $\phi_m = \phi_v$ として、また z_m 、 z_h 、 z_v の粗度パラメータは地表面の形状によって決まるとみなして、 $0.2 z_m = z_h = z_v$ として計算を行った。

地表面での熱の連続条件式は次式で与えられる。

$$R_{sn} + R_{Ln} + J_h - \lambda E = G \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 R_{sn} は純短波放射、 R_{Ln} は純長波放射、 J_h は顕熱フラックス、 G は地中への熱フラックスである。長波放射はステファン・ボルツマンの法則で与えられるが、それは地表面の含水量と温度の関数である。

3. 計算条件と計算方法

3.1 土壌、地表面での諸定数

対象にする土壌は前報で採用した Bristow⁴⁾ によるもの (S-1) であって、その主な水理特性値等はつぎの通りである。

$$\theta_s = 0.4677, K_s = 1.18 \times 10^{-4} \text{ cm/s}, \phi_{es} = -22.4 \text{ cm}, b = 4, m = 11$$

ここに、 K_s は飽和透水係数、 ϕ_{es} は air-entry value であり、 b と m は Campbell⁵⁾ によって定式化されたマトリック・ポテンシャルと水分量の関係 ($\psi \propto -\theta_L^b$) 及び不飽和透水係数と含水量の関係 ($K \propto \theta_L^m$) で現れるパラメータである。なお、その他の諸定数や大気中の諸式に係わる地表面の諸定数は前報を参照されたい。

3.2 初期条件と境界条件

本研究では、前述の通り地下水面が常に地中のある一定の深さに存在する場合を考える。計算では、この地下水面を地中の下端に設定し、そこでの温度は常に一定の20℃とする。また、大気中の計算上端として、地表面上3m ($z=z_a$) をとり、そこでの温度と相対湿度をそれぞれ常に一定の20℃及び25%とする。

本研究では、地表面に入射する太陽輻射(短波放射)を計算条件として風の影響を明確にするために考えなかった。従って、式(13)での R_{sn} は零である。

初期条件としては、地中での水分分布は飽和状態から排水過程を経た土壌水分特性曲線に従い、またそこでの温度分布は一様で20℃とする。

計算は、Table 1に示した通り、地下水面の深さと風速の条件が異なる22通りについて行なった。ここに、Exp. Aとは地下水面が比較的浅く、地表面下0.3mの場合、またExp. Bとは地下水面が比較的深く、地表面下1.0mの場合である。以下では、地下水面の地表面からの深さを z_w と記す。また表中の風速の欄にconst., sine及びrandomとあるのは以下の通りである。const.条件とは計算上端での気流条件を常に一定の風速とした場合、sine条件とはその高さで正弦関数的に変化する風速とした場合を示す。その際、記号 $\langle U \rangle \pm b$, c は、風速を $\langle U \rangle + b \cdot \sin(2\pi t/c)$ で与えたことを表わす。すなわち、周期 c , 平均 $\langle U \rangle$, 振幅 b である。さらに、random条件とは、風速が10min(計算の時間メッシュ間隔)ごとに平均値が $\langle U \rangle$

で振幅が b の一様乱数に従ってステップ状に変化する場合であり、その条件は記号 $\langle U \rangle \pm b$ で表されている。

3.3 数値計算の手順

数値計算は、Fig. 1のように、大きく3つの段階に分けられる。すなわち、第1段階が地中での温度分布の決定であり、第2段階が地中での水分分布の決定、さらに第3段階が蒸発量の決定である。これらの3段階の操作によって、一つの時間ステップについての計算が完結し、次の時間ステップへと進む。以下の計算では、種々の検討の結果、時間のきざみ幅 Δt は10min.とし、また場所(深さ)のきざみ幅 Δz については、適宜、地表面近くでは1mmと細かく、下方に向かうに従って粗くとった。

Table 1. Calculation conditions.

	wind type	wind speed (m/sec)	water table: Z_w (m)
Exp. A-1	const.	7	0.3
Exp. A-2	const.	6	0.3
Exp. A-3	const.	5	0.3
Exp. A-4	const.	4	0.3
Exp. A-5	const.	3	0.3
Exp. A-6	sine	6±2, 12	0.3
Exp. A-7	sine	6±2, 6	0.3
Exp. A-8	sine	6±2, 3	0.3
Exp. A-9	sine	5±2, 12	0.3
Exp. A-10	random	6±2	0.3
Exp. A-11	random	5±2	0.3
Exp. B-1	const.	8	1.0
Exp. B-2	const.	7	1.0
Exp. B-3	const.	6	1.0
Exp. B-4	const.	5	1.0
Exp. B-5	sine	7±2, 12	1.0
Exp. B-6	sine	7±2, 3	1.0
Exp. B-7	sine	6±2, 12	1.0
Exp. B-8	sine	6±2, 6	1.0
Exp. B-9	sine	6±2, 3	1.0
Exp. B-10	sine	5±2, 12	1.0
Exp. B-11	sine	5±2, 3	1.0

4. 計算結果及びその検討

4.1 地表面の湿潤状態と乾燥状態

(1) 蒸発強度, 蒸発能, 地表面水分

$z_w = 1$ mで, 気流の速度が 8 m/s と一定の場合 (Exp. B-1), 蒸発強度 (E_v) は Fig. 2 に示した通りの経時変化をする。この図より, 蒸発強度はまず最初に急減した後, 次第にその減少率が小さくなる (E_v が一定値に向かう) が, ある時点より再度蒸発強度は急減し, そして再び次第に一定値に向かうことが分かる。この状況は前報で述べたが, このように二度にわたって蒸発強度が急減するのは, はじめ地表面がある程度湿潤で, 地下水面が比較的深く, また風速が比較的大きな場合である。一方, 風速が小さく, また地下水面が浅くなると, 二度目の急減の部分が現れずに一定値に向かうことが分かっている。著者らは二度目の急減より前を第1段階, それより後を第2段階と呼んだ。第1段階では, 蒸発の生起場は地表面であり, 第2段階では, 最初の内は地表面近傍であるが, 時間の経過とともに次第にその場所が降下し, ある深さに落ち着くことが認められている³⁾。

蒸発能 (potential evaporation) E_p は, 与えられた環境条件のもとで, 十分湿った地表面からの蒸発強度を表わすが, この値は式 (9) において $e_0 = e_s$ (飽和水蒸気圧) とするこ

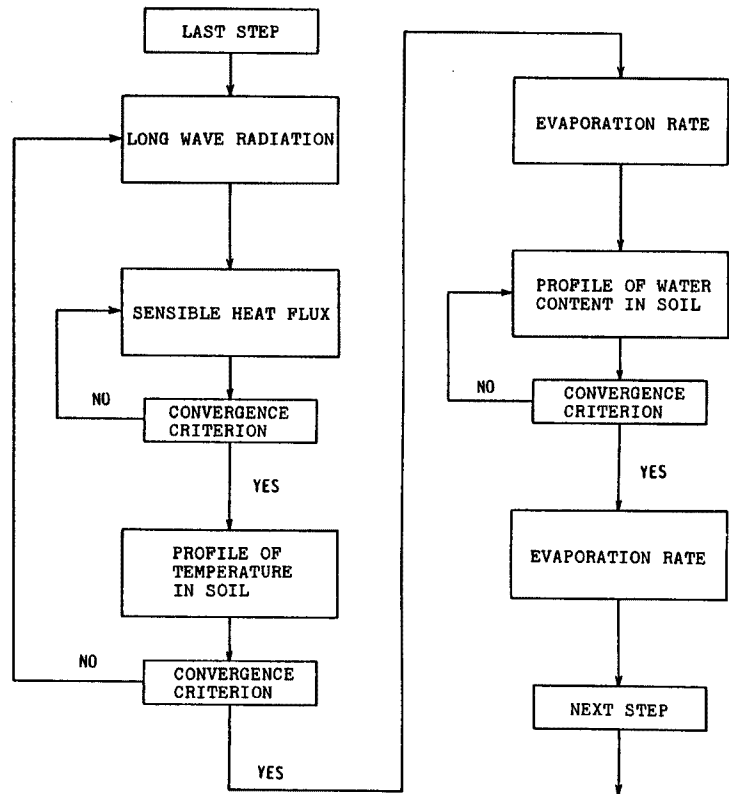


Fig. 1. Simplified flow model of the simulation.

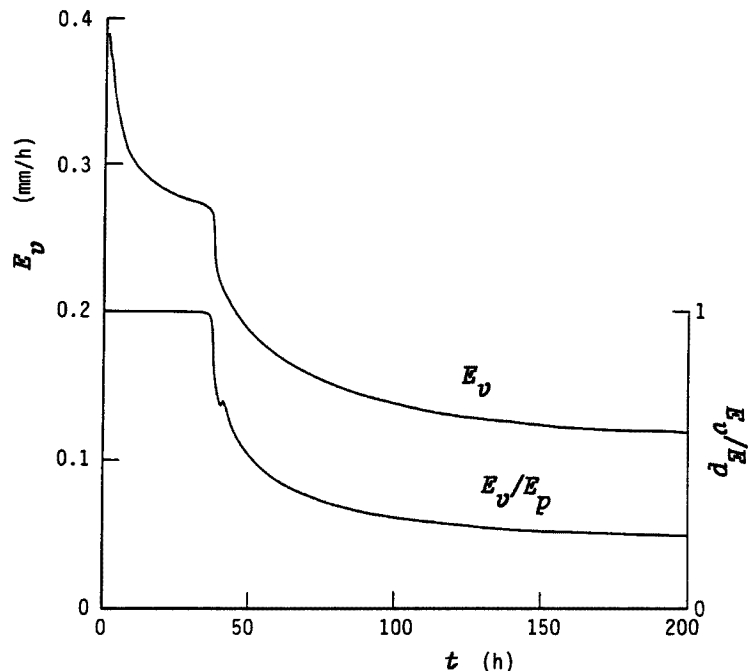


Fig. 2. Changes in E_v and E_v/E_p with time in the case of Exp. B-1.

とによって決まる。Fig. 2中の E_v 値をその時間に対する E_p 値で除した値をプロットすると同図の通りである。この図より、第1段階は $E_v = E_p$ の状態、第2段階は $E_v < E_p$ の状態であることが分かる。ところで、各段階の状況を地表面の含水率(θ_1)との関係で調べた結果、第1段階と第2段階の境界は $\theta_1 = 0.07 (= \theta_c)^3$ となり、 $E_v = E_p$ では $\theta_1 > \theta_c$ 、 $E_v < E_p$ では $\theta_1 < \theta_c$ となることが分かった。ここに、 θ_c は、式(4)のケルビンの関係式で、水分量(マトリック・ポテンシャル)が減少するにつれて、水蒸気の不飽和の程度が急に顕著になるときの水分量である。以下では、地表面の水分状態を前者を湿潤、後者を乾燥と称することにす。なお、風速が小さく、また地下水面が浅い場合については、定常状態に至るまで地表面は湿潤な状態が続くので、 $E_v/E_p = 1$ の関係が最後まで保持される。

(2) 蒸発強度(能)と水蒸気移動の抵抗係数

蒸発強度 E_v と蒸発能 E_p の関係を、風速と大気中の水蒸気移動の抵抗係数との関係を通して調べておく。蒸発強度は式(9)によって表わせ、また、同式に含まれる抵抗係数 r_a は式(12)で定義されている。

Fig. 3は、地表面での水蒸気が飽和の状態にあるとし、そこでの温度を5°C、10°C、15°Cの3通りに変化させて、この抵抗係数と地上3mでの平均風速 $\langle U \rangle$ との関係を調べたものである。この図より、地表面温度の値によって若干異なる

が、風速が大略4 m/sより小さくなると、 r_a 値は急に大きくなる事が分かる。この結果はつぎのことを示唆する。すなわち、風速が大きな場合については、水蒸気移動の抵抗が小さいので、地表面が最初に十分湿っているうちは大きな蒸発強度の値 E_v を保持することができ、その値は E_p と一致する。しかし、次第にそれに見合った水分供給が下方より地表面に向かってできなくなって、地面は乾燥の状態に移行する。そして、 E_v 値は E_p 値より小さくなり、絶対値も減少していく。一方、風速がある程度小さい場合には、水蒸気移動の抵抗が大きいために E_p 値は小さくなり、その結果下方から地表面への水分補給によって地表面は常に湿潤の状態が保持される。このような時には、蒸発強度は蒸発能と一致し、上記のように、蒸発は地表面で生じ続けるのである。

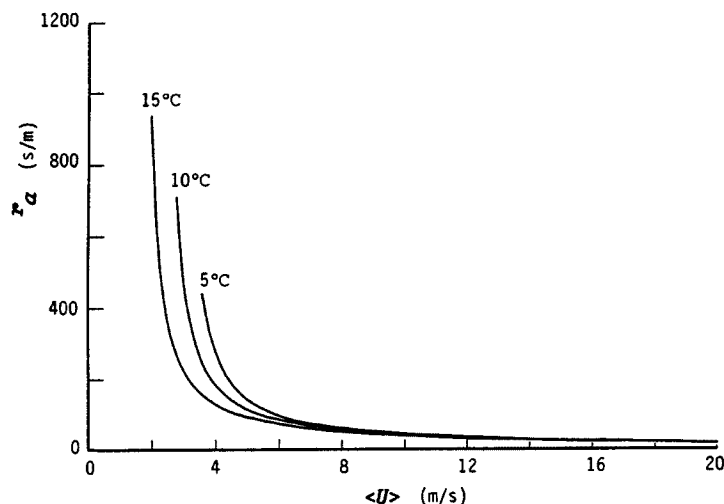


Fig. 3. Relation between r_a and $\langle U \rangle$.

が、風速が大略4 m/sより小さくなると、 r_a 値は急に大きくなる事が分かる。この結果はつぎのことを示唆する。すなわち、風速が大きな場合については、水蒸気移動の抵抗が小さいので、地表面が最初に十分湿っているうちは大きな蒸発強度の値 E_v を保持することができ、その値は E_p と一致する。しかし、次第にそれに見合った水分供給が下方より地表面に向かってできなくなって、地面は乾燥の状態に移行する。そして、 E_v 値は E_p 値より小さくなり、絶対値も減少していく。一方、風速がある程度小さい場合には、水蒸気移動の抵抗が大きいために E_p 値は小さくなり、その結果下方から地表面への水分補給によって地表面は常に湿潤の状態が保持される。このような時には、蒸発強度は蒸発能と一致し、上記のように、蒸発は地表面で生じ続けるのである。

4.2 地表面が湿潤な場合の蒸発

ここで示す計算例では、地表面の水分状態は $\theta_1 > \theta_c$ の条件をいつも満足している。

(1) 平均風速と平均蒸発強度

a) 地下水面が浅い場合 (Exp. A)

Fig. 4は、風速が12時間周期の正弦関数で変化する場合で、その平均風速が6 m/sの場合(Exp. A-6)及び5 m/sの場合(Exp. A-9)の定常段階での蒸発強度の周期的な時間変化(周期解)を示したものである。地下水面の深さは0.3 mである。ここでいう定常段階や周期解とは、蒸発強度の計算値が気流の変化周期と同じ変化を繰り返すようになった段階及びその解を意味し、以下でも同じ意味で用いる。風

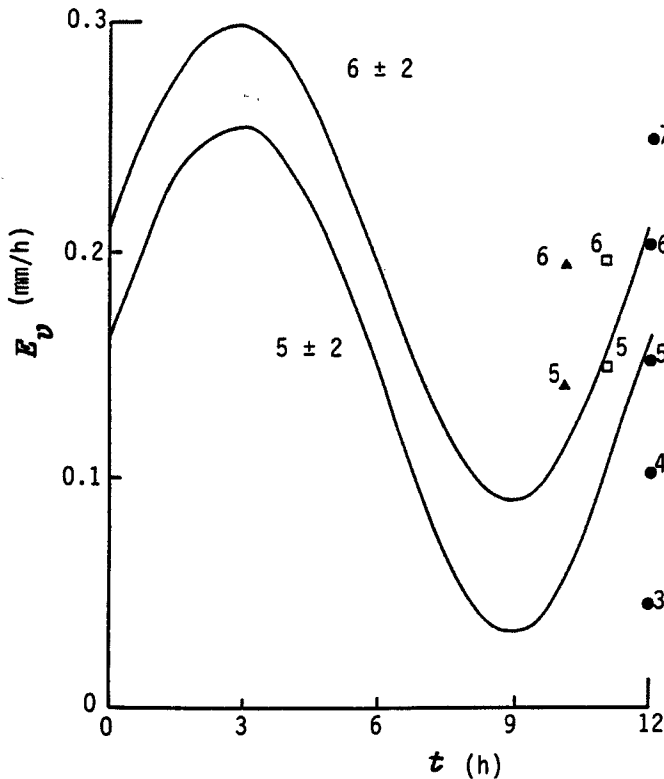


Fig. 4. Periodic solutions of E_v in the cases of Exps. A-6 and A-9, and values of $\langle E_v \rangle$ and $E_{v,s}$.

速は3時で最大, 9時で最小であるので, 図より, いずれの場合の計算でも, 風速が最大及び最小となる時点で, 蒸発強度もそれぞれ最大及び最小となり, いわゆる両者の位相はほぼ一致することが分かる。

この2つの蒸発強度の周期解を1周期間で平均すると, $\langle U \rangle = 6 \text{ m/s}$ の場合 $\langle E_v \rangle = 0.200 \text{ mm/h}$, $\langle U \rangle = 5 \text{ m/s}$ の場合 $\langle E_v \rangle = 0.150 \text{ mm/h}$ となることが分かった。ここに, $\langle E_v \rangle$ は蒸発強度のこのような時間平均値を意味する。Fig. 4中の□印はこのような値をプロットしたものである。また, 上記の周期的に変化する風速の値を参照して, 定常的に一定の風速を与えた場合の蒸発強度の定常時の値 ($E_{v,s}$) は, $\langle U \rangle = 7, 6, 5, 4, 3 \text{ m/s}$ について, それぞれ $E_{v,s} = 0.249, 0.202, 0.153, 0.101, 0.0465 \text{ mm/h}$ となる。この数値は Fig. 4に●印でプロットされており, その横の数字は風速の値を意味する。さらに, 一樣乱数

で風速を与えた Exp. A-10 ($\langle U \rangle = 6 \text{ m/s}$) 及び Exp. A-11 ($\langle U \rangle = 5 \text{ m/s}$) の場合, 十分時間が経過し, 解が安定したと考えられた段階の蒸発強度の平均値 $\langle E_v \rangle$ は, それぞれ 0.197 mm/h 及び 0.144 mm/h となった。ここに, 平均化は風速変化の時間単位 (10 min) の約 1000 倍の時間でなされており, 以下でも一樣乱数の場合の平均化はこれと同じである。これらの数値は▲印で Fig. 4にプロットされている。記号の側の数字は前と同様に平均風速の値を表わす。以上の諸計算の結果から以下のことが分かる。すなわち, 風速を正弦関数で与えた場合の E_v の最大値と最小値は, その風速の最大値と最小値を一定風速として与えた場合の $E_{v,s}$ 値にそれぞれほぼ一致する。また, 風速を正弦関数で与えた場合及び一樣乱数で与えた場合のそれぞれの $\langle E_v \rangle$ 値は, これらの風速の平均値を一定風速として与え続けた場合の $E_{v,s}$ 値とほぼ一致する。なお, 詳細には, 一定の風速, 正弦関数の風速, 乱数による風速の場合の順に, 蒸発強度はわずかであるが小さくなっている。

b) 地下水面が深い場合 (Exp. B)

地下水面が 1 m と Exp. A の場合 ($z_w = 0.3 \text{ m}$) に比し深い場合 (Exp. B-10) の Fig. 4 と同様な計算結果が Fig. 5 の実線で示されている。この場合, 風速は $5 \pm 2 \text{ m/s}$, 周期が 12 時間の正弦関数に従って変化するが, 風速は比較的小さい値であったため, 地下水面が深いという条件にも拘らず, $\theta_1 > \theta_c$ となっていて, 常時地表面は湿潤な状態となっていた (下記 (3), Fig. 5 中の θ_1 を参照)。この図より, 以下のことが分かる。蒸発強度の最大値は 3 時に現われ, この時間は最大風速の生起時間と一致する。しかし, 図ではよく分からないが, 蒸発強度の最小値は最小風速の生起時間 (9 時) より約 20 分遅れて現われていて, 地下水面が浅い場合と若干様相を異にする。しかし, 大略, 風速と蒸発強度の変化の位相は一致しているといえる。

図中の●印及び□印はそれぞれ Exp. B-4 における $E_{v,s}$ 値と, この風速での Exp. B-10 の $\langle E_v \rangle$ 値を

示すが、それぞれの値は 0.105 mm/h 及び 0.102 mm/h である。これより、地下水面が深い場合にも、 $\langle E_v \rangle$ と $E_{v,s}$ の値はほぼ一致すると言える。

(2) 風速変化の周期と蒸発強度

地下水面が 0.3 m で風速が周期 12 時間 (Fig. 4 の Exp. A-6) と 3 時間 (Exp. A-8) の正弦関数で変化する場合、定常段階での蒸発強度の時間変化 (周期解) は Fig. 6 のようになる。ここに、実線は前者及び破線は後者に対応する。計算条件は、 $z_w = 0.3 \text{ m}$ 、 $\langle U \rangle = 6 \text{ m/s}$ であり、また図では周期 12 時間のものを基準にとって、周期 3 時間に関する時間軸は 4 倍に拡大されている。図では、周期の短い場合の蒸発強度 (破線) はそれが最大値をとる近傍で周期が長いもの (実線) より若干大きくなるが、それが最小値をとる近傍では逆に周期の長いものより若干小さくなっている。しかし、およそ 2 つの計算例は互いに重なって、同じ変化をしている。なお、これらの 2 例の間の周期が 6 時間の場合の計算 (Exp. A-7) で、蒸発強度の変化を、時間軸を 2 倍して同様に Fig. 6 に描くと、予想されるように、これは実線と破線の間位置することが分かった。

一方、地下水面が深い場合 (Exp. B) についても、周期 12 時間の正弦関数に従う風速変化の場合の蒸発強度の時間変化図、即ち前出 Fig. 5 に、その周期が 3 時間と短い場合の蒸発強度の周期解が、時間軸を 4 倍に拡大して破線で示されている。図より、これらの 2 つの計算値は非常によく一致していることが分かる。

以上のことより、地下水面が深い、浅いに関係なく、地表面が湿潤な状態

で、風速変化の周期が比較的長い (1 時間のオーダー以上) 場合には、蒸発強度の風速変化に対する応答は非常によいと言え、蒸発強度は風速が大きくなる程大きくなる (本章 2 節 (1) 参照)。この結果は個々の風速変化の周期に対する $\langle E_v \rangle$ 値は十分な精度で互いに一致することを示唆するが、計算上でもこのことが

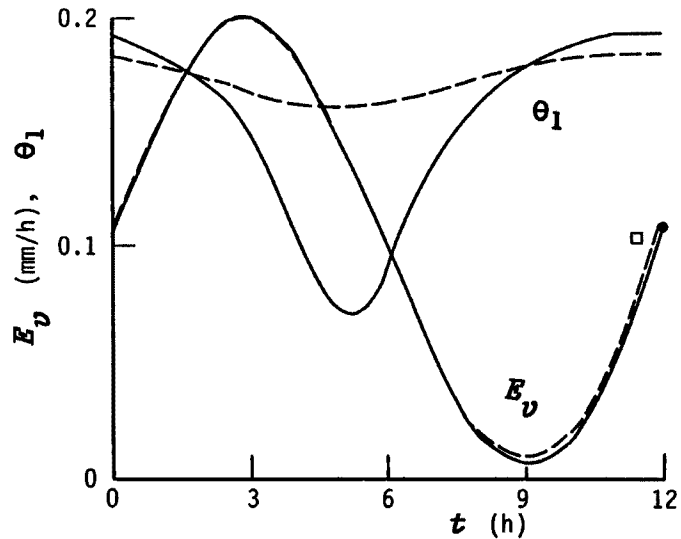


Fig. 5. Periodic solutions of E_v and θ_1 in the cases of f Exps. B-10 and B-11, and values of $\langle E_v \rangle$ and $E_{v,s}$.

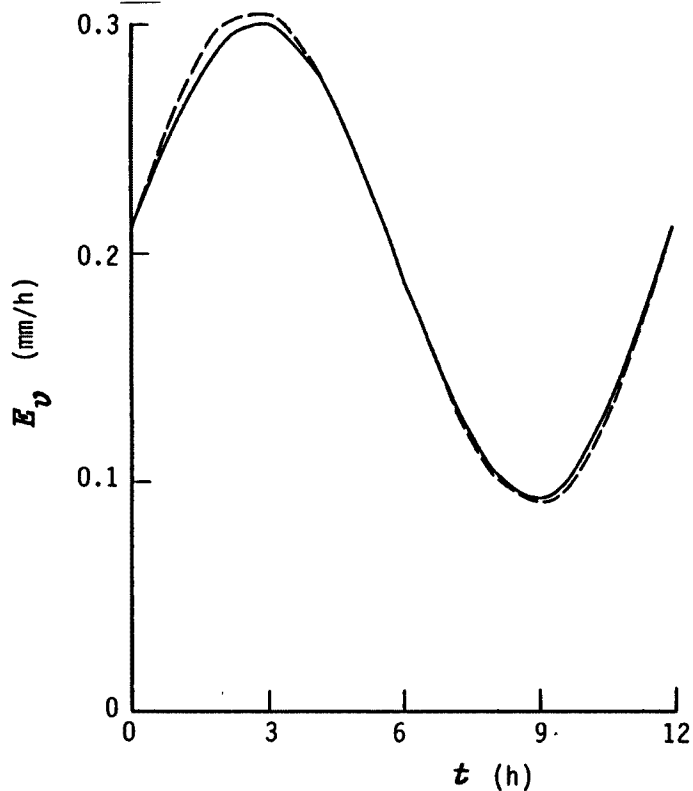


Fig. 6. Periodic solutions of E_v in the cases of Exps. A-6 and A-8.

確認された。

(3) 蒸発強度と地表面水分量

Fig. 5 には、蒸発強度の周期的変化とともに、地表面での水分量 θ_1 の時間変化が示されている。ここに、実線と破線は周期がそれぞれ 12 時間 (Exp. B-10) 及び 3 時間 (Exp. B-11) のものに対応する。この図より、以下のことが分かる。周期の大小に関係なく、水分量の経時変化の様相は類似である。しかし、周期が短い場合の方が長い場合に比し、水分量は一周期間を通して変化が小さく、平均値はかなり大きな値となっている。また、蒸発強度や風速の変化との比較において、地表面水分量が最大値、最小値をとる時間は、蒸発強度や風速がそのような値をとる時間と対応しておらず、またそれらが最大・最小となる時間と地表面水分量が最小・最大となる時間とは、Exp. B-10 についてはほぼ 2.5 時間、Exp. B-11 についてはほぼ 2.5/4 時間ずれている。このような事実から、地表面が湿潤の場合、蒸発強度の地表面水分量に対する依存度は、風速によるものに比し、強いものではないということが分かる。

なお、地下水面が浅い Exp. A-6~Exp. A-9 の場合、風速が変化するにも拘らず、地表面の水分量はほとんど変仕せず、 θ_1 値はほぼ 0.428、変化が 0.01 程度であって、比較的飽和 ($\theta_s = 0.4677$) に近い値となっていた。

4.3 地表面が湿潤-乾燥の状態を繰り返す場合

(1) 蒸発強度, 蒸発能, 地表面水分量

風速が 6 ± 2 m/s, その周期が 12 時間, 地下水面の深さが 1 m の場合 (Exp. B-7) について、定常段階での蒸発強度 E_v とこれを蒸発能 E_p で除した E_v/E_p の時間変化をプロットすると Fig. 7 のようになる。また同図には地表面の水分量の変化も同時に示されている。図より、風速の周期的変化によって、 $E_v/E_p = 1$ と $E_v/E_p < 1$ の状態が交互に現れていることが分かる。地表面が湿潤、乾燥の条件は $\theta_1 > \text{or} < \theta_c = 0.07$ で決まるので、地表面水分量 (θ_1) の値を E_v/E_p の値に対比させると、地表面は湿潤と乾燥の状態が交互に現れていたことが確認できる。また、蒸発強度の最小値は風速が最低値を示す時間 (9 時) に現れているが、その最大値は風速が最大値をとる時刻より約 3 時間 40 分も早く現われていることを考慮すると、蒸発強度と風速との位相は一致していないことが分かる。さらに、地表面水分量 θ_1 は蒸発強度 E_v に対するより、 E_v/E_p との方に位相が一致しており、風速とはほぼ 180° ずれた位相となっている。なお、この風速との関係は、地表面がいつも湿潤の状態の場合 (Fig. 5) とかなり様相を異にする。

この場合、 $\langle E_v \rangle$ 値 (図中 □ 印) は 0.110 mm/h となり、またこの風速の平均値、 $\langle U \rangle = 6$ m/s を定常的に与えた場合 (Exp. B-3) の $\underline{E}_{v,s}$ (図中 ● 印) 値は 0.111 mm/h である。従って、 $\langle E_v \rangle$ は $\underline{E}_{v,s}$ で十分評価できることが分かる。

(2) 風速変化の周期と蒸発

Fig. 8 には、前図 Fig. 7 の風速が 12 時間周期で変化するものの他に、その周期が 6 時間 (Exp. B-8), 3 時間 (Exp. B-9) のものも含めて、これらの蒸発強度と地表面水分量の定常段階での時間変化が示されており、

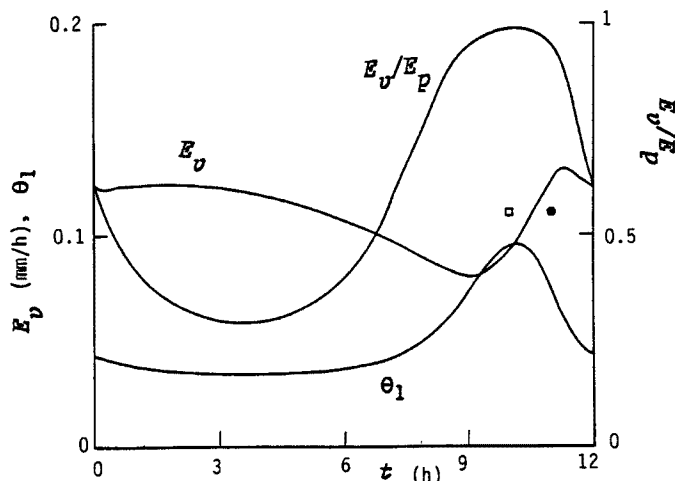


Fig. 7. Periodic solutions of E_v , E_v/E_p and θ_1 in the case of Exp. B-7, and values of $\langle E_v \rangle$ and $\underline{E}_{v,s}$.

それぞれの周期のものは実線、破線及び●印に対応する。ここに、周期6、3時間の時間軸はそれぞれ2倍及び4倍に拡大されている。この図より、以下のことが分かる。風速の周期が6時間、3時間と短い場合は、周期が長い(12時間)場合と異なり、地表面では常に $\theta_1 < \theta_c$ の条件が成立し、乾燥-湿潤の状態の繰り返しは起こっていない。また蒸発強度については、周期が12時間のものとそれ以外のものとは様相が異なり、地表面が湿潤の場合(Fig. 6参照)のように互いに重なっていない。このことは、地表面が乾燥した状態では、蒸発強度は地表面水分量の明確な影響を受けることを示唆する。従って、結果的に、地表面がいつも乾燥の場合(Exp. B-8, Exp. B-9)とそうでない場合(Exp. B-7)とでは重ならなかったと考えられる。

しかし、各々の周期に対する $\langle E_v \rangle$ 値を調べた結果、いずれも0.110 mm/hとなった。このことは、周期が12時間のものは地表面が湿潤・乾燥を繰り返すが、Fig. 7より分かるように湿潤状態の期間が乾燥のものに比し非常に短くなっていたために、上記より乾燥状態の条件が蒸発強度に対して支配的となる。よって、結果的に、 $\langle E_v \rangle$ 値が他のものと一致したとも考えられる。また、この場合の $\langle U \rangle = 6$ m/sの $E_{v,s}$ 値は0.111 mm/hとなったので、計算の範囲では一応 $E_{v,s}$ は $\langle E_v \rangle$ の代替になるといえるが、今後さらに詳細な検討が必要である。

4.4 地表面が乾燥している場合

Fig. 9の実線は、風速が 7 ± 2 m/sのExp. B-5の場合(周期12時間)で、 E_v 、 E_v/E_p 及び θ_1 の時間変化を示している。図より、以下のことが分かる。地表面含水率は非常に小さくて、 $\theta_1 < \theta_c$ の条件(地表面が乾燥する)が満たされ、また1周期間でほとんど変化がない。またこの場合、 E_v の最大値、最小値ともに風速のそれぞれより30~60分程早く現われており、蒸発強度と風速の変化の位相は若干ずれた結果となっている。 E_v/E_p の最小・最大値の生起時間については、風速の最大・最小値の生起時間より逆に30~60分遅く現れている。なお、地表面水分量の変化は非常に小さいが、図を詳細に調べると、その水分量と風速や蒸発強度の変化の位相の関係は、Fig. 8中の地表面が乾燥の状態にある破線や●印のものと同じであることが分かる。

この場合の $\langle E_v \rangle$ 値を求めると、0.113 mm/h(図中□印)となることが分かった。この計算例の平均風速の $\langle U \rangle = 7$ m/sを定常的に与えた場合(Exp. B-2)の $E_{v,s}$ 値は0.108 mm/h(図中●印)となったので、地表面が乾燥している状態に対しても、 $\langle E_v \rangle$ は $E_{v,s}$ で代替できると言える(4.3(2)参照)。

Fig. 9中の破線は、実線の場合に比べ風速変化の周期のみが3時間と異なっているが他の条件は同じ場合(Exp. B-6)の蒸発強度及び地表面水分量の周期解を示したものである。この時間軸は4倍に拡大されている。この破線と実線(周期12時間)の E_v を比べると、最大値の近傍は両者ともよく一致しているが、蒸発強度が小さくなるにつれて周期が3時間の方が大きな値を示し、最小値付近では逆に小さくなる事が分かる。また、周期が3時間の場合の $\langle E_v \rangle$ 値は0.113 mm/hと評価されたので、この値は上記の $E_{v,s}$ 値(0.108 mm/h)と合致していることが分かる。

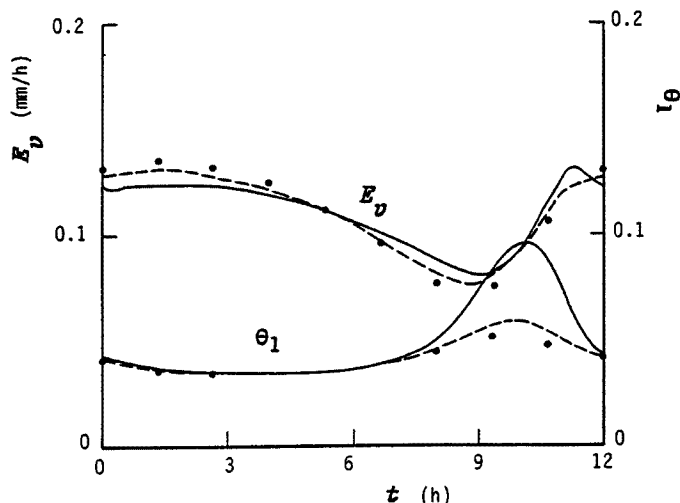


Fig. 8. Periodic solutions of E_v and θ_1 in the cases of Exps. A-7, A-8 and A-9.

4.5 E_v/E_p と θ_c の関係

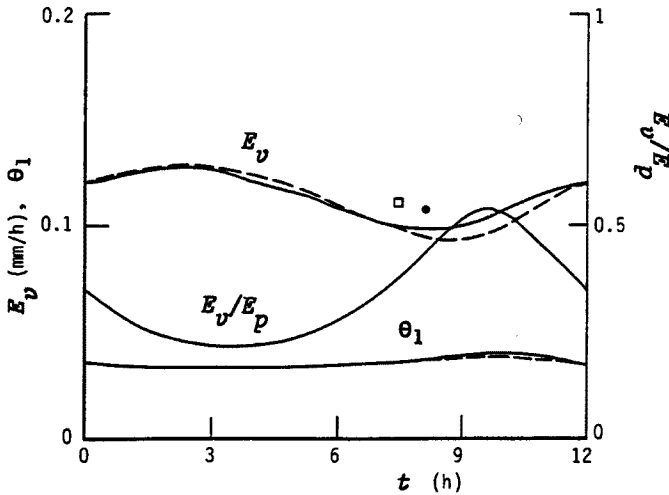


Fig. 9. Same as Fig. 7, but in the cases of Exps. B-5 and B-6.

5. おわりに

以上、裸地に比較的長周期の速度変化をする風が吹き続いたとき、この風によってそこでの蒸発はどのようになるのか、また平均的な蒸発強度はどのように評価されるかを数値計算的に検討した。そこでは、蒸発の場を大気・土地系として捉え、蒸発に関わる水分と熱の諸関係式を、一様な土地条件、水平方向に一様な気象条件、地下には一定の深さに常に地下水面が存在するという条件等を設定して解いた。なお、ここでは、風速変化の効果のみをみるために短波放射の条件は除外した。得られた結果を要約すると以下の通りである。

1) 地表面が常に湿潤の状態や乾燥の状態にある場合、比較的長い種々の一定周期の風速変化によって定常的な周期変化を示すようになった蒸発強度の時間変化(周期解)は、時間軸を風速の周期で無次元化すると、それぞれはほぼ互いに重なる。この結果は本計算で採用した周期3時間以上のも(最大12時間)に対して確認された。なお、ケルビンの式で、水分量がある値(θ_c)より小さくなると、土壤中の水蒸気は急に著しい不飽和の状態となるが、地表面が湿潤の状態とは、地表面の水分量(θ_1)が θ_c より大きな場合であり、乾燥状態とは $\theta_1 < \theta_c$ の場合と定義している。

2) 蒸発強度が蒸発能に一致するような地表面が湿潤の状態にあるとき、蒸発強度の周期解と風速の周期変化との位相は一致する。しかし、風速と地表面水分量の位相は一致しない。

3) 風速の変化によって、地表面が湿潤・乾燥の状態を繰り返す場合、蒸発強度の周期解は風速が最小となる時間に最低値を示すが、その最大値を示す時間は最高風速でのものと一致しない。従って、蒸発強度と風速の変化との位相は一致しないが、蒸発強度を蒸発能で除し

Exp. A-1 ~ Exp. B-11 に関し、計算の初期から最後まで、同一時間の E_v/E_p 値と θ_1 値の関係をプロットした結果が Fig. 10 である。図より明らかなように、 $\theta_1 < \theta_c = 0.07$ の範囲で、各点はほぼ一つの曲線上に位置している。このことは、少なくとも地表面が乾燥の状態にあるときには、蒸発能で基準化された蒸発強度は地表面の水分量の一価関数でほぼ表せることを示唆する。従って、蒸発能が分かれば、このような曲線を用いて蒸発強度が評価できることになる。

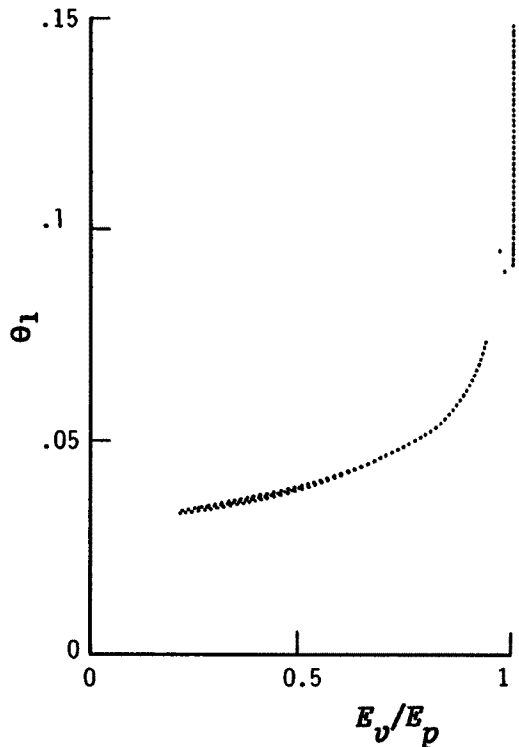


Fig. 10. Relation between E_v/E_p and θ_1 .

たものや地表面水分量は風速の変化とは位相が約 180° ずれている。

4) 地表面が乾燥の状態にある場合、周期的に変化する風速と蒸発強度の位相はほとんどずれていないが、地表面水分量はほぼ 180° ずれた位相となっている。

5) 地表面が湿潤・乾燥の条件に関係なく、周期的な風速変化による蒸発強度の周期解で、その1周期の平均蒸発強度はこの平均風速による定常蒸発強度に十分な精度で一致する。さらに、地表面が湿潤な場合、10分ごとの乱数による速度変化によって、蒸発強度がほぼ安定な変化をするようになった段階での平均値も同様に、その平均風速による定常値にほぼ一致する。これらのことより、風速が比較的長い周期で変化する状況下の平均的な蒸発強度は、その平均風速による蒸発強度によって与えることができる。

6) 本計算のあらゆる場合において、同時刻の蒸発強度を蒸発能で除したものと表面水分量の関係はほぼ一本の曲線に従って変化することが確認できた。従って、蒸発能が分かっている場合、地表面水分量を測定すればこの曲線を用いて蒸発強度が評価できる。なお、本研究では短波放射の条件を考慮しなかったが、この場合にもこのような関係が成立するか否かは今後の検討を要する。

最初に述べたように、裸地蒸発を考える上でいろいろな平均化の問題がある。今後は、現地の状況に照らして、数値計算的に、平均化の諸問題に取り組む予定である。

本論文の図面を作成して頂いた京大防災研究所技官永田敏治氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 例えば, Brutsaert, W.: Catchment-Scale Evaporation and the Atmospheric Boundary Layer, Water Resou. Res., Vol. 22, No. 9, 1986, pp. 39 S-45 S.
- 2) Stewart, J. B.: Measurement and Prediction of Evaporation from Forested and Agricultural Catchments, Evapotranspiration from Plant Communities, ed. by Sharma, M. L., Elsevier Scie. Pub., 1984, pp. 1-28.
- 3) 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——定水位の地下水面がある場合——, 京大防災研年報, 第31号B-2, 1988, pp. 255-274.
- 4) Bristow, K. L.: Simulation of Heat and Moisture Transfer through a Surface Residue-Soil System, Thesis of Ph. D., Washington Univ., 1983.
- 5) Campbell, G. S.: A Simple Method for Determinating Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data, Soil Sci., Vol. 117, 1974, pp. 311-314.