

# II-86 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——

防衛庁技術研究本部 正員 葛葉泰久

京都大学防災研究所 正員 石原安雄・下島栄一

1. はじめに： 裸地からの蒸発は、地質構造、土壌の水理特性、地下水位、地温等の土地条件と、風の速度、温度、湿度や太陽放射等の気象条件によって決定される。本文は、蒸発過程の場を大気-土地系として捉えてそこでの蒸発に関与する諸関係式を連立させ、とくに土壌の粗さ、地下水面の深さ、短波放射などが蒸発に及ぼす影響に注目して、定地下水位下で数値実験を行い、その結果について検討したものである。

2. 基礎式と計算条件： 蒸発現象が水平方向に一樣な気象条件と一樣な土壌の土地条件で生起しているとし、それに対して鉛直方向に一次元解析ができるものとする。数値計算で用いる基礎式は、1)土中の水分に関するもの、2)土中の熱に関するもの、3)大気中の運動量、水分、熱に関するものによって構成される。1)は、水分の連続式、ダルシー則とフィック則によるそれぞれ液水と水蒸気の移動の式、さらには不飽和域で相対湿度、マトリックポテンシャルと温度の関係を示す Kelvin の式などである。土中の水蒸気移動は分子拡散的に行われているとする。2)は、液水移動に伴う熱移動は小さいとして無視した形での熱に関する連続式と移動の式である。また1),2)については、土壌の水理的、熱的な関係式が含まれる。3)は大気の安定度を考慮した気流の速度、湿度、温度に関する対数則分布と、水蒸気と顕熱の移動の式などである。これらの基礎式系が 3) を地面での境界条件とし 1)と 2)が交互に差分法で解かれるが、詳細は参考文献1)を参照されたい。

ここで対象とする土地は土壌で、Bristow の研究<sup>1)</sup>を参照して、飽和透水係数が  $1.18 \times 10^{-4}$  cm/sec、Air entry value が -22.4 cm、空隙率が 0.468等を示すもの (s-1) と、それを基準にとり、scaling theory を介し代表粒径が基準のものの  $\sqrt{5}$  倍、 $\sqrt{10}$ 倍、 $\sqrt{20}$ 倍となる土壌 (それぞれ s-2、s-3、s-4) をも考えた。地表面上 3 mを計算での上方境界条件とし、そこでの温度、湿度、風速を常にそれぞれ 20℃、25%、8 m/s とし、一方土中には定水位の地下水面を設け、そこでの温度を常に 20℃

とした。また地下水面上の初期水分分布は飽和状態からの脱水平衡にあるものとし、初期温度分布については一様の 20℃とした。ここでは表-1 で示すような 11 ケースについて計算を行った。

## 3. 計算結果とその検討

土壌の粒径と蒸発強度： 図-1 の実線は、Exp A(1)~A(4)について、土壌の粒径が蒸発強度の時間変化に及ぼす影響を調べたものである。図よりつぎのようなことが分かる。すなわち、全体的な変化は粒径の大きさによらず類似である。ただ蒸発強度は計算開始後急減した後再び急減するが、その2度目の生起は粒径の大きいもののほど早く、またその後の蒸発強度は常に粒径が小さいものほど大きくなる。ほぼ定常状態に達したと考えられる段階での蒸発強度 ( $E^*$ ) の値は図中に示されている。

地下水面の深さと蒸発： 図-2 は  $E^*$  値と地下水面の深さ ( $Z_w$ ) の関係を示したものである。図中の (・) 内の数字はほぼ定常の段階での地面の体積含水率を示す。図より、地下水面が約 0.5 m より深い時には、

表-1 計算条件

|          | 地下水位(m)   | 土壌  |
|----------|-----------|-----|
| Exp A(1) | $Z_w = 1$ | S-1 |
| Exp A(2) | 1         | S-2 |
| Exp A(3) | 1         | S-3 |
| Exp A(4) | 1         | S-4 |
| Exp B(1) | 0.1       | S-1 |
| Exp B(2) | 0.3       | S-1 |
| Exp B(3) | 0.4       | S-1 |
| Exp B(4) | 0.5       | S-1 |
| Exp B(5) | 0.8       | S-1 |
| Exp C(1) | 1         | S-1 |
| Exp C(2) | 0.3       | S-1 |

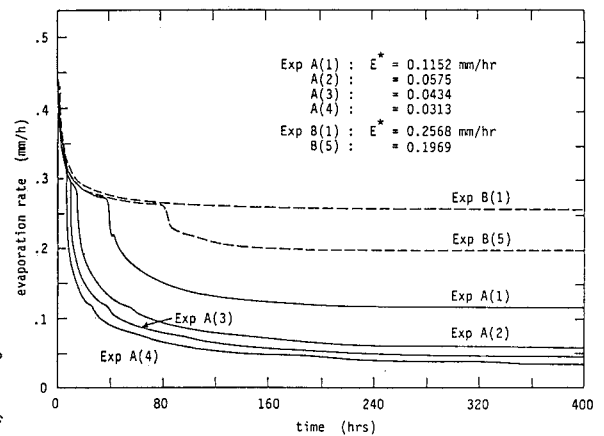


図-1 蒸発強度の時間変化

その深さが蒸発強度に顕著な影響を与えるが、それより浅くなると、即ち地表面の体積含水率が約  $\theta = \theta_s = 0.07$ （水蒸気が急に不飽和になる値）より大きくなると、地下水位は蒸発強度にほとんど影響を与えないことが分かる。図-1 の破線は Exps B(1)、B(5)の場合で、Exp A(1)の結果を参照すると、地下水位がある程度浅くなると上述の蒸発強度 2度目の急減が現れないことが分かる。これは地面での水分量が  $\theta_s$  より小さくならないためである。ここで対象としている条件下では、地中の最低温度点で著しく蒸発が生起していると考えられるが、その深さは、地下水位が地表面下 50 cm までのものについては地表面、80 cm、100 cm のものについては深さ 1 mm となった。しかし、地下水面がもっと深くなると蒸発域（下記参照）も同様に深くなることが予想される。なお、この関係は、粒径の大きさが大いに関与し、毛管力の小さな砂層では地下水面が浅くても、蒸発域は土壌の場合よりかなり深くなることが知られている<sup>2)</sup>。

**短波放射の日変化と蒸発：** 地球表面での放射条件を想定し、太陽放射を 6 時前より 18 時過ぎまで 12 時に約  $450 \text{ W/m}^2$  という最大値を示す日周期の条件を Exp C(1)とExp C(2)に対して与えたところ、ほぼ一定のつぎの周期解を得た。図-3 は蒸発強度の日変化を、また図-4 は最低温度と蒸発域（著しく蒸発が生起している部分）の深さの日変化を示す。また表-2 は特にExp C(1) の場合の特定時刻での地面における熱諸量の収支を示すが、潜熱移動量を 100 としている。これらの図等より、地下水面の高さの相違による蒸発強度の日変化のphaseのズレ、短波放射強度の時間変化による蒸発域の周期的な移動等が認められるとともに、太陽放射がある場合の最低温度点は必ずしも蒸発域を示す指標とはなりえないことも分かる。なお、明け方等での地表面付近で、程度はさほど大きくないが、含水量の一時的な増加が認められた。これは地表での温度低下に起因し、そこではヒステリシス現象が生起していたことになる。

4. おわりに： 以上、裸地蒸発の基本的現象を理解するために、簡単な条件下で基礎式を厳密に数値計算を行い、それについて若干の検討をくわえた。今後、これらの成果を参照しつつ field での蒸発問題に取り組む際、如何に平均化操作を導入するかが問題となろう。

表-2 地面での諸熱量：設定土層からのOUTPUTを正

|     | 短波放射 | 長波放射 | 顕熱移動 | 潜熱移動 | 地中への熱移動 |
|-----|------|------|------|------|---------|
| 0時  | 0    | 75   | -118 | 100  | -57     |
| 6時  | -38  | 67   | -113 | 100  | -16     |
| 12時 | -319 | 52   | 102  | 100  | 65      |
| 18時 | -43  | 83   | -42  | 100  | -98     |

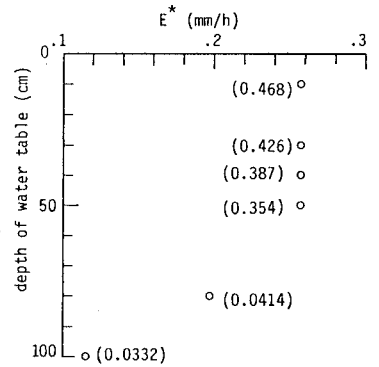


図-2  $E^*$  と  $Z_w$  の関係(S-1)

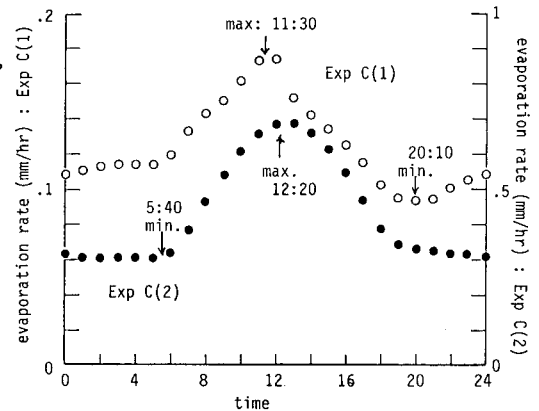


図-3 蒸発強度の周期的日変化

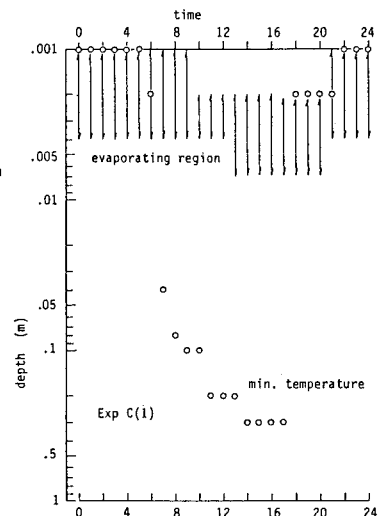


図-4 蒸発域と最低温度点の時間変化

参考文献：1)葛葉・石原・下島(1988):水理講, 2)原田・石原・下島(1988):年講