## 土壌中からの液体蒸発に関する基礎的考察

小野田ケミコ(株) フェロー会員 古賀泰之 小野田ケミコ(株) 新越寿郎

1.まえがき

有害な揮発性物質による汚染土壌の問題を扱う上で、土壌中の液体の蒸発特性に関する知識が必要となる、ここで は、液体として水を用い、土壌中の水分が蒸発し土壌中から排出される過程をモデル化し、そのモデルの検証を小型 供試体実験により行なった。モデルにおいては、土壌中の水分が地下水面以深及び以浅に存在し、それぞれ異なった 速度で進行することを考慮した。

2.モデル化

水は土とともに一定温度下で一様断面の容器に入れられ、蒸発した水は上面から容器外に排出されるものとする。 供試土に対する水の存在状態を以下の3通りの場合に分ける。(a)水位が供試土より上にある。(b)水位が供試土 中間にあり、水位低下に伴い水位より上では水は供試土土粒子に付着した液体の状態で残留するとともに、土壌空隙 中に水蒸気の状態で空気と併存する。(c)水位が消失し、(b)の水位以上と同じく土粒子に付着した水と土壌空隙 中の水蒸気の状態にある。以下では、図-1(後述する実験装置を示している)において、水位以下の領域を飽和領 域、水位以上の領域を不飽和領域と呼ぶ。

<u>(a)の場合</u>

空気に接した水の蒸発は、水と空気の接触面積に比例して生ずるとされている。すなわち、水の残留量*W* について  $\frac{dW}{dt} = -K_1 \rho A \quad (1)$ 

ここに、*W*:水の残留量、*K*<sub>1</sub>:蒸発速度係数、 :水の密度、A:水と空気の接触面積(容器断面積) (b)の場合

2領域の水の移動現象を以下のように仮定する。

- 地下水位以浅(不飽和領域):水蒸気成分は小さなビーカー規模では速やかに外部に放出される。土粒子に付着した水は温度に応じた速度で蒸発し水蒸気に変化し速やかに放出される。すなわち、不飽和領域では土粒子に付着した水が支配的である。
- ・ 地下水位以深(飽和領域):地下水面近傍の水の一部は蒸発し不飽和領域に移動する。この結果水位が低下し、水 位以下の水の一部は水位以上の土粒子に付着して残留する。飽和領域からの蒸発速度は水と空気との接触面積 *S* に比例するものとする。ただし、この接触面積は平面で切った容器断面積*A*でなく、間隙率や土粒子径に依存す る曲面のものと考えられる。

$$\left(\frac{dW_{1}}{dt}\right)_{vap} = -\rho K_{1}S \quad (2)$$

別の表現として、接触面積*S*の代わりに容器断面積*A*を用いて、 蒸発速度係数 *K*<sub>1</sub>を見かけの蒸発速度係数 *K*<sub>1</sub><sup>\*</sup>で表すものとする。

$$\left(\frac{dW_1}{dt}\right)_{vap} = -\rho K_1 * A \quad (3)$$

水位 h<sub>1</sub>が低下したとき、間隙率 n内の残留体積含水率を rとすると、飽和領域 W<sub>1</sub>の重量減少は次式で表される。

$$\frac{dW_1}{dt} = \left(\frac{dW_1}{dt}\right)_{vap} + A\frac{dh_1}{dt}\rho n\theta r \quad (4)$$

キーワード: 蒸発、揮発性物質、温度効果 〒111-8637 東京都台東区柳橋2-17-4



FAX 03-3865-4078

TEL 03-3862-2253

111-770

 $W_1 = \rho nAh_1$  ならびに式(3)を用いて次式が導かれる。

$$W_{1} = \rho nA \left( H - \frac{K_{1}^{*}}{n(1-\theta r)} t \right) = \rho nAH - \rho A \frac{K_{1}^{*}}{1-\theta r} t = W_{0} - \rho A \frac{K_{1}^{*}}{1-\theta r} t \quad (5)$$

同様に不飽和領域の重量 W2について、

$$\frac{dW_2}{dt} = \left(\frac{dW_2}{dt}\right)_{vap} - A\frac{dh_1}{dt}\rho n\theta r \quad (6) \qquad W_2 = \rho A(H-h_1) \times n\theta = \rho A\frac{K_1*}{1-\theta r} \times \theta t \quad (7)$$

ここに、:  $W_2$ 領域内における体積含水率、ここで、 $d\theta / dt = -K_2\theta$  (8)と仮定すると  $W_2$  は次式により与えられる。 $W_2 = Ct \times \exp(-K_2t)$  (9) ここに、C:積分定数である。 式(8)は、空気に接した表面からのみ生ずる飽和層からの蒸発とは異なり、不飽和層では全体積中において水と空気が接触して生じる、そして接触面積はその層に残留する水重量に比例すると考えることに相当する。

両領域の総重量は式(5)(9)から

$$W = W_1 + W_2 = W_0 - \rho A \frac{K_1^*}{1 - \theta r} t + C t \times \exp(-K_2 t)$$
 (10)

この第1項は初期重量、第2項は下部飽和領域の蒸発及び水位低下による重量減少、第3項は水位低下により生成される上部不飽和領域の重量変化を表す。第2項は一定速度の重量変化を、第3項は水位が低下する過程で体積が増加することにより初期に重量が増加し、その後その層からの蒸発が進むことにより、重量が指数関数的に減少する重量変化を示す。

<u>(c)の場合</u>

これは、水位が完全に消失した場合で、飽和領域からの蒸発はなく、不飽和領域からの蒸発のみを考えればよい。 このとき、 $W_2 = \rho n A H \theta$  (11) 式(8)を用いて、 $\frac{dW_2}{dt} = -K_2 W_2$  (11)

したがって、 $W_2 = D \exp(-K_2 t)$  (12) ここに D: 積分定数である。

各パラメータは、(b)及び(c)状態の連続条件を用いて求める。水位消失時刻 tc、その時点における総重量 Wcはそれぞれ実験曲線から求める。また、tc以降の実験曲線から  $K_2$ を求める。

$$W = W_1 + W_2 = W_0 - \rho A \frac{K_1 *}{1 - \theta r} t + \frac{D}{tc} t \times \exp(-K_2 t)$$
 (13)

を用いて、 tc以前の実験曲線から残るパラメータ $\frac{K_1^*}{1-\theta r}$ を求めることになる。

3.実験結果に対する適用

図 - 1の試験装置を用いた土壌からの水の蒸発特性 に関する実験結果とそれを上記のモデルに適用した結 果を図 - 2に示す。供試土は珪砂8号で実験は温度を 24~60 に変えて行った<sup>1)</sup>。この図より、実験結果は 上記モデルでよくフィティングされた。

4. あとがき

今回のモデルでは、供試土中の水面と土粒子に付着 した水とでは見かけの蒸発速度および定式化が異なる ものとした。また、蒸発した水は供試土中から即時に 放出されるものとしたが、実際の地盤中ではそうでは ない。また、供試土が小さくとも寸法の影響は必ずし も無視できない<sup>1)</sup>。さらに、水面以上の不飽和領域も ここで仮定したような一様状態ではないと考えられる。 これらへの拡張が今後の課題である。



図 - 2 実験結果と本蒸発モデルの比較

[参考文献] 1) 笠井ら:土壌中からの液体蒸発に関する基礎的実験(その1)、第37回地盤工学研究発表会(投稿中),2002