

# 蒸発法と流出法の組み合わせによる土壤不飽和水分特性の迅速な計測手法

京都大学大学院農学研究科 ○正岡直也・小杉賢一朗

## 1. 研究背景

森林土壤で起こる水移動現象は、豪雨時を除けばその大部分が不飽和状態で起こっている。不飽和土の水分移動特性は「水分特性曲線( $\theta-h$ )」と「不飽和透水曲線( $K-h$ )」とで与えられ、これらは降雨浸透に伴う洪水流出や斜面崩壊を予測するうえで必要不可欠な情報である。 $\theta-h$ は加圧板法などによる直接測定が比較的容易である一方、 $K-h$ の測定には多くの時間や専門的な装置と技術が必要となる。直近の研究<sup>1)</sup>において、比較的簡易な測定法である「蒸発法」を改良し透水係数の測定可能レンジを拡大した「改良蒸発法(Improved evaporation method, IEM)」が開発された。本稿では IEM の装置を元に開発され、さらに迅速で正確な測定を可能にした「連続流出蒸発法(Continuous outflow evaporation method, COFEM)」について、装置の概要と実際の測定事例を紹介する。

## 2. 研究手法

### 2.1 実験装置と手法

開発した COFEM の実験装置を図 1 に示す。土壤サンプラー(100 ml)の側面から 2 本の小型テンシオメータを挿入し、負圧計と差圧計に接続して圧力水頭 $h$ と動水勾配 $i$ を測定する。装置全体は自記式の電子天びんに載せてある。実験中にアタッチメントを付け替えることで、後述する 2 手法を連続して行うことが最大の特徴である。

第一に、流出法(Outflow method, OFM)実験を行う。図 1a のように装置に OFM アタッチメント(ポーラス板)を取り付け、濾紙を介して供試体を置く。ポーラス板にはチューブと三方バルブを介して定水位タンクと排水管が接続されている。実験前にはポーラス板と定水位タンクを接続し、土壤の圧力水頭を約-3 cm で定常化させておく。実験開始と同時にポーラス板と排水管を接続し、水頭差 $\Delta H$ (初期値 80 cm) により供試体から排水させ

る。排水量は排水管の水位を圧力式水位計で測定し算出する。排水速度がゼロに近づいたら OFM を終了する。

第二に蒸発法(Evaporation method, EM)実験を行う。供試体を軽く持ち上げながらポーラス板アタッチメントを外し、EM アタッチメント(金属メッシュ)に付け替え、供試体下面を大気に開放して自然蒸発させる。以降は電子天秤の重量変化から蒸発速度を算出し、供試体内の平均圧力水頭が -500 cm を下回るのを目安に実験を終了する。

本研究で用いた供試体は花崗岩山地の森林土壤-風化基岩遷移層から採取した自然土壤である。同じ供試体に対し、加圧板法による pF 試験ならびに IEM 試験を行い、比較を行った。

### 2.2 計算方法と注意点

排水量・蒸発量からフラックス $q$ を算出し、 $h$ ,  $i$  の時系列データから非定常の直接的算出法により $\theta-h$ ,  $K-h$ を算出する。本稿では計算式は省略する(既往研究<sup>2), 1)</sup>を参考にされたい)。

飽和含水率と飽和透水係数 $K_s$ は事前に測定しておく。実験中は土壤だけでなく濾紙からも水分が流出・蒸発するので、濾紙の水分特性曲線を用いた補正を行う。

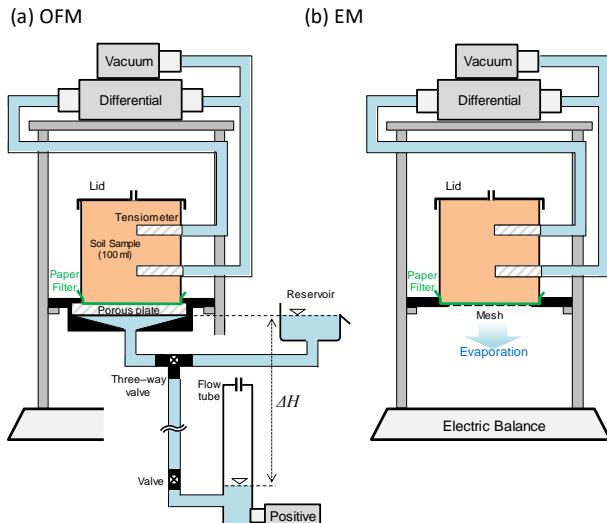


図 1 装置の概略 (a) 流出法 (b) 蒸発法

### 3. 結果と考察

#### 3.1 測定値の時系列変動

図 2 a に上下テンシオメータの圧力水頭( $h_{up}$ ,  $h_{low}$ )と、排水・蒸発量から算出した体積含水率 $\theta$ の時系列変化を示す。比較のため COFEM と IEM の両方の結果を同じ図中に示している。IEM では、 $h$ 平均が約-390 cm、 $\theta$ が約 0.202 に達するまで約 6.3 日を要した。一方、COFEM で同じ値に達するまでに要した時間は約 1.6 日であり、4 分の 1 程度に短縮された。そのうち OFM に要した時間は約 0.07 日（1 時間 40 分）と非常に短く、 $h$ 平均は約-54 cm、 $\theta$ は約 0.282 に達していた。

図 2 b に動水勾配*i*の時系列変化を示す。既往研究<sup>1)</sup>を参考に、*i*の最小分解能の 10 倍である  $6.64 \times 10^{-2}$  以上を*i*の有効範囲とした（図 2 b 中に破線で示す）。EM 実験で*i*が有効範囲内の値を示すのは開始から約 4 日後であった。これは蒸発フラックス $q$ が小さいため、 $K$  の大きい湿潤レンジで Darcy 則から*i*が極めて小さくなるためである。一方、COFEM では全区間で有効範囲にあった。これは、排水によるフラックス $q$ が蒸発に比べはるかに大きいため、湿潤レンジでも動水勾配*i*が小さくなりすぎず保たれたと考えられる。

#### 3.2 水分特性曲線と不飽和透水曲線

図 3 a に得られた水分特性曲線( $\theta-h$ )を示す。IEM と COFEM に加え、加圧板法で測定したデータも併せて示す。COFEM の 2 手法（OFM と EM）から得られたデータは連続的であり、従来法である IEM の結果と良好に一致していた。また加圧板法の結果ともよく一致していたが、飽和付近の $h = -5, -10$  cm の 2 点では若干の誤差がみられた。これはテンシオメータ挿入等の作業で大孔隙の破壊が起こったことが原因と考えられる。

図 3 b に不飽和透水曲線( $K-h$ )を示す。COFEM のデータは良好に測定され、従来法である IEM の結果とよく一致していた。さらに、湿潤側の不飽和透水係数  $K$  の測定レンジが IEM では  $K < 2.08 \times 10^{-4}$  cm/sec ( $h < -30.1$  cm) であるのに対し、COFEM では  $K < 1.89 \times 10^{-2}$  cm/sec ( $h < -5.1$  cm) まで拡大された。これは図 2 b で示したように、OFM

により湿潤域の*i*が欠けることなく測定できたためと考えられる。

### 4. まとめ

以上のように本稿では OFM と EM を連続的に行う COFEM 法を紹介した。EM が苦手とする湿潤レンジ ( $h > -30$  cm 程度) に対し OFM を行うことで、より広いレンジで  $K-h$  を測定でき、さらに時間を大幅に短縮できることが示された。今後は多様な土壤に対する適用性を検討し、手法の確立を目指していく予定である。

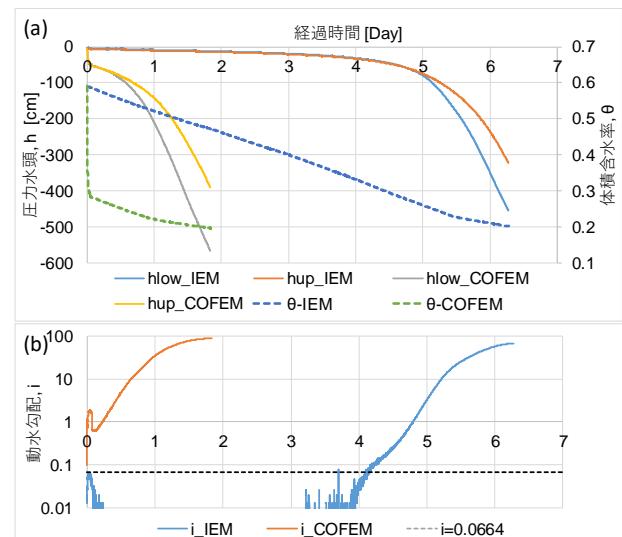


図 2 測定値の時系列データ

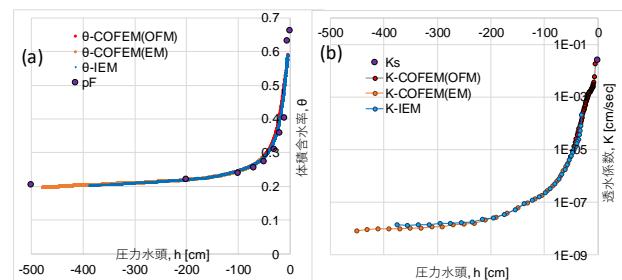


図 3 (a) 水分特性曲線 (b) 不飽和透水曲線

### 引用文献

- 1). Masaoka, N., and K. Kosugi. (2018): Improved evaporation method for the measurement of the hydraulic conductivity of unsaturated soil in the wet range, J. Hydrol., 563, 242-250.
- 2). Salehzadeh, A., and A.H. Demond. (1994): Apparatus for the rapid automated measurement of unsaturated soil transport properties, Water Resour. Res., 30 (10), 2679-2690.

(連絡先 : masaoka.naoya.7e@kyoto-u.ac.jp)