

1. はじめに

降雨時の土砂災害に対する避難勧告や交通規制などの解除には明確な基準がなく、管理者にとって解除のタイミングは非常に難しいとされている。酒匂ら¹⁾は、降雨時の表層すべり型崩壊に対して、斜面内の水分変動に着目した現地モニタリングと数値シミュレーション（飽和・不飽和浸透解析+斜面安定解析）による斜面防災システムの確立に取り組んでいる。この手法より、降雨後の斜面の安定性の定量的評価を行うことが可能であると考えている。その中で重要となるのが、降雨後の斜面表層からの蒸発量の現地モニタリングである。そこで、一般的な気象観測データから蒸発量の推定を行うことのできるバルク法²⁾を用いることにした。しかし、バルク法で用いられる蒸発効率 β は表層土の種類、体積含水率などに影響される³⁾。本論文では、まさ土を用いた土槽・水槽実験より、不飽和土中の水分状態と蒸発効率 β の関係について考察した。

2. 蒸発効率 β の算定方法

2.1 バルク式の概要

単位面積当たりの蒸発量を表すバルク式を次式に表す。

$$E = \rho \times \beta \times g_a \times (q_{SAT} - q_a) \quad (1)$$

その他、式(1)に用いられている変数を表-1に示す。バルク法を用いる際、未知パラメータ（交換速度 g_a と蒸発効率 β ）は事前に求めておく必要があるが、1高度の気象観測データで蒸発量を求めることができる。蒸発効率 β は地表面からの蒸発のしにくさを表すパラメータであり、土の飽和度に対して0~1の値をとる。飽和度 $S_r=0\%$ の時は $\beta=0$ 、飽和度 $S_r=100\%$ の時は $\beta=1$ となる。

2.2 実験概要

図-1に実験の概要を示す。実験は、気象観測装置、土槽実験用装置（土槽+電子天秤）と水槽実験用装置（水槽+電子天秤）で主に構成されている。図-2に交換速度と蒸発効率の算定フローを示す。まず、土槽実験、水槽実験、気象観測を同時に行う。気象観測と水槽実験で得られた結果より水面における交換速度 g_a を算出する。また、土槽実験で得られた結果と求めた交換速度 g_a より蒸発効率 β を求める。

試料として宮之城産まさ土を用い、内径15.5cm、外径16.5cm、高さ2cmの塩化ビニール製円筒容器に初期間隙比 $e_0=0.814$ と設定し、その間隙比になるように締固めた。水槽と土槽の表面、また土槽の表面から1cmの深さにそれぞれ熱電対を設置した。体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を求めるため、表-2に示すように飽和度10、20、40、60、80%に相当する5ケースの体積含水率を初期値として設定し、それぞれ複数回実験を行なった。計測間隔を15分とし、

表-1 算定に必要な気象観測データ

変数	観測データ
空気密度 $\rho[\text{kg/m}^3]$	P : 気圧 $[\text{hPa}]$ T : 気温 $[\text{°C}]$ H_u : 相対湿度 $[\%]$
飽和比湿 $q_{SAT}[\text{kg/kg}]$	P : 気圧 $[\text{hPa}]$ T : 気温 $[\text{°C}]$
比湿 $q_a[\text{kg/kg}]$	P : 気圧 $[\text{hPa}]$ T : 気温 $[\text{°C}]$ H_u : 相対湿度 $[\%]$
交換速度 $g_a[\text{m/s}]$	気象観測から直接算定不可
蒸発効率 $\beta[-]$	

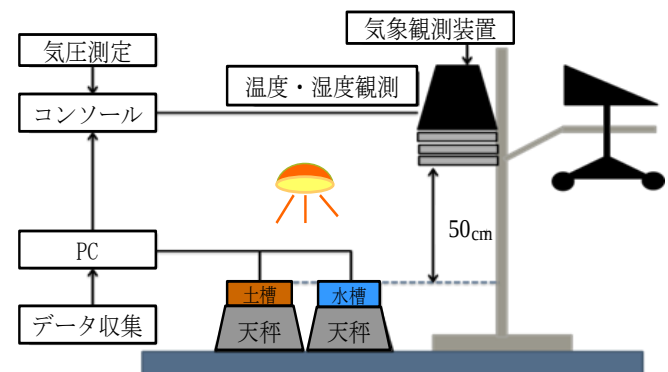


図-1 実験概要図

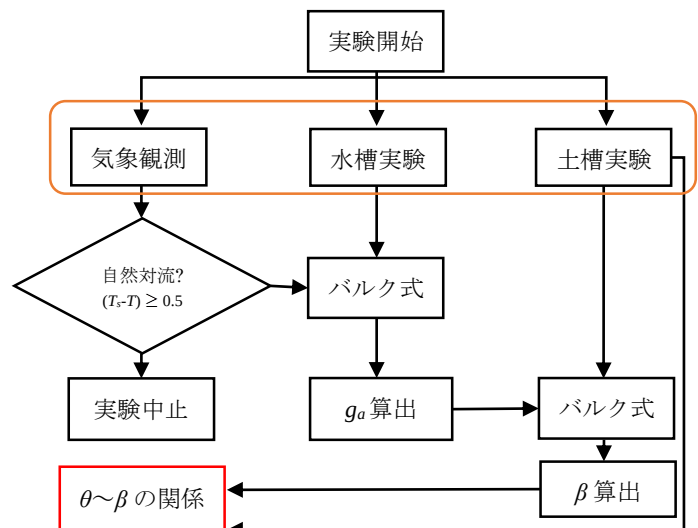


図-2 g_a と β の算定フロー

計測開始後1200分（約1日）経過したときに実験を終了とした。
また、自然対流状態を起こすために、電気スタンド（200W）
を使用し、強制的に自然対流状態を起こし、実験を行なった。

2.3 実験結果

図-3に今回、初期飽和度40%相当の実験で得られた単位時間当たりの土槽・水槽からの蒸発量と体積含水率の時間変化を示す。図-4にまさ土における体積含水率 θ と蒸発効率 β の算定結果を示す。また、Kondoら³⁾が提案する体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係の砂に関するモデル（式(2)）の値も図示されている。

$$\beta = \frac{1}{1 + C_H U \cdot F(\theta) / D_{am}} \quad (2)$$

ここに、 $F(\theta)$:土壌間隙の奥から地表面までの水蒸気の流れに対する距離[m]、 D_{am} :水蒸気の分子拡散係数。

まさ土における土槽・水槽の実験結果で図-4に示す、①蒸発効率 $\beta > 1$ である部分、②ほぼ蒸発効率 $\beta = 1$ である部分、③蒸発効率 $\beta < 1$ である部分に着目し、考察を行なった。

3. まさ土における室内土槽・水槽実験結果に関する考察

図-3と図-4に着目すると、①の部分は、実験開始直後の土槽と水槽では、体積熱容量の差を示し、②の部分は、土槽からの蒸発量と水槽からの蒸発量がほぼ一致している時点での蒸発効率を示している。また、③の部分は、②の状態からさらに時間が経過した際、土の間隙中から水が蒸発ようになるため、土の間隙構造などの影響で蒸発効率が低下すると考えられる⁴⁾。

図-4より、まさ土を実験試料として用いた土槽・水槽実験において、①部分と②部分では多くのばらつきが見られた。これは、まさ土表面が水表面よりも暖まりやすく、交換速度 g_a に影響を与え、体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係のばらつきが大きくなったと考えられる。また、図-4より、近藤らの砂に関するモデルと実験値は一致してないことから、土の種類、粒度、間隙比等を考慮した数値力学モデルの開発が必要である。

4. おわりに

バルク法で用いられる蒸発効率 β は表層土の種類に影響されるため、本論文では、実験試料としてまさ土を用い、土槽・水槽実験を行なった。その結果、蒸発効率 $\beta \geq 1$ 付近での算定値にばらつきがみられた。これは、まさ土表面が水表面よりも暖まりやすく、交換速度 g_a に影響を与えたことで、体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係にばらつきがみられたと考えられる。また、近藤らのモデルでは、砂の体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係のモデルであったが、砂の種類等についてはあまり考慮されておらず、実験値と一致しなかった。今後、多くの実験データを蓄積し、土の種類、粒度、間隙比等を考慮した数値力学モデルを開発し、提案したい。

謝辞：本研究は、科研費（基盤研究(C)）(15K06213、酒匂)の援助を受けた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 1) 酒匂一成, 里見知昭, 菅野智之, 深川良一, 安川郁夫: 降雨時の斜面崩壊に対する防災システムの確立に関する研究, 歴史都市防災論文集, Vol.1, pp.167-174, 2007.
- 2) 近藤純正: 水環境の気象学, 朝倉書店, pp.108-109, 1994.
- 3) J. Kondo, N. Saigusa and T. Sato: A parameterization of evaporation from bares soil surfaces, J. Appl. Meteor, Vol.29, pp.385-389, 1990.
- 4) K. Sako, M. Moriwa, T. Satomi: Experimental Consideration of Evaporation Efficiency β of Unsaturated Sandy Soil Surface, Proc. of the 15 th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, No.JPN-29, 2015.

表-2 実験条件

実験	実験条件	飽和度(%)	体積含水率	実験回数(回)
土槽実験	相対密度 D_r :50% 間隙比 e_0 :0.814	10	0.045	3
		20	0.090	3
		40	0.179	3
		60	0.269	3
		80	0.359	3

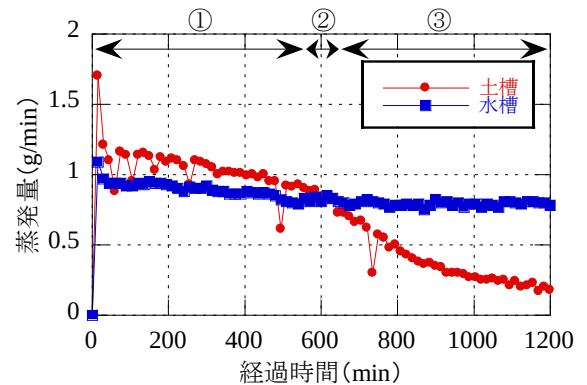


図-3 初期飽和度40%の実験結果

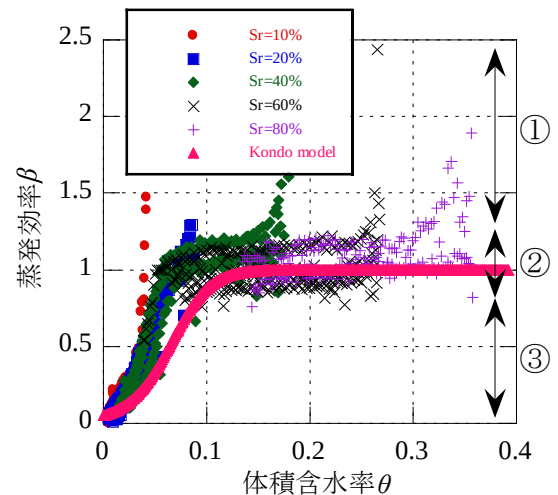


図-4 θ と β の関係