

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。酒匂らりは、降雨時に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、降雨後の斜面内の水分変動を計測、数値シミュレーションし、規制解除に必要な情報を示す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 は表層土の体積含水率や間隙径などに影響される³⁾。本論文では、間隙比を変えた土槽・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 ）を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 $S_s=0\%$ の時は $\beta=0$ 、飽和度 $S_s=100\%$ 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、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、土槽試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。

試料として豊浦砂を用い、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として3ケース（0.708、0.785、0.833）設定し、その間隙比になるように締め付めた。水槽と土槽の表面に熱電対、土槽の表面から1cmの深さに熱電対を設置した。

体積含水率 θ と蒸発効率 β の関係を求めるため、初期の体積含水率として飽和度10、20、40、60、80%に相当する5ケースの体積含水率を設定し、それぞれ複数回実験を行なった。計測間隔を15分とし、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。

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

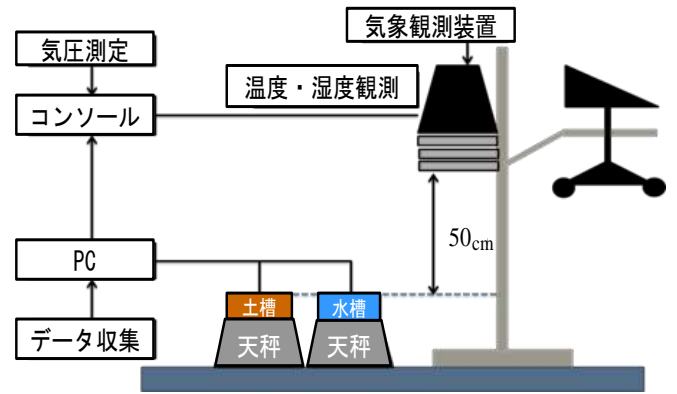


図-1 実験概要図

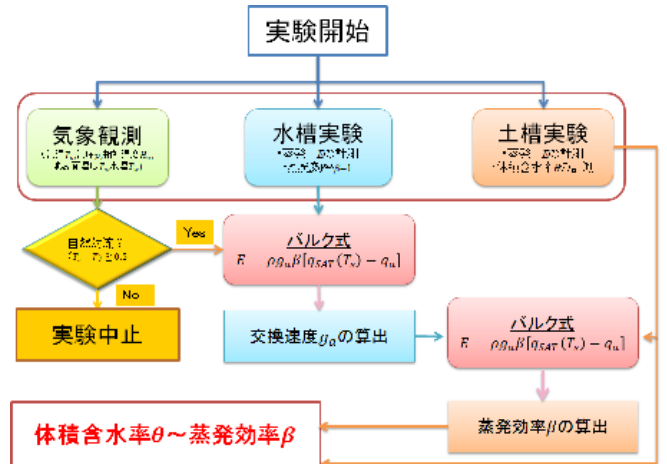


図-2 g_a と β の算定フロー

2.3 実験結果

図-3.4.5に今回、実験で得られた初期間隙比を変化させた3ケースの体積含水率 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 の関係のモデルを示した。式(2)にKondoらのモデル式を示す。

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

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。

初期間隙比を変化させた3ケースの実験結果に図-3~図-5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. 初期間隙比を変化させた実験結果に関する考察

①の部分は、実験開始直後、土槽と水槽では、体積熱容量が異なるため、実験開始後1時間程度は土表面のほうが温まりやすく、蒸発量も多くなっている。しかし、近藤らのモデルでは、土と水の体積熱容量の差を考慮していないため、 θ と β との関係が①の部分のような算定値を示していると考えられる。

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。時間経過とともに、土槽からの蒸発量は徐々に減少するが、水槽からの蒸発量は増加する。すると、土槽と水槽の蒸発量がほぼ同様の測定値を示すようになる。その土槽と水槽の蒸発量がほぼ同様の測定値を示す結果の時 $\beta = 1$ となっていると考えられる。

③の部分は、②の状態からさらに時間が経過すると、土槽内の水分が蒸発することで、蒸発するポテンシャルが低下し、土の含水量に応じて、土の間隙構造などの影響で蒸発量が減少する時点での蒸発効率を示していると考えられる。

今回初期間隙比を変えた実験結果より、②と③の蒸発効率が1以下になる部分の体積含水率に着目し、初期間隙比が大きい土槽（緩い状態）と小さい土槽（密な状態）を比較すると、初期間隙比が小さい土槽で、より大きな体積含水率で蒸発効率が1以下になっていることが分かった。これは、不飽和土では、土中の水が蒸発し、水蒸気が地表面に移動することで、外部に水が出ることから、蒸発のしやすさが土中の間隙に依存するためである。初期間隙比の小さい土槽では、土中の間隙が小さく、複雑なため、土中の含水量が大きい状態でも、蒸発しにくくなっていると考えられる。

4. まとめ

バルク法で用いられる蒸発効率 β は間隙比に影響されるため、本論文では初期間隙比を3ケース設定し、実験を行なった。その結果、初期間隙比が小さくなるとより大きな体積含水率で蒸発効率 $\beta < 1$ となることが分かった。また、蒸発効率 $\beta < 1$ となる部分に関しては、間隙比や粒度を考慮した交換速度 g_a を提案することが必要であるということが分かった。

謝辞：本研究は、科研費(若手A)(24686056、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.

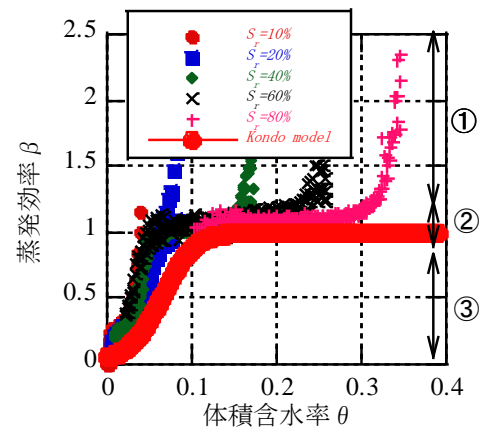


図-3 θ と β の関係 (初期間隙比 0.785)

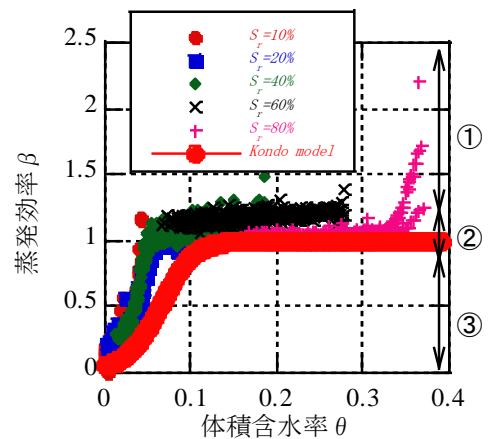


図-4 θ と β の関係 (初期間隙比 0.833)

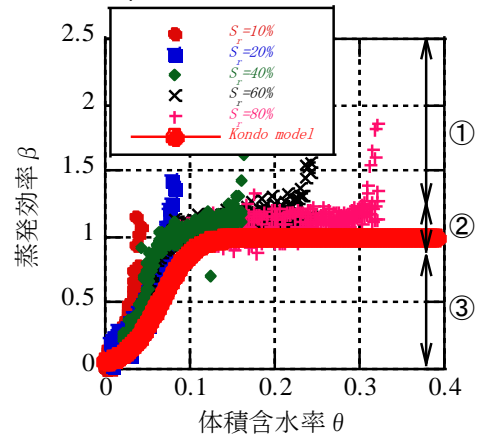


図-5 θ と β の関係 (初期間隙比 0.708)