

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04602

研究課題名（和文）不飽和土の保水・透水特性および蒸発特性に関する室内土質試験法の提案と数値モデル化

研究課題名（英文）Proposal of laboratory test method and concept model on water retention, permeability and evaporation properties of unsaturated soil

研究代表者

酒匂 一成（SAKO, KAZUNARI）

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：20388143

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、不飽和土の水分特性曲線・不飽和透水係数・蒸発効率を同一供試体から得ることのできる室内土質試験法の提案と含水比、不飽和土の水分特性曲線・不飽和透水係数・蒸発効率を推定するための数式モデルの改良とその妥当性評価に取り組んだ。蒸発法による水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置を用いた体積含水率～蒸発効率の関係を求めるための室内試験方法を提案し、試験結果から、試験方法の課題を抽出し、試験法の改善案をまとめた。また、土の基本的な物理量から体積含水率～蒸発効率の関係を推定することのできる確率・統計を援用した数式モデルの提案を行い、室内試験結果を用いて妥当性の検証およびモデルの改良を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

降雨時および降雨後の斜面の安定性の定量的評価には、不飽和浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた数値解析が用いられる。不飽和浸透特性には、不飽和土の水分特性曲線および飽和・不飽和透水係数が必要であり、また、境界条件として雨量や蒸発量が用いられるが、バルク法による蒸発量推定には、不飽和土の蒸発効率が必要となる。よって、本研究課題の成果により、これら数値解析に必要な不飽和土の土質パラメータに関する土質試験法および推定方法が確立することができれば、降雨時に発せられた警報の解除に役立つ防災情報を定量的な評価結果を基に提供するための技術に役立つことができる。

研究成果の概要（英文）：An unsaturated seepage analysis and slope stability analysis are usually employed to estimate safety factors of slopes during rainfall. Then, the safety factor of slopes after rainfall is also important to cancel a warning on rainfall-induced slope failure. The properties of water retention, hydraulic conductivity and evaporation of unsaturated soils are important parameters to calculate a unsaturated seepage behavior and safety factor of a slope. The new laboratory experiment method for simultaneous measurement of these properties was proposed using HYPROP in this research. The validity of the measurement method was checked and points to be improved were discussed. Moreover, the mathematic model to estimate these properties was proposed based on physical and statistical consideration. The validity of the mathematical model was also inspected.

研究分野：地盤工学

キーワード：不飽和土 水分特性曲線 透水係数 蒸発効率

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

県や市町村の防災担当者へのヒアリングで、避難警報の解除のタイミングが困難であることが明らかになり、研究代表者らは、降雨時のみならず、降雨後の表層すべり型崩壊に対する斜面安定度評価に着目した研究を行ってきた<sup>1)</sup>。

降雨後の表層すべり型崩壊に対する斜面の安定性を検討するには、地表面からの蒸発量を把握することが必要である。蒸発量を直接現地で観測するには、ライシメータなどの設置が必要であるが、現地斜面計測システムのメンテナンス負担をできるだけ軽減するため、一般的な気象データ(気圧、気温、地表面温度、相対湿度)から蒸発量を推定できるバルク法<sup>2)</sup>を採用した。バルク法では、気象データに加えて、蒸発効率 $\beta$ や交換速度 $g_a$ が必要であり、特に、蒸発効率 $\beta$ は表層土の体積含水率や間隙径分布などに影響されると言われている<sup>3)</sup>。

そこで、研究代表者らは、蒸発効率の水分依存性(体積含水率～蒸発効率の関係)に関する室内土槽・水槽試験方法の提案、試験データの蓄積を行うと共に、含水比、土の密度と粒径加積曲線から蒸発効率の水分依存性を推定するための数式モデルの提案を行ってきた。

降雨時および降雨後の斜面安定度は、不飽和浸透解析と斜面安定解析を組み合わせた数値解析によって定量的な評価を行う。不飽和浸透解析には、不飽和土の水分特性曲線と飽和・不飽和透水係数が必要である。また、境界条件として雨量や蒸発量が用いられるが、バルク法による蒸発量推定には、不飽和土の蒸発効率が必要となる。そこで、本研究課題では、まず、同一の供試体から水分特性曲線・不飽和透水係数・蒸発効率を同時に得ることができる手法の提案に取り組む。また、数値力学モデルに関して、これまでの研究で明らかになった課題の解決のため、数値力学モデルの改良とその妥当性評価に取り組む。

### 2. 研究の目的

研究代表者らは、元東北大学理学部教授・近藤純正らの研究<sup>2),3)</sup>を基礎に、蒸発効率を得るための室内土槽・水槽試験装置を用いた試験方法を考案し、試験データの蓄積を行ってきた<sup>4)</sup>。また、不飽和土の保水・浸透特性に関する要素試験についても取り組んできており、蒸発法による水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置(HYPROP, METER社)を用いた室内試験を実施している。これらの試験を通して、室内土槽・水槽試験装置の土槽部分を水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置に置き換えることで、水分特性曲線、飽和・不飽和透水係数、蒸発効率を同一供試体から得る手法の開発を目指し、提案する室内試験法を実現するための試験装置の改良および妥当性の検討を行う。また、研究代表者らは、土の基本的な物理量(間隙比、含水比、粒度分布、土粒子の密度)から水分特性曲線および不飽和透水係数を推定する確率・統計を援用した数式モデル<sup>5)</sup>を提案してきた。本研究課題では、そのモデルを基礎に、体積含水率～蒸発効率の関係も推定できる数式モデルの提案および妥当性の検討を行う。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、1) 水分特性曲線、飽和・不飽和透水係数、蒸発効率の同時取得が可能な室内土質試験法の提案、2) 水分特性曲線、飽和・不飽和透水係数、蒸発効率に関する数式モデルの改良の2つのテーマに取り組む。まず、試験方法の提案について、蒸発法による水分特性曲線・不飽和透水係数測定装置(HYPROP, METER社)を活用した試験法について検討し、土質試験を実施し、そのデータを基に提案方法の妥当性評価を行うと共に、課題についてまとめる。また、数式モデルについて、土質試験結果との比較から、モデルの改良点について検討し、数式モデルの改良を試みる。

### 4. 研究成果

(1) 不飽和土の水分特性曲線、飽和・不飽和透水係数、蒸発効率の同時測定手法の提案

#### 測定手法の概要

これまで、研究代表者らは、図-1 に示す試験装置を用いて、図-2 に示すような手順で蒸発効率を求めていた。この試験方法は、近藤らの方法<sup>3)</sup>をもとに、交換速度 $g_a$ の算定法について独自の手法を用いた手法である。室内試験装置(図-1)は、気象観測装置、土槽試験用装置(土槽+電子

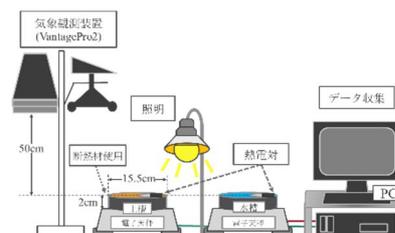


図-1 試験装置の概要(従来)<sup>4)</sup>

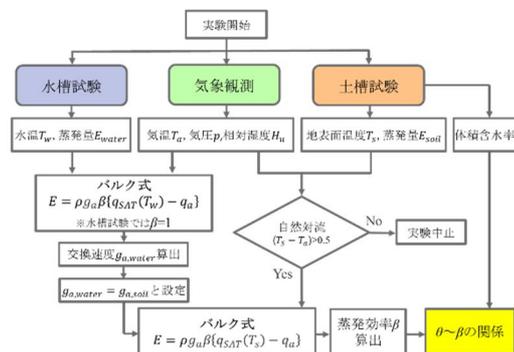


図-2 蒸発効率の測定フロー

天秤)と水槽試験用装置(水槽+電子天秤)で構成され、図-2に示すように、気象観測、水槽試験、土槽試験を同時に行い、気象観測と水槽試験の結果から水面における交換速度  $g_{a,water}$  を求め、 $g_{a,water}$  と地表面からの交換速度  $g_{a,soil}$  が等しいと仮定し、それを蒸発効率  $g_a (=g_{a,soil})$  として、土槽試験の結果とバルク法による蒸発量算定式(式(1))から  $\beta$  が算定される。

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

ここに、 $E$ : 蒸発量、 $\rho$ : 空気密度、 $q_{SAT}$ : 飽和比湿、 $q_a$ : 比湿、 $g_a$ : 交換速度、 $\beta$ : 蒸発効率。

一方、新たな試験方法として、図-3の土槽試験用装置を簡易蒸発法の保水性試験装置(HYPROP, METER社製)に置き換えることを考えた。簡易蒸発法は、図-3に示すように、供試体表面からの蒸発に伴う土中の水分移動から、供試体内に設置された2本のテンシオメータと電子天秤で土中の負の間隙水圧と供試体の重量(蒸発量)をそれぞれ測定し、不飽和土の水分特性曲線と不飽和透水係数を求めるものである。そこで、図-4に示すような試験装置を考えた。気象観測装置、土槽実験兼保水性試験用装置(HYPROP+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、図-5のフロー図のように、従来の土槽実験装置で計測していた供試体からの蒸発量を、HYPROPで計測することで、蒸発量と同時に保水・透水特性算定のための計測データが得られるように変更した。また、水槽試験は、水槽容器をHYPROPの供試体容器と同様の大きさ(内径8cm, 外径8.2cm, 高さ5cm)に変更した。HYPROPの保水特性の計測に影響を与えないように、土槽(HYPROP)と水槽の表面温度を非接触型の放射温度計(HORIBA社製)で計測した。

提案試験法の実現可能性の検討  
本研究では、実験1:HYPROPによる保水性試験(図-3)、実験2:従来手法(図-1)、実験3:提案手法(図-4)による試験を実施した。表-1に示す初期条件(補正後)で、実験1、実験2、実験3を行い、算定結果を比較することで提案試験法の実現可能性を検討した。図-6、図-7に、実験1と実験3で得られた水分特性曲線と不飽和透水係数の測定結果をそれぞれ示す。図より、提案手法(実験3)で、算定値から水分特性曲線と不飽和透水係数を求めることができた。また、提案手法(実験3)では、照明の影響で蒸発が早く進み、試験時間を短縮できた。不飽和透水係数は、照明を使用した提案手法(実験3)の方が安定した結果となった。

図-8に、実験2、実験3で得られた体

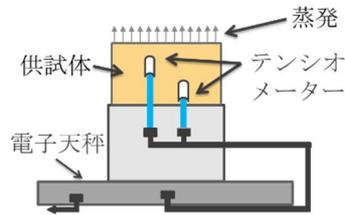


図-3 HYPROPの概要

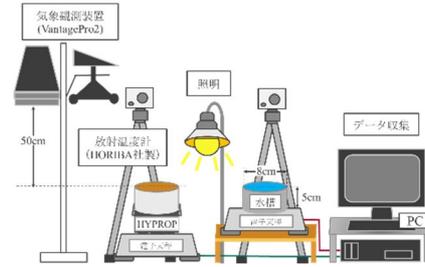


図-4 提案試験装置の概要(提案)

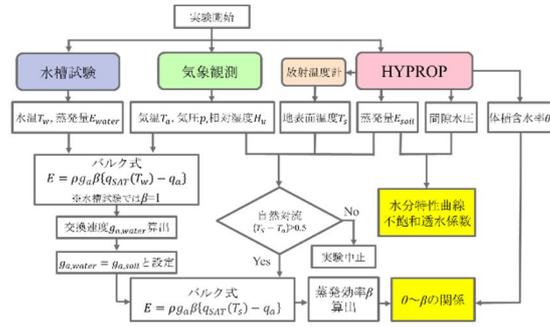


図-5 提案試験法の蒸発効率測定フロー

表-1 各実験の初期条件

実験	土試料	初期間隙比(-)	初期飽和度(%)	断熱材の使用	照明の使用
実験1: HYPROPによる保水性試験	豊浦砂	0.76	87	×	×
実験2: 従来手法	豊浦砂	0.75	78	○	○
実験3: 提案手法	豊浦砂	0.76	87	×	○

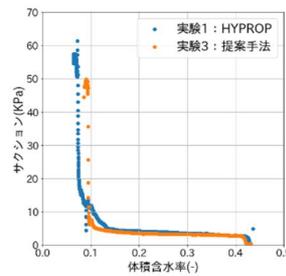


図-6 水分特性曲線

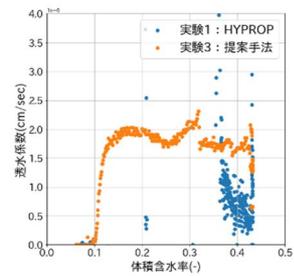


図-7 不飽和透水係数

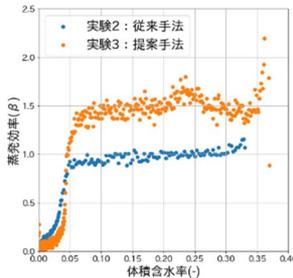


図-8 蒸発効率  $\beta$  と体積含水率  $\theta$  の関係

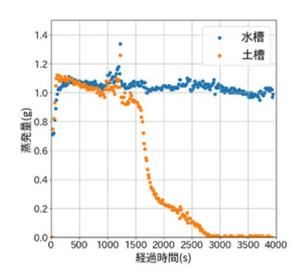


図-9 蒸発量の時間変化(実験2)

積含水率と蒸発効率の試験結果を示す。また、図-9は、実験2の土槽・水槽からの蒸発量の時間変化、図-10は、実験3の土槽・水槽からの蒸発量の時間変化を示す。図-8より、体積含水率が0.05付近から蒸発効率が急激に減少する特徴を、提案手法で概ね再現できた。しかし、蒸発効率は従来手法（実験2）より大きい算定値となった。蒸発効率は、土槽と水槽からの蒸発量が一致するときに1になる。そこで、図-9、図-10の蒸発量の計測値に着目すると、実験2では土槽からの蒸発量と水槽からの蒸発量が約1500秒経過するまでほぼ一致するが、実験3では、土槽（HYPROP）からの蒸発量と水槽からの蒸発量がほぼ一致する部分は僅かである。提案手法（実験3）において、HYPROPの側面に断熱材を付けていないことやHYPROPの構造などが影響している可能性が考えられる。

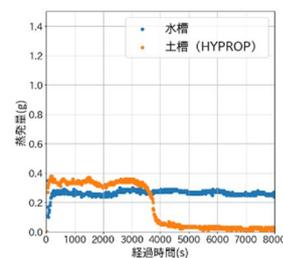


図-10 蒸発量の時間変化（実験3）

#### まとめ

本研究では、不飽和土の蒸発効率、水分特性曲線、不飽和透水係数を同時に同一供試体から得ることのできる室内試験法の提案を行った。その結果、提案手法において、不飽和土の保水・透水特性および蒸発効率を同時に得ることが可能であることがわかったが、蒸発効率の測定値が従来の方法に比べ、大きくなるのが課題として挙げられた。今後は、測定精度向上に向けた試験方法の改良を行っていきたい。

(2) 水分特性曲線、飽和・不飽和透水係数、蒸発効率に関する数式モデルの改良

#### $F(W_v)$ を推定するための数式モデル

$F(W_v)$ は、表層土壌中の水蒸気の分子拡散距離と呼ばれる長さの次元をもつパラメータであり、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を表す。 $F(W_v)$ は、長さの次元を持つパラメータであることに着目し、単位体積の最表層土内の間隙水の体積 $V_w$ を直径 $D_p$ の円管（以下、モデル円管）に置き換え、円管の長さを用いて $F(W_v)$ を表現する数式モデルを提案する。飽和時のモデル円管の長さを $L_{SAT}$ 、不飽和時のモデル円管の長さを $L$ と定義し、水蒸気が間隙中の水面から地表面へと移動することを考慮して $F(W_v)$ を $L_{SAT}$ と $L$ の差と定義する。また、土粒子実質部分の体積 $V_s$ 1単位あたりの水で満たされた間隙部分の体積を $e(d)$ と定義する。モデル円管を図-11に示し、 $L_{SAT}$ 、 $L$ 、 $F(W_v)$ 、 $e(d)$ の定義式をそれぞれ式(2)、式(3)、式(4)、式(5)に示す。

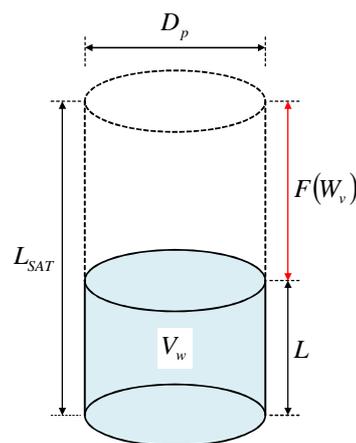


図-11 モデル円管

$$L_{SAT} = \left( \frac{e}{1+e} \right) / \left( \frac{D_p^2}{4} \pi \right) \quad (2)$$

$$L = \left( \frac{e}{1+e} \cdot S_r \right) / \left( \frac{D_p^2}{4} \pi \right) = \left( \frac{e(d)}{1+e} \right) / \left( \frac{D_p^2}{4} \pi \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F(W_v) &= L_{SAT} - L = \left\{ \frac{e}{1+e} (1 - S_r) \right\} / \left( \frac{D_p^2}{4} \pi \right) \\ &= \left[ \frac{1}{1+e} \{ e - e(d) \} \right] / \left( \frac{D_p^2}{4} \pi \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$e(d) = \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D_v) \cdot P_c(\theta) d\theta dD_v \quad (5)$$

ここに、 $V_e$ ：素体積の体積、 $V_p$ ：円管部分の体積、 $P_d(D_v)$ ：管径 $D_v$ の確率密度関数、 $P_c(\theta)$ ：円管の傾き $\theta$ の確率密度関数、 $d$ ：水分を保持している円管の最大管径。

計算を行うため、間隙モデル<sup>5)</sup>により間隙径分布の推定を行い、体積含水率 $W_v$ 、 $e(d)$ 、飽和度 $S_r$ の算定を行う。次に、間隙径分布と算定した $e(d)$ （または、飽和度 $S_r$ ）を用いて、 $F(W_v)$ を推定するための数式モデルにより $F(W_v)$ の算定を行う。その結果、体積含水率 $W_v$ と $F(W_v)$ の関係が得られる。

#### モデル円管の直径 $D_p$ の検討

$F(W_v)$ はモデル円管の直径 $D_p$ に依存しているため、図-8に示すモデルによる $F(W_v)$ の算定フローを用いて $F(W_v)$ の算定を行うためには、モデル円管の直径 $D_p$ の検討が必要となる。そこで、モデル円管の直径 $D_p$ を定義して $F(W_v)$ の算定を行い、室内試験による算定結果と比較することでモデル円管の直径 $D_p$ の検討を行った。

はじめに、確率変数である  $D_v$  の特性値に着目した。特性値として主要なものであり、確率分布の中心的位置を表す数値である代表値を考え、その一つである平均値(期待値)をモデル円管の直径  $D_p$  に用いた。すなわち、モデル円管の直径  $D_p$  として管径  $D_v$  の平均値  $\mu_v$  を用いて検討を行った(検討1)。モデル円管の直径  $D_p$  は式(6)で定義される。

$$D_p = \mu_v \tag{6}$$

検討1における算定結果より得られた体積含水率  $W_v$  と  $F(W_v)$  の関係について、室内試験による  $F(W_v)$  は、体積含水率  $W_v$  に対して非線形に変化しているが、検討1の結果、 $F(W_v)$  は体積含水率  $W_v$  に対して線形に変化しており、これは、管径  $D_v$  の平均値  $\mu_v$  が体積含水率  $W_v$  に対して常に一定であることが原因であると考えられる。そこで、 $F(W_v)$  を体積含水率  $W_v$  に対して非線形に変化させるため、モデル円管の直径  $D_p$  として、水分を保持している円管の最大管径  $d$  に着目した式を提案し、検討を行った(検討2)。検討

表-2 モデル円管の直径  $D_p$  の検討に用いる式

Case.1	水分を保持している円管の最大管径 $d$ を用いる。 $D_p = d$
Case.2	範囲 $0 \sim d$ における管径 $D_v$ の平均値を用いる。 $D_p = \int_0^d D_v \cdot \frac{P_d(D_v)}{\int_0^d P_d(D_v) dD_v} dD_v$
Case.3	範囲 $0 \sim d$ における管径 $D_v$ と確率の積の総和を用いる。 $D_p = \int_0^d D_v \cdot P_d(D_v) dD_v$

に用いた式を表-2 に示し、以下で、各 Case について述べる。

- ・Case.1: 水は、小さい間隙から順に入っていく、大きい間隙から順に蒸発していくと考え、 $F(W_v)$  に最も大きな影響を与える管径  $D_v$  は水分を保持している円管の最大管径  $d$  であると考えられる。そこで、水分を保持している円管の最大管径  $d$  をモデル円管の直径  $D_p$  として用いた。
- ・Case.2: 検討1で用いた管径  $D_v$  の平均値  $\mu_v$  が、管径  $D_v$  の全範囲における平均値であるのに対し、範囲  $0 \sim d$  における管径  $D_v$  の平均値をモデル円管の直径  $D_p$  として用いた。管径  $D_v$  の確率密度関数  $P_d(D_v)$  のを管径  $D_v$  の累積分布関数を用いて補正し、算定している。
- ・Case.3: Case.2 において管径  $D_v$  の確率密度関数  $P_d(D_v)$  の補正を行わず、モデル円管の直径  $D_p$  として用いた。

検討2における算定結果より得られた体積含水率  $W_v$  と  $F(W_v)$  の関係を図-12 に示す。各 Case において、 $F(W_v)$  は体積含水率  $W_v$  に対して非線形な変化となり、体積含水率  $W_v$  の増加に伴う  $F(W_v)$  の減少を表現することができた。しかし、 $F(W_v)$  の算定結果は室内試験による算定結果を大きく上回る値となった。これは、提案するモデルが単位体積の最表層土内の間隙水の体積  $V_w$  をモデル化していることが原因であると考えられる。つまり、単位体積の最表層土内には複数の間隙が存在しているため、モデルによる  $F(W_v)$  の算定結果が複数の間隙における  $F(W_v)$  の総和となっていると考えられる。したがって、今後は、モデル化する間隙水の体積に補正を行い、モデルによる  $F(W_v)$  の算定結果を一つの間隙のみにおける  $F(W_v)$  とする必要がある。

代わりに

モデルの妥当性評価の結果、モデル化の対象を単位体積の最表層土内の間隙水の体積  $V_w$  とすると、 $F(W_v)$  が過大評価されるため、この  $V_w$  の補正などを検討していく必要がある。

<引用文献>

- 1) 酒匂一成, 深川良一, 岩崎賢一, 里見知昭, 安川郁夫: 降雨時の斜面災害防止のための重要文化財周辺斜面における現地モニタリング, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.3, pp.57-69, 2006.
- 2) 近藤純正: 水環境の気象学 - 地表面の水収支・熱収支 -, 朝倉書店, pp.194-198, 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. Moriiwa, T. Satomi: Experimental Consideration of Evaporation Efficiency  $\beta$  of Unsaturated Sandy Soil Surface, Proc. of the 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, No.JPN-29, 2015.
- 5) K. Sako, R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, Soils and Foundations, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.

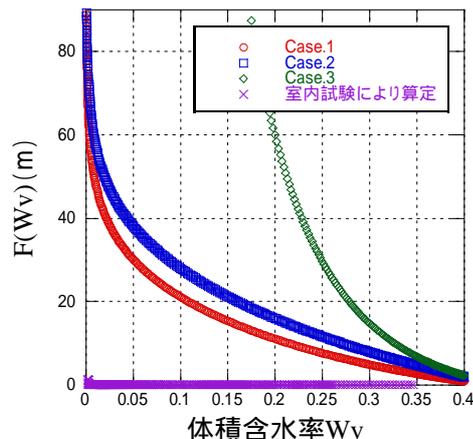


図-12  $W_v$  と  $F(W_v)$  の関係 (検討2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ryosuke Nakajima, Kazunari Sako, Shinichi Ito, Ryosuke Kitamura	4. 巻 -
2. 論文標題 Consideration on a characteristic length in a concept model for Soil-Water Characteristic Curves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of the Technical Forum on Mitigation of Geo-disasters in Asia	6. 最初と最後の頁 162-167
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田西健将, 軸屋雄太, 酒匂一成, 伊藤真一
2. 発表標題 粒度の違いが土の蒸発効率に与える影響に関する一考察
3. 学会等名 令和2年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuta Jikuya, Kazunari Sako, Shinichi Ito
2. 発表標題 A Consideration on Numerical Model for the Relationship Between Evaporation Efficiency and Volumetric Water Content
3. 学会等名 Proc. of 1st International Symposium on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中島亮輔, 酒匂一成, 伊藤真一, 北村良介
2. 発表標題 間隙モデルの素体積高さDchaに関する一考察
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Nakajima, Kazunari Sako, Shinichi Ito, Ryosuke Kitamura
2. 発表標題 Consideration on the relationship between soil properties and a characteristic length in a concept model for soil-water characteristic curve
3. 学会等名 Proc. of the 3rd Joint Seminar on Landslide, Flood Disasters and the Environmental Issues (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 軸屋雄太, 酒匂一成, 伊藤真一
2. 発表標題 蒸発効率の水分依存性のモデル化に関する一考察
3. 学会等名 Kansai Geo-Symposium 2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	伊藤 真一  (Ito Shinichi)  (20825690)	鹿児島大学・理工学域工学系・助教    (17701)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------