

## 雨水の浸透・蒸発挙動の計測とヒステリシスを考慮した数値シミュレーション

Field measurement for infiltration and evaporation behaviors and their simulations with hysteretic SWCC

宮本裕二\*, スリ ウィディアストゥティ\*\*, 松崎陽介\*\*, カロ アーウイン\*\*, 酒匂一成\*\*\*, 荒木功平\*\*\*\*, 北村良介\*\*\*\*\*

Yuji MIYAMOTO, Sri WIDIASTUTI, Yosuke MATSUZAKI, Erwin CALO, Kazunari SAKO, Kohei ARAKI  
and Ryosuke KITAMURA

\* 正会員 工博 鹿児島県企画部世界文化遺産課 (〒890-8577 鹿児島市鴨池新町 10-1)

\*\* 学生会員 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

\*\*\* 正会員 工博 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 株式会社ダイヤコンサルタント (〒331-8638 さいたま市北区吉野町 2-272-3)

\*\*\*\*\* 正会員 工博 鹿児島大学大学院理工学研究科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

### 英文要約

The infiltration and evaporation behaviors of unsaturated Shirasu soil are measured in the model ground of soil tank by rain gauge, tensiometers, moisture sensors, thermometers, and other meteorological devices. Then these behaviors are simulated by some numerical models proposed by Kitamura et al. The numerical model for soil-water characteristic curve (SWCC) can take account of the hysteresis in the drying and wetting processes, i.e., the main drying and wetting curves and scanning curves are obtained from the proposed numerical model. The numerical simulation results are compared with those measured in the soil tank for change in temperature, pore water pressure, volumetric water content in soil with time. It is found from these results that the proposed numerical models are promising to simulate the infiltration and evaporation behaviors in unsaturated soil.

**Key Words :** soil-water characteristic curve, hysteresis, unsaturated soil, temperature

### 1. はじめに

南九州に広く分布するしらす斜面では、豪雨時に表層すべり型の斜面崩壊が発生する。しらす斜面崩壊の直接的な原因は、多量の降雨によって地盤内へ雨水が浸透し、力学的平衡状態が保たれなくなったことにある。しかし、そのような状態に至る以前に地盤は雨水の浸透、日射による温度変化や間隙水の蒸発を繰り返している。このようなプロセスは地盤内の有効応力の変化を生じさせ、不飽和状態の土塊内に繰り返し荷重を与え、疲労破壊のような現象を生じさせているものと定性的には考えられる。したがって、不飽和土の力学特性を明らかにし、しらす斜面でしばしば発生する斜面崩壊のメカニズムを解明するには、不飽和土中の伝熱・浸透挙動の定量的評価が必要である。

本稿では、屋外土槽を用いて経時的に計測した温度・サクシジョンの計測結果から、不飽和土の伝熱・浸透挙動について考察する。また、Calo et al.<sup>1),2)</sup>が提案するヒステリシスを考慮した水分特性曲線を発展させ、走査曲線を予測可能な数値力学モデルを提案し数値実験を行う。さらに、屋外土槽計測結果と数値実験結果を比較し、提案する数値力学モデルの妥当性を検証するとともに、北村ら<sup>3)</sup>が行っている不飽和土を対象とした土質力学の体系化を目指した試みと本研究の成果について述べる。

### 2. 屋外土槽による計測

鹿児島大学北村研究室では、地盤表層部の雨水の浸透挙動および温度変化を測定するため、テンシオメーター、温度計、雨量計による現地計測システム<sup>4),5)</sup>を開発している。また、地表面の植生による雨水浸透・蒸発の影響を定量的に把握するため、植生で地表面を被覆した土槽と裸地の土槽を屋外に設置し、経時的に計測を行っている。図-1、図-2に屋外土槽計測システムの設置状況、概略図をそれぞれ示す。屋外土槽計測システムは、各土槽にテンシオメーター（設置深さ 20cm, 40cm）、温度計（設置深さ 5cm, 10cm, 30cm）、排水量計（土槽底面部）を配置し、気象観測装置により雨量、風力、湿度、日射量を観測している。

### 3. ヒステリシスを考慮した水分特性曲線

#### 3-1. 数値力学モデルの提案

水分特性曲線においてヒステリシス現象が見られ、同じサクシジョン値に対応する飽和度が排水過程において吸水過程より大きくなることが知られている。最近の実験的研究<sup>6)</sup>では、マイクロテンシオメーターを用いた保水性試験の時間短縮化や乾湿繰返しによるヒステリシスの実験結果が得られているが、従来法も含めヒステリシスの実験データの集積が十分であるとは言い難い。一方、ヒステリシス現象を表現するモデル<sup>7),8),9),10)</sup>が提案されているが、そ

これらのモデルの多くは、実験値にフィッティングする関数を選定し、パラメータを用いて水分特性曲線を求めるものである。しかし、それらのモデルは、物理的に意味のあるパラメータを用い、土粒子レベルからアプローチした統一的な数値力学モデルを確立しているものではないのが現状である。つまり、不飽和土は土粒子、間隙水、間隙空気から構成される不均一な三相混合体であり、不飽和土の特性である水分特性曲線をモデル化するためには土粒子レベルからのアプローチが必要であると考えられる。

Kitamura et al.<sup>11)</sup>は土粒子レベルで土粒子と間隙をモデル化し、不飽和土の保水・透水挙動に関する力学モデルを提案し、Sako et al.<sup>12)</sup>が改良を加えた（以下、KITA-SAKOモデルと称する）。図-3(a)は土粒子数個を含む微小要素（基本粒状体と称する）を示している。この微小要素は、図-3(b)に示すように直径が $D$ 、傾きが $\theta$ のパイプとその他の不透水部分にモデル化する（基本粒状体モデルと称する）ことができる。パイプの直径 $D$ と傾き $\theta$ を確率変数と見なし、

それぞれの確率密度関数 $P_d(D)$ 、 $P_c(\theta)$ を導入し確率論的考察を加えることによって、次式に示す土塊の間隙比 $e$ 、飽和度 $s_r$ 、サクシオン～飽和度関係（ $s \sim s_r$ 関係：水分特性曲線）を導いてきている。

$$e = \int_0^\infty \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (1)$$

$$s_r = \frac{1}{e} \int_0^d \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{V_p}{2} \frac{V_p}{V_e - V_p} P_d(D_v) \cdot P_c(\theta) \cdot d\theta \cdot dD \quad (2)$$

$$s = \gamma_w \cdot h_c = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \quad (3)$$

ここに、 $V_p$ ：円管の体積、 $DH$ ：素体積高さ、  
 $V_e$ ：素体積全体の体積、  
 $P_d(D)$ ：管径 $D$ の確率密度関数、  
 $P_c(\theta)$ ：円管の傾き $\theta$ の確率密度関数、  
 $h_c$ ：圧力水頭、 $T_s$ ：表面張力、  
 $\alpha$ ：毛細管と水の接触角、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量、  
 $d$ ：間隙水を保持する円管の最大管径。

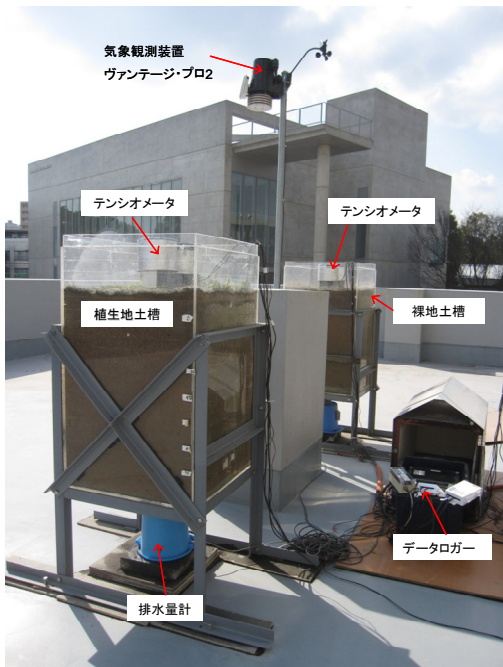


図-1 屋外土槽計測システムの設定状況

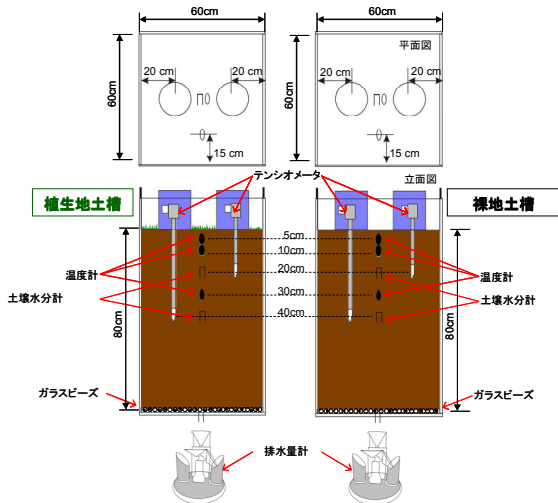
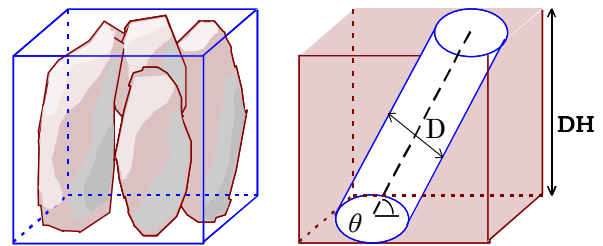
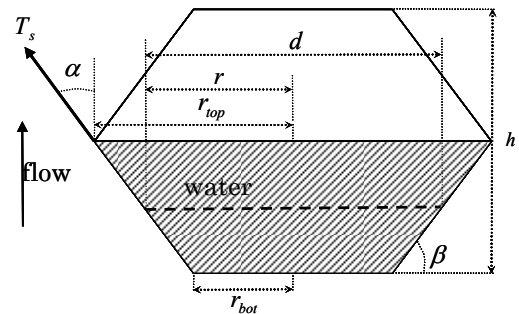


図-2 屋外土槽計測システムの模式図

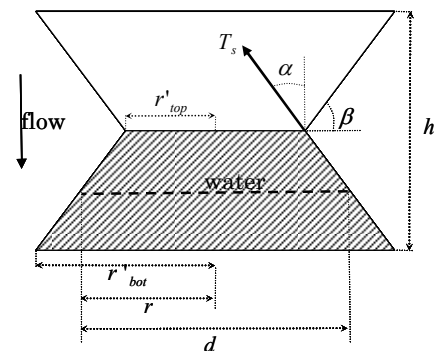


(a) 基本粒状体 (b) 基本粒状体モデル

図-3 KITA-SAKOモデルにおける土塊のモデル化



(a) 排水過程



(b) 吸水過程

図-4 ヒステリシスユニット

なお、KITA-SAKO モデルにおける残留飽和度  $s_{rmin}$  と擬似飽和度  $s_{rmax}$  は、締固め曲線をモデル化した KITA-ARA モデル<sup>13)</sup>から適用している。

さらに、Calo et al.<sup>1),2)</sup>は、図-4(a),(b)に示すヒステリシスユニットを用いた水分特性曲線のヒステリシスに関するインクビンモデルを提案し、主排水曲線 (Main Drying Curve : 以下、MDC) と主吸水曲線 (Main Wetting Curve : 以下、MWC) のモデル化を行っている。ヒステリシスユニットは、図-4(a),(b)に示す六角形を1ユニットとし、ユニットを鉛直方向に積み重ねる (ヒステリシスユニットの高さ  $h$  の合計  $\Sigma h$ ) ことにより、MDC, MWC を算定する数値力学モデルである。ヒステリシスユニットと表面張力  $T_s$  のなす角  $\alpha$ 、直径  $d$  (KITA-SAKOモデルの式(3)の間隙水を保持する円管の最大管径  $d$  と同値) の幾何学的関係、 $T_s$  と  $h$  から総ユニット数  $N$  を求める。  $N$  が増えると  $\Sigma h$  が増え、MDC, MWC のサクシオン値が大きくなる。

図-5はヒステリシスを考慮した水分特性曲線の模式図である。図-5に示すMDC (図中①) とMWC (図中②) の間には、吸水過程の走査曲線 (Wetting Scanning Curve : 以下、WSC (図中③)) と排水過程の走査曲線 (Drying Scanning Curve : 以下、DSC (図中④)) が存在する。

本稿では、経時的に変化する飽和度の履歴を入力値とし、サクシオンを予測するための数値力学モデルを提案する。

図-5よりWSC (図中③) は、飽和度の増加に伴いMDC (図中①) からMWC (図中②) に近づくことがわかる。また、DSC (図中④) は、飽和度の減少に伴いMWC (図中②) からMDC (図中①) に近づくことがわかる。

ここで、図-5中のMDCの飽和度を  $s_{r,dry}$ 、MWCの飽和度を  $s_{r,wet}$  とした数値力学モデル (水分特性曲面) を提案する。水分特性曲面の模式図を図-6に示す。図-6(a)の水分特性曲面は、図-5の飽和度  $s_r$  をMDCの飽和度  $s_{r,dry}$ 、MWCの飽和度  $s_{r,wet}$  に各軸をとり、水分特性曲線を曲面で表したものである。

図-6(b)は、図-6(a)に示す水分特性曲面の  $s_{r,wet} - s_{r,dry}$  平面にMDC (図中①)、MWC (図中②)、WSC (図中③)、DSC (図中④) を投影した模式図である。図-6(b)より、MDC (図中①) は  $s_{r,dry}$  軸上で飽和度が減少し、MWC (図中②) は  $s_{r,wet}$  軸上で飽和度が増加する。WSC (図中③) は、 $s_{r,wet} - s_{r,dry}$  平面上で飽和度が増加し  $s_{r,max}$  ( $s_{r,wet}$  軸) に向かう曲線となることが推測され、DSC (図中④) は  $s_{r,wet} - s_{r,dry}$  平面上で飽和度が減少し  $s_{r,min}$  ( $s_{r,dry}$  軸) に向かう曲線となることが推測される。

次に、図-5、図-6(b)中のE点を例として、サクシオンの計算手法を説明する。図-5に示すE点の飽和度を  $s_r = s_{r(E)}$ 、サクシオンを  $s = s_{(E)}$  すると、MDC, MWC のサクシオンはそれぞれ  $s_{dry} = s_{dry(E)}$ 、 $s_{wet} = s_{wet(E)}$  となる。図-6(b)に示すE点と原点  $O$  を結ぶ直線と  $s_{r,wet}$  軸とのなす角を  $\theta_w$ 、E点と原点  $O$  を結ぶ直線と  $s_{r,dry}$  軸とのなす角を  $\theta_d$  とし、 $s$  と  $s_{dry}$ 、 $s_{wet}$  の差と  $\theta_w$ 、 $\theta_d$  が比例関係にあると仮定すると次式となる。

$$\frac{s - s_{wet}}{s_{dry} - s} = \frac{\theta_w}{\theta_d} \quad (4)$$

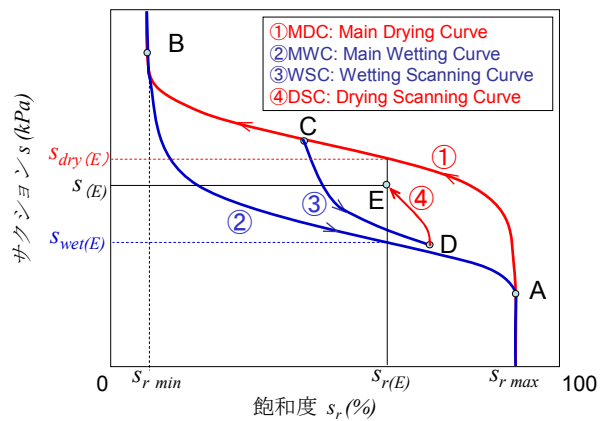
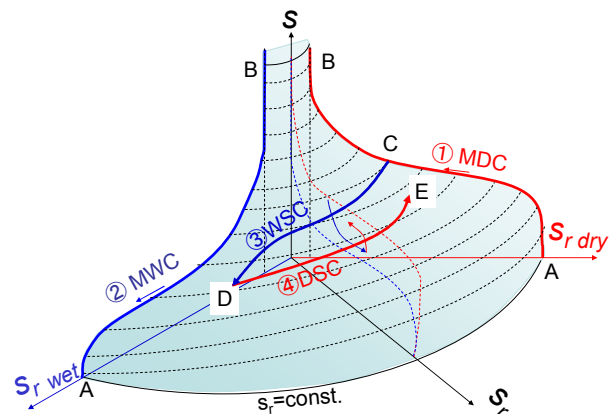
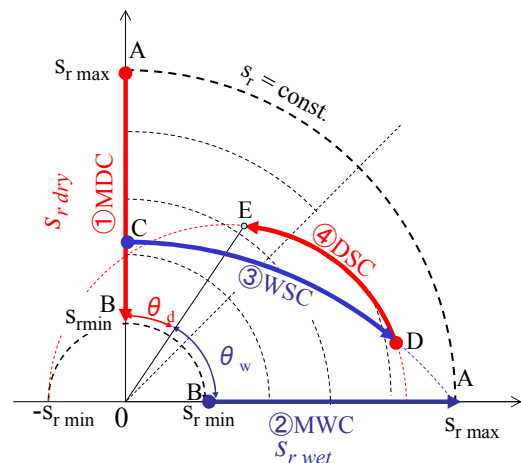


図-5 ヒステリシスを考慮した水分特性曲線の模式図



(a) 水分特性曲面 ( $s - s_{r,dry} - s_{r,wet}$  関係)



(b)  $s_{r,dry} - s_{r,wet}$  関係

図-6 水分特性曲面の模式図

ここで、 $\theta_w + \theta_d = \pi/2$  であることから、 $s$  は次式により求めることができる。

$$s = \frac{2}{\pi} (s_{dry} \cdot \theta_w + s_{wet} \cdot \theta_d) \quad (5)$$

### 3-2. WSC の計算手法

図-7は、飽和度  $s_r$  が増加し、MDC (図中①) とMWC (図中②) の間を移動するWSC (図中③-1, ③-2, ③-3) の模式図である。  $s_r$  の増加に伴い、 $s$  が減少し、MWC (図中

②) に近づいていく。吸水過程のヒステリシスユニットの  
 が排水過程のヒステリシスユニットと比べて多くなる(図  
 -6中③WSCから考えると $\theta_w$ が小さくなる) ことから、図  
 -8に示す $s_{rdry} - s_{rwet}$  の関係において、 $s_r$ が $s_{rwet}$ 上の最大飽和  
 度 $s_{rmax}$ に向かう曲線を仮定する。

図-9に示す中心 $(0, -a)$ 、半径 $r$ で、 $(s_{rwet}(t), s_{rdry}(t))$ 、 $(s_{rmax}, 0)$ を通る円によりWSCの $s_r$ による経路と定義すると、幾  
 何学的な関係より次式が成り立つ。

$$s_{rwet}^2 + s_{rdry}^2 = s_r^2 \quad (6)$$

$$s_{rwet}^2 + (s_{rdry} - a)^2 = r^2 \quad (7)$$

$$s_{rmax}^2 + a^2 = r^2 \quad (8)$$

$$s_r \cdot \cos \theta_w = s_{rwet} \quad (9)$$

$$s_r \cdot \cos \theta_d = s_{rdry} \quad (10)$$

式(6)~式(8)において、 $s_{rmax}$  はKITA-ARAモデルより  
 既知数、 $s_r$ は入力値、 $a$ 、 $r$ は $s_r$ が変化する直前の $s_r - s$  関  
 係の履歴から決定でき、それらを式(6)、式(7)に代入する  
 と、 $s_{rwet}$ 、 $s_{rdry}$ を求めることができる。さらに、 $s_r$ 、 $s_{rwet}$ 、  
 $s_{rdry}$ を式(9)、式(10)に代入し $\theta_w$ 、 $\theta_d$  求め、式(5)により $s$   
 を求めることにより、WSCの $s_r - s$  関係を求めることがで  
 きる。

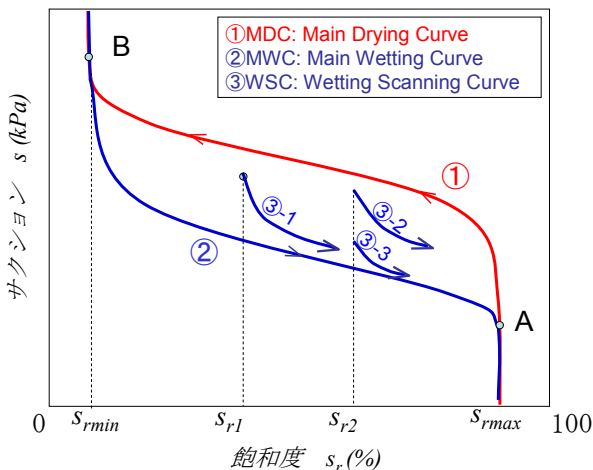


図-7 WSCの模式図

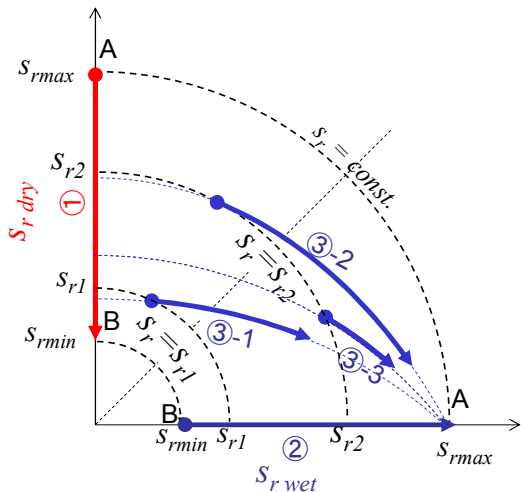


図-8  $s_{rdry} - s_{rwet}$  の関係 (WSC)

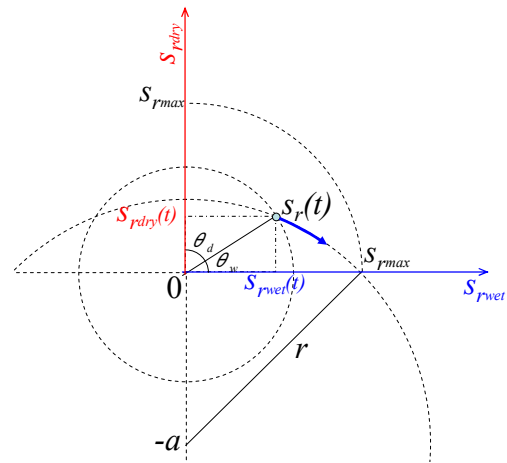


図-9 WSCにおける $s_r$  の変化

### 3-3. DSCの計算手法

図-10は、飽和度 $s_r$ が減少し、MDC (図中①) とMWC (図中②) の間を移動するDSC (図中④-1, ④-2, ④-3) の模式図である。

$s_r$ の減少に伴い、 $s_r$ が増加し、排水過程のヒステリシスユ  
 ニットが吸水過程のヒステリシスユニットと比べて多  
 くなる ( $\theta_w$ が大きくなる) ことから、図-11に示す $s_{rdry} - s_{rwet}$   
 の関係において、最小飽和度<sup>13)</sup>を $s_{rmin}$ とし、 $s_r$ が $s_{rwet}$ 上の  $-s_{rmin}$   
 に向かう曲線を仮定する。

図-11に示す中心 $(a, 0)$ 、半径 $r$ で、 $(s_{rdry}(t), s_{rwet}(t))$ 、 $(-s_{rmin}, 0)$ を通る円によりDSCの $s_r$ による経路を定義すると、幾  
 何学的な関係より次式が成り立つ。

$$s_{rwet}^2 + s_{rdry}^2 = s_r^2 \quad (11)$$

$$(s_{rwet} - s_{rmin})^2 + s_{rdry}^2 = r^2 \quad (12)$$

$$r = s_{rmin} + a \quad (13)$$

WSCと同様に式(2)、式(6)、式(7)および式(11)~式  
 (13)によりDSCの $s_r - s$  関係を求めることができる。

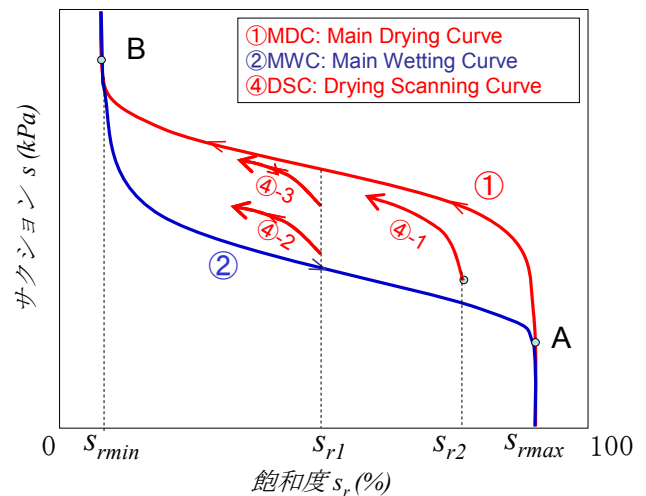


図-10 DSCの模式図

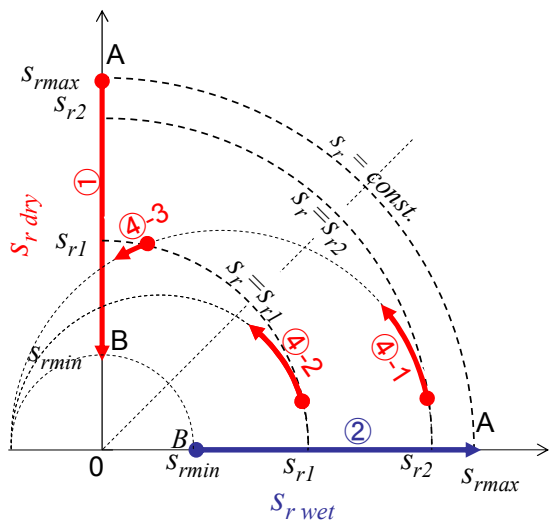


図-11  $s_{r\text{dry}} - s_{r\text{wet}}$  の関係 (DSC)

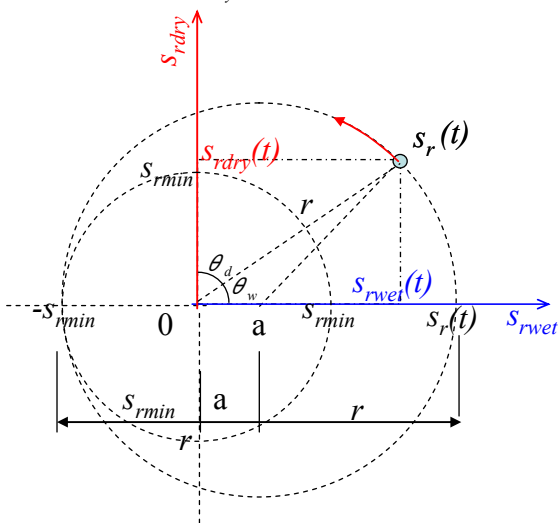


図-12 DSCにおける  $s_r$  の変化

以上により、飽和度の変化の履歴・ヒステリシスを考慮した水分特性曲線の数値力学モデルを構築する。

#### 4. 屋外土槽での計測結果および数値実験結果

表-1は、屋外土槽に用いたしらすの物性値である。粒度試験結果、土粒子の密度はモデルの入力値となる。裸地土槽、植生土槽どちらも土槽全体の土が均等となるように土を詰めた。

図-13は裸地土槽での温度・サクシオン・体積含水率・雨量・排水量の計測結果(2009年11月13日~11月27日)である。晴天時、日射の影響により地盤の伝熱が鉛直方向に徐々に進むため温度変化の周期が深さごとにずれ、日周期的な変動を示している。降雨時、地表面からの雨水浸透により体積含水率が大きくなり、サクシオンが減少する。また、鉛直方向の体積含水率、サクシオンの変化は、地表面に近い20cmの計測結果が40cmの計測結果より先に変化している。体積含水率は40cmの計測結果が20cmの計測結果より大きいことがわかる。

図-14は植生土槽での温度・サクシオン・体積含水率・雨量・排水量の計測結果(2009年11月13日~11月27

日)である。裸地土槽の計測結果と同様、晴天時、日射の影響により地盤の伝熱が鉛直方向に徐々に進むため温度変化の周期が深さごとにずれ、日周期的な変動を示している。降雨時、地表面からの雨水浸透により体積含水率が大きくなり、サクシオンが減少する。また、鉛直方向の体積含水率、サクシオンの変化は、地表面に近い20cmが先に変化していることがわかる。体積含水率は20cmの計測結果が40cmの計測結果より大きく、裸地土槽と異なる結果であり、植生により地表面の保水性が高い状態となっていることがわかる。

図-15、図-16は裸地土槽、植生地土槽における11月20日から11月27日までの降雨前後での深さ20cmサクシオンの計測結果である。図-15、図-16より、11月22日、11月24日の降雨によりサクシオンが減少している。図-15の裸地土槽では、サクシオンの減少にかかる時間がそれぞれ3時間、6時間であるが、図-16の植生地土槽では、サクシオンの減少にかかる時間が6時間、7.5時間であり、植生地土槽が裸地土槽に比べてサクシオンの減少にかかる時間が長いことがわかる。

図-17は裸地土槽のサクシオンと体積含水率関係(水分特性曲線)である。体積含水率が増加しサクシオンが小さくなる吸水過程と体積含水率が減少しサクシオンが大きくなる排水過程で経路が異なり、ヒステリシスが生じていることがわかる。深さ20cm、40cmの水分特性曲線に差異は、屋外環境での雨水浸透・蒸発の繰返しにより、土の間隙状態が変化したこと要因として推測される。

次に提案した数値力学モデルによる数値実験を行う。試料は川内川しらすを用い、表-2にKITA-ARAモデル<sup>13)</sup>の入力値、図-18に締固め曲線(実験値、計算値)、図-19に粒度試験結果(実験値、KITA-SAKOモデル<sup>12)</sup>による計算値)を示す。

表-1 物性値

|                                      |               |          |
|--------------------------------------|---------------|----------|
| 土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> ) |               | 2.407    |
| 自然含水比 $w_n$ (%)                      |               | 24.7     |
| 粒度試験結果                               | 礫分 (%)        | 8.4      |
|                                      | 砂分 (%)        | 57.0     |
|                                      | シルト分 (%)      | 27.7     |
|                                      | 粘土分 (%)       | 6.9      |
|                                      | $D_{50}$ (mm) | 0.1760   |
|                                      | $D_{20}$ (mm) | 0.0246   |
| 地盤材料の分類                              |               | 礫混り細粒分質砂 |

表-2 モデルの入力値<sup>12), 13)</sup>

|                             |                   |       |
|-----------------------------|-------------------|-------|
| 締固めエネルギー $E_c$ (kPa)        | 550               |       |
| 最大乾燥密度 $\rho_{d\text{max}}$ | 1.373             |       |
| 最適含水比 $w_{\text{opt}}$      | 0.247             |       |
| 間隙比 $e_{\text{opt}}$        | 0.869             |       |
| 入力パラメータ                     | $s_{r\text{max}}$ | 0.960 |
|                             | $w_m$             | 0.210 |
|                             | $e_m$             | 0.670 |
|                             | $e_l$             | 0.660 |

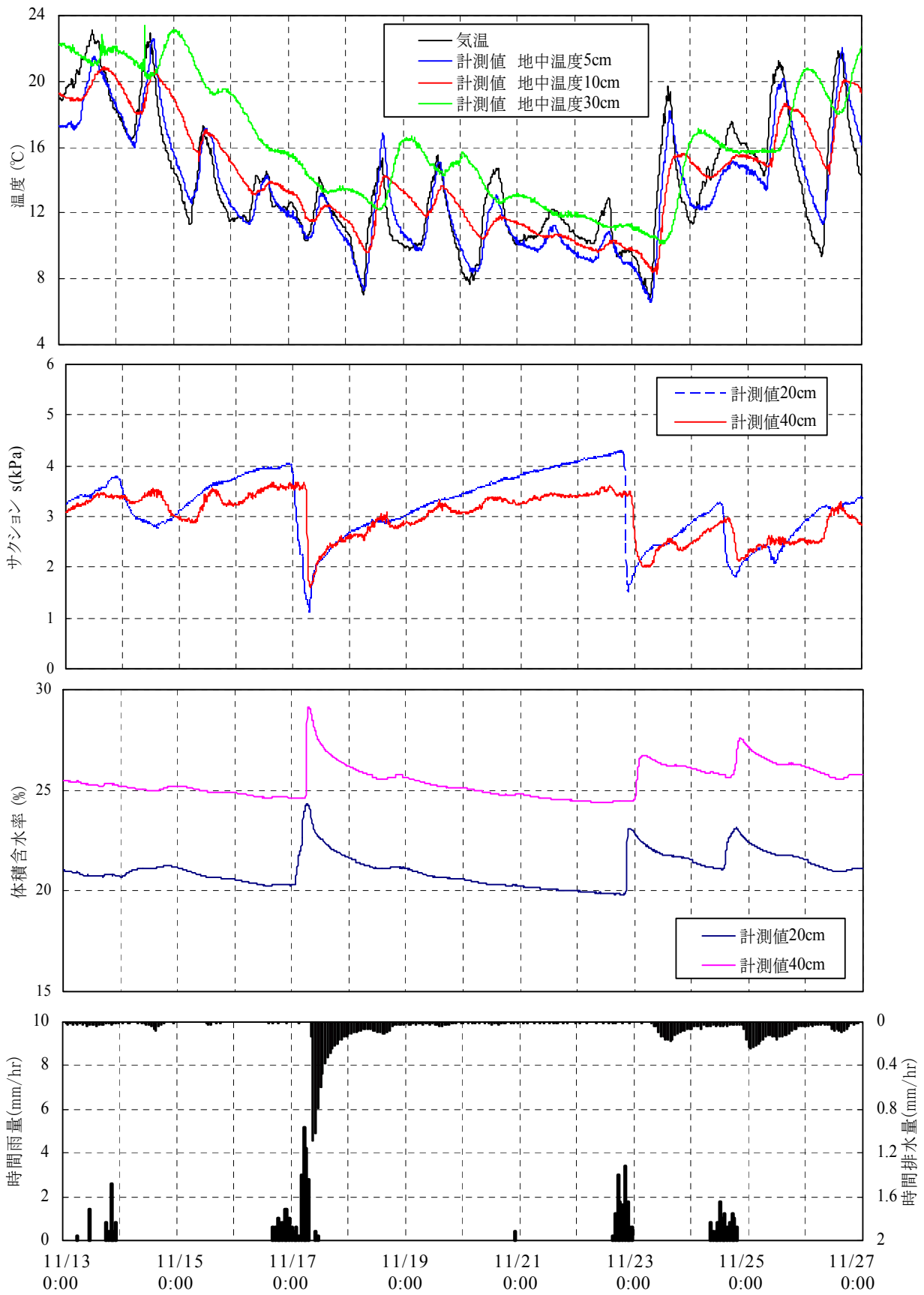


図-13 温度・サクシオン・体積含水率・雨量・排水量の計測結果 (裸地土槽)  
(2009年11月13日~11月27日)

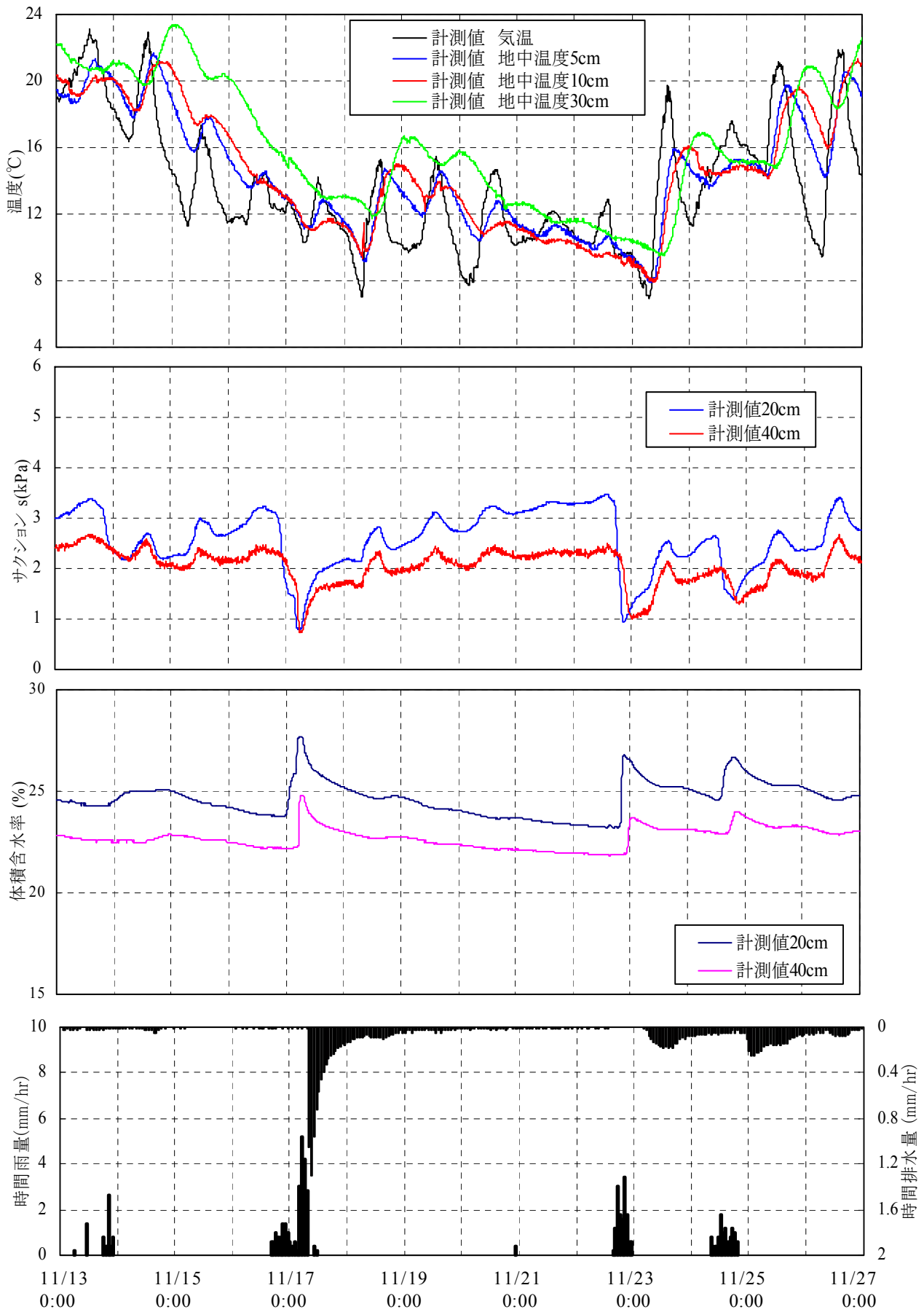


図-14 温度・サクシオン・体積含水率・雨量・排水量の計測結果 (植生地土槽)  
(2009年11月13日~11月27日)

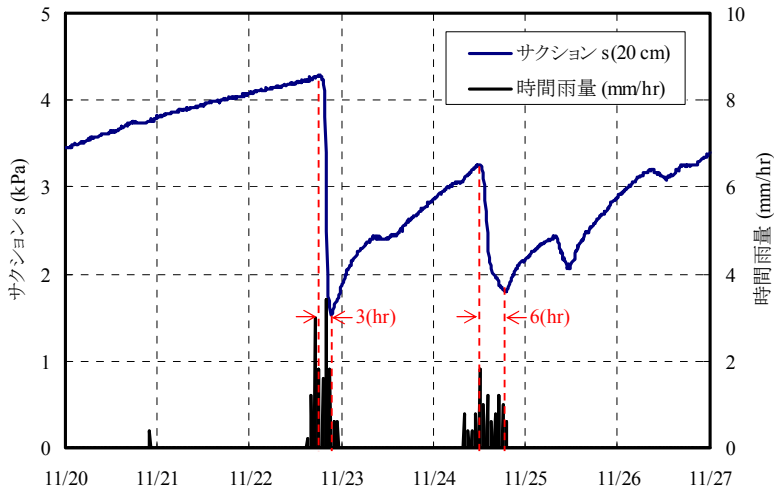


図-15 降雨前後でのサクシヨンの時間変化 (裸地)

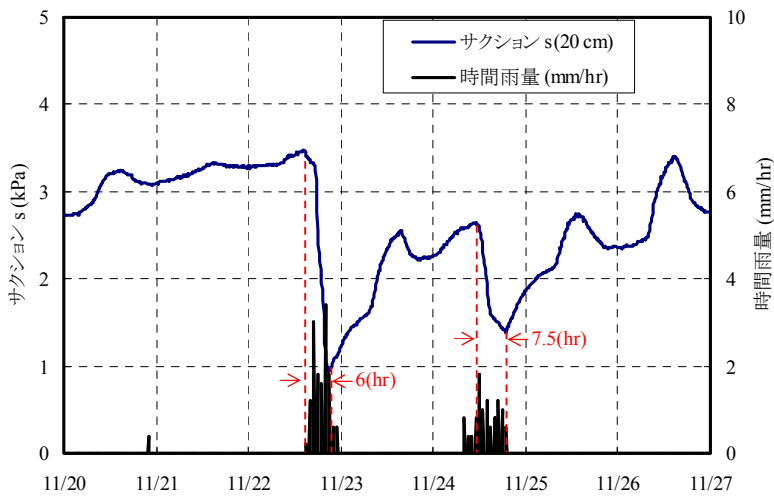


図-16 降雨前後でのサクシヨンの時間変化 (植生地)

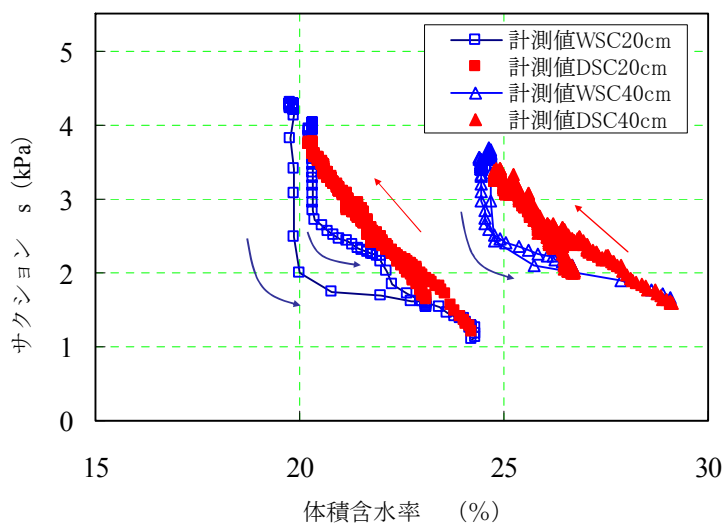


図-17 水分特性曲線 (裸地土槽：計測結果)

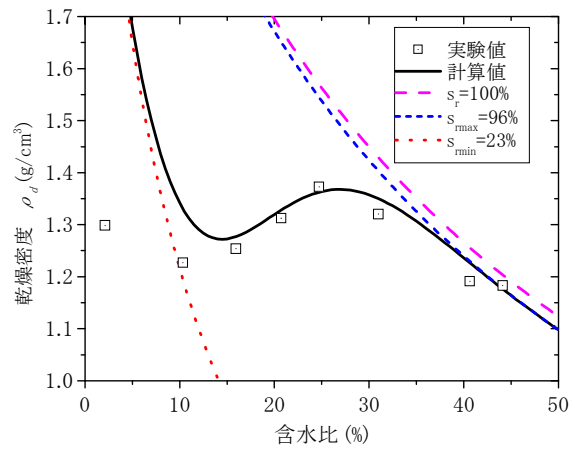


図-18 締固め曲線 (実験値, 計算値)

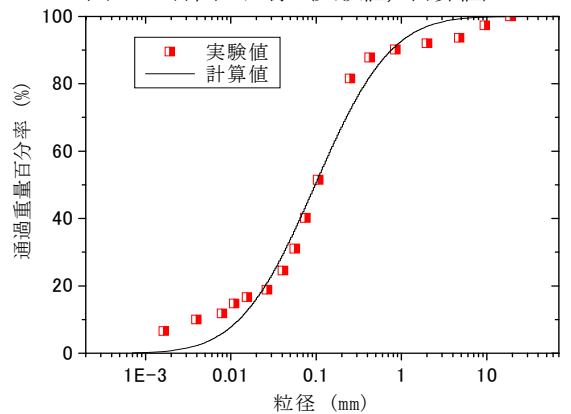


図-19 粒度試験結果 (実験値, 計算値)

図-20にサクシオン (計算値, 計測値), 雨量・飽和度の計測値と計測日時 (2009年6月) の関係を示す。図-20に示す飽和度 (深さ20cm) を入力値とし, 飽和度の変化が大きい2009年6月 (飽和度 $s_r$ =約50%~90%) の数値実験を行うことによりモデルの検証を行った。図-20より雨水浸透により飽和度が増加しサクシオンが低下し, その後, 無降雨時はサクシオンが増加しており, 計測値, 計算値に近い値を示していることがわかる。図-20のサクシオンと飽和度の関係から水分特性曲線を図-21に示す。

図-21より, 計測値の排水過程と吸水過程の経路が異なり, ヒステリシスが生じていることがわかる。これは, サクシオン-飽和度の関係が過去の履歴に影響されることを示している。また, ヒステリシスなしで計算した結果は, 排水過程と吸水過程が一致し, ヒステリシスを考慮した計算値は, 計測値と同じように排水過程と吸水過程が異なる結果となった。

図-22にヒステリシスを考慮した計算値のサクシオンと $s_{rdry}$ ,  $s_{rwet}$ の関係を示す。図-21ではDSC, WSCが同一平面で示されていたが, 図-22に示す $s_{rdry}$ ,  $s_{rwet}$ を用いることによって, 吸水過程と排水過程の変化を定量的に評価できる可能性があると推測される。



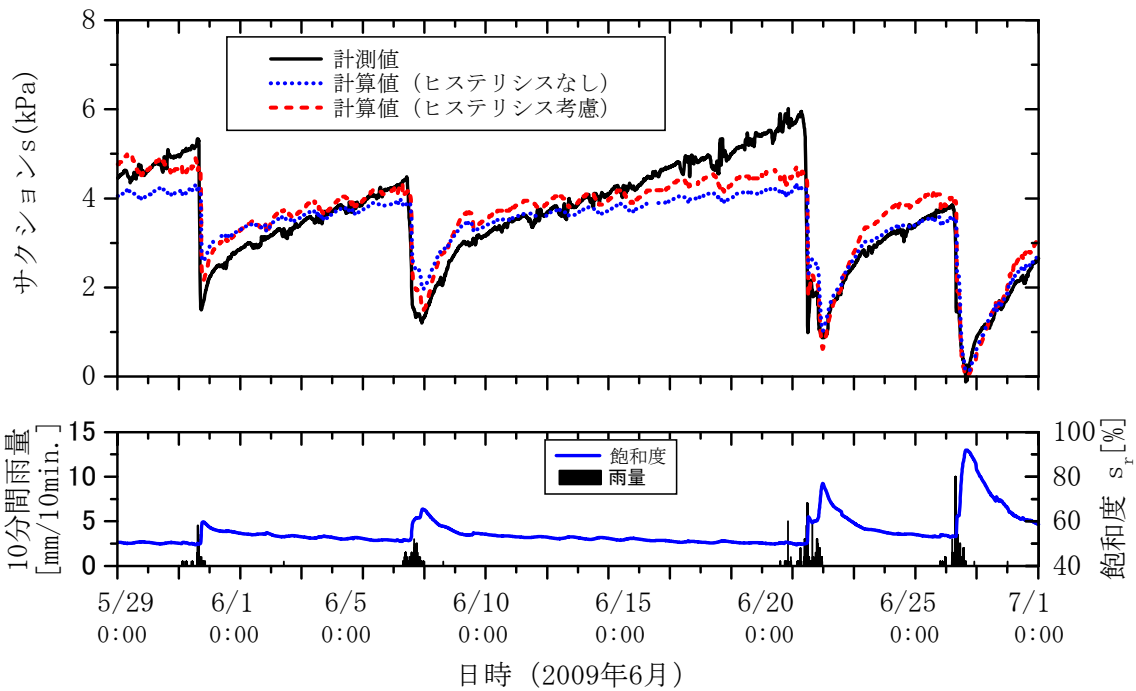


図-20 サクシヨン-飽和度-時間関係 (計測値, 計算値) [裸地土槽 深さ20cm]

図-23に $s_{rdy}-s_{rwt}$ の関係 (計算値) を示す。図-23より排水過程と吸水過程の経路が異なることがわかる。これは、提案する数値力学モデルにおいて、 $s_{rdy}-s_{rwt}$ 関係を単純化するために $s_r =$ 一定ラインを同心円で想定したためであり、今後 $s_{rdy}-s_{rwt}$ 関係の物理的根拠を理論的・実験的に解明する必要がある。

図-24 は、北村ら<sup>3)</sup>が提案する不飽和土質力学の体系化を目指した北村モデルの構成を示している。本稿で提案した数値力学モデルは、KITA-SAKO モデルの水分特性曲線、KITA-MIYA モデルの伝熱・蒸発現象による間隙流体の移動に関連し、地圏シミュレータを構築する上でも必要なモデルであるといえる。

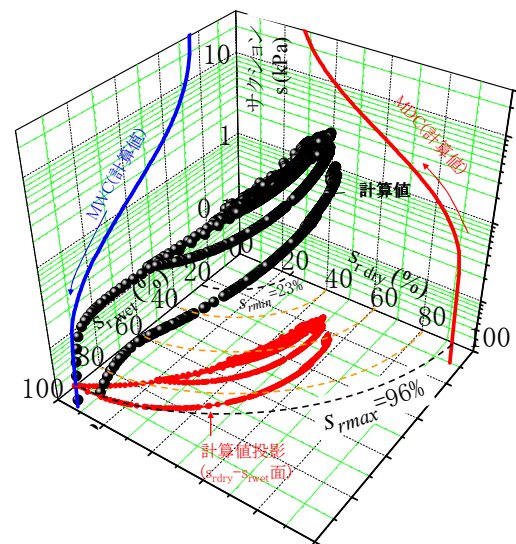


図-22 サクシヨン  $s - s_{rdy} - s_{rwt}$  の関係 (計算値)

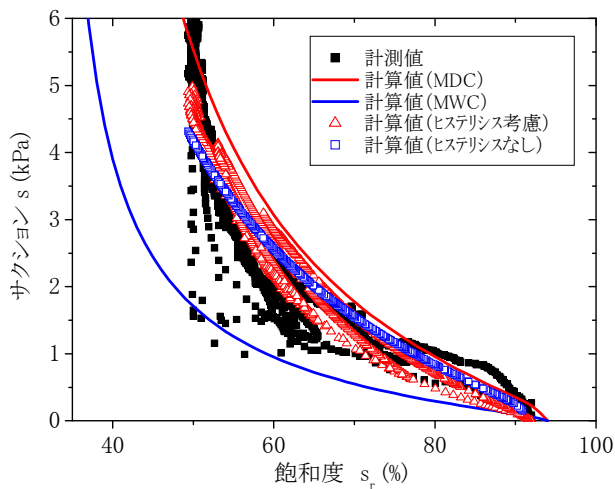


図-21 水分特性曲線 (計測値, 計算値)

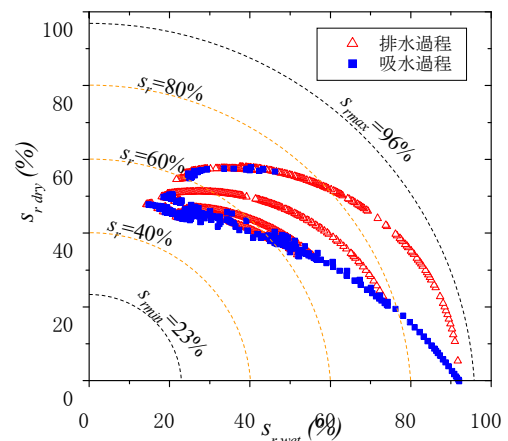


図-23  $s_{rdy}-s_{rwt}$  の関係 (計算値)

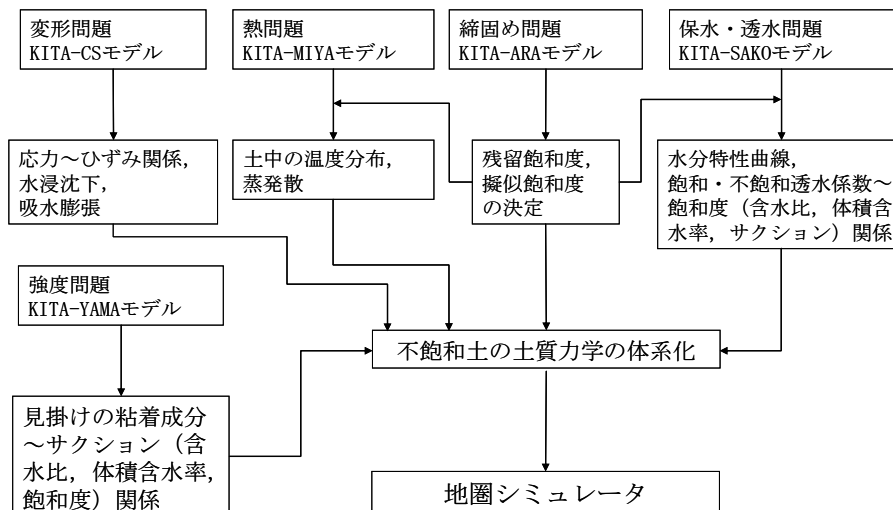


図-24 北村モデルの構成<sup>3)</sup>

## 5. おわりに

本稿では、屋外土槽を用いて経時的に計測した温度・サクシオンの計測結果から、不飽和土の伝熱・浸透挙動について考察するとともに、水分特性曲線のヒステリシスにおいて複雑な挙動となるDSC、WSCについて、 $s_{rdy}$ 、 $s_{wet}$ の関係を幾何学的に仮定し、飽和度を入力値として、サクシオンを計算する数値力学モデルを提案した。

本稿の研究成果を以下にまとめる。

- ・ 物理的に意味のある土粒子レベルからアプローチに確率論的な考察を加えたサクシオンのモデル化を進展させ、吸水過程・排水過程の過去の履歴を考慮できる数値力学モデルを構築した。
- ・ 屋外土槽実験(裸地、植生地)の計測システムを構築した。計測結果から吸水過程と排水過程の経路が異なるヒステリシスが確認できた。
- ・ 提案したモデルの妥当性を検証するため、数値実験結果と計測結果を比較した。モデルの妥当性・精度についての検討課題もあるが、提案するモデルは、走査曲線を定量的に評価できる可能性があることを示した。

今後の課題として、裸地土槽、植生土槽の計測結果を蓄積し、地表面の植生の違いによる雨水浸透、蒸発の違いを定量的に評価するために実験データを蓄積したい。また、本稿で提案したDSC、WSCの $s_{rdy}$ 、 $s_{wet}$ 関係について物理的意味を理論的に考察するとともに、KITA-MIYAモデル<sup>3)</sup>の改良を行い、不飽和地盤の伝熱・浸透挙動の数値力学モデルを構築したい。

## 参考文献

- 1) Calo, E., Sako, K. and Kitamura, R.: A consideration of hysteresis in unsaturated soil based from Kita-Sako model for slope stability studies, *Proc. 4<sup>th</sup> International Engineering Research Conference (IERC2010)*, pp.110-113, 2010.
- 2) Calo, E., Sako, K., Araki, K., Miyamoto, Y. and Kitamura, R.: A Probabilistic and Mechanical approach for Hysteresis of SWCC in Unsaturated

soil, *Geo-Frontiers 2011 Conference, Texas, USA* (submitted).

- 3) 北村良介, 酒匂一成, 荒木功平, 宮本裕二: 不飽和土の力学挙動のモデル化, 第44回地盤工学研究発表会, pp.643-644, 2009.
- 4) 宮本裕二, 城本一義, 北村良介: 不飽和地盤の温度・サクシオンの現地計測およびモデル化, 土木学会応用力学論文集, Vol.2, pp.593-598, 1999.
- 5) Widiastuti, S., Matsuzaki, Y., Miyamoto, Y. and Kitamura, R.: Measurement and Numerical Analysis For Infiltration and Evaporation Behavior in Unsaturated Soil, 土木学会論文集C, Vol. 66, No. 1, pp.58-65, 2010.
- 6) 森本紘文, 阿部廣史, 豊田富晴, 小西純一: 新しい保水試験法による乾湿繰返しについて, 第41回地盤工学研究発表会, pp.865-866, 2006.
- 7) (社)地盤工学会編: 不飽和地盤の挙動と評価, pp.35-42, 2004.
- 8) Kohgo, Y.: A hysteresis model of soil water retention curves based on bounding surface concept, *Soils and Foundations, Vol. 48, No. 5*, pp.633-640, 2008.
- 9) 太田大貴, 杉井俊夫: 間隙変化を考慮した土の保水性評価, 第44回地盤工学研究発表会, pp.965-966, 2009.
- 10) 菊本統, 京川裕之, 中井照夫: サクシオン履歴・間隙比・温度の影響を考慮した水分特性曲線モデル, 土木学会応用力学論文集, Vol.2, pp.343-352, 2009.
- 11) Kitamura, R., Fukuhara, S., Uemura, K., Kisanuki, J. and Seyama, M.: A numerical model for seepage through unsaturated soil, *Soils and Foundations, Vol.38, No.4*, pp.261-265, 1998.
- 12) Sako, K. and Kitamura, R.: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations, Vol.46, No.5*, pp.595-604, 2006.
- 13) Araki, K. and Kitamura, R.: Derivation of SWCC and Unsaturated Permeability Coefficient from Compaction Test based on Kitamura Model, *Proc. 3<sup>rd</sup> Asian Conference on Unsaturated Soils (Unsat-Asia2007)*, pp.327-333, 2007.

(2010年3月9日受付)