J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 102, p. 79～86 (2006)

# 撥水性砂層のぬれ性指標と水分特性

安 中 武 幸*

# Wettability Indices and Water Characteristics for Sands of Mixed Wettability

Takeyuki ANNAKA*

* Faculty of Agriculture, Yamagata University, 1-23 Wakaba-machi, Tsuruoka, Yamagata 997-8555, Japan

**Abstract**

Water-repellent soils have been known to cause finger-like wetting pattern. The objectives of this study are to measure some wettability indices and water characteristics for sands of mixed wettablity and to discuss relationships between the indices and the water characteristics. The WDPT (Water Drop Penetration Time) indicated the sands to be wettable or water-repellent, but it did not correspond to the water-entry pressure which is considered to show the degree of water-repellency. On the other hand, apparent contact angles measured by capillary rise method and sessile drop method showed good correlation with the water-entry pressure. Cassie's equation was found to give good estimations of the apparent contact angles for the sands of mixed wettability. Soil water characteristic curves showed clear transitions from hydrophilic domains to less hydrophilic or hydrophobic domains corresponding to the apparent contact angles. Furthermore, it was found that magnitude of soil-water hysteresis for the sand was affected by its wettability.

**Key words** : water-repellent sand, WDPT, contact angle, water-entry pressure, soil water characteristics

## 1. はじめに

世界各国，特にオランダ，ニュージーランド，アメリカなどで撥水性を示す土壌の存在とそれが不均一な土壌水分分布や不均一な流れの発生，さらには土壌浸食促進の要因となっていることが報告されている（Wallis and Horne, 1992)。わが国でも，報告例は少ないものの，大政（1951），Nakaya *et al.*（1977 a, b)，仲谷（1981)，Nakaya（1982)，小林ら（1996)，小林（1999)，川本・Banyar（2004）によって，撥水性土壌の存在が報告されている。最近では，撥水性土壌が局地的な特殊事象ではなく世界的規模の一般的事象であるとの認識が広まりつつある（DeBano, 2000)。

化学物質により撥水処理された砂と親水性の未処理砂との混合物を用いて，撥水性が水分特性や浸潤過程に及ぼす影響の検討が行われてきた（Watson and Letey, 1970 ; Bauters *et al.*, 1998, 2000 ; Ustohal *et al.*, 1998)。このようなモデル試料の使用は，砂層の，撥水性をも含む意味での，ぬれ性と水分特性・浸潤過程との関わり，および，そのメカニズムを明らかにする上で有効な手段の一つと考えられる。

本研究では，市販の海砂を用いて，水洗いしたものと撥水処理したものの混合物を種々作成し，それらのぬれ性指標と水分特性を測定した。そして，ぬれ性指標相互の関連，および，ぬれ性と水分特性との関連を考察した。

## 2. 試料と方法

### 2.1 用いた試料とぬれ性の調整方法

試料は市販の海砂（和光純薬工業）であり，粒径 0.3 mm～0.6 mm，粒子密度 2.65 g/cm$^3$ である。購入した海砂を水道水で洗った後蒸留水で良くすすぎ，105℃で 24 時間炉乾燥させ，室温まで冷えてから 0.85 mm ふるいを

*山形大学農学部 〒997-8555 山形県鶴岡市若葉町 1-23
キーワード : 撥水性砂層，WDPT，接触角，水浸入圧，水分特性

通過させたものを「水洗い砂」とした。海砂の撥水処理には，固体表面を水にぬれにくくするためによく用いられるOTS（octadecyltrichlorosilane $CH_3(CH_2)_{17}SiCl_3$；信越化学工業）を用いた（ドゥジェンヌら，2003）。乾いた海砂5 kgと重量濃度5%のOTSを含んだエタノール溶液1 kgをミキサーで5時間混合させ，風乾した後蒸留水で良く洗い，105℃で炉乾燥した（Bauters *et al.*, 1998）。炉乾後0.85 mmのふるいを通過したものを「OTS処理砂」とした。OTS処理砂と水洗い砂を混合して，混合率0%，25%，50%，75%，100%の試料を作成した。ここに，

$$\text{混合率}(\%)=\frac{\text{OTS処理砂(kg)}}{\text{水洗い砂(kg)}+\text{OTS処理砂(kg)}}\times 100 \quad (1)$$

である。すなわち，混合率0%は水洗い砂のみの試料であり，混合率100%はOTS処理砂のみの試料である。

### 2.2 ぬれ性指標とその測定方法

土壌のぬれ性指標として，水滴浸入時間（WDPT；Water Drop Penetration Time），みかけの接触角（apparent contact angle），90°表面張力（NDST；Ninety-Degree Surface Tension），水浸入圧（water-entry pressure）など様々な指標が提案されている（宮本，1971；Wallis and Horne, 1992；Letey *et al.*, 2000）。本研究では，WDPT，みかけの接触角，水浸入圧を測定した。

#### 2.2.1 WDPT

WDPTは土壌表面にたらした水滴が浸入・消失するまでに要する時間のことであり，撥水性の安定性を示す指標と考えられている（Letey, 1969；Letey *et al.*, 2000）。一方，この時間の長短を撥水性の強さと関連付けている報告もある（King, 1981；Bisdom *et al.*, 1993；Bauters *et al.*, 1998；川本・Banyar, 2004）。

内径約5 cm, 高さ2 cmの有底のアクリルリングに，乾いた試料をランドマイザーを通して充填し表面を平らにならした後，マイクロシリンジを用いて50 $\mu l$の水滴をランダムに3滴たらした。これらの水滴が全て浸入するまでの時間を測定し，それをWDPTとした。

#### 2.2.2 みかけの接触角

平らで滑らかな固体表面に液滴ができる場合，すなわち不完全なぬれの場合，固-液界面から気-液界面に向かって測られた角度は接触角と呼ばれ，ぬれ性の指標となる（例えば，石黒・コパル，2000）。しかし，粒子充填層は平らでも滑らかでもないため，このような接触角は定義できない。代わりに，種々の方法で「みかけの接触角」が測定されている。本研究では，以下の3つの方法でみかけの接触角を測定した。

① Sessile Drop法

この方法は，平らな板の表面に粒子を平面的に配列させた試料を作成し，その表面に形成する水滴について幾何学的計測を行ない，みかけの接触角を推定するものである（Bachmann *et al.*, 2000）。平らなアクリル板の表面に両面テープをはり，粘着面上に乾いた試料を散布する。荷重をかけて平らにならし，過剰な粒子を取り除いた後，マイクロシリンジを用いて10 $\mu l$の水滴を試料表面に作り，真横からマイクロメータで必要な諸元を測定した（図-1）。みかけの接触角$\theta$が90°未満のときは，水滴の高さhと水滴が試料と接する面の半径jを，$\theta\geq 90°$のときは，水滴の高さhと半径rを測定し，これらの値から次式によりみかけの接触角を推定した。

$$\theta<90°\text{の場合}\quad \theta=180°-2\alpha,\quad \tan\alpha=\frac{j}{h} \quad (2)$$

$$\theta\geq 90°\text{の場合}\quad \theta=\beta+90°,\quad \sin\beta=\frac{h-r}{r} \quad (3)$$

なお，水滴体積を10 $\mu l$と小さくしたのは，重力の影響が無視できるようにするためである。この場合，水滴の大きさは，球および半球を仮定するとそれぞれ半径1.3 mm, 1.7 mmとなる。

② $\gamma_{ND}$法

この方法は，測定対象土壌に対してみかけの接触角が90°となる液体の表面張力，すなわち90°表面張力$\gamma_{ND}$を測定し，

$$\cos\theta=(\gamma_{ND}/\gamma_l)^{\frac{1}{2}}-1 \quad (4)$$

からみかけの接触角$\theta$を推定する方法である（Watson and Letey, 1970；Carrillo *et al.*, 1999；Feng *et al.*, 2001）。ここに，$\gamma_l$は水の表面張力であり，$\gamma_{ND}$はWDPTが5秒となる液体の表面張力として与えられる（Watson and Letey, 1970）。

WDPT試験と同様にアクリルリングに乾いた試料を充填し表面をナイフでならした後，種々の重量濃度（weight%）に調整したエタノール水溶液を用いて，たらした液滴が5秒で浸入する濃度を探した。社団法人アルコール協会が提供しているエタノール水溶液の重量濃度と表面張力の関係（図-2）を用いて，$\gamma_{ND}$を決定した。この値と水の表面張力を上式に代入して$\cos\theta$を求めた。

③ 毛管上昇法

この方法は，毛管上昇高に関する次の関係に基づいている（Letey *et al.*, 1962；Emerson and Bond, 1963；石黒・コパル，2000）。

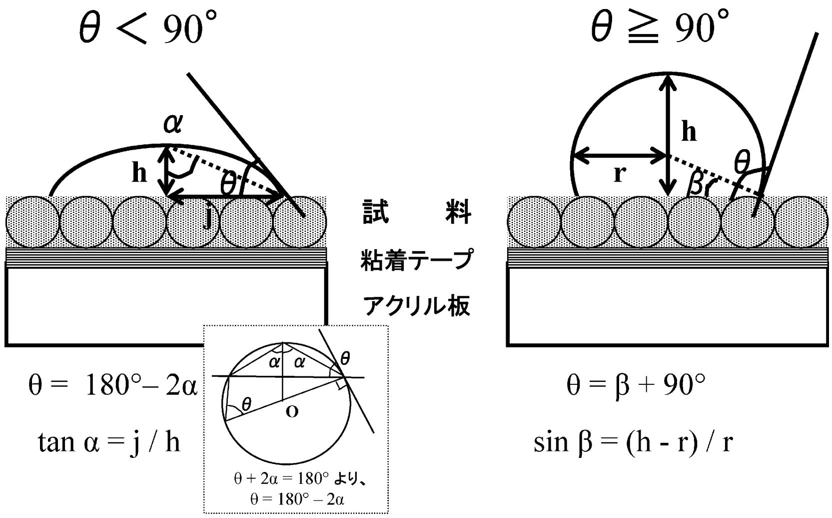



**図-1**　Sessile drop 法（Bachmann *et al.*, 2000）による接触角測定の説明図

**Fig. 1**　Illustration of the sessile drop method developed by Bachmann *et al.* (2000) for measuring contact angle.

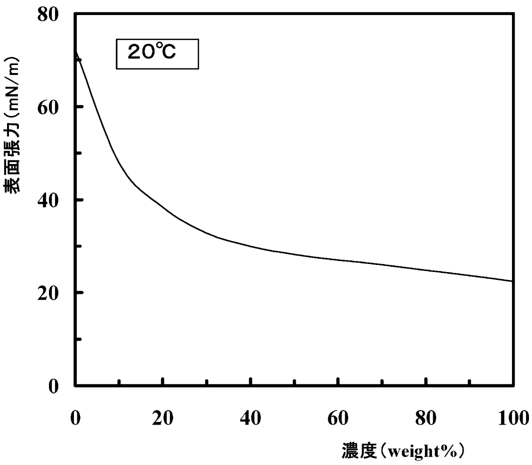



**図-2**　エタノール水溶液の重量濃度と表面張力の関係（社団法人アルコール協会による）

**Fig. 2**　Relationships between surface tension and weight% of ethanol-water solution.

$$H_C = \frac{2\gamma_l \cos\theta}{\rho g r} \tag{5}$$

ここに，$H_C$ は毛管上昇高，$\gamma_l$ は水またはエタノールの表面張力，$\rho$ は水またはエタノールの密度，$g$ は重力加速度，$r$ は充填層の間隙を一本の管とみなした時の半径（等価毛管半径）である。まず，砂層に対するエタノールのみかけの接触角が 0 であると仮定して毛管上昇高を測定し，上式から等価半径 $r$ を求める。次に，水を用いて毛管上昇高を測定し，先に求めた $r$ を用いてみかけの接触角を算出する。

ここでは，$H_C$ を求めるのに毛管上昇速度に関する次式を用いた（Emerson and Bond, 1963）。

$$\frac{dx}{dt} = \frac{k}{\varepsilon}\left(\frac{L-h}{x} - 1\right) \tag{6}$$

ここに，$x$ は浸潤前線の位置，$dx/dt$ は毛管上昇速度，$k$ は浸潤域の透水係数，$\varepsilon$ は間隙率，$h$ は浸潤前線における圧力水頭，$L$ は試料下端の圧力水頭である。$dx/dt$ が $1/x$ に比例することから，このプロットの回帰直線を求め，$dx/dt=0$ となる $x$ を求める。$H_C$ は液面からの上昇高なので，

$$H_C = x - L \tag{7}$$

となる（図-3）。

#### 2.2.3　水浸入圧

乾いた中粗粒砂に十分低い負圧の水が接しても水の浸入は生じないが，水圧が徐々に高くなりしきい値を越えると水が浸入し始める。このしきい値を水浸入圧と呼ぶとき，これが正圧となる場合が撥水性土壌である（Bauters *et al.*, 1998 ; Wang *et al.*, 2000）。

直径 2 mm の小孔をあけた底面を持つ，内径 3.2 cm のアクリル円筒に乾いた試料をランドマイザーを通して

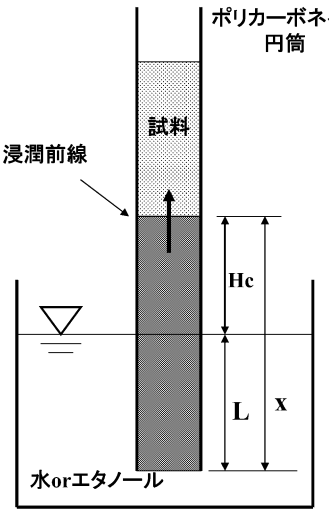



**図-3**　毛管上昇法による接触角測定の説明図
**Fig. 3**　Illustration of the capillary rise method for measuring contact angle.

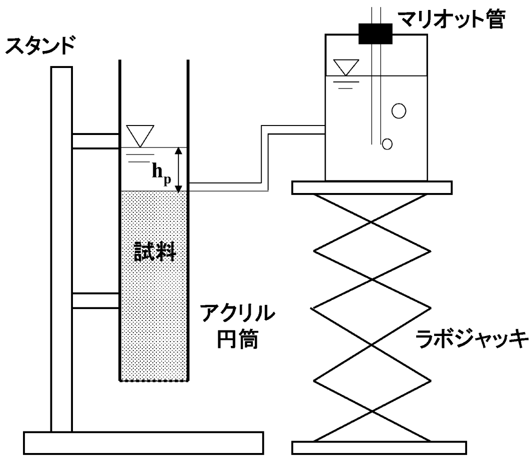



**図-4**　水浸入圧測定装置の概要
**Fig. 4**　Schematic illustration of instrument used to measure water-entry pressure.

充填する。ラボジャッキを操作してマリオットタンクの高さを変えることにより湛水深を徐々に（1 cm/min 程度の速度で）増大させ，水の浸入が観察された時の水深を水浸入圧とした（図-4）。

**2. 3　水分特性**

乾燥試料への吸水過程および飽和状態からの脱水過程の水分特性を，土柱法によって測定した。試料円筒は，内径 4.95 cm・高さ 2.0 cm のアクリルリングを積み重ねて作成した。その際，ビニルテープを何重にも巻いて水密性・気密性を確保するように努めた。吸水過程については，乾いた試料をランドマイザーを通して円筒に落下充填（高さ 30 cm）した後，ただちにマリオット装置を用いて試料下端に混合率に応じて一定の正圧を与えて毛管上昇させ，24 時間後にリングを切り離して含水量を測定した。一方脱水過程については，乾いた試料をランドマイザーを通して落下充填（高さ 40 cm）した後，飽和状態を作出するために，充填された乾燥試料にマリオット装置を用いて下端から水を圧入した。その際，大きな間隙のみに水が浸入し小さな間隙に空気が残ることのないように，40 cm の試料の飽和に 2 時間かけゆっくり給水した。また，混合率が高く撥水性の強い試料の充填層上部に水を圧入する際，砂粒子が持ち上げられることがあったため，それを防ぐために砂の表面に径 4 mm のガラスビーズを載せ押さえとした。試料上部まで飽和後，排水位を試料下端から 5 cm 下に設定し排水を開始した。24 時間後にリングを切り出し，含水量を測定した。土柱法では毛管上昇および排水が停止し平衡に達した時の圧力水頭と含水量との関係を測定する。本研究では，静置時間を 24 時間と 72 時間とした時の比較を行ないほぼ等しい水分分布が得られた（吸水・脱水過程ともに）ので，平衡時間を 24 時間として測定した。なお，各試料について 3 反復の測定を，20℃に設定された恒温室内で行なった。

## 3.　結果と考察

**3. 1　ぬれ性指標**

ぬれ性指標の測定値一覧を表-1 に示した。WDPT は，混合率 0%（水洗い砂のみの試料）で 0 秒，混合率 25% で 3 秒であったほかは，全て 3600 秒を越えた。WDPT による撥水性の区分として，5 秒未満を Wettable, 5 秒〜600 秒を Slightly water repellent, 600 秒〜3600 秒を Severely water repellent, 3600 秒を越えるものを Extremely water repellent とすることが提案されている（Bisdom *et al.,* 1993）。この区分からすると，混合率 25% 以下では Wettable であるが，混合率 50% 以上で Extremely water repellent となる。みかけの接触角については，測定方法によって測定値に差がみられた。前進接触角を測定する sessile drop 法と毛管上昇法の実測値はかなり良い一致を示したが，$\gamma_{ND}$ 法の測定値は試料間の差が他の 2 方法に比べ小さかった。水浸入圧は sessile drop 法と毛管上昇法の実測値と良く対応している。すなわち，混合率 25% 以下では接触角が 90°未満で水浸入圧は負圧であり，混合率 50% 以上では接触角が 90°を越え水浸入圧が正圧となっている。なお，混合率

**表-1**　混合砂のぬれ性指標実測値一覧

**Table 1**　Measured values of wettability indices for mixed sand

| 混合率 | WDPT | みかけの接触角† | | | 水浸入圧 |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Sessile drop 法 | $\gamma_{ND}$ 法 | 毛管上昇法 | |
| % | sec | degree | | | cm |
| 0 | 0 | 53±4 | — | 58±2 | −8‡ |
| 25 | 3 | 83±6 | 90 | 82±1 | −1‡ |
| 50 | ＞3600 | 92±2 | 102 | 93±1 | 1.2 |
| 75 | ＞3600 | 105±7 | 104 | 116±6 | 3.7 |
| 100 | ＞3600 | 126±7 | 106 | 134±6 | 5.8 |

†「平均±標準偏差」で示した。反復数は，Sessile drop 法では 3，$\gamma_{ND}$ 法ではなし，毛管上昇法では混合率 0%〜50% が 3 で 75% と 100% が 6 である。
‡吸水過程の水分特性曲線において，飽和度が 0.95 を越えた時の圧力水頭値。

0% と 25% の試料の水浸入圧は，後述の吸水過程の水分特性曲線（図-5）から推定した値である。その際，飽和度が 0.95 を越える圧力水頭値を読み取って推定値とした。これは，湛水深が徐々に増加する過程で水浸入が生じる場合，ほぼ全ての間隙に水が浸入していると考えたためである。

混合率 50%，75%，100% の場合，WDPT はいずれも 3,600 秒を越え，Extremely water repellent に区分される。しかし，みかけの接触角および水浸入圧の実測値からは，それらの試料間に撥水性の強さに違いがあることが示されている。一方，混合率が 0% および 25% の試料では， Wettable と区分されたが， これは接触角および水浸入圧の実測値との整合性を示している。これらのことは， WDPT が wettable と water-repellent の違いは検出するが，みかけの接触角や水浸入圧と同じ意味で撥水性の強弱を表わす指標としては有効でないことを示唆している。本実験で用いた OTS 処理砂は安定な撥水性を有する（Bozer *et al.*, 1969；Watson and Letey, 1970）ので， 混合砂が撥水性（みかけの接触角が 90°より大きいまたは水浸入圧が正圧）を示す場合には常に WDPT が 3,600 秒を越え， Extremely water repellent と評価されたと考えられる。

### 3.2　水分特性

吸水過程および脱水過程の水分特性曲線（3 回の測定結果を平均したもの）を図-5，図-6 に示した。吸水過程では， 混合率 0% から混合率が増えるにつれて曲線が正圧側にシフトしていき，保水性が低下することが明瞭に示されている。混合率が 50% のとき，ちょうど圧力水頭 0 付近で含水率の急激な変化を示している。 それ以上の混合率では正圧の水しか「保持」できず，明確に撥水性を示している。脱水過程の水分特性曲線も，吸水過程と

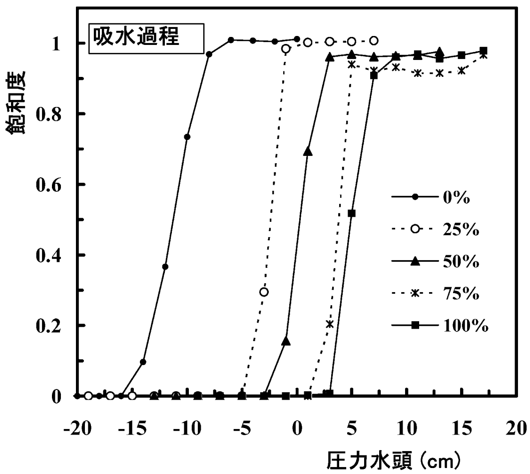
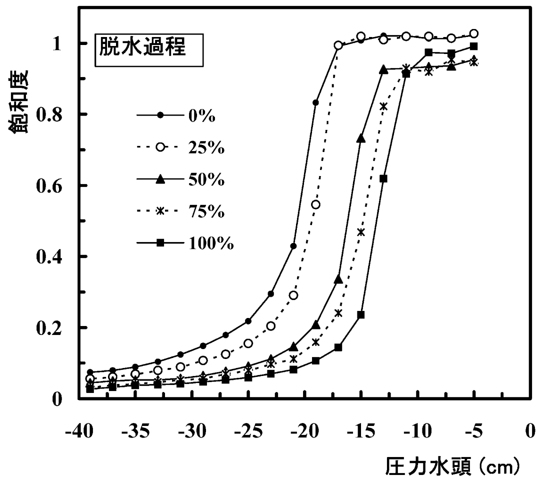



**図-5**　吸水過程の水分特性曲線

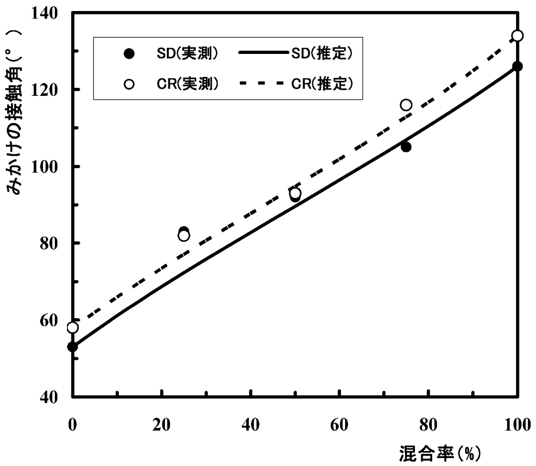
**Fig. 5**　Water characteristic curves for wetting precess.

同様に，混合率が大きくなる程曲線が正圧側にシフトしている。しかしこの場合には，吸水過程では明確な撥水性を示した，混合率 50% 以上の試料についても，弱くはなっているものの保水力が認められる。これは，吸水過程と脱水過程では関係する接触角が異なるためと考えられる。すなわち，吸水過程では前進接触角，脱水過程では後退接触角が関係するが，後退接触角が前進接触角より小さいことによる（例えば，小野，1980）。これらのことは，吸水・脱水曲線上の飽和度 0.5 に対応する圧力水頭値に明瞭に示されている（表-2）。表-2 には 2 つの圧力水頭値の差を示してあるが，この値はヒステリシスの強弱を表わすものと考えられる。OTS 処理砂混合率が




図–6 脱水過程の水分特性曲線

**Fig. 6** Water characteristic curves for drying process.




図–7 混合砂のみかけの接触角の Cassie 式による推定値（「SD」は sessile drop 法，「CR」は毛管上昇法）

**Fig. 7** Apparent contact angles for mixed sand estimated by Cassie's equation.

表–2 吸水・脱水曲線上の飽和度 0.5 に対応する圧力水頭差

**Table 2** Differences in water pressure head between wetting and drying curves

| 混合率 | 圧力水頭<br>吸水曲線 | <br>脱水曲線 | <br>差 |
|---|---|---|---|
| % | | cm | |
| 0 | −11.3 | −20.6 | 9.3 |
| 25 | −2.5 | −19.4 | 17.0 |
| 50 | 0.3 | −16.2 | 16.5 |
| 75 | 3.8 | −14.8 | 18.6 |
| 100 | 4.9 | −13.6 | 18.5 |

大きくなりぬれ性が悪くなると，水分ヒステリシスの強度が増すことが示されている。混合砂における，親水性粒子と撥水性粒子の配列や粒子表面の OTS 吸着状態による不均一性が，吸水過程の前進接触角および脱水過程の後退接触角の大きさに影響するためと思われるが，詳細は不明である。

### 3.3 Cassie 式による混合砂の接触角の推定

本研究で用いた混合砂は，親水性粒子（水洗い砂）と撥水性粒子（OTS 処理砂）を混合したものである。混合砂のみかけの接触角が混合率によってどう変化するかについて，平らな複合面の接触角を表わす Cassie 式（小野，1980）を用いて検討してみる。Cassie 式は次式で表わされる。

$$\cos\theta = A_1\cos\theta_1 + A_2\cos\theta_2 \tag{8}$$

ここに，$A_1$, $A_2$ は表面において物質 1，2 が占める割合，$\theta_1$, $\theta_2$ は物質 1，2 の接触角である。すなわち，2 種類の物質の占有面積率で重み付き平均をとったものである。添字“1”で水洗い砂，添字“2”で OTS 処理砂を表わし，混合率 $m$（%）$=100A_2/(A_1+A_2)$（$A_1$, $A_2$ は水洗い砂および OTS 処理砂の質量）を用いると，Cassie 式は次式で表される。

$$\cos\theta = (1-m/100)\cos\theta_1 + (m/100)\theta_2 \tag{9}$$

図–7 は，sessile drop 法と毛管上昇法による測定値について，Cassie 式を用いた推定値と比較したものである。混合率 0% および 100% のみかけの接触角の実測値をそれぞれ $\theta_1$, $\theta_2$ として，混合質量から $A_1$, $A_2$ を与えた。混合率 25% については若干のずれが認められるが，混合率 50% 以上の試料については良く一致している。Ustohal *et al.*（1998）は，混合砂の水分特性曲線の推定に対して Cassie 式が良く適用できることを示している。本研究の結果は，これと一致している。しかし一方，Bauters *et al.*（1998，2000）は OTS 処理砂のわずかな混合（混合率 5〜10% 程度）が極めて強い撥水性をもたらすことを報告している。本研究においても，OTS 処理砂の作成方法を検討した予備実験段階で，OTS 混合処理後すぐに炉乾燥したり，風乾する場合でも良く水洗いをしないと，Cassie 式からはみかけの接触角が 90°未満と

推定される混合砂が撥水性を示すことがあった。これは，処理砂中の「過剰」なOTSが混合された水洗い砂を「汚染」したためと考えられた。そこで，「調整方法」で述べたように，風乾後蒸留水で良く洗い過剰なOTSを除去することとした。Ustohal *et al.*（1998）および本研究とBauters *et al.*（1998）の結果が食い違う原因は定かではないが，後者ではOTS処理砂が未処理砂を汚染していた可能性は否定できないと考えられる。

## 4.　お わ り に

市販の海砂（粒径0.3 mm～0.6 mm）を用い，水洗いした砂（水洗い砂）とOTSで撥水処理した砂（OTS処理砂）の混合砂を作成し，砂層のぬれ性指標と水分特性の測定を行なった。水滴浸入時間（WDPT）はwettableとwater-repellentを区別できるが撥水性の強弱を表わす指標としては有効ではないこと，毛管上昇法とsessile drop法で測定したみかけの接触角は水浸入圧と良い相関を示すが，$\gamma_{ND}$法で測定したみかけの接触角は相関が良くないことが示された。また，複合表面のみかけの接触角を表わすCassie式が混合砂の接触角を良く表わすことが分かった。乾燥試料への吸水過程および飽和状態からの排水過程に対応する水分特性曲線には，みかけの接触角に対応した平行移動が認められた。また，ぬれ性が悪くなると水分ヒステリシスが強くなることが示唆された。これらの結果は，Ustohal *et al.*（1998）と一致しBauters *et al.*（1998）とは異なった。

## 謝　　　辞

本研究を行なうにあたり，山形大学農学部卒業生　本間治夫・岩崎紗知・後藤史江各氏の協力を得ました。記して謝意を表します。

## 引 用 文 献

Bachmann, J., Ellies, A. and Hartge, K.H. (2000) : Development and application of a new sessile drop contact angle method to assess soil water repellency. J. Hydrol., 231–232 : 66–75.

Bauters, T.W.J., DiCarlo, D.A., Steenhuis, T.S. and Parlange, J.-Y. (1998) : Preferential flow in water-repellent sands. Soil Sci. Soc. Am. J., **62** : 1185–1190.

Bauters, T.W.J., Steenhuis, T.S., DiCarlo, D.A., Nieber, J.L., Dekker, L.W., Ritsema, C.J., Parlange, J.-Y. and Haverkamp, R. (2000) : Physics of water repellent soils. J. Hydrol., 231–232 : 233–243.

Bisdom, E.B.A., Dekker, L.W. and Schoute, J.F.T. (1993) : Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. Geoderma, **56** : 105–118.

Bozer, K.B., Brandt, G.H. and Hemwall, J.B. (1969) : Chemistry of materials that make soils hydrophobic. In Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside, 189–203.

Carrillo, M.L.K., Letey, J. and Yates, S.R. (1999) : Measurement of initial soil-water contact angle of water-repellent soils. Soil Sci. Soc. Am. J., **63** : 433–436.

DeBano, L.F. (2000) : Water repellency in soils : a historical overview. J. Hydrol., 231–232 : 4–32.

ドゥジェンヌ・ブロシャール–ヴィアール・ケレ共著　奥村　剛訳（2003）：表面張力の物理学―しずく，あわ，みずたま，さざなみの世界―．吉岡書店，京都．

Emerson, W.W. and Bond, R.D. (1963) : The rate of water entry into dry sand and calculation of the advancing contact angle. Aust. J. Soil Res., **1** : 9–16.

Feng, G.L., Letey, J. and Wu, L. (2001) : Water ponding depths affect temporal infiltration rates in a water-repellent sand. Soil Sci. Soc. Am. J., **65** : 315–320.

石黒宗秀・Koopal, L.K.（2000）：ぬれと接触角の熱力学．農土学会誌，**68**（1）：75–82.

川本　健・Banyar, A.（2004）：火山灰土壌の撥水性評価に関する実験的研究―有機物含有量と初期水分量が及ぼす影響―．農土論集，**230**：75–83.

King, P.M. (1981) : Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. Aust. J. Soil Res., **19** : 275–285.

小林政広・小野寺真一・加藤正樹（1996）：撥水性が森林土壌の水分特性曲線に与える影響．水文・水資源学会誌，**9**（1）：88–91.

小林政広（1999）：堆積有機物と土壌の撥水性及び土壌水分特性との関係解明．農林水産技術会議事務局編研究成果335「人工針葉樹林における土壌劣化機構の解明」：35–42.

Letey, J., Osborn, J. and Pelishek, R.E. (1962) : Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. Soil Sci., **93** : 149–153.

Letey, J., Carrillo, M.L.K. and Pang, X.P. (2000) : Approaches to characterize the degree of water repellency. J. Hydrol., 231–232 : 61–65.

Letey, J. (1969) : Measurement of contact angle, water drop penetration time, and critical surface tension. In Proc. Symp. Water Rep. Soils, Univ. Calif., Riverside : 43–47.

宮本征一（1971）: 土の濡れと撥水性．土壌の物理性，**27** : 24–35.

Nakaya, N. (1982) : Water repellency of soils. JARQ, **16** (1) : 24–28.

仲谷紀男（1981）: 有機物が関与する土壌の水分特性について—とくに，土壌有機物の存在様式と撥水性を中心にして—．農技研報，**B32** : 1–74.

Nakaya, N., Motomura, S. and Yokoi, H. (1977 a) : Some aspects on water repellency of soils. Soil Sci. Plant Nutr., **23** (4) : 409–415.

Nakaya, N., Yokoi, H. and Motomura, S. (1977 b) : The method for measuring of water repellency of soil. Soil Sci. Plant Nutr., **23** (4) : 417–426.

大政正隆（1951）: ブナ林土壌の研究（特に東北地方のブナ林土壌について）．林野土壌調査報告，**1** : 1–243.

小野　周（1980）: 表面張力，p. 75，共立出版，東京.

社団法人アルコール協会 : http://www.alcohol.or.jp/

Ustohal, P., Stauffer, F. and Dracos, T. (1998) : Measurement and modeling of hydraulic characteristics of unsaturated porous media with mixed wettability. J. Contaminant Hydrol., **33** : 5–37.

Wallis, M.G. and Horne, D.J. (1992) : Soil water repellency. Advances in Soil Science, **20** : 91–146.

Wang, Z., Wu, L. and Wu, Q.J. (2000) : Water-entry value as an alternative indicator of soil water-repellency and wettability. J. Hydrol., 231–232 : 76–83.

Watson, C.L. and Letey, J. (1970) : Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. Soil Sci. Soc. Am. Proc., **34** : 841–844.

## 要　　旨

土壌の撥水性は土壌中の不均一な流れ発生の原因の一つである。本研究では，撥水処理された砂と未処理砂の混合砂を作成してぬれ性指標と水分特性を測定し，指標相互およびぬれ性と水分特性との関連を考察した。水滴浸入時間は親水性と撥水性を区別するが撥水性の強弱を表わす指標としては有効ではないこと，毛管上昇法と Sessile drop 法で測定されたみかけの接触角は水浸入圧と良い相関を示すこと，複合面の接触角を表わす Cassie 式が混合砂のみかけの接触角を混合率から推定するのに有効であることが示された。また，吸水・脱水過程の水分特性曲線はみかけの接触角に対応して平行移動すること，ぬれ性が悪くなると水分ヒステリシスが強くなることが示された。

受稿年月日 : 2005 年 9 月 7 日
受理年月日 : 2005 年 12 月 27 日