

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24780232

研究課題名(和文)撥水砂を含む多孔質媒体の物理特性と浸透流に関する確率的モデル化

研究課題名(英文) Modeling and experiments on hydraulic properties of porous media with mixed wettabilities

研究代表者

竹内 潤一郎 (Takeuchi, Junichiro)

京都大学・(連合)農学研究科(研究院)・助教

研究者番号：20362428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：土壌などに代表される多孔質媒体は、疎水性の粒子が混入することによって、透水性や保水性などの作物を生育する上で重要となる基本的な性質が大きく変化する。この現象を土壌改良や塩類集積の防止に有効利用するために、実験や間隙スケールのモデルを用いてそのメカニズムの解明に取り組んだ。特に、間隙のつながりをネットワークとしてとらえると、疎水性粒子によって、ネットワークのつながりに関する特性が大きく変化することが示された。

研究成果の概要(英文)：It is well known that soil's hydraulic properties, which are very important factors for growing plants, are drastically changed when hydrophobic grains are mixed into the media. To utilize this effect appropriately for agricultural purposes such as soil improvement and prevention of salt accumulation, we need to know its mechanisms in a pore scale. So, we conducted laboratory experiments and developed models expressing pore-scale phenomena. Percolation theory was applied to the pore network, which represents actual pore structures and connectivity with pore bodies connected by pore throats, and it revealed that critical percolation probability, which is one of network properties, was changed significantly by hydrophobic grains, and it is considered this leads to the drastic change of the soil properties.

研究分野：水資源利用工学

キーワード：多孔質媒体 水理特性 疎水性粒子 間隙ネットワーク パーコレーション

1. 研究開始当初の背景

オーストラリアやニュージーランド、アメリカなどの様々な国の地域で、撥水性を示す土壌が知られており、低い保水性による作物の生育障害や地表流の増加による土壌浸食といった被害が報告されていた。かつては撥水性土壌は、改善すべき対象としてとらえられていたが、近年、砂などの粒子にコーティングをすることにより人工的に疎水化する方法が開発され、有効活用することが模索されていた。

疎水性粒子を使用する(通常の土壌に混入させる)最大の理由は、疎水性粒子により土壌の水理学的性質が大きく変わることであり、土壌の透水性や保水性を任意に改良することにより、塩類集積の防止や降下浸透を低下させるなど様々な応用が期待されている。

2. 研究の目的

疎水性粒子によって土壌の水理特性が変わることは知られており、撥水性に関する様々な評価方法などは提案されているが、特性を変化させる要因、そのメカニズムに関して行われた研究はあまり見られない。そこで、本研究では、毛管現象に代表される間隙スケールの現象を念頭に、そのメカニズムをから解明することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験

様々な粒径のガラスビーズ OTS (octyltrichlorosilane, $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{SiCl}_3$) を用いて疎水化したものと、元のガラスビーズを様々な割合で混合した試料を作成する。それらの試料に対し、水滴浸入時間、見かけの接触角、水浸入圧といった撥水性の指標や、水分保持特性や透水性といった水理特性の測定を行い、疎水性粒子による各種特性の影響を解明する。

(2) モデル開発

本研究では、以下の3つのモデルについて検討を行った。

クラスターモデル：4 から 27 個の粒子をまとめたものをクラスターとし、クラスターが対象試料内で 3 次元的に分布したモデル。各クラスターは、含まれる親水性粒子と疎水性粒子の数によりクラスターの性質(見かけの接触角)が決まるものとした。

毛管束モデル：粒子によって形成される間隙を複数の管径が変化する毛管の束として、多孔質媒体をモデル化したもの。毛管の断面形を円形粒子で囲まれた尖点をもつものにした。

間隙ネットワークモデル：多孔質媒体内の間隙のつながりを、ネットワークを用いて表したもの。インページョンパーコレーションを用いて水や空気の侵入をモデル化する。さらに、管水路ネットワーク計算により、透水性の計算を行う。

4. 研究成果

(1) 実験

単一粒径の試料を用いて行った実験の結果を中心に報告する。

水滴浸入時間

水滴浸入時間とは、水滴を試料の表面に滴下したとき、試料内に浸入するまでの時間のことであり、撥水性の程度を示す指標の一つであり、Bisdorn(1993)による分類では、以下の表1のように表される。水滴浸入時間の結果は以下の表2ようになった。

表1: Bisdorn による分類

Time (s)	Class
< 5	Wettable
5 - 60	Slightly water repellent
60 - 600	Strongly water repellent
600 - 3,600	Severely water repellent
> 3,600	Extremely water repellent

表2: 水滴浸入時間

混合率 粒径	0.1 mm	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm
0%	0	0	0	0
25%	>3,600	>3,600	>3,600	>3,600
50%	>3,600	>3,600	>3,600	>3,600
75%	>3,600	>3,600	>3,600	>3,600
100%	>3,600	>3,600	>3,600	>3,600

見かけの接触角

Sessile Drop 法を用いて、見かけの接触角を測定した。測定器は Nick 製の LSE-ME3 を使い、4 μL 滴下した。測定結果は表3のようになった。ここでは、粒径 0.1mm のものと 0.2mm のものを示す。

表3: 見かけの接触角(°)

混合率 粒径	0.1 mm	0.2 mm
0%	61.7 \pm 8.7	47.7 \pm 8.9
25%	93.3 \pm 6.1	100.6 \pm 7.0
50%	119.5 \pm 6.8	113.6 \pm 5.2
75%	118.7 \pm 5.7	120.1 \pm 5.8
100%	122.3 \pm 4.6	123.1 \pm 4.3

水浸入圧

撥水性土壌では、通常の土壌とは異なり、自発的な水浸入は起こらず、圧力をかけることにより水が浸入する。この時の圧力を水浸入圧といい、表4に示す。負圧で浸入するのは空気侵入圧に相当する値を記載している。

表4: 水浸入圧 (cmH₂O)

混合率 粒径	0.1 mm	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm
0%	-44.5	-29.5	-14.5	6.5
25%	9.2	4.3	1.5	1.0
50%	16.7	11.3	5.4	2.5
75%	18.9	11.3	5.8	3.7
100%	19.5	14.7	6.3	4.3

水分保持特性

高さ 2cm と 4cm で、内径 4.8cm のアクリル円筒を用いて、砂柱法で排水曲線と浸潤曲線を求めた。ここでは、粒径が 0.2mm のものを図 1 に示す。

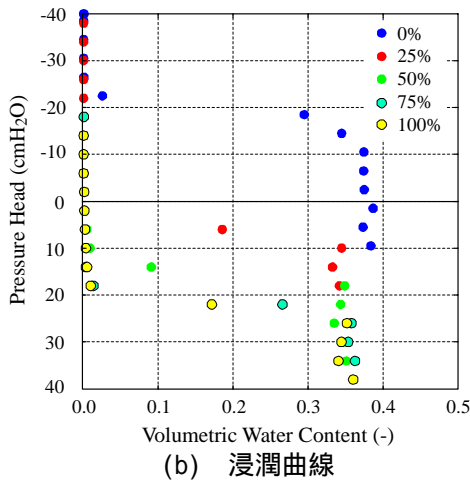
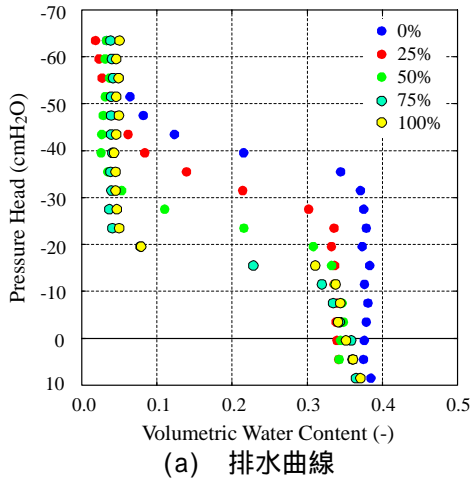


図 1：水分保持特性(0.2 mm, 砂柱法)

他の粒径のものも、間隙の大きさに応じて水・空気浸入圧が変わるものの、ほぼ同様の傾向を示した。

透水係数

定水位法 (DAIKI 製 DIK-4012) で飽和透水係数の測定を行った。撥水性を示す試料については、真空法を用いて飽和させた。結果を表 5 に示す。

表 5：飽和透水係数 (10^{-2} cm/s)

混合率 粒径	0.1 mm	0.2 mm	0.4 mm	0.6 mm
0%	0.94	1.91	4.73	15.97
25%	0.82	1.61	4.08	14.98
50%	0.86	1.61	3.91	14.33
75%	0.85	1.59	4.08	14.78
100%	0.88	1.66	3.95	15.21

以上のように、ガラスビーズでは疎水性粒子を 25%混入することによって、撥水性を示した。これは、標準砂(粒径平均:約 0.25mm)

では 75%混入することによって、撥水性を示した(竹内ら, 2011)の と比べ、非常に少ない割合で撥水性を呈することが分かった。その理由として、ガラスビーズの表面はなめらかであるのに対して、砂の表面は角ばっていたり凹凸があるため、粒子の表面や溝に thin film や wetting layer が生じており、それらを伝って水浸入がおこなわれていると考えられる。しかしながら、25%のみの混入で水浸入を妨げるというのは、後述のパーコレーション理論の観点からは説明がつかない現象である。

(2) モデル開発

クラスターモデル

室内試験スケールの大きさのものを対象とできる点が利点で、排水過程・浸潤過程の水分保持特性や、疎水性粒子が混入した際の浸透の様子を再現できた。しかし、毛管半径の分布が分からない(別に同定する必要がある)点や、クラスターが大きくなるとモデル全体が均一化する点が欠点として挙げられる。

毛管束モデル

毛管束モデルは、van Genuchten-Mualem モデルなどの土壤の水理特性を表現する関数モデルが基にしているモデルであり、その導出過程に関する洞察が得られた。ここで用いたモデルは、毛管断面の角に生じる気液界面を考慮することにより、排水時の残留水や浸潤時のコーナー流による浸入を考慮した。また、断面の大きさが変化するモデルを採用することにより、ヒステリシスも考慮できる。しかしながら、間隙の連結性を考慮していない点が実際の間隙構造と大きく異なる。

間隙ネットワークモデル

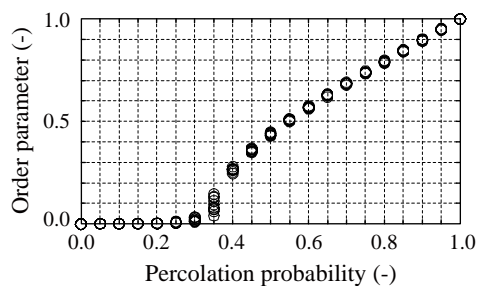
比較的大きな計算負荷がかかるものの、実際の間隙構造をもっとも正確に模したモデルといえる。ここでは、個別要素法を用いて、球形の粒子を自由落下により充填した多孔質媒体モデルを作成し、修正 Delaunay 法に基づいて間隙ネットワークを抽出した。

抽出された間隙ネットワークの、サイト過程とサイト-ボンド過程に関する限界浸透確率は、およそ 30%、50%となった(図 2)。これは、疎水性粒子の混入によって、ネットワークの性質が変わることを示している。

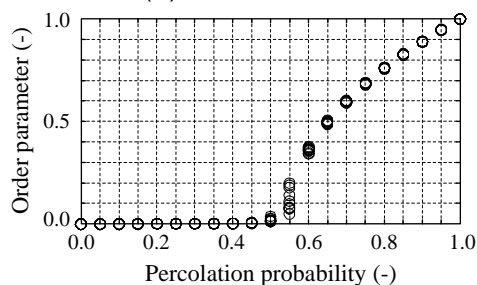
さらに、インページョンパーコレーションという非混合性流体の浸透過程を模した手法を用いて、排水過程、浸潤過程に関するシミュレーションを行った(図 3)。通常、インページョンパーコレーションでは、外部ソースとの連結性を満たしている最も浸透しやすい間隙に浸透するというステップを繰り返すが、ここでは、複数の間隙に同時に浸入することを可とした一般化インページョンパーコレーションを提案した。これは、より大きなキャピラリーナンバーにおける浸透に相当するものといえる。

排水過程や浸潤過程により得られた通水し

ている部分ネットワークに対して、管水路ネットワーク計算をすることにより、相対透水係数や間隙内の流れの様子（図 4）を知ることができる。管径と流量の関係をプロットすると図 5 のようになる。Burdine モデルや Mualem モデルなどの並行管モデルに基づいたモデルでは、流量は管径の 4 乗に比例するという仮定に基づいているが、図 3 や図 4 からは流量と管径はほぼ無相関であることが示された。

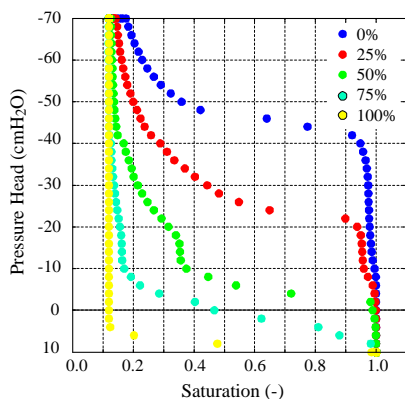


(a) サイト過程

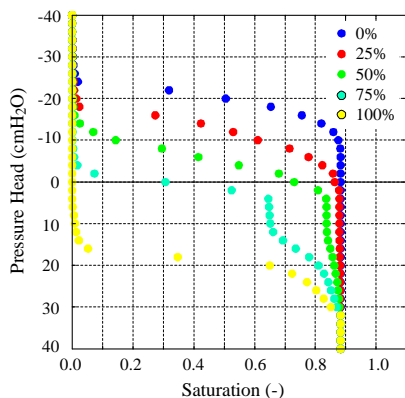


(b) ボンド-サイト過程

図 2：間隙ネットワークの限界浸透確率



(a) 排水曲線



(b) 浸潤曲線

図 3：水分保持特性(0.2mm, 計算結果)

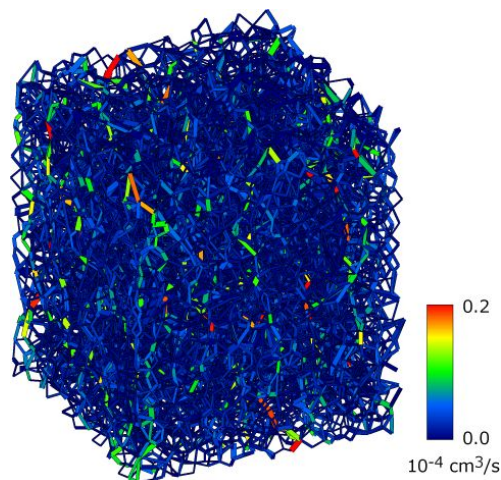


図 4：間隙内の流れ

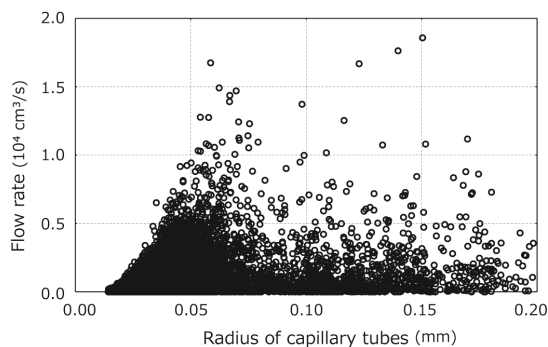


図 5：管径と流量の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Junichiro Takeuchi, Takuya Takahashi, and Masayuki Fujihara, Sub-Darcy-scale modeling of non-uniform flow through porous media with mixed wettabilities, International Journal of GEOMATE, Vol. 6, No. 2, pp.840-847, 2014, 査読有。

〔学会発表〕(計 16 件)

竹内潤一郎, 高橋拓弥, 疎水性粒子を含む多孔質媒体の不飽和透水係数に関する CA を用いたモデル化, 農業農村工学会京都支部第 69 回研究発表会, 4-04, 2012/11/21, 新潟ユニゾンプラザ。

高橋拓弥, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 撥水性粒子を含む混合多孔質媒体のぬれ性と水理特性の評価, 農業農村工学会平成 24 年度応用水理研究部会, pp.86-89, 2012/12/9, 京都大学。

渡邊貴史, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 撥水性土壌における動的毛管力を考慮した水動態のモデル化, 農業農村工学会平成 24 年度応用水理研究部会, pp.90-91, 2012/12/9, 京都大学。

井尻悠士, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 間隙ネットワーク流れを考慮した透水係数の推定, 農業農村工学会平成 24 年度応用水理研究部会, pp.92-93, 2012/12/9, 京都大学.

上田史織, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 粒子法を用いた毛管現象のモデル化, 農業農村工学会平成 24 年度応用水理研究部会, pp.94-95, 2012/12/9, 京都大学.

竹内潤一郎, 高橋拓弥, 井尻悠士, 藤原正幸, 毛管束モデルによる疎水性粒子を含む多孔質媒体の水分保持特性のモデル化, 平成 25 年度農業農村工学会大会講演会, 4-18, 2013/9/4, 東京農業大学.

竹内潤一郎, 藤原正幸, 住居航, 間隙ネットワークを用いた混合多孔質媒体の浸透現象のモデル化, 日本雨水資源化システム学会第 21 回研究発表会, 11-12, 2013/11/2, 島根大学.

北村直己, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 疎水性ガラスビーズからなる多孔質媒体の見かけの接触角の推定, 農業農村工学会京都支部第 70 回研究発表会, 6-14, 2012/11/13, 京都テレサ.

Junichiro Takeuchi, Takuya Takahashi, Masayuki Fujihara, Sub-Darcy-scale modeling of non-uniform flow through porous media with mixed wettabilities, Third International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment, pp.452-457, 2013/11/14, Nagoya.

神崎慧太, 竹内潤一郎, 藤原正幸, 二成分粒子を充填した混合多孔質媒体の水理特性の評価, 農業農村工学会平成 25 年度応用水理研究部会, pp.116-119, 2013/12/8, 京都大学.

竹内潤一郎, 北村直己, 藤原正幸, 気液界面の曲率を考慮した毛管束モデル, 農業農村工学会平成 25 年度応用水理研究部会, pp.120-125, 2013/12/8, 京都大学.

竹内潤一郎, 住居航, 藤原正幸, 間隙ネットワークを用いた混合多孔質媒体の透水性のモデル化, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会, 3-35, 2014/8/27, 朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター.

竹内潤一郎, 住居航, 藤原正幸, 間隙ネットワークを用いた多孔質媒体の透水性のモデル化, 日本雨水資源化システム学会第 22 回研究発表会, pp.151-152, 2014/11/2, 福井工業大学.

竹内潤一郎, 住居航, 藤原正幸, 一般化インバージョンパーコレーションによる混合多孔質媒体の水分保持特性のモデル化, 平成 26 年度農業農村工学会大会講演会, 印刷中, 2014/9/3, 岡山大学.

Junichiro Takeuchi, Wataru Sumii, and Masayuki Fujihara, Modeling of water intrusion into porous media with mixed wettabilities using pore-network model, Fifth International Conference on

Geotechnique, Construction Materials and Environment, in print, 2015/11/16, Osaka.

Junichiro Takeuchi, Wataru Sumii, Hidetaka Tsuji, and Masayuki Fujihara, Estimation of hydraulic conductivity of porous media with mixed wettabilities using pore-network model, First International Conference on Science, Engineering and Environment, in print, 2015/11/20, Tsu,.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

6. 研究組織
(1) 研究代表者
竹内 潤一郎 (京都大学)

研究者番号: 20362428

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし