

平成21年 5 月 26 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18580247
 研究課題名（和文） 不安定な浸潤とフィンガー流の発生に関する総合的な理論の構築に関する研究
 研究課題名（英文） Pressure formation mechanism for unstable infiltration with finger flow development in initially dry soil
 研究代表者
 長 裕幸（CHO HIROYUKI）
 佐賀大学・農学部・准教授
 研究者番号：90136599

研究成果の概要：強度に乾燥した砂質土壌に対し、継続的な水分供給を行うと、浸潤前線が不安定化しやすく、不均一な流れが生じやすくなる。このような流れは、灌漑計画を組み立てる上で障害になるばかりでなく、肥料や汚染物質等の溶液成分を土壌に吸着させることなく速い速度で地下水面にまで輸送し、地下水汚染を発生させる原因の一つとなっている。本研究では、このように流れが不安定になる原因を室内実験で明らかにし、解析的に示すことができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	2,200,000	0	2,200,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	390,000	3,890,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学・農業土木学・農村計画学

キーワード：土壌圏現象，水循環，農業工学，森林工学，土壌学

1. 研究開始当初の背景

(1) 著者らは、過去、不安定な浸潤時に発生する圧力勾配の逆転，即ち、「浸潤前線の降下に従い、前線から地表に向かい圧力が低下する現象」を理論的に明らかにし、浸潤域内の圧力の変化を既存のダルシー則を用いて表すことに成功した。この結果は、過去に報告されている粗性土の測定値を正確に再現することができた。この理論式のパラメータは、地表における浸潤フラックスの値、浸潤域内の透水係数及び浸潤前線の動的水分浸入圧の3個である。

(2) この理論を適用すれば、地表面に供給されるフラックスの値と対象土の動的水分浸入圧との組み合わせにより、浸潤域の不安定化の継続範囲、フィンガー流への遷移過程、フィンガー流の流況等を明らかにでき、不安定化した浸潤時に発生するフィンガー流の観測、予測、コントロールといった展開が可能になると考えられた。

2. 研究の目的

初期、強度に乾燥した粗粒土における、給水フラックスの大きさと浸潤前線の安定化

との関係については、フィンガー流に関して実験的な検証が成されており、 $q_0 < K_s$; q_0 は地表面の給水フラックス、 K_s は飽和透水係数、の条件下において、 q_0 が増加すると発生するフィンガーの数が増加し、最終的にはフィンガー同士の融合により安定した浸潤前線が出現することが示された。また、粗粒土の粒径が小さくなるほど発生するフィンガーの径は大きくなった。

しかし、給水フラックスの減少と浸潤前線の安定化に関する実証的な研究は数が少なく、Yao and Hedrickx(1996)に代表される。彼らは、直径 30 cm と 1 m の塩ビ管に詰められた砂について、地表に散水を行い、給水フラックスが減少するにつれ、フィンガーの発生が止まり、浸潤前線が安定化していくことを示した。

従来、浸潤前線の安定化に関する実験的な検証は、初期水分量の値の違いについて多く成されてきたし、解析的な検証もこれらの実験結果を証明することを目的としてきた。従って、給水フラックスの大きさと浸潤前線の安定化に関する理論的な説明は、まだ十分に成されているとは言えない。

本研究の目的は、未だ明確には説明されていない「給水フラックスの減少により浸潤前線が安定化する傾向」に関して焦点を当て、著者等によって得られた解を用いて、実験的に検証し、明らかにすることである。

3. 研究の方法

浸潤前線の降下に伴う、浸潤部の圧力変化と、地表面に与えたフラックスの大きさとの関係を明らかにする目的で、フィンガー流が発生しない断面積、直径約1cm~2cm、長さ100cmのパイプ型チャンバーに、1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 cmの深さに圧力センサーを設置する、下端はステンレスフィルターを取り付け、大気に開放する。風乾させた、鳥取砂丘砂、黄土高原シルト質土、久住黒ボク土、マサ土を供試土とした。

各供試土を、パイプ型チャンバーに均等に一定密度で詰め、スタンドに固定し、マイクロテンシオメータを所定の深さに取り付け、地表面に、ペリスタティックポンプでフラックスを供給した。フラックスの大きさは、各供試土に対して計測した飽和透水係数を基に砂丘砂で10段階、その他の土で3~4段階に変化させた。

水深換算したフラックスの大きさ、各点の圧力データをデータレコーダCR23X(キャンベル社製)に取り込み記録した。計21通りの実験を行い、各実験における圧力の時間変化に対し本理論を適用し、適合範囲を検討すると共に、適合した土については、その透水係数、動的な水分浸入圧をもとめた。

4. 研究成果

Fig.1, 2に、砂に関して供給フラックスの大きさを変えて行った10種類の実験の内、2つのケースについて、地表面からの深さ $z = 1$ cm と 5 cm における圧力の時間的な変化の測定結果を示す。10種類の実験では、供給フラックスが最も大きなケース Run10 をのぞいて、明瞭な負の圧力勾配が観測された。

Run10では、観測初期において、 $z = 1$ cm で負の圧力勾配が現れたが、空間的な逆圧力勾配には至らず、安定化した流れに近いといえた。時間的に負の圧力勾配が観測された測定について、次式において各実測値における圧力の最大値を h_{we} とし、 $K_{we} = K_s$, $\theta_{we} = \theta_s$, $\theta_{ini} = 0$ とおいて、得られた計算値を同じ図に示した。

$$h(z,t) = \frac{q_0}{\theta_{we} - \theta_{ini}} \left(\frac{q_0}{K_{we}} - 1 \right) t + \left(1 - \frac{q_0}{K_{we}} \right) z + h_{we} \quad (1)$$

ここで、 h は浸潤前線上部の湿潤層内の圧力、 z は地表面からの深さで下向きに正、 q_0 は土壌表面に与えられた水分フラックス、 θ_{we} は浸潤前線における水分量、 θ_{ini} は土壌内の初期水分量、 K_{we} は浸潤前線における透水係数である。 h_{we} は水侵入圧で、水分が容易に土壌間隙に侵入できる圧力であるが、静的と動的な場合では大きさが異なることが示されており、ここで扱う h_{we} は動的な値である。

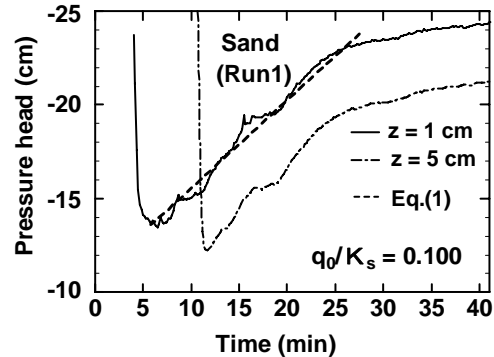


Fig. 1 砂における実験結果と(1)式の比較 (流量が大)

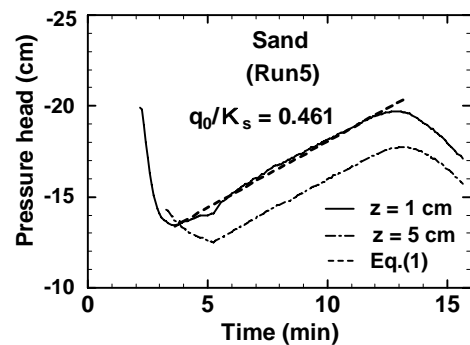


Fig. 2 砂における実験結果と(1)式の比較

(流量が小)

図からわかるように、(1)式において q_0 の値が異なっても直線部については非常によく合っていることが理解できる。この実験で用いた鳥取砂丘砂は、Geiger and Durnford(2000)が行った実験と違い、2 mmでふるった以外は採土したものを風乾し、そのまま用いており、自然の状態に近いのではないかと考える。従って、実際の現場では、非常に乾燥した条件下において、散水後このような圧力変化が生じているといえる。

(1)式より湿潤層内における圧力勾配は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial z} = \left(1 - \frac{q_0}{K_{we}}\right) \quad (2)$$

浸潤前線が不安定化する必要条件として、逆圧力勾配（地表面に向かって圧力が減少）の出現、つまり、(2)式より $q_0 < K_{we}$ が与えられる。この条件は、(1)式より得られる次式において、圧力の時間的な減少を伴い、圧力の時間変化は湿潤層内のどの点においても一定であることが分かる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{q_0}{\theta_{we} - \theta_{ini}} \left(\frac{q_0}{K_{we}} - 1 \right) < 0 \quad (3)$$

これは、浸潤前線の不安定化の必要条件として、従来から示されている空間的な逆圧力勾配の値と同時に、時間的な圧力の減少も満足する必要があることを意味しており、圧力の時間勾配の大きさが浸潤前線の不安定化の指標となり得ることを示す。

そこで、本研究では、(3)式において、時間勾配に対し q_0 が2次の関係になっていることに着目し、次式で表した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{1}{(\theta_{we} - \theta_{ini})K_{we}} \left(q_0 - \frac{1}{2}K_{we} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{K_{we}}{(\theta_{we} - \theta_{ini})} \quad (4)$$

(4)式より、圧力の時間勾配が最大値を示すのは、 q_0 の大きさが K_{we} の半分の大きさになるときであり、その値より q_0 が大きくても小さくても時間勾配の値は減少し、0に近づく。空間的な逆圧力勾配の成立条件は、(2)式より $0 < q_0 < K_{we}$ であり、従来、 $q_0 = 0$ に近づくにつれ、逆圧力勾配は大きくなるため、不安定性は増加すると考えられていた。しかし、動水勾配が小さくなり、相対的に重力の影響が小さくなることによって流れが安定化することが考えられる。この影響は(2)式だけでは表すことができない。つまり、(4)式で表される時間勾配の大きさは、流れの不安定性をより正確に表すことができると言える。これは、浸潤前線が不安定化する必要条件である、(2)式から得られる逆圧力勾配の成立条件、 $0 <$

$q_0 < K_{we}$ において、(4)式で与えられる時間的な圧力勾配の値は、 $q_0 = K_{we}$ ばかりでなく $q_0 = 0$ に近づくにつれても0に近づくため、浸潤前線は安定化していくということである。

そこで、初期乾燥している土壌に対し、地表面に与えるフラックスの値を変化させたときに、(1)式が成立した場合、異なるフラックスの値に対し(4)式も成立するのか、について検証を行った。異なるフラックスに対し、(1)式が成立すれば、当然、(4)式も成立することが予想できる。そこで、砂に関して異なる q_0 における10種類の実験値に対し、直線部の $\partial h / \partial t$ の値をもとめ、 q_0 に対しプロットし、Fig.3に示す。図中の実線は、 $K_{we} = K_s = 0.0228 \text{ cm s}^{-1}$ 、 $\theta_{we} = \theta_s = 0.4$ 、 $\theta_{ini} = 0$ として計算した(4)式の値である。 $\theta_s = 0.4$ は静的な飽和実験でもとめた値であるので、実際は多少小さいことが推測される。そこで、同図には、 $\theta_s = 0.35$ 、 0.30 の場合の計算値をプロットした。実測値は、ばらついてはいるが $\theta_s = 0.40 \sim 0.35$ の範囲でほぼ計算値と適合していることがわかる。従って、供給フラックスの値を減少させていった場合、圧力の時間勾配は小さくなり、最終的に0に近づき、流れは安定化していくものと考えられる。これは、Yao and Hedrickx(1996)が砂について行った実験において、給水フラックスの減少に伴い、フィンガーの発生がなくなり、一様な浸潤断面が現れたとする結果と同じであり、浸潤前線の安定化に対する一つの理論的な説明として考えることができる。

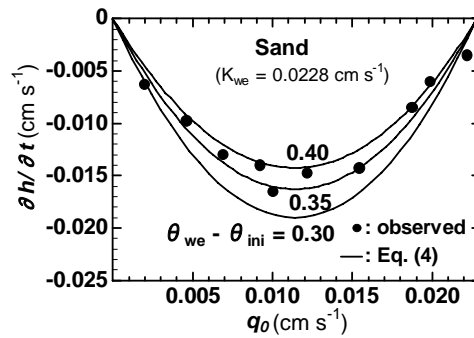


Fig.3 Sandの10回の実験で得られた各 q_0 に対する圧力の時間勾配の値と、(4)式において $K_{we} = K_s$ と近似した場合の計算値との比較

次に、砂以外の土について、このような現象が起こり得るのかという点について、クロボク土(Andisol)、マサ土(Loam)、黄土(Silt)を用いて行った、同様の実験の結果について、結果の一例をFig.4~6に示す。これより、クロボク土については、圧力が増加し、時間的な圧力の差が0という状態は続いたが、負になることはなく、空間的にも逆転は生じなかった。また、マサ土については、空間的には、わずかながら圧力の逆勾配が生じた。しかし、

時間的には、差が0になるところまでは観測されたが、負になるという結果は得られなかった。黄土に至っては、圧力は時間的に単調増加し、安定した流れと言えた。

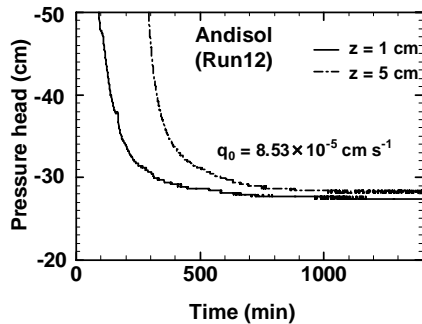


Fig.4 Andisol における圧力の時間的変化の実測値

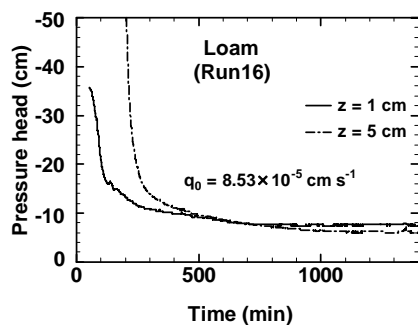


Fig.4 Loam における圧力の時間的変化の実測値

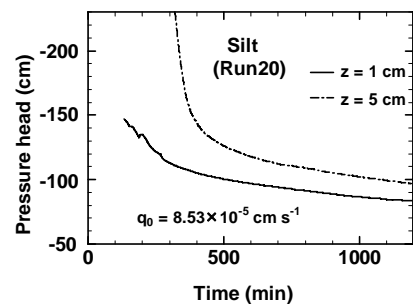


Fig.6 Silt における圧力の時間的変化の実測値

基本的に、(1)式が成立する前提としては、浸潤過程が Green-Ampt 型であることが必要となる。この浸潤型が成立する厳密な条件は、動的な水侵入圧の値が解析的に与えられていない現時点では不明確であるが、経験的には、明瞭な浸潤前線を有している場合であるといえる。砂質土に関しては、従来、この浸潤型の適用が可能な土壌であるとされる。

しかし、他の土壌であっても、初期乾燥した条件下における散水浸潤では、明確な浸潤前線の確認は可能であり、(1)式が成立する可能性はあるといえる。そこで、マサ土とクロボク土に関し、鳥取砂丘砂同様に、実験で得

られた、 K_s 、 θ_s を用いて(4)式の値を計算し、Fig. 7 にプロットした。

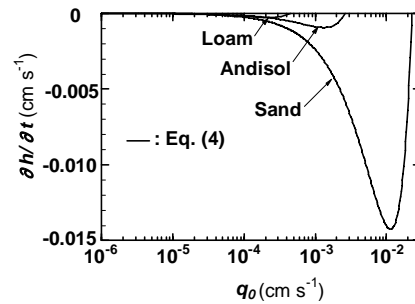


Fig.7 Sand, AndisolおよびLoamについて、 $K_{we} = K_s$ 、 $\theta_{we} = \theta_s$ 、 $\theta_{ini} = 0$ とにおいて(4)式で計算した圧力の時間勾配と q_0 との関係

時間勾配の最大値は、(4)式において $q_0 = K_{we}/2$ で発生し、 q_0 がその値より大きくても小さくても、その値は小さくなり、流れは安定化していくと考えられた。つまり、各土壌において不安定化のリスクが最も大きい散水フラックスは、近似的にその土壌の飽和透水係数の半分であるということになるが、Fig.7 の計算結果からも分かるように、現実的な散水条件や、ピーク時の時間的な圧力勾配の大きさ等を考慮すると、砂質土以外での観測は難しいことが推測される。実際に、継続的な $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$ のフラックスが供給される条件としては、湛水成層（上層が細、下層が粗）条件下での下層における浸潤が考えられるが、これについては、過去、多くの実験的な研究が行われてきた。成層条件下では、2成層の境界面が(1)式における $z = 0 \text{ cm}$ に相当し、もし、上下層の境界面から下層へ一定の浸潤フラックス q_0 が与えられるならば、下層に発達する遷移領域内の圧力は(1)式で表すことが可能であると思われる。しかし、境界面($z = 0$)における圧力の変動は、当然、上層内部におけるフラックスの値に影響を与えるため、現象は複雑になると考えられる。従って、この問題に関しては今後の検討課題の一つであると考えられる。

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 13 件)

- ① 長 裕幸, 井上光弘, 乾燥土壌への散水に伴う浸潤の不安定化に関する研究, 土壌の物理性, 111号, 53-60, 2009, 査読有
- ② 宮本英輝, 長 裕幸, 伊藤祐二, 筑紫二郎, 江口壽彦, 種々の電気伝導度条件に対する静電容量式土壌水分センサーの校正法, 植物環境工学, 印刷中, 2009年, 査読有
- ③ T. Kobayashi, J. Teshima, M. Mori, D.

- Yasutake, W. Wang, H. Cho, Identification of the composite parameters of the BBH-B model specifying the effects of bihydrologic processes on the water balance of crop fields, *Biologia*, 64/3, 478-482, 2009年 査読有
- ④ D. Yasutake, T. Araki, W. Wang, T. Kobayashi, H. Cho, M. Mori, M. Kitano, Analysis of salts transport affected by root absorption capacity in surface – irrigated fields in the upper Yellow River basin, *Biologia*, 64/3, 570-574, 2009年 査読有
- ⑤ M. Kitano, K. Urayama, Y. Sakata, Y. Sonoda, K. Ebihara, Y. Sago, H. Yoshikoshi, T. Araki, D. Yasutake, H. Cho, T. Kobayashi, Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study, *Biologia*, 64/3, 474-477, 2009年, 査読有
- ⑥ M.A.Mojid, H. Cho, Wetting Solution and Electrical Double Layer Contributions to Bulk Electrical Conductivity of Sand-Clay Mixtures, *Vadose Zone Journal*, Vol. 7, No.3, 972-980, 2008年, 査読有
- ⑦ K. Urayama, K. Sakata, Y. Sonoda, K. Ebihara, T. Araki, Y. Sago, H. Yoshikoshi, D. Yasutake, H. Cho, T. Kobayashi, M. Kitano, Preliminary Column Experiment on Dynamics of Water and Ion Transport in Soil Affected by Root Absorption, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 54, 543-547, 2008年 査読無
- ⑧ T. Kobayashi, D. Yokoyama, K. Ebihara, K. Sakata, Y. Sonoda, K. Urayama, H. Cho, H. Yoshikoshi, M. Kitano, Column Experiments on the Salt Accumulation in Adjoining Different-Textured Soil Profiles with a Shallow Water Table, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 54, 529-534, 2008年 査読無
- ⑨ T. Kobayashi, D. Yasutake, Y. Wu, K. Urayama, K. Tagawa, W. Wang, H. Cho, Experiments on the Control of Salinity and Sodicity in Surface-Irrigated Fields in the Upper Yellow River Valley (IV) Tools for Analyzing Soil Salinity and Sodicity and Related Properties of the Field Soils, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 53(2), 535-541, 2008年, 査読無
- ⑩ D. Yasutake, T. Araki, M. Kitano, W. Wang, K. Urayama, H. Cho, T. Kobayashi, Experiments on the Control of Salinity and Sodicity in Surface Irrigated Fields in the Upper Yellow River Valley (III) The State of Salinization and Alkalization in and around the Pingbu Experimental Field. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 53(1), 265-270, 2008年, 査読無
- ⑪ H. Yoshikoshi, W. Wang, H. Cho, T. Araki, D. Yasutake, J. Zhou, K. Urayama, Y. Wu, T. Kobayashi, M. Kitano, Experiments on the Control of Salinity and Sodicity in Surface-Irrigated Fields in the Upper Yellow River Valley (II) Observation System and Calibration, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 53(1), 257-263, 2008年, 査読無
- ⑫ W. Wang, T. Kobayashi, D. Yasutake, M. Kitano, H. Cho, T. Araki, H. Yoshikoshi, Experiments on the Control of Salinity and Sodicity in Surface-Irrigated Fields in the Upper Yellow River Valley (I) Objectives and Methodology, *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 53(1), 251-256, 2008年, 査読無
- ⑬ T. Kobayashi, J. Teshima, R. Iwanaga, D. Ikegami, D. Yasutake, W. He, H. Cho, An improvement on the BBH model made for estimating evapotranspiration from cornfields in the upper Yellow River, *Journal of Agricultural Meteorology*, 63(1), 1-10, 2007年, 査読有
- [学会発表] (計 3 件)
- ① 長 裕幸, 散水浸潤における浸潤前線の不安定化に関する研究, 農業土木学会, 松江, 8月, 2007
- ② 長 裕幸, 井上光弘, 乾燥地土壌における散水浸潤に伴う浸潤前線の不安定化に関する研究, 乾燥地研究センター全国共同利用研究発表会, 鳥取, 12月, 2007
- ③ H. Cho, G.H. de Rooij, M. Inoue, Measuring dynamic water entry suction with microtensiometers during non-ponding infiltration in various soil materials, *Soil Science Society of America, International Annual Meeting, Indianapolis, USA, Nov. 12-16, 2006*
6. 研究組織
 (1) 研究代表者
 長 裕幸 (CHO HIROYUKI)
 佐賀大学・農学部・准教授
 研究者番号 : 90136599

(2) 研究分担者
無し

(3) 連携研究者
無し