

論文内容の要旨

論文題目

砂層におけるフィンガー流の発生と成長機構に関する研究

氏名 川本 健

不飽和土壌で発生する選択流の一つであるフィンガー流は土壌内で部分的かつ優先的な水みちを形成する。このため、水・溶質はこのフィンガーを経由して高速に下方へと移動する。フィンガーは、その発生要因や局所的な水みち形成の性質から、1)土壌汚染・地下水汚染、2)乾燥地・半乾燥地における水管理、3)撥水性を有する土壌での浸透問題、を扱うときに重要な問題となる。

フィンガーに関しては、理論的なアプローチ、室内実験、フィールドでの調査など様々な研究が行われている。しかし、フィンガーの詳しい内部構造や浸潤継続にともなうフィンガー膨張現象を考慮したフィンガーの成長モデルは示されていない。そこで、本研究では以下の二点を目的とした。1)モデル実験を行い、均一砂層で散水浸潤時に発生するフィンガーの発生基準や形状特性を明らかにする。2)フィンガーの内部構造を明らかにし、実用的なフィンガーの成長モデルを提案することである。

はじめに、フィンガーの発生と形状特性を明らかにするため、モデル実験として均一砂層に散水浸潤を行い、浸潤形状の変化や浸潤前線の不安定化について調べた。その結果、砂層で観察される浸潤形状は初期含水比 (W_i) と散水強度 (I_R) の違いで変化し、フィンガー、波状の浸潤前線、滑らかな浸潤前線の三つに分類できた (Fig. 1)。さらにフィンガーは膨張速度が 0.1cm h^{-1} 程度と極めて小さい LSF (low-swell finger) と、 0.7cm h^{-1} 以上の HSF (high-swell finger) の二つに区別できた。

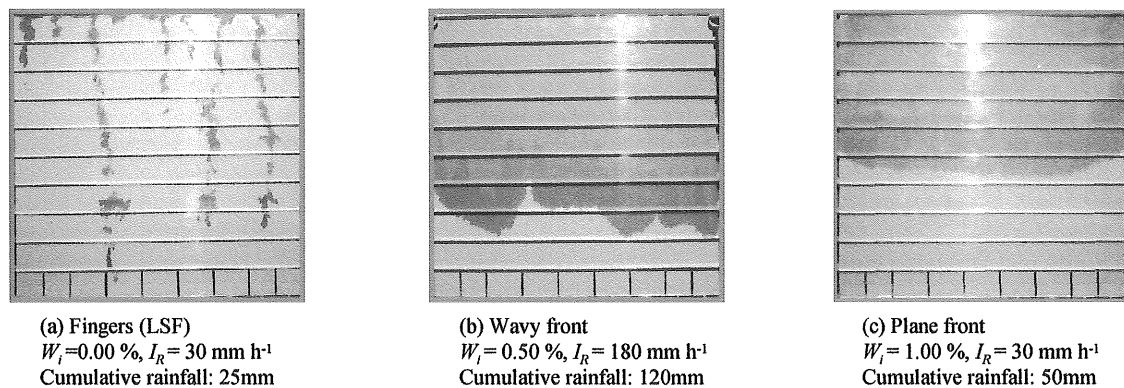


Fig. 1 Photographs of wetting fronts.

浸潤前線が通過する際のサクション変化から、LSF、HSF、波状の浸潤形状は Raats の不安定化基準に従った。このとき、LSF と HSF の両者には浸潤前線通過後のサクション回復 (上昇) の度合いに差があった。また、フィンガーの発生太さや発生本数を既存の提案式で推定したところ、LSF では太さや本数を過大評価するのに対し、HSF では比較的良い一致が見られた。

次に、フィンガーの成長モデル構築にあたり重要となるフィンガーの内部構造について調べた。フィンガー内部は前線の通過と同時に形成されるコアと、その後コアからの水平方向への水移動で形成される膨張領域からなり、砂層内部の含水比測定から両者は異なる水分量で共存した。そして、コアと膨張領域内部の水分状態をサクション変化と水分特性曲線を用いて推察したところ、コアは先端から背部にかけて吸水過程から脱水過程に水分状態が切り替えるのに対し、膨張領域は吸水過程のみをたどることが明らかとなった。

また、コアから膨張領域に向うサクション勾配を計算したところ、LSF・HSFともに膨張時の動水勾配は一定値となったが、HSFのそれはLSFの約1/10と非常に小さな値を示した。

フィンガーの内部構造で得られた知見をもとに、フィンガーの膨張機構を探った。LSFは膨張過程の大半がコア内のサクションが一定値 h_s に達した時点以降に膨張が生じた。これより、膨張領域の形成は一定サクション下での水移動で形成されると定め (Fig. 2(a))、土壌の吸水性を示すソープティビティ S を用いた以下の膨張式で記述した。

$$d = d_f + \frac{2S(t-t_f)^{1/2}}{\theta_{swell} - \theta_i} \quad [1]$$

ここで、 d_f はフィンガーのコアの太さで、 t_f はフィンガー先端の到達時刻、 θ_{swell} は膨張領域の体積含水率で、 θ_i は砂層の初期体積含水率となる。これに対し、HSFは膨張過程の大半がコア内のサクション回復時に生じた。これより、コアと膨張領域の不飽和透水係数 K と動水勾配 i に注目して、膨張領域は一定フラックス下での水移動で形成されると定め (Fig. 2(b))、以下の膨張式で記述した。

$$d = d_f + \frac{2Ki(t-t_f)}{\theta_{swell} - \theta_i} \quad [2]$$

両式でフィンガーの太さの経時変化を推定したところ、LSF・HSFともに実測値と良い適合を得た (Fig. 3)。

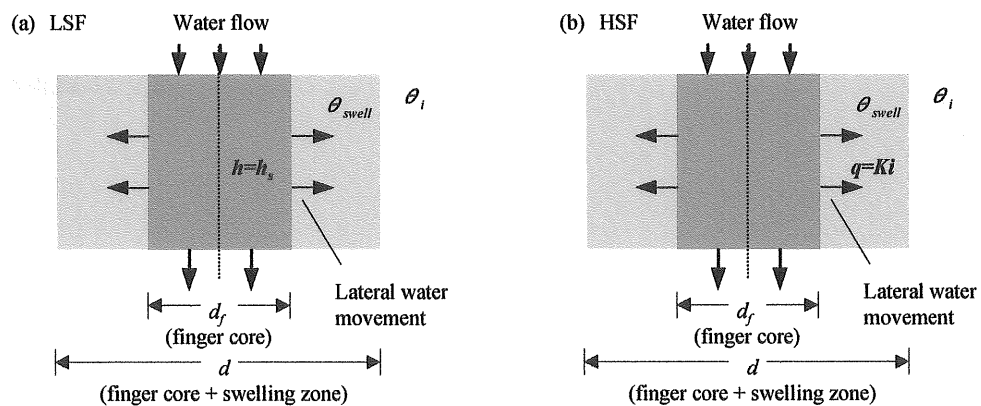


Fig. 2 Schematic diagrams of lateral water movement of fingers.

最後に、フィンガー膨張式を用いて、フィンガーの膨張をともな
った下方への成長を表現するモデルを提案した。成長モデルで散水
中にフィンガーによって形成される湿潤率 F を推定したところ、推
定値と実測値との間に良い一致が見られた (Fig. 4)。

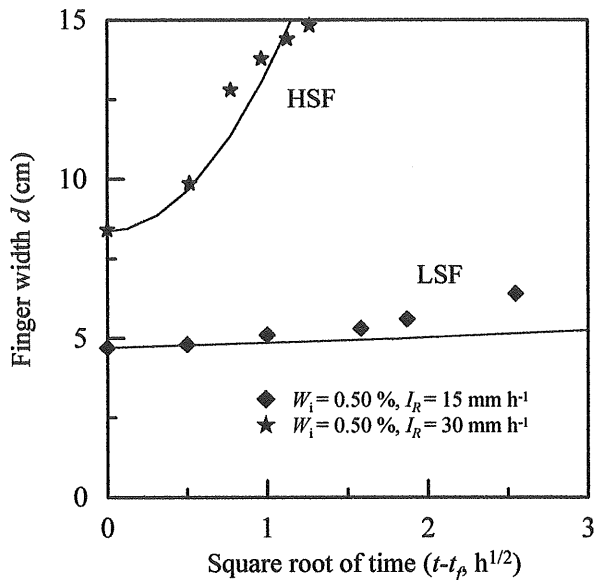


Fig. 3 Finger widths versus square root of time.

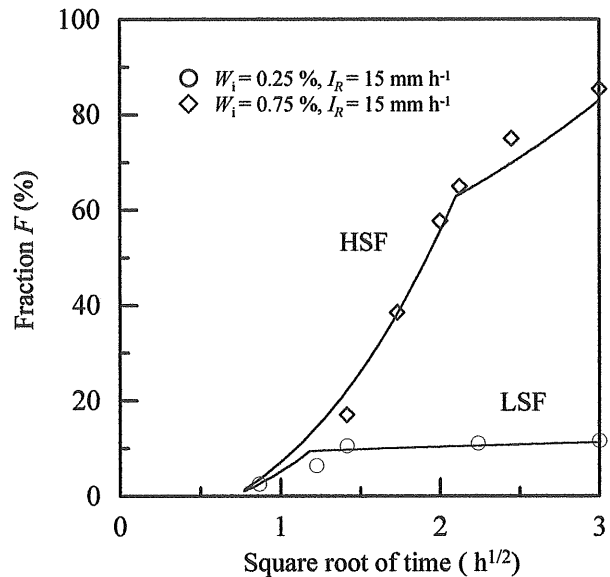


Fig. 4 Fraction of soils by fingers versus square root of time.

本研究で提案したフィンガーの成長モデルは、LSF・HSF 両
者の膨張をともなった水みち形成を上手く表現し、フィンガーによ
る水移動予測を可能とした。また、モデルはシンプルな式で記述さ
れるため実用性が高く、今後フィールドへの適用も期待される。し
かし、本研究ではフィンガーの形状特性を含めた発生に関する知識
とフィンガーの成長を直接結び付けることができず、今後の展開と
してこの問題が残された。さらに、近年、フィールドを中心に土壌
の不均一構造が要因となって発生するフィンガーの研究も盛ん
に行われている。これらから得られる知見と、本研究で扱った均一
構造の土（室内実験）での知見を相互にフィードバックさせて、よ
り実用的なフィンガーによる水・溶質移動の把握・評価に努める必
要がある。