

論文審査の結果の要旨

申請者氏名 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ストリームは土壌内で部分的かつ優先的な水みちを形成するため、水・溶質はこのフィンガーストリームを經由して高速に下方へと移動する。このような特性を有するが故に、フィンガーストリームは、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、などを扱うとき技術的に重要な問題となる。こうしたフィンガーストリームに関して、これまでも多くの理論的、実験的研究が行われてきたが、フィンガーストリーム内部の水理構造を解明したものは極めて少ない。そこで、本研究の目的は、1)モデル実験により、均一砂層で散水浸潤時に発生するフィンガーストリームの発生基準や形状特性を現象論的に明らかにすること、および、2)フィンガーストリーム内部の水理構造を明らかにし、実用的なフィンガーストリームモデルを提案すること、とした。

第1章では、研究の背景と本研究の構成を述べた。

第2章では、既往の研究を総括した。

第3章では、フィンガーストリームのモデル実験内容を述べ、測定結果から得られる現象論的解析を述べた。特に重要な知見として、砂層で観察される浸潤形状は、初期含水比と散水強度の違いで変化し、初期含水比が小さくて散水強度が小さい場合にはフィンガーストリーム形状、初期含水比が中程度で散水強度が大きい場合には波状の浸潤前線形状、初期含水比が大きい場合には散水強度によらず滑らかな浸潤前線形状、という規則的な違いが生ずることを見いだした。このような形状分類は、本研究が初めてである。さらに、フィンガーストリーム形状は、そのままの形状を持続する場合と、時間と共にフィンガーストリームが膨張する場合とがあることを発見し、これらを、膨張速度が 0.1cm h^{-1} 程度と極めて小さい LSF (low-swell finger) と、膨張速度が 0.7cm h^{-1} 以上と大きい HSF (high-swell finger) の2つに区別した。フィンガーストリーム膨張をこのように速度論的に捉えた点にも、これまでに見られない独創性がある。

第4章では、フィンガーストリーム内部の水理構造を解析した。すなわち、浸潤前線が通過する際のサクシオン変化から、LSF、HSF、波状の浸潤形状は Raats の不安定化基準に従うことと、LSF と HSF の両者には浸潤前線通過後のサクシオン回復(上昇)の度合いに差があることを見いだした。そこで、LSF と HSF 内部の水理構造をさらに詳しく解析するために、フィンガーストリームを、浸潤前線の通過と同時に形成されるコア領域と、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とに分割する方法を考案した。この分割法を適用して、コア領域と膨張領域の水理構造の

違いを検討したところ、コア領域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るのに対し、膨張領域は吸水過程のみをたどるという違いが存在することが明らかとなった。さらに、コア領域から膨張領域に向うサクシオン勾配を計算したところ、HSFの方がLSFの約1/10と非常に小さく、従来見落とされていた興味深い結果を得た。

第5章では、フィンガーストリー内部の水理構造について得られた知見をもとに、フィンガーストリーの成長モデルを構築した。まず、膨張が小さいフィンガーストリー LSF につき、コア領域内のサクシオンが一定値であること、膨張領域の形成は一定サクシオン下での水移動で形成されることに基づき、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を提案した。

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

ここで、 d_f はフィンガーストリーのコアの太さで、 t_f はフィンガーストリー先端の到達時刻、 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。一方、膨張が著しいフィンガーストリー HSF につき、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仮定し、以下の膨張式で記述した。

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

ここで、 K は不飽和透水係数、 i は動詞勾配である。両式でフィンガーストリ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一致を得た。最後に、これらモデル式を用いて、フィンガーストリーの膨張をともなった下方への成長を表現するモデルも構築し、散水中にフィンガーストリーによって形成される湿潤率 F を推定したところ、推定値と実測値とは良く一致した。

以上要するに、本論文は、室内実験、現象解析、モデル理論構築を通じて、従来取り扱いが困難とされてきた砂層中のフィンガーストリー形成に関し、詳細な知見と実用的なモデル式を得たものであり、学術応用上寄与するところが大きい。よって、審査委員一同は本論文が博士（農学）の学位論文として価値あるものと認めた。