

# フィンガー流はなぜ生じるのか：2. 乾燥粒状媒体における浸潤前線進行のメカニズム

The mechanism of finger flow: 1. Mechanism of wetting front advance in dry granular media

塩沢 昌\* 藤巻晴行\*\*

Sho Shiozawa, Haruyuki Fujimaki

フィンガー流（部分流）は土壌物理学における長年のミステリーである。フィンガー流が生じるのは、乾燥粒状物質が「浸潤前線は大気圧に近い水圧でないと進行しない」またはガラスビーズのように典型的には「浸潤前線は必ず飽和する；不飽和の浸潤前線は存在できない」という特殊な物理性をもつためであるが、これは浸潤前線（気液界面）が個々の間隙レベルで一線に揃って拡散がなく、マクロにも完全に不連続な界面であることと等価である。この特異な浸潤形態が生じるメカニズムを、球粒子間隙内の気液界面の進行モデルを考えて説明する。

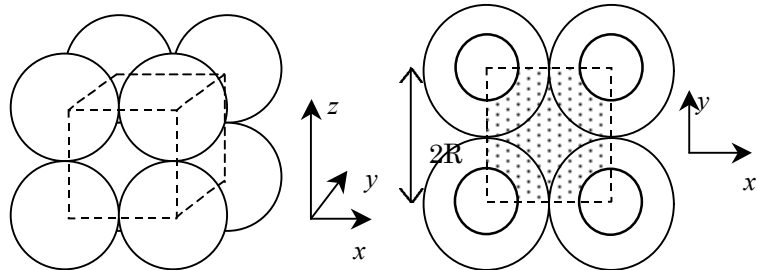


Fig.1 Cubic packing of spheres

単位隙内の界面位置と負圧  $P$  : 半径  $R$  の球粒子立方充填の単位間隙 (Fig.1) における、Fig.2 の気液界面において、空気圧に対する水の負圧  $P$  を考える。表面張力の水移動方向 ( $z$ ) 成分と粒子接触線長との積は、

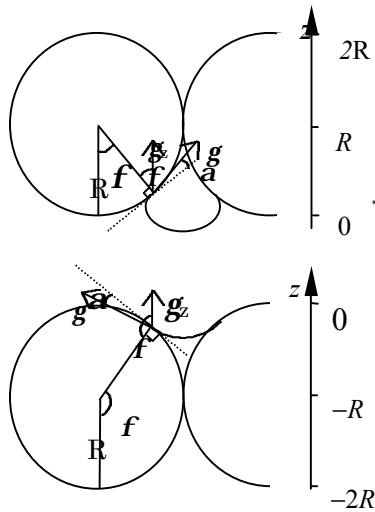


Fig.2 Surface tensile force and definition of angles

### 単位隙内の界面位置と負

圧  $P$  : 半径  $R$  の球粒子立方充填の単位間隙 (Fig.1) における、Fig.2 の気液界面において、空気圧に対する水の負圧  $P$  を考える。表面張力の水移動方向 ( $z$ ) 成分と粒子接触線長との積は、

$$F_g = 2pRg \sin f \sin(f + a) \quad (1)$$

$f$  は界面と粒子との接触線の位置 ( $z$ ) を示す角、 $a$  は接触角である。界面の投影面積は

$$A = R^2 (4 - p \sin^2 f) \quad (2)$$

なので、圧力差 ( $PA$ ) と表面張力による力  $F_g$  との釣り合いにより、 $P = \frac{2pg \sin f \sin(f + a)}{R (4 - p \sin^2 f)}$  (3)

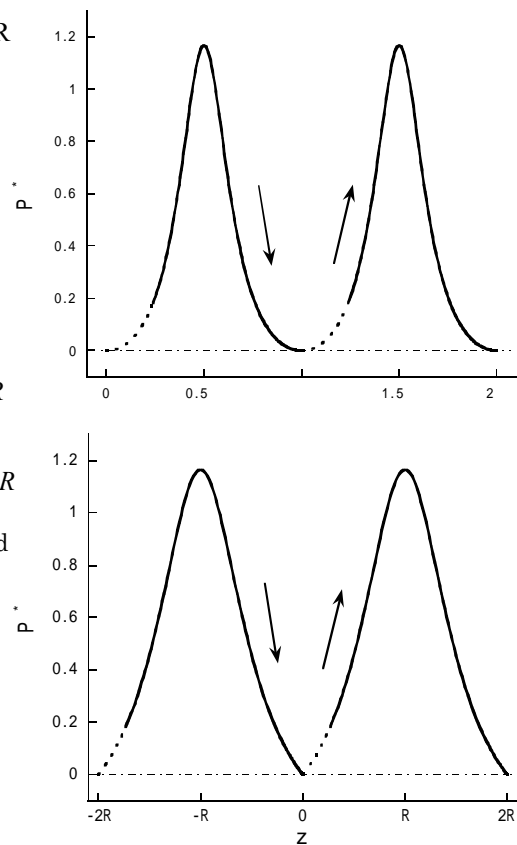


Fig.3 Relationship between  $P^*$  and  $z$  or  $f$

\*東京大学農学生命科学研究 Graduate School of Agric. and Life Sciences, The Univ. of Tokyo  
 \*\*筑波大学農林工学系 Institute of Agric. and Forest Engi., Univ. of Tsukuba

半径  $R$  の毛細管の負圧が  $P_{cylinder}=2\pi\gamma/R$  なので、これとの比  $P^*=P/P_{cylinder}$  によって無次元化し、 $P^*$  と  $f$  および  $z$  との関係を描いたのが Fig.3 である。初期乾燥状態では、上下粒子の接点は  $z \rightarrow 0$  において  $P^* \rightarrow 0$  となる谷である。これは粒子接点近傍で  $f$  が  $z$  方向になることと接触線の長さがゼロに近づくためである。 $z \rightarrow 0$  において界面の一点が上の粒子に接触した瞬間に、界面曲率が小さくなるので  $P^*$  は突然大きな値にジャンプして周囲の水を引きつけ、間隙は水で満たされる。( Fig.4 )

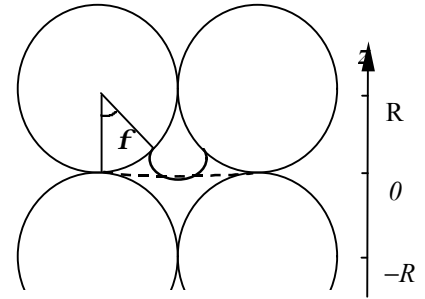


Fig.4 Shape of interface before and after  $P^*$  jump

**間隙間の水侵入同期**：粒子サイズと形に多少のバラツキがある媒体では、各間隙内の界面の方向と進行に一定の任意性がある。間隙 A の界面が点 a で上の粒子に接触したとすると、 $P^*$  のジャンプによる吸水で b 点での接触も直ぐに起こり、間隙 A も B も水で満たされる ( Fig.5 )。さらに粒子接点を共有する隣の間隙にも水侵入を引き起こす形で、接点の吸水を介して水侵入が水平方向に連鎖的に生じる。しかし、周辺間隙の  $P^*$  は擬似的平衡にあり、横に並んだ周囲の間隙の水侵入が全て終了するまで  $P^*$  が低下しないため、どの界面も次の谷を越えられず、次の間隙 ( Fig.5 ; C ) には進めない ( Fig.6 )。こうして各間隙の界面が横一列に揃って一緒に一粒子サイズづつ前進し ( 不連続な、飽和の浸潤前線 )、粒子接点の谷を越えるために  $P^*$  には大気圧に近い圧力が必要となる ( 水侵入圧 )。

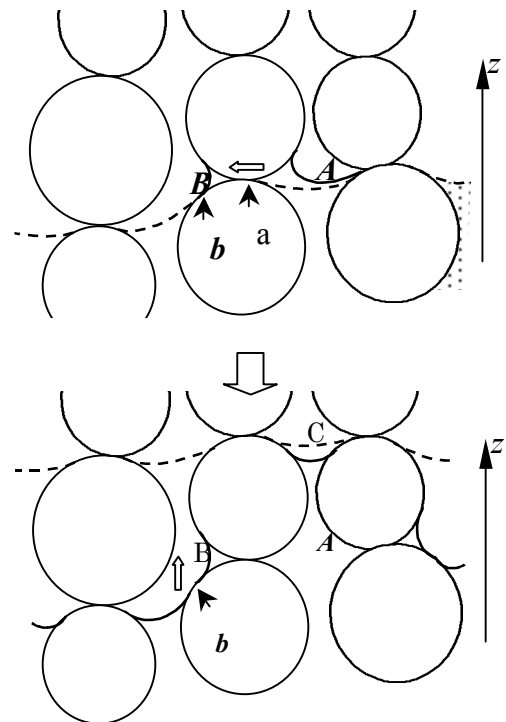


Fig.5 Synchronized wetting front advance among pores

**初期水分の影響**：

初期水分はわずかでも、粒子間接点に存在して  $P^*$  の谷を埋め、 $P^*$  を大きくする ( 初期水分は吸水力を高める ) とともに、接点での  $P^*$  のジャンプと間隙間の水侵入同期のメカニズムを著しく弱める ( Fig.7 )。隣接間隙間の水侵入の連動がなくなり、水を満たす間隙と空の間隙と部分的に満たした間隙の混在が可能になり、浸潤前線は拡散し、不飽和状態が可能になり、ダルシー式の適用可能な普通の浸潤前線になる。

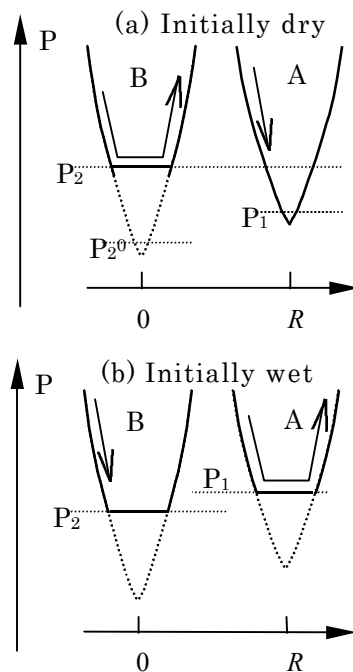


Fig.6 Comparison of P between two neighbor pores A and B

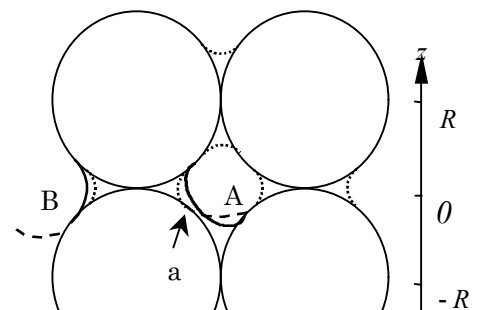


Fig.7 Effect of initial water on the advance of interface in unit pore