

# コンクリート中への塩分浸透の停滞現象の機構解明

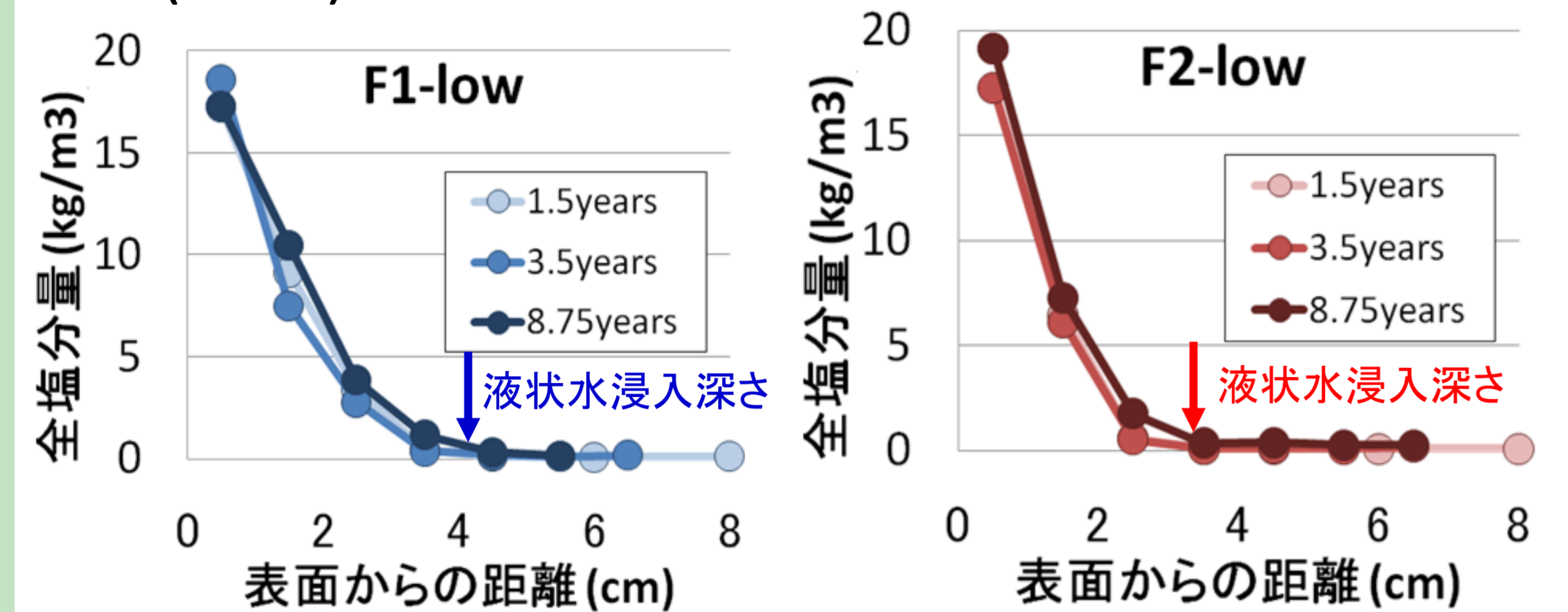
## ① ナノテクノロジー分野の知見に基づく液状水停滞機構の検討

### [背景: 塩分浸入停滞の報告]

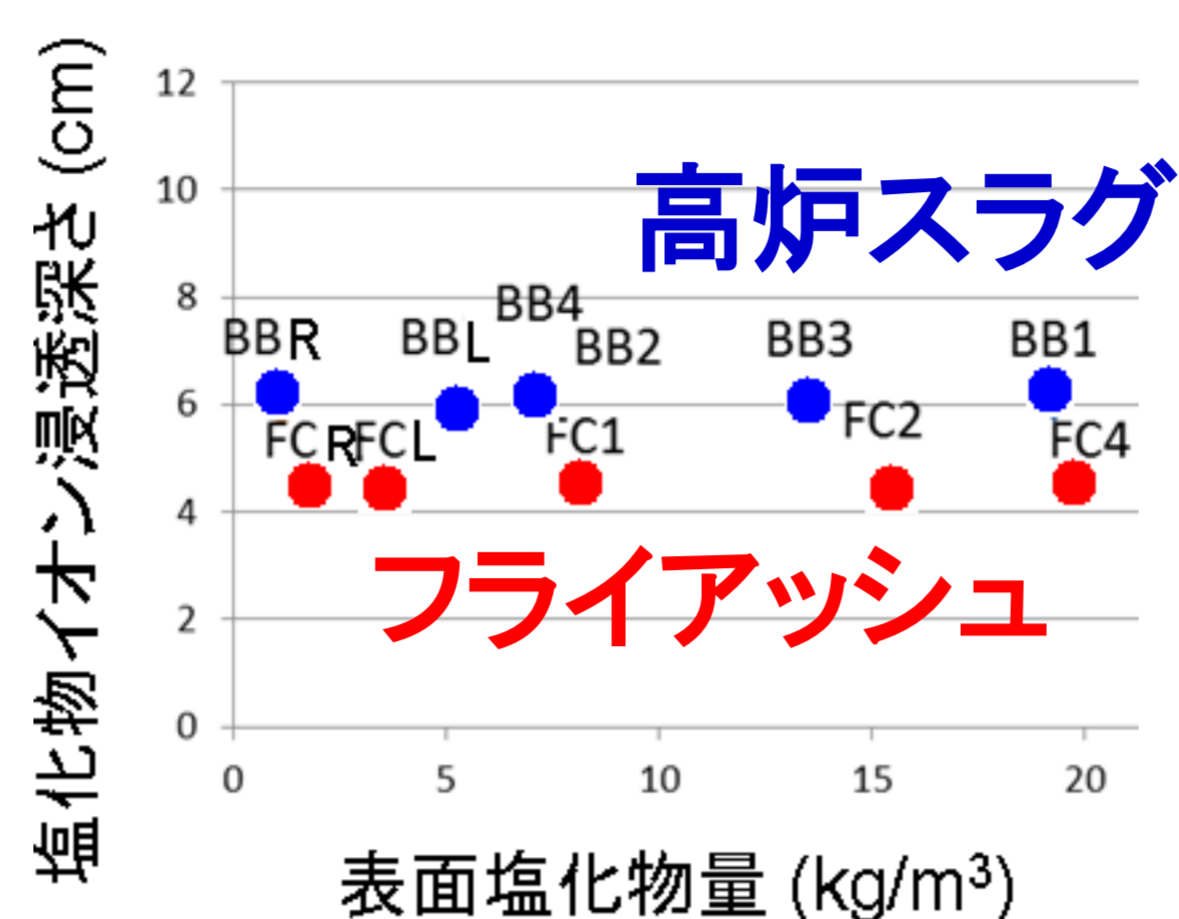
高橋らと佐々木らにより、材齢や表面塩化物量の異なるコンクリート護岸構造物を対象に、塩分浸透性状の分析が行われた。その結果、混和材を用いた構造物において、ある一定の深さで塩分浸透が停滞するという挙動が確認された。また実験室で浸せき試験を行った供試体を割裂し、塩分と液状水の浸透深さが一致することを報告している。

#### 各種混和材を用いたコンクリート護岸構造物

高橋(2010)



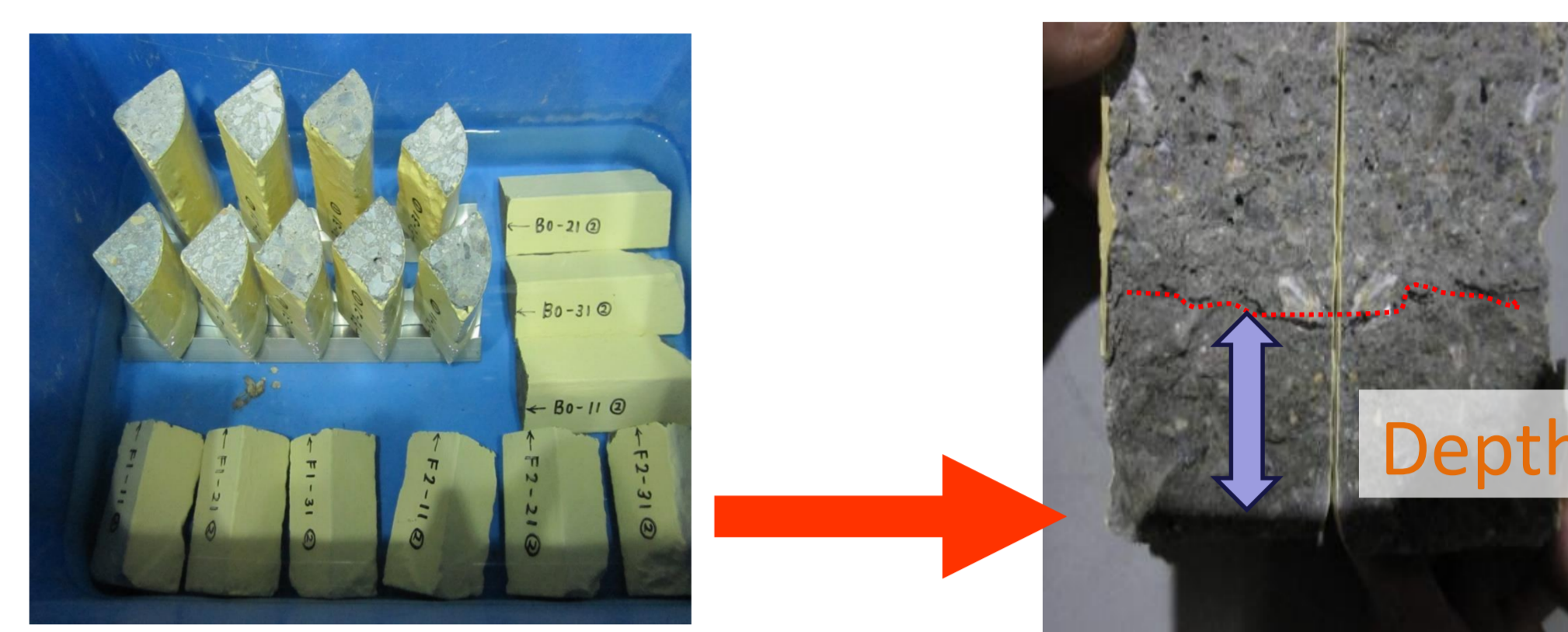
佐々木(2011)



時間の経過や表面塩化物量によらず浸透深さはほぼ一定

#### 塩水浸せき試験

高橋(2010)



80日の浸せき後、供試体を割裂し液状水の浸透深さを目視で確認(左図中に矢印で表示)

### [目的]

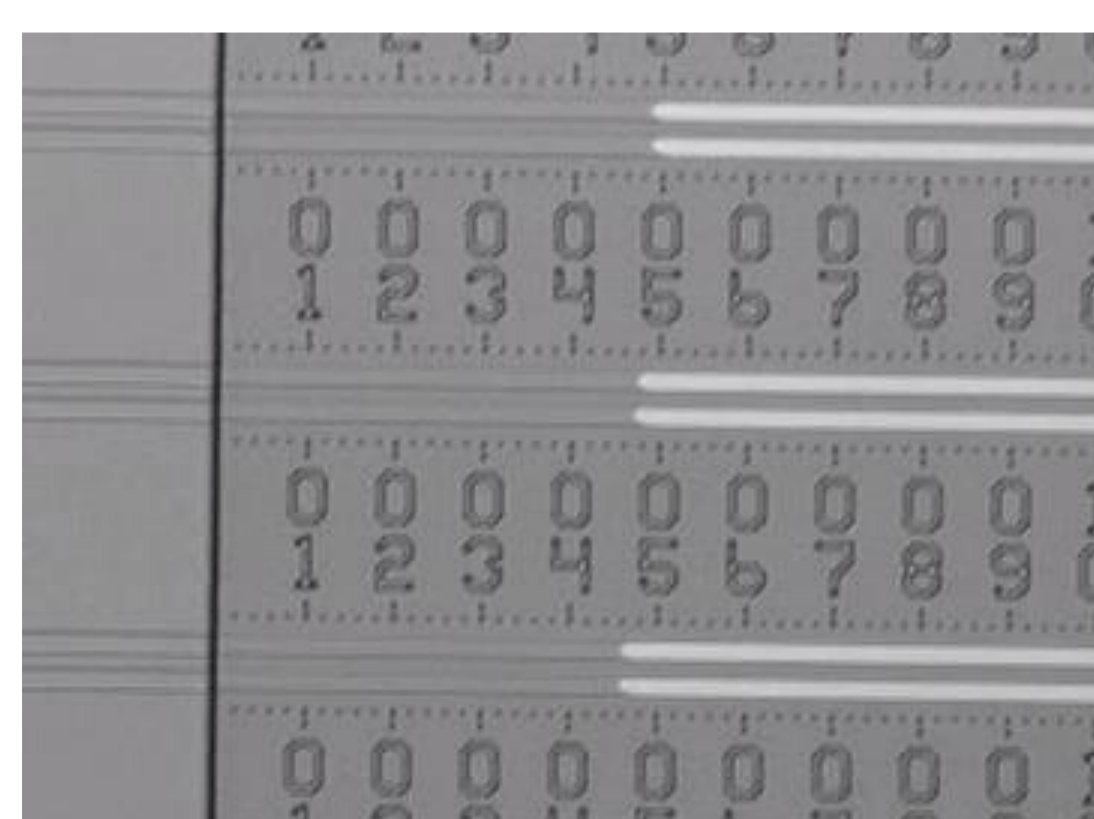
塩分浸透の停滞の有無や停滞深さが予測できれば、耐久性設計の大幅な合理化が可能となる。またコンクリートにバリア機能を期待するなど、材料としての可能性の拡大が見込まれる。しかしながら、塩分が停滞する機構に関しては不明な点が多く、停滞深さを予測する手法も存在しないのが現状である。本検討では塩分浸透が液状水の浸潤領域に限定されるという高橋らの考察より、まず液状水の浸潤挙動に関する理解を試みたものである。

### [液状水浸潤停滞の可能性に関して]

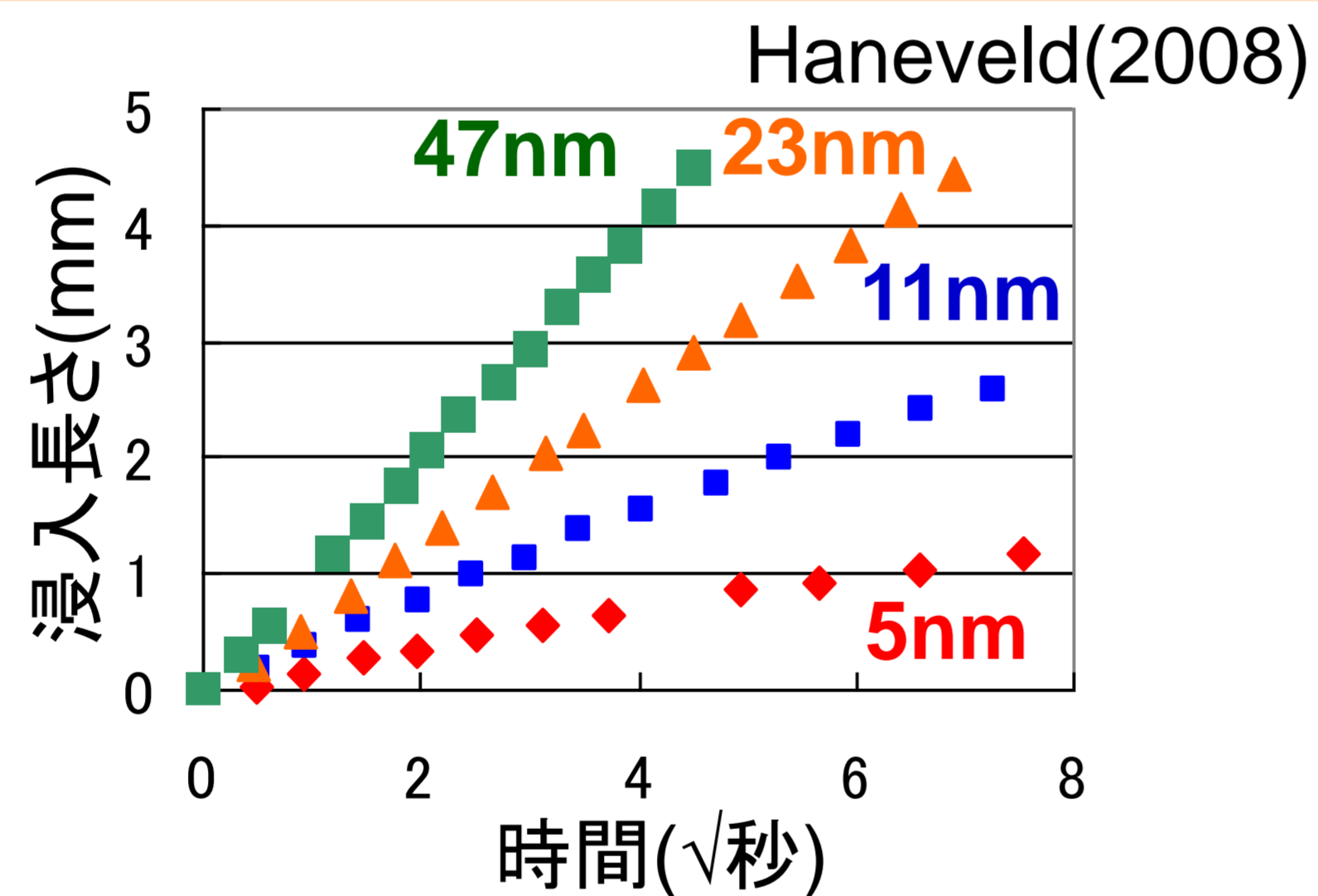
微小空間における物質移動に関しては、電気化学や生化学の分野で多くの知見が蓄積されている。そこで、火原研究室(東大生研物質・環境系部門)とBIOSグループ(TWENTE大学)における議論ならびに文献調査をもとに、液状水の浸入挙動、特に停滞機構に関して検討した。

#### 摩擦抵抗

ナノ流路への浸入挙動



Dr. TAS より提供

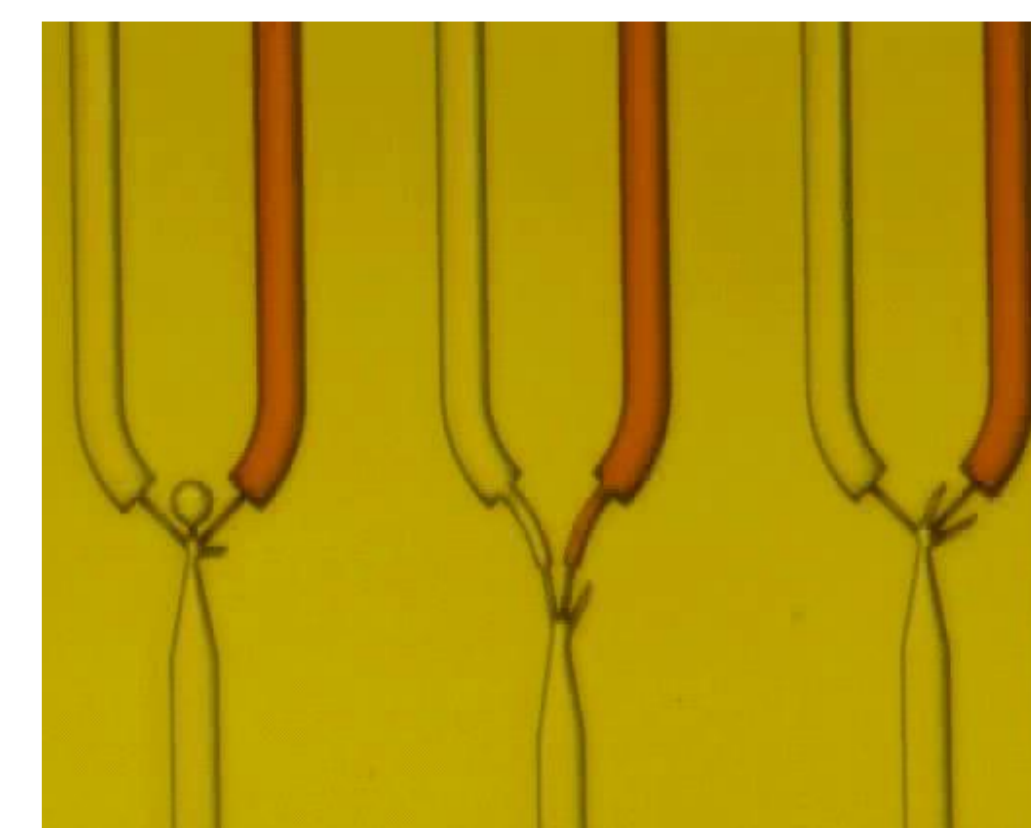
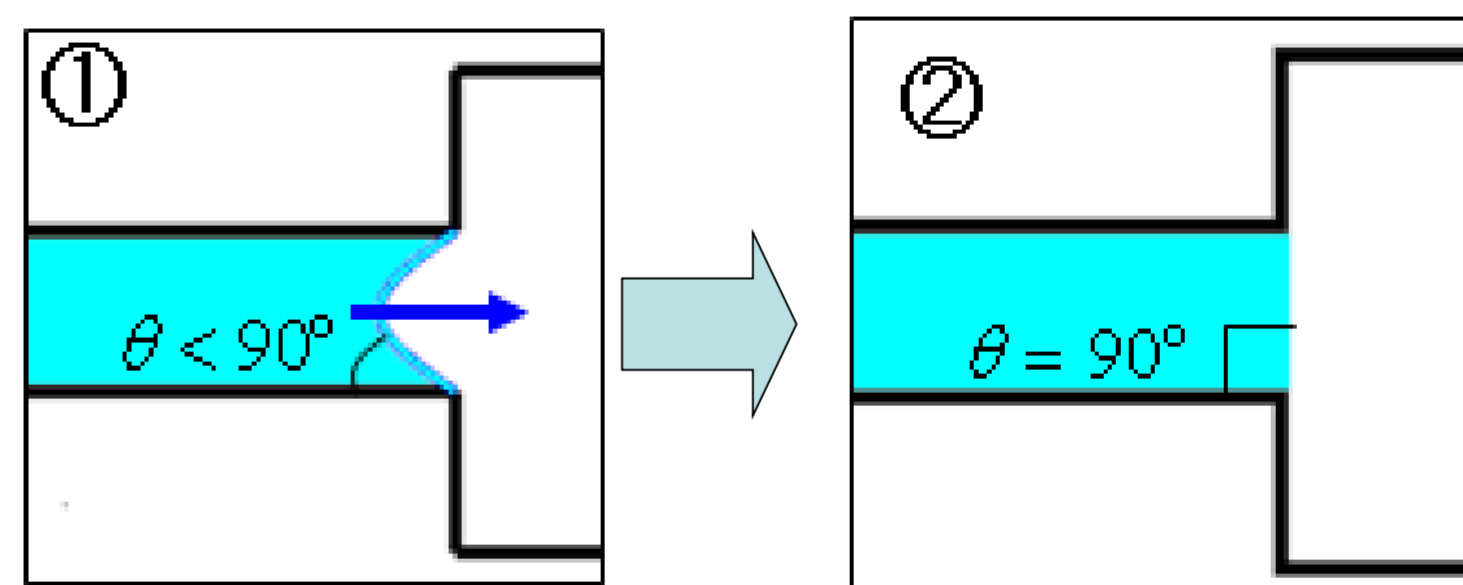


写真は深さ152nmのナノ流路への毛管浸入の様子であり、図は時間の平方根と浸入長さの関係である。深さ5nmのナノチャネルにおいても両者は比例し、Washburnの法則に従っていることが確認できる。

摩擦抵抗により速度は低下するが停滞には至らない

#### 流路形状による圧力差の消失

拡大部におけるメニスカス変化



<http://www.youtube.com/watch?v=gWLD-vIY5uE>

流路の拡大部分においては”ピン止め効果”により接触角が90度となる。その結果、浸入の駆動力であった毛管張力が消失する。写真はこれを利用して液体の輸送をコントロールするシステムである。ただし停止は一時的であり、写真の例では数十分程度。

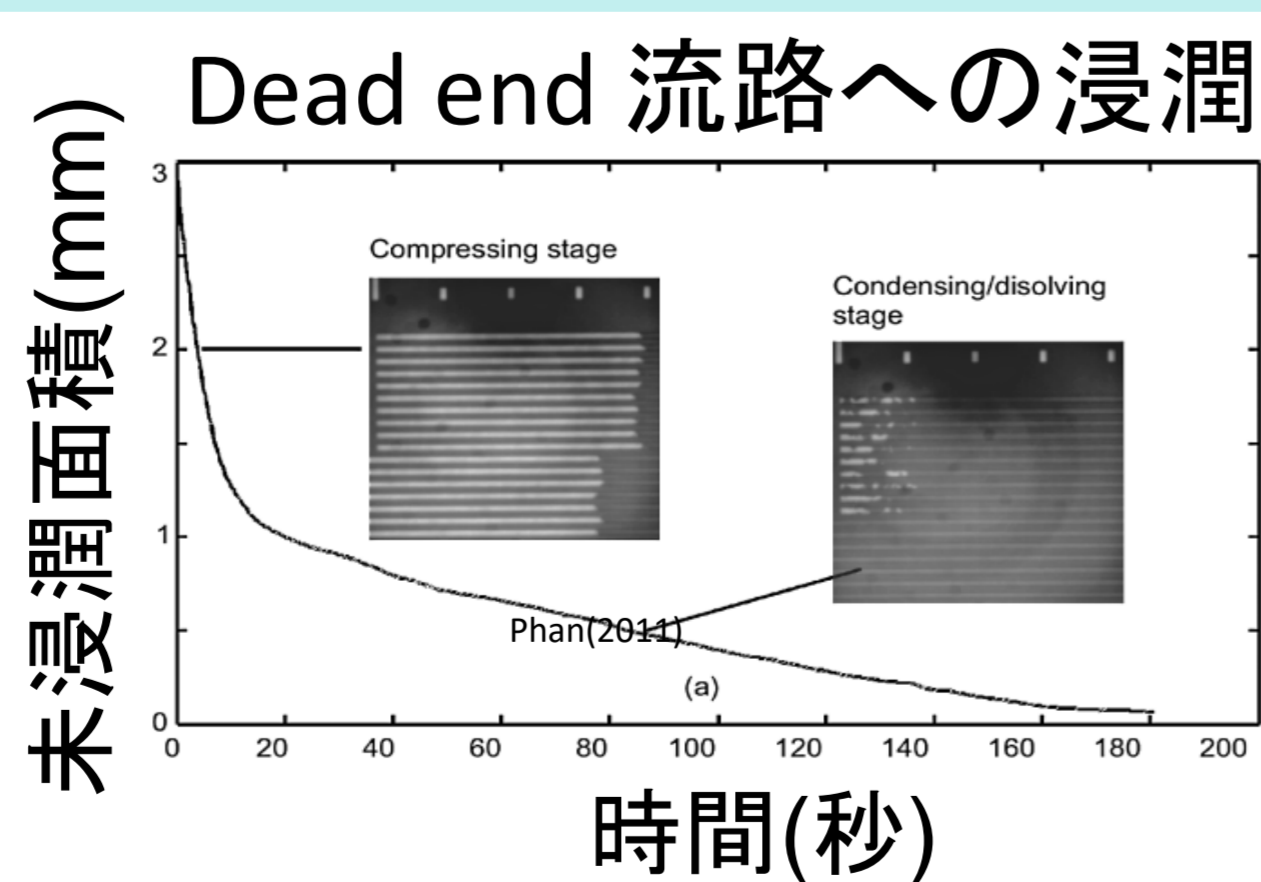
圧力差の消失による停滞は一時的

#### 気泡による妨害

気泡存在下での浸入



Dr. TAS より提供

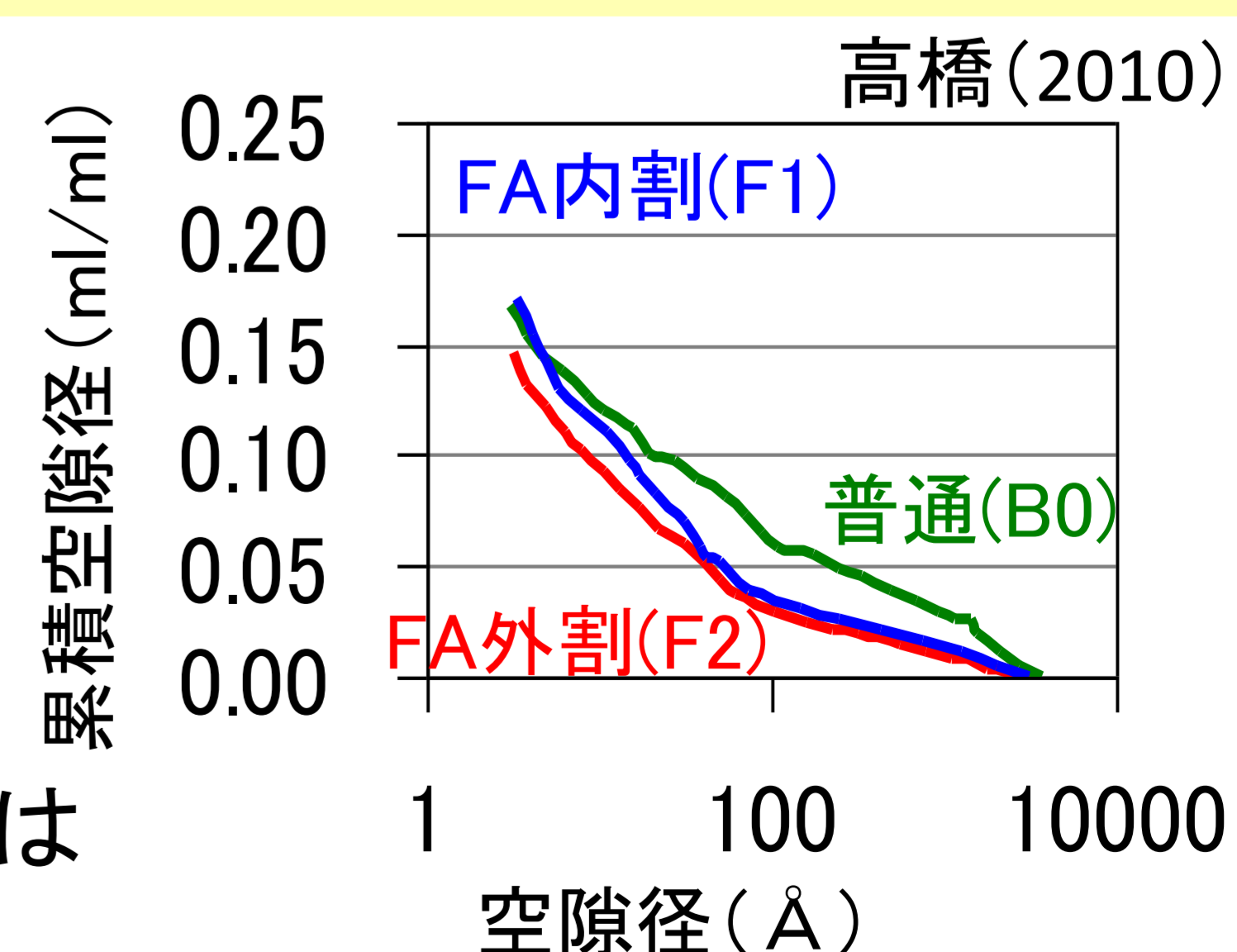


写真は平行したナノ流路への毛管浸入の様子。多数の気泡が発生しているが浸入は継続している。図は一端開放のナノ流路に水を導入した場合の時間と未浸潤面積の関係。途中で浸潤速度は低下するものの、気泡の急激な溶解により最終的に端部まで浸入。

気泡により浸潤速度は低下するが停滞には至らない

#### 浸入不可能な空隙径の存在

- ▷ 高さ5nmの空隙でも Washburnの法則に従って浸入
- ▷ 気泡が存在しても 浸入は継続
- ▷ コンクリート中の空隙には 水銀を圧入可能



不連続な空隙ネットワークによる停滞ではない

最先端の知見を用いても浸潤停滞の機構は明らかにならなかった

# コンクリート中の微小空隙における液状水浸入に関する研究

## ②数値解析による液状水浸潤停滞機構の検討

### [数値解析による浸入挙動の検討]

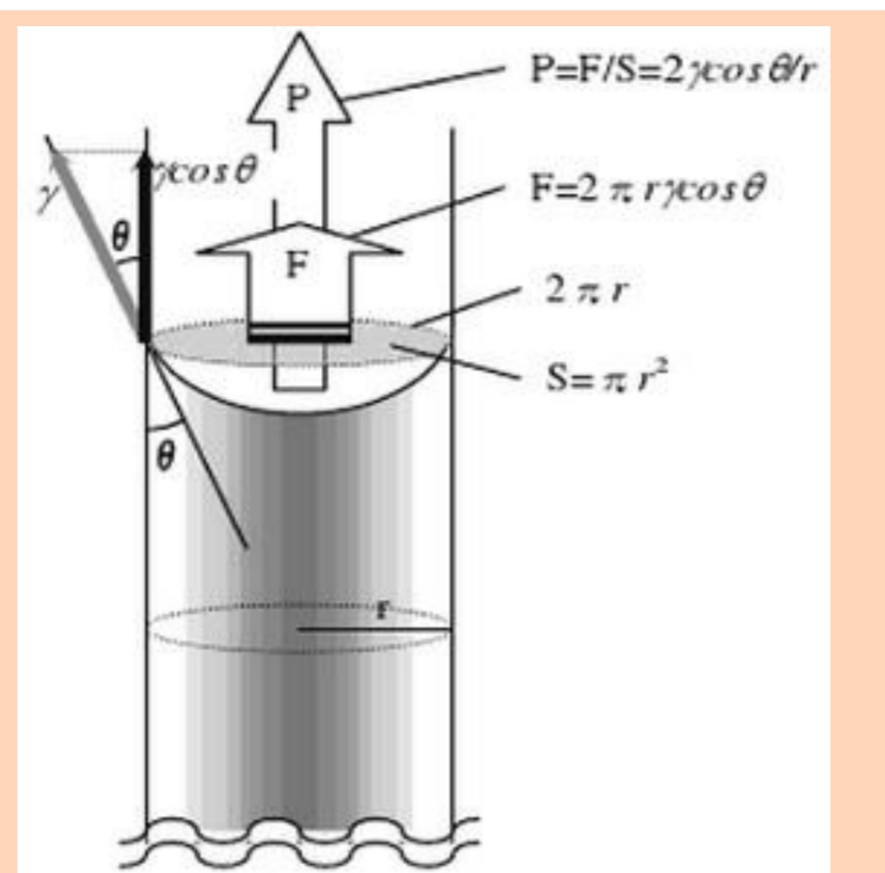
サイズオーダーの異なるネットワーク中における浸潤挙動を検討するため、駆動要因として毛管張力が、また抵抗要因として抵抗摩擦が支配的な系における液状水の挙動を数値解析的に検討した。この場合の液状水の挙動は浸入長さが時間の平方根に比例するというWashburnの式で表されるが、この比例関係は深さ5nmのナノチャンネルにおいても成り立つことが確認されている。

#### 駆動要因

- ・毛管張力: 接触角, 空隙径

$$P = \frac{2\gamma \cdot \cos \theta}{r}$$

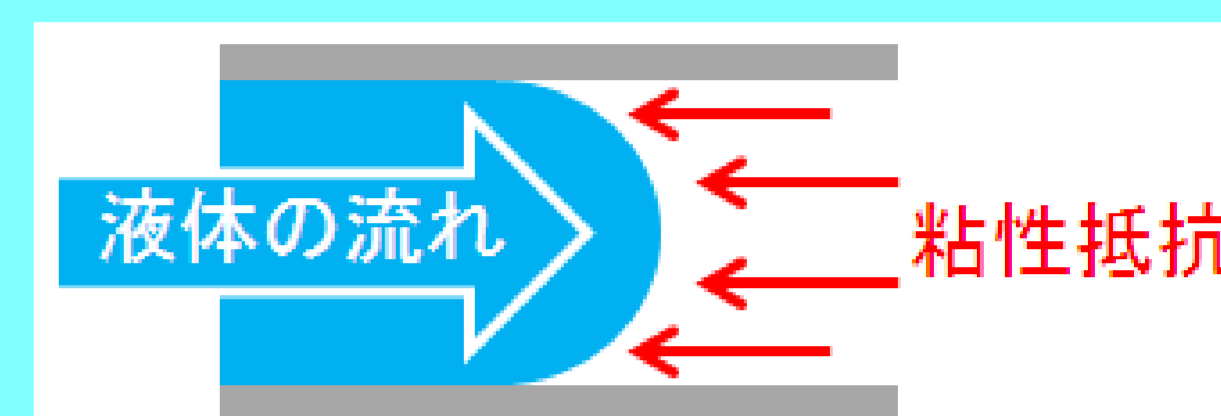
P: 圧力差  
 $\gamma$ : 気液界面張力  
 $\theta$ : 接触角  
 r: 管の半径



江前敏晴: 紙の基礎と印刷適性 (2006)

#### 抵抗要因

- ・摩擦抵抗: 粘性, 空隙径



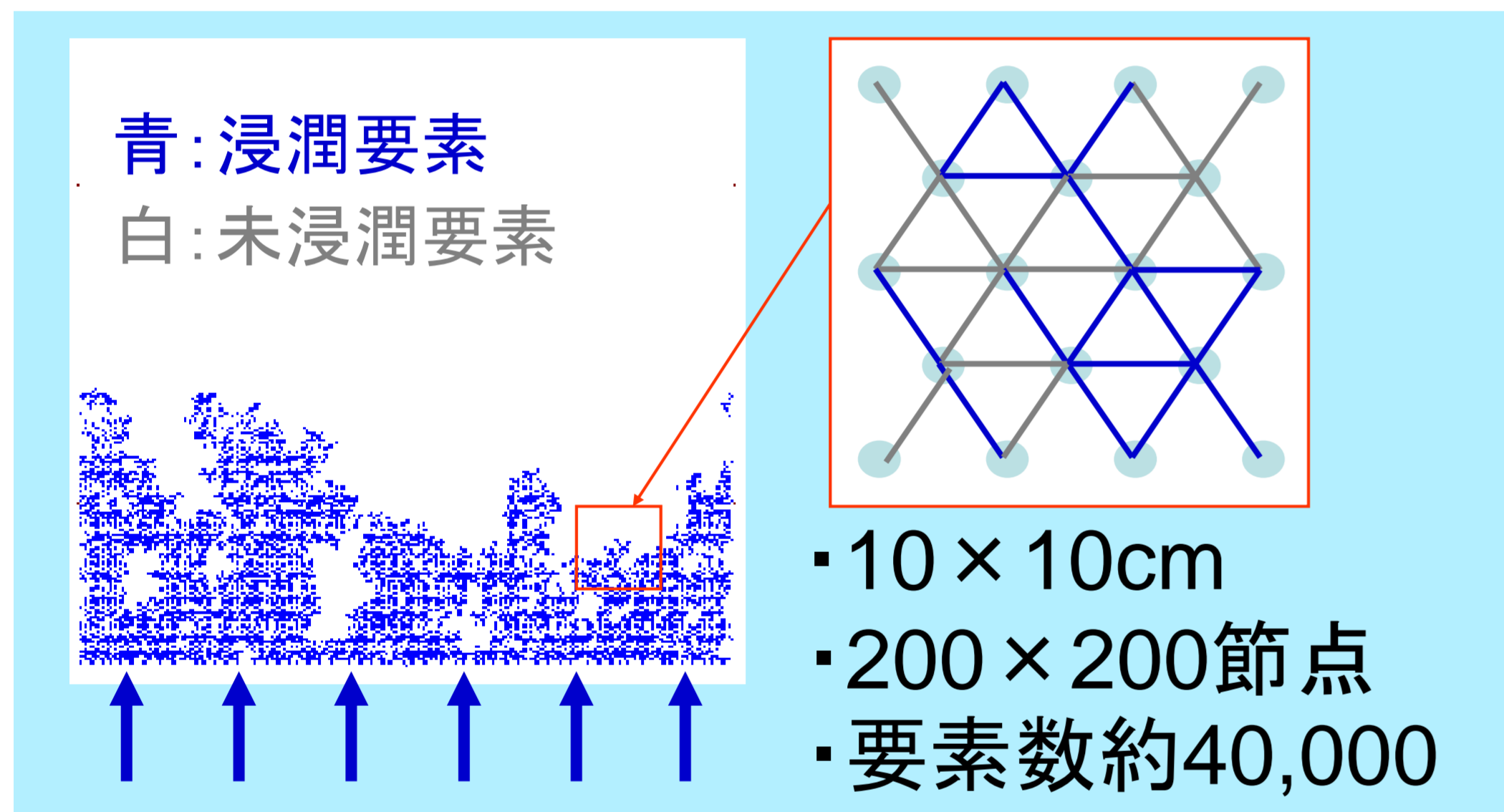
$$\Delta P = \lambda \frac{L}{2r} \frac{v^2}{2g} \rho g \quad \left( \lambda = \frac{64}{Re} \quad Re = \frac{2rU}{\mu/\rho} \right)$$

$\Delta P$ : 圧力損失 (粘性摩擦)     $v$ : 流速    L: 流路長さ  
 $\mu$ : 粘性係数    r: 管の半径

$$x = \sqrt{\frac{2r\gamma \cos \theta}{3\mu}} t \leftarrow \text{Washburnの式}$$

### [パイプネットワークへの液状水浸潤解析]

解析では千鳥状に節点を配置し、それらを連結するようにパイプ状の要素を設置した。各要素はある径を有する空隙の集合体と仮定し、毛管張力と摩擦抵抗に支配された形での液状水浸潤のシミュレーションを実施した。Washburnの式を径の異なるパイプに適用できるように増分形式に変形しており、これを足し合わせることで浸入長さ、すなわち摩擦抵抗の増加による速度の低下が表される。ネットワークは太径と細径の要素から構成されるものとし、太径要素の体積比をパラメータとした。各要素の配置はランダムである。



#### 解析で用いた式

$$x = \sqrt{\frac{2r\gamma \cos \theta}{3\mu}} t \Rightarrow t_i = \alpha \sum_k \frac{x_k}{r_k}$$

$t_i$ : 要素iへの浸入に必要な時間  
 $r_k$ : 要素kが有する空隙の半径  
 $x_k$ : 要素kの長さ  
 $\alpha$ : 液体や壁面の条件に依存する係数

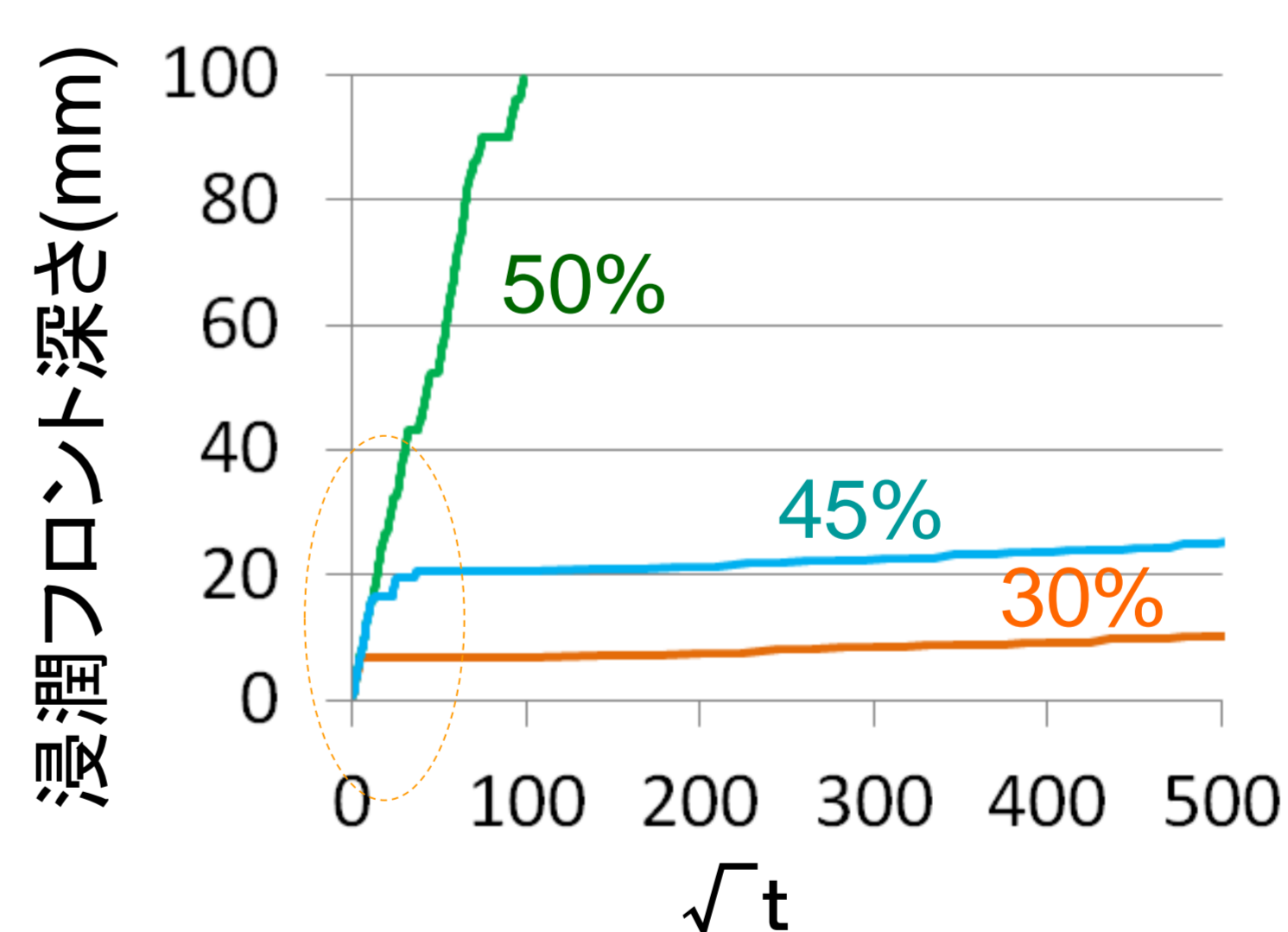
#### パラメータ

- ▷ 要素が有する空隙径 { 太径要素: 1mm (α=1.0, x=0.5)  
細径要素: 10nm
- ▷ 太径要素の体積比 (太径/全要素) : 30~50%

### [解析結果]

$\sqrt{t}=100$ における浸潤の様子を下図に示す。図中の数字は太径要素の体積比を示している。図において浸潤した太径要素は青色で、細径要素は水色で示されている。図より太径要素が増えるにつれて浸潤速度が増加すること、また50%のケースでは太径要素のみを通過して深部に迅速に浸潤していることが確認できる。浸潤深さの推移を見ると30%と45%において、ある深さで傾き、すなわち浸潤速度が急激に減少し、ほぼ停滞していることが確認できる。また浸潤した要素の内訳を見ると、初期に太径要素にある程度浸入した後急激に細径要素への浸入が生じていることが確認できるが、この際に浸潤速度が大きく減少した。以上より、摩擦抵抗の大きい細径要素への浸入により浸潤速度が大きく減少し、見かけ上停滞が生じていた可能性がある。

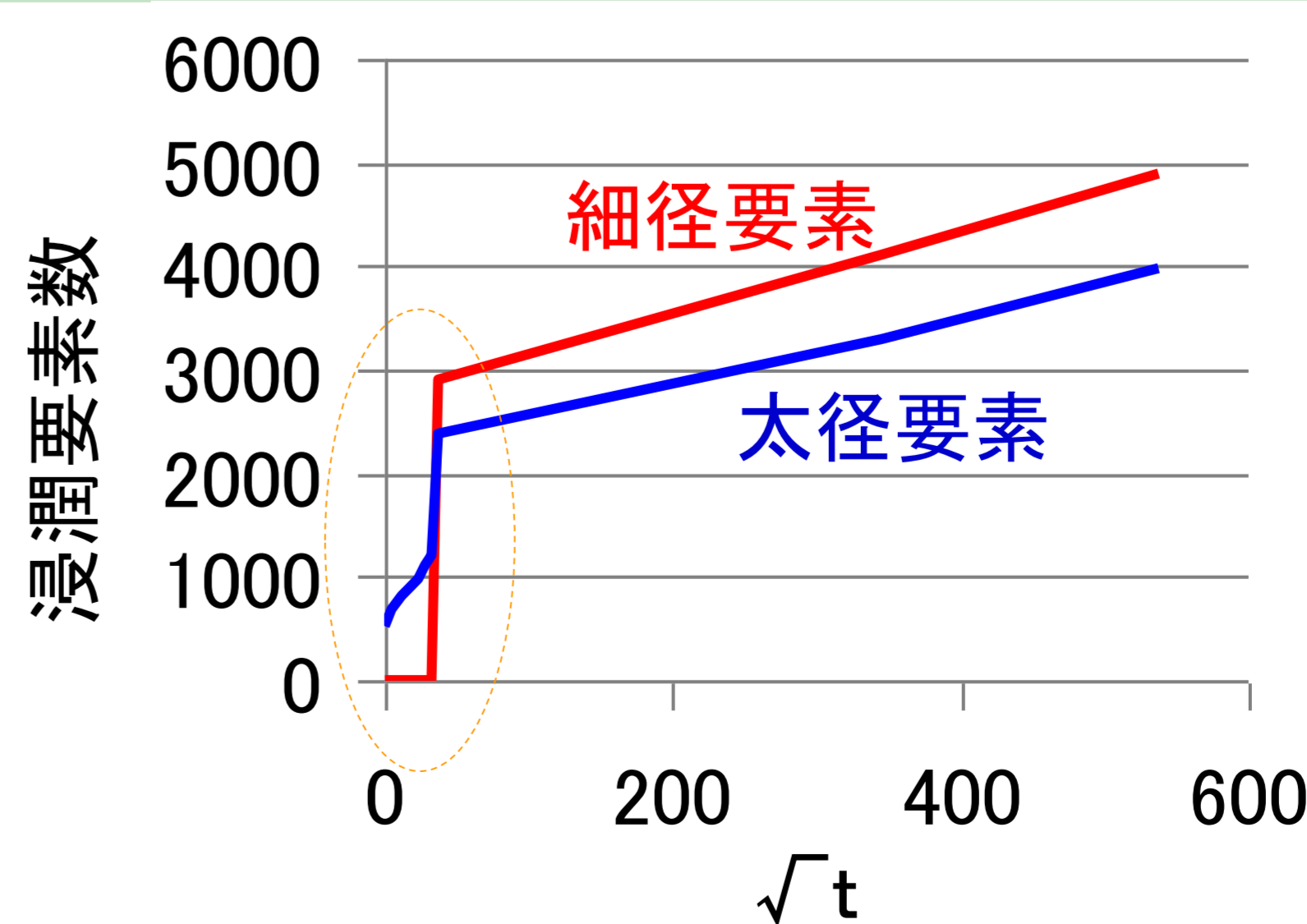
#### 浸潤深さの推移 (図中の数字は太径要素体積比)



太径要素の体積比が30~45%

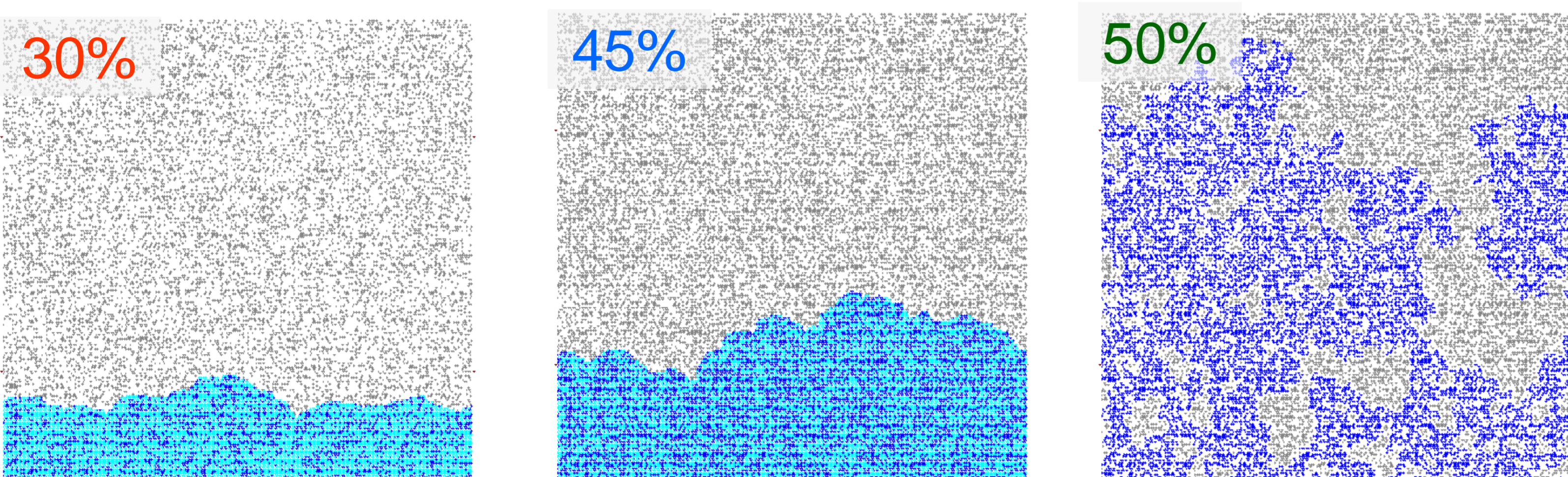
途中で浸潤が緩慢に

#### 浸潤した要素の内訳 (太径要素体積比=45%)



初期は太径要素のみに浸入

その後細径要素にも浸入開始



**粗大空隙から微小空隙に浸潤が移行する際の浸潤速度の急激な減少により見かけ上の停滞が生じていた可能性を数値解析的に確認した**