II−106

地下水流の浸透機構について（第三報）

大阪府立高専　正会員　佐藤邦明

1：研究目的

われわれは，第一報において多孔体のモデル化とその幾何的特性について述べ，さらに第二報で浸透流の空隙規模の分布によるパターンの分類（吸着水非流動化現象，高粘性吸着水流，粘性流，層流遷移流，および完全乱流）を行ない，各々の流水抵抗の表現を明らかにした．しかし，特に後二者，すなわち遷移流，完全乱流に関し，多孔体の空隙寸法と乱れの規模，局所乱流の発生メカニズム，またそれらと抵抗係数との関連，等の具体的な評価はなされなかつた．

本報では，以上の問題点の解明の端緒となる平均流の規模と平均流方向に垂直な浸透流成分（層乱流を含む）の実験的推定，およびこの成分と多孔体特性値の相関についてのべる．

浸透流速度の微視的成分は，直接に空隙中にホットワイヤープローブを設定し，計測するのが妥当であるが，測定の困難のためここでは一様粒径で構成される多孔体，および粒径の分布構成のものについて，流場中の任意点からトレーサー（着色液）の連続的注入によつて起こる定常分散から検討を加える．つまり，これは定常流場内の微速度成分の空間的平均に基づいている．

2：基本的考察

二次元定常浸透流場内の任意の一点から一定量のトレーサーを連続的に注入すると，トレーサー液自身に働く外力を考えなければ，Fig.1の様な分散モデルを想定しうる．

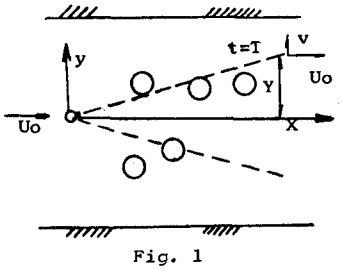


Fig. 1

いま，トレーサー注入点から下流の任意点で，

$$Y = \int_0^T v\,dt \qquad (1)$$

が成立する．ここで，Y；時刻 t＝T でトレーサーのY軸方向分散距離，x；平均流方向距離，U；y軸方向の浸透速度成分，t；時間，である．多孔体の空隙規模にコンパラブルなvを仮定しうるから，$\overline{v^2}_{t=T} = \overline{v^2}$ とすると，分散の数学モデル式は，

$$\frac{1}{2}\frac{d(\overline{Y^2})}{dT} = \int_0^T v_T v\,dt = \overline{v^2}\int_0^T dt \qquad (2)$$

である．さらに，平均流速 Uo を導入すると，$x = Uo\,T$ であるから，

$$\frac{\sqrt{\overline{Y^2}}}{x} = \frac{\sqrt{\overline{v^2}}}{Uo} \qquad (3)$$

が近似的に成立する．すなわち，Yはxの増加と共にリニヤーに増す事になる．したがつて，トレーサーのY軸方向の分散 Yが任意のxの点で与えられると，Uoは簡単に測定できるから，Y軸方向の平均速度成分Vは推定しうる．以下（3）式を中心に実験的考察を試みる．

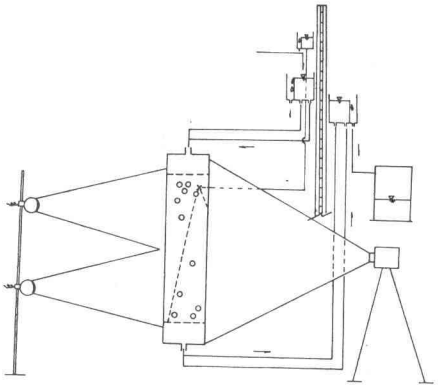
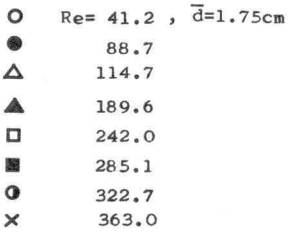


Fig. 2



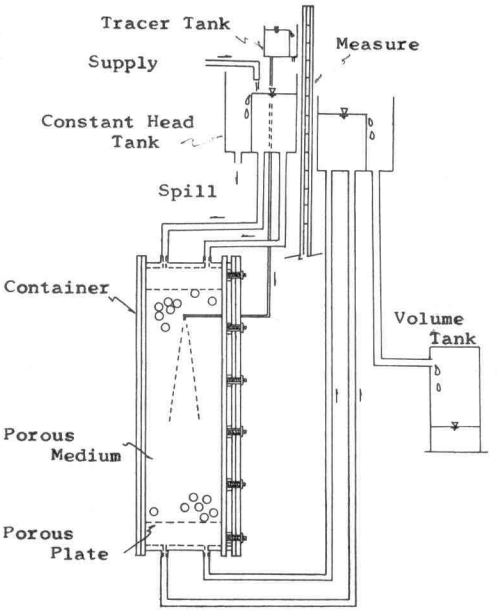


Fig.3

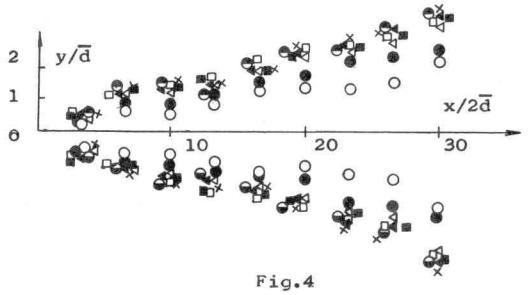


Fig.4

3；実験装置と 実験方法，

実験装置は Fig 3にかかげた 通りであり，主要部は 多孔体コンテイナー（ 内寸法，55 X 17 X 6 cm 透明アクリライト），オーバフロータイプ の定水槽 （ 20 X 20 X 10cmスケール），トレーサー 注入管 （ 内径，0.05 cm 真鍮 ），トレーサー 液計量槽（ 10 X 5 X 5cm ガラス），および浸透水 計量タンク（ 10 X 10 X 10 cm スチール ）である． これらを 連通するものは 内径1.9 cm の硬質 ビニールパイプである． 実験方法の 概略図はFig 2. に示されている.

トレーサー の分散の観測は，多孔体コンテイナー の後部 30 cm程の所に 500 ワットの投光電球2 基を置き， その逆の位置100 cm にカメラを 設置し写真撮影に依つた．トレーサーの 注入口は，浸透流がコンテイナー 壁面の影響を 受ける事を考 慮して，観測側壁面より2 cm離して固定された．トレーサーの注入量に よつて ，その分散は若干の 密度差の効果をもつので，一定量に限 定するため，

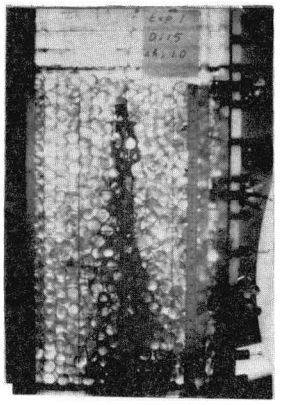


Photo-1 (Re=39.7)

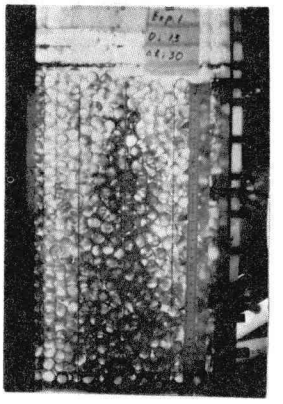


Photo-2 (Re=388.2)

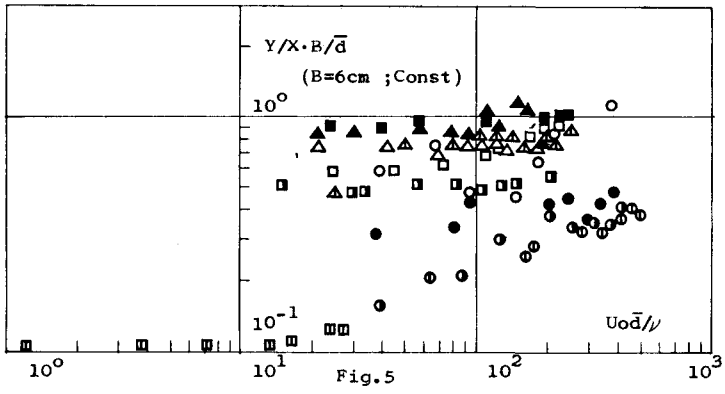


Fig.5

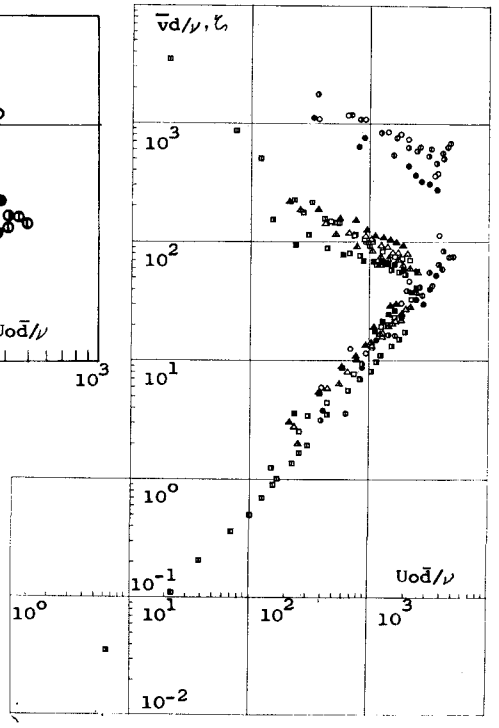


Fig.6

○ P(1.5,0)
◐ P(2.4,0)
◑ P(2.0,0)
● P(1.75,0)
△ P(0.5,5)
▲ P(0.5,3.5)
▲ P(0.5,3.5)
□ P(0.5,1.7)
▥ P(0.15,0)
◨ P(0.5,1.05)
■ P(0.5,0.5)

トレーサー 液計量槽の操作で 調節された，浸 透速度の増減は スタンドメジャーに 固定された2つの定水位槽の位置の 相対高度の 差で与えられる．実験の順序は 次のごとくである．

多孔体のコンテイナー に凡そ5 kgの多孔体を3層に分け，各々の層を一様につき 固めながら充填する次に，漏水止め ラバーを挿入し，上蓋 を12個のボルトで固定し，所定の位置にトレーサー 注入管を設定する．ビニールパイプ を接続し，コンテイナーを 直立させ，準備は完了する．通水時に 注意すべきは空気の混入であるが，これを防止する ため下流方向から 徐々に 逆給水を行なう．数分間通水を続けた後，上下流定水位そう間に水頭差，H =1,3,5,10,15,20,25,30,40,50,60 cm を与え，それらの水頭差に対応するトレーサー 分散の写真をとると 同時に 浸 透水量をその都度計る．多孔体はガラス球で，一様平均径の違つた 5種と径の正規分布 P（平均径，標準偏差）の 異なる6種の計11種を採用した．

（これらについてはFig.5の表を参照せよ） なお，トレーサーは 観測の都合上，ブルーインクと数種の染料を用い，その色素の違い によつて写真のフイルムも白黒とカラーを使い分けた．

4：結果とその検討

トレーサーの分散の写真 観測2例 （一様粒径 d = 1.5 cm の構成多孔体の場合）が photo-1(Re=39.7) と photo-2 （Re=388.2）である．両者共に，前述の(3) 式のごとく，分散は，注入点付近を 除いて（注入管による 局所乱れの発生，トレーサー液と水の密度差に起因）ほぼ直線的に下流方向にひろがる．

しかし，多孔体の 最下端で，ポーラス板と 浸 透流場の消失のため，分散巾は若干急拡する．

さらに，分散形態が同一多孔体（一様粒径 d = 1.75 cm）について，レイノルズ数 の変化に伴ない いかに変化するかを知るため， Fig. 5のような整理を行う．図は，横軸に 平均流速 U_o と平均粒径 $\bar{d}$ による

レイノルズ数 $Re = U_0\bar{d}/\nu$ （ν；動粘性係数），縦軸にトレーサーの分散こう配の無次元量 $\frac{Y}{X}\cdot\frac{B}{\bar{d}}$

（B＝6 cm，一定多孔体中 ）をとり，多孔体特性値 別に全データをプロットしたものである．これから，一様粒径構成多孔体中の分散巾は，他の分布構成におけるものより 小さい傾向がある．これは次の様に説明される．つまり，前者の 多孔体中に形成される空隙 規模は，後者のそれ らより一般に小さい（平均的 空隙率から分る）から，当然，平均流を横ぎる浸透流変動の規模は小さい，他方分布構成多孔体の場合，浸透流のy軸方向成分は大きい．したがつて，トレーサーがy軸方向に 輸送される量は一様粒径 構成のものより 分布構成の多孔体中で多い事は明らかである．さらに，一様粒径構成多孔体（$\bar{d}$＝0.15 cm について，レイノルズ数 Re＝10 位下で $\frac{Y}{X}\cdot\frac{B}{\bar{d}}$ は一定値をとるが，この範囲に おいて層流による 分散であり，Re＝10 においては 乱流による分散が加 わるものと 断定されよう．これらの量的評価は，この程度の実験では 望みがたい．

次に，Fig.6 は，縦軸に $Re' = \bar{v}\cdot\bar{d}/\nu$ を取り，実験値を プロットしたものである．（記号は Fig.5 のそれに対応する） また，同時に，抵抗係数 ζ （$I = \frac{\zeta}{\bar{d}}\cdot\frac{U_0^2}{2g}$ I；動水こう配，g；重力の加速度）も プロットされている．

Re と Pe' にはかなり良い 相関が見られる．実験的に十分な精度で次式が成立する．

$$(\bar{v}\,\bar{d}/\nu) = C\,(U_0\bar{d}/\nu)^n \qquad C = 0.0567,\quad n = 1.167, \qquad (4)$$

この式によつて，層，乱流の分散効果を抽出することは，抵抗係数に関して 明確に判定できるが，不可能であり，両者を含んでいる． なお，抵抗係数の プロットはかなり バラついているが，この点についてわれわれが従来指摘しているごとく，$\bar{d}$の採用の不適当さを表わしている．

5：結論

定常浸透流場において，トレーサーの分散は，(3)式に仮定されたごとく，実験的にもほぼ下流方向距離の増大と共に，トレーサーの 注入点付近を除いて，リニアーに増加する．この点については，レイノルズ数によつて，$Re' = \bar{v}\bar{d}/\nu$ と $Re = U_0\bar{d}/\nu$ がかなり有意な 相関をもち，(4)式で表わされる．

なお，多孔体特性値の差異（一様粒径，分布構成）による Re', Re への直接的な影響は，観測自体マクロ的であるため，的確な評価をなし得なかつた．しかし，一様粒径構成の多孔体の分散は，他の分布構成のそれに比べ，前者の空隙規模がほぼ均質で，後者のそれが 不均質のため，かなりの差が 認められることは注目すべきであろう．

最後に，いうまでもないが，$\bar{v}$ と U_0 の関係が明確に 分る事は，浸 透流のモデル化，さらに分散係数の推定にも，非常に重要なことである．

6：謝辞

本研究に当たり，終始，大阪大学工学部の室田教授から卓抜 した示唆を賜わつた．さらに，本校技術員の坂本氏に実験の労を煩らわした．ここに謝意を表わしたい．