

### 6 7. “水文地質” のフレームワーク (その 3)

はじめに：前号に掲載した表 1 は本課題の骨子ともいえるものなので、一部修正したものを併せて再録する。

表 1 水文地質のフレームワーク

地下水流動場のスケール		局 所 的	局 地 的	地 域 的
ディメンジョン		10 <sup>1</sup> ~ 10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>		10 <sup>4</sup> ~ 10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
自然 的 要 因	地質的要因	キーワード：堆積相 比較的小単元の堆積古環境、たとえば蛇行河川の寄州堆積物や海岸の沖浜堆積物などにみるポーラスメディアの異方性は汚染物質の局所的な動態に関わる。(図 1, 2. 写真 1 参照)	キーワード：帯水層単元・層序 堆積相解析やシーケンス層序に基づいた帯水層単元という概念が水文地質構造の把握に必要。また地表地質と地下地質の対比が重要。 その際、電気検層記録などの各種検層資料が活用される。(図 3 参照)	キーワード：堆積盆地 堆積盆地の成因には鉛直方向の構造運動に起因するものやプレートの水平方向の圧縮に伴う構造運動に起因するものが考えられている。近年はプレートの引っ張り、圧縮に起因した半地溝構造（ハーフグラベン）も提案されている。重力探査、弾性波探査などの各種物理探査は堆積盆地の構造解明に活用される。
	地形的要因	キーワード：微地形 地表の起伏は堆積物の性状を反映していることが多く、特に扇状地などのように河川が頻繁に氾濫して堆積層の多重性がみられるようなところでは浅層地下水は其々これに規定されて存在している。このような場合、小メッシュの DEM による微地形解析は有効。(図 4、5 参照)	キーワード：地形単元 山地、丘陵地、台地、低地といった明確な地形境界に限られた地域を指す。但しそれぞれの地形形成過程に地域差が存在し、それが水循環系の在り様を強く規制しているような場合にはそれに対応した“水文地形単元”が必要となる。(図 6~11 写真 2, 3, 4 参照) なお現在目にする地形はそれより前のステージの地形を引き継いでいる場合が多いことに注目。	キーワード：地下水流域 未固結堆積層からなる台地、丘陵地などにみる高次の谷は地下地質を反映していることが多いので、地下水流域の第一近似として水系網図、接峰面図は有効(図 12、23 参照)。また最近では立体衛星画像による地形解析が可能となり、その活用機会が増加(写真 6 参照)。なお地盤沈下地帯の変遷や沈下パターンは地下水益像を反映していることが多いので参考になる。
地下水の動態にみる注意すべき現象		地層の不均質性(図 25、写真 9-11)を反映した選択流(写真 12-14)の存在は重要。その通路となる間隙部分は降雨浸透→流出の過程で成長し、(写真 15-17) Preferred pass way を構成する。なお不飽和帯→飽和帯で発生するゼロフラックス面は土壤汚染の長期化に関わる。(図 24)	層準を異にする帯水層の水頭差によって生じる漏水現象など。水頭差によっては下部から上部への流れも生じる。地層の連続性を欠く場合、汚染物質はそこから深部に浸入する。水位記録の解析に際しては、鑿井の施工、ケーシングパイプの腐蝕や破損、マルチストレーナによる影響に注意。	地下水流動系の範囲や性格は堆積盆と重なることが多いが、地下水盆を特定する場合には、涵養域、流動域、流出域あるいは滞留域といった地下水流動系を明確にする必要がある。(図 20、21 参照)
解 説		詳細な露頭観察により、堆積サイクルを基準とした堆積時間面の枠組みのもとに堆積相や堆積システムなどの成因論的な観点から地層を解析する「堆積相解析」、「シーケンス層序」が重視されている。		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>・同一層準の地層でも方向によって透水性が著しく異なることがある。</li> <li>・最初ランダムに発生したフィンガリング現象は降雨浸透の繰り返しとともに固定化する。これは汚染物質の浸透機構の上で注目すべき現象。</li> <li>・降雨浸透の繰り返しとともに成長した浸透経路の拡張はソイルパイプの成長を促し、地下侵食が進行。</li> <li>・汚染物質に起因する地層の変質が以後の地中水の移動に影響することがある。</li> <li>・地下水循環の基本ともいえる地下水流動研究にはまだ多くの課題が残されている(図 27、28)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地形的分水界では不透水性の地層を横切る下方への水の流れが観察される。</li> <li>・流出域ではこれとは逆に顕著な上向きの流れが観察される。</li> <li>・不圧地下水の場合、流速は一般に流線が集中する流出域で速く、涵養域で遅い。</li> <li>・上記の現象は灌漑水の導水などの人為的要因が加わって誇張されることがある。</li> <li>・層準を異にする地層間の漏水現象は特定帯水層からの過度の揚水によって惹起される。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・巨視的にみて地下水面は地形と対応していることが多い。この際、地下水盆の規模の第一近似として切峰面図が有効である。</li> <li>・地下水流動系の詳細は基本的に堆積盆の水文地質構造を踏まえたものでなければならない。</li> <li>・往々にして地下水の水理水頭(全水頭)や水温などの情報だけで地下水流動系を特定している例がみられるが、それは妥当とはいえない。</li> </ul>

(着色部は本号の話題、紫色の字は本文に掲載した鍵図)

f) 地層・地中水・間隙物質

ここでやや脇道に逸れるが、この項に関して表2を加え、「水文地質のフレームワーク」が時空間スケールを基調としていることを強調しておきたい。ただしそのすべてをここで述べるのは本題から離れてくるので、ここではその骨子だけを述べるに留める。詳細については、いずれ話題を変えて稿を起したいと考えている。なおこの表にある間隙物質とは元々地中に存在していなかった物質を指している。

さてこの表は不飽和帯から飽和帯、さらには地下水盆スケールまでを考えた地質環境に関して、各領域で注目すべき水と物質の動態特性を示したものである。ここでは同時に水や物質移動とともに、あるいは時間とともに、それに関わる関与要因のオーダーを大きく捉えるべきことを示している。すなわち、いま地表に汚染物質が投棄され、それが地中水の浸透とともに降下し、移動する場合を考える。その挙動に関して最初のゾーン、すなわち不飽和帯では汚染物質は地層の間隙の大きさや分布などの間隙構造が問題となる程度に留まり、局部的現象あるいは局所的現象として捉えることができるが、その下位のいわゆる懸垂水帯から飽和帯の上部までのゾーンに至ると、層理、葉理、堆積相といったやや大きなオーダーの堆積構造が問題となる。そしてさらに下方、あるいは広域の汚染規模になるに従って、より大きなオーダーの地質単元が問題になってくることを示している。以下に表2を補足して、その要点をあげておく。

表2 水と間隙物質の動き、およびそれに関わる地質要因

(出典：新藤静夫(1993)：地層と地下水汚染、第22回日本水環境学会セミナー講演資料一部改変)

水の動き	帯	間隙物質の動き	地質・地形環境
<p>大降雨または 灌漑水の浸透など</p> <p>蒸発散</p> <p>ゼロフラックス面</p> <p>降下浸透</p> <p>ゼロフラックス面</p> <p>地下水面の下降 または涵養域</p> <p>地下水面上昇 または流出域</p>	不飽和帯	間隙物質の浸透・移動における Preferred pass way などの役割  (滞留) 水、間隙物質共に滞留 (残留) 間隙物質のみ残留 (遅延) 間隙物質の性質による移動速度の違い 間隙物質の移動における Preferred pass way などの役割  (滞留)	地層構成粒子の性質 間隙構造 大きさ・配列・分布 間隙間物質の性質  層構造 粘土の薄層 葉理、層理 その他の堆積相
	飽和帯	(集中) ex: 汚染塊、汚染域  (集積・沈積)	地質構造 層位 不整合 埋積谷 断層など  堆積盆/流域地形 (地下水盆、堆積盆)

(注：各要因は横方向にほぼ対応している)

- ① 蒸発散と降下浸透の境界部に生起するゼロフラックス面で物質が滞留する傾向がある。この現象は多量の浸透水の供給によって消滅し、この時物質の下方への移動が行われる。年間では梅雨期とか台風時のように大降雨がもたらされた時がこれに相当する。
- ② このゼロフラックス面の発生は通常はおよそ深度 1m 程度で、2m を超えるようなことは殆どない。なおこの層位での水と物質の移動を追究する際、マトリックス部分とマクロポア部分が共存して機能していることを念頭に入れておく必要がある(写真 9)。
- ③ ゼロフラックス面は降下浸透水と毛管上昇水の境界部にも発生することがあり、それとともに物質も滞留傾向を示す。また地下水面の上昇・下降とともに物質も上下移動を繰り返し、この部分でそれが長期化する傾向を示す(図 24)。
- ④ さらに降下浸透の途中に粘土の薄層があれば、その上部で物質が滞留する。地層中の粘土鉱物、間隙間に存在する(あるいは粘土粒子表面に吸着している)物質(たとえば有機物や塩化物イオンなど)の性質によっては、その現象が強調される。
- ⑤ 飽和帯に到達した物質は地質構造を反映して様々な分布形態、移動形態を示すが、それはある程度類型化することが可能である。このことは汚染調査や対策に際しての最初の手がかりを与える。
- ⑥ 堆積盆地の中心部は通常の状態では、地下水は滞留、あるいは上向きのフラックスを示す場にあるので、汚染物質は集積・停滞する傾向がある。なお涵養域ではその逆の傾向が示される。



写真 9 表層土壌の間隙構造  
[ 写真提供：京都大学 丸山利輔名誉教授  
バリウムを浸透させたのち X線撮影 ]

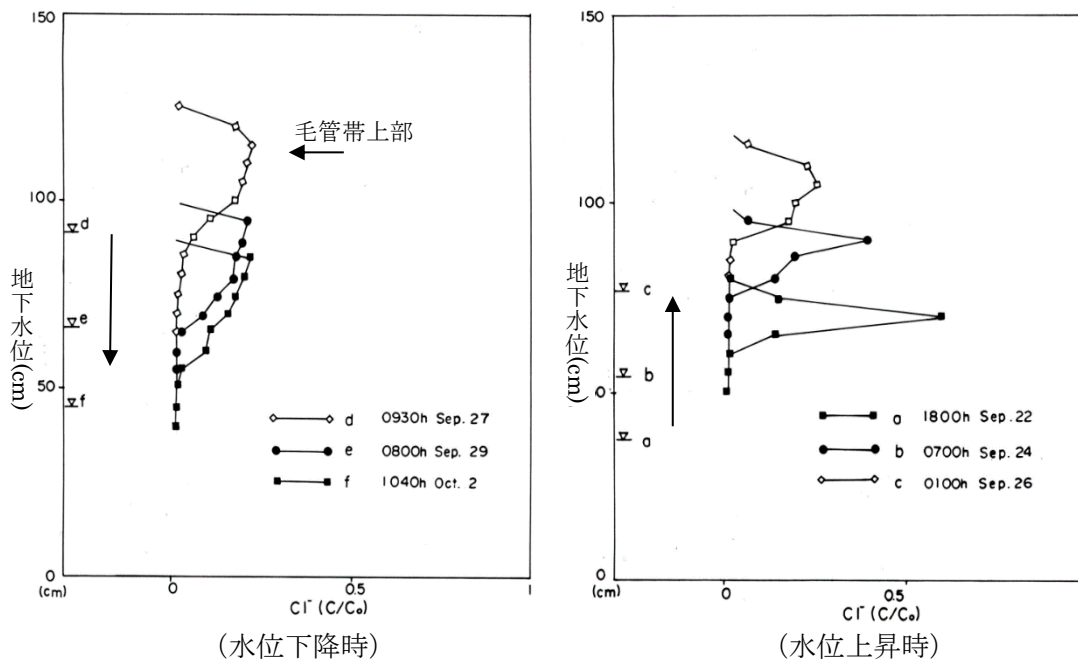


図 24 地下水水位の変化に伴う毛管帯における物質の挙動  
(出典：唐 常源(1985)；筑波大学大学院環境科学研究科修士論文)

g) 地層の不均質性

図 25 は R.Allan Freeze/John A.Cherry(1979)による地層の不均質性のモデルであるが、実際には等方、均一というような例は自然界には殆ど存在しないと言ってもよい。ただし風成砂や花崗岩起源の風化土（マサ土）などには異方・均一、あるいは等方・不均一に近いものは存在する（写真 10, 11）。

不均質性の典型は固結岩体の裂隙であるが、多孔質堆積層にもマクロポアとマトリックスが共存していることが多く、前者を Preferred passway と称する（写真 12）。これは降雨時にマトリックス部分が飽和したのち、“管隙”としての通水機能を発揮し、素早い降下浸透に寄与する。

一見均質にみえる海成粘土層にも Preferred passway の発達をみることがある（写真 13）。その詳細は土壌試料が密閉された容器に複数段階の吸引圧をかけ、それぞれに対応する排水量を測定することによって得ることができる。いわゆる pF 試験<sup>脚注</sup>がそれである。

図 26 はその試験結果の一例である。ここで吸引圧は間隙径に相当するとして、間接的に間隙の性状を知ることができる。なおこの図にみるパターンは、試料の採取深度にかかわらず、ほぼ同様の傾向を示したことから、この地域の海成粘土の特徴といえる。すなわち pF 値の低い部分はマクロポアに相当し、高い部分はマトリックスにあたる極小間隙と判断した。

なおこの図 26 で pF 値 2 に相当する間隙径は凡そ 0.03 mm、pF 値 3 に相当する間隙径は 0.003 mm である。一方、pF 値 < 1 以下では間隙径は 0.3 mm 以上を意味し、毛管現象では水分を保持できない。

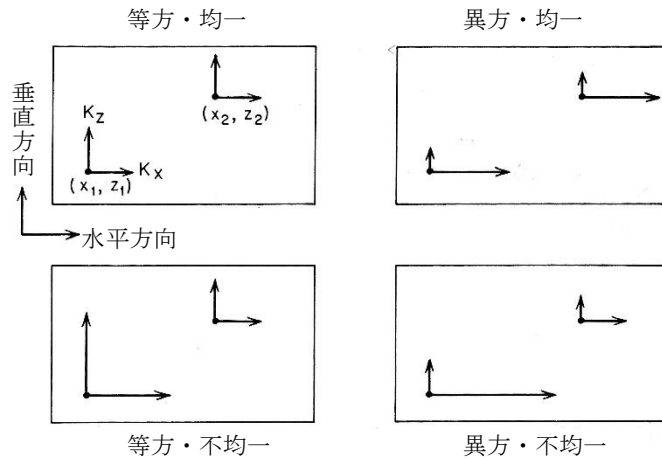


図 25 異方性・不均一性の組み合わせ  
(出典：R.Allan Freeze/John A.Cherry(1979):Groundwater)



写真 10 等方・不均一性堆積物の例  
(愛知県豊田市小原、花崗岩風化土)



写真 11 異方・均一性堆積物の例  
(アラブ首長国連邦 Al Ain、砂丘堆積物)

脚注：土壌試料を密閉した容器から様々な方法によって土壌水を吸引し、その吸引力を水柱高 (cm) に換算して、その対数値と水分率との関係を調べるもの。なお吸引方法には pF 値の段階毎に、土柱法、水頭法、加圧膜法、遠心法、蒸気圧法等の様々な方法が考案されている。



h) 選択流

地中水がある特定の部分に集中して流動する現象を選択流と呼ぶことにする。これには既に触れた写真9や12に示したようなマクロポア、地下浸食に起因するソイルパイプ、また堆積初生時の透水帯(写真14)さらには地下谷のような大規模な流れにいたるものなど、多様な流動形態がある。

ところでミクロな世界で発生する選択流について興味ある現象を捉えたことがあるので、ここに紹介しておく。

これは粒径0.1mmの均一なカラスビーズを用いた室内実験である(写真15、16)。ここでは最初ランダムに発生した浸透水の流れが定常化してゆく様子が捉えられている。トレーサーとしたのはトリクロロエチレンで、これに赤色のマジックインクで着色したものである。

一般に透水性の薄層に支配されて流下方向に枝分かれして流れる現象をFingering(フィンガリング)と称しているが、写真17にあるように、均質・微小な多孔質媒体においても同じような現象が生じるのは注目すべきことである。このようなミクロな現象は、Micro-fingeringといえ、これは時間経過とともに次第に成長してゆき、物質の更なる浸透を加速させてゆく。

ところで選択流の流速というのが問題となるこ

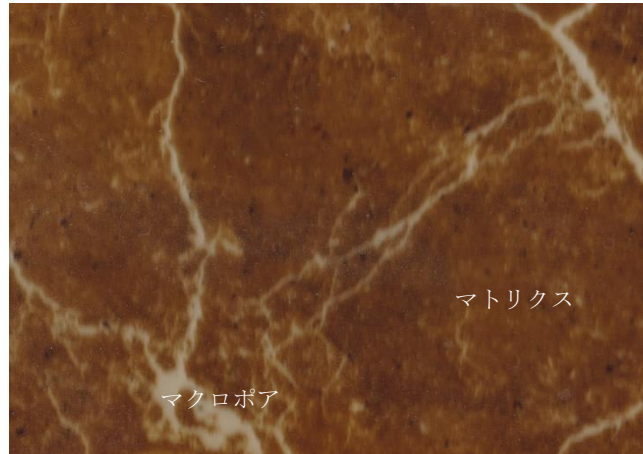


写真12 関東ローム層における不均一性  
(乾湿罅割れ、木の根、小動物などによってできる管隙)



写真13 浅海成粘土層に見る不均一性  
(千葉市東京湾岸、深度33.20mより採取した不攪乱試料)

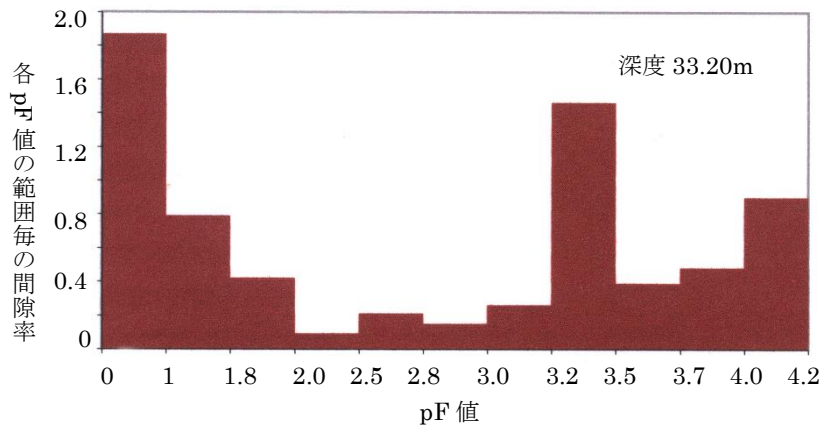


図26 各吸引圧毎の間隙率の分布

とが屢々あるので、これに関連したことについて触れておく。

地下水の流速にかかわる用語には次のようなものがある。

濾速

$$V_1 = Q / A = KI \dots\dots\dots 1$$

Q : 流量, A : 断面積

K : 透水係数, I : 動水勾配

平均流速

$$V_2 = Q / (AP) = KI / P \dots\dots\dots 2$$

P : 間隙率

有効流速

$$V_3 = Q / (AP_0) = KI / P_0 \dots\dots 3$$

P<sub>0</sub> : 有効間隙率



写真 14 河床堆積物に見る選択流  
(霞ヶ浦流域、桜川河床の砂利採掘によって出現)

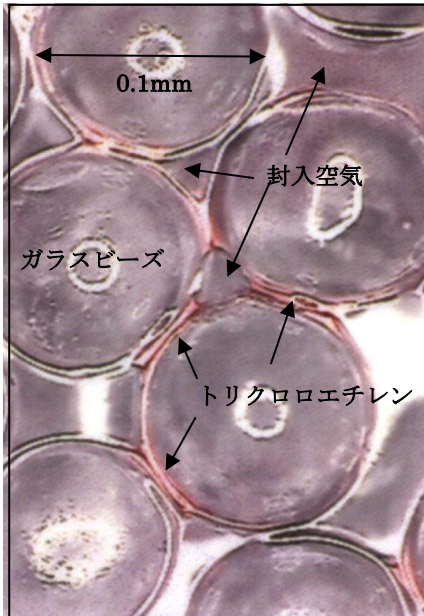


写真 15 粒子・封入空気・物質  
(トリクロロエチレンの存在状況に注目のこと)

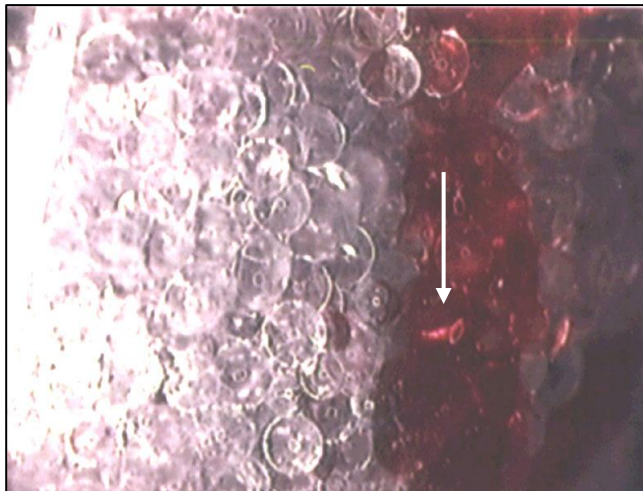


写真 16 封入空気が抜けた部分から浸透

1 式はダルシー式として知られているもので、 $V_1$  は実流速ではないことに注意。

2 式は実用的にはあまり利用されていない。

3 式は真速ともいわれ、トレーサを投入して直接これを追ったり、単井に流向流速計を設置して得られるものである。これは選択流に直接繋がる情報で、自然環境の多様性や複雑性を重視する立場から、筆者は重視されるべき調査項目と考えている。

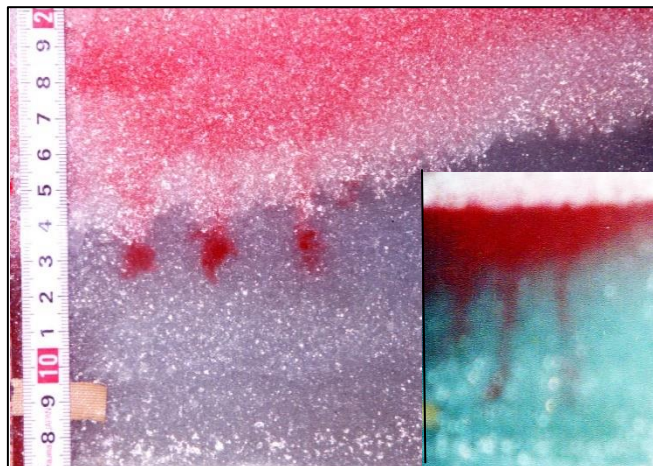


写真 17 Fingering とその成長  
(資料提供：千葉大学園芸学部 唐 常源教授)



#### i) 地下水の流速（真速）

地下水の汚染問題では流向・流速を正確に求めることを必要とするケースが多い。しかしこれは容易ではない。その理由は、一つは計測の技術的な問題であり、他は得られたデータの代表性の問題である。特に後者は場所的なものと時期的なものを含んでいるので余計複雑である。ここで場所的なものは地層の不均質性にかかわるものであり、時期的なものとは、とくに浅層地下水において、高水位期と低水位期で流向・流速が変わるケースがあるという意味である。このような難しさがあるという前提で、これまでの事例をあげてみた。

#### 扇状地

- ① 渡部景隆他(1960)：那須野が原における地下水の流速、応用地質、Vol.1.No.4  
トレーサ（色素）法、および浮子法 50m/hr～65m/hr、最大 100m/hr、
- ② 渡部景隆他(1967)：埼玉県神流川扇状地の水理地質学的研究、秩父自然科学博物館研究報告第 14 号  
トレーサ（色素）法、30～50m/hr

#### 河岸段丘

- 渡部景隆他(1960)：長瀨付近の地下水、応用地質、Vol.1.No.1  
トレーサ（色素）法、25m/hr

#### 沖積低地

- ① 美王宏文他(2005)：流向・流速測定を用いた地下水調査事例、全地連技術 e-フォーラム 2005  
温度法、0.15～0.24m/hr
- ② 新藤静夫 1963)：未発表、埼玉県児玉町 身馴川  
トレーサ法（色素）、0.54m/hr、地下水波法、0.5～0.7m/hr

#### 溶岩台地

- 落合敏郎(1969)：三島溶岩中の岩罅地下水に関する研究、日本地下水学会誌、No.16  
トレーサー法（RI）法、断面中央部で 29～30m/hr、断面周辺部で 0.01m/day、平均 16.7m/hr

#### 河川敷

- ① 藤縄克之(1983)：地下水流速及び分散係数の現場測定法、日本地下水学会研究発表会、  
利根川河床  
ボーリングの中心に置けるトレーサの濃度変化を示す分散移流方程式より求めたもの 0.04m/hr
- ② 渡部景隆他(1967)：埼玉県神流川扇状地の水理地質学的研究、秩父自然科学博物館研究報告第 14 号  
トレーサ（色素）法、100～200m/hr

#### 洪積台地

- ① 細野義純(1967)：昭島市付近の地下水に混入した石油系燃料の流出について、日本鑿井協会誌 横田基地から流出したガソリンが付近の井戸から検出されたのを利用したもの：0.04～0.13m/hr
- ② 新藤静夫(1976)：未発表、武蔵野台地西部、瑞穂町砂利採掘に埋め立てたゴミより溶出した物質によって汚染した地下水の追跡  
0.013～0.04m/hr
- ③ 新藤静夫(1995)：地下水涵養域調査報告書（石神井川）東京都受託研究  
武蔵野台地東部（保谷中学校）

単井 流向流速計、0.022m/hr

④ 新藤静夫他(1984)：霞ヶ浦北岸台地、出島地域における地下水流動系の解析（第一報）

トレーサ法、0.03～0.08m/hr（涵養域）～0.53m/hr（流出域）

### 堆積盆地

落合敏郎(1968)：関東平野における地下水の年代測定とその水文地質学的研究、日本地下水学会誌、No.4

水爆実験の影響を受けた地下水をトリチウムを使って追跡

- ・利根川水系：0.38m/hr
- ・鬼怒川水系：0.46m/hr

〔注記：この値は深層地下水の流速としては速いので、深井戸の揚水によって加速されている可能性があるとしている〕

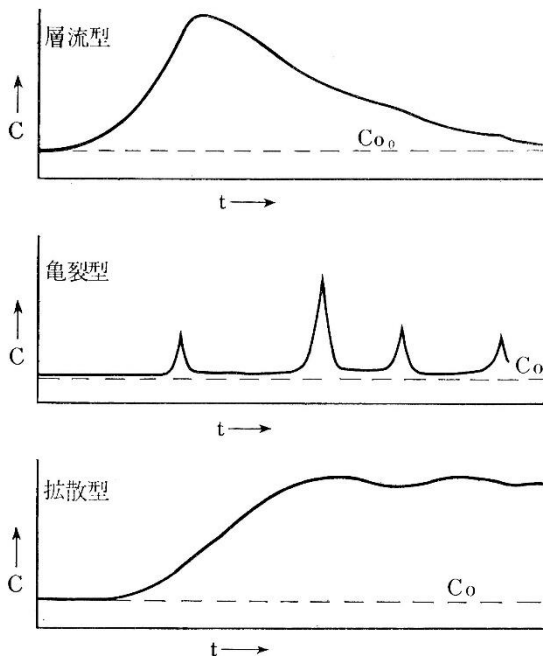


図 27 Tracer の濃度変化の 3 型

出典：渡部景隆(1967)：地下水流動の研究

〔一特に蛍光光度計について、柴田秀賢教授退官記念論文集〕

上記からも言えるように、筆者の恩師である故渡部景隆先生は地下水の実践的研究に力を入れてきた方で、各種水文地質条件下の地下水の流速について主としてトレーサ法によって得た知見を図 27 のようにまとめ、各々について実例を添えて詳しく論じている。そこでこれを引用して本号を締めくくりにする。なお以下は原文の意を大きく損なわないように配慮したうえで、一部修正を加えて引用させていただいた。

#### ① 層流型

地下水調査で最も期待される型で、河水に投入したトレーサをすぐ下流で採水したときと同様に、投入後の経過時間に対応する濃度が一つの山型のピークを示す。岩盤の亀裂にあっても河水のような流れ方をする開放系の場合にもこの型が認められる。

流速は流下距離を、トレーサの投入時刻からその最高濃度が検出された時刻までの経過時間で割った平均流速として求めることとしている。この場合、トレー

サが最初に検出された時までの経過時間を採用する方法もあって、この方が合理的といえることもある。しかしこの場合はトレーサの拡散速度の問題と、トレーサの投入量が少なくて誤差の範囲を超えて検出されたことを確認できる濃度のピークが 1 回か数回の採水しか得られないときの問題から見て、後に述べる拡散型の外は、原則としてピークを採用するのがよいと考えている。

このようにして求めた平均到達時間がトレーサの拡散速度より大きい時には、これをもって流速であると判定できるが、実際には 2 つ以上のピークが現れたり、到達速度が小さかったりする場合には。検討を要することが少なくない。特に地下水の流量を算出する場合には地層の有効孔隙率や拡散速度の問題がつかまとう。



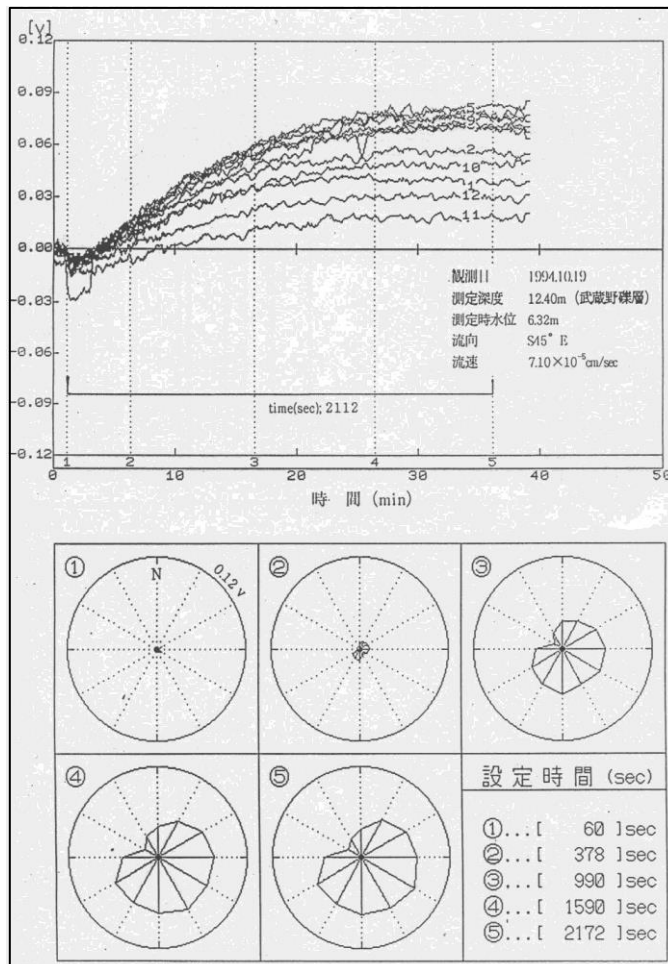
② 亀裂型

岩盤の亀裂をトレーサが流下する場合は、高濃度のピークが2つ以上断続的に検出されることが多い。投入地点から採水地点までの距離が100m以上もあるような場合には、多くの場合、亀裂が複数発達していることがあり、1つの亀裂を通して直接的に採水地点に到達するものや、途中で他の亀裂に移行し、時間差をもって採水地点に達するものがある。またこれらの亀裂の動水勾配がほぼ等しくとも、亀裂を埋める碎屑物の有効間隙率の差に起因した到達時間の差を示すこともある。また層流型と亀裂型の間中型が認められることも少なくない。

③ 拡散型

停滞している地下水にあっても、投入地点と採水地点の水が連続していれば、トレーサは採水地点に到達する。この場合濃度は検出し始めてから漸増し、一様に拡散<sup>脚注</sup>したのちは顕著な濃度変化が見られないまま、最高濃度の状態が維持される。

野外調査では、このような状態を知る目的で行うことは少ないが、結果的には拡散と判定される場合がおこる。特に地表水と岩盤中の水との関係を調べる場合、投入地点と採水地点の距離が数100mに及ぶと観測日数が数10か月を要し、両者の水がつながっていることは確かであるが、流下しているか否かを判定するのに拡散現象を考慮に入れる必要がおこる。



以上が引用の骨子であるが、別に筆者が流向流速計によって得た、明らかに拡散現象を示していると思われる観測例を図28に添えておく。

これは武蔵野台地にある東京大学田無試験地の深度17.3mの観測孔で実施したもので、武蔵野礫層を調査の対象としている。

田無付近は武蔵野地域の台地河川を南北に分ける分水界に位置し、浅層地下水もほぼこれに準じている。そのことが左図のように地下水の停滞傾向と、それにつながるトレーサ(食塩)の拡散現象を示したものである。

図28 流向流速計による観測例

測定地：東京大学田無試験地、対象：武蔵野礫層  
出典：東京都受託湧水涵養域調査報告書 1995 (千葉大学)

脚注：拡散とは、例えば水の入った容器の底へ細管を通じて静かに少量の赤インキを入れると長時間の後に全体が薄赤い水となる。このように異種の物質の混合系が一様に近づこうとする現象をいう。