

1. 地下水トレーサー調査による地下水流動の実態

A case study of the actual groundwater flow, predicated on tracer investigations.

(株)四電技術コンサルタント 露口耕治
K-HGS 栢木智明○

1. はじめに

近年、地下水汚濁や汚染等をテーマとした地下水調査が多くなり、ダルシー則を用いた地下水流動把握だけでは汚染、汚濁の定量的な評価ができず、食塩水や蛍光染料を人工トレーサーとした調査を計画しているケースが多い。実際、地下水トレーサー（人工トレーサー）調査は、比較的狭い範囲の地下水流動箇所や水みちの流動速度などの地下水流動特性を把握する上で有効な調査手法の1つである。ただし、地下水は表流水のように目視で確認することができず、実際の流動形態が確認できない。従来からダムや堤防などの漏水確認などの事例があるが、導通確認が主目的でせいぜいその間の流速を求めたものが多い。

実際には、トレーサー濃度波形を用いた地下水の実流速、拡散速度、帯水層の有効空隙径、移流拡散実態などの空間的に視覚化された地下水流動特性が把握でき、より現実的な工事に伴う地下水汚濁や汚染等の評価などに応用可能と考えられる。しかし、現状ではトレーサー波形解析方法を取り扱った事例や専門書が少ない。ここでは、トレーサー調査事例を基にその解析例やトレーサー波形から見えてくる地下水流動の現実を報告する。

2. トレーサークラウドを通した地下水流動の状況

流動する地下水中に食塩水や染料などの人工トレーサーを投入するとその溶解雲（クラウド）が発生する。このクラウドは、地下水の流に乗って流下するにつれて地下水と混ざり合いながら希釈（移流拡散）され広がっていく。

図2-1は、トレーサークラウドの広がり状況を縦軸に深度、横軸に距離、トレーサークラウド濃度変化を濃淡で示した図である。また、図2-2は、トレーサー投入地点から数m離れた観測地点（ボーリング孔）でのトレーサークラウド濃度変化を縦軸に深度、横軸に時間を取り、イソプロット図として示し、同時に代表的な深度における濃度変化を時系列変化図で表した図である。

一般的には、地下水等高線用いた流線網やポテンシャル分布図から判断される地下水の動向を判断することしかできなかったが、このようにしてトレーサー拡散状況を表現することにより、肉眼で確認することのできないトレーサークラウドの変化を通して地下水の流動状況を見ることができる。

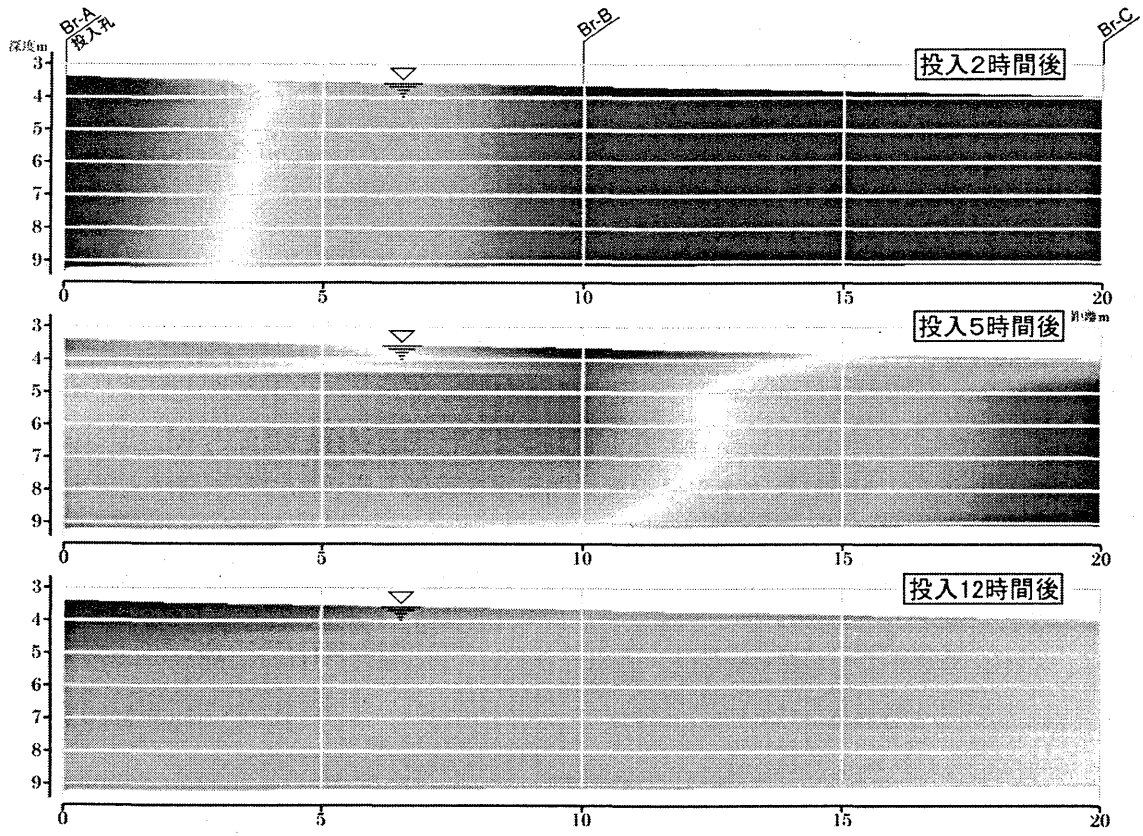


図 2-1 トレーサークラウドの拡散状況図(数段階の図)

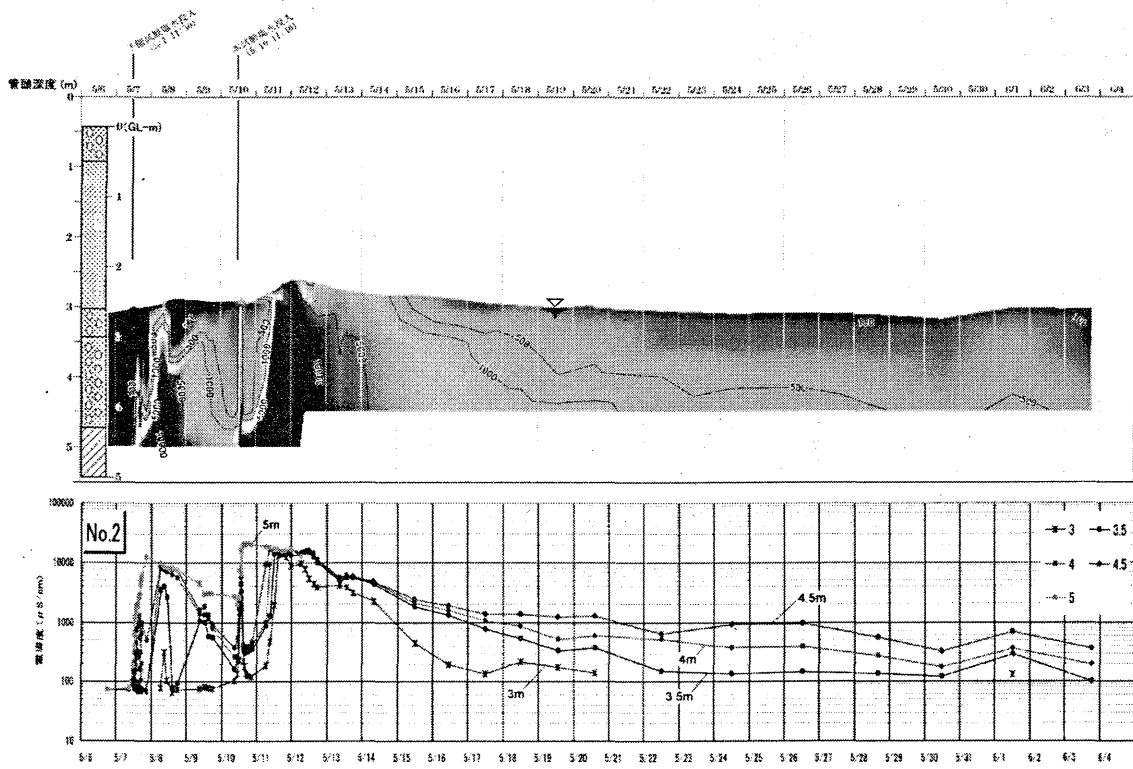


図 2-2 ある地点におけるトレーサー濃度変化イソプロット図

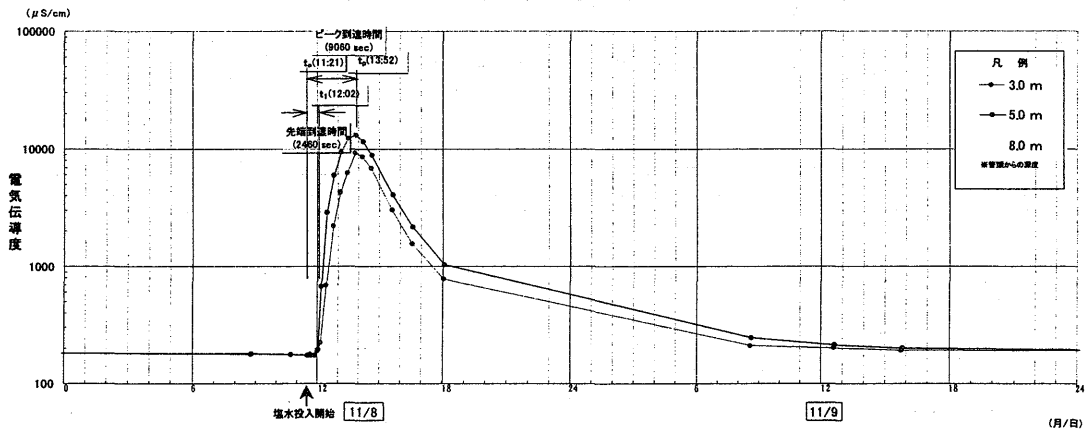
3. トレーサー波形解析の基本式

トレーサークラウドの流下方向へ広がる速さ（拡散速度 U ）は、流体の慣性力と粘性力との比で表されるレイノルズ数（ Re ）に支配され、一般的に地下水の場合 $Re < 10$ 以下で層流、 $Re > 100$ で乱流を示すとされている。地下水の場合レイノルズ数は、①式で定義されている。

$$Re = \phi \times U / \nu \dots\dots\dots \text{①式}$$

（ここで Re ：レイノルズ数、 ϕ ：有効空隙径、 U ：拡散速度、 ν ：水の動粘性係数）

①式で示されるようにトレーサー波形から求まる拡散速度（ U ）とレイノルズ数（ Re ）との関係から地下水流動経路である帯水層中の空隙径が算定できる。図 3-2 は、トレーサー調査事例から Re 、 U 、 ϕ との相関関係を示した図である。特徴的なものとしては、空隙径が 0.3~0.4cm（礫系として 4~5cm 程度）以上でレイノルズ数（ Re ）100 以上となり、乱流を示すものと考えられ、ダルシー則に当てはまらない地下水流動を示していることが言える。このような水みちを扱う場合、一般的なダルシー則を用いた地下水流動モデルでは、解釈できないことを意味している。



● 拡散速度(U)の算出

$$U = V_1 - V_2 \dots\dots\dots \text{①式}$$

ただし、
 t_0 ：トレーサー投入時刻 (11:21)
 t_1 ：先端到達時刻 (12:02) 2460 sec
 t_2 ：ピーク到達時刻 (12:52) 9060 sec
 V_1 ：先端速度 $L/(t_1-t_0)$
 V_2 ：ピーク速度 $L/(t_2-t_0)$
 L ：20.4 m

ここで、
 $V_1 = 20.4 \text{ m} / 2460 \text{ sec} = 0.00829 \text{ m/sec} (0.50 \text{ m/min})$
 $V_2 = 20.4 \text{ m} / 9060 \text{ sec} = 0.002252 \text{ m/sec} (0.135 \text{ m/min})$

$$\text{①式より } U = V_1 - V_2 = 0.0083 - 0.002252 = 0.0060 \text{ m/sec} (0.362 \text{ m/min})$$

拡散速度 (U) = 0.0060 m/sec

● レイノルズ数(Re)の算出

$$Re = (U \times \phi) / \nu \dots\dots\dots \text{②式}$$

ただし、
 U ：拡散速度 (cm/sec)
 ν ：動粘性係数 (19.0°Cの水で 0.0102 cm²/sec)
 ϕ ：空隙の有効径 (実験式より 0.15 cm)
 $\phi = 0.1188e^{0.277U}$ (実験式)
 $\phi = 0.15 \text{ cm}$

$$\text{②式より } Re = (0.60 \times 0.15) / 0.0102 = 8.757$$

レイノルズ数 (Re) = 8.757

● ダルシー式を用いた透水係数(k)

$$V = k i \dots\dots\dots \text{②式}$$

ただし、
 V ：流速 ($V_p = 0.00829 \text{ m/sec}$)
 i ：動水勾配 (0.0044)
 k ：透水係数 (m/sec)

$$\text{②式より } k = V / i = 0.00829 / 0.0044 = 1.9E+00 \text{ (m/sec)}$$

透水係数 (k) = 1.9E+02 cm/sec

図 3-1 トレーサー波形解析例

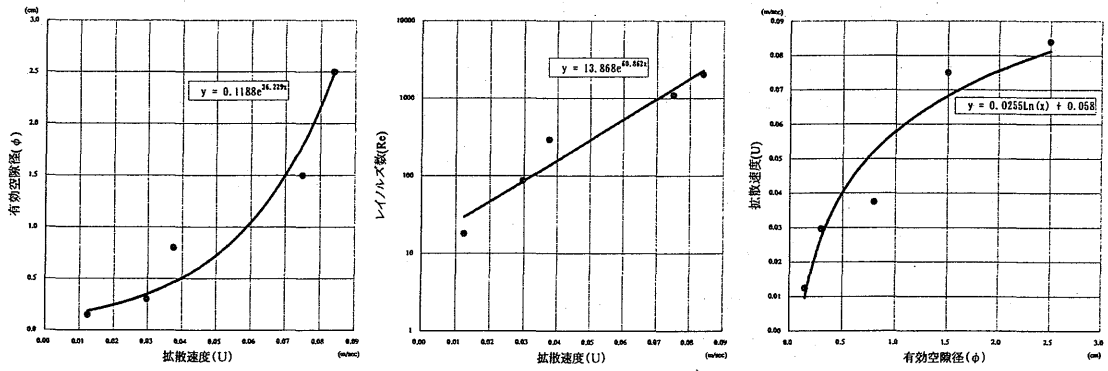


図 3-2 トレーサー波形解析による地下水流動特

4. トレーサー調査による汚濁、汚染影響評価への適用例

沖積低地での水みち部に施工する橋脚基礎や河川改修工事は、下流に公共水源や食品工場などの水源が分布していた場合、施工中の一時的な汚染にしろ経済的、対応的にも社会問題化する場合が多い。

最近このようなケースでは、事前に影響度合いを評価するために汚染シミュレーションを行う場合が多い。しかし、実際には拡散係数や地下水の流動経路となる地盤の物性値がないことが多く、現実的な予測ができない。また、データがあったとしても現状での解析レベルでは、確証をもてる予測はできないのが現状と言える。

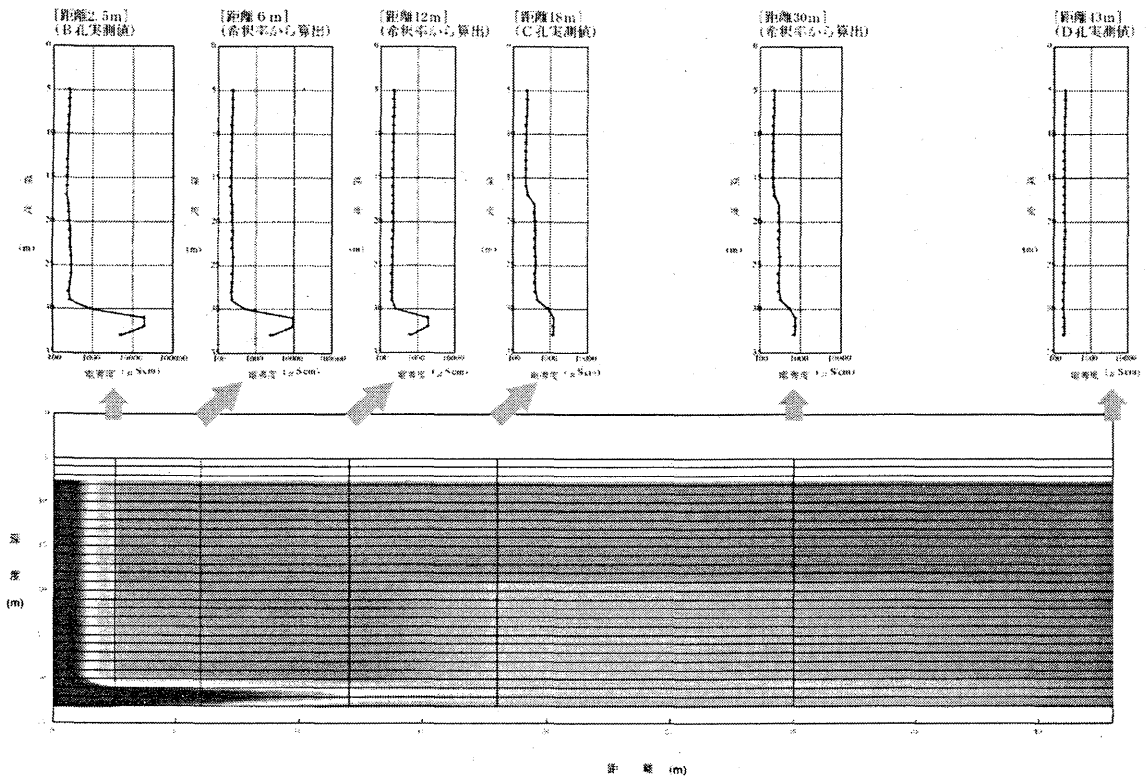


図 4-1 トレーサークラウドの分布状況

ここでは、トレーサー調査結果による波形特性を応用して施工地点から 87m 下流に位置する水源への汚濁、汚染影響を概略予測した事例を紹介する。

トレーサー調査は施工予定地点を投入孔とし、87m 離れた水源との間 2.5m、18m、43m 地点に観測孔を設け、トレーサー濃度を観測した。図 4-1 は、トレーサーの各観測地点におけるピーク濃度の分布を縦軸に深度、横軸に距離、濃度をトレーサー濃度で示した図である。

この図に示すように投入孔から距離が離れるにつれて希釈されている状況（移流拡散状況）が読み取れる。図 4-2 はこの希釈状況と距離との関係を示した相関図である。トレーサー濃度は、距離が増すにつれてマイナスの指数曲線を描いて希釈する傾向にあることが言える。当然希釈度合いは、その場所の空隙や物性値、地下水の流速、流量などにより異なるが、一定の距離でのピーク濃度が測定されれば水源における概略の希釈状況が推定可能となる。

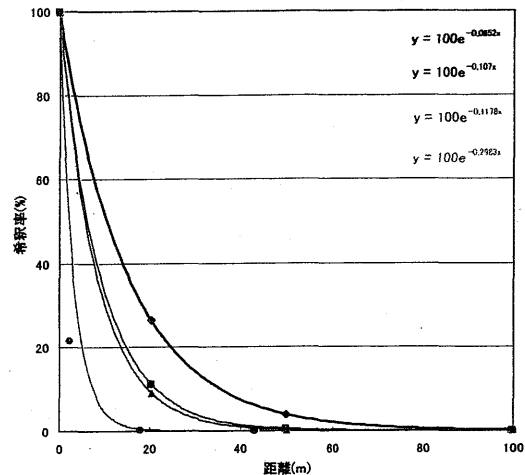


図 4-2 希釈状況と距離との関係

5. 地下水流動の実態

土木工事では、地下水を避けて施工することは殆どできない。また、最近では環境汚染や地下水汚染など地下水流動メカニズムの実態を正確に把握する必要性が高まっている。

しかし、誰一人として地下水の流動実態の現実を肉眼で見た者はいない。現状での地下水流動解析、影響評価、シミュレーションにしる殆ど全ての地下水調査においてダルシー則の応用により論じられている。実際、水みちに関係する調査や施工中、地下水理論で説明つかない現象や解析結果と実績がマッチしないケースに直面することが多くなっている。これは、限られたデータしかないと解釈することもできるが、ダルシー則に当てはまらない地下水流動メカニズムの実態があり、ダルシー則の適用や解釈を間違っている可能性も十分ありうる。

ここに、トレーサー調査から得られたデータで今までの地下水理論では解釈できない現象を捉えた事例を紹介する。

図 5-1 は、トレーサー投入直後に下流部の観測孔で測定された濃度波形で、2つのピークが到達している状況が確認できる。当然、トレーサー投入時は、投入孔の水位が約 70cm 上昇し導水勾配が大きく、流速が速くなっていることが推定できる。しかし、投入終了後一旦基底濃度に戻ったあと再びピーク濃度が観測されている。

今までの地下水理論からすれば、投入孔と観測孔間の空隙全てにトレーサーが充填されて始めて到達したと解釈される。それであれば、平常水位（平常の導水勾配）に戻ったあ

と一旦基底濃度になり、再び濃度上昇するメカニズムが説明できない。
 このメカニズムについては、次の機会に報告する。

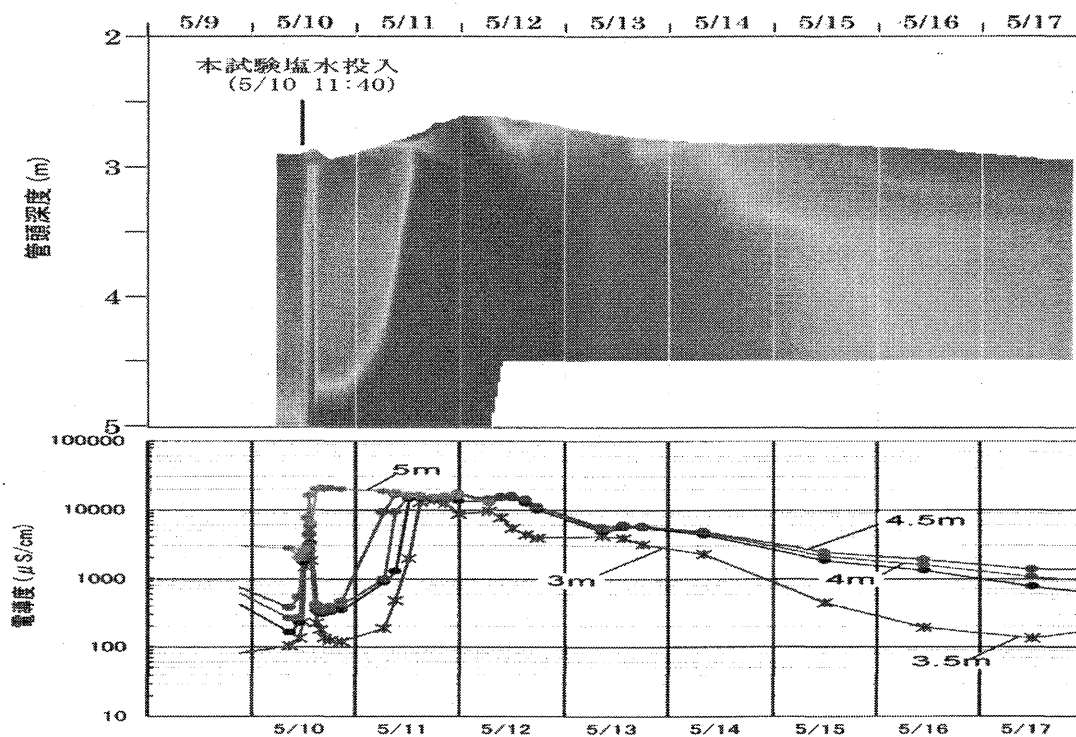


図 5-1 トレーサー調査による特殊な地下水挙動例

<参考文献>

- 1) 山本荘毅(1983)：新版地下水調査法、pp.18-21
- 2) 山本荘毅(1986)：地下水用語辞典、pp.115-116