

2.2. 地下水研究 50 年史—地下水波—

(1) はじめに

今回はあまり聞きなれないこの用語について考えてみる。なお地下水波、つまり Groundwater wave は潮汐の影響下にある海岸地下水の変動を論じる場合の用語として用いられていることが多いが、ここではより広く、地下水の涵養というかたちで加えられた外部負荷に対する応答、つまり地下水位変化と、それから得られる情報の有効性に焦点をあてる。ちなみにこのような立場から論じたものとしては、筆者の知る限り、山本莊毅著「地下水調査法（古今書院，1953）」のみである。先生はこのような現象の有効性についてどちらかと言えば否定的な立場で解説されている。

以下にその一節を引用させていただく。

【地下水波法】

地下水面を連続的に観測すると極大や極小があらわれる。上流の一地点と下流の他の点でこのような連続観測を行い、極大極小のずれを比較対照することによって地下水の速度を推定する方法である。

この方法も時々試みられることがあるが、得られた結果の意味はあきらかでない。即ち、

- ① 地下水波の存在そのものが明らかでない。
- ② 上流の圧力が被圧水の圧力伝播として下流に影響することがある。
- ③ 局部的な降水の影響、地下水面の深浅に伴って地面からの浸透による影響の現れる時間にずれがある。
- ④ 下流の地下水波は必ずしも上流のそれが伝播したものではなく、側方からの影響もある。

といったような種々の難点があつて、必ずしも地下水の流速を表すとは言い難い。

地下水の流速を測定する方法は従来過大に評価されていた。成る程この方法は物質の移動を肉眼で見えるものであるから正確という印象を与えやすい。然し肉眼で見たものが必ず正しく、理論的に推定されたものが必ずしも正しくないとは言い難い。前者でも反対の結果を得ることがしばしば経験されている。地下水の流速実測の諸方法もこの例にもれず、余程慎重に行わない限り、得られた値はとんでもない値を示すことがしばしばある。地下水面の勾配は普通相当大きくても 100 分の 1 位であるから、薬液の注入、試水の採取によって 5~6 倍の変化がすぐ起こるのである。故にこの方法は成るべく使用しない方が望ましい。但し地下水の起源を論ずる場合には有効であることを付言しておく必要がある。」

この一文は先生らしく簡潔明快な説明といえるが、アンダーラインで示した一節については、抵抗を感じる。すなわち私はこの部分の表現は逆で、“理論的に推定されたものが常に正しいとは限らない”とすべきだと考え、また後段の部分では“ただしこの方法の採用にあたっては実施方法や、実施環境をよく把握しておくことが必要である”とするのがよいと考える。現場に立つ技術者は常に“真実は現場にある”という姿勢で臨むべきであるというのが、私の持論だからである。

その根拠にあげた今回の事例は、私の地下水研究史の中ではごく初期のものであるが、地下水波の有効性を証拠立てる極めてよい事例といえるので、ここで紹介することにした。

(2) 調査地域と周辺の概況

ここに紹介する事例の調査地は埼玉県本庄市児玉町の小平地区を流れる身馴川の右岸低地にあたる（図 1）。背後の山地は結晶片岩からなり、その山地の北東縁にはこれを

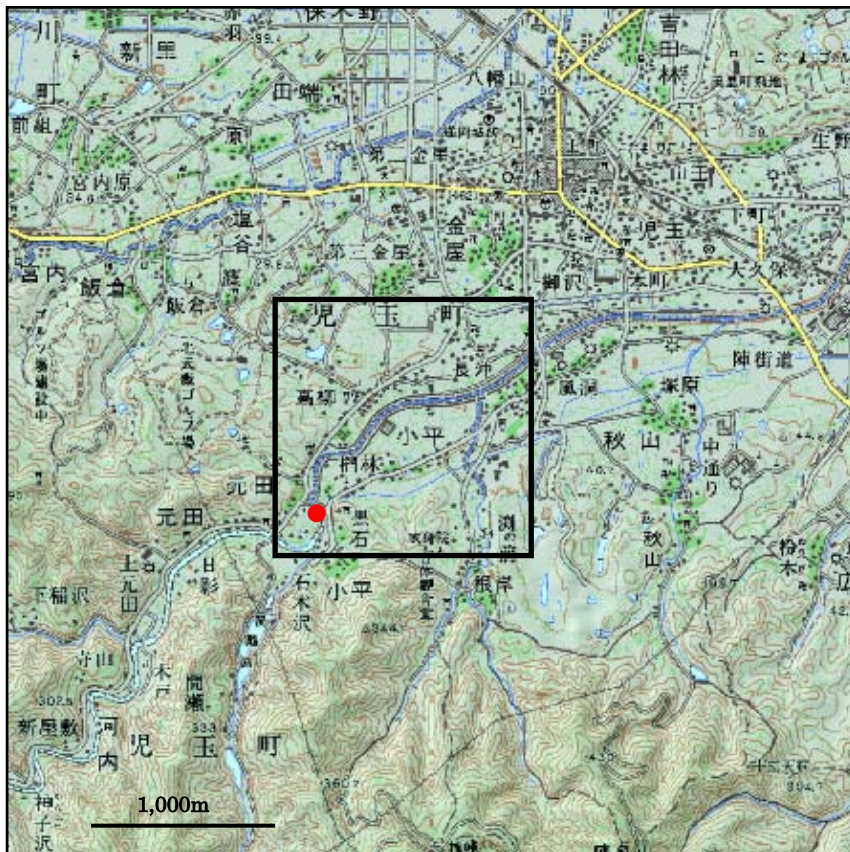


図 1 調査地域

を縁どるようなかたちで、鮮新統～更新統からなる丘陵地群が北東に向かってのびている。

当地域の西部山地に発して北東に流れる身馴川は、“暴れ川”の性質を有し^{注1)}、各所にその痕跡ともいえる蛇行の跡がみられる。流路の改修は近年まで続き、その流路が確定したのは最近になってからで、それとともに河川名も小山川に改称された^{注2)}。なお利根川に

合流するまでの地域には河岸低地との比高の小さい扇状地が広がっている（図 2）。

注1) 身馴川が蛇行を繰り返して流れていたことは本庄市と岡部町間の複雑な市町村界に表れている。

注2) ここでは筆者にとって馴染み深い旧河川名を用いる。

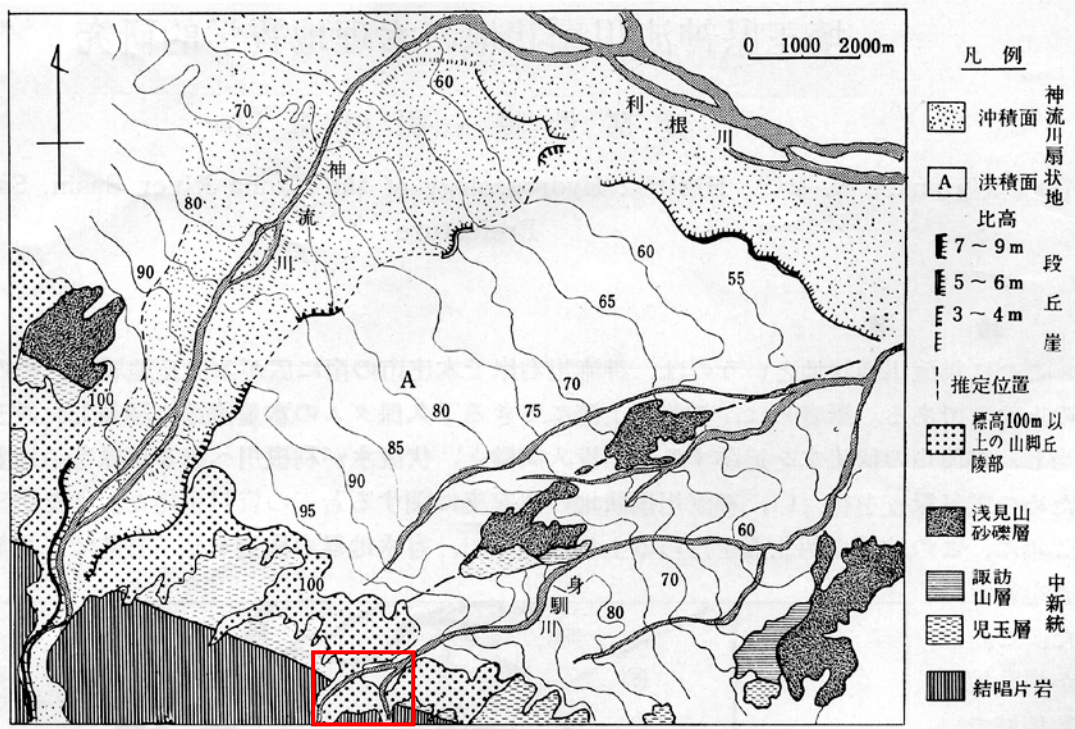


図 2 地形地質概略図（出典：渡部景隆，引田章臣，1967）（赤枠は調査地区）

調査が行われた昭和 38 年当時の身馴川の上流部は、山地を離れて平野に出るあたりで伏流して、通常は殆ど水流が見られず、一面礫河原の状態であった。しかし下流域での河道の直線化などの改修（図 3）が進んだ今日では、その影響で河床は低下し、当時の礫河原はほとんど姿を消し、草木に蔽われるようになってしまった（写真 1, 2）。また中流右岸の美里町沼上には、かつて身馴川の伏流水によって維持されていた湖沼が数カ所に存在していたが、これも昭和 50 年頃には完全に枯渇した。

このような背景を考えると、調査地域周辺の地下水位も当然下がっている筈で、本文で述べるような浅い地下水における現象は今日では軽微か或いは発生しないかも知れない。



写真 1 調査地の最上流部から下流を望む
（秋本橋の下流，前方左岸に結晶片岩が露出）



写真 2 調査地の最下流部から上流を望む
（調査地の最下流で右支の小平川が合流、右側が本流）



(明治後期頃の身馴川の河道 赤枠は調査地区)



(昭和 30 年頃の身馴川の河道 赤枠は調査地区)



(現在の身馴川の河道 赤枠は調査地区)

図 3 身馴川の河道改修

(出典：「平成 12 年度河川改修調査工事 (河川整備計画検討業務委託)」)

(3) 調査時の河況

調査当時、表流水が見られたのは図 1、写真 3 の●印の地点、図 4 の青色で塗色した水溜りまでで、それより下流では流水はみられなかった。写真 4 はこの付近の現在の様子であるが、当時はここがすべて礫で覆い尽くされていた。右岸の山地は結晶片岩からなり、河岸にはその露頭がみられ、これが水衝部となって河道は左に向きを変えている。基盤の上部は厚さ数 m の段丘礫層が重なり、大雨時には河水面はこの位置にまで上昇することが予想された。

さて表流のみられない身馴川も河床を 50 cm 程度も掘れば水面が見られたので、表流

水は当然河道下を潜流しているものと判断された。そこで図4のように、河床に複数の観測孔を掘り、上流の伏没地点に早朝5時に色素(Fluorescein-soda)を投入して、追跡を開始した。ところが色素が検出されたのは投入地点に近い2つの観測孔だけで、以後は不検出の状態が続いた。結局伏流水は予想に反して現河床の方には流れず、投入地点から直ちに右岸側へ向かって流れていると判断されたのは、投入から7時間もたった同日の12時過ぎであった。

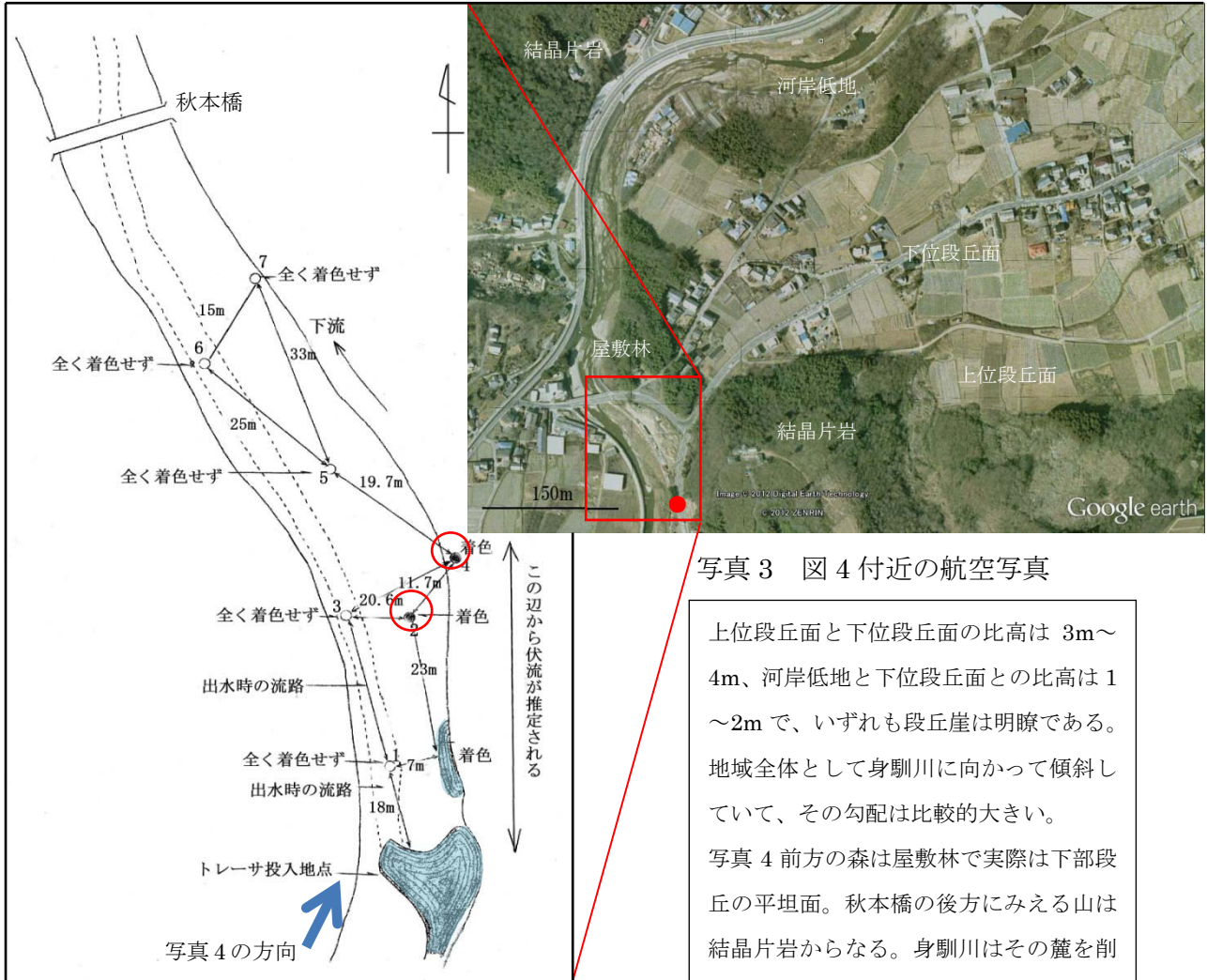


図4 身馴川の表流水が伏没する地点付近の概況 (当時)

写真3 図4付近の航空写真

上位段丘面と下位段丘面の比高は 3m～4m、河岸低地と下位段丘面との比高は 1～2m で、いずれも段丘崖は明瞭である。地域全体として身馴川に向かって傾斜していて、その勾配は比較的大きい。写真4 前方の森は屋敷林で実際は下部段丘の平坦面。秋本橋の後方にみえる山は結晶片岩からなる。身馴川はその麓を削りながら右へ大きく蛇行している。



写真4 トレーサ投入地点の現在の様子 (調査当時は一面礫河原の状態)

(4) トレーサによる追跡

今日ではとても考えられない無茶な調査をしたものだと、いま思い出しても身が縮むほどである。河床での追跡調査を諦めて集落（写真4）の方に帰ってきた時、大騒ぎをしている地元の人たちに出会った。

「うちの井戸水が突然緑色に変わった!!」、「うちもだ」、・・・という騒ぎである。その異変は図5の投入地点から近い人家の井戸群に生じていた。当初予想していなかったところでの現象なので、事前説明をして理解を得ていなかったためである。

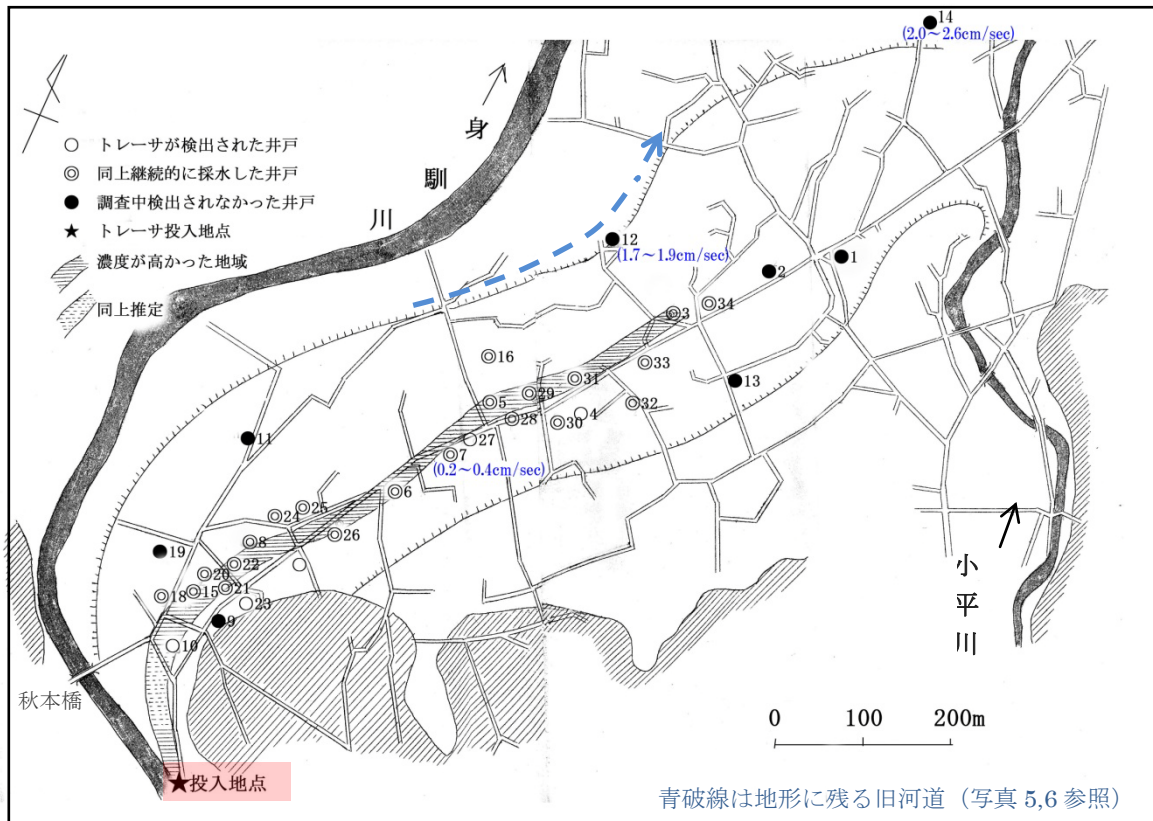


図5 観測井戸とトレーサの検出状況の分布（青字は用水試験から求められた透水係数）

直ちに一軒一軒訪ねて調査の説明と、ご理解をお願いしたのは当然であるが、調査の続行を拒む人が皆無だったのは幸いであった。余談は置いて本題に戻ろう。

トレーサが検出された井戸の分布は図5のように極めて明確で、underground channel 状の透水帯^{注3)}の存在を指し示している。また道沿いに細長くのびるこの地域の集落形態は見事にこれと一致していて、水を求めてきた先人の試行錯誤の跡を物語っているように見えた。

図6は投入地点からの距離と、最大濃度検出経過時間との関係を示したものであるが、最上流に位置する井戸群への到達時間はやや短いものの、その後はほぼ一定となり、平均流速は13m/時と算出された。なおその後、No. 34の井戸は80時間後に、No. 2の井戸は100時間後に最大濃度を示したことが報告されている。

注3) この例の場合“地下谷、つまり旧河道といってもよい。以下地下谷と略称する。

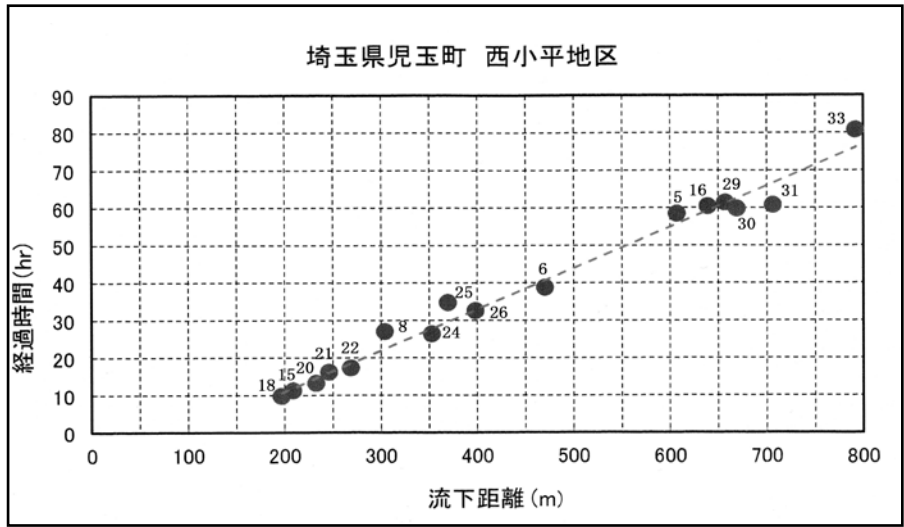


図 6 投入地点からの距離と最大濃度検出経過時間との関係

(5) 地下水波

昭和 38 年 5 月 22 日午後 4 時から 5 時にかけての 1 時間と 7 時から 8 時の 1 時間に調

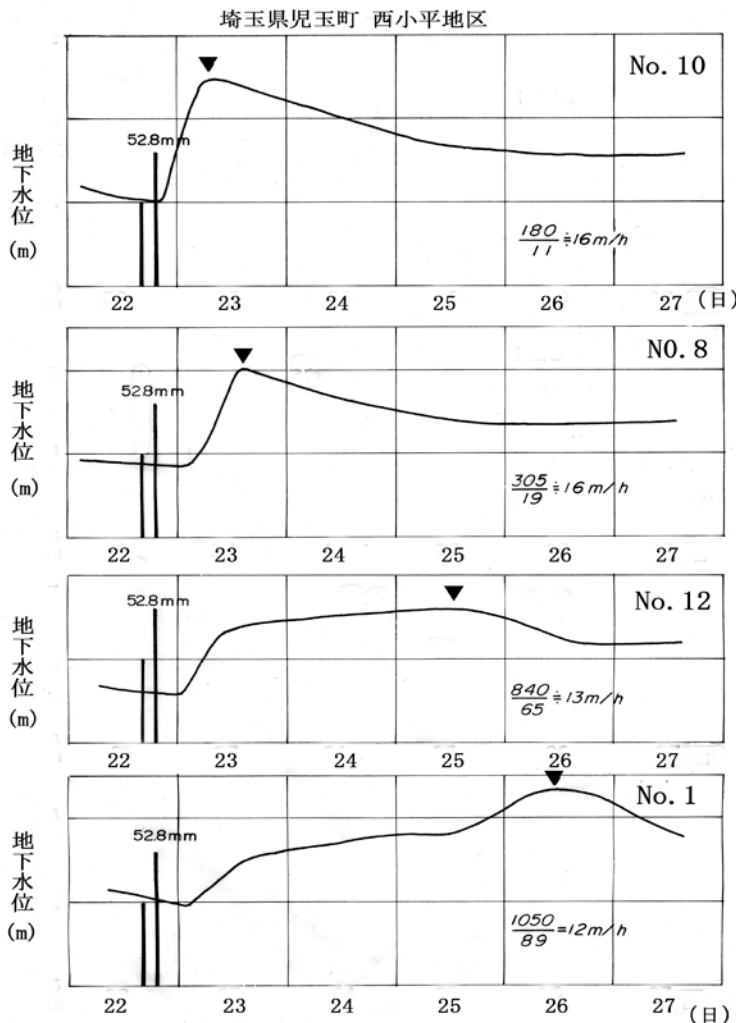


図 7 集中豪雨時の井戸水位変動記録

査地一帯に集中豪雨が
あり、降水量は 52.8 mm
に達した (神泉村役場)。
調査実施に際して予め
観測井として指定して
あった井戸について、早
速詳細に水位変化を追
跡したところ、そのピー
ク時刻と井戸の位置 (伏
流が推定される地点か
らの距離) との間に明瞭
な関係があることが明
らかとなった。図 7 にそ
の一部を例示する。

ここで図の No. 1、
No. 12 の曲線は初期の急
上昇を示す部分と、その
後のなだらかに上昇す
る部分からなっている
のが注目される。前者
はこの井戸周辺の降雨

浸透によるものであり、後者は上流からの流れが到達して上昇したもの、つまり地下水波の影響によるものと判断される。

なおこの2つの井戸は、当時筆者が実施した電気探査、またその後行われた小前隆美等(1990)の調査によって、この地区に複数存在する地下谷(旧河道)の一つに位置することが明らかにされている。図8は小前等による成果の一部である。

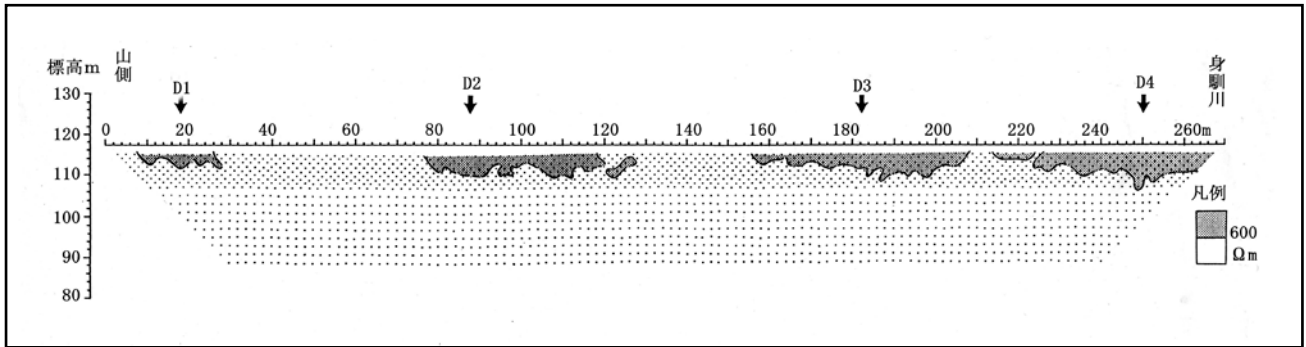


図8 比抵抗曲線断面図(調査地域の最下流部をほぼ南北に横断する方向)

出典：小前隆美他(1990)：旧河道調査における電気探査ダイポール・ダイポール法の適用性について，農業土木学会誌

図7中に地下水位のピークが伏流水の到達時間を代表するものとして求めた地下水の流速を記入してあるが、その値は平均14m/時で、先に示した色素をトレーサとした場合(平均13m/時)と殆ど同じ値であったことは注目すべき結果と言える。

小前等(1990)によれば、この地区の上流部(図9)で、Sc-CyDTAキレート化合物をトレーサとした実験を行った結果、地下水の流速について11m/時という値を得ている。

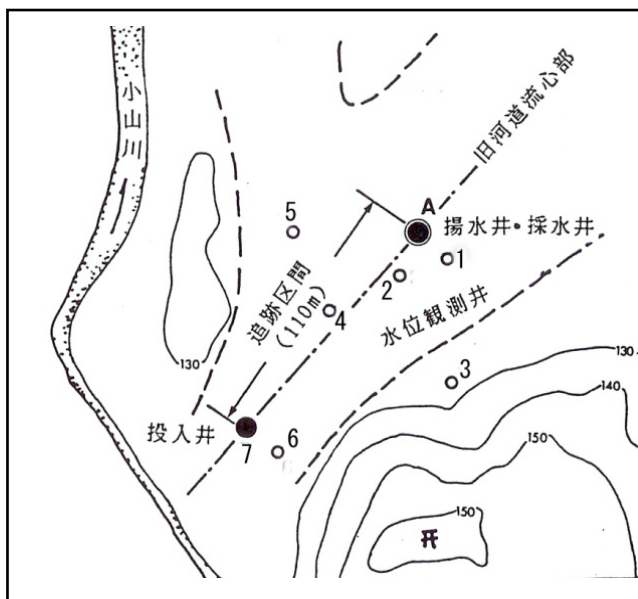


図9 小前等(1990)による追跡実験地

またその濃度の絶対値がピーク時においても1%以下と低いことから、複数の地下谷に分岐して流れたものと想定している。その調査の折、図9のA地点で掘削された試掘によれば、深度6m前後までの表層の地質は図10に示すように玉石混じりの砂礫層からなり、その透水係数は $4.6 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ である^{注4)}。ここに不圧地下水が存在し、その水位は地表下3~4mのところにある。

地下谷のごく新しいものは現地形にもその痕跡が残されていることが多く、この地区でもそれが認められる(写真5, 6)。

注4) その他の地点の透水係数は図5の図中に示したが、地下谷部分の透水性は一般に大きい値を示した。

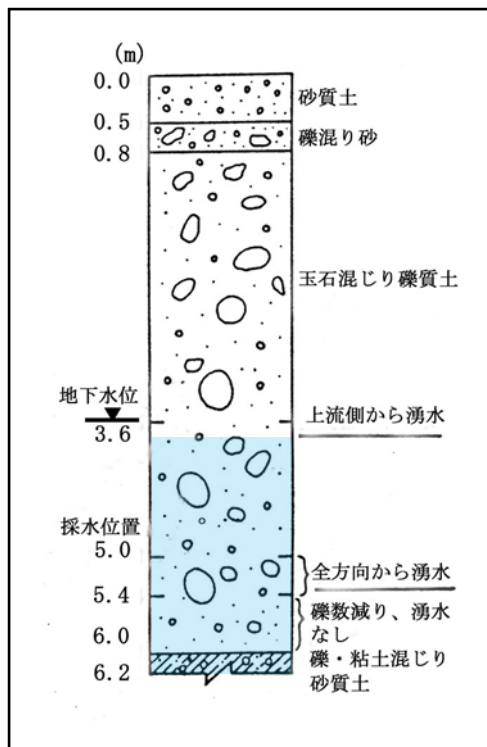


図 10 試掘井の柱状図



写真 5 地形に残る旧河道（上流側、図 5 参照）

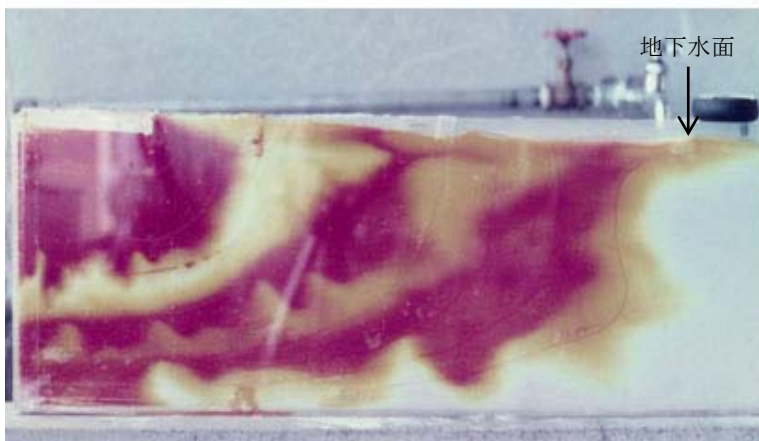
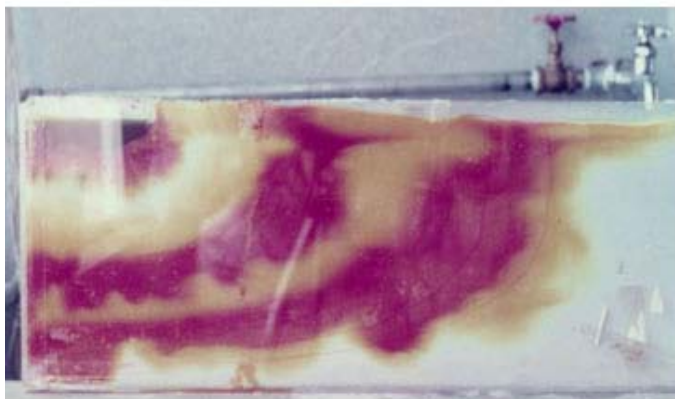
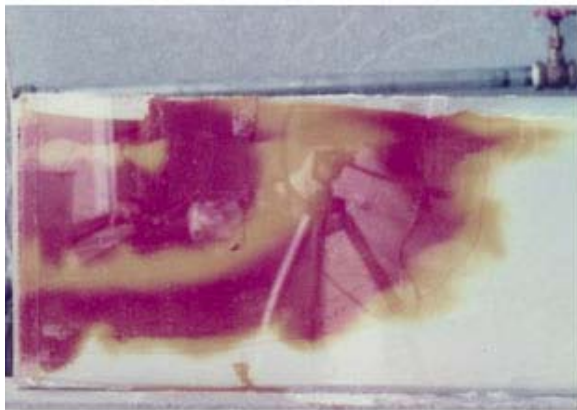
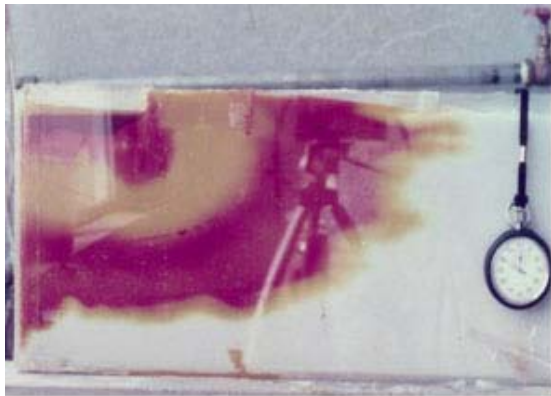


写真 6 地形に残る旧河道（下流側、図 5 参照）

以上から、ここにいう地下水波は、単に圧力の伝播だけではなく、実体としての地下水の移動を伴うものであることは確かである。またその移動を支配している水文地質環境は、幅 20~40m程度の限られた地下谷にあり、身馴川の変遷を物語るように、この地区に複数存在する。これはいずれも高い透水性を有することが示されている。

このような水文地質条件のもとにあつて、地下水波はどのような挙動をするのであろうか？これから先を知るのは実は容易ではない。写真 7 の水槽実験は直接これを意識して行ったものではないが、その理解に参考になると思われる。

この水槽は深さ 20 cm、長さ 150 cm、幅 3 cmの大きさに、硬質アクリル板で作られている。ここに粒径の揃った珪砂を水中で静かに沈殿させて均一になるように敷き詰め、左上の白く見える部分から着色水と清水を、両者が混合しないように、注意深く交互に浸透させてその軌跡を追った。なお排水側は水位を一定に保つように制御されている。



写真は上から下へ時間経過の順に、かつ横のスケールを揃えて並べてある。ここには着色水、清水合わせて5回の連続浸透結果が示されている。それらのフロントの時空間分布から以下のことが指摘できる。

- ① 水流は流動場の空間スケールの支配を受けたかたちに、表層部ほど早く、深さ方向で遅くなる。このことは地下谷という水文地質環境においても同様と言え、地下水波は地下水面に近いところほど強く現れる現象と推察される。
- ② これに対して下底部（現場では地下谷の底部にあたる）では滞留傾向がみられる。
- ③ 流線に沿ってフィンガリング現象が発生している。

④ そのフィンガリングも当初のかたちを保持したまま移動する。

⑤ フロントと拡散領域の境界はかなりシャープなことから色素の移動を過大に評価する心配は少ない。いいかえれば色素法による流速測定は注意して行えば誤差を少なくすることができる。

写真7 物質移動に関する水槽実験

(出典：新藤静夫 未公表資料)

(6) おわりに

地下水波が珍しい現象なのか、ごく普通に起こっているのに観測に漏れているだけなのかは即断できないが、我が国では扇状地や河谷平野などのように、河川の氾濫によって形成された平野では、河水と地下水の交流が行われやすい環境にあるので、増水時には、地下水波現象がごく普通に発生しているものと推察される。このことに関しては関連資料を収集して考察を重ねたいと思っている。

なお地下水波現象は実態としての水の移動を伴う現象なので、上述の水文地質環境にあって、汚染物質の地下での挙動を考究する場合に重要な示唆を与えることを付言しておく。