

68. “水文地質”のフレームワーク（その4）

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 ¹ ~ 10 ² m ²		10 ⁴ ~ 10 ⁶ m ²
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、扇状地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 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水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盆像を反映していることが多いので参考になる。(図〇参照)
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出現象(図29)。これには過度の地下水揚水や地下工事などの人為的な要因が関わって発生するケースが多い。なおこれらの解析の際には深度別の水頭記録が不可欠。ここでは建設工事に伴う地下水障害事例を中心に据えて話を展開した。	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の区分を明確にする必要がある。
	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。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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。 ・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)。	・漏出現象は浅層地下水、深層地下水を問わず、水頭勾配が自然のそれを大きく上回る場合に発生することが多い。 ・不圧地下水の動態に関与する地形要因は大きい(図34)。この場合、その影響が被圧地下水に及ぶこともある(図34)。 ・漏出現象を直接追うことは容易ではなく、この現象に関しては涵養域における地下水涵養機構、汚染物質の深部侵入のメカニズムなど追究すべき課題も多く残されている。	・巨視的にみて地下水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。 ・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。 ・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。

(着色部は本号の話題、紫色の字は本文に掲載した鍵図)

j) 漏出(leakage)

漏出現象に関して早くから注目し、追究してきたのは Jacob や Hantush などをはじめとするオランダの技術者や研究者達である。このシリーズでも以前に触れたが、量、質ともに水資源に恵まれていなかったオランダは、早くから砂丘を利用した地下水の人工涵養や水質浄化技術が発達してきたところで、それに関連する漏出現象が注目されたのはよく分かる。

図 29 はその模式図で、理論的には主帯水層 (main aquifer) の透水係数が上層部の半加圧層(semi-confining stratum)に比べて極めて大きく、かつ水頭差も大きい状況では上層部の地下水は殆ど垂直に加圧層を横切って主帯水層に漏出する。

ここで参考までに、その現象を以前にも紹介した模型実験にあてはめて視覚化した結果を写真 18 に示す。これは図 29 の○印に相当する部分を切り出したものである。なおこの実験は水槽に粒径の異なる珪砂を層状に、各々均一に敷き詰め、上下層

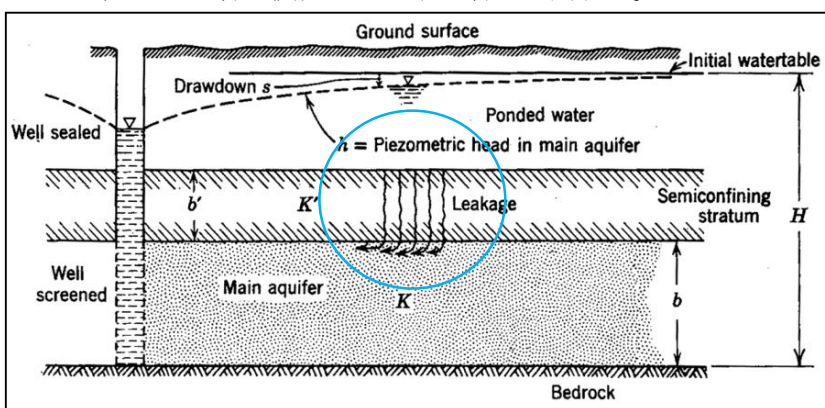


図 29 帯水層への漏出

(出典：Davis & DeWiest(1966) : Hydrogeology, John Wiley & Sons, Ins.)

の水頭差を一定とした状態のもとで進められた。垂直浸透は、はじめランダムに発生するが、時間の経過とともに次第に定着して前号に述べた選択流に成長する。

半加圧層を通して漏出が生じるためには、上下の帯水層間の水頭差が十分に大きいことが必要で、これには地下水環境への人為的インパクトが関与している場合が多い。

k) 漏出に関する事例

以下に述べる知見は筑波研究学園都市及びその周辺地域を集水域とする広域下水道のシールド工事に係る地下水汚染問題^{脚注)}を追究する過程で得たものである。

その調査対象域となったのは牛久沼を西側に控えた稲敷台地南部で、武蔵野面相当の洪積台地にあたる。台地面は標高 23~25m で、南東方向にやや高くなる傾向があり、また図 30 にみるように、地下水の排水機能として発達した樹枝状の谷系を反映して全体として緩い波状の地貌を呈している。工事の路線はこのような地形を背景とした霞ヶ浦水系と利根川水系の分水界を縫うような位置に設定された。なお河谷低地と台地との比高は 5~15m である。

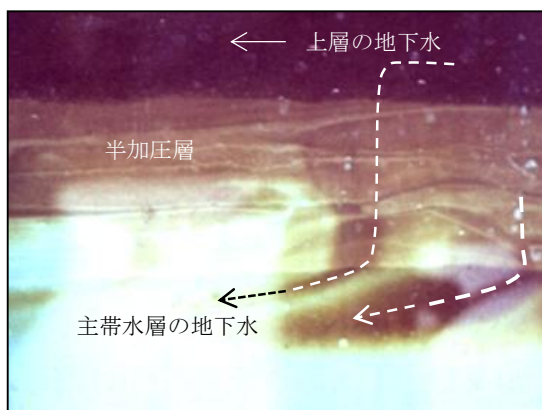


写真 18 漏出現象の模型実験

脚注：詳細については、杏林大学、東京大学合同、牛久・竜ヶ崎健康調査会（代表山内幹郎）による「茨城県牛久町付近に多発した疾患の住民問診調査結果—土木工事に使用された地盤凝固剤との関連をめぐって(1978)」に詳しい。

この地域は元々松林と畑地、またそれらが陸田化された農地であったが、昭和40年代以降、宅地化が急速に進み、同時に折からの研究学園都市の建設と相まって急速に都市化が進行したところである。このような状況にあつて上下水道の整備は緊急の課題になっていた。

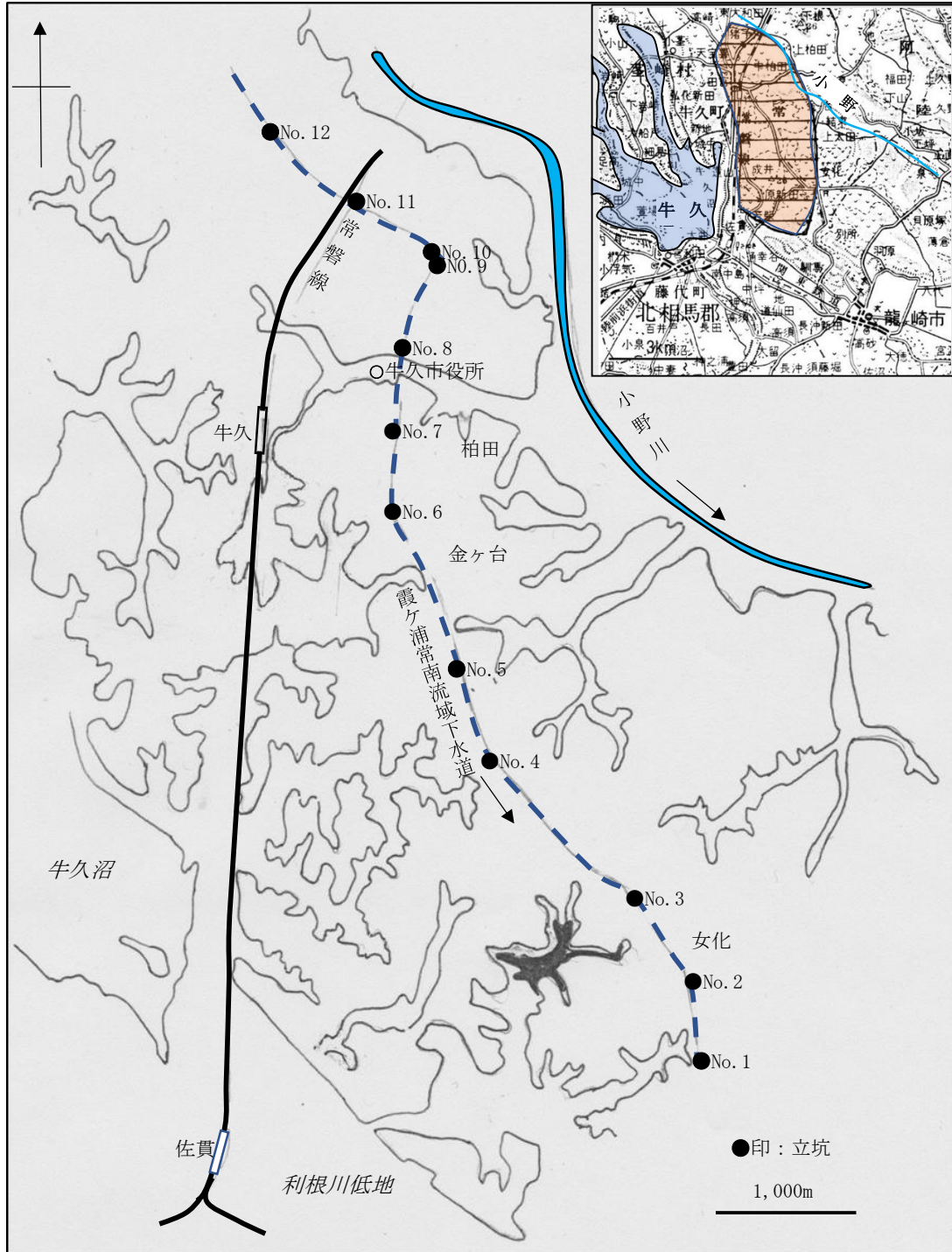


図 30 稲敷台地南部の地形と広域下水道の路線
(地形の起伏と浅い地下水面はよく対応している)

「霞ヶ浦常南流域下水道」と称するこの工事は“環境問題は措いて建設第一”で進められた節がある^{脚注}。これは図 31 に示したように、台地面から深さ 10 数 m のところに分布する軟弱な粘性土層を水ガラス系の凝固剤によって固めながらシールド工法によって掘り進められた。

図 31 で注目すべき点は ▼ 印で示した深い地下水の水位が ▲ 印で示した浅い地下水の水位より常に低い位置にあるという点である。このような傾向はこの地域に広く見られる傾向で、周辺地域の農業用、簡易水道などを加えた多数の深井戸資料を用いて得た図 32 によって、より明らかに示される。

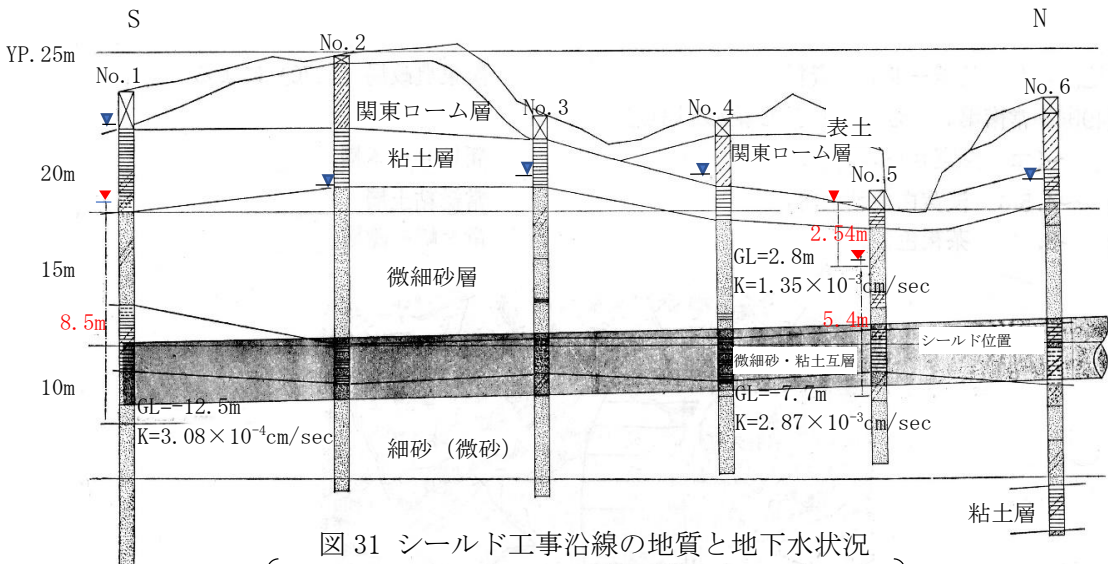


図 31 シールド工事沿線の地質と地下水状況
 (ボカシ部分はシールド位置。ボーリング位置は図 30 に示す。)
 出典：T 建設資料による

この図は井戸ごとに縦軸に取水層の深さ、横軸に取水層の位置から水面までの高さ、つまり圧力水頭をとってプロットしたものである。図にみる 2ヶ所の水頭分布のギャップ(図中○印)は地下水状態がこの部分で急変していることを示している。即ち上部のギャップは宙水化した浅い地下水の存在を、また下部のギャップは、深井戸の水位低下が一樣に行われていない状況を示している。

いずれにしてもこの地域の地下水は大きく下向きのポテンシャル勾配のもとにあり、深井戸による地下水利用という人為的擾乱の場にあることを示している。

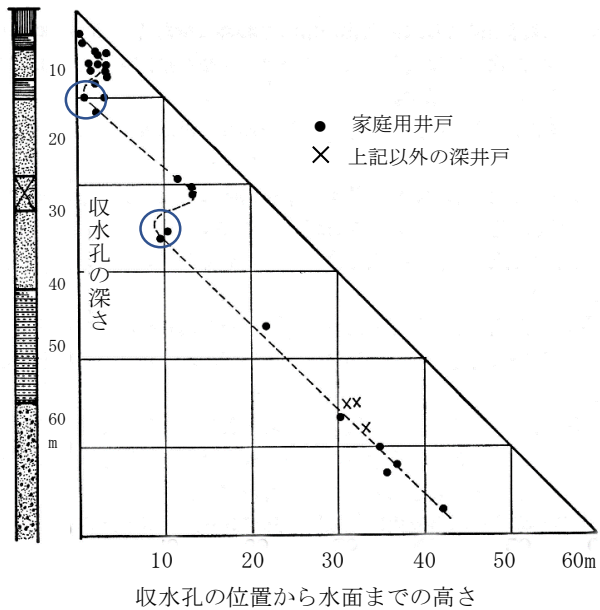


図 32 圧力水頭の垂直分布
 (出典：新藤静夫(1976)：土木工事と地下(1)、
 日本地下水学会誌、Vol. 18, NO. 2)

脚注：下水道管渠工事の際の残土や凝固剤が固化しなかった泥土などが町営住宅建設予定地など各所に投棄されていた。それらの中にはすでに禁止されていた物質(凝固剤の助剤など)も含まれていた。

当地域の地質については以下の表2のようにまとめられる。ここで成田層上部にあたるシルト、シルト質粘土層の標準貫入試験のN値はその下位の地層と極端に異なり、前者では5程度とかなり軟弱なのに対して、後者では20以上(深部では50以上)を示し、固結度の高いことが推定され、土質の違いが著しい。シールド坑はこのようなところを北から南へと縦貫している。

表2 稲敷台地の地質層序

深度	代表的ボーリング資料	関東農政局(1979)による層序
0~3m	関東ローム層	新期ローム層
~4.5m	淡黄白色粘土層	常総粘土層
~8.0m	茶褐色砂層	竜ヶ崎砂礫層
~10.5m	シルト、シルト質粘土層	
~19m	黄灰褐色細砂層	成田層
~23m	黄灰褐色固結細砂層	
~33m	細~中粒砂層	
~46m	シルト~泥層	
~	砂礫層	藪層

この表で成田層とは千葉県北部を中心に発達する第四紀更新世後期の地層のことで下部から地蔵堂層、藪層、成田層に分けられる。これらのうち、貝化石を多産する成田層が有名である。

さて写真19は立坑の例である。面積はいずれも大凡10m×7m、深度は25m前後である。図31から分かるように地下水位はこの位置より上にあり、しかも水頭勾配は下方を示す。そのような条件下ではそれに打ち勝つだけの圧気を掛けながらの工事となる^{脚注}。

図33はその立坑での詳細な地質柱状図で、着色部分がシールド坑にあたり、その位置は図32の上の○印の部分になる。

この付近の民家の浅井戸はこの深度までのものが多い。しかしその地下水は場所によっては上述のように宙水化していて、渇水期には涸渇することがあり、安定した水を得るため、井戸底から更に鉄管を打ち込み、下位の層から取水する井戸も多い。

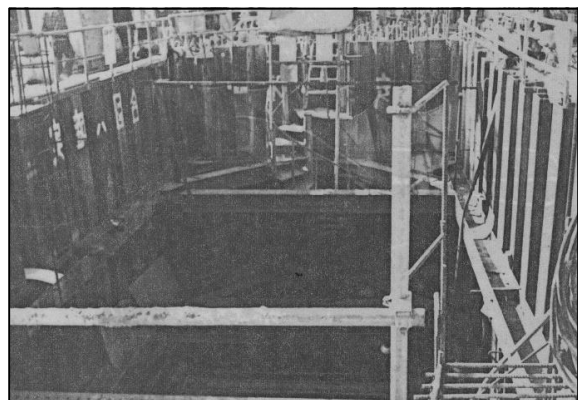


写真19 立坑の状況

図33の貫入試験において、上記の深度からN値が高くなる部分の地層は隣に添えた写真20の露頭からも判読できるように、層相はマッシブ(massive)という表現が当てはまり、無層理、塊状をなすが、含水状態のもとでは脆弱な土性を示すようになるものと予想される。なお写真20の崖下には剥落したその土塊が散在している。ボーリング記録には“雲母片を多く含み、含水量が極めて多い”との記載がある。

脚注：この工事では当時2気圧を掛けたと言われているが、これは一般に比べて高い値と言える。後述のように、工事の際この付近の民家の井戸に空気の吹き出し(ブロー)が発生したが、その原因はこの高い圧気によるものである。

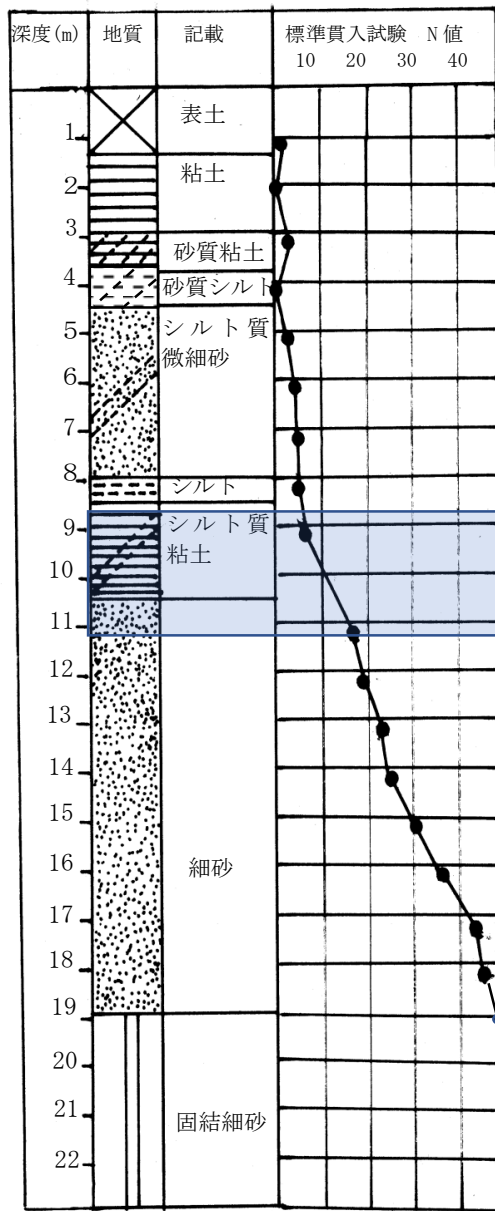


図 33 立孔 No. 1 地点の地質および N 値
 (調査地域最南端 (YP24. 373m)
 着色部分はシールドの位置)

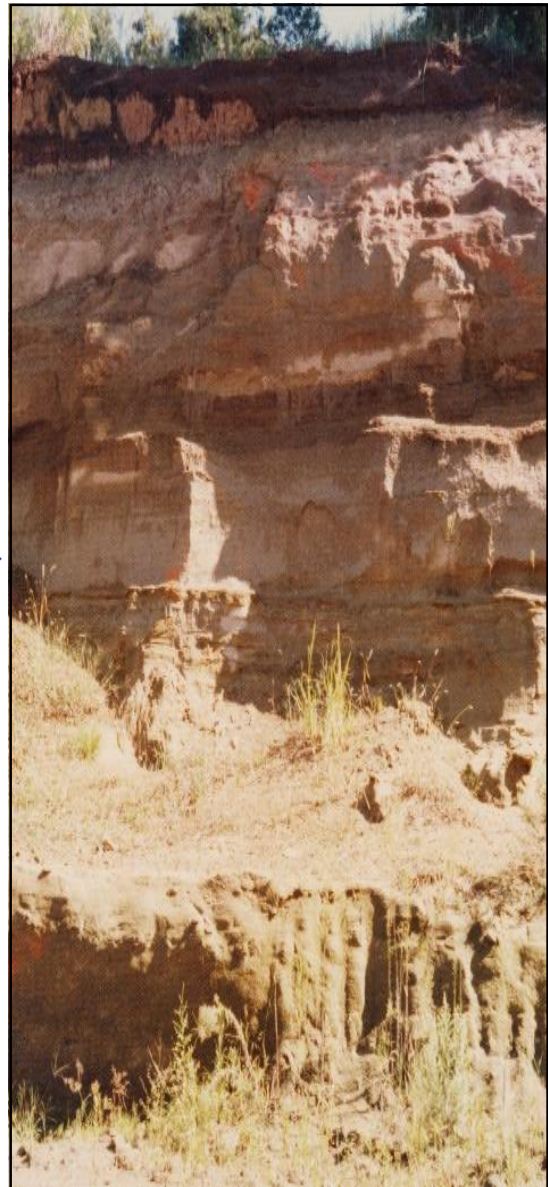


写真 20 竜ヶ崎市羽原町の露頭
 (中央部のシルト質粘土層がシールドの位置に対応)

さて図 32 を再度目にしていただきたい。本文ではこの図の深度 10m 前後の○印付近を“浅い地下水”と“深い地下水”を分ける基準にしている。図 34 はこれに基づいて作成された地下水面図である。この図に見る特徴を整理すると以下ようになる。

- ① 浅い地下水は、おおむね地形の起伏に支配された地下水面形状を示す。
- ② また深い地下水も地層が水平であるにもかかわらず、地形あるいは浅い地下水を反映した形状を示す。

- ③ しかし一部に上記とは別に、複雑な形状を示す箇所がみられ、明らかに人為的攪乱、すなわちシールド工の立坑を通して、浅い地下水が深部に侵入している可能性を示している箇所が存在する。その最も顕著な例は下水道路線が常磐線を横切る地点と図中の神谷集落付近である。
- ④ 多くの地点で深井戸の水位は浅井戸の水位より低い。その水位差は小さいものでは2~3m、大きいものでは15~18mである。前者はシールド工の路線沿いに見られ、後者は路線からの距離に関係して大きくなる傾向が認められる。
- ⑤ 分水界地域で両者の水位差が小さくなるのは、浅い地下水と深い地下水が連続し、漏出現象が生じているものと解釈できる。図35にそのような地区を着色して示した。

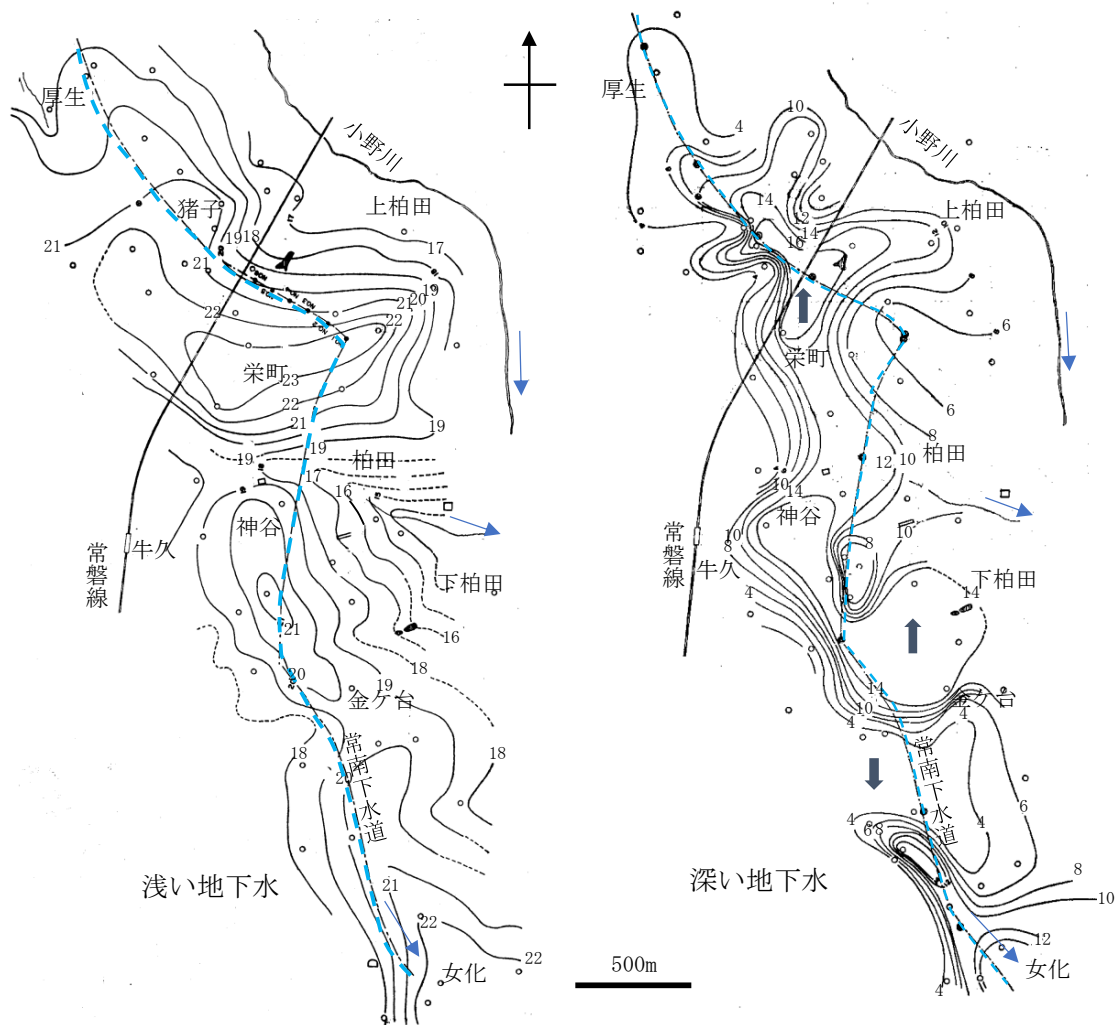


図 34 浅い地下水と深い地下水の地下水面

〔出典：図 31 に同じ。なお図中の下水道の正式名称は霞ヶ浦常南流域下水道と称し、つくば市・龍ヶ崎市・牛久市・稲敷市・利根町・河内町の下水を集めて流れる。〕

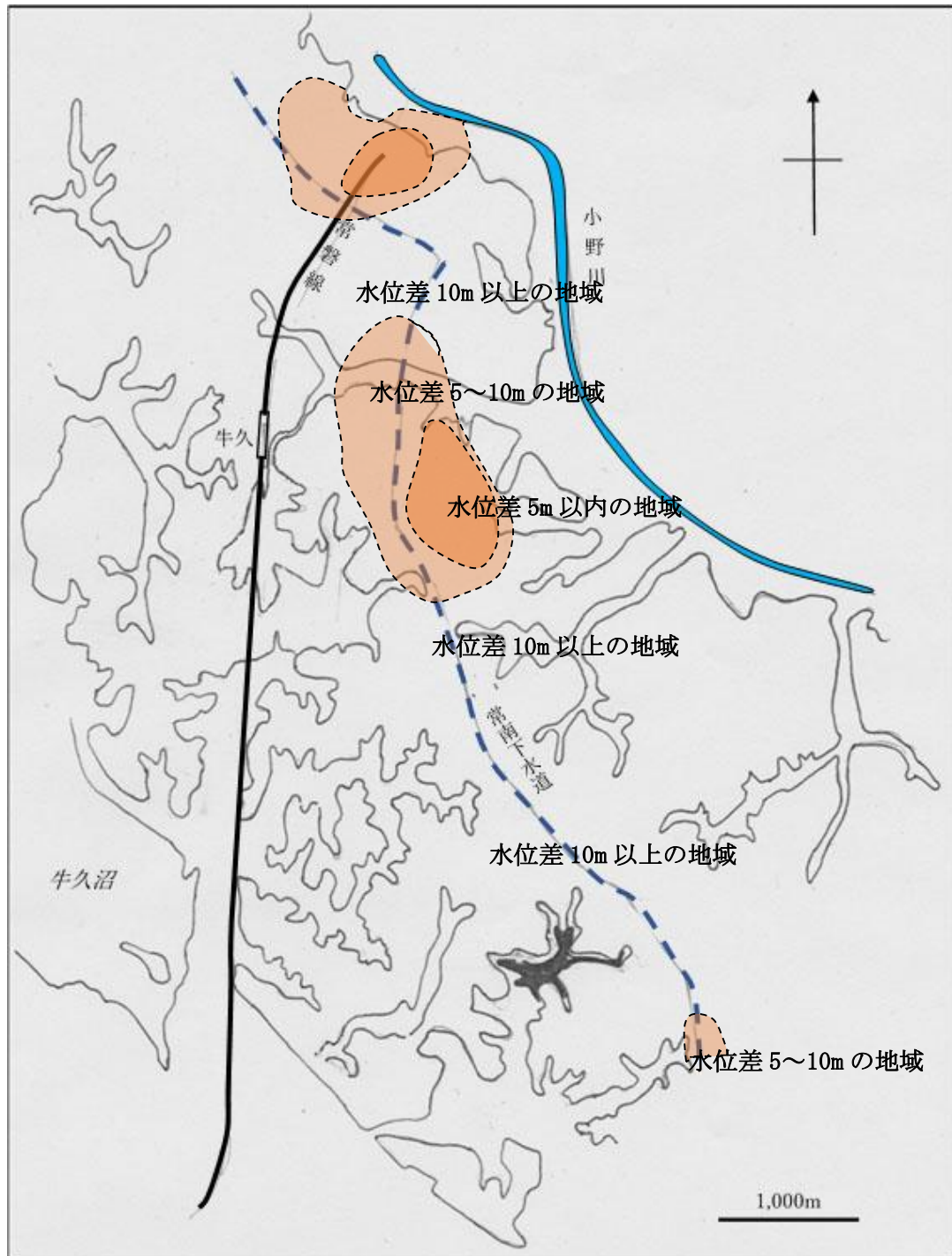


図 35 深い地下水と浅い地下水の水位差の分布
(この図は図 34 の両図を格子状に区切り、その交点における水位差によって得た)

先にも触れたが、漏出現象は多くの場合人為的要因が関係しているといえるが、この地域でも明らかにシールド工事がこれを加速したものと云える。これを明確に裏付ける根拠が図 36 によって示される。これは筆者が調査した当時と同じ時期に杏林大学と東京大学の合同調査によって示されたもので、健康障害が特に著しかった世帯は図 35 の着色地区に集中している。このような傾向は、偶然とは言えない結果といえ、写真 20 や表 3 はこれをさらに明確に裏付けている。

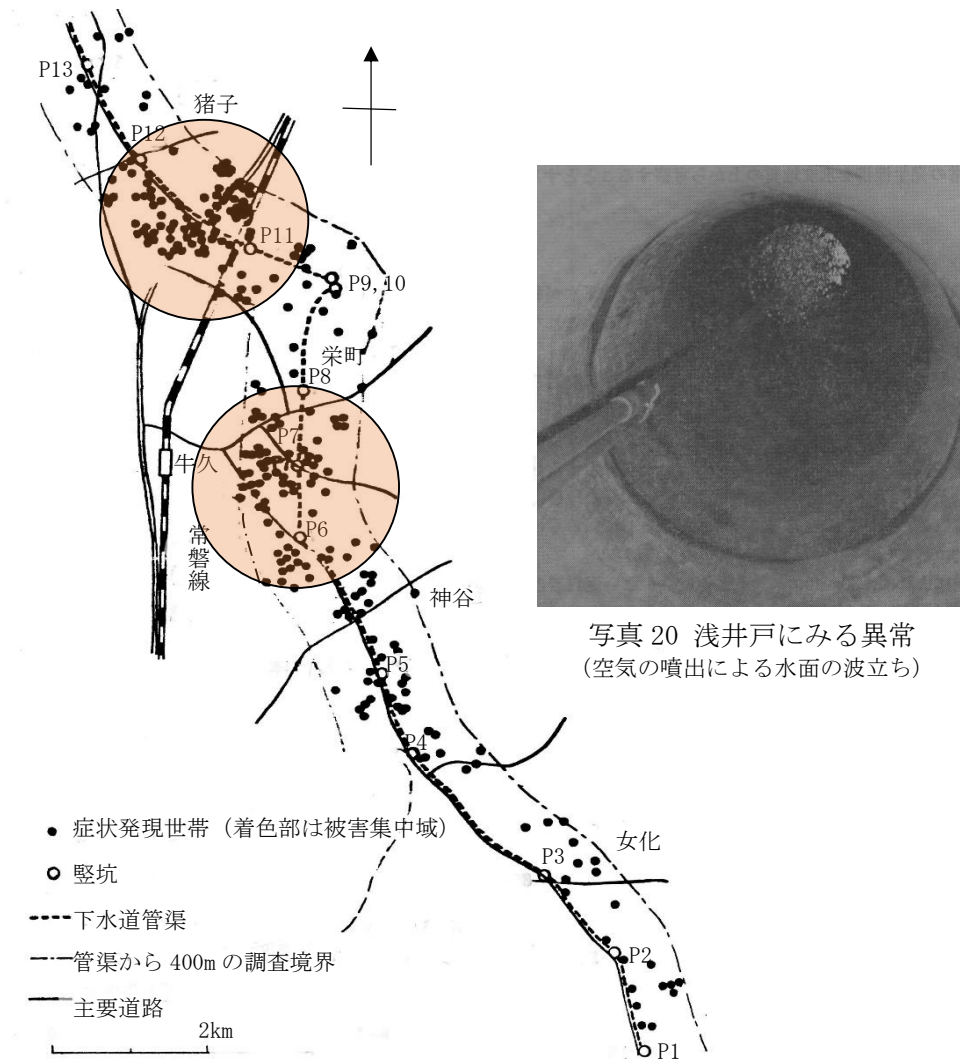


図 36 症状発現世帯地図

〔出典：杏林大学・東京大学合同牛久・竜ヶ崎健康調査会(1978)：
茨城県牛久町付近に多発した疾患の住民問診調査結果
—土木工事に使用された地盤凝固剤との関連をめぐって—〕

表 3 下水道管渠から距離別井戸水異常世帯割合(%)

距離(m)	0～100	101～200	201～300	301～
異常内容	166	221	189	164
空気噴出	11.4	5.9	2.1	2.4
砂粒混入	17.5	13.1	6.3	7.9
褐色混濁	16.3	14.5	11.1	6.7
全異常	44.4	35.3	28.0	26.8

(以下次号)