

1 1. 地下水研究 50 年史－武蔵野台地の地下水（3）－

5. 揚水量の増大と水位変動

武蔵野台地域で深層地下水が多く利用されるようになったのは、昭和 20 年代後半から 30 年代前半にかけての頃からで、これ以後工業用水源としては勿論のこと、各市町の水道水源、各種専用水道水源として急速に深井戸が掘削されるようになった。地下水位の低下は早くもその初期の段階から始まり、その後加速的に進行した。図 21 は当時の水位記録の一例（旧田無町水道水源井）であるが、ここにみる年間 3～4m といった水位低下は当時武蔵野台地のどこでも一様にみられた。

昭和 38 年 8 月から始まった「北多摩水資源対策促進協議会」による「水道統計」は、昭和 48 年以降に東京都による多摩地区水道の一元化が行われるまで、毎月 1 回発行され、各市の水源地の自然水位と揚水水位、及び揚水量がこれに報告されてきた。その背景として、このような激しい水位低下が続けばいずれ地下水が枯渇し、市民生活に重大な支障を来すので、安定的な水供給を確保することが切迫した問題であるとの関係市町の共通認識があったものと思われる。

この「水道統計」は今からみると極めて貴重なもので、武蔵野台地域の地下水開発とそれに伴う初期の地下水位の応答特性を理解するのに重要な情報を与えてくれる。

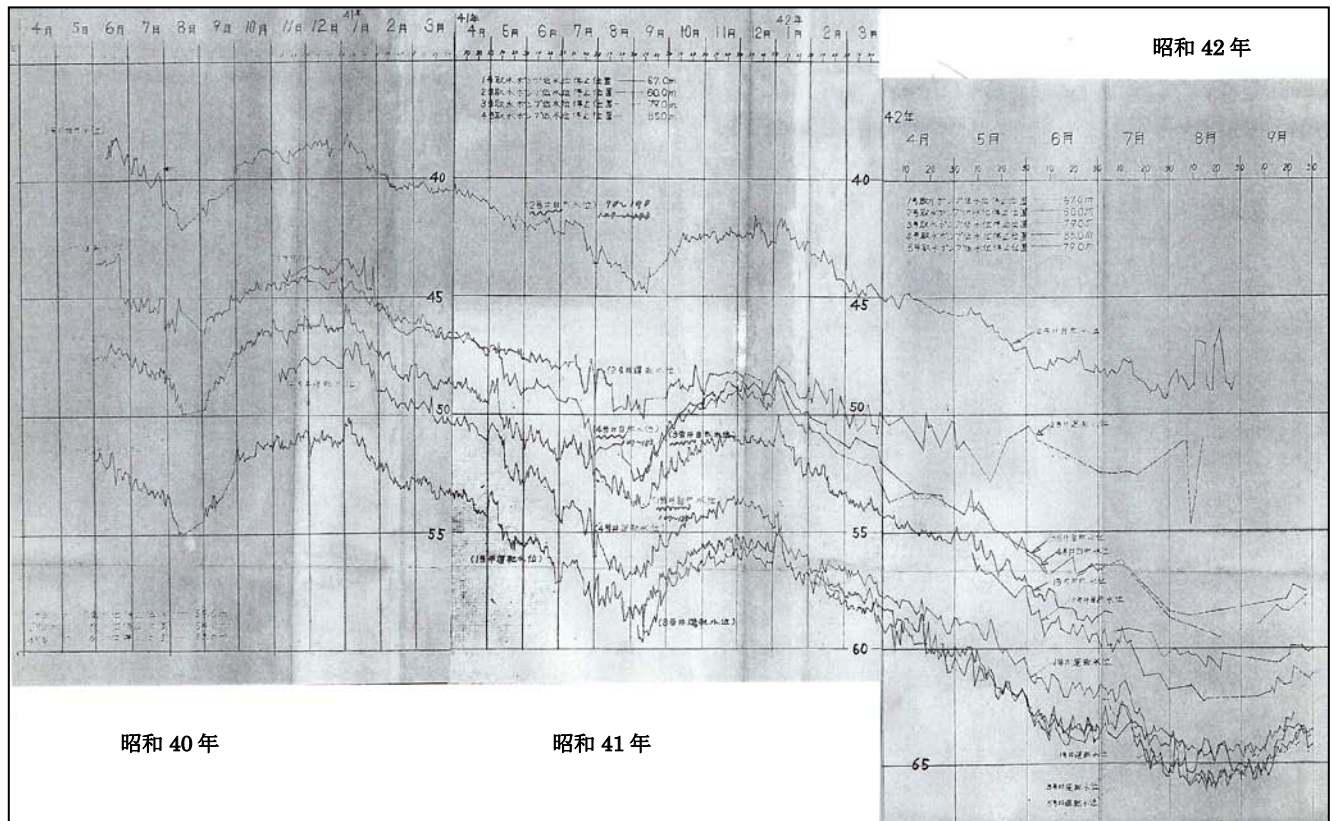
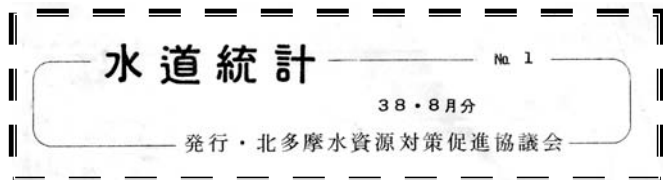


図 21 水源井の水位記録例（田無町水道課）

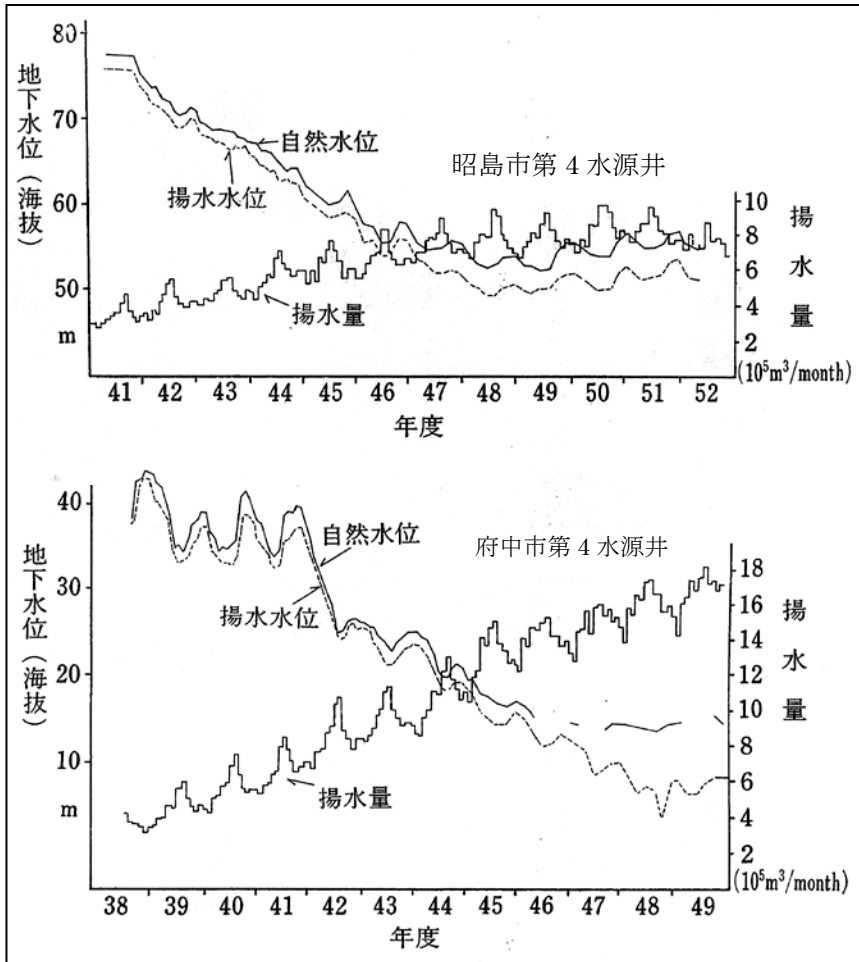


図 22 武蔵野台地における地下水水位と揚水量の長期変動の例
(新藤静夫, 1980)

この 2 点を説明するため、揚水に伴う地下水水位変動に関わる要因について次の仮説を立てた。すなわち、

- ① 地下水開発の初期の段階では、取水帯水層の貯留水に加えて、直近の粘性土層からの圧密による脱水、つまり“絞り出し(Squeeze)” 補給は大きなウエイトを占めている。しかしその量には限界がある。
- ② この段階を経て他の帯水層からの“漏水(Leakage)” 補給が相対的に増加する。

図 23, 24 はこれに関わる簡単な模型実験の結果で、前者は“絞り出し補給”のみを考えた場合、後者はこれに“漏水補給”が加わった場合で、ともに被圧状態にある帯水層を再現するためにカラムに一定荷重を与えている。帯水層にはマンメータを取り付け、砂層部分の蛇口からの排水を一气におこなって、水位を一定値まで低下させた後、蛇口を閉じて水位回復を時系列に記録した。なお、いずれの段階においても回復時間は 1 時間に区切り、排水時の水位低下量に対する回復量の比率を求めた後、次の段階に移った(脚注 9)。

脚注 9) この過程は図 22 の府中市の例における初期段階の水位変動に典型的に見られる。

以下に述べるのはこれを整理することから展開された知見の軌跡である。例えば、これを図化した図 22 から次の点が注目される。

- ① 揚水量に大きな変化がないにもかかわらず、自然水位と揚水水位の差が、経年的に大きくなる傾向がある。つまり同じ水量を確保するためには水位をより深く下げなければならなくなる。
- ② 地下水水位の年間変動幅が経年的に小さくなる傾向がある。(府中市の例)。

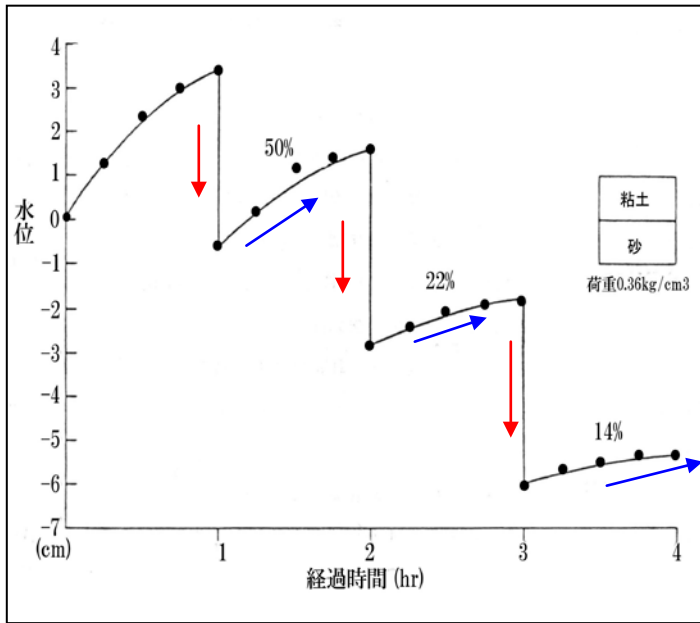


図 23 絞り出し補給のみの場合の水位変化
(数値 (%) は回復率)

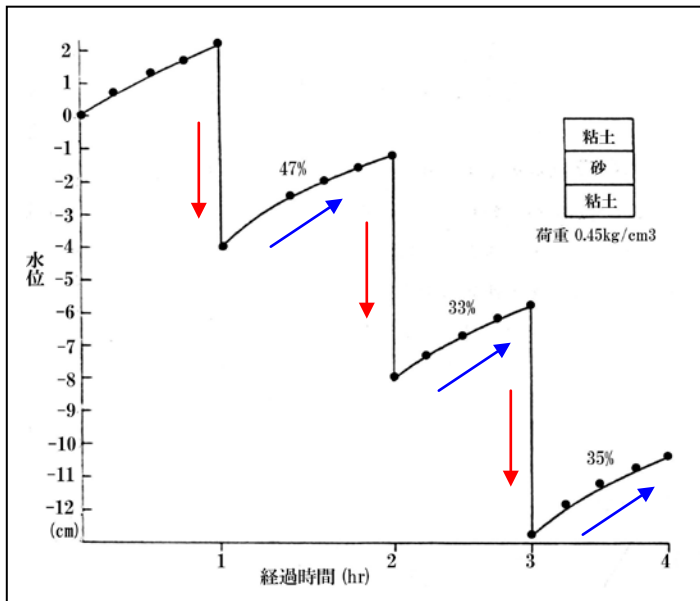


図 24 絞り出しの他に漏水補給を加えた場合の水位変化
(図 23 とともに新藤静夫原図)

この実験では地下水の動きは上下方向のみを考えているので、実際とは異なるが、地下水揚水が局地的に偏在していない限り、夏期などにおいて、地下水揚水がある地域一斉に行われるとみてよいことから、このような一次元の実験結果を二次元的な広がり現象として捉えても大きな誤りはないものとする。

なお府中市の例のようにある時点から地下水位が急速に下がり始め、同時に夏期から冬期にかけての水位の回復率が経年的に小さくなるのは、粘性土層の圧密が進行するとともに、そこからの絞り出し補給量が減少したことを示している。

なお半透水層を通しての漏水現象に関しては、C.E. Jacob (1946) や M.S. Hantush and C.E. Jacob (1955) などによる Leaky Theory として古くから知られており、浅海成堆積物からなる地層において普遍的に認められる現象とされている。

図 25 はその模式図であるが、主帯水層と漏水帯水層の水頭差が図示のような状態にある場合、Semi-confining stratum の透水係数は Main aquifer のそれに比べてはるかに小さいため、地下水はこの部分で鉛直下方に流向を変え、主帯水層に漏水して集水井に向かう。

写真 7 は下から粗粒→極細粒→粗粒の順に粒度の異なる珪砂を均質に敷き詰めて、水槽に下方→上方の水頭勾配を与えておこなった浸透実験であるが、上述の Leaky Aquifer の特徴がよく再現されている。なおいったんこのよ



うな選択的な流が生じると、次からもこの場所が漏水通路として保持されるといった傾向も認められる。なお不均質性が大きい実際の地層にあってはこのような現象が一様に生じるということは無く、ある部分で集中的に生じていることが類推される。

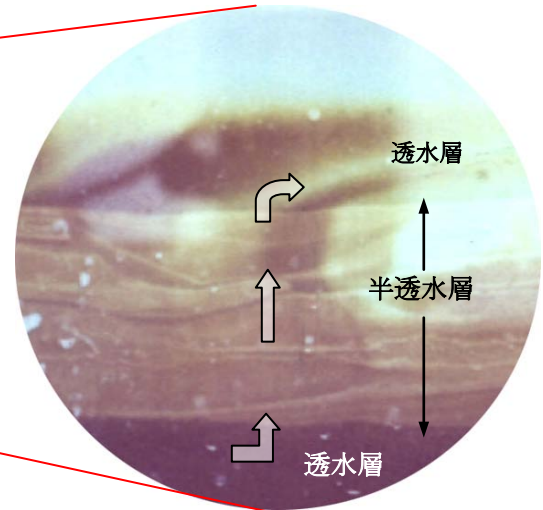
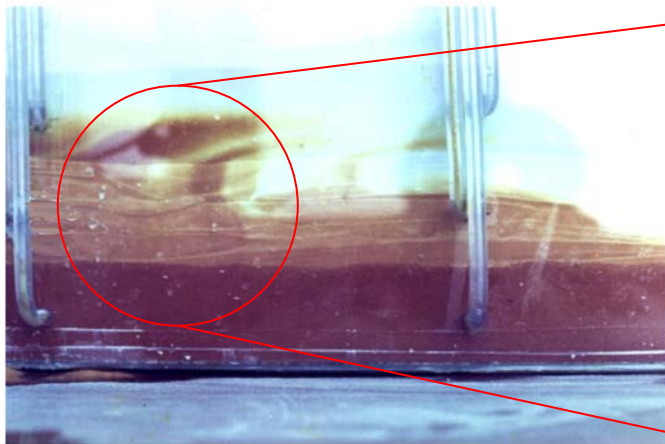


写真 7 漏水現象に関する実験（新藤静夫，未発表）
（ここでは下位層の水頭が上位層に対して大きい場合を想定）

6. 多層準帯水層の地下水流動

“帯水層管理”，“地下水盆管理”，“地下水流動系”といった概念が、我が国で現実に即して論議されるようになったのは、1970年6月に結成された南関東地方地盤沈下調査会の活動に依るところが大きい。今から41年前、筆者36歳の頃である。この調査会は1974年に最終レポートを提出して終了したが、それまでに10冊を超えるレポートをまとめるといったハードなものであった。時に飲み、時に議論をぶつけ合うという日々を過ごしたが、この時の議論から互いに啓発されたものは多い。その折のリーダー格の青木 茂氏、補佐役の柴崎達男氏はもうこの世にいない。

やや形而上的なニュアンスのある上記の諸概念を現実に結び付ける現象として、この“多層準帯水層の地下水流動”を捉えると、その意義が明確になる。ここでは従来の考え方にあまりなかった“地下水のポテンシャル理論にもとづいた空間動態”を強く意識しているからである。

以下に紹介するいくつかの例はこのような主旨から、前項の漏水性帯水層に関する知見を踏まえて進められたもので、一部は南関東地域地盤沈下調査総合報告書(1974)や南関東地域地盤沈下調査対策誌(1974)に掲載されたものである。

写真 8 に示した装置は予備的な実験として使用したもので、透水性や地質構成を変えて複数のカラムを製作した。当時としてはかなり大掛かりな実験で、最終的には実験誤差を出来るだけ排除するために写真 9 のような直径、深さともに 2m という巨大な鉄製の水槽を製作し、透水層、難透水層を模した充填材は粒径や物性を揃え、これを水中に静かに沈積させて多層準帯水層モデルを仕上げた。(以下図 32 までの図幅類は新藤静夫, 1980 による)

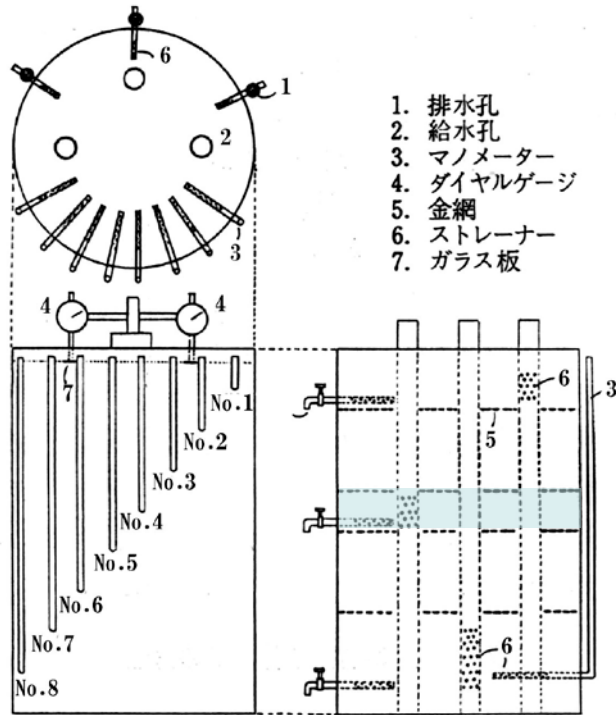


図 25 多層準帯水層の地下水流動に関する実験

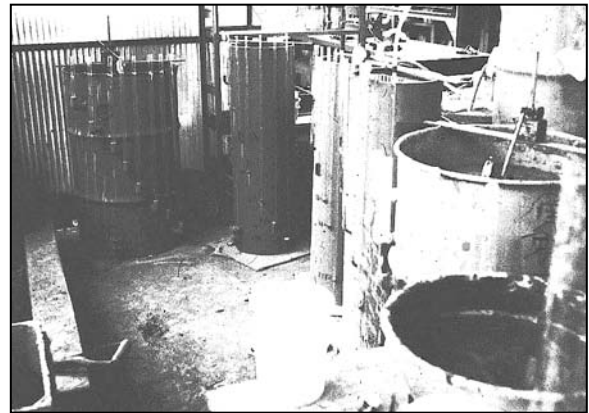


写真 8 複数のカラム実験

図 25 に着色した中央部の透水層から排水させ、その影響による各層準の水位変化を記録したのが図 26, 27 である。排水開始前の静水圧分布を初期状態として、透水層から一挙に排水させ、水頭値がある値に達したのち、バルブを閉じて各層の水位変化を深度-水頭分布として示したものが図 26、層準ごとの水位の経時変化として示したのが図 27 である。

透水層の水位は排水停止後直ちに回復に向かうが、それに隣接する他層準の水位はある時間の遅れを伴って回復に向かう。



写真 9 巨大な水槽実験装置

最終的には一昼夜をかけてスタート時の深度-水頭状態に戻るが、図 26 のように、全体として、初期状態から一定の水位低下量 (= 正味の地下水減少量) をもって水頭分布の平衡状態に至る。

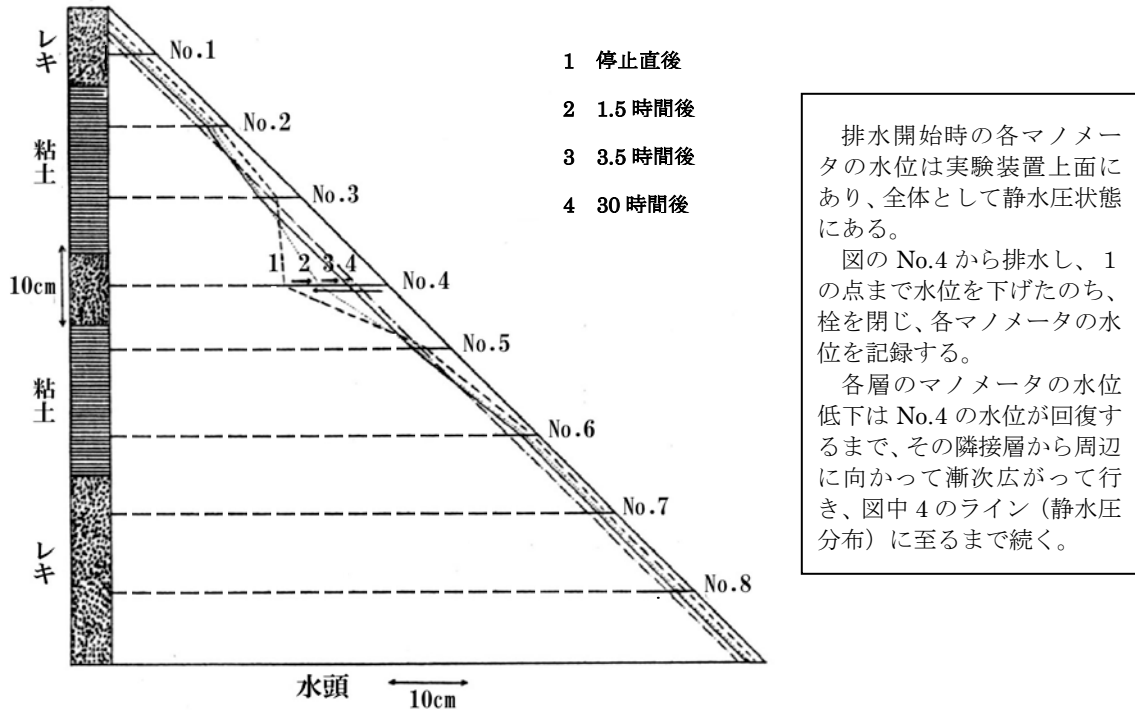


図 26 実験装置での深度-水頭分布

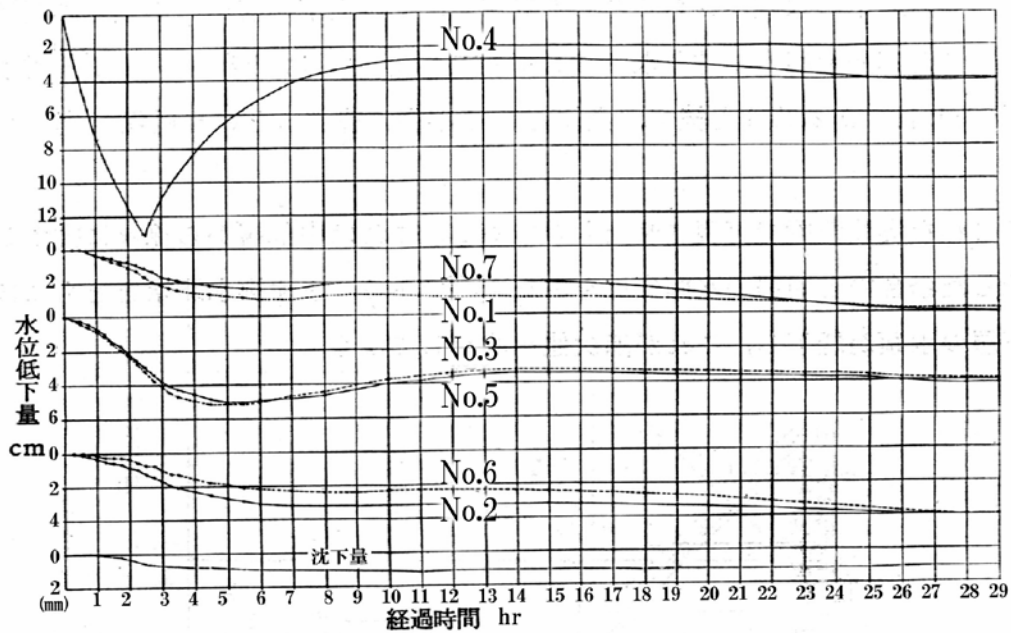


図 27 実験装置での深度別水位経時変化

7. 揚水量の内容

一般に地下水の利用量は夏期に多く、冬期に少なくなるのが普通で、その変動パターンは図 28 に一例を示したように、地下水位の年間変動の周期性として現れている。ここで注

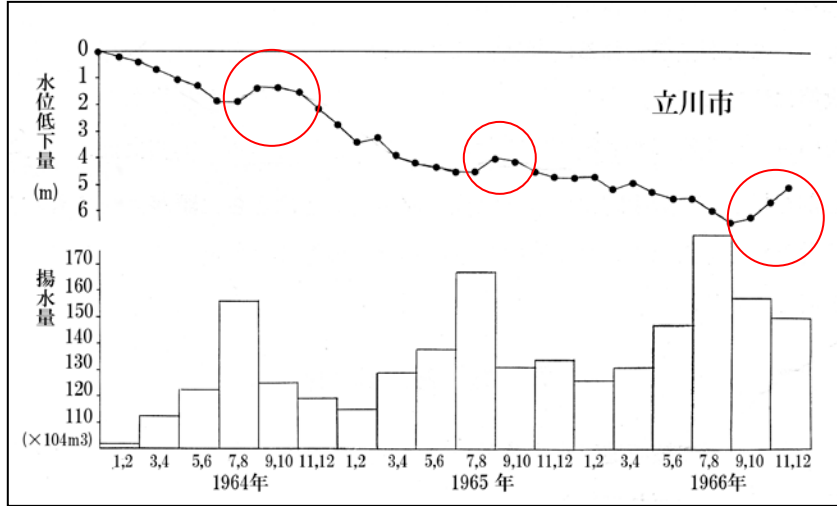


図 28 揚水量と地下水位の変動パターン

目すべき点は、揚水量が減少する時期で、揚水が継続されているにもかかわらず、地下水位が上昇するという事実である(○の部分)。

ここに示した例ではさほど顕著ではないが、他の例では回復率(脚注 10)が 60~70%に及ぶ場合がある(図 22 参照)。回復の時期については地域によって多少のズレはみられるが、多くの場合、ほとんど同時というてよい。このような事

実はこれまで述べてきたことから明らかのように垂直方向からの補給が横方向からの補給に比べて大きいと考えるのが妥当であるが、そのメカニズムと内容はどのようなになっているのであろうか。

図 29 はこれらの現象を同じ実験装置上で再現させたもので、中部層からの排水を段階的に増加、減少させたときの排水量の内容(脚注 11)と中部層ならびに上部層(No.1)と下部層(No.7)の水位変化を示したものである。

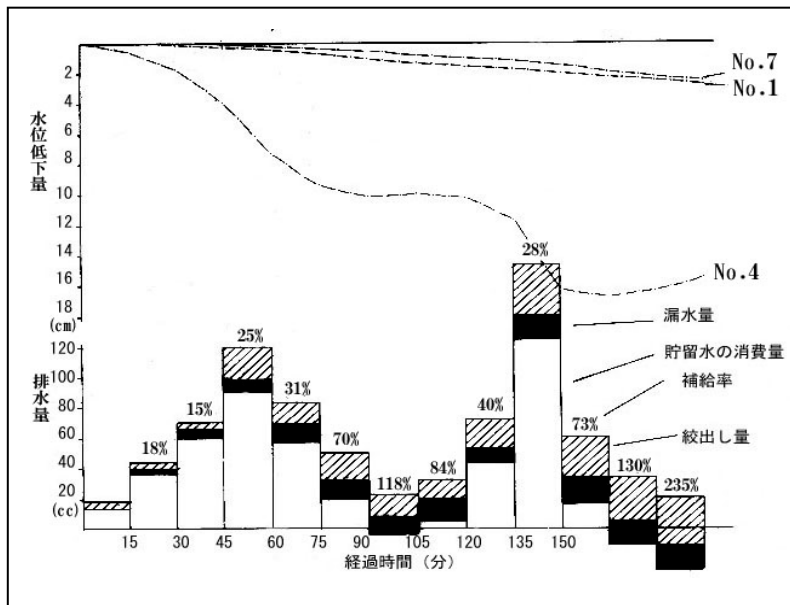


図 29 実験装置での排水量と水位の関係、及び排水量の内容

脚注 10) 前年度における最高水位が次の水位低下期を経て回復した割合

脚注 11) 補給量=排水量-排水を行った透水層の減水量

漏水量=他の透水層の減水量

搾り出し量=補給量-漏水量

漏水量と絞り出し量からなる補給量は排水層と、上部、ならびに下部層との間の水頭差の増大とともに増加しており、排水量が少ないときには補給率が 100%以上、つまり当該層の水位が排水時にもかかわらず上昇していることが指摘される。つまり排水層と上・下部層との水頭差と排水量との間にある均衡が得られれば水位低下を生じないという状態がある期間出現することが示されている。実際にはこれに横方向からの補給が加わるから揚水量の減少期における水位回復の大きさはさらに増幅されるものと思われるが、上下方向の流動を考えただけでも実際の現象をよくとらえていることは注目すべき事実といえる。

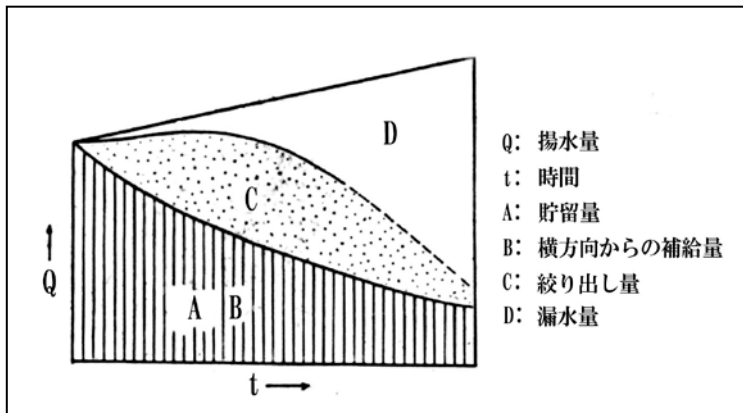


図 30 揚水量の内容を示す模式図

以上の現象を実際に対比させると図 30 のような経過を考えることができる。すなわち、ある地域での地下水があらたに開発された場合、まずはじめに主として利用の対象とされた帯水層に貯留されている地下水が減退する。つぎにその減退によって上部層及び下部層との間にある水頭差が生じると補給が開始されるが、その初頭では上下に重なっている不透水性の地層からの“絞り出し”が行われ、しばらくの間これが漸増する。

さらに水頭差が大きくなり、“絞り出し”量が限界値に近づくと不透水性の地層を通して他の帯水層から漏水してくる量が“絞り出し量”と入れ替わる。この一連の動きはつぎつぎと上下方向の他の層へ伝播してゆき、全体として平衡状態に近づこうとするであろう。ただし実際には地下水の利用は増加の一途を辿るのが普通であるから、平衡にいたることはほとんどない。

木村重彦(1969MS)は関東地方における被圧地下水のトリチウム濃度の経時的測定の結果、あるものは著しい濃度の低下がみられたと述べているが(脚注 12)、これは粘土質層に貯留され、停滞していた古い地下水がこれに隣接する帯水層の水位低下によって絞り出されてきたものといえる。また時間の経過につれて濃度の上昇してくるものもみられるとしているが、これは横方向の流動の増大に加えて漏水量が増加したためといえる。

同じような現象については石井 求等(1975)も武蔵野台地の地下水について指摘している。

脚注 12) 下妻：1965.5 300TU 台から 1966.8 8TU 台
 小見川：1965.5 12TU 台から 1966.9 2TU 台
 大泉：1965.5 40TU 台から 1968.8 2TU 台
 へそれぞれ低下している。

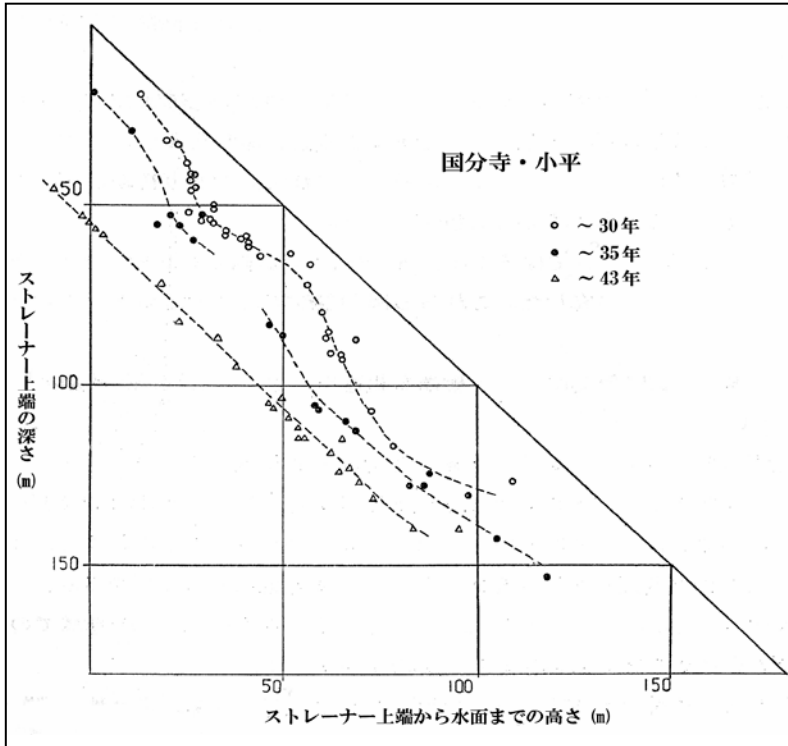


図 31 帯水層の層準別水頭変化 (1)

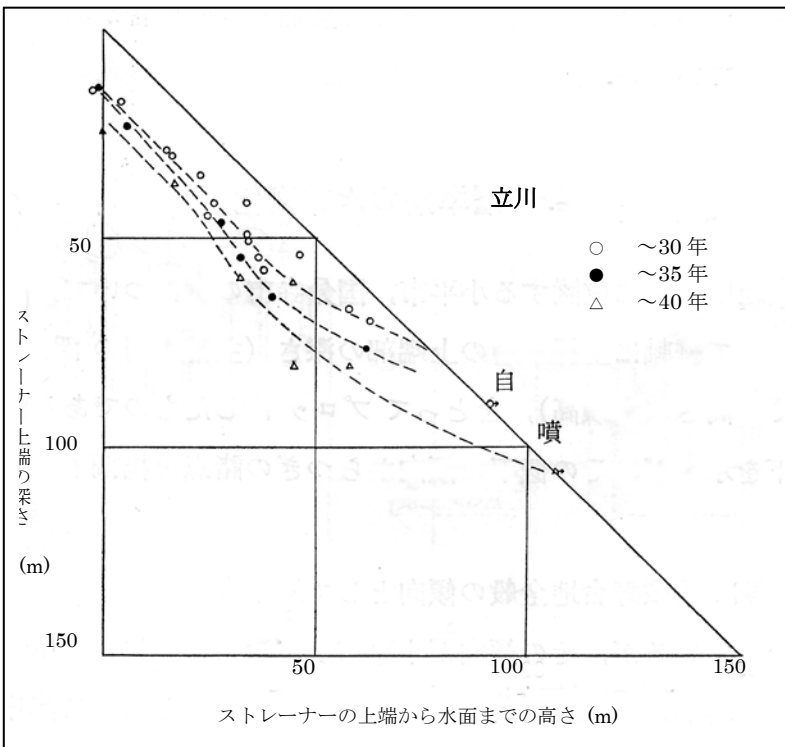


図 32 帯水層の層準別水頭変化(2)

さて、図 31、32 は図 26 に即して現場のデータを整理した武蔵野台地中央部の小平市と国分寺市の例と西部の立川市の例で、縦軸に主帯水層の上端部の深さ、横軸にその場所から地下水水面までの高さ（水頭高）をとってプロットしたものである。いずれの地域も著しい水頭低下を示すが、その低下の傾向から次の諸点を指摘することができる。

① 昭和 35 年前後は武蔵野台地全体として地下水位の低下が著しくなった時期にあたるが、この地域では深度 100m 前後のところに良好な帯水層が発達していて集中的にこれが利用されていたため、図ではこの部分の水頭低下が目立っている。深度 50m 前後のところにも水頭低下の著しい部分がみられるが、この深度は小規模の井戸が集中するところである。

② このような部分は時間の経過とともに他層準からの補給を受けて水頭分布が平滑化していく。

立川市の例では上記のような傾向は顕著には示されないが、地下水利用の増大につれて深部の水頭が上部の帯水層の水頭低下を補うかたちで、年を追って低下しているのが示されている。

(以下次号につづく)