

(19) 三梨 昂ほか22名(1979): 特殊地質図(20), 東京湾とその周辺地域の地質図, 同説明書, 地質調査所

## 第2節 地域の地下水

### 1. 関東平野

#### (1) 地形・地質

関東平野は、わが国最大の平野であり、地下水の入れものとしても最大の規模とすぐれた性質をもっている。そのため、古くから地下水の利用が盛んであった。

明治末期に機械力による作井技術がわが国に導入されて以来、首都圏を擁する南関東一円で急速な地下水開発が進んだ。とくに、戦後の経済成長による首都圏の拡大は、その水需要の大部分を安価な地下水に求めたため、地下水位低下や地盤沈下などの地下水障害を招くことになり、地下水保全対策が強く叫ばれるようになった。

関東平野は三方を山地に囲まれ、それに接した丘陵、台地、低地からなっている。丘陵および台地は何段かの地形に分けられ、沖積低地はこれら台地面を樹枝状に刻み発達する。

丘陵は平野周辺部に分布し、台地に比較して著しく解析の進んだ地形面を形成している。これは、南関東地域で従来から多摩段丘と呼ばれている段丘地形である。台地は平野の大部分を占めて分布し、下末吉段丘、武蔵野段丘、立川段丘などと呼ばれているものである。これらの段丘は、中期～後期更新世の地層で、砂、粘土などからなる未固結の堆積物で構成され、それを関東ロームが薄く覆っている。図2-3-3はこれらの地形分布を示したものである。この図では、多摩段丘相当のものを高位段丘、下末吉段丘相当のものを中位段丘、武蔵野、立川段丘相当のものを低位段丘として図示してある。

台地は平野のほぼ中心部に当る埼玉県北東部の幸手、栗橋付近で最も低く(海拔10~15m)、周辺へいくにつれ高くなっている。これは平野の周辺が隆起し中心部が相対的に沈降する、いわゆる関東造盆地運動の結果と考えられている。これらの地形は、その形態、分布高度の違いとともに、それを構成する地質にも差があって、その中に含まれる地下水の在り方をも規定している。

関東平野の主要な帯水層を形成する第四紀の地質については、古くから多くの研究があるが、地下水の入れものとしての地下地質に関する知見は、ほとんど戦後の次のような諸調査から得られている。それは、①戦後、東京湾岸沿いの地域で行われた石油、ガス鉱床の開発に伴うもので、深層ボーリング(数百メートル以上)試料の分析とその微化石分帯によって、下層の上総層群(後述)に関する知見が増した。②戦後の水需要の拡大に対応した地下水採取のための作井に伴うもので、層相とその分布が次第に判明してきた。③地震予知や地質構造研究のための構造ボーリングや地盤沈下観測のための深層ボーリングが急増するとともに、採取試料の微化石、重鉱物などの分析も盛んに行われるようになり、上位のいわゆる成田層群(後述)に関する情報が急激に増加したなどである。

これらの多くの資料や研究によれば、関東平野の地下地質は、下位から先第三紀の基盤岩類、中新世の三浦層群、鮮新～前期更新世の上総層群、中期～後期更新世の成田層群(下総層群、東京層群)、後期更新世の段丘堆積層、ローム層および沖積層に大別される(表2-3-3)。



表 2-3-3 関東平野の地下地質対比表

時代	遠藤(1978) 他 東京付近(地下) 有楽町七号地下	関東農政局(1976) 他 狭山丘陵 所沢西部 荒川以東	関東平野中～北部	新井(1968) 他 武蔵野東部	青木・馬場(1980) 筑波	穂井ら(1975) 船橋～市原	関東第四紀研究グループ(1969) 常総台地(地表)	特殊地質図 20 (1976)
完新世	立川ローム	立川ローム	沖積層	沖積層	沖積層	沖積層	立川ローム	
更新世	立川砂礫層	立川ローム	上部砂層	上部砂層	ローム	成田層群	下末吉ローム	成田層, 上岩橋層, 清川層
	武蔵野砂礫層	武蔵野ローム	下部泥層	下部泥層	電ヶ崎層	成田層群	常総粘土層	成田層, 上岩橋層, 清川層
新世	東京高砂層	武蔵野砂礫層	A層	N I	成田層	成田層群	電ヶ崎砂層	成田層, 上岩橋層, 清川層
	江戸川層	多摩ローム	B層	N II	淵又・地藏堂層	成田層群	下末吉ローム	成田層, 上岩橋層, 清川層
下世	念人層(城北砂礫)	幸登礫層	C層?	N III	成東層	成田層群	電ヶ崎砂層	成田層, 上岩橋層, 清川層
	東久留米層	谷ツ粘土層	上総層群	上総層群	金剛地層	成田層群	常総粘土層	成田層, 上岩橋層, 清川層
第三紀	北多摩層	三ツ木礫層	上総層群	上総層群	上総層群上部	成田層群	武蔵野ローム	成田層, 上岩橋層, 清川層
	上総層群	SA層群	上総層群	上総層群	上総層群上部	成田層群	立川ローム	成田層, 上岩橋層, 清川層

**基盤**：先第三紀の基盤岩類は、平野を取りまく丹沢山地、関東山地、足尾山地、筑波山地、銚子岬、房総丘陵などにみられ、平野の地下では深く沈み込んでいる。ボーリングで確認されているこれらの基盤の深度は、船橋で 2,149 m (変成岩)、成田で 1,018 m (変成岩)、小見川 659 m (古生層)、鹿島 887 m (中生層)、竜ヶ崎 813 m (古生層) などとなっている。これらは、水文学的には不透水性の地盤で、地下水やガス水の入れものの底を形成している。

**三浦層群**：三浦層群は房総半島および三浦半島の地表に分布する泥岩、砂岩、火砕岩などを主とする地層群からなるが、関東平野の地下でその存在は確認されていない。三浦層群という名称は、従来、三浦半島北部の中新世～前期更新世の地層全体を指し、房総半島の上総層群とほぼ同層準と考えられていたが、近年、房総半島との対比から鮮新世の基底に当る黒滝不整合の下位の地層に限定して用いられるようになってきている<sup>(1)</sup>。

**上総層群**：三浦層群の上位にくる鮮新世～前期更新世にわたる一連の主として海成の堆積層で最大千数百 m の厚さをもっている。全体として、砂層とシルト、粘土層の互層で砂質の部分には地下水や天然ガスを含んでいる。第三紀層と第四紀層の境界は、地表(房総半島)では、上総層群中部の梅が瀬層の中に引かれているが、東京湾北岸では、その境界深度は約 700 m 程度になるという。この境界付近で、上総層群を上部と下部に分ける試みがなされている<sup>(2)</sup>。この境界は、これ以下の下部上総層群に天然ガスが主として胚胎され、上部上総層群に地下水が主として賦存するという水文地質的に大きな意義をもっている。

しかしながら、平野地下の上総層群は 1,000 m を越すような深いところにあるため、仮にそれがすぐれた帯水層であるにせよ、実際上はそれから採水することは技術的にもむづかしく、経済的にも不利である。ただし、房総半島中部や多摩丘陵、武蔵野台地などの平野の縁辺部では、上位の成田層群が薄く上総層群が地下浅所にあるため、良好な帯水層として採水が行われている。

**成田層群**(下総層群、東京層群)：上総層群を覆って平野全域に広く分布する成田層群は、全体としてみれば、未固結の礫層、砂層、シルト～粘土層の互層からなり、ときに貝化石を含む部分がある。最深部の厚さは約 600 m にも達するといわれるが、平野の大部分の地域では 100～200 m の厚さを示している。本層群はその層相からすぐれた帯水層を形成し、しかもそれらの地層は、造盆地運動のため、平野の中心に向かって緩く傾斜する盆状構造を示しており、水文地質的にすぐれた被圧地下水盆になっている。したがって、関東平野の地下水採取にかかわる水位低下や地盤沈下など地下水障害の多くはこの成田層群に関係して起っているといってよく、水文地質的に非常に重要な地層群といえることができる。なお、成田層群については、項を改めてやや詳しく述べることにする。

**段丘堆積層およびローム層**：関東平野の丘陵や台地は、高位、中位、低位の各段丘群に分けられ、何枚ものローム層をのせている。このうち、帯水層になるような堆積物をもつ段丘は、主として、平野北部栃木県から茨城県下に発達する中～低位段丘である。宝積寺段丘、宝木段丘<sup>(3)</sup>などと呼ばれているもので、一般に、数メートルの礫層と砂泥互層からなり、不圧帯水層を形成している。

宝積寺礫層あるいはその相当層は、茨城県南部から千葉県北部へ入ると層厚を増し、斜交層理や葉理の著しい砂礫層となり、竜ヶ崎砂礫層と呼ばれるようになる。竜ヶ崎砂礫層は下位の成田

層群とは不整合の関係にあるが、井戸資料などでは成田層群と区別することはむずかしい。したがって、水文地質的に、成田層群の最上部層として取扱っている場合もある。

なお、各段丘堆積層およびローム層の地下へのつながりはまだよくわかっていない。

**沖積層**（有楽町層）：台地を刻む河川沿いに樹枝状に分布する。とくに、荒川、中川、江戸川、利根川、鬼怒川沿いによく発達する。中川（古利根川）、江戸川沿いの沖積層は、東京湾口部で約40mと最も厚く、春日部付近で約30m、埼玉県北部で20~10mと徐々に薄くなる。そして、微化石分析の結果によれば、群馬県南部~埼玉県北部の沖積層は全層が淡水性の環境を示す堆積物からなるが、春日部付近で下部に貝化石を含む海成砂層を挟むようになり、それより以南ではほとんどが海成の堆積相を示す。これは、縄文前期の高海水準期に、海が内陸深く入り込んでいたことを示すもので、縄文海進と呼ばれている。縄文海進は、少なくとも、埼玉県春日部の北まで及んだといえることができる。

沖積層は、一般に、最上部に砂層があるが、その下はすべてN値5以下の非常に軟弱な泥層からなる。また、常総台地の霞ヶ浦、印旛沼などの湖沼周辺の沖積層も上部砂層と下位の軟弱泥層からなり、その層厚は最大50mにも達することが知られている。

沖積層の表層の砂層は不圧地下水を含み、家庭用の浅井戸で小規模に利用されている。しかしながら、同じ沖積層とはいっても、栃木県の鬼怒川、思川上流部などの扇状地帯では、砂礫層が厚く発達し（最大約10m）、良好な不圧帯水層を形成している。

以上述べた関東平野における第三紀から第四紀の地層群の形成は、中新世中期の地殻変動による丹沢~嶺岡隆起帯が明確になったときに始まったとされている<sup>(4)</sup>。この隆起帯の北側に形成さ

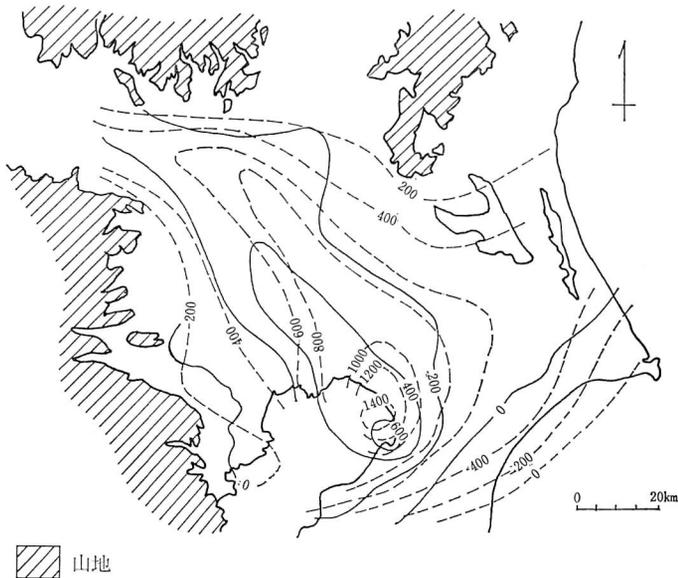


図 2-3-4 関東平野における成田層群基底および更新世~鮮新世境界構造等高線図（単位はマイナス・メートル）  
 —— 成田層基底, - - - - - 更新~鮮新世境界  
 (K. KAWAI -1965-, 第四紀地殻変動グループ-1969による)

れた堆積盆は、北方へ移動しながら、一連の海成層(上総層群)を堆積させ<sup>(5)</sup>、その後、海水面変動などによる何度かの隆起、沈降を繰り返し、約数十万年前からは沈降域と考えられている。

図2-3-4は、K. KAWAI<sup>(6)</sup>による成田層群基底の等高線と、第四紀地殻変動グループ<sup>(7)</sup>による更新世～鮮新世境界の等高線を合せて描いたものである。ともに、石油、天然ガス関係のボーリング資料によるもので、千葉の沖合を中心に北西方向へのびる盆状構造がみられる。成田層群基底の等高線は関東平野における実質的な地下水の入れものの形と構造を示すもので、その規模の大きさがうかがわれる。また、更新世～鮮新世境界の等高線はほぼ天然ガスを含まない水を汲み上げることのできる限界深度を示すものと考えてよい。

(2) 地下水

これまで述べてきたように、関東平野の実質的な主帯水層は成田層群であり、地下水の賦存形態はその層相や構造に制約される。

成田層群は、地表の分布も広く、化石を多産することから、古くから地質学的な調査研究が多く行われ、4~7累層に細分されている。しかし、各研究者によって分類の仕方や視点に多少のくい違いがあり、種々の地層名が与えられ、いまだ統一されていない<sup>(8)(9)(10)</sup>。

これらの地層と平野地下に存在するはずの成田層群がどのように連続し対比されるかは、地下

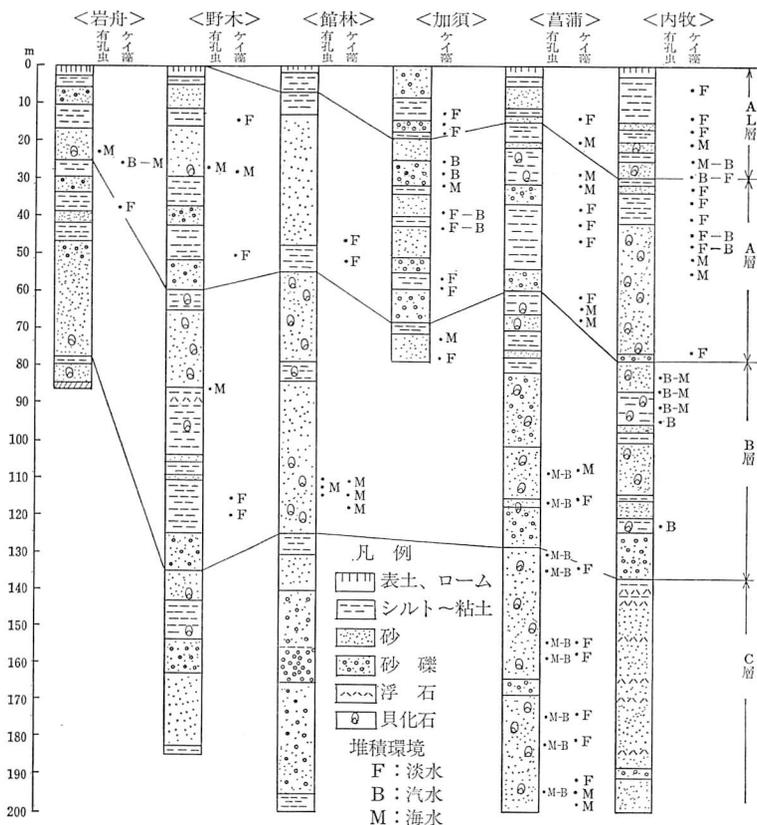


図 2-3-5 関東平野中～北部の代表的地質ボーリング柱状図

水の入れものの形態や性状を知るためにも非常に重要なことである。多くの作井資料を解析して、地下における成田層群の層相区分が行われるようになったのは、1960年代の半ばすぎから1970年代にかけてのことである。武蔵野台地から東京下町地域については成瀬・新堀・羽鳥<sup>(10)</sup>、新藤<sup>(11)</sup><sup>(12)</sup>、遠藤<sup>(13)</sup><sup>(14)</sup>などの報告が主なものであり、平野中央部については新堀・羽鳥・成瀬<sup>(15)</sup>、木野<sup>(16)</sup>、菊地・貝塚<sup>(17)</sup>などが、千葉県湾岸部については楡井ら<sup>(58)</sup>、楡井・樋口・原・古野<sup>(19)</sup>など、常総台地については柴崎・大野・志村<sup>(20)</sup>、関東農政局<sup>(21)</sup><sup>(22)</sup>、そして、北関東の栃木県南部については阿久津<sup>(23)</sup>などの報告がある。

農林水産省は、近年、埼玉県南部から群馬、栃木県南部にかけて、主として地盤沈下の解析と観測のために、数多くの作井と地質ボーリングを実施した。また、千葉県北部から茨城県にかけての常総台地についても現在実施中である。とくに、地質ボーリングは主として成田層群の層相解析と層序の確立を目標にして、全層のコア採取、微化石・重鉱物分析などを行っている。これらの成果はすでに報告済<sup>(24)</sup><sup>(25)</sup><sup>(26)</sup><sup>(27)</sup>のものもある。

図2-3-5は、関東平野の中～北部で行った代表的な地質ボーリング柱状図と微化石分析による堆積環境を示したものである。この図からわかるように、地下約200m程度までの地質は礫層を挟む砂層とシルト質粘土層の互層堆積物からなっている。これらの地質柱状図とその間を埋める多数のボーリング作井資料を参考にし、層相の連続性に注目して、堆積のサイクルを考慮すると、成田層群はA、B、Cの三層に区分することができる。また、図2-3-6は、以上の標準的な層序区分に従って、主な地域の地下の層相区分断面を同一縮尺で描いたものである。これらの図によって、次に各層についてやや詳しく述べる。

**A層：**全体として、50～80mの厚さをもつ砂、礫、粘土の互層からなる地層で、平野の縁辺部へいくほど薄くなる。埼玉県中～北部の堆積盆地の中央部では細粒相が優勢で、周辺部へいくほど砂礫相が多くなっていく傾向がみられる(図2-3-6)。また、2～3層の比較的連続性のよい砂礫層がみられ、とくに基底部の礫層は連続性がよい。微化石分析結果によると、下部は淡水環境を示す堆積物で、中上部に海成層がみられる。しかし、海成層の分布は栃木県南部の野木、群馬県南東部の館林あたりまでで、それより以北～以西では砂礫層が卓越し扇状地性の堆積物となる。

本層は、栃木県南部では、阿久津<sup>(23)</sup>のA層と一致し、平野中～南部では、その基底は菊地・貝塚<sup>(17)</sup>のNIの基底、新堀・羽鳥・成瀬<sup>(15)</sup>のG<sub>4</sub>の深度とほぼ一致し、地表の成田層(狭義)、下末吉層、東京層などに対比される(表2-3-3)。

**B層：**B層以下については不明な点が多いが、その層相はA層と同じような特徴をもっている。平均70～80mの層厚を有し、埼玉県中～北部で最も厚く、細粒相に富み、周辺部へ厚さを減じ、層相も粗粒となる。上部に海棲貝化石がみられることが多く、B層についても下位から上位へ向かって淡水から海水への堆積輪廻が認められる。

B層は、栃木県南部では、阿久津<sup>(23)</sup>のB層と一致し、平野中～南部では、その基底は菊地・貝塚<sup>(17)</sup>のNII、新堀・羽鳥・成瀬<sup>(15)</sup>が屏風ヶ浦層の鍵層としたG<sub>7</sub>とほぼ対応する。したがって、本層は東京付近の屏風浦層、下総台地の藪層～地蔵堂層などに対比されると思われる(表2-3-3)。

**C層：**B層基底の比較的連続性のよい礫層の下位の地層をC層とした。平野中央部では、その

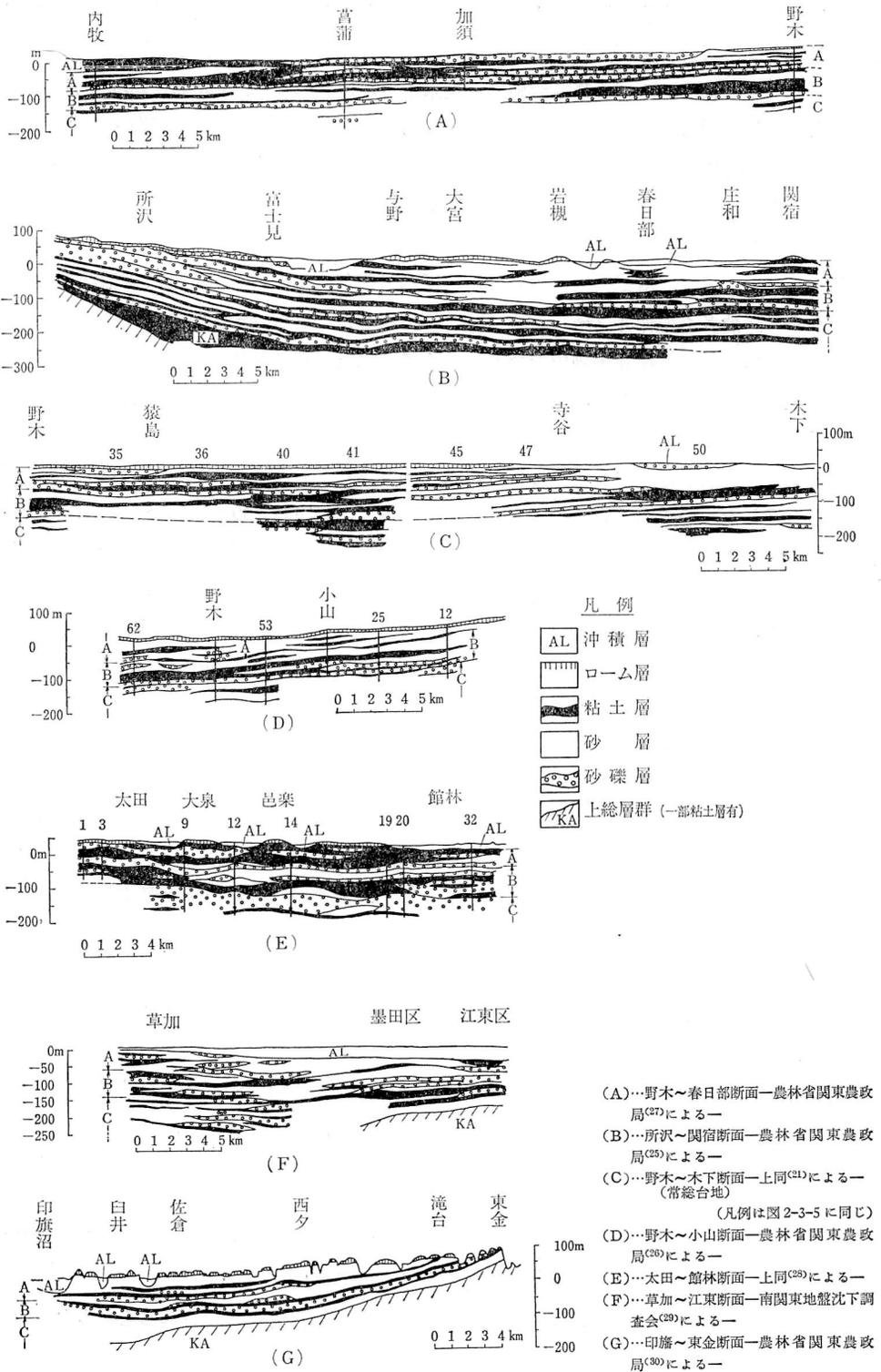


図 2-3-6 関東平野の地下地質断面

下限はよくわからないが、石油、ガスなどのボーリング資料によれば、地表下数百 m に達するといわれる。下総台地、東京下町低地、武蔵野台地などでは、地表下 200m 前後で上総層群最上部のシルト層（笠森層）に達し、その上面をもってC層の基底としている。層相はA、B層に同じく、砂、礫、粘土の互層であるが、北部では砂礫層が卓越するようである。

成田層群は、層相から上に述べたように細分されるが、帯水層となるのは砂礫～礫層部分である。優勢な帯水層はA層、B層の各基底礫層で、最も厚く連続性がよい。とくに、利根川沿いの地域では、B層全体が砂礫相を呈し、優れた帯水層となっている。下総台地では、A層は南東へいくにつれ漸次薄くなり、礫層の発達もよくないが、B層下部の礫層は連続性もよく最も優れた帯水層を形成している。C層では、帯水層の連続性を追跡するのは困難であるが、群馬県南部の館林～太田断面では、160～200m 付近に優勢な砂礫層が発達するのが認められる。しかしながら、これら帯水層の1つ1つを取り上げ、その水文地質的性質を論ずるほどに解析精度があがっているとはいえない。したがって、水文地質的には、成田層群全体を1つの単位として取扱わざるをえない。すなわち、成田層群は未固結の礫層や砂層がすぐれた帯水能を示し、有力な帯水層を形成していて、その層相分布がその地域の採水条件の良否を規定しているといつてよい。

図 2-3-7 は、常陸台地における深度 30～100 m の井戸柱状図から含砂礫百分率を求め、その等値線を描いたものである。この図をみると、全体として成田層群の層相変化が著しく、地域性があることがわかるであろう。すなわち、北部の筑波、新治、土浦付近および南部の水海道、荳崎、藤代付近では、砂礫相が多いのに対し、中部の豊里、谷田部、牛久付近では、多分に粘土がちの層相を示す。したがって、常陸台地の中央部では、北部、南部に比べて成田層群の帯水能が劣っているといわねばならない。このことは、図 2-3-7 の比湧出量分布に明確に示されている。

なお、これまで主として農林水産省の諸調査<sup>(15)(19)(20)(21)(22)</sup>によって明らかにされた成田層群の帯水層の水利定数を表 2-3-4 に示しておく。この表からわかるように、関東平野一円の地下に広く分布する成田層群の帯水層（主として砂礫層）の透水量係数（ $T$ ）は、ほとんど  $n \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

表 2-3-4 関東平野における成田層群の帯水層の水利定数

地 域	層 相	透水量係数 ( $T$ ) $\text{m}^2/\text{s}$	透水係数 ( $k$ ) $\text{m}/\text{s}$
栃木県南部	A 層 (基底礫)	$1.1 \sim 7.4 \times 10^{-3}$	$3.4 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$
	B 層 (基底礫)	$1.2 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-3}$
	C 層	$1.9 \times 10^{-2}$	$1.7 \times 10^{-3}$
群馬南東部	A 層	$5.1 \times 10^{-3} \sim 2.2 \times 10^{-2}$	$1.3 \sim 4.6 \times 10^{-4}$
	B 層	$3.4 \times 10^{-3} \sim 3.7 \times 10^{-2}$	$1.2 \sim 4.9 \times 10^{-4}$
	C 層	$7.2 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-3}$
埼玉東部	A～C層	$2.0 \times 10^{-3} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ ( $2.3 \times 10^{-3} \sim 1.7 \times 10^{-2}$ )	$1.2 \sim 6.2 \times 10^{-4}$
常陸台地	A～C層	$(1.2 \times 10^{-2} \sim 1.2 \times 10^{-1})$	—
下総台地	A～C層	$(1.2 \times 10^{-2} \sim 5.8 \times 10^{-2})$	—

( ) は比湧出量から統計的に求めた  $T$ 。

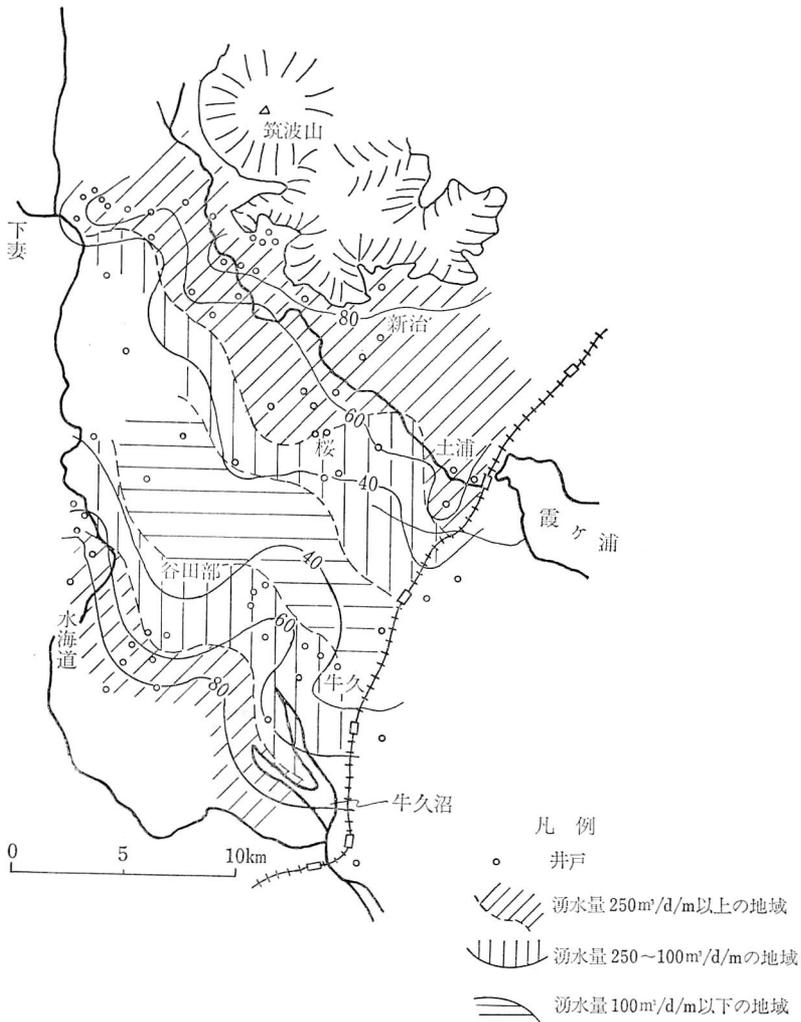


図 2-3-7 成田層群の比湧出量および含砂礫率 (%) 分布図

のオーダーであることがわかる。そして、地域的に  $n \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  オーダーの小さい部分や  $n \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$  の高いオーダーを示す部分がある。比較的低い  $T$  値を示す部分は、大ざっぱに言って、関東地下水盆の中央部で、粘土が優勢な層相を示す部分とほぼ一致する。また、高い  $T$  値を示す部分は常陸台地の霞ヶ浦の南部や鹿島地域にみられる。

次に、関東平野における地下水面（被圧地下水頭）の形をみてみよう。地下水面は地下水の汲み上げに対応して季節的にも経年的にも変化する。図 2-3-3 は、関東平野全域の被圧地下水頭分布図であるが、1973~1974 年の地下水位データによって描いたものである。この時期は、首都圏での地下水採取規制の効果がようやく現われ始め、水位がやや回復に向かい、水位低下の中心が内陸部へ移り始めた頃である。この図からわかるように、関東平野における地下水位低下の著しい部分は、利根川と荒川に挟まれた中川低地帯と東京湾岸部である。この地帯は、とくに戦後急



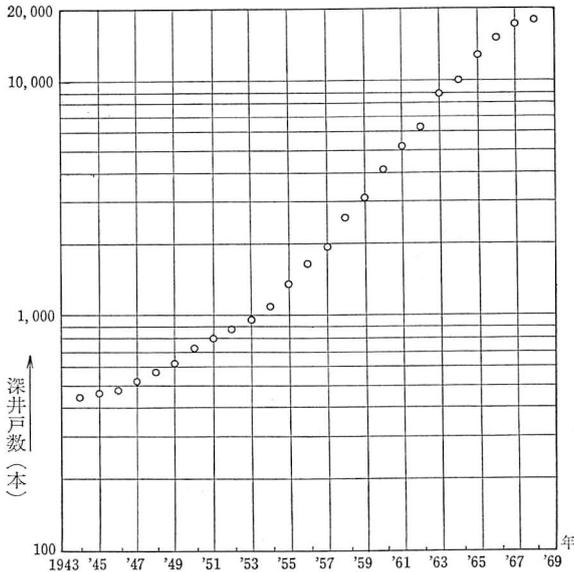


図 2-3-9 深井戸数の変遷 (関東地方)

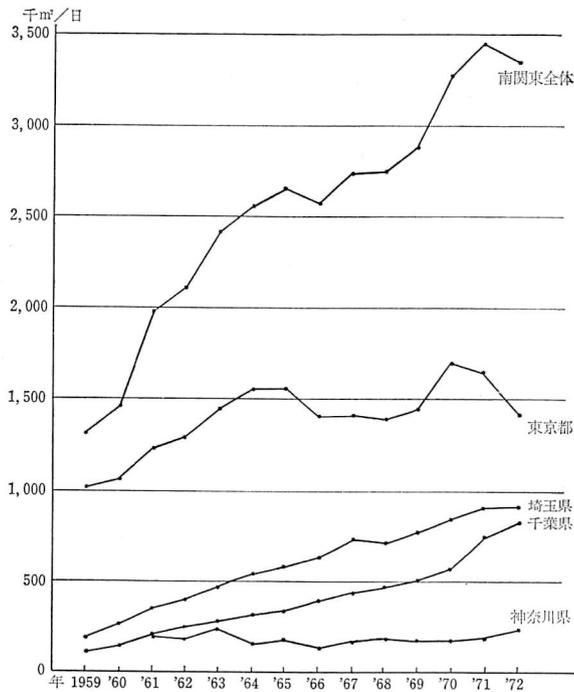


図 2-3-10 南関東地域における地下水揚水量の推移 (南関東地盤沈下調査会 (1974) による)

東地区天然ガス鉱業権買収 (東京都)。

1974年以降……首都圏の地盤沈下は鈍化に向かうが、沈下域は内陸部に拡大、埼玉県北部に及

1946年……船橋ガス田の開発開始。

1946~1953年頃……地盤沈下の停滞期 (最大沈下量 4 cm/年) で、埼玉、千葉県では沈下は発生していない。

1955年以降……東京低地一帯で沈下域の拡大、深層沈下の顕在化。

1961年……工業用水法施行、この頃から船橋ガス井急増 (34 井に達す)。

1962年……地盤沈下域が中川沿いの内陸部へ拡大、一方、江東地区の地盤沈下はようやく鈍化の傾向を示す。

1963年……ビル用水法施行。揚水規制の強化。

1966~1967年……江東地区で、工業用水道の通水による地下水位の急上昇と沈下量の減少。

1967年……一都三県地盤沈下調査会発足。江東地区の地下水位は急上昇してきたが、沈下域は内陸部へ拡大、洪積台地部の沈下も顕著となる。

1968~1972年……南関東全域にわたって地下水位低下と沈下量がピークに達する。

1970年……南関東地盤沈下調査会発足。天然ガス採取企業に対する行政指導、習志野、東金両市に自主規制の要請。自主規制の開始。

1971年……工業用水法の省令改正、自治体条例改正によって採水井構造基準が改正され、地下水採取規制が強化された。千葉県下では、天然ガス採取の自主規制が始まり、徐々に強化された。

1972年……1月に葛南地区の天然ガス鉱業権の買上げ (千葉県)。12月に江

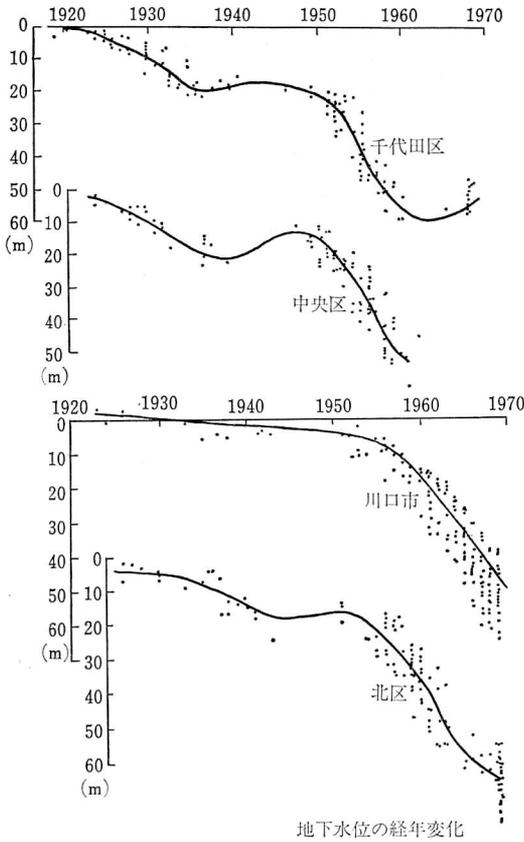


図2-3-11 東京都における地下水位の経年変化 (南関東地方地盤沈下調査会(1974)による)

ぶ。

このような地盤沈下現象の発生と拡大の原因は、戦後の天然ガス採取と水需要の急増に伴う地下水利用の拡大にあったことは明らかである。地下水利用量の増加は図2-3-9の深井戸数や図2-3-10の揚水量の推移カーブによく表われている。揚水量の変遷は、当然、地下水位の経年変化として明確に表われてくる。図2-3-11は東京都の地下水位の変化を井戸掘削時の水位から推定して描いたものであるが、戦後の水位の急激な低下傾向がうかがわれる。しかしながら、1970年代のはじめまで続いた急激な水位低下も、図2-3-12にみられるように、その後は徐々に回復に向かう。この傾向は、埼玉県南部、千葉県東京湾岸部についてもいえることである(図2-3-12~14)。

このように、東京湾岸部を中心とした長年にわたった激しい水位低下と地盤沈下も、現在では、ようやく鎮静化に向かっている。これは、明らかに法律による揚水規制もあるが、千葉県下の天然ガスの自主規制や、各自治体による揚水規制の効果も見逃すことはできない。

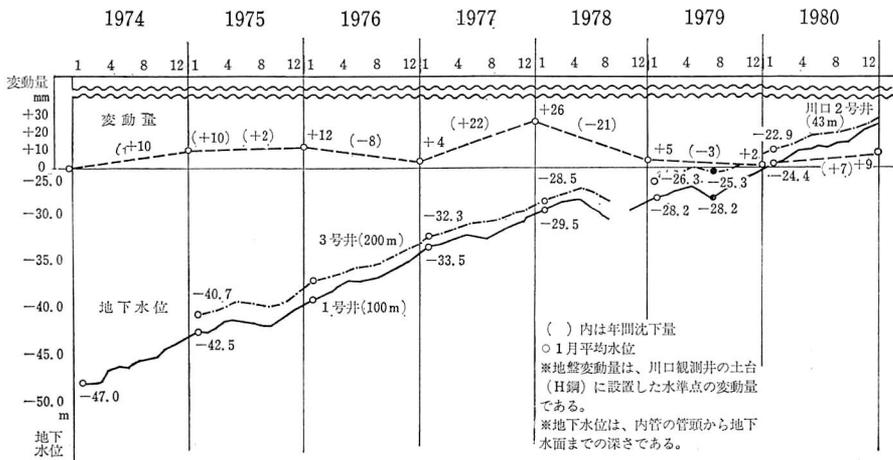


図2-3-12 川口観測井における地下水位、地盤沈下量

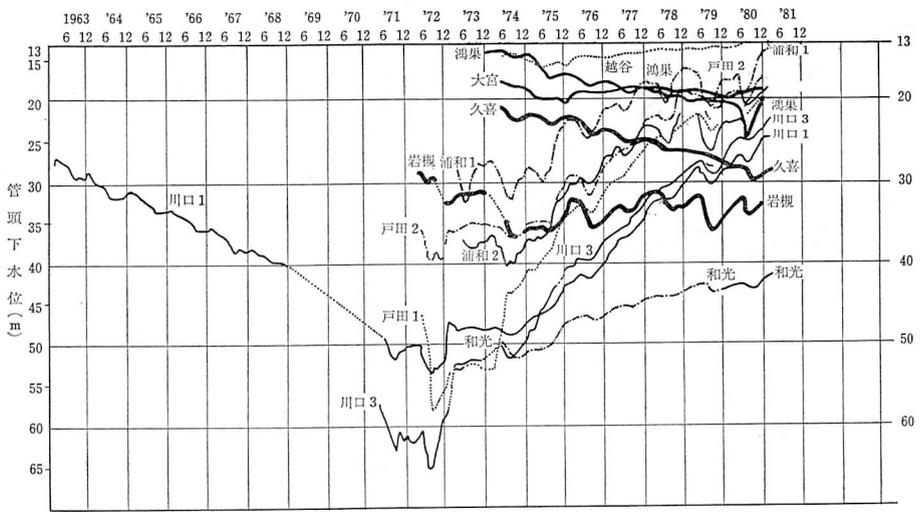


図 2-3-13 埼玉県における観測井の地下水水位経年変化  
(埼玉県環境部(1981)による)

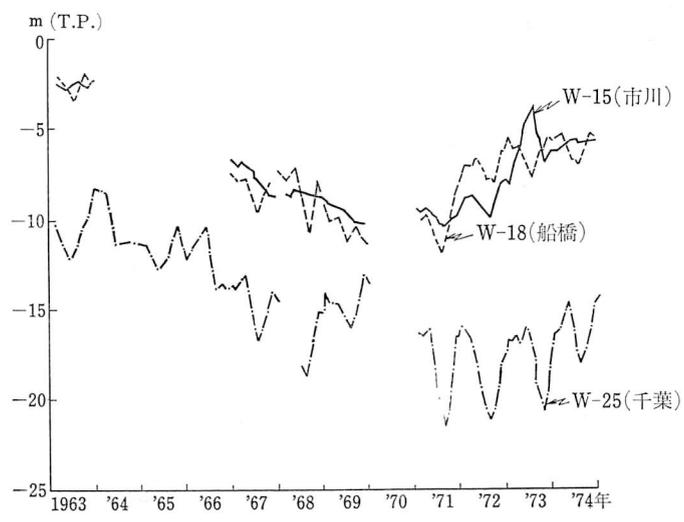


図 2-3-14 地下水水位の経年変化(千葉県)  
(千葉県公害研究所(1975年)による)

とはいうものの、内陸部に拡大した水位低下と地盤沈下は、なお漸増の傾向を示している。埼玉県北部の幸手にある関東農政局の観測井資料によると、1974～1980年の6年間に約20cmの水位低下を示している。しかし、さらに北部の群馬県南部の館林、板倉、西部の熊谷、栃木県南部などの観測井の記録では、経年的な水位低下の傾向は、いまのところほとんど認められていない。

なお、関東平野全体の年間

地下水利用量は、実に24.3億 $m^3$ に達する。これは、日本全体の年間利用量(139.5億 $m^3$ \*)の約17%強に当る量になっている。

**B. 平野中央部における地下水利用と地盤沈下**

関東平野の中央部、利根川中流部から古利根川沿いの中川低地帯を含む地域は、古くから地下水利用のきわめて盛んなところである。とりわけ、上水道用の地下水利用が多く、首都圏の人口増加とともに、利用地帯は北上し、利用量も増加してきた。それとともに、地盤沈下も進行し、

\* 国土庁水資源局(1979年)水資源便覧による。

1965年頃から世間の注目を引くようになった。この地域の大部分は内陸の農業地帯であり、いわゆる海岸平野のゼロメートル地帯と違って、地盤沈下による被害は東京や大阪などの臨海都市地域と異なった形で現われている。

この地域は古利根川および利根川沿いに形成された沖積低地およびその両側に広がる洪積台地によって構成されている。沖積低地の標高は2.5~3.5m程度で、水田を主とする土地利用が行われているが、工場の進出や宅地化が急激に進んでいる。洪積台地の大部分は中~低位段丘に属する平坦な段丘面で、沖積低地との比高は10m前後である。埼玉県浦和市、大宮市、群馬県館林市など市街化の進んだ地域もあるが、大部分は畑地である。

この地域の地下地質は、すでに述べたように、台地部では地表近くから成田層群が厚く分布し、沖積低地では成田層群をけずった谷を埋めて沖積層が分布している。いずれも半固結ないし未固結の粘土、シルト、砂、礫などの互層で、砂礫質の部分は良好な帯水層であり、地下水採取の対象となっている。一方、粘土、シルトなどの軟弱層は砂礫層からの揚水による水位(頭)低下によって圧密収縮を受けるため、その厚さや分布が地盤沈下の様相を規定する重要な要素になる。図2-3-15は、地盤沈下と関係の深い沖積粘土層と成田層群中の粘土層の厚さを等層厚線で示したものである。この図からわかるように、ほぼ古利根川沿いに粘土層の厚い部分が分布する。この



図2-3-15 利根中流域沖積粘土、洪積粘土等層厚線図



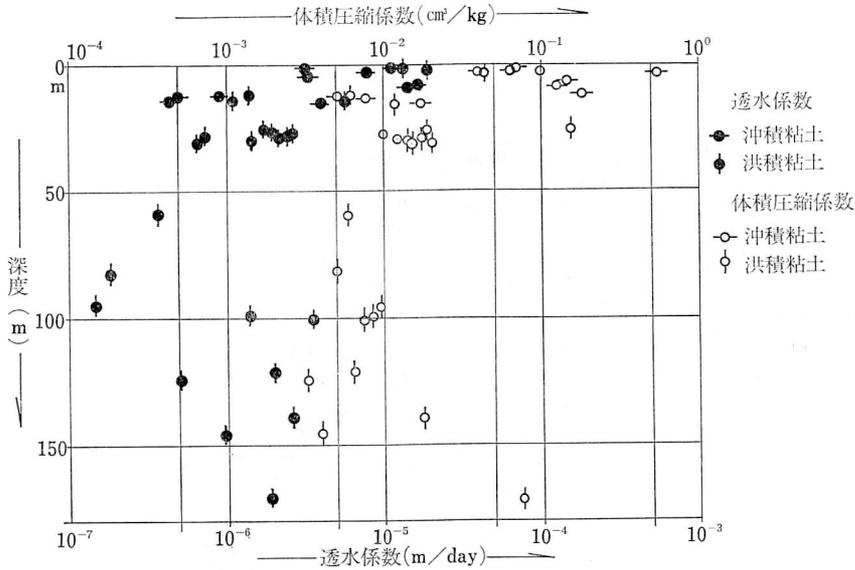


図2-3-17 体積圧縮係数および透水係数と深度の相関

層の分布とその厚さにも強く影響されることがわかる。

この地域は、京浜東北線、高崎線、東武線など交通の便に恵まれ、1965年以降の人口の増加が著しく、工場の進出も盛んであったため、地下水利用が急増した。深さ30m以上の井戸による年間揚水量は、表2-3-5に示すように、3.7億m³を越えている。

図2-3-18は年間揚水量を行政メッシュごとに算出して図示したもので、単位面積当りの揚水量分布を示している。この図からわかるように、1km²当りの年間揚水量が25万m³を越える地域は、埼玉県下では、高崎線、東武線などの沿線沿いに多くみられる。

季節別の地下水利用をみると、農業用水がかんがい期に片寄り、水道用、工業用など農業用以外の用水も夏期に利用量が比較的多くなることなど、夏期に集中し(図2-3-19)、6月、7月、8月の3カ月間で年間揚水量の約40%を揚水している。

深井戸の深度は用途によってかなり差異がある。農業用深井戸は深度30mから50mの間に

表2-3-5 利根川中流域の地下水揚水量(単位: 万m³)

地域 市町村数	埼玉県東南部	埼玉県東北部	群馬県東南部	合計
	用途	29	13	6
農業用	4,861	1,364	2,342	8,567
水道	11,437	3,556	1,009	16,002
工業	3,557	896	1,610	6,063
その他	4,988	1,735	46	6,769
用計	19,982	6,187	2,665	28,834
総計	24,843	7,551	5,007	37,401

井戸深度30m以上、埼玉県東南部は1975年、他は1979年度。

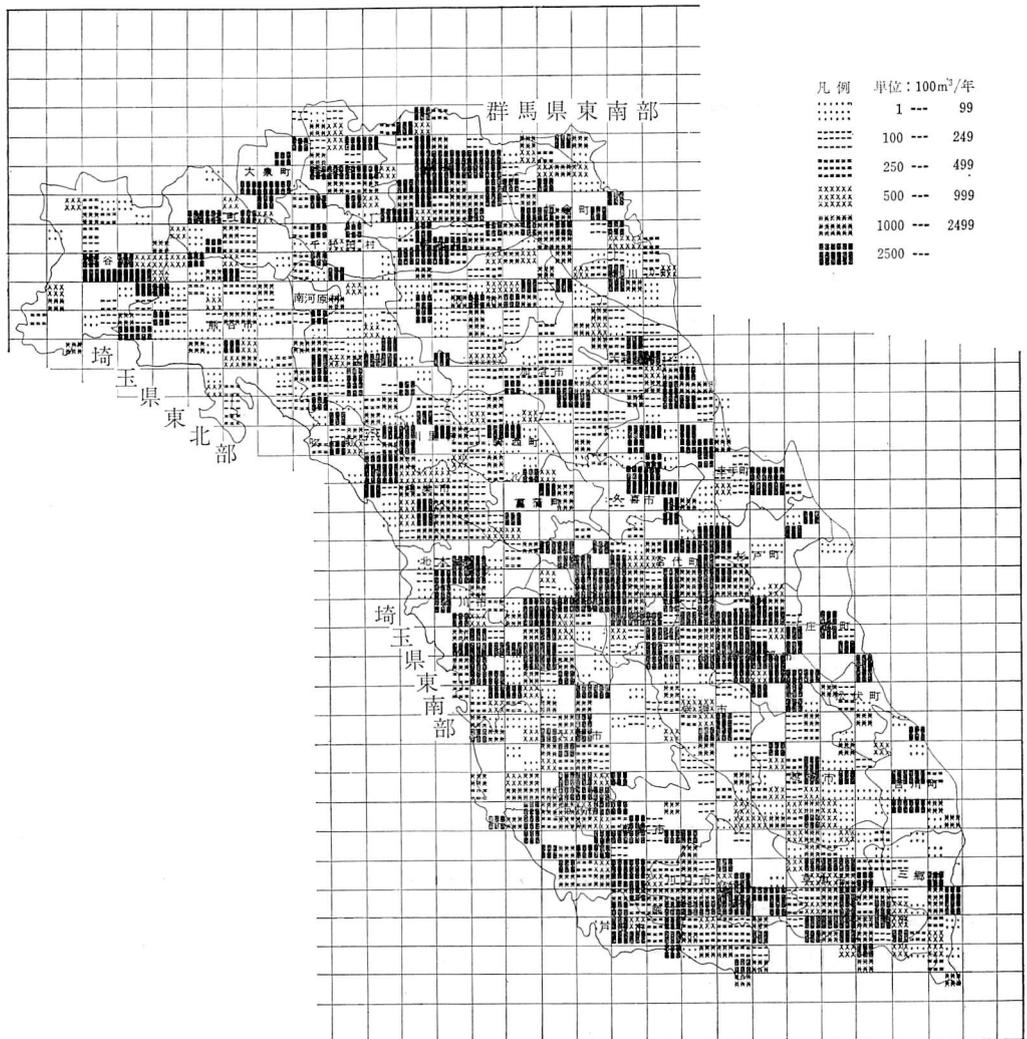


図2-3-18 行政メッシュ別揚水量(全用途)

あるものが群馬県側で68%、埼玉県側で74%に達するが、深度100mを越えるものはそれぞれ2.0%、2.8%に過ぎない(図2-3-20)。

水道用、工業用などの深井戸は、30mから50mの間にあるものは両県ともに13%に過ぎず、逆に、200mを越えるものが30~38%に達する。各用途ともに1955年以降急激に増加していることが図2-3-20から読みとれる。なお、農業用の井戸は口径も小さく、100mm未満のものが77%に達する。

深層の地下水の採水対象層はB層どまりのものが多く、深度150m以上の井戸ではC層に達しているものがかなり含まれる。

すでにふれたように、揚水量の増加が地下水位の低下をもたらし、地盤沈下現象を招くことになるが、両者の関係は地域によって差異があり、地下地質にも制約されている。次に、その辺の

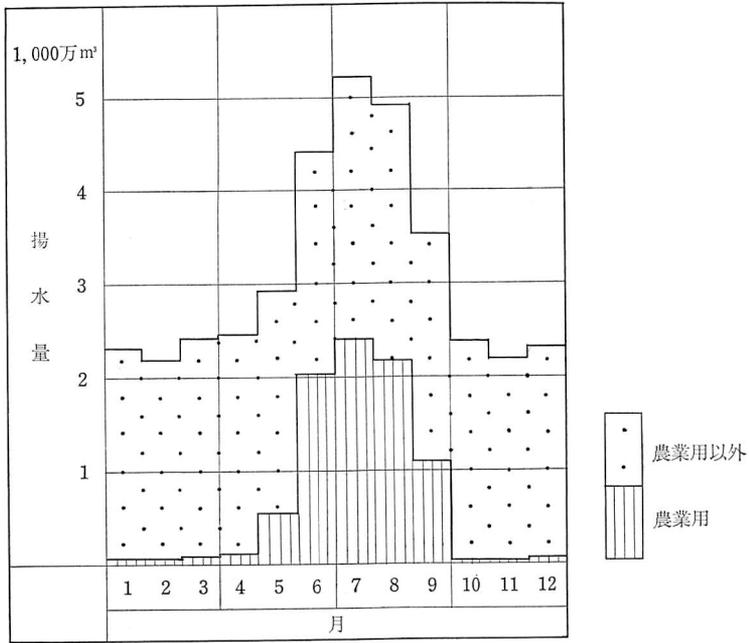


図2-3-19 月別揚水量(深度30m以上)

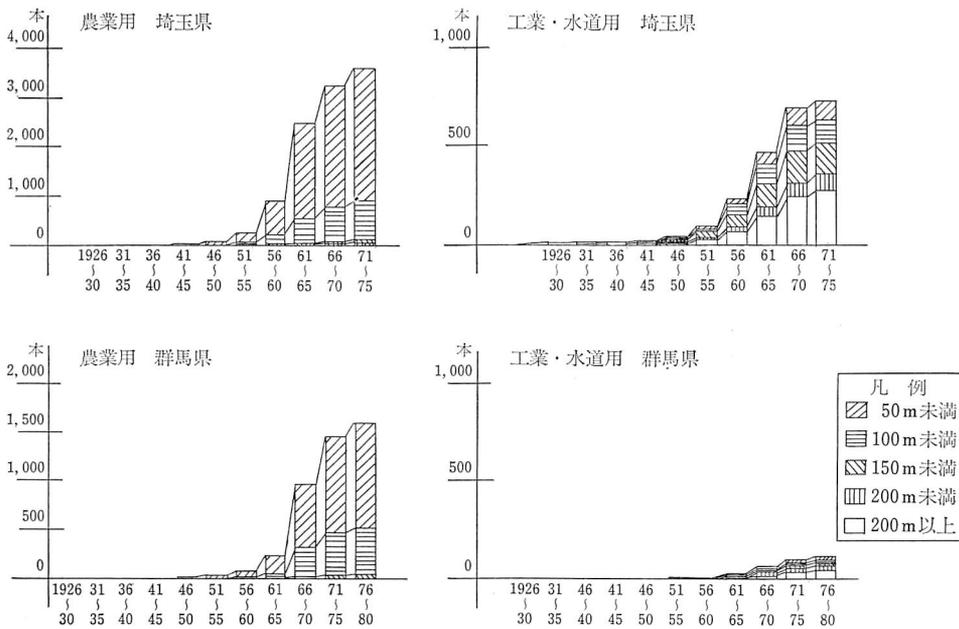


図2-3-20 深井戸の深度別設置数の推移

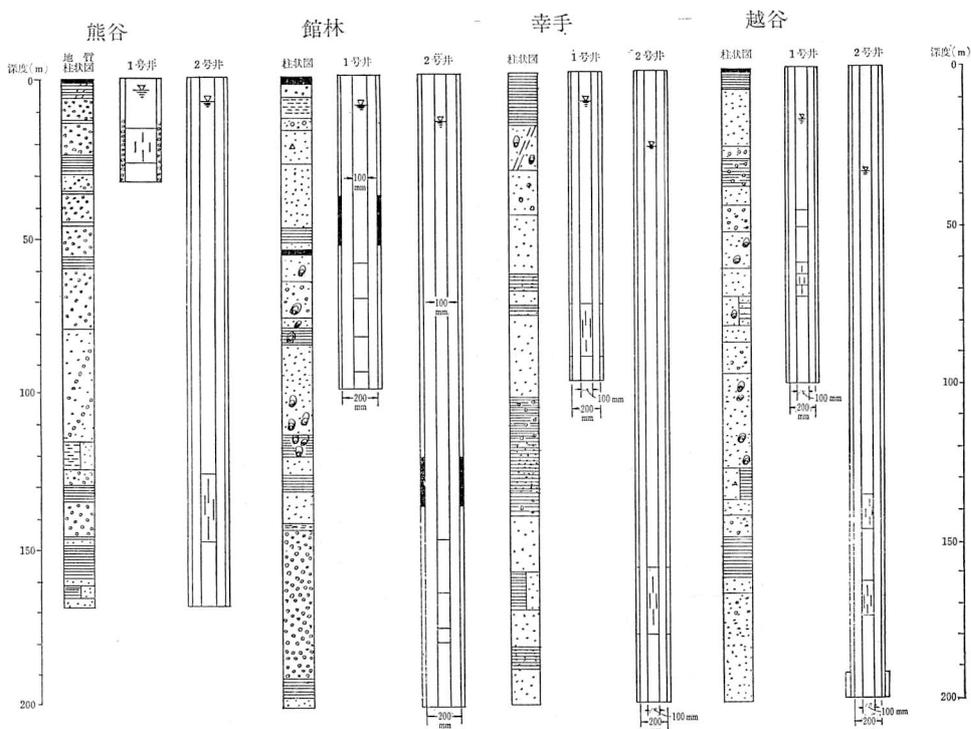


図2-3-21 地盤沈下観測井構造図

事情を、関東農政局で実施してきた5カ所の地盤沈下観測所の記録から読みとってみよう。

利根川の最も上流側で、関東地下水盆の縁辺部に近い埼玉県の熊谷地盤沈下観測所では、砂礫層が優勢で(図2-3-21)、地下水位は1年サイクルで、かんがい期の上昇と非かんがい期の低下を

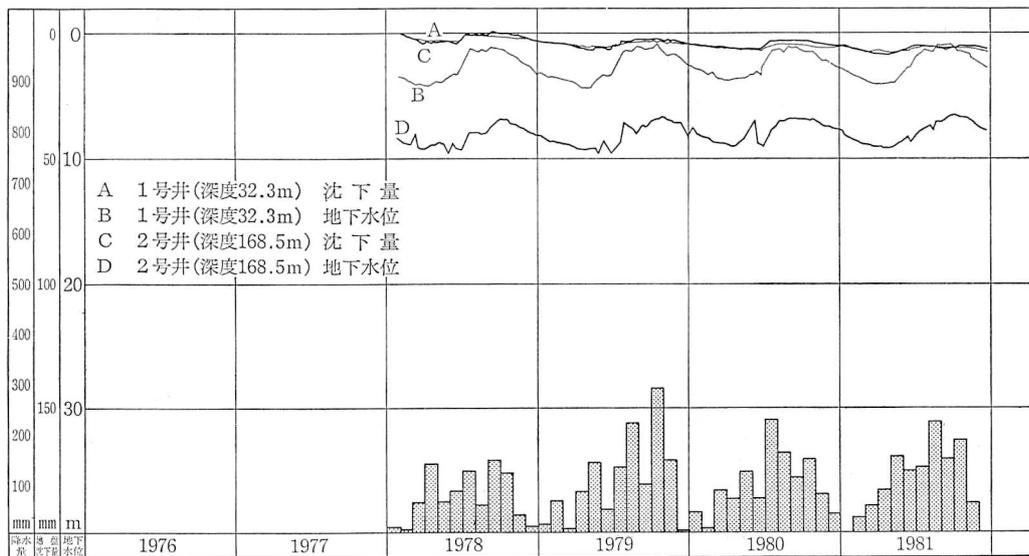


図2-3-22 地盤沈下経年変化図(熊谷地盤沈下観測井1, 2号井)

繰り返す(図2-3-22)。かんがい期の水位上昇は水田に導水されると同時に始まり、それは、スクリーンを沖積層中に設置した深度32mの1号井も、深度126m以深の洪積層中に設置した2号井もほぼ同じパターンとなっている。両スクリーン間は何枚かの粘土層を挟んでいるが、いずれも小規模なレンズ状の広がりを示すもので、地下水の垂直方向の動きは速く、降雨や水田湛水の影響が深部の帯水層にも短時間内に及ぶのであろう。水位は経年的には安定している。地下水位と地盤の変動はきわめて対応がよく、地下水位が下降すると地盤は沈下し、上昇すると地盤も上昇するという弾性的変形を示す。しかし、その量は年間1~2mm程度ときわめて小さいが、かんがいが始まって完全に元に復しない塑性変形と考えられる部分もみられる。1,2号井とも、最上位にある薄い沖積粘土が主に収縮していると思われる。地下水位は熊谷観測所で最も高く、1,2号井の水位差も5m程度と最も小さい。

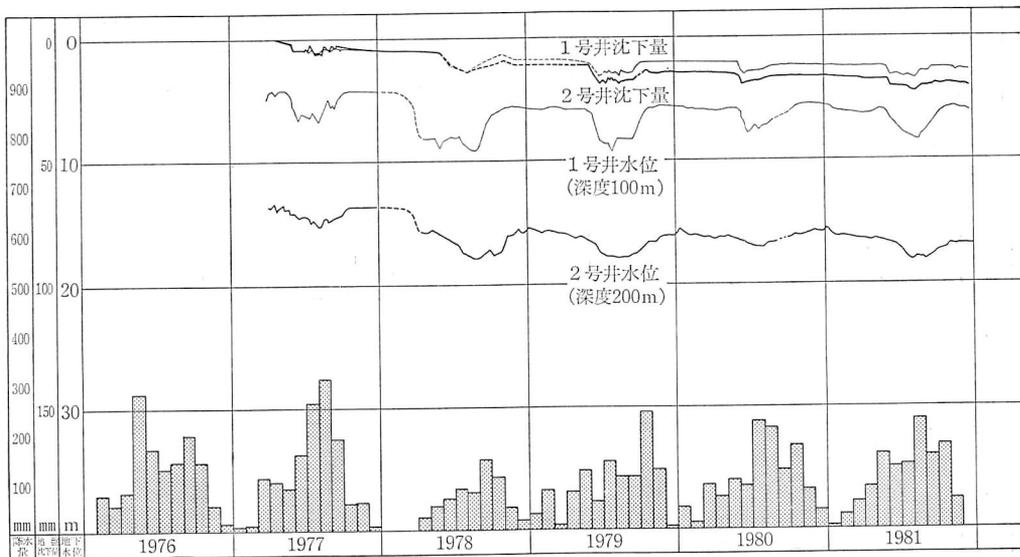


図2-3-23 地盤沈下経年変化図(熊谷地盤沈下観測所1,2号井)

群馬県の館林地盤沈下観測所は、砂礫層が優勢で砂層も粗粒であるが、下位に貝殻を含む海成粘土層が挟まれている(図2-3-21)。この観測所には、深度100mおよび200mの観測井があり、100m井はA層、200m井はB層にスクリーンが設けられている。地下水位はいずれもかんがい期には低下し、非かんがい期に上昇する。これは前述の熊谷地下水位観測所とはまったく逆の変化を示している(図2-3-23)。なお、この観測所の近傍で群馬県千代田村にある深度80mおよび150mの深井戸の水位もかんがい期低下型を示し、その低下量は6~7mに達する(図2-3-24)。

地下水位と地盤変動との対応はよく、熊谷観測所と同様に、弾性的変形を示す。しかし、水位が回復しても完全に元に戻らず、塑性変形が認められ、その量は年間2~5mm程度で、1号井よりも2号井の方が3割程度大きい。

埼玉県幸手町の幸手地盤沈下観測所では、層厚15.5mの沖積粘土層があり、下位の洪積層も粘土層の比率が増し、砂礫層はほとんどみられなくなる(図2-3-21)。この観測所では、沖積

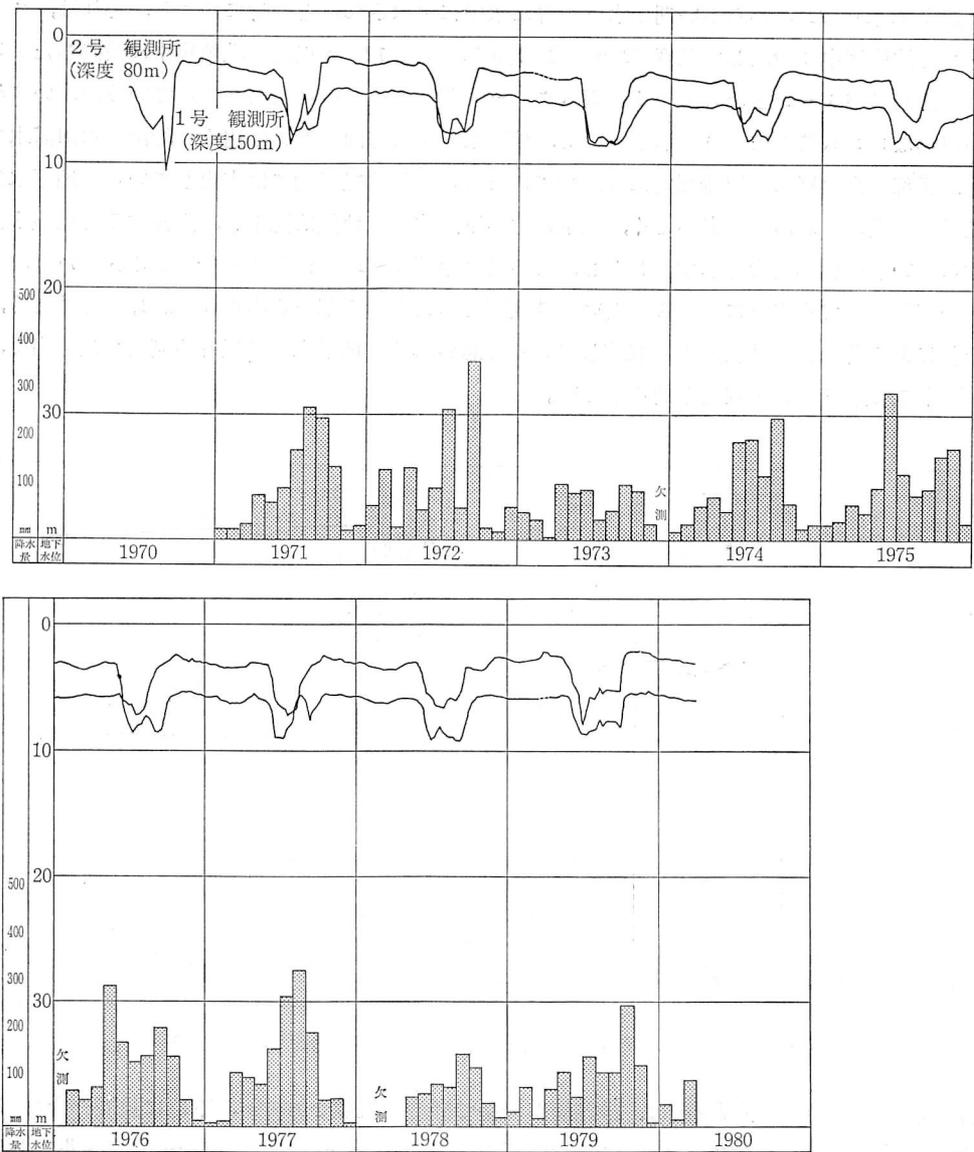


図 2-3-24 地下水位経年変化図 (千代田村邑楽地下水位観測所)

粘土層の 30 m および 20 m 等層厚線の範囲からややずれるが (図 2-3-15), 洪積粘土層の最も厚い地域に位置している。地下水位の年間変動パターンは夏期低下型であるが, その変動幅は 2 m 前後と小さい。経年的変化をみると, 1, 2 号井ともに 1978 年ごろまで年々低下していたが, 1979 年以降はほぼ安定している。これは, 埼玉県南部における水源転換の成果と考えられる。

なお, 1, 2 号井の水位差は 15 m にも達し, 明らかに異なった帯水層の水位変動を記録している。しかし, 地盤沈下は激しく, 深度 100 m の 1 号井で年間 25 mm 程度, 深度 200 m の 2 号

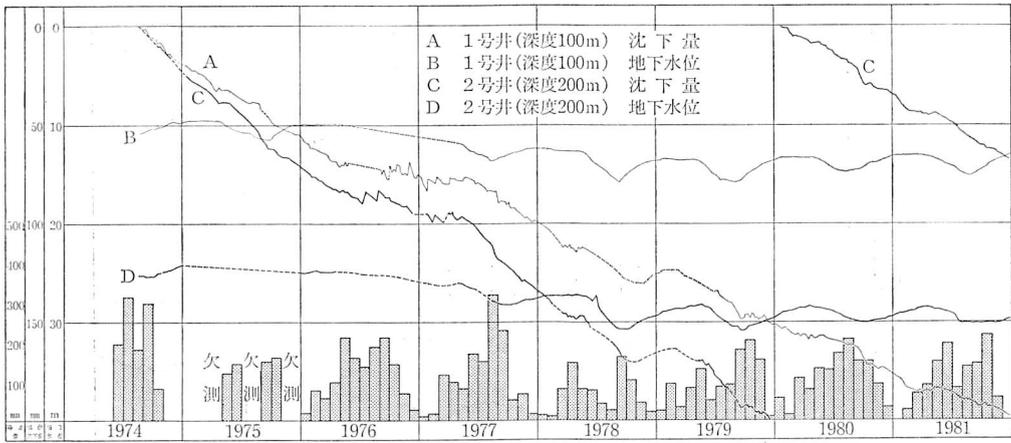


図2-3-25 地盤沈下経年変化図(幸手地盤沈下観測所 1, 2号井)

井で年間 34 mm 程度と、ほぼ一定量の沈下が観測されている(図2-3-25)。地下水位との対応をみると、1979年以降の地下水位の安定期もそれ以前の低下期もほぼ同一のペースで沈下をしており、熊谷および館林観測所のような弾性変形を示していない。地下水位はかんがい期に下降し、9月頃から回復し始めているのに、地盤沈下は9月以降も続いており、地下水位と対応していない。ただ、地盤のリバウンドが9月から11月にかけてみられるが、これは地下水位の上昇期に限られている。

東京に最も近い埼玉県越谷市の越谷地盤沈下観測所も沖積および洪積粘土層が厚い。地下水位の経年変化をみると、深度 100 m の1号井では1973年から1980年までの7年間に1 m 程度回復している。深度 200 m の2号井ではその間に9 m 程度の回復が認められている(図2-3-26)。その結果、1, 2号井の水位差が、当初 18 m あったものが、1980年には9 m まで縮まっている。地盤沈下は1977年まで進行し、4年余りの期間に1号井で27 mm、2号井で45 mm 程度の累積沈下が認められたが、その後は安定している。しかし、水位の回復に対応した地盤の上昇は経年変化図からは読みとれない。この地域は、かつて埼玉県下で最も地盤沈下の激しかったところで、その累積沈下量が0.7~1 m 程度に達していた。しかし、地盤沈下対策事業の1つとして埼玉県が実施した広域第1水道による配水範囲の拡大とともに、地下水位は上昇し、地盤沈下量は減少してきている。越谷市にこの水道が入ってきたのは1974年であり、深井戸から地表水へ順次切りかわりつつある。同市の地盤沈下も、この年を最後に、100 mm 等沈下量線が姿を消し、1979年には60 mm の等沈下量線もみられなくなった(図2-3-27)。

以上、各観測所の諸観測成果からわかるように、地下水位の変化と地盤沈下の進行状況は地域によって著しく異なり、地下水の採取態様(対象の帯水層、採取時期、揚水量、揚水水位)とともに、地下地質と密接に関連している。とりわけ、粘土、砂、砂礫などの累重状態とその堆積年代に注目する必要がある。地下水位の変化と地盤沈下の相関は複雑で、モデル化の最も困難な分野に属し、日々の観測とデータの整理、地下水利用量の把握など地味な努力が、地盤沈下の現状を分析し、将来の予測を行う上でいまのところ最も有効であると考えられる。

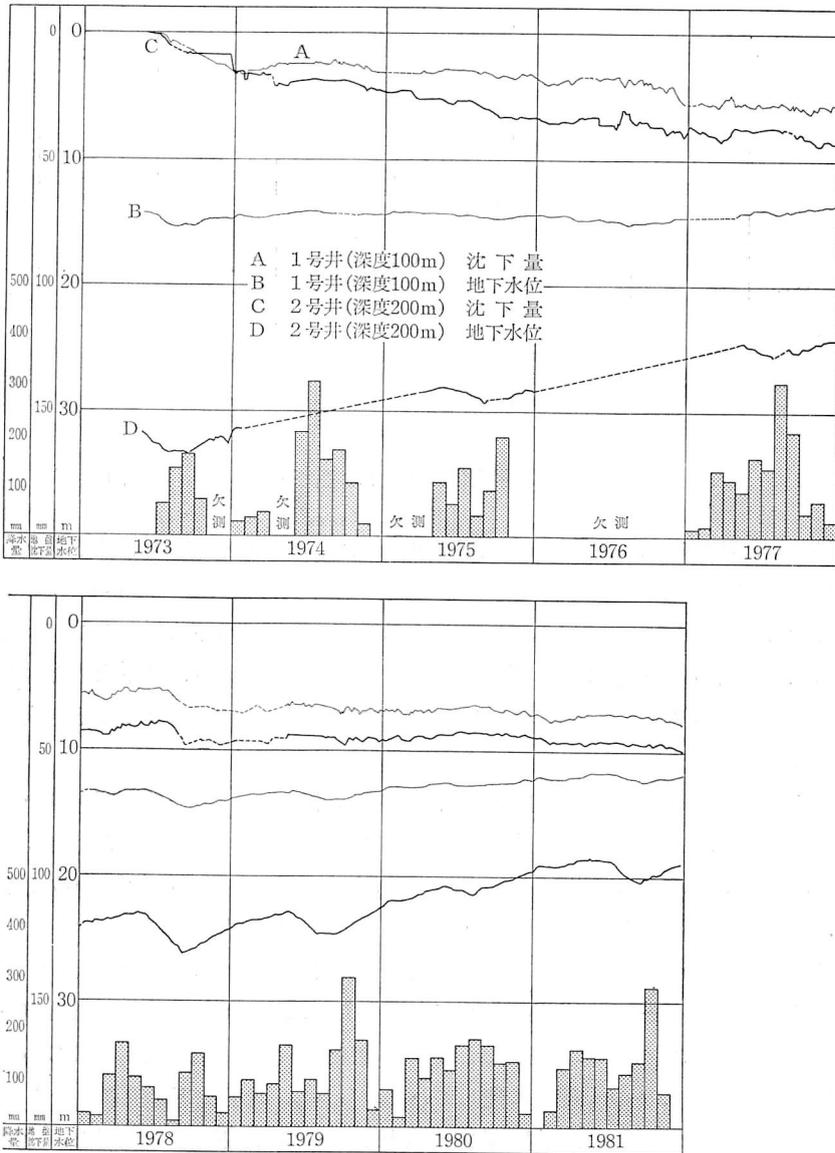


図2-3-26 地盤沈下経年変化図(越谷地盤沈下観測所 1, 2号井)

1965年以降、関東平野における地盤沈下の範囲は次第に内陸部に及ぶようになってきたが、たとえば、年間 $-60\text{ mm}$ の等沈下量線をみると、1971および72年ごろには埼玉県春日部市以南であったものが、1973年には約 $10\text{ km}$ 北方の幸手町北部に達し、1974年にはさらに約 $5\text{ km}$ 北方の加須市以北にまで伸びてきている。

これらの地域の地盤沈下被害は、地盤標高が高く、ゼロメートル地帯の出現するおそれがないため、臨海部にみられるような水害問題は生じない。しかし、その多くは農村地帯であることから、別のタイプの被害が目立つようになっている(表2-3-6)。たとえば、農地や排水路は面的



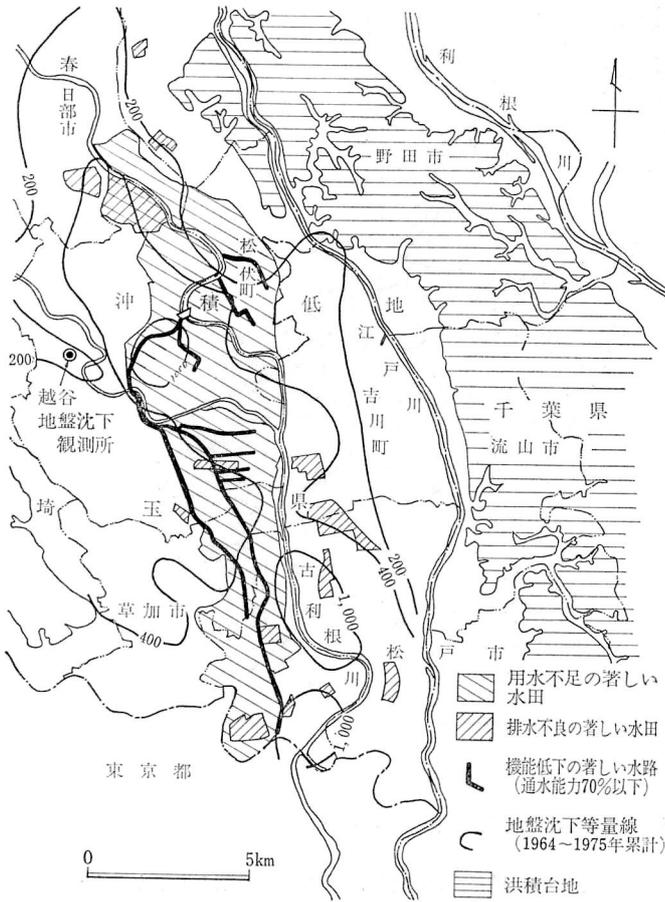


図 2-3-28 地盤沈下による農業被害 (埼玉県南部)

まい、下流に水が届かず、用水不足になる。そこで、その部分の水路を嵩上げすると、水路にかけられた橋りょうが流水を阻害したり、田面との標高差が大きくなって、水路の盛土からパイピングを起し、水田へ漏水するようになる。取水堰のある部分が沈下すると、用水路に計画どおり水が入らなくなる。そこで、取水堰を嵩上げしようとしても、沈下域近傍の農地や住宅が水没するような状態になるために実行できないなど、一般には知られていない深刻な問題が多くなる(表 2-3-6)。

地域内でこのような被害は、草加市東部、三郷市、越谷市、吉川町、松伏町、春日部市南部など埼玉県南部で多く認められ(図 2-3-28)、用排水路をはじめとする農業用施設の応急対策に要した費用は 3 億円を越え、恒

急的対策費として 71.3 億円を必要としている。このような被害地域は、年間 20 mm 以上の沈下が 10 年以上継続した沖積低地の分布とほぼ一致している。洪積台地においては、同程度の累積沈下量を記録しているところでも、農業被害は顕著でない。台地上には、井堰や長大な用排水路が存在せず、排水も台地上では問題化しないためと考えられる。

埼玉県北東部および群馬県南東部の沖積地帯においては、地盤沈下による農業被害はまだ顕在化していない。図 2-3-29 に示す地域を対象として、1976 年および 1979 年の 2 度にわたって、336 カ所の農業用施設および農地を対象とした地盤沈下被害の有無を調査したが、構造物基礎の抜け上り、石積みの乱れ、コンクリート壁のひび割れなどが 15 件認められている程度で、埼玉県南部でみられたような営農面で支障をきたすような著しい被害は報告されていない。

橋りょう、ビルなどの構造物の抜け上りはこれらの地域でもかなり多い。しかし、これも沖積低地に多く、10 cm 以上の抜け上り量を示す構造物も多数認められる。洪積台地上では、まれに 2~3 cm の抜け上りが観察される程度である。

これらの調査から、内陸部において地盤沈下の被害が今後顕在化するおそれのある地域を予測する場合、沖積粘土層の厚さに注目する必要がある。

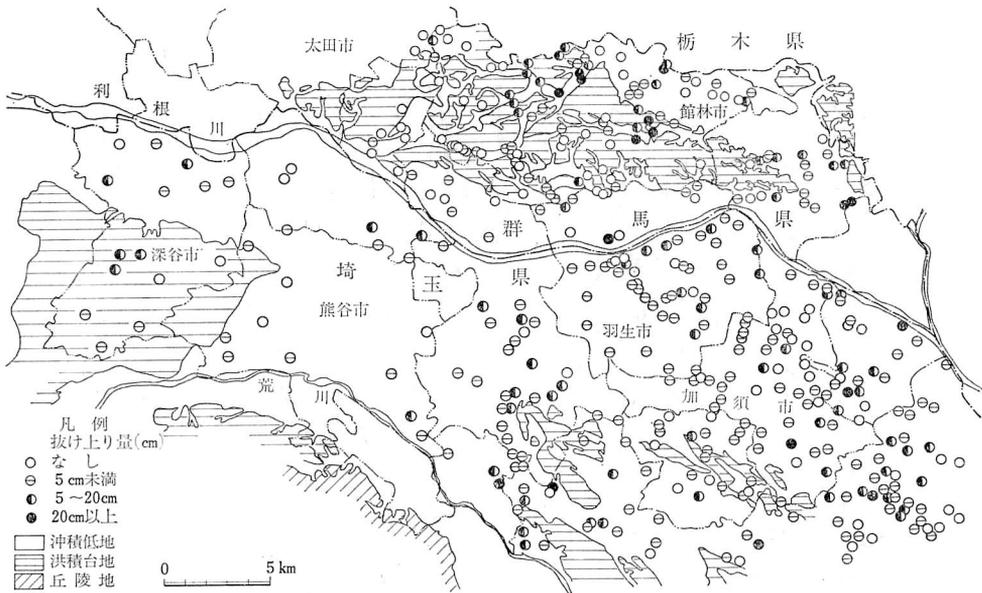


図2-3-29 構造物の抜け上り被害

**C. 栃木県南部地域における地下水利用と地下水位低下**

この地域の水文地質の特徴は、すでに述べたように、関東平野の北西縁部に当り、基盤岩からなる山地に近いため、扇状地堆積物の発達が著しいところである。とくに、鬼怒川、思川沿いに発達する沖積の扇状地堆積物はほとんど砂礫質の粗粒堆積物からなり、浅層の不圧地下水の良好な帯水層となっている(図2-3-30, 31)。

この地域は、農業用の地下水利用が多いことおよび比較的浅い井戸が多いことが特色である(表2-3-7)。農業に供されている地下水は栃木県南部で年間4.1億 $m^3$ に達し、その2/3は深度30m以内の浅井戸によっている。残りの1/3は深井戸(2,220眼)によって揚水され、その64%は深度50m以内の井戸である。したがって、農業用地下水の採水対象層は沖積層および洪積層のA層あるいはその相当層が大部分となっている。

栃木県南部地域における深井戸の用途別の地下水利用をみると、農業用が年間7,172万 $m^3$ で全体の65%を占め、工業用が26%でこれにつき、水道用は6%に過ぎない。農業用以外の深井戸の深度は100~150mのものが大部分であり、洪積層のA、B層およびその相当層が主な採水対象層となっている。C層に達する井戸も多い。

季節別の地下水利用をみると、農業用の大部分(96%)が水田用であるため、夏期に集中する(表2-3-8)。また、その揚水量約2.6億 $m^3$ のうち、2.5億 $m^3$ はかんがい期間中に揚水されており、この地域の面積でこの数値を割ると、約800mmに達する。

この3カ月余りの間に、農業用だけで年間降水量の40%近い揚水が可能である理由は、水田かんがい水そのものが地下水の最大の涵養源となっているためである。なお、この地域における30カ所の実測によれば、平均の日減水深は沖積低地で26mm、台地上で24mmであり、蒸発散量を5mmとすれば、20mm近くは地下に還元され、再び地下水になっていると考えられ

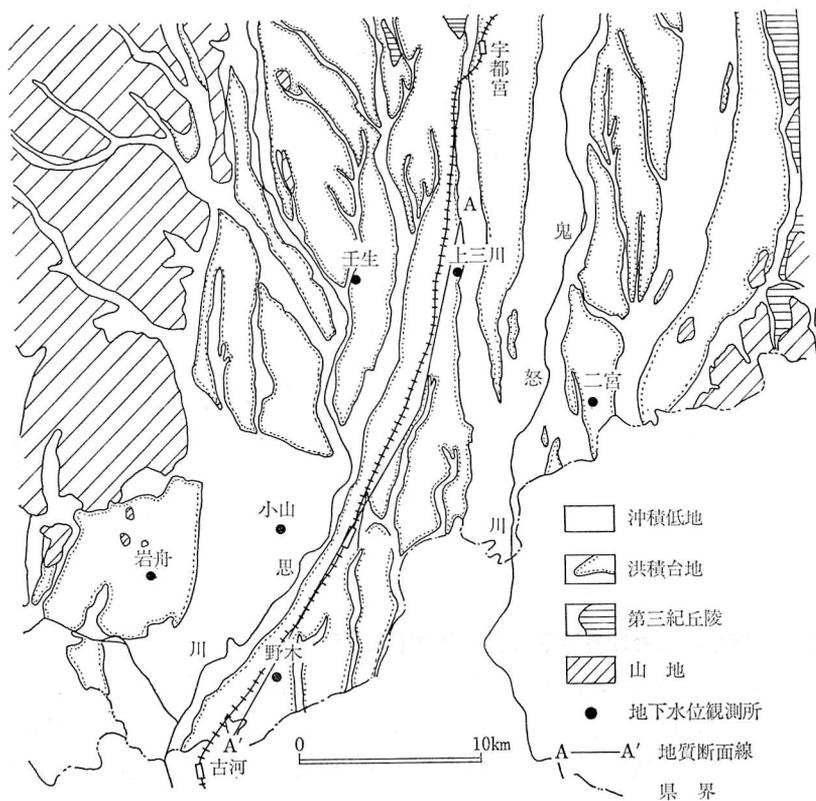


図 2-3-30 栃木県南部の水文地質

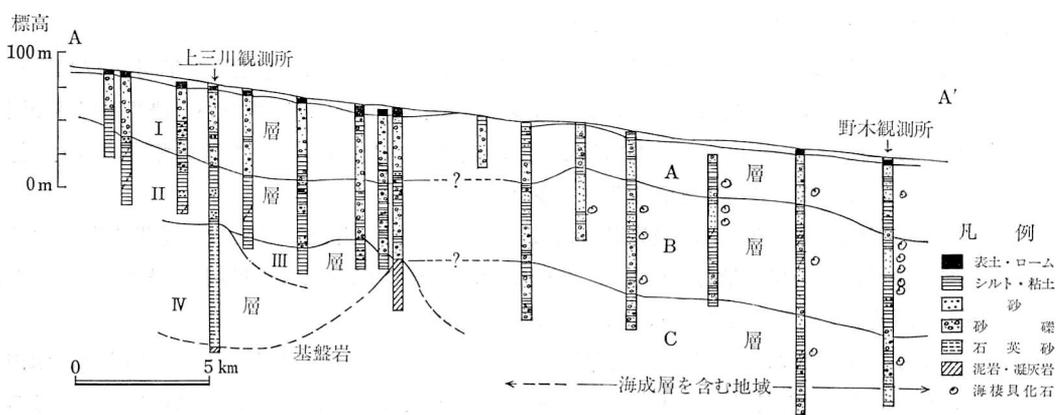


図 2-3-31 地質推定断面図

表 2-3-7 栃木県南部の地下水利用 (単位: 万 m<sup>3</sup>)

地域名	該当市町村	浅井戸 (深度 30m 以上)						合計
		農業用	農業用	工業用	水道用	その他	計	
栃木南部地域	栃木市, 小山市, 野木町 大平町, 藤岡町, 岩舟町	18,623	7,172	2,909	664	282	11,027	29,650
鬼怒川 中流地域	真岡市, 二宮町, 上三川 町, 南河内町, 石橋町, 国分寺町, 壬生町	8,733	6,217	*	*	*	*	—
合計		27,356	13,389	—	—	—	—	—

(注) 1. \*は未調査を示す。農業用以外の浅井戸も未調査。  
 2. 栃木南部地区農業用浅井戸および鬼怒川中流地区農業用井戸は関東農政局 (1978年) による。  
 その他は関東農政局 (1980年) による。

表 2-3-8 栃木南部地域の月別揚水量 (単位: 万 m<sup>3</sup>)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	計
農業用	5.5	5.5	5.5	138	930	1,737	1,932	1,679	643	17.5	5.5	5.5	7,113
農業外用	321	321	321	322	323	333	339	339	329	322	322	322	3,912
計	327	327	327	469	1,253	2,069	2,270	2,018	972	340	328	238	11,025

関東農政局 (1980年) による。

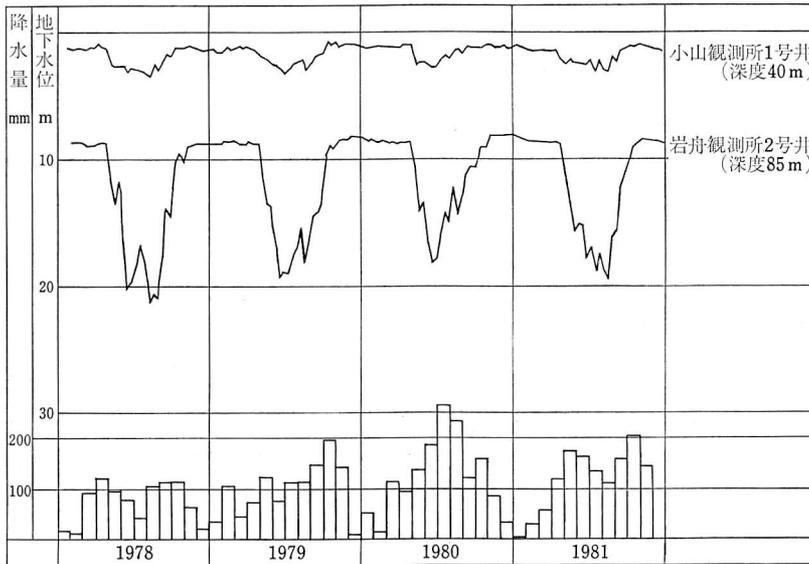


図 2-3-32 地下水位経年変化図

る<sup>(20)</sup>。

小山1号観測井は、広大な沖積低地の中央部に位置し、地表水利用の比較的多い水田地帯にある。この井戸の地下水位観測記録によると、かんがい期に地下水位は低下し、9月から回復に向かう(図2-3-32)。ただし、地下水位の低下量は3mを越えず、回復に要する期間も1カ月程度である。

この観測井は、深さ40m以浅にあるA層およびB層の砂礫層中にスクリーンを設け、被圧地下水頭を測定している。上位に分布する扇状地堆積物とこれらの洪積砂礫層との間には、洪積粘土層が介在し、不圧地下水の静水圧の影響を直接受けなくなっている(表2-3-9)。

表2-3-9 地下水位観測井の概要

観測所名	野木			岩舟		小山	二宮		上三川		壬生
井戸番号	1	2	3	1	2	1	1	2	1	2	1
自然水位 m	13.5	14.9	13.7	6.9	8.4	1.2	4.6	8.8	13.1	12.6	6.2
揚水水位 m	18.9	21.9	15.4	10.7	17.1	7.4	8.9	22.9	26.1	26.7	9.4
揚水可能量 m <sup>3</sup> /日	1,660	2,750	970	1,440	1,980	1,660	2,274	871	1,663	766	1,054
比湧出量 m <sup>3</sup> /日/m	306	394	577	376	228	296	128	54	525	62	328
透水係数 10 <sup>-4</sup> m/s	3.4	11.1	17.4	12.7	1.69	6.5	1.65	0.46	5.9	0.35	8.2
井戸深度											
スクリーン位置											
地層名											
(m)											

岩舟地下水位観測所は洪積台地上にあり、地下水を利用している水田地帯に位置する。この観測所には、B層上部を対象とする深度40mの1号井と、B層下部を対象とする深度85mの2号井が設置されている。かんがい期に入ると、1、2号井ともに地下水位は急激に低下し始め、9月に入って回復に向かう(図2-3-32)。地下水位低下量は1号井で最大11m、2号井で13mに達していて、小山1号井より著しく大きい。地下水位の回復に要する期間は約1.5カ月で、小山1号井より長い、完全に元の水位にもどる。

野木地下水位観測所も洪積台地上にある。周囲の水田は、地下水利用によるもののほか一部に地表水を導水している水田も存在する。小山工業団地に近く、東北本線に沿っていて、近辺に工業用、水道用など農業用以外の井戸が散在する。ここでは3眼の観測井があり、深度85mの1号井はA層およびB層上部、135mの2号井はB層の基底砂礫層、185mの3号井はC層を、それぞれ観測対象としている。いずれも、かんがい期に入ると水位が低下し始め、9月から回復に向かう(図2-3-33)。最大水位低下量は、1号井で7~8m、2号井で9m、3号井で6~7mであって、2号井が最も大きく、最も深い3号井が最も小さい。地下水位の回復に要する期間は長く、4カ月以上を要しており、2号井がとくに遅い。

二宮地下水位観測所も台地上の水田地帯にあって、かんがい期に地下水位が低下するが、低下量は1mあまりで、9月に入ると10日間位で回復する。

以上の各観測所地下水の位観測記録に共通することは、かんがい期に地下水位が低下するが、

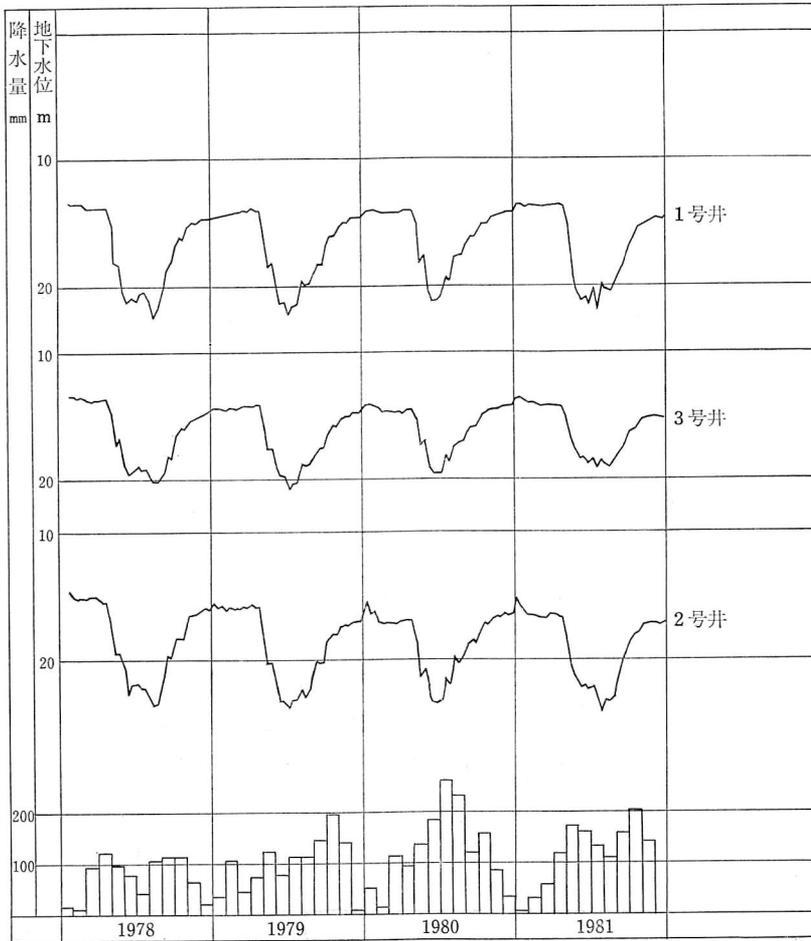


図2-3-33 野木観測所地下水位経年変化図

経年的にみると安定していることである。水田地帯の真中であって、井戸が少なく、帯水層も浅い小山1号井は最も安定していて、年中揚水している水道、工業用の井戸に取巻かれている野木2号井が最も悪条件下にある。

かんがい初期の野木観測所の地下水位記録をみると、1号井は下降を続けていて、1日に15cm程度低下している(図2-3-34)。3号井は、近辺の井戸の揚水に伴う一時的な影響を受けつつ、1号井と同様に下降パターンを描く。2号井は種々な影響を受けていて、昼間に下降し、夜に回復する1日サイクルの変動がまず目につく。これは昼間に揚水する多数の工場などの井戸の影響が重なったもので、休日には消えている。昼夜ともに存在する1~2時間サイクルの変動は、終日操業の工場の井戸の影響であろう。朝夕に現われる小刻みな変動は、水道用井戸の影響であろうと考えられる。2号井は、このように複雑な変動を繰り返しながら、1, 3号井と同様に、全体として下降傾向にある。

この井戸のより長期間の変動は、毎日の一定時間の水位をグラフ化することにより知ることができる(図2-3-35)。この図では、1日のうちで最も水位の上昇する午前6時の水位を目盛ったも

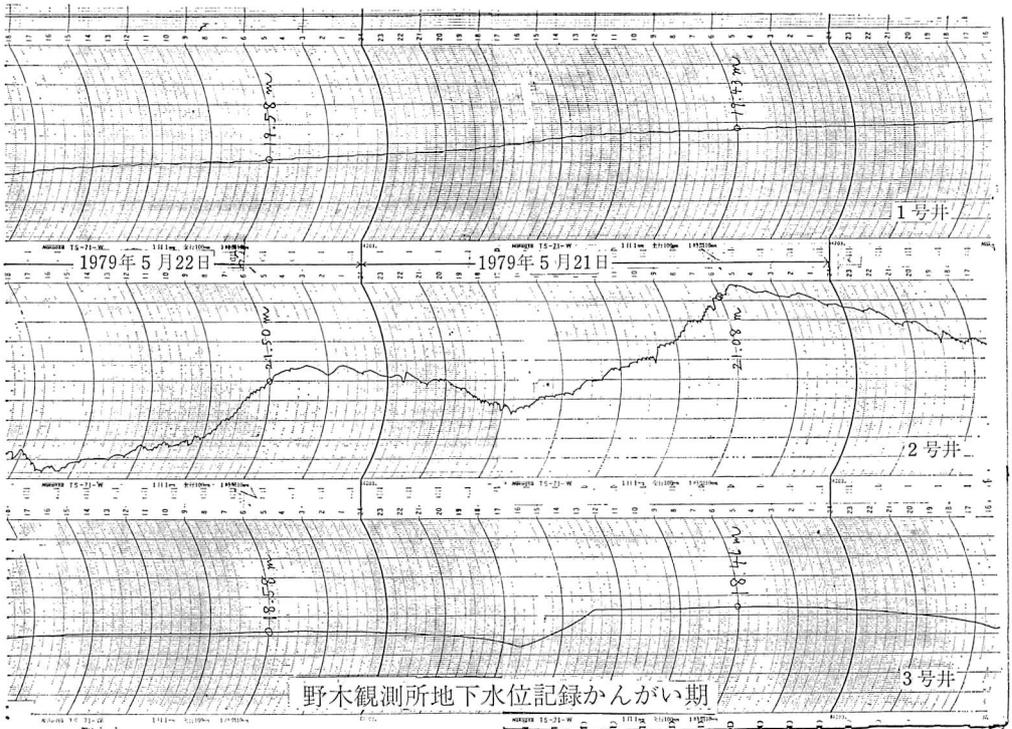


図2-3-34 野木観測所地下水位記録(かんがい期)

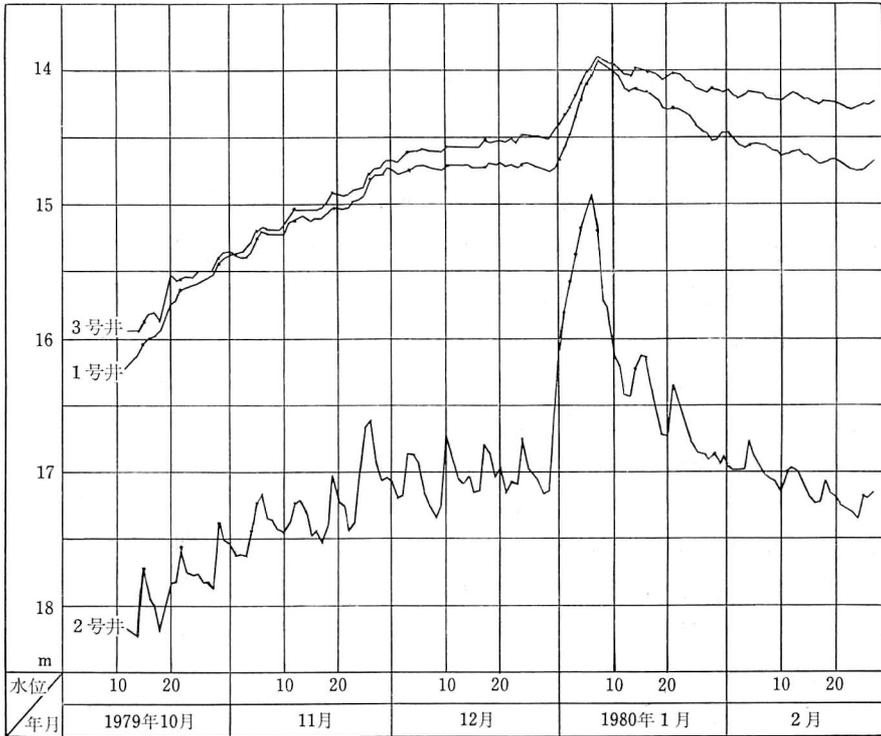


図2-3-35 野木観測所地下水位記録(非かんがい期)

ので、1週間サイクルの変動が認められ、2号井はとくに顕著である。このサイクルのピークは月曜日の早朝にあって、日曜日に休む工場の多いことによるためと考えられる。このサイクルは正月休みに乱れて、この期間には急激な上昇が続き、2号井がとくに顕著である。これは、工場の正月休みによる水位回復を示すもので、揚水を停止すれば、地下水位が急速に回復することを示している。

(磯崎義正・菅原利夫)

### 参 考 文 献

- (1) 三梨 昂ほか (1979): 特殊地域図 (20), 東京湾とその周辺地域の地質図 (1:10,000)・同説明書, 地質調査所
- (2) 石和田靖章 (1972): 南関東水溶型ガス田の開発, 地盤と地下水に関する公害, pp. 47~54, 地質学会第79年学術大会討論会資料
- (3) 阿久津純 (1955): 宇都宮周辺の関東火山灰層と河岸段丘, 宇都宮大学研究論集, 4, 32~46
- (4) 小池 清 (1957): 南関東の地質構造発達史, 地球科学, 34号, 1~8
- (5) 成瀬 洋 (1959): 古東京湾の形成について —— 南関東上部新生界の地史学的研究 (I), 第四紀研究, 1巻, 143~155
- (6) K. KAWAI (1965): Natural Gas Geology of the Southern Kanto Region, Japan, Contr. from the Government of Japan to Economic Commission of Asia and the Far East, Third Petroleum Symposium Tokyo.
- (7) 第四紀地殻変動グループ (1969)
- (8) 中川久夫 (1960): 地蔵堂層および藪層, 地質雑, 66巻, 305~310
- (9) 青木直昭・馬場勝良・堀口 興 (1971): 房総・木更津~大谷地域の更新統, 地質雑, Vol. 77, 741~748
- (10) 菊地隆男 (1974): 関東地方の第四系地殻変動の性格, 関東地方の地震と地殻変動, ラテイス刊, 129~146
- (11) 成瀬 洋・新堀友行・羽鳥謙三 (1968): 関東平野の地下地質, 資源研彙報, 70号, 77~85
- (12) 新藤静夫 (1968): 武蔵野台地の水文地質, 地学雑誌, Vol. 77, No. 4
- (13) 新藤静夫 (1970): 武蔵野台地の地下地質, 地学雑誌, Vol. 78, No. 7
- (14) 関東農政局計画部 (1969): 地盤沈下調査, 利根中流地区調査報告書 (その2) 地盤沈下観測井の概要
- (15) —— (1970): 地盤沈下調査, 利根中流地区調査報告書 (その3) 地下水利用および地盤沈下の実態 — 関東平野内陸部の地盤沈下 —
- (16) —— (1970): 地盤沈下調査, 利根中流地区調査報告書 (その4) 地盤沈下の将来予測
- (17) 栃木県 (1975): 栃木県水理地質書
- (18) 阿久津純 (1965): 栃木県南部の地下地質, 宇都宮大学学芸部「研究論集」第15号, 第2部
- (19) 関東農政局計画部 (1979): 地下水位長期観測調査 栃木南部地区報告書 (その1)
- (20) —— (1980): 地下水位長期観測調査 栃木南部地区報告書 (その2)
- (21) —— (1981): 地下水位長期観測調査 鬼怒川中流地区報告書 (その1)
- (22) —— (1978): 農業用地下水利用実態調査報告書