

④地下水盆のモニタリング

—関東地下水盆を中心に—

楡井 地下水盆のモニタリングというのは、ひと口でいいますと、地下水の揚水量、地下水位、地盤沈下量、地下水の水質などを観測・監視しながら、大地の変動や地下水の動きを把握し、地下水盆の健康管理の台帳をつくっていくことです。ただ南関東の場合には、まず何よりも、当時の緊急課題であった地盤沈下の阻止ということでモニタリングが発効しております。ここでは、地盤沈下のモニタリングについて私が述べ、そのあと古野さんから、関東地下水盆のモニタリングの経過と現状について、お話してもらいます。

地盤沈下のモニタリング

—地層収縮における沖積層と洪積層の違い—

図4・1は、江戸川デルタの先端、東京の方で地下水を揚水すれば、その影響で地盤沈下が生じってしまうという、浦安市の浦安中学校の校内にある地盤沈下観測井です。図に示すように、 U_1 、 U_2 、 U_3 という3本の観測井が、それぞれ左の地質柱状図のような位置に—— U_3 は深さ220mで管底は下総層群上部下位に、 U_2 は深さ150mで管底は下総層群上部中位に、そして U_1 は深さ60mで管底は下総層群上部最上位(沖積層基底直下)に設置されています。同時に、各観測井のストレナは、それぞれの深度の各主帯水層におかれ、地下水位とともに、 U_1 は沖積層の収縮量を、 U_2 ・ U_3 は洪積層(下総層群上部)の収縮量を測っているわけです。この3本の観測井による観測結果が図4・2です。この図には、1966年～1977年における U_1 ・ U_2 ・ U_3 の地下水の水位の変化と、1968年以降の地層の収縮量とを示してありますが、このうち、まず U_2 ・ U_3 の地下水位を見てみます。そうしますと、両者とも、観測が始められた1966年頃から1970年頃までは、ずっと水位が下がっていきます。そして、この時期は U_3 よりも U_2 の方が水位が低い。これは、下総層群上部中位の被圧帯水層の水が大量に揚水されていることを示しているわけです。それが、1970年の終り頃からは低下傾向がストップし、1971年までは横ばいの状態が続き、 U_2 と U_3 の水位も同じレベルになっています。

こうして1972年に入ると水位が上昇し始めるわけですが、これは、地下水の揚水規制が始まっ

た結果です。さらに、1977年頃になると、水位が一段と上がってきますが、これはもちろんそれまでの規制効果と同時に、最初に高橋さんが言われましたように、オイルショックによる経済効果が、こうした形で反映しているのだろーと思います。このようにして水位がずっと回復してくるわけですが、水位が上昇に転じてからは、 U_2 の水位の方が U_3 よりも高くなっている。そういうこともわかっております。

では、沖積層と洪積層の間の付近の水位が記録されている U_1 はどうかといいますと、これも同じようにゆるやかに湾曲した水位変化を示しますが、この方は、2つの深い方の観測井に比べて、常にその水位が高い、ということは、上から下に水が流れ込んでいっている、つまり上層の不圧水から下の被圧帯水層の方に向けて水が流れているということです。

次に、赤色で示されている地層の収縮量をみますと、これは1968年頃からの観測ですが、 U_1 、 U_2 、 U_3 の3本の線が全部右下がりです。ずっと収縮が続いており、1977年時点で、約40cmぐらい収縮しています。しかし、3本の観測井の収縮量はほとんど同じなんです。それで下の方に、 $U_2 - U_3$ の収縮量、 $U_2 - U_1$ の収縮量という洪積層の地層の変動量を示したわけですが、これはごらんのように、1968年以降、その変化はごくわずかです。ですから1968年以降の40cmに及ぶ地層の収縮は、おもに、沖積層と洪積層の間の不整合を境にしてその上の部分で、いわゆる沖積層の部分で生じていることがわかります。このように、地盤沈下が非常に恐ろしいのは、洪積層の問題ではなくて、沖積層の問題ですよということを、この図は教えてくれるわけです。この点を地下水位との関係でさらに詳しくみたのが、図4・3と図4・4です。両図とも、横軸が地下水位の変動、縦軸が地層の収縮量です。図4・3は U_1 観測井で、0～60mまでの地層の収縮量と、地下33.65mからの45.96m(ストレナ深度)間の帯水層の水位と変化との関係を見たものです。そうしますと、1968年～1970年頃までは、水位も下がりますが、地層もずっと収縮する。そして、1970年～1973年には、地下水の規制によって水位はコンスタントになるのですが、地層は相変わらずどんどん収縮していく。1973年～77年頃になると、水位はどんどん回復してくるんですが、帯水層の水位が回復しても沖積層の粘土層の水圧が低下しているために、

地層の収縮はずっと続いている、つまり地盤沈下が進行しているということです。

では、 U_2 の観測井はどうかといいますと、図4・4の上の図がそれです。この場合、地層の収縮量は60～150m間の地層の収縮量で、 U_2 観測井の収縮量から U_1 観測井の収縮量を引いた値になるわけですが、この縦軸の単位はミリメートルです(0～10mm)。一方、水位の方は、113.29m～129.89m(ストレナ深度)間の帯水層の水位変化です。そうしますと、1968年～70年頃まで水位は20mから25.5mぐらいい下がりますが、その間の地層の収縮量は約10mm。その後、1977年までに水位は約9.5m回復し、その間に地層は膨潤します。

U_3 観測井でもこれと同じような結果が出ています。図4・4の下の方の図がそれで、この場合には、地層の方は深度150～220m間の変化、水位の方は178.50m～195.05m(ストレナ深度)間の帯水層の水位変化です。すなわち、1968年～77年までに水位は約6.5m低下しますが、この間に地層はほとんど収縮しない。70年～77年に水位は約8.4m回復しますが、この間に地層は約6mm膨潤しています。この膨潤は、1968年以前の収縮の反動によるのでしょうか。いずれにせよ、地層の変動幅は約10mm程度ときわめてわずかです。

要するに、洪積層の方は、これだけの水位を変動させても地層はほとんど収縮しない、ところが沖積層の方は地層がどんどん収縮するし、それは元に戻らない。そういうことが、3本の観測井を深さを変えて設置することによりわかってきたわけです。

ですから、地盤沈下をさせないで地下水を有効に使う場合には、こうした観測井の垂直方向での適正配置ということが非常に重要になってきます。つまり、1つは、沖積層のベースからちょっと下付近に置いて、地下水位の変動を見る。もう1つは、揚水する主帯水層の付近に観測井を置く。もう1つは、地層の堆積盆のベース、不整合付近に観測井を置く。そういう3本の観測井を置くことによって、主帯水層での水を使いながら水位を監視する。そして、沖積層直下の観測井で、季節的な変動とは別の異常な水位変化がでてくれば、これはもう黄色信号だから、主帯水層からの揚水を抑制しなさい、というようなことになると思います。

このように、地盤沈下は多くの場合、沖積層の

問題ですから、観測井を置く平面的な位置としては、揚水量や井戸配置を勘案しながら、沖積層の一番厚いところに置いた方がよいわけです。図4・5は、同じ浦安市で、沖積層の層厚と地盤沈下量との関係をみたものです。図の青色の線は、沖積層の基底のコンターで、この深さから上が沖積層です。ここには埋没谷があって、沖積層の厚い部分が谷状にくいこんでおります。一方、断面図の上の赤色の部分は、昭和38年～51年までの13年間の地盤沈下の累積層です。それをみますと、沖積層が非常に厚い埋没谷の部分では、沈下量が1mを突破してしまっています。下の断面図とくらべれば、よくわかるように、沖積層の一番厚い谷のところで収縮が最も多く、沖積層の厚さに従って沈下量も変化しております。ですから、観測井の水平分布としては、沖積層の一番厚いところにも、これを置く方がいいということになります。

それからもう1つ、モニタリングにとって重要なのは、水準点の適正配置です。これを一体どのくらい置いたらいいかというのは、ずっと前から議論があるわけですが、やはり沖積層と洪積層（台地）と、一方に片寄ることなく、両方を勘案して置くことが必要だろうと思います。以上のように、地盤沈下のモニタリングにおいては、①水準測量の水準点の適正配置、②観測井の適正配置、この2つのことを、私たちは2本柱として最も重要視しているわけです。

関東地下水盆におけるモニタリングの現状

《基準日による統一的な水準測量の実施》

古野 関東地下水盆におけるモニタリングの現状についてお話しいたします。だいたい関東地下水盆は、日本では最も広大な地下水盆で、関東地方の山地を除くほぼ全域がこれに含まれ、行政的には、1都6県にまたがっております。一方、地盤沈下や地下水位の観測、さらには地下水揚水規制対策というものは、都、県、市などの各自治体を中心になって、それぞれ独自に実施されてきましたので、観測体制や対策には、さまざまな違いがあります。また、大まかにいいますと、地盤沈下が早くから問題となっていた南関東の地域と、その時点では、地下水障害が大きな問題とはなっていなかった北関東の地域とでは、当然、その取り組み方において異なった経緯をたどっております。したがって、関東地下水盆を対象とする場合には、各自治体が相互に協力して、いろいろな観測結果を関東地

図4・2ー浦安地盤沈下観測井（U₃・U₂・U₁）の地下水位と地層収縮の記録

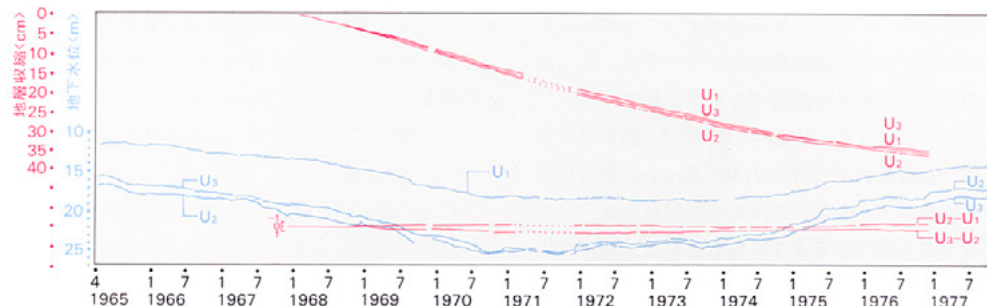
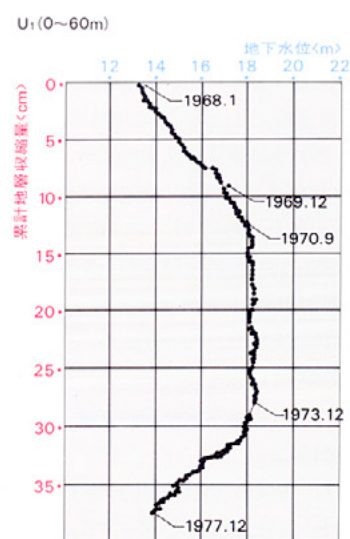


図4・3ーU₁地盤沈下観測井での地下水位と地層収縮の関係



注：図4・2～図4・4における地下水位は地表面からの深さをあらわす

図4・4ーU₃・U₂地盤沈下観測井での地下水位と地層収縮の関係

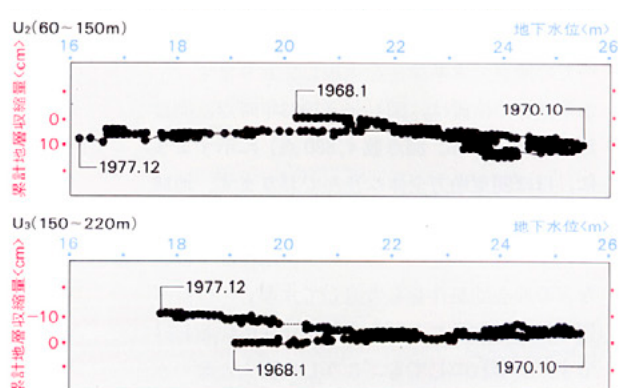


図4・1ー浦安地盤沈下観測井の位置及び地質柱状図とストレーナ位置

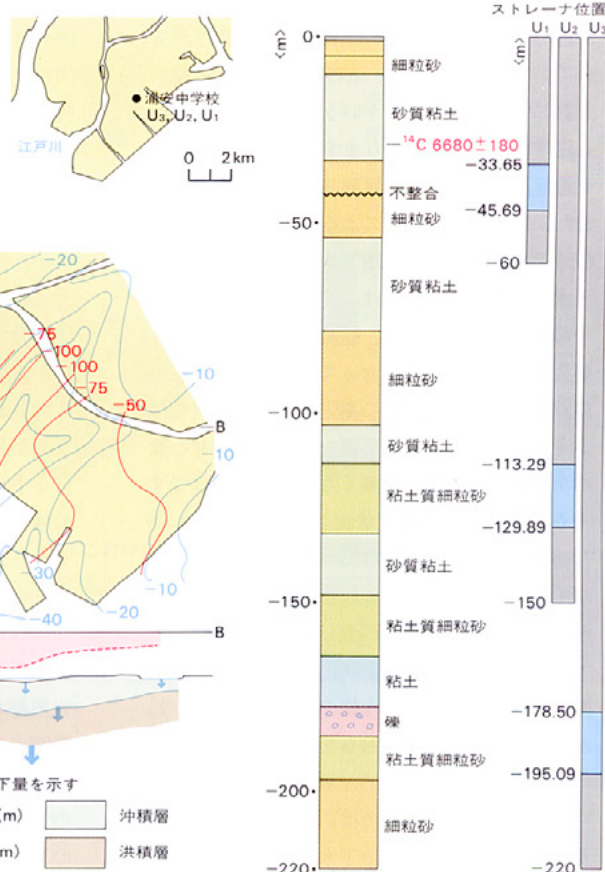
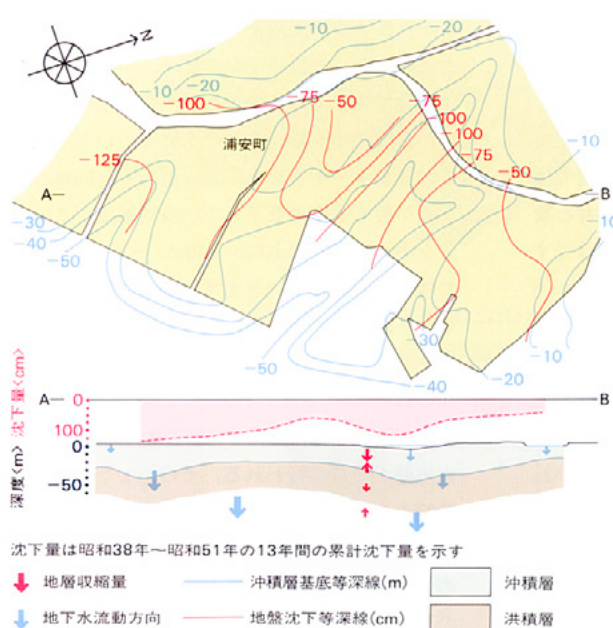


図4・5ー沖積層の基底と地盤沈下量



方全体として統一的に整理し、定期的にデータを蓄積していくことが必要です。

それで、まず地盤変動についてですが、地表面の標高の変動量を測定する水準測量では、表4・1に示すように、1986年の時点で、関東地方全体の測量延長が合計で7,387.6km、水準基標の測点数が4,945点にのぼる水準測量を統一に行うことができるようになりました。関東地方の場合ですと、比較的夏に地下水のくみ上げ量が多く、夏に地盤が変動するものですから、そうした変動の少ない冬の時期に、お正月の1月1日を基準日にして、この基準日に合わせてすべての地点で水準測量を実施しております。

水準基標の位置は、図4・6（1983年時点、測量延長7,363.6km、測点数4,880点）に示すように、ほぼ関東地方全体に及んでおります。地域的に非常に密な部分と薄い部分とがありますが、これは、地下水盆との関係および地盤沈下被害などの社会的条件をも考慮して水準点の位置が選ばれるので、こうした状況になっているわけです。いずれにしても、こうした膨大な数の水準測量を年1回とはいえ、関東地方全体として統一に、また継続してできるようになりましたので、今では、関東地方のどの辺で地盤沈下が進んでいるか、あるいはどの辺が緩和されているか、さらには、どういう地域で地盤が上昇しているのか、そういうところまで、わかる段階になってきております。

《地盤沈下・地下水位観測井の設置状況》

また、地盤沈下観測井による地層の収縮量および地下水位の測定と、地下水位観測井による地下水位の測定については、表4・2に示しますように、1986年時点では、観測地点は292カ所、観測井の数は450本になっております。地層の収縮量および地下水位の測定は、同じ場所で深さを変えて測ることも必要なので、観測井の数の方が観測地点よりも多くなっているわけです。そうした観測井の配置状況は、さきの図4・6（1982年時点、観測地点255カ所、観測井375本）に示してありますが、それらは、だいたい地盤沈下や地下水位の低下が激しい地点で選定されています。こうした観測網によって、今では、関東全体での地下水の水位の動きがだいたいわかるようになってきております。以前は観測井の数が少なく、部分的な状況しかわからなかったわけですが、現在では、観測井の数がだんだん増えてきて、関東地下水盆の大まかな状況

がようやくつかめるようになってきたということです。ただ、これまでにいたる道程には、1本の観測井を設置するためにも、自治体の技術職員の大変な苦労があったわけで、そうしたことも含めてこの図をみていただければと思います。

なお、表4・2には、各自治体の観測開始の年度が示されていますが、これをみますと、自治体として継続的な観測が始められたのは、東京都が一番古くて1953年、その後、川崎市と千葉県が1959年、横浜市が1960年、埼玉県が1962年というように続き、茨城、栃木、群馬の3県では、1963年以降から観測が始められています。

それから地下水揚水規制についても触れておきますと、工業用水法では、1957年に川崎市、1959年に横浜市、1961年に東京の江東地区で、それぞれ地域指定を受け、その後、指定地域がさらに広がっていきます（図4・7）。ビル用水法は、1963年に東京都、1972年には埼玉県と千葉県というように指定地域が広がります。（図4・8）。また、各自治体の条例は、1972年以降に急速に指定地域に広がっていきます（図4・9）。

関東地下水盆における地下水位図の変遷

《1964年～1971年》

図4・10のAは、1964年（昭和39年）時点で、すでに設置されていた観測井のデータから、当時の地下水位の状況を再現してみたものです。この場合には、とにかく地下水盆全体の動きを大局的な視点から把握するのが目的ですから、帯水層がたとえ違っていましても、水位の一番下がっている被圧地下水の水位を連続してつなぐという方法で描いております。それと、関東の場合ですと、1年のうちで一番水位の下がるのが夏期ですから、7月の水位を用いて作図しております。そうしますと、海面下－50mというのが最も水位の低下している地域で、この部分を中心に同心円上に、－40m、－30m、－20mの地域が広がっていきます。一方、横浜の方にも、－30mという水位の大きく低下した地域があります。

次の図4・10のBは、1971年の地下水位図です。この時期は、南関東のいろいろな自治体で地下水規制が一斉に行われる、そのちょうど寸前の時期に当たるわけです。そうしますと、水位の下限は、さらに10m下がって－60mになり、その領域も北西側に動いております。そして、この目玉の周辺に、－50m、－40mというような

低下域が広がっており、さらに－20mの地域が7年前にくらべてぐんと拡大しています。

《1975年～1982年》

その4年後の1975年になりますと、地下水位図は、図4・10のCのようになります。ごろんのように－60mの領域は消えまして、一番下がっているのが－40m。ですから1971年に－60mであった地域では、4年間に20mも地下水位が上昇したわけです。もちろん、－30m、－20mの範囲もぐっと狭くなっています。つまり、この時期には、揚水規制の効果がはっきりとあらわれておりまして、それまでの水位の低下・拡大という傾向が反転し始めているということです。また、観測井も増えてきて、0mの等値線が関東地下水盆の東部ではほぼ半円状の姿で示されます。他方、北部でも地下水位図が描けるようになり、関東全体についての様子がだんだんとわかるようになってきて、同心円上に大きな広がりを見せる関東地下水盆の姿が、おぼろげながらその輪郭をあらわしてきます。

図4・10のDは、その5年後の1980年の地下水位図です。このときは、一番下がったところで－30m。水位低下の一番の底がさらに10m上がってきています。ただし、その外側は余り変わらないか、あるいは逆にちょっと広がっているところがあるということです。そして、この時点ではさらに観測井の数も増え、0mの等値線の形状が、いびつな円形の姿としてあらわれてきます。

図4・10のEは、さらに2年後の1982年の地下水位図です。この時期になると、もう－30mの領域も姿を消してしまひまして、下限は、－20mまで上昇してきます。この領域は、南は東京の墨田区から北は松戸市および野田市の一部を含む地域で、図のようないびつな三角形を示し、比較的底が平らな形になっています。観測井も北部の方で増えてきまして、栃木県の方では＋100mの水頭も描けております。そして、外側から真ん中に向かって地下水が流れ込んでいる形状が、ますますはっきりとしてきます。

《1982年以降》

では、その2年後の1984年の地下水位はどうかというと、図4・10のFにみるように、1982年までに水位低下の底が－20mまで上がってききましたが、もうそれ以上は上がりません。上がらないどころか、－20mの領域が逆に広がったりしています。1984年というのは、気候的な条件

図 4・6－関東地方における水準基標および地盤沈下観測井・地下水位観測井位置図

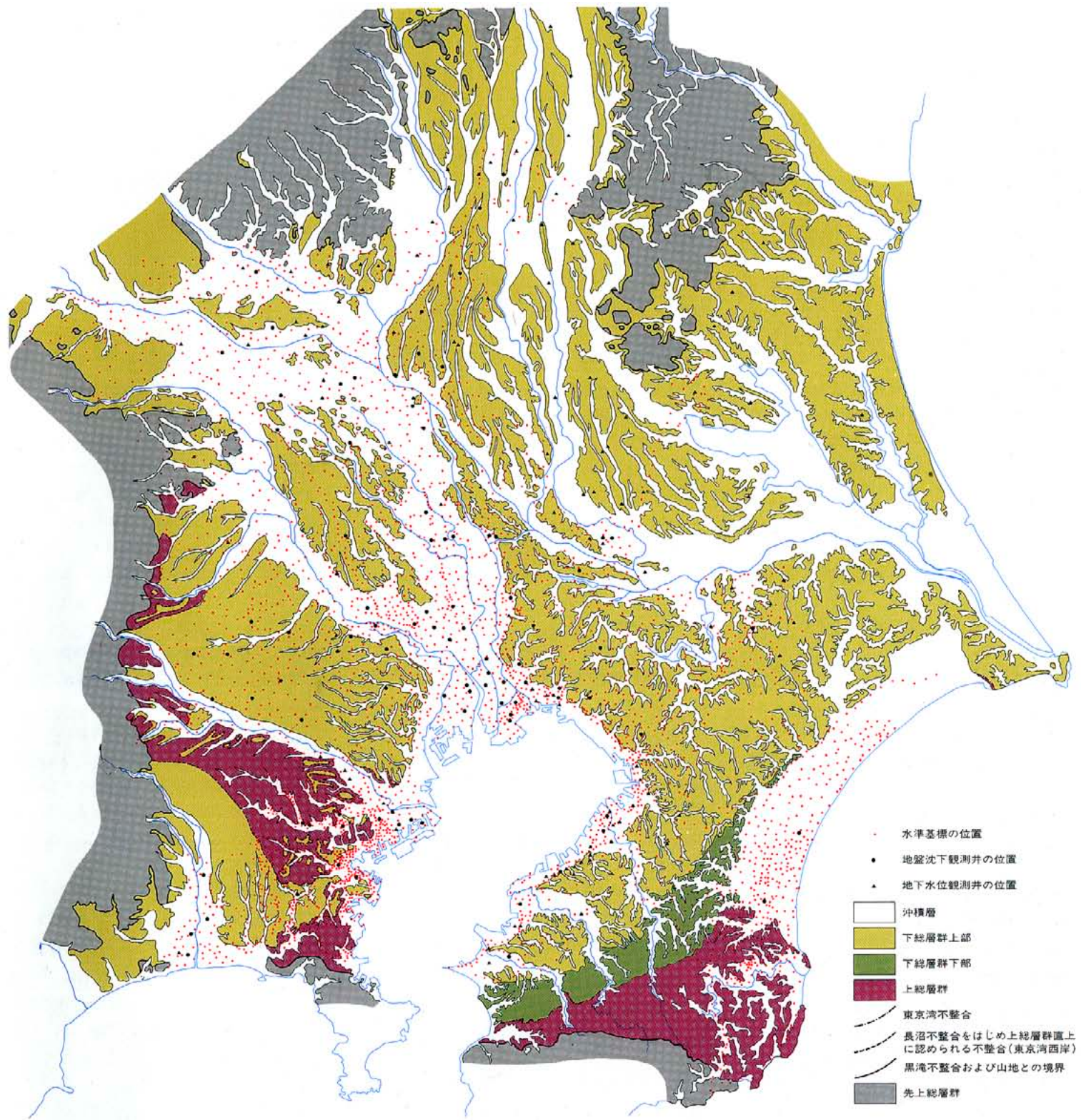


表 4・1－関東地方における水準測量の実施状況(基準日：1986.1.1)

	〈神奈川県各市・町〉	
	測量延長 km	測定水準基標数
東京都(国)	986(74)	659(57)
合計	1060	716
埼玉県(国)	1555(111)	
合計	1666	846
神奈川県	1262.5	1475
千葉県	2365	1366
茨城県	464	303
栃木県	353.1	159
群馬県	217	80
合計	7387.6	4945

	〈神奈川県各市・町〉	
	測量延長 km	測定水準基標数
横浜市	600	623
川崎市	280	400
平塚市	127	162
茅ヶ崎市	60	54
厚木市	38.4	40
海老名市	66	103
寒川町	22	22
鎌倉市	8.1	8
藤沢市	61	63
合計	1262.5	1475

注●1986年1月1日の水準測量は、日本水準原点および12基点〈青梅・八王子(東京都)、横浜・海老名(神奈川県)、君津・勝浦・大原(千葉県)、佐野(栃木県)、日高・寄居(埼玉県)、筑波(茨城県)、太田(群馬県)〉の合計13点を不動点として計算された。

表 4・2－関東地方における地盤沈下・地下水位観測井の設置状況(1986.3.時点)

	埼玉県					神奈川県					千葉県	茨城県	栃木県	群馬県	合計
	東京都	県	建設省	農林省	合計	横浜市	川崎市	平塚市	海老名市	寒川町	合計				
観測開始年(昭和・年)	28	37				35	34	48	45	54	34	48	49	50	
観測地点数	31	23	4	3	30	12	9	4	1	1	26	70	57	56	292
観測井数	75	36	4	6	46	15	9	4	1	1	30	118	97	58	450