

16. 揚水の地下水位並びに地表沈下に 及ぼす影響について I

地震研究所 小 牧 昭 三

(昭和40年10月26日発表—昭和40年12月28日受理)

要 旨

四日市市周辺の地盤沈下の実態と原因を究明する為に、3カ所にそれぞれ3~4本の観測井戸が設けられ、地下水位および地表沈下の連続観測が行はれているが、その中1964年1月~1965年1月の約1カ年間の記録について解析が行はれた。これらの記録には地下水位、地表沈下そのものの主要変動の他に海洋潮汐および気象等の影響を受けて週期的変動をしているので、B. P. Pertzevの方法により、主要変動のみを取り出した。

地下水位および地表沈下の主要変動は種々の外部要因との関連を考察した結果、工業用井戸の揚水量と非常に密接な関係のあることが判明した。

尚、地表沈下の主要変動より得られる1年間の沈下量と、水準測量より得られた1年間の沈下量から、地表沈下の大部分は、地殻変動によるものではなくて、軟弱地盤の収縮によるいわゆる地盤沈下に基くものと考えられる。

1. 序

近年、経済の急速なる伸長に伴って、工業地帯の発展は醒しく、大規模な都市施設や生産施設が建設されて来たが、その反面、該当地域の福祉に相反する問題が起つている。その一つは地盤沈下であり、東京、大阪はじめ、名古屋、新潟、川崎、尼ヶ崎、西宮等はその現象の著しい地域である。

いわゆる地盤沈下の現象は、地殻変動と呼ばれる地下の非常に深い所に基因している変動とは区別され、一般に沖積平野において発生しており、地表面に近い軟弱地層が自然にまたは人為的原因により収縮して起るものと考えられている。

地盤沈下については、既に30年余り前、東京の江東地区や大阪の西部地域および尼ヶ崎において、その著しい現象が認められ、主として、前者に就いては宮部直巳¹⁾、後者に

- 1) 宮部直巳 地震研究所彙報 15 (1937), 16 (1938), 17 (1939), 18 (1940), pt 1, pt 4, 19 (1941), 20 (1942), 21 (1943).
- 2) 和達清夫・広野卓蔵「西大阪の地盤沈下に就いて(第1報)」日本学術振興会災害科学研究所報告 2 (1939).
和達清夫「西大阪の地盤沈下に就いて(第2報)」同上 3 (1940).
和達清夫「西大阪の地盤沈下に就いて(第3報)」同上 6 (1942).

就いては、和達清夫³⁾並びに速水頌一郎等³⁾が、その調査研究に当り、幾多の成果が得られている。

名古屋附近においては、1959年秋、伊勢湾台風の際の浸水により、海拔0m以下になった沈下地帯が意外に広範囲に及んでいることが実証されたが、この地域の地盤沈下は飯田汲事等⁴⁾により調査研究が行なわれている。新潟市周辺の地盤沈下は1955年より急速に著しくなり、国土地理院の水準測量によると1955年8月より1961年9月の約6年間に約1mに達する所(1等水準点No. 4425, 新潟市関屋団九郎)もある程で1964年6月の新潟地震の際、堤防の決壊、揚水ポンプの不能によりいわゆる0m地帯は浸水によつても被害を蒙っている。

名古屋の南西約30km、伊勢湾の北西隅に位置する四日市市周辺は、戦前より紡績、窯業等工業の盛んな所であつたが、戦後は石油化学を中心とする近代工業が勃興し、多数の工場が集中建設された。従つて主として地下水にその供給源を依存している工業用水の使用量も急増し、地盤沈下の現象が著しくなつた。その為、1963年初めには北伊勢地盤沈下調査会が設立され、同年7月に地下水の揚水規制が行はれるに到つた。そして、地盤沈下調査の一環として8月には観測井戸が四日市市川尻町(第I観測点)、同じく千歳町(第II観測点)、川越町亀崎新田(第III観測点)に設けられ、地下水位および地表沈下の連続観測が開始された。

ここでは、この地表沈下および地下水位の観測記録の中、1964年1月1日より1965年1月4日に至る約

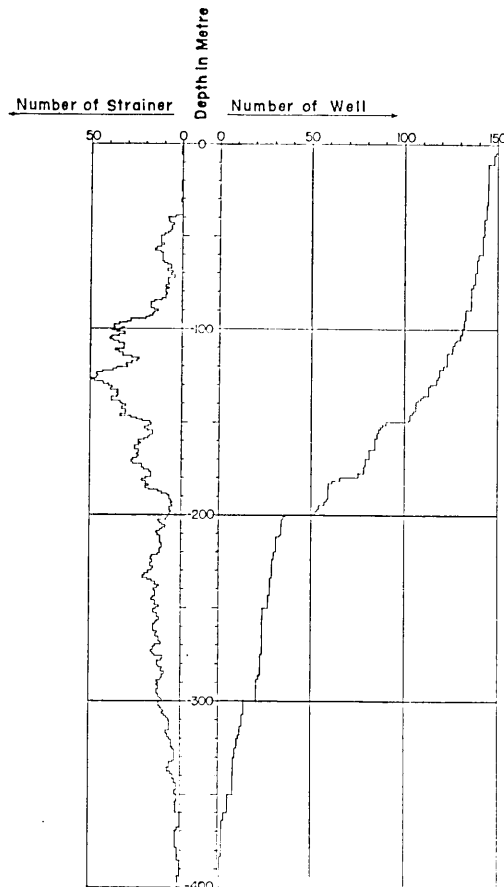


Fig. 1. Depth distributions of industrial using well and of its strainers in the controlled area of ground-water withdrawal.

- 3) 速水頌一郎他「大阪市及び尼ヶ崎市における地下水圧の変動と地盤沈下。(I)~(IX)」大阪港湾技術調査会事業報告, 1952~1957.
- 4) K. IIDA and T. WADA, *Jour. Earth Sciences, Nagoya Univ.*, 3 (1955), 91.
飯田汲事・成瀬聖慈 伊勢湾台風災害の調査研究報告 (1964), 1 および 8.



Fig. 2. (A)



Fig. 2. (B)

Fig. (A). Elevation changes on the northwestern coast area of the Bay of Ise between Feb. 1963 and Feb. 1964.

Fig. (B). Elevation changes on the northwestern coast area of the Bay of Ise between Feb. 1964 and Feb. 1965.

1 カ年間について、解析検討した結果について述べる。

Fig. 1 は四日市市及び楠町の規制地域 (Fig. 3 参照) において、工業用に使用されている井戸の数およびそれに設けられているストレーナーの数を深度別に示したものである。また、1963年2月～1964年2月、1964年2月～1965年2月の各1年間の地盤沈下の状況をそれぞれ等量線で示したものが、Fig. 2 (A), (B) である。

2. 観測装置

地盤沈下の実態と原因を究明するためには、沈下現象が地下のどの部分において、如何なる状態で起つているか、併せて地下水位の変動並びに沈下に関与する地層の性状等を観測調査することが必要である。観測井の設置された地点は、Fig. 3 に示す様に3箇所であり、各観測点には3乃至4本の観測井戸が設けられている (Fig. 15～17)。

この地域は成層状況から見るとほぼ一様であつて、上部から上部砂礫層、上部粘土層 (以上沖積層)、下部砂礫層、下部粘土層 (以上新期洪積層)、第三紀層という層序になつ

ており、第三紀層も砂礫層に富んで良好な滯水層を形成している。Fig. 4 にはそれぞれ海岸線に平行及びほぼこれに直角な方向の断面図が示されているが、これによると北東の木曾川に近づく程、又山地より海岸に向う程、第四紀層が厚くなっている。

各観測点の1号井、2号井はそれぞれ滯水層である上部砂礫層、下部砂礫層中に管底を固定し、またストレーナーが設けてある。3号井は下部粘土層のすぐ下の砂礫層に、4号井はそれ以深の砂礫層にまで達し、これら観測井の概略を図示すると Fig. 5 の様になる。これら観測井の中、1号井には水位計のみ、2号井、3号井、4号井には、水位計および沈下計が備へられている。

観測井の構造は Fig. 6 にその概略を示してあるが、鋼管が2重に埋設されている。内管は滯水層である自然砂礫層の上に載っており、この内管の上下変動により、管底より上部の地盤の収縮を観測するのである。外管は内管を周囲の土圧の影響より遮断し、正確な観測を可能ならしめている。外管に加はる土圧が大きく、管自体に生じた内部応力だけで吸収しきれなくなると、外管は挫屈するか、あるいは上下に動くことになる。この場合、沈降すると、内管はこの外管の管底に載っているから、それにつれて沈降して観測は正確を期し難い、このために、外管の底部には自由に上下移動の可能なスライド装置が備へられ、約 70 mm の外管の沈降までは余裕がとつてある。また外管にはその水位を観測すべき滯水層の箇所にストレーナーが設けてある。これを通つて滯水層の被圧地下水は管内に浸入して来るが、その水圧に応じて水面は上昇下降する。この水位変動をフロート式水位計で観測するのである。ボーリング孔壁と外管との間隙を通つて地表水および各滯水層の水が相互に流通すると、目的とする滯水層の水位変動を正確に観測出来ないので、ストレーナーの真上の所まで、かなりの長さ亘つてセメントを注入して孔壁と外管の間隙を塞いである。

観測装置の設置状況は Fig. 7 に示されている。地表沈下の観測には倍率 20 倍の気圧計式沈下計が用ひられているが、これはコンクリート基礎台の上に固定された I 型鋼の上に取付けられ、更にブラケットにより内管と連結されている。内管底より上部の地盤が収縮した場合、内管は不動であるので、基礎礫層の変動を無視すると、I 型鋼は地盤と共に

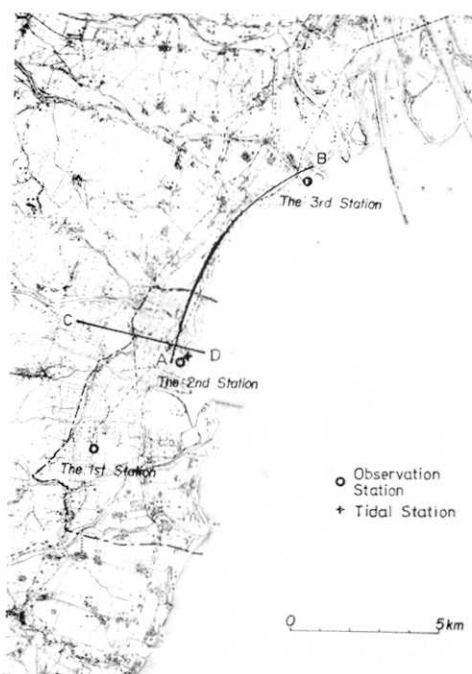


Fig. 3. Distribution of observation stations and tidal station. Area surrounding a chain line is the controlled one of ground-water withdrawal.

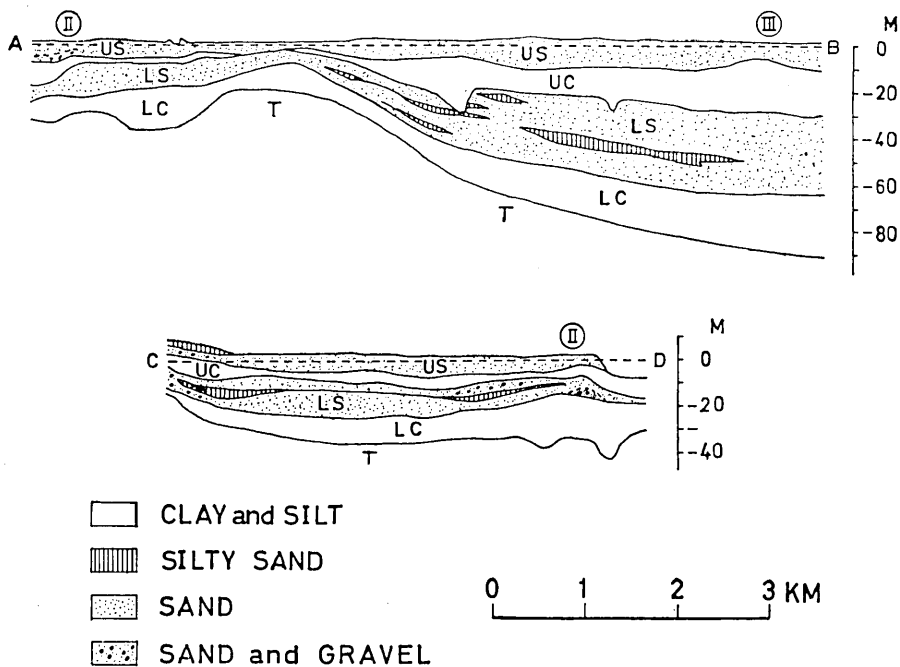


Fig. 4. Profiles of section A—B and C—D shown in Fig. 3.

- US: Upper sand layer
- UC: Upper clay and silt layer
- LS: Lower sand layer
- LC: Lower clay and silt layer
- T: Tertiary
- Ⓜ: The 2nd observation station
- Ⓜ: The 3rd observation station

沈下することになり、沈下計に内管と地表面との相対差すなわち、地表沈下量が自記されるのである。コンクリート基礎台および内管自体の動きは、それぞれ水準点を設け、近くの2等水準点と結んでチェックされる。ブラケットにはもう1本の垂直棒がついており、これに精度 1/100 mm のダイヤル・ゲージを取付けて、週1回、記録紙交換の際に読みとり、1週間における変動量がチェックされる。水位の観測には、K式水位計が使用されているが、これは 1/10、1/20 に倍率を落して、3 m あるいは 6 m (水位変化の激しい第Ⅱ観測点4号井のみ) の変動範囲で水位を自記している。これも沈下計と同様、週1回、電池式水面測定器で水位の定測を行なっている。尚外管の上に取付けられたもう1つの気圧計式沈下計は、同様に内管とブラケットにより連結され、外管の土圧による上下の変動を観測している。これによると、外管はすべて沈下しており、而も深い井戸程、沈下量が多く、観測開始より 1965 年1月までの外管の最高沈下量は、第Ⅰ観測点4号井、第Ⅱ観測点4号井、第Ⅲ観測点3号井で、それぞれ 15 mm、25 mm、28 mm となっているが、

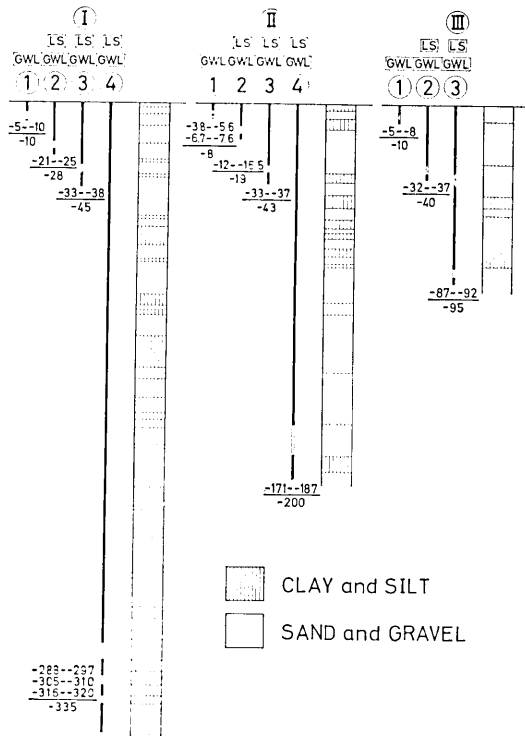


Fig. 5. Diagram of the observation wells at three stations.

- ①: The 1st station
- ②: The 2nd station
- ③: The 3rd station
- ①: The 1st observation well
- ②: The 2nd observation well
- ③: The 3rd observation well
- ④: The 4th observation well
- [GWL]: Measuring apparatus of confined ground-water level equipped on a well
- [LS]: Measuring apparatus of subsidence equipped on a well
- $\frac{a \sim b}{c}$: $\frac{\text{Depth of strainer}}{\text{Depth of well bottom}}$ unit: metre

も少々ある。併し、これらはいづれも地盤沈下の実態を把握するためには、何ら障害になつていない。

観測記録の1例として、Fig. 8に1964年9月21日～9月28日、Fig. 9に同じく12月9日～12月14日の水位計、沈下計の記録を示してある。また、同じ期間の驗潮記

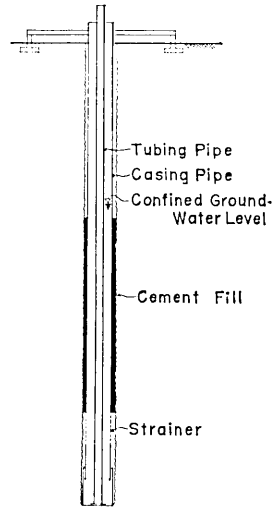


Fig. 6. Sketch of the observation well, (A).

約70mmのスライド装置のために、内管には何らの影響も及ぼさず、従つて正確な観測が続けられると考へられる (Figs. 18～20).

3. 観測記録およびその考察

上述の様な沈下計、水位計合計19箇の観測装置により、3箇所の観測地点でそれぞれの滞水層までの地盤の収縮量、すなわち地表の沈下量および滞水層の被圧地下水位が連続的に観測されている。解析を行つた約1カ年の観測記録の中には急激な変動によるスケール・アウト、時計の故障、フロートの欠陥等で欠測になつてい

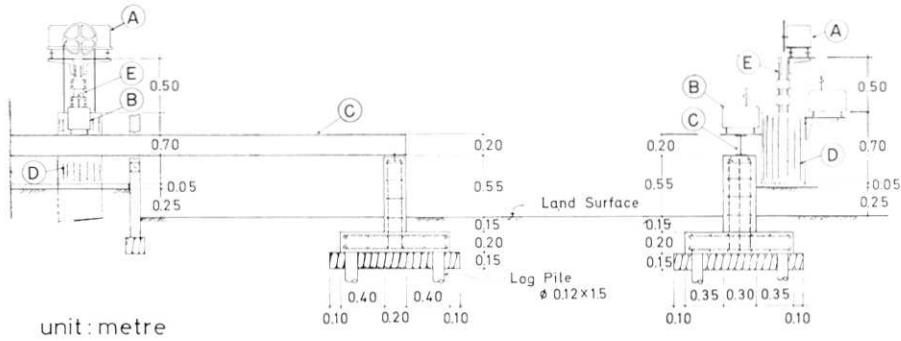


Fig. 7 Sketch of the observation well, (B).

- A: Measuring apparatus of confined ground-water level.
- B: Measuring apparatus of subsidence
- C: Steel beam, I-200 x 100 x 7 mm, L = 6.0 m.
- D: Casing pipe, EX. DIA. 406.4 mm, 7.9 mm thick.
- E: Tubing pipe. EX. DIA. 101.6 mm, 4.2 mm thick.

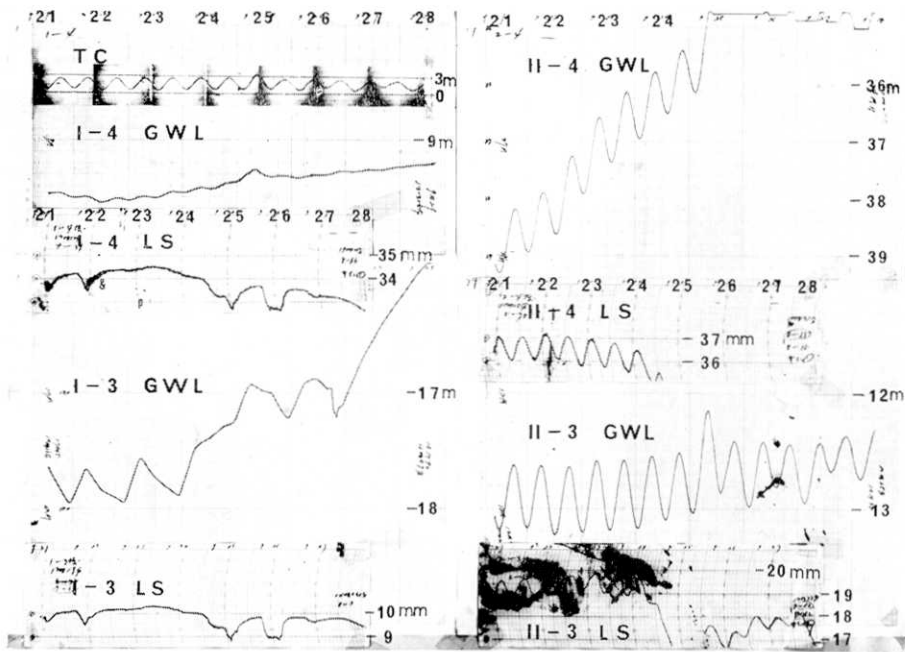


Fig. 8. Examples of records for period 21st to 28th Sept. 1964.

録 (1日巻き) も水位計記録と時間的に合致する様に複写して一緒に掲げてある。 Fig. 8 は、第Iおよび第II観測点の4号井、3号井の記録であるが、9月25日には午前8時頃伊勢湾を南々西より、北北東に通過した台風による海水面上昇の影響の他、主として殆ん

どの工場における操業中止のためと思はれるが、地下水位が急激に上昇し、地表面もそれに伴い上昇して、平常考へられる変動量を極度に超過しスケール・アウトしているものもある。これらの記録では異常変動が大きいので判然としないが、Fig. 9の第II観測点の4号井、3号井、第III観測点の3号井、2号井の水位計、沈下計の記録を驗潮記録と併せ考察すると、地下水位は長週期的変化をしているが、一方では、海洋潮汐に著しく左右され、大潮小潮の変化もそのまま地下水位の変動に現れている。その上、地表面も同様に海洋潮汐の変化に影響されて変動しているのが知られる。これらは第I観測点と異り、海岸に近く特に海洋潮汐の影響を受け易いものと考えられる。

併し、これら観測記録のままでは、ペーパー・スピードが異つて時間的に合致せず、また水位計と沈下計とは変動方向も逆センスであつて考察し難い。そこで1964年2月および8月の水位計、沈下計(第I観測点2, 3, 4号井および、第II観測点4号井)の観測記録の毎時の値を読取り、それをFig. 10(A), (B)に再記してある。更に、地下水位および地表沈下に影響を及ぼすと考えられる海洋潮汐はじめ、気温気圧も同様に観測記録より毎時の値を読取つて再記してある。前者は三重県四日市港務局により観測されており、驗潮儀はFig. 3に示されている様に、第II観測点より約200m離れた千歳町地先に設けられている。後者は共に津市にある津地方気象台で観測されているものである。この他に同気象台により観測された、津での日照時間および四日市市に於ける日降水量、北伊勢地盤沈下調査会で調査された四日市市、楠町の工業用水法の規制地域内にある工業用井戸の日揚水量も併示されている。

このFig. 10(A), (B)について考察すると、地下水位、地表沈下と種々の外部要因について大体次のようなことが知られる。

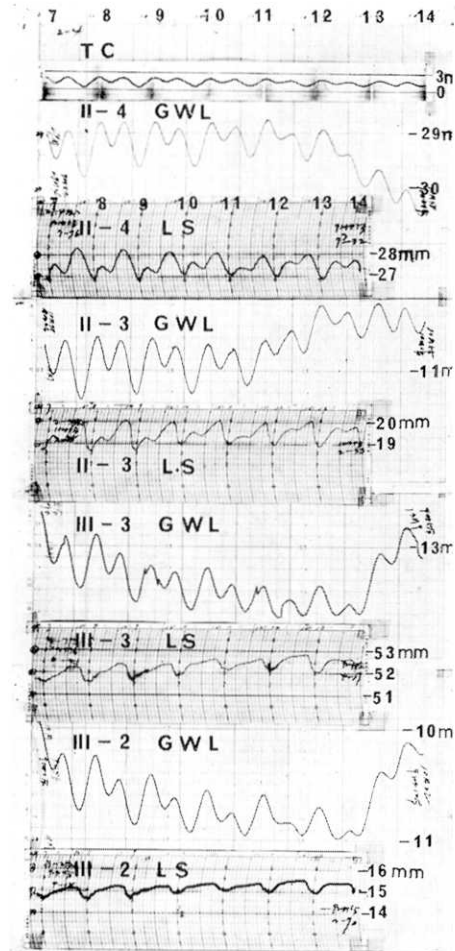


Fig. 9. Examples of records for period 7th to 14th Dec. 1964.

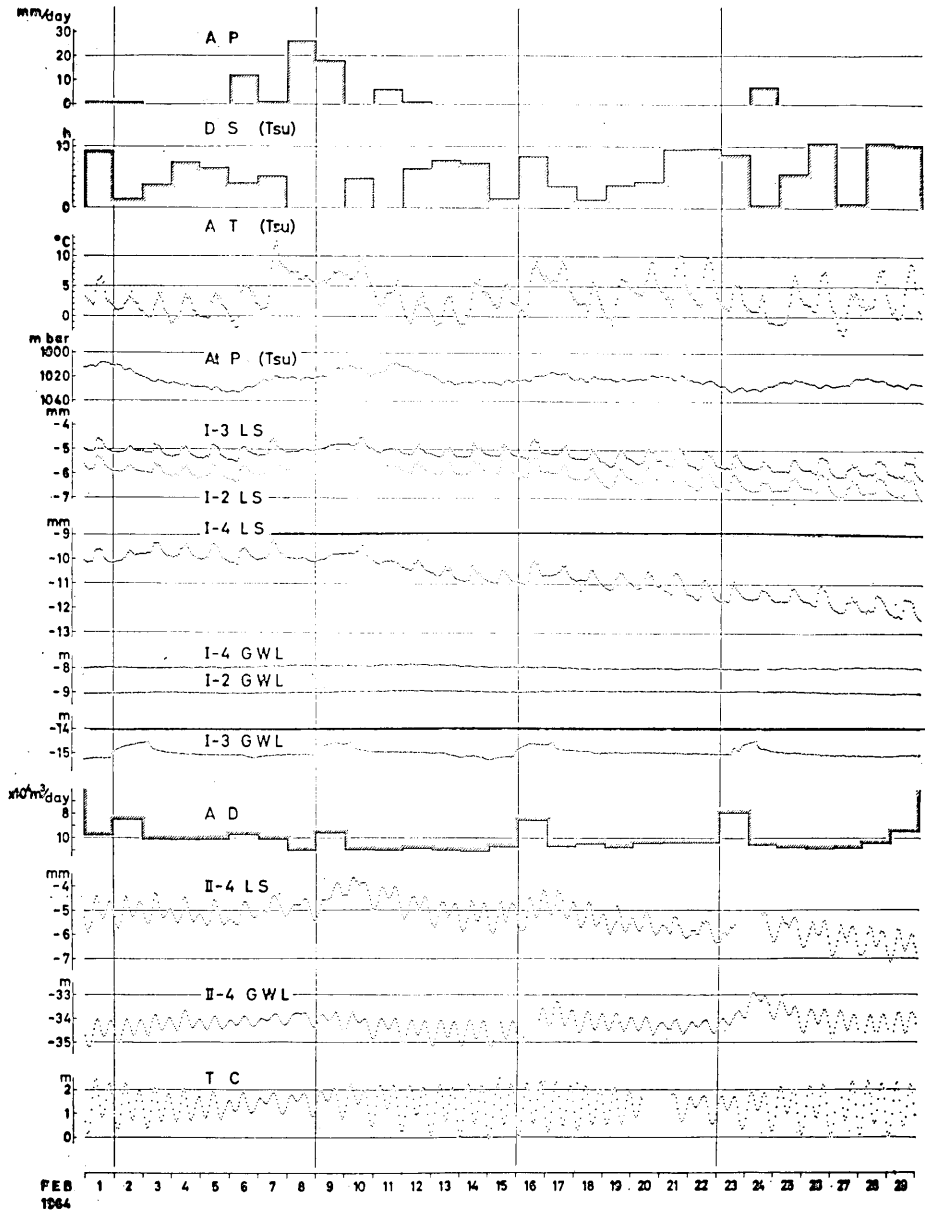


Fig. 10 (A). Observed variation during February 1964 concerning ground-water level GWL and land surface LS on the 2nd, 3rd and 4th observation wells at the 1st station and the 4th observation well at the 2nd station, daily amount of precipitation AP, duration of sunshine at Tsu DS (Tsu), air temperature at Tsu AT (Tsu), atmospheric pressure at Tsu AtP (Tsu), daily amount of discharge of industrial using wells AD and tide curve TC.

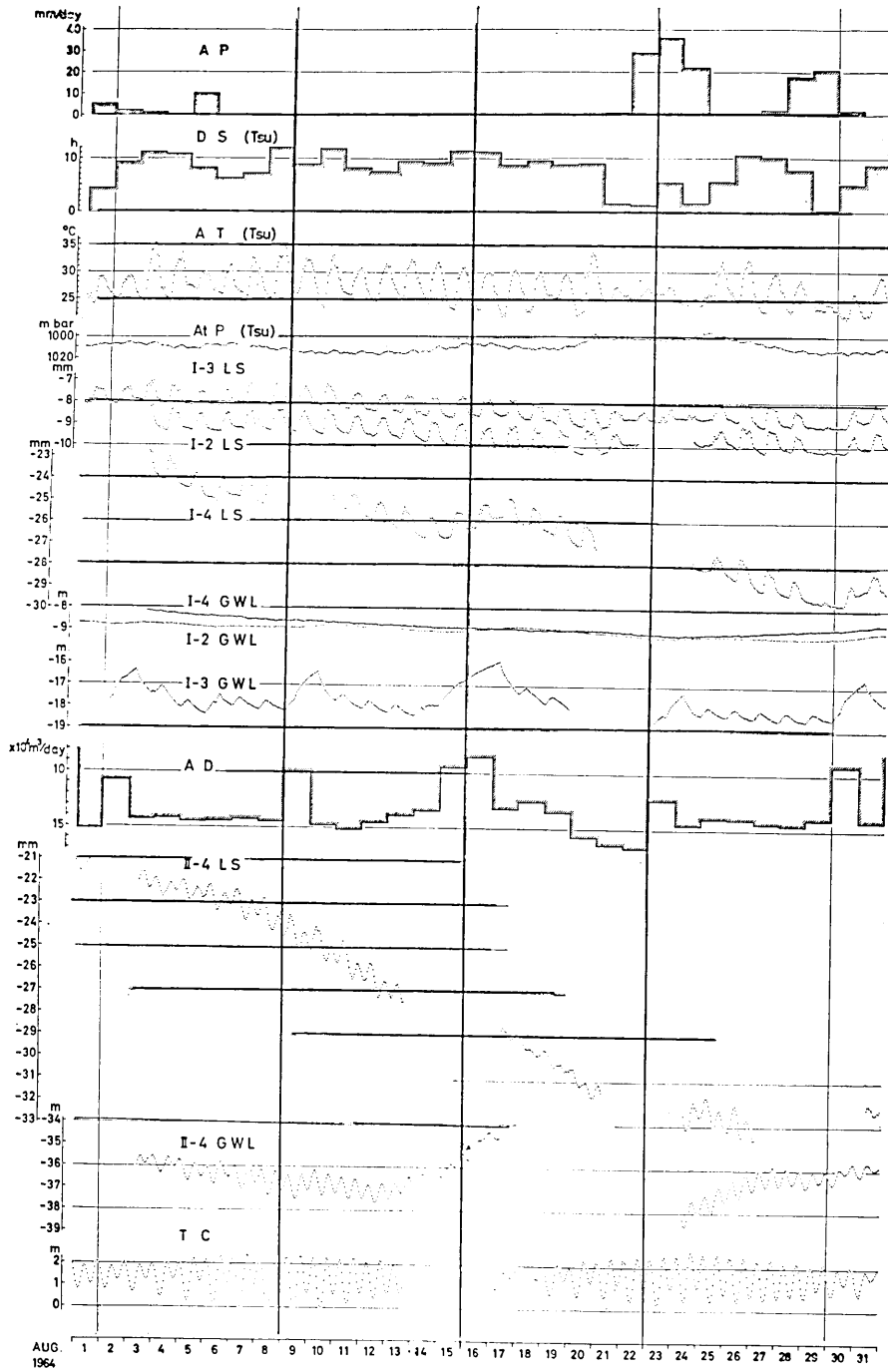


Fig. 10 (B). Observed variation during August 1964.

1. 海洋潮汐

図の下の方に第Ⅱ観測点4号井の桜田地下水位と地表沈下および潮位が記されているが、前者2つの変動は何れも海洋潮汐に著しく左右されている。このような現象は海岸に近い第Ⅱおよび第Ⅲ観測点では何れも認められるのであるが、茲に掲げた第Ⅱ観測点4号井の地下水位に於いては特にその影響が大きく、その振幅に就いては潮汐のその約1/2で変動している。而も験潮場とは約200m離れているに過ぎないので、約2時間位相が遅れている。このような海洋潮汐の影響は観測記録をよく視ると、小さいながらも第Ⅰ観測点の井戸にも現れている。

尚、地下水位と海洋潮汐との関連は、古くは本多光太郎⁵⁾が東京大学構内井戸および横浜、吉原、大久保における観測結果について、その後、松沢武雄の指導の下に、前田競⁶⁾はじめ、森田稔⁷⁾、表俊一郎⁸⁾等が東京大学構内井戸に就いて指摘している。又地表沈下に及ぼす海洋潮汐の影響に関しては、宮部直巳が東京深川に於ける観測結果について論じている⁹⁾。

彼等の研究は更に、気圧、気温、降水量、人為的な地下水の汲上げにも及んでいるが、潮汐の影響の最も小さい第Ⅰ観測点の2, 3, 4号井の地下水位および地表面の変動について、気圧、気温、太陽輻射、降水量、工業用水揚水量との関係を次に比較検討する。

2. 気 圧

2月および8月に於ける気圧はそれぞれ、大体1005~1035mb, 995~1015mbの間で変化しているが、2号井、4号井の地下水位には殆んど変動がなく、3号井のそれには変動が大きく現われているものの、これは後述のように気圧によるものではないと考へられる。地表沈下は一日週期的変動を繰返しながらsecularな変化を示しているが、何れに關しても、気圧の変化は大して関係がないと考へられる。

3. 気 温

気温の地下水位に与える影響は、2, 4号井については、何ら見当らないが、3号井の地下水位は、8月の変化を見ると一日週期についてはある程度の相関を示している。すなわち、大体において気温が最低の時水位は最高である。併し、気温が最高の時に水位が最低ではなく、その上、水位は2, 8月共週末に急に上昇する。これは後述のように殆んどが工業用水の汲揚量に依存するもので、従つて気温は地下水位には殆んど影響を及ぼさないと考へられる。

一方、地表沈下は2, 3, 4号井とも殆んど同様な変化を示し、而も一日週期の振幅の大きさも略同量である。これは、その原因が2号井の井底(-28m)より浅い地表面に近

- 5) K. HONDA "Daily Periodic Change of the Level in Artesian Wells", *Publ. Earthq. Invest. Comm.*, 18 (1904), 73.
- 6) 前田 競「一深井に於ける水位の変化」地震 6 (1934), 275.
- 7) 森田 稔「東京帝国大学構内に在る深さ380米の深井の水位の変化に就て」地震 7 (1935), 395.
- 8) 表 俊一郎「東京帝国大学構内に在る深井の水位変化」地震 8 (1936), 531.
- 9) 前掲 1).

い所にあると考へられる。この変動を気温の変化と比べると、相当関係が深い。すなわち、地表面は2月には大体朝8時頃より上昇を始め、夕6時頃に回復するが、8月には朝6時頃より上昇し、夕8時頃に回復している。また2月8~9日、8月21~24日の間は、雨も降り気温の変化は少く、それと類似して地表面の変動も小さくなっている。このような現象は第IIおよび第III観測点の沈下計記録でも——海洋潮汐による影響が大きいので顕著ではないが——注意して観察すると現れている。このような現象は横浜、川崎、また新潟に於ける沈下計観測記録にも大なり小なり認められている。併しこのよのような現象は外管の上に取り付けられた外管の土圧による変動を観測する沈下計には認められず、唯、I型鋼に取り付けられた沈下計のみに現れるのである。この点より、上述の現象はI型鋼に基因するものと考へられる。そこで鋼の線膨脹率を 1×10^{-5} として、気温上昇のために両端を固定された6mのI型鋼が様に弯曲上昇するものと仮定して、沈下計の設置されているI型鋼の中心の上昇量を求めた場合、その値は2月では沈下計の観測記録に現れる地表面の上昇量の略80%であるが、8月の場合は観測値の1/2しかない。

4. 太陽輻射

上述のようなI型鋼の日昼時の変化に影響を及ぼすものとしては気温の他に太陽輻射が考へられる。そこで、日照時間と地表面の上昇、すなわちI型鋼の弯曲上昇の関係を考案する。この場合、日照時間は30km離れた津と四日市ではかなり異なると思われ、問題もなくはないが、他に観測結果がなくこれを代用する次第である。両者の関係を調べると、2、8月共に相当な関連性が認められる。日照時間が長くすなわち太陽輻射が大きいと、地表面の上昇が大きく、日照時間が短く太陽輻射が少いと、地表面の変動が小さい。2月8、9日は終日雨で日照時間は0、従つてI型鋼には何ら外部よりの影響がなく、観測記録は地表面そのものの変化を示しているものと思へられる。8月21日、22日、24日、および29日の日照時間はそれぞれ、1.6、1.3、1.7、0.3時間で、これらの日の観測記録にも、I型鋼の変動による影響は少ししか現れていない。なお、2月2、15、18、24、27日は日照時間がそれぞれ、1.4、1.6、1.4、0.5、0.7時間と非常に短いのに観測記録にかなりの変動が見られる。これはこれらの日に雪、聚雪、みぞれ等が降つており、しかも気温の変化も決して小さくないことを考へ併せると、短い日照時間に拘らず太陽輻射の影響が大きく現れているためではないかと考へられる。

以上、沈下計の観測記録に現れた異常変動については、大体、気温および太陽輻射に依るものと思つて差支えないと思われる。

このことは、調和解析に於ける結果¹⁰⁾を見ると数値的に如実に現れるのである。すなわち、気温および太陽輻射、それに工業用井戸の揚水量に基づくcomponentとして週期24時間の S_1 を考へて調和解析を行なつたが、その位相差を見ると、地表沈下の S_1 分潮は $-155.5^\circ \sim -168.0^\circ$ の間にあつてほぼ一定であるのに対し、地下水位の S_1 分潮は相当ばらついている。振幅についても、地下水位では S_1 分潮の振幅は他の分潮に比べて小さいが、

10) 小牧昭三「海洋潮汐の地下水並びに地盤に及ぼす影響について I」地震研究所彙報 44 (1966), 299.

地表沈下のそれは相当に大きく、すべての観測井を通じて殆んど同じ大きさと考へてよい。このことは取りも直さず、上述の考察が大体に於て妥当なものと考へられるのである。

併し、この兩者の中何れがその主なる要素であるかについては更に検討しなければならない点である。

5. 降水量

地下水位、地表沈下に及ぼす降水量の影響については、何れに対しても——time lagを考慮しても——殆んど認められない。これは一つには、ボーリング孔壁と外管との間隙を通過して地表水及び各帯水層の地下水の相互交流を遮断する為に、孔壁と外管の間隙にセメントを注入していることにも依るのではないかと考へられる。また、実際には降水が地表近くの滞水層および粘土層に滲透して、それぞれ地下水位、地表沈下に影響すると考へ、1号井の地下水位の変動を確かめたが、降水量による影響は認められない。1号井には沈下計は設置されていないので、粘土層に及ぼす降水量の影響は解らないが、この四日市市周辺の場合は、次に述べる工業用井戸の揚水量が大きいのに比べて、降水量が遥かに小さいので、あるいはその影響が認められないのかも知れない。

6. 工業用井戸の揚水量

工業用として汲揚げる水量の地下水位変動に及ぼす影響を見ると、2、4号井に於ては殆んど変動が認められないが、3号井に於ては、日曜日に揚水量が急激に減少すると地下水位は急速に回復し、また、月曜日には地下水位は降下している。気温が上昇して揚水量の増加する8月には工場の操業に伴ひ、大体朝6時頃に水位が最高を示しているが、それから夜10時頃迄降下の一途を辿り、再び上昇し始める現象を繰返し、土曜日の夜が大体において最低になっている。特に15、16日のお盆は休日であつたらしく、揚水量が減少して地下水位は急激に回復している。また、20~22日の3日間は揚水量が1日16万 m^3 前後になり、地下水位も急速に低下したためにスケール・アウトしている。このように地下水位は工業用井戸の揚水量に著しく左右されており、このような現象は、他の観測井戸についても認められる。

地表沈下と揚水量の関係を見ると、2、3号ではあまり関係はなさそうであるが、4号井の地表沈下は全く関係がなくもない。すなわち、地下水が汲揚げられるにつれて secularな沈下が著しくなっている。特に8月は揚水量が大きいので、secularな沈下も急速になる一方、9日、15~16日、30日の休日には揚水量の減少に伴つて地表沈下も幾分回復し、また20~22日の揚水量の急増する時は沈下がはなはだしく、スケール・アウトした程である。他の観測井戸でも同様な現象が現れている。

地下水位および地表沈下の長期間に互る secularな変化を検討するためには、上に考察したような短周期の外部要因による disturbance を取除いて、地下水位そのもの、地表沈下そのものの主要変動だけを取り出す必要がある。

4. 観測記録の解析

前述のように水位計、沈下計の観測記録に現れている1日週期あるいはそれより短い週

期を有つ、海洋潮汐、気温あるいは太陽輻射、工業用井戸の揚水等の影響を取除いて、地下水位、地表沈下そのものの主要変動を算出する為には、従来平均太陽時の 24 時間、あるいは 25 時間の successive moving mean を用ふるのが普通である。

併し、25 hours moving mean は太陰潮を取除くには良好な方法であるが、太陽潮については満足なものと言えず、他方 24 hours moving mean は太陽潮に対しては良好であるが、太陰潮に対しては不満足な結果を与える方法である。A. T. Doodson と H. D. Warburg¹¹⁾ により平均海面を求める方法として 1941 年に考案された、いわゆる Admiralty method と呼ばれる 30 hours selected mean は、上の 24 hours または 25 hours moving mean よりも、zero line 即ち、主要変動を正確に決定するには常に満足すべき方法である。併し、難点としては計算に相当な労力を要することが挙げられる。1957 年になつて、B. P. Pertzev は地球潮汐の観測結果より drift すなわち zero line を消去する方法として、15 hours selected mean を考案した¹²⁾。この方法は Admiralty method よりその計算労力が半減され、その精度については全く同等である。これら 2 つの方法に関しては、P. Melchior により論じられ¹³⁾、また中川一郎により、特に計算の精度とそれに要する労力について総括的に論じられ¹⁴⁾、Pertzev の方法は現今に於て、短周期の disturbance を除去して zero line を決定する最良のものであると確認されている。

この Pertzev の方法といふのは、ある時間 t を中心として前後 18 時間に亘る観測値 $A_{t-18}, A_{t-17}, \dots, A_{t-1}, A_t, A_{t+1}, \dots, A_{t+18}$ がある場合、この中より 15 個を選び出して次式により平均値 a_t を求める算定方法である。

$$a_t = \frac{A_{t-18} + A_{t-13} + A_{t-10} + A_{t-8} + A_{t-5} + A_{t-3} + A_{t-2} + A_t + A_{t+2} + A_{t+3} + A_{t+5} + A_{t+8} + A_{t+10} + A_{t+13} + A_{t+18}}{15}$$

以上のように検討を行つた結果、計算精度と労力（計算時間）の両点から考へて、最も優れている Pertzev の方法により、水位計、沈下計および験潮儀の観測記録について IBM 7090 に用ひて計算を行つた。

水位計、沈下計の観測記録のそれぞれについて、1964 年 1 月 1 日 00 時より 1965 年 1 月 4 日 07 時まで 1 時間毎に 8864 箇（欠測のない場合）の観測値を読取つた。読取りに際しては、実測による観測値のチェック、並びに時計の僅かな不正確さによる時間の補正は十分に行つた。また験潮儀の観測値については、三重県四日市港務局での読取値をそのまま使用した。

- 11) A. T. DOODSON & H. D. WARBURG, *Admiralty manual of tides*, Admiralty, (1941).
- 12) B. P. PERTZEV, "On the calculation of the drift curve in observation of bodily tides", *Marées Terrestres, Bulletin d'Informations*, N°5, (1957), 71~72.
- 13) P. J. MELCHIOR, "Sur l'interprétation des courbes de dérive des gravimètres", *ibid* N° 17, (1959), 279~287.
- 14) I. NAKAGAWA, "Some Problems on Time Change of Gravity; Part 2. On Analytical Treatments for Data of the Tidal Variation of Gravity", *Bulletin, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.*, No. 53 (1962).

5. 解析結果

このようにして Pertzев の方法により計算を行つた結果、1964年1月1日18時より1965年1月3日13時迄の値が求められた。この中1964年1月1日の18時より12時間毎の値を plot した。Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 にそれぞれ、第I, 第II, 第III観測点の3号井4号井についての地下水位、地表沈下の zero line, すなわちそのもの本来の主要変動が描かれている。欠測の所は勿論記してないが、ある時刻で1回欠測があると、前後18時間計36時間に亘つて zero line は求められないので、欠測が多いように見えるが、これは計算上致し方ない。このような箇所では観測値がある場合は、その値を+印で記してある。かかる値は勿論、種々の外部要因により disturb されたままの値であるが、大勢を見る上には差支えないと思ふ。

驗潮記録について求められた zero line すなわち平均海水面の変動は Fig. 14 に図示してある。これも地下水位、地表沈下と同じく12時間おきに06時、18時の値を図示してある。同図にはこの他に、四日市市、楠町の工業用水法による規制区域内における井戸の日揚水量、週揚水量、津地方気象台で観測された03時と15時の気圧の値(03, 09, 15, 21時に於ける観測値が報告されて、06時、18時の値がないが、気圧の影響は遅れて現れると考えられるので、03時、15時の値)を記した。また、同じく津地方気象台で観測された06時、18時の気温の値、四日市市に於ける降水量を記してある。

Fig. 11~14 を併せ考へると、地下水位および地表沈下の主要変動について大体次の様な知見が得られる。

1. 平均海水面との関係

地下水位および地表沈下の主要変動は平均海水面の変化とは殆んど関係はないと考へられる。すなわち、地下水位、地表沈下と異り海水面は夏に高くなり冬に低くなつてゐる。これは平均海水面が気圧に大きく左右されているものに他ならない。平均海水面に表われる ripple 状の変化も気圧の変動と殆んど対応している。そして平均海水面は上記のような気圧による年変化はあるが、茲に取扱はれた1年間には、水位は大體元に復歸している。従つて、地表沈下は地下深くまで根ざしている地殻変動によるものではなくて、軟弱地層の収縮、いわゆる地盤沈下に基くものと考えられる。このことは、後述のように観測井及び水準測量より得られた沈下量が略等しいことから結論づけられる。

2. 気圧との関係

地下水位および地表沈下の主要変動は、気圧とは著しい関係がないと考へられる。

3. 気温との関係

気温と地下水位および地表沈下の主要変動の間にも本質的な関係はないようである。一方、気温は工業用井戸の揚水量と相当に深い関係にあり、例えば9月末に気温が急に下ると揚水量も急激に減少している。それ故、一見して気温は地下水位及び地表沈下に関連があるようであるが、これらの間には工業用井戸の揚水量が介在しているのである。

4. 降水量との関係

降水量も地下水位および地表沈下の主要変動には直接的な影響を及ぼしていない。

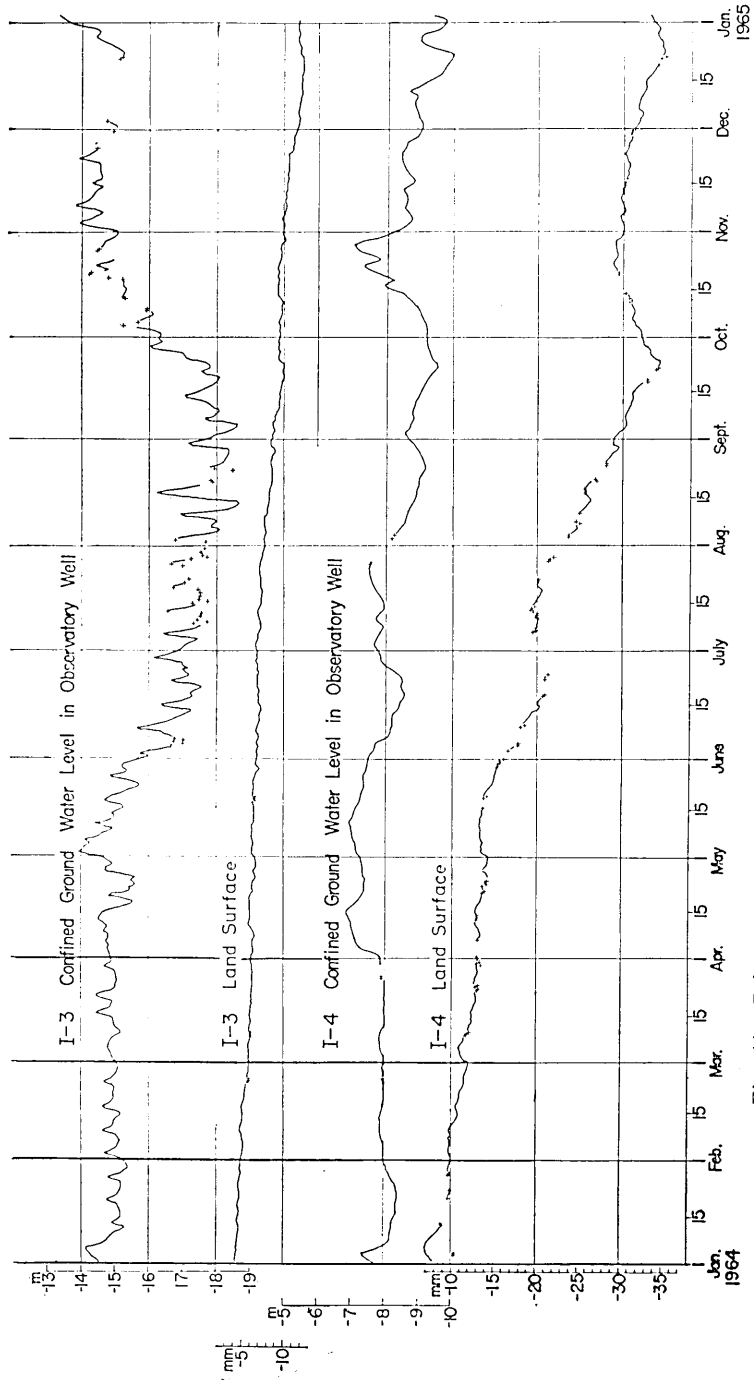


Fig. 11. Primary variations of both the ground-water level and the land surface on the 3rd and 4th observation wells at the 1st station.

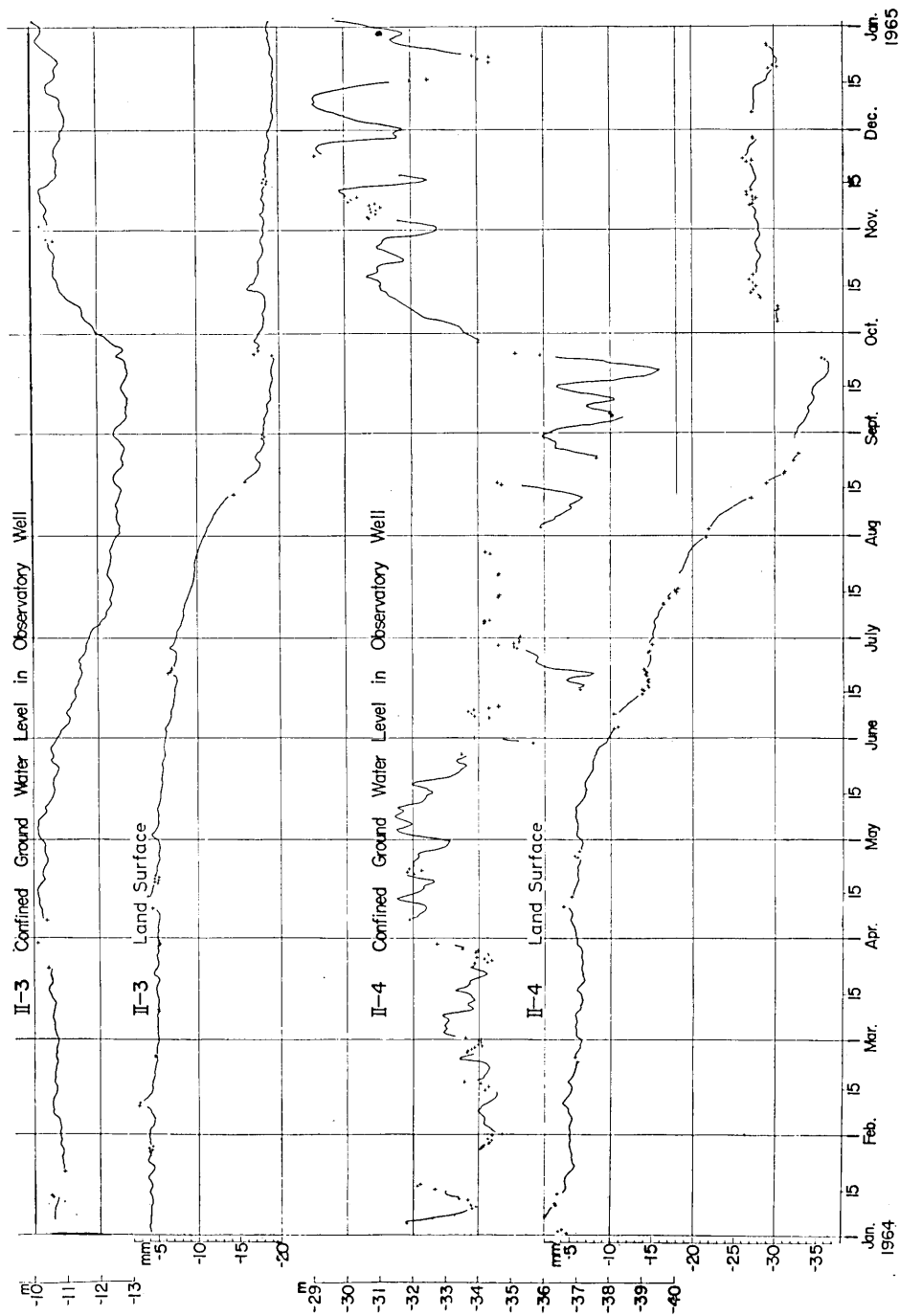


Fig. 12. Primary variations of both the ground-water level and the land surface on the 3rd and 4th observation wells at the 2nd station.

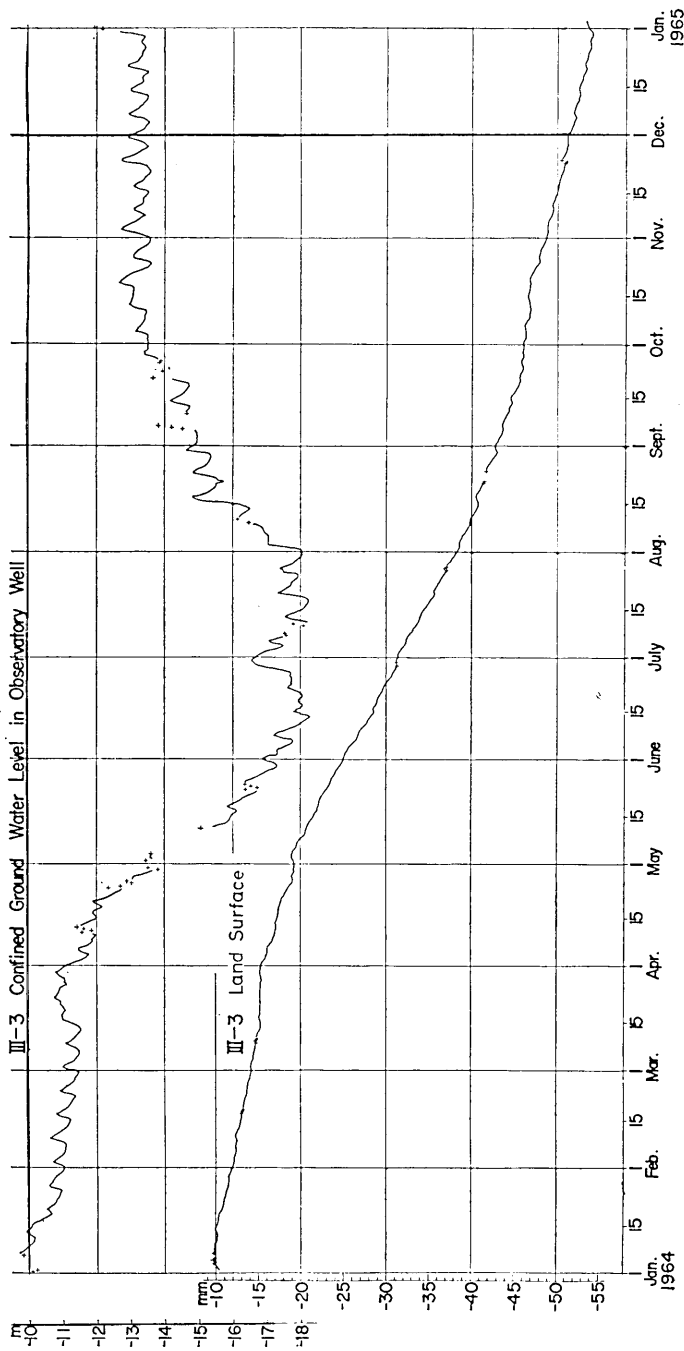


Fig. 13. Primary variations of both the ground-water level and the land surface on the 3rd observation well at the 3rd station.

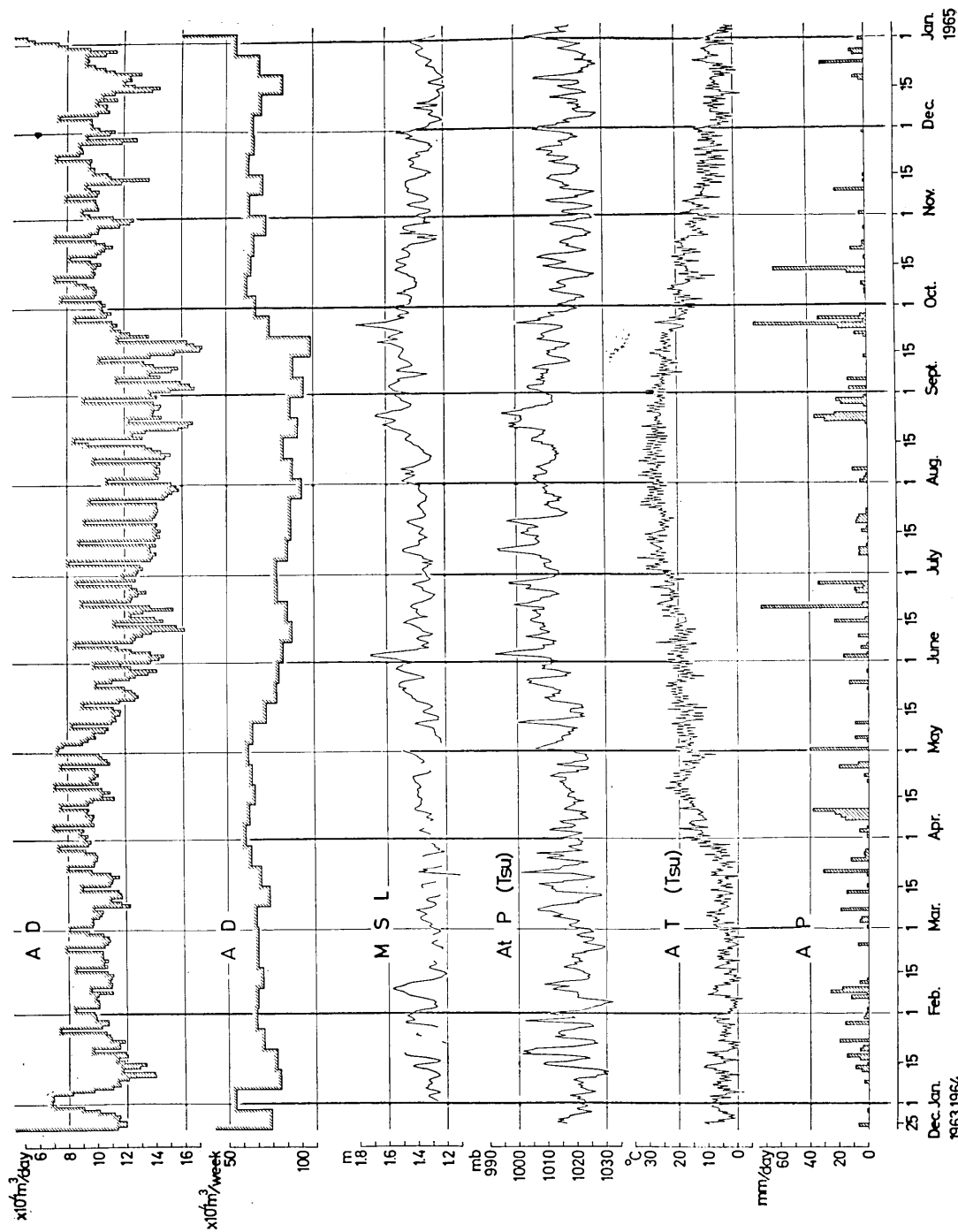


Fig. 14. Yearly variation concerning daily and weekly amount of discharge A D, mean sea level M S L, atmospheric pressure at Tsu A t P (Tsu), air temperature at Tsu A T (Tsu) and daily amount of precipitation A P.

5. 工業用井戸の揚水量との関係

このように検討して来ると、工業用井戸の揚水量こそ、地下水位および地表沈下の主要変動に最も関係が深く、直接に影響を及ぼしていると考えられる。

次に揚水量に影響されている順に各井戸について簡単に考察して見る。

a. 第Ⅱ観測点4号井

5月初めのゴールデン・ウィーク後揚水量は徐々に増加し始め、7月より9月中旬にかけては14万トンを連日越へ、中には17万トンを越へることもある。これに伴ひ-32mあつた地下水位も、5月中旬より降下し始め、7月より9月にかけては-35m以下に達している。更に地表沈下について言へば、同じく5月中旬より沈下の一途を辿り、それまで-4mm~-6mm程度の位置を保つていたものが、約3ヵ月半後には-36mmと30mm以上の沈下を示している。しかも揚水量が減少し、また水位も復旧した10月以降においても10mmの回復も出来ず、-28mm前後を示し、その上、工業稼働が大きく、工業用水の使用量が増加すると考えられる年末にかけては、再び-30mmまで沈下し、1年間に約26mm沈下している。この観測井のストレーナーは-171~187mで、工業用井戸のストレーナーの最も多く集つている深度に位置しているので、この井戸で観測された地下水位、地表沈下の変動は、工業用井戸の揚水量に最もよく左右されている。この井戸のみで考察すると、揚水量が1日12万トン(1週80万トン)以内であると、水位も-34m以上にあつて、この状態ならば、地表沈下は進行せず——勿論回復もしないが——平衡状態に保たれているようである(例へば、1月10日頃~5月末、9月末~12月15日頃)。一方、揚水量が増える5月末から9月末にかけては、前述の通りで、地表沈下は急速に進んでいる。また9月末以降の沈下は休止するとは言へ、大量に揚水した後では水位は回復しても地表のlevelは5月以前の状態には回復していない。これから考へると、夏場だけで1年間分の沈下が行はれると言つても過言ではないであらう。

b. 第Ⅱ観測点3号井

この場合も、量的には少いが、第Ⅱ観測点4号井と同様なことが言へる。しかもこの井戸では、9月以降、揚水量が減少し従つて地下水位が上昇復旧しても地表沈下については回復することなく、1年間に-4mmより-19mmまで約15mmの沈下をしている。

c. 第Ⅰ観測点4号井

第Ⅰ観測点でも、工業用井戸の揚水量、地下水位、地表沈下の間に前述と同様な関連が見られる。この井戸では、地下水位には、それ程激しい変化は認められないが、地表沈下には揚水の影響が如実に現はれている。第Ⅱ観測点の3号井と4号井での変動の中間的な現象で5月中旬より沈下が進行し、9月末一旦回復しかけるが、12月中旬には再び9月末の状態まで沈下が進行している。1年間には-8mmより-34mmまで、約26mm沈下している。

d. 第Ⅰ観測点3号井

ここでは地下水位は、揚水量に著しく左右され、a.の場合と殆んど同様な変遷を示して年末には水位は回復している。地表沈下は、急激な変動はなく直線的に推移し、-4mm

より -12 mm と1年間で約 8 mm 沈下している。

e. 第Ⅲ観測点3号井

この井戸では Fig. 14 に示された揚水量との関係は少く、地下水位が年初に -10 m あつたものが、4月頃より降下し始め、6月より8月初旬にかけて -18 m まで達し、その後徐々に上昇して10月以降は $-13\sim-14\text{ m}$ と略一定である。他方、地表沈下は年初に -10 mm であつたが、3月迄に -15 mm まで沈下し、4月に入ると水位の降下に対応して沈下速度が増し、4月末～5月始めのゴールデン・ウィークおよび水位の回復している9月下旬より約1カ月は沈下は休止しているが、その他の期間では終始沈下を続け、年末には -54 mm に達し、約 44 mm 沈下している。尚、10月末からの沈下速度は、勿論、水位降下の著しい4月～9月中旬のそれに比べて少くなつている。このように第Ⅰ観測点、第Ⅱ観測点と大分趣が異なるのは、この地域が四日市の工業地帯より遠く離れているためと考へられ、また、未開発の場所でもあるので、少しの揚水量でも急激な変化をするものと考へられる。

以上、地下水位および地表沈下に与へる工業用井戸の揚水量の影響を述べた。一般に3号井よりも4号井の地下水位が工業用井戸の揚水量により多く depend しているが、これは3号井のストレーナーの位置が第Ⅰ観測点で $-33\sim-38\text{ m}$ 、第Ⅱ観測点で $-33\sim-37\text{ m}$ 、4号井ではそれぞれ $-288\sim-320\text{ m}$ 、 $-171\sim-187\text{ m}$ で、Fig. 1 に示されているように、工業用井戸のストレーナーの位置が $-50\sim-340\text{ m}$ (主として $-100\sim-190\text{ m}$) にあることから領られる所である。

前述のように、第Ⅰ、第Ⅱ観測点の4号井および第Ⅲ観測点の3号井における1964年1月～1965年1月の1年間の沈下量は、それぞれ 26 mm 、 26 mm 、 44 mm である。一方水準測量の結果、1964年2月～1965年2月の1年間における上記観測井のI型鋼の沈下量は、それぞれ、 30.7 mm 、 29.5 mm 、 42.5 mm である。これらの量より考へると、地表沈下の大部分は地殻変動によるものではなくて、軟弱地盤の収縮による、いわゆる地盤沈下に基くものと考へられる。

6. 結 語

今後、更にいろいろ検討すべき点も多くあるが、これは1号井、2号井等浅い井戸に就いて解析考察する次の機会に譲る。しかし以上述べたような考察からしても、工業用井戸の揚水が、地下水位、更には地表沈下に相当大きな役割を演じているといふことが判明した。

終りにこの研究に関して終始、御激励、御援助を賜りました吉山良一教授、那須信治名誉教授に衷心より厚く御礼申し上げる。また尤大な観測資料の解析について、佐藤泰夫教授、京都大学中川一郎助教授より頂いた、懇切なる御指導に対して深く感謝する次第である。最後に貴重な観測資料を御提供下さつた津地方気象台、三重県四日市港務局、北伊勢地盤沈下調査会、特に種々の御協力を頂いた同会事務局、三重県工業課の岡本正之課長、谷村和郎技師に対して厚く感謝の意を表する次第である。

16. *On the Variation of a Ground-Water Level
and a Land-Surface Subsidence due to
Ground-Water Withdrawal, I.*

By Shawzou KOMAKI,
Earthquake Research Institute.

1. Introduction

For many years the subsidence of land surface has been known to be occurring at several places in Japan, due mainly to ground-water withdrawal for industrial use. This phenomenon occurs also in many areas in foreign lands. One of the most outstanding subsidence areas is the harbour area of Los Angeles and Long Beach in the United State.

At Yokkaichi and its vicinity, situated about 30 kilometres southwest of Nagoya, the subsidence of a land surface has received considerable attention recently. Since July 1963, discharge of ground water has been controlled for industrial plants. Fig. 1 displays a depth distribution of industrial using well and its strainers in the controlled area (see Fig. 3) for removal of ground water. The elevation changes on the north-western coast of the Bay of Ise, including this area, for periods from Feb. 1963 to Feb. 1964 and from Feb. 1964 to Feb. 1965 are shown in Fig. 2 (A) and (B) respectively.

2. Observation

As one of the investigating methods for substance and causes of subsidence, observation wells were installed at three stations as shown Fig. 3 and observation has been carried out since August 1963 (see Figs. 15~17). The profiles of the area are given in Fig. 4. At each observation station, the 1st and the 2nd wells have their bottom fixed at the upper (alluvial) and lower (diluvial) sand and gravel layer respectively and have their strainer at the same layer as an aquifer, too. The 3rd well reaches the sand and gravel layer underlying the lower clay and silt layer, and 4th well extends to a deeper aquifer, as shown in Fig. 5.

The form of the observation well is illustrated in Figs. 6, 7 and 18~20. A measuring apparatus of water level is set on each well, and one for subsidence each well except the 1st one. With such apparatus, the variation of a confined ground-water level and of a contraction of the surface layer — the amount of protrusion of the tubing pipe to the steel beam fixed on a land surface — is observed. The casing pipe protects the tubing pipe from yielding and other effects attributable to surrounding soil pressure.

3. Observational results.

Examples of the records are shown in Fig. 8 (Sept. 21~23, 1964) and Fig. 9 (Dec. 9~14, 1964). In these figures, tide curves of the same periods are affixed which are deduced copies so that their time scale is coincident to that of the record of ground-water level. On the 25th of September, the confined ground-water level rose rapidly and land surface considerably in all wells, in particular in the 4th well at the 2nd observation station. This phenomenon seems to have been caused mainly by curtail operations of most industrial plants when a typhoon passed across the Bay of Ise from the south-

southwest to the north-northeast. Except for the above-mentioned unusual disturbance, oceanic tides exert an influence on a variation of ground-water level and of land surface, especially at the 2nd and the 3rd observation stations near the coast. The tidal station is about 200 metres away from the 2nd observation station and is controlled by the Yokkaichi Harbour Bureau.

In order to understand the influence of oceanic tides more clearly, hourly values read from the records of ground-water level and of land surface on the 4th well of the 2nd observation station in February and August are indicated in Fig. 10 (A) and (B).

In a similar way, hourly values of the tide curve for same periods are shown in these figures. Comparing these observed curves, we find that oceanic tides have a great effect upon a variation of the ground-water level and of the land surface. For the purpose of inspection the other effects excepting oceanic tides, hourly read values of ground-water level and of land surface on the 2nd, the 3rd and the 4th wells at the 1st observation station which are influenced less by oceanic tides because of situation away from coast, and hourly values of the air temperature and the atmospheric pressure at Tsu Meteorological Observatory, situated about 30 kilometres southwest of Yokkaichi, are also shown in Fig. 10 (A) and (B). Furthermore, in these figures, the daily amount of precipitation observed at Yokkaichi and the daily amount of discharge of industrial using wells in the controlled area are given. By considering these figures, we reach the conclusion that the atmospheric pressure and the amount of precipitation scarcely has any direct influence upon the variation of the land surface as well as of the ground-water level, and that the land surface shows a fluctuation the period of which is about one day and which seems to be affected by the air temperature, and that the variations of the land surface on the 4th well and of the ground-water level on the 3rd well depend particularly on the amount of discharge, with periods of about one day and one week. Moreover, considerations lead to the belief that the cause of the daily fluctuation appearing as a variation of the land surface only is possibly due to solar radiation besides the effect of air temperature.

4. Analysis.

The variation of ground-water level and land surface observed is generally composed of two parts. That is, one is a primary variation with long period due probably to removal of ground-water only, and the other is a variation disturbed by oceanic tides, meteorological effects and other factors with periods of about one day or less. In order to obtain the primary variation of ground-water level and land surface, these disturbances must be eliminated from observed data.

As the eliminating methods available, successive moving means 24 and 25 hours-reading have been customarily used for a long time. The moving mean of 25 hours is satisfactory to the lunar components, but not to the solar ones. Conversely, the moving mean of 24 hours is satisfactory to the solar components, but not to the lunar ones. An excellent method satisfactory to both the components was devised by A. T. Doodson and H. D. Warburg in 1941, as a method for estimation of a mean sea level by eliminating oceanic tides. This was a 30 hours' selected mean and is usually called "Admiralty method". The method, however, necessitates considerable labour in its calculation. In 1957, B. P. Pertzev succeeded in halving the labour of calculation, by simplifying the Admiralty method without any lowering in accuracy. His efficient method is a 15 hours' selected mean, as a method for estimation of the drift curve of gravimeter. This method can also be applied for determining the secular variation curves of ground-water level and land surface, or in other words, for determining their

zero lines by eliminating effects of oceanic tides, meteorological effects and other factors with short periods from observed data. The method was ascertained to be excellent by many investigators. Therefore, the primary variation curve, namely the zero line, was determined from all the hourly observed values by this method proposed by B. P. Pertzev.

Reading of records was made at every hour for about a one year period at 00 hour 1st Jan. 1964 to 07 hours 4th Jan. 1965. For each observation, therefore, 8864 hourly read values were used in calculation, unless there was omission in recording. Calculations were carried out by an electronic computing machine "IBM-7090".

5. Discussion.

Calculating by the Pertzev's method above mentioned, we obtained primary hourly values of ground-water level and land surface for the period 18 hours 1st Jan. 1964 to 13 hours 3rd Jan. 1965. The primary variation curve of each observation was plotted by values at every 06 and 18 hours of these calculated ones. The primary variation curves concerning the deeper wells of the 1st, 2nd and 3rd observation stations are shown in Figs. 11, 12 and 13 respectively. Similarly, using hourly values of the tide curve, hourly values of its zero line, namely of the mean sea level, were determined by the Pertzev's method, and the mean sea level was plotted by the values at every 06 and 18 hours, as shown in Fig. 14. The other variation curves shown in this figure were drawn from the daily and weekly amount of discharge of industrial using wells in the controlled area, the atmospheric pressure values at every 03 and 15 hours, and the air temperature values at every 06 and 18 hours observed at Tsu Meteorological Observatory. Moreover, the daily amount of precipitation observed at Yokkaichi is given in the figure.

The following can be mentioned as conclusions from the present investigations of which results are shown in Figs. 11~14. Although it is not carried out as yet the investigations into data with regard to the 1st and 2nd wells at each observation station, the conclusions will not, it is believed, undergo a considerable change.

1. It is likely that primary variations of both the ground-water level and the land surface scarcely have any relations with the mean sea level. The mean sea level almost reverts to a former state for a year period, in spite of effects of atmospheric pressure. On the basis of the information, the subsidence of land surface is probably not due to vertical displacement of the earth's crust, but to the shrinkage of surface layers of soft clay and silt.
2. As above-mentioned, the mean sea level has a yearly variation in which it is higher in summer and lower in winter, with ripple variations due to atmospheric pressure. However, it appears that the atmospheric pressure has no effect on the primary variations of land surface as well as ground-water level.
3. It seems that the air temperature hardly has any direct influence upon the ground-water level and of the land surface, similarly. On the other hand, the air temperature has a close relation with the amount of discharge of industrial using wells. For instance, there was a close relation between them when air temperature suddenly dropped on the last week or so of September. At first sight, therefore, the air temperature seems to have a relation with the primary variations, but the variation of amount of discharge lies in its relation in fact. Then there is presumably no substantial relation between the air temperature and the primary variations.
4. The amount of precipitation has no effect on both primary variations, within the present amount.



Fig. 15. The 1st station of observation well.

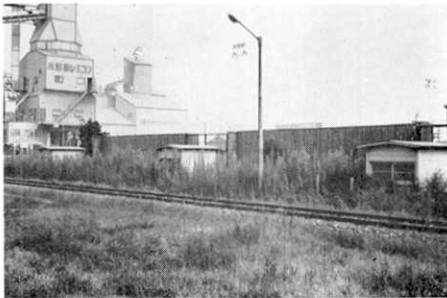


Fig. 16. The 2nd station of observation well.



Fig. 17. The 3rd station of observation well.

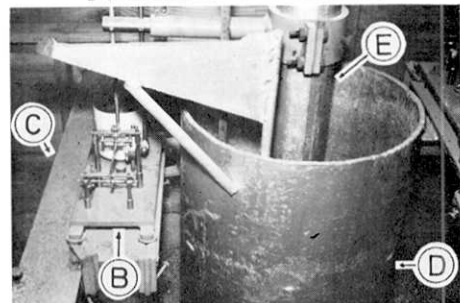
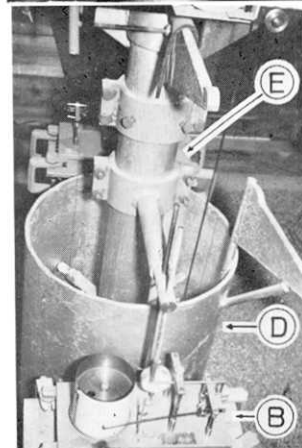
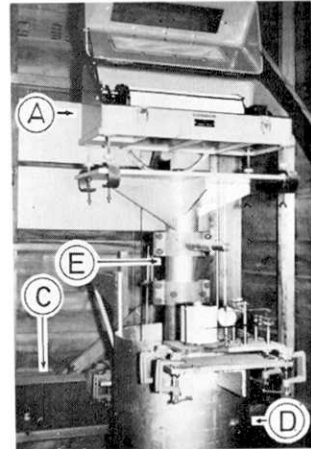


Fig. 18~20. Measuring apparatus of confined ground-water level and of subsidence

Ⓐ: Measuring apparatus of confined ground-water level. Ⓑ: Measuring apparatus of subsidence. Ⓒ: Steel beam. Ⓓ: Casing pipe. Ⓔ: Tubing pipe.

5. After various considerations of the results, it can be concluded that the amount of discharge of industrial wells exerts a great influence upon the primary variations of both the ground-water level and of the land surface. As can easily be seen from Figs. 11~14, the primary variations of the land surface as well as of the ground-water level may completely follow the amount of discharge. Amounts of the primary variation of the land surface for a year are about -26 mm, -26 mm and -44 mm on the deepest observation well at the 1st, the 2nd and the 3rd station respectively. Leveling results for the period Feb. 1964 to Feb. 1965 give -30.7 mm, -29.5 mm and -42.5 mm as elevation changes of the steel beam at the respective stations. On the basis of the results, it follows that the subsidence of land surface is likely caused by contraction of surface layers of soft clay and silt.