

新潟地盤沈下現象に対する考察

正員 傍島 淳*

要旨 新潟地区における地盤沈下現象は、天然ガスの採取がいちじるしく増大するにつれて顕著となってきた。沈下の原因を究明するため現地に新潟地盤沈下調査委員会を結成し、筆者は委員長として種々の調査を行なって資料を集めた。本論文は天然ガスの採取と地盤沈下の相対的関係について究明を行ない、その原因が主としてガス採取にあることを明らかにし、なお今後の沈下の予測を行なったものである。

1. 概 要

地盤沈下の実体を調査するため、沈下の激しい地区に一、二等水準点を多数設置し、その間にさらに細部測量点を設けて、各水準点の沈下状況を詳細に調査した。すなわち 1957 年 8 月に第 1 回水準測量を行ない、その後は大体半年ごとに測量を 6 回実施してその沈下の状況を知ることができた。一方天然ガス採取の状況は、比較的多量に採取が行なわれたのは終戦後であって、特に最近数年間は化学原料としての利用が活発になり、急激にその使用量が増大するに至った。

新潟地区的天然ガスは水溶性ガスのため、ガス採取にさいしてほぼ同量の地下水を同時に吸い上げることになる。この揚水は近くの河海に放水される。したがってガス坑井の位置は河海に沿って開きくされることになり、利用に便利な都市に集中する傾向がある。また深層ほどガス溶存率が高くなり、現在最も多く採取している層は地下 400~600 m の深所である。このガス採取量は年々増大し、現在では 1 日約 80 万 m³ に達している。

2. 地層の土質力学的性質

(1) 土質の概略

0~20 m 付近までの部分は、ほとんど細砂より成る砂で構成されている。-10~-40 m の間では砂とシルトの互層で、大体 4~5 層にわかれています。シルトは sand silt の分類に、砂層はいずれも細砂で 5% 程度のシルトを含有している。-40~-120 m の間の部分は厚いシルト層である。-140 m 付近までは、その上位よりつづいているシルト層で、これより -150 m までの間にはごく薄い粘土層が存在する。-150~-160 m の間は砂礫層である。-160~-220 m の間は砂が卓越している。

-220~-360 m, -220~-230 m の間の部分は砂礫層である。-280~-360 m の間の部分は砂の薄層をふ

くむ粘土層である。-360~-520 m の間の部分は砂、礫層が卓越し薄いシルト層を 2 層はさんでいる。上部は -430 m 付近にあり、下部は -515 m 付近にある。-520~-700 m, -520~-560 m の間の部分はシルト層で、-560~-650 m は厚い砂礫層で、粒径の最も大きな層で、最大粒径約 5 cm くらいである。-660~-700 m までの間はシルト層が存在する。-700 m 以下、-700~-750 m の間は砂礫層より成り、これ以下の部分には厚いシルト粘土層が連続している。-820 m 付近では silt sand, -870 m 付近では clay silt, 以下 -900 ~-1100 m まで clay silt, silt clay に属するものが多い。新潟市内の地質の特徴として、全層を通じていえることは、粘土層、シルト層中にふくまれる clay の量が比較的少なく、シルト量の方が多いことである。

(2) 自然含水比

通常地下水位以下の冲積粘土においては、土の潤滑性がすべて水で満たされていると考えられている。従って粘土の性質に多大の影響を有している潤滑性と含水量とを同一指標として取扱うことができるわけである。

飽和度の深度分布について調べたところ、深度による影響はあまり見られず、ほとんど 90% 前後となっている。冲積土層の地盤の状況は、それを構成する粘土の自然含水量によって決定的に支配されるといつてもよい。また地盤の圧密度を考える場合、その地盤を構成する粘土がいかなる潤滑性を有しているかは、きわめて重要な要素となる。本試験において最も慎重かつ詳細に行なったのは、この自然含水量についてである。この結果潤滑性比の深度分布は、全層を通じておおむね粘土含有量と対応した傾向を有することがわかった。

(3) 見掛け比重

見掛け比重は、一般には粘土含有量に対応した傾向を示すものである。見掛け比重の深度分布について述べれば、地表砂層部では 1.9~2.0, -5.0 m の粘土層では 1.55 となる。-40~100 m の間で粘土層は、上部の砂層につづく部分は 1.8~1.9, -50~-70 m の部分においては大体 1.8, -90~-100 m の間の部分では 1.7~1.8, -300~-350 m の間にある粘土層は 1.7~1.8, -1000 m 付近は 1.9 程度となっている。

(4) 土粒子の比重

土粒子の比重は深度による差ではなく、礫物粒子の混合状態、すなわち堆積物系統（水系）による差があるだけである。新潟冲積層の土粒子の比重はほとんど 2.60~2.71 の間に分布し、粘土層の最頻度 2.64~2.65, 砂層

* KK 水野組 取締役

では 2.65~2.70 である。

ただ例外としては、植物性炭質物をふくんだ粘土は、2.55~2.57, -480 m, -600 m 付近にある白色の浮石質の粗砂は 2.53~2.56 という低い値を示した。

(5) 塑性指数

塑性指数の深度分布について述べれば、-20~-25 m 付近では 25~45 で最も高い値を示している。-40~-65 m 付近では 15~25 で最も低い値を示し、-65~-100 m 付近では 20~30 の値を示している。

(6) 水素イオン濃度(pH)

pH 値の深度分布は、大体地表 ~-200 m までの間では 7.0~7.5, -200~-450 m では 7.5~8.0, -450~-1100 m では 8.5~9.0 程度の値を示している。

(7) Cl⁻ イオン濃度

土壤の間げき水中にふくまれる塩素量を測定する試験で、塩素含有量の深度分布は -10 m で 5 000~9 000 mg/l, -30 m で 13 000 mg/l, -50 m で 8 000~9 000 mg/l, -80 m で 1 500 mg/l, -100 m で 500 mg/l, -200 m で 1 000 mg/l, -450 m で 1 500~2 000 mg/l, -1 000 m で 12 000~13 000 mg/l となっていて、地表より -30 m 付近までは海水の影響で、信濃川の河水の塩素含有量とほぼ同程度である。以下急激に減少して -100 m 付近で最低値となり、それ以下では再び増加して、-450 m 付近まではメタンガス溶存水の塩素含有量とほぼ同程度の値を示している。

(8) 灼熱減量

有機物含有量を調べるために灼熱減量を測定し、あわせてアンモニア含有量測定試験を行なった。この減量は揮発性塩類、化合水もふくまれるが主体は有機物である。灼熱減量とアンモニア含有量とは対応した値を示し、-140~-145 m 付近の粘土だけほかに比較して値が目立って大きいことが特徴である。

(9) 圧密試験

圧密試験機は定荷重式 6 連動型、単動型の両者を使用した。最大垂直圧力は 6 連動型使用の場合は 18, 30, 35 kg/cm² 単動型は 50 kg/cm² まで載荷できた。使用した試料は粘土および砂で、載荷期間は粘土が 24 時間、砂は 21~34 日間であった。図-1 は間げき比-圧力曲線で四日市の試料も併示した。これから Casagrande の方法で各試料の先行荷重を求め、その深度分布を示すと図-2 のごとくなる。先行荷重は深度に対して直線的に増加しており、その傾斜は約 0.075 kg/cm²/m である。この直線は地表面で原点をとおらず 1~2 kg/cm² の過剰先行荷重があることを示す。砂疊層の地下水圧が低下するとその砂疊層およびその上下の粘土層はその低下水圧に相当する圧縮荷重を受けるのであるが、圧密試験を行なった試料の上下の砂疊層の水位は現在 15~25 m 低下している。計算によればこれらの層では圧密度 13~22% 程

図-1 圧密試験結果

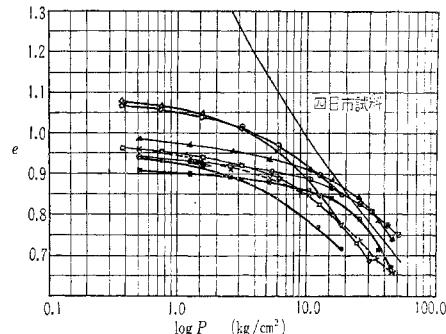
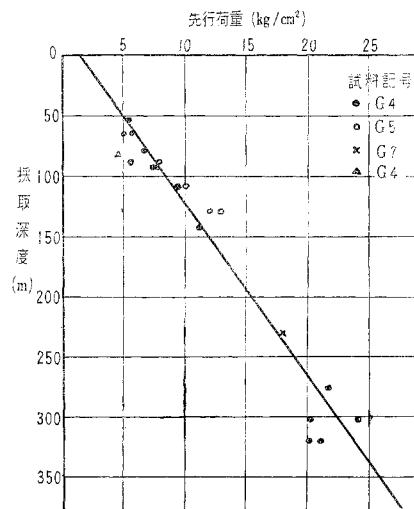


図-2 深度-先行荷重曲線



度にすぎず、圧密はまだ層の中央部には達していない。よって 1~2 kg/cm² の過剰先行荷重は水位低下の起こる前から存在したと考えられる。この理由は不明であるが、10~15 m 厚の土かぶり重量に相当するから、かつてこの地方に砂丘が存在していた影響とも考えることができる。圧密係数 C_v の値は一次圧密の終了時が判然としない試料が多く、図-3 に示す程度に点が散っているが、先行荷重以上では $1 \sim 4 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ の範囲にあり、 $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ と仮定しも大過ないようである。体積圧縮係数 m_v の値も図-4 に示すように先行荷重を

図-3 圧密係数-圧力図

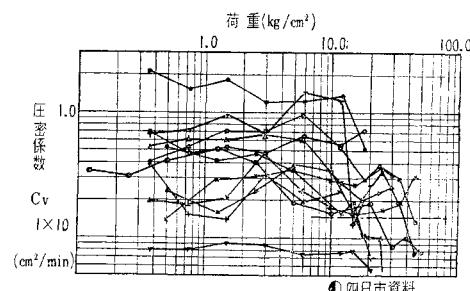
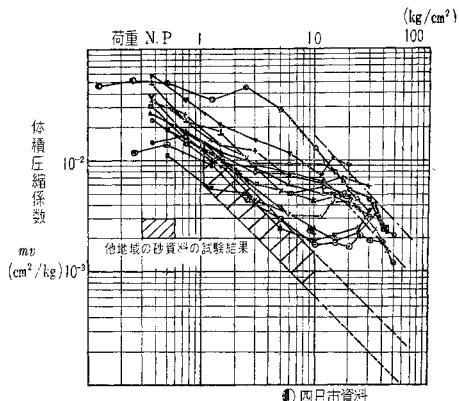


図-4 体積圧縮係数-圧力図



越えるとバラツキの範囲が狭くなり、荷重の増大に従って減少する傾向を示す。すなわち $20 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で $4 \sim 8 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg}$ から $50 \text{ kg}/\text{cm}^2$ で $1.5 \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg}$ となる。深度 700 m までの層を考えるとその平均の荷重は約 $26 \text{ kg}/\text{cm}^2$ であり、この圧力に対する m_v の値は $3.5 \sim 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg}$ である。長期間の圧密の計算を行なう場合には 24 時間載荷によって求めた m_v の値を 50% 程度増して用いるのがよいから、 $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^3/\text{kg}$ を全層の平均値と考えてよいであろう。また砂層の体積圧縮係数については試料が全くないので不明であるが、併示したほかの試料の試験結果から同様に $26 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 付近の値として $4 \sim 8 \times 10^{-4} \text{ cm}^3/\text{kg}$ 程度と考えることができよう。

(10) 試験結果に対する考察

前記各項目試験結果について考察するに、新潟の粘土層は各層とも粘土含有量 $10 \sim 30\%$ 、シルト $40 \sim 70\%$ 、砂 $10 \sim 15\%$ 程度で、土質工学で普通に使われている分類に従がうと大部分はシルト質粘土ロームである。深度 $300 \sim 600 \text{ m}$ の試料についても含水比 $30 \sim 40\%$ 、見掛け比重 $1.75 \sim 1.85$ 、間げき比 $0.9 \sim 1.2$ 程度で、上層の試料と大して変わっておらず、地表面付近のよく締った土と同程度の値である。深い試料の採取時のくらんが多く、試験までの間に試料が膨張して実際よりゆるい状態の値を示すことは予想され、実際に飽和度 $80 \sim 90\%$ を示す試料が多い。しかし深度を考えるとこの影響を考慮してもゆるい土であるといえる。今まで新潟のように深い試料の土質試験を行なった例はほとんどないため、試料の採取運搬および試験については多少不安がある。また圧密試験機の性能上十分な高圧力を加えることができず、先行荷重以上で 3~4 段階の載荷しか行なっていない。しかしいずれの試験結果もはなはだしいバラツキは無く、一応信頼できる結果が得られたものと考えられる。また圧密試験結果についてもほかの試料による試験結果と同様の傾向を示しており、このような深いところの土でもその圧密に対する性質は普通の浅い部分の土と

変わらず、従来の圧密理論による取り扱いが可能であることを示している。

3. 観測井による調査

(1) 概要

土質調査のためのボーリング孔を利用して孔底から観測用鋼管を地上まで立てて、地盤の収縮にともなって生ずる二重钢管の内管の抜け上り量を直接に測定する観測井の方法を採用した。この埋設二重管の地中そう入深度をいろいろと変えることによって地盤収縮現象の深度分布が明らかになり、この観測井群を沈下速度の異なる場所に何箇所か設置することにより、深度分布の地域的変化が明らかになるわけで、水準測量を併用することにより、一層の効果を発揮する。

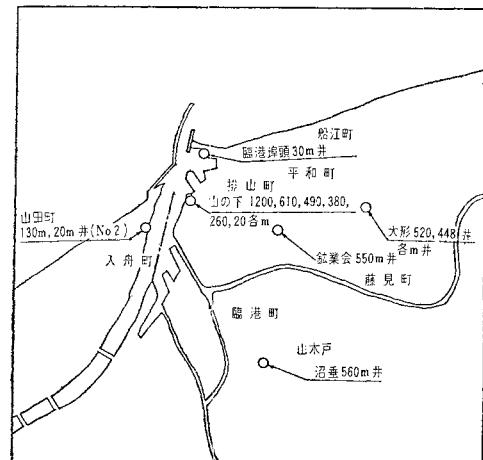
最初に設置したのは 1957 年で、最も沈下の激しく揚水量も多い山の下地区に 610 m (G_5 層), 380 m (G_4 層), 260 m (G_3 層) の各観測井が観測を開始し、同時に $20 \sim 30 \text{ m}$ の浅い観測井も設置して浅層部の調査も平行して行なった結果、 $380 \sim 610 \text{ m}$ の間における収縮速度が最も大きいことがわかった。その後大形、沼垂、秋葉通り各地区にも G_5 層, G_4 層に相当した深度に観測井を設置した。また 1958 年には 610 m 以深の収縮量を調べるために山の下地区に 1200 m の観測井を追加設置した。

(2) 構造

地盤収縮は地下水位の変動と密接な関係があるので、地盤収縮の観測と同時に地下水位の変動も測定できる構造とした。二重管の内管は滞水層である自然疊層の基礎上に静置して、この内管の抜け上りによってその下端から上の地盤の収縮を測定するものである。滞水層内の水は、ストレーナーをとおして管内を上下する。この水位変動を記録するため、フロート式水位計を取りつけた。観測井の設置箇所を 図-5 に、構造を 図-6 に示す。

(3) 観測成果に対する考察

図-5 観測井設置位置図



山の下観測井群のうち610 m, 380 m, 260 mの三井の月平均水位と月平均一日当収縮量(速度)との関係を図-7に示す。また水準測量の結果と対比して次のことがわかった。

- a) 各観測井の記録より得た収縮速度と、この期間において近くの水準点の水準測量結果より得た沈下速度は相関があり、沈下速度の時間的变化が一致している。
- b) 沈下速度の地域的変化は水準測量による沈下の地域的変化と一致している。
- c) 異なる構造の観測井を設置しても大差のない収縮速度を示し、最初に作っ

図-6 観測井

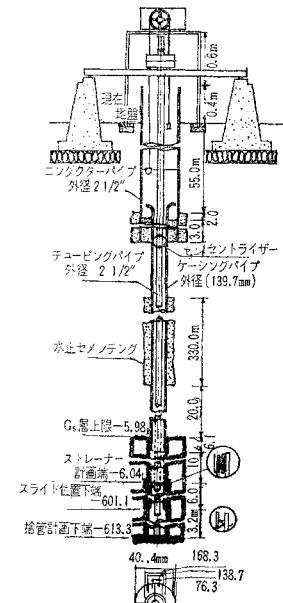
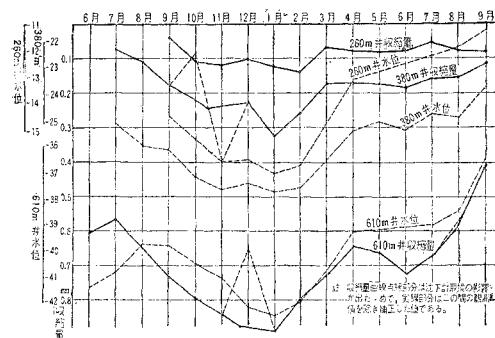


図-7 山の下観測井、月平均水位、収縮量、速度関係図



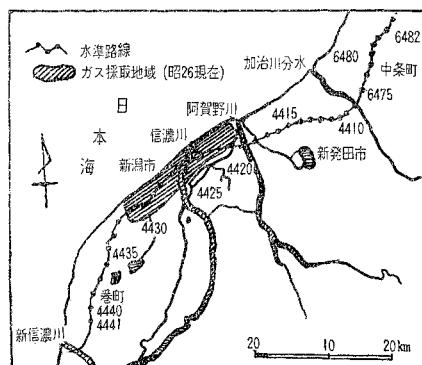
た山の下観測は構造上別に欠陥はないものと考える。

- d) 同一地点の深さの異なる観測群の数値は合理的に深いものほど大きな値を示している。

4. 地盤沈下の状況

(1) 沈下の経年変化

図-8 一等水準点路線



まず水準測量結果による沈下経過について述べる。新潟市付近の一等水準路線で1898年に設置されて以来、今までに9回の改測が行なわれた。その結果による地盤沈下の概略は図-8および図-9

に示す。一方検潮記録から1957年頃から平均潮位のいちじるしい上昇が見られ、地盤沈下が一般に認識されるに至った。1951~1955年までの沈下は、5cm/年程度であったが、1956年以降急激に増大し、1958年には50cm/年に達した。また構造物の沈下を防波堤、埠頭、物揚場について測定した結果も1955年頃を境として急激に増大し、1958年には、30~40cm/年に達したことがわかった。

(2) 沈下の地域分布

1957年8月以降は広く2等水準点を設けて測定を行ない、約半年ごとに測量した結果沈下の地域的分布状況も順次明らかにされるようになり、その一例を図-10に示す。これらの測量によってガス水汲み揚げ状況と対応する沈下速度の分布状況の変化を知ることができた。

(3) 地層の収縮量の深度分布

各所に観測井群を設けて、内管の抜け上りを測定して

図-10 新潟市周辺沈下変動図

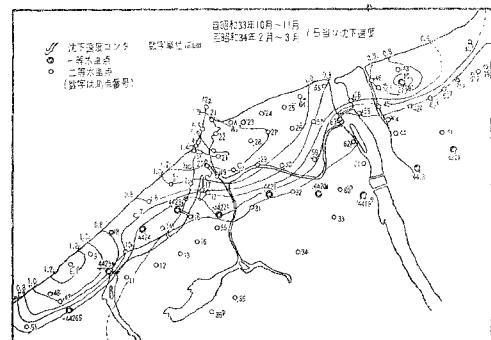
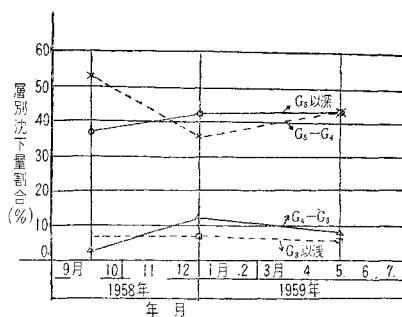


表-1 層別、時期別収縮量の地表面沈下に対する割合

	自 1958年 9月 至同10月			自 1958年11月 至 1959年 2月			自 1959年 3月 至同 7月		
	層 別			層 別			層 別		
	収縮量 (mm/日)	収縮量 (mm/日)	割 合 (%)	収縮量 (mm/日)	収縮量 (mm/日)	割 合 (%)	収縮量 (mm/日)	収縮量 (mm/日)	割 合 (%)
地表面の沈下	1.2		100	1.4		100	1.2	0.421	35
1200 m 井	欠	0.042	37	欠	0.609	43	0.779	0.098	8
610 m 井	0.758	0.636	53	0.791	0.501	36	0.681	0.515	43
380 m 井	0.122	0.050	4	0.290	0.170	12	0.166	0.099	8
260 m 井	0.072	0.076	6	0.120	0.115	8	0.067	0.065	6
20 m 井	-0.004	-0.004	0	0.005	0.005	0	0.002	0.002	0

注: - は降起を示す, 1200 m 井は 1959 年 5~7 月の記録より算定
内管底から上の収縮量を測定することができた。現在までに 13 本の観測井を設けそのうち 10 本は同時に砂礫層の水位を観測している。山の下地区には 20 m, 260 m, 380 m, 490 m, 610 m, 1200 m の 6 本を隣接して設け、これらの記録によって、水準測量の行なわれた 3 つの時期にわけて示すと 表-1, および 図-11 が得られる。これから次のことがわかる。

図-11 各層別収縮量分担図



- a) 20 m 以浅の地層の収縮量はほとんど認められない。
- b) 20~260 m および 260~380 m の地層の収縮量によってそれぞれ全沈下量の 5~10% ずつの沈下を起こしている。
- c) 380~610 m および 610 m 以下の地層の収縮量によってそれぞれ約 40% の沈下を起こしている。
- d) 1200 m 以深に原因のある沈下が全沈下量の 30% 以上もあるよう見える。ただ 1200 m 観測井は完成後日が浅く、まだ満足な記録は得られていないので記録がもっと落ちつくまではわからない。

表-2 新潟地区年度別ガス生産量

年 度	ガス生産量 (m ³ /日)	増加 指数	稼働坑井数	一坑井当り ガス生産量 (m ³ /日)
1947	38 000	10	26	1 500
1948	73 000	19	46	1 600
1949	68 000	18	60	1 100
1950	87 000	23	78	1 100
1951	105 000	28	90	1 200
1952	145 000	38	102	1 300
1953	175 000	46	113	1 500
1954	217 000	57	140	1 500
1955	251 000	66	170	1 500
1956	294 000	77	205	1 400
1957	460 000	121	317	1 500
1958	580 000	155	346	1 700

5. 地下水圧の状況

(1) ガス採取量および揚水量

揚水量に関する資料は重要である。調査委員会による資料は最近のもののみであるが、天然ガス採取の際のガス量とそれから分離する水との割合は、層別に大体一定している。従って、ガスの採取資料から揚水量を推定することは可能である。新潟市全域のガス生産量の経年変化は 表-2 および 図-12 に示す。またガス坑井 1 本当たり生産量は全期間を通じて大差ないので、ガス坑井数の変動からも揚水量の変化を推定できる。図-13 はガス坑井数の変化を示す、揚水量の増大を地域別にわけて港頭地区、中心地区、内野地区、松浜地区にわけて各地区的稼働井数の推移を調べると、港頭地区の揚水量は最大であるがすでに飽和して 1957 年以降は増加を示さないのに、内野地区、松浜地区の揚水量の増大がいちじるしいことがわかった。

(2) 地下水圧の低下状況

地下水位の資料はガス業者が測定した資料と、観測井によるものとがあり、水位は大体その水圧を代表するものと考えられる。これらの資料から地区別に分類した結果を 図-14~17 に示す。これらから次のことがわかる。

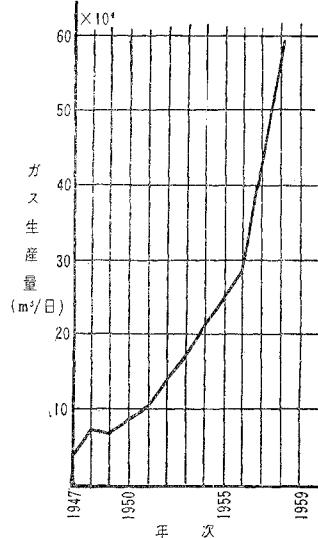
- a) 各地区とも各層とも水位は、ほぼ直線的に低下している。
- b) 各地区とも揚水量の多い、深い層ほど水位低下速度は大きく、かつ水位も低い。また G_{4'} 層と G₃ 層の水位はほぼ等しい。

c) 開発の早く行なわれた港頭地区、中心地区の G₃, G₄ 層の水位低下は早くから起こった。

d) 内野地区、松浜地区で水位低下は開発の行なわれた 1957 年頃、すでに G₃ 層で -5~-10 m, G₅ 層で -20~-25 m 程度であり、その後急激に低下している。

- e) 水位低下を直線的であると見れば、その低下速度および水位が 0 m であった時期は 表-3 のようになる。一方観測井の記録から 図-18 が得られる。これから次のことがいえる。
- f) 各層の水位が大体平行的に変動しているのは、ガスの需要の条件から各層

図-12 天然ガス生産量



のガス井稼働状況が似ているためであろう。

g) 1959年2~5月に水位が3~4m回復した。これは港頭地区の約60本のガス坑井が2~3月から稼働を休止した影響であると考えられる。

6. ガス採取と地盤沈下との対応

(1) 時期的対応

ガス生産量の少なかった時期の新潟付近の沈下は自然圧密程度のもの

であったが、揚水量の増加を見た1945年頃から沈下も第二期に入り、1957年以降は増加速度も急にいちじるしくなっている。港頭地区にある検潮器の示す潮位上昇と新潟地区的ガス生産量の関係を図-19に示す。また地域的にも揚水量と沈下量の相関は明瞭であって図-20

図-14 港頭部水位

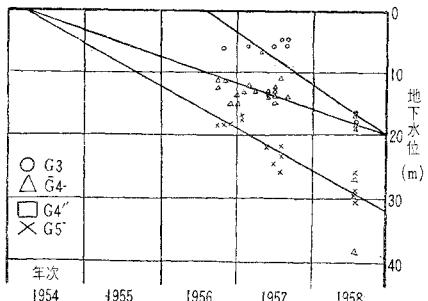


図-15 中心部水位

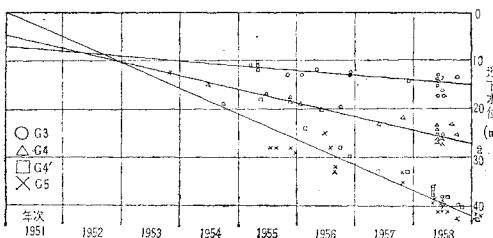


表-3 水位が0mであった時期および水位低下速度

	松浜地区			港頭地区			中部			内野地区		
	G ₃	G ₄	G ₅	G ₃	G ₄	G _{4'} /G ₃	G ₃	G ₄	G _{4'} /G ₅	G ₃	G ₄	G _{4'} /G ₅
水位が0mであった年月	1956年6月	1954年2月	1954年2月	1943年12月	1949年1月	1950年12月	1948年3月	1946年12月	1950年12月	1955年12月	1955年12月	1955年12月
水位低下速度m/年	8.0	4.0	6.25	1.0	2.75	5.25	1.5	2.0	5.0	2.0	3.5	5.5

に示すとくである。また前述のとおり1959年2月以降港頭地区で、約20本のガス坑井が稼働を中止したとき水位が3~4m回復した。この稼働中止の前後に水準測量が行なわれ、中止前後の沈下速度を比較したところ、休止区域外では沈下速度は20~30%増加したが、休止区域内では逆に10~20%の減少をきたしている。

(2) 地域的および深度的な対応

沈下量を測定して沈下速度分布図を作り、これをガス坑井分布図と対照するとこの関係は明瞭である。さらにこれを地域的にわけてガス坑井数堆積図をつくり、その地域の沈下速度の変化と対応させると一層明瞭である。

深度的対応については、地層の収縮は観測井の記録が示すように、揚水の行なわれている層の収縮は全沈下量の大部分を占めている。港

頭地区における1958年4~12月の各層別の揚水量の割合を表-4に示す。これと表-1の沈下量割合とを比較するとこの関係は明瞭である。

7. 地層圧縮量の計算

新潟地区における現在までの地下経過を地下水圧の低下によるものとして数量的にも説明できることを示し、将来の沈下予測を行なうこととする。

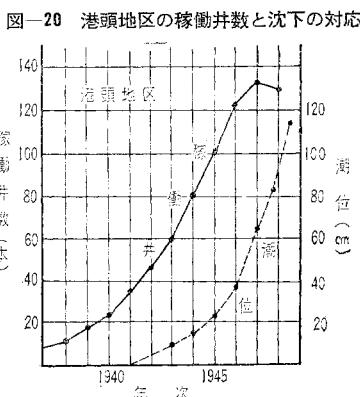
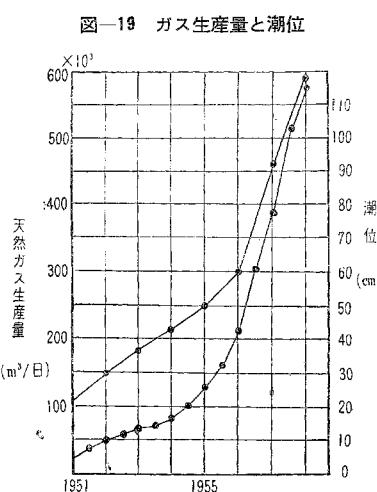


表-4 港頭地区層別揚水量

層別	G ₅	G _{4'}	G ₄	G ₃	計
揚水量	24 914	9 888	11 363	7 994	54 159
同比率	46	18	21	15	100

(1) 計算に用いる仮定

a) 土質柱状図 港頭地区の柱状図を簡単に整理して図-21のごとくする。

b) 砂礫層

および粘土層の性質 砂礫層は時間の遅れがなく弾性的に圧縮し、粘土層は圧密理論に従って圧密するものとし、それらの圧縮または圧密に対する土質常数は簡単のために全層にわたって一様な値を用いることとし砂の体積圧縮係数 $m_v' =$

$4.0 \sim 8.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg}$ 、粘土の体積圧縮係数 m_v やび圧密係数 c_v はそれぞれ $m_v = 5.0 \sim 10.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kg}$ やび $c_v = 1.5 \sim 3.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ とする。また $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の過剰先行荷重を受けたことがあると仮定し、それ以下の荷重すなわち -20 mまでの水位低下に対しては砂および粘土の体積圧縮係数を上記の値の $1/4$ にとる。

c) 水圧低下すなわち圧縮荷重の増加 表-3 やび図-14を使用する。したがって各砂礫層の荷重増加速度および荷重が $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ に達した時期は表-3、表-5のごとくなる。また地層に加わる圧縮荷重の状況は図-21の右図のごとくである。

d) 計算を始める時期 計算の便利のため1951年からの沈下状況の計算を行なう。1951年1月の水位は表-5に示すとくであり、各砂礫層とも1951年1月から表-5に示す水位低下が始まったものとする。

(2) 沈下状況の計算

a) 砂礫層の圧縮による沈下 荷重の増加速度すなわち水位の低下速度が一定で時間 $t=0$ から始まり、 $t=T'$ で $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ に、また $t=T$ で q_0 に達したとする。時間 t の時の砂礫層の圧縮量 S_s は、次式によって表わされる。

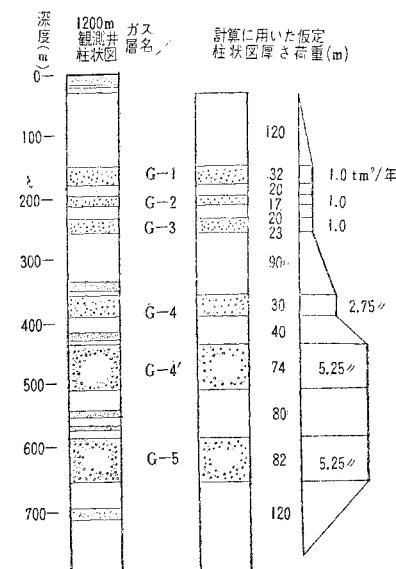
$t \leq T'$ のとき

$$S_s = 2 h_s \frac{m_v'}{4} \cdot q_0 \frac{t}{T'} \quad \dots \dots \dots (1)$$

表-5 水位が -20 m に達した時期

	水位が -20 m に達した年月	1951年1月の水位
G ₃		-7 m
G ₄	1957年1月	-5 m
G _{4'} G ₅	1955年4月(計算上1月とする)	0

図-21 計算に用いた柱状図



$$= 2 h_s m_{v'} \cdot q_0 \frac{t/4}{T}$$

$T' \leq t \leq T$ のとき

$$\begin{aligned} S_s &= 2 h_s \frac{m_{v'}}{4} \cdot q_0 \frac{T'}{T} + 2 h_s m_{v'} q_0 \frac{t-T'}{T} \dots (2) \\ &= 2 h_s m_{v'} \cdot q_0 \frac{t-3/4 T'}{T} \end{aligned}$$

$T \leq t$ のとき

$$\begin{aligned} S_s &= 2 h_s \frac{m_{v'}}{4} \cdot q_0 \frac{T'}{T} + 2 h_s m_{v'} q_0 \frac{T-T'}{T} \dots (3) \\ &= 2 h_s m_{v'} \cdot q_0 \frac{T-3/4 T'}{T} \end{aligned}$$

ここに、 $2 h_s$ は砂礫層の厚さ

$m_{v'}$ は砂礫層の体積圧縮係数

b) 粘土層の圧密による沈下 砂礫層の場合と同様に圧密荷重が時間 $t=0$ から一定速度で増加し、 $t=T$ で q_0 に達したとする。 $v=t/T$ とすれば圧密度 μ_R は次式で表わされる。

$v \leq 1$ のとき

$$\mu_R = v \left\{ 1 - \frac{8}{\pi^2} v M T \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^4} [1 - e^{-m^2 v M t}] \right\} \dots (4)$$

$v \geq 1$ のとき

$$\mu_R = 1 - \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{M T} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{m^4} [e^{-m^2(v-1) M t} - e^{-m^2 v M t}] \dots (5)$$

$$\text{ここで } M = \frac{\pi^2 c_p}{4 h_c^2}$$

c_p は粘土の圧密係数、 h_c は粘土層厚の $1/2$
また最終圧密量 S_e は次式で表わされる。

$$S_e = 2 h_c \cdot m_{v'} \cdot q_0 \dots (6)$$

任意の時間 t の圧密

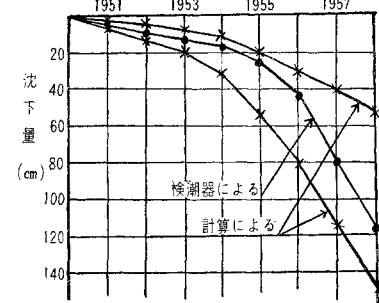
$$S_c = S_e \cdot \mu_R \dots (7)$$

c) 計算結果 以上得られた砂礫層の圧縮量 S_s と粘土層の圧密量 S_c を加えると沈下量が得られ、これを図-22 に示す。この図には検潮記録も併示した。

(3) 計算結果に対する考察と将来の沈下量の予想

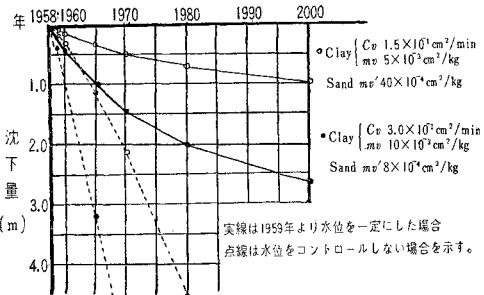
この計算は不十分な資料から大胆な仮定を行なって得られたものであり、議論も多いことと思われる。地下水 100 m の高圧力を受けている砂の圧縮性や粘土の圧密性については資料も乏しくその性質も明らかでない。また地下水位の変動も直線的低下のみではなく、かなりの変動でくり返し圧縮を受けたものと思われる。しかし図-22 を見ると実際の観測値と計算値の深度分布などはかなり一致していることがわかった。しかし G_6 層以下の開発も進みつつあるし、 G_5 層以下の砂礫層の水位も低下することが考えられる。これらを考えると沈下曲線の曲率も一そう大となり 1958 年の計算による沈下速度も観測値に近くなることと思われる。すなわち計算の精度を高めることにより一そう実際の観測値に近づくものと考えられる。

図-22 計算および検潮器による沈下量の比較



将来の沈下状況の予想も地下水位の状況を仮定すればこの方法で行なうことができる。各層の水位が 1959 年以降も従来の速度で低下する場合と、1959 年からは水位が一定に保たれる場合とにつき計算した結果を図-23 に示す。この図は概略の傾向を知るに止まるが、数量的には今後の観測資料の集積にともない、土質常数その他の仮定を修正し計算をやり直して行くべきである。

図-23 将來の沈下量の予想



また許容できる沈下速度を決めれば逆に許容水位低下量を求めるこどもできるわけである。しかし、 G_4' 、 G_5 層の水位が -20 m であった 1955 年の検潮記録の沈下速度は $10 \text{ cm}/\text{年}$ 程度であった。各層の水位を -20 m 程度に保てば沈下速度が $10 \sim 15 \text{ cm}/\text{年}$ 程度に減少するであろうという程度の推定は成立つものと思われる。

8. 結語

以上の諸調査によって新潟の地盤沈下の現象は天然ガスの採取にともづく大量の地下水汲み上げによって起こされているという、結論を資源調査会は発表するに至った。そのため地元はガス採取の規制を実施することとなり、1959 年 1 月の第一次規制に引続いて第二次規制として同年 9 月以降 81 坑井を停止することとした。

この結果地下水位は約 1 箇月で 3 m 回復し、沈下速度も減少することが明瞭に認められた。これらの諸現象から判断して新潟地盤沈下は天然ガスは非常に深層から採取されているとはい、砂礫層と粘土層の互層から成っている地盤の地下水圧の低下にもとづく地盤収縮の現象にほかならないことが判明した次第である。

(原稿受付: 1960.11.7)

STUDIES ON THE PHENOMENON OF GROUND SETTLEMENT IN NIIGATA DISTRICT (THE GIST).

By Minato Sobajima, C.E. Member

1. Outline

Settlement of ground in Niigata District was growing serious as the natural gas product increased.

2. Property of soil from the stand point of Soil Mechanics

The following is a brief explanation of the soil formation. Generally speaking the soil near the ground surface is of sand, at a depth ranging from 10 to 40 m it consists of alternate layers of sand and silt, at a depth ranging from 40 to 120 m it consists of a thick layer of silt and there exists sand-gravel layer at a depth of around 150 m and at a depth ranging from 160 to 220 m it consists of sand layer.

Paying a most serious attention, the water content of clay in the alluvial soil layer was fully investigated, and it has been revealed that the depth distribution of the void ratio tends to correspond to the clay content throughout the entire layer and also that the degree of saturation is little affected by the depth, generally being somewhere around 90%.

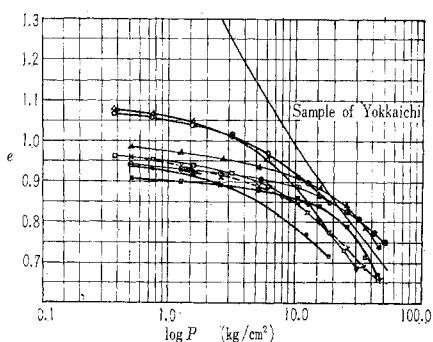


Fig. 1 Consolidation Test

The result of consolidation test is shown in Fig. 1. An excess precompression of somewhere around $1 \sim 2 \text{ kg/cm}^2$ was recognized. Pumping up the gas-water from the sand-gravel layer causes the drop of water pressure and as a result a compression acts on the clay layers

above and below the sand-gravel layer and the degree of consolidation ranges from 13 to 22%, not having reached the central part of the stratum yet.

The value of C_v , the coefficient of consolidation of clay, is found about $1.5 \sim 3.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ from Fig. 2, and the value of M_v , the coefficient of compressibility is found about 3.5

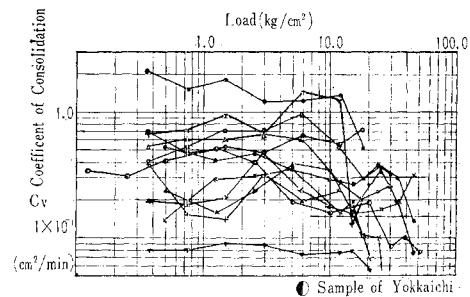


Fig. 2 Coefficient of Consolidation Pressure Lines

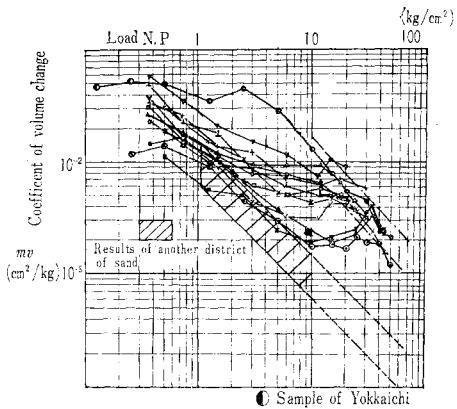


Fig. 3 Coefficient of Volume Change-Pressure Lines
 $\sim 7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kg}$ from Fig. 3, the mean pressure at the depth down to 700 m is 26 kg/cm^2 . When the consolidation of long period is calculated, it would be better to use the value of V_m obtained under 24 hour loading plus 50%, so that $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{kg}$ may be considered the mean value of the whole strata.

It can be concluded from various tests that the clay stratum of Niigata consists of clay loam or silt layer and at a depth ranging from 300 to 600 m the clay is not so much different from

that in upper layers and it is generally loose.

3. Observations by Wells

Special wells were made by inserting double steel tubes in the boring holes which had been bored for testing the soil. Inner tube is lifted up gradually by the settlement of the ground.

If we make the depth of these wells different from each other, we can find out the shrinkage of every stratum at the sites. By installing these wells in many places, we can locate the place under the ground where settlement is going on and make clear how the settlement is happening.

4. Settlement of the Ground

First class leveling route in Niigata was established in 1898, and since then survey has been carried out nine times. On the other hand big rising of average sea level has been recorded by the tide-gauge. Rate of settlement of the ground was about 5 cm/year during the period 1951~1955, and has been further increasing gradually since 1956, finally reaching 50 cm/year in 1958. Since August 1957 many second class leveling points have been set up in this district and the survey has been conducted every 6 months, so the settling phenomena in the whole area have been made clear.

5. Ground-water pressure

From these data it can be said that

- Water-level in every stratum in every place is linearly lowering.
- The rate of water-level lowering in a stratum, where the amount of water pumped up is greater, is larger than in any other strata where the amount of water pumped up is less.
- The water-level lowering in the district, where the gas was taken out in early days, has been happening since that time.
- Water-levels in Uchino and Matsuhama districts are located at a depth ranging from 5 to 10 m in G3 stratum, from 20 to 25 m in G5 stratum as measured in 1957, and since then they have further lowered rapidly.
- The water-level in every stratum in a district is changing uniformly.
- The water level was recovered by somewhere around 3~4 m when the gas was discontinued to be taken out.

6. Settlement of ground and output

of gas

The output of gas and the periodical change of ground settlement well correspond to each other and the rise of tide level shown by the tide gauge in the harbor district (i.e. the ground settlement) also well corresponds to the output of gas of that district. In the district where the gas production was discontinued, the recovery of the ground-water level was ascertained. The result of levelling conducted at around this time ascertained also that the rate of ground settlement in the district where the production of gas had been discontinued decreased.

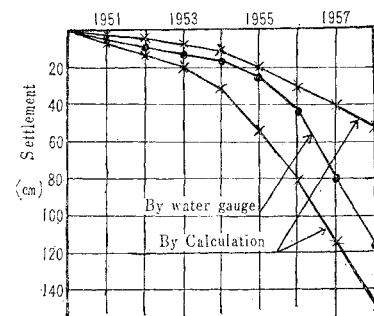


Fig. 4 Settlement of Calculation and its Water Gauge

7. Calculation of amount of soil stratum compressed

The ground settlement in Niigata district may be also numerically explained as caused by the drop of ground-water pressure judging from the development of ground settlement in that district. In other words on the assumption that the sand-gravel stratum is elastically compressed without time lag and the clay stratum is consolidated according to the theory of consolidation, let S_s denote the shrinkage and S_c , consolidation, then the whole amount of ground settlement is expressed by the sum of S_s and S_c i.e. $S = S_s + S_c$, where S_s and S_c are to be calculated for each stratum. Fig. 4 shows the curves of ground settlement calculated and also the curves of the records of tide-gauge.

As a result of the foregoing investigation and calculation it has been concluded that the ground settling phenomenon in Niigata district was caused by the pumping up a large quantity of the ground-water inevitably accompanying the natural gas production and it has been made clear that no other possible causes by which the ground settlement in question may be explained have been found so far.