

## 第7章 応用地質

(中山俊雄)

都市の発展とともに応用地質学的課題も変化してきた。土木地質分野では構造物の支持層調査から、軟弱地盤問題、さらには大深度地下地盤へと対象が広がっている。資源地質分野では、工業用水としての地下水利用から、水溶性天然ガス利用、温泉開発へ移行した。災害地質分野では、地盤沈下問題から、地震時における地盤の揺れ（地震動）予測や液状化予測、急傾斜地対策などへと課題が変化した。

ここでは、地盤調査、地盤沈下と地下水、水溶性天然ガスと温泉、地盤の液状化と地震動について歴史を遡って取り上げる。

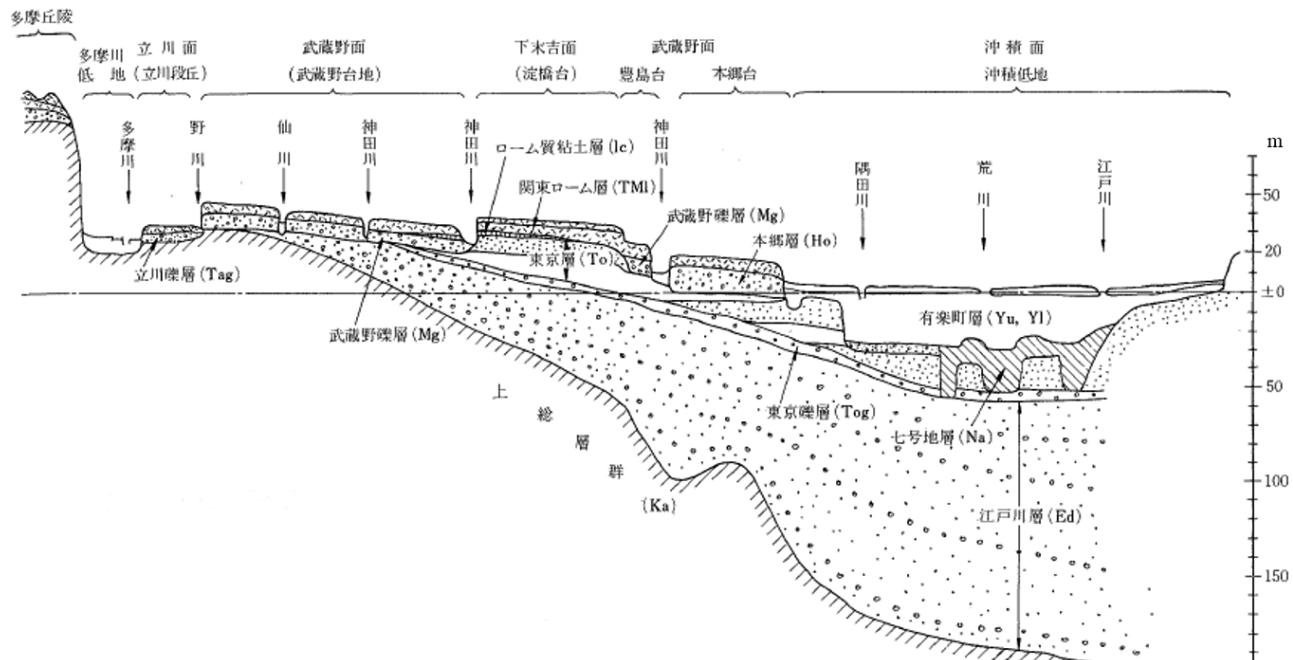
### 7.1 地盤調査

皇居（明治宮殿）<sup>ふきあげ</sup> 吹上地質実験図（明治14年12月27日）という「地質」の名が入った地図が都立中央図書館に保管されている。慶應4（1868）年の明治天皇の東京行幸に伴い江戸城が皇居となるが、明治6（1873）年に御座所とされていた江戸城西の丸御殿が焼失し、そこで明治12（1879）年に新宮殿を造営が決まり、明治21（1888）年に明治宮殿が完成する。この新宮殿建設に、明治10（1877）年に来日し工部大学校造家学教授であったジョサイヤコンドルが地耐力調査を行って

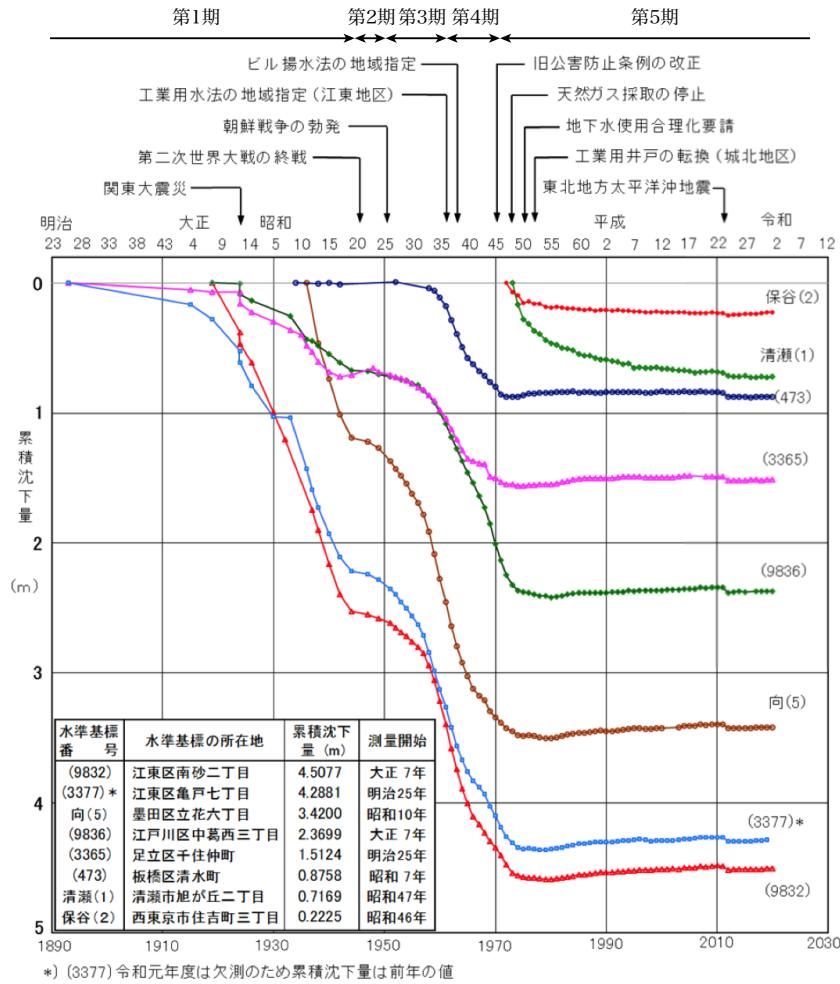
いる。この時の調査図が「地質実験図」である。今日の都市地質図、地盤図の先駆けの図とも言える。近代都市への街づくりとして、その後、鹿鳴館（明治16年：1883）、三菱一号館（明治27年：1894）、東京駅舎（大正3年：1914）などが次々建設されるが、同時に東京の地盤への関心が、特に建築家（造家）の中で高まっていた。

明治21（1888）年、農商務省地質局の鈴木 敏により地質学的視点から「東京地質図説明書」（鈴木、1888）が作成されるが、この中に「都下の地質を査定し、もって、地下に包蔵せられる応用物料の適否を弁じ、その地質と水脈、衛生、地震等との関係を説くにあり」と書かれているように応用地質への活用に触れている。3章の応用地質編には、①応用物料（道路修築用砂利、煉、煉瓦および土器用粘土について）、②地質と水脈との関係（高台の水脈、低地の水脈、雨雪の量および地水の増減について）、③地質と衛生の関係、④地質と地震の関係（沖積層もしくは埋立地に属する平行卑湿の地に震動強きこと、洪積層および第三プリオセン系層より成れる台地に震動弱きこと、沖積層と洪積層と間、もしくは高台の端崖に接近する所に震動強きこと）などと、応用地質的課題が触れられている。

関東大震災後の昭和4（1929）年、復興局建築部か



第7.1図 模式地質断面（東京都土木技術研究所、1977）。



第 7.2 図 累計沈下量図.  
大澤ほか (2020) を一部改変.

ら「東京及び横濱の地質」(復興局建築部, 1929) が刊行される。序文に「復興にあたり、多くは耐震耐火の永久構造物となるべきをもって、地盤の深所にして透徹した地質の状態を知悉すること、今において調査する機会はない」とあり、地質の記載と共に帶水層や地耐力などの課題を取り上げている。また、ここには大正 14 (1925) 年に日比谷公園内での東京市政調査会館建設時に起きた地盤変状 (ヒービング) についても触れている。

この地盤調査の流れは昭和 34 (1959) 年に刊行された「東京地盤図」(東京地盤調査研究会, 1959) に引き継がれる。ここでは、戦後、戦災復興とともに実施された数多くの地質調査資料、3,421 本のボーリング柱状図をもとに、地質図・地盤断面図・礫層分布図などの付図類、地盤の地質・土質力学特性・構造物の基礎としての地層の解説から構成されている。この地盤図の構成は、その後全国各地の都市の地盤図として引き継がれる。東京では、建設省から「東京港周辺地帯の地盤」(建設省計画局, 1969)、東京都土木技術研究所から「東京 23 区地盤地質図」(東京都土木技術研究所, 1969)、「東

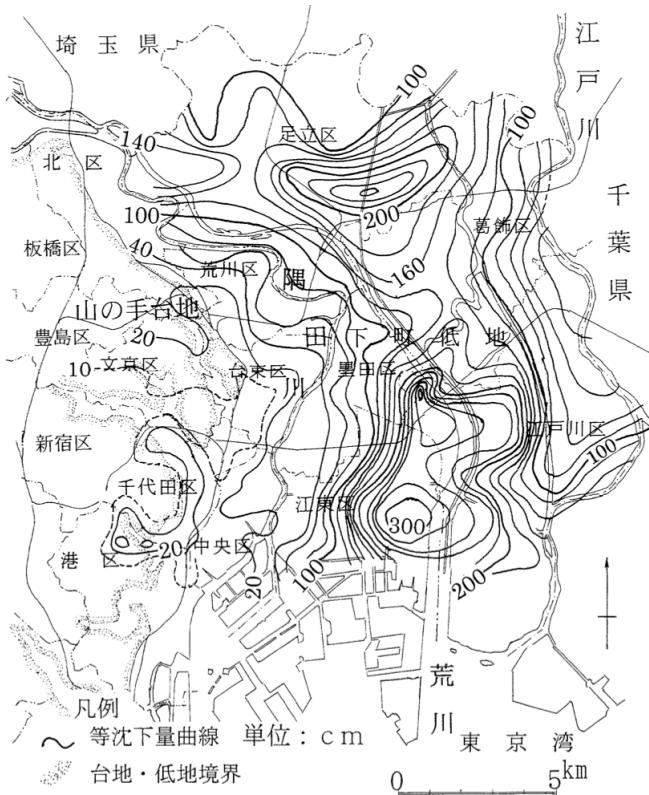
京都総合地盤図(1)」(東京都土木技術研究所, 1977)、「東京都総合地盤図(2)」(東京都土木技術研究所, 1990)、「東京都(区部)大深度地下地盤図」(東京都土木技術研究所, 1996)、東京都港湾局から「港湾地盤図」(東京都港湾局, 1972, 2001) が刊行されている。

これらの地盤図により東京の地盤の概要が明らかになり、台地では、武蔵野面と下末吉面での地盤構成、低地の地下には埋没波食台、埋没段丘、埋没谷の存在、地層の土質特性などが明らかにされた。(第 7.1 図)

## 7. 2 地盤沈下と地下水

東京の地盤沈下は、後述するように明治末から昭和 40 年代までの最も大きな地盤問題であった。

区部での地盤沈下は、昭和 40 年代後半からの地下水揚水規制等により、地下水位の回復と共に地盤沈下量は減少し、令和 2 (2020) 年現在、ほぼ終息状態にある(第 7.2 図)。現在、都内 42 地点(区部 24 地点)に地盤沈下観測所が設置されており、毎年、都内 439 地点の基準点で水準測量が行われている(大澤ほか, 2020)。令



第 7.3 図 昭和 13 (1938) 年～昭和 52 (1977) 年の 40 年間の地盤沈下 (遠藤ほか, 2001) .

和元年の測量結果では、都内で 1 cm 以上の沈下域はなく、区部での年間最大沈下量は江戸川区江戸川六丁目水準点の 0.77 cm である。一方、世田谷区南烏山では年間最大隆起量 1.24 cm が観測されている (大澤ほか, 2020)。

東京都のいわゆるゼロメートル地帯 (T.P.  $\pm$  0 m 以下の地域) は、昭和 15 (1940) 年に江戸川区平井付近と江東区大島付近で初めて見つかり、その面積は約 3 km<sup>2</sup> であったが、その後の激しい地盤沈下により昭和 51 (1976) 年には約 70 km<sup>2</sup> まで拡大した。昭和 13 (1938) 年から昭和 52 (1977) 年までの 40 年間の地盤沈下量を第 7.3 図に示す。沈下の激しかった江東区南部の累計沈下量は 3 m 以上に及んでいる。

地層別の変動量は、地下水揚水規制後は浅層部で収縮、深層部で膨張傾向を示していたが、令和元年ではその差はほぼなくなっている (大澤ほか, 2020)。

以下に区部での地盤沈下の状況を 5 期に分けて解説する (第 7.4 図)。

#### 第 1 期 (昭和 18 (1943) 年以前)

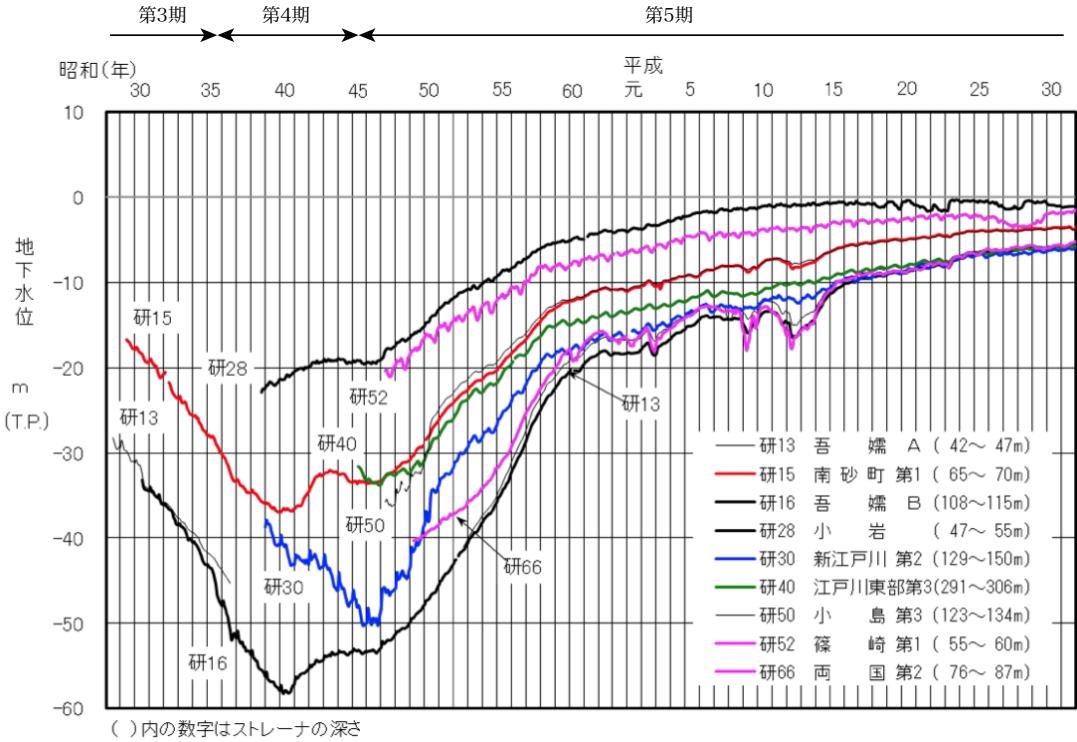
地盤沈下は明治の末にはすでに進行していたことが、井戸の抜け上がりなどから一部の人には知られていたが、大正 4 (1915) 年の陸地測量部による精密水準測量により、江東区・墨田区で地盤沈下が起きていることが初めて公にされた。寺田虎彦は江東デルタで年間最大沈下量が 7.6 mm も生じていることに注目してい

る。関東大地震後の昭和 4, 5 年に行われた地殻変動量調査では、江東地区で年間 140 mm に及ぶ著しい沈下が認められ、沈下範囲も千代田区神田から丸の内一体にも及んでいることが明らかにされた。当初、この現象は地震による地殻変動と考えられていた。その後、千代田区丸の内での建築物の抜け上がりや江東区内の井戸鉄管の抜け上がり、昭和 10 年頃には地盤沈下は表層の軟弱な地層の収縮と考えられるようになったが、その原因については諸説あり特定できない状況にあった。

昭和 10 (1935) 年には、江東区富岡の数矢小学校内に鉄管を利用した最初の地盤沈下観測が始まる。その後も千代田区日比谷公園ほか 8 か所に地盤沈下観測所が設けられ、昭和 13 (1938) 年からは東京市により毎年の水準測量が実施されるようになった。

#### 第 2 期 (昭和 19 (1944) 年から昭和 22 (1947) 年)

第 2 次世界大戦末期、焼土と化した東京では、工場の生産活動がほとんど停止状態になり、地下水揚水も停止する。戦時中も水準測量は継続されており、昭和 19 (1944) 年と昭和 22 (1947) 年の水準測量結果から、下町全域で地盤沈下は起きていないことが明らかになった。逆に、荒川区・足立区・台東区・墨田区では 40 mm の隆起が観測された。江東区にある観測所では、昭和 18 (1943) 年、標高 -40 m にあった地下水位が、昭和 22 (1947) 年には標高 -20 m まで回復した。これらの事実から、地盤沈下の原因がようやく地下水揚水



第 7.4 図 地下水位変動図（江東区、墨田区、江戸川区）.  
大澤ほか（2020）を一部改変。

にあることが明らかになった。

**第3期（昭和23（1948）年から昭和35（1960）年）地盤沈下の再発**

昭和25（1950）年に始まる朝鮮戦争を契機として生産活動の急速な発展、これに伴い工場揚水を始めとする地下水需要が急増し、地盤沈下が再発するようになる。昭和26（1951）年には年間最大沈下量74mm、昭和30（1955）年には年間最大沈下量は110mmに達する。沈下域も下町低地から、隣接する埼玉、千葉へと拡大していった。

**第4期（昭和36（1961）年から昭和45（1970）年）地盤沈下の激化と地下水揚水規制**

下町低地を中心とする地盤沈下は年を追って激しさを増す。昭和36（1961）年に年間100mmを越す地域が74km<sup>2</sup>に及ぶ。そこで、昭和36（1961）年に江東区・墨田区を対象に、昭和38（1963）年には城北地区を対象に、工業用水法に基づき地下水揚水規制の区域指定が行われる。昭和37（1962）年には建築物地下水採取規制に関する法律が制定され、昭和41（1966）年から建築物の揚水規制も行われる。これら規制により、江東地区では昭和41年頃から一時的に地下水位が回復し、沈下量も減少するようになるが、昭和42年後半からは地下水位回復が遅くなり再び沈下が起こる。特に荒川河口では、依然と大きな沈下量を示しており、水溶性天然ガスの採取が影響していることが考えられた。また、調査範囲が広がるにつれ、台地部でも地盤沈下が起きていることが明らかになり、板橋区成増から練

馬区西大泉にかけて年間100mm以上の沈下が観測されるようになる。

**第5期（昭和46（1971）年以降）**

昭和46（1971）年6月「工業用水法及び建築物用地下水の採取規制に関する法律」が制定され、また、東京都による天然ガス鉱区買取により昭和47（1972）年12月31日付で荒川河口付近の水溶性天然ガス採取が停止となり、ようやく区部の地盤沈下は減少傾向を示すようになる。

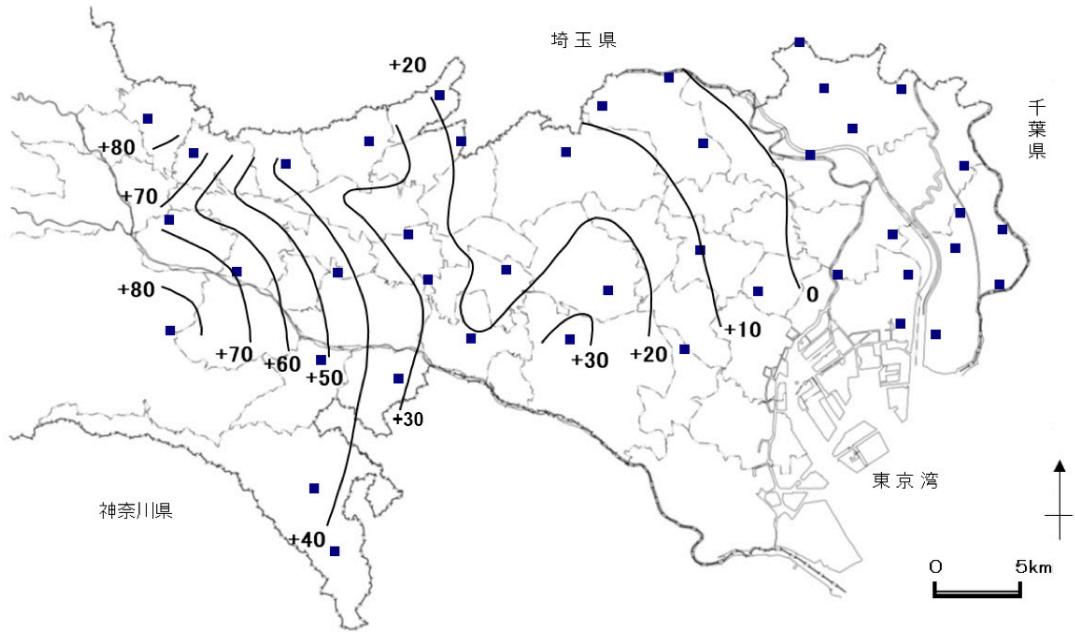
各地の観測井戸の地下水位は、昭和46年前後から昭和50年後半にかけて急速な水位回復を示し、以後、緩やかな水位回復が現在まで継続している（第7.4図）。地盤沈下も地下水規制とともに停止し、昭和49（1974）年には年間100mm以上の沈下域は無くなり、地盤沈下の激しかった荒川河口付近でも年間最大沈下量74.6mm、足立区・葛飾区北部で41.8mmまで減少した。また、昭和48年頃からは揚水量の減少した地域では地盤が隆起する現象が見られるようになった（第7.2図）。

### 7. 3 地下水

都内の地下水位は、帯水層深度から、浅層地下水と深層地下水に区分される。浅層地下水は不圧地下水、深層地下水は被圧地下水に対応する。

#### 7.3.1 浅層地下水

浅層地下水は、台地部ではローム層中の宙水と武藏



第 7.5 図 令和元年末の地下水位等高線図（大澤ほか, 2020）。単位は T.P.+ m.

野礫層（段丘堆積物）を帶水層とする地下水であり、低地では、沖積層上部の有楽町層の上部砂層を帶水層とする地下水である。深度的には、宙水は地表下 2 ~ 4 m 付近に、武藏野礫層の地下水位は地表下 6 m 前後、低地の地下水位は、地表下 2 m 前後にある。これら浅層地下水の水位は、いずれも降雨量に対応した変動を示している。

### 7.3.2 深層地下水

区部の深層地下水は、地下水規制や天然ガス採取停止により、昭和 50 年代末までに急速な水位回復が進み、以後も緩やかな水位回復が継続している（第 7.4 図）。板橋区戸田橋観測井戸では、自噴が見られるまで回復している。各観測井戸での帶水層別の水位を単純平均し求めた水位（頭）の地下水面図をみると、区部では南西から北東に向かった地下水の流れが想定される。世田谷区での水位は標高 30 m であるが、足立区北東部では 0 m である。（第 7.5 図）。

### 7.3.3 地下水揚水量

地盤沈下が始まった明治末期頃の深層地下水揚水量を知る資料はないが、昭和 20 年代に行われた工業用水井戸調査では、80 ヶ所前後のさく井水の揚水量が日量 123.2 万  $m^3$  と報告されている。揚水量調査が始まる昭和 25 年頃には、江東・城北地区での揚水量は日量約 25 万  $m^3$  といわれている。区部全域の揚水量が測定されるようになった昭和 39 (1964) 年には日量 96.7 万  $m^3$  に達している。地下水用水量の規制に伴い、これ以後減少傾向となり、昭和 50 (1975) 年には 20 万  $m^3$  までに減少し、これ以降は揚水量の減少傾向は低下し、日 10 万  $m^3$  台に落ち込んでいる。平成 13 (2001) 年以降、

従来の揚水量推定方法が、東京都環境確保条例に基づく測定に変更されたことにより、その値が小さく変更され、これによると、現在は日量約 5 万  $m^3$  の揚水が行われている（第 7.6 図）。

## 7.4 水溶性天然ガスと温泉

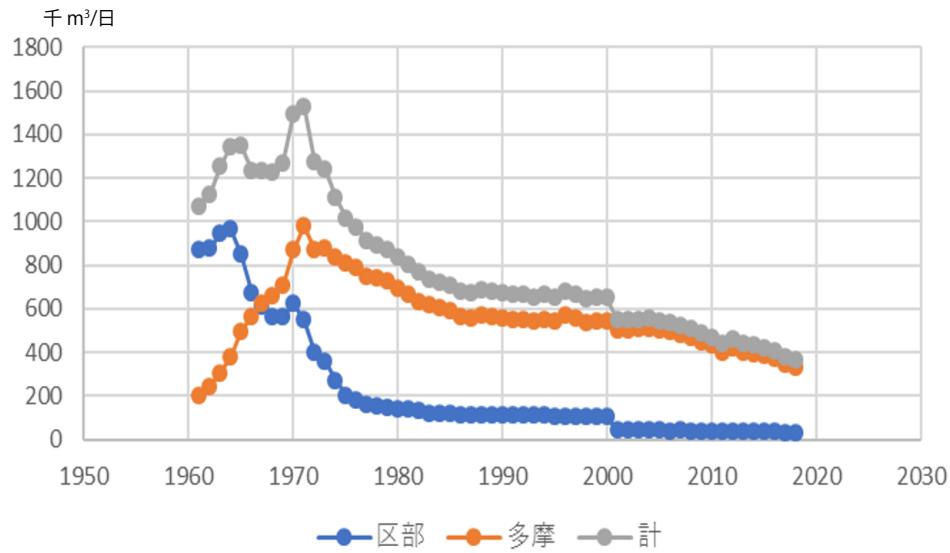
### 7.4.1 水溶性天然ガス

東京の水溶性天然ガスは、千葉県を中心とした南関東一帯に分布する日本最大の水溶性天然ガス田（南関東ガス田）の一画を担っており、特に、江東区・江戸川両区は江東ガス田と呼ばれていた。

下町低地では、古くからガス兆候が知られており、戦後の燃料不足を背景に昭和 26 (1951) 年初めて江東区に水溶性天然ガス井（深度 600 m : ストレーナ深度 404 ~ 590 m）が掘削され鉱床開発が始まる。最盛時の昭和 45 (1970) 年、昭和 46 (1971) 年には 40 を超える井戸があり、ストレーナー深度は 400 m から 1,700 m に達していた。ガスにして日量 7 万  $m^3$  が採取され、都市ガスとして利用されていた。ガスに伴うかん水揚水量は日量 3 万  $m^3$  に達していた。

水溶性天然ガスは沖積層から新第三紀層までの地層中に胚胎している。ガス量の多い層は、深度 400 m から 700 m 付近に分布する江東砂層（上総層群）と呼ばれる地層である。

水溶性天然ガスは、激しい地盤沈下を伴ったことから、東京都はその鉱業権を買い取り、昭和 47 (1972) 年 12 月 31 日から採取を中止している（石井ほか, 1973）。



第 7.6 図 揚水量経年変化図.  
東京都土木技術支援・人材育成センター（2020）に基づく.

#### 7.4.2 温泉

23 区の温泉に関する記述は、明治 44（1911）年衛生試験彙報第 12 号に大田区の穴守鉱泉、森ヶ崎鉱泉の名が見られる。大田区南部では、淡褐色や黒褐色の「黒湯」と呼ばれる古くからの銭湯が知られている。昭和に入ると江東区・江戸川区・品川区・大田区では、工業用水のための井戸が多く掘られるようになり、その中には工業用水に不適な着色水や塩分濃度の高い水が知られるようになる。昭和 23（1948）年の温泉法の施行とともに、これら工業用水に不適な地下水の一部は温泉としての認定を受けることになる。昭和 29（1954）年の温泉施設は区内で 19 か所登録されている。平成に入り、井戸深度 1,000 m を超える大型温泉レジャー施設が区内各地で建設され、平成 7（1995）年調査では 31 の施設が、令和 2（2020）年には 70 を超える温泉施設がある。

平成 14 年の調査（東京都土木技術研究所、2003）では、温泉施設は 19 区に 68 施設がある。区別にみると大田区が 24 施設（約 35%）、次いで世田谷区の 8 施設（12%）、品川区の 5 施設と、区部南部に集中している。このうち井戸深度のわかる 50 井について、その掘削深度を見ると 28 m から 2,000 m まであり、1,000 m 以上の深度の井戸が全体の 25% を占めている。また、区部南部の太田・世田谷・品川区では、100 m 以浅の井戸が多いことがわかる（第 7.1 表）。

地温勾配は、大田区、目黒区の井戸深度 1,000 m を超える温泉での測定例では、100 m 当たり、2.25 度、2.3 度であり、全国な非火山地帯での平均 3 度に比較すると、やや小さい値を示している。

68 施設での温泉泉質をみると、NaCl 型（ナトリウム－塩化物強塩泉）、NaHCO<sub>3</sub> 型（ナトリウム－炭酸水素泉）、Ca(Mg) HCO<sub>3</sub> 型（カルシウム（マグネシウム）－炭酸水素泉）が多い（第 7.1 表；東京都土木技術支援・

人材育成センター、2020）。

NaCl 型は区部南部に多く、HCO<sub>3</sub> 型は内陸部に多い傾向が見られ。特に、井戸の深度が 1,000 m を超える 11 の井戸泉質は大部分が NaCl 型（ナトリウム－塩化物強塩泉）、いわゆる化石水と考えられている。NaCl 型は、海水または化石水が関係していると思われ、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が少ないとから還元性の環境に長年月閉じ込められて SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が失われたと考えられ、NaHCO<sub>3</sub> 型では、Cl 含有量が少ないものが多いことから、海水起源とは考えにくく、腐植質で着色していること、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が著しく少ないとから、地層中に閉じ込められた有機物の分解により発生した二酸化炭素が地層中からアルカリ及びアルカリ土類分を溶出し、かつ長年月貯留されることで、Ca、Mg をイオン交換で失い NaHCO<sub>3</sub> 型になったと考えられている（東京都衛生局、1995）。

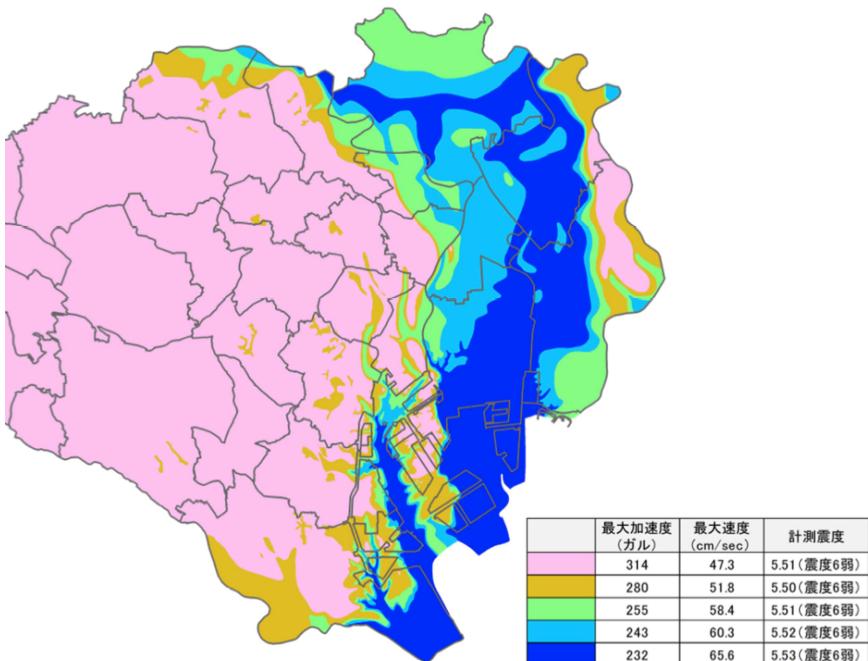
着色水は、区部南部から江東区・江戸川区にかけて分布している。分布深度は大田区で -40 m から -50 m 以深、品川区・港区で -70 m から -80 m 以深、江東区・江戸川区で -80 m から -100 m 以深、荒川区・葛飾区で -300 m 以深である（川島ほか、1996）。

#### 7.4.3 水溶性天然ガス爆発事故

東京の深層地下には、水溶性天然ガスを含むことから、メタンガス爆発事故がしばしば起きている。古くは、昭和 6 年（1931）、江東区の豆腐屋の井戸（深さ 45 ~ 50 m）でガス爆発が起きている。地下水揚水量の増加に伴い地下水位が急激に低下していた昭和 36 年頃から昭和 50 年にかけて、台東区・墨田区・江東区を中心にもメタンガス噴出事故が多発している。その後、地下水位の回復とともに、噴出事故は減少するが、特に江東区や港区の臨海部での建築工事や地盤調査ではメタンガス噴出が起きている。平成 5（1993）年には、江東区越中島シールドトンネルでガス爆発事故が発生し、

第7.1表 東京都区部の温泉泉質（温泉施設件数）（東京都土木技術研究所，2003）。

新泉質名	ナトリウム－炭酸水素泉	ナトリウム－塩化物強塩泉	ナトリウム－塩化物泉	ナトリウム－炭酸水素塩・塩化物	ナトリウム・カルシウム（・マグネシウム）－塩化物・炭酸水素塩泉	単純硫化水素泉	単純鉄（II）（炭酸水素塩型）	カルシウム（・マグネシウム）－炭酸水素塩泉	単純泉	フェロまたはフェリオン	不明
旧名称	重曹泉	強食塩泉	弱食塩泉	含食塩重曹泉	含土類弱食塩泉	単純硫化水素泉	単純炭酸鉄線	重炭酸土類泉	単純泉		
全体	11	10	6	4	1	1	3	24	3	1	4
大田区	8	3	2	2	1	0	0	6	2	0	0
世田谷	0	1	2	0	0	0	1	3	0	1	0
品川区	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0
江戸川区	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	0
板橋区	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0
墨田区	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1
台東区	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0



第7.7図 地表面最大加速度分布図（東京都建設局・港湾局，2013）。

死者4人が出ている。また、平成17（2005）年には北区浮間温泉ボーリング掘削中爆発事故、平成19（2007）年には渋谷温泉施設で大規模ガス爆発（死者3名）が起きている。

北区浮間や渋谷区での事故は、深部の上総層群中のガス胚胎層からの噴出であるが、江東区越中島事故では、メタンガス胚胎層は沖積層基底礫層と考えられている。また、この時のメタンガスの年代は約2万年前の値が得られている。江東区・墨田区での噴出事故時に採取されたメタンガス年代も多くは16,900年前から24,000年前より古い値が得られている（東京都土木技術研究所，1993）。古い生成年代のメタンガスが深部か

ら上昇し、空気との混合による若返りだけでなく、沖積層基底や段丘礫層等の地層でメタンガスが生成され胚胎層になっている可能性があることも考慮しておくことが必要である。

## 7.5 液状化予測と地震動（地表面加速度）分布

### 7.5.1 液状化予測

1964年新潟地震では、地盤の液状化により建物倒壊、昭和橋落橋など大きな被害が生じた。この地震を契機に、わが国の液状化研究が始まる。1970年代後半には、ボーリングデータを用いた液状化簡易判定法が提案さ

れるようになる。

東京都の液状化予測の検討は、1983年日本海中部地震を契機に始まる。東京の地盤特性（地質構造、浅層地下水位、液状化履歴、土地条件図、都独自の液状化判定式）を考慮した「東京低地の液状化予測」（東京都土木技術研究所、1987）が作成された。その後、1995年兵庫県南部地震での液状化被害や2011年東北地方太平洋沖地震では関東地方沿岸部にも液状化被害が広範囲に生じたことと、新たなボーリングデータの蓄積量が増加したことを背景に、東京都全域での液状化予測の見直しが行われ、2013年に改訂版（東京都建設局・港湾局、2013）が出されている。東京都の液状化予測図は、東京都土木技術支援・人材育成センターのHP（東京都土木技術支援・人材育成センター、2013）で見ることができる。

### 7.5.2 地震動分布（地表面加速度）

2013年に改訂された液状化予測図は、1923年関東地震での東京都心部の揺れを想定して作成されている。関東地震では文京区本郷の東京帝国大学地震学教室にあった地震観測記録は地震計の損傷により完全な地震波形は残されていないが、部分的に欠損した地震記録をもとに地震波形が再現されている（山原ほか、1974；森岡、1980）。この再現された波形から本郷での工学的基盤面（東京礫層）の地震波形を求め、この工学的基盤面での地震波形を、都内300地点での工学基盤面の地震波形とし、地表面最大加速度が求められている。これによると、関東地震規模の地震では、軟弱層厚（盛土+沖積層）が厚くなるにつれ、地表面最大加速度が小さくなるという傾向が示されている（第7.7図）。