

地下水位 - 地盤変動予測モデルによる観測データの再現性検証と地盤物性値の推定

平野晃章・愛知正温*

(*東京大学大学院新領域創成科学研究科)

【要 約】令和4年度から令和5年度まで、地盤変動予測モデル（1次元モデル）を用いて、東京都内の台地部及び低地部の地盤沈下解析を行った。その結果、台地部及び低地部ともに概ね良好な再現性が得られ、地域ごとの沈下特性を評価することができた。また令和6年度には局所地下水流動地盤変形連成モデル（3次元モデル）の作成に取り掛かり、境界条件の設定に係る揚水量分布を作成した。

【キーワード】地下水、シミュレーション、遺伝的アルゴリズム、地盤沈下、弾性変形、塑性変形、揚水量

【目 的】

地下水は身近に入手しやすく水質的にも安定した優良な資源であり、近年の地下水位の回復傾向をうけ、地下水利用への関心が高まりつつある。しかし、一旦かつてのような過剰揚水により地盤沈下が引き起こされた場合の社会的損失は莫大なものであるため¹⁾、持続可能な地下水の保全と利用のためには揚水による地盤沈下の影響予測は不可欠である。そこで本研究では最新の解析技術を持つ東京大学との共同研究により、揚水・地下水位低下・地盤沈下の関係を精度よく再現できるシミュレーションモデルの構築に取り組んでいる。また、東京の地形は、山地、丘陵地、台地、低地に大別されるが、このうち、台地部から低地部にかけては舎人層を初めとする上総層群が広範囲に堆積し、地下水の連続性も推察され²⁾、多くの揚水井が設置されている地域であること³⁾から、台地部から低地部にかけた地域において地盤沈下のシミュレーションモデルを作成することを目的とした。

【方 法】

地盤変動予測モデル（1次元）は、弾性修正カムクレイモデルの理論に基づいて地盤沈下量を計算することと、遺伝的アルゴリズムによる逆解析によって地盤物性値（沈下に影響を与える土質定数のこと。以下「物性値」という。）を求めることを同時に行うものである。すなわち観測値に最も近い計算値を与える物性値の組合せを、遺伝的アルゴリズムを用いた繰返し計算により探索していくものである。この探索を深度1mごとに行い、各深度の地盤の収縮と地下水（土壌水分）の移動を詳細に再現しつつ物性を探索するのであるが、このモデルは非常に柔軟性に富んだ自由度の高いモデルであり、反面、土壌の現実的な土質定数を超えて物性値を選択してしまう等、自由度の制御が必要となる。

モデルの解析は、東京都土木技術支援センターが保有する観測井のデータを用いて行った（図1）。令和5年度においては、令和元年から令和4年度までに解析したすべての地点の再解析を含め、23地点の解析を行った。再解析に当たっては解析方法に改良を加えたが、改良点の一つ目は、観測開始以前の過去の地下水位の推計方法である。特に多摩地域の観測井は観測開始年代が遅いため、過去最も地下水位が低下していた年代の観測値

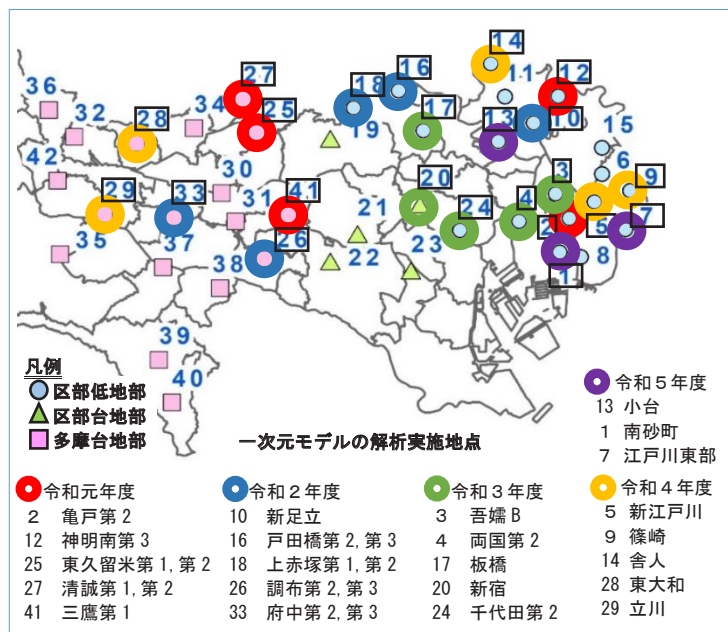


図1 東京都土木技術支援センター 地盤沈下観測井

が得られていない地点が多い。その部分について、それまでは明確な根拠を見いだせないまま推計せざるを得なかった場合もあったが、今回、文献値等から、近隣の水道水源井戸の観測水位⁴⁾などを利用することで改良した(図2)。

改良点の二つ目は、物性値の設定方法である。まず、物性値探索の初期値を文献値等⁵⁾に基づき統一的に設定し(表1)、また、モデルの自由度を制御するため、礫層は塑性変形しない設定とした(※)。さらに物性値探索の許容範囲について既存の室内試験の結果等から、圧縮指数の上限値を10.0から3.0に、比貯留係数の下限値を $5.0 \times 10^{-6}[\text{m}^{-1}]$ から $5.0 \times 10^{-7}[\text{m}^{-1}]$ に変更した。また、探索された結果の物性値のうち、解析上の感度の無い部分を除外して評価した。

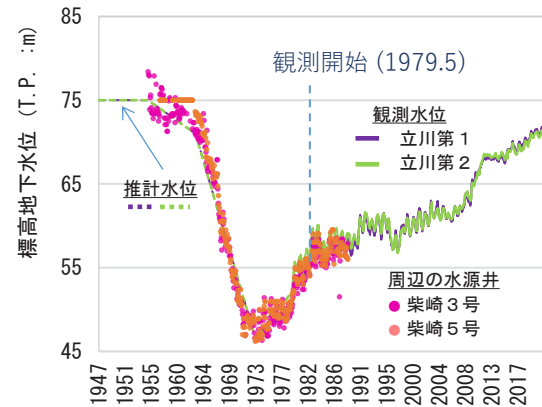


図2 観測開始以前の地下水位の推計
(立川観測井の例)

表1 物性値の探索初期値

土 質		透水係数 [m/day]	間隙比 [-]	過圧密深度 [m]	弾性比貯留係数 [1/m]	圧縮指数 [-]
深層	粘土	5×10^{-5}	0.8	10~100	2×10^{-5}	1.2(0.5)
	砂	1×10^{-3}	0.7	10~100	1×10^{-5}	0.01
	礫(深層)	0.1	0.5	(1000)	1×10^{-5}	0(※固定)
浅層	ローム	10	3	10	$1.5 \times 10^{-3}(2 \sim 5 \times 10^{-5})$	1
	軟弱シルト	2×10^{-4}	1.8	10	$1 \times 10^{-3}(2 \sim 5 \times 10^{-5})$	0.7(0.5)
	粘土	1×10^{-4}	1.4	10	$5 \times 10^{-4}(2 \times 10^{-5})$	1.2(0.5~)
	砂	1×10^{-1}	0.7	10	$2 \times 10^{-4}(1 \times 10^{-5})$	0.01
	礫	10	1	(1000)	$5 \times 10^{-5}(1 \times 10^{-5})$	0(※固定)

また、令和6年度には、23地点すべての地点の弾性変形と塑性変形の割合を整理するため、土壌の骨格粒子に作用する有効応力が圧密降伏応力を超えて作用した変形(塑性変形)と、圧密降伏応力以下で作用した変形(弾性変形)とに分けて、各地点の変位量(沈下量と隆起量)を計算した。

更に令和6年度には、3次元モデルの作成に取り掛かった。まずは、かつて地盤の塑性変形が起きた低地部であって、天然ガスかん水採取の影響によるノイズもなく、台地部からの舎人層の連続性等が確認しやすい地層条件である足立区的地域を対象地とした。本研究はモデル作成のうち揚水量分布の再現を担当したが(図3)、再現に当たっては、文献資料を収集して過去の揚水量を再現し、既知の区の集計値と照合して、資料収集の妥当性を確認して揚水量分布を作成した。

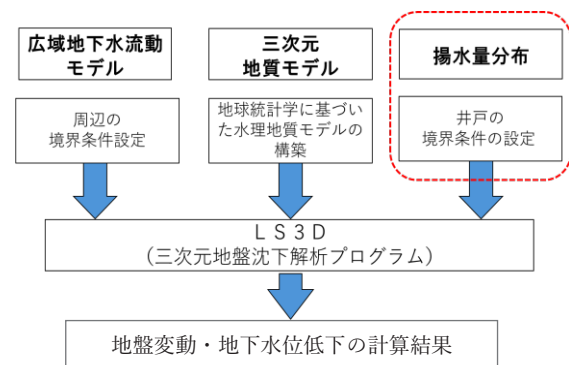


図3 三次元モデル作成の流れ

※ 実際の砂礫層中では微小な粘土混じり層による塑性変形も発生しうることが報告されている⁶⁾。しかし、ここでは土質ごとの物性値の違いを明確にするため一般的な知見に基づき礫層では塑性変形しない設定とした(降伏応力を大きく設定し塑性変形が発生しない条件設定をした。)

【結果の概要】

(1) 令和5年度における改良の結果

図4には、舎人観測井についての令和4年度（まで）の方法による解析と令和5年度の解析の結果を比較して示す。これを見ると、実測期間（1974年～2021年）の沈下量の再現性については令和4年度の結果と令和5年度の結果に差は無い。しかし、全期間（1932年～2021年）の沈下量の計算値を見ると令和4年度の解析では約-2.5mに対し、令和5年度の解析では約-0.8mとなっており、当該地域での沈下量としては妥当な値⁷⁾に改善された。これは、礫層で塑性変形しない設定にしたこと、透水係数の初期値を小さく設定したこと等による。また、圧縮指数の計算値（探索結果：図中赤色のドット）を見ると、令和4年度の解析では圧縮指数が6.0を超える異常に大きな値もあるが、令和5年度の再解析では概ね既存の知見に整合する値となった⁸⁾。

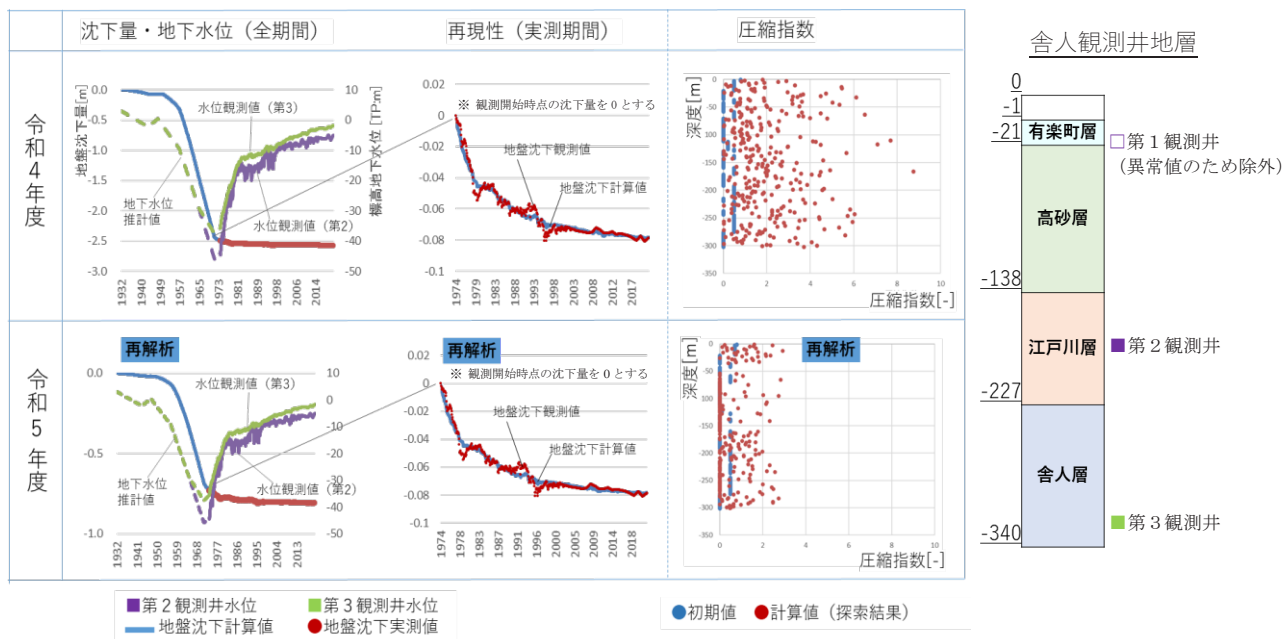


図4 令和4年度と令和5年度の解析結果の比較（舎人観測井の例）

(2) 間隙水圧の鉛直分布

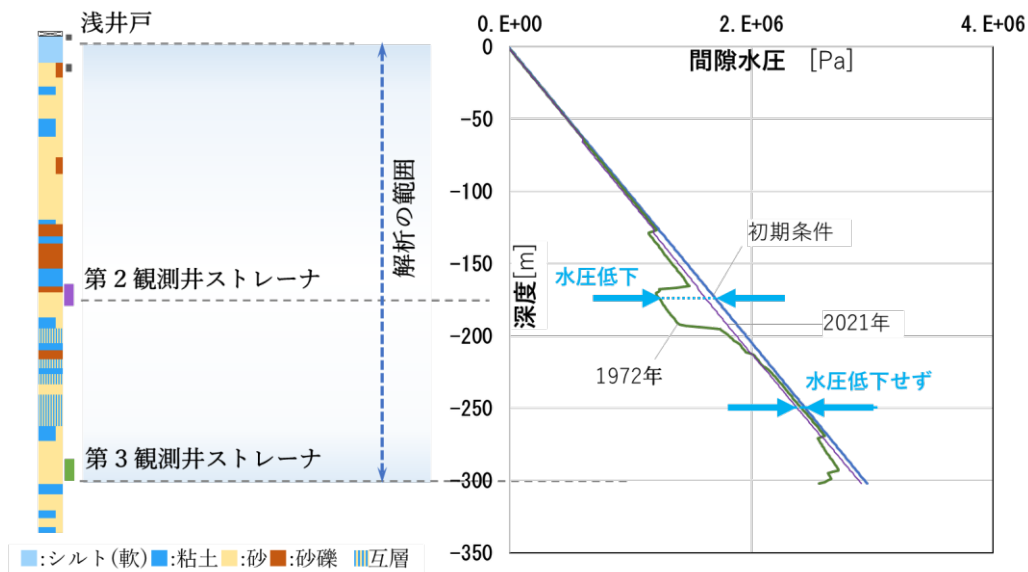


図5 舎人観測井における間隙水圧の深度分布

図5は、舎人観測井の解析の結果から、算出された土壌間隙水圧の深度分布を示したものである。計算開始時点（1932年）の初期条件、最も地下水位が低かった1972年、地下水位が回復した2021年の3つの時点について土壌間隙水圧（計算値）の深度分布を示しているが、これを見ると水位低下の起こった1972年にもストレーナー周辺の水圧が下がるのみで周囲の粘土層等の間隙水圧は下がっていなかったことが推定された。このことは、かつての地下水低下時にも粘土層内の間隙水は排水し切れておらず、未だ地盤沈下の余地を残していることを示唆している⁹⁾。

（3）地盤沈下の地域的特性

図6には、地盤沈下の地域的特性を比較するため、多摩台地部、区部台地部（台地周縁部）、区部低地部（北部）及び区部低地部（南部）の4つの地域の解析結果を比較して示した。これを見ると、多摩台地部の立川観測井では地下水位の上下に合わせ地盤が弾性変動しているのに対し、区部低地部の舎人観測井や亀戸観測井では地盤が沈下したまま回復せず、いわゆる塑性変形をしていることが分かる。

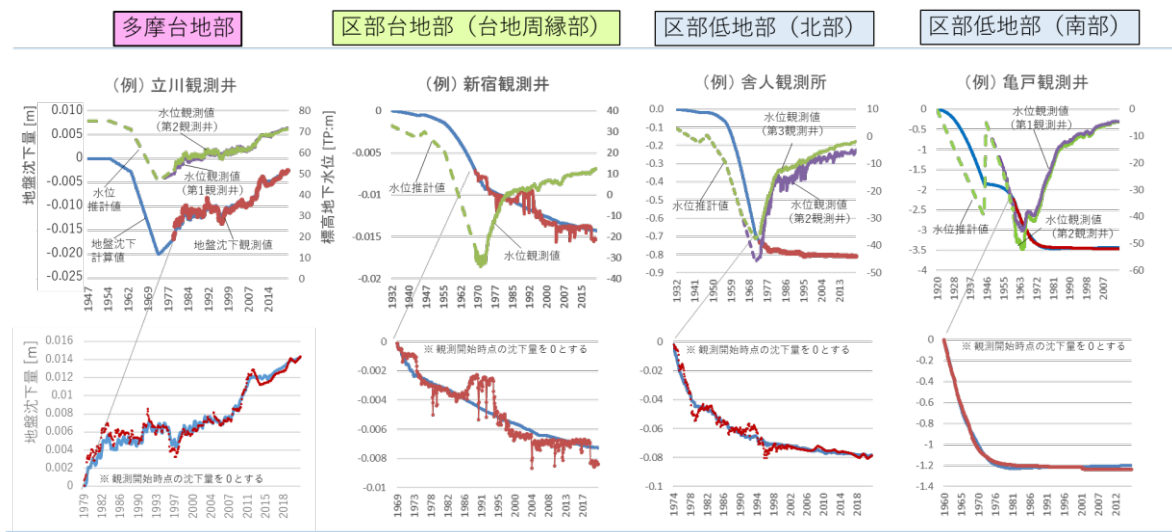


図6 地盤沈下の地域的特性

図7は計算対象とした23地点すべての変位量について弾性変形と塑性変形の割合を示した。各地点における地盤の変位の計算値を時間積分したものであるが、円グラフの青の部分が弾性変形、赤の部分が塑性変形である。西部の台地部から東部の低地部に行くにしたがって、塑性変形の割合が増え、かつて激しい地盤沈下が起きた東部低地帯は、塑性変形の割合が大きいことが分かる。このことは既存の知見と一致する結果であり、このモデルが弾性変形と塑性変形の両方を再現できていることを示している。

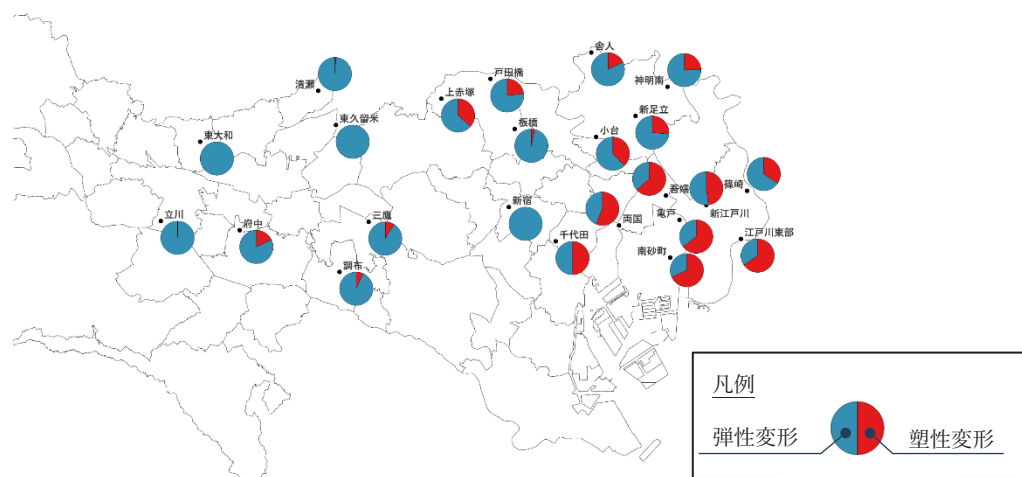


図7 変位量の塑性・弾性比率の分布

ただし、区部台地部（台地周縁部。図6中の新宿観測井のほか千代田観測井、板橋観測井）では微細な変動を再現できていないが、この原因は表層土壌が渇水時に乾燥収縮すること（図8）¹⁰⁾、観測されていない帯水層の水位変動が反映できていないこと、周辺の土地での工事や土地利用の変化によるノイズが発生したことなどが考えられる。これらのノイズ等の変動は、これまでのアプローチではモデル化することが困難で、かつ変動幅が非常に小さいものであり（新宿観測井の場合約50年間で8mmの沈下）、また、3次元解析の中で解消されることが期待される事項もあることから、1次元モデルでの解析の目的は概ね果たされたものと思料する。

（4）過去の揚水量分布の再現結果

図9には、資料収集^{11)~18)}により集められた個別の井戸の揚水量データを集計した結果（個別計）と既知の区の集計値（区集計）¹⁹⁾とを比較して示した。区の集計値の根拠となった各井のデータは失われてしまっているため、揚水量分布を見るには再現された井戸の揚水量によらざるを得ない。揚水量の集計データは各種の資料の間でも2割から3割程度の差がある²⁰⁾ことから鑑みて、今回の区の集計値と個別井戸の集計値の差は、概ね妥当な範囲と思われる。

図10には、最も揚水量の多かった1964年の揚水量を100mのメッシュごとに区分して分布図として示している。足立区の南端部が荒川右岸の地域であるが、歴史的に最初に工業用水法による規制がなされた地域であり、揚水井が高密度で分布していることが分かる。揚水量には工業用水や雑用水、水道用水、銭湯も含まれているが、工業用水がほとんどで、1964年の揚水量の90%を占めている。これら過去の揚水量データは、引用した資料自身も明示している¹⁹⁾とおり必ずしも精度の良いものもある。今後、新たなデータベースが発見された場合、順次更新し、データの精度を上げていく必要がある。

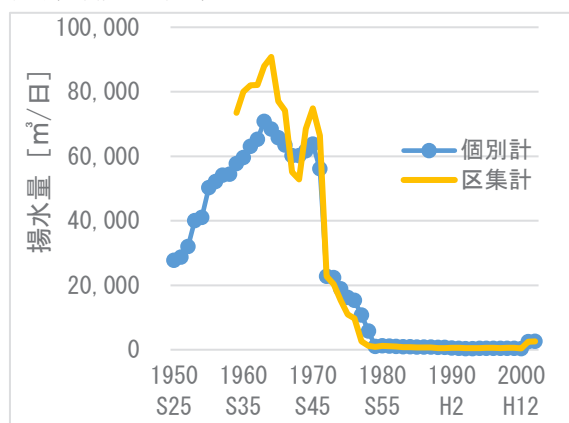


図9 個別井戸の計と区集計値の揚水量

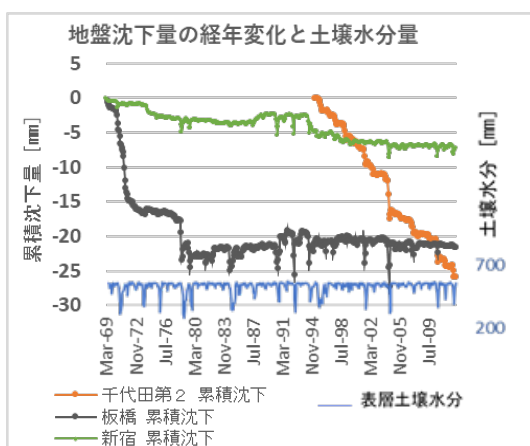


図8 区部台地部観測井の沈下量と表層土壌水分

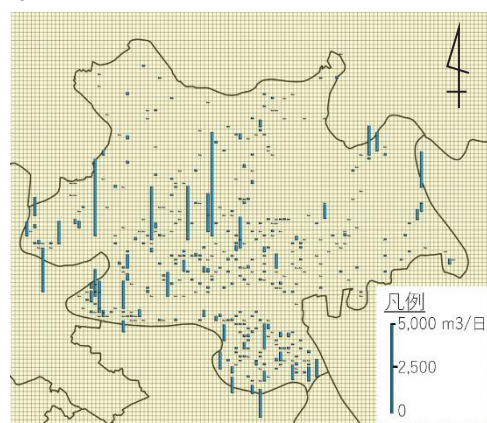


図10 揚水量分布（足立区. 1964年）

参考文献

- 1) 遠藤毅・川島眞一・川合将文（2001）：東京下町低地における“ゼロメートル地帯”展開と沈静化の歴史、応用地質、第42巻第2号、p. 74-87.
- 2) 東京都環境局水環境課（2022）：持続可能な地下水の保全と利用に向けて（地下水・地盤沈下検証結果報告書）、p22
- 3) 田部一憲・愛知正温・髙島智恵子・齋藤由美・木瀬晴美（2019）：都内における深井戸のスクリーン深度の三次元分布図の作成、東京都環境科学研究所年報(2019)、p. 58

- 4) 東京都環境保全局(1990)：地下水実態調査（資料編）
- 5) 例えば、東京都土木技術研究所(1977)：東京都総合地盤図Ⅰ 東京都地質図集 3 東京の地質（1）, 解説
- 6) Kento Akitaya and Masaatsu Aichi(2022): Land subsidence caused by seasonal groundwater level fluctuations in Kawajima (Japan) and one-dimensional numerical modeling with an evolutionary algorithm. Hydrogeology Journal (2022) 31:147-165.
- 7) 東京都土木技術支援・人材育成センター(2024)：令和 5 年地盤沈下調査報告書、p. 17
- 8) 平野晃章・愛知正温(2023)：地下水位 - 地盤変動予測モデルによる観測データの再現性検証と地盤物性値の推定（第 4 報）、東京都環境科学研究所年報(2024)、p. 68
- 9) 東京都環境局水環境課（2022）：持続可能な地下水の保全と利用に向けて（地下水・地盤沈下検証結果報告書）、p. 114
- 10) 平野晃章・愛知正温(2023)：地下水位 - 地盤変動予測モデルによる観測データの再現性検証と地盤物性値の推定（第 3 報）、東京都環境科学研究所年報(2023)、p. 69
- 11) 東京都公害局(1980)：地下水収支調査報告書
- 12) 東京都環境保全局(1990)：地下水実態調査報告書（資料編）
- 13) 東京都公害局・環境保全局・環境局：地下水揚水量報告台帳
- 14) 東京都環境保全局(1970-2002)：条例に基づく揚水量報告
- 15) 東京都土木技術研究所(1956)：地盤沈下調査 5 ヶ年継続事業報告
- 16) 東京都首都整備局(1961)：城北・江東地帯地下水保全対策調査報告書
- 17) 南関東地方地盤沈下調査会(1972)：南関東地域井戸資料台帳
- 18) 東京都首都整備局(1957)：建築物用地下水の実態調査
- 19) 南関東地方地盤沈下調査会(1974)：南関東地域地盤沈下調査対策誌
- 20) 東京都(1969)：江戸川区における地下水理解析調査報告書