

大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討結果

(第二次とりまとめ)

令和7年3月

大阪市

目次

1. 検討の経緯	1
(1) 第一次とりまとめ「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討結果（平成31年2月）」	1
(2) 国家戦略特区の規制緩和提案	2
(3) 国家戦略特区における新たな特例措置（共同命令）の公布・施行	2
2. 新たな検討課題と実証試験	3
(1) 大阪市域における新たな実証試験の場所	3
(2) 実証試験の概要	4
(3) 実証試験の結果	5
1) 全量還水の実現	5
2) 全量還水時における地下水位低下量	5
3) 帯水層蓄熱システムの応力変化による地盤変動	6
3. 指定地域における帯水層蓄熱システムの適用性	8
(1) 帯水層蓄熱システムが地盤に与える応力変化	8
(2) 指定地域における洪積粘土層の圧密特性	9
1) 大阪市域	9
2) 大阪市域以外の指定地域	12
3) 地下水位の変動量からみた指定地域の広域的圧密特性	22
(3) 帯水層蓄熱システムが及ぼす地盤変動量の把握	24
1) 大阪市域	24
2) 大阪市域以外の指定地域	26
4. 第二次とりまとめ	27
5. 更なる検討の必要性	29
付録1 熱源井近傍の地盤高	30
付録2 粘土層の圧密降伏応力	32
第二次とりまとめを終えて	34
大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議	36

1. 検討の経緯

高度経済成長期、大阪市をはじめ大都市の平野部では、地下水の過剰な汲み上げにより、地下水位の低下と地盤沈下が発生した。

大阪市では、工業のみならず、ビルの冷暖房等にも地下水が利用され、地盤沈下は湾岸部から内陸部まで広範囲に及んだが、昭和 37 年に施行された「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」等による地下水の採取規制により昭和 40 年代頃からは沈静化している。

法による地下水の採取規制は現在もなお続いているが、大阪市では、産学官連携の下、新たな地下水利用技術「帯水層蓄熱のための低コスト高性能熱源井とヒートポンプのシステム化に関する技術開発」（環境省 CO₂ 排出削減強化誘導型技術開発・実証事業）に取り組み、我が国では初めての試みとなる大規模な帯水層蓄熱利用技術を確立するとともに、地盤環境への配慮について、一定の知見を得ることができた。

これらの成果から、同技術の速やかな社会実装及び普及の促進に寄与することを目的として、平成 28 年に「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議」を設置し、地下水の適正な有効利用のあり方の検討を行い、平成 31 年 2 月には、第一次とりまとめを公表している。

(1) 第一次とりまとめ「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討結果（平成 31 年 2 月）」

概要

- ① 大阪市うめきた地区で実施した実証試験の結果、帯水層蓄熱システムは、汲み上げた地下水から熱のみを採り出した後、全量を元の地層に還元するため、長期間の連続運転においても地盤沈下は生じなかった。
- ② 大阪市域の規制地域内の洪積粘土層は一定の弾性があり、帯水層蓄熱システムによる地下水位の変動が地盤に与える力は、これに比べて十分に小さいことから、建築物の空調用に利用する限り、帯水層蓄熱システムは、汲み上げた地下水を還元するため大阪市の地下水採取規制区域の全域で、地盤沈下を生じることなく利用できることがわかった。今後、この成果の立証に向けたさらなる検証が必要である。
- ③ 技術開発・実証事業の成果に基づき、帯水層蓄熱システムを適正に利用するために必要となる設備・構造に係る要求事項や設計上の留意事項及びシステムの運用中のモニタリングについてとりまとめた。
- ④ 実証試験を行ったうめきた地区のみならず、大阪市の陸域の第 2 洪積砂礫層（Dg2）以深の帯水層においても地下水の熱源利用が可能と考えられることから、これを立証するため、今後は地盤沈下に対してより条件が厳しい地域での実証試験等が必要である。

※不圧地下水については「水位」、被圧地下水については「水頭」とするのが正確な表現であるが、煩雑になるため本報告書では一括して「地下水位」と表記する。

(2) 国家戦略特区の規制緩和提案

大阪市は、第一次とりまとめ（中間とりまとめ）をもとに、平成30年8月17日に国家戦略特区における新たな特例措置として、建築物の冷暖房を目的とした地下水の熱利用の際、汲み上げた地下水を全量還元する場合に限り、建築物用地下水の採取の規制に関する法律第4条の規定に基づき許可できる特例措置を定めることを提案した。

(3) 国家戦略特区における新たな特例措置（共同命令）の公布・施行

内閣府及び環境省では、令和元年8月27日、「環境省関係国家戦略特別区域法第二十六条に規定する政令等規制事業に係る省令の特例に関する措置を定める命令の一部を改正する命令」が公布・施行された。

この命令の改正は、大阪市からの帯水層蓄熱利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案を受け、自治体がリスク管理のための措置を講ずる場合に、実証試験等を通じて地盤沈下等が生じないことが確認された建築物用地下水の採取に関する特例措置を実現するため、現行の技術的基準の緩和を行うものとされた。

概要

二以上の揚水設備を用いて帯水層にある被圧地下水の揚水及び還水を一体的に行うことを通じて当該地下水を冷暖房の用に供する事業（採取した地下水の全量を外気に接することなく同一の帯水層へ還元するものに限る）について、次の要件（以下、本書では「措置要件」という。）を満たす場合に地下水の採取に係る特例措置を適用する（事業で用いるストレーナー位置、ポンプの吐出口断面積は、実証試験の範囲内とする）。

- ① 事業を実施する場所は、連続する敷地で一体的に開発を行う区域とし、かつ、連続した地層構成及び同一の土質を有すること。
- ② 事業を実施する場所における土質に係る測定結果（揚水を行う帯水層に接する粘性土層の載荷に対する圧密量の測定結果を含む。）により、当該粘性土層が過圧密の状態にあり、かつ、揚水時の圧密圧力が圧密降伏応力に対して十分に小さいと認められること。
- ③ 事業を実施する場所において、季節に応じた地下水や地盤への影響を把握するために十分な期間、当該事業と同程度の規模で被圧地下水を採取し、その全量を同一の帯水層へ還元する実証試験を実施した結果、当該場所及びその周辺において、地下水位、地盤高、地下水の水質及び間隙水圧に著しい変化が認められないこと。
- ④ 前述の実証試験から得られる情報及び当該設備の運用時に想定される熱負荷に基づいて実施される地下水の温度変化に係るシミュレーション（実測値が再現できるものに限る。）により得られる情報から、地下水の温度に著しい変化が認められないと想定されること。
- ⑤ 揚水設備の維持管理及び緊急時の対応に関する計画の策定、揚水設備の試運転の実施、事業の実施期間中におけるモニタリングの実施及び当該モニタリングから得られる情報の都道府県知事への報告、緊急時の都道府県知事への報告その他の地盤沈下の防止等の観点から必要な措置を講じられていること。

2. 新たな検討課題と実証試験

特例措置は、導入予定地で実質約1年間、事業規模の実証試験を要するものであった。

第一次とりまとめにおいても、評価の対象について、埋立地を除いた大阪市の陸域とした上で第2洪積砂礫層(Dg2)以深の帯水層において地下水の熱源利用が可能との考えを示していたため、沖合・沿岸地域を含めた地域において、これを立証するには、地盤沈下に対してさらに条件の厳しい地域での実証試験を必要としていた。

(1) 大阪市域における新たな実証試験の場所

第一次とりまとめの成果をより広域的に適用するため、地盤沈下に対してより条件が厳しい埋立地である図1に示す舞洲地区において、新たに実施した実証事業「複数帯水層を活用した密集市街地における業務用ビル空調向け新型熱源井の技術開発」(環境省 CO₂ 排出削減強化誘導型技術開発・実証事業)で得られた試験データをもとに検討した。

実証対象施設 大阪市舞洲障がい者スポーツセンター アミティ舞洲

【舞洲地区について】

位置 大阪市西部に位置する此花区地先水面を埋め立てた人工島
 受入(埋立)開始 昭和48年12月
 竣工 平成4年7月
 面積 220ヘクタール
 地盤の状況 大阪平野に連続して存する海成粘土層 Ma12 の圧密降伏応力 p_c を比較すると、うめきたが位置する梅田に比べ小さい(地盤沈下に対してより条件が厳しい地域)

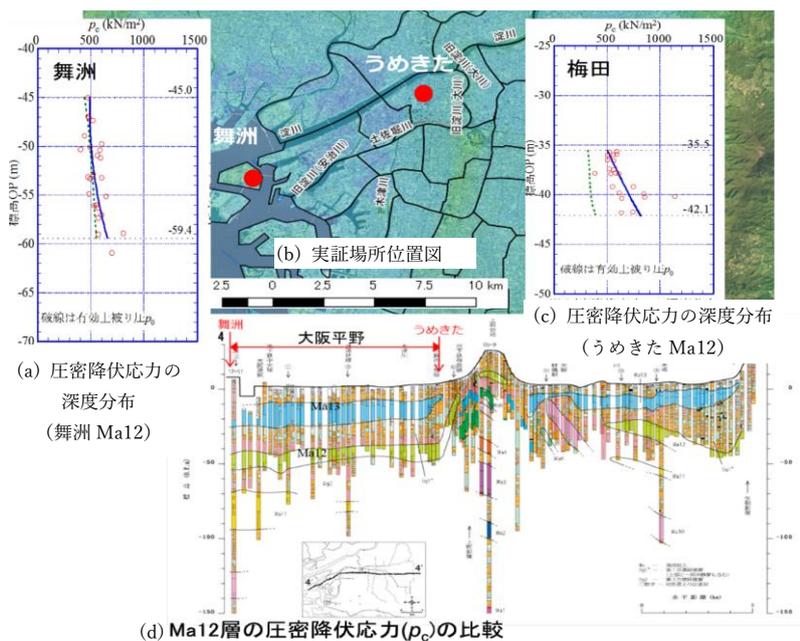


図1 大阪市域の地盤と実証場所

(2) 実証試験の概要

実証試験では、上部洪積層の第2洪積砂礫層 (Dg2) と第3洪積砂礫層 (Dg3) を対象とし、帯水層蓄熱システムによる最大 90 m³/h の揚水・還水が継続的に行われた。

この全量還水中、図2に示す観測井と間隙水圧計及び層別沈下計により、各層の地下水位変動と洪積層以深の地盤変動をモニタリングすることで地盤沈下が生じないことを確認した。

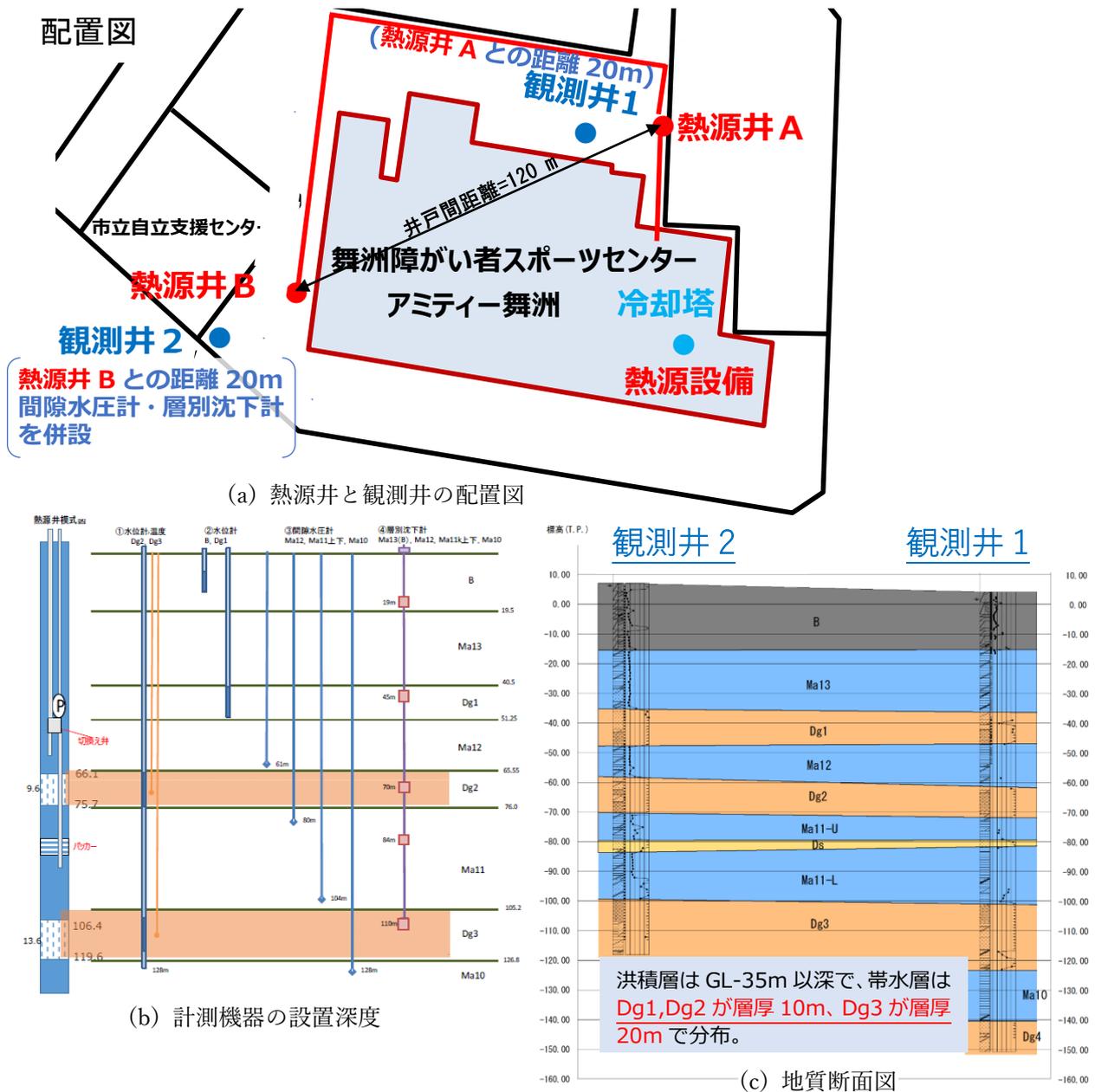


図2 実証試験における井戸配置と計測器設置深度

(3) 実証試験の結果

1) 全量還水の実現

令和2年(2020年)2月～令和5年(2023年)3月(約3ヶ年)にかけて揚水・還水を実施した。図3に示すように最大流量90 m³/hで揚水し、全揚水量34万 m³(Dg2, Dg3の合計で約4.8シーズン)を元の帯水層へ還水した。うめきた2期区域と同様に、安定した大容量全量還水に成功している。

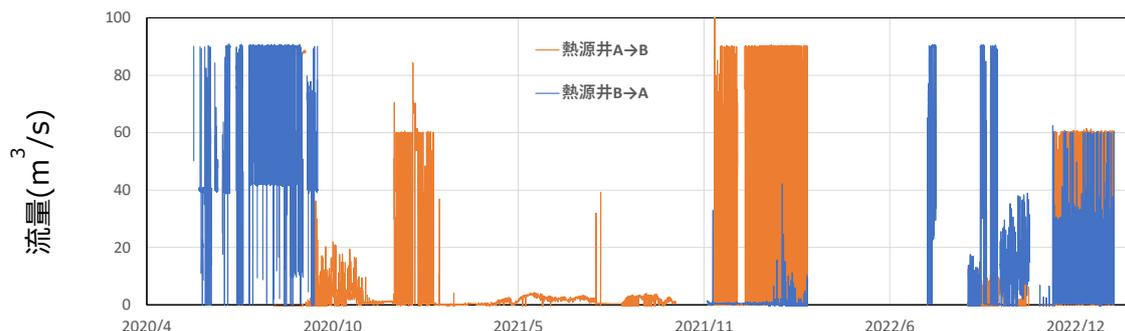
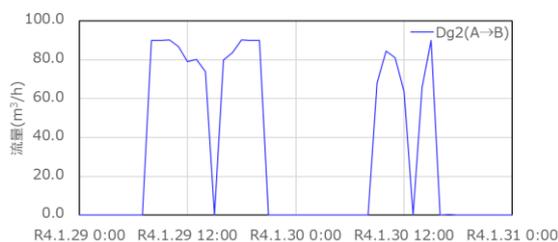


図3 実証事業における揚水・還水流量

2) 全量還水時における地下水位低下量

Dg2の全量還水中の地下水位変動は、熱源井Aから20m離れた観測井No.1で、±0.3m、応力変化としては3 kN/m²であった(図4(a),(b))。Dg3は、熱源井Bから20m離れた観測井No.2で、±0.5m 応力変化としては5 kN/m²であった(図4(c),(d))。

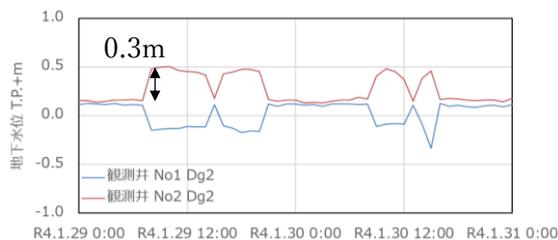
これは、うめきた2期区域(熱源井No.1から20m離れた観測井No.1の地下水位低下量(Dg2)が、揚水のみ0.8m ⇒ 全量還水0.3m)と同程度である。



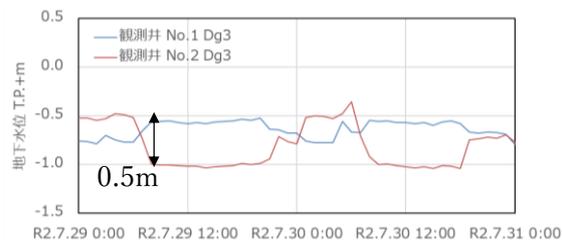
(a) Dg2層の揚水・還水流量



(c) Dg3層の揚水・還水流量



(b) Dg2層の地下水位変動



(d) Dg3層の地下水位変動

図4 全量還水時の地下水位変動

3) 帯水層蓄熱システムの応力変化による地盤変動

最大揚水・還水流量 90 m³/h で、Dg2・Dg3 を各々単層運転し、揚水側の熱源井 B に併設した間隙水圧と地盤変動量を計測した。

この地区は、うめきた 2 期区域に比べ圧密降伏応力が小さく、地盤沈下に厳しい埋立地であったが、措置要件に規定される地盤高の「著しい変化」は認められず、計測も不可能であった（図 5、図 6）。

また、揚水中の帯水層に接する粘土層の間隙水圧にも著しい変化は認められなかった。一部の間隙水圧に 0.2 m～0.3 m（2 kPa～3 kPa）の変動が認められたが、いずれの変動も僅かであり、また、運転開始直後に水圧が変化し、停止後すぐに回復することから、この間隙水圧の変化は、圧密現象による間隙水圧の消散ではなく、圧力伝播によるものと考えられる。

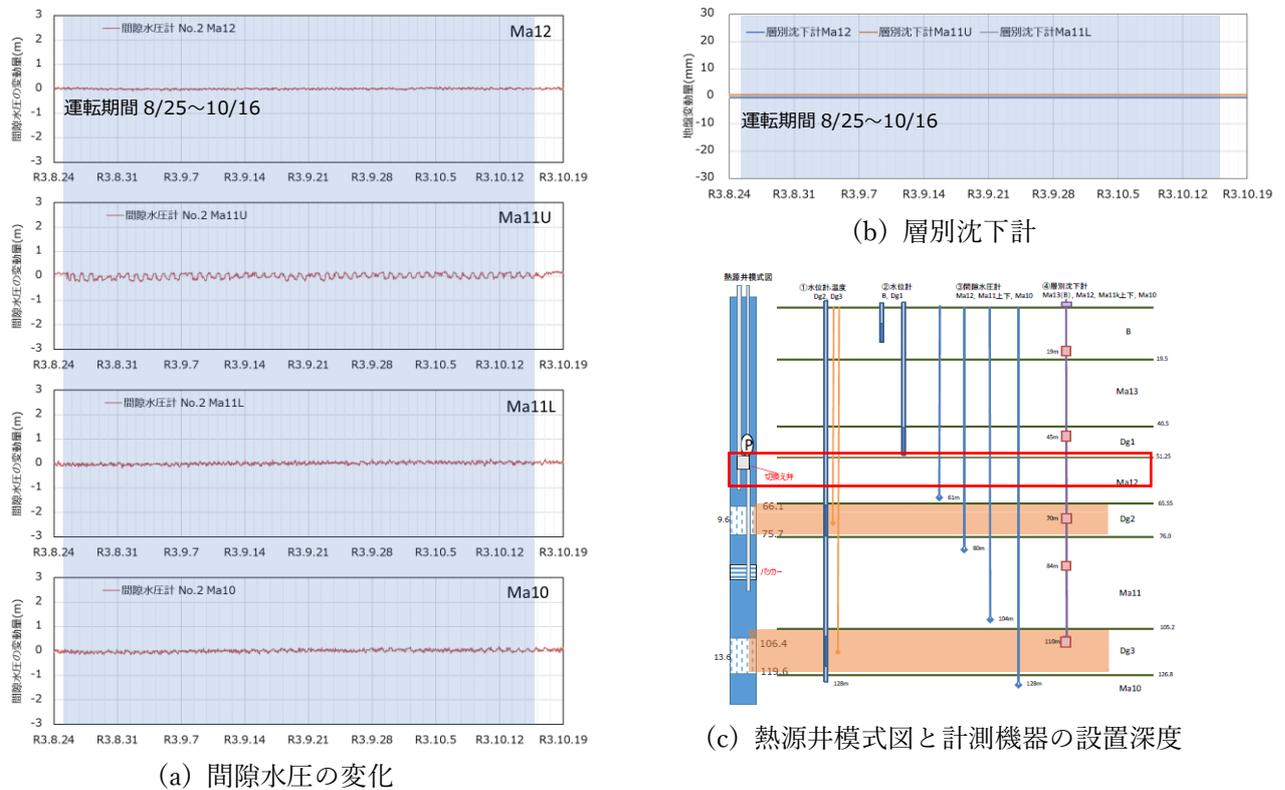
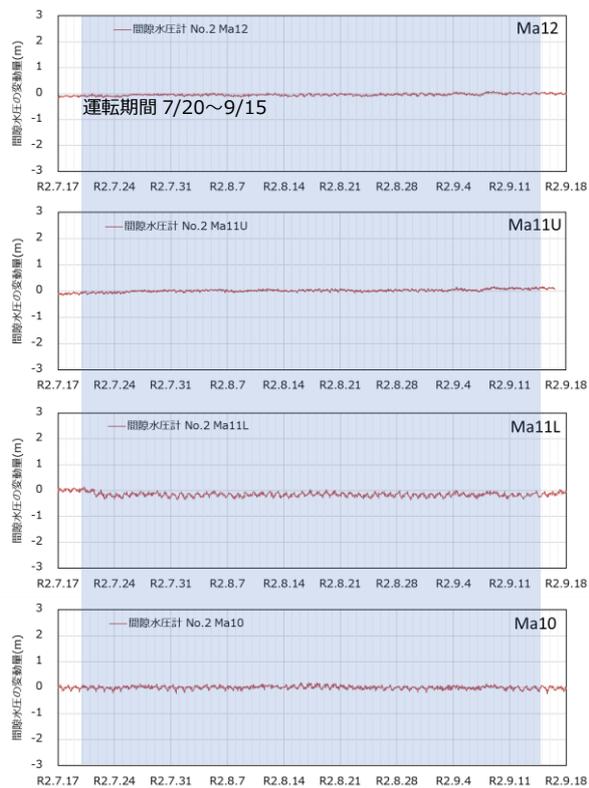
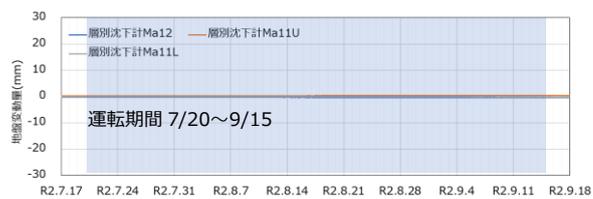


図 5 間隙水圧と地盤変動の推移 (Dg2)

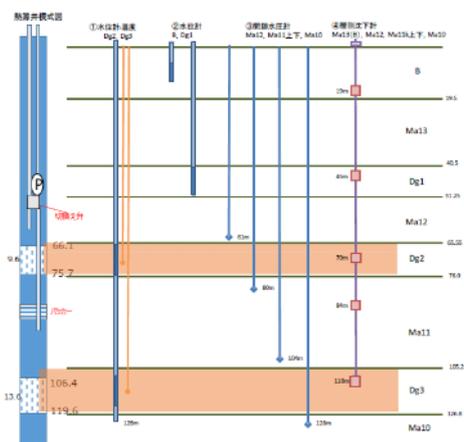
熱源井 B→A $Q_w = 90\text{m}^3/\text{h}$



(a) 間隙水圧の変化



(b) 層別沈下計



(c) 熱源井模式図と計測機器の設置深度

図6 間隙水圧と地盤変動の推移 (Dg3)
熱源井 B→A $Q_w = 90\text{m}^3/\text{h}$

3. 指定地域における帯水層蓄熱システムの適用性

第一次とりまとめでは、大阪市域の洪積粘土層の圧密特性データ及び解析結果から、大阪市の陸域の第2 洪積砂礫層 (Dg2) 以深の帯水層において、実証場所と同様に熱源利用で想定される応力変化に対して十分に過圧密であり、全量還水を前提として新たな圧密沈下を生じることなく、帯水層蓄熱利用が可能であると判断していた。

新たな実証試験により、地盤沈下に対し条件の厳しい沖合沿岸地域の埋立地、即ち圧密降伏応力が小さい場所であっても、うめきた2期区域と同様に地盤沈下は生じないことが確認された。

そこで、大阪市域や我が国の指定地域における過圧密量 $\Delta p_c (= p_c - p_0)$ と帯水層蓄熱システムによる応力変化と関係、さらに実証試験で計測不能であった僅かな地盤変動の把握 (シミュレーション) の有効性について検討した。

(1) 帯水層蓄熱システムが地盤に与える応力変化

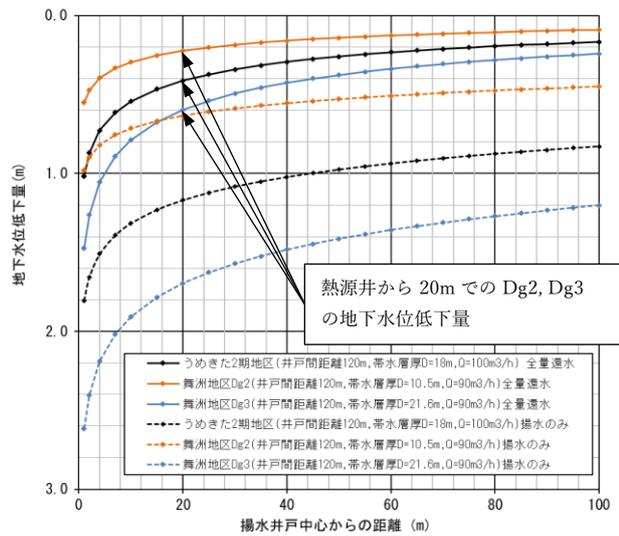
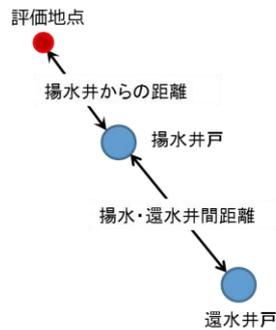
同一帯水層に全量還水を行う際の地下水位低下量を、被圧帯水層を対象とした群井の井戸理論式を応用し、式(1)により求めることができる。

$$s = \frac{Q_w}{2\pi k D} \left\{ \ln \frac{r_r}{r_p} \right\} \quad (1)$$

ここで、

s : 地下水位低下量(m)、 Q_w : 揚水・還水流量(m^3/s)、 k : 帯水層の透水係数(m/s)、 r_p : 揚水井からの距離(m)、 r_r : 還水井からの距離(m)、 D : 帯水層厚(m)である。

式(1)に舞洲地区での実証試験における揚水・還水流量を $Q_w = 90 \text{ m}^3/\text{h}$ 、位置を $r_p : 20 \text{ m}$ 、 $r_r : 140 \text{ m}$ 、透水係数 k を Dg2 : $3.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、Dg3 : $6.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 D を Dg2 で 10.5 m 、Dg3 で 21.6 m を代入したところ、熱源井から 20m での地下水位低下量 s は、図7 (b)に示す通り Dg2 で約 0.2 m 、Dg3 で約 0.6 m となり、p4 図2で示した観測井 No.2 の実測結果とほぼ一致する。同様に、地下水位低下量は、うめきた2期区域においても約 0.4m と同程度であり実測値約 0.3m とほぼ一致する。



(a) 地下水位低下量が最大になる方向 (b) 地下水低下量と揚水井戸中心からの距離の関係

図7 解析的手法による地下水位低下量と揚水井戸からの距離の関係

(※距離は、還水井から遠ざかる方向への長さであり、地下水位の低下量が最も大きくなる方向とした。)

よって、人工涵養機能を備えた帯水層蓄熱システムによる地下水位低下量の予測は可能である。

また、帯水層蓄熱システムの人工涵養機能は、陸域、埋立地の別を問わず、地盤沈下に厳しい条件であっても、応力変化は同じ程度であり、実測、予測ともに、第一次とりまとめと同様の結果となった。

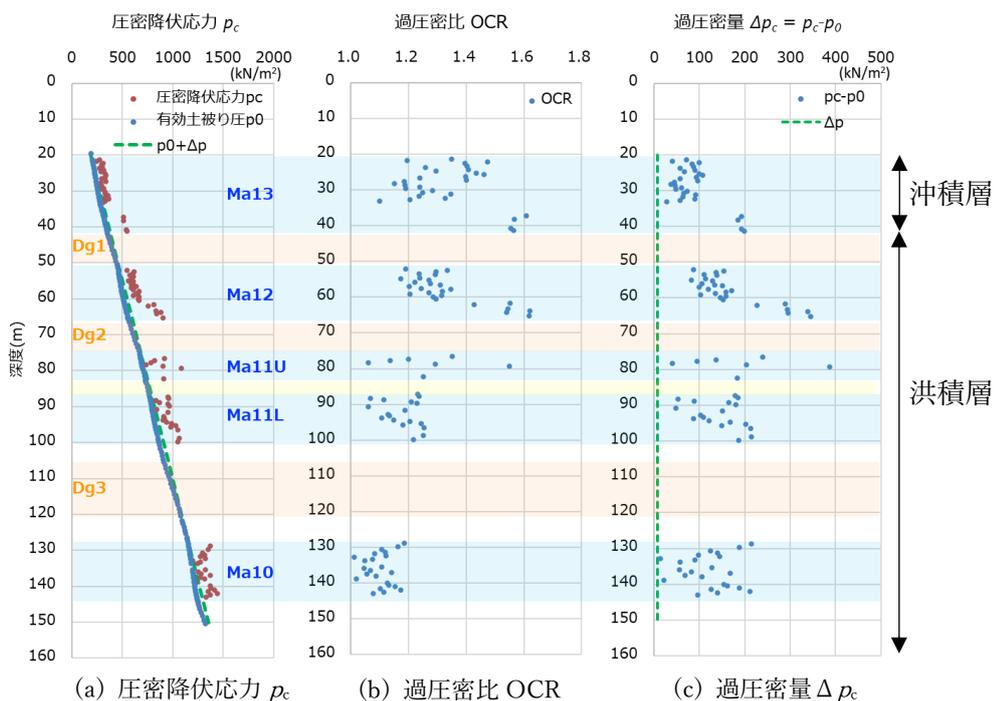
(2) 指定地域における洪積粘土層の圧密特性

1) 大阪市域

図8に舞洲地区の実証試験位置における海成粘土層の圧密試験の結果を示す。原位置で試料を採取、分析することにより、図1(a)の既往資料に見られた大きなばらつきは改善されるが、なおも試料ごとに一定のばらつきがあり、試料の中には過圧密比OCRが1.0に近いものも含まれ、うめきた2期区域に比べて過圧密量が小さいことがわかる。

このように地盤沈下について条件の厳しい埋立地であったが、実証試験の結果、地盤変動が認められなかった。

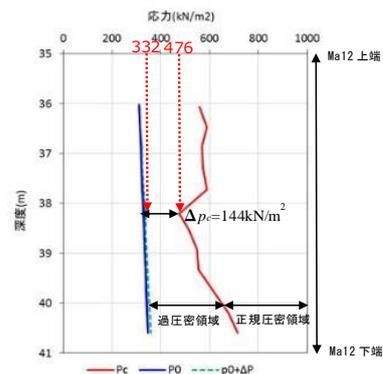
これは、帯水層蓄熱システムによるDg3の有効応力増加量 Δp が全量還水によって前述のとおり 5 kN/m^2 程度に抑制されたこと、また、洪積粘土層がこの応力変化に比べ、十分な過圧密状態(Δp_c の全層平均で $121 \text{ kN/m}^2 \sim 184 \text{ kN/m}^2$)にあったことによる。



(d) 各粘土層の圧密特性

	層厚 (m)	試料数	p_0 (kN/m ²)	p_c (kN/m ²)	Δp_c (kN/m ²)
Ma12	14.3	28	462~558(504)	549~903(667)	83~345(168)
Ma11U	7.65	13	680~740(706)	736~1089(881)	41~387(184)
Ma11L	13.9	26	768~863(813)	834~1069(955)	48~215(145)
Ma10	16.2	32	1149~1256(1203)	1197~1442(1321)	14~215(121)

※括弧内は平均値。



(e) うめきた2期区域 Ma12 の p_c と Δp_c の関係

図8 舞洲地区の各粘土層の圧密状況

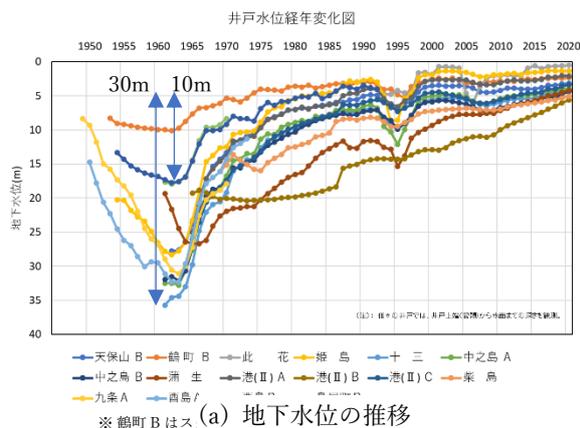
次に、大阪市域全域における圧密降伏応力 p_c と地下水位観測結果から、過圧密の広域的検証を行った。前述のとおり大阪市域の帯水層は、上町台地を挟んで面的かつ連続的に分布する。図9に示すとおり、地下水採取規制の施行直前の1960年頃までは、地下水位が10m~30m(有効応力増加量 Δp にして $100 \text{ kN/m}^2 \sim 300 \text{ kN/m}^2$) 以上まで広域的に低下し、採取規制後に地下水位が回復した。

実測によるこれらの地域の過圧密量は、大半が地下水位低下量と同等以上である。これは、過去の過剰な地下水採取による地下水位の広域的な低下や地盤沈下に加え、海進、海退の繰り返しや、セメンテーション等の年代効果といった堆積環境由来の圧密によるものである。このため、舞洲の様なこれまで地下水採取が行われていない沖合沿岸地域でも同程度の過圧密量が確認され

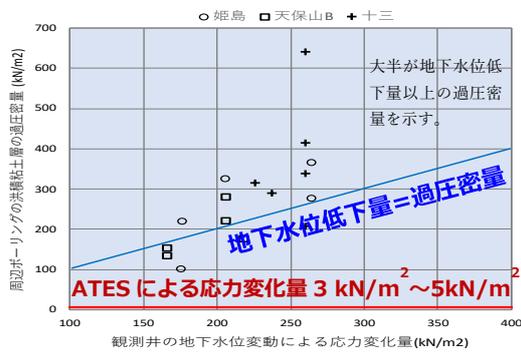
ている。よって、帯水層蓄熱システムの利用に十分な過圧密量の粘土層が、市域全体に分布していると推定される。

平成4年(1992年)には、大阪市域の鉄道開削工事に伴う5mの地下水位低下により、周辺地盤高が3cm低下したが、工事完了以降、地下水位とともに地盤高も回復しており、周辺域における弾性変形が確認されている(図10)。

これは、帯水層蓄熱システムの実証試験では生じさせることのできない大きな応力変化を与えても、地盤沈下が生じないことを証明している。



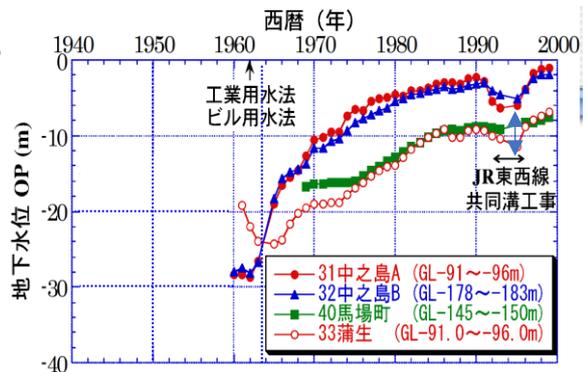
(a) 地下水位の推移



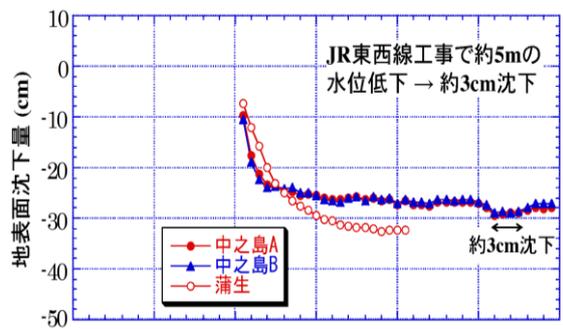
(b) 地下水観測井周辺の水位変動量と過圧密度の関係

図9 大阪市域の地下水位と洪積粘土層の過圧密度

※1 地下水位低下量が明確なビル用水法施行(昭和37年)以前に設置した観測井を対象に整理。
 ※2 帯水層の地下水位測定結果がない場合は、以深の帯水層の地下水位低下量を使用。



(a) JR東西線共同溝工事による地下水位低下



(b) JR東西線共同溝工事における弾性変形

図10 JR東西線共同溝工事時における水位低下と地盤の弾性変形

2) 大阪市域以外の指定地域

東京都、埼玉県、愛知県等の一部においても、大阪市と同様に激甚な地盤沈下を経験し、用水二法の地域指定を受けている。これらの圧密沈下を生じた地域は、地下水位の低下と回復を経験しており、粘土層は一定の過圧密状態にあると考えられる。

このうち、地下水位観測結果と同地点付近の土質試験結果が入手できた愛知県と東京都について、過圧密量の推定を行い、帯水層蓄熱システムによる応力変化や地下水位低下量と比較検証した。

① 愛知県

図11に愛知県を含む濃尾平野の地質断面図を示す。東西の東海層群の間に堆積した濃尾平野部は、海進、海退の繰り返しにより砂礫層と粘土層が互層を形成しており、T.P.-50m付近の第1礫層(G1層)を基底として、以深に洪積層が分布している。

第1礫層(G1層)は地層が不連続で地下水が大規模に採取されておらず、既往の地下水位の観測結果に大きな変動も見られなかったことから、帯水層蓄熱技術が利用可能な帯水層は第2礫層(G2層)以深の洪積砂礫層と考えられる。

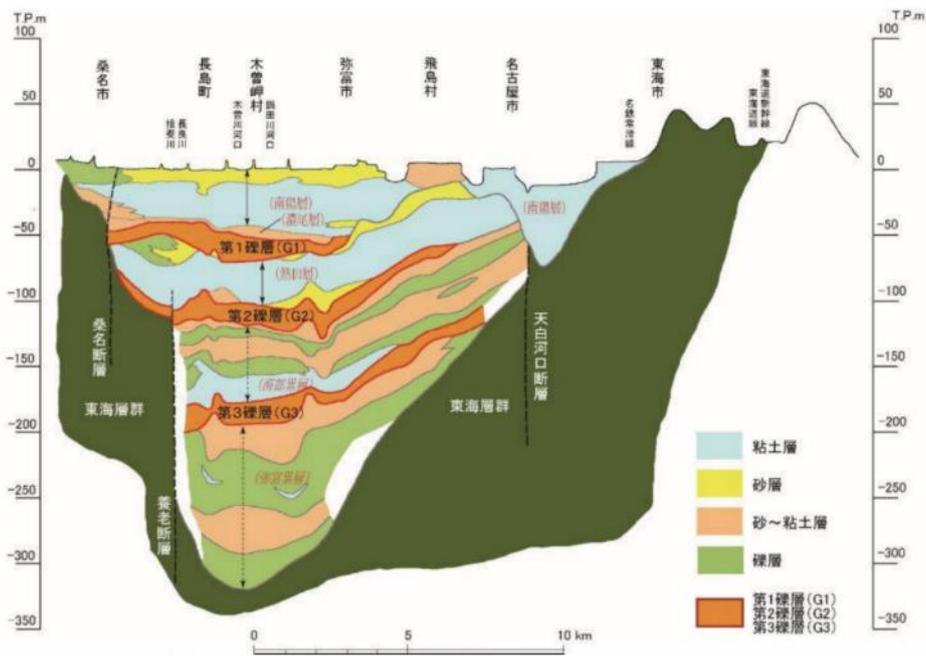


図11 濃尾平野の地質断面図

※出典：東海三県地盤沈下調査会, 令和5年における濃尾平野の地盤沈下の状況

愛知県で実施された地盤沈下・地下水位観測井（飛鳥、美和、稲沢、佐屋、津島、甚目寺）（図12）におけるG2層、G3層の上下に位置する洪積粘土層の圧密降伏応力の深度分布を図13に、当該粘土層における過圧密量の層内平均の分布を図14に示す。

愛知県の洪積粘土層における過圧密量 Δp_c は、層内平均で $15 \text{ kN/m}^2 \sim 2,236 \text{ kN/m}^2$ であり、大阪市域と同様に過圧密と言える。

なお、大阪市域と同様、既往の圧密試験結果にばらつきが見られ、 p_c が p_0 を下回るという通常考えられない過小値も含まれる。ここでは p_0 を下回るもののみ $p_c = p_0$ とみなしたが、舞洲と同様に、現地での試料採取によって p_c の精度向上を図ることで、ばらつきは一定収束するものと期待できる。

愛知県における帯水層蓄熱システムによる有効応力増加量 Δp を、土質試験データが豊富な飛鳥地区を対象に予測した結果を図15に示す。式(1)に揚水・還水流量を $Q_w = 100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、位置を $r_p : 20 \text{ m}$ 、 $r_r : 140 \text{ m}$ 、透水係数 k を G2 : $1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、G3 : $4.8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 D を G2 : 14.8 m 、G3 : 8.5 m を代入したところ、熱源井から 20 m での地下水位低下量 s は G2 : 0.4 m 、G3 : 0.2 m 、有効応力増加量にして G2 : 4 kN/m^2 、G3 : 2 kN/m^2 であり、大阪市域で実証を行った観測井での有効応力増加量（うめきた2期区域（ 3 kN/m^2 ）や舞洲（ 5 kN/m^2 ））と同程度であり、当該地点の過圧密量と比較して十分に小さいことがわかる。

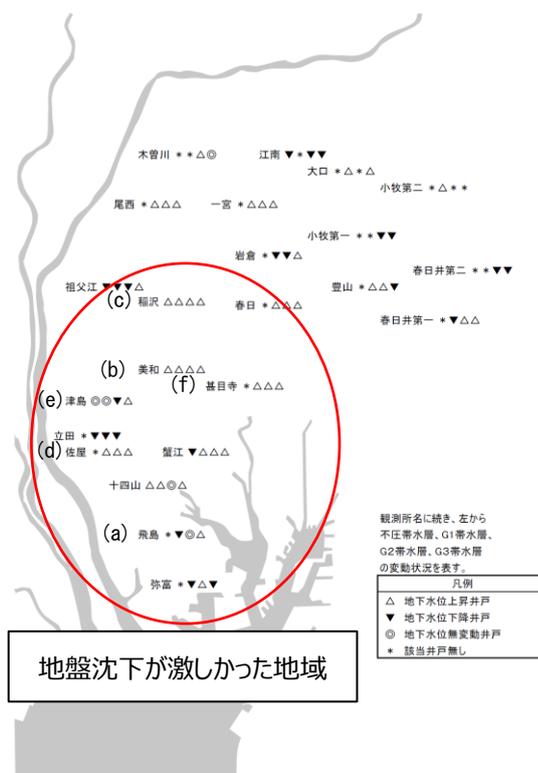


図12 愛知県の地盤沈下・地下水位観測井位置

※出典：愛知県, 2023年愛知県地盤沈下調査結果を基に加筆

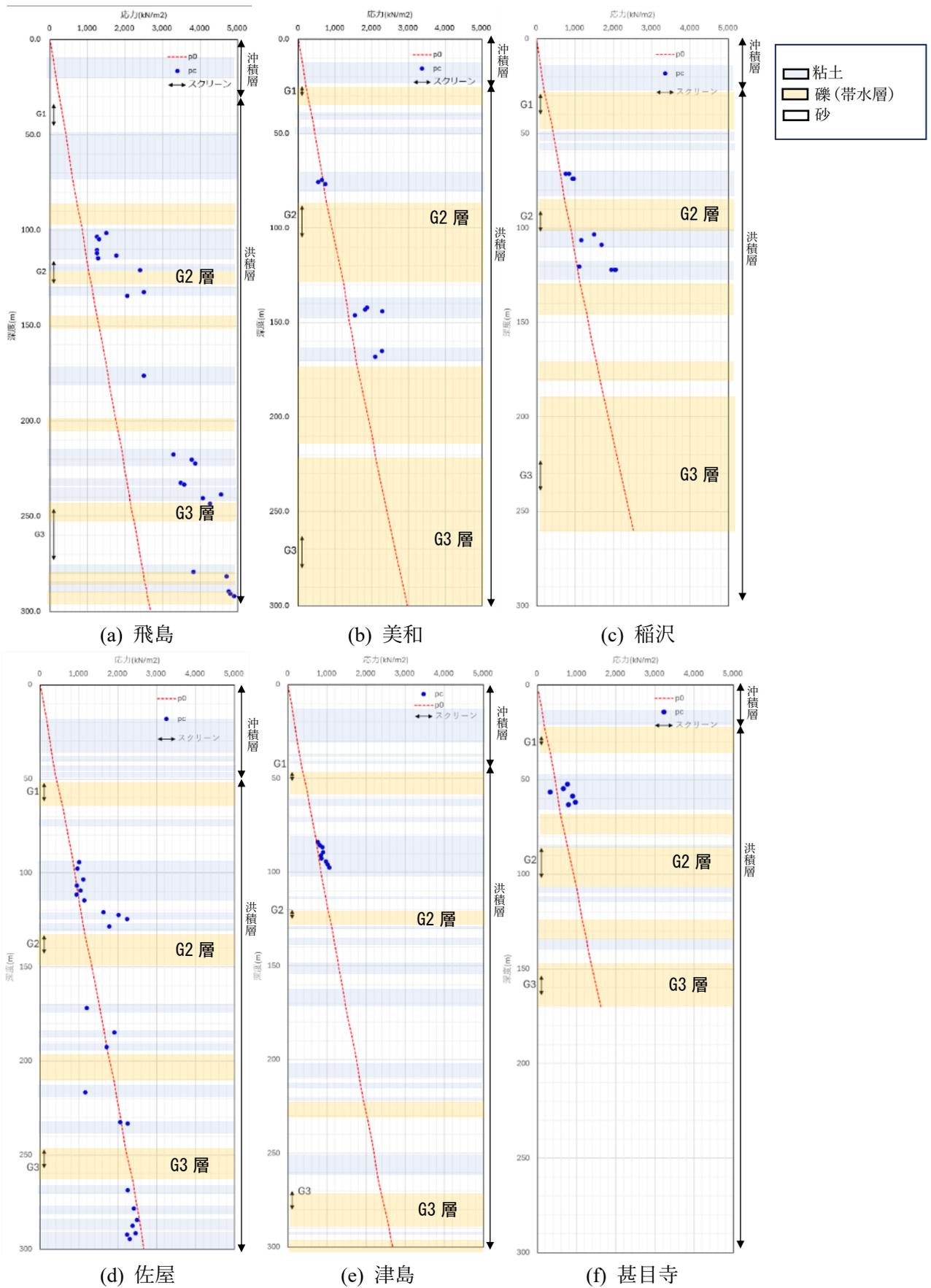
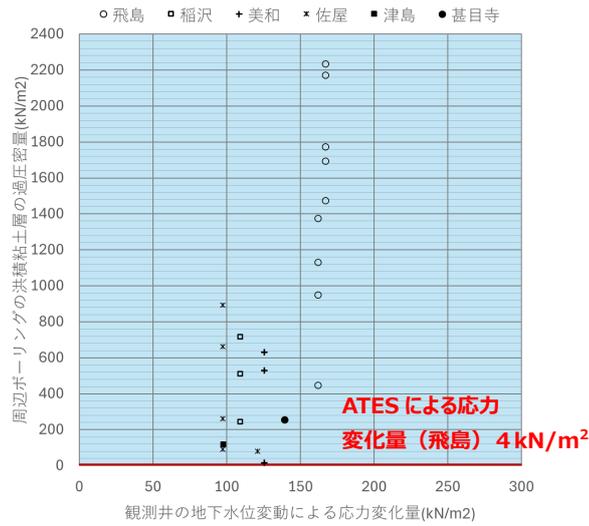


図 1 3 圧密降伏応力の深度分布 (愛知県)

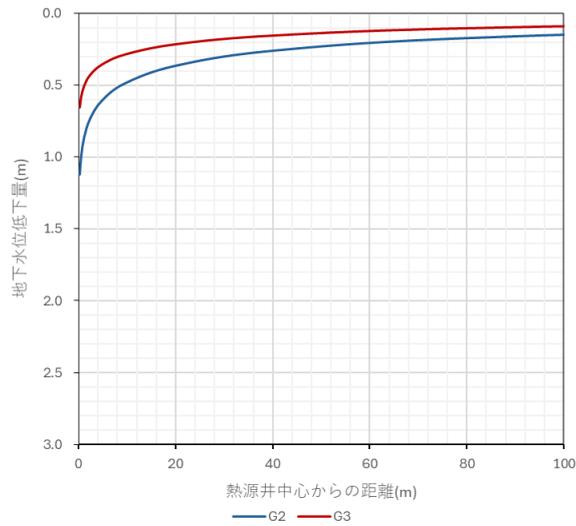
※出典：愛知県提供データを基に作成



	Δp_c (kN/m ²)
愛知県	15 ~ 2,236

※ p_c が p_0 を下回っている場合は $p_c = p_0$ として層内平均を算出。

図 1 4 地下水位変動による応力変化量と粘土層の過圧密度（愛知県）



【計算条件】対象帯水層：G2・G3、揚水・還水流量： $Q_w=100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、熱源井間距離：120m、透水性係数 k ：G2： $1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、G3： $4.8 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 D ：G2：14.8 m、G3：8.5m

図 1 5 愛知県飛島地下水観測井における地下水位低下量の予測結果

② 東京都

図16に武蔵野台地～東京低地に至る東西地質断面図、図17に埋没平坦面の分布、図18に東京低地の地質断面図を示す。東京都の地形は、大きく武蔵野台地と東京低地に区分される。東京低地は、うめきたと同様に沖積平野で、洪積層の下総層群（東京層等）や上総層群（江戸川層、舎人層、東久留米層、北多摩層）を基底として、その上位に海進、海退により形成された有楽町層や七号地層と呼ばれる沖積層が標高-50m～-70mまで厚く堆積し、埋没谷を形成している。武蔵野台地は主に洪積層からなる洪積台地であり、多摩面、下末吉面、武蔵野面、立川面などの段丘面からなり、表層を関東ローム層が覆う。

東京低地には、帯水層として沖積層と洪積層の境界付近に堆積する七号地層の基底礫層や埋没段丘堆積物に含まれる礫層があり、以深にも海進、海退によりシルト層と互層状に堆積する砂・砂礫層が帯水層として存在する。武蔵野台地には、被圧帯水層として上総層群の舎人層、城北砂礫層等の帯水層が存在する。

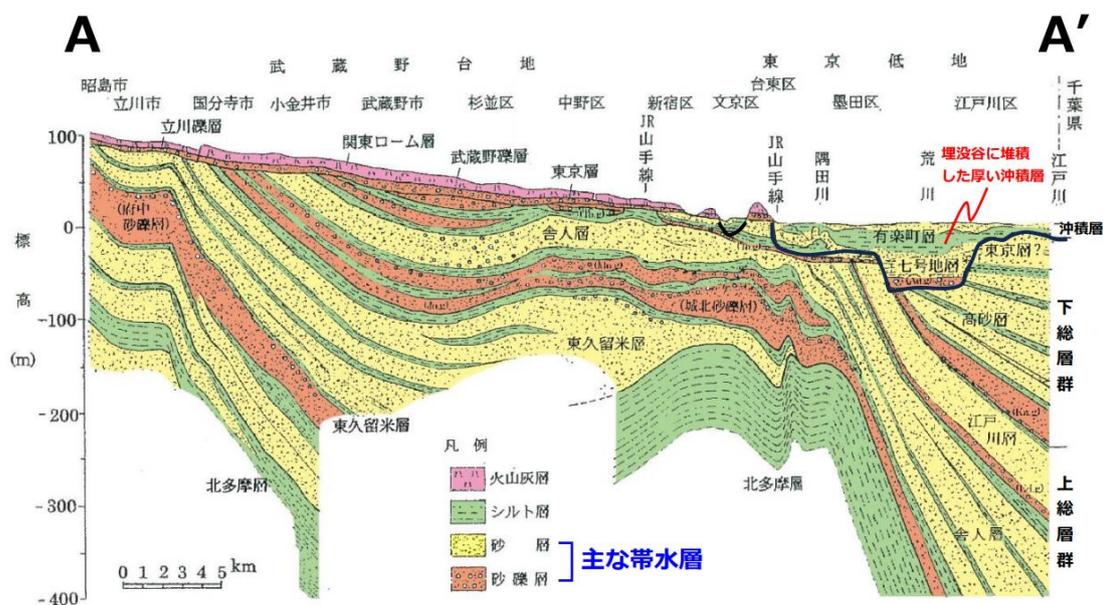
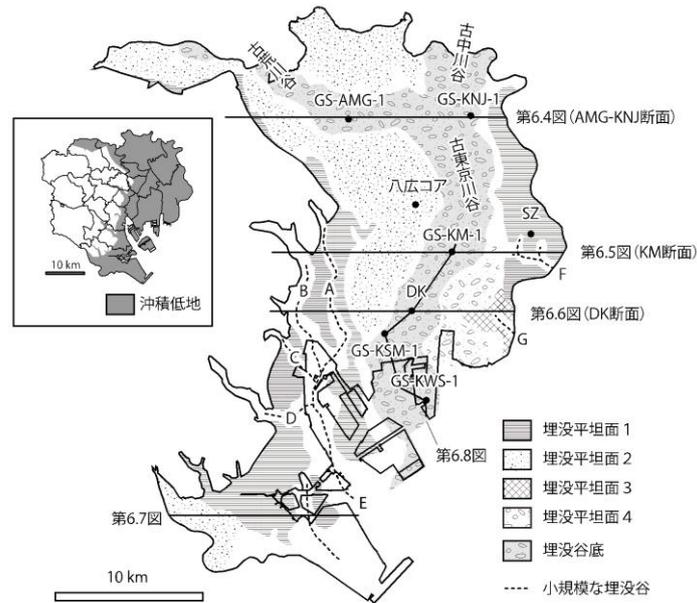


図16 武蔵野台地～東京低地に至る東西地質断面図

※出典：東京都、地下水・地盤沈下検証結果報告書



第 6.3 図 埋没平坦面の分布と分類。
 小規模な埋没谷の名称は A: 昭和通り谷, B: 丸の内谷, C: 古古川谷, D: 古目黒川谷,
 E: 古神田川谷, F: 行徳谷, G: 蒲安谷。

図 1 7 埋没平坦面の分布

※出典：産業技術総合研究所, 都市域の地質地盤図

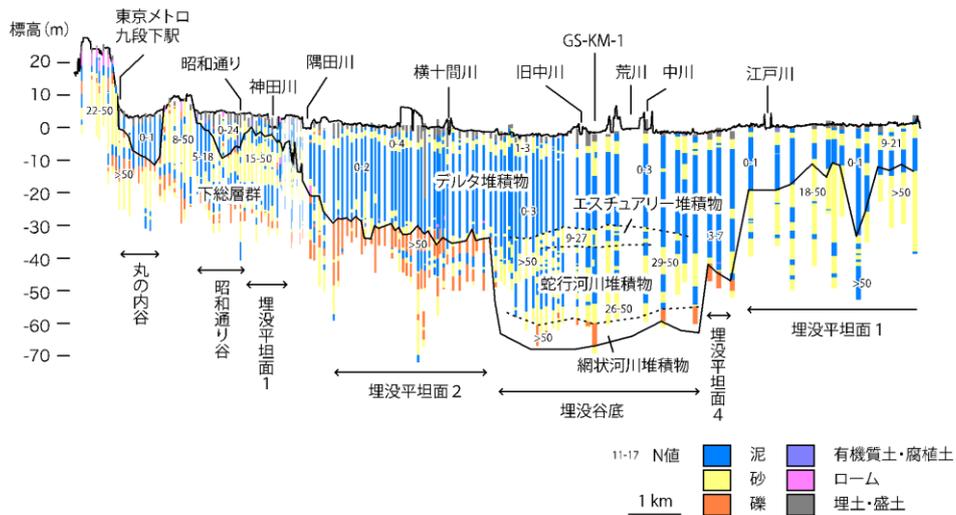


図 1 8 東京低地の地質断面図

※出典：産業技術総合研究所, 都市域の地質地盤図

図 1 9 に東京都において実施・公表されている土質調査地点（亀戸 2 ヶ所、南砂町、新江戸川、伊興、新明南、清澄、新砂、古千谷、谷中、水元公園）及び地下水位観測位置を示す。また、図 2 0 に帯水層に接する沖積粘土層最下部及び以深の洪積粘土層の圧密降伏応力の深度分布図を示す。また、図 2 1 に当該粘土層における過圧密量の層内平均の分布を示す。

Δp は、沖積粘土層最下部で $171 \text{ kN/m}^2 \sim 885 \text{ kN/m}^2$ 、洪積粘土層で $402 \text{ kN/m}^2 \sim 2,584 \text{ kN/m}^2$ であり、大阪市域と同様に過圧密と言える。

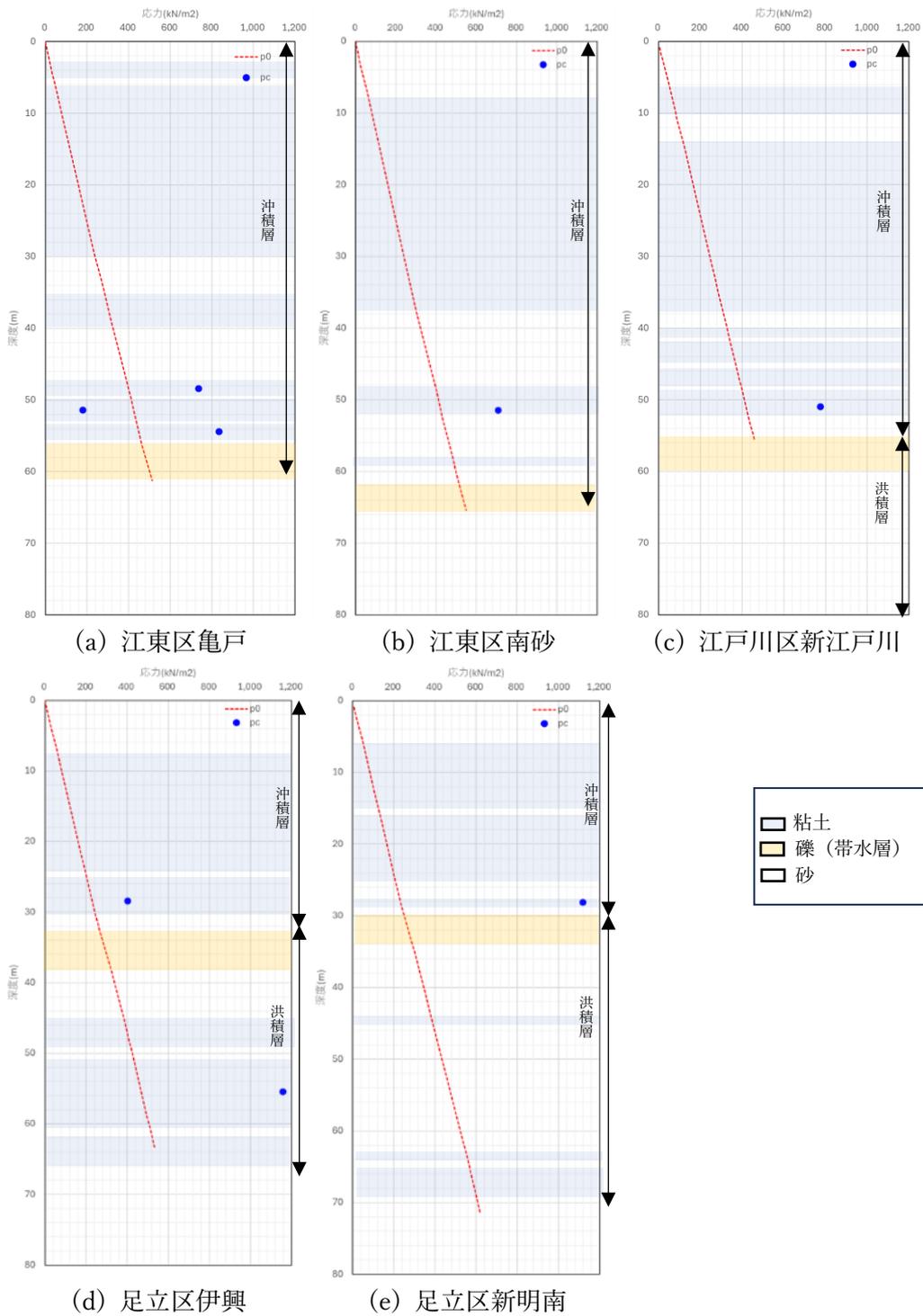


図 2 0 圧密降伏応力の深度分布 (東京都) (1)

※出典：東京都, 東京の地盤 (GIS 版) を元に作成

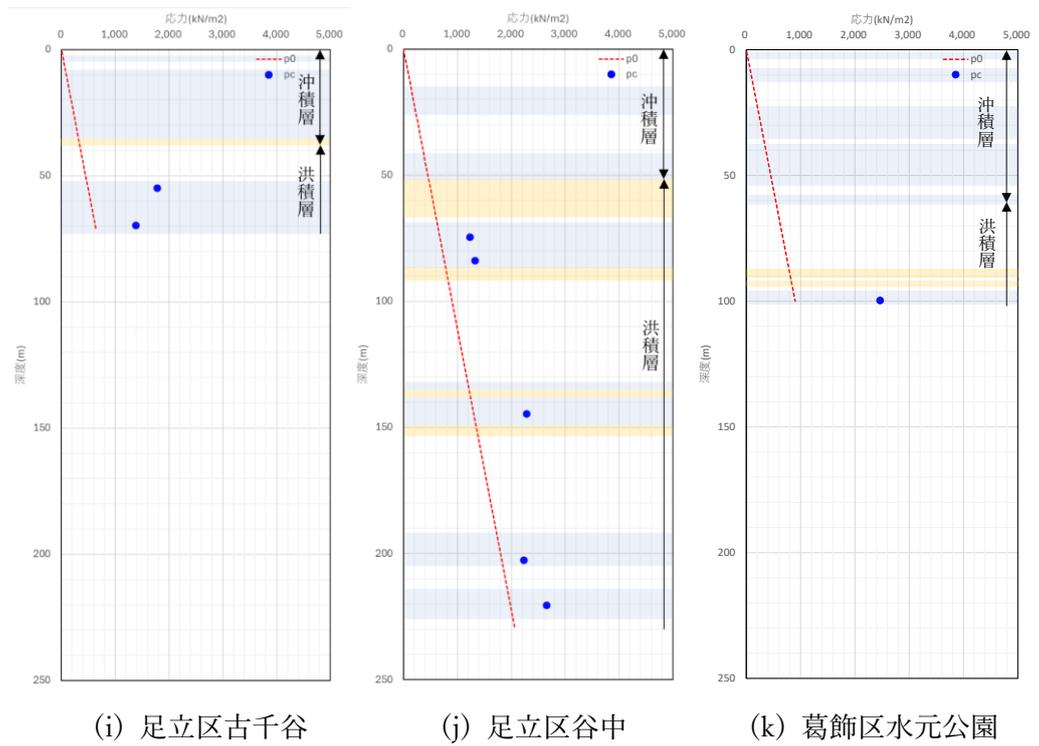
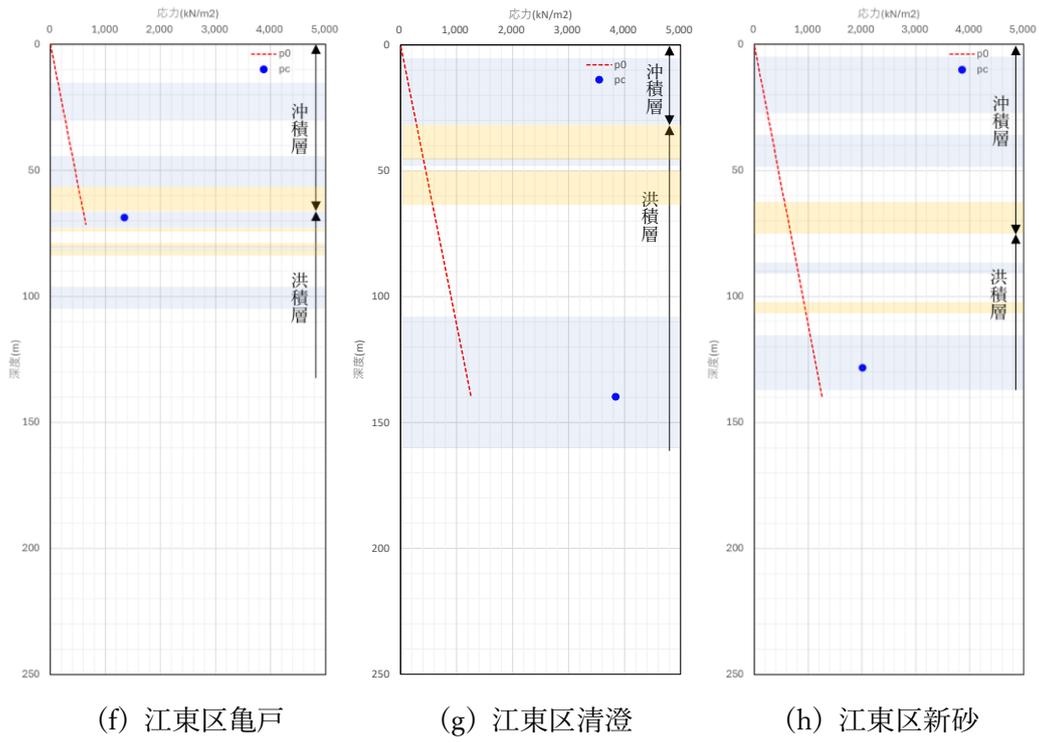
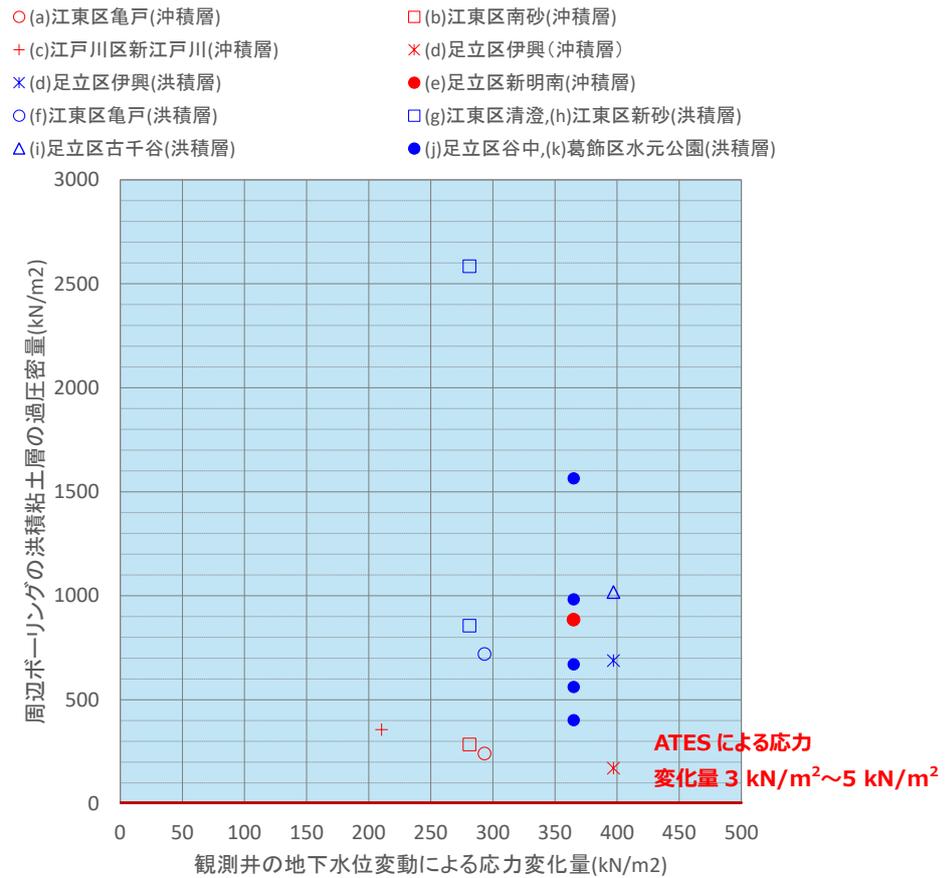


図 20 圧密降伏応力の深度分布 (東京都) (2)

※出典：東京都, 東京都 (区部) 大深度地下地盤図を元に作成





	Δp_c (kN/m ²)
東京都 (沖積粘土層最下部)	171 ~ 885
東京都 (洪積粘土層)	402 ~ 2,584

※ p_c が p_0 を下回っている場合は $p_c = p_0$ として層内平均を算出。

※帯水層の地下水位測定結果がない場合は、以深の帯水層の地下水位低下量を使用。

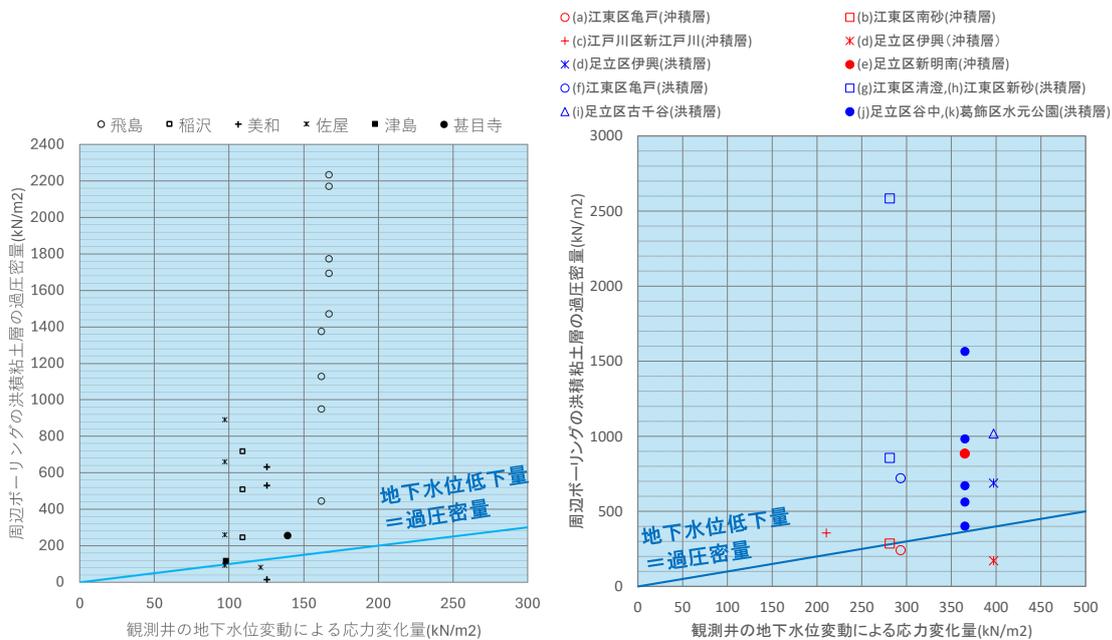
図 2 1 地下水位変動による応力変化量と粘土層の過圧密量 (東京都)

図 2 3 に愛知県及び東京都における過圧密量と地下水位変動量の関係を示す。ここで、地下水位変動量は地盤沈下が沈静化して以降の地下水位回復量である。

いずれの地域も過圧密量 Δp_c は、大阪市域と同様に過去の過剰な地下水採取による地下水位の広域的な低下や地盤沈下に加えて、海進、海退の繰り返しやセメンテーション等の年代効果といった堆積環境由来の圧密等が広範囲に及んだことにより、大半が地下水位低下量（回復量）に相当する応力変化を上回っている。

我が国の指定地域は、いずれも過去に過剰な地下水の採取により激甚な地盤沈下を経験した地域であり、地下水採取規制による沈静化以降、長年を経過していることから、地下水位の著しい低下及び回復を経験しているうえ、堆積環境由来の広域的圧密によって、これらの地域全体に地下水位低下量（回復量）相当以上の過圧密量となった粘土層が分布していると推定される。

以上のことから、我が国の指定地域においては、帯水層蓄熱システムによる僅かな水位低下に伴う応力変化の程度では、地盤工学的に著しい変化が生じる可能性は低いと言える。



(a) 愛知県

(b) 東京都

※ p_c が p_0 を下回っている場合は $p_c = p_0$ として層内平均を算出。

※帯水層の地下水位測定結果がない場合は、以深の帯水層の地下水位低下量を使用。

図 2 3 地下水位変動量と粘土層の過圧密量の関係

(3) 帯水層蓄熱システムが及ぼす地盤変動量の把握

1) 大阪市域

前述のとおり、実証試験の結果、地盤沈下に対してより条件が厳しい埋立地であっても、帯水層蓄熱システムによる僅かな応力変化では、うめきた2期区域と同様に著しい地盤高の変化は生じないばかりか、地盤変動量は計測不能であった。

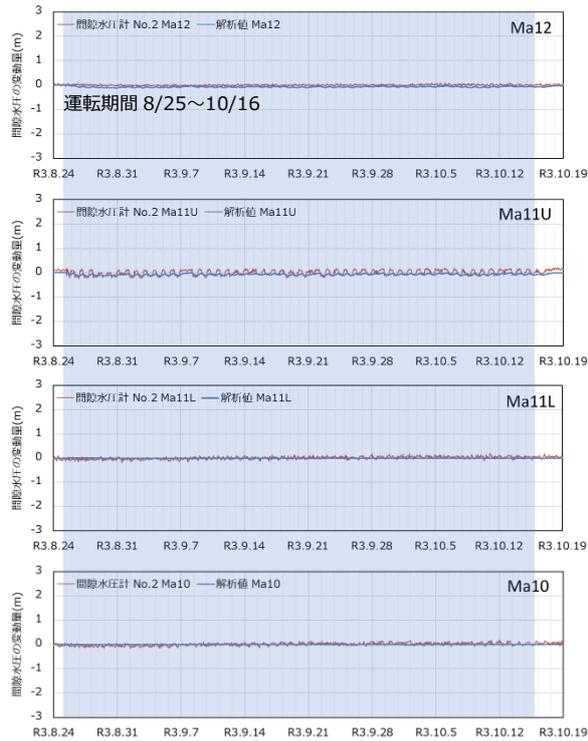
これを、UNSAF-3D-Cにてシミュレーションを実施し確認したところ、地盤変動量はいずれも1 cm以下の微小な変化であり、また一定の再現性が示された(図24、図25)。

よって、現場試験から得られた範囲の土質パラメータを使用した3次元での地下水の揚水と還水に対するシミュレーションであれば、実証試験と同等の確認が可能である。

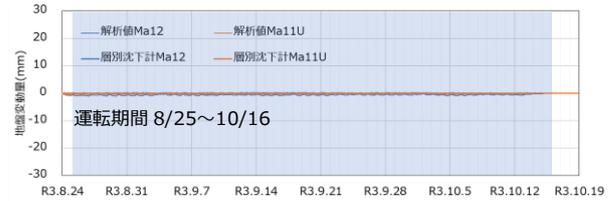
なお、シミュレーションで地盤高に相当有意な変化が予測された場合には、措置要件に基づく実証試験(実測)による確認が必要となる。

UNSAF-3D-C¹：岡山大学 西垣誠教授らによって開発された有限要素法による浸透流解析と圧密沈下解析の連成解析プログラム。地下水の揚水・還水による地下水位の変化とそれに伴う地盤の圧密を同時に解析することができる。地盤収縮について1次元変形状態と仮定し、地盤の側方変位による沈下は考慮しないものとする。圧密沈下量は、浸透流解析により圧密層からの排水量から予測する。

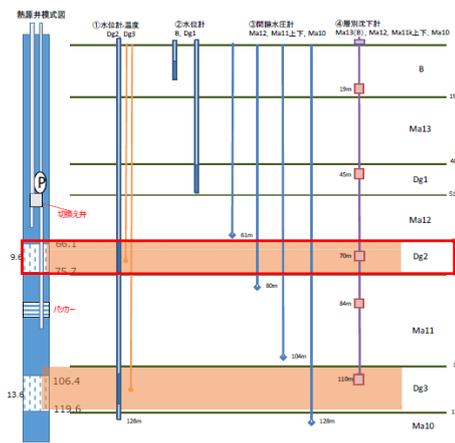
¹ 西垣誠他, 圧縮に伴う比貯留係数の変化を考慮した地下水浸透に基づく地盤沈下解析手法, 土木学会論文集, No.799/III-72, 1-12, 2005.9.



(a) 間隙水圧の変化

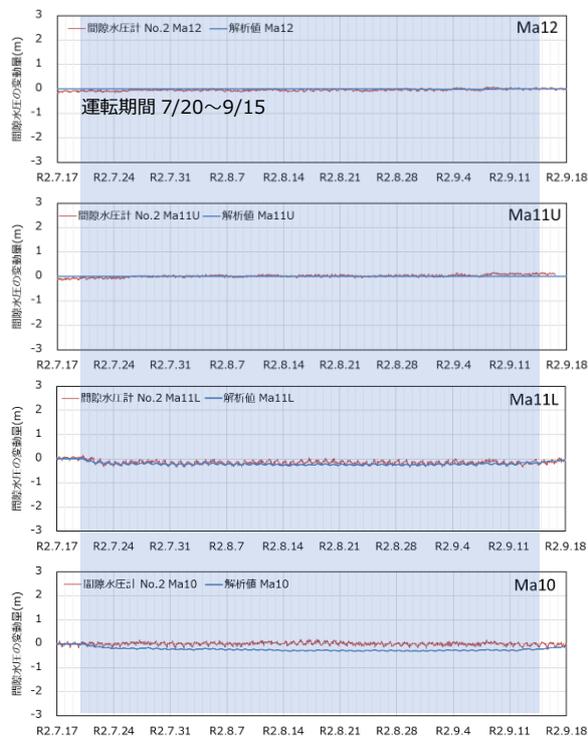


(b) 層別沈下計

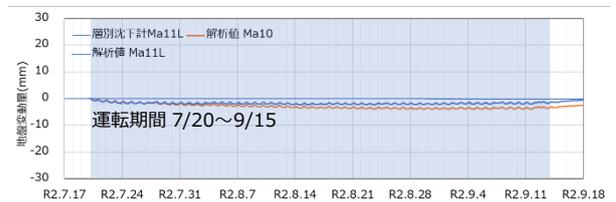


(c) 熱源井模式図と計測機器の設置深度

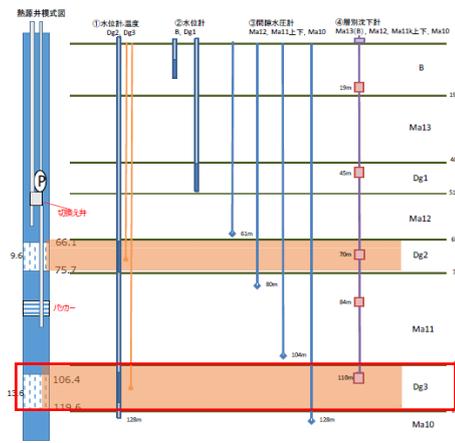
図 2 4 間隙水圧と地盤変動のシミュレーション結果(Dg2)
熱源井 B→A 90 m³/h



(a) 間隙水圧の変化



(b) 層別沈下計



(c) 熱源井模式図と計測機器の設置深度

図 2 5 間隙水圧と地盤変動のシミュレーション結果 (Dg3)

熱源井 B→A 90 m³/h

2) 大阪市域以外の指定地域

図 2 6 に、愛知県の指定地域のうち、土質試験データが比較的豊富な愛知県の飛島において、UNSAF-3D-C により数値解析シミュレーションを実施した結果を示す。対象とする帯水層は、帯水層蓄熱システムによる地下水位低下量が大きく、上下粘土層の過圧密量が比較的低い G2 層とした。

3 (2)2)①で予測した有効応力増加量 4 kN/m^2 (揚水・還水流量を $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、井戸間距離を 120m としたとき、熱源井から 20 m 地点での地下水位低下量は約 0.4 m) を用いた時、UNSAF-3D-C による地盤変動量は、 1 mm 以下の微小な変化であり、地盤高に著しい変化が生じないことはもとより、実測不可能であることを確認した。

当該地点では実証試験を行っておらず、実測との比較はできないものの、土質試験結果から得られた圧密降伏応力が、帯水層蓄熱システムによる水位低下量が及ぼす応力変化を十分に上回っていること、また、これまでのシミュレーションにおいて、実測よりも感度の高い予測ができています (環境安全側) ことから、仮に措置要件が求める実証試験を行ったとしても、この予測結果を大きく上回り、著しい変化と認められるような地盤変動が生じる可能性は低いと考えられる。

なお、シミュレーションの際には、過去の土質調査ではサンプリング精度にばらつきがあることから、舞洲と同様に現場試験の結果を用いることにより、精度を確保する必要がある。

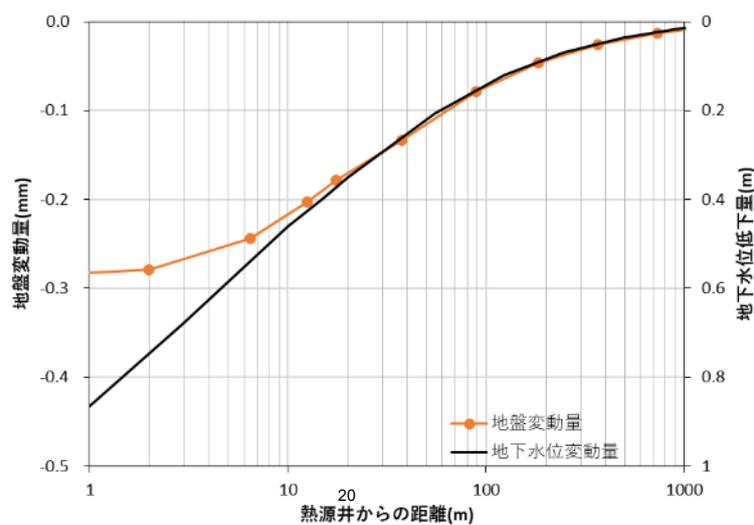


図 2 6 飛島観測所における ATES を導入した場合の地下水位・地盤変動量の予測結果

【計算条件】対象帯水層：G2、揚水・還水流量： $Q_w=100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、熱源井戸間距離： 120m 、
透水係数 $k: 1.6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 $D: 14.8 \text{ m}$

4. 第二次とりまとめ

国家戦略特区における新たな特例措置（共同命令）は、大阪市からの帯水層蓄熱利用の普及に向けた国家戦略特区の規制緩和提案を受け、実証試験等を通じて地盤沈下等が生じないことが確認された建築物用地下水の採取に関する特例措置として、現行の技術的基準が緩和されたもので、その主な要件は、当該場所の土質試験により十分な過圧密状態にあることに加えて、事実上1年以上に及ぶ実証実験により地盤高等に著しい変化がないことの事前確認と、試運転と事後モニタリング等の事後確認と報告を求める内容とされた。

その後の調査により、地盤沈下に対して条件の厳しい地点の代表例として、過圧密量の小さな埋立地であっても、帯水層蓄熱システムによる応力変化に比べて十分に大きいこと、また、同埋立地において実証試験を行ったが、地盤変動に著しい変化が生じないばかりか、計測不能という結果に終わった。

こうした成果を踏まえ、「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議」での検討を経て、さらなる規制緩和の可能性の観点から、これまでの検討の成果を次のとおり取りまとめた。

- ① 帯水層蓄熱システムによる応力変化は、過圧密量の小さな埋立地であっても接する粘土層の弾性の範囲を超えず、間隙水圧はこれまでの実証試験等の実例において圧力伝搬の範囲内にあり、消散することなく元に戻ることが立証された。また、過去の圧密試験結果や過圧密量と地下水位低下量の関係等から、全国の指定地域においても同程度の十分な過圧密状態にあることが示唆された。
- ② 措置要件に規定される実証試験は、①の埋立地で実施しても地盤高の変化は計測不能で、著しい変化はもとより僅かな変化も認められない。
- ③ 現場試験から得られた範囲のパラメータを使用した有限要素法や有限差分法等を用いた数値解析シミュレーションであれば、実証実験で計測できない微細な変動を予測できる。
- ④ よって、帯水層蓄熱システムによる応力変化の程度では、指定地域内において地盤工学的に著しい変化が生じる可能性は低く、上記シミュレーションにより地盤変動量に著しい変化が認められなければ、措置要件に定める実証試験と同等の確認ができたものと判断できる（シミュレーションで地盤高に相当有意な変化が予測された場合には、実証試験による確認が必要）。
- ⑤ ④の場合であっても、措置要件には試運転や事後モニタリングが規定されており、これらが機能することで、異常時の運転停止措置等を講じることで、地盤沈下の未然防止が可能である。
- ⑥ 地下水の水質維持については、空気と触れない密閉回路構造と正圧維持等により著しい変化が生じないことが、これまでの実証試験等の実例において立証されており、これを遵守することで水質が保全される。なお、密閉回路と正圧維持等の構造・維持管理については、環境省 CO₂排出削減強化誘導型技術開発・実証事業の成果として大阪市のガイドラインをとりまとめている。

現行の特例措置を受けた場合と実証試験をシミュレーションで代替した場合の帯水層蓄熱システム導入・運用のフローを図27に示す。

帯水層蓄熱システムの普及を進めるうえで、計測不能な僅かな変動を確認するための実質1年間に及ぶ実証試験は、事業スケジュールの観点からは過度の負担であり、これをシミュレーションで代替することで、地盤環境に配慮した地下水の有効利用の拡大に資することが期待できる。

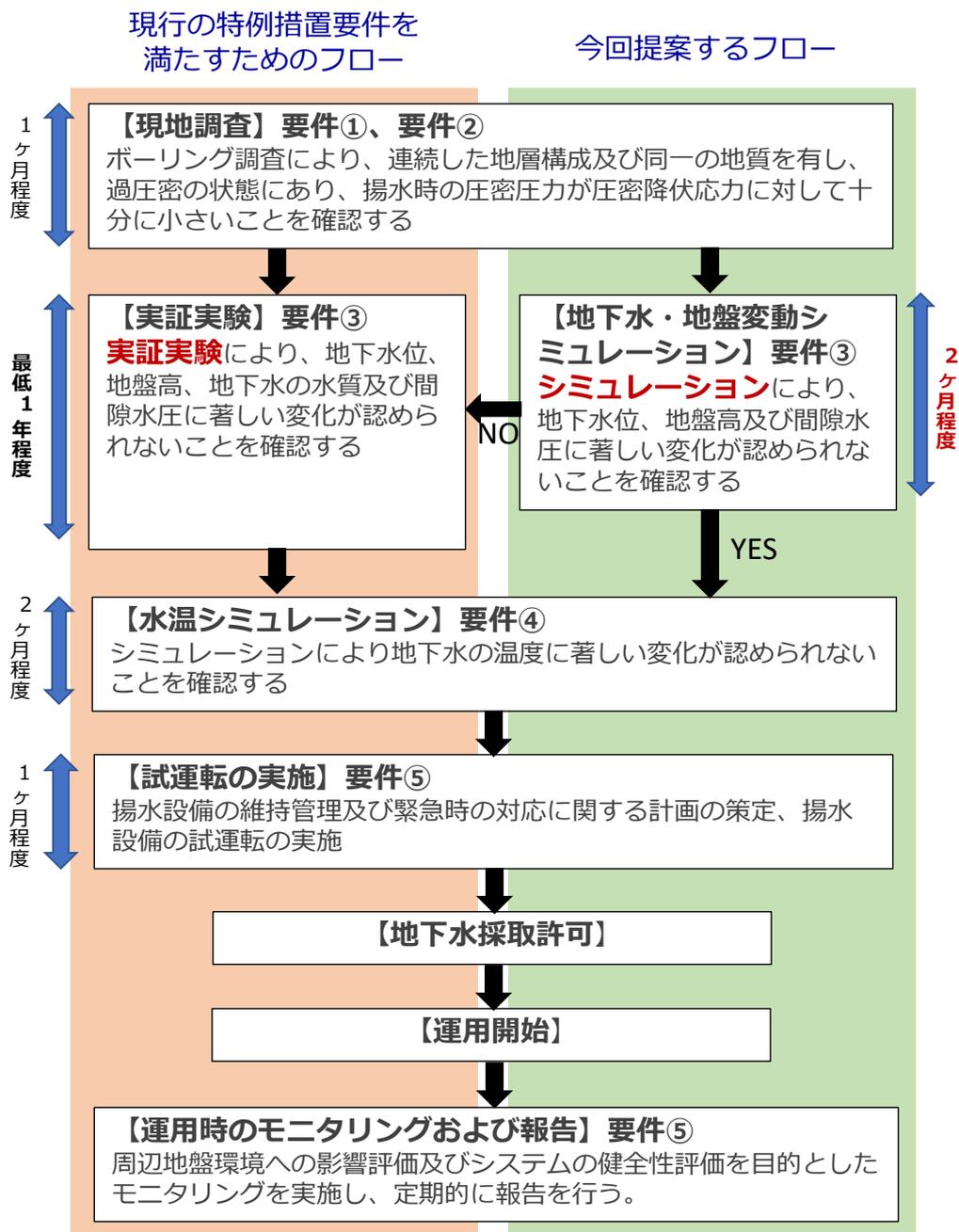


図27 帯水層蓄熱システム導入・運用のフロー

5. 更なる検討の必要性

上述のとおり、圧密沈下を生じた粘土層の大半は、その原因となった数十メートルもの地下水位低下量相当以上の過圧密状態にある。これに比べて、帯水層蓄熱システムによる地下水位低下量に相当する有効応力増加量は、過圧密量を十分に下回るレベルであり、地盤変動については、有限要素法による数値解析シミュレーションを実施したところ、うめきた2期区域、舞洲、飛島のいずれも実測不可能な微小な変化となっている。

このことから、井戸理論式で予測される帯水層蓄熱システムによる地下水位低下量が地盤沈下沈静化以降の地下水位変動量に比して十分に小さい場合には、この地下水位低下量による増加応力が現地試験で得られた過圧密量に比して十分に小さいことが確認できれば、生じる地盤変動量は僅かであるとして地盤変動シミュレーション自体を省略することも検討すべきである。

今後、愛知県や東京都等の指定地域において、現地試料による圧密試験やシミュレーション等の調査・研究が望まれる。

なお、対象地において局地的な地下水汚染がある場合の帯水層蓄熱システムによる地下水汚染拡散リスクについては、地下水採取規制の領域外であり、詳細な検討は行わなかった。帯水層蓄熱システムは、地下水を同一敷地、同一帯水層内において揚水と還水、即ち循環するに過ぎないことや、蓄熱可能な適地では地下水流速が緩慢であることから、地下水汚染の著しい拡散のおそれはないと考えられるが、隣地等との敷地境界付近における地下水流動シミュレーションの要否についても検討の余地がある。

付録 1 熱源井近傍の地盤高

これまでの実証試験では、熱源井から 16 m～20 m の位置に観測井を設置し、地下水位や地盤高を測定、評価するとともに、予測値の精度等を確認したが、この内側では地下水が更に低下するため、観測井の適正位置について補足的に検討を行った。

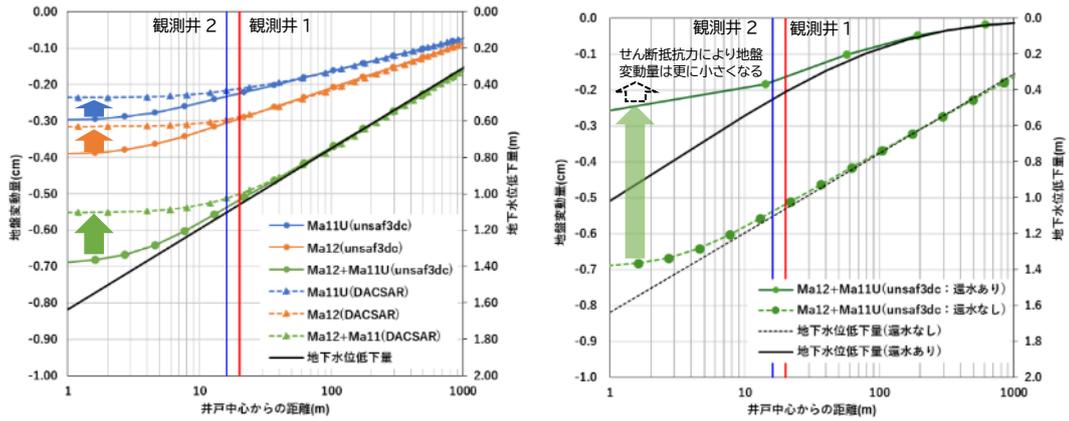
熱源井近傍で地下水位が大きく低下する時、地盤にはせん断抵抗力が働き変形が抑制されるが、UNSAF-3D-C は側方変位を考慮しないため、予測値が過大となる。

このため、うめきた 2 期区域における熱源井付近のせん断抵抗力を DACSAR を用いて解析した。観測井位置の内側における局所的な地盤変動量は、UNSAF-3D-C による予測では熱源井に向かうにつれて地盤変動量が大きくなるのに対し、DACSAR の変動量は観測井付近から小さくなり、熱源井近傍の地盤高は観測井位置からほとんど低下しない（付図 1 (a)）。

同様に舞洲地区で予測したところ、せん断抵抗力はより大きく広範囲に現れ、熱源井近傍の地盤高は、観測井位置における UNSAF-3D-C の地盤高よりも寧ろ高い（付図 2 (a)）。

ここで DACSAR は、2 次元弾塑性解析の軸対称モデルであり、揚水との同時還水を考慮できない。帯水層蓄熱システムでは全量還水を行うため、UNSAF-3D-C による地盤変動量は、揚水のみの場合（付図 1 (a)、付図 2 (a)）に比して 2 mm～4 mm 程度抑制される（付図 1 (b)、付図 2 (b)）。さらにこれにせん断抵抗力を考慮すると、DACSAR の様な 3 次元モデル解析で定量的には示せないものの、地盤変動量は更に小さくなる。

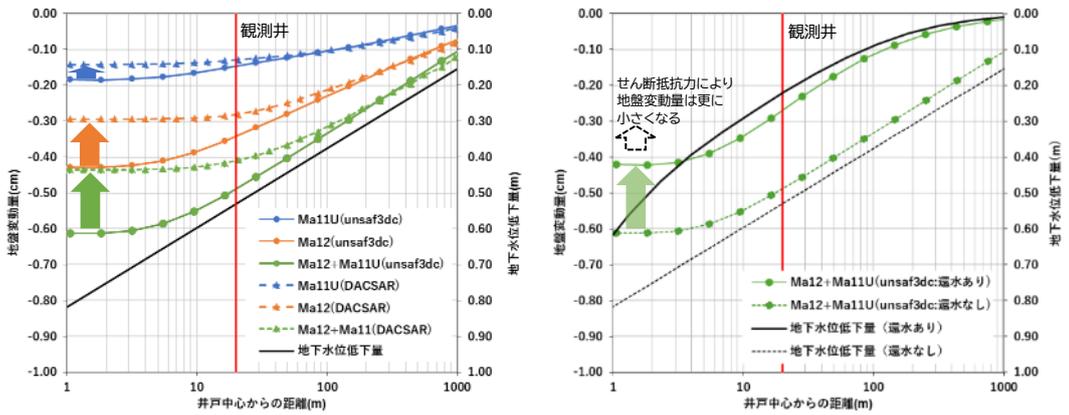
よって、熱源井近傍の地盤変動量は、還水効果に加えてせん断抵抗力により抑制されており、大阪市域においては、これまでの実証試験での予測、観測位置で、地下水位と地盤変動量を適切に捉えることができている。



(a) 揚水のみ(せん断抵抗のみを考慮) (b) 全量還水(還水効果のみを考慮)

【計算条件】対象帯水層：Dg2、揚水・還水流量： $Q_w=100 \text{ m}^3/\text{h}$ 、熱源井間距離：120m、
透水性係数 $k: 1.16 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 $D: 18 \text{ m}$

付図1 せん断抵抗力による地盤変動の抑制効果 (うめきた2期区域)



(a) 揚水のみ(せん断抵抗のみを考慮) (b) 全量還水(還水効果のみを考慮)

【計算条件】対象帯水層：Dg2、揚水・還水流量： $Q_w=90 \text{ m}^3/\text{h}$ 、熱源井間距離：120m、
透水性係数 $k: 3.3 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 、帯水層厚 $D: 10.5 \text{ m}$

付図2 せん断抵抗力と全量還水による地盤変動抑制効果 (舞洲地区)

DACSAR²： 東京工業大学 太田秀樹教授、神戸大学 飯塚敦教授によって開発された、有限要素法による土/水連成の弾粘塑性圧密変形解析プログラム。構成式に関口太田モデルや CamClay モデルなどが使用可能で、せん断変形による沈下も考慮される。

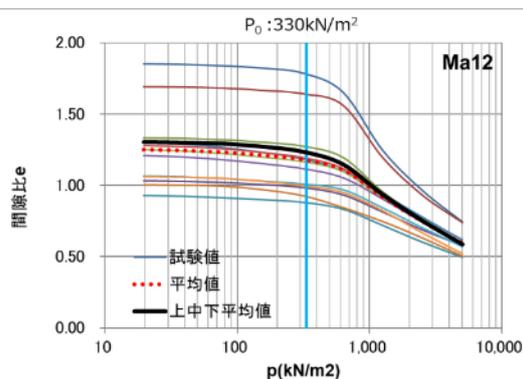
² Izuka and Ohta, A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.

付録2 粘土層の圧密降伏応力

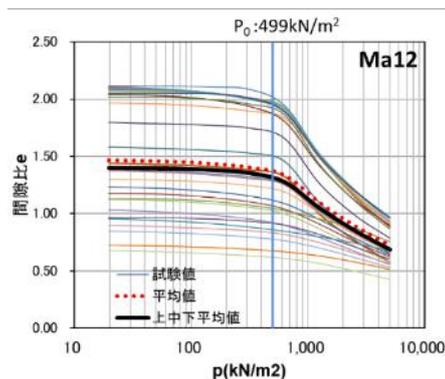
本書3(2)では、洪積粘土層内の過圧密量には、ばらつきがあることを述べた。付図3は、うめきた2期区域、舞洲地区の粘土層ごとの深度別 e - $\log p$ 曲線を重ねたものである。

Δp は、圧密降伏応力に比べて小さく、 p_c の3深度(上部-中部-下部) 平均値を用いた沈下量の解析結果は、0.5 m~1 m ごとの沈下量の全層積算とほぼ同じである。また、第一次とりまとめに示したとおり、大阪市域は、ほぼ全域において p_c の分布状況が既知である。

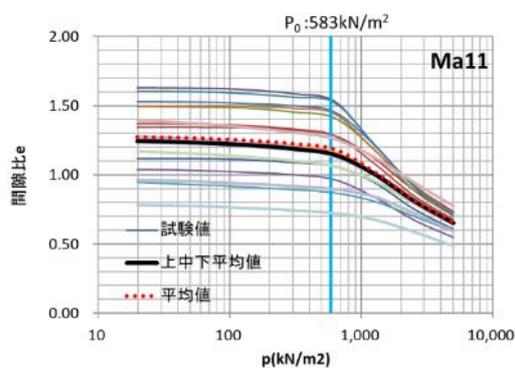
以上のことから、大阪市域においては、粘土層の状況等に応じて3深度(上部-中部-下部) 以上の試料を採取し圧密試験を行い、 p_c の分布状況から圧密の進行の程度を考慮しながら、各層 p_c と帯水層の Δp を比較するなどにより、措置要件 (Δp が p_c に比して十分に小さいこと) を満たすことを確認できる。



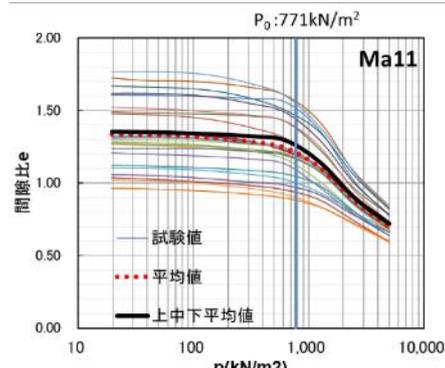
(a) うめきた2期区域 Ma12



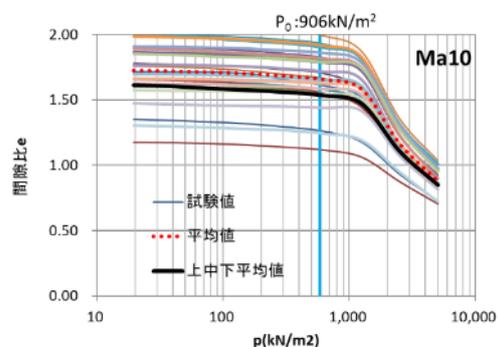
(d) 舞洲地区 Ma12



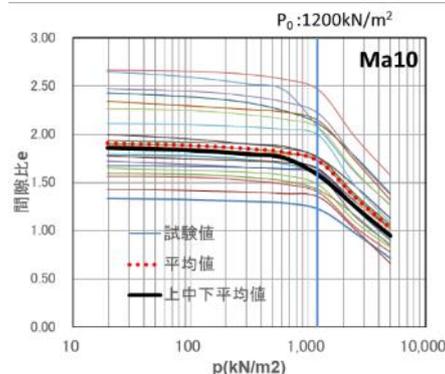
(b) うめきた2期区域 Ma11



(e) 舞洲地区 Ma11



(c) うめきた2期区域 Ma10

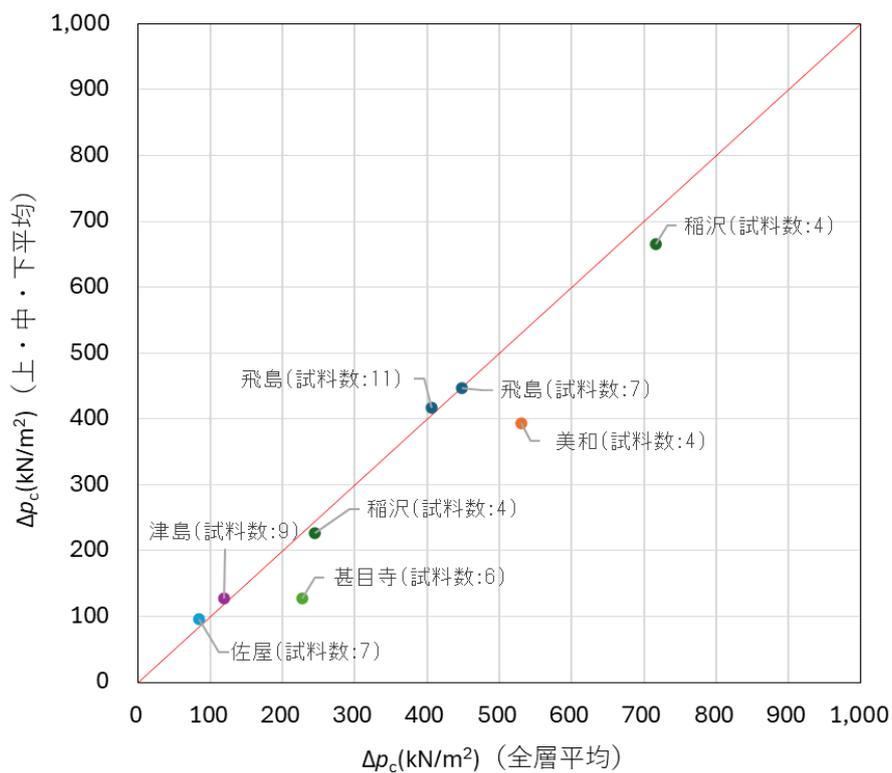


(f) 舞洲地区 Ma10

付図3 各粘土層の層内 e - $\log p$ 曲線の深度分布

(左: うめきた2期区域(深度分布1 m) 右: 舞洲地区(深度分布0.5 m))

粘土層内の過圧密量のばらつきを考慮した Δp_c の層内代表値について、愛知県での粘土層内に複数の圧密試験結果がある地点の Δp_c の3深度（上部-中部-下部）平均値と層内全ての Δp_c を比較したものを付図4に示す。図に示すとおり、両者は概ね同レベルの値となっている。また、試料数の多い地点では両者の相関がより高くなっていることから、大阪市域以外においても3深度（上部-中部-下部）以上の試料を採取し圧密試験で得られた Δp_c の平均値を用いることにより、粘土層内の p_c の状況を把握することが可能となり、措置要件（ Δp が Δp_c に比して十分に小さいこと）を満たすことを確認できる。



付図4 各粘土層の層内 Δp_c の分布（愛知県）

第二次とりまとめを終えて

大阪市では、昭和 31 年に工業用水法が施行された後もビルの冷房用に過剰な汲み上げが続き、地盤沈下が進行したことから、全国に先駆けて昭和 34 年に「大阪市地盤沈下防止条例」を制定するなど、早くから地下水採取規制に取り組んできた。

また、国においては「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」などの整備により、建築物用地下水の採取が規制され、その許可要件はストレーナーを利用可能な地下水のない深い位置とするなど、事実上の全面禁止となった³。これは、当時の地盤沈下が甚大な水害等をもたらせていたことなどから、早急に強力な対策が望まれたためであり、大阪市も厳しい許可基準を求めて国に陳情した経緯がある。

これらの規制により地盤沈下は沈静化、その後 50 年以上が経過する中、地球温暖化対策として海水や河川水の熱利用が広がりを見せる一方、地下水は上記の規制により、長らく水資源として利用されることはなく、地下水位は、大阪市域の一部の観測井において水頭がほぼ地表面に達する程にまで上昇を続け、現在では地下構造物の浮き上がり等の新たな弊害を生じるまでに至った。

こうした中、国内では地盤工学研究の進展により、地盤沈下のメカニズムの解明や数値解析シミュレーション技術の確立とともに、地下水位を粘土層の過圧密領域内に制御することで不可逆的な塑性的圧縮（地盤沈下）を生じることなく地下水を利用できることが解明され、地下水の積極的利用が議論されるようになった。また、井戸技術では、環境省技術開発・実証事業の採択を受け、大阪市を含む産学官連携により、大容量の人工涵養機能を備えた熱源専用井戸の開発に成功したことで、地下水を再びビル空調用熱源に活用するとともに、汲み上げた地下水を全量還水することにより、地下水位を制御することが可能となった。

このような法規制以降近年までに蓄積された研究成果を基に、学識経験者で構成する「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議」の議論を経て取りまとめた報告書（第一次とりまとめ）は、大阪市の国家戦略特別区域法に基づく規制緩和提案の礎となり、その結果、建築物用地下水の採取の規制に関する法律の技術的基準の緩和が実現した。また、大容量熱源専用井戸の開発成果は、大阪市が公表した「帯水層蓄熱システム熱源井構築ガイドライン」に惜しみなく反映され、大阪市域はもとより神戸市、愛知県安城市において事例形成が進んでいる。このように研究、開発成果は、いずれも地下水資源の利活用の再開に少なからず功績をもたらせた。

今後、大阪市は本報告書（第二次とりまとめ）を基に、帯水層蓄熱技術の更なる普及を目的として、汲み上げた地下水の全量還水を前提として地下水採取規制の更なる緩和を提案する予定である。これが実現すれば、現在の規制緩和の措置要件のうち、実証にかかる期間とコストが大幅に軽減され、設計や建設計画への組み入れが容易になり、帯水層蓄熱システムの普及促進が期待できる。

³ 環境庁水質保全局企画課（1990）：地盤沈下とその対策

指定地域の多くは、地下水資源に恵まれる沖積平野に位置し、地上の盛んな経済活動によりエネルギーを大量に消費している大都市であることから、この規制緩和は大阪市のみならず他の指定地域の地球温暖化対策を進めるうえでも意義をもつものとする。

また、地下水採取規制により現在も上昇を続ける地下水位は、前述のとおり新たな弊害を生じるばかりか、防災面においても液状化リスクを高めているとして、適正範囲まで積極的に水位を下げる研究も進められている。今後こうした防災に資する地下水採取の議論が進めば、地域の地下水位や涵養量等に応じて、汲み上げた地下水は必ずしも全量還水を要しないことも考えられ、域内の地下水収支を管理することで地下水位の適正化を図り、地盤環境の保全と防災力の向上の両立が可能な水循環に向けて検討が進むとも考えられる。

地下水資源の利活用にあっては、かつての地下水の過剰な汲み上げに対する深い反省の上に立ちつつ、国においては、技術開発と規制緩和による好循環が生まれ、大阪市をはじめとする地域では、それらの成果を受けて地域の実情に応じた地下水の保全と利用の両立に取り組むとともに、将来、環境、経済、防災その他の社会的側面においても持続可能で健全な水循環が実現することを期待する。

最後に、本報告書のとりまとめに際し、ご専門の立場から真摯にご議論いただいた「大阪府域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議」の委員諸氏に対し、深謝申し上げます。

大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議

(五十音順、敬称略)

氏名	所属	在任期間
おおしま あきひこ 大島 昭彦 (座長代行)	大阪公立大学都市科学・防災研究センター 特任教授	平成28年度～現在
きただ なおこ 北田 奈緒子	一般財団法人 GRI 財団 業務執行理事	平成28年度～現在
すぎた ふみ 杉田 文	千葉商科大学商経学部 経営学科 教授	平成28年度～現在
だいとう けんじ 大東 憲二	大東地盤環境研究所 所長	令和5年度～現在
たなか ただし 田中 正	筑波大学 名誉教授	平成28年度～令和3年度
にしがき まこと 西垣 誠 (座長)	岡山大学 名誉教授	平成28年度～現在

(令和7年3月31日現在)