

各調査研究の実施状況等

	調査研究	実施状況等（R 3 年 6 月時点）
専門性の高い調査研究	1 地下水流動系の解明 《筑波大学との共同研究》 ➤ 東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明	○ 被圧地下水の広域流動の概況把握 - 地下水の涵養域、流動経路、滞留時間を把握するため、土セン観測井31地点61井（低地14地点24井、台地17地点37井）、揚水井29井から地下水を採水し、溶存イオン、酸素安定同位体、六フッ化硫黄（SF₆）の分析を実施した - 涵養源の情報を得るため、都内31地点で降水、河川水、湧水を採水し、酸素安定同位体の分析を実施した - R 3 年度も、R 元～2 年度調査を踏まえ、最大9地点21井の調査を予定
	2 地下水の揚水等の影響予測 《東京大学との共同研究》 ➤ 地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測	○ 一次元地盤沈下モデルの構築 - 台地と低地で広域的に地下水が利用されている舎人層を対象に5カ所（亀戸、神明南、東久留米、清瀬、三鷹）の建設局土セン観測井において一次元地盤沈下モデルを作成し、地盤変動量の再現を確認した - R 2 年度は舎人層5カ所（新足立、戸田橋、上赤塚、調布、府中）で実施 ○ 局所地下水流動・地盤変形連成モデルの構築 - 三次元地下水流動モデルに利用（入力）可能な地盤物性値を、一次元地盤沈下モデルの作成過程から得た - 土セン地盤情報システムの深層ボーリングデータを入手しモデルに反映
基礎データの収集及び解析 （地下水現況調査）	3 地下水質分析 《外部委託》 ➤ 東京の被圧地下水の水質について、地域や帯水層ごとの特性の把握	○ 下記「1 地下水流動系の解明」の採水に合わせて、土セン観測井R 1 年度に15地点22本、R 2 年度に15地点25本 から採水し分析を実施した
	4 不圧地下水の実態調査 《外部委託》 ➤ 水循環の観点から、不圧地下水も含めた地下水全体の実態調査を進め、知見を蓄積	○ 平成28年度から令和元年度に掛けて、湧水の状況や不圧地下水の涵養に関する知見を得るため各種調査を実施した。

1 専門性の高い調査研究について

(2) 「地下水流動系の解明」の概要

■取組の概要

地下水がどこで涵養され（起源：涵養域）、どのくらいの時間をかけ（滞留時間）、どこを流れているか（流動経路）を把握することにより、東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明を目指す。

■実施体制

筑波大学（辻村研究室）と東京都環境科学研究所による共同研究
（3年間：令和元年度～3年度 ※更新予定）

■当研究の特徴

複雑な地形、地質構造に加え、一部の地域では大規模な揚水が行われていることから、東京の地下水流動系は非常に複雑であると言われている。これまで、観測井における水理水頭の観測結果から地下水の流向に関する大まかな検討はなされているものの、涵養源の推定や滞留時間の評価等に関する調査は十分に行われていない。

本研究では、建設局土センの観測井（都内42箇所）等の地下水、地表水（河川水、湖水等）、および湧水における同位体、溶存ガス等のトレーサー成分を分析し、観測井による水理水頭分布のデータと統合し解析することにより、東京における地下水の涵養－流動－流出のプロセスを解明する。

■展開方法

第1段階 被圧地下水の広域流動の概況把握

- 建設局の地下水位観測井（都内42箇所）から採水、各種トレーサー分析を行い、水理水頭の空間分布と統合・解析し、地下水の流動方向、滞留時間等の概況を把握する。
（毎年度10箇所を目途に実施する予定。）

第2段階 地下水と地表水との交流に関する概況把握

- 地下水、河川水、湧水におけるトレーサー成分の空間分布を検討し、さらに河川における特定区間の流量変化を解析することにより、河川から地下水への涵養域、地下水から湧水、河川への流出域を把握する。

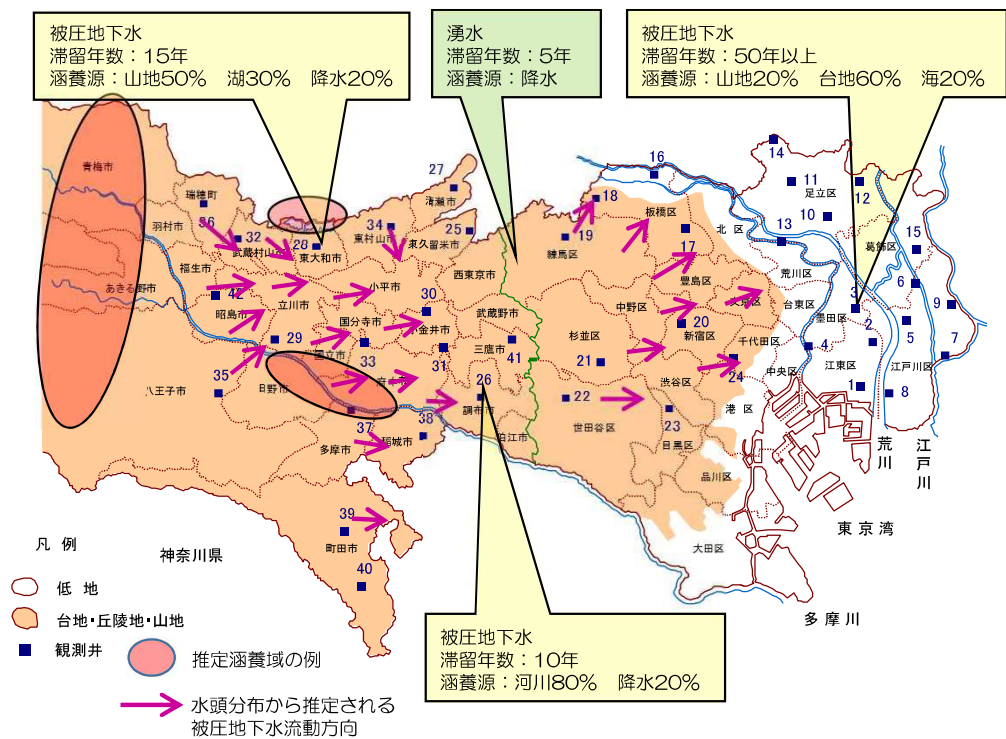
◆地下水の涵養年代が推定できるトレーサー

- ①トリチウム：1950年代水爆実験の前後を判別
- ②フロロン：1940～90年代 ③SF₆：1970年代以降

◆涵養域や流動経路が推定できるトレーサー

- ④溶存イオン：複数地点における水の溶存イオン組成を比較し、流動過程における水－岩石間のイオン交換や滞留時間、流動経路に関する情報を得る。
- ⑤酸素・水素安定同位体比：質量数の異なる酸素18、水素2安定同位体比の値により、涵養域に関する情報や、流動過程における水の混合、相変化等に関する情報を得る。

《地下水流動系解明のイメージ》



■地下水のトレーサーとは

水の流向、流速などを追跡する目的で使用される人工的、半人工的、自然的に水循環系に付加・投入された物質

区分	特徴	例
人工的	追跡する目的で意図的に系に投入された物質	食塩、ヨウ素131（放射性同位体）、色素
半人工的	意図的ではないが人工的に環境に放出された物質	水爆実験由来のトリチウム、フロン類（CFCs）、六フッ化硫黄（SF ₆ ）
自然的	自然的に存在する物質	無機溶存イオン、酸素・水素安定同位体※、希ガス ※安定同位体：放射性壊変しない同位体

■涵養域・流動経路・滞留時間の指標となるトレーサー

1. 無機溶存イオン（Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻）

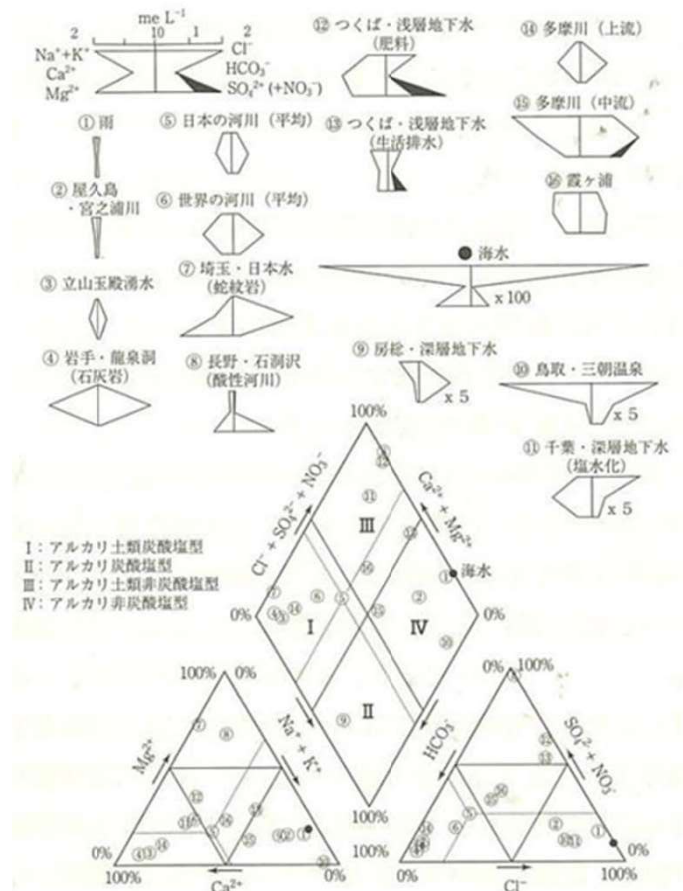
- ・無機溶存イオンは、降水が浸透し土壌水や地下水として地中を流動する過程で、地層や岩石と反応することにより、地下水中に付加される。
- ・地下水中の濃度や組成比を、周囲の地下水や河川水、海水、降水等と比較することにより、地下水の起源水やその寄与率を推定する。
- ・主要イオンの濃度や組成比は、ヘキサダイアグラムやトリリニアダイアグラムといった図で表される。

<ヘキサダイアグラム> 主要イオンの濃度を図形化したもの。

- ・標準的な地下水は相対的にカルシウムイオン（Ca²⁺）や重炭酸イオン（HCO₃⁻）の濃度が高く、珠算玉のような形状を示すが、ナトリウムイオン（Na⁺）濃度が高い場合は、滞留時間が長いことや海水の影響等が考えられる。
- ・異なる地下水におけるダイアグラムの大きさが異なっても、形状が同じであれば、双方とも涵養源が同じ、あるいは同様の流動系に属すと考えられる。

<トリリニアダイアグラム> 陽イオンならびに陰イオンの組成比を図形上にプロットしたもの。

- ・標準的な地下水は、陽イオンに占めるカルシウムイオン（Ca²⁺）+ マグネシウムイオン（Mg²⁺）の組成比と、陰イオンに占める重炭酸イオン（HCO₃⁻）の組成比が高い第1象限（I）にプロットされることが多い。
- ・重炭酸イオン（HCO₃⁻）の組成比が低い第4象限（IV）や第3象限（III）にプロットされた場合は、海水の影響を受けている可能性が考えられる。



ヘキサダイアグラム（上）とトリリニアダイアグラム（下）
「水文科学」（2009年）より

2. 酸素・水素安定同位体 (^{18}O 、 ^2H (D))

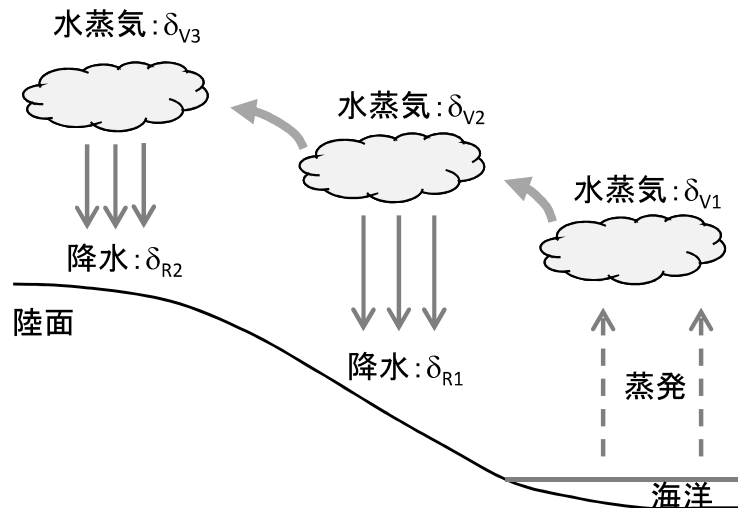
・水分子を構成する酸素原子や水素原子には重さの異なる安定同位体が存在し、自然界に主として存在する ^{16}O や ^1H に対する ^{18}O や ^2H (D) の存在比率（安定同位体比）として表す。また通常、安定同位体比は、標準水と試料水の同位体比の差として示される ($\delta^{18}\text{O}$ 、 δD)。

・大気中においては一般に、重い安定同位体からなる水蒸気から先に降水として凝結する。

いま、海洋から蒸発した水蒸気が、徐々に降水を降らせながら、内陸に、あるいは高標高の地点に移動していくとすると、降水のもたらされた地点と、降水の同位体比との間には一般的に次のような関係が生ずる。すなわち、より内陸に降る降水ほど、また高標高に降る降水ほど、安定同位体比は低くなる。

【海洋から内陸に至る、水蒸気と降水の同位体比の変動を示す模式図】

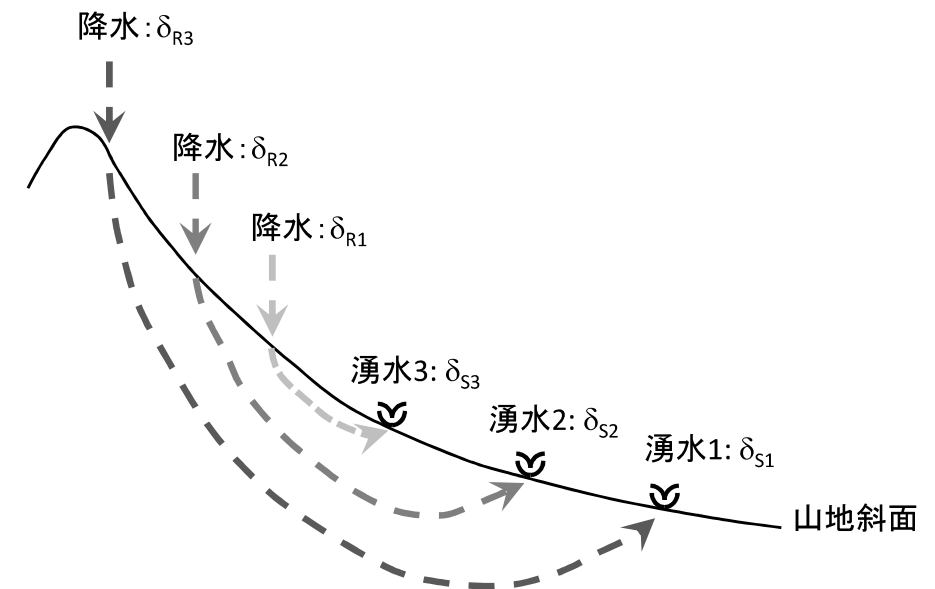
水蒸気の同位体比： $\delta_{V1} > \delta_{V2} > \delta_{V3}$ 降水の同位体比： $\delta_{R1} > \delta_{R2}$



降水の安定同位体比	大きい ⇔ 小さい
降水地域の標高	標高が低い ⇔ 標高が高い
降水地域の海からの距離	沿岸部 ⇔ 内陸部
降水地域の気温	気温が高い ⇔ 気温が低い

【山地斜面の異なる標高に湧出した湧水の同位対比と、それから解釈される、地下水の涵養標高、流動経路を示す概念図】

湧水の同位体比： $\delta_{S1} < \delta_{S2} < \delta_{S3}$ 降水の同位体比： $\delta_{R1} > \delta_{R2} > \delta_{R3}$



・水分子の安定同位体比は地中では変化しないため、地下水の同位体比は涵養された時の水の状態を反映している。そのため、地下水の同位体比を各地の降水や河川水、周囲の地下水の同位体比と比較することにより、涵養域や流動経路が推定できる。

■年代推定に利用されるトレーサー

1. トリチウム (^3H またはT)

- 自然界にも存在する半減期約12.3年の、水素の放射性同位体。
- 1952～62年に北半球で盛んに行われた水爆実験により、大量の人工トリチウムが大気圏内に放出され、降水中のトリチウム濃度が著しく上昇した。1963年のピーク時には東京の降水が天然レベルの200倍の濃度に上昇したが、2000年代以降は天然レベルに戻っている。
- 地下水中のトリチウム濃度を測定することにより、水爆実験の影響が著しかった1963年の前後、いずれに涵養されたのかを明確にすることが可能である。
トリチウムが検出される→核実験影響ピーク（1963年）以降に涵養された地下水
トリチウムが検出されない→核実験影響以前に涵養された地下水
- 近年は、放射壊変を利用し、数年～20年程度の滞留時間を推定する適用事例もある。

2. フロン類 (CFCs) 精度の良い推定涵養年代：1940年代～1990年代前半

- 1930年代に工業用途で人工的に生成、使用開始された。化学的に極めて安定なため大気中に蓄積され、1940年代～90年代に大気中の濃度が単調増加した。
- とくに1970年代から1980年代の大気中におけるCFCs濃度変化が大きいことから、比較的若い年代からなる地下水の指標として使用されている。
- 地下水のフロン濃度を測定し、大気中濃度に換算する。換算値を過去の大気中フロン濃度と対比することで、涵養年代が推定される。
- 1987年モントリオール議定書発効によりフロン類の生産・使用が制限されたことで、大気中濃度は近年低下に転じ、1990年代後半以降の若い地下水の滞留時間推定への有効性は低下してきている。

3. 六フッ化硫黄 (SF_6) 精度の良い推定涵養年代：1970年頃以降

- 1953年以降、工業用に世界各地で人工的に生産されるようになった代替フロン。
- 腐食性・爆発性がなく、変圧器の絶縁ガスなどに使用されている。
- フロンと同様の方法で涵養年代が推定される。1970年頃以降に涵養した若い地下水に対し、年単位での推定が可能。
- 1970年代から大気中濃度が上昇し続けているため、年代推定精度は低下していない。 CO_2 の23,900倍の温室効果ガスであるため、1997年京都議定書により排出規制が設けられたが、工業で必要不可欠であるため今後も大気中濃度は上昇すると予測されている。
- 世界各地で大気中 SF_6 濃度がモニタリング・公開されており、都市やその近傍、工業集積地の大気では北半球平均値をはるかに上回る濃度となる場合もあることから、年代推定に当たっては地域差を考慮する必要がある。

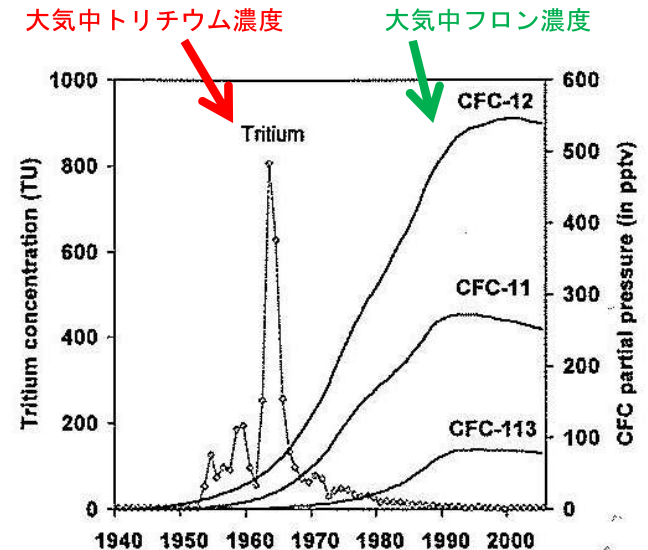


Fig. 5 Historical concentrations of CFCs in the North American atmosphere.

同位体・希ガストレーサーによる地下水研究の現状と新展開
(風早ほか 日本水文科学会誌2007年) より

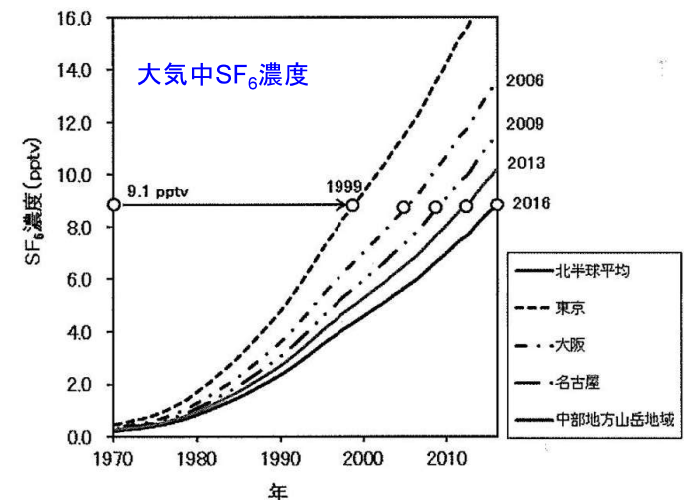


図7 北半球の清浄大気中の SF_6 濃度曲線と日本国内の補正濃度曲線

Fig. 7 Temporal variation of SF_6 concentration in northern hemisphere clean air and local variations adjusted for each region in Japan.

六フッ化硫黄 (SF_6) を用いた地下水の滞留時間推定における課題と展望 (榎原ほか 地下水学会誌2017年) より

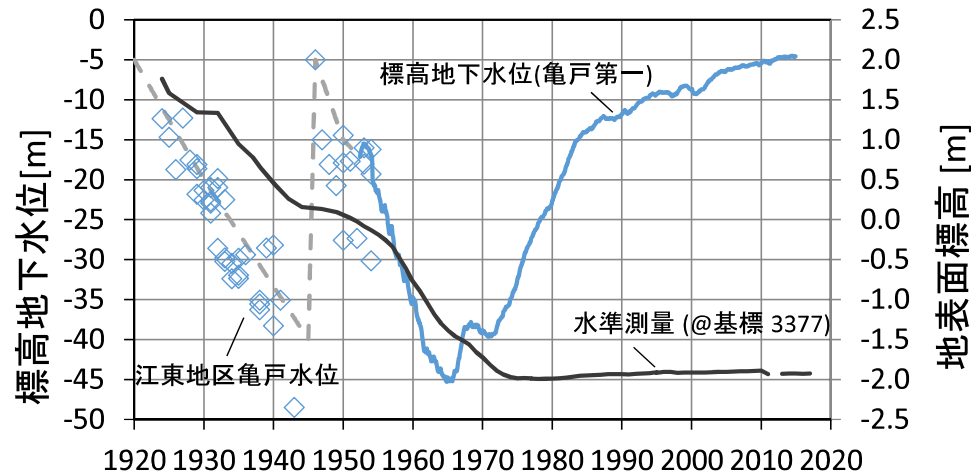
調査結果のまとめ

- 立川、府中、町田、多摩等、台地部における深度100 m以浅の地下水は、カルシウムと重炭酸イオンが卓越する傾向がある。これは、我が国の浅層地下水における平均的な水質組成に相当する。一方、江戸川、江東等の低地部におけるそれは、ナトリウムと塩素イオンが卓越する特徴を示し、台地部とは顕著に異なる。
- 台地部における滞留時間は、概ね数年から40年程度を示す一方、低地部におけるそれは30年から80年以上と顕著に長い傾向がある。
- 立川、府中、町田、多摩等の台地部の地下水における酸素安定同位体比は、江戸川、江東等の低地部におけるそれに比較し、高い傾向がみられる。
- とくに、低地部・南地域の地下水における酸素安定同位体比は、多摩川上流の河川水、上流域の降水における雨量加重平均値よりも低い傾向を示す。このことは、低地部地下水の涵養域を考究する上で、重要であると思量される。
- 以上の結果は、台地部地域と低地部地域において、地下水涵養源が異なることを示唆してはいるが、今後、区部西側地域等を含め、さらにデータを蓄積する必要がある。

2. 地下水の揚水等の影響予測

地下水管理における地盤沈下問題のポイント

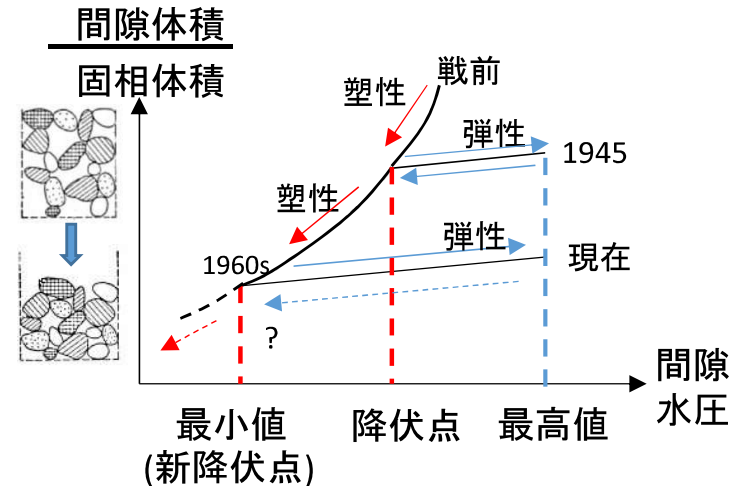
東京の地盤沈下の歴史



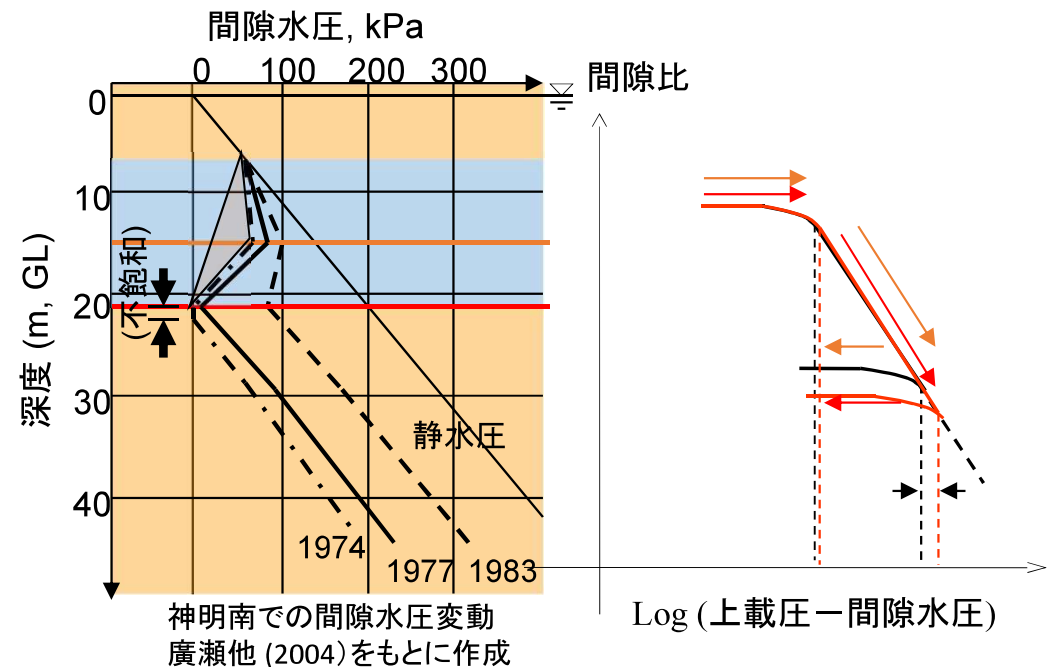
地盤沈下のリスク



粘土の変形特性



複雑な間隙水圧挙動と圧密の進行



神明南での間隙水圧変動
廣瀬他 (2004) をもとに作成

Log (上載圧-間隙水圧)

「地下水の揚水等の影響予測」の概要

■取組の概要 地下水の揚水が地下水位や地盤に与える影響(揚水-地下水-地盤の関係)を定量化し、地盤沈下が起きる地下水位や湧水に影響が生じる地下水位、またその地下水位に達する揚水量等を予測する。

■実施体制 東京大学(愛知研究室)と東京都環境科学研究所による共同研究(平成29年度開始)

■展開方法

第1段階

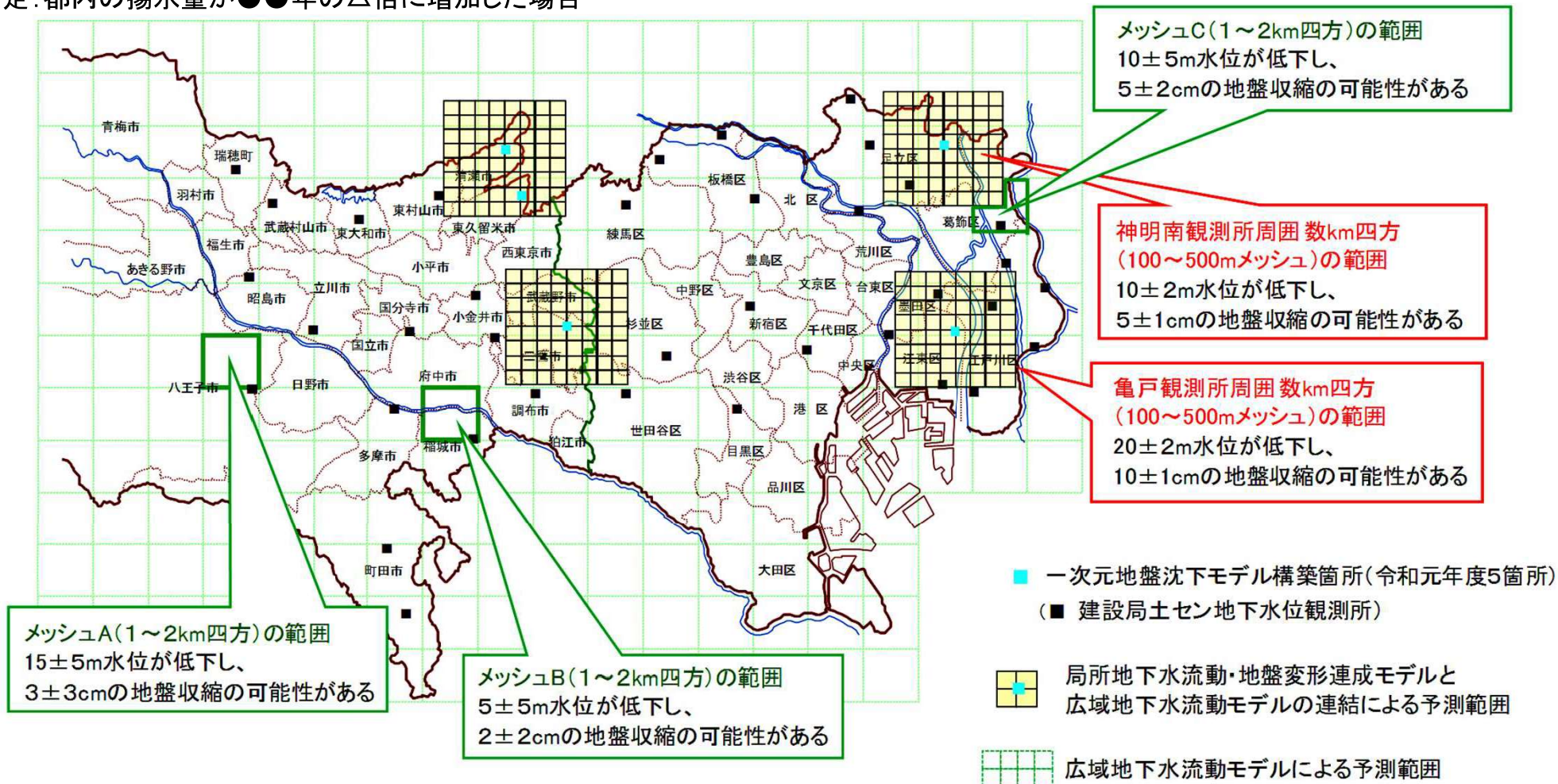
建設局土センの地下水観測井の周辺に、過去の地下水位と地盤収縮の履歴を高精度に再現する**局所地下水流動・地盤変形連成モデル**を作成する。

第2段階

局所地下水流動・地盤変形連成モデルを広域地下水流動モデルと連結し、帯水層がつながる地下水流動を考慮した高精度予測を行う。

■シミュレーション結果イメージ

想定: 都内の揚水量が●●年の△倍に増加した場合



地下水の揚水等の影響予測（令和2年度までの取組）

台地部の揚水における低地部への影響を考える場合、多摩地域から区部低地部へと横断し、広域で揚水が行われている舎人層のモデル化は重要である。東京大学との共同研究による地下水位—地盤変動予測モデル（以下、予測モデルと称する）を用いた解析を行い、令和元年度は舎人層にストレーナ深度を置く土セン地下水位観測井から5地点（亀戸第2、神明南第3、三鷹第1、東久留米第1及び第2の中間層、清瀬第1及び第2の中間層）、令和2年度は3地点（新足立、戸田橋第2及び第3の中間層、上赤塚第1及び第2の中間層）を選んで解析検討を行った（図1）。また令和2年度では舎人層に隣接する東久留米層にストレーナ深度を置く2地点（府中第2及び第3、調布第2及び第3）も検討した。解析では観測井から得られた観測データの再現性を検討し、地盤物性値の推定を試みた。

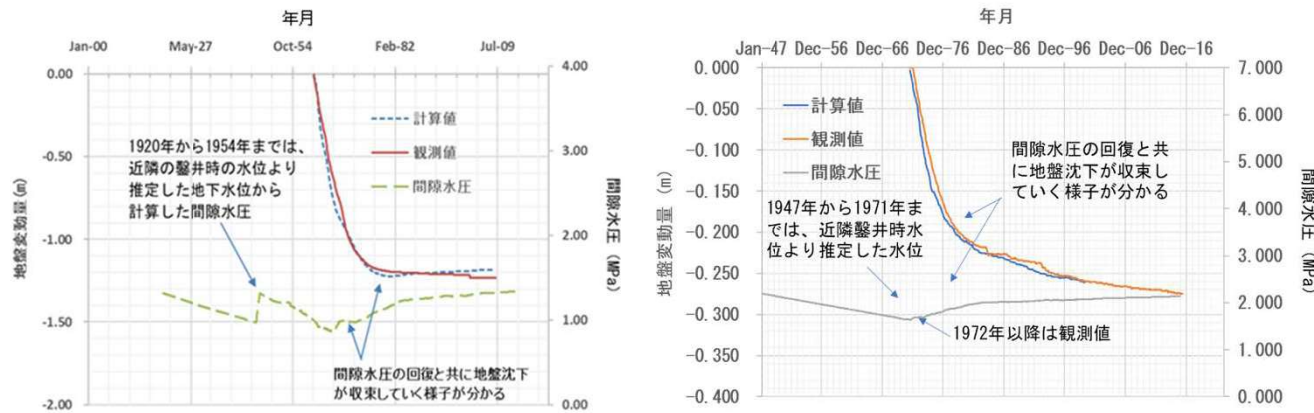


図2 解析結果：観測データ再現性（亀戸第2（左側）；新足立（右側））

地下水位が回復する時期に地盤変動量が収束に向かい始める様子を示しており、良好な再現性を確認した。他の4地点においても同様に良好な再現性を示していた。

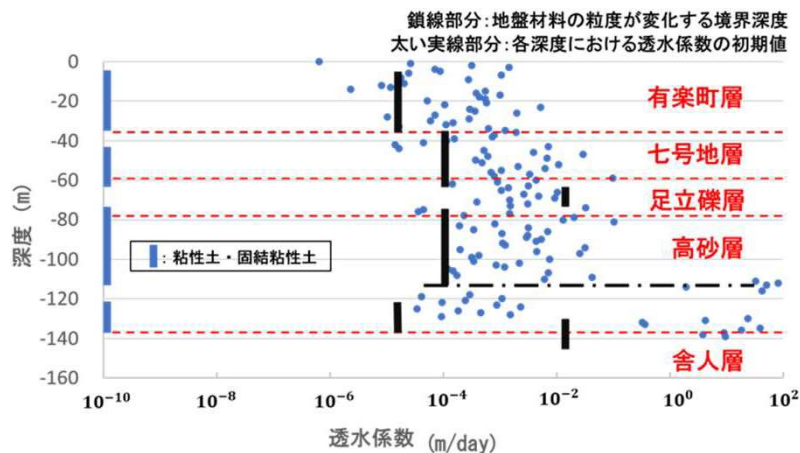


図3 推定した透水係数の分布（亀戸第2）

図3 解析結果：地盤推定値の物性深度全体として、入力値（太い黒線）よりも比較的大きな値側にばらついていました。有楽町層や七号地層などの各地質区分ごとに透水係数が対応しているかどうかは明確ではなかった。高砂層内で砂層となる深度-110m以深で透水係数の値が大きな側にばらつきを示し、極端に大きな推定値も出ていた。これらは岩相の変化に対応しているとも解釈できるが、極端に大きな推定値となった原因については不明であり、今後感度分析を行ってさらに詳細に検討していく必要がある。

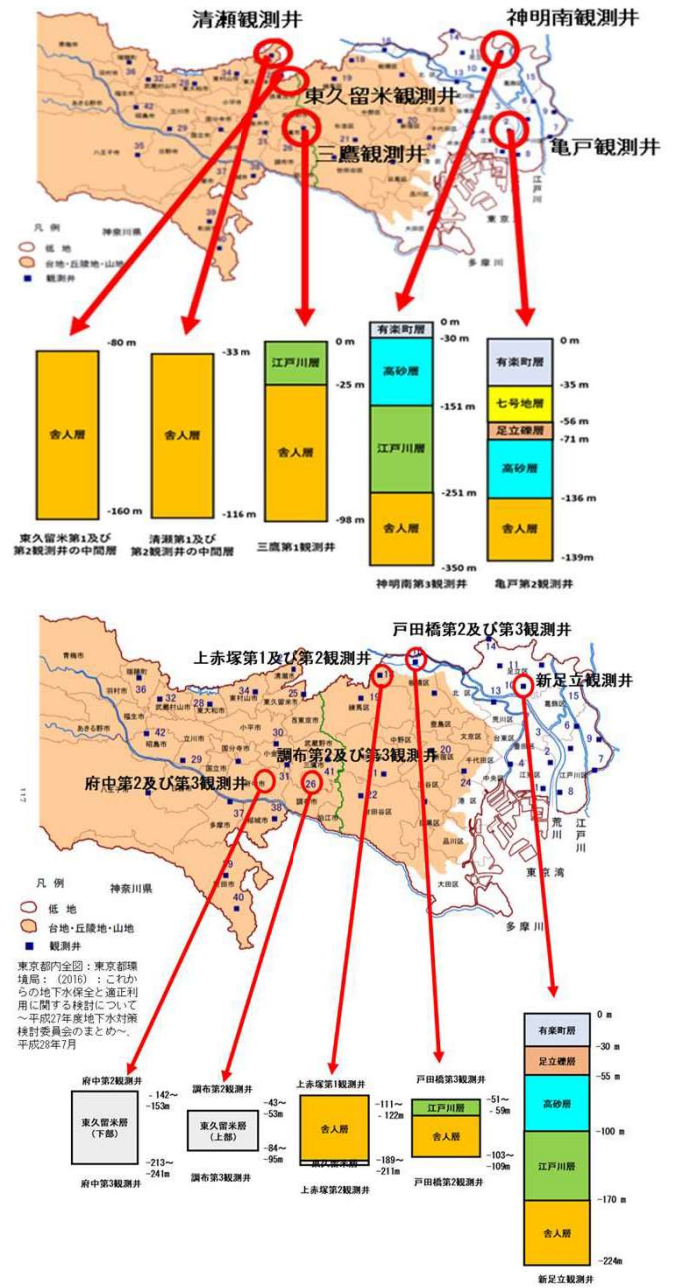


図1 解析検討地点（令和元年度（上側）令和2年度（下側））

1974年においても粘土層内部の間隙水圧は下がりきっておらず、その後、間隙水圧が上昇。

将来的に帯水層の地下水位が1974年同様の水準まで再度低下し、その状態で維持された場合、粘土層の塑性変形が再開する余地が残っている。

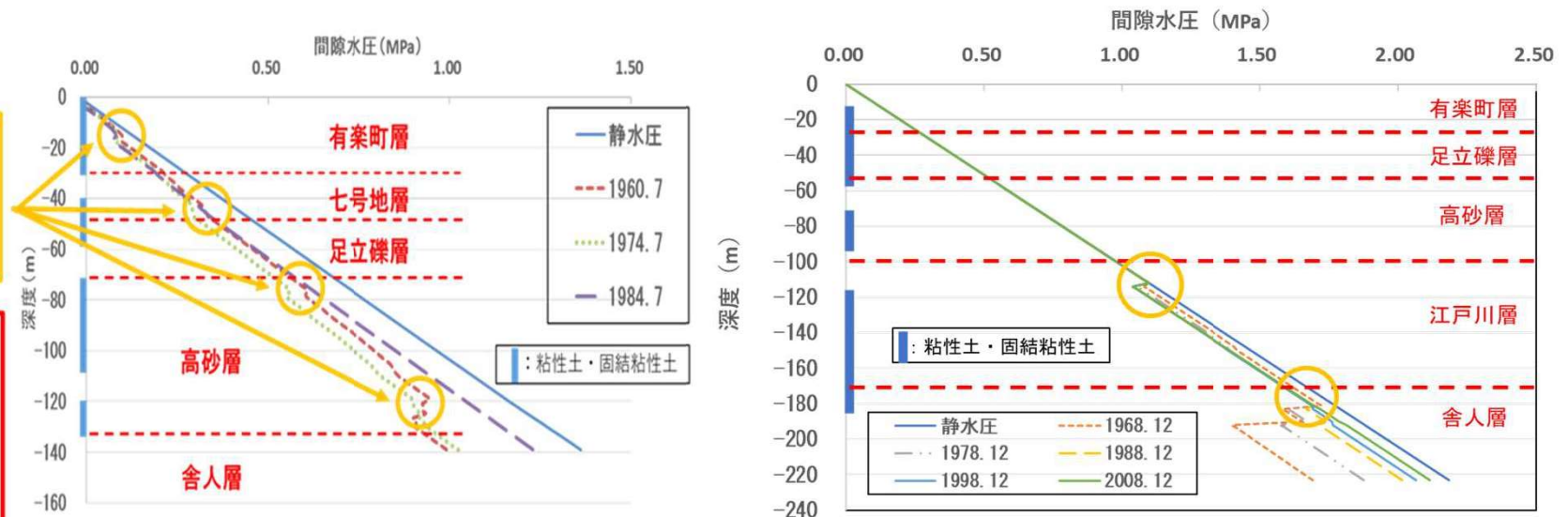


図4 地盤内の砂層や粘性土層に存在する間隙水圧の計算結果（亀戸第2（左側）；新足立（右側））

予測モデル解析では、図4のように地盤の中の砂層や粘土層に存在する間隙水圧を計算した。図中左側に示した区部低地の南側に位置する亀戸第2の結果では、地下水位低下量の最低値を記録した1974年の間隙水圧が最も小さいこと、丸印で囲んだように粘土層境界部の間隙水圧に段差があり、粘土層内部の間隙水圧が下がりきっていないことが分かった。このことは、将来的に地下水位が1974年同様の水準まで低下した場合、地盤沈下が再開する可能性があることを示唆する。また図中右側に示した区部低地の北側に位置する新足立の結果についても、丸印で囲んだように粘土層境界部の間隙水圧に段差があり粘土層内部の間隙水圧が下がりきっていないことが分かった。今後、東京都内全域の地下水位と地盤沈下量の観測データを用いて、計算の精度を高めていくための調査研究をさらに進めていく必要がある。

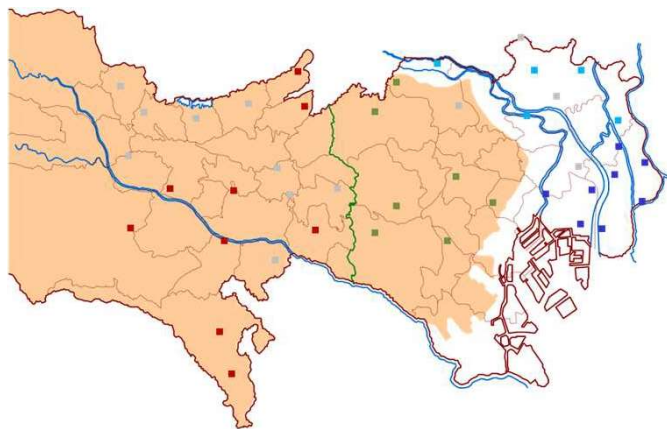
今後の予定

- 2021年度は、台地部における揚水による低地部への影響を検討するために、舎人層について、更に5地点における地下水位 - 地盤変動モデルを構築する等、さらに検討を進める。
- また、2021年度以降、広域地下水流動モデルを開発し、地盤変動予測モデルとの連結を試みていく予定である。

※令和元年度の亀戸第2の結果については、日本地下水学会2020年度秋季講演会で発表した。

・ 田部、愛知（2020）：地下水位 - 地盤変動予測モデルと地盤沈下観測井データを用いた東京層群の地盤物性値推定, 日本地下水学会2020年度秋季講演会予稿集, 66-69.

地下水の水質分析



分析内容

- 試料: 2019, 2020年に土セン観測井(29地点 47本)から採取した地下水
- 分析項目: 水道法水質基準37項目、空調用補給水基準(JRA規格)ほか8項目

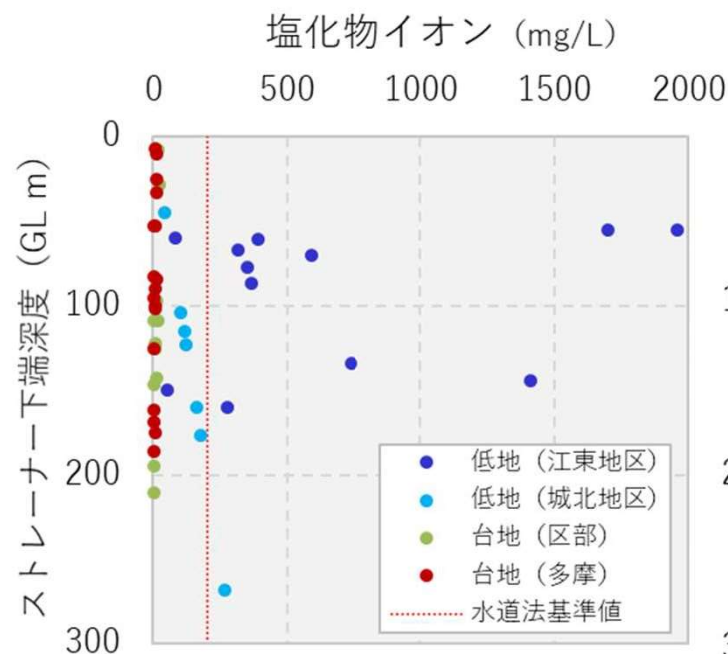
※観測井のため一定量排水後に採水しているが、滞留影響が無いとは言い切れない。

結果

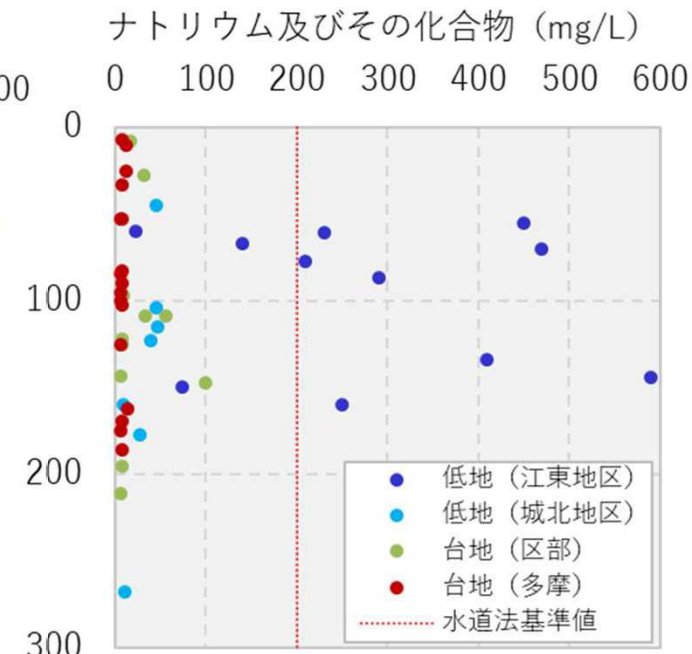
- 塩化物イオンやナトリウム濃度、色度について、低地、特に江東地区で水道法水質基準を上回る傾向にある。
- シリカについては台地でも空調用補給水基準を上回る地点が多く見られる



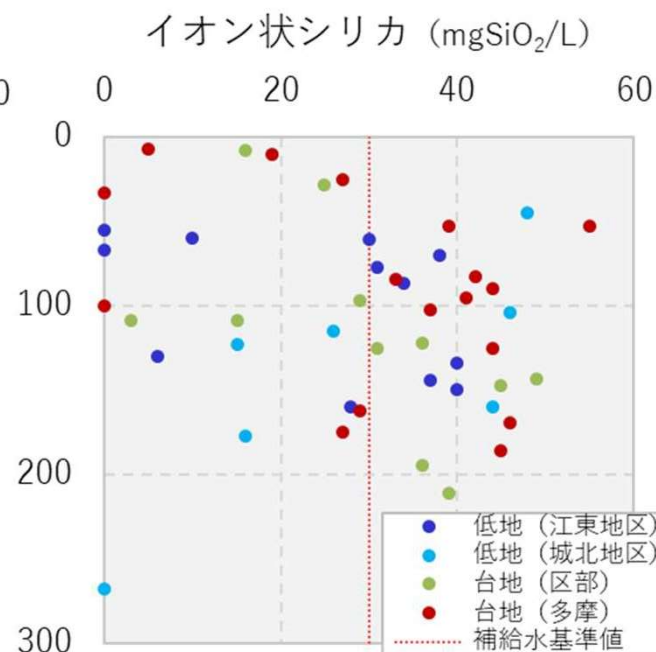
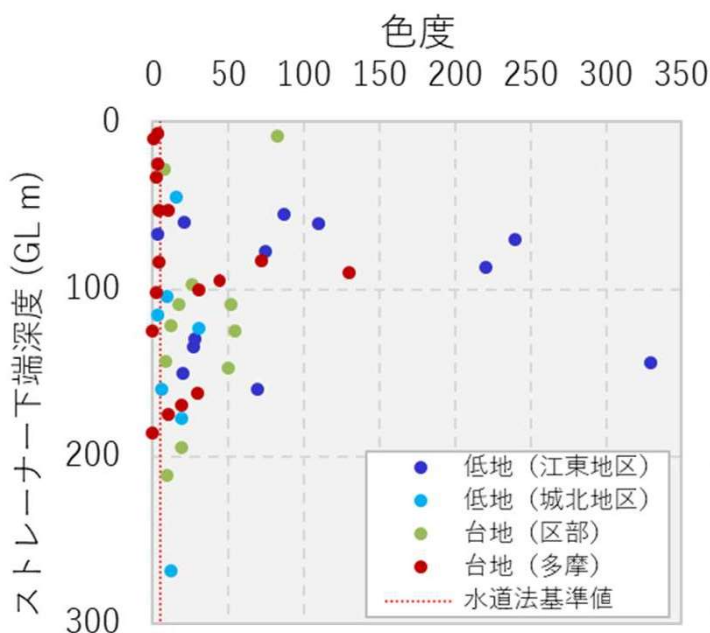
地下水の水質には地域性があり、利用に当たっては、地域や深度帯ごとの水質に関する知見を収集した上で計画する必要がある。



※最大値(GL-130m, 7630mg/L)を除く



※最大値(GL-130m, 3900mg/L)を除く



不圧地下水の実態把握

平成28年度 東京の名湧水57選実態把握調査

➤ 目的

地下水保全施策上実態把握の必要性が高い湧水のモニタリングとして、水量等の基礎データを取得する。

➤ 調査内容

平成15年に選定した東京の名湧水57選について、豊水期と渇水期の2回、湧水量等の調査を実施。

➤ 結果概要

平成15年度の前回調査と比較し、大きく悪化した水質項目は無かった。湧水量については、4地点で降水量が大きく減少していないにもかかわらず湧水量の減少が確認されたほか、崩落等により湧出が確認できない地点も確認された。

平成29年度 湧水涵養域調査

➤ 目的

都内の代表的な湧水地点とその周辺において、環境変化が涵養量及び湧水量に与える要因を調査し、都内の湧水の保全と回復を推進するための基礎資料とする。

➤ 調査内容

都内湧水を代表する7地点について、現地調査及び涵養域の検討、涵養域や湧水量に影響を与える要因の調査・整理を実施。

➤ 結果概要

湧水量と涵養量の関係を定量的に評価するには、目的の湧水について①同一地点での湧水量や水質の継続的な把握、②最新の科学的知見(不圧地下水位の観測記録等)に基づく的確な涵養域の設定、③雨水浸透施設の設置状況の把握が必要であるが、現状不十分である。

平成30年度 湧水分布状況調査(湧水マップ作成)

➤ 目的

湧水保全を目的とした普及啓発の取組として、都内の湧水の分布状況について5年ごとに取りまとめ、「湧水マップ」を作成し公表する。

➤ 調査内容

区市町村に湧水地点の状況調査を依頼、回答に基づき情報を更新。

➤ 結果概要

都内湧水地点数は608点、平成25年度と比較して58増66減となった。増加理由の多くは、従来より湧出していたと考えられる地点が調査の充実により発見された、またはマップ未掲載地点の掲載化によるもの。減少理由には、枯渇のほか、マップからの削除希望、複数地点の湧水群としての統合化などがある。

令和元年度 不圧地下水実態調査

➤ 目的

不圧地下水位や湧水の観測は、環境行政に限らず多様な主体により行われていることがあり、そうした観測記録や不圧地下水面図、地下水流動に関する知見を収集、整理する。

➤ 調査内容

区市町村等にヒアリングし、管轄地域内における湧水や不圧地下水位の観測記録や地下水流動関連文献等の情報を入手し整理。

➤ 結果概要

5団体を含む24自治体、都、河川管理者による観測記録を収集した。都内における湧水等の観測地点数は1980年代から増加し1990年代に最大となるが、2000年代に急減。近年の観測記録が面的に充実しているのは、小金井・国分寺・東久留米の各市、空堀川流域である。

➡ 今後、湧水や涵養域の保全に資するデータ(湧水量・不圧地下水位等)を継続的に取得し蓄積していく