

9. 地下水の実態把握に向けた調査研究

9-1 実態把握の位置づけ

地下水や湧水は、身近な水源として生活用水や農業用水に利用されてきました。一方で、過剰な揚水などによって、水循環や地盤に大きな影響を及ぼし、甚大な地盤沈下などの問題が起きました。

地下水利用について近年、法や制度を整備する新たな動きが進展しており、国は平成26年に「水循環基本法」を制定し、基本理念として水は国民共有の貴重な財産で公共性の高いものであること、また流域に係る水循環について、統合的かつ一体的に管理されなければならないとしています。さらに令和3年6月の法改正では、水循環に関する施策に「地下水の適正な保全及び利用に関する施策」が含まれることや、事業者及び国民の責務についても明らかになりました。それ以外にも基本的施策に地下水マネジメントの考え方を参考に、必要な措置を講ずべき旨の努力義務の規定を追加しています。その中には、地下水に関する調査等による情報収集や協議を行う組織の設置、地下水の採取制限なども含まれています。

また、令和2年6月に改定された「水循環基本計画」では、「国、地方公共団体等として、流域における降水量、河川の水位、流量及び水質並びに公共用水域及び地下水の水位、水質等に関する調査を実施し、必要に応じて調査・観測体制の充実や新技術の導入により、データの集計、解析実施に努めること」と示されています。

一方、世界的にも水資源は、持続可能な開発目標（SDGs）で水へのアクセスが取り上げられるなど、とても重要な資源の一つとして改めて注目を集めています。

東京においても、過去の地盤沈下や揚水規制などの経緯と、今日的要請を踏まえ、前回の報告書（平成28（2016）年公表）において、地下水の実態把握を進め、地下水の保全と適正利用の在り方を議論する下地作りが必要であるとしています。

一般的に、地下の構造は地域的な特徴がみられ、多様性に富んでいます。東京も低地と台地という地域の違いに加え、台地部だけでも複雑な地下構造がみられます。そのため、東京における地下水の実態把握を進めていくためには、帯水層の面的な広がりや地盤構造の状況などについて調べる必要があります。

そこで現在東京都では、学術機関と連携しながら、「地下水流動系の解明」や「地下水揚水等の影響予測」といった専門性の高い調査研究を行い、地下水の実態把握を進めています。

表 9-1 地下水の実態把握に向けた調査研究の概要

調査研究・取組の概要	共同研究機関
<p>■<u>地下水流動系の解明</u></p> <p>▶ 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て（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－流出のプロセス解明を目指す。</p>	<p>国立大学法人 筑波大学</p> <p>公益財団法人東京都環境公社 東京都環境科学研究所</p>
<p>■<u>地下水の揚水等の影響予測</u></p> <p>▶ 地下水の揚水が地下水位や地盤に与える影響（揚水-地下水位-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。</p>	<p>国立大学法人 東京大学</p> <p>公益財団法人東京都環境公社 東京都環境科学研究所</p>

9-2 地下水流動系の解明

地下水の流れは、直接見ることができませんので、様々な研究手法を用いて地下水の流れを評価する必要があります。地下水も、表流水と同様に地下水位（水理水頭）の高いところから低いところへと流れていきますので、観測井同士の水位を比較することでも、大局的にどちらの方向に地下水が流れているかを推定することができます。

しかし地下水位（水理水頭）の高い・低いだけでは、本当にその方向に地下水が流れているかを検証することができません。かつては地下水の流動方向や経路を特定するために、井戸に食塩や無害の蛍光塗料等を投入して下流側に当たる井戸等で検出されるまでの時間を測定するような調査も行われてきました。

このように地下水などの流れ、あるいは特定の物質の移動経路を追跡するために使われる、微量成分や同位体等のことをトレーサーと呼びます。水に溶解している様々な成分の濃度、あるいは水分子を構成している同位体等の構成比を分析することによって、水の起源や流動経路等の履歴に関する情報が得ることができ、水が循環する過程を明らかにすることができます。

分析機器や分析技術の向上によって、現在では様々な物質をトレーサーとして用いることで、地下水の流動経路や滞留時間を推定する技術が確立されています。

表 9-2 地表水と地下水の交流研究において用いられるトレーサー物質と特徴

土原健雄ほか「環境トレーサーを用いた地表水と地下水の交流研究の現状」(2018)^[1]を参考に作成

	用いられているトレーサー	主な特徴
主要イオン	Na ⁺ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SiO ₂	・地表水、地下水中のイオン組成の差異を利用
安定同位体	δD・δ ¹⁸ O, ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, δ ¹³ C, δ ³⁴ S _{SO4} , δ ¹⁵ N _{NO3} , δ ¹⁸ O _{NO3} , δ ⁵⁶ Fe, ⁴ He	・降水を起源とした同位体比の空間分布・時間変動の差異、蒸発による同位体比の変化を利用（δD, δ ¹⁸ O） ・通過した地域や地層の特性を反映した同位体比や濃度を利用（ ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, δ ⁵⁶ Fe, ⁴ He） ・起源によって異なる溶質の同位体比を利用（δ ¹³ C, δ ³⁴ S _{SO4} ・δ ¹⁸ O _{SO4} , δ ¹⁵ N _{NO3} , δ ¹⁸ O _{NO3} ）
放射性同位体	²²² Rn, T (³ H) (4), ¹⁴ C, ²³⁴ U/ ²³⁸ U, ^{223,224,226} Ra	・地表水と地下水における滞留時間の差異、濃度の差異を利用
その他溶質	重金属、有機化合物（有機溶媒、鉱物油等）、リン、溶存ガス（SF ₆ , CFCs）、農薬、医薬化合物（X線造影剤、抗生物質）、その他化合物（人口甘味料、カフェイン、硫化水素）、大腸菌等	・重金属類は主要イオンと同様に、その組成の差異を利用 ・人間活動によって環境に付加された汚染物質、合成化学物質等の分布の差異を利用 ・過去から現在までの大気中におけるSF ₆ 濃度の変化と、地下水や湧水などのSF ₆ 濃度とを比較することにより、地下水・湧水の滞留時間を推定。
人工トレーサー	ハロゲンイオン（Cl ⁻ , Br ⁻ ）、蛍光染料、ガス（SF ₆ ）、硝酸塩、リチウム、合成DNA	・地表水に投入して河床や帯水層へ残留・移動するトレーサーから交流現象を把握 ・SF ₆ は希釈率から地下水流入の推定へ利用、また ²²² Rnの大気への揮散率推定へ援用

筑波大学との共同研究では、東京都の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)を解明するため、東京都建設局土木技術支援・人材育成センターが管理・保有する地盤沈下観測井から採取した地下水に含まれる各種成分をトレーサー物質として用いて、地下水流動系の実態解明に取り組んでいます。ここでは、各トレーサーの特性や分析・解析原理について、簡単に御紹介します。

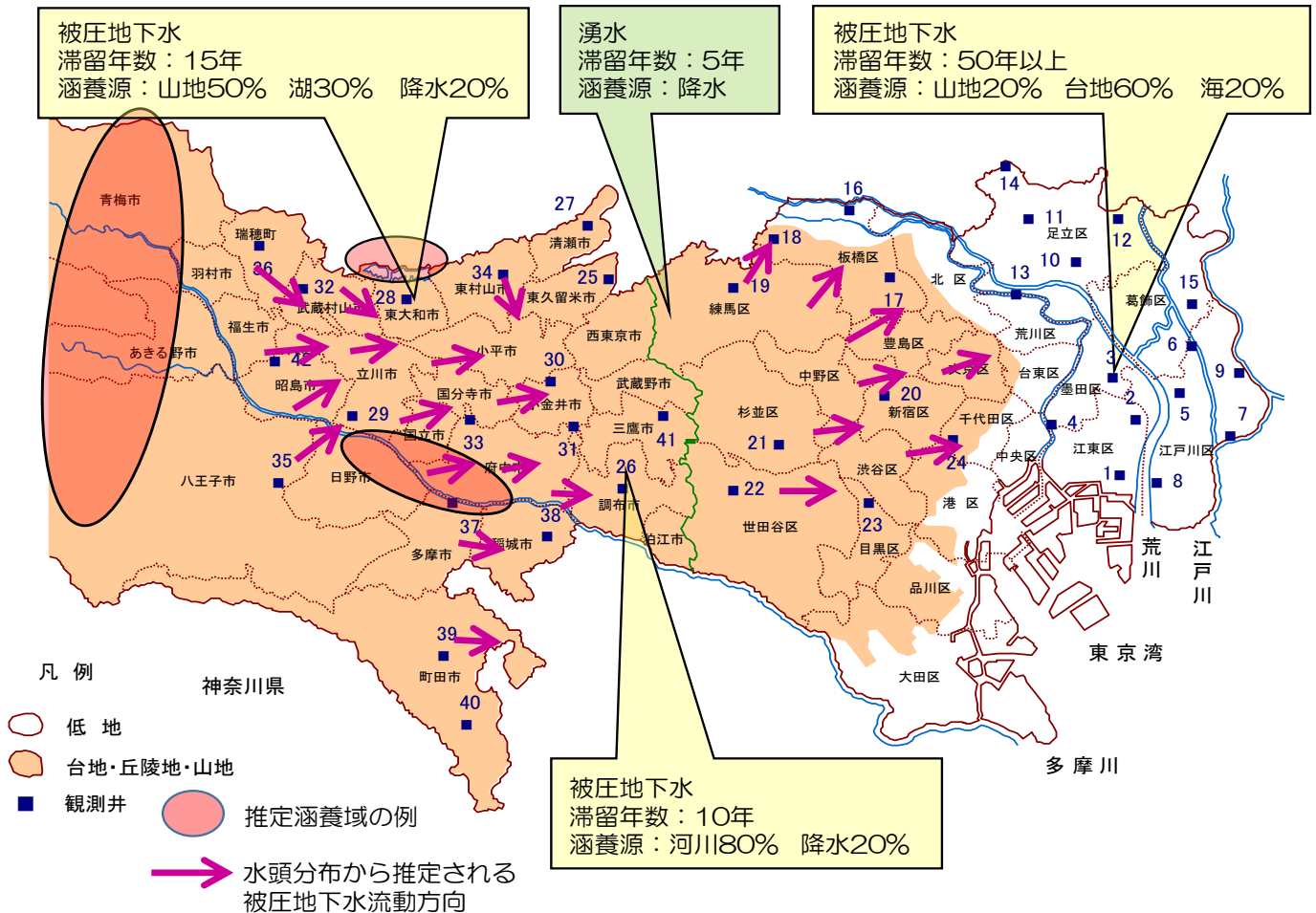


図 9-1 研究成果のイメージ図

※被圧地下水の流動方向は、調査結果ではありません

(1) 主要無機溶存イオンによる流動経路の推定

ア 分析の概要と表現方法

本手法は、水中に溶解込む主要な無機イオンをイオンクロマトグラフなどの機器を使って、陽イオン（ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン）と、陰イオン（塩素イオン、重炭酸イオン、硫酸イオン、硝酸イオン）の含有量を分析し、それらの含有割合や傾向により水質型を分類し、水の起源や流動経路を推定するものです。

一般的に地下水は、帯水層中を流動する過程で、地層中の物質等とイオンを交換しながら水質が形成されていきます。したがって、本手法は、地下水の起源や流動経路を把握する目的で用いられ、以下に示すようなダイアグラムで表現して利用します。

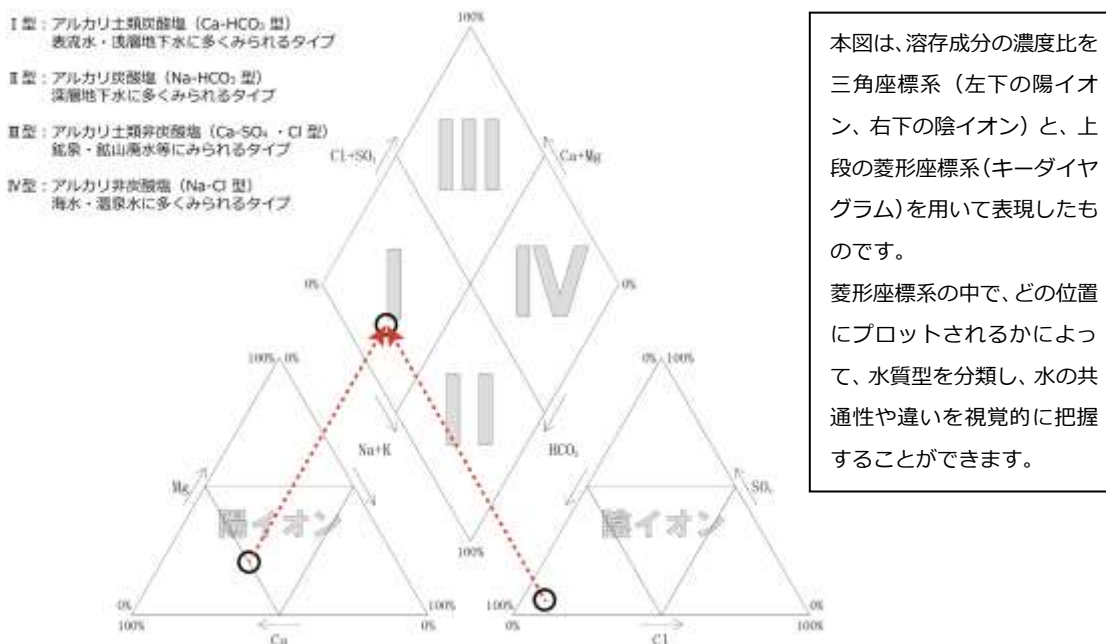


図 9-2 トリリニア（パイパー）ダイアグラムによる水質型の分類例

三角座標系（左下の陽イオン、右下の陰イオン）二点の交差点が、菱形座標系に1点としてプロットされる

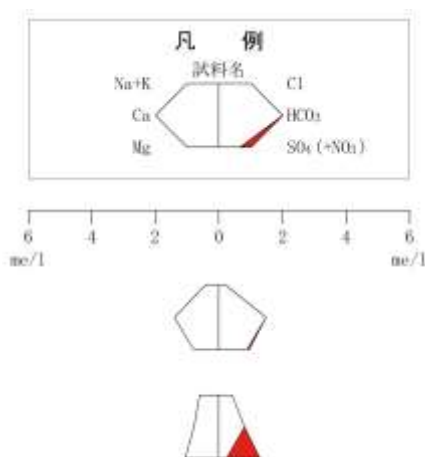


図 9-3 ヘキサ（スティフ）ダイアグラムによる水質型の表示例

(2) 水素・酸素安定同位体比による涵養地域の推定

ア 分析の概要と表現方法

自然界において、水分子 (H₂O) を構成する水素原子 (H) と酸素原子 (O) には、それぞれ中性子の数が異なるものがわずかに存在し、この元素を同位元素や同位体と呼びます。各々の同位体は、中性子の数が異なるため質量数が異なります。質量数が異なる同位体は、水循環中の“ふるまい”が少しずつ異なります。

水が蒸発する時には、質量数の小さい（軽い）同位体を含む水分子の方が、より蒸発しやすい傾向があるので、蒸発前の水に比べ水蒸気中では、質量の小さな同位体の占める割合が大きくなります。

また、水蒸気から雲が形成され、雨を降らせる場合には、質量数の大きな（重い）同位体の方が雨粒になりやすい傾向があります（図 9-4 参照）。このため、海から蒸発した水蒸気が雲となって、雨を降らせながら内陸へと移動すると、より内陸の高い標高では、結果的に安定同位体比が低く（軽く）なります。したがって、ある水の同位体比を知ることによって、その水が受けてきた水文学的な過程の履歴をうかがい知ることができ、地下水中の同位体比を分析することで、地下水の起源となる雨水がどれくらいの標高において涵養されたものであるかを推定することが可能であるというわけです。

なお、海水中ではこの存在比がほぼ一定であるため、海水を標準物質としてこの値からの千分偏差 (‰: パーミル) として、分析値を表現します。

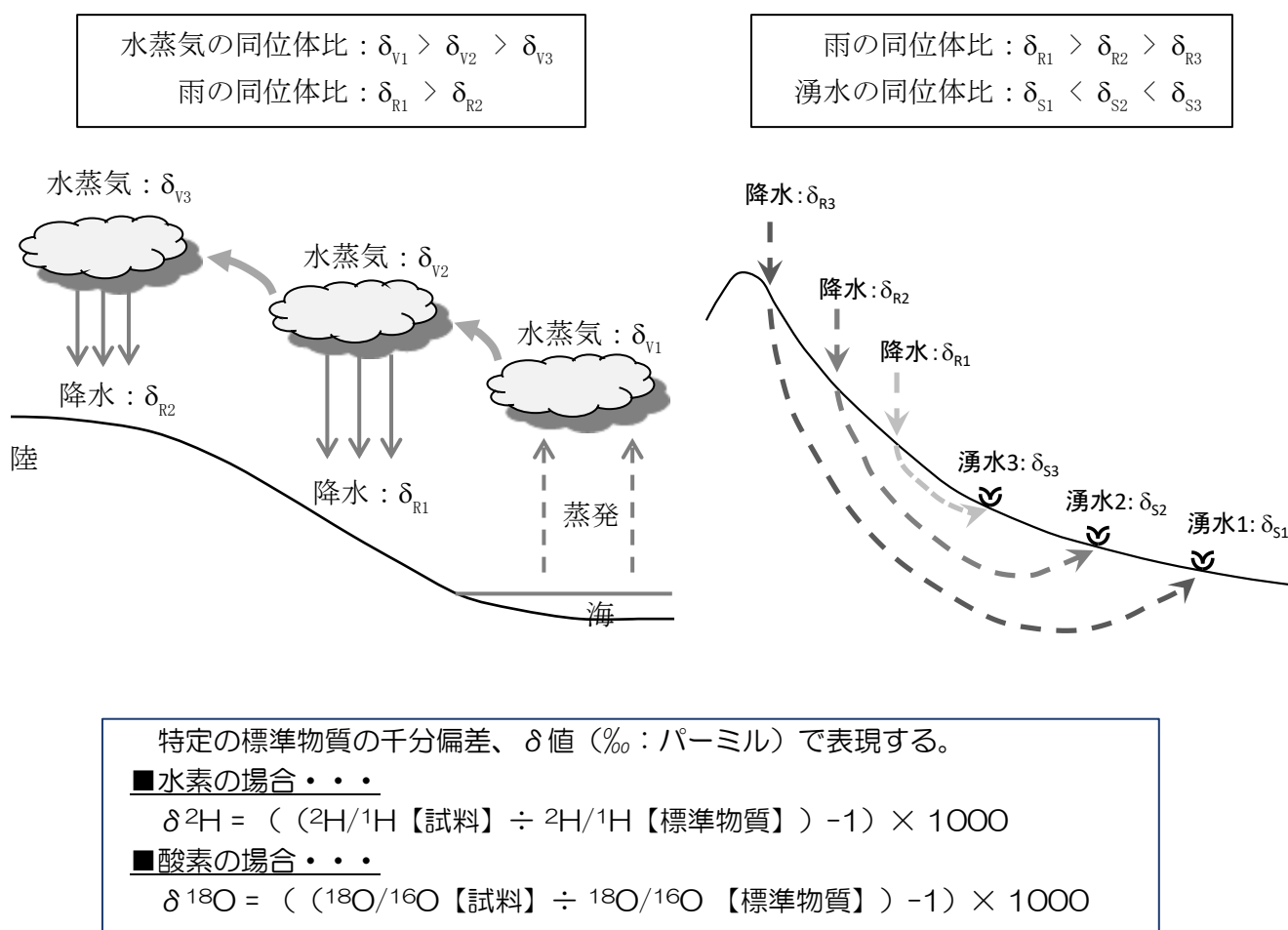


図 9-4 水の循環過程にともなう安定同位体比の変化

雨が降る場所によって重い水が含まれる割合（同位体比）が違うので、地下水の涵養域を推定することができる。

(3) 地下水の滞留時間推定

ア 分析の概要と表現方法

これまで、地下水中の滞留時間を推定するトレーサーとしては、トリチウム (^3H) と呼ばれる放射性同位体を用いた手法が知られていました。これは、1950年代から60年代にかけて北半球の各地で行われた核実験により、短期間に降水中の ^3H 濃度が急激に上昇したことを利用するもので、12.43年毎に半減期を迎える ^3H から、地下水の涵養年代を推定する手法です。しかしながら、現在では降水中の濃度も天然レベルにまで減衰しており、数年から数10年オーダーの地下水滞留時間推定に直接適用することが難しくなっています。

そこで、1930年代から1980年代まで冷媒・溶剤として用いられたCFCs（フロン）類や、現在もなお大気中で濃度が上昇し続ける代替フロン材： SF_6 （六フッ化硫黄）が新たなトレーサーとして活用されています。

東京都では、トリチウムでとらえきれないような若い地下水涵養年代の推定についても、フロン類や SF_6 による年代測定に着目して研究を進めています。

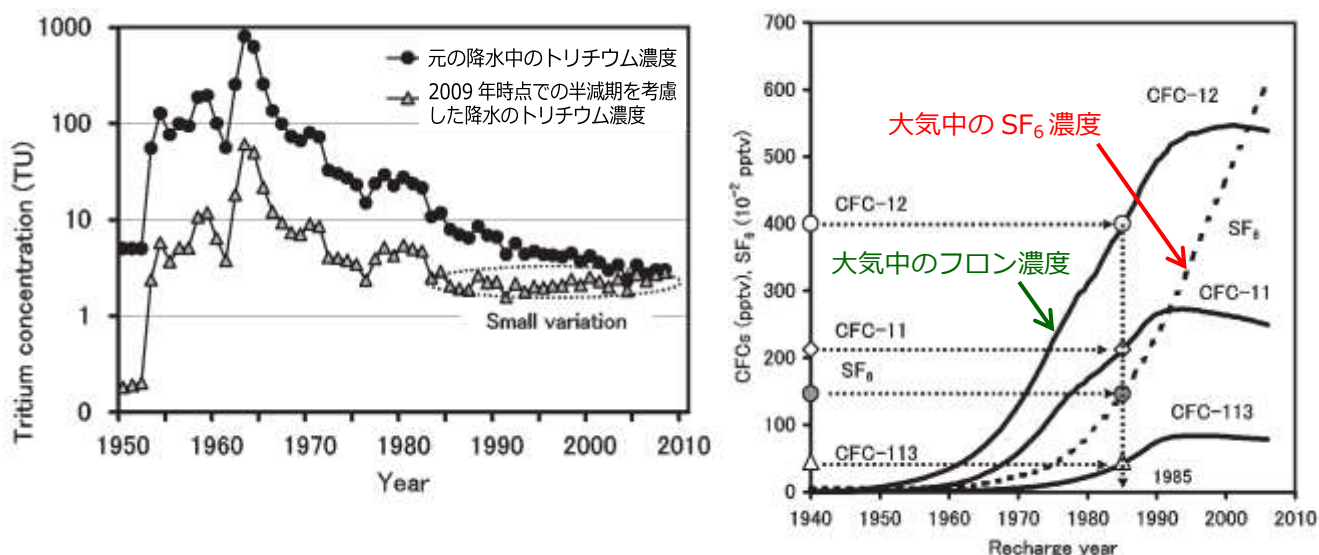


図 9-5 大気中におけるトレーサー物質濃度の推移

浅井和由・辻村真貴「トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法 - 火山地域の湧水へのCFCs年代推定法の適用 -」(2010)^[2]より

左：大気中におけるトリチウム濃度の推移

右：大気中におけるCFCs（フロン）類： SF_6 （六フッ化硫黄）の推移

(4) 本研究の調査対象

本件研究では、観測井の試料を中心に採水し、トレーサー物質の分析を行っていますが、より詳細に涵養域や流動経路に関する情報を得るため、河川水や湧水、降水も調査対象としています。

- ・地下水：東京都が保有する観測井を中心とした地下水(図 9-6 参照)
- ・河川水及び湧水：多摩川を中心とした河川水、及び多摩川の周辺を中心とした湧水
- ・降水：山地、台地、低地の3地点での降水

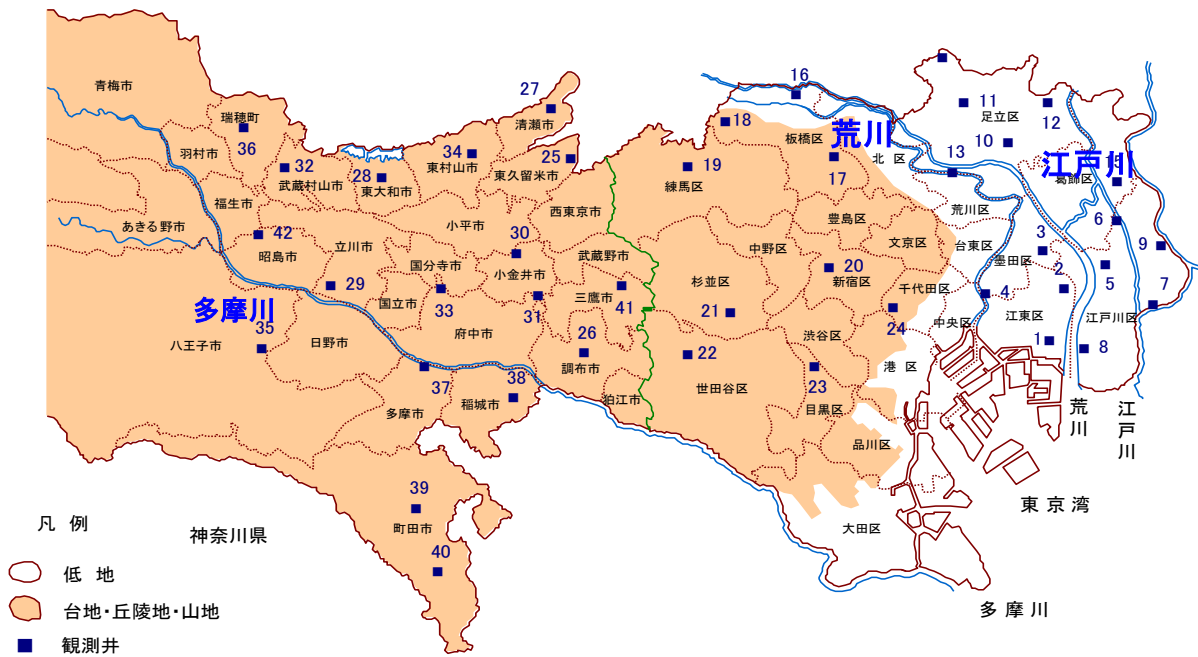


図 9-6 都内における観測井の位置図

(5) 地下水の採水方法

地下水の採水は、観測井に専用の採水ポンプを入れてサンプリングします(図 9-7 参照)。採水時には、地下水が大気に接触したり、採水器具にフッ素系樹脂が使用されていたりすると、地下水中の正確なトレーサー物質濃度が分からなくなる場合があります。このため、採水方法、採水器具の選定等に注意しながら調査を実施しています。



観測井の外観



採水前後での井戸水位確認状況



専用の器具を使った採水状況



地下水の採水状況

図 9-7 地下水流動調査の様子

(6) 現在までの取組状況

これまで、表 9-3 及び図 9-8 に示す地点を中心に調査を行いました。平成 30 (2018) 年から令和 2 (2020) 年にかけての調査で、台地と低地の地下水水質の特徴や滞留時間に関する知見が得られています。今後も引き続き観測井を中心とした地下水水質調査を行い、涵養域の特定や流動経路の解明に向け、取り組んでいきます。

表 9-3 これまでに実施した採水・分析項目

分析項目	地下水	湧水・河川水	降水
	<ul style="list-style-type: none"> 東京都保有地下水位観測井 : 31 地点 61 本 民間井戸 29 地点 から採水 	<ul style="list-style-type: none"> 多摩川を中心とした河川、湧水を採水 	<ul style="list-style-type: none"> 山地、台地、低地の 3 地点 令和元 (2019) 年 8 月～令和 2 (2020) 年 9 月において約 1 か月間の降水を貯留し採水
・主要無機溶存イオン	○	○	○
・水素・酸素安定同位体比	○	○	○
・六フッ化硫黄 (SF6)	○ (観測井のみ)	-	-

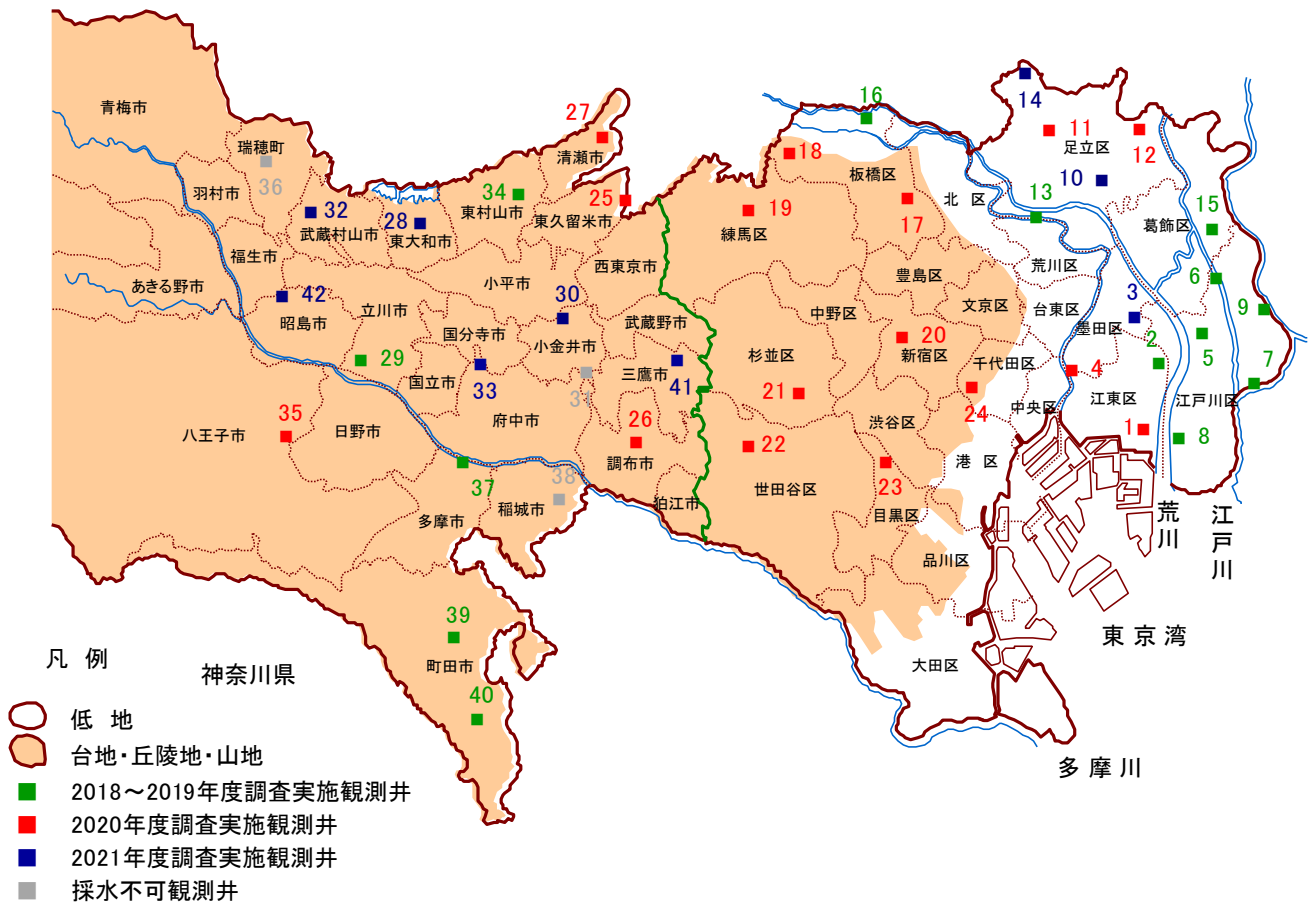


図 9-8 地盤沈下観測井におけるこれまでの採水地点

多摩台地部

区部台地部

区部低地部

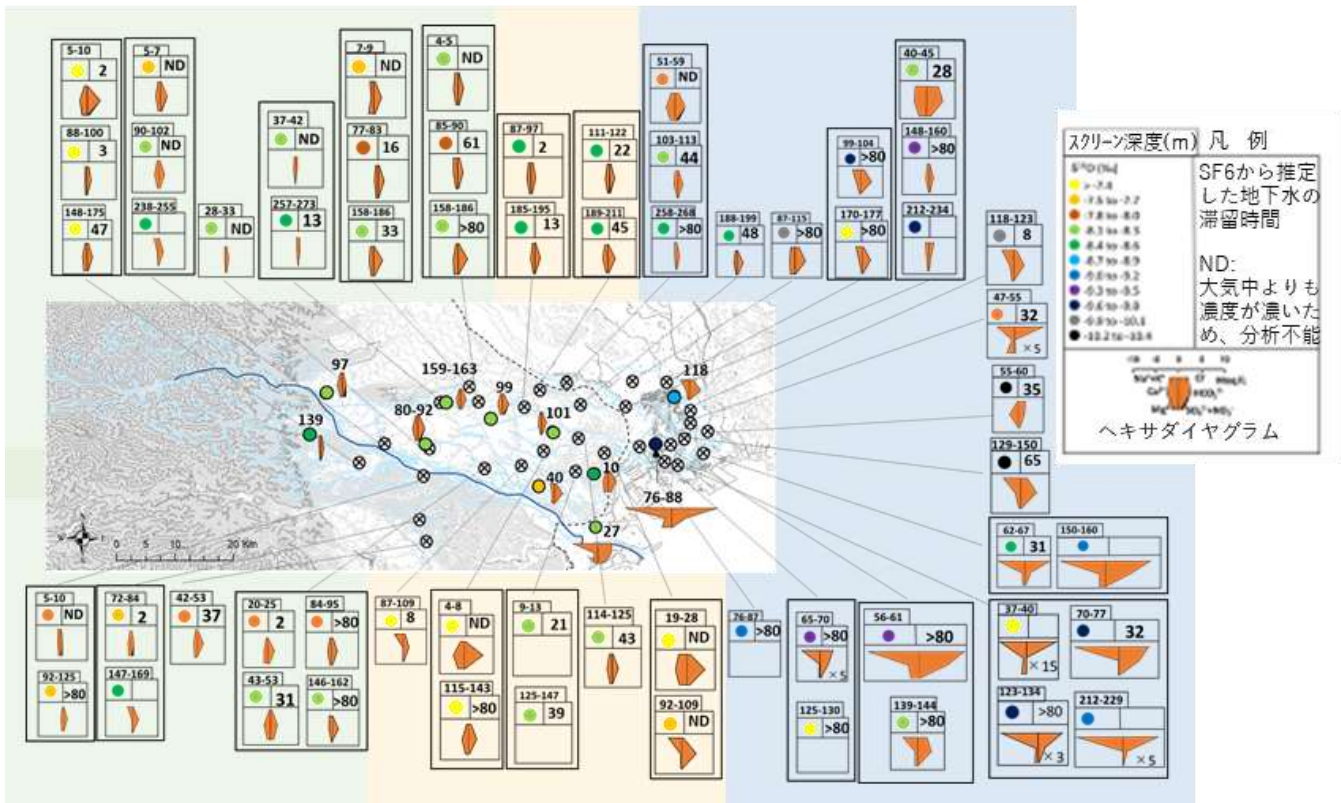


図 9-9 各観測井における溶存成分・安定同位体比分析および推定された地下水の滞留時間

(筑波大学辻村研究室・長野倅介 (2022))

※研究途上成果のため、今後修正される可能性があります

ア 各観測井における調査結果

- ・多摩台地部の地下水は、カルシウムイオン (Ca^{2+}) と重碳酸イオン (HCO_3^-) の濃度が相対的に高く、ヘキサダイアグラムは中央が膨らむ形ですが、江東区などの区部低地部の地下水は、ナトリウムイオン (Na^+) と塩素イオン (Cl^-) の濃度が相対的に高く、多摩台地部とは形が異なる特徴がみられました。
- ・ SF_6 濃度から推定される地下水の滞留時間は、多摩及び区部台地部ではおおむね数年から40年程度であるのに対して、区部低地部では、30年から80年以上と顕著に長い傾向が示されました。ただし、ここで示された滞留時間の値は異なる流動経路からなる地下水が、流動する過程において混合等が生じた結果として示されたものです。
- ・多摩台地部の酸素安定同位体比は、区部低地部と比べると高い傾向がみられました。特に区部低地部の江東区などの地下水の酸素安定同位体比は低く、多摩川上流の河川水や降水の酸素安定同位体比よりも低い特徴が示されました。これは、区部低地部の涵養域を考える際に考慮すべき点です。
- ・以上の結果をまとめると、多摩台地部と区部低地部とは、地下水の涵養源が異なることが示唆されますが、今後は区部台地部に相当する区部西側地域等を含め、更にデータを蓄積する必要があります。

イ 水平面、垂直面でみた地下水の流動と特徴

図9-10には、異なる深度の水平面および、鉛直面で見た地下水の流動と、それともなう水質や滞留時間の空間的な分布傾向を示しています。水平面で見ると、浅い深度と深い深度で、地下水の流動傾向が若干異なることが見て取れます。多摩台地部においては浅い深度、深い深度とも地形勾配に沿って西から

東への流動がみられますが、区部台地部においては浅い深度で南西から北東に向かう流動が、深い深度で南から北に向かう流動が卓越しています。

また、台地部の浅い深度では地下水の滞留時間は10年程度から40年程度であるのに対し、台地部でも深い深度では80年を超えると推定される地下水が流動しています。低地部の深い深度においては、地下水の滞留時間は概ね80年以上と長い特徴がみられ、また、南の地域では、地下水の塩素イオンとナトリウムイオン濃度が高い特徴があります。

鉛直面をみると、多摩台地部ではおおむね西から東に向かい地形に平行な地下水流動がみられますが、多摩台地部と区部台地部の境界付近では、地下水が鉛直下向きに流動する特徴が顕著です。さらに、台地と低地の境界付近では、地形面に平行な流動と、一部でより深部への流動もみられます。

このように、地下水は3次元的に流動しており、特に浅い深度と深い深度においては、その流動傾向が異なること、台地部に比べ低地部において地下水の滞留時間が長い傾向のあることなど地下水の複雑な流動が示されました。しかしながら、台地部においても滞留時間が80年以上と推定される部分もあり、今後より詳細なデータの検討が必要です。

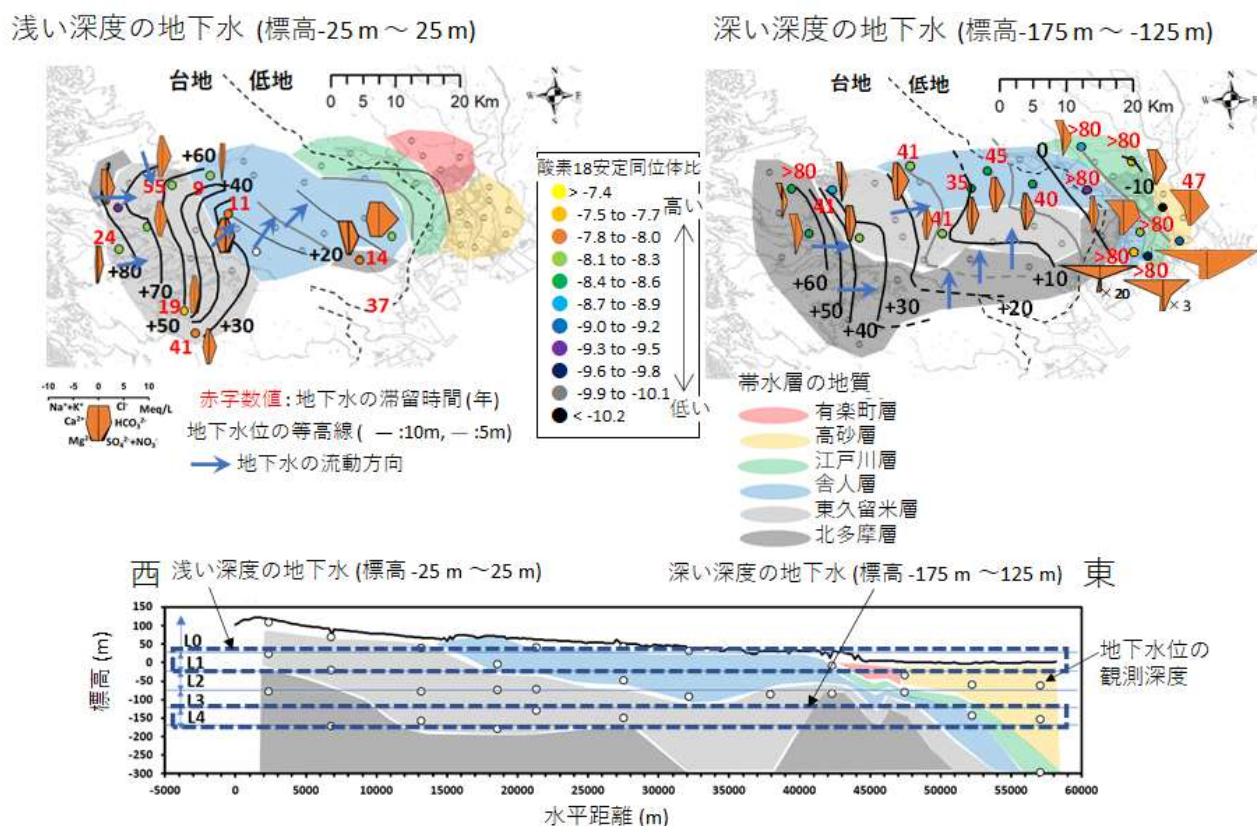


図 9-10 水平面で見た、浅い深度および深い深度における地下水の流動、水質組成、安定同位体比、滞留時間の分布 (研究途上のため今後修正される可能性あり) (筑波大学辻村研究室・長野倅介 (2022))

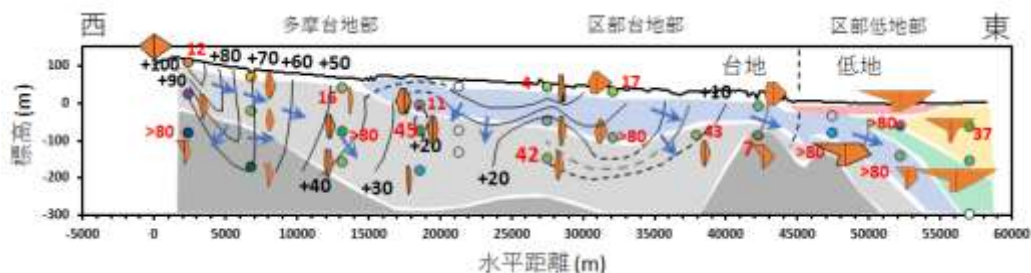


図 9-11 鉛直面で見た地下水の流動、水質組成、安定同位体比、滞留時間の分布 (研究途上のため今後修正される可能性あり) (筑波大学辻村研究室・長野倅介 (2022))

9-3 地下水の揚水等の影響予測

地下水は古くから利用されてきた貴重な水資源であり、その利用を持続可能なものとするには、地盤沈下を初めとする各種の障害を起こさない利用方法を見出していく必要があります。広域的かつ甚大な地盤沈下を経験した東京において、再び地盤沈下を起こさないためには、地盤沈下が起きうる地下水位や揚水量を把握し、そこに達することのないよう、地下水利用を適切に管理することが不可欠です。

そこで東京都は、どこでどのくらい揚水すると、どの地盤にどのくらいの影響が生じるかを予測する、信頼度の高いシミュレーションモデルの構築を目指し、平成 29 (2017) 年度から東京大学と共同研究を開始しています。

(1) 研究の背景と目的

地下水の揚水により帯水層の水圧が低下すると、隣り合う粘土層から帯水層に向かって水が絞り出されます。粘土層内は砂礫層などの帯水層と比べて水が通りにくく、ゆっくり時間をかけて水が絞り出されます。東京低地部のような厚い粘土層の場合、帯水層に近い部分ほど早く水が絞り出されて地盤が収縮し始めますが、帯水層から離れた部分にはまだ水が残っており、一つの粘土層内でも含水状態(「間隙水圧」という。)や収縮状態が異なります(図 9-12)。

どの地盤が今後どのくらい収縮するかを正確に予測するためには、詳細な地層構成に加え、現在、地盤の状況(間隙水圧や収縮状態)がどのような段階にあるのかを、可能な限り正確に捉えることが鍵となります。地盤の状況については、実際のボーリング試験結果から情報を得ることはできますが、得られる試料数や情報量には限度があります。しかし近年、コンピューターの計算速度が著しく向上し、逆解析手法^{*}を用いて効率的に地盤の状況を細かく推定することができるようになってきました。そこで東京都は、本手法による地盤変動予測モデルの作成を先行的に実施してきた東京大学と連携し、信頼度の高いシミュレーションモデルの構築を目指して取り組みを進めています。

^{*} 原因(物性値)から結果(地下水と地盤の変動)を得るシミュレーションモデルに対して、逆に結果から原因について推定することを逆解析手法といいます。地質調査で得られる物性値は現況地盤における物性値であり、過去(例えば地盤沈下中など)の状態における物性値は、逆解析手法により推定する必要があります。

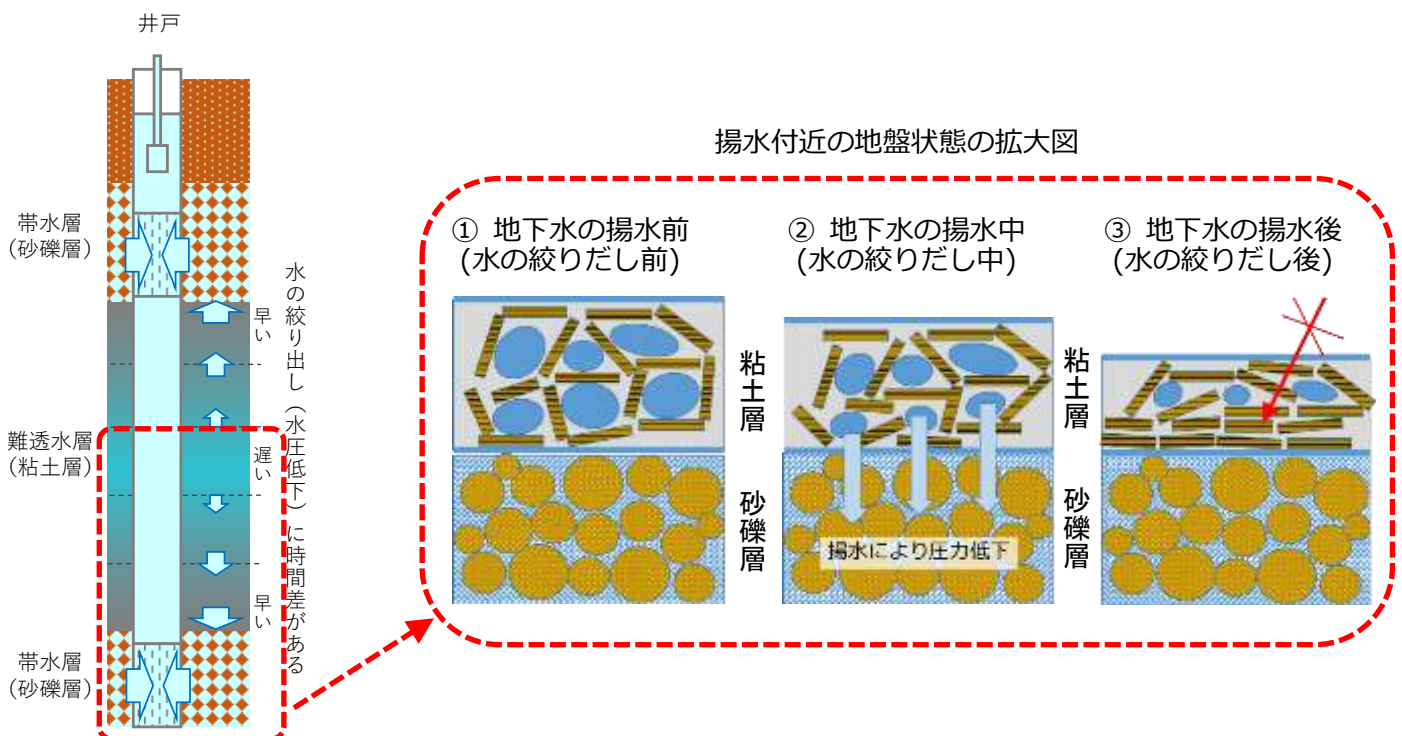


図 9-12 地下水の揚水に伴う地盤沈下の概要図

(2) 研究の手法

ア 観測井データの再現と地盤情報の推定

地盤沈下観測所の観測井では、地下水位の変動と地層別の変動量が継続的に観測されています。構築するシミュレーションモデルは、この観測井での地盤変動量を再現できなければ信頼できるモデルとは言えません。そこで、まずは観測井の地層について、一次元地盤沈下モデルを作成(深度方向1メートル単位でモデル化)し、地下水位が観測値通りに時間変化するとモデル地盤がどう変形するかを計算します。この際、地盤情報の初期値としては、掘削時の試験で得られた各種の値*を設定しますが、地盤変動量の計算値が観測値とずれる場合には、設定した地盤情報を機械的に変化させて計算し直します。この過程を、地盤変動量の観測値が再現されるまで繰り返し、地層モデルを構築していきます(逆解析による地盤情報の推定)。これにより、地盤変動量の予測が高精度にできるようになります。

また、東京都では都内4か所において地下水揚水モニタリングを実施しており、その結果の解析から帯水層物性値の推定に活用しています。

逆解析により推定する地盤情報
弾性比貯留係数[1/m]
固相密度[kg/m ³]
初期過圧密深度[m]
圧縮指数[-]
1MPa 時の間隙比[-]

イ 地盤変形計算と地下水流動計算の組み合わせ

地下水の揚水に伴う地盤変形を予測するには、地盤変形の計算だけでなく、地下水流動(水量と地下水位)も同時に計算する三次元のモデルを作ることが必要です。

東京都では広域的に揚水が行われており、その影響を予測するには、広範囲のモデルを作成し計算する必要があります。しかし、広範囲かつ細かい情報を持つモデルでシミュレーションを行うことは、計算負荷が高くなり過ぎ非現実的です。

そこで本研究では、地盤沈下リスクを特に丁寧に評価すべき地域については、地下水流動と地盤変形を精緻に計算するモデルを作成し(局所地下水流動・地盤変形連成モデル)、その他の地域では比較的単純で負荷の低い計算が行えるモデルを作成して(広域地下水流動モデル)、2つのモデルを連結することにより広範囲におけるシミュレーションモデルを構築することを試みています(図 9-13)。

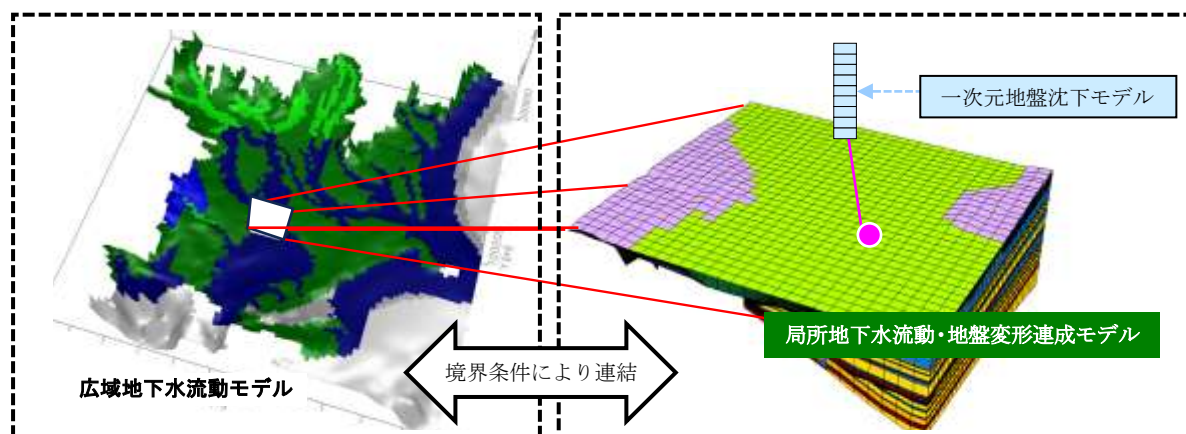


図 9-13 シミュレーションモデルの概要図

(3) 現在までの取組状況

より実態に近いシミュレーションモデルを作るためには、揚水量の多い帯水層周辺の地盤情報を重点的に取得する必要があります。そこで、過去東京都で整理した深井戸の揚水深度分布を地層構成と重ね合わせ三次元的に可視化したところ、「舎人層」が都内広域の帯水層として利用されていることが分かりました。そのため、舎人層周辺を観測している観測井のデータを「(2) 観測井データの再現と地盤情報の推定」で述べた手法で解析し、詳細な地盤情報の取得を進めています。

これまで、亀戸第2観測井など都内10か所について解析したところ(図 9-14)、地盤変動の観測値を良好に再現できる地盤情報を推定することに成功しました。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ました。他の4地点においても同様に良好な再現性を示していました。(図 9-15)

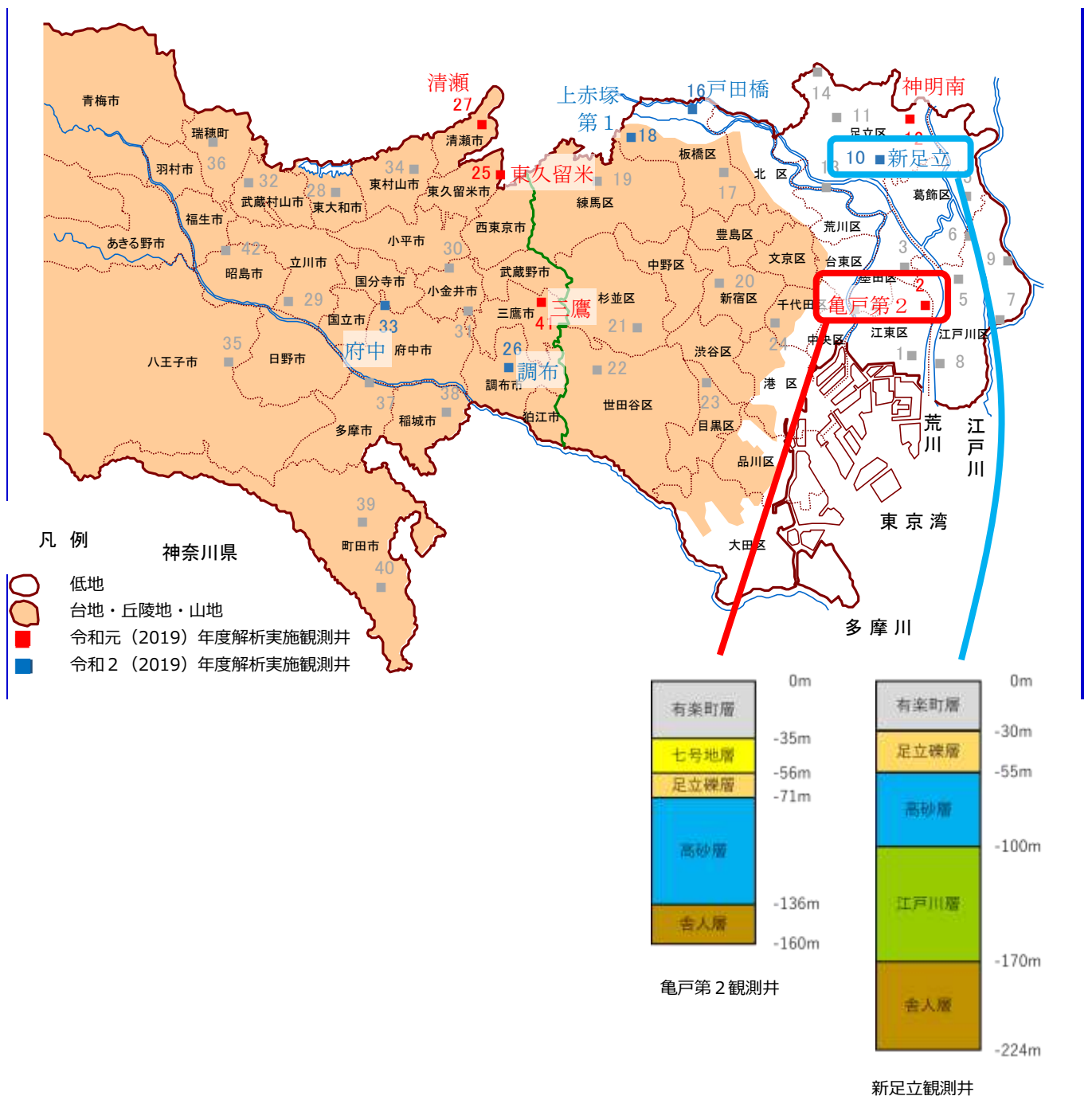


図 9-14 地盤情報の推定位置

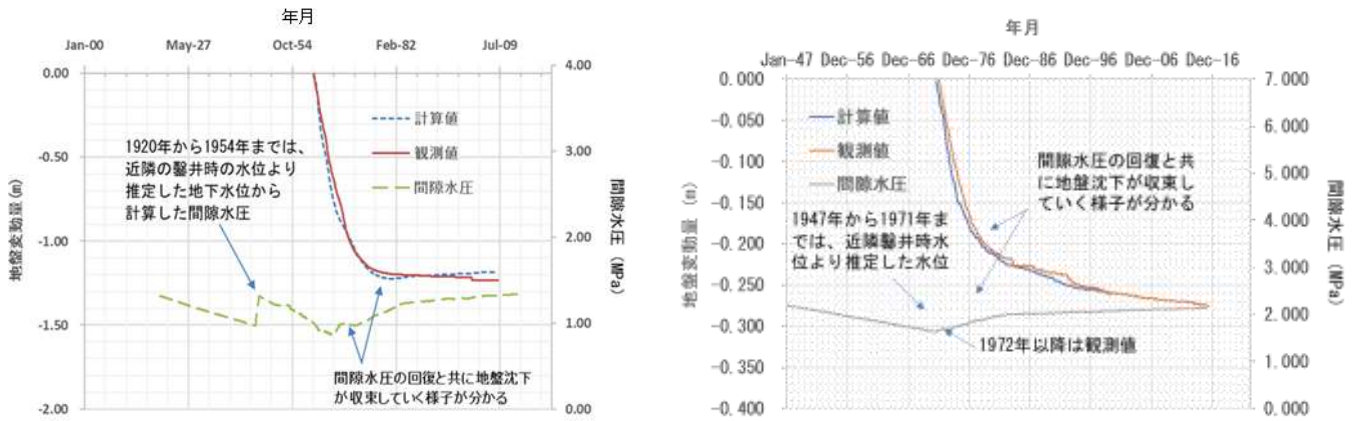


図 9-15 解析結果：観測データ再現性（亀戸第 2（左側）；新足立（右側））

地盤物性値の推定結果について、亀戸第 2 観測井の透水係数を例に説明します（図 9-16）。深度全体として、逆解析の際に初期に設定した入力値（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ありませんでした。

また、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ました。これらは岩相の変化に対応しているとも解釈できますが、極端に大きい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更に詳細に検討していく必要があります。

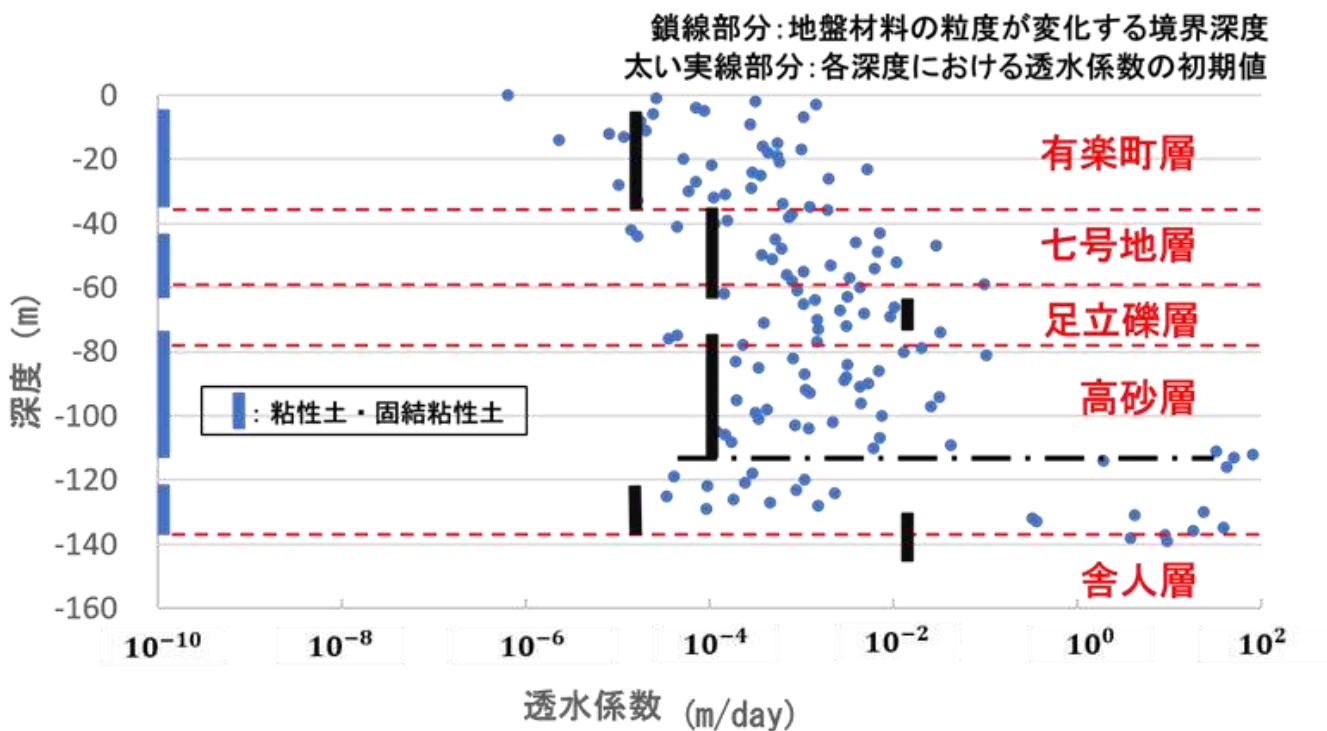


図 9-16 解析結果：推定した透水係数の分布（亀戸第 2 観測井）

また、亀戸の地盤内の間隙水圧の状況を推定したところ、水の絞り出しの遅れによりまだ収縮の余地が残っている箇所（グラフが直線的でなく蛇行するところ）の存在が示唆されました（図 9-17, 18 参照）。

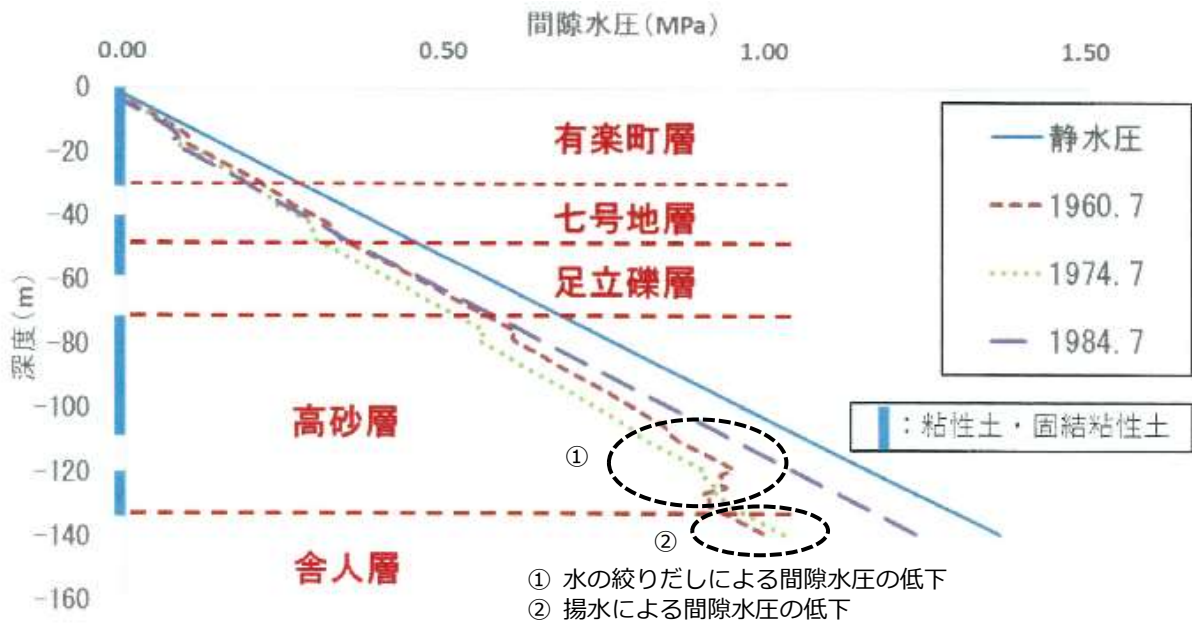


図 9-17 間隙水圧の分布の推定結果(亀戸第2観測井)

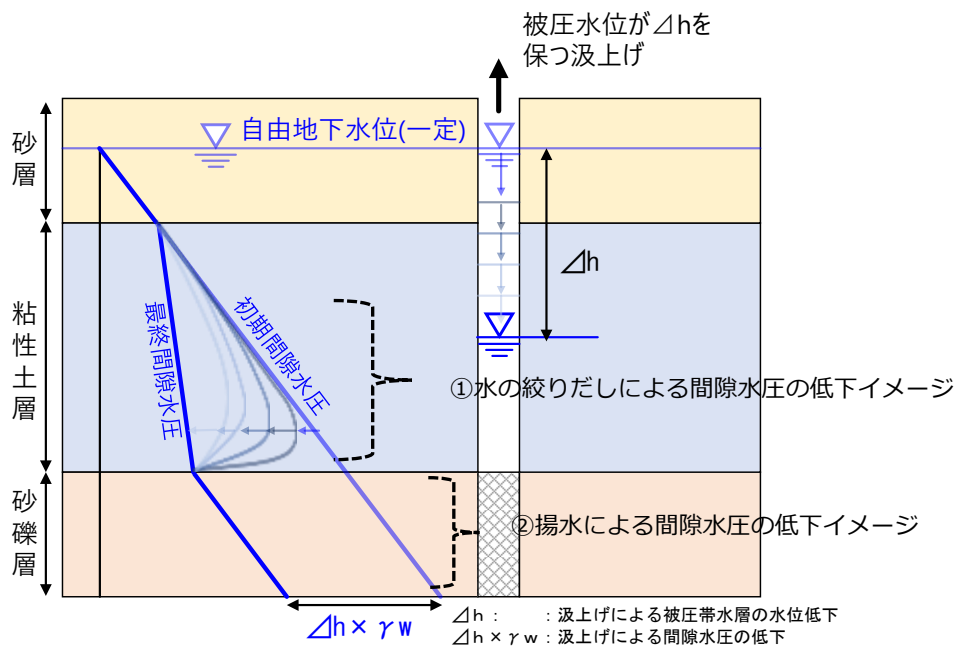


図 9-18 間隙水圧分布(亀戸第2観測井)の変化のイメージ

今後は地盤モデルの地点数を増やすとともに、逆解析で得られた地盤情報や、東京都土木技術支援・人材育成センターに集積されている地質情報などを地下水流動モデルに反映させながら、シミュレーションモデルの構築を進めていきます。

「(2) 観測井データの再現と地盤情報の推定」と「(3) 現在までの取組状況」で述べた研究内容およびシミュレーションの関係性は図 9-19 に示すとおりです。

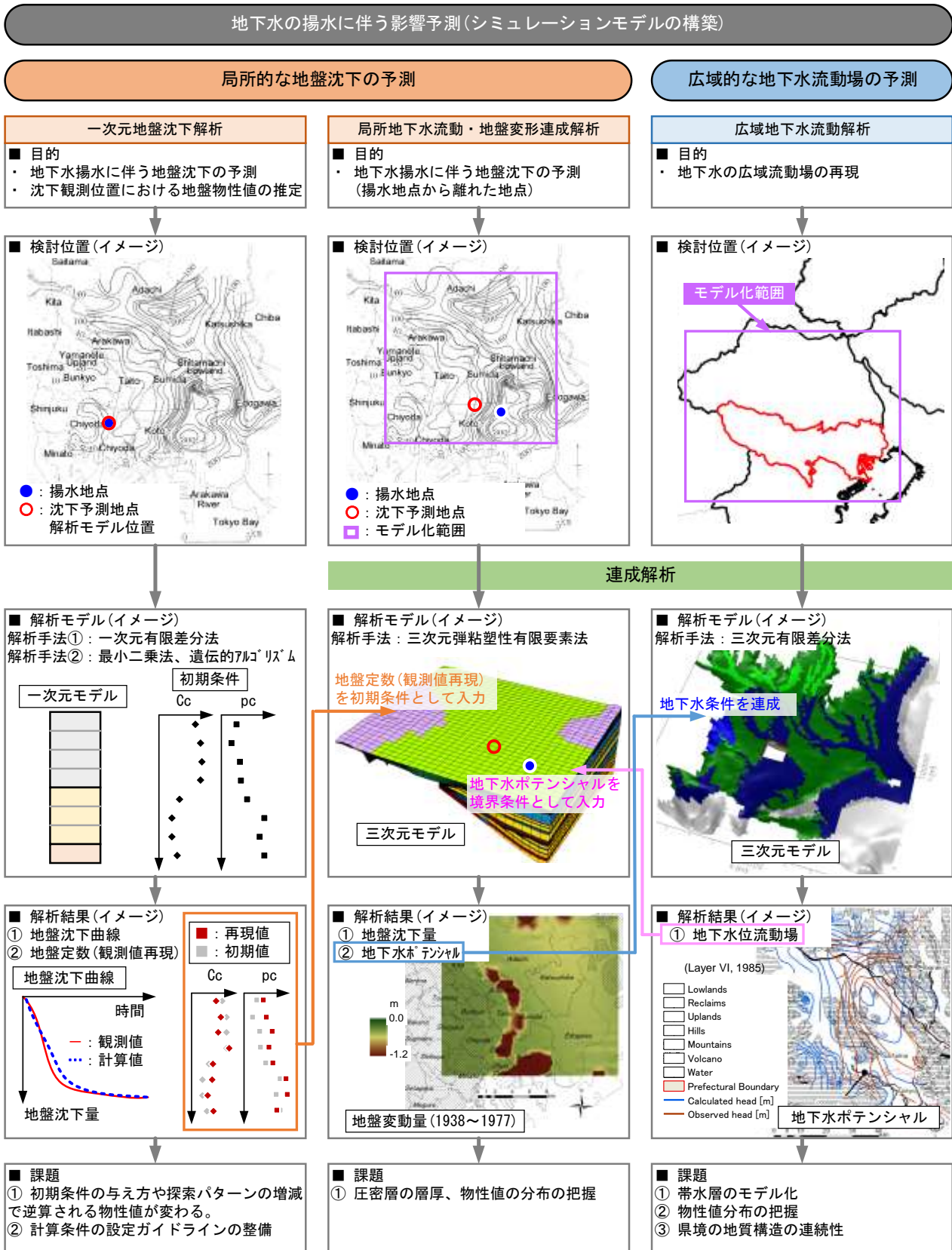


図 9-19 シミュレーションモデルの関係図

引用文献

- [1] 土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・白旗克志・石田聡, 「環境トレーサーを用いた地表水と地下水の交流研究の現状 (地下水学会誌 第 60 巻 2 号)」, 公益社団法人 日本地下水学会, 2018 年.
- [2] 浅井和由・辻村真貴, 「トレーサーを用いた若い地下水の年代推定法 —火山地域の湧水への CFCs 年代推定法の適用— (日本水文科学会誌 第 39 巻 第 3 号)」, 日本水文科学会, 2010 年.