

複雑な

東京の地下水を探る！

～持続可能な地下水の保全と利用に向けて～

ゼロからわかる

地下水の基礎

地盤沈下のメカニズム

東京の地形の基礎

最新研究に迫る

地下水流動系の解明

地下水の揚水等の影響予測

SDGs にみんなで貢献

地下水ガバナンス

第1章 大切な水資源

第2章 地下水の基礎知識

第3章 東京の地形・地質と地下水

第4章 最新の研究成果

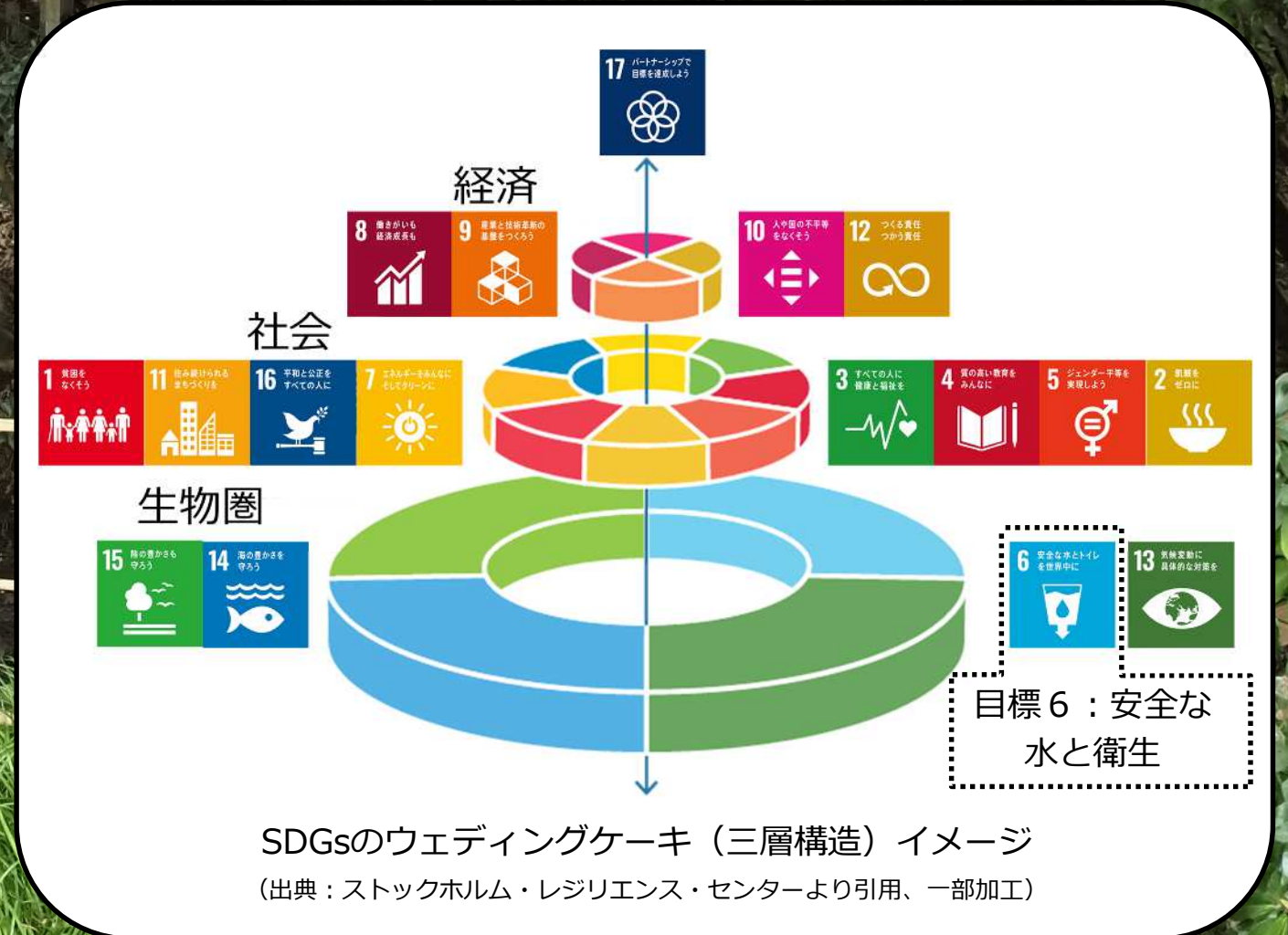
第5章 持続可能な地下水の保全と利用

第1章

大切な水資源「地下水」

地下水って東京にもあるの？
今も使われてるの？

実は生活の中でも身近な「地下水」について、
このレポートでみなさんに知っていただければと
思います。



SDGs（持続可能な開発目標）の三層構造（右上図）では、土台となっているのが「水」を含む「生物圏（自然の豊かさなどの生物多様性）」で、その上に「社会」や「経済」が乗る形となっています。これは土台となる水資源を含む生物圏の環境が整っていなければ、社会や経

済の課題を解決することはできないということの意味しています。

これら水資源の中でも重要な役割を果たしているのに、普段はあまり目に触れることがない「地下水」について、このレポートでみなさんに知っていただければと思います。

ママ下湧水（国立市）

「東京の名湧水57選」のひとつ。多摩川沿いの青柳崖線下のなかでも、最も豊かな水量を誇る湧き水ポイントです。周辺の環境は保全されており、ウォーキングも楽しめます。

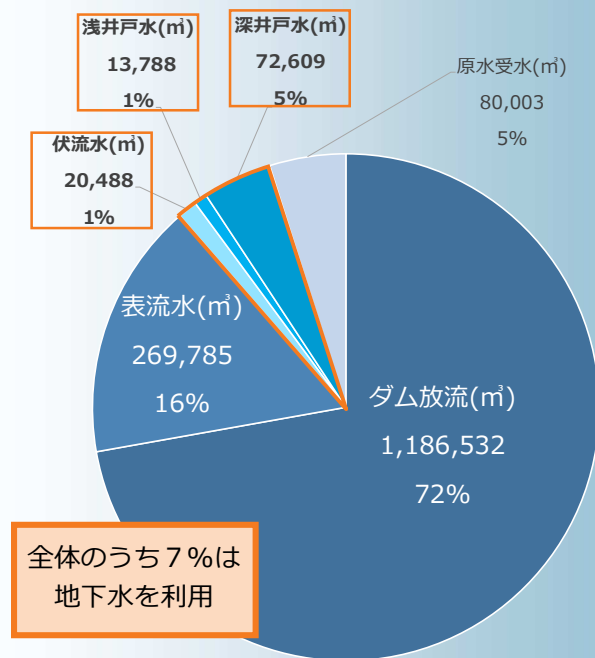
○生活に身近な地下水 ～身近な資源としての地下水～

水道の普及に伴い、都内では荒川、利根川や多摩川などの河川の水を用いた水道水が主流となっていますが、一部の地域では、現在でも飲用水として地下水を利用している地域があります。

普段の生活の中では直接目にする事のない地下水も、

河川水と同様に大切な水資源なのです。

現在では、下記の写真のように伝統的な井戸を設置する事例は少なくなっていますが、震災時に避難所における水を確保できるよう、公園や学校に防災井戸を設置するケースや、災害時協力井戸の指定の取組が増えています。



東京都の水道水源別計画1日最大取水量(H30年度)



立川市歴史民俗資料館内に現存する昔ながらの井戸



荒川公園内に設置の防災井戸（手押しポンプ）

○東京の湧水 ～雨水と河川水をつなぐ地下水～

地下水の流れを直接見ることはできませんが、地中から湧き出る地下水を「湧水（ゆうすい）」として観察できる場所が都内にも複数あります。「湧水」は、台地の崖下や丘陵の谷間などで観察され、自然に地下水が湧き出しています。

都内でも、昔からたくさんの湧水があり、憩いの場や生活用水として、また社寺内にあるものは信仰の対象として親しまれてきました。

井の頭公園（武蔵野市）

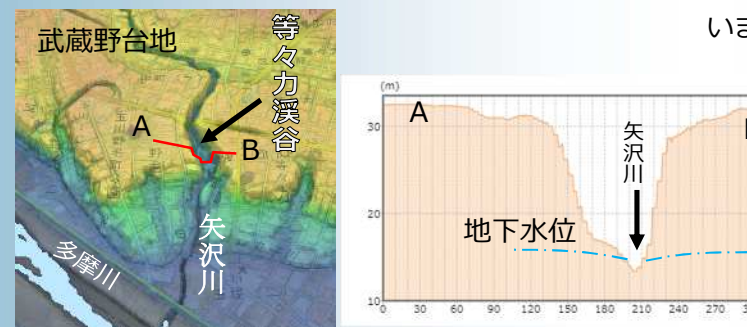
武蔵野台地の標高50m前後にある崖に位置する、武蔵野三大湧水池の一つですが、現在は湧水が枯渇してしまい、深井戸からの揚水で賄っています。

しかし、大雨の直後など地下水水位が上昇すると、一時的に湧水が復活し、園内各所で湧き出すことが確認されています。



等々力溪谷（世田谷区）

武蔵野台地の南端に位置し、数多くの湧水が存在します。「等々力不動尊」という名の寺もあり、その境内にも湧き水があり、かつて修行に用いられた滝もあります。1kmにもわたる溪谷は、都心にあるとは思えないほどに自然が豊かで、四季折々の自然は訪れる人の目を楽しませる散策スポットとなっています。



等々力溪谷周辺の立体図と断面イメージ
国土地理院ウェブサイト（電子国土WEB）を加工して作成

等々力溪谷内を流れる矢沢川が、武蔵野台地を削り、落差20mほどの溪谷ができました。その結果、地下水の流れている層が地表に現れたことで、溪谷内には数多くの湧水が発生し、矢沢川に流れ込んでいます。

○水循環の中の地下水 ～持続可能な地下水の保全と利用～

地下水の保全

調和

地下水の適正な利用

地下水に関する様々な情報を蓄積・共有

地下水、湧水、地盤沈下対策について
地域の多様な関係者（ステークホルダー）の相互理解と対話へ

地下水管理は新たな時代へ

水循環基本法が平成26年に制定されました。

- その中で基本理念として、
- ・水は「公共性の高い国民共有の財産」であること
- ・水の流れる地域での統合的・一体的管理が必要であること

を掲げています。

令和3年の改正では、特に地下水マネジメントの考え方を基に、自治体などが地下水に関する調査や採取制限など必要な措置を講ずべきことが追加されました。

また、事業者や国民の協力についても含まれることとなりました。

東京都では、前回の報告書（H28）において、行政だけでなく地域の多様な関係主体が、時間をかけて連携し、「地下水の保全と適正利用を推進することが望まれる」としています。そのためまずは、地下水の多様な実態を正しく把握し、「地下水の保全と適正利用」のあり方

を議論する下地づくりが必要です。
現在は、地下水の実態把握のために、地下水の流れ等の解明や地下水の揚水シミュレーションモデルの構築などを行っています。

地域の多様な関係者(ステークホルダー)って、誰のこと？

例えば…

住民

地下水を利用したい人
地下水を利用してきた人
地盤沈下を懸念する人

事業者

地下水を利用している事業者
地下水位の上昇など地下水問題で困っている事業者

団体

湧水の保全活動を行っている団体

行政

地下水の情報収集を行う自治体
地下水の規制を行う自治体
地下水活用による地域活性化を希望する自治体

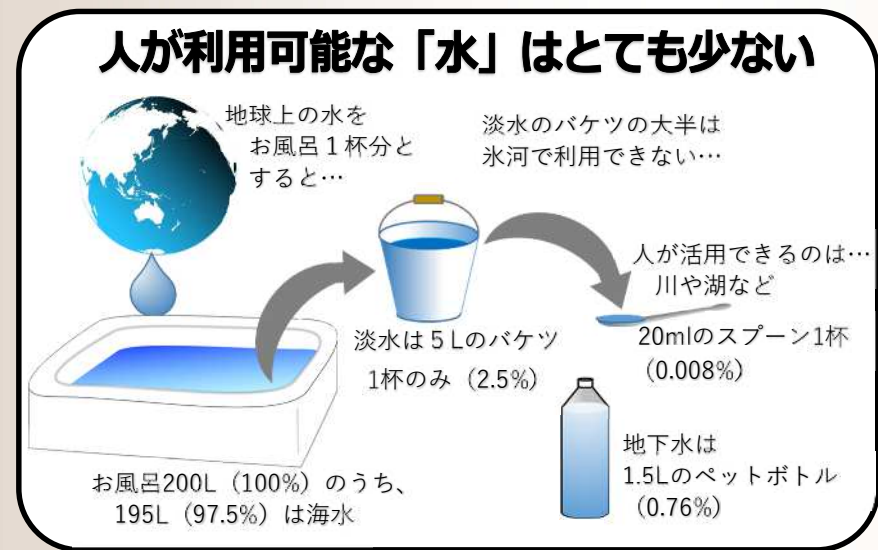
第2章 地下水の基礎知識

地球上の水の総量は約14億km³と豊富ですが、その97.5%は海水で、淡水はわずか2.5%です。その淡水のほとんどは氷河などの氷であるため、河川、湖などの水として存在する水はわずか0.008%、地下水は0.76%となります。地下水は貯留量（ストック）としては多いものの、全てが利用可能ではなく、実際には流れて運ばれている水（フロー）として、河川などの水も多く利用されています。水資源について理解するには、このストックとフローを把握し、理解することも重要です。

本章では、目に見えず分かりにくい地下水や地盤の基礎的な事項について説明します。

水循環の中の地下水

地球上の「水」は、海水や河川水として同じ場所にとどまっているわけではありません。海洋や地表では太陽エネルギーを受けて水が蒸発し、上空で冷やされて雲となり、やがて雨や雪となります。樹木や地表へと降り注ぐ水は、河川水や地下水へと形を変えながら、やがては海へと戻っていきます。このように、水は絶えず循環しており、この循環が適正に維持されるこ



水循環の目指す姿

「健全な水循環」とは、人の活動と環境保全に果たす水の機能が適切に保たれた状態をいいます。

【キーワード】

水に関する安全・安心

自然とのバランスを保ちつつ水の恵みを受

人と水とのつながり



流域マネジメント事例集(内閣官房水循環より)

とで、私たちは毎日様々な形で水を利用でき、水辺の自然や豊かな生態系も育まれます。地下水はこれらの水循環において、雨水と表流水（河川水、湖沼水、海水）をつなぐ重要な役割を担っています。

一方、過去から現在までの都

市化に伴って、水循環も絶えず変化が生じています。都市部への人口集中によって宅地が増え、田畑や森林の面積が減少した結果、雨水が浸透しやすい地域が縮小しています。加えて、気候変動の影響により、突発的な集中豪雨が増え、雨水が地下

に浸透せず河川へ流出してしまうことが懸念されています。その結果、雨水が地面から浸透する量が減少し、湧水や河川水の流量が減少する可能性もあります。

このように、水循環のバランスが崩れると、水辺を巡る様々

な課題が顕在化します。これらの問題を解決するためには、水循環について流域一帯での総合的な対応が必要です。

ここでは、水循環における地下水の基礎知識について説明します。

地下水の基礎知識

たいすいそう なんとうすいそう
帯水層 と **難透水層**

ふあつちかすい ひあつちかすい
不圧地下水 と **被圧地下水** とは…

地表に降り注いだ雨水は、蒸発散して再び大気へと還っていくもの、直接的に河川へと流出するもの、地面から浸透して地下水となるものに大別されます。

このうち地下水は、長い年月をかけて地中をゆっくりと移動します。この過程で、台地の崖下や丘陵の谷間などから湧き出して河川水へと姿を変えるものや、より地中の深くに移動するものなど様々あり、その移動経路は複雑です。

帯水層・難透水層

地面は、礫・砂・粘土などの粒の大きさが異なる地層が重なっています。このうち、礫や砂などの水を通しやすく地下水で満たされた地層を「**帯水層**」と呼びます。一方、粘土層などからなる水を通しにくい地層や、堅い岩盤を「**難透水層**」と呼びます。

地盤内には、この帯水層と難透水層が幾重にも積み重なって

いて、その中に地下水が流れています。

不圧地下水・被圧地下水

難透水層が上部に存在しない地下水を「**不圧地下水**」と呼び、不圧地下水がある帯水層を「**不圧帯水層**」と呼びます。不圧地下水は、地表からの雨水浸透、大気圧や井戸等での揚水によって地下水位が変動しやすい特徴があります。

また、台地の崖下や丘陵の谷間から湧水となって地表に湧出します。

一方、上下を難透水層に挟まれて、上流にある**かんよういき**（地下水が浸透する地域）からの影響を受けて、通常の不圧地下水よりも高い圧力状態にある地下水を「**被圧地下水**」と呼び、被圧地下水がある帯水層を「**被圧帯水層**」と呼びます。被圧地下水は高い圧力がかかっているため、井戸の中の地下水位は、帯水層のある位置よりも水位が高くなっています。

不圧地下水（主に浅井戸で利用）

一般に地表に近いことから、雨水や河川水・海水面の変があります。

被圧地下水（主に深井戸で利用）

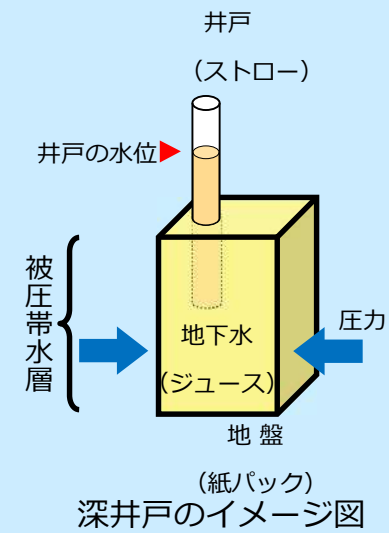
難透水層に挟まれている地下水なので、深井戸の水位は帯これは、ストローをさした紙パック（井戸）の中を水面が上がって

利用

浅層地下水と呼ばれることもありますが、動に対して敏感に反応しやすい特徴

利用

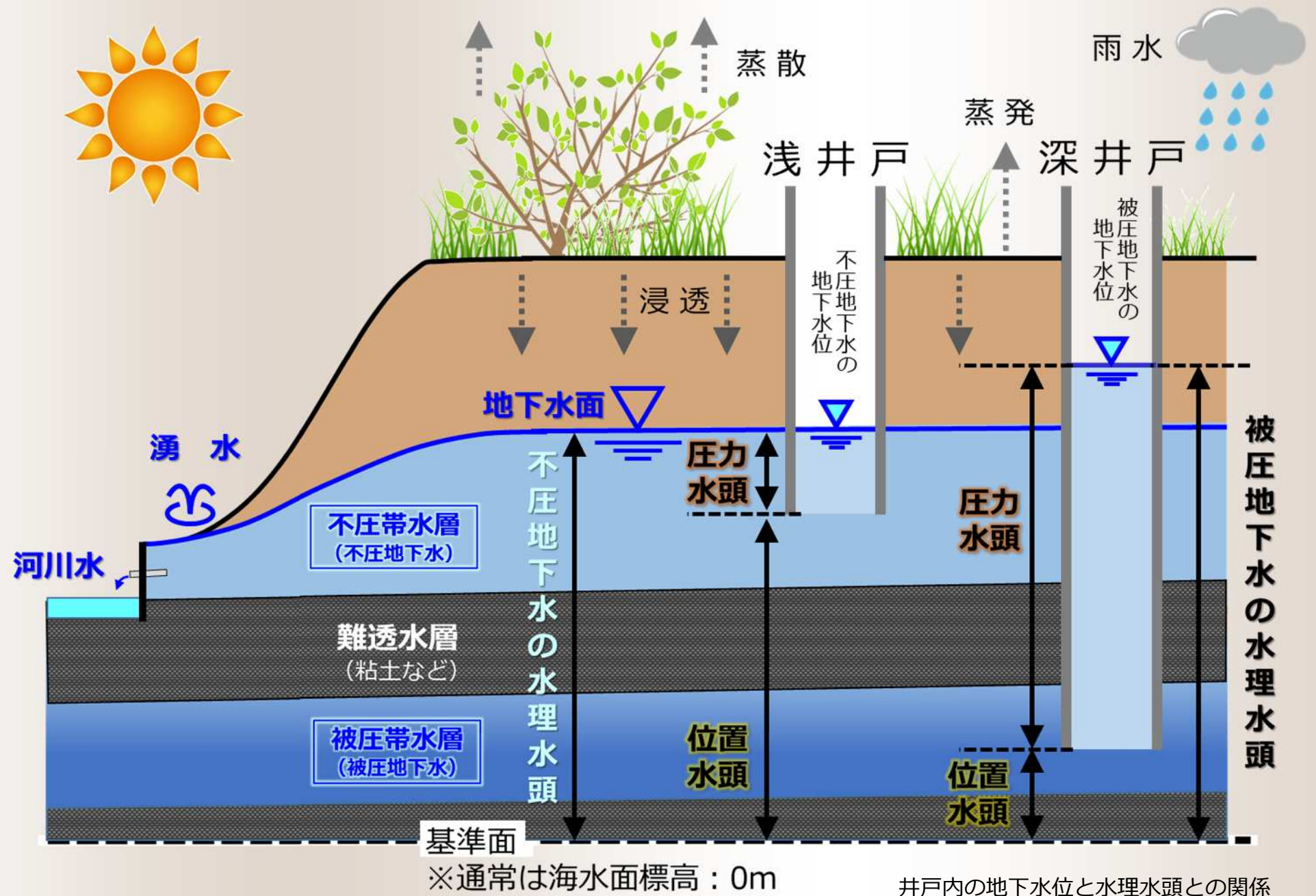
水で、涵養域からの圧力などを受け水層の位置よりも高くなります。ックが押される（圧力）とストローくるのと似ている状態です。



すいりすいとう
 「**水理水頭**」とは、地下水の持つエネルギーの大きさを水柱の高さで表したものです。

地下水の水理水頭は
水理水頭 = 位置水頭 + 圧力水頭
 で表され、井戸の中の「地下水位」に相当します。

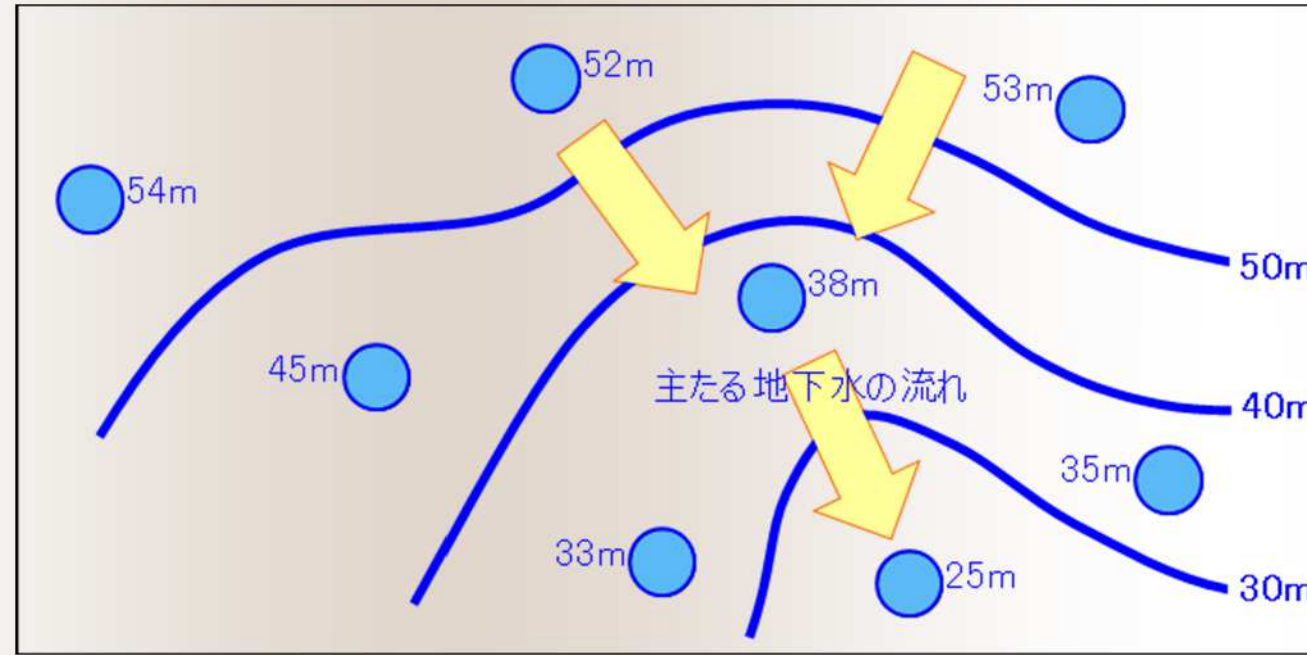
本レポートでは、この「水理水頭」を「地下水位」と表記しています。



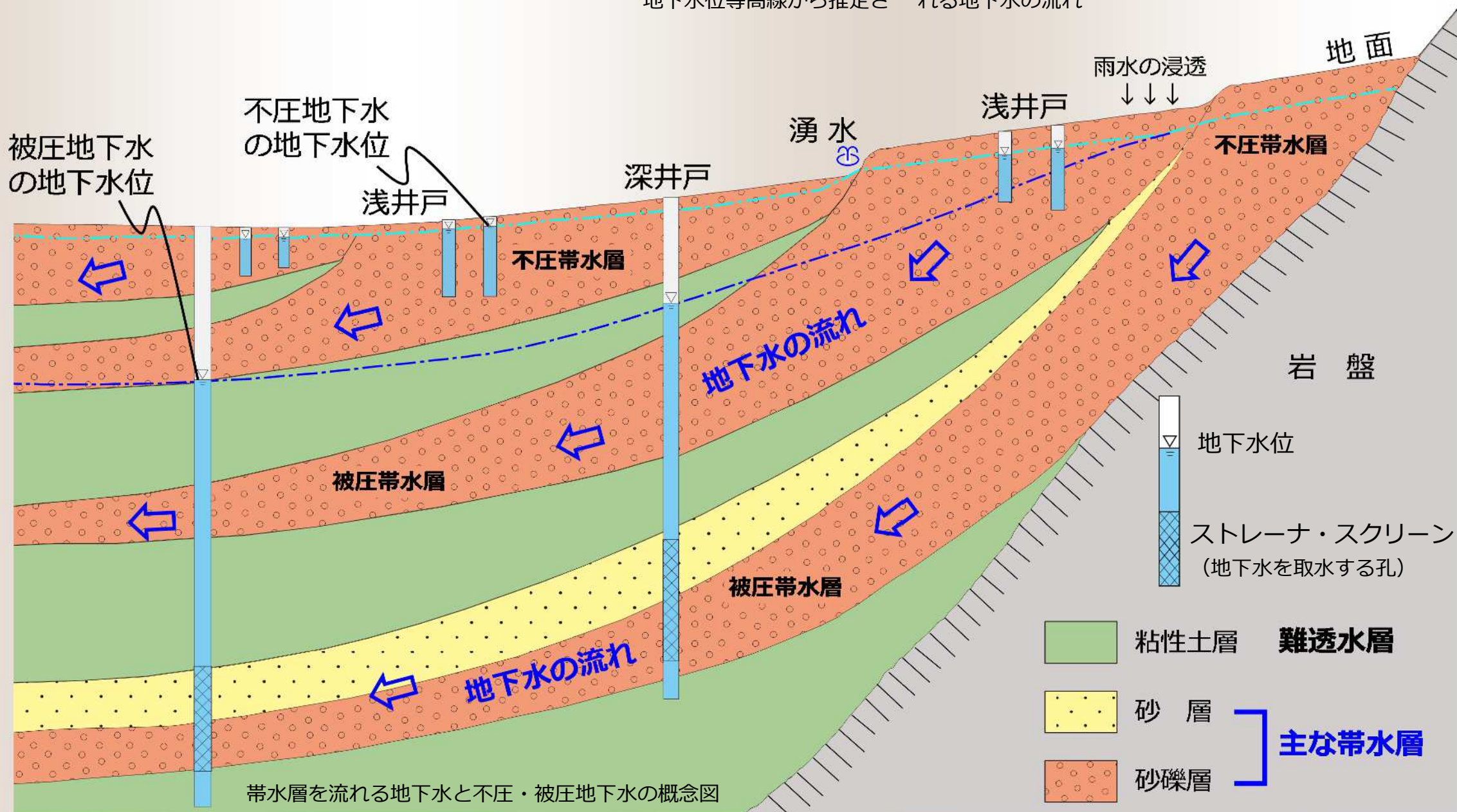
地下水の流れ

複 数地点で井戸内の地下水位を調査し、地下水位が同じ値の地点を線で結び、地下水位等高線という地形図のようなものを書くことができます。地下水は、地下水位が「高い」ところから「低い」ところに向かって流れます。

しかし、複数の井戸から地下水が揚水されているような地域では、絶えず井戸周辺における地下水の地下水位が変化するので、地下水の流れはとても複雑となり、その実態を把握するには長期にわたる専門的な研究が必要です。



地下水位等高線から推定される地下水の流れ



コラム：地下水はだれのもの？

地 下水の位置づけは国によって異なっており、原則として公のものとする考え方と、土地所有権に含まれるとする考え方などがあります。イスラエル、ギリシャ、ポーランド、イタリア(家庭用地下水を除く)のほか、ドイツ、スイスの一部の州では地下水は公のもの、イギリスやアメリカ(細部の見解は州により異なる)では基本的に所有権に含まれるという扱いとなっています。

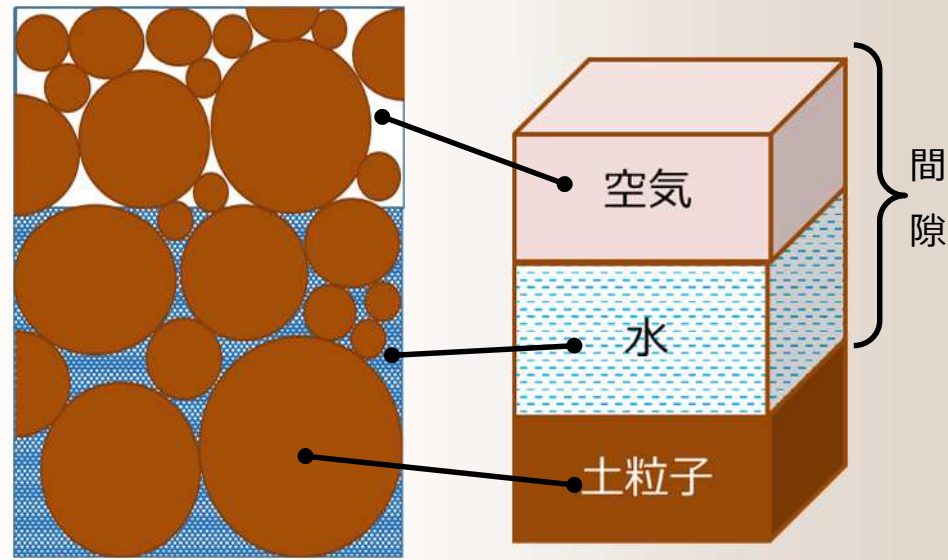
日本においては、従来、法的な土地の所有権について、「法令の制限内に於いてその土地の上下に及ぶ(民法第207条)」として地下水は私有財産と解釈されてきましたが、2014年に「水循環基本法」が制定され、地下水を含む水資源について、「国民共有の貴重な財産であり、公共性の高いもの」としています。

地下水を含む水の循環系を考えると、必ずしも一つの自治体で完結するような流域(地下水盆)だけではありません。

また、地下水の流れを直接確認できないので、地下水流動の実態解明が難しい、地域ごとの自然環境的・社会的な事情が複雑で、様々な立場から合意形成を得ることが難しいといった多くの課題も挙げられます。今後は、地下水を地域共有の財産として、保全・利用していくことが重要です。

地盤沈下発生メカニズム

土は、土粒子、水、空気
で構成されていて、地層により、土粒子の粒の大きさ（粒径）、土粒子間の隙間の多さ（間隙比）などで状態が異なります。粘土やシルトなどの難透水層（粘性土層）は、土粒子の粒径は小さく、隙間の多さを表す間隙比は大きいという特徴があります。一方、透水層である砂や石（礫）層は、土粒子の粒径は大きく、間隙比は小さいという特徴があります。



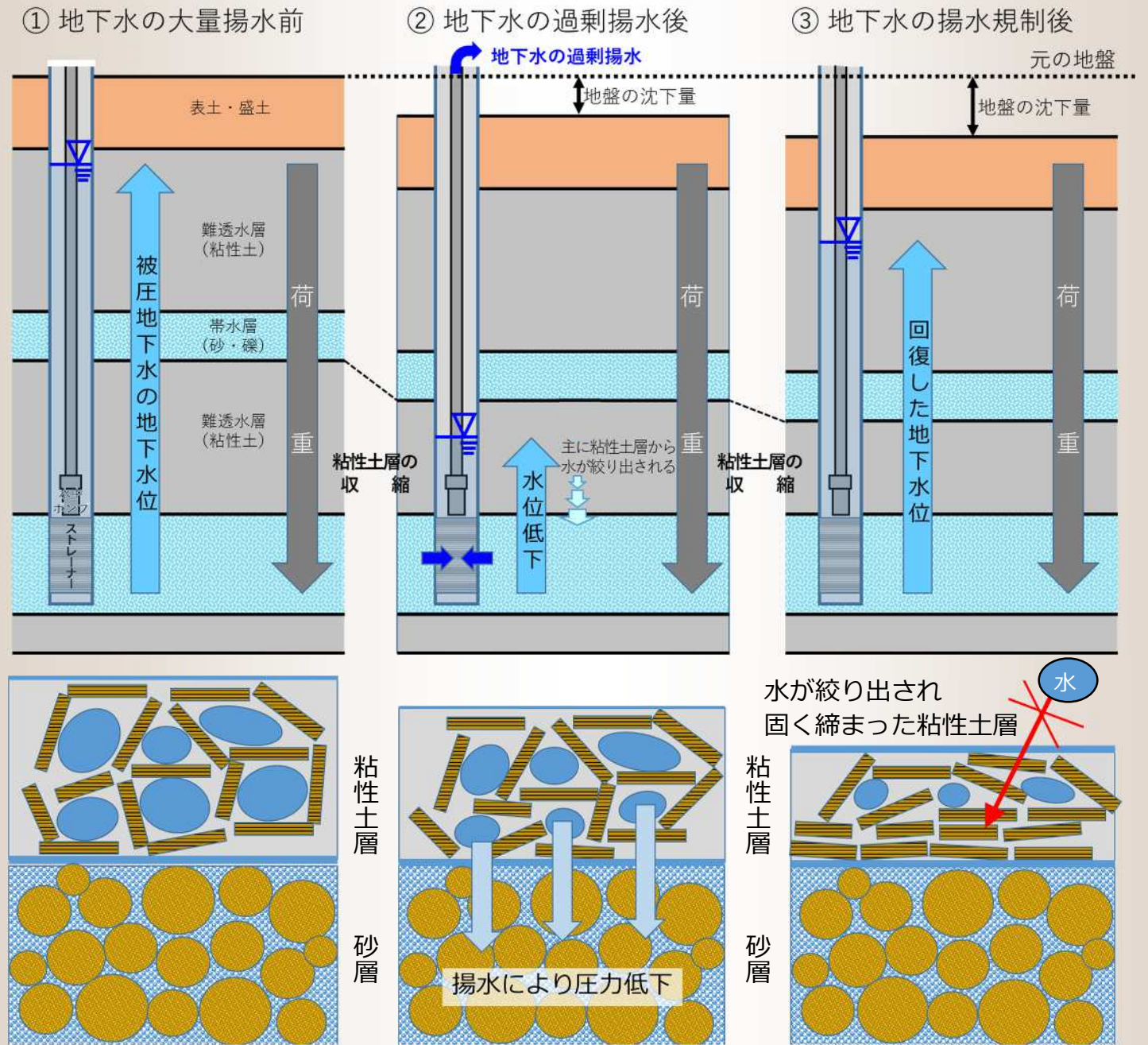
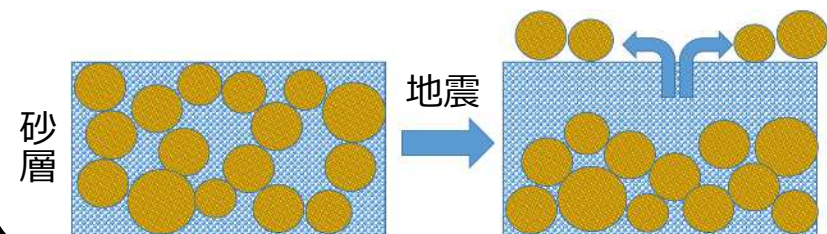
$$\text{間隙比} = \frac{\text{間隙 (空気 + 水)}}{\text{土粒子}}$$

地盤沈下が起きるメカニズムですが、ポイントは**粘性土層**にあります。粘性土層は砂などと比べるとさらに細かい粒子の集まりで、その粒子を拡大すると板状の鉱物で構成されています。この板状の鉱物が水の粒を包むように並んでいます。粘性土層はこの水の粒があることによって支えられ、大きさを保っています。ただ、粘性土層の中の水の粒どうしでは移動がおきにくく、粘性土層全体では水を通しにくい難透水層となります。

コラム：液状化現象と地盤沈下は違うの？

地震の際に発生することがある「液状化現象」は、地下水位が高く、粒の大きさが均質な砂層で発生し、粘性土層が収縮する地盤沈下とは別の現象です。一見固そうな砂層の地盤も、砂粒子が絡み合いながら隙間を

保っています。地震などで強い揺れが発生すると、砂同士が水中で均一化し、泥のように柔らかくなります。その結果、建物が傾いたり、地中構造物が浮き上がったりします。



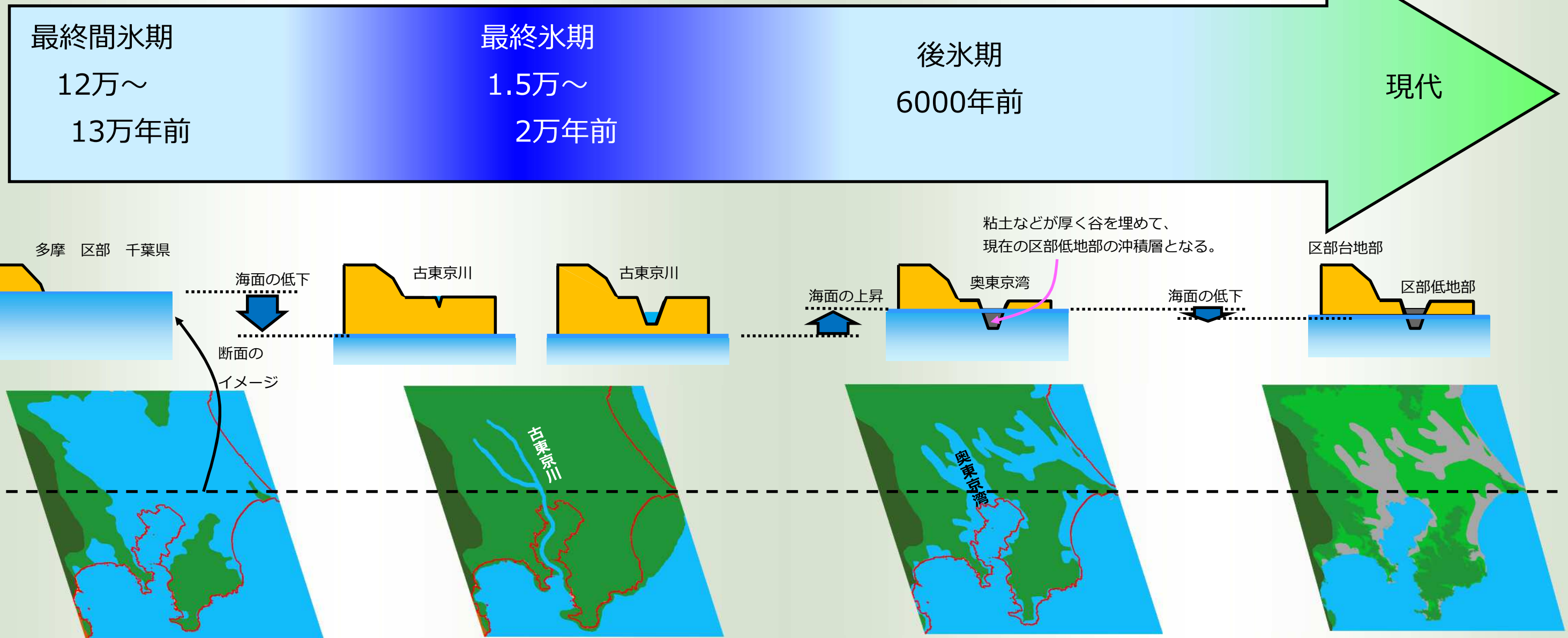
地下水の過剰揚水にともなう水圧低下と粘性土層の収縮イメージ

一方の砂や石（礫）でできた層は、土粒子の間に隙間があり、水が自由に動ける状態にあります。この状態で帯水層である砂層から大量に地下水が汲み上げられると、砂層の地下水位が急激に低下します（水圧低下）。この時、砂層に接している粘性土層では、水は移動しに

くいため、なかなか水は出てきませんが、地下水位の低下が長く続くと、粘性土層から少しずつ水が砂層へ移動します（粘性土層からの水の絞り出し）。粘性土層の体積を支えていた水の粒がなくなることで、残った板状の粘性土層の粒子は、重なるように折りたたまれ

て固く締まった状態になります。いったん収縮した粘性土層はその後地下水位が回復しても元のように粒子の間に水の粒が戻ることはないため、沈下した地盤は収縮したまま回復することはありません。

関東平野の地形の成り立ち



① 氷期と氷期の間（最終間氷期）で、現在よりも海水面が高かったと考えられます。東京は西側の山地のみが陸となっており、山地から河川を通じて運搬、供給された礫・砂・泥が、海底へと堆積していました。

② 最終氷期に入り、寒冷化に伴って海水面が大きく低下して、現在よりも広範囲に陸が広がっていたと考えられています。古東京川（古利根川や古中川）では、この間に河川が地面を削り取り、現在の埼玉東部～東京東部～東京湾にかけて深い谷が形成されました。

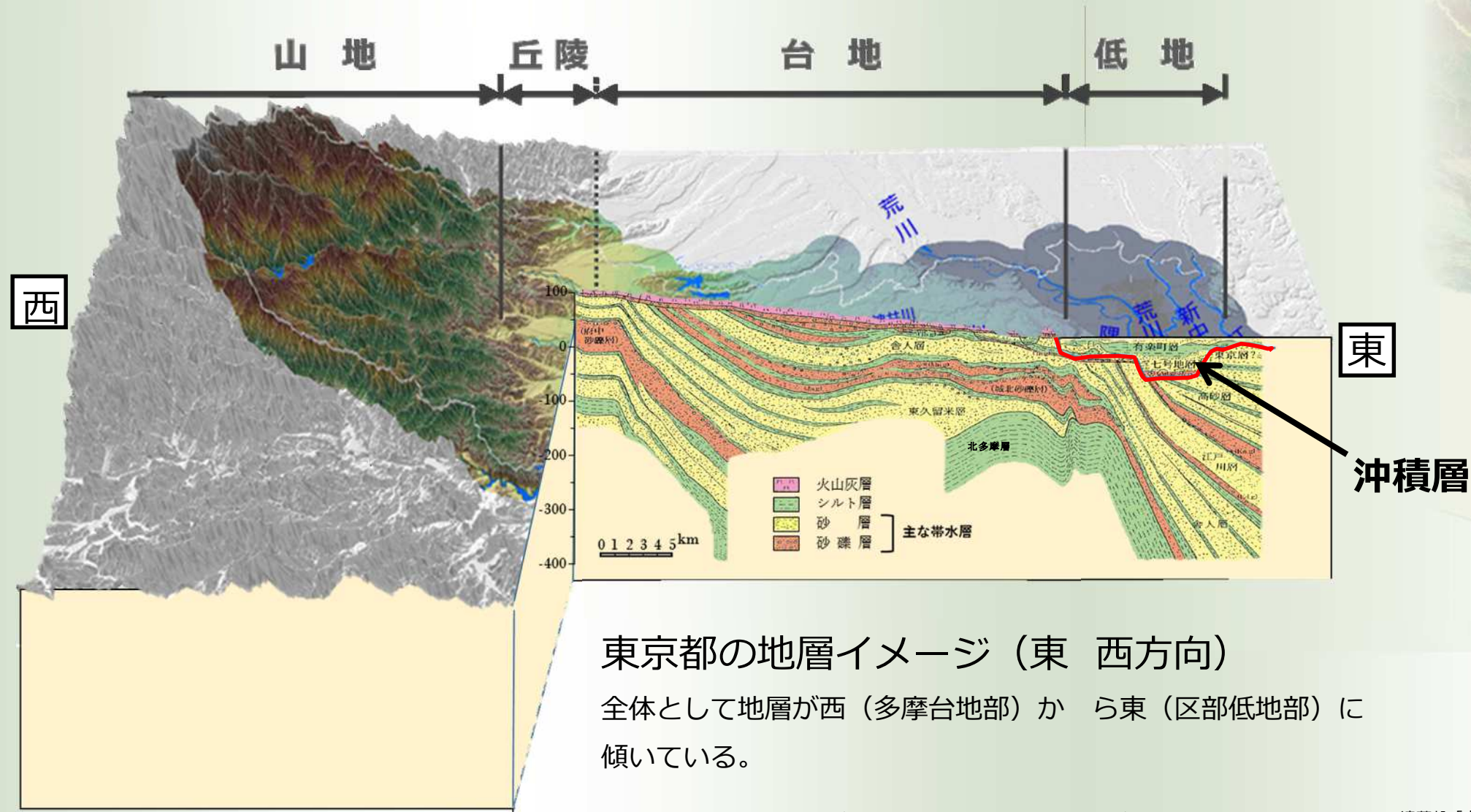
③ 氷期が終わり、温暖な気候により海水面が上昇しました。奥東京湾（古東京川の跡）の水面下では、上流から流れてきた粒子の細かい粘土やシルトなどが、深い谷を埋めるように堆積しました。

谷を埋めた粘土、シルト層は沖積層と呼ばれ、現在の東京の区部低地部に厚く堆積しています。

④ 縄文時代以降は海水面が低下して、水を含む軟らかい堆積物を主体に構成された低地も陸となり、現在の地形が形作られました。

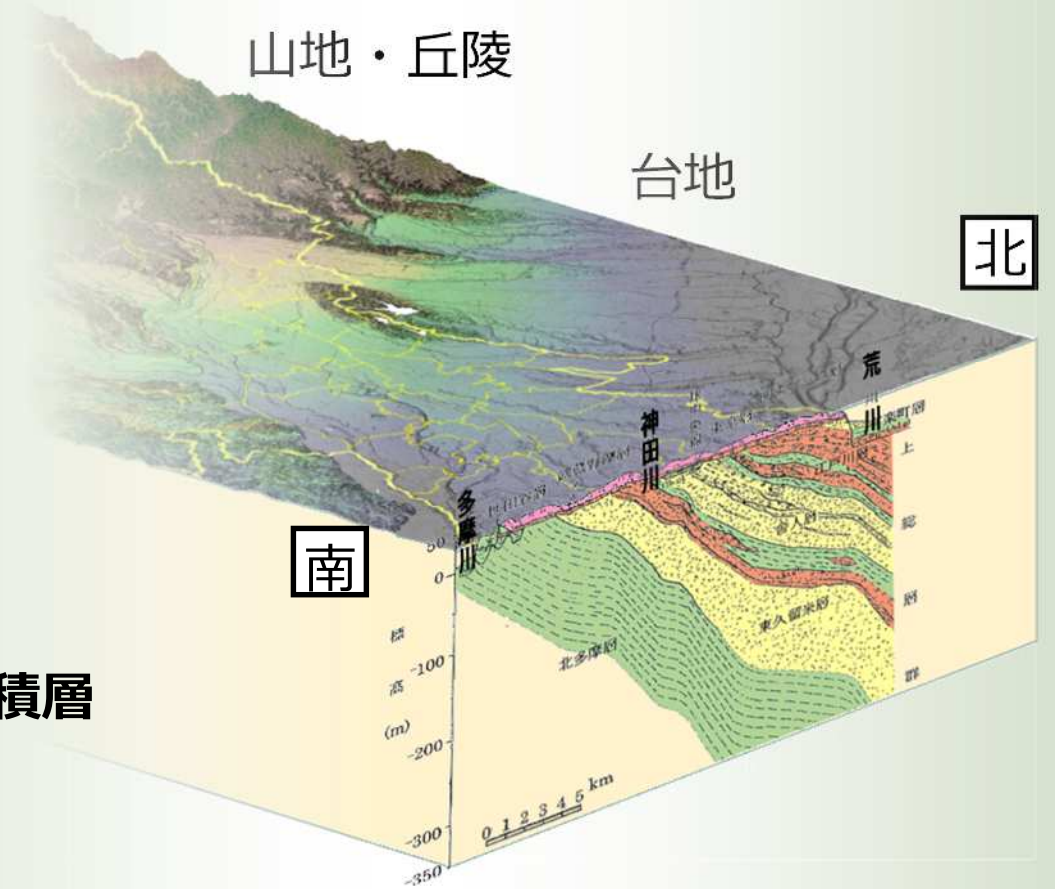
こうして、谷を埋めて平らになった区部低地部と古東京川などに削られなかった区部台地部との境目に崖が残りました。

東京の地質



東京都の地層イメージ（東西方向）
 全体として地層が西（多摩台地部）から東（区部低地部）に傾いている。

垂直方向に比べて水平方向の縮率が大きいので、西から東への傾斜一見に見えるが実傾斜は最大1度である。及び南から北への傾斜は、



東京都の地層イメージ（南北方向）
 南北方向では、地層が南（神奈川県側）から北（埼玉県側）に傾いている。

遠藤毅「東京における深層地下水の研究-地下水利用の今後に向けて-」(2010)^[5]より引用、一部着色・加筆
 断面図のうち、深部の白抜き箇所は調査データがなく未解明な部分

東 京都を含む関東平野の地盤は長い年月をかけて様々な堆積物が幾重にも積み重なることで形成されています。古い地層ほど、繰返し地殻変動や断層運動の影響も受けてい

るため、地下深部では、地層の傾斜が急になっていると考えられています。

また、同じ時代でも、地域ごとに堆積状況が異なっており、広域にわたる地質状況を詳細に調べるには、

地域ごとの地層の積み重ね方を調べ、それらと比較する必要があります。

西の台地部から東の低地部にかけての断面を見ると、地層は西から東に傾いていることがわかります。

低地は古利根川などにより削られ、不連続になっています。

地層を南北に切ると、南から北にかけて傾いていることがわかります。東京の地下水はこの西から東、南

から北にかけて傾斜した地層の中を流れています。

このように、東京都の広域にわたって各層が連続している様子がうかがえます。

このうち、低地一帯に広

く分布する沖積層は、粘土質でもともと多く水を含んでいるため、柔らかく、地下水の過剰な揚水によって内部の水分が絞り出され、不可逆的な収縮を起こすことが分かっています。

東京の不圧地下水

不圧地下水は、地下浅く存在する地下水で、上に難透水層が存在せず、雨水がしみ込むことで自由に水面が変化するという特徴があります。

不圧地下水の一部は、河岸段丘の崖などから湧水として地表に湧き出し、河川水へと姿を変えるなど、地域の水循環をつなぐ大切な役割を担っています。

不圧地下水の分布深度は、浅井戸内の水面や湧水のある地点の標高などから推測することができます。それらのデータを複数個所で集めて、地図の上に等高線を描くと、地下水位の等高線を作ることができ、地下水の流れを把握することができます。

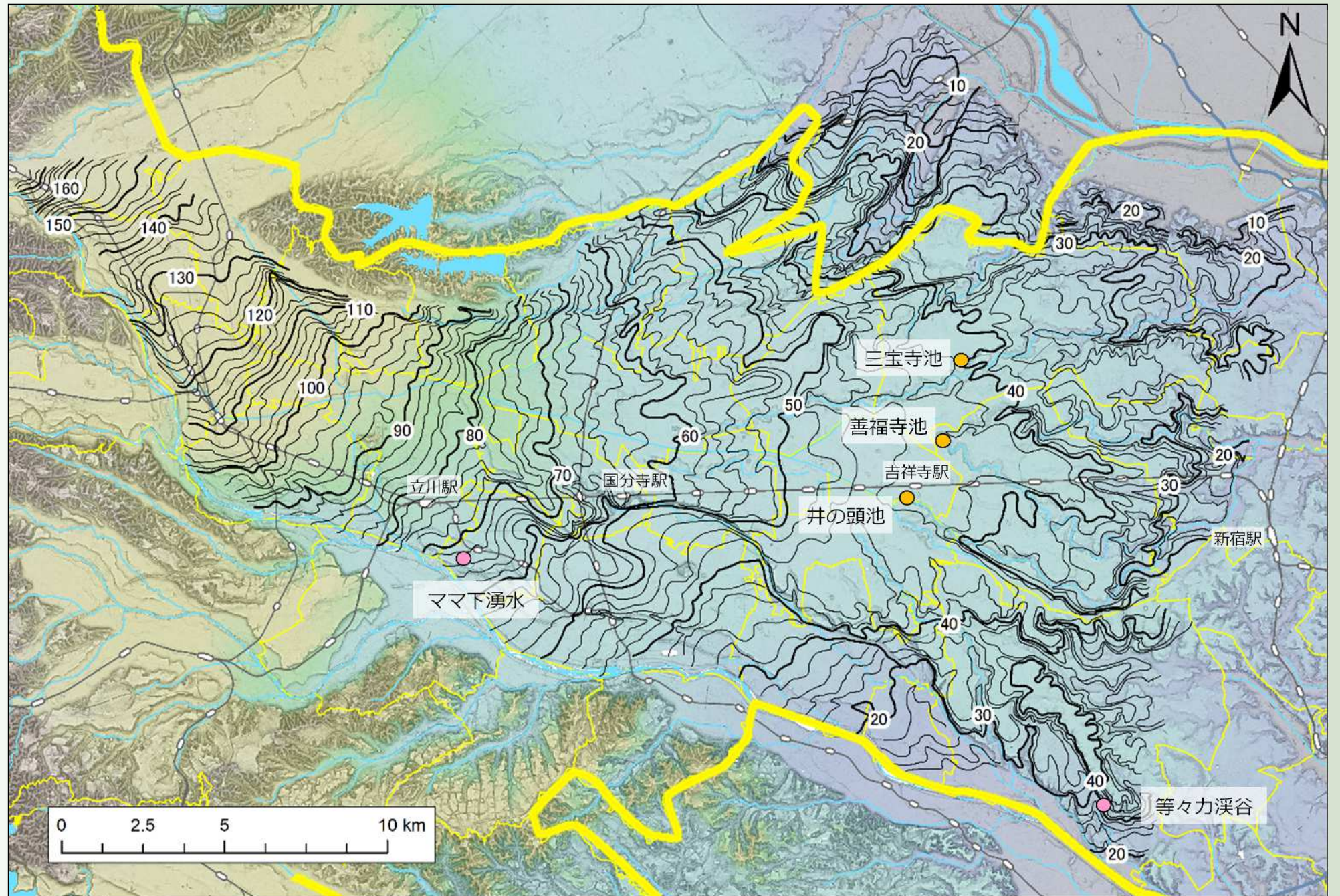
地下水は、この地下水位等高線と直交する方向に高い方

から低い方へ流れていますので、武蔵野台地の地形に調和するように、大まかには西から東へと扇状に広がるように地下水が流れていると考えられます。

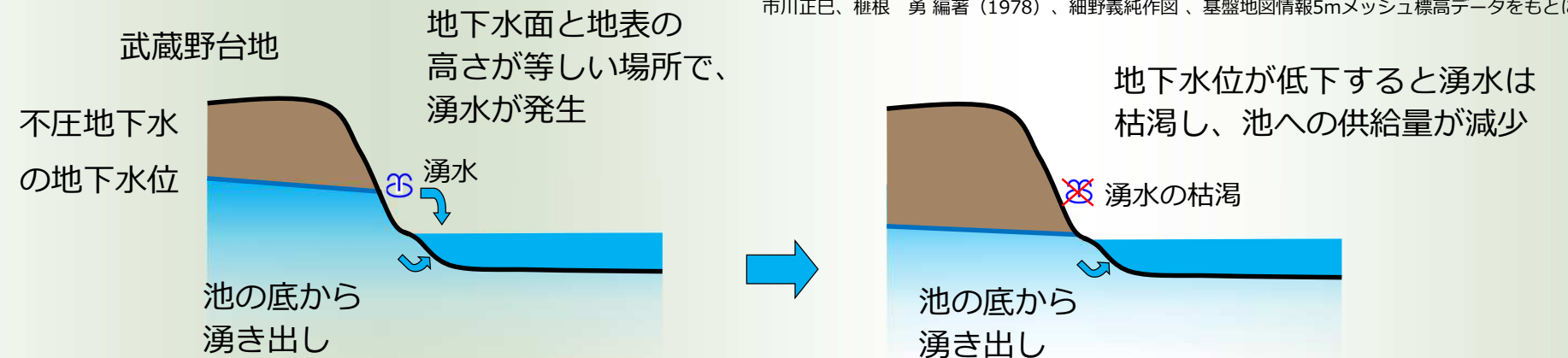
地下水面と地表の高さが等しい場所では、地下水が湧水として湧き出していて、都内にはママ下湧水や、等々力渓谷など崖線から湧き出している湧水が多数存在しています。

武蔵野台地では、昭和30年代半ばまでは井の頭池、善福寺池、三宝寺池など、扇状地の地形を反映した湧水群が存在していましたが、地下水位の低下により、いずれもほぼ枯渇してしまいました。

現在、これらの池には被圧帯水層から汲み上げた井戸水が補給されています。



武蔵野台地における不圧地下水の地下水面等高線図 (S49.8月)
市川正巳、榎根 勇 編著 (1978)、細野義純作図、基盤地図情報5mメッシュ標高データをもとに作成



東京の湧水

湧水は、昔から人々の暮らしと密接に関係しています。野川上流部、黒目川などの湧水周辺では、縄文時代の生活の跡である遺跡が多数発掘されています。また、三鷹市の井の頭池などは、江戸時代に神田上水へと導かれ、貴重な飲用水源として利用されていました。



ママ下湧水 (国立市)

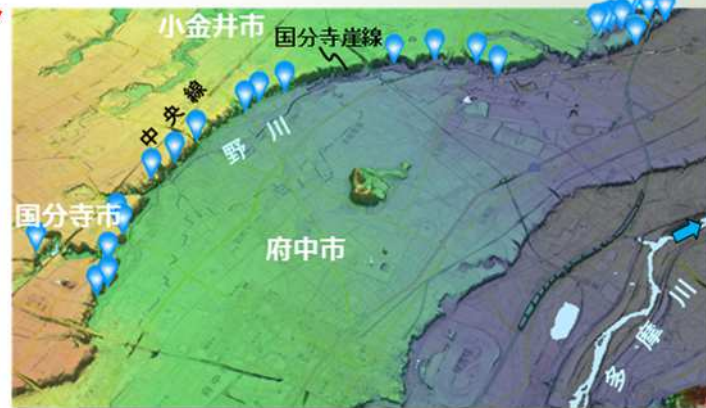
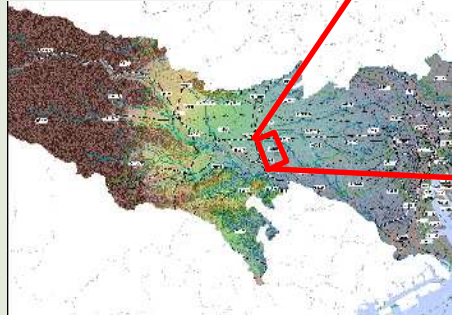
また、社寺とも関係が深く、天平年間に建設された調布市の深大寺は水神と関わりがあり、国分寺市の史跡国分寺は豊富な湧水の場所に建立されたといわれて

います。世田谷区の等々力不動尊など、湧水そのものが信仰の対象とされる場所も都内に数多くあります。現代においても周辺の自然環境とあいまって、湧水

は人々に潤いと安らぎを与え、身近な生き物にふれあえる場として、都市において貴重なオアシスとなっています。

国分寺崖線と湧水の分布

国分寺崖線を境に標高が異なります。崖沿いには、湧水が湧き出している箇所（青い点）があり、崖沿いの野川に流れています。



国土地理院ウェブサイト (電子国土WEB) を加工して作成

東京の湧水

東京の湧水は、武蔵野台地や、多摩川の支川である秋川、浅川流域に多く見られます。東京の湧水は、湧水地点周辺の地形や湧出形態から、「崖線タイプ」と「谷頭タイプ」の2種類に分類することができます。

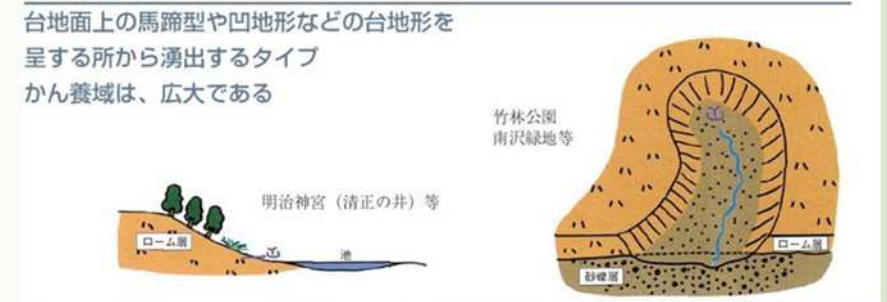
崖線タイプの湧水は、台地の縁や段丘の崖下において、地下水が湧き出すものです。

谷頭タイプの湧水は、練馬区の区立大泉井頭公園の池、善福寺川は杉並区の善福寺池、石神井川は練馬区の石神井池や三宝寺池、神田川は武蔵野市の井の頭池など、都内の中小河川を上流側にたどった源流で見ることができます。

崖線タイプ



谷頭タイプ

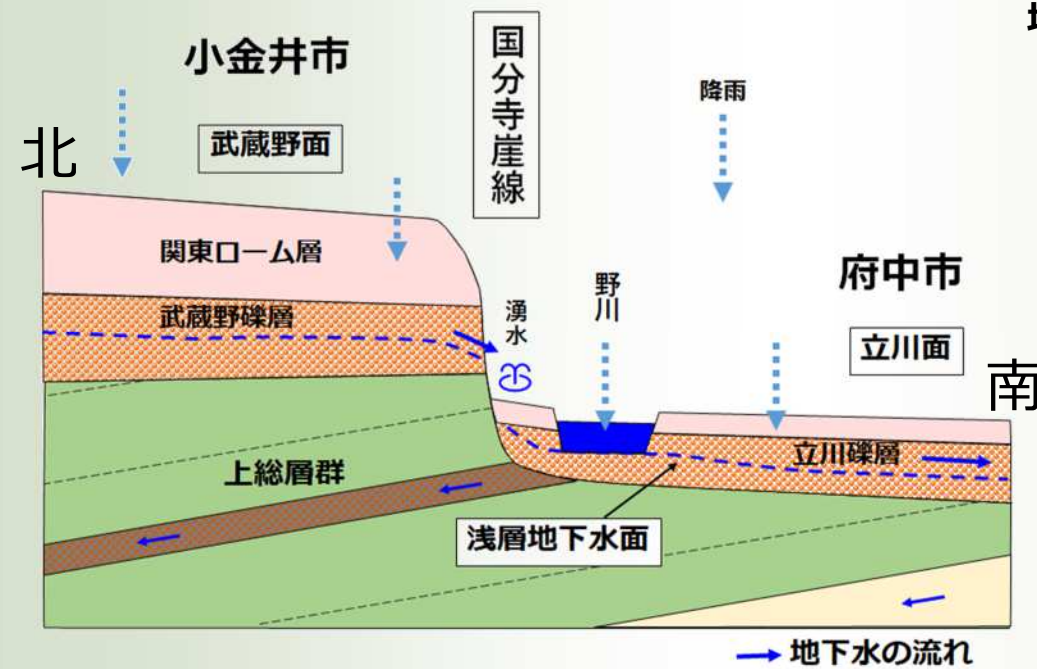


東京都環境局発行「東京の湧水マップ (平成30年度調査) より」

地下水と河川水との交流

武蔵野段丘と立川段丘が隣り合う野川付近では、崖下から湧き出した湧水が河川水を経て、再び地下水として地下に浸透するような、複雑な流れがあることも知られています。

このように、地下水は水循環において、雨水と地表水 (河川水、湖沼水、海水) をつなぐ重要な役割を担っています。



野川における地下水と河川水との交流イメージ

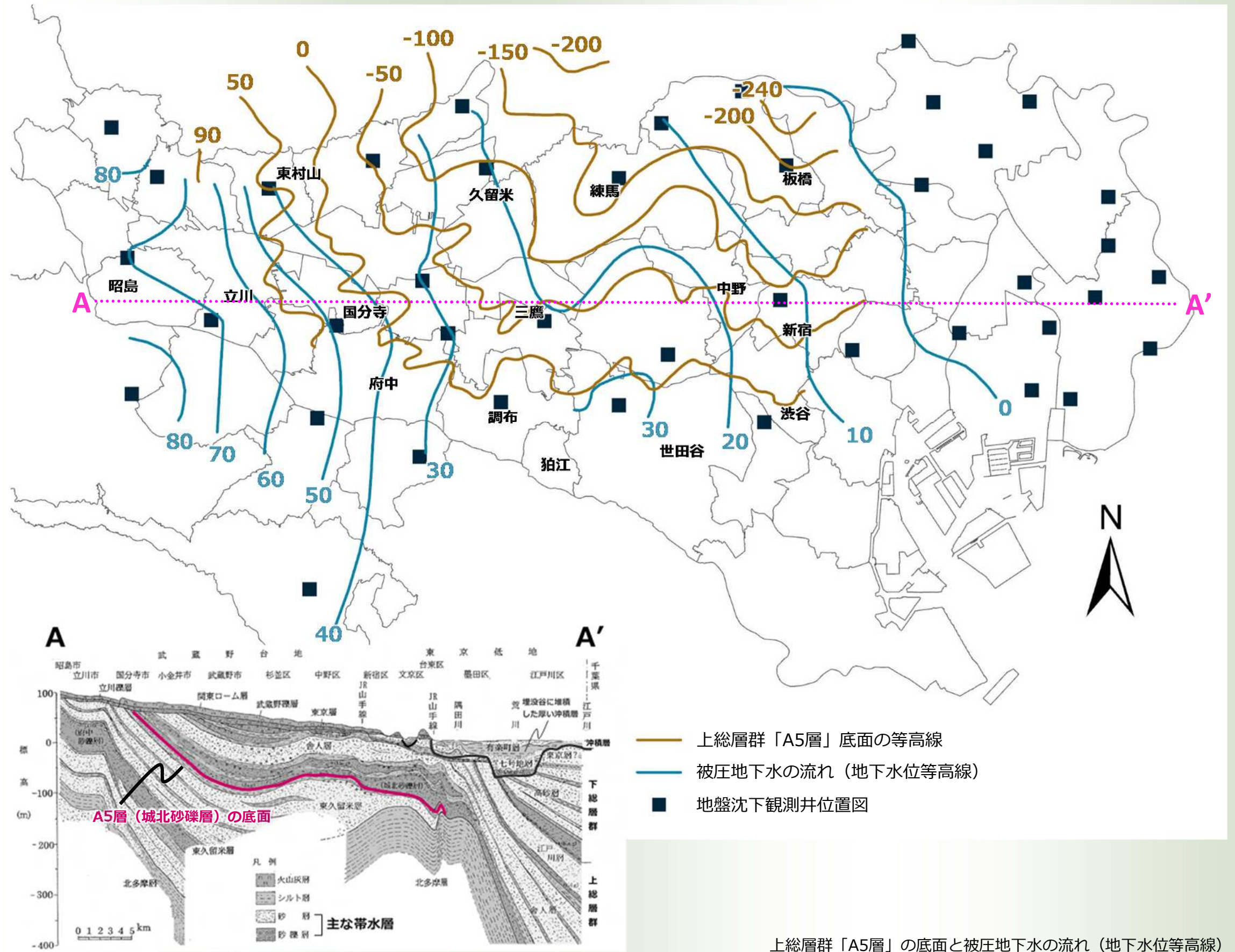
川合・川島・国分, 「河川の水量確保等に関する検討」の成果と課題, 都土木技術支援・人材育成センター年報, 2014. を参考に作成

東京の被圧地下水

不圧地下水は、武蔵野台地の地形に沿って扇状に流れていることを説明しましたが、ここでは、それよりも地下深くに存在する被圧地下水に着目してお話しします。

東京都内で実施された地質調査の結果から、被圧地下水を育む帯水層は、全体として南西から北東方向へ傾斜していることが分かっています。右図は、被圧地下水の帯水層である上総層群中のA5層（おおむね城北砂礫層と同じ地層）という地層の底面の分布と、被圧地下水の平均的な地下水位等高線を重ねたものです。

本図からは、帯水層が全体的に北東側へと傾いていることや、三鷹市から練馬区にかけての谷筋で、被圧地下水の地下水位も谷となっている点が一致しており、武蔵野台地における被圧地下水も、おおむね地層の形状に影響を受けていると考えられます。実際には被圧地下水の流れは、地層以外にも揚水など社会活動の影響も受け、複雑な挙動を示します。



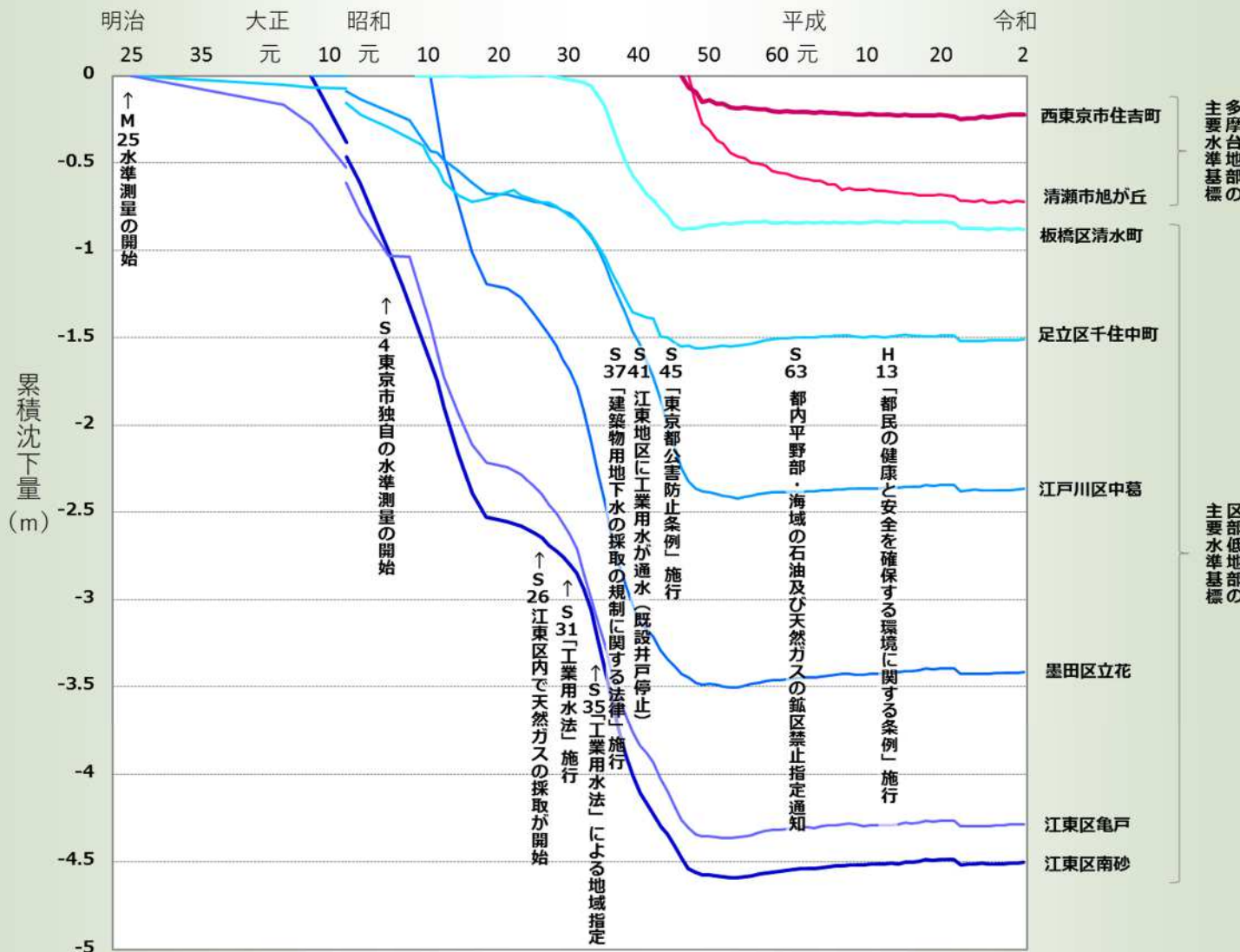
上総層群「A5層」の底面と被圧地下水の流れ（地下水位等高線）
 上総層群「A5層」：遠藤毅（2010）の地質断面に新藤静夫（1968）の「A5層」を加筆し、「A5層」の底面標高分布を図示
 被圧地下水の地下水位等高線：東京都土木技術支援・人材育成センター「令和2年 地盤沈下調査報告書」を参考に作成

東京の地盤の状況の変遷

かつて甚大な地盤沈下を起こした東京都ですが、最近の地盤変動量をみると、年間2cm以上沈下している地域はなく、全体として安定した状態にあります。

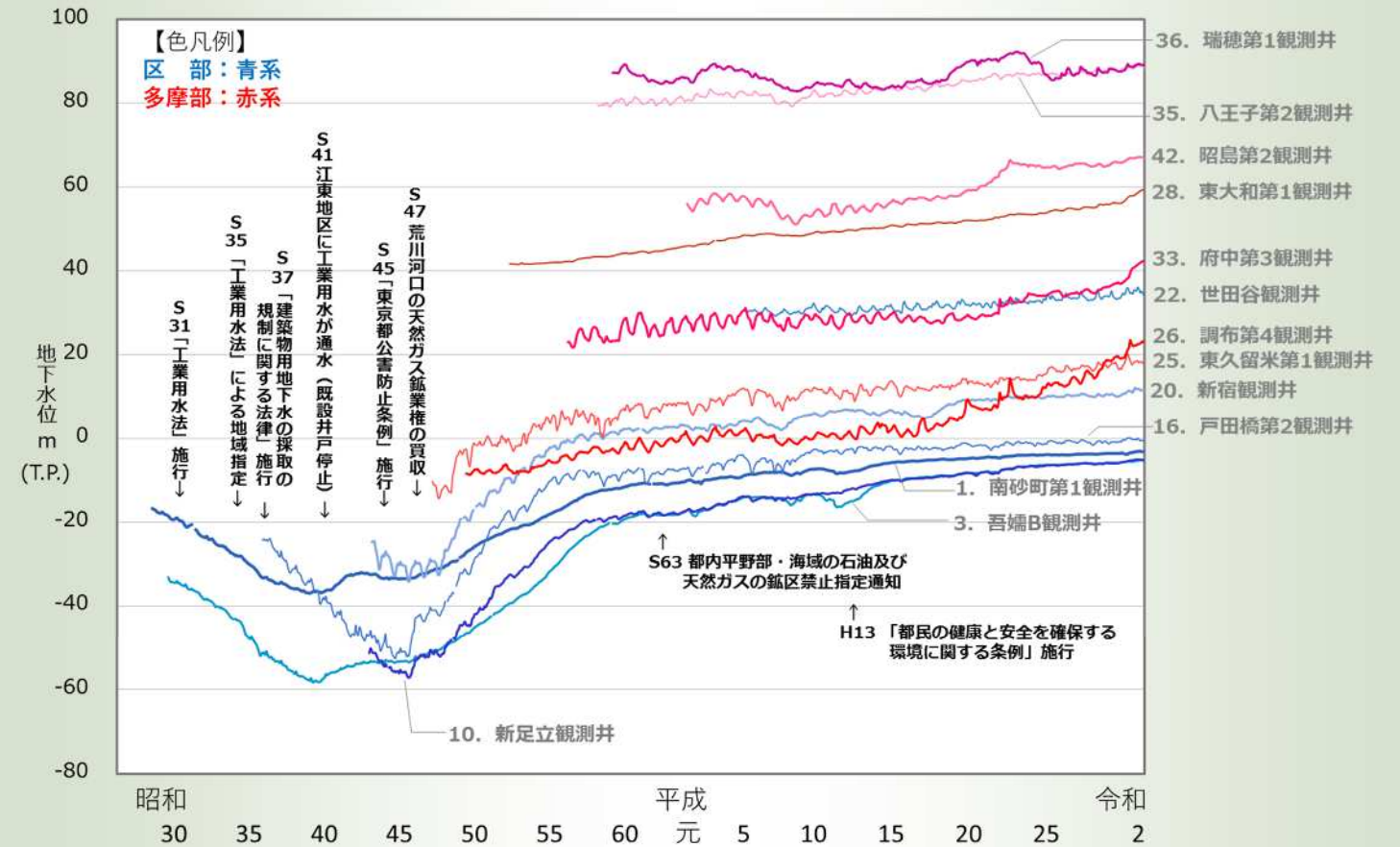
過去地盤沈下が顕著であった昭和36年～46年（昭和43年には過去最大年間沈下量23.89cmを観測）と比較すると、現在では明らかに地盤沈下は落ち着いています。昭和51年以降、5cm以上沈下

する地域はみられなくなり、地盤沈下は次第に沈静化してきています。しかし、地盤沈下が沈静化して以降も、縮んだ地盤は元には戻らず、現在の地盤高は沈下したままです。



都内各地の累積沈下量

東京都土木技術支援・人材育成センター「令和2年 地盤沈下調査報告書」を参考に作成



主な観測井の地下水位変動

東京都土木技術支援・人材育成センター「令和2年 地盤沈下調査報告書」を参考に作成

東京の地下水位の変遷

令和2年の調査結果では、足立区北東部で約T.P.-10m（T.P.:東京湾平均海面）と最も低く、この地域から西部に向かって次第に高くなり、多摩地域の八王子市や瑞穂町付近で約T.P.+80mとなっていま

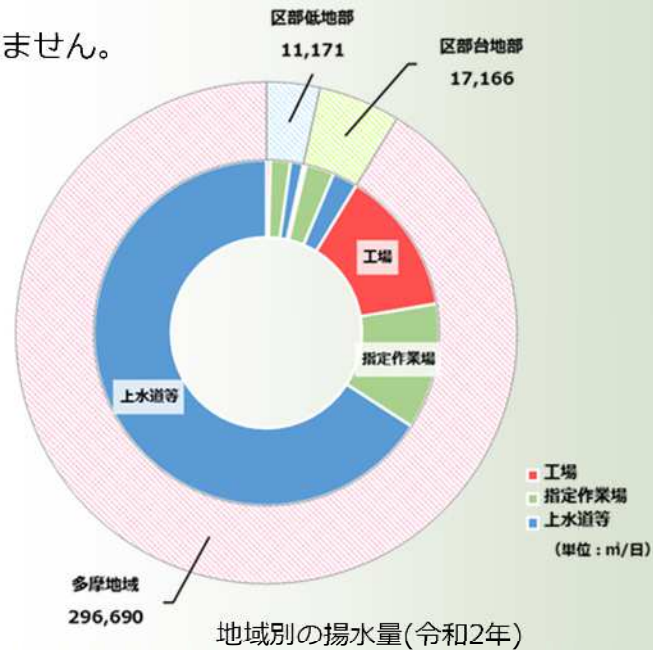
す。この傾向は前回の5年前の報告書からさほど変化はありません。かつての大量の地下水揚水時代から段階的に規制をかけてきたことで、地域によって差はありますが、地下水位は回復しています。

昭和46年頃からの被圧地下水の上昇量は、大きいところでは50m高くなっています。ここ数年の地下水位は安定し、地下水位の上昇がほぼ見られなくなった観測井も出てきています。

東京の地下水揚水量の変遷

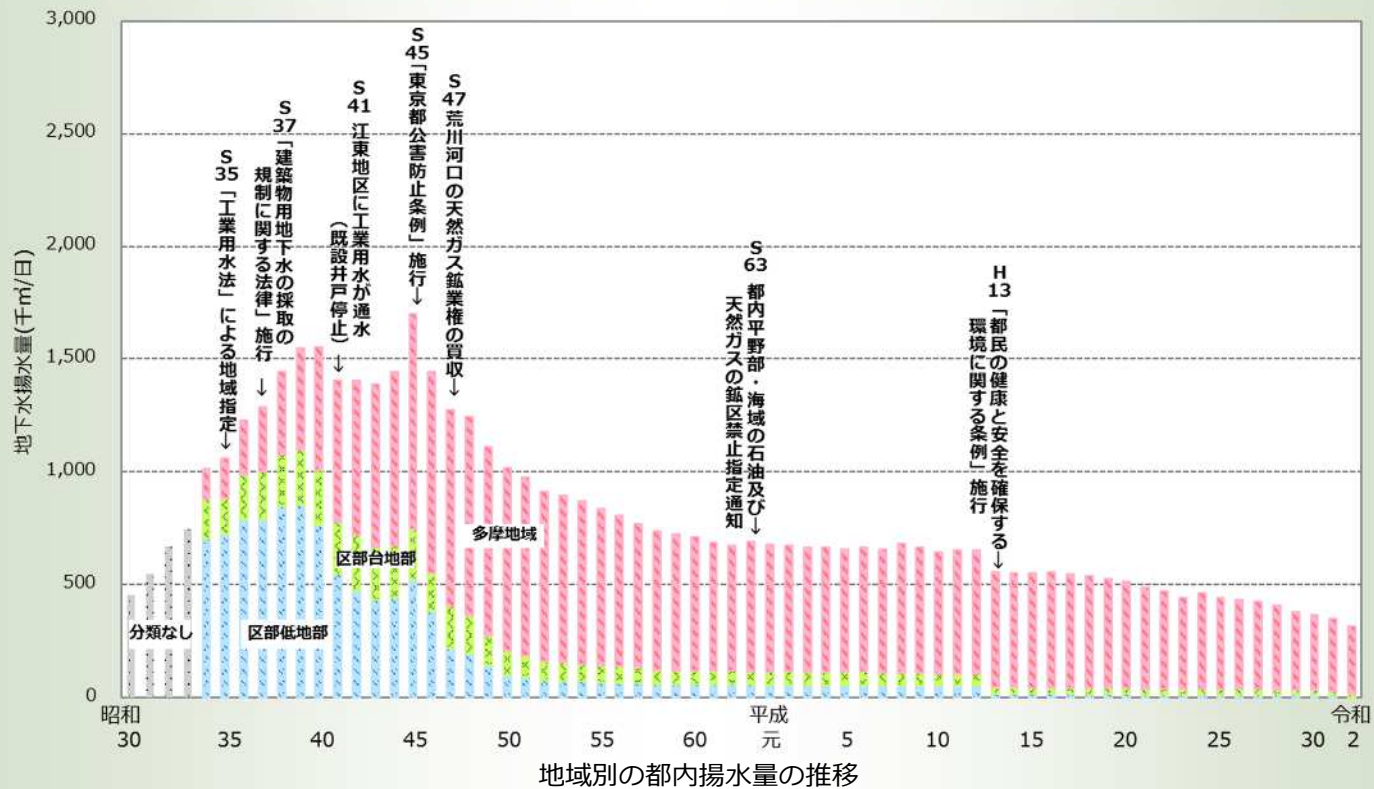
都内の揚水量の変遷をみていきますと、かつては区部低地部での使用が多くを占めていました。しかし、揚水規制を経て東京都内の揚水量全体が減少して以降、その割合の大部分を多摩地域が占めるようになってい

ます。多摩地域が占め、その多くを上水道等に利用しています。この傾向は例年と同様で、変化していません。



東京都環境局「令和2年 都内の地下水揚水の実態(地下水揚水量調査報告書)」

令和2年の調査結果では、揚水量の90%以上を多



地域別の都内揚水量の推移

「令和2年 都内の地下水揚水の実態(地下水揚水量調査報告書)」を参考に作成

地下構造物の浮き上がり

地下の構造物には地下水の浮力が働くことがあります。そのため、地下の構造物はあらかじめ地下水による浮力を受けても大丈夫なように設計・建設されています。

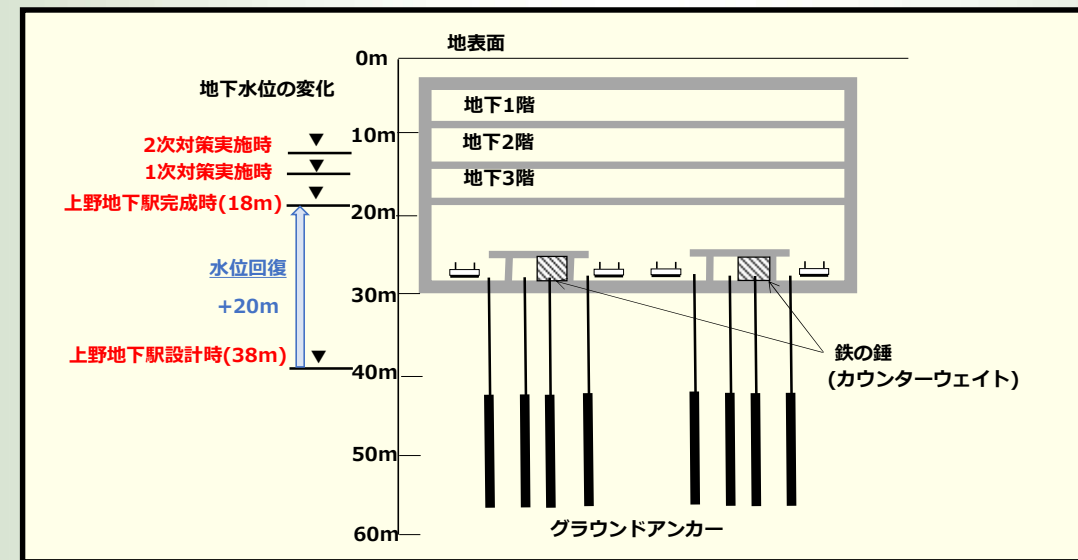
東京駅の総武快速線や上野駅の東北新幹線の駅は地下にあり、容積が大きく、かつ上部に構造物がないという特殊な舟形の構造をしています。これらの駅は、過剰揚水により地下水位が低下していたところに設計・

建設されましたが、駅の建設後、地下水の揚水規制により周辺の地下水位が上昇、駅が浮き上がる可能性や、駅の床が損傷する可能性が生じてきました。

上野地下駅では、設計時には地下水位は地下38mでしたが、完成時には地下水位は20m上昇し、地下18mとなっていました。その後も地下水位は上昇したため、平成7(1995)年に1次対策として、鉄のおもり(カウンターウェイト)を

置いて駅を重くする対策をとり、平成14(2004)年に2次対策として、グラウンドアンカーで駅を地面に固定する対策がとられました。同様に、東京地下駅でもグラウンドアンカーによる固定が行われました。

現在も地下水位の回復傾向は続いていますが、これらの対策によりいずれの駅も安全に利用できています。



上野地下駅周辺の地下水位の変化と対策イメージ

公益社団法人 日本地下水学会「地下水・湧水の疑問50(みんなが知りたいシリーズ13)」を参考に作成

コラム:地盤沈下対策や調査研究に従事された方々の記録

昭和40年代は、江東区や江戸川区で年間20cm以上の激しい地盤沈下がみられ、沈下範囲が多摩地区まで広がった時期です。この地盤沈下最盛期に地盤沈下対策に奔走していた元東京都職員から、当時の東京の状況などをヒアリングしました。



昭和42年～45年
首都整備局 総合計画課
防災対策係
昭和45年～48年
公害局 規制指導部 規制基準課
地盤沈下係
昭和48年～49年
公害局 規制部 特殊公害課
地盤沈下対策係



昭和40年～44年
首都整備局 総合計画課
地盤沈下対策係
昭和44年～46年
<練馬区企画室出向>
昭和46年～50年
公害局 水の循環利用方策係



昭和42年～
建設局土木技術研究所地象部地盤沈下研究室に配属され、地盤沈下対策に関する調査研究を開始。その後長期にわたり、東京の地形・地質、地下水の状況等に関する調査、研究に従事。

◆ヒアリングした都庁OB(昭和40年代の職歴)◆

Q. 昭和40年代の地下水の保全、利用を巡る世論について教えてください。

W氏：梅雨、台風時の内水氾濫※の発生や、年10数cmもの地盤沈下状況の調査の発表などがあると、対策の遅れや、揚水規制の強化の必要性などを指摘するマス

コミの論調が続いていた。一方、産業界からは地下水は有効に利用すべきとの根強い反対意見があった。
(※大雨の際等に、地域の水はけが悪化し、建物や土地・道路が水につかってしまうこと。)
F氏：当時、深層の地下水は、清澄な水資源として有効に活用すべきと考えられ

ていて、科学的な根拠や算出方法が見いだせるなら、有効な水資源として活用すべきであろうと言われていた。しかし、ひとたび沈下した地盤は、永久に復元不能なことを肝に銘じておく必要がある。



写真1：河川の両岸とともに橋が沈下し、船舶の航行が困難になった (昭和35年頃 綾瀬川)

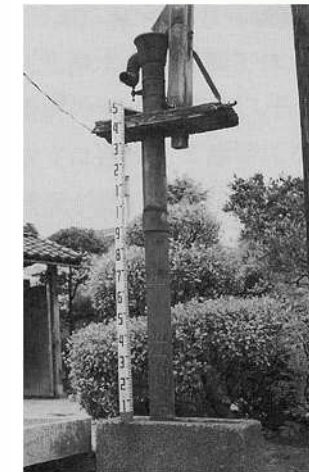


写真2：地盤沈下による井戸の抜け上がり (昭和30～40年代 葛飾区)

Q. 地盤沈下の被害実態について、当時のエピソード等を教えてください。

W氏：橋の沈下により、船が川を航行できなくなる障害が見られた (写真1)。

F氏：地下水を手押しポンプで汲み上げていた井戸が、最終的に1.5m近く抜け上がる事例もあった (写真2)。また、不同沈下と呼ばれる、不均一な地盤沈下も発生して家が傾き、障子やふすまが、閉めたとたんにするすると動き出し、ぱちんと音を立てて戻ってしまう状況を見せつけられた。その他にも、民家が傾

き、住民にめまいなどの健康障害が発生、生活できなくなった事例など、とにかくいろいろな障害が出ていた (写真3)。

E氏：建設局による水害経験・地盤沈下の都民の意識調査の調査結果では、ゼロメートル地帯の中心地である江東区や江戸川区では、住民の9割が水害・地盤沈下への危機感を持っていた。

Q. 次世代へのメッセージをお願いします。

F氏：地下水の保全と利用の両立は、天然の循環資源である「水」を都民が、否日本人が、否全人類がいか



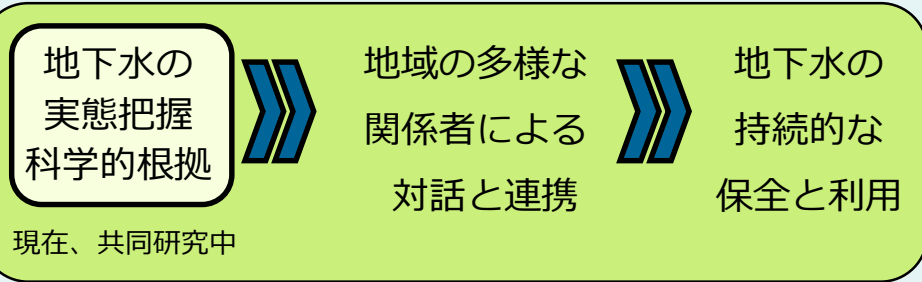
写真3：閉まらなくなった小学校の扉 (昭和38年 北区)

に負のダメージを起こさず、スマートにコントロールするかにかかっている。

E氏：この広い平野部一帯の地下水について、“地域ごとの安全揚水量”をどのように算出するのか考えあぐねている。この命題解決の前にある課題を一つ一つ解決し、一步一步進むより方策は無い。

第4章 最新の研究成果

持 続可能な地下水の保全と利用には、地下水が、どのような状態にあるのかを把握する「実態把握」が欠かせません。そのため、東京都では、大学との共同研究を実施しています。

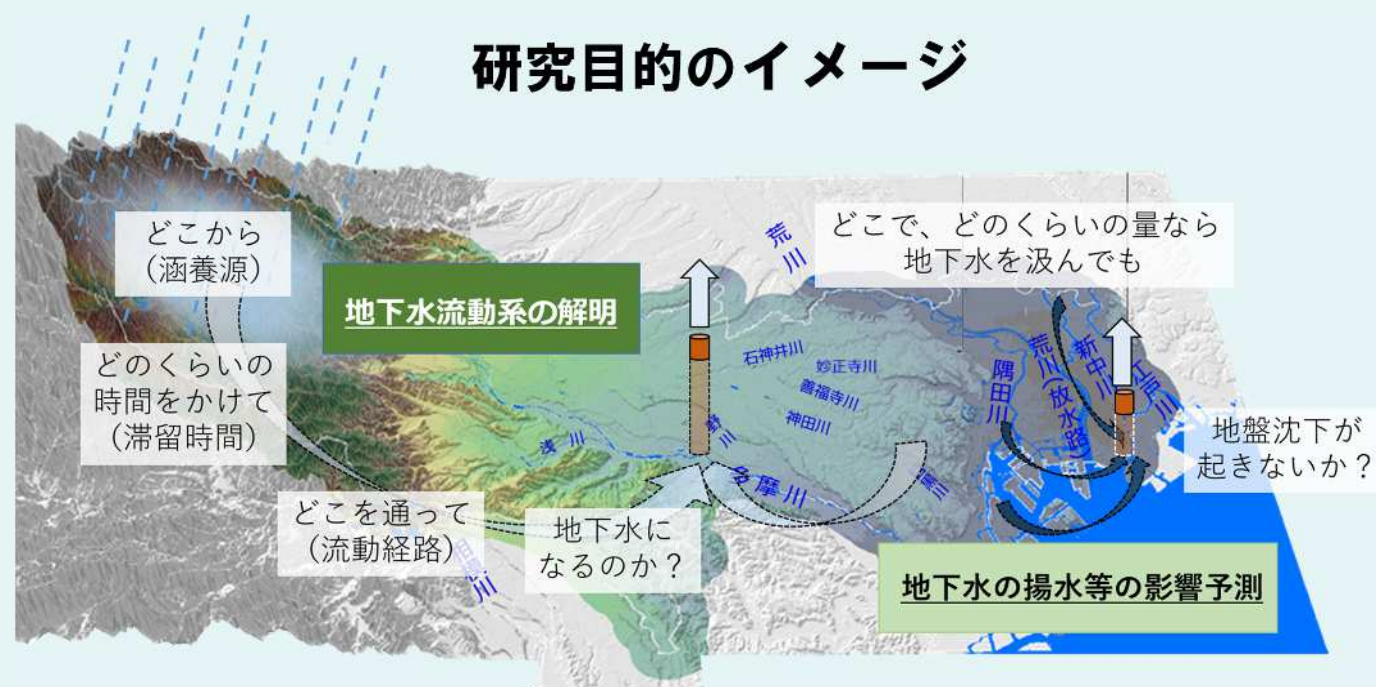


研究テーマ1：地下水流動系の解明（筑波大学との共同研究）

- 地下水が、どこでしみ込み（涵養源）、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）を解明する。

研究テーマ2：地下水の揚水等の影響予測（東京大学との共同研究）

- 地下水を、どこで、どのくらい汲んだら、どこに影響があるか（ないか）を予測するシミュレーションモデルを構築する。



地下水流動系の解明 ～地下水の履歴書を作るには～ (筑波大学との共同研究)

○流動系の解明とは、どのような研究なのでしょうか？

辻村先生：地下水の実態を把握するためには、どこでどのような水が地面にしみこみ、どこを、どのくらいの時間をかけて流れて来るのかを知ることが必要です。雨水や河川などの地表水が地下水に付加されること、すなわち地下水への水のインプットを“地下水の涵養”といいますが、地下水の涵養起源・涵養場所、流動経路、そして涵養されてからの経過時間（滞留時間といいます）を明らかにすることができ、人の履歴書と似ています。そう、**地下水の履歴書**をつくることで、地下水の実態を知る上で必要なのです。

○地下水の履歴書は、なぜ必要なのでしょうか？

地下水に限らず、水に関わる問題は、必ず水循環の上流側、かつ過去の時点において発生したものです。例えば、いま私たちの足下にある地下水が、汚染されているとします。この地下水は、上流のどこかで、過去において汚染物質が加わったため現在汚れています。したがっ

て、汚染の原因を解明するためには、この地下水がどこから、どこを流れてきたかを明らかにしなければならないのです。

また、汚染された地下水がきれいになった後も、足下の地下水をきれいに保つだけではなく、地下水の出身地や経路も含めて、さらに流れるのに必要な時間をかけて、保全していく必要があります。

このように、持続可能な地下水の保全のために、地下水の履歴書は、必要不可欠なのです。

○地下水の履歴書は、どのようにつくりますか？

水は、通常無色透明で、見ただけでは、区別が付きません。出身地や流れの経路が異なっても、地下水の見た目は、大きくは変わらないのです。

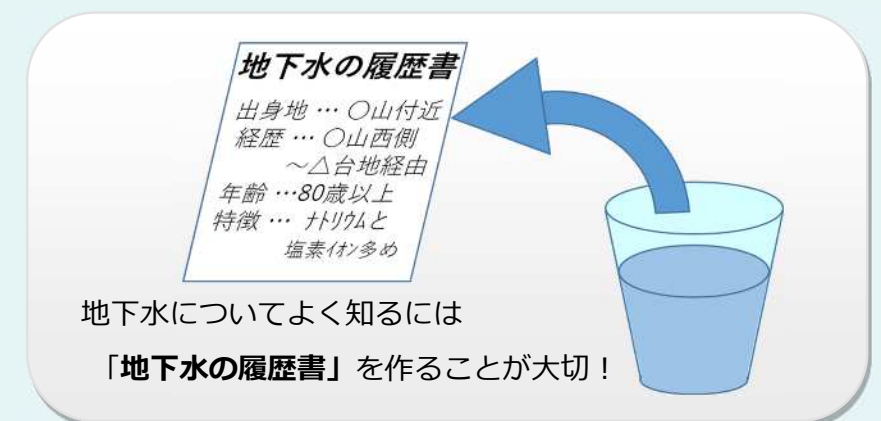
しかし、化学の目で水を見る



と、その違いを区別することができます。例えば、海岸沿いに降った雨が起源になっている地下水は、塩分の濃度が高い特徴があります。

また、高山地域に降った雨が起源の地下水と、平野に降った雨が起源の地下水とでは、含まれる成分が異なります。

このように、地下水の履歴を表す成分のことを、専門用語では“**トレーサー**”とよびます。



○トレーサーにはどのような種類があり、何が分かるのですか？

トレーサーには、大きく分けて2つの種類があります。一つは、“どこに”起源があり、“どこを”通って“流れてきたか”という、“空間の情報”を表すもの、そしてもう一つは、“どの位の時間を”かけて“流れてきたか”という、“時間の情報”を表すものです。

○“空間の情報”が分かるトレーサーは具体的にどのような物ですか？

“どこに起源があるか”、“どこから、どこを”通って流れてきたのか”を明らかにするためには、水分子をつくっている水素や酸素の**安定同位体**や、**水に溶け込んでいる成分**などを主にトレーサーとして使います。

○“安定同位体”とは何ですか？

水の分子は、1個の酸素原子と2個の水素原子からできていますが、このように物質を構成する原子の種類のことを元素といいます。さらに原子は、原子核とその周りの電子からできており、原子核はいくつかの陽子と中性子からできています。この陽子の数によって、元素の種類が決まり、また、原子の質量は陽子と中性子の数の和、これを質量数といいます。この質量数によって表されます。原子の中には、陽子の数が同じで中性子の数が異なるもの、言い換えれば、同じ元素であって質量数の異なる原子が存在し、これらを同位体とよびます。例えば、酸素原子には中性子が8個で質量数が16の同位体 (^{16}O) や、中性子10個で質量数が18の同位

体 (^{18}O) などがあります。

また、水素原子には、質量数が1、2、3の3種の同位体 (^1H 、 ^2H 、 ^3H) があります。これらの同位体は、 ^3H を除いて安定であり、安定同位体とよばれます。多くの水分子は $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ という安定同位体により構成されますが、 $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ や $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ という安定同位体からなる水分子も一定程度含まれ、水とともに環境中を循環します。

安定同位体は、質量数の違いによって性質が少しずつ異なります。そのため、海洋の水が蒸発して水蒸気になるときや、大気中の水蒸気から雨水が作られるときには、質量数の違いにより安定同位体の存在割合に偏りが生じます。例えば、海洋から蒸発した水蒸気が海岸近くの低地から、雨を少しずつ降らせながら、台地、そして内陸の山

地まで運ばれていく流れを考えてみましょう。水蒸気から雨水ができるときには、質量数の大きい同位体からなる水分子の方が先に雨水になりやすい特徴があります。そうすると、海岸近くの低地に降る雨に比べ、内陸の台地に降る雨の方が、質量数の小さな同位体の存在割合が多いという特徴があります。さらに、山地に降る雨水はより質量数の小さい同位体の割合が多くなるという傾向があります。この特徴を利用すると、地下水が海の近くで降った雨由来なのか、山の方で降った雨由来なのかを推定することができます。実際には、水素と酸素における安定同位体の存在割合の差は小さいので、海水を基準としてそこからの差(比)として表現し

ます。これを安定同位体比といい、前述の例をみると、安定同位体比が高いと低地の雨水が、安定同位体比が低いと台地や山地の雨水が起源になっているものと考えられます。

○“地下水に溶け込んでいる成分”とは何ですか？

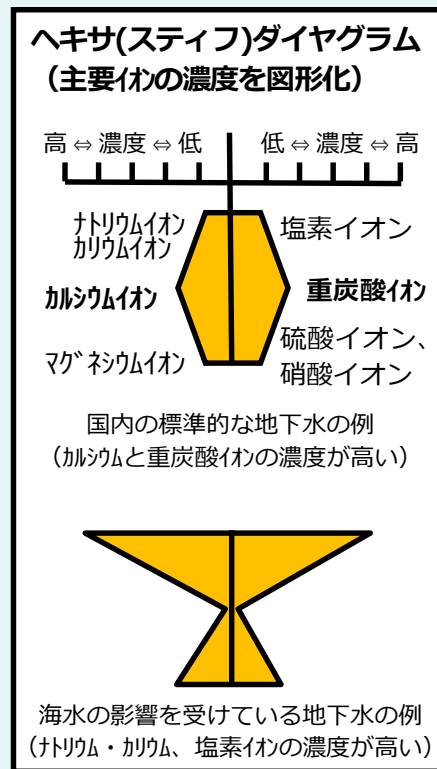
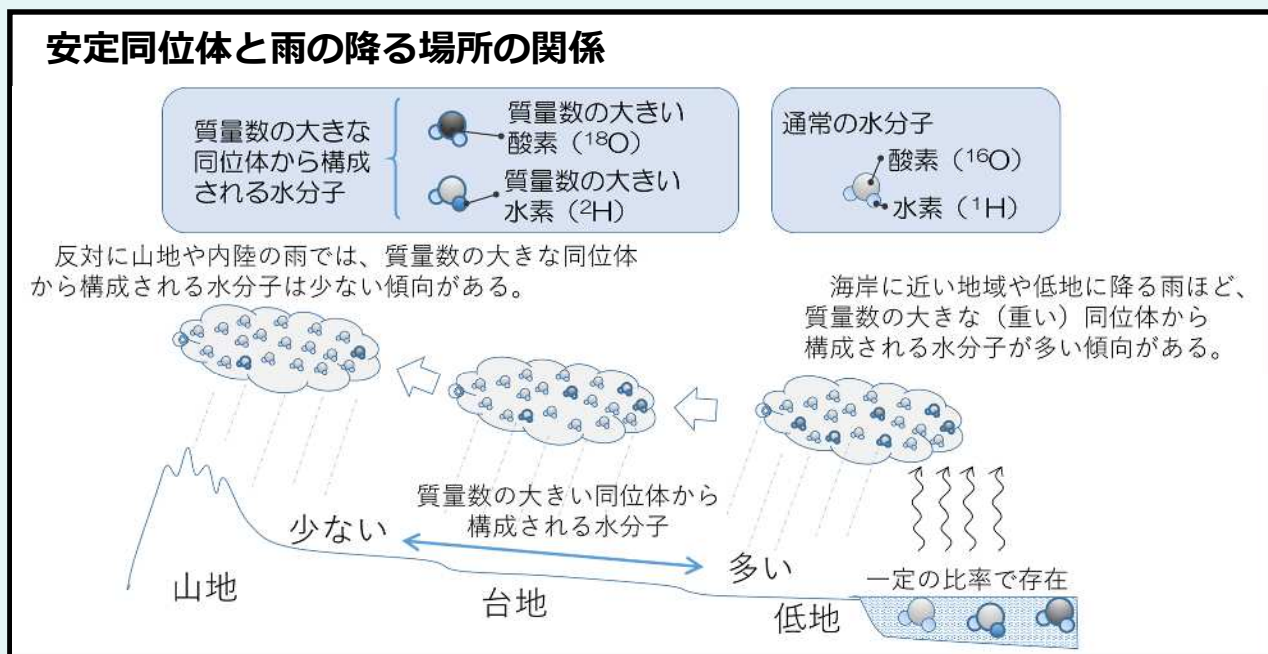
カルシウムやマグネシウム、ナトリウム、塩素などの地下水に溶けて込んでいるイオンなどを利用します。これらの成分は、雨が地表面に浸透し土壌中を降下した後地下水が涵養され、地下水がゆっくりと流動していくうちに土壌や岩石などと反応することにより溶け込んだもので、地下水への涵養が生じた地域や地下水が流動した地域の地形や地質、土壌、植生、気象、人間活動などの場の条件によって、その濃度や成分間の濃度比が変わります。水の各種溶存成分の濃度を六角形に配置してグラフ化したものを、ヘキサ(スティフ)ダイヤグラムといいます。

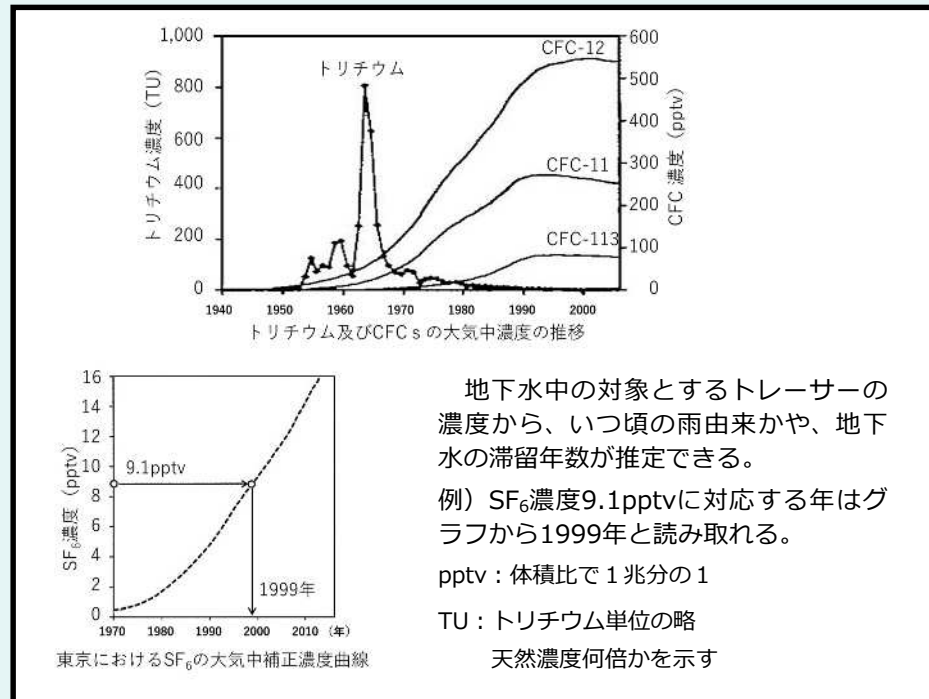
一般に地中の浅い部分を流動した地下水や河川水は、カルシウムイオンと重炭酸イオンの濃度が他の成分に比べ高い傾向があり、ダイヤグラム上では、菱形に近い形を示します。一方、沿岸地域の地下水等、海水の影響がある場合は、ナトリウムイオンと塩素イオン濃度が、他の

成分に比べ高くなり、ダイヤグラムが“あたまでっかち”の特徴を示します。2種類の水で溶存成分の濃度が異なっても、成分間の濃度の比が同程度の場合、言い換えると、ヘキサダイヤグラムの大きさが異なっても、形が類似している場合は、2つの水は起源や流動経路が同じであることが考えられます。このように、溶存成分濃度からも、地下水の“空間の情報”を得ることができます。

○“時間の情報”が分かるトレーサーは具体的にどのような物ですか？

地下水の起源である雨水や大気に含まれる成分や同位体などには、時間とともにその濃度が変化してきたものがあります。濃度の時間変化は地下水の中でも維持されるため、これらの成分が、“時間の情報”をもつトレーサーとして利用されます。主に1950年代から1960年代にかけて北半球を中心に行われた熱核爆発実験により、大気中には水素の放射性同位体であるトリチウム (^3H) が大量に放出され、雨水中に移行しました。このため、雨水中のトリチウム濃度は、1962年に現在の数100倍程度という高い値を示し、その後低下しました。こうしたトリチウム濃度の時間変化が、地下水中でも確認されるため、地下





水が何年前の雨水を起源として流れてきたかという“**時間の情報**”を得ることができます。

温室効果ガスのフロン類は1940年代から大気中の濃度が上昇し、製造・使用禁止された90年代にピークを迎え、現在は下降傾向です。おおむね1950年代から1990年代初頭までの期間に関し、地下水中のフロン(CFC)濃度と大気中のそれとを対照させることにより、地下水がいつの雨水によって涵養されたかを推定することが可能です。一方、1990年代以降、大気中のフロン濃度が低下したため、最近では代替フロンとして使用されている**六フッ化硫黄(SF₆)**をトレーサーとして用いることが多くなってきました。大気中の六フッ化硫黄濃度は現在でも上昇し続けているため、特に1990年代以降に涵養された

比較的“若い”地下水の滞留時間を推定するために用いられます。

このように、水には“**空間の情報**”や“**時間の情報**”が書かれた目に見えないラベルがついています。しかしこのラベルは時に見えにくく、そこから正確な情報を読みとるためには、様々な技術も必要なのです。

○これまででということが分かったのですか？

西の多摩台地部から東の低地部に至る、地下水の3次元的な流動が少しずつ見えてきました。

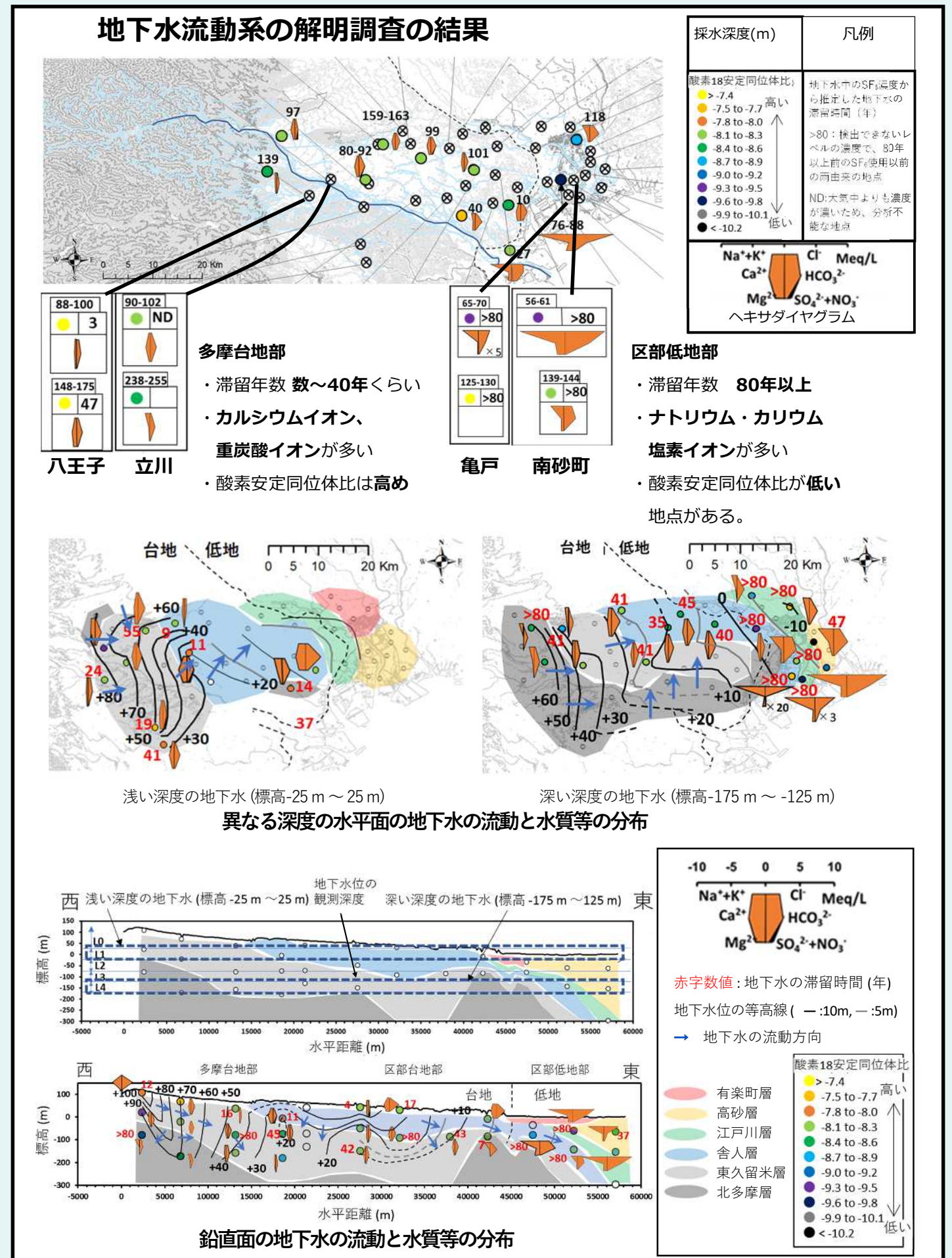
浅い深度では、とくに多摩台地部において地下水は西から東に向かい地形に沿って流動する特徴が、また区部台地部では南西から北東に向かい地下水が流動する特徴がみられました。台地部の地下水質は、カルシウムと重炭酸イオン濃度が相対的に

多く含まれる一般的な浅層地下水の特徴がみられました。さらに、台地部では地下水の滞留時間は10年程度から40年程度が多くみられました。

また、深い深度では区部台地部では南から北に向かう地下水の流動がみられ、滞留時間は40年から80年を超え、特に区部低地部において80年以上の古い地下水が多くみられました。また台地部の地下水質は、浅い深度と同じ特徴を示しますが、低地部ではとくに南部においてナトリウムと塩素イオン濃度が顕著に高い特徴がみられました。

一方、断面で見ると、多摩台地部ではおおむね西から東へ向かい地形に平行な地下水の流れがみられますが、多摩台地部と区部台地の境界付近では、下向きの流れが多くみられます。さらに台地部と低地部の境界では、地形面に平行な流れと深部への流れも見られます。

以上のことから、多摩台地部、区部台地部、低地部の地下水は、浅い深度と深い深度では流れの方向が異なることが分かりました。また、低地部地下水は滞留時間が80年以上と顕著に古く、安定同位体比が低い特徴も合わせて考えると、標高の高いところで涵養され、長い経路を経て流動してきたことが考えられますが、今後より詳細なデータの検討が必要です。



研究途上のため今後修正される可能性があります。
 (筑波大学辻村研究室・長野倅介 (2022))

地下水の揚水等の影響予測 ～シミュレーションモデルの構築～ (東京大学との共同研究)

○シミュレーションモデルの構築とは、どのような研究ですか？

愛知先生：地下水と地盤沈下の関係については、実はまだまだ分からないことが多いのです。この研究では、どこかで地下水を汲んだ時に、離れた場所での地下水にどのような変化が現れるか、それによって地盤にどのような影響があるかを予測するシミュレーションモデルを作っています。

○どのようにモデルを作っていくのですか？

私たちは、地下水が存在する器となる地盤と、地下水の流れを組み合わせるモデルを作りますが、3段階に分けて構築を考えています。

まず、地盤沈下が起きていたエリアでの、地下水位と地盤沈下の関係をモデル化します。これを一次元地盤沈下モデル（1次元モデル）と呼んでいます。

次に、1次元モデルを拡張した数km四方の局所地下水流動・地盤変形連成モデル（局所モデル）を作成します。

最後に、都内全体の地下水の流れの広域地下水流動モデル（広域モデル）の中に、この局所モデルを組み込むことで、**地下水の流れ－地下水位－地盤**の関係が分かるようになります。

○今はどの段階のモデルを作っているのですか？

現在は、1次元モデルを作成しています。

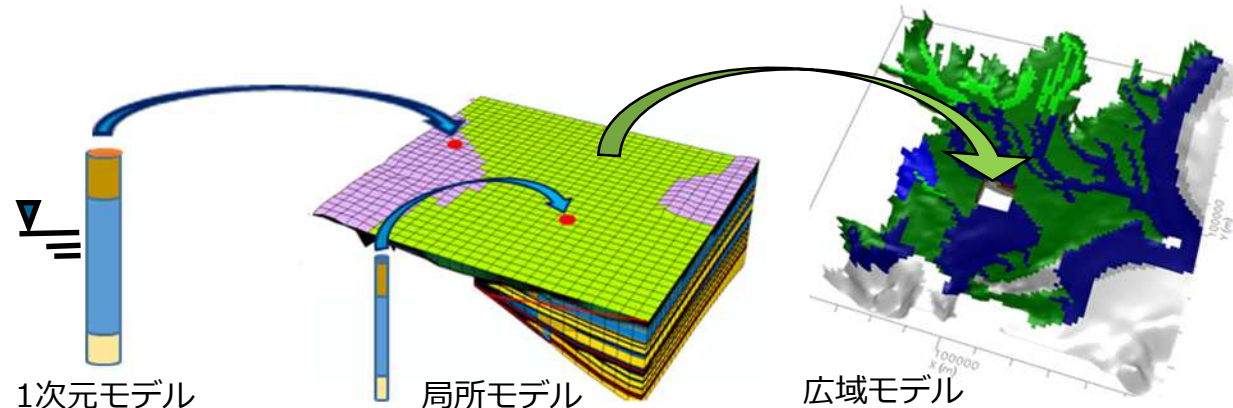
都内ではたくさんのボーリン



東京大学大学院
新領域創成科学研究科
愛知 正温 先生

グ調査が行われていて地下の地層については大まかに分かっていますが、モデルの作成に必要な地盤の性質である物性値など（例 透水係数：水の通りやすさ、間隙比：土粒子の間の隙間の大きさ等）は、詳細な情報が

シミュレーションモデルの構築イメージ



あまりなく、そのままでは正確なシミュレーションモデルは作れません。

ただ、モデルを作成するために、自分たちでボーリングを行うことは大変なので、実際にあった地盤沈下と地下水位の記録から、地盤の詳細な物性値を推定するという**逆解析**という手法を使っています。

○逆解析とはなんですか？

通常、シミュレーションモデルを作る際には、様々な条件（一般的にパラメータといいますが）を設定して、予測を行います。このモデルでは、地下水位が変化したら、地盤がどのようなかを知りたいということ

になりますが、その際に必要なパラメータである地盤の物性値については情報が足りず、このままではモデルを作ることができません。

そこで、実際に地下水位と地盤について、実際にあった過去のデータと合うようにコンピュータで計算し、地盤の情報を探るのが逆解析となります。

○逆解析でどうやって1次元モデルをつくるのですか？

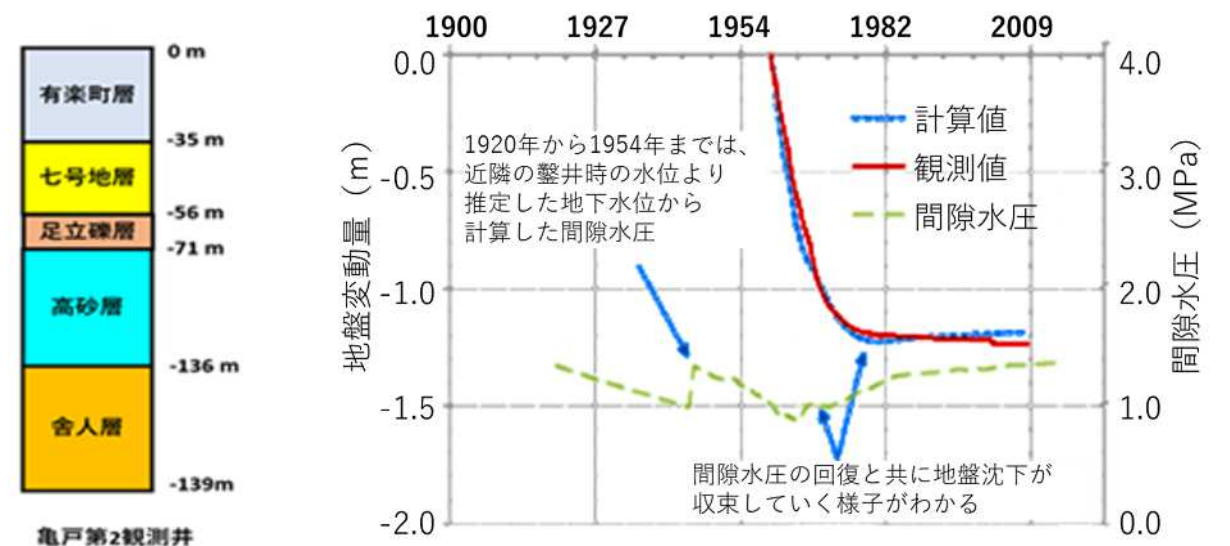
東京都の土木技術支援・人材育成センターの地盤沈下観測井のデータが数十年に渡って揃っているため、これを活用しています。

まず、各地層の物性値を仮の値として地盤沈下の計算を行います。当然、実測値とはズレますので、ここから物性値を少しずつ変えながら何回も再計算を行います。最終的に実測値と合うような結果が得られたときのパラメータが地層の物性値だと推定することができます。物性値を変化させる際には、**遺伝的アルゴリズム**というものを使います。

○遺伝的アルゴリズム…？それは何ですか？

先ほど、実測値に合うように物性値を変化させて何回も計算をすると説明しましたが、より計算回数を少なく、早く実測値

観測井のモデル化（1次元モデルの作成例）



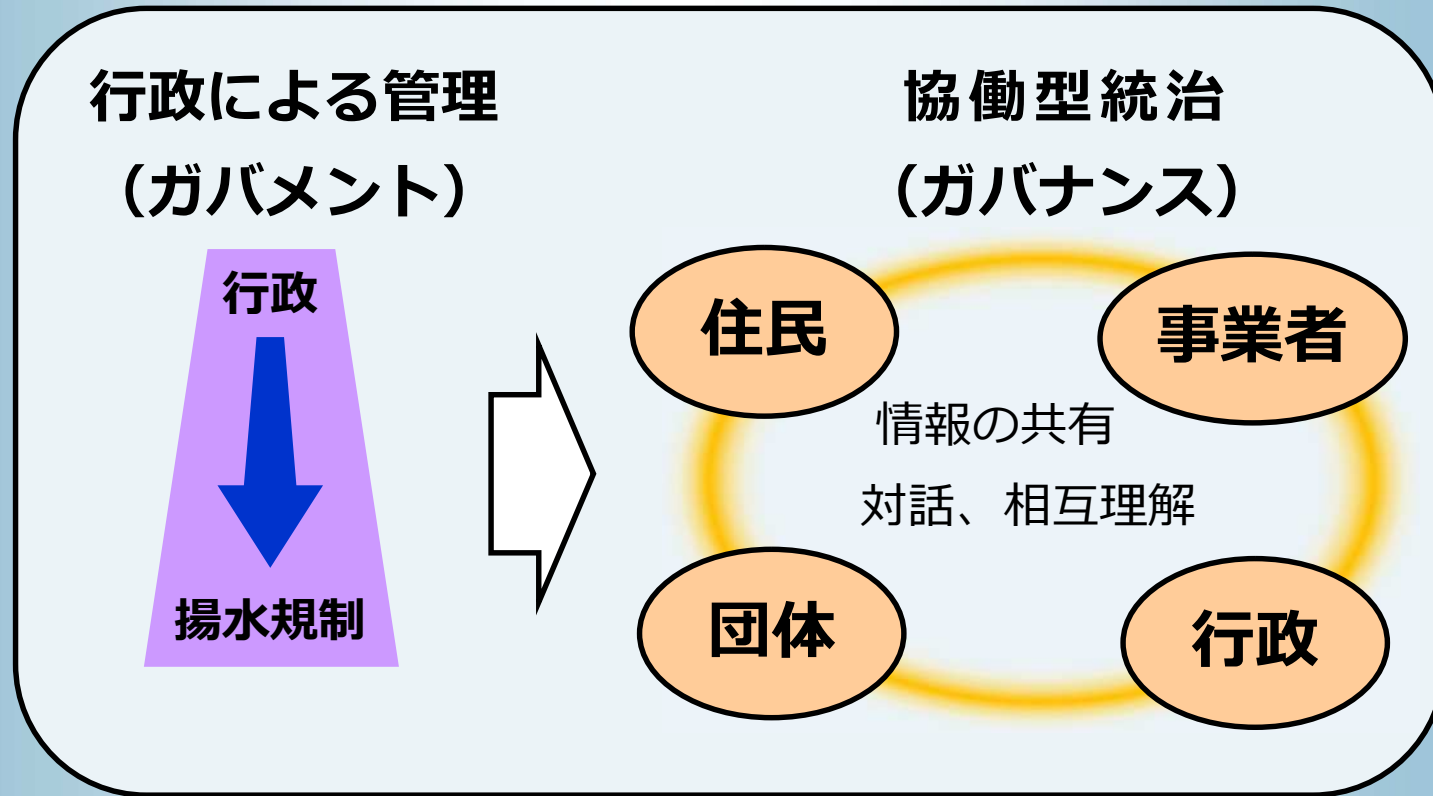
観測井（亀戸第2）のモデル化

地下水位の変化に対して、モデルの計算結果は、観測値とおおむね沿った変化をしています。これにより、深さ139mまで1mおきの地盤の物性値が得られ、1次元モデルを作成することができました。

第5章

持続可能な地下水の保全と利用

新たな地下水ガバナンスへ向けて



これまでの、行政による揚水規制を中心とする**管理（ガバメント）**が行われてきました。

一方、持続可能な地下水の保全と利用に向けては、地下水に関係する住民、事業者、団体、行政など（ステークホルダー）が存在するため、これらの主体間において情報を共有しながら、対話や相互理解を進め、合意形成を目指すことが重要とな

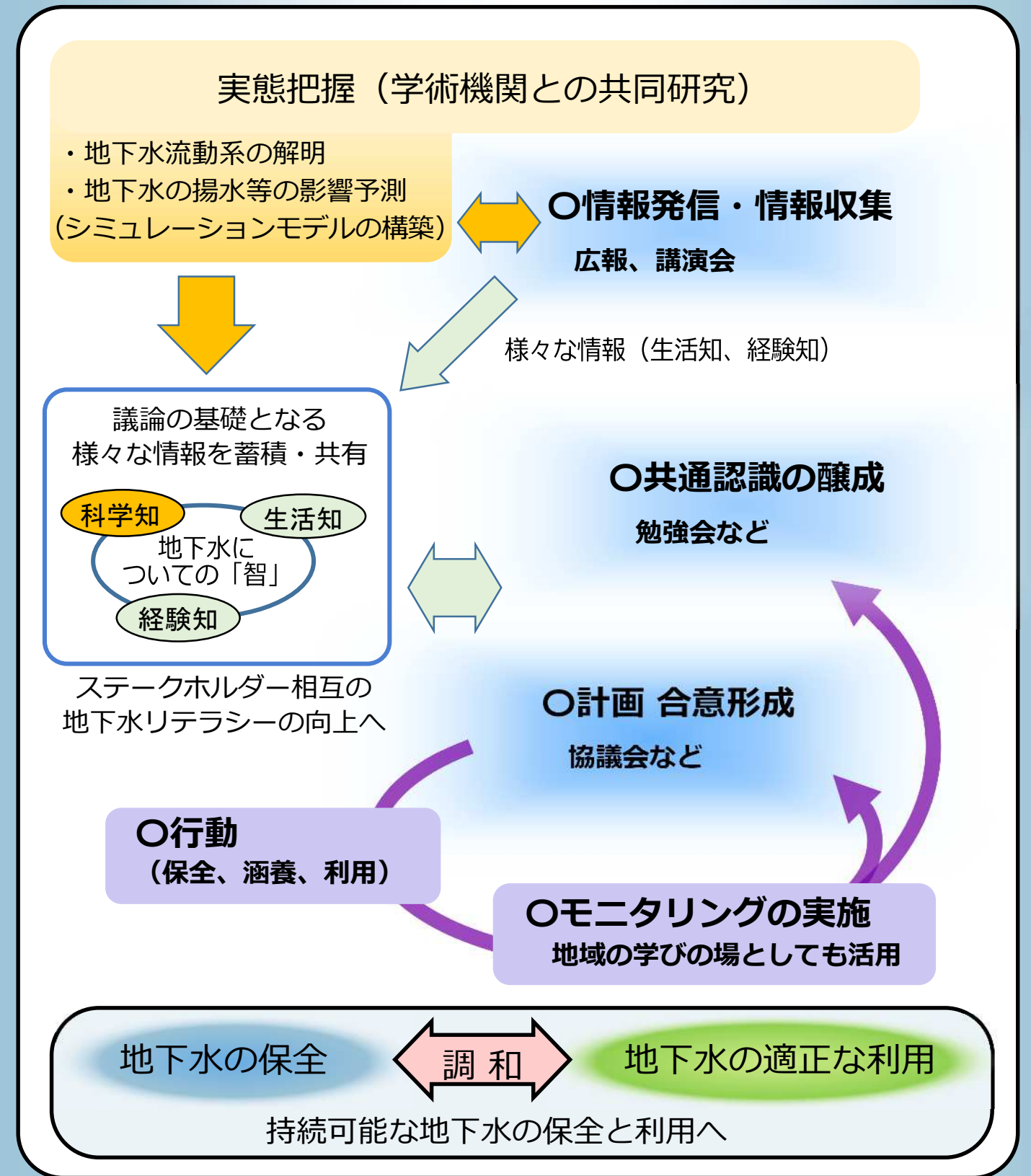
ります。

幅広い関係者が相互に協力しながら地下水の統治を行う仕組みを「**地下水ガバナンス**」と呼んでいます。

この地下水ガバナンスを進めるために、様々なステークホルダーと、地下水に関する知識や情報（科学知や生活知、経験知）などを共有します。それらに基づく話し合いをすることで、

共通認識や相互理解を醸成します。さらに、将来的には協議会などを設置して議論を深め、持続可能な地下水の保全と利用についてに向けた計画策定など、合意形成を目指します。

これらのプロセスには時間をかけて取り組んでいくことが重要です。



地下水ガバナンスへ向けた取組のイメージ

**地下水のこれからについて
みんなで考えていきましょう！**

初 版第 1 刷 2022 年 7 月発行
第 2 版第 1 刷 2023 年 8 月発行

登録番号 (5) 25
環境資料 第35031号

東京の地下水・地盤環境レポート

編集・発行 東京都環境局自然環境部水環境課

東京都新宿区西新宿二丁目 8 番 1 号

電話：03-5388-3547

URL：<https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/>

印刷・製本 株式会社イマイシ

東京都足立区梅島一丁目 3 1 番 1 5 号

電話：03-3848-1311