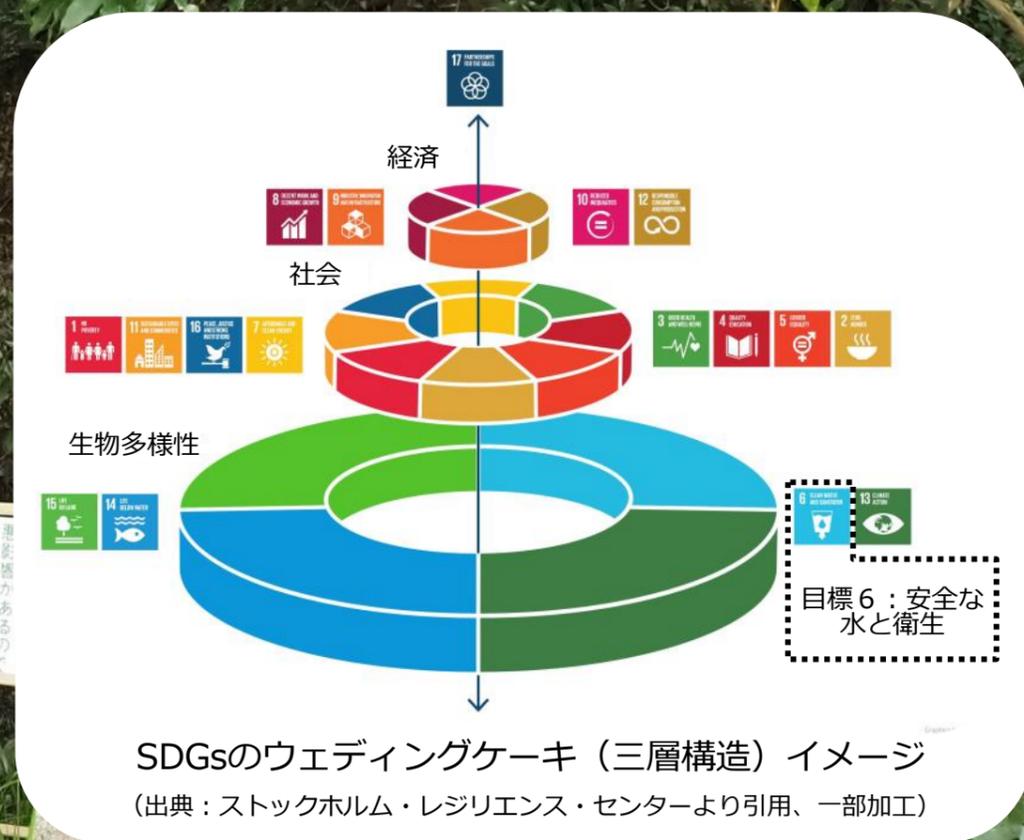


大切な水資源「地下水」

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もらえればと思います。



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「生物多様性（自然の豊かさ）」で、その上に「社会」や「経済」が乗る形となっています。これは土台となる生物多様性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を意味しています。

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、このレポートで皆さんに知ってもらえればと思います。

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。

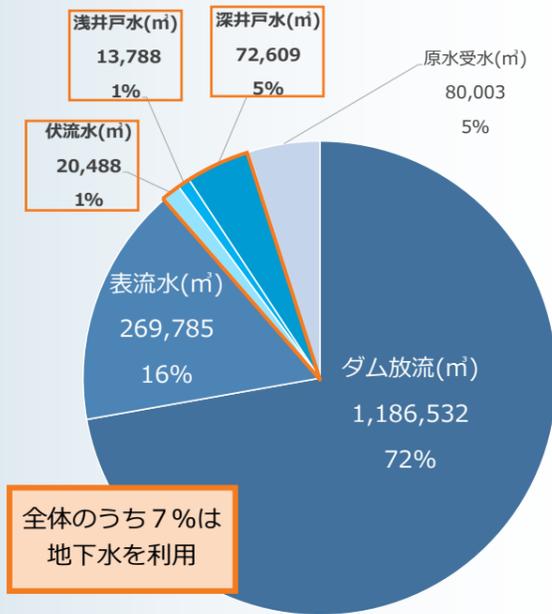
○生活に身近な地下水 ～身近な資源としての地下水～

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。

河川水と同様に大切な水資源なのです。

現在では、下記の写真の様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り組みが増えています。

普段の生活の中では直接目にする事のない地下水も、



東京都の水道水源別計画1日最大取水量(H30年度)



荒川公園内に設置の防災井戸（手押しポンプ）



等々力溪谷周辺の立体図と断面イメージ

○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）

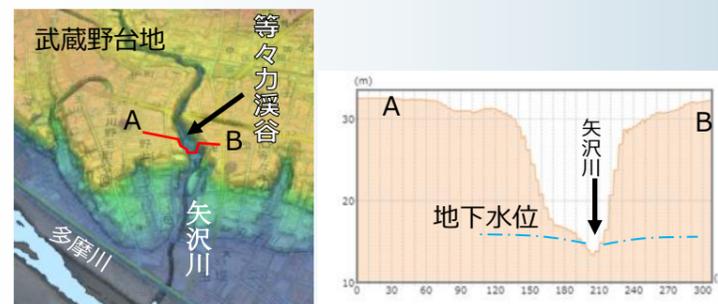
武蔵野台地の標高50m前後にある崖に位置する、武蔵野三大湧水池の一つですが、現在は湧水が枯渇してしまい、深井戸からの揚水で賄っています。

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、また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（科学的なデータ、地域の経験知、生活上の知恵など）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 ～地下水ガバナンスへ向けて～

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、地下水対策検討委員会のまとめ（H28）において、地下水の保全と適正利用に向けた合意形成を図っていくことが重要であるとしています。
現在は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、地下水の

実態把握を行っています。
これらの科学的な情報や地域の地下水に関する知恵や知識などを蓄積・共有し、地域全体での話し合いの場で、相互理解と対話を深めながら、持続可能な地下水の保全と利用の調和を図っていきます。

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

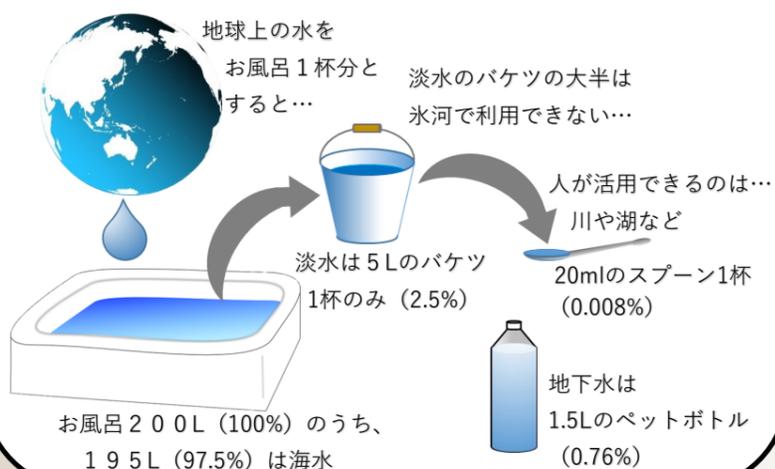
地 地球上の水の総量は約14億km³と豊富ですが、その97.5%は海水で、淡水はわずかに2.5%です。その淡水のほとんどは氷河などの氷であるため、河川、湖などの水として存在する水はわずか0.008%、地下水は0.76%となります。地下水は貯留量（ストック）として多いものの、全てが利用可能できるわけではなく、実際には流れて運ばれている水（フロー）として、河川などの水も多く利用されています。水資源について理解するには、このストックとフローを把握し、理解

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

人が利用可能な「水」はとても少ない



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とで、私たちは毎日さまざま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。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っているようにもなっています。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減少を招いています。このように、水循環の balan

スが崩れると、水辺を巡るさまざま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。

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

多面的機能の発揮

水源涵養機能をはじめとする森林や農地の多面的機能が持続的に発揮されている。

降水

水に関する災害への対応

災害時にも人命・財産が守られ、被害を最小限に抑えることができる。

危機的な渇水への対応

地域の特性と実情に応じて、危機的な渇水に対応することができる。

持続可能な水利用

良質な水の供給をはじめとして地下水を含めた様々な形でいつでも水の恵みを受

水環境と生態系の保全

流域特性に応じた水量・水質が保たれ、美しい水環境と生態系が守られている。

蒸発散

表流水

浸透

地下水

水インフラの適切な維持管理

地域において水インフラの適切な維持管理・更新、耐震化がなされている。

流域での連携

一人一人が水の大切さを理解し、様々な関係者が健全な水循環に向けて協力して積極的に関わっている。

人と水とのふれあい

身近な水辺空間や水文化を通じて、人が水の恵みを受けることができる。

科学技術の振興

産官学による調査・研究、技術開発が行われ、その成果が健全な水循環の実現に活用される。

国際連携と協力

我が国の優れた制度や技術が海外でも活用され、世界の水問題の解決に貢献できている。

地下水の基礎知識

帯水層と難透水層

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、地中に貯えられ長い年月をかけて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、その中に地下水が貯えられています。

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、不圧地下水のある帯水層を「**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き出して地表に湧出します。

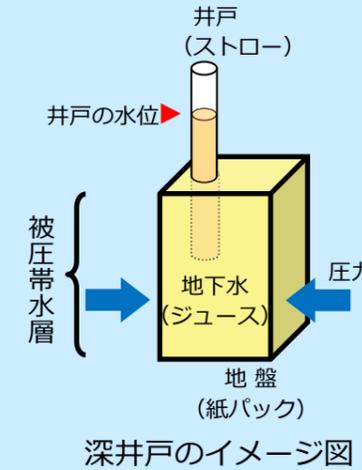
一方、上下を難透水層に挟まれて、上流にある涵養域（地下水が浸透する地域）からの圧力などを受けて、大気圧よりも加圧された状態にある地下水を「**被圧地下水**」と呼び、被圧地下水のある帯水層を「**被圧帯水層**」と呼びます。被圧地下水は高い圧力がかかっているため、井戸の中の地下水位は、帯水層のある位置よりも水位が高くなっています。

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、浅層地下水と呼ばれることもあります。雨水や河川水・海水面の変動に対して敏感に反応しやすい特徴があります。

被圧地下水（主に深井戸で利用）

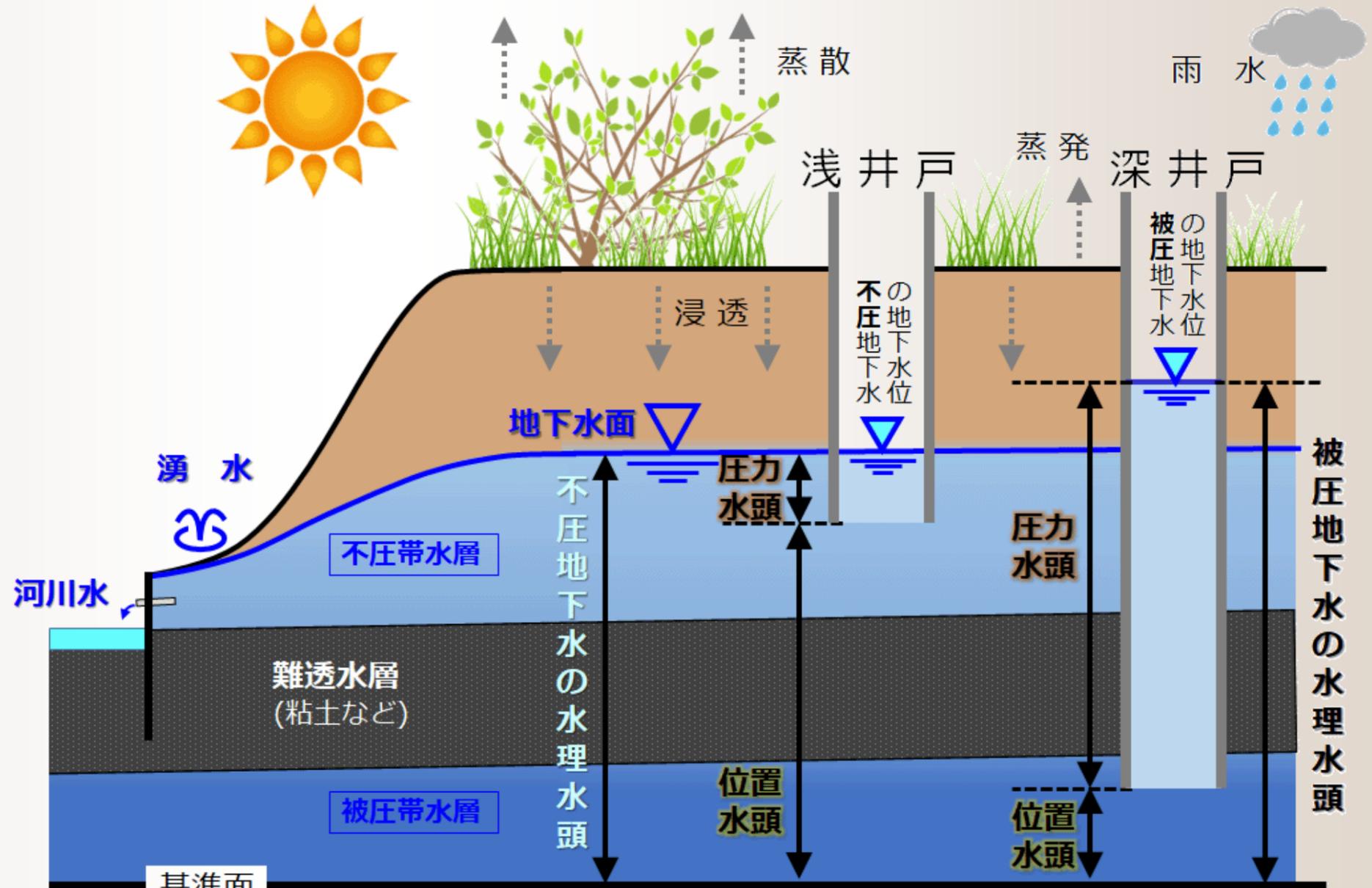
難透水層に挟まれている地下水で、涵養域からの圧力などを受けているので、深井戸の水位は帯水層の位置よりも高くなります。これは、ストローをさした紙パックが押される（圧力）とストロー（井戸）の中を水面が上がってくるのと似ている状態です。



「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。



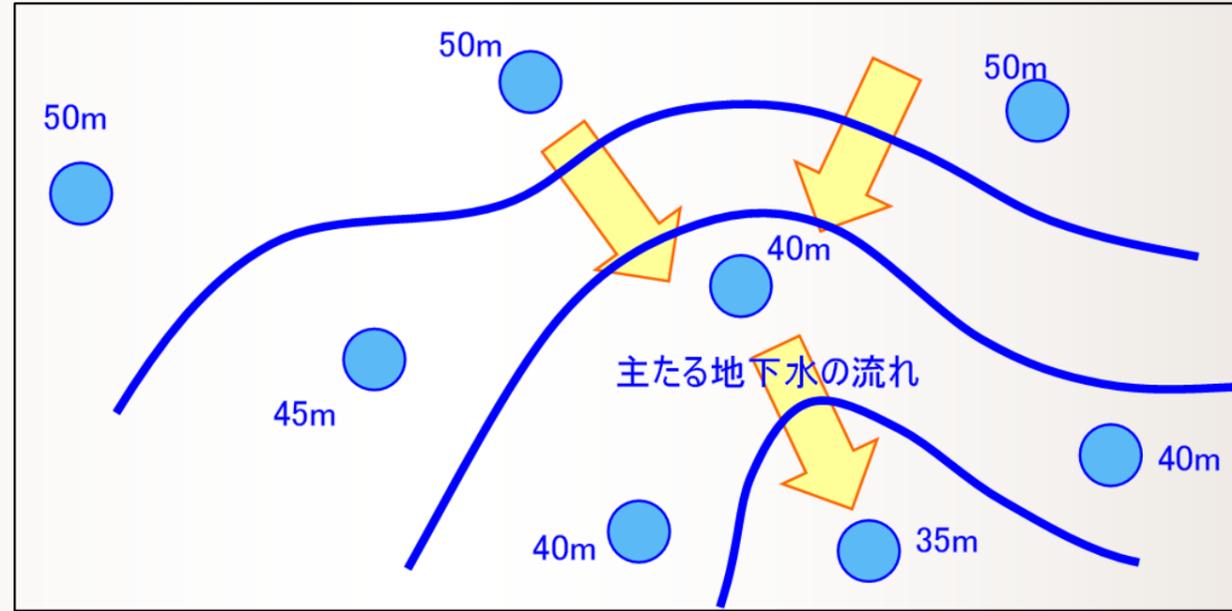
基準面
※通常は海水面標高：0m

井戸内の地下水水位と水理水頭との関係

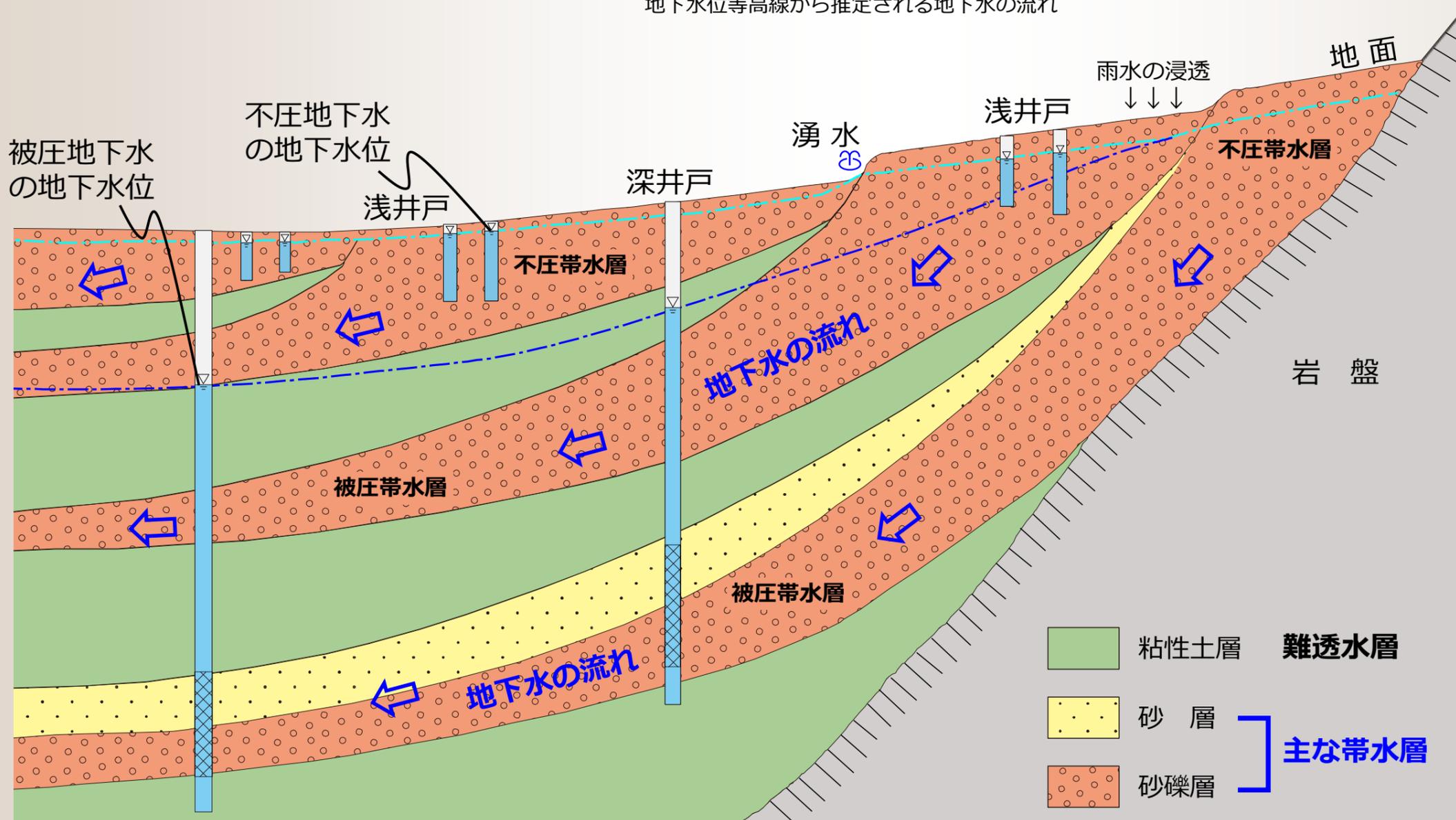
地下水の流れ

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



帯水層を流れる地下水と不圧・被圧地下水の概念図

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「公水論」と、土地所有権に含まれるとする「私水論」に大別されます。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「公水」、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「私水」として扱われます。

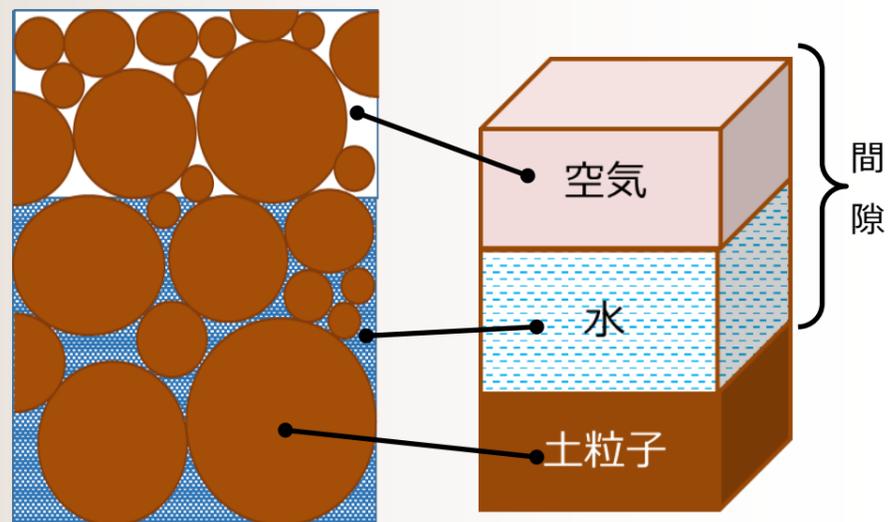
日本においては、従来、法的な土地の所有権について、「法令の制限内に於いてその土地の上下に及ぶ(民法207条)」として地下水は私有財産とみなされてきましたが、2014年に「水循環基本法」が制定され、地下水を含む水資源について、「国民共有の貴重な財産であり、公共性の高いもの」としています。

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こと、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。

地盤沈下発生のメカニズム

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。

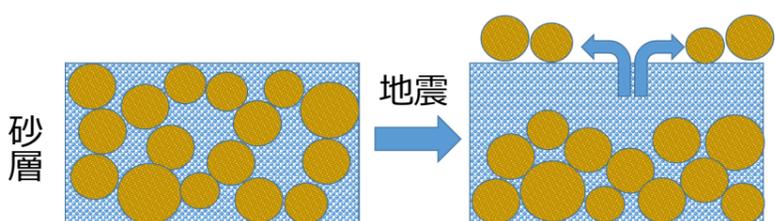


$$\text{間隙比} = \frac{\text{間隙 (空気 + 水)}}{\text{土粒子}}$$

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

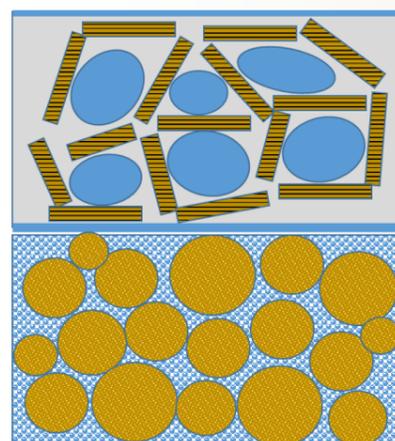
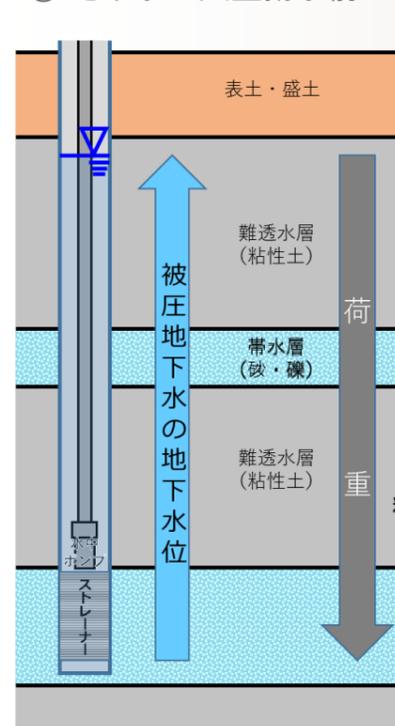
保っています。地震などで強い揺れが発生すると、砂同士が水中で均一化し、泥のように柔らかくなります。その結果、建物が傾いたり、地中構造物が浮き上がったりします。



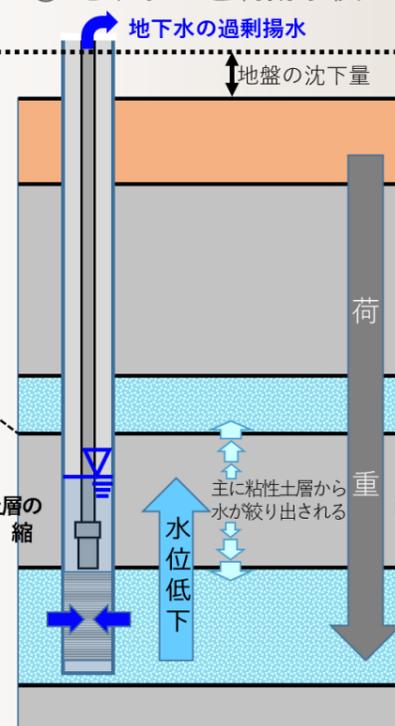
地盤沈下が起きるメカニズムですが、ポイントは**粘性土層**にあります。

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

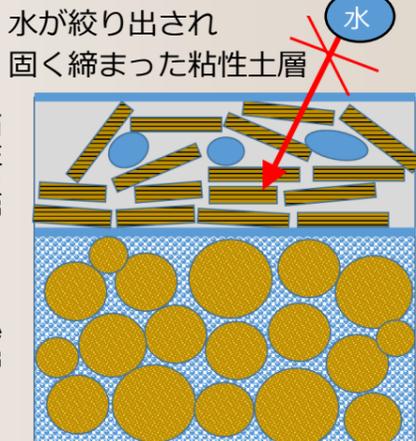
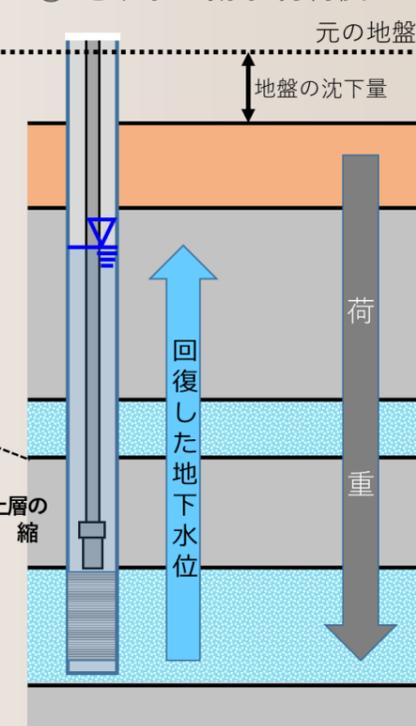
① 地下水の大量揚水前



② 地下水の過剰揚水後



③ 地下水の揚水規制後



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

性土層全体では水を通しにくい難透水層となります。

一方の砂や石（礫）でできた層は、土粒子の間に隙間があります。この状態で帯水層であり、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。この時、

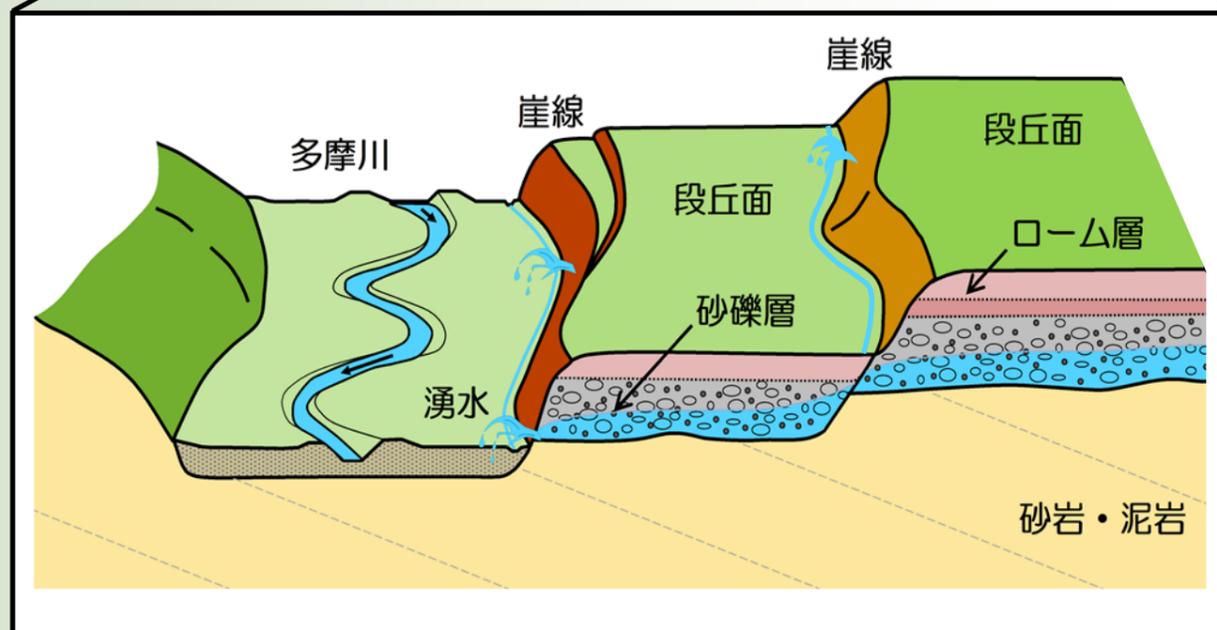
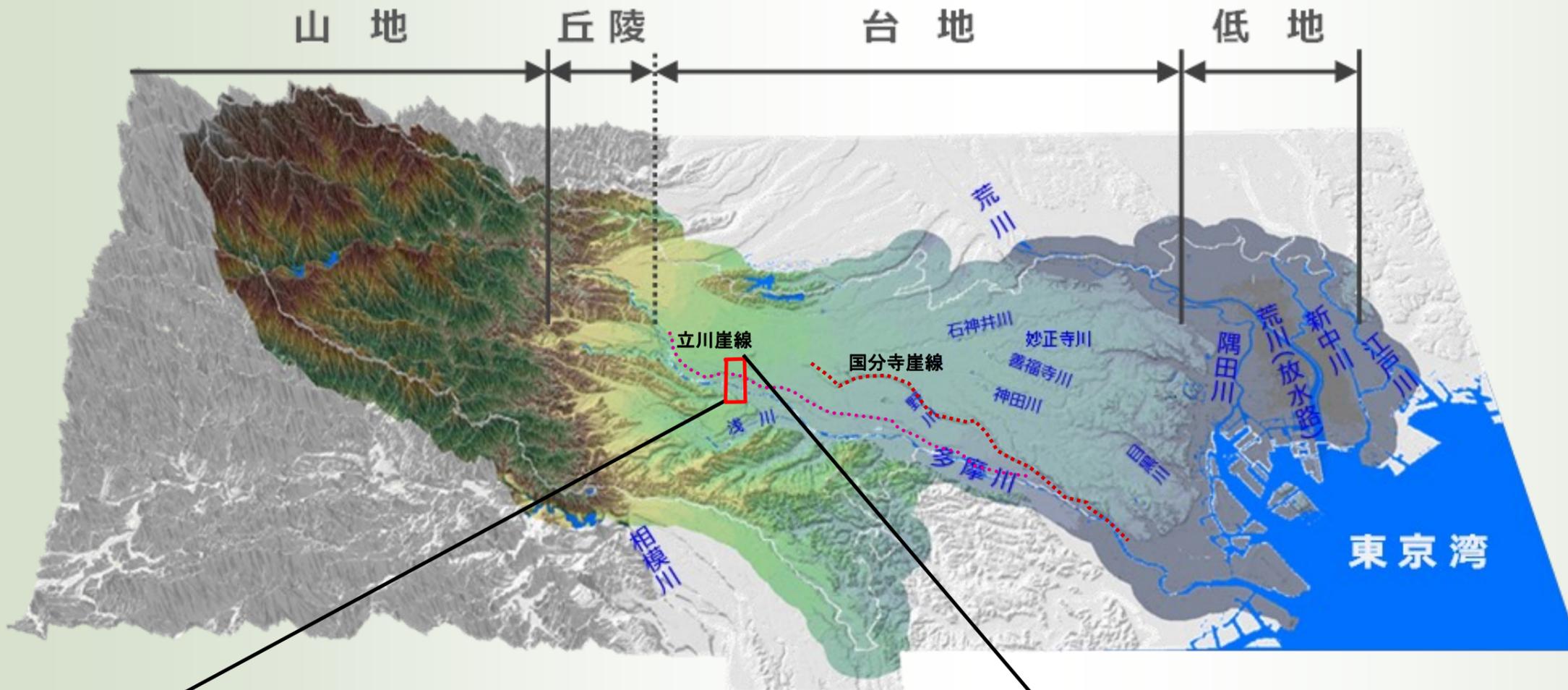
砂層に接している粘性土層では、水は移動しにくいので、なかなか水は出てこないですが、地下水位の低下が長く続くと、粘性土層からも少しずつ水が砂層へ移動します（粘性土層からの水の絞り出し）。粘性土層の体積を支えていた水の粒がなくなることで、残った板状の粘性

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。

第3章 東京の地形・地質と地下水

東京の地形の特徴

- ・低地 … 標高約8 m以下
かつて地盤沈下が顕著に確認された地域。標高が海面よりも低い、いわゆる「ゼロメートル地帯」が124km²（23区の総面積の約2割に相当）の範囲に広がっています。隅田川、荒川、新中川、江戸川などが、北から南に流れています。
- ・台地…標高約8～50 m
武蔵野台地といわれる地域で、野川、石神井川、善福寺川、神田川などの中小河川があり、西から東に流れています。
- 低地部と台地部の境目には、15～30 m程度の急な崖が南北方向に連続していて、崖の東側を京浜東北線が走っています。
- ・丘陵…標高55～350m程度
台地と山地の間に緩やかな起伏を伴って連なっています。
- ・山地…標高数百m～2,000m
東京の最高地点は雲取山2,017mです。

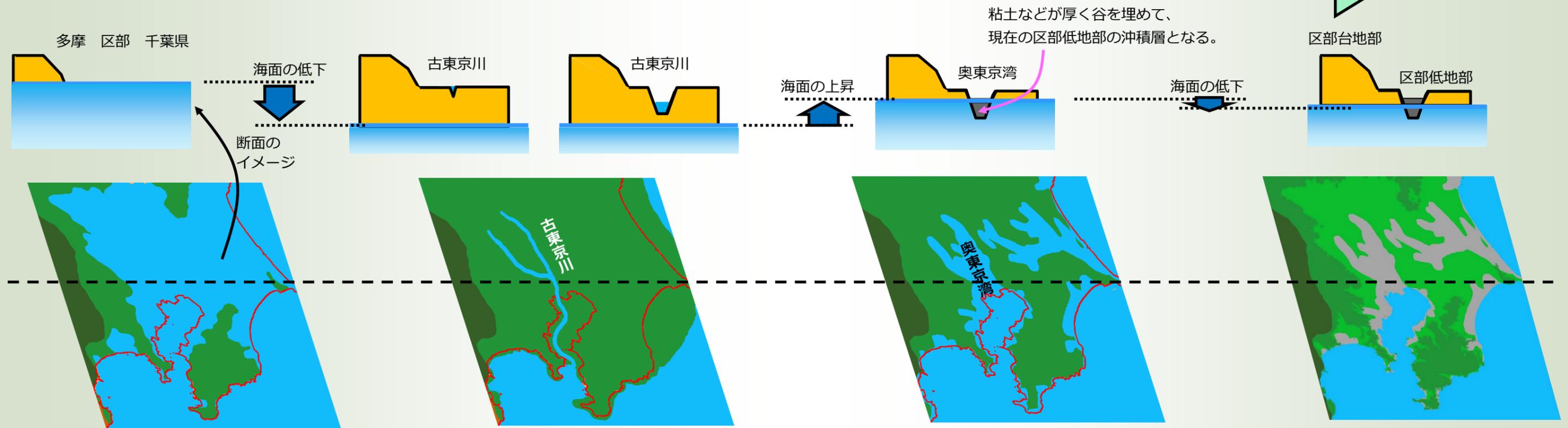
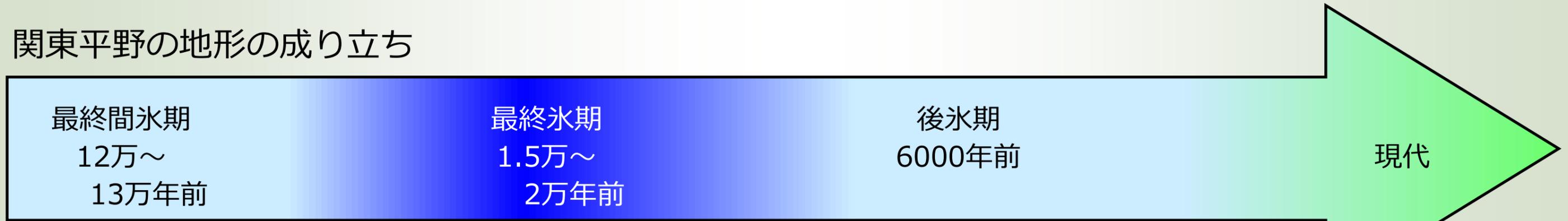


多摩川の河岸段丘

東 京の台地をさらに細かく見ると、多摩川に沿って平らな面と急な崖からなる階段状の地形がみられます。

多摩川が流れる位置を変えながら武蔵野台地を削り取ってできた河岸段丘で、立川崖線と国分寺崖線などがあります。その崖からは地下水が湧水となって出ているところが多く、市街地の親水空間として、また野鳥などにとって貴重な自然地となっています。

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。

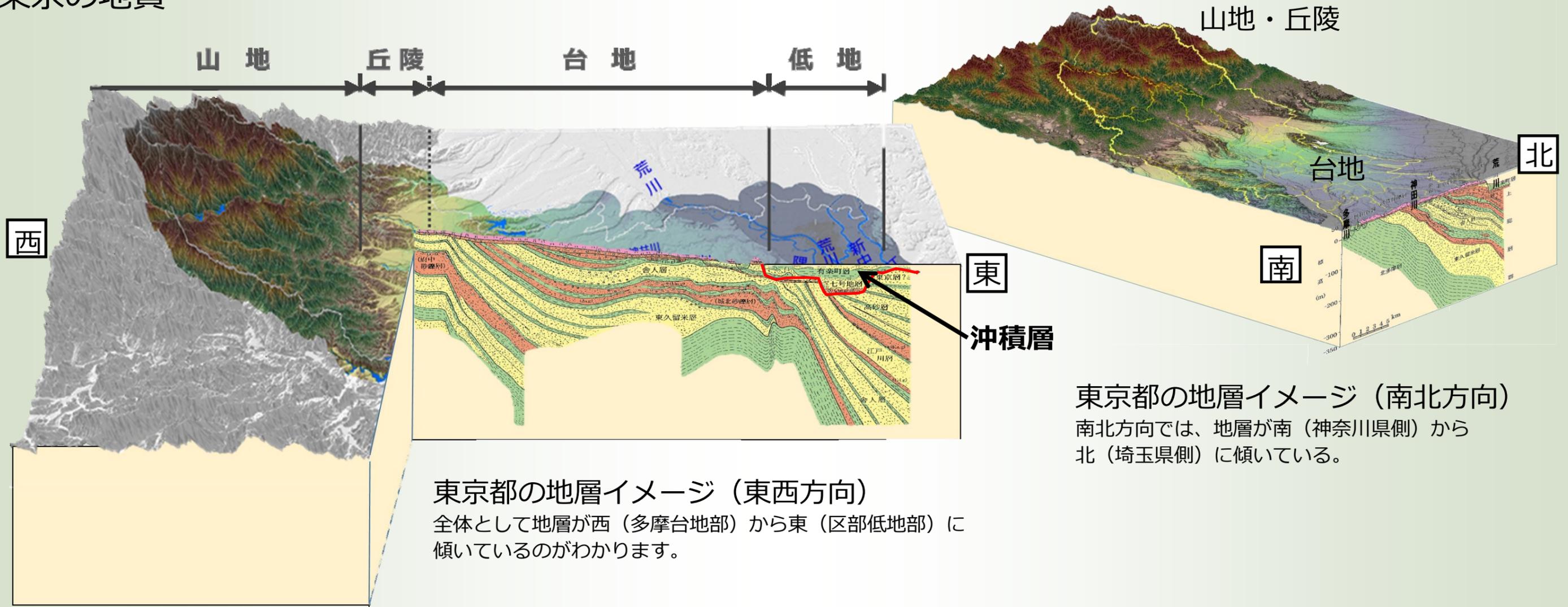
③ 氷期が終わり、温暖な気候により海水面が上昇しました。奥東京湾（古東京川の跡）の水面下では、上流から流れてきた粒子の細かい粘土やシルトなどが、深い谷を埋めるように堆積しました。

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利根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）に傾いているのがわかります。

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。

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なり方を調べ、それらを比較

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のがわかります。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わかっています。

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。

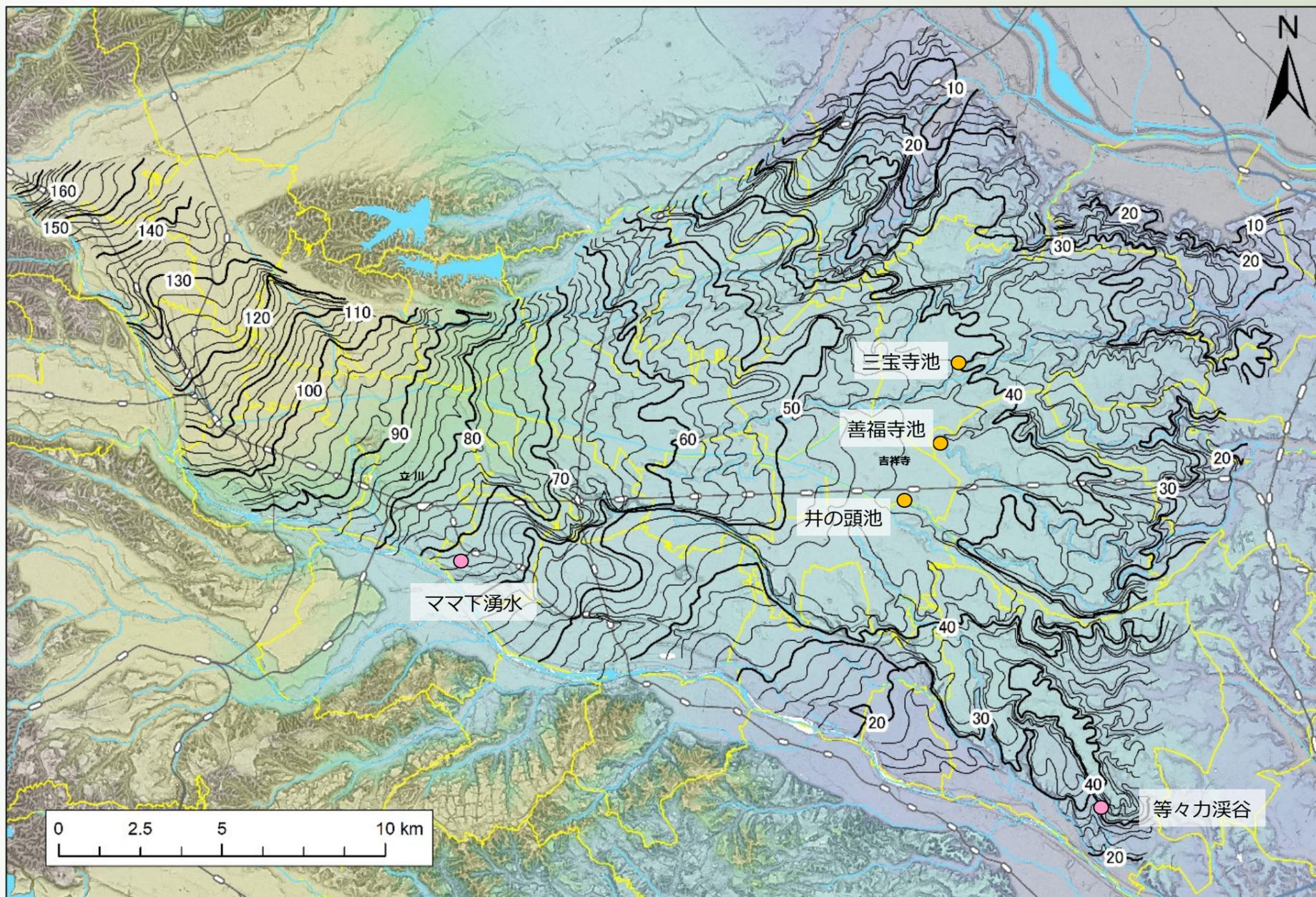
地下水は、この地下水位等高線と直交する方向に高い方から低い方へ流れています。

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。

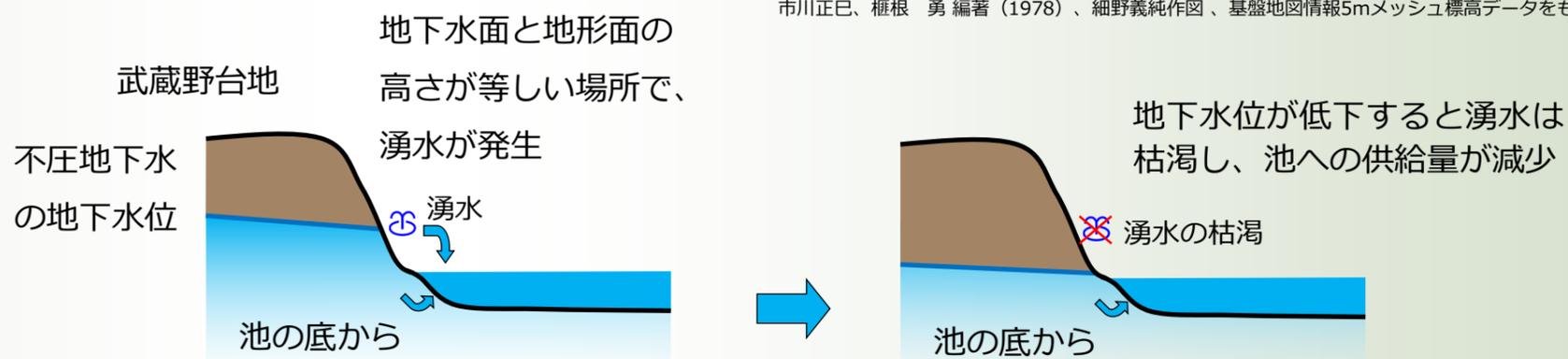
地下水面と地形面の高さが等しい場所では、地下水が湧水として地表に湧き出しており、都内にはママ下湧水や、等々力溪谷など崖線から湧き出している湧水が多数存在しています。

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。



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

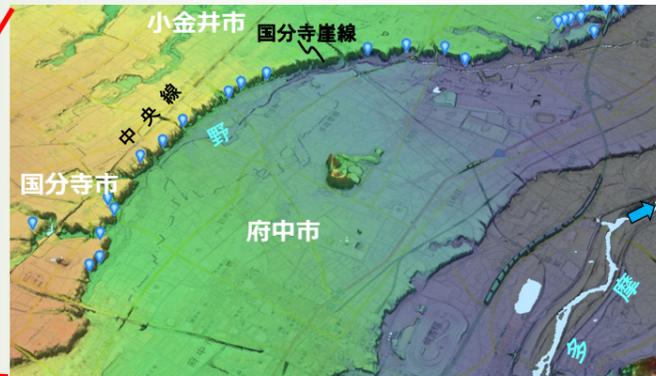
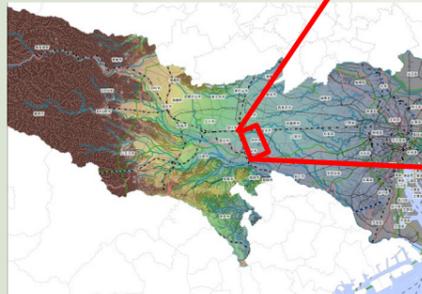
います。世田谷区の等々力不動尊など、湧水そのものが信仰の対象とされる場所も都内に数多くあります。

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。

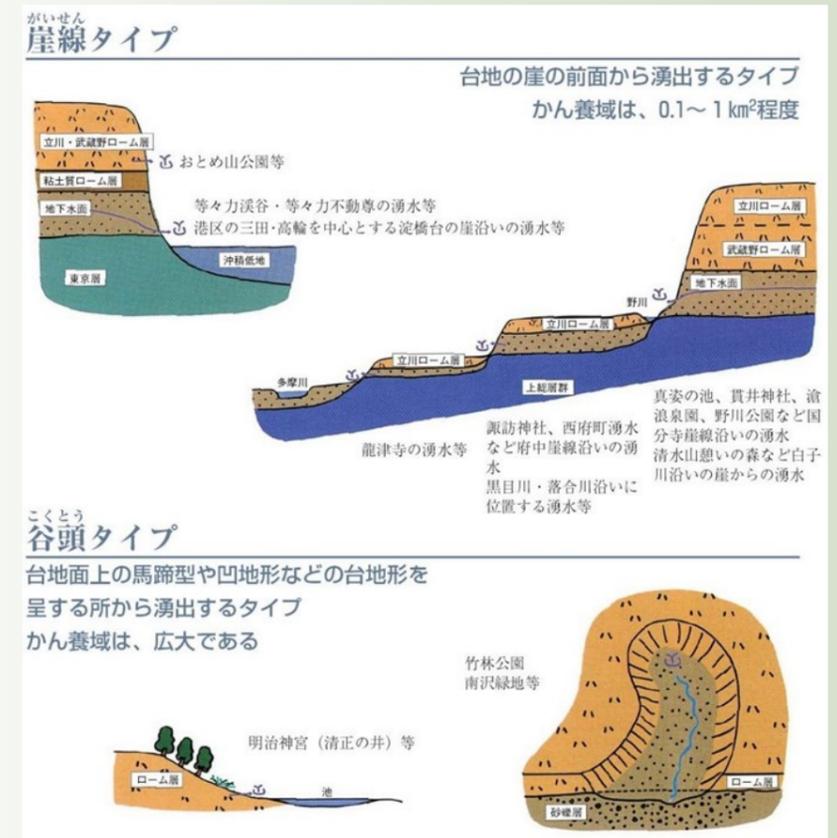


国土地理院ウェブサイト（電子国土WEB）を加工して作成

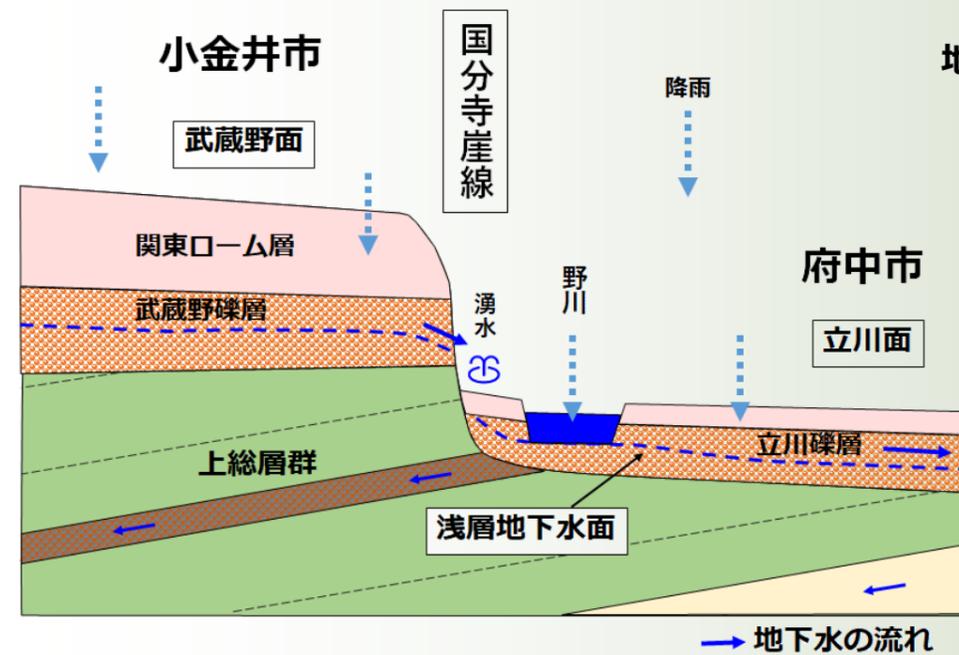
東京の湧水は、武蔵野台地や、多摩川の支川である秋川、浅川流域に多く見られます。東京の湧水は、湧水地点周辺の地形や湧出形態から、「崖線タイプ」と「谷頭タイプ」の2種類に分類することができます。

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。



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」



野川における地下水と河川水との交流イメージ

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。

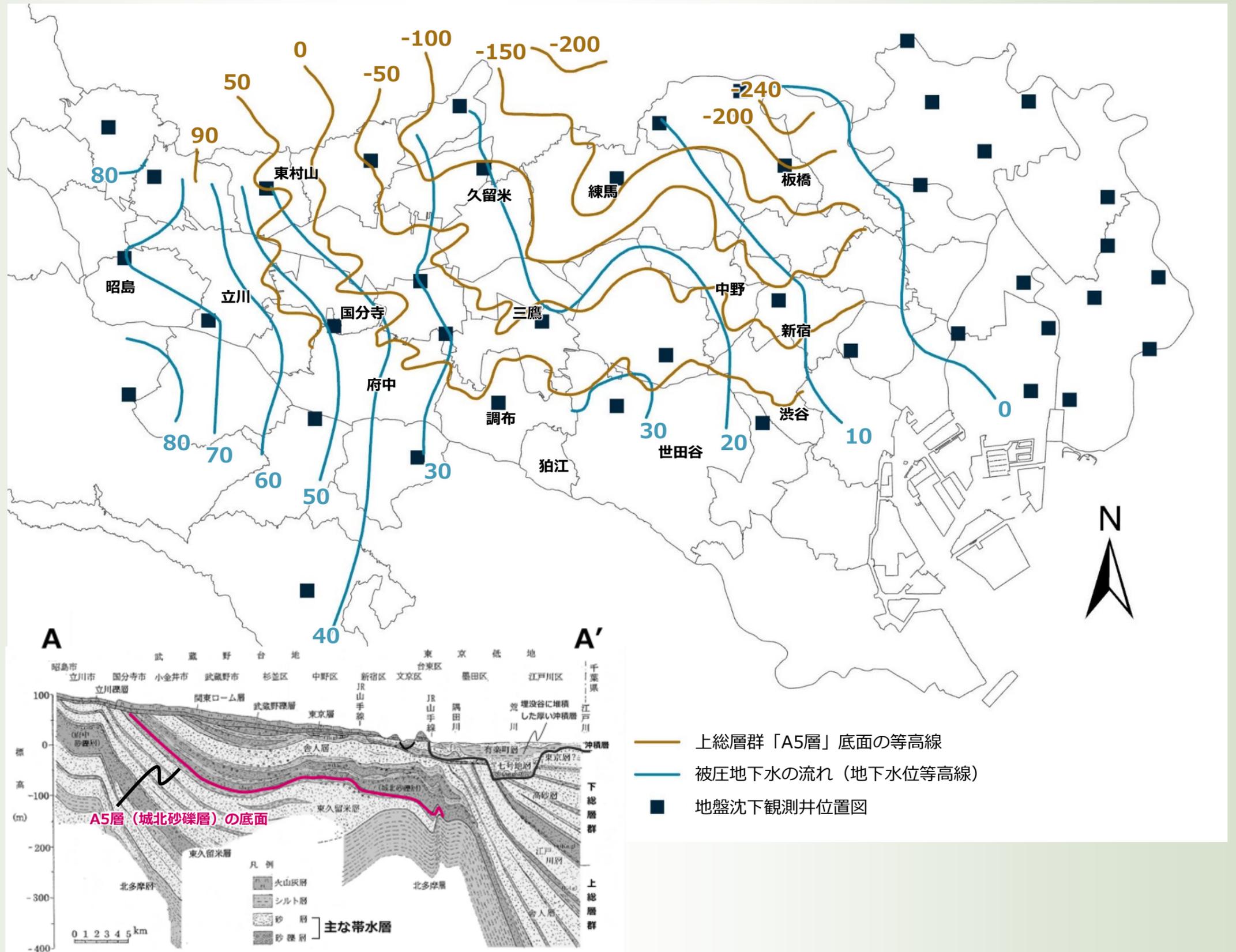
このように、地下水は水循環において、雨水と地表水（河川水、湖沼水、海水）をつなぐ重要な役割を担っています。

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判っています。右図は、被圧地下水の帯水層である上総層群中のA5層（概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た谷筋で、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、概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」：新藤静雄「武蔵野台地の水文地質」（1968）より「A5層」と呼ばれる地層の底面標高分布図
 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

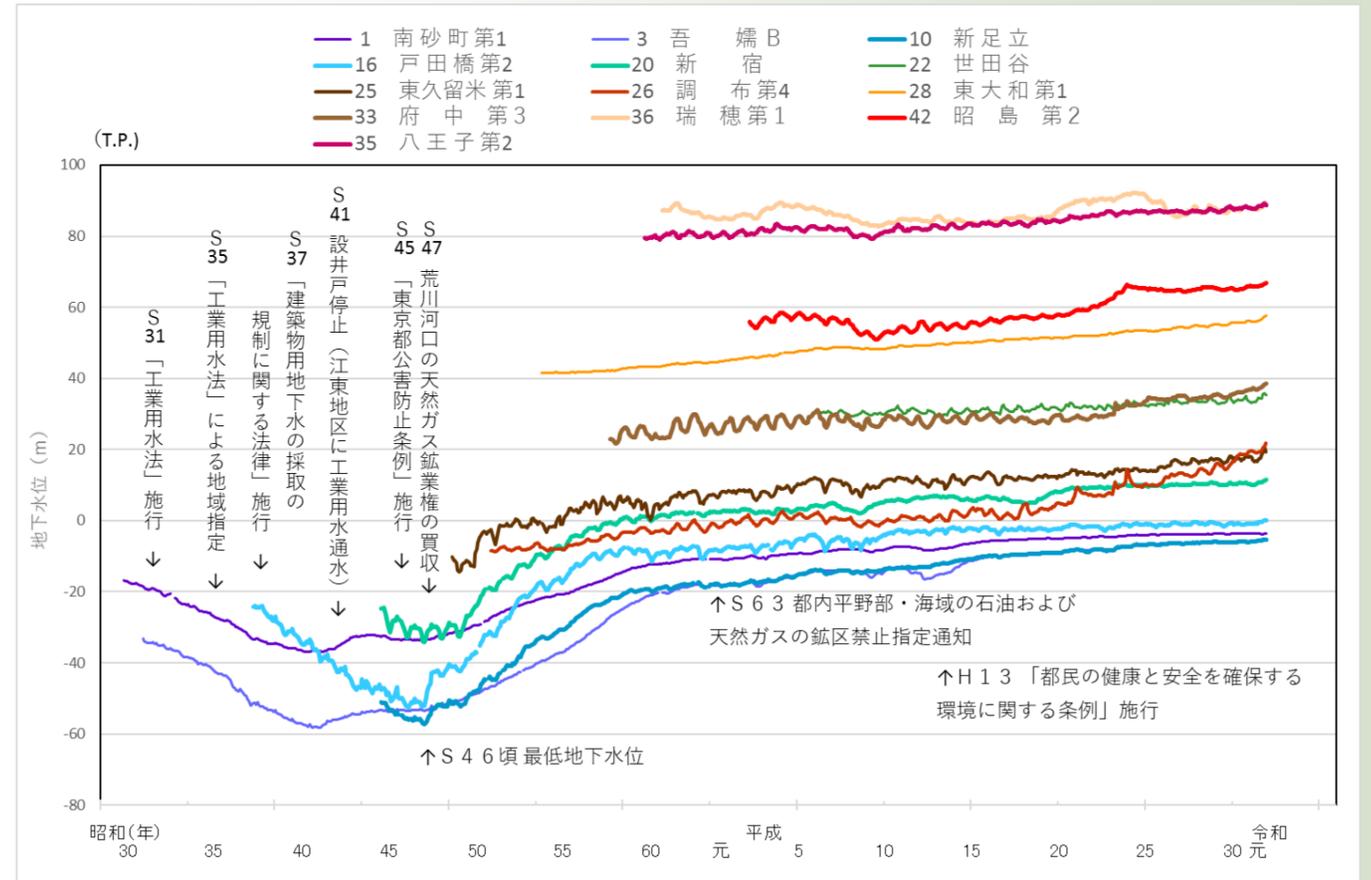
かつて甚大な地盤沈下を起こした東京都ですが、最近の地盤変動量をみると、年間2cm以上沈下している地域はなく、全体として安定した状態にあります。

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。1年間の沈下量が5cm以上のところを沈下の中心としていますが、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、縮んだ地盤はもとには戻らず、現在の地盤高は沈下したままで

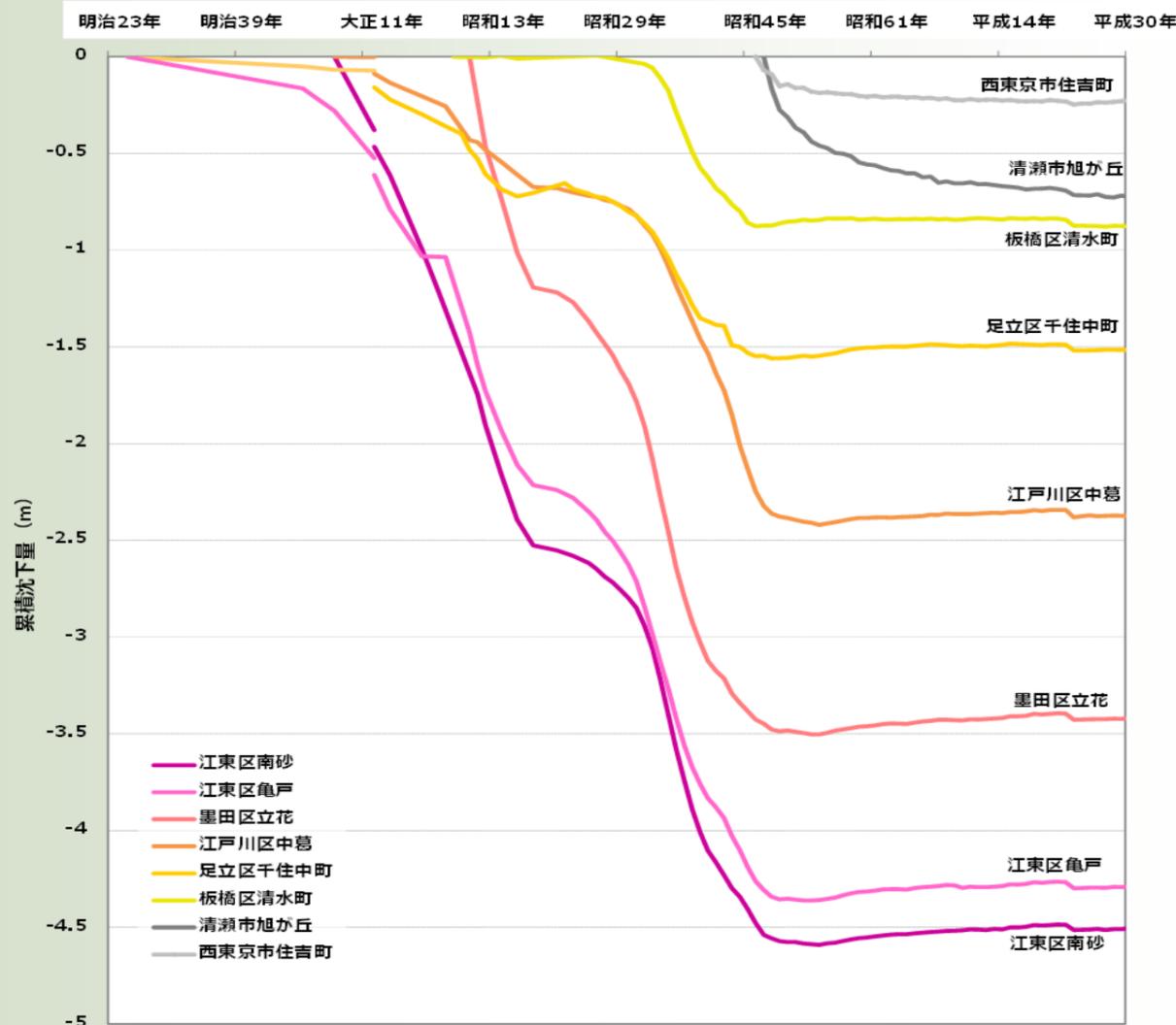


東京の地下水位の変遷

令和元年末の調査結果では、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年頃の最低地下水位から平成6年末までの被圧地

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。

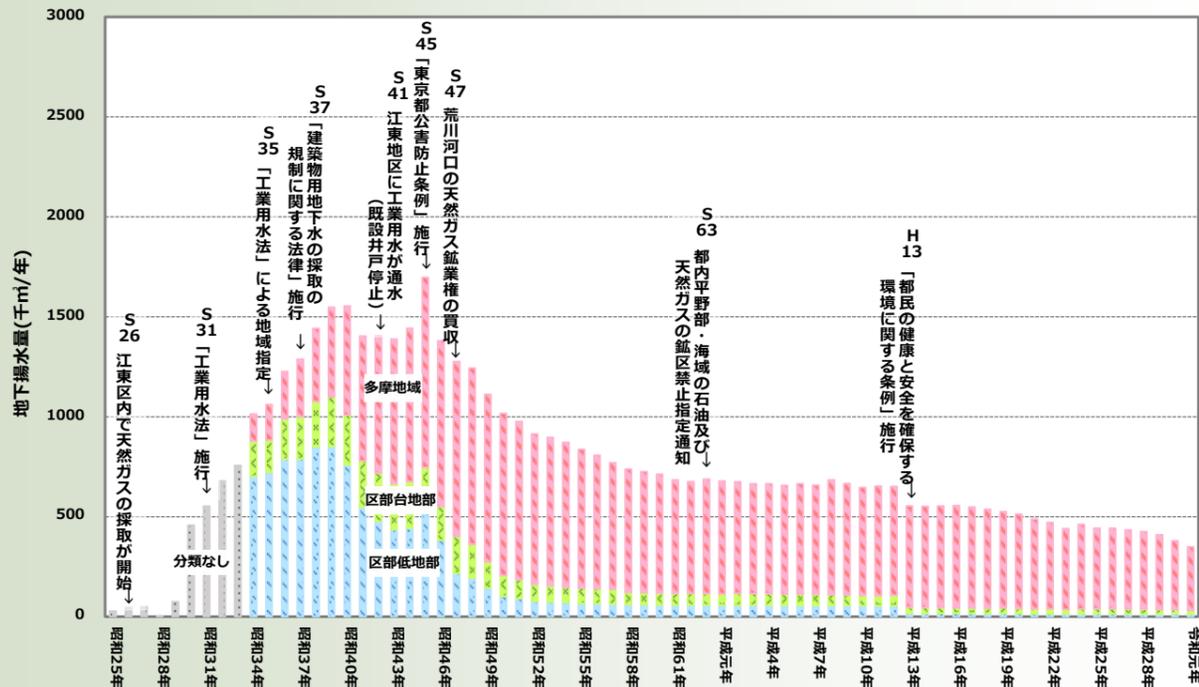
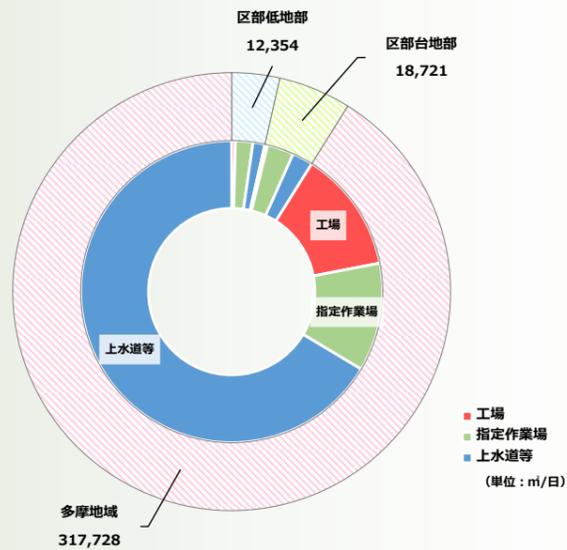


東京の地下水揚水量の変遷

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台地部が占めるようになってい

ます。令和元年の調査結果では、揚水量の90%以上を多

摩台地部が占め、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。



※昭和28年：地下水揚水量のデータなし
 ※昭和45年まで：事業書の種類の分類なし

地域別の都内揚水量の推移

「令和元年 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。

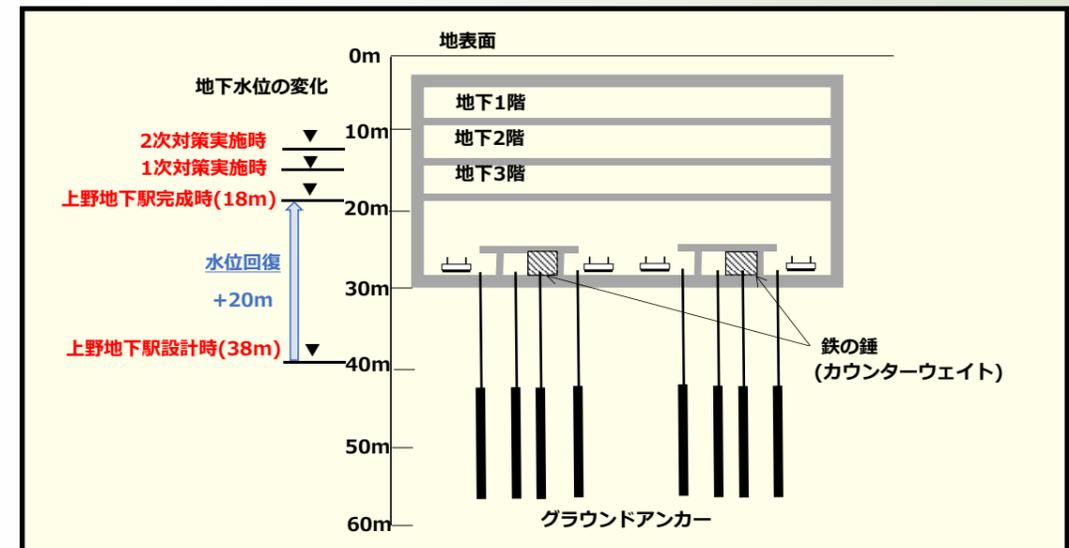
東京駅の総武快速線や上野駅の東北新幹線の駅は地下にあり、容積が大きく、かつ上部に構造物がないという特殊な舟形の構造をしています。これらの駅は、過剰揚水により地下水位が低下していたところに設計・

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18mと地下水位は20m上昇していました。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、鉄の錘(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

○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で、また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、いま汚れています。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、どこを通過して、どの位の時間をかけて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。

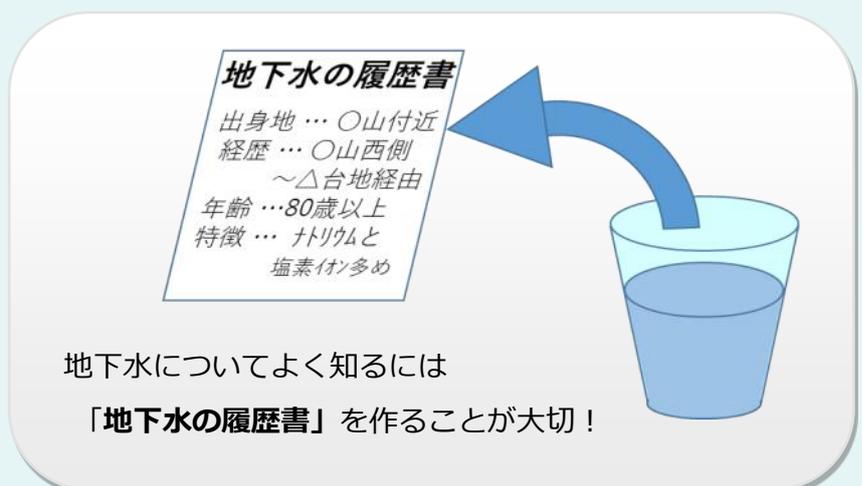
地下水の履歴書は、どのようにつくるのですか？

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って、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。

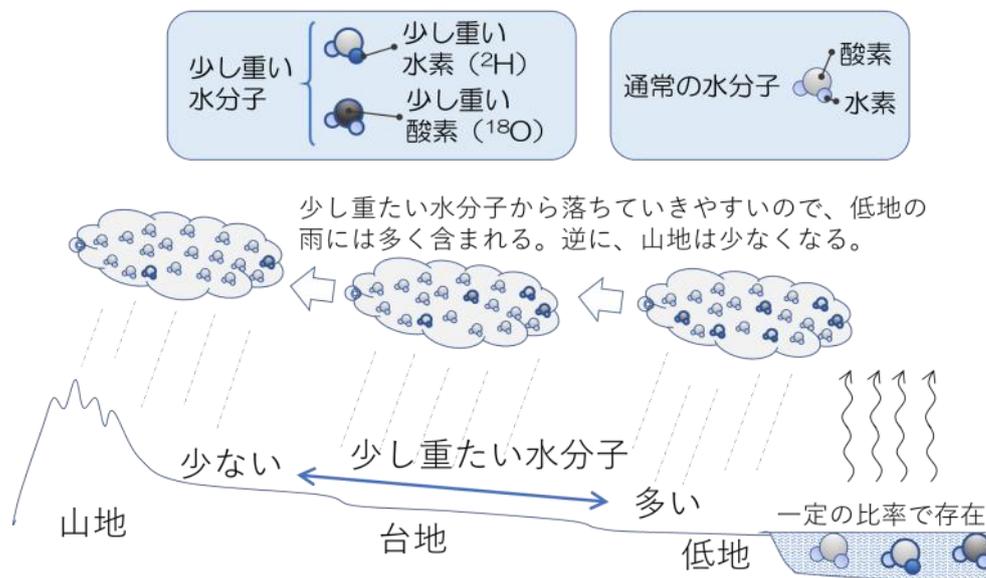
“安定同位体”とは何ですか？

水の分子は、2個の酸素原子と1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。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、安定同位体をよばれます。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ので、トレーサーとして利用されます。

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つくられるときには、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

安定同位体と雨の降る場所の関係



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？

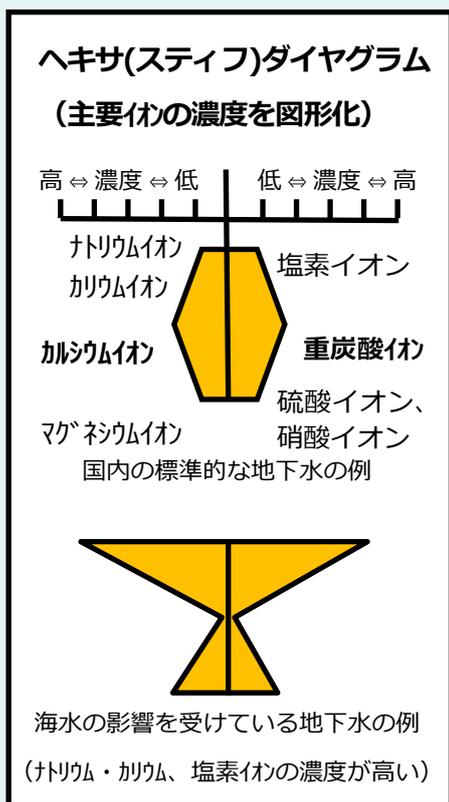
カルシウムやマグネシウム、ナトリウム、塩素などの地下水に溶けて込んでいるイオンなどを利用します。これらの成分は、雨が地表面に浸透し土壌中を降下した後地下水が涵養され、地下水がゆっくりと流動していくうちに土壌や岩石などと反応することにより溶け込んだもので、地下水への涵養が生じた地域や地下水が流動した地域の地形や地質、土壌、植生、気象、人間活動などの場の条件によって、その濃度や成分間の濃度比が変わります。水の各種溶存成分の濃度を六角形に配置してグラフ化したものを、ヘキサ（スティフ）ダイヤグラムといいます。

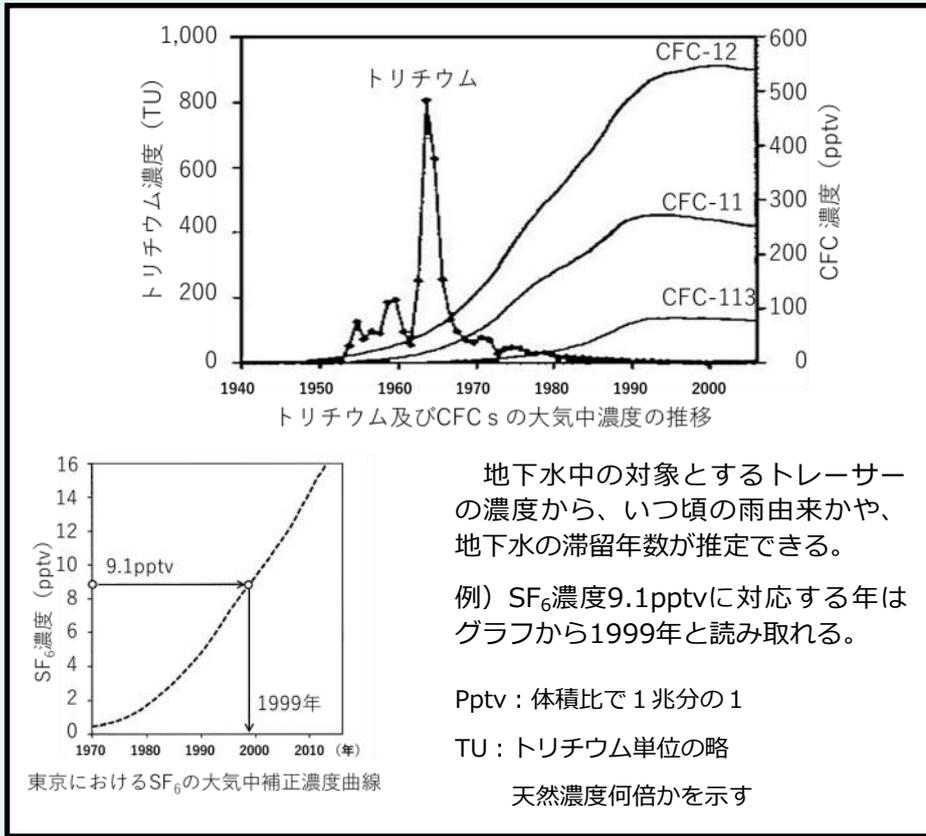
一般に地中の浅い部分を流動した地下水や河川水は、カルシウムイオンと重炭酸イオンの濃度が他の成分に比べ高い傾向があり、ダイヤグラム上では、菱形に近い形を示します。一方、沿岸地域の地下水等、海水の影響がある場合は、ナトリウムイオンと塩素イオン濃度が、他の成分に比べ高くなり、ダイヤグラムが“あたまでっかち”の特

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、言いかえると、ヘキサダイア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ういう物ですか？

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。

温暖化ガスのフロン類は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。概ね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、とくに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。

これまでになんか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

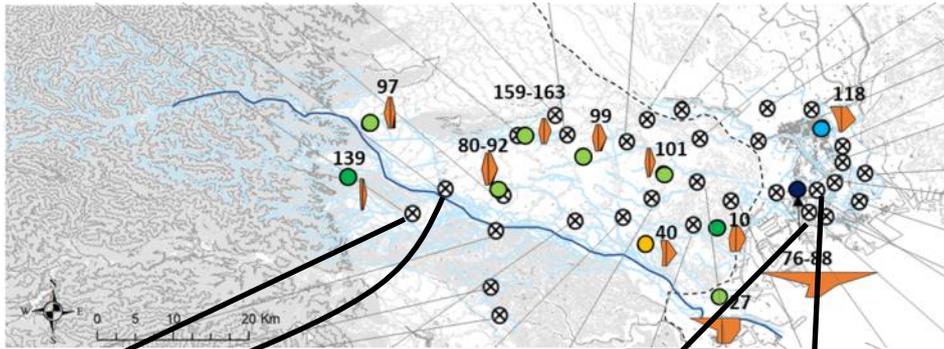
と重炭酸濃度が相対的に多く含まれる一般的な浅層地下水の特徴がみられました。さらに、台地部では地下水の滞留時間は10年程度から40年程度が多くみられました。

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、多摩台地部では概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。

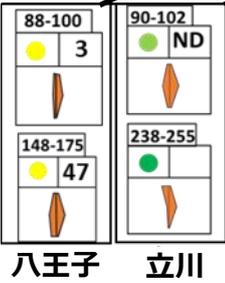
以上のことから、多摩台地部、区部台地部、低地部の地下水は、浅い深度と深い深度では流れの方向が異なるとともに、低地部地下水は滞留時間が80年以上と顕著に古く、安定同位体比が低い特徴も合わせて考えると、標高の高いところで涵養され、長い経路を経て流動してきたことが考えられます。

地下水流動系の解明調査の結果



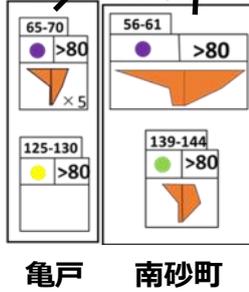
採水深度(m) (スクリン深度)	凡例
酸素安定同位体比(‰)	地下水中のSF ₆ 濃度から推定した地下水の滞留時間(年)
● >-7.4	>80: 検出できないレベルの濃度で、80年以上前のSF ₆ 使用以前の雨由来の地点。
● -7.5 to -7.7	ND: 大気中よりも濃度が濃いため、分析不能な地点。
● -7.8 to -8.0	
● -8.1 to -8.3	
● -8.4 to -8.6	
● -8.7 to -8.9	
● -9.0 to -9.2	
● -9.3 to -9.5	
● -9.6 to -9.8	
● -9.9 to -10.1	
● -10.2 to -10.4	

$\begin{matrix} \text{Na}^+\text{K}^+ & \text{Cl}^- \\ \text{Ca}^{2+} & \text{HCO}_3^{2-} \\ \text{Mg}^{2+} & \text{SO}_4^{2-}\text{NO}_3^- \end{matrix}$	Meq/L
ヘキサダイアグラム	



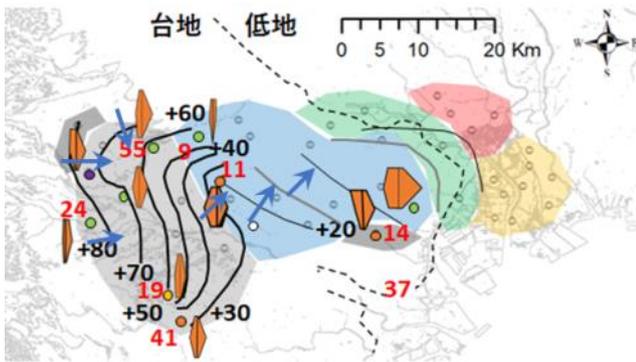
多摩台地部

- ・滞留年数 数~40年くらい
- ・カルシウムイオン、重炭酸イオンが多い
- ・酸素安定同位体比は高め

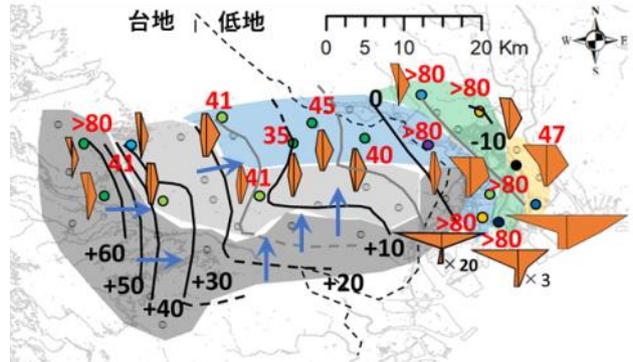


区部低地部

- ・滞留年数 80年以上
- ・ナトリウム・カリウム塩素イオンが多い
- ・酸素安定同位体比が低い地点がある。

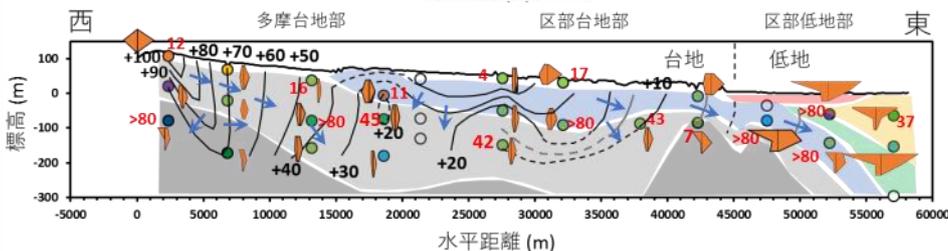
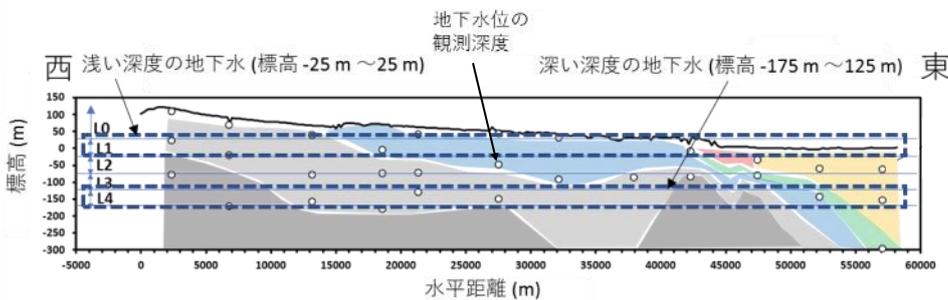


浅い深度の地下水 (標高-25 m ~ 25 m)



深い深度の地下水 (標高-175 m ~ -125 m)

異なる深度の水平面の地下水の流動と水質等の分布



鉛直面の地下水の流動と水質等の分布

-10	-5	0	5	10
$\begin{matrix} \text{Na}^+\text{K}^+ & \text{Cl}^- \\ \text{Ca}^{2+} & \text{HCO}_3^{2-} \\ \text{Mg}^{2+} & \text{SO}_4^{2-}\text{NO}_3^- \end{matrix}$				
Meq/L				

赤字数値: 地下水の滞留時間(年)

地下水位の等高線 (- :10m, - :5m)

地下水の流動方向

○	>-7.4	高い
●	-7.5 to -7.7	↑
●	-7.8 to -8.0	
●	-8.1 to -8.3	↓
●	-8.4 to -8.6	
●	-8.7 to -8.9	低い
●	-9.0 to -9.2	
●	-9.3 to -9.5	↑
●	-9.6 to -9.8	
●	-9.9 to -10.1	↓
●	<-10.2	

- 有楽町層
- 高砂層
- 江戸川層
- 舎人層
- 東久留米層
- 北多摩層

○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～ (東京大学愛知研究室)

○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るのですか？

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。

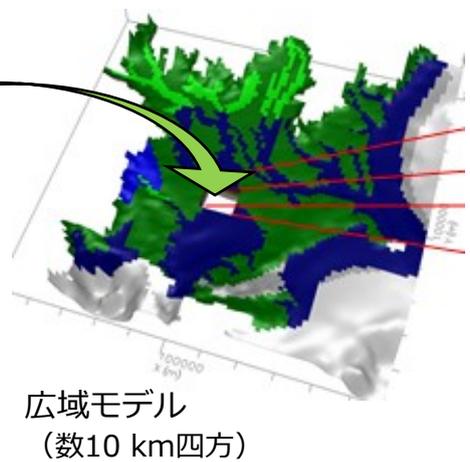
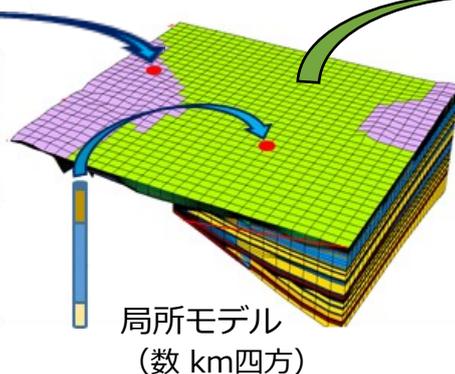
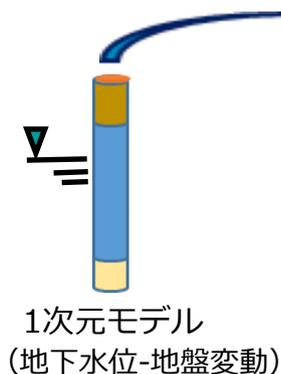
都内ではたくさんのボーリング調査が行われていて地下の地層については大まかにと分かっていますが、モデルの作成に必要な地盤の性質である物性値など（例 透水係数：水



の通りやすさ、空隙比：土粒子の間の隙間の大きさ…)は、詳細な情報があまりなく、そのままでは正確なシミュレーションモデルは作れないのです。

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

シミュレーションモデルの構築イメージ



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）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、地盤がどのようになったかを知りたいという事になりますが、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、地盤の情報を探るとす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ので、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？

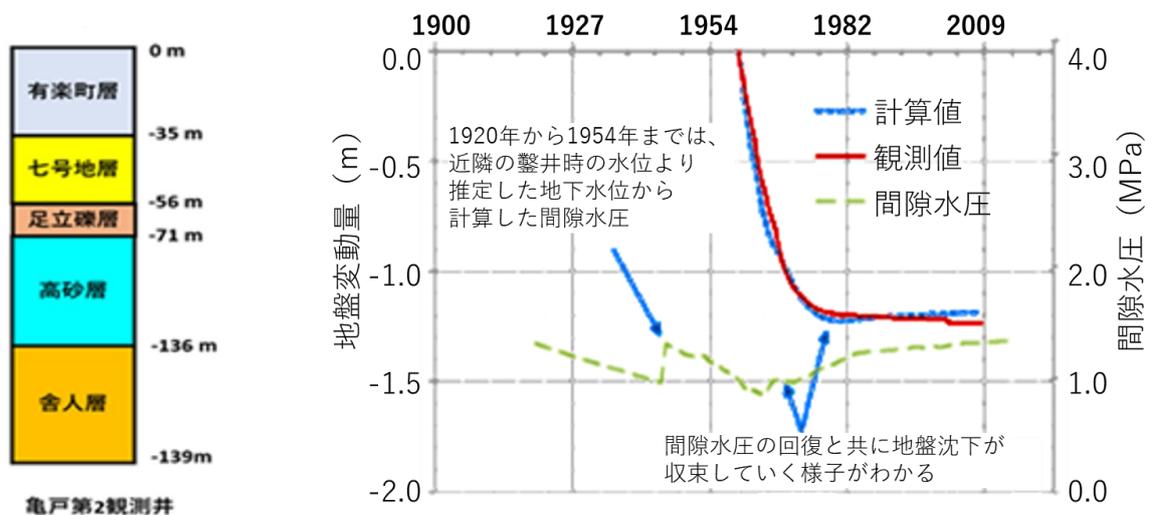
先ほど、実測値に合うように物性値を変化させて何回も計算をすると説明しましたが、より計算回数を少なく、早く実測値に合うようにするための手法です。少しずつ物性値を変化させた条件をたくさん作って、それぞれ計算させますが、その中から結果の良いものを残して更に変化をさせていきます。最適化した条件（遺伝子）を残すことで、より早く最適化ができるという理屈です。

○1次元モデルは完成しそうですか？

令和元年度に5カ所、令和2年度に5カ所の10か所について、1次元モデルが完成しています。

例として亀戸第2（江東区）という観測井を示していますが、地盤沈下の実測値に対して、計算値がほぼ

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、観測値と概ねあった変化をしています。深さ139mまで1mおきの地盤の物性値が得られ、モデルを作成することができました。

合致するようになっているのが分かるかと思います。逆解析の結果として、深さ1mおきの地点の地盤について、それぞれ5種類の物性値が得られました。これにより、地下水の水位が変化したら地盤がどのように変化するかという詳細なモデルを作成することができました。これは従来の地層だけで条件を決めて作成したモデルと比べると、かなり精度が高いものとなっています。

また、[物性値の推定](#)から、現在の地盤の状況について新たに分かった事もあります。

○物性値の推定から何が分かったのですか？

物性値の逆解析からは、現在の地盤の状況だけではなく、過去に地盤がどのような状況だったかも推定でき

ます。

地盤沈下が激しかった1970年頃の地盤の状況を見ることもできます。この頃の「間隙水圧」という地盤中の水の持つ圧力に着目すると、地下水の揚水量が多かった頃なので、地下水が溜まっている砂層（滞水層）から水が汲まれ、砂層の間隙水圧が大きく低下していることが分かっています。それに伴い、砂層に接した粘土層からも引っ張られるように水が絞り出されて粘土層が縮むため地盤沈下が起きています。しかし、今回の計算の結果、粘土層では水の動きがゆっくりなため、間隙水圧は低下しているものの下がりきってはいないことがわかりました。つまり、粘土層には絞り出し切れていない水が残っていて、仮にまた揚水が盛んにおこなわれると、この粘土

層からまた水が抜けだして、地盤沈下が再開する余地があるということが判明しました。この結果については、学会などでも発表しています。

○今後はどういう展開になりそうですか？

一つは、この1次元モデルについて、令和3年度に5地点追加します。

もう一つは、この1次元モデルを拡張させた局所モデル、さらに広域モデルの開発、連結などを予定しています。

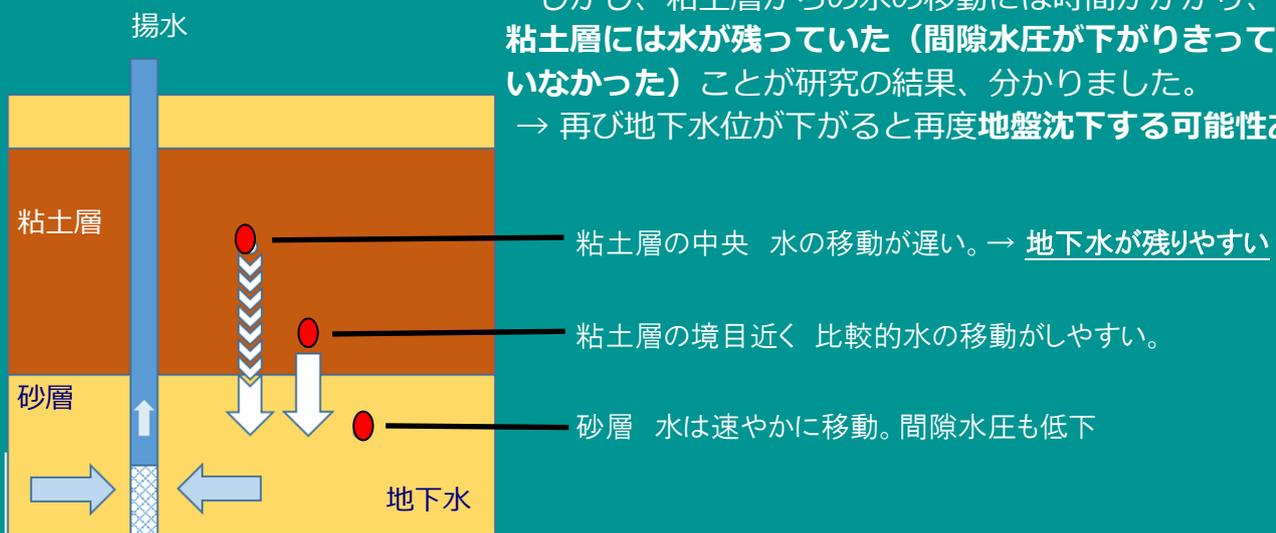
ただ、局所モデル、広域モデルの開発にはいろいろと解決しないといけない課題もあり、まだ何年か時間がかかる見込みとなっています。

○物性値の推定から分かった事

過剰な揚水により、地下水が吸い上げられて砂層の「間隙水圧」が急速に低下しました。

しかし、粘土層からの水の移動には時間がかかり、粘土層には水が残っていた（間隙水圧が下がりきっていなかった）ことが研究の結果、わかりました。

→ 再び地下水位が下がると再度地盤沈下する可能性あり！

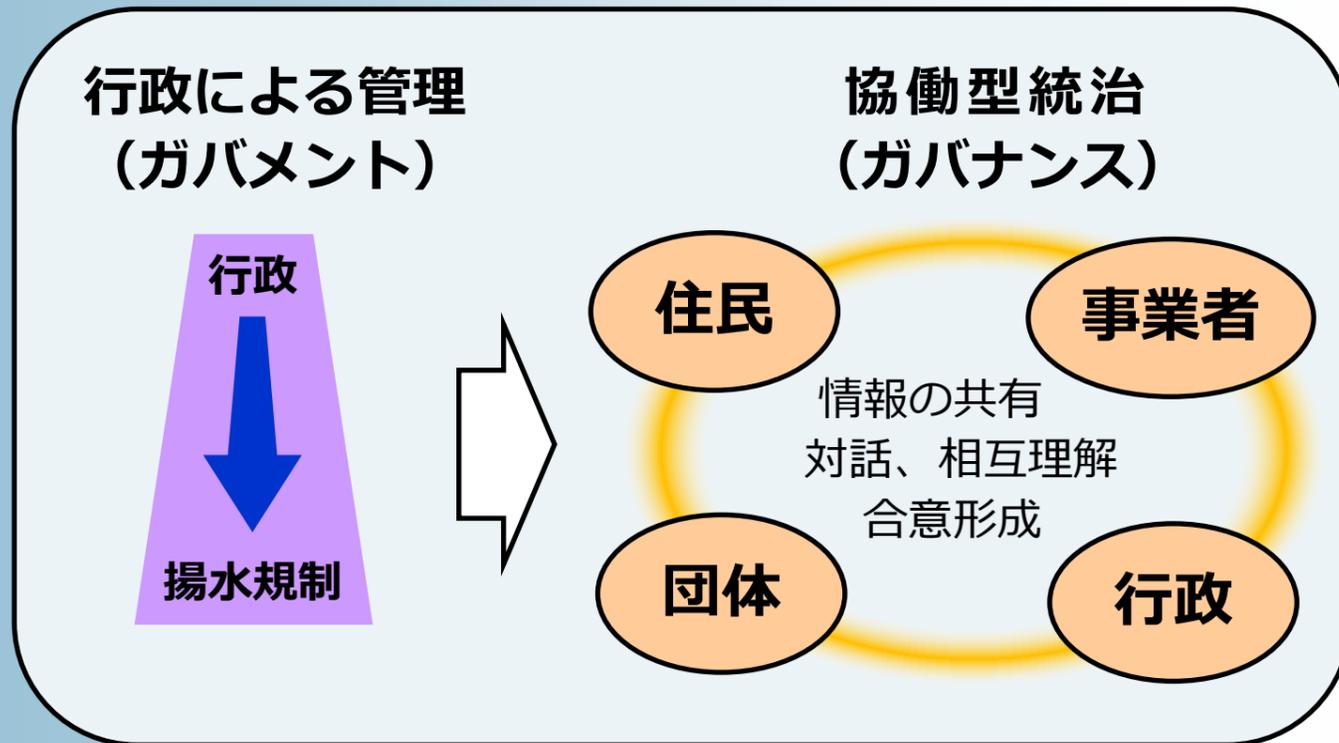


地下水を汲み上げたときのイメージ

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

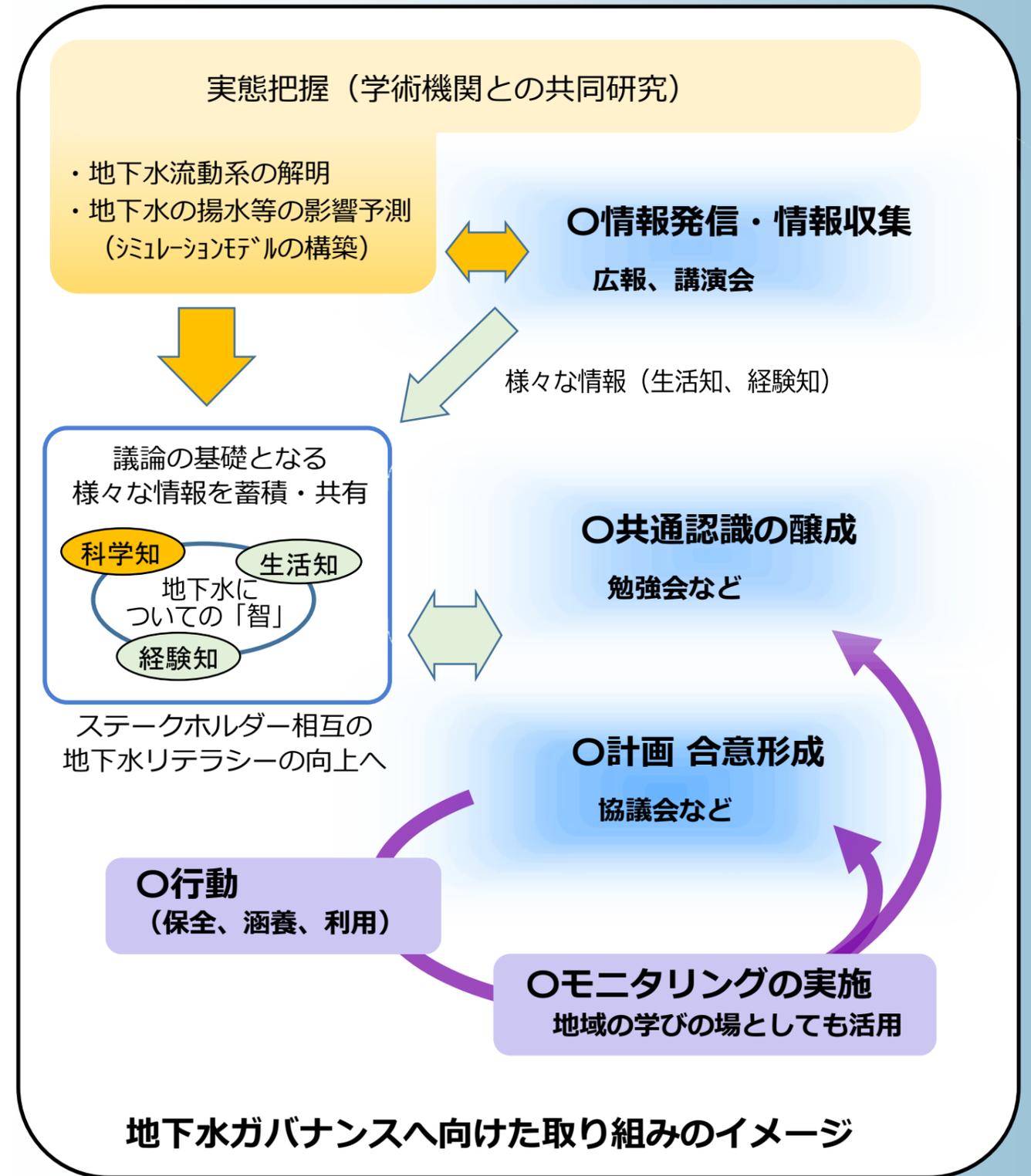


これまでの、行政による揚水規制を中心とする**管理（ガバメント）**が行われてきました。

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。



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！