

第1章

大切な水資源「地下水」

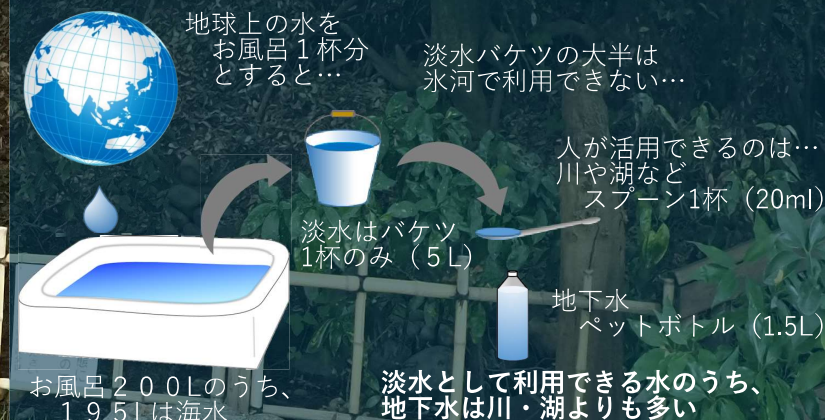
資料2-1

「東京の地下水、地盤環境レポート（案）」

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。

人が利用可能な「水」はとても少ない



水資源は、気候変動の影響の懸念や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、世界的にとっ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。

ただ、地球上の水の大半は海水であるため、人が利用可能な淡水はかなり限られています。そのような中でも川や湖などに比べると、地下水は利用可能な量も多く、重要な水資源の一つです。

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。

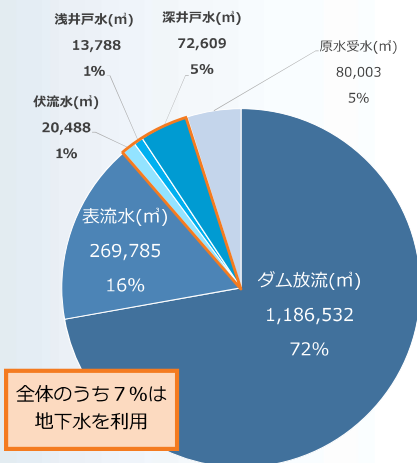
○生活に身近な地下水 ～今も利用されている地下水～

上水道の普及に伴い、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ことのない地下水

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、災害時協力井戸指定の取組みが増えています。



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～

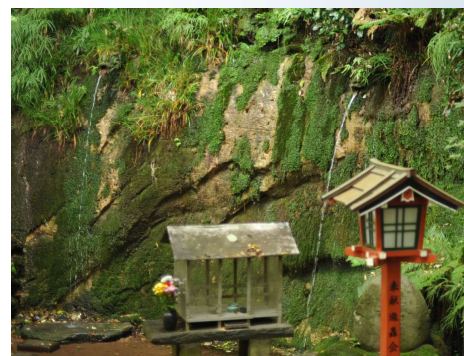
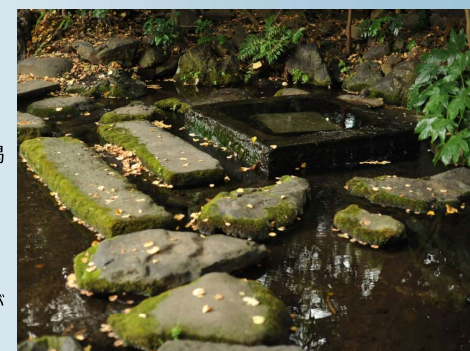
地下水の流れを直接見ることはできませんが、地中から湧き出る地下水を「湧水（ゆうすい）」として観察できる場所が都内にも複数あります。「湧水」は、台地の崖下や丘陵の谷間などで観察され、自然に地下水が湧き出しています。

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）

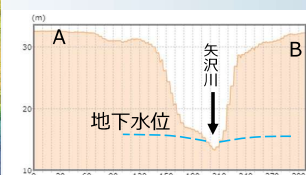
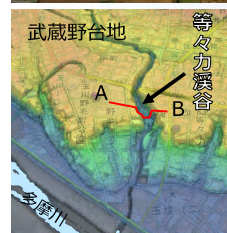
武蔵野台地の標高50m前後にある崖に位置する、武蔵野三大湧水池の一つですが、現在は湧水が枯渇してしまい、深井戸からの揚水で賄っています。

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。



等々力渓谷（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にもわたる渓谷は、都心にあるとは思えないほどに自然が豊かで、四季折々な自然が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。



等々力渓谷周辺の立体図と断面イメージ

等々力渓谷内を流れる矢沢川が、武蔵野台地を削った結果、落差20mほどの渓谷ができました。その結果、地下水の流れている層が地表に現れたことで、渓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。

○東京でかつてあった公害 ～過剰揚水による地盤沈下～

第 二次世界大戦前及び戦後の復興期に、工業用として地下水を大量に汲み上げた結果、地下水を含んでいた地層が縮んでしまい、最大約4.5mもの地盤沈下を引き起こしました。区部低地部を中心に建物などの構造物の浮き上がりや、海面よりも低い地域（ゼロメートル地帯）が発生しました。

現在は、地下水の汲み上げを規制することで、地下水位は回復傾向にあり、地盤も安定していますが、大きく沈下した地面が元のような高さまで戻ることはありません。

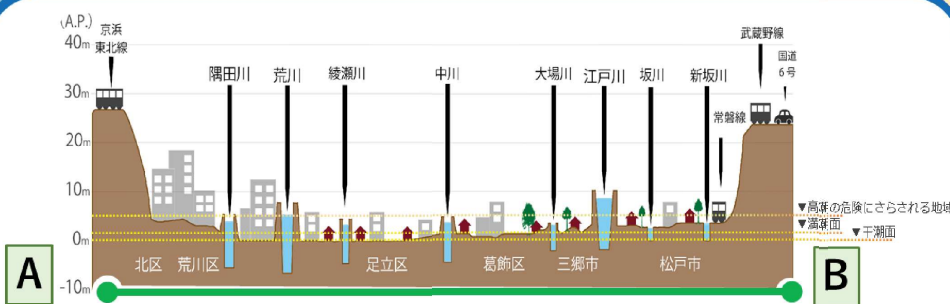
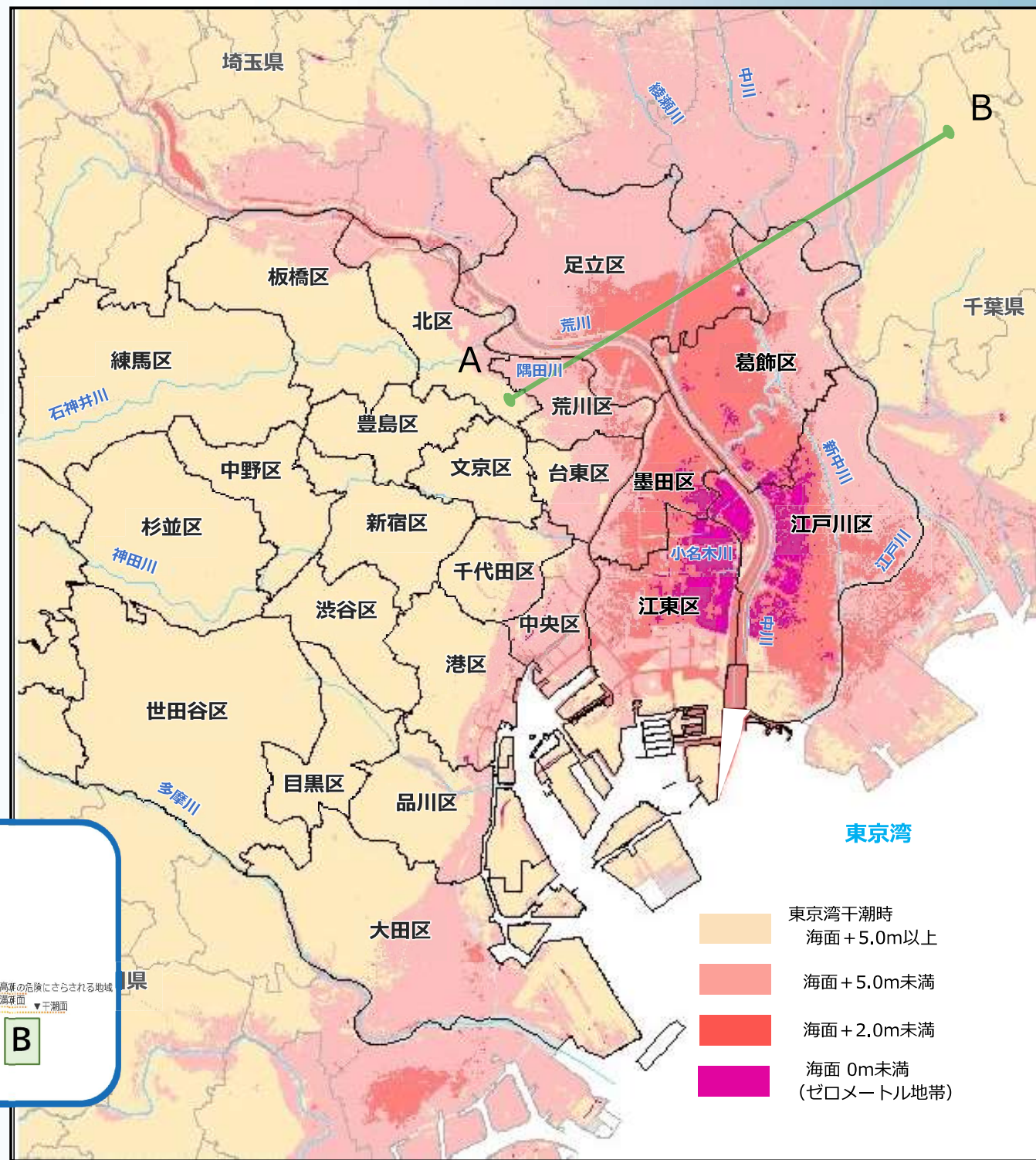


地盤沈下による井戸の抜け上がり
(葛飾区、昭和30～40年代)



満潮時、護岸の天端近くまで水が迫る小名木川
(昭和45年、4次かさ上げ済)

江東区 「町の記憶とみらい展 浸水から親水への道のり」より



- 東京湾干潮時
海面+5.0m以上
- 海面+5.0m未満
- 海面+2.0m未満
- 海面 0m未満
(ゼロメートル地帯)

○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

地下水の実態把握

地下水の利用状況、地下水流動経路、シミュレーションモデルによる地盤への影響予測等…

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）の理解と納得へ

地下水管理は新たな時代へ ～水循環基本法の改正～

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。

これらの地下水についての科
学的な情報を基に、今後、地域
全体での話し合いの場を設け、
理解と納得を深めながら、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、だれのこと？

住民

地下水を利用したい人
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
地下水を規制を行う自治体
地下水活用による地域活性を
希望する自治体

第2章 地下水の基礎知識

地下水は地面の中を流れることから、普段の生活では直接目にすることや意識されることも少ないです。また、地下水に関する情報に触れることも少ないですが、水循環の大きな流れについて理解するには、目に見える雨水や河川を流れる水（河川水）、海の水だけでは不十分で、これらをつなぐ地下水についても理解することが重要です。

本章では、目に見えず分かりにくい地下水や地盤に関する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、目に見える海水や河川水として常に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、この循環を適正に維持することで、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。先に述べたように、地下水は水循環において、

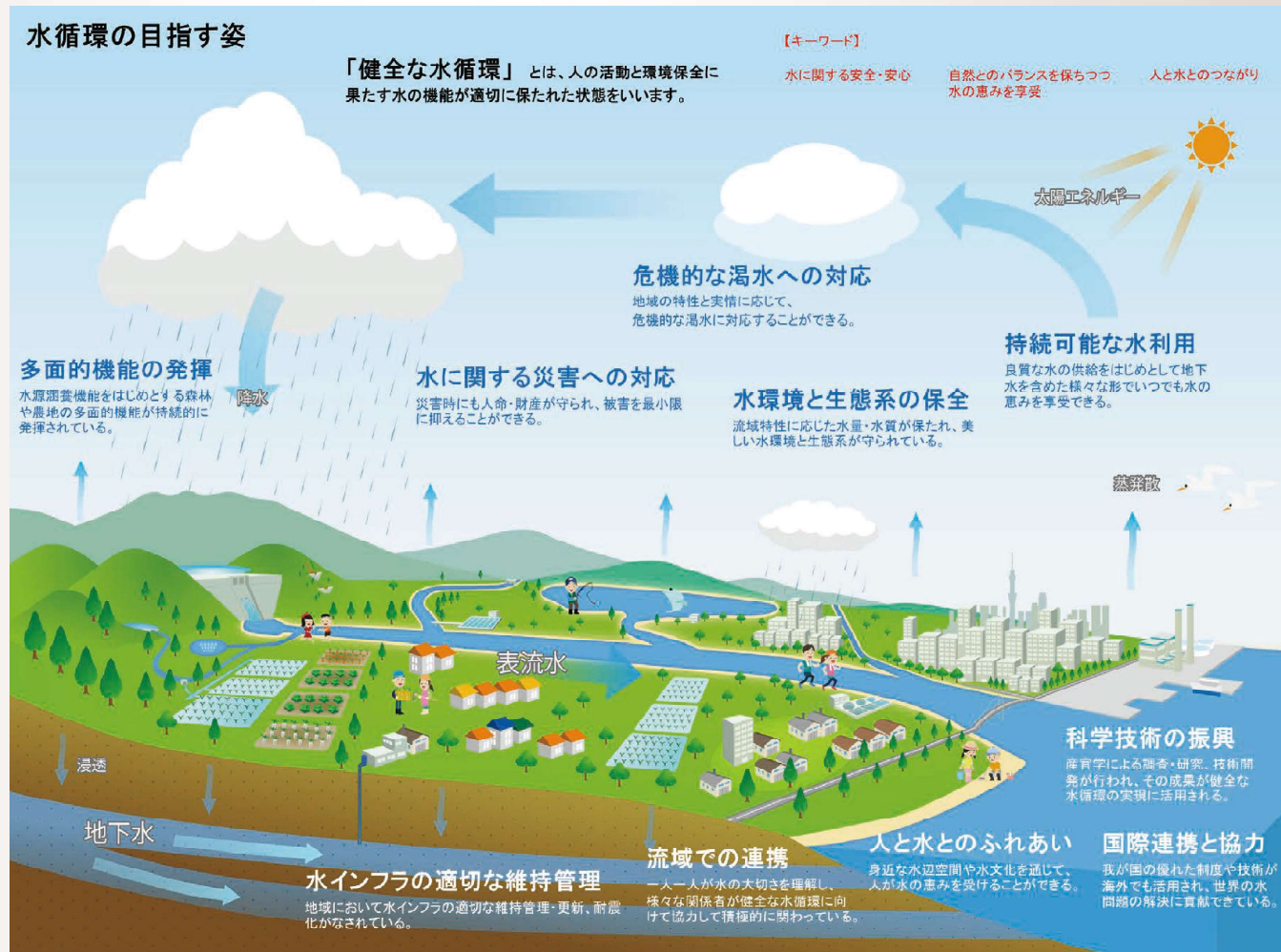
雨水と地表水（河川水、湖沼水、海水）をつなぐ重要な役割を担っています。

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ようになっています。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。このため、東京都は東京都雨水浸透指針を策定するなどして、雨水を地下に浸透させる取組を進めています。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。



流域マネジメント事例集（内閣官房水循環より）

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。

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い地層を「**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。

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、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、地下水が浸透する地域（涵養域）からの圧力や地層の荷重などを受けて、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おり、地下水位の高さの違いで低い方へと地下水が流れます。

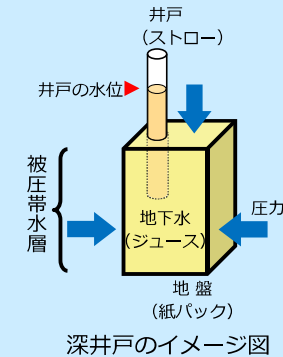
河川水が1日で数km～数10kmの速さで流れるのと比べると、地下水の流れは1日に1m未満～100m程度とゆっくりとしています。一方、河川水や湖沼の水量に比べ、地下水の貯留量ははるかに大きくなります。

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、深井戸の水位は受けている圧力により、自身の帯水層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。



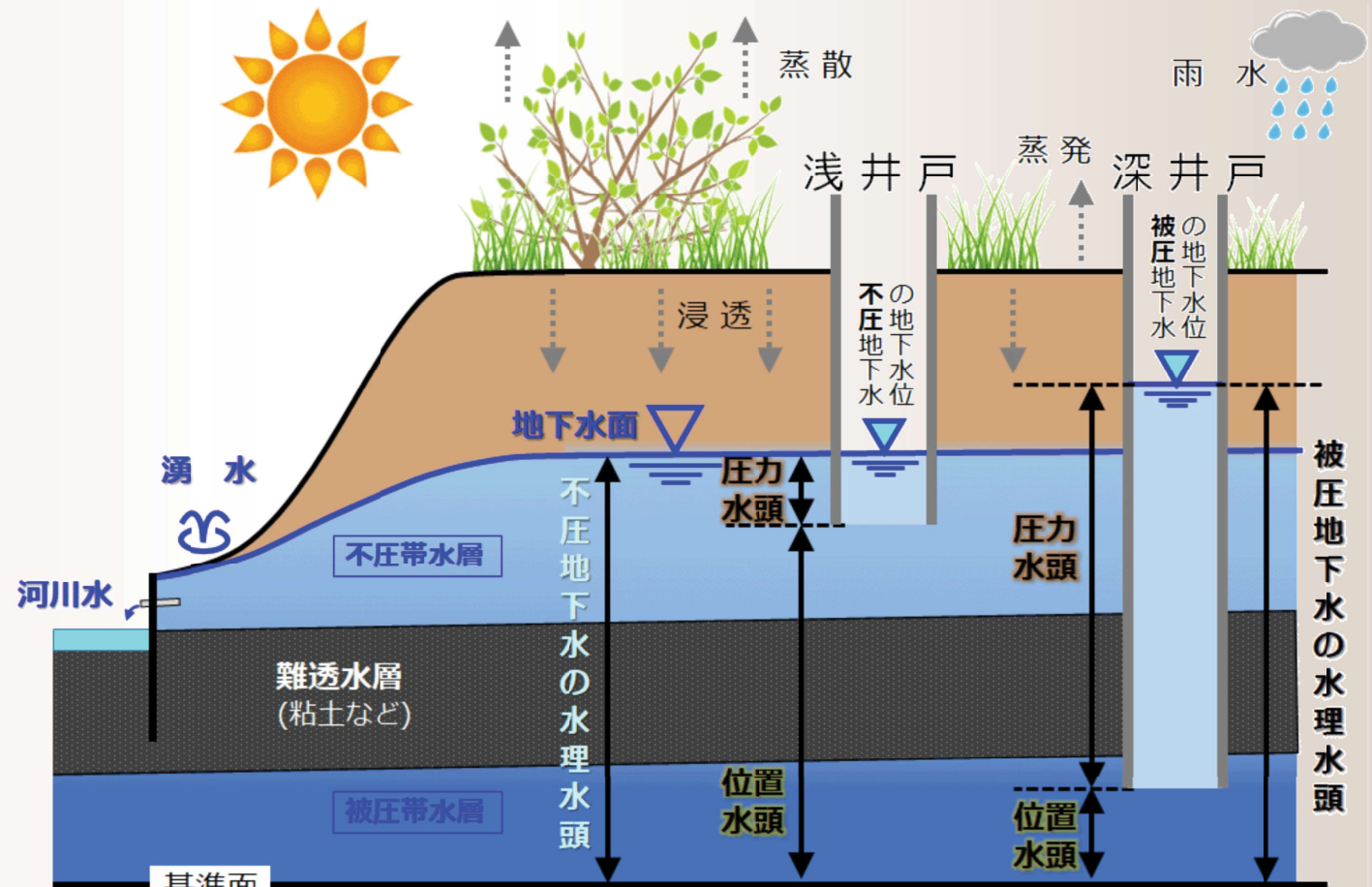
「水理水頭」とは、地下水の持つエネルギーの大きさを水柱の高さで表したものです。

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

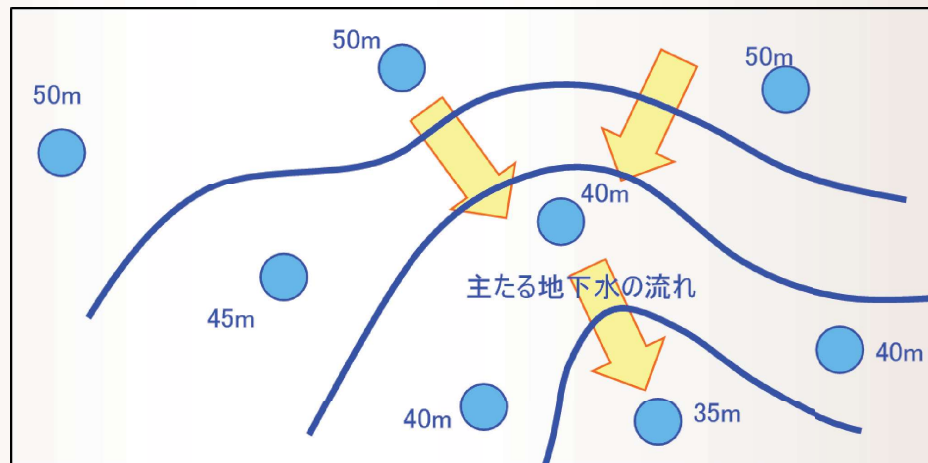
※通常は海水面標高：0m

井戸内の地下水位と水理水頭との関係

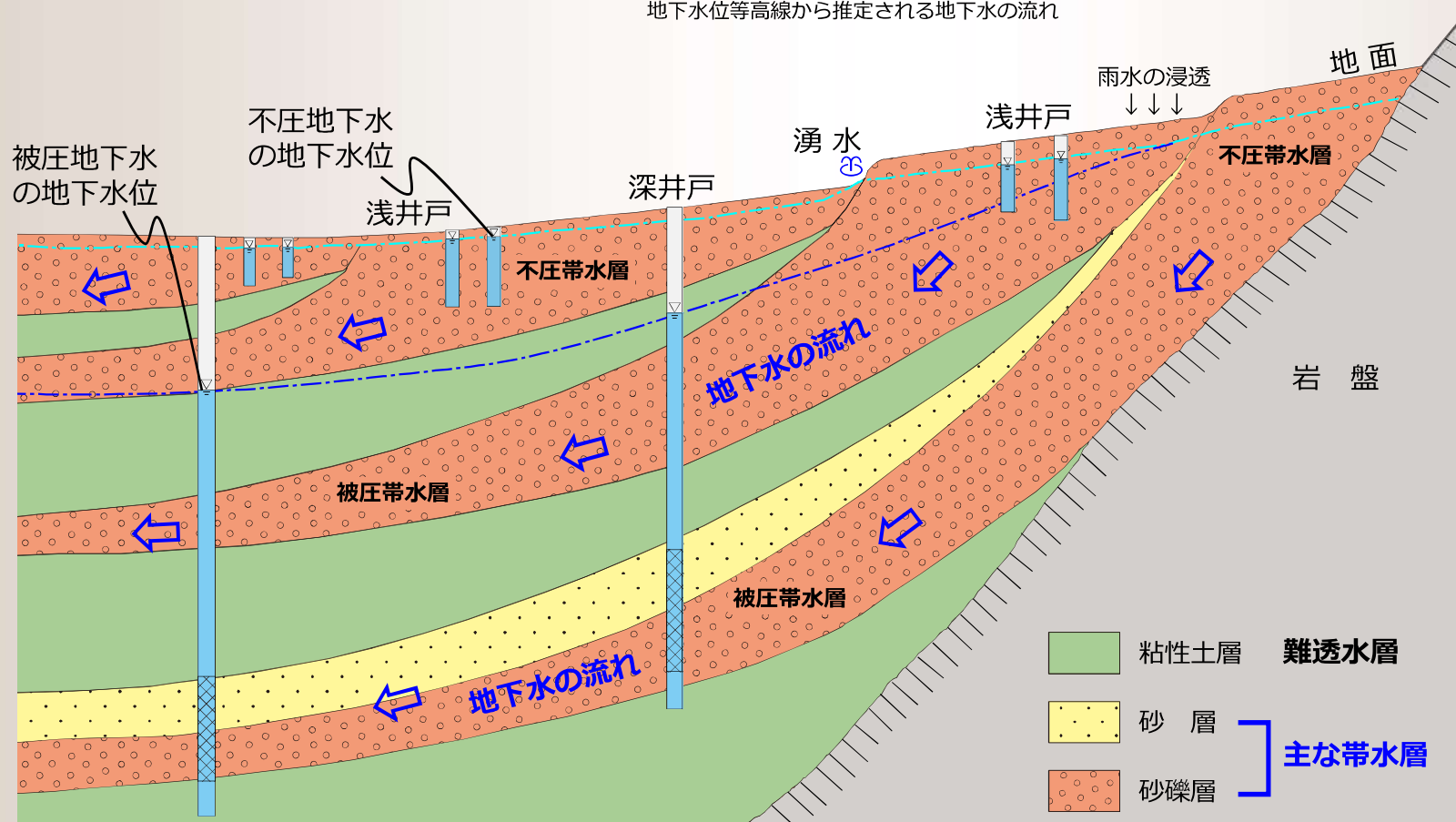
地下水の流れ

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ぶと、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。

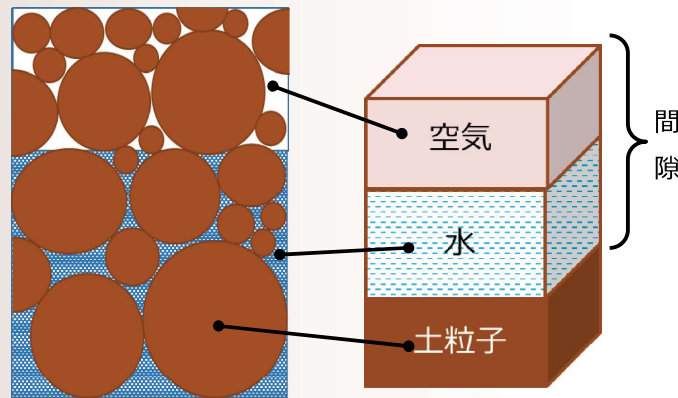
日本においても、地盤沈下の防止や地下水汚染の拡散防止等の観点から、個別に対応する法制化はなされていましたが、「水循環基本法」が制定される以前では、法的な土地の所有権について、「法令の制限内に於いてその土地の上下に及び(民法207条)」とされ、地下水は私有財産とみなされてきました。

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、水分、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。

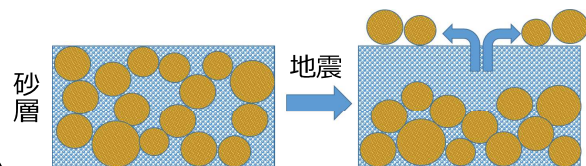


$$\text{間隙比} = \frac{\text{間隙（空気 + 水）}}{\text{土粒子}}$$

コラム：液状化現象と地盤沈下は違うの？

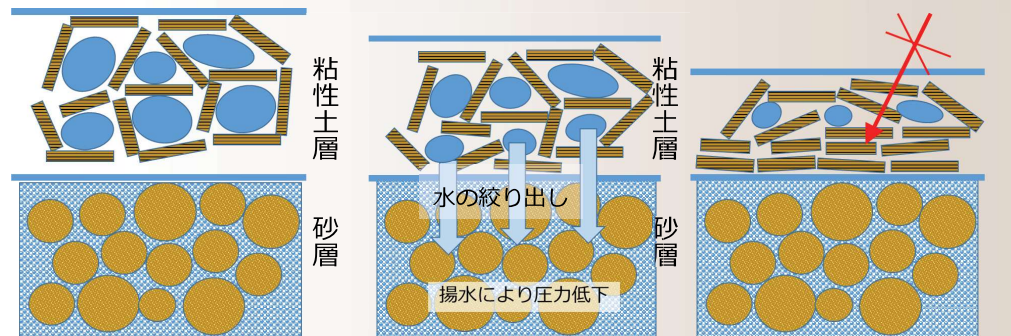
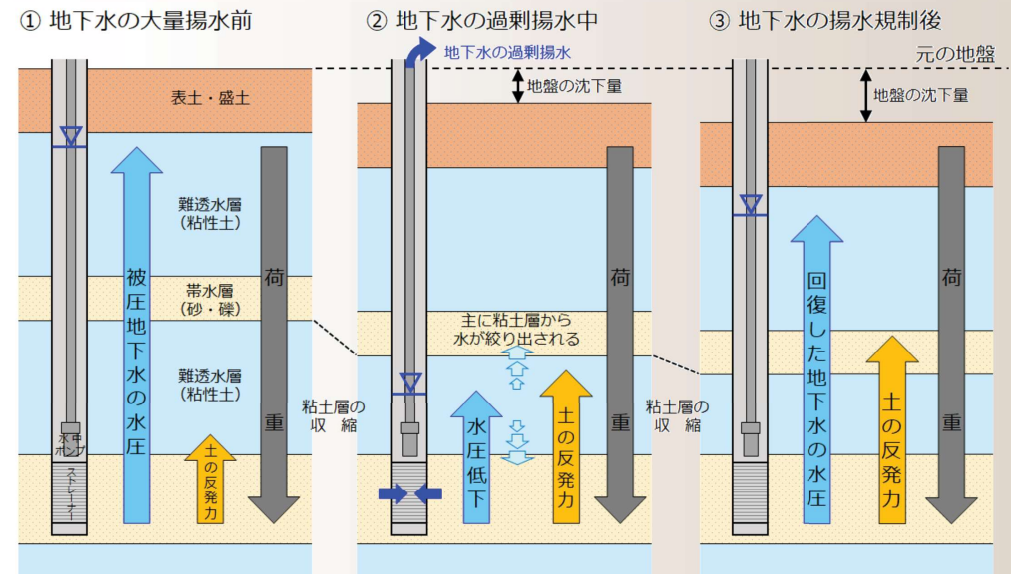
地震の際に発生することがあ
る「**液状化現象**」は、地下水位
が高く、粒の大きさが均質な**砂
層**で発生し、粘性土層が収縮す
る地盤沈下とは別の現象です。
一見固そうな砂層の地盤も、
砂粒子が絡み合いながら隙間を

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



地下水の過剰揚水にともなう水圧低下と粘性土の収縮イメージ

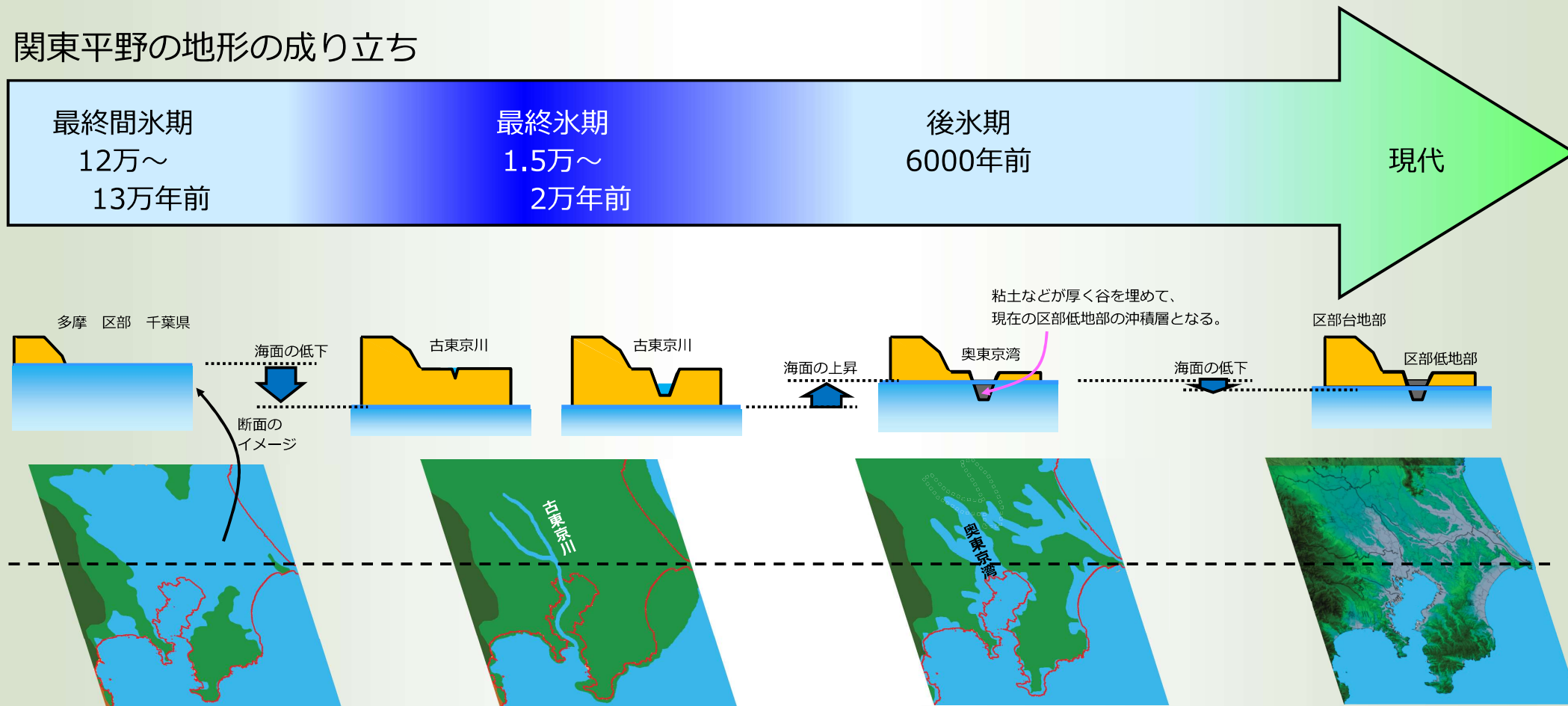
性土層全体では水を通しにくい
難透水層となります。

一方の砂や石（礫）でできた
層は、土粒子の間に隙間があ
り、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。

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。

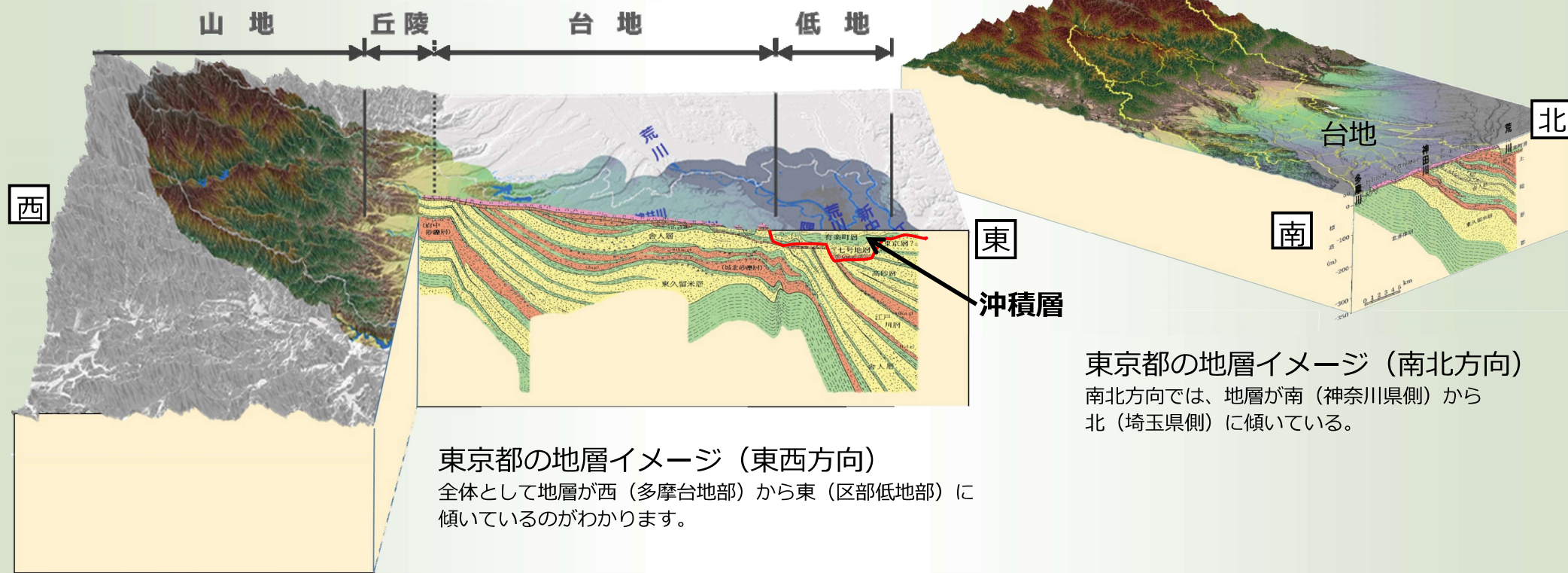
③ 氷期が終わり、温暖な気候により海面が上昇しました。奥東京湾（古東京川の跡）の水面下では、上流から流れてきた粒子の細かい粘土やシルトなどが、深い谷を埋めるように堆積しました。

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。低地に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地下水が流れているのです。

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見えがえま

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、地下浅くに存在する地下水で、上面に難透水層が存在せず、雨水が浸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。

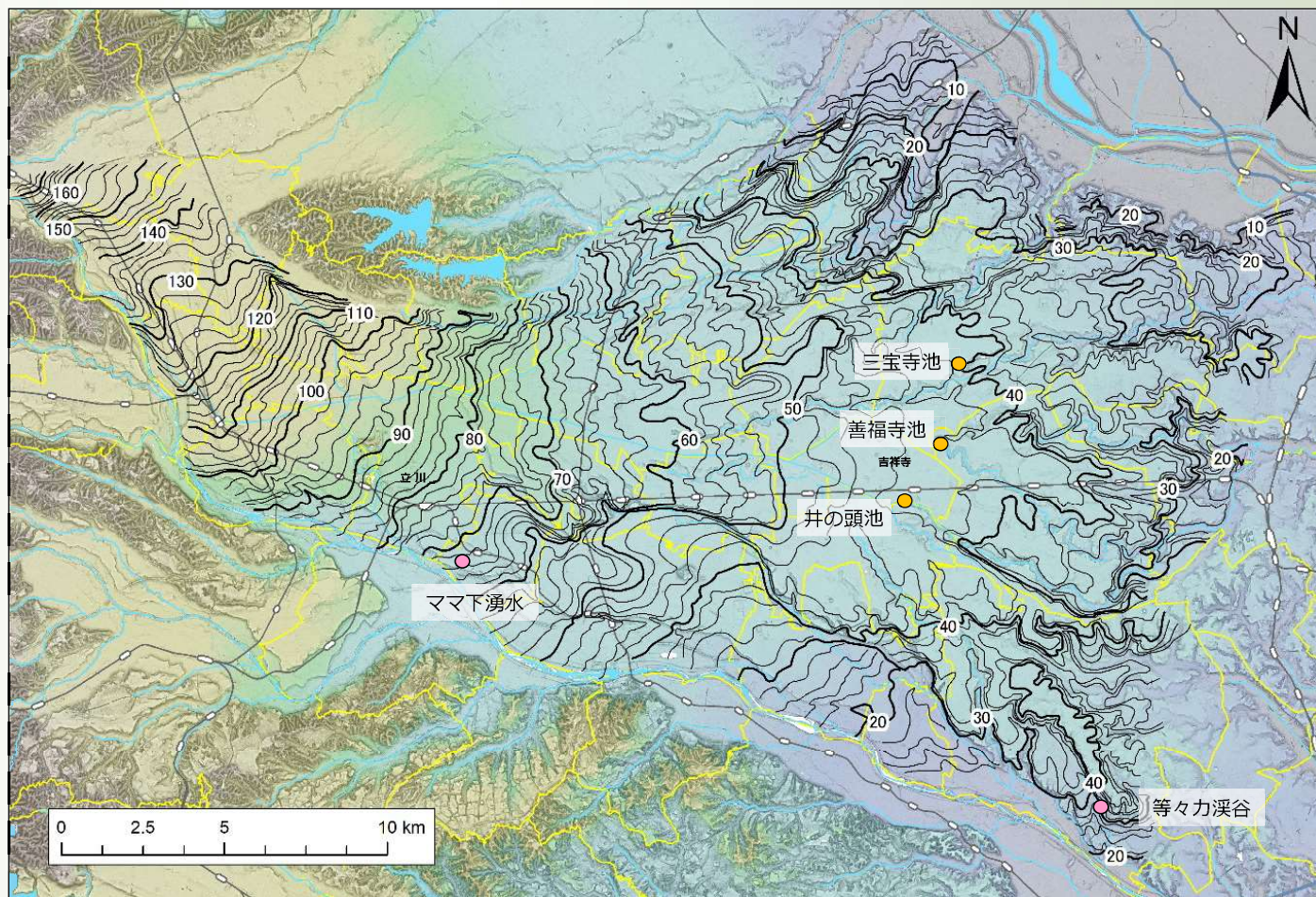
地下水は、この地下水位等高線と直交する方向に高い方から低い方へ流れていますの

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。

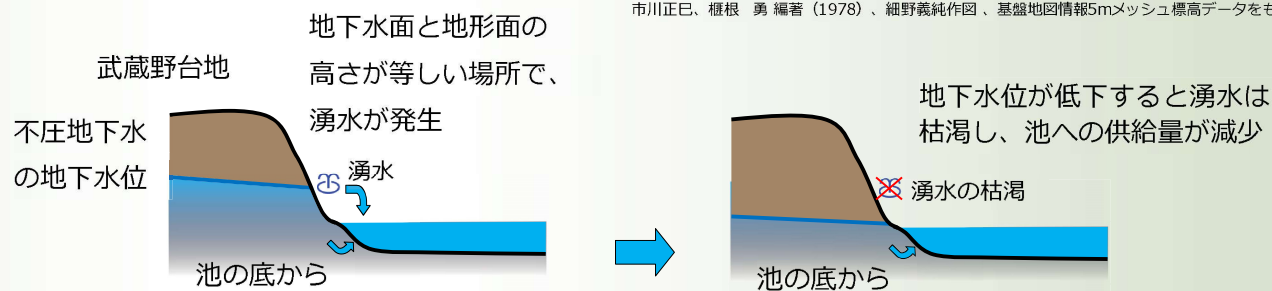
武蔵野台地では、昭和30年代半ばまでは井の頭池、善福寺池、三宝寺池など、扇状地の地形を反映した湧水群が存在していましたが、地下水位の低下により、いずれもほぼ枯渇してしまいました。

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。



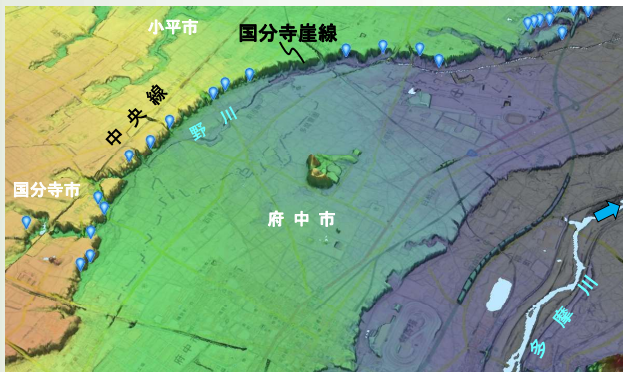
また、社寺とも関係が深く、天平年間に建設された調布市の深大寺は水神と関わりがあり、国分寺市の史跡国分寺は豊富な湧水の場に建立されたといわれています。

湧水そのものが信仰の対象とされる場所も、世田谷区の等々力不動尊など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

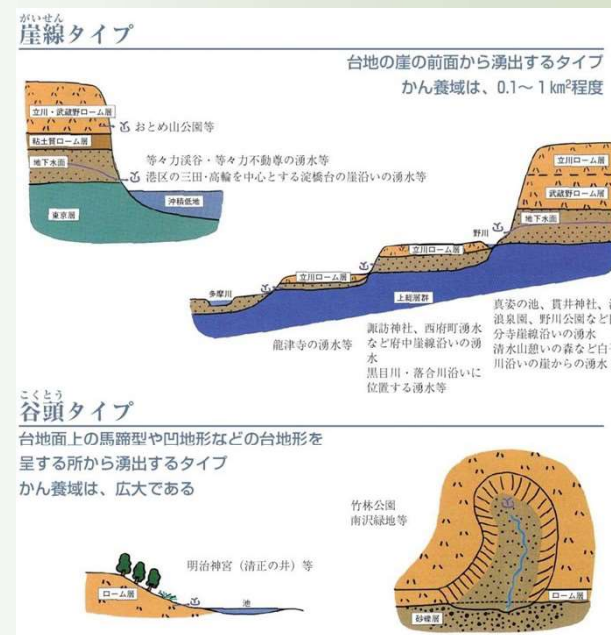
国分寺崖線を境に標高が異なっています。崖沿いには、湧水が湧き出している箇所（青い点）があり、崖沿いの野川に流れています。



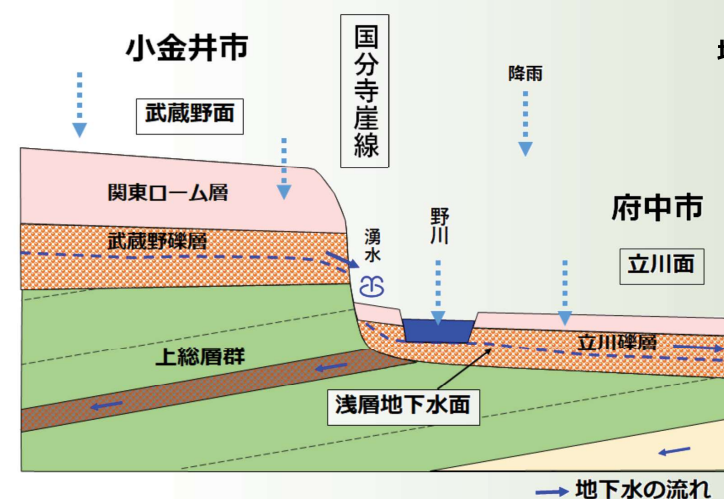
東京の湧水は、武蔵野台地や、多摩川の支川である秋川、浅川流域に多く見られます。東京の湧水は、湧水地点周辺の地形や湧出形態から、「崖線タイプ」と「谷頭タイプ」の2種類に分類することができます。

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

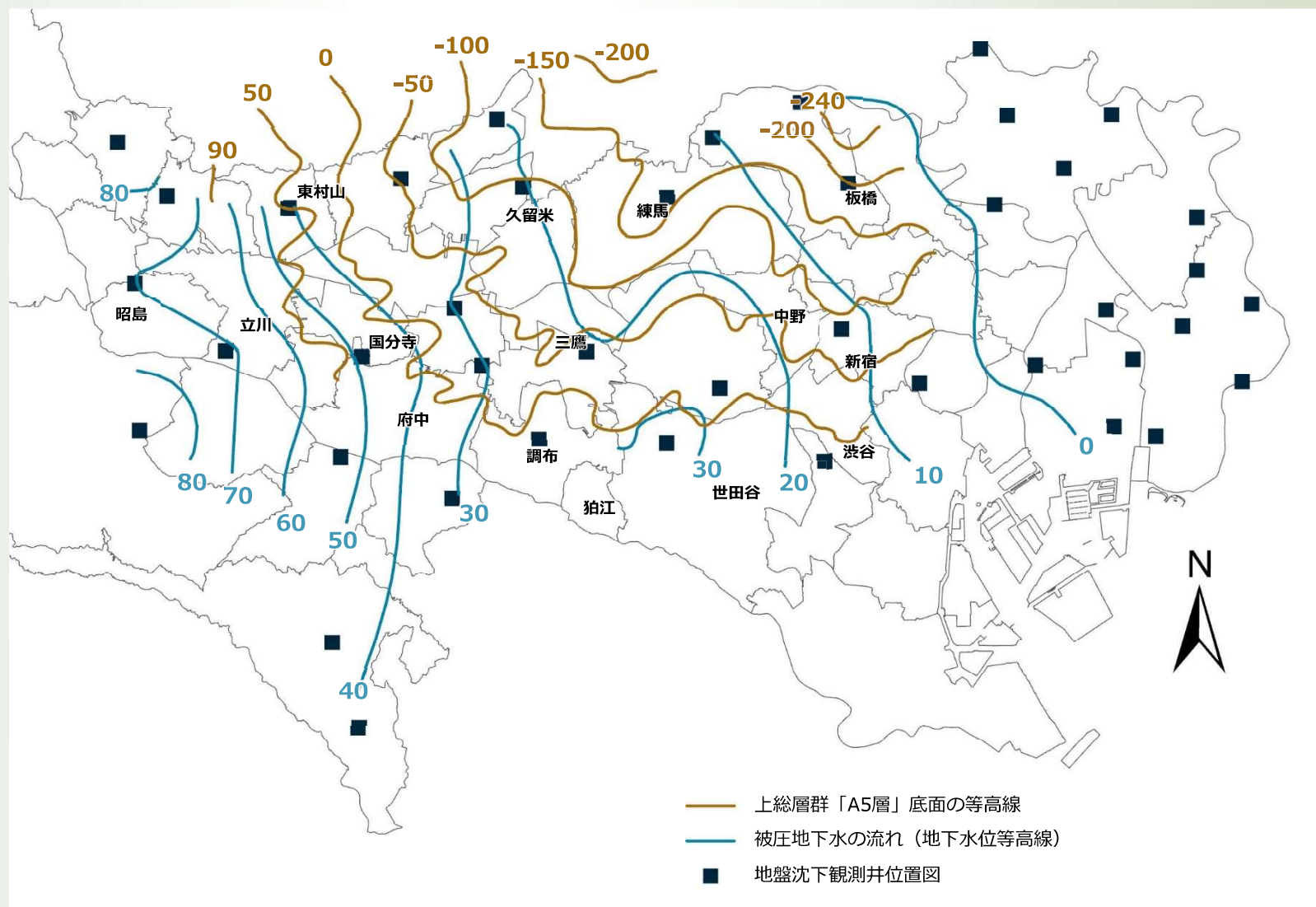
武蔵野段丘と立川段丘が隣り合う野川付近では、崖下から湧き出した湧水が河川水を経て、再び地下水として地下に浸透するような、複雑な流れがあることも知られています。このように、地下水は水循環において、雨水と地表水（河川水、湖沼水、海水）をつなぐ重要な役割を担っています。

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、概ね帯水層の分布に沿って流れていると考えられます。



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）

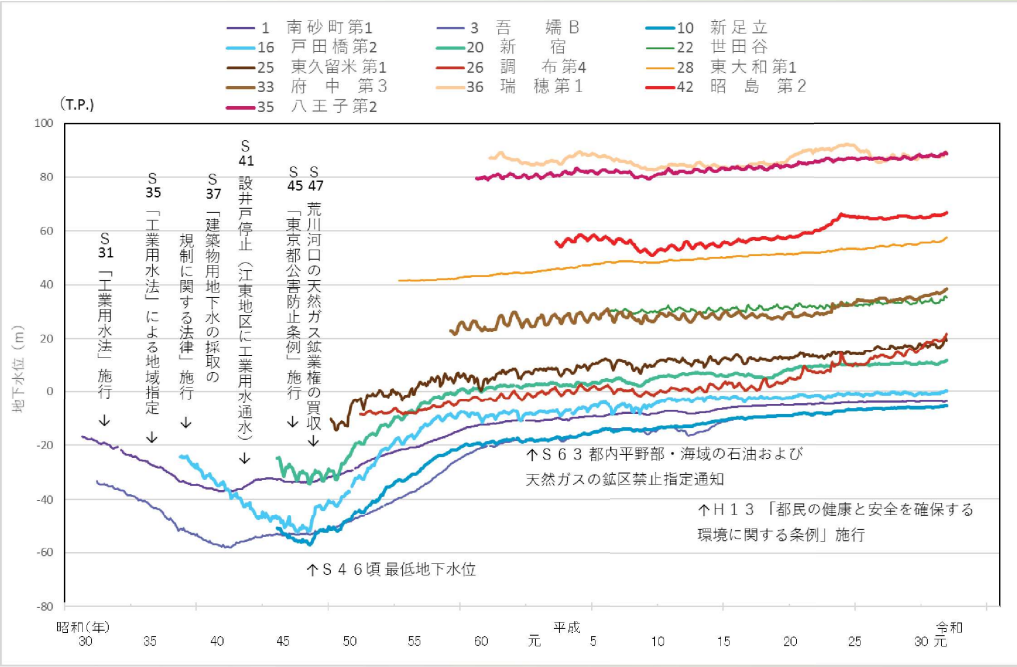
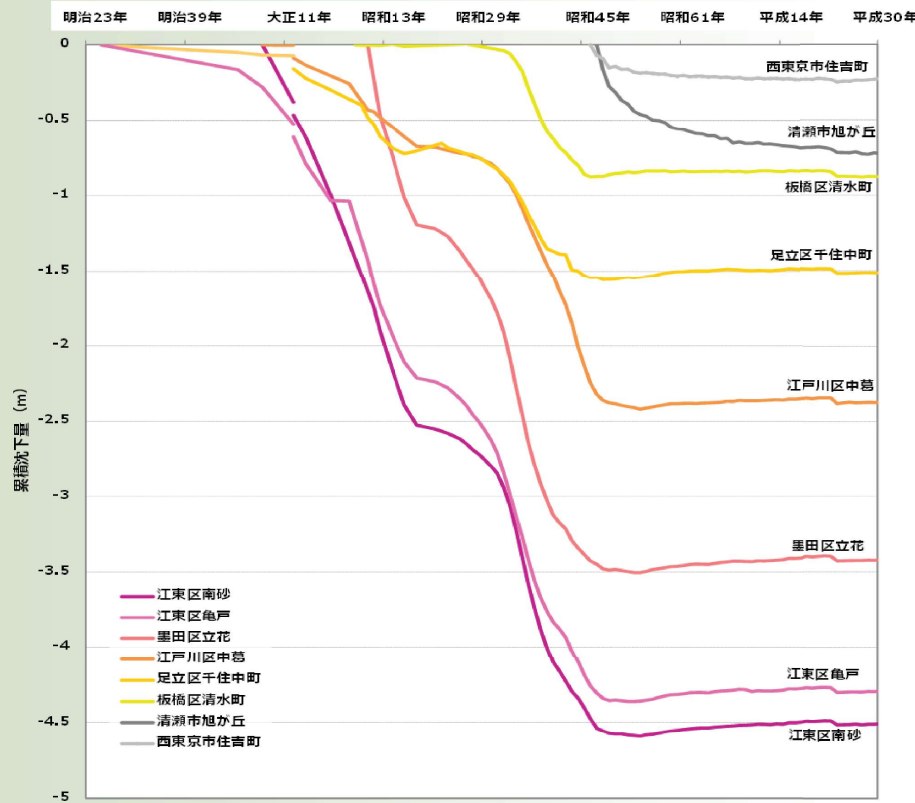
上総層群「A5層」：新藤静雄「武蔵野台地の水文地質」（1968）より「A5層」と呼ばれる地層の底面標高分布図
被圧地下水の地下水位等高線：東京都土木技術支援・人材育成センター「令和2年 地盤沈下調査報告書」を参考に作成

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す。



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

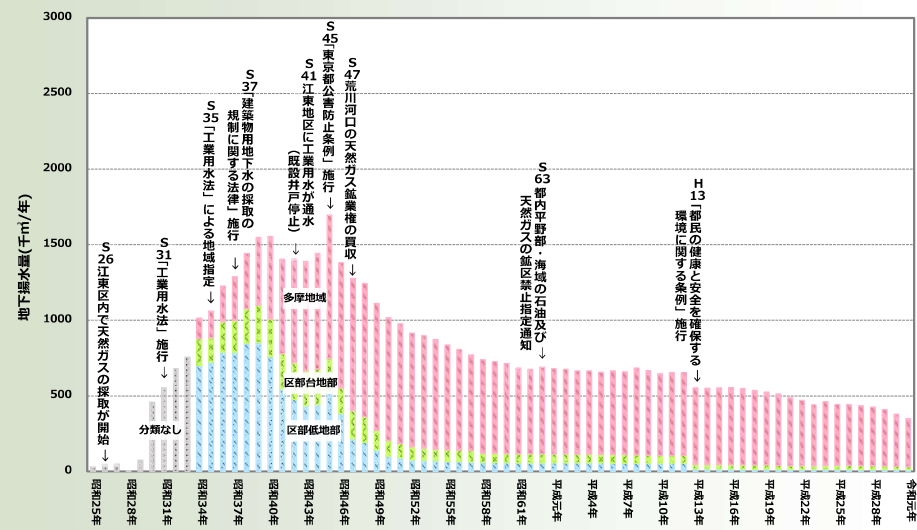
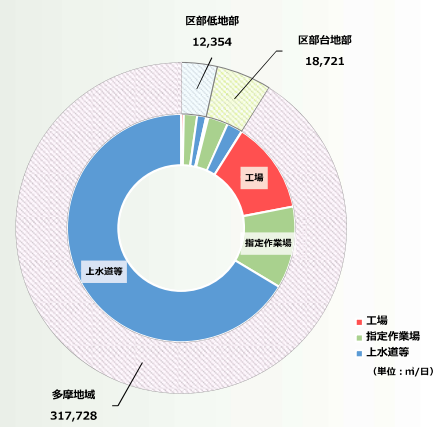
下水の上昇量は、大きいところでは50m高くなっています。ここ数年の地下水位は安定し、地下水位の上昇がほぼ停止した観測井も出てきています。

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きます。

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。

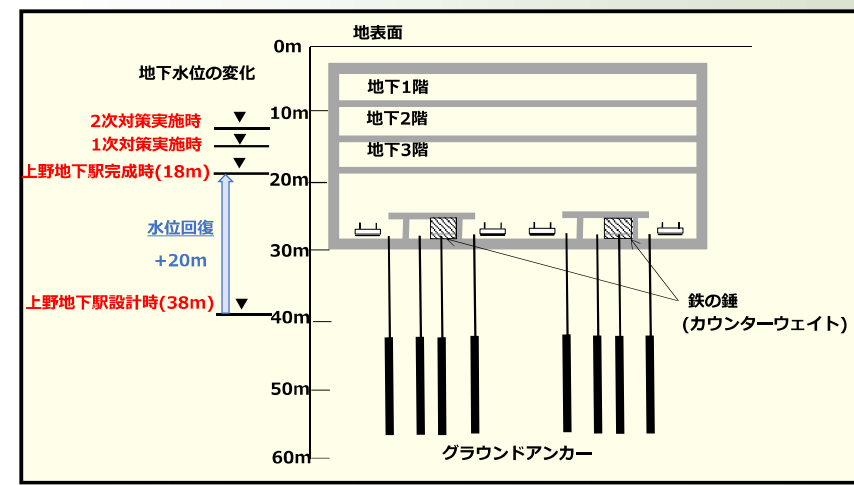
東京駅を通る総武快速線や上野駅を通る東北新幹線は、駅が地下にあります。これらの駅は、過剰揚水により地下水位が低下していたところに設計・建設されました。しかし、地下駅の建

設後、地下水の揚水規制により周辺の地下水位が上昇、地下水の浮力により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38mの深さに地下水位がありましたが、完成時には地下18mと地下水位は20m上昇していました。その後も地下水位が上昇したため、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がとられ、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対策がなされています。

現在まで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

最新の研究成果

地 下水の保全と適正利用には、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。

都ではそのために、大学との共同研究を実施しています。

地下水の実態把握

現在、共同研究中



地域の多様な
関係主体による
議論、連携



地下水の 持続的な 保全と利用

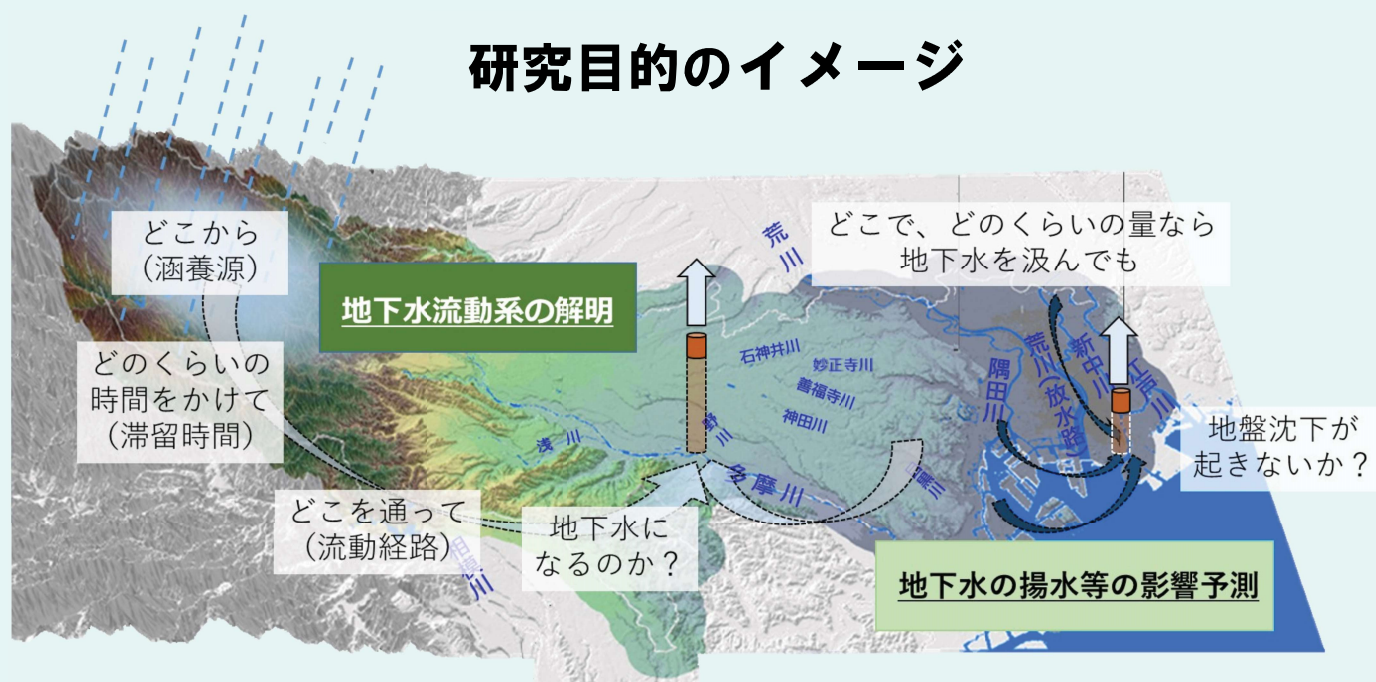
研究テーマ1：地下水流動系の解明（筑波大学との共同研究）

- ・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。

研究目的のイメージ



○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。これらは、地下水の起源・場所、流動経路、そして滞留時間とよばれています。言い換えると、地下水の出身地、経歴、年齢と言うことができ、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。



筑波大学
生命研究系教授
辻村 真貴 先生

○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。

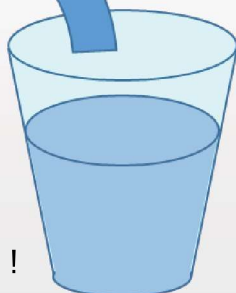
このように、地下水の履歴を表す成分のことを、専門用語で

地下水の履歴書

出身地 … ○山付近
経歴 … ○山西側
～△台地經由
年齢 … 80歳以上
特徴 … ナトリウムと
塩素イオン多め

地下水についてよく知るには

「地下水の履歴書」を作ることが大切！



は“トレーサー”とよびます。

○トレーサーにはどういう種類があって、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には何を使うのですか？

“どこに”起源があるかについては、主に安定同位体というものを、“どこを”通って”流れて

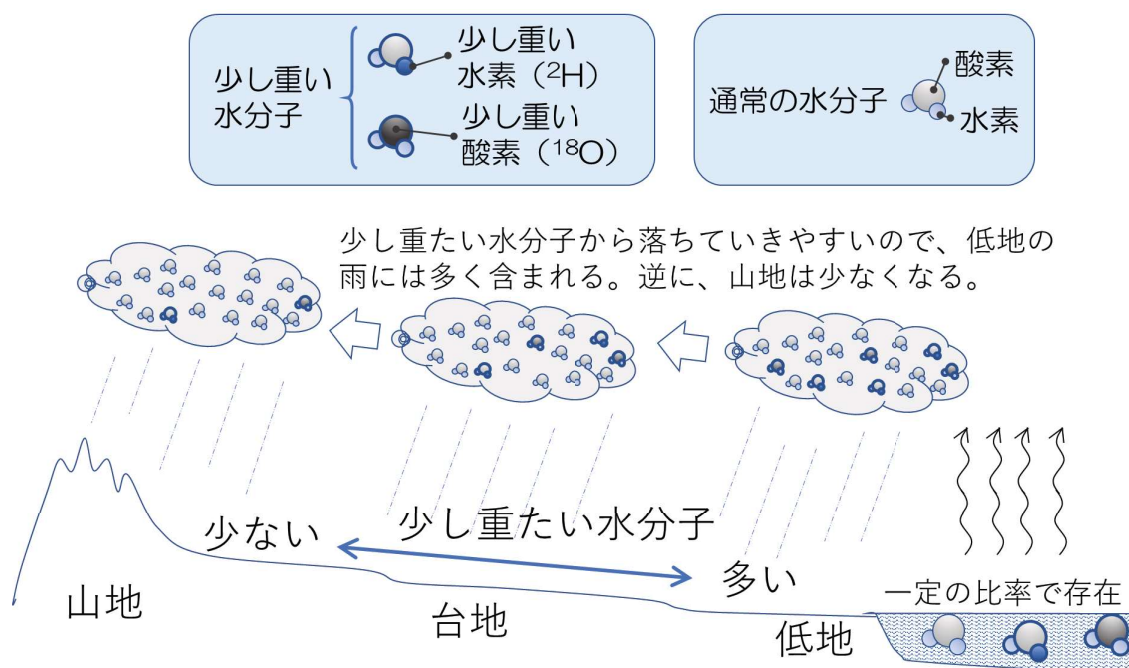
きたかは主に溶存成分をトレーサーとして使います。

まず、安定同位体ですが、例えば酸素の中でも少しだけ重さの重い酸素というのがあります。正確な話をしますと、酸素の原子核にある中性子の数が違いますが、化学的な性質はほとんど同じで、水素と反応して水になったりしますし、放射性物質のように分裂することもないことから安定同位体と呼んでいます。自然中には重さが16の酸素(^{16}O)に対して、重さが18の酸素(^{18}O)が存在し、約0.2%がこの酸素安定同位体になり、私たちの体の中にも存在する身近なものです。

この酸素の安定同位体ですが、先ほど化学的な性質はほとんど同じと説明しましたが、重

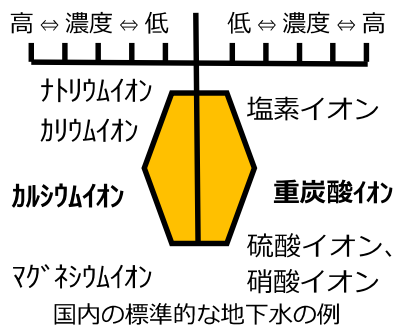
さが少し違うことから、海水中から蒸発して雲になったあと、雨となる際に少し違いが生じます。重たい酸素の方が、先に液体となり雨として落ちやすい性質があるため、海から雲が発生して、雨となる場合、海に近い側で降る雨の中には重たい酸素が多く、内陸や山側に向かうにつれて雨に含まれる重たい酸素の量が減る傾向があります。この違いを利用すると、地下水が海の近くで降った雨由来なのか、山の方で降った雨由来のかを推定することができます。実際には、この海側と山側の雨に含まれる酸素安定同位体の濃度差はかなり小さいので、標準となる海水中の酸素安定同位体濃度との比で表現することが一般的になっています。これを酸

安定同位体と雨の降る場所の関係

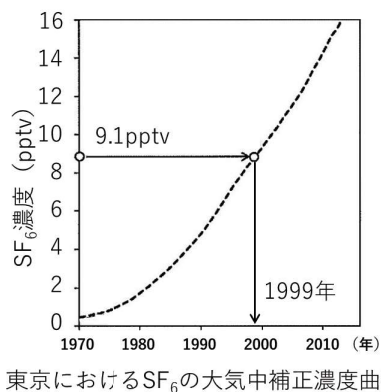
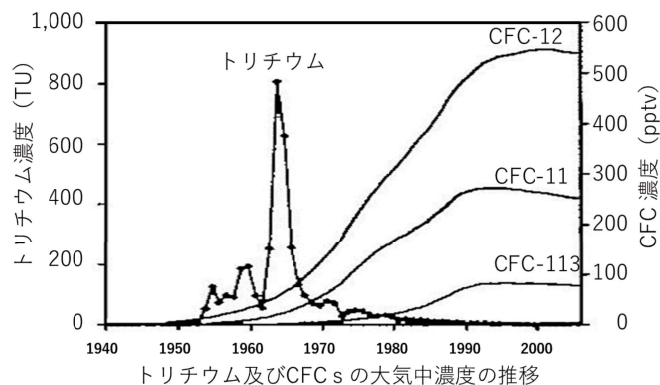


ヘキサダイアグラム

(主要イオンの濃度を図形化)



海水の影響を受けている地下水の例
(ナトリウム・カルシウム、塩素イオンの濃度が高い)



地下水中の対象とするトレーサの濃度から、いつ頃の雨由来かや、地下水の滞留年数が推定できる。

例) SF₆濃度9.1pptvに対応する年はグラフから1999年と読み取れる。

Pptv: 体積比で1兆分の1

TU: トリチウム単位の略

素安定同位体比といい、この比が高いと海側、低いと山側由来と推定することができるようになります。同じようなものに水素の安定同位体もあります。

もうひとつの無機イオンは、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いる成分を見えています。これらの成分は、雨が土に染み込み、地下水として流れていくうちに岩石などから溶け出したもので、地域によってこれら成分の組み合わせが変わります。それぞれの成分の濃度も大切ですが、組み合わせの比率がもっと重要になります。これらの成分の濃度を六角形に配置してグラフにしたのを、ヘキサダイアグラムといいます。例えばカル

シウムに比べてナトリウムが多いと、海水の影響が考えられるなど、成分の組み合わせをグラフの形が似ているか、似ていないかなどから地域間のつながりについて知ることができます。

〇“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？

特定の年代に降った雨に含まれる目印となる成分を対象とすることで“時間の情報”が得られます。戦後の冷戦時代には水爆実験が盛んに行われ、空気中にはトリチウムと呼ばれる放射性物質が多く存在しました。それらが雨に含まれて地上に降り地下水となりました。どこかで汲んだ地下水からトリチウムが

検出されれば、1950年代から60年代の雨に由来していることが分かります。

同様に、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。フロン類が地下水に含まれていれば、この時代であることが分かります。

また、代替フロンとして使用されている六フッ化硫黄 (SF₆) という物質は、1970年代以降大気中の濃度が上昇していることから、比較的最近の年代を測定するトレーサーとして利用できます。

これらのトレーサーの地下水中の濃度を調べることで、雨が地下に染み込み地下水として流

れてから汲まれるまでの滞留時間を知ることができます。

○これまでにどういうことが分かったのですか？

まだデータの蓄積が必要で、結論を出せる状況ではありませんが、現在までの調査では、多摩台地部と区部低地部では、地下水涵養源が異なることを示唆するような結果が得られています。

東京は江東区や葛飾区、江戸川区などの区部低地部と多摩台地部を比較すると、まず滞留年数については、多摩台地部よりも区部低地部の方が長いという結果となりました。

また、涵養域と流動経路については、含まれる無機イオンの種類にも多摩台地部と区部低地部の地下水では差がありました。多摩台地部の地下水はカル

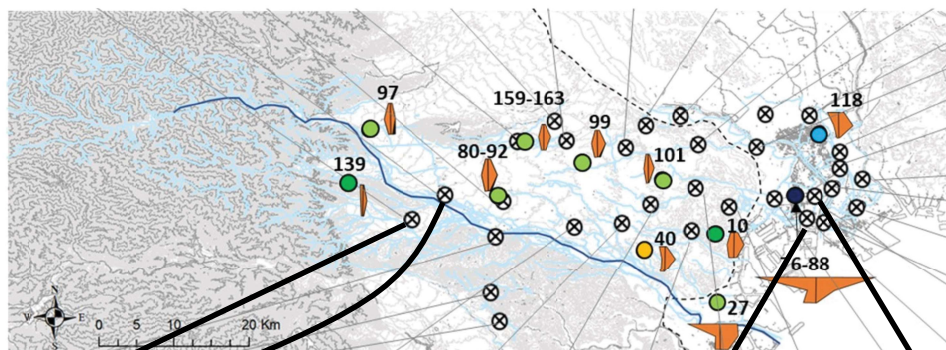
シウムと重炭酸イオンが多く、グラフの形は中央が膨らんだ数珠玉型になっています。これは国内でよくみられる一般的なイオンの組み合わせになります。一方、区部低地部の地下水は、ナトリウムと塩素イオンが多く、グラフの上の方が膨らんだ盃のような形をしていて、多摩台地部とは形がかなり異なることが分かるかと思います。

さらに、酸素安定同位体比で見ますと、区部低地部の地下水では数値がかなり低く、多摩台地部の方が高い結果となりました。先ほどの雨の話でもしましたが、この酸素安定同位体比は海側の雨では数値が高く、山側では低くなる傾向があります。なので、もし降った雨がそのまま地下水になるのであれば、そのまま海側で高く、山側では低くなりますが、実際の地下水で

は逆になっていました。特に区部低地部の地下水は、300～400mの山に近い多摩川上流の水に含まれる濃度よりも低く、海から多摩川上流の標高400mくらいまでの地域に降った雨由来ではない可能性が高いことが分かりました。より標高の高い地域が涵養源の可能性があります、はっきりとどこで降った雨由来なのかは、まだ情報が足らないです。ただ、これらは、区部低地部の地下水の涵養源について考えていく上で重要な結果だと考えています。

以上の結果をまとめますと、多摩台地部と区部低地部では、地下水涵養源が異なることを示唆してはいるものの、今後は区部台地部なども含め、さらにデータを蓄積する必要があると考えています。

地下水流動系の解明調査の結果



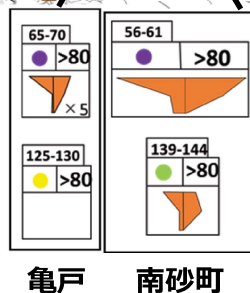
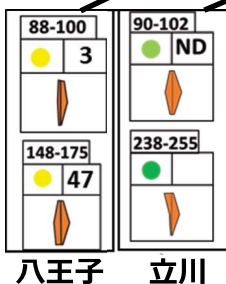
採水深度(m) (スクリン深度)	凡例
酸素安定同位体比(‰)	地下水中のSF ₆ 濃度から推定した地下水の滞留時間(年)
● >-7.4	>80: 検出できないレベルの濃度で、80年以上前のSF ₆ 使用以前の雨由来の地点。
● -7.5 to -7.7	ND: 大気中よりも濃度が濃いため、分析不能な地点。
● -7.8 to -8.0	
● -8.1 to -8.3	
● -8.4 to -8.6	
● -8.7 to -8.9	
● -9.0 to -9.2	
● -9.3 to -9.5	
● -9.6 to -9.8	
● -9.9 to -10.1	
● -10.2 to -10.4	

-10	-5	0	5	10
Na ⁺ +K ⁺			Cl ⁻	Meq/L
Ca ²⁺			HCO ₃ ⁻	
Mg ²⁺			SO ₄ ²⁻ +NO ₃ ⁻	

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。

○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

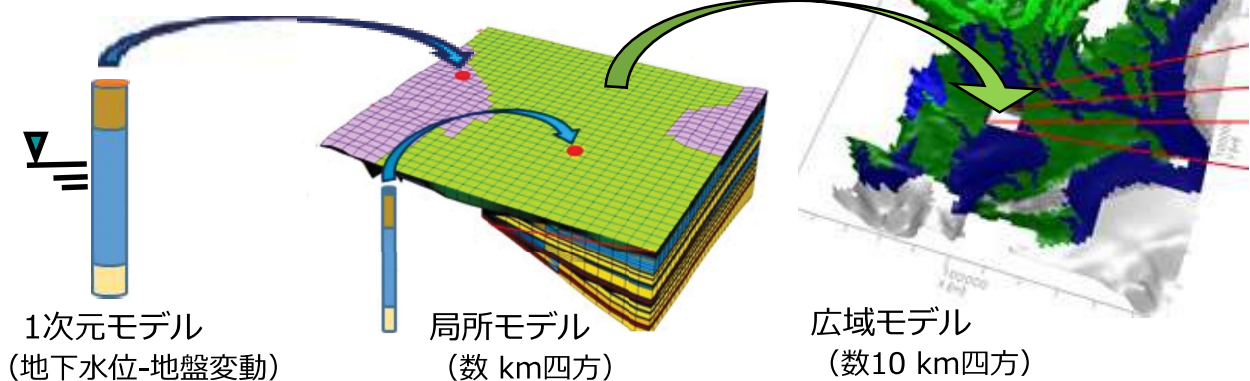


東京大学大学院
新領域創成科学研究科
愛知 正温 先生

の通りやすさ、間隙比：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？

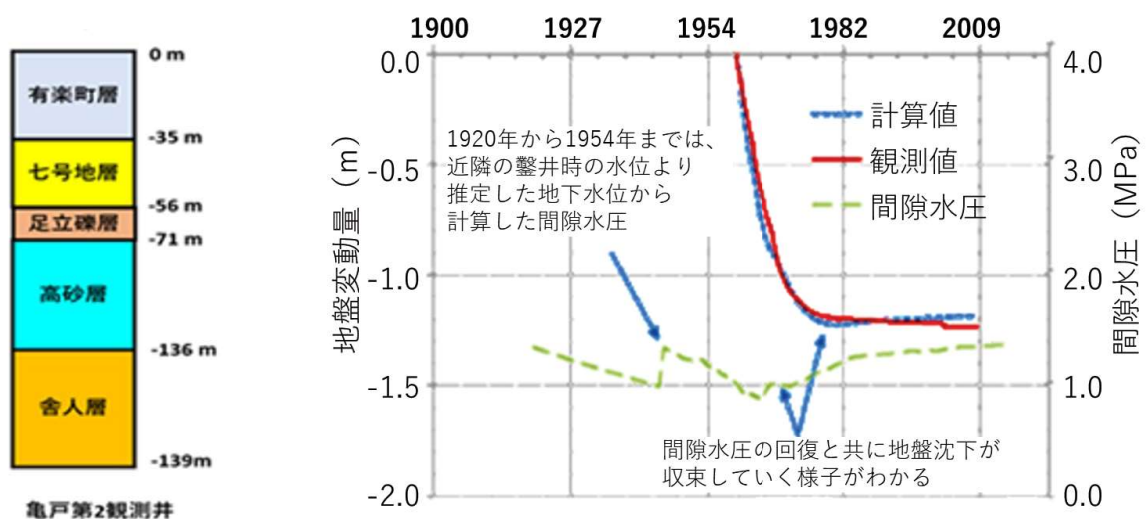
先ほど、実測値に合うように物性値を変化させて何回も計算をすると説明しましたが、より計算回数を少なく、早く実測値に合うようにするための手法です。少しずつ物性値を変化させた条件をたくさん作って、それぞれ計算させますが、その中から結果の良いものを残して更に変化をさせていきます。最適化した条件（遺伝子）を残すことで、より早く最適化ができるという理屈です。

○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、過去に地盤がどういう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！

