

地質地盤環境

1 はじめに

大気汚染や水質汚濁など気圏・水圏での環境汚染（公害問題）が全体として徐々に改善の方向に進む中で、近年、地圏に深刻な環境汚染が広がり始めていることが明らかになってきた。すなわち、土壌・地下水汚染に代表される大地の汚染である。この汚染の特徴は、汚染物質が土壌中に長期間残留すること、また、緩慢な地下水流動により長期にわたって地下の広域・深部に拡散・浸透することにある。さらに、それらの現象が地下で起こっているため、健康被害が発生するまで汚染の進行に気づかない場合が多い。このように、大地の汚染は長い時間スケールの中で（時に世代を越えて）、非顕在的に進行する深刻な環境問題の一つである。

一方、大地は人類史の始まりとともに、人為的な環境の改変を受け続けてきた。今も残る古代遺跡には、人口の集中と都市化によって、周辺の自然地形が改変された跡が残っている。また、同時にこれらの文明（都市）が、地震・火山噴火や洪水などの自然災害で大被害を受けた（消滅した）こともよく知られている。人口集中と都市化（それに伴う自然環境の改変）は、一般に災害に対する被害リスクを高めるが、現代の過密化した都市構造はどれほどのリスクをもつであろうか。特に、埼玉県のように急速な都市化が進んだ地域では、過去の経験から居住に適さないと考えられてきた低湿地などにも、数多くの住宅が建設されている。

以上のように、人々がその生活の基盤とする大地に、今、環境汚染のみならず、自然災害の被害リスクの増大という問題が起こっている。これらは広い意味で、大地を構成する地質地盤に関わる環境問題といえる。そして、このような地質地盤環境に関する現象（問題）は、地域によって様々な異なる自然の地形・地質の性質（台地・低地の別、地質構造など）に密接に関係している。

本稿では、はじめに埼玉県の地形地質の概要と環境問題との関わりについて解説する。次に狭義の環境（公害）問題である地盤沈下、土壌汚染及び地下水汚染について、その発生の歴史や問題点などを概説し、最後に「環境と調和する土地利用」と題して、本県を襲った主要な自然災害の概要と、特に地震防災を対象としたリスク軽減の考え方を述べる。また、これら地質地盤環境問題の各項目の中で、環境科学国際センター（以下、当所という）の調査・研究成果の概要を紹介する。

2 埼玉県の地形・地質と地下水環境

2.1 地形・地質の概要

埼玉県は関東平野の中西部に位置し、1都5県に四方を囲まれた内陸県である。しかし、地質学的な時間スケールで時代を遡ると、本県は全地球的な気候変動に起因する海水準変動^{*1}によって、かつては海に面していたこともある。その海岸線は氷期と間氷期の繰り返しによって位置が大きく移動し、現在の低地の大部分が海面下に埋没した時期もあった（例えば、約6千年前の縄文海進^{*2}時など）。今の地形や地下の地質構造は、このような海面変化や河川プロセス（河川による堆積・浸食作用）などが複雑に絡み合って形成されたものである。地下水汚染など現在の地質地盤環境に関する多くの問題を考える場合、このような地盤のなりたちを理解することが重要である。

埼玉県の地形を概観すると、西に総面積の3分の1を占める山岳地帯、そして東に残りの3分の2を占める平野部（台地と低地）に大別することができる（図1）。西の山岳地帯は関東山地の北部にあたり、秩父山地とも呼ばれている。地質は秩父中・古生層*³、中生層*⁴、第三紀層*⁵及び長瀬系結晶片岩などで構成され、埼玉県の最高峰である三宝山（2,483m）をはじめ、甲武信ヶ岳から雲取山へ続く稜線高度は2,000～2,500mに達している。この周辺は関東山地で最も標高の高い地域で、荒川、多摩川、神流川など諸水系の源流域となっている。

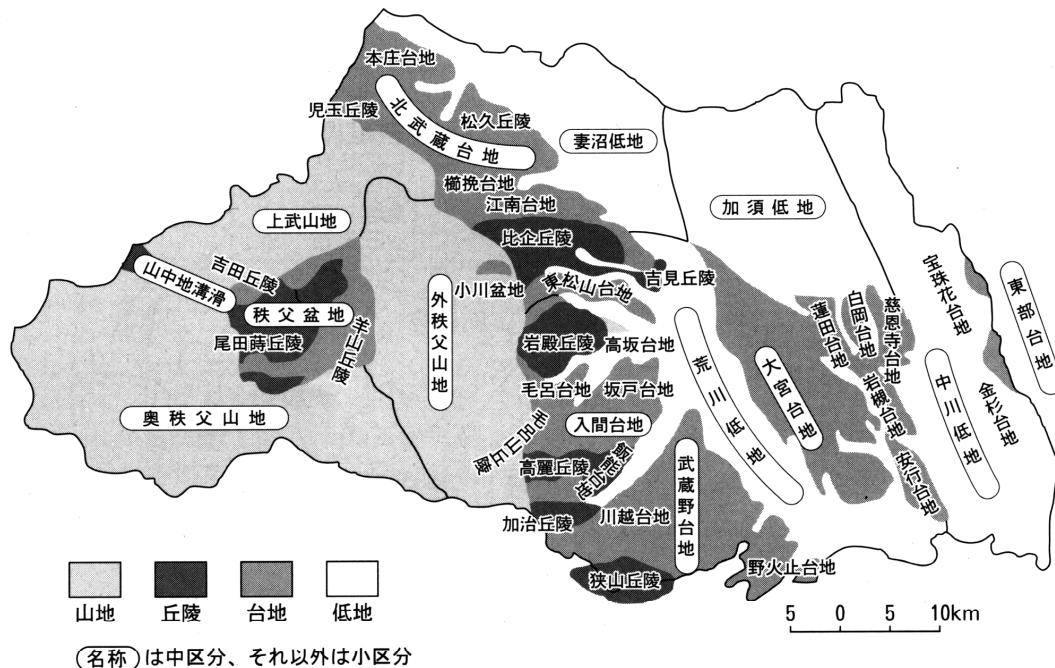


図1 埼玉県の地形分類図¹⁾

山地周縁の山麓部にあたる県西部地域には、北から児玉、松久、比企、岩殿、高麗、加治、狭山等の各丘陵、そして本庄、櫛引、江南、東松山、入間、武蔵野等の各台地が分布している。これらの台地や丘陵の表面は、いわゆる「関東ローム層」と呼ばれる風化（鉄が酸化）して茶褐色に変色した火山灰層で覆われている。これらは単に「ローム」や「赤土」とも呼ばれ、火山から噴出した後に上空の偏西風によって運ばれるため、噴出源の東側に降下して厚く堆積する。埼玉県では、南部は富士や箱根を起源とするものが多いが、北部は浅間、榛名、赤城といった北関東の諸火山からきたものが多い。ロームの厚さは台地ができた時代（段丘面の新旧）や場所（火山からの距離）等によって大きく異なるが、武蔵野台地の主要部では5m前後の場合が多い。火山灰層の下には段丘面を形成した際に、いわゆる“削り粉”の役目を果たした砂礫質の段丘堆積物があり、この地層は透水性が高いため浅層地下水の帯水層となっている。

さらに、東側の県央・県東部地域は、加須、中川、荒川の各低地とそれらに囲まれた大宮台地群が分布している。これらの地域の地質はまだ固まっていない砂やシルト・粘土が主体であり、地下に埋積されたかつての谷底などには礫が分布している。低地は火山灰に覆われることがなく、自然堤防などの微高地を除いて地下水面の深度は一般的に数10cm～1mとごく浅い位置に存在する。また、大宮台地を刻む数多くの谷には厚い腐植土*⁶が堆積していることが多い。

大宮台地を含むこの地域は、関東造盆地運動と呼ばれる地殻変動の影響が顕著に現れている場所

でもある。関東造盆地運動は、そもそも関東平野全体を形成してきた地殻変動で、約2,200万年前に始まる新第三紀から現在に至る沈降運動である。この運動によって、最深部が4,000mに達するといわれる国内最大の盆地（関東盆地）が形成された。沈降の中心は、第四紀（約200万年前）以降は久喜市付近及び東京湾北部と考えられており（図2）、中心部の沈降速度は年間1mm程度と言われている。すなわち、この地域における地盤は前に述べた海面変化や河川プロセスに加えて、地域特有の地殻変動の影響も強く受けている。

2.2 土壌環境

土壌は地盤の表層部（一般的には約1m程度）を構成する未固結堆積物であり、火山灰を除いて基本的には岩石の風化作用や土壌生成作用により形成されたものである。風化作用とは物理的風化（乾湿繰り返し、凍結破碎、応力解放など）と化学的風化（酸化、炭酸塩化、加水分解、水和など）に分けられ、母材の岩石が変質していく作用である。一方、土壌生成作用とは、母材に繁茂した地衣類^{*7}やコケ類によって分解・生成された養分を基に、更に高等な生物が生育し、それらの遺体が腐植物として加わることによって土層が分化することをいう。同一の母材から土層の分化によってできた層を土壌層位と呼び、上位からA₀、A、B、Cとつけるのが一般的である（図3）。基本的には土壌の母材（母岩）をC層、動植物による腐植物等によって黒色化した層をA層、A層とC層の中間的な部分をB層と区分している。特に森林土壌の最表層の部分には、落ち葉の植物繊維が残った未熟な堆積腐植層（A₀層）がA層の上に載っている。

日本で見られる代表的な土壌の種類には黒ボク土、褐色森林土、褐色低地土、灰色低地土及び泥炭土などがある。このうち、特に我々の生活圏において身近に接することが多く、工場や事業場などによる土壌汚染の調査対象となることが多いものとしては、黒ボク土や褐色低地土・灰色低地土などが挙げられる。黒ボク土は火山灰を母材とす

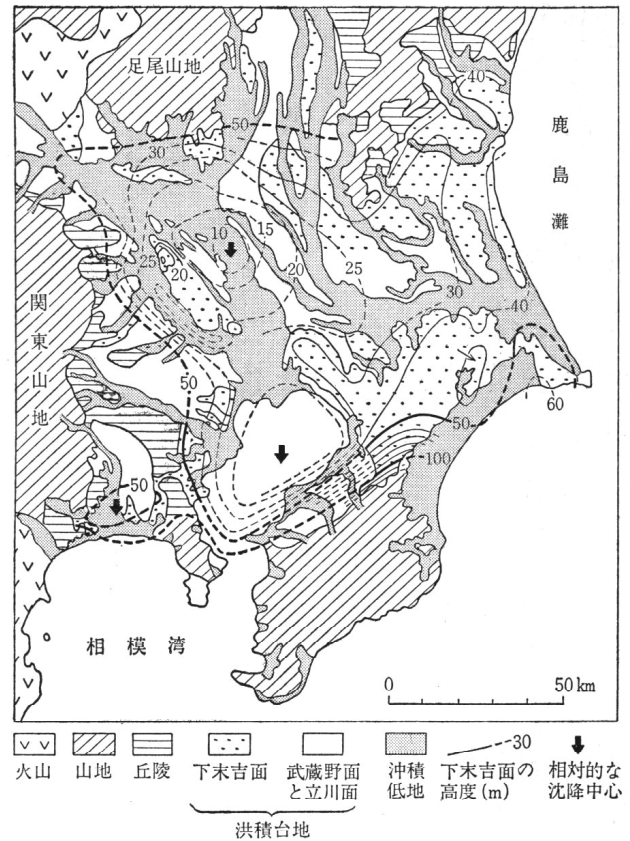


図2 関東平野の地形と第四紀後期の地殻変動²⁾

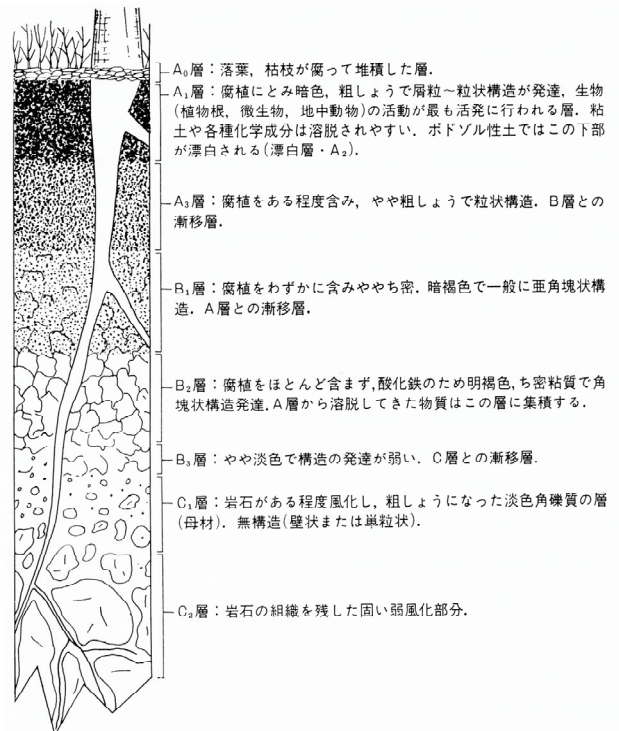


図3 土壌断面の構成と土壌層位の特徴³⁾

る土壌であり、腐植含量が多く黒っぽいA層が特徴的である。日本の国土の約16%を占めるともいわれており、埼玉県においても台地や谷底低地^{*8}上に多く見られる。黒ボク土は酸性で排水性が良いという特徴をもつため、かつては農耕地に不適とされていたが、現在では施肥や灌漑技術の進歩によって畑地として利用されるようになった。また、腐植物質を多く含むことから黒ボク土は重金属類を吸着しやすいが、これは土壌汚染の観点では注目すべき性質といえる。

褐色低地土や灰色低地土とは、河川等が運搬して堆積した土壌で沖積土とも呼ばれる。褐色低地土は自然堤防のような低地の中の微高地などにおいて、砂質土が運搬堆積した場合に多く見られる。このような場所では、地下水水位が低く、酸化的な環境下にあるため褐色を帯びている。一方、灰色低地土は後背低地などにおいて、粘性土が堆積した場合に多くみられる。この場合、地下水水位は安定的に地表面近くにあって排水性は悪い。土地利用の特徴としては、前者は透水性が良い地盤であるため桑畑や畑地などに、後者は田圃として利用されることが多い。

2.3 埼玉県の地下水循環システム

2.3.1 関東地下水盆と地下水流動系

地球上の水は水蒸気、地表水（河川・湖沼・海の水など）、土壌水、地下水及び雪氷など、様々な形態で気圏、地圏及び水圏を循環する。地盤沈下や土壌・地下水汚染などの地盤環境問題のみならず、生物多様性、地球温暖化及び酸性雨といった多様な環境問題に至るまで、実はこのような水循環システムが密接に関わっている。

前に述べたように、関東平野は盆地状の構造をしているため（関東盆地）、地下水に注目する場合は「関東地下水盆」と呼称される。このような地下水盆の内部を流れる地下水は規模の大きい順に地域（広域）流動系、中間（中域）流動系及び局地（局所）流動系と呼ばれる階層状の流動系を形成する（図4）。地下水汚染は、現在のところ主に局地流動系における現象であるが、各流動系は相互に関連しているため、より広域の流動系に汚染物質が拡散する危険性がある。

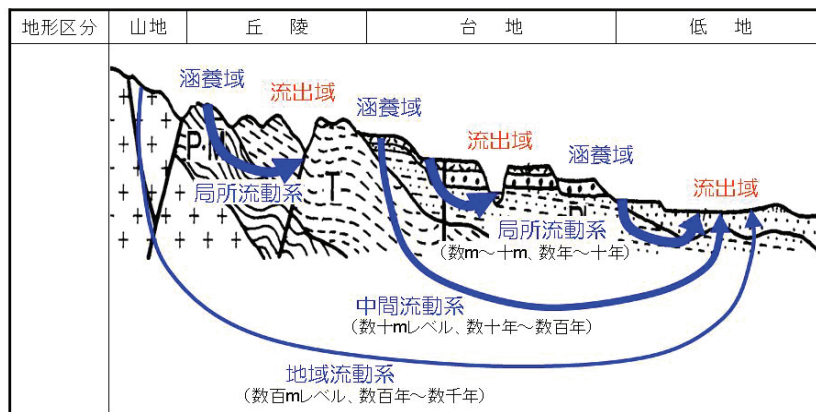


図4 地下水循環システムの概念図

2.3.2 地下水流動の基本概念

図5は、地下水の存在形態を模式的に示したものである。地下の地層は一般に透水性の高い地層（透水層：砂層、礫層など）と低い地層（難透水層：粘土、シルト層など）が交互に堆積しており、地下水は基本的に透水層の中を流れている。最上位の透水層を流れる地下水（自由地下水又は不圧

地下水)は自由表面(地層の空隙を通じて大気に接する水面)をもつため、地上の河川水などと同様に重力の作用によって、高い位置から低い位置に向かって流れる。一方、難透水層に挟まれた透水層の地下水(被圧地下水)は大気と接していないため、重力の作用とともに水流に伴う圧力(水圧)が生じている。

このような重力(位置の高低)と水圧が地下水流動を生じる源(ポテンシャル)であるため、その流動の性質(方向や強さ)を知るには、両者(重力ポテンシャル、圧力ポテンシャル)の和をとった水理ポテンシャル(水理水頭)という量を用いる。この量は自由表面をもつと仮定したときの地下水面の高さに相当し、地下水は水理水頭の大きい方から小さい方に流動する。したがって、特に被圧帯水層では、必ずしも地形の高低に合わない方向に流動することもある。

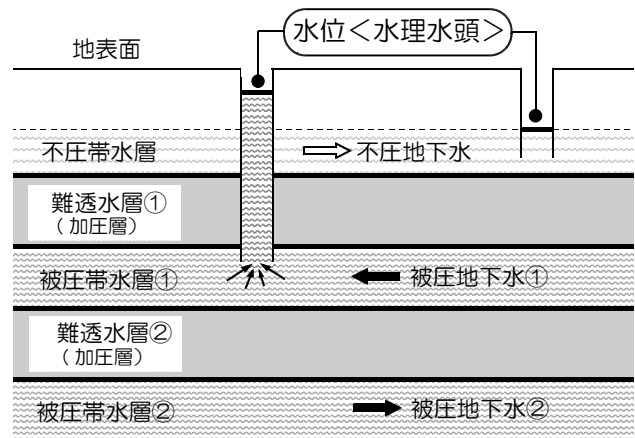


図5 地下水の存在形態の模式図

2. 3. 3 広域的地下水流動

関東平野では、地盤沈下対策を目的とした地下水位観測網がほぼ全域に整備されている。観測井はほとんどが深度50~300m程度のものであり(最大で600m)、この深度範囲の地下水位(水理水頭)の分布や時間的な変動を3次元的に把握することができる。図6は深度100~150mの観測井を対象に、水理水頭の平面分布を示したものである。図の水頭分布は平野周縁部から中央部へ向かって低下する傾向を示し、地下水はこの等値線に直交する方向に流れている。また、この分布は低地や台地といった表層付近の地形条件とは調和していない。このような傾向は、約50~300mまでのどの深度においても同様であることが確認されており、深度50mを超える地下水の流動に共通したものと見える。

なお、図6は平成11~13年現在における水理水頭の分布を示すものであるが、約40年前には中川低地に沿って東京湾(南東方向)に向かう流れを形成していたことが記録されている⁵⁾。このことから、地下水盆内の地下水流動系は、戦後復興に伴う地下水揚水量の激増期や揚水規制強化に伴う地下水位レベルの回復期など、時代(揚水環境)によって変化することが分かる⁶⁾。

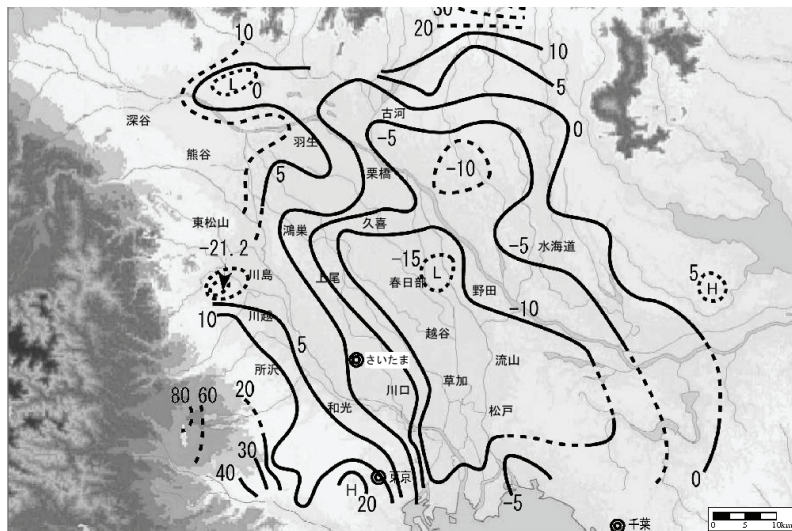


図6 関東平野の深度100-150mの水理水頭分布⁴⁾

2.3.4 浅層地下水の流動

我々が現在直面している工場・事業場周辺の地下水汚染の問題では、一般に汚染物質が地表面付近から浸透していくため、最初に浅層の地下水流動を把握する必要がある。実際には、調査地点の周囲を取り囲む3点以上の掘り抜き井戸などを利用して地下水面の等水位線図を作成し、地下水の流動方向を特定する。しかし、調査を実施する前に、周辺の大局的な地下水の流れの場を把握しておくことも重要である。浅層地下水は通常、自由地下水（不圧地下水）であるため（図5）、図7に例示するように、水位の起伏は地形の起伏に調和していることが多い。特に台地や扇状地など地形面の勾配が低地と比べて急な場合には、「汚染物質の流動方向」≒「地形面の最大傾斜方向」と見なすことができる。したがって、汚染現場を含む大局的な地形情報の検討は、初動調査の有効な手段の一つになる。



図7 武蔵野台地北部における浅層地下水面の分布⁷⁾

2.3.5 地下水涵養域と流出域

地下の温度は一般に深くなるほど高くなるが、その深度分布は地下水流動に伴う熱移流の影響を受けて、地域によって異なる傾向を示す。図8は地下水の涵養域と流出域についてその傾向を模式的に示したものであるが、このような地下温度の深度分布（地下温度プロファイル）を、地域の地下水流動の指標として利用することができる。

地下温度の状況は、通常、地盤沈下用の地下水位観測井で把握することができる。図9は、関東地下水盆の観測井で得られた地下温度プロファイルを、地点ごとに類型化して示したものである。図から、地下温度プロファイルが平野周縁部の丘陵や台地から平野中央部に向かって、涵養域型→中間域型→流出域型へと変化していることが分かる。このような地下温度分布は、平野内の地下水流動系の構造を反映したものであり、前出の水理水頭の結果と矛盾しない。データ数はまだ十分ではないが、これは、地下温度プロファイルから関東地下水盆の涵養域や流出域の地域分けが可能であることを示すものである。

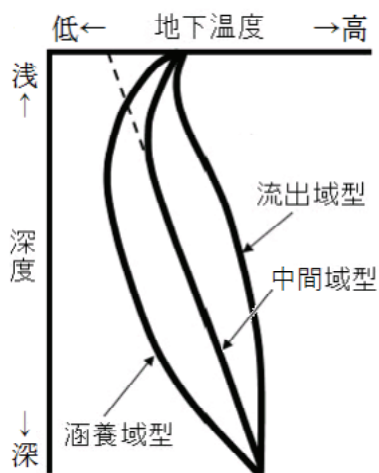


図8 地下温度プロファイルの
模式図(元図⁸⁾より作成)

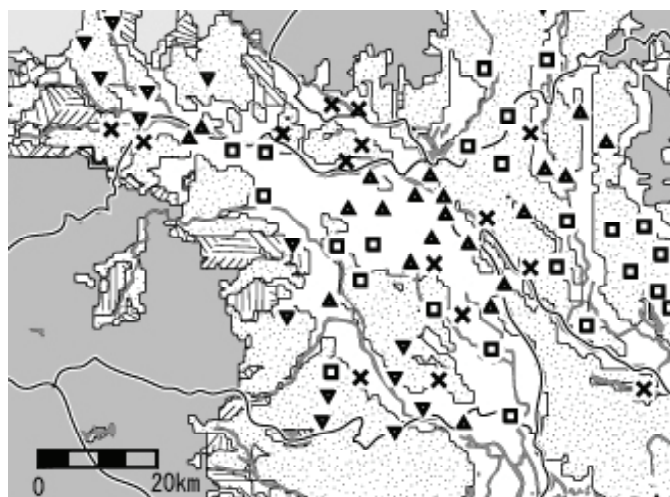


図9 地下温度プロファイルに基づく関東地下水盆の涵養域と
流出域の分布⁹⁾

(▼: 涵養域型、□: 中間域型、▲: 流出域型、×: その他)

2. 3. 6 清澄な地下水の保全と地下水流動系に調和したまちづくりに向けて

これまで述べてきたように、我々が目にしている河川や湖沼などの表流水（地表水）は、規模の異なる様々な流動系を通じて地下水と一連のものとして考えることができる。したがって、従来のように〇〇工場・□□事業場や△△河川といった個々の地点における取組に加えて、今後は涵養域から流出域まで流域を単位とした「地下水循環という立体的な視点」の導入が必要となる。

例えば、地下水位を回復させるための各種地下水涵養施設⁹⁾は、地下水の流出域に設置しても効果は少ないため、涵養域に集中させる必要がある。また、汚染物質を流出させる危険性の高い事業所や施設等が涵養域に立地されている場合には、地下水の監視体制をより強化すべきかもしれない。さらに、ある流動系内に貴重な生態系をはぐくむ湧水や湿原、湖沼などがある場合には、長期にわたってその水質と水量を確保するため、涵養域を含めた流動系全体を対象とした取組が必要となる。

今後は地下水の涵養域と流出域に対応した地域特性評価（マイクロゾーニング）を実施し、これに基づいて土地利用規制や開発行為の適否の判断、埋立処分場や事業所の適地誘導などを行うことが必要であろう。

3 地質地盤をめぐる環境問題

人々が生活する大地の環境問題として、「地盤沈下」及び「土壌汚染」は、すでに公害対策基本法が制定された当初から取り上げられてきた。地盤沈下の現象は、後述のように戦前から知られていたが、戦後の急速な経済成長とともに、特に都市部で大きな社会問題となった。また、土壌汚染も古く明治初期に端を発し（足尾銅山の鉱毒排水¹⁰⁾）、主に農用地の汚染が問題とされてきた。しかし、近年では工場跡地など都市部の汚染も明らかにされるようになり、さらに地下に浸透した有害物質が地下水流動によって拡散する「地下水汚染」の問題もクローズアップされている。

ここでは、このような地質地盤に関わりのある環境問題（地盤沈下、土壌汚染及び地下水汚染）

について概説し、その解決に向けた国や埼玉県の実策と当所における取組を紹介する。

3.1 地盤沈下

3.1.1 歴史的経緯

地盤沈下とは、地下水や水溶性天然ガスなどの地下資源を過剰に採取することに起因して発生する現象である。関東平野では、東京湾岸（特に千葉県）に豊富な天然ガス資源が存在し、この地域ではその採取により深刻な地盤沈下を引き起こした。一方、埼玉県の場合は、工業用水や農業用水などの地下水利用が主な原因となっている。

最も古い記録の一つである東京低地の水準測量によると、1892（明治25）年から1916（大正5）年までの24年間で約17cmの沈下が記録されている。これは平均で年間約7mmの沈下量となり、自然現象によるもの（関東造盆地運動による沈降は約1mm/年）と比べてもかなり大きく、地盤沈下はすでにこの時期にはじまっていたと考えられている。東京都江東区では、昭和5年ごろには年間15～17cmの沈下が記録され、井戸や建築物の基礎が抜け上がる現象などが見られるようになった。地盤沈下という言葉が実際に使われ始めたのもこの時期である。

その後、太平洋戦争を挟んで工場の操業停止などから一時的に沈下量は減少し、ほぼゼロに近づいたが、昭和25年以降から戦後の復興とともに沈下量は再び大きくなり始めた。さらに、高度経済成長とともに沈下は加速され、その地域も埼玉県や千葉県などへと拡大された。

埼玉県における地盤沈下は、昭和30年代前半に川口市を中心とした荒川低地域と三郷市・草加市を中心とした中川低地域において顕在化した。昭和40年代になると、荒川・中川の両低地域の地盤沈下は更に深刻化するとともに、所沢市・新座市を中心とした武蔵野台地西部地域にまで沈下が及ぶようになった。昭和49年には所沢において年間27.2cmという県内の最大沈下量を記録している。

3.1.2 各種規制強化とその効果

このような状況下で、昭和38年には県南部の6市が「工業用水法」の指定地域となったのを皮切りに、「埼玉県公害防止条例」や「建築物用地下水の採取の規制に関する法律（ビル用水法）」などの施行によって規制が強化され、地盤沈下は沈静化に向かい始めた。その結果、昭和52年には最大沈下量が10cmを下回るようになり、その後も沈下規模の縮小傾向を続けながら、平成8年以降は年間4cmを超える沈下量を記録する水準点は皆無となった。

近年では、平成6年と8年に大規模な渇水に見舞われ、年間沈下量が2cmを超える地域が大きく拡大したが、それ以降は緩やかな回復傾向を見せている（図10）。しかし、平成16年には夏季に猛暑・小雨を記録し、県西部で表流水の取水制限が実施されるなど、小規模ながら渇水となった。その結果、所沢・鷲宮・北川辺観測所をはじめ全県的に沈下量が増大し、過去7年間の実績とは異なる傾向を示した。このように、地盤沈下現象は全体的には回復傾向にあるものの、大規模な渇水が発生した場合には再び沈下量が増加する可能性もある。

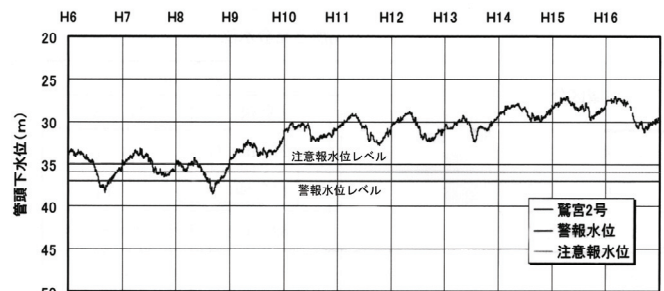


図10 鷲宮観測所における最近の地下水位変化¹⁰⁾

3.1.3 最近の取組

埼玉県では昭和30年代の後半から、精密水準測量と地盤沈下・地下水観測井による観測調査を実施している。また、平成9年からは、県内4か所の代表的な観測井（浦和、越谷東、所沢、鷲宮）にテレメーターシステムを導入し、地下水位と地盤変動の状況を電話回線を通じてリアルタイムで監視している。さらに、県は平成14年4月に「埼玉県地盤沈下緊急時対策要綱」を施行し、地下水位が要綱で定めた警戒水位に達した場合には、「地盤沈下注意報」又は「地盤沈下警報」の発令により地下水採取の抑制措置を促すシステムを運用している。この基準観測井の水位は次のURL（<http://www.pref.saitama.lg.jp/A09/BG00/yousui/FRAME.htm>）で随時確認することができる。

3.2 土壌汚染

3.2.1 土壌汚染の概要

我が国における土壌汚染の歴史は古く、明治初期には足尾銅山（栃木県）からの鉱毒排水による農用地土壌汚染が報告されている。土壌に蓄積された有害物質は作物生育を阻害し、当時大きな社会問題にまで発展した。昭和30年代には富山県神通川流域でイタイイタイ病^{*11}が発生し、周辺住民の健康に甚大な被害が生じた。イタイイタイ病は、神通川上流の鉱業所から排出されたカドミウムが農用地土壌に蓄積し、それが農作物や水を介して多量に摂取されて引き起こされた慢性中毒である。土壌汚染の多くは鉱業活動に伴う廃水を発生源とし、これが河川に流入して下流域に点在する農用地を汚染する形で進行していった。

近年、工場や研究施設の跡地開発が盛んになるにつれ、都市部でも土壌汚染が顕在化するようになった。この汚染は、工場等の敷地に廃棄されたり施設から漏洩した有害物質によって引き起こされるものである。市街地土壌汚染は、周辺地下水の汚染判明を契機に発覚するが多い。そして、このような市街地での土壌汚染は、図11に模式的に示すように、地下水の飲用利用や飛散した汚染土壌の直接摂取などを通じて、周辺住民の健康に悪影響を及ぼすことが懸念される。

このような社会状況の下で、土壌汚染対策に関する法規制が求められるようになり、平成3年に「土壌の汚染に係る環境基準（土壌環境基準）」、平成14年に「土壌汚染対策法」が制定された。これらの法律では揮発性有機化合物（VOC）^{*12}、重金属類及び農薬が特定有害物質^{*13}に指定され、各物質ごとに基準が設定された。埼玉県は平成13年に「埼玉県生活環境保全条例」を制定し、その中で土壌汚染の調査方法及び対策に関する具体的な指針を定めている。

土壌中に浸透した有害物質は、地下水まで達して周囲に拡散する可能性がある（図11）。このように、土壌汚染と地下水汚染は密接な関係にあり、対策を講じる上で、これらを切り離して考えることはできない。

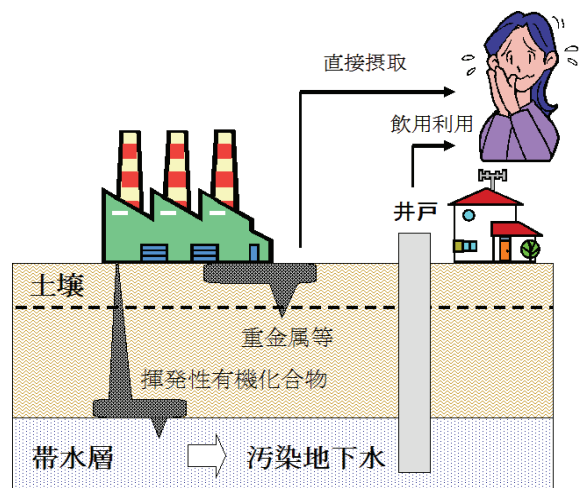


図11 市街地土壌汚染と有害物質の暴露経路

3.2.2 土壌汚染の現状

国内における土壌汚染調査事例数と基準超過事例数の経年変化を図12に示す。平成15年度までの調査事例数は2,802件、そのうち基準超過事例数は1,458件（52％）に達している。特定有害物質ごとの基準超過事例数を比較すると、VOCによる汚染は平成10年度以降、ほぼ横ばいで推移しているのに対し、重金属類による汚染は、平成13年度から飛躍的に増加している。

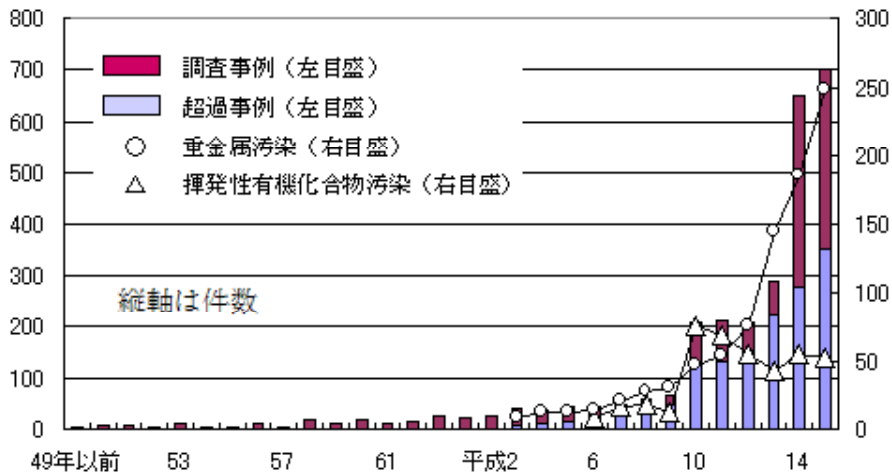


図12 土壌汚染判明件数の推移¹¹⁾

重金属類は水に溶けにくく、かつ土壌に吸着されやすいため、表層土壌中に残留し続けるという特徴をもつ（図11）。一方、VOCの多くは水より比重が大きく、粘性も小さいため、帯水層まで浸透して地下水汚染を引き起こす場合が多い（図11）。重金属類による土壌汚染の顕在化は、これら汚染物質の物理化学特性を反映していると言える。重金属類の中では、鉛とひ素による汚染事例が突出して多く、六価クロム、ふっ素による汚染がこれに続いている。鉛、ひ素、ふっ素は全国的に広く分布し、地質由来など自然的原因による基準超過も各地で報告されている。

本県における基準超過事例数は、平成15年度までで100件近くに達しており、東京都（392件）、神奈川県（258件）、大阪府（120件）に次ぐ多さである。平成13年度までは、VOCによる土壌汚染が目立っていたが、その後、重金属類による汚染事例が増加し、現在では、ほぼ同水準で推移している。

3.2.3 当所の取組

当所では、現場で実施可能な土壌中重金属の新規汚染評価システムの構築に取り組んでいる。このシステムは、物理探査の一つである電気探査（後述の3.4を参照）等を利用して、汚染土壌の存在範囲をあらかじめ絞り込んでから簡易計測法によって有害物質濃度を測定するため、公定法に比べて調査に要する時間、費用及び労力を大幅に削減することができる（図13）。

また、的確で効率的な汚染対策を早急に講じる上でも非常に有効である。電気探査の原理及び環境調査への適用例については3.4で解説するため、ここでは土壌

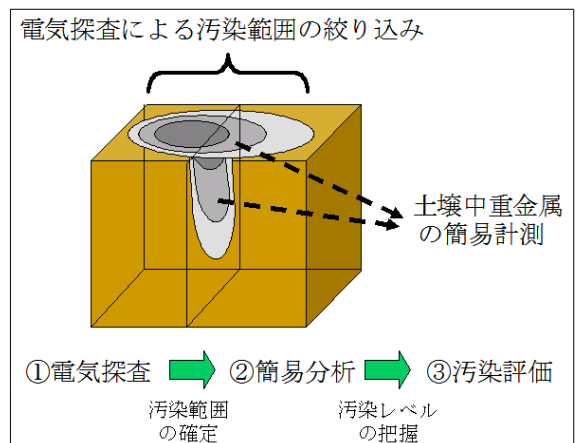


図13 新規汚染評価システム

中重金属の簡易計測法について説明する。

電気化学分析法は簡便性及び迅速性に優れた分析技術であり、環境試料中の微量成分の定量法として広く利用されている。当所では、電気化学分析法の中でも高感度なストリッピングボルタンメトリーを土壤中重金属の簡易計測法として適用した¹²⁾。この分析法は使用する装置が小型で軽く、複数元素の同時定量も可能である（図14）。土壤汚染調査には、試料の乾燥と抽出^{*14)}の工程が含まれている。当所では、これら前処理操作の簡略化についても検討し、分析所要時間を公定法の1/10以下に短縮することに成功した。また、分析に用いる試料量及び試薬量を低減し、現場調査で適用可能な簡易土壤抽出法及び簡易ろ過法を開発した（図15）。

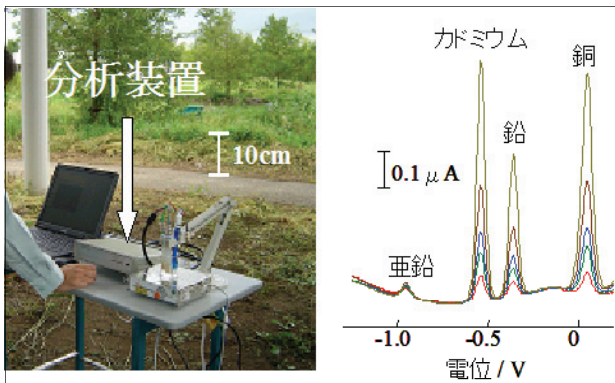


図14 土壤汚染の簡易計測法及び解析データ

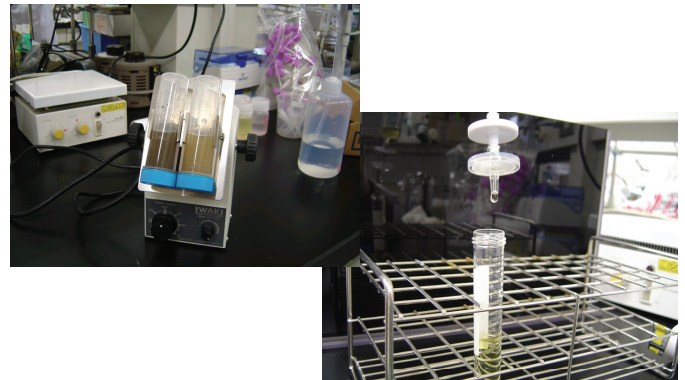


図15 簡易土壤抽出(左)及び簡易ろ過(右)

ストリッピングボルタンメトリーによる簡易計測法を、長瀬総合射撃場敷地内の鉛汚染土壤調査に適用し、現場で汚染概況の把握を試みた¹³⁾。調査地域は射撃場の北東部とし、30m四方の区画を設定した。この区画をさらに10m四方の単位区画^{*15)}に分画し、各単位区画の中央付近の土壤を採取分析した（図16）。調査の結果、9単位区画のうち沢下流方向の2地点（図中の④、⑦）で基準を超過する鉛が検出されたが、その他の7地点はすべて基準以下であった。今回の調査地点は射撃場からの飛弾が集積する尾根の下方に位置し、急峻な斜面を滑落した鉛散弾が堆積しやすい地形条件となっていたため、一部の単位区画で比較的高い濃度の鉛が検出されたものと思われる。鉛汚染は、深度方向には拡散しておらず、表層15cm程度で止まっていることが確認できた。

本法と公定法の汚染調査結果を比較したところ、図17に示すように、鉛含有量に若干の相違が見られたが、基準を超過する汚染土壤の存在地点（④、⑦）は一致した。現在、電気探査等と組み合わせた包括的な汚染解析システムの構築に取り組んでいる。

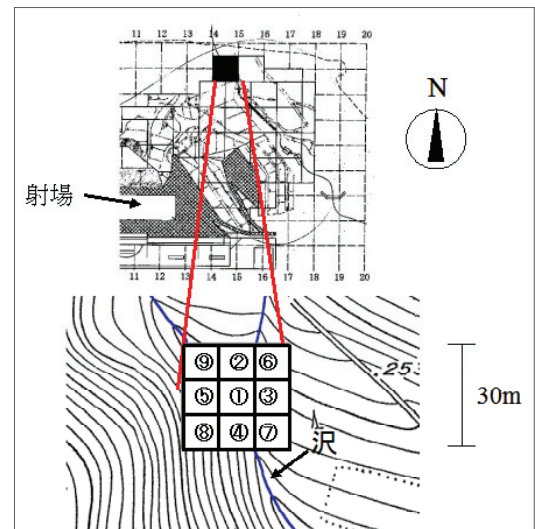


図16 調査場所及び試料採取地点

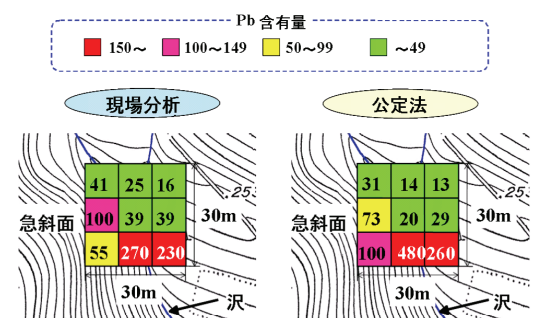


図17 射撃場における土壤汚染調査結果

3.3 地下水汚染

3.3.1 地下水汚染に関する施策と取組

地下水は、民法によると土地に従属するものとして地権者に利用権があり、公共財（公水）として位置づけられていない。このため、地下水の監視や基準策定などの取組は近年になってからであり、大気及び公共用水域の場合に比べて非常に遅れたものとなった。しかし、表1に示すように、米国シリコンバレーの大規模な有機塩素系溶剤による地下水汚染事故を契機に、我が国でも様々な取組が進められることになった。

表1 土壌・地下水汚染に関する国及び県の取り組みの経緯

昭和45年	「農用地の土壌の汚染防止等に関する法律」制定（特定有害物質：カドミウム、銅、ひ素）
57年	米国シリコンバレーで塩素系有機溶剤による大規模な地下水汚染が発覚 全国15都市の地下水汚染実態調査を実施（各地で有機塩素化合物による汚染が確認）
59年	県：県内事業所井戸の地下水汚染実態調査を実施（暫定基準値超過の井戸を確認）
63年	県：秩父・県北地域16市町村の井戸調査に着手。翌年から法に基づく常時監視に移行。
平成元年	「水質汚濁防止法」の一部改正 ・有害物質を含む水の地下浸透の禁止 ・都道府県知事による地下水質常時監視
3年	「土壌の汚染に係る環境基準」設定（現在27項目）
5年	地下浸透規制の強化（有害物質の追加等）
9年	地下水の水質汚染に係る環境基準（23項目）」設定 県：「地下水汚染クリーンアップ事業」開始
10年	県：トリクロロエチレン取扱い事業所に対する緊急一斉調査を実施
11年	環境基準項目に硝酸性窒素及び亜硝酸性窒素、ふっ素、ほう素を追加 県：「トリクロロエチレンに係る地下水汚染対策に係る基本方針」策定。 広域重点調査の開始
13年	県：「生活環境保全条例」制定、地下水・土壌汚染対策に係る規定を追加
14年	「土壌汚染対策法」制定（特定有害物質25項目が指定）

我が国で最初の地下水汚染に関する実態調査は、昭和57年に環境庁（現環境省）が全国15都市の井戸1,360本について行ったものである。その結果、トリクロロエチレン（TCE）及びテトラクロロエチレン（PCE）が全体の約3割で検出され、水質暫定基準値の超過率もPCEが4%、TCEが3%と各地の汚染が明るみになった。県でも昭和59年に34本の事業所井戸を調査し、2地点で暫定基準を超過するPCEが検出された。その後、地下水汚染が全国的な広がりを見せたため、国は平成元年に水質汚濁防止法を改正し、工場などでの有害化学物質の地下浸透規制^{*16}、さらに自治体による常時監視を定めた。しかし、地下水質の環境基準が定められたのは平成9年と遅れ、TCEやPCEなどVOC11項目を含む23項目の基準が初めて設定された。

県では、地下水汚染クリーンアップ事業を平成9年から開始し、常時監視によってTCE最高濃度（基準値の140倍）が検出された深谷市人見・折之口地区で、汚染源を特定する調査に着手した。翌年にはTCEを使用している県内約500事業所の緊急一斉調査を実施し、106事業所で土壌ガスを検出するとともに、12事業所で地下水汚染を確認した。この結果を基に、県は平成11年に、事業者の自主調査や県の周辺調査等を内容とする地下水汚染に関する基本方針を策定した。さらに、広い範囲に汚染が及んだ地域を対象に広域重点調査を行い、現在までに4地域で対策が進められている。平成14年

の県条例全面改正では、生活環境保全条例に新たな規制分野として地下水・土壌汚染対策を加え、汚染状況調査や拡散防止措置の義務付け、知事による浄化命令権などを規定した。

3.3.2 埼玉県地下水汚染状況

本県の地下水汚染状況を常時監視の概況調査結果から見ると、年間およそ170本の井戸が調査される中で、平成10年度までは毎年数本の井戸が、それ以後は30本前後の井戸が基準を超過している（図18）。内訳は平成16年度までの累計でVOCが66本、ひ素が26本、鉛が6本となり、平成11年に新たに基準に追加された硝酸・亜硝酸性窒素は、その年以後だけで143本が超過している。基準超過率はここ数年は全国平均を上回る10%台で推移し、河川など公共用水域の基準超過が非常にまれであることと比べても、地下水汚染が深刻な環境問題であることが分かる。

VOC汚染の原因は、金属・電気製品や精密部品の工場及びドライクリーニング店などで、洗浄や乾燥の用途で使われていた溶剤の不適切な管理や投棄と考えられている。TCEやPCEは油成分をよく溶かすとともに引火性のない優れた溶剤であるため、これまで大量に使用されてきた。しかし、表2に示すように、水よりも比重が大きいいため容易に地下に浸透する。また、水に少量しか溶けないことから、多量に漏洩した場合には長期間に及ぶ地下水汚染を引き起こす。

一方、環境基準が定められているVOCの中で、ガソリンスタンドなどで汚染が問題となるベンゼンだけは比重が水よりも小さいため、その汚染形態が異なることが知られている。VOC汚染のメカニズムの解明と対策では、比重が大きいものをDNAPL (Dense non-aqueous phase liquid)、小さいものをLNAPL (Light non-aqueous phase liquid) と区別して扱っている。

硝酸・亜硝酸性窒素の主な汚染原因は畑作等で使用する窒素肥料や家畜の排泄物と考えられ、図19のように、土壌中でこれらに含まれる窒素が硝酸に酸化され、地下水汚染を引き起こす。県北の櫛引台地は汚染が顕著に見られる地域であるが、早くから県の農業試験場（現農林総合研究センター）が中心となり、農地から流出する硝酸性窒素の把握と軽減対策が行われた。この地域の調査を例にとると、畜産・露地野菜面積2,477haに対して発生源比率は肥料7%、畜産70%、生活系25%となり、畜産系だけで年間約900kg-N/haの窒素負荷があった¹⁴⁾。

汚染対策を考える場合、VOCは汚染源の特定が比較的容易であるため工場などでの対策は実施しやすいが、一般環境に広がった汚染地下水の浄化は費用と時間がかかる。一方、硝酸・亜硝酸性窒素の対策は、前述のとおり、汚染源が多種多様で面的な広がりもあるため容易ではない。そこで、大地が有している自浄作用が大いに期待されており、自然減衰に関する研究が盛んに進められている。

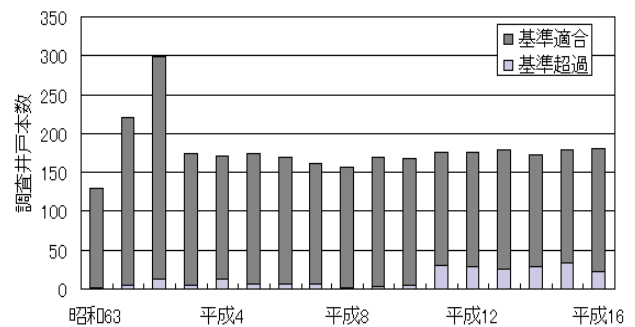


図18 地下水質概況調査結果の推移

表2 VOCの物性と水との比較

項目	水	TCE	PCE	ベンゼン
分子量	18.0	131.4	165.8	78.1
比重	1.00	1.46	1.63	0.88
蒸気圧 (mmHg)	12.8*	60*	58*	100***
溶解度 (mg/L)	—	1100**	400**	1790**
沸点 (°C)	100	86.9	121	80.1
環境基準 (mg/L)	—	0.03以下	0.01以下	0.01以下

神奈川県環境科学センター Kis-NET *：20℃，**：25℃，***：26.1℃

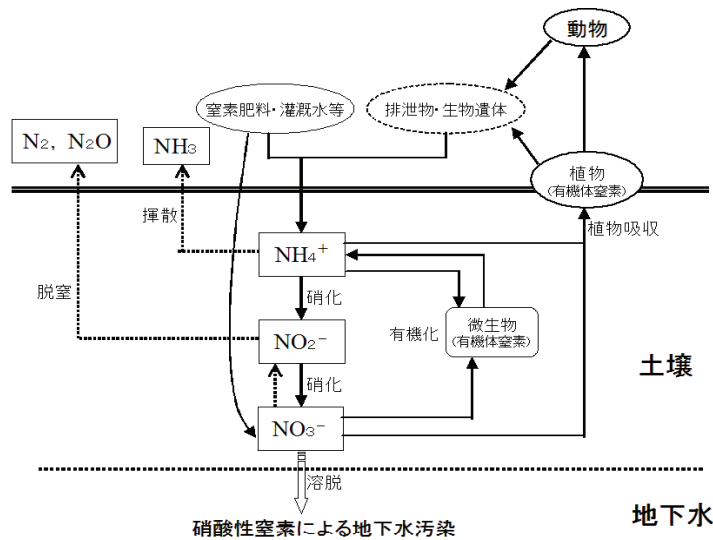


図19 土壌中における窒素の動態と地下水汚染模式図

3.3.3 地形地質と地下水汚染特性

常時監視で汚染が見つかった井戸については、周辺調査によって汚染原因を解明し、その後、定期モニタリングを実施することになる。平成16年度の定期モニタリングでは、VOCは46本、硝酸・亜硝酸性窒素は119本の基準超過井戸が対象となっている¹⁵⁾。表層地質図¹⁾に各々のモニタリング井戸をプロットしてみると、図20及び図21に示すように、台地に多くの汚染井戸が分布している。

これは、台地には古くから農業用水や生活用水として利用されてきた浅層地下水が広く存在しているため、その地下水の汚染が著しいことが分かる。しかし、汚染地下水の流動先となる低地では、汚染はあまり見られない。硝酸・亜硝酸性窒素に汚染された地下水は、台地から低地に流動する際に窒素ガスとなって消失する脱窒作用が明らかになっており、地形連鎖又は土地利用連鎖としてその浄化能が期待されている。前述の櫛引台地でも、台地の地下水と低地の水田が地下水移流で連鎖しており、台地からの窒素流出量と水田における窒素除去量から収支を調査したところ、農地外への窒素流出がないことが示されている¹⁴⁾。

当所が地下水汚染の調査を行った地域では、地下水が台地から低地に流動する過程でTCEの分解が確認されている。対象地域の推定地質断面と観測井の水質を図22に示すが、台地では高濃度のTCEが低地では極めて低濃度となり、逆

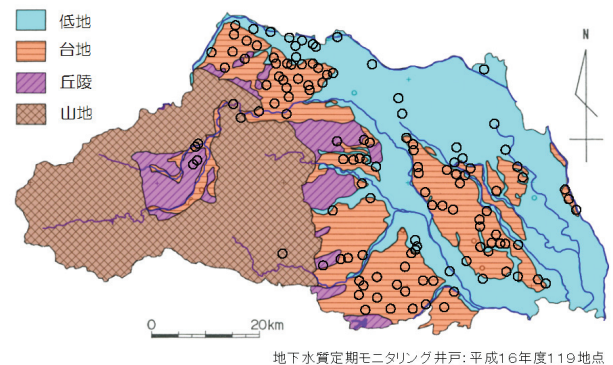


図20 硝酸・亜硝酸性窒素による汚染井戸分布

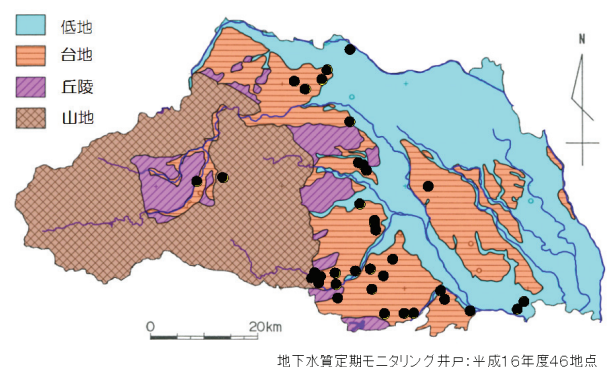


図21 TCE及びPCEによる汚染井戸分布

に、その分解生成物と考えられるcis-1,2-ジクロロエチレン (DCE) 濃度が増加していることが分かる。

PCE及びTCEの還元反応は、理論上は図23のように考えられるが、実際の嫌氣的地下環境^{*17}では、TCEが微生物の作用によりcis-1,2-DCEになることが知られている。観測井の結果は、このTCEの還元反応と、それを裏付ける溶存酸素量 (DO) 及び酸化還元電位 (ORP) で見られる嫌氣的環境の形成を表している。台地で検出された硝酸性窒素は低地では痕跡もなく、脱窒が起きていると推察された。この嫌氣的環境の形成には、湿潤な低地に一般に存在する有機質含量の多い粘性土 (高有機質粘性土) が深く関与していると考えられる。

現在、このような地形地質条件による汚染物質の分解メカニズムの解明と浄化能の評価を進めている。その成果は低地が果たす環境保全機能を明らかにし、地形地質を活用した浄化技術に利用できるものとして期待される。

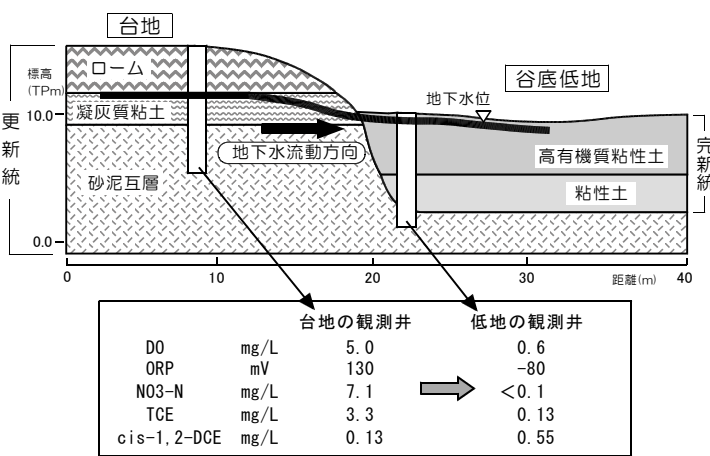


図22 TCE汚染地下水の地下水流動と還元反応

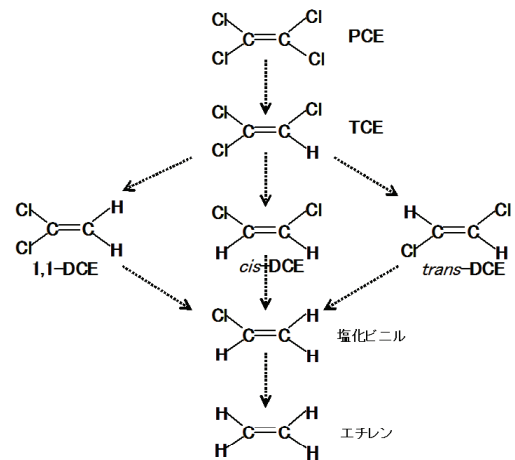


図23 PCE及びTCEの理論的還元反応

3.3.4 その他の地下水汚染

本県では、この他にひ素が特定地域の井戸で検出される事例が目立つ。ひ素による汚染は、最近、茨城県神栖市の飲料用井戸で高濃度の有機ひ素化合物が検出され、甚大な健康被害が発生した問題が起こった。この事件は、当初は旧日本軍の毒ガス弾が原因と疑われたが、その後の掘削調査で高濃度のひ素化合物を含有するコンクリート塊が確認されたことなどから、不法投棄された可能性が高いと推定されている。

一般に、ひ素による汚染は、鉱山採掘、金属精錬及び半導体工業等の産業活動に伴う排出や農業由来など人為的な原因によるものである。一方で、鉱物や温泉湧水にも含まれることから、地層に含まれる自然由来のひ素が地下水中に溶出してくる汚染も知られている。県では、平成15年度までの概況調査で基準超過井戸26本を確認しているが、井戸深度や周辺の地歴から自然由来のひ素と推定している。鉛も時折検出されるが、地下水試料に土壌粒子が含まれて分析されたことが予想され、同じく自然由来と考えられる。

地下水汚染の将来予測や保全対策には、様々な特徴を持つ有害物質の地下環境における動態を正しく理解しておくことが重要である。そのためには、化学物質の物性だけでなく、地形地質に関する正確な知見が不可欠である。

3.4 土壌・地下水汚染調査への物理探査の適用

地下の汚染状況や埋設物などを調査する場合、通常、ボーリング掘削等によって土質及び地下水試料の採取や埋設物の位置確認を行う。しかしながら、この方法で確かな結果を得るには、多数の地点を掘削する必要があるため、一般に経費が高くなる。さらに、地下の状況が不明なまま掘削を行うと、汚染状態を変化させたり、難透水層の破壊によって汚染の拡大を引き起こす危険性がある。

そのため、最近、このような調査に物理探査技術を適用することが試みられるようになった。物理探査とは電磁波、電流、弾性波等を用いて地表面から地下の状況を非破壊的に推定する技術であり、古くは地下資源調査（石油や金属鉱床など）に利用されていたが、近年では土木・防災分野への適用が進められている（地下構造推定など、

4.5.2(2)を参照）。物理探査の特長は広範囲の地下状況を効率的に把握（可視化）できることにあるため、図24に示すように、最近では環境分野への適用が検討されている。

汚染調査で期待される物理探査の役割は、①汚染が分布する地盤の水理地質構造の把握（場の把握）と、②汚染範囲や汚染量の把握（汚染自体の把握）に大別される¹⁶⁾。物理探査には様々な手法があるが、地盤の汚染を対象とする場合には、次に示すように、水理地質条件との関連が高い電気的あるいは電磁的な手法が多く用いられる。

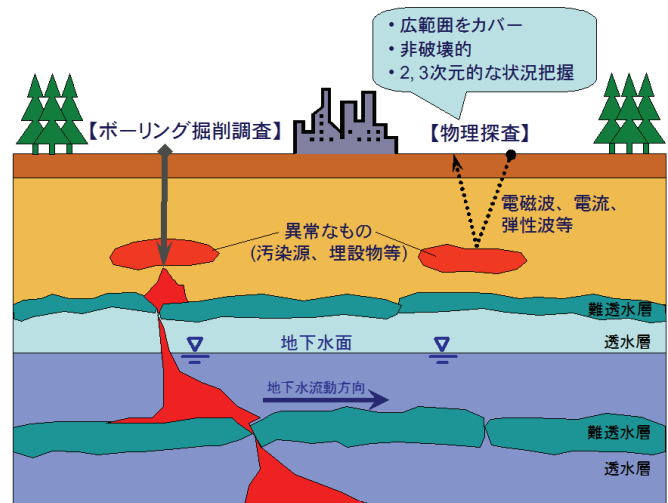


図24 汚染調査における物理探査の概念図

3.4.1 汚染調査等に用いられる物理探査法の概要

(1) 電気探査法

電気探査は、地盤に通電し、電気の流れにくさ（比抵抗）の分布を求める手法である。地盤の比抵抗は導電性鉱物の含有量や間隙水^{*18}の飽和度などに依存するため、この手法は帯水層分布、地質構造等の把握に用いられる。

(2) 電磁探査法

電気・磁氣的性質が異なる物質を電磁波が通り抜ける際に新たな電磁波が発生するが、電磁探査法は地表から電磁波を地中に射出し、この2次的な電磁波を計測・解析することで、地盤の比抵抗分布を推定する手法である。この手法は、金属や帯水層など比抵抗の低い領域の検出に優れているため、特に金属埋設物等の検出に有効であるとともに、地下水分布や粘土層（難透水層）の位置推定にも用いられる。

(3) 地中レーダ探査

地中レーダ探査は、地中埋設物のように地盤との比抵抗差の大きい境界面で起こる電磁波の反射を利用する探査法である。地表から照射した電磁波が地中で反射して戻ってくるまでの時間を計測・解析し、埋設物や亀裂等の位置や大きさ、形状等を把握することができる。

3.4.2 汚染調査等における物理探査の適用事例

物理探査の汚染調査への適用に関する検討は、欧米では1980年代から進められている。特に、石

油系の軽質油による汚染（以下、油汚染という）に対しては、模擬実験や実際の汚染現場において電気・電磁的な手法の適用を試みた事例が多数報告されている。一方、国内では環境基準設定物質のうち軽質油に該当するものはベンゼンのみであり、油汚染は主たる調査対象とされてこなかった。それゆえ、環境分野における適用事例は廃棄物層の特性把握等を対象とする場合が多く、汚染調査への適用は比較的近年になってからである。

こうした背景を踏まえ、当所では土壌・地下水汚染の迅速な解決を図るための物理探査手法の適用について検討している。ここでは、探査事例の一部を紹介する。

事例(1) 土壌・地下水汚染調査における適用

土壌・地下水汚染調査への適用性を検討するため、有機溶剤のPCEによる汚染が確認されている工場跡地で電気探査及び地中レーダ探査を実施した。図25は探査結果の一例である。

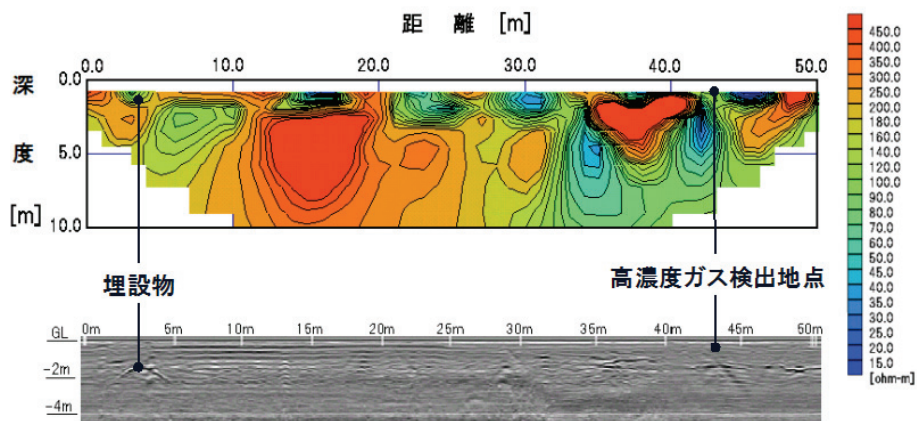


図25 ①比抵抗構造断面と②地中レーダプロフィール

電気探査による比抵抗構造断面は、工場内の表層土壌の攪乱による影響が大きかったため、汚染か所を直接推定することは困難であったが、工場外（未汚染地域）の比抵抗分布との対比により、周囲よりも低比抵抗を示すことを確認した。また、地中レーダ探査では、埋設物や地盤の不均質な状態を捉えることができたが、汚染状態の把握には至らなかった。

事例(2) 不法投棄調査における電磁探査法の適用

整地の際、地中からドラム缶等の廃棄物が掘り出された埋立地において、投棄の概要、特に未発見ドラム缶の有無を把握するため、電磁探査を実施した。図26は、結果の一例として、地表面付近の導電率^{*19}を反映する電磁波成分の分布を示したもので、電気的な特性の異なる2種のパターンが現れている。地表の視察による調査や採取試料の分析結果と合わせて、これらが、

- ①掘り出したドラム缶や金属埋設物の位置（白色領域）
- ②導電率の高い塩類等が存在する位置（濃色領域）

に対応することが確認された。

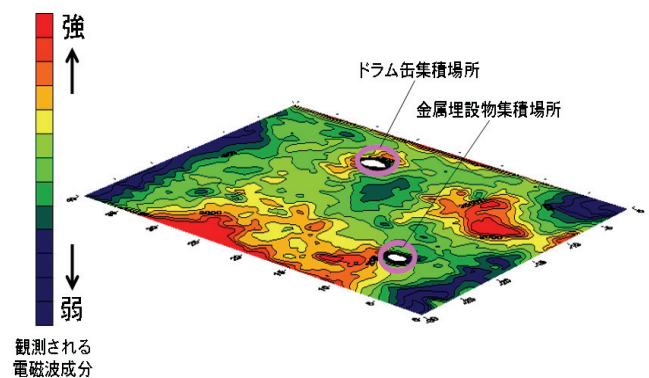


図26 地表面付近の電磁波成分の分布

さらに、これらの導電率分布を深度別に比較したところ、

- ・①の白色領域はこの2カ所以外には見られない
- ・②の濃色領域は表層付近のみで見られ、かつ①の影響とは明らかに異なる

ことから、結論として、これまで確認されている以外に新たなドラム缶等の埋設はないと判断した。こうした情報を提示することで、今後の対策に向けた行政判断を支援することができると思われる。

このように、物理探査は土壌・地下水汚染調査に有効であると考えられるが、更に実用性を高めるための検討が必要である。特に、探査結果の解釈をより確実なものとするために、適用事例を更に蓄積するとともに、

- ・汚染物質による土壌物性の変化に関する知見の収集
- ・地中における汚染物質の化学的、生物化学的变化とそれが土壌物性に与える影響に関する知見の収集

を図っていく必要がある。

4 環境と調和する土地利用

4.1 はじめに

現在、埼玉県内には高圧ガスや火薬類など危険性物質を扱う事業所が約1,400カ所存在する（内訳：高圧ガス製造所777、化学工場・医薬品製造所549、火薬類製造所14、廃棄物処理施設65）。また、廃棄物の最終処分場は埋立が終了したものも含めると、一般廃棄物処分場が約350カ所、産業廃棄物処分場が約100カ所になる。本県は、昭和30年代以降の高度経済成長とともに急激に都市化が進んだため、これらの各種施設と住宅地が隣接している例が少なくない。

一方、埼玉県はこれまで、大正時代に発生した関東大震災や戦後の復興期に襲来したカスリーン台風といった数多くの自然災害を経験している。現在のように過密化した都市が同様の災害を受けた場合、被害がより深刻になる危険性がある。そのために、起こりうる被害を想定し、最小限にとどめるための方策を事前に検討しておく必要がある。

ここでは、本県を襲った過去の自然災害の中で、被害が広範囲に及んだ地震災害と洪水災害について、その概要を述べる。さらに、災害時に周辺環境に重大な影響を及ぼす危険性のある各種化学工場、廃棄物最終処分場、ごみ山及び焼却施設等について、その想定される被害内容と一般環境への影響について考察する。

4.2 埼玉県に甚大な被害を与えた地震災害

詳細な記録が残る近代以降の地震災害を対象とした場合、大正関東地震（1923年）は本県にも甚大な被害を与えた。また、昭和以降にも、西埼玉地震（1931年）や埼玉県中部地震（1968年）などによる被害が発生している。

4.2.1 大正関東地震(1923年)

大正12（1923）年9月1日午前11時58分、相模湾・伊豆大島近傍を震源として発生した地震を大正の関東地震と呼び、また、これに伴って発生した火災等の被害も含めて関東大震災と呼ぶ。この地震は南部を中心とした関東地方の広範囲に甚大な被害をもたらし、全体で死者は約10万5千人、

被害家屋は約29万棟に達した。

埼玉県でも死者343人、被害家屋約4,800棟と大きな被害を受けたが、上に示した全体被害に占める割合はかなり小さいものとなっている。その理由として、本県が東京や横浜など大被害を受けた地域に比べて震源からやや離れていたこともあるが、都市化が進んでいなかったことが挙げられる。しかしながら、最近の研究では、本県でも震度6弱から震度7と兵庫県南部地震（阪神淡路大震災、1995年）と同程度の揺れに見舞われた地域が広く存在していた可能性があり（図27参照）、現在のような過密都市に変貌した県南地域では多大な被害となることが懸念される。

4.2.2 西埼玉地震(1931年)

西埼玉地震は、昭和6(1931)年9月21日、深谷市を震源（地震の規模：M6.9、震源の深さ：約17km）として発生したと推定されており、関東地方の広い範囲で震度5が観測された。被害は死者16人、負傷者114人、全壊家屋207棟であり、特に、荒川の北部や利根川沿いの沖積低地に被害が集中した。この地震は、群馬・埼玉県境の関東平野北西縁断層帯で発生したとみられる左横ずれ断層型の地震だが、地表に断層は現れなかった。揺れが強かった地域ではいたるところで地面の亀裂が生じ、地下水や土砂の噴出、井戸水の濁りなどが広い範囲で見られた。

4.3 埼玉県に甚大な被害を発生した河川災害

4.3.1 明治の大水害(明治43(1910)年8月)

明治以降、荒川の最大の出水となったこの大洪水では、埼玉県の全面積の24%（低地のほぼ全域）が浸水し、東京下町が壊滅的な被害を受けた。この大洪水は、梅雨前線による長雨と二つの台風の襲来によって引き起こされたものである。これによって県内で314か所の堤防が決壊し、死傷者401人、住宅の全半壊・破損・流出18,147棟などの被害となった。また、農産物の被害は2,400万円（現在の資産価値で1,000億円）に達した。

4.3.2 カスリーン台風(昭和22(1947)年9月)

戦後間もない関東及び東北地方に甚大な災害をもたらした台風で、本体勢力の割には降水量が多い雨

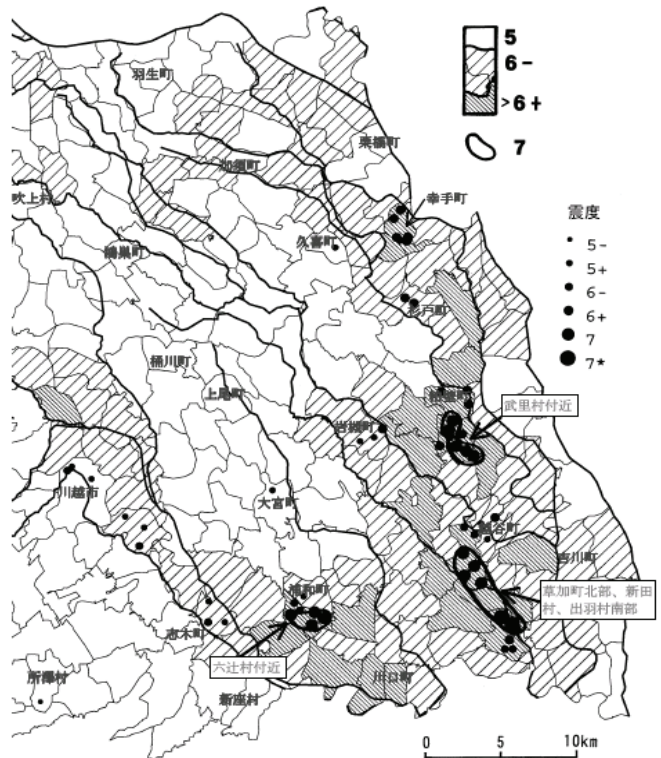


図27 被害調査報告書から推定された関東地震の震度分布¹⁷⁾



図28 カスリーン台風による県東部の浸水域の分布¹⁸⁾

台風の典型例とされている。この台風の被害は、全体で死者・行方不明者約2,000人、住家浸水約38万棟、耕地流失埋没約1万3千haに達した。

この時、本県では東村（現在の大利根町付近）における利根川堤防の決壊が発端となり、利根川水系8か所・荒川水系2か所が決壊し、県東部の江戸川と元荒川に囲まれる範囲のほぼ全域が水没した（図28）。

4.4 自然災害による環境関連施設のダメージと一般環境への影響

上に述べたように、埼玉県では過去において深刻な地震・洪水災害に見舞われた。現在では、特に堤防の増強などの治水対策が進められ、家屋の耐震強度や災害時の救急・救援体制も飛躍的に向上しているため、自然災害による被害危険度（リスク）は一面では少なくなっている。

しかしながら、急速な都市化及び社会構造の変化（人口の集中、工業化社会の形成、巨大構造物の建設、地下利用など）によって、全体としてのリスクは過去に比べて増加しているものと考えられる。そのため、多くの自治体では、現在の社会構造の様々なリスク評価を行って、将来の自然災害による被害を想定し、防災対策を進めている（4.5.1に本県の地震被害想定を例示）。

ここでは、様々なリスクのうち、特に環境汚染に直接的に影響する各種施設（本稿では、これを環境関連施設という）について、地震・洪水災害時に予想される汚染シナリオを整理し、簡単に解説する。

予想される汚染シナリオは、おおむね以下のようなものである。

[地震災害（液状化を含む）]

- 化学工場・焼却施設など
→施設破損・火災発生→有害ガスの大気への放出、有害化学物質の地下浸透
- 最終処分場
→遮水工・シート破損、水処理施設の損傷→有害化学物質の地下浸透
- ごみ山
→斜面崩壊→土砂の敷地外流出、汚染土壌の拡散

[水災害（洪水等）]

- 化学工場・焼却施設など
→施設破損→有害化学物質の流出・拡散、地下浸透
- 最終処分場（ごみ山を含む）
→冠水（斜面崩壊）→有害化学物質の流出・拡散（土砂の敷地外流出）、地下浸透（汚染土壌の拡散）

地震災害時には、化学工場などでの火災の発生によって、有害ガスの拡散や消化活動による各種化学物質の拡散が予想される。特に、中小の廃棄物中間処理施設が多い埼玉県では、このような被害が同時多発的に発生する危険性がある。また、最終処分場では、地震時に誘発された液状化によって遮水シートが破損することも考えられるため、液状化しやすい地盤にある処分場などは地震発

生後の地下水の監視などが必要である。さらに、処分場の最悪シナリオとして挙げられる内部保有水の地下水漏洩や火災の発生などは、漏水検知システムの設置や周辺井戸におけるモニタリング体制の確立など、施設が持つソフト・ハードの相違によってリスク評価が大きく異なる。

一方、洪水災害の場合には、一度に広大な面積が浸水するため、多くの環境関連施設からの化学物質の流出・拡散が懸念される。このような洪水災害によるリスクは、埋立てが終了した最終処分場では比較的低いと考えられるが、埋立て途中の処分場でも、セル工法（即日覆土）や中間覆土の採用などによってリスクの低減が期待できる。

今後は、想定される自然災害に対して、環境被害を最小限にとどめるために、各種環境関連施設の環境汚染リスクを正しく評価する必要がある。

4.5 地震被害の軽減に向けた取組

ここでは地質地盤に直接関わりのある地震災害について、被害軽減を目的とした県の取組のうち、消防防災課が実施している地震被害想定調査の概要と、当所の取組を紹介する。

4.5.1 地震被害想定調査

県（消防防災課）は、近い将来に予想される大規模地震に備えて、昭和55、56年度に初めて「埼玉県地震被害想定調査」を実施し、その後の社会状況の変化に応じて、適宜、見直しを行っている。最近では平成8、9年度に抜本的な見直しを行った。これは、兵庫県南部地震の教訓を生かして、地震動の推計方法や評価方法などを全面的に改めたものである。

そこでは、過去の被害実績のある地震（大正関東地震の再来を想定した「南関東地震」、西埼玉地震）に加えて、発生の可能性が指摘される大規模直下型地震（東京都ー埼玉県境下地震、綾瀬川断層による地震）を対象としている。この調査では、各地震が発生した場合の人的被害、火災発生、ライフライン被害など様々な地域危険度を、全県を500mのメッシュに分割して評価している（図29に例示。埼玉県地震被害想定調査報告書¹⁹⁾、平成10年3月）。

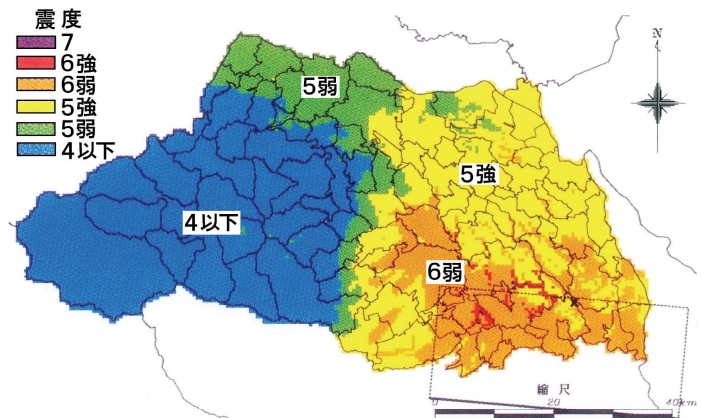


図29 地震被害想定調査結果の例

（東京都ー埼玉県境下地震における予測震度分布）

この調査結果を基に、実際の震災対策計画が策定されている（埼玉県震災対策計画、埼玉県防災会議、平成11年11月）。

そこでは、震災に強い地域づくりを主体とした「震災予防計画」、救急・救援活動を柱とする「震災応急対策計画」及びその後の復旧・復興活動に関する「震災復旧復興対策計画」が定められている。

4.5.2 当所の取組

(1) 地域地盤の地震増幅度特性の推計

上述の地震被害想定では、図29の例示のように、想定した地震に対して、地域の揺れの大きさ（震度）を推計している。これは、地域の震度は地震の規模や震源からの距離によって異なるためである。一方、台地や低地など地形・地質構造が異なると同一の地震でも揺れ方が変わるため、被害軽

減策を検討する場合、地盤が固有に持つ揺れやすさの度合い（これを、地震増幅度特性という）を評価することも重要である。ここでは、地域ごとの地震増幅度特性について、当所が実施した検討結果を紹介する。

地震が発生したときの地表面の揺れの強さは、前述のように、震源規模（マグニチュード）・震源距離とともに、地下構造に由来する地盤増幅度によって決定される。図30は、震源からの地震の伝わり方を模式的に表したものであるが、図のように、地盤の増幅度は地下深部での増幅と浅層での増幅が関係する。しかし、地域ごとの相違については、主として浅層での増幅の影響が強く反映されるため、この検討では、特に浅層の地下構造の相違に着目した。

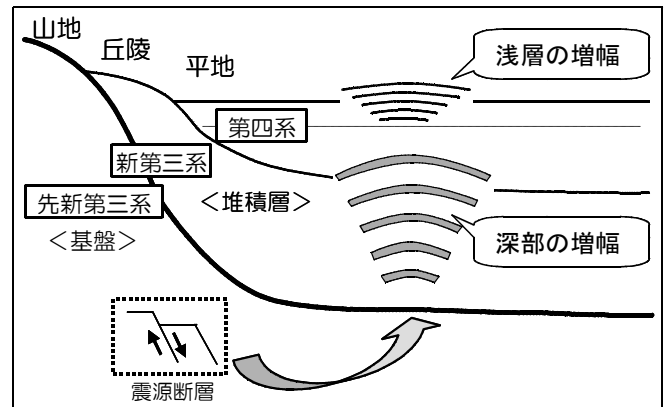


図30 地下構造と地震波の伝わり方

検討に必要な地域ごとの浅層地下構造は地震被害想定調査¹⁹⁾で設定されたデータを利用した。しかし、地盤増幅度の推定には、想定調査とは別個の手法で計算する必要があるため、当所で新たに推計方法を検討した²⁰⁾。

図31は、その方法に基づいて計算された地盤の増幅度を示したものである。計算は、全県を500mメッシュで分割した約15,000の地域について行われたが、図は各メッシュの増幅度の大小によって濃淡を変えて示している（色が濃いほど増幅度が大きいことを表す）。

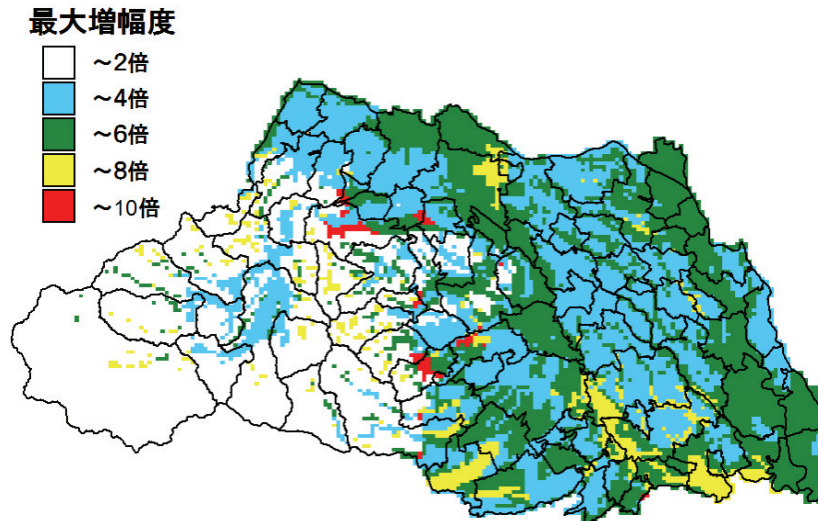


図31 地域地盤の地震増幅度²⁰⁾

この図について、増幅度分布の概略傾向を列記すると次のとおりである。

- ・ 県西部の山地は増幅度が小さい。これは、山地の多くは基盤がほぼ露出した状態にあることによる（堆積層での地震波の増幅が少ない）。ただし、山地でも、河川に沿った地域では増幅度が比較的高くなる場所が存在する。
- ・ 県西部から中央部の丘陵地や台地については、増幅度が比較的高い地域が複雑に混在している。

- ・ 県東部の低地及び台地の増幅度分布は、やや複雑である。概して台地部分の増幅度は低く、荒川流域及び中川流域では増幅度が比較的高くなる傾向がみられる。大宮台地の南側部分には、台地に切れ込んだ谷底低地に相当する地域で増幅度が高くなる。

このように、地盤の増幅度は地域ごとに大きく相違しており、地震被害の軽減対策（住宅の適地誘導、耐震補強対策など）を検討する際には、この相違を十分考慮する必要がある。さらに、ここで示した例では1メッシュ内を同一の地盤とみなしているが、実際は同一メッシュ内でも異なる地下構造をもつため、具体的な軽減対策を考える場合には、地域の地盤に対してより詳細な検討が必要になる。

(2) 深部地下構造調査

(1)の増幅度推計は浅層地盤の構造を基に計算されたものであるが、この増幅度推計や被害想定精度をより向上させるためには、図30に示した深部構造に由来する増幅度を正確に把握する必要がある。被害想定については、浅層の増幅度が家屋（低層構造物）の被害に密接に関係するのに対して、深部構造に由来する増幅度が高層ビルや石油タンクなどの大規模構造物の被害に大きく影響するためである。

しかしながら、主に建設ボーリングによる浅層構造資料（最大深度100m程度まで）が数多く収集されているのに対して（後述(3)を参照）、最大深度が4,000mに達するとされる地下深部の情報の入手は極めて困難である。これは深部構造調査には莫大な経費がかかるためで、例えば、県内で深度1,000mを超える深層ボーリングはわずかに7本（基盤に到達したものは3本）である。図32は、このような深層ボーリング資料（近県資料を含む）を用いて作成した県中央部の東西方向断面図であるが、少数のボーリング資料（点情報）だけでは、正確な構造を理解することが困難である。

そのため、3.4に述べた物理探査がこのような深部構造調査にも適用されてきた。その方法は、大規模な人工震源（ダイナマイトによる爆破、起震車など）によって人工地震を発生させ、地下構造を推定する方法（地震探査法）である。しかし、この方法も経費がかかるほか、都市部での人工地震の発生は環境問題（騒音・振動）を引き起こす可能性があるため、適用に制限がある。

当所では、このような背景の下に、新しい探査手法を用いて、県内の広域・深部構造調査を実施した。この方法は、海洋波浪を起源とする地盤の微振動から地下のS波速度（地層の固さに対応する物性値）の構造を推定するもので、微動探査法と呼ばれている。この方法は、当所が初めて大規模探査に適用したもので、従来の地震探査法のような環境問題を引き起こすことなく、格段に低いコストで実施することができた。調査対象地域は、県西部の丘陵部から千葉県及び東京都に接する県南全域で、その面積は約1,500km²（東西約50km、南北約30km）に及んでいる。図33は、調査結果の一例として、図32に対応するS波速度構造断面を示したものである。

推定された構造は、図に示すように、深層ボーリングの地質層序によく対応し、さらにボーリング資料のない地域を補完したものとなっている。この断面から、基盤はさいたま市付近で最も深く、

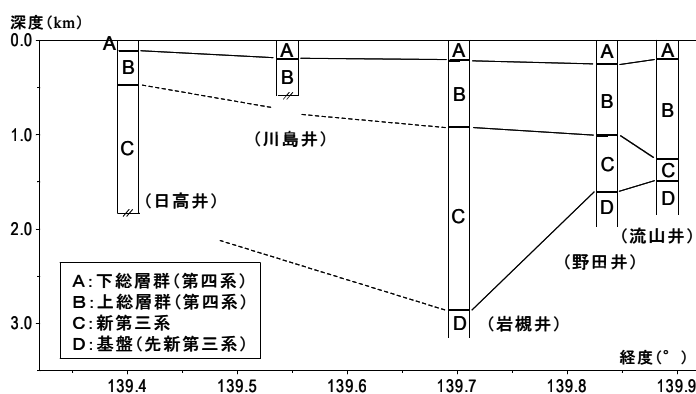


図32 深層ボーリングによる推定断面(日高ー流山)

東西に向かって浅くなること、第四系（上総層群、下総層群）が東に向かって層厚を増しながら傾斜していることが分かる。

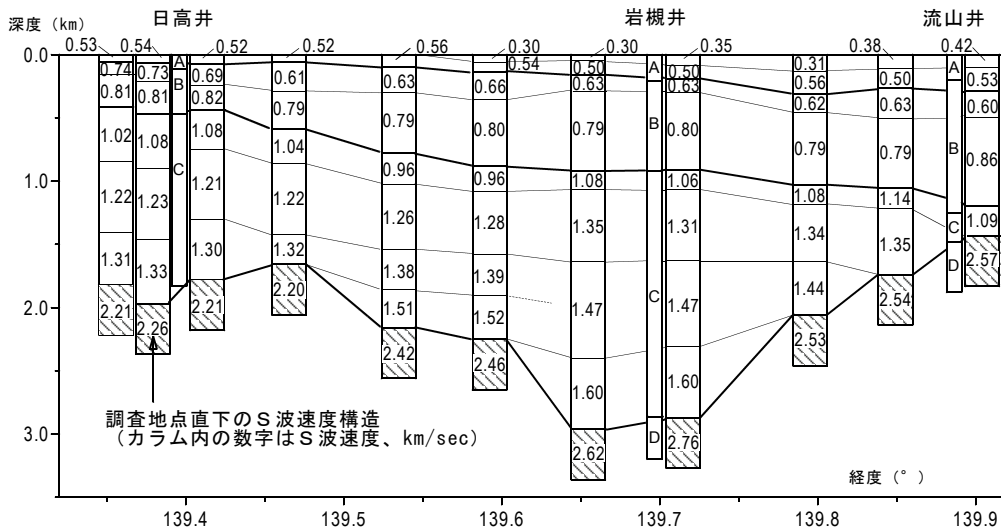


図33 S波速度断面(日高一流山)²¹⁾

さらに、図34は、推定された基盤の3次元形状を示したものであるが、図から県南部平野の基盤は南北に深い谷（最大深度3,400m）をもつ複雑な形状であることが分かる。

このように詳細に解明された深部構造は、精度の高い地震被害想定（地震動予測）のための資料や大規模構造物の耐震性評価・耐震設計資料として直ちに利用できる。また、地震防災への利用にとどまらず、深部地下水流動を把握するための基礎資料にもなるため、深部流体資源（地下水、温泉水など）の適正利用にも役立つものと考えられる。

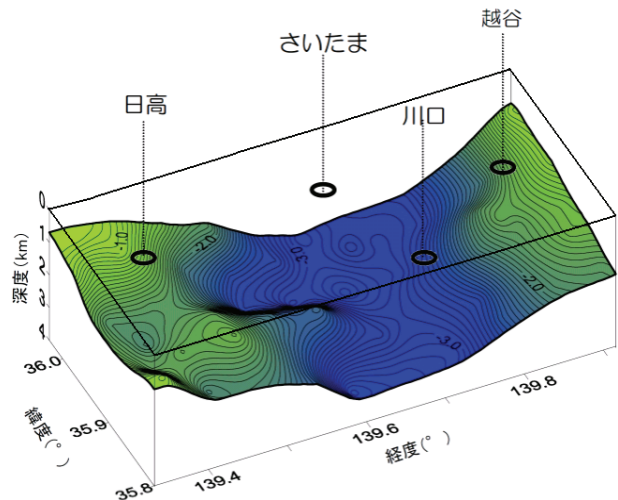


図34 県南部平野の3次元基盤形状²¹⁾

(3) 地質地盤インフォメーションシステムの運用

当所では、県庁各課所で個別に保管されてきた地質地盤資料をデータベース化し（「埼玉県地質地盤インフォメーションシステム」：以下、システムという）、行政部門への情報提供や地質地盤に関する様々な研究に利用している。システムに搭載されているデータは、主に公共事業に関連して得られた浅層ボーリング資料（地質柱状図：全県について約12,000本）である。行政に提供される情報は、土壌・地下水汚染調査、耐震計算・補強工事、圃場整備及び各種建設工事などに利用され、各方面の行政事業の効率化とコスト削減に寄与している。

一方、システムの研究利用としては、ボーリングデータから地盤の様々な特性を調べ（例えば、地震関係では、地盤増幅度特性、液状化危険度など）、その特性に基づいた地域分類の方法（マイクロゾーニング）を検討している。このマイクロゾーニングは、県内各地域の地盤環境を正確に把握・評価しようとするもので、環境に適した土地利用を進めるための基礎資料を提供する。ここで

は、以下に前述の(1)に関連した増幅度特性を取り上げ、その検討内容を概説する。

前述の(1)では、全県を対象として500mメッシュごとにそのメッシュ内の代表的な浅層構造を用いて増幅度を推計したが、そこでも触れたように、実際はメッシュ内でも地形・地質が大きく異なる場合が多い。そのため、この研究ではメッシュで分割する評価方法に変えて、地形ごとに増幅度を推計する方法を検討した。

図35は、大宮台地南部の地域を対象に土地分類図（地形による分類）を作成し、システムのボーリングデータから計算された増幅度を、地形ごとに評価したものである。図の○は増幅度の計算結果を基に評価したランクを示したもので、大きいほど増幅度が高いことを表す。

図に示すように、増幅度の分布は地形（台地、谷底低地）や表層地質とよく調和したものとなった。したがって、このマイクロゾーニング手法を県内各地域に適用すれば、県が進める「災害に強いまちづくり」のために、有用な資料を提供することができると考えられる。

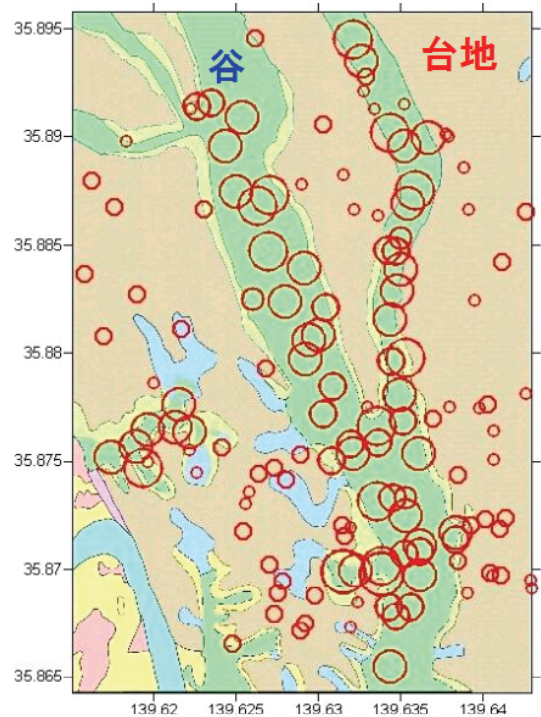


図35 地形による増幅度の違い

5 おわりに

埼玉県は地形地質条件は山地・丘陵・台地・低地とバランスがとれた構成となっており、地下水循環の観点から言えば涵養域から流出域まで極めて広域な一連の水循環系を有している。特に、県民の多くが居住・生活の場として利用している台地や低地は、我が国最大の関東地下水盆に位置し、その内部には実に豊富な地下資源を湛えている。実際に、都市化が進展した現在でも多くの湧泉が見られ、井戸水を日常的に利用している人たちも多い。これらの貴重な資源を次世代に継承するため、土壌・地下水汚染など、現在深刻化している地質地盤汚染問題を一日も早く克服する必要がある。

また、埼玉県は関東地方の中でも広大な平地をもつため、土地利用の面では有利な条件にある。そのことによって、今後より一層の都市化が進むことは明らかである。これは生活の利便性や快適性を増すとともに、他方で、自然災害による被害リスクが更に増大する危険性をもつことになる。したがって、今後は防災対策を強化するとともに、地域の自然の地質地盤環境を考慮した安全で適正な土地利用を進めることが必要である。

当所では、このような観点から、本県の地質地盤環境に関する様々な科学技術情報や研究成果を行政機関に提供するとともに、県民への情報公開を進めることにより、安全で安心な県土利用の実現を目指している。

用語解説

*1 海水準変動

地質時代の世界的な海水準（海面）の変化に対して用いられる用語で海面変化とも呼ばれる。海面変化の主な原因としては、温暖期（間氷期）と寒冷期（氷期）の繰り返しによって生じる大陸内の氷河や氷床の消長が挙げられ、また、地域によっては大陸（地盤）自体の昇降による影響も大きい。

*2 縄文海進

約6,000年前の縄文時代における海水面の上昇のことを指す。当時は、年間平均気温が現在より1~2℃ほど高く、海面が3~5m高かったと言われている。我が国の海に面した平野部の多くはこの時代に陸地の内部にまで海が入り込んだことが知られている。

*3 秩父中・古生層

約3億年前から1億3,500万年前の時代（石炭紀~三畳紀）にできた地層群であり、チャート（放散虫などの死がい）、緑色岩（火山島などの溶岩や火山灰）そして石灰岩（サンゴの死がい）など非常に硬い岩石で構成されている。

*4 中生層

中生代の地層の総称であり、本県に存在する同時代の地層は白亜紀（1億3,500万年前~6,500万年前）、いわゆる恐竜時代の地層のものが多い。この時代は現在よりも温暖で、本県の大部分は海であった。

*5 第三紀層

第三紀の地層の総称であり、本県に存在する同時代の地層は中新世（約1,500万年前）のものが多く、秩父盆地や比企丘陵などで見られる泥岩・砂岩・れき岩・凝灰岩（ぎょうかいがん）などが代表例として挙げられる。

*6 腐植土

朽木や落ち葉など植物の遺骸がバクテリアなどの微生物によって分解され、土状になり堆積した地層。土の性質としては極めて多量の水分を保持（高含水比）し、酸性土壌となる。また、極めて軟弱な地層であるため、地震時の地盤の揺れが大きくなる可能性が高い。

*7 地衣類(ちいるい)

地衣類とは、菌類と藻類が共生関係を結んでできた複合体であり、一般には「こけ」と呼ばれる雑多な生物群の総称である。

*8 谷底低地(こくていていち)

台地や丘陵地に刻みこまれた河川（谷）沿いの低い平地。谷の出口が河川本流の自然堤防や海岸の砂州などにふさがれた場合は腐植土が厚く堆積して極めて軟弱な地層となる。

*9 地下水涵養施設

雨水浸透施設ともよばれ、敷地内に降った雨水を集めて地下に浸透させる施設。都市化に伴う雨水浸透量の低下に起因する地下水や湧水（ゆうすい）の枯渇を防止する役目や豪雨時における水路や河川の負担を軽減する役目などをもつ。

*10 足尾銅山の鉱毒排水

日本で最初の公害事件。渡良瀬川上流の足尾銅山から流出した鉱毒排水が流域の農漁民へ多大な被害を与えた。この問題は明治24(1891)年、田中正造により初めて国会で取り上げられた。

***11 イタイイタイ病**

骨がもろくなり、患者が「痛い、痛い」と泣き叫んだことから、地元の開業医により「イタイイタイ病」と名付けられた。

***12 揮発性有機化合物(Volatile Organic Compounds:VOC)**

沸点が比較的低いため、揮発しやすい有機化合物の総称。土壌及び地下水の環境基準では、トリクロロエチレン(TCE)及びテトラクロロエチレン(PCE)などやこれらが分解して生成される物質を含めて11項目が定められている。

***13 特定有害物質**

土壌に含まれることにより人の健康被害を生ずるおそれのある物質。現在25物質が規定されている。

***14 抽出**

液体を加えて試料中の化学成分を溶け出させる操作。

***15 単位区画**

土壌汚染対策法に基づく調査では、10m×10mを最小単位として試料採取等を行うことが基本となる。この最小単位を単位区画という。

***16 地下浸透規制**

水質汚濁防止法により、有害物質を含む水の地下への浸透が禁止されている。現在26物質が対象になっており、公共用水域への排水基準よりも厳しい基準が定められている。

***17 嫌氣的地下環境**

分子状の酸素がない状態を嫌氣的(嫌氣性)という。1Lの水(20℃)には約8.8mgの分子状酸素が溶け込むことができるが、酸素の供給のない地下環境で微生物等に酸素が消費されると、嫌氣的な地下環境になる。

***18 間隙水**

土や岩石などを構成する土粒子間のすき間(間隙)に存在する水分。

***19 導電率**

電気の流れやすさを表す指標で、値が大きいくほど電流が流れやすいことを示す。

文 献

地質地盤環境

- 1) 村本達郎(1975)埼玉県の地形区分と名称, 埼玉大学紀要 (社会科学篇), **22**, 11-14.
- 2) 貝塚爽平(1977)日本の地形, 岩波書店.
- 3) 国土調査研究会編(1992)土地・水情報の基礎と応用, 古今書院.
- 4) 産業技術総合研究所(2004)水文環境図 NO. 3 関東平野.
- 5) 林武司(2004)関東平野中央部における地下水環境の変化と地下水質, 日本水文科学会誌, **34**, 217-226.
- 6) 木野義人(1970)関東平野中央部における被圧地下水の水理地質学的研究, 地質調査所報告, **238**, 1-38.
- 7) 国土庁(1996)地下水マップ (埼玉・群馬地域).
- 8) Domenico, P. A and V. V. Palciauskas(1973)Theoretical analysis of forced convective heat transfer in regional groundwater flow, *Geological Society of America Bulletin*, **84**, 3803-3814.
- 9) 宮越昭暢, 内田洋平, 佐倉保夫, 林武司(2003)地下温度分布からみた関東平野の地下水流動, 日本水文科学会誌, **33**, 137-148.
- 10) 埼玉県環境防災部(2005)平成16年地盤沈下・地下水位観測年報.
- 11) 環境省(2005)土壤汚染調査・対策事例及び対応状況に関する調査結果の概要.
- 12) 石山高, 高橋基之, 鈴木幸治, 古庄義明(2004)水銀膜微小電極を用いたストリップングポルタンメトリーによる土壤中垂鉛, カドミウム, 銅及び鉛の簡易迅速定量, 水環境学会誌, **27**, 715-720.
- 13) 石山高, 高橋基之, 鈴木幸治, 古庄義明(2006)ストリップングポルタンメトリーを適用した鉛汚染土壤のオンサイト評価手法の開発, 水環境学会誌, **29**, 115-120.
- 14) 日高伸(2002)環境保全型農業と硝酸性窒素汚染対策, 第44回日本水環境学会セミナー講演資料集, 26-38.
- 15) 埼玉県環境防災部(2005)平成15年度公共用水域及び地下水の水質測定結果, 339-355.
- 16) 奥村興平(2000)土壤・地下水汚染問題と物理探査, 物理探査, **53**, 520-531.
- 17) 武村雅之, 諸井孝文(2002)地質調査所データに基づく1923年関東地震の詳細震度分布 その2. 埼玉県, 日本地震工学会論文集, **2**, 2, 55-73.
- 18) Wikipedia[Internet](2005)カスリーン台風<<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%AB%E3%82%B9%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%B3%E5%8F%B0%E9%A2%A8>>.
- 19) 埼玉県(1998)埼玉県地震被害想定調査報告書.
- 20) 白石英孝(2003)地域地震動特性解析に関する研究, 埼玉県環境科学国際センター報, **3**, 136-141.
- 21) 松岡達郎, 白石英孝(2002)関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用, 物理探査, **55**, 127-143.