

7. 地下水の水質保全と土地利用

藤 縄 克 之 (信州大学教養部環境科学研究室)

1. 地下水の特徴

地下水には河川水や湖沼水には無い多くの特徴がある。

まず第一に、わが国の地下水は欧米の地下水と異なり軟水が多く、水質も一般に良好である。厚生省の”おいしい水研究会”が、全国の人口10万人以上の都市の水道水を比較したところ、おいしい水道水の大部分は水源が地下水であった(小島、1986)。微妙な味覚を身上とする日本茶は、おいしい水があってはじめてその本分が発揮できる。カビ臭くなった都会の水道水に代わり、瓶や缶入りの水を求めるようになった現代を、果して豊かな社会と呼ぶことができるであろうか。

ところで、地下水はなぜおいしく、安全なのであろうか。その答えは土壌・地下水中で起こる多くの作用にある(表-1)。地下水中で汚染物質は拡散され、希釈されるが、より大切なのは地層の持つろ過機能である。浸透する水が固形物質や微生物などの懸濁物を含んでいても、地層を構成する土粒子の間隙より大きな懸濁物はその間隙を通過できない。地層はこのように懸濁物を液体と固形物に仕分けする機能をもっている。地下に浸透する水には、大なり小なり固形微粒子がふくまれているが、流動する過程で地層がろ材となり、懸濁物はしだいに除去される。地下水が一般に澄んでいるのは、この地層によるろ過作用に負うところが大きい。

また、汚染物質は土壌・地下水中で多様な化学的作用を受ける。たとえば、マイナスに帯電した粘土鉱物や腐食コロイドは、重金属イオンやアンモニウムイオンなどの陽イオンを吸着する。地層中ではこの吸着-脱着反応のほかにも、表-1に示すような化学的作用が起こるため、汚染物質は地層中に捕捉される。

土壌中の微生物による汚染物質の分解や病原菌等の捕食も良好な地下水水質を形成する上で大きな役割を果たしていることはいうまでもない。

地下水の二つ目の特徴は、水温が一年を通じて安定していることである。図-1は長岡市の降水量、平均気温、信濃川の河川水温、水田の水温、深度15mの地下水水温の経年変化を示したものである。平均気温と信濃川の河川水温はそれぞれ約30℃、20℃の経年変化をしているが、地下水温は最高で13.8℃、最低で11.0℃と一年を通じてほとんど変化しない。冬に温かく、夏に冷たい地下水は、地層の持つ断熱的性質により育まれたものである。

第三の特徴は、地表水と比べて流量が極めて安定しているということである。渇水が続いてもこんこんと湧く湧水によって人々は古来より多くの恩恵を受けてきた。この現象を裏返してみると、地下水の流速はたいへん遅いことを意味している。トレーサーを用いて利根川の河原の下を流れる地下水の流速を測ったとこ

ろ、1.02メートル／日という値が得られた。帯水層中の地下水の流速は最大でも1日十数メートル程度である。従って、もし地下水が汚染されれば長期間にわたって汚染が持続することになる。

2. 汚染される地下水

1980年ごろより、半導体のメッカといわれる米国カリフォルニア州の通称シリコンバレーで住民の間に心臓欠陥、先天異常児出産、流産などの健康障害が多発し、大きな社会問題となっている。その原因は半導体の製造工場からトリクロロエチレンやテトラクロロエチレン、あるいは1,1,1-トリクロロエタンといった有機溶剤を含む廃液が少なくとも18ヶ月以上にわたって大量に漏出し、水道用の地下水が汚染されたためであった。この事態を重くみた環境庁は1982年度に全国15の都市で地下水汚染の調査を実施した。その結果が表-2である。

調査項目の中では硝酸性窒素および亜硝酸性窒素による汚染が突出しており、調査井戸の10%が飲料水の水質基準値である10mg/lを越えていた。また、シリコンバレーで地下水汚染を起こしたトリクロロエチレン等の有機塩素系溶剤は、動物実験で発ガン性があることが確認されているが、表-2に示すようにわが国の地下水中からもかなり高い割合で検出されている。その後の1984年から1987年にかけて、2,048の市区町村でおこなわれた地下水汚染の実態調査では、トリクロロエチレンは2.1~5.2%の井戸で、テトラクロロエチレンは3.2~4.8%の井戸で、また1,1,1-トリクロロエタンは0.1~0.2%の井戸で厚生省の暫定水質基準を越えており、また汚染がみつかった井戸周辺地区の調査結果でも1986年のテトラクロロエチレンの超過率13.2%を筆頭に、のきなみ高い超過率がみられた。このようなトリクロロエチレンとテトラクロロエチレンによる地下水の汚染を防止するため、水質汚濁防止法が一部改正されて両物質は有害物質に指定され、1989年10月から地下浸透などが禁止されることになった。

とはいえ、1982年度の環境庁の調査結果からもわかるように、上記2物質以外にも多くの化学物質が地下水中から検出されている。たとえば、カリフォルニア州では地下水中から多くの農薬が検出されている（表-3）。表-4は日本で使用されている農薬のうちアメリカ環境保護庁が発ガン性を確認した農薬である。わが国では農薬による地下水汚染の実態はよく知られていないが、アメリカにおける農薬による地下水汚染を踏まえ、手遅れにならないよう早めの対策が望まれる。

トリクロロエチレンなどの合成有機化合物のほかには表-5に示すような重金属、放射性物質、無機態富栄養塩類、さらには病原性微生物が地下水汚染をひきおこす。

重金属類は、電気・メッキ・冶金・なめし皮・化学薬品などの工場排水処理施設からの廃液や廃棄物として、あるいは工場廃液を処理した下水汚泥中に含まれていたり、あるいは鉱山廃水としても排出される。

ところで、アメリカの統計によれば、1946年から1977年のあいだに発生した米国の水系感染症のうち、その48%までが汚染地下水によるもので、さらに原因の

42%が汚染されたし尿浄化槽やし尿溜からの漏出が原因であった。日本でも汚染された井戸水によって赤痢やA型肝炎、あるいはチフスなどが集団発生している例がある。病原性微生物による地下水汚染が原因で生じた水系感染症は、水道の普及にともない激減しているが、まだ学校などで集団発生している例もあるので注意が必要である。

表-5に示した放射性物質のうち、ウラン鉱山発掘中に生態系へ放出される ^{226}Ra （ラジウム）を除いた他の5つの核種は、いずれも原子力発電に伴って生成されるものである。また、 ^3H （トリチウム）は地上核実験によっても生成される。これらの放射性核種のうち骨を構成しているCa（カルシウム）と同じイオン半径をもつ ^{90}Sr （ストロンチウム）・ ^{226}Ra ・ ^{239}Pu （プルトニウム）はCaと置換されて骨格に、また ^{129}I （ヨウ素）は甲状腺にとりこまれ、一方 ^3H や ^{137}Cs （セシウム）は血管をとおして全身に送りこまれる。表-5の放射性核種のうちで、半減期の短いものは12.3年の ^3H や28.1年の ^{90}Sr であるが、逆に長いものでは ^{129}I の1,700万年が最高で次が ^{239}Pu の24,400年である。一方、これらの放射性核種の半分が人体の生化学的排泄作用によって排出される生物学的半減期では、最も短い ^3H が12日で、最も長い ^{239}Pu では200年であるとされている。放射性物質は突然変異や奇形をおこすだけでなく、悪性腫瘍や白血病の原因になるなど、身体にさまざまな障害をもたらす。このため、放射性廃棄物の管理ミスや原子力発電所の事故などで大切な地下水が放射性物質により汚染されることがないように最大の注意が払われなければならない。

窒素（N）・リン（P）・カリウム（K）などの無機態塩類は河川や湖沼を富栄養化させるため、対策が急がれている。その主な起源は、下水処理水・家庭雑排水・肥料などで、私達の日常生活と深い関係がある。無機態窒素のうち亜硝酸性窒素（ $\text{NO}_2\text{-N}$ ）は地下水中で形態変化しやすいため、その濃度は一般に低く、またアンモニア性窒素（ $\text{NH}_4\text{-N}$ ）は陽イオンであるため負に帯電している土壤に強く吸着される。しかし、陰イオンである硝酸性窒素（ $\text{NO}_3\text{-N}$ ）は地下水中での移動性が高い。

3. 水文循環の中の地下水

地球上の水は、太陽の放射熱をエネルギー源として、水蒸気・水・氷などに形態をかえながら、大気圏・陸水圏・海洋圏を大循環している。図-2はこのように循環する水の様子を描いたものである。

ところで、地球上の水の94%は海洋に賦存し、その水量を地球の全面積でわって平均水深を求めると、実に2,500mにも達する。このため、すべての海水が1回入れかわるのに平均で約4,000年もの時間を要する。これに対して、河川水と湖沼水は、いずれも全水量の0.01%以下にすぎず、それぞれの平均滞留時間は2週間および10年と、海水と比較すると非常に短い。

岩盤の割れ目や地盤の間隙のなかの水を総称したものである地下水は地球上の全水量の4%を占めるにすぎないが、淡水資源にのみ着目すれば、その大部分を占

めていることになる。

水や氷、あるいは風などの作用で運搬・沈積した堆積物や、溶岩などの火山岩が積み重なってできた層を地層とよんでいるが、地下水学では水の流れやすさによって、地層を帯水層・難透水層・不透水層に分類している。このうち、帯水層とは地下水を大量に含みその移動性が高い地層のことで、砂や礫などの透水性の大きい堆積物で構成されている。また、地下水の移動性が帯水層中と比べてほとんど無視できるほど小さい地層は不透水層とよばれ、地下水を入れる器となる基盤岩層や細粒粘土層がこれに相当する。

シルトや粗粒粘土などで構成される難透水層は、帯水層と不透水層の間的な性質をもっている。難透水層は、また、帯水層の上部にあって帯水層中の地下水を被圧させる役目を果たすことにより、加圧層とよばれたり、あるいは上下部が帯水層で挟まれ、その帯水層中に存在する地下水の水圧に差があるときには、水圧の高い帯水層から水圧の低い帯水層へ漏水が生じるので、漏水層と呼ばれることもある。

第2、第3帯水層のように、帯水層の上部に難透水層がある場合は、地下水は自由に拡がることができず高い水圧をもつようになる。そこで、このような帯水層を被圧帯水層と呼んでいる。これに対して、第1帯水層のように帯水層の上部に難透水層や不透水層がない場合は、帯水層中の地下水は地表面より降雨やかんがい水、あるいは河川水などのかん養を直接受けたり、あるいは地下水の汲み上げなどによって、地下水面形が自由に変化する。そこで、この地下水面を自由地下水面と呼んでいる。また、このような地下水を、被圧された地下水を被圧地下水と呼んでいるのに対して、不圧地下水あるいは自由地下水と呼んでいる。

帯水層中の地下水は、自由地下水面や被圧地下水面の高いところから低いところへと流れる。もし、2つの帯水層の間に難透水層があると、地下水は図-2に示すように、この難透水層を通して水頭の高い帯水層から低い帯水層へと漏水する。

地層はいろいろな要因による不均質性によって特徴づけられている。このため、数十mを単位とするような大づかみの地層のなかには、河川の旧河道が埋没していて、地下水が旧河道に沿って流動していることもある。したがって、地下水の汚染経路を解明する場合、このような不均質な地層をどこまで精密に調査できるかが重要な決め手となる。

5. 地下水汚染を防ぐための土地利用のあり方

地下水は自然の一部であり、心無い人間の不注意が大切なこの水資源を台無しにしてしまった例はアメリカのシリコンバレーの事例を持ち出すまでもなく、わが国でも少なくない。地下水を保全するためには、正しい科学的知識、住民の理解、強い行政的指導力が不可欠である。我々はヨーロッパ諸国に、地下水を保全するための強い意志と実行力を見ることができる。

表-6は英国イングランド南部水道局による地下水保護のための水源かん養域での活動規制項目とその内容である。何種類もの潜在的汚染源に対してきめ細かな

対策が盛り込まれている。ところで、英国では1974年に汚染防止法(The Control of Pollution Act)が施行されている。その中で、廃棄物埋立地の決定は許可制となっており、まず埋立地の選定や汚染防止対策などについて水道公社と相談しなければならない仕組みになっている。1983年に改訂された汚染防止法では、地下水も含めた水域へ無許可で汚染物質を排出することを違法行為とし、さらに地下水汚染防止のための地域指定もできるようになった。表-6に示す活動規制はこの汚染防止法に基づき策定されたものである。

地下水が汚染されれば、水源を変えるという小手先だけの対策は、問題解決を先送りしただけでなく、解決をよりいっそう困難にするものである。汚染された地下水の快復は非常に困難であり、もし可能であるとしても莫大な費用が必要である。イギリスの例にも見たように、土地利用と地下水水質との間には密接な関係があり、地下水の水質を保全するためには土地利用のあり方を改めて見直す必要がある。

5. 参考文献

小島貞男(1986):おいしい水の探求、NHKブックス

藤縄克之(1983):諸外国の地下水汚染、地質学論集、第23号

藤縄克之(1988a):長岡平野における消雪用地下水利用、アーバンクボタ、27

藤縄克之・飯塚宏栄(投稿中):潜在的地下水汚染源としての農業、地下水学会誌

藤縄克之(1989):地下を流れる川、川と人間、第7巻、農文協

藤縄克之(1987):地下水問題の基礎知識、農業土木学会誌、55(3)

藤縄克之(1988b):地下水の汚染機構、地下水学会誌、30(3)

Headworth, H.G.(1981): The influence of urban development on groundwater quality, Quality of Groundwater, Elsevier

表-1 汚染物質が土壌-地下水中で受ける作用

区分	細目
物理的作用	ろ過、移動、希釈
化学的作用	吸着-脱着反応、溶解-沈澱反応 酸化-還元反応、複合化反応
生化学的作用	分解

表-2 1982年度環境庁地下水調査結果

物質名	検出 検体数等	浅井戸		深井戸		計		(参考) 河川	
		1,083		277		1,360		139	
		検出検体数 (%)	検出範囲 ($\mu\text{g/l}$)	検出検体数 (%)	検出範囲 ($\mu\text{g/l}$)	検出検体数 (%)	検出範囲 ($\mu\text{g/l}$)	検出検体数 (%)	検出範囲 ($\mu\text{g/l}$)
硝酸性窒素および亜硝酸性窒素		980 (90)	20~80,000	202 (73)	20~12,000	1,182 (87)	20~80,000	127 (91)	20~25,000
塩化メチル		2 (0)	2	0 (0)	—	2 (0)	2	0 (0)	—
ジクロロメタン		5 (0)	2~6	1 (0)	6	6 (0)	2~6	9 (6)	1~5
クロロホルム		240 (22)	0.5~28	65 (24)	0.5~31	305 (22)	0.5~31	40 (29)	0.5~13
四塩化炭素		84 (8)	0.05~2,200	47 (17)	0.05~1.7	131 (10)	0.05~2,200	8 (6)	0.05~0.20
1,1-ジクロロエタン		20 (2)	1~175	9 (3)	1~30	29 (2)	1~175	0 (0)	—
1,2-ジクロロエタン		14 (1)	1~33	2 (1)	3~13	16 (1)	1~33	1 (1)	7
1,1,1-トリクロロエタン		142 (13)	0.2~1,600	44 (16)	0.2~70	186 (14)	0.2~1,600	33 (24)	0.2~93
1,1-ジクロロエチレン		10 (1)	1~7	3 (1)	1~5	13 (1)	1~7	0 (0)	—
cis-1,2-ジクロロエチレン		88 (8)	1~537	31 (11)	1~338	119 (9)	1~537	2 (1)	1
trans-1,2-ジクロロエチレン		15 (1)	1~15	5 (2)	2~10	20 (1)	1~15	0 (0)	—
トリクロロエチレン		289 (27)	0.5~4,800	90 (33)	0.5~210	379 (28)	0.5~4,800	54 (39)	0.5~16
テトラクロロエチレン		289 (27)	0.2~23,000	83 (30)	0.2~190	372 (27)	0.2~23,000	50 (36)	10.2~3.0
ベンゼン		3 (0)	4~11	0 (0)	—	3 (0)	4~11	0 (0)	—
トルエン		12 (1)	2~42	8 (3)	3~15	20 (1)	2~42	2 (1)	14
キシレン		5 (0)	3~17	0 (0)	—	5 (0)	3~17	1 (1)	3
フタル酸ジ-n-ブチル		27 (2)	2~48	1 (0)	8	28 (2)	2~48	1 (1)	9
フタル酸ジエチルヘキシル		40 (4)	4~18	5 (2)	5~10	45 (3)	4~18	4 (3)	5~21

表-3 カリフォルニア州の地下水中から検出された農薬の検出率と溶解度

(藤縄・飯塚より引用)

農薬名	未検出数	検出数	総数	検出率(%)	溶解度($\mu\text{g}/\text{l}$)
アルディカーブ	38	42	80	52.5	6,000
カーボフラン	237	1	238	0.4	320
クロロホルム	1	15	16	93.8	
1, 2-D	256	110	366	30.1	
DBCP	3120	3730	6850	54.5	1,000
エンドリン	55	4	59	6.8	0.3
EDB	640	39	679	5.7	3,400
リンデン(γ -BHC)	104	1	105	1.0	7
PCP	14	3	17	17.6	
シマジン	226	6	232	2.6	5

表-4 日本で使用されている農薬のうちアメリカ

環境保護庁が発ガン性を確認した主な農薬

(藤縄・飯塚より引用)

種類	農薬名
殺虫剤	アセフェート、メソミル
除草剤	アラクロール、グリホサート、オキサジアゾン、 パラコート、トリフルラリン、アトラジン、 リニュロン
殺菌剤	ベノミル、カブタホル、TPN、マンゼブ、 マンネブ、PCNB、チオファネートメチル、 ジネブ

表-5 地下水汚染物質の分類

区 分	項 目
重金属類	カドミウム、鉛、クロム、銅、ヒ素、水銀、マンガン、鉄、亜鉛、シアン等
病原性微生物	チフス菌、パラチフス菌、コレラ菌、赤痢菌、大腸菌、流行性肝炎ウイルス、ポリオウイルス、赤痢アメーバ等
合成有機化合物類	BHC, DDT, PCB, トリクロロエチレン等の有機塩素系化合物、パラチオンやメチルジメトン等の有機リン化合物、有機水銀化合物、ABS、フェノール等
放射性物質	^3H , ^{90}Sr , ^{129}I , ^{137}Cs , ^{239}Pu , ^{226}Ra 等
無機態富栄養塩類等	無機態窒素、無機態リン、塩化物、硫化物、リン酸塩等

表-6 英国イングランド南部水道局による地下水保護のための水源涵養域での活動規制
(Headworth, 1981)

可能汚染源	規制項目
家庭及び無害廃棄物	有害物質を含まない廃レンガや砕石を除いた全ての投棄の禁止
有害廃棄物、下水、下水汚泥、焼却炉残渣、医療廃棄物など	投棄の全面禁止
貯蔵	石油類、化学物質類、肥料類などの大量の貯蔵禁止、但し厳密な管理下で家庭用に少量貯蔵することは可
一般開発	し尿浄化槽の設置や微生物処理水の排水禁止、地下浸透は屋根に降った雨水のみ可、墓地は禁止
鉱業	採掘、鉱業廃棄物の処理、深井戸の掘削などは厳密な管理下でのみ可
農業	発酵させた家畜飼料や家畜糞尿の堆積、農業排水の地下浸透は適正な管理下でのみ可。大規模畜舎は南部水道局へ届出て審査を経る必要有り。農業などの投棄や家畜の死体の埋設は禁止。過度な肥料の使用は禁止
下水汚泥や下肥の農地への還元	投棄の全面禁止

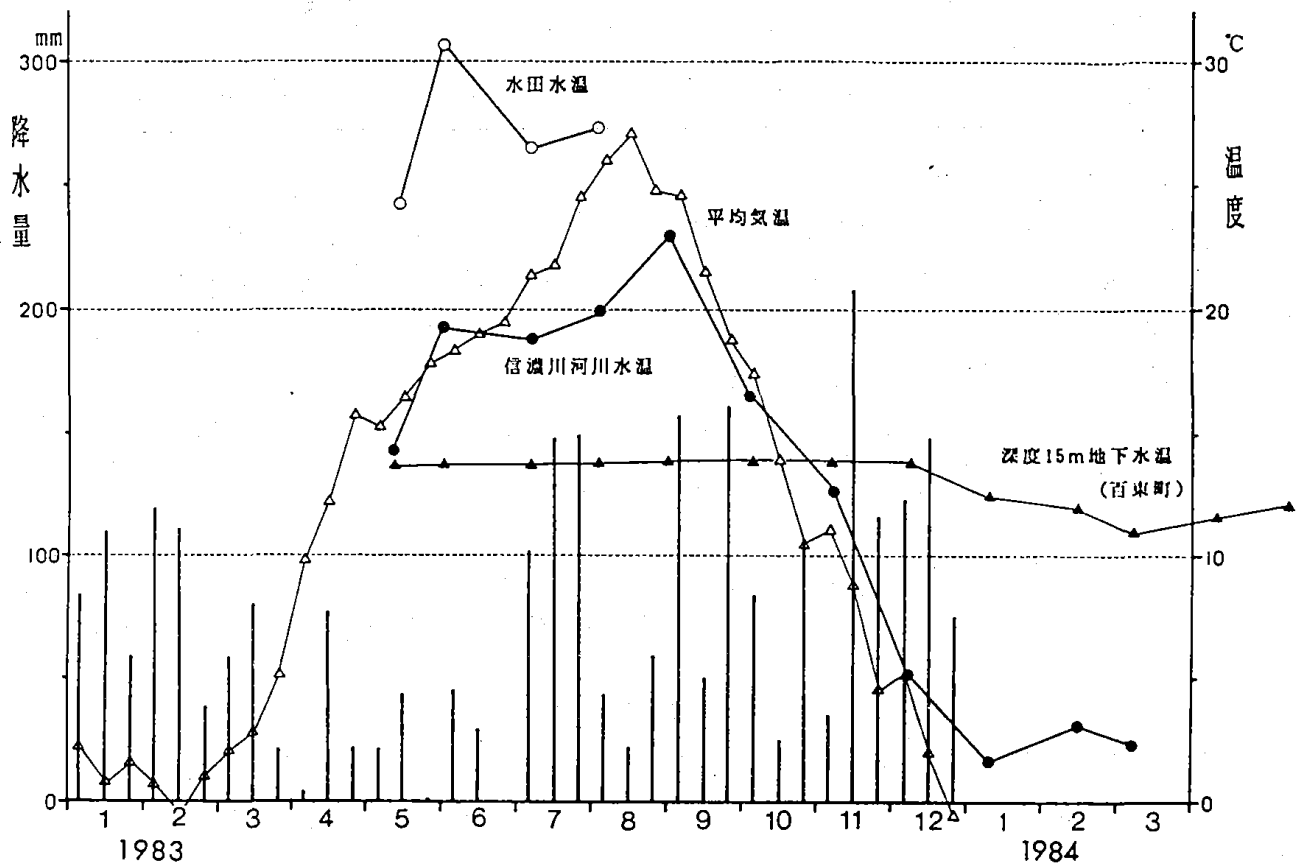


図-1 長岡市における降水量、平均気温、信濃川河川水温、水田水温、深度15m地下水水温の経年変化

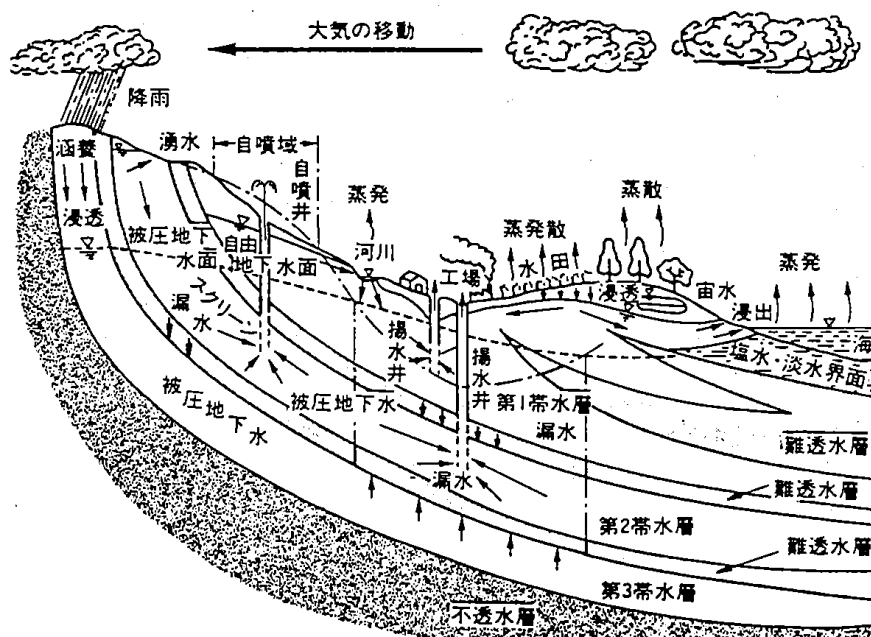


図-2 水文循環と地下水