

地下水の汚染とその保全

麻布大学 生命・環境科学部 環境科学科 教授

稲葉 一穂 Kazuho Inaba

1. はじめに

地球は約14億 km³の水が存在する水に溢れた豊かな星である。しかし、表1に示すように、地球上に存在する水の97%は海水であり、淡水は3500万 km³に過ぎない。さらに、その約7割が南極と北極の氷、約3割が地下水で、我々の身近な存在である河川・湖沼水は0.4%程度である¹⁾。すなわち、われわれは水の惑星に生活していながら、生命維持水として利用しやすい水資源はそれほど多くはなく、飲用水源を地下水に頼らざるを得ないのが実情である。

実際に多くの国で飲料水源を地下水に頼っているが、そこには様々な問題が潜んでいる。本稿では、飲用水源としての地下水の現状と、その保全に向けた対策について解説する。

2. 地下水汚染とは？

(1) 地下水の特徴

一口に地下水汚染と言っても、その由来も負荷形態も様々なため、その対策は多岐にわたることになる。そして、その対策を難しくする要因となるのが、地下水そのものの性質である。地下水は地下の地層内で水を通しにくい層（不透水層）の上を流れている。不透水層が何層もあれば、地下水流も何段も積み重なって流れているが、その流れの方向は必ずしも地表の傾斜とは一致しないし、全ての地下水流が汚染されているわけではない。また、河川水のように自由に流下するのではなく、地層内の砂礫の間隙を染み出していくの

であるから、その流速は1日当たり数 cm から数百 m、平均で1 m/日程度と河川の流速と比較して著しく小さな値である。表流水のように流れの方向や流速を確定することは容易なことではなく、いったん汚染されるとその影響は長く、思わぬ所にまで現れることもある。

(2) 汚染の由来

汚染の由来は様々であるが、自然由来のものとは人為由来のものに大別される。「水源の汚染」と聞くと、工場排水や漏出事故など人為由来の汚染を想像してしまうが、自然由来の汚染も存在する。その代表的なものが、ヒマラヤ山脈周辺の地下水に顕著に含まれるヒ素による汚染である。地層に含まれるヒ素が風化と共に溶出したもので、例えばインド西ベンガル州の井戸水は平均0.2 mg/L（最大3.7 mg/L）のヒ素を含んでいる²⁾。これはWHOの飲用水ガイドライン（0.01 mg/L）

表1 地球表層の水の分布

水の種類	貯留量 (103 km ³)	対全水量 (%)	対全淡水量 (%)
塩水			
海洋	1349929	96.59	
塩水湖	94	0.007	
塩水地下水	13000	0.93	
淡水			
氷	24230	1.734	70.24
淡水湖	125	0.009	0.362
河川	1.2	0.0001	0.003
土壤水	25	0.002	0.072
淡水地下水	10100	0.723	29.28
その他	14.2	0.0011	0.041
総計	1397518.4	100	100

藤永ら (2005)¹⁾ の表序 -1 (p8) を一部改変

の20倍である。このような地層からの染み出しによる汚染では、発生源を除去することは不可能であり、飲用井戸水の浄化を怠ると重篤な被害が発生する可能性が高い。

一方、人為由来の原因としては、工場や処分場などからの漏出事故、畑地からの溶脱などが挙げられる。人為汚染の様々な発生源について、Fetterはその著書³⁾の中で解りやすい図を示している(図1)。また、アメリカ環境保護庁⁴⁾は考慮すべき負荷発生源として、農業、商業、工業、居住およびその他の各施設約50種類の事例をまとめている。アメリカでの50事例がそのままわが国にも当てはまるわけではないが、地下水を汚染する可能性のあるルートは実に多種多様であることが理解できよう。

(3) 汚染の負荷形態

汚染物質の供給位置が特定の場所に限定できるもの(点源負荷)と地域全体から供給されるもの(面源負荷)に大別することができる。自然由来の汚染では、汚染物質を含む鉱物や温泉水が埋蔵された地層が由来となるため、多くの場合にはその汚染源は広い領域を占めることになる。一方、人為由来の汚染では、発生源は人間活動の場に限定されるが、その面積規模は様々である。工場や処分場からの漏出などでは汚染源がピンポイントで指

摘できる例も多いが、農耕地からの肥料成分や農薬類のように面全体からの負荷が影響していることも多い。この発生源の負荷形態の差異は、汚染対策の選択に様々な制限をもたらすことになる。

3. 対策

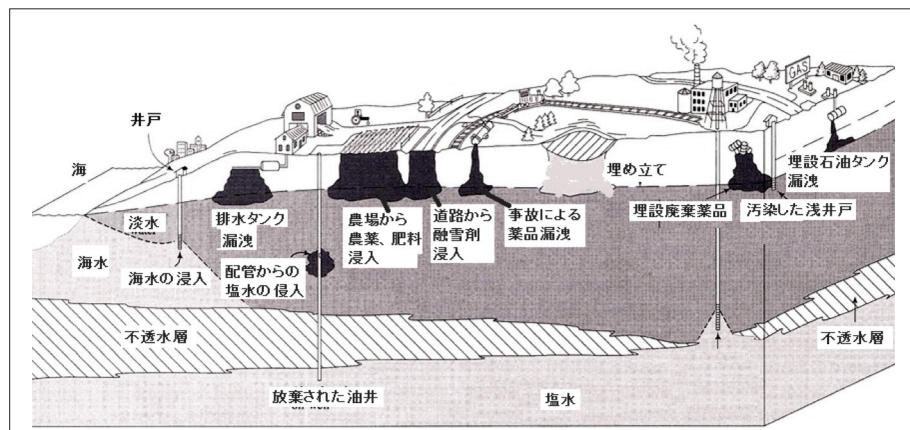
河川や湖沼など表流水域の汚染であれば、常時監視による汚染の察知や汚染源の特定は容易であり、さらにかんりの流速を持った流れの中で汚染物質が滞留する時間もさほど長くはならない。監視結果に即応した浄化処理や安全対策も容易である。これに較べて地下に隠れている地下水では、汚染源が明確にならず汚染水の移動も不明確で長期間を要し、さらに都市部では住宅や道路などの構造物が地表を覆っているため、汚染源周辺を掘り出して処理するなどということも容易ではない。このような汚染に対する現行の対策のいくつかを簡単にまとめてみる^{5),6)}。

(1) 自然減衰法

(Natural Attenuation Method)

地下水の流れに任せて、汚染物質が減少していくのを待っておこうという方法である。しかし、汚染源への対策をせずにただ流すだけでは解決にはつながらない。この方法は、

図1 様々な人為的地下水汚染の模式図 (Fetter (1999) から引用)



有機塩素系溶剤のような漏出事故の場合には、漏出した物質の殆どが回収されてから、また施肥による硝酸・亜硝酸性窒素汚染や農薬汚染の場合には、使用量の減量などの発生源対策を充分に行ってからでなければ意味がない。また、上流域からの汚染されていない地下水による希釈と洗浄、土着微生物による分解浄化を利用する方法であるから、その効果が現れるには長い年月が必要となる。

(2) 揚水浄化法

(Pump and Treat Method)

井戸から汚染地下水を汲み上げて地上の水処理装置へと導入し、処理水を地下に還元する方法である。工場や住宅団地の排水を公共用水域に放出する前に水処理装置に導入するのと同じように、汚染物質濃度が高く、汚染物質の拡散・希釈の度合いが小さい汚染源近傍で揚水することができれば、効率よく浄化が可能である。しかし、揚水井戸の設置本数の大小や地下水流の変化なども考えると、汚染源からの汚染地下水を揚水井戸で全て回収できる可能性は少ない。

(3) 微生物浄化法

(Bioremediation Method)

土壌圏内で微生物によって汚染物質を分解処理する方法である。汚染地周辺に生息する土着菌に栄養や酸素を与えて分解活性を高めるバイオスティミュレーション法と、対象汚染物質を分解することのできる微生物を散布するバイオオーグメンテーション法の2通りがある。汚染物質を分解可能な微生物が存在するならば有効な手段となるが、地下水の深度などにより利用可能性に制限がかかる場合もある。また、バイオオーグメンテーションの場合には、土着の生態系を変化させることとなるので注意が必要である。

(4) 透過型浄化壁法 (Permeable Reactive Barrier Method)

汚染物質の下流への流出を抑える目的で、汚染源の下流側に地下水を通過させることのできる壁を設置し、その壁内に汚染物質を分解する基材を導入する方法である。有機塩素系溶剤であれば、還元分解反応を促進するために鉄粉などを、硝酸・亜硝酸性窒素では土着微生物による硝化脱窒反応を促進するために還元雰囲気を作成する有機物を添加することが一般的である。これらの浄化剤を砂利や砂に混ぜ込んで、対象とする地下水が通過できる深さまで埋め込んでいく。点源負荷の汚染で汚染位置が明らかであれば、下流側に取り囲むような壁を構築すれば効率よく浄化が進行するが、面源負荷の場合には取り囲むような壁を作ることは事実上不可能である。そこで、負荷地点にボーリングを行って多数の穴を掘り、その穴に浄化剤を含んだ砂礫を投入する方法が採られることが多い。面源負荷の場合、面源全体にこのような注入穴を設置することも可能である。

4. 汚染事例と問題点

(1) 有機塩素系溶剤

有機塩素系溶剤による地下水汚染は、米国シリコンバレーでの漏出事故による健康障害で有名となった。1977年から1981年にかけて、半導体製造企業であるフェアチャイルド社サンノゼ工場の地下貯蔵タンクのひび割れにより使用済みトリクロロエタンが漏出し、600 m 離れた飲用井戸を汚染したため、付近の住民に流産や先天性奇形などの健康影響が発生した。この漏出問題はフェアチャイルド社だけに止まらず、その後の調査でシリコンバレーの使用済み化学物質貯蔵地下タンクの80%から漏れが見つかり、約100種類の化学物質が地下水から発見されたのである。

わが国でも1988年に千葉県君津市の東芝コンポーネンツから使用済みトリクロロエチレンが漏出するなど、同様の汚染の報告がなされている。1982年に当時の環境庁が地下水質調査を開始して以降、全国各地の地下水から基準を上回る汚染が発見され、2006年の環境省地下水質調査結果⁷⁾によれば、トリクロロエチレンの測定を行った3911井戸のうち2.7%に当たる105井戸からトリクロロエチレンによる汚染が検出されている。有機塩素系溶剤は強い脱脂力と速乾性から、半導体や機械工場、ドライクリーニング工場で使用されており、これらが発生源となり得る。

有機塩素系溶剤は比重が1.5程度と水よりも重いため、漏出した原液は素早く地下に浸透し、地下水下部の不透水面上端に到達する。しかも、水への溶解度が著しく小さいことから、この原液溜まりは長期間残留して、微量の溶剤を地下水中に供給し続けることになる(図2)⁵⁾。このようなタイプの化学物質による汚染への対策としては、原液溜まりを掘り上げることが最も効率的であるが、地中にある原液溜まりの位置をピンポイントで推定することは容易なことではなく、掘削を失敗すれば原液を下方の帯水層に移動させることにもなりかねない。そのため、化学分解や微生物

分解を利用した透過型浄化壁工法が一般的な浄化法である。アメリカやカナダでは処理期間の短縮を狙って、上流部の井戸から洗浄剤(界面活性剤やアルコールなど)を注入し、難溶性溶媒の溶解度を上昇させて下流部の井戸からポンプアップする工法も試みられている。

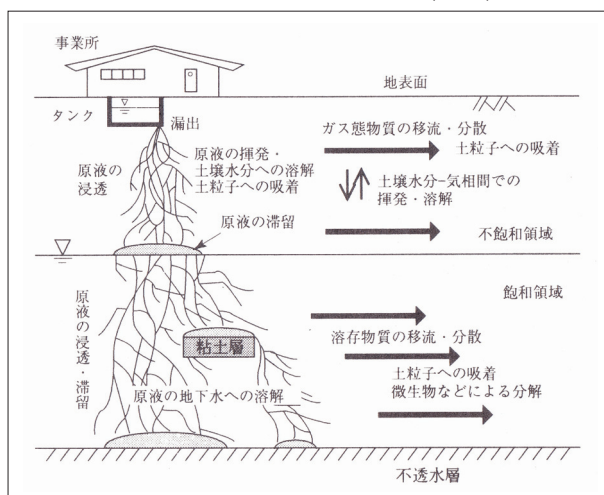
(2) 硝酸・亜硝酸性窒素

硝酸・亜硝酸性窒素による地下水汚染がクローズアップされるようになったのは、ブルーベビー症候群^{*1}と呼ばれる病気の原因となることが明らかとなったためである。硝酸・亜硝酸性窒素による水質問題と言えば、湖沼や内湾の富栄養化が注目されがちであるが、このような新たな問題も発生している。そのため、わが国では平成11年に水質環境基準の健康項目に追加指定され、同時に水質汚濁防止法の有害物質指定も受けている。

河川や湖沼の富栄養化に関与する窒素の発生源は主に生活排水と言われているが、地下水汚染問題での発生源は、窒素肥料の過重施肥と畜産排水の安易な自然還元によるところが大きい。特に問題となるのは、茶、果樹、ニンジンなど窒素肥料を大量に必要とする農作物の畑である。中でも茶は、与えた窒素肥料の分だけ味が良くなると言われ使用量は膨大である。作物への施肥は食物生産上不可欠であり、単純な削減は行えない。しかも、施肥した肥料は全てが植物に吸収されるわけではない。多くの肥料成分は利用されることなく、水分と共に直接根の作用する根圏を通過して地下水を汚染していくのである。化学物質の漏出事故であれば、「しっかり管理しろ!」という対策も可能であろうが、施肥の場合にはどのように頑張っても地中への溶脱窒素による汚染が発生し、工場や廃水タンクのような点源からではなく、畑地全体から面源負荷として供給されるのである。

※1
ブルーベビー症候群
人間を含む動物が硝酸態窒素を大量に摂取すると、体内で亜硝酸態窒素に還元され、ヘモグロビンがメヘモグロビンに酸化される。メヘモグロビンは酸素を運搬できないため、メヘモグロビン血症という酸欠症状を引き起こし、最悪の場合には死に至るが、酸素と結合していないメヘモグロビンこのような症状は乳児において顕著であり、発症した乳児の体色が青紫になることからブルーベビー症候群と呼ばれている。

図2 有機塩素系溶剤による地下水汚染のメカニズム
(地下水・土壌汚染の基礎から応用(2006)より引用)



これらに対しては、作物の商品価値が著しい低下をしない範囲で施肥を減量し、溶脱窒素量を減らすことが、地下水汚染の進行を止める方法である。環境省の硝酸性窒素総合対策モデル事業で報告された、果樹園への施肥量を減量し、溶脱窒素濃度(5.4 mg/L)を半分の2.7 mg/Lまで減少させた場合、現状の汚染地下水がどのように移動し、濃度が低下していくのかをシミュレーションした将来予測を図3に示す⁷⁾。10年程度では明確な変化は見られず、30年程度経過すると下流域も浄化されてきていることが明らかである。しかし、わずか1 km 程度の流下距離の浄化が完了するには50年が必要という計算結果が得られている。

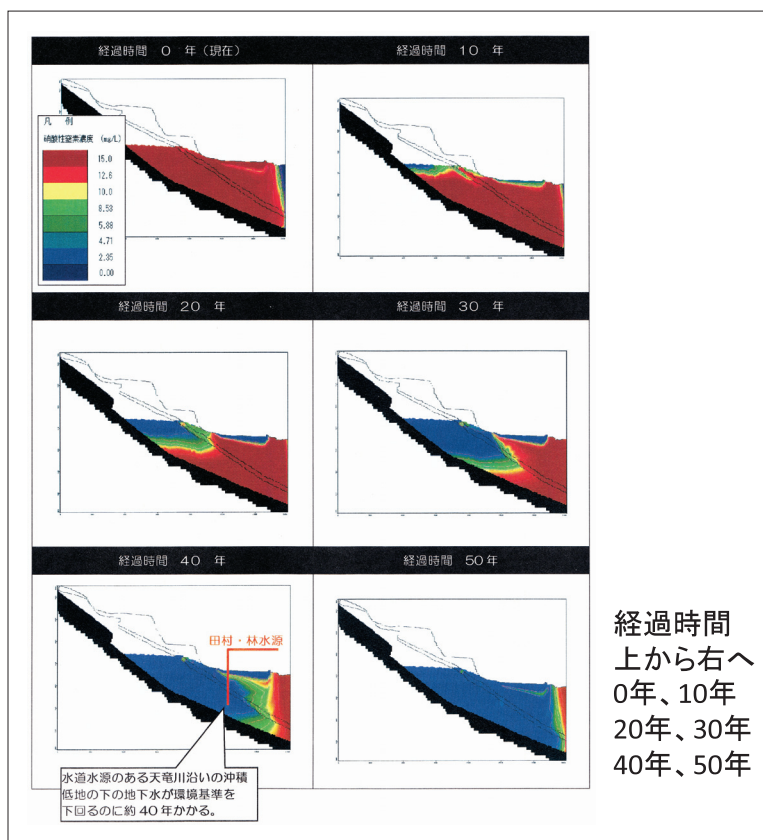
一方、養豚や養鶏の大規模化に伴い、家畜排泄物の処理も問題となっている。家畜排泄物は、以前は空き地に素掘りの穴を掘って回収し浸透処理するなど、かなり杜撰な管理が行われていたという話も聞くが、現在では微生物により発酵させ堆肥化し、肥料や土壤改良材として農業用に再生利用するコンポスト化が勧められている。しかし、堆肥としての需要がなければリサイクルにはつながらない。多くの農家が使用している化成肥料から堆肥への転換が進まなければ、畜産排泄物対策も頓挫してしまうのである。

5. おわりに

これまで概説してきたように飲用水源として地下水は、非常に重要なものであるが、いったん汚染されると地下という見えない空間での汚染が長期間継続するという特徴がある。飲用水の安全確保のためには、汚染を早期発見し十分な浄化対策を採ることが重要であるが、残念ながら汚染原因の究明も対策も河川や湖沼と比較して遅れている。

私たちは地下水への汚染物質の放出を防ぐ

図3 溶脱量を制限した場合の地下水浄化速度の推定値 (平成18年度硝酸性窒素総合対策モデル事業報告書(2007)より引用)



のはむろんであるが、地下水の特徴を良く理解し、長期間にわたる回復過程の安全性を見守っていかなければならない。

参考文献

- 1) 藤永太郎, 宗林由樹, 一色健司: 海と湖の化学, 京都大学学術出版会, 2000.
- 2) 安藤正典: インド・バングラディッシュにおける地下水ヒ素汚染と健康影響, 公衆衛生研究, 49 (3), 266-274, 2000.
- 3) C. W. Fetter: Contaminated Hydrology, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1999.
- 4) www.epa.gov/region1/students/pdfs/gwc1.pdf
- 5) 日本地下水学会編: 地下水・土壤汚染の基礎から応用, 理工図書, 2006.
- 6) 平田健正ら: 土壤・地下水汚染の浄化および修復技術, NTS, 2008.
- 7) 八千代エンジニアリング株式会社: 平成18年度硝酸性窒素総合対策モデル事業(長野県豊丘村における硝酸性窒素対策検討調査) 報告書, 2006.

いなほかすま

東京都出身。1980年東京理科大学理学部応用化学科卒業。1985年同大学院理学研究科博士課程化学専攻修了(理学博士)。同年4月に環境庁国立公害研究所(現 国立研究開発法人国立環境研究所)入所。水圏圏での化学物質の挙動解析法の開発に携わる。2014年4月より現職。