

人類を支える地下水

た せ のり お
田瀬 則雄

筑波大学 生命環境系 名誉教授

1. はじめに

今回、編集部から与えられたテーマは、表題のように「人類を支える地下水」である。人類を支えることは「地球を支える」ということであるとも解釈できるが、後述のように地下水はローカルな、地域密着型の水（資源）であり、地域という視点が重要であるといえる。

地球は水の惑星と呼ばれ、地球表面の7割を海洋が占め、その広い海洋が地球の水循環を形成、維持している。地球上を水、基本的に淡水として循環することにより、人類を含めた生物が存在、生存でき、社会が活動を継続あるいは持続できるといえる。

地球上を水は循環しており、地球全体として見れば、水の量は、地球上でのあり方、形態（相）は変化（この一連の相変化を水循環と捉えることも可能である）するものの、一定であるが、流動していることが重要である。地球上には、海水、氷床・氷河、地下水、湖沼、河川、水蒸気という形で存在するが、今回取り上げる地下水は、身近にある最大の淡水資源である（表1）。

筆者は、「水循環とは、地球上に安定した水の供給を保証する流れ」と定義した（田瀬、2018）。ここで“安定した”とは、水の

ある場所（パス・経路）が決まっている、通過する時間（季節）配分が決まっている、そしてその量も決まっているということで、流れていることが重要である。ただし、ゆらぎ・変動は当然あり、場の条件の違いにより賦存、在り方（occurrence）は変わってくる。そしてもう一つ重要なのが、清浄な淡水を供給する蒸留器を組み込んでいることで、これらによって水が更新可能な資源（renewable resources）となっているのである。

これらを裏返すと、逆に水のない・来ない時空間（地域、季節）もあり、水は遍在するのでなく偏在するということを理解するのが重要である。この偏在していることを認識することは、近年盛んに取り上げられている持続可能な開発（目標）（SDGs：Sustainable Development Goals）を考えるうえでも重要なのである。水の有無によって、持続可能性への考え方、対応は全く異なってくることを認識するのは重要である。

ちなみに、日本は大気の川（水蒸気が収束する降水域、とくに夏季）の下に位置しているため、基本的には安定した豊かな水が約束されているのであるが、持続可能性を支える最も重要な条件のひとつである水が保証されているといえる。一方で、安定

した豊かな水が約束されていない地域や国が多々存在するのも現実である。

このようななか、地下水は遍在性の高い水資源とみることができる。

2. なぜ地下水は重要なのか

水が、物質として特異な物性を持っていることはよく知られている。また、その水の持つ各種機能、生態系サービス（地生態系サービスと呼ぶほうが適切）は、水資源の供給、栄養の供給、生息場所の提供、生物多様性の保全など多々ある（宮永、2013）が、ここで地下水の役割、特性、長所、短所を再確認してから、地下水の持続的利用を考えてみたい。

一般に、特に日本のような温暖湿潤な地域では、地下水の利用特性として、以下の点が挙げられている（国土庁、1977参考）。

- ①アクセス性：遍在性が高く、帯水層まで井戸を掘削し、ポンプなどの揚水施設を設置すれば、一般的にどこでも容易に良質な水が得られる。
- ②経済性：オンサイトで利用可能なので、地下水の取水のための経費として、井戸の掘削、ポンプなどの揚水施設の設置などの初期経費と、ポンプの電気代などのランニングコストのみであるので、他の水資源に比べて一般に安価である。
- ③良質な水質：地下水は、長期間かけて地層中を流動するもので、地層から有害成分を溶出しなければ、不純物質や微生物が土壌に付着・ろ過されることから、一般に水質は良好であり、適度にミネラル分を含有している。
- ④恒温性：地下水は地域によって差異はあるものの、年間を通じてほぼ一定の水温（ほぼ平均気温）であり、表流水に比べて夏は冷たく、冬は暖かい。

これらの点を、現在日本で最も利用され

ている河川水と比較しながら考えてみる。

表1には一般的な特徴を示したが、地域による特色や例外などは多々存在することがあるので、留意する必要がある。表1にあるように、地下水は地表の90%をカバーしている、すなわち身近でどこにも存在する水資源である。資源と呼ぶには安定して量と質が確保できることが必要であるが、量的、質的（例えば、塩分濃度が高い等）に不十分な地域も多々ある。しかし、概してどこでも開発が容易で、安価であるということが地下水利用の最大の利点である。河川水はほぼ固定された河道を流下するので利用しやすいが、利用する場合にはインフラ整備（ネットワーク）が必要である。

一方、遍在する地下水は基本的に点、オンサイトで利用可能であるという長所を持つ。また、水質がよい、水温が安定しているなど河川水と比較して優位な性質もあり、生活用水、工業用水として古くから利用されてきた。地下水を利用するためには、井戸を掘削する必要があり、掘削技術・揚水ポンプの進歩により、地下水の利用が大幅に広がった。縄文時代などは（地下）水の利用は、基本的に湧水（源流水／渓流水）の利用であり、弥生時代からは井戸も掘削されたが、手掘りでは限界があった。「まいまいず井戸」のように、周辺の土地をすり鉢状に掘り下げ、その底に井戸を掘削するような工夫もされた。

100万都市、江戸を支えた水は、井戸のイメージがあるが、井戸は井戸でも水道井戸、神田上水や玉川上水から引かれた水を溜めた井戸であり、地下水では、多くの人口を支えることは不可能であった。上総掘りは大きな進歩であったが、地下水が水利用を担うようになったのは、機械掘りの技術、動力ポンプの導入によって、深井戸（被圧帯水層）から大量の水を揚水できるようになったからである。水利用の歴史については、本誌・本号の古賀「文献から井戸水

表1 河川水と地下水の比較

	河 川	地 下 水	備 考
地球上の総量(%) [*]	0.0002	1.7	海水96.5%、雪水1.74%、湖沼水0.013%
淡水での割合(%) [*]	0.006	30.1	雪水68.7%、湖沼水0.26%、大気中の水0.04%
陸地での分布割合(%)	流域としてみると100%	90.6	地下水の遍在性 日本の水(湖沼・河川・水路)面積率(0.8%) 河川流域と地下水域は必ずしも一致しない 行政界とも一致しない
集水域	(河川)流域	地下水域	
流動場	地表の河道	地下の帯水層(間隙、空隙)	河道の下の地下水は伏流水と呼ばれ、 日本の法律上では河川水になる
流動域	上流－中流－下流－河口	涵養域－流動域－流出域	
流速	1m/sec程度 Manning式など 動水勾配、径深(平均水深)、粗 度	1m/day程度(自由地下水) Darcy式 動水勾配、透水係数	比較のイメージとしてで、 条件によりオーダーが変わる
滞留時間	数日～数ヶ月	数ヶ月～数百年	比較のイメージとしてで、 条件によりオーダーが変わる
水量(水位)	季節変化があるが、ダムなどの 調整により、利用しやすい	季節変化は穏やか(除 水田地帯) 過剰揚水により水位低下や井戸涸れ	
水温	気候により季節変化が大きい 夏季高く、冬季低い	恒常的(ほぼ平均気温) 夏季冷たく、冬季暖かい	
水質	人為活動の影響を受けやすく 汚染されることがある	地質や土地利用の影響を受けるが 一般的に清浄、塩水地下水も多い	
水利用	ダム、取水堰、取水口、用水路 上水道施設	湧水、自噴井、掘削井戸	井戸の利用は掘削技術・ポンプの進歩と関連 河川はネットワークで、地下水は点で利用 可能
エネルギー	水力発電(ダム)、水車	地熱・地中熱、消雪、CO ₂ 貯留	
災害・障害	洪水(氾濫)、渇水(水不足) 土石流	井戸涸れ、地盤沈下、塩水化 湧水消失	
主な関連法	河川法	工業用水法、ビル用水法 ^{**} 、温泉法	
共通	水循環基本法、環境基本法、水質汚濁防止法		
水利権	公水(許可水利権・慣行水利権)	私水	地下水も公水として認識されてきた
国際水域	国際河川	越境帯水層	

*Shiklomanov(1997)

^{**}建築物用地下水の採取の規制に関する法律(ビル用水法)

を考える」を参照されたい。

地下水のアクセス性の良さ、経済性の利点を活かせるのが防災井戸・災害応急用井戸である(本誌の石塚「防災井戸の活用と課題」参照)。1995年の阪神・淡路大震災、2011年の東日本大震災などにより水道ライフラインが遮断され、飲み水、トイレなど生活用水の確保に窮した被災者がメディアに取り上げられ、自治体や企業、家庭では、防災用井戸への関心が高まっている。多くの自治体で「災害応急用井戸」として一般家庭の井戸を指定して、災害緊急時に備えている。

筆者の住んでいるつくば市では、自主防災活動を行う組織に対して、予算の範囲内で補助金の交付による支援を行っているが、災害用井戸の設計費、整備費、付帯設備費、既存井戸調査費及び修繕費、井戸建

設時の井戸水水質検査費なども含まれている。また、病院や老人ホームにも設置が進められているが、被災時などだけでなく、ろ過技術の発達により平常時の水道代削減や安全性、健康面などで、その有用性が注目されている。水道事業との競合、これから始まる民営化などとも関連して考えなければならない点もある。上水道施設の老朽化、水道料金の高騰などの可能性は高く、地下水による自家水道への転換が増加する可能性もある。

地下水には、滞留時間が長い、流速が遅いといった性質もあり、前者は貯留量の多さもあり、地球全体での水循環の中では、安定性をもたらすバッファの役割を担っている。ローカルで見ると、大量に揚水できるようになり、集中的な過剰揚水が水位低下・井戸涸れ、地盤沈下、塩水化などの弊

害をもたらす危険がでてきた。実際世界の多くの地域で弊害が大きな問題となっており、しかも先進国から後発国／発展途上国へと同じ歴史を繰り返している（谷口、2010）のは残念である。また、いったん水質が汚染されると、回復に長時間要するということになる。地下水汚染、特に硝酸性窒素による汚染は集約的農業、畜産地域など全国的に顕在化しており、根本的な解決方策が依然として模索されている状況である（田瀬、2014）。世界的にも窒素の汚染は深刻であるが、開発途上国などでの自然由来のヒ素も無視できない（本誌の川原「地下水ヒ素汚染と国際協力—バングラデシュでの経験—」などを参照）。

地下水の水質は、ヨーロッパなどと比べ降水量が多く、石灰岩や大理石が広く分布せず、滞留時間も短い日本では、基本的に清浄で、溶存成分の少ない軟水である。日本人が嗜好するミネラルウォーターは溶存成分が少ない水であるが、本来のミネラルウォーターはカルシウムやマグネシウムなどが多く含まれる水、硬水（に近い水）である。河川水ほど人為活動の影響を受けないが、上述の硝酸性窒素や有機塩素系溶剤、いわゆるトリクロロエチレンなどによる地下水汚染はかなり深刻である。

水温の安定性、恒常性は地下水の大きなメリットであり、冷却水としての利用はその代表であるが、近年はクーリングタワーによる回収利用が進み、節水が進んでいる。

50年以上前に新潟県長岡市で始まった消雪（パイプ）システムは、地下水の恒温性を利用したもので、雪に悩まされてきた地域での生活の利便性を格段に向上させ、広く普及した。しかし、水位低下が発生したり、地盤沈下が確認され、とくに降雪量が多い年は、新潟県の南魚沼や高田平野などで大きな地盤沈下量が記録されている。また、このシステムを利用して夏季に打ち水を実施する地域が出てきている。比較的冬

場でも暖かい下水処理水も融雪用水として利用されてきており、併用可能な地域では、消雪後に地下へ浸透させるなどすれば地下水の涵養、水資源の再利用にもつながる。ヨーロッパなどでは下水処理水を一度地下へ浸透させ、地下水として再利用している。

最近注目されているのが、地中熱利用である。内田ほか（2018）は、地中熱システムは、太陽光や風力、地熱発電とは異なり、発電する技術でなくエネルギーを賢く使う省エネルギー技術であると述べており、持続可能な地下水利用の一つになる可能性がある。高密度に設置された場合の地下水の熱汚染の可能性は低いと思われるが、検証が必要かもしれない。地中熱利用の現状などは、本誌の名古屋「地下水による地球温暖化対策——注目される地下水熱利用の仕組みと課題」などを参照されたい。

水利用において河川水と地下水で大きく異なるのが、河川水が公水であるのに対し、地下水は基本的に私水で、土地に付随するものと捉えられている。ただし、地下水は土地の地下に貯留しているのではなく、流動しており、土地所有者が好き勝手に利用してよいものでなく、「同一の地下水域、帯水層、水脈の地下水流を有する土地の所有者は、地下水利用について共同で利益を享受しなければならない」という地下水利用の合理的制限は、判例上（宮崎、2015）でかけられてはいる。

近年、熊本県（2012）や鳥取県（2012）などは、条例で、「地下水を公共水」と位置づけており、国も2014年に制定した水循環基本法で、地下水を含めた水を公共性の高いものと法的に位置づけた。これにより、地方自治体などの地下水管理は大幅に前進できる。ただし、地下水の公水化への道は依然として難しいようである（三好、2016）。

表2 最近の持続的な地下水利用に関する流れ

1997	「わが国の地下水—その利用と保全」（国土庁）
2000	秦野市地下水保全条例（→ 2015 秦野市地下水総合保管理計画）
2007	「健全な地下水の保全・利用に向けて」（国土交通省・今後の地下水利用のあり方に関する懇談会）
2008	「越境帯水層法典」草案採択（国連）
2012	「地中熱利用にあたってのガイドライン」（環境省） 熊本県地下水保全条例改定（1992年制定） とつとりの豊かで良質な地下水の保全及び持続的な利用に関する条例（鳥取県） 国連持続可能な開発会議（リオ+20）
2013	特集「震災と地下水」（地下水学会誌、55(1)） 小特集「これからの地下水資源の利用のあり方」（地下水学会誌、55(2)）
2014	水循環基本法 雨水利用推進法
2015	特集「地盤沈下の現状から見る今後の地下水管理」（地下水学会誌、57(1)） 水循環基本計画 「持続可能な開発のための2030アジェンダ」—持続可能な開発目標（SDGs）—（国連サミット）
2016	特集「地下水の保全、涵養及び利用に関する法制度下に向けた現状と課題」（地下水学会誌、58(2)、58(3)） 「地下水保全」ガイドライン～地下水保全と持続可能な地下水利用のために～（環境省） 「地下水マネジメント導入のススメ」（内閣官房 水循環政策本部）
2017	特集「水循環基本計画の下での地下水に関する取り組み」（地下水学会誌、59(4)、60(1)、60(2)）
2017～2018	『地下水マネジメント合意形成の進め方』（国土交通省）
2018	特集「地下水と地熱・地中熱エネルギーの利用」（地下水学会誌、60(4)）

3. 地下水の持続的利用に向けて

上述のように、地下水は多くの長所があるが、場合によっては厳しい短所となる面を持ち合わせている。地下水の短所を理解しながら長所を活かすことが、地下水の持続的利用につながることになる。それは、地下水が地域の多様な自然条件（気候、地質、地形など）により様々な様相を呈するため、共通の共有すべき側面はあるが、それぞれの地域で地域に適した地下水利用・管理を模索しなくてはならず、このような動きは着実に進んでいる（表2）。本誌の橋本「日本の地下水の未来」で紹介されている昭島市の取り組みは、興味深い。

熊本県地下水保全条例は、全国で初めて取水規制（揚水許可制）を盛り込んだ条例である（嶋田、2013）。熊本県は、水道水源の約80%を地下水に依存しており、とりわけ熊本市は100%を地下水でまかなっている全国でも稀な大都市である（本誌の松本「世界に誇る地下水都市「くまもと」～地下水を守り継承する取り組み～」）。この条

例が可能になったのは熊本県・熊本市の関係者、多くのステークホルダーの努力のたまものであるが、背景として大きな地下水障害がこれまでほとんど発生していなかったという事実もある。

鳥取県（2012）は、『とつとりの豊かで良質な地下水の保全及び持続的な利用に関する条例』を制定した。鳥取県は豊かな地下水に恵まれ、ミネラルウォーターの生産量は全国第3位、県内の水道水に使われている地下水の比率は96%である。地下水は県民が誇りに思う豊かで貴重な資源であり、条例の前文では「県民誰もがその恩恵を享受できる県民共有の財産」であり、「県、市町村、県民がその大切さを十分認識して、みんなが一体となって保全に取り組む」ことを明記している（九鬼・丁田、2018）。

これらのほか、古くから地下水を市民共有の財産と位置づけて、利用企業から地下水利用協力金（1975年は5円/m³、2014年は20円/m³）を徴収し、保全してきた神奈川県秦野市のこれまでの取り組み（長瀬、2010）、また、福井県の大野市の井戸割れ

から始まった保全活動（岡田、2016）なども、持続可能性を目指したものと見える。

国も水環境基本計画を受けて、内閣官房・水循環政策本部（2015）は「地下水マネジメント導入のススメ」を、また、環境省（2016）は、地下水マネジメントを計画的に推進するため、地方公共団体等の地下水保全施策の手引きとして『「地下水保全」ガイドライン～地下水保全と持続可能な地下水利用のために～』を取りまとめている。国の取り組みについては、本誌の「地下水保全と持続可能な地下水利用のために」と「持続可能な地下水の保全と利用の推進～地下水マネジメントの進め方について～」を参照されたい。

なお、日本地下水学会は、会誌『地下水学会誌』に地下水利用に関連した多くの特集を組んでおり、本論でも引用したが、参考になると考えられるので参照されたい（表2）。

このように、地下水の利用を未来へつなぐ持続的な仕組み・取組みについては、近年確実に進展しているが、次の点を再確認しておく必要がある。水循環基本法では、地下水と河川を一体とした流域と捉えることとなっているように、基本は、地下水の持続的利用が可能になる前提として、河川（地表水）の持続的利用も担保されなければならないということである。すなわち、どちらかが持続可能でなければ、他方が持続可能であり続けることは不可能で、いずれ両方とも破綻してしまうこととなる。そのためには環境（自然）・社会・経済が一体となったガバナンスのもとで水（資源）を捉える必要がある。

残っている課題として、すでに地盤沈下や地下水塩水化といった地下水災害が顕在化し、採取規制が行われている地域、そして規制の効果が上がり水位が回復している地域での地下水管理を今後どのようにする

かは大きな課題である。すなわち、今後規制を解除、あるいは緩和するためにはどのような条件が必要なのであろうか。もちろん、地下水に関する科学技術的な知見は格段の進歩を見せてはいるのだが、課題は山積している。

地下水を公共性の高い資源と位置づけられても公水とできない大きな要因は、現段階では責任ある管理ができないということが背景にある。逆に言えば、多少の水位低下だけで、大きな地下水障害（地盤沈下など）がない状態の時点で、地域にかなった持続可能な地下水管理の方策を模索し、制定しなければならない。大きな障害が出てからでは手遅れになってしまうということでもある。

4. おわりに

世界には絶対的に水が、量的にも質的にも問題がある開発途上国や最貧国が数多くあり、この問題の解決は喫緊の課題である。多くの乾燥地・半乾燥地では、水＝地下水である。そして水の確保が、持続可能性を担保するために最初の乗り越えなければならないハードルである。

水が豊富で、海に囲まれている日本は、地下水を含めた水のガバナンス、持続的利用が可能な条件に恵まれているといえ、今回は、我が国の地下水を念頭において論を進めたので、偏った面が多々ある。しかし、地球温暖化が将来、プラネタリー・バウンダリーを超え、地球の水循環を大きく変化させる可能性も考えられ、我々は「小さな地球の大きな世界」（J. ロックストローム・M. クルム、2018）の視点で、地下水と対峙していく必要があるのではないかと考える。

散漫な総論になってしまったが、本号の各論が地下水を考えるきっかけになれば幸いである。

参考・引用文献

- 内田洋平・吉岡真弓・シュレスタ ガウラブ・黒沼 覚 (2018)：地域の地下水環境を活かした地中熱の研究、地下水学会誌、60 (4)、475-482
- 岡田高大：水と共に生きる大野市の活動～井戸涸れから始まった地下水保全の取り組み～、地下水学会誌、58 (2)、217-225、2016
- 榎根勇：地下水と地形の科学、講談社学術文庫 2158、253p、2013
- 環境省 (2016)：「地下水保全」ガイドライン～地下水保全と持続可能な地下水利用のために～
- 九鬼貴弘・丁田充：鳥取県での地下水保全への取組について、地下水学会誌、60 (2)、131-138、2018
- 小池一之・山下脩二ほか編：自然地理学事典、朝倉書店、152-157、2017
- 国土庁：『わが国の地下水－その利用と保全』、1997
- 嶋田純・上野眞也：持続可能な地下水利用に向けた挑戦－地下水先進地域熊本からの発信－、誠文堂、310p、2016
- 嶋田純：広域地下水流動の実態を踏まえて熊本地域における地下水の持続的利用を目指した新たな取り組み－地下水資源利用料維持のための揚水許可制の導入－、地下水学会誌、55 (2)、157-164、2013
- 田瀬則雄：水循環再考、日本水文科学会誌、48 (1)、23-28、2018
- 田瀬則雄：環境中の窒素の流れと地下水の硝酸性窒素汚染、畜産環境情報 54号、1-14、2014
- 田瀬則雄：わが国における地下水汚染の現状と課題、安全工学、51 (5)、290-296、2012
- 田中正：これからの地下水ガバナンス、地下水学会誌、57 (1)、73-82、2015
- 谷口真人：持続可能な地下水の利用と保全－水循環基本法及び水循環基本計画の制定を受けて－、地下水学会誌、58 (3)、301-307、2016
- 谷口真人：水循環基本法と地下水、地下水学会誌、57 (1)、83-90、2015
- 谷口真人編：アジアの地下環境－残された地球環境問題－、学報社、243p、2010
- 鳥取県：とっとりの豊かで良質な地下水の保全及び持続的な利用に関する条例、2012
- 長瀬和雄：秦野盆地の地下水管理、日本水文科学会誌、40 (3)、109-120、2010
- 三好規正：地下水の法的性質と保全法制のあり方～「地下水保全法」の制定に向けた課題～、地下水学会誌、58 (2)、207-216、2016
- 宮崎淳：水循環基本法における地下水管理の法理論－地下水の法的性質をめぐって－、地下水学会誌、57 (1)、63-72、2015
- 宮永健太郎：生態系サービスマネジメントとしての持続可能な水資源・環境保全、水資源・環境研究、26 (2)、59-66、2013
- J.ロックストローム・M.クルム：「小さな地球の大きな世界～プラネタリー・バウンダリーと持続可能な開発」、丸善出版、242p、2018
- Shiklomanov, I.A.: Assessment of water resources and water availability in the world., WMO, 88p., 1997