

社会経済の変化と 安全な飲料水の供給

Supply of Safe Drinking Water under
Changing Socio-economy



滝沢 智

Satoshi TAKIZAWA

東京大学大学院工学系研究科
都市工学専攻 教授
Professor, The University of Tokyo
Department of Urban Engineering
Graduate School of Engineering

先進国では20世紀後半に水道の普及が進み、水系感染症を克服し豊かな社会を作り上げた。開発途上国においても、21世紀にはいってMDGs^{*1}やSDGs^{*2}などの目標を設定し、世界の国々が努力することにより、安全な飲料水へのアクセスを得る人が増加している。水道は安全な飲料水の供給に大きな役割を果たしているが、水道サービスの質的な向上や公平性、事業経営の持続性など新たな課題も生じている。これらを克服するためには、経営と技術が一体となった水道システムを構築する必要がある。

*1: MDGs (Millennium Development Goals): ミレニアム開発目標。2000年に採択された「国連ミレニアム宣言」にもなっており、まとめられた2015年までの開発目標。

*2: SDGs (Sustainable Development Goals): 持続可能な開発目標。2015年「持続可能な開発サミット」で採択された「持続可能な開発のための2030アジェンダ」に含まれる一連の目標。

The world's developed countries have achieved universal access to piped water in the last half of the 20th century, which enabled eradication of water-related illness and construction of affluent society. In developing countries, access to safe drinking water has risen thanks to the efforts made by governments under the goals of MDGs and SDGs. Piped water supply plays pivotal role in supply of safe drinking water, but new challenges have emerged such as improving the service quality, egalitarian supply, and sustainable water supply business management. To overcome these challenges, it is indispensable that we build new water systems that consolidate water-related technologies and business management.

はじめに

地球は、水の惑星と言われていました。宇宙から見た地球の姿は、まさに水の惑星を象徴しています。水は、地球の気候を安定化するだけでなく、多様な生物の成長を可能にし、水産資源を育み、農業や工業、舟運を盛んにし、人間の健康な生活を支えるなど、多くの恩恵をもたらしています。しかし、これほど水が豊かな地球で水不足が起きるのはなぜでしょうか。地球上の水資源の分布には偏りがあるだけでなく、20世紀以降の急激な人口の増加や、より多くの水資源を求めるといった人間の行動にも問題があるかもしれません。また、過去の開発行為が、水資源の枯渇をもたらした事例もあるでしょう。一方で、我々人類は、水を利用する技術を開発し、水を有効に利用する手段も手に入ってきました。

国連の予測によると、21世紀中には、世界の人口が100億人に達し、歴史的にも世界の人口が最大になると予想されています。このような中で、自然環境を守りながら、水資源を有効に活用し、公平に配分することがますます重要となっています。本稿では、水をめぐる世界の状況や課題とともに、日本の社会経済の変化が水利用に及ぼす影響と、

それを克服するための技術やマネジメントについて説明します。

世界の水資源と安全な飲料水の供給

人間が利用する水は塩分を含まない淡水ですが、地球上の水の多くは海水や塩分濃度が高い地下水として存在します。我々が利用可能な淡水は、河川や湖沼などの地表水と、海水などの影響を受けていない地下水など、地球上の水のごく一部に限られます。地表水や地下水などの水資源は雨や雪によってもたらされますが、地域によって雨や雪が降る量は大きく異なっています。例えば、アフリカのサブサハラ地域や、中東などでは年間の降水量が300 mm以下の地域もありますが、インドネシアのように年間2,000 mm以上の降水がある地域もあります。また、大きな湖に蓄えられる地表水は長い時間そこにとどまるのに比べて、河川水は比較的短い期間で流出します。そのため、年間を通じて河川水を利用するためには、水を蓄えるためのダムが必要となります。地下水は降水が地下に浸透して地層の間に蓄えられたものですが、数万年ものあいだ地下に滞留している化石地下水から、数10日程度で河川に流出する浅い地下水まで、様々な地下水があります。我々は、これらの水

資源を、地域の特性や用途に応じて利用しています。

これまで降水量には地域による偏りや、経年的な変動がありました。将来の気候変動はこれらの偏りをさらに大きくする可能性があります。現在の予測技術では、将来の降水量や水資源の量を正確に予測することまではできませんが、複数の予測を組み合わせて、それらの平均をとることで、将来の気候と降水量変化の傾向をつかむことはできます。降水量の変動幅が大きくなると、洪水と渇水の両方に備えなければならなくなります。これまでのようにダムを建設して河川の流れを制御することは、今後はますます難しくなるでしょう。その場合、将来の水資源の変化に積極的に適応するため、水利用の方法を変えたり、利用量を削減することが必要となります。また、地震や洪水などの災害時の水供給も大きな課題です。日本は、毎年のように地震や洪水、渇水などの自然災害が発生しており、これまでの経験から応急給水などの対応力を高めてきました。今後は、IT技術などを組み合わせて、水を必要とする被災者によりはやく水が届くような情報を共有する仕組みを構築する必要があります。これには、SNSやクラウド技術などが役立つかもしれませんが、一方で、情報の信頼性やセキュリティを高めることも忘れてはいけません。

水資源の用途については、開発途上国では、農業が80%以上を占めるのに対して、先進国では、農業、工業、都市用水がほぼ同じくらいの割合を占めています。このため、水資源に乏しい国では、都市用水や工業用水の需要が高まるにつれて、水利用の用途間での水争いも深刻化しています。たとえば、地下水を農業用の灌漑と都市用水の両方に利用している南アジアでは、地下水の過剰利用により、地下水の水位が低下したり、地下水が汚染されたりする事例も多く報告されています。しかし、他に水源が無いため、地下水の水位低下と汚染が拡大しつつあります。また、人為的な汚染以外に、地下水中にはヒ素やフッ素が含まれているために飲用には適さない場合があります。これらの汚染された地下水を利用したために、世界で多くの人が健康被害にあっていますが、代わりとなる良好な水質の水源はなく、また、水処理技術も普及していないため、汚染された水を飲み続けています。ヒ素やフッ素により汚染された地下水を引用して健康被害を受けている人々は、世界で数億人とみられていますが、正確な人数は把握されていません。

このように安全な飲料水へのアクセスが得られない人口を削減するため、国連ミレニアム開発目標(MDGs)では、安全な飲料水へのアクセスが得られない人口を、1900年時点と比べて、2015年までに半減するという目標を掲げました。この目標は、世界的には2015年よりも早く達成されましたが、目標が未達成である国や地域があることや、安全な飲料水の代替指標である「改善された水源」が必ずしも安全ではないことなどの問題が残されています。中でも、2015年までのMDGsの取組期間に安全な飲料水へのアクセスを得たとされる26億人のうち、19億人が水道水の供給を受けることによってアクセスを得たと推定されていることから、水道の普及はMDGsの達成に大きな役割を果たしました。しかし、開発途上国の水道は日本の水道とは大きく異なり、水源の不足や機械の故障、停電などにより、しばしば給水停止になることや、水質の安全性が確保されていないなどの問題があります。例えば、ネパールの首都のカトマンズ市では、市内の半数の家庭への水道の給水は、1週間当たり3回以下、給水時間は6時間以下にまで低下しています。また、水道水の50%から大腸菌が検出されるなど、水質基準を満たしていませんでした^[2]。さらに、1週間当たりの給水時間は、給水区域や家庭により大きな違いがあり、このことが市民の水道に対する信頼を損ねる大きな原因となっています。

MDGsの後継である持続可能な開発目標(SDGs)では、このような水道サービスの水準を向上し、間欠給水をなくすることが目標となっていますが、これは大きなチャレンジです。なぜなら、多くの開発途上国では、農村から都市への人口の流入が起きており、都市人口の増加率は、都市用水のための水源の開発量の増加率や、水道の普及率を上回っているからです。このため、水源開発のみに頼るのではなく、漏水や水利用量の削減を含めた水利用の大幅な効率化が必要です。日本の水に関する技術には、水道の漏水を検知し削減する技術や、耐久性が高く漏水しにくい水道管など、水不足に直面する世界の都市で活用できる技術があります。また、節水器具も多く作られており、福岡市をはじめとして、節水に成功した事例があります。これらの技術やノウハウは、人口増加に悩む開発途上国の水道にとって、必要性が高い技術です。

Table 1 飲料水水源の分類(WHO/UNICEF共同モニタリングプログラム)^[1]

		MDGs (~2015)		SDGs (~2030)	
改善された水源	宅内水道接続	個人の住宅や敷地への水道接続		安全に管理された水源	宅内水道接続
	その他の改善された水源	公共水栓、深井戸、保護された井戸や泉、雨水利用		基礎的な水源	水汲み時間30分以下
				制限された水源	水汲み時間30分以上
改善されていない水源	改善されていない水源	保護されていない井戸や泉、タンカーやドラム缶による販売、ボトル水		改善されていない水源	保護されていない浅井戸や泉
	地表水	河川や湖などからの直接利用		水供給なし	地表水を直接利用

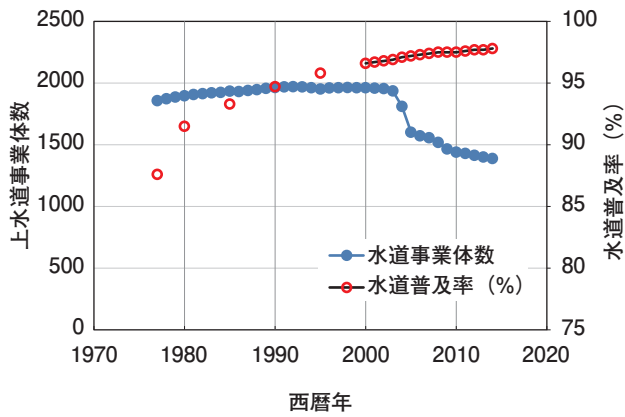


Figure 1 水道普及率と水道事業者数の変化 (出典：日本水道協会, 水道統計)

日本の水資源と水道の普及

日本は、年間平均1,500 mm程度の降水があり、比較的降水量が多い国です。しかし、年間の降水の多くが台風などによってもたらされるために季節的な偏りがあり、雨を伴った台風が来るかどうかで年間の総降水量が大きく変動します。また、島国であるために河川の流域が小さく、降った雨を蓄えることが困難です。琵琶湖や霞ヶ浦などの湖沼は自然の大きな「水がめ」ですが、このような湖沼が無い地域では、地上に降った雨は、ダムなどにより蓄えなければ、そのまま海に流出してしまいます。しかし、ダムの建設に適した土地が少ないばかりでなく、流域が小さいために蓄えられる量も大きくはありません。このようなダムや河川などの地表水とは別に、地層に蓄えられた地下水を利用することもあります。富士山や阿蘇山などの火山は地下水の涵養に適した地層である場合が多く、これらの山の山裾に位置する地域では豊富で良好な地下水に恵まれています。しかし、東京や大阪などの大都市では、かつて地下水の過剰なくみ上げにより地盤沈下を引き起こした経験があります。このため、地下水は、地域や都市の大きさによって利用可能であるものの、大規模な都市での利用は難しいとい

えるでしょう。

日本の水道は、規模の拡大とともに地下水から地表水へと水源を転換してきました。戦後の高度経済成長期には、東京、大阪などの大都市に人口が集中し、水需要が急激に高まったため、水源の開発と水道施設の拡張を進めました。その結果、1960年から2000年の40年間で、水道普及率は53.4%から97.5%と上昇し、2016年度末現在では、全国の水道普及率は97.8%と世界でもまれに見る高い普及率を達成しています。その間に、水道事業者の数も増え続け、1992年には1971事業者と最大となりました。しかし、その後は、市町村合併が進んだことにより2014年末には1388事業者まで統合が進みました。

水道の普及が進んだ1960年～2000年の間には、水質汚染の問題から異臭味被害が拡大し、粉末活性炭の添加やオゾン・粒状活性炭を利用した高度浄水処理が普及しました。粉末活性炭の添加は、京都市や横浜市で行っているほか、オゾン・活性炭による処理は、大阪市、東京都、千葉県などの大都市で行われています。しかし、オゾン・活性炭処理は、ジェオスミンなどの臭気物質の分解・除去に有効である一方で、臭化物イオンを含む原水をオゾン処理することにより、臭素酸という副生成物が作られることが明らかとなりました。このため、海水の影響や臭化物イオンを含む排水が流入する水源では、オゾンの添加率を抑制しなければなりません。その一方で、水源の水質が変化しつつあり、これまで異臭味の問題がなかった寒冷地の水源でも、異臭味の問題が発生するようになってきました。これらの問題に対処するためには、水源水質の変化の原因を探り、新たな浄水処理技術を開発する必要性が高まっているといえるでしょう。

社会の変化と水道事業の課題

このような状況の中で、将来も安心して安全な水を使い続けられるようにするためには、どのようにすれば良いので

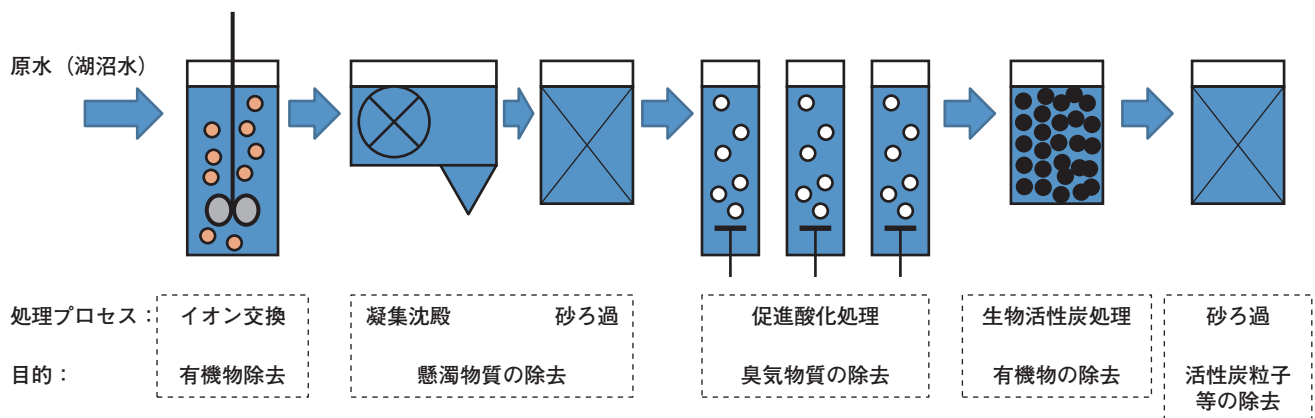


Figure 2 新しい浄水プロセスの検討例^[3]

しょうか？日本を含む先進国では、20世紀後半に水道の普及を進め、全国の隅々まで安全な水道水の利用を可能としました。しかし、建設から50年を経過した水道施設は、更新の時期に差し掛かっています。例えば、アメリカでは、アメリカ水道協会の推定によると今後20年間で100兆円規模の更新投資が必要だと推定しています。これは年間5兆円もの投資になりますが、アメリカの人口当たりに換算すると年間約1万6千円になります。日本では、年間約1兆円の投資が必要であると試算されていますが、国民一人当たりでは年間約8千円になります。アメリカは国土が広く、人口密度が日本よりも低いので一人当たりの水道管路の延長が長くなる傾向がありますが、そのようなことも今後の更新費用に影響しているかもしれません。一方で、アメリカでは依然として人口が増加しているのに対して、日本の人口は既に減少を始めています。このまま人口減少が進むと、一人当たりの負担額は増加する可能性が高くなります。

このような背景のもとで、厚生労働省は、2013年3月に「新水道ビジョン」を公表し、「地域とともに、信頼を未来につなぐ日本の水道」を標語として、水道事業の経営基盤の安定化への取り組みを始めました^[4]。さらに、平成29年中には、水道法を改正し、水道事業の広域化や官民連携などの取り組みを加速する予定です。水道事業の経営は、これまでの市町村による経営原則を維持しつつも、都道府県により市町村の水道広域化の議論をリードする役割や、さらに国がそれを後押しすることが期待されています。水道の経営基盤を強化するためには、これまで市町村ごとに経営してきた水道事業を、より広い視点で地域全体をみなおして、事業の効率を高めることが必要となっています。さらには、民間企業の持つノウハウも水道事業経営に取り入れて、公民連携を進める取り組みが始まっています。これらの取り組みを支えるため、水道施設のエネルギー効率を高める技術や資産管理(アセットマネジメント)を支援するようなツールの開発にも期待が寄せられています。

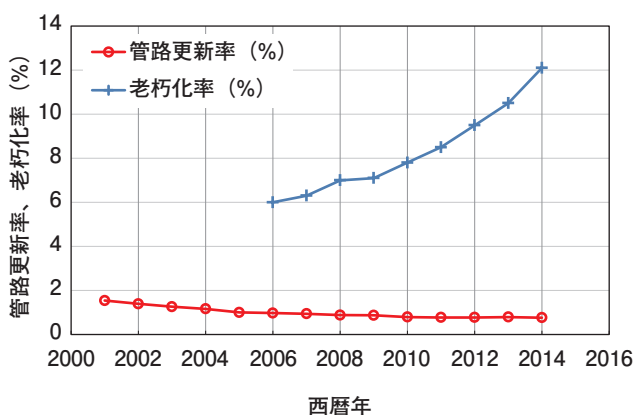


Figure 3 水道管路の更新率と老朽化率(出典：日本水道協会, 水道統計)

将来の水利用技術

このように水利用をとりまく自然環境や社会の状況が変化の中で、我々はこれからどのような技術を開発すればいいのでしょうか？ 渇水が続いたオーストラリアでは、多くの主要都市で海水淡水化施設を稼働させました。海水淡水化には多くのエネルギーを必要とするため、同時に、再生可能エネルギーの利用も義務づけています。その結果、水利用の安定性を高めた一方で、造水コストが上昇し、水道料金にも影響を与えています。また、アメリカ西部のカリフォルニア州では、長年続いた渇水のため、海水淡水化に加えて、下水の再利用を加速する方向で技術の開発が進められています。これまでは、下水の再生水を地層に注入し、地層において浄化した後に利用していたものが、そのような地層による処理を得ずに、直接的に飲用水としての利用を可能にしようという動きです。当然のことですが、下水中には多くの汚染物質が含まれているために、飲料水として利用することには多くの反対意見もあり、あらゆる汚染物質を除去するような技術の開発と、高度な水質モニタリングの技術が求められています。

日本でも沖縄県の離島や、小笠原諸島では、時折深刻な渇水に見舞われています。このため、小規模な海水淡水化施設を建設するとともに、移動式の海水淡水化施設を利用しています。しかし、小笠原諸島では、今年も長期にわたる渇水に見舞われ、深刻な状況となっています。このことから、これらの離島の水供給の不安定な状況を解消するためには、小規模な海水淡水化の技術は今後さらに必要となるでしょう。一方、利根川流域など、大規模な流域では、平成6年及び8年以降は大規模な渇水は発生していませんが、小規模な水不足には遭遇しています。そのような場合に、汚染物質の流出などの水質事故が発生すると、大規模な断水につながる恐れがあります。実際、平成24年には、利根川流域では工場排水中に含まれる物質により浄水場の塩素消毒でホルムアルデヒドが生成し、下流の浄水場が給水を停止しました^[5]。このような水質事故をいち早く検知し、対応策を講じるためには、水源監視のシステムをより高める必要があります。また、水需要の変化により、水道の配水管網内の滞留時間が変化することが考えられます。配水管内部での滞留時間が長くなると、消毒副生物の濃度が増加したり、残留塩素濃度が低下したりします。これらの状況をリアルタイムで監視し、水運用に反映させることが必要となります。配水管が老朽化すると、漏水や汚れた水の浸入の危険性が高まります。このようなリスクを回避あるいは低減するためには、管路内の水圧の異常検知や、水温・水質の急激な変化を検知することも必要でしょう。現在利用可能な装置でもこれらは測定できますが、これからはより小型で安価な装置が求められます。

水道でもスマートメータの利用が施行されています。ス

スマートメータの活用により、検診が不要になるだけでなく、毎日の水使用状況が把握できるため、節水や水需要の予測に活用することができます。しかし、電機やガスに比べて水道のスマートメータの普及は進んでいません。これは、スマートメータの価格が通常の水道メータに比べて高く、電気やガスに比べて家庭での料金が安い水道では採用しにくいことが大きな要因です。さらに、地面の下にある水道メータは雨などでぬれやすく、構造的にもより耐久性が高いものが求められています。しかし、今後は、定期的な検診が困難な地域や、使用料が多い商業用などをはじめとして、スマートメータが普及する可能性があります。そのためには、水道用のスマートメータのコストを引き下げるだけでなく、付加的な用途を考えることも重要です。

一方で、都市部における水道は、施設の維持管理や更新を加速する必要があります。施設の維持管理では、これまで紙の帳票で整理してきた情報を、クラウド技術を含めた電子的な情報に置き換える必要があるでしょう。施設の運転情報も、現場での表示から電子的に収集し、集中的に表示・管理ができる仕組みへと転換する必要があります。これは、SCADA^{*3}システムで実現している水道事業者もありますが、今後、運転管理に要する人員が減少することを考えると、水道管路網の水圧、流速、水質などの情報と、浄水場の運転管理情報を集中的に管理するシステムを、従来よりも安価で使いやすい形で構築する必要があります。

***3**：SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)：産業制御システムの一つ。コンピュータによるシステム監視とプロセス制御を行う。

おわりに

2015年を目標年としたMDGsの達成により、開発途上国においては、安全な飲料水へのアクセスが無い人口を半減することができました。このような経験をもとに、より高い目標であるSDGsの達成に向けて、日本を含む先進国と途上国とが力を合わせて取り組むことが重要です。先進国では、20世紀の後半に、水系感染症を克服し、安全な飲料水を確保することができました。しかし、水源環境の変化による異臭味の問題や、新規微量汚染物質の問題など、新たに取り組むべき課題が増加しています。さらに、人口減少と一人当たりの水利用量の減少により、水道事業者の料金収入は今後さらに減少すると予想されています。このようななかで、老朽化した施設の更新を行うためには、新しい技術の開発とマネジメントの刷新が求められています。これを実現するためには、水道の利用者である市民や企業、政策決定者の幅広い理解を醸成してゆく必要があります。

参考文献

- [1] UNICEF/WHO, Safely Managed Drinking Water, 2017. https://www.wssinfo.org/fileadmin/user_upload/resources/JMP-SMDW-TR-1-March-2017.pdf
- [2] Guragai B., Takizawa S., Hashimoto T., Oguma K., "Effects of inequality of supply hours of consumers' coping strategy and perceptions of intermittent water supply in Kathmandu Valley, Nepal", *Science of The Total Environment*, **599-600**, 431-441, 2017.
- [3] 茨城県企業局資料 [http://www.pref.ibaraki.jp/kigyou/qcms/news/20161226/files/symposium\(20161114\).pdf](http://www.pref.ibaraki.jp/kigyou/qcms/news/20161226/files/symposium(20161114).pdf)
- [4] 厚生労働省水道課, 新水道ビジョン <http://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/newvision/newvision/newvision-all.pdf>
- [5] 厚生労働省水道課 <http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000002gthr-att/2r9852000002gtmb.pdf>