

日本の水

九州大学工学部
助手 河村 明

1. はじめに

地球上の生物は、その生命を維持するために本能として水を摂取する。人間も生物の一種であるから、その生理的機能を維持するため必要最小限の水は不可欠である。しかし、人類は自らの生活の場を快適な環境に改善するため、その必要最小限の量を超えて、水を多種多様な用途に利用してきた。人類の歴史は、水の恵みのもとで始まっており、我々の生活、文化、経済などは、水に支えられて発展してきた。そして今日、水は生活の基盤をなす貴重な資源として認識され、都市の発展においても、水は重要な制約要因となっている。さらに近年、都市圏において渇水は頻発する傾向にあり、しかもひとたび渇水が発生すると、その経済的・社会的な影響は甚大なものとなっている。

本報では、以上のような背景のもとで、日本の水について、水を主として資源として捉えた立場から、その特徴、現状、利用状況、開発、課題、人との拘り合い等について概説し、今後の日本の水資源対策のあり方全般について考察を行っている。

2. 資源としての水

水資源とは、人類が地球上に存在する水を

資源として利用していることを意味している。水を資源として見るとき、他の資源（例えば石油など）とはかなり違った特徴をもっている。第一に、石油などはそれを使用してゆけば、いずれは枯渇してしまう（消滅してしまって再利用することは不可能である）が、地球上に存在する水の量は限られているものの一定であり、なくなることがない。すなわち、水は、気体、液体、固体と各種の態様をとりながら、主として太陽エネルギーにより、絶えず地球表面を循環しているにすぎないのである。地球上の水は、海や陸から蒸発して雲となり、雨や雪となって地上に降り、さらに川や地下水となってやがてまた海に戻って来る。第二に、水資源は、量的にも質的にも、地域的に不均衡な分布をしていること、時間的に（長期的にも短期的にも）その分布が大きく変動することが挙げられる。これらの特徴については後で詳しく述べることにする。

ここで、地球上に存在する水の総量を見てみると、これについては多くの推計があるが、



河村 明 (かわむら あきら)

昭和30年 岐阜県生まれ
昭和60年 九州大学大学院工学研究
科博士課程単位修得の上退学
昭和60年 工学博士
昭和60年 九州大学工学部助手、現在
に至る。共訳「パソコンによる地下
水解析」（森北出版）

●表1 地球上の水の構成比

	態 様		%
1	海	水	97.5
2	氷	雪	1.75
3	地 下	水	0.72
4	淡 水	湖	0.009
5	塩 水	湖	0.007
6	土 壤	水	0.002
7	大 気	中	0.001
8	河 川	水	0.0001
9	生 物	中	0.0001
	総 計		100.0

およそ14億km³で、その構成比は表1のようである^{1),2)}。これを見ると、地球上の水のおよそ97.5%は海水で、淡水は僅か2.5%程度である。しかもこの淡水の約70%は南極・北極およびグリーンランドの氷として存在している。一般に水資源というときは、現段階では、海水や塩分の混じった水および淡水であっても我々の手に容易に届かない水は除いて考えるので、我々が水資源として直接利用できる水は、河川水、湖沼水そして地下水の一部であり、これらは地球上の水の0.8%にも満たないのである。このように、水の惑星と呼ばれ表面の70.8%が海洋で覆われている地球ではあるが、人間が水資源として手近に利用できる水の量は意外と少ないのである。

次に、日本の水資源の年間の収支を大雑把に見てみよう。日本全土の年間平均降水量は後述するように約1,750ミリで、それに日本の面積37万8千km²を掛けると年間の日本全土への降水量は約6,600億m³となる。水資源的にみれば、降水量から蒸発散量（水面や土壌面から蒸発する蒸発量と植物の葉面などから水蒸気が大気中に蒸発する発散量とを加えたもの）を差し引いた水の賦存量と呼ばれるものが重

要となる。この量は水資源として期待できる極限の値すなわち実際の利用可能対象量で、これを例えば地域毎に求め水資源特性を比較するのに用いられている。日本では、平均的にみて降水量の約3分の1に当たる約2,300億m³が蒸発散量として天に帰り、その結果、日本全国の水資源賦存量は約4,300億m³と推定されている³⁾。さらに、降水量のおよそ3分の1以上に相当する2,000~3,500億m³は、洪水その他となって流れ、水資源どころか甚大な水害を引き起こしながら海へ流れていく。このため、結局我々が水資源として利用できるのは年間降水量のおよそ3分の1程度である。なお、上記の水資源賦存量4,300億m³は、平年並みに降水がある年の場合で、水資源計画で対象となる渇水年（概ね10年に1度起こると推定される少雨の年）の水資源賦存量は約3,000億m³と推定されている。ダム建設の効率からみて、この渇水年の水資源賦存量の約6~7割に当たる約2,000億m³が、日本において水資源として利用できる一応の限界であると想定されている⁴⁾。

3. 水資源の源としての降水

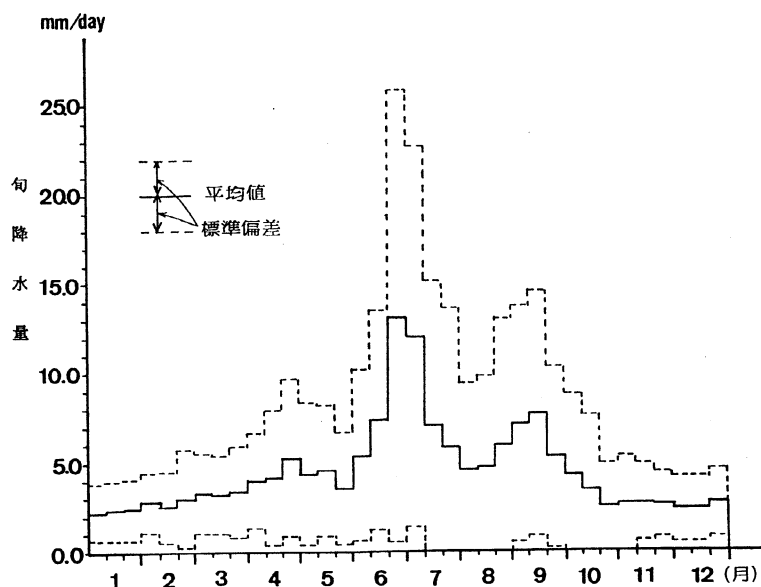
日本は水資源に恵まれていると言われる。「湯水の如く使う」と言う諺は、わが国の豊富な水資源を如実に言い表している⁵⁾。水資源の源は、つまるところ、天からのもらい水すなわち降水である。そしてそれが川に流れ出て、また一部は地下水となって、我々が水資源として利用することになる。そこで本節では、水資源の源である降水の特徴を見てみよう。

地球上の気候はマクロ的にみれば、緯度とともに変化する。水資源の供給総量としての年降水量は、平均的にみると赤道付近で最も大きく、北・南半球とも緯度が高くなると共に小さくなってゆき、40°~55°付近で再び大きくなる。その後降水量は、極に近づくにつれ小さくなってゆき極地方で最も小さくなる⁷⁾。そして、同じ緯度でも一般的に海上の方が陸上よりも降水量は大きい。日本の北緯30°~45°の緯度帯は温帯の中ではむしろ年降水量が少なくなっている⁷⁾。ところが、日本の年間の平均降水量約1,750ミリは、世界の平均

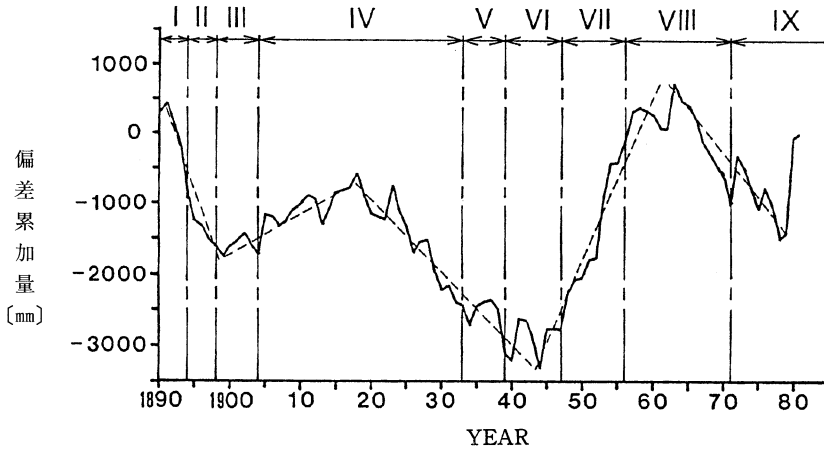
降水量の約970ミリの2倍弱で、温帯に位置する国としてはずば抜けて多く、これほど多量の降水があるのは温帯では例外的で、熱帯並の降水量である。これは、日本が世界でも有数の多雨地帯であるアジアモンスーン地帯に位置しているためであるが、とにかく日本は降水には恵まれている。しかし、日本は狭い国土に人口が多く、人口一人当りの年降水量は約5,500m³で、世界平均の34,000m³のおよそ6分の1程度しかなく^{4),6)}、この視点からみれば、わが国の降水量は必ずしも豊富とはいえない。

さて、水資源の問題を具体的に検討する場合には、降水の時間的および空間的分布状況が重要になってくる。水資源は地域的に偏在し、ほとんど雨の降らない砂漠地帯や飲み水が石油よりも高価な中近東の国々から、日最大雨量が千ミリを超え年最大降水量が2万ミリを超えるようなインドのアッサム地方まで様々である⁷⁾。狭い日本国内においてさえも、降水量は地域的および季節的に大きく変動する。地域的に言えば、太平洋側の夏期多雨・冬期乾燥型、日本海側の冬期多雪型、瀬戸内

● 図1 福岡市旬降水量の平均値と標準偏差



● 図2 福岡市年降水量の平均値からの偏差累加曲線



沿岸、関東内陸、東北の太平洋側および北海道の少雨型といった具合である³⁾。

ここで一例として、福岡市の降水量の年間の変動を旬単位で調べてみると図1のようになる⁸⁾。この図は、明治23年から昭和53年までの降水データを用いて、各旬毎に、1日当りに換算した降水量の平均値およびその標準偏差（平均値の回りにどの程度データがバラツクかを示す尺度）を示している。図1の実線柱状図より、福岡市の旬降水量は4月下旬、6月下旬、9月中旬の3箇所にピークを持つことが分かる。これらはそれぞれ菜種梅雨、梅雨、台風の時期に相当している。また標準偏差はこれらの多雨期に大きく、冬期の1月から3月までの少雨期には小さくなっている。このように福岡市では梅雨期による雨が断然多く、冬期の数倍にも達する。福岡市に限らず日本においては、降雪期、梅雨期、台風期の短い期間に降水量が集中するという特徴がある⁹⁾。これら梅雨、台風および降雪による春先の融雪洪水は、水害をもたらす元凶ではあるが、日本の貴重な水資源の供給源となっているのである⁸⁾。

次に考慮しておきたいことは、降水量の経年変化である。これまでの研究で、損失とし

ての蒸発散量は、年単位で見ると降水量の変動にかかわらず各年ともほぼ一定値であることが知られているので⁴⁾、水資源賦存量は降水量の経年変化に直接対応することとなる。ここでは、一例として、福岡市の明治23年から昭和55年までの92年間の年降水量について、各年の降水量と92年間の降水量の平均値との差を累加したものを図2に示している⁹⁾。図中には後述する分割区間(I、II、……、IX)も示している。この図の実線の右上がりとは多雨年、右下がりとは少雨年を示しており、図の破線は年降水量の大体の傾向を示したものである。この破線が数十年にわたって上昇・下降を示していることは、年降水量が数十年にわたって、多雨期、少雨期にわかれることを示したもので興味あることである。すなわちおよそ1891年から1899年の間、1918年から1944年の間および1963年から1978年の間は少雨期間、1899年から1918年の間と1944年から1963年の間は多雨期間であり、長期的な経年変動が認められる。特に1918年から1963年に対応する40数年程度の長周期は、福岡市年降水量のスペクトル解析の結果¹⁰⁾の顕著な44年周期に対応するものと考えられる。

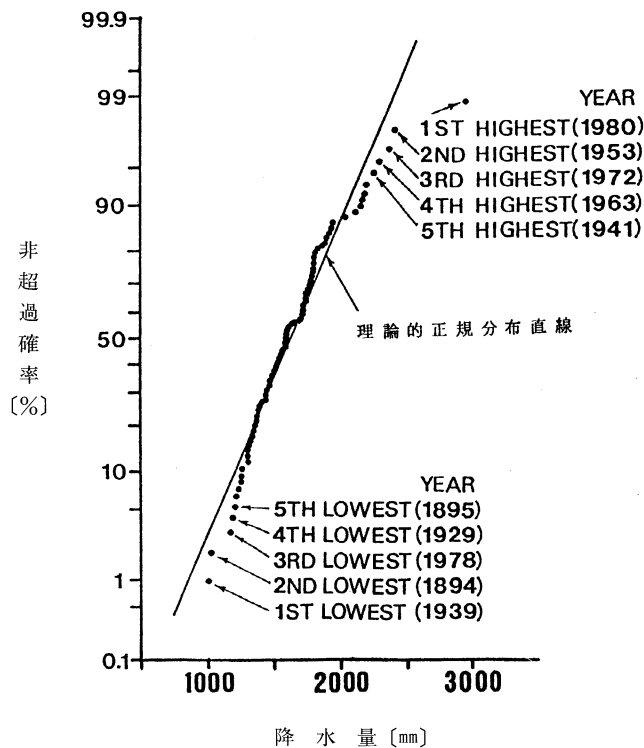
また、一般に年降水量はほぼ正規分布（平

平均値の回りに最も多くのデータが集中し、平均値からはなれるに従って左右対称にデータ数が徐々に少なくなる御椀を伏せたような形の分布)に従うといわれているので、92個の年降水量を正規確率紙という特殊なグラフ上にプロットしたものを図3に示す。このグラフ上に点が直線上に並べば、年降水量が正規分布に従うことを示すことになる。この図より年降水量はほぼ正規分布にしたがっているように見えるが、多雨年や少雨年は正規分布の直線からずれている。これより多雨年や少雨年の現れる年は、平年の年降水量を表す単一の母集団(統計的性質が同じで、標本を抽出するもととなる集団)とは異なった母集団から取り出されているとも考えられる。またこの図の直線からの外れ具合より、年降水量の量的に異常な年とその異常の程度を知る

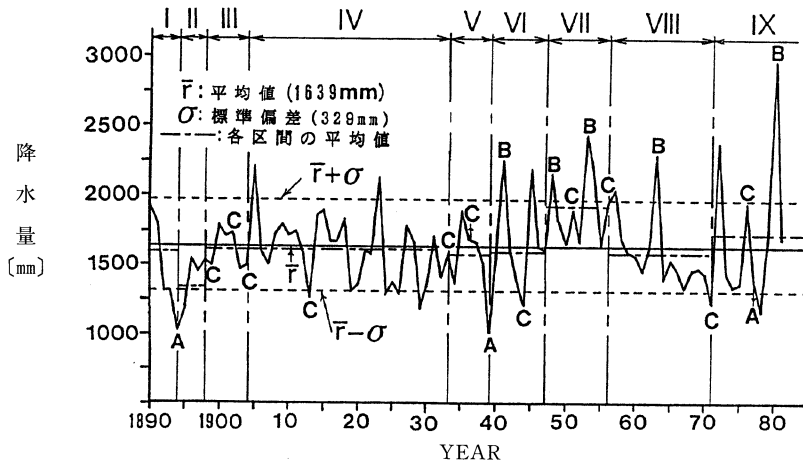
ことが出来る。例えば、多雨年1位の1980年の降水量は相当な異常多雨であることがわかる。

次に、上述の92年間の月降水量1,104ヶ月の時系列(月降水量を時間の経過通りに並べたデータ)に対して、筆者らの提案した特殊な手法により、長期的降水パターンの変動解析を行った結果¹⁾を示す。図4に、本手法により同じ降水パターンと見なせる9つの降水区間(図中のI、II、……、IX)に分割されたものを年降水量時系列について示している。また図中の記号A、B、Cは、筆者らの手法により検出された異常降水のタイプおよびその異常降水が起こった年を示している。ここでいう異常降水とは1年間の平均的月降水変動パターン(図1の実線の柱状図に相当)から異常に外れた月降水パターンのことを意味し

● 図3 福岡市年降水量の正規確率紙上へのプロット



●図4 同一降水パターン区間に分割された福岡市年降水量時系列



ている。異常降水のタイプは3つに大別され、タイプAは各月とも平年以下の少雨が継続し、大渇水となる可能性が大きい少雨継続タイプ、タイプBは平年以上の多雨が継続する多雨継続タイプ、タイプCは平年より極端な多雨と少雨が2～4ヶ月おきに交互に現れる変動の大きいタイプである。図4より、19個の異常降水のうちタイプAが3回、Bが5回、Cが11回起きていてタイプCが最も多いことが分かる。

次に筆者らが分割した9つの分割区間I、II、…、IXの降水パターンの特徴を概観すると以下ようになる。なお、詳しくは参考文献11)を参照されたい。区間I、III、IV、V、VIIIは1年周期が卓越し、それ以外の周期成分は小さく、ほぼ平均的降水パターンの区間であった。区間IIは図3より92年間の少雨2位の年(1894年)と少雨5位の年(1895年)が含まれ、1年周期が顕著でなく、長周期成分が卓越し、平均的降水パターンとはかなり異なった区間であった。区間VIIは図2、図4より多雨期といえるが、この区間の月降水の降水波形はほぼ平均的な降水パターンの形状であった。区間VIおよびIXは、4年周期が卓

越していた。これは区間VIに対して少雨1位の年(1939年)および多雨5位の年(1941年)、また区間IXに対して多雨3位の年(1972年)、福岡大渇水を引き起こした少雨3位の年(1978年)および多雨1位の年(1980年)などを含む少雨年と多雨年が、図4の区間VI、IXに示されるように、顕著な4年周期で交互に出現していることに対応している。またこれらの区間にはA、B、Cの3つの異常降水タイプが出現していて、変動の大きい区間であることがわかる。すなわち、区間VI、IXは、降れば異常に降り、降らねば異常に降らず、数年でならせばほぼ平年並みの降水という、4年周期の卓越した、そして非常に変動の大きい降水パターンの区間といえる。

さて、通常水資源計画においては、10年に1度起こる程度の渇水を対象として計画をたてることになっている。しかし、例えば区間VIIのような多雨区間においては、7年に1度の渇水の年であっても平年並みの降水量が期待できるので、このような多雨区間の降水をもとにして設計された水資源システムは、この区間が終わって他の降水区間に移行した場

合、水資源の利水上の安全性はかなり低下することになる。すなわち、降水パターンの経年変化により、その利水安全性が大きく異なり、水資源システムの設計に用いられた降水パターンと現在の降水パターンの違いが利水安全性に大きく影響を及ぼすといえる。このことはこれからの水資源利用計画においても慎重に留意しておかなければならないであろう。

また近年、世界各地の異常気象が話題となっている。異常気象や気候変動の要因については色々挙げられているが、特に、人間活動に伴う、温室効果をもたらし気体の増加による、将来の気候の温暖化が危惧されている。今度数十年程度の見通しを立てる場合には、二酸化炭素などの温室効果気体の影響が気候変動の最も大きな要因とも言われている³⁾。このような気候変動および異常気象の発生は、将来の水資源確保という点からみて、不安定な要因として懸念されている。

4. 日本の水の利用状況

本節では、水がどのようにどの程度使われているか見てみよう。1987年の日本の水の使用量は取水量ベースで894億 m^3 と推定されている³⁾。取水量ベースというのは、河川水、地下水などの水源から各種用水として取水された水量（取水量）を基に水量を議論する場合に使われる用語である。このうち、農業用水が585億 m^3 で全体の65.4%を占めている。そして、生活用水が155億 m^3 （17.3%）で、工業用水が154億 m^3 （17.2%）となっている。ここで工業用水は淡水補給量（後述する）の集計である。なお生活用水と工業用水を合わせて都市用水と言っている。

4.1 農業用水

農業用水は、水田灌漑用水、畑地灌漑用水および家畜飼育等に必要なる畜産用水から成っ

ているが、このうち水田灌漑用水が用水量の大部分を占めている。水田灌漑用水は、一般に4月中旬から9月までのいわゆる灌漑期間にその需要が発生し、特に田植え時に多量の水を必要とする。

水田面積は昭和45年以降、減少が続いており、それに伴って余剰水が発生するはずである。しかし、水田整備に伴う単位面積当りの用水量が増加していることや都市化による水田のスプロール的（都市域の膨張が虫食いで無秩序的）な減少の場合には、残った水田のために水位を維持する必要があるため、必ずしも水田減少に相当する余剰水を期待できるわけではない。このため、農業用水需要量はほぼ横ばいで推移するものと推測されている³⁾。

なお、農業用水は域内の水田で反復利用された後、その相当部分が河川に戻って来ると考えられるので、実質の使用水量は上記の値よりかなり少なくなるであろう。また水田灌漑用水は、地下水のかん養や近年クローズアップされている親水空間創出の機能なども有している。

4.2 生活用水

生活用水は、飲料水、炊事、洗濯、風呂、掃除、水洗トイレ、散水などの家庭用水として、また、学校、事務所、病院、デパート、ホテル、消化用水などの都市活動用水として使われている。家庭用水と都市活動用水の使用水量比は約7：3と推定されている³⁾。

生活用水の使用量は、昭和40年代は年平均約8.6%もの高い伸びを記録した。昭和50年以降は年平均約2.6%の伸びとなっており、伸び率は鈍化したもののしかし着実に増加している。その結果、昭和62年現在で生活用水の使用量は昭和40年の約3倍にも達している。これは、水道の給水人口の増加、都市活動用水の増加そして洗濯機や水洗トイレ等の普及に代表される生活様式の変化による一人当りの

水の使用量の増加が原因となっている。

ちなみに、日本の水道事業は、明治時代になって、コレラ、赤痢といった水系伝染病に対処するために始められた。そして水を浄水した後の汚染物質の混入を避け、水道管により水压をかけて配水するという技術が導入され、1887年に横浜市に初めて近代水道が開設された。爾来、近代水道の歴史は既に百年を超えている。その間水道は、公衆衛生の向上および生活環境の改善に多大な貢献をなしてきた。水道により供給される水の大部分は生活用水であり、1987年現在で、水道普及率は94%に達している。すなわち、総人口1億2千2百万に対し、水道の給水人口は1億1千5百万となっている³⁾。

4.3 工業用水

工業用水は、工業の分野で、ボイラー用水、原料用水、製品処理用水、洗浄用水、冷却用水、温調用水などに使われる水を総称したものである。

ボイラー用水は、蒸気として熱源や動力源として利用され、回収して再利用されるので使用量はそれほど多くはない。原料用水は、ビールなどのようにそのまま製品の原料となるものであるから、量的には少ないものの水質が重視される。製品処理水は、製品に化学的・物理的に作用を及ぼすのに用いられる水であり、洗浄用水は、製品、施設の水洗いに使われる水である⁴⁾。冷却用水は、発電所や製鉄所そして化学工場などにおいて、物を冷却するために使われる水で、この目的のために使われる水が工業用水の中では最も多い⁵⁾。温調用水は、温度や湿度などを調節するためのエアコンなどに使われる水のことである。

工業用水には、火力発電所のタービン冷却水のようにほとんど海水のみを用いているものもある。この海水の使用量は膨大な量ではあるが、日本の水資源という場合の水は通常淡水のみを考えるので、ここでは海水の使用

量は省いて考えることにする。

製造工程などで使用される水の総量（淡水使用量）は、新たに取水される水量（淡水補給量）と繰り返し使用される水量（回収水量）の合計からなる。1988年の工業出荷額は307兆円³⁾で1970年のおよそ2.3倍となっているが、淡水使用量は約1.7倍の増加に止まっており、工業用水使用量に相当する淡水補給量に至っては逆に16%も減少している。これは、水の高騰などのために、各工場が節水型の生産工程を採用したためである¹²⁾。

化学工業、鉄鋼業および紙・パルプ工業が用水多消費の三大業種で、この三業種で淡水使用量の約70%を占めている。これを淡水補給量（全工業用水需要量）でみると約60%となっている。したがって、これら三業種の水需要の動向が工業用水の使用量に大きく影響を及ぼすこととなる⁴⁾。

工業用水の使用量に大きな影響を及ぼす回収率について見てみると、化学工業、鉄鋼業では、回収が比較的容易な冷却・温調用水が使用量の90%程度と大きな割合を占めていることもあり、近年すでに化学工業で81%、鉄鋼業で89%と回収率はほぼ頭打ちの状態に達している^{3),4)}。一方、紙・パルプ工業は回収が容易でない製品処理用水、洗浄用水が使用量の81%を占めていることもあり、回収率は39%と低い水準にあるが、その用途の性格上大幅な向上は困難と考えられる。すなわち、今後工業用水の回収率の向上は余り期待できないと考えられる。

4.4 その他の用水

水の使用目的としては、上述の①農業用水②生活用水③工業用水の他に、④発電用水⑤環境用水⑥消流雪用水⑦養魚用水などが挙げられるが、日本の年間の水使用量を量的に考慮する場合、上記の④～⑦の用水は考慮されていないようである。と言うのは、これらの水は、水の持つ位置エネルギーや熱エネルギー

一そして心理的効果などを利用するもので、水を実際に消費してその水質を著しく変化させるものではなかったりその使用量が相対的に小さいからであろう。

発電用水は、水の位置エネルギーを利用し、水力発電を行うための用水である。明治維新以後、水力発電は日本が近代化する過程で導入され、豊富な水資源と急峻な地形という自然条件を巧みに利用して成長し、わが国の工業の発展に重要な役割を果たしてきた。わが国における発電電力構成比は、「水主火従」と呼ばれる水力発電が主体の時代がしばらく続いたが、昭和30年代後半に「火主水従」へと火力発電が主体の時代に転換した。その後燃料の高騰などもあり、近年、原子力発電の電力供給に占める割合が高くなってきている⁵⁾。1988年の発電電力量の構成比は火力63.6%、原子力23.7%、水力12.7%となっている。水力発電の比率は以前と比べ小さくなってきたものの、クリーンなエネルギーとして国内資源の有効利用、水資源の総合利用の見地から、その重要性は大きくなってきているといえよう。

これまで高度成長に伴う人口の都市集中、土地利用の高度化などにより、良好な水辺の環境が損なわれ、人と水辺との関わりが希薄化してきていた。しかし、日本が世界にもまれな経済発展を遂げた今、生活水準の向上や自由時間の増大等に伴い、水の利用についても、これまでの直接的な役割は勿論のこと、豊かで潤いのある快適な生活環境を保全・創出するいわゆる環境用水へのニーズが高まってきている。そして、河川、湖沼、水路等の持つ親水機能を維持、回復、創造するための事業が既に数多く実施されている³⁾。

雪国においては、冬期の降雪による産業活動や住民の生活を守るため、消雪や流雪のためのいわゆる消流雪用水が重要である。これには、水の持つ熱エネルギーを利用して降雪を融かして流下させる消雪パイプと、道路の路側等に設置された水路に雪を投入し、水の

持つ位置エネルギーを利用して雪を押し流す流雪溝がある。消雪パイプには、冬期間においても水温の高い地下水が適している。このため1988年度では全使用量59百万 m^3 のうち79%を地下水で賄っている。一方、流雪溝には981百万 m^3 の水が使用されているが、そのほとんどは河川水で賄われている³⁾。なお、九州沖縄地方にはこれらの施設は設置されていない。

養魚用水は、ます、あゆ、うなぎ、鯉、金魚等のふ化や養殖に使用される水で、全国的に使われている。人工の養殖池での養魚用水の使用量は、1988年で約87億 m^3 と推定されていて、かなり大量に使用されているものの、その大部分は河川に還元されるので、必ずしも消費的な水使用ではない。

5. 水資源の開発と課題

水資源開発とは、地球上を循環している水を、より多く人間の生生活活動に利用するため、その循環過程を変えることであると解釈される。この場合、海水や地下水そして汚濁した水が容易に利用できれば問題はないが、そのいずれもが多くの問題を抱えているため、水資源開発が人類にとって重要な課題となっている²⁾。なお、日本では、蒸発散量は相当あるものの、降水量に比べてその量は小さいので、蒸発散量の多寡が水資源開発の上で問題にされることは余りない。

水資源開発方法には以下のような方法が考えられる。(1)水の地表滞留時間の増加、すなわち、ダムや溜池等による貯留や貯水池からの蒸発抑制等、(2)地下水の揚水やかん養、(3)水の運搬移動による地域間融通、(4)質の純化による再生利用、すなわち、海水の淡水化や下水処理水の再生利用など、(5)既存水利用の改善、すなわち、農業用水等の既得水利の合理化や水道水の漏水量の減少等、(6)気象制御、すなわち、人工降雨や台風・低気圧の進路制

御等が挙げられる。

さて、1987年の都市用水（生活用水と都市用水）約309億 m^3 の水源について見てみると、河川水からが68.0%、地下水からが29.3%そして湧水等その他の水源が2.8%となっている³⁾。これを1975年の都市用水使用量306億 m^3 について比べてみると、使用総量はほぼ横ばいであるが、河川水は3.8%増加し、地下水は4%の減少となっていて、地下水の河川水への転用がある程度進んでいることを示している。事実、都市用水に対する地下水取水量は、1975年の約102億 m^3 から約90億 m^3 に減少している。また、農業用水については、水源を河川水に依存するものがその取水施設数の割合で85%、ため池が13%、そして地下水が2%となっている³⁾。そこで本節では、まず最も多く利用されている河川水の開発について述べ、次いで地下水の利用そしてその他の種々の水資源開発方法について言及しよう。

5.1 河川水の開発

これまで日本で水資源開発と言えば河川水の開発であり、しかも河川水をできるだけゆっくりと地上を流下させる方法であった¹²⁾。河川の流量は降水量の変化により、年によってまた季節によって大きく変動する。特に、日本の河川は烈しい洪水流量がある反面、通常は川幅が何百mもある河川でもチョロチョロと水が2、3筋流れているにすぎない。また、河口近くでも河川上流のような大きな砂利がゴロゴロしていて、河川の中流、下流がほとんどなく、いきなり河川上流から海へ突っ込む形となっている¹⁾。これらは日本の河川の大きな特徴である。すなわち、ある一定期間の河川の最大流量と最小流量の比を河況係数もしくは河状係数と言うが、日本の河川ではこの河況係数が非常に大きい。ヨーロッパのセーヌ川、テムズ川、ライン川では河況係数は40以下なのに比べ、例えば筑後川では8千以上と桁違いに大きい¹³⁾。さらに、河川の勾配

が世界の有名な諸河川に比べ非常に大きい。かつて、明治時代に日本に招聘されたオランダ技師デレーケは、富山県の常願寺川を見て、「これは川ではない、滝だ!」と叫んだという逸話¹⁴⁾もある程である。

一般に、急峻で河況係数の大きい河川は、洪水も渇水も共に起こり易い。そこでダムを築いて洪水の流れを一時貯留させて下流の水害を防ぐと共に、渇水時には貯水している水を放流して利水に役立てることとなる。このため日本全国至るところに多くのダムが築かれ、河況係数の大きい日本の河川流量の平均化を行っている⁵⁾。これが、ダム建設が日本の水資源開発の代名詞ともなっている由縁でもある。

さて、河川のある地点での流量の変動を流況というが、河況係数の大きい日本の河川においては自然の流況のままで利用できる流量は僅かである。何故なれば、河川水を取水利用する場合、必要な時期に必要な量を常に取水できなければならないので、常に安定して流れている流量言い替えば激しく変動する河川の流量においていくら流量が減少してもこれ以下には減多にならない流量（これを専門用語で渇水流量という。より正確には、渇水流量とは1年を通じて355日はこれ以下にならない流量のことで、年間の流量のうち少ない方からほぼ10日目の流量となる）を取水計画の対象とすることになり、日本の河川では、この渇水流量が非常に小さいからである。もし渇水流量を超えて水を取水すれば、その取水が不可能となる時期が存在することを意味するので、その取水は不安定であるという。また、河川からの取水量が渇水流量よりも少ない場合は、その河川は未開発な河川と呼ばれる。

日本の河川の場合、江戸時代中期から末期ごろまでに、安定して流れる水量である渇水量はほとんど農業用水によって取水し尽くされている状態であった。尤も、この頃は河川

の水は舟運にも利用されていたので、これに必要な流量も含まれていた。当時農民にとって、水を得られないことは死活問題であったから、取水流量が渇水流量を超えたり、異常渇水が生じて水が不足した場合には、利水者の中で血で血を洗う激しい水争いが起きていた。しかしこのような水争いが繰り返されるうち、次第に水利秩序が生み出され、地域社会が容認する慣行の水利権が形成されてきた¹⁾。すなわち、渇水流量を超える新規利水を規制しながら、既存利水者の間では、先発利水優位の原則（古くから水を取水しているものの方が水を優先して使う権利があること）を維持しながらも、異常渇水時には互いに水を融通しあうような水利秩序が形成されてきた。

ところで、水利権とは水を使用する権利のことであるが、今日、水利権は、河川法に基づき、許可された河川水を使用する権利のことであり、河川水を使用する場合は許可を得なければならない。この制度のもとでは、河川水は公共の水であるとの立場から、新しい水利権については、水利利用の内容を細かく規定することになった。この制度に基づく水利権を「許可水利権」と呼んでいる。しかし、河川法が明治29年に制定される以前から、上で述べたような社会的に容認された慣行的な河川水の使用権利が存在していて、河川法制定後もこの権利はそのまま継承され許可を受けたものと見なされた。この水利権は「慣行水利権」と呼ばれ許可水利権とは区別されている。

さて、自然の流況に基づいて、渇水流量まで取水されている河川に、新しく水の利用者が現れた場合、ダムなどを建設して自然流況を改良しない限り新規利水者はその河川から水を取ることはできない。すなわち、ダムにより洪水時等の流量を貯め、流量の少ないときにこれを少しずつ放流することにより、河川流況を平滑化して自然流況を改良し、渇水

流量の増大を図れば、この増大した流量分が新しく開発した水資源量となるのである。河川の渇水流量を増強する試みは、古くから行われており、日本では最も古く溜池を造って水利用をしたのは弥生時代末期と言われていて、日本の水資源の開発はこの時代に端を発している²⁾。

前述したように、江戸末期には農業用水だけで渇水流量は取り尽くされ、近年都市用水の重要性が高まってきたときには、新規の利水の入り込む余地はなくなっていた。しかし、昭和10年代から土木技術の進歩によって、ダムにより、これまでの水利利用の限界を打ち破り、河川の渇水流量を人為的に大幅に増強させることが可能となり、増強させた分について水利権が得られるという水資源開発のための画期的な手段が登場した。戦後、高度経済成長とともに、生活用水、工業用水は、ダム建設を積極的に推進し、新しい水利権を大幅に拡大した。そして、水利利用の高度化に対応して、新河川法が昭和39年に制定され、慣行水利権の許可水利権への切り換えが推し進められている。

ここで、河川にダムなどの水利施設が建設された場合の利水上の安全性の度合について見てみよう。ダムなどの水利施設は10年に1度起こる程度の渇水を対象に計画が立てられている。ということは、それ以上の異常渇水が起こった場合には、ダムは枯渇し、当然水不足の状態が発生することになる。この場合、河川水利秩序の原則では、新規利水は既得利水に影響を及ぼさないこととされているが、だからといって、新規利水者（えてして都市用水）の取水をストップするわけにもいかないであろう。既得利水者と新規利水者で乏しい流量を配分しなければならなくなり、水利調整が重要な問題となってくる。しかも、一部の地域では増大する水需要に水資源開発が追いつかず、ダムなどの水利施設が近い将来に建設されることを見越して、暫定的に渇水

流量を超して水取水がなされている。これは不安定取水と呼ばれ、河川流量が豊富なときには取水できるが、流況が悪化すると取水が困難となる性格のものである。1983年時点での不安定取水量は日本の都市用水取水量の何と約1割を占めている³⁾。

以上のように、河川にダムなどの利水施設が新たにつくられると、渇水被害がなくなるとまではいかなくとも少なくとも軽減されるように錯覚しがちであるが、ダム建設は新規の水利権が発生することを意味するので、一般に利水上の安全度は下がり、異常渇水により水不足が生じたときの被害は増大することになるのである。

5.2 地下水の利用

地下水は、地下の水を通しやすい地層（帯水層）中に存在する水で、表1に示したように地下水は地球上で海水、氷に次いで多い水で、最も手近かに利用できる淡水としては量的にいえば最大である。地下水は、その場で容易にしかも安価に利用できる利点の他に、一般に水質が河川水に比べ優れていること、水温が一年中ほぼ一定していることなどの長所がある。

日本でも地下水は古くから井戸水として生活用水に多く使われてきた。その後農業用水にも利用範囲が拡大し、さらに昭和30年代に入ると産業の発展に伴って工業用水への利用が急速に増加した⁷⁾。今や地下水の利用は、湧水の利用から浅層の地下水の利用、さらに技術の発展に伴い深層の地下水の利用へと拡大し、各種の用途に使用されている。1987年現在、各用途に使用される地下水の総量は年間139億 m^3 で、そのうち工業用水に最も多量に使用されており全使用量の38%、次いで生活用水と農業用水がそれぞれ27%ずつ、残り8%は冷却用水と雑用水として、主としてビルで使用されている³⁾。また、工業用水、生活用水、農業用水の地下水への依存率は、それぞれお

よそ34%、24%、6%となっている。

以上のように地下水の新規利用が急速に進み、地下水のかん養量を上回って過剰の地下水を汲み上げたため、これに伴い地下水が取水できなくなる揚水障害、地盤沈下、地下水の塩水化などの問題が生じている。さらに近年ではハイテク産業が排出するトリクロロエチレン、テトラクロロエチレン等の発ガン性物質による地下水汚染も問題化している³⁾。これらの地下水障害は一度生じると回復には非常に長期間を要したり、あるいは回復不可能となる性質のものである。

地盤沈下は昭和30年以降全国規模で発生している。今日では地下水の採取を規制する法律や条例などにより、かつてのような激しい地盤沈下はみられないものの、年間1cm以上沈下した地域は全国で25地域あり、筑後・佐賀平野などでは依然として年間4cm以上の地盤沈下が生じている³⁾。また近年、消雪用水として冬期に温度の高い地下水を汲み上げるために、日本海側の各地で地盤沈下が起きている。さらに、臨海部では地下水の過剰採取により、帯水層に海水が侵入して地下水の塩水化が生じ、多くの地域において飲用不適、工業用水の水質の悪化、農作物への被害等が生じている。

以上のような地下水障害対策として、法律や条例により地下水採取を規制し、取水を河川水、湖沼水などの他の水源へ転換を進める他に、近年、地下水を人工的にかん養保全する方法が注目されている。日本では既に多くの実施例があるが、その多くは、井戸から洪水時などの水を注入する方法である。最近では、雨水等を地下に浸透させる方法（透水性の舗装など）が積極的に取り入れられつつある³⁾。また、地下の帯水層中に止水壁を作り地下水位を高めるいわゆる地下ダムという新しいタイプのダムもモデル事業化されている^{3),12)}。これにより下流からの塩水等の浸入も防ぐ効果があるため、特に離島や海岸地域等

における新しい水資源開発手法として期待されている。

5.3 廃水の再生利用

都市用水として利用された水は、利用後はほとんどそのまま家庭や工場から汚水となって排水される。すなわちこのような都市域では利用水量とほとんど同量の汚水が豊富に得られることになる。よって汚水の水質さえ改善できれば、水資源の負担ははるかに軽減されることになる。しかもこれらの廃水は濁度の高い水質でなければ、海水に比べ再利用のためのコストは安価である。1988年度には、全国738の下水道終末処理場から年間約83億 m^3 の下水処理水が発生している³⁾。現在過半数の下水処理場では下水処理水の場内再利用を行っているし、処理水を工業用水、雑用水等の各種の用途に再利用している事例も増えている³⁾。また、新しくビルや学校、住宅団地等を建設する際に、上水道とは別の給水システムを設置し、水洗トイレ用水、ビルの冷却用水など飲用水ほどの高い水質を必要としない用途の水に、一度使った水もしくは雨の水を直接処理して再利用するいわゆる雑用水利用の設備も増えている。1987年8月現在全国の約840の施設で雑用水を利用して、このうち雨水利用の雑用水利用施設は86である³⁾。なお、廃水の再生利用は、河川や海域への汚水の排水を減少させ、水質汚濁の対策としても資するため、今後積極的に推し進めていくことが望まれよう。

5.4 海水の淡水化

海水は表1に示すように地球上の水の97.5%を占める程大量に存在し、しかも手近に得られる水である。これが何の問題もなく水資源として利用できれば、水資源開発の問題はほとんど解消してしまうであろう。しかし海水はそのままでは、火力発電所などの冷却用水として多量に使用されている以外にはほと

んど使われていない。それは言うまでもなく海水が平均して約35,000ppm (3.5%)もの塩分を含んでいるからである。よってこの塩分を何らかの方法で取り除いてやれば、海水は貴重な水資源に生まれ変わることになる。現在、塩分を取り除き海水を淡水化する技術は、既に何種類も開発されている。この場合の最大の問題は何と言ってもコストが高いこと、およびエネルギー消費の問題である。エネルギーの多消費は、最近特に問題となっている地球温暖化の原因となる大気中の二酸化炭素濃度の増加にもつながってくる。

ここで、海水淡水化をその原理別に分類列举すれば、①蒸発法、②冷凍法、③逆浸透法、④電気透析法、⑤透過気化法などが挙げられる^{3),15)}。蒸発法は、海水に熱を加えて蒸発させ、その発生した水蒸気を冷却して淡水を得る方法であり、良質の水が得られる一方エネルギーを多く消費しコスト高となる。冷凍法は、海水を凍結させると塩分を含まない水ができることを利用して、海水を凍らせた後、水を溶かして淡水を得る方法であり、凍結のためのエネルギーは蒸発エネルギーの6分の1～7分の1程度ですむ⁷⁾。水結のためのエネルギーとしては液化天然ガスの冷熱を有効利用しようとしている。逆浸透法は、水は通すが塩分は通さない特殊な半透膜の片側に海水を入れ、高い圧力をかけて淡水だけを透過させる方法であり、所要エネルギーがきわめて少なくすむ。膜の透過性や耐久性の問題が改良されれば、日本では将来有望な方法となるであろう。電気透析法は、陽イオン交換膜および陰イオン交換膜の間に海水をいれ、両膜の外側から直流電圧をかけ、海水中に溶存している塩素イオンとナトリウムイオンを除去して淡水を得る方法であり、塩分濃度が高い場合は所要エネルギーが大きく造水コストが高くなる。透過気化法は、水蒸気は通すが液体の水は通さない透過気化膜で容器を仕切り、その片側に海水を入れ、水蒸気のみを透

過させて淡水を得る方法であり、排熱が、十分に存在する地域では有効な方法であろう。

海水淡水化プラントは世界的にみると1988年1月現在設備容量は1,198万 m^3 /日で、その63%は水が少なくかつ石油のコストが非常に低い中東で占められている³⁾。その結果、エネルギー多消費型の蒸発法によるプラントが全体の70%を占めている。日本では海水淡水化プラントは、これまで主として離島の水源および工業用水等の一部として使用され、その合計の造水能力は1990年1月現在87,300 m^3 /日に達している³⁾。

現在水資源の不足に悩む福岡市においても、渇水対策の一つとして海水淡水化を本格的に検討している。方式は逆浸透法で、実現すれば造水能力は日量10万~20万トンで、最大で福岡市の給水能力の3分の1をまかなえることになっており、日本で初めての大規模な海水淡水化の試みとなるであろう。このように日本においても海水淡水化は現実的レベルで水資源開発の一つとして考慮され始めている。

5.5 水の運搬移動

まず、水の運搬移動による地域間融通として流況調整河川と広域利水について見てみよう。流況調整河川は、流況の異なる複数の河川を水路で連結させ、余剰流量のある河川から他の河川へ水を相互に融通するものであり現在かなり行われている。また、太平洋側と日本海側の河川の流況特性が異なることを利用して、日本海側に流入する河川の水を太平洋に導入しようとする構想もある⁷⁾。

広域利水について考えると、日本全体もしくは九州全体として水資源をみれば水資源の不足はないのである。ただ問題は、水の需要量の多い地域や時期に限り水資源が不足しているのである。つまり、例えば九州全体の水をネットワーク化し互いに融通可能とすれば水資源開発問題の大部分が解決するといっても過言ではない。しかし、広域利水は技術的

には可能であっても、現実問題としては日本では経済的・政治的理由等により、その実現は現時点では極めて難しいようである⁶⁾⁷⁾。可能なのはせいぜい同一経済圏域内の水の融通程度であろう。

上記以外の水の運搬としては、渇水時に船や列車などで水を運搬することが現実に行われている。また、年間を通じて雨量の非常に多い鹿児島県屋久島の河川水をタンカーに積んで、水資源の価値が非常に高いアラビア湾岸諸国に持って行き、帰りに水と交換に石油を積んでくるというアイデアもあった⁶⁾。世界では、極地方から巨大な淡水源である氷山を、水需給の逼迫した地域に輸送し融解して水資源として使おうとするアイデア等もある⁷⁾。

5.6 気象制御

気象制御による水資源の開発について見てみると、雲から人工的に降雨をもたらす人工降雨および降雨をもたらす対流性の雨雲を人工的に造り出すこと、さらにハリケーンなどの進路を変えようとする実験が主にアメリカで行なわれている⁶⁾⁷⁾。これらの基礎となる人工降雨の実験は、1946年アメリカでシェーファーとラングミュアによって行なわれ、過冷却した（零度以下になっても氷結しない状態の）高積雲にドライアイスが散布し、雲から人工的に雪を降らせることに成功したのが始まりとされている。その後アメリカやオーストラリア、カナダ等でドライアイスやヨウ化銀を用いた実験が繰り返され、日本でも1947年北九州地域でドライアイスが散布され、最初の人工降雨の実験が行われた⁶⁾⁷⁾。そしてその後も何度か同様の実験が行われ、ある程度の効果は認められてはいるものの、現在のところ積極的な水資源開発の手段として実施されてはいない。一方、アメリカでは1962年以降77年までスカイウォーター計画のもとで人工降雨の実験が続けられ、実用化に近い段階にまで達したとも言われている⁷⁾。ただ、これ

らの気象制御は人間生活などに大きく影響することが考えられるので、その実現に当たっては十分慎重に検討することが必要である。

5.7 蒸発抑制

蒸発の抑制について見てみると、特に乾燥地帯の国々にとっては、降水のかなりの部分が蒸発してしまうため、この損失を抑えることは水資源開発にとって非常に有効である。蒸発抑制の研究は現在のところ貯水池水面からの蒸発抑制に集中している。方法としては、貯水池の水面に化学物質を張って蒸発を防ぐ方法および表面水温を低下させることにより蒸発量を低下させる方法とが考えられている⁷⁾。表面水温を低下させる方法としては、水温の高い貯水池表面の水を垂直方向にかき混ぜて、水温の低い貯水池深部の水と混合することなどが考えられている。日本では、乾燥地帯に比べそれほど蒸発量が多くなく、蒸発量が水資源の開発の上で問題にされることはほとんどないので、蒸発抑制の実験も余り積極的には行われていない。

5.8 既得水利の合理化

最後に、農業用水等既得水利の合理化について述べると、今日、都市化地域では農耕地が減少し、その結果、農業用水の必要水量も減少する傾向にあり、農業用排水体系を合理的に再編成することによって生み出される余剰水を、都市の生活用水等に転用するいわゆる水利権の転用が可能となっている。都市側は、そのために必要な農業水利施設整備費を負担することになるが、その投資額判定に際し、水利権の潜在的な経済的価値が認識されつつある⁸⁾。すなわち、現行制度では水利権は単に公水の使用権であり、経済的価値は否定されているが、その水利権に経済的価値が付きつつあり、水利権のこれからの課題である。また、一般に農水の水利権は灌漑期だけであり、いくら灌漑期だけ都市用水量の使用権利

が増加しても、都市用水として年間を通じて安定して取水するためには、非灌漑期の使用水利量を何らかの方法で増加させなければならない。このため非灌漑期の水量をいかに増加させるかが農業用水の合理化に伴って問題となってきている⁷⁾。

6. むすび

水の需要は今後も増加が見込まれている。国土庁の全国総合水資源計画では、日本の水需要は、昭和62年の約894億 m^3 から平成12年(西暦2000年)においては年間1,056億 m^3 程度に増加すると推定されている。この年間約162億 m^3 の需要量の増加に加え、河川からの不安定取水の解消や地下水の表流水への転換などの量をあわせて約230億 m^3 もの新規の供給を行う必要があるとしている¹⁵⁾。

さて、ここ何十年、日本の水資源開発と言えばダム建設が主体であり、既に2,300余りのダムが稼働していて、これらのダムが水を集める面積は日本の国土の74%すなわち概ね全山地面積に達している¹²⁾。今後のダム建設は非常に効率が悪く費用は非常に高くつく。それにもましてダム建設に伴う水没の補償や自然破壊などの問題もあり、ダムによる水資源開発の時代は終りつつあり、そろそろダム建設以外の水資源開発を積極的に推し進める時期に来ているといえよう。これには、広域利水、廃水再利用、海水の淡水化等が有効な手段となってくるであろう。そしてこれからは、既存の利水施設の有効かつ合理的な運用管理が重要な課題となってくるであろう。本報では、水源から取水して水質等の浄化を行い、需要者まで水輸送を行う水供給システムについては取り上げなかったが、今後、特に水需給の逼迫している都市においては、水源の状況を把握しつつ既存の施設を相互に関連させ、総合的見地に立つ水資源管理システムを確立することが必要と考えられる。また、計画以上

の異常渇水が生じた場合の対策や水配分の調整なども差し迫った問題である。この場合の対策の一つとして、福岡市においては異常渇水時用の備蓄ダムの計画も進められている。

一般に、水の貴重さに対する認識は、日常生活や経済社会活動に影響が出る渇水時のみ関心が寄せられ、水道の栓をひねりさえすれば水が得られる平常時の生活状況においては、ほとんど念頭から離れてしまう宿命にある。しかし、水資源開発を高度に行うほど逆に水需給に対する弾力性が減少し、一旦水不足に陥ったときの被害は増大することを忘れてはならない。日常生活や都市活動の中で、水に依存する度合が従来にもまして高まっている現在、適正な社会活動・都市活動を維持していくためにも渇水に対する利水安全度を向上させなければならない。と同時に、まず、我々日本人の豊富で安価であるとの水に対する認識を改め、水は貴重でいわば有限な資源となっていることを理解しておく必要がある。このためにも、水需給の実態、将来の水資源の確保および保全策など水資源問題への国民の理解と関心を高めるため、日頃から啓発活動を積極的に推進する必要がある。そしてこれからの都市の発展のためにも節水型の都市づくりを目指す必要がある。

今後、都市での水資源問題の根底として、次の選択を迫られることになるであろう⁹⁾。すなわち、都市への人口流入を制限して水の需要量の増加を抑制し、水の賦存量に合わせて水需要の地方への分散化を図るのか、あるいは、都市への人口集中を是とし、水の供給を増大する都市の水需要に即応させていくのかの選択である。これらの選択には国民的コンセンサス（同意）が必要となるが、そのいずれを選択するにせよ水資源の問題は今後益々複雑困難となっていくであろう。

最後に、本報では余り言及しなかったが、水はその量のみならず質が非常に重要である。水利用は、それぞれの用途に応じた適正な水

質を前提としている。よって水質の悪化は、水資源の利用に制約を加えるので、その防止と改善は水資源保全上の非常に重要な課題である。河川・湖沼水の水質は、昭和40年代後半から50年代後半にかけて全般にかなり改善されたもののその後は頭打ち状態である⁹⁾。都市部の河川では水質が悪いままで推移しているものも多く、湖沼水域の一部では依然として富栄養化の進展がみられる。また、農村部において、家庭排水の影響等による河川・水路などの汚濁が問題となったり、山間部での開発により水質汚濁が河川上流部へも進行してきている。さらに、近年、トリクロロエチレン等やゴルフ場における薬剤による地下水汚染の問題が顕在化するなど、飲用水の安全性の確保も問題となっている。今後、経済社会活動の活発化、人口・産業の多極分散化などから水質問題の広域化が一層懸念されている¹⁵⁾。

参考文献

- 1) 高橋裕編： 水の話 I、II、III、技報堂出版、1982年
- 2) 土木工学大系編集委員会編： 土木工学大系24ケーススタディ水資源、昭和53年
- 3) 国土庁長官官房水資源部編： 平成2年度版日本の水資源(水資源白書)1990年
- 4) 国土庁水資源局編： 21世紀の水需要—地域経済社会の変化に備えて—、山海堂、昭和58年
- 5) 高橋裕： 日本の水資源、東京大学出版会、1963年
- 6) 谷村喜代司： 水資源の開発、山海堂、昭和57年
- 7) 中澤式仁： 水資源の話、日本経済新聞社、昭和49年
- 8) 河村明・上田年比古・神野健二： 福岡市旬降水量時系列の低水管理のための特性と模擬発生について、九州大学工学集報、第59巻、第6号、pp. 779~786, 昭和61年12月
- 9) 河村明・神野健二・上田年比古： 長期的パターン変動による利水安全性の変化、第31回水理講演会論文集、pp. 271~276, 1987年2月
- 10) 上田年比古・神野健二・河村明・高吉晋吾： 降水時系列が周期関数で表される場合の異常値検出について、九州大学工学集報、第55巻、第6号、pp. 585~591, 昭和57年12月
- 11) 河村明・上田年比古・神野健二： 降水時系列の長期的パターン変動の解析、土木学会論文集、第363/II-4, pp. 155~164, 1985年11月
- 12) 千賀裕太郎： 水資源のソフトサイエンス、鹿島出版会、1989年
- 13) 篠原謹爾： 河川工学、共立出版株式会社、昭和50年
- 14) 産業計画会議： 水資源をどうする、大成出版社、1971年
- 15) 国土庁長官官房水資源部編： 全国総合水資源計画、昭和62年