

「地球上の生命を育む水のすばらしさの 更なる認識と新たな発見を目指して」

科学技術・学術審議会 資源調査分科会報告書、文部科学省（平成 14 年）

国際基督教大学教養学部理学科教授 吉野 輝雄

第 1 章 水の性質と役割

（要旨）

「水が合わない」、「湯水のように使う」など、日本語には「水」を使った言葉も多く、我々日本人にとって、非常に身近な「水」であるが、その性質は、自然界の他の物質と比べて、特異なものであり、かつ、その性質故に、私たちの生活環境において重要な役割を果たしている。

例えば、自然界の物質の多くは、温度が上がるに従って、膨張して密度が小さくなるが、水の場合は、4℃で密度が最高になり、そこから温度が上がるにつれてだんだん密度が小さくなる。したがって、0℃の水が湖の表面に張っても、水の密度が一番大きいのは4℃であるため、密度の大きい4℃の水は底に沈んでいき、湖底では℃4のままで、湖の魚も凍って死ぬことはない。

また、水の比熱容量は他の物質よりも大きく、「温まりにくく冷めにくい」ことから、海辺や水辺では昼夜や季節の温度の差が小さくなるが、水の少ない内陸部では、昼夜や季節の温度差が非常に大きくなることとなる。

水は星の形成の過程で生まれ、更に、その水の中で生まれた生命は、水と深い関わりを持って生命を維持しており、水なしでは生きられない。それだけに、良好な水質が確保されていることは、生き物にとって非常に重要なことである。

2002 年 9 月に開催されたヨハネスブルグ・サミットにおいても、「水」は重要なテーマのひとつであり、実施計画の中で「安全な飲み水」にアクセスできない人の割合を 2015 年までに半減することが目標として掲げられることとなった。

また、地球上の水の総量は、14 億あると推計されているが、そのうち塩水が 97.5 パーセントを占めていることなどにより、全体のわずか約 0.01 パーセントが淡水の液体の水として、湖沼、河川などの形で我々の周りにあるにすぎない。それを利用しながら人間の生活が営まれており、また、生き物の生命が維持されている。

地球上では、毎年 40 兆トンの海水が、太陽を熱源として、淡水化されて陸地に運ばれ、また、陸からは、75 兆トンの水が蒸発して雲となってもう一度雨や雪として降ってくる。その過程で、陸地の汚れた水も、一たん水蒸気となることできれいになる。また、大気中にある汚れを溶かして降ってくるため、大気を浄化する機能もある。

近年、地球全体の気象が大きく変化しつつあると報告されているが、それは水の移動と深くかかわっており、その対策の検討のためには、地球上の水循環の解明が必要である。また、水を使って作ることができる農産物や工業製品の量を増やす技術や節水のための技術など水に関する科学技術の振興が重要となってくる。

また、このままの人口増加、都市化などの傾向が続けば、水不足の状態におかれる

と予測される世界の人口の割合は、2025 年には、約 3 分の 2 になるという推計もあり、水不足、水質汚染、洪水などの世界の水問題に適切に対応していくには、水に関する技術支援や水問題解決のための科学技術の調査・研究を進めていくことが必要である。

日本の水資源について見ると、日本は地理的には、非常に水に恵まれており、国土が狭く資源の少ない我が国においては、この水を上手に活用していくための科学技術の振興が望まれる。もっとも、人口一人当たりの降水量で見れば、日本は、世界平均の約 4 分の 1 程度となる。内閣府の「水に関する世論調査」の結果を見ると、「水と関わる豊かな暮らし」として「洪水の心配のない安全な暮らし」を挙げた者は 34.5 パーセントあり、「身近に潤いとやすらぎを与えてくれる水辺がある暮らし」を挙げた者とほぼ同じ比率となっている。日本各地に存在する龍神伝説が暗示するように、流れが急でしばしば氾濫する川などの人間が制御しえない水は、古来より日本人にとって畏れの対象であり、社会が近代化し治水が進展した現代においてもなお、水は制御の難しい恐ろしい存在という面を残しているものと考えられる。実際、治水施設の整備を求める声は多い。

また、世論調査の結果を見る限り、世界の水問題についての国民一般の関心は十分に高いが、一方では、水を「豊富に使っている」者の割合が約 3 割を占めており、水問題について危機意識の方は高いとは言い難い。

しかし、目前に迫った世界的な水に関する危機に対応するためには、まず、国民に対して、水に親しむ機会や水に関する科学的知識を学習する機会を提供して、国民の水に関する意識の向上を図ることが必要である。その上で、水問題解決のための科学技術の振興や技術協力などを推進して、循環型社会の構築を目指すべきである。

----- 本論 -----

第 1 章 水の性質と役割

日本人にとって、「水」は非常に身近な存在であり、それは日本語の様々な表現にも見られる。

例えば、「水」は、その土地の風土・気候の象徴のようなものであり、広辞苑によれば、「水が合わない」とは、「その土地の風土・気候が自分に合わない」ことを指し、逆に「水に慣れる」とは、「新しい土地や環境になれる」ことを指す。

また、「水」は、汚れたものを清めてくれる存在であり、私たちは、多少もめ事があっても、最後は、「水に流」し、「とやかく言わず、すべてなかったこと」にしがちである。

更に、「水」は、どこにでもたくさんあるものと考えられており、「湯水のように使う」とは、「金銭を惜しげもなくむやみに費やすことの形容」である。

内閣府が平成 13 年 7 月に実施した「水に関する世論調査」によれば、普段の生活で節水している者の割合は、64.9 パーセントであり、昭和 61 年 8 月の調査の 51.2 パーセントと比較して大きく伸びてはいるが、まだ、「豊富に使っている」者の割合が 29.6 パーセントと約 3 割を占めており、「湯水のように」使うという感覚がまだ残

っているように思われる。日本は海に囲まれ、梅雨、台風と大雨に悩まされる時が毎年来る。しかも、水道栓をひねればすぐに水が出てくる。最近の近代的なビルや駅では手をかざすと自動的に水が出てくる。夏に水不足が叫ばれることがあるものの、このような状況の中で生活している日本人には水危機が身近に迫っていることを理解している人が少ないのは当然なのかも知れない。さらに、本報告書のまえがきが述べているように、21 世紀には世界的な規模の水危機に直面することが国連からも警告されている。世界人口の増加、グローバル化が進む今世紀においてそれは日本の水に関わる生活、活動にも大きな影響を及ぼすことは明白である。今こそ水の重要性を根本から考え直す時にあると思われる。

「水」はあまりにも身近な存在であるが、その性質は、自然界の他の物質と比べて、特異なものであり、かつ、その性質故に、私たちの生活環境において重要な役割を果たしている。そこでまず、その水の性質と役割についてみてみよう。

1 水の性質

1-1 湖が凍っても湖の魚が凍らないのはなぜ？

長野や東北地方の山間部の湖では、毎年冬になると湖が凍結し、その氷の上でわかさぎ釣りを楽しむ人たちが賑わっている。しかし、なぜ湖は表面しか凍らないのだろうか？また、なぜ湖のわかさぎは凍ってしまわないのだろうか？

このことを水の性質から解き明かしてみよう。

氷が水に浮くことを不思議に思う人は、あまりいないと思うが、これを自然科学的に見ると実は非常に不思議なことであり、水以外に同じ体積で比較した時に固体が液体より軽い例は非常にまれである。

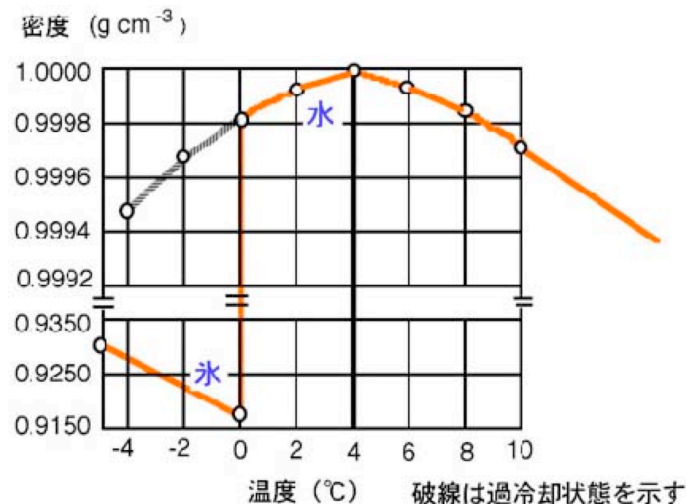


図1 水の密度の温度変化

水の密度が温度によってどう変わるかを示したグラフが図1であるが、自然界にある物質としてこんな不思議な変化を示すものは他にない。すなわち、自然界の物質の多くは、温度が上がるに従って、膨張して密度が小さくなるが、水の場合は、4℃（厳密には 3.98℃）で密度が最大になり、そこから温度が上がるにつれて密度がだんだん小さくなる。そして、100℃を超えれば、気体の水蒸気に変化するのである。

一方、4℃から温度が下がって0℃に近づくとともに密度がだんだん小さくなり、固体の水の密度は更に一段と小さくなる。

これは、4℃以上では通常の液体と同じように、温度がどんどん上がれば膨張する一方、0℃以下では、氷はダイヤモンドのような形の結晶構造をつくるため、液体の水よりもかえって分子間のすき間が大きくなるためである（図2）。



図2 氷のダイヤモンド様結晶構造

一つの水分子の周りに幾つの水分子があるかと数えると、氷の場合には4個であるが、水の場合はおおよそ4.4個で密度は水よりも大きい。氷と水の密度比はおおむね10対11になっている。このように氷は水よりも密度が小さいために氷は水に浮くのである。

「氷山の一角」という言葉があるが、氷山はおおよそ10分の1だけ海面に頭を出し、ほとんどは海中に沈んでいる。

不思議なのは0℃から4℃までの間であり、この状態の水には氷の構造が含まれているため、0℃に近づけば近づくほど、その割合が多くなるので密度が小さくなると説明されている。

なお、これらは1気圧の下での変化であり、仮に、温度が374℃以上となり、かつ、圧力が218気圧を超えると、液体の水と気体の水蒸気は互いに区別ができなくなる。これが超臨界水である。この超臨界水の中では、通常の圧力と温度の条件下とは異なった化学反応が起こることが知られており、現在、その研究が進められている（第4章の2参照）。

以上のような水の特異な性質が、自然界において生命の生存に大きく係わっている。

冬に凍結する湖の例で言えば、もしも、水が通常物質のように固体の密度が大きく、固体が液体に沈むとすると、湖の水の温度はどこも0℃になって凍ってしまい、魚も生きていられない。さらに春になっても、太陽光が湖底まで届かず、冷たい水のままとなるであろう。

ところが、実際は、湖面が氷点以下に冷やされると湖の表面に氷が張る。しかし、水の密度が一番大きいのは4℃であるため、冷却の過程で4℃になった水は湖底に沈み、氷結中の表面と湖底の間の水温は密度の差によって0～4℃となる（この状態を逆列成層という）ので魚は凍って死ぬことがない。

以上のことを湖水の温度が四季を通じてどのように変化するかをもう少し詳しく見てみよう（図3）。

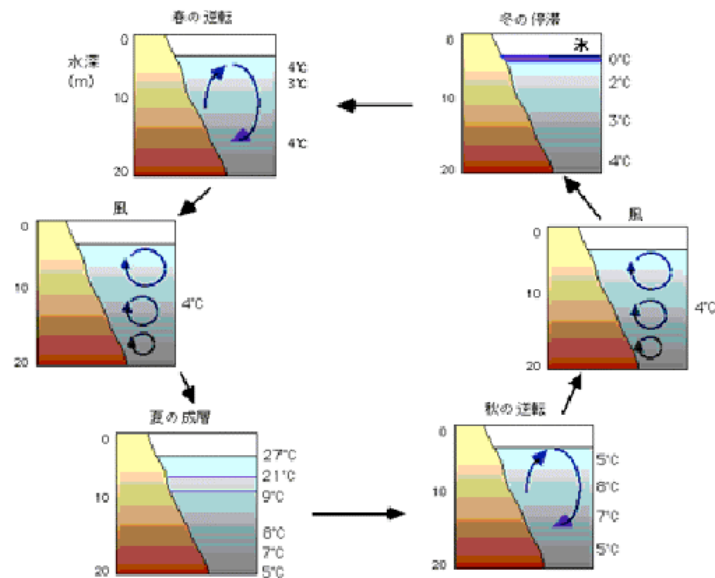


図3 四季による湖水の温度変化

水深の深い湖では、冬に湖の表面が0℃に冷やされて氷が張っていても湖底付近は4℃の水の塊である。

春になると氷が溶けて、だんだん温度が上がっていく。例えば、温度分布が表面は4℃、湖底は4℃、その間は0～4℃となり密度的に不安定な状態になり水の対流が起こる。風が吹けばさらに拡散するため、湖水がかき混ぜられることになる。

夏になると、表面が暖かく湖底は冷たい水になり、密度的には安定な状態になるが（この状態を成層するという）、秋になると、表面温度が下がるため垂直方向の温度分布が変わり、水の対流が起こる。このように春と秋の両方の季節に、湖の表面から酸素が湖底に供給されることで、生物が棲むのにふさわしい環境が湖に整えられていく。

1-2 京都の夏はなぜ暑い？

夏の京都と言えば、祇園祭や大文字焼きが有名である。毎年大勢の観光客であふれているが、京都の夏は暑く、そして冬の寒さは厳しい。京都の8月の平均気温は、ほぼ同じ緯度にある千葉県銚子よりも2.9℃も高い。一方、京都の1月の平均気温は、銚子よりも1.7℃低い。しかし、なぜこんなに差が出るのか？

ここでも水の性質が関係している。

水は、その密度のほかに、比熱容量、すなわち物質1の温度を1℃上げるのに必要な熱量にも特徴があり、水の比熱容量は、他の物質より非常に大きい。

例えば、水の比熱容量 $4,182 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ は、エタノールの比熱容量 $2,418 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ の約1.7倍であり、鉄の比熱容量 $452 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ の約9倍である。

よく「水は温まりにくく冷めにくい」と言われるが、これは、水の比熱容量が大きいから、温めるのには大きな熱量が必要となる一方で、いったん温まると熱量がある程度貯えられることによる。

この大きな水の比熱容量を利用して、水（又は不凍液の水溶液）でエンジンを冷やしているのが水冷エンジンである。

人の体温が、暑い夏でも急上昇することはないし、運動してもすぐに上がらないのは、体の中の60パーセント以上が水であるためである。

また、水の気化熱は、 $2,257 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ と、エタノールの $838 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ の約3倍近く

あり、人が汗をかいて、汗が蒸発するときこの大きな気化熱を奪うので、人の体温が調節されるのである。

一方、氷が溶ける際 $334 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ という大きな融解熱を周りから奪い、逆に、氷が凍る際に同じ量の凝固熱を放出する。氷を水に入れると氷が冷えるのは、氷が溶ける際に融解熱を奪うからである。この値は同量の水の比熱容量の 80 倍に相当する。また、春先に夜間お茶畑に水をまくことがあるが、これは、お茶について氷が凍る際に出す凝固熱により、お茶の新芽を 0 前後に保ち、霜の害を受けることを防いでいるのである。

水がこのように「温まりにくく冷めにくい」ことや、気化熱、融解熱（凝固熱）が大きいのは、その分子の特徴によると考えられている。水分子は、マイナスの電荷を持つ酸素原子が、プラスの電荷を持つ水素原子 2 つと結合してできているが、水素原子と酸素原子の 2 つの結合は、直線ではなく、酸素原子を中心に、 $104^{\circ}30'$ の角度を作っているため、酸素原子側はマイナスの電荷を、水素原子側はプラスの電荷を帯びた極性分子となっている。このため、水分子同士は、特定の方向に並んだときに、強い分子間力で結びつく。これが水素結合と呼ばれるものであり、水がこの水素結合により強く結びついていることが、容量や気化熱などが他の物質よりも大きいなどといった水の特性につながっている。

このように水が「温まりにくく冷めにくい」ことから、水が大量に存在する地域、すなわち、海辺や水辺では昼夜の温度の差が小さくなるが、水の少ない内陸部、とりわけ砂漠地帯では、昼夜の温度差が非常に大きくなることとなる。

また、千葉県銚子のような三方を海に囲まれた土地では、海にある大量の水が、気温の変化を和らげてくれるため、冬と夏の寒暖差も比較的小さくなる。

しかし、京都のような海のない内陸の盆地では、夏は陸地が太陽熱で温まる一方で、海などに熱が逃げないためにとても暑くなり、また、冬には陸地は冷える一方で海からの熱の供給がないため寒くなることとなる。

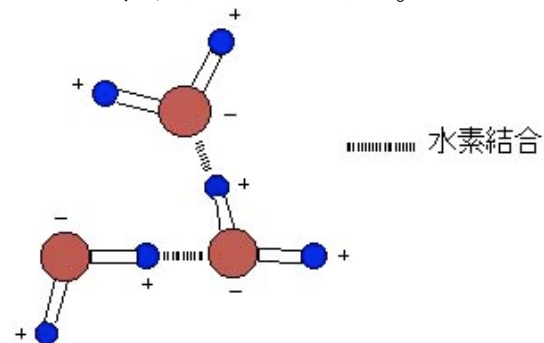


図 4 水素結合（水分子間を結ぶ引力）

水素原子の 2 つの結合は、直線ではなく、酸素原子を中心に、 $104^{\circ}30'$ の角度を作っているため、酸素原子側はマイナスの電荷を、水素原子側はプラスの電荷を帯びた極性分子となっている。このため、水分子同士は、特定の方向に並んだときに、強い分子間力で結びつく。これが水素結合と呼ばれるものであり、水がこの水素結合により強く結びついていることが、容量や気化熱などが他の物質よりも大きいなどといった水の特性につながっている。

このように水が「温まりにくく冷めにくい」ことから、水が大量に存在する地域、すなわち、海辺や水辺では昼夜の温度の差が小さくなるが、水の少ない内陸部、とりわけ砂漠地帯では、昼夜の温度差が非常に大きくなることとなる。

また、千葉県の銚子のような三方を海に囲まれた土地では、海にある大量の水が、気温の変化を和らげてくれるため、冬と夏の寒暖差も比較的小さくなる。

しかし、京都のような海のない内陸の盆地では、夏は陸地が太陽熱で温まる一方で、海などに熱が逃げないためにとても暑くなり、また、冬には陸地は冷える一方で海からの熱の供給がないため寒くなることとなる。

1-3 地球に海があるのはなぜ？

太陽系には、8つの惑星があるが、水が液体の状態が存在して海を形成しているのは、地球だけである。これはなぜだろうか？

宇宙で一番多い元素は水素で全体の質量の約7割を占め、次いでヘリウムがおよそ3割近くあると推計されている。宇宙創成のメカニズムは未だ解明されていないが、約150億年前に超高温のビッグバンによって全ての物質の単位である陽子、電子、中性子をはじめとする素粒子が創成されたという仮説が有力とされてる。陽子は水素原子核であり、数千万度の超高温状態で2個の陽子と中性子が核融合してヘリウム原子核が作られ、更に質量数の大きな元素が生成していったと考えられている。さらに数億度の状態となってヘリウム原子核が核融合して炭素、酸素などの元素が作られ、最終的に、最も質量数の大きなウランウムまで92個のすべての元素ができたと言われている。実は、この過程は星の進化過程と同じであって、今も恒星の中では元素の生成反応が行われている。そうやってできた酸素原子が水素原子と出会い、低温となって電子が結合して安定な物質であるすなわち水分子になったと考えられている。

水分子は宇宙に分散して存在しているが、液体として存在できるのは温度が0℃から100℃の間にある狭い範囲に限られる。宇宙の平均気温は3Kつまりマイナス270℃であるため、宇宙空間では、水は液体では存在しえない。

一方、地球の平均気温は15℃前後に保たれている。寒いときにはマイナス30℃からマイナス40℃になるし、高い時には50℃から60℃になるが、それでも宇宙的な視野からすると非常に狭い範囲の温度に保たれている。



水の惑星：地球

太陽系惑星と表面温度

水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
330	200	15	-50	-130	-150	-190	-200

これは、まず、太陽から地球までの距離が、地球が凍り付いてしまうほど遠くはなく、かつ、地球が暑くなり過ぎるほど近くないことが大きい。例えば、太陽に近い水星、金星では、太陽熱のために表面温度が200℃以上で、水はすべて水蒸気になっている。一方、地球のすぐ外側の火星では表面温度が50℃といった低温のために水は完全に氷結している。また、このことに加え、地球の大気の中に水蒸気と二酸化炭素があり、水と二酸化炭素の分子が太陽からの光を吸収しないで素通りさせる一方、地球からの赤外線を吸収してエネルギーを放射するため、この温室効果により、太陽からの放射と地球からの放射のバランスがとれていると考えられている。もし、大気中の水蒸気と二酸化炭素がなければ地球の気温は、255Kつまりマイナス18℃ぐらいになるところを、15℃前後に保たれているのである。

このように、地球の気温が0℃から100℃の間にあるため、地球上には液体の水が海を形成でき、水が大きな気化熱、比熱容量をもつために温度差が小さいのである。

なお、月は、太陽からの距離が地球とほぼ同じであるにもかかわらず、月には水がない。これは、月の引力が地球の6分の1であり、水分子を引力圏内にとどめることができず、宇宙空間に逃げていってしまったからであると考えられている。水のない月では、昼間は110℃、夜間は180℃と大きな温度差がある。

1-4 植物はなぜ地中から水を吸えるのか？

植物は、地中から栄養分を水とともに吸収し、幹、茎、葉の隅々まで行き渡らせ生命活動を支えながら、最後は気孔から大気中に蒸散していく。草木は比熱容量の大きな水を多量に含む太陽熱で過熱されて枯れることがなく、また、蒸散に伴う気化熱により温度上昇も防いでいる。

植物中の水移動には表面張力という水の特異な性質が関係している。

液体の分子は互いに引き合っているが、液体の表面では分子は内向きの力を受ける一方、液体の内部では分子が周辺の分子から受ける力が均衡しているため、結果的に液体は表面積の小さな形つまり球になろうとする。この力が表面張力である。表面張力は、分子間力が大きいほど大きい。例えば、水の表面張力が $72.75 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ であるのに対してエタノールは $22.39 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ で、3倍以上の値となっている。

表面張力の大きな液体は大きな球をつくるという性質につながるが、それだけでなく他の固体表面と接触する場合に固体分子と分子間力が大きければよく濡らし、その隙間にしみ込んでいく。水吸収力の大きな紙、タオル、おむつなどの材料を選ぶ時に重要となる。一方、ビニールやテフロン加工した容器や撥水处理した衣類にはしみ込まず、水だけが球状に集まろうとする。さらに、表面張力の大きな液体は毛細管の固体表面をぬらす関係にあるので縦方向であれば上昇し、横方向であればどこまでも拡散して行こうとする性質をもつ。

このようにして表面張力により、植物は、土壤中の水に溶けた栄養分を細い根管から吸い上げ、さらに、導管と呼ばれる毛細管で高い茎の先や葉にまで吸い上げ、高い樹木として育つことができる。それは水の中に溶けた栄養分を毛細管を通じて運ぶプロセスであるとともに、酸素を吸収し、植物としての生命を維持するプロセスでもある。

動物の場合には、血管などの毛細管によって体の隅々まで血液、体液を通して、栄養分と酸素が運ばれていくことになる。

1-5 生き物はなぜ水を飲むのか？

生き物は、水無しでは生きていけない。人は、1日におよそ2.5リットルの水を摂取しており、体内の水分の1パーセントが失われただけでも、のどの渴きを覚えると言われている。

また、人の体の60パーセント以上は水であり、特に赤ん坊や若者は水分の割合が高く、皮膚だけでなく体全体の細胞の活動が活発であることを示している。

「水の滴るような」と言えば、「美男美女のつやつやとして色気のあるさま」を指すが、「水」は生命力の象徴と見られているのはそのためである。

生き物が水無しでは生きていけないのは、水が生命の誕生や生命の活動そのものと深く関わっていることによると考えられる。

まず、生命の誕生については諸説があるが、地球上の生命が、原始地球上の海で誕生し、海の中で進化して、やがて陸に上がっていったことについては、あまり異論はない。

初めに海中に誕生したバクテリアなどの原始生物は、ブドウ糖を栄養源として使い、

発酵により、エネルギー運搬体(ATP：アデノシン三リン酸)とアルコールを作っていたと考えられている。

一方、緑色植物は太陽エネルギーを使って水と二酸化炭素()からブドウ糖と酸素をつくるシステムを造り上げた。これが光合成である。

その後、バクテリアも植物も動物も、こうして生産された酸素を使って、体内のブドウ糖などの有機化合物から、より多くのエネルギー運搬体(ATP)をつくるシステムを造りあげた。これが呼吸である。この呼吸の後には、いわば「燃えかす」として二酸化炭素と水が残る。

水は、非常に安定した物質であり、ここから物質やエネルギーを取り出すことは非常に難しい。例えば、水から水素を取り出すには、エネルギーを加えて、電気分解をする必要がある。

しかし、緑色植物は、この「燃えかす」として残った水と二酸化炭素を、太陽エネルギーを利用して、ブドウ糖などの有機化合物と酸素に還元している。

このように、水の中で誕生した生命は、水と関係が深い「呼吸」と「光合成」というメカニズムを造り上げていったわけである。

また、水は、非常に多くのものを溶かすことができるという特性のため、生き物の体内では水に溶けた様々な物質を用いて、「代謝」と呼ばれる生体化学反応によって、生命活動に必要なエネルギーや各種の物質を作り出し、不用になった物質を分解している。この「代謝」は、水という溶媒の中で行われているとともに、その生体化学反応の触媒として作用する酵素タンパク質もまた、水に囲まれた柔軟な立体構造を保っているためにその機能を発揮することができる。

一般には水に溶けないと言われているような物質ですら、若干は水に溶けてあらゆるところに運ばれていく。自然界にすむ動物や植物は、水溶性の無機化合物と、酵素を用い、水を媒体として有機化合物を合成し生命を維持しているのである。最近では、水を溶媒として有機化合物の合成をする研究も進んでいる（第4章の3参照）。

また、人は1日に最低2.5リットルの水を必要とするが、実際には、人が1日の活動を維持するためにはその約10倍の水が必要だと言われている。その差をどうしているかということ、体内でリサイクルされている。腎臓でろ過された水が、また体内を循環しているのである。

このように、海水の中で生まれた生命は、水と深い関わりを持って生命を維持しており、水無しでは生きられない存在となっている。

それだけに、良好な水質が確保されていることは、生き物にとって非常に重要なことである。

我が国の河川や湖沼は、かつてはかなり水質が悪化していたが、水質の法的規制や下水道の普及、水処理技術の発達などにより、その水質は次第に改善されてきた。今後は、更に、環境への負荷のより少ない水処理技術が研究されている（第4章の1参照）。

また、現在、新たに環境ホルモンが問題となっており、水質の保全のために、水源地域における汚染の発生源対策の必要性が叫ばれている（第3章の1参照）。

2002年9月に開催されたヨハネスブルグ・サミットにおいても、「水」は重要なテーマの一つであり、実施計画の中で「安全な飲み水」にアクセスできない人の割合を2015年までに半減することが目標として掲げられることとなった。

2 水の役割

これまではどちらかというとミクロな目で、あるいは水の物理的な、あるいは化学的な性質との関係で、水の機能を考えてきたが、マクロな目で地球上の水の役割についてみてみよう。

2-1 地球上の水の役割

地球上の水の総量は、およそ 14 億、すなわち約 140 京トンであると推計されている。しかし、その内訳は、塩水が約 97.5 パーセントを占め、淡水はたった約 2.5 パーセントである。しかも、その大部分は極地の氷で、残りの淡水のほとんどは地下水である。したがって、全体のわずか約 0.014 パーセントの量が淡水の液体の水として、湖沼、河川などの形で我々の周りにあるにすぎない(World Resources 1988-89, World Resource Institute)。それを利用しながら人間の生活が営まれており、また、生き物の生命が維持されている。

さて、地球上の水は、太陽の熱で蒸発し、上空で雲となり、更に、雨や雪となって再び地上に降りてくる。このように地球誕生以来、液体、気体である水蒸気、固体の雪や氷と状態変化をしながら地球上を移動している。これを水の大循環という(図 5)。

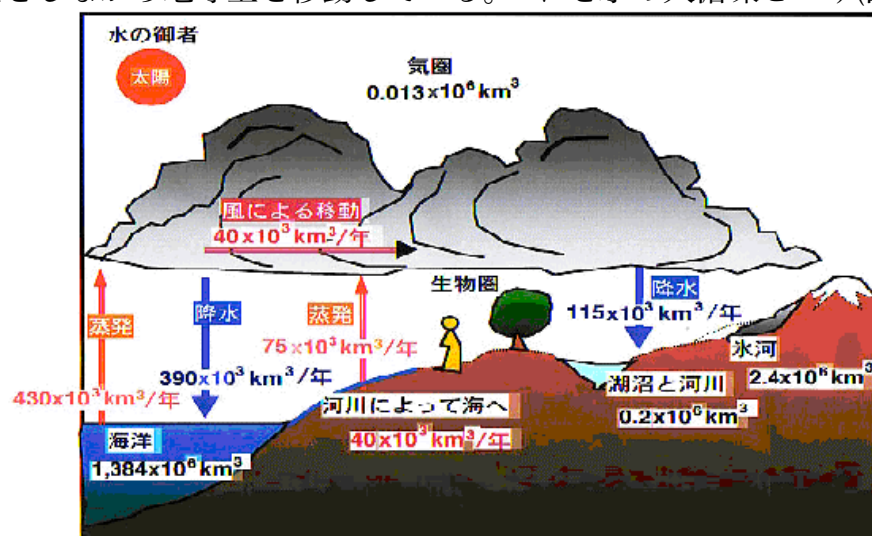


図 5 水の大循環

この事が地球を特異な星としており、絶えず変化する地球の気候を支配し、人間を含む全ての動植物の中を出入りしながら生存を支え、人間の生活、農業、工業といった活動と不可分の関係にある。

まず、水の大循環を数量的に見てみよう。海からの蒸発量は、毎年約 430 兆トン、海への降水量は約 390 兆トンと推計されており、その差 40 兆トンは、海から蒸発した水が陸に運ばれてくる量である。それが降雨などとして陸地に降り、河川や地下水を通してまた海に戻っているわけである。

単純に言えば、地球上の水は、塩水が 97.5 パーセントと大部分を占めているが、太陽熱により海から蒸発した水のうち毎年 40 兆トンが淡水化されて陸地に運ばれていく。40 兆トンの水が陸地に降った後、陸地の気象、生命活動をはじめとするあらゆる自然活動を支え、と同時に水資源として人間活動に利用されながら海へと戻ってゆくのである。

水の大循環には、つぎのような機能もある。山地に降った雨が流れ落ちる落差が水力発電によるエネルギー資源となる。また、陸から蒸発し雲となった水（推計 75 兆

トン) は、もう一度雨や雪として降ってくる。すなわち、陸地にたまっていた水が仮に汚れたとしても、それを一たん水蒸気としてきれいにし、もとに戻してくれる機能である。大気中にある汚れを溶かしながら降ることで、大気を浄化する機能もある。

2-2 世界の水資源

近年、地球環境問題が注目を集めているが、その中でも、水については、近い将来世界的な規模で水の危機が発生することが懸念されている。

その世界の水資源がどうなっているのか概観してみよう(第2章参照)。

地球上の水の中でも、雨や雪として陸地に降った水が、河川や地下水を経由して海に戻っていく途中の淡水がいわゆる水資源となる。このほかに地下に長期間にわたって蓄積された地下水である「化石水」があるが、これは再生可能な水資源ではない。

世界的には、陸地に降る水の年間総量は約 115 兆トンあるが、水蒸気として蒸発するため、地上に残るのは約 40 兆トンと推計されている。しかも、この約 40 兆トンの水資源は、熱帯雨林と砂漠の例に見られるように地域的に偏っていたり、夏の台風や冬の降雪など時間的に不均等に存在したりするため、すべての水資源を利用できるわけではない。水資源を利用するには、それらを貯えなくてはならないし、また、水質の低下により利用が困難なものもあり、実際には、約 3.8 兆トンの水しか取水されていない。その内訳は、農業用水として約 7 割、工業用水として約 2 割、生活用水として約 1 割である。

農業生産には水は不可欠であるが、工業製品を作る際にも水が必要であり、工業化が進むと農業用水は減少するが、工業用水の需要が伸びるし、所得が増加すれば、水洗トイレなど生活用水の需要も増加することとなる。

また、水を使いながら物を生産し、消費する人間の様々な活動が、水質を低下させ、環境に負荷を与えている。

現在の世界人口は、約 60 億人であるから、約 3.8 兆トンの水を使って、約 60 億人が生活しているという計算になる。このままのペースで人口が増え続けていくと仮定すると、2025 年にはおよそ 80 億人に、更に 2050 年ぐらいには世界の人口は 100 億人近くになると予想されている上に、仮に、みんなが肉からたんぱく質を摂取するようになると今まで以上に穀物を消費することになる。それに向けて食料を増産する方法のひとつに、かんがい農業の拡大があるが、そのためには多額の投資が必要であるし、また、農地の拡大には物理的な限界があり、簡単にはいかない。

1997 年の国際連合の事務総長の報告書である「世界の淡水資源についての総括的アセスメント」では、このままの傾向が続けば、水不足の状態におかれると予測される人口の割合は、2025 年には、約 3 分の 2 になると報告されている。

また、第 2 回世界水フォーラムで公表された「世界水ビジョン」でも 2025 年ぐらいに深刻な水不足が来ると警告されているが、それは全体的な話であり、個別に見れば、それ以前に、深刻な水不足に苦しむ地域が多数出てくると考えられる。

水の場合は、運搬にコストがかかりすぎるため、食料と異なり、ミネラル・ウォーターなどの一部の高価な飲料水を除いては、輸出入はあまり行われていない。とにかく需要の限界が間近にきていることだけは、厳然たる事実である。

水は、人間の活動に使われると同時に自然の動植物の命を育み、また、人々に水辺での心のやすらぎを提供してくれる(第3章の2参照)。

近年、地球全体の気象が大きく変化しつつあることが報告されているが、それは水

が湖に静かにたたずみ、見ていてもゆったりと河川を流れている時とは打って代わり、人間の力を大きく超える力で奔走する事がある。まさに自然への畏怖を覚える時である。水はそのような両面を持ち合わせた存在として近年、物理学の「カオス理論」研究の対象ともなっている。それは異常気象の原因を解明することにもつながり、21世紀の大きな研究課題の一つであると言ってよいだろう。地球上の水の大循環の解明もそれと表裏一体の課題である。また、水を使って作ることができる農産物や工業製品の量を増やす技術、つまり水の生産性を上げる技術や節水のための技術など水に関する科学技術の振興が重要となってくる。

ちなみに、内閣府の「水に関する世論調査」によれば、世界各地で発生している水問題について、「安全な飲料水が十分に確保できないこと」を挙げた者が 58.6 パーセント、「水質汚染」を挙げた者が 56.3 パーセント、「洪水被害」を挙げた者が 50.0 パーセントあり、そういった世界的な水問題の解決のために、日本は援助や協力を行う必要があるとする者の割合が 84.2 パーセント、そう回答した者に、日本はどのような援助や協力を行う必要があると思うか聞いたところ、「技術支援」を挙げた者の割合が 81.2 パーセント、「調査・研究」をあげた者が 49.6 パーセントなどとなっている。

世界の水問題に適切に対応していくには、この世論調査にも現れているように、水に関する技術支援や水問題解決のための科学技術の調査・研究を進めていくことが必要である。

2-3 日本の水資源

ふりかえって、日本の水資源の状況をみると、年間降水量がおよそ 1,718 あり、これは世界の平均降水量約 970 の約 2 倍である。このように、日本は、地理的には、非常に水に恵まれた緑の多い、文字通り「豊草原の瑞穂の国」である。国土が狭く資源の少ない我が国においては、比較的豊富に存在している水は貴重な資源であり、この水を上手に活用していくための科学技術の振興が望まれる。

もっとも、年間降水量自体は多いが、人口一人当たりの降水量で見れば、日本は、約 5,100 年・人と世界平均の 22,000 年・人の約 4 分の 1 程度となる（第 2 章の 2 参照）。

しかも、我が国は、地形が急峻で河川が短い上に、雨が梅雨や台風の時期に集中することなどから河川の流量の変動が大きく、森林を整備して水源をかん養するとともに、ため池やダムで水を一時貯留するなど、その地域に応じた様々な工夫により、水資源を利用しているのが実態である。森林保護は、自然保護と同時に水資源として今後とも重要課題と捉えていかねばならない。

我が国の水資源の利用状況を見ると、年間約 877 億トンの取水量のうち、農業用水が、3 分の 2 の約 579 億トン、次いで、生活用水が約 2 割の 164 億トン、工業用水が約 15 パーセントの約 135 億トンとなっている。また、近年の積雪量の減少や少雨化傾向により、資源として利用可能な水の量が減少しつつあると言われている。一方で、我が国の使用量は戦後の社会経済発展とともに増大し、とりわけ都市化の拡大に伴う増加率が著しい。水不足に対する国民の認識を深め、具体的な対策の推進が我が国においても急務と言える。

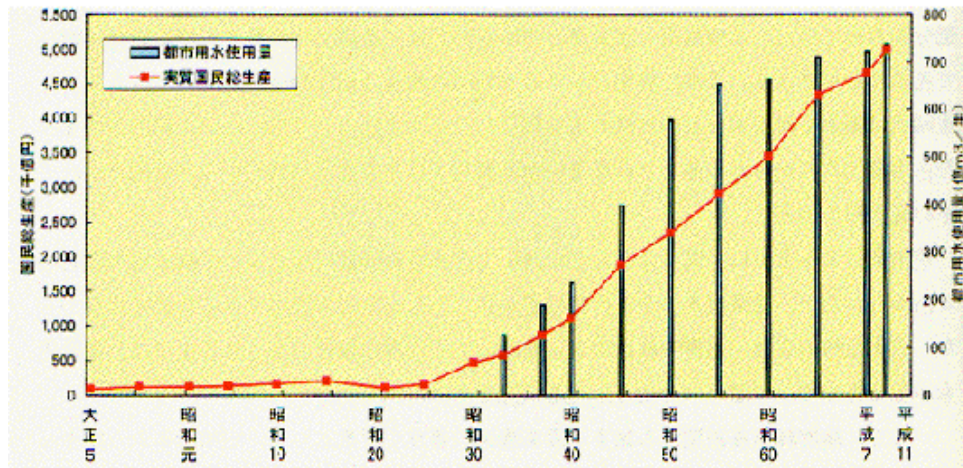


図6 国民総生産と都市用水使用量の経年変化

- (注) 1. 都市用水使用量は国土交通省水資源部の推計による取水量データベースの値であり、生活用水、工業用水の合計。
 2. 工業用水は回収水量を含む淡水使用量である。但し、公共事業において使用された水は含まない。
 3. 生活用水の昭和 40 年以降は国土交通省資源部調べ、昭和 33 年及び昭和 38 年は水道統計の配水量から工業用の配水量を差し引いたもの。

なお、車や電気製品などの工業製品を生産する過程でも水を利用している事を忘れてはならない。つまり、工業製品も農産物同様の一種の水産物であり、その輸出入は水の輸出入でもあるということである。このような水は「間接水」と呼ばれている。グローバルに密着した世界となるこれからの時代の水不足を議論する場合に、この「間接水」の視点が重要になるだろう（第 2 章の 1 参照）。

内閣府の「水に関する世論調査」によれば、喝水による断水・給水制限の経験のない者は、58.8 パーセントと喝水の経験がない者が過半数をしめている一方、喝水時でも安定的に水を供給するための対策については、現状よりも負担が増えても施設整備を進めるべきであると答えている者が 52.3 パーセントと、日本人が水を豊富に使える生活を望んでいることが見て取れる。

また、「水と関わる豊かな暮らし」として「身近に潤いとやすらぎを与えてくれる水辺がある暮らし」を挙げた者が 34.8 パーセントあり、かつ、河川などの水質や水辺の環境の改善については、「現状より負担が増えても、早急に進める」と答えた者の割合が 28.8 パーセント、「現状の負担で、現状どおり進める」と答えた者の割合が 47.1 パーセントとなっており、水質や水辺の環境の改善についてのニーズは高いようである。

一方、同じく「水と関わる豊かな暮らし」として「洪水の心配のない安全な暮らし」を挙げた者も 34.5 パーセントあり、「身近に潤いとやすらぎを与えてくれる水辺がある暮らし」を挙げた者とほぼ同じ比率となっている。日本各地に存在する龍神伝説が暗示するように、流れが急でしばしば氾濫する川などの人間が制御しえない水は、古来より日本人にとって畏れの対象であり、社会が近代化し治水が進展した現代においてもなお、水は制御の難しい恐ろしい存在という面を残しているものと考えられる。

実際、治水施設の整備については、「現状より負担が増えても、早急に進める」と

答えた者の割合が23.1パーセント、「現状の負担で、現状どおり進める」と答えた者の割合が50.1パーセントとなっており、治水施設の整備を求める声は多い。

更に、将来にわたって安全で安定的に水を利用していくために、国民自らが取り組むべきことについては、「水を汚さないよう生活排水に注意する」と答えた者の割合が76パーセントと最も高く、以下「水を無駄に使わない」、「川や湖の美化活動などに参加する」、「水源地域の森林を整備する活動に参加する」などの順になっている。

これを見ると、水問題についての国民一般の関心は十分に高いが、一方では、水が「豊富に使っている」者の割合が29.6パーセントと約3割を占めており、水問題について危機意識の方は高いとは言い難い。

しかし、目前に迫った世界的な水に関する危機に対応するためには、まず、国民に対して、水に親しむ機会や水に関する科学的知識を学習する機会を提供して、国民の水に関する意識の向上を図ることが必要である。21世紀は水の世紀と言われているが、まさに「水とのつきあい方」に人間の未来がかかっている事を今こそ深く認識する必要がある（第5章参照）。

ここで、簡単な計算問題を通して水と人間と自然とのつながりについて考えてみよう。

問題： コップ1杯の水(180 mL)中には水分子がアボガドロ数(18 mL当たり 6×10^{23} 個) $\times 10 = 6 \times 10^{24}$ 個含まれており、一方、地球上に存在する水の総量は上で述べたように $1,380 \times 10^6 \text{ km}^3$ とされている。それでは、コップ1杯分の水分子に何らかの印を付けて地球上に均一に分散し、改めて空のコップ1杯に水を満たして飲んだとしたら、一人の体の中には印のついた水分子が何個入ることになるか？

答え： 地球上の水の総量を単位に換算すると $1.38 \times 10^{24} \text{ mL}$ となるので、1mLあたりでは $6 \times 10^{24} / (1.38 \times 10^{24}) = 4.3$ 個印のついた水分子を含む。つまり、コップ1杯の水を飲むと $4.3 \times 180 = 774$ 個取り込むことになる。

この問題から何が考えられるか？地球上の水の総量は数十億年も前の昔から変わらず姿・形を変えながら自然界を循環している。海、川、大気中だけでなく人間を含めた全ての動物、植物についても同様である。大海の水の一部が自分の身体の一部とも言えるし、水は地球上のすべての動物、植物の共有物としてそれぞれの存在を支えている。もしも循環系のどこかが汚染されると汚染が自然界に広がっていく。この簡単な計算が、自分の生活を含めた人間活動の結果が水循環により自分に還って来るという事実に気づかせることになれば意味をもつことになるはずだ。

実際行動としては、水に関する環境学習などを通じ、水の大切さと同時に人間活動が環境の汚染につながっているということを認識し、どのように自然と共生し、水問題に対処していくのかということを真剣に考えていく必要がある。

その上で、水問題解決のための科学技術の振興や技術協力などを推進して、循環型社会の構築を目指すべきである。

なお、筆者は大学生に「水と人間」という主題の一般教育科目を毎年開講しており、その中で学生の水について様々な角度から話すと同時に、学生が日本市民の一人という立場から水と人間生活に関わる問題について調査・レポート・発表・討論の機会を設けている。水資源、水質汚染の問題に目が開かれ、人間の課題について真剣に考えた跡が読みとれる優れたレポートが多数寄せられて来る。それらの中で公開を了承し

てくれたレポートの一部を筆者のホームページ上に掲載しているので、ご参照頂きたい。<http://subsite.icu.ac.jp/people/yoshino/waterstage.html>

(参考文献)

- ライアル・ワトソン、「水の惑星」、河出書房新社、1988.
R. Wetzel, Limnology, Academic Press、1983.
C. E. Rolfs and W. S. Rodney, Cauldrons in the Cosmos, シカゴ大学出版、1994.
鈴木 啓三、「水および水溶液」、共立出版、1977.
内海 誓一郎、鈴木 啓三、坪田 博行、野田 春彦、妹尾 学、吉田 章一郎、「水-生命のふるさと」、共立出版、1974.
「水-東京大学公開講座」、東京大学出版会、1976.
中村 運、「水の生物学」、培風館、1992.
中村 運、「生命にとって水とは何か」、講談社ブルーバックス、1995.
B. φ. デルプゴリツ (堀江 豊訳)、「水の世界」、講談社ブルーバックス、1975.
高橋 裕編、「水循環と流域環境」-岩波講座地球環境学(7)、岩波書店、1998.
高橋 裕編、「水・物質循環系の変化」-岩波講座地球環境学(4)、岩波書店、1999.
宇井 純、「日本の水を考える」、NHK 人間大学日本放送出版協会、1994.
半谷 高久編、「水とつきあう」、化学同人、1983.
国土交通省・土地・水資源局水資源部編、「平成 13 年版 日本の水資源」、国土交通省、2001.
P. H. グレイク、「しのびよる水資源危機」-新時代に挑むエコサイエンス、日経サイエンス社、2001.
「バイオスフィア」-Newton、第 8 巻、第 8 号、教育社、1988.
「地球を守る」-サイエンス、第 19 巻、第 11 号、日経サイエンス社、1989.

氷山の海面の上に出ている部分の体積はアルキメデスの原理で計算できる。

海水中の氷山は、その氷山自体が押しのけている海水の重さに等しい大きさの浮力を受けており、氷山の重さとの浮力が釣り合っている状態にある。したがって、

$$(\text{海面下の氷山の体積}) \times (\text{海水の密度}) = (\text{氷山の体積}) \times (\text{氷の密度})$$

という関係にある。ここで、氷の密度は、約 0.917 g/cm^3 であり、また、海水の密度は、約 $1.01 \sim 1.05 \text{ g/cm}^3$ であることから、これを 1.03 g/cm^3 とすると、

$$\begin{aligned} (\text{海面下の氷山の体積}) &= (\text{氷山の体積}) (\text{氷の密度}) \div (\text{海水の密度}) \\ &= (\text{氷山の体積}) \times 0.917 \div 1.03 \\ &= (\text{氷山の体積}) \times 0.89 \end{aligned}$$

したがって、海面下の氷山の体積は、全体の約 89 パーセント、海面上の体積は約 11 パーセントとなる。