

5.1 水の自然科学・利用技術・人間との関わり

吉野輝雄

5.1.1 導入：水について考える

三重苦のヘレンケラーは、自宅の庭の井戸*¹から汲み上げた冷たい水の流れに触れて、“water”という言葉が発した。それは、ヘレンが、すべての物には名前があり、言葉と自分との関係を理解するための“橋”の役割をもっていることを知った瞬間であった。目で見えず、流れる音が聞こえなくても、手のひらで流れの感触と冷たさを感じ取り、水を認識したのだ。私たちにとって水は、いつも身近にありふれた存在になっているので、水について改めて考えたり感じたりすることが少ないのではないかと？



水は、昔から人間の生活、感性、思想と深い関わりを持っていた。科学・技術の発達した現代において、水と人間との関わり、自然環境における水の役割を知ることには以前にも増して重要になっている。

ざっと水と人間との関わりについて考えてみよう。のどが渴けば誰もが水を欲する。食事、洗面、洗濯、入浴といった日常生活は水と切り離せない。お茶を飲んでくつろぎ、酒を飲んで疲れをふき飛ばし、飲み過ぎた時には水を飲む。化粧品はほとんどが水を含み、保湿効果をうたった製品が多くある。水を利用したスポーツや楽しみも多い。例えば、水泳、スキー、魚釣り、ヨット、スキューバーダイビング、花栽培、観光船など数限りない。温泉は身体と心の癒しであり、日本人の生活文化となっている。雨、雪は日常の気象だが、台風、大雨による崖崩れ、洪水といった災害は水が荒れ狂った姿を現した時だ。

世界中どこに行っても、井戸、雨水、上水道の利用は人間生活の基本である。また、食料を得るための農業、漁業に水は不可欠である。水田による米作りは、人間が水とのつき合いの中で得た知恵と言える。機械・電機工場でも水は冷却用水、洗浄用水として無くてはならない。IT産業も高純度の半導体製造に超純水を必要とする。水力発電は山間地に降った雨水の位置エネルギーを電気エネルギーに変換する

¹朝日新聞より

技術だ。蒸気機関も水蒸気のエネルギーを利用したものだが、火力・原子力発電でも水蒸気によって発電タービンを回転させて電気エネルギーを得ている。このように人間生活の多くの場面に水が関わっている。

水は太古の昔から地球上を絶えず循環している。水は人間だけでなく地球上のあらゆる生物にとって必要不可欠な物質で、水によって保たれている自然環境の変化があらゆる生物の生存に影響を与える。地表の71%を覆う海水と大気中の水蒸気の動きは、気候変動、地球温暖化と密接に関係している。

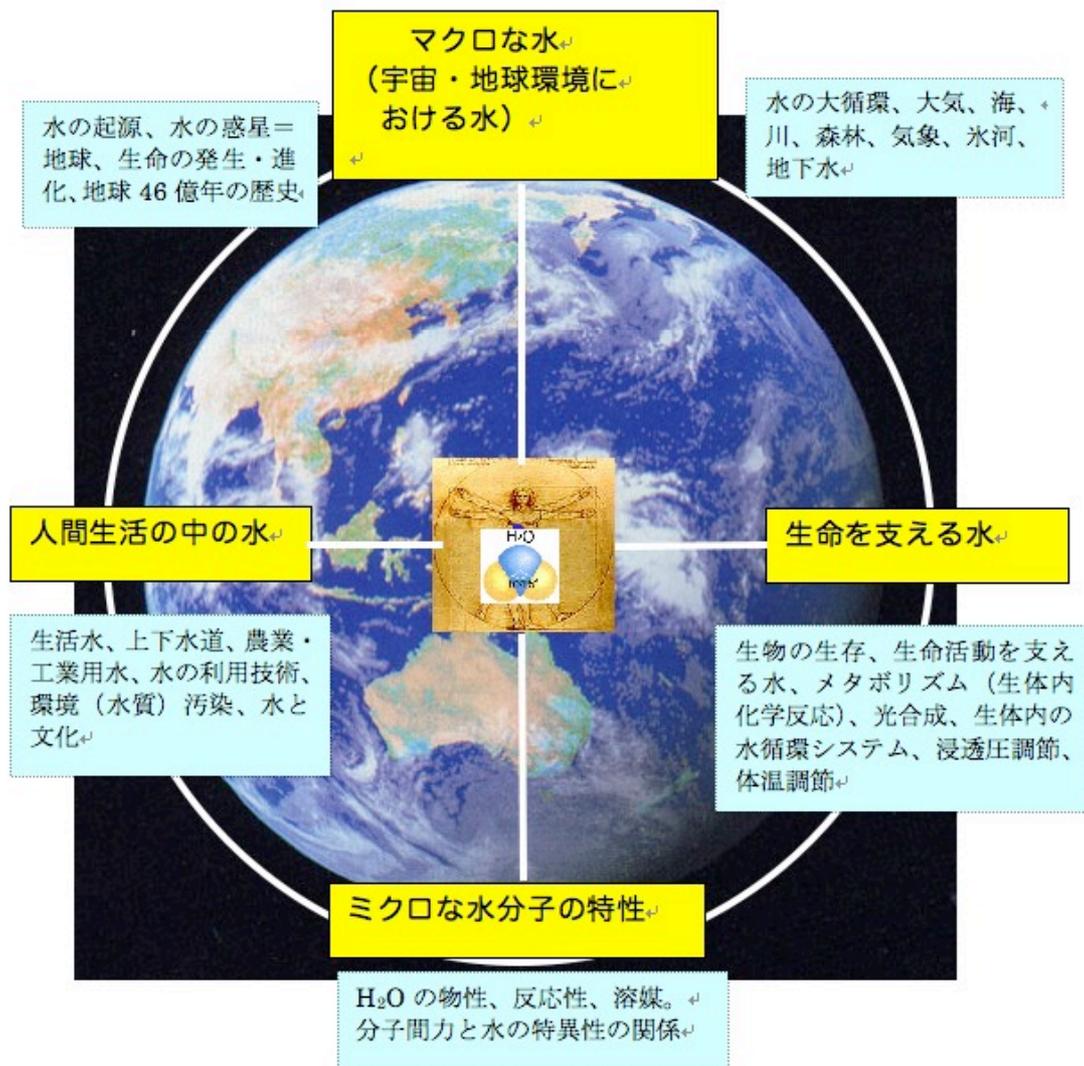
世界人口が70億人を超えようとしている今世紀、生命を支える安全な生活水が不足するという予測が国連から出されている。「20世紀は石炭・石油をめぐって戦争が起きたが、21世紀は水を巡る戦争が起こる」という予言がなされ、「21世紀は水の世紀である」と言われる理由がここにある。

水を自然科学の目で調べていくと、水は他の物質とは異なる性質をもっていることが明らかとなる。例えば、温まり難く冷め難い（比熱が大きい）、氷が水に浮く（固体の密度が液体よりも小さい）、 0°C ではなく 4°C で水の密度は最大になる、水ほど多くの物質を溶かすものはない（大きな溶解性）、分子間引力が大きく、毛細管に浸透できる（大きな表面張力）などの性質は、“異常”と言えるほどである。Martin Chaplin は、水には63の異常な性質があると言っている²。それらの性質が、上に述べた生命活動、人間生活、自然環境を支え、地球を「水の惑星」と言う他の惑星とは異なる特異な星にしているのである。

水は、人間生活—生命—原子・分子の科学—自然環境—気象—宇宙を結ぶテーマである。水について以下の順に考えてみることにしよう。

1. 人間生活と水との関わり
2. 地球環境における水：マクロな視点で見る水
3. 水分子の特異性：ミクロな視点で見る水
4. 生命はなぜ水を必要とするのか？
5. 水の起源：水と生命の星＝地球の誕生
6. 水と文化

² Martin Chaplin, Water Structure and Science <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>

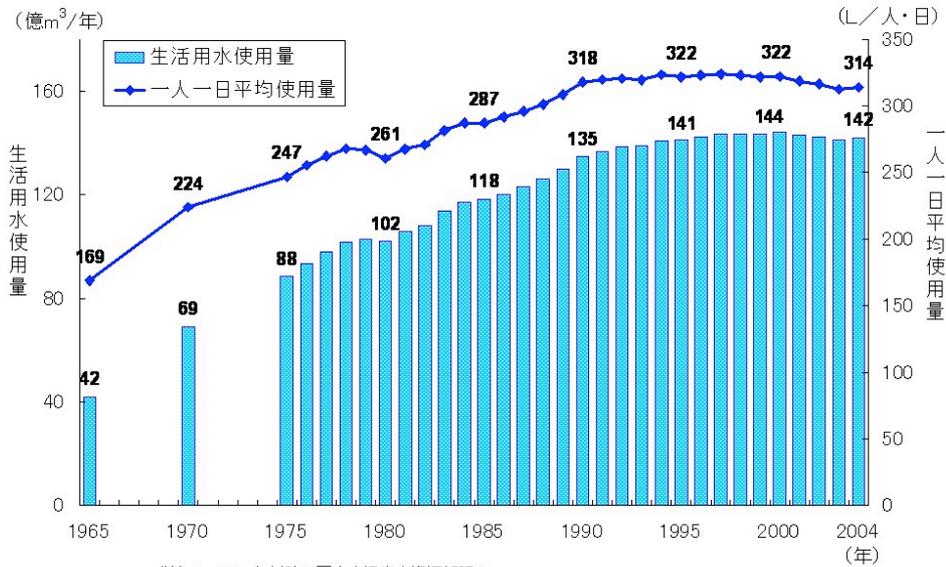


5.1.2 人間生活と水との関わり

人間は、水なしでは一日たりとも生活できない。水は人間にとって資源である。飲み水、調理、洗濯、風呂などの生活用水として、日本人は一日1人当たり約300L（全国民で年間140億トン）使用している。この量は世界平均170Lの約1.8倍である。

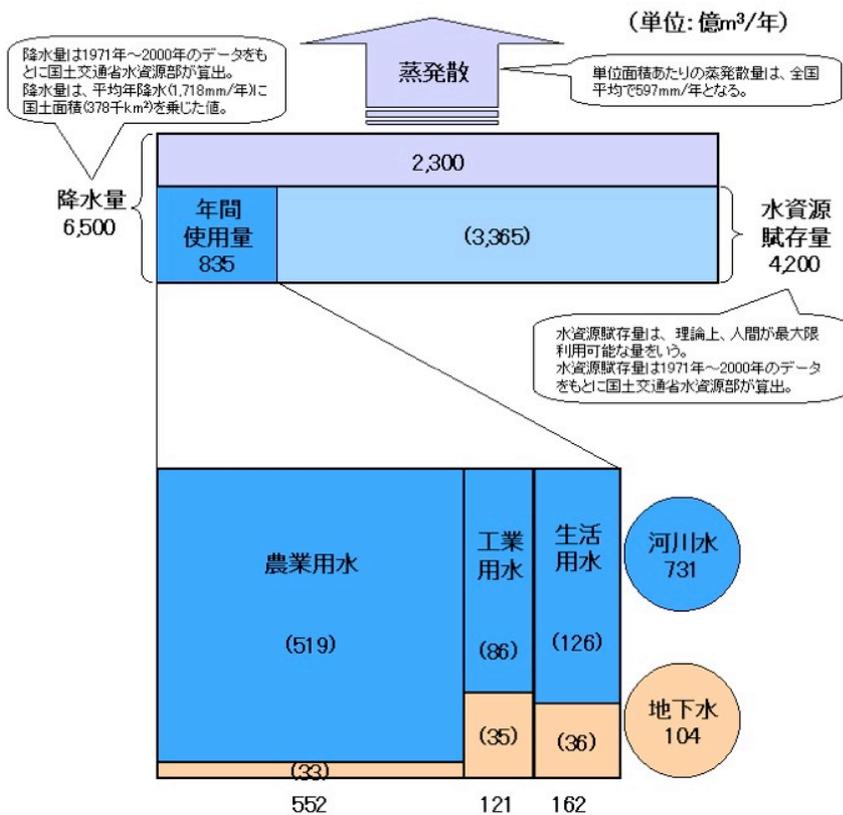
水資源は、農業用水（7割）、工業用水（2割）、運搬、レクリエーション用に使われている。生活に必要な水は都市化と共に増大し、日本の水使用量は過去25年間で1.5倍に増えている。使用量の変化を見ると、GNPの変化と共に増加していることが分かる。今後、世界中で都市化が進み、発展途上国も経済成長と共に水需

要が多くなることが予測されるので、世界的に水不足が大きな問題となるであろう³。



(注) 1. 1975年以降は国土交通省水資源部調べ
 2. 1965年及び1970年の値については、厚生労働省「水道統計」による。
 3. 有効水量ベースである。

生活用水使用量の推移



(注) 1. 生活用水、工業用水で使用された水は2004年の値で、国土交通省水資源部調べ
 2. 農業用水における河川水は2004年の値で、国土交通省水資源部調べ。地下水は農林水産省「第4回農業用地下水利用実態調査」(1995年10月～1996年9月調査)による。

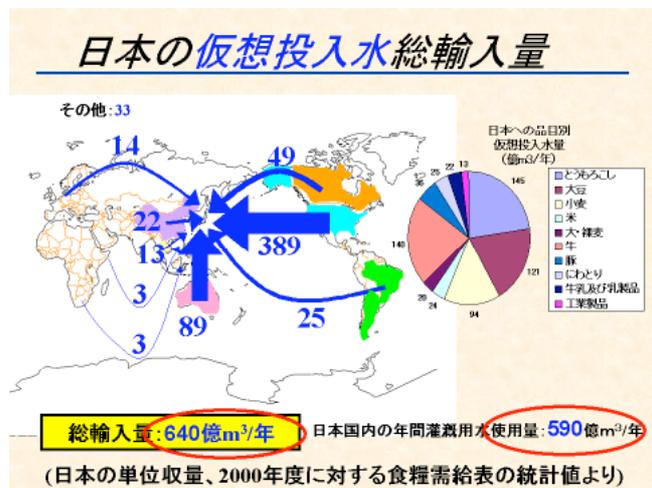
³国土交通省 『日本の水資源』 国土交通省水資源部
<http://www.mlit.go.jp/tochimizushigen/mizsei/>

水資源は、降水量に依存する。日本は平均降水量が 1,700mm (総量で 6,500 億 m³) と世界平均値 950mm の 2 倍近くで、水資源に恵まれている国だ。しかし、山地が多く、台風、梅雨などの地理的気候的条件のために、降水量の約 80% は利用されずに川から海洋に流れて行くか、地下水となる。また、蒸発により 2,300 億 m³ が失われる。地下水の 2.3% が汲み上げられ利用されることを考慮すると、日本の水資源は 850 億 m³ (総量の 13%) となる。この量は、世界的に見ると恵まれている方だが、年間降水量自体は多いものの一人当たりの降水量は約 5,100 m³/年で、世界平均 (22,000 m³/年) の約 4 分の 1 であり、日本は決して水の豊かな国とは言えない。しかし、一般に水不足感に乏しい。それはなぜか？ 日本は、季節的に大雨に襲われることが多いからという理由もあるが、実は、いま大量の水を輸入しているからだ。飲料水ではなく、農産物、畜産物を輸入するというかたちである。農産物を国内で育てるには水が(穀物 1kg 生産するために約 1.4 m³)必要とされる。牛、豚を育てるにはさらに多くの水が (牛肉 1kg で 20 m³) 使われる。すなわち、農産物を国内で生産する代わりに輸入することにより、

国内の水不足を補っているのである。2003 年に日本で開催された「世界水フォーラム」で、沖大幹教授はこの事実を「仮想水」あるいは「間接水」と名付け、日本人の目を開かせた(右図)⁴。

現在、日本が輸入している仮想水の量は年間約 640 億 m³ で、国内水資源の 78% に当たる。農畜産物の輸出

国もこれから水需要の問題に直面することを考えると、この方法だけでは水不足の抜本的な解決とはならないことは明らかだ。水資源の利用効率は、利用技術の進歩があったとしても、最高 20% が限界と言われている。水需要の課題をどう解決するかは、日本だけでなく、どの国においても死活の問題と言っても過言ではない。



⁴ 沖 大幹 『世界の水危機, 日本の水問題』 2006 <http://hydro.iis.u-tokyo.ac.jp/Info/Press200207/>

最近、「青い黄金 (Blue gold)」と呼ばれる水ビジネス企業が欧米に出現している。人間の生存の基本である水源地を買い取り、水を商品として販売する企業、上水道システムが不完全な町村の水管理や水供給をビジネスとする企業である。水を買うことのできない貧しい人々が生活水を得ることができない事態を生む可能性のあるこのような動きを、商業の自由として許容するかどうかは今問われている。

日本に限らず各々の国が、ダム建設により水の供給を図ってきたが、土砂の流入によるダム効果の減少、自然環境への影響などを慎重に考慮しながら建設を進めなければならないことが共通認識となっている。

森林が人工のダムの20倍以上の保水能力をもつことは案外知られていない。森林は、涵養作用（スポンジのように水を貯め、ろ過により水を浄化する作用）をもっている。すなわち、森林は自然の貯水場（水源林）であり、落ち葉で柔らかくなった土に浸透した雨水をろ過し、上質の水をつくり出す浄水場なのだ。ハゲ山と比較すると、森林は大雨の時の鉄砲水を減らし、蒸発で失う水量を大幅に減らす効果がある。また、森の土壌は棲む虫や微生物を育てる力があり、汚れた水も、その土の中の微生物によって分解され、浄化される。さらに、空気中のCO₂を吸収して成長し、酸素をつくり、緑豊かな美しい自然をつくり出してくれる。今や国をあげて森林保護に取り組む時代ではないか。

宮城県では、カキの養殖のために海と山地の人々が協力して植樹運動を始めたところ、昔のように腐葉層からの養分を含んだ清い水が戻って来て、カキが元気に育つようになったという事例がある。豊かな森が豊かな海を育てるという自然のしくみの妙味がここにある。

多くの人口を抱える都市の生活を支えるためには、安全な水を大量に供給できなければならない。そのために、井戸水ではならず、各都市に上水道が整備されている。水道の水の多くは川から汲み上げられ、安心して飲める水に浄水処理されている。都市化と共に汚染の進む川の水を浄化するには、長年の経験と高度な水処理技術が要求される。東京、大阪の浄水場では、旧来の沈殿処理だけでなくオゾン処理、生物活性炭吸着処理を行った水が給水されるようになっている。最終的には微生物を死滅させるために塩素処理が行われるが、水道水はおいしく安全な水である。ボトル入りの水だけが安全で、水道水が飲めない、あるいはおいしくないから飲まないという人々が多くなったとしたら、それは深刻な事態ではないか。水道水を飲まない理由としてトリハロメタンの危険性をあげる人がいるが、汚染度が高くなるほど塩素処理する量を多くする必要があり、その結果トリハロメタンを生成すると言

われている。汚染原因に目を向けず、川の汚れを見過ごしては、自らの命と安全な生活を危うくするということを認識しなければならない。

都市の生活の結果は下水道に現れる。下水道は、公衆衛生を守るだけでなく、生活排水を処理し再び自然の川に戻すシステムである。ここでも沈殿、ろ過と共に微生物を利用した有機物の分解処理が行われている。問題は処理能力で、中性洗剤、油カスを含んだ生活排水の処理は難しいと言われている。田畑からの余剰肥料の流入も問題となっている。

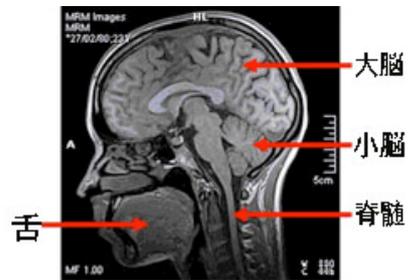
上下水道は、人間が生活を営むために不可欠な水利用システムであるが、それを生活と自然にとって安全なサイクルとして維持管理することは人間の責任である。また、水生植物や微生物の力を借り、曝気やオゾン処理による有機物の分解を利用するなど科学の知識を総動員して、より安全な水を供給する技術を開発する必要がある。

東京都墨田区は「雨水は流せば洪水、貯めれば資源」を合い言葉にして都市の雨水利用を積極的に進めている。都会に降る雨は一举に下水管に流れ込み、下水処理場の処理能力を越えることがあるが、雨水を雨水貯留タンクに溜めてトイレの流し水、植木の手入れ、初期消火用水などに利用することで資源の節約ができる。

水利用技術の中で、海水の淡水化は最も注目すべき技術の一つであろう。淡水だけが水資源と考えると、無限に近い量が存在する海水を淡水化して利用できれば、水不足の問題が一举に解決する。水が石油よりも高いサウジアラビアでは、海水の蒸留によって淡水をつくるプラントが日本のメーカーから輸出され実施されている。しかし、他の国ではコストの点で実施は現実的ではない。最近、日本の企業が逆浸透膜法で日量1万トンを超える大型プラントによる海水淡水化を実現している。まだ規模が小さいが、将来の水不足に備えて技術を発展させることが望まれる。

その他、水の特性を利用した技術として水カッター、超純水、電子レンジ、MRI(磁気共鳴画像法)などがある。水カッターは、超高压水の衝突エネルギーを利用する加工技術で、細いノズルから噴射する水によって金属や宝石などの硬い物や、樹脂や食品などの軟らかい物まで、あらゆる物の切断を可能にした。超純水は、純度100%に限りなく近い水で、微粒子や酸素まで除去し尽くす力があることから半導体素子関連の製造工程における洗浄や遺伝子工学分野での細胞培養などに利用されている。電子レンジは、特定の振動数のマイクロ波を照射して水分子の回転運動を最大にさせ、効率よく温度が上がるように設計された家庭調理器具である。熱を加えずに水を含む物だけを暖めることができる電子レンジは、水の特性に注目した科学の智の例と言える。

MRI は、脳をはじめ身体の断面を手術することなく視覚化するもので、今や医療診断に無くてはならない機器となっている。MRI 断層イメージ (右図⁵⁾) は、身体組織中の水分子をはじめとする水素原子からの微少な磁気信号を検知し、コンピュータ処理することによって得られる。どの臓器も水を含むので水分子の挙動や状態を見て診断することができ、X 線撮影と違い放射線の危険性がないのが特徴である。



環境 (水質) 汚染

川、湖沼、海の汚れは人間活動の結果である。これを水質汚染という。汚染には、家庭、職場、企業から出される大量の一般ゴミと産業廃棄物がある。しかし、これらの見える汚染源だけでなく、中性洗剤、化粧品の残り、ドライクリーニングや半導体産業で使用する有機塩素化合物 (トリクロロエチレン、テトラクロロエチレンなど)、漁業用の網に塗る有機スズ化合物、廃油は水に溶けずに分散して水質を汚染する。これらは難分解性で生物体内に蓄積される。例えば、PCB(ポリ塩化ビフェニル)が海水に棲むプランクトンに取り込まれると、それを食べた魚の体内に蓄積し、食物連鎖を経て1万倍以上に濃縮されて人間の体内に入ってくる。

また、食料生産や保存の過程で使用される肥料、農薬が環境汚染の原因となっている。肥料は水溶性の窒素やリンを含むため、余剰肥料が河川や湖に流入すると富栄養化の原因となる。また、スミチオンなどの有機リン農薬は生体に入ると生体内の物質代謝を阻害し、神経系の機能を狂わせ、中毒を引き起こす。DDT、BHCなどの有機塩素系農薬は分解されず脂肪中に蓄積される。除草剤の中には植物の成長を狂わせる効果を持つものが多く、生態系に大きな影響を与える。

これからは、自然界の生態系と物質サイクルを考慮し、自然界で安全な物質に分解される農薬、肥料の生産をめざすことが今後の課題となる。

30年前までは、水質汚染は製紙工場や化学工場等からの廃水が主な原因であったが、それらの工場は汚染を最小限に抑える環境対策を行ってきた結果、現在の水質汚染原因のトップは、家庭排水となっている。個々の家庭から油汚れを含む生ゴミを流すと、積もり積もって膨大な汚染源となることを認識し、地球市民としての自

⁵大阪府立呼吸器・アレルギー医療センター http://www.hbk.pref.osaka.jp/s_xsen/mri.html

覚をもって行動する必要がある。

5.1.3 地球環境における水：マクロな視点で見る水

地球は水と生命の惑星である。地球は半径 6400 km の球体で、地球表面の 71% が海の水で覆われている。陸と海には多様な生物が生息し、水を飲み、水の中や森の中で生き、絶えず変化する気象の影響を受け、水と空気の満ちた大地と太陽エネルギーによって生命が支えられている。人間もそのような地球環境の中に存在する生物の一種であるにも拘わらず、科学技術の成果を利用して、海空を越えて自由に移動することができ、火を初めとする地球のエネルギー資源を発掘・消費し、生活面積を地表のどこまでも広げ、地球環境を変えるまでの力を得てしまった。しかし、人間も地球の仕組みの中で生き、生かされている存在であることには変わらない。ここでは、地球をマクロな視点で見ながら、地球環境における水と人間との関係について考えてみよう。

地球上の水

地球上の水の総量は、およそ 13.8 億 km^3 があると推計されている。しかし、その内訳は、海水が約 97.5% を占め、淡水はたった 2.5% 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 0.014% (20 万 km^3) 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)。それを水資源として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。水資源は、石油・石炭と違って消費されることはない。しかし、人間がすぐに利用できるのは淡水であり、降水として供給される量に限界がある資源であるという特徴がある。

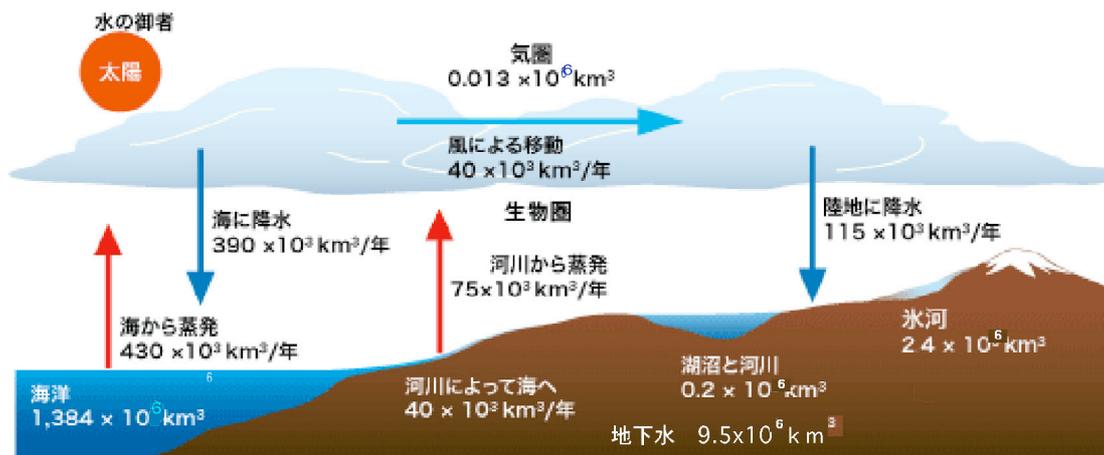
地球上の水は、気体・液体・固体という三つの状態で存在している。気体は雲、液体は海や湖、川、そして固体は氷河・冰山・雪として存在する。海と陸地の水は、太陽の熱で蒸発し、上空で雲となり、それから雨や雪となって再び地上に降ってくる。このように地球誕生以来、地球上の水は、水蒸気、液体、雪や氷と状態変化しながら地球上を循環している。この時と空間を越えて絶えず動き、循環している地球上の水を「水の大循環」という*。水の大循環を数量的に見てみよう。海からの蒸発量は毎年約 $430 \times 10^3 \text{ km}^3$ 、海への降水量は約 $390 \times 10^3 \text{ km}^3$ と推計されており、その差 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$

* Nikon Today, Vol68 (2007) <http://www.nikon.co.jp/main/jpn/profile/about/today/vol68/index.htm>

が、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、 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$ が河川や地下水を通してまた海に戻っていく。

ここで、「水の大循環」の意味を考えてみよう。

(a) 水は蒸発する時に周囲から大きな熱を吸収し、かつ、熱容量が大きいので温まり難く冷め難いという性質をもつため、広大な海に覆われた地球の気温変化を和らげ



る働きがある。いわば太陽からの熱エネルギーを吸収・蓄積するスポンジと言える。その結果、地球の年間平均気温は 15°C に保たれ、水が液体として存在でき、動物・植物の生存に適した環境をもたらしている。因みに、最も暑い中近東の夏の最高温度は約 40°C 、グリーンランドの冬の最低温度は -50°C であるが、海水温度の最高は 36°C （ペルシャ湾）で最低は -2°C （3.7%の塩溶液の凝固点）である。水のない月表面では、昼間の気温は 110°C 、夜間は -180°C と急激な寒暖を繰り返している。また、宇宙全体の平均温度は -270°C 付近と言われ、逆に恒星の中は数千万度という超高温であることを考えると、地球の気温は非常に狭い温度範囲に保たれていることが分かる。

(b) 水の大循環は、海水という塩水を真水に変えて地上に戻す巨大な蒸留装置と見なすことができる。陸地には年間 $115 \times 10^3 \text{ km}^3$ の雨雪が降るが、その約 $1/3$ の約 $40 \times 10^3 \text{ km}^3$ は海面から蒸発し、陸地に移動した後に降ったものだ。すなわち、人間の生活用水、農業用水、工業用水として不可欠の真水（水資源）が、水の大循環により無料で供給されるしくみが地球に備わっていることになる。

(c) 陸地に降った雨は、動植物の生存を可能とし、豊かな生命活動を支える恵みの水である。

(d) 山地に降った雨はダムに貯められると、水力発電によってエネルギーに変換される。

(e) 雨、川、海は自然の浄化装置である。雨は大気中のほこりやチリを洗い浄め、また、地上の岩も屋根も車もすべての物を洗い、その汚れを川へ海へと流し出してくれる。かつて人間は、川や海をゴミ捨て場のように考えていた。確かにある限度内の量の食べ物カスや枯れ葉などは、この水の大循環の過程で、微生物によって完全に分解され、再びクリーンな水循環に戻っていく。しかし、人間が出す廃棄物は、今や川も海が浄化できる能力を超えてしまっている。この事実を認識し、エコサイクルの破壊がこれ以上進むのを防がなければならない。

(1) 気象変化と水

日本の夏の気象は、 1m^3 の空気中に30g以上の水蒸気を含んでいる。大気の主成分である窒素、酸素に比べるとせいぜい1%に過ぎないが、気象への影響は圧倒的に大きい。海を含む広い地域における水の三態変化と、変化の際に出入りする熱エネルギーが気象変化を引き起こしていると言ってもよい。海と陸地から蒸発した水蒸気は雲となり、地球の自転と気圧の差によって移動する。暖められた大地の上空に辿りつくと、雲となり、雨雪として降る。地球は地軸が 23° 傾いて自転しているため、位置によって異なる光照射を受け、受ける太陽熱に差が生じ、緯度の違いによる気象や四季の変化となって現れる。また、大気成分（主に水蒸気と CO_2 ）に差が生まれて気圧の差が生じ、気象変化となる。気象変化は大まかな規則性に従って起こるが、一定の規則性に従うわけではない。それは、水や大気の運動が古典力学の方程式に従わないことを示すもので、天気予報が難しい理由がそこにある。最近、「カオス理論」、「非線形の理論」によって説明しようとする科学研究が行われている。

近年、この気象変化に人間活動が影響を与えるようになってきた。天然ガス、石油、石炭の燃焼によってエネルギーを得るといった人間活動の結果、 CO_2 の排出量が増大し、海での CO_2 の吸収・放出、光合成による植物の CO_2 吸収と呼吸の均衡（バランス）が崩れ、その結果、熱エネルギーの移動に大きな変化が生じて「地球温暖化／気候変動」が起こっているのである。なお、ある地域において数10年間にわたって繰り返される気象変化を気候と呼び、30年に1度の確率でしか起こらない気象現象を異常気象と呼ぶ。世界各地から今、異常気象が報告されており、人間活動による気候変動が今起こりつつあるというIPCCの報告(2007年)を真剣に受け止め、「京都議定書」(1997)の CO_2 削減目標に国、企業、個人がそれぞれの責任で取り組

む必要がある。

(2) 海と二酸化炭素 (CO₂)⁶

海に吸収される CO₂の正確なデータは出されていないが、 3.7×10^{14} kg/年と見積もられている。

地球と大きさが似ている惑星（水星、金星、火星）との大きな違いは、海が存在（大量の液体の水）と大気中の CO₂量が少ないこと、及び動植物の存在である。海も生物もない他の惑星では、重い気体である CO₂が惑星表面を覆っている。

海水には CO₂が溶ける。また、ありとあらゆる金属がイオンとして溶けている。海水中に CO₂が溶けると沈殿として堆積し、石灰岩を造る。こうして原始地球の歴史の過程で、大気中の CO₂量が減少していったと考えられている。さらに、サンゴや貝類が発生した後は、炭酸カルシウムとして体組織中に固定化され、さらに生物濃縮効果も加わって CO₂が減り、今から 40 億年前に現在量まで減少したと考えられている。さらに、20 億年前に光合成する生物（シアノバクテリア、緑色植物）が発生し、CO₂を利用して酸素と糖を合成するシステムが地球にできあがった。この CO₂収支バランスのとれたシステムを歪めているのが、化石燃料を大量消費する人間の活動による地球温暖化である。

(3) 氷河・氷山

最近数年間で、北極、南極の氷が急速に減少している。氷は、淡水の約 6 割を占め、氷の大きな融解熱（融ける時に水よりも 80 倍の熱エネルギーを必要とする）により地球全体の気温調節の役割を担っている。また、地球上の水を氷として貯蔵し、海の水位の上昇を抑えている。氷山が融けると、水位が上がり、水面下に沈む島や地域が出てくる。すでに、ツバル島では現実となっており、東京湾のゼロメートル地帯は、海水に覆われる可能性がある。

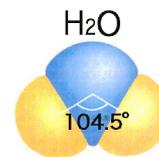
水は、液体、水蒸気、氷・雪を三つの状態を変えながら絶えず循環し、地球の自然環境に大きな影響を与え、生物の存在を支え、気象を決定し、緑の草木を育て、人間生活に潤いを与えている。この地球には、水なしでは生きていけない多様な動物、植物が互いに関係をもちながら生存している。水が海として、川として、氷河として、大気中の水蒸気として存在することで、熱帯から温帯、寒冷帯の気候が決定され、四季による自然の変化がもたらされ、豊かな地球環境ができ上がっている

⁶和田英太郎編 講座地球環境学『水・物質循環系の変化』岩波書店 1999

のである。まさに、地球はユニークな水と生命の星である。

5.1.4 ミクロな視点で見る水：水分子の特異性

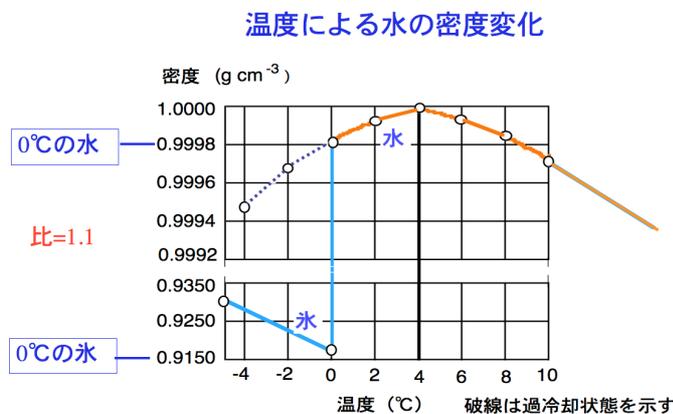
水は H_2O という単純な構造をもつ分子である。人間の生命、生活、文明と深い関わりがあり、自然環境の中で重要な働きを担っている



ことは、有史以前から明らかであったにも関わらず、その正体が H_2O という分子式で表せる微粒子であることが分かったのは、今から 200 年前に過ぎない。分子としての性質を自然科学の目で調べていくと、水は他の物質とは異なるユニークな物質であることが分かる⁷。

水のいくつかの特性に目を向けてみよう。水は、日常生活の中で液体—固体—気体の三つの状態間を変化する様子を見ることができる。そのような物質は、化学の実験室は別として、他にはほとんど見あたらない。

水は氷になると水面に浮く。これは水が液体から固体となると密度が小さくなることを意味する。一般には物質は固体になると重くなるので、水は“異常な”性質をもつと言える。水以外ではアンチモンくらいしか例がない。もしも水が普通の物質のように固体の密度の方が大きいとどんなことが起こるか。真冬に湖が氷結した場合を考えると、氷は湖の底の方に沈み水温全体が $0^{\circ}C$ となって、恐らく湖にすむ魚や植物は全滅するであろう。仮に生きのびたとしても、冬が過ぎても太陽の光は湖底まで届かず、長い期間氷が湖底に残るに違いない。実際には、氷は表面に張るだけだ。



また、水には冷え難く（比熱容量が大きい）、凍り難い（融解熱が大きい）という性質がある。そのため水を氷に変えるには氷点下に長時間放置する必要がある、余程の寒波に襲われない限り氷の厚さが1m以上になることはない。湖面に張った氷は厚みが増しても氷の温度は $0^{\circ}C$ のまま。一方、水には $4^{\circ}C$ で比重が最大になるという特

⁷ 鈴木啓三 『水と水溶液』 共立出版 1980

異なる性質がある。つまり、どんな寒波がやって来ても、湖の底の方の水温は4°C近くになっているので魚はこごえ死ぬことがないのだ。

水に対してさらに自然科学の光を当てていくと、水は自然界に存在する物質の中でもかなり“常識はずれ”の物質であることが分かってくる。

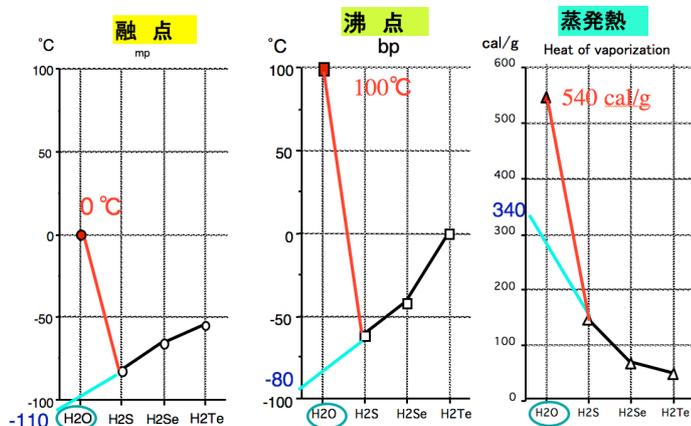
自然界には一番軽い水素から最も重いウラニウムまで92個の元素が存在し、ファミリーのように構造、化学的な性質、物理的な性質がよく似た元素が周期的に現れることから、「周期表」という一覧表が作られている⁸。これらの中で、酸素と同じファミリー元素（硫黄S、セレンSe、テルルTe、ポロニウムPo）は、 H_2O のように二つの水素と化学結合して安定な分子をつくる。 H_2O では、H-O-Hの結合角が 104.5° であるが、硫黄やセレンなどの結合角は約 90° と狭い。しかし、量子力学的には、 90° の方がむしろ自然で、 104° まで開いている水分子は異常だ。結合角が 180° の直線構造であってもよいはずだが、 H_2O の場合には不安定であることが理論的に説明されている。

この水の構造は、水が持っている特異な性質を説明する基本となる。そこで、 H_2O の仲間の分子(H_2O 、 H_2S 、 H_2Se 、 H_2Te)について、融点（固体が融けて液体になる時の温度）、沸点（液体が気体になる時の温度）、そして、蒸発熱（液体を完全に気体に変えるのに必要な熱量）の三つの性質を比較してみよう。

他の分子の値から H_2O の値を予想すると、水の融点は $-100^\circ C$ 、沸点は $-80^\circ C$ になる。しかし、実際には融点（氷点）

は $0^\circ C$ 、沸点は $100^\circ C$ なので、予想が裏切られる。蒸発熱も実際の値(540 cal/g)の約1/2と予想される。これらのデータは、水が融けにくく（融解熱が大きい）、沸騰しにくい（蒸発熱が大きく、気体に変えるには多くの熱エネルギーを要する）ことを意味する。同様な性質として、比熱容量（1gの物質の温度を $1^\circ C$ 上げるのに必要な熱量）も他の物質と比較すると水は異常に大きい。これらの異常な性質によって、

H₂X 分子どうしの物性を比較する



は $0^\circ C$ 、沸点は $100^\circ C$ なので、予想が裏切られる。蒸発熱も実際の値(540 cal/g)の約1/2と予想される。これらのデータは、水が融けにくく（融解熱が大きい）、沸騰しにくい（蒸発熱が大きく、気体に変えるには多くの熱エネルギーを要する）ことを意味する。同様な性質として、比熱容量（1gの物質の温度を $1^\circ C$ 上げるのに必要な熱量）も他の物質と比較すると水は異常に大きい。これらの異常な性質によって、

⁸ 文部科学省 「一家に一枚周期表」 http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/shuki.htm

地球の平均気温が+15°Cに保たれ、地表の気温変化を和らげ、温暖な気候をもたらす原因となっている。この性質は日常生活においても、昔は庭の水打ち、氷のう、湯たんぽ等に応用され、現代においては、車のラジエーター、機械の冷却剤、魚の冷蔵運搬などに応用されている。なお、 H_2O 以外の H_2X 分子はどれも人間にとって毒性をもつことが知られている。硫化水素ガス (H_2S) は火山地方に噴出し、登山客が中毒で倒れるという事故を引き起こした例がある。

水の持つ物理的な性質の一つに、「表面張力」がある。分子間力の大きな液体分子ほど表面張力が大きいという性質と関係づけて考えると理解しやすい。表面張力の大きい液体は、大きな球、液滴を作ることができる。水の表面張力は、水銀に次いで大きく、他に例のない液体である。表面張力の大きな水は親和性の大きな物質と接触すると、できるだけ相手と密着し、すき間があれば浸透し、全面を濡らそうとする。これは毛細管現象として現れる。例えば、紙の上に水を垂らすと、紙繊維の間に浸透して濡れる。タオルも汗が繊維の間に浸透する性質が利用されている。数十メートルも高い木の頂まで水が昇っていきけるのは、細い導管内を昇る性質と葉の表面にある気孔からの蒸散作用による。逆に、水と馴染まないロウやプラスチックのような物質と接触した場合には、水分子だけで集合する力が強いために相手の物質を弾く。これを撥水作用という。日常生活における撥水作用の例としては、例えば、フッ素化剤で表面処理し撥水加工したテントや傘、雨雪用のズボンは水に触れてもしみ込んだり、濡れることがない。

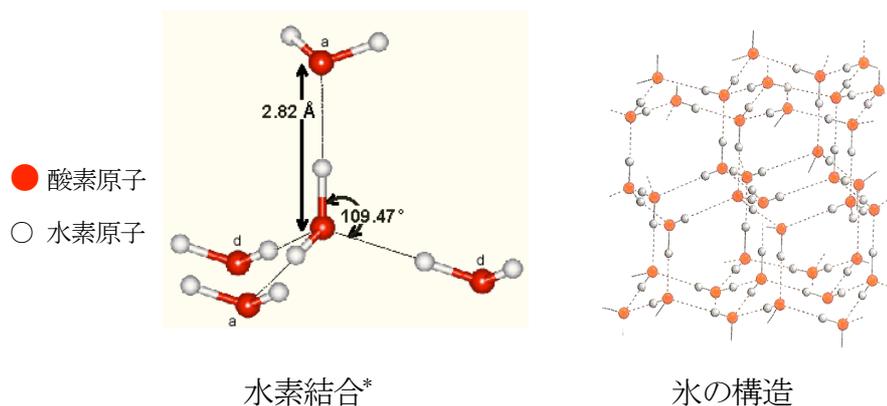
水ほど多くの物質を溶かす力のある物質はない。砂糖、食塩が水によく溶けることはだれでも知っていることだが、様々な無機物、有機物の溶解度を調べるとその範囲の広さに驚かされる。実際、海にはあらゆる物質が溶けていると言っても過言ではない。様々な金属イオン、無機塩、糖、アミノ酸はもとより、酸素、二酸化炭素などの気体も溶解している。また、水には溶けないはずの油性の物質や DDT などの農薬も小さく分散して溶けている。また、ヒトの体内には、酵素タンパク質をはじめ糖、金属イオン、無機塩が溶け、生命活動を維持している。ヒトの身体の元素成分は海水の成分とよく似ていると言われるが、事実である (5.1.6 参照)。

油は水に溶けない。しかし、人間は油脂を食物として摂取し消化できる。また、体内には油性のコレステロールやリポタンパク質が存在する。水に溶けない物質を生命活動に利用するための仲介役を担っているのが、胆汁酸、リン脂質などの界面活性分子である。界面活性分子は、親水性と親油性 (疎水性とも言う) の性質を同時に備えている分子で、油性物質を包み込み、水溶性に変えてしまう力がある。セ

セッケンも界面活性分子である。油性の汚れをセッケン分子が包み込み、水に分散させる作業が洗濯である。セッケンは、水の表面張力を下げる力があるので、セッケンが布地の隙間に浸透しやすくなり、洗濯効果が大きくなる。水だけでも汚れを落とす力があるが、界面活性剤を使うと洗浄効果が増大する。

水は、これ以外にも多くの特性を持つ。Chaprin は、水には 63 の異常な性質があると言っている⁹。なぜ、 H_2O という単純な構造を持つ分子がそのような異常性をもっているのか？自然科学の法則から外れた分子なのか？

そのようなことはない。基本的な現象については、きちんとした科学的説明がつけられている。その根本を簡単に解説する：水分子 H_2O の酸素原子は部分的にマイナスに電荷し、2つの水素原子はプラスに電荷している。このように分子内の正負極が分かれている分子を極性分子という。水分子間には、図のように $H-O-H \cdots OH_2$ という配置をとった時に大きな分子間引力が生じる。この極性分子間力を水素結合という。水素結合は、2分子間だけでなく、周囲の水分子の間にも生じるので、水分子が集合すると、互いに水素結合で結ばれた大きなネットワークを形成する。この結合は、固定したものではなく、結合・切断を絶えず繰り返しながら運動している。これが、液体の水のダイナミックな構造である。水分子間の水素結合が異常に大きいことが、水の融点、沸点、熱容量、蒸発熱、表面張力（凝集力）が異常に大きい理由となっている。



氷は、水素結合が最大に働く形をとって位置が固定した状態であり、水分子は規

*⁹ Matin Chaplin, Water Structure and Science <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>

*⁹ 荒田洋治 『水の書』 共立出版 1998

則正しい結晶構造（六方晶系、氷 Ih 構造）をとる（図参照）¹⁰。氷構造は、水素結合による安定構造をとっているため液体の水よりも隙間が多く、水よりも 1/11 だけ密度が小さくなるために、氷が水に浮くのである。水の密度が 4°C で最大になるのは、0°C で氷が融けた後も 4°C までは部分的に氷構造が残っているため、と考えることができる。また、氷の融解熱(80cal/g)が、水の比熱容量(1cal/g)よりも 80 倍も大きいことは、氷が水よりも強い水素結合による結晶構造を形成していることで説明される。雪の結晶が六方晶系の美しい形をしていることも容易に理解できる。

さらに、水は、 $2 \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$

という電荷をもつイオンと非イオンとの平衡状態にあるため、イオン性の物質（塩）をよく溶かすと同時に、 H_2O という極性分子として様々な物質と親和性をもつことができ、極性分子であれば容易に溶解できる。この性質が、体内でイオン性をもつタンパク質や DNA、RNA が、水に溶けているナトリウムやカルシウムなどの金属イオンと共存しながら水との親和性を持ち、機能を発現するための基本条件となっている。

以上述べたように、水の性質や役割を説明する場合には、 H_2O 分子単独の性質ではなく、水素結合でネットワークを作りながら柔軟に絶えずダイナミックに構造を変える水分子の集合体の特性と考えることが重要で、小さな水分子の集合体（クラスター）が長時間保持されることはないと言ってよいだろう。

5.1.5 生命はなぜ水を必要とするのか？

水の特性と生物との関係を整理してみよう。

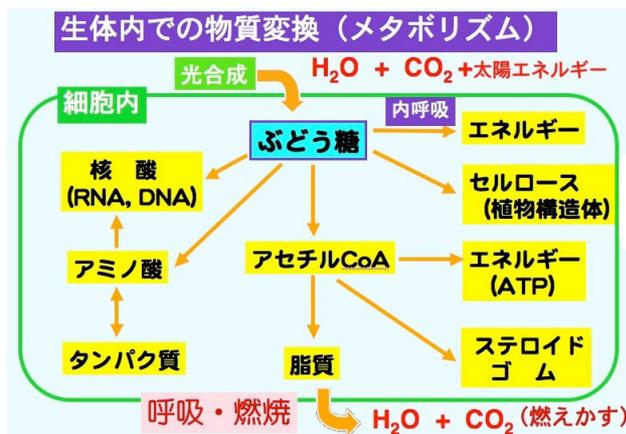
(1) 植物と水の関係

水は大きな溶解力をもつので、植物は土壌中の様々な有機・無機物を溶かして根から吸収し、導管を通じて組織の隅々にまで運ぶことができる。また、比熱（熱容量）と蒸発熱が大きいので、太陽熱を受けても暖まりにくい。日中は、気孔から水分を蒸発させて灼熱化を防いでいる。水分を失った植物はしおれ、やがて枯れる。水の融解熱は非常に大きい（80cal/g）ので寒風にさらされてもすぐには氷結しない。しかも葉の中の水はハチの巣のような構造の細胞組織の中にあつて様々な物質を溶かしているので氷点下でもすぐには凍らない。また、葉の表面はろう物質で覆われた照葉樹や油性分子を含んでいる針葉樹は、冬でも落葉しない。これは、氷結

による枯れ死を防ぐメカニズムを備えているからである。

水は表面張力が大きいので、毛細管現象により組織の隅々にまで行きわたり、親水性の細い導管を通して、背の高い樹木の頂まで昇っていくことができる。高さが100mのメタセコイアの頂きまで到達するためには、さらに葉からの蒸散による陰圧ポンプ作用が働いている。水を含む枝や葉は柔軟性に富む。それに対して枯葉はすぐに碎け、枯れ枝は折れやすい。

ほとんどの植物の木部や葉の組織はグルコースが高分子化したセルロースからできていて、水分子によって取り囲まれている。グルコースは、緑の植物が太陽エネルギーを受け、水と二酸化炭素から酸素と共に光合成される。水と二酸化炭素は、生物体内で、グルコースをはじめとする栄養素が酸素と反応（体内燃焼）してエネルギーに変換する際



に生じる、いわば燃えカスである。この燃えカスを太陽エネルギーによって再利用し、グルコースと酸素を再生産するシステムが光合成である。光合成する緑の植物は、地球に棲む全生物が必要とする原料合成工場であることが分かる。

グルコースがセルロースとは別のかたちの高分子になると、エネルギーの貯蔵源であるデンプンがつくられる。グルコースは、生体が必要とする物質を生合成するための原料としても使われる。例えば、体内のエネルギー運搬体であるATPがつくられる。さらに、植物に固有の匂い物質、花の色物質、味物質などが生合成される。水が原料となってグルコースがつくられ、グルコースから様々な生体材料がつくられ、それらが組み合わされて多様で豊かな植物の世界がつくられているのである。

すいか、ぶどう、みかん等の果物は、水分を豊富に含む自然の恵みである。含まれる果汁は、土の中から根を通して吸収され、いくつものろ過装置を経てゆっくりと果実中に蓄積されるので、浄化された安全な飲み物である。しかも、グルコースや、クエン酸、ビタミンC、香料成分を含むおいしい飲み物である。自然のしくみは何とすばらしいことか。しかし、果樹園に水溶性の農薬が撒かれると植物体内に吸収され、汚染された果物に変わる可能性もあることに注意しなければならない。

(2) 動物と水の関係

動物と水の関係に目を転じてみる。植物と違って、動物（陸上哺乳類）は水場を求めて移動し、食物をとり、変化する自然環境に適応しながら生きている。地球上の生物は極寒地、乾燥した砂漠、空気の薄い山岳地帯にも適応して生息しているが、水を必要としない生物はいない。砂漠に棲む昆虫もラクダも水を必要としている。ウイルス、微生物でさえ水の存在する場で生き、水を含む細胞を抱えて生きている。ウイルスは、細胞の中で、生存に必要な物質を生合成し、自らを複製し増殖している生物と無生物の境界にいる生物であるが、水なしでは感染能力を失う。

脊椎動物の場合、血液は酸素と結合したヘモグロビンと生命維持に必要な多種多様な物質が水に溶け、体中に張り巡らされた毛細血管を通じて体の隅々にまで運搬されている。ここでは水の大きな表面張力と溶解力が役にたっている。

食物は消化酵素の助けにより、水との反応によって生体材料に消化・分解される。タンパク質からはアミノ酸、デンプンからはグルコース、脂肪からは高級脂肪酸がつくられ、酵素の作用により、それらを材料として必要な生体物質が再構築される。

生体反応の過程で残される血液中の老廃物は、体内の水処理機関である腎臓でろ過されて除かれ、再生された水は99%リサイクル利用される。

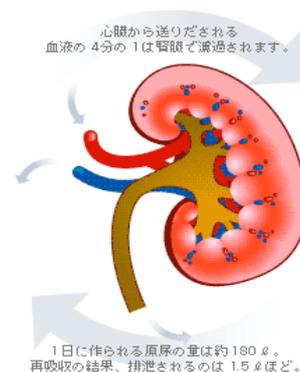
水を含む体は急激な体温変化から守られている。また、運動によって体温が上昇すると、発汗により体温調節する。ここでも水のもつ大きな比熱容量、蒸発熱が役だっている。

水中生活をする魚や貝、サンゴや藻の場合、水に溶けている酸素、ミネラルを取り入れ、食物連鎖により他の水生動物から栄養を取り入れている。水中生物は水と絶えず接触しているため、浸透圧により体が水で膨張しないように、また、体表面や内部組織が水に溶けないようにするための防御機構が備わっている。

（3）ヒトと水の関係

ヒト（大人）の体重の60-70%は水である。すべての組織中に水が含まれている。例えば筋肉に76%、脳に75%、骨に12%。髪の毛も水分を失うと、潤いを失いカサカサとなり、裂けやすくなる。「髪はカラスのぬれば色」とは、潤いのある髪のことである。

ヒトは一日平均2.5Lの水を取り入れ、同じ量を排泄する。水補給は生命維持の基本条件であることをヒトは乳飲み子の時から本能的に知っており、日常生活の中に組み入れて一般に、ヒトは（体重60kg）、水分が2%（120mL）減少すると渴きを覚え、5%で目眩を起こし、20%失うと死を招く。



乾燥地に住む人や大量の汗を流すスポーツを行う時は、水分補給に注意しないと脱水状態になる。2003年のノーベル賞は、ヒトの腎臓細胞にあって脱水状態から体を護る「アクアポリン（水の穴）」というタンパク質を発見した人に贈られた。アクアポリンは腎臓に存在し、水分が不足すると尿管表面に現れて、尿の中からきれいな水だけを取り出し、水分の減った血管に送り出す。脱水状態が解消されると、元の細胞内に戻るといふしくみである。

このように腎臓は、ヒトの場合にも水処理場のような重要な働きを担っているが、一日に飲む水 2.5L の約 100 倍量の水が腎臓を通過している¹¹。ヒトが毎日生きていくためには、それだけの水が生命維持装置を動かす物質代謝（メタボリズム）に必要であることを意味する。

水は栄養素、酸素、エネルギー運搬物質（ATP）、ミネラルを血液、体液に溶かして体内の隅々まで運搬し、また、使用済みの老廃物等を溶かして腎臓に運び、糞尿として排出される。こうして、ろ過された水の 99%以上が再び体内に戻り再利用される。

（４）酵素タンパク質の作用

細胞の中で物質代謝とエネルギー代謝が行われ、成長・分解を繰り返しているのが生命体である。

水に溶解して運ばれる栄養素は、酵素の助けを借りて水と反応（加水分解）し、アミノ酸、脂肪酸、糖に分解・消化され、アミノ酸からは、DNA の遺伝情報に基づいて酵素をはじめとするタンパク質がつくられる。さらに別の酵素作用によって多糖、脂質、核酸が生合成される。

これらの生命活動を担う物質の合成・分解反応が、水で満たされた細胞内や体液中で行われており、水は生体反応の溶媒としても必須である。

代謝を司っている酵素タンパク質は、柔軟で特定の立体構造をとらなければ機能を発揮することができない。タンパク質が柔軟で特定の構造をとるためには、アミノ酸が数十から数百個連なったペプチド鎖が立体的に折りたたまれ、その鎖全体に水分子が水素結合によって密着し、クッションのように取り囲む必要がある。そして、水分子に囲まれた生体分子と出会い、特異的に結合することによって相手を識別し、合成・分解反応が行われる。このような生体機能を担っているのが酵素である。すなわち、生命活動は酵素作用によって営まれ、制御されている。これが、なぜ生物は水を必要とするのかという問に対する分子レベルの世界からの答えである。

¹¹ <http://www.koei-chemical.co.jp/know/kidney/index2.htm>

(5) 生態系

水をたたえる海、川、湖、湿地帯、干潟には、魚、昆虫、藻類、貝類をはじめとする多種多様な生物が生息している。大きな体の動物は、より小さな動物を餌としながら互いに食物連鎖で結ばれている。これを生態系という。豊かな生態系は豊かな水環境を必要とする。その典型例は海だろう。海鳥が潮の引いた干潟に集まるのは、そこに小さな魚、カニ、貝、ゴカイなど多くの生物が生息していることを知っているからである。豊かな海に棲む魚介類は、また人間に豊かな食をもたらしてくれる。その生命をいただいて人間は生き、生活している。人間も生態系の一部であるが、他の動物たちの生存条件を奪い、絶滅の危機に追いやっている事例が多くある。人間はいつから地球の主人公になったのか。主人公であるならば、生態系を正しく認識し管理する責任がある。主人公でないならば、人間活動を制御し、許容範囲を見定める謙虚さが必要ではないか。

5.1.6 水の起源：水と生命の星(地球)の誕生

生物はなぜ水を必要とするのか？ その理由を、ここでは、宇宙における水の起源、水の惑星(地球)の誕生、海の出現、地球における原始生命の発生から現在の生物システムに進化するまでの地球46億年の歴史を見ながら考えてみよう。

水の起源をたずねることは、

1. 宇宙のはじまりをたずねること
2. H(水素原子)、O(酸素原子)がなぜ存在するのか？
3. H₂Oという分子がなぜ地球上に液体として大量に(海として)存在するのか？
4. 海の中で生体分子がいかにして合成されたのか？
5. 生命はいかにして発生したのか？
6. 生物はどのように進化していったのか？

というような問に向かい合うことであり、自然科学の大課題である。自然科学ではまず観測データを集め、事実を説明する仮説を立て、何度も修正され、確かな根拠を探りながら真実を追求する。以下は宇宙創世の仮説である¹²。

¹² 上田弘「地球」 裳華房 1995

文部科学省「一家に一枚宇宙図」http://www.mext.go.jp/a_menu/kagaku/week/uchuu.htm

宇宙で最も多い元素は水素(93%)で、次いでヘリウム (7%)、他は1%以下である。

水素原子核は、137 億年前に数十億度の超高温のビッグバンによって宇宙が誕生して、最初に作られた正電荷をもつ素粒子で、陽子と名付けられている。陽子と同時に、中性子と負電荷をもつ電子が作られた。その後、数億度に温度が下がって銀河系が誕生 (120 億年前) し、92 種の元素が形成された、と考えられている。このような超高温状態では、核融合反応が起こり、水素(H)原子核からヘリウム(He)がつくられ、さらにヘリウムから炭素(C)や酸素(O)の原子核がつくられた。H、O 原子核は数千万度以下に冷えると、負電荷をもつ電子と結合してH、O 原子がつくられ、H、O 原子が出会って安定な分子である H_2O が形成された、と説明できる。

銀河系の中の超新星が約 50 億年前に爆発し、飛び散った元素 (92 種) が再び集まって密度の高い集団 (星) を形成した。その一つが太陽 (protosun) であり、46 億年前に地球をはじめとする 8 つの太陽系惑星と微惑星がつくられた。

原始地球は、灼熱の星であったと考えられているが、その地球上で起こったことをまとめると、

- ・大部分の酸素は、鉄やケイ素などの重い元素と結合して岩石となり、地核を形成した。従って、原始地球大気中には酸素ガスはほとんど無かった。岩石の中には、水和物として水が取り込まれた。

- ・軽い元素は大気成分となった。例えば、二酸化炭素 CO_2 のような比較的重い気体と、水素を含む軽い気体 (H_2O , アンモニア NH_3 , メタン CH_4 , 硫化水素 H_2S , 塩酸 HCl , ホルムアルデヒド $HCHO$, 青酸ガス HCN) 。

- ・水素ガス H_2 , ヘリウムガス He とのような軽い気体は、大部分が宇宙空間へ逃げた。

因みに、地球と同時期にできた木星の大気は H_2 , He が主成分である。

- ・水蒸気は、雲となり激しい雨となって降り注ぎ、再び、太陽熱/地熱によって蒸発を繰り返していた。大気中では絶えず雷 (放電) が発生し、同時に太陽からの強い紫外線が地上に注いでいた。

- ・ $HCl(gas)$ は雨に溶け、強酸性の塩酸になった。強酸性の雨 (水) は岩を溶かし、ナトリウム Na^+ , カルシウム Ca^{2+} , マグネシウム Mg^{2+} , 鉄 Fe^{3+} などが溶けた川となり海となった。

・CO₂の行方は？（水星、金星、火星ではCO₂が大気の主成分なのに、今の地球ではなぜ窒素と酸素が主成分なのか？）

CO₂は海に溶け、Ca²⁺、Mg²⁺と出会って沈殿物（石灰岩）となった。

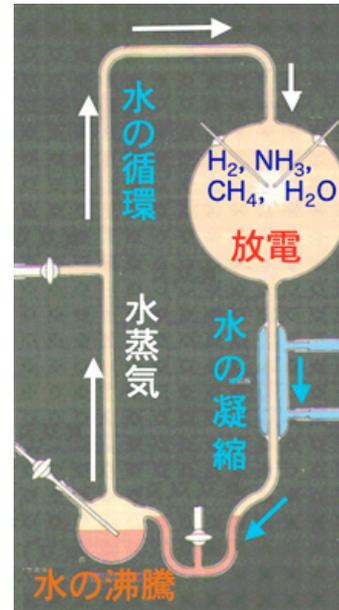
CO₂はサンゴが発生した後は、サンゴの身体を作って固体化した（珊瑚礁）。こうして、海の存在が地球のCO₂量を減少させた。

・ミラーは原始地球の大気を再現する実験を行った（右図，1953）。

環境：激しい雷雨、強い放電、太陽からの強い紫外線が降り注いでいた。

結果：溜まった水の中に有機化合物（アミノ酸、糖、核酸塩基）が生成した。

生成した有機化合物は海に溶け、太陽からの強い紫外線によって分解されずに蓄積していった。海の中では、有機化合物同士が反応し、より複雑な分子（分子と分子の間から水分子が脱離した高分子）が形成されていった、と考えられる。



ここまでは、原始地球ができてから約10億年間の出来事で、「化学進化の時代」と呼ばれる。

（1）原始の海の形成（30-35億年前）

地球上の水素(H₂)のすべてが宇宙空間に飛び散ってしまったのではなく、火によって燃えてH₂Oとなり、一部は水蒸気として大気中に噴出し、また一部は岩石中に水和物として閉じこめられた。地核内部に閉じ込められた水は、火山活動に伴って岩の間から噴き出し、原始の海となった。

海（液体の水）が出現する基本条件を考えてみよう。地表温度が0～100℃であることが基本条件である。

第一条件：太陽からの距離（表面温度を決定する）。

惑星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星
表面温度	330	200	15	-50	-130	-150	-190	-200 (°C)

地球より太陽に近い惑星では、水はすべて水蒸気、地球よりも外の惑星表面は氷結している。

第二条件：惑星のサイズ（引力の大きさをきめる）

月は、太陽からの距離が地球と同じであるにもかかわらず水が無い。その理由は、月が地球よりもサイズが小さいために、重力が地球の 1/6。そのため、水分子を引力圏内にとどめておくことができず、宇宙空間に逃げてしまった。また、水がないために月表面の昼間の温度は 110°C、夜間は-180°Cになる。

結論：地球は、太陽からの距離と大きさが、水が液体として存在できる奇跡の条件を満たしている。そのために、水が海として大量に存在するのだ。海は、大気温の変化を和らげ、種々の物質を溶かす。自然界に存在する 92 種すべての元素が溶けている。

海にはイオン性の物質 (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- 等) だけでなくアミノ酸や糖などの有機化合物、二酸化炭素、酸素) も溶けている。こうして、海の中で生命が発生する基礎条件がつけられた。

(2) 海の中で生命が発生した¹³

海は、生命の発生、進化の場となり、生物を支える源となった。ミラーの実験が示すように、原始大気成分からアミノ酸、糖（グルコース、リボース）、核酸塩基が生成して海に溶け、さらに、いろいろな有機化合物も作られたと考えられる。以下は、原始生命発生の仮説である。

海水に溶けた有機化合物は、火山周辺の岩のくぼみに蓄積し、太陽熱と地熱により水が蒸発して高濃度の海水になった。粘土表面は化学反応を容易にする触媒作用をもつので、高濃度の有機化合物同士が反応して高分子になる。その結果、タンパク質、核酸(RNA)、多糖類などの生体高分子が合成されたと考えられる。あるいは、原始の海底から噴き出す熱水エネルギーによって有機化合物がつけられ生体高分子がつけられたと考える仮説もある。高分子は、液胞をつくりやすい。液胞の中にイオン性の物質やアミノ酸や糖などの小分子を包み込んだものが原始細胞（コアセルベート）である。

コアセルベートの中は外部よりも 1000 倍も物質濃度が高いので、その内部で物質代謝（生体物質の合成、変換、分解反応）が起こったと考えられる。このような変化の過程で同一組成のコアセルベートを複製するものが生まれた。こうして無生物

¹³中村運 『水の生物学』培風館 1992

から細胞（生命体）が発生したと考えられている。今から 34 億年前のことである。

酸素が無かった時期の原始生物（藍藻類、バクテリア）は、グルコースを栄養源として使い、発酵によってエネルギー運搬体(ATP)とアルコールをつくっていた。

生命活動には、物質代謝を円滑に行わせるための触媒（酵素）と細胞を構成するタンパク質が必須である。原始単細胞生物のあるものは、細胞を複製し、タンパク質合成の遺伝情報を備えた自己複製システムを構築した。最初は RNA から複製していたが、細胞核に DNA として遺伝情報を保持するように進化していった。

シアノバクテリア（藍藻類）は、太陽エネルギーを使って二酸化炭素と水からグルコース（糖）と酸素をつくる光合成システムをつくった。今から 20 億年前のことである。その後、バクテリアも植物も動物も蓄積した酸素を使って、より多くのエネルギー運搬体(ATP)を効率的につくるシステムをつくりあげた（これを呼吸という）。呼吸は発酵よりも 19 倍の ATP 生産能力をもつ。

それまで酸素は有機化合物や細胞を破壊する力をもつ“毒ガス”であった。呼吸はその毒ガスを有効利用する革命的なシステムと言える。また、大気上空の酸素は太陽の紫外線によりオゾンに変換されて、地上に降り注ぐ紫外線を和らげる装置としての役割を担った。こうして、陸上でも生物が生存できる環境ができあがった。

やがて、おだやかな気温と酸素量が増えた陸上で生活する動物が現れ、多種多様な生物へと進化していった。そして、今から約 200 万年前に人類（ホモサピエンス）が地球上に現れた。地球 46 億年の歴史を 1 年 365 日に例えると、人間は大晦日の 23 時過ぎになって現れたことになり、地球上では全くの新参者である¹⁴。

ヒトを構成する元素の種類と比率を海水と比較して見ると、非常によく似ている。これは、生命が海の中で発生し、今も海を抱えているためと考えられる。



14 朝日新聞・日曜版より

人体（体液）、ヒトの羊水、海水の主要元素の成分構成と存在する量*

存在量の順位	1位	2位	3位	4位	5位	6位	7位	8位
人体	H	O	C	N	Na	Ca	P	S
羊水	H	O	Na	Cl	C	K	Ca	Mg
海水	H	O	Na	Cl	Mg	S	K	Ca

H: 水素 O: 酸素 C: 炭素 N: 窒素 Na: ナトリウム Ca: カルシウム
P: リン S: イオウ Cl: 塩素 K: カリウム Mg: マグネシウム

地球に棲むすべての生命（生物）の細胞・組織中には水が含まれており、水の存在が生命活動である物質代謝を支えている。なぜ生命は水を必要とするのか？ その答えがここにある。

5.1.7 日本と西洋における水認識の歴史

日本人は、水に対してどんな思いを持ち、表現してきたかを見てみよう。

縄文時代につくられた火焰土器には、川の流に現れる渦と炎が描かれている*。そこから、縄文人が水辺で生活し、草や獣の肉を火で煮たり焼いたりしていたことが想像される。鎌倉時代、鴨長明は「方丈記」で「ゆく河の流れは絶えずして、しかも、もとの水にあらず。淀みに浮かぶうたかたは、かつ消え、かつ結びて、久しくとどまりたる例なし」と、流転する人の世を絶えず流れ変化する水の姿と重ね合わせている。



京都鴨川の水源地には貴船神社という晴雨を司る神が祭られている。日照りや長雨が續くと雨ごい、雨やみの祈願が行われてきた。鴨川は生活の基盤であると共に、暴れ川でもあった。また、都に疫病がはやり、たくさんの子どもが亡くなったことがあった。鴨川は、都の人々にとって生活と密接し、その水源の神は命の源の神であり、怒れば洪水をもたらし、汚すと疫病が広がり祟りをもたらし、ありがたい神であるとともに、恐ろしい神として信仰されてきた。**¹⁵ 日本各地には水神社が祭られ、井戸が大切にされてきた。正月には各家で、井戸に供え物をして感謝を表す習慣があった。

*長岡の歴史 http://www2.ocn.ne.jp/~nryou/history_nagaoka.html

¹⁵**高井和大 水とともに暮らす作法 <http://www.kkr.mlit.go.jp/yodosou/result/kicyou.html>

江戸時代、歌川広重が描いた東海道五十三次の浮世絵の中には、「庄野の雨」、「蒲原」の雪景色をはじめとして作品の中に水が描かれているものが38枚もある。自然の中の水の美しさが広重の感性と日本人の心に触れたのだと思う。千利休によって始められた茶の湯は、井戸から汲み上げたばかりの自然の水を使って茶の湯を立て、味と香りを楽しむ文化である。武具も飾りも脇に置いて茶の湯に向かうという美学は日本独特のものであろう。また、芭蕉は、古池に飛び込む蛙や最上川の流れなど水を詠んだ名句を残している。古都京都には、土の中に埋めた瓶に水が落ちる響きを静寂の中で楽しむ（水琴窟）という繊細な文化があり今に引き継がれている。

江戸末期、高野長英は、「遠西水質論」の中で、「水は自然界に普遍的に存在するが故に、水を構成する三元素、即ち、酸原（酸素）、水原（水素）、火原（カロリック）が自然のあらゆる営みにかかわりをもつ」と述べ、水を化学的に理解していた。また、宇田川榕菴は、18世紀末期の西洋の化学を完全に理解し、多くの化学用語を創作して、「舎密開宗」（化学入門）を著した。この本には、ラボアジェの水分解実験や気体実験装置の挿絵も含まれており、日本の化学を一気に西洋の水準まで上げたものとして評価されている。近代となって、物理学者の中谷宇吉郎は、雪の結晶成長について独創的な研究を行い、「雪は天からの手紙である」という名言を残した。

雨について、日本人ほど繊細な目で観察している民族はいないのではないか。それは、雨を多様な言葉で表現していることから分かる。例えば、春雨（はるさめ）、五月雨（さみだれ）、氷雨（ひさめ）、時雨（しぐれ）、凍雨（とうう）、俄雨（にわかあめ）などである。

水を意味する氵の付く漢字をあげてみると、水の多様な姿、人間と水との関わりが分かっておもしろい：海河湖沼沢汐洲波瀬流湧渦酒漬浄清澄濁潤濡漁潜淳渴湯液涙汗活など。

言葉は認識の豊かさと深さを示す尺度でもあることを考えると、日本人は中国人と同様に優れた自然認識力を持っていると言えるのではないか。

一方、西洋では、古代ギリシャのターレスが、「万物の根源（アルケー、元素）は水である」と唱え、自然界と人間存在の根源は何かという究極の問を發した。その後、アリストテレスは、「万物は、水、空気、土、火の四つの元素から成る」という四元素仮説を唱え、その後の元素転換（金でない物から金をつくる）の基礎理論となって、1700年間以上錬金術者たちを導いた。同時代に、デモクリトスは、「万物は、これ以上分割できない最小の物質である原子（分割不可能を意味するアトム）と空間から成

る」と主張したが、1800年にドルトンが原子論を復活させるまで歴史の陰に追いやられてしまった。世界の四大文明地は大河の近くに発生した事はよく知られた事実であるが、その中の一つ古代エジプトでは、ナイルの水を利用してパピルスを作り、農業、陶器作りなどの技術を発達させ、その豊かな水利用技術を墓の壁画として残した。

聖書にはヘブライ人の自然観、水に対する考えが書かれている。天地創造の神が水をはじめ光、大地、生き物、人間を造った。水は、海と天上の雨に分かれ、天から降る雨は地を潤し、収穫をもたらす恵みの賜物であると同時に、ノアの時代に人々が大洪水で滅ぼされたように、大きな破壊力をもつ恐ろしい存在でもあった。また、洗礼に見られるように人間の罪の赦しと救いの象徴であり、生きる力を聖霊なる神が与えてくれる永遠の命のしるしであった。

ルネッサンス時代、ダビンチは絵画だけでなく多くの科学研究を行い、その考察と結果を書き残した。その中で水の矛盾した挙動を見抜いて波や渦の動きをスケッチし、「水は自然の推進力である」と書いている*。17世紀にデカルトは、学問において真理を探究する方法の一



例として、「気象学」を著し、粒子論の立場から水について論じている。すなわち、「水はウナギのような微粒子が集合したものである。液体は互いに絡まり合った状態、体積膨張した気体は激しく動き回っている状態、固い氷は干からびた状態と考えられる」と説明した。18世紀後半にラボアジェは、水は、アリストテレスが考えていたような元素ではなく、水素と酸素から成る化合物であることを、水の合成（水素の燃焼）と分解反応の定量実験データに基づいて証明した。

19世紀に入り、アボガドロによって、水が H_2O という原子組成の分子から成ることが証明され、18グラムの水には 6.02×10^{23} 個の分子が含まれることが分かった。ここに近代化学の基礎が確立し、水を含めた全ての物質の性質、反応、合成法の基本原理が明らかとなった。この時から、肉眼で見える物質の世界と一億分の一の分子の世界とをつなぐ橋が出来上がり、近代化学が急速に発展して行った。今や電子顕微鏡で原子の像を見ることができ、原子、分子の存在は疑いのない真理であることが証明されている。

*Chris Witcombe, Leonardo da Vinci and Water, <http://witcombe.sbc.edu/water/artleonardo.html>