

水の伝説

八木善彦*

The Legend of Water

Yoshihiko YAGI*

1. はじめに

水はありふれた物質でわれわれの身近に豊富に存在する。この水の当たり前でないことに気づくことから物語は始まる。2013年のエイプリルフール、米国フロリダ州のラジオ番組が「一酸化二水素」のジョークを使って水道の危険性を警告したところ、水道局に問い合わせが殺到。DJたちはラジオ局から無期限謹慎処分になった。

一般の人々の科学リテラシーにまつわる古いジョークがある。「摂取しすぎると死ぬ恐れがある危険な物質がある。その物質に完全に浸されると呼吸が妨げられる。その物質名は、一酸化二水素（ジハイドロジェン・モノオキサイド：DHMO）⁽¹⁾

事実のみを提示したとしても、その提示の仕方によっては聞き手の認識を誤った方向に誘導することができる典型と言える。

- 水酸と呼ばれ、酸性雨の主成分である。
- 温室効果を引き起こす。
- 重篤なやけどの原因となりうる。
- 地形の侵食を引き起こす。
- 多くの材料の腐食を進行させ、さび付かせる。
- 電気事故の原因となり、自動車のブレーキの効果を低下させる。
- 末期がん患者の悪性腫瘍から検出される。

情報化された現代では、このような誘導のための表現がいたるところにあふれている。記事はこのように締めくくっている。「一般大衆が基本的な化学式も理解できないのだとすると、複雑な用量関係や複数の要因が関わってくる、もっと込み入った問題が理解されることは、おそらく望むべくもないということだ。」

水はわれわれに多くのものを与えてくれている。われわれは水から生まれた。母親の体内では羊水の中

で成長する。人間の体には多くの水が含まれる。血液の9割以上は水で、腎臓は82%、筋肉は75%、骨は22%、の水を含む。全体重の71%は水である。

水はわれわれが生きて行くのに直接必要なだけでなく、人間の生活のあらゆる面において影響を与え続けている。

人間が農耕を始めることにより計画性のある水利事業、井戸掘りや灌漑設備、洪水をせき止めるダム、長く一定の緩やかな傾斜をもつ水路、を構築しなければならなくなった。このような活動は、個人の利己を公共の福祉に従属させ、感情的な力を合理的な統制に服させ、社会組織を安定に保つ倫理を発達させる。水の振る舞いの人間への感化は経済的な分化や、宗教の教義や道徳に及ぶ。

水が作り出す情景は人間の情緒や芸術に驚異と感嘆、そして安らぎを与え、その不思議さに気づく者に科学の心を芽生えさせる。

人間は水をみて物質の3態（固体、液体、気体）を知り、蒸気機関によって産業革命を起こした。

そこで、若い学生や専門でない人々に科学の概説を提供し、自分自身で自然現象を研究しようという人々を生み出すために1950年代にアメリカで出版されたScience Study SeriesのWater: The Mirror of Science (S18)⁽²⁾をもとに水の不思議をひもといてみる。

2. 水の異常さ

2.1 水の沸点・凝固点

どんな物質でも、分子同士が十分に接近すると弱い引力が働く。この力をファン・デル・ワールス力という。この分子間力は一方の分子の原子核と他の分子の電子との引力の力の方が、原子核同士や電子相互の斥力よりもわずかに大きいために生じる。この引力は、重い分子間の引力は軽い分子間の引力よりも強い、重い分子の物質の沸点・凝固点は高く、その物質の分子量に比例して沸点・凝固点が上昇する。

*一般科 教授

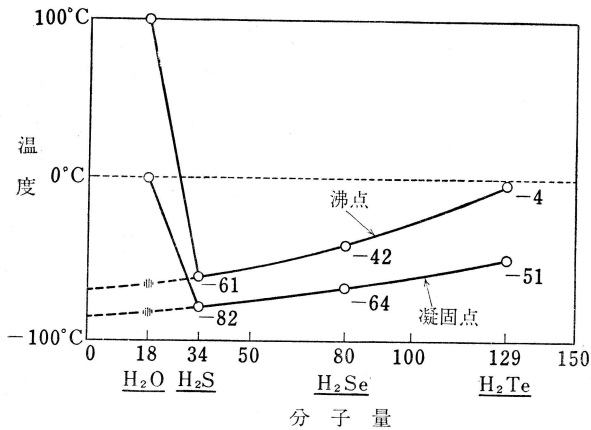


図1 周期律表で水の同族にある分子の沸点・凝固点

物質の分子構造や分子量を知ると他の物質と比較してその物質の沸点や凝固点をかなり正確に予測することができる。では、酸素の同族であるSイオン、Se、セレン、Te、テルルについて化学構造式がH₂Oと同じH₂S、H₂Se、H₂Teの沸点や凝固点を調べると分子量が増すごとに上昇して行く(図1)。この性質を利用してH₂Oの沸点、凝固点を予測すると-95°C、-100°Cとなる。実際にはよく知られた100°C、0°Cである。

このことは水が通常分子間力と異なる結合力を持っていることを表している。実際に水は水素結合によりこの力を得ている。典型的な水素結合(5~30 kJ/mole)は、ファンデルワールス力より10倍程度強いが、共有結合やイオン結合よりはるかに弱い。水素結合は水などの無機物においても、DNAなどの有機物においても働き、水の性質、たとえば相変化などの熱的性質、あるいは水と他の物質との親和性などにおいて重要な役割を担っている。

2.2 氷ると体積が増加

熱の考察は熱い・冷たいという感覚から始まった。1592年ガリレオは球付のガラス柱を水面に倒立させて、球部を暖めることによって水面が変化することを示す(空気温度計)の温度計を発明した。最近では、ガラス柱の中にいろいろな色の水の入ったバルーンを浮かべた「ガリレオ温度計」なるインテリアオブジェを購入できる。この発明により熱の科学は始まった。熱を客観的な数量でとらえられるようになった。18世紀の中頃ジョセフ・ブラックが熱を「重さのはかれない流体」というあたかも物質のようなものと考えてこれを「カロリック」と命名した。物体によってこのカロリックを吸収できる能力が異なり、ある物体に同じ熱量を与えても温度のあがり方が異なる事実を説明した。現在では熱はエネルギーの一つの形態であり、原子や分子の運動の活発さの目安とされている。

固体では、分子は互いに固定した規則正しい配列をしている。温度が上昇するにつれて、物体の分子の運動エネルギーは増加し、分子同士を引きつけている結合力にさからって配列を歪ませ流動させる。これが液体である。気体ではこの分子間の結合力を振り切って飛び回ることになる。

この理屈では温度に比例して分子の運動は激しくなり、すべての物質は温度が上昇するにつれて体積が増加し、温度が低下するに従って体積は減少することになる。水では、100°Cから温度を低くしていくと4°Cまでは体積が縮小していくが、温度が4°Cから3°C、2°C、1°C、0°Cと低下するにつれて収縮せず、逆に膨張していく。

0°Cを経て水が固体(氷)になると突然、液体のときよりも体積が十一分の一増加する。この特性は、海や湖が凍るほど寒くなくても水面から凍ることになり水中の生物の生存を助けている。水分の少ない砂漠では昼の気温は驚くほど上昇し熱風が吹き荒れるが、夜になると骨まで凍るような冷え込みに襲われる。

この体積増加を打ち消すように圧力をかけてやると氷は溶けて水になる。この性質により人間はスキーやスケートを楽しむことができる。水になることで摩擦係数が極めて小さくなりよく滑るのである。氷河の下部では圧力が高くなり液体化することで氷の塊が動きやすくなる。この動き出した氷河の浸食作用は洪水と比べてもはるかに大きい。

氷になると体積が増加するのは当たり前と思うかもしれない。しかし、固体も温度に比例して体積が減少するので、十分に温度を下げてやると水より重たい氷も当たり前存在する。さらに、氷の結晶は圧力によりI型、II型、…と変化し、その中には液体から固体になるときに体積の増加しない氷もある。

圧力を変えることで相変化を起こし、結晶構造や物理的性質に差がある、さまざまな高圧相氷になることが知られている。この場合、我々が普段目にする「普通の」氷は「氷I」と呼ばれる。現在のところ、圧力が高い状態において氷IIから氷VIIまで発見されている。特に、きわめて高い圧力下では、水素結合が縮んで水分子の配列が変わる。このように様々な相が存在することを多形という。(3)

2.3 潜熱

固体状の物質の温度を融点まで上昇させるときか、液体状の物質を沸点までに上げるときには、熱を加えても温度上昇が停止する転移段階があり、二相(固体と

液体、液体と気体)が共存する状態がある。この期間を通して固体が完全に液化するまたは液体がすべて気化するまで、加えた熱は吸収されて物質の温度変化は起こらない。この熱を潜熱と称し、物質によって異なる。水ではこの潜熱の値が他の物質と比較して非常に大きく熱のエネルギーをより多く蓄えられる。

氷点下以下の気温の夜でも水槽に水を満たした室内の温度は外気温よりも暖かいし、雪かまくらは雪の断熱性だけでなく、この潜熱によって暖房の効果を果たす。

逆に冷凍に使うこともある。氷を利用した冷蔵庫(氷室)は電気冷蔵庫が出現するまで世紀を越えて使われていたし、古代人は多孔性の容器(素焼きの壺)を利用して飲料水を冷却していた。最近、熱帯の乾燥地帯で水るほど冷たい水をつくる壺のうわきや気化熱式冷蔵庫がネットで話題になった。

水は潜熱の大きさと体積の変化によって大気および海洋の熱交換の主役となり、地球上に生命を育む恒常性の世界を作り上げている。熱交換のエネルギーは熱帯で発生する台風に、また熱で膨張し上昇した水蒸気が水滴になるときに発生する潜熱で作られる巨大な上昇気流と積乱雲、それに付随しておこる竜巻や雷に見て取ることができる。

2.4 溶媒と表面張力

二つ、もしくは三つ以上の物質が一つの物理的境界で他から分離されているものを溶液と名付け、そのうちの一つで他を含むものを溶媒という。その他の溶解して溶液中に一樣に分布している物質を溶質という。

天然水には化学元素として知られている元素の半数が溶け込んでいる。世界中の海洋は、イオンの形で金属、非金属、無機物、有機物を溶かし込んでいる。しかし水自体は不活性である。この性質は生物にとって有用で、生体の隅々に必要な物質を運び、不要なものを運び去ることができる。しかも何回でも繰り返し溶媒として利用できるのである。多くの物質を溶かし込んだ海水で、干潟のような環境があり海水が繰り返し水の蒸発、浸水を繰り返す環境から遺伝子の一部 RNA が作られることが確かめられている。

水の表面には互いに引き合う力が働いている。これを表面張力という。水の表面張力は水銀を除けば一番大きい。これは、他の物質に付着する力でもある。二枚のガラス板を近づけて水面に立てると水の表面部分はガラスに引き寄せられ水面より高くなる。二枚のガラス板の間隔が狭くなれば狭くなるほどガラスの壁に接した部分の水面は高くなる。これは毛細管現象とも呼ばれ、土壌の中での水の移動や植物の根が水や養分を

吸い上げたり幹に循環させること、動物の体内を血液が隅々まで循環するのに役立っている。

3. 水の伝説

3.1 純水

ここまで見てきたように水は生命にとって非常に大切なものであるとわかる。しかし、その水は純水の話では無かった。

小学生の頃、「純水を飲むと下痢をする」という噂が立った。しかし、だれも実験してみる者はいなかった。

純水は不純物の混入を嫌う化学実験や電子部品の洗浄、製品のばらつきを押さえるための食品や飲料、更には医薬品の製造などに用いられる。半導体の洗浄に使われる超純水については、有害性に関する風説がある。「純水はものを溶解する能力が極めて高く危険であると言われている。」

これに対し、

超純水とは高度に精製された水の「状態」を意味し、何らかの物質や核種を指すものではない。つまり「コップに採った超純水状態の水を飲む」とことは可能だが、体内に入ったコップ一杯分の水を、超純水状態に維持し続ける事は不可能である。従って、飲んだ超純水が腸管粘膜に与える影響、などというものには存在しない。歯の脱灰についても、砂糖の摂取や唾液による再石灰化と比較する限り無視できる。

普段飲用に供する水(水道水、井戸水、河川水など)と比較すると、それらが一般に溶解している物質(残留塩素や「ミネラル分」など)を含んでいないが、生体に必要な微量元素などは食物から供給されるものであり、長期間飲用したとしても欠乏することはない。(4)

のような反論がなされたが果たして実験してみるまでもなく、複雑な用量関係や複数の要因が関わってくる、もっと込み入った問題が理解できるのであろうか。

3.2 重水

今まで、水について化学構造式が H_2O という単一の化合物の話をしてきた。ところが水素には安定同位体である二重水素 2H 、放射性同位体の三重水素 3H が自然界には存在し、さらに酸素も自然界には 3 種の安定同位体が存在する。

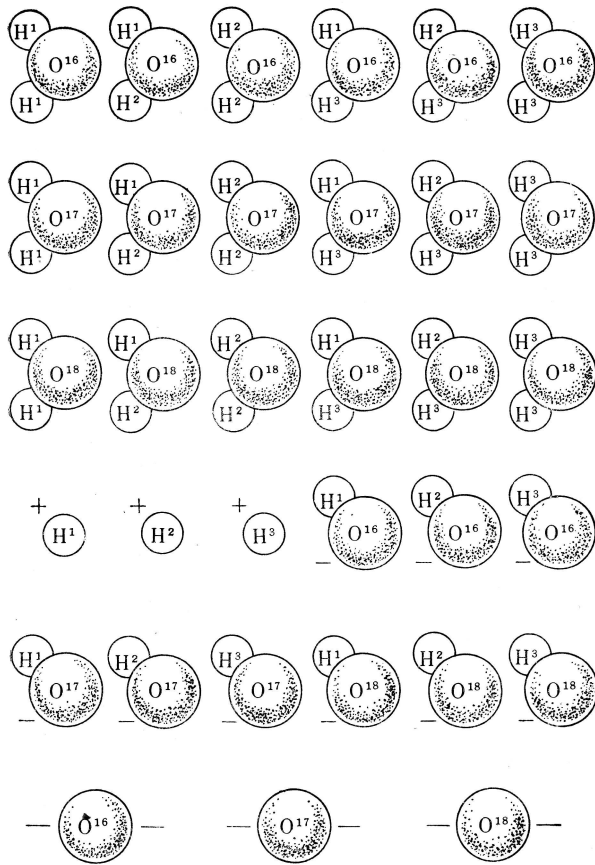


図2 同位体を考慮にいたした水の分子

これらを考慮して純粋水は18種の同位体と15種のイオンからなる混合物である(図2). H, ^2H , ^3H の存在比は海水中で0.999816, 0.000184, 0.000000(水素ガス中では0.999974, 0.0026, 0.000000)である. O, ^{17}O , ^{18}O の存在比は0.99762, 0.00037, 0.00204でこれらを考慮して水の各同位体の存在比が計算できる. これは、重水 $^2\text{H}_2\text{O}$ の密度:1.11 g/cm³, 沸点:101°C, 融点: 3.8°Cが水 H_2O と異なる値をもつため、日常使用する水の性質の計量では混合物の物理的値となることに注意する必要がある.

重水の有害性に関する風説がある。「純重水は、物質の溶解度、電気伝導度、電離度などの物性や反応速度が軽水とは異なる値を示す. それ故、飲料水などとして大量に(体重に対して数十%以上)摂取すると生体内反応に失調をきたす. 重水中では魚類はすべて死に、植物は発芽しない. 微生物は重水中でも培養できるものもある。」これは本当らしい.

4. H_2O の有極性

2つの水素は酸素に対して105°の角度をなしている. 原子、電子の正負の電化分布が不均等になり水の分子は正と負の極をもつ. 分子の大きさに対して、この極の分離間隔が大きいので双極子モーメントが大き

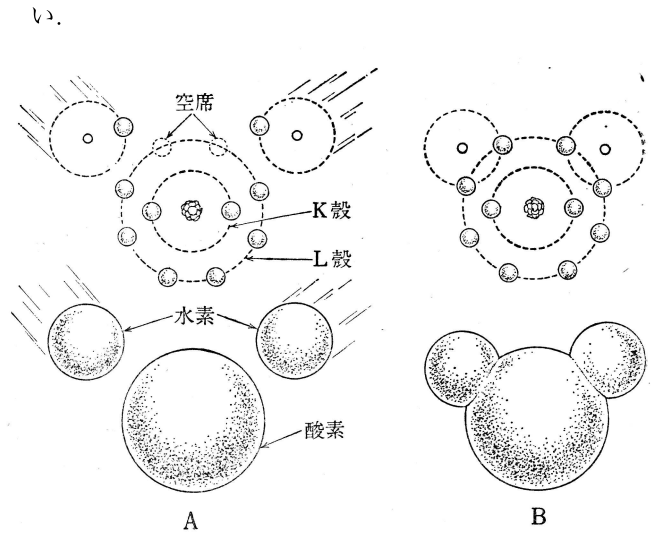


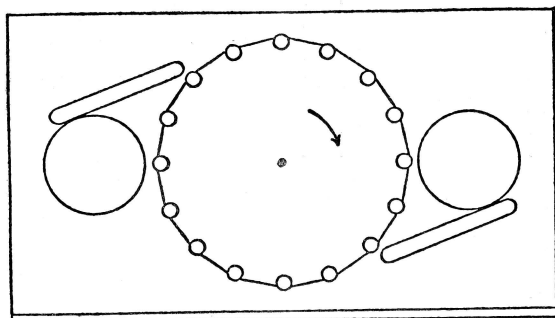
図3 水分子の原子核と電子配置の模式図

図3に水分子の原子核と電子配置の模式図を示す. 実際は電子の配置が立体的であるが平面の配置でも電子の位置の平均と陽子の位置の平均から分極が理解できる. この分極のために電場をかけると、水の分子はその電場を打ち消すように並び、水中におかれた2つの電荷が引き合ったり退け合ったりする力は弱くなる. このことは、水が物質をよく溶かし、特にイオン結合だけで、あるいは主としてイオン結合している物質をよく溶かすということの説明になっている. 食塩NaClは Na^+ イオンと Cl^- イオンが互いに引き合っ

5. 帯電

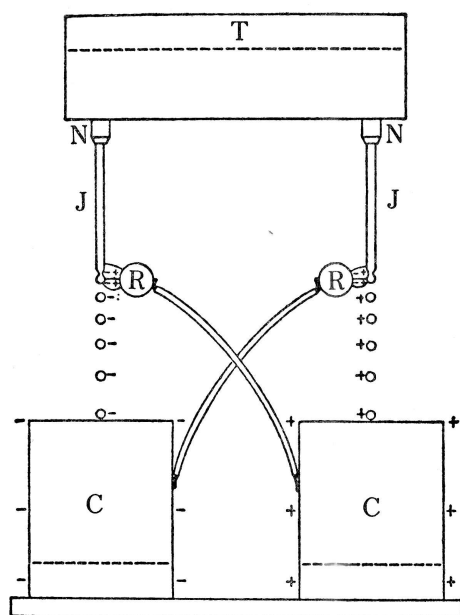
乾いた雪や水の結晶の表面を他の物質が通過すると摩擦電気が生じる. 飛行機が電気をもった雲の中を飛ぶと、電荷を受け取り、それは数十万ボルトにも達する. 純水は電気を通さないため、静電気の運び手となる. ベンジャミン・フランクリンは雷が電気であることを明らかにした人物であるが、世界で最初にモーターを発明した人でもある. フランクリンの静電モーターは、絶縁体の円盤に金属の球をつけ、そばに二つの電極をつけたものである. これだけで回転する. 回転の向きは、はじめにどちらにスタートさせるかで決まる.

図4はフランクリンモーターを自動的に動き一方向にだけ回転するように改良したものである. 垂直な壁は絶縁体で、円盤はプレキシガラス(Plexiglas, アクリル酸樹脂)で導体のボールが周りに埋め込まれている. 円盤の中心は針がさしてあり、自由に回転できる.

図4 自動的に回転するフランクリン・モーター⁽⁵⁾

針は壁に固定してあり、実際は円盤が抜け落ちないように壁を後ろに傾けてある。左右の丸いものは電極の管で壁に突き刺してあり、さらに電極にしんちゅうの棒を取り付けてある。しんちゅう棒のおかげで一方向にだけ回転する。このモーターを見た人は何も動力が無く回転を続けるので永久機関ができたと思うだろう。

静電誘導発電機がきっかけで、イギリスのケルビン卿は落水発電機(ケルビン発電機)を考えついた。彼の発電機を図式的に示す(図5)。

図5 ケルビン落水発電機⁽⁵⁾

絶縁体の上に錫の罐をおく。絶縁体で支えた二本の金属の棒が罐につないであり交差して他方の罐の上に来るように調整してある。一番上には水を入れたタンクがあり2つの罐に水を注ぐノズルがある。ノズルから流れる水は繋がって流れ、金属棒の位置で水滴に分かれるように流水量を調整してある。何らかの理由で一方の罐の電位が他方の罐よりあがると、そこにつながれた金属棒によって他方の罐には静電

誘導により、低い電位になった水滴が落下する。他方の罐が電位が下がるのでそこにつながれている金属棒によってもとの罐には、高い電位になった水滴が落下する。このようにしてたまった電荷によりさらに多くの電荷が誘導されてたまっていく。

この形では、電圧が高くなると電圧に引っ張られた水流が棒に引き寄せられ放電してしまう。金属の棒の先を水流を取り囲むリング状に改良して一方向に引かれないように改良した落水発電機では15キロボルトの電圧を達成している。このときは落下する水滴が他方の罐に引っ張られてそちら側に落下するようになり、発電が停止する。

6. その他にも

水10ccに5ccを加えると15ccになる。では、水10ccにエタノール5ccを加えると体積はいくらになるか？それは、14.6ccである。正確にはエタノールの濃度によって異なるが、体積の減少は、エタノールの濃度が18%のときに最大になる。

水は温度によって物を溶かす能力が変化する。一般に温度が高くなると固体や液体はよく溶けるようになる。気体は水の温度が低いほうがよく溶ける。ところが、この溶解性はものを溶かす順序で変わってくる。単純に物質Aをa gと物質Bをb g溶かして水溶液を作るところが、溶かす順番によって溶けなくなったりする。

1956年4月、アーサー・M・パスウェルとウォース・H・ロッドブッシュは「サイエンティフィック・アメリカン」で水の氷点について報告している。天然ガス輸送のパイプ中では水は20°Cという高い温度で凍ってしまう。この柔らかい雪のためにパイプが塞がってしまい、ガスも止まってしまう。トウモロコシは4.45°Cまで温度が下がると、結氷の被害を示す。この温度では、まだ霜は降りない。

このことが契機となって、水の構造について詳しく研究されるようになった。この現象は水分子が作る構造から起こる。メタン分子は水の二倍の体積を持っている。水分子がメタン分子の周囲に集まって「籠」を作る。そのとき、メタン分子は水分子間の引力を断ち切ってしまう。そのために水は凍る。

同じことがタンパク質分子と水の場合にも起こる。生物でもタンパク質分子の表面にそって水分子が結晶し、膨張して生物の組織を破壊する。

これらは、水分子同士を結びつける水素結合の力のためである。水素結合により、水分子同士は一体となり、連続した構造を保っている。

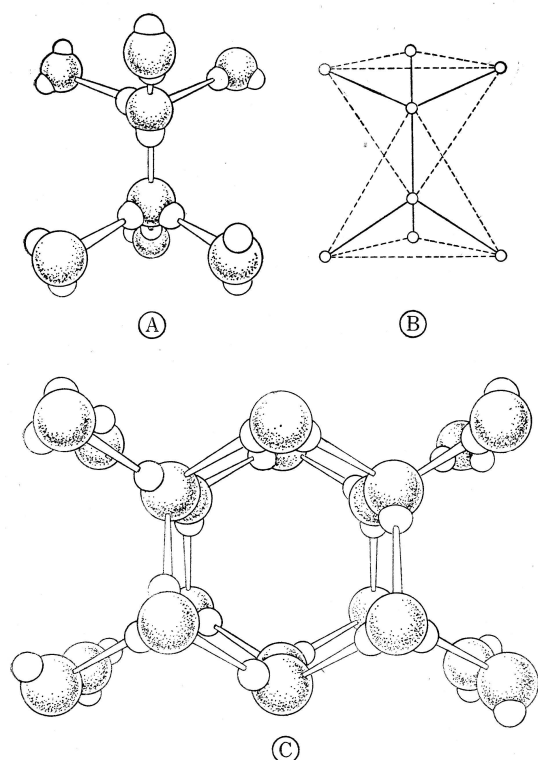


図6 氷の結晶の四面体構造

図6に氷の結晶の四面体構造を示す。水素結合によるこの構造は、水分子の隙間だらけで間に他の物を取り込む能力をも示している。同時に水分子のクラスター仮説やその他の伝説も呼び込むのである。

7. おわりに

物理学の中に、人間原理というものがある。「宇宙が人間に適しているのは、そうでなければ人間は宇宙を観測し得ないから」という論理を用いる。

これは多重宇宙説であり、われわれの住む宇宙では、いろいろな物理定数がうまく調節されている説明を与える。

ブランドン・カーターはこれをさらに進めて、知的生命体が存在し得ないような宇宙は観測され得ない。よって、宇宙は知的生命体が存在するような構造をしていなければならない、という「強い人間原理」を示した。スティーヴン・ホーキングは、宇宙の時間が逆転する可能性を述べた上で、そのような現象を人間は観測できないとした。人間が宇宙を観測する時、それは人間の脳に記憶として蓄積されるが、時間が逆転すれば記憶は失われていくので、観測は不可能になる。よって、時間が過去から未来へと進むのは、人間がそのような時間の流れる宇宙しか観測できないからとした。

水もこの人間原理に従っている。水の微妙に調整された、驚くべき振る舞いは知的生命体が存在するように仕組まれた絶妙な配剤である。

参考文献

- (1) 「「一酸化二水素」ジョークで、米国のラジオ番組DJが無期限謹慎処分に - WIRED 2013.5.15 WED 版」
: <http://wired.jp/2013/05/15/dihydrogen-monoxide-joke-gets-djs-suspended/>.
- (2) Kenneth Sydney Davis (Author) , John Arthur Day:“Water: The Mirror of Science (Science Study Series, S18)”, Anchor Books, 1961.
- (3) 「ウィキペディア「氷」」:
<http://ja.wikipedia.org/wiki/氷>, 2013.
- (4) 「ウィキペディア「超純水」」:
<http://ja.wikipedia.org/wiki/超純水>, 2013.
- (5) A. D. Moore:“Electrostatics”, Doubleday & Company, 1968.