

Circulating Water in Nature and Our Lives

- Water Literacy for teachers -

Teruo Yoshino, Professor Emeritus
International Christian University

In this article, a key feature of water, "water circulation" is described from different scale-views for teachers to open children's eyes toward the uniqueness and significance of water, and the relationship with life including human being on this Earth.

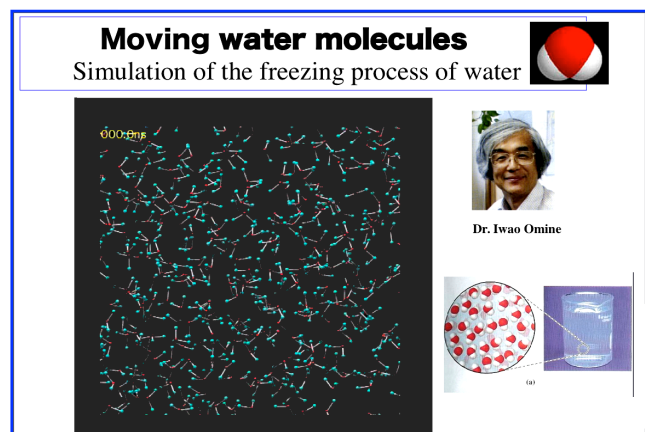
1. Nanoscale: dynamic motion of water molecules.
2. Ordinary scale: water in plants and our body.
3. Macroscale: water cycle in nature.
4. Ultra macro scale: our earth is a water planet nurturing life.

1. Nano scale: dynamic motion of water molecules

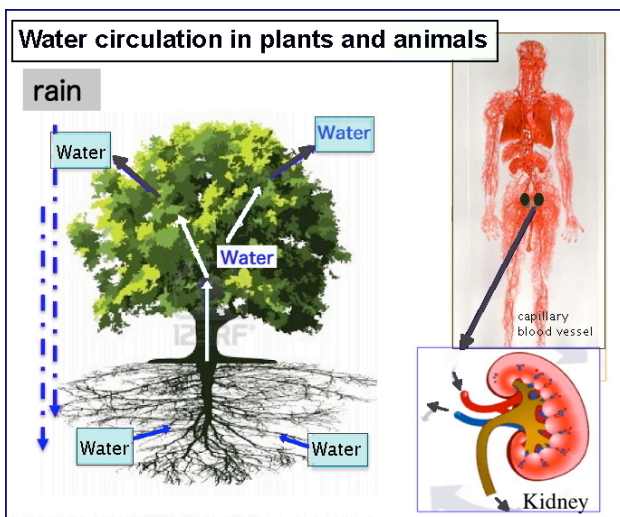
You can see water everywhere as tap-water, rain, river and sea. So, people think water is an ordinary substance and not special at all, because water is abundantly seen in their daily lives. But, from the scientific view, water is quite abnormal and unique substance.

Dr. M. Chaplin says water has 67 anomalous properties, and he gives the precise scientific explanation in his web-article [1]. This article is worth reading for teachers to tell to pupils about some examples found in daily life. But, I would like here to just point out that these unique properties are the basis of our life and natural environment as exemplified later.

Water is a liquid assembled of very small particles called molecule. Water in a glass looks still, not moving. But, water molecules are always dynamically moving in a nanoscale view (1m/1,000,000,000) as shown in simulation movie by Dr. I. Omine [2], the Director of Molecular Science Res. Center. The motion and the mutual interaction (dynamic network) are the basis of unique properties of water observed in ordinary and macro-scale phenomena as well.



2. Ordinary scale: water in plants and our body sustains their lives.



Then, let us look at water in ordinary scale; first in plants. Water circulates in plant and sustains the life as follows; Water is absorbed from roots and moves up to trunk and leaves with carrying minerals and nutrition. Finally, water evaporates from leaves into air, that prevents tree from the overheat.

Thus, water circulation is a life-sustaining mechanism of plants.

Water in animals circulates with heart pump through blood capillary like human body, carrying nutrition and oxygen even to the terminal.

A man intakes 2.5 liters water everyday and discharge the same amount, but water is recycled about 100 times in a body by removing

wastes with kidney. Kidney is water recycling apparatus and providing water needed for driving biological reactions in the body.

Photo-synthesis ?

Green plants produce glucose and oxygen from water and carbon dioxide by sunlight.

$$6 \text{ H}_2\text{O} + 6 \text{ CO}_2 \xrightarrow{\text{sunlight}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$$

Water carbon dioxide Green plant glucose → starch cellulose oxygen

Meaning of photo-synthesis:
 Water and carbon dioxide are "cinders" produced by burning and respiration to earn energy. Reproducing system to change "cinders" to useful materials (nutrition) and oxygen.

Photo-synthesis is an essential natural factory to sustain lives of plants and animals on the earth.

What is photo-synthesis? It is a natural system in green plants, producing glucose and oxygen from water and carbon dioxide with sunlight (actually using solar energy).

What is the meaning of photo-synthesis ? : Water and carbon dioxide are "cinders (residues)" produced by the cellular respiration in order to get energy. Water and carbon dioxide are also produced by burning woods, coal and petroleum in our daily lives. Therefore, photosynthesis is a reproducing system changing "cinders" in nature to useful materials (glucose, an essential nutrition for life and oxygen).

Glucose is further converted to carbohydrates (starch and cellulose), proteins and lipids in a body. So, photo-synthesis is an essential natural factory to sustain lives of plants and animals on this Earth.

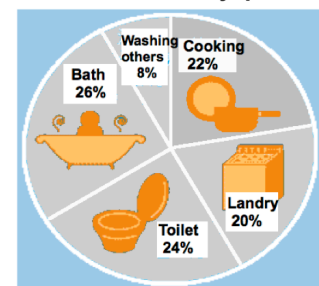
How much do we need water for daily life?

One person in Tokyo uses about 300 liters everyday for well known purposes as shown in the right figure. 150 liters for the world average, and about 50 liters in dry areas in Africa.

Advanced countries use more water than developing countries for daily lives, agriculture and industry. Water is important resource like petroleum and coal, but must be shared with everyone. We have to seek for saving water in our daily live, for example, by reusing bath water for laundry and toilet for sustaining our living and life.

Water in our daily life

300L /day, person



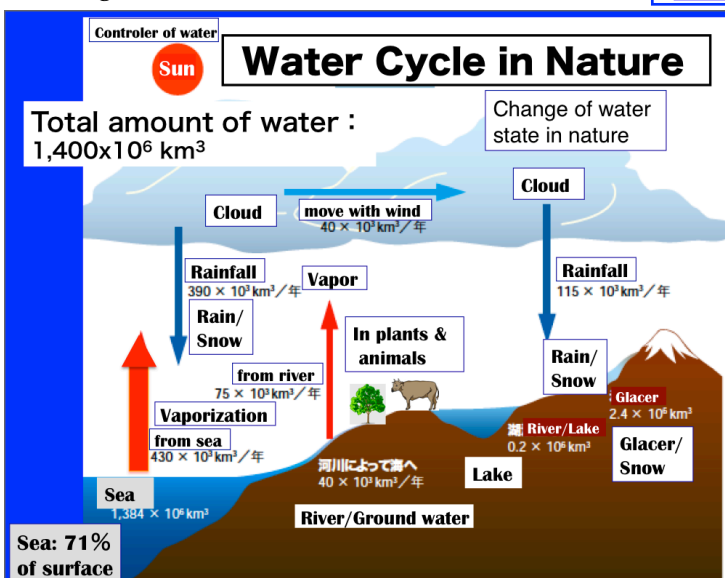
Tokyo Metropolitan Gov. of Waterworks(1997)

3. Macro scale: water cycle in nature

Let us look water in macro scale; First, see the various appearances of water moving in nature (see right figure). This is a subject for 1 & 2 grade pupils.

Water is found as river, in green forest and grasses, fields producing crops, floating cloud (vapor) in the sky, running as ravine, freezing as glacier (ice) and abundant as sea water nurturing fishes, marine plants and planktons. Water is the essential element of life and making beautiful natural environment.

Various appearances of water in nature



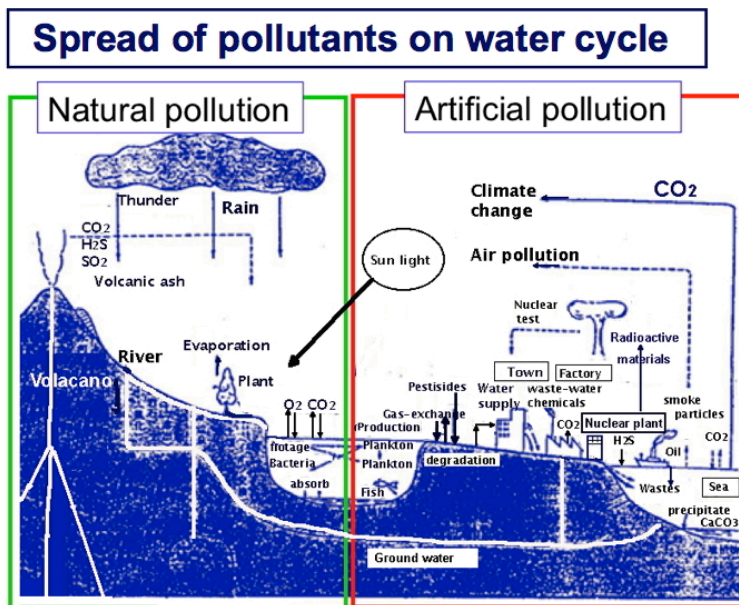
Water Cycle in Nature: this is a most important topics to be taught, I think. Water Cycle is the circulation flow of water with changing the states by solar energy; sea water evaporates to vapor and moves with wind as cloud toward land, and then falls down as rain water or snow.

Total amount of water on the Earth remains unchanged since the primitive age and constantly circulated over four billion years.

Just keep the amount of circulating water ($40 \times 10^3 \text{ km}^3$ (tera ton)-a-year) in mind.

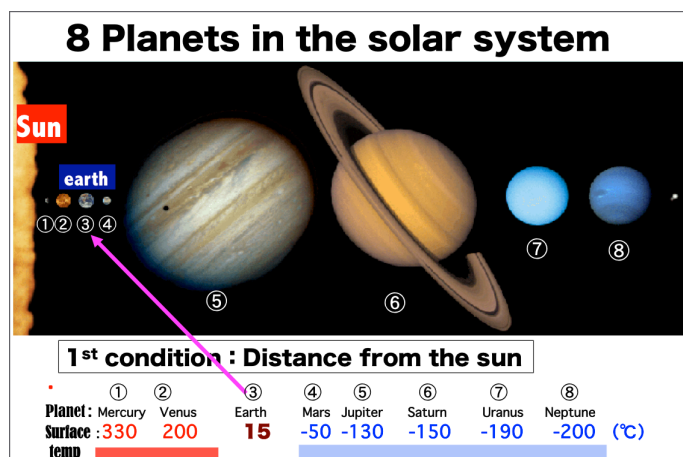
What is the meaning of Water Cycle? Essential questions for the following reasons.

- 1) Natural system changing sea water to clean water (40 tera ton-a-year regularly provided with free of charge)
- 2) Energy flow and energy resource (hydro power) provided by rain water dropped in the mountainous area (40 tera ton-a-year).
- 3) "Water resource" for human being: circulating water (river and ground water) from land to sea. (40 tera ton-a-year; 0.003% of whole water).
 - Water resource : for agriculture, industry, our domestic lives.
 - Sustaining lives of all plants and animals
 - Refreshing and offering comfortable environment to human being.
- 4) Sustaining the mild climate of the Earth. Preventing the surface of Earth from overheating with sunlight by vaporizing sea water and also absorbing carbon dioxide (+15°C, average surface temp.) Thus, Water Cycle is an essential life-sustaining cycle.



But, if poisonous materials are put into the water cycle, they are dissolved in water and spread in nature. Such materials are called pollutants. For example, natural poisonous gases spurt from volcano, and artificial pollutants like wastes from factories and houses, radioactive materials from nuclear plant, carbon dioxide produced by industrial activities using petroleum and coals.

Polluted water is not resource any more for us and put our life at risk. Human being is a part of nature and given a lot of natural bless, then must not destroy the blessed water system.



4. Our earth is a water planet nurturing life

Finally, we will have a ultra-macro view on water: Earth is water planet where organisms are living. Not difficult knowledge but attractive to children, I think.



Basic question here is **Why only the Earth in 8 planets in the solar system has such a huge amount of liquid water as sea ?**

2nd Condition: size

No water on the moon. Why?
Distance between the sun and the moon/earth is almost same.

Gravitation of the moon: 1/6 of the earth

Surface temp. of the moon:
110°C in the daytime
-180°C at night

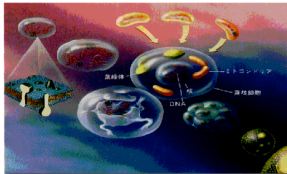
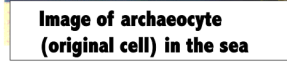
The required conditions is : atmospheric (surface) temp. must be between 0 and 100 °C (under 1 atmospheric pressure) .

First, compare the distance between the Sun and 8 planets in the solar system, and then, their surface temp. As seen in the left figure, 15 °C for Earth, and over 200 °C for inner planets and lower than -50°C for outer planets. Children may understand water can exist as liquid only on Earth.

Second, think about Moon and Earth. No water on the Moon. Why? Distances between the Sun and the Moon/Earth are almost same. But, the gravity is different due to the size; Moon's gravity is 1/6 of Earth, then, water on Moon's surface spread out to space. Then, surface temp. of the Moon is 110°C in the daytime and -180°C at night. In such condition, no organism could survive.

Children may understand the Earth fills the two conditions by a miracle, and then make it possible to water planet.

Final interest is " **Why living organisms exist in the Earth ?** (The following answer is still a hypothesis).

Why living organisms exist in the earth ? (Hypothesis)	
Life generated in the sea 3.8 billion years ago.	Genesis of living organism 
▼All organisms including animals hold water to sustain their life.	Image of archaocyte (original cell) in the sea 
▼ Human species appeared 2 million years ago, holding water, 2/3 of the weight.	

Life generated in the sea 3.8 billion years ago. All organisms including animals hold water to sustain their life. Human species appeared 2 million years ago, holding water, 2/3 of their weight, necessary for sustaining the life.

During 4.6 billion years of the Earth history, it has become rich in various kinds of plants and animals living in the interrelationships (network) with each other. Human being appeared in the last place among all animals, but changed the natural environment and

consumed vast amount of natural resources on the earth. Who is responsible for changing the future?

Summary

1. Water circulates in our body to sustain life and domestic lives, as well as in nature to control the natural environment and climate.
2. All living organisms including human being need water to live, and have to share the limited amount of clean water (40 tera ton-a-year) provided *gratis* by water cycle in nature.
3. The earth is a unique planet where water exists as liquid, vapor and ice, and always circulates on the Earth to make it possible for various lives to be generated and sustained.
4. These basic and global knowledge should be given to young people and connected with their local acts and experiences. This is a water literacy for mature citizens.

Reference:

1. Martin Chaplin, Anomalous properties of water,
<http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>
2. Iwao Omine, "Molecular Dynamics Simulation of the Ice Nucleation and Growth Process Leading to Water Freezing" nature 416, p.409-500
3. Teruo Yoshino, "Water stage": class website at International Christian University,
<http://subsite.icu.ac.jp/people/yoshino/waterstage.html> (Japanese).
4. 「水を知る旅に出よう Let's start journey for knowing water"」
Science Window, April 2010, JST. <http://sciencewindow.jp/mizu/>



自然と人間生活の中を循環する水

—小中学校教師のための水リテラシー—

吉野輝雄 国際基督教大学名誉教授

水の最も重要な特性である「水循環」を以下に示す異なるスケールで見ることによって水のユニークさと重要性について子どもたちの目を開かせ、さらに、私たちがすむ地球上の人間をはじめとする生命と水との関係について考える。

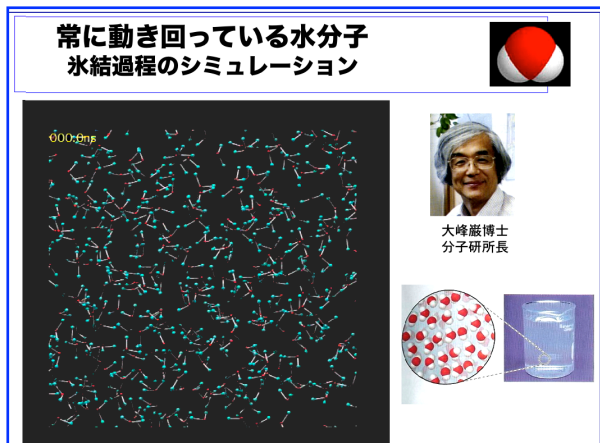
1. ナノスケールの視点で：ダイナミックに絶えず動いている水分子
2. 日常スケールの視点で：植物や動物の身体の中を循環している水
3. マクロな視点で：自然における水の大循環
4. 超マクロな視点で：生命のすむ水惑星・地球

1. ナノスケールの視点で：ダイナミックに絶えず動いている水分子

水は、水道、雨、川、海としてあらゆる場所で見ることができる。そのように水は日常生活のどこにも存在しているので、多くの人々は、水はありきたりの物質で、とりわけ注目すべきものではないと考えている。しかし、サイエンスの目で見ると、水は他に例のない“異常”な物質で、とてもユニークな性質を持っていることが分かってくる。

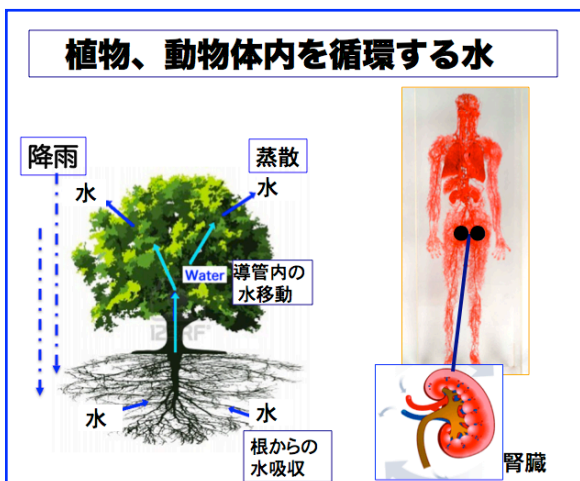
M.チャップリン博士は、「水には67の異常な性質がある」とウエブサイト記事の中で述べ、一つの性質について詳しい科学的説明を与えている [1]。この記事はたいへんおもしろく、ていねいに読む価値がある。教師が生徒たちにその中からいくつかの例を取り上げ、日常生活の中で見られる現象例について話して頂きたい。しかしここでは、以下に解説するので「水のユニークな性質が我々の命と自然環境を支える基本要素となっている」という事実を指摘するだけにとどめる。

水は「分子」と呼ばれる極小の粒子が集まってできている。ガラス容器の中の水は静止して動いていないかのように見えるが、ナノスケール（1m の1億分の1）で見ると、水はダイナミックに絶えず動き回っている。その様子を、大峯 巖博士（分子研所長）が興味深いシミュレーション動画で見せて下さった [2]。私たちの日常生活やマクロスケールで営まれている自然現象に現れている水のユニークな性質は、水分子の動きと相互作用（水分子間の結合と切断）が基礎となっている。



2. 日常のスケールの視点で： 植物や動物の身体の中を循環し 生命を支えている水

水は植物の中を循環し、生命を支えている。すなわち、ミネラル、栄養分が溶けている水が根から吸収され、導管という毛細管が伸びている幹・枝の中を通過して木の上方に移動し、葉・花・実には運ばれている。この過程が植物の命を支える仕組みである。最後に、水は葉（気孔）から水蒸気として空気中に蒸散する。この“吸引ポンプ”と毛細管現象により、植物体内を水が巡り植物の成長を助け、木の灼熱化を防いでいる。生命活動は溶解能力の大きい水



を含む細胞の中で営まれ、水が温まり難く冷めにくいというユニークな性質を持っている事が支えとなっている。

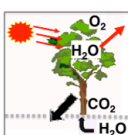
動物（人）体内の水循環：

水は動物体内に巡らされている毛細血管を通じて身体の隅々にまで酸素と栄養物が運ばれる。復路では、老廃物が腎臓に運ばれ、ろ過された血液は心臓（ポンプ）に戻り、再び体内を循環する。また、運動をして体温が上がると発汗し、蒸発熱の大きな水が熱を下げ“熱中症”になるのを防ぐ。

人は一日約 2.5 リットルの水を摂取し、同量の水を排泄する。実は、体内ではその 100 倍量の水がリサイクルされている。腎臓は水再生／廃棄物除去装置であり、体内で営まれている生体反応に必要な水を供給し続けているのだ。

光合成とは？

緑の植物が、太陽光（エネルギー）により、二酸化炭素と水からブドウ糖（栄養源）と酸素を合成する過程。



$$6 \text{H}_2\text{O} + 6 \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{太陽光}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$$

水
二酸化炭素
緑色植物
ブドウ糖→デンプン
(栄養源)
セルロース
(植物組織)
酸素

光合成は、地球上の植物、動物の命を支える物質を生産する必須の“生命維持工場”である。

「光合成とは何か？」

光合成は緑の植物が営む生体内化学反応で、太陽光の力により（太陽エネルギーを利用して）水と二酸化炭素からブドウ糖と酸素を合成する。光合成の意味を考えてみよう。水と二酸化炭素は、体内で「内呼吸」というエネルギー生産した結果生じる“燃えかす”である。また、人間生活の中で木や石炭・石油を燃やした後にも生じる“燃えかす”である。とすると、光合成は、自然界の“燃えかす”を有益な物質（栄養源の一つであるブドウ糖と酸素）を再生産するシステムであることが分かる。

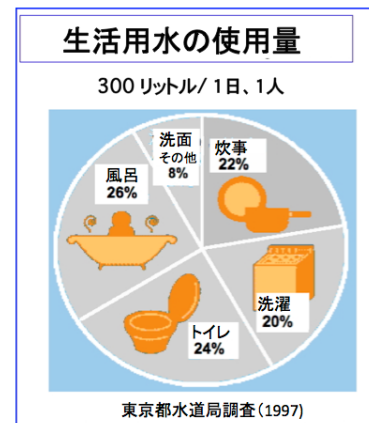
ブドウ糖は、体内でさらに生命にとっての必須栄養素である炭水化物（デンプン、セルロース）、タンパク質、脂質に変えられる。というわけで、緑の植物が営む光合成は、この地球に生きる動植物の命に必要な物質を生産し続けている「自然の生命維持工場」である。

ブドウ糖は、体内でさらに生命にとっての必須栄養素である炭水化物（デンプン、セルロース）、タンパク質、脂質に変えられる。というわけで、緑の植物が営む光合成は、この地球に生きる動植物の命に必要な物質を生産し続けている「自然の生命維持工場」である。

私たちは毎日の生活にどれだけの水を使用しているか？

東京に暮らす大人は一日一人です約 300 リットル使用している。その内訳は誰もが知っている通りである（右図）。世界平均は 150 リットル、アフリカの乾燥地帯では 50 リットルで生活している。

先進国は途上国に比べ大量の水を消費している。生活用水だけでなく、農業、工業用水も同様だ。将来の水不足が心配される。水は、石油・石炭と同じように重要な資源であるが、命を支える必須要素なので、すべての人と共有されるべきである。持続可能な未来の社会を築くためには、私たちは生活を見直し、できるだけ節水に努めなくてはならない。例えば、風呂の水を洗濯やトイレに再利用する生活スタイルを考える時ではないか。

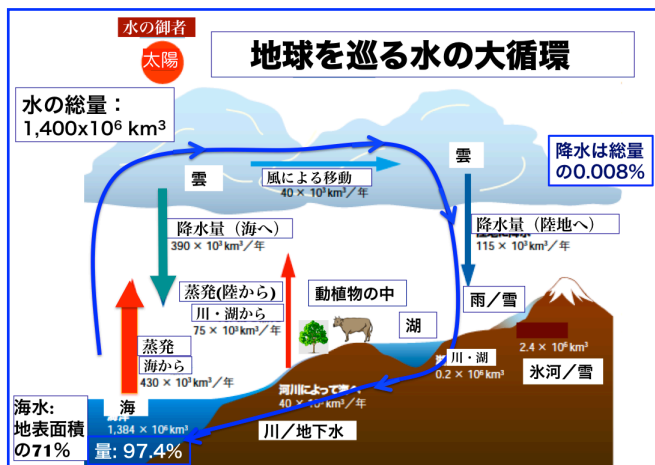


3. マクロな視点で：

自然における水の大循環

マクロな視点で水を見てみよう。まず、自然界において様々なかたちで現れる水の姿に目を向けよう（右図）。水は、川、緑の森や草木、米麦などの穀物を生産する田畑、空に浮かぶ雲（水蒸気）、渓谷を流れる清流、雪や氷河（氷）、そして、豊かな水量をたたえる海は魚、海草、プランクトンを育む所として存在する。まさに水は自然環境と生物にとって無くてはならない存在である。

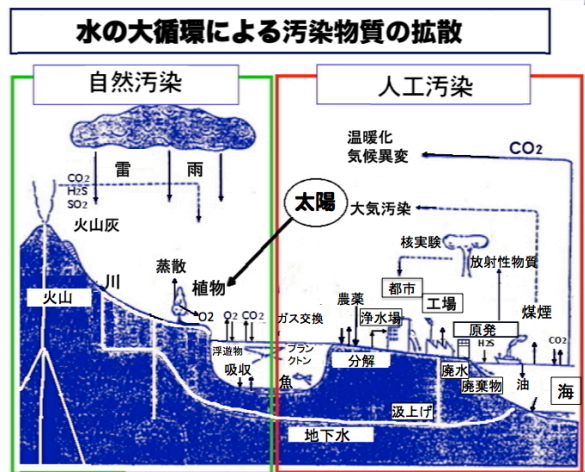




水の大循環は生徒に教えるべき最も大事な題材である、と私は考えている。地球上の水の総量は $1,400 \times 10^6 \text{ km}^3$ で、その 97% は海水である。地球表面の 71% を覆う海水が太陽熱によって蒸発して上空で雲となり、その約一割 (40 兆トン/年) は風に乗って陸地に移動する。地上から蒸発した水蒸気と合わせ、年間 115 兆トンが雨雪となって降る。山地では雪氷河となって積もり、湖沼に一時的に溜まり、やがて川と地下水として (40 兆トン/年) 海に戻る。これが「水の大循環」(左図) である。このように地球上の水は循環していて太古の昔から総量はほとんど変わらない。

この意味は計り知れない。海水の淡水化、水力発電エネルギー源、人間にとっての水資源 (農業、工業、生活水)、地球の灼熱化防止・温和化 (平均気温 15°C)、生物の生存環境維持、気象の支配などだ。人間が利用可能な淡水の量 (水資源) は総量の 0.014% に過ぎないが、水の大循環の過程で毎年 115 兆トンが降水として地上にタダで供給されている。何という恵みか。

しかし、21 世紀となり世界人口が 70 億人を超え、水不足が間近かに迫っている。この人類の危機にどう向かい合うかが、これからの正に死活問題である。子どもも含めて誰一人、生命と生活に関わるこの大問題から逃げるできない。

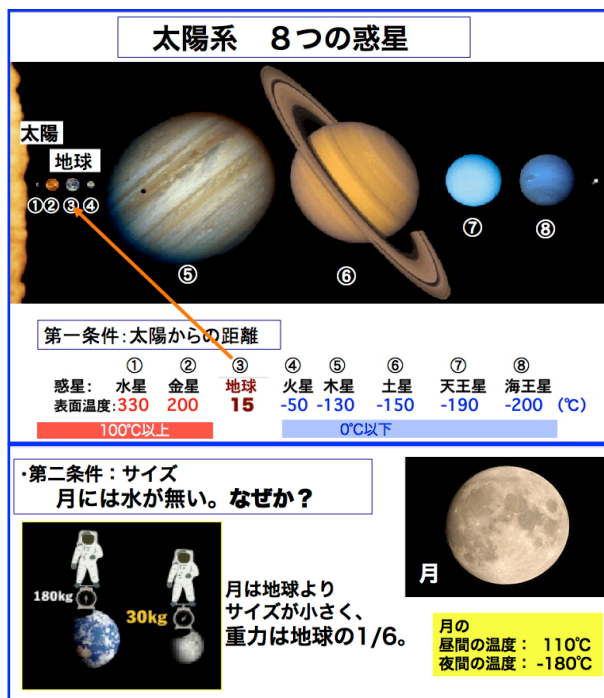


しかし、もしも水の大循環の中に毒性のある汚染物質が捨てられたならば、水の流れと共に運ばれ自然界に拡散して行くだらう。例えば、火山の噴火で有毒ガスが拡がる「自然汚染」や工場や家庭から出される廃棄物、原子力発電所から漏れ出る放射性物質、石油・石炭を使用する工場からの二酸化炭素のような「人工汚染」物質などが川や海に流された場合である。汚染された水は、最早資源ではなく、人間をはじめ生命を脅かす危険物質に変身する。人間は自然の一部であり多くの恵みを自然から受けながら生きている。だからこそ、命と生活に不可欠な恵みの水循環を破壊してはならないのである。

4. 超マクロな視点で： 生命のすむ水惑星・地球

8 つの太陽系惑星の中で地球にだけ大量の液体の水が存在する。水が液体として存在する温度は $0-100^\circ\text{C}$ (1 気圧として)。水星表面の平均温度は 300°C 、金星は 200°C 、地球は 15°C 、火星 -50°C 、火星よりも外側の星ではもっと低くなる。表面温度は太陽からの距離が大きくなると低くなる。地球と太陽との距離は、水が液体として存在できるちょうど良い距離にあるのだ。

一方、月も地球も太陽からの距離にほとんど違いがないのに、月には海がない。これは、月のサイズが小さく引力が地球の 6 分の 1 だからだ。地球と月は同じ頃にできたのだが、月面上の水は宇宙空間に飛散し水のない衛星にな



ったと考えられている。地球は太陽からの距離とサイズが水を保つのにちょうど良い条件を満たしているのだ。

月の表面温度は、マイナス 180℃と 110℃の間を毎日変化している。地球の一日の温度変化が小さいのは水があるから。水は比熱が大きく、冷えにくく温まりにくいので、地球の一日の温度変化は小さく抑えられている。地球環境には水が大量にあるので、平均温度が 15℃！水のユニークな性質によって地球環境が支えられている事が分かる。

最後に「なぜ地球には生命が存在するのか？」という大問題について考えよう（以下に述べることは、未だ仮説であるを予めお断りする）。

生命は 38 億年前に海の中で誕生した。すなわち、自己を複製できる原始細胞が海の中で発生し、やがて複数の細胞が複合し多細胞生物へと進化（複雑化）していった。人類の祖先は今から 200 万年前に地球に現れた。あるゆる生物は生命を保つために水を抱えている。人間の場合、体の 65%は水で、どの組織・細胞にも水が含まれている（血液の 63% 筋肉の 76%、骨の 12%が水）。この地球には多様な植物、動物が共存し、豊かな自然を造り、互いに影響を与え、受けながら生きている。生物の中で最後に地球に現れた人間は、自然環境を変え、膨大な資源を消費し続けている。人間は自然の一部として環境と他の生物とうまく共存していると言えるだろうか？誰がこの地球の未来に責任をもつのだろうか？

なぜ地球に生命が存在するのか？（仮説）

**海の中で 38億年前
生命が発生した**

もう一つの奇跡

原始細胞 / 海の中

• 原始地球上の海辺で生体高分子（タンパク質、核酸）がつくられ、自己複製できる原始細胞＝原始生命が発生した。

全ての生命体は水を抱えている。生命維持に水が必須。
ヒトの体重の2/3は水。

まとめ

1. 私たちの身体を巡る水は生命活動を支え、日常生活にも水は不可欠である。それだけでなく自然環境を造り、気候を支配している。
2. すべての生物が必要としている水は、地球創成の頃から自然界に備わっている「水の大循環」により天からの恵みとして与えられ、総量は変化していない。毎年陸地に降る降水量 1 1 5 兆トンの中 4 0 兆トンが、人間が利用できる水資源であり、水環境の保全と水資源の共有が持続可能な世界を築くための基本課題である。
3. 地球は、「生命が存在する水惑星」である。すなわち、水が液体、水蒸気、氷の状態が変化しながら存在するユニークな惑星である。また、海の中で発生した生命が多様な生物に進化し、循環する水によって生存が可能となっている。
4. これらの基本的でグローバルな知識を、日常の行動と経験に結びつけ、適切な時期に次世代を担う若者たちに伝えるべきである。それが成熟した地球市民を育てるための「水リテラシー」である。

参考資料:

1. Martin Chaplin, 「水の異常な性質」, <http://www.lsbu.ac.uk/water/anmlies.html>
2. Iwao Omine, "Molecular Dynamics Simulation of the Ice Nucleation and Growth Process Leading to Water Freezing" nature 416, p.409-500.
3. 吉野輝雄, 「水の広場」: 国際基督教大学におけるクラスウェブサイト, <http://subsite.icu.ac.jp/people/yoshino/waterstage.html>.
4. 「水を知る旅に出よう」, Science Window, April 2010, JST (日本科学技術振興機構). <http://sciencewindow.jp/mizu/>

