



# 筑紫女学園大学リポジット

## 論理的思考を養う題材（2）水分子の循環

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2014-05-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 速水, 良晃, HAYAMI, Yoshiteru メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://chikushi-u.repo.nii.ac.jp/records/313">https://chikushi-u.repo.nii.ac.jp/records/313</a>

## 論理的思考を養う題材 (2) 水分子の循環

速水良晃

### A Topic for Teaching and Learning that Leads to Logical Thinking (2) — Circulation of Water Molecules —

Yoshiteru HAYAMI

#### 抄録

文科系大学におけるリベラル・アーツとして設置されている理科系科目の中で、学生に興味を持たせるための題材の例として、今回は「水分子の循環」を採り上げる。この題材は最近いろいろな教育現場で採り上げられているが、高校で化学を深くは学習していない学生に対して、地球環境問題の中に出てくる物質循環や水質汚染という言葉の意味をイメージとして理解させることに効果があると思われる。中学生レベルの理科の知識と、仮定ではあるが論理性を基にした説明によって意外な結論が得られるので、理科系科目の導入題材として最適である。

#### はじめに

文科系大学における理科系科目設置の意義は、リベラル・アーツそのものであり、現代社会で安全で便利に生活していくために必要な科学知識や、科学の本質である論理的思考の習得であり、義務教育以来の教育目標の継続でもある。

しかし前報で採り上げたように、「理科離れ」[1] や「理科系科目の履修離れ」[2] の原因である(1) 理科系科目に付随する抽象的概念が学習を困難にしているということと、(2) 指導要領の改訂と入試科目の削減の影響に加えて、(3) 1990年代初頭から始まった18歳人口の減少に伴う競争軽減による「学習離れ」[3] も進行しているようで、本学の多くの学生は卒業後の就職に直結していないように見える理科系科目に履修の必要性をあまり感じていないようである。

このように種々の分野の基礎科目としてのリベラル・アーツの重要性が理解されていない状況ではあるが、社会生活に必要な科学的教養いわゆる科学リテラシーを学生に習得させるために、

理科系科目へ興味を持つような講義題材を探るとというのが、本シリーズのテーマである。

科学的な好奇心を高揚させるトピックの例として、今回は「水分子の循環」を紹介する。この題材は最近、いろいろなウェブページや教育現場で採り上げられているようであるが、20世紀物理学の偉大な成果である量子力学の発展に大きな貢献をしたシュレーディンガーが「生命とは何か」で引用したように、19世紀の偉大な物理学者ウィリアム・トムソン（ケルヴィン卿）が「原子はなぜそんなに小さいのか？」を説明するために使ったのが始まりのようである[4]。

まず、どのようにしてこの題材に辿りついたかを説明する。学校建築などに広く使用されていたアスベストは肺癌や中皮腫の原因になるとして1970年代に大きな問題になったが、当時の対策が不完全だったので今世紀に入って再び大気汚染物質として問題になっている。現在、日本やアメリカにおける大気中アスベスト敷地境界基準値は10本/L（全石綿として）である。佐藤らが、1988年に測定した大気中のアスベスト濃度は0.19~2.83本/Lの範囲で、平均値は0.63本/Lであった[5]。WHO（世界保健機構）によれば、世界の都市部の一般環境中のアスベスト濃度は、1~10本/L程度であり、この程度であれば健康リスクは検出できないほど低いとされている[6]。私は日頃、日本人の清潔好きは過剰であると思っているが、さすがにこれらのデータを見た時には、呼吸の度にアスベストを吸い込んでいて本当に大丈夫なのかと不安を覚えた。

それまでの講義では、「環境」分野の物質循環の例として、「炭素の循環」を採り上げ、植物の光合成と食物連鎖を組み合わせると、人間も仙人と同じように霞を食って生きていく能力を持っているという笑話をしてきたが、身近な所にアスベストが浮遊しているという事実を知って、循環している物質を具体的に計算することで物質循環を説明してみようと思った。計算例としては、混合物である空気の成分として存在している酸素や二酸化炭素ではなく、単体として一番身近な存在である水を選んだ。データも揃っていたし、意外な結果が得られたので、2、3年前から講義の題材として使い始めた。

自分としては独自に開発した題材だと思っていたが、昨年の講義で使用した後、概要とその内容についての考察を課題とするレポート提出を求めたところ、数人の学生がウェブページを利用したと考えられる類似した内容のレポートを提出したので、調べてみたら前述のシュレーディンガーの「生命とは何か」について記述したウェブページがあり、私の思考はケルヴィン卿の跡を辿っていたことが判明した。

但しシュレーディンガーは、その当時の知識人に対しての講演録である「生命とは何か」において、物質が無数の非常に小さい原子や分子から構成されているということの説明として「水分子の循環」を使っていたが、私の講義では理科系科目をあまり学習していない学生に対して、物質循環や水質汚染という言葉の意味を具体的なイメージとして理解させるために使っている。

## I. 地球における水の形成と役割

講義としては地球環境中での水の循環の話なので、先ず地球でどのようにして液体の水が形成され、なぜ生命にとって水が重要なのかという話から始める[7]。

宇宙は137億年前に、惑星地球を含んでいる太陽系は46億年前に生まれたと言われている。出来た直後の惑星、例えば地球や金星の表面は微惑星の衝突エネルギーの熱で岩石が融けたマグマオーシャンによって覆われていた。その当時の地球や金星の表面温度は、マグマの熱と大気圏に充満していた二酸化炭素の温室効果でものすごく高く、全ての水は、水蒸気だった。太陽系に存在していた衝突すべき微惑星が衝突し終わると、惑星表面のマグマは、冷えて硬くなってきたが、地球は金星や他の惑星とは異なる方向に変化した。簡単に言うと、金星はあまり変化せずに、まだ出来た当時の姿を示していると考えられている。

地球の場合、大量の水蒸気の存在が、地球の歴史に素晴らしい影響を与えた。およそ300度まで表面温度が下がり、大量の水蒸気から熱い雨を長期間作り出すことで海が生まれた。膨大な量の水蒸気が液体の水に変化し、地球の表面を覆ったので、地球表面の構成成分の多く（例えばカルシウム）がイオンとして海水に溶け込んだ。大きな海が出来たので、大気中の莫大な量の二酸化炭素が徐々に海水に溶け、カルシウムイオンと結合することにより、固体の炭酸カルシウムに変化した。すなわち、二酸化炭素の大部分は、海の中で石灰岩に変化した。

このように温室効果が減少したので、表面温度は更に生物の生息に都合良い条件に、大気圧は現在の値にまで下がった。温室効果ガスの代表である二酸化炭素は、現在の地球環境の大きな問題であるが、その量はとても少なく、空気のわずか0.03%である。それでは、現在の金星または初期の地球の空気に、どれくらいの量の二酸化炭素が含まれていただろうか？金星の大気圧は90気圧で、その中の96%が二酸化炭素なので、現在の地球の約30万倍の濃度である。このものすごい温室効果のために、金星の表面温度は450度である。

27億年前、最も原始的な植物プランクトンであるシアノバクテリア（藍藻類）が光合成によって酸素を生産し始めた。酸素の発生によって最初に起こったのは、全世界の海水中に存在していた鉄イオンの酸化であった。鉄と酸素のそのような親和性を、かなり多くの生物がヘモグロビンやその類似物質として利用している。15億年掛かって海水中の全ての鉄イオンが酸化鉄（鉄錆）に変わった後、酸素は水中そして大気中に溜まり始め、大気圏の酸素の一部は強い紫外線と反応してオゾンが発生させた。この蓄積したオゾンによってオゾン層が形成され、その当時地上まで到達していた強い紫外線を遮ってくれるようになったので、それまで水中で生活していた生物が上陸出来るようになった。このように充分生存可能な環境となった地球上で、全ての生物が其々の環境に適応して異なった方向に進化していった。

前述のように、最も重要な要素は初期の地球における大量の水の存在である。全ての生物は生命維持のために、体内に或る程度の水を含んでいる。水の状態は、温度と圧力に応じて気体、液体、固体と変化するが、生体に必要な成分を溶かして、それらを必要な場所へ輸送するというような生命に関連した働きをするのは全て液体状態の水である。

水は、化学式 $H_2O$ で表わされ、1つの酸素原子に2つの水素原子が結合した簡単な構造である。酸素原子は水素原子より高い電気陰性度を持っているが、もし3つの原子の配置が直線的であれば、それぞれの原子の電氣的な極性は立体的に打ち消されて、無極性分子になるだろう。し

かし、酸素原子を中心とする2つの水素原子への結合角は約104度なので、水分子中の酸素原子の部分は電氣的に僅かに負の極性を持ち、水素原子の部分は電氣的に僅かに正の極性を持つ。このように水は電氣的に極性を持った分子であり、各々の水分子は、磁石のようにそれらの間で引力を持つ。したがって水は、氷状態だけでなく液体状態でも、多数の水分子間の結合を持っているので、氷が融けて液体状態になる時や、水が蒸発して気体状態になる時には、水分子間の結合を切るために、かなりの熱を必要とする。更に、逆もまた真実であり、液体の水が凍る時や、水蒸気が液化する時には、大量の熱を取り去ることが必要である。言い換えると、水の温度を変えるのは非常に難しい。これらの稀な性質に基づく温度変化への緩衝作用によって、水は地球の気候を和らげてくれている。

その他の変わった性質として、水は凍る時に体積が9%増加する。氷が水に浮くのは周知の事実であるが、水以外に固体がその液体に浮かぶ物質は殆ど無い。そして、水が一番重くなるのは約4℃なので、水面が凍っても水中で生物が生き延びるのに役立っている。

## II. 水分子の循環

地球環境における液体の水の形成と生物に対する水の存在意義を説明した後に、生態系における物質循環やエネルギーの流れの話を進めていく。前述の炭素の循環などの話を終えた後に、物質循環のもう1つの例として、「水の循環」[8]を採り上げ、その中で特に水を構成している「水分子の循環」として考えてみるということにする。

まず、地球表面を含めて上空や地下への連続的な水の移動を意味する「水の循環」について考えてみる。循環であるから、どこが始めでどこが終わりというのは無く、地球上の水のバランスは時間に対してかなり一定であるが、水は循環過程の様々な場所で、気体になったり、液体になったり、固体になったりして、頻繁に移動している。水循環過程の具体例としては、海洋水、蒸発、昇華、蒸発散、水蒸気、凝縮、降雨・降雪、氷・雪、雪解け水、表流水、河川水、淡水、地下浸透、地下水、伏流水の湧き出し、湧水などがある。それらの循環過程の中で、地球上の全ての水の大部分、すなわち97%は海洋水の状態である。これらの水循環過程は、気候の調節や栄養分の移動など生態系の維持に大きな影響を持っている。

次が、今回の題材として採り上げた「水分子の循環」の例として、コップに入った水を地球上に均一にばらまいた後に、1すくいしたら戻ってくることがあるだろうかという話である。今から2050年ほど前の古代エジプトのプトレマイオス朝最後の女王であったクレオパトラが飲んだコップの水に印が付けてあったと仮定する。つまりそのコップの中の水分子全てに他の普通の水分子と区別できるような何かの印が付けてあったとする。その水は新陳代謝として体外へ排出され、長い時間をかけて、アレキサンドリアから地中海へ、そして大西洋や太平洋へ拡がり、さらに海の中だけにとどまらず、蒸発して雨や雪となって世界中の大地へ降り注ぎ、地下水や湖の水ともなる。このように他の水と区別できる印の付いた水分子が均一に世界中に拡がったとすると、あなたがこれから飲む水の中に、このクレオパトラの体を通ってきた、印の付いた水分子が

入っている可能性があると思いますか？

例えば、博多湾で水をコップにすくった時（博多湾の水は飲まないでください）、或いはあなたの家の蛇口から水道水をコップに注いだ時、その中に印を付けた水分子が入っていると思いますか？それとも、地球全体に、コップ1杯の水をばら撒いているから、どこへ行ったか分からないと思いますか？

どういう計算をすれば、どこかでコップ1杯の水を飲む時に入ってくる印の付いた水分子の数が分かるのでしょうか？まず地球上の水の総量がほぼ海水に等しいとして、水の総量を計算してみましょう。

$$\text{海の面積} \quad 3.6 \times 10^8 \text{ km}^2 = 3.6 \times 10^8 \times 10^6 \text{ m}^2$$

$$\text{海の平均の深さ} \quad 3750 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{海水の量} \quad 3.6 \times 10^8 \times 10^6 \times 3750 \text{ m}^3 &= 1.35 \times 10^{18} \text{ m}^3 = 1.35 \times 10^{18} \times 10^6 \text{ ml} \\ &= 1.35 \times 10^{24} \text{ ml} \end{aligned}$$

コップ1杯の水の体積は180 ml、重さだと180 g

地球上の海の水全部をコップに注ぎ分けるとすると、何杯分になるのでしょうか？

地球上の海の水全部をコップに注ぎ分けるときに必要なコップの数

$$\begin{aligned} &= (\text{地球全部の海水の量}) / (\text{コップ1杯の水量}) \\ &= (1.35 \times 10^{24} \text{ ml}) / (180 \text{ ml}) = 0.0075 \times 10^{24} \text{ 個} \end{aligned}$$

水の場合、18 gの水の中に水の分子が $6 \times 10^{23}$ 個入っている。クレオパトラのコップの中には、180 gの水が入っていた。→印の付いた水分子が $10 \times 6 \times 10^{23}$ 個 =  $6 \times 10^{24}$ 個入っていた。

この印の付いた水分子が約2000年前に地球全体の海に散らばっていき、時間と共に蒸発し雨や雪となって降って、地下水や水道の水に均一に混ざっていると考える。

どこかでコップ1杯の水を飲む時に入ってくる印の付いた水分子の数はどうすれば計算できるのでしょうか？それは次の図を見れば分かるでしょう。

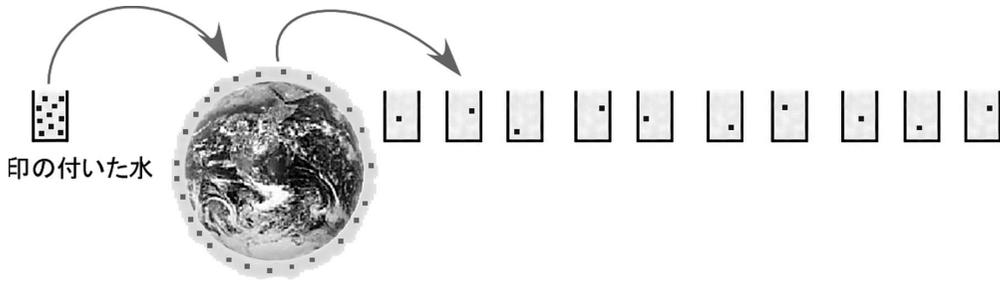


図 地球上の水をコップに注ぎ分ける

どこかでコップ1杯の水を飲む時に入ってくる印の付いた水分子の数

$$= (\text{印を付けた水分子の数}) / (\text{地球全部の海水をコップに注ぎ分けた時のコップの数}) \\ = (6 \times 10^{24} \text{ 個}) / (0.0075 \times 10^{24} \text{ 個}) = 800 \text{ 個}$$

計算結果は、均一に混ざったとすれば、どこの海ですくっても、雨水からも、湧水からも、或いはあなたの家の水道からも、クレオパトラが飲んだ水が、分子数として約800個コップの中に入ってくるということになる。→ これは何を意味しているのでしょうか？

計算結果は、物質が莫大な数の原子や分子から構成されていること、そして原子や分子の大きさが驚異的に小さいことを意味している。

これらのことは、水だけでなく身の回りの全ての物質が「歴史上の色々な経歴を持った」多くの元素から構成されていること、そしてそれらは常に変化し循環しているという重要な概念へ導いてくれる。

それは、方丈記の真髓である有名な次の1節に通じる。「ゆく河の流れは絶えずして、しかももとの水にあらず。よど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ためしなし。」

### Ⅲ. シュレーディンガーの考え

シュレーディンガーは、波動方程式を導出し量子力学分野の発展に大きく貢献した物理学者であるが、「生命とは何か」という講演会では、物理学の法則を生物学の現象に適用した様々な考えを提案しており、そのことがその後の分子生物学の誕生に大きく寄与しているのではないかとと思われる。その他に本題と別のことであるが、この約400人の聴衆を集めた講演会の開催が1943年で初版の出版が1944年ということ、その当時の戦時下の日本の生活環境や研究環境と比較すれば、甚だしい国力の差や愚かな戦争をすべきではなかったということが痛切に感じられる。

シュレーディンガーは「生命とは何か」の中で「原子や分子が非常に小さい」ということの説明に、ケルヴィン卿の「水分子の循環」の話を用いた。更に、物理や化学の法則が原子や分子1

個の動きではなくて原子や分子の集団の統計的性質から導かれているという原理から、原子1個の衝突を意味のあるものとして感じるような感覚器官は存在し得ないということを演繹的に明らかにし、そのことと原子や分子の大きさに比べて生物の身体の大きさが莫大なことの理由として、「生物体の働きには本質的に正確な物理法則が要る」という結論を導き、それを基に遺伝と染色体の問題に取り組んだ。

#### IV. 学生の反応

上記のように、私が講義題材として「水分子の循環」を使う理由は、地球環境問題において物質循環や水質汚染という言葉の意味を、具体的なイメージとして理解させ易いと思うからである。昨年度前期から今年度前期にかけての理科系4科目で、「水分子の循環」の概要とそれについての考察を課題とするレポート提出を求めた。目的とする効果がどの程度得られているかを調べるために、考察および感想の内容を分類してみた。

科目名 (レポート提出数)	環境 (44)	教職総合演習 B (8)	科学 (42)	総合講座 (生命) (97)	合計 (191)
考察および感想の主旨					
800個という意外な結論に驚いた	23	0	12	14	49
水分子の大きさは非常に小さい 液体の水を構成する水分子数は非常に多い	2	4	6	9	21
物質構成元素は循環している (入れ替わっている)	8	2	20	59	89
水を汚さないようにしなければならない	5	6	7	26	44
水分子の寿命を考えるべき	0	1	1	8	10
2000年前の水は存在していない (生きていない)	1	0	0	4	5

表 「水分子の循環」 についてのレポート内容の分類

合計で見ると、「物質構成元素は循環している (入れ替わっている)」が1番多く、「800個という意外な結論に驚いた」が2番目で、「水を汚さないようにしなければならない」が3番目で、「水分子の大きさは非常に小さい、液体の水を構成する水分子数は非常に多い」が4番目に位置している。つまり、本学の学生は「水分子の循環」という題材に対して、水分子が地球上を広範囲に循環している要因でもある水分子が非常に小さいとか、液体の水の中には物凄く沢山の水分子が入っているとかいうことよりも、世界中に印の付いた水分子が広がったという計算結果から、地球環境問題における汚染物質の循環や水質汚染という言葉をより多く連想している。したがって、「水分子の循環」という題材は環境教育の教材としても有効であると思われる。

その他に、レポートに記載されている内容の中には、科学リテラシーとして訂正しておくべき典型的な誤解が幾つかあった。表の項目にも1つ入れたが、代表的な5つを紹介しておく。

- (1) 2000年前の水は存在していない (生きていない)。
- (2) 水、雨、雪はそれぞれ違う分子である。

- (3) 誰かの使用後の水を飲むのは気持ちが悪い。
- (4) コップに800個の水分子が入っているということは、つまり、今、飲んでいる水も何年前かに別の人が飲んだ水と同じである
- (5) 地球上に動植物に触れられていない未使用の水は有るのか？

これらの記述の問題点は

- (1) 分子はそれらが存在している状況に応じて、原子間結合が切れて解離し、元の分子ではなくなる。分子が生成して解離するまでの時間を分子の寿命と呼ぶこともあるが、学生の記述は無生物である原子や分子が生物と同じように命が有り、時間が経つと死んでしまうと考えているようである。
- (2) 全ての物質が温度や圧力の変化に応じて、気体、液体、固体の3態を採るということを理解していない。
- (3-5) 水道水がどのようにして水源地へ集められ、浄化され、各家庭へ給水されているかを知らないようである。

なお、表の中の「水分子の寿命を考えるべき」という項目は、水の中では水分子中の酸素原子と水素原子の結合が100万分の1秒以下で切れて、近くの水分子同士で結合の相手を交換しているので、元の水は残っていないという話がウェブに載せてあり[9]、その内容をレポートに記載しているようであった。確かに、水分子の寿命まで考慮するとクレオパトラが水を飲むという行為の途中で、水分子は変化してしまっている。水分子の寿命まで考慮して物質循環を考えるためには、水分子に印を付けるのではなくて、飲むという行為の中の或る瞬間に水分子を構成している酸素原子と水素原子それぞれに印を付けるということが必要になってくる。しかし、それを考慮して計算すると、コップの中に入ってくる元の酸素原子の数は水分子の場合と同じ800個、元の水素原子はその2倍の1,600個となる。つまり水分子の寿命を考慮すべきかどうかという問題は、水分子の循環を考察するという教育目的に対して本質的な問題ではないと考えられる。計算結果に影響が大きな仮定は、この題材の計算で通常無視している、約4,000年という海水の平均滞留時間の方だと思われる[10]。

## おわりに

成書やウェブページでケルヴィン卿の「水分子の循環」の話が扱っていても、ケルヴィン卿からの由来であることを明示しているもの [4, 11-13] とそうでないもの [9, 14-21] がある。但し、九州大学中央図書館の保存資料となっていたシュレーディンガーの原著「生命とは何か」(1955年版)にも、ケルヴィン卿の「水分子の循環」の記述はあるが、そこには引用文献が記載されていないので、ケルヴィン卿がどこで発表したのかについては、未だ探し当てていない。

## 参考文献

1. ～「理科離れ」について・自分の経験を踏まえて～、鹿俣浩、  
<http://www.omn.ne.jp/hyou-tan/rikagirai/rikagirai.html>
2. 「理科離れと理科教育」－理科離れをどうとらえ、どう対処するか－、竹本信雄、  
[http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/rika\\_banare.htm](http://www008.upp.so-net.ne.jp/takemoto/rika_banare.htm)
3. 「理科離れ」解消のために何が必要か ～「世界一受けたい授業」だけでは、ものづくりの危機は救えない～、東レ経営研究所産業経済調査部、[http://www.tbr.co.jp/pdf/report/mon\\_d002.pdf](http://www.tbr.co.jp/pdf/report/mon_d002.pdf)
4. What is life? The Physical Aspect of the Living Cell、Erwin Schrödinger、Cambridge University Press、1955、p 5  
生命とは何か－物理的にみた生細胞、シュレーディンガー（著）、Erwin Schrödinger（原著）、岡小天（翻訳）、鎮目 恭夫（翻訳）、岩波書店、1971年、p 7
5. アスベスト汚染 －健康影響と予防対策の実際－、アスベストによる環境汚染と健康障害、滝澤行雄、<http://homepage3.nifty.com/anshin-kagaku/sub051217takisawa.html>
6. 平成20年度アスベスト大気濃度調査結果について、環境省＞報道発表資料＞  
<http://www.env.go.jp/press/press.php?serial=11172>
7. 生活環境論、岩槻紀夫、南江堂、2003年
8. The Water Cycle、U.S. Geological Survey、<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>
9. 分子の不思議－Wonder World of Molecules－、Hamaguchi Lab. <http://www.chem.s.u-tokyo.ac.jp/users/struct/invitation/wonderworld.html>
10. 北野（1992）による〔『化学の目でみる 地球の環境－空・水・土－』（73-86p）から〕、  
[http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/ES\\_E\\_U1.html](http://home.hiroshima-u.ac.jp/er/ES_E_U1.html)
11. <http://www.nagasaki-u.ac.jp/zaigaku/jyuko/HTML/DATA/423/4230409.pdf#search='物理科学（文学で学ぶ物理学）後藤信行'>
12. [http://www.mns.kyutech.ac.jp/~kishine/notes/physi08\\_problems.pdf#search='物理学Ⅰ問題集 岸根順一郎'](http://www.mns.kyutech.ac.jp/~kishine/notes/physi08_problems.pdf#search='物理学Ⅰ問題集 岸根順一郎')
13. 私の【理科教師日記】 <http://rikadiary.cocolog-nifty.com/kusuda/2008/11/1-6007.html>
14. 分子生物学入門、美宅成樹 著、岩波新書、2002年、p 44
15. <http://subsite.icu.ac.jp/people/yoshino/FinalComment09.pdf#search='NSIII「自然の化学的基礎」のまとめ 吉野 輝雄 2/23/2009'>
16. 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、第1章 水の性質と役割、[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/030101ba.htm](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu3/toushin/030101ba.htm)
17. 偶然の確率、2008年09月05日21：16、大翔  
[http://blog.livedoor.jp/enjoy\\_math/archives/51205285.html](http://blog.livedoor.jp/enjoy_math/archives/51205285.html)
18. 私と二度めに出会う「水」、クリスマスの小さな遺品  
<http://www.hirax.net/keywords/log/%E5%88%86%E5%AD%90%E6%95%B0/latest#top>
19. 不思議な数字、その2、コップ一杯の水を全世界の海水に混ぜる、富田  
<http://homepage3.nifty.com/tommy1949/wonders.htm>
20. コップ一杯の水（赤い水：水分子に色がついていると仮定）を海に流し  
<http://soudan1.biglobe.ne.jp/qa2161645.html>
21. 高校講座 理科総合A・B、第39回 A-20、環境のことを考えよう  
<http://www.nhk.or.jp/kokokoza/library/2009/tv/rikasougou/archive/resume039.html>

（はやみ よしてる：現代教養学科 教授）