

## 「水」を素材とした理科の学習文脈 —地球の成り立ちと水の循環—

吉富 健一・網本 貴一・梅田 貴士・富川 光

(2016年12月22日受理)

Learning Contexts in Science Education Using “Water” as a Material:  
Evolution of the Earth and Role of the Water

Kenichi YOSHIDOMI, Kiichi AMIMOTO, Takashi UMEDA and Ko TOMIKAWA

We are studying on the development of teaching/learning materials in Science. This article focuses on a contextual science learning of the Earth's origin and the hydrological circulation from the perspective of “water”. Some storylines about the origin of water, the gravity of planet, formation of the atmosphere and seas, and the creation of life are proposed in connection with the knowledge and concepts of physics, chemistry, and biology as well as earth science. And an example of lesson practice for state transition of “water” including the interdisciplinary aspects such as thermodynamics in physics and meteorology in earth science is also presented.

Key words : Science education, Teaching/learning materials, Context-based learning, Water, Interdisciplinary education

### 1. はじめに

理科教育の目標は、自然を愛する心を育てるとともに、自然の事物・現象についてよりよい理解を図りながら、問題を解決する能力と科学的なものの見方や考え方を養うことにある。

「この世の中はどうなっているのだろうか?」という探究心から日夜研究が行われ、日進月歩で進歩する自然科学の原理や理論をもとに理科教育は行われている。物事を探究する過程は知的好奇心を満たす楽しい行為であるが、その前に自然科学における概念や法則が現在どこまで明らかになっているのかを「既存の知識」として理解させる行為が、現在の学校教育で行われている系統学習 (Systematic learning) に他ならない。

系統学習の利点として、教師から児童生徒に対して短時間で多くの情報を伝達できることが挙げられる。その反面、児童生徒の興味や関心が引き出されにくく、主体的な学びとなりにくいことが指摘されている (宮原, 2003)。

小学校理科で取り扱われる身の回りの現象に比べ、中学理科では目に見えない抽象的な現象が多く取り扱われるようになるため、抽象的な概念

の理解を苦手とする生徒の理科離れが進む。また、科学技術が十分に発達した時代に生まれ育った生徒は、科学技術の成果に基づいて生産された機械や道具を利用するにあたり、その仕組みや動作原理、構造への興味・関心は少ないとされる。そこには身の回りにある便利な機械や道具があまりにもブラックボックス化されているという事情もある。そのため、小・中・高等学校を通して学習する内容が、日常生活と深く結びついており、将来の科学技術の発展に資するものであるという感覚が希薄となり、科学技術は消費するものといった考え方が定着してしまった。

このような中、さまざまな素材やテーマをある文脈として提示し、関連する科学知識や技能を獲得させながら、日常生活や社会との連携を意識させる文脈学習 (Context-based learning) が注目されている。これまでに、物理分野では Salters Horners Advanced Physics や Advancing Physics, 化学分野では Salters Advanced Chemistry や Chemistry in the Community (ChemComm), Chemistry in Context: Applying Chemistry to Society など、そして生物

分野では Salters-Nuffield Advanced Biology (SNAB) が、文脈学習を取り入れた教科書として後期中等科学教育や大学初学年度の自然科学教育においてそれぞれ用いられている。一方で地学分野は、特に諸外国では一教科・科目として取り扱われるよりも、宇宙や気象は物理分野において、岩石や鉱物は化学、化石や進化の領域は生物など、物理・化学・生物の各科目に地学の諸内容を分散させて取り扱われることが多く、それだけに他領域との横断的・学際的な学習展開が期待できる分野となっている。

本研究の目的は、小・中・高等学校を通して学ぶ理科のあらゆる場面で普遍的に見いだされる素材やテーマを複合的に用い、知識をただ伝えるのではなく、先人たちが「知識」を得るために何をどう努力してきたのか、現在までに行われてきた自然探究のプロセスを文脈を通して意識させることで、文脈学習の可能性を示すことにある。

今回は、そのような学習展開を可能とする素材として「水」に着目した。水は身近かつ豊富に存在するとともに、理科のあらゆる学習場面において科学的事象の提示素材として活用されているためである。昨年度本誌において「『水』を素材とした理科の学習文脈」として、物理・化学・生物・地学の各分野における水の取り扱い、ならびに学習展開と授業実践の具体例を、分野別にそれぞれ報告した経緯がある(梅田, 2016; 網本, 2016; 富川, 2016; 吉富, 2016)。それらの中で、物質としての水の構造や性質を化学分野で基礎的に取り扱い、物理分野では物理概念や法則性を理解させる実験素材として水を活用するのに対し、生物・地学のいわゆる第二分野では、自然の事物・現象に水がどのように関わっているかが学習や探究の主題となることが示されている。

本稿では、地球がどのようにして生命の誕生と進化に適した水の惑星として進化してきたのか、およびそのときに大きな役割を果たした水の循環について概説するとともに、物理・化学・生物・地学のそれぞれの科目の知識・理解を総動員しながら生徒の学習と思考を展開させる学習文脈と実践例を示す。

## 2. 「水」の特異な性質

水は化学式  $\text{H}_2\text{O}$  で表される水素と酸素が共有結合で結びついた化合物であり、図 1 に示すように日常的な温度範囲で気体・液体・固体の三態を観察できる例外的な物質である。

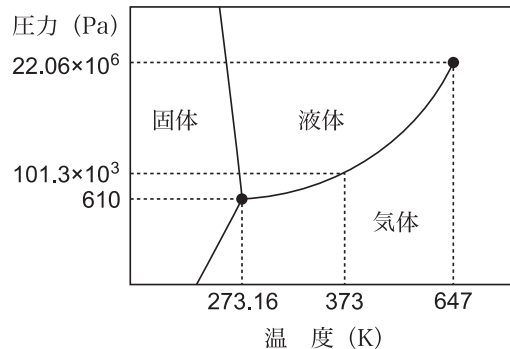


図 1. 水の状態図

日常生活で用いられる温度の単位は、セルシウス度と呼ばれる。セルシウス度は、元来の定義が 1,013 hPa (1 気圧) のもとで水の凝固点を  $0^\circ\text{C}$ 、沸点を  $100^\circ\text{C}$  とすることからも、水の存在と状態変化が人類の生活にどれだけ身近であったかを理解することができる。現在ではセルシウス度の定義は「ケルビン (K) で表した熱力学温度の値から 273.15 を減じたもの」とされている。このときの温度の基準点は、固相・液相・気相の三相が共存可能な水の三重点の正確な温度を  $0.01^\circ\text{C}$  ( $273.16\text{ K}$ ) とし、絶対零度との差の 273.16 分の 1 を  $1^\circ\text{C}$  として決められている。

水は、固体の密度が液体のそれよりも小さい異常液体である。一般的な物質では液体から固体になる際には密度が大きくなる。ところが水の場合、温度の低下にもなって水の分子同士が接近してくると、水素結合と呼ばれる分子同士の距離を一定に保とうとする分子間相互作用が働く。温度の低下にもなって分子同士が近づこうとする力と、水素結合により分子同士の距離を一定に保とうとする力の均衡がとれるのが  $4^\circ\text{C}$  で、このとき水の密度が最大となる。このことは高等学校化学基礎「物質の構成」ならびに化学「物質の状態」で取り扱われる。

氷が水に浮くという現象は、あまりに日常的で不思議とは感じられない。しかし水の持つこの性質は、地球環境の形成と生命の持続的な発展において重要な働きを果たしてきた。もし固体としての氷の密度が液体としての水より重かった場合、海や湖の表面で形成された氷は下に沈み、やがては全体が凍りついてしまう。我々の祖先が“全球凍結”と呼ばれるような、地表が全面的に凍結してしまうような状況の中でも絶滅せずに生き延びられたのは「氷が水に浮く」という極めて例

外的で、かつ単純な現象のおかげといえる。

### 3. 地球の成り立ちを題材とした学習文脈

地球上で生命が誕生し、多様な種に進化するためには、様々な条件が必要とされる。その最たるものは、水素と酸素の化合物である水が、液体の状態で存在したことであろう。そのことは、太陽系内の惑星探査において「生命体の存在の可能性＝水が液体として存在する可能性」として考えられていることから明らかである。この章では、地球が海の惑星として進化するために必要とされる事象について、高等学校理科における学習単元とともにそれぞれ解説する。

#### 3-1. 水の形成と起源

地球表面の約7割を覆い、生命の源となっている水が一体どこから来たのかについては、実はまだよくわかっていない。

宇宙形成初期には、宇宙空間には水素とわずかなヘリウムしか存在しなかったとされる。そこから酸素がどのように形成されていったかを学ぶプロセスは、高等学校地学基礎における単元「宇宙の構造」にある「恒星の性質と進化」で取り扱われる。恒星内部で起きている現象を理解するためには高等学校物理における「原子」の核融合反応、その結果生成される元素の様々な性質に関しては高等学校化学における「物質の構成」での同位体の概念が必要となる。

高等学校地学基礎「恒星の性質と進化」の単元では、ヘルツシュプルング・ラッセル図を用いて恒星の進化を学習する。この単元で、質量-光度関係により、質量が大きく明るい恒星ほど寿命が短いこと、恒星質量の違いによって星の寿命や恒星内部で生成される元素が異なることなどが取り扱われる。

水素より重く鉄より軽い元素が、恒星内部の核融合反応によって生成される核反応は“恒星内元素合成”と呼ばれる。核融合反応とは、複数の原子核を融合させることで、融合前とは全く異なる元素を生成する核反応である。なぜ鉄を境とするのかについては、鉄やニッケルは核子の結合エネルギーがもっとも低い元素であるため、これらの元素による核融合や核分裂ではエネルギー収支がマイナスになるため、反応が自発的に起こらないことに起因する。恒星内部での核融合反応が $\text{Ni}^{56}$ で止まり、この $\text{Ni}^{56}$ が崩壊した $\text{Fe}^{56}$ が恒星中心に溜まりはじめると、いきなり吸熱反応へと変わる

ため、中心部の熱と圧力が急激に失われ、超新星爆発への引き金となる。このような超新星爆発の際に、鉄よりも重い元素が中性子捕獲によって生成される反応は、“超新星元素合成”と呼ばれ、恒星内元素合成とは区別される。

恒星内部で生成される元素の詳細に関しては、高等学校物理の「原子」の単元で、原子核の構成、原子核の崩壊および核反応として取り扱われる。また、高等学校化学基礎「物質の構成」の単元では、原子番号、質量数および同位体が取り扱われる。同じ元素（陽子数）で中性子の数が異なるものを同位体と呼ぶ。地球上の水素には、陽子と電子をそれぞれ1つずつから構成される水素（軽水素）と、軽水素の原子核に中性子を1つ含む重水素が一定の比率で存在する。自然界におけるこのような同位体の存在比を、同位体比と呼ぶ。

水素同位体比に基づくと、地球を含む太陽系に存在する水の3~5割は、太陽が生まれる前の恒星間空間で作られる必要があるとするシミュレーション結果が報告されている（Ilse Cleeves, 2014）。太陽系内における水の起源を考える際も、この水素同位体比がヒントとなる。オールトの雲（太陽から1万天文単位以上離れたところにあるとされる仮想的な天体群）を起源とする彗星に含まれる水には、地球上の水に比べ重水素の含まれる割合が多いことが知られる。そのため、地球の水と同じ水素同位体比をもつ水を作るためには、彗星はあまり関与していないと考えられてきた。しかし近年、ハーシェル宇宙望遠鏡による観測調査により、エッジワース・カイパーベルト（太陽からおよそ30天文単位的位置にある海王星軌道より外側にある、天体が密集した円盤状の領域）を起源とすると考えられるハートレー彗星のコマの水素同位体比は、地球の海のものと同様に近い値を示すことが明らかとなった。このことは、地球の水の起源として、彗星が大部分を占める可能性があることを示している。エッジワース・カイパーベルトおよびオールトの雲は高等学校地学「宇宙の構造」で取り扱われる太陽系外縁天体であり、それらと水の起源との関連は生徒の興味関心を引く話題の1つとなる。

#### 3-2. 惑星の重力

太陽系を構成する惑星のうち、より内側を公転する水星、金星、地球、火星は地球型惑星として分類される。外側を周回する木星や土星などの木星型惑星が、水素やヘリウムなどを主体とするガ

惑星であるのに対し、地球型惑星は金属の核を持ち、表面を岩石で覆われるという特徴を持つ。表 1 に地球型惑星の物理的性質を示す。

表 1. 地球型惑星の物理的性質

	太陽からの距離 (AU)	直径 (km)	質量 (kg)
金星	0.72	12,104	$4.9 \times 10^{24}$
地球	1	12,756	$5.9 \times 10^{24}$
火星	1.52	6,794	$6.4 \times 10^{23}$

惑星表面における重力の強さは、高等学校物理基礎「物体の運動とエネルギー」で学習する重力加速度（物体を落としたとき、その物体の速度が時間当たりどれだけ変化するか（大きくなるか））で示される。惑星表面における重力加速度  $g$  の強さは、自転による遠心力の影響を考えない場合、天体の質量を  $M$ 、半径を  $R$  とすると、万有引力の法則から万有引力定数を  $G$  として、

$$g = \frac{GM}{R^2}$$

と表される。この式から惑星表面での重力加速度の強さは、天体の質量に比例し、天体の半径の二乗に反比例する値であることがわかる。火星の直径は地球の約半分、質量は地球の十分の 1 程度であるため、表 1 の値をもとに火星の表面での重力加速度の大きさを求めると、地球の約 38% となる。重力の弱さに起因して、火星の大気は希薄で、火星表面における大気圧は約 750 Pa と地球表面における平均値 1013 hPa の約 0.75%、金星表面の平均 9.3 MPa に比べるとわずかに 0.0065% に過ぎない。逆に大気の厚さを示すスケールハイトは約 11 km に達し、およそ 6 km となる地球よりも高い。これらはいずれも、火星の重力が地球よりも弱いことを示している。火星探査機による表面の詳細な調査により、かつては火星にも大量の水が存在した可能性が明らかになっており、長い時間をかけて次第に失われた結果、現在の姿になったと考えられる。その理由として、火星の質量が地球や金星に比べて小さいため、大気を保持しておくことができなかった可能性が指摘される。

惑星の重力を振り切るために必要な、惑星表面における初速度は第二宇宙速度 ( $v_2$ ) と呼ばれ、以下の式で求めることができる。

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

空気抵抗を考えなかった場合、地球の第二宇宙速度は、地表付近で約 11.2 km/s となるが、地球よりも重力の小さい火星の場合は約 5 km/s である。高等学校物理「熱と気体」で学習する気体分子運動論によって気体の分子運動の速さは以下の式で求めることができる。

$$\sqrt{\frac{3RT}{\mu \times 10^{-3}}}$$

$$R = 8.31 \text{ (J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}) \quad T = \text{絶対温度 (K)}$$

$$\mu = \text{分子量 (mol}^{-1}\text{)}$$

つまり、大気を構成する分子はバラバラに飛び回っているものの、その平均の速さは大気の絶対温度の平方根に比例し、分子量の平方根に反比例する。ここで大気の絶対温度を、火星の最高気温  $T = 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$  とし、 $\mu = 2$ （水素分子の分子量）として計算すると、水素分子の速度は約 1.9 km/s、平均分子量が 18 となる水分子の場合、水素の 1/3 の速さの 634 m/s である。ここで計算した速度はあくまでも平均の速さなので、当然、これ以上の速さで動く分子も存在する。また、高度が高くなるほど第二宇宙速度を求める式の右辺分母の半径の値が大きくなるため、気体が惑星にとどまることのできる閾値となる脱出速度の値は小さくなる。大気を構成する分子運動の速さが火星の第二宇宙速度を超えた時、大気を恒星する分子は宇宙空間に逃げてしまう。実際、火星の大気の上層では、太陽風の影響を受けて火星大気が宇宙空間へと流出していることが、旧ソビエト連邦の無人火星探査機フォボス 2 号による観測で明らかにされている。

このように、高等学校物理での学習内容を踏まえて重力や気体分子の運動に関する定性的な理解をもとに、地球型惑星の大気環境を議論する学習文脈を構成することができる。

### 3-3. 大気の形成

約 46 億年前、原始太陽系円盤の中で微惑星や隕石が集まって原始地球が形成された。隕石には鉄やニッケルを主成分とする“隕鉄”，ほぼ等量の鉄・ニッケル合金とケイ酸塩鉱物からなる“石鉄隕石”，主にケイ酸塩鉱物を主体とする“石質隕石”などの種類がある。これらの隕石が微惑星に絶え間なく衝突し、運動エネルギーが熱に変換されることにより、形成直後の原始地球の表面は“マグマオーシャン”と呼ばれる熔融状態であったと考



えられる。この状態で、より密度の大きい金属成分が溶融液体中で沈み込み、鉄やニッケルで構成される核と、ケイ酸塩鉱物を主体とする地殻・マントルの分離が、ごく初期の段階で起きたと考えられている。

その理由として、図 2 にマグマ中での気体の反応を示す。もしマグマオーシャンの中に金属鉄が大量に存在した場合、鉄は水と反応して酸化鉄を生じ、同時に水素の気体が発生する。すると水は水素を経て、地球の重力では保持できずに宇宙空間に散逸してしまい、地球上に海洋を形成できなくなる。鉄が存在してこの反応が進行すると酸素と水が消費されるので、図 2 の化学反応の平衡は右に片寄ると考えられる。生命の材料となる有機物の合成にはメタン (CH<sub>4</sub>) やアンモニア (NH<sub>3</sub>) に富んでいたほうが有利ではあると考えられる。しかし、地球誕生直後の原始大気はそのような還元的大気ではなかったことがわかる。

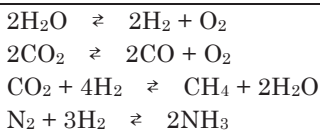


図 2. マグマ中の気体の反応

これに対し、初期の段階で核が分離され、マグマオーシャン中に金属鉄が存在しない場合、図 2 の化学反応は左辺に移動し、水や二酸化炭素として抜け出したさまざまな揮発成分が、原始大気を形成する。誕生当初の地球の原始大気は、30 MPa 程度の水蒸気と 5~10 MPa 程度の二酸化炭素が主成分であったとされる。なお、現在の地球大気の約 8 割を占めるのは窒素であるが、地球形成当初は 0.08 MPa しかないマイナーな気体であった。

表 2 に地球型惑星の大気組成を示す。金星はその大きさや密度が地球とほぼ同じくらいで、地球と似た過程で作られたと考えられている双子の惑星である。しかしながら、金星の大気の大部分は今なお二酸化炭素が占める。大気圧は約 9.3 MPa とされ、水蒸気は 0.002% しか含まれていない。二酸化炭素による強力な温室効果により、金星の表面温度は約 460℃ に達する。双子の星として誕生し、形成当初は似たような環境であったにもかかわらず、なぜ地球は生命の生存に適した環境へと進化し、金星は厳しい環境のまま存在することになったのか、地球の大気の組成とその変化から次のように考えられている。

表 2. 地球型惑星の大気組成

	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
金星	96.50%	3.50%	
地球	0.03%	78%	21%
火星	95.30%	2.70%	0.13%

地球上では光合成生物の働きによって二酸化炭素と水から炭水化物と酸素が生成されていることは、中学校理科および高等学校生物で学習する光合成として知られる。ところが光合成によって生成される炭水化物を、酸素と再び化合させ二酸化炭素に戻したとしても、生成される二酸化炭素の量は、現在酸素が大気中に占めている割合 (約 20%) と同程度にしかならない。原始大気に含まれていた大量の二酸化炭素を取り除くのに重要な働きをしたと考えられているのが、地表に液体として存在した水と炭酸塩の形成である。大気中の二酸化炭素は水に溶けて炭酸となり、誕生したばかりの地球表面の鉱物を溶解させる。陸地の岩石から溶出したカルシウムイオンをはじめとする様々なミネラル成分は海洋中に蓄積され、さらに炭酸と化合して炭酸カルシウムなどの難溶性の炭酸塩として海底に沈殿する。



海洋の誕生後、このプロセスによって大量の二酸化炭素が石灰岩 (炭酸塩) などの形で地中に固定された。さらに、サンゴなどの炭酸カルシウムの殻を作る生物の誕生が炭酸塩の沈殿を促進し、二酸化炭素の固定に重要な役割を果たした。このような生物プロセスは、バイオミネラリゼーションと呼ばれる。そのため石灰岩として地中に閉じ込められている二酸化炭素が大気中に放出されたと考えると、地球の大気組成も現在の金星のそれと変わらない結果となることが想定される。このような炭酸固定プロセスは炭素循環の一部として高等学校化学「無機物質」や高等学校生物「生態系での物質循環」とも深く関連する。

地球上では海洋が誕生し二酸化炭素の固定に水が大きな役割を果たした。金星も形成当初は地球と同様に、大量の水蒸気が存在した可能性が指摘されている。しかし、金星は太陽からの距離が近かったために惑星表面の冷却速度が非常に遅く、また紫外線の強度がより強かったため、ほとんどの水蒸気は、凝縮する前に酸素と水素に分解されてしまったと考えられる。水蒸気の分解によって発生した酸素が、大気対流によって下降し、高

温状態の地表付近の岩石を酸化分解(風化)させ、硫化鉄を酸化して二酸化硫黄のガスを発生させたと考えられる。こうして発生した二酸化硫黄が、水蒸気の分解により生じた酸素によって更に酸化されて三酸化硫黄となり、これが水に溶け込んで硫酸を生じる。金星の表面には硫酸の雨が降っている事実は、金星大気の特徴としてよく知られていて、硫酸化の化学プロセスは高等学校化学「無機物質」での学習事項に沿って読み解くことができる。そのほかにも金星大気に水が存在したとされる根拠の一つとして挙げられるのは、金星大気の水素同位体比である。金星大気に含まれる重水素の割合は、地球に比べ100倍も大きいとされる。金星大気中の水蒸気は、水素と酸素に分解されたという指摘は先に述べた。このときより軽い水素が選択的に宇宙空間に放出され、金星大気から水蒸気が失われるとともに、重水素が同位体分別されたとする可能性が示唆されている。

このように、高等学校化学「無機物質」での学習内容とも関連させることで、地球および金星の大気環境を議論する学習文脈を構成することができる。

#### 3-4. 海洋の形成

地表において二酸化炭素の固定に大きな役割を果たしたとされる原始海洋の誕生について、現在見つかっている地球最古の堆積岩は、カナダ最北東のラブラドル地方から発見された約39億6,000万年前のもたとされる。堆積岩は、陸地の岩石が雨や風によって浸食され、河川により運搬されたものが堆積し形成される。地球形成からおおよそ6億年後にはすでに侵食される「陸」と、堆積場となる「海」が形成されていた証拠である。

星間物質の集積と衝突による惑星の成長がひと段落し、地表の温度が水の臨界温度(374 K)を下回るようになると、大気中に大量に含まれていた水蒸気が一斉に凝縮して水に変わり、原始海洋を形成したと考えられる。効果的な温室効果ガスである水蒸気が液体となり、さらに水の中に二酸化炭素が炭酸という形で溶け込んで大気から失われることにより、地表温度の低下は加速される。

地球誕生から海洋形成まで、実際どれくらいの時間がかかったのかについては、明らかになっていないが、脱ガスによって発生した水蒸気が、海洋の形成にいたるまで存在し続けるためには、様々な条件をクリアする必要がある。二酸化炭素に比べて分子量の小さい水蒸気は比重差により上

昇し、大気の上層部で太陽からの紫外線によって水素と酸素に分解され、より軽い水素は宇宙に散逸してしまう。もし太陽が放射している紫外線の強さが現在と変わらない程度だったとすると、原始大気の水蒸気の量は10億年も経たずに消失すると見積もられている。そのため、地球で海洋が形成されるためには、火星と違って十分な重力を保つ大きさに成長し、金星よりも太陽から遠くて程よく冷却され、誕生からまもない太陽からの紫外線の強度が今よりずっと弱かった、などの条件が必要となる。

#### 3-5. ハビタブルゾーン

ハビタブルゾーンとは宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境と考えられている天文学上の領域をいい、高等学校地学「宇宙の構造」の発展的内容として取り扱われる。恒星系を公転する惑星を考えたとき、ハビタブルゾーンであるかを決定する大きな要因は、恒星から構成から放射されるエネルギー量、つまり中心となる恒星からの距離である。惑星の表面温度が生物の生存に適していて、水が液体の状態を保てる場所とされる。太陽系の場合、太陽からの距離でハビタブルゾーンの範囲が決まることになる。太陽に近すぎると、表面温度が高すぎて水は蒸発してしまう。反対に、太陽から距離が離れすぎると水は凍ってしまう。太陽系のハビタブルゾーンを具体的な数値で表すと、地球と太陽の平均距離である1億5000万kmを1AUとした場合、0.97AU~1.39AUの範囲になるとされる。地球は、ハビタブルゾーンのどちらかという内側に位置している。

地球の大気圏外で太陽に垂直な面で、1秒間に受け取るエネルギーは約1,366 W/m<sup>2</sup>で、これを太陽定数という。太陽から放射されるエネルギーの強さは、距離の二乗に反比例する。このことをもとに表1の値を参考に計算すると、金星が太陽から受け取るエネルギーの量は地球の約2倍となり、火星では約43%程度であることが計算できる。

実際には太陽からの距離以外にもさまざまな要因によって惑星表面の温度が決定される。地表では水が液体の状態を維持され、形成された地表の7割を占める巨大な海洋の中で生命が誕生したと考えられている。生命の誕生に関しては諸説あるが、海水に溶けこんだアミノ酸などの有機物から、化学進化によって原始生命が誕生したという化学進化説が現在の主流とされる。

地球上で最初に誕生した生命は、化学合成ある

いは嫌気性呼吸によってエネルギーを得ていた。初期の地球では、海洋、大気中ともに酸素は極めて少なかったが、約 27 億年前に光合成を行うシアノバクテリアが誕生して以降、地球上の酸素量は上昇していった。約 19 億年前には好気性バクテリアをミトコンドリアとして細胞内小器官化した真核生物が誕生した。真核生物は、酸素の酸化をエネルギーとして効率的に利用できるようになり、単細胞生物から多様な多細胞生物へと爆発的に進化していったと考えられている。これらの内容は、高等学校生物「生命の起源と進化」で取り扱われる。

現在でも、太陽光のまったく届かない中央海嶺のチムニーと呼ばれる熱水噴出孔付近では、熱水中の硫化水素のような還元的な無機物を酸化することでエネルギーを得て、二酸化炭素から糖を同化する化学合成細菌が発見されている。この細菌の存在は、生命の祖先もこのような化学合成細菌に近いものであったことを示唆している。

地球の衛星である月も、当然ハビタブルゾーンの中にあるはずであるが、月には大気も水も存在しない。この理由については 3-3 節で述べたように月の直径は火星よりさらに小さく、重力は地球の 6 分の 1 となるため、大気を保つことができなかつたと考えられる。生命が誕生し進化するためには、恒星からの距離とともに、惑星そのものの大きさや重さなども影響を与えていることが理解される事例である。

#### 4. 水の状態変化と水循環に関する授業実践例

2 章で述べた水の特異な性質および 3 章で述べた水と地球の成り立ちに関して、理科全般にわたる幅広い知識・理解を連携させながら学習展開させる授業実践の一例について、筆者らが高等学校への訪問授業や本学自然系コースの講義ならびに教員免許更新講習等の中で行った具体を述べる。

水の状態図(図 1)は、高等学校化学「物質の状態変化」で必ず取り扱われる。生徒にとってこの図は暗記の対象と思われている感があるが、我々が経験的に知る水の性質から、以下のような展開の中でこの図を描くことは決して難しくない。水の沸点は減圧されると低下することから、気液平衡を表す蒸気圧曲線は右上がりの曲線として描かれることを生徒は導くことができる。

また、スケート靴で氷上を滑走できるのはブレードを介して氷に圧力をかけると氷が溶けてエッジと氷との摩擦が小さくなるためであることを教

師側が話題にしなが、氷の融点が圧力をかけると低下する(大気圧の元で凍ることができていた水がより圧力がかかることで凍ることができなくなった)ことを導かせる。このことから、固液平衡を表す融解曲線は右下がりの曲線として描かれることを生徒は念頭に置いて、水の状態図を描くことができる。

水の状態図に関する理解を確立した後、その理解を活用する場面として二酸化炭素の状態図を読み解く展開へと移る。二酸化炭素は大気圧の元で $-78^{\circ}\text{C}$ で昇華するため、液体の二酸化炭素を観測することはできない。そこで、液体の二酸化炭素を観測するにはどうすればよいかという課題を提示して二酸化炭素の状態図をもとに生徒に議論させ、三重点以上の温度( $-57^{\circ}\text{C}$ )と圧力(5.3 気圧)にすれば液体の二酸化炭素を観察できることに気づかせる。その後、高等学校物理で断熱圧縮の教具としてしばしば用いられる圧縮発火器を使って二酸化炭素の固体(ドライアイス)を圧縮する操作を行うと、期待したとおり液体の二酸化炭素を観察することができる。

しかしながら、ここまでで行った操作はドライアイスに対する加圧だけで、特に加熱はしていない。この矛盾を生徒に気づかせることで、断熱圧縮に伴う温度変化を考えさせる契機となる。温度センサと圧力センサが組み込まれた気体法則実験用シリンダをデータロガーに接続して、急激な圧力変化に伴う温度変化を計測した結果を図 3 に示す。

シリンダ内に閉じ込められた大気圧かつ室温にある空気を急激に圧縮すると、圧力が 2~3 気圧まで高まるとともに系内の温度が $20^{\circ}\text{C}$ 超まで上昇する。逆にピストンを引いて空気を急激に膨張させると、圧力の減少とともに温度が $10^{\circ}\text{C}$ ほど低下する。この理論的背景は、高等学校物理「熱と気体」の単元で断熱変化として取り扱われるとともに、高等学校地学「大気と海洋」における雨と雲の形成やフェーン現象とも関連する内容を含む。こうして、高等学校化学「物質の状態変化」に関する学習をきっかけとして、物理における熱力学と地学における気象や水循環との関わりへも関連させた学習文脈を構成することが可能になる。

物理の断熱変化に関しては、熱力学の第 1 法則  $\Delta U = Q + W$  ( $\Delta U$ : 系の内部エネルギー変化;  $Q$ : 系が吸収した熱量;  $W$ : 系にされた仕事)に基づいて考察させる。気体が圧縮されて体積が減少するとき  $W$  は正である。また、急激な体積圧



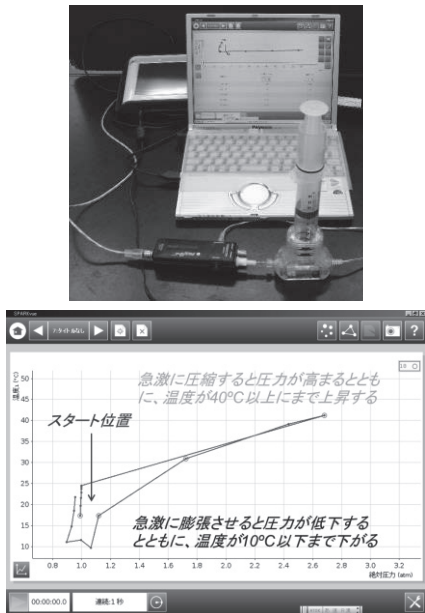


図 3. 断熱変化における系の温度・圧力変化を測定する装置の写真と典型的な測定データ

縮であるため熱の出入りができない断熱変化であるので  $Q=0$  と見なせる。このため、 $\Delta U$  は正となり、温度が上昇する。反対に気体が膨張するときは  $\Delta U$  は負となり、温度が低下する。

続いて、気象や身の回りの現象とも関連させた話題へと移る。空気の塊が上昇するときには断熱膨張が起こり、温度が低下する。やがて水蒸気量は飽和に達して雲を形成し、雨を降らせる。降雨により乾燥した空気の塊が山麓を下降するときには断熱圧縮が起こり、空気の温度が上昇する。これがフェーン現象である。ディーゼルエンジンは圧縮空気の温度上昇が軽油を含む混合燃料の発火点以上になることを利用した内燃機関であるし、状態変化に伴う潜熱を加熱や冷却に利用するヒートポンプ熱機関については高等学校化学や物理の参考やコラムとして教科書に記載されている。

## 5. まとめ

地球の形成当初という誰も見たことのない時代の出来事について、地学ではおおまかなストーリーとして学習する。今回はそのストーリーに「水」を文脈として物理・化学・生物のそれぞれの学習内容を織り込むことで、具体的にどういった物理現象、化学的なプロセスが働いて、地球に液体の水が保持され、生命の誕生に至ったのか、自然探

究のプロセスを文脈を通して意識させつつ示した。そうすることで、内容を理解しやすく、取り組みやすくなるとともに、遠い過去に起こった現象でも、まったくのフィクションではなく、高校までの理科で学習する知識をもとに理論立てて推測することができる、ということが示すことができた。

また、小中学校では理科という一つの教科であったものが、高等学校で物理・化学・生物・地学とそれぞれ違う科目としてわかる。そして、どの科目を履修するのが受験や進学・就職に有利かという話題になりがちなものが、もとはといえば自然を対象とする自然科学を背景にもち、自然を探求する上では、それぞれ相互に関連づけられるべきものであることを示すことができたと考える。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費（課題番号：JP25242015）の助成を受けたものである。また、本稿の執筆にあたっては、広島大学大学院教育学研究科自然システム教育学の各先生方に多くのご意見・ご助言をいただいた。お世話になった皆様方に心より御礼を申し上げる。

## 引用文献

- 網本貴一（2016）「水」を素材とした理科の学習文脈（化学領域）：化学事象や自然事象における水の役割。学校教育実践学研究，22，105-112.
- L. IIsedore Cleaves, Edwin A. Bergin, Conel M. O'D. Alexander, Fujun Du1, Dawn Graninger, Karin I. Öberg, Tim J. Harries (2014) The ancient heritage of water ice in the solar system, *Science*, 345, pp. 1590-1593.
- 宮原 修 (2003) 系統学習、『新版 学校教育辞典』今野喜清・新井郁夫・児島邦宏編，教育出版，p260.
- 富川 光 (2016) 「水」を素材とした理科の学習文脈（生物領域）：海洋生態系。学校教育実践学研究，22，119-124.
- 梅田貴士 (2016) 「水」を素材とした理科の学習文脈（物理領域）：デモンストレーションを用いたアプローチ。学校教育実践学研究，22，113-117.
- 吉富健一 (2016) 「水」を素材とした理科の学習文脈（地学領域）：地球表層におけるエネルギー循環。学校教育実践学研究，22，125-134.