

解説

“地学の見方・考え方”を働かせるために（その1）

鶴田孝三^{*1}・上塚穰二^{*2}・本多栄喜^{*3}・鶴田るみ子^{*1}・田口清行^{*4}・田中 均^{*1}

^{*1} 熊本県博物館ネットワークセンターミュージアムパートナー・

^{*2} 宇城市立豊川小学校（元熊本県博物館ネットワークセンター）・^{*3} 熊本県立宇土高等学校・^{*4} 熊本市教育委員会

キーワード：地学教材，気圏，大気組成，転向力（コリオリ力），台風

To Help Children Use the "Geoscientific Perspectives and Ideas"(part1)

Kouzou TSURUDA, Jouji UETSUKA, Eiki HONDA, Rumiko TSURUDA, Kiyoyuki TAGUCHI and Hitoshi TANAKA

本論では、学習者が大気組成や気象について知識や概念の定着があまり図られていない内容について論述している。例えば、地球大気組成の二酸化炭素の比率が約0.04%と他の地球型惑星（金星や火星の二酸化炭素のその比率は95%以上）と比較して極めて低い理由を説明できない。また、わずかに地球に約0.04%の比率しかない二酸化炭素が、なぜ地球環境を激変させる温室効果ガスとして取り上げられているのか説明できない。気象分野では、高気圧・低気圧とコリオリ力（転向力）から高気圧と低気圧の風の吹き方について、単に高気圧は時計回りの、低気圧は反時計回りの風がそれぞれ吹くと暗記しているだけで、コリオリ力（転向力）の概念を用いてそれぞれの風の吹き方について説明できない。さらに、台風の上空での風の吹き方についても、気象衛星の画像や動画の雲の動きをみて反時計回りに風が吹いていると誤った認識を示す学習者が多い。今回は、おもに対流圏での大気や気象についていくつかの事例を挙げて『地学の見方・考え方』を記述した。

はじめに

理科の教科の中で地学は、他の分野の物理、化学、生物と比較して変化の時間軸が極めて長いことが大きな特徴の一つである。そのために、我々が実験などを通して直接、変化を目にすることができる事象は少ない。

新学習指導要領には、各教科の目標に「見方・考え方を働かせ」の文言が入っている。従来の理科の授業はどちらかといえば内容重視であった。また、驚きビックリするような教材を考える、知識を効率よく伝授する、「児童・生徒にどのように考えさせるか」を工夫するなど、教師目線の授業であった。これからは、「児童・生徒がどう学ぶのか」、「児童・生徒はどのような見方・考え方をするのか」を意識した子ども目線の授業づくりをするべきではないかと考えられる。

本論では、大学での気象分野の講義、地学実験等を通して、学生に十分な科学的な知識や概念が定着していない内容や中・高等学校の生徒に科学的な見方や考

え方を育成するための事例を示しながら論述している。授業の事例については、実社会・実生活との関連を重視する内容を示すとともに、導入の段階で資料を示しながら生徒の考えを具現化する、例えば“台風の鉛直断面で風の吹き方を記入させる”と生徒自身がいろいろな疑問を生じ、それを生徒同士で話し合う実態がそこにあった。このように生徒が自ら課題を見つけ解決していく能力を育成することは、主体的・対話的で深い学びにつながると考えている。

さらに、生徒に“どのような資質・能力を育成したいのか”、“何をどのように学ぶか”などを『地学の見方・考え方』を働かせることを意識した教材研究をするとともに授業改善に役立てて欲しい。

今後、水圏・地圏・惑星としての地球・環境問題などについて地学的な見方や考え方を述べていきたいと考えている。

なお、大学生、中・高等学校の生徒、児童および子ども達の表記を、これ以降学習者として記述する。

地学的ものの見方・考え方の事例

(1)【原始地球のCO₂はどこに消えた?】

地球型惑星は、「水星、金星、地球、火星」の四つである。しかしながら水星のように重力が小さい星においては十分に気体を保持することができず、気体はすぐに放出され、真空中に近い状態にある。さらに、水星は太陽に近すぎて激しく動く大気分子を捕まえておくことができなかったと考えられている。

課題：大気を持つ惑星といえば「金星、地球、火星」である。これらの惑星の大きな違いは、CO₂の量である。大気中に含まれるCO₂は、金星は96.5%、火星は95.3%とほぼ同じ比率である。一方地球では、0.039%しか含まれていない(図1)。原始地球では他の惑星と同じように多くのCO₂(炭酸ガス)があったと思われるのに、この違いはどのようにして生じたのか、地球の大気中のCO₂はどこに消えたのだろうか。

学習者の反応：学習者の正答率は極めて低いことが判った。その理由の1つに高等学校で地学を履修していない学習者が多いことや地球と他の惑星の大気の比較など、授業では取り上げられなかったことなどが挙げられる。学習者の反応から、科学的な見方や考え方を育成するための学習活動を一層充実させることが必要であることを痛感した。

課題についての地学的な見方や考え方：

その鍵を握るのが生物である。地球上の最も古い生命体として、約39.5億年前の生物の化石(Tashiro *et al.*, 2017)が発見されているが、生命は進化、増殖しつつも、その後約35億年も海中での生息を余儀なくされた。それは日光に有害な紫外線が多量に含まれていて、なかなか上陸できなかったからである。

しかし、海中にシアノバクテリア(藍藻類)が増えるにつれ、これらの光合成によって、海に溶け込んだ炭酸ガスから分離した酸素(溶存酸素濃度)が増えた。酸素は海水中の鉄と結合して酸化鉄が堆積し、縞状構造を示す縞状鉄鉱層となり、現在での鉄鉱床となった。さらに発生し続けた酸素は、その後大気中に出ていき、海水中の炭酸ガスは減ると同時に大気中の酸素が増加し、その一部がオゾンとなった。オゾンは層をつくり、上空で有害な紫外線を遮るようになる。こうして、生物の陸上進出が可能となり、上陸を果たした植物が海の植物と一緒にあって、ますますCO₂を減らしたのである。なお、現在でも「生きた化石」シアノバクテリアが光合成を行い、酸素を作り、ストロマトライト(図2)が形成されている場所がオーストラリアにある。一方、光合成によりCO₂からO₂が分離された際に残った炭素はどこへ行ったかという点、生命由来の石油、石炭及び生きている生物の体に固定されているのである。この固定化に大きな役割を果たしたのが、石灰質の殻をもつフズリナやサンゴである。これらは、生きている間CO₂を取り込み、殻を作り、死後は海底につもり石灰岩(炭酸カルシウム)になった。後に人類はコンクリートの材料として重宝することになった。

以上述べてきたように、地球の大気組成や生物の進化などを関連させながら、生物が地球環境を作り出したことを、大局的な視点や流れの中で理解することが重要である。さらに、学習者の「見方・考え方」を刺激して学習者自ら課題を見つけ、課題解決に向う授業づくりをしてほしいと考えている。

そこで授業としては

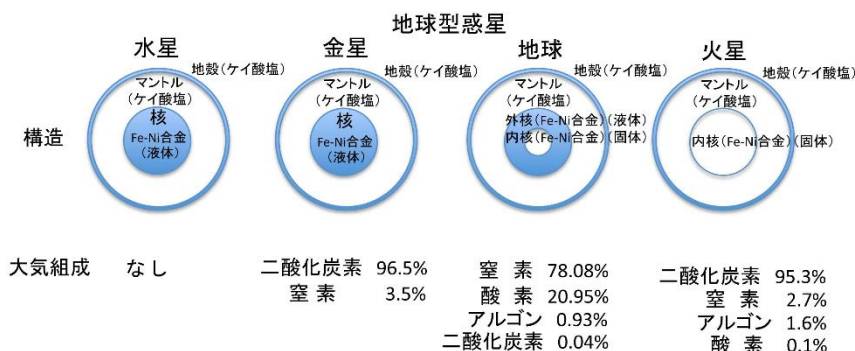


図1「地球型惑星の大気組成」:

「地球型惑星の大気組成」:『地球型惑星』『ニューステージ新訂地学図表』 浜島書店、2010年、p116をもとに作成。『各惑星を同一半径で描いてある。地球型惑星の特徴はケイ酸塩のマントル金属鉄の核がある(火星はマントルに酸化鉄、核に硫化鉄も含む)。平均密度は5g/cm³程度』から引用
 「大気組成」:阿部 豊(2005年)「地球環境の変遷 比較惑星学の視点から」日本気象学会「地球環境の進化と気候変動」050515SympoPrdng. pdf (metsoc.jp)から引用 022年1月22日取得
 「地球の二酸化炭素濃度」:NHK 高校講座テレビ学習メモ 地学基礎第27回地球の大気(nhk.or.jp) https://www.nhk.or.jp/kokokoza/tv/chigakukiso/archive/chigakukiso19_27.pdf から引用 022年1月27日取得

例1 地球型惑星である金星，地球，火星の大気組成の図表を配布し，なぜ，地球大気組成のCO₂の比率が他の地球型惑星と比較して極端に少ないのかを考えるように指導する。



図2 「ストロマトライト」：JAMSTEC（ジャムステック・海洋研究開発機構）JAMSTEC×Splatoon 2『Jamsteec（ジャムステック）』地球46億年の歴史と生命進化のストーリー <https://www.jamstec.go.jp/sp2/column/04/> から引用
『シアノバクテリアが層状に堆積しながら成長してできた、ストロマトライトという岩石。現在でもオーストラリアのシャーク湾など限られたところに「生息」している。岩石が生息するという不思議な感じがするが、表面にいるシアノバクテリアが日中は光合成して酸素を作り出し、夜は堆積物を表面に固める。こうしてストロマトライトは少しずつ大きく成長している。（写真提供：平朝彦）』 2022年1月22日取得

（2）【大気の厚さ-特に対流圏について-】

課題：地球の大きさに対して対流圏はどのくらいの厚さか，具体例を示しながら説明しなさい。

学習者の反応：対流圏は極めて薄いことは判っているが具体例を示しながら説明できる学習者は極めて少ない。ただし，卵の殻，みかんの皮，りんごの皮などを例として説明した学習者が数名いた。実際の対流圏はそれらよりももっと薄いことを理解できていないのは，実社会・実生活との関連を重視した授業内容ではなかったことが影響していると思われる。

課題についての地学的な見方や考え方：

大気圏は気温の変化の様子から，対流圏，成層圏，中間圏および熱圏の4つの層に区分されている。大気圏全体では100km程度の厚さで，ここより外側は宇宙となる（図3）。

ここでは，生命体の存在する対流圏を取り上げて議論する。対流圏の特徴は，①高度とともに気温が低下する（100m上がるごとに約0.65℃の割合で下がる），②さまざまな気象現象が起こる，③対流圏は水（水蒸気）の比率が高い，④質量比では大気圏の成分の半分以上が対流圏に存在する，⑤赤道付近の対流圏界面は17km程度と厚く，極でのそれは9km程度と薄い，⑥対流圏の中は，気流が地球の摩擦の影響を受ける大気境界層とほとんど受けない自由大気に分かれる。なお，⑤については，一般的に気温が高くなる赤道付近では，空気が膨張して軽くなり上昇気流が生まれ，大気は常

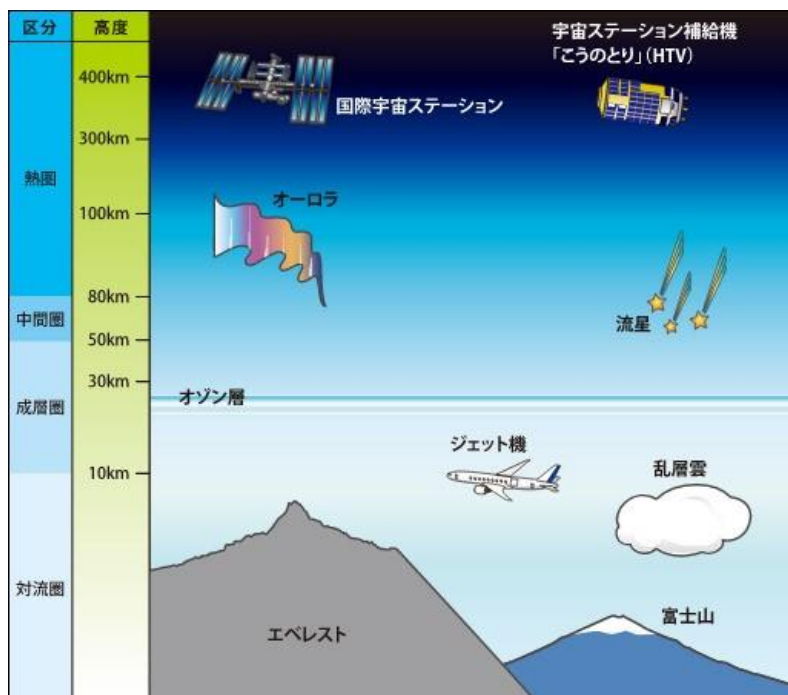


図3 「大気の鉛直構造」：空と宇宙の境目はどこですか？ | ファン!ファン! JAXA! <https://fanfun.jaxa.jp/faq/detail/103.html> から引用 2022年1月22日取得

に下から上に吹き上げているため対流圏界面までの厚さが厚くなる。一方、極では冷やされた空気は収縮して重くなり下降気流が生まれ、対流圏界面までの厚さが薄くなるというわけであり、この現象は季節によっても変動する。

さて、故カール・セーガン博士は大気圏について「球にニス塗ったとしよう。地球に対する大気の厚みは、その球に対するニスの厚みくらいだよ」という言葉を引いて、地球の大気の薄さを表現している。確かに大気はたいへん薄いのだが、学習者にとって、多様な生物が生きている大気を薄いととらえるのは難しい。そこで、大気圏の厚さを20km（便宜上このように仮定する）、地球の半径を6400kmとして、地球の大気の薄さを実感させる方法を考えてみる。

例1 自分の家から約20km先の地点Aと6400km先の地点Bへ時速60kmの車で行くと、どのくらい時間がかかるか。

A約20分、B約107時間（約4.5日）

例2 比率で考え、身近なものに置き換えて考える。

20km : 6400km = 1:320

1mmと半径32cm（直径64cm）の球

実際の授業で、いかに学習者に生活実験に基づく実感を持った展開を考えるのが重要となる。

この手法は、太陽と地球の大きさや地質年代などを学習者たちに実感させる際にも用いることができる

と考える。※地質年代にかかる詳説は地圏の内容を取り扱う時に議論する予定である。

(3)【温室効果のメカニズム】

課題：温室効果のメカニズムについて説明しなさい。

学習者の反応：温室効果のメカニズムについて概要を説明できる学習者は極めて少ない。環境問題と関連させて、二酸化炭素が気温を上昇させる悪玉なので、大幅に減らす必要があることは多くの学習者は理解していた。

課題についての地学的な見方や考え方：

太陽からの放射エネルギーは、約3分の1程度は大気や地面に反射されて宇宙空間に逃げ、残りの多くは大気を通過して直接地面を温める。そして、夜になって太陽エネルギーが届かなくなると、昼間に温まった地面や大気からは赤外線が放射される。それらの一部は宇宙空間に逃げだすが、残りは再び大気や地面を暖め、そこからまた、赤外線が放出されるといったプロセスが繰り返される。これは、宇宙に逃げ出すはずの赤外線が大気によって再利用（再吸収）されるということの意味する。その結果、地球大気は太陽エネルギーの一部を常に内部に蓄えることになり、その分だけ気温が高くなる（図4）。この赤外線を途中で吸収するのが温室効果ガスである。例えば、二酸化炭素やメタンといったものである。

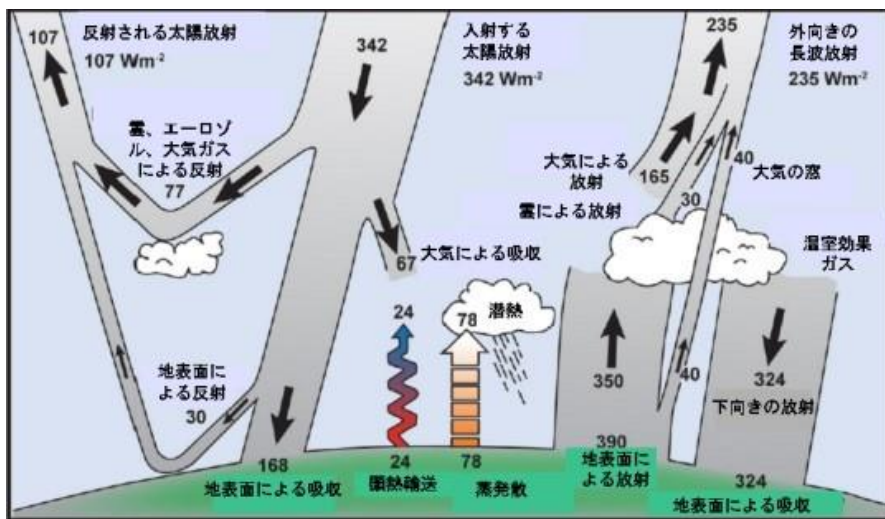


図4 「年平均した地球全体のエネルギー収支の見積もり」：気象庁ホームページ

<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html> 第1章気候変化の科学に関するこれまでの概要「図1 年平均した地球全体のエネルギー収支の見積もり」から引用
2022年1月22日取得

『長期的には、入射した太陽放射のうち地球と大気によって吸収された分は、地球と大気から放射される同じ量の外向きの長波放射とつり合う。入射する太陽放射のおよそ半分は地表面で吸収される。このエネルギーは、地面に接する大気の加熱（顕熱輸送）、蒸発散過程、雲と温室効果気体に吸収される長波放射などによって、大気へと輸送される。一方、大気は、宇宙空間だけでなく地球へも長波放射を放射して返す。出典：Kiehl and Trenberth (1997)』

この温室効果ガスは地球環境を破壊する負のイメージが強いが、地球の歴史から見れば、地球を温暖な気候に保つとともに生命をはぐくむ物質として重要な役割を果たしている。すなわち、地面から放出する赤外線を温室効果ガスがある程度吸収しているため、地球環境は平均15℃程度の気温が保たれていることを忘れてはならない。地球に温室効果ガスがなければ、地球は凍りついて、平均気温はマイナス18℃にもなり、生物にとって危機的な状況になっていたと考えられている。温室効果ガスは負の要素である前に、生命をはぐくむ重要な物質なのである。

地球の大気を作っている物質の99%は窒素と酸素だが、これらの物質はほとんど温室効果を示さない。これに対して大気に含まれる微量物質、すなわち水蒸気、メタン、二酸化炭素、オゾン、亜鉛化窒素などが熱を溜め込んだり放出したりする温室効果ガスとなっている。

そこで授業としては、

例1 温室効果ガスの種類や発生についてどのように調べたら良いか考えさせる。(温室効果ガスに、自然由来と人為発生的なものがあることに気づかせ、その発生量の大きな変化が何によって生じているのか等、学習者の目線に沿って指導する。)

例2 地球の大気で一番多い約78%を占める窒素はどのような経緯で地球にそんざいするのか。ちなみに、金星の窒素は約3.5%、火星のそれは2.7%である。この違いはどのような経緯を経て生じたかなどの課題を学習者自身が見つけ解決できるように指導する。

(3)【地球の大気組成のわずか0.04%（体積比）を占める二酸化炭素がどうして温暖化に関与しているのか】

課題：なぜ二酸化炭素が温室効果ガスとして注目されているのか説明しなさい。

学習者の反応：地球温暖化の原因が二酸化炭素などの温室効果ガスであるとの新聞、テレビ報道や教科書にも書かれているために答えているだけである。二酸化炭素が温暖化にどのように関与しているのかその原理についてよく理解していない学習者が多い。課題についての地学的な見方や考え方：

“人為起源の温室効果ガス総排出量に占めるガス別排出量の内訳”によると、人類が発生させている温室効果ガスの76.0%が二酸化炭素と考えられている。

一般的に、原子間の結合がよくバネで例えられるように、原子間の結合距離と結合角度は常に振動している。例えば、二酸化炭素のC-O原子間の結合距離は

1.16Åといわれているが、この値で常に固定されているというわけではない。もちろん空気中に含まれる温室効果ガスにも、バネのような原子の結合をもっている。そのような結合と、太陽光に含まれている赤外線が共振することで、原子の振動が大きく激しくなっていく。この気体分子運動が赤外線のエネルギーを吸収して蓄えていると言っても過言ではない。ここで蓄えられたエネルギーは、すぐに熱エネルギーとして放出される。この熱は宇宙空間に放出されずに、地球にとどまることになる。以上が温室効果の概要である。このメカニズムのため、原子間距離や角度の振動数と一致した赤外線のみ気体分子に吸収される。温室効果ガスと聞いて最初に思い浮かぶのは二酸化炭素だと思うが、実は二酸化炭素そのものはそこまで強い温室効果をもたらさない。二酸化炭素の量が全大気組成の0.04%といっても他の温室効果ガスよりもはるかに多い、あるいはそれが急速に増加しているから温室効果ガス=二酸化炭素というイメージが作られたと思っている。同量ならば、二酸化炭素よりもメタンの方が強い温室効果を作る。

なお、温室効果をもたらさない気体として、窒素 N_2 ・酸素 O_2 ・水素 H_2 ・一酸化炭素 CO ・アルゴン Ar がある。

一方、「 CO_2 の増加が温暖化の原因ではない」という研究者もいる。何らかの原因で気温が上昇してくれば、海洋が吸収した CO_2 を放出し、さらに北極地方の永久凍土から CO_2 やメタン等が大量に放出され温暖化が進行するという考えである。どちらの考え方をするにしても、取り返しがつかなくなる前に CO_2 を削減することは極めて重要である。

2021年のノーベル物理学賞にプリンストン大学の首席研究員である真鍋淑郎氏が選ばれた。受賞の理由は、世界に先駆けて大気と海洋を結合させた物質の循環モデルを提唱し、二酸化炭素濃度の上昇が地球温暖化に影響するという予測モデルが高い評価を得たことである。これによって、人類は本気で二酸化炭素削減に取り組む必要に迫られ、各国がそれぞれ削減目標を掲げて対策に乗り出している。

そこで授業としては、

例1 学習者ができる CO_2 の削減方法について考えさせる。

ゴミを少なくする、分別ゴミの徹底など環境問題と関係させて道徳教育を充実させることが必要と思われる。

一方、国や地方自治体および家庭でできることとして、次の事項などが挙げられる。

① 化石燃料消費の抑制。

- ② 炭酸ガスをドライアイスにしてグラスウールで覆い、深海底に貯蔵。
- ③ 熱帯雨林の植物の保護、育成
- ④ 乾燥地帯の灌漑と植林
- ⑤ サンゴなどの海洋生物の育成やCO₂吸着効率の高いサンゴ等の品種改良。
- ⑥ カーボンリサイクル技術に係る研究開発・事業化を加速させる。

さらに、現在二酸化炭素を空気中から直接抽出し削減する研究などとともに“地球を寒冷化させる”研究、例えば人工的なエアロゾル粒子を上空に噴霧し、より白い雲を多く発生させて太陽光を反射させる研究や炭素を多量に溜め込んでいる森林を効果的に多く育てる研究などが各国で進められている。

(4)【暗い太陽のパラドックス】

課題：暗い太陽のパラドックスについて説明しなさい。
学習者の反応：暗い太陽のパラドックスについて、その概要を説明できる学習者は極めて少ない。その理由として基礎地学を履修した学習者でも、教科書で取り上げられていないため全く聞いたこともないという状況にある。

課題についての地学的な見方や考え方：

地球の歴史の初期段階においては、太陽の光度は現在の値の70%程度しかなく、現在に至るまでに徐々に増加し続けている。そのため当時は、地球上に液体の海を維持するには太陽の光が弱すぎたと考えられてい

る。このことと地球上で発見されている地質学的及び古生物学的な証拠は矛盾するということが、1972年に天文学者のカール・セーガンとジョージ・ミューレンによって指摘された。

標準太陽モデルによると、太陽のような星は主系列段階の寿命の間に、核融合によって引き起こされるコアの収縮に伴って徐々に光度が上昇する。つまり、若いころの太陽は現在よりも光度が低く暗かったと予想される。40億年前の太陽のモデルから予想される光度と、現在の地球の温室効果ガスの濃度を考慮すると、当時の地球の表面の水はすべて凍りついてしまっていたことが予想される（図5）。

しかし、地質学的に考えられている最初の氷期は今から約24から21億年前のもので、ヒューロニアン氷期と呼ばれている。この氷期の原因は十分には解明されていないが、ストロマトライトが繁栄し始めた直後であることが注目されている。ストロマトライトは、シアノバクテリアが光合成によって海水中にO₂を吐き出したことでつくられた。それは同時に、大気中から温室効果のあるCO₂が取り除かれたことを意味する。つまり、シアノバクテリアの光合成でCO₂の温室効果が弱められて最初の氷河期が引き起こされたのではないかと考えられている。また、液体の水の存在と関連する堆積物は、古いものでは38億年前のものが発見されている。さらに初期の生命誕生の兆候は最も古いものは39.5億年前までさかのぼることがわかった。また、この同位体を調べたところ、2種ある同位体のう

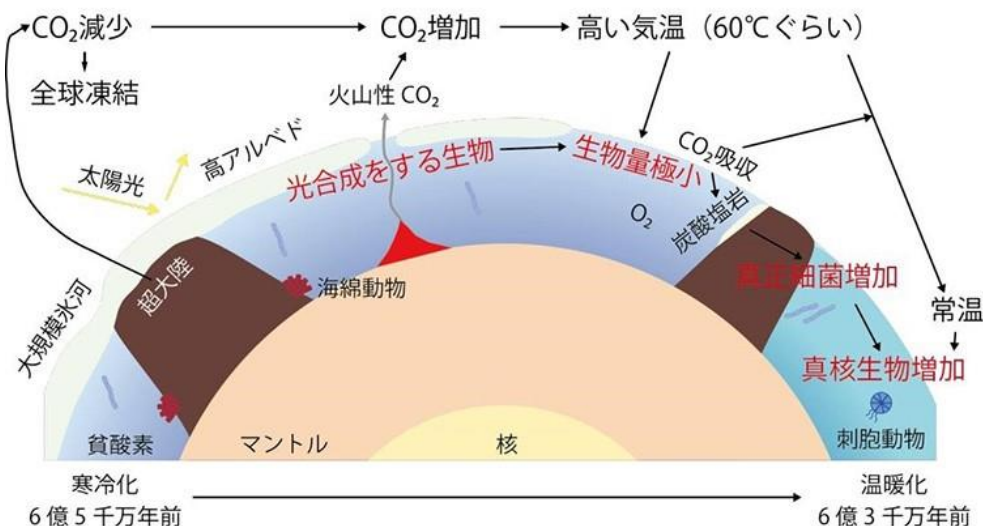


図5 「全球凍結の時代とその後に起きた生物変化」：スノーボールアース後に真正細菌、その後、真核生物繁栄 6億5～3千万年前のスノーボールアースに微量の光合成生物（2021年海保・静谷ら）から引用

Science Portal - 科学技術の最新情報サイト「サイエンスポータル」 科学技術振興機構 (jst.go.jp)

https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20210903_n01/ から 2022年1月22日取得

ち、生物が炭素を取り込むときに選ぶ炭素が、ほかの炭素よりも多く含まれていることがわかった。

上記のように、「若い太陽は暗く、地球表面に液体の水を維持できるほどの光度を持っていなかった」という理論的な推測と、地球表面には形成後の早い時期から継続的に液体の水が存続し続けていたことを示す地質学的・古生物学的な証拠は矛盾している。これらが暗い太陽のパラドックスであり（図5）、解決のための有力な仮説がCO₂の働きによるものではないかという提案であるが推論の域をでない。この考えが地球温暖化二酸化炭素犯人説の起源ともなっていることはあまり知られていない。

そこで授業としては

例1 現在の地球において、太陽の光度が現在の約70%程度になったとすると地球環境はどのようになるか思考実験をするように指導する。

（5）【コリオリの力（転向力）：風にはたらく地球自転の効果】

課題：北半球におけるコリオリの力（転向力）を説明しなさい。

学習者の反応：大部分の学習者はコリオリの力（転向力）について説明できない。基礎地学を履修した数名の学生は、“北半球では風の向きが右側にそれる”ことは暗記して覚えているが、なぜそのような力が働くのかはよく理解していない状況である。

課題についての地学的な見方や考え方：

コリオリの力（転向力）とは、回転している物体上（回転座標系）で移動するとき、移動方向と垂直な方向に受ける移動速度に比例した慣性力（作用反作用の法則を満たさない「見かけの力」）である。地球の自転によって起こるコリオリの力とその影響について具体的に考察する。

地球は東向き（反時計回り）に自転しているため地球上にある物はすべて東向きからの力を受ける。地球は球体で高緯度と低緯度で一周の距離が異なってしまうため自転速度が緯度によって変わる。高緯度ほど速度は小さく低緯度の速度は大きいので、受ける力の大きさも緯度によって異なるし、移動する方向によっても向きは変わる。コリオリの力は北半球では時計回り（進行方向に右向き）に、南半球では反時計回り（進行方向に左向き）にはたらく。そして、赤道で0となり極で最大になる。

コリオリの力は地球規模の現象で、大気に影響を与え、偏西風やジェット気流が吹き、天気に変化することになる。大気だけではなく海流も影響を受ける。さ

らには長距離の飛行機の運航やミサイルの射程にも影響する。

コリオリの力の影響は壮大なスケールの場合であり、実生活でモデル化することは大変難しい。学習者の理解を図るために、教科書や参考書等で北極点から真南に巨大なボールを打ち上げると、風の影響などを0だと仮定したらボールは真南ではなくやや西に落下するのだ、飛行機が真南に飛んだが実は少し西にずれた所に到着するのだといった内容の記述がある。しかし、これは思考実験的なものであり、観察・実験の手法ではない。

コリオリの力は見かけの力である。飛行機による説明であれば、真南に飛んだ飛行機はコリオリの力によりまっすぐではなく曲線をたどっているように見えるという説明でなければならない。コンパスだけに頼って飛行していた航空史初期のフライトでもないかぎり、真南に飛んでいたはずなのに到着点がずれてしまったなどありえないお話であり、学習者を上手に煙に巻いているように感じる（図6）。

また、コリオリの力を学習者に理解させるために回旋塔からボールを投げる事例があったが、これは自転を理解させるためには有効であっても、回転体上でボールが移動するわけではないからコリオリの力そのものの理解とは異なってしまう。

ただし、現在ではコリオリの力を見せようと工夫している動画もあるので、正しい理解のために指導者が厳選したものを上手に利用することも可能だろう。

学習者には、実際に目にすることができる気象現象からコリオリの力の理解に迫る方が妥当であるかもしれない。

そこで授業としては、応用問題として

例1 赤道上で東-西、あるいは南-北に向けて飛行機が飛んだとするとその軌跡はどのようになるかを考えるように指導する。

例2 さらに北緯30°の地点から東-西、あるいは南-北に向けて飛行機が飛んだとするとその軌跡はどのようになるかを考えるように指導する。

（6）【地上の高気圧と低気圧に伴う風の吹き方（北半球）】

課題：[高気圧] なぜ、地表付近では右回りに風が吹き出し、中心付近には下降気流が生じるのか。[低気圧] なぜ、地表付近での低気圧は左回りに風が吹き込み、中心付近には上昇気流が生じて雲がでやすいのか。

学習者の反応：高気圧は他の地点より気圧が高いので下降気流が生じて、吹き出す風はコリオリ力（転向力）

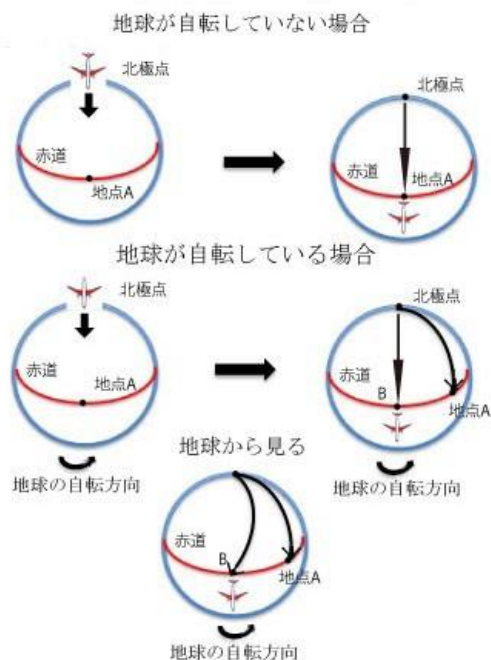


図6「地球自転の効果（コリオリの力）」：
『新編 地学基礎』数研出版，2019年，
p124 をもとに作成）
『ある時刻に、北極点から飛行機が、真南にある
地点Aに飛び立ったとする。もし地球が自転して
いなければそのまま真南に飛行を続け、地点Aに
到達するはずである。しかし実際には、飛行機が
飛行している間に、自転のために地点Aは東に移
動している。よって、真南に飛行し続けた飛行機
は、地点Aより西に位置するA'に到達してしま
う。自転する地球上に静止して観測者にとって
は、真南へ飛行する飛行機にたいして、飛行機
の進行方向右向きの力がはたらくように見える。
これがコリオリ力（転向力）で、北半球では物
体の運動方向に対して右向き（南半球では運動
方向に対して左向き）にはたらき、その大きさは
運動の速さに比例する。』

によって右方向（時計回り）に曲がる。低気圧は他の
地点より気圧が低いので上昇気流が発生して雲がで
きるが、吹き込む風は左方向（反時計回り）にまが
ると覚えている学習者が多くいる。学習者の中には、低
気圧の場合はコリオリ力が左に働いていると間違っ
た理解をしているものがいた。暗記している学習者が
多数おり、特に低気圧の風の吹き込みについての基本
的な理解ができていないことが判った。

課題についての地学的な見方や考え方：

気圧が周りより低い場所を低気圧、逆に高い場所を高
気圧という。風は気圧の高い方から低い方へと流れ込
むので、低気圧には風が吹き込み、高気圧からは風が
吹き出す。

天気予報などをみると雨雲が発達して天気が悪く
なる場所には低気圧や前線が分布していることが多
い。これは、低気圧や前線がある場所には必ず上昇気
流が存在からである。逆に、高気圧のある場所は下
降気流となっている。結局、雨が降る、降らないは
気流が上昇して雲ができるか、下降して青空が広がる
かで決まる。（高気圧の周縁では下降した気流が再び
上昇し雲ができるので雨が降ることもあり、高気圧
が低気圧だけでは降雨の決め手とはならない。）

それでは高気圧と低気圧では風の吹き込む向きは
どのようなになっているのだろうか。高気圧での風の
向きは右に働くコリオリの力によって時計回りに風が
吹き出す（図7）。低気圧の場合は風の向きが高気
圧と大きく変わる。低気圧は周辺部から中心部に向
かうほど吹き込む力がつよくなるため、周辺部では
コリオリの力は進行方向に右向きの力が働くが、
中心部に向かうに従って中心に吹き込む力が強くな
るため左方向

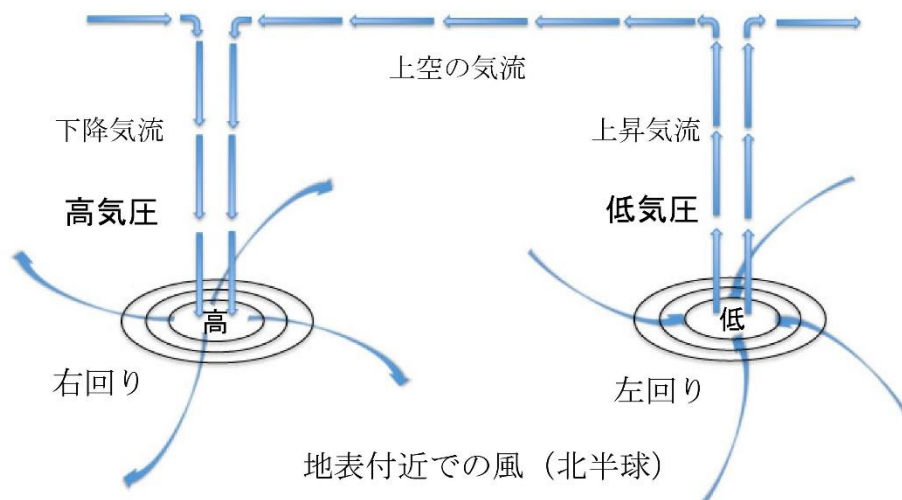


図7「高気圧・気圧付近に吹く風」：
『最新理科便覧』浜島書店，1996年，p73 をもとに作成

に風向が曲げられる。このため、低気圧ではその中心に向かって反時計回りに吹き込むように曲がる(図8)。

高気圧や低気圧は等圧線により天気図にあらわされる。等圧線の間隔が狭いところでは風は強く、広いところでは風が弱いというのが気象学の原則である。低気圧の中心付近のように、等圧線の間隔が狭く、線が混み合っているところでは強い風が吹いているし、高気圧の真ん中のようにほとんど線がないところでは無風に近い状態と思ってよい。学習者には、高気圧だから風が吹かないのではなく等圧線が広いからなのだというところを実際の天気図を見せて確認させることが重要である。

さらに、高気圧や低気圧、前線などの風の向きは、いずれも地表での風向を表していることに気づかせることも重要であり、大気(対流圏)を立体的に観て考える力を発達段階とともに養っていく必要がある。

そこで授業としては、

例1 高気圧と低気圧の風の吹く方向をワークシートなどに書かせて、なぜそのように風が吹くのか考えるように指導する。

(7)【台風について】

課題：北半球における台風の構造について、ワークシートの台風の鉛直断面図に風の向きを記入して説明しなさい。

学習者の反応：台風は、地表付近では強い風が反時計回りに吹くことは知っているが、台風の構造を鉛直断面にして考えたことがなかったようでほぼ全員描くことができなかった。ただ、多くの気づきがあったようで台風は激しい上昇気流が発生しているのに、なぜ、台風目(青空が見えたり、無風状態になる)ができ

るのか。台風の衛星写真や動画をみると、反時計回りに雲ができながら移動している。学習者はこの反時計回りの雲の状態から風も同じ方に吹くと思い込んでいた。しかし、地上からの反時計回りの上昇気流と上空の反時計回りの下降気流がどこかでブツかってしまうことになり、一体台風の構造はどうなっているのか、などの疑問が学習者の間で生じ、科学的に探求する学習活動がみられた。

課題についての地学的な見方や考え方：

台風は北緯5〜20度付近の海上で誕生する。海面の水温が約27℃を超えるような熱帯の海では、海面に接した空気が温められて水蒸気が多量に供給される。すると、暖められた水蒸気は上昇し積乱雲の塊を作る。これが台風の卵となる。

低緯度(熱帯)で生まれた台風の卵は、熱帯低気圧へと成長する。温かい海の水が持つエネルギーにより水蒸気が供給され、その水蒸気が上昇して氷の粒になり昇華熱を放ち空気を暖める。すると上昇気流はますます激しくなり、熱帯低気圧は中心気圧を下げ、中心に流れ込む風の速さが増す。このように発達した熱帯低気圧のうち、最大風速がおおよそ17m/s(34ノット、風力8)を超えるものを台風と呼ぶ。

台風の構造を見てみよう。地上付近で中心に向かって吹き込む風は、気圧の低下に伴って次第に加速されながら反時計回りの渦巻き状に吹き込み、吹き込んだ風は遠心力のためそれ以上中心に進めなくなり、螺旋を描きながら上昇する。台風の上層では時計回りに空気が発散されている。そして高さ十数kmの円筒状の積乱雲(アイウォール[eyewall])を作る。この積乱雲に囲まれた雲のない空間が「台風目」である。上空での「台風目」の中心部は少し低気圧の状態になって

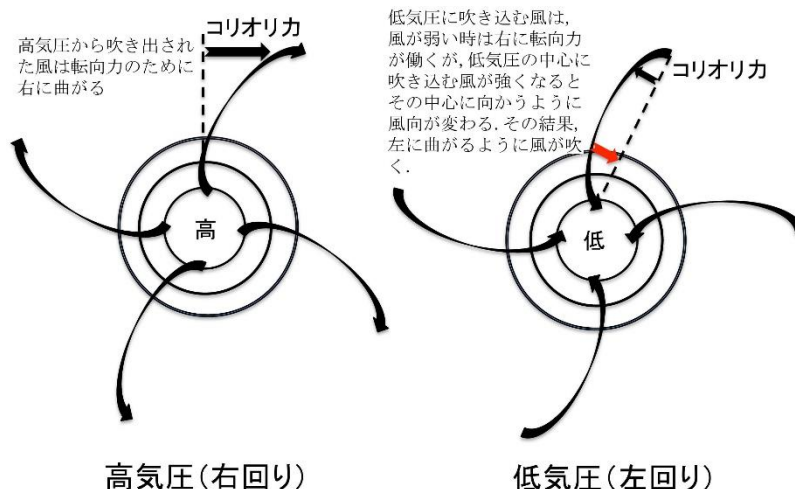


図8「コリオリ力と高気圧、低気圧の風向」：『最新理科便覧』 浜島書店、1996年、p.73をもとに作成

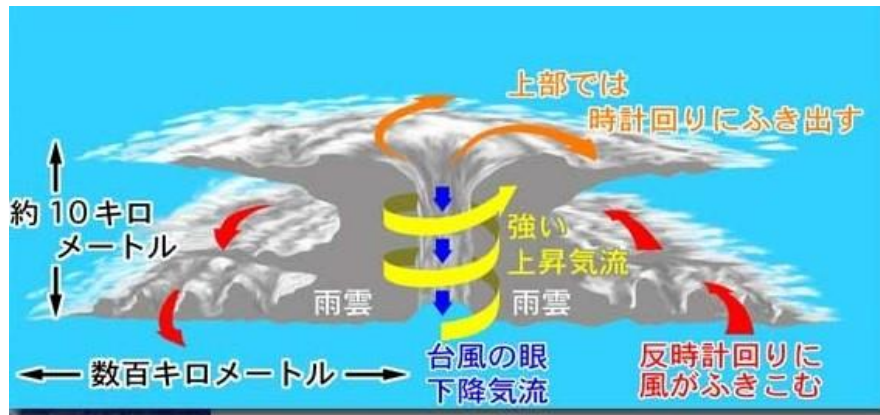


図9「台風のしくみ」：理科ねっとわーく <https://rika-net.com/contents/cp0130/10/10-1.html> から引用 図版は著作：国立教育政策研究所 製作：国立研究開発法人 科学技術振興機構 2022年1月22日取得

いる。この低気圧の状態を埋めるために、上空から“下降気流”として冷たい風が温められながら降りるため、台風の目には雲がないと言われている（図9）。

学習者に台風の動画や衛星写真をみせて（図10、11）、台風の上空での風の向きを矢印で写真に書かせてみたら、渦の中心に向かって風が吹き込むように書いた学習者が多数いた。これは子ども時代の生活体験、たとえば風呂の栓を抜くと風呂の水は渦を巻きながら吸い込まれていく現象や天気予報での台風の風の向きの図などを見ての答えと思われる。台風は反時計回りに回転しながら海上や地上を北上するように進む。しかし、上空では、風は中心から時計回りに吹き出すように吹いているのである。学習者や時には指導者も地表での台風の風向と上空のそれとが異なっていることに気づいていないのではないかとという授業事例も見受けられる。台風には吸い込まれていくように見え

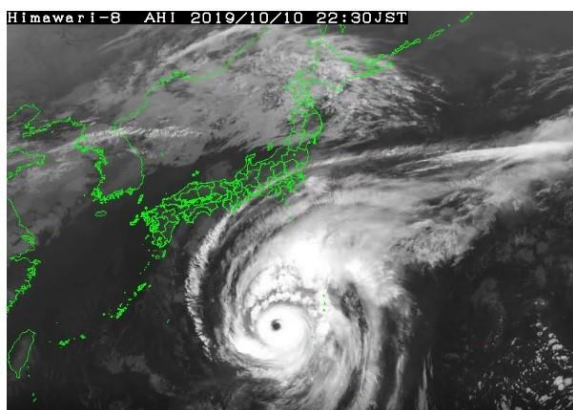
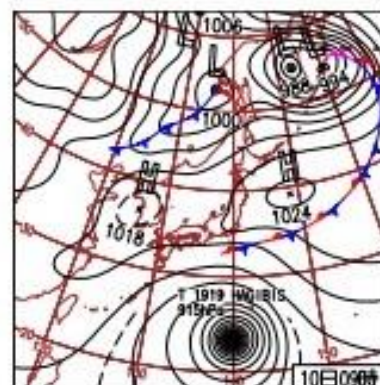


図10「台風の衛星画像」：気象庁ホームページ https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_typh.html#obs_j20210910 令和元年台風第19号（2019年10月10日22時30分）を2022年1月22日取得

る風がどこに行ってしまうのかを考えさせれば、上空の風が逆向きに吹き出していることは合理的であり、理解につながると思われる。天気の変化を引き起こしている風の向きや力などを地球規模の広い観点で学習者に考えさせたり、台風の鉛直断面図を描画させることで概念が覆されたり、広げられたりして、興味・関心が高まり、課題を見つけ解決していく能力が徐々に育成されていくことにつながると考えている。

さて、余談ではあるが『ボイスバロットの法則』をご存知だろうか。この法則は台風や低気圧（高気圧）の中心位置が、自分が立っている地点からどの方向にあるかを知る方法である。「風の吹いてくる方向を背にして立った時、北半球では左前方の方向に台風や低



10日（木）全国的に晴れ
朝鮮半島と三陸沖の高気圧に覆われ、全国的に晴れ。北日本中心に冷え込み、岩手県釜川は氷点下。大型で猛烈な台風第19号は日本の南を北上。父島で最大瞬間風速39.2m/s。

図11「図10の台風の天気図」：気象庁ホームページ [jma.go.jphttps://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2019/201910.pdf](https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/data/hibiten/2019/201910.pdf) 平成元年台風第19号（2019年10月10日9時の天気図）を2022年1月22日取得

気圧の中心があり、高気圧の中心は右後方にあるという法則である。このような法則は実生活でも体験することができ、このような自然体験を繰り返すことによって、科学的な見方や考え方の育成に繋がっていくと思われる。なお、南半球では右手前方に低気圧の中心がある。

そこで授業としては

例1 台風の気象衛星写真や台風時の天気図を用意して、台風の風向の変化をワークシートに記した鉛直断面図に描くように指導する。

例2 赤道上の台風や南半球の熱帯低気圧のかぜの向きなどを考えるように指導する。

この単元は、実社会・実生活との関連を重視しながら学習者の学習意欲がさらに高まるように授業改善につなげたいところである。

おわりに

今回、学習者の見方・考え方を働かせるために主に地学の気象分野からの考察を試みた。

内容的にはかなり難しいものであるが、科学の原理、真実を踏まえたうえで学習者の発達段階に応じた指導方法を考え、教材化していくことが指導者の腕の見せ所であると考え、それぞれの教育課程に応じて、時間配分や実験・観察の量や深さも変わってくるので、ここでは例としてごく一部を論述した。

指導者にとっても、科学的な事実は日々書き換えられており、研修により自身のアップデートを図らねばならないが、日々の業務に追われてままならないことも多い。また、事象の奥にある真実に気づけなかったり、長年の思い込みだったりすることもあるかもしれない。そんなときに、本著がヒントとして指導者に受け取られ、学習者への指導につながることを期待したい。

謝辞

本論文を投稿する機会を与えて頂いた熊本県博物館ネットワークセンター長をはじめ職員の方々に感謝申し上げます。また職員の方々の指摘によって本論文が読みやすくなったことを心より感謝申し上げます。

引用した図版・資料等の出典

「地球型惑星の大気組成」：「地球型惑星」『ニュースページ新訂地学図表』浜島書店、2010年、p116をもとに作成。『各惑星を同一半径で描いてある。地球型惑星の特徴はケイ酸塩のマントル金属鉄の核がある（火星はマントルに酸化鉄、核に硫化鉄も含む）。平均密度は

5g/cm³程度』。から引用

「大気組成」：阿部 豊（2005 年）「地球環境の変遷 比較惑星学の視点から」 日本気象学会 「地球環境の進化と気候変動」050515SympoPrdng.pdf(metsoc.jp)から引用

2022年1月22日取得

「地球の二酸化炭素濃度」：NHK高校講座テレビ学習メモ 地学基礎第27回地球の大気 (nhk.or.jp)

https://www.nhk.or.jp/kokokoza/tv/chigakukiso/archive/chigakukiso19_27.pdfから引用

2022年1月27日取得

「ストロマトライト」：JAMSTEC（ジャムステック・海洋研究開発機構）JAMSTEC×Splatoon 2『Jamsteec（ジャムステック）』

地球46億年の歴史と生命進化のストーリー

<https://www.jamstec.go.jp/sp2/column/04/>

から引用 2022年1月22日取得

「大気の鉛直構造」：空と宇宙の境目はどこですか？ | ファン!ファン!JAXA!

<https://fanfun.jaxa.jp/faq/detail/103.html>

から引用 2022年1月22日取得

「年平均した地球全体のエネルギー収支の見積もり」：気象庁ホームページ

<https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html>

第1章気候変化の科学に関するこれまでの概要「図1 年平均した地球全体のエネルギー収支の見積もり」から引用 2022年1月22日取得

「全球凍結の時代とその後に起きた生物変化（海保邦夫・東北大学名誉教授提供）」：(Atena Shizuya, Kunio Kaiho, Jinnan Tong 2021. Marine biomass changes during and after the Neoproterozoic Marinoan global glaciation) から引用

出典：Science Portal - 科学技術の最新情報サイト「サイエンスポータル」

『「カンブリア爆発」前夜の全球凍結、生物への影響を明らかに 東北大など』（2021年9月3日）科学技術振興機構（JST）(jst.go.jp)

https://scienceportal.jst.go.jp/newsflash/20210903_n01/

から2022年1月22日取得

「風が受ける地球の自転の効果とは?」: 小川勇二郎
ほか. 『新編 地学基礎』数研
出版社, 2019年, p124 をもとに作成

「高気圧・低気圧と風」: 浜島書店編集部『最新理科
便覧』浜島書店, 1996年, p 73をもとに作成

「台風のしくみ」: 台風の断面図
理科ねっとわーく <https://rika-net.com/>
台風のしくみ

<https://rika-net.com/contents/cp0130/10/10-1.html>から引
用 図版は著作: 国立教育政策研究所 製作: 国立研
究開発法人 科学技術振興機構 2022年1月22日取得

「台風の衛星画像」: 台風の衛星画像
同時期の天気図
気象庁ホームページ
[https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/imag
e_typh.html#obs_j20210910](https://www.data.jma.go.jp/sat_info/himawari/obsimg/image_typh.html#obs_j20210910)
令和元年台風第19号(2019年10月10日22時30分) から
引用 2022年1月22日取得

文献

- Atena Shizuya, Kunio Kaiho, Jinnan Tong 2021. Marine
biomass changes during and after the Neoproterozoic
Marinoan global glaciation. *Global and Planetary Change*
10.1016/j.gloplacha.2021.103610
- Sagan, C.; Mullen, G. 1972. "Earth and Mars: Evolution of
Atmospheres and Surface Temperatures". *Science*. 177
(4043):52-56
- Tashiro T., Ishida A., Hori M., Igisu M., Koike ., Méjean P.,
Takahata N., Sano Y & Komiya T. 2017. Early trace of
life from 3.95 Ga sedimentary rocks in Labrador, Canada.
Nature, 549. 516-518