

気象 5 地球の熱収支と CO₂ 量の変化

気象に関しての第 5 回目は地球の熱収支と CO₂ 量の変化についての話です。私たちが歩く，食べるなど生命活動ができるのも，元をたどれば太陽からのエネルギーのおかげです。太陽からのエネルギーがどのように配分されているのか，そして人類はどのように関わっているのでしょうか。

(1) 地球の熱収支

太陽からは電磁波という形で地球にエネルギーが与えられます。電磁波（以後，光と表現しておきます）は「空間」そのものが振動して，その振動エネルギーが「波」という形で伝わってくるものをいいます。

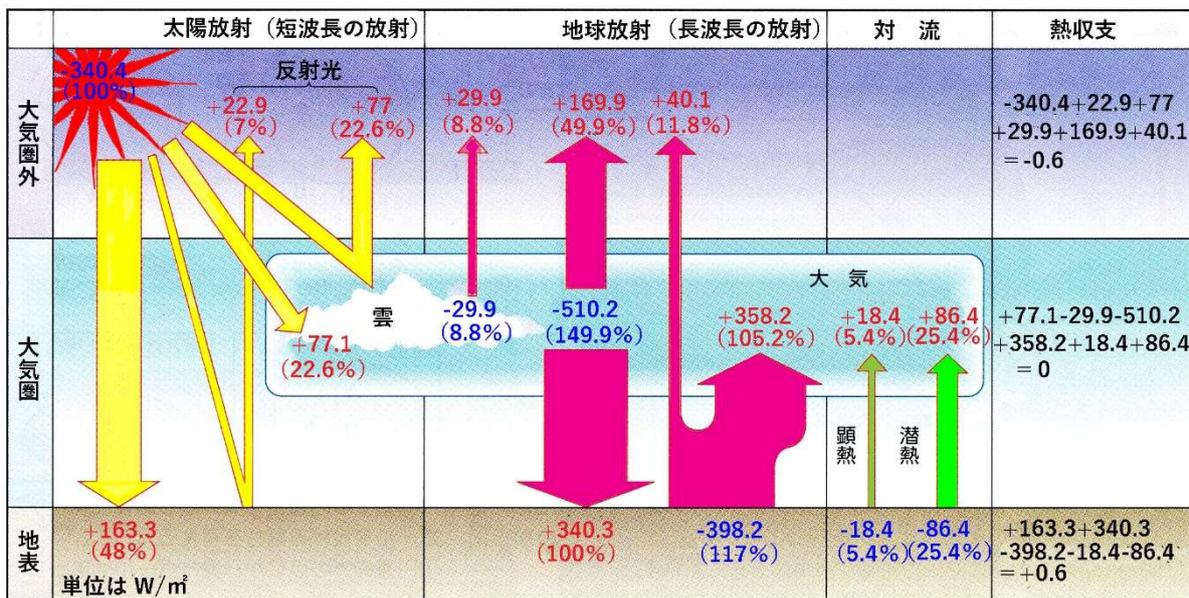


図 1 地球の熱収支 (地学図表：浜島書店の図をベースに数値を改)

地球は，そのおよそ半分を地表が，約 2 割を大気が吸収し，およそ 3 割を吸収せずに宇宙空間に戻しています。その様子を示したのが図 1 です。数値はエネルギー量(単位は W/m²)を示し，()の中は%で示してあります。太陽放射の 99%は波長 0.15~3 μm の範囲に含まれており，-50°C~50°C 付近で出す放射を地球放射といいます。

図 1 の黄色の矢印が太陽からもたらされるエネルギー（短波放射といいます）で，可視光線が一番強くやってきます。太陽放射は空気分子と，大気中に浮遊する微粒子によって散乱や吸収されて減衰します。散乱は光線の進行方向を変えるだけですが，吸収はその場の大気の温度を上げます。散乱には空気分子によるものと，浮遊する微粒子（雲など）によるものがあります。前者をレイリー散乱と呼び，空が青く見える原因です。後者はミー散乱と呼び，微粒子が増えると空は白っぽくなります。太陽エネルギーをどの程度反射しているかを数字で表したものをアルベドといいます。砂漠や雪原では比較的大きく（よく反射する），草地や森林では比較的小さいです。砂漠や雪原では風景をまぶしく感じるのはこのためです。また，スキー場などで天気が良くても雪が融けにくいのはアルベドが大きく，入射光の多くを反射してしまうからです。およそ 1/3 を反射というのはすこし意外かもしれません。

一方的にもらうだけだと地球は高温になってしまいますので、地球からもエネルギーを放出します（地球放射：図 1 の赤い矢印：赤外放射・長波放射ともいいます）。地球放射は大気中の水蒸気、二酸化炭素、オゾンなどによって吸収されます。同時に、それらの気体は長波放射を放出します。地球が受け取った分だけエネルギーが減少（温度が下がり）し、波長が長くなって赤外線*という光が地表からも放出されます。赤外線のために人の目には認識できません。太陽からもらった光をそのまま（可視光線のまま）地球が放出すると、夜中でも地面が明るく輝くことになりそうですね。そして、この赤外線を大気中の CO₂ や H₂O が吸収し、大気を温めてくれます。これが大気の温室効果です。この効果がないと地球の大気は -18°C になってしまうといわれます。大気が吸収したエネルギーの一部を除いて再び地表に戻されます。

*波長×温度=一定（ウィーンの法則）から温度が下がると波長が長くなります。赤外線は可視光線より波長が長く、およそ 0.7 μm～1.00 μm の電磁波をいいます。

さて、図 1 で注意しておくべきことは、地表からのエネルギーの放出は主に赤外線という光だけでなく、熱という形でも放出をしていることです（緑の矢印）。それには顕熱と潜熱という形の 2 種類があります。顕熱は伝導と言い換えてもよく、地表から熱がじわじわと上空に逃げていく現象です。潜熱は蒸発と言い換えてもよく、地表の水が蒸発するときに熱を奪って上空に行く現象です。蒸発が意外と大きな量の熱を運んでいるのがわかります。

図 1 は地球の熱収支の説明にはよく使われます。そして、「地表」「大気圏」「大気圏外」のそれぞれの部分で収支が 0 になっている（図 1 の右端の計算）と説明されています。でも図 1 では地表部分が +0.6 となっています。この図の元図は浜島書店の地学図表を利用させていただいていますが、数値は NASA の資料に置き換えてみました。それは近年、話題になっている温暖化のイメージをつかめるかなと考えたからです。入手できる資料が見出しに使った NASA の図でしたので、その値を使って計算してあります。すると地表部分に 0.6 W/m² が吸収過剰となります。太陽からもらう量の 0.2% 程度です。主に海洋に蓄えられているといわれます。この量を何とかすれば温暖化問題の解決の一助になるのではと考える研究もあるようです。例えば、大気中に生物に害のない微粒子をまいて光を散乱（ミー散乱）させ入射量を減らせないか（火山噴火による火山灰や恐竜絶滅の原因とされる大気中の塵埃の増加などによる気温低下の実例があります）、太陽光発電などで地表に吸収させずに使ってしまうというのも一つの対策です。どれも現実的にはむつかしそうです。

図 2 と図 3 は太陽放射と地球放射を大気中のどの物質がどの波長の光を吸収しているかを示しています。図 2 からわかるように、CO₂、H₂O、O₃ などが主に太陽放射を吸収します。

地球温暖化で大きな働きをす

るのは地球放射です。図 3 の右側の“山”（「300K の黒体放射*エネルギー」）がほぼ地球放射を表しています。

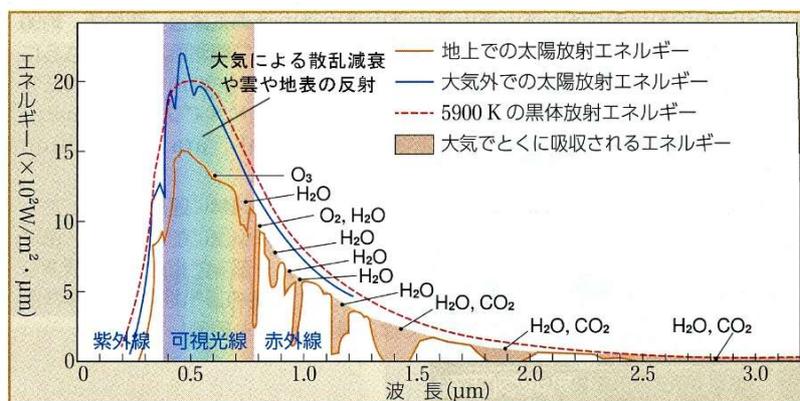


図 2 太陽放射の吸収（地学図表 浜島書店を改）

*黒体放射：黒体とは、全ての波長の電磁波（光）を全く反射しない物体をいいます（真っ黒に見えます）。現実にはそのような物体は実在しないのですが、太陽や地球からの放射を考える時には、それらを黒体と仮定することがよくあります。「6000Kの黒体放射エネルギー」は太陽放射、「300Kの黒体放射*エネルギー」は地球放射と考えてよいと思います。Kは絶対温度を表しています。 $0\text{K} = -273^\circ\text{C}$

「大気の窓」という言葉があります。光が大気によって吸収されない部分です。それには、太陽放射（短波長領域）が吸収されない波長域と、地球放射が吸収されずに宇宙空間に放出される波長域をいいます。図3に示されるように8~12 μm はCO₂やH₂Oは地表からの赤外線をほとんど吸収せず、宇宙空間に地球放射を逃がしています。この部分を「地球放射の窓」といいます。実は温室効果は単純に地球の温度を上げる（保つ）だけでなく、この地球放射の窓を利用して温度を一定に保つ働きをしています。4 μm 付近にも窓があります。大気の窓は天文観測の分野では特に重要な事柄です

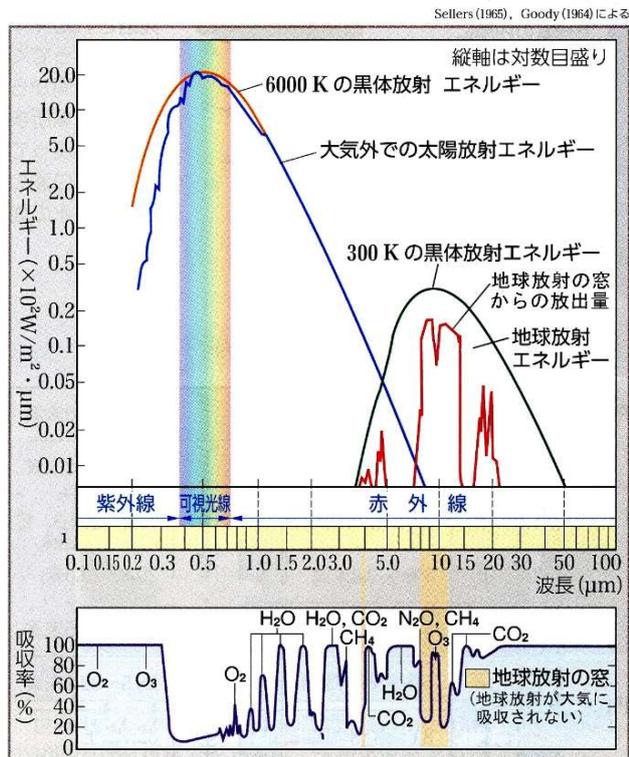


図3 地球放射の吸収と地球放射の窓（地学図表 浜島書店を改）

(2) 二酸化炭素の増加

図4のようなグラフを目にしたことがあるかもしれません。これはキーリング曲線（Keeling Curve）と呼ばれ、大気中の二酸化炭素の蓄積をグラフ化したものです。1958年からハワイ島マウナロア観測所で、C.キーリング（1928-2005）が始めた連続観測がもととなっています。これにより、大気中の二酸化炭素の急増が目目されました。

現在も続くこの観測結果はWebサイトで公表されています（URL2：図4は今月までのデータです）。

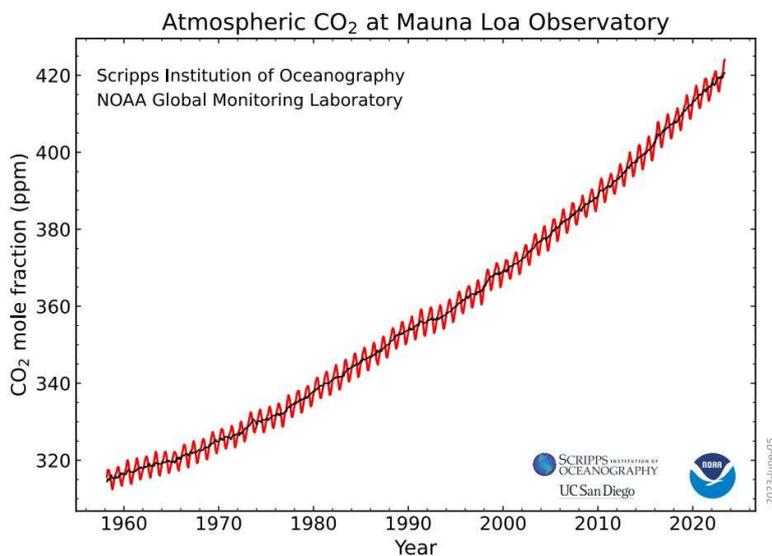


図4 キーリング曲線（2023年6月）（URL2）

キーリング曲線は、毎年約5 ppmv*（体積百万分率）の周期的な変動を示しており、これは世界中（おもに北半球）の陸地の植物が行う光合成（CO₂の取り込み）の季節変化が原因です。5月を光合成の極大とし、9月を最小値とする（春から夏にかけて光合成が盛ん）変化に対応しています。9月以降は植物や葉が枯れて朽ち果てるとCO₂は大気圏に戻り、北半球の秋から冬にかけて

再び上昇すると考えられています。

マウナロア観測所はハワイ島のマウナ・ロア山(4169m)北斜面の標高3397mのところにあります。大陸から遠く離れた場所にあり、植生がないことから選定されたそうです。

高校生を連れてこの観測所を訪れたことがあります。事前の依頼では迷惑をかけないように短時間ですぐお帰りと“短時間なら来るな”と叱られ、また、高地なので数人が高山病(頭がぼんやり?気分が悪化?携帯用酸素ボンベは用意しておきましたが)で、座り込むしで、少々、疲れた訪問でした。でも、わざわざこの高地まで登って来ていただき、見学、説明をいただけてうれしかったです。その時、マウナ・ロア山は活火山なので心配だと伺っていましたが、2022年11月27日に噴火したようです。この観測所の少し下に東京大学宇宙線研究所の全天高精度素粒子望遠鏡(超新星などの観測)があったので、知人を通してその見学もさせていただきました。



図5 入り口でキーリング曲線の説明



図6 観測所構内での説明(周りは溶岩原)



図7 キーリングが使用していた観測機器



図8 観測機器の一つ

文献

二訂版 ニューステージ地学図表, 2023, 浜島書店

URL1 近藤純正ホームページ <http://www.asahi-net.or.jp/~rk7j-kndu/kisho/kisho34.html>

URL2 カリフォルニア大学サンディエゴ校スクリップス海洋研究所
<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>