

第1回 環境サイエンスカフェ（主催：日立環境財団）

テーマ 「気候変動の科学・その1」～地球の気候はどのようにして制御されてきたか？～
 講師 多田隆治 さん <古環境学者> 東京大学理学系研究科 教授
 日時 2011年2月23日（水）18：30～20：00
 会場 サロン・ド・富山房 Folio
 参加者 41名



1. 地球の気候はどのように制御されてきたか

今回は気候変動の科学の第1回目です。「地球の気候はどのように制御されてきたか」、ちょっと堅苦しいタイトルですね。今日はなるべく数式は出さないつもりでいますが、一つだけ出します。しかし、中学ぐらいの算数の知識で理解できる範囲だと思えますので、式が出てきたからといってすぐに引かないように、是非お願いします。

1-1 太陽からのエネルギー・エネルギーバランス

では、本題に入りましょう。気候にはいろいろな要素があるのですが、その中でやはり一番根本的な要素というのは温度だと思います。我々は日頃から気温を気にします。今日はどのぐらい着ていけばいいとか。雨も重要な要素ですが、基本的には温度にコントロールされています。気候を特徴付けるすべての要素について語るには時間が足りませんので、それをあえて一つに絞りこむと「地表温度がどうして決まったか」ということになります。

我々は地球の表面に住んでいるわけですが、その地球表面の温度を決めている要因の一つは、太陽から地球に届く放射エネルギーです。一方で、地球自体は赤外線放射をします。地球自体が暖められて温度を持つと、それが温度に応じて長い波長の放射を

出すのです。太陽放射は地球の断面積で地球が受けます。

【図1】に πr_e^2 (r_e は地球の半径) と書いてありますが、これは地球の断面積です。それに対して、地球からの放射は地球表面全体から出されます。それが $4\pi r_e^2$ です。 r の右下の e というのは地球(earth)の e です。基本的には地球表面の温度というのは、地球が受けている太陽のエネルギーと、地球が放出するエネルギー（長波長の赤外線）のバランスで決まっています。これを数式で解いていきます。

地球が太陽から受けるエネルギー

太陽定数 $[S_0] = 1380W/m^2$
(地球の距離でうける単位面積当たりの太陽エネルギー)
 ×
地球の断面積 $=\pi r_e^2$
 ×
地球の熱吸収率 $= (1-A)$
(反射されずに吸収される割合。A=反射能:アルベドと言う)
 ||
 $S_0(1-A)\pi r_e^2$

【図1】

1式 (地球が太陽から受けるエネルギー) $= S_0(1-A)\pi r_e^2$

地球が太陽から受けるエネルギーというのは、1 m²あたりおよそ 1,380 ワットぐらいあります（太陽定数：S₀）。1 m²で 1,380 ワットというと 100 ワット電球で 14 個ですから結構明るいわけです。これに地球の断面積をかけます。それから、人工衛星から地球を見ると分かるのですが、例えば海は青黒く見えます。だけれど雲も結構あって、雲は白い。また。陸地は海よりは明るいですよ。何を言いたいかというと、地球は受けた熱をすべて吸収しているわけではなくて、一部反射をしているという事です。それをここで A と表していますが、これをアルベド（反射能）と呼びます。そうすると（1 - A）というのは、反射されずに地球に吸収される割合になりますが、これをかけます。つまり、太陽の光が地球の距離で受けるエネルギーに面積をかけて、さらに反射されないで吸収される割合をかけてやると、地球が受けるエネルギーになるわけです。

男性： 太陽定数 1380W/m² には時間の項が入っていませんが、それでよいのですか？

太陽定数の単位に入っている W はエネルギーを時間で割ったエネルギーの流量を示す単位で、その中に時間の項が入っています。

今日、皆さんにお見せする式は、これと次にお見せする項をイコールにつないだ式だけです。アルベドについてももう少しご説明しますと、例えば地球がミラーボールだったら、アルベドが 1 です。地球が真っ黒だったらアルベドはゼロです。ちなみに地球の表面はいろんなものが構成しますが、それらのアルベドを簡単にご説明していきます。例えば雪で覆われた場合、アルベドはいくつぐらいだと思いますか？

男性： 0.9。

素晴らしいですね。0.8~0.9 です。要するに、非常によく反射をするわけです。だからこそ我々はスキーに行く時にサングラスがないとえらい目にあうわけです。では、砂漠はどうでしょう。

男性： 半分ぐらい、0.5。

そうですね、それぐらいあるのもあると思うのですが、0.3~0.4 ぐらいと言われています。森はどうでしょう？

男性： 0.1 ぐらいは。

素晴らしいですね。植物は太陽の光を使って光合成をしているわけですから、なるべくエネルギーを吸収しようとするわけです。その結果、森のアルベドは 0.1 ぐらいです。海はちょっと厄介なのですが、光が真上からあたる時はほとんど吸収するのでアルベドは 0.1 ぐらいですが、斜めにあると基本的には反射します。ただ表面が波立っていて一部吸収をするので、0.7 ぐらいとなっています。地球全体の平均は 0.3 ぐらいだと言われています。

ここまで地球が吸収するほうのエネルギーの話をしましたので、次に自分から出すエネルギーの話します。ここで、ステファン・ボルツマンの法則というのが出てきます。【図 2】

地球が放射するエネルギー

ステファン-ボルツマンの法則

温度を持っている物質は、電磁波により熱を放出している

$$I_e(\text{放射強度}) = \sigma T_e^4$$

$$\times$$

地球の表面積 $4\pi r_e^2$

$$\parallel$$

$$4\pi r_e^2 I_e$$

σ (ステファン・ボルツマン定数) = $5.67 \times 10^{-8} \text{ (Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$

【図 2】

2式 (地球が放射するエネルギー) = $4\pi r_e^2 \sigma T_e^4$

この法則の意味は、簡単に言うと、温度を持っている物質は、温度に応じて電磁波（波長が短ければ X 線とか紫外線、長ければ可視光から赤外線など）として熱を放出しているということです。もう少し詳しく言うと、物質（例えば地球）の放射強度は物質（地球）の表面温度の 4 乗に比例するという法則です。これ（放射強度）に先ほど言った地球の表面積をかけると、地球が外に向かって放射するエネルギーになるわけです。ちなみに右辺のシグマ（σ）というのは、ステファン・ボルツマン定数と言われます。これと先ほどお示した地球が受けるエネルギーとが、基本的にはつりあっているのです。

3式 $S_0(1-A)\pi r_e^2 = 4\pi r_e^2 \sigma T_e^4$

では、この式を解くことにします【図 3】。一見面

倒くさそうに見えますが、計算していただければ地表温度が 255° K となります。

(地球が太陽から受けるエネルギー) = (地球が放射するエネルギー)

$$S_0(1-A)\pi r_e^2 = 4\pi r_e^2 \epsilon$$

$$S_0(1-A) = 4\sigma T_e^4$$

A = 0.3, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$
 $T_e = 255$

放射平衡計算では、地表温度は -18°C になってしまう。

でも、地表温度は +11°C もある。
何故だろう？

【図 3】

この ° K というのは絶対温度で、摂氏に直すと -18 度になってしまいます。でも -18°C という地表温度は低すぎますよね。南極、北極ではこれぐらいになっているかもしれませんが、地表の大部分はもっと高いわけで、具体的には +11 から 13°C くらいになります。だからこの答えは合っていないわけです。最初から早速困ってしまいました。

何故合わないのでしょうか。いかがでしょうか、どなたか何故合わないのかに関してご意見がおありの方は？ 計算間違い (笑)。時々やりますが、多分大丈夫だと思います。いかがですか？

男性：地球が熱を持っているから。

地球自体も内部から熱を出す、それはそうなのです。ただ少なくとも現在は、その地球が出す熱量というのは太陽から受ける量の何千分の 1 ぐらいで、無視できる程度なのです。

男性：きっとそうだと思うのですが、つまり放熱している分がまた戻ってきているからということですよ。地球からの放熱が温室効果ガスでまた戻ってきている。つまり全部放熱しているわけではないということだと。

そうです。どういうことなのか次にご説明します。

1-2 地表温度の違いは何を意味するか？ - 温室効果

地球が太陽から受けるエネルギーと地球が放射するエネルギーをバランスさせる。これはさっきと同

じです。ただし、今度は右辺に射出効率 (α) というパラメータが入っています。地表からの放射エネルギーのうちの α (0 から 1 の間の値を取り、すべてが出れば 1、全くでなければ 0 です。) が地球外に出て行く割合ということです。それから、また地表温度 (ちょっと都合で高めにしていますが) を、288° K (=15°C) とします。地表温度を先に与えると、ステファン・ボルツマンの式から地表からどれだけ放射があるかというのは計算できます。

一方で、地球外に出て行く放射ですが、地表から放射されたエネルギーの一部は温室効果により地表に戻されるので、必ずしも全部は出て行かないのです。その効率を α というパラメータで見たいと思います【図 4】。

(地球が太陽から受けるエネルギー) = (地球が放射するエネルギー)

今、地表からの放射エネルギーのうち $\alpha (0 < \alpha < 1)$ が地球外に出て行くとする
 また、地表温度を 288 K とする

$$S_0(1-A)\pi r_e^2 = \alpha 4\pi r_e^2 \epsilon$$

$$S_0(1-A) = \alpha 4\sigma T_e^4$$

$S_0 = 1380 \text{ W/m}^2$, A = 0.3,
 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

α (射出効率) = 0.62

地表から放射されたエネルギーのうち、62%しか地球外へ出ていっていない。

【図 4】

4 式 $S_0(1-A)\pi r_e^2 = \alpha 4\pi r_e^2 \sigma T_e^4$

4 式が **3 式**と違うのは右辺に α をかけたということです。Te というのを 288 度にして α を求めてみましょう。太陽定数を 1,380 ワットにして、アルベドを地球にあたった太陽の光のうちの 3 割が反射されるとして、あとステファン・ボルツマン係数も入れます。それで α を求めてやると 0.62 です。これはどういうことを意味するかというと、地表から放射されたエネルギーのうちの 62% は外に出て行くのだけど、残りの 38% は出て行かないでまた地表に戻ってくるということです。残りの 38% というのは、大気が吸収して熱を持つので大気自身がまた放射するわけです。その時に外側にも放射するけれども内側にも放射する。その内側に放射したのによって、地表が温められるのです。まさしくこれが温室効果なのですが、多分まだここまでの説明だと温室効果イメージが完全にはわからないと思いますので、もう少し説明をしましょう。

1-3 透明な大気と不透明な大気

太陽の光の強さを波長別に測ってみます。すると太陽の光があまり地表に届いていないのが解ります。これは太陽光が大気で吸収されている事を示します。可視領域を中心とした0.3から1.3ミクロン辺りの波長帯はほとんど地表に届いているのですけれど、1.5ミクロンより長い波長帯になると、ところどころで光が地表まで届く波長帯があるけれど、基本的には大気により吸収されて地表まで届いていないことがわかります。

一方、太陽は表面温度が5,780° Kあります。非常に熱いので短波長の電磁波を放出します。波長で言うと0.5から1ミクロンあたりです。それに対して地球は、これは大気の上端での温度なのですが、255° Kありますが、長い波長、10から50ミクロンという赤外線波長の電磁波を出しています。大気による吸収との関係を見ますと、太陽の光に対しては、地球の大気はほとんどそれを通してている。即ち透明なのです。少し吸収する波長帯もありますが、地球の大気は太陽の光をほとんど通しています。

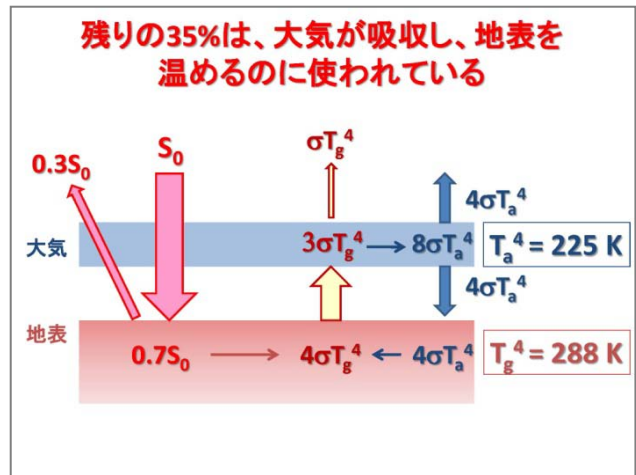
この太陽光に対して大気が透明な波長帯が可視領域にあたるというのは実は偶然ではありません。生物の目というのは太陽の光の反射を使って周辺のことを察知しようとするので、我々が目で見える波長の領域（可視領域）というのは、実は大気を透過してきた太陽光の反射をよく見える領域になっているわけです。

一方、地球の表面から放出される電磁波に対しては、大気はかなり不透明です。不透明というのは吸収してしまうということです。もし我々が赤外線が見えるめがねをつけて、地球の外から地球を見たら地表から放射される赤外線は大気によりほぼ全て吸収されるので大気より下の地球は何も見えないということです。要するに地球の大気というのは、太陽の光はほとんど通すのだけど、地球が出す長い波長の電磁波はほとんど通さない、ですから先ほど言った残りの38%というのは、地表が出す長波放射が大気が吸収し、大気が暖められてまた放射をすることによって地球を暖めるのに使われる、これが温室効果なのです。

すなわち太陽の放射 S_0 はもろに地表に届きます。このうちの3割ぐらいが反射されます。一方、地球は、その表面温度(T_g)の4乗に比例して長波長の電磁波を出します。このごく一部は大気を通り抜けますが、大部分は大気に吸収される。そうすると吸収さ

れたエネルギーが大気を温めますので、大気はその温度(T_a)にみあう量の放射をします。この時、大気は上と下の両側分け隔てなく放射をする。これにより、地球の表面は $4\sigma T_a^4$ の熱をもらうわけです。これと太陽からの放射 S_0 と合わせたものが、地表が出す放射とバランスしているはずですが、それから大気について、大気が吸収するエネルギーと、大気が放射するエネルギーとがバランスしているはずですが。そう考えると、これも簡単な連立方程式で解くことが出来、地表温度が大体 288° K ぐらい、大気の温度は 225° K ぐらいになります【図5】。これはちょっと低すぎますね。温室効果というのはこういう役目をするということです。地球からの放射を大気が全部通さずに、その半分近くをキックバックをする事で地表は暖まるという訳です。これが、温室効果の基本的な概念です。

実際の温暖化予測では、こんな単純なことはしていません。本当に地球表面をグリッドに切って、更に大気も何十層にも分けて、各ボックス間の物質やエネルギーのやりとりをスーパーコンピューターで全部式を解いているんですが、単純に考えるとやっていることは大体このようなことだということです。これを基本にしてこの次の話がありますので、ここまでは是非分かっていたいただきたいです。



【図5】

男性：入ってくる S_0 の値ですが、地表に着く前に大気で吸収される部分があるわけですよね。それはどういう格好で。

実際の過程はおっしゃるとおりもっと複雑で、大気に、大体1割強ぐらい吸収されます。それから、実は雲の部分で散乱されるものもあるのです。だから実際はもっと複雑です。これからも、こういうシ

ンプルな形でご説明をしていきますが、それは現実を非常に単純化しているので、それで出てくる数値自体は現実と必ずしもぴったりは合いません。正確な数値は本当にフルに細かい数式を解いていかないと出ないということは、一応ご了承くださいたいと思います。

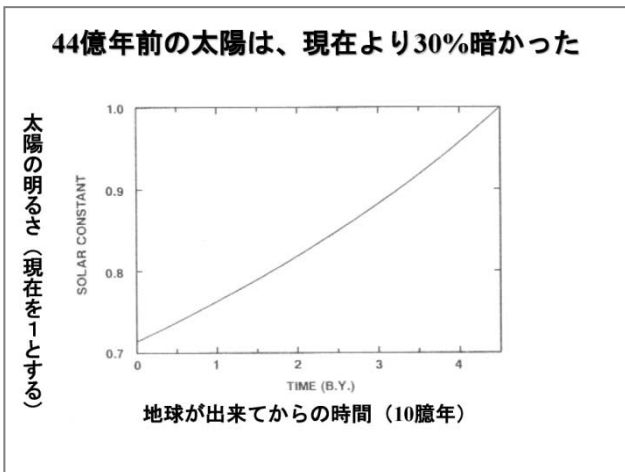
司会者：今までのところ地球というのは鉄球じゃなくて、周りに空気の層があり、その部分が熱を吸収する役目をしている何か座布団みたいなものがついているのだというような理解でいいんでしょうか？

そうですね。毛布をかぶせているような感じで、イメージとしてはそうです。ただ、ここであえて数式を使っているというのは、エネルギーのバランスを1個1個とりながら、どこで何が起きているかというのを理解していただくというのがポイントだからです。原理を是非分かっていたきたいということです。

2. 暗い太陽のパラドックス

2-1 暗い太陽のパラドックス

次に2番目の「暗い太陽のパラドックス」というお話をしたいと思います。アメリカの非常に著名な惑星学者、宇宙学者であるカール・セーガンが提案された「暗い太陽のパラドックス」という謎の話です。今度は太陽の話になります。地球の歴史、太陽系の歴史というと、太陽系が出来たのがおおよそに言って46億年前、地球はそれより少し若くて45億何千万年前です。その頃の出来たての太陽というのは今より暗かったという話です。



【図6】

これは我々の地球科学者の領域は超えていまして、天体物理学とか、恒星進化論、太陽のような星がどうやってできて、どうやって進化していくかということの研究する分野の話です。恒星（自分で光を放つ星）は、いわゆる主系列星になってから徐々に光を増していくというのです【図6】。それは確立された理論であって、疑問を挟む余地ないと。何故そうなるかと言うと、太陽の中で核融合が起こっているからです。水素が燃焼してヘリウムになっていく、その過程で放出されたエネルギーが太陽の光となって放射されるわけです。それが徐々に徐々に活発化していくのですが、物理の法則を駆使すると、どういふふうになるかというのがちゃんと予言できるということだそうです。

では、今から44億年前の太陽が、現在の7割ぐらいの明るさしかなかったとしたら、地球はどうなるのでしょうか。今度は太陽定数 (S_0) が現在の70%として、さっきの式をもう1回解いてみましょう。簡単です。0.7をかけてあとは全部同じです。これを解いていきますと、今度は温度が 263°K になりました。 263°K というのは 0°C より低いので、地球の表面は凍るということです【図7】。そうすると、これだけでは済まなくなってしまいます。

**太陽が現在の70%の明るさで、
射出効率が0.62の場合の地表温度**

$$0.7 \times S_0 (1-A) \pi r_e^2 = 0.62 \times 4 \pi r_e^2 I_e$$

$$S_0 (1-A) = 3.54 \times \sigma T_e^4$$

$S_0 = 1380 \text{W/m}^2, A = 0.3, \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$T_e = 263 \text{K}$

↓

**全球凍結してしまう
($A = 0.8$)**

【図7】

どういうことかということ、凍るということは水が氷になる、それから雨が雪になる。当然と地球の表面は雪で覆われる結果になる。それから海も凍る。そうすると、これまでの地球表面のアルベドが0.3だったのが、低めに見積もっても0.8位になる。太陽放射が現在の70%、射出効率が同じで、アルベドが0.8にして計算してみると、地表温度は 193°K となります。これはちょっと半端じゃない寒さです。これでは全球が凍結し、ガチガチに凍ってしまいます。

太陽が現在の70%の明るさで、
射出効率が0.62、 $A=0.8$ の場合の地表温度

$$0.7 \times S_0(1-A)\pi r_e^2 = 0.62 \times 4\pi r_e^2 \epsilon_e$$

$$S_0(1-A) = 3.54 \times \sigma T_e^4$$

$S_0 = 1380 \text{ W/m}^2$, $A = 0.8$, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$$T_e = 193 \text{ K}$$



いったん $A=0.8$ になると、太陽放射が現在の
~4倍まで上がらないと全球凍結から脱出できない
それは、恒星進化論的にあり得ない

【図8】

一旦氷で地球表面のアルベドが 0.8 になった状態から脱出するためには、太陽の明るさが明るくなることで脱出する場合、この式だと太陽が4倍の明るさにならなければ脱出できません。実際は先ほど言いましたように三次元のモデルを使ってもっとちゃんとした計算をすると、4倍は必要なくて1.3倍程度なのですが、それでも現在より明るい太陽が過去に存在しない限りは脱出できません【図8】。それは恒星進化論のほうからはとんでもない話で、「地球科学者は何ぼけたことを言っているのだ」と言われてしまいます。

一方、わたくしは地層の記録を調べるという仕事をしているわけですが、少なくとも36億年前には、地球には既に海があったようです。どういうことかという、グリーンランドにある今から36億年前の地層から、きれいに円磨されている礫岩が見つかったので。円磨された礫は、水の流れがなければできません。これ以外にももっといろいろな種類の地質学的な証拠があり、それらを調べるとどうしても36億年前には海がなければならなかったことになります。そうすると全球凍結はあり得ないという結論になるわけです。これが、セーガンが提唱した「暗い太陽のパラドックス」です。太陽の明るさが今の7割しかなかったら、地球の表面は凍りつき、凍ったら現在に至るまで絶対にそこから抜け出せないはずだと言うわけです。だけれど、実際は少なくとも36億年前には海があったわけです。矛盾ですよ。それがパラドックスということです。

2-2 セーガンの答えー40億年前の大気

では、このパラドックスはどうやったら解けるのか。要するに全球凍結に陥らずに現在に至ったとし

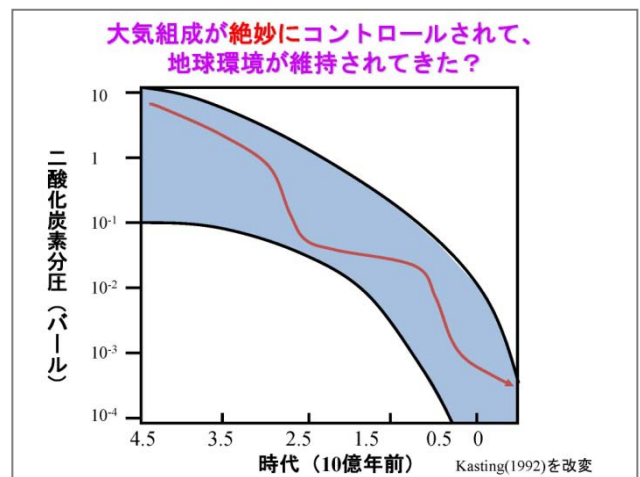
たら、どういう理由で現代まで凍結に陥らずにすんだのか、それが、セーガンが問いかけた問いです。答えが分かる方、いかがでしょう。ではどうぞ。

男性：多分、大昔は炭酸ガスがいっぱいあったのでは？今までの話を聞いていて、そうだろうなど。

はい、そうなのです。セーガンは答えを用意していたのです。答えは、40億年前の地球の大気がより強い温室効果を持っていたというものでした。だから全球凍結は免れたのだと考えました。先ほどの簡単な式でいくと、射出効率が0.15と低く、地表からの放射がほとんど出てこなければ、地球の表面は水が存在する状態で保たれるというわけです。セーガンは実は CO_2 ではなくてアンモニアを想定していました。還元大気を想定していたのですが、今でもそれについては議論があります。いずれにせよ、強い温室効果を持つガスで地球は覆われていたから凍結を免れたというのがセーガンの答えです。

2-3 更なる謎ー地球は幸運だったのか？

ただ、わたしはこの答えだけでは実は満足しません。40億年前温室効果が非常に強かったとして、一方で40億年前から現在まで太陽は徐々に明るくなっているわけです。それに対して海が本当にずっと存在し続けたのだとしたら、何らかのメカニズムが、太陽が明るくなるのとバランスするように大気中の温室効果ガス濃度を減らしていかなければいけません。



【図9】

【図9】は縦軸に温室効果ガスを二酸化炭素で代表させた場合の、液体の海を保つに必要な二酸化炭素濃度を、横軸が時代を表わしています。もし温室

効果ガスが二酸化炭素だとしたら、45億年前に10分の1気圧から場合によっては10気圧ぐらいないと地球は凍ってしまいます。その後、太陽は徐々に明るくなってきますから、液体の海を保つのに必要な温室効果ガス濃度というのは徐々に低下して行って、図の青の網をかけた範囲内であれば地球は凍らずにすむと言うことを図は示しています。放射平衡の計算によると地球が一旦凍ったらそこから脱出できないということを考えると、図の青の範囲を区切る下の境界を切ったら元に戻れないこととなります。また何らかの理由で上の境界を切ると今度は蒸発して海がなくなることになりますので、何らかの理由で網をかけた範囲内で大気の組成をうまく変化させて現在までこなさなければいけない。では、地球というのは本当にラッキーな惑星で、もしくは神様が意識的に大気組成をコントロールして、現在に至ったのか。そうだとしたら、我々は本当にラッキーな生物になるわけですが、本当なのだろうか。それが次の話題です。

2-4 全球凍結は起きていた

さきほど、全球凍結に陥ったら駄目だ、だから絶妙に大気が組成を変えつつ現在に至らなければいけないという話をしましたが、我々地質学者はそうではない証拠を見つけたのです。どういうことかというところ、全球凍結が起こったらしいのです。実際にこれは気の遠くなるような昔の話だと思いますが、24億から22億年前、それから9億から6億年ぐらい前に、大陸氷床（雪が降り積もって厚さが何キロにもなった氷の台地。例えば、今の南極がそうです。）が赤道付近まで、しかも山のてっぺんではなくて海岸にまで広がっていた。そういう地質学的な証拠がいろいろ見つかったのです。

例えば、永久凍土の証拠が見つかったのです。永久凍土は、日本だと北海道の山上にちょっと見られるぐらいですが、年間の平均気温がマイナス10度から15度ぐらいよりも低いところで出来ます。その条件では、土壌が凍ったまま溶けないのです。ただ温度には季節変化がありますから、凍った地面の体積が変化して割れ目ができるのです。そこに夏に地面の表面が溶けて出来た泥水が流れ込んで、そこでまた冬に固まる。そうするとその泥水が固まった割れ目がくさび状に凍結した土壌を切った構造が出来ます。それは、永久凍土の確実な証拠になります。そういうものが、見つかったのです。これがもし本

当だったら、全球凍結から抜け出でないはずなのに、何で抜け出したのだろうかという疑問がでてきたのです。

実はこういう話が出てきたのは、それほど昔のことではありません。1990年台になってオーストラリアの研究者が7億年前ぐらいに海岸付近の環境で永久凍土があった証拠を示しました。しかもその地層過去の緯度は赤道付近だった事が、地層の中にある磁性鉱物の磁化の向きからわかりました。地層中の磁性鉱物は、磁化した当時の北の向きや、伏角という赤道付近だとほとんど水平で、緯度が高くなるにしたがってだんだん角度を持って磁化するのですが、それを調べることによって、その地層のできた時の緯度を知ることができるのです。それによると先ほど言った海岸付近まで永久凍土があった証拠を持つ地層というのは、ほとんど赤道の下で堆積したものだということが解ったのです。そういう報告をオーストラリアの学者たちが1980年代にしました。

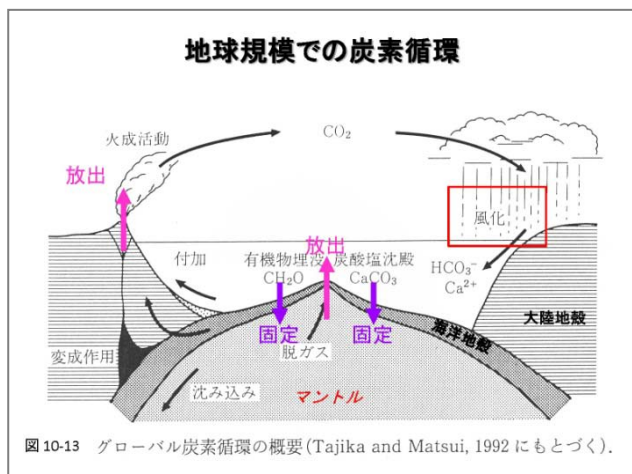
それに対してカリフォルニア工科大学のカーシュリンクという有名な過去の地球の磁場を調べている学者（古地磁気学者）が、「そんなのは嘘に決まっている」と反論しました。彼はオーストラリアに行って、その説が違っていることを証明しようとしたのです。しかし、調べれば調べるほど違っていないということになってしまい、彼はとうとう低緯度まで氷床が広がったのは本当だという論文を書きました。一番反対している人が寝返ったというか、自分で証明してしまったわけで、それでこの説にはずみがつきました。

ただ、カーシュリンクさんというのは、わたしもよく知っているのですが、転んでもただでは起きない。実は、彼はこの全球凍結から何故地球が脱出できたかという謎の答えを出したのです。1992年にその説を発表したのですが、その考えが広く知られるまでにはそれから10年近くかかりました。最初は反対者がすごく多かったのですが、徐々にいろんな人が調べれば、特に反対している人が調べると、それが合っているという答えが出てきてしまうということが繰り返されて、今はかなりの人が信じるようになってきているという状況です。

2-5 地球規模の炭素循環

カーシュリンクさんの出した答えを説明するには、「地球規模での炭素循環」について話をしないといけません。地球規模での炭素循環を知ること

は、地球の大気中の CO₂ が一体どういうふうには制御されているか、コントロールされているかということを知るといことなのです。それを説明するための1枚目のスライドが【図10】です。



【図10】

図の左が大陸縁辺の火山です。これは海がその後にはないので、日本列島と言うより南米のチリをイメージして頂ければと思います。その下に沈み込んでいるのが海洋プレートです。海洋プレートは海の底を構成しており、例えば大西洋だとその真ん中に中央海嶺という海底山脈が延々と走っています。その頂上でマグマが噴出して、海洋底をつくっているのです。そこで海洋プレートをつくって、それが何千万年もかけて徐々に動いていって、例えば太平洋だと太平洋中央海膨というんですが、東太平洋の低緯度に拡大の軸があって、そこで出来た海洋プレートが延々と西北に動いていって、日本の下に沈み込んでいます。その沈み込みによって、日本に火山もできるし、地震も起こるといわけです。実は大陸をつくる地殻というのは海底をつくる地殻とは組成が異なります。大陸地殻のほうが相対的に比重が軽いのでマントルの上に浮いています。

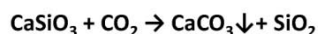
では炭素に関しては一体何が起きているかという、海洋地殻が作り出される中央海嶺、それから沈み込み帯のところ、日本とか環太平洋の火山帯はみんなそうですが、そういうところから火山活動によって CO₂ が放出されているわけです。これが大気に出されるほうです。では大気と海洋から取り除かれるほうはどうかという、これは CaCO₃ の沈殿によります。CaCO₃ とは石灰のことで、貝殻とか、海に住むプランクトンで石灰質の殻を作るやつが結構いるんです。それらが炭素を固定する。それから有機物、図の CH₂O というのは炭水化物を表わしますが、有機物の化学組成を非常に単純化して表したも

のです。実際は、有機物はもっとすごく複雑な化学式を持ちますが、ざくっとおおざっぱにこう表してもそんなに間違いではありません。これが大気と海洋から炭素を除去するほうです。これら供給と除去のバランスで大気中の CO₂ 濃度は決まっています。それから、この炭素循環で重要な役割を果たしているのが、陸上で起こる化学風化です。これは岩石が CO₂ を溶かし込んで炭酸となった雨水と化学反応する過程で、溶かしたものをカルシウムイオンなどとして炭酸イオンと共に海に流します。そして、海でこれを使って生物が石灰の殻をつくり、それが堆積して炭素を固定するというわけです。

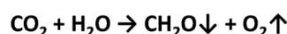
地球におけるCO₂の固定(とO₂の放出)過程

CO₂の固定:

1) 岩石の化学的風化と石灰岩の堆積



2) 光合成による有機物の形成と堆積



O₂の放出:

2)の過程は、酸素の放出過程でもある

【図11】

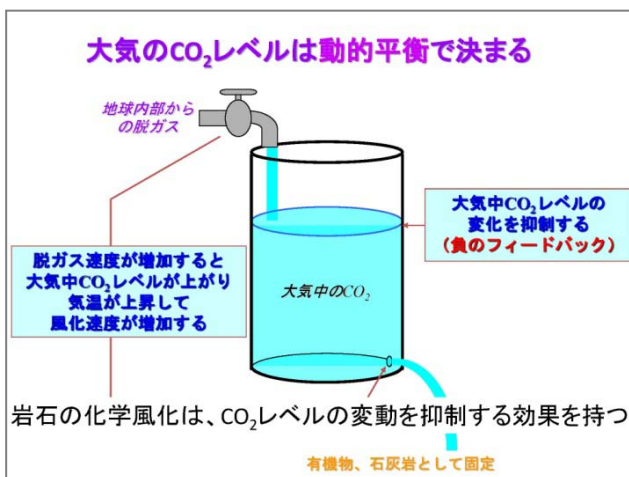
今言ったことをもう少し専門的な式で書いて見ましょう【図11】。まず一つは岩石の化学風化です。岩石というのはカルシウムだけではなくていろんなイオンを含んでいるのですが、そのうち特にカルシウムとマグネシウムが重要です。それらは SiO₂ を私達はシリカと呼んでいますが、これとくっついて鉱物を作ります。一番皆さんが知っている鉱物は石英ですが、石英は SiO₂ だけから成ります。それ以外にも宝石になるようなきれいな鉱物もありますが、それらのうちの Ca を含む鉱物が CO₂ と反応すると、最終的に海でたまる石灰岩とほとんど SiO₂ からなる火打石みたいな石、これをチャートと呼ぶのですが、になっていきます。もう一つが有機物の形成です。これは要するにプランクトンがたくさんできて、その死骸がたまって石油、石炭になっていくプロセスです。これは基本的には二酸化炭素と水を使って炭水化物をつくり、実は微量のリンとか窒素などの栄養塩類が必要ですが、それを有機物として地中に埋め込みます。

それが熟成すると石油や石炭になります。実は、こ

の過程で副産物として酸素を放出します。今日のお話とはちょっとずれるのですが、この過程は大気中に徐々に酸素が出てきて、我々みたいな酸素呼吸をする生物が出現し、進化するのに関係しています。

2-6 化学風化と動的平衡

では、大気中の CO_2 というのは、一体どういうふうにしてコントロールをされているのでしょうか。我々のイメージだと、例えばある容器の中に CO_2 を入れる際、それに CO_2 をたくさん入れれば濃度が上がるし、ちょっとだけ入れれば濃度が低いというイメージの方も多いと思います。しかし、先ほど言ったように炭素というのは地球というシステムの中で循環しているわけです。ですから、たとえば、ドラム缶の上に蛇口があって、そこから水がドラム缶にザーザー入っている。だけれどドラム缶の下には穴があいていて、水はそこからサラサラと出て行くわけです【図12】。ある条件、つまり出す水の量、もしくは下の穴の大きさをコントロールしてやると、水面が一定で動かない状態が生まれます。遠くから見ていると、蛇口や穴が見えず、何も起こっていないで、水面が一定に保たれているように見えるのですが、実際は常に水が入って、出ていっている。つまり、供給と消費のバランスが取れた所で水面の位置が一定になるのです。そして、一定になった水面の位置は、循環する速度で決まっています。こういうのを動的平衡と言います。



【図12】

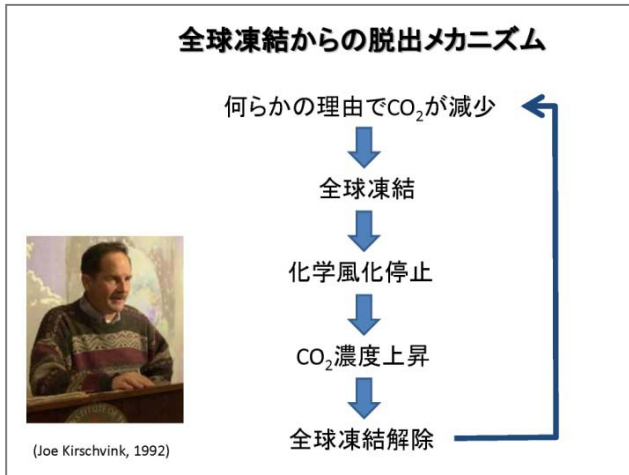
CO_2 に関して言えば、蛇口に当たるのが、先ほどの地球の内部からガスが出てくる過程です。下の穴の出口は、先ほどの有機物とか石灰岩が埋没してどんどんたまっていく過程です。この二つがバランスして大気中の CO_2 の濃度が決まっています。

この過程において、実は化学風化が非常に重要な役割を果たしています。どういうことかということ、何かの原因で蛇口を強く開けてしまったとします。すると、下の穴から出る水の量が変わらなければ水面は上がってきますよね。蛇口を開けたというのは脱ガス速度を増加させたということです。そうすると、大気中の CO_2 レベルが上がります。すると何が起こるかということ、先ほどご説明した温室効果で気温が上がってきます。すると、化学風化というのは温度が高いほど風化速度が速くなるのです。鉱物というのは大体温度が高いほうが水と反応しやすい。だから下の穴から出すほうにきいてくるわけです。要するに、出すほうを速くする効果がある。その結果、水面は蛇口をひねる前よりはちょっと上がるけども、永久にバーツ上がり続けてあふれ出したりはしなくて、少し上がったところでバランスして新しい平衡状態になるのです。ですから、例えばこの化学風化というのは、大気中の CO_2 レベルが大きく変動するのを抑制する効果を持っています。少しは変動しますが、増え始めるとブレーキをかける、減り始めてもブレーキをかける、というわけです。こういう機能を負のフィードバックと言います。これは一つの代表例ですが、自然界にはこういうフィードバックプロセスがたくさんあります。今日のご説明する暇がないですが、正のフィードバックというものもあります。これはちょっと平衡からずれ始めたら、それを助長する、一気にバーツと変化させてしまう、というものです。話を戻しますが、この負のフィードバックというのはある状態を安定させるのに、非常に重要な働きをします。ですから、岩石の化学風化というのは、 CO_2 レベルの変動を抑える働きを持っているのです。

2-7 カーシュリンクの答え

だけれど、そういう負のフィードバックにも限界があるわけです。具体的には化学風化が促進されたり、遅くなったりという化学反応も水溶液との反応で起こっているわけです。先ほど説明した負のフィードバック機構というのは、水の存在が前程になっています。話を全球凍結に戻して考えると、全球凍結ということは、水が凍ってしまうということです。温度が 0°C を切ったとたんに化学風化がパタッと止まるわけです。 0°C よりも高い時は水があるから化学風化は遅いながらも進行します。このことを先ほどご紹介したカーシュリンクさん—この写真で

は結構真面目な顔をしています、もっと奇抜なすぐ面白い人なのですが一が答えを提案しました。



【図 1 3】

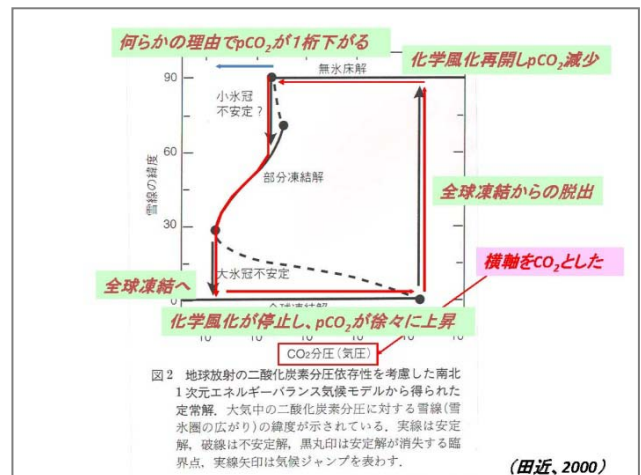
どういうことかということ、何らかの理由で CO_2 が減少したとします。そうすると、やがて全球凍結に陥ります。全球凍結に陥ると、化学風化が止まります。化学風化が止まるけれど、一方で火山ガスはどんどん出てきます。そうすると何が起こるかということ、大気中の CO_2 がどんどん上がってくるわけです。そして、あるしきい値まで達すると、いくら氷でアルベドが高くなって太陽の光をほとんど反射するようになっていたとしても、大気からの放射が増加するわけですから地表温度が上がり、やがて CO_2 による温室効果が勝って、ついには凍結状態が解除されるというプロセスが起こったのではないかということ、カーシュリンクさんは 1992 年の論文で書きました【図 1 3】。

実は、カーシュリンクさんの論文というのは原生代という地球の初期の環境のこの研究を集めたとても分厚い本の一部なのですが、そういう分厚い本というのはみんなあまり読まないですね。ですから彼がその論文を書いてからしばらくは誰もこの仮説を知らなかったのです。その論文を発掘したのが、実はハーバード大のホフマンという人で、それが 1998 年に今度は誰でも読むような「サイエンス」という有名な科学雑誌に出して、それで一気に全球凍結という概念が有名になりました。だけど実は彼は 1992 年に仮説ですが答えを提唱していたということです。

2-8 全球凍結と三つの安定状態

繰り返しになりますが、今言ったことをちょっと

違う表現でご説明します。【図 1 4】は、わたしの同僚の田近さんという方が描いた図です。この方は、物質循環、炭素循環モデルの第 1 人者です。



【図 1 4】

図の横軸は、今度は大気中の CO_2 濃度（分圧）です。縦軸は、雪線の緯度と書いてありますが、緯度にして何度まで凍っているかということで、90 度というのは極域だけ凍っているということです。緯度で 0 度まで凍ると全球凍結になるわけです。今、仮に無氷床状態からスタートするとします。温室効果がそこそこ効いていて、氷床がない状態です。そこから、何らかの理由で CO_2 が一桁下がったとします。何らかの理由については後でちょっとお話しますが、とにかく下がったと。そうするとどうなるかということ、無氷床状態の左端より更に左になるので無氷床状態ではいられなくなり、次の安定状態に移る。一気に 60 度ぐらいまでは氷床が広がります。その後、しばらくは部分氷床の存在可能領域に沿って氷床がどんどん広がっていくのだけど、その限界に達すると更に飛んで全球凍結になるというわけです。

問題はここから。全球凍結になった後です。今度は化学風化が止まるので、その結果火山ガスの放出によってどんどん大気中の CO_2 が上がってきます。この図でいくと三桁以上上がります。そして全球凍結状態の限界まで達した時に一気に凍結が解除されて、無氷床状態まで戻る。つまり、行く道と帰り道が違う経路をとるのです。これを非線形というんですが、 CO_2 の濃度と氷床がどこまで広がるかという関係が 1 対 1 ではないシステムです。

ここで知っておいていただきたいのは、例えば CO_2 濃度によっては解が三つあるという事です。全球凍結の解と部分凍結の解と無氷床の解。あまり広い範囲ではないのですが、ひとつの CO_2 濃度に対して、地球を全球凍結の状態に置いたらその状態で安定、

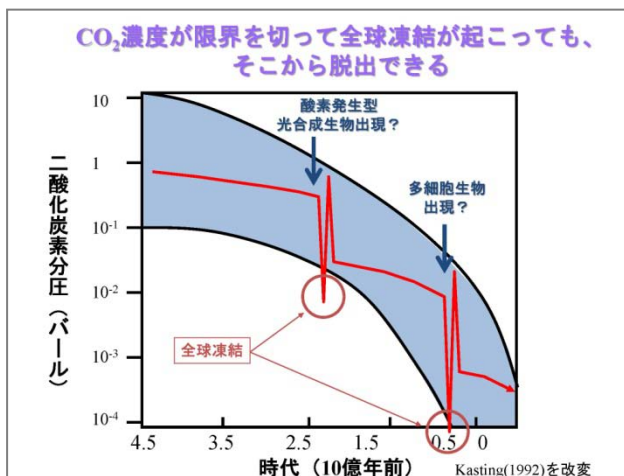
部分氷床状態に置いたらそれで安定。無氷床状態に置いたらまたそれで安定というふうに、安定状態が複数あるのです。そのどこにいるかということは、この経路をどうたどってきたかによっているということも、この図で分かります。

女性：すごく素朴な質問なのですが、全球凍結しても火山はちゃんと活動できるのですか。

火山というのは地球の内部の熱でマグマ（岩石が溶けている状態）ができて、それが噴出する現象なので、太陽光がみんな反射されてもその活動は変わらないです。

ここまでの全球凍結の話で分からないところは？ よろしいですか？

この全球凍結の発見というのは非常に重要です。先ほど、地球の歴史の中で、大気中の CO_2 濃度は、あたかも神の手で導かれたように、海水の安定領域の上限と下限の境界にぶつからないように変化してきたという話をしましたが、全球凍結から脱出できるのであったら、下の境界にはぶつかってもよいということになります。先ほど話しました様に 23、4 億年前に 1 回、6～7 億年前にもう 1 回全球凍結に陥ったと考えられています。その際、多分【図 1 5】に示されるように脱出し、単に無氷床状態に戻るのではなくてオーバーシュートして一時的に異常に暑くなり、それからまた安定化していったと思われます。この図で、なぜ元に戻らないで前より低い CO_2 濃度になっているかということ、これは想像ですが、炭素循環が、ある状態から別の状態に移ったからではないかと考えています。



【図 1 5】

2-9 生物進化と全球凍結

全球凍結が何故起こったかということは、まだ良く分かっていません。やっと仮説が出はじめている段階で、それらを証明できていません。だからここからの話は全部仮説です。ちなみにこの仮説を提唱しているのもカーシュリンクさんです。

生物進化の研究結果に基づくと、大体 25 億年前あたりで、酸素を発生するタイプの光合成をする生物が出現するのです。そうすると、もしそれより前の大気が CO_2 大気ではなくてメタン大気だったら、そこで一気にメタンが CO_2 に変わっていくと想像されるのです。これによって、不可逆的に大気の組成が変わる。 CO_2 ももちろん温室効果ガスですが、メタンのほうがもっと温室効果が強いのです。つまり、メタン大気が消え、それが CO_2 大気になるということは、温室効果が一段階レベルダウンすることを意味します。それから、6～7 億年前については、このあたりでは多細胞生物が出現しています。それより前は単細胞生物しかいなかったのですが、ある程度の大きさを持った動物がぼちぼち出てきます。それが何で全球凍結に関係するかというと、今度は有機物を最終的に固定する過程に関係するらしいのです。どういうことかということ、海の表面では、プランクトンが有機物を作るのですが、それは 1 つ 1 つが小さくて、そのままだと沈降速度が遅くて、沈降している間にみんな酸化して分解されてしまいます。ところが現在は、結構堆積物の中に有機物が埋っているのです。それは何が原因かということ、プランクトンを食って糞をするやつがいるのです。それは重り効果というんですが、プランクトンの死骸を集めて大きな糞粒にすることによって沈降速度を速めて、糞をするやつがない場合の 100 倍とかもっと速い速度で海底に有機物を沈降させるのです。多細胞動物の出現によって、そういう効果ができたのではないか。このあたりのことは、まだ分かっていませんので、ここだけの話にしていきたいのですが。

ポイントは、これらの時代に何らかの炭素循環システムの不可逆的な変化があったのだろうということです。それによって、全球凍結の前はより高い温室降下ガスのレベルで安定していたものが次の段階ではそれより低いレベルで安定して、次の全球凍結の後には一番低いレベルで安定するということが起こったのではないかということです。全球凍結の理由はさておき、重要なのは、ここで説明したような

メカニズムがあれば、下側の境界線にぶつかることはあんまり気にしなくていい、元に戻れるということなのです。それでも我々は多分ラッキーな生物ではあるのかもしれませんが、最初の話ほど千に一つの偶然というわけではなくて、結構必然的に現在に至っているのだということがこれで分かってきたのではないのでしょうか。

3. まとめ

今日のまとめです【図16】。まとめというか、こういうことをお伝えしたかったということです。

6. まとめ

1. 地表温度は、放射平衡で決まる。
2. 大気の温室効果とは、大気が太陽光には透明で、地表からの長波長放射には不透明なことによる。
3. 地球システムには、その状態を安定させようとするメカニズム(負のフィードバック)がある。
4. 地球の気候には、複数の安定状態(モード)があり得る。
5. 気候変動の原因となる要因の変化がある閾値を超えると、モードジャンプが起こり得る。

【図16】

その一つ目は、地球の表面の温度というのは、放射平衡、入るエネルギーと出るエネルギーのバランスで決まっているということです。

二つ目は、温室効果です。温室効果というのは大気が太陽の光に対しては透明で、地表からの長波の放射に対しては不透明だということに起因し、これが温室効果を作り出しているということです。

三つ目というのは、地球のシステム、気候システムでもいいですが、それには状態を安定させようとするメカニズムがある。だからある状態、ある変動範囲ではわりに安定が保たれます。もう一つは、先ほどで言えば凍ってしまうということが起こった途端にフィードバックでは安定が保てなくなって、次の別の安定状態にジャンプするという性質も持っているということです。全球凍結(スノーボールアースと英語で呼ばれますが)が地球の歴史の中でその最も劇的な例ですが、それよりもちいさいスケールでも、あるところまでは状態が安定なのが、次の瞬間にバッと別の状態に変わることが、いろいろなところに見られます。だから、温暖化に関して、実はそうした状態のジャンプが一番怖いのでは

ないかということ、何回目か後にお話しようと思っています。

それから、地球の気候には複数の安定状態が存在することが結構あるのですよ、というのも重要なポイントです。そして、その安定状態を保っているのは、実は負のフィードバックメカニズムなのですが、それについては、結構いろいろな研究がされていますが、全てが分かっているわけではないです。

わたしたちのように、はるか過去の事を研究していると、一体そんな研究が何で近未来の予測に役立つのかと、昔は陰口を叩かれまくっていましたが、この頃そうでもないのです。それは、過去のことを探っていくと、我々が知らないフィードバックメカニズムが見つかります。スノーボールアースが一番劇的です。そういう例がいくつも出てきて、やっぱり昔のことを知るということは無駄じゃないということが分かってきたということです。それから、あるところまでは安定化のメカニズムが働くけれども、しきい値を超えるとモードジャンプ(ある状態から次のところにバッと移る)ということが結構あり得るということです。これらが今日お伝えしたかったこととなります。

■ 質疑応答

質問者: 太陽が明るくなっているというのは、今も明るくなっているのでしょうか？

多田先生: はい。今でも明るくなっています。ちょっと正確な数字は忘れましたが、10億年ぐらいのスケールで、地球はやがて大気中のCO₂を全部なくしても、それでも熱くなりすぎて、暴走温室効果というんですが、人間が住めない、火星みたいな星になるというふうに言われています。

質問者: ちょっと心配ですね。

多田先生: そうですね、億年ぐらいの寿命があれば。

質問者: 先ほどの全球凍結の場合には、戻る道があるということですが、先ほどのグラフの中のこの幅に入らなきゃいけないときに、上側に外れた場合というのは何が起こって、戻ってくる道筋というのはあるのでしょうか？

多田先生: 上側のほうは、多分今言ったことが起こ

ってしまうのではないかと思いますので、戻る道筋は見つかっていないと思います。

質問者：ということは、今までは起こったことがないでしょうね。

多田先生：ということだと思います。さっきのお見せした図は対数グラフなので、実は現在の地球に至る過程でのいろいろなことは下の境界線の近くで起こっているのだと思います。さっきの図では結構幅いっぱい過去に辿ってきた線を書いていますけれども、もう少し小さい範囲で下のほうに近いところで起こっていたのだと思います。

質問者：以前に地球には元々水はなくて、水を持った大きな天体が地球にぶつかって、初めて地球には水がもたらされたというような話を聞いていて、それが当時は通説だったような気がしていたんですが、今の先生のお話だと、やはりそういう考え方はあてはまらないということなんでしょうか？

多田先生：どの拙論をおっしゃっているのがちょっと完全には分からないのですが、今日お話したのは44億年、45億年前のことではないのです。そこがポイントなのですが、地球がどうできたかという、基本的には太陽系ができる過程で微惑星のステージがあるのです。元々は太陽系というのはガスからできている、それが徐々にチリが固まって、直系10キロとか20キロの小さな天体をつくるようになって、それが徐々に集合して地球や他の惑星になっていきます。太陽系をつくるガスの中には当然揮発性成分、水もありますし、CO₂もあります。それを含んだ微惑星が地球をつくる過程でぶつかりながら塊を大きくしていきます。その時に衝突脱ガスというのですが、衝突で高温になって、中にふくんでいた揮発性成分を出します。地球ができる過程で、月よりも小さい状態だと、衝突によって脱ガスされた大気は引力で保たれないためにみな散逸して、逃げてしまいます。出来かけの地球が月ぐらいの大きさになると、引力が勝って大気を持つようになります。それを脱ガス大気といいます。そういう大気を地球は持ちながら、数千万年ぐらいのタイムスケールで現在に近い状態に成長します。その時の脱ガス大気というのは非常に濃い温室効果ガスを含んでいて、それから隕石がぶつかる時に運動エネルギーを放出しますから、その結果地球の表面というのは溶けるのです。それにより、マグマがどろどろに溶けた状態が地球

の表面を覆うステージがあります。それが徐々に固まる過程で大気中に含まれている水蒸気が雨となって落ちてきて、それでできたのが海だというふうに言われています。これは、わたくしの同僚の阿部豊さんが今から20年ぐらい前に「ネイチャー」に論文を出しています。それは、今の基本的な考え方になっています。ただし、最近はもう少し複雑なことが起こっているらしいということが分かりつつあるみたいですが。

質問者：最後の結論のところですとおっしゃっていただいたところです。地球の温度というのは放射平衡で決まると。それによって、全球凍結が起こるから実際にはどれぐらいの濃度になるかというのが決まるということだったのですが、そうすると最初の式で出てきた反射率ですか？アルベドですか。その大きさというのが非常に重要になるかと思うのですが、それは実際にはどうやって測定しているのでしょうか。

多田先生：現在は基本的に人工衛星によります。そのへんのところは今日の話でもあんまり明確にはしていませんが、実は測っているのは大気の外側からなんです。だからいろんな高度レベルで実は太陽光は反射しています。今日お話したのは地表付近を構成するものだけについてですが、実はまだそれ以外に雲があって、雲もできる高さで反射能が違うんです。だから実際はもっと複雑です。ただ基本的には反射能というのは衛星観測によって行っているのが実態です。過去については、そういう意味では先ほどの海がどのぐらいとか、陸がどのぐらいしか分からないわけです。非常におおざっぱな話になる。全球凍結が分かりやすいのは、全部雪になれば0.8でそこそこ合っているだろうというそういう話なのです。それ以外の中間的な値が当然あったと思うし、それから植物が陸上に出てくる前と後で当然変わったと思われるのですが、そのへんのところは証拠がないから、話としてはいくらでもできるけれども、検証しようがないというのが実態です。だけど、アルベドは本当にそういう意味で重要です。

質問者：0.3がちょっと小さくなった0.2とか0.25とか、ちょっと変わっただけで、でもおっしゃっていただいたようなストーリーが。

多田先生：変わります。地球温暖化の問題でももち

ろん CO₂がメインの温暖化の原因になっていますが、それ以外に例えば大気中のダスト、土ぼこりみたいな粒子、わたしがやっている黄砂もそうですが、それに最近結構影響が大きいと言われているのが、ブラックカーボンといって、人為的に放出した煙り、すすです。すすが一番厄介で、実はすすというのは非常に細粒なために、長期間大気中に滞在できるのです、しかもブラックカーボンというぐらいだから熱を良く吸うわけです、実はそれが今結構大きな問題になっています。

以上