

## 第2回 環境サイエンスカフェ

テーマ 「気候変動の科学・その2」

～地球は回り気候は変わる：ミランコビッチ・サイクルと氷期―間氷期～

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4月27日(水) 18:30~20:00

会場 サロン・ド・富山房 Folio

参加者 39名



多田先生：どうも、こんばんは。お久しぶりです。というのは、およそ半数の方が2回目に来てくださったということで、私としては少しほっとしております。アンケートの中にはレベルが若干高いというご意見もあったんですが、今日もだいたい前と同じぐらいのレベルになると思いますので、そこのところはご承知おきいただきたいと思います。

早速、今日の話に入りますが、「地球は回り気候は変わる」というタイトルになっていますけれども、「ミランコビッチ・サイクルと氷期―間氷期」というお話です。ミランコビッチとは古気候、過去の気候変動の研究の分野では、知らない人はいないというセルビアの科学者です。今日はその方が一生をかけて計算して、氷期―間氷期サイクルは何で起こるかという問題の解明のきっかけを作ったというお話をさせていただきたいと思います。

タイトルバックに『アイスエイジ』というアメリカの映画の画像を使っていますが、これはマンモスが生きている時代で、今からたかだか2万年前の地球の状況を描いています。20世紀フォックスが描く映画ですからそれなりに考証はされていて、全くの嘘ではなくて、そこそこ尤もらしく描かれていると思います。『アイスエイジ』というと日本語で訳すと氷河時代となりますが、実は氷河

時代と氷期―間氷期というのは定義が違うのです。科学的用語の話ですけど、そのこともちょっと話させていただきます。

今日のメニューとしましては、まず、一応シリーズ物ですし、私としても関連をもって話をしているつもりなので、前回の復習を簡単にさせていただきます。それから氷河時代と氷期―間氷期という言葉の定義の話。この用語の違いを知っている方は、一般の方ではほとんどいらっしやらないと思うのですが、今日の話の中ではある意味を持ってきますので、この話を致します。というのは、前回に雪球地球、全球凍結の話をしましたので、それとの関係もあります。それからミランコビッチ・サイクルの話を残りの時間でしたいと思います。若干慣れていない方には難しい話だと思うので、本当に分からなかったら、ぜひストップをかけて聞いてください。分からないまま苦痛に耐えながら聞かれるのは私としても一番心苦しいので、ぜひ途中で結構ですから手を挙げてでも「ストップ」と言って聞いてください。

### 1. 前回の復習

では、早速、前回の復習から入ります。【図1】最初に数式を出して、ちょっと気分を引き締めて

いただこうと思います。

## 1. 前回の復習

$$\text{放射平衡の式: } S_0(1-A)\pi r_e^2 = \alpha 4\pi r_e^2 I_e = \alpha 4\pi r_e^2 \sigma T_e^4$$

- $T_e$  (地表温度)は、 $S_0$  (太陽定数)、 $A$  (アルベド)、 $\alpha$  (射出効率: 温室効果)により決まっている。
- 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。
- 地球の気候には、複数の安定状態 (モード)があり得る。
- 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、ある安定状態から別の安定状態へのモードジャンプが起こり得る。

【図1】

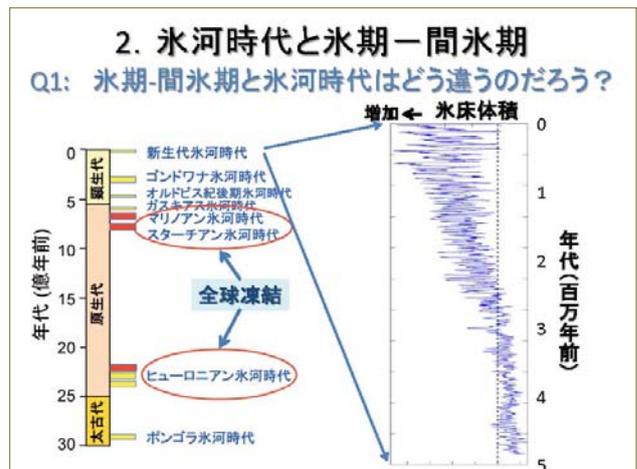
実は前回出した、唯一の式なのですが、この式がどういう意味を持つかというのは知らなくても、思い出さなくても結構です。前回は、地球の表面の温度はどういう要因で決まるか、というお話をしました。その要因というのはここに書いてある通りなのです。1つは太陽定数と書いてありますけれども太陽の明るさですね。2つ目がアルベド。これは今回初めての方にはなじみのない言葉だと思いますけれど、日本語訳は反射能といいまして、要するに地球に当たった光の何割が反射されるか、その反射率です。この用語は今日は頻繁に出てきますので、ぜひ覚えておいてください。それから、ここでは射出率と書いてありますけれども、簡単に言うと温室効果を表します。これは全地球の平均の気温を議論するというおおざっぱな話ですけども、全地球の平均の表面温度を何が決めているかということ、太陽の明るさと、どれだけ反射するかということと、温室効果、これは逆にどれだけため込むかという事ですが、その3つの要因で決まっているというのが前回のお話です。

それからもう一つは、地球システムは、その状態を安定させるようなメカニズム、これを負のフィードバックといいますけれども、これがあるために、その環境をなるべくある状態に保とうとする性質を持っているということです。けれども地球システムに加えられるエネルギーがある限界までできずと別の状態にパッと移る。それが3つ目の点で、要するに地球の気候には複数の安定状態があり得るということです。常に複数あるかどうかというのは必ずしも断言できないですが、過去の気候を調べていきますと、ある状態から別の状態にパッと移るということは、地質学的にはかなり頻繁、何十万年とか何百万年に1回起こって

ます。ある要因が、あるしきい値を超えると突然、別の安定状態にジャンプする性質を持っているのです。要するにそのしきい値までは、システムが頑張るのです。これは実は地震についても同じようなものなのです。ひずみがあるしきい値になるまでは頑張るのだけど、それを超えるとバツと断層が動いてしまう。モードジャンプといいます。地球環境がそのような性質を持っているということ、前回は「全球凍結」という一番極端な例をお話ししながら、説明しました。これが前回の復習です。

## 2. 氷河時代と氷期-間氷期

ではいよいよ今回の話に入ります。最初に氷河時代と氷期-間氷期、この違いについてです。先ほど、ほとんどの方は知らないでしょう、とお話ししましたが、どなたか知っているらっしゃる方はいらっしゃいますか？もし知っているらしたら手を挙げていただきたいのですが・・・さすがにいらっしゃらないですね。氷河時代と氷期-間氷期の違い、難しいですからね。では答えにいきます。まず2つ図を出します。【図2】



【図2】

左の図は何かというと、これは、地球の歴史年表です。地球は46億年歴史がありますが、その後半の30億年分が示されています。その中で、線が引いてある所が氷河時代といっている時期です。では氷河時代とは何かというと、地球の少なくともどちらかの極に氷床が存在する時代です。氷床とは何かというと、雪が積もってそれがどんどん厚くなって、下のほうから雪の重さで氷になったものです。例えば現在でいうと南極氷床がその典型例です。南極氷床の厚さがどのくらいあるかどなたかご存じですか。

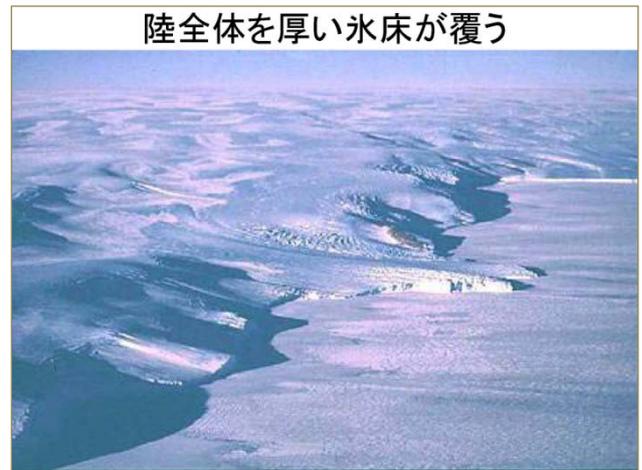
質問者：確か、2,000～3,000メートル。

多田先生：そうです。だいたい3キロぐらいあります。だからそのぐらいの厚さになったものを氷床と呼ぶわけです。地球の歴史の中で、ここで棒線を引いた時代がそういうどちらかの極に氷床が存在する時代なのです。その中で赤で書いた棒が前回の話のテーマになった全球凍結、要するに地球全体が凍ったと考えられている時期です。それが23億年前ぐらいと7億、8億年前ぐらいのところにあります。それ以外の黄色で書いた棒は、これは極域に氷床があるが全球は覆わなかった、そういう時代です。この図を見て、もう一つ気付くことがおありだと思うのですが、実は地球の歴史の中で極に氷床が存在した時代というのは意外に少ないのです。氷床がない時代のほうがどちらかというといふのです。ちなみに現在を含む過去約3,500万年間というのは極域に氷床があった時代、だから現在は立派な氷河時代です。しかも現在は南極に氷床がありますよね。それからグリーンランドにも氷床がある。だから両極に氷床があるのです。両極に氷床がある時代というのは地球の歴史の中ではおそらく他にはありません。というのは両極域に大陸が位置する時代が地球の歴史の中でほとんどないからです。だからどっちかの片方の極にしか氷床がない時代がほとんどなのですが、そういう意味では、新生代氷河時代と言いますが、一番新しい氷河時代なのです。我々が住んでいる現在は地球の歴史の中でも非常に立派な、両極にちゃんと氷床がある氷河時代なのです。

だけど我々は、氷河時代という寒い世界に生きてるといふ感覚はないですよ。それは我々は、氷河時代の中の間氷期にいるからなのです。右側の図は何かというと、過去500万年間の氷床体積の変動を表しています。左側の図の一番新しいところの、最後の500万年に当たります。皆さんの感覚だと、500万年は膨大な時間ですけども、今は30億年の話をした後ですから、すごく短い期間に聞こえると思います。この500万年の中で約300万年前ぐらいからガタガタと振動しつつ、その振幅が大きくなりながら、氷床の体積の極大値が大きくなってきています。これが氷期―間氷期の繰り返しの繰り返しなのです。図の左側にある氷床があまり大きくない時が現在を含む間氷期であって、右側の氷床が大きい時が氷期なのです。ですから現在は一番新しい氷河時代の中の一つ新しい間氷期

にあたるということになります。

### 3. 過去に氷床・氷河期があったことはどうしてわかったのだろうか？



【図3】

これは南極の写真【図3】ですけれども、要するに大陸氷床があるという事は、こういう状態ということ。表面は一面に雪で覆われていますけれども、厚さが一番中心で3kmもある。だから巨大な氷の大地な訳です。それが極を覆っているという状態が氷河時代という訳です。先ほど地球の過去のいくつかの時代に氷床が存在したとお話ししましたが、ではどうやってそれを復元したのでしょうか？ どうかアイデアを。ご存じの方はおられますか？ 過去の氷床、氷河時代の存在は、どうやって分かったのでしょうか。

質問者：コアです。

多田先生：コアですか。何のコアですか。地面に掘るコア、地層の中に記録があるという意味ですね。そういう意味ではそうです。具体的にその研究の歴史から入っていきますと、我々人類が、過去に氷床がもっと広がっていた事、具体的には2万年前の最終氷期にどれだけ氷床が広がっていたかということに関して、最初に科学者が気付いたのが18世紀頃です。この写真に写っている大きな石は迷子石と言いますが、ここに人がいますから、その大きさが解ると思います。【図4】この写真ではあまり分からないかもしれませんが、この礫を構成する岩石の種類と、その下にある岩盤を構成する岩石の種類は全然違うのです。これは地質学をはじめとする自然科学が最初に発展した国、イギリスの例だと思うのですが、地質

学者が山を調査していると、巨礫とその下の岩盤とで石の種類が全然違うことに気づいたのです。

Q2: 地球の過去に、氷床が存在した事は、どうやって解ったのだろう？



www.chikyu.ac.jp/shiraiwa/glacier/glacierphoto/Glacialphenomena/Erratic.jpg

【図4】

そして、この巨礫にそっくりな石はどこにあるかという、何百キロも北にあるというわけです。一体どうやって運ばれてきたのでしょうか。こんなに大きい礫を何百キロも離れたところまで運ぶメカニズムというのは氷河しかないのです。こんな巨礫を何百キロも流すような洪水というのはとても考えられないので、氷河しかないというわけです。

このような迷子石をどのようにして運ぶかを調べている過程で、氷河の存在を示す、別の証拠が見つかりました。【図5】

この写真は大変古い時代の例ですが、実はここに平らな基盤の石を削った面が出ていて、そこに線が見えますね。これが氷河擦痕なのです。氷河擦痕の写真としては、なんかたいしたことがない写真じゃないかと思われる方がいるかもしれませんが、教科書によく出てくる氷河擦痕の写真は2万年前の最終氷期の氷河擦痕の写真なのです。この写真は、実は2億6,000万年前の氷河擦痕で、こういうのはなかなか残っていないのですが、ちょうど南アフリカに巡検に行った時に見たので写真に撮ったのです。これはこういう氷河に削られた面ができた後、すぐに上に堆積物が乗っかって保存されたのです。それが最近、またこういうふうに露出したのです。こういう擦痕があると氷床がこれを削ったということが分かると同時に、どういう方向に氷床が流れたかというのも分かるのです。こういうふうにして過去の氷床の流れの方向も知ることができるのです。

それから、写真の下側が氷河擦痕がついた岩盤なのですが、それを覆って、これも2億6,000万年前の大きな礫がポンポンと入った地層が乗って

います。この写真だけでははっきりしないのですが、これは氷河性の漂礫と言います。要するに氷河というのは氷の上にいるような礫を乗せてベルトコンベアみたいに運んでゆくのです。水の流れて運ばれる礫というのは、淘汰されて同じ大きさにそろってゆくのですが、氷河が運ぶと淘汰を受けませんから、いろいろな種類の礫を、角張ったものから円いまで、それから大きいものから小さいのまで一緒ごとに運んでいくんです。それを氷河が溶けたところで落としていく。こうした漂礫があって下の岩盤に擦痕があると、これはもう間違いなく氷河があったという証拠になるわけです。

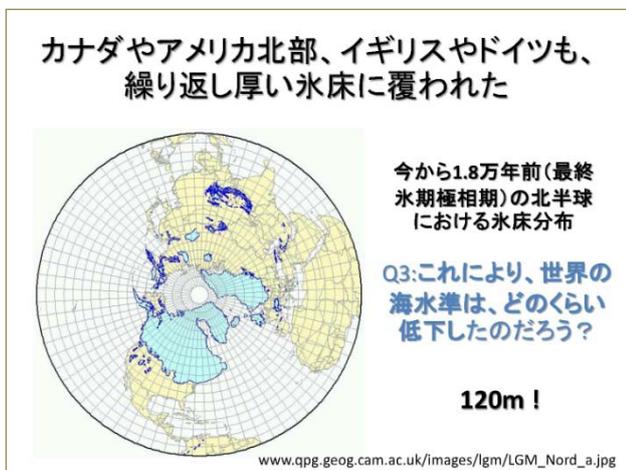


【図5】

だからこういうものを地層の中から見つけ出して、過去の氷床を、氷河時代を復元していったのです。あまり何億年も前の話を延々とするつもりもないので、ここで最終氷期の話に戻します。ああいう迷子石はどうやって運ばれたのでしょうか。迷子石や氷河昨今などを元に、ヨーロッパの学者たちが、その後アメリカの学者も、数万年前の北半球における氷床分布を調べました。その結果、イギリス全土、更にはドイツとかスカンジナビアも、どうも比較的近い過去に、しかも1回だけで

はなくて繰り返し氷床の下になっていたという事が解ってきました。要するにイギリスやヨーロッパの半分、それから北米でいうとカナダ全部とニューヨーク辺りまで、厚さ3キロもあるような氷床の下敷きになっていたということが分かってきたのです。

これはずっと後にもっと精密に調査をして復元した図ですが、最終氷期、今から1万8,000年前に、北半球においてはこれだけ氷床で覆われていた。【図6】ニューヨークが氷床の末端付近、カナダはもう全部氷床の下、それからスカンジナビアとイギリスも氷床の下になっていた。それからロシアもそうですね。こういう状態だったことが分かってきたのです。



【図6】

質問者：日本はどこですか。

多田先生：はい。日本はここです。日本は幸い氷床の下ではありません。

質問者：氷床の厚さが3キロと繰り返しおっしゃいますけれど、当然その末端には、1キロのところとか500メートルのところとかが、あるわけですよ。

多田先生：はい、もちろんそうです。氷床というのは、何て言いますか、お供え餅みたいな格好をしてまして、その中心がだいたい3キロぐらいの厚さです。それが今おっしゃったように、だんだん縁にいくにしたがって薄くなってゆくのですけれども、割と縁近くまで厚さを保つのです。最後のところで急に薄くなるという性質を持っています。

質問者：すみません、アラスカのボーフォート海というのは、全然、氷床はなかったのですか。

多田先生：この辺ですか。

質問者：そうですね、今さされてるところですね。ボーフォート海。

多田先生：先ほど言いましたように、氷床というのは雪が固まって厚くなったものです。この図では、氷床しか示していませんけれども、北極海、それからベーリング海や北大西洋北部は海氷が全部覆ってました。海氷というのは海水が凍ったものなのです。今の北極海の一部は多年氷で要するに何年もかけて数メートルの厚さまで凍っています。一方、氷床のほうは雪が積もって数キロの厚みを持っています。海氷は置いておいて、厚さ3キロの氷床がこれだけの面積に乗ったらどうということが起こるか。その氷を構成する水の起源はどこでしょうか。どなたか？

質問者：海です。

多田先生：海ですよ。そうしたらこれだけ氷が陸に乗った場合、海面はどのくらい下がるでしょう。いかがでしょうか？

質問者：100メートル以上。

多田先生：100メートル以上。もっと多いと思う人、いないですか。

質問者：500メートル。

多田先生：500メートル。はい、いかがでしょうか、もっと多い人は？ 正解は120メートルです。だけれど地球の歴史の中では最大500メートルぐらい下がった例はあったようです。ただその時の変動は氷だけではなくて別の原因があったようです。これまでご説明しましたように、最終氷期には海水準を120メートル下げるだけの量の氷が大陸の上に乗っていたのです。ちなみに今ある、残っている氷を全部溶かすと、あと何メートル位海水準は上昇するでしょう？

質問者：十数メートル。

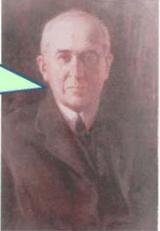
多田先生：いや、十数メートルよりもっと多いですよ。60メートル弱ぐらいだと思います。ちょっと正確な値を記憶していないのですが。ということで正解は120メートルです。どうもありがとうございました。

#### 4. ミランコビッチの仮説ー地球の公転と自転

Q4: 氷床の拡大縮小の繰り返しは、何によって引き起こされたのだろうか？

3. 氷期-間氷期サイクルに関するミランコビッチの仮説

「地球の公転軌道の離心率、地軸の傾き、公転軌道に対する地軸の歳差運動の変化による日射量分布の変化が、氷期-間氷期サイクルを生み出した」



(Milutin Milanković : 1879-1958)

【図7】

先ほどの話に戻りますけれども、そのイギリスの学者たちが自分たちが住んでるところが過去-その頃はまだどのぐらい前かというのは正確に分からなかったんですが、でも割に近い過去、少なくとも我々人類や我々が知ってというような動物達が生きてるような、マンモスも生きていた程度の過去に、自分たちが住んでいるところが氷の下になっていたということが分かってきた訳です。しかも繰り返し氷床が前進、後退を繰り返していた。そうすると当然多くの人が考えるのは、次にいつ氷期が来るかという事ですよね。地震予知などと同じです。それを18世紀ぐらいには本気で議論していた訳です。次にいつ氷期が来るかというのを予測しようとした。まさしく地球温暖化とか地震とかと同じことの議論が起こっていたわけです。当然、氷床の拡大・縮小は何で起こったんだろう、という議論になった。では、答えはもうタイトルに書いてあるのですが、何で起こったのかと。タイトルにはミランコビッチ・サイクルとは書いてあるけど、それが何かを意味するかまでは書いていません。ミランコビッチ・サイクルとはどういうものか？いかがでしょうか。

質問者：太陽の黒点。

多田先生：太陽の黒点ではないですね。

質問者：太陽の明るさ

多田先生：ええ、太陽は絡んでるのですが。これからお話するミランコビッチ・サイクル、ミランコビッチの仮説を提唱されたミランコビッチさん、ミリュージン・ミランコビッチという方ですけども、彼の説の概略はここに書かれているのですが、これだけ読むと難しくて帰りたくなると思うのですが、今日は延々、このことをご説明いたします。だから今の段階ではあまり引かないください。分かっていたきたい事は、地球が太陽の周りを回る軌道は円くなったり楕円になったり変化するのです。それが1つミランコビッチ・サイクルに絡んでいる。2つ目は、地球が太陽の周りを回る公転軌道面に対して地球回転軸（地軸）が傾いており、その角度が変わっているのです。それも影響している。3つ目はその地軸がごますり運動-歳差運動というんですけれど-をすることです。それが影響している。それらがどう影響しているかというと、太陽の光が地球に当たるときに、その当たり方が変わる。具体的には当たる日射の緯度方向の分布を変える。それから季節によってどれだけ当たるかという季節分布を変える。地球が年間で受ける総日射量としてはほとんど変わらないけれども、当たり方が変わる。そうした日射量の緯度分布、季節分布変動が気候変動を、氷期-間氷期サイクルを引き起こしているのだ、というのが、ミランコビッチさんが立てた仮説なのです。【図7】

適切な例かどうか分かりませんが、例えば焼き鳥を焼く時、あまりひっくり返さないで焼くと片方だけ焦げてしまうけれど、まんべんなくひっくり返しているとうまく焼けますよね。それと同じとは言いませんが、(会場：笑)例としてよかったかどうか分かりませんが、そういう火の当て方の違いみたいなものですね。下から燃えている火の強さは変わらなくても、焦がしたりうまく焼けたりするというのと同じようなことです。

#### 5. 地球にはどうして季節があるのだろうか

これからミランコビッチ・サイクルの話をも具体的に一個一個話していくのですがけれども、最初の話題として、地球には季節がありますよね。春夏秋冬。では、この季節って、どうやって生まれて

いるのでしょうか。

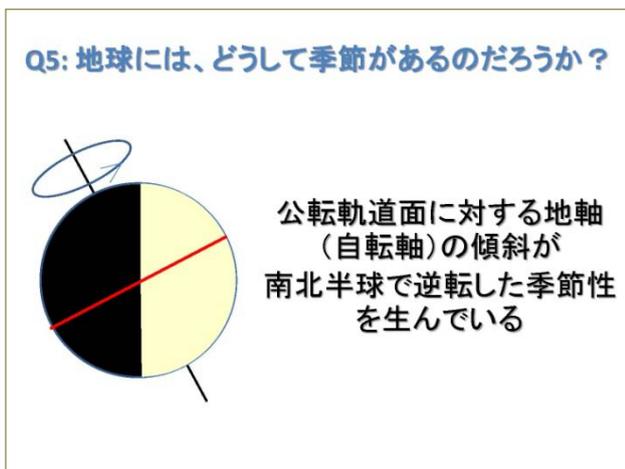
質問者：地軸が傾いている？

多田先生：地軸が傾いているから？

質問者：太陽の当たり方が違う。

多田先生：その通りです。はい、この答えがすんなり出ないこともあるのですが、今日はすんなり出てしまいました。(会場：笑)【図8】

今答えていただいたように、地球の自転軸というのは、地球が太陽の周りを回るその公転軌道に対して23度ぐらい傾いている。そうすると、図の地球に赤道を書きましたが、図にある地球の状態というのは北半球の夏でしょうか冬でしょうか？冬ですよ。北半球への光の当たり方はこれだけですものね。南半球はこれだけたくさん当たって北半球はこれだけしか当たっていない。ですから、公転軌道に対して地軸が傾いていることによって地球は季節を持つのです。要するに公転軌道に対して自転軸が傾斜していることによって、南北で逆転した季節を生んでいるわけです。だからこそ我々は冬に南半球に行けば暖かいし、逆に南半球の人がわざわざ日本までスキーに来ることもありますよね。それは南北で季節が逆転しているからこそできるわけです。



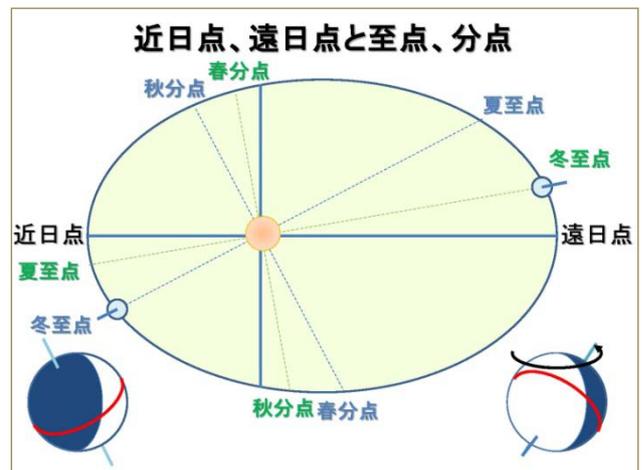
【図8】

この様に地軸の傾きは南北半球で逆転した季節性を生んでいるのですけれど、では、地軸が傾きを増すと地球の気候はどういうことになるでしょうか。

質問者：季節の変化が大きくなる。

多田先生：そうですね。南北で逆転した季節性が強くなる。逆に角度が緩むとその季節性が弱くなるわけですね。後でお話ししますが、具体的には22度~24.5度ぐらいの範囲で地軸は傾きを変えているのです。しかもその周期はだいたい4万年ぐらい。4万年ぐらいの周期で22度~24.5度ぐらいの間を行ったり来たりしているのです。この周期で南北逆転した季節性が強くなったり弱くなったりしていることが1つ目の特徴です。

2つ目は歳差運動の話です。【図9】地軸がこういうふうに歳差運動をすると、地球の気候にどういう効果を生むでしょうか。



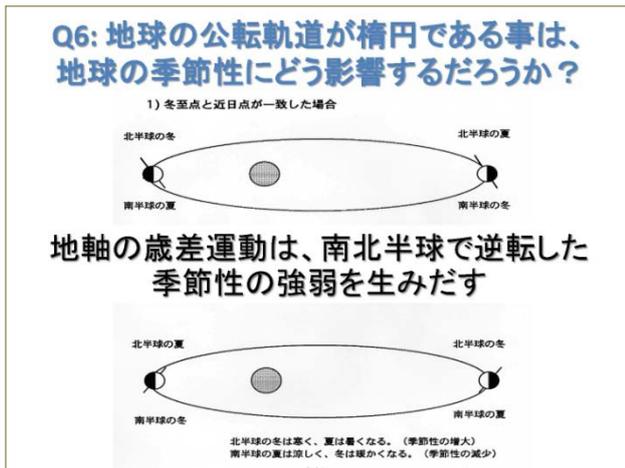
【図9】

図のなかで、これは太陽です。これは地球です。地球は太陽の周りを回りますけれども、今ここに棒を書いたのが地軸のつもりです。この図で地球は今、この位置で冬至の状態です。北半球に一番、日が照っている時間が短い状態。一方、公転軌道が楕円の場合、ここが一番地球と太陽の距離が近づいた近日点、こっちは遠日点です。この図でここは冬至点、これが春分、夏至、秋分点ですけども、これは冬至点と近日点が違う状態で、今は、地球の公転軌道はこういう状態にある。地軸が歳差運動をして180度逆転するとどうということになるかという、今度はこの図のようになります。今度はここが冬至になります。こちらが夏至、春分、秋分点となります。いいですか。

もし地球が太陽の周りを回る軌道が円軌道であれば、この歳差運動は地球の気候に別に何も影響はないのです。ところが楕円軌道だと影響が出てきますよね。では、どういう影響が出てくるのでしょうか？答えを言ってしまうでしょうか。

【図10】上の図左側は、近日点一番太陽と地球

が近づいた時一が冬至に当たっている状態です。ということは南半球の夏の状態でもありますよね。では、この軌道状態でどうということが起こっているかという、北半球は冬に太陽に近い、だから北半球の冬は暖かく、この時南半球は夏ですから南半球の夏は暑い、という事になります。一方、右側は北半球の夏の状態ですけど、夏は太陽から距離が遠いから涼しい夏です。一方、この時に南半球は冬で、これは寒い冬ですよ。というふうになる。これが近日点と冬至点が一致した場合です。



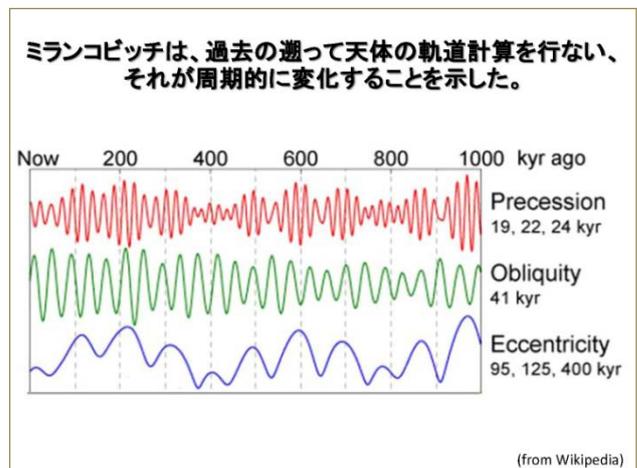
【図 10】

歳差運動というのは実は2万年ぐらいの周期で地軸がごますり運動をしているのです。だから1万年後にどうなるかという、1万年後は下の図のようになります。今度は北半球は大変ですよ。夏は暑いわ、冬は寒いわということになる。だからこれも南北半球で逆転した季節性の強弱を、南北半球で逆に引き起こしているんです。楕円軌道における地軸の歳差運動は、この様な効果を持っているんです。この効果は楕円軌道がつぶれればつぶれるほど強くなる、円に近くなればなるほど効かなくなる、そういう効果です。地軸の歳差運動というのは南北半球で逆転した季節性の強弱を作り出しているのです。

ミランコビッチさんの何がすごかったかというと、コンピュータがない時代にこの軌道計算と、軌道計算だけではなくてその軌道計算の結果起こる日射量の変動を全部計算したという事です。手回し計算機を使ったのだそうですけども、人生全てをかけてのとてもじゃない仕事です。しかも、そのうちの10年近くは、捕虜になって牢獄に入っていたのだそうです。牢獄の中でかえって計算が進んだらしいですけど。(会場：笑) ひたすら計算した

という事がすごいですね。

この図【図 11】はもちろんその後にはコンピュータでもっと細かく計算し直した結果ですけども、すでにお話ししましたように地軸の歳差運動というのはだいたい2万年の周期で変動するのです。

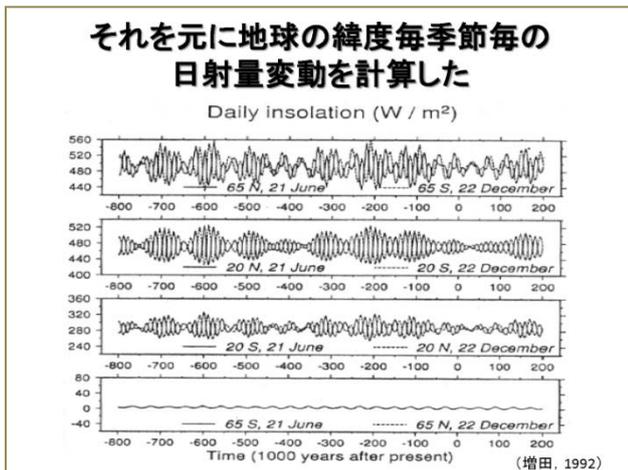


【図 11】

図に示されている曲線は、実は単なる歳差運動ではなくて、歳差運動に楕円軌道の効果を入れた気候歳差と呼ばれる指標です。楕円軌道のつぶれ方は、図で eccentricity と書いてあるものです。実は、楕円軌道のつぶれ具合というのは、だいたい10万年周期で変わっていくのです。図に示される変動はだいたい10万年の周期なのですが、単に同じ振幅ではなくて、もっと大きい、上の階層の周期があって、それが約40万年の周期なのです。ともかくこれらの周期で楕円軌道のつぶれ具合が変わってくる。それに伴って歳差運動による季節性の効果が強くなったり弱くなったりして、歳差運動の2万年周期の振幅の変動が繰り返している。それからこちらの図は、地軸の傾きの変動を示しています。ここに角度は書いてありませんけど22度から24.5度ぐらいの間で、およそ4万年の周期で変化しているというわけです。

ここまでの軌道計算だけだと、天文学者だったら、まあ誰でも、とまでは言いませんが、できるのです。ミランコビッチのすごいところは、彼は天文学者だから、こういう計算をする能力を持っていて、しかも同時にそれが気候に与える影響を知りたいから日射量の変動を計算したというところなのです。この図【図 12】はずっと後でコンピュータを使って計算した結果ですけども、図の縦軸が日射量です。単位はW/m<sup>2</sup> (ワットスクエアメートル)。ここに4つ並んでいる変動曲線は、それぞれ緯度が違うのです。上の図は65度の緯度。

これはちょっと重なって見にくいですが、実線が北緯 65 度の夏、6 月 21 日の日射量です。それから点線のほうは南緯 65 度の 12 月 22 日。これは南半球の夏です。だから両半球の高緯度での夏の日射量の時代変動を示しています。上から 2 番目の図は、20 度の緯度、低緯度の夏です。上から 3 番目の図は低緯度 (20 度) の冬ですね。一番下の図が、高緯度 (65 度) の冬です。何が言いたくてこれらの図を示しているかということ、緯度によって軌道変化が起こったことによる日射量の変動パターンが違うということなのです。高緯度の夏は、2 万年や 4 万年の周期が卓越してますよね。だけれど低緯度になると 4 万年周期が余り見えなくなり 2 万年周期が強くなってきます。この様に 4 万年の周期は、高緯度ほど強くなる傾向があります。それから両半球の高緯度の冬は、当然ですけどほとんど日が当らなくなる、ということになります。



【図 12】

もう一つ見ていただきたいのは一後でこの話が出てくるので覚えておいていただきたいのですけれども一日射量変動の振幅は南半球と北半球で同じように変化するんだけど、当然のことながら位相は逆だということです。図でも、北半球で日射量が極大の時には南半球は極小になっている。北半球で夏の日射が強いときには南半球は弱い。さっき言ったことと同じことです。繰り返しますが、要するに地球の軌道要素が変わることによる日射量変動というのは、日射量の緯度方向の変化と、それから季節の変化で特徴づけられ、南北で逆位相ということです。

## 6. 北半球氷床の消長を決めるのは？

ミランコビッチはこういう計算をしたのですけれども、それだけではないのです。もう一つ、彼は非常に重要な仮説を立てたのです。それはどういうことかということ、先ほど一つ前の日射量の変動の説明によって、例えば北緯 65 度の夏の日射量は 2 万年周期で変動して、時々 4 万年周期が強くなるパターンを示す、要するに周期的に変化する事は分かりましたよね。だけれどこれを、どの様にして氷床の拡大・縮小と結び付ければ良いのでしょうか。しかも、どの緯度、どの季節の日射量をとるかでリズムが違ってしまうわけですから、どこの日射量が重要かということを考えないといけない。そこでミランコビッチは北半球、まあ彼はとりあえず北半球に住んでいましたから南半球のことはあまり考えていなくて、北半球の氷床の消長、拡大・縮小を決めるのは、どの季節、それからどの緯度の日射量だろうか、と考えたわけです。これは当然ながら計算する前に考えたのですね。一つの計算をするのに膨大な時間がかかるから、意味がない緯度の意味がない季節について計算をしたくないわけです。意味のある緯度と季節についての計算をしたかった。彼はだから、どの緯度、どの季節が重要かと考えたのです。そして、彼は人に相談した。もちろん彼もある程度気候のことは知っていましたが、でも気候学のプロではないわけです。彼は基本的には天文学者なわけですから。だから気象学者もしくは気候学者にこの問いを問いかけたのです。では、気候学者になったつもりで、いかがでしょうか。いつの季節？夏ですか、冬ですか、春ですか、秋ですか？ それとも 1 年の平均？

質問者：夏じゃないですか。

多田先生：夏。それはどうしてですか。

質問者：やっぱりエネルギーの量が多いところ、多いか少ないかという点で考えると。あまり正確じゃないですが。

多田先生：はい。では、ついでにどの緯度？

質問者：緯度が高いところ。

多田先生：それはどうしてですか。

質問者：いやあー。(会場：笑)

多田先生：いや、正解なのですよ。それで正解なのですが、理由まで言ってくたさると、なおうれしいんだけど(笑)

質問者：いずれにしても氷床があるのは両極ですよ、南極か北極か。というのはやっぱりその周辺、その近くということていくと、やっぱり高緯度にならざるを得ないと。

多田先生：はい、ほぼ正解です。ミランコビッチがこれの研究をやり始めたのはまだ彼が若いとき、30代前半ぐらいだと思いますけれども、すでにその時に大気候学者であったケッペンに相談した。そしてもう一人、ケッペンの娘婿のアルフレッド・ウェーゲナー。ウェーゲナーって聞いたことがおありだと思うのですがけれども、何で有名な方だかご存じですか。

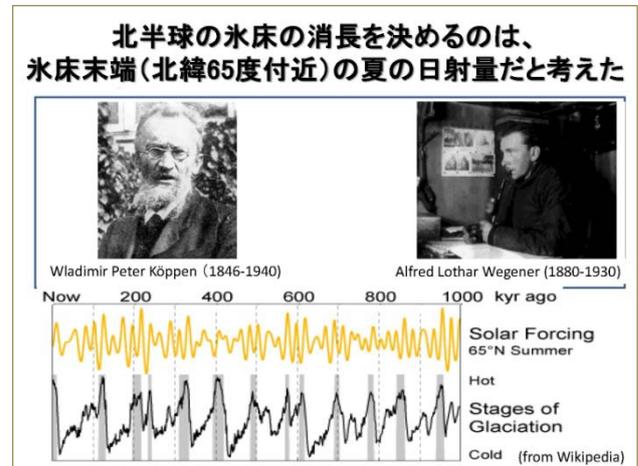
質問者：大陸移動説。

多田先生：大陸移動説ですよ。そうなのです。ウェーゲナーというのは、後世では大陸移動説で非常に有名になった人ですけれども、彼は実は気象学者の側面のほうが強くて、実際に亡くなったのも気象観測で極域、確かグリーンランドに行つて遭難されたはず。遭難だったか病気だか忘れましたが。

この2人にこの質問をミランコビッチはしたわけ。そして、答えは今おっしゃった通りです。北半球の氷床の消長を決めるのは氷床の末端、だいたい60度ぐらいですけど、やはり末端で溶けないと話が進まない。だから末端の緯度が重要だろうと。それから冬はどっちみち寒くて融けないのだから、やっぱり重要なのは夏だろうと。ある意味では当たり前前の答えですけども、それが答えだったわけ。それでミランコビッチはその緯度と季節の計算をしたというわけ。【図13】

下の図はウィキペディアからとっていますけれども、この黄色の線が北緯65度の夏の日射量です。日射量は、このように2万年周期で変動し、さらに10万年周期の振幅の増減が見られます。それから下の図は大陸の氷床の大きさの変化を示します。

図に示されるように、氷床体積が最大になってからバツと融けるのですが、それに当たるのが、だいたい日射量変動の振幅が大きく、極大値をとる時です。



【図13】

ミランコビッチはこれだけ細かい計算はしていません。また、彼が日射量変動の計算をしていた時には、氷床の消長に関する、この様に細かい変動記録はありません。解っていたのは、氷床がいつ頃にあった、いつ頃になかった、それだけです。一応、彼が計算した結果とその当時の知識に基づく氷床の消長とがだいたい合っていたということで、1890年頃にミランコビッチの仮説は注目を浴びたのです。ミランコビッチの仮説のお話をもう少しすると、実は彼の説は一旦注目を浴びたのですが、その当時、こういう仮説を提唱すれば、人々は検証しようとするよ。それで地質学者がいろいろな氷床が拡大した時期を従来より細かく調べたのですが、そうすると合わなくなってきました。それで20世紀に入った頃には、ミランコビッチの仮説を支持する人はほとんどいなくなりました。実はミランコビッチは、この研究の集大成を1930年に書き上げたのです。40年ぐらいかかって書いたのですが、それが完成した時にはもはや注目されなかった。だけれども、タイミングが合わないように見えたのは、実は地層の年代を決める手法が十分、精度がよくなかったからで、ミランコビッチが間違っていた訳ではなかったのです。検証しようとした地質学者の推定のほうの誤差が大きすぎたのです。こうした状況を一気に塗り替えたのが炭素14という放射性同位体による年代測定技術の発達です。そして、ミランコビッチ仮説は、1970年代によみがえるのです。その話面白いのですが、今日はその話は置いておいて、話の本筋を進めたいと思います。

では、北緯 65 度の夏の日射量に応答して北半球の氷床が拡大・縮小したとして、この拡大は日射量が減って寒くなったから拡大したのでしょうか。それともそれだけではなくて、氷床が拡大したから寒くなったという効果もあるのでしょうか？ ちょっとヒントを言ってしまいましたけれども、どちらでしょう。本当は二者択一ではないのですが、いかがですか。氷床が拡大したから寒くなったという効果もあると思われる方。

質問者：氷床が拡大したから寒くなった。かな。

多田先生：はい、そうですね。答えを言ってしまいましたからね。この効果が実はフィードバックなのです。最初に申しましたように、ミランコビッチ・サイクルというのは日射量の季節分布とか緯度分布は変えるけれど、地球全体が年間に受ける総日射量というのは、ほとんど変えない。ということは氷床を拡大させ、地球を寒くするには日射の当て方だけではダメで、氷床ができることによって気温が低下する、つまり最初はその地域の日射量が減るから気温は低下するのですが、それを増幅するメカニズムがないといけません。これを正のフィードバックというのですが、小さな変化をどんどん大きくしていく、そういうフィードバックが必要なのです。では、こういうフィードバックというのには、どういうメカニズムが考えられるか。何かアイデアはおありですか。

**Q8: N65度の夏の日射量に応答して北半球氷床が拡大・縮小したとして、寒くなったから氷床が拡大したのか、氷床が拡大したから寒くなったのか？**

- ミランコビッチ・サイクルは、日射量の季節分布、緯度分布を変化させるが、地球全体で年間に受ける総日射量は、ほとんど変わらない。
- 氷床が出来ることによる気温低下を増幅する正のフィードバックが必要
- その代表例が、アイス・アルベド・フィードバック

【図 14】

質問者：氷の反射率。

多田先生：そうですね。ずばり答えが出てしまいました。素晴らしいですね。その代表例がアイス・アルベド・フィードバックです。前回来られまし

た？ やはり前回ちゃんと聞いていらっしやると答えがスーッと出ますね（会場笑）。これは要するに雪が積もるとその場所の反射率が高くなる。だから太陽光が当たってもみな反射して返してしまうから、暖まらないのです。そうすると余計そこが寒くなるから、もっと雪の領域が広がるという、そういう正のフィードバックです。【図 14】

## 7. 北半球が氷期のとき、南半球は？

一応ミランコビッチの仮説の概略は今説明した通りなのですが、当然こうした説が出てくると、皆いろいろなことを考えますよね。そういうふうにして考えられて出された疑問のうちの一つにこれはなかなかいい疑問だと思いますが一北半球が氷期の時、南半球はどうなっていたか、という疑問がありました。この疑問についてはいかがでしょうか。南半球は間氷期だったのでしょうか。南半球も氷期だったのでしょうか。それとも南半球はどっちでもなかったのか。いかがですか、どれが正解でしょうか。

質問者：間氷期。

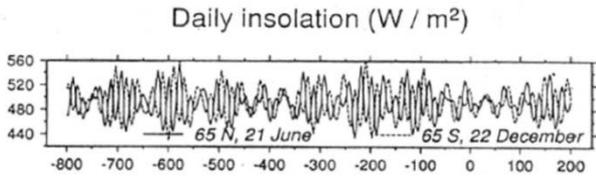
多田先生：間氷期だった。他の方はどうですか。

質問者：氷期。

多田先生：どっちも氷期だった。おっ、両方の意見が出ました。ミランコビッチの仮説によると南北両半球で氷期—間氷期サイクルは逆転するはずです。先ほど言ったように、北半球の日射量が大きい時というのは、南半球は小さいわけですから。先ほど説明した様に高緯度の夏の日射量が氷床の消長を決めているというのがミランコビッチの仮説です。だからこの仮説を信ずれば、南北半球で氷期は逆転していたはず。この「はず」と書いているということは、答えは違うということですよ。ね。（会場：笑）みな、当然調べたのです。しかし逆転しているだろうと期待して調べたら、実は氷期は両半球で同時に起こっていたのです。これは実は非常に重要なことなのです。【図 15】

では、なぜ北半球の氷期—間氷期サイクルに南半球が同調しているのだろう。このことは本当に重要なのです。なぜかという、太陽の光というのは南半球にも北半球にも同じように当たってい

**Q9: 北半球が氷期の時、南半球はどうなっていたのだろう？**



ミランコビッチの仮説によれば、南北両半球で氷期—間氷期サイクルは逆転しているはず

しかし、地質記録は、氷期—間氷期サイクルが両半球で同時に起こっていたことを示していた！

【図 15】

るはずなのに、なぜか北半球の夏の日射量に全てが支配されている。そういう意味では、不公平ですよね。だけれど実際はそうなっているわけです。では、なぜ同調してるのだろう。これはすごく大きな問題なのですが、どなたかこの答え、グッドアイデアはないですか。

質問者：北半球に陸地が多いからではないですか。

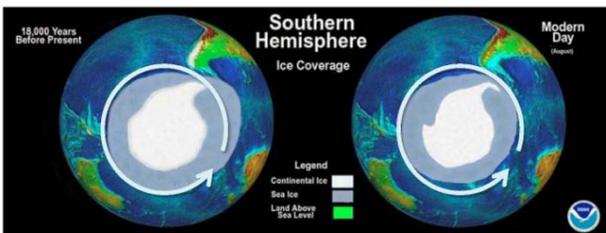
多田先生：北半球は陸地が多い。なるほど。陸地が多いとどうして？

質問者：要するに気温の変動が大きいというか、南半球は日射量の変動に対して気温の変動が北半球と比べれば小さくなりそうな気がしたんですが。

多田先生：はい、それもかなり正解に近いですね。ではまず南半球から話していきます。これには南半球を、真南から見た図です。【図 16】これは最終氷期の南極大陸、一番寒かった時期、1万 8,000 年前です。それからこれが現在の南極です。

**Q10: 何故、北半球の氷期—間氷期サイクルに南半球のそれが同調しているのだろう？**

南極大陸は、南極環流により低緯度から遮断されており、南極氷床は安定して存在できる

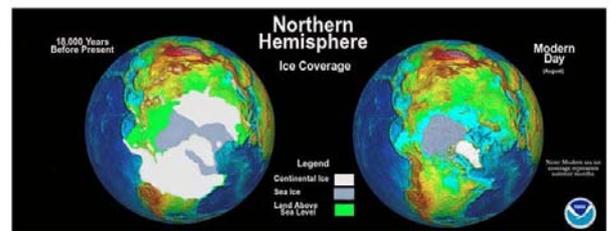


大陸は65度以南に分布

【図 16】

海氷の張り方が若干違っていますが、基本的に南極には氷床があるままなのです。なぜこのようになるのかというと、図を見るとお分かりだと思いますが、南半球には南極大陸が真ん中にあるのですが、それ以外は結構海が多いのです。しかも周辺の大陸との間がみな開いているので、南極環流が、南極の周りをぐるぐる回っています。これが低緯度からくる暖かい海流をみんな止めてしまっているのです。その結果、南極大陸は常に十分寒くて氷床が溶けない状態になっている。それに対して北半球はどうかというと、今言われた通り、大陸が中緯度まで広がっているために氷床がどんどん中緯度まで拡大できたのです。【図 17】言い忘れましたが、南極のほうはどうかというと、氷床を拡大しようと思っても、65 度ぐらいにある海岸線で終わりですから、それよりも北に延びようとしても海でおしまいなのです。それに対して北半球というのは大陸がずっと低緯度までありますから、実際に一番寒い時期には 45 度まで末端が南下したわけです。現在は 65 度ぐらいのところ氷床の末端がちょっとあるだけですけれども。だから確かに大陸分布が重要なわけです。

**一方、北半球では、大陸が中緯度まで広がるため、氷床末端が65-45度まで変動出来た**



氷期の氷床末端は、45度まで南下

【図 17】

**8. なぜ北半球と南半球の氷期 - 間氷期サイクルは同調するのだろうか？**

今の話で、北半球の氷床のほうにセンシティブでその変動が大きいという事の説明がつかますよね。では、そういう大きな変動がなんで南半球まで伝わったのでしょうか。北半球に氷期—間氷期があって、南半球は何もなかったのだったらいいのだけれど、南半球も、暖かくなったり、寒くなったりという変化を北半球と一緒にしているわけです。では、北半球の寒暖サイクルがどうやっ

て南半球に伝わったのだろうか。これに関しては何かいいアイデアはないでしょうか。

質問者：海流。

多田先生：海流ですか。はい、他には。海流というのは具体的にどういう海流を考えれば良いのですかね。

質問者：深層水じゃないですか？

多田先生：深層水循環ですね。はい、なるほど。それは正解に関わってはきますね。次回の話になります。(会場：笑) 今回はそこまで話はいかないのですが、アル・ゴアの『不都合な真実』という映画を見られた、もしくは本を読まれた方はいらっしゃいますか？ では映画を見られた方で、ゴアがリフトに乗って何かを指しながらビューッと上がっていったのを覚えていらっしゃいますよね。あのグラフは何のグラフでしたか？

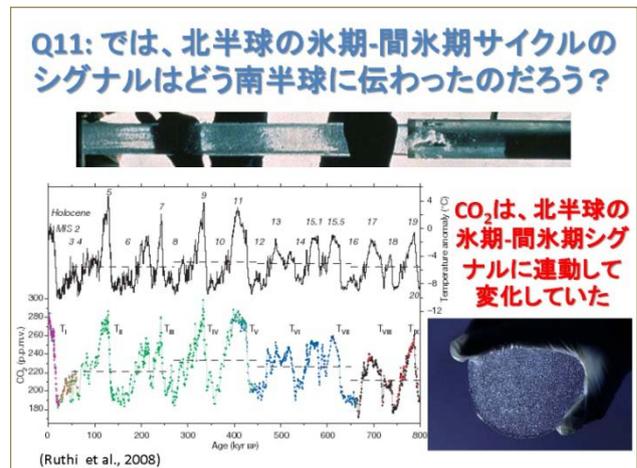
質問者：炭酸ガスです。

多田先生：CO<sub>2</sub>ですよ。現在に向かってCO<sub>2</sub>がビューッと上がる前にも周期的に増減していたのを覚えてます？ みんな、最後に上がるのところしか見てないですよ。その前にもちゃんと動いているのです。ということで、答えはこの氷のコアの中にある。この写真は、グリーンランドか南極かどっちかで掘ったアイスコアをパイプから抜いているところです。コア、要するに氷の柱ですよ。それを3キロくり抜いているわけです。日本もドームふじでそれをくり抜いているわけです。これを見ると、なんか完全に透明な氷じゃないですよ。なにか小さな不純物の様なものがたくさん入っている。もう一つの写真は、コアを輪切りのしたものを、持っている写真ですけど、中に小さなツブツブが見えます。これは何だか分かりますか？【図18】

質問者：気泡に見えますけれど。

多田先生：気泡です。そうです。だからこれは過去の大気のカプセルなのです。実はこの氷は南極の氷ですけども、これをオンザロックで飲むとおいしいんですよ。(会場：笑) 融ける時にパチ

パチパチパチ音がする。それはなぜかという、気泡はすごい圧力で押しつぶされて中に含まれているから、それが溶けて解放されるとパチパチと音がするのです。聞くところによると、銀座で飲むとウン万円だっていう話もある。(会場：笑) だいぶ昔ですけど、私は極地研といって南極の調査をしているグループにただでいただいて、音を楽しんだことがあります。話が脱線しましたが、これは過去の大気のカプセルなのです。図は、これを分析して出したCO<sub>2</sub>の濃度変化です。濃度は180ppmから280ppmで変動しています。人間がCO<sub>2</sub>を出す前のレベル、後氷期のレベルは280ppmぐらいです。現在では80万年前まで復元できています。その結果、氷期-間氷期に対応してCO<sub>2</sub>が変動しているという事が分かった。しかも、図には出していませんけれど、これが北半球の氷床の拡大・縮小とほぼ同調して、氷期と間氷期の間でCO<sub>2</sub>の濃度が変動しているのです。



【図18】

CO<sub>2</sub>の濃度というのはどこかで変動しても、それは全世界に伝わってしまいますよね。ですからCO<sub>2</sub>がこの様に氷期に低くて間氷期に高いということが、実は氷期-間氷期のシグナルをグローバルに伝えているということなのです。

そうすると次にこういう質問が出てきますよね。では大気中のCO<sub>2</sub>濃度というのは何で北半球の高緯度の日射量に連動して変動したのだろう、と。この問題を解かないと氷期-間氷期サイクルの謎を全部解いたことにならないのです。すっきりしないですよ。地下鉄をどこから入れたか、みたいな話で、これが解けないとやっぱり全部分かった気にならないのですが、これはいかがですかね？ これはかなり難しい問題ですね。どなたか解る方いらっしゃいませんか？

質問者：光合成が関係しているとか。

多田先生：光合成……それだけとは、いえなくてすかね。

質問者：海に出ていたCO<sub>2</sub>。

多田先生：そうですね。海に溶けてるのですが。実はそんなに簡単に答えを出されると困るのですよね。この問題はまだ完全には解けてないのです。海が吸ったり吐いたりしていることは分かっている。それからそれに関わって、深層水循環といいますが、それが関わっていることは分かっているのですが、完全にはまだ解かれてないです。簡単に言うと、現在の海洋の深層水は、海の深いところをずっと流れてるのです。すごくゆっくり流れている。現在、間氷期ではグリーンランド沖で世界の深層水の8割が9割が作られている。残りが南極の周りで作られているのです。氷期には南極で作られる方が多かった、グリーンランド沖で作られる方が相対的に少なかったのです。現在はグリーンランド沖で8割、9割作られて、そこで作られた深層水が大西洋を南下して、南極周回流の流れに乗って、太平洋とかインド洋に回って行っている。要するに深層水というのは、図に示されるようにコンベアベルトのように、地球をぐるっと一周するのです。この一周に1,000年とか2,000年かかっているのです。深層水が、こうして世界の海をめぐってゆく過程で、CO<sub>2</sub>をため込んでいくのですが、それが何らかの理由で北半球の日射量に連動して変動したと考えられるのです。【図19】



【図19】

今ご説明したように、グローバルな深層水循環が深く関わってくるのですけれども、特に北半球高緯度域が鍵になるということは、要するにそこには巨大な氷床が存在し、この氷床が溶けたり崩壊したりすると、北大西洋高緯度海域に影響が出てくる、ということに関係しているのです。詳しくは次回。(会場：笑い) 次回はCO<sub>2</sub>がどういうふうに制御されるかという話に入っていきます。

## 9. まとめ

**まとめ**

- 地球の公転軌道の変化、自転軸の傾きの変化、自転軸の歳差運動は、10万年、4万年、2万年の周期で起こる。
- そうした地球軌道要素の変動が、地球に当たる日射量の緯度分布、季節分布を周期的に変化させる。
- 北半球氷床は、そうした日射量(特に高緯度の夏の日射量)変動に敏感であった。
- そうした敏感なサブシステムの存在とその変動を増幅させる正のフィードバック過程が氷期一問氷期サイクルを生み出した。

最後に1枚、一応毎回まとめをしないと、今日の話は何がポイントだったのかという事が分からないままではもったいないので、まとめをさせていただきます。1つ目は地球の公転軌道の変化。もう今日の話が聞かれた後だから大丈夫ですよ。公転軌道の変化と自転軸の傾き、そして歳差運動の変動というのが、実は10万年、4万年、2万年といった周期で起こっていて、こうした軌道要素の変化が、日射量の緯度とか季節の分布を周期的に変化させているという事です。次に北半球の氷床というのはそうした日射量の変動に非常に敏感であったために、そういう敏感なサブシステムが北半球の高緯度にあったことが、正のフィードバック過程を通して氷期一問氷期サイクルを生み出したということです。ポイントとしては、地球の表面を覆ってる部分の中で、いわゆるスイートスポットがあるという事です。だから例えば日射量の変動のシグナルというのは地球のいろいろな緯度に、いろいろな違ったリズムでシグナルを送ってるのだけれど、その中で非常に敏感なところに当たったシグナルが、地球全体に伝播していくという事です。そこが実は今日のポイントで、ミランコビッチの仮説の非常に重要な点です。だから、

この点をぜひ押さえていただければと思います。地球の気候にはスイートスポットがあって、そこに弱いリズムでも信号が入るとそれがどんどん増幅されるということが非常に重要なポイントです。

それからもう一つは、前回の話と組み合わせると、こうしたスイートスポットが地球上のどこか違う場所にいく可能性はあるわけです。それこそ温暖化が進んで、例えば気温があるしきい値を超えると、北半球で氷床がもう二度と拡大しなくなるということもあり得るわけです。そうした時にはスイートスポットが今度は別の場所に移って、別のシグナルに応答して気候システムが応答し出す可能性もあるということです。これは一般論で、先ほどの質問には100%は答えてないとは思いますが、可能性としては、地球の過去の記録を見ていると、そういうスイートスポットの変化というのは十分に起こり得ることなのです。はい、これが今日のまとめで、今日のお話はこれでおしまいです。ありがとうございました。

#### ◇質疑応答

質問者：もし私の聞き違いでなければ、最初に今は北半球と南半球と両方に氷床がある、地球の歴史の中では珍しい時期だとおっしゃったと思うのですが、でも、全球凍結の時には北半球も南半球も氷床に覆われてたのではないのでしょうか。

多田先生：それは氷床と海氷とを区別しないといけないのです。

質問者：ああ、なるほど。

多田先生：全球凍結の時には、もちろん全球凍結していたのですが、大陸が極域になかったのです。少なくとも北半球にはなかったはずで、だからそういう意味で片方の極にしかない。だけど、どちらが寒いかという意味ではもちろん全球凍結が寒いわけです。

質問者：先ほど3つの要因で、氷期-間氷期のサイクルが説明付くという話でしたが、それ以外に氷河期か氷河期じゃないかというサイクルもあるのですか。

多田先生：その話は一切、今日はしてませんが、非常にいい質問ですよ。それは、だいたい数千万年から億年スケールで起こっているのです。それに何が効いているかという、一つは大陸配置で、もう一つは、そういう周期で地球の中から出てくるCO<sub>2</sub>の放出量が変わってるのです。実は大陸というのは数億年の周期で集合したり分裂したりを繰り返しているのです。集合する時というのは海底にある中央海嶺と呼ばれる火山活動が盛んなベルトがあるのですけれども、それが沈み込み帯に入って沈んでしまう。だから大陸が集合している過程というのは火山活動がどんどん弱くなるのです。そうするとCO<sub>2</sub>があまり出されなくなるので、大気中のCO<sub>2</sub>レベルは下がってくる。そうすると氷期になりやすくなるのです。逆に大陸が分裂する時というのは、新しくそういう中央海嶺がどんどんできますよね。だから盛んにCO<sub>2</sub>を出す。それによって暖かくなるのです。そういうサイクルが繰り返している。

そういう意味では、現在を含む一番新しい氷河時代は、大局的には大陸が集合している過程の最中なのです。ちょうどその中で氷期が起こっているという、そういうことです。

質問者：はい、ありがとうございました。

質問者：次回以降でしょうか、気候変動とCO<sub>2</sub>との関係等もお話ししていただけそうなお話だったのですが、本日の最初、第1回目のサイエンスカフェの復習の中で、あるしきい値を超えるとモードジャンプが起こり得るといったお話に触れていただいたかと思うのですが。例えばCO<sub>2</sub>とか温室効果ガスが徐々に徐々に増えていって、あるしきい値を超えると大きな気候変動を引き起こすといった、例えば深層水の循環がストップするとか、なにかそういう可能性も起こり得る、どういう状況になれば起こり得るという話も、次回、次々回ぐらいでご紹介していただけるのでしょうか。

多田先生：若干はできるかもしれないのですが、私は主に過去を見ているわけです。過去に未来の完全なアナログがあるかという、それはそうではないのです。ただ、具体的には間氷期、要するに氷床があまりない時の状態で気候の変動の振幅がどのぐらい時期によって大きくなるか、と

いう事を研究している最中です。特にモンスーンの強さがどのぐらい変わるかという事は私は個人的には研究しているので、機会があればそのお話もできると思います。

質問者：今日はどうもありがとうございます。先回は残念ながら、開催は存じてたのですが出られませんでした。それで、それを踏まえてお話ししたいと思います。今日のお話は最終氷期の氷河期の話で、2万年なり10万年前ということですよ、大陸の配置はほぼ現在と同じ状況だったのでしょうか？

多田先生：そうです。

質問者：今日のお話の中では過去、億年の単位で見ると大陸が集合したり離散したりした景観があるということでした。最後のスイートスポットの話からするとそれが変動すると。そういうことでしたら、これはお願いなのですが、ぜひその大陸の集合とか、そういうものと、例えばスノーボールアースのこと、それから今度の氷河期を並べてグラフにするようなことをぜひやっていただきたいと思います。

多田先生：そうですね。努力したいと思います。どうでしょうか。プラス1回ぐらい必要かもしれない。そういう長いスケール、いろいろなタイムスケールでものを見るというのは実は私が一番得意とするところなのですけれども、今回は気候変動に焦点をあてているわけで、割に近過去、近未来が中心なのです。話をそういうふうに構成していますけれども、そういうリクエストがあれば、その辺のところをもう少しお話ししてもいいとは思っています。

質問者：ちょっとお伺いしたいのですけれども、太陽の光はあまり変化がないというのは今日の話では前提だったように思うんですが。もちろん変化は多少あるのでしょうか、気候システムに大きな影響を与えるということはないということだったのですが。この太陽の光についても変動があるのだとか、いろんな話を俗説かもしれませんがよく聞くのですが。少なくとも今日の話のタイムスケールのような、だいたい数万年とか10万年とかというその程度のオーダーだと、太陽の光

の変化は事実上変化はあまりないというふうに考えて良いのでしょうか。もっとタイムスケールを大きくすると、太陽の光というのはどんな明るさだったのでしょうか。

多田先生：すごくうれしい質問をしていただきました。太陽活動と気候変動の話は最終回ですつもりです。簡単にお答えしますと、数百年スケールから数千年スケールで影響が出ている。それから、それより長いスケールの変動は実は今のところ知るすべがないのです。だから、「ない」とも「ある」とも言えないが、あっても全然おかしくない。それから、もっと長いタイムスケールはスノーボールアースでお話ししましたが、太陽は億年スケールではどんどん明るくなってる。これはかなり確立した事実です。だから太陽の明るさというのは最初の前回の復習でもお見せしましたように地球の表面の気温を決める非常に重要な要因の一つで、それが変動しないという保証は全くない。ただ衛星観測や何かで知られているのは、太陽の明るさは0.1%ぐらいしか変動しなくて、だから無視してもよいというのが従来の考え方だったのです。しかし、実はそうではなく、事はもっと複雑だというのが最近分かってきた。もう一つはごく最近ですけど、今一番新しい太陽の11年周期に入っていますが、今回のサイクルは今までとちよっと違うのだということがいわれています。だからそれがどのぐらい違うかという事も最終回の第5回にお話しするつもりなので、ぜひそれまで来ていただければと思います。

司会者：今のご質問は太陽の黒点のことが多分マスコミでいろいろ書かれているからでしょうか？

質問者：聞かれますね。

多田先生：そうですね、では簡単にご紹介しますが、一番新しいサイクルの直前には黒点がなくなる状態が結構続いたんです。通常の11年周期ではそういうことは起こっていないので、もう少し長い周期、88年から90年ぐらいの周期の変動の極小期を今見ているのではないかという話が、まだ確定ではないのですけれど、いわれています。通常の11年周期では太陽の明るさの変動は0.1%ぐらいなのです。だけれども、それがもっと長いタイムスケールの変動ではどのぐらいの振幅を持

っているのかは、まだ分からないのです。要するに衛星観測の期間は30年ぐらいですから、それより長い周期の変化は分からない。それが今回もしかすると分かるかもしれない。もしそれが0.1ではなくて、0.2とか0.3になってくるとその影響は無視できなくなってくるという事があります。

それからもう一つは、太陽の明るさの変動はトータルとしては0.1%なのですけれども、実は紫外領域では数%はあるのです。紫外領域というのは太陽放射全体のごく少ない割合しか占めていないのですけれども、紫外領域での太陽活動に伴う変動は数%もあるんです。紫外領域が何故重要かという、例えばオゾンの生成に関わってくるのです。オゾンというのは温室効果ガスなのです。だからその辺のメカニズムが今どんどん分かってきていて、要するに大気の高層部分でどういう反応が起きて、それが温室効果ガスをどうコントロールしているのかというのが、だんだん分かってきていて、分かってくればくるほど太陽活動というのは無視できないという雰囲気になってきています。

私はもともと太陽活動の重要性をずっと主張しているのですけれども、ただ、太陽活動が無視できないという議論は非常に危険な側面があって、CO<sub>2</sub>ではなくて太陽活動が20世紀後半の気温上昇の原因だ、という話になってしまうと、それは全然違うのです。気候変動の主要因はやはりCO<sub>2</sub>なのです。つまり、太陽活動は従来は全く気候に影響はないといわれていたのですが、どうも2番目に重要な要因らしい。しかもCO<sub>2</sub>に比べて例えば10%とか、そのぐらいの効果は十分に持っている。そういうことを第5回目にお話ししようと思っています。

質問者：すいません、今話していただいたのは地球の自然の大きな流れだと思いますけれども、それに対して、人間の営みということがどれだけ影響を与えるかというのを、ちょっと聞いてみたんですけど。やっぱり人が今、CO<sub>2</sub>をいっぱい出しているということで、地球の大きな流れがすごく促進するとか、そういうことというのは、やっぱりあるということなのかな。

多田先生：ちょっと質問が抽象的な部分があるのですけれども、具体的な話をすれば、人間が今、CO<sub>2</sub>をどんどん出していますよね、それで現在その濃度は380 ppmぐらいまで上がっています。も

ともとは280ぐらいしかないはずなのが、380。もう上昇量が100ppmは超えてるわけです。それから2100年にどこまで上がるかというと、1,000ぐらいまでは上がると言われていています。多分、残念ながらその予想は下回らないでしょうね。要するに人間の欲望が優先する限りは下回らない。でCO<sub>2</sub>濃度が1,000ppmの世界というのはどうなるかということ、地質時代には1,000ppmという濃度の時代は結構あるのです。その時も生物はのびのび生きています。だからトータルとしては問題ないのだけど、ただ、では人間に対してどうかということ、例えば国境があったり海のそばに家を建てたり、そういうもののために経済的な影響とか、それから国と国との間の利害とかに影響して、社会的環境が格段に悪くなる。だからそういう意味での影響は膨大だと思います。

それからもう一つは、CO<sub>2</sub>は確かに一番高い時—今から6,500万年以上前の白亜紀ですけれども—に、おそらく4,000ppmぐらいあったのです。実は、CO<sub>2</sub>が高いということだけだったらそんなに問題はないのですけれども、ただし、今の上昇の速さというのは異常なのです。地球の歴史の中でも最も速い上昇をしている。そういう急激な上昇があった時に何が起こっていたかということ、生物の絶滅です。だから、そういう意味では……でも生物が絶滅してもちゃんと生き残ってまた繁栄するのだから、それはそれでいいのですけれども、(会場：笑)ただ、その絶滅する生物の中に人間が入っていないという保証は全くないわけです。人間を含む人間に都合がいい生態系がその中に入っていない、という保証は何もないということです。よろしいでしょうか。

司会者：それでは私からも一つ質問ですが、先ほどから、この50億年ぐらいの温度が分かっているというようなことをいわれるのですけれども、50億年も前のそんな昔の温度がどうすれば分かるかということ、教えていただきたいなと思います。

多田先生：分かっているのは30億年ぐらい前までです。もちろん過去にさかのぼればさかのぼるほど精度は悪くなります。それこそ30億年も前の事になると、僕たちが地質温度計と呼んでいるものの精度は低くなり、10℃とか20℃ぐらいの誤差を平気で持つものになります。簡単に言えば、

一つは海の水が液体の水であるかどうかですね。要するに沸点に達しているかどうか。それから凍っていないかどうか。だから液体の水がずっと存在すれば、0℃から100℃の間にあったと言えます。これは多分皆さんの感覚では、それでは何も決まったことにならないではないか、と言われるかもしれないのですけれども、いろんな惑星と比較すれば、0℃から100℃というのはそれなりに狭い温度範囲なのです。ハビタブルゾーンといいますけど、要するに生物が生存できるような状態であるという意味では非常に重要です。

もう少し時代が現在に近くなると、もっといろんな温度計が使えるようになります。具体的には、例えば鉱物ができる時に微量な元素をその中に取り込むんですけども、その取り込む量ですね、それが温度の関数である鉱物が結構あるのです。それを利用するのです。今私たちのところでは石灰質の殻を持つ化石の中のMgとCaの比を使って温度を復元しているのですけども、公称では0.1℃の精度で復元できます。本当はもうすこし誤差が大きいと思いますけれども。

それからもう一つ例を挙げますと、生体の膜脂質ですね。細胞膜を構成する有機分子を使うという、そういう方法もあるのです。それはどういう原理かという、要するに生物は、人間もある程度そうですけれども、温度によって細胞膜を硬くしたり軟らかくしたりする。その膜を通していろいろな栄養をとったり中の要らないものを出すわけですけども、それを膜の硬さでコントロールするのです。それが温度に関係してくるので、それと温度の関係を使って水温を復元する方法もあります。

だから地質学者というのは過去のことを温度にしる、例えば今はCO<sub>2</sub>も測る方法をいろいろ考えてるのですけれども、鉱物とか生物の仕組みをうまく利用して、その温度依存性や何か、それからCO<sub>2</sub>ならCO<sub>2</sub>の依存を利用して復元するというのをいろいろ考えるのです。

質問者：恐竜時代は何度ぐらいになるのでしょうか。6,500万年前の恐竜時代。

多田先生：そうですね。赤道域で平均気温が38℃ぐらい。今は28℃ぐらいだから10℃ぐらい高かった。極域でも20℃ぐらいあったといわれています。だから、そこそこというか結構暑いですね。

私たちには住みにくいと思う。クーラーがないと辛いかもしれないですね。(会場：笑)でも生物一般についていえば、暖かいほうが元気が出るのですね。だから体も大きくなります。

質問者：最後のほうで炭酸ガスの濃度の変動と気温の変動がちゃんと相関しているという話があったのですが、この炭酸ガスの変動というのは、何か前回の時の要するに負のフィードバックというストーリーなんですか。それとも何か別の要因があるのでしょうか。

多田先生：別の要因があります。CO<sub>2</sub>の問題というのは実は結構複雑で、タイムスケールによってCO<sub>2</sub>を制御するシステムが変わってくるのです。簡単に言うと、前回のお話で出た、スノーボールみたいな何百万年、何千万年というタイムスケールでの変動では、先ほどもちょっとお話ししましたが、地球の中から出てくるガスと、それからそれを固定する過程のバランスで決まります。固定するのは2通りルートがあるのですけれども、大きなのは実は化学風化なのです。岩石が炭酸によって溶けて石灰岩を沈殿させるのです。その時にCO<sub>2</sub>を固定するのです。そのプロセスが一番効きます。

だけれど今我々が問題にしてるような数十年、数百年、せいぜい数千年のスケールでは、そういうプロセスはあまり効かなくて、主に問題になるのは大気と海洋、それから生物圏の間のやり取りなんです。それがどういうものがあるって、どういう仕組みで制御されているかというのが次回のテーマなので、これ以上言うと次回のネタが減ってしまいますので、このぐらいにしておきます。

以上