

## 第4回 環境サイエンスカフェ

テーマ 「気候変動の科学・その4」

～Day After Tomorrow の世界：急激な気候変動とそのメカニズム～

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8月31日(水) 18:30~20:00

会場 サロン・ド・富山房 Folio

参加者 37名



多田先生：こんばんは。早いもので、もう第4回になりました。大分顔見知りというか、見慣れた顔も多くなり、こっちもリラックスして話ができます。

今日は、「急激な気候変動とそのメカニズム」というタイトルのお話です。サブタイトルにある「The Day After Tomorrow」というのは四、五年前に公開された SF 映画なのですが、皆さんのコメントを見ますと、それを観てから来ますというものが幾つもありました。私も、題名を付けた手前、もう一回復習しないとまずいと思って、息子に頼んで借りて観ました。

では、早速いつものように、前回の復習から入っていききたいと思います(図1)。前回の感想で、難し過ぎるというものが結構ありまして、前回はCO<sub>2</sub>の話だったのですが、これが一番分かりにくいテーマなのです。できるだけ分かりやすくは話したつもりなのですが、やはり難しかったらしく、分からないというコメントが随分ありました。テープで起こした講演録を読んでみたら、自分でも、何故こんなに日本語が下手なんだろうと思うほど

ひどい日本語で、やはり説明もまずかったのではないかと思います。ただ、講演録は、かなり時間をかけて手をいれましたので、それを読んでいただければ、講演のときには分からなかったことも、分かるのではと思います。

**前回の復習**

**大気中のCO<sub>2</sub>濃度は、どう制御されてきたか？**

- 大気中のCO<sub>2</sub>濃度は、～10万年周期で変動し、氷期には現在より100 ppm低かった。
- こうしたCO<sub>2</sub>濃度の低下は、CO<sub>2</sub>が一時的に海洋にため込まれる事により引き起こされた。
- 海洋にCO<sub>2</sub>を送り込むポンプには、溶解ポンプ、生物ポンプ、アルカリポンプ(炭酸塩ポンプ)の3つがある。
- 深層水循環の変化、ダストによるFeの供給、SiO<sub>2</sub>の殻を持つプランクトンの増加などがポンプの効率を変えた可能性が高い。
- 大気中のCO<sub>2</sub>濃度変化は、正のフィードバックで増幅された可能性が高い。

【図1】

それでは、早速話をしていきます。前回は、CO<sub>2</sub>がどういうメカニズムで制御されたかという話をしました。まず、映画『不都合な真実』から取った図を使って、CO<sub>2</sub>の変化が大体10万年の周期で変動していた事を述べました。人間がCO<sub>2</sub>を放出

する直前の大気 CO<sub>2</sub>濃度は、大体 280ppm です。また、今から 2 万年ぐらい前、最終氷期と言われている時代には、それよりも 100ppm ぐらい低かったと言われます。つまり、180ppm~280ppm ぐらいの間を行ったり来たりしていたという事が、この図から分かると思います。その中で、人間が活動し始めてから、100ppm 近く CO<sub>2</sub>が一気に上がっているという点が、『不都合な真実』でアル・ゴアが強調したことです。

そして、CO<sub>2</sub> が例えば氷期に減少したのはなぜかということに関しては、基本的には海の中に CO<sub>2</sub> が一時的に押し込められたからだというお話をしました。では、押し込むメカニズムとしてどのようなものがあるか、これが一番難しい問題なのですが、溶解ポンプ、生物ポンプ、アルカリポンプとこういう 3 種類のポンプがあって、それが働いているのだという話をしました。この 3 種類のポンプがどういう物かについては、前回の講演録を読んでいただければと思います。

更に、これらのポンプがどのぐらいよく働くか働かないかという事には、実は今日の話の主題でもある深層水循環、これが結構効いているのです。それ以外には、黄砂の様な陸から飛ばされる塵の中に入っている鉄が、実はこの生物ポンプを活性化させる役割をしているかもしれない。それから、プランクトンの種類などもポンプに影響しているというようなお話を前回したわけです。

そして、もう一つ、大気中の CO<sub>2</sub>の濃度変化自体が正のフィードバック、つまり、いったん変化が起こり始めると、それをより大きい変化にするようなメカニズムがあって、それによって CO<sub>2</sub>の変動が増幅されている可能性が高いというお話もいたしました。

今回は、急激な気候変動の話なのですが、まず「The Day After Tomorrow」がどういう映画かという事を、見ておられない方のために簡単にご説明します(図 2)。主役はジャックというちょっと変わった古気候学者。海洋観測の結果から北大西洋の水温、塩分が低下したという現象が分かり、それに対して、古気候の記録に基づくと、そうい

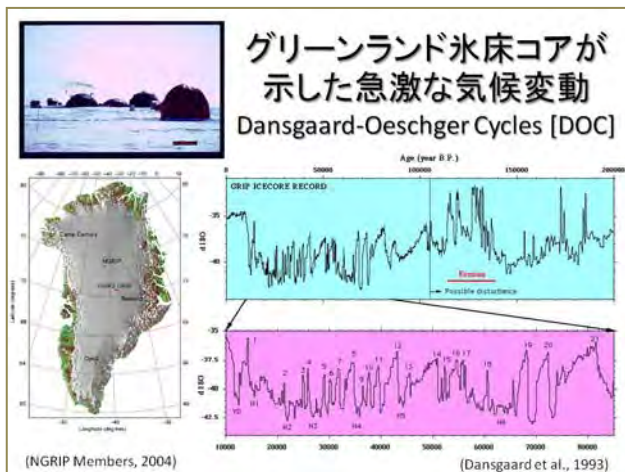
Jack 「イカレタ古気候学者」  
北大西洋海流の水温低下、塩分低下  
気候モードの大きなシフトが起こる  
気候モードシフトは6-8週間で起こる  
竜巻の頻発  
津波  
Stormが過ぎたら地球は氷河期  
予測モデルはあてにならない

【図 2】

う現象が起こり始めると気候モードの大きなシフトが起こるということを彼は主張します。さらに、気候モードのシフトというのは 6 週間~8 週間で起こると主張します。最初のうちは、周囲は彼を相手にしなかったのですが、どんどんと寒冷化が進み、大きな竜巻が起こって都市を破壊するとか、津波が起こって街を飲み込むとか、嵐が過ぎ去ったらその後地球は氷河期になってしまうというように、映画ではストーリーが進んでいきます。

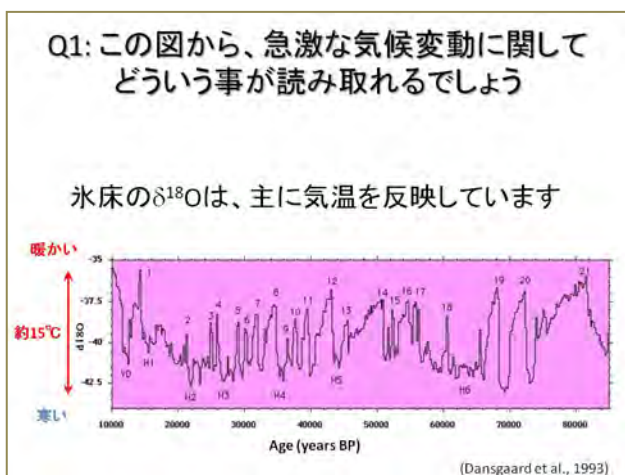
それから、少し外れますが、気になったのでピックアップしておいたのですが、「予測モデルは当てにならない」という発言が映画の中に出てきました。きょうのお話の最後に、このれら中のどれが本当で、どれがウソか、でっち上げかという話をしたいと思いますが、とにかく映画の中では、この様に話が進んでゆきます。

ちなみに、この映画のヒントになった話が、今日お話する急激な気候変動なのです。その急激な気候変動は、最終氷期、今から 8 万年ぐらい前から 2 万年ぐらい前、に繰り返したのですが、その存在が分かったのは比較的最近なのです。そのきっかけになったのは、1993 年に「ネイチャー」という科学誌に載った論文なのです。グリーンランドの中心部で、アメリカとヨーロッパのグループが競い合うように掘削をおこなって、氷床コア(氷の柱)の解析を行いました。グリーンランド氷床には、過去 10 万年ぐらいの気候変動が記録されているのですが、氷床コアを分析して、その結果を報告したのが 1993 年なのです(図 3)。



【図3】

これがその結果ですが、縦軸が氷の酸素同位体比で、これは基本的に気温を表しています。それから、横軸が時代です。これは、実際は氷の深さなのですが、それを時代に変換したものです。図の最終氷期について見ると、前々回にお話した海の堆積物の酸素同位体比の変化では、同位体比の変動はもっとずうっと滑らかな変化だったのですが、それが氷床コアではこんなにギザギザしています。下の図は、上の図の最終氷期部分を拡大したのですが、数百～数千年で繰り返す大振幅の変化が見つかりました。これが急激な気候変動です。ダンスガードという人とオシュガーという人がこれを最初に見つけたということで、二人の名前を取ってダンスガード・オシュガー・サイクル（ここではDOCと呼びます）と呼ばれています。では、早速最初の質問に入ります。



【図4】

この図（図4）からどういうことを読み取るでしょうか。そういう事を考えることは、頭の体操にもなるし、観測事実を理解するには非常に重要な

のです。この図を見て、そこから理解できることを言ってもらえれば良いのですが、いかがでしょうか。図では、縦軸が温度、横軸が時代です。図中の→は温度幅にして大体 15 度ぐらいあります。では、これからどういうことが読み取れるでしょうか。

会場：非常に大きな、急激な温度変化が比較的短い間におきた。

多田先生：そうですね。大体、数百年から数千年ぐらいのタイムスケールで繰り返し変化している事が読み取れます。じゃあ、振幅はどうでしょう？ 振幅は？

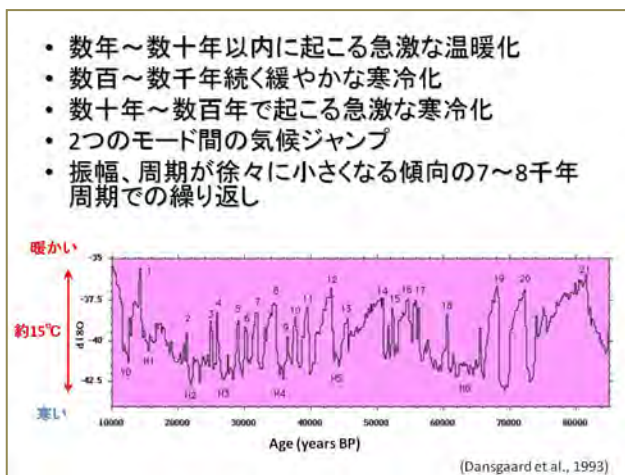
会場：それはシャープ。

多田先生：そうですね。温度にすると、一番大きなものと 10 度を超えます。そのぐらい急激だということがわかります。ほかにはどうですか。すべてというわけではないのですが、急激に上がって、少しなだらかな下りがある、急激に下るといった特徴もあるように見えるのですけれども、いかがでしょうか。

ということで、第一に、急激な温暖化が非常に急激に起こっている事がわかります。この最初のデータでは、この分析の間隔が 100 年ぐらいだったのですけれども、実は例えばここだと一気に、一直線に上がっていますよね。これがどのぐらい急激かという事に、当然その氷の分析をしている人たちも興味持つわけです。そこで、それを分析していくと、一番短い場合で 3 年、平均して大体 10 年～20 年ぐらいで変動が起こっていたということが分かったのです。

実は、この論文は 1993 年に報告されたのですが、この現象自体が見つかったのは更に 10 年以上前なのです。氷の研究をしている人たちは、最初は、これが気候変動を反映していると信じられなかったのです。だから、変動の審議を確認するために何箇所も掘削し、最終的にグリーンランドの中央を掘って決定版が出て、1 地点だけのたまた

まの現象ではないことが確認されました。また、断層で切れている訳でもないことも確かめられました。それから、変化の急激さについては、先ほどもお話ししましたように、最終的には3年というのが一番短い例だったのですが、1993年の報告では、10年ぐらいと濁しています。というのは、彼ら自身が3年という短さを信じられなかったのです。その後繰り返しチェックして、一番短い例で3年、平均して10数年という事が分かってきたのです。



【図5】

それから、先ほども言いましたように、大体数百年から数千年ぐらい、少しなだらかに寒冷化が起こり、その後比較的急激に一下がる方は、上がる方ほどは急激ではないのですけれども一大体数十年から数百年間で一気に下がるという変化が見られます。

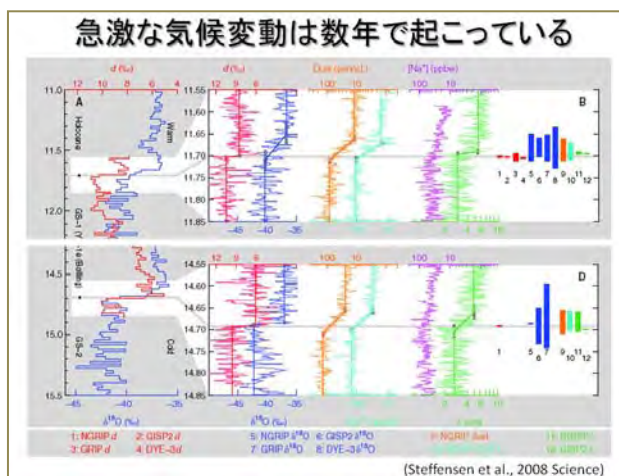
若干波はあるのですけれども、基本的に、温度が低いところと高いところの間を行ったり来たりして、中間がありません。これは、このヒストグラムを取るともっときれいに見えます。暖かいモードと寒いモードの間を行ったり来たりしている、これを気候モードジャンプと言いますが、という特徴があります。

それから、もう一つは、暖かいモードと寒いモードの繰り返しの特徴的なパターンがあるという事です。例えば、約43,000年前（12番）にバツと温度が上がっていますよね。ここでは上がる幅も大きく、持続期間も長くて、やがて下がる。2番目（11番）は、12番に比べて振幅が小さく、持続期間もちょっと短くなります。3番目（10番）はも

っと小さく、短くなる。そういう傾向が、特に12-9番、8-5番で顕著に見えます。それ以外にも似た傾向が見えますよね。それが何を意味するかは別にして、一つの特徴です。

ということで、93年にこの報告がでると、今までは氷期・間氷期っていう、数万年スケールで割とゆっくり変化しているものだと安心してた変動が、どうもそうとも限らないということになってきました。数年と言ったら、人間の一生より短いですからね。数年の間に温度が10度変わるとレジュームにも書きましたけれど、数年以内に東京の状態が稚内になってしまうわけですよね。それはやっぱり困るので、どういうメカニズムなのかとか、これは氷期の話なのですが、間氷期にもこういう事が起こるのかとかいう疑問がワーンとわいて、研究がここに集中したのです。

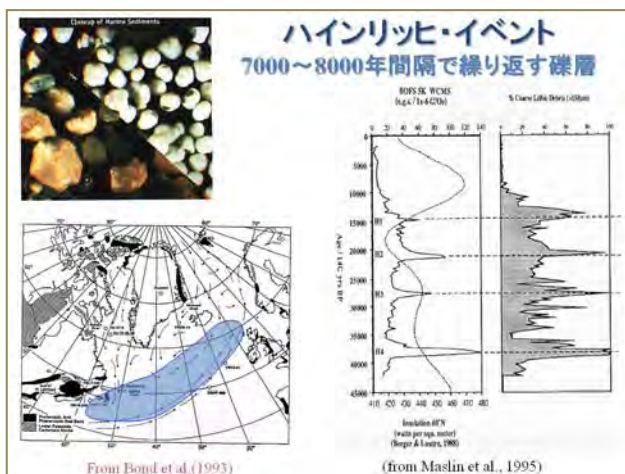
こうした変化が本当に数年で起こっていたことを、その後2008年に出た論文が示しました（図6）。図における酸素同位体や素同位体比は温度を反映するのですが、それらの変化は、10年どころか一、二年で変化していたのです。



【図6】

それから、氷の中には、例えば砂ぼこりが入っており、おそらくはゴビ砂漠、タクラマカン砂漠から来たと言われていますが、それらは大体50年ぐらいで変化していることもわかります。こうして、急激な気候変化というのは本当に数年～数十年で起こっている事が確実になってきたのです。

氷のデータで急激な気候変動が示されたのと時期を同じくして、海の方、まあ、私もそうなんですけれど海の堆積（たいせき）物を扱っているコミュニティでも、ハインリッヒ・イベントと呼ばれるイベントを示す堆積物が、特にグリーンランドの沖合にあるというのが分かってきたのです（図7）。これはどういう堆積物かという、我達は海底堆積（たいせき）物を取るのに、ピストンコアラと言って、船の上から、鉄のパイプを落として堆積物に差し込むのですが、それを北大西洋高緯度海域で落とすと、スムーズに入らないでじゃりじゃりっと、途中で邪魔者があるのです。



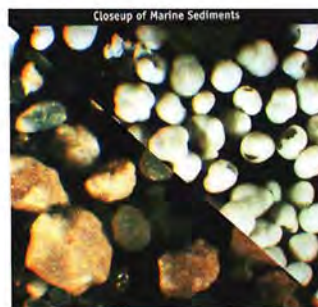
【図7】

通常こういう遠洋域では、陸からの影響がほとんど無いので、有孔虫という、差し渡しが0.1ミリとか0.2ミリぐらいのプランクトンの殻が堆積します。ところが、北大西洋高緯度海域では、ある特定の層準に写真の様な岩石の破片がたくさん入っているのです。大きい物で1ミリ以上の破片が入っている。次の図がその例なのですが、堆積（たいせき）物の中で、どのぐらい岩片が入っているか、その割合です。縦方向が、海底からの深度なのですが、図では年代に直しています。そうすると、1万5,000年前とか2万1,000年前というふうに数千年間隔で、特に岩片が多い時期がある。これを最初に見つけたのがハインリッヒという人だったので、ハインリッヒ・イベントっていう名前がつけました。

では、ハインリッヒ・イベントの礫は一体どこから来たのでしょうか？海の中真ん中で、大きいのは1ミリを超えるものが堆積した訳です。どの様に

に堆積したのでしょうか。

Q2: ハインリッヒ・イベントとして知られる礫層の礫は、どこから、どの様にしてもたらされたのでしょうか？



【図8】

会場：火山の噴火。

多田先生：火山の噴火でも、確かにこのぐらいの大きさの物は飛んでくるのですが、ハインリッヒ・イベントについては、岩片の種類が分かっています。多くは石灰岩の破片なのです。ですから、この場合は火山ではないのですね。

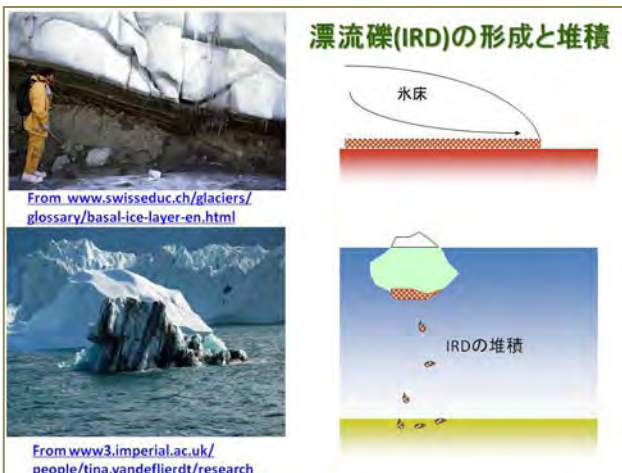
会場：黄砂。

多田先生：1ミリの岩片を風で飛ばすというのは容易ではありません。実は私は日本海の堆積（たいせき）物に含まれる黄砂の研究をしているのですが、その大きさは大体10ミクロンぐらいです。最大で30~40ミクロンぐらいですかね。ハインリッヒイベントの岩片とは2けたぐらい大きさが違います。だから、海の中真ん中にこれだけの岩片を運ぶには、非常に限られたメカニズムしかないのですが、いかがでしょう。はい。

会場：氷が解けて

多田先生：はい、そうです。正解が出ました。それを漂流礫、あるいは、IRDと呼びます。icrafted debrisの略なのですが、要するに氷山が運んだ礫のことです。これらの礫は、氷河の底面に付いているのです。氷床というのは厚いところで数kmあり、それが流れているという事は、前回お話ししたと思います。それが流れるときに、その底面

で岩盤を削っていくのです。だから、底面付近は氷あずき状態になっている。それを示したのがこの写真（図9）です。



【図9】

氷床の底面を見ると、上の氷床が流れるときに岩盤を削って、それを取り込んでいます。氷床の基底付近は割ときれいにしまがありますが、その部分も実は氷で、氷の中に岩片がまぶされているのです。これが海に突っ込むと、下の写真の様に、氷床の基底の、岩盤を削って取り込んだ部分も冰山となって、きれいな冰山と一緒にプカプカ流れていくのです。

これが大西洋極域から南へ、プカプカ流れて行くのですが、それが南から来るメキシコ湾流（暖流）にぶつかる、そこで融けて、石のくずをポタポタと下に落とすわけです。これがさっきのハインリッヒ・イベント層の正体なのです。ですから、ある特定の時期に大西洋の真ん中まで冰山が流れて、そこで融けたということなのです。



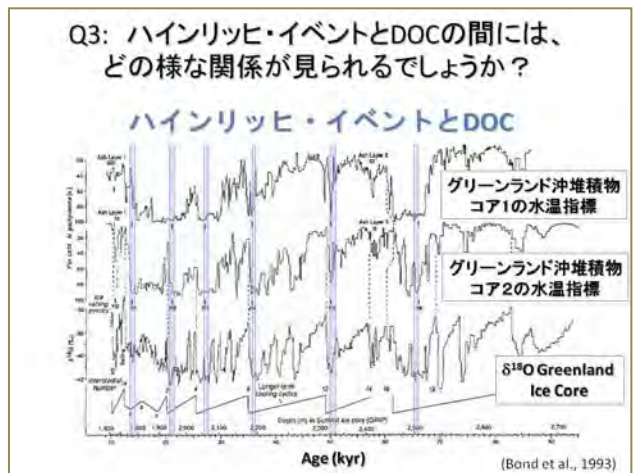
【図10】

さらに、ハインリッヒ・イベント層に含まれる礫

の種類を見ると、ハドソン湾に起源があるような石灰岩の礫が多いことが分かってきました。これ

（図10）は、最終氷期に北米の大部分を覆っていた氷床（ローレンタイド氷床）の分布を示しています。厚いところで、厚さが3 km以上あったと言われています。ハドソン湾起源の礫というのは、ローレンタイド氷床の北の部分が冰山になって北大西洋に流れ出たことを意味するのです。それが南から来るメキシコ湾流とぶつかって、図に示される海域でみな融けて、その礫を落としたというわけです。これは、ローレンタイド氷床の北のセクターが一気に崩壊したことを意味するのではないかという事が、ハインリッヒ・イベントを研究して分かってきたのです。つまり、グリーンランドではダンスガード・オシュガー・サイクル（DOCと略します）があるということが分かってきて、海の方ではハインリッヒ・イベントというものがあることが分かってきた。

では、両者の関係はどうなっているのかと考えるのが当然ですよね。その答えがこの図です（図11）。

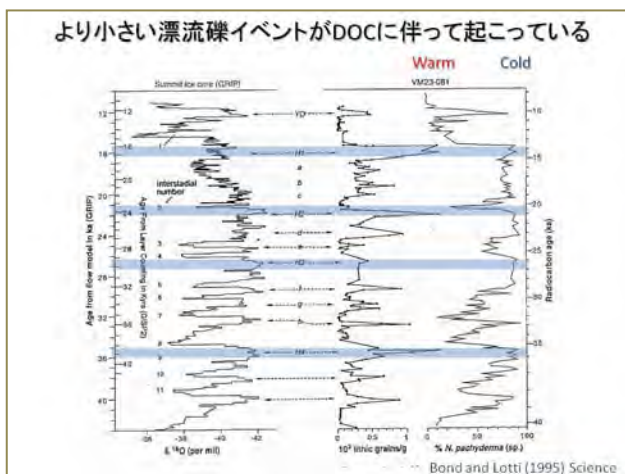


【図11】

一番下の図が、グリーンランドの氷床コアの酸素同位体比（ $\delta 18O$ ）の変動です。上の図は、グリーンランド沖合の海から取った堆積物コアに含まれる浮遊性有孔虫と呼ばれる微化石を使った水温の指標です。どういう指標かという言うと、ある種の有孔虫の殻は、寒いと左巻き、暖かいと右巻きという風に巻き方が逆転するのです。その比を示した図です。すごくそっくりとまではいかないですけれども、グリーンランドの $\delta 18O$ とかなり似

た形の変動を示しますよね。このパターンを対比をすると、先ほどお話したハインリッヒ・イベントの位置と、DOCの関係を見る事が出来る。要するに、グリーンランドの氷床コアの酸素同位体比の変動に、ハインリッヒ・イベントの位置を入れたわけです。先ほど言いましたように、ダンスガード・オシュガー・サイクルの急激な変動というのは、ときどき大きい振幅で長く持続する温暖期があつて、それに続く2回目、3回目の温暖期はだんだん振幅が小さくなって、持続期間も短くなる。そしてまた次の大振幅の温暖化があります。そこを区切っているのがハインリッヒ・イベントなのです。だから、ハインリッヒ・イベントと、このダンスガード・オシュガー・サイクルと呼ばれる急激な気候変動は、完全に同じものではないのですが、密接に関係しているということが分かってきたのです。

さらに、先ほどの漂流礫 (icerafted debris) の量の変化を細かく調べたのが次のスライドです (図12)。図の中央が icerafted debris の量の変化、左がグリーンランド氷床コアの酸素同位体比の変化、左が水温指標で、その関係を示しています。グレーで色を掛けたのがハインリッヒ・イベントで、漂流礫が多くなっているのがわかります。それ以外にも、実は小さなピークが結構あるのが分かってきました。これらが、ダンスガード・オシュガー・サイクルの寒い時期に対応しているのです。



【図12】

そして、寒い時期に対応したピークの礫の種類を見ると、ハインリッヒ・イベントの礫は、ロー

レンタイド氷床が崩壊した証拠を示しているのに対して、小さなピークを構成する礫は、もう少し小さな氷床、例えばアイスランドの氷床とか、スカンジナビアの氷床とか、の崩壊を示しており、ローレンタイドではないらしいことも分かってきました。以上の事から、ダンスガード・オシュガー・サイクルは、小さな氷床の成長・崩壊と関係しているらしい。一方、ハインリッヒ・イベントは、一番大きなローレンタイド氷床の成長・崩壊と関係しているらしい、ということが分かってきました。理由はさておき、氷床の成長、崩壊と、急激な気候変動が、かなり密接に関係していることが分かってきたわけです。

これが分かってくれば、次は当然なぜという疑問になりますよね。この疑問に答えていきたいと思うのですが、その伏線として、ローレンタイド氷床はおおよそどのぐらい体積があつたのか、考えたいと思います。いかかでしょう？正確にはもちろん地図を使って計算しなくては行けないのですが、例えば海水準にしてどのぐらい相当でしょうか？

会場：10m以上。

多田先生：10m以上、そうですね。面積は、大体  $1.1 \times 10^7 \text{ km}^2$ 、北米大陸の約半分、地球の表面積の約2%ぐらいです。平均の厚さが、最大ときで2.4kmぐらいということなので、海水準にすると75m相当ぐらいです。結構巨大だったのです。では次に、ハインリッヒ・イベントがもしローレンタイド氷床の崩壊によつたとすると、海水準にどのぐらい影響があつたのでしょうか。先ほど、海水準で75m相当とお話したのは、ローレンタイド氷床が一番大きいときの全体積です。また、ハインリッヒ・イベントがローレンタイド氷床の崩壊に関係していると言いましたが、崩壊といっても完全に無くなるわけではないのです。崩壊したのは、北部セクターと呼ばれる、北の半分、面積にして4分の1ぐらいで、それが一気に流れたい。また、流れたといっても、完全に無くなったわけではな

くて、あるところまで薄くなると氷山の流出は止まるのです。多分半分ぐらいの厚さになったと言われています。面積で4分の1、厚さで半分とすると、全体積の8分の1ぐらい、海水準にすると10m程度となります。これは、そんなに正確な数字ではなくて、15mぐらいと言う人もいるし、せいぜい5mだと言う人もいます。しかし、せいぜい5mと言っても、海水準がそれだけ上がったらえらいことになりますよね。そのぐらいのことが起こったということなのです。

**Q4: ローレントイド氷床の体積は、どの位あったでしょうか？**

- 面積は、約 $1.1 \times 10^7 \text{km}^2$   
= 地球の表面積 ( $51 \times 10^7 \text{km}^2$ ) の約2%
- 最大体積は、約 $2.7 \times 10^7 \text{km}^3$  (Paterson, 1972)  
= 平均の厚さ2.4 km  
= 海水準にして、 $2.7 \times 10^7 \text{km}^3 \div 36.1 \times 10^7 \text{km}^2 = 75\text{m}$

【図13】

という事で、環境への影響の一つ目は、海水準です。でも、それだけでしょうか。実は、もう一つ、重要な影響があるのです。海流が止まるのです。何で止まるのでしょうか。

会場：沈み込みが。

多田先生：沈み込みが止まるからなのだけれど、何故沈み込みが止まるのでしょうか。

会場：海水の中に溶けている塩分。

多田先生：そうですね。表層水の塩分が下がったのです。では、何故で塩分が下がったでしょう？

会場：氷が解けるから。

多田先生：そうです。氷床が崩壊して流れだした氷山が北大西洋高緯度域で融けることによって塩分が下がるわけです。では、その融けた淡水の供

給量はどのぐらいあると思いますか。ちなみに、ハインリッヒ・イベントの持続時間は、大体500年ぐらいと言われています。どうでしょうか。大体500年～1000年間持続したと考えて、先ほどのローレントイド氷床の全体積の1/8を割ると、水量に $1.43 \times 10^5 \text{m}^3$ となります。これは、揚子江の5倍ぐらいの流量です。揚子江は世界で4番目か5番目ぐらいの大河川ですが、その5つ分が500年間北大西洋に淡水を供給し続けたわけです。

**Q5: ハインリッヒイベントは、環境にどのような影響を及ぼしたのでしょうか？**

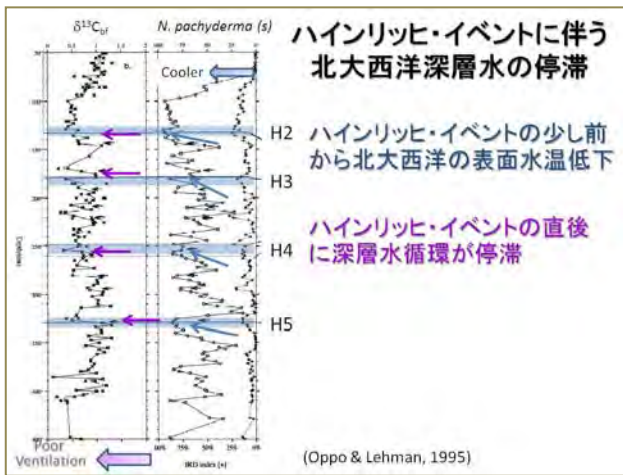
- ローレントイド氷床の1/4の面積で、厚さが半分になったとすれば、 $3.4 \times 10^6 \text{km}^3$ の体積に相当  
- これは、約9mの海水準を引き起こす
- ハインリッヒイベントは、500-1000年持続したと言われる。  
-  $3.4 \times 10^6 \text{km}^3 \div 750\text{年} = 4.5 \times 10^3 \text{km}^3/\text{y}$   
=  $1.43 \times 10^5 \text{m}^3/\text{sec} (=0.143\text{Sv})$   
- この値は、揚子江の流量の5倍

【図14】

これは「The Day After Tomorrow」の中の北大西洋の塩分と水温が下がったという話と関係しますが、では、これだけ流れれば本当に深層水循環を止められるのか。その前に、そもそも止まった証拠はあるのでしょうか。氷山が流れ出して融けて表層水の塩分が薄くなるということは、比重が軽くなるということですから、それで沈めなくなったという論理なのです。では、本当に止まった、もしくは弱まった証拠があるのかという疑問に対して、たくさん証拠が示されましたが、今日は一つだけ挙げさせていただきます。

(図15)は、北大西洋から取ったコアの分析の結果です。左側が、底生有孔虫と言って海の底にすんでいる有孔虫の殻の炭素の同位体比です。炭素の同位体というのは、有機物が上からたくさん降ってきて分解すると、どんどん軽くなります。だから、よほど海水ほど軽い値を持っている。右側の図の左は、パキデルマという浮遊性有孔虫殻の左巻きの割合で、表層水温の変化を示しています。右の図の右のグラフは漂流礫の量の変動を示し、ハインリッヒ・イベントの2、3、4、5

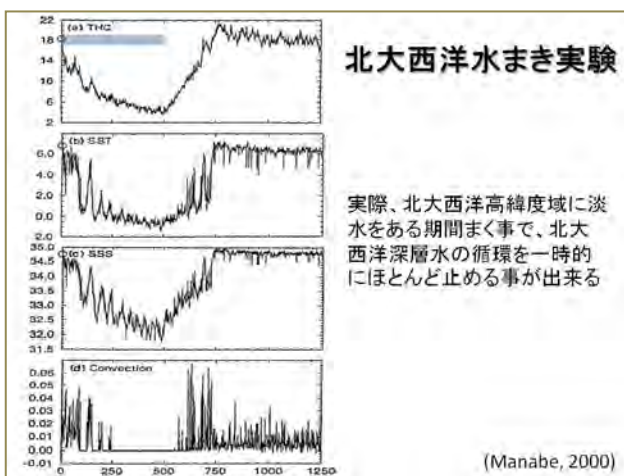




【図 15】

の位置を灰色の影で示しています。この図から分かることの第一は、ハインリッヒ・イベントが起こる前に、水温が低下している、どんどん寒くなっているということです。では、深層水はどうかというと、ハインリッヒ・イベントの後に炭素同位体比が軽くなっているのです。要するに、ハインリッヒ・イベントが起こると、その海の深層はよどみ、沈み込みが無くなる、ということを示している。これらのことから、氷山が流出して、それが融けて塩分が薄くなることによって深層水循環が停滞したということが言えるわけです。

こういう古気候学のデータが出てくるとそれに対応して、本当にそうなるかどうかをコンピューターで再現してみようという考えが出てきます。それをやられたのが、プリンストン大の真鍋先生です。コンピューターを使った気候モデル、ジェネラル・サーキュレーション・モデルと言うのですが、その原型を世界に先駆けて作った方です。

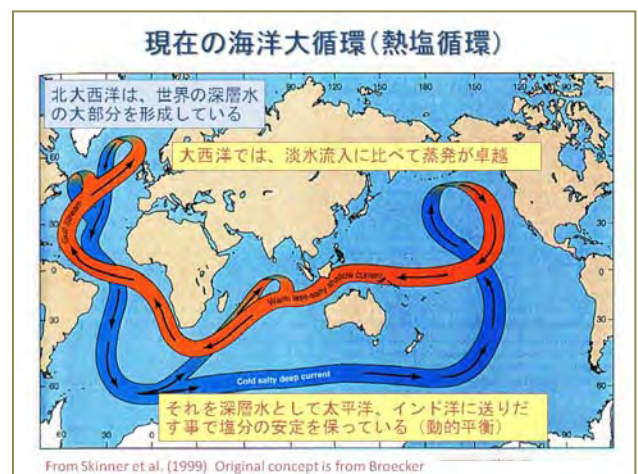


【図 16】

非常に有名な方ですが、その方が、やってみま

しょうと、コンピュータ上で、北大西洋に 500 年間水をまく実験をされました。これは、水まき実験と呼ばれています。要するに、北大西洋に水をちょっと多めに、揚子江 10 本分ぐらいをまいたのですが、その結果が (図 16) です。図の一番上が、深層水循環の強さで、THC と書いてあるのは Thermohaline circulation (熱塩循環) の略です。図から明らかなように、水をまき始めた途端に深層水循環の強さが、もともと 18 Sv (スベルドラップ=流量の単位) あったものが、4 ぐらいまで落ちてしまうのです。水まきを止めた途端に元へ戻る。表層水温 (SST) も、まき始めるとワッと下がり、終わると戻る。それから、表層塩分 (SSS) も同じです。

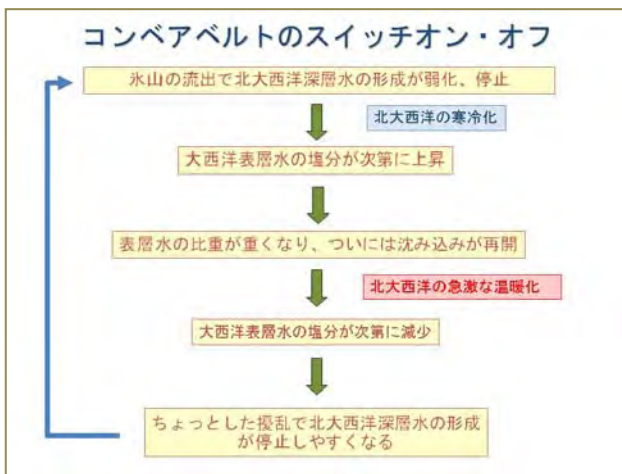
ということで、古気候学的な証拠から推測されることが、ちゃんとコンピューターの中でも再現できたのです。これが「The Day After Tomorrow」の映画を作るきっかけになったデータです。映画は 2000 年に撮られています。真鍋さんがこの結果を最初に出されたのは 95 年か 96 年あたりだと思います。繰り返しになりますが、北大西洋の高緯度域に淡水をある期間まくことで、北大西洋深層水循環を一時的に止めることができるというわけです。この後、真鍋先生の論文に刺激されて、たくさん水まき実験が行われます。



【図 17】

(図 17) は、前にもお見せしました現在の海洋大循環の模式的な図ですが、現在何でこういうことが起こっているのでしょうか。北大西洋のグリーンランド沖で世界の深層水の 9 割が形成され

ているわけですが、実は現在の大西洋では、蒸発の方が、雨や川で入ってくる量よりも卓越しているのです。だから、もしほうっておくと——ほうっておくというのは、深層水循環がなければ—大西洋はどんどん辛くなっていきます。一方、太平洋はひたすら甘くなっていきます。そうならないために深層水循環で塩分を太平洋に戻しているのです。深層水循環で太平洋とかインド洋に辛い水に戻して、それで甘い—要するに相対的に塩分が低い—水を大西洋に戻しているのです。これが深層水循環を駆動しているわけです。これを、北大西洋に氷山でたくさん淡水を供給することによって一時的に止めるというメカニズムなのです。氷山の流出で北大西洋の深層水の沈み込みが弱まるのです。



【図18】

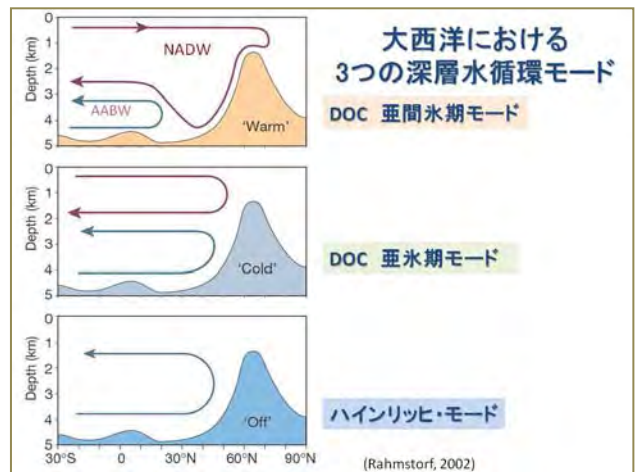
そうすると、次に何が起こるでしょうか。メキシコ湾流というのは、塩分だけではなく熱も運んでいます。昔、地理の授業で習ったと思いますが、何故ヨーロッパは高緯度にあるのに暖かいのかというと、メキシコ湾流があるからです。従って、これが停止すると、どんどん寒くなります。寒くなると同時に深層水の形成が停止していますから、北大西洋の表層水の塩分はどんどん上昇するわけです。深層水の沈み込みが止まっていた理由は、淡水流入で塩分が低くなったからなので、淡水の供給が止まって—要するに氷山の流出が止まって—塩分が上がってくると、やがて表層水の比重が十分に重くなって、ほうっておいても深層水の形成が再開するというわけです。

するとメキシコ湾流がまた入ってきますから、

北大西洋沿岸域で急激な温暖化が起こるわけです。深層水はそこでどんどん形成されますから、今度はたまった塩分がまた徐々に運びだされて、塩分が下がっていきます。最終的には、ちょっとした擾乱（じょうらん）で、また止まりやすい状態になるわけです。ちょっとした擾乱とは、例えばローレンタイトの氷床の崩壊—これは結構大きい擾乱ですけど—あるいはもっと小さい氷床の崩壊でも止まり得るという訳です。

このように、大西洋を中心とした深層水循環システムというのは、一回止まっても、それを回復してまた動き出す能力を持っているわけです。動いている状態では、弱い擾乱でも、また止まりやすい。止まると、しばらく止まっているけれども、塩分がどんどんたまってやがて動き出す。そういう性質を持っているということです。

実際にその後のいろいろなコンピューターモデルの結果から分かってきたことは、大西洋における深層水循環には3つの安定状態があるらしいということです。1つが、現在やダンスガード・オシュガー・サイクルの亜間氷期の循環モードです（図19）。



【図19】

図の NADW というのは北大西洋深層水で、図の横軸が北と南、基本的に北で深層水ができて、これがずっと南に流れていきます。これが現在や亜間氷期の循環です。これに対して、ハインリッヒ・イベントのときには、北大西洋に大量に氷床が流出するので、NADW が完全に止まってしまい、南極の方から来る深層水(AABW)だけが残ります。これが2つ目の循環モードです。3つ目はダンス

ガード・オシュガー・サイクルのハインリッヒ以外の垂氷期—そんなに著しい氷床の崩壊はないが、小規模の崩壊はある—の循環モードで、NADWが完全には止まらないで浅くなった状態で循環し、その下にAABWが循環する、という3つのモードがあるらしいことが分かってきました。そして、北大西洋で氷山の流出が起こると、世界の海洋の深層水循環が、一番規模が大きいハインリッヒ・イベントのときには一時的にとまり、そうでない、もう少し規模の小さい流出のときには、完全には止まらず、弱まって循環が継続すること、そのどちらの場合も、時間がたつとまた循環が復活することが分かってきたのです。

そうすると、次の疑問として、では、氷床の崩壊はどうやって起こったのだろうかという疑問がわかりますよね。これまで、急激な気候変動の原因を追ってきて、氷床の崩壊が原因であるというところまで分かってきたのだけど、氷床がなぜ崩壊するかということに関しては、まだ答えが出ていないわけです。で、この質問は、いかがでしょうか。どなたか？

会場：そもそも氷床が海へ落ちる方向へ行くということなのですが、温暖化みたいなものによって滑りやすくなる、滑る。

多田先生：結構いいポイントですね。要するに氷床が流動するのがどういうメカニズムによるかということですね。

**Q6: では、北大西洋への氷山の流出は、何によって引き起こされているのでしょうか？**

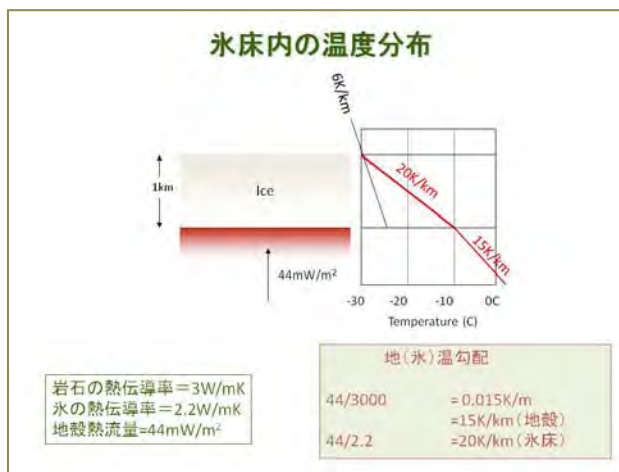
- ハインリッヒ・イベント開始前に北大西洋の寒冷化が進んでいる > 氷床の成長
- 氷山の流出は、~500年くらいで一気に起こり、その後、停止している > 氷床の崩壊

【図20】

氷床の厚さが3 km あるという話をしましたけれ

ども、その氷床の底はどうなっているかご存じでしょうか。見たことがある人はそうはいないと思いますが。氷床の底は融けている場合があるのです。乾いている場合もあるのですが。それがポイントなのです。

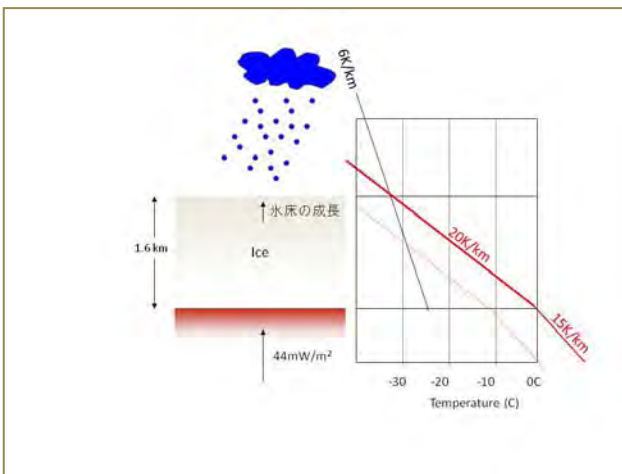
先ほど示したデータの中に幾つかヒントが入っていて、一つは、ハインリッヒ・イベント開始の前に既に寒冷化が進んでいるという点です。寒冷化は氷床の成長を引き起こします。それから、氷床の成長の結果として寒冷化が起こるという側面もあります。それから、もう一つのヒントは、氷山の流出は500年ぐらいの間に一気に起こり、その後は停止していることです。要するに、氷床というのはワーッと流れる時期と、あまり流れないで止まっている時期との2つがあるということです。



【図21】

これらのヒントをもとに、メカニズムを考えるのですが、それには少しだけ式が必要です。(図21)の下側の茶色い部分が岩盤で、上の灰色に書いてある部分が氷床です。とりあえず氷床が1 kmの厚さとしておきます。それから、地球は、地球内部から表面に地熱が逃げています。これ熱流量と言うのですが、大体44mW/m<sup>2</sup>くらいあります。右側の図では、横軸に温度、縦軸に氷床の高さを取っていますが、氷床ないの温度分布はどうなっているのでしょうか。岩石の熱伝導率、氷の熱伝導率と、地殻熱流量を与えてやると、温度分布が計算できます。それからもう一つ、氷床上の気温がどうなっているかですね。気温というのは高度が高いほど下がります。通常は大体1 km 上がると

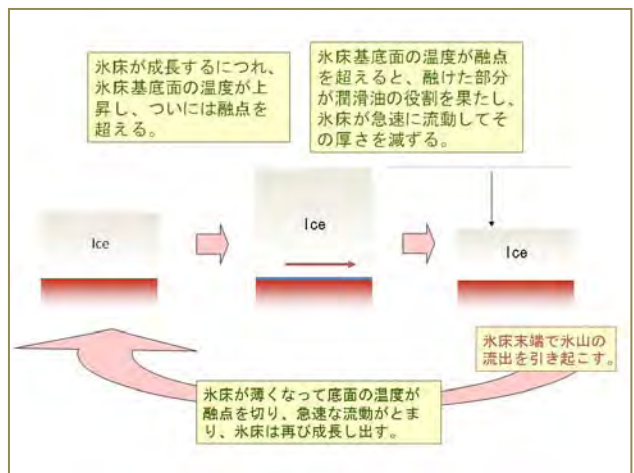
6度下がる。ここでは、一応この値を仮定します。また、氷の表面で気温が-30度ぐらいであるとします。そうすると、氷の中と地面の中での温度の分布が分かります。要するに熱流量が分かって熱伝導率が分かれば、温度こう配が計算できるわけです。図は、その結果を示しています。この場合は、氷の底面の温度は、-10度となります。凍っていますよね。これをドライベースの状態と言います。ドライベースだと氷床はあまり流動しませんから、雪が降れば氷床はどんどん成長するわけです。では、氷床が成長していくとどういうことが起こるか。それが次の図(図22)です。



【図22】

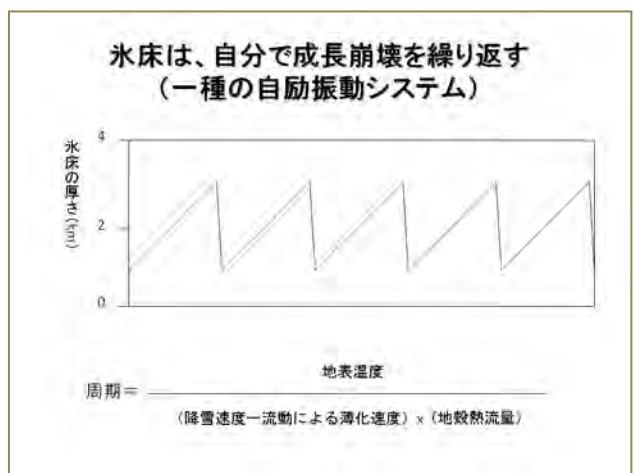
図にあるように雪が降って、氷床が1.6kmまで成長したとします。そうすると氷床の表面の温度は-33度ぐらいと温度は少し下がりますが、氷の中の温度分布を計算していくと、氷のベースの温度は0度になってしまいます。そうすると、融け始めますよね。つまり、ドライベースで流動しない状態で氷床があるところまで成長していくと、氷床の中の温度勾配のおかげで、次第にベースの温度が上がり、ついには融けてしまうのです。そうすると、氷床は一気にバツと流れてその厚さを減少させる。要するに、氷床が薄いときはどんどん成長して、ある厚さまで達すると、ベースがメルティングポイントに達してワツと流れる。そうすると、一気に薄くなりますよね。薄くなると、ベースはまた凍ってしまい、氷床の流動は止まる。そしてまた成長が始まり、ある厚さに達するとワツと流れて、例えばハインリッヒ・イベントが起こるわけです。このサイクルを繰り返すのです(図

23)。つまり、氷床はほうっておいても自分で踊っているのです。成長したり、崩壊したりを繰り返す一つのサブシステムなのです。



【図23】

(図24)の縦軸が氷床の厚さ、横軸が時間ですけれど、氷床はじわじわじわつと厚くなって上限に達すると一気に崩壊し、下限に達すると流動が止まって、また厚くなってゆく。こういうことを繰り返している。そしてその周期は、氷床の大きさとか、どのぐらい雪が降るかとか、どのぐらい流動するかとかのバランス、地面の下から来る熱の流れ、それから地表の温度などの関数で決まります。ちなみにローレンタイド氷床について計算すると、大体七、八千年。だから、ハインリッヒ・イベントとよく合うな周期を持っています。だから、どうもハインリッヒ・イベントというのは、ローレンタイド氷床が自分で成長拡大を繰り返している減少を見ているのだと考えられるわけです。



【図24】

司会者：すみません。それは、簡単に言うと、地

面というのは必ず熱を出している。その上に氷のふたをすると、熱が下から出てきているものがたまっちゃうと。たまって、ふたをして。

多田先生：まあ、そういう説明でもいいですけど、結局氷も物質なんで、その中を熱が流れると、熱こう配を氷の中に作るのです。そのため、氷がある厚さまで達するとベースの温度が零度を超えてしまうということです。今、司会者さんがおっしゃった説明は、一般の人に分かりやすくするには良いけれど、正確さを求めるという意味では、やはり温度こう配をきちんと考える方がいいと思います。

会場：すみません、では、冬になってどんどん雪が積もっていったとすると、零度以下で圧力が強くなってくると凝固点が下がってくるんで、つまり、それも解けやすい方向に行くわけですよね？

多田先生：そうですね。厳密にはおっしゃるとおりで、圧力の影響を本当は入れなければいけないので、さっきの零度というのは不正確です。それはおっしゃるとおりです。しかし、その効果は余り大きくないので、氷床がある厚さになると融点を超えて融けて滑り出し、自励振動システムをつくり出すという結論は変わりません。

ちなみに、さっきの深層水循環のところであまりはっきり言わなかったのですが、あれも一種の自励振動なのです。止まっても自分で復活して、また微妙なバランスで止まりやすくなるのです。ただ、あの場合は、きっかけを何か与えてやらなければいけない。そのきっかけを与えるのが、氷床の崩壊なのです。例えばローレンタイドみたいに大きな氷床とか、スカンジナビアみたいに小さな氷床が、それぞれ自分のリズムで踊っているわけです。それで、小さな氷床が崩壊したときに起こるのがダンスガード・オシュガー・サイクルの亜氷期の状態で、ローレンタイドの氷床は大きいので、数千年に一回しか崩壊しなのですが、それが崩壊した時に起こるハインリッヒ・イベントの状態です。現実には、それらの合成が起こっている

のです。

地球の環境というのは、いろんなサブシステムが相互に影響し合いながら変動しているのですが、これは、そのサブシステムがそれぞれ固有の振動をしていて、相互に影響し合っていることの分かりやすい例だと思います。

### ここまでのまとめ

- 最終氷期のグリーンランドでは、急激な気候変動が繰り返した
- それは、北半球氷床の崩壊に伴う北大西洋の氷山の流出が、一時的に北大西洋の深層水循環を止めた(あるいは弱めた)事により引き起こされた
- 北大西洋の深層水循環には3つのモードがあり、小さな擾乱によりモード・ジャンプが起こる
- 氷床は、独自のリズムで成長崩壊を繰り返した(自励振動)

【図25】

ここまできをまとめますと、1つ目は、最終氷期にグリーンランドで急激な気候変動が繰り返したことが分かってきたということ。2つ目は、それが北米のローレンタイド氷床の崩壊に伴って氷山が北大西洋に流出し、一時的に北大西洋での深層水形成を止めた、もしくは弱めたことによって引き起こされたものであること。3つ目が、北大西洋の深層水循環には複数の安定モードがあって、小さな擾乱(じょうらん)によってモードジャンプが起こること。その擾乱(じょうらん)の程度によって、深層水循環が弱まるか、止まるまで行ってしまうかという違いがでること。そして、氷床というのは独自のリズムで成長・崩壊を繰り返していたこと、が分かってきたということです。

会場：南極の氷はどういうふうに扱うのですか。

多田先生：結構鋭い質問ですね。南極はもっと寒いですね。だから、北半球のローレンタイド氷床との大きな違いは、一つは、北半球は、寒いといっても相対的には暖かくて、水蒸気が多いのです。そのため、降雪量も多いのです。その結果、北半球の氷床は早く成長してメルティングポイントに達すると。それに対して南極の方は、あまり

に寒過ぎて雪が余り降らず、氷床の成長が遅いのです。その結果、氷床の自励振動がなかなか起こらないのです。だから、南極が今後温暖化していくと、氷床の成長、崩壊が起こり得るかもしれないですね。

会場：今の話は、2万年から8万年前の間に起こったイベントですよね。

多田先生：そうです。

会場：今の氷床の大きさは、その2万年から8万年前の間の何分の1ぐらいなのですか。

多田先生：2万年から8万年前の間、ダンスガード・オシュガー・サイクルが典型的に起こる状況での海水準は-90mぐらいです。現在残っている氷床がすべて融けると海水準が50m以上上昇する筈ですから、現在の3倍弱ですね。最終氷期にローレnciaイド氷床が最大になったときには氷床は安定していたのです。(図3)をもう一度見て頂くと、最終氷期で一番寒いとき-2~3万年前にはあまり急激な変動はないのです。ハンリッヒ・イベントは起こっているのですが、ダンスガード・オシュガー・サイクルの様な変化は見られません。これは、北半球のローレnciaイド氷床の大きさがあるしきい値を超えると、安定化してしまう事を意味します。この状態は、海水準にして-120mですから、海水準で30m分ぐらい小さくなったときが一番変動が激しいときに当たります。もう少し小さくなくてもまだ変動は起こるのですが、変動の周期が長くなってきます。氷床サイズによって、応答の周期が実は変わるのです。その氷床サイズは何によりコントロールされているかというと、ミランコビッチサイクルなのです。話がどんどん複雑になっていくので、ここまで話すと多分收拾がつかなくなるなと思って話さなかったのです。

グリーンランドとか、北大西洋では結構大きな変動があったことが解ったとして、では、この変動は、どこまで達しているのでしょうか？グロー

バルなのか、地域的なのか、そういう疑問が当然わいてくると思うのですが、どうでしょう？

会場：グローバルじゃないですか。

多田先生：グローバル？そうですね。

会場：太平洋側にまで。

多田先生：太平洋側にまで達しているかと？

会場：ええ。

多田先生：少なくとも北半球全域に及んでいることが分かっています。実は、南半球にも及んでいたのですが、単純ではないのです。この話を今日の後半でして、終わりたいと思います。

**Q7: では、こうした急激な気候変動の影響は、どこまで及んだのでしょうか？**

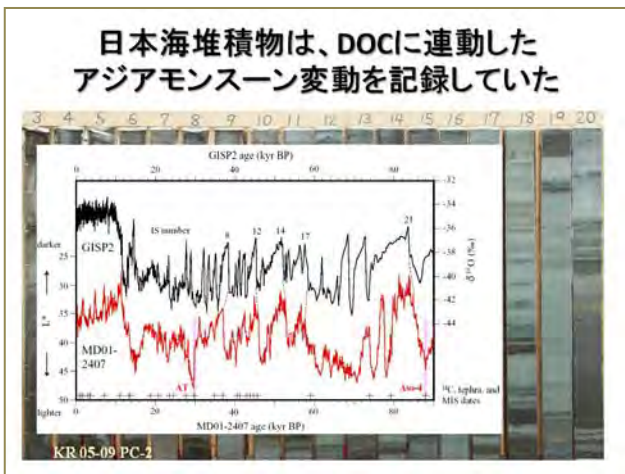
- DOCの影響は、北半球ほぼ全域に及んでいた
- 南半球へもその影響は及んでいたが、その様式は単純ではない

【図26】

そこで、たまには自分の話もしようかと思いません。実は私は、これに関係したことを研究しているのですが、きっかけは、日本海の堆積物を別の目的で研究していたら、偶然この現象の証拠を見つけたのです。もう20年ぐらい前の事です。

(図27)は日本海の堆積物の写真なのですが、これは15mぐらいのコアを半割りしたものです。20m以上のパイプを海底に刺して、それを回収して、1mずつ刻んだのです。写真を見てお分かりだと思いますが、日本海の堆積物は、非常に複雑な白黒のしま模様、これが延々と続くのです。しかも、これが日本海の深いところ全域にあり、それらが全部対比できるということが分かったのが1989

年です。だから、ダンスガード・オシュガー・サイクルが報告される前なのです。何でこの様な縞模様ができるのかがすごく不思議で、それが、気候変動に興味を持ったきっかけなのです。



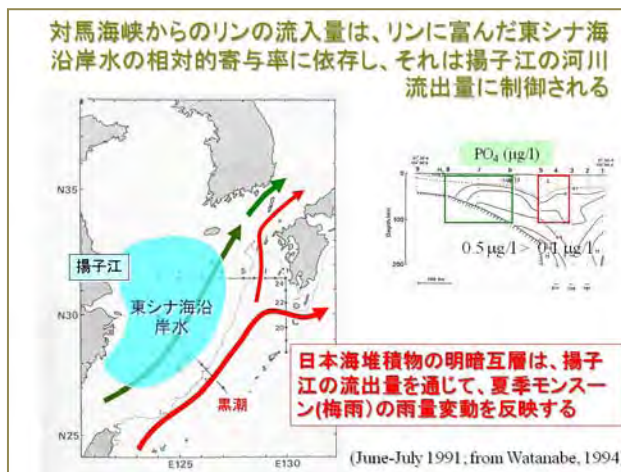
【図 27】

この堆積物の色を測ってやると、Slide 28の赤線に示される変動を示します。上の黒線がグリーンランドのアイスコアの酸素同位体比です。両者の年代は独立に決めているのですが、相互にかなり似ているのがお分かり頂けるとと思います。何か理由はわからないのだけれども、日本海の堆積物の白と黒の縞は、ダンスガード・オシュガー・サイクルと連動して堆積しているのです。

では、これはダンスガード・オシュガー・サイクルとどの様に連動しているのだろうという事を私はずっと研究してきたのです。まず色の原因ですが、黒い縞は有機物が多いのです。プランクトンの死骸（しがい）が多いのです。白い方は、実は碎屑物で、黄砂や川から運ばれた泥です。では、何故プランクトンの死骸（しがい）が多くなったり、少なくなったりするのでしょうか。これは、日本海に、プランクトンが繁殖する基になるリンとか窒素などの栄養塩累がどのくらい入ってきたかに関係します。では、日本海への栄養塩の供給は何が決めているのかというと、対馬海峡から入ってくる水の種類と量なのです。

（図 28）の右の図は現在の観測のデータで、左の図の南側の測線に沿ったリンの濃度を示しています。右の図の緑の四角の部分、これは大陸棚外縁の部分ですけれども、この上ではリンの濃度が大体  $0.5 \mu\text{g/l}$  ぐらいあります。これに対して、

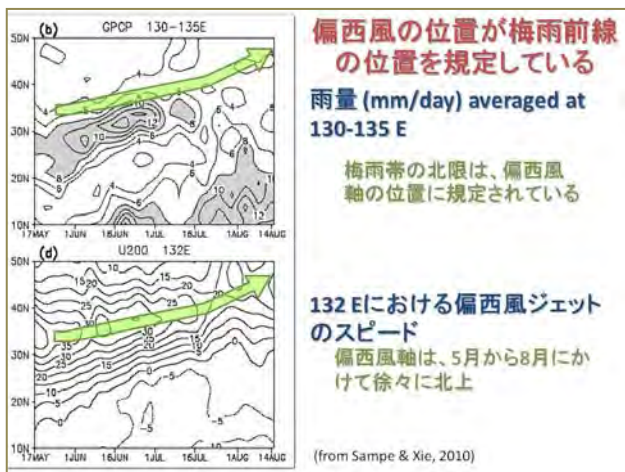
赤い四角の部分は黒潮で、これが分岐して対馬暖流になるのですが、こちらの部分の栄養塩濃度は  $0.1 \mu\text{g/l}$  以下と、栄養塩がほとんどが入っていないのです。日本海へは、黒潮から分岐した対馬暖流が対馬の南側を通って入り、緑の四角の部分—東シナ海沿岸水と呼ばれますが—は、対馬の北側に沿って入ってきます。この緑と赤の比が何で決められているかというと、実は揚子江から出てくる淡水の量によるのです。揚子江からたくさん水が流出すると、東シナ海の沿岸水が張り出します。すると、黒潮があまり日本海に入れなくなって、東シナ海沿岸水ばかりが入ってくるようになります。逆に、揚子江からの水があまり流出しなくなると黒潮がたくさん入ってくるということが起こります。では、揚子江からの流出量は何で決まっているかというと、梅雨、アジアモンスーンなのです。



【図 28】

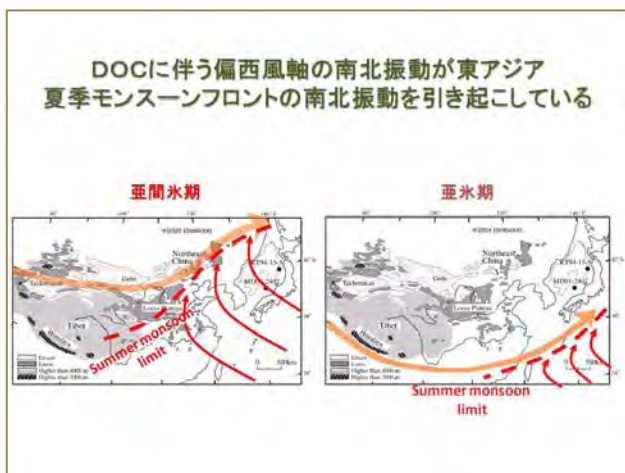
ということで、日本海堆積物の白黒のしまというのは、実は東アジア・モンスーン、梅雨の雨量の変化を見ているということが分かってきました。日本海の堆積物の明暗のしま模様は、揚子江の流出量を通じて梅雨の雨量変動を見ているのです。

私がこの研究を行って論文を書いた後、中国の鍾乳石を使って、揚子江流域で雨がどう変化したかというデータも出てきて、それにもきれいにダンスガード・オシュガー・サイクルが出ている事が示されました。そういうことで、揚子江流域に降る雨の量が、何らかの理由でダンスガード・オシュガー・サイクルに連動して変動したことが分かってきました。



【図 29】

では、梅雨の雨量は一体何が決めているのでしょうか。(図 29) は現在の観測に基づく梅雨前線と偏西風の位置の季節変化を示しています。横軸が季節です。上の図は5月から8月にかけて梅雨前線が南から来て北に動いていく様子を示しています。下の図は、偏西風の強い部分が北上して行く様子を示しています。図を見ると偏西風の軸は、5月には北緯 30 度ぐらいのところにあって、それが季節とともに北上していきます。上の図の網かけ部分は、梅雨前線の雨が一番よく降るところを示しますが、緑の矢印は、偏西風の軸部の位置の季節変化を示します。図から分かることは、偏西風の位置が梅雨前線の北上を規定しているのです。この様に現在の気象観測データからも、偏西風ジェットの位置が、梅雨前線の位置を決めていることを示しています。



【図 30】

細かい話は飛ばしますが、私たちは、日本海堆積物の中に入っている黄砂の起源をずっと研究し

ています。それによると、偏西風が北上したときには、タクラマカン砂漠起源の砂がたくさん飛んで来ます。一方、偏西風が北上しない時は、冬に飛んでくるゴビ砂漠の砂ばかりなのです。ですから、それらの量比を調べる事によって偏西風がどう動いたかを知ることができるのです。そうすると、ダンスガード・オシュガー・サイクルの亜氷期には偏西風が北上していて、それによって南中国にたくさん雨が降った。ダンスガード・オシュガー・サイクルの亜氷期には偏西風がずっとチベットの南に居っぱなしで、その結果、揚子江流域にあまり雨が降らないで、日本海には栄養塩が入っていかなかったということが分かってきたわけです。

あまり自分の研究の話ばかりすると、話がちょっと狭くなるので、この辺にしておきますが、そういうことで、ダンスガード・オシュガー・サイクルというのは、実は北半球全域に及ぶのです。今私がお話したのは、アジアモンスーンですけど、これ以外にもインドモンスーンも、北アフリカのモンスーンも、北アメリカもモンスーンもダンスガード・オシュガー・サイクルに連動して変化しているという研究が、ほぼ同時並行で進んでいて、2000年のあたりから、こういう証拠がワッと上がってきたのです。そして、北半球全域にダンスガード・オシュガー・サイクルに連動した変動があることが分かってきたのです。

**DOCは、少なくとも北半球全域に及ぶ変動である**

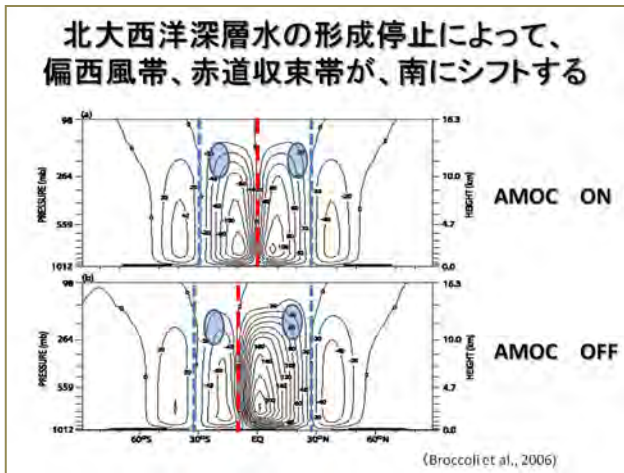
- D-O サイクルに連動した同様の変動は、インドモンスーン、北アフリカモンスーン、北アメリカモンスーンでも認められる
- それらの変動は、偏西風や赤道収束帯(ITCZ)を通じて伝播しているらしい

【図 31】

更に、そういった変動は、どうも偏西風とか、赤道収束帯—赤道収束帯というのは、赤道域で上昇気流が起こる場所です。衛星から見ると、赤道



のところだけ雲がずうっとかかっている、その下が熱帯雨林なわけですから—の位置の変動がどうもダンスガード・オシュガー・サイクルの信号を伝播（でんぱ）しているらしいことが分かってきました。



【図 3 2】

そういう証拠がそろってくると、またモデルの人たちが、では、それが本当に再現できるかというモデル実験をするのです。これ(図 3 2)がその一例ですが、図の AMOC というのはこれは北大西洋深層水循環の事で、上の図がそれが流れているとき、下の図がそれがスイッチ・オフのときに対応します。横軸は緯度で北が右、縦軸が高度ですが、赤道付近で上昇気流が起こって、中緯度付近で下降気流が起こるといってハドレー循環のパターンが見えています。赤の部分、さっき言った赤道収束帯ですね。それから、水色でマルをした部分が、偏西風が吹いているところなのですが、北大西洋深層水(AMOC)が動いているときは、上の図に示す位置にあります、AMOC を止めると(下の図)、特に赤道収束帯ははっきり南下するのです。それから、北半球の偏西風帯はあまり顕著ではないのですが、ほんの少し南にシフトします。南半球の偏西風帯は明確に南にシフトします。要するに、北半球の偏西風、それから赤道収束帯、南半球の偏西風が、北大西洋深層水を止めることによって、みんな南にシフトするということが起こっているというのです。

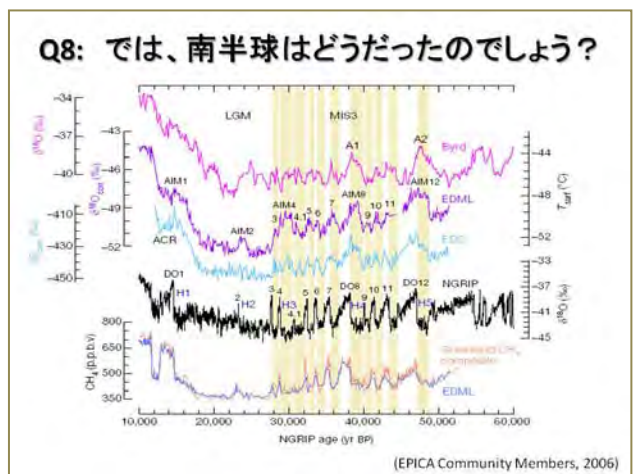
これはちょっと考えれば簡単で、要するに北大西洋深層水を止めるということは、メキシコ湾流を止めることなのです。そうすると、北半球は寒

くなる。一方、次にお話ししますが、深層水循環(AMOC)を止めると、南半球は暖くなるのです。北半球が寒くなると、偏西風とか赤道収束帯を南に押しやる効果があり、南半球は暖くなると、それらを南に引っ張る効果があります。その両方が同時に働くために、全体が南にシフトするということなのです。

ちなみに、CO<sub>2</sub>を変えた場合にはどうなるかという、赤道収束帯の位置を変えずに、ハドレー循環が縮小したり。拡大したりという、赤道に対して対照的な動きをされると言われています。北大西洋深層水を止めたり動かしたりした場合に、全体が南にシフトしたり、北にシフトしたりする、非対称な動きとは大きく異なるのです。

最後に、ダンスガード・オシュガー・サイクルは南半球ではどうだったのかについてお話しします。南半球でも南極で氷床コアが掘られているので、それと北半球の気候変動の記録を比較してやればよいのですが、では、グリーンランドの氷床コアと、南極の氷床コアのどこどこが同時かというのは、どうやって分かるのでしょうか？これ、結構難しい問題ですよ。実はきょうはお話ししなかったのですが、以前、氷床の氷の中には気泡が入っていて、過去の大気の成分を分析できるという話をしました。そのときは CO<sub>2</sub>の話が主でしたが、メタンも入っています。

(図 3 3) の下の図に示されるのは、メタンの濃度の変化です。



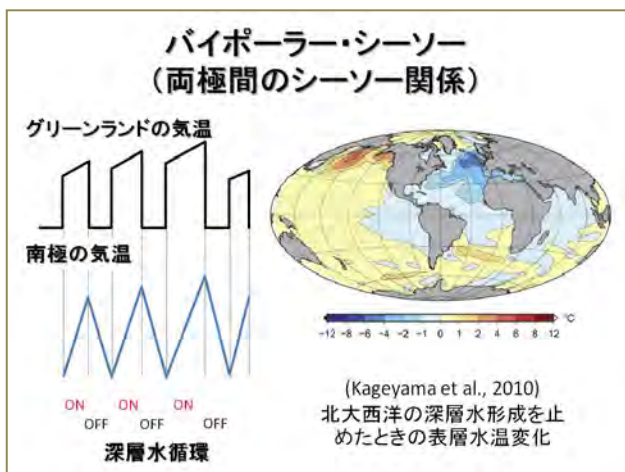
【図 3 3】

実はメタンの濃度というのは、ダンスガード・オシュガー・サイクルに連動して変動しています。

これはなぜかという、メタンの主な発生源は中・低緯度の湿地なので、モンスーンが強くなったり弱くなったりすると、湿地面積が変化するからだと言われています。図で青と赤の線があるのがお分かりかと思いますが、赤の線はグリーンランドの氷の中のメタン、青の線は南極の氷の中のメタンです。大気中のメタン濃度の変化は両極同時ですよ。だから、これを対比することで、2つのコアを対比できるのです。

こうして対比したのが上の酸素同位体比の図です。一つ上がグリーンランド氷床の酸素同位体比の変化、その上の3つが南極の氷床コアの酸素同位体比の変化です。数100～数1,000年スケールの変動という意味では似ているのですが、タイミングが合っているかという、あまり合っていないですよ。よく見ると、例えばDOの8ですけれども、グリーンランドは暖かい時期に当たりますが、南極は、どちらかといえば寒いときに当たっています。どちらかという両極で変動が逆転しているのです。完全な逆転ではないのですが、どちらかと言えば逆転しています。

この様子を模式的に書いたのが(図34)です。



【図34】

例えばグリーンランドが一番寒いとき、つまりハイネリッヒ・イベントのときには、深層水循環がオフになっている。そうすると、北から冷たい深層水が来なくなり、南極は徐々に暖まり出します。次に深層水循環がオンになると寒冷になって来ます。しかし、その変化は余り急激ではありません。

実際、モデルで再現したのが右の図です。深層水循環を止めると、どういところが寒冷になる

か、どういところが温暖になるかを示しています。実はここが温暖になるかはモデルによって異なるのですが、少なくとも、大西洋については、北大西洋が寒冷になり、南大西洋が暖まるという関係は共通しています。これを両極間のシーソー関係と呼びます。ということで、急激な気候変動に関しては、南極も影響を受けるのですが、どちらかという、逆転したセンスで応答したと考えられます。また、温度変化の振幅は、南極の方がずっと小さいことも分かります。

### 後半のまとめ

- D-Oサイクルに連動した変動は、北半球全域におよぶ
- その信号伝播には、偏西風、熱帯収束帯の南北シフトが関与していた
- 偏西風、熱帯収束帯の南北シフトは、コンペアベルトのスイッチオン・オフにより引き起こされた
- 南半球への影響は、信号が逆転する形で起こっている
- これも、コンペアベルトのスイッチオン・オフの影響による

【図35】

ということで、後半のまとめです。まず、ダンスガード・オシュガー・サイクルに連動した変動は、北半球全域に及んでいること。次に、その信号の伝播には、偏西風とか、熱帯収束帯など大気の流れが非常に重要な働きをしていること。それから、偏西風帯や赤道収束帯の南北シフトは、基本的に深層水循環のスイッチのオンオフで引き起こされたということ。最後に、南半球には、その信号がどっちかという逆転するような形で影響していること、をお話ししました。

ということで、幾つものサブシステムが複雑に絡み合っ急激な気候変動が起こっている、それから、その変動の伝わり方も、単純ではないということがお分かりいただけたと思います。

最後にもう一度「The Day After Tomorrow」の話に戻ります(図36)。急激な気候変の存在を古気候学者が言い出したのは、マルです。それから、北大西洋の表層水温低下、塩分低下が起こって、それがきっかけになるというのもマルですね。気候モードの大きなシフトが起こる、これもマル。

この辺からが映画のフィクションで、まあ、6～8週間で変化するというのはちょっと厳しいですね。短くて3年ぐらいです。大体映画というのは、針小棒大というか、ちょっとしたネタを10倍、100倍に誇張して大げさにやらないと映画にならないのでしょがないですけど。それから、竜巻は、これはどうして竜巻が出てきたのか理解できないんですけど、証拠全くないし、普通に考えると、現在より温暖化しないと竜巻が増えないですから、まあ、ついでに入れてしまえということだと思います。それから、津波もバツです。ただし、氷床崩壊でローカルに津波が起こることはあり得ますね。あと、このストームが過ぎたら氷河期というもの何か理屈がわからないですね。多分、これだけだとちょっとインパクトが少ないから、ほかの温暖化に関係した変動も全部入れて派手にしてしまえということだと思います。それから、予測モデルが当たらないというのは、一今ここにモデルをやっている人いないですよ。ね。(笑) 一かなり正しいと思うのですけれども、これはどういうことかということ、現在の天気予報や何かのモデルというのは、基本的に観測データを基にチューニングしているのです。だから、状況がある範囲を越えたところでどういうサブシステムがどう動くかという要素は入っていないのです。

「古気候学者」が言い出した	○
北大西洋海流の水温低下、塩分低下	○
気候モードの大きなシフトが起こる	○
気候モードシフトは6-8週間で起こる	×
竜巻の頻発	×
津波	×
Stormが過ぎたら地球は氷河期	×
予測モデルはあてにならない	△

【図36】

最近、IPCC などでも、古気候のことを重要視し始めたのは、それから、モデルをやっている人たちが非常に重要視し始めたのは、我々の今までの経験や観測で分かっているところを越えたところで、どういうサブシステムがどういうふう動く

かを知ることができるからなのです。だから、古気候のデータを基に、それを再現する実験が盛んにはじまっています。通常天気予報のモデルを使っても再現できないわけですから、それを再現するためには、いろんなサブシステムとそのメカニズムを入れなくてはいけないのです。そういうものを入れることによって、自分たちの知っている範囲を越えたことが起こったときにもモデルが少しでも対応できるように、チューニングを一生懸命しているということなのです。

### おわりに

- 地球には、様々なサブシステムが存在し、条件が整うと、与えられた信号を増幅する(減衰させる)役割を果たす=正(負)のフィードバック
- サブシステムは、しばしば複数の安定モードを持ち、その間でモードジャンプを起こす
- モードジャンプは、入力信号がある閾値を超えたときに急激に起こる
- 我々は、そうしたサブシステムとその性質のごく一部を知っているに過ぎない
- 従って、例えば地球温暖化に伴って、我々がまだ知らないサブシステムのモードジャンプが起こる可能性は十分ある

【図37】

終わりに、今日お話ししたことで分かっていたきたいのは、地球にはさまざまなサブシステムが存在していて、条件が整うと、与えられた信号を増幅する場合があるということです。今日はどちらかという正のフィードバックの方を多くお話ししたので、増幅する例でしたけれども、逆に、押さえる働きをするサブシステムもあるわけです。それから、サブシステムというのは、しばしば複数の安定モードを持っていて、安定状態がその間をジャンプする性質を持っていることです。モードジャンプというのは、その入力信号があるしきい値を超えたときに急激に起こります。例えばCO<sub>2</sub>を徐々に上げていったときに、それに平行に温度が上がっていくかということ、必ずしもそうとは限らないのです。あるしきい値を超えるとバツと上がる場合があり得るし、その逆もあるかもしれないのです。

それから、私たちは、そういったサブシステムの存在や、その性質のごく一部を知っているに過ぎないのです。まだ知らないものがたくさんある

ということです。したがって、これはちょっとあおるようですが、地球温暖化に伴って我々がまだ知らないサブシステムが働きだし、それによってモードジャンプが引き起こる可能性は、少なくともゼロではないのです。逆に、ひょっとしてすごく運がよければ、これから負のフィードバックが働いて、CO<sub>2</sub>を上げてもしばらくは安定するかもしれないですけど、どっちかという、正のフィードバックのほうがあるような気がします。

ともかく重要なのは、気候モデル屋さんも含めて、全部を知っているわけではないのです。だからこそ、もう少し違う条件という事で、今までは割に近い過去の方が現象を正確に把握できるので、その研究が多く行われていたのですが、近い過去にはCO<sub>2</sub>が非常に高い状態というのは存在しないのです。しかし、もう少し古くまでさかのぼるとあるのです。だから、最近、そういう古い時代の極端な変動の再現を始めているのです。

ただ、古い過去まで行くと、例えば大陸配置が違ったり、植生が違ったりしますから、結果をそのまま応用はできないのですけれど、古い過去を探ることによって、我々が知らないけれども、これから重要になるかもしれない、急に出現するかもしれないサブシステムとかフィードバックが見つかる可能性があるのです。それで、そういうところを最近研究し出しているということです。これで本日は終わりです。(拍手)

司会者：はい、どうもありがとうございました。今日は、「The Day After Tomorrow」の世界ということで、映画を見ていただいた方の中で、いろいろ質問があると思いますので、いろいろな質問をぜひしていただけたらと思います。どうでしょうか。どうぞ。

会場：すみません、大変基本的なことで恐縮なのですが、最初の話で、気候変動が起こるときに、数年で温暖化をして、寒冷化が徐々に起こって、寒冷化がバンと急激に起こるといった説明があったかと思うんですけど、この温暖化するタイミングで氷河が流れているのか、寒冷化するタイミン

グで氷河が流れているのか、どちらになっているんですか。

多田先生：寒冷化が起こって氷床が成長して、崩壊して、崩壊が終わると温暖化が起こるのです。その図がどこかにあったのですが。これはちょっと氷山の流出から始まっていますけれど、これにより深層水循環が止められて、しばらく寒冷な状態が続くのですけれども、実は先ほど、この前から寒冷化が始まっているということをお話ししました。氷山流出の前から寒冷化が始まって、氷山が流出して、一番寒冷な状態になるのです。これからはしばらくは循環が止まるのですが、氷山が流れるときが一番淡水を供給するときなのです。水まき実験の結果を見ると、氷山の流出が終わると温暖化に向かいます。要するに流出が止まると塩分がどんどん上昇してきて、また沈み込みが再開するのです。シミュレーションによるとここまでの時間が2~3百年ぐらいなのです。

会場：急激に寒冷化するということが、このタイミングで？

多田先生：寒冷化の始まりは、タイミング的には、氷床崩壊より前だと思いますね。ただ、急激な寒冷化は、氷床の崩壊と深層水循環の停止により引き起こされたと考えられます。

会場：そういうことですか。わかりました。ありがとうございました。

司会者：いかがでしょうか。どうぞ。

会場：2点ばかりお伺いしたいのですが、酸素の存在量、同位体の存在値が、その時代の温度を示すというのが、ちょっと非専門の私にはよく分からなかったのが1点でございます。それから、もう1点、氷床が成長と崩壊を繰り返している過程で、今人為的なCO<sub>2</sub>濃度が徐々に徐々に増えていって、それが何らかの氷山を解かすきっかけになるのかなとぼんやり思ったのですが、まあ、いろ

んなさまざまなモードがあり、サブシステムがあるということなので、安易にそんなことを考えない方がよいのかどうか、コメントをいただければと思います。

多田先生：はい。氷床の酸素同位体というのは、雪の酸素同位体なのですけれど、それは気温が低いほど、軽くなるのです。これは、水蒸気と、水蒸気から晶出する雪との間の同位体分配が温度に依存していることが原因なのです。ただし、酸素同位体比を変えるのは、温度だけではなくて、水蒸気の供給源も実は影響しています。今日は温度で全部説明しましたけれども、この変化は、ここで15℃と書いてあるのですが、今言ったような同位体分別だけで説明すると、10℃ぐらいなのです。更に水蒸気の供給源の変化を考慮すると、もっと大きくて15℃ということが、その後分かってきたのです。ちょっと専門的な話で分かりにくいかもしれませんが、よろしいですか。

それから、2番目の質問を忘れてしまったのですが、すみません。

会場：氷床が成長したり、崩壊したりを繰り返している。長い年月の間に繰り返すのでしょうか、今、人為的なCO<sub>2</sub>濃度の上昇が叫ばれておりますが、これによって成長した氷床が解けだすきっかけになるのかなという、ちょっとぼんやりそんな、それが淡水の量を増やして深層水の流れに大きく影響する危険性もあるのかなと思ったんですが。

多田先生：はい、分かりました。温暖化に伴って、まずグリーンランドの氷床が今縮小している、これはもう間違いない事実です。ただ、グリーンランドの氷床が今縮小していることによって淡水が北大西洋に供給されますよね。それが、先ほどのお話の北大西洋深層水を止めるかという、その量には到底達しない。だから、止まることはないと思います。そういう意味では、「The Day After Tomorrow」は間氷期の条件で北大西洋深層水を止めるという話なので、そこはうそですね、多分。氷期の条件だと、それだけ大きな氷床があって、

それが崩壊して淡水が融け出るから止めることができるのですが、グリーンランドの場合は、今融けているのは割と小さな氷床なのです。だから、全体が一気に崩壊するわけではどうもないので、今のところは大丈夫だと思います。もっと進行するとわからないですけれども。だから、間氷期の条件で、深層水循環が止まるかっていうと、なかなか止めるのは難しいというのが、多くの人の考えだと思います。

実は氷床の崩壊だけを考えると、西南極の氷床の方が崩壊の危険性が高く、人によって意見が分かれますが、過去の間氷期で西南極氷床が完全に崩壊していたことがあるという証拠も幾つかあります。ですから、温暖化に伴って西南極氷床が一気に崩壊するという事はあり得ると思います。そうすると、海水準の上昇はかなりありえます。西南極氷床が全部崩壊して4mですから、一、二メートルがいいところかもしれないですけれども、一、二メートルでも冗談ではないですよ。だから、そういう意味じゃ、危険性はある。IPCCでは、今までは海水準の上昇は基本的に温度による水の膨張しか考えていなかったのですけれども、前回から氷床の崩壊を考えだしまして、次回の報告では、それがもう少しきちんとした格好で入ると思います。だから、氷床の崩壊過程とかメカニズムとの解明というのは、今一生懸命専門家が観測をして、より正確に予想ができるような情報を得ようとしているところです。その崩壊の前に間に合うといいですけどね。(笑)温暖化で問題になることは、もちろんたくさんありますけれど、僕は海水準というのはかなり深刻な問題ではないかなと思っています。それでよろしいですか。

ただ、南極の場合は、崩壊しても深層水の形成の場所には淡水が出ないので、深層水循環にはそれほど影響はないと思います。しかし、海水準にはかなりの影響が出ると思います。はい。

以上