

インタビュー

② 空の話

気候システムと
エルニーニョ

筑波大学教授

安成 哲三



安成 哲三(やすなり てつぞう)

昭和22年(1947)山口県下関市に生まれる。

昭和46年(1971)京都大学理学部卒業。

京都大学東南アジア研究センター助手を経て、現在、筑波大学地球科学系教授、専門は気象学・気候学、理学博士(京都大学)

気候は地球の大きなシステムとして常に動いている

私の専門分野は温暖化や異常気象の仕組みや見通しを含めた、地球環境の研究です。より範囲を狭めると気象学で、モンスーンの研究と気候変動が中心です。気候の短い変動では特にエル・ニーニョの発生のメカニズムについて調べています。

地球の気候問題というのは、大気だけの問題ではありません。大事なことは大気と水、それから陸の上には生物がいたり植物が生えていたり、そういうものが全部、相互に作用しながら一つのシステムをつくっていて、その中で気候の変動が起こり、地球の温暖化も起こっているということです。です

から、これからの気象学というのは、空の話だけでは駄目です。特に大事なものは、エル・ニーニョやモンスーンの変動などに見られるような大気と海と陸の相互作用を探っていかなければならないと思います。

海と大気、それから陸のプロセス、特に雪氷と生物圏、これらがいろいろな時間スケールで絡み合って、気候の現在の状態がつけられ、変動が起きている。それをちゃんと解明しないと、最近の温暖化の問題もはつきりしません。CO₂などの温室効果ガスが年々増えているのも確かですが、本当にCO₂が増えた結果は、今言ったような気候をシステムとして把えて、システムの応答として調べる必要があります。そういう意味では、私がやっているのは気象

学・気候学というよりも地球気候システム論です。学と言ってもいいのかもしれないけれど、そういう分野ができてきつつあります。

もっとタイムスケールを長くすると、何億年ということになります。そうすると、上田先生が言ったように、プレート・テクトニクスと地球の気候が関係してくる。例えば、恐竜時代は非常に暖かかったと言われています。今の北極も熱帯、亜熱帯の植物が生えていた。明らかに、現在と過去は海陸分布が違います。海陸分布が変わると、地球の気候も変わるわけです。

もう一つは、いわゆる火山活動が現在と過去とは違う。火山活動によって、大気中に放出されたCO₂や水蒸気量が変わりますから、それによっても

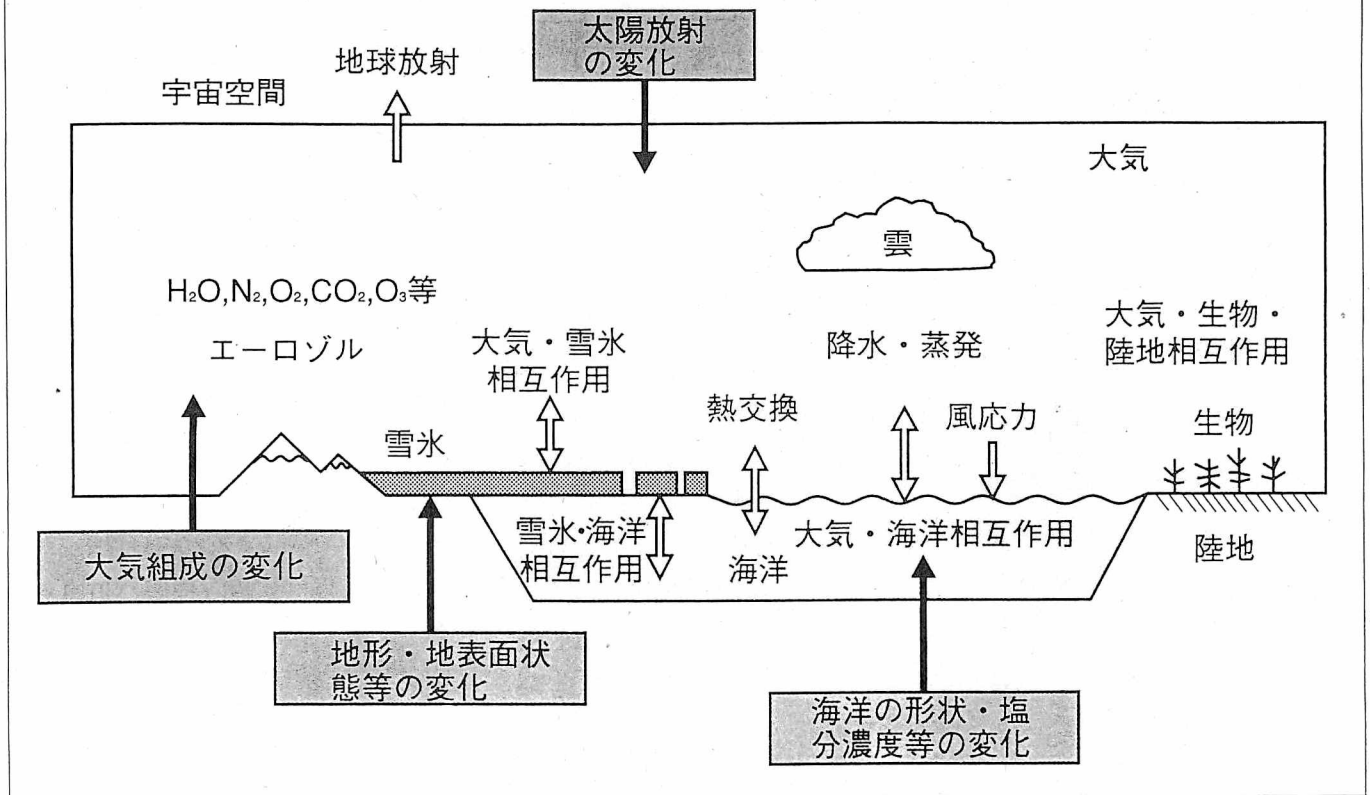
地球の気候は違ってくる。気候が変わると、当然、生物も変わる。こういうことがあるわけです。

現在の長期予報にはつきりした根拠はない

今、一番関心を持っているのは年々の気候の変動です。いわゆる異常気象と言われていますが、その異常気象がどういうメカニズムをとっているのか、それがわからないと、なかなか予測ができないわけです。

気象庁には長期予報課というのがあって、そこで来月の天気予報とか、今年の冬はどうなのかということや、一応仕事として出しているわけです。しかし、その根拠がはつきりと確立して

図1 大気—海洋—降水—雪氷から成る機構システムの概念図
 ⇔ はシステム内相互作用（内因、 → は外因）



いないんです。そういう意味では、今の段階で長期予報をやるというのはそもそも無理なんです。

世界各国で大気の観測をずっとやっているわけですけど、それだけではなくて、海はどうなっているとか、陸の雪や解氷とかがどういう具合に変動しているか、そういう情報を全部含めないといけない。それは単に気候の指標というよりも、例えば、ある年に大陸で雪が平年よりも多いとしますと、雪が多いと、雪がないところと比べて太陽の反射率が大きいですから、それだけ大気の地球のシステムに入ってくるエネルギーが減るわけです。減るから、それだけ地球の大気の気温が下がる。下がると、また雪の量が増える可能性がありますがあるわけで、そうすると、ますます寒くなるということです。こうした気候変化の仕組みの流れをフィードバックと言います。

一方で、別のフィードバックもあるんです。気温が下がると大気中の水蒸気量が減りますから、むしろ雪の量が減ることもありうる。いろいろなフィードバックがこの気候システムの中にあるわけです。それを一つ一つ解明していかないと、本当の意味の異常気象とか気候の変動の仕組みはわからないんです。

今、気象庁のデータなど、世界的に蓄積している気候のデータは大気の状態を示すデータなんです。これは、か

なり蓄積されています。気温とか降水量とかは百年ぐらいのデータがあります。それでもいろいろな問題があつて、海洋上のデータがないんです。地球の表面の三分の二は海洋です。海洋上の気温のデータとか雨のデータとか、これはまだほとんどないんです。陸の上で測っている分だけでいろいろと言っているわけです。

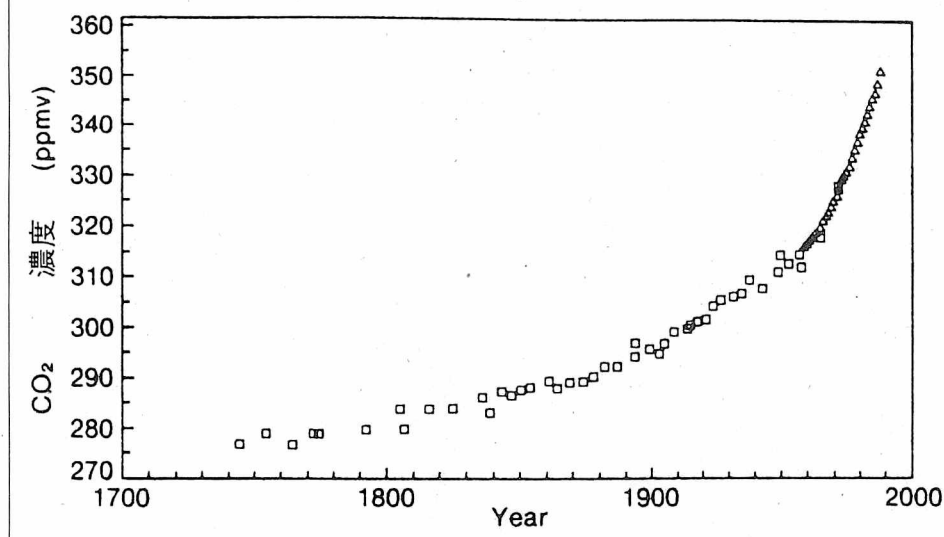
今後の気象学は気候システム全体を見つめていかなければいけない

最近、地球の気温が上がっているという話がありますが、その根拠がどこからどうやって出てきたかというところ、基本的には三分の一しかない陸の上の気象観測網のデータを見て判断しているんです。

もう一つは、海水温が商船によって測られてきているんです。そのデータが百年ぐらい蓄積されていて、その海水温を気温にぬり変えてやってみると、やっぱり上がってきている。

気温の変動そのものも非常に不確定なところがありますし、観測値そのものも不確定な要素があります。さらに、上昇しているメカニズムとなると、確かにCO₂は増えている、気温もあやしいけれど恐らく上昇している、ただし上がったたり下がったり、両方はなんとなく関係がありそう、その程度なんです。

図2 過去250年間の南極の氷にとじ込められた空気中のCO₂濃度の上昇度



しかし、CO₂は温室効果を持っているということがはつきりわかっています。一九五八年からハワイでCO₂を観測したデータを見ると、ずっと上昇してきています。もっと遡れば、図2は一七〇〇年からのグリーンランドや南極にある氷のなかの空気中のCO₂を分析したものなのですが、確かに産業革命の頃からだんだん上がってきている。

だから、CO₂は確かに増えている。CO₂は温室効果ガスだということになっていきますから、当然、温度も上がってきているだろうという推測があるわけですが、これは過去百年間の気温、地上の気温が中心で、グローバルに平均したらどうなっているかということです。確かに一八六〇年、一九九五年、こういう具合に上がってきているんです。特に、最近の一九八〇

年以降の上がり方は非常に顕著です。温暖化がやかましく言われているのは、まさにこのせいなんです。考えてみたら、この辺はかなり信頼性が豊かですけれども、一九〇〇年代の初めとか、この辺はかなりあやしいデータなんです。しかも、このカーブとCO₂の増加というのは、上昇傾向という意味では一致しているけれども、それ以外の一致はあまりないんです。ただポテンシャルとして、温暖化が起こりつつあるのではないかということでは、かなりい

ろいろな証拠が出てきている。

それから、八〇年代になって上がってきています。これは一九九四年の気温が、三〇年間の平均に対してどれだけ高いかということなんです。一番上がっているのはどこかというと、ユーラシア大陸、シベリア、それからアラスカの辺り、それから熱帯の海なんです。特に著しいのはシベリアと北米大陸の一部です。なぜここが上がってきているのかという問題があるんですが、これもまだちゃんとした答えが得られていません。

雪が減ってきているという別の証拠もあります。雪が減ってくると、さっきの効果(アルベド効果)で、要するに反射率が減ってくる、それだけ吸収する太陽エネルギーが増えますから、ますます暖かくなるということです。雪があることによって気温が低くなり、なくなることによって高くなる、そう

いう側面があるわけです。しかし、それもちゃんとしたメカニズムがわかっていないんです。

そういうことを考えると、これから気象学、気候変動の研究というのは、気候システム全体をちゃんとモニターすることが大事です。それから、そのプロセスをきちんと調べる。それから、それを理論的に解明してモデル化して、予測につなげるということです。

エル・ニーニョが日本の気候に与える影響のメカニズム

エル・ニーニョという語がよく問題にされますが、これは数年周期で起きる非常に顕著な気候の変動現象です。特に日本の天候は、エル・ニーニョが起これると暖冬になるとか冷夏になると言われています。そういう意味で、



気象庁もエル・ニーニョがどう起こっているかということに非常に注意をしているんです。気象庁はエル・ニーニョ監視センターをつくりましたが、ここでは主に海のデータを集めて予報の役に立てようと進めています。

地球の南半分はほとんど太平洋が占めています。普通の地図で見ると、太平洋を大きく思わないんですが、本当はほとんど地球の半分が太平洋なんです。特に赤道太平洋が大きい。この大きな海洋部分の水温がどういう変動をするかは、地球の気候にとって非常に大きな問題なんです。赤道だから一番太陽エネルギーが強く、海水温が高いんですけれども、ではペルー沖とインドネシアの付近では同じ水温かというと、実はすごい水温差があるんです。インドネシアの西太平洋の辺りが大体三〇度、ペルー沖は二〇度で、一〇度の温度差があります。その水温差は時々崩れるんです。崩れて、温かいところが移動して総体的に差がなくなる、これがエル・ニーニョなんです。

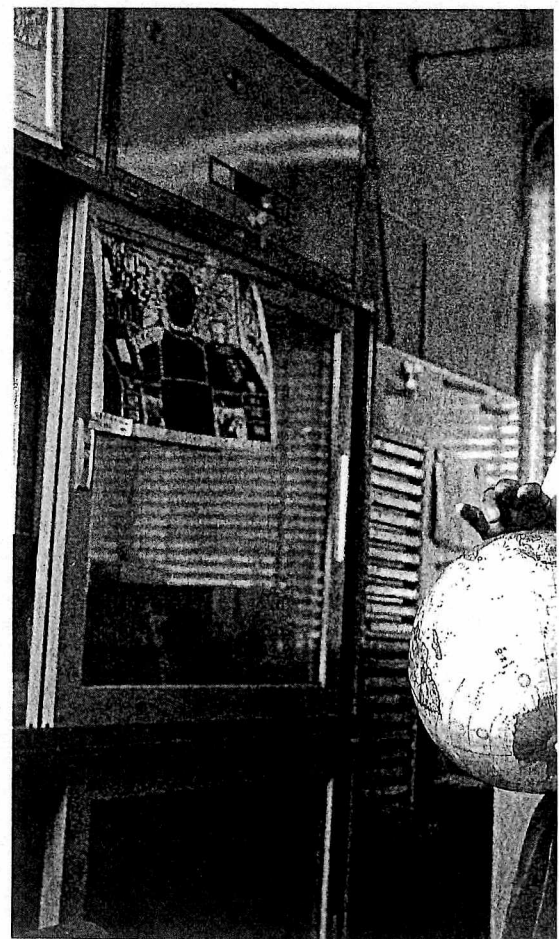
海水温が温かいと、それだけ大気中の水蒸気量が増えるし、大気不安定になって、雲が起こりやすいんです。普段は温かいところに雲があるんです。二八度を超えると、途端に雲が増えます。普段、冷たいところはほとんど雲がないんです。ところが、エル・ニーニョが起こると、温かい海水温が冷たい方に移動しますから、水温に伴って

雲が移動してくるんです。それがどんな影響を与えるのか。この偏西風の下降パターンを変えて、場合によっては日本に異常気象を引き起こすことになるんです。それが数年周期で起きるわけです。

エル・ニーニョは気候システムのゆらぎ

一九八〇年頃から、TOGA(トロピカル・オーシャン・アンド・グロブアル・アトモスフィア)という有名な国際的なプロジェクトが設置され、世界の気象学者と海洋学者が一緒になって研究してきました。そのプロジェクトの研究でわかってきたことは、一つは、海が大きな役割をしていて、海の中でそういう数年周期の海水温の変動が起こり得るということでした。

これはアメリカの海洋学者が中心になって出してきたんですが、コンピュータのモデルをつくってシミュレーションのモデルをつくらば、温かい温度部分が移動するというのは、一種の海の波だというわけです。波として温かい水の塊が東へ移動すると南米大陸にぶつかります。温かい津波みたいなものと考えてください。それがぶつかる、両半球の陸沿いに分かれます。それが一〇度付近までいくと、今度は別の波になって発射され、西へ戻るといふんです。ちよつと赤道から離れた



ところで、今度は別の波になって、一方をケルビン波、もう一方をロスビー波というんですが、海の中にゆっくり戻る。ものすごくゆっくり戻るんです。ゆっくり戻って、今度はフィリピンにぶつかる。フィリピンでぶつかったら、また元に戻る。これが数年周期で起こる。これが繰り返して起こっていて、大気というのは、基本的にはそれにくっついていっただけだということなんです。海水温が高いところには雲がある、冷たいところには雲はできない。そうすると、それに伴った大気の循環ができるわけです。それがエル・ニーニョに伴って崩れてしまう。

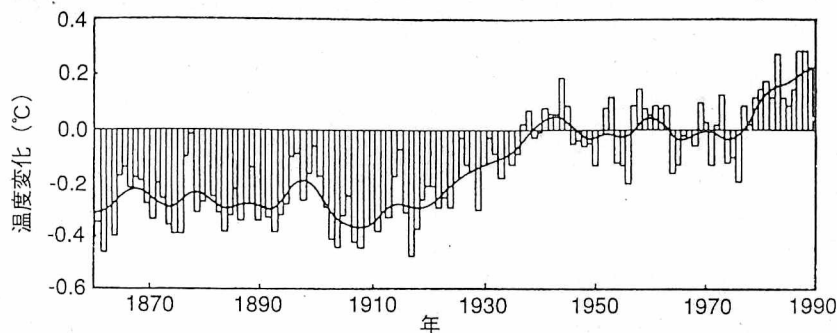
ところが、もともと赤道の西と東とで温かいところと冷たいところの分布ができています。その中に波動が生じるというわけですが、よく考えてみると、彼ら(アメリカの学者)は海の方を重視して考えているんですが、それではな

ぜ、平均としては西が温かくて東が冷たいんだ、その問題があるわけです。

これは実は大気の原因です。というのは、赤道付近は貿易風という風が吹いており、このため赤道沿いに東風が吹いています。この東風によって海が引っ張られるんです。さらに強い太陽光線が当たっているため海の表面を温めているわけです。温まったのが、東風に乗って西に流されているんです。

それからもう一つは、同時に地球は回転していますから、回転にともなう自転によってある力(コリオリ力という)が働いているんです。これは大気だけではなくありません。例えば、地面の上を車で走っていても、北半球では黙っていても進行方向に対して右の方にずれていくんです。飛行機で大阪から東京に向かっていたら、なんの力も与えずに飛んだら、方向が東にはずれていくんです。それが地球の転向力です。

図3 1861年から1989年にかけての地上気温及び海面水温を結合した全球平均温度変化。1951年から1980年の平均値を基準とする。



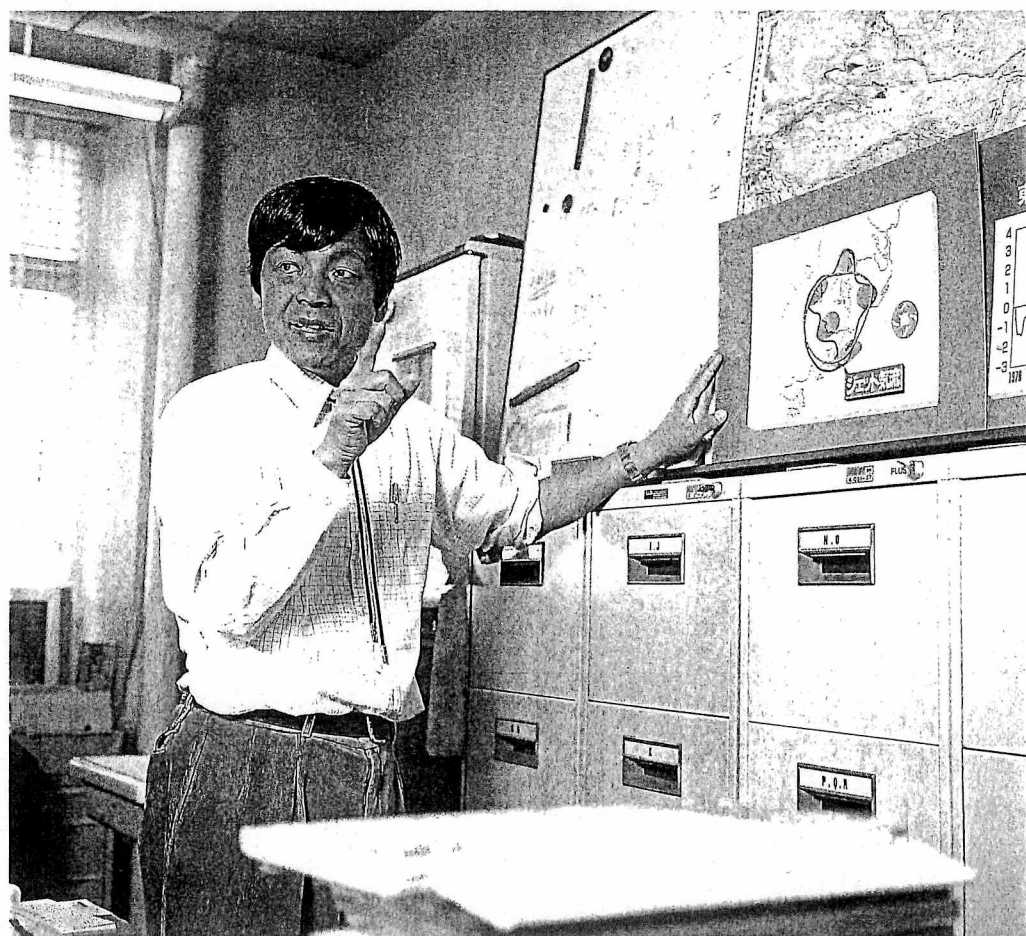
それは海でも働きます。東風によって西の方に流されると、北半球で流されている水はだんだん北にずれていくんです。南半球側に流されているのは、逆に南に行きます。ということは、東風が吹いて、それに流されると、その流れはだんだん両側に逃げていく形で流れていき、表面の水はまわりにどん

どん発散していきます。発散していくと、水は減ってしまうからどこからか補ってやらないと、水面は保たれません。それがどこから移動してくるかというところから水が来るんです。だから東風が吹くと、汲み上げが起こるんです。西風が吹くと、下の方に水が落ちる。下の水は冷たいですから、東風が吹くと冷たい水が汲み上げられて、ますます冷たくなるんです。それで、冷たい温かいの差ができるんです。

いったん差ができると、冷たいところは重たくなり温かいところは対流ができる。そうすると、一方で下降して一方で上昇する。大気の方はそれをつなぐように、結局東風が強くなる。これはプラスのフィードバックです。これが普段働いているんです。普段はその効果で、一方で上昇して一方で下降して、西で温かく東で冷たい海をつくり、それをさらに維持するような風の流れ、大気の循環ができるわけです。

そのパターンはしっかりしているんです。プラスのフィードバックでつながっているシステムというのはプラスに働いているから、その状況になるとますます強くなる。ところが、いったんそのどこかが断ち切られると、ガタガタと崩れるわけです。正のフィードバックが崩れていくんです。その崩れた状態がエル・ニーニョです。

エル・ニーニョのメカニズムを考えると、そもそもなんで太平洋の西側



の赤道付近に対流活動が起こりやすく雲が起こりやすいのか、さらに東風が吹きやすいか、そういうことで考えるんです。ここでも雲の活動が起こりやすいかというと、アジアとオーストラリアの大陸があつて、例えば夏になると地面が熱せられます、海よりも熱せられる、海から大陸に向かって風が吹く、これがモンスーンですが、この

モンスーンがあるからです。エル・ニ

ーニョがなぜ起こるか エル・ニーニョを起こすようなことがなぜ生じるかというと、西側に大陸があるからというのも一因になります。

したがって、本当にエル・ニーニョのメカニズムを把握するのが、アジアのモンスーンの変動のメカニズムも分析する必要があります。アジアのモンスーンとエル・ニーニョを起こすものは一体だ、というのが我々の主張なん

です。今、その方向で研究をしています。

海のベルトコンベアーが地球の気候を安定させる

海の流が気候システムを形成する大きな要素となるという話として、海洋ベルトコンベアーという現象もあります。(図4)これは暖かいメキシコ暖流が活発な蒸発を行いながら北大西洋で非常に塩分の高い海水になり、高密度になって海洋の深い部分に潜り、北太平洋で再び表層の部分に出てきてまた大西洋の方に流れていくという循環を繰り返す現象をいいます。これが現在の北大西洋地域とヨーロッパの比較的暖かな気候をつくりだす基になっているのです。

しかし、北大西洋で海水の蒸発が減ったり降水量が増すなどのことがあるとこの流れを止めてしまうんです。すると、暖かい海水の流れもなくなり、北大西洋やヨーロッパは一挙に寒冷地となってしまう。すると、現在北半球にあるグリーンランド氷床は拡大することになり、全地球的に寒冷化が起きます。

そうすると、海面の低下が起こり、それがある臨界値以上に達すると再び海洋表層面での塩分濃度が高くなる何らかの原因が生まれ、再びベルトコンベアーが動き出すことになります。そして、急激な温暖化と氷床の縮小が起

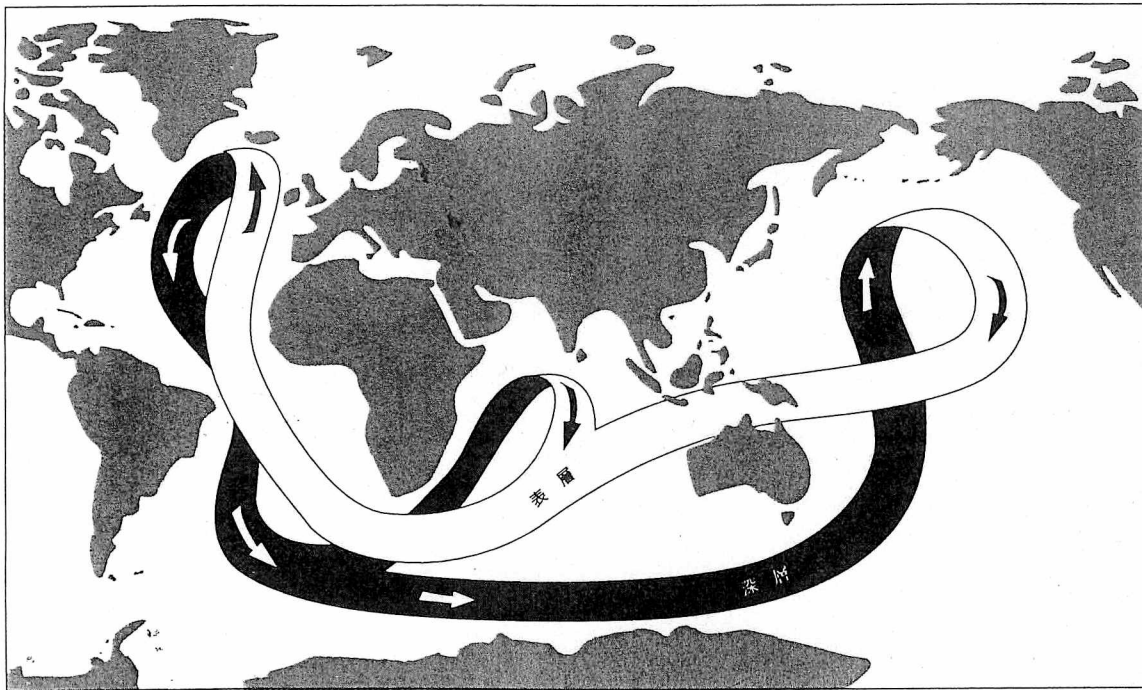
きます。

このように寒冷化と氷床の拡大氷期(温暖化と氷床の縮小(間氷期))がこの地球では一定したサイクル、現在ではおよそ一〇万年のサイクルで繰り返

されています。

このような、気候システムの、いわば内部メカニズムによるサイクルの説明に、外部メカニズムとして、旧ユーゴスラヴィアの地球物理学者ミルーテ

図4 海洋のベルトコンベアー循環像 (Broecker et al., 1958:Nature, 315, 21-26.)



イン・ミランコヴィッチが提唱した「三つの天文学的要因の変化」という考え方があります。三つの要因とは、「自転軸の歳差運動」「公転面に対する自転軸の傾き」「公道軌道の離心率」です。最初の歳差運動というのは地球の自転軸が指す方向が微妙にずれてしまうこととです。この三つの要因は他の惑星の引力などの影響でそれぞれが約二万年から一〇万年の周期で変動してきているんです。

三つの変動がそれぞれ複雑に組み合わせられて地球に届く日射エネルギーが変化してきます。そして、北半球の高緯度地域の夏の日射量が極端に少なくなつたときに氷期への変化が起きているわけです。ミランコヴィッチの唱える日射量の変動も氷期・間氷期のサイクル一〇万年とだいたい対応しています。その他にもヒマラヤ山脈やロッキーマ脈の上昇が気候システムの変化に関係している説も出てきています。要するに、こうした大きな山脈が偏西風の流れを変えることによって北からの冷たい空気が南下しやすくなって北半球の氷床を拡大させて氷期になるという考え方ですが、これなどもコンピュータを使ったシミュレーションによってかなり具体的に証明できるようになってきています。

このように複雑な気候システムに、最近では人類の活動が影響を与えつつあるわけです。