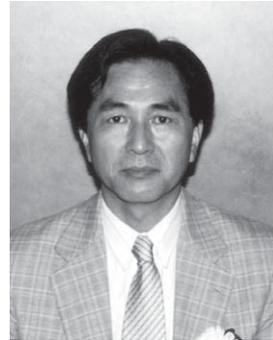


エルニーニョの科学

東京大学大学院理学系研究科教授 山形 俊男



ただいまご紹介いただきました東大の山形と申します。皆さんお疲れだと思いますが、エルニーニョに関して1時間くらいいろいろお話しさせていただきます。昨年から今年にかけてエルニーニョの問題がずいぶん騒がれて、皆さんも関心が非常におありだと思います。図1は、ずいぶん昔の話、1982年の写真ですが、カリフォルニアで大洪水がありまして、人が流されています。今回のエルニーニョにおいても、カリフォルニア近辺では洪水などの水害があったということが、マスコミなどで盛んに報道されています。

太平洋の東岸の方がこのように非常に湿気に富む状態になってしまい、それが行き過ぎで洪水になるということです。つまり、通常は太平洋の西岸が湿気に富む状態にあるわけですから、反対の状態になっているということです。

一方、1982年のオーストラリアの方の状況を見ますと、通常は大きな湖があったような所でも、それが干上がってしまっていて、もともと湖に沈んでいた枯れ木が露出してし



All Valley, California, 1982. (Photo by Steve Skow/PRI)

図1 1982年のエルニーニョ時にカリフォルニアで発生した洪水

まうようなことが起こりました。太平洋の反対側、西の方は、このように非常に乾いた状態になってしまったということです。

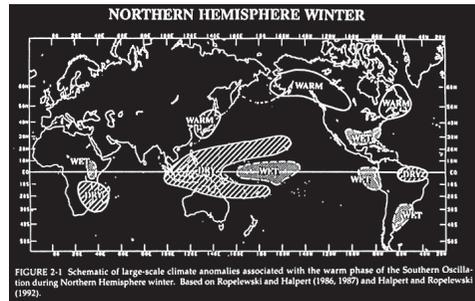


図2 北半球が冬の時のエルニーニョの影響

図2は、エルニーニョが全世界にどういった影響を及ぼすかということについて、これまでの長い統計に基づきましてまとめたものです。エルニーニョが起こりますと、オーストラリアのあたりが非常に乾燥することがわかります。太平洋の真ん中あたりが非常に湿気に富む状態になることも示されています。

それからペルーのあたり、ソマリアの付近も雨が多くなります。日本の冬が暖かくなるという話も皆さん新聞などでよくご存じだと思いますが、統計的には確かにそのようになっています。この様にいろいろなところに影響が及びますが、赤道太平洋におけるものはエルニーニョの直接的な影響とすることができます。

エルニーニョがどういったメカニズムで生まれ、どのように成長し、どのように減衰、終息していくのかといった問題に関しては、

1980年のはじめ頃から急速な展開がありました。マスコミではそこまではなかなか取り上げてもらえないわけですが、かなりのことがわかってきたと言えます。こうなりますと、めでたし、めでたしといくかなとお思になるかもしれませんが、科学というのはある段階のことがわかりますと、更に新たな問題が生じて来ます。その新たな問題とは何か。それは、前半の野崎先生の話とも結びつくことになると思います。本日の講演ではその辺に關しても新しい知見をご紹介したいと思います。

これからお見せる図には若干難しそうなものもありますが、できるだけかみ砕いてお話ししたいと思います。まず、この図3はペルーの付近の海水温の変動を示しています。南米沖の海面水温の長い年月の変動を平均して描いたものです。実線はエルニーニョと言われる異常現象が起きた場合、点線が通常の状態、エルニーニョの前後の年も加えて3年にわたって示してあります。

通常の状態でも、必ず12月から1月頃に、ペルー沖では水温が上がります。そのためにエルニーニョという言葉が生まれました。英語では、ザ・チャイルドということになります。スペイン語では女性形と男性形がありますので、男性形の表現になっています。ザ・

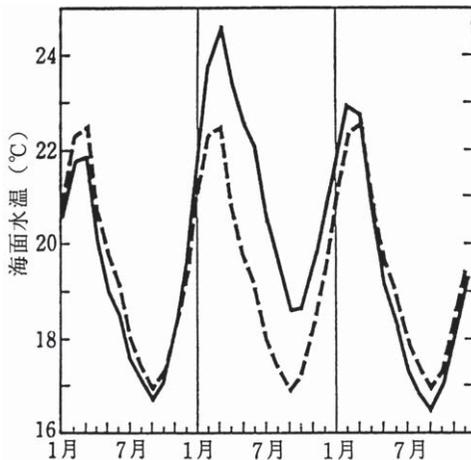


図3 南米沖の海面水温 (破線)季節変動 (実線)エルニーニョ現象の平均

チャイルドというのは特定の子供ですから、これは何を指すのかというと、12月に生まれたイエス・キリストのことです。いつも決まって12月頃に水温が上がり、それが数年に一度大きく上昇します。この数年に一度起こる現象の方を、現在はエルニーニョ現象と呼びます。日本では「現象」という言葉を付けて、毎年起こるエルニーニョと区別しています。ふつう海外では、どちらもエルニーニョと言ってしまう。

このように、エルニーニョというのは本来は季節変動を指す言葉だったのですが、現在ではどちらかというと異常現象として、数年に一度のエルニーニョ現象が取り上げられることが多くなりました。新聞、テレビなどではよく異常気象現象と呼ばれますが、われわれ海洋学者から見ると、気象現象と言われるのはちょっと困ることもあります。言葉のもともとの意味は季節変動であり、それはペルーの漁師、あるいはスペインの征服者たちが付けた言葉です。世界史の話になりますが、1531年にピサロがペルーを征服しました。その時はたまたま巨大なエルニーニョ現象が起きた時で、砂漠に植物が繁茂していたので、騎馬隊がどんどん奥地まで進軍できたという記録があります。このように、エルニーニョという言葉には二つの意味があります。しかし現在では経年変動、数年に一度起こる大きな現象を指すようになっていきます。

図4のようなものをわれわれは時系列と呼びます。横軸が時間で、この場合は1890年から1980年頃までを書いてあります。縦軸にはそれぞれ違った物理量を描いています。一番上は赤道太平洋の海面水温で、それが上がったところに印を付けてありますが、これがエルニーニョに対応しています。2番目が中央部赤道太平洋における降雨量です。降雨量がエルニーニョに対応して変化していると言えます。この雨というのは、気象の方の情報になります。3番目はダーウィンというオーストラリアの北の方の町の地上で測った気圧です。したがって、これも気象の方の量に

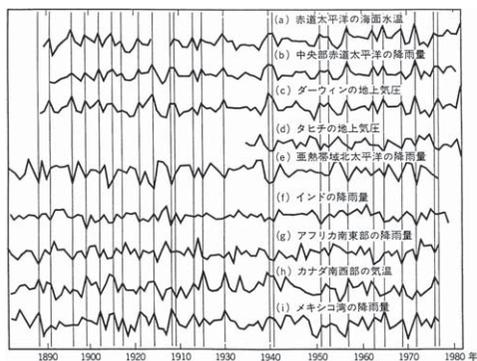


図4 エルニーニョ現象に関する様々な時系列

なります。その下が太平洋の東の方にある島、タヒチで測った地上気圧です。

面白いことに、ダーウィンの地上気圧はエルニーニョが起こると正の偏差（ずれ）を示しています。本来、ダーウィンのあたりは気圧が低く、そこに東から貿易風が吹き込んでいるのですが、その低い気圧の度合いが少し弱まるわけです。したがって、本来の状態から見ると気圧が少し上がった、正のずれが起きたということをこの図は示しているわけです。一方で、タヒチの方はエルニーニョの時には逆に気圧が下がります。ちょうどダーウィンのこぶがタヒチの谷になっていますが、エルニーニョの時にはこういう妙な状態になるわけです。この奇妙な大気圧の振動を「南方振動」現象と呼びます。

そのほかいろいろなところにエルニーニョの影響が出てまいります。特に興味深いのはインドの降雨量です。インドでは夏の雨は非常に重要で、昔は雨が降らないと干ばつ、飢饉が必ず起こりました。この図は、インドの雨とエルニーニョは非常に関係しているらしい、ということも示しています。

1891年に大きなエルニーニョがありました。その時に、ルイス・カランザというリマの地理学会会長だった方が、ペルー沖のフンボルト海流の反転を伴い、異常気象現象を引き起こすエルニーニョ現象の研究の重要性を、初めて指摘しました。1899年の現象の直後にインドの気象庁長官になりましたイギリス人のウォーカー卿は、あまりにも悲惨なイン

ドの窮状、つまり1899年のエルニーニョに伴い雨が降らなくて、たくさんの方が亡くなったたりしたことを見まして、それを予報しなければいけないというふうに考えました。ウォーカーという方はそのあといろいろなことをやりまして、さきほどの南方振動現象、つまりエルニーニョを海の現象とすると、それと表裏一体をなす大気側の現象を発見することにつながった方です。

ずっと最近の話になりますが1957年／1958年にもエルニーニョがありました。これは、たまたま国際地球観測年にあたります。そのときには、カリフォルニア大学の教授で、ノルウェーから米国に帰化したビアルクネスという人（この方はお父さんも非常に著名な流体力学者です）が、大気と海洋が相互作用をしているのではないかという仮説を初めて言い出しました。赤道の上は東から西に貿易風が吹いていますが、その貿易風のために、東太平洋のあたりに冷たい水が下層から湧いています。海洋学の初歩的な理論なのですが、風が吹きますと地球の自転の影響で、北半球では表層の水はちょうど風を背にして右手の方向に吹き寄せられます。南半球では反対に左手の方向に水が吹き寄せられます。したがって、赤道の上を東から西に風が吹きますと、北半球の部分では水が北の方に吹き寄せられてしまう。南半球の部分は南の方に吹き寄せられる。そうすると下から湧いてこなければいけない、というのが赤道の湧昇の理論なのです。海面が冷たくなりますと、その上の大気は冷やされて重くなります。そうすると気圧は高くなります。赤道上では、風は気圧の高いところから低いところに吹きます。したがって、ますます東風が強くなります。風が強くなると、さきほどのメカニズムでますます冷たい水が湧いてくるでしょう。そうすると、それでますます風が強くなるのではないかと考えて、大気と海洋の正のフィードバックというものを最初に指摘したのが、このビアルクネス教授です。しかし、それを数理的に表現するには至りませんでした。

1972年にも非常に巨大なエルニーニョが起きました。ペルーは、その直前までアンチヨビー（カタクチワシ）漁によりまして、世界一の水産国であったわけです。そのカタクチワシが全く取れなくなってしまいました。この巨大な1972年／1973年のエルニーニョも、「エルニーニョの科学」の進展に大きく貢献しました。ハワイ大学のウィルツキー教授が、『エルニーニョというのは、その前段階として貿易風が非常に強くて、西太平洋のフィリピンやインドネシアの周辺に暖かい水をたくさん吹き寄せていて、何らかの理由で貿易風が弱まったために、あたかもつかえ棒が外された状態になったために暖水が西から東にどっと移動する現象なのだ。』と指摘したのです。貿易風という風系の弱まりに対する海の応答（レスポンス）としてとらえることを提唱したわけです。エルニーニョは海の現象であるけれども、それは大気現象に一方的に支配されるものとしてとらえたということです。

したがってこの段階においては、大気と海洋が相互作用する現象であるという学会の共通の認識はまだありませんでした。もちろんビヤルクネスがそのアイデアを出していたわけですが、それが気象学や海洋学において、きちんとした形で定式化されることにはならなかったということです。

少し話は逆戻りしますが、図5はエルニーニョとインドの穀物の生産がいかに関係しているかということを示しています。横軸が年代です。縦軸が穀物の生産額を示します。下図の方がエルニーニョに伴う雨の変動です。したがって、エルニーニョのときは雨が少なく、しかも穀物も取れない。全体として生産額が右上がりになっているのは、肥料とか灌漑とか人間の英知の表れによるものです。しかし、そうした中にもこういう自然の災害が影響を及ぼしているということです。ウォーカー卿が心配した時よりも事情ははるかによくなりましたが、まだそういうことが起こるといことです。

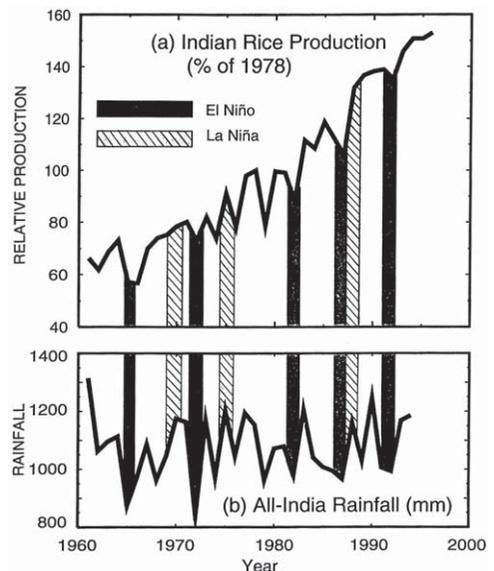


図5 インドの米の収穫量（1978年を基準とした場合）と降水量の関係

このウォーカー卿が発見したのが南方振動という現象であることは、すでに紹介しました。これは、当時は完全に気象の現象であると考えられていました。とにかくウォーカー卿は、インドに飢饉をもたらすような天候の変動を予報するために、何かよい情報はないかということのをいろいろ考えました。もちろんウォーカー卿の前にもいろいろ調べた方もいますが、象徴的にウォーカー卿の仕事ということになっています。彼は何をやったかというと、当時も気圧はわりに簡単に測れる量でしたので、この分布を調べまして、ダーウインの気圧とタヒチあたりがシーソー現象していることを見出したわけです。本来は東西振動と名付けたほうが正確かもしれませんが、振動の重心が少し南にずれているということで、南方振動と名付けました。

図6は非常に新しいグラフですが、先ほどの南方振動の様子が1980年頃から最近まで描いてあります。下の方は東太平洋の海面水温変動を示していますから、水温の高い年はエルニーニョを表します。たとえば1982年／1983年、1986年／1987年、それに今回の1997年／1998年のエルニーニョがよく見

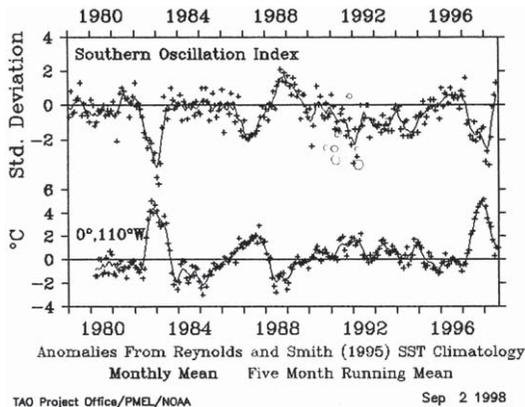


図6 南方振動指標と東太平洋(0度、西経110度)の海面水温変動

てとれます。1990年代の前半に弱いエルニーニョ的なものが続いているのもわかります。図6の上、下のグラフは実に見事に対応しています。このように、南方振動という気象の量と東太平洋の海洋の量が、見事な対応をしているのです。このことから、南方振動という現象とエルニーニョという現象が、一つの現象の二つの側面であることがわかります。言い換えますと、大気と海洋があたかも夫婦のような関係にあり、そしてその片方をエルニーニョと海洋学者は呼び、もう片方を気象学者は南方振動と呼んできたということが示唆されるわけです。

1998年の9月現在ではどんなことが起きているのだろうかという点、1997年の10月頃のエニニョのピークとは反対の状態(つまり通常の状態)に近づいています。最近ではエルニーニョの反対の現象をラニーニャという言葉で呼びます。これは、かつて私の共同研究者だったジョージ・フィランダーというプリンストン大学の教授が付けた言葉です。これにはいろいろな経緯がありました。始めはエルニーニョの反対だからアンタイ(反)エルニーニョと付けようではないかと言ったわけです。それに対しては、エルニーニョというのは宗教的な意味がありますので、クリスチャンの方々からの強い反発があったようです。エルニーニョが子供なら、もう一つのフェーズは老人と付けようと、これもわ

れわれの研究仲間のジム・オブライエンというフロリダ州立大学の教授が提唱したのですが、なかなか一般的にはなりません。老人という言葉はなかなかアピールしないわけです。それでフィランダー教授が、エルニーニョが男の子なら、女の子にしたらというのでラニーニャとなったわけです。この用語がほとんど定着しかけています。今年の8月中旬にリスボンで国際海洋年を記念する大きな会議があったのですが、そこにいろいろなエルニーニョ関係者が集まりました。彼も来まして、ラニーニャの名付け親ということで称賛されていました。

では、そのラニーニャというのはどういう状態かという点、西太平洋の方の水温が高く地上気圧が非常に低く、そこに貿易風が強く吹き込んでいる状態です。吹き込むとそこに空気の塊りが集まり、それは上昇します。吹き込む東風は、赤道域の中央部から東部に冷たい湧昇域をつくっています。したがって、ますます西と東の水温のコントラストができることとなります。エルニーニョのときは空気塊の上昇域が東の方にずれます。エルニーニョとラニーニャは、必ずしもどちらかが正常あるいは異常ということではなくて、自然の一つのシグナル、リズムともいってよいでしょう。

二つの両極端、エルニーニョとラニーニャの典型的なケースのお話をしたわけですが、その間はどうなのか。どういうふうに移りしていくのかということが重要です。その辺のことが1980年代のはじめ頃にわかってきました。この頃になると「エルニーニョの科学」の歴史に私も絡んでまいります。当時もずいぶんエルニーニョ研究が盛んにありまして、私もこの東レ科学振興会にずいぶんお世話になりました。図7はその頃、1984年に書いたずいぶん古いものです。真ん中の図は外向きの長波の放射の偏差と言うものです。地球は太陽からの短波で熱を受けていますが、同時に地球は宇宙空間に長波として熱を放出します。もし非常に丈の高い雲、Cumulonimbus

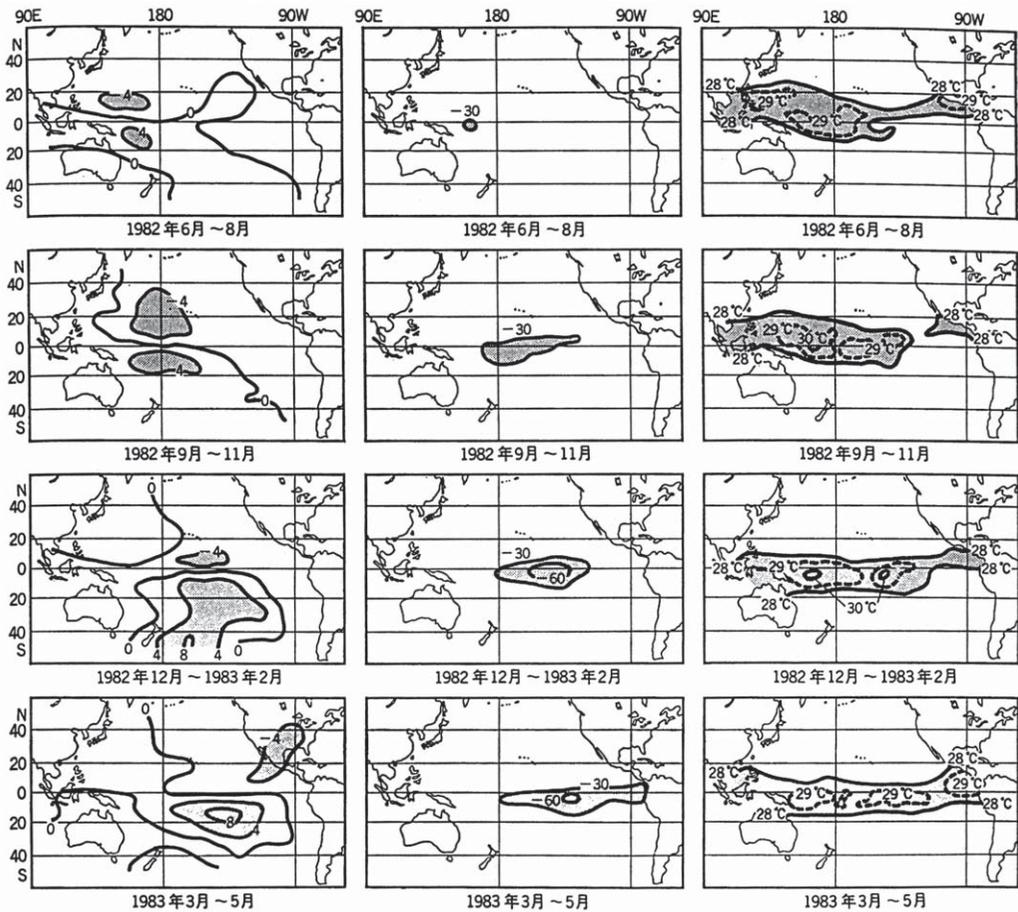


図7 (左)850ヘクトパスカル面の流線関数の平年値からのずれの時間発展
 (中)外向きの長波放射の平年値からのずれの時間発展
 (右)海面水温の時間発展

と呼ばれる積乱雲ができますと、どうしても外向きに出ていく長波が妨害されますので、偏差としては負の値になります。1982年のエルニーニョは、まず6月から8月にかけてニューギニアの東方海上に小さな負の値が出まして、それがどんどん面積を増やして西から東の方に成長していったわけです。それに伴いまして、気圧が850ヘクトパスカルあたりの下層大気中に、サイクロンの渦のペアができました。形は少しくずれていますが、それが成長しながら東の方に移動したということです。

右の図は海面水温を表します。熱帯域は全般的に高いのですが、海面水温の高い部分の重

心がやはり東の方に移動していったことがわかります。現在の気象学では、赤道に関しては海面水温が28度あるいは29度を超えますと、積乱雲が非常に立ちやすくなるということがわかっています。これを見ましても、明らかに29度あるいは30度という高温域が東の方に移動しています。図7は大気と海洋が結合して、しかも相互に助け合いながら成長していくということを明確に示しているわけです。

エルニーニョは全世界の気温に非常に大きな影響を与えます。図8の一番上のグラフは1958年から1973年までの東太平洋の表面水温で、それぞれエルニーニョに対応するピークがあります。真ん中のグラフは北半球の平

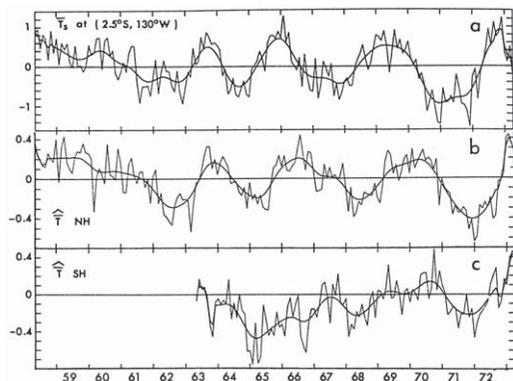


図8 (上) 東太平洋の海面水温変動
(中) 北半球の平均気温の変動
(下) 南半球の平均気温の変動

均気温です。大気の気温を全部平均したものです。この図から、エルニーニョが起きまして数カ月から半年後に、北半球の気温は上昇していることがわかります。その表れとして、日本付近は冬は暖かいとかいうことになるわけですが、このことは非常に意味があります。もしエルニーニョが頻発し、その振幅が次第に大きくなるならば、北半球の気温あるいは地球の気温は上がったように見えるのではないということになります。それが後半の話、地球温暖化の問題につながります。

こうして熱帯海洋が全地球の大気に影響を与えているということで、トガ (TOGA) という研究計画が学者によって立案されまして、1980年代の半ばからたくさんのがわかってきました。あとでお見せしますが、熱帯太平洋にはいろいろな測機が係留されています。本日の様子をコピーしてくればよかったのですが、忙しかったものですから、2~3日前の熱帯太平洋の水温の断面図をお見せします (図9)。

そういうわけで、エルニーニョと南方振動というのは非常に密接なものであり、切り離せないものであるということがおわかりになったと思います。1980年代の前半までは、エルニーニョというのは私たち海洋学者の仕事、それから南方振動を研究するのは気象学者の仕事になっていたわけですが、しかし、そ

れが1980年代の初めから気象学と海洋学の垣根が取れまして、非常に学際的な研究が生まれ、象徴的にENSO (エンソ) という言葉ができました。これはエルニーニョと南方振動のそれぞれの頭文字を取ったものです。そのエッセンスは、大気と海洋が密接につながって影響をお互いに及ぼし合い、お互い助け合って生まれる現象であるということです。

まず、海の物理というもののはどのように理解されるのだろうかということから見ていきましょう。大気と海洋を分けてしまいますと、海洋学者にとっては大気の情報 は外力になります。それには、海面における密度フラックスがあります。海の表面が冷たくなると、海水は沈み込みます。もし、非常に塩分に富む水であると、それはかなり重い海水になりますから、海の底付近まで沈降してしまいます。そうすると、1000年~2000年の時間スケールで世界の海を巡るコンベアベルトという話になります。そういう非常に長い時間スケールの現象を研究する海洋学者もたくさんいます。

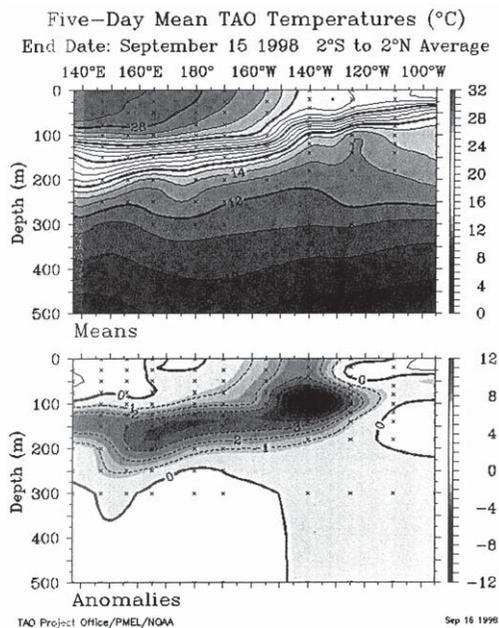


図9 1998年9月11-15日の赤道大太平洋の水温(上)と平年値からのずれ(下)

もう一つ非常に重要な外力として、大気の風が海の表面付近を駆動します。大気が運動量を海の中に与えるということです。どちらかというところ、エルニーニョというのはせいぜい数年の現象で、モジュレーションがあっても10年から20年程度のものでありますから、この風応力の方が圧倒的に重要です。

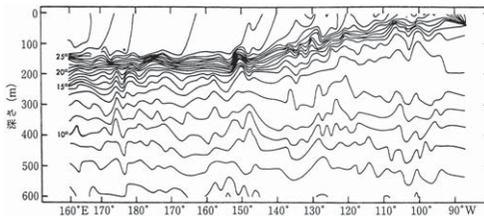


図10 赤道に沿う海水温度の断面図
平均状態を示す。

図10には、赤道海洋は平均としてどういう水温構造をしているか、ということを描きました。表面付近はだいたい同じような温度の海水がたまっています。西太平洋では、温度が急が変わるところが水深200メートルあたりにあります。これは、温度のジャンプするような層であるということで、温度躍層 (thermocline) というのが海洋学で定着した言葉になっています。重要なことは、西太平洋で非常に深いところにある、深いといっても中緯度の黒潮とかに比べるとずっと浅いのですが、水深200メートルあたりにあることに注意して下さい。それから、東太平洋では表面付近にあることが特徴的です。これは、東太平洋付近では赤道湧昇で、冷たい水が湧いているためです。少し深くなりますと、等温線はほとんど水平になりますので、あまり大気側の影響は受けていません。実際にエルニーニョに関係するのは、この上の方にある海水の話です。では、何がこういう状態をつくっているのでしょうか？。われわれ流体力学者にとって、地球の流体を考える時に非常に重要になるのは、地球の回転効果です。こういう巨大なスケールのものに関しては、地球が自転しているということが非常に重要な意味を持ちます。地球の自転の鉛直成分を取

りますと、赤道の上での自転の鉛直成分というのはちょうど地表面に直交する方向ですから零の値をとり、あたかも地球が自転していない状態になります。それから、極の方では自転そのものを感じるようになります。そういうわけで、中高緯度の海洋力学では回転流体の力学が非常に重要な役割をします。しかし、赤道においては普通の常識的な非回転系の流体力学が中心になります。

水を満たした容器を吹いてみればわかると思いますが、吹き続ければ水は吹き寄せられて下流の方にたまります。まさに、赤道太平洋はそういう状態にありまして、貿易風が東から西に吹いていますので、表面の暖かい水がかき集められて西太平洋にたまっていきます。もちろん、赤道を少し離れたところでは地球の回転の影響が利きますので、表層の水は北半球では北の方に吹き飛ばされ、南半球は南に吹き飛ばされるという三次元的な構造をしています。赤道の真上で見るかぎりにおいては、東から西に風が吹いて、暖水が西にたまるという単純な状態になっています。これは常識的な、身近にわれわれが経験するような力学でよろしいわけです。

ところが、この東風が何らかの原因で少し弱まりますと、水の高まりを支える風のつかえ棒が無くなります。風の応力と圧力傾度力のバランスがとれなくなりますので、この西側の暖水がどっと東へ移動してしまう。そんなイメージで1972年／1973年のエルニーニョを理解していたのが、ウィルツキー教授たちです。単に、風に対する赤道海洋の応答として、つまり、海洋学の問題としてとらえていたわけです。

1982年／1983年のエルニーニョの時の風系をそっくりもってきて、海の簡単なモデルに適用してやります。そうした場合には、どのくらい実際の海の水位変動が再現されるかを示したのが図11です。貿易風が弱まるということは、偏差としては西風が吹いたということになります。そのような風の偏差を与えた時に、モデルでは非常に良く水位の変

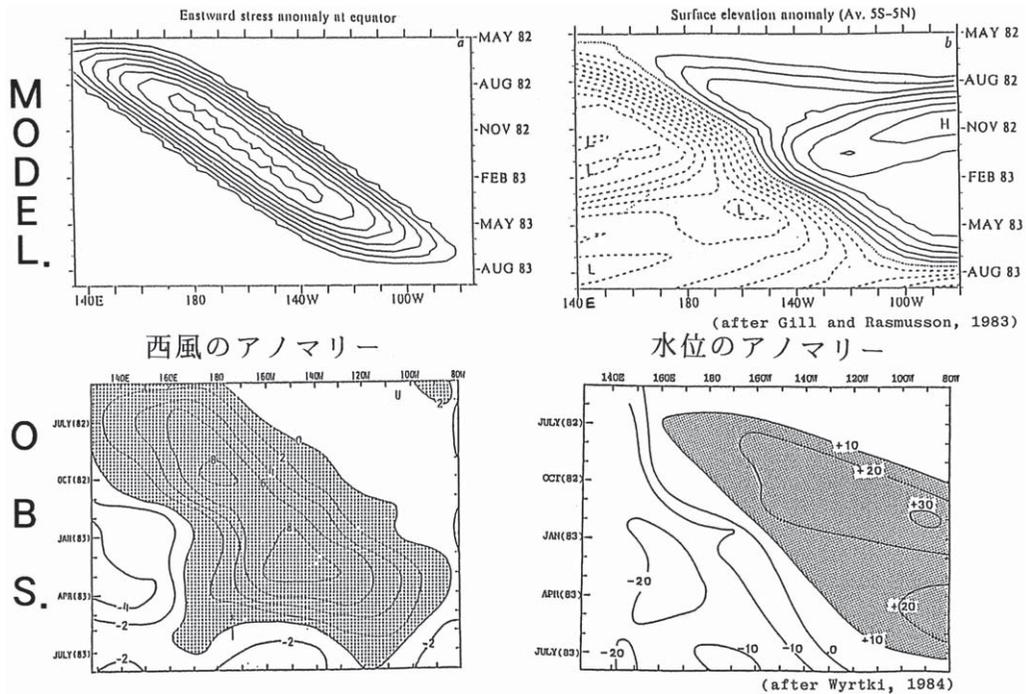


図11 (上段) モデルで用いた西風の偏差と得られた海面水位の偏差
 (下段) 観測された西風の偏差と観測された海面水位の偏差
 横軸は経度、縦軸は時間の経過を表す。

動に関して再現されています。右下図は、実際に島々の水位データを取りまして作図したものです。実際の風を入れてやれば、海のことはかなり良く再現できるということが当時でもわかっていただけです。1980年代の頃には、海の表面の凸凹を人工衛星で観測する技術はありませんでしたので、島の潮位計のデータを丁寧にウィルツキー教授が整理しまして図11の右下の図面をつくり、それに対して理論家が海洋モデルで説明したという涙ぐましい努力があるわけです。現在では、海の凸凹は2~3センチの精度で、高度計を搭載した人工衛星によって測れるようになっています。したがって、この数十年の間に観測においても著しく進展があったことになります。

それでは、大気モデルはどうでしょうか。図12をご覧ください。上の二つはエルニーニョの最盛期の対流圏の上層の流線関数、対流圏の下層の方の流線関数を描いたものです。対流圏の下層にサイクロンの渦対があること

がわかります。これを駆動するのは、上から三段目の図からわかるように、積雲に伴う加熱です。大気の熱源を与えることによって、サイクロン循環を再現できるかというのが気象学者のテーマでした。一番下段の図は、非常に簡単な大気モデルで再現したものです。これを原理的に最初に提示したのは、今は退官した松野太郎東大教授で、1966年の仕事です。今では、学部生の4年生、あるいは修士課程の1年生くらいが簡単に解けるようなものですが、熱源を入れますと、サイクロン渦対が非常によく再現されるわけです。したがって、気象の問題も非常に簡単な気象のモデルで再現できるわけで、地球の大気というのは一見して非常にごちゃごちゃしているように見えますが、きれいな室内実験のような姿を見せるときがあるということになります。

大気現象も海洋現象もそのように再現できるならば、その簡単な大気モデルと簡単な海洋モデルを結合すれば、もしかする

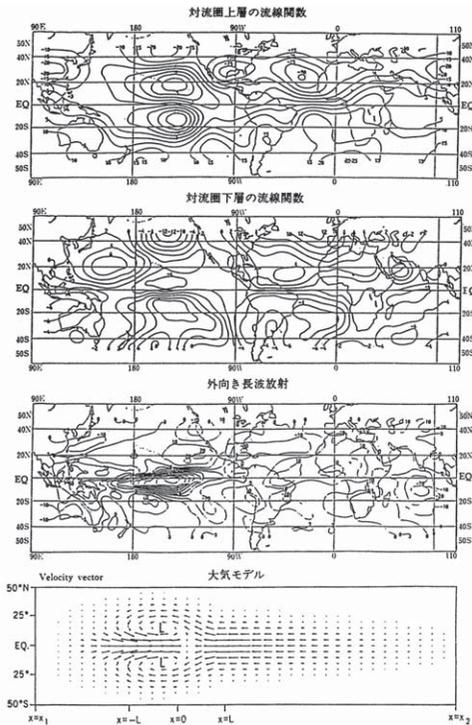


図12 上から1982/83年のエルニーニョの最盛期の対流圏上層、下層の流れ、外向き長波放射、簡単な大気モデルによる対流圏下層の流れ

と自動的に何かエルニーニョのようなものが生まれるのではないかということになります。エルニーニョが生まれたら、神の領域に踏み込んだことになるのではないかと当時、1980年の初め頃にわれわれは思っていました、傲慢なくらいに自信をもっていました。

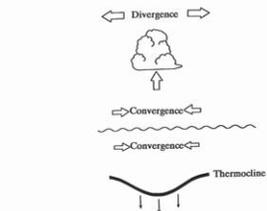
その頃に国際学会で紹介したのが図13です。海で風が吹くとますます暖かい水がたまり、そうすると海面から蒸発が活発になって上空で熱が放出され、上昇気流が活発になり、循環が大気にできます。そうすると、それは最初の風をもっと強めるので、もっと多くの暖かい水がたまるという、正のフィードバックのメカニズムがありうるわけです。ちょっと難しいかも知れませんが、大気方程式と海の簡単な式も示してあります。

ポイントは、 Q という量にあります。この Q は大気の運動を起こす熱源ですが、海面水温に関係します。海の表層の水の厚みと海面

水温は密接に関係しますので、この厚みを表す h と大気の熱源を表す Q を簡単に結びつけたわけです。 h が厚くなれば熱源 Q も増えるということになります。 τ は風の応力を表します。それは大気の流れ (U, V) の場によって決まります。大気の流れが海を駆動し、海の表面の厚みが熱源と関係して大気を駆動する、という簡単な閉じた系をつくりました。エルニーニョの必要条件として、大気と海洋が助け合って正の相関をもつことが重要だという定理を導いたわけです。

しかし、こうした仕事はもはや飛行機で言うならばライト兄弟の仕事のようなものです。現在では気象庁等の世界の重要な気象機関が、大きな気象モデル、海洋モデルを使いまして、本格的に予測にチャレンジしています。原理は上で述べた簡単なモデルに入っていますが、今やジャンボジェットの世界になったということです。

私たちがこうした簡単なモデルを発表した直後に、米国のショフという方が、エルニーニョの輪廻というか、エルニーニョとラニーニャの間をつなぐ理論を出しました。エルニーニョが起こり、そして消え、ラニーニャが起こる、ラニーニャが消え、またエルニーニョが起こる、これは一つの輪廻ですから、そ



$$\begin{aligned}
 U_t - fV + gH_x &= -AU \\
 V_t + fU + gH_y &= -AV \\
 H_t + D(U_x + V_y) &= -BH - Q \\
 u_t - fv + gh_x &= -au + \tau^x \\
 v_t + fu + gh_y &= -av + \tau^y \\
 h_t + d(u_x + v_y) &= -bh \\
 (\tau^x, \tau^y) &= \gamma(U, V) \\
 Q &= -ah
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2}(d(u^2 + v^2) + gh^2)_t = -a(d(u^2 + v^2)) - b(gh^2) + \gamma(d(uU + vV))$$

図13 1980年代前半の簡単な大気海洋結合モデルの概念と大気海洋結合モデル

遅延振動子モデル

$$\frac{dT}{dt} = aT - bT(t - \tau) - cT^3$$

Tは東太平洋の海面水温

τ は遅れ時間

a, b, cは係数

図14 遅延振動子モデル

の輪廻を解かなければいけないということで、モデルをつくりました。さきほど私がお見せしました式をちょっと複雑にしたようなものから出発して、それを変形しますと、図14のような非常に簡単な式ができます。ここでTは東太平洋の水温とさせていただいて結構です。そうすると、左辺はTの時間の変化率を表します。右辺にaTという項がありますが、ほかを考えないと、温度が上がればもっと上がるという成長のメカニズムが、この項の意味するところです。右辺の第二項に輪廻の考えが入ります。t - τ という時間遅れの制御の項が入っていますが、これはエルニーニョの成長するプロセスで、必ずラニーニャという子供が北側と南側の両サイドに産み落とされまして、その子供が成長してゆき、ついには親のエルニーニョを倒してしまうということを意味します。エルニーニョというのは一方的なものではありませんで、エルニーニョが成長するときにはラニーニャというものを同時に産み落としていく。そしてそれが成長して、ついにエルニーニョを壊してしまうということです。簡単に言えば、たとえば私の後ろに壁がありますが、その壁にボールを投げつけます。私は皆さんの方に逃げたとしても、ボールは跳ね返ってきて、私の後ろから頭をごんとたたくことになるでしょう。まさにそういう状態です。エルニーニョが起きますと、私がエルニーニョとすれば、どんどん成長しながら西から東に走って行きま

す。そのときに、私はボールを後ろにどんどん投げていくわけです。それはラニーニャのボールです。それがスクリーンの壁で反射して、後ろからたたいて私に当たるわけです。ボールが反射してくるまでに少し時間がかかりますが、それが時間遅れの制御です。

こうして得られた式に実際のパラメーターを入れると、いろいろな状況が実現します。たとえば、エルニーニョとラニーニャがばたばた交互に起こる場合もあります。あるパラメーターの範囲では、エルニーニョが起こるとずっとエルニーニョのまま、あるいは、ラニーニャが起こるとラニーニャの状態でびくともしない、という解もあり得ます。したがって、パラメーター a, b, cを何が決めるのかということが、大気海洋の相互作用では非常に重要です。実際は、そのパラメーターはもっと長い時間スケールの気候変動によっても影響を受けます。そういう意味で、エルニーニョの研究はエルニーニョだけを調べていてもだめでした。本日のパート2の話につながるわけです。

さきほど、ボールを壁にあてながら逃げていく話をしましたが、その絵を描いたものが図15です。エルニーニョの最盛期には東の方に暖水がたまりますが、同時にラニーニャの子供を産み落としています。このラニーニャの子供は、赤道を離れたところにある冷たい双子渦の構造をしているのですが、それは西へ西へと移動する性質があります。それが西へ西へ向かいまして、ついには西の方の海の境界にぶつかりまして跳ね返ります。跳ね返りますと、一部は赤道の方に戻りまして、専門の言葉では赤道ケルビン波というものに変わります。今度は東の方に動いてきます。そして、もともとのエルニーニョを殺してしまいます。

反対にラニーニャが成長していくプロセスにおいては、今度はエルニーニョの子供を赤道を少し離れたところに産みます。これは暖かい双子渦です。それが西の方に移動しまして、跳ね返って赤道に集まり、また暖かいも

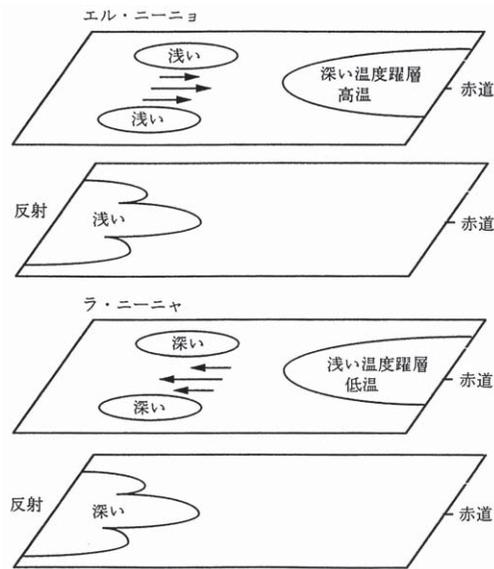


図15. 遅延振動子モデルによるエルニーニョとラニーニャの輪廻
上段から下段に向けて現象が進み再び上段に戻る。

のがゆっくりと成長していく。ここからのプロセスが、まさにエルニーニョの成長期になるわけです。ちなみに現在、この9月はどういう状況にあるかといいますと、ちょうどラニーニャがどんどん成長していくような状態に対応していると思います。

最近は、人工衛星の写真から海の凸凹を通して全体が見えるようになったと申しましたが、それをご紹介します(図16)。1996年10月29日にはエルニーニョが起こっていませんで、水位の異常に高い状態はまだ西太平洋にありました。前年から貿易風が強くて暖水をためていたということです。12月から1月にかけて、赤道太平洋に西風が急に吹き、貿易風が弱まりました。1997年の2月から3月頃にもう一度西風が吹きました。5月、6月にも吹いています。こういう間欠的な形で貿易風が弱まり、西太平洋にたまった暖水を東の方に移動させていったわけです。したがって、貿易風の弱まり方にはさらに微細構造があるわけです。これが季節内振動という現象で、この方面でもずいぶんいろいろな研究がなされています。そんな状態が起きて、

まず西太平洋にあった暖水の一部が非常に速いスピードでペルー沖に到達しました。それが1997年4月頃の状態です。それから暖水の本体がどんどん成長してゆきまして、6月頃に活発なエルニーニョの成長期に入りました。

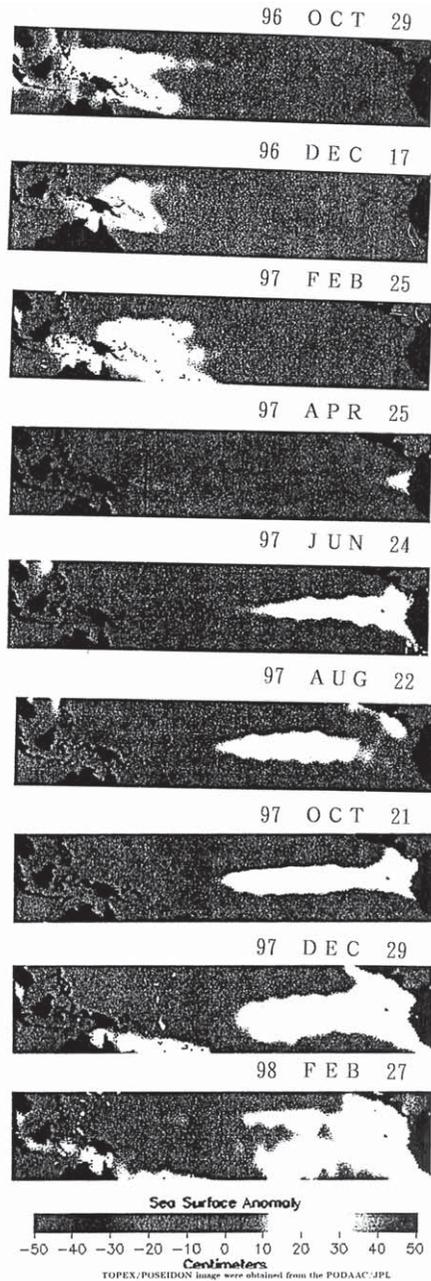


図16 人工衛星から観測された海面水位の変動
1996年10月から2ヶ月ごとに1998年2月まで示

た。10月から12月くらいには最盛期になりました。でも、この頃の状態をよくご覧になっていただきたいのは、赤道を少し離れたところにラニーニャの子供を産み落とし、それが西太平洋にたまりつつあるということです。まさに後ろから追いかけてきたボールのたとえのように、エルニーニョを西側から壊すように入ってきているわけです。これが1998年6月の状況です。しかし、そのときには同時に西太平洋には暖水がたまりつつあります。そういうことで、簡単な理論から予想されるようなメカニズムは、現象の上からもある程度検証されています。

1980年代の半ば以降、比較的簡単なモデルを使いまして、いろいろな方々、特にコロンビア大学のケイン教授とゼビアック博士が、予測をやってみようと思いました。一番簡単な予測は何かということ、今が未来永劫続くということです。ある条件を与えて、その状態がずっと続くというのが、予測の最も簡単なものです。したがって、私たちがやる予測というのは、それ以上の的中率を持たないと困るわけです。この、今が永久に続くという予測と実際の状況の相関を取りますと、どんどん時間とともに値は下がってゆきます。この値よりも私たちの予測は上に行かなければ意味がないのです。

図17は、簡単な大気海洋モデルを用いまして、予測をやってみた結果です。これは水温を予測したものです。まず、海のモデルを何年にもわたって実際の風を外力として動かしまして、次に、ある時間になりましたら、風のところを大気モデルに取り替えてしまいます。そして大気モデルと海洋モデルを結合するわけです。最初の海の水温は、大気の状態を与えてモデルがつくった水温ですから、最初の段階で予測が悪いわけです。最初の段階で海の水温の観測値を使いますと、実際現象との相関はパーフェクト、つまり1になるわけです。したがって、予測値全体がもっとうよくなります。

当時は、海の中の水温とか、そういったデ

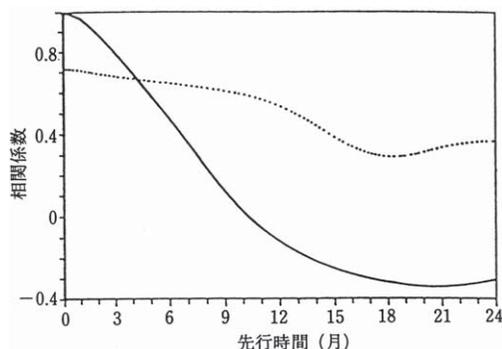


図17 大気海洋モデルを用いた海面水温の予測スコア
実線は現在の水温が永久に続くとするもの、破線はモデルを用いた予測。

ータがありませんので、入れることができませんでした。したがって、観測された風を持ってきまして海を駆動し、助走期間を置きまして、ヨーイドンというときに大気側を簡単なモデルに取り替えてしまったわけです。ある意味では、人工心臓に取り替えたようなものではないでしょうか。こういうことをいろいろやりまして、予測してみました。すると、1986年/1987年にエルニーニョが起ると予想されたわけです。そして実際に起こったのです。ペルーの穀物の生産額を見ましょう。1982年/1983年の当時は、われわれを含めまして予測の基礎理論が可能かどうかということいろいろやっていた段階でしたので、エルニーニョが起ってペルーの穀物生産高は前の年に比べて大幅なマイナスになってしまいました。ところが、1986年/1987年はまさに予報が的中しました。パブロ・ラゴス博士が政府に進言し、政策に取り入れられたということです。

綿花は乾燥したところを好み、非常に根が深いようですから、雨が多くなりますと根が腐ってしまいます。エルニーニョがあると、さきほどお見せしましたように、東南アジアのような状態になるのですから、稲作に変えたほうがよいというわけで、急ぎ作付けを変えたそうです。それがうまく当たりまして、むしろ穀物生産額が増えたということです。これでいろいろな国がエルニーニョ

の予測は可能だと考えるようになったという状況があります。

もし、エルニーニョの予測が完全にできずと、いろいろな影響があります。たとえば、オーストラリアの穀物生産額は、ニューギニア周辺の水温と密接に関係していますが、この水温はエルニーニョに密接に関係します。水温が高いということは、ラニーニャの状態です。穀物生産額が増えます。統計では0.5度水温が上昇すれば、30億ドルの値打ちがあるようです。オーストラリア政府はラニーニャを好むことになります。

海の中のデータがないと、予報の精度が悪いということですので、科学者がアドバイスしまして、図18のような非常に簡単なブイをつくりました。さきほど述べましたが、海の水温を測るのは非常に重要ですので、上方に温度を測るサーミスタチェーンというもの、それから大気の水を測る風速計がついています。ほんとうに簡単な量だけを測るブイで、1台500万円くらいの非常に安いものです。それが現在、驚くなかれ約70台近く太平洋に入っていて、これが常時データを転送してきます。

すでに図9で数日前の状況をお見せしましたが、太平洋の中央部から東太平洋のあたりは非常に冷たい状態、つまり湧昇が強く起こっている状態にあります。貿易風がけっこう強く吹いていますので、ラニーニャが進行中であることがわかるわけです。海の非常に精巧なモデルと絡み合わせまして、データを海の中に内外挿してやることも可能になりました。

気象庁もそろそろ始めると思いますが、現在いろいろな国が本格的な大気の大循環モデル、海洋の大循環モデル、それにさきほどのデータを入れまして予測を始めています。ここにオーストラリア気象局が1997年8月の段階までのデータを用いまして、そのあとペルー沖の温度を予報したものがありますが、12月くらいにピークになりましてだんだん下がり、弱くなっていく状況がよくとらえられ

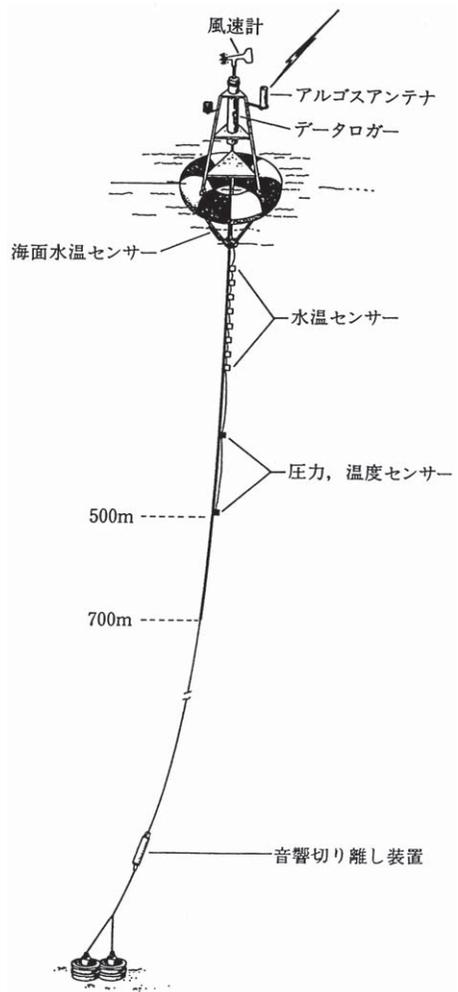


図18 熱帯太平洋に約70台設置されているアルゴス係留ブイの概観

ています。現在のエルニーニョがほぼ終息した状況もよく当たっています。そういう時代になってきています。

最近では、皆さんのご家庭でもパソコンがずいぶんあると思いますので、Webサイトで <http://www.ogp.noaa.gov/enso> などを開いてみるとよいでしょう。さきほどラニーニャに老人という名前を付けたフロリダ州立大学のものは、<http://www.coaps.fsu.edu> です。コロンビア大学のものは、<http://www.iri.ideo.columbia.edu> となっていますので、見られるとよろしいと思います。その中には、エルニーニョの定義など、いろいろな情報も満載さ

れています。

こんな風に、めでたしめでたしということで、私たちも職業がなくなるかと思ったのですが、実際はもっともっといろいろな問題が出てきました。一つは、さきほどのような簡単なモデルでは、太平洋上の大気と海洋の相互作用だけですから、アジア大陸のモンスーンなどは何も関係しないわけです。ところが、ラニーニャというのは基本的に対流域を西太平洋にとらえておくものですから、これはアジア大陸の存在が非常に重要です。アジアモンスーンとの絡み、それからインド洋との絡みがエルニーニョに変化を与えているのです。この問題に関しては、かなり気象学が絡んでまいりますので、今回は触れないことにしまして、もう一つある意味でもっと重要なと思われるものがあります。これは野崎先生の話にもありましたような、地球温暖化の問題で取り上げられた、最近の平均気温の上昇との関係です。たしかに地上の平均気温は大幅に上がってきています。ところで、図8でお見せしましたように、エルニーニョが起こると気温も上がります。エルニーニョというのは、熱力学的には熱帯海洋に貯まり過ぎた熱が中高緯度に放出される過程であると同時に、大気に放出される過程でもありますので、大気の温度が上がるわけです。

それから、今日は触れなかったのですが、北大西洋の方にもう一つ重要な振動、北大西洋振動（NAO）という現象があります。これは、場合によっては太平洋の長期変動現象と密接につながっている可能性があるのですが、一応ここでは別個の問題としておきます。それに絡む地上の温度上昇もあります。両方を足しますと、最近の温度上昇のかなりの部分が説明できるのです。それを、現在地球温暖化として問題になっているものから引き算をしますと、温度上昇はあまり目立たなくなります。

単に温暖化というものではなくて、その中に構造があるようなのです。エルニーニョや北大西洋振動にCO₂増大が絡んでいる可能性

は、ないとは言えないわけですが、温暖化というものの正体は、そのような大気海洋系の構造をもったものにあるということをよく知らなければいけないと思います。このことが往々にしてないがしろにされているのは、非常に残念なことです。

そういう長い時間スケールでの変動を、ダイスと呼びたいと思っています。ダイスというのは何かというと、Decadal/Interdecadal Climate Eventsの略字です。つまり、10年から数10年スケールの変動を起こす気候変動のことです。ダイスはサイコロという意味もありますので、この言葉が気に入っています。最近少し外国の人も使いだしたようです。そんなことを考えるきっかけになった古い図をお見せしましょう（図19）。8年ほど前に、CCCOという、海洋の気候変動との関わりを議論する委員会で作ったものですが、一番上の図は、気象庁が東経137度沿いに凌風丸を使って測った海の温度から熱帯付近の水深300メートルまでの海の蓄熱量を書いたものです。蓄熱量が少なくなったということは、エルニーニョの時に対応しています。しかし、これを遠目に見ますと、1976年頃からいつも蓄熱量が少ないように思うのです。真ん中の図は、南方振動の指標で今日の話に何度も出てきたものです。これを見ましても、明らかに1976年以降ほとんどいつも負の値を示していて、エルニーニョ的です。まるで基準の値が変わってしまったように見えます。それから一番下の図は、温暖化として騒がれるもとなった地上気温の図です。3者は同じような変動を示しています。これは、さきほどの繰り返しにもなりますが、長い時間スケールでの変調現象があるということを示します。1976年とか1988年とか、10年から数10年ごとに起きる大事件が、気候のレジームを変えているのではないかと考えるようになったわけです。

最近までの南方振動を調べますと、非常に強いラニーニャが1988年／1989年に起りましたが、それ以外はずっと熱帯はエルニーニ

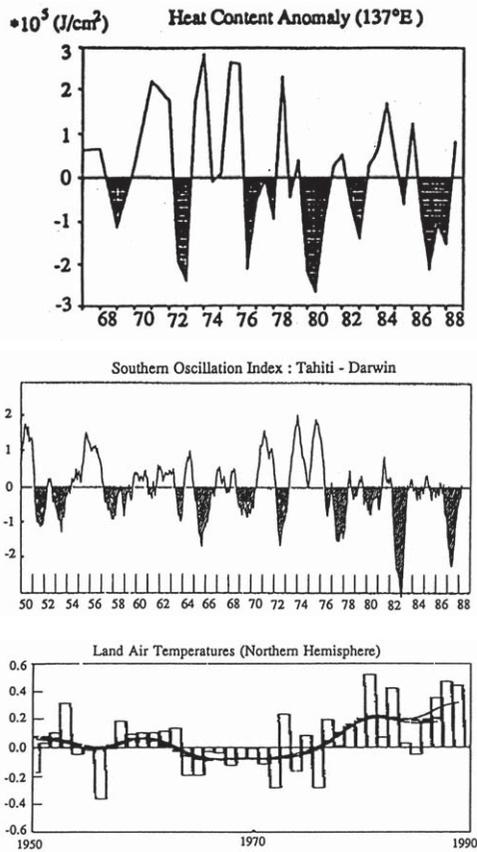


図19 (上) 西太平洋熱帯域の海洋の蓄熱量の変動
(中) 南方振動指標
(下) 北半球の地上気温の変動

ヨ的なフェーズにあると言えます。ということは、同時に熱も多量に大気に放出され続けていることになります。では、そういった長い時間スケールでのエルニーニョの変調は、何が起きているのだろうか、それはどんな空間構造をしているのか、ということが次にテーマになります。

そういう太平洋上の気圧の変動を調べますと、北部北太平洋のベーリング海の少し南あたりの広い範囲で、1976年あたりを境に気圧が低くなっています。言い換えれば、アリューシャン低気圧が強化されています。これは、東大の気候センターの昨年亡くなりました新田教授と、気象庁の山田さんという方が発見したのですが、非常に画期的なことでした。アリューシャン低気圧が1976年以降強

くなったということですが、ではそういったことがどうして起こるのか興味があります。これは気象学の話になりますが、熱帯域に下層大気の収束域があり、上昇気流が起きると、そこで上昇した大気の一部は両半球に流れていきまして、しばらくして下りて来ます。最初の下りて来るところには、高気圧ができます(図20)。これが典型的な夏になりますと、北太平洋では太平洋高気圧と呼ばれるものに対応します。もともと熱帯の収束域がエルニーニョで東の方へ動けば、全体が東へシフトするというのは、これを見ても当然だと思います。今年の夏が不順であったのはこのためです。高気圧のさらに後ろにもう一つ波ができます。むしろ渦と言ったほうがよいのですが、これがアリューシャン低気圧に対応するものです。なぜこんなことが起こるのかというと、船の後ろに波が立つことを思えばよいのです。実際は地球の自転のために回転流体の性質によりまして、渦ですからそれが太平洋高気圧あるいはアリューシャン低気圧とかになって現れてくるわけです。こういう遠隔地への影響をテレコネクションと呼びます。遠方に大気を経由して影響を与えるという意味です。

海のデータを見ますと、強化されたアリュ

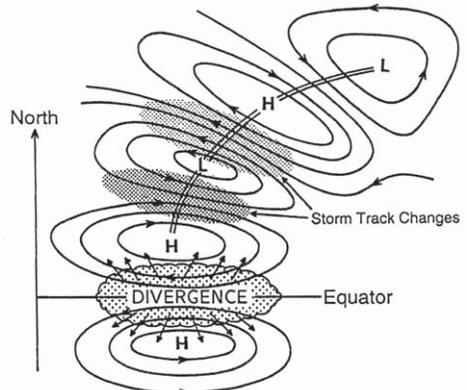


図20 暖かい海面水温の赤道上空の発散場からの波の伝播
Hは高気圧、Lは低気圧を示す。

ーション低気圧によってかき混ぜられ、また蒸発も活発になるために、1976年以降どんどん水温が下がっていることが明らかになっています。スクリップス海洋研究所というアメリカの重要な海洋研究所が、ラ・ホヤというサンディエゴの近くにありますが、このあたりは逆に水温は上昇します。これは、エルニーニョの暖水が岸沿いに北上するためです。ほんとうにそうなのかなということで、スクリップス海洋研究所の海岸でどなたかが測ったデータを見ますと、確かに1976年から水温が上がっています。非常にローカルな現象が、グローバルな現象に結びついているということが、これでもおわかりになると思います。

最近では、こうした現象が単に熱帯からの影響だけではないということがわかってきました。これは私どもの研究グループの中村博士との共同の仕事ですが、いままではデータの解析が粗く、北太平洋の大気海洋のシグナルが一つに見えていたのですが、実際は黒潮の北の亜寒帯の親潮流域に近いところに出るシグナルと、もう少し南の亜熱帯循環系に出るシグナルの二つに分かれ、それぞれに大気の変動もリンクしているということがわかりました。熱帯と直接につながっているのはむしろ亜熱帯の方のシグナルであり、亜寒帯の方のシグナルは熱帯とはかなり別個の変動をすることが見えてきました。亜寒帯の方の現象は、1976年以前に始まっていて、すでに冷たい状況が起こっているのに対して、黒潮などを含む亜熱帯の方では、きれいに熱帯のエルニーニョの水温変動と対応する現象になっていることがわかったのです。亜寒帯に、独自の大気・海洋相互作用があるらしいという片鱗が最近見えてきたわけですが、意外なことに、水産学者あるいはその関連の方々は、前からそのような観点は持っていたようです。

同じくわれわれの研究グループの安田助教授によれば、驚くなかれ、マイワシの日本近海の漁獲高は1976年あたりから急激に増えまして、1988年を境にぐっと落ちているよ

うです。イワシというのは弱い魚と書くくらいで、水温に非常に敏感なようです。この長い時間スケールの大気海洋変動を、見事に反映しているらしいというわけです。

もう一つの熱帯と密接に結びつく亜熱帯の問題と、亜寒帯の問題がどのように違うのか、象徴的な図をお見せしましょう(図21)。水面下15メートルくらいまで尾を引いていくドリフターを亜寒帯に入れ、それを人工衛星で探知しますと、亜寒帯に入れたドリフターは絶対に亜熱帯循環系には入りません。一方で、亜熱帯循環系に入れたドリフターは、ただ1個を除いては亜寒帯には侵入していないのです。この一つでさえも、もしかすると漁船か何かで運んでいたずらをしたのではないかとされるくらいですので、驚くほど二つの循環系は違うことがおわかりになるかと思えます。

どうしてそういうことが起きるのかといい

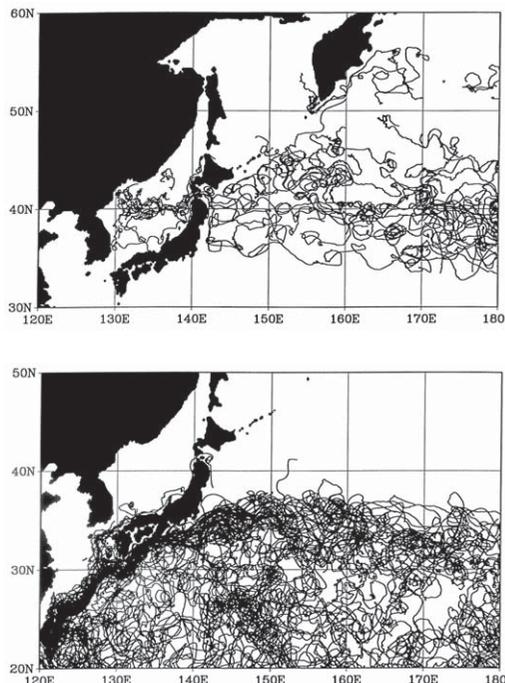


図21. 表層を漂流するブイの軌跡
(上) 亜寒帯域に投入したもの
(下) 亜熱帯域に投入したもの

ますと、両循環系の境界に強い収束域があり、表層の水が沈降しているためです。この海域では、真水ではありませんが非常に雨水に富んでいる表層水が、冬季にここで急速に冷やされます。しかし、淡水に富みますからあまり重くはなれず、深くは沈まず、せいぜい水深1000メートルくらいまでに到達します。その後は同じ密度面に沿ってどんどん南下して行って、熱帯の方に近づいていきます。そして熱帯の方でだんだん表層に近いところに湧いてくるわけです。そういう現象を通して、中・高緯度の現象が低緯度の現象に影響を与えていくことになります。

海の表面は、雨が降りますから塩分濃度は低いわけですが、下の方は塩分に富んでいます。しかし、中層の低塩分の水は全世界のデータを平均しても明確に表れるくらいはつきしたものです。こういった中層の水塊が、さらに長い時間スケールで熱帯の変動に影響を与える可能性があるということになります。

亜熱帯の現象に関しては、熱帯の現象と非常に関連があるということを示すことができましたが、それはデータの上でもわかります。黒潮の源流となる北赤道海流の流量の変動となります。黒潮の変動、ミンダナオ海流の変動は、非常によく関係しています。スペクトル処理などの統計手法を用いませても、黒潮の続流域、北赤道海流、貿易風の変動は、非常によく関連しているということが言えます。

琉球の近くにPN線という気象庁の海洋観測線がありまして、長崎海洋気象台が非常に長期間にわたってデータを取っています。この長いデータを調べますと、1976年以前は平均値よりも黒潮の流量が少なく、それ以降は流量が多いことがわかります。そして、黒潮の流量が多い場合に、遠州灘沖で大蛇行が起こりやすいこともわかっています。黒潮の大蛇行は、極めてローカルな非線形の現象ですが、グローバルな大気海洋現象に関係しているわけですから、非常にチャレンジングな海洋学のテーマを提起しているわけです。

エルニーニョは熱帯の現象でしたが、それ

が発展して中緯度あるいは高緯度の現象へ、今日はインド洋の話はしなかったのですが、そちらにもたくさんの面白い現象がありまして、相互のいろいろな関係が重要になってきました。現在私どもは広大な観測システムを考えています。海洋科学技術センターは、熱帯域をはじめ黒潮続流域のところで沈み込みを観測する計画を立てています。それから黒潮に関しては、たくさんの新しい測機を導入する計画が進行中です。それから、人工衛星の軌道の真下に現場観測の測線を維持していく計画もあります。熱帯に関しては、米国のブイに加えて塩分もきちっと測っていかうということで、海洋科学技術センターがTRITON計画というのを開始しました。また、インド洋にも重要な問題がありますので、そちらにもブイを展開していくことになっています。また、海の中層あたり、水深1000メートルくらいのところから湧いてきて、熱帯の海面水温に影響を与え、エルニーニョの変調を起こす可能性があるということで、海洋中層にブイを入れて漂わせる計画も立案されています。こうした計画は、すべて国際共同、日米共同あるいは多国間の共同で行われています。またこうした計画による大量のデータをモデルに入れて、気候変動をよりよく予測していく計画も現在活発に進められています。

そういうことですから、10年後に同じようなお話をするときには、おそらくダイスという10年スケールの現象に関してパート2が終わって、パート3の新しい話題が出てくるのではないかと想像します。しかし、その頃は私はおそらく退官していると思いますので、本日のお話に興味をもたれた新しい世代の方が登場してきてくださることを願い、私の話を終わりにしたいと思います。