



平成8年度(第5回)ブループラネット賞

受賞者記念講演会 講演録

日時：平成8年11月1日

会場：国際連合大学国際会議場（東京）

財団法人 旭硝子財団

本講演録は、平成8年度(第5回)ブループラネット賞表彰式関連行事として平成8年11月1日に、東京、国際連合大学国際会議場において開催された受賞者記念講演および対談の様相を収録したものです。
受賞者である米国のウォレス・ブロッカー博士、インドのスワミナサン研究財団を代表してスワミナサン博士と、対談ゲストの奈須紀幸博士、石弘之教授には、原稿編集、推敲にあたり多大なご協力をいただきました。
諸氏のご尽力に、記して深謝申し上げます。

目次

プログラム	1
ウォレス・S・ブロッカー博士記念講演および対談	2
記念講演	3
『我らが青い星「地球」の気候システムが危ない』	
奈須 紀幸博士との対談	13
M S スワミナサン博士記念講演および対談	22
記念講演	23
『エコテクノロジーと持続可能な食糧安全保障』	
石 弘之教授との対談	31

- 13:00 開会
- 主催者挨拶 理事長 古本 次郎
- 13:05 記念講演 ウォーレス・S・ブロッカー博士
「我らが青い星“地球”の気候システムが危ない」
- 東京大学名誉教授
奈須 紀幸博士との対談
- 質疑応答
- 14:50 休憩
- 15:10 記念講演 M S.スワミナサン博士
「エコテクノロジーと持続可能な食糧安全保障」
- 東京大学大学院総合文化研究科
石 弘之教授との対談
- 質疑応答
- 17:00 閉会
-

記念講演 および対談



記念講演

コロンビア大学教授 同大学ラモント・ドハティ地球研究所
ウォーレス・S・ブロッカー博士(アメリカ)

ブロッカー博士は1950年代に、当時開発されたばかりの ^{14}C 同位体による年代測定法を用いて、最後の氷河期が約1万1千年前であることを発表した。その後、 ^{14}C 同位体を用いて世界の海洋全域にわたる海洋中の流動状態を調べる国際調査を推進した。80年代半ばには、ブロッカーのコンベア・ベルトと呼ばれる全地球を覆う海洋大循環流が存在し、その表層水と深層水とが千年単位で入れかわることを発見した。さらに、海洋中の物質、特に二酸化炭素に注目して、その化学的な変化および、海洋と大気間で、相互に移動する速度を検討し、これらが地球気候に与える重要性を世界に先駆けて明らかにした。そして博士は、過去の地球気候の変化を解明する過程で、地球気候が今まで信じられていたよりもはるかに不安定なことを知り、二酸化炭素の蓄積が、予想外の変化を引き起こす危険性を警告している。



「我らが青い星「地球」の気候システムが危ない」

本日、このような栄えある場に招待され、価値あるブループラネット賞受賞の栄誉をいただきましたことを心から嬉しく思います。またこのたび私と妻にこのような素晴らしい来日経験を与えてくださった、旭硝子財団の古本次郎理事長、ならびに同財団および関係者の方々に、心からお礼を申し上げます。

本日の講演において、私は3つのことを申し上げたいと思います。まず最初に、氷河の氷や海底の堆積物の中に記されたことの背景をお話します。地球の気候は過去10万年の間に約20回、数十年単位で起こった全地球的变化を経験しています。そのことを示す証拠が、氷や堆積物に残されているのです。次に、こうした変化を引き起こした原因は何か、またそれらの変化は現在の気候システムについて何を教えてくれているのかをみてみようと思います。そして最後に、過去においてそのように頻繁に起こった現象は果たして将来の一大変事を予告しているのかどうかについて、若干コメントいたしましょう。

まず、これらの変化が起こったことを示す主な証拠は、グリーンランドの氷の中に見つかります(図1参照)。グリーンランドの氷冠を底までボーリングして取り出したのは、デンマークのチーム、そしてヨーロッパとアメリカのチームでした。そうして得られた記録のうち、最も新しく最良の記録は、ヨーロッパとアメリカのチームがグリーンランド中央部で掘りだした長さ3千メートルの2本のアイスコアです。このコアには、グリーンランドの気候だけでなく、世界の他の場所の気候についても11万年前までさかのぼって記されていました。冬と夏の雪を1対にして正確に数えていくと少なくとも4万5千年前の海底までさかのぼることができますから、このアイスコアの年代についてはほとんど疑問の余地はありません。

この記録で分かったのは氷の同位体組成で、これはグリーンランドの気温に関係しています。1万年前から現在までの地球は、10万年前からと比べると、大変安定した気候になっています。8千年前に小さな変動が1回ありましたが、それを除けばグリーンランドの気候はほとんど変わらなかったといっていでしょう。図1からもお分かりのように、1万年より以前は、グリーンランドの気候はやや寒い程度から極寒の間で激しい変化を繰り返しています。このいわゆる「氷期」の中間メジアン気温は、氷の熱プロフィールからはっきり確定されていますが、過去1万年間より16度も低いのです。これは気温の大変化といえます。

そこで、この大変化の原因を探るとい課題が生じます。ここ4、5年、いろいろな調査で明らかになってきたのは、こうした変化はグリーンランドに限らず、地球規模で起こっていたということです。これから数枚のスライドで、その証拠をいくつかお見せしましょう。

その前にまず、この変化のスピードはどうなっているか。現在まで続いている温暖期に焦点をあててみましょう。この温暖期は、私たちの文明が発達した時期です。まず最初に農耕・農業が起ります。図2は、炭酸カルシウムを含むダストの降水量に対する酸の降水量の割合を氷中の導電率で示したのですが、これを見るとその値が急激に上昇しています。いわゆる「ヤンガー・ドリユアス・コールド・イベント」(YD)には、炭酸カルシウム(CaCO_3)ダストの降下率が高く、そのため酸は全体的に中和されていました。したがってこの時期の導電率は非常に低かったのです。現在に続く温暖期が始まると、ダストが減少して酸が多くなってきます。酸から出た陽子は氷中の導電性を維持しますから、導電率は高くなります。

右端のグラフは、堆積の年層から数えた暦年令です。層の数は数え間違える場合もありますから、必ずしも正確とはいえませんが、気候の移行期間の変化は非常によく記録されていますから、20年とでたらそのとおり20年です。これを見ると、現在に続く温暖期は突然始まったことが分かります。わずか2、3年で温暖化が起こり、その後多少のゆれがあって、ダストの増加を不規則にみた後、低ダスト・高酸状態で安定します。この変化は、30年もたたずに完了しました。

次にお見せしたいのは、アイスコアが熱帯の気候についてもある程度教えてくれるということです。氷に閉じこめられている気泡がメタンガスを含んでいるからです。皆さんもご承知のように、メタンガスは現在、稲作と牧畜からたくさん発生します。しかし農業が行われる以前は、主として沼沢から発生したのです。今日では、こうした沼沢の多くは、北半球の温帯にあります。地球の気候が大変寒かった氷河期には、北半球の沼沢はすべて氷板で覆われるか凍ってツンドラになっていましたから、メタンガスを出していませんでした。したがってヤンガー・ドリユアス・イベントの時期にはメタンガスはほとんど熱帯で発生していたと思われます。この時期の末期に大規模な温暖化が起こると、氷中に記録された大気の大気メタン濃度は、500ppbをわずかに下回るレベルから、約750ppbへと急上昇します。これは熱帯の湿潤化によってメタンを発生する沼沢地が規模においても数においても増大したためと考えられます。ですから熱帯の湿潤化の時期とグリーンランドの温暖化の時期との関連性を探るのは、大変興味ある問題です。

以前私が教えた大学院生にジェフリー・セベリングハウス君という人がおりまして、同じ気泡の中にグリーンランドの温度変化を測定する手がかりがあることを見つけ、大発見をいたしました。彼はその測定値を使って、グリーンランドの温暖化が、メタン濃度上昇開始のわずか10年かそこら前に始まったことを明らかにしました。ただ図3から見ると、どうみてもタイムラグは50年程度と思われます。いずれにしろグリーンランドが突然温暖化すると、熱帯も急に湿潤化の道をたどります。つまり何が起こったにせよ、その影響は少なくともグリーンランドから熱帯へと広がったのです。

私の友人、メーン大学のジョージ・デントンは、ニュージーランドで同僚と研究しているとき、フランツ・ジョセフ氷河の前進の後に残された非常に興味深いモレーン(堆石)を見つけました。図4は、フランツ・ジョセフ氷河の現在の大きさをブルーで、小氷期(西暦1850年)の大きさをグリーンで示しています。面白いことに氷河はタスマン海に向かって谷沿いに流れ下り、浸食最先端にワイホ・ループ・モレーンを形成しています。モレーンを構成している岩石の分壊層の上にはたくさん木が堆積しています。デントンの推測によると、氷河は森に押し寄せ、木々を引き裂き、倒し、地ならし的に流れ下っていく。彼はいろいろな木片から25の放射性炭素を測定して年代を推定し、 $11,050 \pm 約50$ 炭素(^{14}C)年という結果を得ました。これはヤンガー・ドリユアス・イベントの開始時に北半球で測定された放射性炭素年とまさにぴったり一致したのです。そこでデントンはこうつぶやいたにちがひありません - “南半球もヤンガー・ドリユアス・イベントを知っていたんだ。山岳氷河は雪線がかなり低い所に下がったのに応答した”と。そのためには南半球の温度が大幅に低下することが必要でした。

ごく最近になって、カリフォルニアのサンタバーバラ沖海盆の堆積物から重要な発見が相次ぎ、上に述べた現象がヤンガー・ドリユアス・イベントだけでなく、いわゆる「ダンスガード・ウシュガー」(D-O)イベント全般にわたって広く強力に見られることが実証されました。アイスコア研究の2大先達にちなんで名付けられたこのD-Oイベントは、図5からも分かるように約7万年前から2万年前までの間の急激な変化があった時期です。しかし海洋堆積物にこの時期の氷中と同様の記録を見つけることは大変難しい。堆

積は大体において非常にゆっくりと行われたので、堆積物中の虫がかき回すことによって、千年単位の記録が消されてしまっているからです。

カリフォルニア大学サンタバーバラ校のジム・ケネットは、推考を重ねた上、サンタバーバラ海盆の深海掘削計画でほんの一日を2個の浅い穴を掘ってみる活動に当てることにしました。このちょっとした試みが情報の金脈を掘り当て、これらの堆積物が千年に約1メートルの速度で沈殿したことが分かり、ダンスガード・ウシュガー・イベントの適切な記録の解決法であることが分かったのです。図5に見られるようなケネットが発見した記録は、現在では堆積孔に含まれる水の酸化度で測れる(堆積層に年層があるかどうかで分かる)ほか、炭素や酸素の同位体の測定値によっても確定できます。グリーンランドのアイスコアに全部で17みられるD-Oイベントのうち、少なくとも16はサンタバーバラでも記録されていることを、ケネットは発見したのです。

それが私たちにとってどんな意味をもっているのか、とお思いになるかもしれません。いま現在、グリーンランドははるかかなた、太平洋を越え、アメリカの向こうの遠い存在です。しかし私にとって、このことはパズルを解くとても重要なカギなのです。北太平洋のサーモクライン(水温躍層、つまり水温の鉛直分布で温度勾配の大きな層)の水循環は、図5の黄色の帯の間の時期に増大します。ですからグリーンランドの寒冷の原因は、北太平洋において海洋の上層循環の様相を急変させた原因とマッチしているのです。

以上で私は、気候変化が地球規模でしかも突然だったという主な証拠をいくつかご紹介しました。次のテーマ、これらの驚異的な変化はいかにして引き起こされたかについて話を進めましょう。私がブループラネット賞をいただいたのも、世界で初めてこれを解釈する理論を出したからだと思っています。

このアイデアが浮かんだのは、スイスのベルン大学で親友のハンス・ウシュガーの講演を聞いていたときでした。彼はこう言いました。「グリーンランドのアイスコアに記録されたデータが示しているところによると、地球の気候はある1つのオペレーション・モードが100万年くらい続くと、突然別のモードへと変わる」。ハンスのこの考えに魅せられて、私はこれらのモードが何なのかを研究し始めました。そしてそれらが、私がコンベア・ベルトと名付けた海洋循環の変化と関係しているのではないかと思うようになりました。この海洋循環は、現在、プロッカーのコンベア・ベルトとして有名になっていますが、同僚のアーノルド・ゴードンはコンベア・ベルト理論は彼が唱えたものだと思っているくらいです。いずれにしろどちらでもいいことですが。

私のアイデアを要約すると次のようになります。図6に示したように、現在の海洋循環の最も大きな特徴の1つは、大西洋の上層水が強い勢いで北へ動いていることでしょう。この海水がアイスランド近辺に到達すると、カナダやグリーンランドから吹いてくる冷たい冬の空気で冷却されます。アイスランドに到着したときは12-13だった海水が、2-3にまで冷やされます。大西洋はとくに塩分濃度の高い海ですが、この冷却によって表層の海水密度が増して、海底へと沈んでいき、南方へ流れます。この海水の大部分はアフリカの方に向かって流れ、そして南半球の周極海流へと流入します。

気候にとってこの海流が非常に重要なのは、それが大量の熱を運ぶからです。このコンベアの流量は、あのアマゾン川の実に100本分に相当します。地球上の降水量をすべて合わせたほどの量です。ちょっと想像してみてください。もしあなたが3本の水道管をもっていて、1つには北大西洋の深海水、もう1つは地球上の全降水量、そして3つめにはアマゾン川100本分の水を流すとする。出口で出てくる水の量はほぼ同じなのです。コンベアで上層を北へ流れる部分により運ばれ大気に放出される熱量は、ジブラルタル海峡から北の大西洋にまで及ぶ地域に注がれる太陽熱の約25%に相当します。実に巨大な熱量です。私はすでにこのことは知っていました。なぜなら私の研究歴は2つの分野にあって、1つは放射性炭素やその他の微量元素を使った海洋深部の循環の研究。狙いは化石燃料による二酸化炭素が海洋に吸収される速度を明らかにすることでした。もう1つの研究は、古気候です。研究の中で私が惹き付けられたのは、過去100万年の間に人間が経験した氷河期は何度かあって、それぞれ10万年ほど続いたわけですが、それらはみんなカタストロフィー的な終焉を迎えているのですね。

そうして1984年に、私はこの2つの研究を1つにまとめて、こう自問したのです。もしこの大海流に何かが起こったら、例えば分断されるとか、方向を変える、あるいはオペレーションの仕方を変えるということになったら、どうなるだろうか。北大西洋地域の気候に大変化をきたすに違いないと。私の示唆に基づいて、モデル研究者らがコンピューターでシミュレーションを開始し、北大西洋に流れこむ暖流が分断

されると、北大西洋海域周辺の陸地の年間平均気温は5 - 10 下がることをあつという間に計算して出しました。こうした気候変化はカナダのニューファンドランドやグリーンランドでまず感じられ、次いで北ヨーロッパへと広まるでしょう。しかしモデルによりますと、この寒冷化は地球上の他の地域には拡大しない、アメリカもサンタバーバラ付近の太平洋まで変化しない、また熱帯にも、ニュージーランドにも影響しないようなのです。

また、理論的観点からみて海洋にはいくつかの明確なオペレーション・モードがあるということを初めて唱えたのは、ウッズ・ホールのヘンリー・ストメルですが、海洋モデル研究者らは、このストメルの初期の研究を引き継いだのでした。さまざまなシミュレーションをやってみた結果、日照量が同じなら極地域に真水が加わると深海水の組成は大きな影響をこうむるため、海洋の循環はまったく違う様態をとることが分かりました。雨水には塩分がゼロですから、降水によって海面近くの海水濃度は下がります。ストメルがかつて非常に単純な考察から推測したことが、現在ではこうした新しい種類のモデルによって実証されたのです。これらのモデルで見ると、海洋オペレーションは、ある1つのモードから別のモードへと劇的に変化するのです。したがって北大西洋海域へ運ばれる熱量も大きく変化します。コンベアの中の変化によってもグリーンランドのアイスコアに記録されたデータについて同様の説明ができますが、モデルの気は遠隔地への影響を示しておりません。

ところでもっと理論の領域で考えてみたいと思います。こうした地球規模の変化を説明するのはデータの蓄積とは別のものが必要だからです。この点で重要な情報は、氷河時代のうち極端に寒かった時期の地球システムの状態に関する情報です。図7からお分かりのように、この時期はカナダの全域とアメリカの北東部および中西部は氷に覆われています。地球上の山々は、雪線が標高1,000メートルまで下がっています。アンデス地方とニュージーランドのサウス・アイランドは、今でも小さな氷河が残っていますが、この当時は非常に巨大な氷河がありました。

これは何を意味しているか。氷河期には地球全体が非常に寒冷な状態に入っていたということです。私に言わせると、地球が最終氷河期にどうやってこんなに寒い状態に突入していったかについて、まだ誰も適切な説を唱えた人はおりません。現在では氷河時代のサンゴと同じく氷河時代の地下水から、この時期に熱帯は今より5 度も寒かったという新たな証拠が見つかっています。強い外因がなんら無いのに、地球はどうやって気候をこんなに大きく変えたのでしょうか。

この点の話を進める前に、山岳氷河についてちょっと見てみましょう。地形学者らは地球各地を回って、現在の山の雪線と最終氷河期のそれ(地形の特徴から復元)とを比較してみました。図8は、アメリカのコルディレラ山脈を例にとったその結果です。実線は現代、点線が氷河期ピークのもので、南緯40 から北緯40 の間はすべて、なんと1,000メートルの差があります。

この山岳氷河の記録と、南米アンデス山脈のワスカラン山で標高6,000メートルほどの地点から掘りだした氷河期の氷のアイソトープ記録とを比べてみました(この氷はオハイオ州立大学のロニー・トムソンが氷床を160メートル掘り、もう少しで岩盤にぶつかる地点から掘りだしたコアで、幸運にもそのうち10メートルが氷河期のものだったのです)。私がやっと出した結論は、氷河期の大気湿度は現在よりずっと低かったにちがいない、したがって大気に水蒸気を加えたり、除去したりするプロセスは、現在とはまったく異なっていたにちがいない、というものでした。ただこの点については、気象モデルで証明されているわけではありません。事実、気象モデルは、このような地球規模の変化についてはまったく無力なのです。なぜ水蒸気なのかとお思いになるかもしれませんね。それは、水蒸気は大気成分の中で一番強力な温室効果ガスだからです。もしみなさんが地球を5 ほど冷やしたければ、なにか魔法を使って大気の水蒸気濃度を、そうですね、30%ほど下げれば、できないことはありません。大気中の水蒸気は、地球をかなりの程度暖かくしているのです。近付きつつある地球温暖化の程度について科学者たちはかんかんがくがくの議論をしていますが、その要は水蒸気のフィードバックをどう考えるかにあります。もし大気中の水蒸気が現在と変わらなければ、炭酸ガスを今の2倍排出しても、温度の上昇は1.5 程度ですみます。しかし炭酸ガスを2倍にして、しかも大気の水蒸気が増えた場合は、温度は3.5 ± 1 上昇します。これほどの温暖化になりますと、農業、とくに内陸部の農業に大きな支障が出るでしょう。したがって議論の中心は、各モデルが大気中の水蒸気の変化をどれほど実際と同じにシミュレートできるかという点にあります。

私の考えを申し上げますと、深海流の変化が気候に及ぼす影響は当初、北大西洋海域に限定されていま

したが、この変化はいずれにしろ大気の水蒸気濃度をも変えたと思われま。水蒸気は、熱帯間収束帯にそって上昇する空気によってまず熱帯の大気に供給されます。ですからもし大気中の水蒸気濃度を変えたときは、熱帯、とくに熱帯の中でも西太平洋に注目すればよい。熱帯である西太平洋は今日の海洋の中で最も水温の高い海です。ここでは対流が最も盛んに行われている地域で、大部分の水蒸気は大気の中に入っていきます(図9)。

そうだとすると、深海流の変化は海洋上層にも反響していったにちがいません。再びサンタババーラのデータに戻りますと、少なくとも北太平洋では湧昇流の動きに大きな変化があったにちがいないことを示す証拠が見られるのです。このことは大変重要です。なぜなら赤道地方の大気におけるエネルギー量は冷海水の湧昇によって変わってくるからです。例えば有名なエルニーニョも、この湧昇流によって現われたり消えたりするのです。こうした変化は今日の気候を変動の多いものにしてしています。いずれにしろ海洋の上層循環の強さが変わることによって、赤道地域への湧昇の強さが変わり、したがって大気への水の蒸発量も変わったのだと思います。

私のこの考えはあくまでも理論的推論です。実際に起こりえたことを知ることができないのですから。しかし地球気候に赤道付近で南北対称的な変化が大規模かつ急激に起こるためには、問題は大気中の水蒸気だけだと私は思います。もし水蒸気が犯人だとすれば、カギとなる赤道地帯のシステムを解明しなければなりません。ご存じかもしれませんが、エルニーニョに関連して、何が起きているのかを理解しようと、いま詳しい調査研究が進められています。私は、北大西洋に流れこむ淡水の量が深海の循環を混乱させるのではないかと考えています。海流のオペレーション・モードを変え、それによって他の海域の変化を引き起こし、そのため熱帯地域の大気の水蒸気をもたらしのではないかと。もちろんこの水蒸気は北と南へ広がり、北緯35 から南緯35 までの大気中の水蒸気量を維持します。

最後に、過去の気候に関するこうした知見が将来にどんな意味をもっているのかをみてみたいと思います。まず最初にお話しするのは、皆さんもご存じの問題です。地球の人口はいま年率1.75%で増えつつあります。図10に示したように、この増加傾向が続くと、21世紀半ばの人口は140億かそれ以上に達するでしょう。幸いなことに出生率が低下しているからそんな絶望的な状態には至らないというのが、大方の予想ですが、それでも100億以上に向かっていることは事実です。温室効果ガスが大幅に増えると見られているまさにそのときに、養うべき人口が現在より50億人も多い時代へと突き進んでいます。今回ブループラネット賞を受賞したスワミナサン博士も話されるでしょうが、たとえもし気候変化が起これないとしても、この人口増だけでも人類にとって大変な問題です。

私たちが排出する二酸化炭素の量は、2つのことに依存しています。どれくらい人間がいて、どれくらいエネルギーを使うかです。私たちが使用するエネルギーはほとんど化石燃料から得ており、そしてこれが大気へ炭酸ガスを放出するのです。リオでの地球環境会議では、二酸化炭素の生産量を1990年のレベルに保つことが可能だという期待が語られました。しかし実際はすでにそのレベルをはるかに超えています。リオ会議の目標は達成可能だという政治家もいますが、私はそうは思いません。数字を挙げて言いますと、私たちは毎年7億トンの炭素を炭酸ガスの形で生産している。地球上の貧しい人々は生活水準の向上をますます求めていくだろうし、そのことはより多くのエネルギーを消費するというにほかなりません。

したがって大気中の二酸化炭素量は今後も増え続けることが分かります。どのくらいまで増えるかは、いろいろな条件がからんできます。奇跡が起こるかもしれませんが、環境を害さず経済的に可能な代替エネルギーも発見されるでしょう。図11に示したように、21世紀中に二酸化炭素の量は産業革命前の値280 ppmの2倍、つまり560ppmに達することは確実です。化石燃料への依存から抜け出せるようになる前に、おそらく700ppmかそれ以上になるでしょう。とにかく、最終氷河期の地球大気の炭酸ガス濃度は、約200 ppmでした。

図12にあげた二酸化炭素の増加グラフを見ますと、地球環境への警告の程度はモデルによって幅があります。それは水蒸気のフィードバックをどう見るかが異なっているからです。フィードバックがまったくないとすると、温暖化は約1.5 ほどで、これは大した問題ではありません。しかし二酸化炭素が2倍になると、多くのモデルが予想するように温暖化は3 、4 、あるいは5 にもなり、これが大問題を引き起こすことは万人の認めるところです。

問題はすでに十分複雑ですが、私はそれに加えて、過去の気候変化は緩やかにやってきたのではなかったことを申し上げたい。地球気候の変化の原因が何であれ、緩慢な変化ではなく、あるオペレーション・モードからまったく別のモードへと跳躍してきたのです。そこで当然疑問が湧きます。二酸化炭素の増加が引き起こす気候変化はこれまでと違ったどんな別のオペレーション・モードに跳躍するのだろうか。今のところコンピューターでこうした“激変”をシミュレートできていませんから、地球が一体いくつのオペレーション・モードをもっているのか分かりません。“激変”を引き起こす原因も全然分かりません。したがって私たちはいま、危険な領域に入りこみつつあるのです。私たちは今、危険な“獣”を目覚めさせているように思えます。気候システムは予想外のまったく新奇な動きをすることがあるのです。その可能性があることが分かったのは、わずかここ5年かそこらですから、将来この可能性がどのように現出するか、具体的には分かっていません。しかし少なくとも、私たちの行為について慎重でなければならないことだけははっきりしています。私たちはこの危険な気候システムについてもっとよく知って将来に備えなければならないし、また、たとえ炭酸ガスの増加による気候変化が大規模、またはもっと始末の悪いものであっても、あるいは地球上の農業環境を急変させたとしても、それに対処する力を貯えなければなりません。このことはしっかりと頭に入れておくべきでしょう。今後100年間にそうした変化が起こる可能性がたとえ1%だったとしても、その結果は悲惨なものですから、怠りなく準備をしておくべきです。

最後のまとめとして申し上げますと、私は生涯をかけて地球気候システムを研究してきましたが、それは私を大層謙虚にしてくれました。私たちは、このシステムの複雑さを過小評価してきましたし、また降雨量を左右する要因から、極地の大陸棚から深海へ流入する淡水の量にいたるまで、まだよく分からない現象の重要性を過小評価してきたと思います。こうしたモデル化の難しい自然プロセスは、気候システムの作用の仕方に巨大な影響を与えています。もし将来予測をしようとするなら、大規模な影響だけでなく、こうした小規模なプロセスをもっとよく理解することが必要です。

最後にもう一度、日本へ招待していただき、このような素晴らしい賞を与えてくださった旭硝子財団にお礼を申し上げたいと思います。妻にも私にも、なんと素晴らしい機会だったことか。来週はみなさんの素晴らしいお国を8日間も見て歩けるのです。ご清聴ありがとうございました。

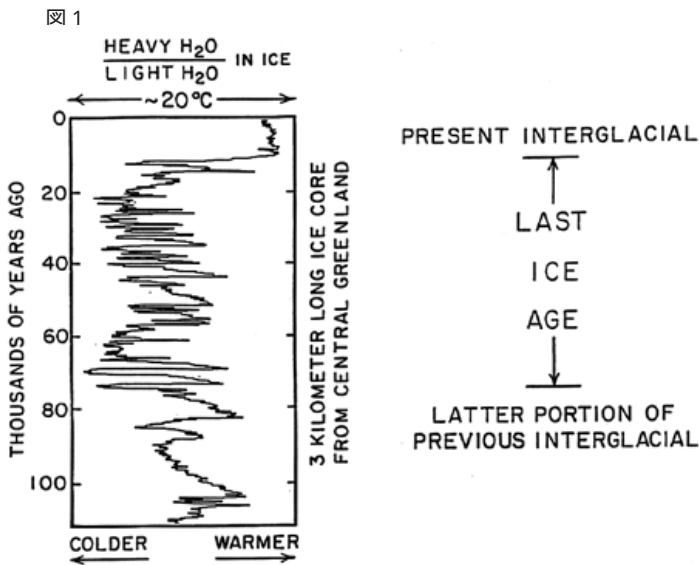


図1： グリーンランド中央部の最高地点でGRIPグループが掘りだした長さ3,000メートルのアイスコアに記録された酸素同位体比率(Dansgaard et al., 1993)。酸素同位体比率は気温と相関しており、重い同位体が減れば減るほど、気温は低くなる。掘削孔の温度測定値から、氷河期のグリーンランドの平均気温は、現在の間氷期より16度低いことが分かった。タイムスケールは、氷の年層を数えて得た。過去1万年だけがグリーンランドの気温がほぼ一定になっていることに注意してほしい。最終氷期と前回の間氷期の後半を比較してみると、大規模かつ急激な変化が起こったことが分かる。グリーンランドの気温は1,000年以上、同じ気温を保つことはなかった。

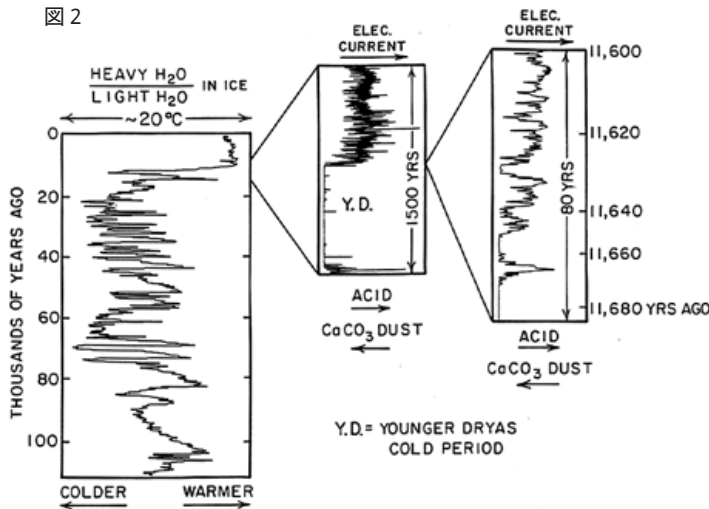


図2： グリーンランドの氷の導電性は、氷中の酸の量によって決まる。GISPのアイスコア(40キロ離れたGRIPのコアの複製)で測った値から、極寒期では導電性はほぼゼロになることが明らかになった。その理由は、風が運んだダストに含まれている炭酸カルシウムが雨となり、その雨量が酸の中和に必要な量を超えていたからである。導電性の値は氷を1対の電極で削れば連続的に測定できるから、非常に詳細な記録が得られる(Taylor et al., 1994)。上に見るように、この記録から、気候の変化は突発的に、ほんの2、30年間に起こっていることが分かる。さらにこの短い移行期にダストの量が2、3年単位で増減している。

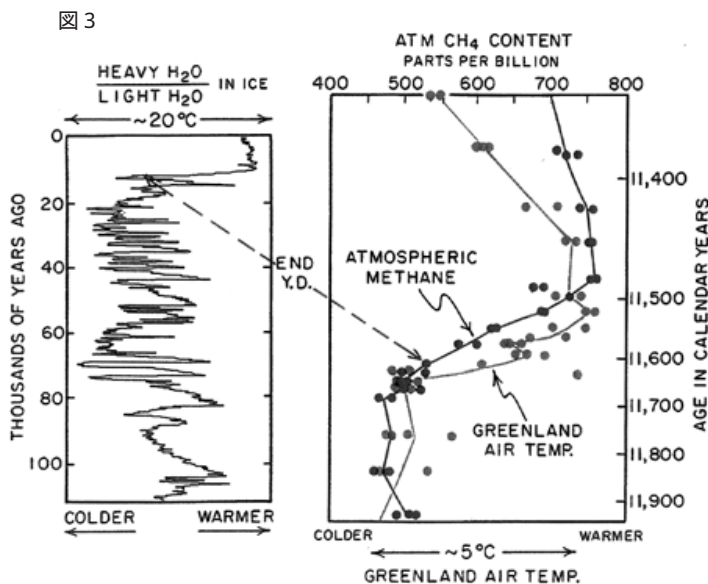


図3： 微量気体の濃度は、氷に閉じこめられた気泡に記録されている。とくに興味深いのはメタンガス。氷河期にメタンガスは熱帯の沼沢で大量に発生した。メタン分子はわずか10年かそこらで酸化されてしまうから、アイスコアに記されたメタンの量を測定すれば、生産率が分かる。図に示したようにヤンガー・ドリユース寒期の末期に大気中のメタンの量は約50%増えている(ロードアイランド大学エド・ブルックの未発表データ)。この増加は熱帯地方の降雨量が増えていることの反映でもあり、したがって沼沢地や湿地に触れている大気も増えていることになる。メタンの増加の時期とグリーンランドの気温上昇の時期との正確な比較をうために、ロードアイランド大学マイケル・ベンダー研究室のジェフリー・セベリンガウスは、気泡自体の温度を推定するスキームを作った。気泡は氷の上のフィルム(氷になりつつある万年雪)の70~80メートル下に閉じこめられているから、これは必要な作業だった。その結果分かったのは、急激な温暖化と積雪量の増加に関連した気候条件の変化によって、フィルム中深くにある窒素ガス中の¹⁵Nの比率が増えているのである。セベリンガウスは予想どおりの変化を発見し、グリーンランド温暖化の2、30年間に大気中のメタンガス濃度が増加しはじめた(したがっておそらく熱帯の湿潤化も)ことを明らかにした。

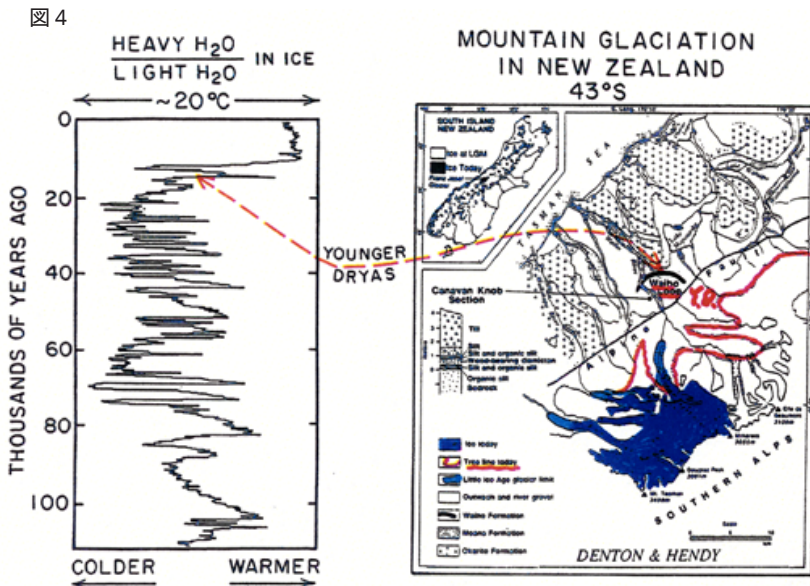


図4： 現在、フランツ・ジョセフ氷河の先端からずっと下方の谷間にはっきり残っているワイホ・ループ・モレーンは、ヤンガー・ドリユアス期間に南半球が大冷却された証拠である。このモレーン基底部分で見つかった木に記された多様な放射性炭素が何年前のものかというデータから、デントンとヘンディは1994年に、氷河の誕生が、スイスアルプス北部にあるいくつかの小さな湖に記録されたヤンガー・ドリユアス寒期の開始とほぼ同期、50年と変わらないことを明らかにした。

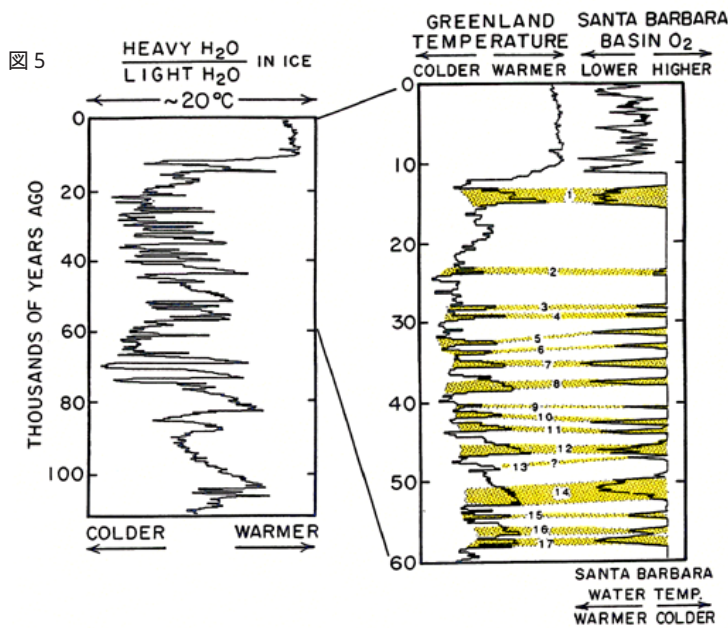


図5： サンタバーバラ海盆で1,000年に1メートルという速い速度で沈積した堆積層には、グリーンランドのアイスコアに記録されたいわゆるダンスガード・ウシュガー・イベントがすべて記録されている。パールとケネットは(1996年) 堆積層には層の見える部分と、層のない部分が交互に出現することを発見した。層が見える部分は、堆積物に入りこんだ水が無酸素で海底の虫による侵食がなかった時期を示し、他方、層のない部分は水に酸素が含まれていて、虫による侵食によって堆積物が完全に攪拌された時期を示している。そして層のある部分とない部分が交互になっているのは、まさにグリーンランドの気温の交互の変化と対応しているのである。ヤンガー・ドリユアスのように極寒期には、酸素に富む水が北太平洋の水温躍層(サーモクライン)へと流入したに違いない。今日の北太平洋の表層は塩分濃度が低いため、サーモクラインより下層の海中で直接循環は行われないが、こうした交互の堆積層は北太平洋海域の塩分濃度が大きく変化したことを示唆している。

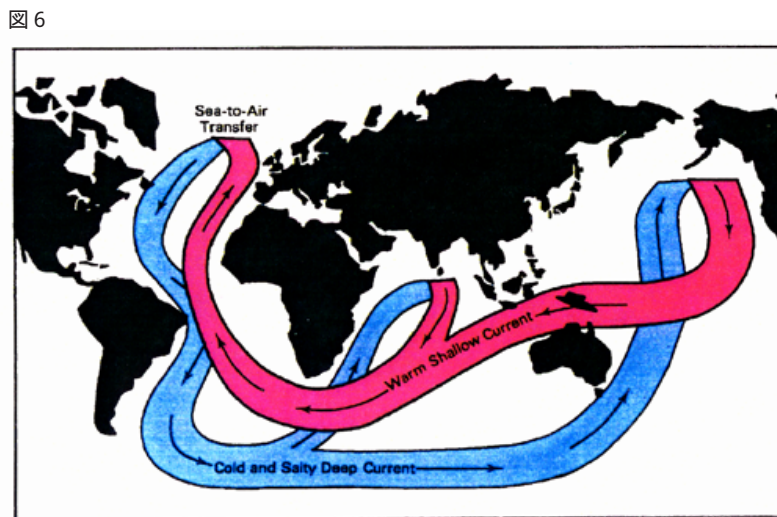


図6： 海洋の大コンベアベルトは、暖かい海水をアイスランド付近へと運び、そこで冷たいカナダ気塊で冷やされた海水は密度が高くなって底の方へと沈んでゆき、南へ移動する水塊となる。その海水流量(1秒間に2,000万立方メートル)はアマゾン川100本分に相当し、あるいは地球の総降水量と等しい。これが大気へ放出する熱量は膨大であるため、北ヨーロッパの気温はもしコンベアベルトがなかった場合と比べて5~10 暖かく保たれている。

図 7



図 7： 氷河期のピークには、カナダ全域と合衆国中西部および北東部は、厚さ数千メートルの氷板に覆われていた。その最南端は現在のオハイオ川沿岸の都市シンシナチにまで達していた。南半球の同じ緯度でも、ニュージーランドとアンデス山脈の山岳氷河が海にまで張りだしていた。

図 8

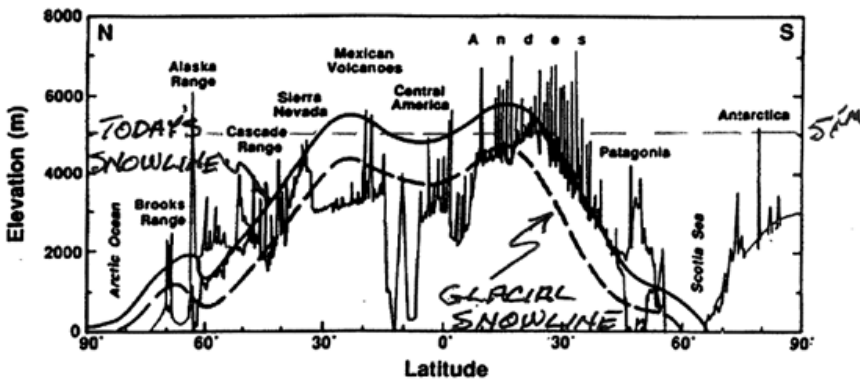


図 8： アメリカのコルディレラ山脈に沿った緯度で最も高い山々の頂は、現在でも氷河に覆われている。0 の等温線より高度の高い所では、雪は融けないであるいは蒸発しないで積もっていく。図中の実線は、純積雪の下限を示す高度が緯度とともに変化していることを示している。地形学的データに基づいて再構成した値(破線)を見ると、氷河期ピークにはこれら山々の雪線はほぼ海拔1,000メートルにまで下がっていたことが分かる。トムソンら(1994年)が熱帯のアンデスの山、ワスカランで標高6,000メートルの高度から回収した氷河期の氷に含まれる酸素同位体のデータと合わせて考察すると、雪線がこんなに下がっていることは、氷河期の熱帯がたんに低温だっただけでなく、乾燥していたことを示している。

図 9

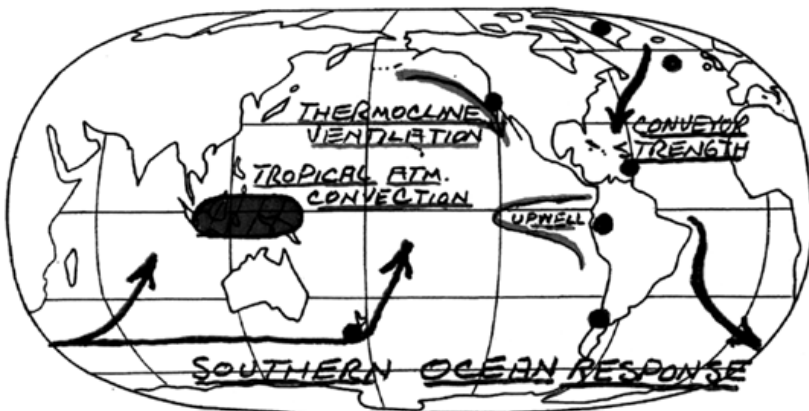


図 9： 地球気候変化をもたらすプロセスはおそらく次のように考えられる。大西洋コンベアが動く強さが大きく減少すると、その影響は海洋全域に現われる。例えばサンタバーバラ海盆では海洋上層のオペレーションに変化があったことが記録されている。これらの変化の影響で、例えば赤道周辺の東太平洋における湧昇の強さが増加したことは十分考えられる。エルニーニョの研究から、湧昇の変化は熱帯地方の大気に広範な変化をもたらすことが分かっている。湧昇の変化は熱帯地方における海面から大気への水分蒸発率を減らすのではない。水蒸気は地球最大の温室効果ガスだから、その減少は地球冷却化につながると思われる。

図10

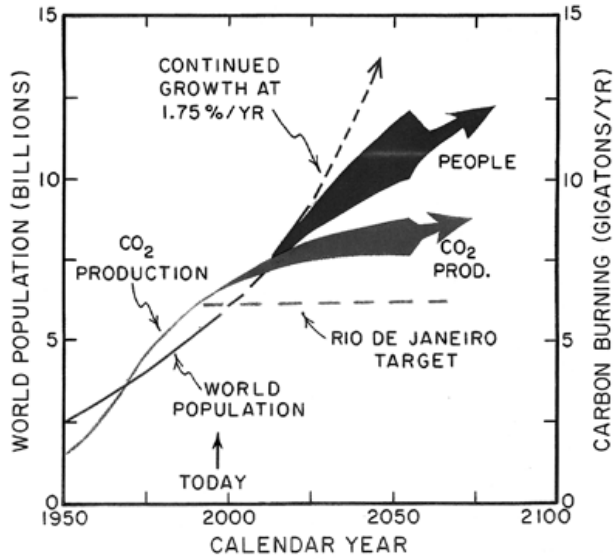


図10： 地球の人口増加率は現在、年1.75%。これが徐々に減少したとして、21世紀半ばには、世界人口は100億から150億の間になるであろう。化石燃料の燃焼から出る二酸化炭素を1990年のレベルに保ちたいとしても、人口が増えればエネルギー需要も必然的に増大する。21世紀半ばには年間最低7.5ギガトンの炭素が大気中に排出されるようになるだろう。

図11

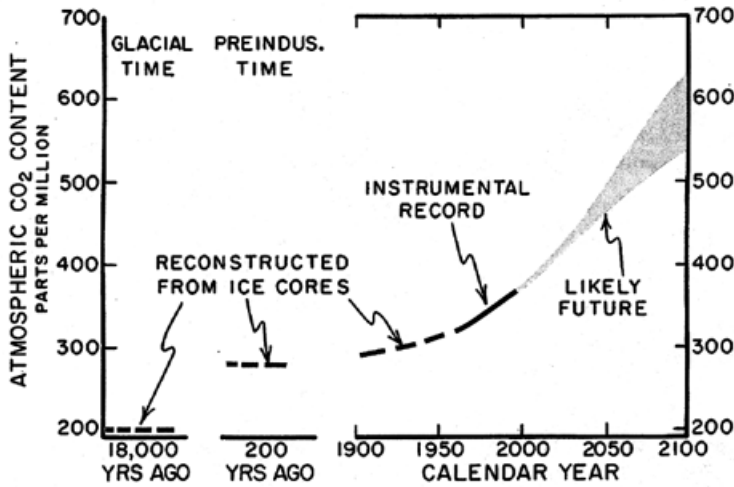


図11： 最終氷河期には大気中の炭酸ガス濃度はわずか200ppmだった。氷河時代が終わると、やがて280ppmに上がり、産業革命の開始以前までほぼこの値を保った。ところが過去100年間で、主として化石燃料を燃やすことにより炭酸ガス濃度は現在の365ppmにまで上昇を続けてきた。21世紀末期にはおそらく産業革命以前の2倍の数値になると予想される。

図12

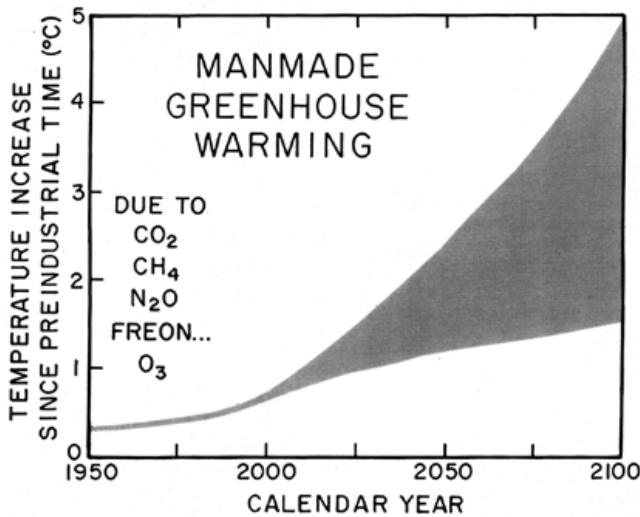


図12： 大気中の炭酸ガスやその他の温室効果ガスが現在のように増え続ければ、地球の温暖化は確実に進行する。しかし残念ながらどの程度温暖化するかについては、水蒸気もたらす温暖化の様相が確定できないために分からない。21世紀末には、地球の温度は現在より1から5度までの範囲で高くなると推定できる。もちろんこの推定は、温室効果ガスの増加によって地球システムがまったく別のオペレーション・モードに急変しないという仮定に立っていることである。

1996年ブループラネット賞受賞者
ウォーレス・S・ブロッカー博士

対談ゲスト

奈須 紀幸博士(東京大学名誉教授)

東京帝国大学第二工学部物理工学科および東京大学理学部地質学科卒業後、1951年から55年までカリフォルニア大学スクリップス海洋研究所に留学し、Ph.D を取得した。帰国後、東京大学に戻り、理学博士号を取得、助教授を経て、1962年、新設された東京大学海洋研究所海底堆積部門担当の教授に就任。1984年に停年退官するまでの間4期8年、所長を務めた。その後、1994年まで放送大学教授、現在は同客員教授のかたわら、内外の諸機関の委員を務めている。古久慈川の埋積谷の発見や、プレートテクトニクスの一環として、深海掘削の結果、親潮古陸を発見し命名するなど、日本の海洋地質学の先駆者として活躍し、現在は国内外の共同研究の推進に努め、その業績は海外からも高く評価されている。



奈須 ブロッカー博士の今回の受賞を心からお祝い申し上げます。

今、博士の研究の一端である比較的新しい分野の研究についてご講演がありました。ある意味では、人類の将来を救う仕事を担っていらっしゃると思っております。これは、人類に対しての大きな貢献であると思っております。

実は、1959年、今から40年近く前になりますが、戦後第一回目の国際海洋学会議がニューヨークのできたばかりの国連ビルで開催されたことがありました。日高孝次先生をはじめとする数十人の日本人研究者の一員として、私も会議に出席いたしました。そこでは、戦争中、全くお互いに交流が途絶えていた学者達一同に会して、それまでに溜めに溜めていた成果を発表されたので、非常な感銘を受けました。

その中で、ブロッカー博士のプレゼンテーションがたいへん光っておりました。丁度、1952年に発明されましたリビー博士の炭素14法による年代測定を早速アプライされまして、動植物の中で気候が暖かくなった場合に栄えるもの、冷たくなった場合に栄えるものを仕分けて、いろいろ残されているものの中から拾いいただきました。そして最後の氷期といいますが、大規模に大陸氷河が発達していた時代が終わって、後氷期あるいは最後の間氷期といっているPostglacial Ageに入ったのが、約1万1000年前から1万2000年前であると指摘されました。それまで、確かに最後の氷期があって、そのあと気候が温暖化したということは、わかっておりました。けれども、定性的であり、定量的にいつから後氷期が始まったかは、誰にもわからなかったのです。それを1959年に博士が発表され、今日までこの半世紀の間、その値は変わっておりません。つまり、博士がそこでスタンダードを提出されたわけです。

このプレゼンテーションによって、その後、後氷期の研究が世界的にたいへん進歩するわけですが、その動機をつくってくださった方がブロッカー博士です。私はそのとき以来、非常に博士を尊敬しております。今日、この壇上で並ばせていただけることを大変光栄に感じております。

その後も今、お話がありましたように、重たい水と軽い水、同位体酸素18と酸素16の比、水温が違おうとその比が違ってくるということがユリーという方により発見されました。同じ1959年の会議でシカゴ大学のローエンシュタム先生がその結果を用いて、化石となった貝殻が暖かい水に住んでいたのか、冷たい水に住んでいたのかを発表されました。これも非常に大きな発表でした。

こういった研究結果を使われて、グリーンランドをはじめ、氷河のボーリング結果から得られた事実と、それに基づく推論の数々をお話し下さったわけです。その他、博士は学者の方々を集めて世界的に色々な組織を作られて、リーダーシップをとっておられます。先程話されたブロッカーのコンペアルトという海の中の大きな循環を発見されて、一つの目安を作られるなど、非常に素晴らしい業績を次々とあげておら

れます。

実は私は1951年から1955年までカリフォルニア大学のスクリップス海洋研究所に留学していたのですが、そのころの所長のロジャー・レベル教授が「努力も非常に大事だが、努力だけではどうにもならない人達もいる。運も伴わなくてはならない。自分は非常に運が良かった」と、私に率直に個人的におっしゃいました。私はよく、この話を思い出します。ブロッカー博士も、もちろん努力の人であります、その上非常に強運の人ではないかと思えます。

ご家庭で、ずっとご両親の愛情の元に育ち、大人になられたわけですが、恐らく先生がそういう環境のなかでどうしてこの道にお入りになったのか、その動機についてお伺いすることができればと思います。たとえば、今日本では、若い人達をスティミュレートすることが大事だといわれております。本日聴講されていらっしゃる方々の中にも若い人達がたくさんおられます。その皆さんへ、またご年輩の方々はお子様やお孫さんにブロッカー先生の動機をお伝えいただければ、こういった輪が広がっていけると思います。それでは、大変プライベートな事を質問して失礼かと存じますが、先生にお伺いしたいと思います。

ブロッカー 私も兄のホーウィも遅咲きの人間でした。母は知的な人で、学校でしっかり勉強するように励ましましたが、いい成績がとれなかったとき罰を与えるようなことはありませんでした。母は前向きの勇気づけをしてくれました。私がこの道に進むにあたって知的な動機があったわけではありません。宿題はよくしましたし、成績も良かったのですが、何といたってもバスケットボールに夢中でした。スポーツが好きだったんですね。大学に入ったとき、私の「ビッグブラザー」になったのがポール・ギャストです。彼は私のことを人生の目標も持たずに毎日を過ごしているといって、心配してくれたのです。まったくそのとおりで、私はいまではポール・ギャストに大変感謝しています。彼は私に人生の大きな目的を持たせたいと思い、1年間あれこれ努力したのですが、うまくいきませんでした。そこで私が3年生になったとき、コロムビア大学のラモント研究所で夏休みのアルバイトをするように取り計らってくれました。私が科学研究の道に進むことを願ったのでした。

私は彼の言うとおりにし、1952年の夏、ラモント研究所で働きました。グレースともそこで出会いました。そして私はいまでもここにいるわけです。ですからポール・ギャストの仕掛けはまんまと成功したというわけです。1年もたたないうちに、私は新設の放射性炭素研究室で研究するようになり、科学研究の魅力に取りつかれました。ありがたいことに私はこれまでの生涯でまさにやりたいことだけをやって、生きてこられました。例えていえば皆さんがクロスワードパズルを解くときのようにであり、面白いと思ってやっていけば、精神的にもいいですね。いってみれば科学研究も大きなパズルを解くようなもので、重要な1片がびたりとはまれば、非常に嬉しいものです。ましてやある発見をしたときの嬉しさは格別です。賞をいただくのも素晴らしいことですが、真の喜びは創造性から生まれます。

確かに私はラッキーでした。良い大学に行き、良い教授に出会え、エキサイティングな新しい学問であるアイソトープ研究の道に進むこともできました。また私の研究室は非常に優秀な大学院生に恵まれています。私の業績は、もちろん彼らの業績でもあります。彼らがいなかったら、私がこの場にいたかどうか分かりません。私は6歳で科学者になろうと思ったなどは、とても申せません。事実、そうじゃなかったのですから。ただ私は数学が好きで、数学的才能はあったと思います。だから自然にこの道へ辿りついたのでしょう。もっと勉強しろと毎日強制するような親がいなくても、ここへ辿りつくことができ、チャンスを上手に生かせたのだと思います。

奈須 どうもありがとうございました。実は、深海研究というのは1872から76年にかけて英国軍艦チャレンジャー号が世界一周の航海をしたことに始まったわけです。今から約120年ほど前のことです。ですから、今博士が行っております深海の研究は非常に若い学問なのです。しかし、幸いにしてこの一世紀の間に非常に多くのデータを蓄積してきております。

それから、もう一つは、話がわかりますけれども、1898年にキュリー夫妻が、ラジウムを発見されました。これは正確に崩壊していくので、時計として使えることがわかりました。この応用により20世紀に入りますと、地質の絶対的年代がわかるようになりました。それまでは、化石が古いか、新しいかで相対的に調べていたわけです。ただし、非常に多くの放射能を持っている物質、例えば、ウラン238が44.7億

年という半減期であるのに対し、ルビジウム87ですと488億年という長い期間になります。それより短い数万年間というのを計る手段がなかったのです。それが1950年にリビー博士が炭素14という同位体を使うことを発見しました。半減期が5730年でございます。ですから、丁度、数万年の間をアプライすることができます。このことが、例えば、考古学とか氷河に関する研究、特にブロッカー博士が行っていらっしゃる研究に非常に役に立つということとなったわけです。

また皆様をご存じのように今から半世紀ほど前からコンピューターが発達いたしまして非常に多くのデータを処理できるようになりました。ご記憶にあるかと思いますが、それまでは皆さん手動で計算機を回していたわけです。しかし今では、処理能力が完全に違っていました。

さらに海に関しますと、人工衛星を使うことが出来て、少なくとも海の表面近くの水温とか最近では流れの方向についても、一挙に全面的に同時につかめることになりました。ですから博士は運もお強い方だと思うわけでございます。

1つには深海研究が若いにもかかわらず、非常に多くのデータが集まっていたということ。2つ目は炭素14法がお使いになれたということ。3つ目はコンピューターを駆使することができたということ。そして4つ目は人工衛星のデータを使ってそれまでよくわからなかった海面のことを一挙に全般的に把握することができたということ。これらが相乗効果をもって博士の自然の解明につながったであろうと思います。

ブロッカー 私もそう思います。本当にラッキーな人間だったと思います。

奈須 少し前に話を戻させていただきますけれども、先ほどの講演では、博士が直接タッチなさいましたお仕事について、非常にかみ砕いて一般の方にも分かりやすくご説明くださいました。しかし、それでもいわゆる村言葉という私共の仲間の言葉がありましたので、前提となりますいくつかのことについて、僭越ながら私が敷衍して申し上げたいと思います。

実は怖いことなのですが、どういうわけか約2億5000万年おきに地球上では大氷河時代というのが襲ってまいります。10くらいの説明がありますが、皆が納得する理由はまだありません。この研究の最初は1837年にスイスのアガシーという学者がヨーロッパで迷子石という下の地質とは全く違う地質の石が上に転がっているという現象の謎を、氷河が迷子石を持ってきて残していったせいではないかと考えて解いたことです。このことで今は陸地になっているヨーロッパも昔は分厚い大陸氷河が覆っていたのではないかと推定を生んだのです。その後、大陸氷河の研究が急速に進みました。そして、実際の最後の大陸氷河時代は200万年前 - 180万年前から始まっているといわれていますが、少なくとも過去40 - 50万年前から北米大陸ではネブラスカン、カンザス、イリノイアン、ウィスコンシンの4回の大陸氷河が発達した時代があり、その間に間氷期があったといわれています。今は、それより前にも氷期と間氷期が何回もあったことが分かっております。現在は明らかに間氷期の一つにあたりますが、今後、氷期が来るかどうか分からないのです。これは怖いことです。それで、最終氷期の後、現在までを後氷期と呼んでおりますが先ほども申し上げましたように、数値的に後氷期がいつから始まったのかということが分からなかったのです。1959年にブロッカー博士が初めて定量的に指摘されたわけです。気候学的に見た場合に後氷期は1万1000年か1万2000年前ごろから始まったというわけです。

私が一番面白いと思いますことは、ギリシャのプラトンが失われた大陸アトランティスのことをいっております。これは、逆算すると1万1500年前のこととなっております。個人的に私はなにか気候の変化と関係があるのではないかと疑っているわけです。同時に1959年の国際海洋学会議の時にやはり炭素14法を適用して、スクリップス海洋学研究所の私より一年後輩のコックスさんと私の恩師でありますシェパルド先生が、貝殻をテキサス沖の大陸棚から集めて年代を測定し、発表されました。波打ち際のごく浅いところに住んでいた貝の殻だけを選び分けてそれらの年代を測定したわけです。時代が新しくなるにつれて、貝殻が採れた水深はだんだんと浅くなってあります。そして現在の海岸付近では過去5000年から6000年位までの年代の貝殻が混在してあります。1万8000年程前の貝殻が80メートルの深さにありました。そして、1万8000年前から海面が上がってきまして、1万1500年前ごろに急激に上がってきていることを発見されており、過去5 - 6千年前くらいから現在までは海面が安定していたのです。

ただ、私がおのときからずっと妙に思っていたことがあります。コックス先生とシェパルド先生がその

後も、この海水準変動の研究を続けまして、この最後の氷期が、海水準変動で見ると2万年前に終わっているとの結果を得ておられます。2万年前から以後、海水準が上がっているということです。気候学的に見た場合には1万1500年前後に明らかに暖かくなっているわけです。そこに、8500年の差があります。これは、学問的には非常に大きな疑問なのです。このことについて、一昨日ブロッカー博士といろいろお話ししたのですが、これから申しますことは私の推定で当たっているかどうかわかりませんが、お話しさせていただきます。

何千メートルもの高さの大陸氷河では2万年前ほどから太陽の日射が、暖かくなってそれで氷河が溶けて流れるというのではなく、昇華現象で直接氷から、水蒸気となり、その後、雲や雨となり、海に戻った可能性があるかと推定しております。以前このことをヒマラヤ登山家の今井通子さんにお話ししたところ、手をたたかばかりに賛成していただきました。実はヒマラヤの高いところに登って氷壁にとりつくると南に面している表面はガザガザになっているとのこと。このことは明らかに昇華現象の結果だということが言えるとおっしゃいました。また、北側に面している氷壁はつるつるで、ガラスを磨いたような面であるそうです。ですから、たぶんそういうことがあったのではないかと思うということでした。

今、私は、後氷期の始まりについて、海水準変動から見た場合と、地表近くの気候変動から見た場合で8500年の差を生じていることの一つの説明として、高いところにおける大陸氷河からの昇華現象が原因ではないかと思っております。地表近くの大気が温暖化し、植物が冷たい時代のものから暖かい時代のものになり、動物でも、例えば海の有孔虫のフォラミニフェラが冷たい水のものから、暖かい水のものになり、その数が増えたのが1万1000年から1万2000年前頃からだったのではないかと思っております。そういう意味でも博士のご意見をお伺いしたいと思っております。

ブロッカー たしかに氷河作用に関するまったく新しい説だと思います。「ネイチャー」誌に出して、その反応をみるといいですね。私も最近、「ネイチャー」に論文を送ったのですが、採用されませんでした。あまり重要とは見なされなかったみたいです。その点では、奈須さんの説の方が注目を浴びると思います。

奈須 実際は、この点につきまして、OECDの「メガサイエンスフォーラム」というシリーズの雑誌の一つに出しました。しかし、これまでのところ、全く私の意見に対する反論というのは頂いておりません。

1961年にアメリカが始めた深海掘削計画は大きな成果を挙げながら10数年が過ぎた段階で、アメリカの呼びかけでインターナショナルになりました。日本もその始めの1975年に入りました。日本の参加については私も努力をした一人です。1977年にグローマー・チャレンジャー号というアメリカの掘削船が東京に入って参りました。このあとの第57航海には私も乗船して日本海溝域の掘削に従事しました。

実は話がそれますが、一昨日当時のデータを整理しておりましたら、プレス関係の代表としてNHKの方と朝日新聞の方に招待状を東京入港時に船から差し上げていたことがわかり、朝日新聞への招待状に本日のもう一人の対談者、石弘之先生のお名前が出ておりました。今から約20年前のことですが、今日一緒にするのでたいへんうれしくなりました。

当然、ブロッカー博士は深海掘削のデータも、お話にありましたように活用して下さっております。私はこの深海掘削計画の価値を高く評価しております。日本でも今、掘削船を作ろうかという動きが強く起こっておりますのを強く支持しております。アメリカの船と並んで一緒に協力して深海掘削計画をやりたいという希望が盛り上がっておりますが、この点について何かご意見がございましたら、博士にお伺いしたいと思います。

ブロッカー さきほどサンタバーバラ海盆から得たデータをお見せしましたが、このコアはいまおっしゃった掘削船で得たものです。例えば1000年間に1メートル以上というような速い堆積率の区域で過去10万年間を調べようとするなら、クーレンベルグの発明した従来型のピストン掘削装置ではだめです。それだと深さ10メートルか20メートル、あるいは30メートルぐらいなら掘れます。大型機なら50メートルまで可能でしょう。しかし深さ100メートル、150メートル、あるいは200メートルまで掘り下げて堆積物を取り出そうと思ったら、油圧式ピストンコアリング装置が必要です。こういうふうにするんです。まず、何段にもつないだパイプを海底に降ろしていく。海底に着いたらパイプ内部のピストンコアリング装置で堆積層を

20メートルほど掘り下げてから、引き上げる。これは海上の掘削船からやるわけです。そしてまたコアリング装置を降ろして、さらに20メートルを掘り進む。こうして堆積層を壊さずにそっくり掘りだすことができるのです。普通の掘削機だと、掘りだした堆積層はぐちゃぐちゃに攪拌されてしまい、調べたいと思う多くの大切な特徴が失われてしまいます。油圧式ピストンコアリング掘削機なら、たくさんのデータが得られます。ジム・ケネットがカリフォルニア沖の大陸棚でやったような調査は、ほかにはまだそんなに見られませんが、もしダンスガード・ウシュガー・イベント期にどんな海洋循環があったかを理解したいのだったら、世界のあちこちでこうした堆積コアをもっともっと掘りだす必要があるでしょう。非常に興味あると思われる地域の1つは、アジア大陸の太平洋側、そう日本近辺です。日本の方々新しい掘削船を作ってくださいれば本当に有難いと思います。

奈須 先程私は、コンピューター時代に入り非常に多くのデータの処理ができるようになったと申し上げました。ブロッカー博士は特に数字をお上げにはなりませんでしたが、あれだけの成果をあげるためには、非常に多くのデータを処理なさったと思います。そこで、大体の数で構いませんので、いろいろな海の中の個々のデータについて、どのくらいの数を先生はコンピューターで処理なさいましたでしょうか。

ブロッカー ゼロです。驚きましたか。私自身はコンピューターは使いません。専門家に任せたのです。昨日の表彰式ではお見せしませんでした。データの一部は、私の友人で私が世界最高の海洋モデル学者と思っているエルンスト・マイヤー・ライマーが出してくれました。彼はクレイ社のコンピューターを使っており、彼の研究所は最先端の高速高性能のコンピューター装置を備えています。彼はこんな素敵なことを言ってくれました。「ブロッカー、君は僕のコンピューター・モデルを診察するのが僕より上手だね」と。だから私は彼のところへしょっちゅう行って、医者求真事をやるんです。モデルは今日の海洋を模したと思われまから、その結果を見てエルンストに言うわけです。「これは正しくない、間違ってるよ。重大なミスだ。これをなくすには君のモデルを手直ししなけりゃ」と。私たちは、5、6年も一緒にやっただしょうか。で、いまではこのモデルははるかによくなりました。

実は今、東京でエルンスト・マイヤー・ライマーのモデルを使ってある会議が開かれているのです。日本は以前から大型発電所から出る炭酸ガスの液化とその深海への投棄に熱心に取り組んでいます。この方法は二酸化炭素が大気から海へ循環する近道となるわけです。この会議の講演者の1人、ボブ・ペカストロ氏がエルンスト・マイヤー・ライマーのモデルを使って、炭酸ガスを深海に捨てた場合、海面に再び戻り、大気中に放出されるまでにどのくらいの期間がかかるかを算出しています。

そういうわけで私はコンピューター・モデルの崇拜者ですが、自分で大量のデータを処理しているわけではありません。科学のカギを握るのは、何が重要かを判断することです。情報は無数にありますが、問題の本質に関係するのは残念ながらほんのわずかです。成功に到る科学者と失敗に終わる科学者の別れ道は、膨大な情報の中からほんのわずかの本質的情報を拾い出すにはどうしたらいいか、にあると思います。幸いにも私はこの面の才能があったのでしょ。

前にも申し上げましたが、優れた科学者は一度に27のことを手懸けることができます。なぜ27か、などと聞かないでください。つまりこういうことです。あなたはいくつかの問題に興味をもったとする。それらはみんな関連はあるが、別々の問題だとします。あなたは各々全部やろうとするが、壁にぶつかってしまう。そしてこの状態は、ある新しい情報が出てきたとき、あるいは誰かがあるアイデアを吹き込んだとき初めて、前進するのです。ハンス・ウシュガーが、私たち全員がすでに目にしていながら気付かなかったことを指摘したことがあります。私はそれをそんなふうに考えたことはなかったのですが、それがきっかけとなってこの分野の問題に集中し、過去の気候変化の原因を解明する新しい道が開けたのでした。

ですから、ハイテクがなければできないことがたくさんある一方、ハイテクがあってもそれだけではだめです。私たちは問題を解決するには諸々の要素を頭の中でオーケストラのように1つに総合する必要があることを忘れがちではないでしょうか。つまりある意味では、科学とは複数の頭脳のチームプレーで進むものではありません。主としてある1人の頭脳で前進するのです。私の場合は、幸運にもそうだったのでした。

奈須博士に申し上げたのですが、私がラッキーだった1つの理由は、まだ若い大学院生のとき、グレート・ベイスン考古学会議で教授の代わりに放射性炭素による年代測定法について講演する機会をもったことでした。1954年のことで、この年代測定法は誕生わずか4年のほやほやの理論でした。私の講演が終わったとき、1人の男が近付いてきました。カウボーイブーツにブルージーンズ、口にくわえたパイプには短い葉巻がくゆっていました。ガニマタでたったいまネバダの牧場からやってきたように見えました。彼がだしぬけにこう言ったのです。「どうやら君はよく勉強してるようだね(私は数学や物理のことを言っているのだと思いました)だがな、地球のことはちっとも分かっとらん。わしのところで3週間一緒にやってみなさい。人生が変わると思うよ。まさに衝撃でした。私はグレースを呼び出し(そのときもう子供が何人もいたし、まるで教会のネズミみたいに貧乏だったんです) ウシュガー教授が人生を変えてくれるというから、3週間留守にしてもいいか、と聞きました。妻は、費用を彼がもってくれるなら行ってらっしゃい、と答えました。そこで私は彼の許へ出掛け、彼は私の人生を変えたのです。つまり堆積層の読み方を教えてくれたのでした。

もし私に能力があるとしたら、それは非常に異なった種類のデータを読む能力でしょう。もうお分りでしょうが、最先端の同位体年代測定値とは別に、山岳氷河や深海の堆積物が意味するものを読むということです。私は雑誌で読んだりこうした会議で得たデータ類を通して、真に役に立つものをピックアップし、別のデータを付け加えて、この複雑なパズルを解こうとしているのです。

奈須 素晴らしいエピソードを聞かせていただきました。それでは、だいぶ時間が差し迫って参りましたので、最後に先生にお願いがございます。今後の研究の一つのテーマとしてお考えいただきたいのですが、これはやはり、1959年の時点に立ち返りますが、コックスとシェパルドがプレゼンテーションした海水準変動、海面変動ですね、約5 - 6千年前から今日まで奇蹟的に海水準が安定しております。これが説明されていません。私は人類が文明をかくも急速に発展させた原因の一つに、この5 - 6千年間の海水準の安定があると思います。現在の海岸に沿って大きな都市を作ることができ、それが、水没することもなく、また、山の上に残されることもなく、海岸で発展することができた。これがある意味でのベースラインと言っているかと思うのですが、将来、このベースラインがどう変わるかを誰もまだ説明していません。もちろん、多くの科学者の方が二酸化炭素の増加によって海水準が変動することがあるといったことをスーパーコンピューターをつかって議論しておられます。ただ、世界の海面を変えるような何か秘密を、自然が隠しているのではないかと私は非常に心配しています。わずか2万年前には世界中の海面が120メートルから140メートル現在の海面よりも下がっていたのです。過去約5 - 6千年間、幸いにして海水準はほぼ同一のレベルに保持されてきています。しかし、その点についても将来を予言することが必要だと思います。それには、もっとたくさんの陸地はもちろん、海のデータが足りないのではないかと考えております。ですから、さらに多くのデータを海、あるいは大陸から集めることができれば、そのへんの予言もできるし、なぜ2億5000万年おきにこの地球に大氷河時代がくるのかという謎を解くキーを得られるかと思えます。先生のような天才的な方にぜひこのような問題に手を染めていただきたいと思いたいと思えます。やっていただけますでしょうか？

ブロッカー 自分が天才かどうかなんて分かりません。ただ複雑な問題を解こうとしているだけです。グリーンランドの気温が一定しているのと同じ理由で、この期間、海面の水位も一定を保ってきました。ただし海面が一定レベルを保つようになるには、より長い時間がかかりました。巨大な氷板が融けるのに時間がかかったからです。氷板がほとんど融けたのはおそらく6500年前ぐらいでしょう。気候が一定モードを保っているのは、この9000年ほどです。ですから最初の2、3千年で氷が融けて、それ以後、地球の気候は大変安定しています。海面の水位と氷河の大きさがほとんど変わっていないというのは、非常に重要な観測データです。グリーンランドにはまだ大量に氷がありますが、もしこれが融けたら、海面は6メートルほど上昇するでしょう。南極の氷が融けたら、海面の上昇は55メートルになるとみられています。氷は、海面の上昇をもたらす水を大量に貯蔵しているという役割をもっているのです。

そのことについては前の間氷期についてお話したとき見ましたが、私たちが何をしようとしているかはしばらく置いておきましょう。もしも今後、地球が知性ある人々の手に委ねられずに推移した場合、

あと2、3千年以内に気候は突然変化し、より氷河期に近い気候になるでしょう。過去においてはそうでした。現在のような温暖期の最後に何かが起こると、地球は突然、寒冷期になるのです。炭酸ガスの排出によって氷河期への移行が引き止められるという意見の人もいます。しかし私は絶対にそうはならないと思います。なぜなら時間の尺度が同じではないからです。私たちはこのまま炭酸ガスをあと2 - 3百年出し続けるでしょうね。しかしその2 - 3百年で次の氷河期が始まる可能性は1%かそこらでしょう。氷河期への突入は、そうですね4千年後くらいでしょうか。そのくらいになれば、いつ突入してもおかしくありません。

海面の水位に影響を与えようとしているのは、地球の温暖化ですが、これには2つの側面があります。1つはグリーンランドと南極の氷が次第に溶けていくこと、もうひとつは、温暖化が海水の温度を上げることによって、海水が膨張することです。海水が膨張すると、海の水位が上がり、陸地を浸します。ですから氷が融けなくても、地球温暖化によって21世紀の海面は50センチほど上昇してしまいます。地球上の多くの場所にとって、これは大問題です。氷河の融解については、それを予測するのは非常に難しいことが分かっています。たくさんの方がこの問題について述べていますね。もちろん誰にとっても知りたい問題でしょうが、実際は非常に難しい。その理由の1つは、高緯度の海洋では深海でミキシング(攪拌)が起こっているため、極地の気候は気温変化の影響を受けにくいのです。つまり高緯度の気温を上げるためには深海の水温を上げなければなりません、それには長い時間がかかります。この深海の循環が温暖化によってどの程度変わるのか、私たちにはまだよく分かっていないのです。温暖化は海水の密度を小さくしますから、循環の速度は遅くなるはずですが、深海の水循環については、まだよく分かっていないことが多いのです。したがってそのモデル化についても、適切なものができるとは言いがたいのが、実情です。

私たちが学ぶことの中には、将来に対処するのに役立つと思われる事がたくさんあります。温暖化への対処の仕方いろいろ考えられます。私たちは問題をあらゆる方向から考察し、多大の努力を費やさなければなりません。なぜならいろいろな理由で私たちは非常に困難な時代へと突入しつつあるからです。私たちは将来の戦争や経済問題を心配してきましたが、それ以上に将来の地球環境に注意を払う必要があります。少なくともアメリカでは、軍備に膨大な資金を注ぎ込んでいるのに比べて、環境保護の実践にはほとんど金をかけていません。深海の定期的モニターはまったくやっていません。私の専門分野でいえば、深海の変化は真っ先に高緯度の海洋に現われるはずですが、深海の水流や水温、放射性アイソトープなどを測定するモニタ - ステーションは、私にとって必要不可欠ですが、資金もないし、実際にやろうという望みさえ持てないのが現状です。私たちは、この美しい地球で起こっていることを監視するために必要なことをあまりやっていないのです。

奈須 それでは、フロアーからもご質問がお待ちしておりますので、どうぞ遠慮なく、手を上げてください。

質問者 1(旭硝子株式会社社長 瀬谷) 炭酸ガスの濃度のセルフコントロールについてご質問したいと思います。炭酸ガスの発生量を減らすには、一つには人為的に化石燃料の使用を減らすことが人間としてできることです。もう一つは、発生した炭酸ガスを減らすことですが、大気中の炭酸ガスが植物によって同化されて減ること、それから海水中に吸収された炭酸ガスが炭酸カルシウムになって固定されて減ることの、二つがあるかと思います。前者の炭酸ガスの同化には、炭酸ガスの濃度と大気中の温度がプラスの相関をして、作用するのではないかと思います。そして、後者の海水中に溶けるには大気中の温度はマイナス、濃度はプラスの相関をして作用するのではないかと思います。今の350ppmの炭酸ガスの濃度がいくらになったとき、そして、気温がいくらになったときに、大気中の炭酸ガスの発生量と吸収量がバランスすると考えられるのでしょうか。

ブロッカー この問題につきましては、これまで私の半生をかけて追求してきたわけですが、現在私たちが大気中に排出している炭酸ガス量のざっと3分の1が、海に吸収されていることが分かっています。問題のカギは深海におけるミキシングにあります。もし今よりも100倍の速さでミキシングが起こったら、排出される炭酸ガスの6分の5が吸収される可能性があるでしょう。ですから大気と海洋をもし十分攪拌で

きるとするならば、排出炭酸ガスの6分の5は海に吸収され、残った6分の1だけが大気にとどまることとなります。問題は、現在のように自然に攪拌されるのを待つならば、海が完全に攪拌されるまで1000年ほどかかることでしょう。したがって炭酸ガスの6分の5を海に吸収させるには、長い年月がかかります。それまでは3分の1が海に吸収され、3分の2はそのまま大気に残ります。

おっしゃるように問題はとても複雑です。植物は炭素を貯えます。貯蔵場所は主として腐植土と木で、人間などに貯えられる炭素量は多くありません。ご存じのように今日、森林破壊が進行し、木がますます少なくなっています。その責任は私たち全員にあります。ですから私たちは化石燃料による炭酸ガスの排出に加えて、森林破壊によっても炭酸ガスを増やしているのです。皆さんは第2回ブループラネット賞の受賞者としてチャールズ・キーリング博士を選んでくださいましたが、息子のラルフ・キーリングさんも素晴らしい研究をしたのですよ。彼は大気中の酸素が減少していることを測定して明らかにしたのです。そして炭酸ガスの増加と合わせて考察し、過去5年間に土壌中と木に貯えられている炭素の量が増えていることを明らかにしました。森林が伐採されているにもかかわらず、地球の全体的緑化という現象がみられるのです。このことについては全部が分かっているわけではありません。この緑化現象の原因の1つに、炭酸ガスの増加が植物の成長を促進していることがあげられます。しかしもっと重要な原因はおそらく、私たちが自動車や発電所から地球全体にまき散らしている固定窒素にあると思われます。こうした窒素はやがて自然林に降り注ぎ、ほとんどすべての自然林は窒素を吸収し制限する役目を果たしています。唯一の例外はおそらく北ヨーロッパの中心部で、ここは窒素の降水量があまりにも多いために、植物がそれを処理する能力を超えてしまっているのです。この為、地球の緑化が進んで、炭素の貯蔵能力が増え、それによって大気中の炭酸ガス濃度の上昇をスローダウンする結果が生まれているのです。この余剰貯蔵が、地球温暖化と二酸化炭素および窒素の増加のダブルパンチにどのように対応しているのかについては、いろいろな意見が出されています。二酸化炭素と窒素の貯蔵は増えるでしょうが、地球の温暖化に伴って土壌の温度が上がると、地中の微生物がそれらを“食べる”速度も速くなり、土壌中に貯蔵されている二酸化炭素と窒素の量は減少します。つまり貯蔵量は下降するのです。これまでたくさんの方がこうした計算をやってきました。こうしてみてきますと、地球の未来にはまだまだ未知のことがたくさんあるわけですが、今後百年に限ってみると、人間が出す炭酸ガスの少なくとも半分は、大気中に残留する、しかも長期にわたって残留することは確実と私は思います。自然のメカニズムではそれを除去することは一切できません。これまで溜まってきた二酸化炭素は、ほとんど化石燃料によるもので、それに森林伐採によるものが若干加わります。十分な時間がたてば、地球の回復は可能でしょう。二酸化炭素は海に降り注ぎ、海底のカルシウムを溶かして炭酸カルシウムとなる。そして結局、海水のアルカリ濃度が変わり、そしてそれは大陸の気象によって中和されます。おそらく5万年も経てば、人間が地球に対して行ったことは忘れられ、再び今と同じ状態にまで回復するでしょう。しかし私たちが現在行っている行為の結果は長く地球上に尾を引き、長い、長い年月の間、二酸化炭素濃度の高い地球環境となるでしょう。

奈須 次の方いらっしゃいませんか。

質問者2(東洋学園大学教授 岡本) 2つほど、ブロッカー博士のお話にあったコンベアベルトに関連して伺いたいと思います。今朝、イギリスから出ている有名な科学雑誌の「Nature」の最新号(11月9日号)を読んでおりましたら、ランストフという人が北大西洋に冷たい水が流れ込んだ場合コンベアベルトが弱くなるという、ちょうどブロッカー博士がお話しになったようなことを数値計算でやっているのです。その場合、本当にコンベアベルトは急激に弱くなって、急激な寒冷化が起きると、そこまではわかるのですが、数年でもって、数度下がるということもありうると、これは、私が思うにあまりにも早く起きすぎるのではないかと思うのですが、コンピュータの計算ではそうなるそうですが、どうお考えになりますか。

そしてもう一つの質問は北太平洋の問題です。我々日本人にとって、北大西洋はちょっと遠いのですが、北太平洋で寒冷化が起きますと、東北や北海道の米作が非常に深刻な打撃を受けます。ところが、私が気象庁の委員だった頃まとめたデータでは、北太平洋側も最近、北大西洋の海水温の寒冷化によってかなり平行して寒冷化が始まり出しています。そこで、その北大西洋と北太平洋の間にテレコネクションといいますが、何か関係がないかと。お話の最後のころに、北太平洋のことにちょっとお触れになりましたが、

私の理解が間違っておりませんでしたら、コンベアベルトの変化に応じて水蒸気の蒸発量が違ってくるので大気に対する供給量が違う、それで何か北太平洋に影響が起きるといふふうにお話しになったような気がしたのですが。最初の数年で、数度温度が下がるということがありうるだろうか。それから、北大西洋と北太平洋の関連性について、この2点についてお伺いできれば幸いです。

ブロッカー 難しい質問ですね。まず初めに申し上げたいのは、私たちが地球を少しずつ変えているといっても、それで自動的に氷河期に戻ると言うつもりは毛頭ありません。地球がどのようにして氷河期になるのか、可能性のある変化モードについて、よく分かっているわけではありません。私に言えるのは、それがもし起こるとしたら、これまで言われているのとは違うだろうということです。次に言えるのは、私たちがアイスコアや海底堆積物から得ているデータは、こうした変化は地球規模で起こったことを示しているということです。明らかにテレコネクション(遠隔相関)が見られます。こうしたテレコネクションが何なのかを明らかにする重要な手がかりが現在では見つかっています。私が提示したのは、「海洋の上昇循環 - 熱帯地方の海における海水の湧昇 - 海面からの水蒸気の蒸発」のテレコネクションです。これは私が見つけたものです。他の可能性もありますから私が完全に正しいとはいいません。

今の時点ではどういうことが起こるのかを、具体的に予測できるとは思いません。現在もっているデータから言えるのは、こうした突然の変化が現実におこったこと、そして世界規模で、しかも数十年間という極めて短い期間におこったということだけです。ですから、私たちが温室効果ガスをどんどん排出することによって地球の気候システムに干渉し、突然でかつ大規模な変化を引き起こす可能性があるのです。日本もアルゼンチンもノルウェーも、つまり地球上のあらゆる場所がその影響を受けるのです。しかしこれらの変化の意味、気温や降水量の変化の度合いなどについては、現在語ることはまったくできません。またこれらの変化が起こる確率が100万分の1なのか、それとも10分の1なのかを言うこともできません。私たちにはまだよく分かっていない現象なのです。たとえもし気候への影響を見るために二酸化炭素を大気中に放出し環境影響評価を行いたいと科学者が提案しても、そんなことは世界中どこでも許可しないでしょう。外につまみ出されちゃいますよ。あなたが裁判官だったらそんな実験は絶対認めないでしょう。

他方で、私たちがいわば「追い詰められた」状態にあります。地球上にはたくさんの人間が暮らしていて、その人々が衣食住の心配がなく、生活をエンジョイできるのは、大量のエネルギーを消費することによつてです。そして現在、私たちが使えるエネルギーとは、ほぼ化石燃料のエネルギーだけといっても過言ではありません。ですから二酸化炭素の排出をやめることは不可能です。まあ、二酸化炭素の生産ペースを若干スローダウンすることはできますが、それでも二酸化炭素は溜まっていくでしょう。現在提案されている法規制で問題が解決できるなどというのは、いんちきに等しい。せいぜいが、今後100年間に放っておけば二酸化炭素が750ppmになるところを、排出を鋭意抑制すれば650ppmに抑えられるだろう、ということぐらいです。違いは、650ppmか750ppmか、の差です。そして100ppm多くなるとどのくらい危険度が増すのか、もちろん分かりません。現在の科学では無理です。しかしより危険であることだけははっきりしています。

これで少しは答になったでしょうか。具体的なことは何も分かっていないということを申し上げたかったのです。過去の記録データを見ることはできる、そして実際に変化が起こったことも分かる。それはもう疑いの余地はありません。初めにお話ししたようなことは、誰も異議はない。みんなが認めていることです。しかしそれが語る意味については、全員一致ではありません。まだはっきりとは理解できない問題だからです。これらのことはどのモデルでも大気に広範な影響を及ぼしますから実験してみることはできません。地球のシステムにはたくさんのリンク(関連性)がありますが、今日明らかになっている精巧な気候シミュレーション・モデルでさえも、実験できないためにそうしたリンクはとらえられていません。

奈須 学ぶべきことが多い、大変有益なお話を有難うございました。まだ、ずいぶん手があがっていらっしまったのですが、時刻をすでに過ぎておりますので、大変残念ですが終わりにさせていただきます。ご清聴ありがとうございました。ブロッカー博士どうもありがとうございました。