



1995年(第4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7年11月3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

13:00 開会／主催者挨拶 旭硝子財団理事長 古本 次郎

13:05 第一部：推進賞受賞者記念講演および対談

講演者 アース・カウンシル議長  
モーリス・ストロング氏

演題 『新たなグローバルパートナーシップの確立のために』

対談ゲスト 成蹊大学経済学部教授  
広野 良吉氏

質疑応答

14:50 休憩

15:10 第二部：学術賞受賞者記念講演および対談

講演者 ストックホルム大学名誉教授、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)議長  
バート・ボリン博士

演題 『炭素循環と気候変動』

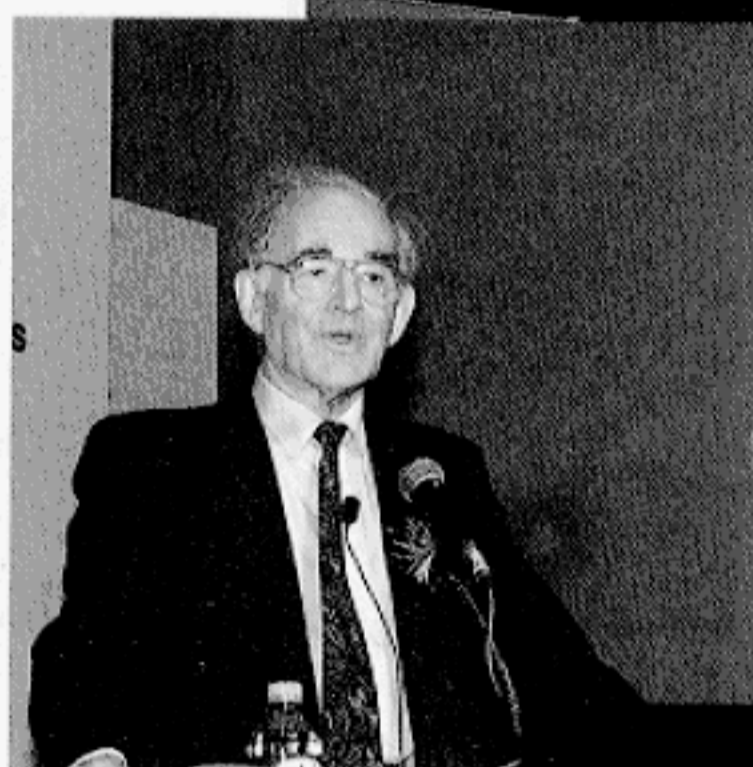
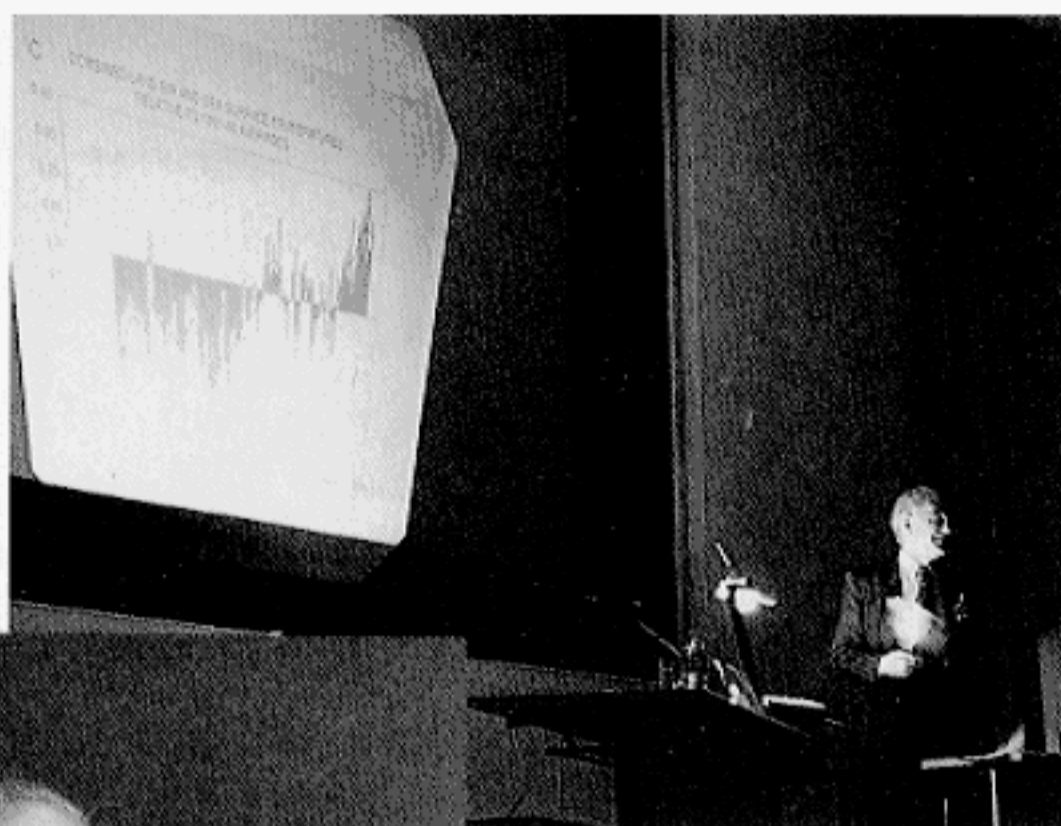
対談ゲスト 気象庁予報部  
時岡 達志博士

質疑応答

17:00 閉会

---

第二部  
学術賞受賞者  
記念講演  
および対談



ストックホルム大学名誉教授・気候変動に関する政府間パネル(IPCC)議長  
パート・ボリン博士

ボリン博士は、大気中の二酸化炭素が地球温暖化問題にとって極めて重要であることを早くから認識し、長年にわたる世界の気象データの分析結果に基づいて、海洋、大気、生物圏の諸因子を取り入れた「炭素循環モデル」を開発した。このモデルは国際学術連合会議のレポートとして報告され、地球温暖化を深く理解する上で大きな役割を果たしている。博士は数多くの国際的学術委員会でも長を務め、地球温暖化や温室効果ガスに対処する政策の決定に科学的根拠を提供してきている。博士はまた、地球温暖化問題に対処するため世界気象機関と国連環境計画によって1988年に設立された「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」の議長を当初より務め、その卓越した研究能力とリーダーシップにより、地球温暖化問題に関する国際的な政策形成に多大なる貢献を収めている。



## 『炭素循環と気候変動』

1995年ブループラネット賞の受賞記念として、ここに講演の機会をいただきましたことは、私の大きな喜びとするところです。さて本日の講演では、当初考えていた内容を少し変えてお話ししようと思います。もちろん、講演の基本的要素である事実や知識を変えるわけではありません。しかし、発見した事実を社会に有用でありかつ行動に結びつくような方法で提示することに、科学の重要性があると考えます。そして、そうするためには科学的問題をどのように提示すべきなのかという点が一層重要になってくると、ストロングさんの講演をお聴きしながら思いました。科学がこうした責任を負っていることはいくら強調しても強調しすぎることはありませんが、これまでその責任が果たされてきたとは必ずしも言えません。さて、我々科学者が言うことの多くは理解しやすいとは言えませんので、これからの私の講演が皆様に分かっていただけることを願っています。

この世界が生まれてからすでに何十億年もの長い年月が経ちました。今日私達の見る世界は、誕生以来、徐々に変化を遂げてきたその結果です。私達人間も、その一部です。そしてもちろん、私達は今後もこの世界の一部として存続していきたいと望んでいます。したがって私達は、自分たちの存続を危うくするようなこと、例えば地球環境を激変させるというようなことは、してはなりません。

生命は、地球が誕生したときすでにあった比較的少数の元素の存在に依存しています。中でも最も重要なのが炭素であることは言うまでもありません。すべての有機物は炭素原子からできています。炭素のほかに重要な元素は、窒素、リン、イオウでしょう。しかしこれらは、ときに環境汚染物質とみなされます。なぜなら、地球人口の増加によってこれら栄養分の多くが循環過程に流入し、環境における濃度が高まってしまふからです。人類の持続可能な開発とはとりもなおさず、環境を不当に変えてはならず、地球環境の生命部分つまり生物圏を尊重するという命題を私達が受け入れることなのです。

人工衛星によって、私達は地球の姿を鳥瞰することができました。図1は、宇宙からの観測データに基づいて作った地球上の光合成の活動を表したものです。光合成がまったく行なわれていない地域は茶色、光合成が最も活発に行なわれている地域は白と紫、緑はその中間を表します。図は8月と2月、つまり北半球での夏と冬の状態を示しています。南半球では季節が反対となります。北半球の夏は、生物が高緯度

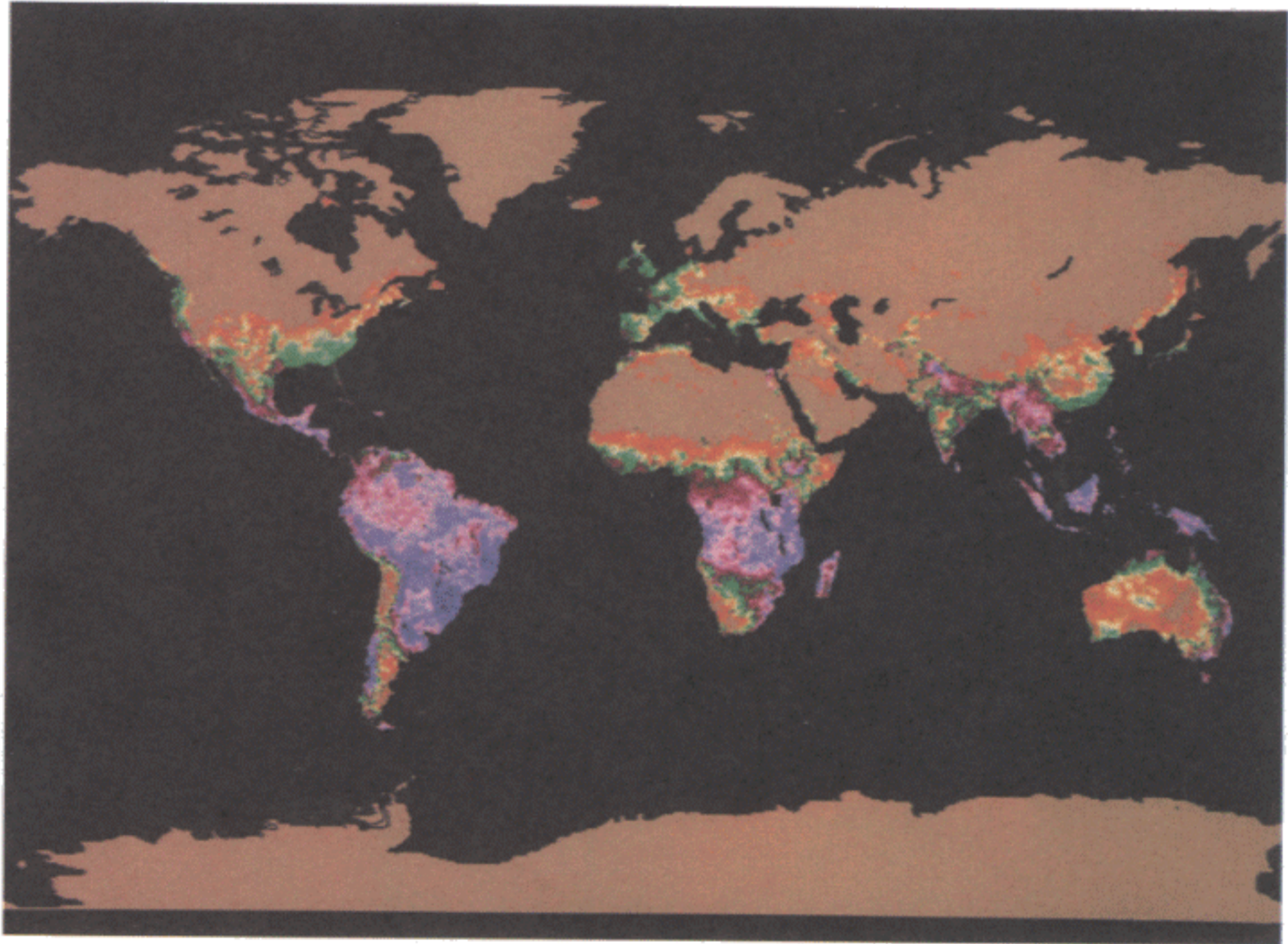
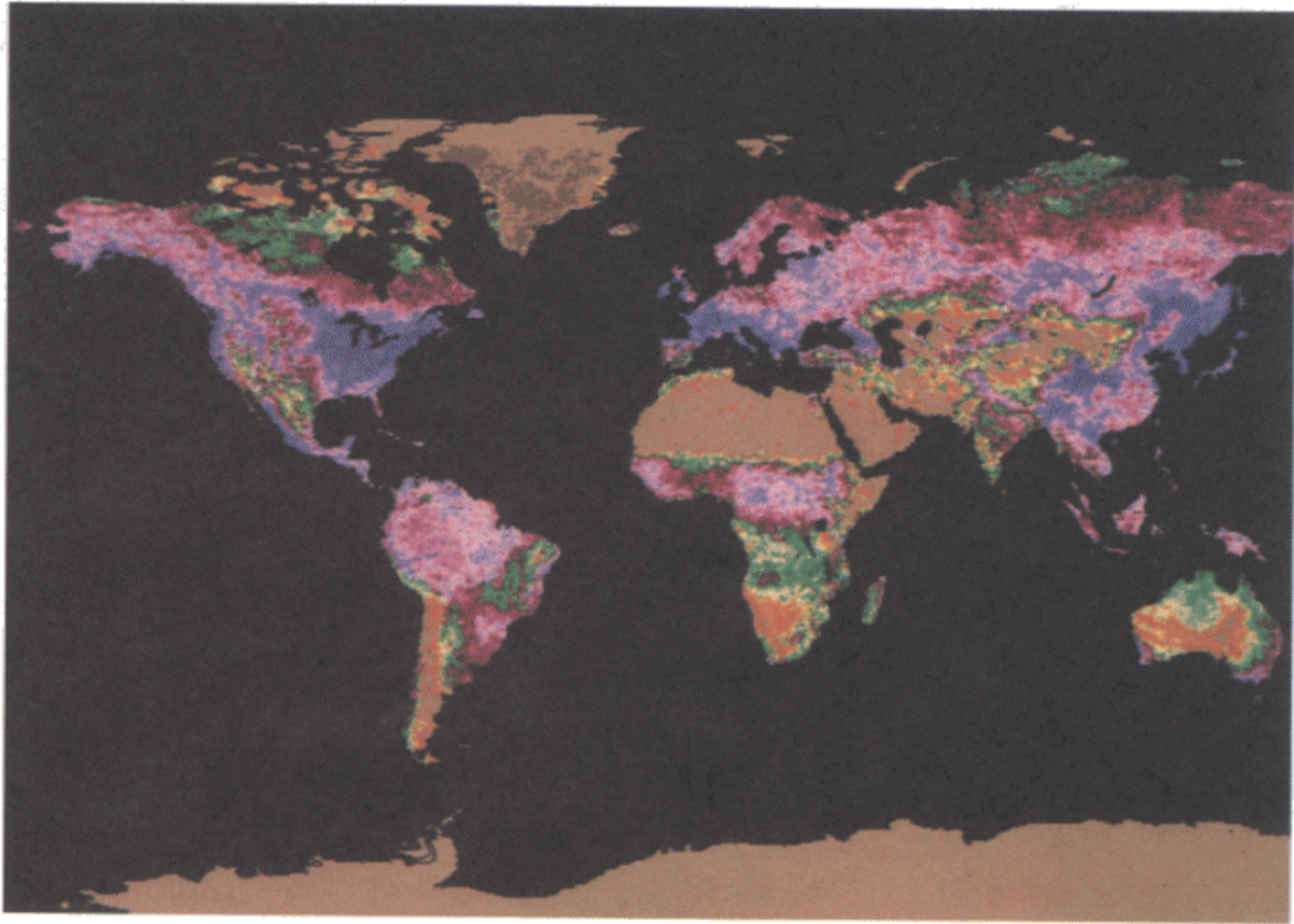


図 1. 1982年8月と83年2月の人工衛星による観測値(AVHRR)から作成した光合成率  
(Tucker et al., 1986)

の地域まで活発に活動し、南半球では緩慢になります。北半球の冬は、その反対です。お分りのようにサハラ地域は一年中植物の成長がほとんど見られません。それと対照的に熱帯雨林では一年中、光合成が活発で、生命に溢れています。

今日見られるこうした現実には、将来にわたっても大きく変化させてはなりません。これは地球上の生命体にとって最も基本的な条件だからです。光合成は、私達に必要なエネルギーを与え、エネルギーは人類と人間社会の持続可能な未来に不可欠です。私達は過去の地球上の生命について多くのことを知っていますが、それは生命を構成する基本要素の循環の変化について湖底や海底の堆積の中に、あるいは土壌や氷床の中に残っている生命体の残滓が教えてくれるからです。これらの知見から過去の気候もまた推測できます。気候と生命の間には密接な関係があるからです。

図2は、グリーンランドと南極の氷床を数千メートル掘り下げて取り出した氷塊からどんなことが分かるかを示したものです。酸素同位元素 $^{18}\text{O}$ の測定値から、22万年以上前から現在までの温度変化が分かります。最後の氷河期の気温は、現在より $10^{\circ}$ 以上低いことが鮮明に示されています。約12万年前の最後の間氷期は、現在より若干暖かかったことが分かっており、その後、現在までの約1万年が同じ状態で推移しています。人類の文明は、地質学的に見ればほんの短いこの時期に発達したということになります。

図2では、大気中のメタンも大きな変動を見せています。このことはグリーンランドと南極の氷に閉じ込められた小さな気泡の空気を分析して分かりました。ここには22万年前からの記録があるのです。産業革命以前の大気中のメタン濃度は約0.7ppmvであり、最後の間氷期の濃度もこれと同じでした。一方、氷河期では、メタン濃度はこの約半分でした。メタンは有機物が分解するときできますから、地球上の生命活動の強度をこれで表せます。氷河期には生命がさほど活発でないということは、十分推測可能です。今では氷塊から量的測定だけでなく、質的な測定も可能です。現在のメタン濃度は1.7ppmv、つまり人為的な攪乱のない間氷期の2倍以上です。この原因としては稲作の拡大、そして食料としての家畜飼育数の増大が挙げられますが、石炭・石油、天然ガスをエネルギー源として採取する際に漏出するのも大きな原

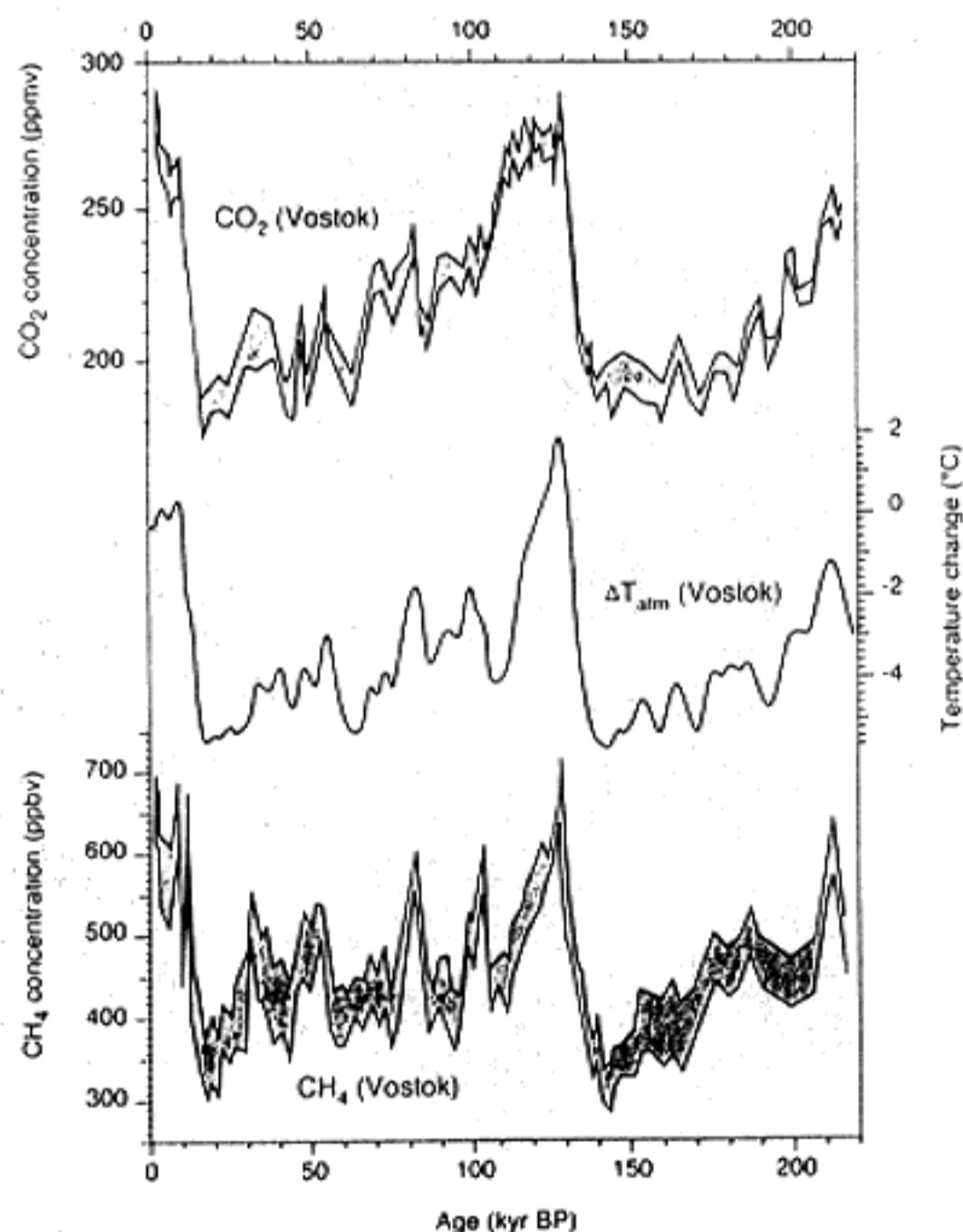


図2. 南極ヴォストクの氷河氷、およびアイスコアから採取した氷の気泡を分析して得られた、過去22万年間の気温、二酸化炭素、メタンの変動データ (IPCC, Special Report, 1994)

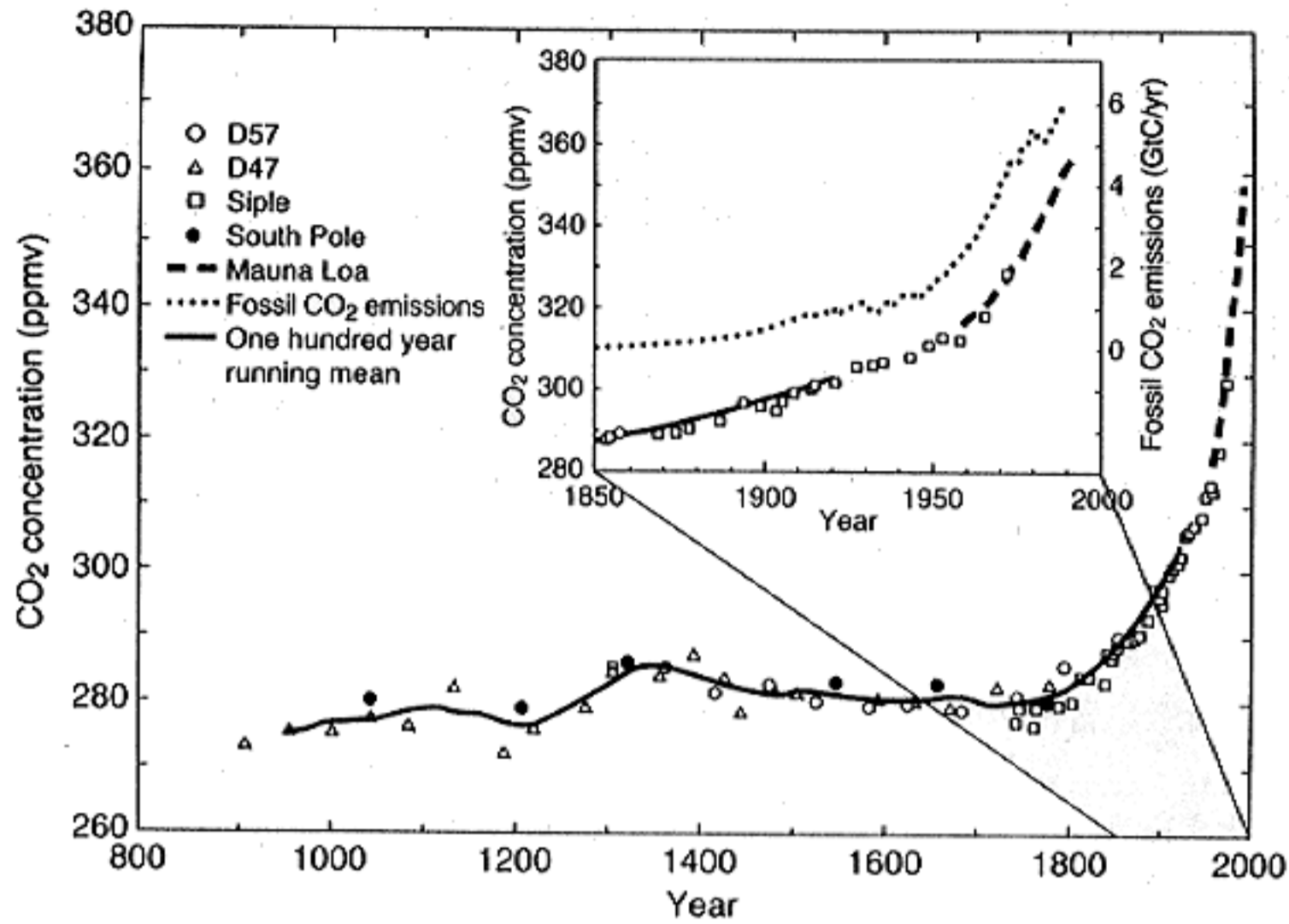


図3. 氷河氷の気泡に含まれている物質の分析から得られた、西暦900年～1958年までの大気中の二酸化炭素濃度データ。1957年以降のデータは大気中濃度を直接測定した。図中のD57、D47、Siple、South Poleは、それぞれ南極の4ヵ所のアイスコアから得られたデータである。二酸化炭素の形で排出された年間炭素排出量のグラフも付け加えた。  
(IPCC, Special Report, 1994)

因です。大気中の二酸化炭素も、前回の氷河期と間氷期に同じような大きな変化を見せています。前回の長い氷河期には200ppmvの低い数値となり、19世紀初期からの産業革命以前は約280ppmv。大気中の二酸化炭素およびメタンと生命活動との間に密接な関係があることは明らかです。

図3は、二酸化炭素濃度が、約200年前の280ppmvから現在の360ppmvまで、一貫して増え続けていることを示しています。ほぼ30%の増加です。この増加分のうち約8割は人間が化石燃料を燃やしたことによるものであり、約2割は森林伐採と土地利用の変化が原因です。かくして現在、地球上に生えている植物や農耕地に存在する炭素の量は、数百年前と比べると減少しています。私達は土地を耕すことは利益を産む活動だと考えていますが、実のところ、有機物という中身を減らしているのです。長期的に見れば、持続可能とは言えません。

図4をご覧ください。これは過去約2000年間の大気中の窒素酸化物の変化を表したものです。大気中の窒素酸化物も、有機物の分解過程と関係しています。このデータも、グリーンランドと南極の氷に含まれる気泡を分析して得られたものです。最近数百年間の激増ぶりがお分かりになるでしょう。このようにして私達は、南極の測定値の中に、15億頭の牛やその他の家畜を(主として北半球で)飼育した結果を読み取ることができるのです。

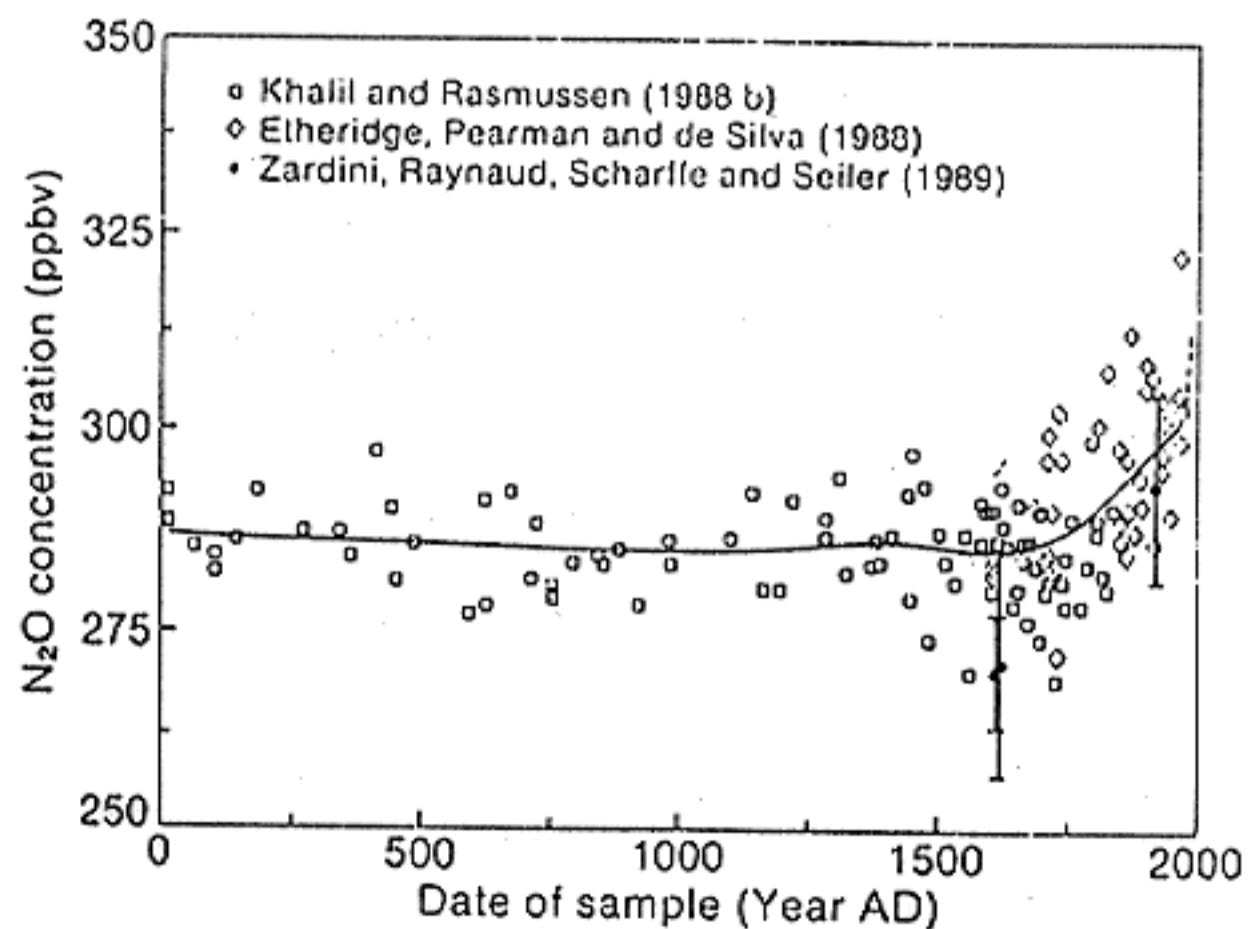


図4. アイスコアから測定した大気中の窒素酸化物濃度 (IPCC, 1990)

事実、私達は今日においても、大気成分をさまざまな方法で変えつつあります。したがって現在、何が問題か、生物圏のどの部分が増減のプロセスに関係しているのかを早急に理解しなければなりません。生化学循環がどのように機能し、光合成や植物の成長のプロセスの中でどのように相互に作用しあっているのかを理解することが緊要です。カギとなるのはもちろん炭素循環ですが、これと他の要素の循環との相互作用および相互依存も忘れてはなりません。それは、この問題の重要な一部なのです。

炭素は大気中にあると同時に、陸上に生えている植物にも、土の中の死んだ有機体としても存在し、また海中には有機炭素としてあるいは無機炭素として溶けているほか、動植物として存在しています。また海底の堆積物としても存在しています(図5参照)。海中の炭素の量は、大気中の二酸化炭素の約50倍です。大気中の二酸化炭素は約4年間で海水に溶け込んだり、地上の植物に同化されます。そして自然の循環過程にあつてはほぼ同量の二酸化炭素が再び大気中に戻り、バランスが保たれます。しかし海に溶ける二酸化炭素の量は僅かであり、また海水の攪拌は激しくないために、炭素は海中に何百年も何千年も留まります。この自然のバランスを崩しつつあるのが、人間による二酸化炭素の大気中排出です。私達は、何万年、何億年もかかって地殻に蓄積された炭素を取り出し、燃やしています。大気中に放出される炭素の量が激増したのは、ほんのここ数百年のことであり、それはおそらく今後も続くと思われます。これはつまり、炭素循環の大きな乱れにほかなりません。このことは、今後長期的に何を意味するのでしょうか。

一般に大気中の二酸化炭素濃度が高いと植物がよく成長することは知られた事実です。ただしこの場合、水と栄養がたっぷりあることが条件です。そうなれば全球的な光合成率が増えることは当然予想できます。しかしどの程度まで増えるかを予測するのは難しいものです。また二酸化炭素の分解速度もまた、最初の生産速度の増加と気温の上昇に応じて変化すると考えられます。植物や地中の死んだ有機物の中に蓄えられる炭素の合計量は、いくら増えるといっても限度があります。したがって化石燃料を燃やして出る二酸化炭素の大半は、結局、海が引き受けることになります。二酸化炭素は海水に溶けて炭酸塩を作り、海水の酸性度を上げてしまいます。こうして海水の成分は次第に変わっていくでしょうが、それは私達人間のせいなのです。しかしこのプロセスは緩慢としていますから、まだ海洋全体に大きな影響を与えるには至っていません。もし最終的に、これまで排出された二酸化炭素の何層倍もが蓄積されれば、海水のpHは本来の半分まで下がることもありえます。それによって海水と沈殿物の自然のバランス、あるいは海水と海洋動植物の炭素構造との自然バランスも、崩れるでしょう。こうしたことのすべてが、地球上の生命はほぼ一定の比率で元素が利用可能だという前提の上に立って成り立っていることを示しています。この比率はすでに明らかにされています。ただ、生命は“賢い”ことを忘れてはなりません。もしある基本栄養素が足りなければ、動植物はそれぞれの生化学プロセスで必要な分子を作るためにそれらの栄養素を体内に蓄積することができます。

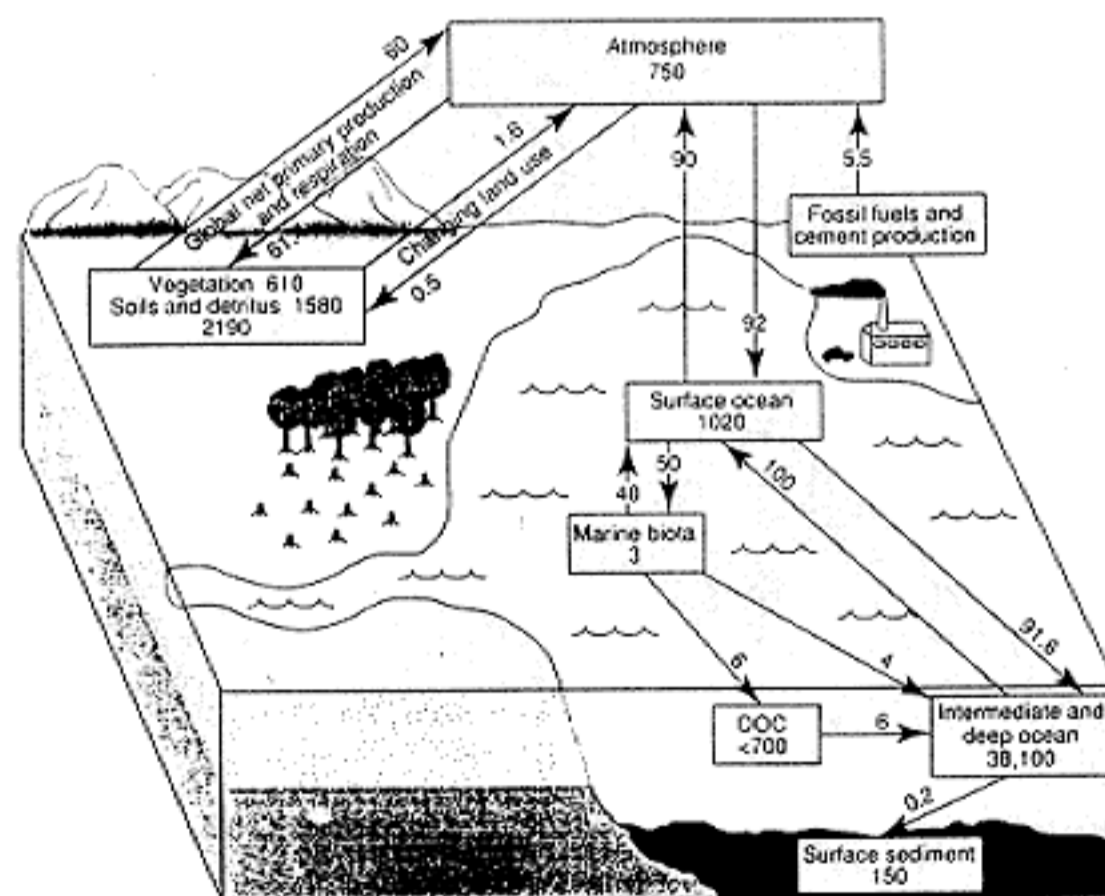


図5. 炭素循環図。枠内にある数字は、各項目に含まれる炭素量を示す(単位10億トン)。矢印は項目間を移動する年間炭素量を示す。DOCは溶解有機炭素を意味する。  
(IPCC, Special Report, 1994)



ここで視点を変えて、人類が最近どんなことをやってきたのか、今後数十年、あるいは数百年に何が起こるのかを見ていきましょう。大気中の二酸化炭素の量が、現在の生態系を壊し、したがって結局は人間にとっても破壊的なレベルに達するという事は起こりうるのでしょうか。今日、大気中の炭酸ガスは、以前に比べて約30%ほど増えました。しかも地殻にはまだ大量の石炭・石油・天然ガスがあることを私達は知っています。今後、大気中の炭酸ガスは2倍にも3倍にも増える可能性があるのです。もちろん、そうなるには産業活動がもっと増えるという前提があります。しかし現在、東アジアや東南アジアの例をとっても、すさまじい経済成長が進んでいます。現在、全球的な炭酸ガスの増加が一時的に止まっているのは、単に旧ソ連や東欧諸国の経済活動が小休止しているからにすぎません。

二酸化炭素、メタン、窒素酸化物、あるいは人間が大気中に排出しているその他の気体は、温室効果ガスと呼ばれていますが、地球-宇宙間の放射平衡を破る働きをします。図6は、現在の変化が全球的な放射強制力を約 $2.5\text{Wm}^{-2}$ だけ上げるのと等しいことを示しています。これは放射強制力全体から見れば約1%にすぎませんが、それでも人間の現在のエネルギー消費率のざっと100倍に相当します。すなわち産業革命以前の状態より平均気温は上昇する、あるいはすでに上昇してしまっているとも考えられます。

しかし変化はこれだけではありませんでした。空気中のハロカーボン濃度の上昇によって、成層圏のオゾン濃度が減少しています。これは逆に地球表面を冷やす働きをします。また人間は細かい粒子状の物質も排出します。石油や石炭を燃やすと、そこに含まれているイオウ分が燃えて、硫酸エアロゾルができます。同様に例えば熱帯地方の人々がバイオマスを燃やしても、大量の粒子が排出されます。それらは1、2週間もすれば地表に落ちたり、雨で洗い流されますが、排出は依然として続いていますから、大気中の濃度はどんどん上がっていきます。こうしたエアロゾルは太陽放射を反射しますから、温室効果ガスとは反対の働きをします。人為的に排出され、大気中の水蒸気によって強化された温室効果ガスの温暖化効果は、エアロゾルの太陽熱放射拡散によって20~40%減少するといわれています(図6参照)。しかしここで重要なのは、エアロゾルは温室効果ガスと違って全球的に均一に放出されるのではないという点です。つまりエアロゾルの放散は、温室効果ガスの濃度上昇による全球平均温暖化を単純に相殺するものではありません。

この他にも複雑な要因があります。有機物を燃やしたとき出るすすです。すすの正体は炭素ですが、これは太陽熱放射をきわめて吸収しやすいのです。ただし現段階では、地球の放射平衡を破るにはすすの量は不十分だとされていますが、はっきりした結論を下せるほどの測定はまだなされていません。

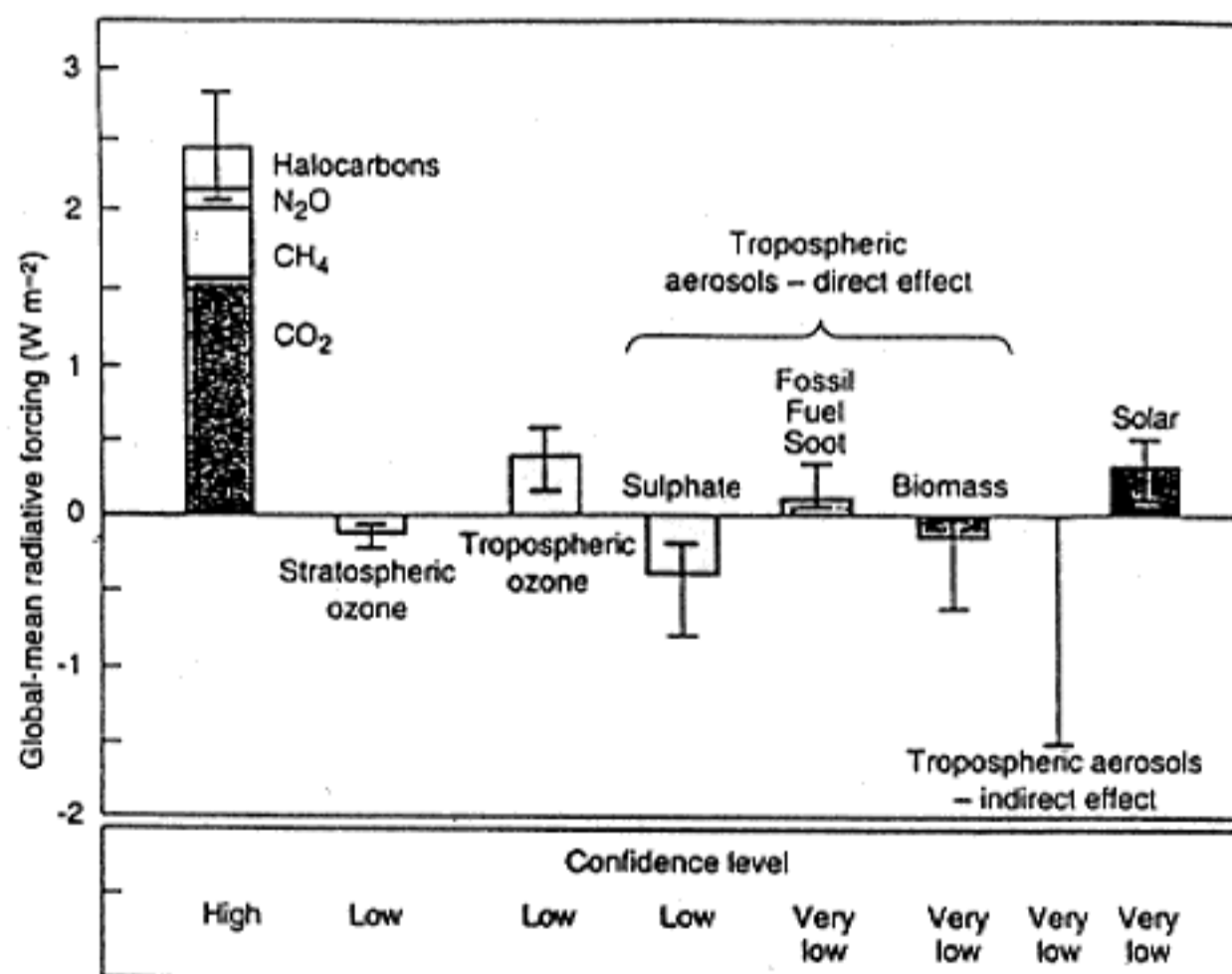


図6. 1850年~1990年の人為的排出を原因とする大気組成の変化による現在の大気の“放射強制力”(Wm<sup>-2</sup>)。異なる推定値もあるため、その不確定範囲も記した。対流圏のエアロゾル(硫酸エアロゾルは除く)濃度上昇による強制力の推定値は、0~1.5Wm<sup>-2</sup>の範囲にあることを銘記していただきたい。対照として太陽の強制力のグラフも加えてある。(IPCC, Working Group I, 1996)

大気中の温室効果ガス濃度の上昇によると思われる放射強制力の測定から、直ちに地球の気候変動がどの程度であるかを判断できるわけではありません。今日の気候の形成において相互に作用しているプロセスはたくさんあります。気候変動という点から大気組成の変化を説明するには精緻な気候システムのモデルが必要です。こうしたモデルは現在のところまだ簡単なものですが、人為的な原因による放射強制の一定の変化に対応してどのような気候変動が予想されるかということは大体分かります。モデルに関して最も重要な分析は、例えばブループラネット賞の第1回受賞者(1992年)でもある真鍋淑郎博士の分析です。この分野の研究に関しては、私は自分の専門分野を一応置いて、真鍋博士のような研究者の研究成果に基づいて、なかんずく私が1988年から長を務めてきましたIPCCが達成した広範囲に及ぶアセスメントに基づいて話したいと思います。

気候モデルはまず、太陽熱放射による強制と産業革命以前の(温室効果ガスおよびエアロゾルの)濃度レベルにある大気とを、現在の気候を推測するのに使います。そうして得られた結果と実際に測定した結果とは有意に合致します("control run")。次に過去200年間の人為的な排出による濃度変化から、放射強制力がどう変化したかを見る実験を行ないます。気候システムはこのようにして放射強制の変化に対応し、その結果の気候変動が算出されます。図7は、1990年時点の放射強制力上昇の分布を全球的に推定したものです。この図から、強制力は、温室効果ガスによって極地域の約 $1.5\text{Wm}^{-2}$ と熱帯地域の $2.5\text{Wm}^{-2}$ の間にほぼ均一に存在することが分かります。エアロゾルがもたらす負の強制力は空間的に非常に不均一となっています。中央ヨーロッパや合衆国東部などの比較的限られた地域では、総強制力は負になっています。つまりこれら地域のエアロゾルの量は、温室効果ガスの濃度上昇に伴う温暖化を相殺する以上に存在するという事です。

図8は、全球平均地表温度の変化を、温室効果ガスにエアロゾルを加えた場合と加えない場合に分けて見たものです。対照として1994年までの変化を観測した実際値もつけました。1950年ごろまではモデル推測値と実地観測値のいずれにも似たような不規則な変化が見られます。したがって観測値の不規則な変化は人為的な排出によるものではないと思われまます。しかし20世紀後半には、3つのグラフはすべて右肩上がりになっています。観測値とモデル推測値は、エアロゾル効果を含めても、有意に一致しています。ただしこれはモデルの放射強制の感度がまだ安定していないため、偶然に一致したのかもしれない。モデル推測値と実測値がたとえ一致しても、モデルの質が高いことにはなりません。しかし最近、モデル推測値と実測値の細部にわたる特徴のいくつかが一致していることが分かりました。それによると温暖化が起こっているのは対流圏であって、成層圏では逆に温度が下がっています。エアロゾルによる冷却昂進のない南半球では、この点は一層はっきり見られます。地域的な変化パターンはある程度の類似性を示しています。とくに大気中のエアロゾル分布が均等でないために放射強制力が不均等であることを考えると、これはよく分かります。このことからIPCCは「証拠となる事実全体から、全球的気候に人間活動の影響を認めることができる」と結論を下しました。人間は地球の気候を変化させる1つの原因となっているのです。しかし気候が人間の介入にどの程度影響されているのか、その感度はまだよく分かっておりません。

以上の知見から、気候モデルの信頼性は、数年前に考えられていたより高いと見ていいでしょう。つまり気候が将来どうなるかを予測する上で、モデルの信頼性は高まっています。ここでもうひとつ難しい問題があります。将来の人為的な排出量の予測が確定できないのです。そこでIPCCは、考えられる予測値をいくつか挙げ、そのうちどの可能性が最も高いかを今の時点で言うことはできないとしました。"中心"予測値を用いていくつかの実験をすでに行なっていますが、これは必ずしも起こる確率の最も高いものというわけではなく、どんなことが起きるかを知るためのものです。図8には、向こう50年の予測値が示されていますが、確率は±50%です。排出予測値も、放射強制変動に対する気候システムの感度もはっきり確定できないからです。おそらくはエアロゾルを考慮したケースのグラフが最も起こりうると思われまますが、まだはっきりしたことは言えません。重要な点は、不確定だということはすなわち高い予測値が起こりうるものとして考えるべきだ、という点です。少なくとも不確定の理由がはっきり分かるまでは、それをよくわきまえておくことです。

図9は、21世紀半ばごろの地表温度変化の全球的分布を予測したものです。思い出していただきたいのは、各地の地域内変化は全球平均変化とは大きく異なり、予測不能な確率的变化にも従うという点です。

図 7. 放射強制の全球分布。温室効果ガス濃度とエアロゾル濃度の上昇効果を含む。  
(Kiehl and Briegleb, 1993)

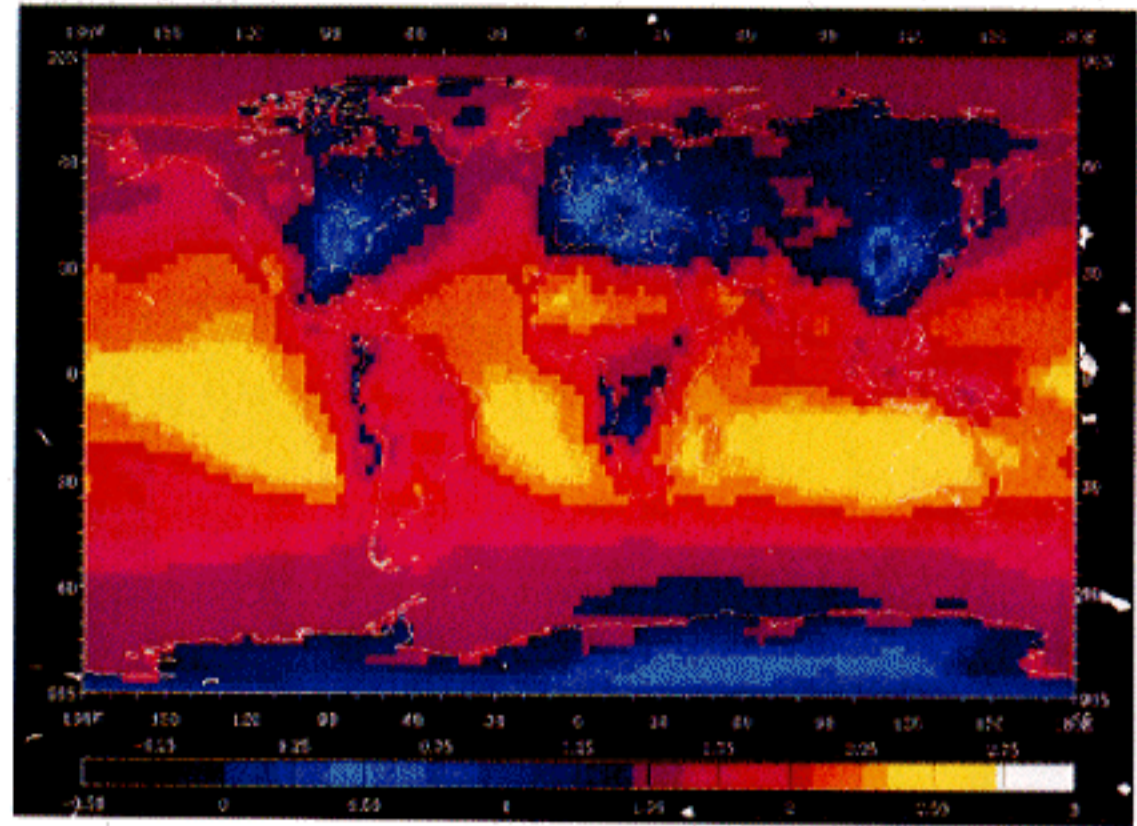


図 8. 全球平均地表温度の観測値(1860~1994年)＝赤で表示＝、および予想される変化のモデル計算値(1860~2050年)。過去のデータは1994年までにおける大気組成のおおよその変化に基づいたものであり、また将来の予測データはIPCCのシナリオIS92aが2050年までの将来変化を予測したものである(将来の気候変動の緩和は考慮していない)。温度予測値は、温室効果ガスのみによる“放射強制”に基づいて計算し、青で表示。またエアロゾルの排出効果を加えた場合を緑で表示した。  
(Hadley Centre, 1995)

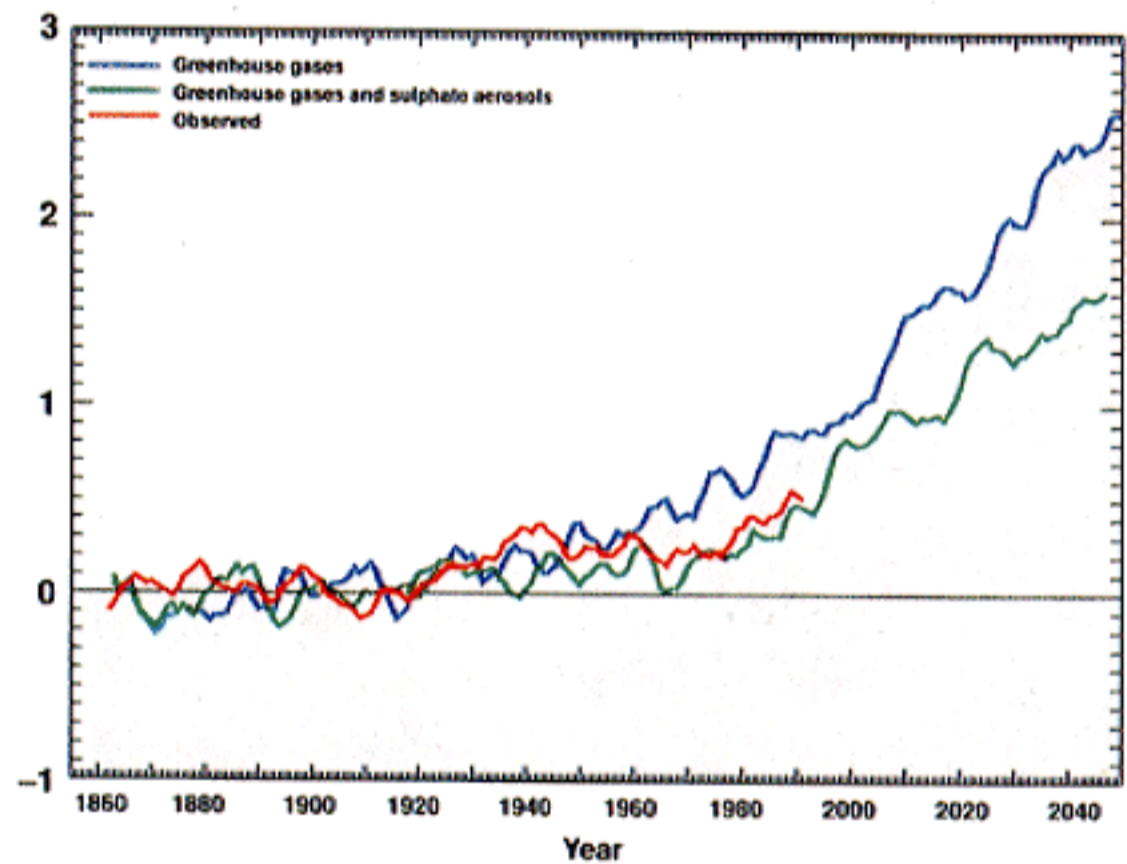
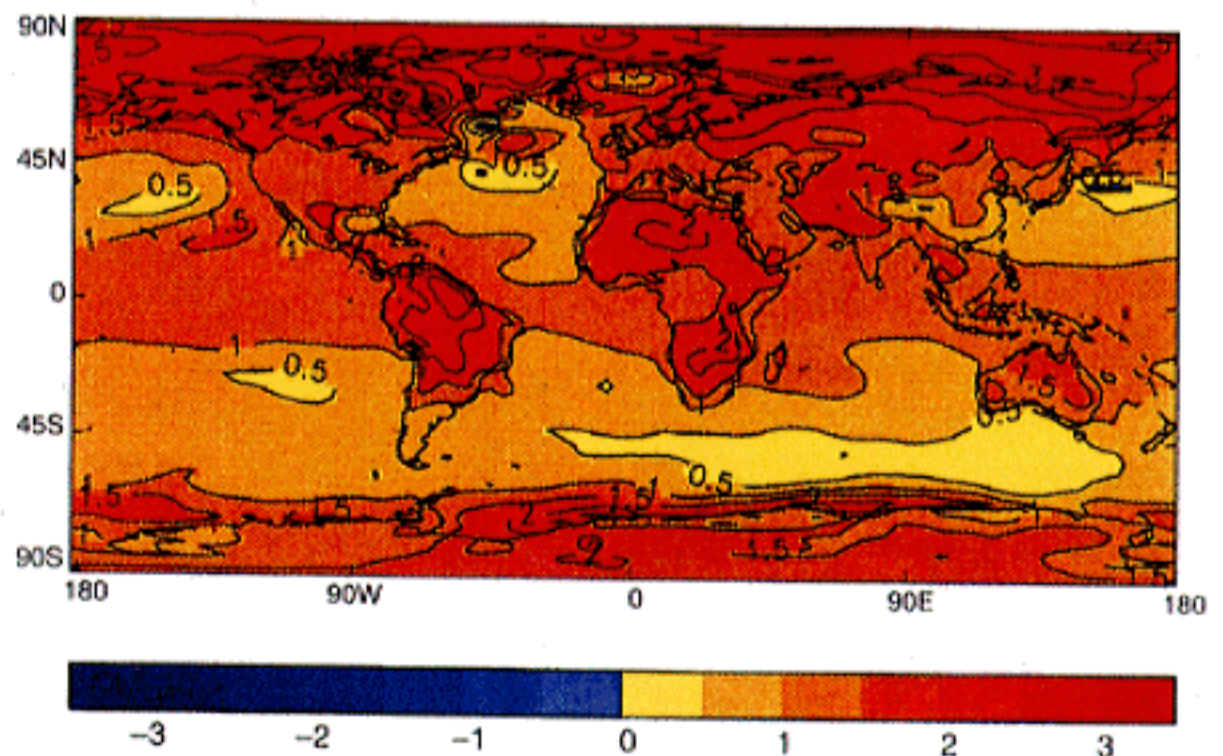


図 9. 1970~1990年の年平均温度と2030~2050年の推定年平均温度間の差に基づく、50年後の地表温度の変化。図8と同様にエアロゾル効果を含む。  
(Hadley Centre, 1996)



例えば、全球的気温が非常に大きく変化すると予測されても、地域別に見ると、北大西洋地域と北太平洋地域では、温暖化がまったく見られないことに気がきます。このように予測された気候変化についても地域的な差がありうることをわきまえておかなければなりません。この点は、気候変動の影響を評価するとき、統計的に考える必要があるでしょう。

気候変動はもちろん、気温の変化だけではありません。地球上の生命にとって非常に大切な水、つまり降水と水蒸気の量も変化します。一般に、気温が高ければ高いほど、海洋、陸地、大気の水循環は活発になります。しかし旱魃を避けるためにはより多くの水が必要とされています。温暖化は必ずしも各地で平均ではなく、したがって降水量の増加を同じように望めるわけではありませんから、温暖な世界にあっても農業の見通しは地域によって大きく異なります。私達はまだ変化を完全に予測することはできませんから、気候変動に関しては予防的に対処するのが一番いいと思われれます。

それでは何をすべきで、何ができるのでしょうか。エアロゾルと同様、あらゆる温室効果ガスが影響を与えているのは明らかですが、なかでも最も考慮すべきは二酸化炭素であることははっきりしています。もちろん私達は、気候変動を防ぐのにエアロゾルの濃度を上げて冷却効果を期待するわけにはいきません。酸性雨や淡水の酸性化などの原因となるエアロゾルを無制限に増やすことはできません。現在、温室効果ガスが大気中に増えたことによる放射強制の上昇分の約6割は、二酸化炭素が原因とされています。しかし炭酸ガスの排出がなんら制限されなければ、今後この割合は75%、ないし80%にまで上がる可能性が十分あります。もし大気中の濃度が一定レベルを超えてはならず、そのレベルでの安定を保つことを目指すのであれば、“許容できる”排出量はどの程度であるかを、科学者たちは算出しようとしてきました。

しかしどのレベルでの安定をめざしたらよいのかは分かっていません。ですからその実際上の選択は政治的次元でなされるべき問題で、単にお金のことだけではないにしても、さまざまに柔軟な選択肢についてコストとメリットを慎重に考慮する必要があります。そこで目標となる安定濃度を450、550(産業革命以前の濃度の約2倍)、650、750、1,000ppmvにした場合に、それぞれどのような経過をたどるかを見ました(図10参照)。最も高いレベルは産業革命以前の4倍近くになり、地球のヒート・バランスを大きく6~8 Wm<sup>2</sup>も崩します。これを容認する人はいないでしょう。

図11は、以上の分析結果です。注目していただきたいのは、あるレベルの安定に達するのに2種類のコースがある点です。明らかに、もし防止措置が遅れて排出量が最初に急上昇すると、後で急激な減少過程が必要となることが分かります。また、化石燃料の使用制限をしない場合に予測される値よりずっと低いレベルに、早急に排出を抑えなければなりません。設定目標レベルが低いほどそうなります。しかし炭素循環については十分分かっていないため、この分析はまだ確定的ではありませんが、私達人間が地球環境に手を加えてよい範囲については、自然がある制限を加えていることは明確になっています。そして私達が何をしなければならないのかも、ほぼ明らかです。

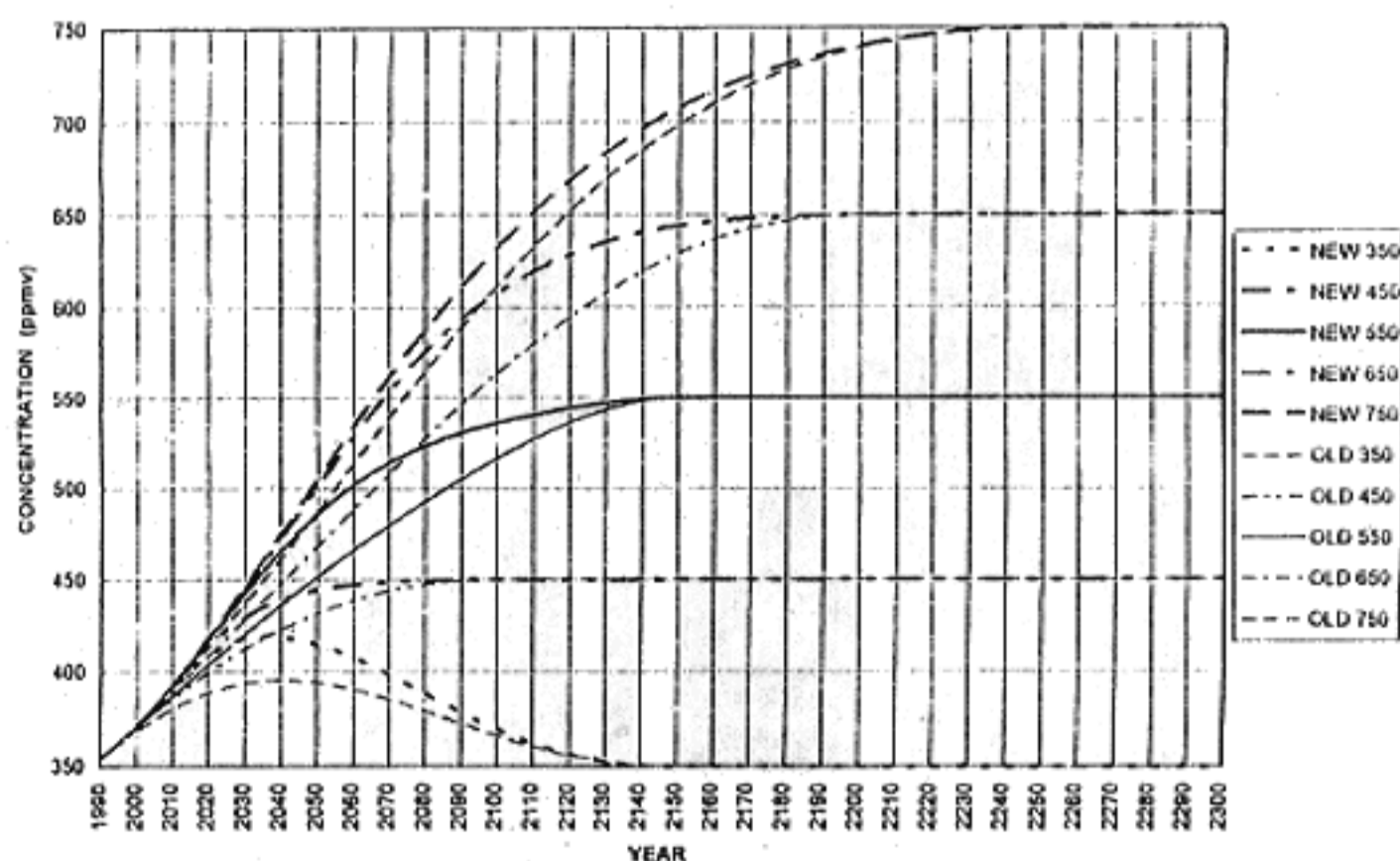


図 10. 大気中の二酸化炭素濃度将来予測値を排出予測値との相関で見ると。(Wigleyによる; IPCC, Working Group I, 1996参照)

もう少し具体的に、安定レベル550ppmvの例をとってお話ししましょう。もし許容できる炭素の排出量を当面、年間105億トンとすると、その後は急速に排出を減らさねばなりません。森林の(正味)減少や土地利用の変化による排出も含めて、世紀末になる前に現在の70億トンよりかなり排出量を下げることが必要でしょう。もしもっと予防的アプローチをとって、当初の炭素排出限度を年間80~90億トンにすれば、21世紀後半まで排出量をもう少し余裕のあるものにできます。

今度は1人当たり排出量を考えて、現在見られる先進国と途上国の大きな差も考慮に入れて見ると、もっとはっきりします。化石燃料を燃やした場合の二酸化炭素の全球平均1人当たり年間排出量は、現在約1.1トン(炭素換算)であり、森林伐採と土地利用の変化による正味排出量は1人当たり約0.2トン、合計で1人当たり約1.3トンになります。化石燃料による先進国と新興工業諸国の1人当たり平均排出量は約2.8トン(ただし国によって約1.5トンから約5.5トンの開きがあります)。それに対して途上国は平均0.5トンで、低い所は0.1トンですが、2.0トンを超える国もいくつかあります(1990年の数値)。

21世紀前半に予想される世界人口の増加を考えると、図11の排出は安定レベルを550以下にとった場合、1人当たり排出量はまったく増えてはならないこととなります(図12参照)。しかし、上に述べたように、先進国と途上国で大きな差があるのですから、途上国は当然、国民1人当たりの排出量を現在レベルより上げて然るべきと考えるでしょう。もし安定レベルを産業革命以前の2倍以下にするという目標を達成するには、先進国は早期に二酸化炭素の排出量を必ず減らさなければなりません。しかし先進国で劇的に減らしたとしても、森林伐採を含めた現在の世界平均1人当たり排出量1.3トンを経済途上国が大幅に超えてよいことにはならないのです。

途上国も先進国も含めてすべての国でエネルギーのもっと効率的な使用を実現できれば、持続的開発はかなり容易になるでしょう。そうすれば長期的な解決策を見付ける時間的余裕もでてくるでしょう。エネルギーの供給と効率的利用に答を出すには、化石燃料以外の代替燃料が必要でしょうが、すぐというわけにはいきません。今日世界で使用されているエネルギーの約8割は化石燃料の燃焼によるものだからです。技術を開発し、その可能性を証明し、そして実際のエネルギー市場に導入するには、必然的に時間がかかります。既存のエネルギーシステムに高いコストをかけて資本投資を早期回収するのは避けなければなりません。

私達のもっている選択肢は太陽エネルギーまたはその変形(とくにバイオエネルギーと水力)か、それとも核エネルギーかです。太陽エネルギーはたっぷりとあります。直接的には太陽放射として、また間接的には水力、風力、バイオエネルギー、地熱などがあります。これらのエネルギーは使い果たすということ

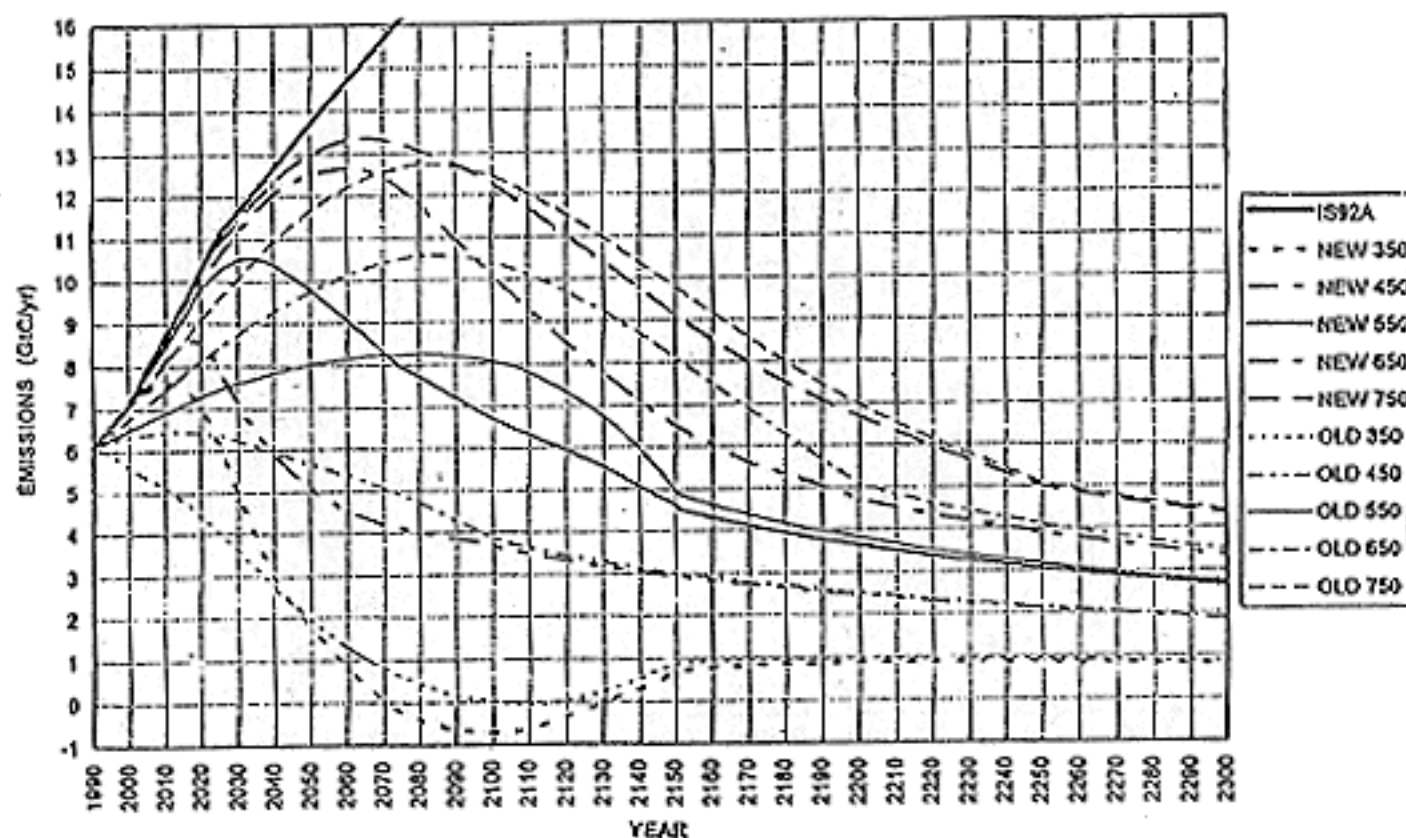


図 11. 図10に示したような大気中二酸化炭素量の変化を確かめるための排出予測(Wigleyによる)。予測値のブレは±10から20%。図中の“NEW”と“OLD”は、図10に挙げた2つの平衡ケースに対応する。最も急上昇を示すグラフは、IPCCのシナリオIS92a (“Business as Usual”)にしたがって算出した排出予測である。

(IPCC, Working Group I and Synthesis Report, 1996参照)

はないでしょうが、効率的、かつ安価な形で使いこなすのは必ずしも簡単ではありません。一方、核エネルギーは資源が有限な上、長期供給するには増殖炉(もっと長期的には核融合)が必要でしょう。開発はビッグプロジェクトになり、研究開発費も膨大な額が必要です。むしろ開発費は減少しているのが現状です。この点で先進国が先頭に立たなければなりません、新規市場の見通しが立つまでは民間主導は適切でないでしょう。つまり世界の各国政府だけが、将来的に新エネルギーシステムが必要だという合意に立って、イニシアチブをとることができるのです。

前に述べた分析は、将来的発展のために“準”数量規制が設定されていますから、重要なことは間違いありませんが、その規制は今のところ単なる目安にしかすぎません。それも二酸化炭素についてだけです。忘れてならないのは、石炭や石油を燃やすと、必ずイオウが二酸化イオウの形で大気中に放出されることです。これは、温室効果ガス濃度の上昇による温暖化を抑える方向に働きます。しかしイオウの排出は、工業地域の大气汚染を引き起こすと同時に、淡水や土壌の酸性化の大きな原因となります。途上国の中には現在こうした排出を減らすことによって環境問題に対処しようとしている国もありますが、さらに多くの国が早急に同じ努力をする必要があります。もしそれらが削減されれば、温室効果ガスによる温暖化の認識が進んだという証拠でしょう。同様に、フロンガスを徐々に減らすことも、温暖化の抑制につながるでしょう。フロンガスは、人間がオゾン層の破壊阻止のために取り組んでいる努力の結果、21世紀始めごろに減少に向かうと見られています。他方、成層圏のオゾン濃度は21世紀になっても減少せず、温室効果ガスとして大きな影響を及ぼすでしょう。こうした例を見ていくと、地球環境問題は多かれ少なかれ相互に関係しあっているのが分かります。地球は大きな1つの全体として捉える必要があるのです。

問題は、これらの環境問題をきわめて重大に受け止めてさらに一致協調した行動が必要であると考えている人や政治家が、世界中でまだほんの少数にすぎないということです。ここでオゾン問題を詳しく見てみるのも面白いと思います。南極上空にオゾンホールができた原因が人間によるフロンガスの排出だということがはっきりし、一般に受け入れられると、それへの取り組みは驚くほど素早いものでした。しかしフロンガスの排出によってオゾン層に重大な変化が起きるという警告は、ずっと以前の1970年代に出されていたのです。ほぼ10年を費やして協議されたのち、1985年、オゾン層保護のための条約が合意されるに至りました。しかしこの条約では、フロンガスの使用に関する具体的な規制は何ら触れていませんでした。1985年にオゾンホールが発見されたとき、より強力な措置が合意を得るのにわずか18ヵ月しかかかりません

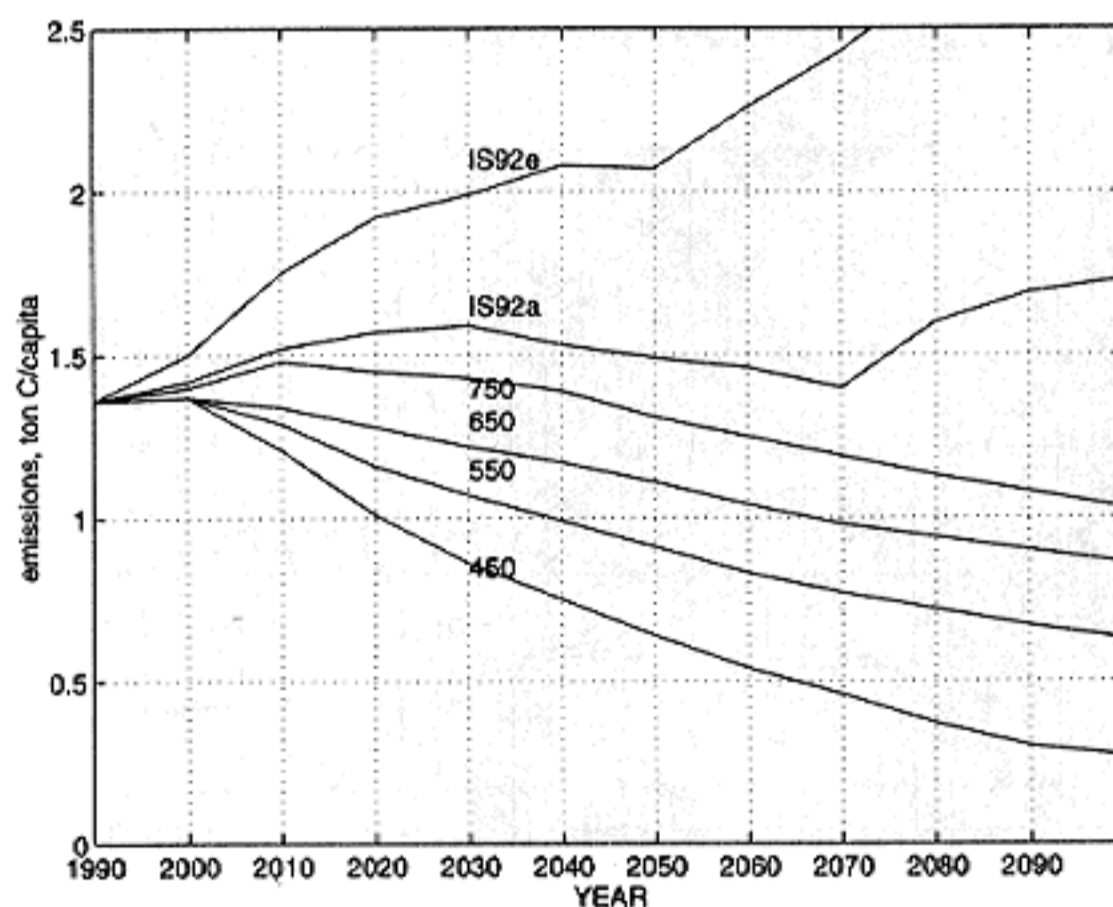


図 12. 1人あたりの二酸化炭素排出予測値(炭素量換算)。これは図11の各シナリオに基づいて算出したもので、世界人口の増加については国連のデータに基づいた。これらの数値には正味森林伐採と土地利用の変化に伴う排出も含んでいる。上2本の線はIPCCのシナリオ IS92a (“Business as Usual”)より算出。(IPCC, Synthesis Report, 1996も参照)

でした。このときの合意がいわゆるモントリオール議定書です。その後1990年と93年に合意された国際協定では、さらに厳しい規制が課されています。1996年初頭に実施される規制措置によって、おそらく世紀の変わり目ごろにはフロンガスの大気中濃度が安定するでしょう。

しかしながら気候変動は、さらに難しい問題です。気候の変化を阻止するための政策自体もそうですが、変化の結果は地球社会全体に大きな影響を与えます。フロンガスはほんの一握りの企業が生産し、それが使用されている製品も限られていました。しかし炭酸ガスの排出、つまりエネルギーの使用は、ほとんどすべての人が関わっている問題です。

ある人は質問するかもしれません。私達は“オゾンホール”問題を政治的に対処したのと同じように気候問題についても対処できるのではないかと。しかし私は、そのような期待はまったく危険だと思います。たとえもしひどい嵐や洪水、旱魃といった大災害の発生が増えて、それが気候変動の兆候だとしても、どの災害が人為的原因による地球気候の変動で起こったものかを確定するのは、まだまだ当分無理でしょう。これはまさにジレンマであり、行動を起こすのを遅らせている原因です。現時点で私に言えることはただ、科学者は研究に邁進しなければならないが、その理論的努力や観測努力を政治家やそのほかの関係者に最も役に立つような形で知らせる必要がある、ということだけです。おそらく、より広範な施策がとられるようになるまでには、まだまだ多くの旱魃や洪水やその他の自然災害を経なければならないでしょう。

気候変動に関して科学者の役割をもう少しお話しするのも興味あるかと思います。研究はもちろん今後も続けられますし、それには研究費の手当ても適当に行なわれるでしょう。私の指摘したい一番の問題は、科学者の知識知見をどのように評価・統合するか、そして科学者と、政治家・企業経営者・マスメディア・一般市民との間の相互交流をどのように組織するのがベストか、ということです。

- 最も重要なのは、世界中のすべての科学者が気候変動問題のアセスメントに参加することでしょう。現在、途上国の科学者の参入も増えてきましたが、この問題に関する研究の大部分、とりわけ全球的側面の研究の大部分は、先進国で行なわれているのが現状です。新しい科学的知見を世界中に伝えるには、科学者を通じて行なうのが最も有効な方法です。途上国を含めて世界の政治リーダーたちは、外国の科学者のアドバイスよりは、自国の科学者の意見を受け入れやすいように見受けられます。だからこそ世界的な科学者ネットワークが大変重要になってきます。
- 科学的プロセスは公開が原則です。しかし研究の目的は必ずしもすべての問題で合意に達することではありません。科学上の論争は、科学の進歩をもたらす基本です。そうした合意可能な問題をはっきりと公衆に知らせることが肝要ですし、同時にまた科学的フロンティアがどこにあり、論争点は何なのかを明らかにすることも大切になってきます。そのためには、科学的アセスメントをまかされた中心的科学者集団が、その仕事を遂行する上で公正でないとか、客観的でないという理由で非難されることのないように、科学的レビューのプロセスに学界全体が参加していることが重要でしょう。IPCCのやり方に満足していない方もおられるでしょうが、IPCCの見解は実際に広く学界の支持を得ています。信頼されているということは、アセスメントのプロセスが認められるための基本として肝要です。もしきちんとした科学的な方法で気候変動問題に関して別の見解をお持ちの研究者グループがおられたならば、当然世界は困惑して、政治的には何一つ成果を達成することができないでしょう。

気候変動問題に関して今後とられる行動は、もし産業界の協力が得られないなら、うまく開始することはできないと思われます。ある種のパートナーシップが望ましいでしょう。私は、産業界のリーダーたちが、IPCCによる問題の技術的・財政的評価に基づいてどうしたらこの環境問題に最もよく対応できるかについて自分達の意見を提示してほしいと思います。彼らにとっての問題点や優先事項は何なのでしょう。

IPCCは、こうした協力的活動を歓迎いたします。

しかし気候変動による損害を評価し、対応策の影響を判断しようとするとき、社会的な考慮が最も重要になってきます。IPCCは最後のアセスメントの中でこうした問題を扱っています。経済的評価が常に問題の社会的側面を適切に含んでいるとは限りません。むしろ経済的分析だけが幅をきかせています。しかし私達は、気候変動の問題に対処するには社会システムの大きな変革が必要なことを知っています。また、人間やその集団である国が蒙っているストレスが平和りに解決されないとき、簡単に危機に陥ることを、日常茶飯に見ています。複雑で、ある種混沌としているのは気候システムだけでなく、社会もまたそうなのです。現在存在する社会経済モデルは通常うまく機能しておらず、科学はもはや解決策を見付けるカギではありません。こうした状況にあっても、今後の研究に基づいて判断を下すことは、おそらく可能でしょう。科学研究の成果を活用するためには、科学の世界と政治の世界の間の対話が必須条件です。こうした対話は現在のところ十分実現されてはいませんが、しかしその方向に進んでいると考えます。ご清聴ありがとうございました。



## [参考文献]

- Hadley Centre, 1995. Modelling Climate Change, 1860-2050. Department of the Environment, The Met Office, UK
- IPCC (1990), Assessments: Climate Change 1990.  
I Working Group I, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press.  
II Working Group II, The IPCC Impact Assessment, Canberra: Australian Government Publishing Service.  
III Working Group III, The IPCC Response Strategies, Geneva: WMO/UNEP.
- IPCC Scientific Assessment (1992), Working Group I. The supplement report to the IPCC Scientific Assessment 1990, Cambridge University Press.
- IPCC Special Report (1994), I, Working Group I, Chapters 1-5; III, Working Group III, Chapter 6, Cambridge University Press.
- IPCC (1996), *Climate Change 1995*. IPCC Second Assessment Report.  
*Synthesis Report*. An Assessment of Scientific Information Relevant to Interpreting Article 2 of the UN Framework Convention on Climate Change. WMO, Geneva (to be published).  
Working Group I. The Science of Climate Change.  
Working Group II. Impacts, Adaptation and Mitigation Options.  
Working Group III. Economic and Social Dimensions of Climate Change.
- Kiehl, J.T. and Briegleb, P., 1993. The relative roles of sulfate aerosols and greenhouse gases in climate forcing. *Science*, 260, 16 April, 311-314.
- Tucker, C.J.; Fung, I.Y.; Keeling, C.D.; and Gammon, R.H., 1985. The relationship of global green leaf biomass to atmospheric carbon dioxide concentrations, *Nature*.

1995年ブループラネット賞学術賞受賞者  
パート・ボリン博士

対談ゲスト

時岡 達志博士 (気象庁予報部長期予報課)

東京大学理学系大学院地球物理学修士課程修了後、同大学で理学博士号取得。気象研究所予報研究部研究官として気象庁に採用後、一貫して大気大循環モデル、気候モデルの開発に従事し、気候モデルを用いた地球温暖化予測実験等を行ってきた。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の科学的知見作業部会日本代表を務めており、第1作業部会の第1回(1990年)および第2回(1995年)報告書の執筆責任者の一人である。



時岡 まず、最初にボリン博士には、「炭素循環と気候変動」ということで非常に明快なお話をいただき、どうもありがとうございました。その内容は、先ほどのストロングさんの講演をちょうど補完するようなもので、非常に分かりやすいお話だったと思います。また、昨日は第4回ブループラネット賞を受賞されまして、改めてお祝いを申し上げます。私は、IPCCの第一作業部会に関わっており、そこでボリン博士のご活躍を近くから拝見しておりましたので、今回受賞されたということに対して、特にお祝いを申し上げたいと思っております。

まず、今日お話になった内容についてのご質問に入るまえに、私自身、ボリン博士のご経歴、そしてこれまでのご活躍についていくつか強い興味を感じているところがございまして、そのことについてのご質問をさせていただきたいと思っております。私が大学院に入りまして、指導教官からこういう論文を読みなさいと言うリストをもらったわけなんですけど、その中にボリン博士の論文がございました。その論文は、バロトロピックモデルを使った数値予報というものでありまして、それを大学に入りたての頃、一所懸命読んで記憶がございまして。その後、気象力学の分野で先生の論文を見かけなくなりました。ところがしばらくして後に先生の名前の論文を面前にすることがありましたが、その論文は気象力学の論文ではなくて炭素循環の論文でした。最初は、これが果たして同じ人の仕事なのかと戸惑いましたが、これは私が非常に世間知らずでありまして、同じ方であったということが後で分かりました。私がそこで非常に興味を覚えますのは、なぜ数値予報という分野で素晴らしい仕事をなさっているながら、突然分野をお変えになったのかと、その辺についてちょっとお話しさせていただきたいと思っております。

ボリン 私のその時の教授が、気象力学の世界では最も高名な方といえるグスタフ・ロスビー教授でした。ただ、ロスビー教授が実は環境科学全体に及ぶ幅広い分野に関心を持っておられた方であることは、あまり知られていません。教授はその研究の初期の頃に、大気圏に排出された気体が、どの位の間存在するのかということに関心を抱いていらっしゃいました。そして、私が研究の方向を変えた1956年の時点では、CO<sub>2</sub>が大気中に存在する期間が2週間なのか、あるいは2千年なのかということは、ほとんど何も研究されていませんでした。しかしながら、皆さんご存じかと思いますが、1895年にはすでに、後にノーベル賞を授与されたスウェーデンの化学者であり地球物理学者であるアレニウス教授によって気候が人の影響を受けているということは考えられていましたので、CO<sub>2</sub>が最も重要な気体であり、関心を持たなければならないということは認識されていたわけです。そしてロスビー教授は、この手付かずの分野の研究を私に勧めてくださったのです。研究を進めるほどに、いかに重要なことかが分かりましたから、教授には非常に感謝しております。

時岡 私は、そういう歴史的な研究にはまったく不案内でありました。すでに1895年の段階からそういうCO<sub>2</sub>の影響についての研究がスウェーデンでなされており、それにロスビー先生がお気づきになっていて、そちらの方にテーマを変えることをボリン博士に助言され、それでテーマをお変えになったということで、非常に興味深くお聞きいたしました。我々は早い段階にいろいろテーマを変えるということはあるわけですが、ボリン博士の場合はPh.Dを取得後、お変えになりました。これはなかなか決断する上で非常に勇気を要することだと思いますが、おそらく、この新しい問題の将来性ということボリン博士自身がよくご理解しておられたことなんだろうと思います。現在、地球環境問題ということで、これが大きな、科学の分野の問題でもありますし、それに対していかに政策的に対応するかという、大きな政治的課題にもなっております。これまで、地球科学は大気は大気、海は海、あるいは陸は陸、生物は生物ということで研究がなされておりましたが、こういう問題に直面いたしまして、それらの分野を総合して地球全体をシステムとして捉え、その中で、例えば人間活動が全体にどう及ぼすかということを見ていかなければいけない、という問題に現在直面しているわけです。そういう場合に、これまでは一つの限られた分野の知識を持っているだけでよかったわけですが、それだけでは済まされない。全体を見る目ということが強く求められている。またそういう目で研究を指導する人、そういう人が必要になっていると思います。そういうことで考えますと、ボリン博士のような気象力学をご存じで、しかも生物地球化学のこともご存じである。こういう人が今まさに研究をリードする人として求められている。そういう目で見まして、少なくとも私が大学におりました頃は、地球物理学というところで、そういう広い範囲を全てカバーして置くということではなかった。これは現在大きく変わっていて、おそらく地球をシステムとして捉え、気候全体を学問できるような体系になりつつあると思います。特にそういうことを広い目で、物事を捉えることができる人を、全員がそうでなくてはならないとは思いませんが、そういう人を育てることが必要なのではないかと思います。

それからまた、ボリン博士の学術的な分野での活動の紹介がプログラムに載っておりまして、非常に興味深く拝見いたしました。それを見ますと、最近30年間で地球科学、大気化学の分野での非常に重要な国際的なプロジェクトの中で、全体の計画の調整、推進、実行、そういう面で常に中心的な役割を担っていらっしゃったということが非常に明確になってまいります。そういう中で、いろいろな経験をなさってきていらっしゃると思いますが、特に印象に深く残っていらっしゃるような役割を果たされたものについてご紹介ください。

ボリン 先ほどお答えしたことに付け加える形で、今の質問の答につなげていきたいと思っています。気象力学をロスビー教授の元でやってきたわけですが、本当に幅の広い見方ができるようになりました。気象というのは最も容易にものを地球規模で考えることができる分野だと思うんです。といいますのも、我々は地球をめぐる大気の循環を何週間とか、あるいは何ヵ月という範囲で考えるからです。しかし、別の分野においては、地球規模ではなかなか考えにくいことに対して、グローバルな質問が起こりがちです。大気汚染や水質汚染というのはその典型的な例と言えるでしょう。私たちは身近な汚染についてはよく認識しています。しかし、その汚染のグローバルな重要性ということまでは、なかなか考えられないものです。1950年代初頭にロスビー教授がイニシアチブをとり、大気化学的なネットワークが築かれました。これは、気象学のグローバルな見方が、他の分野である大気化学に持ち込まれたという一つの例だと思います。局地的な大気汚染をグローバルに見るということです。このような観測機関のネットワークは、例えば酸性雨の問題を見つけるのに役立ったと思います。1950年代に始まった観測が基礎となり、10年、20年たって認識されてくる。これは各国の局地的な大気汚染だけの問題ではないんだ、もっと悪い意味があるんだ、ということが分かってきたわけです。この経験は私に大きな影響を及ぼしました。そしてさらに、窒素はどうか、あるいはオゾンはどうなのか。こういった局地的なことが地球的なベースでどのように相互作用するのかということを考えなければいけないと分かったわけです。「シンク・グローバリー・アクト・ローカリー」という言葉が先ほどでてきました。地球規模で考えて地域ベースで活動しようということですが、これはまったく逆も言えると思うんです。すなわち、地域的に考えグローバルに行動する。これはどちらかということではなく、両方言えると思うわけです。このような意味で、大気化学の分野において、気象力学が本来持っている地球規模での観点が役にたったと思います。

1960年代の末から70年代の初頭にかけて、私はGARP(地球大気研究計画)という共同研究を始めました。これは気象力学のプログラムで、気象予報を地域的な問題からもっとグローバルなものにしていこうという動きで、このことが地球の気象モデルを1970年代に発展させたといえます。ここでの経験は、歴史的に物事を見る重要性を教えてくださいました。

大気化学の研究に携わっていると、もうひとつ別の分野とのつながりが生じてきます。人間が大気に働きかけるだけではなくて、自然そのものも働きかけるわけです。ですから、地球環境を考える上で、生物学的なプロセスをも巻き込むことが基本条件となるのです。世界気候研究計画(WCPR)が構成された当初、他の先生方もそうだったと思うんですけど、何か欠けているんじゃないかという気がしていました。WCPRは物理学的なプログラムとして発足したのですが、しかし、グローバルプログラムとしては、化学的あるいは生物学的な局面も必要じゃないかと思ったわけです。WCPRは1980年代の初頭から活動を始め、最終的に、生物学、化学をグローバルな観点のもとに統合する地球圏・生物圏国際共同研究計画(IGBP)に発展しました。これらは今日の気候研究プログラムの2つの柱といえるものになりました。このように、科学的な問題の見方をどんどん広げていくということには大きな意味があります。現在では説明する必要もない当たり前のことですが、3、40年前は全然当たり前ではなかったのです。

時岡 ボリン博士のご活躍を見て特に感じますのは、次のようなことです。科学者といいますと、自分の出した科学的な成果に非常に満足するわけですが、特に環境問題に関しましては、そういう成果を適切に社会に知らせることが大事になってまいります。それには政治家も含まれますし、政策決定者も含まれることとなります。そこで、科学者でありながら、そういう橋渡しをするという役割が非常に重要になってまいります。ボリン博士の経歴を拝見していて、まさに、IPCCでボリン博士がそのような役割を担っていらっしゃる。そういうことのできる人というのは意外に少ない。そういう人材が現在、非常に強く求められている。これはまた、意識して、そういう人材を作っていくようにしなければいけないのではないかと。私は、ボリン博士にお聞きできるとしたら、どういうふうにしてそういう資質を獲得されたのか。おそらく、先ほどの学術的な活躍などの経験を通して培われたもの、これはもちろん、疑いなく大事な部分であったろうと思いますが、それとは別に、ボリン博士ご自身で、役割を果たすということを常に意識してやっていたのかどうか教えていただきたいと思います。

ボリン 時には自分が非常に無知だったという気がします。しかし、そのおかげで私はいろいろなことを学ぶことができました。まず一番大切なことは、ギャップを埋めるための橋渡しという役割は、事実をただ政治家に伝えるのでは不十分だということです。むしろお互いの対話を進める、対等の関係で対話を進める必要があります。政治家の立場を理解し、そしてその立場を尊重する。そうすれば政治家の対応も変わってきます。お互いを信頼し、尊重しあうことが基本なのです。そして科学者が政治家の信頼を得るためには、事実をいかに自信と確信を持って伝えられるか、そして、分かっていること以上のことは決して予測して語らないことが重要です。予測がいつもはずれてばかりだと、もちろん信頼など得られるわけがありません。

科学に関するアドバイスを与えるということは継続的なプロセスであることを、科学者は忘れがちです。時々メディアのインタビューを受けて意見を新聞に発表し、またラボに戻って自分の研究に没頭する、そういう関係ではないんです。継続的なプロセスでなければなりません。科学者は、政治家が政策を決定するためにどのような情報を必要としているのかを把握する必要があります。ただ、そのような理想の状況にはまだまだ遠いと言わざるを得ません。私たちが提出する報告書には、政治家の方々に理解できず、また、必要としていないような内容がたくさんあります。それが政治に混乱をもたらしているということもあるでしょう。ですから政治家は、科学的な根拠のもとで問題を単純化できる人々と対話を進め、その中から何が政策面で重要なのかを引き出す必要があるのです。

それから、もう一つの重要な点ですが、地球の環境システムというのは、まさにカオスの世界なんです。基本的に予測可能なものではありません。天気予報ひとつを見ても、10日あるいは2週間先の予測をすることなどできないんです。もし政治家の方々に聞かれても、そんな予測はできないとお答えします。人間が予測するので、できることは限られています。政治家は政治の動向を予測できるでしょうか。

もちろん社会や経済の動きが予測可能なはずがありません。遠い未来の地球で、戦争が起こるかどうかなんて予測できないのです。こういうわけで、予測という言葉は誤解を生み出しやすいと言えます。私たちは、先ほども申し上げましたが、期間を定めて計画を立てるべきであり、そうすることでいろいろ違った発展が起こり得ると考えてます。そしてその発展は、社会経済システム同様、自然システムを脅かさないものであるべきでしょう。

このように継続的プロセスの基盤ができ上がっても、政治的な意思決定が必ずしも正確な予測をもとに行われるとは限りません。科学者も同じように自分たちを戒めなければなりません。いろいろ違った要素を考慮しなければ意思決定というのはできないのです。そして環境に携わる科学者としては、理解可能な全体像を提示し、私たちはどうあるべきか、どのような形で貢献をできるのか、このことを明確にしなければなりません。

時岡 どうもありがとうございました。とにかく、政治家との間で信頼を失わず、明確に情報を伝え、継続して対話を続ける。そういうことから努力して、ある種の基本的なコミュニケーションプロセスを確立することが大事であるということ。非常に面白いお話でした。次に、今日の講演の内容に関する部分についてご質問をさせていただきたいと思います。炭素循環、これはボリン博士のご専門ですが、このことにつきまして、特にIPCCの第一次報告書で非常に話題を呼んだことに、二酸化炭素の“ミッシングシンク”という問題がございます。これにつきましては、昨年出されましたIPCC特別報告書では、ちょっと記述が変わってきています。特に、北半球の森林が成長しそこに有機物として炭素が固定されるというプロセスを、より量的にきちんと評価をしてみた。そうしますと、その部分がある程度、炭素を吸収しているということが出てきて、全体として、炭素循環の枠組として見た場合、我々が何かミスしているということはないという判断で、“ミッシングシンク”という言葉は報告書から消えてまいりました。消えたからといって、炭素循環の中の各プロセスの評価が問題でなくなったというものではないと思います。そこにはまだ、いろいろ不確定な要素があると思います。これについては今日はそこまで詳しくはお話にはなりません。比較的どれもまだ不確定な感じがいたしますが、それらの中で特に不確定性の大きいところはどこなのか。あるいは、それを変えていくための研究として、どういうことをやらなければいけないか、質問が一般的になりすぎるかもしれませんが、教えていただきたいと思います。

ボリン “ミッシングシンク”という言葉は誤解を生みがちで、むしろ“ラック・オブ・アンダースタンディング—理解不足—”と言うべきだと思います。私たちは自分たちに理解できない事象を、“ミッシングシンク”という自然界の中の何かわからないもののせいにしていただけなのです。私はこれはおかしいと思います。間単にご説明いたしましょう。人間が化石燃料の燃焼によって排出する炭素の量については、すでによく知られています。そして、それが大気中に滞留する量についても年々理解されています。また、海洋がどの程度炭素を吸収するのかというモデルもかなり高度に発展してきました。しかし最も重要なポイントは、大気中から海洋中、特に深海層、海底に蓄積されていく量を知ること、すなわち海洋力学について理解するということであり、これが困難な問題でもあります。

すでに知る限りでは、CO<sub>2</sub>の濃度が大気中で増加することが、海洋の生物に対して直接影響を与えることはありません。これは海洋中に維持する力を持つものがあるということで、私たちは、この海洋中における生物学的な貯蔵槽、シンクというべきものの機能を促進する必要があると思います。これはまだ未知のものですが、海洋の生物学的プロセスと人間の影響をモデルに含めることによって、一つの方向性が出るかもしれません。海洋中に吸収された量と大気中に滞留する量を合わせると、化石燃料の燃焼による人為的な排出量とほとんど対応します。しかし、化石燃料の燃焼と同時に私たちは森林を伐採し、そして土地を耕しています。その結果何十億トンもの炭素が化石燃料による排出とは別に存在すると考えられるのですが、まだこの数字は不確実なものです。もしこの計算が正しければ、排出された炭素がどこかに消えているということになります。もしかすると、海洋は私が考えている以上に重要な役割を果たしているかもしれません。

最もはっきりしているのは陸上の生物圏ですが、このシステムは非常に多様で複雑であるため、グローバルなレベルでは把握しにくいものです。まず最初の問題は、人為的活動が大気中のCO<sub>2</sub>の濃度を高めて

いるということです。しかし生物の成長は非常に速いものです。木々はまた土に還り、また新たに成長します。そしてまた、地域によっても成長速度は変わってきます。熱帯での植物のライフスパンは極地の植物に比べると非常に短いものです。ですから、エコシステムに対して大気中のCO<sub>2</sub>の増加がどのように影響しているのかということ、これはなかなか簡単には分からない2つ目の問題といえます。

それから3つ目ですが、森林の伐採は熱帯地域だけで起こっているものではありません。特に19世紀後半から20世紀の初めにかけては、中緯度の地域で大規模な森林の伐採が行われました。その結果、150年くらい前に比べるとアメリカやヨーロッパの森林はすっかり変わってしまったといえる位です。今後これらの国々での森林の再生が、何かしらの役割を果たしていくことになるのではないのでしょうか。

次に4つ目として、この5年間で非常にはっきりしてきたことをお話しします。ピナツポ火山の噴火というのがありましたが、この噴火の結果、たくさんのエアロゾルが大気中に放出されました。この放出は短期間で直接的に地球の気候に影響を与えました。冷却化が進行したわけですが、そして局地的にも気候に大きな変動が生まれました。メタンや炭素の循環にも悪影響が及びました。このように、地球の陸地システムというものが、局地的な気候の変動とどのように関わっているのかということも大きな問題なのです。

いま4つの点を挙げましたが、これら4つを総合し、そこにもう少し違う観点を盛り込むことで、解答を見いだすことができると考えています。いま大切なのは、排出を削減するためのプログラムを開発し、どのようにすれば成功できるのかを判断することであり、その取り組みをきちんと分析することです。そのためには炭素循環について詳しく知る必要があるのです。ですから、炭素循環についての研究はもちろん、気候変動に関する枠組条約の枠内でどう取り組んでいくのかが、非常に重要なことになると考えています。

**時岡** 炭素循環の関係でもう一つコメントをいただきたいことがございます。1995年の4月から気候変動に関する枠組条約(FCCC)の締約国会議での議論が始まりました。そこでは、気候系に悪影響を及ぼさないレベルでの大気中の温室効果気体を安定化させるというFCCCの目標に対して、具体的にどういう対策をとるかということの議論が始まっているところです。そのことに関連して、炭素循環のモデルに基づいた二酸化炭素の安定化のシナリオに沿った場合に、どういった排出量が許されるかという計算例を示されましたが、そういうモデルがどのくらい正確であるかということが非常に重要になってくる。しかもこれが、どのくらいの不確定さを持っているかというのは必ずしも明確にされていない。その辺がこれからの議論の中で少し問題になってくるのではないかと。そのことについてのコメントと、もう一つは、二酸化炭素の濃度を安定化させるということがどのような性質を含んだ問題なのかということも、もう少し明確にお話しいただきたいと思います。例えば、簡単に数十年のスケールで安定化ができてしまうものなのかどうか。安定化を先延ばしにしてもよいのか、早くからやるべきであるのか。そういう点についてもコメントをいただきたいと思います。

**ボリン** おっしゃる通り、非常に不確実な要因が炭素循環のモデルにはつきまとっています。先ほどの講演で、安定化についてのシナリオを図で示しましたが、そのカーブの最終的な数値を正確なものとは考えていたくないのです。今から100年いや50年後のことでさえ、どのような変化が生じているかを予測することはできません。気候のみならず、その他に多くの変化を引き起こす要因がありえるのですから。むしろ興味深く見ていただきたいのは、近い将来に予測される変化です。先ほども申し上げましたように、あまりにも遠い将来について正確な予測を試みるべきではないと思っています。私たちは、行動指針を作り、その結果を見定め、必要な修正を加え続けなければなりません。例えば炭素循環について考えますと、何か政策を打ち立てることで、大気中のCO<sub>2</sub>濃度に対してこれから20年のうちにどの程度影響を及ぼすことができるのかは非常にはっきりしています。なぜならこれからの20年間に、これほど劇的な変化を引き起こす要因は見当たらないからです。近い将来については、かなり信頼性の高い形で予測はできると思います。ですから先進国によるCO<sub>2</sub>排出量の安定化—締約国会議で締結された唯一の規定ですが—だけでは不十分であると、ためらうことなく申し上げます。これは非常に重要なことなのです。排出量の安定化は最低限必要なことであって、それに加えて何をすることが非常に難しいのです。しかし5年という先を考えてみますと、あらゆる評価をし続ける中でたくさんのご意見を学ぶでしょう。はっきりしてい

るのは、先進国による排出量の安定化だけでは不十分だということです。そして、長い目で見れば、途上国が先進国のこれまで記録したような排出量のレベルに至ることはありえません。ここに重要な点があります。しかし、それ以上のことについては、私たちは慎重でなければなりません。もっと炭素循環についての理解を深める必要があるということはもちろん、将来、今まで言ってきたことがどれくらい妥当であるのかということをもっと明らかにすることができるでしょうし、これまで取り組んできたことがどれくらい妥当なのかということも検証できると思います。人によれば、そんなものは生温いとか、あまりにも遅々として進まないんじゃないかと言う方もいらっしゃるでしょう。しかし、遠い将来に向かって、今の考証の段階、あるいは枠組条約の取り組みを進める上で、いろんな問題があるということを理解しなければなりません。

時岡 どうもありがとうございました。ここで、会場の方からご質問なりコメントをいただきたいと思えます。

質問者1 炭素循環に関連しまして、成層圏オゾン破壊によって紫外線が増加するというのは、これは有名で、実際に観測でもそういう結果がでておりますが、それが、例えば森林とかプランクトンに対して悪影響を与える。最近の日本の環境庁の研究ですと、森林を形成する相当種の樹木の発芽期の苗に対して、悪影響を与えるという結論が出ています。またプランクトンに対しては、表面にずっととどまっているタイプのプランクトンはそれほど影響を受けません。しかし、昼間、紫外線を避けて少し底の方に沈んで、夜になって出てくるタイプですと、北緯40度くらいに位置する北海道で、さほど紫外線の強くない10月の観測で、悪影響を受けるという結果がでております。そうしますと、今後おそらく数十年はオゾン層破壊による紫外線増加が考えられますが、それによって、森林または森林の炭素吸収とか、プランクトンの吸収というものが悪影響を受ける可能性があるんですが、これが全地球的な炭素循環に影響を与える程度になるかどうか、ご意見をお聞かせください。

ボリン 2つに分けて考えたいと思います。紫外線が特にプランクトンや樹木の苗に与える悪影響についてですが、問題は、これまでにどの程度実際に変化が起こっているのかということです。例えば日本などが位置する北半球の中緯度の地域では、紫外線を吸収し地上への影響を和らげる成層圏のオゾン層に一定の異変性があります。しかしながらこの変化は、成層圏オゾン層の破壊によって引き起こされる紫外線の変化に比べて非常に大きくなっています。ですから、総合的な影響として、中緯度の地域の森林が被る影響があることは明らかですが、それがどの程度のものであるかは、はっきり分かりません。またこれについてグローバルなレベルで分析された方がいらっしゃるのかどうかも、私はよく承知していません。

逆に、オゾンの増大もまた、陸上のプロセスに対して有害な影響を与えます。これは現状においてはより重要な意味を持っていますが、気候変動と直接の関係はありません。しかし、大気下層でオゾンが増大すると、地球上の生物や水質に悪影響を与えるのは間違いありませんから、これを防ぐことは重要といえます。

質問者2(ブループラネット賞第1回学術賞受賞者 真鍋淑郎博士) ボリン博士、あなたは科学的調査において素晴らしい役割を担ってこられました。今回の受賞についてあらためてお祝いを申し上げます。さて、先ほどのお話で、“ミッシングシンク”という言葉は適切ではなく、それについて説明するときには、私たちの理解が不足しているのであることをはっきりさせるべきだと強調されました。あなたは“ミッシングシンク”の発見により、炭素循環の不確定性と、気候変動においてエアロゾルの冷却効果が大きな影響を及ぼしていることに気付かれたのでしょうか。例えば先ほどカーボネイテッドエアロゾルの話をされましたけれども、これも不確定性が高いものです。そこで質問ですが、私たちが将来の気候変動の予測、あるいは将来の二酸化炭素の量の予測を政策者に見せて、二酸化炭素の排出を規制すべきであると提案した場合に、それほど不確定な要素の多い予測を基に、莫大な予算の必要な規制を行うことは不可能だ、不確定性が高い場合は何もしない方がよいのではないかと、という返事がきた場合に、どう彼らに言えばよろしいのでしょうか。

ボリン これも分かりやすい、しかしお答えするのは難しい質問です。まず、いま予測という言葉が使われたんですけども、その言葉は誤解を生むのであまり私は使いたくないですね。常に私たちは一連のシナリオとして提示すべきだと思います。いまお話ししているのは経済開発の問題ですが、人間の行動、そしてそれによって生み出される排出物が、どのようなシナリオを作っていくのかを提示しなくてはなりません。もちろんシナリオには不確定な要素がたくさんあります。そのいくつかの要素の中で、どちらを選べばいいのか、どちらの起こる可能性がより高いかは分からないのです。しかしそれは重要ではありません。私たちが社会経済システムに求めること、それが将来の排出に対して影響を与えるのです。悲劇的な事態を避けるためには、慎重な予防措置を講じなければなりません。

そして次の段階では、このシナリオを元にして真鍋博士の懸念されている気候変動を考えるわけです。気候システムがそれに影響する要因である排出にどれだけセンシティブであるかによって、異なったシナリオが考えられます。通常、大量の排出を想定したハイ・シナリオではなくて、より少なめの排出しか想定しないロー・シナリオで未来を捉えがちです。しかしロー・シナリオの方が現実的に可能性があるという根拠はどこにもありません。重要なのは正確な予測ではなく、起こり得るあらゆるリスクを見据えることです。そういう意味で、ハイ・シナリオを除けて考えることはできないと思います。

しかるに、可能な限りあらゆる措置を、無駄なく、しかし十分に講じることが次のステップとなります。ストロングさんがおっしゃいましたように、エネルギーには莫大な金額が補助されています。しかし、この補助金がエネルギーを間違った形で使用させているとも考えられます。例えば、アルミニウムの溶鉱炉において消費される電力はあまりにも大量で、結果と釣り合っているとは思えません。ですから、より効率的で、そして社会にとって負担が少ない形でのエネルギーの使用方法を考えなければなりません。これがなによりも大切なことです。

一人一人がこのような取り組みを進めることによって、社会に対してお金を還元することもできると思います。その還元されたお金によって、もっとさまざまな対策がとれるようになるでしょう。これは理に適っていると私は思います。例えば、多くの人が生命保険に加入し、少なからぬ保険金を毎月支払っているのは、そこにリスクがあるからです。社会においても、一種の保険のような形でのリスクへの対応を考える必要があるのではないのでしょうか。どの程度の危険性があるのか、そしてそれにはどの程度の保険が必要なのか、政治的な立場から判断を下さなければなりません。政治家は、このような判断には科学者以上に慣れていていると思います。だからこそ私たち科学者は、政治家に判断の土台となる将来のシナリオを提示するのです。残念なことに政治家は、しばしばその不確定性を口実に言い抜けようとしています。しかし、現実的な問題として、起こり得るリスクをシナリオで示すということが、科学者の成すべきことだと思います。難しいかもしれませんが、やってみる価値はあると思います。

時岡 ボリン博士は、さらに講演の中では、最近の地球温暖化に関する科学的な知見のいくつかをご紹介になりました。これについては、間もなくIPCCの第一作業部会の第二次報告書に向けてのとりまとめが最終的になされ、多分11月の末には、それがプレスに発表されると思います。その時点でさらに詳しい情報を、みなさん得ることができると思いますので、それを参考にさせていただきたいと思います。とにかくこの5年間に多くの進歩がございましたが、まだまだ多くの、将来に向けて重要な残された課題があり、これに向けて関係する科学者の努力が強く求められますし、先ほどボリン博士がおっしゃいましたように、信頼できるデータを擁し、政策決定者との対話を継続的に続けるということが非常に大事になってくるでしょう。おそらく議長を務めていらっしゃるボリン博士は、IPCCをそのような主旨に沿ってこれからも指導してくださると思います。今後とも、そういう面でのご指導をよろしくお願いしたいと思います。今後とも、ご健康に注意されて、世界のこの方面での指導者としてご活躍くださることをお願いいたします。この第二部を終わりたいと思います。どうもありがとうございました。

ボリン 私ひとりの取り組みだけでは足りません。みなさんの協力が必要なのです。ありがとうございました。





財団法人 旭硝子財団

〒100 東京都千代田区丸ノ内1-4-2 東銀ビル12F

Phone 03-3285-0591 Fax 03-3285-0592

※本報告書は再生紙を使用しています。