

No.52

August 15, 1995

Information

講 演

1995年4月21日（金）・第70回談話サロン（東京・東條会館）

講師・題目

松野太郎：「地球温暖化の科学—研究の現状」

日本工学アカデミー

THE ENGINEERING ACADEMY OF JAPAN

地球温暖化の科学—研究の現状

松野太郎



1934年10月生まれ

1957年3月 東京大学理学部卒業

1959年3月 同 大学院修士課程修了

1962年3月 同 博士課程退学

1962年4月 同 理学部助手

1966年6月 九州大学理学部助教授

1971年6月 東京大学理学部助教授

1984年4月 同 教授

1991年4月 東京大学気候システム研究センター長

1994年10月 北海道大学大学院地球環境科学研究科教授

現在に至る

この間、ワシントン大学、プリンストン大学、国立大気研究センター客員研究員。

理学博士。専門分野：気象学、特に大規模運動の力学、気候ダイナミック。

日本気象学会賞（1970）、藤原賞（1992）を受賞。

司 会（清山地球環境専門部会長） 定刻になりましたので、始めたいと思います。

私、司会を務めます清山でございます。よろしくお願いいたします。

きょうは、第70回の談話サロンとしまして、松野先生にお願いをいたしました。演題は「地球温暖化の科学—研究の現状」でございます。前々から松野先生に一度、この日本工学アカデミーの談話会で講演をいただきたいと考えておったのですが、なかなかお忙しい先生で、つかまえるのに骨が折れまして、きょうやっと拉致してきたところでございます。

最初に、先生のご略歴を簡単に紹介させていただきます。

松野先生は、昭和9年（1934年）のお生まれでありまして、東京大学理学部物理学科地球物理学コースを昭和32年に卒業されまして、大学院に進まれ、昭和37年に東大理学部の助手になられました。それから、一時、九州大学の助教授をされ、東大に戻られて、昭和59年に教授になられました。平成3年から東京大学気候システム研究センターの教授で、センター長を兼ねてやっておられたのですが、平成6年10月に北大大学院地球環境科学研究科の教授として転任され、現在に至っております。

れます。その間に、ワシントン大学の大気科学科、またプリンストン大学の地球流体力学、それから米国の国立大気研究センターの客員研究員として、相当長期間、米国でお仕事もしてこられまして、日本気象学会から学会賞、あるいは藤原賞を受賞されておられます。

ご承知の方は非常に多いと思いますが、先生は気象学、特に大規模運動の力学、最近の地球環境の気象というところで非常に世界的な学者でございます。今、どの辺までがほんとうで、どの辺までいろいろ予測なり研究が進んでおるかという、我々が平素知りたいことを、一番権威ある先生から聞けるということで、きょうはたくさんの方がお集まり下さっておりますのでございます。

では、先生、よろしくお願いいたします。

松 野 ご紹介いただきました松野でございます。本日は、日本工学アカデミーにお呼びいただきまして、ここで講演させていただくことを大変光栄に思っております。実は清山先生から、日本工学アカデミーの地球環境部会というところで、観測と予測に関するワーキンググループをつくって、問題を検討するようということをお話しいただいたんですが、なかなかその仕事はかどらずに大変ご迷惑をおかけしておりました。何とかしな

ければいけないということで、最初に私が研究の面で大体どういうふうになっているかということをお話しして、それを出発点にして、計測と予測に関してワーキンググループを発足させたらいいのではないかということで、ここで話しさせていただくことになりました。

先ほど、なかなか忙しくてというお話が出ていたんですが、ほんとうに非常に忙しい思いをずっとしておりました。現在は北海道大学にいますが、東大にいた時、地球温暖化問題が非常に大きな社会的問題になるにつれて、官庁の委員会とか、いろいろなことをやらなければならませんでした。

それはどうしてかと言うと、私自身はずっと気象学を専攻してきました、今、ご紹介いただきましたように、大気の力学、つまり成層圏の運動であるとか、赤道付近での大気や海の力学、今、異常気象で話題になっていますエルニーニョのメカニズムの基礎になるような力学、そんな基礎的な研究をしてまいりました。温暖化に関する問題は、広い意味では地球環境問題ですが、我々の学問的な見方でいきますと、長期的な気象といえますか、気候の変化に関する研究です。

気候の変化というのは、気象、つまり、昨日のお天気がどうで、今日がどうだというのに比べて、より長期の問題、去年は非常に暑い夏で、おとしは非常に寒かった、そういうふうな年々の変化がどうして起こるのか。さらに長い方にいきますと、氷期、間氷期というふうなサイクルがあります。10万年ぐらいの間隔でもって氷河期が来たり、暖かい時期があったり、そういうのはどうして起こるのか。そういう気候変動の問題が気象の次の問題としてクローズアップされてきました。それは学問的な意味でも大変興味深いことですので、そういう研究に進もうと思っていたところ、いわば内容的にはそれと全く重なるような形で温暖化の問題が出て来ました。これは原因が人間の排出した温室効果ガスにある訳ですが、その結果として気候が変わるということに関しては自然の気候の変化と全く同じことですので、いわば気候の変化の研究というものの延長上にあるわけです。そういう問題が、ここ10年ぐらい前から大変大きな問題になりまして、それが社会的なインパクトが

非常に大きいことから、それがどういう問題であるかを、いろいろなところでご説明するということをせねばなりませんでした。

ちょっとわき道にそれますが、なぜ私が一人で沢山の委員会に出なければならなかったかについてお話ししたいことがあります。その第一は、こういう研究をしている人間が、極めて少ない。今日は工学アカデミーということですので工学関係の方が多いと思いますが、そういう分野に比べて非常に少ない、地球科学という分野がもともと多くなかったということが大きな原因です。そのため、こういう社会的な大問題になった時に、それにどう対処するか、我々は非常に苦慮しているところで

す。それに加えてもう一つ、やや偶然的な事情があります。それは、私の先輩に当たるような人が沢山いたんですが、その人たちがほとんどすべてアメリカに渡っておられるという事です。そして、こういう問題の研究で世界的に非常に立派な仕事をしておられます。何故かという、第二次大戦後、非常に苦しい時期で、大学で研究することが大変難しかったということで、アメリカに渡って研究の仕事につかれた。もう一つ、特に絶対的な条件だったのは、これからお話の中でいろいろ明らかにしていきますが、それにはコンピューターを使った研究が必要なんです、それがなかったからです。今でこそ日本はスーパーコンピューターも世界的に非常に立派なものになって、貿易摩擦にからんで問題になっていますけれども、長い間、1980年ぐらいまでは、アメリカなんか比べて、日本のコンピューターでは全然お話にならなかった。そのような状況にあった時に、コンピューターを使った研究は日本ではできないということで、私の上の世代、細かく言いますと、東京大学を卒業して気象を専攻した先輩で、私の10歳ぐらい上からちょうど一つ上まで、全員アメリカに行かれました、アメリカでずっと研究を続けられているという状況があります。

そういうちょっと珍しい状況といえますか、もともと人数が少ないところですから、偶然の要素がかなりあるかと思いますが、我々の研究分野というのはそういうような状態にあるという

ことを、ちょっとご紹介させていただきました。

温暖化の問題はじめ、最近の地球規模の環境問題で非常に特徴的であると思うことがあります。お配りしました予稿にも書きましたが、以前の公害と違って、被害がまだ何らはっきりしていないにもかかわらず、科学者の予言に基づいていろいろ何か対策を立てねばならないという点において、非常に特別なところがあるように思います。以前の公害問題では亜硫酸ガスとか、有機水銀とか、現実に局所的に有害物質が出て、それで現実に被害があらわれて、それでも疑問が出されなければ、まあまあ因果関係がだれにもわかるようなものでした。地球環境問題においては、オゾン層の問題にしても、温暖化にしても、これは直接CO₂が悪いとか、フロンが悪いとかじゃなくて、地球の環境を現在の姿に保っているメカニズム、それに人間活動の所産であるそういうものが介入してきて、それを狂わせるというか、それがなかった時とは違う状況にするという予測がされている。そのことが人間にとって非常に都合の悪いことになる可能性があるということで問題が起こってきています。もう一つ、研究という面でも公害・汚染とは違う所があります。地域的な公害問題の時には、汚染されたところというのに対して自然というものが別にありますので、汚染と本来の自然という区別があって、自然に戻すということになります。けれども、地球規模の環境問題は、オゾン層にしても、温暖化問題にしても、ただ一つの地球それ自身が変わっていくということです。自然と別の汚染大気の研究があるのでなく、この研究は自然そのものの研究と全く区別がつきません。地球にCO₂が増えたというのは事実で、仮にそうでなかったのが本来だから、自然科学者としての気象学者は、本来CO₂があるべき姿の気象を研究するんだなんていうことを言っても意味がありません。というような意味において、地球環境に関しては、環境問題の研究というのは地球科学、自然科学としての研究と全く変わらないと私は考えております。

前置きが長くなりましたが本題に入りたいと思います。きょうは研究の現状ということでお話をさせていただくわけですが、これは非常に大きな

問題で、当然、自分自身で手をつけているなんていうことではないので、専ら現在の世界的な研究の状況のご紹介をし、ほんのちょっぴり、そういう中で自分はこう思っているという私見をつけ加えさせていただきます。

図1（次頁）は皆さんもうごらんになったことがあると思いますが、温暖化というと必ず出てくるハワイのマウナ・ロア山における二酸化炭素の増加の図です。1958年以来、観測されているCO₂（二酸化炭素）の濃度の変化です。見てわかりますように、1年周期で変わっています。CO₂は、ご存じのように、光合成を通じて植物に取り入れられ、それが冬になると木の葉がなくなりますから、落ちたものが分解してまたもとへ戻るということで、1年の周期で変化しているわけですが、全体としてこういうふうになっています。最初の頃は315ppm、現在は360ppm ぐらいになっています。

この始まったのはどういう時かと言いますと、57年、58年に、IGY（国際地球観測年）という、地球全体の観測をしようという国際的な観測キャンペーンがありました。その時に始まったものです。日本では南極観測が始まり、超高層の電離層とかを対象にして、人工衛星を使った観測が必要であるということで、57年10月4日にスプートニクが上がりました。背景として軍事的なことがあったかと思いますが、表向きは地球観測年で、地球の観測を始めるということで始まったわけです。いわば宇宙時代の幕開けであった国際地球観測年に、この問題も、いくつもあった地球科学の課題の中の一つとして、観測が開始されたのです。ちょうどその頃、地球科学における将来の重要な問題の一つとして、CO₂の増加による気候の変化というものが考えられて、一刻も早く観測を始めるべきであるという海洋化学者レベルの主唱のもとに、スクリップス海洋研究所のキーリングによって観測が始められました。

ついでに申し上げますと、私、ちょうど57年に卒業しまして、その頃こういうことがあったわけですが、CO₂が増えて気候が変わるということは、昔からの有名な問題としては知っていましたけれども、それが現実に起こり得る深刻な問題というような認識は全くありませんでした。私自身は、

先ほどもお話ししましたように、低気圧の力学に関係するような研究をしていたんですが、我々の仲間に、バート・ボリンというスウェーデンの研究者がいて、現在、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の議長をしております。その方も同じようなテーマで優秀な研究をしていて、大変秀才の誉れ高かったんです。彼の先生でロスビーという、我々気象学者の間では大変著名な世界の指導的学者なんですが、その人に、これから大気の力学なんかよりも大気の組成に関する科学が大事な問題だから、CO₂の研究をなさいと言われ、CO₂の観測や循環モデルの研究を始め、この頃からボリンはそちらの方面の論文を書き始めています。同じ頃、スウェーデンの研究で、各地の雨の中の化学組成の色刷りの論文が出ていまして、私は大学院へ入ってすぐ、どうしてこういうのが面白いのかななんていうふうに思ったものです。しかしながら、スウェーデンというのは、酸性雨なん

かが非常に早くから問題になったところですので、先導的な研究者は、その時にこれがこれからの重要な問題であるということを指摘して、観測を始めたという訳であります。

現在、いよいよこれが問題になってきた訳ですけども、CO₂が増えれば地球の温度が上がるということは19世紀の末からずっと言われてきたわけです。それでは、実際にそんなに増えているのなら、温度がどうなっているのかといいますと、図2は気象庁でまとめられた報告に出ているものですが、地球全体の平均気温の過去100年余りの変化は、こんなふうになっています。

1960年から90年の平均を基準にしてゼロにしていると思いますが、それを基準にとりますと、19世紀の終わり、100年ぐらい前には相対的に0.4度ほど低かった。それが現在、この辺にきていますから、この100年間に全体として0.5度ないし0.6度温度が上がっています。確かにここ100年の間に温

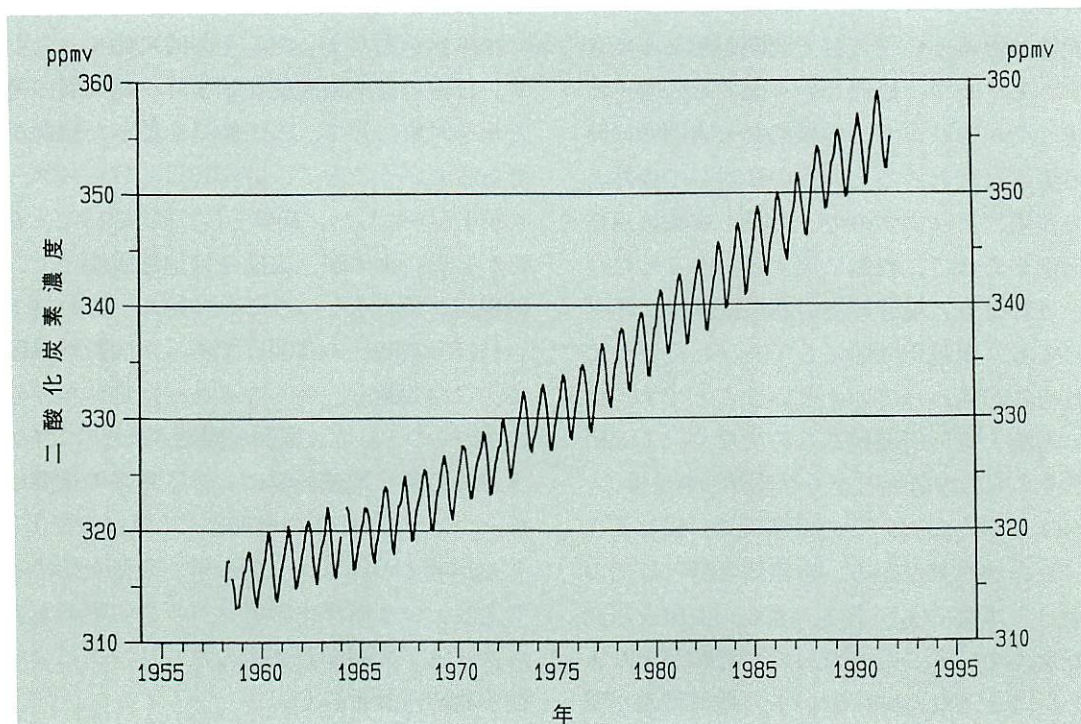


図1 マウナ・ロア山における二酸化炭素濃度の変化

(WMO温室効果気体世界資料センター、米国海洋大気庁気候監視診断研究所 (NOAA/CMDL, Summary Report No. 20: 1992) 及び米国二酸化炭素情報解析センター (Trends '91: 1992) のデータから気象庁温暖化情報センターが作成した。)

度が上がってきているという事実があります。

ただ、そう単純ではなくて、非常に大きな変動がある。破線でかいてあるのが1年毎の年平均気温で、これを見て分かりますように、非常に変化が激しいんです。こういう変化がなぜ起こるのか。気候の年々変化、おとしは非常な冷夏だったけれども、去年の夏は暑夏だった、そういう変動があります。これは一つの大きな自然の気候の変動ですが、こういう変動がなぜ起きるのかというのが現在の大きな研究の対象です。細かくお話しする時間はございませんが、現在、話題になっているエルニーニョ現象は、全部ではありませんが、大きな原因の一つであるということが分かっています。

それから、火山噴火。90年、91年というのは過去最高気温と2位を記録したんですけども、92年は、世界的に気温が下がった。これは前年6月のピナツボ火山の噴火で、成層圏に細かいエアロゾルが漂い日射を僅かながら遮った、その影響が出ていると思います。そういうことも影響します。

そこで、こういうあまり細かい変化はやめにして、前後2年を加えた5年間の平均をとりますと、この太い線でかいたような格好になりまして、か

なり滑らかになります。しかしながら、それで見てもCO₂は非常に滑らかに上がっていますけれども、気温の方はそうでなく、それ以外に自然の変化がある。1930年代から40年代にかけて気温が非常に上がった時期があった。実はこの時既にヨーロッパでは、近頃暖かくなってきた、これは人間活動による二酸化炭素の増加のせいじゃないかということが言われまして、現在につながる研究はここからスタートしております。

そうだったんですけども、その後、50年代から60年代にかけて、むしろ地球全体の平均気温が下がった時期があります。従って、1970年代は、ご記憶の方があるかと思いますが、むしろ気候の寒冷化ということが言われました。この変化がなぜ起こるのかというのは、いまだによく分かりません。このゆっくりと数十年で上がったり下がったりするのがなぜかということは大きな研究課題になっていますが、最近、気象研究所のグループが温暖化の問題に関連してコンピューター実験をした結果、もしかしたらこのゆっくりとした変動に関係あるんじゃないかという結果が出て、みんな大変興奮しているというか、興味を持っているところです。それは後でお話しします。

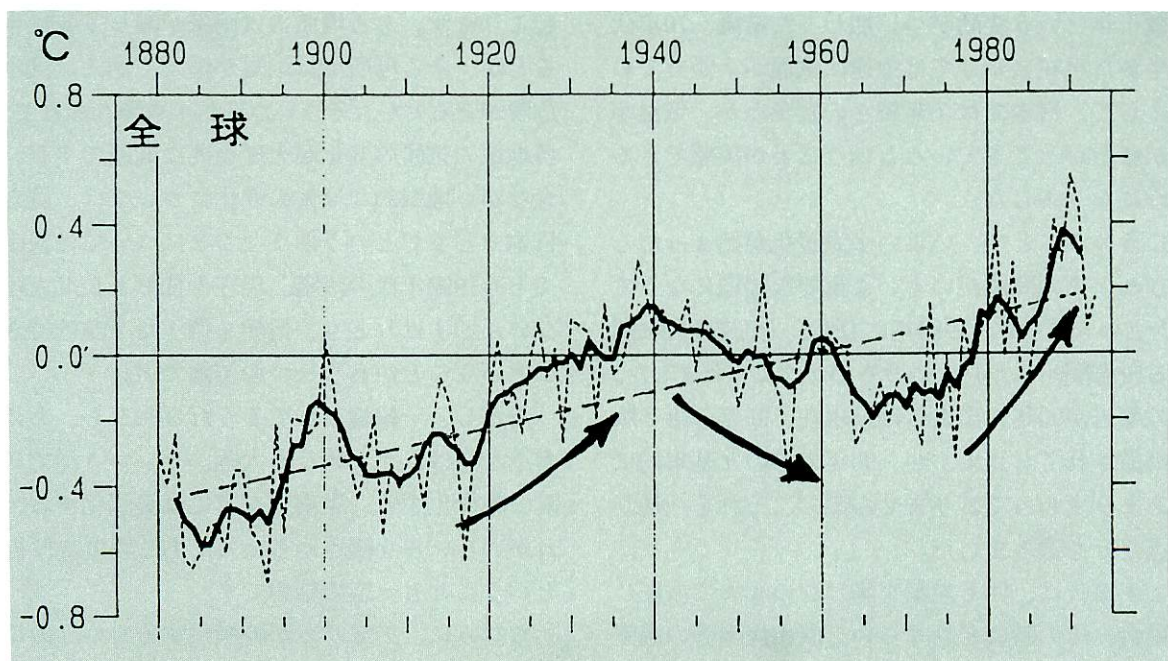


図2 全地球平均気温の過去110年間の変化 (気象庁：地球温暖化レポート，1993より)

という訳で、もちろん60年代、70年代には分かりませんでした。従って、このカーブで70年代後半以後をかくして、70年代、ここまで見た時にどう思ったでしょうか。上がるんだと思ったら下がりはじめた、一体どうなるんだろうか、何か原因の分からない自然の変化で、寒冷化する可能性があるということで、その頃、1974年に出た、気象庁の異常気象のレポートでは、気候が寒冷化するおそれがあるということが書かれています。この時期には、こういう訳で自然の変動が分からなかったのですから、CO₂が増えれば温度が上がるということは分かっておりまして、いろいろな研究も既にかなり進んでいましたが、自然の変動によって、もし寒冷化の方向に向かうんだったら、CO₂の増加によって温暖化が起こっても、それを多少やわらげる程度じゃないかということで、そのため社会的な警告というのが遅れたということがあったように思います。

しかしながら、その後、結局、原因が分からないままに、再び70年代後半から気温が上がるようになりまして、それからの温度の上がりというのは大変急速です。ここまで来て全体を見て分かりますように、我々は、多分この上昇は温室効果ガスの増加によるものだろうと思っています。自然の数十年という変動がつけ加わった結果、70年代後半から現在にかけては急速に気温が上がっておりまして、日本では7年続きの暖冬とか、気温が確かに上がってきているということが実感できるようになりました。

こういうことで、いよいよ温暖化が始まったとか、この問題がいよいよ重要な問題になってきたということで、1988年にIPCC（気候変動に関する政府間パネル）というものがつくられました。その報告が90年に出ました。現在、95年の第2版が準備されておりますが、90年のものと基本的にはあまり変わっておりませんので、それを一通り要点だけを書きました。

まず第一に、何も対策を講じないままで放任した場合、その時にどれぐらい二酸化炭素等の温室効果ガスが排出されるかというのは、当然、経済の見通しとかによっておりますが、そういう専門家によってシナリオが作られています。この場合、

たしか排出量が1%とか、そのぐらいの割合で増えていく。ほっておけばそうなるという前提がありますが、その前提のもとで将来の気温がどうなるかということを計算をしてみますと、今から2025年までには約1度、地球全体の平均気温が上がる、さらに21世紀の末、2100年までには3度ぐらい上昇するであろうということです。100年で3度ですから、10年につき0.3度、—10年という単位期間を使うのは英語でディケードということと、もう一つは、一年一年というのは変化が激しいので、先ほどお見せしましたようにあまり意味がないので、10年ぐらいを単位に物を考えると、0.3度という割合で温度が上がっていくということです。そしてこれは自然の変化を超えた大きさである。自然の変化を超えた大きさという言い方をしているのは、温度が上がってどういう影響があるのかという時には、数だけでは非常に分かりにくいので、自然と比べてみて、いわば自然か不自然かというふうな意味です。これは後でグラフでお見せしますが、そういう大きさであるということです。

次に、温暖化問題というのは、温度の変化ばかりではなくて、むしろクライメートチェンジ（気候変化）ということが大事なわけで、雨の量が変わるとか、気圧配置が変わるとか、気候の変化が起こります。ある場所では雨量が減って乾燥化するとか、ある場所では雨量が増えて例えば洪水の危険があるとか、そういう変化が大事なわけです。各地域の気候の変化が大変重要な問題ですが、残念ながら地域的な気候の変化については、例えば日本でどうだというふうなことについては、少なくとも1990年代の段階、現在も依然として大差がないんですけども、信頼を持った予測はできないということがもう一つの結論です。

ただし、一般論としてそうだけれども、あえて言うならば、北アメリカ大陸、ヨーロッパでは、夏、乾燥化する、東南アジアでは湿潤化する、これがいろいろな観点からいってある程度あり得るということも一応の結論です。

ちなみに、アメリカが乾燥化するというのは、先ほどお話ししました私どもの先輩の真鍋さんという方が、もう20年ぐらい前になりますが、1975年にCO₂増加に関する気候モデルを使った実験を

やって最初に出てきた一つの結果で、それが大変インパクトを与えた。というのは、アメリカは当然、農業の中心ですし、世界の小麦の生産地ですが、そこが夏、乾燥化することによって非常にマイナスの影響があるということで大きな話題になっていたんです。その後、他の人がやると必ずしもそうならないというので、乾燥化するか、湿潤化するか、という議論もあったんですが、このIPCCの90年の段階では、いろいろなモデルの共通点としてこれはどうも言えそうだ。ある程度の共通性があるということです。

あと、海水準の上昇。これは大変大きな問題ですが、きょうはあまりお話できないと思いますが、先ほどの2020年に相当する時期までに約20センチ、さらに100年の間に65センチぐらい水位が上がるおそれがあるというのがおおよその見当です。

先ほど予想される気温上昇が自然の変化を超えた大きさであるということを言いましたが、そのことを実感していただくために、グラフにかいてみたのがこれです(図3)。

あまり量的に確かかどうか分からないのですが、氷河期が終わってから過去1万年間の地球全体の平均の温度がどんなふうに変ったかが花粉分析等を通じて推定されています。生えていた植物の花粉が残っている、どういう種類の木がこの辺にあったか、それからこの辺の気候はどうであった、そういうふうなことから推定したもので、まあまあ信頼できると思われます。

それによりますと、約1万年前に最後の氷期が

終わった時に、温度は地球全体では約4度か5度上がっている。あとは、ほぼプラスマイナス1度ぐらいの範囲で上がったり下がったりしてきている。気候最適期、クライマティック・オプティマム、あるいはヒブシサーマルとか呼ばれる時期が今から6千年前ぐらいにあって、日本では縄文海進ということで、海がずっと関東地方の内部まで入ってきた。ただし、この海進というのは、決して、今、温暖化で問題になっているように、グリーンランドの氷が解けたりして海進していた訳ではなくて、この最後の氷期が終わったことによる一種の反動みたいな現象、地殻変動につながっているので、ちょっと別です。とにかくこういう言葉で表現される時期に、日本はわりと温暖な気候で、中部日本の辺でも照葉樹林が多かったとか、そういう変化があります。また、「緑のサハラ」と書いてありますけれども、これもサハラ砂漠の中の洞窟に草原の動物をかいた絵がある。今砂漠になっているところが草原だった、ということは雨が今よりはもうちょっと降っていた訳です。

そういうふうに、いわば気候が変わる、植生が変わり砂漠が草原になる、その程度のことをおこした気候の変動が、実は地球全体の平均温度に直せば1度に相当するぐらいであった。それに比べて、これから起ころうとする変化というのは100年の間に3度ですから、それをここへ書けば、まず絶対値として非常に大きい、それからスピードがめっちゃめっちゃ大きいということにおいて非常に不自然な変化であるということです。

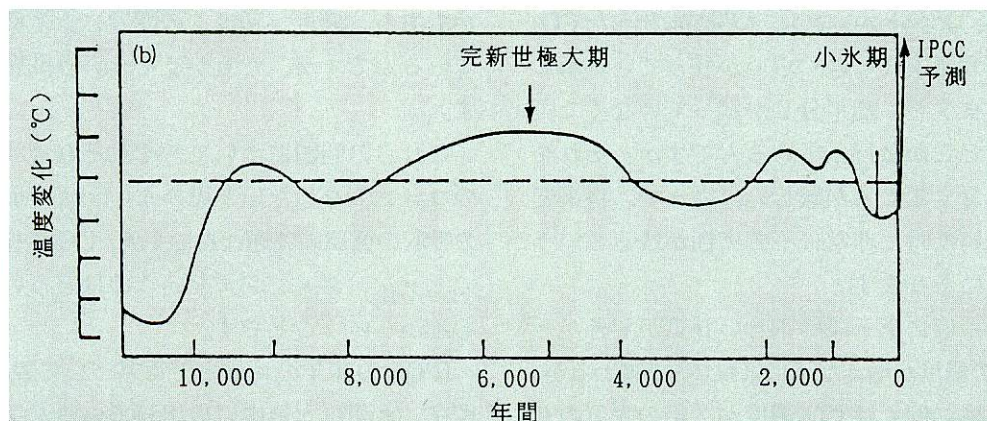


図3 最後の氷期終了から現在までの全地球平均気温の変化
(花粉分析等による推定値)

実はこれ以上のことがよく分からなくて、じゃ、本当にこの不自然ということがどのぐらい不自然で、具体的にどんなふうな影響があるのかというのは大変難しい問題です。現在、私どもがやっております温暖化の気候変化の予測以上に、多分、社会に対する影響がどうかという評価は不確かで難しい問題であると思っております。このことが今の地球温暖化問題の議論にとって最も不確かで、何とかしなければならぬ問題だと思っています。

今のような気候変化の予測がどんなふうにされているのか、そこにどういう問題があるかということを、これから後、簡単にお話ししたいと思います。

今の予測は大まかに言うと三つぐらいの要素から成り立っています。まず一つは、CO₂、まあ、一般に温室効果ガスですが、その濃度の予測。排出量は人間が原因ですから、シナリオとしてある程度仮定しなければいけません、それが与えられた時に大気中の濃度がどう変わっていくかということの予測をしなければいけません。特に CO₂についていいますと、CO₂というのは自然界でただじっとしているのではなくて、海に溶けたり、先ほどのカーブでわかるように、陸上の植物が光合成で取り入れたり、あるいはそれが腐ってまた出たり、その間を行ったり来たりしていますので、それでどのぐらい吸収するかということを推定しなければいけません。これが大変難しく、特にミッシング・シンクという言葉で言われておりますが、現在、よく分からない。人間が放出した CO₂ の量から、大気中にどのぐらいが残っているかと計算してみますと、約半分しか残ってなくて、残り半分がどこかに行っているんですが、それをきちんと定量することが難しい。従って、将来どうなるかという時に非常に不確実性が残るという問題が第一にあります。

二番目は、仮に第一段で正しい計算ができたとして、CO₂の濃度が増えた時に気候がどう変わるか。そのためには、例えば CO₂濃度が2倍の大気のもとで、気候が現在とどんなふうに違うかということコンピューターでもって実験いたします。私が去年までいました東京大学の気候システム研究

センターというのは、こういう研究をすることを一つの重要な目的としてつくられたところなんです、そういう研究は世界中でいろいろやられているんですが、結果が非常にばらついている。代表的に、CO₂が2倍になった時、現在の気候と例えば地球平均温度でどのぐらい違うかという結果が、2度という結果もあれば、5度という結果もある。あるいはもう少し低いものもあります。この範囲にばらついている、非常に大きいという問題です。その原因として、特に雲の扱いが問題だということなんですが、それはいまだに解決していません。

その次に、これは CO₂が2倍というのを一つの代表として取り出して、それでみんな比べて見ているんですが、現実には徐々に温室効果ガスが増えていきます。そうすると、実際には CO₂の濃度が仮に2倍になったとしても、例えばこの2度が正しいとして、直ちに温度が2度上がる訳じゃなくて、それは遅れます。というのは、ご存じのように、海は熱容量が大変大きくて、季節の変化にしても、一日一日の変化にしても、海岸では温度変化が小さいと同じように、地球温暖化においても海の熱容量が大きいので、海が熱を吸収して直ちには温度の上昇が起こらない。その遅れるのがどのぐらいかというのは、海の循環によって非常に大きく影響されるんですが、今、海の循環というのは観測が難しいことがあって、4千メートルの海の底と表面とどんなふうに水が循環しているかということがよく分かっていない。そのために、どのぐらい遅れるかということの計算が大変不確かである。最近、私はこの問題に大変興味を持っているんですが、とにかくそういう問題があります。

これらの問題について、それぞれ現状と私自身のコメントをしたいと思います。まず最初に CO₂の吸収の循環の問題なんですが、CO₂の循環の問題でミッシング・シンクというのはどういうことであるかということです。

IPCCの90年のレポートに基づいて説明します。現在、人間が大気中に放出している CO₂の量を、その中の炭素の量をギガトン（10億トン）を単位にしてはかってみますと、化石燃料の燃焼で約5.4ギガトンの炭素が大気中に放出されている。それ

から、正確な見積もりが難しいんですけども、熱帯林の破壊を中心とした森林伐採によって、今まで植物体で有機物の形で蓄えられていたものが、分解されて大気中にCO₂という格好で出てくる、その分を見積もると約1.6ギガトン。合計で7ギガトンです。先ほどのグラフで見たような、年間にどんどん増えていく量から大気中にあるCO₂の量がどれだけ増えたか計算してみると、3.4ギガトンです。放出量は7ギガトンですから、約半分。残り3.6ギガトンはどこかに行っていかなきゃいけないということになるわけですが、先ほどのミッシング・シンクというのは、要するにこのソースに対してシンクが必ずしも十分に説明し切れないという問題です。

非常に明瞭なのは、海水に溶け込む。これは物理化学的な変化ですから、比較的見積もりしやすいんです。といってもいろいろ問題があります。大気中のCO₂濃度が自然状態だった時にはちょうど海が平衡していたわけですけども、濃度が増えるので非平衡が生じて溶け込む。これもいろいろ問題がありますが、このプロセスが計算できても、ややこしいのは、この表層だけで平衡してしまっただけでも溶け込みません。そこで深層循環の役割が重要になります。これは温暖化の遅れの問題でも重要な役割を果たすのですが、表面の水が海の中に深く入り込むことによって、下からフレッシュな産業化以前の水が出てきて、そこへまたCO₂が溶け込む。そういう循環がはっきりしないと、この量を見積もることはできないんですが、これがなかなか難しい。それでも、今までいろいろな研究によって、いろいろな形で推測されております。例えば原爆実験で生じたトリチウムがどういうふうに深層に入っていくか、そういうことを通じてある程度見当がついていますから、それをもとにモデル的に計算してみると、およそ2ギガトンということです。

そうすると、残りは1.6ギガトンなんですけど、では、これがどこに行くのか。あとはもう生態系に行くしかない訳ですが、熱帯林破壊で1.6は出しているけれど、これはたまたま偶然の一致で、ちょうど同じぐらいがどこかで生態系に吸われていなくちゃいけないということです。90年の報告の頃

から、多分、それは中高緯度の既にある森林にあるのではないと言われるようになりました。「肥沃化効果」とここに書きましたが、もともと中高緯度には森林帯があるわけですが、そういうところで大気中の二酸化炭素の濃度が増えると、ちょうど海水との間で物理化学的な平衡が破れたのと同じように、生物の方もCO₂濃度が増えれば光合成の能力が増すので、自然と木が大きくなるということが考えられます。第二次大戦後、栄養がよくなったので日本の子供の体が大きくなったのと同じように、いわば森林が太っているという効果が重要であろうという推測がされました。

これに対して、ごく最近分かってきていることは、中高緯度の森林再生という事で、第二次大戦後、日本も含めて北半球中高緯度で盛んに植林が行われて、その木が今成長期にあるということです。これは、ちょうど熱帯林の破壊を一方でやっておりますけれども、中高緯度ではむしろその逆です。さっきの既存の森林で栄養がよくなるというのはファーターゼーションですが、そればかりでなくて、普通の意味で木の増えている分が0.5ギガトンくらいじゃないかということです。栄養がよくなるようなことで吸っていると思われるのが、CO₂の濃度が増えたことによるもの、それから、これも人間活動で出て来て、光化学スモッグとか、酸性雨の原因になる窒素酸化物、これはよくないことですけども、同時に肥料の効果を持っていますので、それを人間がつくることによって窒素肥料をやったと同じで、それで木が太る。それから、一般に温暖化すれば木が大きくなります。気候が暖かく、かつ、雨が多いということがあれば太る可能性があります。そういう複数の肥沃化要因があって、その結果として既存森林が太り、炭素保有量が増えているんじゃないかと現在言われているようであります。これら各種の肥沃化効果の合計で、残り約1ギガトンを吸収しているというわけです。

95年のレポートでこの方向でミッシング・シンクの問題を解決する考えが出され、見積もりがされております（表次頁）。

ちょっとここでもとへ戻りますが、海による吸収は確かだろうかという点があります。最近の見

積もりの中に出て来るスリー・ディメンショナル・オーシャン・ジェネラル・サーキュレーション・モデル、これはコンピューターを使った三次元の海洋モデルによってどれだけ吸われるかをシミュレーションしたものです。先ほどの海の中の循環をすべて取り入れているはずなんですが、この結果がわりと小さいんですね。それに比べて、ボックス・ディフュージョン・モデル、これは非常に簡略化した地球の海全体を一つのボックスに置きかえたようなモデルです。それを、核実験の結果生じた C_{14} が時とともにどう変わるかを再現できる

よう調節したモデルをつくる。それを用いた結果の CO_2 吸収が大きくて、こちらの三次元モデルのほうが小さい。とすると、小さいほうがほんとうじゃないと言われるかもしれませんが、今のコンピューターを使ったモデルというものが分解能の点でも、物理過程のとり入れ方の点でもまだまだ不十分で、海洋の循環を方程式によって三次元的に丁寧に計算したからといって、それがほんとうをあらわすとは限りません。私は、むしろ今までの観測データのある核実験の結果をもとにしてつくった簡略化モデルのほうが、現段階ではまだ信頼が置けると思っています。という訳で、より進んだ三次元モデルの結果だと言ってもこれはあまり気にしないことにしても、なおかつ、大体2ギガトンということです。

これが最近の見解ですが、私自身は、ほんのちよっぴりなんですけれども、海に溶ける効果で、自分はこうだと思ふようなモデルをつくって計算してみた結果は (図4)、2.0よりももうちょっと大きくていいんじゃないか、2.5ギガトンぐらいに

表 1980年代における陸上生態系による CO_2 吸収量の見積り (単位 GtC/年)

中緯度の植林	各種要因による肥沃化(成長促進)		
	CO_2 濃度上昇	NO_x (窒素肥料)	気候効果
0~1	0.5~2.0	0.2~1.0	0~1.0

(IPCC 1994 による)

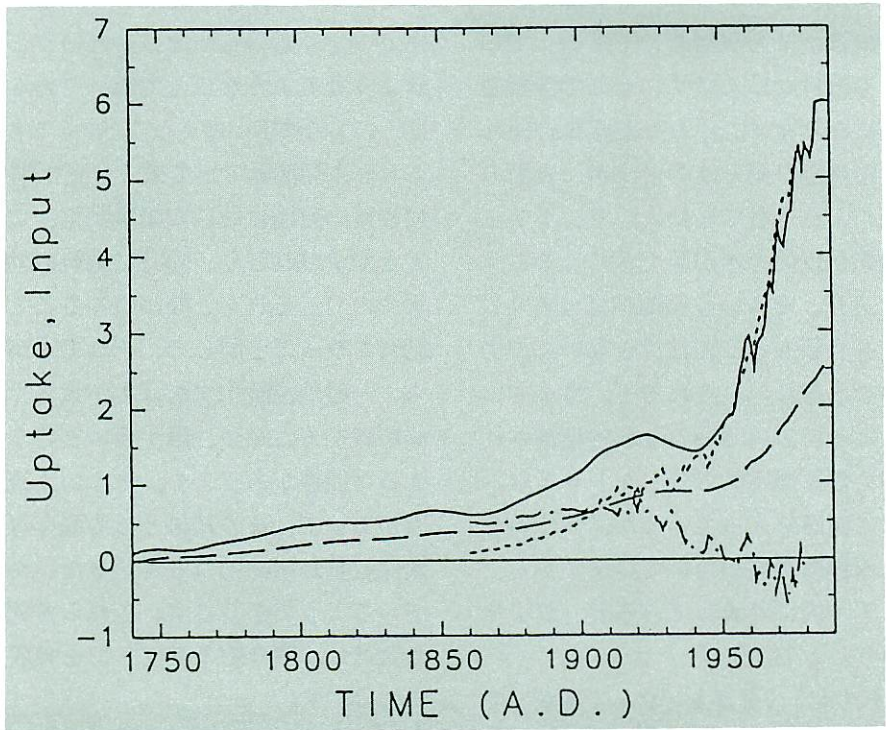


図4 大気中 CO_2 濃度変化から、2層湧昇拡散モデルで計算された、過去の放出量や吸収量。

横軸は西暦年、縦軸は年放出量および年吸収量。実線＝全放出量。破線＝海の吸収量。点線＝Rotty(1881)による化石燃料燃焼による放出量の見積もり。一点鎖線＝生物圏の放出量(実線データから点線データを差し引くことにより求められる。)

なるのではないかとと思っています。

なぜこれにこだわるかというと、実はこれは将来予測に影響します。将来、さらにどのぐらい人間がCO₂を出してもいいか、まあ、言い方は変ですけども、許されるかというような計算が行われています。現在のファーターライゼーションが間違いなければ、将来CO₂が増えて仮に濃度が倍になれば、植物はそれをどんどん吸う可能性があるわけです。それがどのぐらいかというのを、現在の状況でもってキャリブレーションしたモデルに立って推定するわけですが、現在植物が吸ってくれるものが大きいという前提で物事を考えますと、将来、非常に沢山吸うということになってきます。それが本当だろうかということで、大変気になるところです。

仮に私の海の吸収量の推定が正しければ、2.0に比べて、私の推定は2.5ぐらいですから、差の0.5は小さいみたいですけれども、植物が吸うべき量というのはこれによってかなり減ります。中高緯度の森林再生を除いた肥沃化で太る分は1.0から0.5へと半分になります。ということは、将来、植物があまり吸わない。そういう意味において、非常に細かい議論をしているようですけども、大事な問題があるんだということを強調させていただきたいと思います。

以上、ちょっと細かいことを言い過ぎましたけれども、これがミッシング・シンクの問題ということです。

次に、温暖化で、将来CO₂がいくら増えたという状況のもとで温度がどれだけ上がるかの推定。CO₂が2倍になった時に地球の気温がどれだけ変わるかというのは、最も単純な温室効果のメカニズムということだけを考えますと、予稿に書いておりますけれども、その範囲では不明な点は余りない。基本的には温室効果というのは、大気上端から入射する太陽からのエネルギーはそのまま入ってくるけれども、地球から出て行く赤外線はCO₂等に吸われて吸収、再放出を繰り返して少しずつ下から上へ移って行くという、いわば大気温度の鉛直構造の問題です。そのために地球の温度はCO₂やH₂Oがないときよりも高い。これは温室効果。もう一つは、対流があって、対流によってエネルギー

ギーが下から上に運ばれる。従って、基本的には鉛直方向の一次元で物事を考えればいいわけです。そういうことで計算がされております（図5次頁）。

こういう計算で古典的なものは真鍋さんが1967年に出されたものです。今お話ししましたように、太陽の光が入ってきて、対流が起こって、上に熱が運ばれて、それから赤外線になって宇宙空間へ出ていく、そのプロセスを鉛直方向の問題としてH₂OやCO₂の赤外吸収スペクトルの実験データを使って非常に詳しく扱う。こういう計算によってCO₂が2倍で約2.4度上がるという結果が得られました。その後もこういう研究がされております。この辺が一番根本ですが、もしかしたら2.4じゃなくて例えば1.7度かもしれないけれども、決して0.2度とか0.5度といったけた違いの値ではなくて、2度近辺であるということまでは確かなわけですから（図6次頁）。

実を言うと多少問題がありまして、この計算ではフィードバック、CO₂の増加による直接の温暖化効果の他に水蒸気が増えるという間接効果がとり入れてあります。というのは、もしCO₂が増えて温度が上がりますと、飽和水蒸気圧が上がります。ご存じのように、空気中に含み得る水蒸気の量というのは温度が高いほど多いので、そうすると、高温になれば自然と大気中の水蒸気が増える。水蒸気はもともと一番重要な温室効果ガスですので、それによって地球全体の温度が上がるという訳で、CO₂が2倍になったことによる温度の上昇をさらに拡大する効果を持っています。真鍋さんの古典的な論文は理論的な計算ですから、両方の場合を計算できるので、温度が上がっても水蒸気の絶対量は変わらない、地球平均で1平方センチ当たり何グラムある、その量は変わらないという前提で計算すると、CO₂が増えただけでは1.3度しか上がらないという結果も得られます。これに対して相対湿度が70%ぐらいで変わらない、温度が上がれば相対湿度が変わらないよう水蒸気の絶対量が増えるという前提でやると2.4度。約2倍近く、間接の効果で温度の上昇が拡大されています。

こういう間接の効果というものにはいろいろありまして、地球全体で各地域気候が変わることによって、地球全体のエネルギーのバランスがさま

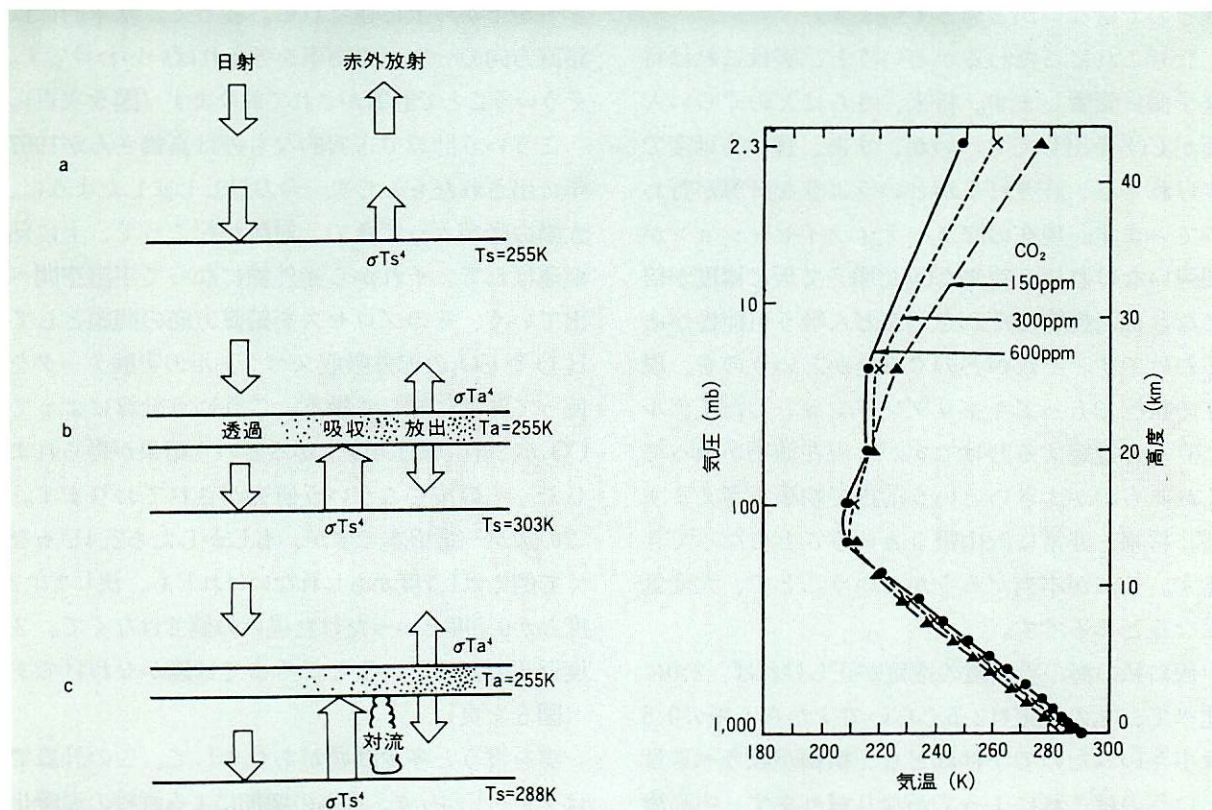


図5 温室効果の模式図。

a: 大気層がない場合, c: 大気層がある場合の放射平衡, c: 放射に加え, 対流による熱輸送がある場合の平衡。 σT^4 は温度Tでの黒体熱放射。矢印の幅はエネルギー流束に比例するように描いてある。

図6 放射・対流平衡にある大気温度の鉛直分布を CO_2 濃度が300ppm, 600ppm, 150ppmの場合について理論的に求めた結果。

(Manabe and Wetherald, 1967)

ざまに変わってくるという問題です。そのような気候の地域性までとり入れるには気候モデルが必要です。東京大学の気候システム研究センターでもそういう研究をしているのです。

気候モデルとはどんなものか、ちょっと概念だけお見せします。ご存じの方もいるかと思いますが、天気予報のモデルと同じことで、地球全体を沢山のメッシュに分けて、鉛直方向にも層に分けて、そして気圧の変化、風の変化、温度の変化、水蒸気の変化、こういうものを運動方程式、あるいは熱力学の方程式で計算していく、そういうのが基本的な考え方です (図7)。

それで例えば現在の気候がどのぐらい再現されているかという、これは東大の気候センターで計算した結果です (図略)。実はまだ本格的なものでなくて、海の温度を既知としているので、多少

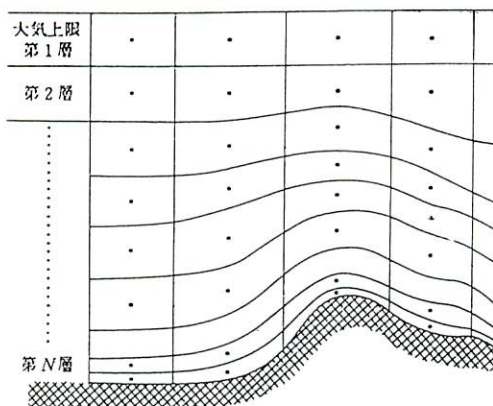
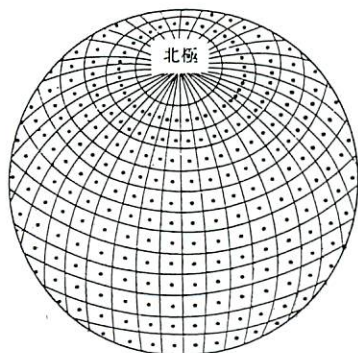
カンニングしているんですけども、これが計算結果です。7月の気温ですが、観測と気候センターで計算した気候、ごらんになって分かるように、分布なんかも非常によく似ています。温度なんかはわりとやりやすいほうです。

これは気圧配置 (図略)。夏の気圧ですが、太平洋に高気圧1,020ミリバール。観測ですと、この辺に1,020ミリバールの高気圧があって、モデルはよく合います。これに対してアジア大陸は暑いですから低気圧になるんですが、これは観測がこの程度なのに、こちらはちょっと過大に出ています。しかしながら、この程度には気圧配置等も再現できます。

それから、雨の量なんかも……。6、7、8月の雨量ですが (図略)、インドのこの辺で雨が多いというのは再現されています。この帯状のところ

図7 大気モデルとは

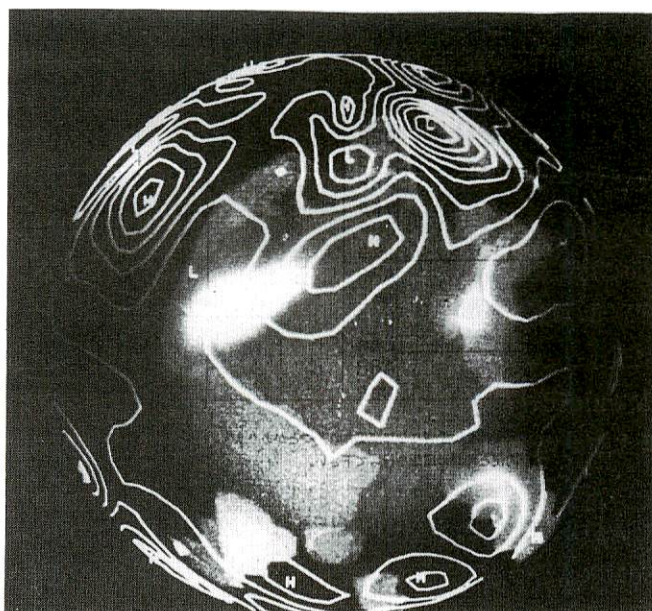
地球をメッシュに分け



物理の方程式に従って

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \pi}{\partial t} + \nabla_{\sigma} \cdot (\pi \mathbf{v}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \sigma) = 0 \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{\sigma} (\pi \mathbf{v}) + \nabla_{\sigma} \cdot (\pi \mathbf{v}) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \sigma \mathbf{v}) + \mathbf{f} \mathbf{k} \times \pi \mathbf{v} + \nabla_{\sigma} (\pi \phi) - \frac{\partial (\phi \sigma)}{\partial \sigma} \nabla \pi = \pi \mathbf{F} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\pi c_p T) + \nabla_{\sigma} \cdot (\pi \mathbf{v} c_p T) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \sigma c_p T) = \pi (\omega \alpha + Q) \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} \right)_{\sigma} (\pi q) + \nabla_{\sigma} \cdot (\pi \mathbf{v} q) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (\pi \sigma q) = \pi S \end{array} \right.$$

時々刻々に変化する気象(気圧, 気温, 風, 降水)を計算する



はちょっと合わないです。位置は合っていますが量が合っていない。

こんな程度に気候モデルでもって、いわば物理法則をもとに頭がなしに気候を計算するということができます。こういうふうに気候を計算することができれば、同じようにして、CO₂を2倍にした状況で気候を計算して、それで気候がどんなふうに変わるかという研究ができる訳です。そういうのを、東大のセンターでは予備的なことはやっていますが、まだ途中です。

そういうわけで、IPCCの90年のレポートに出てくるものによりますと、例えば温度の上がり。これはいわゆる温室効果の直接の表れですので、こういうものはわりと計算しやすいとか、どのモデルでも同じように計算できます。これは三つの異なる研究機関の結果ですが、冬の12月、1月、2月の温度の上がりを示したものです（図略）。三つとも、絶対値、分布等もまあまあこの程度には合っているんですが……。

ところが雨量になると、上昇気流は低気圧や前線によって生じるものですから、大変計算しにくい。これ（図8）は同じようにCO₂が2倍になった状態と現状との雨量の差で、夏、6、7、8月です。これ（中）が先ほどお話ししている真鍋さんのグループですし、これ（上）はカナダの気候センター、これ（下）はイギリス気象局の結果で、さっきの温度の上がりとは違って、これは何か非常にばらついていて、共通点を見つけるのが大変難しい。最初にIPCCの報告のまとめであったのは、夏、北アメリカ、ヨーロッパに関しては乾燥化の傾向。この程度にはセンスは合っている。量は非常に違ってきます。それから、東南アジアのインドモンスーンの地域の雨量は増える。真鍋さんのところではこういう傾向が非常に強いんですが、これ（上）はまあまあ言えるんですが、これ（下）なんかではちょっと無理やりで、大変予測が難しいということです。

ちょっと話を飛ばしましたので説明をしなかったんですが、気候モデルというのは天気予報のモデルと違って、海水温や極域の海水の広がり、さらに地面の湿り具合とか、そういうことも方程式を立ててみんな計算します。そのかわり、

粗いモデルになります。取り扱いが粗っぽいことになるんですけども、土壌水分量というものを、バケツモデルという、地球各地点にバケツを置いたように考えて、そこに溜まる水の量で表現し、計算します。それによって夏の場合の土壌水分量が、CO₂が2倍の状態と現状とで、乾燥化するのか、湿潤化するのかということを調べてみると、こんなふうになっています（図略）。北アメリカ大陸からヨーロッパにかけて、土壌水分量が現在に比べて減る方向にあるというのは、まあまあ一致しています。しかしながら、日本とか中国とかではどうなるだろうかということ、例えば中国の東の方はモデルによって全然違うわけです。という訳で、さっき大まかに言えばこういうことが言えるということがありましたけれども、現実には、まだ現在の我々のモデルではこんなにばらついていて、地域的な気候の変化についての結論は出し得ないというような状況であります。

時間がありませんで、あまりうまくお話できませんけれども、工学アカデミーでは将来のCO₂の放出をいかにして減らすかということを研究していращやるということですので、それについて一言だけ触れさせていただきたいと思います。

気候変化のおそれがあるので、どうすべきかということで、一刻も早く規制すべし、要するにちょっとでも遅れると温暖化を防ぐことが困難になるという考えがあります。これに対して、よく考えてみると、もともとこれは今日、明日という問題じゃなくて、非常にゆっくりと起こる現象です。100年ぐらい先の問題ですから、長期的な視野に立って、今すぐできなくても、将来、大幅に減らす手だてがあれば、最終的にはそれでいいわけです。そういうふうな考え方でもいいんじゃないかというので、ここにも関係された方がおられるかと思いますが、日本の通産省が数年前に、この問題に対して「地球再生計画」という考え方を出しました。つまり、長期計画で今すぐはできない問題でも、将来、大いに技術的なことで頑張って減らしましょうということです。

実はIPCCでは、少なくとも90年段階ではあまりそういうことは考えずに、いくつかのシナリオを考えたんです。放出シナリオで、BaU、放任して

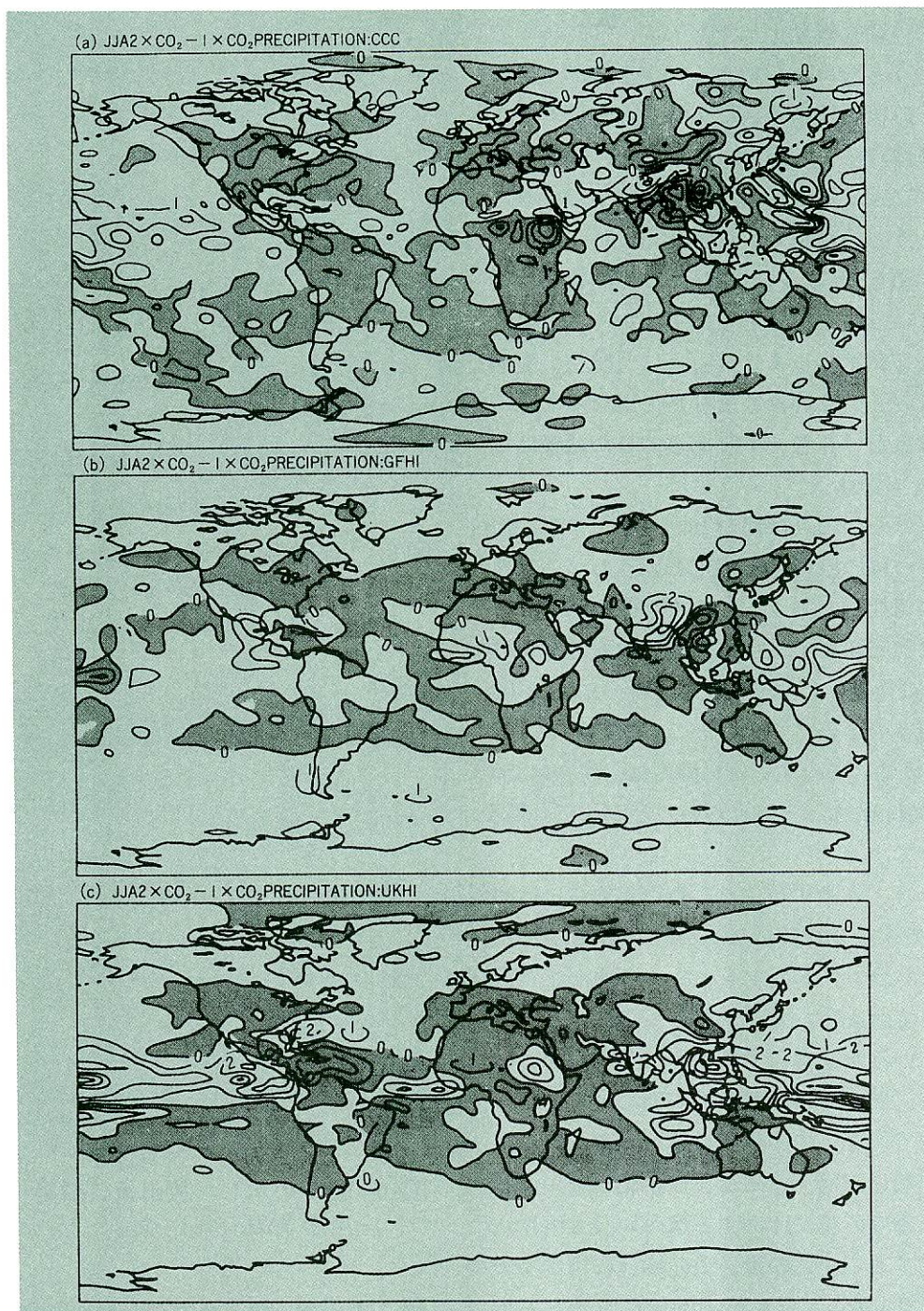


図8 3種類の気候モデルで得られたCO₂倍増平衡気候と標準気候との夏(6, 7, 8月)の降水量の差。CO₂ 2倍のほうが降水量が減少する領域に影がつけてある。

(a)はCCCモデル, (b)はGFDL高分解能モデル, (c)はUMKO高分解能モデル。

(IPCC報告, 1990による)

おけばCO₂の放出がこう上がるというのと、その他に、いろいろな規制措置をとって、もう今以上にあまり増えないようにした場合はどうか、さらにもっと減らした場合はどうか、こんないくつかのシナリオをつくって、それに対応するCO₂濃度

の将来予測がいくつかあるんです。けれども、全部がこういったタイプですので、先ほどの地球再生計画みたいな、当面は難しくても将来的にはというのとはかなり違います。そこで、そういう格好のものをちょっと調べてみました。

これは思い切り概念化したもので、2050年まではどうしようもないから増えるほかない、しかしながら、その後、技術革新によって非常にドラスティックに減らすことができたとする、最終的には、2100年にはほぼ現状の半分ぐらいまでできたとしましょうという訳です（図9）。

こういう放出シナリオに対応して、CO₂濃度がどうなるかというのを自分たちのモデル—この場合には、先ほどお話ししましたように、植生、生態系による吸収というのはあまり当てにならないので、まずは海だけを考えて計算してみた結果はこうなります（図10）。

これの言いたいことは何かというと、まず、あるレベルで一種の濃度の安定化というのが、この場合実際に可能だということです。前の図のように放出量は2050年まではすごい勢いで増えますけれども、その後は、どんどん減らしていったら、2100年からは現在の半分ぐらいのところで抑えることができたとする。そうすると、濃度は、現在は350ですが、600ppm ちょっとぐらいのところではほぼ安定化するのです。

このメカニズムですが、ここ数百年ぐらいは海の中で、まだ産業化以前にCO₂が約280ppm だった頃、それにバランスしたフレッシュな水がまだ沢山蓄えられています。4千メートルの海のうち大部分はそういう水を含んでいます。それが海の循環によって、ある一定の割合で表面にわき上がってきますので、そこの中に溶け込む。あるレベルまでCO₂の濃度が高くなると、産業化以前の濃度とその時の濃度の差に比例する量がいつも溶け込みますので、ある一定の量、この場合には1年に3ギガトンですが、3ギガトン出し続けても、ちょうど産業化以前の水がなくなるまでは、—それは数百年もつと思いますが—一定の状態が保てるということです。

最近のIPCCでは逆に、将来、濃度を安定化させるにはどうすればよいかということを調べています。現在から始まって、将来の大気中の濃度を550ppm あるいは650ppm という限界をもうけ、今後、200年300年かけて一定にするというシナリオを作り（図11）、その時にどれぐらいの放出が許されるかというのを逆算しています。

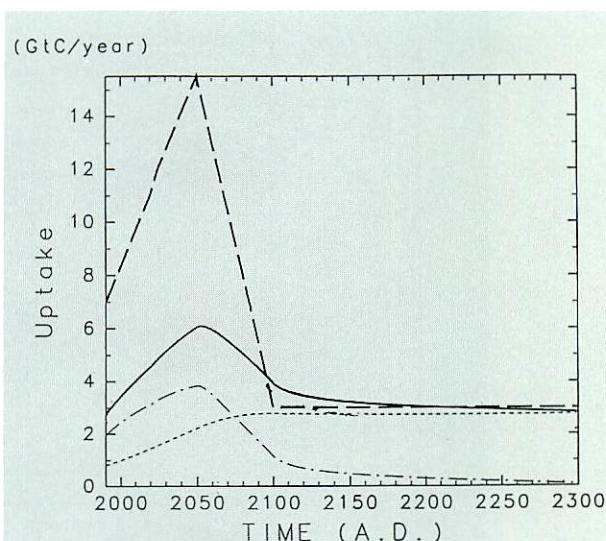


図9 「地球再生計画」の考えをもとに簡略化したCO₂放出量のシナリオ
(田辺清人，東大修士論文，1993)

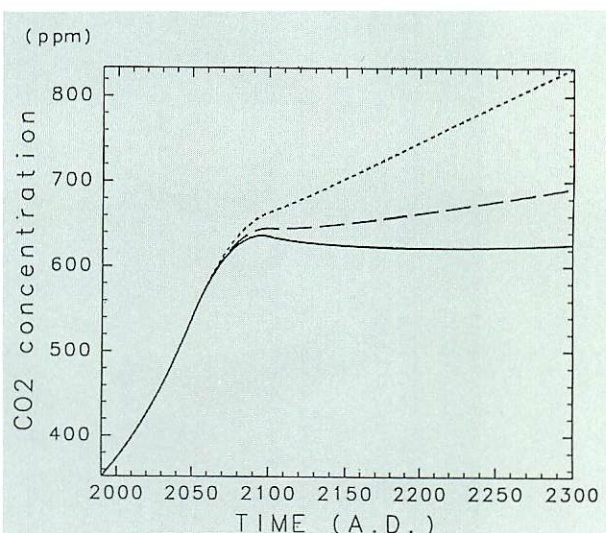


図10 図9の示した放出量に対応するCO₂濃度の予測（図9と同じ）

その結果が、例えば650ppm のケースなんかはこんなふうです（図12）。このように人間が放出を許されるCO₂の量というのが、現在、既に6ぐらいまで来ているんですが、この場合には650で安定化させようと思ったら、ほんのちょっと、10ギガトン強ぐらいまでしか許されない。750ppm でも12、13ギガトンで、現在の倍ぐらいがやっとなんかということになります。

しかし、これはこの途中のパスによる訳で、実はさっきの私の計算例がそうでなかったのに620ppmで安定化していたというのは、少しもとへ戻ると、

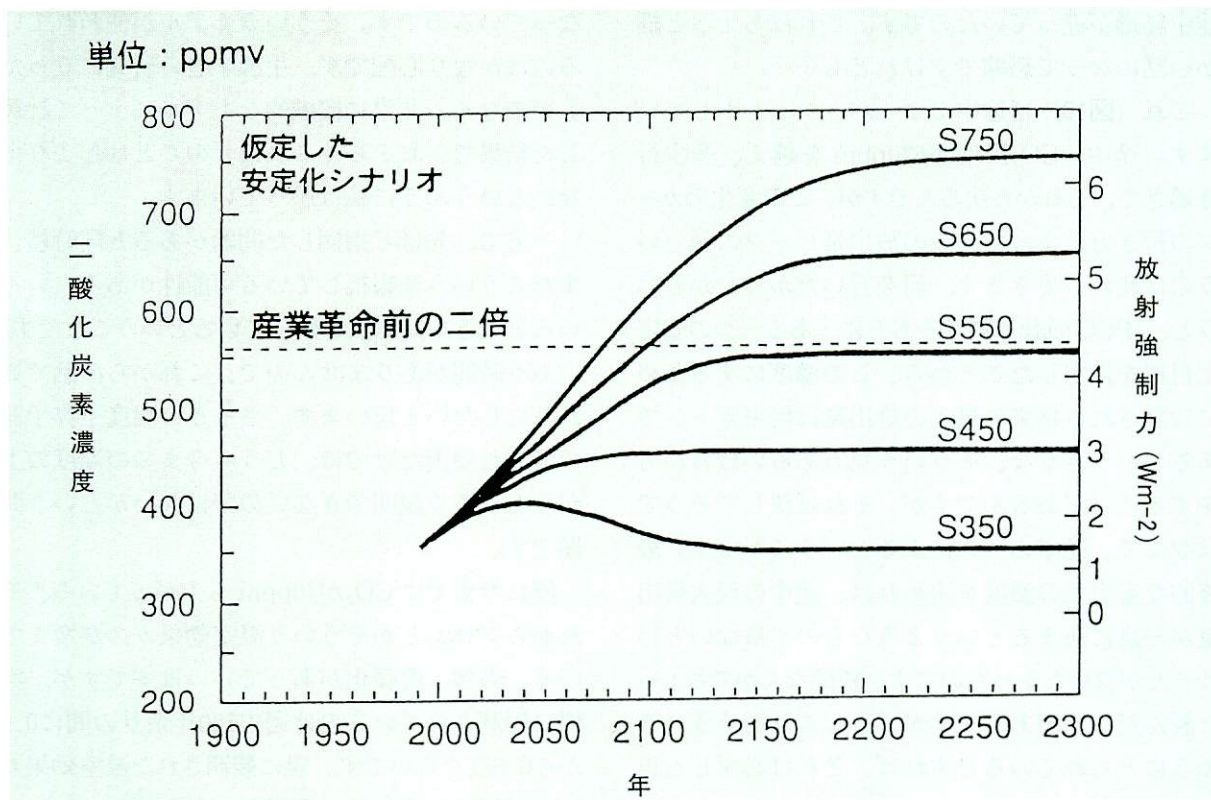


図11 二酸化炭素の大気中濃度が350, 450, 550, 650, 750ppmvに安定化するときの大気中濃度の変化。

(気象庁：地球温暖化レポート，1994より)

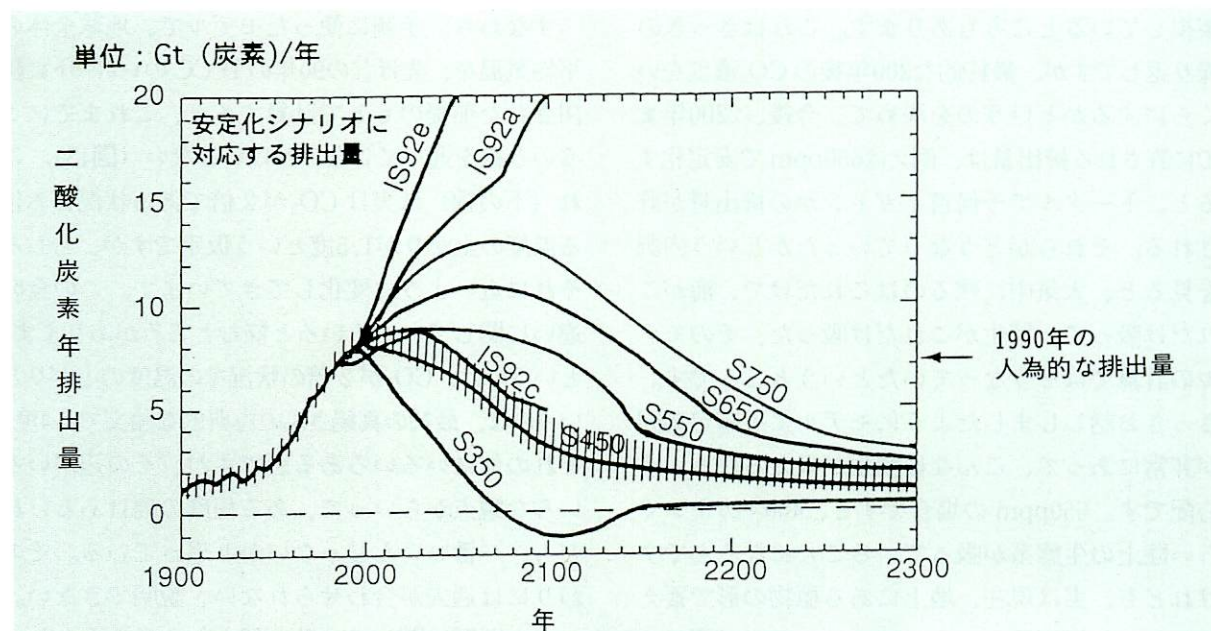


図12 図11のように二酸化炭素の大気中濃度が350, 450, 550, 650, 750ppmvに安定化するときの人為的なCO₂排出量の変化 (中間の結果を与えるモデルによる)。

(気象庁：地球温暖化レポート，1994より)

途中経過が違っていたのです。これはちょっと細かい話になって恐縮ですが……。

これ（図10）は途中でオーバーシュートしています。途中、CO₂濃度が620ppmを越え、多少行き過ぎて、それから戻るんですが、この変化のカーブの行き方によって、この放出量ピークの値というのは変わってきます。何を言いたかったかというと、IPCCの計算結果をもとに、ある一つの安定化目標を指定したことから、この濃度にするためには許される将来の最大の排出量は何ギガトンであるというふうな、そういう見方あるいは言い方をすることがあるんですが、それは決してそうではなくて、途中のパスによるということです。最終的な安定化の濃度を決めれば、途中の最大排出量が一意に決まるというようなものではないということが言いたかったのです。新聞なんかでちょっと読んだことがあります、もしこれをそういうふうにとられているとすれば、それは必ずしも正しくないということです。

それからもう一点、最近 IPCC でやっていることについて。今の計算で心配になっている別の点で、今のいわきびしい制約ととられる点とは逆に楽観視しているところもあります。これはさっきの繰り返しですが、最終的な200年後のCO₂濃度をいくくらにするかというのを決めて、今後、2200年までに許される排出量は、例えば650ppmで安定化すると、トータルで千何百ギガトンかの排出量が許される。それらがどうなっていったかという内訳を見ると、大気中に残るのはこれだけで、海がこれだけ吸って、植生がこれだけ吸った、そのモデルの計算ではそうになっていたということです。さっきお話ししましたようにモデルに不確定要因が非常にあって、こんなに植生が吸えるかという心配です。650ppmの場合ですと、400ギガトンぐらい陸上の生態系が吸っていることになるんですが、実は現在、地上にある植物の形で蓄えられている炭素量というのは、これとほぼ同じぐらいです。つまり、こういうことを言うのは、2200年までに木の量が倍ぐらいになる。太さが変わるか、根が太るか、木の高さが変わるか、あるいは新しい森林が自然にできるか、とにかく保有する炭素量が倍ぐらいになるということが暗黙の前提に

なっているのです。そういうモデルが使われているのはかなり心配です。生態学者の研究に立ったものでなく、非常に機械的なモデルによって計算した結果で、おそらくこれほどのことは起こり得ないというふうに私は思っています。

一方で、先ほど指摘した問題があると同時に、またこういう楽観視している可能性がある、いろいろと大きな問題点が残っているということです。

もう時間ありませんので、これからのお話で終わりにしたいと思います。さっきの温度上昇予測で考えた要因だけでは、どうも今までの温度の上がり方をうまく説明できないのではないかという問題です。

既に今までにCO₂が70ppmも上がっている、それからフロンとかそういう温室効果ガスが増えている。当然、温暖化があっているはずですが、実際に観測されているのは過去100年余りの間に0.5から0.6度ぐらいです。現に観測された温室効果ガスの増加に対応して、今現在、最も正しいらしいと思われる、CO₂が2倍になったら2.5度という前提で計算すると、0.9度の上昇になり、これは観測に比べて明らかに過大です。

すなわち、予測に使ったモデルで、地球全体の平均気温を、先ほどの90年のIPCCのレポートに採用された前提のもとで計算すると、これまでにこういう線を通してこなければいけない（図13）。これ（下の線）は実はCO₂が2倍である状況における温度の上がりか1.5度という仮定ですが、むしろそれに近いように変化してきています。この食い違いに関して、いろいろと悩むところがあります。というのは、CO₂が2倍の状況での温度の上がりというのは、最初の真鍋さんの古典的な論文で2.4度。それの他にいろいろある訳ですが、その辺がいろいろな観点からいって、ある程度の幅はあるけれども、一番いいんじゃないかと思っている。そのわりには過去が合わせられない、説明できない。

この問題に関しては私の個人的な考えもありますが、時間がないのでそれはやめて…。現在、中心的に考えられているのは、今まではCO₂だけを考えたんですが、化石燃料をたけば、当然、亜硫酸ガスが出てくる。これが逆に、温度を下げるという考えです。亜硫酸ガスは酸性雨の原因として

Recent Global Temperatures and the Intergovernmental
Panel on Climate Change Projections

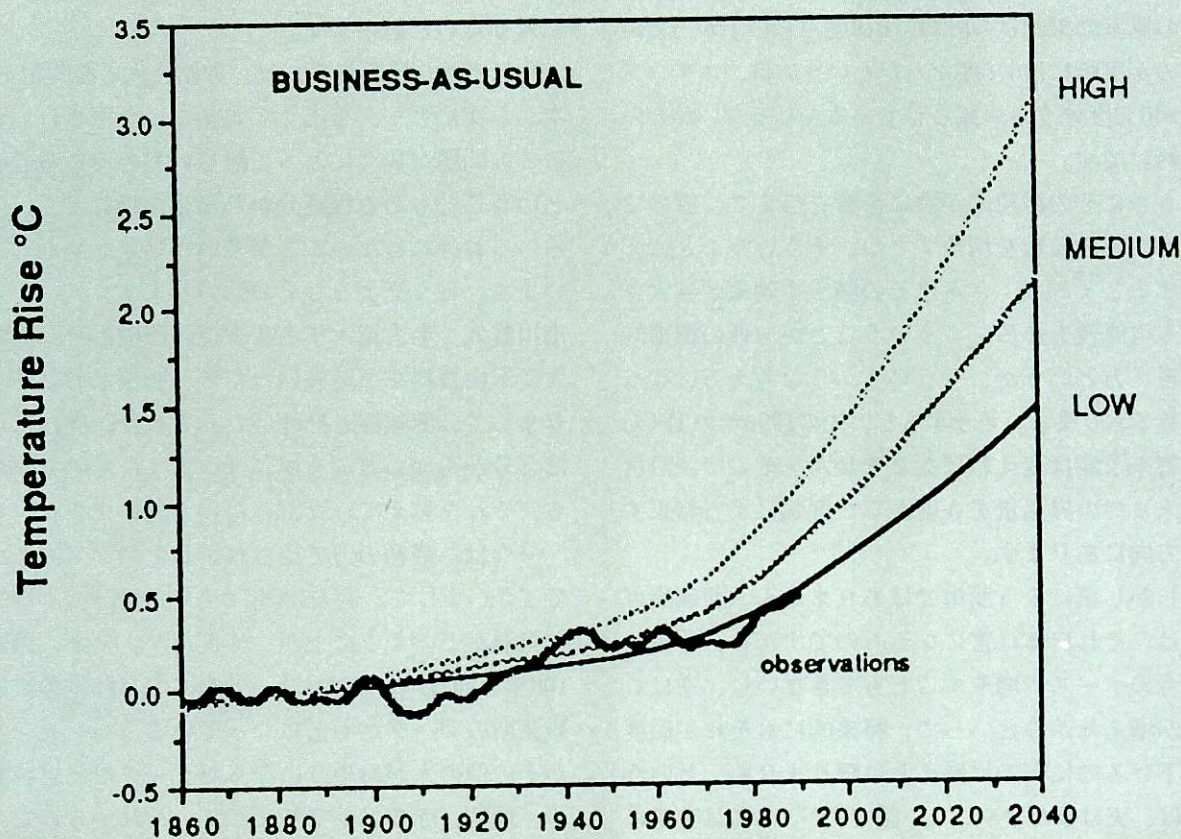


図13 IPCC1990によるこれまでの気温上昇と将来の上昇予測（3本のなめらかな線）
とこれまでの実測値（太実線）。

（これまでの温室効果ガス増加にもとづき簡略化海洋モデルを用いて計算したものに将来の増加シナリオによる気温上昇予測をつなげたもの。CO₂倍増時の平衡昇温を1.5, 2.5, 4.5°Cと3通りに変えて計算した。）

大変悪評高いんですが、それが空気中で酸化され硫酸塩のエアロゾル、つまり微粒子になって日射を遮る。これは地域的な汚染の問題では我々は既に体験しました。1960年代の終わりから70年代の初めにかけては、川崎の辺というか、東京、横浜とか、あの辺は何かいつももやもやしていました。一般的に言って、化石燃料使用の増加とともに亜硫酸ガスがもとのエアロゾルが生じ、非常に広い範囲で日射を散乱して、そして地球を冷やす効果があります。これも大変難しいんですが、その量をいろいろ見積もってみると、過去の温度の上がりのカーブに関しては、ちょうどこの差を説明するぐらいにその量があったのではないかということ、現在、多くの人が言っております。これ

がほんとうかどうかという、SO₂の排出量の見積もりはいいのだけれども、それがエアロゾル、すなわち小さな微粒子をつくるというところのプロセスがよくわからない。どんな微粒子ができるのか、半径がどのぐらいか、数がどのぐらいとか、日射をどれぐらい散乱したり吸収したりするか、さらにそれが雲にどういう影響を及ぼすかということが大変不確かです。

それを表現したのがこれですけれども（図略）、CO₂、それ以外のメタンとか、そういう温室効果ガスによって温度を上げる効果を積算したレベルがここで約2.5W/m²だとすると、エアロゾルによる温度を下げる効果—このエラーバーがついているのは見積もりにこんなに幅があるということです

が、微粒子ができて、それが日射を散乱する効果で、これは温室効果による温度上昇を3分の1くらい減らす効果があるだろうということです。さっきの温室効果だけの計算で0.9度くらい上がっていたのが実際には0.6度だったというのは、エアロゾルが0.3度分くらい減らしているんじゃないかというわけです。

さらにその微粒子が雲に影響を与えて、雲のでき方、雲の粒数を増やすとか、そういうことに影響するとすれば、さらにその減らす効果が拡大される可能性もある。こういうことが一種の標準的な考え方というか、そういうふうな考え方になってきております。そうすると、先の1990年のIPCCの将来予測は変えねばなりません。そこで、21世紀末までの昇温量を3度から2度強に下方修正する方向にあります。

しかし事はそう簡単ではありません。亜硫酸ガスは、それ自体は害になるものですから、将来とも今のペースで増やすこともできないし、逆にこれが増えたからといって、将来的にもそれが温度を下げるのに有効に働くとは限りません。というのは、実はまたややこしい話ですが、CO₂は非常に安定なもののなので、出せばどんどん蓄積していきます。しかし、亜硫酸ガスは寿命が非常に短いので、過去に発生したものが蓄積することはない、その時の放出量によって決まります。これまでみたいに放出量が指数関数的に増加した時には、CO₂と亜硫酸ガス濃度の増加は比例関係にあります。将来だんだん指数関数的じゃなくて、放出量の増え具合が減ってくると、亜硫酸ガス濃度はCO₂濃度に比例して増える訳ではなくて、冷やす効果は頭打ちになり、温める効果はいずれにせよ増えてきます。従って、現在は仮にこの考えが正しいとしても、将来はいつまでもその効果が同じように働いて、温暖化を先ほどのIPCCの1990年の予測よりも低く保つというふうなことは必ずしも期待できない。

最後のところは非常に駆け足で、しかもこんなに時間が超過してしまって申し訳ありませんでした。どうもありがとうございました。（拍手）

司 会 どうもありがとうございました。

それでは休憩後、30分ぐらい質疑応答を予定

しておりますので、よろしくどうぞ。

（休 憩）

司 会 お食事が済んだようですので、質疑応答に入りたいと思います。

先ほどから松野先生には、非常に大きな問題を、次から次にデータを出してお話いただき、いかにこの問題が我々にとって難しいものであるのかということもある程度分かりましたけれども、いろいろお尋ねしたいことが多いんじゃないかと思います。どうぞよろしくお願いいたします。

市川真人 名古屋大学名誉教授の市川と申します。大変沢山資料をご準備いただき、明快なお話を承りまして、興味深く拝聴いたしました。実は二つほど分からないところがございましたものですから、それを教えていただきたいと思います。

一つは、最初の方で出されました図面（図2）でございまして、過去100年ぐらいの地球の平均的な気温がどのように上がってきたか。全部、過去100年を通算いたしますと、大体これは陸地の気象観測所のデータがもとになっている。ハンセンとかその他の人がおやりになったデータだと思えます。最初、赤でアップしまして、それから青でダウンして、またアップした。1940年から60年、70年にかけて0.2～0.3度下がっているのをございますが、ハンセンのデータの他にもいろいろなデータを見ましても、その傾向は大きく、あれは5年移動平均でかいてあるのでございますが、変わっておりませんでした。1940年から65年、70年にかけて、地球の平均気温が下がるような要因があった。それに対して説明をされた論文を何も見たことがございせんものですから、まさかその時に地球のあちらこちらでもって、火山が25年から30年間噴火いたしまして、エアロゾルが増えて、そして減少傾向をたどった。大体、火山の噴火のエアロゾルの増加による傾向というのは、1、2年で終わるといふふうに書いてございましたものですから、25年から30年にかけてあんなに下がるというデータが他にもございまして、それがなぜか。先生は最初、あれをご紹介なさいました時に、後から触れますとおっしゃいましたが、触れられなかったような気がいたしましたものですから、何か新しい説ができてきているんだというような

お話の向きであったと思います。それを一つお伺いしたい。

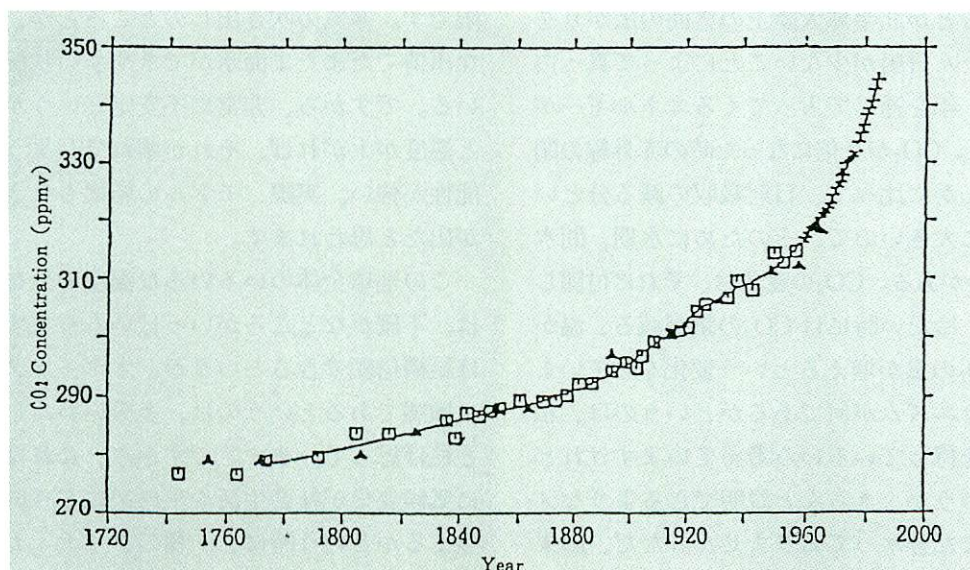
もう一つお尋ねしたいことは、スイスのサイプル基地のデータでもって、約200年間の炭酸ガスの増加を示す傾向が、先生の図面（配布資料）の1ページ目にございます（資1）。これは過去100年間で見ますと、1880年から1980年の100年間で50ppm ぐらい増えております。その間の過去100年間のデータというのは、先ほどのハンセンその他のデータによりまして0.5度程度上がっている。50ppm 増えて、その他に空気中の水蒸気の濃度がどうなるとか、雲がどうなるとか、あるいは海に吸収されるのがどうだとかいうことをもろもろ総合いたしまして、50ppm 増えて0.4、5度上がるということは、まあまあ常識的かなと思うのでございます。

よく世間で出ておりますソ連のボストーク基地でやりました、1万8千年前で大体最後の氷期が終わりまして、7、8千年かけて現在の温暖期の間氷期、まあ、後氷期と言っているようですが、そこへ移り変わっていくのでございます。その間の大気中の炭酸ガスの濃度の変化というのは、約2千メートル掘りました南極基地でもって、1メートルごとの約2千個余りのアイスコアを成分分析しまして、酸素あるいは水素の同位元素から温度を推定している。そうしますと、最終氷期

から現在の温暖期に入ります間に、炭酸ガスの濃度は、たしか70ppm か80ppm か、そのくらい増えているわけでございます。ところが、温度は7度ぐらい上がっているのでございますね。

最終の氷期、1万年ぐらいの間の、炭酸ガスの濃度変化と氷を分析した同位元素からの分析の温度変化というのが非常にいい相関をとっているんです。しかし、絶対量で見ますと、最終氷期の最後の時から現在の温暖期に入ります間に、わずか70、80ppm の炭酸ガスの濃度変化でもって温度が7度ぐらいも変わっているということは、量的には断然合わないという気がしているんです。『ネイチャー』にはそういった結果だけ出してあって、別にそれがなぜかということには触れておりませんけれども、それがどうも量的に断然合わないというのは、古い地球物理学の問題で、先生のご専門とどうかかわり合うのか私は分からないんですが、ものすごい70、80ppm の炭酸ガスの変化に対して、温度が7度ぐらいも変わったというのはなぜかという、何か推定的な理論のようなものがありますかどうか。この二つを教えていただきたいということでございます。

松 野 それでは、後のほうからお話ししますと、お話にありましたように、これは今ご質問があったのも無理もないことで、実際にCO₂の濃度変化と温度とが非常に関係があるという議論が、地球



資1 近200年のCO₂濃度の増加傾向

(南極サイプル基地での氷床コア中の気泡の分析から得た)

温暖化の問題と関連して IPCC のレポートなどにも書いてあります。しかし実はほんとうは非常に違ったメカニズムで、これは比べるべきじゃないのにもかかわらず、何となくそういうことをいろいろな形で使うのは、かえってまずいと思います。

というのは、氷期、間氷期の変化というのは、まだ完全には分かっていないものの、ほとんどの人が間違いないだろうと思っているのは、ミランコビッチ・セオリーと言われるものです。地球の地軸の傾き方は、今は、12月の初旬、地球の楕円軌道で太陽に平均よりも2%ぐらい近い時に北半球が冬になるようになっていきますけれども、もっと別の時期には、歳差の関係で北半球の夏に太陽が一番近いという時期もあります。そういうことによって、特に高緯度地方で、北半球の夏の日射量が5%、あるいはもっと大きく増減します。そうしますと、それによって、例えば北半球の夏の日射量が非常に少ないと、冬の間、大陸上に積もった雪が解けずにそのまま残って冬越しをしてしまって、夏の間は太陽がいっぱい照るけれども、雪が白いとそれを反射してしまうので、地球が獲得するエネルギーは結局少ないということで、実質的に日射が減ったと同じような状況が生じる。そのため寒冷な氷期が維持されます。

そういうことを通じて、要は地球の軌道要素の変化のために、北半球の夏の日射量が多いか少ないかということが北半球大陸上の雪面の広がりを決めて、一たん日射が少ないことによって真っ白になると、1年を通じて入ってくるエネルギーが減ってしまう。CO₂が2倍になった時の赤外線の閉じこめ量なんかに比べて、日射吸収の減る分というのは非常に大きいので、そのために氷期、間氷期のサイクルがある。CO₂の変化は、それに付随して受け身で、冷たい時にはCO₂の量が減る、温かい時にはCO₂の量が増えるという変化をしています。そのメカニズムが何であるかというのは、私自身も興味を持っていろいろ考えていますけれども、定説というか、きちんと説明できるようなメカニズムはまだ分かっておりません。ただ、因果関係は温暖化問題と逆で、寒い時にCO₂が減るという関係です。

CO₂がその結果として寒さをさらに拡大するとい

うか、寒い時に減ったから、もっと寒くなるという方向にあることは確かですが、第一義の因果関係は逆になっている。従って、それと現在の問題との比較はできない。現在のままでそのまま比較しますと、現在のような増え方だったら、めちゃめちゃ温度が上がらなきゃいけないことになります。お話にあったとおり、氷期から間氷期へは、ただか80ppmの差で、地球全体の平均温度が5度も変わっているんですから、CO₂濃度は現在既にそれに匹敵するプラスがある訳ですから、それと同じだったら産業化以前に比べて4度も5度も上がることになります。それがそうではないということです。

もう一つの点については、お話しできず大変失礼いたしました。最近の数十年の変化が少し分かってきたと申しましたが、これは全く楽観的なのですが、去年、気象研究所のグループがやった実験、これは温暖化の実験だったんですけれども、その中にヒントがあるように思えます。

これはCO₂が2倍になった時の温度の上がりの分布をかいたものです(図略)。これは今の話題とは別ですけども、一つ面白いことは、オホーツク海の温度の上がりが非常に大きいことです。現在、海の氷は北極、南極、両方ありますが、こんなに緯度の低いところまで海水があるというのは非常に珍しい。オホーツク海というのは海水の南限です。寒気の吹き出しのところとか、いろいろな事情でたまたま海水がしやすい状況になっている。ですから、非常に不安定というか、ちょっと温度が上がれば、それが壊れてしまうという可能性が強い。実際、モデルの結果もそういうことが出たと思われます。

この地球全体のいろいろな温度の分布に関しては、不確かなところがいっぱいありますが、これは結構信頼できるというか、オホーツク海が非常に敏感であるというのは、多分いいんじゃないかと私は思っています。ですから、これは、将来的に気候変化が社会生活や生態系にどういう影響を与えるかという時に、一種のクリティカルなポイントになるので、たまたま私は北大にいますが、北大の低温科学研究所なんかで、今、環オホーツク海環境の変化というのをみんなで協力してやろ

うという計画を立てております。そういう意味でこれは非常に重要な結果です。先ほど時間がなくてお話しできなかったのですが、関連質問を機会に紹介させていただきました。

さて、この実験で、こういう全体的なCO₂の増加による温度の上がりの他にさまざまな変化が起こるので、それを分析します。具体的には、温度が上がっていく状況がある方法に従っていくつかの空間分布の成分に分けます。そうすると、一様にCO₂増加に伴って上がる成分の他に、自然に振動する成分が出てきました。これは30年ぐらいで上がったり下がったりしています。ですから、30年ぐらいで振動する自然の気候変動。これは、大気と海とがお互いに影響を与え合いますと、例えばエルニーニョ現象がそうですけれども、4年に1回ぐらい太平洋の水温が温かくなって気候も変わる。それと同じように、もっと長いタイムスパンで海と大気とが影響を与えながら変化する。こういう変化の時の海水温の分布がどうなっていたかを調べると、こういうパターンをしていまして(図14次頁)、これはエルニーニョとも非常に関係が深いけれども、ちょっと違って、緯度30度ぐらいまでの熱帯域の太平洋東部の温度が、上がったり下がったりしてゆっくり変化する。図のプラスマイナスの分布から分かるように、その時、中高緯度では逆向きの変化をしているわけです。こういう自然変動が計算機で方程式を解いた結果出てきました。

これで我々が非常に興奮する理由は、最近の十数年間で起こった変化というのと非常にパターンが似ているんですね。これは同じように太平洋で、さっきの緯度プラスマイナス30度より熱帯側で、何かこの格好もそっくりなんです。それには理由があって、ここに亜熱帯高気圧があって、その亜熱帯高気圧のもとで、風の力で海の水が動かされて、表面から300メートルから400メートルの水というのは大気の影響で循環しているんですが、その全体の状況が30年ぐらいで変動しているらしい。実際の現象は50年ですけども、そのぐらいの違いというのは十分あり得ることなので、何かそういうメカニズムがあるんじゃないか。そうだとすると、それが数十年の自然変動の一つの可能性。

その現れとして、1940年代の高温、1970年代の低温が起こったのではないかという解釈です。

我々は太平洋を注目している訳ですけども、ヨーロッパやアメリカの人たちは大西洋のほうに注目しています。というのは、やはりこの時期に大西洋のほうでも変化があって、大西洋ではグリーンランドの沖の辺で非常に強い沈み込みがあるんですが、そここの沈み込みが弱まったという可能性はあるんです。ご存じのように、ヨーロッパが緯度に比べて非常に高温なのは、例えばヨーロッパの緯度が40度、50度のところで東京なんかとあまり変わらない気候なのは、暖流がずっと入っているからです。グリーンランドの沖で吸い込むので、それに勢いよく流れ込むという暖流があるんですが、それが沈み込みが弱まる。その沈み込みが弱まる理由というのは、塩分が薄くなると沈み込む力が弱くなるので、5、60年代、塩分が薄くなって沈み込みが弱まった。その分、暖流が弱まって、ヨーロッパ地域で温度が下がった可能性があります。これもまだそのメカニズムを全部追っていませんけれども、今のところ、この数十年の変化に関してはそういう二つの可能性が出てきて、その辺をこれから一生懸命やりたい。そうすれば、1960、70年代に全球的に気温の下がった理由が分かり、温室効果による温暖化も今より確かに分かるようになるでしょう。

もう一つ、大事なことを忘れていました。実は、最近、今のIPCC報告の改訂版準備に関して、大気海洋結合モデルの実験にエアロゾルの影響を加えて、これ(過去100年の気温変化)が出たという報告がマックスプランク・インスティテュートのグループとかから出てきています。これに非常にそっくりなカーブをかいているんですが、おっしゃるように、エアロゾルがこれだけ増えて、また減ってという、これは実際、いろいろなデータをいじくるとそういうカーブもつくれるという言い方は変ですけども、いろいろなデータの具合によってたまたまそういうものがある。それをインプットしたら、観測に近い温度変化の結果が得られた。それでもって非常にうまく説明できたようなことを言っている人もいます。私は個人的には非常に心配で、そういう外的な要因よりも、今

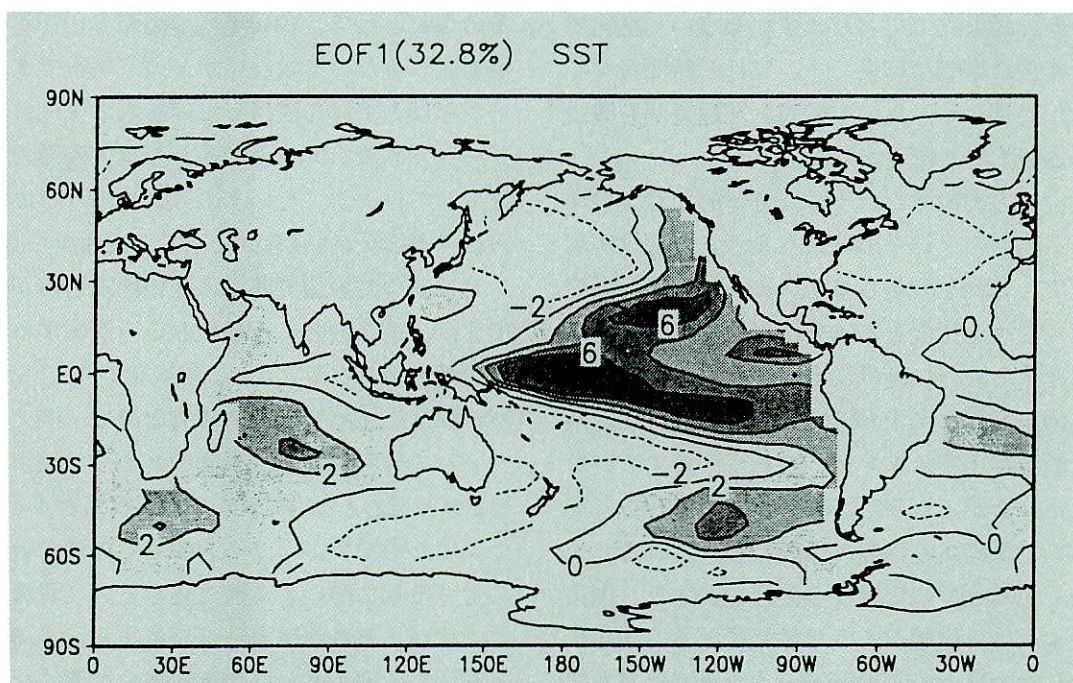


図14 a 基準実験の年平均海面水温の経験的直交関数(EOF)解析における第1モード(最も卓越した変動成分)の空間パターン。

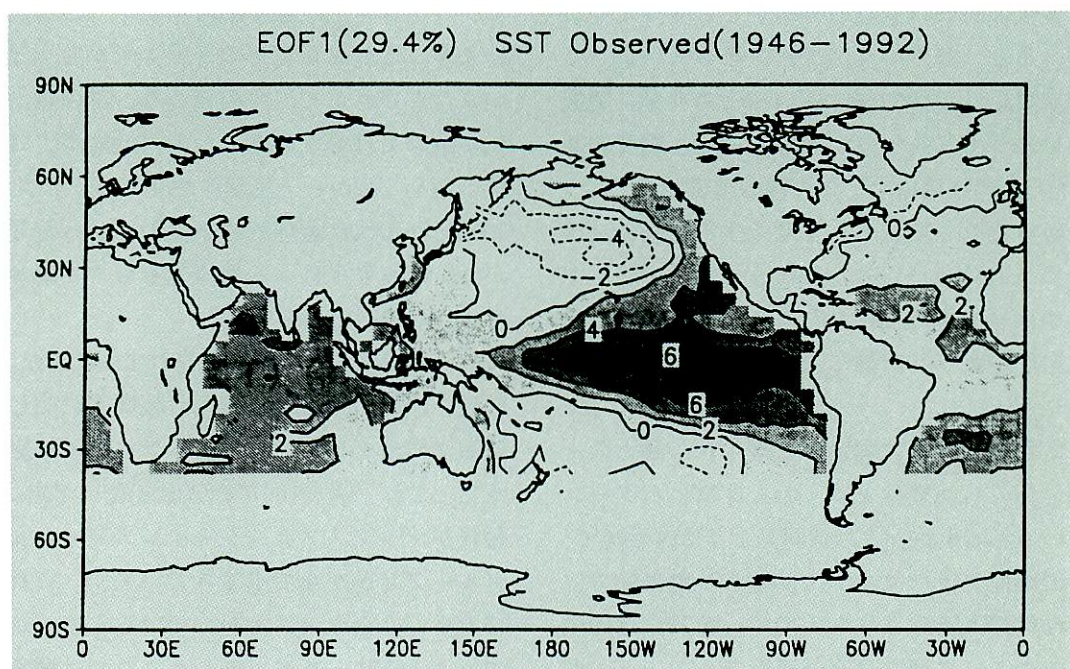


図14 b aに同じ。ただし、観測された年平均海面水温(1946～1992)に対するEOF第1モード。

(気象庁：地球温暖化レポート，1994による)

の海の変動のような内部的なメカニズムのほうが大きい、それはまだこれから研究すべき問題だというふうに思っています。おっしゃったような、エアロゾルが云々という考え方もあります。

市川 どうもありがとうございました。
司会 では、次に山口さん、お願いします。
山口 務(専門委員) RITEの山口でございます。今月になりまして、電話ですけれども、たま

たま真鍋先生とお話しする機会がありました。実は2年前に真鍋先生が気候海洋大循環モデルで予測されたものを、引用したいと思ってお電話したんですけども、先生は御自分のこの前のシミュレーション予測について留保条件をかなりつけられました。そのポイントは、さっきもちょっと出しましたが、あれは硫酸ミストの問題を考慮していなかった、CO₂ 2倍、あるいは4倍の時の100年、200年、300年といった予測について、そのことを強調してくれるならば引用してもいいということをおっしゃっていたので、非常に印象深かったんです。先ほど先生も最後に触れておられたんですが、今回、IPCCの最終報告が近く出ると伺っているんですけども、その時には、先ほどの将来予測の3度プラスマイナス1.5とかというのは、かなり大幅に下方修正されて、例えば3度のところが2.5になるとか、そういうことも聞いたりするんですが、いかがなものかということをお聞きしたい。これが一点です。

それから、先ほど市川先生がご質問されたことに関連して、そもそも非常に初歩的なことで大変恐縮ですけども、全地球の平均気温というのをどうやって出すのかという問題。特に過去100年にわたって出すという時に、北半球と南半球というような問題、陸と海とか、観測地点というのはものすごく限られているんじゃないかと思うわけです。従って、南半球なんかは、ほんとうに限られた100年間にわたるデータをもとにして推計されているおそれもある。極端な素人から言いますと、北半球でああいうふうなデータになっておっても、南半球では逆の動きがあったりして、実は70年代も寒冷化ということが盛んに言われて、そういう論文もいくつかありましたけれども、実は南半球で見たら上がっておったとか、そういうことはないのかなと。データの不足という問題、特に南半球の海上のデータというのは、どうやって補正されているのかなという疑問です。

松野 まず、データのほうから申しますと、おっしゃるとおり大変難しい問題で、議論がいつまでも絶えません。非常に少ないデータから推測できるのはなぜかということ、もし地球全体が一様ならば、一点でも代表できるわけですね。問題は何か

というと、地域的な異常気象があつて、毎年毎年、例年よりは温度が高いところもあれば、低いところもある、そうすると、その非常にわずかな点でそれを代表できるかという問題なんです。

これから申します私の考えは一般的に言われていることではありませんが、説明すればみんなきつと賛成してくれると思います。最近になって研究が進んで、少数の点で代表するのに非常に有利な状況があることが分かってきた。異常気象とか冷夏とかありますが、その時の温度の変化の空間スケールは3千キロから4千キロ。これには理論的な根拠のあるメカニズムがあつて、テレコネクションという言葉で呼ばれるもので、大気中の力学的な原因でスケールの大きな高気圧とか低気圧が順々にできていくメカニズムがあるんですが、毎年そのスケールで、この地域は平年より高温だった、この地域は低温だったという固まりが3、4千キロの広がりです。ということは、局地的な気温偏差が非常に少なく、3、4千キロに観測点がぼつぼつとあれば、結構、北半球全体もカバーできるということです。これはある種のメカニズム的、理論的な根拠ですが、同じことを数値モデルを使ってやってみると、今の観測点を置いて、それを計算機のモデルの中でサンプルしてみても平均を出し、ほんとうの平均、つまり正解が分かっていますから、それでどのくらい違うか調べてみますと、さっきの0.5度上がるといった程度のはサンプリング誤差でなく、十分計算できるというのが結論になっています。これはサンプリングの問題です。

ただ、都市化の影響の問題は大変難しく、それは一生懸命除去するように、いろいろな工夫をして、都市に観測所があった時には近くの分と比べてその差をどうするとか、そういう補正をもとのデータ処理をしています。そういうことで一応可能なんじゃないかと思っています。

南半球は確かに海が多くて、南半球のデータは少ないんですが、実は温室効果にしても、太陽黒点なんかの変化が仮にあったとしても、あるいはエアロゾルにしても、南北両半球はある程度独立に変化するはずで、フロンにしても、CO₂にしても、北半球が原因で増えていくのですが、南半球

まで行くのに約2年遅れる。というのは、空気がまざるのには2年ぐらいかかるということの証明です。ところで、入ってくる日射と赤外放射と対流とでバランスする、最初にお話した一次元の放射対流平衡に到達する時間というのは、大体1カ月から2カ月。従って、仮にCO₂が北半球だけで増えたら、北半球だけが高温化するのです。従って、南北両半球それぞれ独立に影響が出て来るので、仮に南半球のデータがなくても検証は可能と考えられます。

もう一つのエアロゾルのほうですが、先ほどもお話ししましたようにエアロゾルは今、IPCCではやはりというか、皆それに持って行きたがります。さっきお話ししましたように、CO₂が2倍の状態の平衡状態での温度の上がりかどのくらいかというのが、数値実験の結果では2度から5度と非常に幅広く散らかったので、IPCCでは、いろいろな考察から2.5度という値をとったわけです。その上で、今度は海による温暖化の遅れなどをとり入れて時間的推移の計算や予測をやったわけです。その結果が、さっきもお見せしましたように2.5度とすると、過去100年の間の上がりか0.9度ぐらいいないといけない。それが0.5ないし0.6度しかないということですが、実は90年の段階ではレポートにはあまり書いていないんですね。今質問が出された意味において、過去の観測データというのは非常に幅があるので、計算が違っていると断定が簡単にはできないんです。

これは私自身の考えですが、前の計算の時には海による遅れの効果が多少、過小評価されていた可能性がある。海による遅れの効果はもうちょっと大きい。他の人はあまり言っていないで、私だけなんです、海のモデルをちゃんと検討してみると、IPCCの90年に使われた海のモデルは、海による遅れの効果を少なくとも0.1度とか0.15度ぐらい過小評価する可能性があるということがあります。差が0.3か0.4度だとすると、それだってばかにできないわけです。

その他にまだいくつか可能性があります。今はエアロゾルがはやりなものですから、それで説明をしようとしていますけれども、それだけで説明していいものかどうか。エアロゾルの効果という

のはかなり幅があって、どんなサイズのものができるとか、そこをどうやって詰めていくかというのがこれからの大問題だと思います。当然のことですけれども、量が同じでも、散乱は表面積で効きますから、小さい粒が沢山できれば散乱は大きくなるし、大きい粒が少しだったら散乱量は減ります。どのくらいのサイズのものができたかとか、できるべきかとかなどを調べる。さらに、過去にさかのぼって、混濁度という、太陽からの光がどのくらい届くかなんていう観測がありますから、そういうのとうまく合わせて、その効果が過去において、ほんとうに0.4度分ずらせるだけの差があったのかというチェックが必要かと思います。

もとへ戻りますと、IPCC、90年では、CO₂が2倍の段階での増え高として広い幅の中で2.5度をとった。その結果過去の温度上昇がうまく説明できないので、じゃ、2.5度を改めるかということ、2.5度はそのままにして、亜硫酸ガス、エアロゾルで考えている。ということは、将来予測に関してもエアロゾルの散乱効果を考え、CO₂だけの場合より大幅に下方修正すべきかという問題が出てきます。亜硫酸ガスは化石燃料からCO₂と一緒に出てきますけれども、酸性雨の原因になるから一生懸命減らさねばならない。それから、CO₂はどんどんたまりますが、亜硫酸ガスは非常に雨に流されやすいので、すぐ落ちてしまいます。寿命が短いので、将来、仮に化石燃料の燃焼が5ギガトンなら5ギガトンで一定になったとすると、CO₂はどんどんたまりますから温室効果は進みますが、日射を散乱するエアロゾルの源の亜硫酸ガスの濃度は現在と同じで終わりになります。これらのことから考えても、今まではある程度きいたかも知れませんが、将来予測においては、酸性雨の観点からももっと減らさなければいけないし、化石燃料の燃焼の増加傾向が鈍れば、いずれ温室効果には必ず負ける、という意味においてそれほど重大ではないというふうに思います。

ただ、今の100年ぐらいの予測に関して、今のようなことを考慮に入れば、2100年までに3度はやや過大だったんじゃないか、亜硫酸ガスの効果を入れればもうちょっと低いんじゃないか、とい

うことは現に議論は出ていますが、そう簡単に量的評価ができるか、それだけでいいのかという点で大変疑問に思っています。

司 会 他にございませんか。

大 塚 大林組の大塚と申します。先ほど CO₂が、人間活動で出されたもののうちの一部が海に吸収されているということで、ボックスモデル等についての予測で、大体1.6ギガトンとかいう結果が出されていたんですけども、そういう評価をする際に、もちろん考えられているとは思いますが、海の波とか、気泡によって取り込まれる量とか、そういったものがオーダーとして大体どれぐらい計算結果に幅を持たせるものなのかということをやちょっとお伺いしたいと思います。

松 野 大気と海洋の間のやりとりの見積もりに、海の含んでいる CO₂の平衡分圧と大気との差で見積もる時には、今のような問題があります。海の水をとってきて、そこに含まれている全炭酸と平衡する分圧がいくらで、それと大気との間の分圧差がいくら、それに交換係数を掛け算して、どれだけ吸われているかを見積もる、そういうやり方が一つのやり方です。実際、こうして吸収量を見積もる時には、今のは大変大きな影響を与えます。

しかし、モデルでは、もちろんその効果は入っているんですが、それに対してはわりとセンシティブではありません。その効果は律速過程になっていなくて、わりと速く、むしろたん表面の数百メートルが大気と平衡に近く、それから先、もっと何千メートルの深さとどのぐらいのスピードで交換するか、そういったところがむしろ律速になっています。表面の交換速度はモデル的ではそれほど律速でない。ただ、観測データから見積もろうとする時には、それは非常に大きな不確定さの原因になります。

それ以上に、地域的な観測、季節的な差というのが大きいので、そのやり方では、交換係数の問題が致命的になるよりも、もっとデータを増やすほうが大きな問題になっているという状況かと思います。

大 塚 どうもありがとうございました。

司 会 あまりもう時間が……。では、もうお一

人。

森 三菱電機の森と申します。別の側面でお伺いしたいんですけども、初めスーパーコンピューターがアメリカと大分ギャップがあつてというお話だったんですが、現在はギャップがどのぐらいなのか。あるいは、ヨーロッパの連中と比べて。もう一つ、日本の国内のネットワークの問題なんかでどんなことを考えられているか。

松 野 スーパーコンピューターそのものは日本製のものは全く違いがなくなっています。以前は、外国製のものを輸入して我々が使うことができなかった、日本製のものでは能力が低かったので外国と同じ研究ができなかったという話です。現在はその問題はなくて、研究者に対して、あるいは研究所でどのぐらい利用可能かということですが、これは急速によくなりつつはあります。しかしながら、まだまだ窮屈というか、それは程度問題で、沢山あれば、それだけいろいろな実験をやってみることができ、沢山やれば、それだけ間違いに気づいたり、いろいろな試しができます。その意味において、どの辺がいいという、その基準の置き方というか、要求の度合いによりますが、最低限の要求は何とか満たされて来ました。実際、気象研究所の実験は、国立環境研にある共同利用のスーパーコンを、2千〜3千時間使ってなされ、国際レベルの成果を出しました。

森 総体論なんですね。アメリカの研究所とか研究者と、ヨーロッパの研究者と、日本の研究者とどのぐらいギャップがあるかということに関して。

松 野 むしろ一番大きいのは、遅れてきた分、今までの蓄積のなさですね。もう一つは、研究者の数が少なく、多様な違った考えを出す人間が少ないということ。それから、一番致命的なのは、これは一般に言われていますが、計算機が大変複雑になっているので、非常に大きな何万ステップというようなプログラムをメインテナンスしていくのは、研究者じゃなくて、情報科学技術者ですが、そういう人のサポートが得られないということ。大学でも国立研究所でもそういう人がいない、これが最大のネックと言えるかと思います。

司 会 ちょっと最後に一つ、俗っぽい質問ですけども、例のフィリピンのピナツポ火山の噴火

で相当低温になっておるんですけれども、あの場合は、やっぱり SO_2 関係のもの……。火山灰はどうですか。効果はないんですか。

松 野 火山灰はわりと早く落ちてしまうので余り影響しません。エアロゾルでも SO_2 のままでも、対流圏では水に溶けてアツと言う間になくなりますけれども、成層圏に入って酸化され硫酸エアロゾルになると、成層圏の中で雲や雨がないのでいつまでも漂っています。成層圏の空気が入れかわるのに約2年かかる、その間ずっと滞留して、それで日射を散乱するために影響が大きいというこ

とです。

司 会 分かりました。

ご質問が尽きないかとも思いますが、大分時間がたっていますので、この辺で閉会にしたいと思います。

非常に緻密な地球気象のお話を聞くことができました、大変私どもも勉強になって、ありがたいことであったと思っております。最後にもう一度、感謝の意を込めて拍手をお願いしたいと思います。

(拍手)

どうもありがとうございました。

1995年 8 月15日

編集
発行 **日本工学アカデミー**

〒100 東京都千代田区丸の内 1-5-1
新丸ビル 4-007

TEL : (03) 3211-2441 ~ 2

FAX : (03) 3211-2443