



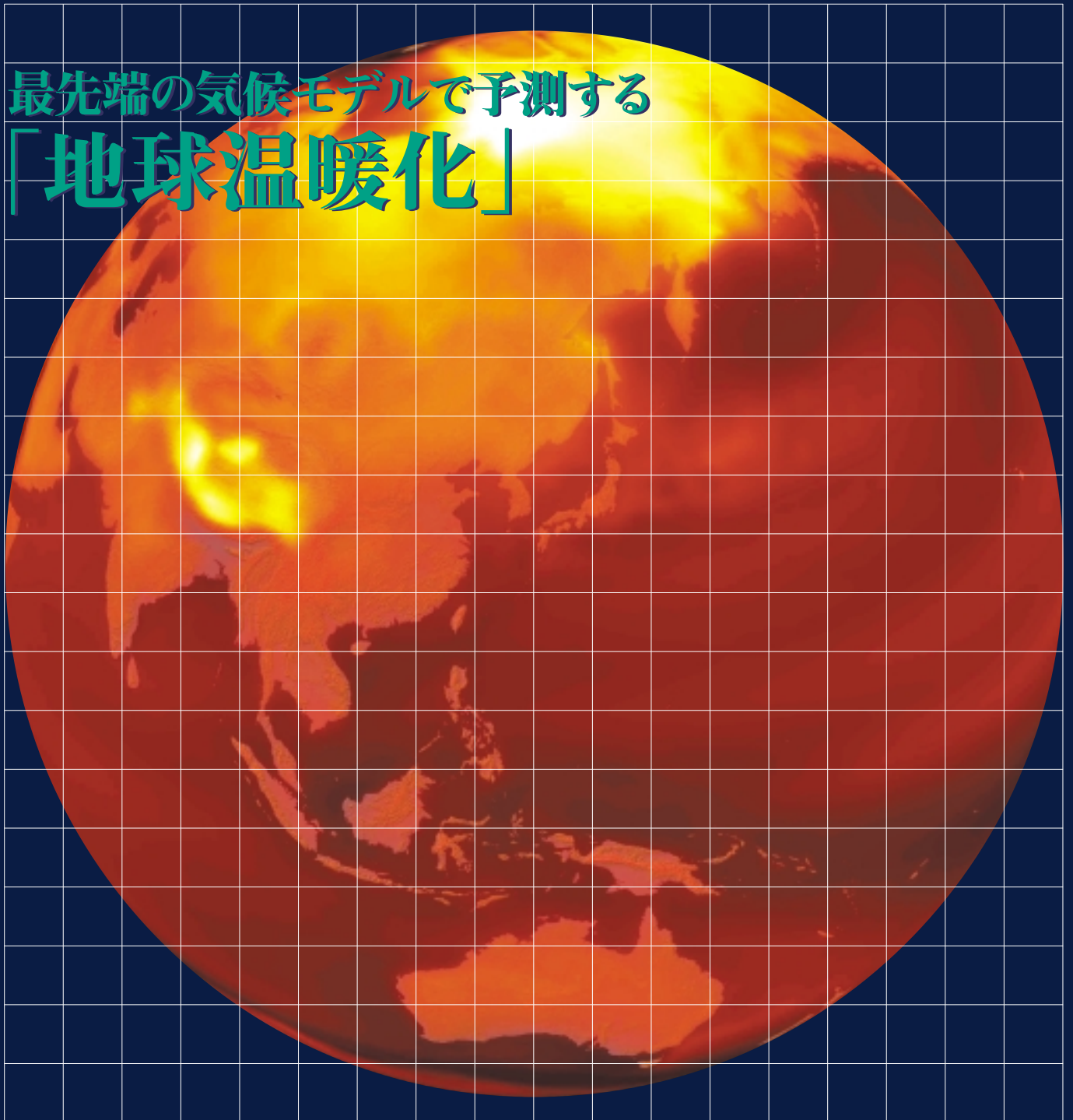
NIES RESEARCH BOOKLET

環境儀

NO. 19 JANUARY 2006

国立環境研究所の研究情報誌

最先端の気候モデルで予測する
「地球温暖化」



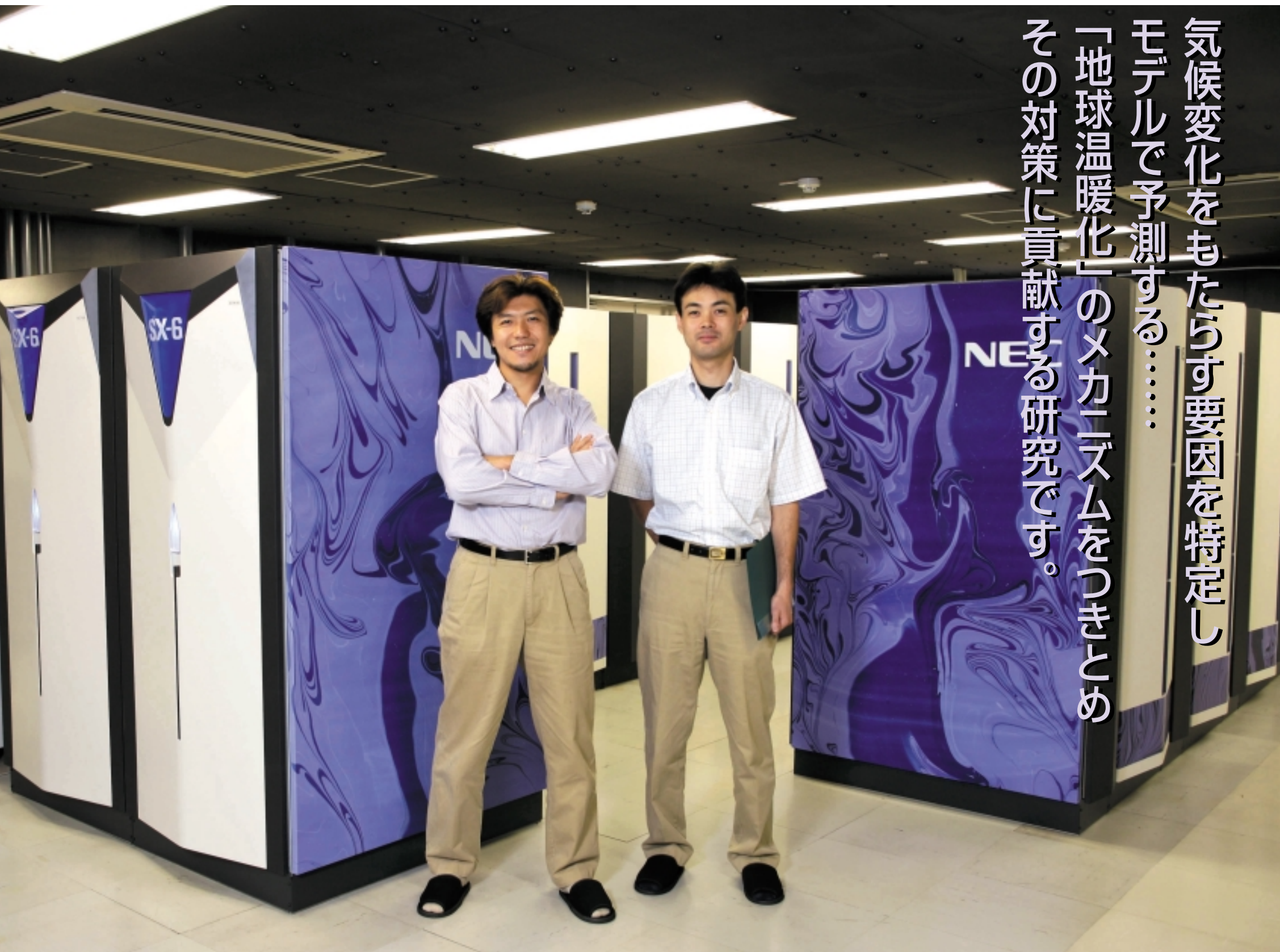
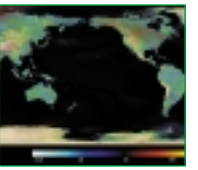
環境儀

NIES RESEARCH BOOKLET No.19 JANUARY 2006 独立行政法人 国立環境研究所

独立行政法人

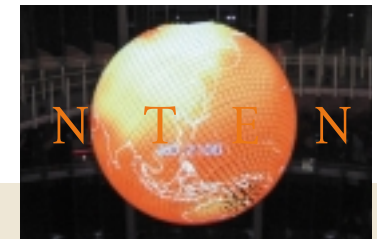
国立環境研究所

<http://www.nies.go.jp/>



気候変化をもたらす要因を特定し
モデルで予測する……
「地球温暖化」のメカニズムをつきとめ
その対策に貢献する研究です。

あいつく異常気象や自然災害との関連が指摘されるなど、「地球温暖化」の真相解明を求める声が高まっています。これに応じて、国立環境研究所は東京大学気候システム研究センター、海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターと合同チームを結成して研究を続けています。気候変動を現実的に再現するための「気候モデル」を開発し、地球シミュレータなどのスーパーコンピュータを用いて20世紀において観測された地球の平均地上気温の上昇傾向を再現。同時に2100年までの地球温暖化の見通し計算を行うなど、さまざまな成果を上げるに至りました。これらの研究から得られたものは近年30年余りの昇温傾向は人間活動に伴うものであるという見解と、何も対策が講じられずに時間が過ぎれば100年後には地上の平均気温と降水量が大幅に増加するという予測です。国際的な温暖化対策の取り決めにも大きな影響を及ぼす、未来を予見する研究プロジェクトの動向をお伝えします。

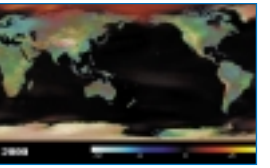


C O N T E N T S

最先端の気候モデルで予測する「地球温暖化」

- Interview
研究者に聞く……………P4~P9
- Summary
気候モデルによる地球温暖化研究の成果から …………… P10~P11
- 研究をめぐって
地球温暖化研究、世界の視点と動向……………P12~P13
- 国立環境研究所における気候モデル研究の歩み…………… P14

●本研究プロジェクトの詳細は国立環境研究所のホームページでご覧いただけます。
<http://www.nies.go.jp/climate/index.html>
●表紙写真：100年後の地球の気温上昇量分布（色が明るいほど気温上昇が大きい）



スーパーコンピュータを用いて、地球全体の大気・海洋の変化を計算する「気候モデル」は、最新鋭の気候変化の予測手段として脚光を浴びる存在です。いまだ解明されない部分も多い地球温暖化の実態に迫り、その対策にも貢献する画期的な気候モデルはどのように開発されたのでしょうか。数々の難関も存在したこの研究プロジェクトを担当する二人の研究者に聞きました。



江守 正多 / 大気圏環境研究領域 大気物理研究室長

野沢 徹 / 大気圏環境研究領域 大気物理研究室主任研究員

世界の温暖化政策を前進させる 最先端「気候モデル」の成果

1: 「温暖化」と「異常気象」は異なるもの

Q: あいつく異常気象のニュースもあって「地球温暖化」はいまや社会的な関心と呼ぶテーマです。この分野を専攻する科学者として、どんな印象をお持ちですか？

江守: センセショナルに取り上げられすぎる面がありますね。ある年の夏が暑かった、巨大ハリケーンが猛威を振るった、洪水被害が相次いでいる……すべて観測にもとづく事実ですが、その陰で例えば2003年などは梅

雨が明けずに冷夏だったことは忘れられがちです。これらの現象は専門的な分類からいけば「異常気象」とされる内容で、地球の気候が「温暖化」したことを証明する現象とはいいい切れません。

野沢: これは日々の天気を指す「気象」と、その気象を集めた数十年間の平均値を示す「気候」が混同されている状態なのです。自然界には長い時間の中で起こる「気候の揺らぎ」が存在します。おなじみの「エルニーニョ」は東太平洋の海水温度の上昇によって発生し、日本に冷夏や

暖冬を引き起こすことはよく知られていますが、これなどは「気候の揺らぎ」の好例です。いま問題となっているのはこの「気候の揺らぎ」の上に人間の社会活動による影響が上乗せされて「気候」が変化し、地球の「温暖化」が進行しているのではないかとさまざまな分野の専門家からの指摘です。これらの気候システムの外側から与えられる変動要因を正確に計算に加えて「温暖化」をどこまで予測できるか、という課題が私たちに与えられた研究テーマです。たまたまの「異常気象」なのか、確実に進んでいる「温暖化」なのかを見きわめる作業といえるでしょう。

江守: これは誰もが日々感じる天候や気温の問題ですから、馴染みやすいテーマである代わりに実態は解りにくい。本当に温暖化は起こっているのか？ 人間のせいでは起こっているのか？ このまま進めば何が起こるのか？ こういった問題に対するコメントは、市民団体、政府、マスコミ、経済界などさまざまな立場から発信されています。

そして私たちはもちろん科学的な見地から見解を述べなくてはなりません。気象の大きな変化が起っても、これはたまたまの「異常気象」であって「温暖化」の産物ではないかもしれない。例えばアメリカでハリケーン「カトリーナ」の被害が出れば、私たちは「これは地球温暖化の影響か？」という質問を受けます。「断定はできない。偶然にこのレベルの熱帯低気圧が発生する可能性もある。でも温暖化の傾向によって発生の確率が高くなっている可能性はある。世界中で行われているシミュレーションは温暖化がこのまま進めば、それが引き金となって今回のような強い熱帯低気圧が増えると予測している。災害対策とともに温暖化防止策も必要となるでしょう。」現状ではこの程度の回答がせいぜいでしょうね。

野沢: 我々の課題として、気候の変化である「温暖化」は「異常気象」とは別物であるという認識を広めて行かなくてはなりません。これを混同して扱っていただければ環境の変化を見誤る危険があります。自然界の「気候の揺らぎ」の陰で進行する「温暖化」を放置しておけば、おそらく地球の気候は引き返すことができない事態になる。科学的に立証されたその証拠が出そろいつつあるわけですから。

2: 世界の温暖化予測、発展の経緯

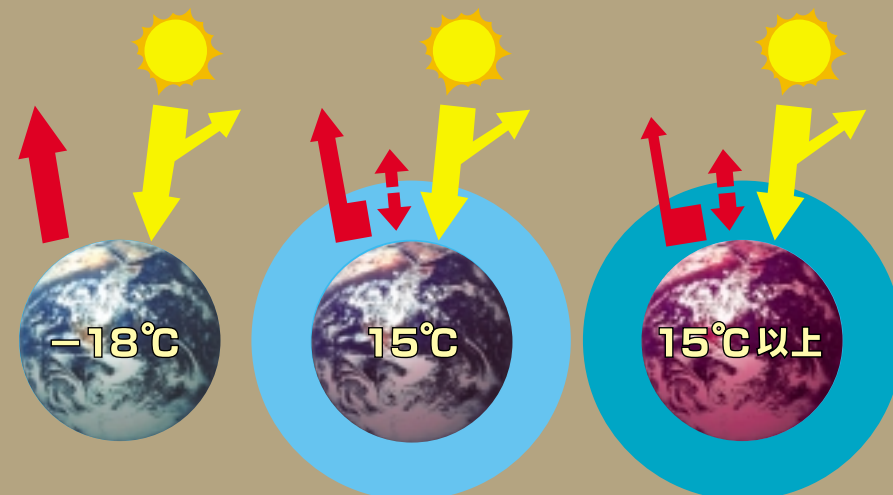
Q: 30年ほど前までは「地球は寒冷化している」という学説が有力だったようですが、この見解はその後どういう経緯で変化していったのですか？

江守: 地球は10万年くらいのサイクルで激変してきた歴史を持っています。厳しい寒さの氷河期と、その間を埋める温暖な間氷期のくり返しですね。

『地球温暖化の仕組み』

もしも地球が地表を暖かく保つ「温室効果」を持っていなかったら、地球の気候はどのように変わっていたでしょう。地球の表面は太陽からのエネルギーを受け取り、それとちょうど釣り合うだけのエネルギーを赤外線という形で宇宙空間に放出しています。地球表面は温度が高いほど大きなエネルギーを放出するので、このエネルギーの釣り合いを条件として地球表面の温度が決まります。「温室効果」がなかった場合の地球表面の平均温度は、およそ-18℃になります(右図①「温室効果がなかったら…」)。

しかし、現実の地球には温室効果を持つ大気が存在します。地球表面から放出された赤外線の一部は大気によって吸収され、さらに大気からは地球表面に向けて赤外線が放出されています。その結果、



① 温室効果がなかったら…

② 温室効果があるので…

③ 温室効果が強まると…

● 地球のエネルギーバランスの概念図

黄色い矢印は太陽からのエネルギー、赤い矢印は赤外線のエネルギーを表している。

▶ 地球表面は太陽と大気の双方からエネルギーを受け取ることになり、平均温度はおよそ15℃というレベルに保たれるのです(左図②「温室効果があるので…」)。

地球の大気に温室効果をもたらしている物質は水蒸気や二酸化炭素(CO₂)といった微量成分です。この大気を持つ温室効果は自然現象であり、人類の産業活動が始まるはるか前から地球表面の温度を適度に保つ役割を果たしてきました。地球温暖化は大気中のCO₂が人間活動によって増加し、温室効果を強めることで起こる現象のことです。温室効果が強まると地球表面から放出された赤外線が大気によって吸収される割合が上昇し、大気から地球表面に向けて放出される赤外線も増大。その結果、地球表面が受け取るエネルギーが大きくなり地球温暖化が進行するのです(左図③「温室効果が強まると…」)。

この学説が定着した頃、ちょうど世界の気温も全般的に下降傾向にあったために、世界はいま間氷期から氷期に向かっていているという「地球寒冷化」の説が唱えられたわけです。ところがその後の観測で産業革命以来、大気中の二酸化炭素(CO₂)濃度が増加して地球の平均気温は長期的に見れば上昇を続けていることがわかってきました。

野沢: そのあたりが「地球温暖化研究」の出発点でしょうね。温室効果ガスの増加がもたらす気候変化を解明しなくてはならない必要が生じたのです。この研究テーマは世界中の気象に関するデータが基盤となりますし、研究成果を国家間で共有して将来への指針とする意味合いも強いので国際的な連携も求められるようになりました。代表的なものとしては世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)の協力のもとに設立されたIPCC(気候変動に関する政府間パネル)という機構があります。

江守: 地球温暖化の問題はそれぞれの国情に照らしての主張や発表が行われるケースもあるので、IPCCには世界の科学者の合意をまとめ、それを各国政府にも認証



●地球シミュレータ
写真提供：独立行政法人海洋研究開発機構

させて対策を世界レベルで前進させる目的があります。国際的に通用する科学的知見として5~6年に一度のペースでレポートを発表してきた実績があり、温室効果ガスの削減交渉など国家間の取り決めを行う際の基礎資料を作る役割を担っています。

3: 試行錯誤の末に完成した気候モデル

Q: お二人を中心とする日本の温暖化研究がIPCCにおいてどのような評価を受けているのか、またその成果を手に入るまでの苦労話などもお聞きたいのですが?

江守: 諸先輩のご尽力により日本でも温暖化の研究が本格化してきました。これは地球環境を専門に研究する地球フロンティア研究システム(現海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター)の発足とか、完成当時世界最大の演算能力を誇った「地球シミュレータ」(平成14年3月完成)が登場したことに象徴されています。気候変動を予測するためにはコンピュータ上で変動の様子をシミュレーションするプログラムを作る必要があります。これを「気候モデル」と呼ぶのですが、このモデルの精度が研究成果を左右する決め手となるのです。私たちの研究は東京大学の気候システム研究センターとの共同

研究からスタートしました。ここは当時「気候モデル」の開発に本格的に取り組む世界でも数少ない機関で、国立環境研究所から転出された同センターの沼口敦助教授はこの分野における日本の第一人者でした。沼口さんとの共同研究で気候モデルを完成させ、私たちのグループとしては初めて、将来100年の温暖化予測実験を行ったのです。この成果はIPCCの第3次報告書にも記載され(図1)、ひとまず「我々のグループの研究成果を持ってIPCCに貢献する」という目的の端緒につけたのですが……。残念なことにその直後に沼口さんが事故で急逝されるというアクシデントに見舞われました。

野沢: 私たちが沼口さんの後を引き継ぐ形となり、次の成果を目指す体制を作り始めたわけですが、このタイミングで横浜に地球シミュレータが完成します。これをきっかけに国立環境研究所、東京大学気候システム研究センター、地球フロンティア研究システムの3者の協体制が固まり、多くの研究者たちが「気候モデル」をもとに「グループで温暖化実験を実施」し、「IPCCに貢献する」という共通目標を旨として活動できる環境が整いました。世界最大級のデータ容量や演算速度からみても地球シミュレータが次のモデル開発の大きな武器となることは確実でした。

江守: 私は、このタイミングで地球フロンティア研究システムに出向しました。目標はもちろんIPCCの第4次報

告書への参画です。地球シミュレータを使えば世界一の計算ができるのですが、それには気候モデルの性能をそれに見合うように高めなくてはなりません。モデル中で気候を再現する最小単位である格子の大きさは「解像度」と呼ばれますが、まずこの解像度を高めたモデルをうまく走らせるまでが一苦労でした。地球シミュレータの性能をじゅうぶんに活かすためには高速で走る、効率の良いプログラムを作らなくてはなりません。しかしその精度がいくらアップしても、現実の気候変動を忠実に再現できていないかぎり意味がないわけです。野沢さんとの連携で、モデルを改良するさまざまな努力を続けました。

野沢: 江守さんがモデルの高度化を行っている間、私は気候システムの外部から気候に影響を与える様々な変動要因のデータを整備していました。過去から将来まで、より現実的なシミュレーションを行うためです。その後、江守さんが地球シミュレータで数年間分をシミュレーションした高解像度のテスト版モデルを、横浜から国立環境

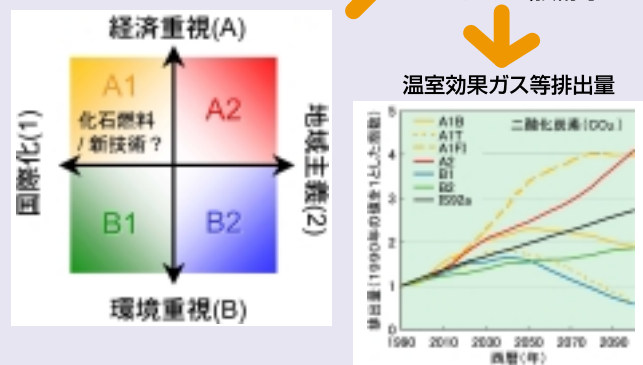
● 温室効果ガス等の将来の「排出シナリオ」概念図

将来の世界の社会経済はどんな方向に発展するか?
→排出量は どう変わるか

予測は不可能 → 様々な場合(シナリオ)を考える

様々な将来世界像

人口、経済活動、エネルギー、技術等



IPCCで用いられる「SRESシナリオ」の概念図。将来の世界が経済重視(A)で進むか、環境重視(B)で進むか、国際化が進むか(1)、地域主義になるか(2)で場合分けし、それぞれの場合について将来100年間の二酸化炭素などの排出量を推定している。A1B、T、FIは、主に用いられる技術によってさらに分けたもの。IS92aは旧シナリオ。

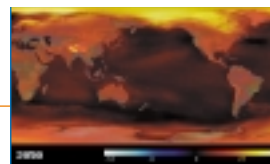
『温暖化予測とは?』

このまま地球温暖化が進むと100年後の世界ではどんなことが起こるのか……。この予測を行うためには、いくつかの手順が必要になります。まず始めは、世界の社会経済がどのように発展するかについてのシナリオ作り。これは客観的な予測のもとに作成することは不可能なので、いくつかのケースを想定した複数のシナリオを用

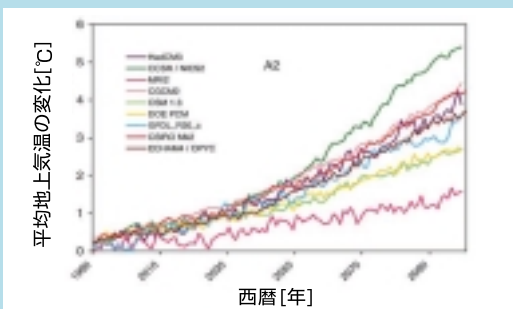
意しなくてはなりません。次にそれぞれのシナリオについて人口、経済、技術といった諸要素の変化を考慮しながらCO₂などの排出量を推定し(これを「排出シナリオ」と呼びます;左図)、次いでこれらのCO₂などの物質がどれくらいの割合で大気中に残るかを計算します(CO₂の場合、現在では人間活動により大気中に排出された総量の約半分が陸上生態系と海洋によって吸収され、残りは大気中に残ります)。ここまでの手順でCO₂などの大気中濃度の将来シナリオが完成するのですが、これを前提条件として、さらに気候モデルによる将来予測シミュレーションを行います。気候モデルの計算を行えば、シナリオ毎に温暖化によって将来の気温や降水量が世界の各地域でどのように変化するかという予測を立てることが可能。この予測結果を用いれば、最終的には水害、水資源、農業、健康などの様々な分野についてどのような影響があるかを推定して対策に役立てることができます。

『気候モデルと解像度』

「気候モデル」とは、地球の気候の仕組みをコンピュータ上に再現するシミュレーションプログラムのこと。CO₂が増加すると地球はどうなるか……。など、実際には実現不可能な実験を「コンピュータ上に再現した地球」であるこのモデルを使って行うことができます。気候モデルにおいては大気と海洋を水平・鉛直の格子(マス目)に分割して表現しますが、この格子が大気・海洋の現象を再現する最小単位です。この格子の細かさは「解像度」と呼ばれ、コンピュータの計算能力が大きいほど解像度を高く(格子を細かく)することができ、より小さい空間における詳細な現象をとらえることができます。従来のスーパーコンピュータ上で大気と海洋の両方を結合した気候モデルを作成した場合、大気の水平の解像度は300km前後というレベルが限界でした(右図 中解像度モデル)。しかし世界最大規模の「地

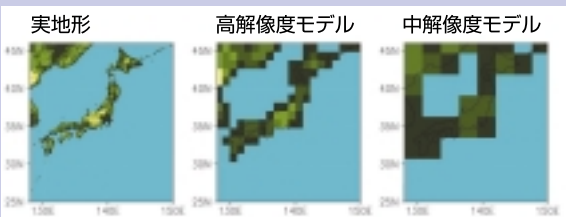


■ 図1 地球平均地表気温の変化予測



世界のさまざまな研究機関が予測した2100年までの地球平均年平均地表気温の予測を示したグラフ。一番高い数値の温度上昇を予測している曲線がCCSR/NIES(国立環境研究所)のモデルの結果。(IPCC第3次評価報告書<2001年>より)

● 気候モデルにおける日本付近の格子



異なる解像度の気候モデルにおける、日本付近の格子の表現。高解像度モデル(およそ100km格子)では、日本の太平洋側と日本海側の気候の違いが表現できるが、中解像度モデル(およそ300km格子)では表現できない。

球シミュレータ」の登場により、100kmの水平解像度が実現(上図 高解像度モデル)。中解像度モデルでは表現することができなかった数100kmの大きさの熱帯低気圧も、高解像度モデルの使用により表現できるようになりました。

研究所に送ってもらう。それを低解像度化し、こちらのスーパーコンピュータで100年間のシミュレーションを行うわけです。対象とするのは実際の観測データがある過去100年間の気候。その結果と比較してモデルがどのくらい正確に気候を再現できているか、誤差が出た部分は何が原因か、どんな変動要因をどう取り入れてモデルを作り直すべきか等を検討して江守さんにフィードバックする……この作業をIPCCが指定したデータ提出の締め切り(2004年8月)に間に合うぎりぎりまでくり返しました。

江守: モデルを1箇所修正した結果をテストするだけでも数週間も費やす、とういうようなハードな内容でしたが(笑)。でもおかげでエアロゾルの濃度変化が気候変化に及ぼす影響をどのようにモデル中で表したらよいかなど、いくつかの重要な点について検討が進み、それらを反映させた高水準のモデルが完成したのです。IPCCでの反響も大きく、第4次報告書では本文に我々の論文や学説が数多く引用される見込みで高い評価をいただくことができました。

4: コンピュータは「気候」をこう再現する

Q: 「コンピュータで気候の変化を計算する」という作業は、具体的にどのようなものなのでしょうか。

江守: 例えば地球シミュレータを用いれば、世界最高レベルの解像度で地球上の空間を格子に分割できます(解像度については7ページのコラム参照)。大気で300km、海洋で100km程度しかなかった従来の解像度が、それぞれ100kmと20kmレベルにまで細分化することが可能になりました。地球上の空気や水の流れは「流体力学」



●球体ディスプレイ「Geo-Cosmos」に映し出された温暖化シミュレーション
写真提供:日本科学未来館

の物理法則に従うので、その流れの計算だけならば解像度を上げるほど正確な答えに近づることができます。ところが気候システムの計算の中には流体力学の計算だけでは割り出せない要素も含まれています。それは「放射伝達」とか「雲や雨が発生するプロセス」とか「グリッドの目がとらえ切れない気象変化」といった事象なのですが、これらについては観測結果から得た半経験的な方程式を当てはめて計算するしかありません。この方法は一般にパラメタリゼーションと呼ばれますが、これを改良することがモデルの計算結果を実際に観測された気候に近づける重要なポイントとなります。なかなか計算結果が現実と一致しない時には、「どんな要素のどんな側面が欠落しているか」を的確に思い浮かべる一種のカンも働かさなくてはなりません。例えばモデルの計算結果が、実際に観測された気温よりも高くなってしまったとします。これはモデルの中では観測よりも「日射が強かった」とか「地表が乾燥していて蒸発が少なかった」などの原因が推測できます。前者なら雲とか大気中のエアロゾルが少なすぎる可能性を考えなくてはならないし、後者なら雨が少なすぎる可能性を考慮するために雨雲の分布の再確認が必要になる……そんな具合にさまざまなアングルから検証し、予測モデルの精度を高めてきたわけです。

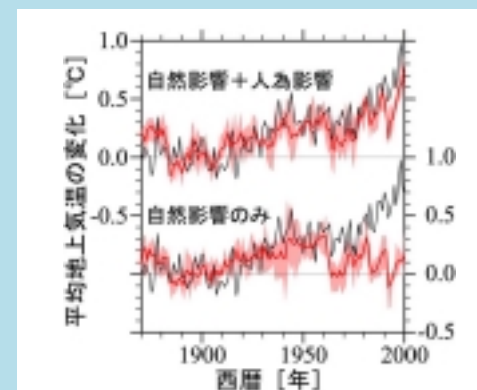
野沢: 私は気候変動要因の情報収集やデータを検証す

る研究を続けてきましたから、観測された気候変動の要因を推定する役割を担当しました。一方江守さんはモデルを高解像度化する部分を受け持つことで、もともと興味を持っていた地域規模の気候変化に関する研究をさらに進展させました。この研究における二人の役どころを解説すると、そんな感じになりますね。

Q: この気候モデルによってお二人が得た予測の成果を簡単に解説してもらえますか。

野沢: 考えられる気候変動要因をすべて考慮に入れた気候モデルは、実際に観測された1970年以降の温暖化傾向を忠実に再現します。ところが自然起源の気候変動要因のみを考慮した場合には全く再現できません(図2)。つまり近年の温暖化傾向は人間活動に伴う気候変動が原因である可能性がきわめて高いことがわかりました。IPCC第3次評価報告書(2001年)においても20世紀後半の温暖化傾向は人間活動が原因であると指摘されていましたが、当時のモデルはいくつかの重要なプロセスや気候変動要因を考慮していませんでした。今回の研究ではそれらの問題点を改善して現状で考えられる要因

■ 図2 過去130年間の平均地上気温の経年変化



全球年平均地上気温の経年変化のグラフ。黒線は観測値を、赤太線は計算結果(初期値の異なる4実験の平均)を示している。観測、モデルともに1881~1910年の平均気温を引いたもので、薄赤色の部分は初期値の異なる4実験結果のばらつきを範囲を表す。上段はすべて(自然+人為)の気候変動要因を考慮した場合、下段は自然起源の気候変動要因のみを考慮した場合を示している。20世紀最後の30年程度の昇温傾向は、人間活動に伴う気候変動を考慮しなければ再現できない。

をほぼ完璧に考慮しており、気候モデルの信頼性を高めることができたといえるでしょう。

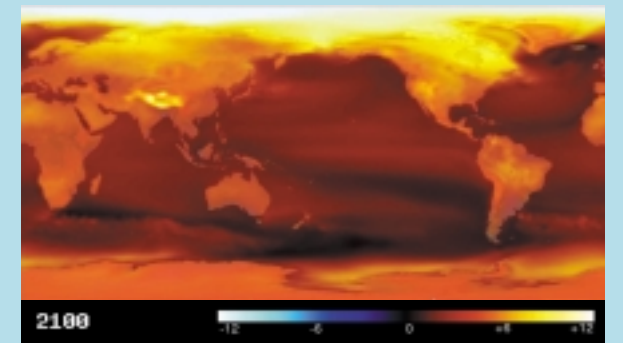
江守: 将来予測に関していえば、いままでは温暖化が進んだときの気温上昇量の分布は、大陸規模程度の大まかな特徴しか高い信頼性で予測することができませんでした。また気温、降水量などの平均的な変化予測は可能でも、極端に暑い日や大雨の頻度といった短時間の範囲内で起こる現象の変化の予測はできませんでした。それが、今回の地球シミュレータを用いた計算では時間的にも空間的にもより詳細な予測を行うことが可能になりました。このような気候予測によって、洪水被害が増えるかどうか、熱中症のような健康影響が増えるかどうかといった、より具体的な温暖化の影響評価を行うことが可能になったと考えています。

Q: 最後に、ご自分たちで予測した2100年の世界の気候(図3)を見ての率直な印象をお聞かせください。

野沢: センセーショナルな結果ですよ。ただ、これはある将来像を想定した上での一つの可能性に過ぎません。温暖化していくことは間違いないと思いますが、その度合いは、今後の対策しだいでも大きくも小さくもなるのだということもきちんと伝えていくべきだと思います。

江守: 確かにインパクトの大きい結果だと思います。これを見せて、社会に温暖化の危機感を煽ることも可能でしょう。しかし、社会の皆さんには「煽られた危機感」ではなく、「正しい危機感」を持ってもらうべきです。そのためには、予測結果のうちどの部分の信頼性が高く、どの部分はまだ確信が持てないかということをきちんと説明する努力が今後とも必要です。一方で、まだ確信が持てない部分についてはしっかりと研究を進め、予測を進化させていきたいです。

■ 図3 2100年頃の年平均地表気温上昇量の分布

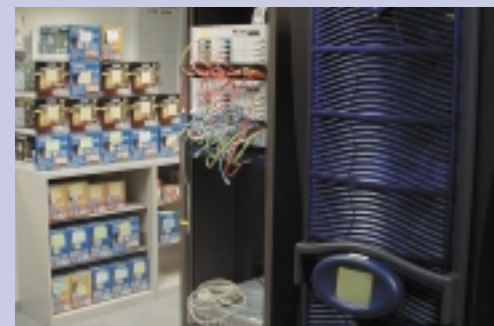


シミュレーションされた2071~2100年の年平均地表気温上昇量(1900年を基準)の地理分布。

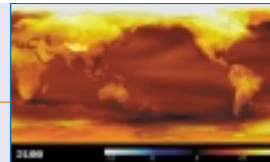
『データ“転送”ならぬ“配送”？』

この研究においては世界最大級のスーパーコンピュータが採用され、大気海洋結合モデルとしては世界最高の解像度(高解像度版)でのべ1000年程度、標準的な解像度(中解像度版)ではのべ20000年程度の温暖化予測の計算が行われました。モデルから出力される1年分のデータ量は高解像度版で約60GB、中解像度版では平均3GB程度であり、少なくとも120TB以上(1TB=1000GB)ものデータが計算によって生成されたことになります。横浜の地球シミュレータから当研究所へ持ち込まれたデータは約40TB(全体の約1/3)。これだけの容量をインターネット経由で転送することは物理的にも時間的にも不可能で、大量の外付けHDD(ハードディスクドライブ)にデータを格納して宅配便でデータを送る“配送”がくり返されました。

●大量の大容量HDD(ハードディスクドライブ)の山



国立環境研究所・大気物理研究室の計算機室の様子。奥に見える箱の山が、地球シミュレータとの間のデータ搬送に用いたハードディスク。



気候モデルによる地球 温暖化研究の成果から

地球上のさまざまな地域から、台風や豪雨、熱波、ハリケーンなどの異常気象が報告されています。原因として地球温暖化との関連性が指摘されていますが、その実態は科学的には解明されていない部分が多いといえるでしょう。将来このような異常気象が増加するかどうかを予測するには、より精度の高い気候モデルの計算が必要です。温暖化予測の基礎データとなる過去100年と未来100年の気候モデルの計算に取り組んだ、当研究プロジェクトの概要をご紹介します。

● 近年の昇温傾向は人間活動に起因

気候モデルを用いた地球温暖化予測では、使用する気候モデルの信頼性が重要になります。そこで、この分野においてはその一助として、20世紀の気候再現実験が行われてきました。しかし、従来の研究では、煤(すす)に代表される炭素性エアロゾルの増加など一部の重要な気候変動要因が加味されていないために、結果は不十分であるとされていました。

今回の研究プロジェクトで野沢徹主任研究員が主導した「20世紀の気候再現実験」は、いままで加味されなかった変動要因を最大限考慮して計算していることが、大きな特徴です。

考慮された気候変動要因は8つ。①太陽エネルギーの変動 ②大規模火山噴火に伴い成層圏にまで到達したエアロゾルの変化 ③温室効果ガス(二酸化炭素、メタン、亜酸化窒素、ハロカーボン)濃度の増加 ④1970年代半ば以降の成層圏オゾン濃度の減少 ⑤人間活動に伴う対流圏オゾン濃度の増加 ⑥工業活動に伴う二酸化イオウ(硫酸エアロゾルの原因物質)排出量の増加 ⑦人間活動に伴う煤などの炭素性エアロゾル排出量の増加 ⑧土地利用変化(①～②は自然起源、③～⑧は人為起

源の気候変動要因)

「20世紀の気候再現実験」の結果、すべての気候変動要因を考慮した場合、モデルは20世紀前半(1901～1950年)や近年(1971～2000年)の温暖化傾向および20世紀中盤(1941～1980年)の緩やかな寒冷化傾向を、地球全体で平均した地上気温だけでなくその地理分布も含め、きわめて正確に再現しています。これは世界に先駆けて、現状で考えられるほぼすべての気候変動要因を考慮した成果であると考えられます。例えば、20世紀中盤におけるアジアやアフリカ、南米での寒冷化傾向は、炭素性エアロゾルの増加を考慮することにより、その再現性が向上したことを確認しました(図4)。

観測された地上気温の変動要因を推定するために、人為起源のみ、自然起源のみなど、さまざまな気候変動要因を切り分けて実験を行った結果、1970年以降の顕著な温暖化傾向は、すべての気候変動要因を考慮した場合にはより正確に再現されていますが、自然起源の気候変動要因のみ考慮した場合には、まったく再現できていません(P9、図2)。このことから、近年(20世紀最後の30年程度)の温暖化傾向は人間活動に伴うものであることが強く示唆されます。人為的な気候変動要因には、温室効果ガスの増加に伴う温暖化と、対流圏エアロゾルの増加による寒冷化とに大別されますが、前者が後者を大きく上回るために温暖化傾向が顕在化しているものと考えられます。

● 100年後の地球の気候を予見する

江守正多研究室長主導による「地球温暖化予測計算」は、2100年まで未来100年間の地球温暖化の見通しを予測するものです。このような気候モデル計算では、大気・海洋を格子に分割して解析します。格子の細かさを解像度といい、解像度を高くするほど詳細な予測が可能にな

ります。640台のベクトル計算機を高速ネットワークで接続したスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を使うことで、解像度が飛躍的に高まり、大気100km、海洋が20km程度まで、精度の高い予測計算が可能になりました。地球全体の大気・海洋を計算するものとしては、現時点(2006年1月)で世界最高の解像度を持っています。

1900～2000年については、温室効果ガス濃度やエアロゾル排出量など野沢主任研究員のデータを与えて計算し、2001～2100年は、IPCC(気候変動に関する政府間パネル)が作成した将来シナリオの2パターンについて計算しています。一つは、未来社会が経済重視で国際化が進むと仮定したシナリオ「A1B」(2100年の二酸化炭素濃度が720ppm)、もう一つは環境重視と仮定した「B1」(2100年の二酸化炭素濃度が550ppm)です。計算の結果、全地球平均の気温は過去30年(1970～2000年)の平均に比べて、未来シナリオ「A1B」は4.0℃、「B1」は3.0℃上昇。降水量は前者が6.4%、後者が5.2%の増加となりました。大規模な地理分布では、北半球の高緯度地域で気温の上昇が大きいなど、従来からの予測と同様の結果が確認されました。

そして、2071～2100年で平均した日本の夏の日平均気温はシナリオ「A1B」では4.2℃も上昇し、真夏日の日数も約70日増加(図5)。降水量も平均的に増加し、豪雨の頻度も高まると予測されました(図6)。これは、熱帯太平洋の昇温と関係して日本の南側が高気圧偏差となり、これが日本付近に低気圧偏差をもたらすと同時に暖かく湿った南西風をもたらすからです。さらに大陸の昇温と関係して日本の北側が上空で高気圧偏差となり、梅雨前線の北上を妨げることが主因とみられます(図7)。豪雨の頻度が高まるのは、大気中の水蒸気量が増加することで、ひと雨当たりの平均降雨量が増えるからと考えられます。

● 気候を予測し、精度を高める意義

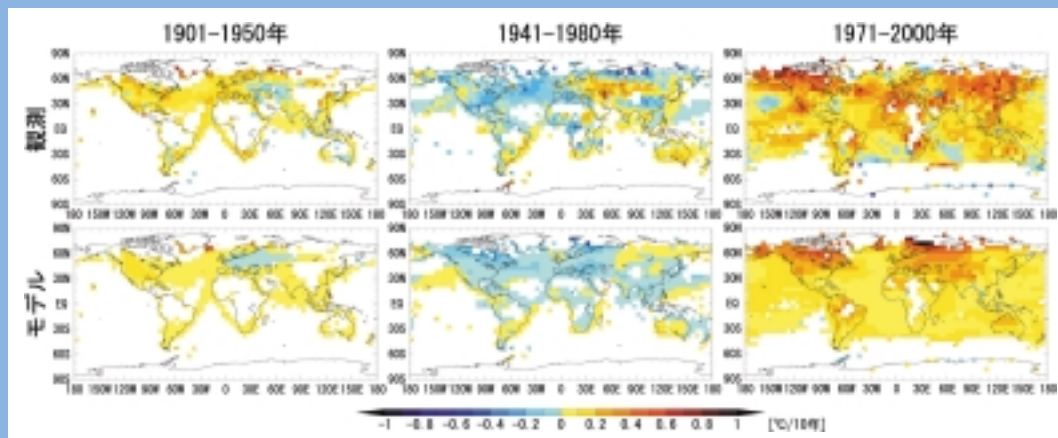
気温上昇量の絶対値の予測には大きな不確実性があります。気候にもたらされる年々の自然の揺らぎは大きく、必ずしも真夏日や豪雨が年を追って単調に増加するとは限りません。同様に、特定の年の異常気象を地球温暖化と関連づけることもまた、難しいといえます。

しかし、今回の「地球温暖化予測計算」によって、これまでの研究では不十分であった地域的な気候変化、すなわち真夏日の日数や豪雨の発生の増減など、地球温暖化に伴う異常気象の予測について新しい研究成果を提示することができました。

「IPCC第3次評価報告書」(2001年)でも、気候モデルを用いた計算によって20世紀後半の昇温傾向は人間活動、前半は自然起源に起因するという可能性が指摘されていました。しかし、当時の計算では、いくつかの重要なプロセスや気候変動要因を考慮していませんでした。当研究では、それらの問題点を改善し、現状で考え得るほぼすべての気候変動要因を考慮していることで、従来の知見の信頼性をより高めることができています。

過去100年の地球の平均地上気温の変化を再現する「20世紀の気候再現実験」と、2100年までの未来100年に渡る見通しを予測する「地球温暖化予測計算」が、互いに相互補完的な役割をしていることも、当プロジェクトの大きなポイントといえるでしょう。

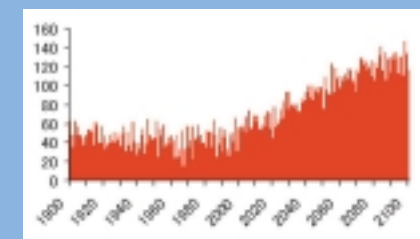
過去を検証して未来を予測する気候モデルによる地球温暖化研究は、21世紀の世界が進むべき方向を示す国際世論の形成に大きな影響を及ぼす重要な研究なのです。



■ 図4 20世紀前半、中盤、後半における地上気温の長期変化率の地理分布

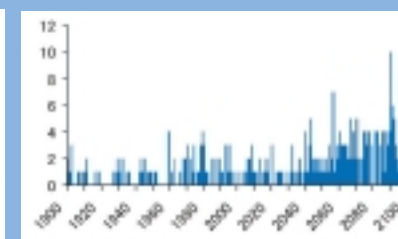
年平均地上気温の長期変化率の地理分布。上段が観測結果、下段がモデルの予測結果(すべての気候変動要因を考慮した場合)を示している。左からそれぞれ、1901～1950年、1941～1980年、1971～2000年の地上気温変化率を示す。寒色系が寒冷化傾向を、暖色系が温暖化傾向を表示。20世紀のどの期間を取っても、予測結果は観測結果をかなり正確に再現している。

■ 図5 日本の真夏日(最高気温30℃以上)の日数変化

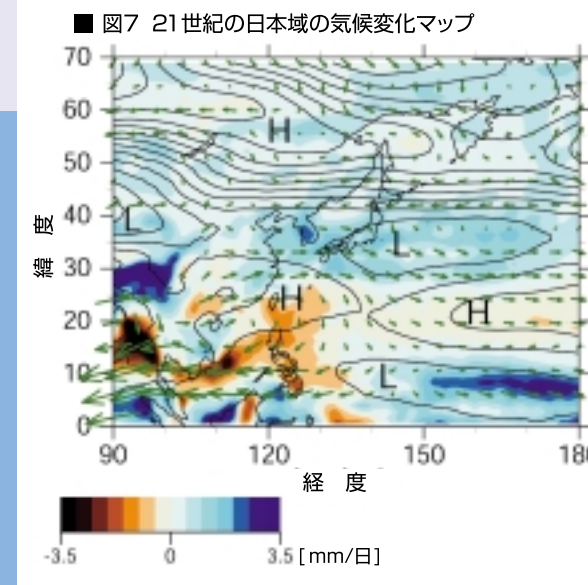


■ 図5 モデル中の日本の真夏日日数の変化。九州から北海道までのモデル格子で1つでも真夏日があれば、真夏日1日と数えた。

■ 図6 日本の豪雨(日雨量100mm以上)の日数変化



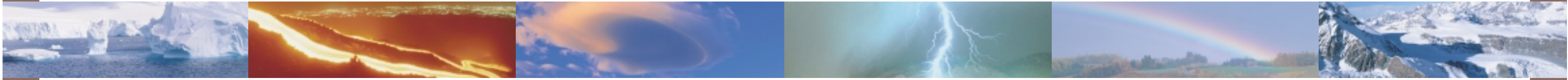
■ 図6 モデル中の日本夏季の豪雨日数の変化。九州から北海道までのモデル格子で1つでも100mm以上の日雨量があれば、豪雨1日と数えた。年々の変動が大きい。21世紀後半には、豪雨の多い年が目立つ。
■ 図7 日本の夏の予測結果。水色は降水量が増えるところ。等値線は対流圏を代表する気圧変化(500hPa高度)、矢印は対流圏下層(850hPa)の風の変化を表す。年々の変動はあるが、平均的には気圧配置は2003年のような冷夏に近くなる。南の高気圧偏差が暖かく湿った空気をもたらす。北の高気圧偏差が梅雨前線の北上をじゃまする。天気は悪いが気温は高く真夏日は大幅に増加、かつ大雨の多い気候となる。



■ 図7 21世紀の日本域の気候変化マップ

〈地球温暖化研究、世界の視点と動向〉

2005年2月16日に「京都議定書」が発効したことを受け、地球温暖化対策に向けた国内外の動きが活発化しています。この夏、米国を襲った超大型ハリケーン「カトリーナ」の例はいうまでもなく、記録的な暴風、熱波、洪水など、世界中で異常気象が頻発しています。このまま温暖化が進めば、異常気象による大規模被害が増え続けると、世界中の科学者が予測しています。いまや待ったなし。地球の温暖化を防ぐには、国際社会が連携しながら対策に取り組まなければなりません。



■ 世界では

地球温暖化問題はいまや正念場を迎えています。国際的な温暖化防止対策の進展としては、「京都議定書」で各国ごとに定められた温室効果ガス削減約束の達成が重要課題として注目されています。この議定書は数値目標を定めて、2008～2012年の間に先進国からの温室効果ガスの排出量を1990年レベルより全体で5%以上削減することを義務づけた約束です。

従来より温暖化問題に積極的であった欧州では、各国共同で排出量8%削減を目指しています。一方米国政府は、京都議定書は「途上国に数値目標を課さないのは不公平で「我が国の健全な経済活動を損なう」などという見解を背景に今も京都議定書の批准を拒否したままです。

G8に先立つ2005年2月、英国気象局ハドレーセンターで、英国ブレア首相の主導による「温室効果ガスの安定化濃度に関する科学者会合」が行われました。G8各国はじめ中国、インドなど約30ヶ国から200人以上の研究者が出席し、「危険な地球温暖化のレベルとそれを避けるための方策」について様々な知見が発表されました。例えば、珊瑚礁は海水温が1℃上昇するだけで白化して死滅する可能性があるなど、温暖化影響のリスクは予想以上に深刻なことが明らかとなりました。

2005年夏に、米国ルイジアナ州に壊滅的な被害を与えたハリケーン「カトリーナ」はメキシコ湾上空で急速に勢力を拡大し、同湾の暖かい海面から大量のエネルギーが供給されたとみられています。ハリケーン発生数が新記録を更新した米国では、その原因が地球温暖化によるものかどうか議論が再燃しています。

「IPCC（気候変動に関する政府間パネル）」は、気候変動に関する最新の科学的知見を集約した評価書を随時発表しています。「第3次評価報告書」（2001年）では、1990～2100年の地表気温は地球全体の平均で1.4～5.8℃上昇すると予測していました（図8）。現在は「第4次評価報告書」（2007年）の準備を進めており、日本を含

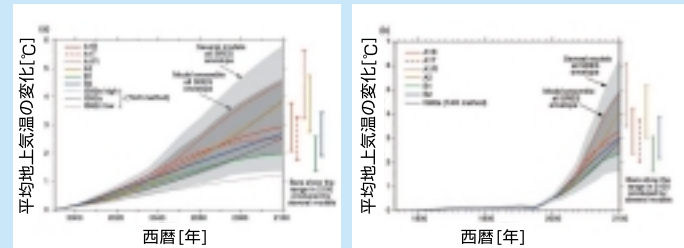
め世界中の研究機関による20以上の気候モデルの予測結果が用いられる予定です。2013年以降の世界規模の温暖化対策をまとめる上で、「第4次評価報告書」のデータは、各国の指針を決定づける極めて重要な意味を持っています。

■ 日本では

IPCCの動きに呼応して、国内でも気候変動に関するさまざまな研究がスタートしています。本環境儀で紹介しているこの研究も「人・自然・地球共生プロジェクト」の一環として、国立環境研究所、東京大学気候システム研究センター、海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターの協力のもとに実施されたものです。

プロジェクトでは温暖化予測「日本モデル」を構築するためのミッションが組まれていて、日本モデルの精度向上を図ることを目的に、体系的な研究が進められています。例えば、気象庁を中心とした研究グループは、大気のみで全球超高解像度(20km格子)モデルを使って世界初の長期積分を行い、温暖化が台風の活動などにおよぼす影響の予測を行っています。また電気事業に関わる研究機関である電力中央研究所は、米国大気研究センター(NCAR)と共同研究で2100年以降の超長期の温暖化予測実験を行いました。このように多くの機関が連携しながら、より詳細で信頼性の高い温暖化予測の研究に努めています。

■ 図8 IPCC 第3次評価報告書による、2100年までの地球平均気温変化予測



IPCC 第3次評価報告書による、2100年までの地球平均気温変化予測。様々な将来シナリオと、気候モデルの不確実性を考慮すると、2100年までに1990年と比べて1.4～5.8℃の気温上昇があると予測されている。

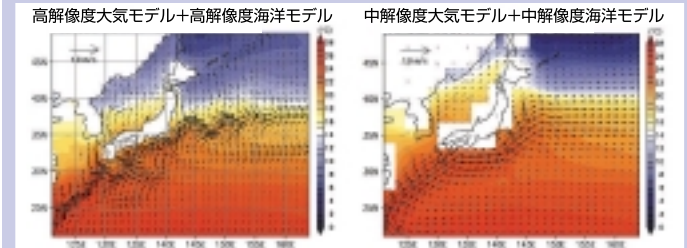
日本は、京都議定書の責任ある議長国として、削減目標6%をぜひでも達成しなければなりません。しかし、環境省によれば(2005年10月の速報値)、日本の温室効果ガスの2004年度総排出量は京都議定書による基準年(1990年)の総排出量と比べ約7.4%上回り、削減目標とは約13～14%の隔たりがあります。削減目標達成のためには今まで以上に国民一人一人の合意が必要であり、削減の取り組みを推進するためにも、より具体的な温暖化影響予測が必要といえるでしょう。

■ 国立環境研究所では

当研究所は、気候モデル研究と温暖化の影響対策研究の両方を行っている、世界でも数少ない研究機関です。地球温暖化については未解明な現象が多くあり、研究所内に「地球温暖化の影響評価と対策効果プロジェクト」を発足させて、地球の未来にとって最善のシナリオを探るべく研究活動を行っています。

このプロジェクトには、過去・未来100年間の気候予測計算を行った今回のチームのほか、湿地からのメタンの放出や森林によるCO₂の吸収等、炭素循環を調べるチームなど5つのチームがあり、研究を同時進行させています。また、温室効果ガスの排出量が急激に伸びている中国を含む、アジア太平洋地域の温暖化対策も緊急の課題であるため、この地域のガス排出量・気候変化・影響を統合分

● 高解像度モデルと中解像度モデルによる日本付近の海面水温と海流



高解像度および中解像度の気候モデルにより計算された、日本付近の海洋の状態。カラーは海面水温、矢印は海流を表す。高解像度モデルでは、黒潮の蛇行や離岸流が現実に表現されている。

析できる「アジア太平洋統合評価モデル(AIM)」を開発し、プロジェクトの重点的課題として研究を進めています。

地球温暖化は、農業・健康・水資源などが生きていくために必要なあらゆる分野に影響を与えます。異常気象が世界の食糧供給にどのように影響するのか。降水量の減少は深刻な水不足や砂漠化を招くかもしれません。当プロジェクトによって詳細で信頼性の高い気候変化シナリオを作成できれば、農業・健康、様々な分野での影響を予測し、その緩和策や適応策を講じる手だてにもなります。

気候予測モデルの開発と温暖化の影響対策の両方を視野に入れて行う「地球温暖化の影響評価と対策効果プロジェクト」は、IPCC第4次評価報告書に寄与できる、より信頼度の高いレベルを目指しています。その成果は京都議定書以降の国際的枠組み交渉における日本の説得力を高め、同時に、地球規模の温暖化対策を推進している日本の立場を支援する研究としても、多に期待されています。

● 排出シナリオ、気候モデル、影響評価の連携図



国立環境研究所では、温暖化の総合的な予測に必要な研究グループが揃っており、それらが密接に連携して研究を行っている。排出シナリオ、影響評価などの社会経済的なモデルはAsian-Pacific Integrated Model (AIM) と呼ばれるもの。

国立環境研究所における気候モデル研究の歩み

国立環境研究所(NIES)では、平成3年度から以下の課題に沿って、東京大学気候システム研究センター(CCSR)と共同で、気候モデルの開発と地球温暖化予測の研究を行ってきました。平成14年度からは、さらに地球フロンティア研究システム(現海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター、FRCGC)がこの共同研究に加わりました。

課題名

気候モデルによる気候変動評価に関する研究

(平成3～8年度)

CCSR/NIES大気大循環モデルおよびCCSR海洋大循環モデルの第一版が完成し、これらのモデルが世界の他のモデルと比較して遜色ない気候再現性を持つことが確認されました。

課題名

気候・物質循環モデルによる気候変動の定量的評価に関する研究

(平成9～11年度)

CCSR/NIES大気海洋結合気候モデルの第一版が完成し、我々のグループとしては初の地球温暖化予測実験を行いました。当時としては、エアロゾルの取り扱いを特に詳しく行いました。

課題名

気候変動の将来見通しの向上を目指したエアロゾル・水・植生等の過程のモデル化に関する研究

(平成12～14年度)

「フラックス調節」を用いない、CCSR/NIES大気海洋結合気候モデルの新バージョンを開発しました。また、モデル中のエアロゾルや水循環と衛星データとの詳細な比較も行いました。

課題名

高分解能大気海洋モデルを用いた地球温暖化予測に関する研究

(平成14～18年度)

地球シミュレータ用のCCSR/NIES/FRCGC気候モデルを開発し、地球シミュレータ上で、高解像度モデルによる温暖化予測実験や、中解像度モデルによる20世紀再現等の様々な実験を行っています。

課題名

大気中の水・エネルギー循環の変化予測を目的とした気候モデルの精度向上に関する研究

(平成15～17年度)

エアロゾルや対流圏オゾンのモデルの高度化と、モデル中のエアロゾルや水循環と衛星データとのさらなる比較・検証を行っています。

これらの研究は、環境省地球環境研究総合推進費及び文部科学省「人・自然・地球共生プロジェクト」の課題として実施されています。

この研究は以下の組織・スタッフにより実施されてきました。

〈研究担当者〉

●大気圏環境研究領域

江守 正多、野沢 徹、日暮 明子、小倉 知夫(以上、地球温暖化研究プロジェクト併任)、菅田 誠治、永島 達也、横畠 徳太、岡田 直資、塩竈 秀夫、鶴野 伊津志(現九州大学)、神沢 博(現名古屋大学)、中根 英昭、高敷 縁(現東京大学)、大楽 浩司(現防災科学技術研究所)

〈共同研究機関・共同研究者〉

●東京大学 気候システム研究センター

住 明正、木本 昌秀、中島 映至、高橋 正明、羽角 博康、阿部 彩子、松野 太郎(現海洋研究開発機構)、杉ノ原 伸夫(現海洋研究開発機構)、山中 康弘(現北海道大学)、沼口 敦(故人)

●海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター

高田 久美子、西村 照幸、鈴木 恒明、對馬 洋子、鈴木 立郎、坂本 天、長谷川 聡、須藤 健悟

●東京大学生産技術研究所 沖 大幹

●森林総合研究所 渡辺 力

●九州大学 竹村 俊彦

●北海道大学 渡部 雅浩

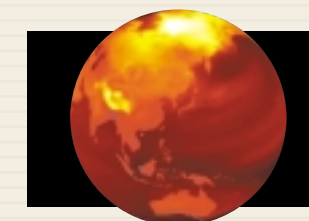
●高度情報科学技術研究機構 井上 孝洋

地球上の平均気温が近年になって上昇していることを、疑う者はいないでしょう。その主たる原因が人間活動によるもので、具体的には二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量の増大であることも広く認められるようになりました。

問題は、これからどのようになるかでしょう。いつ、どこで、どのくらい気温が上昇するのか、わからないことが多くあります。その影響を緩和するためにも、まず求められているのは信頼性の高い予測です。国立環境研究所は、東京大学気候システム研究センターおよび海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センターと共同し、世界でもトップレベルの気候モデル研究を展開しています。

本号は、その研究の概要をわかりやすくまとめたものです。毎号の環境儀とおなじように、研究者の生の声もお伝えしています。研究が本来的にもつ「きびしさ」と「おもしろさ」を含め、気候モデルに基づく温暖化研究について理解を深めていただければ幸いです。予測のつきにくるのは、地球温暖化の程度を小さくし影響を軽減する努力でしょう。環境儀 No.2(2001年10月刊)には「地球温暖化の影響と対策」を特集していますし、本研究所のホームページでは新しいデータも紹介しています。あわせてご覧ください。

2006年1月
理事長 大塚 柳太郎



環境儀 No.19

— 国立環境研究所の研究情報誌 —

2006年1月31日発行

編集 国立環境研究所編集委員会

(担当WG: 横内 陽子、江守 正多、野沢 徹、伊藤 智彦、植弘 崇嗣、白井 一成)

発行 独立行政法人 国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

問合せ先 (出版物の入手) 国立環境研究所情報企画室 029(850)2343

(出版物の内容) // 企画・広報室 029(850)2310

環境儀は国立環境研究所のホームページでもご覧になれます。

<http://www.nies.go.jp/kanko/kankyogi/index.html>

編集協力 (社)国際環境研究協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-1-13

無断転載を禁じます

「環境儀」既刊の紹介

No.1	環境中の「ホルモン様化学物質」の生物・発癌影響に関する研究	2001年 7月
No.2	地球温暖化の影響と対策－AIM；アジア太平洋地域における温暖化対策統合評価モデル	2001年10月
No.3	干潟・浅海域－生物による水質浄化に関する研究	2002年 1月
No.4	熱帯林－持続可能な森林管理をめざして	2002年 4月
No.5	VOC－揮発性有機化合物による都市大気汚染	2002年 7月
No.6	海の呼吸－北太平洋海洋表層のCO ₂ 吸収に関する研究	2002年10月
No.7	バイオ・エコエンジニアリング－開発途上国の水環境改善をめざして	2003年 1月
No.8	黄砂研究最前線－科学的観測手法で黄砂の流れを遡る	2003年 4月
No.9	湿沼のエコシステム－持続可能な利用と保全をめざして	2003年 7月
No.10	オゾン層変動の機構解明－宇宙から探る 地球の大気を探る	2003年10月
No.11	持続可能な交通への道－環境負荷の少ない乗り物の普及をめざして	2004年 1月
No.12	東アジアの広域大気汚染－国境を越える酸性雨	2004年 4月
No.13	難分解性溶存有機物－湿沼環境研究の新展開	2004年 7月
No.14	マテリアルフロー分析－モノの流れから循環型社会・経済を考える	2004年10月
No.15	干潟の生態系－その機能評価と類型化	2005年 1月
No.16	長江流域で検証する「流域圏環境管理」のあり方	2005年 4月
No.17	有機スズと生殖異常－海産巻貝に及ぼす内分泌かく乱物質の影響	2005年 7月
No.18	外来生物による生物多様性への影響を探る	2005年10月

「環境儀」

地球儀が地球上の自分の位置を知るための道具であるように「環境儀」という命名には、われわれを取り巻く多様な環境問題の中で、われわれは今どこに位置するのか、どこに向かおうとしているのか、それを明確に指し示すべしという意図が込められています。「環境儀」に正確な地図・航路を書き込んでいくことが、環境研究に携わる者の任務であると考えています。

2001年7月

台志 隆一

(原稿集巻1号「発行に当たって」より抜粋)