



平成25年度（第22回）ブループラネット賞  
受賞者記念講演会講演録

---

松野 太郎 博士

## 日本における地球温暖化・気候変化予測の研究をふりかえる

松野太郎博士

- 地球温暖化の科学と社会の認識（1970年代まで）
- 地球環境問題の社会的認知と気候変化研究の発展（1980年代以降）
- 日本の気候の特色である夏季の対流性降雨はどうか？（最近の研究から）

### はじめに

私は1957年に大学を卒業し、大学院で気象の研究を始めました。そのころから今までを振り返って、「地球温暖化」すなわち人間の活動によるCO<sub>2</sub>の増加がもたらす地球の温度上昇の問題が、科学の問題としてどのように研究が進み、その後現実に起こり得る問題として社会で受け取られるようになり、その社会的課題に対して我々気候の研究者がどのような活動をしてきたかを自分の経験をもとにお話ししたいと思います。

### ●地球温暖化の科学と社会の認識（1970年代まで）

#### 1954、55年のエピソード

私が大学院で気象の研究を始めたのは1957年ですが、その前にちょっぴり、面白いエピソードをお話しします。（スライド4）1954年の夏は大変な冷夏でした。ここに示す図は日本の夏3ヵ月間、6、7、8月の平均気温を記録のある1900年あたりから今年の夏までグラフで示したのですが、1954年は記録的な低温です。その原因として気象学者の間で真剣に取り上げられたのが、その年の春ビキニ環礁でおこなわれた最初の水爆実験です。大気中高くまで巻き上げられた塵によって日射が遮られ低温となったという考えです。大きな火山爆発の後、成層圏に入った火山噴煙由来のエアロゾルによって地球全体が低温になることはいまでは確立し、モデルの検証に利用されるほどです。当時も、火山噴火と地球の低温化は議論され教科書にも載っていました。このような議論があったので、翌55年に行われた五月祭では地球物理学科の先輩の人がこれをテーマとして、展示をしていました。この年55年の夏は一転して暑夏でした。いわゆる「空梅雨」気味ではやくから暑く、平均気温もかなり高くなりました。今度はその事について、新聞に誰かのコメントが出ていたのですが、私のぼんやりした記憶では、何でもCO<sub>2</sub>の増加で気候が温暖となり、その結果日本の梅雨はなくなるのだ、と言う事です。私は、CO<sub>2</sub>増加が温暖化をもたらすことは知っていましたが、現実の問題と結び付けて考えたことはなく、このコメントも本気で考えませんでした。なぜか気になって覚えています。

#### 数値天気予報の研究から実用化への時代そして国際地球観測年（IGY）

大学院に入り、正野重方教授のもとで気象学の研究を始めました。当時の東大の気象研究室では大気の流れを対象とした気象力学、地球大気を扱う流体力学と言えるような研究を中心としていました。また、中心テーマは「数値天気予報」の基礎的・準備的研究が盛んだった時期の終わりごろに当たります。（スライド5）「数値天気予報」というのは、現在気象庁で行われている天気予報の方法ですが、毎日の気象観測データをもとに、気圧・気温・風などの変化を支配する物理の方程式をコンピューターを用いて解き、将来の気象を予報しようとするものです。地球上の大気を100kmくらいのグリッドに区切り、各点での気圧や気温であらわされる気象状態の刻々の変化を計算機で追いかけます。膨大な量の計算を短い時間ですませなければならぬので、大型のコンピューターを必要とします。プリンストンの高等研究所でフォンノイマンが計算機を作り、それを応用する問題として天気予報を取り上げ、気象学者と一緒に実行して論文が出たのが1950年です。（スライド6）日本では、計算機がないのにアメリカの論文を読んで研究を積み重ねるとともに気象庁の幹部に計算機の導入を働きかけ、それが成功してIBM704という当時のスパコンともいえる先端機種を導入が決まったのが1957年で59年に業務開始しました。東大の気象研究室では気象庁、気象研究所の研

究者と協力して、グループを作り準備をするとともに数値天気予報の先の新しい方向の研究もしていました。第1回ブループラネット賞受賞者の真鍋淑郎先生とは、大学院で1年半同じ研究室で過ごしました。この「物理の方程式に従って明日の気象を計算する」という考え方の延長上に、「物理の方程式に従って気候を計算する」、さらには「CO<sub>2</sub>の濃度が増えた時の気候を計算する」という温暖化予測研究の出発点があります。真鍋先生は数値予報実現の10年後くらいから早くもこの方向に向けて研究を開始され一貫して世界の先頭に立ってこられたわけです。

元に戻りますと、1957、58年は「国際地球観測年」、International Geophysical Year、略してIGYと呼ばれる地球物理学にとって大変重要な年でした。(スライド7) 日本では私達の先生であった永田武先生が中心となり、南極に観測隊を送って総合的な観測が始まり、今に続いています。世界全体では、何と言っても旧ソ連が世界最初の人工衛星スプートニクを打ち上げたことです。これは宇宙時代の幕開けを告げるものでした。

地球温暖化にとってもエポックメイキングな出来事がありました。スクリップス海洋研究所のRoger Revelleが弟子のCharles Keeling (ブループラネット賞受賞者) と協力して、ハワイ島マウナロア山で大気中CO<sub>2</sub>濃度の連続観測を始めたのです。以来続いているCO<sub>2</sub>濃度の増加をしめすカーブは、時にKeeling曲線とよばれ、この問題のシンボルとなっています。

#### 1960年代温暖化の科学の基礎がつくられた

1960年代の温暖化の科学についてお話ししますと (スライド8)、Keelingはハワイでのモニタリング観測を続け、CO<sub>2</sub>濃度が植物の光合成による1年周期の変化をしながら全体が徐々に増えていくことが明瞭に示されました。一方、後にIPCC設立の立役者となるBert Bolin (ブループラネット賞受賞者) は地球上各地のCO<sub>2</sub>濃度を測り、緯度分布、高度変化など空間的・時間的変化を明らかにしました。それが基礎となって人間活動により主に北半球でCO<sub>2</sub>が放出されていることが確実になるとともに、その後大気中の循環と海洋や陸域の森林による吸収の解明、炭素循環のモデル化が進むこととなります。

次に、CO<sub>2</sub>が増えた時の気候の変化、これは19世紀以来議論が続いてきた問題ですが、真鍋先生の一連の研究によって、現在につながる科学的知識の枠組みが出来あがりました。まず、大気の温度構造を放射対流平衡によって見事に説明され、ついでその理論の枠組みに立ってCO<sub>2</sub>が増えた大気の温度を導かれました。19世紀以来CO<sub>2</sub>増加による地表温度の増加に関しては有名な科学者の議論がありましたが、真鍋先生の研究は正しい理論的枠組のもと、妥当な実験データを使って計算された最初で決定的なものです。

真鍋先生は数値天気予報の考え方を拡張し物理法則に立って世界の気候を計算する、という分野の開拓者でもあります。その面でも世界の先頭にたつ研究を進めてこられました。CO<sub>2</sub>の増加した世界の気候を簡略化した地形条件のもとで計算した研究を1975年に発表しておられます。いま我々がやっている大掛かりな計算は本質的にはこれと同じで、実際に近い地形条件とか、モデルに取り入れる大気海洋のプロセスを増やし、現実に近づくよう詳しくしているのです。

温暖化理論の基礎について真鍋先生の研究を簡単に紹介します。

(スライド9) 気温の高さ分布はこの図のようになっています。なぜこのようになっているのか? という問いに答えるのは気象学の古典的問題です。中でも地表の温度が平均として15℃であることを説明することから、「温室効果」という概念が生まれました。真鍋先生はこの温室効果を量的に正しく取り扱うためH<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>など温室効果ガスの赤外線スペクトルを計算機による数値計算で丁寧に取り扱いました。それまでの温室効果の議論は簡略化した式で表していたので、理論と実際とを比較する意味がありませんでした。真鍋理論では、さらに大気が不安定になっておこる対流の効果も経験式ながら実際に近い形で扱いました。その結果得られたのが (スライド10) です。理論計算の結果と観測による平均的大気温度分布が示してありますが、二つは区別が困難なほどです。これが、気象学の基本的な問題に対する最初で決定的な理論となったわけです。

大気の温度分布を物理法則に基づいて計算するのですから、CO<sub>2</sub>がなかった場合とかオゾンがない大気とについても同じ理論で計算できます。そうして、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、オゾンの役割が分かるようにしたものが（スライド11）です。H<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>の両方がある場合とH<sub>2</sub>Oのみの場合を比べてCO<sub>2</sub>の役割が分かります。CO<sub>2</sub>が全くないと10℃も現在より低くなります。

この論文は1964年に発表されたものですが、この理論的枠組があれば、CO<sub>2</sub>の濃度が現在と異なるときの温度も容易に計算できるはずですが、ただし、注意しないといけないのは高温になると空気中の水蒸気が増え、その温室効果によってさらに温度が高くなる点です。このことを考えた研究が1967年に発表されました。（スライド12）に示されているのが結果です。表で示すようにCO<sub>2</sub>が2倍になると地表の温度は、2.4度高くなります。先ほどの効果も考え、相対湿度が変わらないとした場合です。もしも水蒸気量の絶対値が変わらなかつたら、温度の上がりには1.4℃に過ぎず、水蒸気が温暖化に加勢し、1.8倍にも拡大します。このように、温度上昇に付随して起こる効果をどうとり扱うかによって、結果は異なります。真鍋先生の理論は地球平均の大気ですが、現在のモデルではもっと多くの付随効果——フィードバックが沢山あり、その扱いの差によって結果がばらつくのです。ともかく、1967年に出来あがった真鍋先生の理論は現在につながる出発点で、揺らぐことはありません。

### 1960-70年代 地球寒冷化と異常気象への関心、気候変動予測が次の目標

再びその後の研究の動きをお話しします。真鍋先生の理論が出たころ、それに対しては気象学の基本問題にこたえる学問的な問題としての関心で、実際と結びつくとはほとんど考えられませんでした。（スライド14）（スライド15）実際の気候の状態は全く逆で、1960年代から70年代にかけては地球寒冷化が起きていることが明らかになり、研究者がその謎にとり組むと同時に社会の関心も呼びました。

この時期、地球全体の寒冷化と並んで、異常気象が社会的に大きな問題となってきました。（スライド16）私は、実際に異常が大きくなったというより、70年代ともなると日本でもヨーロッパでも戦後の成長期に入り産業・経済や人々の生活圏が大きくなり、気候・気象の変化に対して影響を受けやすくなってきたためと思っています。異常気象に関係する現象として、エルニーニョ、テレコネクション、ブロッキング等々についての研究が盛んになりました。これらは今でも異常気象の解説に現れるキーワードです。このような社会的背景のもとで、気象・気候の研究は異常気象を起こす原因の追及に向いて行きました。

こうして世界の気象・気候の研究に新しい流れが生まれてきました（スライド17）。

1960年代電子計算機の誕生によって数値天気予報が生まれたことはお話ししました。それとほとんど同じ時に宇宙から人工衛星で気象を監視することが可能になりました。そこで、未来の天気予報の姿として常に衛星で全世界の気象を監視しながら、計算機の中のモデル大気でそれをシミュレートし、将来を予測するシステムを構築することが構想され、その実現を目指して国際協力による全球大気研究計画、Global Atmospheric Research Program（GARP）が1967-79年に行われました。日本は世界全体を監視する5個の静止気象衛星の一つを分担し最初の「ひまわり」を1977年に打ち上げました。このようにして、現在我々が見ている姿の天期予報が実現したのです。

GARPは大成功で新しい天気予報のシステムが出来あがりましたが、そのころには次の問題として、異常気象を引き起こす気候変動が社会にとって重要な問題となってきました。もっと長期間の予報、今年の夏は冷夏になるか暑夏になるかといった年年の気候の変動を予測することが次の目標になったわけです。そこでGARPを引き継ぎ、世界気候研究計画World Climate Research Programが1979年に開始されました。冷夏暖冬といった年年の気候の違いは大気だけではなく、海面の温度や陸上の積雪の広がりといった大気以外の状態に影響されます。（スライド18）そこで、気候変動を予測するには数値予報の考え方を海洋・陸域の状態にまで拡張し、海流とその変化、海面の温度を物理の方程式に従って計算し、陸上の積雪や土壌水分の量の変化もそれぞれの方程式で計算することになります。大気・海洋・陸域は相互に影響しあう一つのシステムとして変化していくので、それらをひとまとまりの「気候システム」としてとらえ、その変化を数値天気予報

のように物理法則を基に計算して将来を予測しよう、というのが気候変動予測です。

### 1970年代地球環境問題も芽を出す

異常気象や気候変動の研究がクローズアップされていたころ、「地球環境問題」も芽を出してきました（スライド19）。1972年に国連の人間環境会議が開催されました。70年代早くから具体的になった地球環境問題は成層圏オゾン層の問題です。成層圏を飛ぶ超音速ジェット機の開発計画があり、排気中の窒素酸化物が成層圏のオゾン層を分解する触媒作用をすることが指摘されたのです。そのため大掛かりなプロジェクトが立てられ、そのころ成層圏の研究をしていた私は最初の大きな会合で基調講演をしました。このSSTの問題は、それ自体が経済性の問題で取りやめとなりましたが、新たにフロンが分解されてできる塩素がオゾン分解の触媒となることがローランド博士によって指摘されその後米国NASAが中心となって研究がすすめられ、成層圏の大気化学は大変貌を遂げました。

温暖化に関しては、真鍋先生の研究が進むと同時に、もう一つNASAのハンセン博士（ブループラネット賞受賞者）の研究が出てきたところで、世界の気象学の指導的研究者であったMITのチャーニー教授を中心として、米国科学アカデミーが報告書をまとめました。科学の世界から社会への最初の警告と言えます。その中で、CO<sub>2</sub>が2倍になったときの平均気温上昇を3℃±1.5℃と見積もりましたが、この数値と不確定幅は30年以上たった今も変わっていません。日本で温暖化の科学に目を向けると、東北大学の山本義一先生は、早くからCO<sub>2</sub>の放射の研究をしておられ、温暖化問題にも関心を持っておられたので、後継者である田中正之さんは1979年に仙台で日本最初のCO<sub>2</sub>濃度のモニタリングを始め、さらに各地で野外観測を始めました。

### 1960-70年代世界の気象学の飛躍と変貌の時期、日本では？

1960-70年代の世界の気象・気候の研究について話してきました。その間日本ではどうだったかについて触れたいと思います。私がおのち、気候モデルの研究センター設立に努力する出発点となった話しです。（スライド21）

1960年代電子計算機と人工衛星の出現によって気象学・天気予報に革命がおこりましたが、アメリカではそれを支える基礎研究の大型化に対応すべくNSFの資金によるNCARが設立されました。ヨーロッパではアメリカより少し遅れましたが70年代には異常気象や将来の温暖化問題と言った社会的課題にこたえるため、モデリングを専門とする研究組織が各国で作られるようになりました。

日本では60年代のアメリカでの動きに刺激され、63年に若手による将来計画の議論が行われ、NCARに倣って大型の研究、総合的研究の場として「大気物理研究所」を作ろうという運動がおこなわれました。65年に学会会議から政府への勧告がなされ、その後具体案を詰めて72年に京都大学から予算要求をするまでになりましたが、政府の財政状態などから実現は困難で、79年に断念することになりました。（スライド22）私はこの一連の活動に参加しました。私の専門としてきた気象力学では、それまでは多くは理論的な研究でした。私自身の学位論文も赤道域の大気海洋の基本的性質を理論的に明らかにしたものです。しかし、数式の解析だけで調べられることには限界があることは明らかです。一方複雑な対象でも計算機を使って数値的に解ければ現象のメカニズムを明らかにできます。実際、私がアメリカに滞在中に行った成層圏突然昇温現象の研究は計算機の助けを借りて問題を解いたものです。

もう一つ私が日本でモデル研究を行える環境を作りたいと願った背景があります。（スライド23）ここに示しますのはアメリカ気象学会の雑誌に出た記事ですが、第2次大戦後アメリカにわたった日本出身研究者の活躍を分析したものです。私が大学院に進んだころ日本では多くの優秀な人材が数値モデルによる研究を進めたいと願っていました。しかし、当時の日本では、研究の場という面でも、計算機環境でも到底アメリカに太刀打ちできるものではありません。真鍋先生はじめ多くがアメリカに渡り、そこで先輩達は気象・気候のモデル研究で世界をリードしておられました。（スライド24）この系図のようなものに示されるように、私より上の先輩のほとんどがアメリカに行かれ、私は日本に残って研究を続けた世代の最年長者になっていたのです。そこで、大気物理研計画の中にあつたモデル研究を日本でも可能にすること、そのような場を作

ることを自分の役目と思うようになったのです。

## ●1980年代 地球環境問題の社会的認知と気候変化研究の発展

1970年代に科学の世界から警告の出された地球環境問題は、80年代半ばになると一挙に国際政治の課題にまで拡大しました。(スライド26) まずオゾン層破壊の問題で、米国NASAが中心となって進めた大規模な研究によってフロンによるオゾン減少が間違いないものと受け取られ、85年にはオゾン層保護のウィーン条約が出来ました。それを受けて、フロンの使用を制限するモントリオール議定書が87年に成立しました(特定フロンの生産50%減)。88年の初めのころ、私の友人でNASAゴダード大気研究所長をしていたゲラー博士の率いるアメリカのオゾン層科学の代表団が日本政府の対応を促すため訪れ、環境庁と通産省がそれぞれ主催する会合が行われました。しかし、極めて皮肉なことにウィーン条約のできた85年に南極上空の成層圏オゾンが著しく減少するオゾンホールが発見されたのです。それまでのオゾンをめぐる科学からは予想されなかったもので、大きな衝撃を与えました。87年に、2004年にブループラネット賞を受賞したアメリカのスーザン・ソロモン博士が、南極上空の成層圏中に出来る微細な氷の雲(Polar Stratospheric Cloud, PSC)の表面で起こる特殊な反応によって一旦無害化したフロン由来の塩素化合物が再活性化されオゾンを大量に壊すことを明らかにしました。この事実を知らないうちに決めたモントリオール議定書では不十分なので、90年には特定フロンに加え2種の化学物質の使用を一切禁止するロンドン改定が行われました。これが実行に移されると、大気中に蓄積されていたフロンなどによる塩素原子の総量は横ばいから減少に転じ、オゾン層問題は解決に向かって進んでいます。(スライド27:成層圏突然昇温)

オゾン層問題と並んで科学研究の結果から、実際に何も起こっていないうちに大きく取り上げられるようになった「地球温暖化」も並行して国際政治の問題となりました。1985年SCOPEの主催によりオーストリアのVillachで開かれた会議で研究のまとめがなされました。これは後のIPCCのひな形のようなものです。温暖化問題の大きな転機となったのは1988年です。北米では猛暑と乾燥に見舞われ、米国議会で問題となったときNASAのハンセン博士がCO<sub>2</sub>による人為的効果が大きいと証言し、一挙に社会問題となりました。同じ年に行われたトロントのサミットで国連のもとに温暖化の科学をまとめる「気候変動に関する政府間パネル、IPCC」の設立が決まりました。翌89年にフランスで行われたアルシュ・サミットでは気候変動が中心となる議題となりました。90年には第2回世界気候会議でIPCCの最初の報告書を承認し、国連として公式に温室効果ガスの増加による気候変化の可能性を認めたのです。それを受けて、1992年にリオデジャネイロで行われた「地球サミット」で気候変動に関する枠組み条約が締結されました。このように1987年からわずか5年の間に科学の世界で議論されてきた地球環境の問題が国際政治のトップ・アジェンダになったのです。(スライド28) この急速な変化の原因として科学史家の米本昌平氏はゴルバチョフの登場により米ソの対立構造が解消し核戦争の脅威がなくなったため世界のトップが話し合いのテーブルにつかねばならないアジェンダとして地球環境問題が意図的に取り上げられたと分析しておられます。

このように短期間のうちに一挙に国際的な大問題となった「地球環境問題」に関して、日本の政府関係者も重要性を理解し、先ずその科学研究の基礎を固めるための措置を講じることとなりました。(スライド29) 科学研究を担当する文部省と科学技術庁は次々と新しい研究組織を設立し大型研究プロジェクトを立ち上げました。主なものを表にまとめ示します。先にお話ししましたように私は日本でもモデルによる研究を始めたい、そのためには専門の研究組織がいると考えてきました。(スライド30) そこで、1984年に私が東大の気象学の教授になったとき、いずれ社会的に必要とされる事だろうからモデル研究の準備をしようと考え、私自身に大掛かりなモデルの経験がないので、気象庁で数値天気予報のモデル開発に携わっていた住明正さんに助教授としてきてもらいました。彼は、大学院生を指導して少しずつモデルによる研究をすすめ、準備をしていました。そこで、文部省や科学技術庁の地球環境問題対応の新しい展開に際して、住さんの協力を得て積極的に対応してきました。その結果1991年から三つの新しい研究組織の立ち上げに参加するこ

とになりました。

#### ・東京大学気候システム研究センター、(スライド31, 32, 33, 34)

全国共同利用施設として、小さいながら学部から独立した組織とし、全国の関係研究者の協議でセンターにふさわしい人に集まってもらいました。(スライド35) 基本となるモデル開発については気象庁でエルニーニョ予測モデルにかかわっていた木本昌秀さんの参加を得て、温暖化予測に必要な大気・海洋結合モデルが出来、2001年のIPCC第3次報告に独自の結果を出すことが出来ました。そのほか大気だけモデルで成層圏の東西風が約2年周期で変化するQBOと呼ばれる不思議な現象の再現に高橋正明さんが世界で初めて成功するなどの成果が生まれてきました。

気候システム研究センターは、モデル研究ばかりでなく実際の気象・気候の現象について、衛星観測などのデータを用いて解析することも重要なテーマとしています。この面でも中島映至さんが中心となって、エアロゾルの分布や特性を巧みな方法で分析するなどの成果が生まれました。さらに、センターの機能として国際共同研究の日本の受け皿になることも考えていましたが、この面でも日米共同の熱帯降雨観測衛星の日本側PIを新田勅さんが務めるなどメンバー全員が気候研究のセンターにふさわしい活動をしました。(スライド36) 私個人の研究としては大学院生の田辺清人さんを指導した修士論文研究として、簡略海洋循環モデルを作って炭素循環に適用し、CO<sub>2</sub>濃度安定化の検討をしました。実は、1990年のIPCC第1次報告で用いられている簡略海洋循環モデルが、炭素循環を扱うものと気温の上昇を調べるものと同じはずのパラメーターが著しく異なることに気付いたことが動機になっています。この問題への興味はその後も持ち続けています。(スライド37) 1994年の秋、私がセンターを離れた時には、教職員全部で20名、それに大学院生約10名のセンターに成長していました。正規のポジションに加え、伊藤忠商事から寄附研究部門を受けていたことが研究の強化と若手の成長に大きな役割を果たし、感謝しています。

#### ・北大大学院地球環境科学研究科

1994年私は新しく発足した北海道大学大学院地球環境科学研究科・大気海洋圏環境科学専攻の専攻長をお引き受けし、10月に北大に移りました。(スライド38) 地球環境研究拡大の機運の中で新設されたものですが、単に名前をつけたのではなく、低温科学研究所と水産学部には関連分野の研究者が核になり新しいポジション約10名分を用意して日本各地の大学や海外の大学に滞在中の第一線の研究者を集めたのです。新進の気にあふれたすばらしい雰囲気でした。大学院生も、日本各地から集まり多様なバックグラウンドを持ち、新しい大学院を作るのに一緒に努力しました。

素晴らしかったことは、同じ専攻の若手教官がいつも一緒に議論し、昼食も一緒にしたことです。(スライド39) お陰で海洋循環についての知識に自信が持てるようになり簡略海洋モデルについての考えも進みました。勝手にLunch time oceanographerと称していました。(スライド40) そこで、再び修士課程の学生だった前田芳恵さんのテーマとして、簡略海洋循環モデルを取り上げました。極域と海洋本体に分け循環を扱うHILDAモデルと言うモデルが作られ、それを少し修正したBernモデルがIPCC報告で一つの標準のように扱われていました。所が、このモデルで海洋本体の平均湧昇速度が0.6m/年と、一般的に考えられている4m/年に比べて著しく小さいのです。この原因を調べ、より適切な値を求めました。ややこしい議論になりますので、省略しますが、大筋は(スライド41, 42)にあります。

#### ・地球フロンティア研究システム

地球フロンティア研究システムは旧科学技術庁が気候変動や地球環境問題に対応する大型研究プロジェクトとして1997年に開始したものです。(スライド43) 科学技術庁は傘下の宇宙開発事業団(NASDA)が衛星による地球観測を行っており、また海洋科学技術センター(JAMSTEC)ではエルニーニョを念頭に置いた海洋観測網の整備をし始めていました。そこで、これらの観測で得られるデータを社会に役立てるには、どうすればよいか検討し報告をまとめました。報告書のサブタイトルは「地球変動予測の実現に向けて」となっており、これが新しく作られる研究システムの目標を示しています。地球科学の場合、社会に役立つの

は予測です。「地球の変動」の中でどのような予測が必要で、可能であるか検討し6目標を掲げました。これらの目標を達成するため1期10年で2期20年に渡る研究開発を行うこととし、NASDAとJAMSTECの共同事業として1997年10月に「地球フロンティア研究システム」が発足しました。(スライド44, 45) 私は報告書のまとめ役でもあったので、システム長の役を引き受けました。

地球フロンティアでの「予測の実現」のための戦略は、実際の地球の現象をシミュレートできるようなモデルを作り予測をしようと言うものです。中には地球温暖化のように既にほかの研究機関で取り組まれているものもあります。新しく始めるには他にない特色をもったモデル開発をしなければ意味がありません。そこで、東大気候センターの住さんと相談して、(スライド46) に示す方針を決めました。

- (1) 地球温暖化予測は社会的重要な問題でフロンティアも参画すべきである。しかし、既に経験のある東大や気象研があるのに別個に独自に行っても無駄である。先行の東大気候センター・国立環境研の合同チームにフロンティアも参加して、外国に負けない強力なチームを作る。
  - (2) 地球フロンティアには、大気組成、生態系などこれまで普通の気候モデルには含まれていなかった要素のモデル開発計画がある。これらを組み込んで総合的な地球(環境)システムのモデルを開発し、今後気候変化によって炭素循環が変化することまで考慮に入れた進んだモデルとする。
  - (3) 地球シミュレーター計画が進んでおり、その大きな能力を活用することが期待されている。解像度を一段と高めた大気モデル、海洋モデルを開発し、これまで扱えなかった現象、大気なら熱帯の対流を直接格子で表現するモデルを開発し、世界の先頭を切る。
- (2) と (3) のモデルの要点を (スライド47, 48) に示します。

これらのモデルは親組織の海洋開発機構の改編によって地球フロンティアがなくなっても尚、特色のあるモデルとして高い評価を得ています。(スライド49) そこでいま働いている若手と一緒に撮った集合写真を掲げます。

## 地球シミュレーターとそれを用いた気候変化予測プロジェクト

### スーパーコンピューターと気象・気候の研究と予測について (スライド51)。

気象・気候のモデルによる研究は多くの科学分野の中で、もっとも多くコンピューターを必要とするものと知られています。真鍋先生のおられた米国NOAAのGFDLは常にその時代トップレベルの大型コンピューターを持ち、それを少数の研究者が利用することによって、世界のトップを走り続けていたのです。

日本ではそもそもコンピューターの能力が世界水準に及ばない状態が1970年代まで続いていました。気象庁では日本で最大級のコンピューターを設置していましたが、天気予報の業務が中心で、研究利用はわずかでした。大学にも日本でトップレベルのコンピューターがありましたが数か所の大きな大学の計算センターで、利用者は何千人と言う数でしたから、一人で使える計算資源は微々たるものでした。

日本製のコンピューターの能力は70年代末から80年代初めにかけて世界水準に追い付きました。気象研究所が1984年筑波に移転したのを機に研究専用のコンピューターが導入されてようやく世界に追い付くことが可能になり、IPCCの最初の報告に気象研究所では独自の予測結果を何とか出すことが出来ました。

1990年になって温暖化が国際政治の大問題となり、また、日本のコンピューターの能力が高まり、アメリカとの間の貿易摩擦が起こって、国立環境研、防災科学技術研に当時としては大型のコンピューターが導入されました。気象研では国立環境研に設置されたコンピューターを利用し、IPCC第2次報告に世界の他のグループと同じタイプの計算をすることができました。2001年のIPCC第3次報告には気象研と、東大気候センター・国立環境研チームがそれぞれのモデルで予測を行い、モデルのレベルとしては世界の中で真ん中より少し後ろと言うところだったと思います。

このような時に世界トップのコンピューターを開発し、「地球シミュレーター」の名のもと地球温暖化予測始め環境の研究に重点を置いた計画が発足したのです。

(スライド52) 世界トップの計算機の能力の進歩

(スライド53) 地球シミュレーターの概要

(スライド54, 55) : 地球シミュレーター及び地球シミュレーター2の姿

#### 地球シミュレーターを利用した温暖化予測プロジェクト

(スライド56) 文部科学省では地球シミュレーターを有効に利用して地球温暖化予測を実施しIPCC報告に貢献することを目指し、2002-2007年に「人・自然・地球共生プロジェクト」、2007-2011年に「21世紀気候変動予測革新プログラム」という二つのプロジェクトを実施しました。これらのプロジェクトを通して、幸い日本の気候変化研究は世界の中でトップレベルに躍り出ることができましたがそれは大変な経験でした。

(スライド57) 「人・自然・地球共生プロジェクト」に参加した日本の気候モデル研究者は一挙に拡大したESの計算能力にいかに取り組み短時間で成果を出すかと言う大問題に直面しました。IPCC第4次報告書の場合2004年8月末までに計算が完了するよう求められていたのです。(スライド58) 共生プロジェクトは、地球シミュレーターを有効に使用するため、日本の関連研究者が協力して温暖化実験を行えるよう立案され、結果として文字通り「オール・ジャパン体制」が出来あがりました。(スライド59) IPCC報告で中心となる大気・海洋結合モデルによる温暖化実験に関しては、東大気候センター、国立環境研、地球フロンティアの研究者が一体となった実施体制がつけられ、緊密な協力が出来ました。東大の住さん、木本さんによる研究現場での指導・統率がすばらしかったことには感服するばかりです。

ESの能力は既存の計算機の1000倍もありますから、それに合わせて作ったモデルは大きすぎて事前にテストすることができません。実際にESを利用して初めて様々な修正や調整が出来るのです。中には、モデル構造の基本にかかわることが、急きょ改造が必要とわかった点もあります。このように、多くの課題があり、並列計算機としては初めての経験であるにもかかわらず、すべてを含め2年と言う驚くべき短時間で奇跡的に計算が終了しIPCC第4次報告に間に合うタイミングで結果が得られたのです。振り返って住さんは「天佑神助」との感想を言われますがその通りだと思います。付け加えるなら、ESが当初目標よりも実効で3倍速かったことは大きな「神助」であったと思います。

共生プロの成果の二三をお見せします。(スライド60) に示す日本近海の海流、海水温分布はIPCC第4次報告書に最高解像度モデルとして載っているものです。黒潮が蛇行し、銚子沖で東に向け日本をはなれます。これは、20kmメッシュという高解像度で初めて可能で、100kmメッシュでは蛇行など表せません。大気もそれまででない高解像度の100kmメッシュで梅雨前線なども表現可能でした。(スライド61) そこで、温暖化による雨の変化として、以前から指摘されている強い雨が増えるかどうかを調べ、実際に近年おこっている傾向がモデルで示されました。強い雨が増える一方、雨の降らない日も増えるのです。気象研究所のグループは大気だけの20kmメッシュモデルを用い別途求めた温暖化した時の海面温度を大気モデルに与え、温暖化世界での台風を調べました。(スライド62) その結果、熱帯低気圧の数は現在より少なくなるが、(スライド63) 強さを見ると、温暖化世界で最も強い台風は現在最も強いものより強力になることが示されました。全球20kmメッシュのモデルで得られたこの結果は大変貴重なもので、IPCC報告にも記されています。COP(締約国会議)の時の展示や発表を通じて関係者に知られ、特に「南」の国の機関から情報提供の依頼が多くありました。

このように地球シミュレーターと共生プロジェクトによって、日本の気候変化予測研究は一躍世界のトップレベルとなり、特に高解像度モデルによる台風や豪雨に関する予測結果は他にない貴重なものとして世界の関係者に知られました。当然これを引き継いで次のIPCC報告にはさらに進んだ予測結果を出すことが求められます。文部科学省では2013年に予定されるIPCC第5次報告への貢献を目指して、2007-11年度に「21世紀気候変動予測革新プログラム」を実施することとしました。共生プロでは短時間の間に研究者の大変な努力で新しい予測モデルが開発されました。同時に若手が5年間に習得した知識・ノウハウ、それに「オール・ジャパン」の協力体制は共生プロの貴重な資産です。

革新プロ立案に際しては、共生プロでの経験を生かし、社会の必要と科学の前進を考慮して、3種の予測実験とモデル開発を行う事にしました。(スライド64)にそれが示してあります。この中で新しく特色があるのは、2番目の30年先の気候の「予報」です。これまで温暖化予測というのは温室効果ガスの排出を今の勢いで増やしたら100年先にどのような危険があるかを示すことでした。第3次からはいく種類かの場合を想定して排出シナリオを作り一つ一つについて100年先の気候がどうなるかを投影(project)しました。これに対し、30年くらいの近未来なら、現在の排出と大幅に違う事は考えにくいので、前提とするシナリオによらずに未来が決まると考えてよさそうです。要するに「超長期予報」をすることになるので、エルニーニョなど自然の気候変動を含めて予報せねばなりません。天気予報と同じように現在の状態に関する「初期条件」が大事です。このくらいの時間スケールでは海洋中で深さ数百メートルまでの温度分布が重要と考えられます。これは全く新しい試みで科学としても大きなチャレンジです。日本で革新プロ立案の中で生まれましたが、世界も同じ方向を向いていたので、日本が先導してこの型の実験を行う事になったようです。(スライド65)革新プロでは3種の主要予測実験に加え、今すぐ予測には使わないが、将来必要になる先端的なモデルの開発を行い、また、予測のデータを使い、気象災害が将来どうなるかを調べ、対策立案につなげる研究課題を含めました。この成果は多くあるので全体的な紹介は省き、個人的にも興味を持ち、社会的にも重要と思われる夏の対流性降雨が将来どうなるかについてこの後お話しします。革新プロでは影響評価を含めさらに大きな研究者集団により研究がおこなわれました。(スライド66)として昨年2月に行われた最終成果報告会での集合写真をお見せします。

## ●日本の気候の特色である夏季の対流性降雨はどうか？

今年の夏は各地でそれまでの最高気温が更新され、地球温暖化が進んでいることを実感させられました。それと並んで温暖化の進行を示したのが集中豪雨の頻発です。「これまで経験したことのないような」激しい降雨があり洪水を引き起こしました。この言葉は気象庁が人々に特別の注意を喚起するための表現ですが、私は、温暖化によって文字通りこれまで日本の気象にはなかったタイプの対流性降雨が生じ得ると思っています。このような夏の激しい雨、対流性降雨の変化を大事な問題として共生プロ・革新プロを通じて力を入れてきましたので、成果の一端を紹介いたします。

(スライド68)は、気象衛星の画像で2009年6月のものです。特別のものではなく熱帯の雲と中・高緯度の雲のコントラストを示す例です。冬である南半球、中・高緯度には温帯低気圧の大きな雲の帯が見えます。これに対して熱帯域では海の上も陸の上も対流雲の塊が広く散らばっています。この対流雲の塊はクラウドクラスターと呼ばれる独特の構造をしています。それを模式的に示したのが(スライド69)です。積乱雲つまり入道雲が単独でできているのではなく沢山の雲が集まって100kmスケールの塊となり、一つの雲より長時間持続し、かつそれ自体のメカニズムに従って動き、変化していくのです。従って、対流雲も表し得る細かいメッシュが必要です。(スライド70)に示すように、全球20kmメッシュのモデルで、日本周辺の地域だけを5kmのメッシュで詳しく計算するモデルを開発しました。さらに、集中豪雨の多い西南日本に限って2kmという一段と細かいメッシュのモデルを埋め込みました。対流性の雨を出来るだけ正しくシミュレートし、その変化を調べたのです。結果を(スライド71)に示します。各点での雨量を統計的に処理し雨の強さ別出現頻度を示したものです。強い雨ほど出現頻度は小さくなっていきますが、20kmメッシュで得られたカーブでは強い雨が観測よりずっと少なく、急速に減ります。これに対して5kmメッシュで計算した結果は観測の線と区別がつかないほどです。20kmでは集中した強い雨がとらえ切れていないが、5kmなら合格とわかります。5kmメッシュで温暖化した時の雨を調べると、明らかに強い雨が増えています。これをもう一度詳しく見てみます。(スライド72)青い線の現在気候の頻度分布と赤い線の温暖化気候の頻度分布の比をとってみると100mm/日あたりを境にして弱い雨は減ります。これに対して強い雨は温暖化によって増え、日雨量250mm~300mmと洪水の起こるような雨は20%~50%も増えることがわかりました。このような予

測データは将来の洪水防止のための計画に参考にされます。

熱帯では衛星画像で見たようにほとんどの雨は対流性ですからクラウドクラスターを直接モデルで表現することが必要です。先にスライド69で見たように、独特の構造をし、特有のメカニズムで発生・発達・移動するのでそれを直接モデルで取り扱って始めて正しいシミュレーションが出来るはずで**す**。(スライド73) 地球シミュレーターの能力をフルに生かすものとして、熱帯のクラウドクラスターを表し得る5km以下のメッシュによる全地球大気モデルを目標に掲げ、これに応じて佐藤正樹さんをリーダーとする若手のチームがゼロからスタートして開発を進め、2005年に最初の結果が出るころに来ました。以来世界でただ一つの地位を守っています。

熱帯に特有で、10,000kmスケールの対流雲のシステムにマッデン・ジュリアン振動(MJO)というものがあります。(スライド74) に概略を示すように地表では南北両半球にひとつずつの低気圧があり、その間では赤道沿いに西風が吹くというものです。この西風の領域に対流雲が広がっており、システム全体がゆっくり東に動くのです。

天気予報と同じように、インド洋にMJOの雲集団が現れた時を出発点に1月間の予報を試みました。そのうち、2006年のクリスマスから2007年の元日まで1週間は3.5kmのメッシュで計算したので、その結果を衛星画像と同じ形で表現し、本物と比べます。(動画75) 雲の大きな塊がインド洋からインドネシアの上にゆっくり移るのが見事にシミュレートされました。MJOにともなって、しばしば熱帯低気圧が発生します。この場合も3個生まれました。二つはNICAMで見事に再現され、特に計算開始から2週間もたってからオーストラリア北方で生まれた熱帯低気圧がほとんど同じ時期と場所で生まれたのは驚くばかりです。それを(スライド76, 77) にそれぞれ示します。

(スライド78) NICAMがこのように素晴らしい結果を出したので、アメリカのCOLA (Center for Ocean, Land and Atmosphere) を率いてモンスーンや熱帯気象の研究に力を入れているインド出身のシュクラ博士は2008年に行なわれた「世界気候モデルサミット」での議論を踏まえ、高解像度化がモデルの性能に与える効果を確認するため、ヨーロッパ中期予報センターの10kmメッシュモデルとNICAMとをアメリカNSFの援助により専用計算機で長時間走らせるプロジェクトを行いました。結果をきれいな動画に作ってもらいましたのでそれをお見せします。(動画79)

(スライド80) 日本は、ヨーロッパに比べ低緯度に位置します。スペインの南端ジブラルタル海峡は北緯36度ですが、これは日本では筑波の位置です。ヨーロッパの中心的都市ロンドン、パリ、ベルリンはいずれも北緯50度近辺で、日本の近くならサハリンに相当します。これまでの気象学はヨーロッパで発達したため熱帯の対流現象にはあまり重きが置かれていませんでした。これに比べ、日本では梅雨期の雨のように対流を考えなければならぬ気象が多くあり、温暖化を考えるとますます熱帯的になり熱帯の気象に重点を置くのは大事なことです。高解像度モデルで対流性降雨や台風を直接計算することは科学として大変チャレンジングですし、社会の必要にこたえる上でも重要なことは明らかです。その上、このような研究は広くアジア・モンスーン域初め「南」の国の将来気候の予測にも貢献することは間違いありません。

## 結び

今年9月にIPCCによる第5次報告の自然科学的基礎の部がまとめられました。2007年の第4次報告と比べ進んだ所もありますが、温暖化と気候変化予測の研究にはまだまだ解くべき多くの課題が残されています。我々は改めて問題の難しさをかみしめていますが、解けないはずはないとの信念で世界の仲間と協力して取り組んでゆく覚悟です。関係者の方、一般の方々にはあるいはもどかしいと思われるかもしれませんが、研究というものの宿命です。どうか辛抱強く支持し、見守っていただきたいとお願いいたします。



公益財団法人 旭硝子財団

〒102-0081 東京都千代田区四番町5-3 サイエンスプラザ2F

**THE ASAHI GLASS FOUNDATION**

2nd Floor, Science Plaza, 5-3, Yonbancho  
Chiyoda-ku, Tokyo 102-0081, Japan

Phone 03-5275-0620 Fax 03-5275-0871

E-Mail [post@af-info.or.jp](mailto:post@af-info.or.jp)

URL <http://www.af-info.or.jp>