

## 専門分科会「気象学における地球環境問題」の報告\*

地球環境問題委員会

## 1. はじめに

地球環境問題委員会委員長

近藤 豊 (東京大学先端科学技術研究センター)  
前期の地球環境問題委員会委員長の田中 浩氏の以下の記事にあるように、2002年度春季大会に「気象学における地球環境問題」というテーマで専門分科会が開かれた。今回の報告は専門分科会の開催にあたっての田中 浩氏の考え方と、行われた講演の中で「気候変動予測」を中心とした木本昌秀氏と江守正多氏の考えをまとめた記事を掲載する。この分野は地球環境問題に取り組んでいる気象学会会員にとって最も多くの関心があると考えられる。お二人の意見が「地球環境問題委員会」や「気象学会」の考えを集約したものではないものの、第一線で活躍する研究者の「環境問題」のとらえ方には重要な提言が多く含まれている。地球環境問題委員会は来年以降の春の専門分科会で地球環境問題を取り上げ議論を深めていく予定である。今回は誌面の関係で含まれなかった大気組成・物質循環と地球環境問題についても取り上げていきたいと考えている。

## 2. 気象学・気候学と地球環境問題の接点

田中 浩 (名古屋大学大学院環境学研究科)

「地球環境問題を気象学会の立場から考察し、社会に発信するスタンスを探ってみよう」というのが本企画の出発点である。日本気象学会が地球環境問題に対応すべく、理事会の中に「地球環境問題委員会」を立ち上げてから数年を経過するが、社会に対する活動はいまだ行われておらず、どのようなスタンスで社会に臨むかの議論さえ未成熟のままである。このような状況

のもと、まず気象学の研究者にそれぞれの研究から抽出される地球環境問題への描像を語ってもらうべく、2002年度春季大会に「気象学における地球環境問題」というテーマで専門分科会を組織した。十数人の研究者からそれぞれの研究領域における地球環境問題との関わりについて発表が行われた。それぞれの発表には研究面で感銘を受けた部分も少なくないが、地球環境問題との関わりという意味では必ずしも煮詰まった議論が展開されたとは思えなかった。発表者の中から2名の方に地球環境問題と気象・気候学研究との接点、および社会への敷衍について方策を述べてもらい、今後の活動の指針の1つとすることを目指している。もっと多くの方に参加してもらうべきであったが、紙数の制限もあり果たせなかったことをご容赦いただきたい。

人類はその生存のため資源を収奪し、生態系を破壊してきたが、このまま放置すれば人類の生存が危機的状況に陥ることはほぼ確実である。では、どうすればよいのか？ IPCC (2001) には、種々の温室効果気体や硫黄化合物の放出シナリオのもと2100年には平均温度が1.4~5.8℃上昇すると報告されている。気候学にできることはこの数字を示すだけなのだろうか。もっと積極的な役割はないものだろうか。「きっとそのうちに化石燃料が尽きて温暖化は止まるに決まっているさ」と悲観的とも楽観的ともつかない声が聞こえる。「再生可能なエネルギーこそ地球環境を救う唯一の道だ」といって技術の進歩に望みを託す人も少なくない。「戦後の窮乏を思い出せば環境危機なんて怖くはないよ」と強がりという年配者もいるだろう。このような多様な意見をもつ社会人に私たちはどのような対応ができるだろうか。

地球温暖化は産業革命による生産力の急速な増大と、人口の急激な増加が原因であることは明らかである。産業革命以前は二酸化炭素は数千年にわたり280 ppmを維持しており、それなりの循環型社会が継続さ

\* Report on the special session  
"global environmental problems related to meteorology".

© 2002 日本気象学会

れていた。われわれは新しい未来型循環型社会を目指しているが、その具体的な像はまったく見えていないし、それほど順調に軟着陸できるとも思えない。世界の人口は増加しているが、しかし、人口増加率ははだいに減少に向かっていくことも事実であり、数百年後には増加率はゼロとなり安定化した循環型社会が消極的な意味で実現するだろう。しかし、その社会は半砂漠化した荒涼たる世界かもしれないのである。21世紀の100年間こそ問題である。この世紀が乗り切れるかどうか、それもうまく乗り切れるかどうかが人類存続の鍵となることは明らかである。

変革期には指導的な思想潮流が必ず現れ大きな影響を及ぼす。日本では、明治期は「富国強兵」、戦後は「民主主義」、「平和主義」、「経済成長主義」であった。21世紀の思想潮流は「環境主義」に向かうことは必然であろう。しかし、環境主義は民主主義とも平和主義とも異なる思想かもしれない。

加藤尚武著「環境倫理学のすすめ」(1991)は環境倫理の厳しい掟を如実に述べた特筆すべき書物である。地球環境を守ることを至高の目的とするならば、近代思想である自由主義や個人主義、未来世代の利益を考慮しない共時的な法律的・政治的・経済的諸制度は無限の空間においてのみ成立するものであり、有限地球ではもはや有効ではないと述べられている。21世紀の環境絶対主義は個人の権利(あるいは個人の愚行権)をも厳しく制限し、抑圧的な思想形態をとることになろうとも述べられている。

「持続的発展」とはいかににも玉虫色の思想である。どの先進国も発展途上国も熱烈に経済成長を希求している。環境抑制という枠組みのもとで経済成長を達成するためには社会、政治、経済、文化、教育などあらゆる領域の効率化を進める以外に道はなく、悪くすると抑圧的な環境倫理と効率化が結合した悲惨な切捨て社会が実現しないとも限らない。21世紀の気候変化がこのような社会状況の桎梏のもとでの人間活動の動向に依存するものならば、その予測はそれほど単純ではないだろう。

本稿では、先進的かつ意欲的な気候学研究者が未来気候の変動理解に対する方法論、達成可能性、意義などについてそれぞれの見地から語ってくれている。木本さんは、自然の気候変動だけでもわからないことだらけであり、一段高いレベルからの理解(気候力学)が必要であることを力説している。江守さんは不確実な人間社会の変化を気候にいかに取り入れるかのシナ

リオ作りで腐心している。いまだ自問自答の域を出ていないが、一生懸命考えぬくことにしか未来を開けないこともまた真実であろう。彼らの活躍を期待したい。

## 参 考 文 献

加藤尚武, 1991: 環境倫理学のすすめ 丸善ライブラリー, 226pp.

### 3. 気候の自然変動研究より高いリアリズムをめざしてー

木本昌秀(東京大学気候システム研究センター)

#### 3.1 はじめに

地球環境問題の如何にかかわらず、気象学の真髄は気象現象、気象擾乱について研究し、知見をより高く深いものにすることである。研究は好きなことをやるのが一番だ。自分が面白いと思うことをやる。一般社会人からするとうらやましい話である。そんなことで生きていける人は多くはない。だから、研究者になるのは難しく、また、運良くなれても給料はそこそこ...

しかし、アマチュアはともかく、気象で飯を食うとなれば責任も伴う。「好きな研究」もいいが「もとめられる研究」を無視するわけにはゆくまい。地球環境が危機に瀕しているというのがそれに対する専門家の見識は如何? 世間が注目するこれだけの問題にシカトを決め込むようであればプロの資格はない。

だからといって、気象学会の総力を挙げて地球温暖化予測をしよう、というのではない。たしかに、温暖化、気候モデルというわりには直接予測やモデルの改良に碎身する人口の少なさに不満はある。が、それには科学的魅力を十分に引き出せていないせいもあると思っている。

では、どうするのか? ここからは、テーマをしぼらないと話しにくいので、コンピーナから与えられた「気候の長周期変動」、自分の言葉では「気候の自然変動」を例にとって所感を述べることにする。

#### 3.2 気象学は新世紀を迎えている

地球環境問題への関心の高まりと計算機をはじめとする技術の進歩のおかげで気象・気候研究はそれこそ新世紀を迎えつつある。いまや学生の多くが、全球の格子点データは必要なときにインターネットで入手でき、3時のおやつの前には図化が完了するものだと思っている。新しい衛星は(誰のおかげかよく知らないが)どんどん上がるし、モデルだって自分で作るよ

りインターネットで取ってくる方が早い。気に入らなければ他のを使う。あぐくの果てに頼みもしないのに横浜には世界記録を5倍近く塗り替えた地球シミュレータが、どうぞお使いくださいとばかりに鎮座ましまして。金融バブルは過去のことであるが、地球環境バブルは今が真っ盛りの様相である....

しかし、である、若人よ。自然の中に不思議はないか？ 先人の説明に不満はないか？ 手元のモデルは観測データと違わないか？ 気象学の新世紀がほんとうに開けるかどうかは君達の手にかかっている。

### 3.3 地球環境問題が自然の気候変動研究にもとめるもの

そろそろ話を具体化させないとまずい。

自然の気候変動にはさまざまなものが知られている。ブロッキング、太平洋-北米パターン (PNA) や北大西洋振動 (NAO) などのテレコネクションパターン、マッデン-ジュリアン振動 (MJO)、エルニーニョ、太平洋や大西洋の十年規模変動等々々。ひょっとしたら未知のものの方が多いのかもしれない。いま知られている現象の多くは30年前には未知であった。各種の観測データや再解析のおかげで、蒙昧としていた所謂長周期変動の一部に固有名詞がつき、ひとまとまりの現象として認知されるにいたったのである。それだけでも30年前より格段の進歩である。時々長期予報の先輩が「俺らが昔言ったインデックスサイクルとか三波型の気圧パターンとかそういうのも無視しないで研究しろ」という意味のことをおっしゃるが、それらは北極振動などと多少近代的に名前を変えてちゃんと研究されています。予測という観点からすれば、そもそも長期予報は原理的にも難しいから思い通りのペースで点数は上がっていないかもしれないが、大循環モデル (GCM) が予報に使われるなど確実に進展してきている。エルニーニョの力学予報が実用化されたことは気象・海洋業界の特筆すべき成果といってよいと思う。

しかし、ことメカニズムということになるとはなはだ心もとない。上に挙げた例ではわずかにエルニーニョがある程度わかってきたくらいか。そのエルニーニョにしても MJO や十年規模変動との関連や温暖化時の変化になるとお手上げ。そもそも1997~98年のイベントは何故あんなに強力になったのか？ モンスーンへのテレコネクションはいかように生じるのか？

PNA や NAO などの所謂テレコネクションパターンも遠隔熱源に対するロスビー波応答説が有力かと思われた時期もあったが、そればかりではない、という

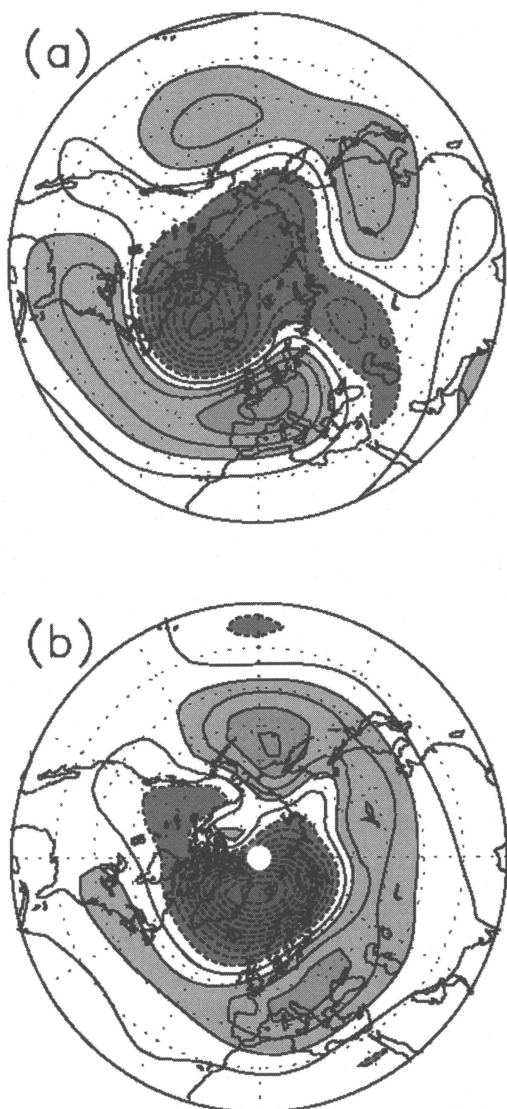
ことがわかってきた。3次元的に曲がった基本場のもとでの摂動？あるいは移動性高低気圧のような高周波擾乱からのフィードバック？そもそもあらゆる可能性の中からなぜわれわれはいつも似たようなパターンばかり目にしなければならぬのか？ PNA や NAO は十年規模変動にも深く関わっているが、一体大気だけでそんな長いメモリを持ちうるのか？ そうでなければ海洋や陸面との相互作用はいかように行われているのか？

地球環境問題に関連の深い話では、台風の個数や強さはどのように規定されるのか、温暖化したらどうなるのか？ モンスーンや梅雨前線帯の豪雨にしてみせしめ。

このように地球環境問題は自然の気候変動についてのわれわれの知識に対して深刻な要求をつきつける。月平均や季節平均などいわゆる平均場の変化だけでなく、平均値まわりの確率分布の変化の予測ももとめられている。いま見る現象の説明もできないのに将来の変化を論ずることはできまい。すみません、わかりません。嘘はつけないからそう言うが、いつまでもそこに甘んじるつもりはない。そう、要求されているのは他でもない自然の変動とそのメカニズムに対するわれわれのより高い知識である。望むところではないか。それこそわれわれ気象研究者の「やりたいこと」そのものではないか。自分自身も含めて地球環境問題という無理な応用問題を解かされるような気分になる人も少なくないと思うが、必ずしもそうではないのではないか？

### 3.4 気候変動の「モード」

ここで少しく個人的な見解を述べる。地球環境問題と関連してくると話はいきおい流体力学中心の気象力学から、海や陸との相互作用やそれに伴う雲、雨の変化というような要素を含む“気候力学”になってくる。引用符を使用したのはまだ確立した用語ではないと思うからである。気象力学にしても気候力学にしても扱う自由度は大きい。風や気温の場所々々での変化をともにそのまま扱ってはいつまでたっても話は混沌を脱しないであろう。気象力学では、地衡風、温度風や重力波、ロスビー波という形で風と気温、気圧の間の関係をつけ、また、低気圧または傾圧不安定波という形で遠隔地間の変数に関係をつけてひとかたまりの現象-「モード」として自由度を落とし、話をわかりやすくしてきたと思う。PNA, NAO または北極振動などというのは、気候力学におけるそのような「モー



第1図 北極振動に伴う400 hPaの高度偏差。(a) 観測、(b) 北半球冬の観測された気候平均場を基本場とする2層線型モデル(Itoh and Kimoto, 1996; T21版)の第1特異ベクトル。

ド」と捉えてはどうか。例えば、NAOは1回1回の出現を見れば微妙に形も位置も持続期間も違っているだろう。よく調べれば励起するメカニズムも違うことが明らかになるかもしれない。しかし、何はともあれ、NAOパターンとして認知が可能で、繰り返しわれわれの目に触れるわけであるから、これを1つの「モード」と捉え、その形成維持、発達励起のメカニズムを調べることに意味はあろうと思う。

もちろん、何でもかんでも名前を付けてモードと呼べと言うものではない。1個の力学的実態として変数間に一貫した関係があることを示す必要がある。Kimoto *et al.* (2001) においてわれわれは、いわゆる「北極振動」とよばれる北半球の偏差パターン(第1図a)が、冬の3次元平均気候場のもとでの摂動に関する数学的特異モード(もっとも減衰の少ないモード; 第1図b)と認知できるという議論を展開した。減衰が効かないのは、軸対称と非軸対称成分間に基本場を介した正のフィードバックが働くからである。他のどの可能性よりも長周期帯で北極振動パターンが卓越し、われわれの目に触れる理由の一端を見た気がする。

同様の手法でWatanabe *et al.* (2002) は、熱帯軸対称モード(Tropical Axisymmetric Mode; TAM)を観測データ、海面水温気候値を与えたGCM、線型計算の3通りの方法で同定した。TAMはエルニーニョとモンスーンの関係にも何かしらの役割を果たすのではないかと考えている。

これらは乾燥大気の力学のみでうまくいくもっとも簡単な例であろう。他のモードでは高周波擾乱との相互作用とか積雲対流群の効果などまで含めた力学を考えなくてはなるまい(実例は省略する)。モードは線型に限ると言っているわけではない。ある現象をひとかたまりの、力学の裏づけのある「モード」と同定できれば、他のモードとの相互作用、外的条件の影響等々について見通しがよくなるのではなかろうかと考える次第である。

まあ、モードといってもいわずに理解の深浅に影響はないのかもしれない。本稿のもとになった学会での講演の後、廣田理事長から「モードはムードに通じる可能性があるね」とのコментарを頂いた。たしかに言ってるうちにわかった気になってしまったのでは困る。

### 3.5 おわりに

気候の自然変動研究においてわかったことは決して少なくないが、わからないことの方がはるかに多い。相関、総観解析や粗いモデルに基づいてわかったように見えることも本当にそうなのかと疑えば実はよくわかっていないことに気づく。

気候変動を対象とした本稿であるが、ぜひ一言だけ触れておきたいことがある。気候モデルによる地球温暖化予測において致命的なのは、熱帯での水蒸気の上方輸送や雲のパラメタリゼーションである、というよく知られた事実である。温暖化の予測は雲物理や雲量

の決定メカニズムにクリティカルに依存する。地球シミュレータでGCMを細かくしても解決しない。

Lindzen ほか (Lindzen, 1990; Lindzen *et al.*, 2001) の指摘に答えるには観測とともに雲解像モデルなどによる研究が切望されていることだけは記しておく。

本稿は、頼まれて弱った挙句、個別研究の話は止めて、とくに若い人に言いたいことを言ってやろうと決めた行った講演をもとにしている。説教じみた物言いはご容赦願いたい。しかし、ものはついでなので、当日発したメッセージをいくつか最後に挙げさせて頂く。

- ・天気図をよく見よう

気象学だから当たり前、のはずなのであるが、簡単に手に入る格子点データ、数値モデルの氾濫により、かえって天気図を見なくなっていないか？ EOF もスペクトルもいいが、マップを見て現象がイメージできなければお話にならない。

- ・仮説を立てよう

風が吹いたら桶屋が儲かるでもよい。データや天気図をよく見て色々考えよう。

- ・仮説は検証しよう

ただし、仮説は検証されねばならない。そうでない仮説は「妄想」と呼ばれても仕方ない。風が吹いたらどういふプロセスを経て桶屋が儲かるのか、それは他の競合する可能性に比べて定量的に卓越するのかを問おう。筆者は、不完全でも数値モデルを上手に使うことが有用であると信じている。

- ・より高いリアリズムをめざそう

モデルの解像度を上げればすむという話ではない。一見わかったような説明も自然界で本当にそうになっているか疑い、より高いレベルでの理解を目指そう。

- ・たまには予測もしよう

予測やデータ同化は現場の仕事、研究は別、といった風潮はないだろうか？ その昔、数値予報の実現を目指して気象力学は発展した。いまなら長期予報であろう（メソも大事）。予測（研究では hindcast）を実際に手がけることで現象もよく見るし、モデルも格段に向上する。

- ・道具は自分で作ろう

研究道具を買ったり貰ったりしたものだけでまかなうのはプロの恥である。何もかも自分で作れとは言わない。いいものは借りてもいい。だが、具合が悪ければ自分で直す。製造元へのフィードバックを心がける。

いかん、説教そのものになってきた。もうやめる。とにかく、われわれは地球環境問題に背を向けるわけにはいかない。堂々と社会の要求を受け止め、プロとして、そしてプロの誇りを一切損なうことなくこれに応えるべきであると考え。多少、時間はかかるかもしれないけれど。

最後に、本稿の機会を与えて頂いた田中 浩先生と紹介した研究の共同研究者である渡部雅浩、F.-F. Jin、安富奈津子、伊藤久徳各氏に感謝します。学会機関誌をアジ演説まがいの原稿で汚してしまったことをお詫びします。

## 参 考 文 献

- Itoh, H. and M. Kimoto, 1996: Multiple attractors and chaotic itinerancy in a quasi-geostrophic model with realistic topography: Implications for weather regimes and low-frequency variability, *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2217-2231.
- Kimoto, M., F.-F. Jin, M. Watanabe and N. Yasutomi, 2001: Zonal-eddy coupling and a neutral mode theory for the Arctic Oscillation, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 28, No. 4, 737-740.
- Lindzen, R. S., 1990: Some coolness concerning global warming, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **71**, 288-299.
- Lindzen, R. S., M.-D. Chou and A. Y. Hou, 2001: Does the Earth have an adaptive infrared iris? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **82**, 417-432.
- Watanabe, M., F.-F. Jin and M. Kimoto, 2002: Tropical axisymmetric mode of variability. Part I: Dynamics as a neutral mode, *J. Climate*, **15**, 1537-1554.

## 4. 地球温暖化の影響対策研究から見た気候モデル研究

江守正多(地球フロンティア研究システム；国立環境研究所より出向中)

高橋 潔・野沢 徹・神沢 博(国立環境研究所)

### 4.1 はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、WG1. 気候変動の科学、WG2. 影響・適応策、および WG3. 緩和策の3つの作業部会 (WG) から構成されており、政策決定者等に向けた気候変動に関わる総合的な科学的知見を提供するよう設計されている。気象学が直接関わるのは WG1 であり、日本気象学会においてもこれに関わる研究活動が活発に行われてきているが、そ

これらの活動が IPCC 全体における自らの位置付けについて自覚的であったとは必ずしも思われない。気象学が他の学問分野と連携して地球環境問題への有効なアプローチの一端を担っていくためには何を考える必要があるのか。ここでは、IPCC における気象学的活動として特に象徴的でもある、気候モデルによる将来の気候変化見通し研究を中心に、これを考えてみたい。

こんなことを言い出した背景には、国立環境研究所において気候モデルと影響対策の両研究グループが有機的な研究協力を模索して議論を重ねてきたことがある。さらに言えば、主著者（江守）の動機には、100年後にならないと完全には検証できないような地球温暖化という問題に、現在の不確実な科学が「十分に科学的に」取り組み得るのかという疑念、その不確実な科学への社会からの過大な期待というジレンマ、そういったものに対して感じている居心地の悪さがある。

今回、2002年度春季大会「地球環境問題」分科会での発表を契機に我々の考えをまとめ、さらにコンペーナの田中 浩先生のお勧めにより、ここにその報告をまとめる機会を頂いた。これを我々の「不確実な科学による温暖化への有効なアプローチを考える」ための一歩としたい。

## 4.2 地球温暖化のシナリオ分析とその意義

### 4.2.1 地球温暖化のアセスメント

将来に向けて徐々に顕在化しつつある地球温暖化の問題に関して、政策決定者に直接有用な知見とは例えば以下のようなものである。

- ・温室効果気体の排出削減対策（緩和策）と、温暖化の影響に社会が適応する対策とでは、両者をどのようなバランスで取るのが最も低コストか。
- ・将来の世界がどのような方向に発展することが、温暖化対策を講じる上で最も望ましいか、またどのような方向が望ましくないか。
- ・将来の世界がどのような方向に発展したとしても有効性が高い（ロバストな）政策は何か。

これらの問題にアプローチする上で、将来に関する何らかの推計を行うことは必要不可欠である。それがいわゆる地球温暖化のアセスメントである。

IPCC の企てでは、3つの WG の連携により地球温暖化の総合的なアセスメントが以下のような手順で行われることになっている。

- ① 世界の社会経済発展シナリオ (WG3)
- ② 温室効果気体 (GHG) 等の排出シナリオ (WG3)

③ GHG 等の大気中濃度シナリオ (WG1)

④ 気候変化シナリオ (WG1)

⑤ 影響評価 (WG2)

⑥ 緩和策 (WG3)・適応策 (WG2) の検討

ここで、手順の下流側は、上流側の結果をシナリオとして前提に用いる。例えば、③の大気中 GHG 等濃度シナリオは②の排出シナリオを前提とするし、⑤の影響評価は④の気候変化シナリオを前提として用いる。では、その最上流である 1. の社会経済発展シナリオとは、如何にして作られるのであろうか。

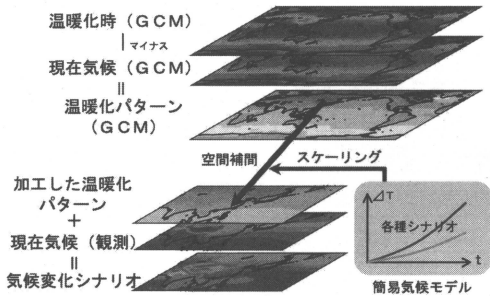
### 4.2.2 IPCC SRESに見られるシナリオ分析

2000年にまとめられた IPCC の「排出シナリオに関する特別報告書」(Special Report on Emissions Scenarios; SRES)における排出シナリオ（社会経済発展シナリオを含む）の作成過程は以下のものであった (IPCC, 2000; 森田・増井, 2000)。

- ① 既存の排出シナリオのレビュー
- ② 叙述的シナリオ（ストーリーライン）の作成
- ③ 定量的シナリオの作成
- ④ インターネットによる公表と意見聴取（オープンプロセス）
- ⑤ 定量的シナリオの改良

ほぼ全員が自然科学者であるだろう「天気」読者の皆さんが、これらの過程を見て「科学的」と感じられるかどうかは甚だ疑わしい。しかし、この一連の過程には、不確実な問題に最大限合理的にアプローチするための知恵が随所に見出される。後述するが、そのような知恵こそが、不確実な気候モデルを用いて将来の気候変化について言及する際にも参考になるのではというのが我々の考えである。

考えてもみて欲しい。将来の社会経済を考える場合、問題とする系は、政治体制、価値観など、人々の意識的または無意識的な各種判断に依存した要素を含み、これらの将来変化を予見することはまず不可能である。そこで、そのような要素については、考えられる可能性を幅広く網羅した複数のストーリーラインとして記述する。その上で、人口、経済発展、エネルギー利用、土地利用などの諸要素の変化を、既知の自然科学的、社会科学的諸法則に照らして整合性を保つように、数理モデルを用いて定量的に推計する。最後に、オープンプロセスにより寄せられる多くの質問やコメントに答え、また改訂が施される。IPCC SRES では、このような網羅性・整合性・公開性をもって、極めて不確実な将来への言及に、ある種の合理性・科学性を



第2図 気候モデル(GCM)の温暖化実験結果から影響研究のための気候変化シナリオを得る手順の概念図。

担保しているのだと言える。

このように、ストーリーラインと数理モデルの相互連携によって複数の内部整合的なシナリオを作成し、不確実な未来の事象にアプローチする方法はシナリオアプローチないしはシナリオ分析と呼ばれる(松岡ほか, 2001)。上述したようにSRESの排出シナリオ作成過程はシナリオ分析の1つであるが、これを含むIPCCのアセスメント全体が1つの大きなシナリオ分析と見ることもできる。このとき、気候モデルは、各ストーリーラインに沿ったシナリオ中の自然科学的整合性を保つための、数多くある数理モデルのうちの一つとして位置付けられる。そして、気候モデル業界の外からIPCC的な文脈で気候モデルを眺める人々は、まさにそのような役割を気候モデルに期待しているものと思われる。その感覚は、気候モデル業界の中だけから外を眺めていてもなかなか理解しにくいものではなからうか。

#### 4.3 気候モデル研究と影響研究の溝

##### 4.3.1 影響研究者と気候変化シナリオ

次に、気候モデルによる気候変化シナリオの下流である、影響研究について見てみたい。一口に影響研究と言っても、その分野は気象・気候災害、水資源影響、農業影響、健康影響、生態系影響など非常に多岐にわたる(IPCC, 2001)。しかし、それらの多くは、気候モデルによる気候変化シナリオを以下のような共通な作法で用いる(第2図)。まず、気候モデルにより計算された温暖化時の気候から、同じ気候モデルによる現在の気候の計算結果を差し引き、これを「温暖化パターン」とする。この温暖化パターンに、空間補間とスケーリングによる加工を施す。すなわち、影響研究者が必要とする気候変化シナリオの空間分解能(例えば数10

km以下)は、現在温暖化の実験に用いられている気候モデルの分解能(数100 km)よりも小さいため、空間補間が必要となる。また、気候モデルによる気候変化シナリオはそれほど多くのシナリオ(ストーリーライン)について作成されないで、多数のシナリオに対して簡易気候モデルにより見積もられた全球平均気温上昇量などを使って、温暖化パターンの全体に定数を乗ずるスケーリングを施し、多数のシナリオに対応する気候変化シナリオをどうにか得ようとするのである。最後に、こうして加工した温暖化パターンに現在の気候の観測値を加えたものを、気候変化シナリオとして用いる。現在の気候の観測値を噛ませるのは、影響研究者達が、気候モデルの持つ系統誤差(バイアス)に自覚的な証拠である。

##### 4.3.2 影響研究者の言い分

以上の手順を見れば、影響研究者の多くが、現在の気候モデルの出力結果が、彼らが期待するよりも

- ① 空間解像度が粗い
- ② シナリオの数が少ない
- ③ 現在気候再現におけるバイアスが大きい

と感じていることは明らかである。温暖化アセスメントの有効性の観点から考えれば、もしも空間解像度の細かい結果を用いて地域的な影響評価が可能ならば、

- ・農業管理計画や治水計画などの地域的な適応策の提言ができる。
- ・各国への温暖化影響(被害)を具体的に示すことによって、京都議定書のような緩和策(排出削減)を議論する国際交渉における各国のスタンスに影響を及ぼす。

などといったことが考えられ、有意義である。また、もしも多数のシナリオを用いた影響評価が可能ならば、前に述べたことの繰り返しになるが、

- ・多数のシナリオにおいて有効(ロバスト)な政策が何かを検討することができる。
- ・進むべき/避けるべき世界発展の方向についての国際的な世論形成に影響を及ぼす。

といったことが考えられ、やはり有意義である。空間分解能の細かい気候変化シナリオを得る方法には、単純に空間内挿を行う以外にも、地域気候モデルを利用した力学的ダウンスケーリング、過去の気象場の統計的關係を利用した統計的ダウンスケーリングが試みられているが、いずれも決め手になるほどの実用性は確立されていない印象を受ける。

その他にも、影響研究者と実際に話をすると、彼ら

は

- ④ 影響研究者が利用できる出力の時間分解能が粗い
- ⑤ 影響研究に必要な変数の種類が揃っていない
- ⑥ 新しい実験結果を影響研究者が利用できるまでに時間がかかる

と感じていることが分かる。時間分解能については、例えば月平均降水量のデータでは洪水の発生について十分に議論することができないので、せめて日平均のデータが欲しいということなどがある。

#### 4.3.3 気候モデル研究者の言い分

これらに対して、気候モデル研究者の言い分はおそらく以下のようなものである。①の空間解像度が粗いことについては、計算機資源の制約によるので仕方が無い。②のシナリオの数については、これも計算機資源の制約、取り扱うデータが膨大になること、モデルの実行にかかる手間を考えると、少ないシナリオで勘弁してもらいたい。③のバイアスについては、もちろん小さいに越したことはないので努力はしているが、パラメタリゼーションの不確実性というものがあるので、あなた達が想像するほど簡単によくなるものではない。例えば、解像度が上がったらすぐにその分だけよくなるものでもない。④の時間分解能については、出力するのは簡単だが、やはりデータが膨大になるので大変である。⑤の変数の種類は、影響研究者と話したことが無いので何が必要なのか分からない。⑥の最新の結果の提供については、むしろ影響研究者側がどのように気候モデラーにコンタクトしてデータを求めたらよいか分からないことが大きいのではないか。

上記に並べた観点の大部分は、計算機資源と人的資源（突き詰めて言えば研究予算）が足りれば済むことであるか、もしくは影響研究者と気候モデル研究者の間のコミュニケーションが足りれば済むことである。しかし、もっと重要な観点は別にあるのではないか。例えば、解像度の高い計算ができたとしても、その結果に意味があるかは別だ、ということである。すなわち、亜大陸規模程度の大規模な温暖化パターンに関しては、いくつものモデルで計算して欲しい同じようになるし、メカニズムの説明も欲しいので、それを元にいろいろ議論して頂いてもまあよい。ところが地域的な温暖化パターンは、モデルによって結果が違ふし、メカニズムの議論もまだまだなので、それを元に影響などの議論をするのは尚早だ、ということである。早い話が、モデルの不確実性をよく知っている

ので、結果に意味があるか自信が無いのである。高い時間分解能の出力も、多種類の変数も、最新の結果も、意味があるか自信が無いのであまり見せたくない。そのような結果が政治的な文脈で1人歩きされても責任が持てない。定量的な数字も、2℃なのか3℃なのかと問われても、意味のある精度で答えることができない。

#### 4.4 有意な連携に向けて

##### 4.4.1 連携に向けての取り組み

総合的な温暖化のアセスメントを目標としたIPCCにおいては、当然上記のような問題が議論され、気候モデル研究者と影響研究者の連携に向けての取り組みが行われている。「気候影響評価のためのシナリオに関するタスクグループ」(Task Group on scenarios for Climate Impact Assessment; TGCIA)の活動がそれである。TGCIAでは、WG1, 2, 3の研究者が協力して、

- ① 影響研究者からの要望に関する気候モデル研究者とのコミュニケーション、気候モデル研究者へのリコメンデーション
- ② 気候モデルの計算結果データ及びモデルの情報に関する系統的なデータ配信(Data Distribution Centre; DDC; <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>)
- ③ 影響評価の方法論のガイドライン作成

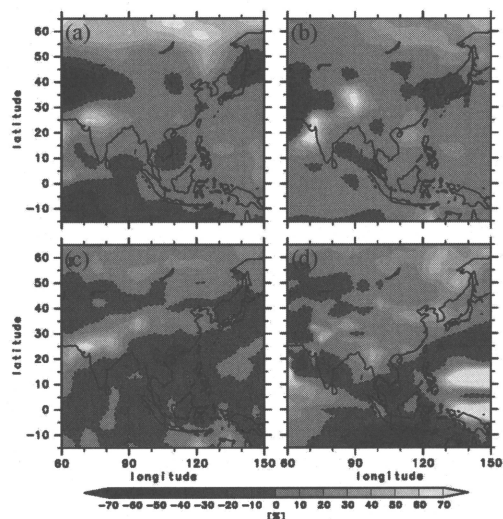
といった活動を行っている。特に外部から見て分かりやすいのは②のDDCであろう。DDCから取得できる気候変化シナリオを用いて、多くの影響研究が行われている。

日本国内においても、例えば国立環境研究所では、多数のシナリオに基づく気候モデル計算を行い、それらを用いた農業影響などの評価を始めたところである。2001年にスタートした科学技術振興調整費課題「21世紀のアジアの水資源変動予測」(代表：気象研究所 鬼頭昭雄室長)では、土地利用変化シナリオ、全球・地域気候モデル、水資源影響の研究者がコミュニケーションを取りながら研究を行っている。また、2002年にスタートした文部科学省の「人・自然・地球共生プロジェクト」では、世界最高速のスーパーコンピュータである「地球シミュレータ」を用いて、多数のシナリオについての高解像度の気候モデル計算が行われる予定である。

##### 4.4.2 気候モデル研究にもオープンプロセスを

このように、前段の問題、すなわち研究予算の問題





第3図 4つの異なる気候モデルにより、同じシナリオ (A2) の元に計算された、2071～2100年で平均したアジア域の降水量変化分布。それぞれのモデルの現在 (1961～1990年) の分布からの変化の割合 (%) で示した。(a) CCSR/NIES, (b) CSIRO, (c) CCCma, (d) HadCM3.

とコミュニケーションの問題については、取り組みが始まっていると言ってよい。残される本質的な問題は、気候モデルの不確実性を気候モデル研究者と影響研究者の間でどう捉えていくかである。

例えば、第3図は IPCC DDC より取得できるデータを用いて作成された、4つの異なる気候モデルによる東アジア域の将来の降水量変化パターンである。同じシナリオを用いているにもかかわらず、4つの図はよく似ているとは言い難い。このような図を日々目している影響研究者達が、気候モデルの不確実性について無自覚であろうはずは無い。しかし、このような結果の違いをもたらすモデルの違いを知ろうにも、彼らが知り得るのは、IPCC DDC で提供されているモデル情報の中の、解像度の数字や計算スキームの名前だけである。

ここで我々は、前に述べた IPCC SRES シナリオ作成過程における、オープンプロセスに注目したい。気候変化シナリオに対しても、同様な方法が有効ではないだろうか。すなわち、DDC の要領で気候変化シナリオのデータを公開し、そのホームページ上で質問やコメントを受け付け、返答し、それらを公開するのである。影響研究者からは、例えばこのような質問が寄せられる。

「あなたのモデルでは○○地域で気温上昇が大きいですが、本当であればそこでの農業被害は深刻であろう。なぜそこで気温上昇が大きいのか？」また、他の気候モデルグループから、このような質問も来るだろう。「そちらのモデルでは××地域の乾燥化が顕著だが、うちのモデルでは湿潤化している。そちらの乾燥化のメカニズムは何か？」

これらに対して、基本的には、指摘のあった現象のモデル中でのメカニズムを調べ、返答する。場合によっては、「そのような小スケールの現象をモデルは正しく表現していないので、それについては議論しないで欲しい」というように不確実性を宣言する必要もあるだろう。あるいは、メカニズムを調べるうちにモデルの間違いが見つかるかもしれない。このようにしていけば、「モデルの信頼度」はある意味において格段に向上するだろう。

結局、ここで行われるべきことは、モデルで実験をしたらモデル中のメカニズムをよく解析しようという、全く当り前のことを、影響における重要度と他のモデルとの違いにフォーカスしながら、迅速かつ開け広げに行う、というだけである。このような過程から、例えば、影響において重要なある現象について、異なる結果をもたらすモデル間でのメカニズムの違いが浮かび上がり、どちらのメカニズムが尤もらしいかを白黒付けるために必要なモデルの高度化、必要な観測は何か、というような議論が発展するとすれば、これを建設的な地球環境科学の発展と呼ばずして、何をそう呼ぶのか。

#### 4.5 おわりに

気候モデルで IPCC 的な実験を行うことにどれほどの意味があるのか懐疑的であった方々に対して、それが有意味であること、あるいは、やり方によっては有意味であり得ることを、なんとか説得するつもりで書いてみたが、成功したかどうか分からない。

現状の不確実な気候モデルを用いて、さも温暖化の将来「予測」が可能であるかのような顔をして研究予算を取ってくることは、研究者としての自尊心が許さない。逆に、不確実なことしか言えないからといって社会に対して沈黙してしまうこともまた、研究者としての自尊心が許さない。そんなふうに感じている研究者が連携して、第三の賢明な道を模索していけたらよいと思う。

謝 辞

本稿の執筆を薦めて頂いた名古屋大学の田中 浩教授に感謝します。また、本稿の構成に直接間接にご助言、ご協力を頂いた、国立環境研究所の森田恒幸部長、原沢英夫室長、甲斐沼美紀子室長、増井利彦主任研究員、京都大学の松岡 譲教授に感謝します。

参 考 文 献

IPCC, 2000 : Special report on emissions scenarios, N. Nakicenovic and R. Swart (eds.), Cambridge Uni-

versity Press, Cambridge, UK, 612pp.

IPCC, 2001 : Climate change 2001 : Impacts, adaptation and vulnerability, J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken and K. White (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1032pp.

松岡 譲, 原沢英夫, 高橋 潔, 2001 : 地球環境問題へのシナリオアプローチ, 土木学会論文集, 678/VII-2, 1-11.

森田恒幸, 増井利彦, 2000 : 気候変化予測のための排出シナリオ, 天気, 47, 696-701.

新刊図書案内

| 表 題  | 編 著 者   | 出 版 者           | 出版年月    | 定 価    | ISBN          | 備 考  |
|--|---|-----------------|---------|--------|---------------|--|
| 新しい航空気象  | 橋本梅治<br>鈴木義男                                      | クライム気象<br>図書出版部 | 2003.03 | ¥9,381 | 4-907664-45-1 | 昭和29年初版の改訂12版  |
| 気象予報士試験<br>問題と正解<br>平成14年度第2回                    | 気象業務支援セ<br>ンター                                    | 気象業務支援<br>センター  | 2003.03 | ¥1,680 |               | 気象業務支援センター<br>Tel. 03-5281-0440<br>Fax. 03-5281-0445<br>URL : www.jmbssc.<br>or.jp |
| 地球温暖化研究の最前<br>線<br>環境の世紀の知と技術<br>2002            | 総合科学技術会<br>議環境担当議員<br>内閣府政策統括<br>官 (科学技術政<br>策担当) | 財務省印刷局          | 2003.03 | ¥1,500 | 4-17-264130-X |  |
| 理科年表ジュニア<br>第2版                                  | 理科年表ジュニ<br>ア編集委員会                                 | 丸善              | 2003.03 | ¥1,400 | 4-621-07214-5 |  |
| エルニーニョと地球温<br>暖化                                 | 住明正   | オーム社            | 2003.04 | ¥2,200 | 4-274-19701-8 |  |
| 気象予報士試験<br>模範解答と解説<br>平成14年度第2回                  | 天気予報技術研<br>究会                                     | 東京堂出版           | 2003.04 | ¥2,200 | 4-490-20495-7 |  |
| 天気図の見方と調べ方                                       | 土屋喬<br>稲葉征男                                       | オーム社            | 2003.04 | ¥2,600 | 4-274-19702-6 | 新田尚監修  |
| 日本の猛暑はどこから<br>来るか<br>非地衡風による気象学                  | 光藤高明  | 新風舎             | 2003.04 | ¥2,857 | 4-7974-2749-3 |  |
| 気象のしくみと天気予<br>報                                  | 上村喬<br>明石秀平                                       | ナツメ社            | 2003.05 | ¥1,350 | 4-8163-3458-0 |  |
| 真壁京子の気象予報士<br>試験数式攻略合格ノー<br>ト<br>数式大嫌いの人に贈<br>る! | 真壁京子<br>大野治夫                                      | 週刊住宅新聞<br>社     | 2003.05 | ¥1,800 | 4-7848-0691-1 |  |

注 : 表中で定価はすべて本体価格です (特記したものを除く)。