

## わが国の気候変動研究計画 (WCRP)\*

## 4. 気候モデリング\*\*

## 世界気候小委員会 気候モデリング作業委員会

## 1. はじめに

世界気候小委員会の中に、気候変動研究計画推進のための各種の作業委員会が設けられたのは1979年秋であった。2, 3度集って協議してみたが、対象が広すぎ、数年後にスタートしようとする短期計画に何を対象とすべきかを決めかねた。その判断の道を探るために、1980年1月、この分野の研究に関心を持つと思われる研究機関や研究者にアンケートを出し、計画への参加の意向や計画の進め方などについての意見を求めた。その時、十数の研究機関、20名を越す研究者から広範囲のテーマが寄せられたのであるが、それ等を1つのプロジェクトにまとめるのは、かなりの無理を生ずる事を痛感した。その年の9月に、気候診断作業委員会との合同で検討会を開催し、計画の進め方についての自由討論を行い、協同研究やサブ研究グループの結成の必要性などが提案された。さらに1981年1月には、具体的な5か年計画作成を目的として拡大作業委員会を、以下の問題について討論されることを期待して開催した：

- 1) 気候モデリング研究計画の基本方針について
- 2) サブ研究グループの必要性について
- 3) 協同研究の必要性について
- 4) 5か年計画の組立について
- 5) 作業の分担その他

しかし、討論の焦点は気候変動研究計画のあり方に終始し、気候のような膨大で莫然としたものを対象として、1回限りの5か年計画という短期決戦をしようすることは極めて危険であるとの強い反論が出され、計画案作成はペンディングとなり、上記の項目もその場では討論されずに終わった。作業委員会として、はっきりした目標を提示出来なかったことにも大きな原因があったと言える。

その後作業委員会の活動は休止していたが、世界気候小委員会での取り決めにより、9月に再度アンケートを出し多数の研究者からより具体的な回答を得た。

この報告では、まず「気候モデルの開発とその応用」の対象とする分野について総括し、次に今回のアンケートの取りまとめ、最後に研究の進め方についての提案を示す。

## 2. 気候モデルの開発とその応用

気候変動研究計画において、気候モデリングの研究が占める位置は第1図のように考えられる。研究の第1フェーズは、力学的計算スキーム、気候形成に重要なサブシステムのモデリング(パラメタリゼーション)の研究およびそれ等を導入した大気および海洋の大循環モデルの開発と改善である。第2フェーズは、両者を一体化する大気海洋結合モデルの開発である。これは一応気候モデルと言えるものである。そして第3フェーズとしては、地球化学生物サイクルや植生の変化、その他可能なすべてのフィードバック系を導入した総合気候モデルの確立を目指すことになる。また第1, 第2, 第3フェーズを通じて、それぞれの段階で開発された大循環モデルあるいは気候モデルを用いて、感応性実験が積極的に実施されると共に気候予測の可能性にメスが入れられることとなる。

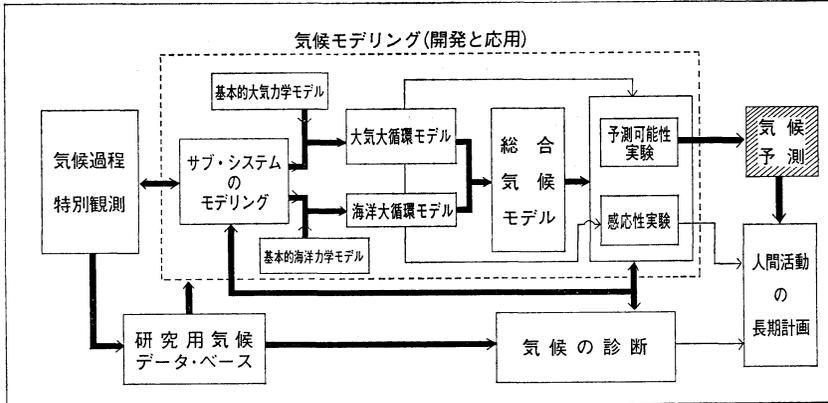
気候過程の特別観測は、サブシステムのモデリングに有効な資料を与えることを主目的として実施され、気候診断の研究で得られる結果は大循環および気候モデルの改善と検証のために欠かせない情報を提供するものである。

## 2.1. 気候モデルの開発

気候モデルの開発は、上述のように WCRP にとって必要欠くべからざる柱の1つである。気候システムとは、すでに述べられた如く、大気・海洋・陸地表層・雪氷圏および生物圏の5つの体系からなり、幅広い空間および時間スケールにわたり、複雑な相互作用を及ぼし合

\* World Climate Research Programme in Japan.

\*\* Climate Modelling (執筆) 片山 昭 (気象研究所予報研究部)



第1図 気候変動研究計画における気候モデリングの役割. 太線矢印は基本ルート, 細線矢印はバイパス・ルート.

っている。そのため、気候およびその変化・変動の機構を理解しようとする場合、高度に構成された気候モデルによる研究が本質的な役割を果すことになる。最も総合的な気候モデルは、気候システムに関連するあらゆる物理変数やパラメータを複雑な相互作用のもとに動的に記述し得るものでなくてはならない。このようなモデルが近い将来に完成するとは到底考えられないが、何等かの簡略化を施した妥当な総合気候モデルを20世紀末まで実現させたいとの願望は強いものである。

気候モデルは5つの体系を記述すべきであるが、研究を効率的に進めてゆくためには、それ等のプライオリティを考える必要がある。気候そのものは大気の統計的狀態であるから、第1の優位性は大気大循環に与えるべきである。第2の優位性は、地球の3/5を覆い、流動性があり、熱および運動についての慣性の高い海洋の大循環にある。残りの雪氷、陸地表層および生物の3つの体系は、大気と海洋の動向への依存性が強く、サブシステムとしての座を与えるのが妥当であろう。

大気大循環モデルについては、その複雑さの度合によって種々のものがあり、その分類の仕方も様々であるが、ここでは下記のような分類を採ることとする：

- i) 全球3次元モデル
- ii) 帯状平均モデル (南北2次元モデル)
- iii) 熱収支モデル (1次元あるいは2次元モデル, 運動は陽には含まない)
- iv) その他

この中で、開発の本命は全球3次元モデルである。これは現在すでに実用化されている短期や中期の数値予報モ

デルの延長線上にあり、その研究も軌道に乗っている。今後の問題は、計算スキームの改善とサブシステムのモデリングの開発と改善である。計算スキームの面では、山岳と極地方の取扱いの改善である。特に山岳に関しては十分満足し得るスキームは無く、その解決への努力が強く望まれる。一方、サブシステムのモデリングでは、大気境界層と積雲対流群のパラメタリゼーションの改善、雲と放射のモデルの開発、関連体系としての陸地表層、雪氷および生物(主として植物)圏をどの程度どの様にモデル化するかが焦点となろう。その中で最も重点を置くべきは雲の問題である。雲のモデリングに要求されるのは雲型別の雲量、雲高、雲厚やその雲水量を診断あるいは予測すると共にその放射特性を記述し、雲の分布と放射収支の間に介在する敏感な反応を正しく再現することであり、極めて厳しい課題である。

全球3次元モデルの開発には、スーパー・コンピュータを十分使用し得る環境に恵まれることが前提条件であり、コストは高価なものとなる。これに対して、帯状平均モデルや熱収支モデルによる計算時間は、全球3次元モデルの数百分の1以下であり安価であるが、上手く問題を把握し、それに適したモデルを作る時、有用な情報を与えられ得ることを忘れてはならない。ただこの場合、サブシステムのパラメタリゼーションは全球3次元モデルに対するよりも一段と省略化が必要となり、かえって難しいものとなる。例えば、帯状平均モデルの場合、運動量の南北輸送を如何に表現するか、海陸分布や山岳分布の効果をどうするかといった恐るべき困難さを解決しなければならない。熱収支モデルでも熱の南北輸

送を正確に表現しようとする時、大きな困難を味わうことになる。しかし、熱収支モデルの目的とするところは、現実の気候を正確に再現することではなく、熱を気候を支配する主体として、気候およびその変化の抽象的原理を探ることである。そのため、そのモデルの構成は研究者のフィロソフィに支配され、創造的部分が多く、今後とも研究されるべき分野である。

海洋の大循環モデルは、流体力学としての原理は大気と同様であるにもかかわらず、現在初歩的段階にしかない。その主な原因は、シノップチックな観測の困難性から海水の運動に関して未知の部分が多く残されているからである。海洋大循環のサブシステムとして重要であると現在指適されているものは、中規模うず・海洋混合層および海氷である。200 km 前後の中規模うずは海洋の保持する運動エネルギーのかなりの部分を受け持っており、運動量や熱の輸送への寄与も小さくない可能性がある。大気中の中間規模じょう乱のパラメタリゼーションが困難のごとく、この中規模うずのモデル化も簡単なものでなく、あるいは当分不可能でないかと憂慮されている。もし不可能ならば、海洋大循環モデルにおける格子間隔は 50 km かそれ以下を採用せざるを得なくなり、膨大な計算が要求されることになる。海洋混合層のモデリングは表面海水温の予測に不可欠であり、海氷の消長は冷源域である高緯度の海空間の熱交換に多大の影響を与えるゆえに、そのモデリングは重要である。

以上の大気と海洋の大循環モデルの開発は、原則的には並行して推進されるべきであり、その両者が納得し得る段階に到達してから大気海洋結合モデルへの開発に着手するのが理想的であろう。しかし現在、海洋モデルは大気モデルよりかなり遅れており、今後もその差は拡大する傾向を内在している。この見地から、原則あるいは理想論にこだわることなく、海洋大循環モデルの開発にわずかの時間ラグを保ちつつ並行して大気海洋結合モデルの開発を推進するのが得策であろう。世界的にみる時、結合モデルの先駆的研究は GFDL (地球流体力学研究所) の Manabe-Bryan (1969) によって発表され、それを拡張した全球モデルによる数値実験の結果が Manabe-Bryan-Spelman (1975) によってまとめられている。日本における結合モデルの開発への取り組みは今後の問題であり、その遅れは十数年になろうとしている、そのギャップを縮める努力が要請されるが、研究環境さえ満たされれば、短かい期間にそれを果し得るポテンシャルは十分蓄積されていることを強調したい。

大気海洋結合モデルは気候モデルの基本であるが終極のものでない。大気中の微量物質の生物地球サイクル、陸地表層の精緻な取扱い、生物圏との相互作用などのすべての可能な過程を合理的に組み込み、気候の変化・変動のすべてをシミュレートし得る総合的気候モデルを完成するのが、気候モデリング研究の最終ゴールである。しかし、その道は険しいものであろう。社会の要請に答えるために、少なくとも20世紀末までに次善の総合気候モデルを開発することに努力すべきである。

## 2.2. 数値モデルの応用 (数値実験)

大気と海洋の大循環モデル、それらを結び付ける大気海洋結合モデル、さらに進んで総合気候モデルの開発と並行して、それ等を用いた種々の数値実験が積極的に実施されることになる。最初の数値実験は大循環や気候のシミュレーションを目的としたものである。その結果は出来るだけ多くの観測事実により検証すると共に診断的研究結果との比較や種々のモデル間の相互比較を積極的に実施する必要がある。これによってモデルの長所・短所が明らかにされ、モデルにより得られる結果の適切な評価が可能となり、改善の方策も得られるのである。このような過程を経て妥当なモデルが開発された場合、その応用の分野は広い。ここでは主要な3つのテーマにしばって説明する。

### 2.2.1. 気候およびその変動の機構の研究

信頼し得る数値モデルによる数値実験の結果は、現実の大気や気候系のプロトタイプ (原型) と見なし得る。現実の観測体系では測定し得ない物理量が多いため、解析に多くの困難を伴うが、数値実験では解析に必要な物理量のはほとんどすべてが計算されているのが長所である。このため、総合的な数値解析が可能であり、気候およびその変動の解明に大きく寄与することとなる。

### 2.2.2. 感応性 (sensitivity) の研究

WCRP には2つの最終目標が設定されているが、その1つは、人間活動の気候への影響の範囲を決定する事である。すなわち、人間活動による二酸化炭素、クロロフルオロメタン、水素や窒素の氧化物やエーロゾル等の放出、森林破壊、熱放出などが気候に与えるインパクトを評価することである。これらはすべて感応性の研究の分野に含まれる。さらにこの分野には、自然起因の準外因的要素の変動の及ぼす影響の研究も含まれる。これには、海面水温の異常、雪氷被覆領域の変動、植生の変化、土壌水分の変動、地球入射日射量の増減や火山噴火による火山灰の放出などの影響が対象になる。

以上のように広範な対象をもつ感応性の研究において、数値モデルを用いた数値実験の手法は重要な位置を占めている。この手法は、まず対象要因がノルマルである場合の状態を与えて行う規準実験 (control experiment) とノルマルからずれた状態を与えて行うじょう乱実験 (disturbed experiment) あるいは異常実験 (anomaly run) からなり、その両者を比較して有意な差異を検出することである。

この研究で留意すべきは、大気に自然変動性 (natural variability) が存在すると同様にモデル大気にもモデル変動性があることである。たとえ境界条件が平年の状態にあったとしても、個々の月平均の大気の状態は平年の状態になることはまれであり、そのまわりに多少ずれるのが普通である。これを気候ノイズと称する。じょう乱実験の結果意味ありげな差異が得られたとしても、それが気候ノイズでなく有意なシグナルである事を検定する必要がある。そのため、モデル大気での気候ノイズの空間分布や季節変化等の実態を十分把握しておくことが、信頼に足る結論を得るための先決問題である。

なお、この分野の研究では、全球3次元モデルのみならず簡略化されたモデル、例えば1次元、2次元の熱収支モデルによっても、価値ある結果を得ることが出来ると考えられる。

### 2.2.3. 予報可能性 (predictability) の研究

WCRP のもう1つの最終目標は、気候をどの程度予測出来るかを決定することである。気候モデルによる数値実験は、この問題を探究する最も強力な手法である。すでに、大気大循環モデルを用いての数値実験により、日々の天気を詳細に予測するという決定論的予測の限界は2~3週間であろうとのコンセンサスが得られている。しかし、それより長期の予測に対して、どのような量がどの程度予測可能であるかについての理論的根拠を持った結論はまだ得られていない。気候系内の緩かに変動する過程の影響を適切にシミュレートすることにより、数週間から数十年にわたる時間間隔に対して、大気変動の重要な特徴を気候モデルにより予測できるかどうかを探究することが強く要請される。

この課題において、1か月程度であるならば、大気大循環モデルによってもかなりの線まで研究が可能であり、また予測もある程度可能であると考えられる。しかし、数か月以上の長期間に及ぶ場合、それは無理であり、何等かの気候モデルの開発を待つて研究に着手されることになる。

### 3. アンケートの取りまとめ

今回 (1981年9月) のアンケートの内容は、研究計画に具体的に参加する場合の研究テーマ、研究目的、研究の年次計画およびその経費について質問し、さらに、研究テーマを実行する場合の問題点・考慮すべき点および研究計画作成の進め方についての意見を求めたものである。研究テーマとしては便宜のために第1表のような一覧表を付した。なお、研究計画のスタートを1983年としたのは書き損じとはいえ重大な誤りであり、お詫びしたい。

具体的に参加を表明した研究機関は10か所であり、研究者数は36名である。研究機関の名前は参考のため第1表に示したが、当然暫定的なものである。

次に、研究の進め方について寄せられた意見の主なものは以下のようである。

1) 各所の研究計画が不明であるため、逆に夫々の研究グループが具体的な計画を立てにくい面がある。アンケートの中間結果を知らせて欲しい。

2) 関連テーマ毎にチーム編成が必要であると考える。各個人にテーマを持たせる方針では成果に不均衡を生ずる恐れがある。

3) 大型プロジェクト研究としての実効があがるように、研究者間の討論を充分行い、計画の整合をはかる必要がある。

4) 異なる研究者が、同じようなテーマを同じような方法で研究しようとする時、調整をはかるのか、競争を重んずるのか、方針はある程度はっきりさせるほうがよいと思う。

5) 海洋にかかわる諸問題は基礎的段階のものが多く、今後10年位はプロジェクト研究にはいる以前のレベルに止まると思う。

6) テーマ一覧表に示されたもののうち、かなりのものは WCRP を実施するかどうかに拘らず取り組んでゆくべきものである。

上述の意見の間で共通している点は、何等かの研究グループを作り、討論を充分交わし計画の整合をはかることが提案されていることである。

以上のほかに、気候変動研究計画の進め方全般についての長文の意見も寄せられた。それを要約すれば：

現在の段階では、気候の変動を支配する要因が何であるかは必ずしもはっきりしていない。そのため、気候変動の研究を具体的目標を持つ短期プロジェクトとして実施するのは時期尚早ではないか。気候の研究は

第1表 研究テーマと研究機関 (暫定).

研究テーマ	研究機関
<b>A. 気候モデルの開発</b>	
1. 大循環モデル (a) 大気大循環モデル i) 全球3次元モデル ii) 帯状平均力学モデル iii) 熱収支モデル iv) その他 (b) 海洋大循環モデル (c) 大気・海洋結合モデル (d) 総合気候モデル (含生物圏)  2. サブシステム・モデリング (a) 大気境界層 (b) 積雲対流群 (c) 陸地表面 (含植生) (d) 雲 (e) 海氷 (f) 海洋混合層 (g) 海洋中規模うず (h) その他	気研予報, 京大理 (気候施)  公資研 (長距離輸送モデル) 筑波大, 気研海洋, 京大理・教養 気研予報・海洋 気研予報  東大海洋研, 気研予報, 公資研 東大海洋研, 名大水圏研, 気研台風・予報 横浜国大, 気研予報 東大海洋研, 横浜国大, 名大水圏研, 気研予報 筑波大, 京大理・教養, 極地研, 北大低温研, 横浜国大 東大海洋研, 気研海洋 筑波大, 気研海洋
<b>B. 数値モデルの応用 (数値実験)</b>	
1. 感応性 (sensitivity) の研究 (a) 境界条件 (日射, 海面水温, 雪氷, 植生等) (b) 大気組成 (CO <sub>2</sub> , エロゾル, 火山灰等) (c) その他  2. 予報可能性 (predictability) の研究 (a) 1ヵ月予報 (b) 数ヵ月予報 (c) その他	気研予報・高物 名大水圏研, 気研予報・高物, 公資研  気象庁, 気研予報 気研予報
<b>C. 気候メカニズムの基礎的研究</b>	
	九大理, 東大海洋研, 東大理

「がん特別研究」や「地震予知計画」と同様に、その解決に至る道のりは遠いものであり、人類の将来にとって極めて重大なものであることを社会一般に十分認識してもらい、その上で気候問題の基礎を支える研究を幅広く行なってゆく策を講ずるべきである。

傾聴に値する意見であり、今後の計画策定に当って十分留意すべきであろう。

#### 4. 研究の進め方

アンケートの回答に示された年次計画等を参考にし

1982年5月

て、今後日本における気候モデリングに関する研究に対し、期待されあるいは希望されるタイム・フレームは第2表のように想定される。モデルの開発については、ほぼ5年毎に①, ②, ③, のように区切りをいれておいたが、例えば③に対応する第3世代あるいは第3次モデルがどんなものになるかを現在明確に認識しているわけではない。

全球3次元モデルの場合、大気および海洋大循環モデル、大気海洋結合モデルを経て総合的気候モデルの開発に至る道のりは長く、たゆみない研究努力を必要とし、

第2表 気候モデリングの研究に想定されるタイム・フレーム。

破線は予備研究期間、丸印は区切りを示すもので例えば②は第2世代あるいは第2次モデルの完成を表わす。

テーマ	年代				
	1980年代 前半	1980年代 後半	1990年代 前半	1990年代 後半	2000年代
大気大循環モデル(A-M)	①	②	③	④	⑤
海洋大循環モデル(O-M)		①	②	③	④
大気海洋結合モデル(AO-M)		①	②	③	
総合気候モデル(C-M)				①	②
サブシステムモデリング		①	②	③	
感 応 性 実 験	----- (A-Mによる実験) ----->		----- (AO-Mによる実験) ----->		----- (C-Mによる実験) ----->
予報可能性の研究 1か月予報の開発	----- ルーチン化 ----->		----- AO-M採用 ----->		----- モデルの改善 ----->
数 月 予 測	----- (AO-Mによる) ----->				
気 候 予 測	----- AO-M ----->		----- C-M ----->		
基 研 究	----->				

5か年計画の枠内に収まるものではない。また気候予測の研究においても、数値1か月予報の開発はすでにスタートしており、早急なルーチン化が業務的に要請されており、研究計画のスタートを待つべき性質のものでない。また数か月以上の気候予測の問題は想定される研究期間(1986-1990)に本格的に実施することは無理であろう。もし5か年計画が1986-1990に実施されたとした場合、その重点は特別観測と対応するサブシステムのモデリングの研究に置く事が望ましい。それに加えるに、タイム・フレームと大体一致する第1次海洋大循環および第1次大気海洋結合モデルの開発と第2次大気大循環モデルによる種々の数値実験の実施がある。

より具体的に可能な研究テーマを示すことにすれば

- 1) サブシステムのモデリング (パラメタリゼーション)
  - (i) 雲と放射に関わるモデリング
  - (ii) 海洋のサブシステム (海氷, 中規模うず, 海洋混合層) のモデリング
  - (iii) 陸地表層のモデリング
- 2) 大循環モデルの開発
  - (i) 第一次海洋大循環モデル
  - (ii) 第一次大気海洋結合モデル
- 3) 数値モデルの応用

- (i) 数値実験によるブロッキングの研究
- (ii) 大気大循環モデルによる サブシステムモデルの検証
- (iii) 大気大循環モデルによる 感応性実験 (二酸化炭素, 海面水温, 雪氷被覆を主とする)
- (iv) 数値1か月予報モデルによる 予報可能性の研究

4) 気候の基礎研究

以上の研究を進めるにあたり、特にサブシステムのモデリングの研究において、前節の意見にあったように、何等かの研究グループを作る必要があろう。テーマ別にするか全般的なものにするかどちらが有効に機能するかの判断はしかねるが、最初は全般的なサブシステム研究グループを結成し、情報を交換しつつ、研究の進め方を具体的にしてくのが良策と考える。

第2表の長期的タイムフレームの中でこの5か年計画が占める位置をみると、この計画は気候変動研究の扉を開く役割を荷なっていることは明らかである。その後こそ重要な研究過程にはいってゆくのである。そのため現在策定しつつある5か年計画に対して気候変動研究計画の中の重要な一環としての意義づけをすることが良策であろう。