

## 気候変動のモデリングについて\*

廣 田 勇\*\*

### 1. まえがき

このシンポジウムのコンビーナーから与えられたテーマは筆者にとっていささか荷が重すぎる。ひとつには気候及び気候変動に関する研究の経験や実績が自分には全く無いこと、他方には客観的に見て本当の意味での気候変動モデルの名に値する具体的なモデルがまだ出来ているとは言い難いこと、などがその理由である。従ってここでは、従来の個別的な研究内容やその結果の詳細にわたる総合報告或いは解説としてではなく、気候及び気候変動の問題を理解するために必要な基本的概念をもう一度初心に立ち帰って考え直してみたいと思う。つまりここで言う modeling とは問題のとらえ方を意味するものと諒解していただきたい。コンビーナーも読者諸賢も筆者にそれ以上のことは期待していないはずである。それ故本文の内容はこの問題に多少なりとも興味を持っている人々が常日頃各自なりに考えておられるであろうことの域を殆ど脱していないかも知れないが、本シンポジウムの岸保氏の講演にも述べられているように、“気候の物理的過程の理解”という立場のひとつとして受け取って貰えれば幸いである。

本文では気候と気候変動とを一応明確に識別し、前半では気候に関する定義と記述方法を論じ、後半では気候変動の物理的意味について私見を交じえた考察を加えることにする。

### 2. 気候とは何か

地球大気中のさまざまな気象現象を構成する物理量(気温、気圧、風速、降水など)を一括して今“気象要素”と呼ぶことにすれば、“気候とは気象要素のある有限期間にわたる時間平均である”と定義される。空間平均については必ずしも問わない。従って緯度、経度、高度についての三次元分布を意味する場合もあり、緯度平均値や大気全体にわたる総量や平均値を指す場合もある。

時間平均の取り方はある一定の連続期間にわたる場合(たとえば年間平均)や一年周期の特殊性を考慮した不

連続期間の多年にわたる統計(たとえば1月についての30年平均)など種々あり得る。

時間平均に関し重要なことは考える期間の長さの上限である。何故なら、もし地球が未来永劫に存続するとして無限時間の平均値を仮想的に考えたとしても、それが有限の一定値を持つ保証は全くないこと、また仮に有限の一定値が存在したとしても、そこにはその値の時間変化すなわち気候変動という概念の入り込む余地が全く存在しないことになってしまうからである。気候の定義に用いる有限期間の長さの上限を如何ほどにすべきかはアプリアリに決められるものではない。気候及びその変動の特性を論ずる過程においていわば結果的に決められるべきものである(現在気候値の定義に用いられている30年平均とは、非常に限られた目的や要請に応じた多分に便宜的なものであることに注意されたい)。

気候というものを考える際の期間の長さの意味は本論の終りでもう一度考えることにする。

### 3. 気候の決定要因

地球の気候を決定するさまざまな要因は、般く行なわれるように“内因”と“外因”とに大別することが出来る。ここで言う内因とは気候決定に関与すると同時に気候自体からの作用によって影響を受け変化し得るものを意味し、前節で述べた気象要素と直接間接に相互作用をなすものを指す。このような要因の例としては大気組成(H, C, O, N, 等の原子分子)、海洋、地表面諸要素(陸水、生物系)などが考えられる。一方、気候には影響を与えるが気候からの反作用(feedback)は無いと考えられるものを外因と呼ぶことにすれば、太陽からの種々のエネルギー入射、地形(山岳、海陸分布)、火山活動に伴うガスや微小物質の大気への供給……等が挙げられよう。微妙な反作用の例としては風系が大陸移動や造山運動或いは地球自転速度に及ぼす影響も原理的にはあり得ようし、人間活動も気候に対し作用と反作用の両面を持っているとも言えるが、これらは一応本論の対象から除外しておく。

内因外因という分類とは別に、気候決定の独立なパラメータとして地球に固有の物理定数(地球のサイズ、重

\* On the Modeling of Climatic Change

\*\* I. Hirota: 気象研究所(現在所属:京都大学理学部)

力加速度、自転公転周期など)が存在する。これらの定数は地球の気候を他の惑星のそれと比較して論ずる場合に重要な意味を持つが、本論では地球のみに話を限り、これらのパラメータを普遍定数と考えておく。

#### 4. 気候問題へのさまざまなアプローチ

従来の気象学或いは広義の地球物理学の立場から気候の問題を調べるアプローチは数多く試みられている。それらは取扱いの手法及び目的に応じていくつかのステップに分けることが出来る。以下、これらさまざまなアプローチについて順序に応じ考察を進めよう。この議論で重要なことは、個々の具体的な研究内容や結果ではなく、取扱いの方法や枠組みによってきまる包括概念領域のひろさである。

##### AI. 気候及び気候変動に関する統計的記述

このアプローチにおいて用いる気象要素の観測内容としては、観測歴史以降の直接的気象資料以外に、観測時代以前の記載事項からの翻訳や有史以前の古地球物理的古生物学的資料からの間接的証拠などがある。これらの資料の統計処理による気候の事実及び推定に関する記述がまず第一の出発点である。次に、その統計期間のちがいに応じた気候の変化、すなわち気候変動の記述があり得る。第三には、気候の変動期間中におけるさまざまな物理量及びその分布状態の中から、前節で述べた内因外因を問わず相互に関連を有していると見なされる組合せを統計的立場から検出することである。事例を挙げるならば〔太陽黒点数とある地点の気温〕とか、〔北半球平均気温と北極の雪氷量〕とかの間に統計的に有意な相互関係を見出すことがあり得よう。但しこの場合の相互関係とは、必ずしも現在知られている物理法則の応用組み合わせで直接結びついていることを意味しなくても良い。非常に複雑な地球大気海洋地表システムの遠く離れた鎖の両端が結果的に統計的事実として顕著に見えるということも充分あり得るからである。

以上、このアプローチ AI から得られるものは気候及びその変動の事実記載とそれに関連する統計的経験則である。

##### AII. 放射平衡及び力学平衡状態の数理的記述

このアプローチは観測から良く知られている現在の地球大気の状態を放射及び力学の立場から説明することである。現在の気候の状態は比較的短期間の平均、例えば年平均状態で見ればかぎりほぼバランスしているものと考えられる。従って現実の外因的物理量(太陽放射強度など)や内因のうちのあるもの(大気組成の一部、海洋な

ど)を既知のものとして固定的に与え、それにバランスする残りの気象要素を物理法則の適用によって求める試みが為されている。

大気の熱的バランスに関する放射平衡モデル、主として力学的バランスに着目した大気大循環モデルなどがその例である。従来行なわれている斯様な放射及び力学に関する平衡状態のモデル化は初歩的なものから非常に精密で大がかりなものまで数多く存在し、それぞれの程度に応じて観測結果と比較し得る数値解を提供している。

ここで注意すべきは、これらのモデルの粗密さ或いはモデル計算から得られる情報の価値の大小が、単なる計算精度の問題ではなくむしろそのモデルに含まれる物理変数の自由度の大きさによって決定されることである。何故なら、外因を固定して既知のものを与えるのは一応容認されるとしても、内因は本来それ自体が相互にある物理法則によって支配され結果的に決まるべきものであるにも拘らず、現実のモデルではそれらのあるものを既知として定数的に或いは境界条件や経験則として最初から天下りの的に与えているからである。換言すれば、このことは気候を決定する物理法則(因果関係)の一部分を最初からカットしていることに相当する。この法則のカット数が少く従って解かるべき気候の変数の種類(自由度)の多いモデルほどその普遍性、一般性が大きいことになる。

数学的に言うならば、上記の放射平衡モデル及び大気大循環モデルにおいて、解くべき独立変数(末知数)同志、及び変数と与えられた条件間の相互関係を記述する方程式の数  $E$ 、独立変数の個数(自由度)  $V$ 、及びいま取扱うすべての内因的物理量の個数  $P$  との間には一般に

$$E = V < P$$

の関係がある。〔 $P - V$ 〕がすなわちカットされた法則数に対応するわけである。このことは気候に関与するすべての量がモデルの内部で必ずしも self consistent になっているとは限らないことを意味している。従ってアプローチ AII の範疇にあるモデルは、現実の気候状態の部分的説明にはなっていると、何故現在の気候がこのように決まっているのか? という質問に対する解答は与えていないことになる。

##### AIII. 現在と異なる仮定要因に対する平衡解

アプローチ AII と全く同じ手法を用いて、現在の地球の気候と相異なるものをモデル的に作り出すことは可能である。それには AII の場合に既知として与えた条件

のうちのあるものを仮想的に変えて再び計算を行い、それぞれの場合に対応する気候の解を求めれば良い。具体例を挙げれば、外因の変化として現在と異なる太陽強度を与えてみたり、海陸分布の異なるものを仮定してみたりすること、また内因の変化としては炭酸ガスやオゾンの量を変えてみたりすることである。その結果として得られる平衡解つまり気候は現在のそれと大いに異ったものであり得る。

このアプローチの最大の長所は気候決定の素過程の相対的重要度をある程度量的に推測出来るところにある。たとえばオゾン総量の1%の増減と海水表面温度の1%の増減とのどちらが地球の平均気温の増減により大きくはねかえるかを比較することは気候の決定過程を理解する上で重要な意義があろう。更にそれぞれの要因の及ぼす影響は一般には加算的(線型的)とは限らないから、いくつかの要因の変化の組み合わせの比較も興味がある。

但しこのアプローチにおいて注意を要することがふたつある。そのひとつは、モデルに現実の観測及び統計解析結果から求められたある種の経験則が含まれている場合、それを非現実的な(つまりまだ観測されていない)ケースに対し外挿的に用いるのは一般に危険を伴うこと、もうひとつは与える要因の変化とはあくまでも“仮想変位”を意味するのみで、如何なる機構によりそれらの要因が変化するかに関しては一切触れていないことである。従ってこのようにして得られた異なる気候状態が何時如何にして現実に出現するかという問いに対しては答えるすべを持たない。繰り返して言うならば、天下りの仮定とそれから求められる結論とを結ぶ物理過程の検討がこのアプローチの特色である。その際、現実の気候状態を基本にした諸要因の微小変位に対する“摂動”の概念で気候の変化傾向のみを見ようとする手堅い立場と、現実の気候を支配する因果律を大胆に敷衍し全く異なるレジームの気候を想定する立場とが同一の手法の中にあり得ることを重ねて注意しておきたい。

### 5. 気候の一意性と多意性

AII と AIII のアプローチでは支配方程式の個数と独立変数の個数とが等しくなるようにモデルが構成されていることを述べた。この事情はモデルの粗密さによらず常に保存されているべきものである。しかしながらそのとき解が一意的(unique)に定まるという数学的な保証は本来全く存在しないはずである。同じ附加条件、同じ支配方程式のもとで相異なる二種以上の平衡解が同時に存

在し得る可能性は充分ある。

もしあるモデルに含まれる気候の解が unique に定まる場合、そのモデルは他動的(transitive)であるという。これに対し解が多意性を有する場合そのモデルは自動的(intransitive)であると言う。現在、実際の気候を記述すべき支配方程式系に関する我々の知識は不充分であり、厳密な数学的証明を与えることは困難であるが、地球の気候が外因を固定したとき果して unique に決定されるものか否か、つまり transitive か intransitive であるかは非常に興味のある問題である。

一般にある方程式系が非線型性を有しているときには解が unique でない場合が多い。この観点からすれば、大気の流れを規定する流体力学方程式をはじめとし、気候を記述すべき連立方程式系は高度の非線型特性を有していることを考え合せ、おそらく気候システムはその非線型性に起因する intransitivity を有しているであろうと想像される(事実、比較的簡単な放射モデルで同一の外的条件に対し異種の解を持つものが作られている)。

この推論の結果から直ちに次のような重大な疑問が生ずる。もし地球の気候が intransitive であるとしたならば、相異なるいくつかの気候形態のうち、現実にある特定のひとつが選ばれて出現するのは一体何によるものであろうか? そしてひとたびそのいずれかが出現したときには、外因が変らぬかぎり他の気候形態は可能性のみを秘めて現実には遂に姿を見せないであろうか?

この設問に関しては後程章を改めて論ずることにし、その前にもうひとつの重要な概念について触れておこう。

### 6. 気候と気候変動

これまでにしてしばしば“与えられた外的条件に対応する支配方程式系の解”としての気候を考えてきた。ここで注意すべきはその解が“時間”という物理変数を含んでいなかったことである。AII の段階におけるさまざまなモデル、例えば大気大循環数値モデルにおいては、解法的手段としては運動方程式その他の時間積分という形態を取ってはいるものの、最終的に得られる気候の情報はその時々刻々の解の統計的時間平均量のみである。一方 AIII の段階における要因の変化とは前にも述べたようにあくまでも仮想変位を意味し、その変化の原因を問わないばかりではなく“時間変化”という概念は一切含まれていなかったはずである。

要するにここまでの段階の気候モデルの解とは“定常解”のことであり、その範囲で論ぜられる気候とは

steady state, 或いは balanced state に限定されていたわけである。

然るに気候変動とは文字どおり“気候が時間と共に変化すること”, すなわち unsteadiness を対象とした議論であり, これは上記の AII 及び AIII のモデルには含まれていなかったことになる。この意味において, 従来ややもすれば安易に混同されていた気候と気候変動とは本質的に次元の異なる概念であることを強く認識する必要がある。つまり気候変動を論ずるには解そのものではなくて解の“ふるまい”を調べるための時間依存性モデルを考えなければならぬと言えよう。繰り返して言うならば, この要請は単に解法的手段として時間積分を行うことを意味するものではない。本質的に解の非定常性を表現することが必要なのである。

然しながらこのような目的で作られた具体的な気候変動モデルは実のところまだ殆ど無いと言って良い。それで次節では気候変動モデルの持つべき特徴をごく概念的に考察してみることにする。

### 7. 気候変動モデル

再三述べてきたように, ここで言うモデルとは如何なる方程式系を何についてどう解くかということではなく, 気候の変動現象を解釈する基本的な考え方を明らかにすることである。

さて, 気候変動の原因としては大別して(1)外因の時間変化, (2)気候システムの intransitivity の二つが考えられよう。

まず(1)の意味は太陽放射強度や火山活動などの外因が何かの理由で(その原因はいま問わない)時間的に変動したとき, 地球の気候システムが如何なる応答をするかの問題である。この種の最も単純な例は地球の公転に伴う太陽エネルギー入射の緯度分布の時間変化に対応する地球大気的一年周期変動すなわち季節変化である。太陽活動それ自体の変動としては他に有名な黒点数11年周期などがあるが一般に外力の変動は周期的とは限らない。第4節の AI で述べた過去の観測統計から外因と気候の変化との間に如何なる経験則が知られているかはとも角として, この外力励起による気候変動のタイプをいま仮に“forced mode”と呼ぶことにしよう。

これに対し(2)の intransitivity に起因する変動とは, 外因が全く変化しない場合でもその外的条件に対応して存在し得る複数の気候状態相互間の自己遷移過程を意味する。このタイプの変動がもしあり得るとすればこれを“free mode”と名付けることにする。

これら二つのモードは決して互に矛盾するものではないから両者の組み合わせも当然考えられる。以下順を追ってそれぞれの特徴を考えてみよう。

まず forced mode のみの場合, 気候システムは与えられた外的条件に対し唯一の解を持つのであるから, 外力変化に対する応答特性のみが問題となる。気候システムの応答時間より長い外力変化に対しては, 第一近似的には各時点における外力条件に対応する定常解の連結がすなわち気候変動そのものになる。上に挙げた季節変化の例で言えば(ふつう季節変化を気候変動とは言わないが)各月の平均太陽高度に対応する定常解を独立に求め, その12個の解を順番に並べたものがほぼ1年の変化を表現しているようなものである(但し実際には春秋の非対称性や時間の位相差が存在する。そのことは単純な一年周期変化も完全には forced mode のみではないことを意味している)。もし気候変動が本質的にこのケースに近いのであれば問題は単純であり基本的にはアプローチ AIII に尽きていることになる。つまりこの種の変動のみを考えるかぎりにおいては, 時間というものの物理的意味あいが稀薄になってくる。

次に free mode による変動の場合を考えよう。しかし intransitivity を論じた第5節の段階では, 解の多意性とはあくまでも相互に独立した定常解についての話であった, intransitive model で非線型方程式の数値時間積分という手法を用いるときには, 初期条件の取り方によって落ち着くべき定常解の分岐が起り得る。しかしそのことと時間経過を含んだ物理過程としての気候変動とは全く異なる問題である。時間に関係しない定常解の議論から定常解同志の遷移の問題に発展させることこそ第5節の終りで提起した設問に答えることに他ならない。もう一度繰り返すと, もし気候変動がその系の intransitivity に起因する多様な気候状態間の自己遷移であるならば, ある特定の free mode の選択性は一体何によって決まるのであろうか? ここに至って“気候の安定性”という概念が登場する。

もしあるひとつの気候状態が存在し, それが気象要素及び内因的物理量のある乱れに対して自励的な不安定性を持っていたとすればその乱れは時間と共に増幅され遂にはその気候状態を破壊して他の気候状態に移行することがあり得よう。良く知られている気候不安定性の例としては, 極冠の雪水量と気温との間の positive feedback の問題がある。現在ほぼ平衡状態にある極の雪水量の僅かの乱れによる増大が太陽入射に対する反射能(アルベ

ード)の増加をもたらして地上気温を低下せしめ、その気温の低下がまた雪氷量の増加を助長するという形で自動的に氷河気候に移行する可能性は充分あると考えられる。同様な意味で逆に平均気温の上昇に伴う蒸発の促進効果が大気中の水蒸気量を増加させ、それが放射バランスにおける green house effect となって再び地上気温の上昇に寄与するという positive feedback もあり得よう。

さてそのとき、“乱れ”とは何かが問題となってくる。現在の気候はほぼ平衡状態にあるとは言っても決して厳密な意味での定常状態ではなく常に何がしかのゆらぎを内在している。しかしその個々の細かいゆらぎ或いは乱れは多くの場合むしろ negative feedback によって押えられある一定以上の枠を越えられないからこそ準定常状態が保たれているに他ならない。従って不安定性の原因となるような乱れとはその大きさはもちろんのこと質的にも特定の条件が満たされていなければならぬであろうことは想像に難くない。このような乱れは気候システムの内部で作られ出されることもあり得ようが、もうひとつの可能性として考えられることは外因の偶発的一時的変動に伴う forced mode である。もしそれが内在的気候不安定性をひき起すきっかけになるものならば、その後外的条件がそれ以前と同じ状態に戻ったとしても、気候状態それ自身はもはや復元力を持たず、異なる気候へと遷移してしまうであろう。この場合、気候変動の本質はあくまでも気候システムの持つ intransitivity であるが、何時、どの方向への遷移が起きるかは偶発的な forced mode の性質に強く依存していることになる。

ここで考えた気候変動のタイプを形態的に見ればひとつの平衡状態から他の平衡状態への突発的な移行、つまり catastrophic transition と言うことが出来よう。

これに対し同じ intransitivity に起因する自己遷移過程の形態として、forced mode とは無関係に、そのシステムの非線形性による偽周期的振動タイプの気候変動を想定することも可能である。この考えに立てば、気候とは常に時間の函数としての乱れを内在しているものであり、ある有限期間の平均値として定義される気候とは文字どおり算術平均としての意味しか持っていない。比較的短期間で見ればあたかも平衡状態にあるかの如く見えるだけである。従って AII 及び AIII の範疇で求められた平衡状態(定常解)もそのように解釈し直されるべきである。つまりこのタイプの気候変動とはある定常状態から次の定常状態への catastrophic transition ではなく、

本質的に非定常状態の反復出現、言うならば ergodic process に他ならない。

以上気候変動を解釈するための基本的な概念をいくつか述べた。おそらく地球の気候システムはそのいずれの可能性をも持っているであろうと想像される。しかしながら現在までのところ、観測統計やある種の具体的数値計算の結果から気候変動のどの側面が相対的に卓越しているかを論ずる程の知識を我々は持っていない。従って将来のモデリングの方向として、気候変動に関するこれらの異なる考え方或いは立場を明確に識別してゆくことが望まれる。

### 8. 気候変動のタイムスケール

これまでの議論では外因内因の時間変化についてその変化期間の長さに関しては殆ど触れなかった。しかし気候変動を他の気象現象と区別する最大の特徴はそのタイムスケールの長さにかこあるはずであった。その点を忘れてしまうとこれまでの議論は従来の大気大循環論の域を一步も出ていないことになる。第6節で気候と気候変動とは根本的に違うことを強調したのもひとつにはこの理由があるからであった。そこで最後に気候変動のタイムスケールについていささかの考察を加えてみよう。

タイムスケールの概念は、前節で述べたいくつかの気候変動のタイプに対応して、次のような意味を持っている。

まず外力励起によって生ずる変動すなわち forced mode の場合、気象要素及び内因的物理量の相互間の個々の素過程における応答速度の問題がある。外力変化のタイムスケールにくらべて気候システムの応答時間が充分短かければ気候変動のタイムスケールはすべて外力のそれで決ってしまう。しかし応答時間の長い素過程が重要な役割を果す変動があるならば、さまざまな励起外力の変動に対する一種の filtering が起り得ようし、逆に resonance の可能性もあろう。

第二に気候システムの内在不安定性による変動の場合、それが何時起きるかは偶発的な forced mode によるとしても、問題は自動的に不安定性を起こすに至る forced mode の持続時間の長さに何らかの条件が必要ではないか、ということである。

第三には、気候変動を大気海洋地表諸要素から成る非線形システムの偽周期的振動或いは ergodic process としてとらえたとき、それぞれの phase の継続時間がその系に固有のある特徴的な長さを持っているのではないかと、そしてそれは何によって決まるものなのか、が問題

となろう。

この一応三つに分けたタイムスケールの意味をもう少し具体的にするために、それぞれに対応して次のような素朴な質問を提出しよう。

(1) 地球公転に伴う太陽入射の一年周期に対応して、気象要素のかかなりの部分が鋭敏に応答して明瞭な季節変化を示すのは何故か？ 逆に一年周期はあまり明瞭に現れずより長周期のものが見える現象（海洋など）のあるのは何故か？

(2) 現在の気候から氷河気候に移行するための極地方雪氷量と気温との自励的不安定化が起るには半球の平均気温が $2^{\circ}\text{C}$ 程度低下するだけで充分であるとの計算もあるが、もしそうならば現在の夏と冬の平均気温差が約 $20^{\circ}\text{C}$ もあるのに拘らず何故ひとと冬の高緯度地域の積雪量増加（或いは冷却）がそのまま氷河気候に移行しないのか？ 逆に、もし地球の公転周期が充分長ければ、一回の冬で直ちに半球が氷河で覆われ夏が来ても元に戻らないというようなことはあり得るか？

(3) 26か月周期（準二年周期）振動が赤道成層圏における帯状流と波動の相互作用の結果として説明されるのと同様に、直接の周期的励起外力を持たなくても地球大気それ自身の固有な性質から生ずる準周期的現象が他にもあり得るのではないか？ 過去の統計から憶測されている35年の Brückner 周期、80年とか700年位のオーダーの変動、或いは数十万年から百万年にわたる氷期の反復出現……等々は同じ範疇に属するものと考えられないだろうか？

以上三つの設問は結局のところ地球大気海洋地表諸要素から成る気候システムの熱的力学的相互作用によって生み出される固有のタイムスケールという問題に帰着されるはずである。それでは気候の固有なタイムスケールとしてはどのようなものが考えられるであろうか。以下に個々の素過程について大よその見積りをしてみよう。

まず大気中の個々の現象の持つタイムスケールは非常に短いことがわかる。グローバルな空間スケールで見ても部分的な放射の非平衡状態を解消したり水蒸気の剰余分を降水として地上に落したり、或いは水平温度差の過不足を大規模水平対流による熱輸送で補正したりするのに要する時間は高々10日から1か月以内のオーダーである。地表面の水循環もおそらく数か月以内（ひとつの季節）のものであろう。季節変化が太陽入射の一年周期に良くフォローしている理由はこのタイムスケールの短かさにある。通常の大気大循環数値実験で等温静止大気か

ら出発し時間積分を行う場合 physical time 数十日で種々の物理量がほぼバランスするのも同様な理由による。

次に海洋循環の持つ固有の時間スケールを考えると、大気循環のそれに比してかなり長いことがわかる。海洋の総質量が大気質量の約300倍、熱容量はさらにその4倍、深層海流まで含めた海洋流速が代表的風速の1/1000のオーダーであることなどから、海洋の持つ熱的力学的タイムスケールはおよそ100年のオーダーと見積られる。この点だけから推測すれば、100年程度の時間スケールの気候変動のかかなりの部分は大気海洋系の相互作用の範疇で理解出来るかも知れない。

さらに polar ice の変動はより長い時間スケールを持つ。その総質量は海水の1/60であるが潜熱の大きさを考慮すれば熱容量としてはほぼ海洋と同程度、一方変動速度は substantial velocity 及び phase velocity とも大雑把に見て数百  $\text{m/year} \approx 10^{-3} \text{cm/sec}$  で海洋流速よりさらに三桁も小さい。これらの事情をふまえて polar ice の持つ固有のタイムスケールを強引に見積るとおよそ  $10^4$  年となろう（このへんはまことにあやふやなので glacier dynamics の専門家の御教示を仰ぎたい）。

加之、より長い時間スケールの変動を考える場合に無視出来ない重要な内因としては生物系の変遷の問題がある。生物系特に植物系の気候システムに占める意義は、アルベド、水蒸気バランス、炭酸同化作用による大気組成との関連等々から見ただけでもその重要性が直ちに推察されよう。しかしながら、生物系の時間変化が如何なる法則に支配されているかについての知識の不確かさはとうてい大気海洋に関するその比ではない。その上、生物系の進化過程における“時間の不可逆性”にまで想いをめぐらすと、将来の気候変動論における生物系の占める地位は非常に独自なそれだけに困難なものとなりそうである。

いずれにせよ、気候変動を論ずるには個々の素過程の持つ固有の時間スケールに起因する変動期間の長さの問題を忘れてはならない。ここでは気候システムというものがさまざまなタイムスケールを持つ要因を含んでいること、逆に言えばどの時間スケールの気候変動を考えるかによってそれを表現するモデルに取り入れるべき個々のプロセスの種類が自ずから規定されることを注意しておきたい。

## 9. あとがき

この小論においては、気候および気候変動モデルに関する具体的な記述は一切行わず専らこの問題を物理的

に取扱い際に必要と思われる基本的な概念を中心に話を進めてきた。その理由は、気候変動に関するこれまでの研究が現象記述の側面以外はまだまだ少く、学問的に見て始ったばかりの時点にあると思われるからである。近年、異常気象という言葉が良く聞かれるが、どこそこで大雨が降ったとか、どの地方の気温が低下したとかいう断片的な情報をことさら強調し性急な気候変動予測を試みるの余り、挙句には氷期が近いなどとオオカミ少年もどきに人心を惑わす発言をすることはもとより筆者の好

むところではない。気候変動とは或いは気象学・大気物理学にとって永遠にして不可解なるテーマでさえあるのかも知れない。少くとも現在、この問題と取り組むために一番必要なものは確固たる自然哲学的背景なのではないだろうか。

【附記】本文は、筆者が気象庁の「気候変動調査研究会」のメンバーのひとりとして本年3月に発表した報告書の分担執筆部分とその内容がかなり重複していることをお断りしておく。

551. 588

## 気候変動研究の技術的アプローチ\* —主として COSPAR-WG 6 報告より—

関 原 彊\*\*

### 1. はしがき

気候変動の研究はようやく注目され出したというのみでその研究方法さへまだ確立されているとはいえない。ここに述べられている事柄は FGGE が1日から数週間の気象現象の解析と記述を目指して行なわれようとしている現在、その延張として気候変動の物理機構、ひいては人間活動の影響まで解明出来るであろうという楽観的立場に立って考えられる技術的問題点を展開しようとする一つの試みである。

### 2. 一般的注意

気候の研究に際しては放射の効果が非常に重要であることは一般に認められていることである。これは入射する太陽エネルギーの問題ばかりでなく大気及び地表面における放射収支の地域的分布とか全地球的バランスが重要であるということである。

この様な観点から見ると通常的气象観測が大気の中にあつて比較的短時間の微細構造とその変化を見るのに適しているのに比して人工衛星による観測が大気外において日射を観測したり又は地球を観測したり出来る点においてあまり垂直の微細構造を問題にしないで全地球の規模ひろがりが観測し得る点において今後のこの種の研究における最も重要な武器を与えるであろうことが了解されるであろう。

このような了解のもとに注意すべき点をいくつか次にのべて見よう。

第1はサンプリングの問題である。一般に地球物理学的量の測定にあたっては実は予め測定の計画を立てる前にその量の時間的空間的変動の性質が分かっていることが必要である。これはある種の量については分かっているがまだ分っていないものも数多くある。そこで人工衛星から観測する計画をたてる場合には多分に測定量の変動のスペクトラムに応じて衛星の軌道要素とかその数を設定する必要があるであろう。

次に大切な問題は測定器の校正 (Calibration) の問題である。気候変動の測定にあたっては放射測定器の絶対校正特に校正の安定性が重要である。これは我々が問題にする量が長期間の微小変動量であることから考えてすぐに理解出来る。又数多くの衛星が同一目的のために運用される場合にその測器の比較校正が重要となることも直ちに分るであろう。

3番目はデータの問題である。測定値を無差別にため込めば如何なる磁気ドラムも磁気テープも直ちにパンクしてしまうであろう。如何なる測定値を重要であるとして取り出し貯蔵するかという問題はそれ自身あまり事柄の重大性に気づかれていない点にむしろ問題がある。ことに長期間の測定ともなればこの種の測定値の処理と貯蔵の計画はあらかじめ考えねばならぬ重大問題である。

### 3. 気候のモデルと測定すべき項目の設定

気候のモデリングの最終目標は地球の気候とその変化を計算記述し得る第1原理を見出すことにあるがこれは

\* On the Technological Approach to the Study of Climatic Change

—From the Report of COSPAR-WG 6—

\*\* K. Sekihara: 気象研究所