

気候変動シンポジウム—諸要因の変動—*

昭和53年12月7日、気象庁講堂において、上記のシンポジウムが、9時30分より17時までの長時間にわたって行なわれた。以下で、このシンポジウムについて簡単に記す。

気候変動は、人類の現在から未来にかけての生活・生存に重大な係わりを持つものであるが、この課題の研究は困難かつ複雑多岐にわたるもので、単に気象学だけでなく、他の分野の研究にも負うところが大きい。そこで、当シンポジウムでは、気候変動の要因のうちで重要と思われるいくつかの要因を取り上げ、それらについて気象学のみならず、それ以外の分野での研究の現状や問題点を知り、気候変動の研究の現状を概観して、それぞれの立場の研究者の参考に供する目的で開かれた。もちろん、気候変動の研究を概観すると言ってもこの複雑多岐にわたる課題を1回のシンポジウムでできる筈はなく、今回はその第1回のつもりで開かれた。席上会員から、今回ののはシンポジウムでなくセミナーであるとの意見があったが、その点については、一般会員には比較的馴染の薄い話題が多く、その上時間的な制約のために、討論が充分できなかった点があった事は認めざるを得ないが、それはそれとして多くの参加者にとっては有意義なものであったと信ずる。この種のシンポジウムは、視点を変え、気象学会で今後機会あるごとに取り上げるに値する重要かつ複雑、困難な問題であろう。下記の各講師の方々による当日の講演要旨からも察せられるように、比較的研究が進み明らかになった部分もあるが、未だ不明で問題を含む点が多い。しかし、研究は定性的なものから定量的なものへと着実に進展しているように思われる。残念なことは、当日講演予定の大阪大学の川井教授の「地磁気の変動と気候」が教授の急病のため中止となった事である。シンポジウムの終わりに、岸保理事長より、世界気候計画 (World Climate Program) について話があり、気候変動研究の計画等についての報告があった。なお、当シンポジウムの詳細な報告は、気象研究ノート (昭和54年中に発行予定) に掲載される予定である (嘉納宗靖)。

過去の気候変動

—主として古生物学の立場から見た古環境とその変動—

高柳洋吉**

地質時代の気候変動は、地質学・古生物学の分野における古典的大命題の一つである。そして、古気候論が“現在は過去の鍵である”といういわゆる齊一説的基礎に立って、造礁サンゴや植物の化石のような生物的証拠と、氷河堆積物や蒸発残留岩のような非生物的証拠に基づいて展開されている事情は、古典的時代以来あまり変わってはいない。しかし、過去における研究と現在のそれを比較すれば、前者では言わば点的な証拠によった定性的研究がもっぱらであったのに対し、現在は定量的研

究への指向性が顕著であるといえることができる。ここでは、そのような古生物学の立場から古気候変動を追求する方法論について触れるとともに、現在の研究水準の一端を紹介してみたい。

古生物学における方法を理解するには、海洋プランクトンを対象にする微古生物学の分野が古気候の解明にどのようにして寄与できるのかを知るのが、いちばん手取り早いであろう。一口にプランクトンと言っても、化石として残存し得る CaCO_3 や SiO_2 でできた硬い骨格を持ったグループがここでは対象になる。これらの現生種の分布についての調査が近年進行し、世界の海洋での生活群集はもちろん、海洋底の表層堆積物の一員となっ

* Symposium on the Climate Change and Variability

** Y. Takayanagi, 東北大学理学部

た遺骸群集の分布まで追求されるに及んで、両者とも海洋で帯状分布をする水塊の配置と良く対応した分布型（種の構成や頻度組成）を持つことが明らかになった。いっぽう、これらの化石が地質年代を指示する、いわゆる示準化石としてきわめて好ましい条件を備えていることについて認識が深まり、これらにより地層を時間的順序に従って細分し、また、遠隔地域間で地層の対比をする化石層位学が発達した。さらに、同位体古生物学の進歩により、 CaCO_3 からなる浮遊性有孔虫の殻の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ の同位体比を水温計に用いる研究が活発に行なわれるようになった。

このような古生物学の発展に加えて、それを支える外的要因もまた出揃っている。戦後の海洋地質学の進展は、海洋底堆積物の採集法の発達を促した。海洋物理学の方面でも、各種探査法の開発により深海底の構造をかなり深部まで解析できるようになり、堆積物の発達状況が船上で把握できるようになった。現在では、調査船を目標に正確に近づく操船法の洗練化に助けられ、あらかじめ設定した目的の深海底から長い柱状の堆積物試料を採集することが可能になっている。

さらに特筆したいのは地磁気層位学の勃興で、これは

堆積岩中に残留する磁気を測定し、地球磁場が過去において反復逆転した経緯を明らかにしつつある。これと各種放射性同位体による年代測定法の協同によって、物理的手段による地質年代の編年への道が開かれた。その結果、プランクトン化石による古生物学的手段とあわせて二つの独立した“時計”で地質年代決定が可能となり、両者を綿密に対照することによって“時計の刻み”を細かく識別し、堆積岩に留められた古環境の記録を詳しく編年する作業が進行中である。

最終氷期の極期に当たる18,000年前の気候復元をしたCLIMAPの研究(1976)では、多数の深海底堆積物試料についてプランクトン化石の多変量解析を行ない、表面海水温の状態を復元するのが微古生物学者の役割であった。古生物を指標とする古気候研究の方法は一応確立されたと考えられるが、時代をさかのぼって第四紀以前の古気候解明のためには、まだ解決を要する問題が多々ある。しかし、世界の各所より採集される堆積岩の連続的試料は、いわば地質時代における長期変動の定点観測資料に相当し、今後のこれらの研究に多くの期待がかけられる。

太陽放射の変動性

—太陽物理学の立場から見た太陽放射の変動性—

桜井 邦朋*

太陽放射が、光球の等価温度約6000Kの熱放射から成ることはよく知られている。また、この等価温度は、長い間に亘ってほとんど変わることがなかったと考えられている。したがって、これから決まる太陽常数は同様に長期に亘って、やはり不変であったことを示している。この太陽放射は、太陽の中心部で進行している熱核融合反応の結果作られるものであるから、太陽常数がほとんど不変に保持されているという推論は、この融合反応も長期に亘ってその能率がほとんど変わらなかったことを示唆している。

ところが、この反応の副産物として創成される太陽=

ニュートリノのフラックスに関する最近の測定結果は、この太陽のいわゆる恒常不変性に対し疑問を投げかけている。つまり、このフラックスの大きさが、太陽の内部構造研究における標準モデルから期待される値に比べて、 $1/3$ ほどにしかならないのである。このことは、太陽中心部で進んでいる熱核融合反応の能率が現在それだけ下がっていることを示している。

現在観測されている太陽放射は、約200万年前に太陽中心部で放出された核エネルギーに由来するものであるから、やがては、太陽放射のフラックスが現在のそれよりも小さくなる時期が来るものと予想される。こうした事態は、太陽の四十数億年に亘る長い歴史の中で、既に何回も繰り返り起こっている可能性のあることが、現在

* K. Sakurai, 神奈川大学工学部

指摘されている。したがって、太陽常数は少なくとも100万年のオーダーより長い時間スケールでは、かなり大きな変動を繰り返して来た可能性があることになる。このような変動が地球環境に大きな影響を及ぼし、氷河時代などの原因となったかも知れぬと、現在指摘されている。

太陽活動が約11年周期の変動を示すことはよく知られている。さらに、80年周期変動の存在も指摘されている。この周期変動が55年と115年の二つの周期変動から導かれるものであるとする考え方も、現在提唱されている。短いものでは、準2年周期変動の存在も知られている。このように、太陽活動にはいくつかの周期変動がある。この他に、最近詳しく研究されて明らかにされた非周期的な不規則変動もある。たとえば、マウンダー・ミニマムとか、グラント・マキシマムと呼ばれている異常太陽活動期の存在である。マウンダー・ミニマム(1645年—1715年)にあっては、この期間中、太陽黒点はほとんど観測されず、また、太陽面全体がコロナ・ホールで掩われたような状況にあった。この時期が、いわゆる小氷河期の最盛期とほぼ一致していたため、太陽活動の変動が、こうした地球環境における小規模なスケ-

ールの変動の原因となっていると指摘されている。

太陽活動の大きさは、太陽の全体としての自転スピードの変動にコントロールされているという証拠がある。マウンダー・ミニマム期には、この自転スピードは、現在の観測値(平均)に比べて数%大きかった。実際には、太陽活動はこの自転スピードの増大と共に小さくなって行く傾向を示す。ここ10年間(1967年—1976年)においては、この自転のスピードは漸次加速の傾向を示していた。このことが、太陽活動サイクル20(1965年—1976年)の黒点活動の大きさに反映していたと考えてよいだろう。太陽活動の大きさと太陽の自転スピードの大きさは逆相関の関係にあることが、過去300年に亘る太陽観測データから求められている。

太陽常数や太陽活動の変動が、いかに地球環境の変動と因果的に関係しているかについては、今後の精力的な研究を待たねばならないが、太陽がかつて考えられたような恒常不変な星ではないことは、十分考慮されるべきである。実際、最近の過去約30年に亘る太陽活動は、過去300年の太陽活動の歴史の中で最も活発なものであったことを、忘れてはならないであろう。

第四紀の火山活動の変動と気候

町 田 洋*

1. テフラ(火山灰)を大気中に噴出する火山活動と気候

この関係については、次の三つの視点からの研究がある。

(a) テフラによる気候変化史・氷河性海面変化史の編年学的研究：地史の研究にテフラは時間指標層として利用される。

(b) 火山活動に与える氷河性海面変化の影響：火山活動の源である上部マントルの活動に対して海面変化はhydroisostaticな影響を与えるので、これによる火山活動の消長もあり得る。

(c) 大気中に供給された細粒テフラ(エアロゾルを含む)による気候の制約

2. 第四紀中・後期の気候変化史

その復元方法には、深海底コア(有孔虫組成やその酸素同位体比)の編年、サンゴ礁の地形・地質研究による海面変化史研究、さらに1(a)で述べたテフラ編年学的研究などがある。それらの結果はかなりよく一致する。すなわち、最近の70万年間の気候-海面変化は、大きな間氷期-氷期のサイクルがおよそ10万年ないし12万年の周期で訪れ、小サイクルは過去13万年間に関する限りおよそ2万年周期で起こったこと、また、大間氷期の後の気候の寒冷化は fluctuate しながら概してゆっくり進んだが、氷期最盛期後の温暖化は急激であったこと、などが明らかにされている。また、最近20万年間では、氷期のピークは16~15万年前と5.5~5万年前および2.5~1.3万年前であり、間氷期のピークは13万年前と6千年前に認められる。

* H. Machida, 都立大学理学部

3. 第四紀の火山活動の消長

(a) グローバルな尺度での新生代火山活動には消長がある。世界各地の深海底に堆積しているテフラの時代別頻度をとると、第四紀は過去2千万年間で最も火山活動の活発な時期である (Kennett・Thunell, 1975)。

(b) 過去数十万年ないし数万年間の火山活動史となると、グローバルな尺度ではなかなか資料がまとめられない。ここでは研究の進んでいる九州、本州中部と東地中海火山群の噴火史 (20万年間) を取り上げた。これらの例では、1万年刻み程度の粗さでは、火山活動の消長と気候史との対応はあまり明瞭でない。

(c) 過去2.5万年間 (最後の氷期以降) の火山活動の消長につき、日本の諸火山 (富士, 阿蘇, 桜島, 霧島,

十和田, 北海道の4例) とニュージーランド北島の火山を取り上げた。その結果、ヒブシサーマル期にはその後よりテフラを噴出する爆発の頻度が小さくなった例が多く認められた。また最近5千年間は、多くの火山で活動が活発化した時期である。

4. 問題の所在

(1) 3(c) で述べた最後の氷期と後氷期についての火山活動史の資料を、地球上のいろいろの火山について求めることが今後必要である。

(2) 気候変化は種々の要因の複合によると考えられるが、もし火山活動と気候との間に有意な対応が認められるなら、因果関係のモデルとなる1(b)と1(c)それぞれの評価と結びつきはどのように考えたらいいか。

最近の火山活動の変動と気候

山元 龍三郎*

Benjamin Franklin が、約200年前に異常天候の原因を火山噴火だと示唆して以来、数多くの研究者が気候に対する火山噴火説を論じてきた。噴火時に成層圏にまで噴き上げられた火山灰が日射を妨げるので気候の寒冷化の原因になるというこの説は、多くの人に受け入れられたが、一方では裏づけとなる信頼できる証拠がないという理由で賛成しかねると明言する学者もいる (Landsberg, 1974; Mason, 1976)。ここでは、主として1976年以降最近までの噴火説に関する研究を展望する。

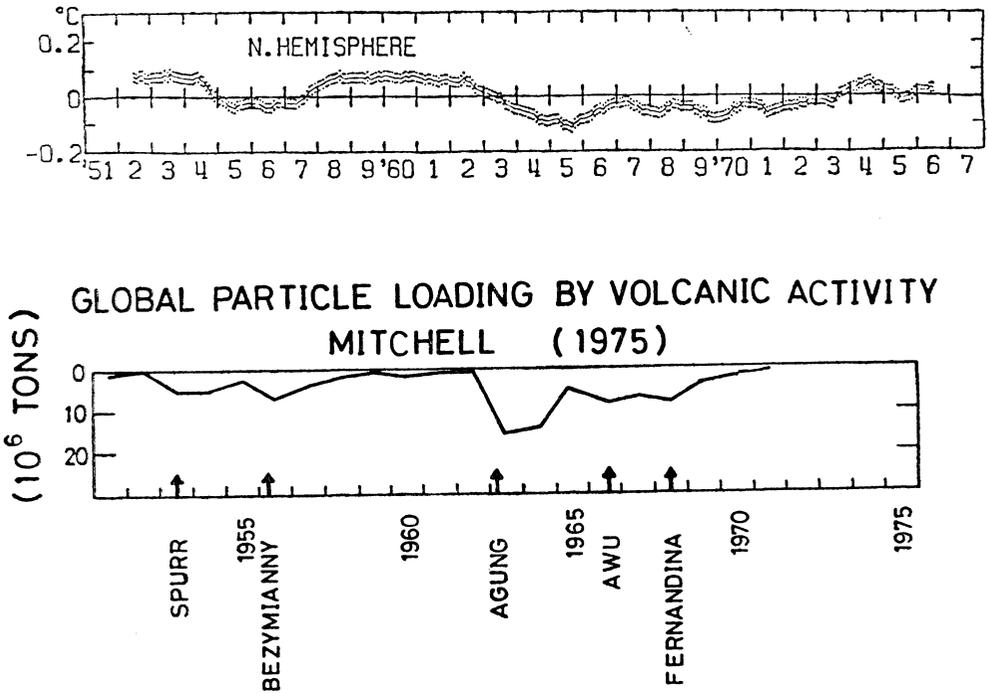
1961年に発見された下部成層圏のエアロゾル層 (エンゲ層) に関連して実施されたU-2機による成層圏エアロゾルのサンプリングや大気中の硫酸粒子の量の経年変化の観測により、今世紀後半では最大と言われるBali島のAgung噴火による成層圏エアロゾルの挙動が明らかになった。噴火時に、火山灰と共に火山ガスが噴出するが、火山灰は比較的速く沈降し数カ月でほとんど姿を消す。火山ガスとして成層圏へ送り込まれた亜硫酸ガスは、酸化・加水反応により硫酸粒子となり、1年以上成層圏に浮遊して、日射を妨げる。

エアロゾルの組成・粒径によって、その放射特性が変

わる。また、噴煙の届く高度が高いほどエアロゾルの空気中での滞留時間が長くなり、水平方向の拡がりも広範囲となる。これは、大気循環によって支配される事が明らかである。火山噴火説を理論的に強固なものにするためには、気体-粒子変換過程を含めたエアロゾルの挙動・放射過程・力学過程を総合した複合過程の定量的研究が必要である。Hunt (1977) は、エアロゾルの挙動を局限する仮定をおいたが、放射と循環との間の非線型相互作用を取り入れた数値実験を行ない、噴火による気温低下を得ている。

一方、観測資料解析から噴火説を裏づける研究成果が、最近いくつか発表された。次頁の図は、北半球平均気温の年差を最適内挿法で求めた星合 (1978) の結果と、Mitchell (1975) が噴火時の総噴出量の1%が成層圏に噴き上げられ、その量が14カ月の間に1/eに減少すると仮定して算定した、成層圏エアロゾル量の推移を対比したものである。両者のかなり良い対応関係が示されている。このような観測資料解析や上述の数値実験などがさらに推進されれば、LandsbergやMasonの噴火説に対する不信感が取り除かれるであろう。

* R. Yamamoto, 京都大学理学部



上は、最適内挿法で求めた北半球平均気温の年平均偏差の36ヵ月移動平均であり、点線は算定誤差の範囲を示す(星合, 1978 による)。下は、Mitchell (1975) による成層圏エアロゾル量の年平均の推移を示す。矢印はエアロゾル量に効果を及ぼした火山の噴火を示している。

地球軌道要素の変動と気候

—ミランコヴィッチ説とその位置づけ—

中 島 映 至*

気候の変化の原因を地球外の天文学的要因の変化に求める考え方は、素朴だが魅力的で古くから多くの説が生まれた。軌道の変化による地球と太陽の相対位置の変化が、日射の総量や緯度的・時間的変化を起し、これが気候の寒冷化・温暖化を促すという説もその一つである。Herschel (1830), Adhemer (1842), Croll (1875) を経てMilankovitch (1938) によって定量的に確立された。いわゆるミランコヴィッチ説である。その後、年代測定や古気温の測定技術が進み第四紀の水期群が理論の

予想する周期性を示していることが確認されるに至って、数万年スケールの気候変動の理論として身近な説になり始めた。Milankovitch は、長さが等しい夏と冬半年の積算日射量を定義し、高緯度の夏半年の値を気候の寒暖の独立変数とみなした。しかし、地質学的データと日射曲線の厳密な比較は必ずしも良い対応を示しているわけではなく、また理論による説明にも困難が伴っている。

近日点経度、赤道面傾斜、離心率等を含む軌道要素は、他の惑星や月、太陽による摂動によって変化するが、それは多体問題の困難を反映して複雑で、Milankovitch や

* T. Nakajima, 東北大学理学部

Brouwer・Woerkom (1953), Sharaf・Budnikova (1967) による計算結果は細部においていくらか違っている。また、Berger (1977) は摂動の高次項を取り入れるとこれらがさらに変更を受けることを指摘しており、理論にとって不可欠な軌道要素の時系列についても議論は収束していない。

Emiliani (1955), Fairbridge (1960), Broecker (1966) らによる古気温や海水位と日射曲線の対比の研究はミランコヴィッチ説を支持する劇的な例であったにもかかわらず、約5000年前に起こったとされる climatic optimum 等、地質学的に知られている重要な事件のいくつかは日射曲線の中に対応を見い出せなかった。氷-水圏の長い時定数や低緯度の日射曲線を考慮する等、現象論的な説明が試みられたが、満足のゆくものではなかった。70年代に入って CLIMAP による大規模で総合的な深海底堆積物の採掘と解析が進むようになって、ミランコヴィッチ説の周辺も新たな段階を迎えた。数十万年にわたる詳細な古気温等の時系列から、Pisias (1976), Hays *et al.* (1976) は power spectrum を計算したが、歳差、赤道面傾斜、離心率が示す約2, 4, 10万年の周期に対応する極大が見られ、気候がこれらの軌道要素の変化に伴って変動する証拠と考えられた。しかし、最も卓越する離心率の10万年周期の変動が日射曲線では無視できるほど

弱いこと等、単純なミランコヴィッチ説のみでは説明できない点が明らかになってきた。

軌道要素の変動と気候変動を現実的な気候モデルで結びつけようとする試みは、しかしまだその端緒にある。Shaw・Donn (1968), Budyko (1972) は、夏半年の積算日射量の緯度分布を簡単な熱収支モデルに与えて、軌道要素の変化によって気温、氷床が顕著に変動することを示した。Held・Suarez (1974) も、赤道面傾斜の変化に伴う年積算日射量の緯度分布の変化が氷床の安定度に大きな影響を与えることを示した。一方、Saltzman・Vernekar (1971), Sellers (1970) は、ほぼ同様な気候モデルに年積算日射量の緯度分布を与えたが気温の変動は極めて小さかった。現在、日射量を年または半年積算で与えるのではなく、その季節変化を考慮できるモデルや、今まで無視できるとされた離心率の変動を気候変動に結びつける可能性のある力学的非線形効果を取り入れたモデルの開発が課題になっている。

軌道要素の変動は、気候の変動を捉す他の多くの要因の一つにすぎず、今後ほかの要因との関連を理解することが重要である。特に、ミランコヴィッチ説では説明できない氷期群の開始の機構を理解することも今後の課題となろう。

近年の気候変化

朝 倉 正*

1. はじめに

筆者は5年前、気候変化や異常天候の実態とその見通しについて調査するためカナダとアメリカに渡ったが、その当時は極く一部のしか関心を払っていなかった。むしろ、天候は変動の大きいのが常であって、現在とくに問題にする必要はないという意見の方が多かった。このような意見は日本においても主張する向きがみられるが、その多くは時間スケールの取り方が違うためか、実況に基づかない観念的な思考のためのように見受けられる。しかし、近年世界的にこの方面の関心が強まり、WMO を中心にして世界気候計画 (WCP) が1980年代

に展開されようとしている。アメリカは、昨年 (1978年) 9月に気候に係わる研究についての法律が議会で承認されるなど様変りの観を呈している。このような風潮はやがて日本の気象界にも波及するであろう。というのは、気候変化の研究は気象の広い分野に係わりを持っているだけでなく、氷河、海洋、天文、地磁気、地球化学、生態学などとの学際的協力なしには進歩しない、いわば総合科学の頂点にあるようにも汲み取れるからである。

2. 背景

高度成長時代には未来学が華やかであったが、かの有名なローマ報告以降、資源有限と人口増加、気候不順などを基調にした終末論が横行し、未来の評価については

* T. Asakura, 気象庁長期予報課

大きく揺れた。現在は、極端な楽観論も悲観論も影をひそめている。その中において、気候変化とその変動（気候の変化を表現する英語はたくさんあるが定義があいまいである。WMOは、1978年の執行委員会において climate change and variability に用語を統一したようである）が大きな問題になってきたのは、1972年に世界的な干ばつが発生し、主要輸出国における穀物備蓄量が1961年～1965年の平均値の半分に落ち込み、食糧危機が唱えられたことが発端になったように考えられる。日本は外貨があって輸入できたので食糧危機にならなかったが、外貨の乏しい発展途上国は飢餓の淵に立った。このような、天候の著しい平年からの偏りはその後も発生し、たとえば1977年アメリカの大寒波が経済活動を阻害し、GNPの伸びを停滞させるなど社会の各方面に影響するところが多い。このような社会的影響の大きいこと以外に、FGGEの次の段階として1980年代に気候の物理的基礎を解明することが計画されている。

3. 気候変化の実態

気候の変化を議論するときは時間スケールを決めないと混乱する。1000年の時間スケールで気候変化をみると、氷期気候の到来が近いという見方が分からないでもないが、100年以下の時間スケールで見るとそのような見方を素直に受け入れることはむずかしい。ここでは数10年～10年の時間スケールで見た近年の気候変化の実態についてまとめたもので、その要点は次の通りである。

(1) 過去1,000年の気候変化の中で、小氷期以降の温暖化は例外的と言えるほど著しい。

(2) 上記の温暖化は、1940年頃ピークに達した。その後、寒・暖の変動を繰り返しながらも傾向としては寒冷化している。

(3) 寒冷化の傾向は緯度によって異なる。高緯度では1960年半ば頃まで北極地方を中心にして気温は低下した

が、その後昇温し、1970年代は平年の状態に戻った。しかし、中緯度地方の対流圏下層の平均気温は1970年代に入っても引き続き寒冷化している。

(4) 南半球は資料が少ないので詳しくはわからないが、1960年代半ば頃までは寒冷化し、その後、温暖化に転じたようである。南・北両半球の平均気温を加えるとほぼ平均値に近く、全球平均では寒冷化も温暖化もしていない。

(5) 10年当たりの平均的傾向を数値的に表わすと、北半球の平均気温（0～90°N、地表～16km）は -0.196°C 南半球は $+0.092^{\circ}\text{C}$ である。

(6) 太平洋中部における表面水温は、1970年以降持続的に平均値（1947年～1966年の平均）を下回り、水温は低下しつつある。

(7) 上記のような気候変化に伴い、地上気温の空間的な変動度が増大している。

(8) 1960年代は東西流が発達し、70年代は南北流が発達している。これに伴い、1973年～1977年の北半球における月平均気温の異常値の発生は減少せず、出現率の期待値ごとに集計すると、数十年に1回という現象と数百年に1回という現象は同じ位出現している。

4. 今後の予測

いまは、気候が形成される物理的基礎を理解しようとしている段階なので、予測することはかなり先のことになる。しかし、一方において温暖化説、寒冷化説がある。これらは、気候の変動するリズム、太陽活動、あるいは人間活動による熱収支から予測したものが大部分である。とくに、欧米ではCO₂による昇温作用が大きく取り上げられているが、これは、アセスメントとしての価値はあっても気候予測としての価値は少ない。今後、社会から気候予測についての要望が高まるであろう。この方面の研究を大いに推進する必要がある。