

- вопросу о связи температуры Арктического Бассейна с осадками умеренных и тропических широт (北極海の気温と温帯熱帯の降水量との関係について). Труды ГГО вып 258, 49-55.
- Дресдов, О.А. и Покровская, Т.В., 1973: Проблема прогноза колебаний климата (気候変動の予想の問題). Труды V всесоюзного метеорологического съезда том III, 17-26.
- Джержиджо, В.А. и Романов, Н.Н., 1973: Реально ли использование солнечной активности в прогнозировании погоды в настоящее время? (天気予報に太陽活動を利用するのは現在、現実的であるか?) Метеорология и Гидрология, 8, 99-103.
- Кац, А.Л., 1973: Необычное лето 1972 года (1972年の異常な夏). Л. Гидрометесиздат, 1-58.
- Логвинсов, К.Т., 1973: Особенности 1972г. на Украине (ウクライナにおける1972年の干ばつの特性). Л. Гидрометесиздат, 1-32.
- Паршин, В.Н. и Снитковский А.И., 1973: Гидрометеорологические особенности 1972 г (1972年の水文気象の特性). Метеорология и Гидрология, 4, 85-87.
- Полозова, Л.Г. и Сазанов Б.И., 1969: Современное потепление климата и возможная его причина (近年の気候の温暖化とその仮説的原因). Труды ГГО вып, 245, 49-55.
- Рубинштейн, Е.С., 1973: Структура колебаний температуры воздуха на северном полушарии (北半球の気温の変動の構造). Л. Гидрометесиздат, 1-34.
- Федоров, Е.К., 1973: Погода и урожай (天気と収穫). Л. Гидрометесиздат, 1-56.
- Хромов, С.П., 1973: Солнечные циклы и климат (太陽周期と気候). Метеорология и Гидрология, 9, 93-110.

551.582 (73:71)

## アメリカ、カナダにおける長期予報と気候変動の研究の動向\*

朝 倉 正\*\*

## はしがき

昨年(1973年),世界の異常気象の実態調査のため10月21日から11月16日まで,アメリカ・カナダの気象機関と大学,研究所を訪問した.そのとき,たまたま気候変動研究について知り得た知見をまとめたもので,標題に対しては全く不十分な断面をとらえたものにすぎない.したがって,これをもって,アメリカ・カナダにおける気候変動研究の全容を伝えるものとするには出来ないし,また,その任でもない.

アメリカ・カナダにおける気候変動研究を大別すると,気候の sensitivity, 大循環モデルの改良, Predictabilityなどがあげられる.その主な内容はおおよそつぎの通りである.

## 1. 気候の sensitivity

大気の運動を予測の立場から大まかに分類すると,(i)主に初期条件によって(勿論境界条件も大事だが)決まる短期間の運動,(ii)初期条件に余り関係がなく,境界条件に大きく支配される超長期間の大規模な運動,(iii)初期条件にも境界条件にも大きく支配される長期

間の運動,に分けられよう.(i)はいわゆる短期予報,(ii)は大気大循環,気候(iii)は週間,長期予報である.1960年代初頭の頃は,この順序で研究が進歩するであろうと言われたが,いまふり返ってみるとほぼその通りになっている.(i)が完成に近づいて(ii)が始まることはSGGEのスタートを意味する.

MCARの笠原さんによると,FGGEによって,短期予報と1~2週間さきの予報が著しく進歩するであろうが,これにはあと10年はかかるという.SGGEが活動を始めるのは早くとも1980年代に入ってからで,そのときのテーマは気候形成の物理的な理解と,そのつぎに気候変動の課題に進むと考えられている.

だからと言って,現在,気候のシュミレーションの研究が進められていないというわけでない.NCARの中にあるAtmospheric Analysis and Predictionの下にGARP(A. Kasahara)とClimatic theory and Analysis(P. Thompson)などがある.後者の気候研究グループは各方面から専門家を呼んで活発に討論会を開催している.具体的な研究成果は今後に期待されているが,このグループは気候を支配する要素を物理的に決めることに主眼をおいている.ここが,やがてSGGEの一つの主体になるグループなのでその活動の情報をよく知る必要がある.

\* On the Present Status of the Study of Long Range Forecasting and Climatic Change in USA and Canada

\*\* T. Asakura: 気象庁予報部

WMO の気候委員会の結論の一つには、GC (大循環) モデルによる気候形成の研究の促進をあげている。筆者は GC モデルの改良に取り組んでいる UCLA, NCAR, GFDL の順で訪問したが、そこで共通して提起された問題は気候の sensitivity であった。これは気候を形成している要素たとえば海水温とか雲量、CO<sub>2</sub> を変えたとき、気候がどのように感応するかということで、ある意味では control experiment のことである。現代における力学的気候形成の研究は sensitivity を組織的に行なう段階に位置づけられている。

気候の sensitivity は各 GC グループが取り扱っているが、その中で NCAR の W. Washington と GFDL の真鍋さんの研究を紹介しよう。Washington は Scripps 海洋研究所と協同で NORPAX (North Pacific Experiment) の一環として、海洋-大気系の大規模、長期間の変動を研究している。海面温度の変化が大気の運動に影響していると主張している研究をとらえて、NCAR の GC モデルでそれを検証しようというものである。大気の大規模な運動に影響していると主張されている海面温度のパターンとしてつぎの3つを取り上げている。

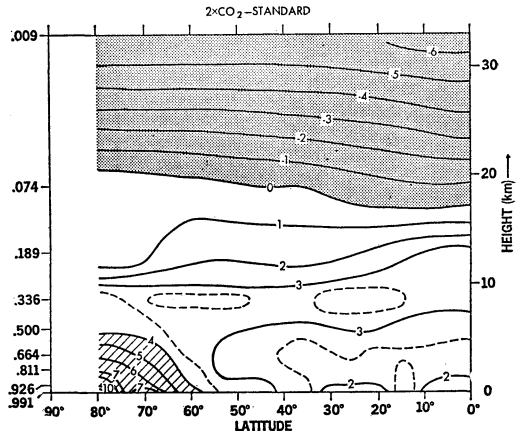
I. 中部太平洋における中緯度の海面温度分布が東西方向で逆な分布をする (Namias, 1972).

II. 西太平洋における中緯度の海面温度が南北方向で逆な分布をする (White と Barnett, 1972).

III. 赤道太平洋における海面温度が赤道にそって東西方向で逆の分布をする (Bjerknes, 1972).

検証するとき比較するものとして、海面温度に偏差がない場合、ランダムに noise として海面温度に小さな偏差をあたえた場合とどれだけ違うかにかかっている。一般に、高水温域では蒸発と顕熱輸送が活発となって、そこに弱い尾根が形成され、ときに18kmの高さに達することがある。この場合、太陽高度を1日中甸に固定しかつ海面温度は一定にして、一方向きの海気交換しか考えていない制御実験なので、正確な結論とするのは時期尚早かも知れないが、I. と II. の場合は期待された程の循環変動はなかったようである。

GFDL の真鍋さんによると、海水温の変化が大気環流を変えるのは1カ月平均程度では現われないという。これは、natural variance の方が大きいので、もっと長期間の平均をとると海水温の効果が現われてくる。したがって、季節予報には海水温の効果を無視するわけにゆかない。もっともこれは中緯度における結果であって、低緯度地方の場合には適用されない。真鍋さんの実



第1図 二酸化炭素が倍になったときの昇温分布 (真鍋, 1973)

験によると、低緯度における海水温を変動させると、大気は敏感に反応し、じょう乱の発生、降水量分布がきめんに変わる性質が指摘されている。さきに述べた、NCAR の Washington も、大循環は III. の例 (ビヤークネス) のように赤道地帯の海水温の変化に敏感でなからうかと期待していた。

気候の sensitivity でもう1つ注目すべきことは、環境汚染である。CO<sub>2</sub> がふえると温室効果のため昇温するというのは常識になっている。そして、しばしば引用されるのが真鍋さんが考案した対流による鉛直調整モデルの結果である。これが世界的にみても一つの標準になっている。しかし、真鍋さんはさらに先きのことを考えており、CO<sub>2</sub> イコール温暖化、dust イコール寒冷化というストレートな考え方に対して、慎重な態度をとっておられた。その一つの根拠として、大気中の CO<sub>2</sub> 濃度を2倍にしたときの気温上昇を簡単な3次元モデルで算出した、このモデルでは、計算領域は限定されていて、極端に理想化された地形分布を仮定している。また、海洋は熱容量のない湿めった沼と仮定して計算を進めた。その結果は第1図に示す通りである。この結果は global average model で期待されるよりも気温上昇が大きいのは、雪原の減少による positive feed back を取り入れ、convective heating が下層に限られたため、高緯度地方は global average model のときの約2倍の7~10°C、その他の緯度では2~3°C昇温した。

しかし、昇温した結果、対流が活発化し、雲のふえることは考えに入れていない。全球平均で下層雲が僅か2.4%ふえただけで、地表面温度は約2°C低下する。こ

これは CO<sub>2</sub> による昇温を打ち消してしまう。すなわち、雲量・雲形の気候に対する sensitivity はかなり敏感である。それに global albedo など放射を支配する要素が複雑にからみ合っているので、CO<sub>2</sub> が増加したからと言っても、大気の流れを考えると昇温するどころか、逆に冷却する可能性すらあることを真鍋さんは強調している。いま、世界的に流行している Man's Impact もより現実に近い GC モデルが完成するまで結論の大半は不確定と言った方がよさそうである。この点について、真鍋さんは意欲的で、GFDL では新しい計算機が導入されたら、fine mesh で太陽高度の季節変化を入れて季節の動きを再現する計画があり、それが完成したら氷河期の形成の研究を進める予定である。これは SGGE の目的でもあり、今から成果が期待される。

気候の sensitivity でさらに面白いと思われる実験が NCAR で行なわれていた。その一つは NCAR モデルによる地形の影響である。笠原さんはチベット高原を入れた場合と入れない場合を計算機で平行して走らせて結果を比較したところ、チベット高原を考慮した場合には成層圏でアリューシアン高気圧が形成されるが、チベット高原がないとアリューシアン高気圧が形成されないことを指摘された。これは、海と山による波数1のエネルギー鉛直輸送 ( $\overline{p'w'}$ ) が外の波数にくらべて著しく大きいためである。

しかし、これだけでは polar night Jet 形成の説明では不十分であった。同じく NCAR の笹森さんは成層圏にオゾンを入れて計算したところ、オゾンによる加熱作用が加わって南北温度傾度の集中が起これ、そこに polar night Jet を形成することに成功した。

このように、海洋、山岳、オゾンあるいは太陽活動、環境汚染質の気候形成に及ぼす効果が制御実験を通して定性的議論から定量的議論に進歩して来たことに注目したい。

## 2. 海洋と大規模な環流の変動

さきに紹介した NORPAX の本部はスクリップス海洋研究所内にある。この研究所はロスの南、San Diego との間であって、実に気候のよい所である。NORPAX の主な責任者の Stidd は相関法を高層天気図に始めて適用した人で長期予報にはなじみの人である。ここでは、海洋と大規模な環流との関係を研究しているが、気象の方からいうと海洋といっても熱的な効果が主に問題になるので、海面温度資料を用いて大気運動とどのように関係しているか研究されていた。

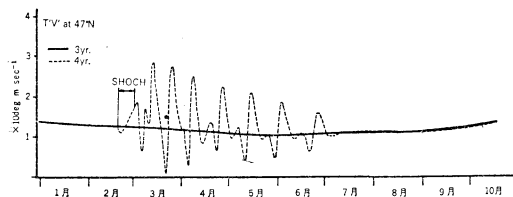
この方面の研究という、まず、J. Namias があげられる。彼は以前から大規模な環流を変化させる主要因として海水温の偏差を強調していた。たとえば、高水温は大気に熱と水蒸気を平年より絶えず多く供給するので低気圧が発生しやすくなり、そこに気圧の谷が形成される。その結果、南から北に向けてより多くの熱が輸送されて、下流に尾根が形成されるという筋書きのものであった。

しかし、今回改めて季節平均の 700mb 天気図と季節平均の表面海水温度との相関を北太平洋域（中緯度以北）について計算したところ意外な結果が示された。すなわち、同時相関ではアリューシアン南方に 0.6~0.7 程度の高相関が得られ（夏にもっとも大きい）、同時的には海洋と大気が密接に関連していることがうかがえる。つぎに季節をずらして、例えば冬の 700mb 天気図と春の表面海水温度との相関はやはりアリューシアン南方で高相関が得られている。しかし、冬の表面海水温度と春の 700mb 高度との相関は 0.2~0.3 程度と小さな値で、まずは無関係とみた方がよいようである。すなわち、大気の流れは海洋を支配するが、海洋が大気を linear に支配することはなく、対流現象を通してより複雑な機構によって影響しているの、相関という手段では評価できないのではないかと Namias は考えている。これは従来の Namias の主張を支持するものかどうか疑問が残る。

海が大気の大規模な運動や気候形成に重要な役割りを果たしていることは誰も疑う人はいないが、その評価の程度についてはいろいろ議論の余地がある。この点について、個人的な見解としてつぎの2つが指摘された。その1つは、海気交換による大気の変化と大気運動自体の相互作用によって作られる変動を量的にくらべた議論に欠けているので、定量的に海洋の重要性を肯定するところまで分かっていない。もう1つは、前者に関連して海洋の熱と水蒸気を大気に移送するモデルの開発は、かなり不満足なもので、今まで得られた結果をうのみにするのは危険であるという意見もあった。筆者の印象として、海洋の大気大循環に対する重要性は変わらないが、その評価の精密化については今後の研究に期待するところが大きいように思われた。

このような議論をふまえた上で、特記すべき研究は栗原さんの2層地球統計-力学モデルによる研究であろう。このモデルは熱量、運動量などの渦動輸送を統計的に記述する方式をたてて、帯状平均した量に関する予

報方程式になっている。この方程式を用いて、全球が陸地の場合と海洋の場合の気候特性を比較している。その結果はいろいろあるが、たとえば低緯度上空が強い偏東風が吹くのは陸地の場合で海洋の場合にはみられない。また、Hadley cell は両者とも夏半球から冬半球にまたがっているが、Ferrel cell は全球が陸地の場合冬に強く夏に消失するのに対し、全球が海洋の場合は年間を通して勢力は弱いが存在している。さらに面白い実験は海洋だけの地球モデルで drag coefficient を 0.001 から 0.0043 に突然ふやしたときそれがどの位の期間、大気は記憶しているかを計算した、それによると、ショックをうけた大気はかなり大きな振幅の noise が発生するが、約5か月目にはおさまっている。このモデルの場合、大気は海面からうけるショックをか5月間記憶していたことになる(第2図参照)。



第2図 全球が海洋の場合3年目(実線)と4年目(点線)の47°Nにおける熱輸送量の時間変化。点線はショックをあたえた場合(栗原, 1973)

### 3. Predictability と長期予報

Predictability の話にはいる前にカナダ、アメリカの長期予報についてふれたい。まず、カナダでは長期予報は今後研究してゆこうということで、ルーチン的には何もなされていない。さし当り5日ないし7日の延長予報からスタートすることになっているが、その時期は未定である。対社会の要望に対してはアメリカ(NOAA)のプログノをFAXで受信している、たとえば、海氷の1か月予報などはプログノから主風向、風力を推定して海氷の運動を予測し、必要あるときは警戒を呼びかけている。また、農業に対するサービスは3日先きまでの予報を提供するだけにとどまっておき、サービスの主体は防霜におかれている。

カナダの予報研究部(Dr. Cloadman)ではよりきめ細かな予報をいかにして出したらいかと考え、ウオターロー大学と共同して研究を進めている。カナダでは解析センターから190km gridのプリミティブ・モデルで

プログノを放送すると、管区ではそれを基にして、新しい資料を追加し、125km gridでプログノを再計算して地域の特性に合った予報を出すことを計画し、バンクーバーではすでに実行している。これを regional modelと呼んでいる。さらに大気汚染とか都市気候のような局地現象に対しては100×100kmの領域を5×5kmの格子にわけて regional model で予報された  $u$ ,  $T$ ,  $V$  などを用い、さらに実測の風や熱源の値も利用して1時間ごとにプログノを out put しようと研究を進めている。

また、ここには Boville がいて成層圏の汚染を研究しているが、実際には大循環の研究を進めている。今回は、報告に値する成果を聞かれなかったが、Man's Impact によって成層圏が汚染される可能性については否定的であった。

NOAAの長期予報業務は Namias が去ってから、つぎの発展にそなえて準備中というべき形態をとっている。気象庁の予報部に相当するところが NMC でここには、Development Division, Forecast Division, Automation Division があって、NMCのDirectorはDr. Shumanである。長期予報はその何れにもぞくさない独立した組織で長期予報グループと呼んでいる。GilmanがNamiasの後任者でスタッフはMeteorologist 4人、助手5人、庶務2人、計11人にすぎない。資料は日本の長期予報とほぼ同質のものが多く、日本にない資料は北半球の表面水温偏差分布、北半球の氷雪分布であった。逆に日本が活用している資料の中でアメリカになかったのは、成層圏天気図、数値解析資料である。ここは課制でなく、グループとして存在しているせい、ルーチン作業の当番に当たっていないときは気象衛星の研究所にいたり、NCARなどの研究機関にいたりして自由に研究を進めているのは学ぶべき点と思われる。ここでは1か月予報を月に2回、3か月予報(季節予報とよんでいる)を年4回季節に合わせて発表している。後者は予報文でなく、季節平均の気温偏差分布だけ予報している。1か月予報はFAX、テレックスを通じてマスコミに発表しているが、3か月予報は要求のあったところにのみ提供している。降水量の予報を出さないのは、試行したときの成績が有意な skill に達しなかったためである。Ademの方法はルーチン化されているが、その成績は期待された程でなく、参考にする程度に利用されている。

将来の技術開発としては、南北両半球の質量、熱、運動量交換を量的に算出し、長期予報にとり入れることを

計画していた。Gilman 得意の経験的直交函数による統計予報は活用されず、全体として物理的な方法に役立つ開発業務に重点がおかれているのは正しい行き方を示すものであろう。

しかし、学問的な基礎からみた季節予報の将来については、いくつかの説がある。GFDL のある方からお聞きしたところによると、昨年(1973)のはじめ NSF(国立学術財団)の主催で Lorenz, Mintz, Spar などの委員が集まって討論会が持たれたという。そこでの結論はかなり悲観的であったらしいが、長期予報についての predictability はむしろこれからの問題と考えた方がよいようである。

いわゆる短期予報を何日先きまで延長できるかの predictability の議論をここで再現するつもりはないが、長期予報の predictability はつぎの重要な研究テーマになるであろう。NCAR の笠原さんの将来構想によると、まず短期予報の predictability を見極めねばならないが、これは対流、境界層、水平・鉛直の resolution、雲など physical parameterization によって予報が変わらなくなった時期に始めて結論に達する。おそらく、10年ぐらいのうちにメドが立つのではないかと積極的な意見であった。勿論、計算機速度と無関係でなく、今より6~7倍の速度に達することも一つの条件である。

その後長期予報が attack の対称になりうる。長期予報には外力の予報が重要であるが、それが予報出来たとしても、決定論的な予報が1か月先き、2か月先きまで出せるとは、誰も期待していない。そこには、ある種の平均操作が必要であり、モンテカルロ予報方式も研究対称に考えられよう。平均をとるにしても、時間平均、空間平均、アンサンブル平均のどれが予報の対称になりうるかが、長期予報の predictability を論ずるのにまずつき当たる問題であるとしその時期は10年先きのことと予想されている。

この種の問題に対して、UCLA の荒川さんは大学の研究室らしく、地味ではあるが、かなり深い思索をめぐらしておられたのが印象的であった。ここでは柳井さんや新田さんが積雲対流の研究を進めており、雲のアンサンブルとしての heat flux、放射平衡、planetary boundary layer における flux などの物理的な parameterization の研究が進められている。これは気候形成や長期予報にとって、熱の効果が主要な因子になっていることから分るように地味ではあるが、基本的には最も重要な問題であり、これが完成したときの成果は短期予報だ

けでなく長期予報にも多くの成果を提供するものと十分期待される研究であった。UCAL における大循環の研究は3つの柱から成り、1つは前述のパラメタライズする研究、つぎは対流圏のモデルを成層圏、中間圏まで拡げる研究、第3番目は海洋大循環の研究である。近く、2層モデルと海洋(5層)とを couple させて、どのような現象が海気交換によって起こるか研究する予定だという。長期予報が対称とする平均状態の predictability は、海洋の運動と海気交換をどのように取り扱うかによって大きく変わる性質のものであることが指摘され、UCLA の基本的な姿勢が長期予報や気候形成理論の研究にいかにも重要であり、研究のちか道であるか強く印象づけられた。

NCAR におられる大山さんも、積雲対流の研究を進め、大規模な運動との関連を研究している。1つの雲が大規模な大気の変動を変えようとは考えられないが、いくつも集まった雲の集団は大量の空気、熱、潜熱、運動量を鉛直輸送するので、大気の変動を予測するには無視することの出来ない大きな問題である。大気運動を予測するときの格子間隔にくらべると、雲の size はかなり小さい。その集団をどのようにパラメタライズするのがもっともよいか、雲の size による集団、雲の高さによる集団、mass の鉛直 flux と雲高と雲の size との関係などが研究されている。今から10年以上前、日本の長期予報技術検討会の特別講演に小倉さんが、この方面の話がされ、長期予報や気候のシュミレーションにとっていかに重要であるかを解説されたことがあった。その当時としては、大規模な運動のみに興味を向けていた時代なので、雲のように小さなスケールの現象のもつ重要性の話は一部の人間にとっては唐突であった。このような先見性のある貴重な話をした何人かの方々がアメリカで活躍していることは喜ばしい限りであるが、日本で活躍していただけるだけの研究環境に乏しい実態は悲しいことである。

GFDL の都田さんは日本を出発する前後、気象庁の長期予報作業室に2回ほど来られ、熱っぽく抱負を語ってゆかれた。それは1か月予報から季節予報の研究をするためにアメリカに行き、それを成功させたいということであった。今度、プリンストンでお会いしたときの話はまさにそれであった。

一般に短期予報の predictability の限界は2週間と言う人が多い。人によってはもっと短い人もいるが、都田さんは違う。都田さんの意見によると半球モデルでは

12日先きまでの予報が限界であるが、global model のときの限界はどこまで延長されるか誰も分らない筈と言い切っておられ、彼自身の見通しとしては21日ないし25日でないかと考えておられた。そして、都田さんはつぎに時間平均の predictability に取り組む計画だと言う。具体的には1974~1975にかけて1カ月予報を試み、Global model では14日からきいてくる海洋の影響を中心に1か月さきまでの予報を試行したい希望が示された。それが終わったら3~4か月先きの季節予報まで延ばし、時間平均の predictability を具体的に、かつ物理的なメカニズムの面から追及する計画である。この計画には彼の人生の情熱が注がれており、必ず実現されるものと期待されよう。

また、GFDL におられる栗原さんが数年前に発表された zonal mean の予報方程式は日本でも有名であるが、長期予報の predictability の議論が花やかになる頃には、先見性のある大論文として再評価されるのでないかと言われている。折角の研究は中断されているが、日本の長期予報の中に取り入れたい希望を筆者らは持っている。

4. 南西モンスーンの研究

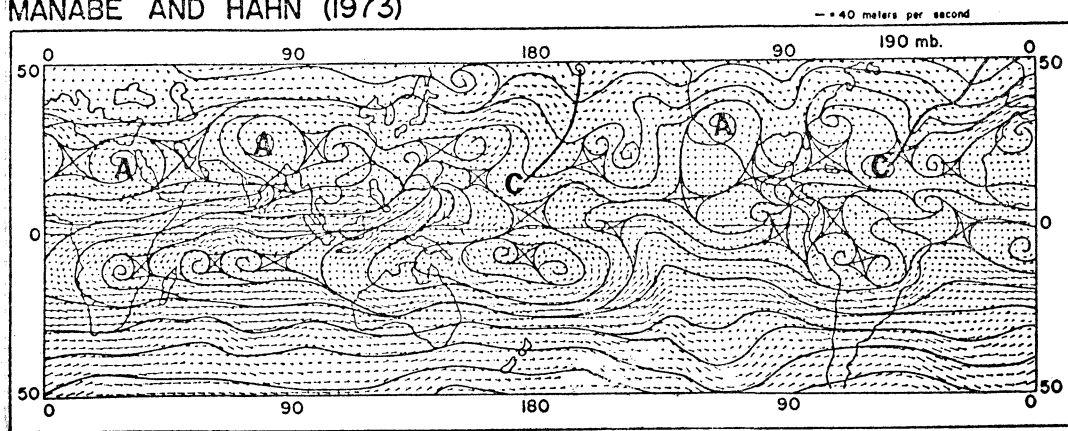
南西モンスーンの研究の位置づけは日本では想像できない程。高いものであることを特に若い研究者に訴えたい。すでに天気で告示されたように、日本にも MONEX (Monsoon Experiment) の委員会が発足した。これは、インドのモンスーンを研究するためということもあるが、背景として局地的な現象でなく Global な現象とし

てとらえることの重要性が認識されたからである。アメリカでもハワイの Ramage さん、村上さんを始め、GC モデルを研究している研究者達は異口同音にモンスーンは南北両半球の交換現象としてとらえることの重要性を指摘しておられた。

とくに、笠原さんの持論によると大循環の具体的な現象としてモンスーンをまず解明すべきであり、ついでブロッキング現象を解明することになるのではないかという。すでに NCAR モデルによって、南半球からインドに向かう南西気流の Simulation が movie picture に取められている。日本では本年(1974年)5月の AMTEX Study Conference のさい一般に公開された。もちろんこれでモンスーンが解明されたわけではなく、物理的なメカニズムの研究はこれからであると笠原は強調しておられたが、全く同感である。

GFDL の真鍋さんも Global model を用いて、cross-equatorial flow の simulation を movie 化している。190mb における流線図は第3図に示すように、チベット高原とアフリカ大陸上に中心をもつ高気圧が形成されている。前者がチベット高気圧と呼ばれ、この南側を偏東風ジェットが吹いている。これはモンスーン期の典型的パターンで、上記の2つの勢力が強いときは同時現象としてモンスーンの雨量は多い、この実験でチベット高原をとってしまうと、モンスーンのパターンは再現されない。すなわち、チベット高原がないと南西モンスーンは吹かないということである。そして、日本の梅雨活動や西日本の夏の干ばつはチベット高気圧の勢力に支配さ

MANABE AND HAHN (1973)



第3図 典型的な7月の流線分布のシュミレーション (Manabe, Hahn, 1973, 未印刷)

れるので、我々日本人にとっても重要な研究の対称であることに注目してほしい。

真鍋さんの下に Shukula さんが働いている。彼は気象庁の電計室で始めて気象の勉強し、気象現象を物理的にとらえる教育を十分して頂いたことを感謝し、岸保、新田、藤原さんなど電計室の多くの人名をあげておられ、最後に長期予報の和田さんが巧みなジョークをまじえて、モンスーンの研究が日本の長期予報にいかに関重要であるかを教えてくれたと感謝していた。Shukula さんは真鍋さんのジュミレーションでモンスーン・トラフの形成が不十分であるとして、その研究を進めていた。彼はチベット高原だけの大地形でもンスーン・トラフのような局地的な現象は再現されないことに注目し、ビルマのパトカイ山脈とアラカン山脈を入れて真鍋さんと同じモデルを走らせたところ、ベンガル湾北部で南西気流の向きが変わり、気流が収束してモンスーン・トラフを形成することに成功した。彼はインドの農業、インドの国民のためにモンスーンの研究をするのだと、インド人特有の澄んだ眼差しに情熱をたたえて語った印象は強烈であった。何故こんなことを記したかと言うと、ハワイ大学の村上さんはモンスーンの研究が日本の気象に重要であるにもかかわらず、研究者が育たないことを国際的視野から残念がっておられたからである。

モンスーンの研究はハワイ大学でもっとも解析資料が整っており、ここには Ramage さんや Sadler さんなどが活躍しておられた。村上さんは NMC の Winston の客観解析資料から 200mb における中部太平洋の谷が発達するとチベット高気圧が発達することに注目し、これが低緯度における波数1のじょう乱に対応するとした。風の場合であれば、中部太平洋の低緯度で偏西風が発達するとインドではモンスーン偏東風が発達するということである。この太平洋の谷は Sadler の詳細な解析によると MPT (mid pacific trough) による中・高緯度じょう乱との周期的なやりとりによって起こっている。近く証明されるであろうが、村上さんは波数1の波には固有周期として約20日があって、これがモンスーンの雨の周期に対応しているのではなかろうかと考えている。モンスーンの個々の雨はモンスーントラフにそってはいりこむ各種のじょう乱によるものであるが、降水全体としては波数1という大規模なじょう乱が小さなじょう乱を支配していることになる。ここで注目しなければならない点は、モンスーンの変動を南半球との相互作用でなく、北半球の中・高緯度の偏西風じょう乱との関連

(MPT) において考えている点である。

##### 5. 太陽活動と気候のシンポジウム (NASA)

たまたま、アメリカを訪問中 NASA で「太陽活動と気象現象とに関係があるのか、あるいはないのか」に関するシンポジウムが開かれた (1973年11月7～8日)。ここには以前気象研電磁研究室におられた前田さんが元気でおられる。もう50歳をすぎたはずであるが、まだ30代のような若さであり、フェイスは昔と少しも変わらない素晴らしい spirit であった。前田さんのお陰でこのシンポジウムに出席出来たが、日程の都合で1日しか出席できなかったのは残念であった。このシンポジウムには101歳になる C.G. Abbot 先生が出席し、表彰をうけられただけでなく、5分程度のスピーチをされた。その後、約1か月して亡くなられた。日射の仕事をされている方には忘れられない大先生で、まことに残念なことである。

このシンポジウムには気象関係者だけでなく、電磁気や太陽物理の専門家が集まって太陽活動が本当に大気に影響するかどうかそれぞれの専門の立場から討論しようというものである。UCAR の W. Robert が主たる推進者であったせいか、人選が必ずしも公平でなく否定論者は少なかったようである。Session は4つに分かれ、(i) 太陽活動が気候・気象に影響している事実は何らか、(ii) 地球大気に入る太陽エネルギーの変動度、(iii) 物理的機構の研究、(iv) 将来何を観測し、どんな理論的研究が必要であるか、そして宇宙空間から貢献出来ることは何か、である。ここで、全容を伝えることは出来ないが、気候に関する話題提供だけにとどめる。

##### (a) W. Robert: 太陽活動と気候との関係

1972年ソ連の干ばつは世界食糧に大きな問題を提起し、多くの気候学者の関心を集めている。このような気候変化の原因は実に沢山あるが、太陽活動が関係していることは明白である。1971～1973年とロッキー山脈の東部にはきびしい干ばつがづいたが、過去の干ばつをみると20～22年の周期で発生している。これは Hale の double sun spot number cycle で、黒点数の極小期から minor max の近傍で発生する。ネブラスカの年輪にはこの周期が長期間にわたって現われていることから偶然の関係ではない。西ヨーロッパのプロッキンの発生度数は太陽活動が活発のときに多発していることから、干ばつの発生は太陽活動と関係が深いことが指摘されよう。

##### (b) J.M. Wilcox: 太陽活動と気象との関係

300mb の極わずの指標と微粒子放射の目安になる  $K_p$ -index との関係を見ると、flare があってから7~8日後にうずの強さがもっとも大きくなる。

この他に9つの論文が話題として提供され、分野は違うがアラスカ大学の赤祖父さんは「電離層D層におけるオーロラの影響」について話題を提供されたが、大変に好評を博したようである。全体のまとめがどのようになされたかは第2日目に出席できなかったので知る事は出来なかったが、前田さんの話によると、大気の流れを変えるのにどれだけのエネルギーが必要であるか量的にわかっていないが、太陽活動はエネルギー的にどれだけ変動しているのかも量的に測定された事がなかった。そして結論的には太陽定数を測定できる衛星を打ち上げ、長期間にわたる観測の必要性が強く提言されたという。なお、このシンポジウムの詳しい紹介は B.A.M.S. の1974年2月号に掲載されたので、興味のある方は参照されることを希望する。余談になるが、前田さんが一度ジュネーブに移ったときに発表した論文をめぐって、ある大きなプロジェクト・チームと論争を永年にわたって続けられたが、遂に前田さんの論文の正しい事が認められた。外国に行ってみると、日本人が活躍し、評価されている話を聞くと、不思議なことに身内のことのように嬉しく感じられるものである。

## 6. 気候変動論と環境汚染の評価

カナダのトロント大学で K. Hare 教授と最近の気候変動について意見を聞いた。カナダは1970年代にはいつから、気候が急速に寒冷化し、夏には小麦栽培地帯に雪が降ったり、冬の積雪は過去100年以上の観測記録のなかで新記録が更新された。トロントにおける気温はすでに19世紀当時(小氷期末期)よりも寒くなっていることは、日本では余り知られていない。このようなことを背景に、K. Hare さんに気候変動の見通しについて質問したが、むずかしい質問だと答えただけであった。

Hare さんは北極圏地方の放射平衡に及ぼす植物の影響について研究している。放射は地表面の条件によって変わるが、それが森林の分布によって大きく支配されることを強調している。年間の放射熱のたまりを測定するとツンドラ地帯: 0~7, その南で木の育たない地帯: 7~15, Forest ツンドラ地帯: 15~20, 木がまばらにある地帯: 20~33, 森林地帯: 33~40, 中緯度の森林地帯: 40以上(単位キロカロリー)。植生分布の変化を見ると、じょじょに南下しているもので、それにとまって放射平衡は変わってゆく。北極圏で木が育たなくなると

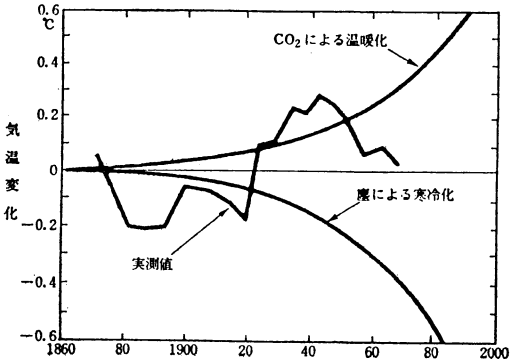
年間に5K cal の熱を失うので気候はさらに寒冷化する。この関係は積雪のために気候が寒冷化する self-amplification と同じ思想である。Hare さんは太陽定数が一定でも気候は変わって来ているのは、境界条件が変わってくるため、その主な原因は雲量および大気と地表面における熱のやりとりの変化をあげている。すなわち、環境破壊が大規模に行なわれたときには、気候が変化しうることを警告するものであろう。

しかし、実際の問題として環境汚染がどの程度人間活動によって起こっているかとなるとさだかではない。NOAA の Air-resources 研究所にいるバックさん(何回か来日し、日本語の名刺を持っている)は、planetary scale でみた場合、人間活動が大気組成をどれだけ変えたかわかっていない。現在はバックランド汚染のモニタリング組織を早く展開することがもっとも必要なことだと強調している。最近の汚染の資料として、オゾンが10年間に北半球では4%, 南半球では1.5%増えた事実が観測された。しかし、それは自然現象なのか人間活動のためなのか決めがたいのが現状である。二酸化炭素は化石燃料の消費量から推定すると、1960~1965年の間では平均40%が大気中に残留し、1969~1972年は70%も大気中に残った。そのため、さいきん二酸化炭素が大気中に急にふえているが、その物理的理由は解明されていない。海洋との交換や植物とのやりとり、あるいは、気温変動による容量の変化などが考えられるが、全く分らないのが現状である。したがって、地球規模の汚染の観測体制を一日も早く展開することは、大きく言えば人類の生存のために必要なことであろう。問題はこれから始まるというのがバックさんの強い意見であった。

これに対し、NOAA のミッチェルさんはエアロゾルと二酸化炭素は将来の気候形成に無視出来ない要素であるとし、その影響を調べている。一般にエアロゾルは日射を散乱させるので冷却作用、二酸化炭素は温室効果による昇温作用があると云われている。しかし、前者に冷却作用があるかどうかミッチェルは疑問視している。というのは、火山爆発のチリは成層圏まで打ち上げられ、大きな粒子は落下して小さな細塵だけが浮遊している。これは日射を散乱する効果が大きいであろうが、3年から5年のうちに落下してしまうと考えられているところから、1つの火山爆発だけをとると長期間の気候を支配することにならないが大きな火山爆発がつづく、小氷期時代のように気候は寒冷化するであろう。

しかし、最近問題になっているエアロゾルの増加はそ





＜図 6＞二酸化炭素と塵による平均気温の変化と予測

第 4 図 二酸化炭素とエアロゾルの増加にともなう  
気温変化の予測 (ミッチェル, 1972)

の源が地表面から舞い上がる程度であるから、それがすべて成層圏で浮遊するわけでない。大きな粒子はその周辺で落下するであろう。そして残りの大部分は対流圏に浮遊しているが、その微粒子は水分を含んでいてある特定の高度に集まっていることが考えられる。ミッチェルは微粒子の鉛直分布と微粒子が湿めっていることを仮定して、種々のモデルを設定して計算したところ、人間活動によって放出される微粒子は大気に対して冷却作用よりも昇温作用の方が大きいという結論に達した。したがって、人間活動によって二酸化炭素とエアロゾルが増加するにつれて、気候は温暖化し、現在の気候の寒冷化は早いうちにむきを変えらるかも知れない。ミッチェルはエアロゾルに冷却効果がないと主張しているわけでないが、100%冷却作用に働くのでないことを指摘している。今後の見通しとして二酸化炭素が年に4%、エアロゾルも年に4%ずつ増加すると仮定し、エアロゾルが100%冷却作用に働くとした場合の昇温と冷却の量は第4図に示すように予測されている。2000年頃をみると、両者はほぼ釣り合っているので気候に対しては何も影響しないことになる。しかし、この場合エアロゾルによる冷却を100%に見込んでいるが、実際には熱を吸収する量もあ

るので、最終結論としては温暖化することになる。

これに対し、ビスコンシン大学のプライソンはエアロゾルによる冷却作用の方が大きいことを観測資料を基にして計算している。大気の混濁係数の経年変化からエアロゾルの増加量を推定し、それを基にして気温の低下する量を算出すると、実際に観測される気温よりも低すぎる。そこに二酸化炭素による昇温を加えてやると、最近の寒冷化傾向とよく合うグラフを算出している。これを根拠にエアロゾルの冷却作用が十分大きいとしている。エアロゾルによる日射の散乱は光の経路の長い北極地方が大きな影響をうけるので、北極地方の寒冷化は目立って進行し、南北の温度傾度が增大することになる。そうすると、ロスビー領域は拡大し、ハドレー循環の下降流の分枝はより南になる。この根拠は Smagorinsky の大循環シュミレーションによるとしているが、真鍋さんに尋ねた範囲では間違とはいえないが、正しいかどうか分らないという。Smagorinsky 先生自身も理解しかねているそうである。それは免も角として、Bryson の結論を急ぐと、ハドレー領域が南偏すると亜熱帯高気圧は例年より南に下がって、モンスーン流の北上を阻止するようになる。そのために、乾燥地帯が拡大することになり、たとえばサハラ砂漠のすぐ南のセネガル、マリなどの六か国の干ばつは偶然のものでなく、組織的なものであると考えられる。そして、その一つの証拠として北西インドで干ばつを観測した地点数は南北気温傾度が大きくなった1900年前後と最近も増加している事実をあげている。しかし、この問題は最近の気候変動のもっとも重要なところであり、今後の研究にまつところが大きいように思われる。

最後に、この稿を終えるに当たり、在米中の村上、荒川、柳井、新田、笠原、笹森、大山、須田、前田、栗原、真鍋、都田(訪問した順序)各氏の皆さんに便宜を計って頂き、その協力のお陰で任務を果たすことが出来たことを紙上を借りて感謝いたします。

(用語解説 645 頁の続き)

#### 文 献

Schaefer, V.J., 1966: Ice nuclei from automobile exhaust and iodine vapor, *Science*, 154, 1555-

1557.

Morgan, G.M. Jr. and P.A. Allee, 1968: The production of potential ice nuclei by gasoline engines, *J. Appl. Met.*, 7, 241-246.

(北川寿江)