

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の気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。

* On the Technological Approach to the Study of Climatic Change

—From the Report of COSPAR-WG 6—

** K. Sekihara: 気象研究所

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

第1表 気候モデルに考慮すべき放射パラメーターインプットの種類 (f : 関数)

物理的因子	全球平均気候モデル	半経験的緯度圏気象モデル	統計的緯度圏モデル	大循環モデル
日射吸収	f (H_2O , CO_2 , O_3 , 雲) または f (アルベドのみ)	f (アルベドのみ)	f (アルベド, 大気の吸収率)	f (H_2O , 雲)
長波放射	f (T , H_2O , CO_2 , O_3 , 雲)	f (地表面温度, 雲量, 時に水蒸気量)	f (地表面温度, 大気平均温度)	f (T , H_2O , CO_2 , 雲)
雲の射出率	水滴雲=1 絹雲=1または0.5	1	……	水滴雲=1 氷または積乱雲=0.5
アルベド				
(a) 雲	(a) 高さの分布または雲量の指定	f (緯度圏)	(a), (b), (c) それぞれ一定	(a) f (高さ)
(b) 地表面	(b) 普通 0.1			(b) f (種類)
(c) レーレー大気	(c) 一定値			(c) 一定または天頂角と気圧の関数
(d) 微粒子	(d) モデルに従い考慮に入れる			
雲量	……	一定値 (それぞれにつき)	アルベドに陰に含まれる	f (H_2O , T , 垂直流) 2層または3層
アウトプット	\bar{T} (大気) \bar{T} (地面)	\bar{T} (地面)= f (緯度) —	T (地面)= f (緯度) T (大気)= f (高さと緯度) 気流= f (緯度)	気温, 気圧, 風速, 雲の三次元的場 (海流を含む) 海面温度, 塩分の移動速度, 海水, 雪面

例えば気候変動を支配する方程式と太陽からの入射エネルギーとか地面や大気系の成分とか地表面の構造とか地球の回転速度とかいつた環境条件を定めることなどである。この辺の議論はまだ未解決の点が多いが、ここでは先づある種の気候モデルに対してそのモデルから予想される結果の信頼度を高めるためには何を測定すべきか、更には気候変化とその原因を正しく知るためにはどのような測定をすべきかをきめる指導原理としてのいくつかのモデルの記述からはじめて見る。

3.1. 気候モデルの4つの型

イ) 全地球平均モデル

計算される変数 (普通地表面湿度とか気温垂直分布) を全球の平均値で表わす。この場合は本質的には放射平衡又は放射と対流の平衡状態を考慮して水平運動の効果は無視する、従って気候の状態の境界条件は日射とか大気組成とか雲量とか雲高とかの全地球平均によって与えられる。この様なモデルは最も簡単なものではあるが炭酸ガスとかエアロゾルの変化に対する気温の理論値を出す場合には今のところはこの方法によるしかない (Manabe and Weatherald, 1967 および Rasool and Schneider, 1971)。

ロ) 半経験的な緯度圏モデル

大部分を観測から得られた経験則に頼っている。計算される量は地表面温度の緯度分布などである (Budyko 1969, Sellers, 1969)。エネルギー収支とかその輸送効果はこの場合観測値に基いている。Adem (1964) のものはこの種のものより進化した型のものである。

ハ) 統計的 (又は統計的-力学的) 緯度圏モデル

変数の経度と時間の平均値について方程式がたてられる。気候で関心があるのはある特定の時における高低気圧の位置ではなくその時間的平均値である。しかし平均化を導入することにより方程式に非線型性に由来する熱とか角運動量の差しひきの輸送量といった余分の変数が入り込んでくる。このために変数すべてについて解けるようにするために更に方程式とか条件とかを附加することになる。Salzman (1968) のものがこの種のもので、気候の変数は緯度と高さの関数として表わされる。

ニ) 大循環モデル

現在の大循環モデルを水圏, 氷圏との関係をも考慮に入れて積分する。勿論海水の塩分濃度とか温度の輸送, 地表面の氷も考慮に入れられる。この方法は経度変化と非線型フィードバック効果を表わし得る点で唯一つ

のものであるが膨大な計算量従って巨大な計算機を要する。NOAA, NCAR, UCLA のグループのものがその代表例である。

3.2. 気候モデルにおける重要なパラメーター

前にも述べたが放射効果は一般に最も重要であるとされており SMIC Report にくわしく出ている。簡単にいえば放射の差し引き量 Q_N は、入射量 Q_S から反射量 Q_R と射出量 Q_E を差し引いたもので、

$$Q_N = Q_S - Q_R - Q_E$$

で表わされる。

この式の右辺の各項に関連する重要因子観測に対する一般の観点から第1表の如きものが項目として考えられる。何れにしても上式右辺の太陽入射光, 反射光, 赤外射出光が重要観測項目となることは間違いない。

普通には太陽入射光は一定と考えられているが, 反射光と射出光は地球大気系における様々な物理的機構に関連した量となる。

例えば反射光は大きく雲に依存してくる。この意味で雲は二番目(放射の次に)に重要であるといえる。

微粒子(エアロゾル)はこの意味で雲の次に位する重要性をもってくる。

赤外射出光は水蒸気, 炭酸ガス, オゾン等の大気成分に関係してくる点により4番目として登場してくる。これらにつき第1表にまとめられているわけである。

3.3. モデルを改善させるために必要な観測データ

これには二通りの考え方がある。第一には、介在する物理機構をより実際に近く考えて行こうとする観点であり、例えば雲の反射にしてもその反射率とか吸収率とかをより正確に決定するとか、又は地面反射率をその地理的分布とか季節変化を入れてより正確に評価するなどである。又この種のものとしては、大気中のある種のガスの大気海洋でのサイクルが海洋の水温とか、塩分濃度に非常に敏感に反応することが云われているし、又一方では成層圏では非常に複雑な微量成分の化学反応が分って来ているが、先づそれと対流圏との関係が分らなくてはならないであろう。

さて2番目のアプローチはモデルの効率化の問題である。これはモデルのパラメータ導入の方法を工夫して計算の過程を出来るだけ単純化し、かくして本質を失うことなしにインプットデータの量を最も少なくしようという努力である。これは含まれている物理過程をよく理解するという前提の上に立ってはじめて達成される。雲の

層として用いられる高さの数は最小限幾通りか? 大気中の微粒子の変化はどんなものでこれを実際に近いようにその影響を導入するためにはどの程度の空間頻度, 時間頻度で測定すればよいか? 放射収支の測定の空間的, 時間的頻度はどの程度ならばよいのか? 微養成分の変動は如何なる方法でとり入れるのが最も簡単か? ある種の成分(例えば SO_2)と微粒子とか雲とかの間に統計的な関係があるのだろうか? これらのうちのある種の物質の観測は必ずしもしなくともよくはならないか? 緯度平均値はどのように考えられねばならないか? 等々。

以上のような気候モデルをより事実をよく表わし、且つより単純になるためには今後の研究に待つ所が多いが、その内容としては多様なデータの組合せを用いた数値実験と異なつたパラメーター間の統計的関係の確立と、更にはパラメーターの物理的意味をより正確にすることが必要となってくるであろう。

具体的には比較的短期間に多くの人工衛星を集中させ、又地上のある場所における強化観測と呼応してこの種の研究を行ない、今後常時観測に移すべきものが何であるかを決定するといった作業になるであろう。

3.4. 気候変動研究の目的で行なうモデル実験に必要な観測。

しかし、前記で述べた目的のために気候変動因子の本質を探るために長期間の観視を必要とすると思われる観測項目も又存在する。第1表のパラメーターの中で現在知られている気候変動の原因から推して次の事柄があげられる。

- イ) 放射収支パラメーター: 入射光, 反射光, 射出光。
- ロ) 雲と地表面: 雲分布(高, 中, 低層を含めて)雲の射出率, 氷の分布, 海面温度, 地表面アルベド, 地表面射出率,
- ハ) 微粒子: 対流圏と成層圏におよぶその光学的, 物理的, 化学的性質の時間, 空間分布。
- ニ) 微量気体成分: CO_2 , O_3 及び関連ガス。
- ホ) その他: 海洋表面現象, 対流圏の熱力学と力学, 成層圏の平均気温, 平均降雨。

4. 気候変動評価のために必要な観測(各論)

4.1. 熱収支

4.1.1. 入射太陽放射

現状: ロケット, 航空機, 又は地上の観測についての総合報告は(Labs and Neckel, 1968)によってなされている。成層圏飛行の航空機による精密な分光測定につ

いては (Drummond, 1970), (Thekekara, 1970) の報告がある。NIMBUS-3 号と、4 号による紫外線分光観測についての2年間の観測結果の報告は (Heath & Westcott, 1970) によってなされている。

現在みとめられている太陽常数は $1.95 \text{ cal/cm}^2/\text{min}^{-1}$ (1.360 Wm^{-2}) で、かつての (Jonson, 1954) によるロケット観測から決定された値より 2.5% 低くなっている。この種の問題については更に研究の余地がある。

又その時間変化についての知識も重要である。気球による観測によれば地球に到達する日射は太陽黒点による変動、あるいは惑星間物質による変動の存在を示唆している (Kondratyev, 1969). (Heath と Westcott, 1970). の $0.12 \sim 0.28 \mu\text{m}$ の太陽紫外線の変動はやはり太陽の自転と黒点週期によるものと思われるものをとらえている。この変動は非常に波長による相異が大きい。これらはすべて未だ実験の段階で気候変動の原因を議論する材料とするに足りる程の長期間の監視というものではない。

将来の課題：太陽常数の測定は結局スミソニアン研究所で行なわれるような水流日射計による放射測定に頼るのが基本であるが、今の所この種の機械による測定を大気外で行なう事が実現する可能性はうすい。

それまでは銀盤日射計その他の二次標準器を用いざるを得ない。今考えられることはこれらの二次標準器を有人衛星にのせて比較測定を行なうことである。少なくとも11年週期程度の観測が望ましいが今の所まだ具体化の動きはない。

そこで相対誤差の少ない測器を無人人工衛星に乗せて測定する問題が次の課題としてのぼってくるが、 $0.16 \sim 0.20$, $0.20 \sim 0.23$, $0.23 \sim 0.25$, $0.26 \sim 4.0 \mu\text{m}$ の各々の領域をフィルターを用いて分光測定する課題が考えられる。測器の校正に関しては測器を回収するとか超高空航空機とか、気球とか、有人衛星で行なうなどが考えられる。 1°C の気候変動に対応する変化を検出するためには、長期間にわたり $0.1 \sim 0.2\%$ の精度を維持する必要があるであろう。

4.1.2. 反射光と射出光

現状：過去10年間種々の人工衛星による地球からの反射光と射出光の測定はその放射フラックス密度についても、又方向分布についても、観測が成功しその結果地球の放射収支についての地理的分布とか年変化についても逐次知識が改善されて来ている。

地球の平均アルベドは従来考えられていた35%から、

一段と低くなり約29%ということになった。又その平均の放射温度は従来考えられていた 250°K から 254°K ということになった (Von der Haar and Suomi, 1971, Raschke *et al.* 1972). 15°S と 15°N の間では従来考えられていた以上に熱を得ていることになった。砂漠地帯は常に熱を失っていることが分った。しかし2週間以上の長期間になると地球全体としては入射放射エネルギーと射出放射エネルギーは2~3%の精度において平衡状態にあることが示された。従って気候の変化がもし放射収支の不均衡によって惹き起されるものならばこの種の観測はもっと高い精度で行なう必要があることになる。

将来の課題：反射あるいは射出放射はフラックス密度と共に狭い角度のビーム放射計でも測定する必要がある。反射光については $0.16 \sim 3.5 \mu\text{m}$ の波長領域を6波長に分けて測定する必要がある。射出光については $4.0 \sim 50 \mu\text{m}$ の波長域を2波長に分けて測定する必要がある。校正の方法については太陽光については前述の一般論に準じよう。そのために測定は同時に校正も内蔵するものにする必要がある。サンプリングの点からいえば、一個の衛星からの観測のみでは不十分で極軌道と静止衛星の両者のコンビネーションが望ましい。この問題は現在運用されることになっている静止衛星による実験を含めて放射収支の時空間特性の解析のためにはどのようなシステムにすべきかにつき研究をすすめるよう提案する。

気候変動のようにより長い時空間変動を問題にする場合には、軌道衛星よりはなれた場所、例えば静止衛星又は更に月からのフラックス密度測定の必要性をも提案したい。精度としては10年間に 1°C の変化を検出するといったものを考えたいが、これはフラックス密度としては1.6%、又はアルベドとして1.1%の変化の検出ということになる。但し測定変化が下層大気のみで起ると仮定すれば、上述の測定精度は2~3倍のファクターでゆるめられる。

しかし大気下層の温度変化を、海洋上層の温度変化として蓄積すると考えるとその温度変化の程度は年に 1°C が、年に 0.1°C に減るがこの種の変化が重大な問題であることから考えてやはり前述の精度が要求されるといってよい。

問題のポイントは、入射光、反射光、射出光を同時にはかる一貫システムの問題、射出光については短期間のものと長期間のものを区別して測定するシステムで前者は数個の人工衛星の組合せ、後者は静止衛星又は月から

の観測で又同時に長期観測に耐える校正方法の確立が最重要課題となる。

4.2. 雲

雲の問題の重要さとむづかしさについては気象学者の誰しも認める所であるが、今その具体的な点について述べて見る。

重要さという点については日射の反射と赤外放射の射出の両面において最も大きな役割を果たすことにより分るのであろう。

むづかしさはその発生とか形が非常に多様であり、原因としてあげられるものとして水蒸気の分布、凝結核の存在、局地的又は大規模な力学的効果などがあり、それらの要素が又雲の型、高さ、光学的特性、寿命などを決めているといったことで表現される。

この様に変化のはげしいときの放射効果を大規模の大循環とか気候のモデルにとり入れるためには雲の発生と大循環パラメーターとの間の関係についてより多くの知識を得ることが先づ必要とされる。又ある程度は発生する雲の型をきめる要素となるべき微気象学的知識も必要となる。雲の放射効果と雲型、厚さ、型との関係も又欠くことの出来ない研究課題である。

人工衛星による観測は全地球の分布と共に比較的短時間のその変化を観測するのに適しているがその垂直分布に関する知識を得るには比較的弱い。そのためには雲に関する最終的パラメーター化、又は放射効果を論ずるまでに要する研究の過程としてどうしても地上又は航空機による共同観測が必要となる。

4.2.1. 雲の分布と雲型の分類

現状：現在の極軌道衛星と、静止衛星で可視と赤外窓領域の雲の画像はとれる。軌道衛星では1日2回、静止衛星では20分に1回の頻度であるが、1977年の段階では軌道衛星2個、静止衛星5個が全地球をカバーする予定である。尚、米軍気象衛星(2コ)も最近一般に利用されるようになったが本質はアメリカ気象衛星と同じである。

実験としてはソ連の Meteor 8号衛星の実験とか航空機による観測では近赤外の反射光により水の雲と氷の雲との分離が可能になっている。又、ソ連の cosmos 243号衛星と米国の NIMBUS-5号衛星により、マイクロ波で雨域の観測が可能になっている。

これらの実験は雲の分布と雲頂高度についての知識を与えると同時に雲の明るさの表示は雲型との厚さについての情報をも与える。

将来の課題：近赤外画像による水と氷の区別、マイクロ波の画像による雨域の観測は未だ将来の研究課題を含んでいる。このためには、理想的には0.5~0.7, 0.8~1.2, 6.3~7.7, 10~12 μm の各領域の画像を同時にとることが望まれる。又同じ目的で1.7~3.0 μm の偏光測定50~100 μm との放射強度の測定も望ましい。

0.5~1.2 μm の放射によれば、夜間月の光による雲分布の観測も可能である。これは米軍気象衛星で実証されている。以上のことがらはずべて近い将来に実用段階に入る。以上の雲の分布観測は大気の反射光と射出光測定による放射収支の測定と非常に強い関連があり、ある意味で相補的であることは注意するまでもあるまい。

雲が多層構造をもつときにはこれまでに述べた方法では解決しにくい問題が生ずる。それは例えば、網雲が存在してその下に又雲があった場合には網雲の高さは実際より低く見積られてしまうであろう。この種の高層構造を解明する最も有力な手段と思われるものは衛星からのライダー観測である。これは将来の重要課題である。

雲の検出については今までの経験によれば赤外については11 μm 窓領域で射出率が0.2以上のときは網雲が存在し、又、可視域の反射率が背景に比し2~4%もあれば検出されるというが、この種の課題も将来更にたしかめらねばならない。

雲型の統計をとるために必要な放射計の空間分解能は1~2kmであるとされているが、これは将来の気象衛星としては設計上考えねばならぬ点であるが同時に全地球の統計をとるためにはこれから30~40 km^2 あるいはそれ以上の空間の平均値を問題にすることになるであろう。

放射計に要求される精度としては雲高にして1km, 30~40 km^2 領域の雲量として10%以下の誤差で測定出来るような放射量測定が出来ねばならない。

サンプリングの問題として未解決なことは雲量の昼夜の差である。これは静止衛星による今後の研究により明らかにされるであろう。その後に必要なサンプリングのための衛星システムが考えられることになるであろう。

4.2.2. 雲の光学的性質

現状：飛行機観測と気球観測の組合せで各種の試みがなされ殊に BOMEX の結果は種々の事実を物語っている(JOC, 1971)。例えば、雲の短波長反射は従来考えられていたより低かったし、又放射による加熱と冷却の量も従来のもとはかなり異なった値を示している。この事は下層大気と雲に関する放射収支の研究が今後の重要

研究課題であることを物語っている。これはCAENEX, GATE (更にAMTEX) などの GARP Sub Program で今後明らかになるであろう。

今後の課題：こまかい雲の光学的性質は衛星観測のみでは分らない、衛星からの分光観測と雲型とを関連づけること、放射フラックスにおける雲の役割を評価する問題は雲を容観的にパラメーター化する方法を確立するためには是非必要なことである。この方向に向かって進められているのが衛星、航空機、気球の観測を同時に行なう前述の CAENEX, GATE, AMTEX 等である。一旦これらの方法でパラメーター化の問題が解決すれば、これはそのまま長期間の気候の問題に延長出来るであろう。

4.3. 微粒子

大気中の微粒子は日射も赤外放射も散乱又は吸収するがこれはその成分、形状、粒度分布に依存している。ここでもう一つ注意しておかなければならない重要性は微粒子が存在することはその散乱効果により大気の光学路程を長くし大気中のガス状物質の吸収効果を大きくする作用がありこれは微粒子の吸収効果と同程度であろうということである。現在の所微粒子の放射効果に関しては上記各要素の夫々の組合などに不明な点が多く、まだ一意的にきめ得る段階ではないが衛星又は航空機による観測から大づかみな特性をおさえて解析とパラメーター化に役立てることは今後必要な課題となる。

4.3.1. 地理的ならびに垂直分布

現状：大気溷濁度の測定が大気下層における微粒子の多寡に関する尺度を表わしていることはよく知られておりこれが又人間活動により年々増加していることも指摘されている所である。超音層ジェット機によるサンプリング実験により成層圏下部にかなり寿命の長い微粒子がその発生源よりはるかにはなれた所でも存在していることも知られている。これらについては地上からのライダー観測についても実測があるし又衛星からの画像にもその影響と見られるものがみとめられている。特に米ソの有人衛星による地球の縁辺のカラー写真には成層圏の微粒子層は定性的にはみとめられている。偏光計はこの種のものの観測に有効なことは分っているが今の所航空機搭載機器の開発までは行なわれている。ネフエロイータについても同じことが云える。

今後の課題：この種の観測のための衛星搭載機器の開発はまだ初期の状態にあると云ってよい。すなわち、多くのものがまだ概念設計の段階である。以下その主なものを列記してみる。

分光走査偏光計：日射の反射光を分光測定し更にその偏光成分の測定を行なうところは、第1に重要な課題である。雲や地面反射の影響を避けるために偏光計の視野角は30km以下、多分10km位が望ましい。先づ当初は軌道衛星で試験されるものであろうが、将来は静止衛星に搭載することが望まれる。数百km毎に1コ、1日1回程度の観測が望ましい。偏光測定の精度は0.2%程度が要求される。強度に関する精度は2%程度でよい。

星の掩蔽：人工衛星を用いて大気層減衰による星の強度変化を測定する問題でこれは上層の微粒子層の観測として有望なものであるが、今のところ概念のみの段階である。

衛星からのレーザー観測：現在の所下層の垂直分布をはかる唯一のものと目される。航空機実験によれば、口径0.25m, ピークパワー、20MW, 平均ワット数500W, 毎秒1回のパルスのものが微粒子観測に適していると考えられている。この方面の実験はソ連でかなり活発である。リターンビームの偏光(発射光は完全に偏光している)を測定すれば微粒子が球形が非球形かが分る。

4.3.2. 粒子の成分

今まで述べた衛星搭載機器による測定は成分に関しては、1. 水滴であるか(球形)、2. 氷の結晶であるが、3. 他の固体(非球形)である、などについての情報を与えるだけで一般に大づかみな情報を与えるものと理解してよい。この項目に関してはロケット、気球、航空機によるサンプリングの方法が主要な役割を占め、今後数年この種の観測に盛に行なわれ、人間活動によるものと自然のものとの区別などに貢献するであろう。

4.3.3. 光学的性質

微粒子の放射収支への寄与は結局においてそれがどれだけ光を吸収し、又散乱するかによってきまる。この問題はどちらかといえば衛星により全地球的観測をする以前の問題であるが、これは前記の放射収支の実験と協力してこの問題に焦点をおいた in situ の測定によって解決されることである。

微粒子の項(4.3.)のまとめとしてこの項が直接又は間接に放射収支に重大な役割を果たすことはたしかであるが、その実体を量的に大気モデルにパラメーター化するためには以上述べた多くの器機の開発と共に総合研究、理論解析が必要である。

4.4. 微量気体成分

微量気体成分は大気の放射収支における重要な部分を受けもっている。オゾンによる太陽紫外線吸収は成層圏

上部の加熱の主要な原因であり、水蒸気、炭酸ガス、オゾンによる赤外放射は熱機関としての大気における主要な冷源となっている。

他にもより微量の気体成分があるが、これは上述の主要気体成分の増減と間接に関連している点で重要性をもっている。例えば、大気オゾンの生成増減における酸化窒素、水酸基の役割などにおいて明らかに示されている。更に亜硫酸ガス (SO_2) は大気中の寿命は比較的短かいが大気中の微粒子の生成源としての重要性をもっている。

この節では主として気候問題に関連すると思われる気体成分にかぎりその観測の問題を議論する。

問題点としては、これらの物質の全地球的分布を把握してバックグラウンドをおさえること、これらの物質の放射特性につき実験室と大気中での状態における実状についてくらべることがあげられる。

4.4.1. 測定技術

吸収(射出)特性を有する気体物質の測定法は一般的に共通の原理と方法があるのでここではそれについてのべる。

物質の分光特性に関する情報は、

(i) 大気、地面、雲からの反射光の中に吸収として現われる。

(ii) 衛星から太陽又は星を地球縁辺の大気を通して見るときにやはり吸収として現われる。

(iii) 大気を鉛直下方から、又は地球縁辺方向から見るときはその物質の射出光が見えるがそれは大気における当該放射の射出と吸収の繰返しの結果である。放射量は物質の量ばかりでなく大気温度にも関係する。もし CO_2 のように混合比が一定ならば温度に関する情報が与えられ、又気温分布が分っていれば放射量から物質分布に関する情報が与えられる。

(vi) レーザーのようなアクティブな光源によるもの。この場合には吸収はラマン散乱とか共鳴散乱の観測になる。

(i), (ii), (iii) については紫外の領域が用いられ、(iii) と (iv) については赤外からマイクロ波の領域が用いられる。

分光方式としては回折分光、フィルター、干渉分光、セレクトィブチョッパーなどが考えられているが現在までの所、気温、水蒸気、オゾンの測定に用いられている。

相関分光計は衛星搭載としては若干開発がおこなわれてい

る。

4.4.2. 炭酸ガス

現状：気候への影響の可能性としては最も多く議論されているものの一つである。地上と航空機により化学的方法と赤外吸収セルによる方法で多くの測定例がある。非常に強い局地的発生源があるにもかかわらずかなりよく全地球的に混合されており、又これには季節変化緯度変化があるようである。ハワイマウナロア観測所の結果では、10年間に2%の増加を示している。これは短期間には0.1%の精度の観測となり、これは衛星ではむりて地上の観測を延長するのが最も実際的ということになる。100~1,000km に1箇所位、毎日1回程度の観測がのぞましい。

将来の課題：衛星からの測定で CO_2 を決定するのは無理としても、気温測定の基礎データとして、又透過観報の決定等になすべきことがある。

4.4.3. 一酸化炭素

この気体は放射効果としての重要性はうすいが特に成層圏におけるオゾン等のからんだ化学作用の一因として考えられており、その意味からの観測が望まれる。実態がよく分っていないといった方が事実に近い。勿論毒性の問題も一つの重要な考慮すべき事項である。

現状：現状として衛星からの具体的観測方法は考えられていない。

将来の課題：反射光中から $2.3\mu\text{m}$ の吸収、射出光として $4.6\mu\text{m}$ の測定が考えられる。2~3箇月に一回地球全量が分ればよいのではないかと、成層圏に関しては縁辺大気の透過光からの吸収により測定出来る。これによれば温度効果も分るであろう。

4.4.4. オゾン

オゾンの紫外吸収は成層圏における主要な熱源であり、その紫外線吸収が又地上の生物圏に対する致命的な役割を果たしていることが SST 開発の是非に関連して大きな社会問題になっている現在、オゾンの生成消滅に関連した観測と研究は重大な意味をもっている。

現状：オゾン全量の測定についてはドブソン分光計による地上観測網がかなりの程度行きわたっており、これによる反転効果(天頂光測定)測定から垂直分布をある程度(50km位まで)推定出来るようになっている。オゾンブドウも開発されて30km位までの垂直分布もある地点で(日本は三地点)は行なわれている。オゾンは一般に35km以上附近に光化学的な生成源でありこの附近での寿命は短かいが、20~30kmでは比較的安定である

ばかりでなくその量も多くその変化は大部分が移流によるとされている。

衛星による観測法も開発され、NIMBUS-4号では0.25~0.34 μm の紫外線反射の観測によりオゾン全量とオゾンの上層の分布についてのマッピングに成功している。NIMBUS-3号と4号では又、干渉分光計により9.6 μm 射出の測定からオゾン全量について測定が実証されている。

これまでの知見からオゾン量については長期間の変動として1%程度の精度を必要とすると考えられるが、現在衛星からの測定技術ではそこまでまだ行っていない。この点については地上の観測網との協力が是非必要である。

今後の課題：衛星によるオゾン観測は上述の様に引続き続行、改良をはかられる必要がある。又縁辺の大気の透過光の実験も試みられているが、これはオゾン光化学に関連した他の物質との問題に貢献することが期待される。将来の反射紫外線の観測としては0.31~0.34 μm に数Å幅の4チャンネル0.35~0.37 μm に更に2チャンネルのものが考えられるが、これによれば、オゾン全量として1%、オゾン垂直分布として10%程度の誤差以内の測定が可能と見られている。衛星としては、正午に赤道を横ぎる太陽同期の極軌道衛星(NIMBUSがそれである)が適当である。又、9.6 μm 帯による縁辺光の射出測定も考えられている。

4.4.3. 水蒸気

対流圏の水蒸気については、6.3 μm 回転振動帯と18 μm の回転帯により測定に成功している(Smith, 1970)。しかし、成層圏ではあまりに稀薄で衛星からは見えない。

アメリカのMastenbrook、英国のN.P.L.の気球による測定によれば、成層圏の水蒸気量はファクター2位の変動があり、中緯度の量が低緯度の圏界面温度と関係しているという説がある。何れにしても全地球的な成層圏水蒸気量分布は今後測定する必要がある。

今後の課題：対流圏の水蒸気量については全量と垂直分布について20%程度の精度で測定が行なわれるよう計画され実行されている(例えば、NIMBUS-5, THIR, NOAA-2号, 3号, VTPR等)。

成層圏の水蒸気量については同じ赤外波長で

(i) 縁辺大気の射出量(Gille, 1971)

(ii) 相関分光計の応用, Pressure Modulation Techniqueの応用(Abel *et al.*, 1970)

(iii) 太陽光の縁辺大気による透過光(この場合は近赤外吸収帯)等が考えられる。

4.4.6. 亜硫酸ガス

これは自然(火山)の発生源のものと人為的に硫黄分の多い石炭を燃やす結果大気に放出されるものが考えられる。その大気中での寿命は比較的短かいが、結局において硫酸を含んだ水滴となり、微粒子の主要な発生源と考えられるので、この意味で観測の重要性がある。

現状：航空機、気球による硫酸水滴の検出はなされているが、SO₂からの変化を実際に追跡した例は少ない。

今後の課題：衛星からの観測の必要性はみとめられるが、その主要な吸収帯の0.31 μm はオゾンと重なり、8.7 μm は水蒸気その他にかくれて非常に条件は悪く、可能性の追求は今後の課題である。

4.4.7. メタン、酸化窒素その他の微量成分

CH₄(メタン)、N₂O、H₂Oは自然に地表面から供給されそれぞれppm(混合比、百万分の1)程度、(但しH₂Oは成層圏で)またはそれ以下の存在量のものであるが、これらの成層圏での振舞いがこの2~3年SST開発に関連した成層圏汚染の課題としてクローズアップされて来ている。これらは最大の重要性はオゾン光化学との関連においてであるが、最近の気球による光学的、化学的観測によりNHO₃、NO₂等多くの観測が活発に行なわれている。しかし一般にその濃度は低く衛星で観測するためには縁辺光によるのが適当であろうと思われる。しかしその中で今後の気候変動に関連して何が重要であるかに関しては気球による観測などを併用して今後の常時絶視への移行の可否につき充分に研究評価する必要がある。

4.5. 大気と地表面のパラメーター

気候観視という立場から現在一般の気象観測として行なわれており、又将来行なわれようとしている気象因子とその観測法について通観して見ると、

4.5.1. 対流圏と成層圏の平均気温

これは現在行なわれているCO₂射出帯を用いた気温垂直分布の測定の延張として引続き行なわれるものが役に立つ。雲の影響を除去する計算の手続等を終ると200km四方のメッシュについての30km位までの7層程度のものが得られる。但し最近開発されているSCR(Selective Chopper Radiometer)によれば50km位までの高さまでの情報が得られる。

4.5.2. 地表面のパラメーター

第2表 気候のパラメーターと衛星センサー、衛星システムとの関係

観視すべきパラメーター		センサーシステム											静止衛星	極軌道衛星			
		R B S P	C S I P	C S I M I	A R	L A S S	S T O S	P H P O	I R V S	L R S S	B R U V	A C C S			S O S	P L D R	
1. 地球の熱収支	放射フラックス	I														A	A
2. 雲	雲量・雲型		I	R/I		R		R								A	A
	雲水量			R												A	B'
3. 微粒子分布	対流圏					R		R									A
	成層圏					R	R						R				A
4. 気体物質	対流圏 CO																A
	対流圏 H ₂ O								R							B	A
	成層圏 H ₂ O								I					R			A
	成層圏オゾン								D		P	D					A
	他の成層圏ガス										P			R			A
	他の対流圏ガス (SO ₂)													R			A
5. 他のパラメーター	地表面アルベド		I														A
	水面		D	P													A
	海面温度		I													B	A
	降雨				R	R										A	A
	対流圏温度									D						B	A
	成層圏温度									D	P					B	A
	海洋上層													P		A	

D: 開発済み, P: 計画中近く打上げられる, I: 概念設計済み改良進行中, R: 実行可能と見られる研究開発が望まれる, R/I: 静止衛星に対して R, 軌道衛星に対して I, A: サンプルングの観点から要求される, B: 補助的観測として望ましい, B': Aの立場からではないが望ましい.

これは射出放射と反射率(アルベド)に関するものである。この問題は植物帯の状態、地面の含水量、地面温度、海面の状態等に関するもので大気の大粒子の測定におけるバックグラウンドとして偏光特性の測定も必要とされる。

可視域のものについては ERTS 衛星の情報が有用である。地面温度については、1°C以下の精度のものが現在得られる。勿論比較として地上での観測は今後も必要である。衛星間の放射計の比較校正が重要なことはすでに述べた。

4.5.3. 平均降雨量

衛星機器による全世界の測定は未だ手がつけられていない。静止衛星からの観測は最終的に最も有効であるように思われる。パッシブのマイクロ波の観測は、雲の含水量と降雨域、地面温度、海面状態についての情報を与えるとして実験が進行中である。アクティブなマイクロ波によるレーダエコーの観測は、将来の問題として是非

研究が必要な項目である。

5. 気候観測のために考え得るセンサーと宇宙観測システム

1977年頃を予想して前節で議論して来た諸種の観測項目とそのセンサーシステムの概観を第2表にかかげる。この中で特に新しい手段の開発を必要とするものとしては、大粒子の観測とか、放射フラックス絶対測定とかがあげられる。この表では、縦欄に観測項目、横欄にそれに対するセンサーシステムがあげられ、それぞれのシステムの開発段階が記号として各欄にかかっている。以下センサーシステムの略号の説明をしておく。

5.1. センサーシステム

RBSP: Radiation Budget Spectrophotometer, 放射収支分光光度計

日射については、0.1~0.18, 0.18~0.22, 0.22~0.26, 0.26~4.0μm, 地衛面については0.26~4.0, 0.5~0.7, 0.8~1.2, 5~50, 10~12μm, 視野角について

は全太陽及び地球面では $30 \times 30 \text{ km}$ で軌道に沿って走査、短波長、長波長の広波長域について地球全面からの広視野角、これらの総合的観測システムは今後の開発を要す。

CSLP: Cloud and Sea Surface Imaging Spectrophotometer, 雲頂・海面画像分光光度計

$0.5 \sim 0.7, 0.8 \sim 1.2, 3.8 \sim 6.8, 10 \sim 12 \mu\text{m}$ の分光領域が必要、可視及び近赤外には更に偏光計が必要だが、もしこれが技術的に問題があるならば、氷と水の区別のために $50 \sim 100 \mu\text{m}$ のチャンネルを加える必要がある。空間分解能 $2 \times 2 \text{ km}$, 1973 年から 2 チャンネルのものが実用気象衛星に搭載され、1976 年あたりに TIROS-W がこの種のものとして予定されている。更に月光により夜間の雲画像をとるために高感度のものを用意することが望ましい。この種のものとしてはすでに米軍気象衛星 (DMSP) に搭載して一般にも公開されている。

CSIMI: Cloud and Sea Ice Microwave Imager, 雲と海氷の画像

波長は 0.8 cm , 氷の観視としては分解能 $30 \times 30 \text{ km}$, 雲水量測定としては波長 3 cm , 分解能 $100 \times 100 \text{ km}$ 程度のもの、 0.8 cm のものは NIMBUS-5 号に搭載している。又、ソ連 COSMOS 衛星にも搭載成功を見ている。

AR: Active Radar, アクティブレーダー

降雨域ならびに降水量の観測として有効。 100 km 程度の分解能でよいだろうが走査方式が必要となり、目下は概念設計の段階。

LASS: Laser Sounder System, レーザー探測システム

反射光又は後方散乱光を測定するものとしてソ連で計画が進められている。宇宙での実験はまだなされていない。

StOS: Star Occultation Sounder, 星の掩蔽探測

大気の大気による微粒子の減衰を星を点光源として測定するもの。概念設計の段階。

PhPo: Phtometer Polarimeter, 偏光光度計

$0.3 \sim 1.0 \mu\text{m}$ で $4 \sim 6$ 波長に分けて測定するのが望ましい。軌道に垂直方向への走査が望ましい。前述の CSIP の一部として開発されない場合独立に開発の要がある。

IRVS: Infrared Vertical Sounder, 赤外垂直探測装置

$3.8, 4.3, 6.8, 10 \sim 12, 15, 18 \sim 22 \mu\text{m}$ が用いられこれらは炭酸ガスと水蒸気が目的である。空間分解能

$20 \times 20 \text{ km}$ 1976 年頃の TIROS-N で計画されている。他のガスについて研究開発が望ましい。

LRSS: Limb Radiance Stratospheric Sounder, 成層圏縁辺射出光探測装置

$6.7, 9.6, 15 \mu\text{m}$ の波長、垂直分解度を非常によくする必要があり。NIMBUS-F にこの種のものが予定されている。他のガスについても研究開発が望ましい。

BRUV: Buck Scattered Radiation in Ultraviolet, オゾンについて NIMBUS 衛星で実験中。これは観視目的に用いられるのが望ましい。

ACCS: Atmospheric Composition Correlation Spectrometer, 相関分光光度計

大気の反射又は射出光についての相関分光光度計で種々の実験が試みられている (SO_2, NO_2 等)。

SOS: Solar Occultation Sounder, 太陽光による縁辺探測装置

アメリカ OSO 衛星で実験が進められている。

PLDR: Platform Location and Data Relay

気球、ブイ、その他の観測器の位置を方位決定とかドップラー効果により決定するもの、対象としては 1000 km 位、位置決定の精度として 2 km 位が用いられる。これは NIMBUS-3 号、及び 4 号、EOLE 計画で実証されている。NIMBUS-F, TIROS-N でより簡単な方法 (random transmitting doppler shift method) が開発中。

5.2. 衛星とサンプリングに関する考察

対象により用いられる衛星はサンプリングの立場からも考慮されねばならぬ。

例えば雲の統計を目的とした場合にその夜昼の分布に差があるかどうか問題となる故、1 コの太陽周期極軌道衛星ではこれは不十分。しかし静止衛星からのみでは雲が氷か水であるかなどのこまかいことは分らない。又各国で打上げる衛星から地球規模の均質な雲の統計を得るためにはかなり注意深いデータ解析が必要となる。

5.3. 衛星システムに関する考察

気候観測という目的のためには勿論従来の実用気象衛星がその基盤となるが、その延張としてのみでは不十分で気候観視独特のセンサーのみならず衛星システムそのものを国際的規模で考える必要があることを最後に強調したい。

6. 結言

この稿は主として 1972 年夏にストックホルムで開かれる国連人間環境会議及び環境科学委員会 (SCOPE) に

対する準備として COSPAR 第6作業班がその組織をあげてまとめあげたものを骨子とした解説である。この作業班は FGGE の観測計画を組織する事実上の推進役を果たして来た実績を有して居りここに述べられている事柄は同じ意味で SGGE 観測計画への第1歩であると云ってもよいと思われる。このレポート以後に追加されたものとしては NOAA-2号及び3号衛星, NIMBUS-5号衛星, ERTS-衛星の実現であるが、これらはすべてこのレポートで予測されていたものである。米空軍気象衛星 DMSP が最近 NESS を通じて公開利用が可能になったのは一つの話題で、これは現在 AMTEX で活躍しているが本質は高感度、高分解能の可視、赤外の雲の画像である。

文 献

この報告はその大部分を参考文献の COSPAR-第6作業班報告に頼っている。他の大きな総合報告としては参考文献の Mao-Fou Wu による成層圏微量成分のものがある。

- Abel, P.G., P. J. Ellis, J.T. Houghton, G. Peckham, C.D. Rodgers, S.D. Smith and E. J. Williamson, 1970: Remote Sounding of Atmospheric Temperature from Satellites II The Selective Chopper Radiometer for NIMBUS-D, Proc. Roy. Soc. Lond, A, **320**, 35-55.
- Adem, J. 1964: On the Physical Basis for the Numerical Prediction of Monthly and Seasonal Temperatures in the Troposphere-Ocean-Continent System, Mon. Wea. Rev., **92**, 91-104.
- Budyko, M.L. 1969: The Effect of Solar Radiation Variations on the Climate of the Earth, Tellus, **21**, 611-619.
- COSPAR, Report on the Application of Space Technique to Some Environmental Problems, Preliminary Observing System Considerations for Monitoring Important Climate Parameters, prepared by COSPAR Working Group 6 for the United Nations and Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), Sept. (1972).
- Drummond, A. J., 1970: Precision Radiometry and its Significance in Atmospheric and Space Physics, in Advances in Geophysics, **14**, 1-52. Academic Press, N.Y.
- Gille, J. and F.B. House, 1971: On the Inversion of Limb Radiance Measurements I: Temperature and Thickness, J. Atm. Sci., **28**, 1427-42.
- Heath, D., and R.D. Weastcott, 1970: The Monitor of Ultraviolet Solar Energy (MUSE) Experiment, in the Nimbus IV User's Gyide, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Md., 135-148.
- Johnson, F.S., 1954: The Solar Constant, J. Meteorology., **11**, 431-439.
- Joint Organizing Committee, 1971: Report of the 5th Session of the Joint Organizing Committee, GARP, Bombay, 1-5 Feb., 1971, Annex G.
- Kondratyev, K. Ya., G.A. Nicolsky, I. Ya. Badinov, S.D. Andreev, 1969: Direct Solar Radiation up to 30km and Stratification of Attenuation Coefficients in the Shatosphere, Appl. Optics, **6**, 197-207.
- Labs, D. and H. Nekeel, 1968: The Radiation of the Solar Photosphere from 2000Å to 100µm, Zeitschr. f. Astroph., **69**, 1-73.
- Manabe, S. and R. Wetherald, 1967: Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity, J. Atm. Sci., **24**, 241-259.
- Mao Fou, Wu, 1973: Observation and Amalysis of Trace Constituents in the stratoeosphere (総合報告), Annual Report, Contract No. DOP-OS-20217, ERT Project No. P-393, prepared for DOT (CIAP) Environmental Research & Technology, Inc. pp. 1-210.
- Raschke, E., T.H. Von der Haar, M. Pasternak, and W.R. Bandeen, 1972: The Radiation Balance of the Earth Atmosphere System from NIMBUS III Radiation Measurements (15 April 1969-3 Feb. 1970)
- Rasool, S.I., and S. Schneider, 1971: Atmospheric Carbon Dioride and Aerosole Effects of Large Idcrease's on Globzal Climate, Science, **173**, 138-141.
- Saltzman, R., 1968: Steady State Solutions for Axially Symmetric Climatic Variables, Pure and Appl. Geophys., **69**, 237-259.
- Sellers, W., 1969: A Global Climate Model Based on the Energy of the Earth-Atmosphere System. J. App. Met., **8**, 392-400.
- SMIC, 1971: Inadvertent Climatic Modification Report on the Study of Man's Impact on Climate (SMIC), MIT Press, Cambridge, Mass.
- Smith, W.L. 1970: Iterative Solution of the Radiative Transfer Equation for the Temperature and Absorbing Gas Profile of an Atmosphere, Appl. Optics, **9**, 1993-1999.
- Thekaekara, M.P., 1970: Proposed Standard Values of the Solar Constant and the Solar

Spectrum, Environm. Sciences, 4, 6-9, NASA
Tech. Note In Print.

Von der Haar, T.H. and V.E. Suomi, 1971:
Measurements of the Earth's Radiation Budget

from Satellites During a Five Year Period, Part
1: Extended Time and Space Means J. Atm.
Sci., 28, 305-314.

討論及び後記*

関 原 彊**

討 論

先づ議論は井上氏による「3ヶ月予報は可能か?」という朝倉氏に対する質問により口火を切られた。この問題は当然確答の得られる性質のものではないが、これを契機として気候変動におけるタイムスケールの問題へと発展した。樋口氏によれば、雪氷の相変化のある時期とない時期では気候変化に対する影響は異なり、更にそのフィードバックの機構を考えると時間は必ずしも一様には流れない。倉嶋氏の指になる二年週期の存在もこの様な種類の現象と関連するのではないだろうか、又統計のとり方もこの辺を考慮すれば単なるカレンダー年では不適當で氷のとけはじめる時とかその他対象に応じたとり方が必要なのではなからうかということである。その点については荒川博士も同種の御指摘をされていたが、和田博士によればベルリン大学では実際にこの辺の考慮はある程度しているそうである。

次に中心となった問題は吉野氏と広田氏の議論に主として象徴されているもので、気候とは気象現象の結果として現われた平均値として表わされるものか、それとも気候とはその内部に自ら変動する性質をもったものであるかという点である。広田氏の論点は多分に後者の性質を強調されて居り気候を元来変動するものとしてとらえる方法を模索して居られたと見受けられる。ここで又、Time Scale の問題がやはり重要な要素となって入ってくるのであろう。倉嶋氏の所論には二年週期の現象が強調されていたのが印象深かったが、これも気候変化に元

来内在するものであるのかも知れない。しかし2年周期は周知の如く赤道地方成層圏ならびに高緯度のオゾン層にも同種の周期が指摘されていることも注目すべきであろう。又、最近の傾向特にソ連で太陽活動の微粒子流の効果が話題となっているのも注目に値する。

根本氏の所論は、現在起りつつある異常気象は過去に例を見ない程の大きな異変を伴なっていることから考えて、そのケーススタディーは切実なものであり、又重要であるところを強調された。又斎藤博英博士は気候をとりあつかう場合の時間的平均もさることながら空間的な分布を注意深く取扱う必要があり気候の空間的パターンに注目するところを強調された。

岸保氏の所論は、SGGE にむかって氷と海洋の観測が重要視され、この意味で、Polex-North, 及び Polex-South は一つの重要なステップとなる。同様にオゾン観測がSGGEへむかっての主題の一つとなる。更にこれらの問題を包含したSimulationの研究は外国特に米国に比し我が国が次第におくれつつある現状は憂慮すべきであり、気象研究所あたりが強力な推進母体となるべきではなからうかと結んでいる。

後 記

この論文集は去る昭和49年3月19日気象庁講堂において気象研究所、学会会議 GARP 分科会共同主催のもとに行なわれた「気候変動研究 シンポジウム—SGGE への布石」と題して行なわれた討論会における各講演者の講演内容と討論内容につきその後筆を加へて集成されたものである。尚この会議の発案ならびに司会に当時の気象研究所長今井一郎博士が貢献されていることを特筆して御礼を申し上げたい。

* Discussions and Comments

** K. Sekihera: 気象研究所