

## わが国の気候変動研究計画 (WCRP)\*

### 6. 気候形成に重要な諸過程の観測計画\*\*

#### 世界気候小委員会

世界気候小委員会においてわが国の WCRP 計画を討議・検討した結果、気候形成に重要な役割を果たすと考えられる諸過程については、集中特別観測による研究が必要であるとの結論を得た。この結論にもとづき、小委員会の中に、観測作業委員会\*\*\* が設けられ、海洋観測および南極観測以外の特別観測について関連研究者の意見およびシンポジウムでの討議を参考にしながら、観測計画案が検討された。作業委員会では、WCRP の観測計画としてどのようなものが重要であるか、その中で我国ではどのような課題をとりあげるべきか、そして、我国の研究者層、従来の実績を考慮すると、当面どのような課題を中心に観測計画をたてるのが望ましいかを討議した。その結果、次の3つの研究課題について観測計画をたてるのが望ましいと結論された;

- (a) 雲の特性と放射過程
- (b) 地表・大気間の物質とエネルギーの交換過程
- (c) 大気中の微量気体とエアロゾルの分布と挙動

現在、これらの課題について観測計画の具体案を検討中であるが、以下、観測作業委員会および世界気候小委員会における討議の内容、計画案の大枠等を紹介する。

#### 1. 雲の特性と放射過程

##### 1.1. 研究の意義

雲が気候の形成およびその変化に関与する過程は、大きく分けると次の3つにまとめることができる;

- a. 放射過程に関連するもの
- b. 熱、水および運動量の輸送過程に関連するもの

\* World Climate Research Programme in Japan.

\*\* Observational Programme of Climatologically Significant Processes (海洋観測計画および南極観測計画を除く)、(執筆) 武田喬男、田中正之、樋口敬二。

\*\*\* 内嶋善兵衛、内田英治、小野晃、片山 昭、榎根勇、近藤純正、坂上 務、武田喬男(主査)、田中正之、嘉納宗靖、樋口敬二、前 晋爾、三崎方郎。

#### c. 降水形成過程に関連するもの。

注意すべきことは、それぞれの過程において主に関与する雲が異なることである。気候がなんらかの原因で変化した時、雲の分布・状態が変る一方、雲の変化はまた放射過程等を通じて大気温度分布その他に大きな影響をおよぼすと考えられる。気候の形成過程における雲の重要性は、このようなフィードバック機構が考えられることに関係している。この事は気候の数値モデリング等を通じて最近も広く認められるようになった。

しかし、気候の変化に伴って雲の分布、状態がどのように変化するかは、現在のところ全くといってよいほど明らかにされていない。例えば、地表に到達する太陽エネルギーが何らかの原因で増加したとすると、地表温度は増加し、地表からの蒸発散は活発になり、雲の分布が大きく変るであろう。雲の分布の変化が、雲頂の高さの変化でなく地球をおおう雲量の増加として現われるならば、地球全体のアルビードは増加し、地表温度の増加はおさえられるといった負のフィードバックが起ることになる。また、雲量が変わることなく雲頂の高さのみが増加するならば、雲の温室効果の増加により地表の昇温がすすむといった正のフィードバックが働らくことになる。

気候の変化に伴って雲の分布が変化する場合、その変化がどのような性質をもった雲の分布の変化として現われるかは、気候形成過程にとって重要なことである。

気候形成に関与する広域の雲は集合体として多様な姿をみせ、これらの雲が気候形成に関与する物理過程も多様である。広域の雲の姿および気候形成に関与する過程は、大気中のさまざまな空間スケールの力学過程、放射過程、水循環過程の複雑な相互作用に依存するものであり、地球上の各気候域によってもかなり異なっているものである。気候に関連する雲の研究は、いろいろの立場からなされるべきであろう。1978年にオックスフォードに多くの研究者が集まって開かれた“JOC Study Conf.

on Parameterization of Extended Cloudiness and Radiation for Climate Models”においても、このような研究では、雲の物理過程、大気中の放射過程、雲のモデリングの研究者等が協力することが必要不可欠であることが強調されている。広域の雲の形成、維持、消滅の機構、放射および水循環の過程に関連する雲の特性等について、現在までに得られている知識は不十分であり、気候の形成、変動の過程に雲がどのように関与するかを調べるための知識が不足している。雲に関連した問題について、総合的な特別観測により確実な知識を増すことは、世界中で強く要望されていることであり、また、必要なことでもある。

## 1.2. 研究されるべき課題

気候形成と雲との関係において、放射過程に関連するものは特に重要であり、また研究の推進が望まれているものである。特別観測により研究されるべき課題は次のようなものであろう。

### 1.2.1. 雲の気候学

雲は地球の約半分をおおっているが、大気の上層、中層、下層に存在するもの、対流性のもの、層状性のもの、広域をおおうもの、散在するもの等、多種多様であり、それに応じて放射特性も異っている。気候変動の研究の基礎資料として、それぞれのタイプの雲に応じた雲量および雲頂・雲底の高度の空間的・時間的変動度が地球上の各気候域毎に得られていることが必要である。このような雲の気候学に関するこれまでの知識はかなり不完全であり、今後、放射特性、凝結水量等を考慮した雲の気候学の発展が望まれる。

この研究は、地上からの視野のせまい観測のみでは無理で、広い領域が同時に観測出来る衛星の利用が非常に有効であろう。特に、近年は、衛星に可視、赤外、マイクロウェーブの領域の多波長の放射計が搭載されており、これらのデータを組み合わせて利用することにより、雲の種類、雲頂高度、放射特性、凝結水量等を知ることがある程度可能になり、またそのような試みがなされている。しかし、衛星の多波長のデータを物理的に正しく解釈して使うためには、まず、雲について衛星観測と同時に航空機観測、地上観測等を行ってデータの詳細な比較をすることが必要であろう。また、更に質の良いデータを得るためには、衛星搭載の新しい器機の開発ももちろん必要である。雲を構成する粒子が水滴であるか氷粒子であるかをリモートセンシングで判別する技術は、いまだに確立されていないが、雲の気候学のみでな

く、他の課題にも関連する重要な問題として、開発の望まれるものである。

### 1.2.2. 雲の微細構造と放射特性

雲の放射効果を正しく気候の問題に考慮する上で、各タイプの雲について雲の物理量と放射特性を関係づけることが必要であるが、質の良い観測結果は極めて少ない。すなわち、太陽放射に対する雲の反射率、透過率、吸収率、および赤外放射に対する雲の射出率等の詳しい観測データはない。

現在、数値計算法の進歩により、水滴の集団の放射特性、放射伝達を理論的に求めることは、水滴の粒径分布を与えることが出来るならばかなりの程度まで可能である。しかし、それぞれのタイプの雲の代表的な水滴粒径分布は、観測事実として十分な確からしさでは求められていない。第1図に示すように、今のところ、理論計算から求められた雲の放射特性と実際に航空機観測等から求められたものとはかなりのずれがある。雲内の水滴の粒径分布は空間的にも時間的にもかなり変動するものである。雲の微細構造および物理量と雲の放射特性との関係を、それぞれの変動性も考慮して、総合的な観測により各タイプの雲について得ることがぜひとも必要である。

気候の問題と関連させるためには、雲の全体像をも把握するような総合観測が必要であり、次のような課題が研究されるべきであろう。

#### (a) 雲の構成要素と放射特性との関係

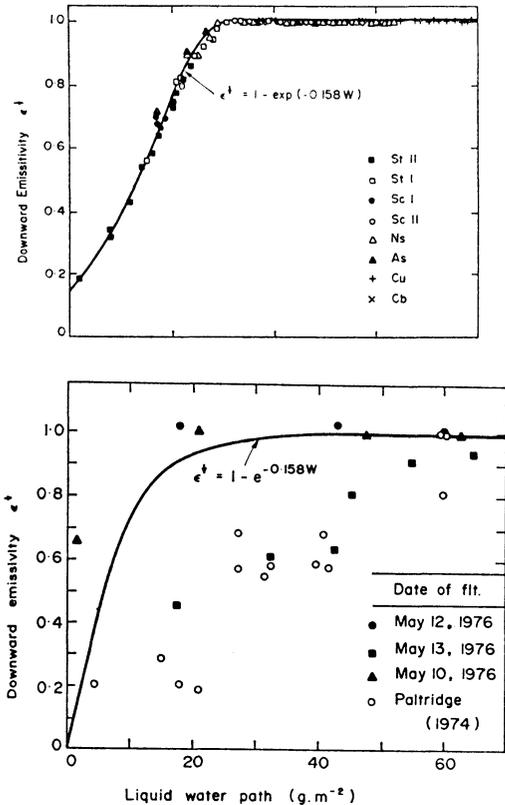
$S_t$ ,  $A_g$ ,  $C_g$  等の単層の層雲の典型的な例について、水滴あるいは氷粒子の粒径分布（特に、最も数密度の多い粒径）、雲層内の単位面積気柱あたりの凝結水の量等と対応させて、放射特性のデータを得る。この際、エアロゾルが雲の放射特性におよぼす直接的効果、雲粒形成等に関連しておよぼす間接的效果も知ることが望ましい。

#### (b) 雲の幾何学的構造、分布が放射特性におよぼす効果

雲の上下の境界の凹凸は、太陽放射に対する反射率にも大きな影響を与えるはずである。また、広域の雲はさまざまな大きさと形状の雲が集合したものであり、それらの集合状態が全体の放射特性におよぼす効果を知る必要がある。

#### (c) 雲の多層構造の効果

雲は多くの場合層状構造をしていて、雲の放射特性は相互干渉により著しく変ることが予想される。



第1図 雲の emissivity と integrated liquid water との関係。上図および下図はそれぞれ理論計算と観測の結果 (Stephens, 1978)。

(d) 雲内の各層における放射エネルギーの収束・発散の実態

(e) 入射する放射場の性質のちがいの効果

雲の微細構造が同じであったとしても、地表面のアルビードのちがい等によって雲の放射特性が異なることが予想される。

1.2.3. 雲の生成, 維持, 消滅の機構

先に述べたように、気候の因子、大気の状態が変わった場合、それに応じて、雲、特に広域の雲の分布、構造、その放射特性がどのように変わるかは、現在よく分っていない。気候のモデリングにおいても非常に簡単に扱われているのが現状である。雲の放射特性および水循環特性そのものが雲の変化に大きな影響を与えるものと考えられ、従って、この問題は、大気の流れ力学的、熱力学的立場からのみでは解決されるものではない。大気の大規模な状態、因子が知られた場合、どのような分布、構

造、特性をもった雲が存在し、どのように変化をしていくかを知らうとすることは、小さい時間、空間スケールの物理過程をパラメタライズするという問題にもつながる。これまでに、いろいろのパラメタライゼーションが開発され、気候モデリングにも適用されているが、いたずらにパラメタライゼーションをいそぐことなく、広域の雲の分布、構造を実態として更に詳しく知ることも必要である。

観測を通じて研究されるべき課題は次のようなものであろう。

(a) 大気の状態、因子から集合体としての雲の分布を決めるこれまでのパラメタライゼーションの妥当性と限界。

(b) 雲内単位面積気柱あたりの凝結水量の水平的な分布としての雲の分布状態と大気の大規模な状態との対応。

(c) 凝結水から降水への変換速度。

凝結した水がどのような速度で降水に変換していくかは、雲の維持・消滅をきめる重要な因子であり、これは雲の微細構造(水滴粒径分布、氷粒子の有無等)と密接に関連したものである。気候に関連した現在の雲のモデルでは、雲のタイプによる差が十分考慮されていない簡単な仮定がなされているのみである。

(d) 雲の生成, 維持, 消滅の新しいモデル。

これまで、熱帯の積雲の集団、境界層の層雲等については研究が進んでいる。大気の放射過程にとって重要と考えられる広域の層雲系統の雲、特に不均一な分布をしているものについて、雲量・雲頂・雲底高度等の三次元的分布(雲の微細構造もある程度)を考慮したモデルをつくることが望まれる。放射過程に対する効果が複雑な C<sub>0</sub> の研究も重要である。

1.3. 我国の観測計画

はじめにも述べたように、気候に関連して“雲と放射”に関する研究を行う際、力学、放射、雲物理の各研究者の協力が必要である。各国においても“雲と放射”の問題について観測計画がたてられているが、特に、我国には力学、放射、雲物理の研究者がそろっており、それらの密接な協力による総合的な観測の実施が期待出来る。観測計画をたてる際、測定技術、器機の開発、我国が研究すべき気候域、観測対象とする雲のタイプとその空間スケール、他の分野、特に海洋の観測計画との協力態勢および諸外国との協力態勢を考慮すべきであろう。気候形成における雲の役割について、知識が非常に欠けてい

る現段階では、当面広域の雲の諸特性を実態として調べることを主な課題とすることが妥当であると考えられる。

### 1.3.1. 観測領域および対象とする雲

これまで熱帯の太平洋あるいは大西洋上の雲については特別観測が行われ、雲のモデルがつくられてきたが、中緯度の雲についてはまだモデルをつくることまでには観測が進んでいない。西太平洋上日本付近は、亜熱帯に属し、大気が湿潤な気候域にある。この領域の雲を観測対象とすることは、その重要性からしても、他の気候域とはかなり異なる分布と特性をもつことが予想されることからしても、適当であると考えられる。特に、海上の雲は、地球上の雲量に対する寄与が大きいこと、衛星のマイクロウェーブのデータによる凝結水量の評価が可能であること、観測用航空機が区域として飛行し易いこと等の理由から、観測の対象として適当であろう。また、リモートセンサーその他の地上観測、気球観測、そして海面およびその近くのデータの利用等を考慮すると、第2図のように、伊豆七島からマークス島までの領域、あるいは南西諸島海域と海洋特別観測の計画されている137度線近辺の領域を含む領域内の雲を選ぶことが望ましい。

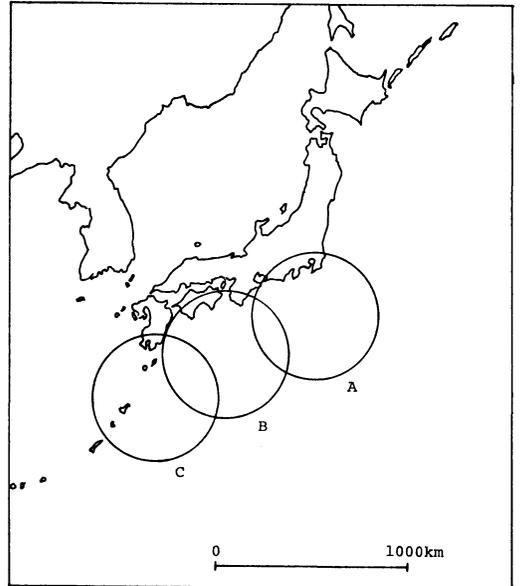
総合観測は、数 km～数10 kmの空間スケールで雲のさまざまな物理的パラメーターを詳細に観測し明らかにした上で、気候形成に重要な役割を果たすと考えられる数10 km～数100 kmのスケールで雲の分布、特性をモデル化することが出来るように計画されるべきである。対象とする雲は、西太平洋上の雲の気候学の研究とあわせてきめていくものであろうが、広域に多量の降雨をもたらすような広域の厚い雲よりも、むしろ雲厚のそれほど厚くない広域の層状雲および積雲の集団が適当であろう。その中には、西太平洋上特有のものではないが、気候の問題に特に重要と考えられる  $C_o$  および  $C_i$  が含まれることが望ましい。

### 1.3.2. 観測項目 (第3図, 第1表, 第2表)

#### (i) 雲の微細構造と放射特性

先にも述べたように、雲の放射特性については、確実な観測データが必ずしも得られていず、従って、雲のどのような性質によって実際の雲の放射特性がきまっているのかは明らかでない。この観測は、航空機を主な手段として、次の課題について行われる。

(a) できるだけ単純な構造、形状をもつ層状性の雲について、雲の物理的性質、構造と放射特性を同時に測



第2図 「雲の特性と放射過程」の観測予定領域 (AあるいはC)。Bは海洋観測予定領域。

定し、両者を比較することにより、雲の放射特性は雲のどのような特性と関係しているかを調べる。

(b) 雲の上部の形状、雲内の構造、雲の分布等の水平方向の雲の不均衡性が雲の放射特性におよぼす影響を調べる。

#### (ii) 広域の雲の放射特性

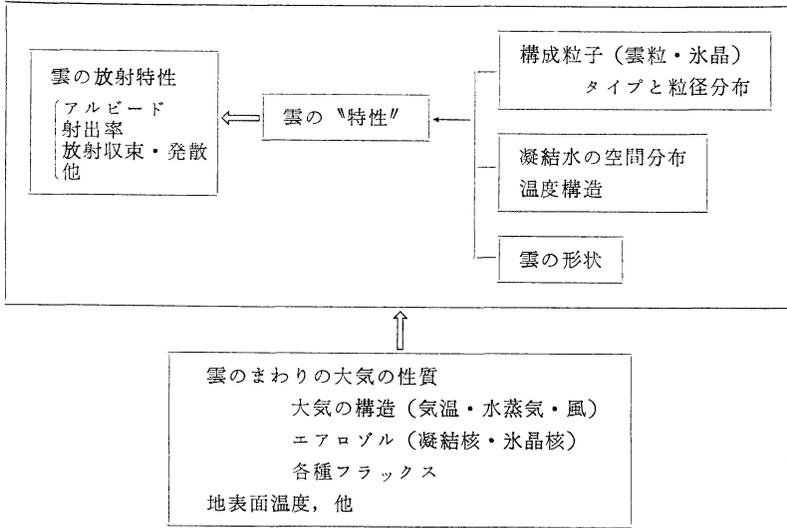
(i) の成果を基礎として、気候形成に直接関係すると思われる広域の雲 (数10 km～数100 km) について、放射特性と雲の特性との関係を調べる。この研究は、主に気象衛星と航空機の観測をもとに行われる。

上記 (i), (ii) のいずれの観測においても、雲の諸特性と大規模な場との関係、および雲の形成・維持・消滅の過程を調べるための基礎データとして、観測対象の雲領域を囲む領域の気象要素 (気温、水蒸気量、風)、エアロゾルの性質 (物質、粒径分布)、各種フラックスその他の観測を行う。

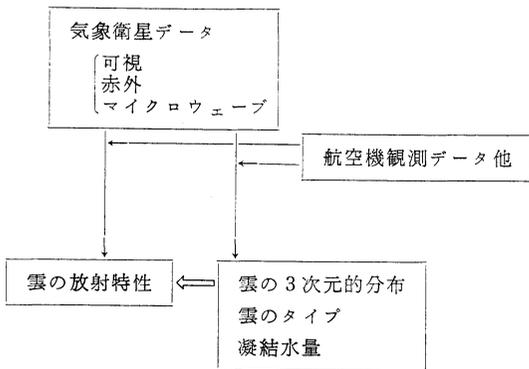
### 1.3.3. 観測方法

総合観測では、地上および気球による一般気象観測の他に、人工衛星、航空機、地上設置の各種リモートセンサーによる観測が必要不可欠になる。

可視・赤外領域のデータを用いた雲の分布の解析以外に、雲の物理的諸特性を調べるために、多波長のデータ



第1表 雲の微細構造と放射特性の観測項目。



第2表 広域の雲の放射特性の観測。

を正しく利用する技術を開発する必要がある。そのためには、衛星による観測と合わせて航空機観測等を同時に行い、衛星データを物理的に正しく解釈するための研究を行わなければならない。特に、気候の問題では、マイクロウェーブのデータを利用した雲内の凝結水量の評価が重要になるであろう。また、人工衛星としては、静止衛星ひまわり、軌道衛星 NIMBUS, NOAA, MOS 等の利用が有効であると考えられる。

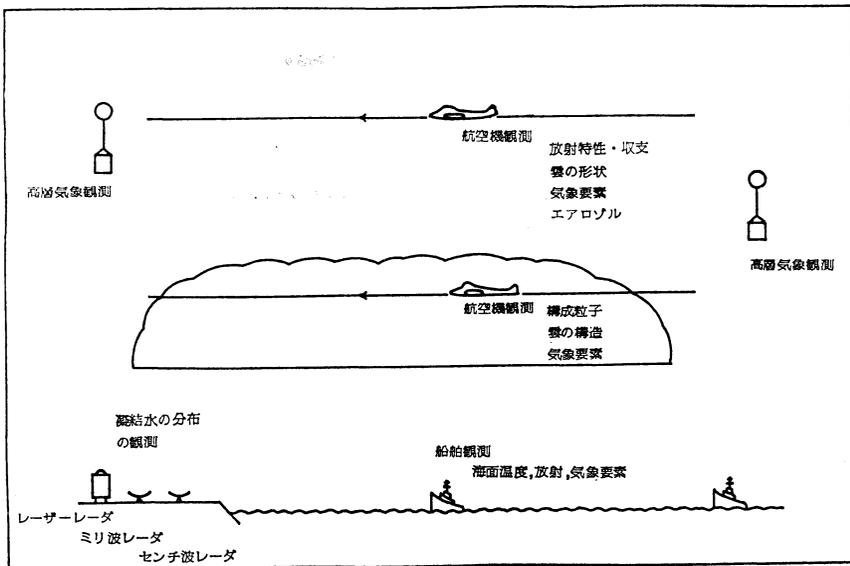
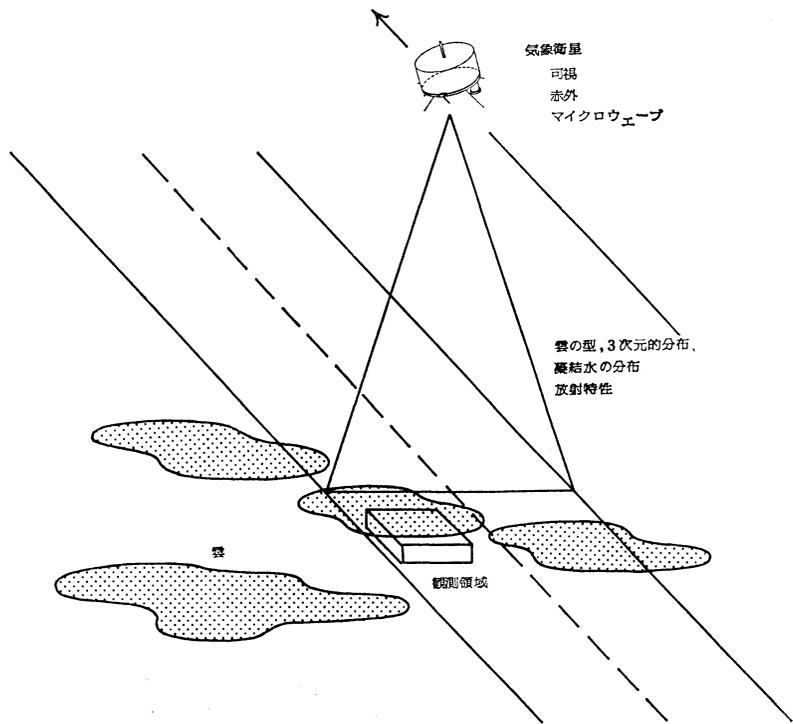
航空機による観測は、雲内の物理過程の研究、衛星データの正しい解釈等のために不可欠のものであるが、残念ながら航空機観測の技術は諸外国に比べて大幅におかれている。観測用航空機の確保、観測技術の開発は、

“雲と放射”の観測計画において最優先されるべきものである。観測計画では、雲内の物理的パラメーターの観測と雲外からの放射特性その他の観測を同時に行うことが必要であり、2機以上の観測用航空機を同時に使用するべきであろう。雲の微細構造、放射特性を調べるための航空機用測器は世界全体としてかなり進歩しており、既存のすぐれた測器を利用することはもちろん必要であるが、データの性質を熟知した上で良質のデータを得るためには、新たに我国で測器を開発することも必要である。

ミリ波およびセンチ波のレーダー、ドップラーレーダー、レーザーレーダー等、特別観測用のリモートセンサーはかなり整備されてきているが、量的に信頼の出来るデータを得る技術、異なる波長あるいは異なる質のレーダーの同時観測により新しい性質のデータを得る技術を開発することが必要となる。人工衛星、航空機、リモートセンサーによる観測全てについて共通なものとして、雲を構成する粒子が水滴であるか氷粒子であるかを判別する技術は非常に有用なものであり、その開発が要望される。

1.3.4. 参加研究機関

予定される主な参加研究機関は次の通りである；北海道大学（理学部，低温研），北海道教育大学，秋田大学（教育学部），東北大学（理学部），東京大学（理学部，海洋研），埼玉大学（理工学部），東京理科大学



第3図 雲の特性と放射過程の観測.

(理工学部), 横浜国立大学(教育学部), 名古屋大学(水圏研, 空電研), 京都大学(防災研), 大阪教育大学, 九州大学(農学部), 気象庁, 気象研究所(予報, 台風, 物理気象, 高層物理), 気象衛星センター, 国立防災センター

他の気候域における類似の観測の成果との比較を行い, 亜熱帯湿潤気候域の雲の特徴を明らかにすることももちろん必要であるが, 諸外国, 特に, アメリカ, オーストラリアの研究者に参加をよびかけて, 異なる立場と異なる測定技術の観測を組みこむことは, 観測計画を充実させるためにはぜひとも望まれることである。特に, 1つの航空機を多目的の観測に用いることは現実には不可能であり, 航空機観測を中心とした参加が望まれる。

## 2. 地表・大気間の物質とエネルギーの交換過程

### 2.1. 研究の意義

地表面に入射した太陽放射エネルギーは地表面諸過程によって, 顕熱と蒸発(蒸散も含む)の潜熱に交換されるが, その分配のされ方が気候を大きく支配している。エネルギー分配のされ方は地表面の粗度のほか土壌中の水分や地表面が何で覆われているかによって変わる。

地球の表面の約15%を占める森林・農耕地等植物で覆われた地表面の物理的性質は季節によって変化する。一般に植物が生えたようなキャノピー層からなる地表面は風に対する摩擦が大きく熱交換も高い。水蒸気や二酸化炭素・酸素の交換は植物生理との相互作用によるが, 植物にとって地中からの水分補給が十分であり, その他の条件が整っていれば植物群落からの蒸発による熱の放出は水面からの場合とほぼ同等またはそれ以上になる。一方植物の活動がにぶる冬期には蒸発の潜熱は微弱で0に近づく。それゆえ, 植物キャノピーから形成された地表面の潜熱は極端から極端まで変動する。地表面で潜熱放出が多いか少ないかは砂漠の例でわかるように, 気候形成への影響が大きい。しかし, その観点からみると, 地表面における蒸発散の過程は, まだ充分にわかっていない。

また, 太陽放射を比較的良好に吸収する陸地表面が積雪でいったん覆われると, アルビードや熱伝導などの物理的条件が変わるので大気に及ぼす効果も変わってくる。地球上で, 氷床, 氷河, 海水で覆われた面積は地球表面積の約12%であるが, この値は季節によって大きく変化する。この面積と気候変動は密接な関係にある。

一方, 地表面は, 大気中の二酸化炭素, その他の物質

の供給, 吸収に大きな役割を果している。特に最近, 人為的な原因にもとづく  $\text{CO}_2$  放出によって, 大気中の二酸化炭素ガス濃度は着実に上昇しており, 近い将来における気候への影響が心配されている。

大気中の  $\text{CO}_2$  上昇および  $\text{CO}_2$  収支に, 植物圏の活動が密接に関係しており, 植物圏は  $\text{CO}_2$  の吸源であると長く信じられてきた。しかし, 最近の森林開発は吸源から湧源へそれを変化させたという意見が出されるようになり, 地表面の変化が大気との間の物質交換過程に与える影響の解明が重要となってきた。

以上述べたように, 地表面と大気間における物質とエネルギーの交換に関する研究は, 気候変化の解明と予測法の確立のために非常に重要である。したがって, 気候変化のシミュレーションモデルの作成において, 地表面での物理的過程(放射収支, 熱・水蒸気交換, 運動量交換, 物質交換)のパラメタライゼーションは重要な役割をになっている。しかしながら, 現在までこの分野に関する研究は断片的であり, かつそれぞれ異なった目的のためになされており, 気候変動への影響ならびに数値モデルの立場からみると極めて不十分である。この研究では, 次の目的のため, タワー観測を中心に“地表と大気間での生物・物理的諸過程”に関する実験的定量的観測を行なう。

### 2.2. 観測計画

本研究は, 従来の研究が一地点に注目したものであったものを単に空間的に拡大して行なうものではなく, わが国のように, 複雑地形の地域では山地と斜面, それに平地間の相互作用が強いので, それらが1つの領域に含まれるような地域を対象とし, その効果を明らかにするものである。つまり, 複雑地形から成る地表面と大気とのエネルギー・物質交換の実態を明らかにし, それをパラメタ化するものである。また, その地域に占める特定の植被面積の規模とその配列が変化したときの広域パラメタがどう変化するかを求め, 気候変化に及ぼす影響を見出すことである。

そこで, 観測は, 1) 基礎的研究, 2) 季節的・地理的变化の研究, 3) 多様な地目をもつ広域に関する研究, に分けて, 次のように計画されている。

#### 2.2.1. 基礎的研究

##### (i) 裸地面蒸発量のパラメタ化

一様平坦な理想的な地表面を選定して傾度法, 熱収支法, 渦相関法, 直接計量型ライシメータなどによって評価される裸地面からの蒸発量を真価として用い, 1高度

バルク法による蒸発量のパラメータ化を行なう。また、半乾燥地を含めて土壌水分のリモートセンシングの方法を開発し、土壌水分のルーチ的な測定方式と予報方式の方法を提示できるようにする。土壌水分のリモートセンシングはマイクロ波放射計を塔に設置して行なうが、広域への応用段階では航空機に搭載して行なうことを考えている。

#### (ii) 植物群落からの蒸発散パラメータ化

森林や畑などの植物群落上の蒸発量、顕熱フラックスを傾度法その他の方法で評価されたものを真価として用い、1高度バルク法による蒸発量のパラメータ化を行なう。

その際、キャノピー内のエネルギー交換のモデル化を行なう。1高度バルク法は、植物の種類、その配列構造のほか、一般気象データと広域にわたって観測された葉面温度のデータを用いて蒸発量が計算できるものである。

#### 2.2.2. 蒸発散・物質交換の季節的・地理的变化の研究

日本各地の代表地点12箇所連続観測を実施し、傾度法その他の方法によって顕熱と蒸発の潜熱を求め、季節・地域・地表面の種類によるボーエン比の実態を明らかにする。代表地点としては水田、裸地、森林、雪水面等である。この観測は、5~20mの観測塔によって行なう。

この種の観測は多くの研究者によって断片的に行なわれてきたが、本研究ではそれを2ヶ年間にわたって連続して行なう点に特徴がある。

また、上記の地点の観測によって林地および耕地の植生によるCO<sub>2</sub>などの吸収強度の季節変化ならびに地域的变化の実態を明らかにする。そして、大気中のCO<sub>2</sub>バランスでのこれら植生の役割を判断できるようにする。また、大気CO<sub>2</sub>収支式を解いて、CO<sub>2</sub>濃度上昇の傾向予測が可能となる。

#### 2.2.3. 多様な植被をもつ広域の蒸発散・物質交換の研究

##### (i) 平坦地における総合観測

地表面におけるエネルギー交換は気候形成の主原因の一つであるが、水平方向に均質な広い地表面上のエネルギー交換過程については、すでに一般理論が確立している。しかし、不均質な面の集合からなる広域面でのエネルギー交換については、地点の代表性や移流効果など未解決の問題が残されている。蒸発散に関しては、土壌

面蒸発、遮断水の蒸発、植物による蒸散、水面蒸発がそれぞれメカニズムを異にするため、それらの集合である広域からの蒸発散量の推定は経験的方法にたよるを得ないのが現状である。また植物が覆われた面からの蒸発散量も、植物の種類や年齢によって異なることが、最近の観測データで明らかになった。広域からの蒸発散量の推定は水資源問題としても重要であり、緊急を要する課題である。

そこで、水平距離20km程度の、平坦な筑波研究学園都市内部で、代表的な地目として林地、草地、裸地等を選び、各研究機関が分担して同時観測を行ない、まず各地目別蒸発散量の基準値を季節ごとに決定する。つぎにこれらの観測データに基づいて広域からの蒸発散量推定モデルの開発を二つの方法で試みる。第1は熱収支に基礎をおく方法である。純放射量は広域からの蒸発散量の上限を示す重要な気象要素であるが、この値が常時観測されているのは我が国では高層気象台に限られ、筑波地区はこの種の研究を行なう場所として最適である。第2は地上100m程度の気層の大気条件をパラメータ化することによる広域からの各種流束の決定法の開発である。この研究にも、既設観測塔の利用が可能であり、また航空機の利用に関しても、対象地域が平坦地であるうえ、各研究機関による同時地上観測が可能であるという利点がある。

##### (ii) 傾斜地への応用のための基礎観測

山地や平地を含み、森林・田畑等が混在する複雑地形をもつ地域において、観測塔、低層ゾンデ、航空機によるエネルギー交換量の総合観測を行なう。観測塔では精密な連続観測を行ない、航空機は空間的な分布を観測する。

地域の半分は冬期に積雪で覆われ、平野の水田は裸地になり、季節による地表面の変化が多様であるような地域、たとえば、宮城県北部における観測が計画されている。

基礎研究で得られた成果も応用して、複雑地形におけるエネルギー交換量を評価し、そのモデル化・パラメータ化を行なう。そして、平坦地の観測結果、モデル化を傾斜地に応用するための基礎をつくる。

#### 2.2.4. 参加研究機関

予定される主な参加研究機関は次の通りである。

北海道大学(理学部、環境科学科、低温研)、北海道農試、東北大学(理学部、農学部)、東北農試、筑波大学(地球科学系、生物科学系、水理実験センター、

菅平高原実験センター), 気象研, 高層気象台, 農技研, 公害研, 公害資源研, 林試, 防災センター (センター, 平塚支所), 名古屋大学 (水圏研), 金沢大学 (教育学部), 北陸農試, 京都大学 (防災研), 大阪市立大学 (理学部), 岡山大学 (理学部, 農学部), 鳥取大学 (砂丘研), 九州大学 (農学部), 九州農試, 琉球大学.

### 3. 微量気体およびエアロゾルの分布と挙動

#### 3.1. 研究の意義

大気中に存在するある種の微量気体やエアロゾルは, 直接・間接に太陽放射や赤外熱放射の伝達に関与し, 地球のエネルギー収支に影響を与えている. これらの中にはもちろん自然に存在してその濃度も大きくは変動しないものもあるが, 自然的あるいは人為的な原因によって顕著な変動を示すものもある. 特に, 人間活動の結果, 自然の変動幅を越えた著しい増加傾向を示すものがあり, 将来の気候変化の誘因となる危険性が懸念されている.

このような物質としては, エアロゾルのほか二酸化炭素, オゾン, 水素酸化物, また窒素, 塩素, 硫黄等の化合物がある. 例えば, 地球の放射エネルギー収支に直接的に関与している二酸化炭素が年々増加の一途をたどっていることはよく知られた事実であり, それによる気候の温暖化や降水分布の変化とそれらがもたらす影響は深刻な関心事となっている. また, 化学肥料と関連する亜酸化窒素や, 成層圏飛行等で放出される窒素酸化物, あるいはハロカーボンの大量消費などは, 成層圏オゾン層の破壊に連がる危険性が大きいと憂慮されている. さらに, 硫黄酸化物等から発生するエアロゾルが放射エネルギーの収支におよぼす直接・間接効果にも少なからざる関心が払われている. しかし, これらの微量気体やエアロゾルについては, その分布や挙動について, ましてその気候影響について, 定量的な知識は極めて乏しいというのが実情である.

そこで WCRP においては, 特に放射過程を介して気候に影響を与える可能性をもつ微量気体成分とエアロゾルについて, まず, それらの時間的・空間的分布の実態と発生・輸送・変質・除去等の機構を明らかにするという基礎的な研究を推進する必要がある. 各成分の将来の濃度の予測やその気候影響の評価などは, このような基礎研究の上にはじめて可能となると考えられるからである.

#### 3.2. わが国の観測計画

上記の観点に立ち, かつわが国の関連分野の現状および WCRP の他の観測計画を勧奨すると, わが国において推進することが望ましい研究課題としては以下のものがあげられる.

##### 3.2.1. 計測技術・方法の確立

各気体成分およびエアロゾルに関する計測技術は一般に多様で, 各研究者あるいは研究グループ毎に個有の技術を持っている. しかし, 計測の精度についての客観的な吟味は必ずしも十分とはいえない. このため, 異なる技術あるいは同一技術であっても異なる研究者間での結果の量的比較の困難な場合も少なくない. また, 目的に応じて自づから計測に求められる精度がある (例えば二酸化炭素の年々の増加量や空間分布の計測では 0.1 ppm の精度が要請されている) はずであるが, それに関する吟味も不十分な場合が多い. さらに, 対象とする成分の時間的・空間的な変動に応じたデータのサンプリングが行われなければならないが, そのような吟味は特に不十分である. そこで測器の相互比較や検定法の改良・開発を十分行なうとともに, 目的毎にサンプリングに求められる時間的頻度や空間的間隔を明らかにすることが当面の大きな課題である. 微量気体もエアロゾルも基本的には長期間に亘るモニタリング態勢を整える必要のあるものであるので, WCRP の初期にこのような基礎技術を確立しておくことが強く望まれる.

##### 3.2.2. 広域的な分布特性の把握

二酸化炭素, エアロゾルなどの例にみられるように, 微量成分の濃度には, 一般に時間的にも空間的にも顕著な局所性が認められる. 一方, 気候影響という観点からは, より広域, より長期の濃度分布や変動に関する知見が求められる. また, 微量気体については, 各成分の生物地球化学サイクルの正確な把握によって, はじめてそれらの将来濃度の予測等も可能となるが, 大気-海洋間, 大気-生物圏間の交換量の正確な評価は現状では極めて困難である. これに対し, 大気中の濃度の全地球的規模での空間分布とその時間変動を正確に把握できるならば, それぞれの成分の source や sink の強さや, その時間的・空間的分布をかなり正確に知り得るといふ大きな利点がある. WMO が二酸化炭素の観測網の整備を各国に呼びかけているねらいの一つは, 二酸化炭素の生物地球化学サイクルに対するこのようなアプローチにあるのである. エアロゾルについては, 広域にわたる濃度や質の変化の実態の把握は, その大気中での挙動の解

明にも欠かせないものである。このような広域的情報は、また、エアロゾルの間接効果として重視されている雲核として雲の状態を変える効果の解明にも貴重な資料を提供するものと考えられる。

以上の観点から、航空機・船舶等を用いて、わが国近傍の極力広い空間領域を対象とした微量気体・エアロゾルの系統的観測が望まれる。幸い WCRP においては、海洋の観測、雲の放射特性の観測などの一連の観測計画が広域を対象として立案されているので、それらの一環

として微量気体とエアロゾルの観測を進めるのが現実的であろう。

### 3.2.3. 参加研究機関

予定される主な参加研究機関は次の通りである；  
北海道大学（理学部・工学部）、東北大学（理学部）、  
東京大学（理学部）、埼玉大学（理工学部）、名古屋大  
学（水圏研、空電研）、気象庁、気象研究所、公害研  
究所、電波研究所

齋藤直輔 著

## 天気図の歴史

— ストームモデルの発展史 —  
気象学のプロムナード 5

東京堂出版、1982年2月刊、  
A5判、215頁、3,200円



「歴史」という書名から博物館的天气図の陳列を想像する人も、あるいはあるかも知れない。しかしこの本は、そのようなカビ臭さとはほど遠い。「ストームモデルの発展史」なるサブタイトルにも示されるように、温帯低気圧という生き物の、その深遠な実体をつかもうとして、我々の先達がどのようなアプローチを続けて来たかの物語である。しかも本書の後半は、「歴史」というよりは、むしろ「現代史」と呼ぶにふさわしく、また「天気図の……」というよりは、むしろ「シノプティック気象学の……」と名付けるにふさわしい。

すなわちそこでは、「質量の発散・収束からみた低気圧の三次元モデル」や、「ロスビーと上層偏西風の波動」、「準地衡風モデル」などの章が設けられており、必要最小限の数式と、逆にたくさんの図を用いて、これら気象力学的概念についての解説がなされている。しかもそれは単なる祖述ではなく、著者自作の図を用いた、いわば「齋藤気象学」といった趣きで、たとえば傾圧不安定の説明などにも、普通の気象力学の本にはない味わいと明快さがある。また、東シナ海を東進する低気圧を例にと

っての流線分布の模式図などは、立体感にあふれていて、眺めているだけで楽しくなる。

というわけでこの本は、気象学を学ぶ人一般のよい読物であることは勿論だが、特に全国の気象台で天気予報の仕事にたずさわる人達にはぜひ読んでいただきたいものである。

ただ惜しむらくは索引のないことで、「歴史」と名付けるからには、せめて人名の索引だけでもつけて欲しいと思う。

さて著者は、天気図が力学と結合して来たプロセスをたどったあと、“総観気象学とはもはや一つの表現法にしかすぎない”というような見解も世に生まれていることを憂えて、次のように述べている。「むしろ、そうではなく総観気象学は力学と協力して力学概念の監視者、助言者としての良きパートナーの役割を果さねばならぬ。現実の天気の反映である天気図の、細やかに注意深い考察が失われないようにすることが大切である。」

これは正に、天気予報の現場で私も常づね感じていることである。力学モデルではまだうまく捕えられていない現象すなわち問題点の発掘は、現実の天気あるいは天気図に毎日とり組んでいる者の仕事である。気象レーダー・衛星の利用度が高まるにつれ、天気図のあるべき姿はこれから大きく変わるであろう。そのような現在、天気図についてのこのようなレビューが出たことも、まことに意義深い。

(櫃間道夫)