

雲と気候と衛星観測

浅井 富雄

(科学技術振興事業団)

1. はしがき

千葉大学環境リモートセンシング研究センターと気象研究所「雲が地球温暖化に及ぼす影響解明に関する観測研究（科学技術庁調査研究促進費）グループ」が共催する「雲のリモートセンシングと気候影響に関するシンポジウム」に御招待いただき、講演する機会を与えていただいたことに感謝する。

気象研究所で始まり（1959年10月～1967年11月）、千葉大学（1996年4月～1998年3月）で終わったこれまでの私の研究生活を顧みると、その研究活動の背景には終始「雲」が存在していた。千変万化する「雲」はまた脚光を浴びる側面も時代と共に移り変わる。「山といえは川」の如く「雲といえは雨」が合言葉であるが、昨今、雲といえは衛星画像や気候変動を連想する人が増えつつある。たしかに時間・空間スケールの全く異なる雲と気候の間には不可分の関係があり、リモートセンシングとりわけ衛星によるそれは雲や気候の研究に不可欠な観測手段となっている。私の経験を通して、雲・気候・衛星観測を三題噺として思いつくままに振り返ってみたい。

2. 大気科学と技術開発

科学の発展の経過を辿って見ると、多くの場合、技術の発展と密接にかかわっていることに気付く。気象学もその例にもれず、観測技術或いは観測データを処理する技術が気象学の発展の歴史に画期的な役割を果たしている。

今世紀初頭までの気象学は地上付近の気象観測に基づくものであった。19世紀末、気球に観測機器を搭載し、それが上昇していく過程でデータを信号電波として地上に伝える手段が開発された。今世紀に入ってそれがラジオゾンデとして実用化され、上層の気象が観測できるようになった。しかしながら気球はその放球点付近の上空の観測しかできない。それに対して1940年代になると、航空機が観測手段として使えるようになった。飛行機にしても、気球にし

ても地上たかだか 20 ~ 30km までの観測である。

気象学の対象は地上から 10km ぐらいまでの対流圏から 40km ぐらいまでの成層圏へ拡大した。成層圏には、今日地球環境の重大問題になっているオゾン層も含まれている。さらにその上熱圏に至るまでの中間圏も今日では気象学の対象になっており、ロケットによる観測が行われている。また雲や降水現象の研究は 1940 年代に導入されたレーダー観測技術に負うところが大きい。このように気象学の発展には常にそれを支える技術開発が背景にあったことがわかる。

3. 衛星観測の開始

1957 年ソ連が人工衛星 Sputnik さらに 1959 年 Meteor を、1960 年米国が TIROS を打ち上げ、衛星観測時代の幕開けを迎えることになった。人工衛星が現実のものとなり、1961 年国連総会において、「外圏大気の平和利用に関する決議 1721」のなかで、「気候変動の物理過程を明らかにし、また大規模な気象調節の可能性をたしかめるために大気科学の研究とそれに必要な技術開発を行う」という決議がなされ、世界気象機構 (WMO) と国際学術連合会議 (ICSU) に対しその実施についての勧告がなされた。1962 年の国連総会では外圏大気の平和利用に関して再度決議 1802 が採択され、「WMO の加盟国に対し大気科学の調査研究を一層推し進めるように、また ICSU に対しては WMO と協力して上記の研究を発展させるように」との勧告がなされた。このようにして、人工衛星を平和目的に使うその最初のものとして地球大気の研究が取り上げられた。

4. 大気大循環の研究

1960 年代、米国の TIROS、ESSA シリーズ、ソ連の COSMOS シリーズは気象界に大きな衝撃を与えずにはおかなかった。当時、我が国ではまだ手に入りにくかった僅かな雲の写真に胸を躍らせたものである。巨大な渦巻きの熱帯低気圧、寒冷前線の尾をひく温帯低気圧、雲の密集する熱帯収束帯など教科書通りの雲の分布が一枚の写真に生き生きと描き出され、気象学もまんざらではないと感じ入ったことを記憶している。このようないわば既知の現象を再確認し理

解を深めると共に、他方、未知なる現象、思いも及ばなかった多くの事象も視野内に入ってきた。

このような背景のもとで、天気予報の精度向上・予報期間の延長・大気大循環の理解の増進に向けて、地球大気開発計画（Global Atmospheric Research Programme, GARP）が1960年代に立案され、WMOの世界気象監視計画（WWW）と表裏一体となって1970年代に世界各地で種々の課題を掲げた副計画が実施された。5個の静止衛星と2～4個の極軌道衛星から成る今日の「世界気象衛星観測網」は1970年代末に実施された第1回GARP全球実験（FGGE, 全球天気実験GWEとも呼ばれる）のためにその骨格が作られたのである。我が国の静止気象衛星GMS「ひまわり」はその一つとして位置づけられている。

GARPにおいては大気中の気象要素の相互作用による変化、いわば気象システムの自己調節とでもいうべき変化過程を数値モデルを用いて追求することである。その際生ずる難点の一つはsub-grid scaleの現象の取扱いである。レニングラードで開かれた国際研究会議“Parameterization of Sub-grid Scale Processes (1972)”はそのためであった。

そこでの雲にかかわる主要な対象は対流雲であった。水平規模は小さいけれども（1）熱・水蒸気・運動量の鉛直輸送、（2）水蒸気の凝結に伴う潜熱の解放と降水、（3）太陽放射の反射と赤外放射の吸収・射出などの機能・機構をどのように取り入れるかが主要な課題である。層状雲は放射過程を通して気候に影響するであろうというにとどまった。

5. 気候変動の研究

気象衛星打ち上げの最初の十年間は米・ソの独壇場であったが、1970年代には静止衛星も実用化され、搭載センサー・アルゴリズムの開発と相まって衛星観測は量的に充実・質的に向上し、その利用は拡大・高度化した。

当初GARPの第二期における目標として掲げられた「大気大循環の統計的性質を支配する要因を解き明かすこと」に着手すべく、その第一歩としてストックホルムで国際研究会議“Physical Basis of Climate and Climate Modelling (1974)”が開催された。そこで初めてcloud

regime, cloud clusterなどの概念が導入され、雲と気候との物理学的関わりが明示された。即ち（1）力学と水循環過程、（2）放射過程と力学・水循環過程、及び（3）降水と陸域水循環過程である。

1980年代に入って、日々の天気予報から1～2ヶ月先までの天候の長期予報や、数ヶ月～数年の気候変動の予測を可能にするとともに二酸化炭素濃度の増加などの人間活動がより長期の気候変化に及ぼす影響を明らかにすることを目指して気候変動の物理機構に関する理解を深めるための世界気候研究計画（World Climate Research Programme, WCRP）が立案された。

1980年にGARPのためのWMOとICSUの合同組織委員会（JOC for GARP）が発展的に解消してWCRPのための合同科学委員会（JSC for WCRP）が設置された。1983年第3回合同科学委員会において初めてWCRPの研究目標と研究課題が次のように策定された。

第1目標：長期（～月の時間スケール）予報の物理学的基礎の確立

指定された地表面境界条件のもとで大気の変動を決定論的な観点から大気内部系の調整過程として考察する。したがって大気モデルの改良に重点がおかれ、この目標達成のために（1）雲と放射、（2）陸地面過程及び（3）海洋－大気間の熱・水蒸気輸送等についての研究計画が立案された。本稿に最も関係の深い「雲と放射」に関する具体的研究計画として（a）国際衛星雲気候学計画（ISCCP）、（b）雲のパラメタリゼーション及び（c）地球放射収支実験計画（ERBE）が実施された。

第2目標：大気大循環の年々変動の機構の解明

熱帯海洋と大気大循環の相互作用に関する研究に重点がおかれ、エルニーニョと南方振動（ENSO）がその中核的研究課題である。

第3目標：気候変動の機構解明と外因に対する気候の敏感度評価

世界海洋循環実験（WOCE）と気候敏感度評価とりわけ温室効果気体などの人為起源物質の濃度増加に伴う気候システムの応答に関する研究が重要な研究課題となる。

6. 雲と放射

水蒸気の凝結の潜熱が台風のエネルギ源になっていることは1940年代に既に知られていたが、熱帯低気圧発達 of 力学機構（CISK）

と対流雲の役割が明らかにされたのは 1960 年頃である。一方、熱帯循環のエネルギー収支において対流雲、とりわけ背の高い積乱雲 (hot tower) の熱輸送に果たす役割が指摘されたのは 1950 年代であり、大気大循環と小規模対流雲とのかかわりがクローズアップされる契機となった。

大気モデルの改良すべき点の一つは非断熱過程を適切にモデルに導入することである。雲と放射はとりわけ大気中の非断熱過程として最重要課題となる。

(1) 総観気象学・雲力学

広域の雲画像は一般に最もなじみ深いものであり、大気諸現象の研究や日々の天気予報業務に欠かせないものとなった。我が国では ESSA シリーズについては 1966 年から ATP 受画がなされたが、階調不足で十分な利用はなされなかったが、1974 年 NOAA シリーズの受画が始まり、VHRR による可視光 (VIS) と赤外光 (IR) の画像が得られ利用されるようになった。

雲画像は低気圧や前線を確認することにとどまらず、未知の部分を含んだ冬季高緯度帯海洋上で発現する寒帯低気圧 (polar low)、雷雨嵐、集中豪雨雪、対流雲分布などの監視・研究に利用されている。

(2) 雲気候学

地球表面のほぼ 50 % を覆っている雲は①太陽放射を反射することにより地球を冷却する効果 (反射効果、アルビード効果、或いは日傘効果) と②地表面からの赤外放射を吸収することにより地球を加熱する効果 (温室効果) を併せ持っている。平均的には前者が卓越して、雲は地球を冷却するとされているが、雲高、雲型など雲の性状によってその効果に差異が生じる。

1980 年代に立案され、1985 年以来、国際衛星雲気候学計画 (ISCCP) のもとに 5 個の静止衛星と 1 ~ 2 個の極軌道衛星により日変化を解像し得る雲量、雲頂高度、雲頂温度、光学的厚さ、雲水量、アルビード等、雲パラメーターについて全球的な統計調査が行われている。米国の FIRE、日本の WENPEX、西独の ICE などは ISCCP の地域研究計画である。

(3) 放射収支

放射エネルギー収支は気候形成に最も基本的な役割を果たしている。大気頂における放射収支は①入射太陽放射、②反射短波（太陽）放射、及び③地球から放射される長波（地球）放射から成っている。

入射太陽放射エネルギーを決定する太陽定数は 19 世紀以来、多くの人によって測定されてきた。なかでも 1902 年以來スミソニアン研究所で継続的に観測され、特に 1920～52 年の 33 年間にわたる観測により得られた 1353Wm^{-2} は太陽定数として最も信頼されてきた。1978 年に打ち上げられた SMM 衛星と Nimbus 7 号衛星により初めて太陽放射の衛星連続観測が開始された。その結果、太陽定数は約 1370Wm^{-2} 、～ 0.1 % の大きさのゆらぎが認められている。したがって、地球大気上端での平均太陽放射入射量は太陽定数の 1/4 の 342Wm^{-2} となる。

入射太陽放射エネルギーの約 31 % は大気中の気体分子、エアロゾル、雲、地球表面等によって散乱・反射され宇宙空間へ放射される。即ち地球のアルビードは 0.31 である。したがって残りの 235Wm^{-2} が地球表面と大気によって吸収され、また、それと同量のエネルギーを地球大気系は長波放射として宇宙空間へ放出して平衡を維持している。

1980 年代、WCRP の副計画の一つである地球放射収支実験 (ERBE) が ERB 衛星、NOAA-9、10 号衛星を用いて、放射エネルギー収支の空間分布と時間変化を測定すべく実施された。1985 年 4 月の全球平均値として雲の反射効果 (-44.5Wm^{-2}) が温室効果 (31.3Wm^{-2}) を上回り、 -13.2Wm^{-2} の冷却効果が示された。

地球温暖化を始め地球規模の気候変動に関する研究にとって放射エネルギー収支は基本的問題でありその直接的な評価は衛星観測により精度の高いデータが得られるようになった。

(4) 気温と大気微量成分濃度

大気の温度の鉛直分布は 1969 年 Nimbus 4 号で初めて全球的に得られ、その後 NOAA 衛星搭載の気温鉛直分布放射計 (VTPR) により、種々のアルゴリズムを用いて鉛直分布が導出され、大気の放射

効果を補正して地表面温度も得られた。

大気成分としてはとりわけ水蒸気とオゾンの濃度測定に努力された。オゾンは大気中に～ 10ppm 含まれる微量気体であり、高さ 20～30km に濃度の高いオゾン層のあることはよく知られている。1970年代、毎年南極の春に相当する 9～10月に南極大陸上のオゾン濃度が～40%も減少するという奇妙な現象が見出された。通常オゾン濃度の低下は 8月末～9月初、極夜が明けると共に始まるが、近年その減少は著しくなり、オゾン層に一時的に大きな「穴」が開く、いわゆる「オゾンホール」現象が知られるようになった。1978年11月から 1993年5月まで Nimbus 7号のオゾン全量マッピング分光計 (TOMS) により系統的に日々のオゾン全量の全球分布が得られるようになり、その後 Meteor 3号、NOAAなどに引き継がれている。10月の月平均オゾン全量の南半球における分布の年々変動をみると、南極大陸上の極小値は 1979年には全球平均値に近い 300m atm cm (大気柱のオゾンを 1気圧、0℃の地表に集めたときにオゾンの層の厚さを cm 単位で測り、それを 1000倍する)であったが、1980年に 250, 1982年に 225, 1983年に 200, 1985年に 175, 1987年に 150と減少した。オゾン濃度の急減は南極大陸上で発見されたが、その減少傾向は最近 20年間、全球的に見られる。

7. 雲の気候影響

(1) 雲の反射効果と温室効果

大気中の水蒸気が凝結・昇華して液体・固体となると、晴天に比してより多くの紫外線や可視光線を散乱する。個々の微水滴は入射エネルギーの 85%を前方へ散乱するが、多数の水滴から成る雲はエネルギーの 75%以上を後方へ散乱する。その結果、大気・地球系のアルビードが大きくなり、大気により吸収される太陽放射を減ずる。一方、雲は大気の長波放射に対する不透明性を強め、宇宙空間への放射を減ずる。このように、雲の温室効果は地球を加熱するが、反射効果はそれを冷却する。前述の ERBE に基づくこれまでの結果によると、全球年平均として温室効果+ 31Wm²、反射効果-48Wm²

が得られている。CO₂ 倍増の加熱効果が + 4Wm²であることを考えると放射収支の精確な評価がいかに重要であるかわかるであろう。

下層雲は冷却効果を熱帯巻雲などは加熱効果をもつことが指摘されているが、雲の放射特性が水滴の密集度とサイズ分布を含む雲の微物理に依存することによってさらに複雑となる。したがって、反射効果と温室効果は雲の性状によって大きく変動する。

(2) 雲の大気熱構造維持に果たす役割

大気・地球（表面）系の放射エネルギー源は太陽放射の吸収と宇宙空間へ射出される長波放射の収支、すなわち、大気頂での（正味入射短波放射）－（射出長波放射）である。40N～40Sで正、赤道で最大値 70Wm²、高緯度帯で負となり、その結果、熱帯が高緯度帯より高温となる。熱的構造が放射過程のみによって決定されるならば、熱帯では少なくとも 30K ほど高温、極域では 40K ほど低温になり、高・低緯度間の温度差は現状よりはるかに大きくなる。小規模な対流運動による熱の鉛直輸送と大規模な高・低気圧擾乱による熱の南北輸送が有効に働いて現状を維持している。さらに海から供給された水蒸気の凝結に伴う雲と降水の形成により大気の放射冷却を補うと同時に大気と海洋を結合させている。

大気への正味放射フラックスから晴天時のそれを差し引いた残りを雲によるものと見做して雲の効果を評価してみよう。大気大循環モデル（NCAR）によれば雲は 50N～50S 帯で大気を加熱し、その最大値は 5N 付近にみられ、高緯度帯の大気を冷却する。モデルでは雲は短波を殆ど吸収しないから、正味雲放射フラックスは長波雲強制力が卓越する。

熱帯の雲の強制力は、主に長波放射 30Wm² であるが顕熱・潜熱の極向き輸送による全強制力（60Wm²）の約 1/2 である。したがって大循環モデルを用いて長波雲強制力の役割を大気から除くと、大規模循環（Hadley 循環）を～1/2 に減じる。

地表面での同様な解析によると、短波雲強制力は熱帯で卓越し、-60～-70Wm² であり、一方温帯では地表での短波雲強制力と長波雲強制力は同程度に重要であり 20～50Wm² と概算できる。高緯度帯

では、長波雲強制力が卓越し、 60Wm^{-2} となる。比較の為に地表面からの潜熱フラックスは、熱帯で 160Wm^{-2} 、温帯で $\sim 60\text{Wm}^{-2}$ である。これらから、地表面の短波雲強制力は全地表面熱収支の重要な成分となることがわかる。

大気頂での正味放射フラックスは気候系の強制力と定義される。温室効果気体の増加、火山性エアロゾル、或いは太陽活動の変化によって現在の気候系に擾乱が与えられると、乱された気候系は新たな平衡状態を求める。

(3) 雲のフィードバック機構

1989年に設置された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第1作業部会は人為起源物質、とりわけ二酸化炭素などの温室効果気体の気候影響・地球温暖化を評価することを重要課題の一つとしている。これまでの評価結果として、二酸化炭素濃度の倍増は全球平均地上気温に $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ の上昇をもたらすことを示した。この評価の不確定性(温度巾)は温室効果気体増加に伴う大気中の複合的調整過程とでもいふべきフィードバック機構の未解明に起因するところが大きい。その例として、

- ①温暖化に伴う大気中の水蒸気(温室効果気体)の増加はさらに温暖化を促進するという正のフィードバック、
- ②雲の量、分布、光学的性質の変化、例えば低層の水雲は冷却効果を、高層の水雲は加熱効果をもたらす。

海洋上の下層の層状雲の雲量14%増は CO_2 倍増の初期強制力を打ち消す能力に匹敵する。これは気候システムにおける雲の負のフィードバックの例である。一方、雲量20%増加に伴う地球温暖化は雲高増加(500m上昇)、雲頂温度低下をもたらし、その結果、宇宙空間への長波放射が減少して大気は正味加熱(2.4Wm^{-2} 増加)される。これは気候システムにおける雲の正のフィードバックの例となる。

雲は現在の気候系のエネルギー極向き輸送を制御する放射及び潜熱過程にとって重要である。雲のフィードバック機構はまた、気候

系に与えられた擾乱を増大したり減少したりすることができる。これらの過程のモデル化の不精確さを減ずるために種々の雲の性質について研究を推進しなければならない。

地球放射収支や地球水文システムにおける雲の役割の理解が不足しており、新しい衛星観測システムの開発が必要とされる所以である。

8. あとがき

気象学はその対象の領域の拡大、そこで生起する諸現象の理解の深まり、その成果の気象事業への応用を通して急速に発展してきた。長期間にわたり、広域を同時に一様に観測できる衛星観測はその気象学の進歩に決定的な役割を果たした。周知の通り衛星観測は既に日常の気象業務に取り入れられ、今や気象観測システムの不可欠な一つの柱として定着している。今後は、一方では、これら衛星観測からより信頼度の高い有意義な情報を抽出して有効利用をはかること、他方では新しいセンサーやアルゴリズムを開発することであり、これらの成果に基づいて気候システム、ひいては地球環境の実態把握に迫る地球観測システムを構築することである。