

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No.29

**A SYNTHETIC STUDY ON
CLOUD-RADIATION PROCESSES**

BY

**CLIMATE RESEARCH DEPARTMENT
PHYSICAL METEOROLOGY RESEARCH DEPARTMENT
APPLIED METEOROLOGY RESEARCH DEPARTMENT
METEOROLOGICAL SATELLITE AND OBSERVATION SYSTEM RESEARCH DEPARTMENT
TYPHOON RESEARCH DEPARTMENT**

気象研究所技術報告

第29号

雲の放射過程に関する総合的研究

**気候研究部
物理気象研究部
応用気象研究部
気象衛星・観測システム研究部
台風研究部**

気 象 研 究 所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1992

Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director-General: Mr. Toshiyoshi Tada

Forecast Research Department	Director: Mr. Ryuji Hasegawa
Climate Research Department	Director: Mr. Harushige Koga
Typhoon Research Department	Director: Mr. Shin Ohtsuka
Physical Meteorology Research Department	Director: Mr. Takenori Noumi
Applied Meteorology Research Department	Director: Mr. Toshiyoshi Tada
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director: Mr. Toyoaki Tanaka
Seismology and Volcanology Research Department	Director: Dr. Masaaki Seino
Oceanographical Research Department	Director: Mr. Masatake Kikuchi
Geochemical Research Department	Director: Dr. Koji Shigehara

1 - 1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305 Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief: Masatake Kikuchi

Editors: Yukio Misumi	Isamu Yagai	Masahiro Hara
Shigeru Chubachi	Takahisa Kobayashi	Hiroshi Nirasawa
Hidemi Ito	Hiroshi Ishizaki	Yoshimi Suzuki

Managing Editors: Yoshitsugu Nagasawa, Yukihiisa Nakajima

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute since 1978 as a medium for the publication of survey articles, technical reports, data reports and review articles on meteorology, oceanography, seismology and related geosciences, contributed by the members of the Meteorological Research Institute.

The Editing Committee reserves the right of decision on acceptability of manuscripts and is responsible for the final editing.

©1992 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of articles in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from articles in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of articles in this journal, that are not for personal use in research, study, or teaching, require permission from the MRI.

序

気候の予測可能範囲と人間の気候に及ぼす影響を明確にするために気候のメカニズムの理解を深めることを目的とし、具体的な目標として、①1～2カ月を対象とした長期予報の物理的基礎の確立、②数カ月～数年にわたる全球的気候変動のうちの予測可能面の理解、③数十年にわたる人為的あるいは自然の影響に対する気候の応答の評価、を掲げた世界気候研究計画（WCRP）が世界気象機関（WMO）と国際学術連合会議（ICSU）とによって立案された。この計画は、その実施について世界各国に参加が要請された国際協力事業である。

これを受けてわが国では、1986年測地学審議会が気候変動国際共同研究計画（WCRP）の実施についての建議を行った。この計画には、

1. 気候変動予測とそのモデル
2. 雲の分布とその気候への影響
3. 大気大循環に及ぼす熱帯海洋の影響
4. 海洋混合層の実験観測
5. 南極域の大気と海氷の年々変動
6. 気候に対する自然的要因及び人為的要因の影響

の6課題が含まれている。

気候変動の物理機構を理解するには、気候の変化に伴って雲がどのように変化し、その結果放射過程を通して雲がどのように気候に影響を及ぼすかを知らなければならない。しかし、現在の気候の下で雲が地球上にどのように分布し、その放射特性がどのようなものかの基本的知識さえも不十分である。そこで雲の形成・維持過程を解明するとともに、雲粒・雪結晶の大きさや雲水量等の放射特性に対する影響を明らかにし、雲の分布状態とその放射特性との間の関係を見出し、衛星雲データから有効な情報を取得する必要がある。この目的を達成するために、上述の課題2『雲の分布とその気候への影響』が策定された。研究項目には

1. 雲の分布と放射の基本特性
2. 雲の放射過程の実験観測及びモデル化
3. 気候災害と層状雲の変動に関する研究

があげられ、それぞれ大学、気象庁、科学技術庁が担当することとされた。

この計画を受けて、気象研究所では特別研究『雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究』を昭和62年度から4年計画で進めてきた。この研究の内容は、

1. 雲の微物理特性及び放射特性の総合観測
2. 雲の放射過程のモデル化

3. 雲の放射過程のパラメタリゼーション及び検証

である。

また、気象研究所は、この研究に先立ち、昭和59年度から3年計画で、気象庁の特別研究として『雲及び放射の総合観測手法の研究』を実施した。この研究の内容は、

1. 雲粒子ゾンデシステム及び観測手法の開発
2. 航空機搭載雲粒子測定システム及び観測手法の開発
3. 航空機搭載雲内エアロゾル測定システム及び観測手法の開発
4. 航空機搭載雲観測用分光日射測定システム及び観測手法の開発

である。これらの研究には気候研究部をはじめ物理気象研究部、応用気象研究部、気象衛星・観測システム研究部の延べ約30名の研究者が参加、協力した。

本報告書はこれら7年間に亘る研究成果をまとめたものである。個々の研究成果については既に気象学会等で発表されているものもあるが、今後の研究活動の一助となることを願い、これまでの研究成果をまとめ印刷発行することとした。内容は測器の開発に始まり観測方法、観測データ、その解析結果及びモデル化に関する研究と多方面にわたっている。その内容の詳細は本文に譲るが、雲の気候に及ぼす影響解明に関する研究は緒についたばかりであり、今後気候研究の重要課題として益々重みを増すことにならう。この分野の今後の研究促進に貢献出来るものと信ずるものである。

なお、気象研究所では平成3年度から10年計画で『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；海洋開発及び地球科学技術調査研究促進費）を推進することとしている。気候システム解明のためにこの分野の研究の一層の進展を望みたい。

平成3年11月

気候研究部長 古賀晴成

目 次

序	
概要	1
Summary	11
第 I 部 雲及び放射の総合観測手法の研究 (1984-86年度)	21
謝辞	22
第 1 章 雲と放射の観測手法の開発	23
1.1 雲粒子ゾンデシステムの開発	23
1.2 航空機用雲粒子測定装置 (AVIOM-C)	40
1.3 航空機搭載雲内エアロゾル観測システムの開発	50
1.4 航空機搭載雲観測用分光日射測定システムの開発	74
1.5 まとめ	92
第 II 部 雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究 (1987-90年度)	95
謝辞	96
第 2 章 層状雲の航空機観測	97
2.1 目的と方法	97
2.2 「雲-放射」航空機観測システム	101
2.3 観測データ	110
2.4 水雲の層積雲と氷化した層積雲の雲物理構造	125
2.5 雲内エアロゾルの航空機観測	140
2.6 多波長反射率測定による雲物理パラメータの推定	152
2.7 雲の放射収支解析	168
2.8 航空機観測と同期した衛星データの解析	176
2.9 航空機観測のまとめと今後の課題	182

第3章	氷晶雲の地上観測	185
3.1	目的と方法, および観測日時	185
3.2	雲粒子ゾンデ観測	190
3.3	ライダー観測	201
3.4	放射観測	210
3.5	氷雲の地上観測	220
第4章	放射過程のモデル化	251
4.1	有限雲群の短波長反射特性	251
4.2	不均質層状雲の太陽放射伝達	262
4.3	分解したVoigt線形を使ったLine-by-Line法による大気吸収スペクトルの計算	270
4.4	大気大循環モデルのための赤外放射スキーム	282
第5章	衛星データの利用	295
5.1	NOAA衛星データ処理プログラムと利用法	295
5.2	衛星の赤外域の波長でみた雲	309
補章	323
A.1	観測機器	325
A.2	観測データ・ディレクトリー	330
A.3	研究成果	336

CONTENTS

Summary	11
Part I Development of Instruments and Methods of Cloud and Radiation	
Observation (FY1984-86)	23
Chapter 1 Development of instruments and methods of cloud and radiation	
observation	23
1.1 Development of Cloud Particle Video Sonde	23
1.2 Development of an Airborne Video Optical Microscope for Measuring Cloud Particles (AVIOM-C)	40
1.3 Development of a Measuring System of Cloud-Interstitial Aerosols	50
1.4 Development of airborne Multi-channel Cloud Pyranometers	74
1.5 Summary of Chap. 1	92
Part II Field Experiments and Theoretical Modeling of Cloud-Radiation	
Processes (FY1987-90)	95
Chapter 2 Aircraft observations of stratiform clouds	97
2.1 Purpose and method	97
2.2 Aircraft observation system of cloud and radiation	101
2.3 Observational data	110
2.4 Microstructures of non-glaciated and partially glaciated stratocumulus clouds	125
2.5 Aircraft observation of cloud-interstitial particles	140
2.6 Estimation of cloud parameters from spectral reflectances measured by airborne Multi-channel Cloud Pyranometers	152
2.7 Radiation budget analysis of a water cloud layer	168
2.8 Satellite data analysis of the same cloud as observed by aircraft	176
2.9 Summary and discussions	182

Chapter 3. Cirrus observation from a ground-based system	185
3.1 Purpose and method	185
3.2 Microstructure of cirrus clouds observed with HYVIS	190
3.3 Cloud observation by lidar	201
3.4 Radiation measurement	210
3.5 Data analysis	220
Chapter 4. Theoretical modeling of cloud-radiation processes	251
4.1 Radiative properties for broken cloud fields	251
4.2 Short wave radiative characteristics of horizontally inhomogeneous stratiform cloud	262
4.3 Line-by-Line computation of the atmospheric absorption spectrum using the decomposed Voigt line shape	270
4.4 An infrared radiative scheme for general circulation models	282
Chapter 5. Satellite data processing and utilization	295
5.1 TIROS-N, NOAA series satellite data processing	295
5.2 Infrared view of clouds using the instruments on NOAA series satellite	309
Supplements	323
A.1 Instrumentation	325
A.2 Observational Data Directory	330
A.3 List of Publications	336

概 要

Summary

概 要

雲とその放射の過程は、地球-大気系のエネルギー収支を支配しており、気候変化の予測における不確定性の主要因として、緊急に解明すべき課題の一つとされている。気候形成に及ぼす雲の役割を解明し、気候変化の予測精度を高めるためには、雲とその放射効果を適正に表現できる気候モデルを開発するとともに、各種衛星を利用した雲の分布・性状のグローバルな観測法を開発する必要がある。それには、雲と放射の総合的な観測による実態把握と、物理法則に基づいた各過程のモデル化が基本となる。このような観点から、雲を捕らえようとする大々的な雲と放射の実験観測が、WCRPの一環として欧米および日本において80年代後半に開始された。

気象研究所においても、特別研究費による研究課題としてこの問題に取り組んだ。ただし、わが国においては経験の乏しい雲の直接観測、特に航空機観測を開始するにあたって、まず必要な測器の開発から始めねばならなかった。即ち、わが国のWCRP実施に先行し、1984-86年度に特別研究「雲及び放射の総合観測手法の研究」が行われ、引き続き特別研究「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」(1987-90年度)の実施に備えた。後者は、わが国のWCRPの課題2「雲の分布とその気候への影響」に関する気象庁の研究活動として位置づけられる。

本研究報告書は、計7年間にわたる2つの特別研究の成果をまとめたものである。本書の構成は、2部から成る。第I部において「雲及び放射の総合観測手法の研究」における4種の独創的な観測システムの開発が述べられる。第II部は、「雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究」における多様な研究活動の成果が章別に記述される。また補章として、航空機観測に用いられた測器類の特性、観測データ・ディレクトリー、および研究成果の一覧表を付した。

第I部 雲及び放射の総合観測手法の研究

第1章は、この特別研究においてなされた4種の観測システムの開発が述べられている。一つは、小型テレビをつんだ雲探査用の新型ゾンデ(1.1節)であり、他の三種は航空機観測用の測定システムで、雲粒子ゾンデと同じ原理を応用した雲粒子測定装置(1.2節)、雲内のエアロゾルを分離測定するための装置(1.3節)、および分光反射特性を測るための多波長日射計(1.4節)である。前三者の開発により、雲を構成する粒子の3次元分布の測定が可能となる。また、多波長日射計の開発により、雲の微物理特性と太陽光の反射特性の対応の調査が可能となる。各測定システムの構成・性能の要点は、以下の通りである。

1) 雲粒子ゾンデシステム(1.1節)

雲内の雲粒子(雲粒・氷晶)の数、粒径分布・相の鉛直分布をゾンデによって観測するシステム。雲内に向けて雲粒子ゾンデを飛揚し、雲粒、氷晶を透明なフィルム面に連続的に捕捉して、

TVカメラで撮影した映像を地上に電送するシステムである。地上に電送された画像は、雲粒子画像解析装置により処理され、雲粒子の粒径分布など統計量が求められる。雲内の雲粒子の $7\mu\text{m}$ ～ $1000\mu\text{m}$ の大きさのものが測定可能である。地上から高度約 15km までの雲の内部が観測できる。室内及び野外実験によって改良を重ね、ゾンデの雲粒子捕捉率を大きくした。直径が $7\mu\text{m}$ の小さな雲粒の捕捉率が大幅に改善され 0.1 程度までになった。

2) 航空機搭載雲粒子システム (1.2節)

航空機に搭載して、雲内の雲粒子の数、粒径、相を測定するシステム。システムはセンサー部と雲粒子画像収録装置から成る。機外に突出したパイプを通して、航空機の飛行速度(約 80m/s)で多量に飛び込む雲粒子を高速制御シャッター機構によって適切な量に減らし、回転ドラム上のスライドに捕捉する。これを顕微鏡CCDカメラで撮影する。以上がセンサー部である。機内には収録装置があり、ビデオテープに収録された映像データは地上で画像分析装置にかけられ雲粒子の数、粒径、相が求められる。層状雲の飛行試験を繰り返し、改良を加えた結果、直径 $5\mu\text{m}$ ～ $500\mu\text{m}$ の雲粒と氷晶の数と粒径が高い精度で測定できるシステムとして完成した。

3) 航空機搭載用雲内エアロゾル観測システム (1.3節)

雲内のエアロゾルを航空機によって測定するシステム。雲内の気流を高速で取り込み、空気から雲粒子を除去し、エアロゾル粒子のみを取り出して計測する。雲粒子とエアロゾルとを分離するのにバーチャルインパクト方式のセパレータを設計した。これにより、直径 $2\mu\text{m}$ 以上の雲粒子は効率よく除去されており、雲内エアロゾルの観測における雲粒子とエアロゾルの分離という目的を達した。また、空気取入れ口の着氷防止にヒーターを使用し、過冷却雲内での観測に対応できるものとした。

4) 航空機搭載観測用分光日射測定システム (1.4節)

雲の分光反射特性を航空機によって時間的空間的に高分解能で測定する分光日射測定システム。システムは上向き、下向きフラックス測定用の一対の多波長全天日射計から成る。日射計センサー部には発泡石英の拡散板があり、これで得た日射フラックスは干渉フィルターによって分光される。測定波長は、可視から近赤外域($420\sim 1650\text{nm}$)にかけての9波長で酸素吸収帯の 760nm および水蒸気吸収帯の 720nm (後に 938nm に変更)を含む。分光された光は、ビームスプリッターにより分割され、Si光ダイオードおよびGe光ダイオードの受光素子により検出され、記録される。日射計出力は、航空機の機体姿勢データ、対空速度データなどと共に、データ・ロガーを通してCMTに収録される。

これ等の測定システムは、実際の航空機試験観測等を通して改良を重ね、その性能については満足すべき結果を得た。そして、引続き行われた雲と放射の実験観測の目玉測器として使用され、大変興味深い観測結果をもたらし、国内外の注目を集めている。

第Ⅱ部 雲の放射過程に関する実験観測及びモデル化の研究

本研究では、太陽放射エネルギーや赤外線熱放射エネルギーの収支に関与する雲の放射特性（太陽放射の反射率・透過率・吸収率や赤外放射の射出率など）と、雲の性状（微物理特性、分布状態など）との関係に関する理解を深め、大気大循環モデル（GCM）における雲の放射過程のパラメタリゼーションを改良することを目的としている。研究内容は、層状雲の微物理特性と放射特性の実験観測（第2章、第3章）、雲の放射伝達過程のモデリングとGCM用の放射スキームの改良（第4章）、及び衛星データの利用（第5章）など、多彩な活動を含む。雲と放射の実験観測は、①前線や寒気吹き出しに伴う雲など、主として下層・中層の層状性水雲を対象とした航空機観測（第2章）と、②巻雲など上層の氷晶雲に対する地上観測（第3章）に分けられる。実験観測の概念をFig. Aに示す。

第2章は、航空機観測について記述される。航空機観測では、雲と放射の測定の同時性を確保するために二機の小型飛行機を使った同期飛行観測を工夫した（1987年度は、一機のみ使用）。この方法を採用することにより、雲層の放射収支および雲物理特性と放射特性との関係を調べる上で必要な良質の測定データが得られるようになった（2.1節）。航空機観測に用いた測器と測定法の説明が2.2節においてなされる。

航空機観測は、1987.9.19-21（1987年度）、1989.3.28-30（1988年度）、1989.12.20-23（1989年度）および1990.12.13-16（1990年度）に、八丈島（33°06'N, 139°47'E）の近海上にて実施された。取得されたデータは、内外の研究者が利用できるように整理されている（補章A.2 観測データ・ディレクトリー参照）。各年度毎の典型的な層状雲の観測事例における雲物理および放射データが、2.3節に示されている。これらの測定データは、雲の構造や放射収支の解析など、様々な観点から解析されており、これまでに得られた結果については2.3~2.8節に報告されている。そこではいくつかの重要な知見が得られた。まず、北西太平洋域の特徴的な雲の一つである冬季の層積雲の構造について、その特徴が明らかにされた。即ち、暖かい海洋上（海面温度~20℃）の層積雲は、一般にその下に積雲が散在する二層構造を成しており、その雲頂部には、しばしば強い温度逆転を伴っている。また、雲底下では、しばしば降雨があった。層積雲の微物理特性は、一般に水平・鉛直方向にきわめて不均質である。水平方向の変動に関しては、比較的大きなスケールでは数kmの周期の変動が放射データおよび雲物理データの分布に認められる（2.3節）。

ほぼ同じ雲頂温度（約-4℃）をもつ水雲および氷化した層積雲の微物理構造（粒径分布、雲水量など）が調べられた（2.4節）。水雲の場合、鉛直方向には雲水量は雲底部で小さく、雲頂部に上がるほど増大している。一方、雲粒子数は、雲層を通じてほぼ一定であり、雲水量の変化は、雲粒子の大きさの変化によってもたらされている。また、雲頂温度が-4℃程度の比較的暖かい層積雲においても氷晶が発生することがあり、そのような氷化した層積雲では、雲水量は逆

に雲底部で大きくなっていった。そして、雲層上部で氷晶が発生し、雲内で昇華や雲粒付着により成長するとともに融解している様子が、FSSPや2D-Cデータの解析で観察された。

航空機観測では、雲内・外でのエアロゾルの測定も行われた(2.5節)。これには、粒子の運動慣性の違いを利用してエアロゾルと雲粒子を分離するための雲内エアロゾル分離装置が使われた。これにより、雲形成におけるエアロゾルの変化を示す興味ある結果が得られた。即ち、雲内においてサブミクロン領域(半径 $0.15-1\mu\text{m}$)のエアロゾル濃度の顕著な減少が観測された。これらの粒子は、凝結核として働き雲粒子に移行したものと考えられる。また、海塩粒子や硫酸アンモニウム粒子など凝結核となりうる吸湿性のエアロゾルが残留していることも検出され、雲層内においても過飽和度の低い、あるいは未飽和の空間領域が混在していたことが示唆された。

雲上を飛行する航空機に搭載した多波長日射計(1.4節参照)による雲の分光反射率の測定から、リモートセンシング的に雲物理パラメータを推定する方法を開発した(2.6節)。これは、可視域の波長 500nm と近赤外域の 1650nm のチャンネルの反射特性を組み合わせ、雲層の光学的厚さと雲粒の有効半径を同時に推定する。また、大気中での混合比が一定な酸素分子の吸収帯(760nm)の反射率から雲水量を、更に 938nm の水蒸気吸収帯の反射率から雲内の平均水蒸気量を推定する画期的な方法である。推定された雲物理パラメータは、雲の微物理量の直接観測値と比べて、もっともらしく求まっている。

二機の航空機の同期編隊飛行による放射収支観測の事例解析(1989.3.30の層状雲に対する)が行われた(2.7節)。その結果、分光反射率の測定から推定された雲物理パラメータを用いたシミュレーション計算は、全波長域及び近赤外域の太陽放射フラックスの測定値をよく再現していた。また、放射観測との整合からすると、熱線型雲水量計で測られた雲水量は、 $1/3$ ほどに過小評価している恐れがあることが示唆された。さらに、同じ事例に対して、NOAA衛星のAVHRRの近赤外チャンネル($3.7\mu\text{m}$)を用いた有効半径の推定が試みられ、この方法は雲物理特性の広域分布の調査に有効であることが示された(2.8節)。

航空機観測のまとめが2.9節においてなされる。ここでは、雲物理量の測定には測器による測定値の大きな差が認められ、雲の微物理特性の航空機観測になお大きな不確定さがあること、有効半径や雲水量などの直接測定値と分光反射率測定からの推定値との間に有意な差があり、新たな「異常吸収」の問題となっていることなど、今後解決すべき課題が指摘される。

第3章では、氷晶雲の地上観測について述べられる。航空機による直接観測の困難な巻雲などの上層の氷晶雲に対する地上観測は、氷晶雲の光学特性と微物理構造に関するデータの収集を目的として、雲粒子ビデオゾンデ、ライダー、各種放射計・分光計を組み合わせで行う(3.1節)。同時にNOAA衛星等の衛星データを収集・解析する。観測は気象研究所構内($36^{\circ}03'N, 140^{\circ}08'E$)にて1987.12.11, 1989.6.22, 1989.6.30, 1990.10.29, 1990.11.01, 1990.11.19の計6回行われた。本章では主に1989.6.22と1989.6.30の結果について報告される。両日も全天を覆う巻層

雲を観測したものであり、これらは、それぞれ梅雨前線（1989.6.22）および低気圧に先行する温暖前線（1989.6.30）の接近に伴って出現した。

雲粒子ビデオゾンデ（HYVIS）では、通常のゾンデで測定される気温・湿度の鉛直分布の他に、氷晶の数密度、粒径分布などの雲の微物理構造を測る。このゾンデ観測から、1989.6.22の巻層雲の雲物理特性が解析された。その結果、この日の巻層雲は日本の南海上に停滞する梅雨前線の北上に伴い、総観スケールで暖気が寒気との間の前線面を滑昇することによる約10cm/秒の上昇流によって形成されていること、雲粒は全くなく、氷晶だけの雲であること、氷晶は主に六角柱であり雲内で22°ハローが見られたことと整合すること、氷晶形成には昇華成長過程が卓越しており、雲の上部から下方へ向かって氷晶が大きくなっていること、氷晶の数密度は $10^5/m^3$ のオーダーであることなどの特徴が明らかにされた（3.2節）。

ライダー観測からは、条件が良い場合には、雲底・雲頂高度、雲の幾何学的厚さ・光学的厚さの測定、偏光解消度からの水滴と氷晶の区別などが可能である。HYVISが時間的に点の情報であるのに対して、ライダーは雲の多層構造や雲底高度の変化などの連続的な情報を提供する。ただし、ライダーからの氷晶雲の光学的厚さの推定は、値が3以下の薄い場合に対してのみ可能であった（3.3節）。

3.4節においては、各種放射測器による放射観測の説明がなされる。またここでは、サンフォトメータによる分光直達日射の観測から雲層の光学的厚さを推定する場合の誤差の補正についても論じられる。太陽方向の放射には、雲の厚さに依存してかなりの割合の多重散乱成分が含まれる。サンフォトメータの観測に対して、モンテカルロ法によるシミュレーション計算を行い、その成分の補正方法を開発した。

3.5節において雲粒子ビデオゾンデ、ライダー、各種放射計の測定を組み合わせた総合的な解析の結果が示される。更に、NOAA衛星データの解析結果も示される。まず、1989.6.22、1989.6.30両日のHYVIS画像を解析して、巻層雲の全層にわたって平均した氷晶のサイズ分布が得られた。このサイズ分布は、ベキ乗則で近似することができ、ベキ値は平均で $\alpha=3.24$ であった。

分光直達日射計（サンフォトメータ）を用いて、太陽方向の放射を測定することにより可視域の光学的厚さの値を10程度の厚さの場合まで推定することができた。同時に測定した下向き日射フラックスと対応させて、日射フラックス透過率と可視の光学的厚さとの関係を得ることができた。その関係を理論計算による関係と比較した結果、光学的厚さ3～10の範囲では3%以内で一致していた。

赤外線放射温度計による $10\mu m$ 域の赤外放射の観測、ライダーによる雲底高度の観測、ラジオゾンデによる高層観測、地上気象観測のデータを組み合わせることにより、巻層雲の下向き有効射出率を推定した。これと可視の光学的厚さを結びつけて両者の関係を得ることができた。この

関係図には、雲の微物理特性の違いを反映すると思われる分布の違いが見られる。また、FTIR分光計により $10\mu\text{m}$ 赤外窓領域($800\sim 1200\text{cm}^{-1}$)の下向き大気放射のスペクトルを測定した。このスペクトルをシミュレーション計算によるスペクトルと比べることにより $10\mu\text{m}$ 域での巻層雲の光学的厚さと粒径分布の情報を得ることができた。それにはHYVIS観測から得られたベキ乗則で近似される粒径分布の下限サイズおよび光学的厚さを変えた計算値と測定値を比べる。その結果、粒径の下限を変えないとスペクトル分布が説明できないことにより、スペクトル測定から粒径分布の情報が得られることがわかった。解析例は少ないが、同時刻の赤外と可視の光学的厚さの推定値よりその比率を求めることができた。比率は、(赤外： $10.5\mu\text{m}$) / (可視： $0.5\mu\text{m}$) ～ 約2であった。

6月22日13:00 (JST) 過ぎに日本上空を通過したNOAA-11衛星のAVHRRのch.4とch.5, およびHIRSのch.8とch.10について散布図を作り、モデル計算値と比べた。その結果、ベキ乗則分布の下限粒径 $4\sim 16\mu\text{m}$ に対応した計算値の間に衛星データが散布していた。HIRSの赤外チャンネル・データも粒径の推定に使えることが分かった。これまで赤外波長と同じ程度の小さな氷晶までの実測と放射の同時観測は行われていなかった。この観測によって初めて、理論的に予想されていた波長程度の小さな氷晶の存在と衛星データの赤外チャンネル間に見られる大きな輝度温度差との対応が確認された。

第4章には、有限雲群(4.1節)と不均質層状雲(4.2節)における太陽放射伝達のモデル計算、大気吸収スペクトルの新しいLine-by-Line計算法(4.3節)およびGCMのための赤外放射スキーム(4.4節)の開発について記述される。4.1節において、小規模な積雲が散在する場の太陽放射に対する反射特性を調べるため、モンテカルロ法によるモデル計算を行った。その結果、有限サイズの雲の群れでは、雲の側面を太陽が照射する効果及び雲と雲の間の相互作用が、層状雲との差を生み出すものになっていること、特に側面照射の効果が大きいことが分かった。更に、積雲群の反射率に対する地表面反射の効果を調べた。これらをもとに、上記の2つの効果をパラメータにして、積雲群による太陽放射の反射率を簡単に計算するためのパラメタリゼーションを開発しその精度を調べた。

水平方向に不均質な層状水雲における太陽放射伝達の近似解法及び数値計算法を開発した(4.2節)。それを航空機観測によって得られた実際の雲水量の水平分布をもつ雲モデルに適用し、太陽放射の反射・吸収に及ぼす不均質性の効果を調べた。その結果、吸収のない波長域では、平均的な雲水量をもつ一様な層状雲に比べて、不均質雲の反射率は最大で8%ほど小さくなり、他方透過率はその分大きくなることが分かった。また、厚い雲の場合、近赤外波長域での反射には殆ど差がないが、吸収は逆に数%大きくなる。

4.3節において、Voigt線形を使ったLine-by-Line法による大気吸収スペクトルの新しい計算法が提案される。この方法においては、Voigt線形を直接数個の補助関数へ分解する。補助関

数の基本形として 2 次の偶関数を使う。この関数形を採ると、その半値幅を容易に推定でき、それ故波数領域のサンプリング間隔を経験的に決める必要はなくなる。各補助関数は、それぞれ独立に吸収線の寄与を計算する。最終的な吸収スペクトルは、それぞれの吸収スペクトルを重ね合わせることによって得られる。この新しい Line-by-Line 法を、k-分布吸収係数の計算や、放射加熱・冷却率の計算などに適用し、その有効性を確認した。

GCM 用の放射スキームの改良に関して、中間圏中層から対流圏まで有効に使える高精度・高速の赤外放射計算スキームを開発した (4.4 節)。このスキームでは、赤外波長領域を $20-550\text{ cm}^{-1}$ 、 $550-800\text{ cm}^{-1}$ 、 $800-1200\text{ cm}^{-1}$ 、および $1200-2200\text{ cm}^{-1}$ の 4 つに分け、水蒸気の連続吸収、回転帯と $6.3\mu\text{ m}$ 帯、二酸化炭素の $10\mu\text{ m}$ 帯と $15\mu\text{ m}$ 帯、およびオゾンの $9.6\mu\text{ m}$ 帯と $14\mu\text{ m}$ 帯を考慮した。均質大気の透過率をマルチパラメータ・ランダムモデルで表現し、不均質大気へは Godson 法を修正して適用し、スピード化をはかった。このスキームを用いて計算した晴天モデル大気の放射フラックスおよび放射冷却率の値は、Line-by-Line 法による精密な計算値と比較すると、放射フラックスは 1 W/m^2 、冷却率は 0.3 K/day 以下の差で一致した。

第 5 章は、雲と放射の研究における NOAA シリーズ衛星の利用について述べられる。5.1 節では、本研究において整備された NOAA 衛星搭載の各種放射計 (AVHRR, HIRS, MSU, SSU) データの抽出・処理を行うプログラムの利用法の解説がなされる。このプログラムの整備により、NOAA 衛星データの広範な定量的利用が可能となった。5.2 節では氷晶雲の地上観測と関連して、上層の氷晶雲が NOAA 衛星のリモート・サウンディング用の HIRS 放射計では、どの様に見えるかの調査がなされ、多チャンネル・データを利用した雲パラメータ推定の可能性が検討された。その結果、HIRS の ch. 4 ~ ch. 10 (ch. 9 は除く) が、上層雲の検出・雲物理パラメータの抽出に利用可能であること、ch. 19 ($3.7\mu\text{ m}$) のような近赤外域における太陽光の反射特性が水の相の識別に利用できることが分かった。

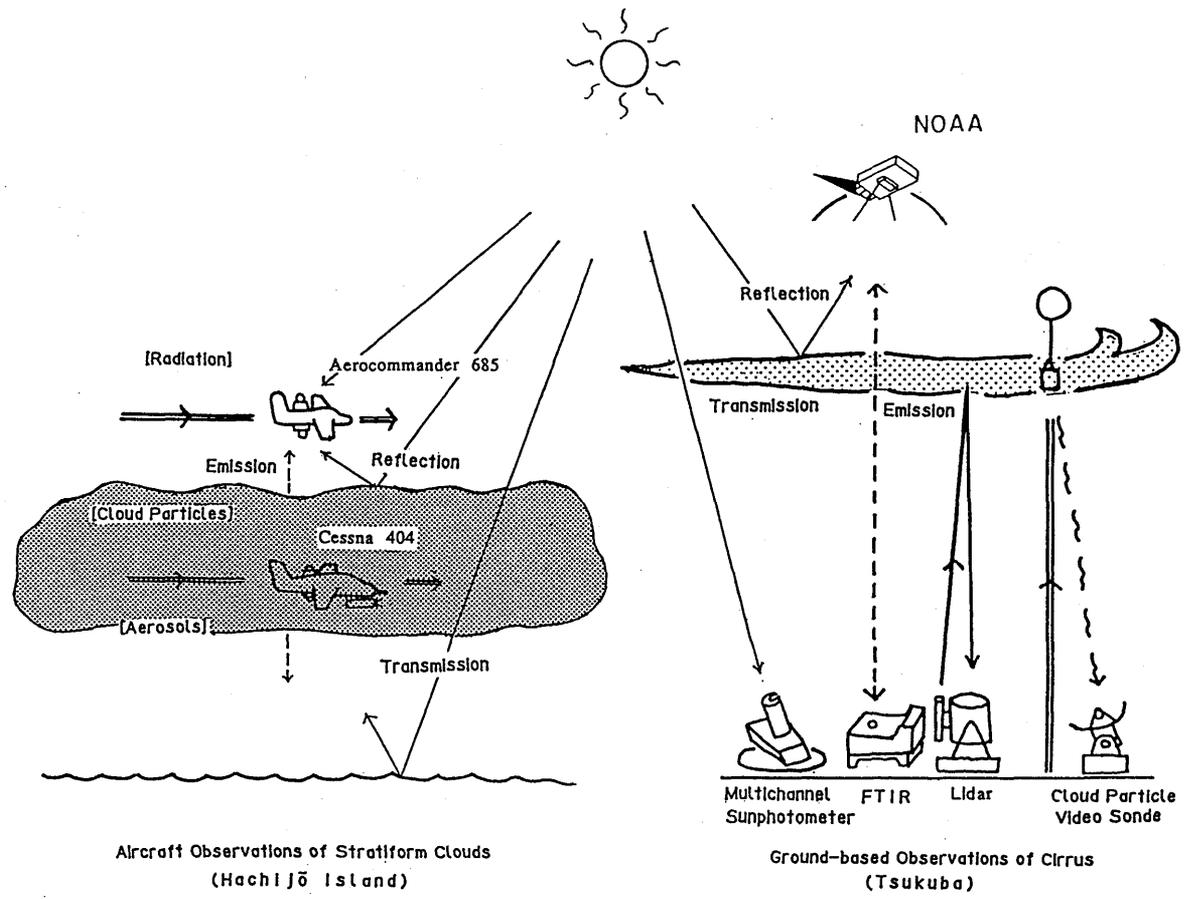


Fig. A Schematic diagram for the aircraft observation of stratiform water clouds and the ground-based observation of ice clouds.

Summary

This report contains the results of researches done in the two WCRP-related research programs on cloud and radiation which were carried out at the MRI (Meteorological Research Institute) of the Japan Meteorological Agency, during the 7 years from FY1984 through FY1990. This report consists of two parts. Part I describes development of four original instruments for cloud and radiation measurements in the research program "Development of Instruments and Methods of Cloud and Radiation Observation" (FY1984-86). Part II contains the results of various research activities in the research program "Field experiments and Theoretical Modeling of Cloud-Radiation Processes" (FY1987-90).

Part I Development of Instruments and Methods of Cloud and Radiation Observation (FY1984-86)

Four unique instruments for cloud and radiation observation have been developed in this research program. A major purpose of our cloud and radiation observations is to make clear the relationship between the radiative properties of clouds and their microphysical and macrophysical structures. In order to start cloud observations at the MRI, especially *in-situ* aircraft observations, for which our experiences and instruments had been very poor, development of new devices was required. These should give more detailed information on cloud microphysical and radiative properties than obtained by the conventional instruments. The newly developed four instruments are a special video sonde for measuring cloud particles, an airborne video-microscope for cloud particle measurement, an airborne measuring system of cloud interstitial aerosols, and an airborne multi-channel cloud pyranometer system. With a combined use of the first three instruments, three dimensional distributions of cloud forming particles can be measured. Further, the development of multi-channel cloud pyranometers may improve our understanding of the relation between solar spectral reflectances and cloud microphysical properties. The characteristics of the instruments developed are described in each separate section in Chapter 1.

1) Cloud Particle Video Sonde (Sec. 1.1)

A special sonde for measuring cloud particles, which is named a Cloud Particle Video Sonde (CPVS), has been developed. When a CPVS quipped with a small TV camera is

launched into clouds, it transmits to the ground station images of hydrometeors in the size range from $7 \mu\text{m}$ to 2cm as well as meteorological element data in clouds, at a frequency of 1.6GHz . The particle image signals are received and recorded on a VTR, and simultaneously displayed on a CRT. At the same time, data on meteorological elements are printed out from a digital analyzer. Afterward the particle image information on the VTR is read out for analyses of hydrometeors in clouds. Using the collection efficiency of the CPVS for water droplets determined from a laboratory experiment, the number concentration of cloud particles and the variation of their size distributions with altitude can be calculated. The CPVS, thus designed, was tested in field observations for several cloud layers, and showed good performance.

2) Airborne Video Optical Microscope for Measuring Cloud Particles (AVIOM-C)
(Sec. 1.2)

A new system has been developed for measuring cloud particles on board aircraft. The system consists of three parts: cloud-particle detection unit, image display and recording units, and control unit. The detection unit mounted in the nose part of an airplane has three components: two shutters for adjusting the timing of sampling, stepping hydrophobic-glass stages and an optical microscope with a CCD video-camera. From images of cloud particles on a cathode-ray tube, the phase of cloud particles (water or ice), size, shape, and number are immediately identified visually. The images of cloud particles are simultaneously recorded on a video-tape recorder (VTR). After flight, the image information is easily read from the VTR and processed by a particle-image analyzer to get further information. Collection efficiency for particles larger than $5 \mu\text{m}$ in diameter is estimated to be 100% in the case of flight speeds greater than 50m/sec . Airborne test observations showed that the system can provide high-quality images of cloud particles in the size range of 5 to $150 \mu\text{m}$ in diameter with a time resolution of 1.4 seconds. The liquid water content calculated from the image of particles were compared with those by a Johnson-Williams hot-wire probe.

3) Airborne Instrument for Measuring In-cloud Aerosol Particles (Sec. 1.3)

A new airborne instrument for measuring in-cloud aerosol particles has been developed. Efficient separation of cloud-interstitial aerosols from cloudy air containing cloud droplets and/or ice crystals was accomplished using a virtual separator which was designed to discriminate interstitial aerosols from cloud particles with sizes above $2 \mu\text{m}$. The cloud-interstitial aerosols, thus separated, were confirmed to be smaller than $2 \mu\text{m}$ in diameter. Aerosols smaller than $2 \mu\text{m}$ are then piped through to an optical particle counter and/or an

aerosol sampling device. To prevent the instrument from icing, a deicing heater was installed, especially around the air inlet nose of the instrument. Airborne tests proved its good performance in measuring the size distribution of cloud-interstitial aerosols.

4) Airborne Multi-channel Cloud Pyranometer System (Sec. 1.4)

A spectro-radiometer system for airborne measurements of cloud radiative properties has been developed. The instrument consists of a pair of multi-channel pyranometers, each of which is installed on the top and the bottom of aircraft fuselage to measure the downward and upward solar fluxes, respectively. The multi-channel cloud pyranometers (MCPs) provide nearly monochromatic solar fluxes at nine wavelengths, between $0.42 \mu\text{m}$ and $1.65 \mu\text{m}$ including $0.76 \mu\text{m}$ and $0.94 \mu\text{m}$ in the O_2 and H_2O absorption bands, respectively, using interference filters with very narrow band widths. The interference filters are built in a rapidly rotating wheel. Solar radiation passing through a filter is instantly detected by a silicon photodiode for wavelength $\lambda < 1 \mu\text{m}$ and by a germanium photodiode for $\lambda > 1 \mu\text{m}$. From measurements of the downward and upward solar fluxes by MCPs over a cloud layer, we can obtain the spectral distribution of reflectances of the cloud layer. The performance of MCPs was confirmed through laboratory calibrations and airborne tests.

Section 1.5 summarizes the characteristics of the developed instruments. The instruments for airborne use were subjected to test flights in order to examine their performance as a combined whole system for cloud and radiation observations. They proved good performance through the test observations. However, it was revealed that the aircraft observational method should be improved in a future study to minimize errors due to high variability of clouds in terms of microphysical and radiative properties.

Part II Field Experiments and Theoretical Modeling of Cloud-Radiation Processes (FY1987-90)

As part of the WENPEX (Western North-Pacific Cloud-Radiation Experiment) in the Japanese WCRP, the Meteorological Research Institute (MRI) have operated the above titled research program during FY1987 through FY1990. The major scientific objectives of the program are threefold : one is to improve our understanding, through field experiments and theoretical modeling, of the relationship between bulk radiative properties and microphysical and macrophysical structures of stratiform clouds. Here the bulk radiative properties are such radiative characteristics, averaged over a cloud layer, as flux reflectance, absorptance and transmittance for the shortwave radiation, and emittance for the longwave radiation. The

second objective is to improve the parameterization of the cloud-radiation processes used in the atmospheric general circulation models (AGCMs). For these purposes, several kinds of radiative transfer computational models for cloudy atmospheres were developed. These radiation models were used to analyze the field observation data and to simulate the radiative processes in various cloud fields. The third is to develop advanced uses of satellite data to detect and retrieve cloud parameters.

Two types of field experiments have been carried out for observations of radiative and microphysical properties of stratiform clouds. One is the *in-situ* aircraft observations for low- and middle-level clouds over the ocean around Hachijojima (33.1°N, 139.8°E) (Chap. 2), and the other is the ground-based observation at the MRI, Tsukuba (36.0°N, 140.1°E), for high-level ice clouds, for which direct aircraft measurements are not available (Chap. 3). A schematic picture of the field experiments is shown in Fig. A. In these field experiments, the above mentioned unique instruments developed at the MRI have provided interesting and valuable data.

Chapter 2 gives descriptions of the aircraft observation for low- and middle-level clouds. Two aircraft (Cessna-404 and Aerocommander-685) were used to make simultaneous measurements of radiation and cloud microphysical properties including aerosols. Synchronized formation flights by the two aircraft were adopted to obtain simultaneous data on radiation and clouds (Sec. 2.1). The instrumentation for the aircraft observation is explained in Section 2.2. The aircraft observation was carried out during September 19-21, 1987 (FY1987), March 28-30, 1989 (FY1988), December 20-23, 1989 (FY1989), and December 13-16, 1990 (FY1990), mostly for stratiform water clouds and partly for scattered cumulus cloud fields.

The data obtained are summarized in the data directory in Supplement A.2, and they are available to every researcher who wants to use them. Examples of the data are shown in Section 2.3 for several typical cases of stratiform clouds observed in each fiscal year. In the section, the GMS satellite images at the observation dates, observational flight paths, vertical and horizontal distributions of the measured radiative fluxes and cloud microphysical properties are shown in figure form. These data are being analysed from various points of view, and some results are presented in the following Sections 2.4-2.8.

From these analyses, a general feature of winter stratocumulus clouds, which are one of the typical clouds over the western North-Pacific region, could be specified as follows. Winter stratocumulus clouds over the warm ocean ($T_s \approx 20^\circ\text{C}$) around Hachijojima usually coexist with scattered cumulus clouds below the stratocumulus layer. At the cloud top, there

is frequently a strong temperature inversion, and above that the atmosphere is usually very dry. The microphysical structure of the stratocumulus clouds is fairly inhomogeneous both vertically and horizontally.

Section 2.4 analyzes the microstructures of non-glaciated and partly glaciated (mixed phase) stratocumulus clouds, observed on December 13 and 14, 1990, respectively, of which cloud top temperatures were nearly same with -4°C . In the water cloud without glaciation, the liquid water content generally increased and the cloud droplet size distribution became wider from the cloud base to the top, although the concentration of cloud droplets was almost constant throughout the layer. On the other hand, in the partly glaciated stratocumulus cloud, ice crystals were found in the upper part of the cloud layer and, horizontally, in some sporadic regions. Ice crystals have grown by the deposition and/or riming processes during dropping down through the cloud layer, and then melted in the lower part of the layer where the liquid water content was largest.

In Section 2.5, aerosols within and without clouds have been measured by using the airborne instrument for measuring in-cloud aerosols developed in Section 1.3. The aerosol measurements have brought interesting features on aerosol behaviors associated with cloud formation. A significant decrease as much as 65% in volume was noticed in cloud-interstitial aerosols, compared with aerosols outside clouds, in the sub-micron size range with radii between $0.15\ \mu\text{m}$ and $1\ \mu\text{m}$. This means that the sub-micron aerosols are thought to have efficiently worked as condensation nuclei of cloud droplets. However, an electron-microscopic analysis of aerosol samples has also shown that cloud-interstitial aerosols were also hygroscopic such as sea salt particles and ammonium sulfate particles. This suggests that there were areas of low supersaturation and/or under-saturation even in the clouds.

Section 2.6 describes an estimation of cloud parameters from spectral reflectances measured by the airborne multi-channel cloud pyranometer system (MCP) developed in Sec. 1.4. In this remote sensing procedure, cloud layers are assumed to be locally plane-parallel, and vertically homogeneous. Optical thicknesses at wavelength $\lambda = 500\text{nm}$ and effective particle radii of water clouds are simultaneously estimated from reflectances at a visible channel of $\lambda = 500\text{nm}$ and a near-IR channel of $\lambda = 1650\text{nm}$. Next, cloud liquid water content can be estimated from reflectances at $\lambda = 760\text{nm}$ in the O_2 absorption band, under the assumption that the cloud altitude is known, and then the amount of oxygen molecules per unit path length is known. Then the integrated liquid water path and geometrical thickness of the cloud layer, and cloud droplet concentration can be evaluated as by-products from

combining the above-inferred cloud-physical parameters. Finally, mean water vapor amounts within clouds can be retrieved from reflectances at $\lambda = 938\text{nm}$ in the water vapor absorption band. The estimated cloud-physical parameters reasonably agreed with the *in-situ* measured parameters. However, the estimated effective particle radii and liquid water contents were generally larger than those measured directly with an FSSP probe and a KING hot-wire probe, respectively.

A case study of radiation budget analysis is described in Section 2.7 for the stratiform water cloud observed with the synchronized flights of two aircraft on March 30, 1989. Simulation calculations which adopted the optical thickness and effective particle radius estimated from the spectral reflectances measured by the MCP yield the reflected and transmitted solar radiation fluxes coincident with the measured fluxes. The observed solar absorptance of the cloud layer is almost equal with the simulated one; the so-called abnormal absorptance was not recognized in this case. In order to adjust the optical thickness (or integrated liquid water path), however, we had to increase the liquid water content measured with the KING hot-wire probe by as much as three times, which suggested that the measured liquid water content might be underestimated. For the same case, a spatial distribution of effective particle radii in a wide area was estimated from a satellite data analysis for ch. 3 ($3.7\ \mu\text{m}$) data of NOAA/AVHRR (Sec. 2.8).

Section 2.9 summarizes the aircraft observations for stratiform clouds. Here it is pointed out that there remains much uncertainty in aircraft observations of cloud microphysical properties, and that there is a discrepancy between *in-situ* measured effective particle radii and liquid water content and those retrieved from the spectral solar reflectance measurements.

Chapter 3 describes the ground-based observation of high-level ice clouds, for which no research aircraft is available in Japan. One main purpose of the ground-based measurements of ice clouds is to accumulate simultaneous observation data on optical properties and microphysical structures of cirrostratus clouds associated with midlatitude fronts. For that, we have organized a ground-based observation system combining various instruments (Sec. 3.1). The measured data involve cloud height, thickness and backscattering profiles measured by an MRI lidar system, vertical profiles of ice crystals as well as temperature and humidity measured by an improved cloud particle video sonde, the solar and infrared irradiances measured by various radiometers, cloud optical thicknesses by a sunphotometer, and the spectral zenith radiance in the $10\ \mu\text{m}$ window region by an FTIR

radiometer. The concurrent NOAA satellite data were also archived and analyzed. The ground-based observations were carried out at the MRI, Tsukuba (36° 03' N, 140° 08' E) during six days of December 11, 1987, June 22 and 30, 1989, October 29, 1990, and November 1 and 19, 1990. In this report, we mainly present the results for cirrostratus clouds observed on June 22 and 30, 1989. On both days, cirrostratus clouds were observed and appeared very similar to each other. They were associated with a Bai-u front (June 22, 1989) and a warm front of a coming low pressure system (June 30, 1989), respectively.

The cloud particle video sonde described in Sec. 1.1 has been improved to a Hydrometeor Video Sonde (HYVIS) which has two small TV cameras with different magnifications to take images of hydrometeors from 7 μm to 10 mm in size. The HYVIS has been applied to the ground-based ice cloud observations (Sec. 3.2). The microphysical structure of the cirrostratus on June 22, 1989, which was analyzed from the HYVIS data, can be specified as follows: the cirrostratus was caused by an upgrading warm air mass associated with the northward moving Bai-u front which had stayed south along the Japan Islands, with an estimated updraft speed of $\sim 10\text{cm/sec}$. The dominant shape of ice crystals was a hexagonal column, whose size increased from the cloud top to bottom. This reveals that deposition process was the major ice forming mechanism in this cloud. The concentration of ice crystals was of the order of 10^5 per m^3 .

Section 3.3 explains the lidar system used in the ice cloud observations. Under proper conditions, the lidar can provide information on the heights of cloud base and top, cloud geometrical and optical thicknesses, phase of cloud particles by depolarization measurements. With our lidar system, however, successful estimation of the optical thickness was limited to thin clouds with optical thicknesses less than about 3. Moreover, the lidar observation has an advantage in getting information on time variations of the structure of ice clouds.

Various radiation measurements taken in the ground-based observation system are explained in Section 3.4. A correction procedure for the optical thickness measurement by the sunphotometer is discussed through simulation calculations by a Monte Carlo method for multiple scattering effects into the sunphotometer's field of view. With this correction, the visible optical thicknesses as large as about 10 were successfully estimated from the sunphotometer measurement.

Section 3.5 presents results of a synthetic analysis of various data from the ground-based observations for the cirrostratus clouds on June 22 and 30, 1989. From the HYVIS image analysis, the size distributions of ice crystals averaged over the cloud layer were

obtained. The size distribution is approximated with power law distribution functions. The mean exponent is estimated to be 3.24. Combining the sunphotometer measurement with the solar flux measurement, the solar flux transmittances were related to the visible optical thicknesses and compared with the simulated transmittances computed for some model ice clouds. The transmittances were coincident with each other within an error of 3% for optical thicknesses of 3~10.

The effective downward emissivity in the 10 μm window region was estimated from the IR radiation thermometer measurement. In the procedure, effects of the atmospheric radiation below cloud layers were corrected by considering time variations of cloud-base heights and temperature and humidity profiles measured by the lidar and radio sonde observations, respectively. This effective emissivity was correlated with the visible optical thickness. Spectral distributions of the down-coming atmospheric radiation were measured by an FTIR spectrometer in the IR window region ($800\text{--}1200\text{cm}^{-1}$). The observed spectra were compared with simulated ones which were computed assuming spherical ice particles with the measured power law size distributions. From the comparison, we could estimate IR optical thicknesses at $\lambda = 10 \mu\text{m}$ and lower-limit sizes of the power law distribution. The estimated IR optical thicknesses were about twice the visible optical thicknesses.

Concurrent NOAA satellite data over the Japan area were analyzed. The brightness temperature differences between ch. 4 and ch. 5 of AVHRR data of NOAA-11 satellite were compared with those computed for model ice clouds with the observed exponent but for different lower-limit sizes in the power law size distribution. The results show that the satellite brightness temperatures mostly scatter between calculated values with the lower-limit sizes of 4 μm and 16 μm . Through this ground-based observations of ice clouds, it was for the first time confirmed that there is a close correlation between the existence of small ice crystals of the order of 10 μm and large differences in the brightness temperatures observed by the different IR channels.

Chapter 4 gives descriptions on the theoretical modeling of the transfer of solar radiation in broken cloud fields (Sec. 4.1) and horizontally inhomogeneous water cloud layers (Sec. 4.2), a newly developed Line-by-Line calculation of the atmospheric absorption spectrum (Sec. 4.3), and a newly developed infrared radiation scheme for AGCMs (Sec. 4.4).

In Section 4.1, Monte Carlo calculations have been performed for various cumulus field models in order to parameterize the reflection of solar radiation from broken cloud fields. The results with the effects of cloud-cloud interaction and enhanced illuminated area are

compared with those by the plane-parallel approximation. It is shown that the enhanced illuminated area effect is the most effective for the broken cloud fields. The effective cloud fraction is then parameterized by considering the above two effects both for non-reflecting and reflecting underlying surfaces. The effective cloud fraction is a non-linear function of the cloud cover viewed normally and the area enhanced ratio, indicating that the plane-parallel approximation is, in general, not satisfactory for finite cloud fields. The parameterization scheme yields a reasonable approximation to Monte Carlo results for finite cloud fields.

An approximate numerical computation method has been developed for the transfer of solar radiation in horizontally inhomogeneous cloud layers (Sec. 4.2). The method is a P-3 approximation extended to a two-dimensional space. The method was applied to inhomogeneous cloud models based on the aircraft observations, and the effects of horizontal inhomogeneity on the solar reflection were studied. The results show that, at visible wavelengths, inhomogeneous clouds reflect, at most, 8% more than homogeneous counterparts with the same mean liquid water contents do.

Section 4.3 proposes a new Line-by-Line method developed to calculate the spectral absorption coefficients of absorption lines with a Voigt line shape in the terrestrial atmosphere. In the method, the Voigt line shape is decomposed into several sub-functions, with even quadratic functions used as sub-functions. This functional form allows for easy estimation of the half-width of the sub-function. The final spectral absorption is obtained by the superposition of independent spectral absorption coefficients. The finer details of the absorption spectrum are then examined to determine whether they are zero or not at every grid point. This procedure eliminates unnecessary calculations in interpolations of absorption coefficients from coarser to finer resolution and also saves storage capacity. This method has also been applied to several problems in the field of atmospheric radiation.

In Section 4.4, an accurate but computationally fast scheme of the infrared radiative transfer is developed based upon the multi-parameter random model to be used in climate and numerical prediction models. The entire infrared spectrum is divided into four spectral regions, 20-550, 550-800, 800-1200 and 1200-2200 cm^{-1} , including the H_2O rotation and 6.3 μm bands, the CO_2 10 and 15 μm bands, and the O_3 9.6 and 14 μm bands. The continuum absorption of H_2O is incorporated in all the spectral regions. The mean diffuse transmittances for homogeneous paths are calculated by the multi-parameter random model. The transmittance calculations through inhomogeneous atmospheres are carried out by the

modified Godson method, which independently uses the Godson method to the line and wing parts of the transmission function. When the transmission functions vary rapidly in the vertical integral in a GCM scheme, transmittances are calculated only between the half-levels of the vertical coordinate, while the Planck fluxes are evaluated at both the half- and full-levels. The vertical integral in one layer can be represented with two terms: one for a temperature profile with no inversion and the other for a profile with inversion. The errors in heating rates calculated by this scheme for the model atmospheres are less than 0.3 K/day in the troposphere and stratosphere and less than 0.8 K/day above the stratopause. The errors in radiative fluxes are less than 1 W/m² both at the surface and the top of the atmosphere.

Chapter 5 describes the use of NOAA satellite data in the cloud and radiation study. In Section 5.1, the processing procedures of various radiometer data (AVHRR, HIRS, MSU, SSU) on board the NOAA-series satellites. The processing computer programs are now ready for use at the MRI, and they have improved quantitative uses of the satellite data in a more advanced way.

In relation to the ground-based observations of ice clouds, sensitivity of the multi-channel HIRS data on high-level ice clouds has been studied. The results show that the HIRS data of ch. 4 through ch. 10 (except ch. 9) can be used to detect ice clouds and to estimate their cloud physical parameters. It is also shown that the solar reflection characteristics at ch. 19 (3.7 μ m) is promising in the discrimination of phases of cloud particles (water or ice).

In Supplement A.1, the instruments used in the field experiments are summarized in tabular form. Appendix A.2 gives the directory of data obtained in the field observations. Publications and reports of research results are listed in A.3.

(S. Asano)