

STUDIES ON METEOROLOGICAL AND SEA SURFACE

PHENOMENA BY DOPPLER RADAR

BY

METEOROLOGICAL SATELLITE RESEARCH DIVISION,
TYPHOON RESEARCH DIVISION,
FORECAST RESEARCH DIVISION,
APPLIED METEOROLOGY RESEARCH DIVISION,
OCEANOGRAPHICAL RESEARCH DIVISION, MRI

気象研究所技術報告

第19号

ドップラーレーダによる気象・海象の研究

気象衛星研究部
台風研究部
予報研究部
応用気象研究部
海洋研究部

気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

MARCH 1986



Meteorological Research Institute

Established in 1946

Director : Dr. Kazuo Yanagihara

Forecast Research Division	Head : Dr. Masahiko Aihara
Typhoon Research Division	Head : Mr. Keizo Masamura
Physical Meteorology Research Division	Head : Mr. Hachiro Uemura
Applied Meteorology Research Division	Head : Mr. Tsunehiro Majima
Meteorological Satellite Research Division	Head : Dr. Keikichi Naito
Seismology and Volcanology Research Division	Head : Dr. Masaharu Ichikawa
Oceanographical Research Division	Head : Dr. Hayato Iida
Upper Atmosphere Physics Research Division	Head : Dr. Hisashi Muramatsu
Geochemical Research Division	Head : Dr. Osamu Asaoka

1-1 Nagamine, Yatabe-Machi, Tsukuba-Gun, Ibaraki-Ken 305, Japan

Technical Reports of the Meteorological Research Institute

Editor-in-chief : Tsunehiro Majima

<i>Editors</i> : Koji Yamazaki	Haruo Ohnishi	Tomoyuki Ito
Tomoaki Yoshikawa	Tsutomu Takashima	Masami Okada
Masahiro Endoh	Yukio Makino	Katsnumi Hirose

Managing Editors : Keiko Nishida, Yusai Yuhara

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 MRI.

序

気象研究所の筑波移転に当ってレーダーの更新が認められ、5 cm 波と 3 cm 波のドップラーレーダーが整備された。5 cm 波は本館屋上の固定型、3 cm 波は可搬型となり、前者は気象衛星研究部が後者は台風研究部が開発、維持を主として担当している。

この更新に先立って、気象衛星研究部は本庁予報部等の要望により、レーダエコーのデジタル化とグラウンドクラッター除去の開発を行ってきた。この成果を利用し、ドップラーシフト測定機能をも備えたレーダーの製作を行ったのである。可搬型をも必要としたのは、他地域での観測もありうることの他に、2 台のレーダーで同一領域内の詳細な三次元的風速分布測定をも、必要に応じて行うということのためである。これに 3 cm 波を選んだのは、可搬型では大きなアンテナを装置しにくいので、角度分解能をあまり低下させたくないからであった。また可搬型では、設置場所を必ずしも高所にすることが出来ず、観測範囲が余り広くない。そこで 3 cm でも減衰の制約が大きくはないと考えたのである。

整備されたレーダーを基に行われたことは、データ処理の改善と観測・解析の気象研究への利用である。

データ処理についてはソフト面だけでなくハード面も含まれている。ドップラーについては、単独測定と複数測定のそれぞれの利用、三次元的解析のソフト開発等について検討されてきた。デジタル処理についても、グラウンドクラッター除去に関する誤差の問題、すなわち精度向上のハード、ソフト面の開発がなされている。

シビアストーム等の気象研究への利用に関しても、本文に記述されているように各種の問題に取り組んできた。デジタル化された資料が、研究のスピードを上げることは当然である。ドップラー測定値の本格的利用は我が国では初めての経験であって、それまで米国および英国の独占的であったものが、ここに自前の資料として十分料理できるのは、我々の大きな喜びであった。

デジタル化は我が国の現業に現在導入されているが、ドップラー測定はまだ検討されていない。しかし米国ではすでに導入されており、英国においてもその緒についているようである。

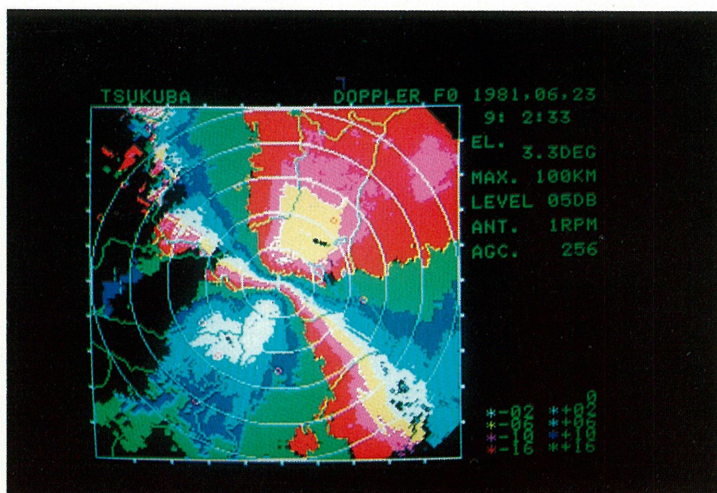
わが国においても、上陸した台風や集中豪雨雪等の現業ドップラー観測は、取得される風と雨の構造から予警報のために非常に有効なものと考えられる。ただこれには現業に使用しうる形で、我々

の研究をまとめ上げることが必要である。本報告はそれを念頭において、我々が行ってきたものの
第一段階を示すものである。

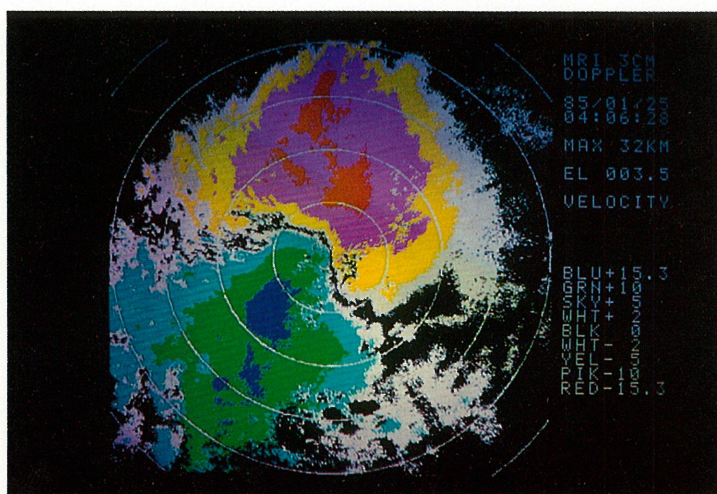
昭和61年3月

気象研究所 気象衛星研究部長

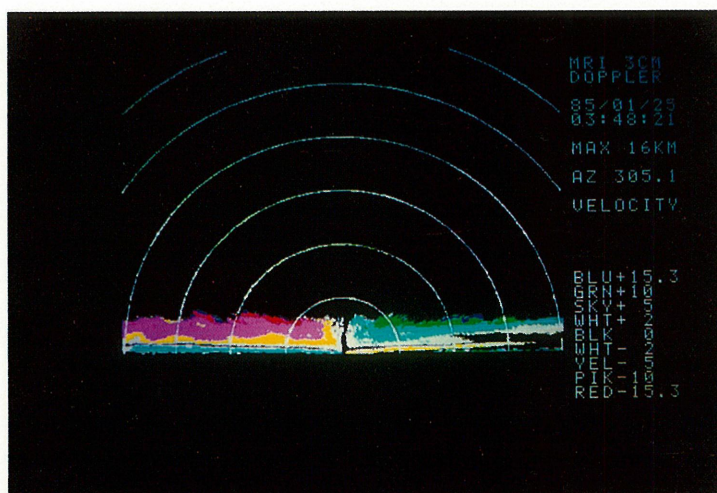
内 藤 恵 吉



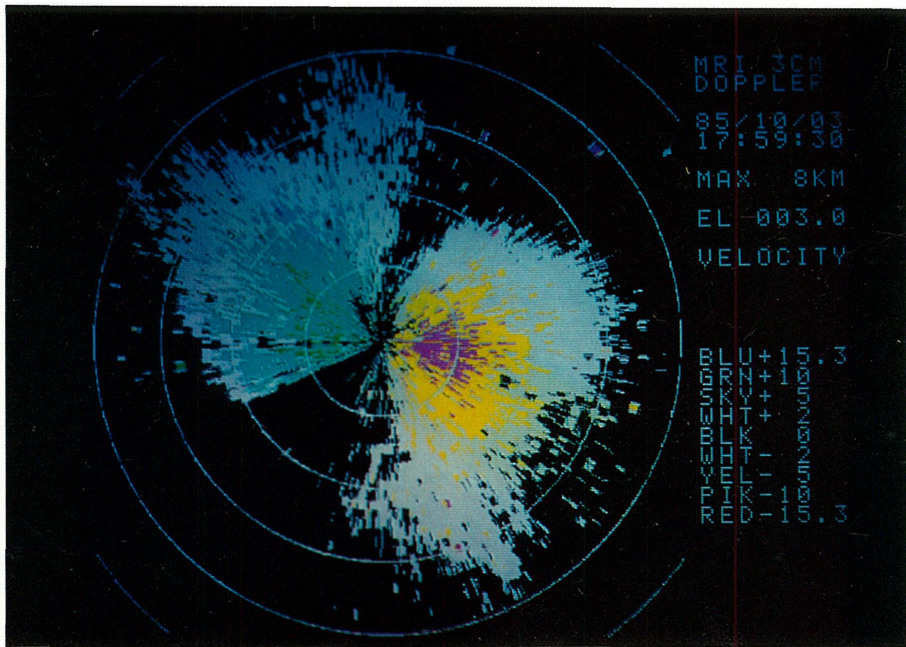
口絵写真 2.1 ドップラー
PPI 表示。仰角 3.3°、距離
マーカー 20 km、1981 年 6
月 23 日 09 時 02 分



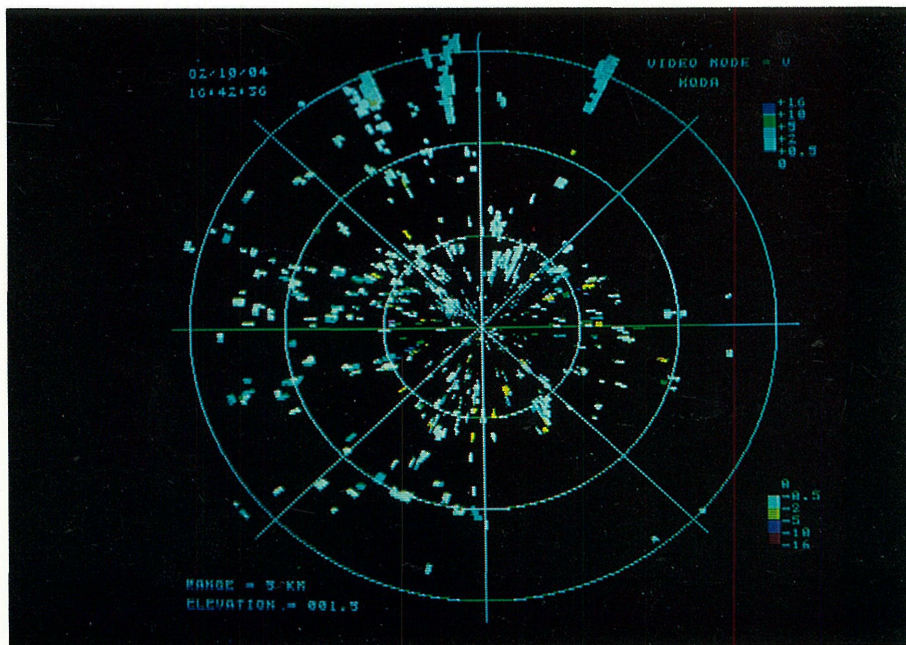
口絵写真 6.1 ドップラー
速度の水平分布を示す PPI
像 (1985 年 1 月 25 日 04 時
06 分 28 秒)



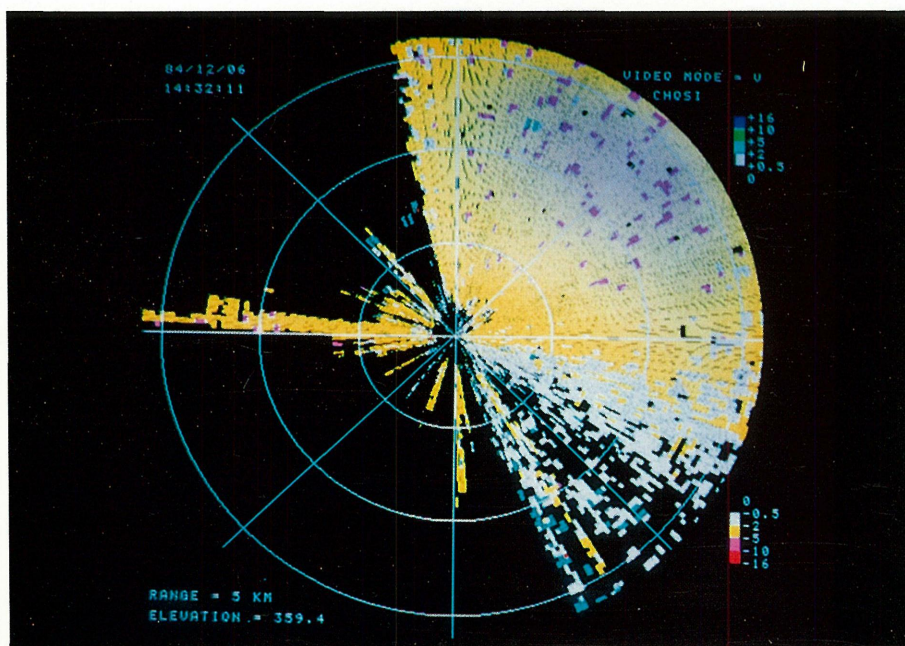
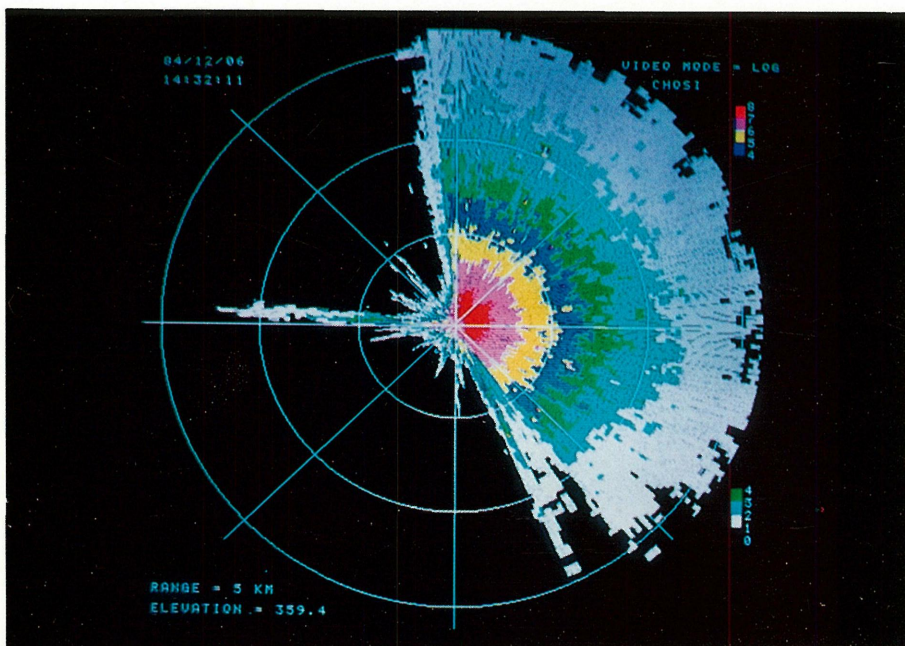
口絵写真 6.2 ドップラー
速度の鉛直断面を示す REI
像 (1985 年 1 月 25 日 03 時
48 分 21 秒)



口絵写真 8.1 エンゼルエコーの移動を示すドップラー速度の PPI 像 (1985 年 10 月 3 日 17 時 59 分 36 秒)



口絵写真 8.2 トンボの移動を示すと思われるドップラー速度の PPI 像 (1982 年 10 月 4 日 16 時 42 分 30 秒)



口絵写真 9.1 PPI 画面でみた波浪による散乱エコー。上が受信強度、下がドップラー速度。速度で色が黄色は向いの 2~5 m/s、白は 0~2 m/s の範囲を示す。

目 次

序

概 要 (和文)	1
Abstract (英文)	3

第1章 ドップラー信号処理とレーダ装置

7

1.1 はじめに.....	7
1.2 ドップラー信号と処理.....	7
1.3 パルスペア技術による信号処理 (平均値及び標準偏差)	10
1.3.1 スペクトル解析.....	10
1.3.2 パルスペア信号処理の特徴.....	13
1.4 周波数成分の計算.....	15
1.5 固定型 5 cm 波ドップラーレーダ	16
1.6 可搬型 3 cm 波ドップラーレーダ	21
1.7 アンテナ三次元走査システムの開発.....	23
1.7.1 3 cm 波可搬型レーダの三次元走査	24
1.7.2 5 cm 波固定レーダの三次元走査	25

第2章 ドップラーレーダの観測方法

35

2.1 はじめに.....	35
2.2 単ードップラーレーダによる上層風の測定.....	36
2.2.1 VAD 測定風方式	36
2.2.2 ドップラー平均速度 PPI 図と VAD 分布を得るための前処理	37
2.2.3 VAD 分布の実際	42
2.2.4 ドップラー測定精度の評価法.....	42
2.2.5 相関係数による評価.....	50
2.2.6 データの脱落の補正によるレーダ測風精度の改善.....	52
2.2.7 一様風測定の評価規準.....	55
2.2.8 あとがき.....	58
2.3 2台のドップラーレーダを用いた観測と解析	59
2.3.1 観測原理.....	59
2.3.2 レーダの配置の理論と実際.....	61

2.3.3	観測とデータの編集	62
2.3.4	折り返し補正	63
2.3.5	座標変換	64
2.3.6	風の算出	65
2.3.7	系の移動補正	66
2.3.8	結果の表示	67
2.3.9	ま と め	67
第3章	台風降雨帯の構造の解析	77
3.1	はじめに	77
3.2	台風8124号の降雨帯の解析	78
3.2.1	周囲の状況	78
3.2.2	降雨帯周辺の風と気温場	81
3.2.3	降雨帯の中小規模の特徴	81
3.2.4	考 察	91
3.2.5	結 論	92
3.3	台風8305号の降雨帯の構造の解析	94
3.3.1	台風8305号の概観	94
3.3.2	観測結果	97
3.3.3	考 察	105
3.3.4	ま と め	105
3.4	台風8514号の降雨帯の解析	107
3.4.1	台風の一般的特徴	107
3.4.2	レーダ反射強度分布の特徴	108
3.4.3	降雨帯の性質	111
3.4.4	降雨帯の時間変化	111
3.4.5	水平風分布の特徴	111
3.4.6	水平発散分布の特徴	114
3.4.7	降雨帯の鉛直構造	115
3.4.8	考 察	118
3.4.9	ま と め	119
第4章	低気圧に伴う降雨域の構造の解析	121

4.1 はじめに	121
4.2 関東地方南部で観測された温暖前線に伴う強雨域の構造	121
4.2.1 周囲の状況	121
4.2.2 降雨の状況	122
4.2.3 降雨セルのレーダエコーの時間変化	123
4.2.4 弧状エコー付近の気流	124
4.2.5 エコーの鉛直構造	128
4.2.6 考 察	130
4.2.7 ま と め	132
4.3 冬期北陸地方西部で観測された寒冷前線降雨帯の構造	133
4.3.1 総観場とエコーの状況	133
4.3.2 寒冷前線降雨帯内の反射強度とドップラー速度分布	137
4.3.3 寒冷前線降雨帯通過時の気象要素の変化	140
4.3.4 考 察	141
4.3.5 ま と め	142
第5章 雷雲の構造の解析	145
5.1 はじめに	145
5.2 結果と考察	146
5.2.1 線状多細胞型雷雲（1983年7月27日）	146
5.2.2 非定常な多細胞型雷雲（1984年8月3日）	158
5.3 ま と め	163
第6章 雪雲の構造の解析	167
6.1 はじめに	167
6.2 平野部に降雪をもたらした帯状降雪雲の構造	167
6.2.1 天気概要	167
6.2.2 PPI像からみた風の場合・エコー強度の特徴	170
6.2.3 REI像からみた風の場合・エコー強度の特徴	179
6.2.4 ま と め	181
6.3 山間部に大雪をもたらした線状降雪雲の構造	183
6.3.1 周囲の状況とレーダエコーの概要	183
6.3.2 線状降雪雲内の反射強度とドップラー速度分布	186
6.3.3 線状降雪雲内の垂直速度分布	189

6.3.4 考 察	190
6.3.5 ま と め	192
6.4 山ぞい・山間部に大雪をもたらした帯状降雪雲の構造	193
6.4.1 周囲の状況	193
6.4.2 帯状降雪雲の垂直構造	199
6.4.3 考 察	203
6.4.4 ま と め	204
第7章 ドップラーレーダとチャフによる気流の観測	207
7.1 はじめに	207
7.2 チャフ	208
7.3 レーダの設定	209
7.4 チャフの散布と観測	210
7.5 あとがき	212
第8章 エンゼルエコーの観測	213
8.1 はじめに	213
8.2 電波屈折率が急変している層からの反射	213
8.2.1 エンゼルエコーのレーダ観測	213
8.2.2 エンゼルエコーの反射機構	215
8.3 昆虫・鳥等による反射	217
8.4 ま と め	218
第9章 波浪の観測	221
9.1 はじめに	221
9.2 銚子における観測の概要	221
9.3 観測結果	222
9.3.1 ドップラースペクトル	222
9.3.2 受信強度・ドップラー速度と海上風速・波高との関連	224
9.3.3 風速が大きい時のドップラー速度と受信強度の連続記録	225
9.4 ま と め	225
第10章 結び—将来の展望・課題	231
付：英文図説	235

概 要

気象研究所は筑波研究学園都市への移転後の1980年、81年にそれぞれ5 cm 波、3 cm 波のドップラーレーダを整備した。これらレーダはそれぞれ気象衛星研究部と台風研究部が改良・維持・管理に当たっている。ドップラーレーダによる散乱体の運動の測定機能は、多くの研究部の研究課題解決の有力な手段となった。たとえば台風、低気圧、雷雨、豪雪の観測では雨滴、雪粒子を、晴天時の大気の観測ではチャフ（人工散乱体）や屈折率の乱れを、海上では波浪をそれぞれ散乱体として測定し、多くの事実が明らかにされた。ドップラーレーダを利用した研究に参加した研究部は上記二研究部以外に予報、物理気象、応用気象、海洋の各研究部である。

ドップラーレーダの整備以来約5年経過し、上記のように各方面で行なわれた研究観測もその多くは成果がまとまってきた。また集中豪雨雪および強風の短時間予測に関連して、ドップラーレーダに対する期待が気象庁内はもちろん社会的にも高まっている。本技術報告は、このような状況下で関係各位に気象研究所におけるドップラーレーダに関する開発、研究の現況を報告し、ドップラーレーダの機能と我々の研究活動に対する理解を更に深めて頂くためのものである。

この報告書は全体で10章から成っている。第1章ではまずドップラー信号処理方式について述べる。特に両レーダで採用しているパルスペア技術について詳述する。次に両レーダの主要機能と性能について述べる。また両ドップラーレーダの整備後に開発付加された三次元走査機能についても述べる。

第2章ではドップラーレーダによる観測法について述べる。まず1台のドップラーレーダによるVAD方式を用いた上層風の測定について述べ、つぎに2台のドップラーレーダの同時操作による風の三次元分布の観測法およびデータ処理について述べる。

第3章から第9章までは各種現象の観測の結果について報告する。第3章では台風の降雨帯の構造について述べる。対象とした台風は8124号、8305号、8514号である。これらはいずれも筑波周辺で観測されたものである。台風8124号については、まだ2台のレーダによる協同観測の機能のなかった時期であり、1台のドップラーレーダによる観測法によっている。台風中心側から外側にゆるやかに傾く中規模上昇流の下で大雨となった。台風8305号、8514号では2台のドップラーレーダによる観測がなされ、降雨帯内で台風中心側から外側へ傾く上昇流という特徴的な風の三次元分布が得られている。

第4章では低気圧に伴う降雨域の構造について述べる。これらはいずれも1台のドップラーレーダによる観測である。東海道沖の小低気圧に伴う温暖前線付近の強雨域は筑波の5 cm 波ドップラーレーダで観測したものである。南方から下層強風が温暖前線帯に侵入した前方で強雨となっていた。寒冷前線は関東平野では地形の影響により非常に不明瞭なことが多い。ここでは北陸におけ

る豪雪観測時の典型的な寒冷前線の構造について述べる。海上における典型的な構造が山岳の影響により崩れる過程が示される。

第5章では雷雲の構造について述べる。関東地方で発生した2例の多細胞型雷雲を2台のドップラーレーダで観測した。一例は上層風が強く鉛直シヤーの大きい状況下で発生した。大規模な線状の雷雲がシヤーに沿った方向に形成された。しかし内部の流れは三次元的であった。他の例は鉛直シヤーの小さい状況下で発生しており、コアの発生消滅により伝播していた。

第6章では雪雲の構造について述べる。ここでは冬季日本海側における寒気吹き出し時の対流性雪雲の構造について述べる。観測は1984年、1985年1月に金沢市郊外に設置した3cm波ドップラーレーダにより行ったものである。解析は特徴的な降雪雲3例について行った。第一は海岸線に平行に海上にできる収束域で発生し、海岸付近に雪を降らせる雲、第二は海上ですでにスコールライン状に組織化されており、内陸に進入して雪を降らせる雲、そして最後は中規模の水平流により組織化され、内陸部で雪を降らせる幅の広い帯状雲である。

第7章では散乱体として降水粒子がない時のチャフによる気流の観測について述べる。特にチャフに関する事、および降水雲の観測と異なる特徴について詳述する。

第8章では電波屈折率の乱れを散乱体とするエンゼルエコーの観測について述べる。海風前線通過時のエンゼルエコーによる風観測データが鉄塔の風観測データとよく一致すること、およびエンゼルエコーの反射機構について述べる。また昆虫、鳥等を散乱体とするエコーの観測例を示す。

第9章では波浪の観測について述べる。銚子におけるドップラーレーダ観測の結果を波崎の海上風データ、鹿島の波高データと比較した。その結果、散乱体の速さは数 ms^{-1} であった。また反射強度、速さともうねりの波高よりも海上風とよい相関を示した。降水がある場合でも波浪の反射は降水の反射とドップラースペクトル上の速度差から区別できることがわかった。

第10章では結びとして将来の展望と課題について述べる。装置を含む観測方法の改善および気象と海象の解析について、それぞれいくつかの課題が例示される。

Abstract

On removing to Tsukuba Science City, the Meteorological Research Institute installed 5 cm wavelength and 3 cm wavelength Doppler radars in 1980 and 1981, respectively. These radars are in the charge of the Meteorological Satellite Research Division and the Typhoon Research Division for their maintenance and improvement. The capability of the Doppler radars in measuring the motion of scatterers has provided an effective means to solve many problems in six out of the nine research divisions of the M.R.I. For example, observations of typhoons, extratropical cyclones, thunderstorms and heavy snowfalls use raindrops and snow particles as scatterers. In the observation of clear air, "chaff" and refractive index irregularities are used as scatterers. Water waves are scatterers in the sea surface observation. Many facts have been revealed by these observations. The research divisions participating in the Doppler radar observation are the Forecast Research Division, Physical Meteorology Research Division, Applied Meteorology Research Division and Oceanography Research Division as well as the above-mentioned two.

Doppler radar observations have been carried out for about five years at our institute. Some of their results have been published and others are now in preparation. Doppler radar has been considered as one of the very important tools in the very-short-range forecast of heavy rainfall, snowfall and strong wind not only in the Meteorological Agency but also outside. This paper reports on the present situation of the development of Doppler radar and the research activities in its use. It is desired that this report is helpful in showing clearly the capability of Doppler radar and our research activities.

This volume consists of ten chapters which are summarized as follows.

Chapter 1 Processing of Doppler signals and radar equipment

The method of processing Doppler signals is described. In particular, the pulse pair processors which are incorporated in the two Doppler radars used at our institute are described in detail. Then the main functions and characteristics of the radars are stated. And the function of the three-dimensional sector scan which is developed and added after the installation of the radars is described in detail.

Chapter 2 Observation mode of Doppler radars

The upper wind measurement by a single-Doppler mode, that is, the V.A.D. method is described, and its accuracy is discussed. Then the methods of observation and data processing for the dual-Doppler mode are described to obtain three-dimensional wind fields.

Chapter 3 Structure of typhoon rainbands

The analysed typhoon rainbands were associated with Typhoon 8124, Typhoon 8305, and Typhoon 8514. These were observed around Tsukuba. The rainband associated with Typhoon 8124 was observed by a single-Doppler mode, since the dual-Doppler observation system had not been established yet in 1981. This rainband included a mesoscale slant updraft with a gentle slope from the low levels on the typhoon center side to the higher levels on the outer side. A heavy rainfall occurred below this updraft. The two rainbands in Typhoons 8305 and 8514 were observed by the dual-Doppler mode. The most prominent feature in these rainbands is the relatively steep slant updrafts from the typhoon center side to the typhoon outer side.

Chapter 4 Structure of rain areas associated with extratropical cyclones

Rain areas in this case were observed by single-Doppler mode. A warm-frontal heavy rain area associated with a small low pressure was observed by the 5 cm wavelength Doppler radar at Tsukuba. A heavy rain occurred in front of the area where the low-level strong southerly wind intruded into the warm-frontal zone. Cold-frontal rainbands on the Kanto Plain observed by the same radar usually show indistinct structure because of the effects of the mountainous region to the west of the Plain. Therefore, we observed a rainband around western Hokuriku by the 3 cm wavelength Doppler radar during an observation period of heavy snowfalls. Thus a typical cold-frontal rainband in winter was observed, which showed its decay process due to the mountains.

Chapter 5 Structure of multicell thunderstorms

Two cases of multicell thunderstorm over the Kanto Plain were observed by the dual-Doppler mode. One case was associated with a strong vertical wind shear. Lines of thunderstorms were formed along the wind shear. The internal airflow was three-dimensional in spite of the two-dimensional external appearance. The other case occurred in a weak shear condition. In this case the thunderstorm propagated in sequences of formations and dissipations of cores.

Chapter 6 Structure of convective snow clouds

The structure of convective snow clouds which appeared over the Sea of Japan in the cold air outbreak in winter is described. These clouds were observed by the 3 cm wavelength Doppler radar located at Kanazawa in western Hokuriku. Three cases of characteristic snow clouds were analysed. In the first case snow clouds were formed above the convergence zone over the sea affected by the land breeze, causing snowfalls near the coast. In the second case, snow clouds had already been organized like squall lines over the sea and they caused snowfall mainly in the inland area. In the last case, snow clouds were organized in a very wide cloud band by mesoscale horizontal flows. They also caused snowfall mainly in the inland area.

Chapter 7 Airflow observation by dispersing "chaff"

Airflow observation by dispersing "chaff" as scatterers is described in non-precipitation conditions. In particular the characteristics of the chaff and the features different from those observed by using precipitation particles as scatterers are described in detail.

Chapter 8 Observation of "angel" echoes

The "angel" echoes observed were probably associated with the irregularities of refractive index. Winds estimated by the angel echoes during the passage of a sea-breeze front agree well with the winds measured by the anemometer at the top of the tower of the M.R.I. (213 m above the ground). The mechanism of the backscattering by the irregularities of refractive index is described. In addition, examples of the observation of non-precipitation echoes which were due to insects and birds are shown.

Chapter 9 Observation of sea waves

The sea surface echoes observed by the 3 cm wavelength Doppler radar at Choshi were compared with the sea surface wind measured at Hazaki and the wave height data at Kashima. The radial component of the motion of scatterers was of the order of several meters per second. The reflectivities and Doppler velocities in sea surface echoes indicate better correlation with the sea surface wind than with the height of swells. It was found that the backscattering by waves can be distinguished from that by precipitation particles because of the difference in the Doppler spectra.

Chapter 10 Closing remarks —Tasks for the future —

The tasks for the future are shown in two fields, that is, (1) improvement of observation equipment and data processing method and (2) further Doppler radar study of meteorological and sea surface phenomena.