



共同研究報告書
整理番号第55号

DNDレーダによる降水現象の観測 に関する共同研究報告書 (第4報)

平成3年3月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

Copyright © (1991) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

DNDレーダによる降水現象の観測 に関する共同研究報告書（第 4 報）

建設省土木研究所水文研究室	室 長	益倉克成
	”	吉野文雄 *
	主任研究員	松崎典夫
	研 究 員	深見和彦
		水野秀幸
		井川貴史
		及川博史
		丸山義孝
		岡川道裕
		吉田武弘
		長屋勝博
		長田正嗣
		浜津享助
		若林 勝
		市山 尚

(株)東芝・小向工場

日本無線(株)・三鷹製作所

三菱電機(株)・通信機製作所

* 現先端技術開発研究官

要旨

洪水時の河川管理及び積雪地域の冬期の道路管理を適切に行うには、広域・面的でかつ正確な降水量の情報を入手する必要がある。この情報を入手することのできる測定器として、降水粒子群から得られる情報を複数にした、より精度の良い観測が可能となるレーダの 1 つである直交二偏波・ドップラーレーダがある。土木研究所では、(株)東芝、日本無線(株)、三菱電機(株)の 3 社と共同して、直交二偏波・ドップラーレーダ（DNDレーダと称する）を試作し、降水量の観測手法の開発研究を行っている。本報告書では、第 1 報～第 3 報の成果を踏まえ、①信号処理方法、②降雨観測精度、③降水粒子の反射特性について述べるとともに、④DNDレーダの実用化に向けての検討結果について報告する。

キーワード：レーダ，降雨観測，降雪観測，直交二偏波，ドップラー

DNDレーダによる降水現象の観測 に関する共同研究報告書（第4報）

（まえがき）

本報告書は、土木研究所が降雪観測用レーダ研究会（会員：（株）東芝、日本無線（株）、三菱電機（株））と実施中の共同研究課題「降雪観測用レーダの開発研究」による研究成果を中間報告書として取りまとめたものである。この研究は、現在建設省が各地に建設を進めているレーダ雨量計網による降雨や降雪の観測精度をより向上させて、河川や道路の管理情報に活用する目的で開始された。そのため、現在のレーダ雨量計が持つ観測上の限界や問題点を抽出し、それらを解決するための新しい考えを取り入れて次世代レーダの基本構想を明らかにする立場からこの研究は実施されている。

建設省では、河川や道路の管理のため必要な雨量情報を、広域にわたり実時間で観測する目的で、1966年から建設省研究補助金によりレーダ雨量計の開発研究に着手した。この研究は、雨量積算レーダ研究会の指導のもとに行われ、赤城山にXバンドのレーダを設置し、雨量換算の可能性や方式の基礎研究を実施した。その後、1967年から1969年にかけて、科学技術庁の特別研究促進調整費及び河川総合開発事業費による研究が、科学技術庁、気象庁との共同研究として始められた。これらの研究で特に問題とされた課題は、受信信号の変動を平均するための時間積分の方法、降雨量への換算式、データ処理方法、等であった。この様な諸問題を解決するためには高性能の計算機が必要であったが、当時の段階ではまだこの分野には限界があった。

その後、関東地方建設局は、土木研究所の協力のもとに赤城山レーダを現業に使用する努力を続け、降雨量の換算方法やレーダの設計方式についての研究を進めた。一方、この当時は電子計算機の能力の飛躍的向上があり、またデータの通信技術も発展したため、1975年にレーダ雨量計の実用一号機を導入できるまでに至った。

このようにレーダ雨量計の開発に当たって長年の努力が為され、現在見られるようなレーダ雨量計網が構築されてきた。この間には雨量換算定数の研究や大地クラッターの除去の研究、表示法の研究、河川管理への応用研究、等が実施され、その結果、現況でもほぼ十分な精度で観測値を提供できる水準に達している。そして河川情報センターを通して観測データの一般ユーザーへの提供も行われるに至っている。これらの諸研究に携わられた方々の努力に敬意を表したい。

しかしながら現在のレーダシステムでは、以下のような問題点も指摘できる。現在のレーダによる降水量の観測方法は、目標の降水粒子（雨滴、雪片等）群からの電波の散乱強度（反射因子 Z という）を測定し、これを降水強度 R との関係式 $Z = BR$ により降水強度に変換する。しかし、この時に用いられる B 、 β は、降水粒子の形態（雨滴か氷粒か雪片かといった）や、降雨の成因（雷雨、台風、前線等）により大きく異なることが明らかになっている。しかし、現在のレーダシステムによる降水量の観測は、得られる情報が一つ（反射因子 Z ）しかないため、

①雨滴と氷晶との判別が不可能であること

②レーダ情報だけでは定数 B 、 β の推定が困難であること
という問題があり、現況以上の観測精度の向上は困難であると考えられる。

また、レーダによる降雪量の観測は、

- ①降雪現象は降雨に比べて電波の反射強度が弱いこと
 - ②雪片は風の移流を受けるため上空と地上との対応が難しいこと
- 等の問題により定量的な降雪観測が困難であると考えられる。

しかしながら、これらの問題点は現在のレーダ雨雪量計の観測値やその活用に問題有りとするものではない。現況でも実用上十分な降雨観測や降雪観測がレーダ雨雪量計で実施されていることを指摘しておきたい。しかし、この分野の技術進歩は目ざましいものがあり、今後のレーダ雨雪量計のよりいっそうの精度向上の努力も今から進めておく必要がある。

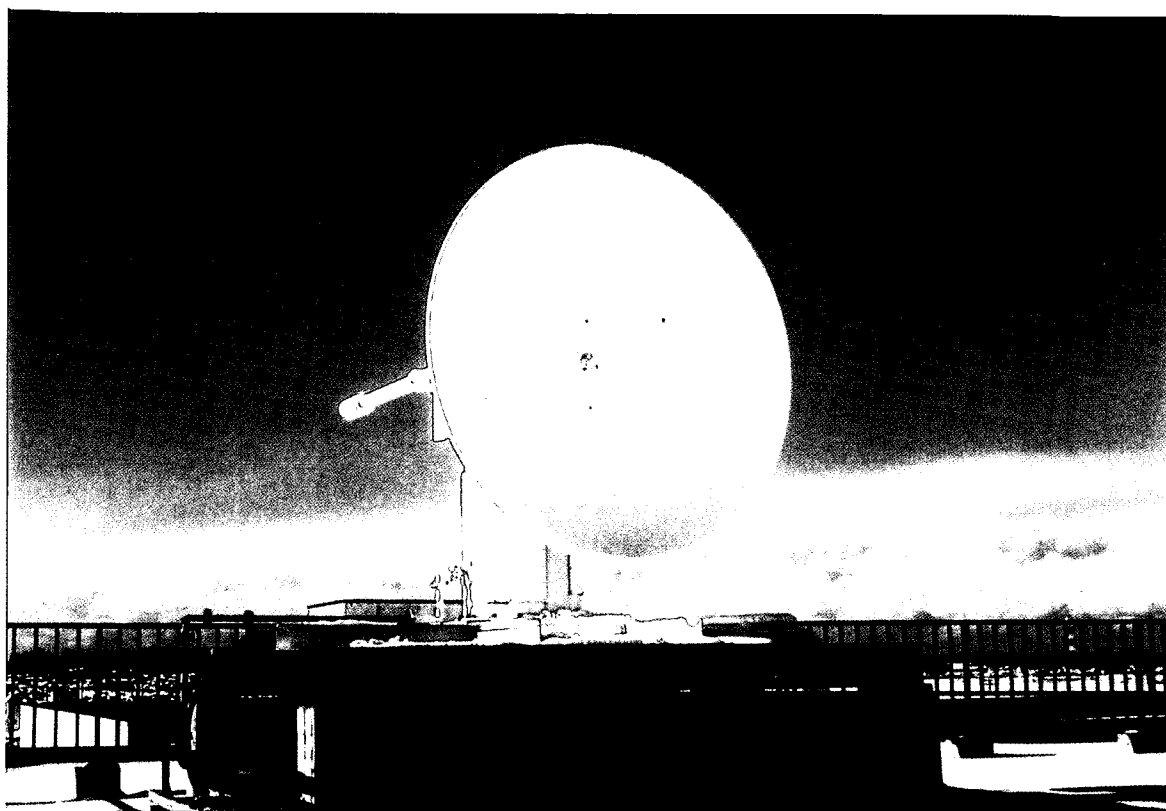
上述した諸問題を解決するにはレーダシステムを見直し、新たな構想で研究を実施することが必要であるとの判断に立ち、本共同研究が始められた。この研究で取り上げたレーダは、現在、世界の気象学者や電子技術者が競って研究を進めているMultiparametered Radarのひとつである直交二偏波・ドップラーレーダである。この分野の研究は、まだ緒に付いた段階であり、今後の研究に期待しなければならない問題も多く残されている。本研究では、すでに、共同研究報告書第1報を土木研究所資料No.2594で、第2報をNo.2757で、第3報を共同研究報告書No.39で報告した。本報告は、平成2年度に実施した、直交二偏波・ドップラーレーダの降雨観測・降雪観測等についての研究結果を取りまとめた。この研究は、本年度で基礎研究の段階を終了し、来年度からは実用化を目指した研究を行う予定である。本報告書がレーダ雨雪量計の観測に携わる方々に有益な情報を提供するものであることを期待している。

この共同研究を実施するにあたり学識経験者の協力を得るために、社団法人建設電気技術協会に特殊レーダ研究会を構成し、協力を得ている。記して感謝の意を表したい。

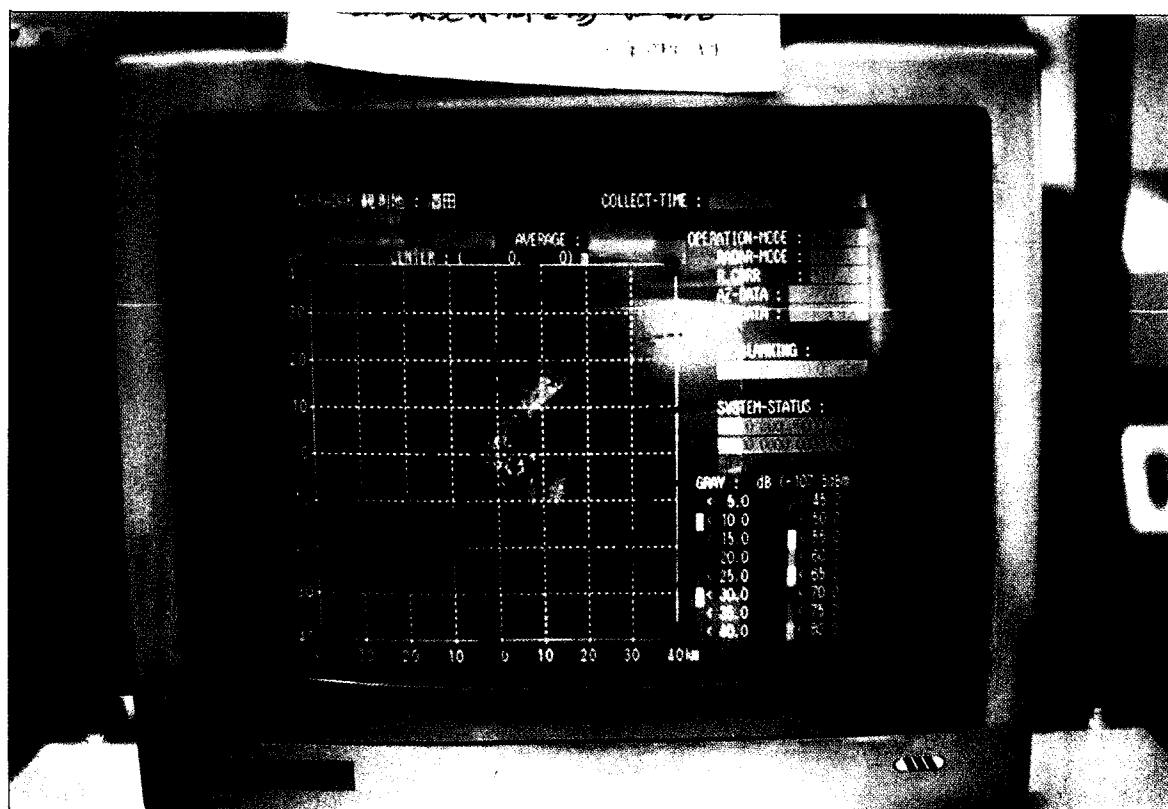
なお、本研究は研究会の運営や観測実施に多数の方々の御協力を得ている。電気通信室の方々や河川局治水課、河川計画課、開発課、道路局国道1課、2課の方々、北陸地方建設局及び富山工事事務所、東北地方建設局及び酒田工事事務所、九州地方建設局及び筑後川ダム統合管理事務所の関係者に厚く感謝の意を表したい。

平成3年3月

土木研究所河川部水文研究室

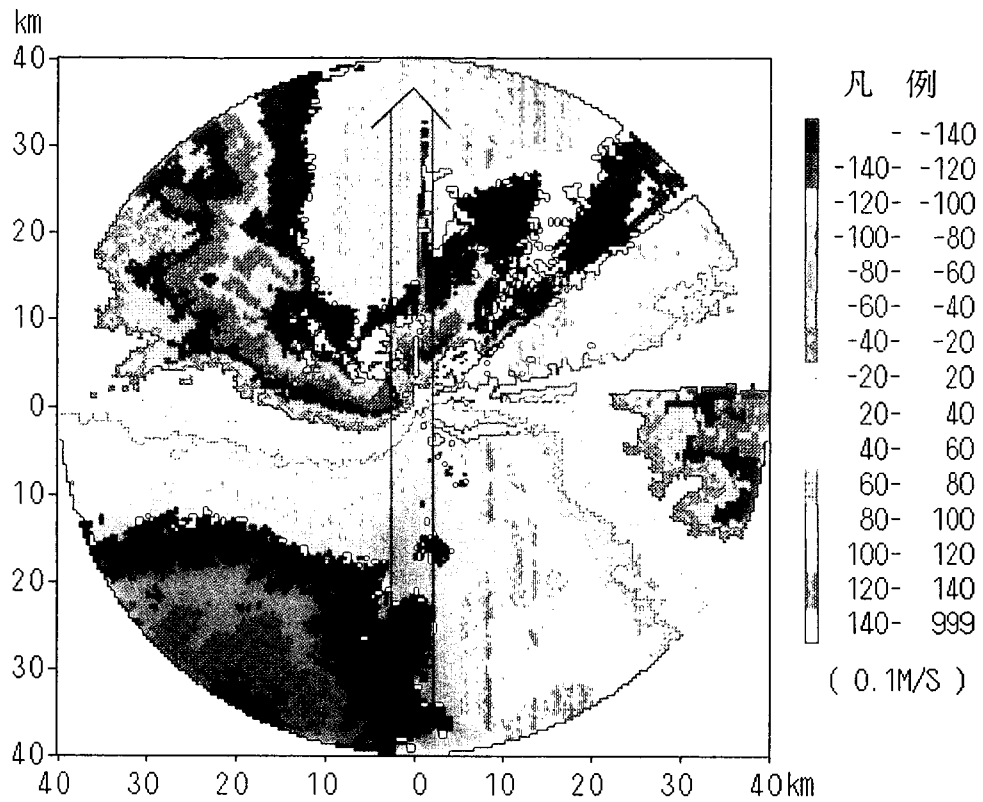


DNDレーダ外観（酒田）

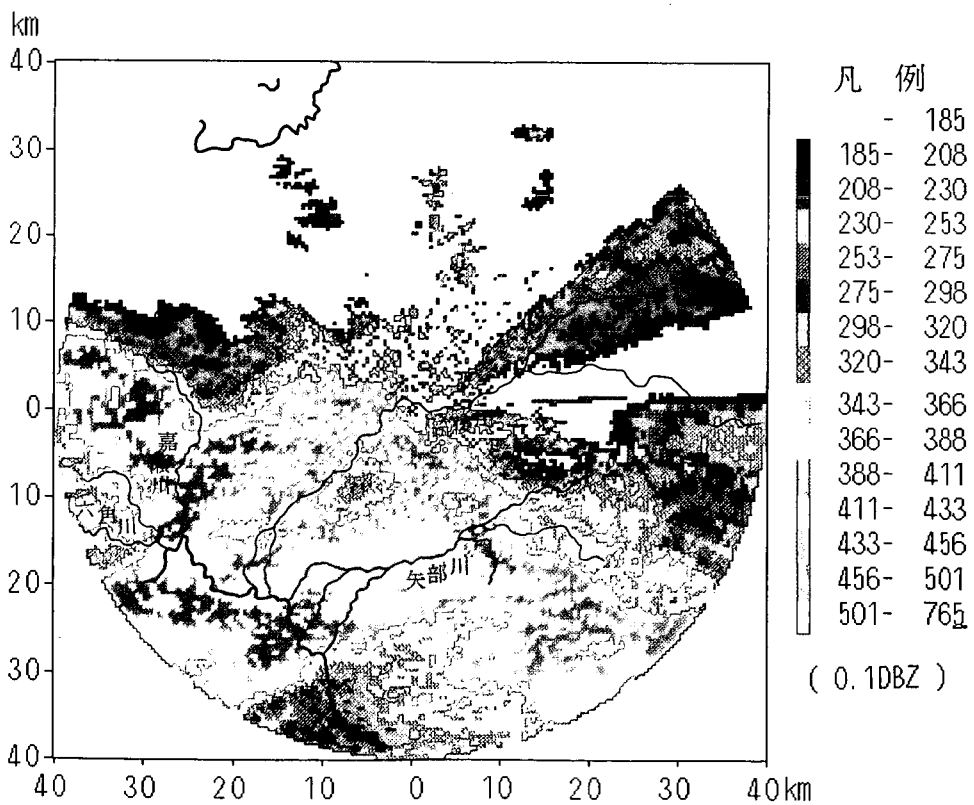


DNDレーダオンライン端末

DNDレーダがとらえた九州中北部豪雨



ドップラーレーダによる風向・風速観測結果 (1990, 7/2, 2時30分)



直交二偏波レーダによる反射強度の測定結果 (1990, 7/2, 7時)

目 次

まえがき

第1章 研究の経緯	1
第2章 直交二偏波レーダにおける信号処理	7
2.1 データサンプリング間隔と測定精度	7
2.2 MTI出力特性	19
第3章 直交二偏波レーダによる降雨強度の測定精度	31
3.1 はじめに	31
3.2 簡易 Z_{DR} 法による降雨強度の計算手法	31
3.3 精度評価データとデータ処理	45
3.4 精度評価	52
3.5 最適F値の検討	70
3.6 まとめ	71
(参考) 1990年久留米での観測結果	72
第4章 直交二偏波レーダによる降雪雲の観測	81
4.1 はじめに	81
4.2 降水粒子の反射特性	81
4.3 観測結果	83
4.4 Z_H , Z_{DR} , LDR の高度変化	94
4.5 ゾンデとの協同観測	99
4.6 地上観測との対比	102
4.7 まとめ	105
第5章 DNDレーダ絶対較正作業	107
5.1 はじめに	107
5.2 作業方法	107
5.3 作業実施状況	111
5.4 データ解析結果	127
5.5 考察	153
第6章 DNDレーダの実用化に向けての検討	155
6.1 はじめに	155
6.2 空中線系	155
6.3 レドーム	158
6.4 キャリブレーションの方法	158
6.5 グラウンドクラッターの除去方法	158

6.6 観測レンジ	159
第7章 まとめ	161

第1章 研究の経緯

1. 1 研究の目的

洪水時の河川管理及び積雪地域の冬期の道路管理を適切に行うには、広域・面的でかつ正確な降雨量及び積雪量の情報を入手する必要がある。現在この情報を入手する測定器として気象レーダが用いられている。

レーダによる降水量の観測方法は、目標の降水粒子（雨滴、雪片等）群からの電波の反射強度（反射因子 Z という）を測定し、この反射因子 Z と降水強度 R との関係式 $Z = BR^\beta$ を用いて、降水強度を推定するものである。

この B 、 β は降水粒子の形態（雨滴かひょうか雪片か）で異なる。また、雨滴でも降雨成因（雷雨、台風、前線性等）によって異なる。

しかし、現在のレーダシステムによる降水観測は、得られる情報が1つ（反射因子のみ）しかないため、①降水粒子の形態の識別が不可能、②レーダの情報だけでは B 、 β の推定が困難、という問題があり、これ以上の降雨量の観測精度の向上が望めない。

また、レーダによる降雪観測は、①降雪現象は降雨現象に比べ電波の反射強度が弱い、また、②雪片は風の移流を受けるため上空と地上の対応がとり難い、ため定量的な降雪観測が難しい。

そこで、土木研究所では、レーダで複数の情報が得られるMultiparameter-Radarの1つである直交二偏波・ドップラーレーダ（DNDレーダと称する）を試作し、DNDレーダによる降水量の観測手法の開発研究を行っている。

なお、このDNDレーダの開発研究は、建設本省電気通信室の協力を得て、㈱東芝、日本無線㈱、三菱電機㈱の3社と共同して行っている。

1. 2 研究の経緯

土木研究所水文研究室では、昭和40年頃からレーダによる降雨観測に関する研究を開始し、昭和59年度からは既存型レーダによる降雪観測の可能性の検討を始めた。また、昭和59年度から直交二偏波・ドップラーレーダ等の特殊レーダ（Multiparameter-Radar）による降水観測手法の開発を始めた。

既存型レーダによる降雪観測手法の検討は、昭和59年度は建設省深山レーダ雨量計と札幌市SMASレーダの観測結果を用いて解析した。昭和60年度は小型レーダを用いて新潟県長岡市で降雪観測を実施し検討した。これから、既存型レーダによる定性的な降雪観測は可能であるが、定量観測を行うにはシステムの性能向上を図る必要があることが分かった。

特殊レーダによる降水観測システムの開発研究は昭和59年度から開始した。昭和59年度は、海外における特殊レーダによる降水観測に関する研究現況を調査した。これから、直交二偏波・ドップラーレーダが最も優れていることが分かった。これを受けて、昭和60年度に、直交二偏波・ドップラーレーダの仕様の検討を行い、製作を開始した。

昭和61年12月に直交二偏波・ドップラーレーダが完成し、その後、以下に示すような観測実験を行っている。

昭和61年度	富山で降雪観測を実施
昭和62年度	富山で降雨観測・降雪観測を実施
昭和63年度	久留米で降雨観測を実施
	富山で降雪観測を実施
平成 元年度	久留米で降雨観測を実施
	酒田で降雪観測を実施
平成 2年度	平成元年度と同じ

これらの観測データを用いて、次のような研究を行っている。

①直交二偏波・ドップラーレーダによる降雪観測システムの開発のため、降雪予測モデルの開発、雪片の移流モデルの開発、降雪時のレーダ方程式の検討、DNDレーダの最適運用方法の検討、及び、降水物質の形態識別手法の開発を行う。

②直交二偏波・ドップラーレーダによる降雨観測システムの開発のため、降水物質の形態判別手法の開発、粒径分布推定法の開発、DNDレーダの特性を用いた降水量測定手法の開発、DNDレーダの最適運用方法の検討、及び、DNDレーダの特性を用いた降雨予測モデルの開発を行う。

平成元年度までの研究成果については、

「DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第1報）」

（昭和63年3月）

「DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第2報）」

（平成 元年3月）

「DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第3報）」

（平成 2年3月）

に、とりまとめられている。参考のため、以下にそれらの目次を示す。

1) DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第1報）

第1章 序 論

第2章 DNDレーダ（二重偏波・DNDレーダ）の製作

- 2.1 DNDレーダの仕様とその決定の経緯
- 2.2 空中線部の構造とその性能
- 2.3 送受信部の構造とその性能
- 2.4 信号処理部の構造とその性能
- 2.5 偏波切替器の構造とその性能
- 2.6 データ収録部の構造とその性能
- 2.7 表示部の構造とその性能
- 2.8 総合調整について
- 2.9 二重偏波モードの性能評価
- 2.10 ドップラーモードの性能評価

- 2.11 保守点検方法について
- 2.12 富山での設置工事について
- 2.13 ま と め

第3章 DNDレーダによる降雪観測

- 3.1 降雪観測における反射電力のサンプリング時間
- 3.2 DNDレーダ及び宝達山レーダによる降雪観測
- 3.3 パラボラ面への着雪が降雪観測に及ぼす影響について
- 3.4 降雪粒子の特性観測
- 3.5 レーダによる降雪観測のための基礎調査
- 3.6 ま と め

第4章 DNDレーダによる降雨観測

- 4.1 降雨観測事例
- 4.2 レーダの較正
- 4.3 Z_{DR} の算出方法と測定精度
- 4.4 降雨観測における反射電力のサンプリング時間
- 4.5 Z_{DR} による降水強度の測定精度
- 4.6 ドップラーモードの観測精度
- 4.7 ま と め

第5章 結 語

2) DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書(第2報)

第1章 序 論

第2章 二重偏波・ドップラーレーダ(DNDレーダ)の改造

- 2.1 改造の必要性と概要
- 2.2 信号処理部の性能と動作原理
- 2.3 データ収録部の性能と動作原理
- 2.4 表示部の性能と動作原理
- 2.5 久留米での設置工事について
- 2.6 ま と め

第3章 DNDレーダによる降雪観測と予測

- 3.1 降雪による電波減衰について
- 3.2 雪片の移流を考慮した降雪量の測定
- 3.3 レーダによる降雪予測の可能性について
- 3.4 ま と め

第4章 DNDレーダによる降雨観測の精度

- 4.1 雨滴の粒径分布の測定
- 4.2 Z_{DR} 法による降水強度の測定精度
- 4.3 ドップラーレーダを用いた雨滴の粒径分布の推定
- 4.4 レーダ反射電力のサンプリング間隔について

4. 5 ま と め

第5章 結 論

3) DNDレーダによる降水現象の観測に関する共同研究報告書(第3報)

第1章 序 論

第2章 データ平均方法と Z_{DR} の測定精度

2. 1 DNDレーダの補正係数の検討

2. 2 データサンプリング方法

第3章 直交二偏波レーダによる降雨強度の観測性能

3. 1 はじめに

3. 2 直交二偏波レーダによる降雨強度の測定原理

3. 3 観測精度に関する理論的検討

3. 4 降雨観測

3. 5 雨滴の粒径分布の測定

3. 6 測定精度の検証

3. 7 ま と め

第4章 ブライトバンドの観測と降水粒子の形態識別

4. 1 はじめに

4. 2 降水粒子の形態識別に関する既往の研究

4. 3 直交二偏波レーダによる降水観測

4. 4 降水粒子の Z_H 、 Z_{DR} に関する特性

4. 5 降水粒子の誘電率

4. 6 ま と め

第5章 DNDレーダのハードウェアの諸特性

5. 1 各部のロス

5. 2 アイソレーション

5. 3 VSWR

第6章 結論

本報告においては、平成2年度に実施した降雨・降雪の観測結果、及びDNDレーダの実運用化に向けての検討課題について報告する。

なお、本研究は、本年度で一応の基礎研究を終了する。来年度以降は、図-1. 1に示すような項目について検討し、実運用機のプロトタイプの開発を行う予定である。

直交二偏波・ドップラレーダによる降水観測システムの開発研究を進めるにあたり、表-1. 1に示す特殊レーダ研究会を発足し、研究会の委員の方々に指導して頂いた。また、富山における降雪観測並びに降雨観測で、建設省北陸地方建設局河川管理課、電気通信課、筑後川工事事務所、筑後川ダム統合管理事務所の皆様に、酒田における降雪観測で、東北地方建設局、河川管理課、電気通信課、道路管理課、並びに酒田工事事務所の皆様に多大な協力をして頂いた。ここに記して謝意を表します。

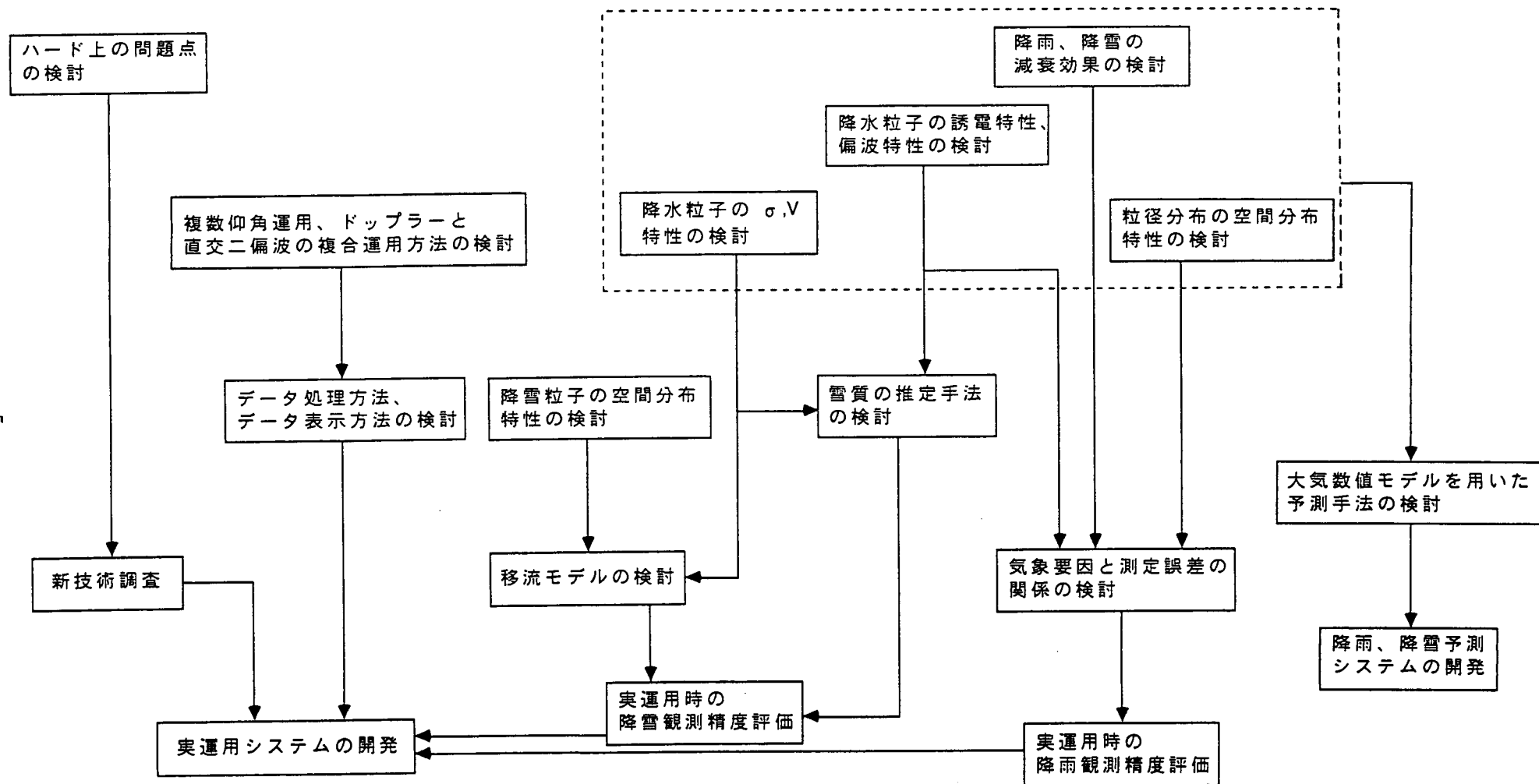


図 - 1. 1 研究計画（平成3年度以降）

表-1. 1 特殊レーダ研究会委員名簿

氏 名	所 属
(委員長)	
木下 武雄	科学技術庁国立防災科学技術研究所第一研究部長
(委員)	
八木 鶴平	科学技術庁国立防災科学技術研究所第一研究部広域防災研究室長
青柳 二郎	運輸省気象研究所気象衛星研究部第二研究室長
田畑 明	〃 台風研究部第三研究室研究官
小口 知宏	郵政省通信総合研究所第三特別研究室長
藤田 正晴	〃 通信技術部通信装置研究室長
阿波加 純	〃 電波部大気伝搬研究室主任研究官
井原 俊夫	〃 鹿島支所第一宇宙通信研究室長
一宮 邦夫	建設省建設経済局調査情報課電気通信室長
小岩井靖男	〃 電気通信室建設専門官
青木 佑久	建設省土木研究所河川部長(平成元年度～)
益倉 克成	〃 河川部水文研究室長(平成2年度～)
中野 悟	(株)東芝・小向工場レーダ技術部技術第二担当課長
吉田 武弘	日本無線(株)・三鷹製作所技術第二部次長
浜津 享助	三菱電機(株)・通信機製作所電波部システム第二課主幹
(前委員)	
堀 重信	61年～62年度:(前)建設省建設経済局調査情報課電気通信室長
松下 守夫	63年度:(前) 〃 電気通信室建設専門官
橋本 宏	61年～63年度:(前) 〃 土木研究所河川部長
吉野 文雄	61年～2年度:(前) 〃 〃 河川部水文研究室長
畑 浩靖	61年度:(前)(株)東芝・小向工場無線機設計部情報設計課長
萩原 護也	61年度:(前)三菱電機(株)・通信機製作所電波部システム第二課主幹
(幹事)	
松崎 典夫	建設省土木研究所水文研究室主任研究員(63年度～)
深見 和彦	〃 研 究 員(平成2年度～)
水野 秀幸	〃 技 官(62年度～)
井川 貴史	〃 技 官(62年度～)
(前幹事)	
水野 雅光	61年～63年度:(前)建設省土木研究所水文研究室研究員
河関 大祐	61年度:(前) 〃 技 官
(事務局)	
堀 重信	(社)建設電気技術協会専務理事
岡部 澄弥	〃 事務局

第2章 直交二偏波レーダにおける信号処理

2.1 データサンプリング間隔と測定精度

2.1.1 降水強度の変動特性

レーダによる降水強度の観測では、空間的に連続した降水強度が得られると共に、時間的にも微細な降水強度の変化を得ることができる。また、レーダは方位角方向にスキャンを行っているために、ある1地点の降水強度はスキャン毎の離散値として得られる。レーダの運用方法（複数仰角による運用、データ平均時間）について検討を行うには、レーダで得られるこの離散的な時系列データの特性について把握を行う必要がある。

降水強度の変動周期、変動量などの特性は気象現象によって異なるが、ここではDNDレーダの梅雨期と台風期の降雨観測で得られた表-2.1に示す降水強度を用いて解析を行った。

表-2.1 解析に用いた降雨観測データ

No	観 測 日 時	種別
1	1989. 6. 14 10:30～1989. 6. 14 12:31	前線
2	1989. 6. 14 19:21～1989. 6. 14 21:31	前線
3	1989. 6. 16 11:07～1989. 6. 16 13:58	前線
4	1989. 6. 23 23:58～1989. 6. 24 02:37	前線
5	1989. 6. 29 23:47～1989. 6. 30 02:05	前線
6	1989. 7. 2 16:01～1989. 7. 2 18:14	前線
7	1989. 7. 3 03:53～1989. 7. 3 07:46	前線
8	1989. 7. 8 21:34～1989. 7. 9 00:59	前線
9	1989. 9. 19 04:36～1989. 9. 19 07:31	台風
10	1989. 9. 19 09:24～1989. 9. 19 12:25	前線

(1) 降水強度の時間変化と自己相関

図-2.1にDNDレーダの方位角および仰角を固定して、1地点を連続的に2時間以上にわたって観測を行い得られた降水強度の時間変化図を示す。なお、ここでは反射因子Zを算出する際には空間平均2レンジビン×6レンジ=12，時間平均9パルス×51=459データにより平均を行っており、パルス毎の変動が観測値に及ぼす影響は、変動の標準偏差 $\sigma_P = (5.57^2 / 5508)^{1/2} = 0.08(\text{dB})$ 程度でありほとんど無視できる値である。

また、降水強度の時間変化から求めた自己相関関数 $\rho(\tau)$ を図-2.1に併せて示す。

図が示すように、10例中7例において降水強度の自己相関が0.1以下になる相関時間は約8～20分であり、他の3例においては0.1以下になる相関時間は50分以上であった。また、前者においては相関時間の増加とともに自己相関関数は負に転じる傾向にある。これは、降水強度が周期的に変化する特性を持っているために生じるものと推測される。

(2) 降水強度の自己相関関数の指数関数による近似

前述のように多くの場合自己相関は10分前後で急速に小さくなる傾向がある。したが

って、指数関数により降水強度の自己相関関数の近似が可能であると推測される。そこで、自己相関関数を表す近似式として次の式を仮定する。

$$\rho(\tau) = \exp(-|\beta\tau|^\alpha) \quad (2.1)$$

ただし、 τ は相関時間、 α 、 β は近似のための定数とする。

表-2. 2に観測値から求めた α 及び β の値を示す。

表-2. 2 降雨毎の変動特性：相関係数が0.1 以下になる相関時間
， α 、 β 及び変動の平均と標準偏差

N o	相関時間 (分)	α	β	平均(mm/h)	標準偏差(mm/h)
1	10.6	1.7922	0.002244	1.75 1.68	1.04 1.00
2	20.3	1.4038	0.001304	3.78 4.14	2.58 2.33
3		1.0396	0.000449	2.69 0.64	2.36 0.72
4	54.6	0.4915	0.000409	0.62 1.95	0.60 1.43
5	19.6	1.4385	0.001434	1.26 1.08	0.67 0.77
6	18.6	1.4633	0.001241	0.52 0.61	0.36 0.64
7	50.3	1.1916	0.000637	4.64 2.41	3.08 2.68
8	12.2	1.7232	0.002181	2.79 2.04	2.41 1.39
9	17.2	1.4502	0.001386	2.81 4.05	0.66 1.91
10	14.5	1.4332	0.002032	10.10 8.13	3.67 4.99

α 及び β の値は、10分前後で自己相関が0.1 以下になる観測例では $1.4 < \alpha < 1.8$, $1.2 \times 10^{-3} < \beta < 2.2 \times 10^{-3}$ の範囲にある。また、50分以上にわたり自己相関が0.1 以上の観測例では $0.5 < \alpha < 1.2$, $4.1 \times 10^{-4} < \beta < 6.4 \times 10^{-4}$ の範囲にあった。これらの近似的に求めた自己相関関数を図-2. 1中に併せて示す。

(3) 平均による自己相関関数の変化

一般に、時間軸方向に移動平均を行うことによって自己相関関数が高くなることが推測される。図-2. 2に5.1秒毎のデータを1分平均、5分平均した場合のそれぞれの自己相関関数の1例を示す。なお、平均方法はレーダの実運用方法に合わせて、10秒毎（アンテナの回転数が6 r.p.m の場合には10秒で1スキャンデータが得られる。）に1データが得られるようにデータを1/2に間引いて平均を行っている。

ところで、移動平均後の自己相関関数 $\rho_m(\tau)$ は、平均前の自己相関関数 $\rho(\tau)$ を用いることにより次式によって表される。

$$\rho_M(\tau) = \frac{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} (M - |m|) \rho(m-\tau)}{\sum_{m=-(M-1)}^{M-1} (M - |m|) \rho(m)} \quad (2.2)$$

上式を用いることにより、(2.1) 式に示す自己相関関数の近似式から移動平均後の自己相関関数を得ることが可能である。図-2.3に(2.1) 式及び(2.2) 式から求めた1分平均及び5分平均後の自己相関関数を示す。この図と図-2.2とを比較して分かるように両者は良く一致している。

これらの図から、次のことが分かる。

- ① 5分平均後の自己相関は、平均前のデータ及び1分平均データに比べ、高い値となる。
- ② 1分平均後も自己相関はほとんど変化しない。

これは、データ平均時間 m が相関時間 τ に比べて非常に小さい場合には、自己相関関数は近似的に $\rho(m-\tau) = \rho(\tau)$ 、 $\rho(m) = 1.0$ となり、移動平均後の自己相関関数 $\rho_M(\tau)$ が $\rho(\tau)$ に等しくなるためである。

また、このことから上記の検討で得られた5.1秒毎の平均降水強度の自己相関関数は、実際の運用時に得られるスキャン毎データにおいても等しい特性を持つと考えられる。

(4) 降水強度変動値の平均と標準偏差の関係

観測で得られた降水強度の平均値 $E(r)$ と、変動の大きさ(標準偏差) σ_r を表-2.2に示す。また、 $E(r)$ と σ_r との関係を図-2.4に示す。図が示すとおり平均降水強度が増大するにつれて、変動の大きさもそれに比例して増加する。

また、図から次に示す $E(r)$ と σ_r の回帰式が得られた。

$$E(r) = 1.517 \sigma_r \quad (2.3)$$

2. 1. 2 データ積分方法と測定誤差の関係

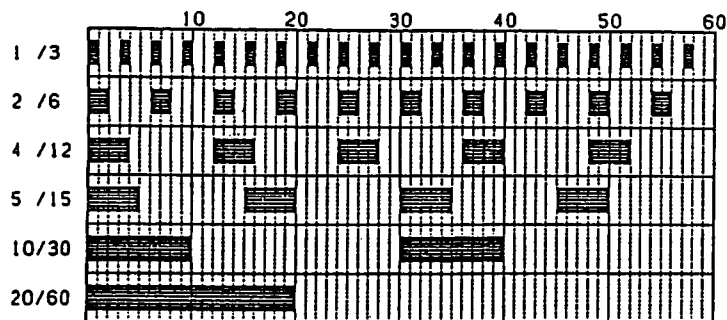
旧来のレーダ雨量計においては1仰角に固定した運用が行われてきたが、近年では観測距離が遠い地点での観測精度を向上させるため、及び降雨域の立体構造を把握するために複数仰角での運用が図られるようになってきた。また、ドップラー観測と併用することを考えた場合、観測時間5分を有効に生かして各種の運用が行われるように配慮する必要がある。このような理由から、ここでは複数の仰角で運用を行う際のデータ積分方法と測定誤差について検討を行う。なお、検討を単純化するために、①仰角数を2、3及び5仰角の3種類とする、②各仰角の運用時間を等しくして検討を行うこととする。

(1) 複数仰角運用に伴う観測精度の低下

複数の仰角でレーダの運用を行う場合、1仰角で運用する場合に比べて、同じ5分間の平均雨量を算出する際に平均データ数が $1/N$ (N 仰角で運用を行う場合) となり、観測精度の低下が予想される。また、これに伴い観測を行っていない期間が生じるため、その間のデータを観測データで代表させる際に標本化誤差が生じ、観測精度が低下することに

なる。

まず、複数仰角で運用を行う場合の観測精度の低下を検討するために、連続して観測を行った全データの1時間平均値を真値とし、これに対して右図に示すように仰角数3として仰角の切り替え間隔を1分から20分までの間で変化させた場合に相当するデータの標本化を行い平均化を行ったデータとの比較を行った。図



データ収集総時間が1/3

ー2.5に真値と標本化を行ったデータとの散布図を示す。この図から、総データ収集時間が同一の1/3(20分)であっても、仰角の切り替え間隔が長くなるにつれて相関が悪くなり、観測精度が低下することが分かる。

次に、仰角数2、3及び5の場合の、真値に対する標本化誤差を次に示す相対誤差および標準偏差によって評価した結果を図ー2.6に示す。

$$\text{相対誤差} = \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - R_{0i}|}{\sum_{i=1}^n R_{0i}}$$

$$\text{標準偏差} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{0i})^2}{n}$$

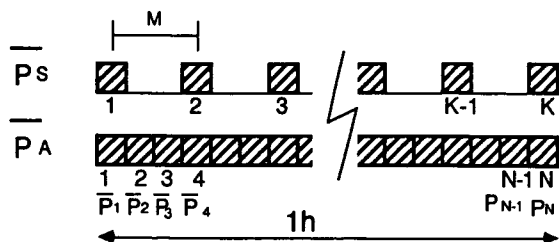
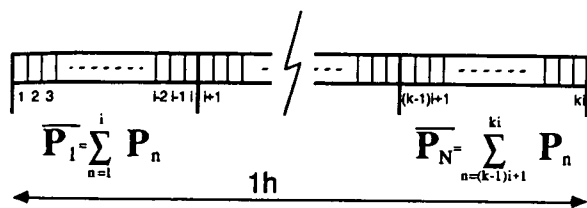
ここで、 n ：対象データ数、 R_i ：あるサンプリング方法のときの i データの降水強度、 R_{0i} ：サンプリング方法(1/1)のときの i データの降水強度

図が示すように、標本化誤差は明らかに仰角の切り替え間隔つまりデータを取得していない時間に比例して増大することがわかる。また、標本化誤差は総データ収集時間が小さいほど増大する傾向はあるが、総データ収集時間が1/2の場合と1/5の場合とではあまり違いがないことがわかる。

(2) 標本化誤差の理論的検討

(1)の検討で、標本化誤差と仰角の切り替え間隔つまりデータ収集間隔との間には比例関係があることが分かったが、両者の関係は観測例によって変化するため、ここでは降水強度の時間変化をモデル化し、標本化誤差とデータ収集間隔、総データ収集時間との関係について検討を行う。

下図のように1時間毎の平均値を $\overline{P}_A$ とし、1時間内のデータから i 個のデータを標本化して平均をとった値を $\overline{P}_S$ とする。



標本化誤差 e を $e = \overline{P}_A - \overline{P}_S$ で表すと、 e の標準偏差 σ_e は次式で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_e^2 &= V(e) = E((\overline{P}_A - \overline{P}_S)^2) \\ &= V(\overline{P}_A) + V(\overline{P}_S) - 2C(\overline{P}_A, \overline{P}_S)\end{aligned}\quad (2.4)$$

ただし、 $E(\cdot)$ は平均、 $V(\cdot)$ は分散、 $C(\cdot, \cdot)$ は共分散を表わすものとする。

ここで、標本化の方法として前図のように 1 時間データを N 個に分割し、それぞれの平均を $\overline{P}_n$ とする。その N データの中から、 M 個間隔で K 個 ($K = N/M$) のデータを抽出し平均を行うものとする。

この場合、 $\overline{P}_A$ 、 $\overline{P}_S$ はそれぞれ次式で表わされる。

$$\overline{P}_A = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \overline{P}_n \quad (2.5)$$

$$\overline{P}_S = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{P}_{M(k-1)+1} \quad (2.6)$$

ここで、近似的に標本化平均値が全データの平均値に等しい、つまり次式 $E(\overline{P}_A) = E(\overline{P}_S) = \mu$ が成り立つと仮定すると、 $V(\overline{P}_A)$ 、 $V(\overline{P}_S)$ 、 $C(\overline{P}_A, \overline{P}_S)$ はそれぞれ次式となる。

$$V(\overline{P}_A) = V(\overline{P}) \frac{1}{N^2} \sum_{n=-(N-1)}^{N-1} (N - |n|) \rho(n) \quad (2.7)$$

$$V(\overline{P}_S) = V(\overline{P}) \frac{1}{K^2} \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} (K - |k|) \rho(Mk) \quad (2.8)$$

$$C(\overline{P}_A, \overline{P}_S) = V(\overline{P}) \frac{1}{KN} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho(Mk-n) \quad (2.9)$$

したがって、(2.4) 式より、

$$\begin{aligned}\sigma_e^2 &= V(\overline{P}) \frac{1}{N^2 K^2} \left\{ K^2 \sum_{n=-(N-1)}^{N-1} (N - |n|) \rho(n) + N^2 \sum_{k=-(K-1)}^{K-1} (K - |k|) \rho(Mk) \right. \\ &\quad \left. - 2KN \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \rho(Mk-n) \right\} \quad (2.10)\end{aligned}$$

が得られる。ただし、 $\rho(\tau)$ は P の自己相関関数を表わす。

この結果から、降水強度の自己相関関数として、2.1.1(2) で得られた (2.1)、(2.2) 式を用いることにより、モデル的な降水に対する標本化誤差を知ることができる。図-2.7 に自己相関関数を表わすパラメータとして、表-2.2 に示す α および β を与えたときのデータ収集間隔と標本化誤差との関係を示す。なお、図中の標本化誤差は、 $1/V(P)$ により正規化して示してある。図が示すとおり、観測結果と良く一致した傾向にあり、標本化誤差はデータ収集間隔に比例し、また、総データ収集時間が減少するにつ

れて誤差も増加している。また、(g)と(j)を比較して分かるように、降水強度の自己相関が高い(j)の方が標本化誤差は小さくなる傾向にある。

次に、複数仰角運用により生じる降水強度の測定誤差を10%以内にするために必要とされる運用方法について検討する。

降水強度の平均値 $E(R)$ と変動の大きさ $\sigma_R = V(R)^{1/2}$ との関係を表す(2.3)式と、標本化誤差の標準偏差を表す式との関係から、次式が得られる。

$$\sigma_{e.N} = \frac{1.517 \sigma_R}{E(R)} \quad (2.11)$$

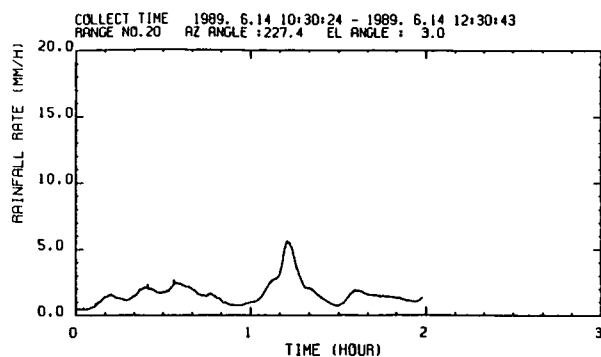
ここで、 $\sigma_{e.N}$ は正規化された標本化誤差の標準偏差を表す。

降水強度の測定誤差を10%以内にするためには、 $\sigma_R / E(R)$ を0.1以下にすれば良い。したがって、 $\sigma_{e.N} < 0.1517$ の場合に測定誤差を10%以下にすることができる。図-2.7から、測定誤差を10%以下にするためには、5仰角で運用を行う場合にはデータ収集間隔を5分以下にする必要があることがわかる。

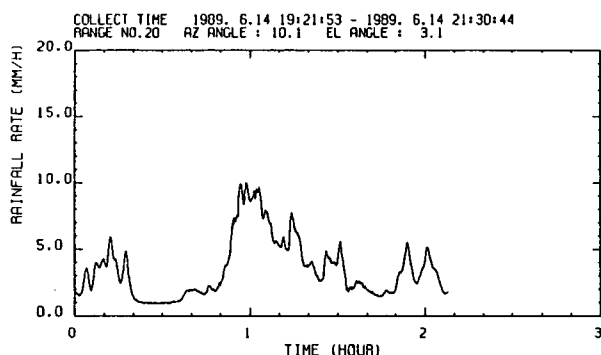
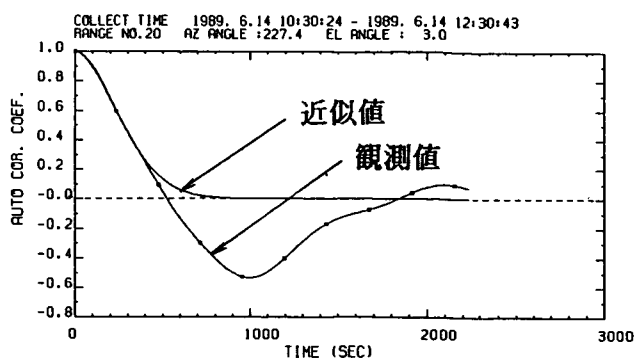
2. 1. 3 まとめ

これまでの検討により次の結果が得られた。

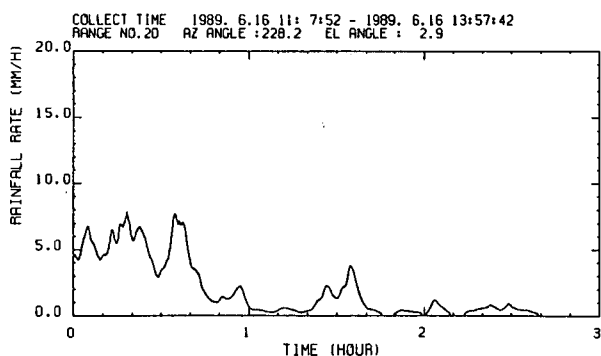
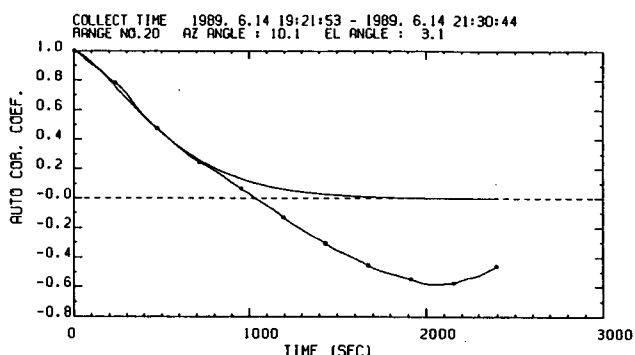
- ①降水強度の自己相関は、10例中7例までが8分から10分の間に0.1以下になり、3例が0.1以下になるまでに50分以上を要した。また、自己相関を近似的に表す指数関数を得た。
- ②降水強度の自己相関は、1分程度の移動平均ではほとんど変化しない。
- ③降水強度の変動は、平均値の増加に従い増大し、両者の関係を表す回帰式を得た。
- ④標本化誤差をデータ収集間隔、総データ収集時間を用いて表す計算式を得た。
- ⑤モデル計算により、標本化誤差は主にデータ収集間隔に比例して増加し、総データ収集時間の減少につれて増大する。また、自己相関の低い降水ほど標本化誤差は大きくなる。
- ⑥複数仰角運用に伴う測定誤差を10%以下にし、5仰角で運用を行うにはデータ収集間隔を5分以下にする必要がある。



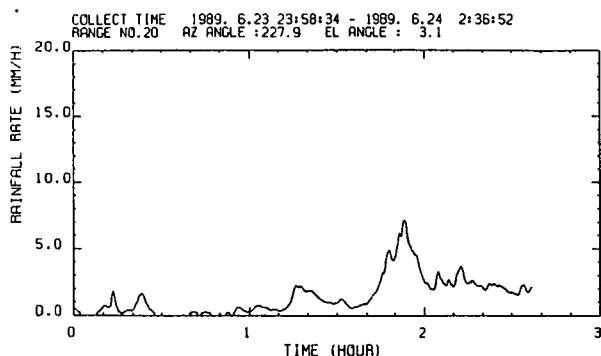
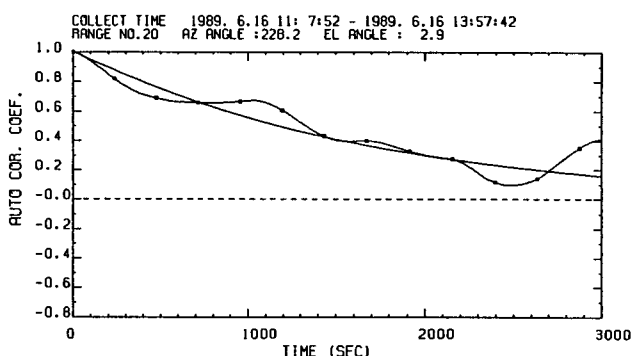
(a) 1989. 6.14 10:30~1989. 6.14 12:31



(b) 1989. 6.14 19:21~1989. 6.14 21:31



(c) 1989. 6.16 11:07~1989. 6.16 13:58



(d) 1989. 6.23 23:58~1989. 6.24 02:37

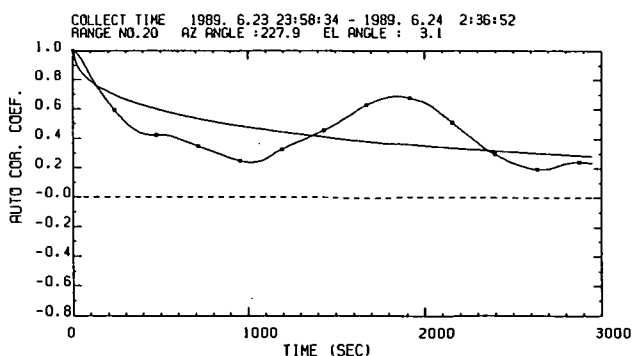
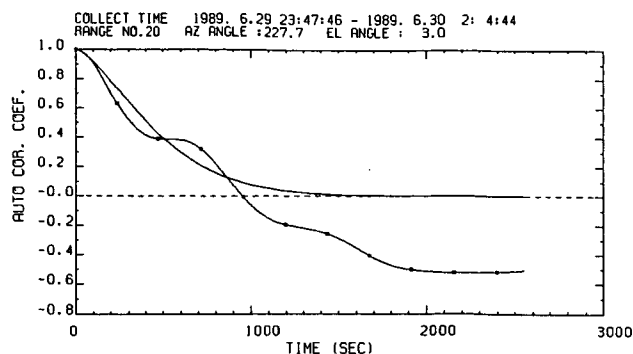
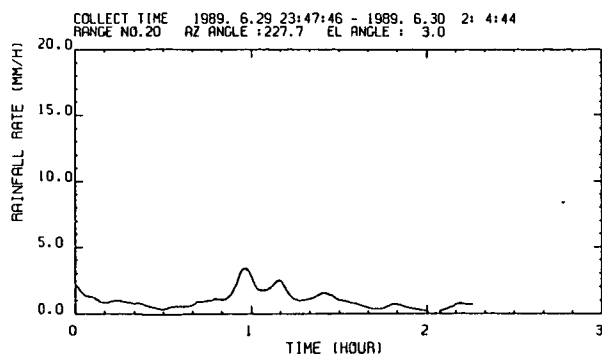
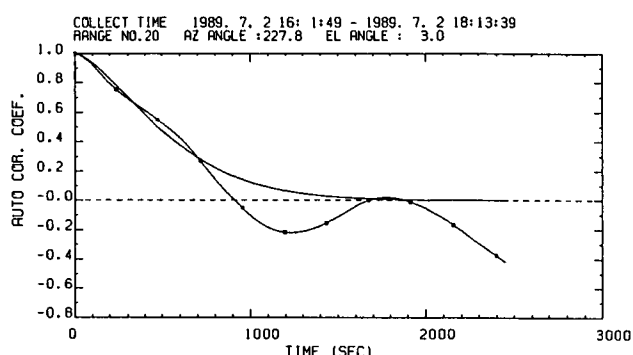
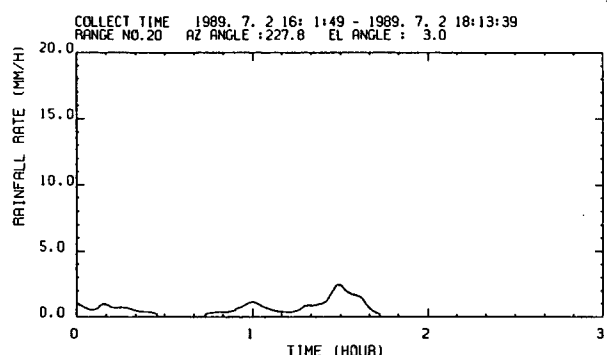


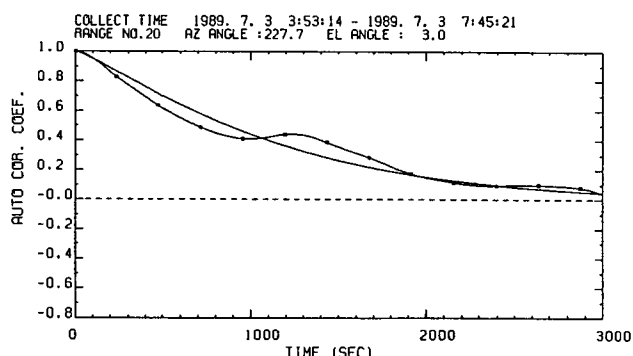
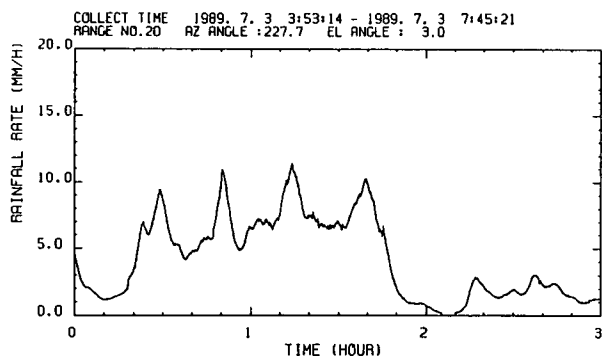
図-2. 1 降水強度の時間変化と自己相関関数 (1)



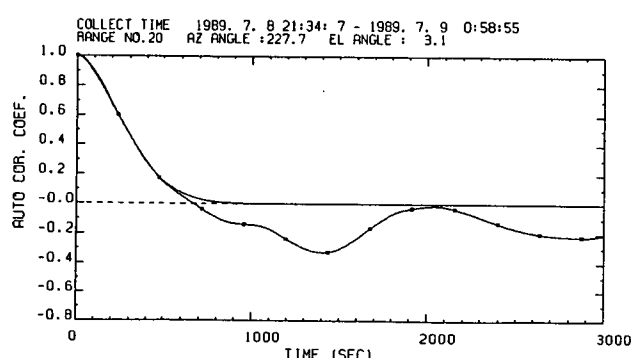
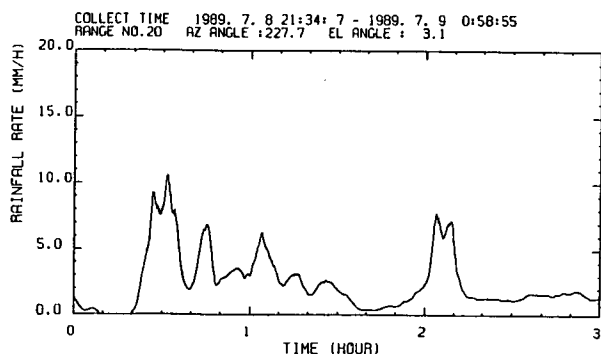
(e) 1989. 6.29 23:47~1989. 6.30 02:05



(f) 1989. 7. 2 16:01~1989. 7. 2 18:14

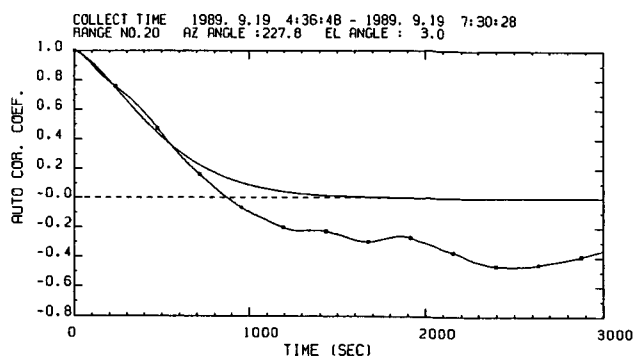
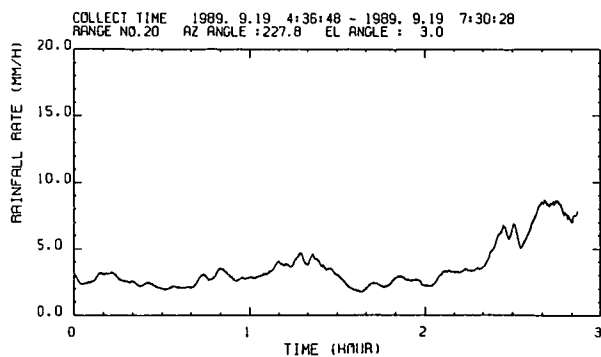


(g) 1989. 7. 3 03:53~1989. 7. 3 07:46

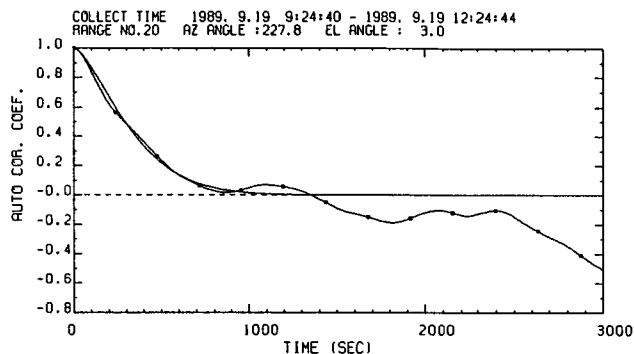
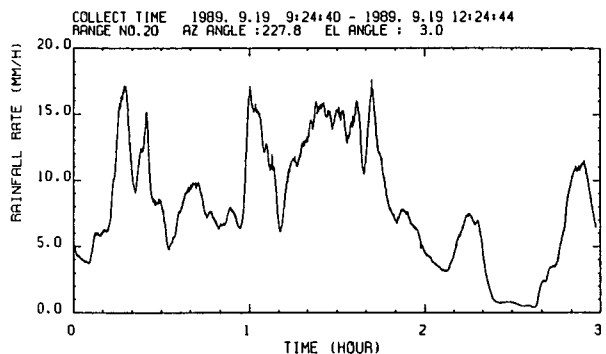


(h) 1989. 7. 8 21:34~1989. 7. 9 00:59

図-2. 1 降水強度の時間変化と自己相関関数 (2)



(i) 1989. 9. 19 04:36~1989. 9. 19 07:31



(i) 1989. 9. 19 09:24~1989. 9. 19 12:25

図-2. 1 降水強度の時間変化と自己相関関数 (3)

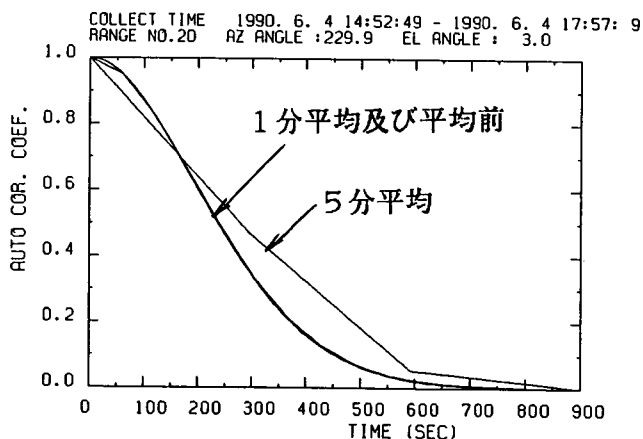
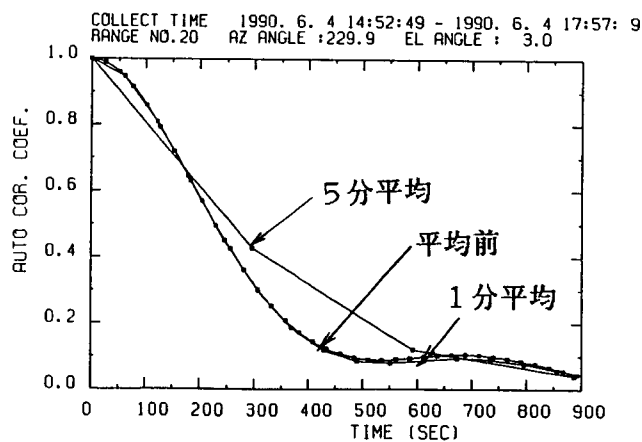


図-2. 2 平均による自己相関の変化 (観測値)

図-2. 3 平均による自己相関の変化 (近似値)

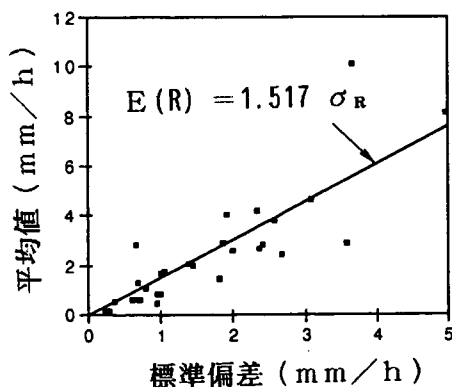


図-2. 4 降水強度の平均値と標準偏差の関係

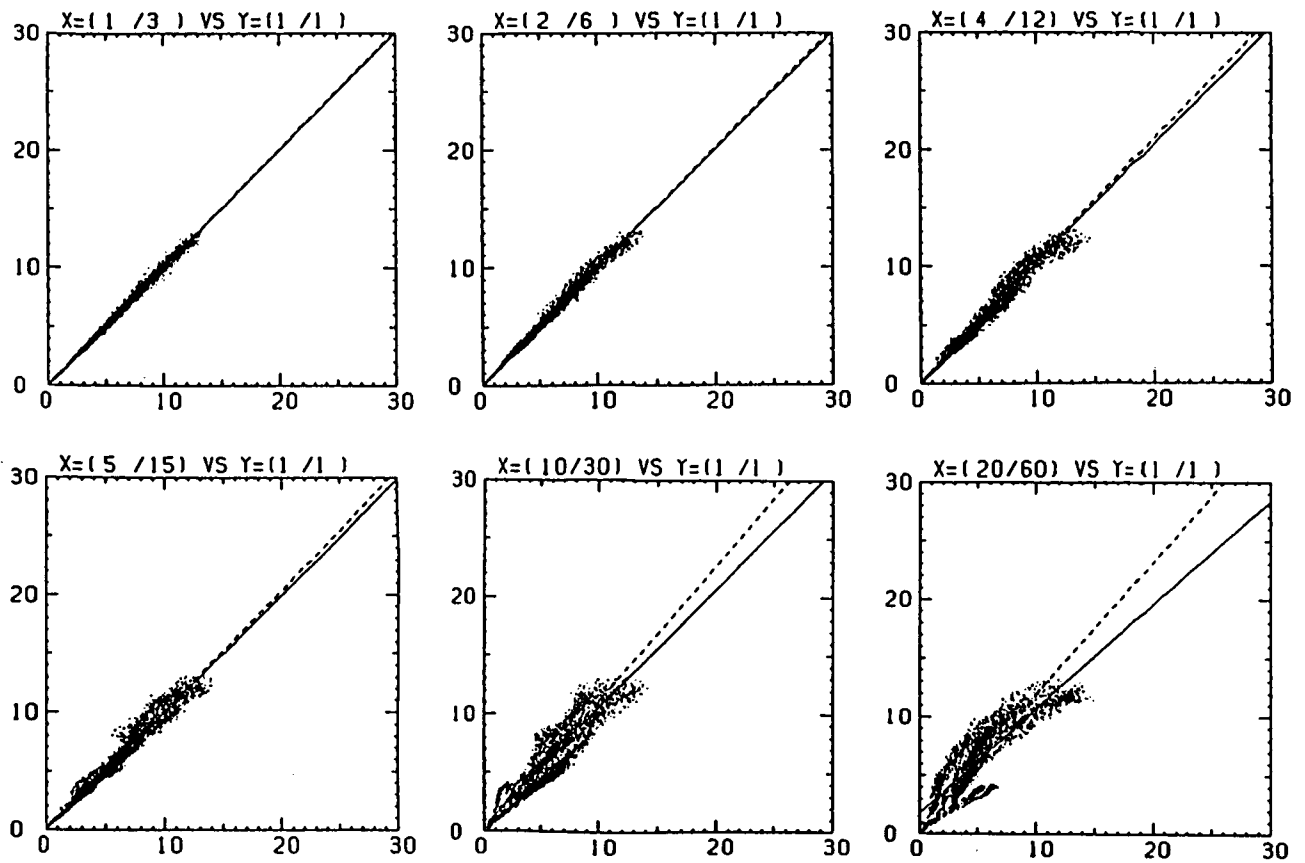
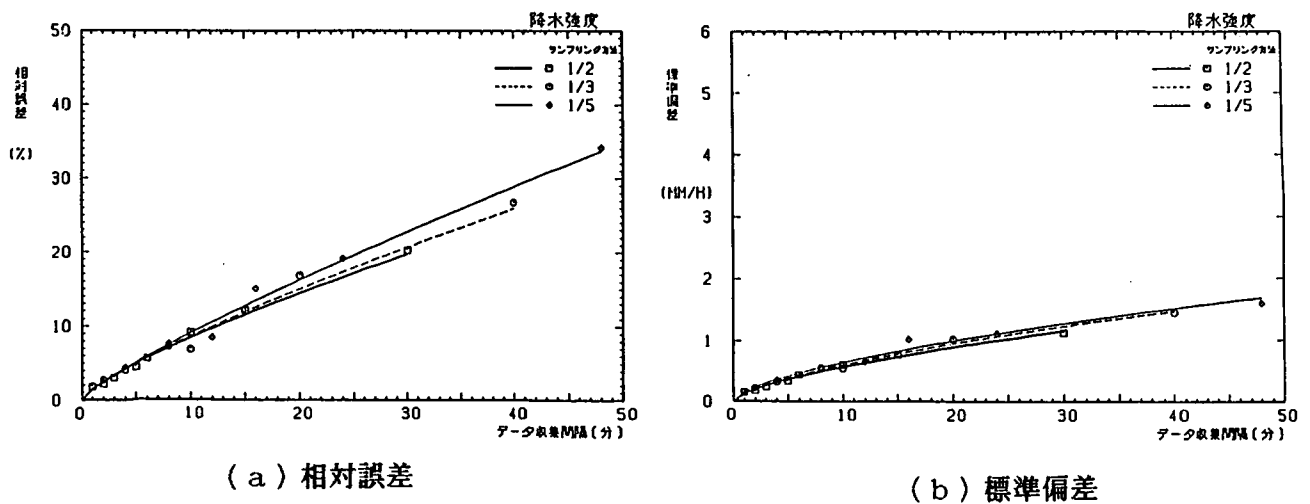


図-2.5 1時間平均降水強度の標本化データと真値との散布図

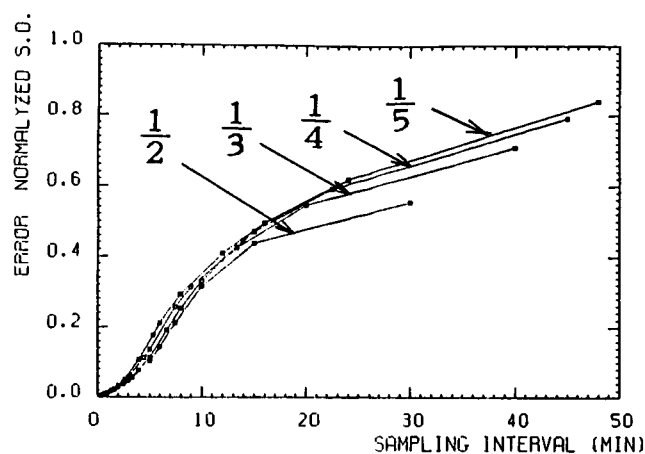
[横軸：真値，縦軸：標本化平均値 (mm/h)]



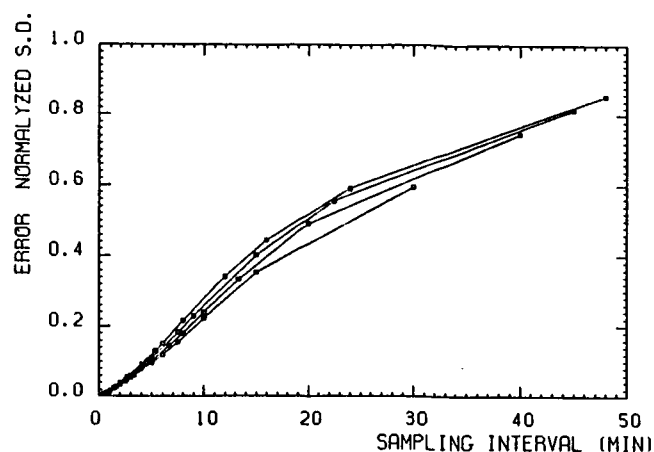
(a) 相対誤差

(b) 標準偏差

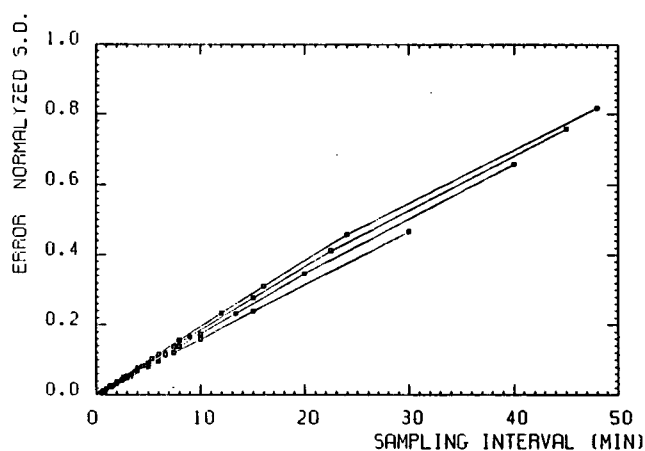
図-2.6 標本化方法と測定誤差の関係 (観測値)



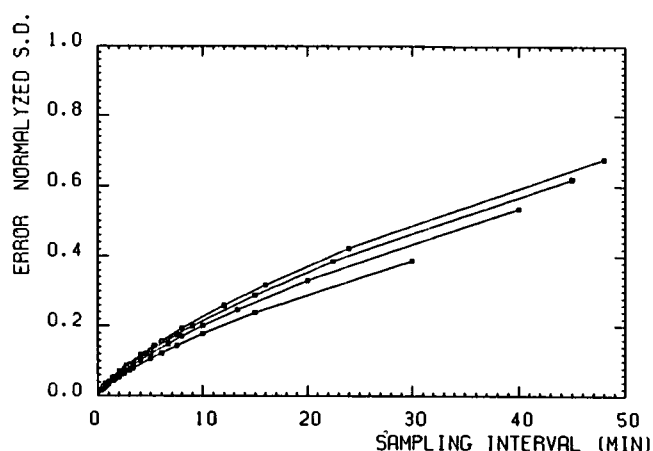
(a) $\alpha = 1.7922$, $\beta = 0.002244$



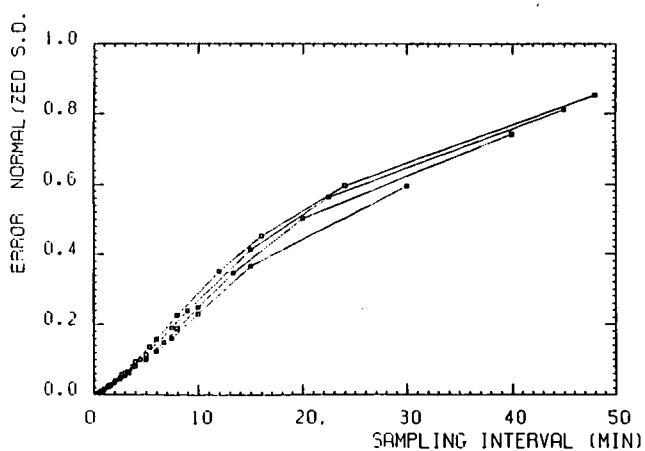
(b) $\alpha = 1.4038$, $\beta = 0.001304$



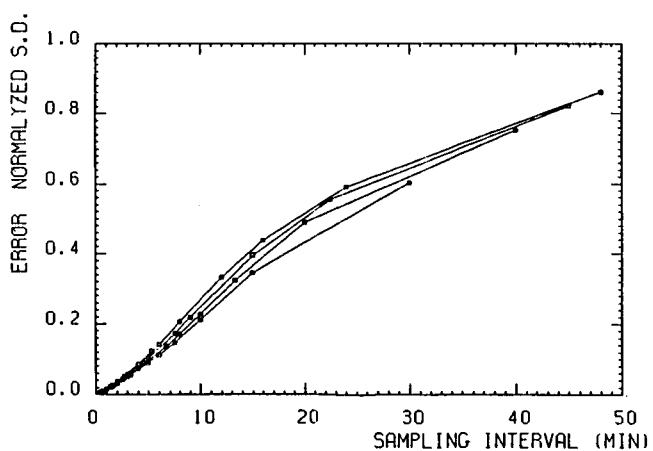
(c) $\alpha = 1.0396$, $\beta = 0.000449$



(d) $\alpha = 0.4915$, $\beta = 0.000409$



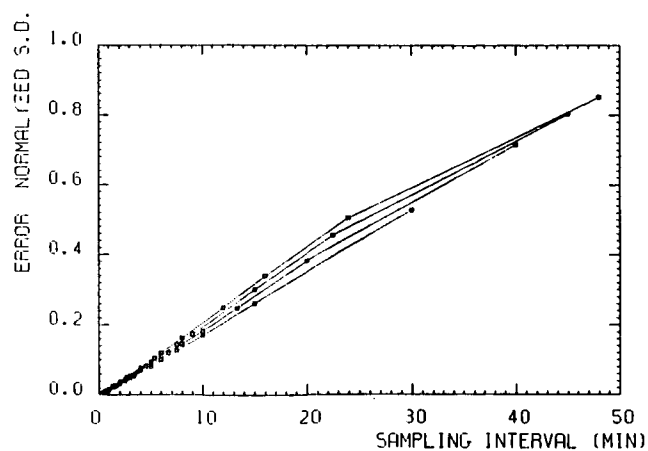
(e) $\alpha = 1.4385$, $\beta = 0.001434$



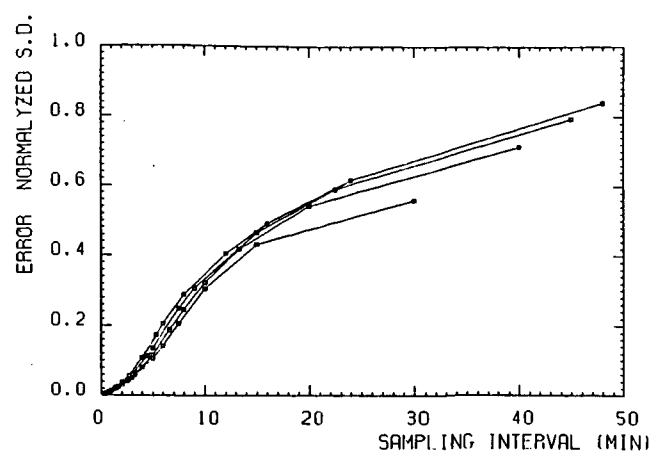
(f) $\alpha = 1.4633$, $\beta = 0.001241$

図-2.7 (a) 標本化方法と測定誤差の関係 (計算値)

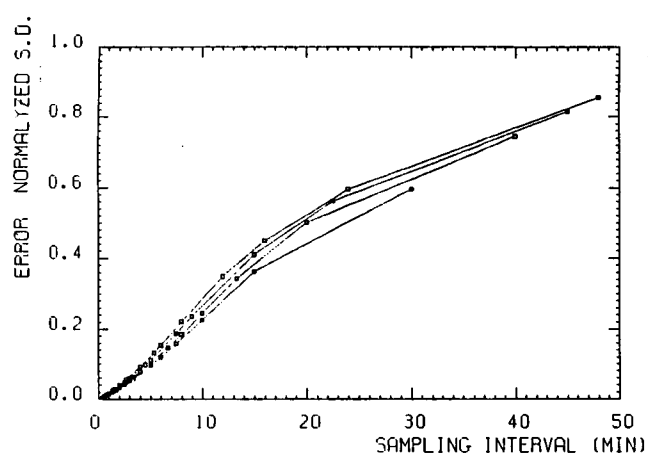
[横軸: データ収集間隔 (分), 縦軸: 正規化された標本化誤差]



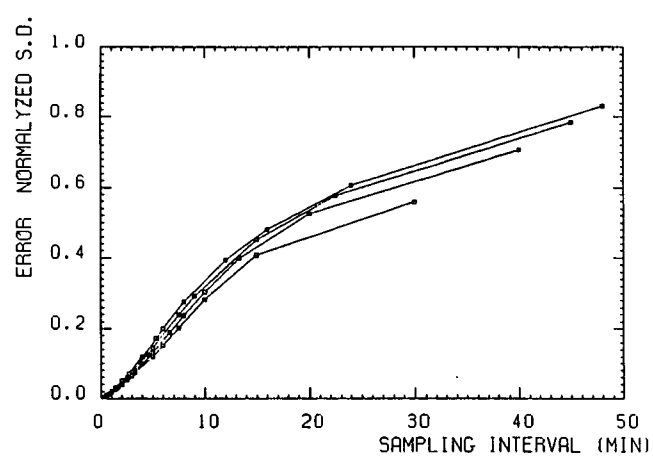
(g) $\alpha=1.1916$, $\beta=0.000637$



(h) $\alpha=1.7232$, $\beta=0.002181$



(i) $\alpha=1.4502$, $\beta=0.001386$



(j) $\alpha=1.4332$, $\beta=0.002032$

図-2.7(b) 標本化方法と測定誤差の関係(計算値)

[横軸: データ収集間隔(分), 縦軸: 正規化された標本化誤差]

2. 2 M T I 出力特性

2. 2. 1 はじめに

直交二偏波レーダを実運用で用いるためには、グラウンドクラッタの除去を行う必要がある。既存のレーダではグラウンドクラッタの除去には次の2つの方法が主に用いられている。

(1) log 減算方式

(2) M T I 方式

直交二偏波レーダでは水平偏波と垂直偏波の反射因子差を降雨強度の算出に用いるため、グラウンドクラッタ除去後の値が、水平・垂直偏波共に同等の特性を持つ必要がある。しかし、(1)のlog 減算方式では降雨時のレーダエコーから晴天時のエコーの減算を行うため、晴天時と降雨時で地上の反射が等しくなければならない。ところが、地上の反射強度は水平偏波と垂直偏波では大きく異なり、また、地表面の状態の変化に大きく左右されるため、グラウンドクラッタ除去後の値を用いた反射因子差の算出は困難である。

これに対して、M T I 方式では降雨時のエコーから直接グラウンドクラッタ成分を除去する方法であり、直交二偏波レーダにおけるグラウンドクラッタ除去方法として有効な方法であると考えられる。このため、ここではM T I フィルタ通過後の信号の特性について調査を行い、M T I フィルタが降雨強度の測定精度に及ぼす影響について検討を行うものである。

2. 2. 2 M T I フィルタ出力信号の特性

レーダ雨量計におけるM T I フィルタは、レーダエコーから地表の反射を取り除くとともに降雨エコーを正しく出力しなければならない。また、地表の反射の有無に関わらず、同一の降雨には同一の出力が得られなければならない。

したがって、M T I フィルタ出力値を直交二偏波レーダで用いるためには次の点について調査を行う必要がある。

a. 降雨エコーのみの場合

① M T I 出力値とノーマル出力値の平均値の比較

② M T I 出力値とノーマル出力値の分散の大きさの比較

b. 降雨エコーにG. Cエコーが重なっている場合

③ G. Cの除去能力

④ G. C除去後の値の精度

(1) M T I 出力値とノーマル出力値の平均値の比較

D N Dレーダでは昭和63年度の改造により、運用パターン7（仰角・方位角固定観測モード）においては1パルス毎に偏波面が切り替わり、同一偏波のデータは2パルス毎（約7.1 msec）に得られる。M T I フィルタではこの様にして得られる各偏波のデータを別々に取り扱っているため、近距離（40 km以下）においても、パルス間の相関によるM T I フィルタ出力値の低下は従来に比べて少なくなっていると考えられる。図-2.

8に運用パターン7で観測を行った場合の水平偏波と垂直偏波それぞれにおける受信電力 P_{rN} (ノーマル出力値) と P_{rM} (MTI出力値) の時間変化図及び散布図を示す。

(a), (b) 共に1990年7月2日3時40分～6時50分までの観測データで(a)は距離9km、(b)は距離35km地点のデータを用いている。(a), (b)の散布図を合成したものを(c)に示す。なおデータは $256 \times 9 = 2304$ パルス平均値である。

これらの図から次のことが分かる。

- ①ノーマル出力値とMTI出力値は1対1に良く対応している。
- ②MTI出力値は受信電力値が -67.5 dBm (図では 40 dB)を超えると飽和特性を示す。
- ③ノーマル値とMTI出力値で 4 dB のずれがある。

上記②, ③の原因はそれぞれ次によるものと思われる。

・MTIフィルタの飽和特性は、MTIフィルタ内部において、 $\log$ 値から直線値に変換してMTI出力値を作っているため、直線値でのビット数の不足により生じたものと推測される。

・ノーマル値とMTI値のずれは、当初MTI出力値の調整を行った際に、パルス間の相関が高いデータも含めて平均的にノーマル値とMTI値が等しくなる様に調整を行ったため、今回の様に相関が低い場合にはMTI値がノーマル値より大きく出力されるものと推測される。

なお、この飽和特性は図-2.9に示す受信電力値の頻度分布図からも確かめられる。図が示すようにMTI値は通常の降水エコーの頻度分布とは異なり、ピークより大きい部分に分布の拡がりが見られず、約 45 dB で頭打ちとなっていることが分かる。

次に、ノーマル値とMTI値とから得られる Z_{DR} の比較を行う。図-2.10に Z_H 、 Z_V 、 Z_{DR} についてのノーマル値とMTI値の時間変化図と散布図を示す。(a)は9km地点(b)は35km地点のデータであり、(c)は両者の合成を行った Z_H 、 Z_V 、 Z_{DR} の散布図である。(b)ではノーマル値とMTI値は良く一致しているが、(d)においては逆に負の相関を示している。したがって、全体的には(c)が示す様に Z_{DR} は正の相関部分と負の相関部分を持つ特性となりMTI値では正しく Z_{DR} の測定を行うことができない。

これは次の理由によるものと思われる。

・水平偏波と垂直偏波間で電気的特性(C項、導波管等のロス等)に違いがあるため、 Z_H と Z_V でMTI出力の飽和による特性にずれが生じる。今回の例では Z_H より Z_V の方が飽和レベルが高い。このため、反射因子が大きくなり飽和状態が大きくなるに従って、 Z_H と Z_V の飽和特性の違いによる負の Z_{DR} の測定誤差が増大する。一般に Z_H が大きいほど Z_{DR} も大きくなるため、(a)の様に Z_{DR} が大きくなるに従ってMTI値の Z_{DR} が減少し負の相関を示すものと推測される。

なお、(b)に示す様に反射因子 Z が飽和レベル以下の場合には、ノーマル値とMTI値から算出した Z_{DR} は良く一致する。

飽和状態が大きくなるに従って、 Z_H と Z_V の飽和特性の違いによる負の Z_{DR} の測定誤差が増大する。一般に Z_H が大きいほど Z_{DR} も大きくなるため、(a) の様に Z_{DR} が大きくなるに従って M T I 値の Z_{DR} が減少し負の相関を示すものと推測される。

なお、(b) に示す様に反射因子 Z が飽和レベル以下の場合にはノーマル値と M T I 値から算出した Z_{DR} は良く一致する。

(2) M T I 出力値とノーマル出力値の分散の大きさの比較

レーダで降雨の観測を行う場合、受信電力は統計的にレイリー分布に従って分布する。M T I フィルターは基本的には2つの独立した値の差の値を出力値としているため、M T I 出力値の分布は2つのレイリー分布する値の差の分布となる。単純にガウス分布で考えると、差の分布の分散は、元の分布の2倍となる。従って M T I 出力値の分散は、ノーマル値の分散の2倍程度であると推定できる。

図-2. 11 に運用パターン7-1 (9パルス平均) で観測された降雨からのエコーの頻度分布図を示す。(a) は水平偏波におけるノーマル値、(b) は水平偏波における M T I 値、(c) は垂直偏波におけるノーマル値、(d) は垂直偏波における M T I 値のものである。また、M T I フィルタの飽和を避けるため、平均値 -82.5 dBm (25 dB) 付近のデータを用いている。この図から M T I 値はノーマル値のより分散が大きいことがわかる。表-2. 3 にノーマル値、M T I 値それぞれの平均値と分散及び M T I 値とノーマル値の分散の比を示す。

表-2. 3 ノーマル値と M T I 値の受信電力 ($S_{\min} = -107.5 \text{ dBm}$) の平均と分散

No	観測日時	データ数	平均値 (dB)		分散 (dB^2)		σ_N^2 / σ_M^2	
			ノーマル	M T I	ノーマル	M T I		
1	1990.7.2 03:40~	512	25.4	29.4	33.0	41.3	1.40	水平偏波
	03:41		23.0	27.3	48.3	65.4	1.34	垂直偏波
2	1990.7.2 03:40~	5888	25.7	29.7	35.6	51.9	1.46	水平偏波
	03:50		23.5	27.5	37.8	54.8	1.45	垂直偏波
3	1990.7.2 03:40~	12032	25.0	28.9	66.6	84.7	1.27	水平偏波
	04:00		22.5	26.5	66.9	91.3	1.36	垂直偏波
4	1990.7.2 06:00~	768	25.0	28.9	37.3	49.9	1.34	水平偏波
	06:01		25.0	29.0	33.8	49.8	1.47	垂直偏波

この結果から M T I 値とノーマル値の分散の比は約 1.3 ~ 1.5 倍程度であることが分かる。このことは M T I 出力値を用いてノーマル値と同程度の精度で降雨量を算出するには、最大で約 1.5 倍程度のデータを取得する必要があることを示している。

(3) G. C の除去能力

MTI 出力値に G. C の消え残りが含まれている場合には、G. C の大きさが水平偏波と垂直偏波で等しい場合には Z_{DR} の算出に際しては、互いにキャンセルされて問題はないが偏波によって異なる場合には重要な問題となる。

(4) G. C 除去後の値の精度

降雨エコーに G. C エコーが重なった場合には受信電力の分布はレイリー分布からレイリーガウス分布へと変化する。このため MTI 出力値は図-2.11 の様に ± 1.8 dB の範囲で変化する。G. C が水平偏波と垂直偏波で等しい場合には Z_{DR} の算出ではその効果はキャンセルされるが、異なる場合には最大で 3.7 dB の Z_{DR} 測定誤差が生じることになる。

2.2.3 まとめ

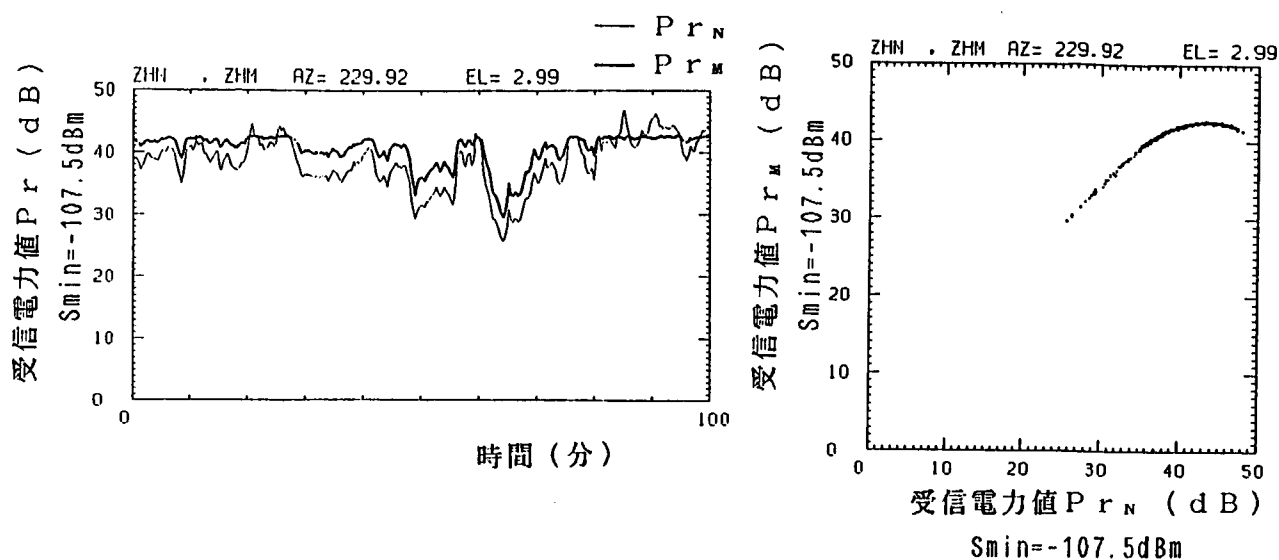
直交二偏波レーダでは水平・垂直偏波間の差が降雨強度算出精度に影響を及ぼす。しかし、水平・垂直偏波間で共通する誤差は互いに打ち消されて、 Z_{DR} の値には表れない。従って、MTI フィルタが Z_{DR} の測定に及ぼす影響は次の点に示ばられてくる。

① MTI フィルタを用いる事によりデータの分散が約 1.5 倍程度となるため、データ取得時間も約 1.5 倍程度必要となる。

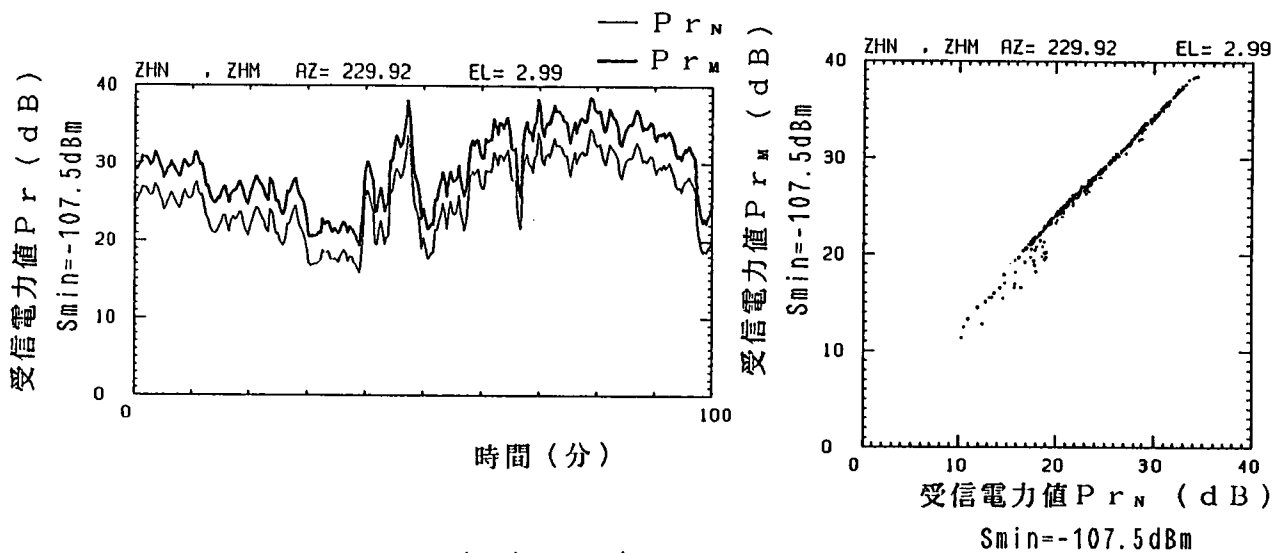
② 水平・垂直偏波間で電気的特性に相違がある場合には、MTI フィルタの飽和特性が Z_{DR} の値に大きく関与してくる。

③ G. C が偏波面によって異なる場合には、G. C の消え残り及びレイリーガウス分布への移行による誤差が Z_{DR} の測定誤差をもたらす。

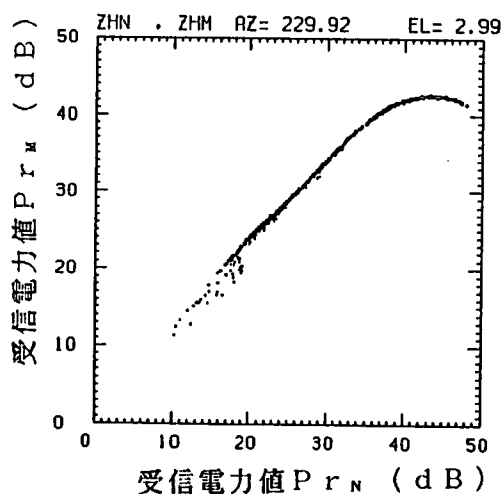
これらのうち、②については水平偏波と垂直偏波で電気的特性を等しくするか、あるいは MTI フィルタが飽和しないようにする必要がある。また、③については更に G. C の偏波特性の調査を行い、 Z_{DR} への影響の大きさを評価する必要がある。



(a) レンジ No. 18



(b) レンジ No. 70



(c) (a) と (b) の合成

図-2.8 ノーマル値とMTI値(受信電力)の時間変化図および散布図(1.)
(水平偏波, 観測日時: 1990年7月2日3時40分~6時50分)

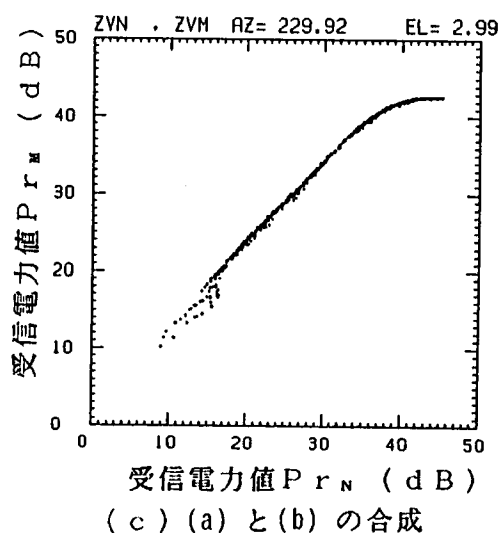
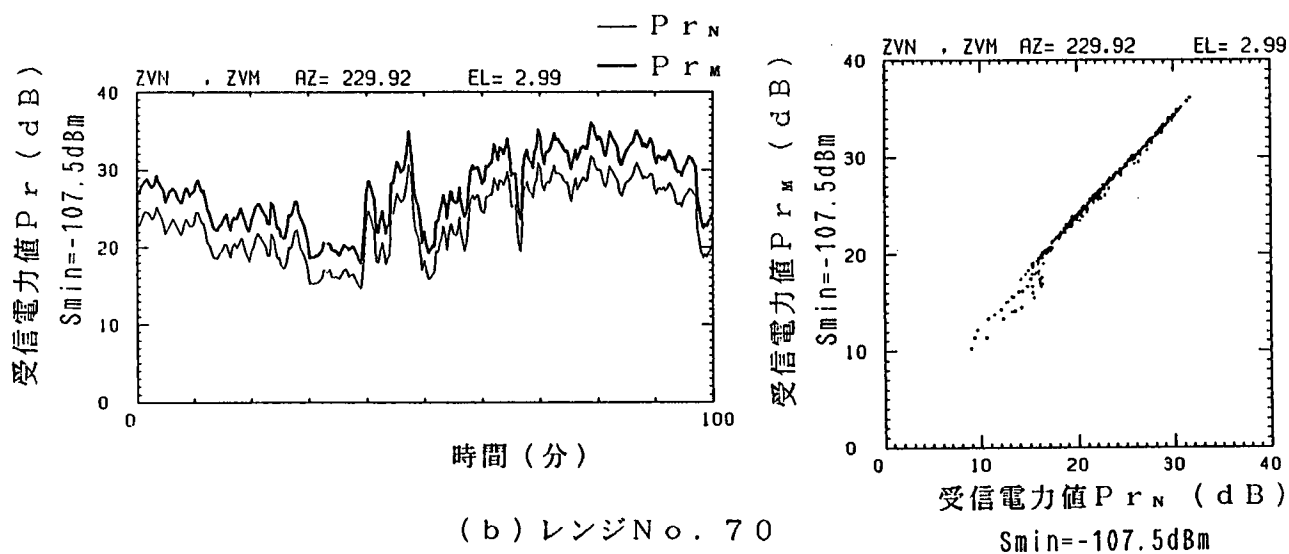
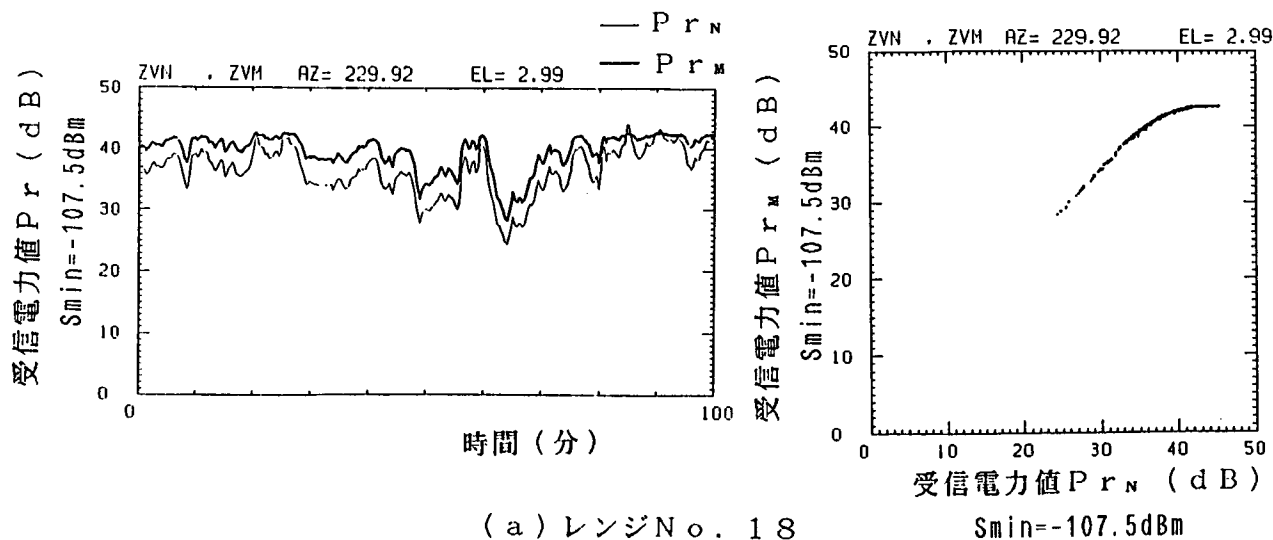
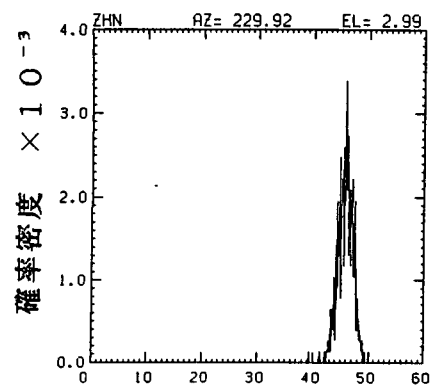
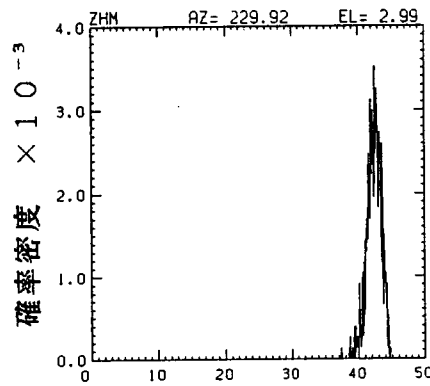


図-2.8 ノーマル値とMTI値(受信電力)の時間変化図および散布図(2)
(垂直偏波, 観測日時: 1990年7月2日3時40分~6時50分)



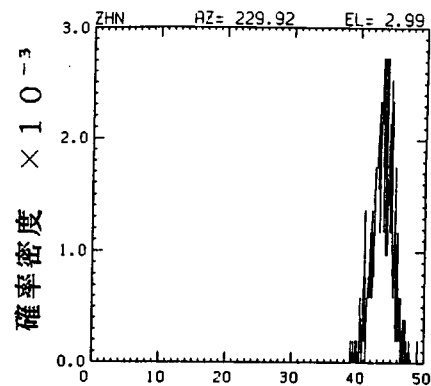
受信電力値 $P r_N$ (dB)

ノーマル値, 水平偏波



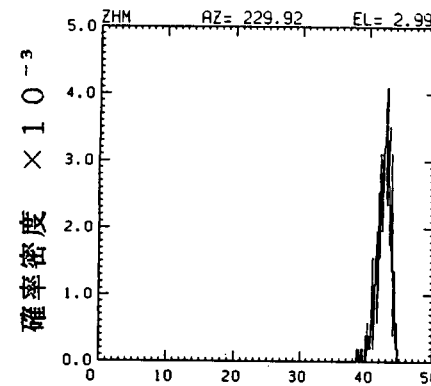
受信電力値 $P r_M$ (dB)

MTI 値, 水平偏波



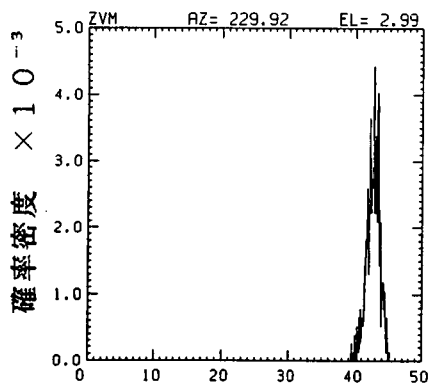
受信電力値 $P r_N$ (dB)

ノーマル値, 水平偏波



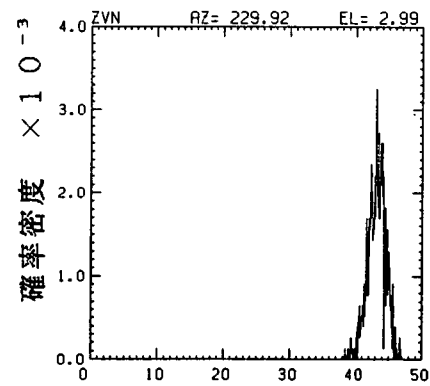
受信電力値 $P r_M$ (dB)

MTI 値, 水平偏波



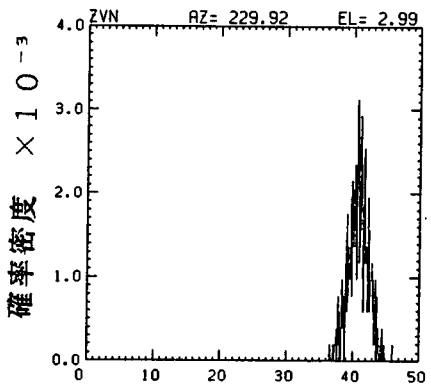
受信電力値 $P r_N$ (dB)

ノーマル値, 垂直偏波



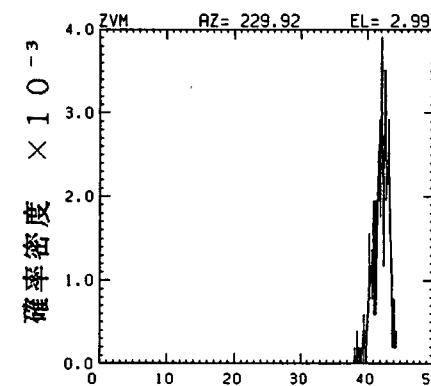
受信電力値 $P r_M$ (dB)

MTI 値, 垂直偏波



受信電力値 $P r_N$ (dB)

ノーマル値, 垂直偏波



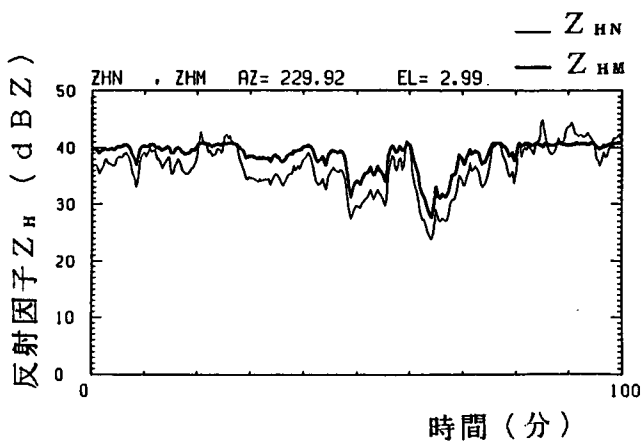
受信電力値 $P r_M$ (dB)

MTI 値, 垂直偏波

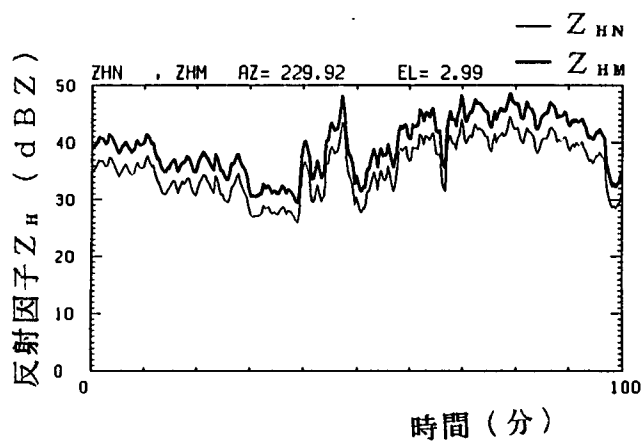
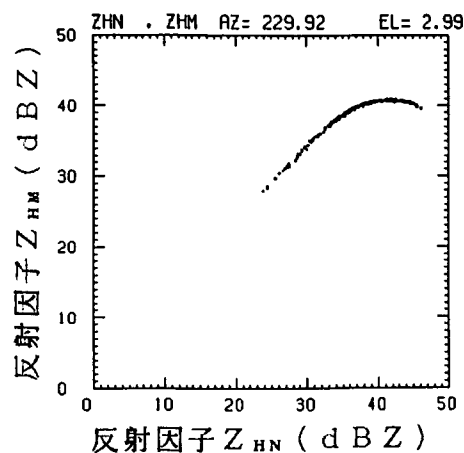
(a) 1990. 7. 2 06:00 距離 9 km

(b) 1990. 7. 2 06:40 距離 9 km

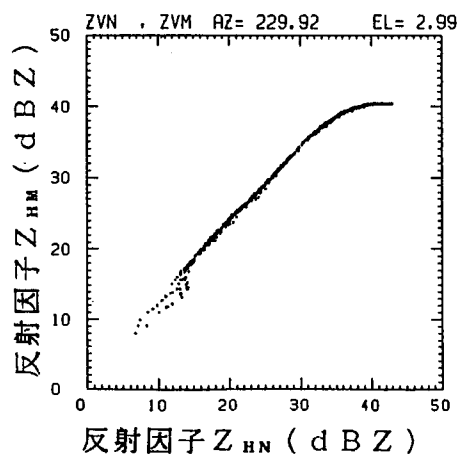
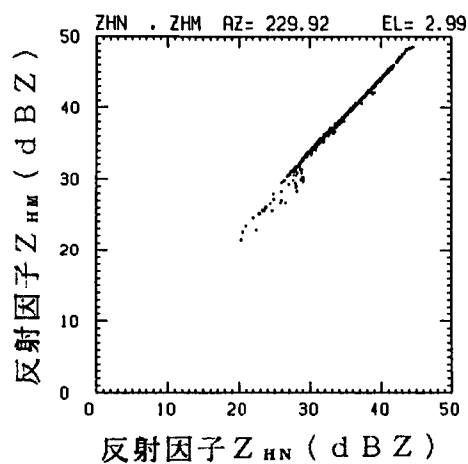
図-2.9 ノーマル値とMTI値(受信電力)の頻度分布図



(a) レンジNo. 18

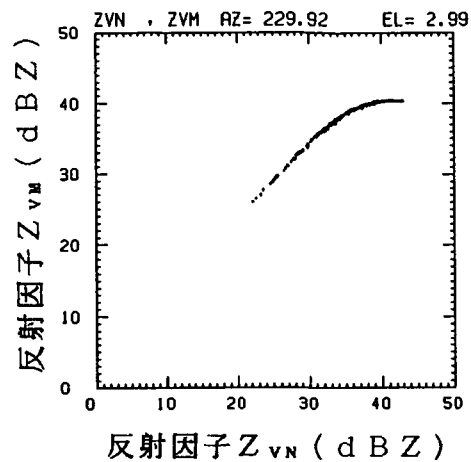
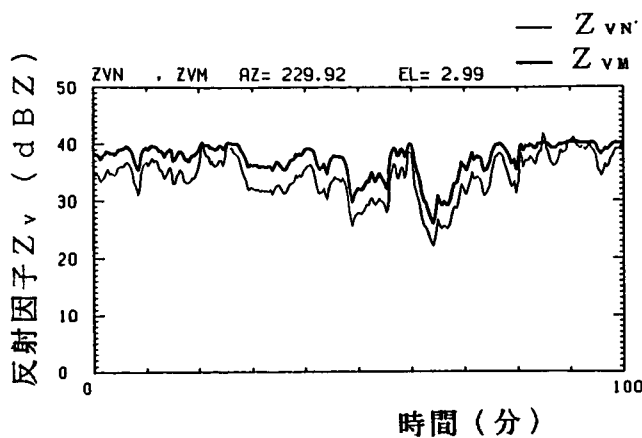


(b) レンジNo. 70

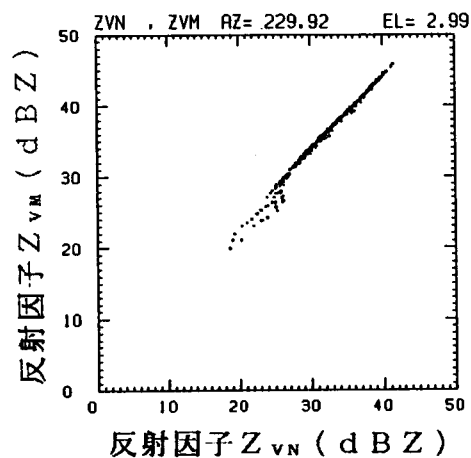
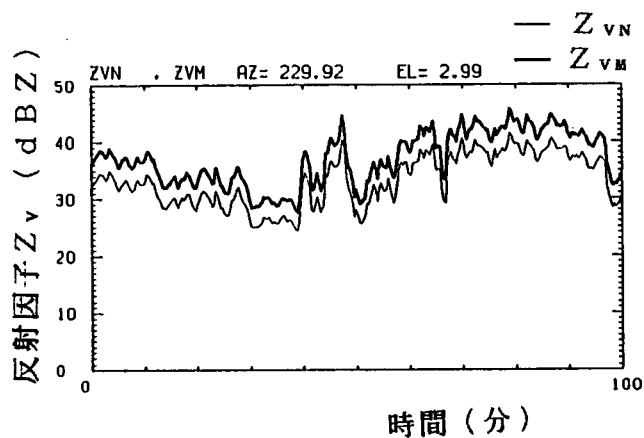


(c) (a) と (b) の合成

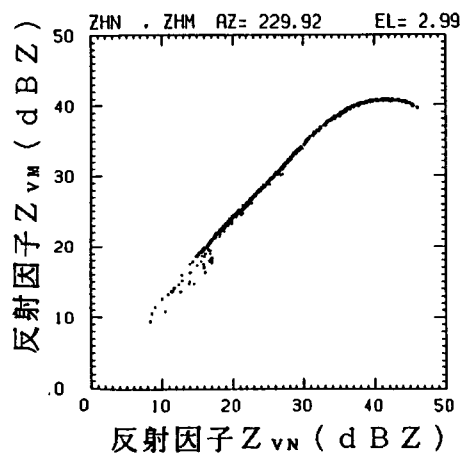
図-2.10 ノーマル値とMTI値(反射因子)の時間変化図および散布図(1)
(水平偏波, 観測日時: 1990年7月2日3時40分~6時50分)



(a) レンジNo. 18

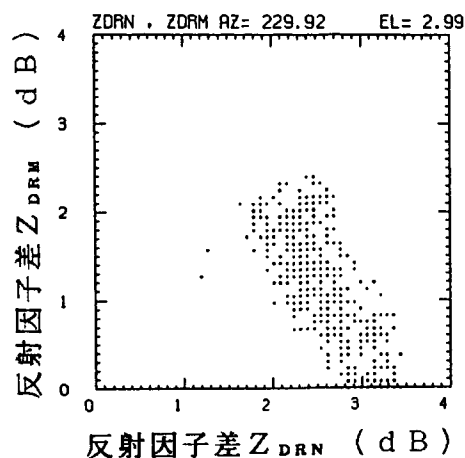
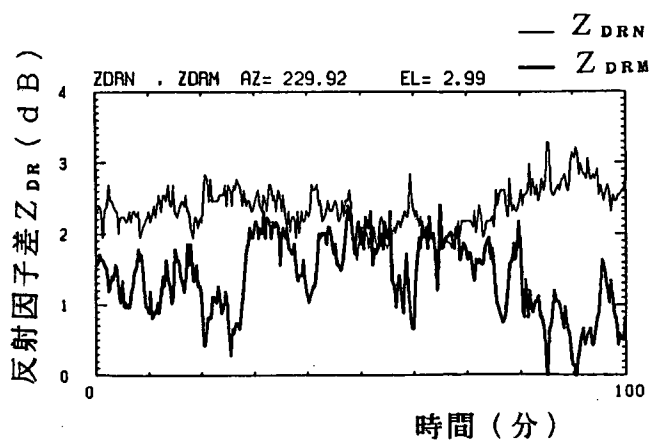


(b) レンジNo. 70

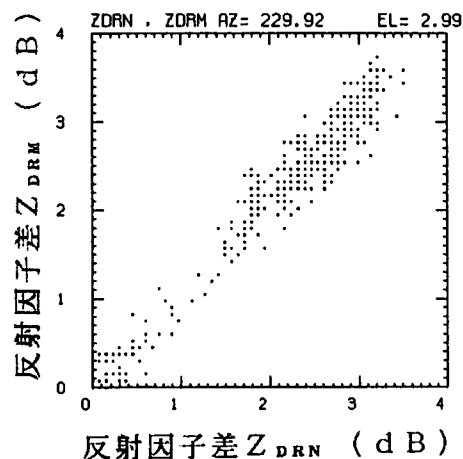
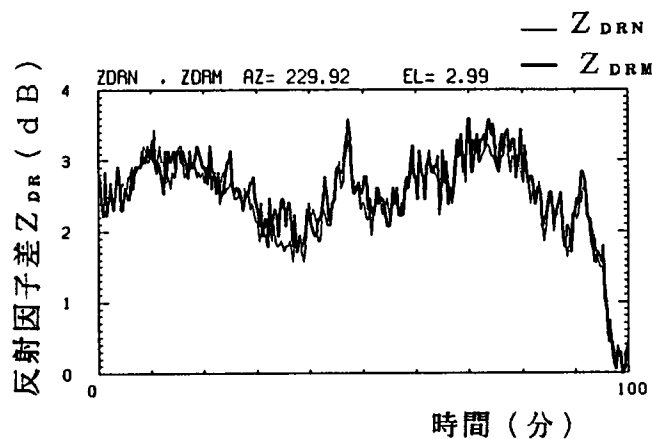


(c) (a) と (b) の合成

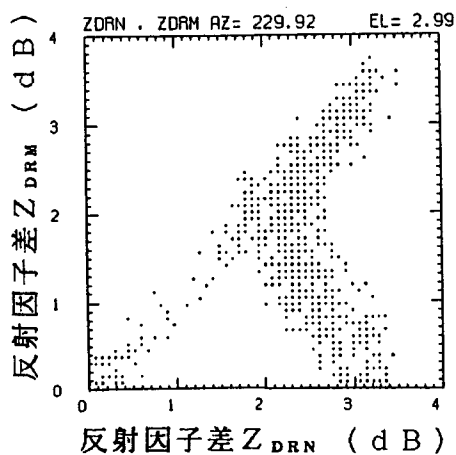
図-2.10 ノーマル値とMTI値(反射因子)の時間変化図および散布図(2)
(水平偏波, 観測日時: 1990年7月2日3時40分~6時50分)



(a) レンジNo. 18

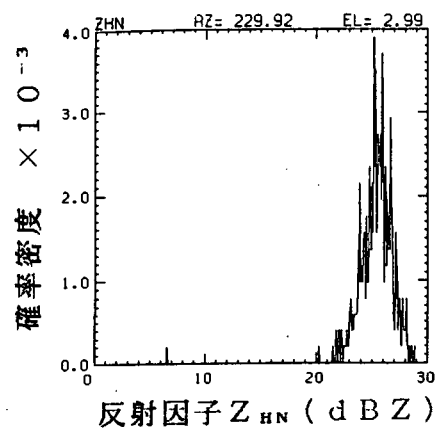


(b) レンジNo. 70

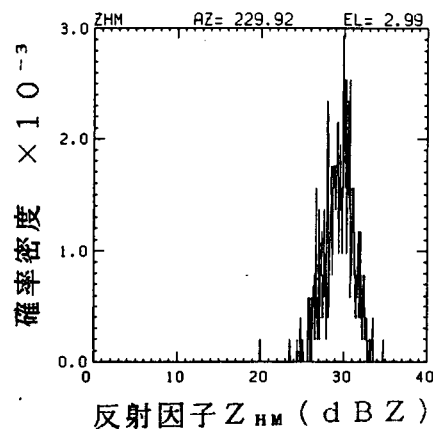


(c) (a) と (b) の合成

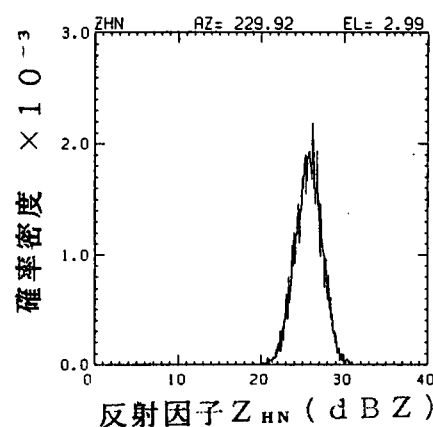
図-2. 10 ノーマル値とMTI値(反射因子)の時間変化図および散布図(3)
(水平偏波, 観測日時: 1990年7月2日3時40分~6時50分)



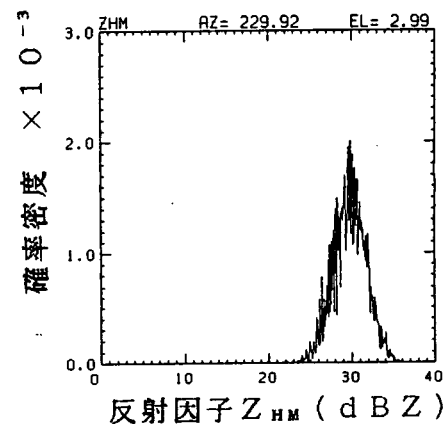
① ノーマル値, 水平偏波



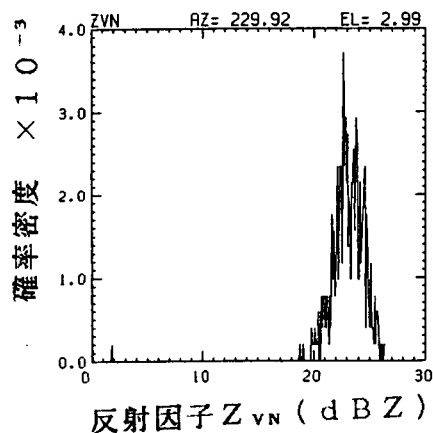
② MTI 値, 水平偏波



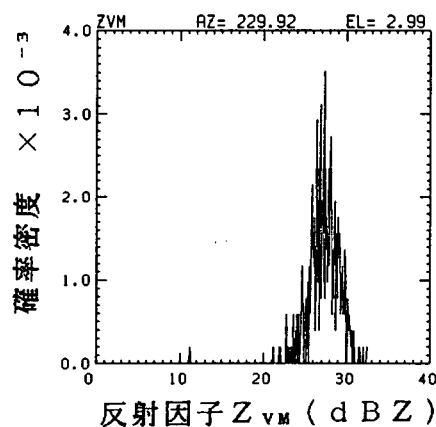
① ノーマル値, 水平偏波



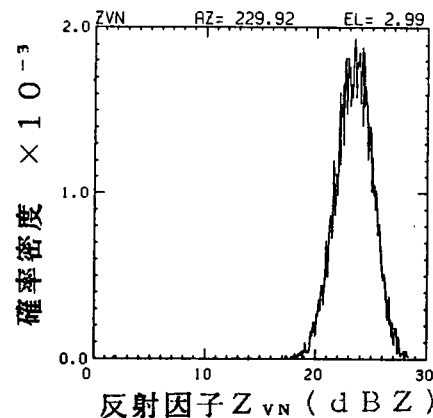
② MTI 値, 水平偏波



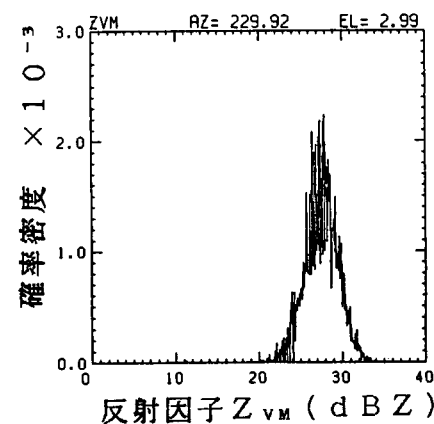
③ ノーマル値, 垂直偏波



④ MTI 値, 垂直偏波



③ ノーマル値, 垂直偏波

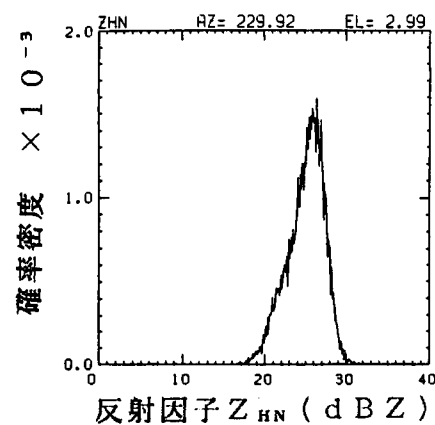


④ MTI 値, 垂直偏波

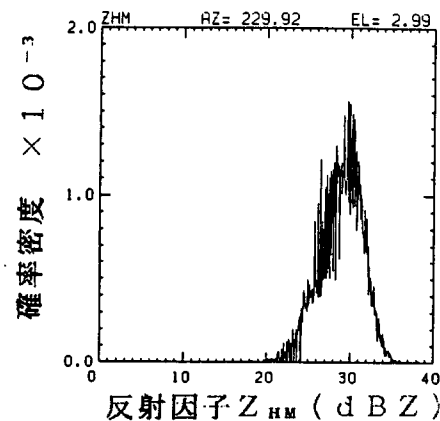
(a) 1990.7.2 03:40~03:41 距離 35 km

(b) 1990.7.2 03:40~03:50 距離 35 km

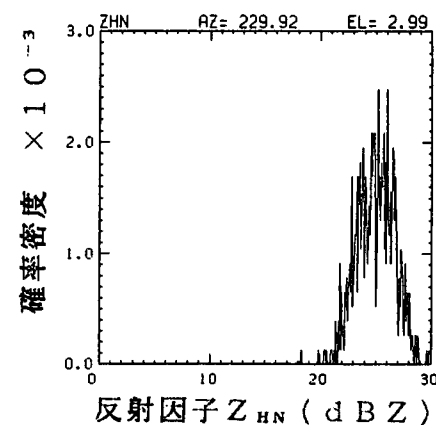
図-2.11 ノーマル値とMTI値(受信電力)の頻度分布図



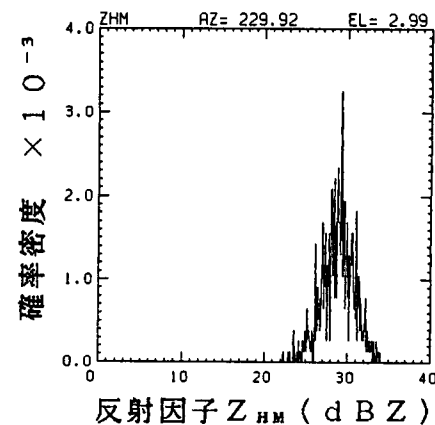
① ノーマル値, 水平偏波



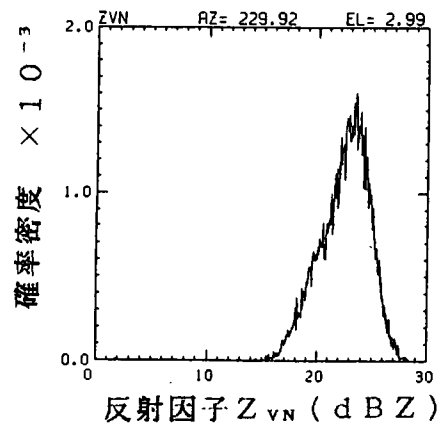
② MTI 値, 水平偏波



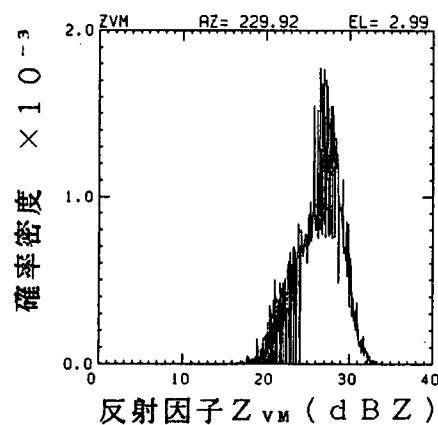
① ノーマル値, 水平偏波



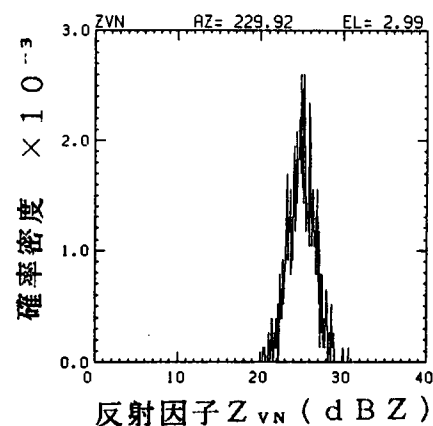
② MTI 値, 水平偏波



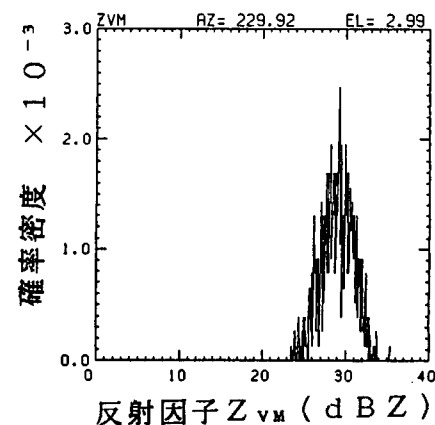
③ ノーマル値, 垂直偏波



④ MTI 値, 垂直偏波



③ ノーマル値, 垂直偏波



④ MTI 値, 垂直偏波

(c) 1990.7.2 03:40~04:00 距離 35 km

(d) 1990.7.2 06:00~06:01 距離 35 km

第3章 直交二偏波レーダによる 降雨強度の測定精度

3. 1 はじめに

従来のレーダによる方法（経験式 $Z = B R^\beta$ を用いる、以下「 $B\beta$ 法」と呼ぶ）と直交二偏波レーダによる方法（粒径分布を推定し降雨強度を計算する、以下「 Z_{DR} 法」と呼ぶ）によりレーダ雨量を計算し、両者の測定精度について検討した。

また、レーダによる降雨観測においては、特に強降雨時において、雨滴による到達電波の減衰が問題となる。この雨滴による減衰を正確に把握できれば観測精度を向上させることができる。減衰量は、降雨強度すなわち雨滴の粒径分布に関係する。直交二偏波レーダでは、レーダ観測値から雨滴の粒径分布が計算できるので、それを用いて正確な降雨減衰量を求めることが可能である。ここでは、降雨減衰の影響をレーダ方程式に導入した場合の降雨観測精度についても併せて報告する。

3. 2 簡易 Z_{DR} 法による降雨強度の計算手法

直交二偏波レーダの反射因子差 Z_{DR} を用いて降雨強度に変換する方法は、次の3つがある。

①理論式を用いる方法

この方法は、理論式から厳密に降雨強度を求めるものである。すなわち、雨滴の粒径分布を

$$N(D) = N_0 \cdot D^n \cdot \exp(-\Lambda \cdot D) \quad (3.1)$$

で表せると仮定し、レーダ測定値 Z_H 、 Z_{DR} から定数 N_0 、 Λ を推定することにより空間の雨滴の粒径分布が推定できる。粒径分布がわかれば、次式により降雨強度が計算できる。

$$R = C \int_0^{D_{\max}} (D/2)^3 \cdot N(D) \cdot V(D) dD \quad (3.2)$$

②経験式を用いる方法

この方法は、 $B\beta$ 法と同様に、地上値を用いて換算式の定数を定めるものである。換算式は、次式で表される。

$$R = a \cdot Z_{DR}^b \cdot Z_H \quad (3.3)$$

この式は、 $B\beta$ 法の換算式の形にすると

$$Z_H = B \cdot R^\beta \quad (3.4)$$

ここに、

$$B = a^{-1} \cdot Z_{DR}^{-b}$$

$$\beta = 1.0$$

となる。

定数 a , b は、デスドロメーターによる粒径分布の測定結果から決定することができる。

③ $B \sim Z_{DR}$ (理論的關係) を用いる方法

この方法は、上記 2 つの方法の中間的な方法である。すなわち、理論計算から B と Z_{DR} の關係をあらかじめ求めておき、(3.4)式により計算するというものである。

①の方法を用いると最も正確に降雨強度が計算できるが、計算が複雑で時間もかかり、実運用での使用を考慮すると、あまり良い方法ではない。②の方法は、計算は簡単であるが、地上値を用いて定数を定めることになるので、従来の $B\beta$ 法と同じリスクを負うことになる。③の方法は、理論計算結果を用いて近似式を作成しておく方法であるので、①、②両方の利点を持つことになる。

ここでは、③の方法により降雨強度等を計算する方法について検討した結果について報告する。

3. 2. 1 降雨強度の計算

デスドロメーターの測定結果 (1988年～1990年の九州での測定データのうち、大川出張所での観測データを除く全データ) を用いて $Z_H \sim R$ 關係を求めると図-3. 1 のようになる。これから、 $B\beta$ 法の定数が、 $B = 221.3$ 、 $\beta = 1.31$ と計算できる (図の点線)。この値を用いて経験式 $Z_H = BR^\beta$ により降雨強度を計算しても、点のばらつき分が全て計算誤差となる。観測値がばらつく主な原因は、雨滴の粒径分布の影響である。

デスドロメーターの測定結果から計算される Z_{DR} の値を用いて、 Z_{DR} ごとの $Z_H \sim R$ 關係を求めた結果が、図中の実線である。これらの $B\beta$ の値は次のとおりである。

$$Z_{DR} = 0.1 \text{ dB} : B = 72.01, \beta = 0.962$$

$$Z_{DR} = 0.5 \text{ dB} : B = 307.95, \beta = 1.025$$

$$Z_{DR} = 1.0 \text{ dB} : B = 647.86, \beta = 1.047$$

$$Z_{DR} = 1.5 \text{ dB} : B = 1037.40, \beta = 1.011$$

これから、 Z_{DR} が一定の状態、すなわち粒径分布が同じ状態では、 β の値はほぼ 1.0 になることがわかる。

同様の關係を理論計算により求めることができる。図-3. 2 にその結果を示す。この図は、粒径分布を仮定 ((3.1)式で $m = 2$ とした分布形) し、 $D_{max} = 7 \text{ mm}$ として理論計算した結果である。点線は、図-3. 1 で示した $Z_H \sim R$ 關係 ($B = 221.3$ 、 $\beta = 1.31$) である。この図からもある Z_{DR} に対して、 $Z_H = BR^{1.0}$ の關係があることがわかる。

B と Z_{DR} の關係を求めると図-3. 3 のようになる。關係式は次式で表し、 m ごとの定数 a , b の値は表-3. 1 のとおりである。

$$B = 10.0^a \cdot Z_{DR}^b \quad (3.5)$$

この關係式を用いて、 $Z_H = BR$ から近似的に降雨強度が計算できる。

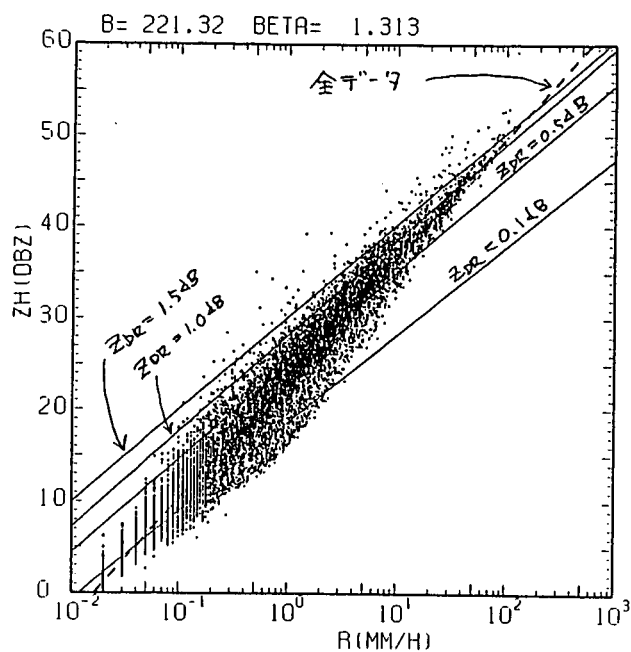


図 - 3. 1 $Z_H \sim R$ 関係

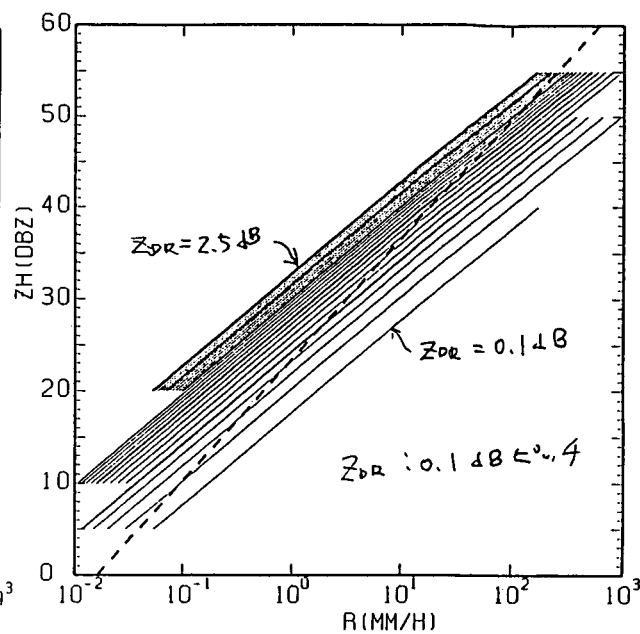
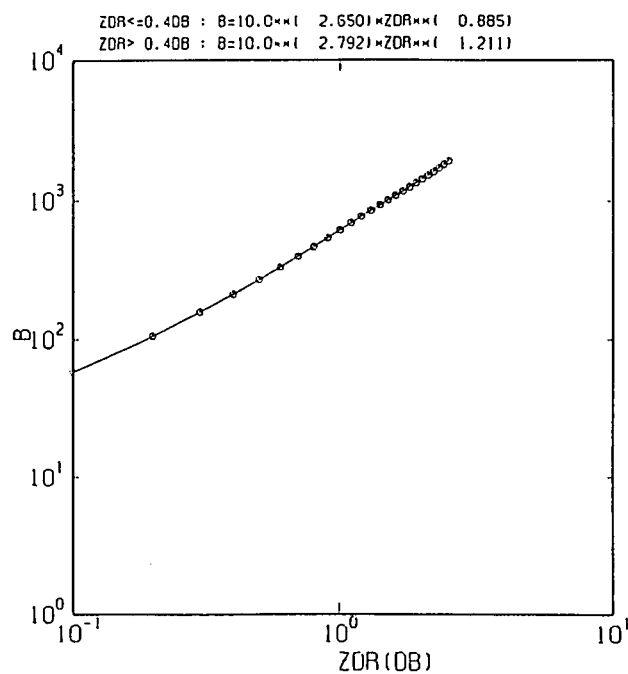
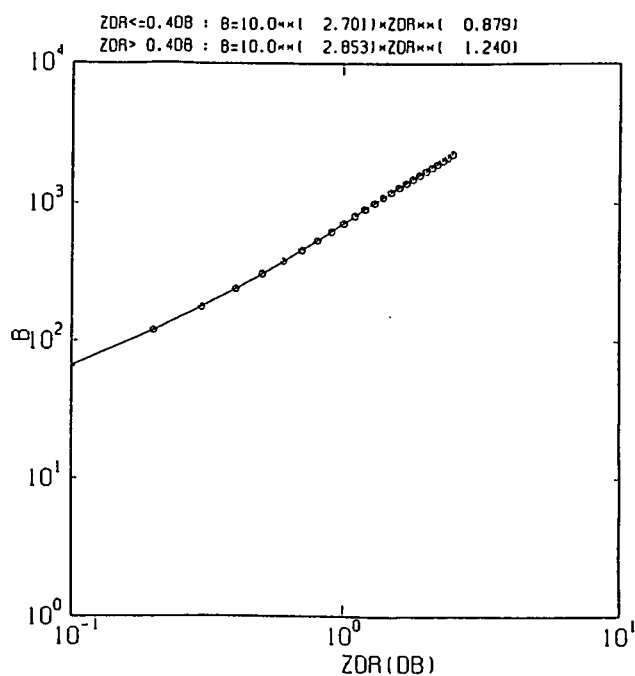


図 - 3. 2 $Z_H \sim R$ 関係 (理論値)



(a) $m = 2$



(b) $m = 5$

図 - 3. 3 $B \sim Z_{DR}$ 関係

表 - 3. 1 $B = 10^a \cdot Z_{DR}^b$

m	$Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB}$		$Z_{DR} > 0.4 \text{ dB}$	
	a	b	a	b
0	2 . 5 8 8	0 . 8 8 7	2 . 7 1 9	1 . 1 8 6
1	2 . 6 2 3	0 . 8 8 6	2 . 7 6 0	1 . 1 9 9
2	2 . 6 5 0	0 . 8 8 5	2 . 7 9 2	1 . 2 1 1
3	2 . 6 7 1	0 . 8 8 3	2 . 8 1 6	1 . 2 2 1
4	2 . 6 8 8	0 . 8 8 1	2 . 8 3 7	1 . 2 3 1
5	2 . 7 0 1	0 . 8 7 9	2 . 8 5 3	1 . 2 4 0
6	2 . 7 1 3	0 . 8 7 8	2 . 8 6 7	1 . 2 4 7
7	2 . 7 2 2	0 . 8 7 7	2 . 8 7 9	1 . 2 5 4
8	2 . 7 3 1	0 . 8 7 6	2 . 8 8 9	1 . 2 6 1

3. 2. 2 平均粒径 D_0 の計算

デイスドロメーターによる測定結果を用いて、 $D_0 \sim Z_{DR}$ 関係を求めると図-3. 4 のようになる。これから、次の関係が得られた。

$$D_0 = 1.64 \cdot Z_{DR}^{0.412} \quad (3.6)$$

理論計算においても、同様の関係を求めることができる。図-3. 5 に $D_0 \sim Z_{DR}$ ($m = 2$ 、 $D_{max} = 7 \text{ mm}$) 関係を、表-3. 2 に m ごとの定数の値を示す。

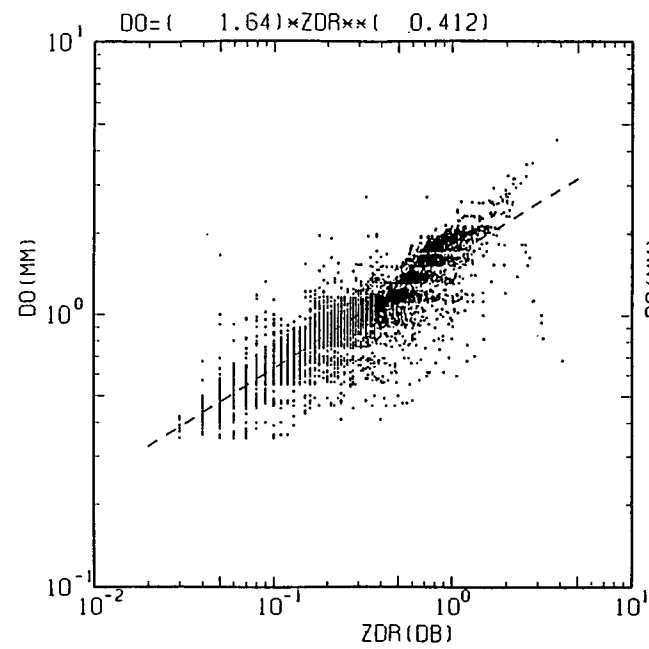


図-3. 4 $D_0 \sim Z_{DR}$ 関係

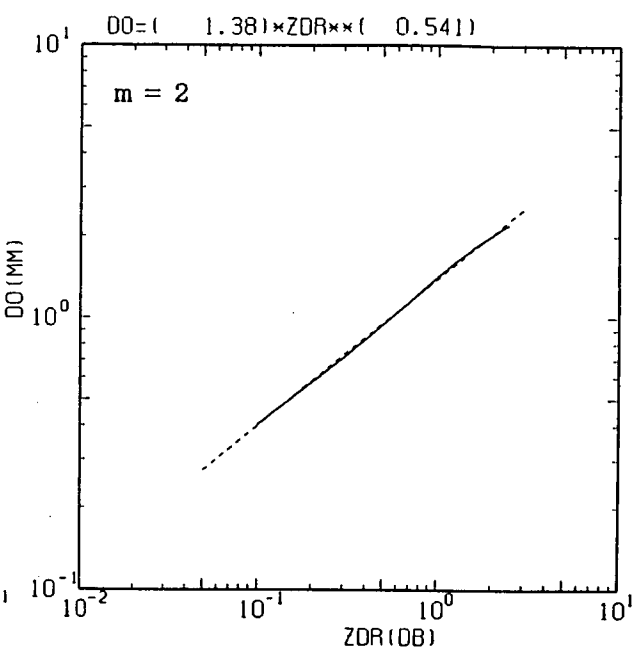


図-3. 5 $D_0 \sim Z_{DR}$ 関係

表-3. 2 $D_0 = a \cdot Z_{DR}^b$ (mm)

m	a	b
0	1.12	0.545
1	1.27	0.542
2	1.38	0.541
3	1.48	0.539
4	1.56	0.539
5	1.62	0.539
6	1.68	0.539
7	1.73	0.539
8	1.62	0.539

3. 2. 3 粒径分布の計算

雨滴の粒径分布を(3.1)式で表せると仮定したときに、 N_0 、 Λ の値を近似的に計算する方法を示す。

N_0 、 Λ の近似計算式は、次式で表した。

$$Z_H / N_0 = 10.0^a \cdot Z_{DR}^b \quad (3.7.a)$$

$$\Lambda = 10.0^a \cdot Z_{DR}^b \quad (3.7.b)$$

これらの関係を理論計算で求めると図-3. 6 ($m=2$ 、5、 $D_{max}=7\text{ mm}$) のようになる。また、定数の値を表-3. 3に示す。

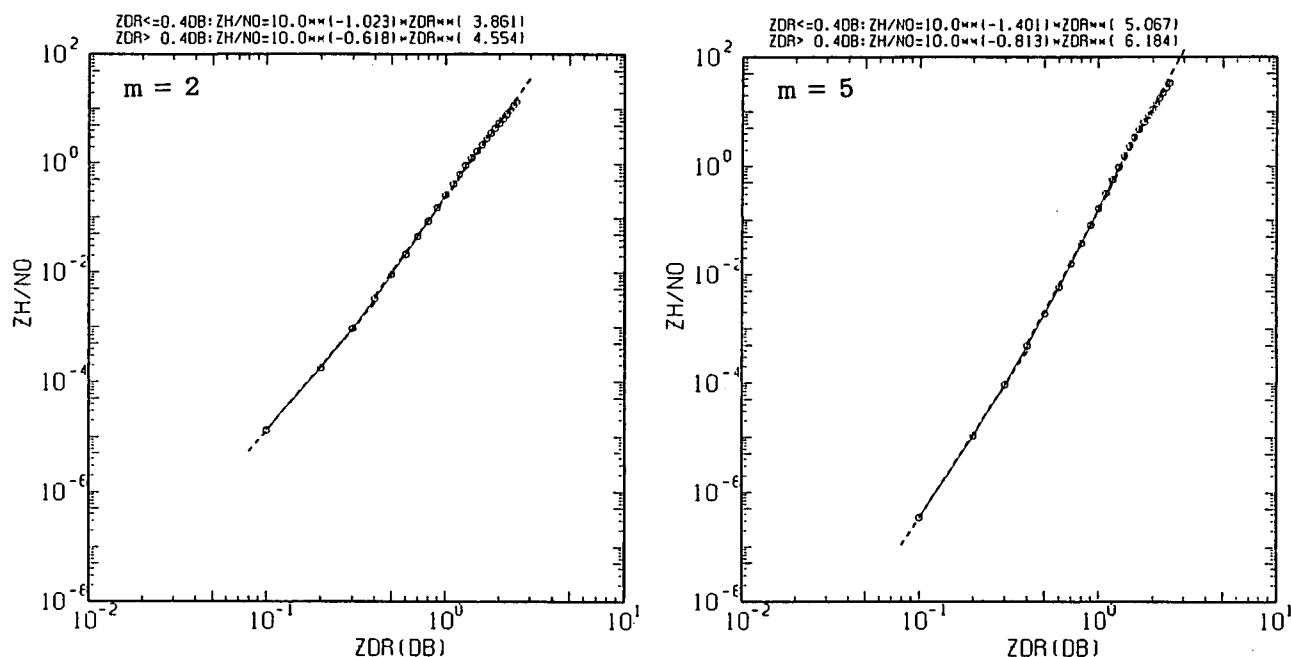


図-3. 6(a) $Z_H / N_0 \sim Z_{DR}$ 関係

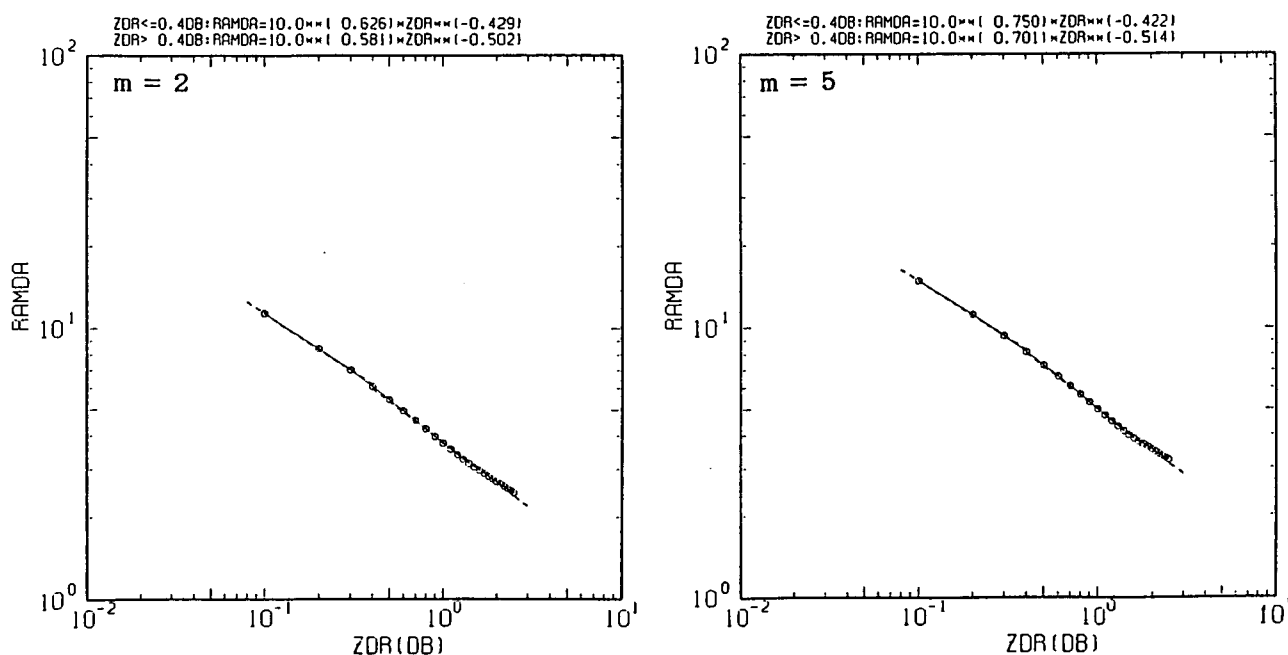


図-3. 6(b) $\Lambda \sim Z_{DR}$ 関係

表 - 3. 3 (a) $Z_H / N_0 = 10^a \cdot Z_{DR}^b$

m	$Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB}$		$Z_{DR} > 0.4 \text{ dB}$	
	a	b	a	b
0	- 0 . 7 6 1	3 . 0 5 1	- 0 . 4 7 3	3 . 5 1 1
1	- 0 . 8 9 4	3 . 4 5 6	- 0 . 5 4 8	4 . 0 2 7
2	- 1 . 0 2 3	3 . 8 6 1	- 0 . 6 1 8	4 . 5 5 4
3	- 1 . 1 5 1	4 . 2 6 4	- 0 . 6 8 6	5 . 0 9 1
4	- 1 . 2 7 6	4 . 6 6 6	- 0 . 7 5 0	5 . 6 3 5
5	- 1 . 4 0 1	5 . 0 6 7	- 0 . 8 1 3	6 . 1 8 4
6	- 1 . 5 2 4	5 . 4 6 9	- 0 . 8 7 5	6 . 7 3 9
7	- 1 . 6 4 5	5 . 8 6 9	- 0 . 9 3 5	7 . 2 9 7
8	- 1 . 7 6 6	6 . 2 7 0	- 0 . 9 9 4	7 . 8 5 8

表 - 3. 3 (b) $\Lambda = 10^a \cdot Z_{DR}^b$

m	$Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB}$		$Z_{DR} > 0.4 \text{ dB}$	
	a	b	a	b
0	0 . 5 1 7	- 0 . 4 3 6	0 . 4 7 7	- 0 . 4 9 3
1	0 . 5 7 5	- 0 . 4 3 2	0 . 5 3 2	- 0 . 4 9 7
2	0 . 6 2 6	- 0 . 4 2 9	0 . 5 8 1	- 0 . 5 0 2
3	0 . 6 7 1	- 0 . 4 2 6	0 . 6 2 5	- 0 . 5 0 6
4	0 . 7 1 2	- 0 . 4 2 4	0 . 6 6 5	- 0 . 5 1 0
5	0 . 7 5 0	- 0 . 4 2 2	0 . 7 0 1	- 0 . 5 1 4
6	0 . 7 8 5	- 0 . 4 2 1	0 . 7 3 5	- 0 . 5 1 7
7	0 . 8 1 7	- 0 . 4 1 9	0 . 7 6 6	- 0 . 5 2 1
8	0 . 8 4 7	- 0 . 4 1 8	0 . 7 9 5	- 0 . 5 2 4

3. 2. 4 減衰量の計算

減衰を考慮する場合のレーダ方程式は、次式で表される。

$$P_r = \frac{C \cdot F \cdot Z}{r^2} \cdot 10^{-K/10} \quad (3.8)$$

$$K = 2 \int_0^r (K_a + K_r + K_c) dr \quad (dB)$$

ここに、 P_r ：受信電力， C ， F ：定数， Z ：レーダ反射因子， r ：レーダサイトからの距離， K_a ：大気による減衰， K_r ：雨滴による減衰， K_c ：雲による減衰

また、 C バントレーダの場合は、 K_a ， K_c は K_r に比べて小さいので省略できる。

雨滴による減衰 K_r (dB/km) は、次式により計算される。

$$K_{rH,U} = 0.4343 \int_0^{D_{max}} N(D) \cdot Q_{tH,U}(D) dD \quad (3.9)$$

ここに、 N ：雨滴の粒径分布 ($個/mm/m^3$)， Q_t ：全吸収断面積 (散乱の断面積と吸収の断面積を合わせたもの， cm^2)

$Q_{tH,U}$ については、雨滴の形状を与えれば理論計算により求めることができる (本研究では、郵政省通信総合研究所の小口氏から頂いた計算プログラムにより計算した)。 N については、直交二偏波レーダによる観測値 Z_H ， Z_{DR} から計算できる。

したがって、 $K_{rH,U}$ は、 $Z_{H,U}$ と Z_{DR} の関数として表すことができる。理論計算により、 $Z_H (Z_U) \sim Z_{DR} \sim K_r$ の関係を求めた結果 (粒径分布式の $m=2$ ， $D_{max}=7mm$) を図-3.7に示す。これから、 $Z_{H,U} = C_{H,U} \cdot K_{rH,U}$ の関係で表せることがわかった。図-3.8に C と Z_{DR} との関係を示す。この図から、次の近似計算式が得られた。他の m に対する $C_{H,U}$ については、表-3.4に示す。これらから、減衰量が簡単に計算できる。

$$Z_{H,U} = C_{H,U} \cdot K_{rH,U} \quad (3.10)$$

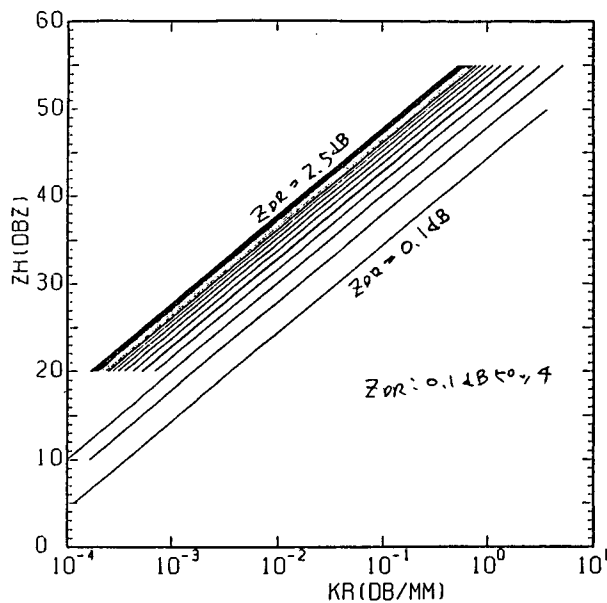
ここに、

$$C_H = 10^{5.616} \cdot Z_{DR}^{1.178} \quad (Z_{DR} \leq 1.1 dB)$$

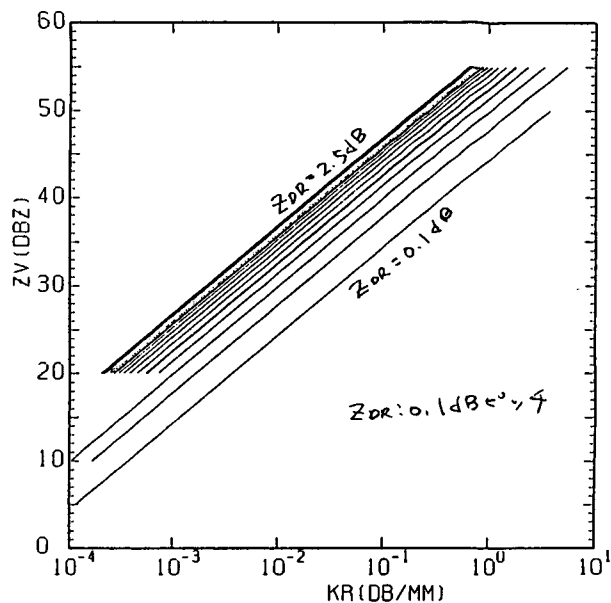
$$C_H = 10^{5.651} \cdot Z_{DR}^{0.323} \quad (Z_{DR} > 1.1 dB)$$

$$C_U = 10^{5.572} \cdot Z_{DR}^{1.134} \quad (Z_{DR} \leq 1.1 dB)$$

$$C_U = 10^{5.616} \cdot Z_{DR}^{0.200} \quad (Z_{DR} > 1.1 dB)$$

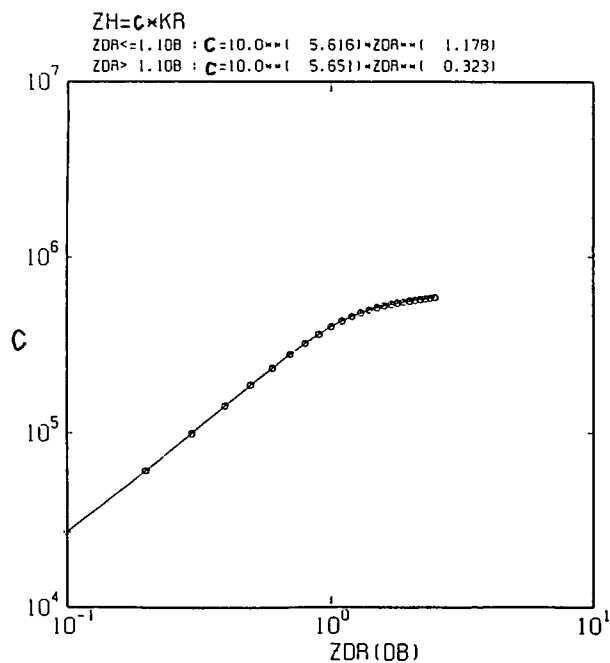


(a) $Z_H \sim Z_{DR} \sim K_r$ 関係

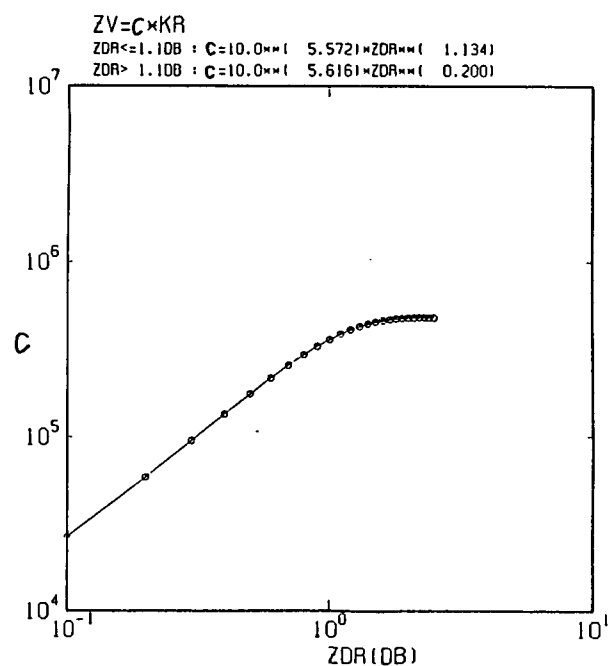


(b) $Z_V \sim Z_{DR} \sim K_r$ 関係

図-3.7 Z , Z_{DR} , K_r の関係



(a) $C_H \sim Z_{DR}$ 関係



(b) $C_V \sim Z_{DR}$ 関係

図-3.8 Z_{DR} と C の関係

表 - 3. 4 (a) $C = 10^a \cdot Z_{DR}^b$ ($Z_H = C \cdot K_R$)

m	$Z_{DR} \leq 1.1 \text{ dB}$		$Z_{DR} > 1.1 \text{ dB}$	
	a	b	a	b
0	5. 5 3 4	1. 2 3 0	5. 5 6 3	0. 4 9 2
1	5. 5 8 2	1. 2 0 2	5. 6 1 4	0. 3 9 6
2	5. 6 1 6	1. 1 7 8	5. 6 5 1	0. 3 2 3
3	5. 6 4 1	1. 1 5 7	5. 6 7 9	0. 2 6 3
4	5. 6 6 0	1. 1 4 0	5. 7 0 1	0. 2 1 4
5	5. 6 7 5	1. 1 2 6	5. 7 2 0	0. 1 7 1
6	5. 6 8 7	1. 1 1 4	5. 7 3 5	0. 1 3 4
7	5. 6 9 7	1. 1 0 3	5. 7 4 8	0. 1 0 2
8	5. 7 0 6	1. 0 9 4	5. 7 5 9	0. 0 7 3

表 - 3. 4 (b) $C = 10^a \cdot Z_{DR}^b$ ($Z_U = C \cdot K_R$)

m	$Z_{DR} \leq 1.1 \text{ dB}$		$Z_{DR} > 1.1 \text{ dB}$	
	a	b	a	b
0	5. 4 8 4	1. 1 8 0	5. 5 2 0	0. 3 4 5
1	5. 5 3 6	1. 1 5 6	5. 5 7 6	0. 2 6 2
2	5. 5 7 2	1. 1 3 4	5. 6 1 6	0. 2 0 0
3	5. 5 9 9	1. 1 1 6	5. 6 4 5	0. 1 5 1
4	5. 6 2 0	1. 1 0 0	5. 6 6 9	0. 1 1 1
5	5. 6 3 6	1. 0 8 7	5. 6 8 7	0. 0 7 8
6	5. 6 5 0	1. 0 7 5	5. 7 0 2	0. 0 5 0
7	5. 6 6 1	1. 0 6 5	5. 7 1 5	0. 0 2 6
8	5. 6 7 0	1. 0 5 7	5. 7 2 5	0. 0 0 5

3. 2. 5 mの検討

以上の近似計算式は、全てmを設定しなければならない。ここでは、理論計算によるmごとのBの値（(3.5)式）とディスドロメーターの測定結果から求めた Z_{DR} ごとのBの値を比較することにより、最適なmの値を検討した。

その結果を表-3. 5及び図-3. 9に示す。

表-3. 5 Z_{DR} と最適m

Z_{DR}	m	Z_{DR}	m
0. 1	8. 2 6 7	1. 1	2. 8 8 9
0. 2	8. 0 7 8	1. 2	2. 7 7 9
0. 3	7. 3 7 9	1. 3	3. 9 5 3
0. 4	6. 8 1 1	1. 4	5. 0 4 1
0. 5	5. 7 3 4	1. 5	2. 4 0 8
0. 6	4. 9 0 2	1. 6	2. 1 3 0
0. 7	3. 7 5 7	1. 7	6. 6 8 2
0. 8	3. 8 3 6	1. 8	11. 2 3 2
0. 9	3. 7 4 4	1. 9	8. 9 2 4
1. 0	2. 8 0 7	2. 0	6. 7 0 4

これから、mの値は、0. 5 dB以下と1. 7 dB以上で5以上の大きな値をとるが、通常の降雨（ $R > 1 \text{ mm}$ ）において最も生じる頻度の高い0. 5 dB～1. 7 dBでは、比較的mの値の変動が少なく、平均的に $m = 3$ 程度であることがわかる。

Z_{DR} の範囲ごとにmの平均値を求めると次のようになる。

$$0. 0 < Z_{DR} \leq 0. 5 \quad m = 7. 3$$

$$0. 5 < Z_{DR} \leq 1. 0 \quad m = 3. 8$$

$$1. 0 < Z_{DR} \leq 1. 5 \quad m = 3. 4$$

$$1. 5 < Z_{DR} \leq 2. 0 \quad m = 7. 1$$

$$\text{全 平 均} \quad m = 5. 4$$

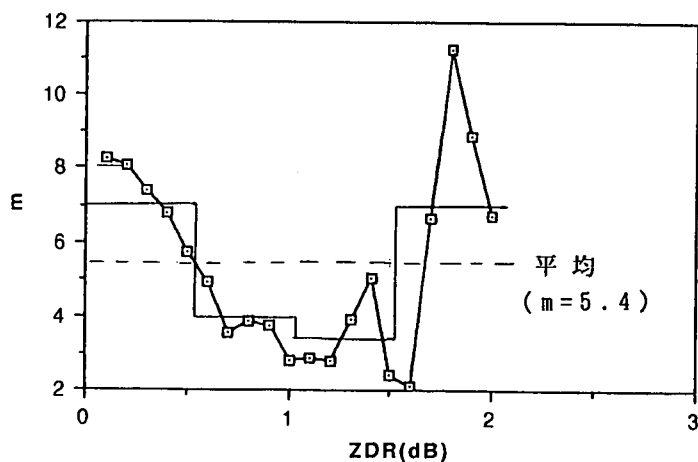


図-3. 9 $m \sim Z_{DR}$ 関係

3. 2. 6 Z_{DR}法の理論的測定精度

Z_{DR}法が理論的にはどの程度の測定精度を有しているかデイスドロメーターデータを用いて調べた。計算方法は、①理論式を用いる方法、②経験式を用いる方法、③B～Z_{DR}関係（理論的関係）を用いる方法、の3ケースを用いた。計算条件は、次のとおりである。

① Z_H、Z_{DR}、Rはデイスドロメーターの測定値から計算されたものを用いる。

’88年～’90年の大川出張所のデータを除く全データを用いる。

② 平均時間は、5分である。

③ 理論計算におけるパラメーターの値は、D_{max} = 7 mm, m = 2, 5, 7とした。

(1) 理論式を用いる方法

図-3. 10に結果を示す。降雨強度が大きい場合は、m = 7が良く合うことがわかる。

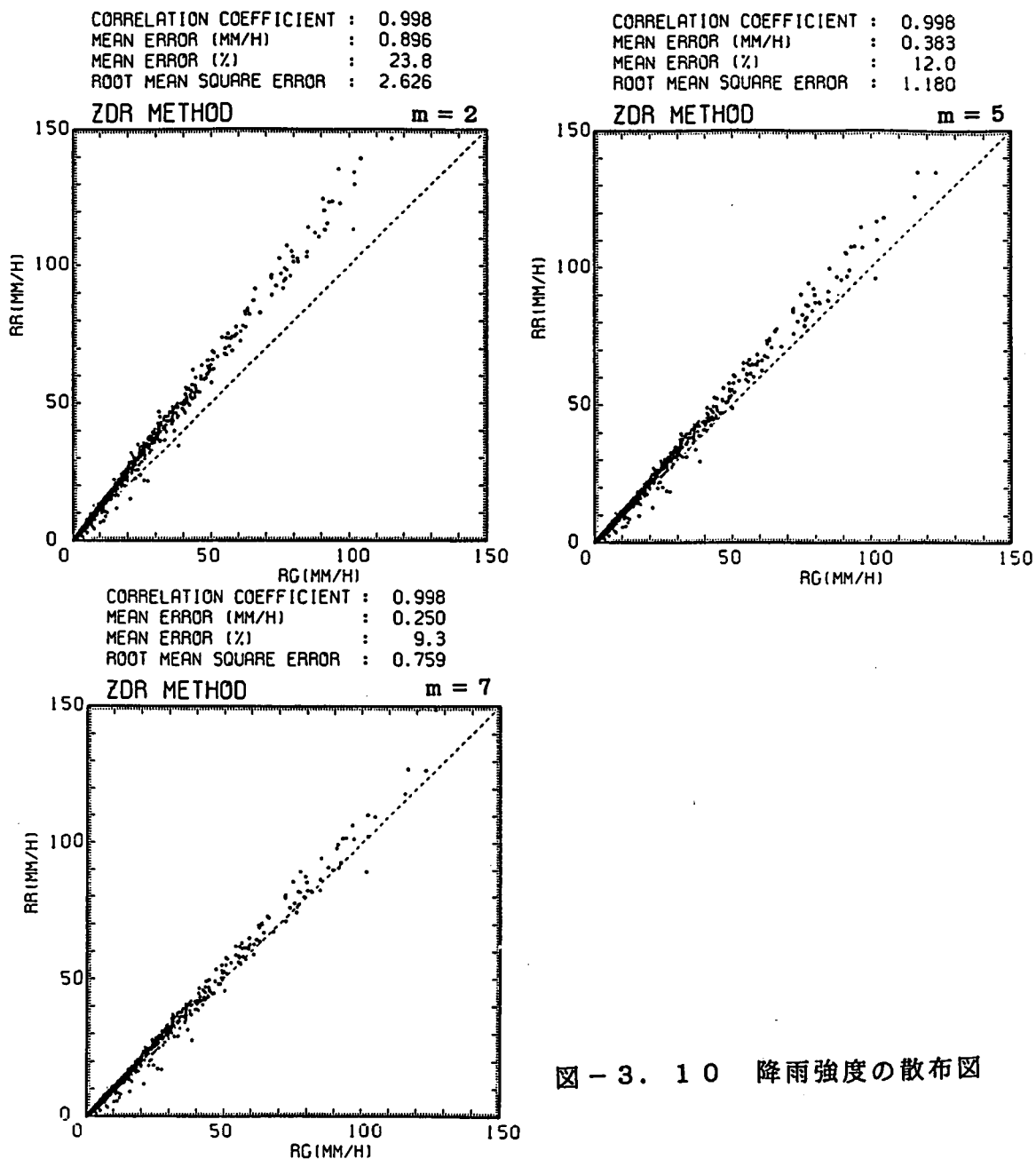


図-3. 10 降雨強度の散布図

(2) 経験式を用いる方法

図-3. 11に結果を示す。理論計算よりは、少し精度が劣る。

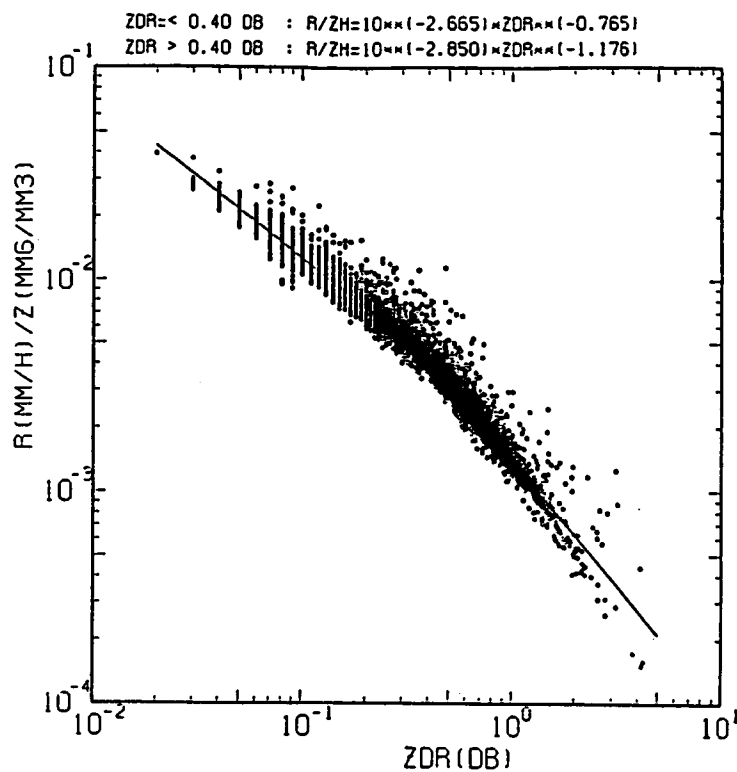


図-3. 11 (a) $R/Z_H \sim Z_{DR}$

CORRELATION COEFFICIENT : 0.995
 MEAN ERROR (MM/H) : 0.343
 MEAN ERROR (%) : 8.1
 ROOT MEAN SQUARE ERROR : 1.475

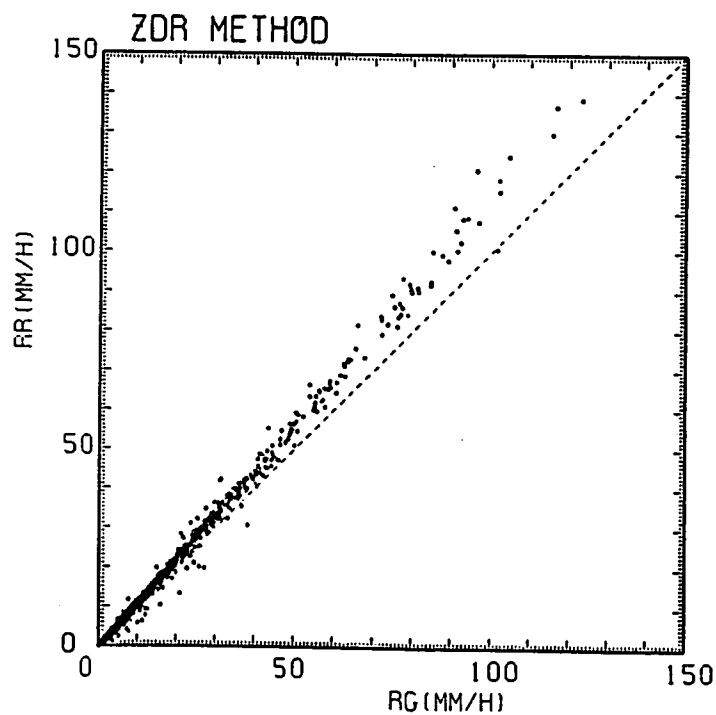


図-3. 11 (b) 降雨強度の散布図

(3) B ~ Z_{DR} (理論的關係) を用いる方法

図-3. 12に結果を示す。理論計算による方法とほぼ同じ精度であることがわかる。
したがって、実用上は、この方法が最適であると判断できる。

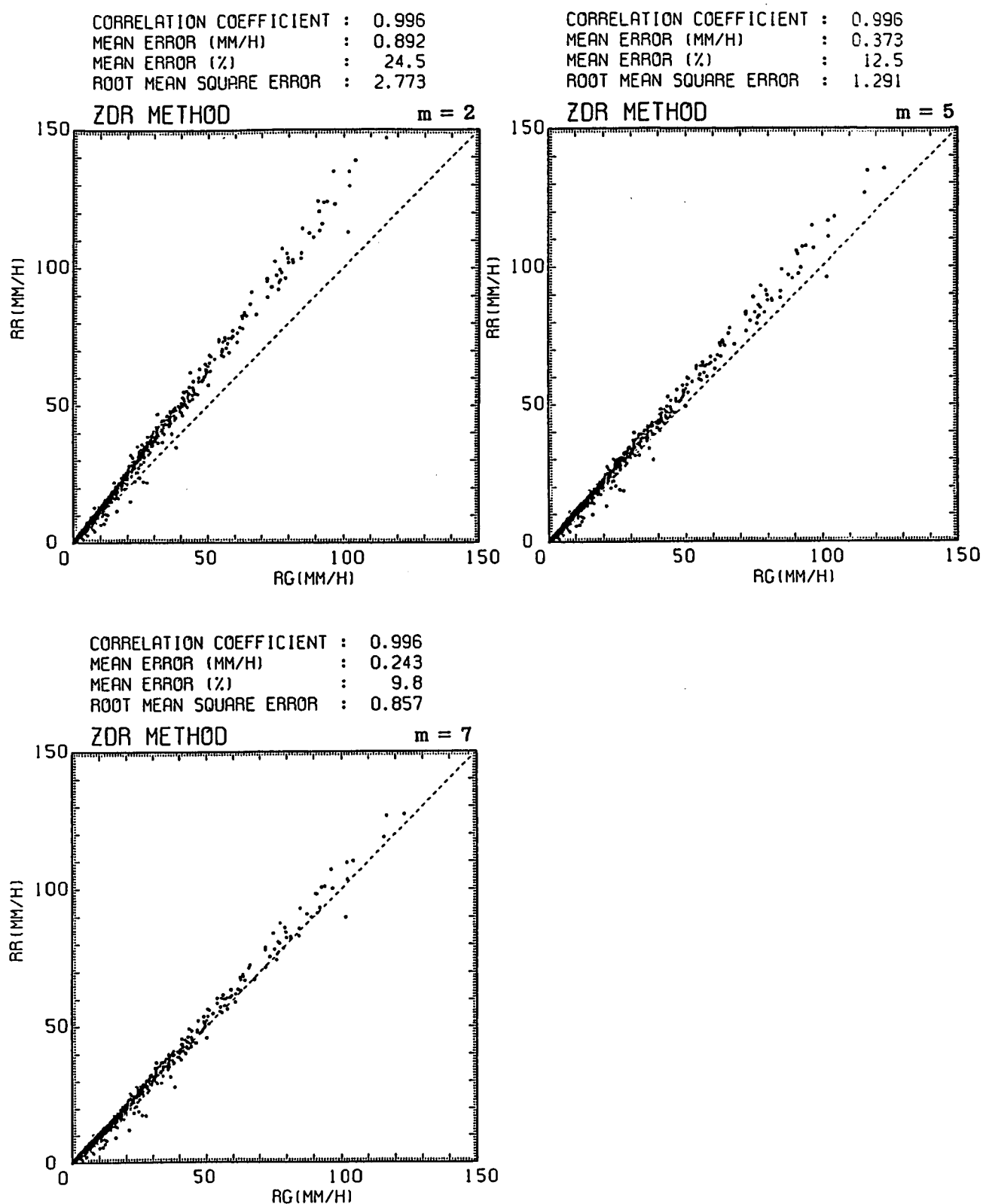


図-3. 12 降雨強度の散布図

3. 3 精度評価データとデータ処理

3. 3. 1 対象降雨

表-3. 6 にディストロメーターデータと比較用の対象降雨、表-3. 7 に転倒ます雨量計データと比較用の対象降雨、表-3. 8 に運用パターンとデータ平均個数を示す。

表-3. 6 ディストロメーター比較用データ一覧

NO.	期 間	レーダ観測方法	降雨成因	備 考
I-①	1988年10月 5日 17:00~20:20	運用パターン7	前 線	気温=18.0℃
I-②	1989年 6月16日 11:10~13:10	〃	〃	気温=18.8℃
I-③	1989年 6月24日 00:00~02:30	〃	台風 6号	気温=20.9℃
I-④	1989年 6月29日 23:50~01:50	〃	梅雨前線	気温=21.9℃
I-⑤	1989年 7月 3日 04:00~06:00	〃	〃	気温=19.7℃
I-⑥	1989年 7月28日 06:30~08:30	〃	台風11号	気温=27.0℃
I-⑦	1989年 9月19日 04:40~07:00	〃	台風22号	気温=23.2℃
I-⑧	1989年 9月19日 09:30~11:30	〃	〃	気温=19.6℃
I-⑨	1990年 6月30日 05:20~07:00	〃	前 線	気温=21.6℃
I-⑩	1990年 7月 2日 04:20~06:20	〃	低 気 圧	気温=23.0℃

表-3. 7 転倒ます雨量計比較用データ一覧

NO.	期 間	レーダ観測方法	降雨成因	備 考
II-①	1989年 6月 5日 08:30~11:00	運用パターン2	低 気 圧	気温=20.5℃
II-②	1989年 6月15日 00:00~03:00	〃 〃	梅雨前線	気温=19.8℃
II-③	1989年 7月 3日 04:30~07:00	〃 7	〃	気温=19.5℃
II-④	1989年 7月 8日 19:00~20:50	〃 2	〃	気温=23.9℃
II-⑤	1989年 7月 8日 21:40~23:40	〃 7	〃	気温=23.6℃
II-⑥	1989年 9月19日 09:30~11:30	〃 〃	台風22号	気温=18.3℃
II-⑦	1990年 6月 4日 15:00~17:00	〃 〃	低 気 圧	気温=20.0℃
II-⑧	1990年 6月15日 01:00~03:00	〃 〃	梅雨前線	気温=23.3℃
II-⑨	1990年 6月29日 00:50~02:50	〃 3	〃	気温=23.4℃
II-⑩	1990年 6月30日 21:10~23:10	〃 5-5	〃	気温=21.0℃
II-⑪	1990年 7月 2日 04:20~06:20	〃 7	〃	気温=22.7℃
II-⑫	1990年 7月 2日 06:50~08:10	〃 5-5	〃	気温=23.0℃
II-⑬	1990年 7月 2日 09:00~10:00	〃 〃	〃	気温=22.4℃
II-⑭	1990年 7月 2日 11:00~12:30	〃 3	〃	気温=22.5℃

表-3. 8 運用パターンとデータ平均個数

運用パターン	A Z	E L	平均時間	1データ当りの平均個数
2	SCAN	3°	3分	9
3	SCAN	3° ,6.5° ,10° ,13°	各1分	3
5-5	SCAN	3°	5分	15
7	固定	3°	20秒	256

3. 3. 2 解析方法

(1)地上降雨

地上降雨は、雨滴計（ディストロメーター）による降雨観測データと転倒ます雨量計による観測データを用いる。図－3. 13に観測所位置図を、表－3. 9に観測所一覧を示す。これらの観測所のうち精度評価には、次の観測所データを用いた。

a)精度評価に用いるディストロメーターデータ

降雨Ⅰ－①，Ⅰ－⑧以外と比較する場合・・・元筑邦出張所(No.6)

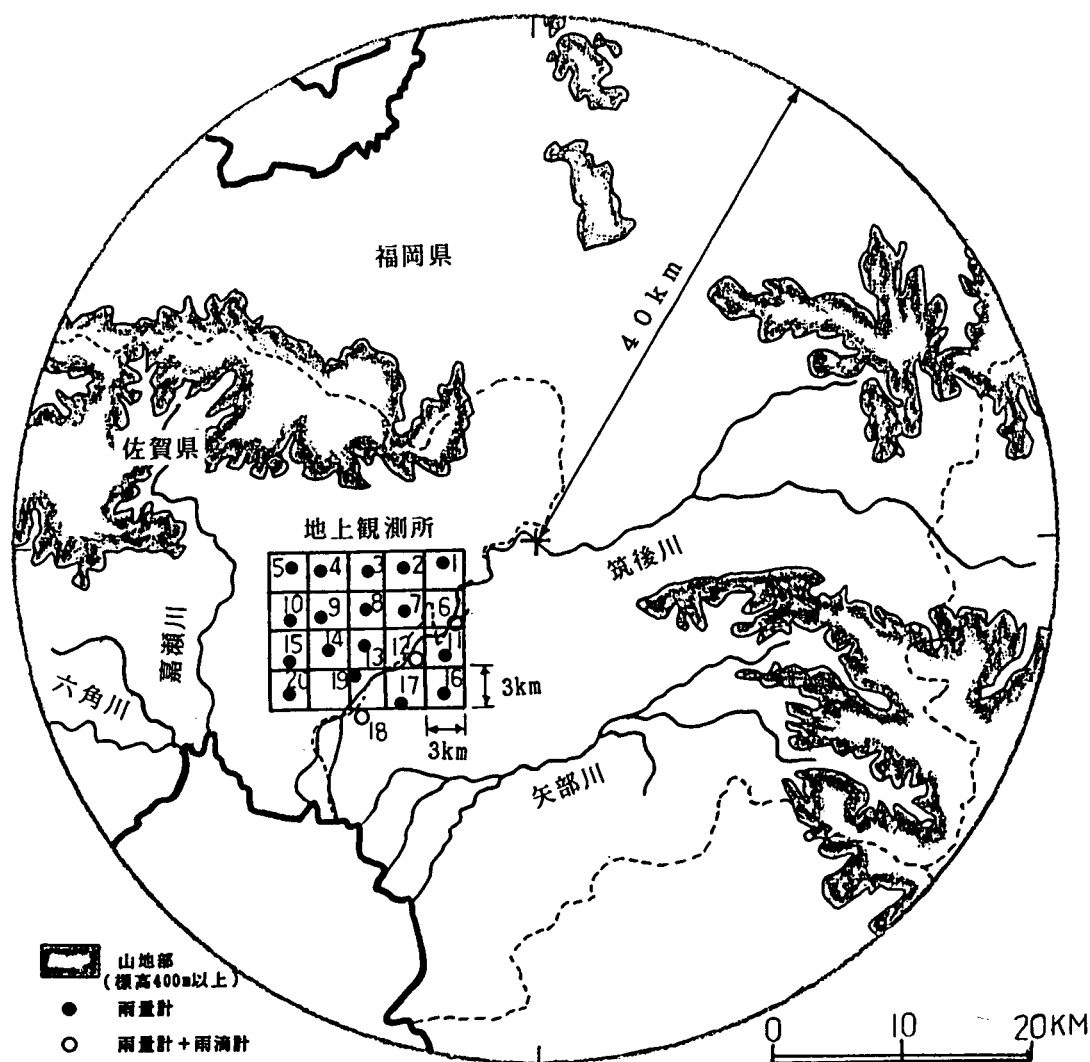
降雨Ⅰ－①，Ⅰ－⑧と比較する場合・・・山ノ井排水機場(No.12)

b)精度評価に用いる転倒ます雨量計データ

元筑邦出張所(No.6)、三根西小学校(No.7)、蔵戸区長2P(No.8)

筑後川土地改良区(No.11)、山ノ井排水機場(No.12)、千代田東部小学校(No.13)

筑後生コン(No.16)、五反田公民館(No.17)、大川出張所(No.18)



図－3. 13 観測所位置図

表 - 3. 9 観測所一覧

No	観測所名	レーダサイトからの位置		対応メッシュ	
		距離(km)	方位(°)	レンジ番号	セクタ番号
1	北茂安町役場	6.49	261.8	1 3	1 8 6
2	上峰村役場	9.51	261.2	2 0	1 8 6
3	三田川町役場	12.16	263.3	2 5	1 8 7
4	ビーシー橋梁	16.15	265.4	3 3	1 8 9
5	久保泉小学校	18.65	265.6	3 8	1 8 9
6	* 元筑邦出張所	8.74	227.8	1 8	1 6 2
7	三根西小学校	10.86	242.1	2 2	1 7 2
8	蔵戸区長 2 P	13.61	249.5	2 7	1 7 7
9	宇部生コン	17.19	251.7	3 5	1 7 9
1 0	宝正幼稚園	19.17	255.3	3 9	1 8 2
1 1	筑後川土地改良区	10.03	218.5	2 1	1 5 5
1 2	* 山ノ井排水機場	12.10	229.9	2 5	1 6 3
1 3	千代田東部小学校	14.59	237.5	3 0	1 6 9
1 4	千代田西部小学校	17.89	244.2	3 6	1 7 4
1 5	巨勢小学校	20.27	244.2	4 1	1 7 4
1 6	筑後生コン	12.86	212.1	2 6	1 5 1
1 7	五反田公民館	15.59	219.7	3 2	1 5 6
1 8	* 大川出張所	18.19	226.3	3 7	1 6 1
1 9	諸富出張所	17.26	235.1	3 5	1 6 7
2 0	紫金山光源寺	21.61	238.6	4 4	1 7 0

(注) *は、雨滴計（ディストロメーター）を併設

(2) F 値

a) 1988年データ

$$\begin{aligned} F(Z_H) &= 6.26 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (その他)} \\ &= 11.43 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(Z_U) &= 6.29 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (その他)} + 1.21 \text{ (Z}_{DR}\text{補正)} \\ &= 12.67 \text{ dB} \end{aligned}$$

b) 1989年データ

$$\begin{aligned} F(Z_H) &= 6.26 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (Z補正)} \\ &= 11.43 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(Z_U) &= 6.29 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (Z補正)} + 1.99 \text{ (Z}_{DR}\text{補正)} \\ &= 13.45 \text{ dB} \end{aligned}$$

c) 1990年データ (降雨 I - ⑨の場合)

$$\begin{aligned} F(Z_H) &= 4.3 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (Z補正)} \\ &= 9.47 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(Z_U) &= 4.2 \text{ (導波管ロス)} + 5.17 \text{ (Z補正)} + 1.99 \text{ (Z}_{DR}\text{補正)} \\ &= 11.36 \text{ dB} \end{aligned}$$

d) 1990年データ (降雨 I - ⑩及び II - ⑦～⑭の場合)

$$\begin{aligned} F(Z_H) &= 4.3 \text{ (導波管ロス)} + 8.32 \text{ (Z補正)} \\ &= 12.62 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F(Z_U) &= 4.2 \text{ (導波管ロス)} + 8.32 \text{ (Z補正)} + 1.21 \text{ (Z}_{DR}\text{補正)} \\ &= 13.73 \text{ dB} \end{aligned}$$

ここで、導波管ロス以外の補正值の意味は、次のとおりである。

5. 17 dBの補正: 1988年データを用いて、B β 法 (B=200, $\beta=1.6$) により降雨強度を計算した時に、最も地上値と良く合うように補正した値。

1. 21 dBの補正: レーダを真上に向けて観測した時の Z_H と Z_U の差の補正。

1. 99 dBの補正: 1. 21 dB + 0. 78 dB

0. 78 dBは、1989年のデータで求めたレーダにより観測した Z_{DR} 値と雨滴計から得られた Z_{DR} 値との平均的な偏差を補正するためのもの。

8. 32 dBの補正: 5. 17 dB + 3. 15 dB

3. 15 dBは、降雨 I - ⑩について求めた Z の補正值

(3) 空間平均

a) ディスドロメーターデータと比較する場合

比較対象となる地上観測地点の直上メッシュ±1メッシュの3メッシュデータを平均する。

b) 転倒ます雨量計データと比較する場合

比較対象となる地上観測地点の直上メッシュ±1メッシュの3メッシュデータを平均し、なおかつ9観測所分を平均する。

(4)時間平均

a)ディストロメータデータと比較する場合

20秒ごとの観測データをさらに1分間ごとに平均する。

b)転倒ます雨量計データと比較する場合

5分間平均する。

(5) Z_{DR} 法による降雨強度の計算

次式により計算する。

$$Z_H = B \cdot R \quad (3.11)$$

ここに、

$$B = 10^{2.650} \cdot Z_{DR}^{0.885} \quad (Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB})$$

$$B = 10^{2.792} \cdot Z_{DR}^{1.211} \quad (Z_{DR} > 0.4 \text{ dB})$$

この式は、雨滴の粒径分布式の定数 m を2、最大粒径 D_{max} を7mmとして理論計算した結果得られたものである(3.2.1節及び本節(9)参照)。

(6) B β 法による降雨強度の計算

定数 B 、 β の設定は、次の3つの方法を用いることとする。

ケース1： $B = 200$ 、 $\beta = 200$ 、1.6で固定して計算する。

ケース2：各降雨ごとに同定した B 、 β ((2)で定めた F に対する値)を用いる。

ケース3：30分ごとに B 、 β の値をキャリブレーションする。

(7)減衰量の計算

減衰量は、次の2つの方法により計算する。

a)偏波データ (Z_H 、 Z_V 、 Z_{DR})を用いて計算する方法

次式により計算する。

$$Z_H = C_H \cdot K_{rH} \quad (3.12a)$$

ここに、

$$C_H = 10^{5.616} \cdot Z_{DR}^{1.178} \quad (Z_{DR} \leq 1.1 \text{ dB})$$

$$C_H = 10^{5.651} \cdot Z_{DR}^{0.323} \quad (Z_{DR} > 1.1 \text{ dB})$$

$$Z_V = C_V \cdot K_{rV} \quad (3.12b)$$

ここに、

$$C_U = 10^{5.572} \cdot Z_{DR}^{1.134} \quad (Z_{DR} \leq 1.1 \text{ dB})$$

$$C_U = 10^{5.616} \cdot Z_{DR}^{0.200} \quad (Z_{DR} > 1.1 \text{ dB})$$

これらの式は、雨滴の粒径分布式の定数 m を 2、最大粒径 D_{max} を 7 mm として理論計算した結果得られたものである（3.2.4 節及び本節(9)参照）。

b) 経験式を用いる方法

次の今井の式を用いる。

$$K_r = 0.0013 \cdot R^{1.1} \quad (3.13)$$

(8) 減衰を考慮したレーダ雨量の計算

ディストロメータデータと比較する場合は、減衰を考慮したレーダ雨量を計算する。

DNDレーダの場合は、6レンジ（3 km）までは、ハードウェア上の制約から正確な値が得られない。したがって、観測データの6レンジ目までは減衰が無いと仮定し、7レンジ目から減衰量を考慮することとする。

減衰を考慮した場合のレーダ雨量は、次の手順により計算する。

① 減衰を考慮しない場合の $Z_{H,U}$ 、 Z_{DR} をレーダ方程式から求める。

② 減衰量及び減衰補正後の $Z_{H,U}'$ 、 Z_{DR}' を求める。

i レンジにおける減衰量 $K_{H,U}(i)$ (dB) および減衰考慮後の $Z_{H,U}(i)'$ 、 $Z_{DR}(i)'$ は、次式により求める。

$$(1 \sim 7 \text{ レンジ}) \quad K_i = 0$$

$$Z_H(i)' = Z_H(i), \quad Z_U(i)' = Z_U(i)$$

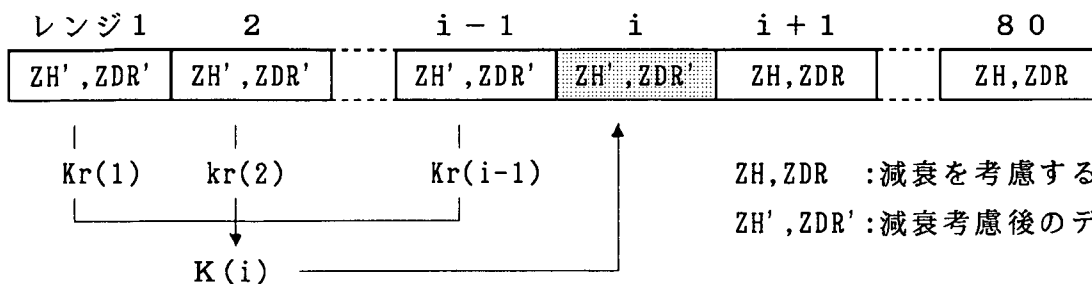
$$Z_{DR}(i)' = Z_H(i) - Z_U(i)$$

$$(8 \sim 80 \text{ レンジ}) \quad K_{H,U}(i) = 2 \times 0.5 \times \sum_{n=1}^{i-1} K_{r_{H,U}}(n)$$

$K_{r_{H,U}}(n) = (3.12) \text{ 式 or } (3.13) \text{ 式から計算}$

$$Z_H(i)' = Z_H(i) + K_H(i), \quad Z_U(i)' = Z_U(i) + K_U(i)$$

$$Z_{DR}(i)' = Z_H(i)' - Z_U(i)'$$



③ 降雨強度を計算する。

減衰考慮後の Z_H' 、 Z_{DR}' を用いて降雨強度に変換する。

(9) パラメーター m と D_{max} の取り扱い

これまでの検討結果から、 m 及び D_{max} の値については、次のような結果が得られている。

a) m 値

□ 地上で測定された粒径分布を直接ガンマ分布に当てはめると、

平均的には、 $m = 2$ (最も頻度が高い)

降雨強度 50mm/h 以下では、 $m = 2 \sim 4$

降雨強度 50mm/h 以上では、 $m = 4 \sim 7$

□ 3. 2. 5 節の方法により求めると、

平均的には、 $m = 5$

Z_{DR} が 0. 5 dB ~ 1. 7 dB (観測する上で最も頻度が高い) では、 $m = 3$

b) D_{max} 値

□ 地上での粒径分布測定から、

降雨強度 5mm/h 以上で、 $D_{max} \geq 5 \text{ mm}$ となる。

□ Z_H 及び Z_{DR} 及び K_r に対する雨滴径の寄与率の理論計算から、

降雨強度 100mm/h では、6 mm 付近の粒径の寄与が支配的となる。

以上から、本研究では、 m 及び D_{max} は、次の値を最適値として使用することとした。

$m = 2$

(理由) 最も生起頻度が高く、さまざまな降雨に対して平均的な精度が良くなる。 $m = 3$ でも良いと思われるが、 $m = 2$ と大きな差はない。

$D_{max} = 7 \text{ mm}$

(理由) 観測された降雨で比較的弱い雨でも、5 mm 以上の粒径が生じているのに加えて、計算精度上 6 mm 以上とする必要がある。

(10) 地上値とレーダ値の時間ずれの補正

精度評価の対象となる地上観測所地点でのビーム高度は、500 ~ 700 m 程度になるので、上空と地上では、雨滴の落下時間による観測時間のずれが生じる。本研究では、レーダ値と地上値の相関が最も良くなるように時間のずれを補正した。補正時間は、次のとおりである。

a) ディスドロメーターデータと比較する場合

ディスドロメーターデータ比較する場合は、1 分間平均データを用いるので、1 分単位で補正値を求めた。

降雨 I - ①, ⑧ 以外のデータ 時間補正 3 分

降雨 I - ① データ 時間補正 6 分

降雨 I - ⑧ データ 時間補正 4 分

b) 転倒ます雨量計データと比較する場合

転倒ます雨量計と比較する場合は、5 分間平均データを用いるので、5 分単位で補正値を設定する。ディスドロメーターデータの場合の補正値が、3 ~ 6 分であるので、時間補正 = 5 分とした。

3. 4 精度評価

3. 4. 1 全体的な精度評価

(1) 評価指標

評価指標は、相関係数・相対誤差・相対誤差率・自乗平均誤差・自乗平均誤差率を用いた。計算式は次のとおりである。

a) 相関係数

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.14)$$

b) 相対誤差 (平均誤差)

$$ME = \frac{1}{N} \sum |y_i - x_i| \quad (3.15)$$

c) 相対誤差率 (平均誤差率)

$$ME(\%) = \frac{1}{N} \sum \left\{ \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \right\} \times 100 \quad (3.16)$$

d) 自乗平均誤差

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (y_i - x_i)^2} \quad (3.17)$$

e) 自乗平均誤差率

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.18)$$

ここで、 x ：地上雨量、 y ：レーダ雨量、である。 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ は、それぞれ平均を示す。

(2) 精度比較 (各降雨ごと)

各降雨における精度比較 (相関係数, 自乗平均誤差) を表-3. 10, 3. 11 に示す。表-3. 10 はディストロメーターデータと比較した場合であり、表-3. 11 は転倒ます雨量計と比較した場合である。ここで、 Z_H 、 Z_{DR} については、ディストロメーターによる粒径分布の測定値から理論式により計算した値と実際のレーダ観測値とを比較したものである。

B β 法及び Z_{DR} 法による降雨強度とともに、観測精度が良いものもあれば悪いものもあることがわかる。 Z_H 、 Z_{DR} の測定精度についても同様である。これら個々のケースについての考察は、3. 4. 2 節以降で述べることとし、ここでは比較表の掲載のみとする。

表-3. 10(a) ディスドロメーターと比較した場合の観測精度(相関係数)

降雨NO.	Z H		Z D R		降雨強度〔Bβ法〕					降雨強度〔Z D R法〕		
	減衰無	減衰有	減衰無	減衰有	定数固定			最適定数	30分ごと 定数校正	減衰無	減衰有	今井式
					減衰無	減衰有	今井式					
I-①	0.902	0.901	0.548	0.560	0.844	0.841	0.842	0.840	-0.113	0.772	0.774	0.775
I-②	0.949	0.949	0.412	0.414	0.807	0.802	0.806	0.738	0.307	0.664	0.665	0.663
I-③	0.867	0.867	0.361	0.364	0.836	0.836	0.835	0.814	0.060	0.788	0.789	0.789
I-④	0.877	0.877	0.741	0.740	0.782	0.782	0.781	0.756	0.412	0.650	0.650	0.650
I-⑤	0.871	0.873	0.641	0.645	0.857	0.862	0.861	0.853	0.703	0.668	0.659	0.668
I-⑥	0.306	0.306	0.254	0.257	0.492	0.495	0.494	0.410	0.235	0.306	0.306	0.270
I-⑦	0.750	0.751	0.628	0.632	0.294	0.294	0.294	0.299	0.171	0.380	0.377	0.381
I-⑧	0.740	0.783	0.464	0.471	0.561	0.631	0.584	0.466	0.523	0.672	0.658	0.667
I-⑨	0.975	0.975	0.757	0.761	0.968	0.967	0.967	0.963	0.898	0.877	0.866	0.877
I-⑩	0.917	0.920	0.779	0.728	0.840	0.865	0.854	0.838	0.575	0.820	0.799	0.812

表-3. 10(b) ディスドロメーターと比較した場合の観測精度(自乗平均誤差)

降雨NO.	Z H		Z D R		降雨強度〔Bβ法〕					降雨強度〔Z D R法〕		
	減衰無	減衰有	減衰無	減衰有	定数固定			最適定数	30分ごと 定数校正	減衰無	減衰有	今井式
					減衰無	減衰有	今井式					
I-①	3.73	3.82	0.38	0.39	2.28	2.31	2.30	4.34	11.83	5.96	6.05	5.95
I-②	4.56	4.67	0.24	0.25	1.74	1.86	1.79	2.91	3.74	9.66	10.04	9.89
I-③	5.65	5.66	0.21	0.22	0.99	1.01	1.01	2.61	17.22	2.85	2.89	2.94
I-④	2.10	2.10	0.28	0.28	0.59	0.59	0.60	0.60	1.03	0.39	0.39	0.39
I-⑤	2.93	2.96	0.30	0.30	1.86	1.97	1.93	1.90	2.62	4.79	5.20	4.90
I-⑥	6.16	6.25	0.45	0.47	4.63	4.77	4.79	22.19	3.30	4.97	5.06	5.39
I-⑦	1.48	1.51	0.17	0.17	4.21	4.20	4.20	4.19	4.60	4.00	4.00	4.00
I-⑧	2.18	2.32	0.36	0.43	7.26	6.38	6.84	14.35	8.49	9.53	12.03	10.26
I-⑨	2.08	2.12	0.37	0.38	1.91	2.00	2.02	0.80	2.12	1.55	1.66	1.59
I-⑩	2.97	3.67	0.60	0.80	13.65	10.77	11.91	12.31	20.20	13.09	14.52	13.56

表-3. 11(a) 転倒ます雨量計と比較した場合の観測精度(相関係数)

降雨N0.	降雨強度(Bβ法)					降雨強度(ZDR法)		
	定数固定			最適定数	30分ごと 定数校正	減衰無	減衰有	今井式
	減衰無	減衰有	今井式					
II-①	0.351	0.341	0.346	0.001	-0.062	0.341	0.537	0.400
II-②	0.363	0.358	0.358	0.016	0.106	0.371	0.102	0.092
II-③	0.770	0.782	0.774	-0.546	0.373	0.795	0.800	0.812
II-④	0.820	0.448	0.900	0.834	0.433	0.643	0.518	0.852
II-⑤	0.663	0.697	0.687	0.673	-0.095	0.762	0.711	0.764
II-⑥	0.799	0.851	0.808	0.666	0.632	0.749	0.864	0.807
II-⑦	0.431	0.438	0.424	*****	0.669	0.668	0.633	0.715
II-⑧	0.801	0.732	0.808	*****	0.303	0.795	0.813	0.373
II-⑨	0.755	0.156	0.762	*****	-0.158	0.754	0.730	0.781
II-⑩	0.778	0.728	0.769	*****	-0.516	0.686	0.551	0.806
II-⑪	0.920	0.862	0.929	0.096	-0.458	0.900	0.862	0.809
II-⑫	0.564	*****	0.229	*****	-0.905	0.276	0.790	-0.247
II-⑬	0.339	0.323	0.314	*****	-0.727	0.283	0.221	0.328
II-⑭	0.254	*****	0.313	*****	0.396	0.207	-0.110	0.262

表-3. 11(b) 転倒ます雨量計と比較した場合の観測精度(自乗平均誤差)

降雨N0.	降雨強度(Bβ法)					降雨強度(ZDR法)		
	定数固定			最適定数	30分ごと 定数校正	減衰無	減衰有	今井式
	減衰無	減衰有	今井式					
II-①	13.38	25.53	17.86	33.52	20.42	20.85	19.43	13.23
II-②	5.56	7.82	6.29	16.27	12.18	12.85	11.89	13.86
II-③	3.43	3.43	3.43	25.35	0.78	3.29	3.24	3.94
II-④	26.54	10.64	26.58	18.66	13.52	26.54	6.02	15.45
II-⑤	7.61	7.41	7.49	7.64	6.61	6.44	7.12	6.05
II-⑥	3.97	2.81	3.38	27.11	27.39	6.93	2.62	11.58
II-⑦	2.42	2.49	2.47	15.42	2.65	3.96	3.78	4.23
II-⑧	8.60	13.78	11.71	8.05	6.61	11.94	16.16	15.62
II-⑨	41.61	52.12	53.72	*****	48.94	34.02	11.51	33.17
II-⑩	8.69	14.98	11.56	*****	19.08	6.48	13.49	18.70
II-⑪	14.85	9.43	9.73	9.97	3.56	10.35	11.21	20.79
II-⑫	21.15	45.27	33.50	*****	29.08	23.01	41.47	38.03
II-⑬	13.58	23.48	20.11	34.40	9.32	19.99	12.42	26.45
II-⑭	33.64	15.46	38.43	*****	32.56	23.12	42.00	33.69

(3)精度比較（全降雨）

全降雨のデータ（ディストロメーターとの比較データ＋転倒ます雨量計との比較データ、ただし、 $Z_{DR} < 0.5$ dBのデータは除く）による精度比較（相関係数，自乗平均誤差）を表-3. 12に、散布図を図-3. 14に示す。ここで、 $B\beta$ 法の精度計算値及び Z_{DR} 法の精度計算値ともに減衰無しで計算したものである。また、 $B\beta$ 法の計算方法は、定数固定のケース（ $B=200$ ， $\beta=1.6$ ）である。

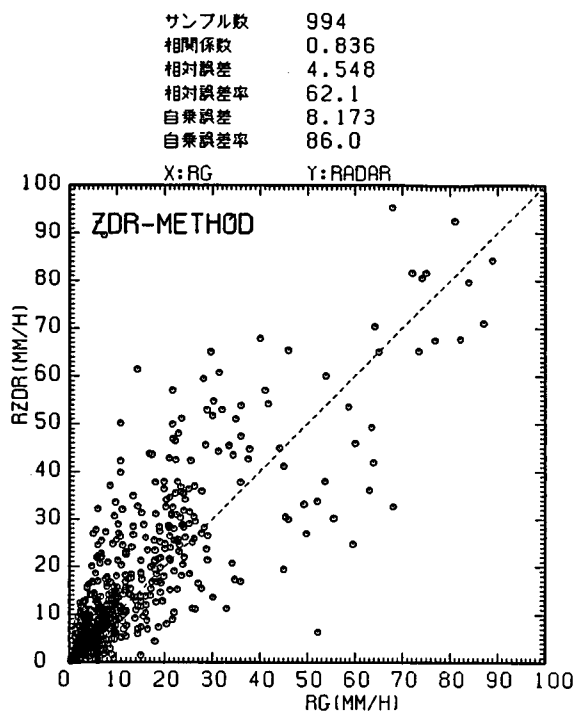
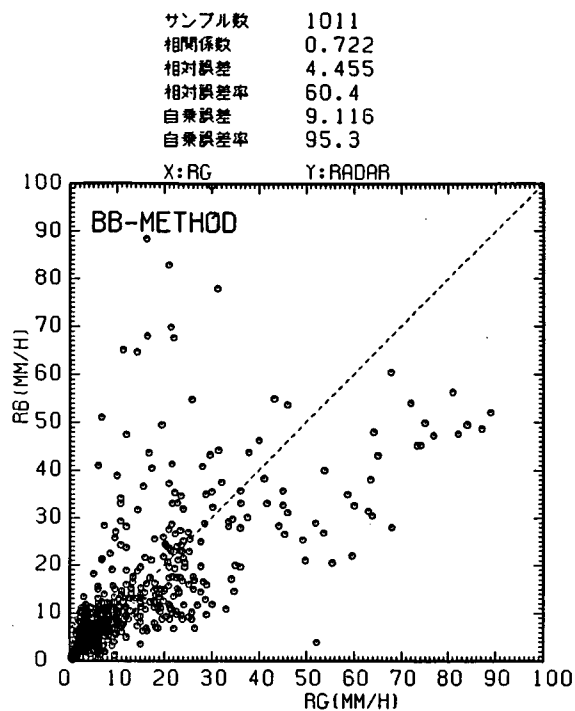
これらから、次のことがわかる。

- ①全降雨（ $B\beta$ 法定数固定）のデータで見た場合には、 Z_{DR} 法の精度が $B\beta$ 法の精度より良くなる（自乗平均誤差で1 mm/h程度）。
- ②方位固定データ（運用パターン7で観測したデータ）とSCANデータ（運用パターン2，3，5で観測したデータ）を比較すると、 $B\beta$ 法， Z_{DR} 法ともにSCANデータの精度が悪くなっている。相関係数に着目すると、SCANデータの場合の Z_{DR} 法の値が極端に悪くなっている。これは、データ平均個数が少なくなったことにより、降雨強度の計算に用いる Z_{DR} 値の精度が劣化したためである。一方、自乗平均誤差については、 $B\beta$ 法の精度が悪くなっている。これは、 $B\beta$ 法が空間的な降水現象の変化に対応できないためと考えられる。すなわち、定数 B ， β が空間的に変化する（雨滴の粒径分布が変化する）ために地上値との誤差が大きくなったためと考えられる。
- ③地上観測方法の違いによる観測精度への影響について見てみると、転倒ます雨量計データを用いた場合の方がディストロメーターデータを用いた場合に比べ精度が劣る。これは、測定器の時間分解能の違いによるものである。
- ④散布図を見ると、降雨強度が大きい場合は Z_{DR} 法の精度が $B\beta$ 法より良くなることがわかる。

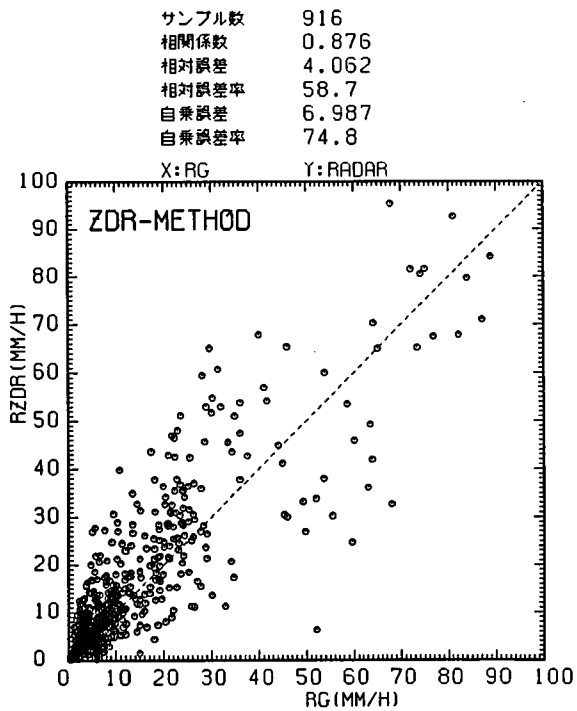
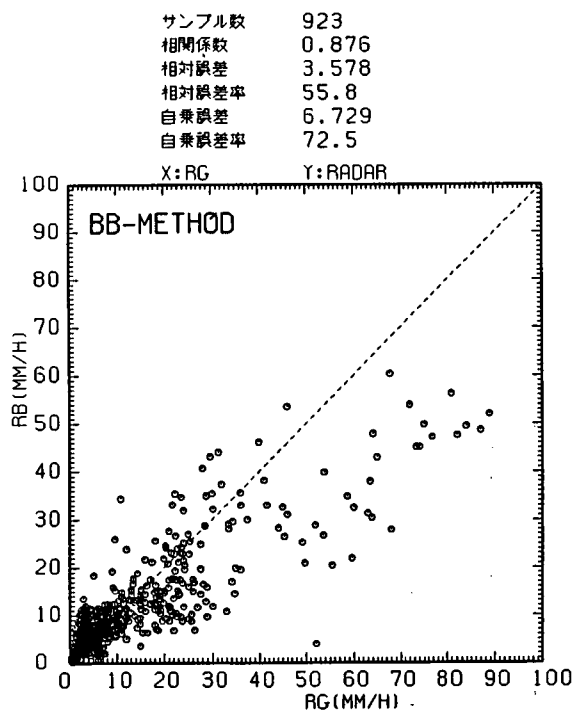
表-3. 12 全データによる精度評価

	サンプル数		相関係数		自乗平均誤差	
	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法
全 降 雨	1011	994	0.722	0.836	9.116	8.173
方位固定データのみ	923	916	0.876	0.876	6.729	6.987
SCANデータのみ	88	78	0.624	0.429	21.904	16.676
ディストロメーター 比較データのみ	809	803	0.876	0.874	6.475	6.860
転倒ます雨量計 比較データのみ(全)	202	191	0.556	0.704	15.749	12.239
〃 (方位固定データ)	114	113	0.864	0.883	8.313	7.825

(注) Z_{DR} 値が0.5 dB以上のデータを用いている。

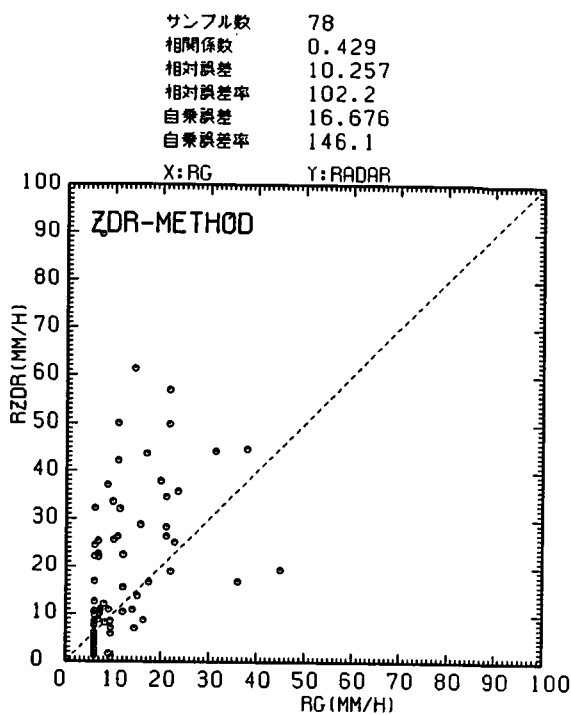
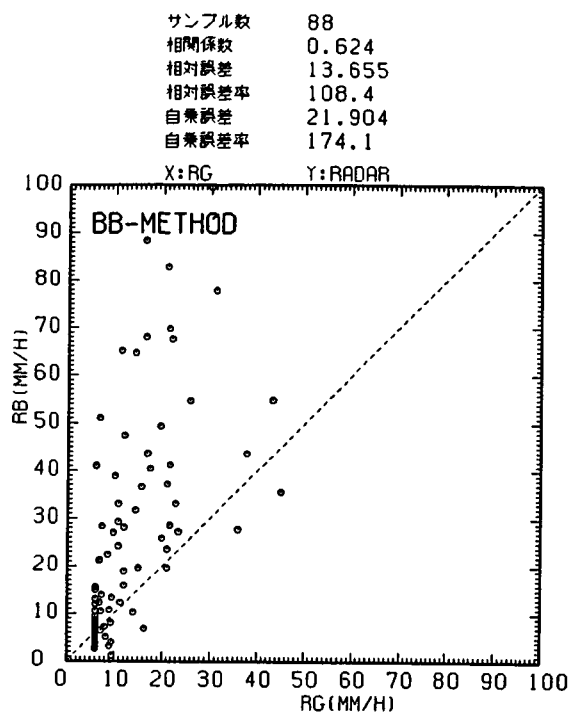


(a) 全降雨

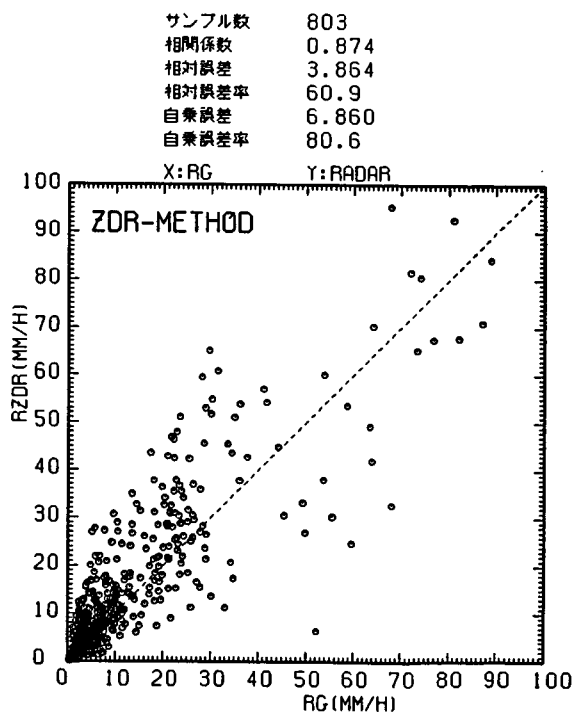
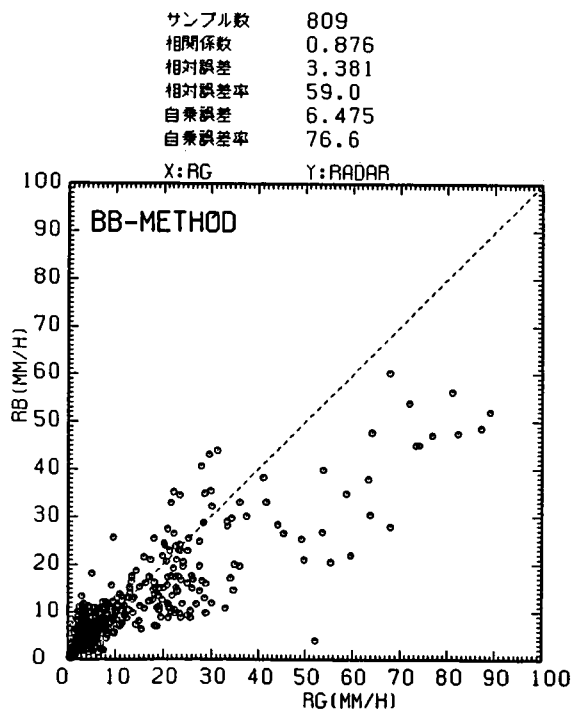


(b) 方位固定データのみ

図 - 3. 1 4 降雨強度の散布図(1)

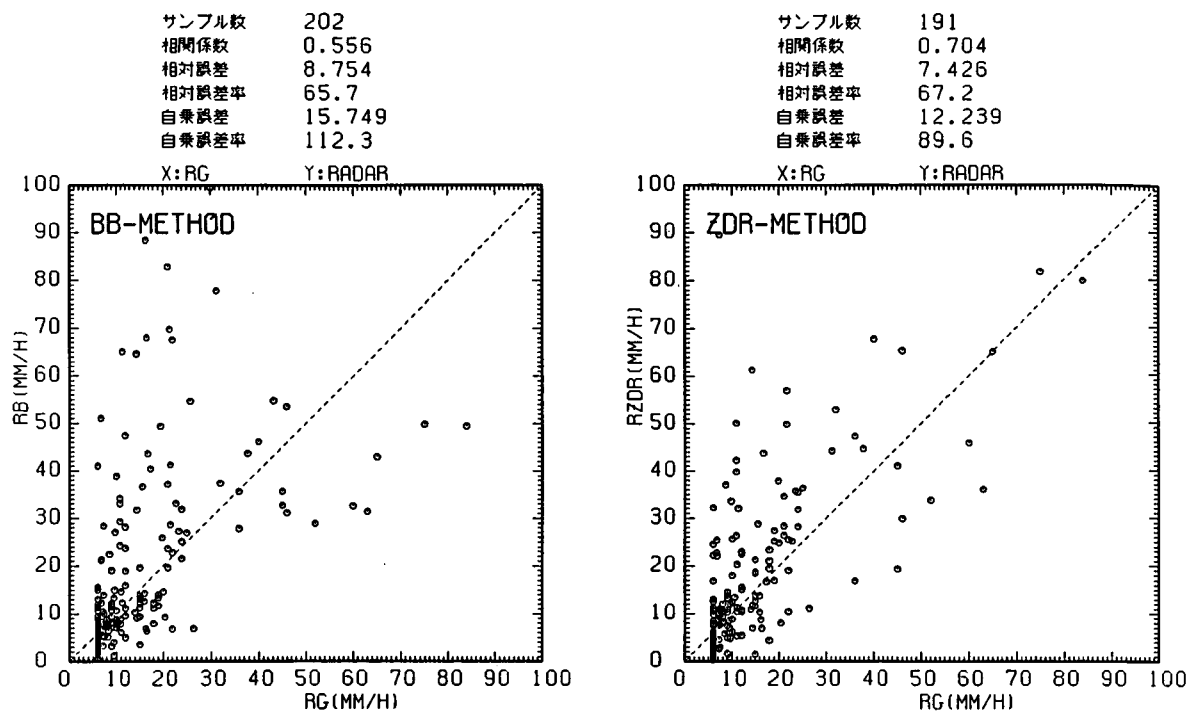


(c) SCANデータのみ

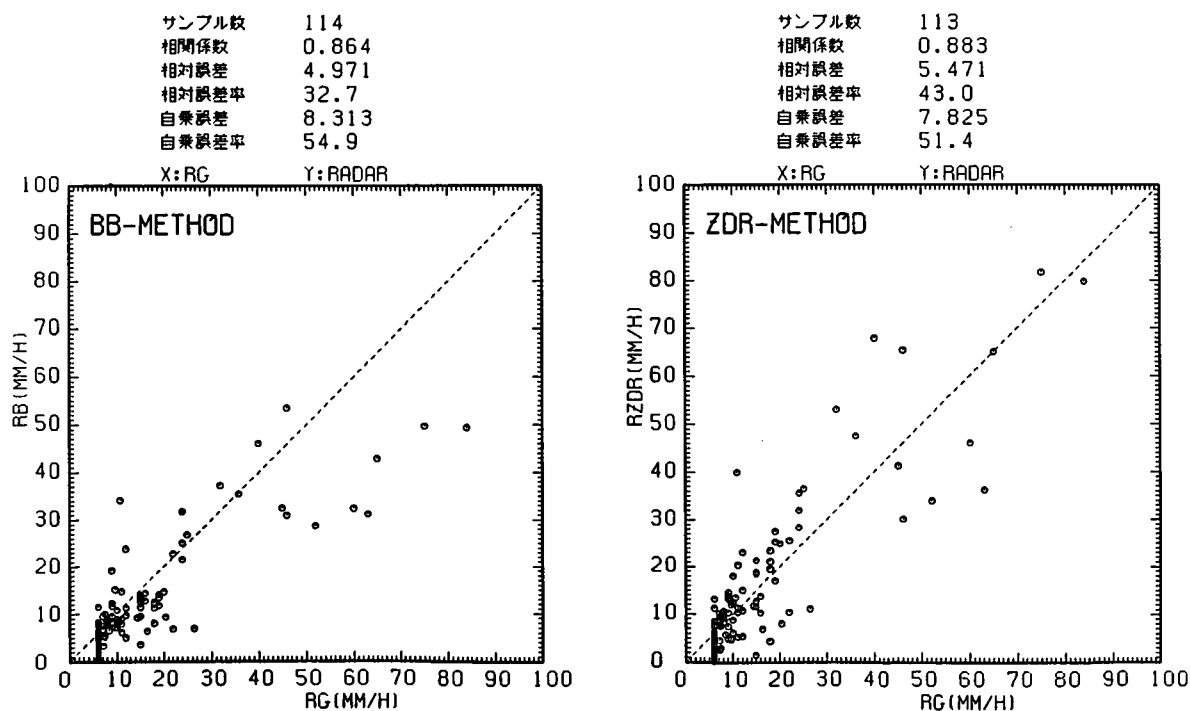


(d) デイスドロメーター比較データのみ

図 - 3. 14 降雨強度の散布図(2)



(e) 転倒ます雨量計比較データのみ(全)



(f) 転倒ます雨量計比較データのみ(方位固定データ)

図 - 3. 1 4 降雨強度の散布図(3)

(4) Z_{DR}法の優位性

Z_{DR}法は、Z_H、Z_{DR}の測定精度に大きく影響を受ける。特に、Z_{DR}値については、その値が0～3 dB程度であるので、測定誤差が含まれやすい。ここでは、Bβ法の測定精度に対するZ_{DR}法の精度向上率を相関係数等の指標を用いて表し、Z_{DR}法の優位性について検討した。計算方法等は、次のとおりである。

a) 評価指標

① 相関係数を精度指標とする

$$\text{Z}_{\text{DR}}\text{法による精度向上率} = \frac{\text{相関係数 (Z}_{\text{DR}}\text{法)} - \text{相関係数 (B}\beta\text{法)}}{\text{相関係数 (B}\beta\text{法)}} \times 100$$

② 自乗平均誤差 (R.M.S.E.) を精度指標とする

$$\text{Z}_{\text{DR}}\text{法による精度向上率} = \frac{\text{R.M.S.E. (B}\beta\text{法)} - \text{R.M.S.E. (Z}_{\text{DR}}\text{法)}}{\text{R.M.S.E. (B}\beta\text{法)}} \times 100$$

③ 相対誤差率を精度指標とする

$$\text{Z}_{\text{DR}}\text{法による精度向上率} = \frac{\text{相対誤差率 (B}\beta\text{法)} - \text{相対誤差率 (Z}_{\text{DR}}\text{法)}}{\text{相対誤差率 (B}\beta\text{法)}} \times 100$$

b) 使用データ

デイスドロメーターとの比較データ全てを用いた。

c) Bβ法とZ_{DR}法の計算

Bβ法の計算手法については、

① 定数固定のケース

② 最適定数を用いて降雨強度を計算するケース (対象データ全てを用いて求めた最適B, βを使用する、B = 164.12, β = 1.59)

の2種類について計算した。

また、減衰については、Bβ法・Z_{DR}法ともに考慮していない。

d) 精度向上率の計算

精度向上率の計算は、対象とするZ_{DR}及びZ_Hの範囲ごとに行った。すなわち、ある値以上のZ_{DR}値、Z_H値のデータを用いて精度計算を行い、上式によりZ_{DR}法の精度向上率を求めた。

Z_{DR}に対する精度向上率の計算結果を図-3.15 ((a)~(c)) に示す。この図は、たとえば、Z_{DR} = 1.0 dBの時の精度向上率が5%であるならば、Z_{DR}値が1.0 dB以上のデータを用いて精度評価するとZ_{DR}法を用いることによりBβ法に対して5%の精度向上があることを意味する。また、図-3.15 (d)に、Z_Hに対する精度向上率の変化を示す (自乗誤差のみ)。図中の実線はBβ法が定数固定のケース、点線は最適定数のケースである。

B β 法が定数固定のケースについて見てみると、次のことが言える。

- ① 相關についてはほとんど変わらず、精度向上率は0%前後である。
- ② 自乗平均誤差あるいは相対誤差で見ると、Z_{DR}が0.5 dB以下では、Z_{DR}法の測定精度がB β 法と比べて極端に劣る。
- ③ 自乗平均誤差で見ると、Z_{DR}が0.6 dB～1.2 dBの間は、精度向上率が-3%～+3%であり、Z_{DR}法とB β 法の精度の違いはほとんど無いと言える。
- ④ 相対誤差で見ると、Z_{DR}が0.6 dB以上では、Z_{DR}法がB β 法より精度が良くなる。また、自乗平均誤差では、1.2 dB程度からZ_{DR}法の精度が良くなる。
- ⑤ Z_Hの変化では、46 dB以上に対してZ_{DR}法の精度向上率が大きくなっている。
- ⑥ 以上より、Z_{DR}法がB β 法に対して優位に立つのは、Z_H、Z_{DR}値が大きい部分、すなわち降雨強度が強い時であると言える。Z_{DR}法がB β 法と比べて精度が向上する範囲（B β 法と同じ精度の部分も含む）は、

$$Z_H \geq 45 \text{ dB} \quad \text{または} \quad Z_{DR} > 0.5 \text{ dB}$$

である。ただし、これは、現状のハードウェアシステムに対しての値であり、今後のハードウェアの改良の如何によっては更に精度が向上すると考えられる。

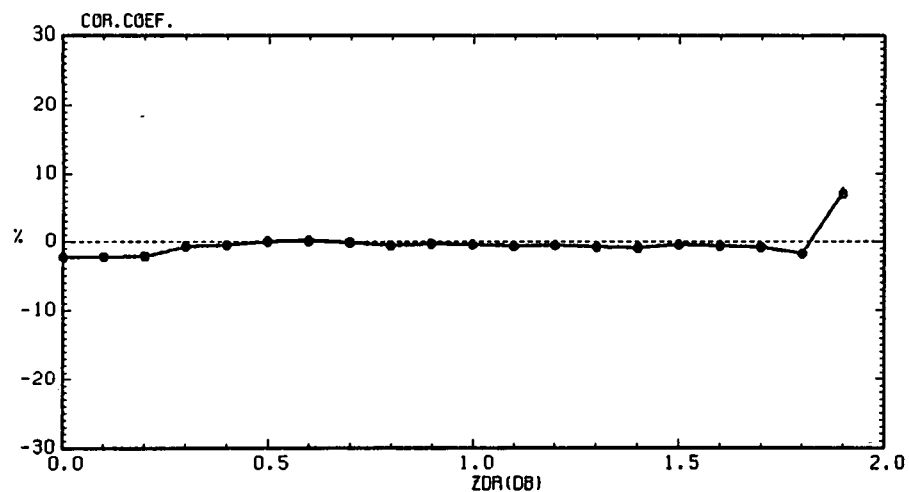
B β 法が最適定数のケースでは、Z_{DR}法が優位となる範囲は狭くなり、Z_{DR}値の範囲で見ると、0.9 dB以上（自乗平均誤差を指標とした場合）でB β 法と同程度の精度となる。また、参考のため、相対誤差率を指標とした場合についても、最適定数のケースの計算結果を示しているが、この場合には逆にZ_{DR}法が優位となる範囲は定数固定のケースより広がっている。この理由は、次のとおりである。

すなわち、相対誤差率の場合は、小さい降雨強度の場合の誤差が相対誤差率の値に大きく影響する。最適化した定数を用いた場合には中程度の降雨強度に最も良く合うようになるので、相対誤差率を用いて精度評価することにより、かえって定数固定の場合より精度が悪くなったと考えられる。したがって、最適定数のケースと定数固定のケースを比較する場合、相対誤差率よりも自乗平均誤差を指標とした方が適切であると言える。

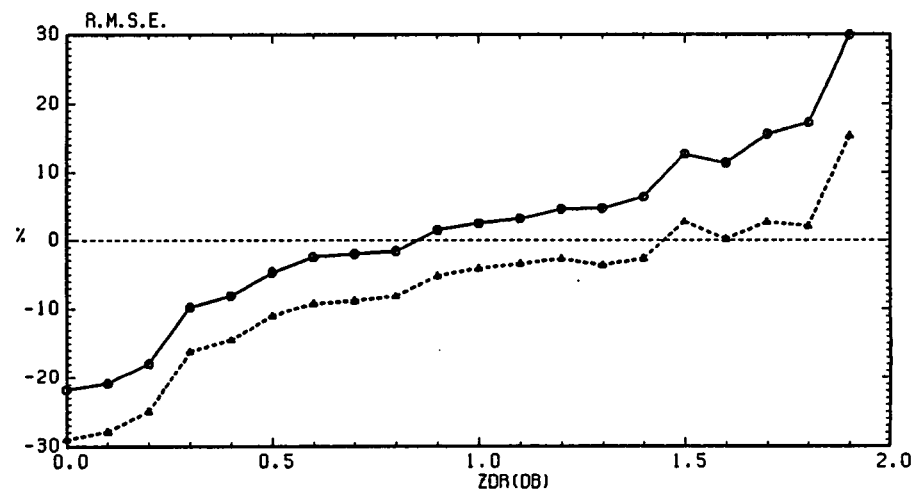
一方、Z_H値の範囲では、48 dB以上（自乗平均誤差を指標とした場合）でZ_{DR}法が優位となる。

以上から、最適定数を用いた場合にはZ_{DR}法よりもB β 法を用いた方が有利であるように思えるが、実際のレーダの運用を考えた場合には、どのような降雨に対しても最適となるような定数B、 β を設定することは難しい。すなわち、定数固定の場合のケースで考えた方がより現実的であると言える。

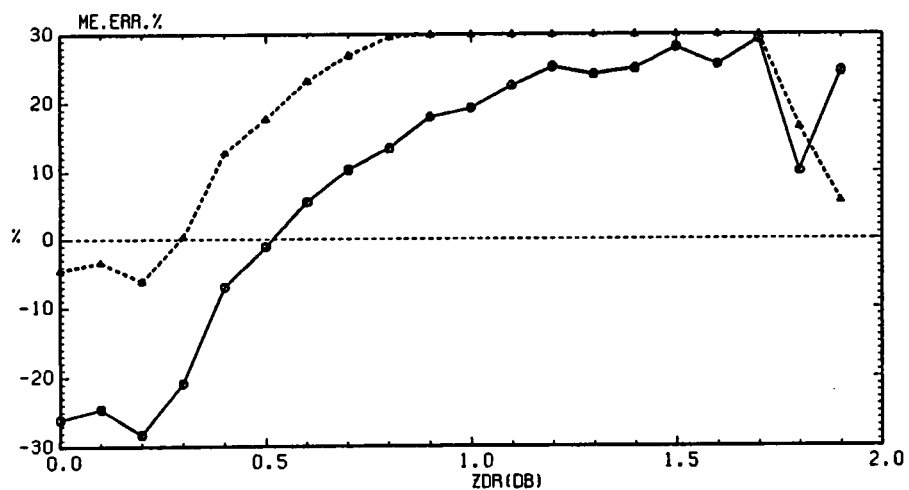
したがって、Z_{DR}法は、定数を設定することなしにB β 法の定数固定のケースの場合の観測精度と同様かそれ以上の精度を有する方法であるので、実用的及び将来的な面ではB β 法に比べて有効な方法であると言える。



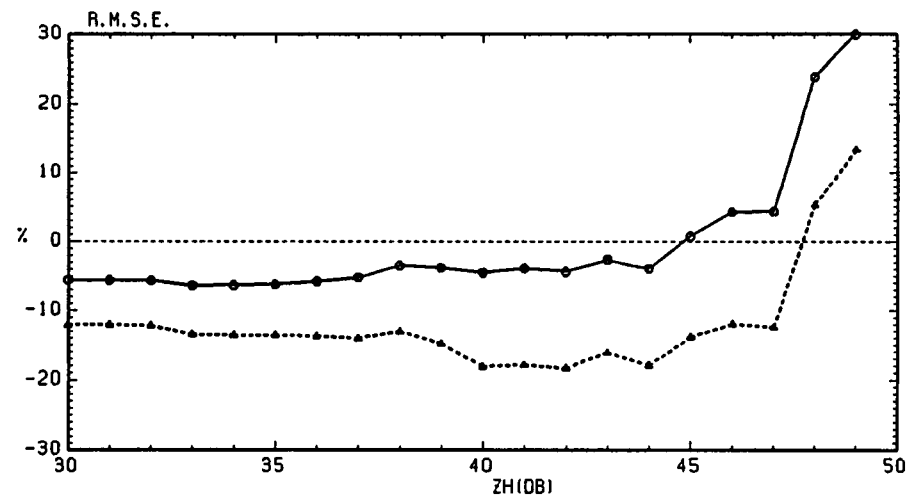
(a) Z_{DR} と精度向上率 (相関係数)



(b) Z_{DR} と精度向上率 (自乗平均誤差)



(c) Z_{DR} と精度向上率 (相対誤差率)



(d) Z_H と精度向上率 (自乗平均誤差)

図 - 3. 15 精度向上率の変化

○ — ○ 定数固定 $B\beta$ 法, $\triangle$ - - $\triangle$ 最適定数 $B\beta$ 法

3. 4. 2 Z_H , Z_{DR} の測定精度

図-3. 16に Z_H , Z_{DR} の地上値との比較(降雨I-⑤, ⑥)を示す。これらの降雨は、同じF値を用いているにもかかわらず測定精度に違いがある。降雨I-⑤の方は、地上値と非常に良く一致している(自乗平均誤差では、 Z_H : 2.93 dB、 Z_{DR} : 0.3 dB)が、降雨I-⑥の方は、誤差が多い(自乗平均誤差では Z_H : 6.16 dB、 Z_{DR} : 0.45 dB)。この原因としては、偏波切り替え器の温度特性によるものと考えられる。降雨I-⑤の観測時の気温は19.7°C、降雨I-⑥の観測時の気温は27.0°Cであり、かなり異なっている。

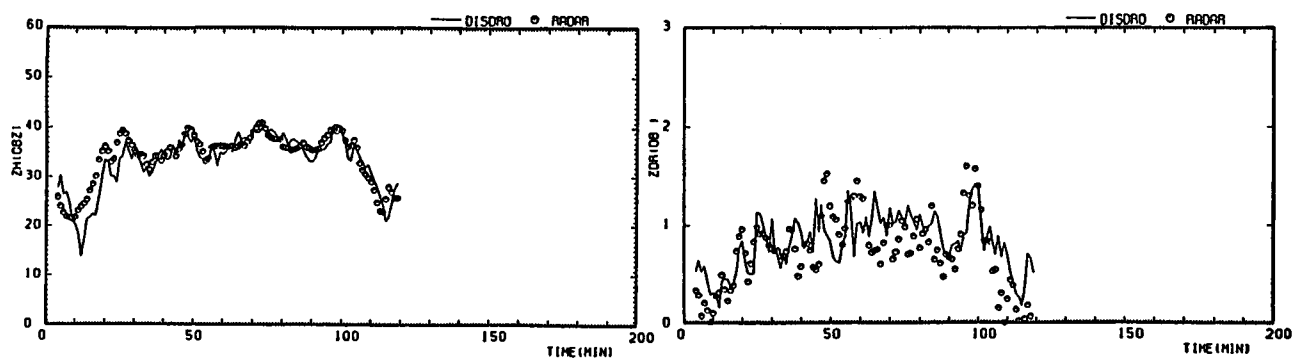


図-3. 16(a) Z_H , Z_{DR} の比較(降雨I-⑤)

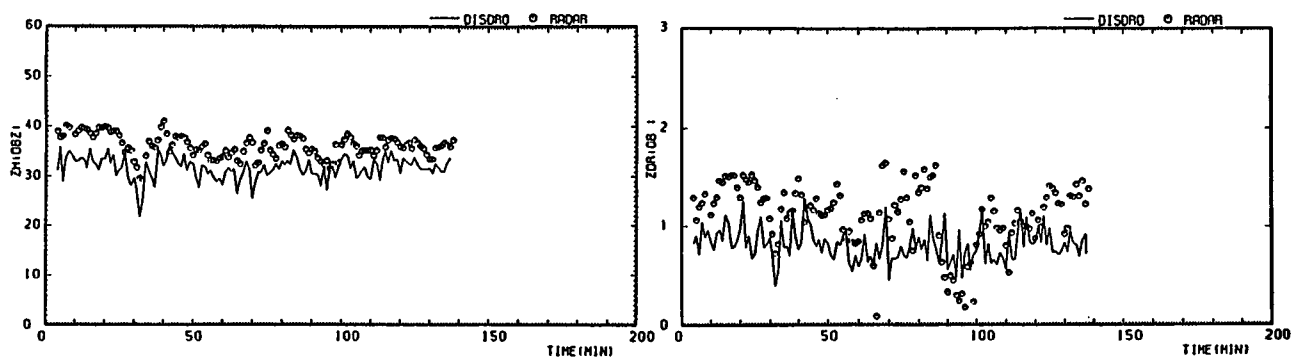


図-3. 16(b) Z_H , Z_{DR} の比較(降雨I-⑥)

3. 4. 3 降雨強度の測定精度

(1) $B\beta$ の設定方法による違い

$B\beta$ を固定する方法（ケース 1）、最適 $B\beta$ を用いる方法（ケース 2）及び 30 分ごとに $B\beta$ をキャリブレーションする方法（ケース 3）の 3 ケースについて計算したが、最も安定した精度が得られたのは、ケース 1 であった。その理由は、次のとおりである。

① ケース 2 では、降雨強度が時間的に大きく変化しない場合は、最も精度が良い（図 - 3. 17 (a), 降雨 I - ⑨）が、激しく変化する場合は、かならずしも良い精度とはならない（図 - 3. 17 (b), 降雨 I - ⑧）。

② ケース 3 でも降雨強度が急激に変化する場合は、精度は向上しない（図 - 3. 17 (c), 降雨 I - ④）。

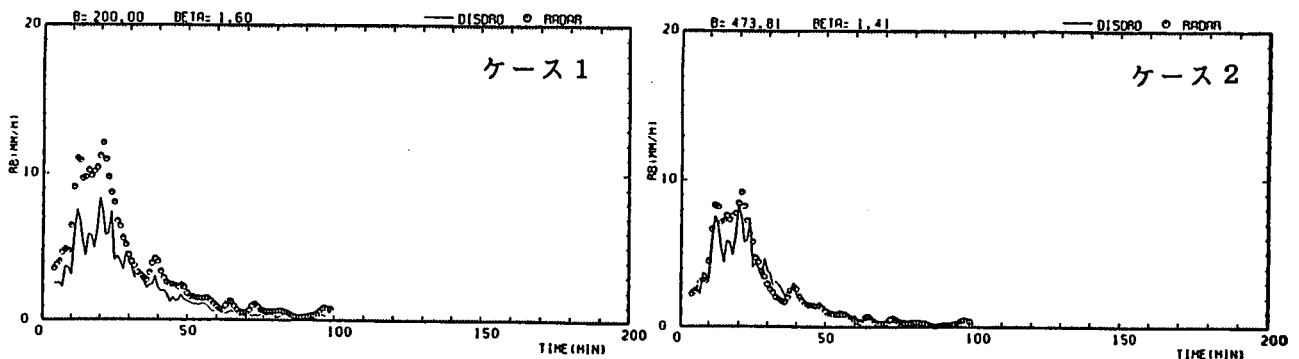


図 - 3. 17 (a) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I - ⑨）

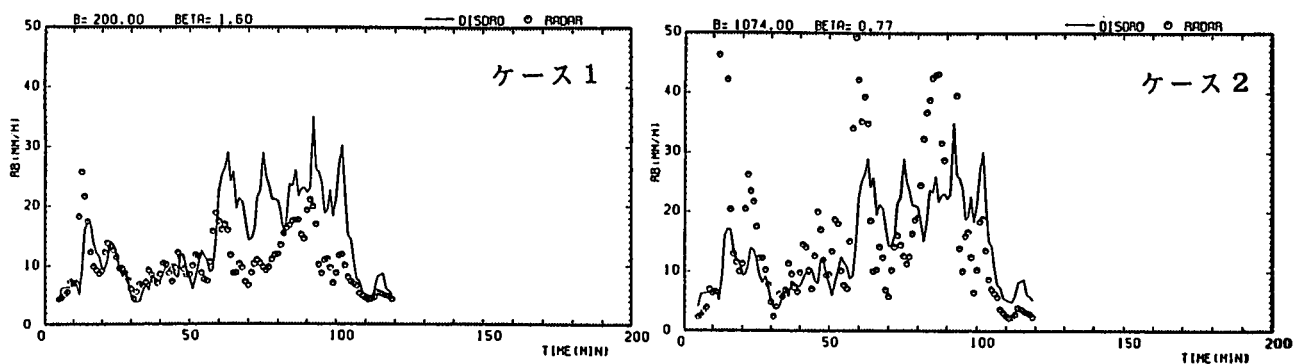


図 - 3. 17 (b) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I - ⑧）

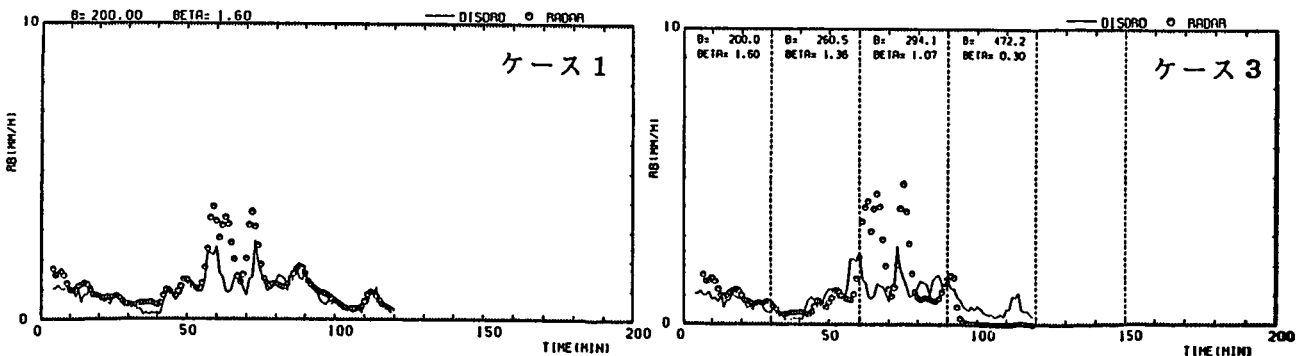


図 - 3. 17 (c) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I - ④）

(2) $B\beta$ 法と Z_{DR} 法の比較

$B\beta$ 法（定数固定）と Z_{DR} 法の精度比較を行った。 Z_{DR} 法は、現状のハードウェアでは Z_{DR} 値が 0.5 dB 以下の降雨で、精度が非常に劣る（図-3.18(a), 降雨I-③）。しかし、 Z_{DR} が 0.5 dB 以上となると比較的安定した精度で測定できるようになり（図-3.18(b), 降雨I-④）、 Z_{DR} が 1 dB 程度かそれ以上となると $B\beta$ 法より観測精度が良くなる（図-3.18(c), 降雨I-⑩）。

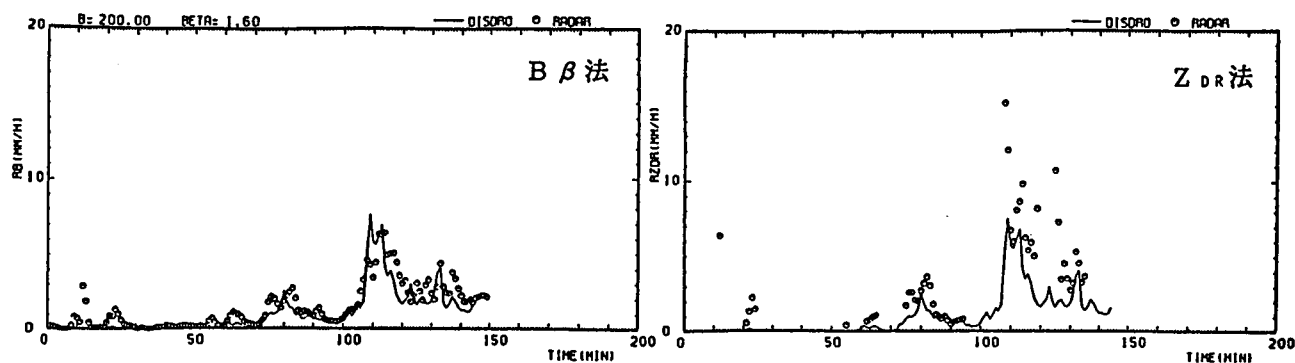


図-3.18(a) 降雨強度の比較（降雨I-③、 $Z_{DR} \leq 0.5\text{ dB}$ ）

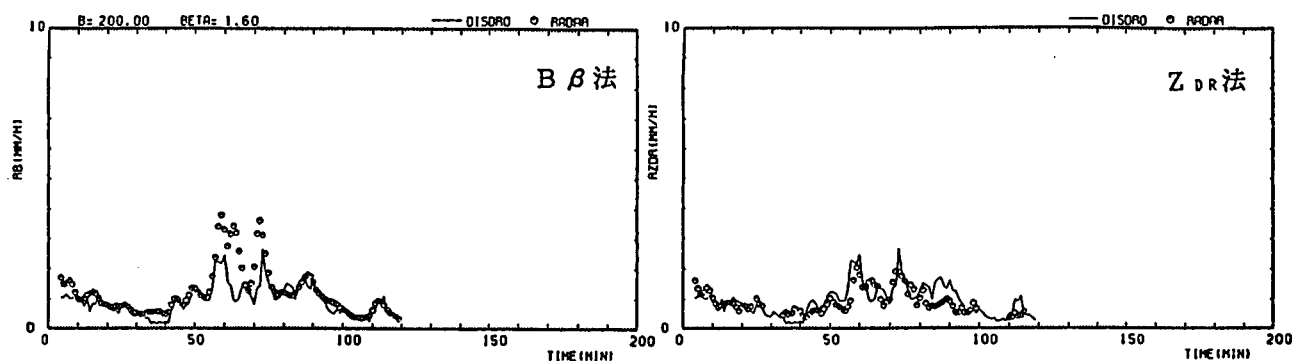


図-3.18(b) 降雨強度の比較（降雨I-④、 $Z_{DR} \geq 0.5\text{ dB}$ ）

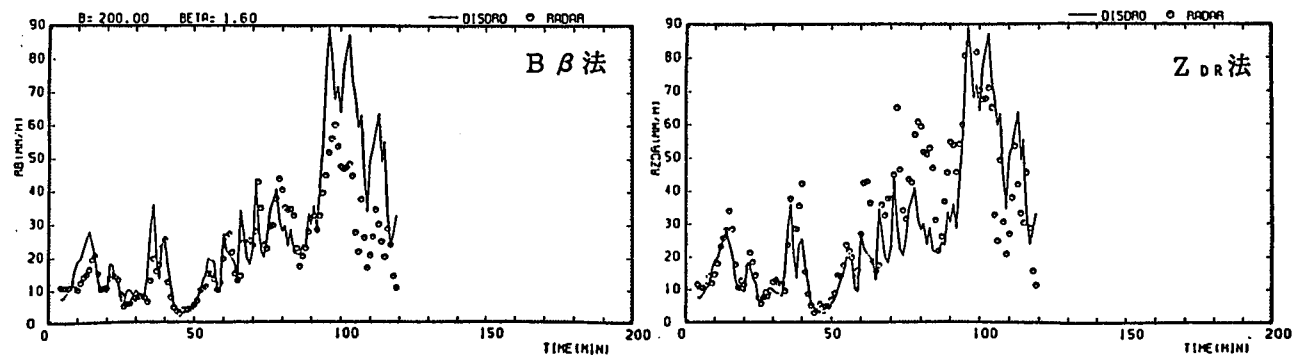


図-3.18(c) 降雨強度の比較（降雨I-⑩、 $Z_{DR} \geq 1.0\text{ dB}$ ）

3. 4. 4 減衰の考慮した場合の効果

(1) $B\beta$ 法の減衰の効果

ここでは、偏波データから減衰量を求める方法について、降雨強度の測定精度（ $B\beta$ 法、定数固定）への影響について調べた。弱い降雨の場合（ 10 mm/h 以下）では、減衰の効果はほとんどない（図-3. 19(a), 降雨 I-⑦）。 30 mm/h 程度の降雨になるとわずかではあるが、減衰を考慮した効果があり、精度が少し向上する（図-3. 19(b), 降雨 I-⑧）。さらに降雨強度が強い場合は、大幅に精度が向上する（図-3. 19(c), 降雨 I-⑩）。

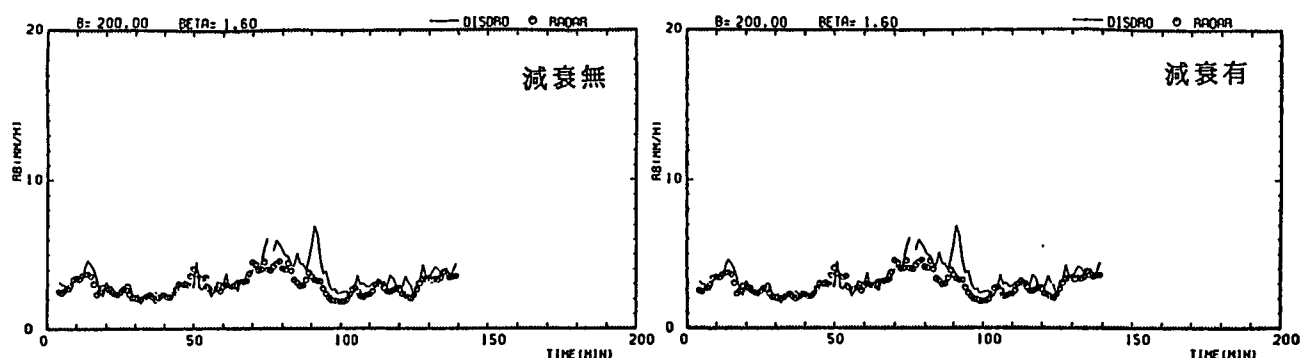


図-3. 19(a) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I-⑦）

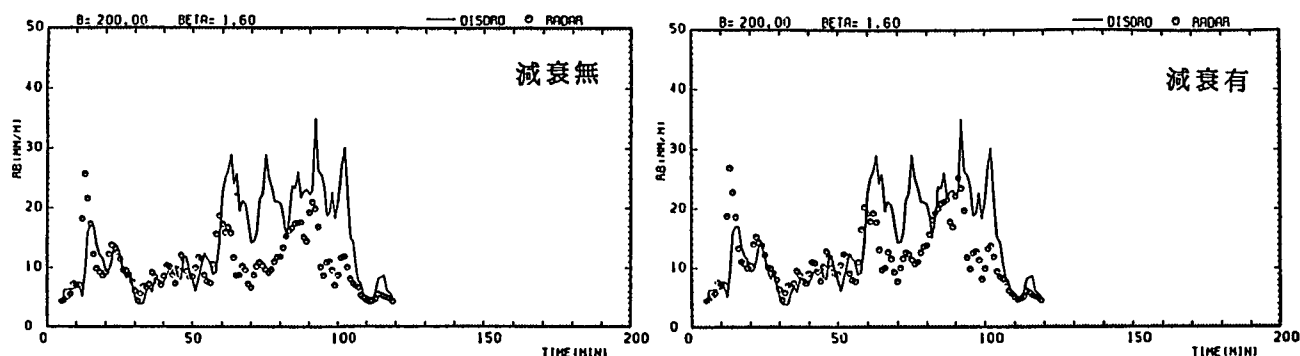


図-3. 19(b) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I-⑧）

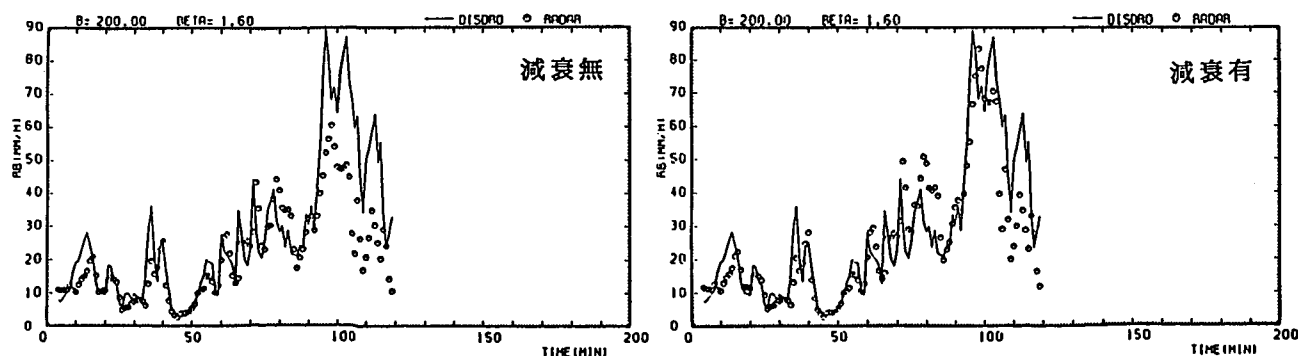


図-3. 19(c) 降雨強度の比較（ $B\beta$ 法, 降雨 I-⑩）

(2) Z_{DR} 法の減衰の効果

Z_{DR} 法の場合は、減衰の効果がほとんど現れない(図-3. 20, 降雨I-⑦, ⑧, ⑩)。これは、 Z_{DR} 法では Z_H , Z_{DR} の両方が減衰の影響により変化するため、降雨強度に換算したときに、結果としてあまり大きく変化しないためである。すなわち、 Z_{DR} 法では、減衰の影響をなくす効果があるのではないかと考えられる。

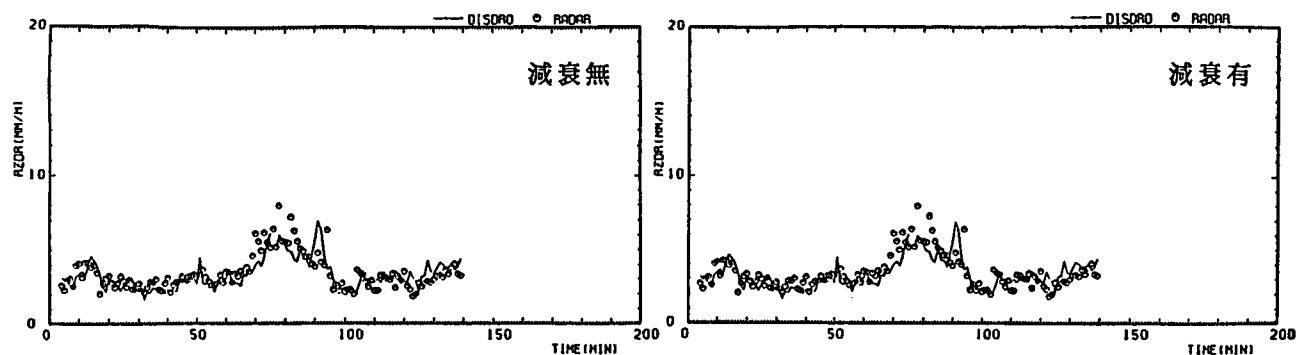


図-3. 20 (a) 降雨強度の比較 (Z_{DR} 法, 降雨I-⑦)

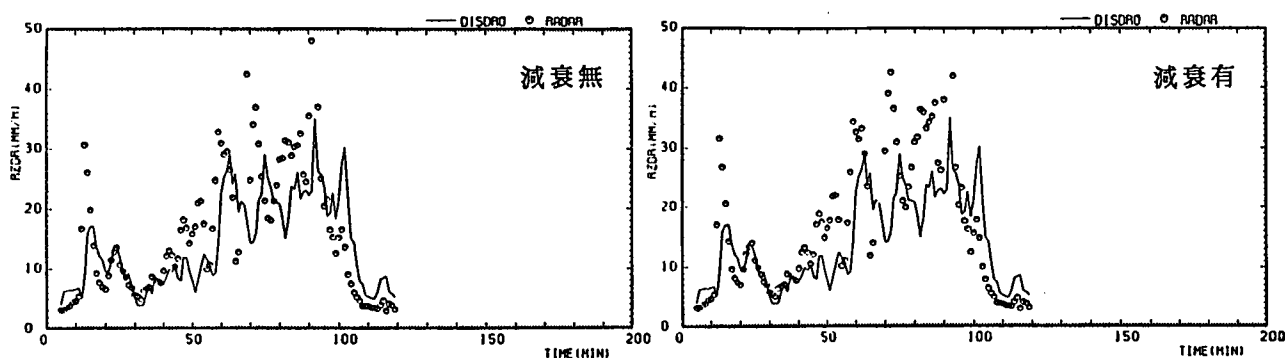


図-3. 20 (b) 降雨強度の比較 (Z_{DR} 法, 降雨I-⑧)

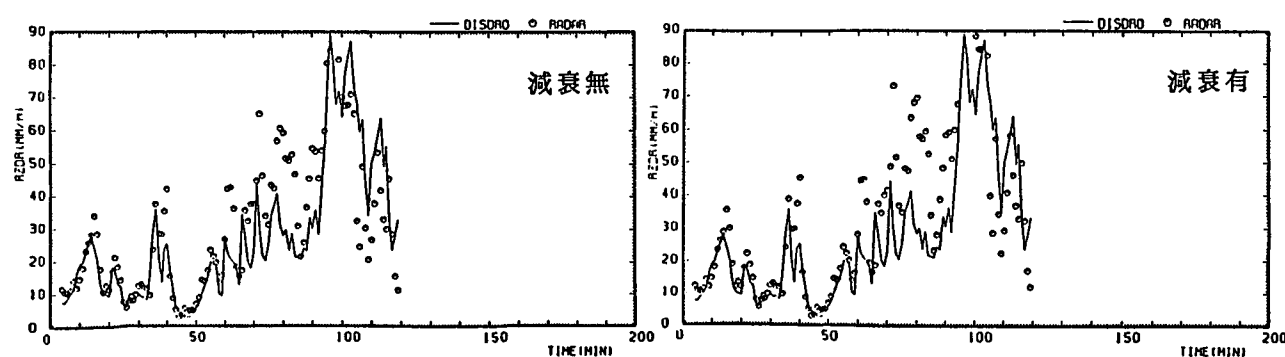


図-3. 20 (c) 降雨強度の比較 (Z_{DR} 法, 降雨I-⑩)

(3) 今井式との違い

B β 法について、今井式により減衰を考慮した場合と偏波データからの計算による減衰を考慮した場合とを比較した(図-3.21, 降雨I-⑧・⑩)。両者に大きな差はないが、偏波データにより方が若干精度が良いことがわかる。

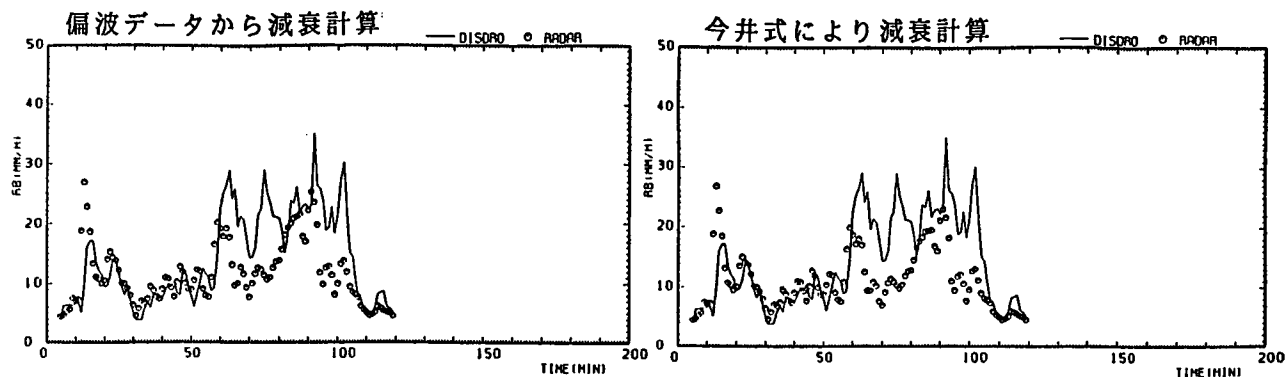


図-3.21(a) 降雨強度の比較 (B β 法, 降雨I-⑧)

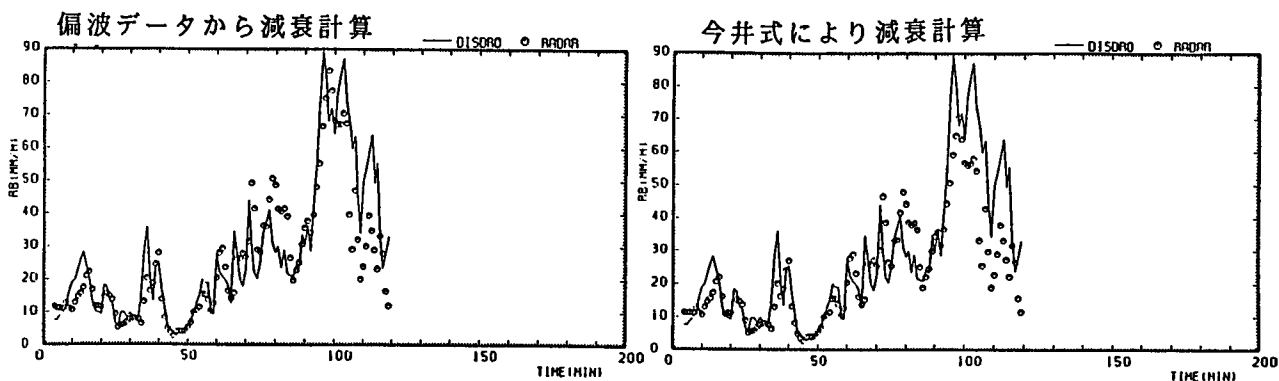


図-3.21(b) 降雨強度の比較 (B β 法, 降雨I-⑩)

3. 4. 5 SCANモードでの観測精度

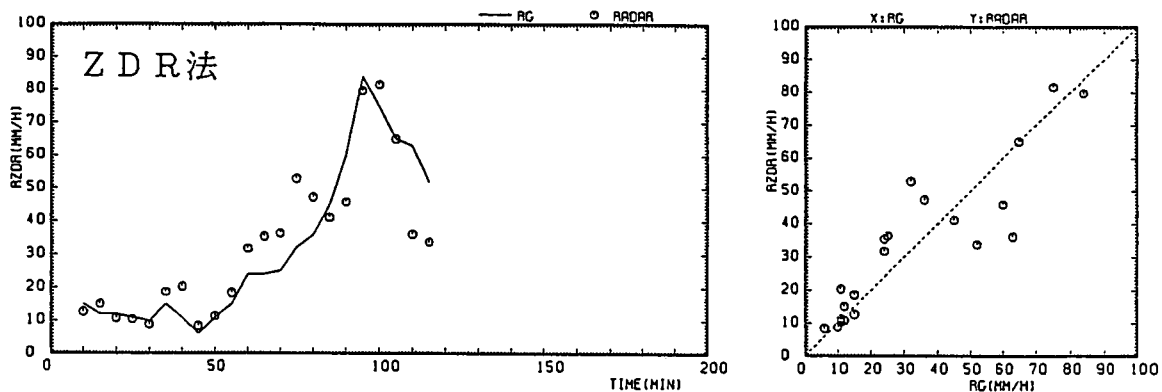
図-3. 22にSCANモードでの観測結果と方位固定モードでの観測結果の比較を示す(降雨II-⑪,⑫)。全体評価のところでも述べたが、Z_{DR}法の場合は、SCANモードでの観測精度が方位固定モードの時と比べて悪くなる。その理由は、Z_{DR}の平均個数が少なくなるためである。すなわち、観測されるZ_{DR}値が、大気現象の平均的な変化を捉えることができずに、時間的な変動(測定誤差も含む)の影響を大きくうけるためである。

転倒ます雨量計データによる精度評価で用いた方位固定データ(運用パターン7)とSCANデータ(運用パターン5-5)の5分間平均データ平均個数を比較すると次のようになる。なお、平均個数には、時間平均と空間平均の両方を含むものとする。

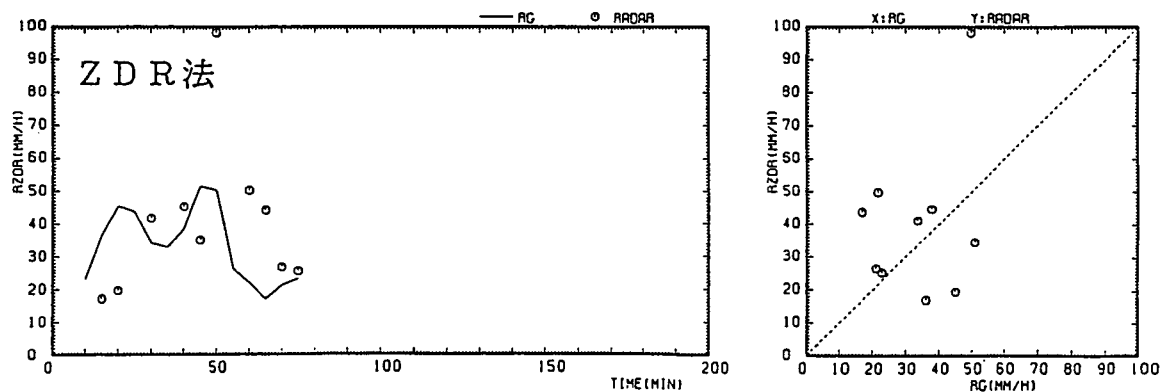
運用パターン7 $(256^\circ\text{-タ}/20\text{s}) \times (5\text{min} \times 60\text{s}) \times 3\text{メッシュ} = 11,520\text{データ}$

運用パターン5-5 $(15^\circ\text{-タ}/5\text{min}) \times 5\text{min} \quad *9\text{メッシュ} *9\text{観測所} = 1,215\text{データ}$

したがって、SCANモードでの平均個数は、方位固定モードでの平均個数の約1/10であることがわかる。SCANモードで方位固定モードと同じ精度で観測するには、1ビーム方向当りのデータ収集時間を長くしなければならない。今後、短時間に多数のデータが収集できるような運用方法を検討する必要がある。



(a)方位固定モード(降雨II-⑪)



(b)SCANモード(降雨II-⑫)

図-3. 22 SCANモードと方位固定モードの比較

3. 4. 6 雨滴の粒径分布の推定精度

ここでは、実際に観測された雨滴の粒径分布とレーダにより推定された粒径分布とを比較した。

図-3. 23に Z_{DR} の時間変化図と散布図（降雨Ⅰ-⑩）を示す。この観測降雨は、図中の領域Aでは主に前線による降雨であり、それが領域Bでは低気圧による降雨に変化していった降雨である。

これから、 Z_{DR} は、降雨強度の強い部分（領域B）で、地上値との誤差が大きくなっていることがわかる。領域Aと領域Bの Z_{DR} 値を比較すると次のことが言える。

領域A：レーダ値の方が、0.3 dB程度大きい、地上値と1対1に対応している。

領域B：降雨強度の強いところほど地上値との差が大きくなっている。

領域A、Bについて、粒径分布で比較してみると、図-3. 24のようになる。領域Bでは、レーダから推定した分布形状と地上で観測された分布形状がかなり異なることがわかる。この原因としては、降雨強度が強い場合には、雨滴の衝突による併合や分裂が激しく起こるために高度方向に分布形状が大きく変化し、その影響が Z_{DR} の誤差、すなわち粒径分布の誤差となって現れたことによると考えられる。

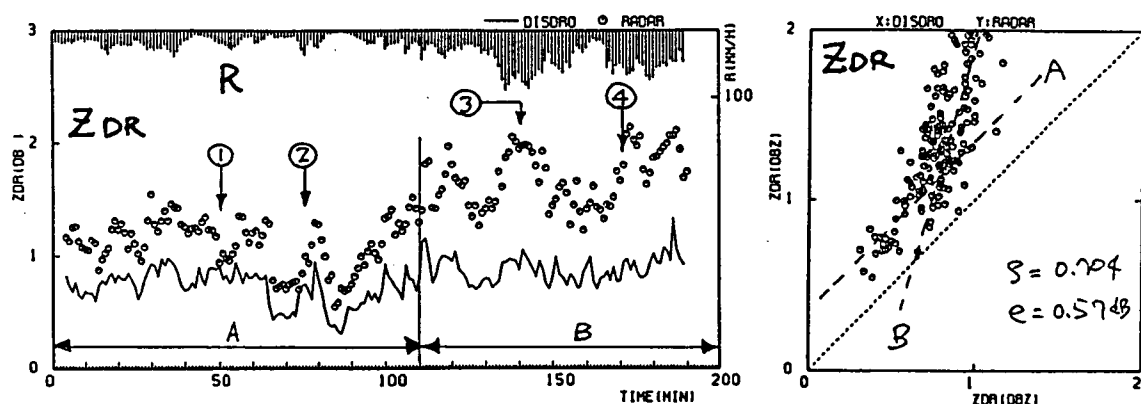


図-3. 23 Z_{DR} の時間変化図と散布図（降雨Ⅰ-⑩）

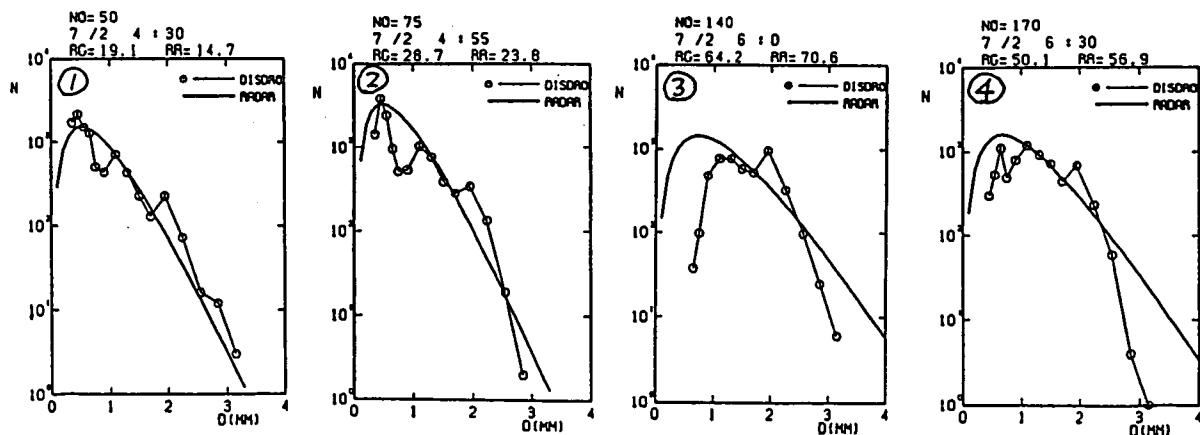


図-3. 24 粒径分布図

3. 5 最適 F 値の検討

Z_H , Z_{DR} の地上値との比較から、最適な F 値を求めた。その方法は、設定済みの F 値を用いて得られた、レーダ観測の Z_H , Z_{DR} のディストロメーターデータから計算により求めた Z_H , Z_{DR} に対する自乗平均誤差を求め、その値で F 値を補正した。具体的には、次のように計算した。

$$\text{最適 } F (Z_H) = \text{設定 } F (Z_H) \text{ 値} - \text{自乗平均誤差} (Z_H)$$

$$\text{最適 } F (Z_V) = \text{設定 } F (Z_V) \text{ 値} - \text{自乗平均誤差} (Z_H) + \text{自乗平均誤差} (Z_{DR})$$

結果を表-3. 13に示す。これから、降雨により最大3 dB程度の差があることがわかる。ただし、降雨 I-⑩のみが5 dBと大きくなっている。この降雨の場合は、降雨強度がかなり強く、他の降雨とは観測条件がかなり異なったためと考えられる。

降雨 I-⑩を除いた平均的な F 値（導波管ロスを除く）は、次のとおりである。

$$F (Z_H) = -1.86 \text{ dB}$$

$$F (Z_V) = -4.07 \text{ dB}$$

表-3. 13 最適 F 値

降雨 No	設定 F 値		自乗平均誤差		最 適 F 値			
	Z H	Z V	Z H	Z D R	導波管ロス含む		導波管ロス以外	
					Z H	Z V	Z H	Z V
①	11.43	12.67	3.73	0.38	7.70	9.32	1.44	3.03
②	11.43	13.45	4.56	0.24	6.87	9.13	0.61	2.84
③	11.43	13.45	5.65	0.21	5.78	8.01	-0.48	1.72
④	11.43	13.45	2.10	0.28	9.33	11.63	3.07	5.34
⑤	11.43	13.45	2.93	0.30	8.50	10.82	2.24	4.53
⑥	11.43	13.45	4.96	0.44	6.47	8.93	0.21	2.64
⑦	11.43	13.45	1.48	0.17	9.95	12.14	3.69	5.85
⑧	11.43	13.45	2.26	0.36	9.17	11.55	2.91	5.26
⑨	9.45	11.36	2.08	0.37	7.37	9.65	3.07	5.45
⑩	12.62	13.73	2.97	0.60	9.65	11.36	5.35	7.16

3. 6 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

① Z_H , Z_{DR} から降雨強度を計算する場合は、2つのパラメーター m と D_{max} を決定する必要がある。本研究では、ディストロメーターによる観測結果及び理論計算から、 $m = 2$ 及び $D_{max} = 7 \text{ mm}$ と設定することとした。

② 降雨強度 R と Z_H , Z_{DR} は、近似的に次の関係があることがわかった。

$$Z_H = B \cdot R, \quad B = a \cdot Z_{DR}^b$$

定数 a , b については、理論計算($m = 2$, $D_{max} = 7 \text{ mm}$)から、

$$a = 2.650, \quad b = 0.885 \quad (Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB})$$

$$a = 2.792, \quad b = 1.211 \quad (Z_{DR} > 0.4 \text{ dB})$$

となる。この式から、簡単にかつ精度よく降雨強度が計算でき、実運用上も有効であると考えられる。

③ 現在のハードウェアシステムでは、 $Z_H \geq 45 \text{ dB}$ または $Z_{DR} > 0.5 \text{ dB}$ の範囲で従来のレーダ以上の降雨観測精度が得られる。

④ Z_{DR} が 0.5 dB 以上のデータを用いて $B\beta$ 法と Z_{DR} 法の降雨観測精度比較をすると次のとおりとなった。

相関係数 $B\beta$ 法: 0.722 Z_{DR} 法: 0.836

自乗平均誤差 $B\beta$ 法: 9.116 Z_{DR} 法: 8.173 (mm/h)

(地上値は、ディストロメーターデータと転倒ます雨量計データ)

⑤ $B\beta$ 法と Z_{DR} 法の散布図を比較すると、降雨強度が強いところでは Z_{DR} 法の精度が $B\beta$ 法より良くなることが確認できた。

⑥ 個々の降雨では、 $B\beta$ 法, Z_{DR} 法ともに、観測精度が良いものもあれば悪いものもある。これは、 F 値が一定していないことに起因するものと考えられる。

⑦ 最適化した $B\beta$ 法でも、定性的に見て、降雨強度が大きく変化する(粒径分布が変化する)時間帯では、過小評価や過大評価になる。

⑧ Z_{DR} 法の場合は、減衰を考慮しても降雨観測精度への効果はほとんどない。しかし、降雨Ⅰ-⑩についてのみ、 $B\beta$ 法で、減衰を考慮した場合に大幅に精度が向上した。

⑨ 今井式による減衰と偏波データから計算される減衰とでは、あまり大きな差がなかった。レーダサイトからの距離が遠い地点で比較してみる必要がある。

⑩ 地上観測値との比較により得られた最適 F 値は、 $F(Z_H) = -1.86 \text{ dB}$, $F(Z_V) = -4.07 \text{ dB}$ であった。

(参考)

1990年久留米での観測結果

— 6月30日～7月2日 九州中北部豪雨 —

1. 降雨概況

九州北部は、梅雨前線の影響により6月30日から弱い雨が降り続いていたが、7月1日の夜から強くなり、2日には一部の地域では集中豪雨となった。

DNDレーダの観測範囲でも強いエコーが観測され、地上での観測（ディスドロメーター）では、100mm/h程度の降雨強度が観測された。

図-1にDNDレーダ観測エコーを、図-2にディスドロメーター観測結果（元筑邦出張所）を示す。6月30日17時付近でレーダ観測範囲全域にエコーが生じるが、強度自体はそれほど強くはなく、エコーは次第に縮小する。7月1日23時付近から再びエコーが全域にかかり、徐々に強度が強くなる。ディスドロメーター観測地点では、7月1日の17時までは、瞬間的に10mm/hを超える時もあるが、ほとんど5mm/h以下の弱い雨が降り続き、以後、次第に強くなり、最も降雨強度が強い時間帯は5時～7時で、降雨強度は20～90mm/hであった。

雨滴の粒径分布測定結果 <1990 7 / 2 0 : 0 - 7 / 2 10 : 0 > <1990 7 / 2 5 : 0 - 7 / 2 8 : 0 >

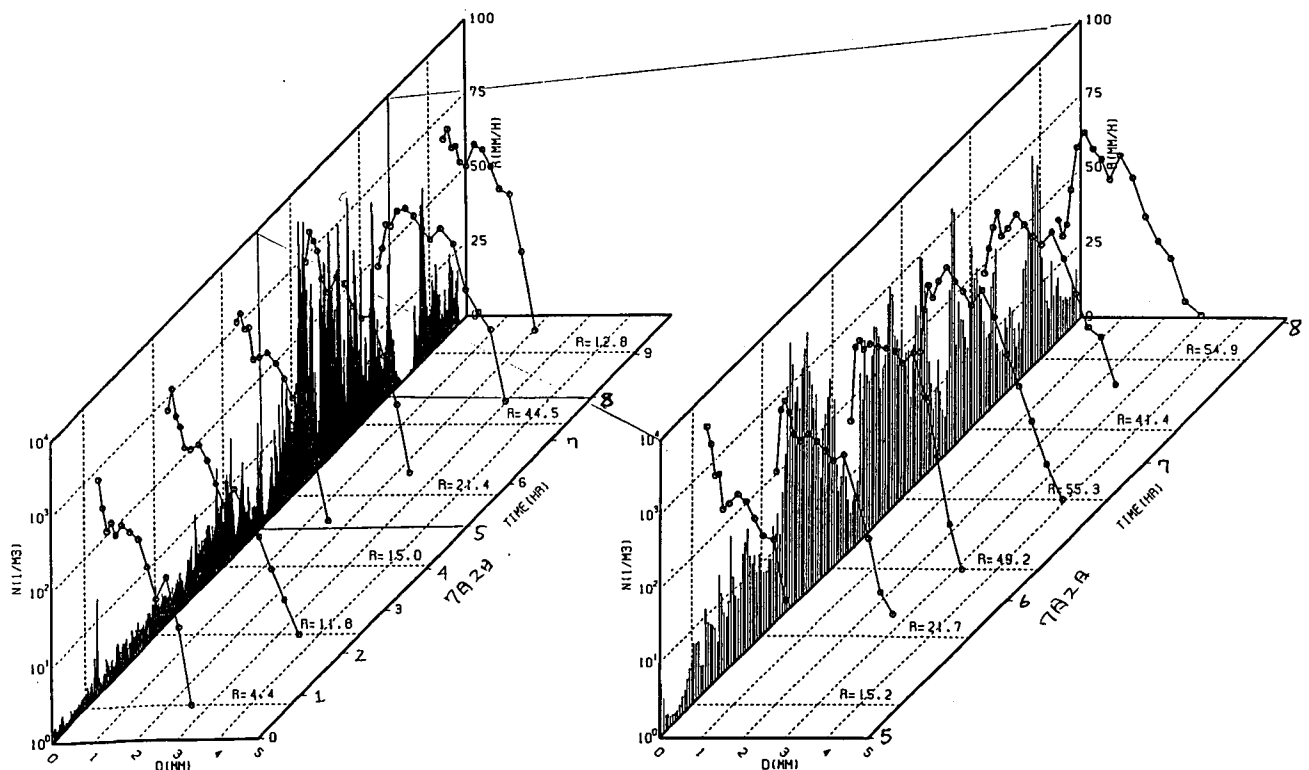
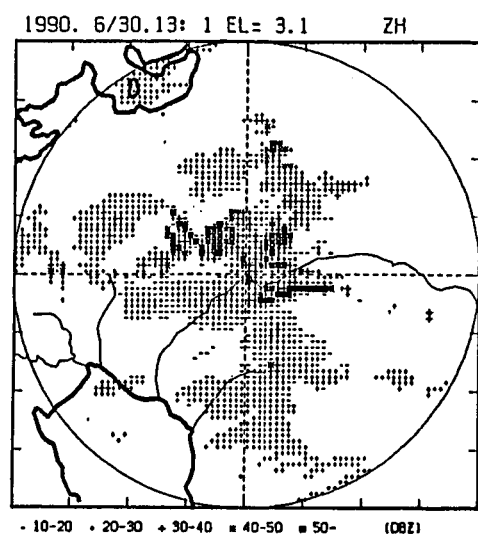
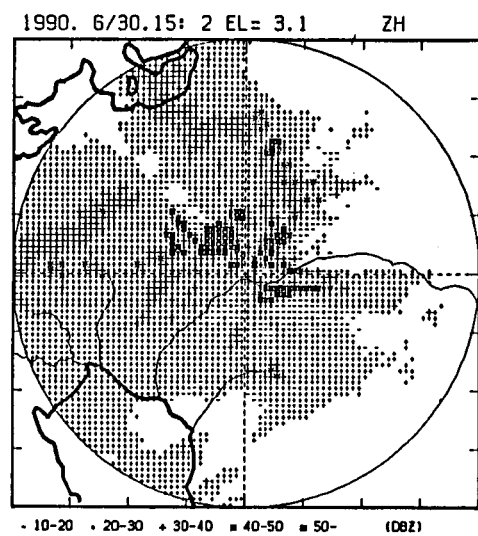


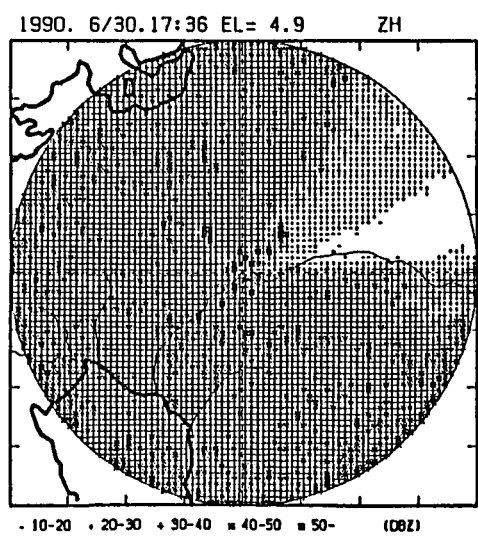
図-2 ディスドロメーター観測結果（元筑邦）



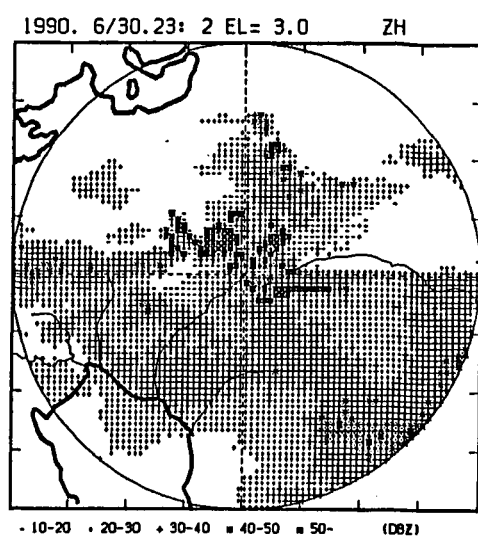
↓ 6/30 13:01



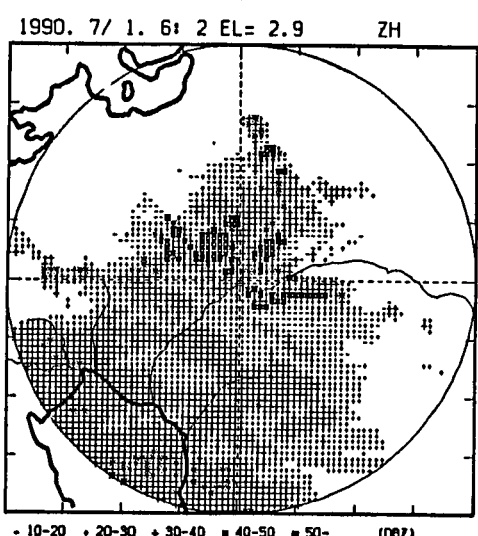
↓ 6/30 15:02



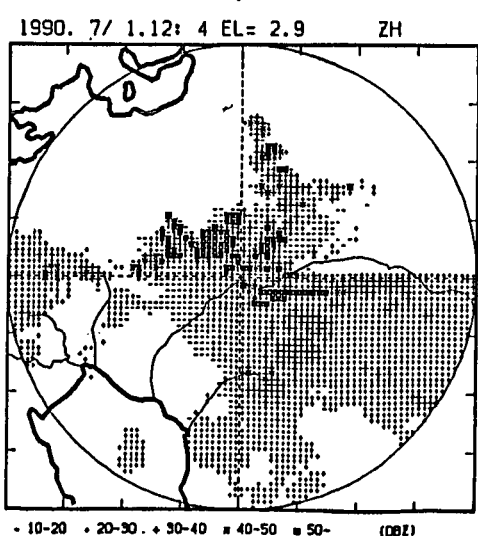
↗ 6/30 17:36



↓ 6/30 23:02

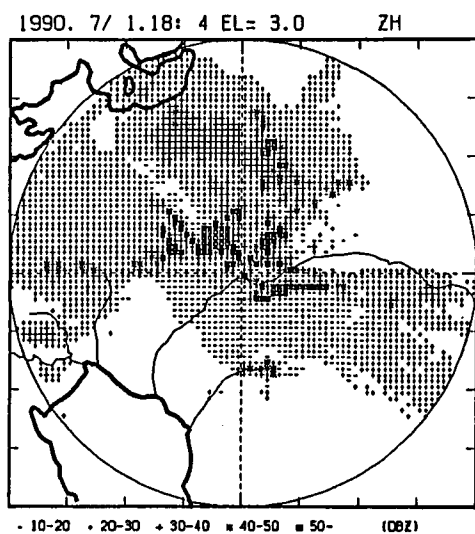


↓ 7/1 6:02

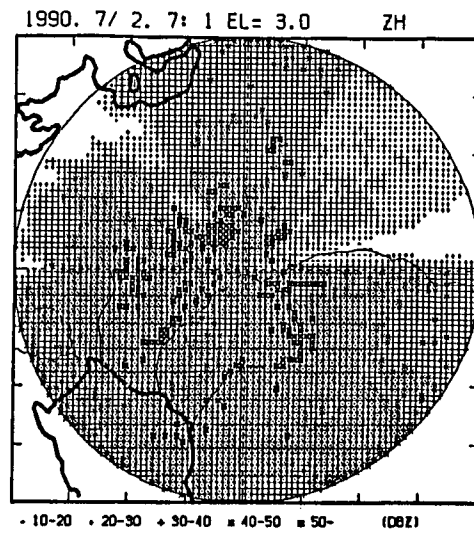


↓ 7/1 12:04

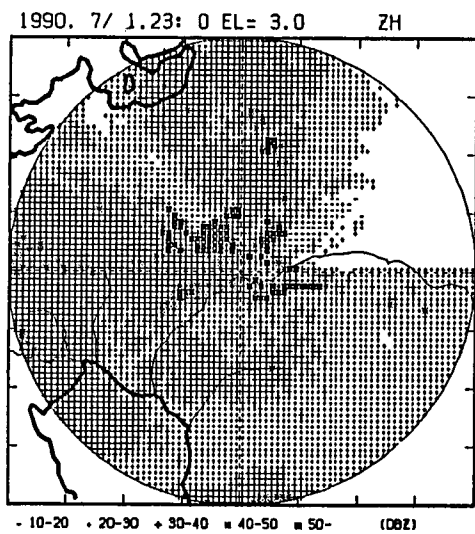
図-1(a) DNDレーダ観測エコー



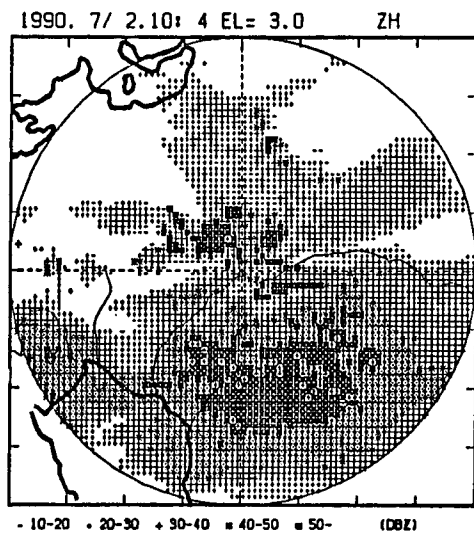
↓ 7/1 18:04



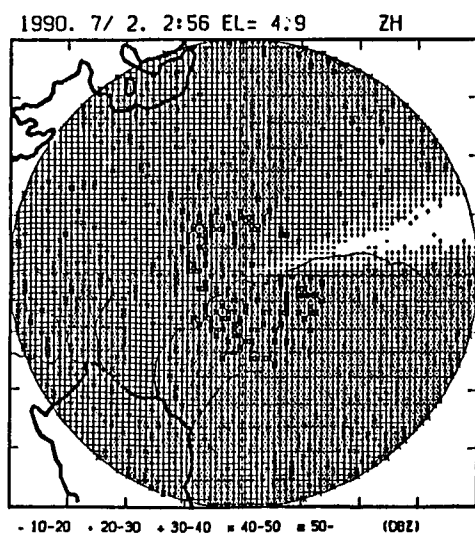
↓ 7/2 7:01



↓ 7/1 23:00



7/2 10:04



↑ 7/2 2:56

図-1(b) DNDレーダ観測エコー

2. R H I 観測

下記時間帯において、R H I 観測を1時間ピッチで4回行い、その時間変化について調べた。

① 6月30日17:00～ 20:17 (梅雨前線の南下に伴う降雨)

② 7月 1日23:16～2日02:53 (低気圧による降雨)

観測方位角は、ディスドロメーター方向である。R H I 観測の合間は、ドップラー観測と4仰角偏波観測を行った。

図-3にR H I 観測期間中の降雨状況(ディスドロメーター)を示す。6月30日降雨の方は、5 mm/h程度の弱い雨で、雨滴の粒径も最大2 mm程度である。7月1日～2日の降雨は、徐々に降雨強度が強くなっていく状態であり、最大降雨強度は、30mm/hを超えている。また、雨滴の最大粒径も強い所で3 mmを超えている。

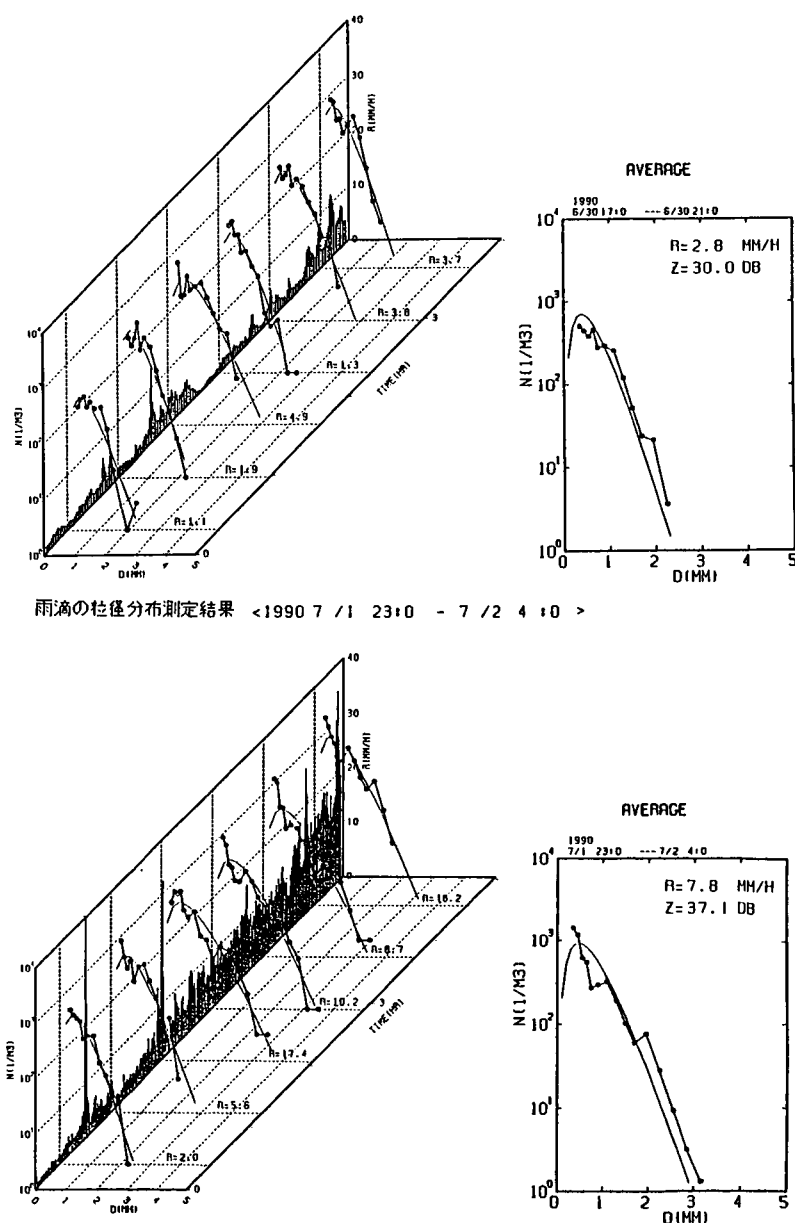


図-3 R H I 観測期間中の降雨状況

2. 1 6月30日観測

(1) ドップラー観測

図-4にRHI観測期間中のドップラー観測結果を示す。(a)は17:09観測で、風向に不連続が生じており、典型的な前線性降雨であることを伺わせる。下層の風速は10 m/s以下であり、上層(高度2.5km以上)は20m/s程度である。(b)は20:05観測で、(a)に比べて前線面が不明瞭になっている。

(2) 高度変化図

図-5に各時間における Z_H 、 Z_{DR} 、 D_0 (平均粒径)の高度変化図(レーダサイトからの距離12.1kmの地点)を示す。高度4 kmに少しピークが見られるのは、ブライトバンドである。 D_0 に着目すると、①、②の時間では、高度1.5 km付近にピークが見られるが、③ではそれがなくなり、④では D_0 の値全体が1 mm以下と小さくなる。この結果は、ドップラーの観測結果と併せて考えると、次のように推察できる。

すなわち、①、②の時間帯では、前線が比較的活発な状態にあり、前線面に沿って上昇流が生じている。それに伴い、水蒸気の凝結が促進された、あるいは、雨滴の衝突併合が促進された(相対的な落下速度の低下による)ことにより、 D_0 が高度1.5 km付近で一時的に大きくなった後、大きい雨滴の自然分裂により D_0 が減少したと考えられる。

③の時間帯では、高度方向に比較的 D_0 が大きい(1.5 mm程度)状態を保っている。これは、上昇流が強くブライトバンド高度近くまで達しているためではないかと考えられる。

④の時間帯では、観測地点が前線の周辺部に移ってしまい、激しい大気の動きがないために、 D_0 がブライトバンド直下の状態からあまり変化しないためと考えられる。

なお、参考のために、通常の層状雲による降雨(6月15日観測)と対流性降雨(6月23日観測)の観測結果を図-6に示す。層状の降雨では、 D_0 は高度が下がるにしたがって大きくなる。一方、対流性の降雨では、 D_0 が高度方向に大きく変化し、ピークを描く。6月30日の降雨は、対流性の降雨の D_0 の変化と似ており、すなわち、強い上昇流があったことが推定できる。

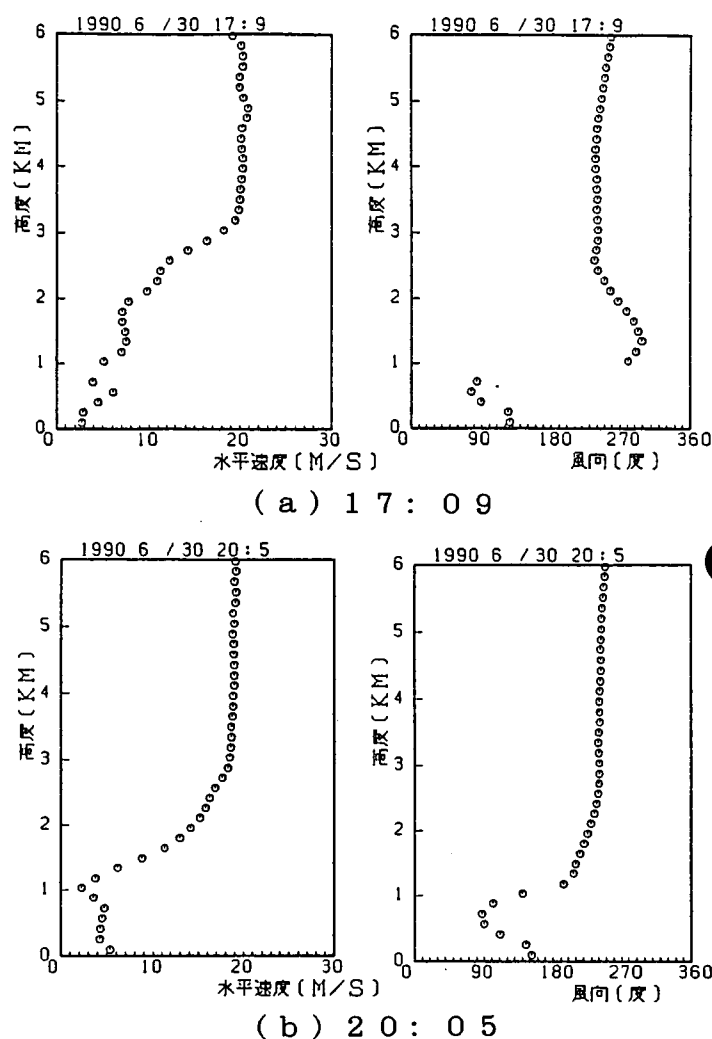
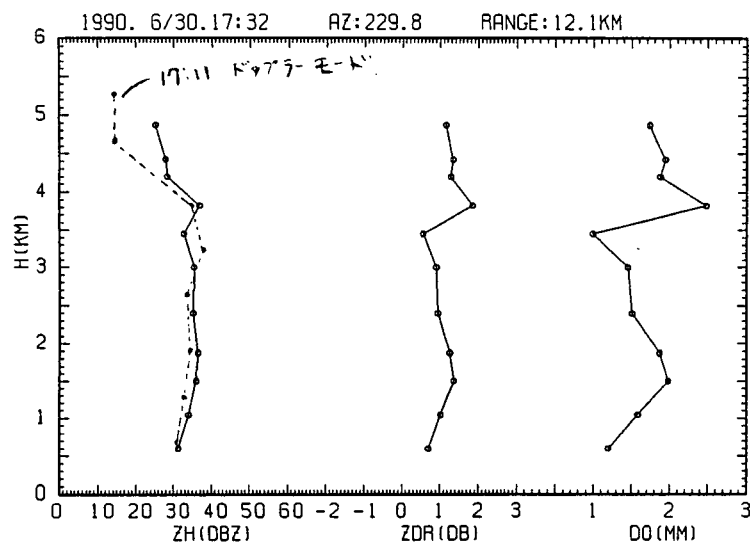
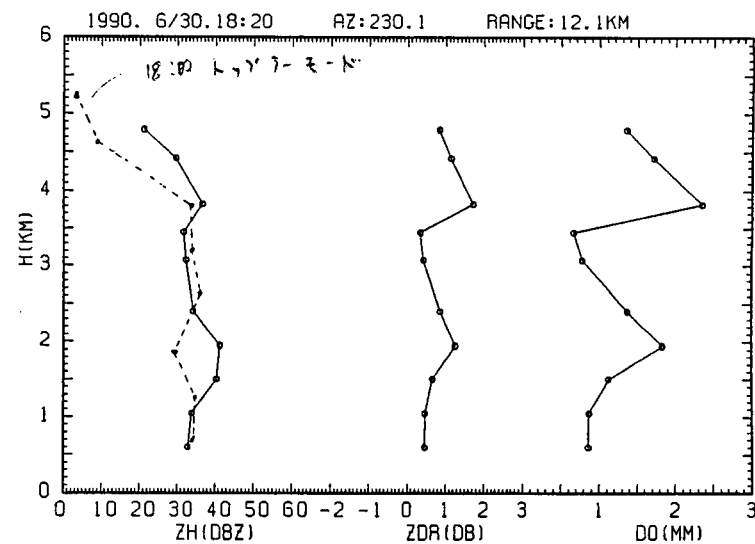


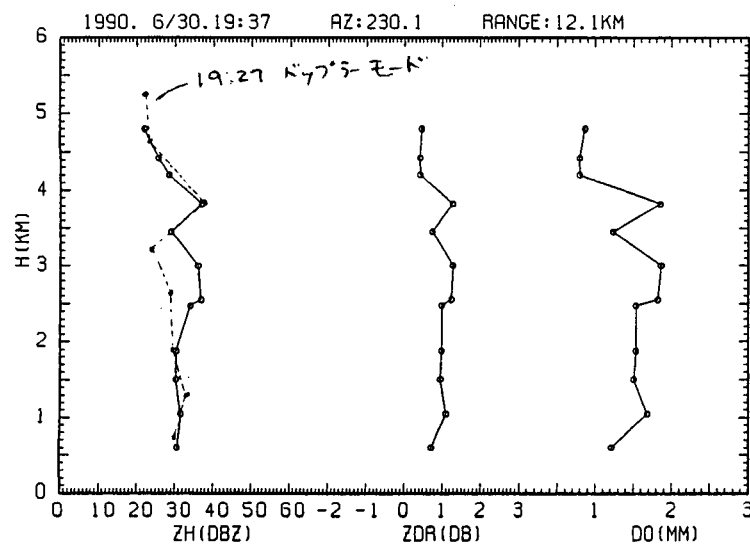
図-4 ドップラー観測結果



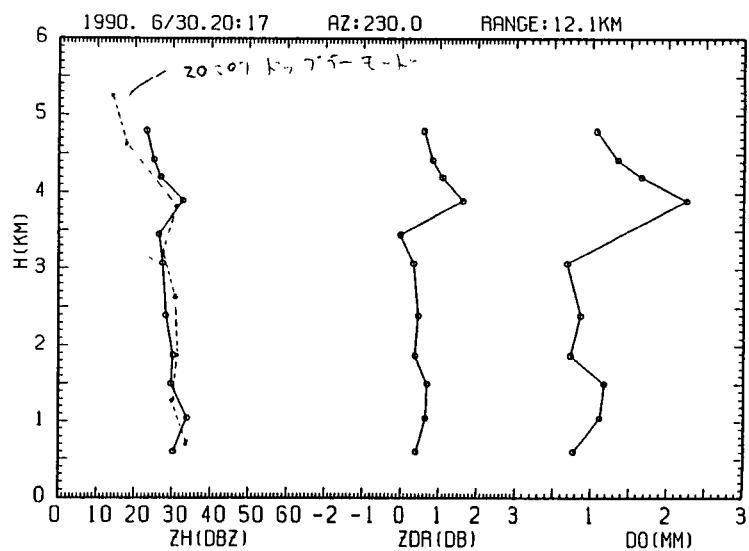
① 17:32



② 18:20

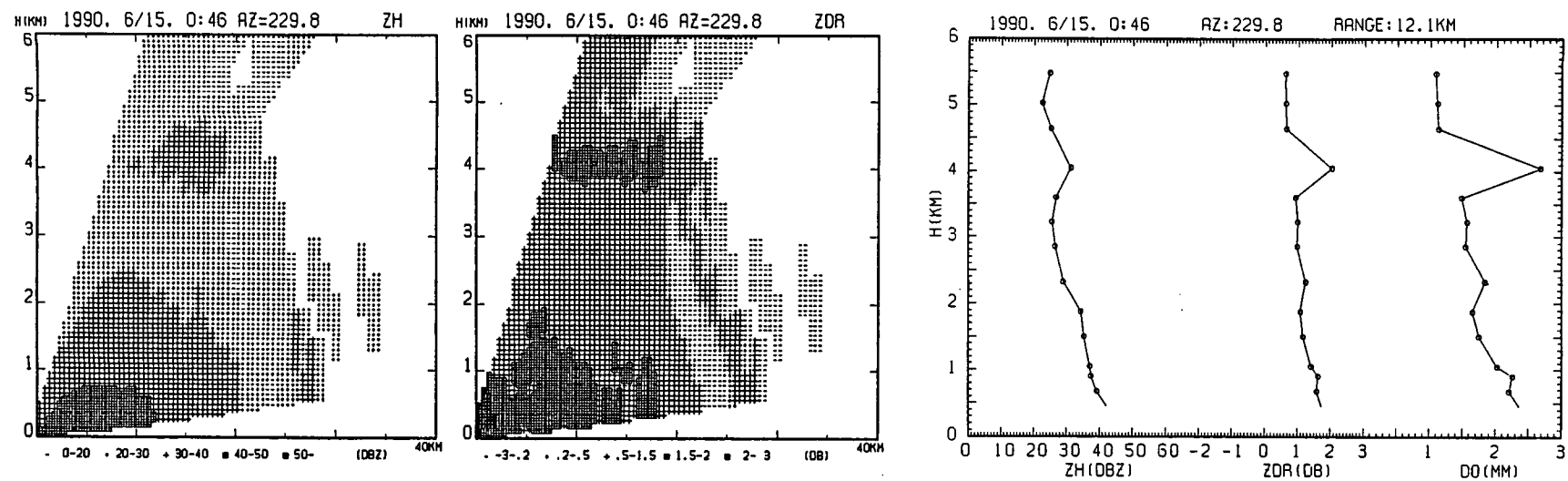


③ 19:37

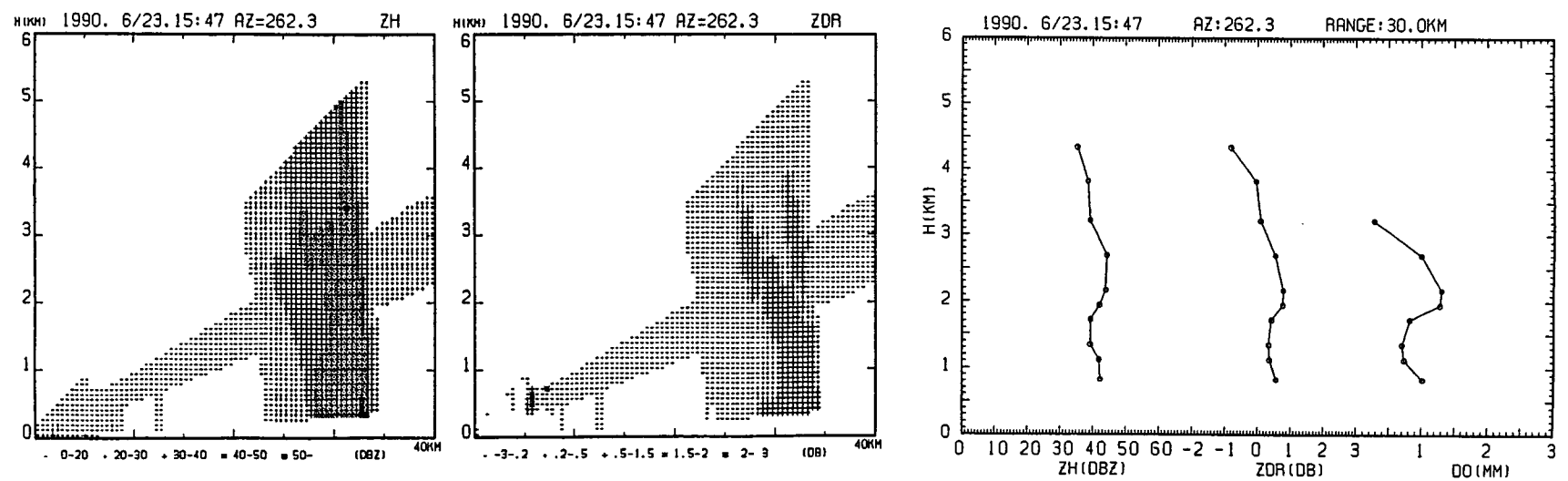


④ 20:17

図-5 高度変化図(6月30日)



(a) 層状性の降雨の例 (6月15日, 00:46)



(b) 対流性の降雨の例 (6月23日, 15:47)

図-6 高度変化の比較

2. 2 7月1日～2日観測

(1) ドップラー観測

図-7にRHI観測期間中のドップラー観測結果を示す。(a)は7月1日23:24観測、(b)は、7月2日2:38観測である。風向は、一定であるが、下層の風が(a)では10~15m/sであるが、(b)では15~25m/sと強くなっている。

(2) 高度変化図

図-8に各時間における Z_H 、 Z_{DR} 、 D_0 (平均粒径)の高度変化図(レーダサイトからの距離12.1kmの地点)を示す。高度4km付近に少しピークが見られるのは、ブライトバンドである。 Z_H の時間変化を見ると、23:40の観測では30dB程度であったが、02:53の観測では40dBと強くなっている。また、それに伴い、 Z_{DR} も0.5dBから1.0dBへと大きくなっている。 D_0 について着目してみると次のようになる。

23:40 平均的には、 $D_0 = 0.5$ mm程度であるが、高度1.5km付近にピークが見られ、1.4mmまで増大する。

00:47 高度2.3kmより上では1.5mm程度、それより下の高度では1.0mm程度である。

01:51 高度が下がるにつれ D_0 が減少している。

02:53 高度2km付近でピークが生じ、 D_0 が2mm程度まで増大する。

この降雨は、6月30日降雨のように前線面による上昇流はないが、時間経過とともに降雨強度が増大し、それに伴い D_0 の高度変化も激しく変化している。この降雨の場合は、前線は伴ってはいないが、低気圧による降雨であると考えられるので、風の収束による上昇流の変化が、 D_0 の変化に影響していると推定できる。

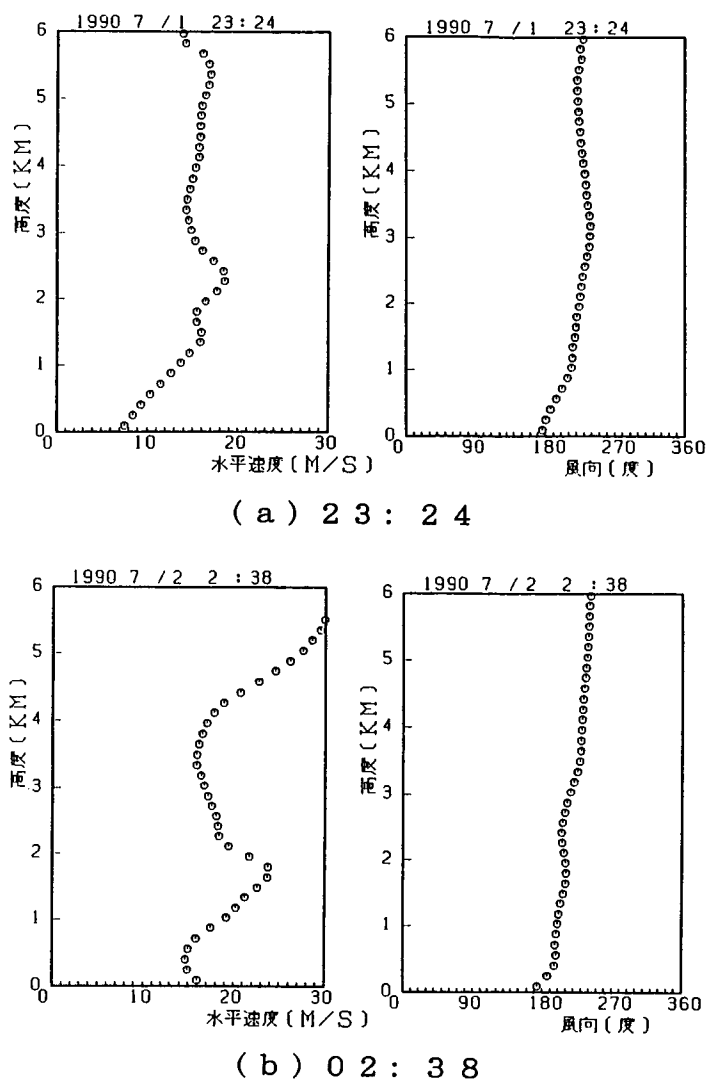
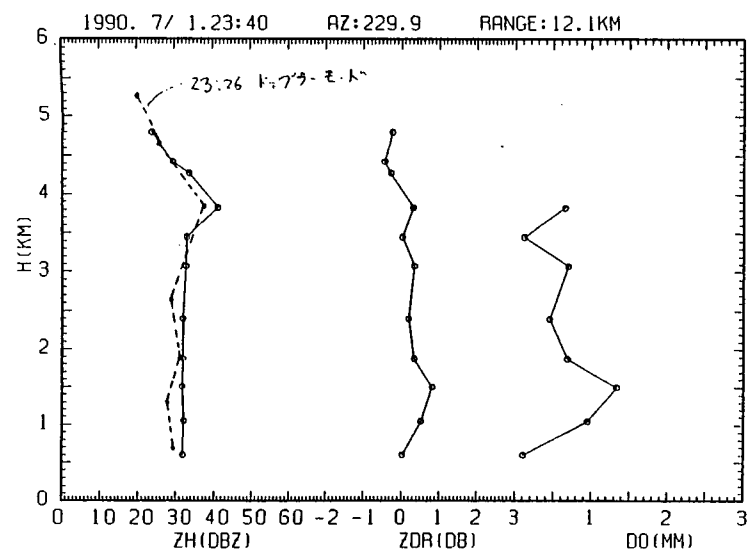
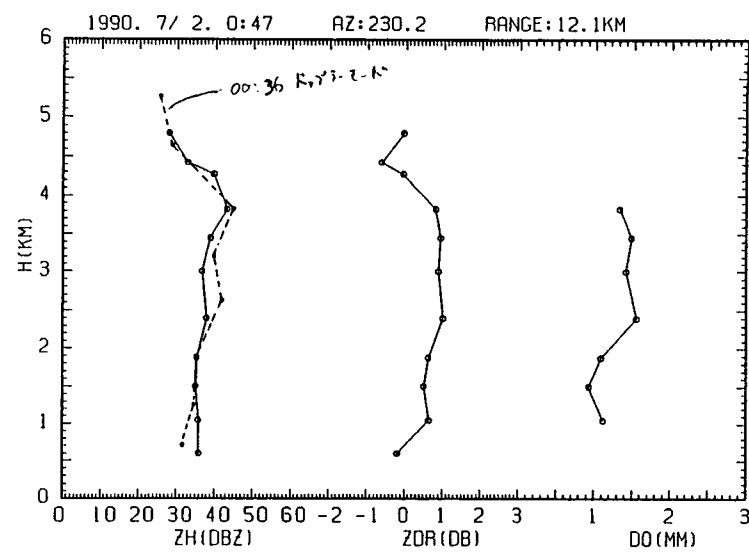


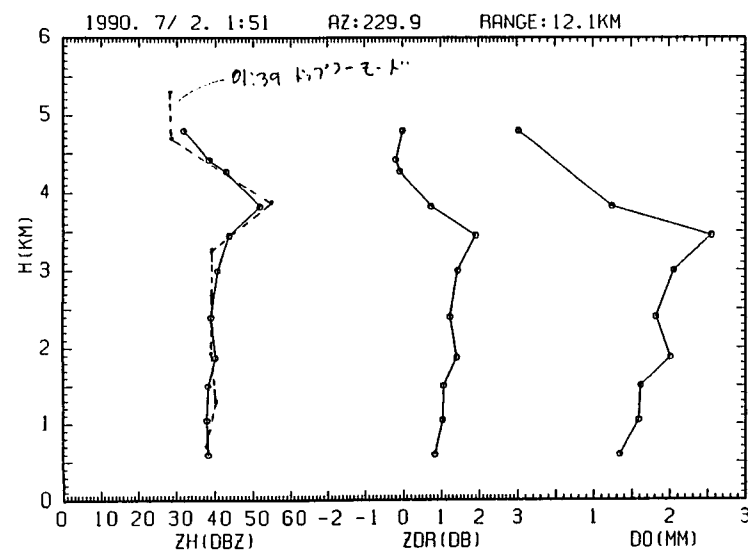
図-7 ドップラー観測結果



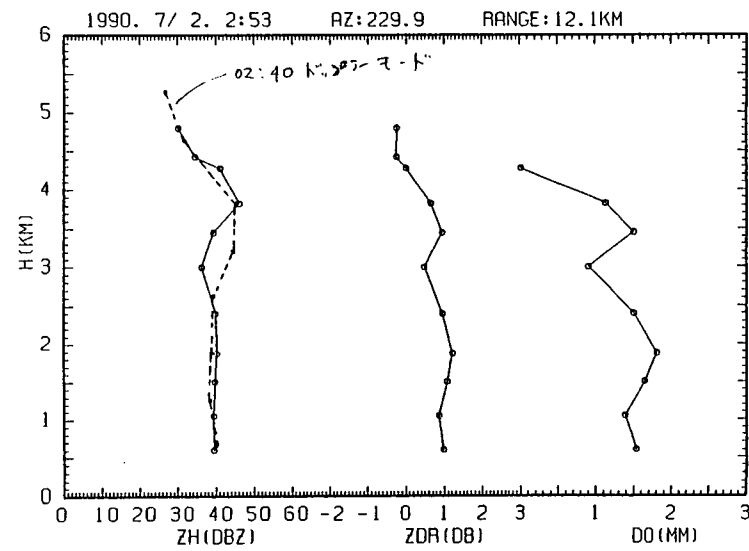
① 23:40



② 00:47



③ 01:51



④ 02:53

図-8 高度変化図 (7月1日~2日)

第4章 直交二偏波レーダによる 降雪雲の観測

4. 1 はじめに

大気中の降水粒子は、氷晶、水滴、雪片、ひょう、あられなど多様な形態をとる。レーダによりこれらの降水粒子の観測を行う場合、通常のレーダでは情報量が1つしかないため、形態の識別が不可能であるが、情報量を複数にした直交二偏波レーダを用いれば可能となる。すなわち、直交二偏波レーダでは、 Z_{HH} 、 Z_{HV} 、 Z_{VH} 、 Z_{VV} の4つの測定値が得られる。これらから、反射因子差 Z_{DR} (Z_{HH} と Z_{VV} の比、Differential Reflectivity Factor) 及び直線偏波抑圧度比 LDR (Z_{HV} (Z_{VH})と Z_{HH} (Z_{VV})の比、Linear Depolarization Ratio) を求めることができる。

Z_{HH} (あるいは Z_{VV})からは、降水粒子からの反射の強さの情報が得られる。これは通常のレーダで得られるものと同じであるが、 Z_{HH} (あるいは Z_{VV})の値が、降水粒子の誘電率と粒径分布 (降水強度) の2つのファクターに影響されるものであるので、この情報のみから降水粒子の種類を識別するのは困難である。

Z_{DR} からは降水粒子の形状の情報が得られる。すなわち、 $Z_{DR} > 0$ dBならば縦長、 $Z_{DR} < 0$ dBならば横長、 $Z_{DR} = 0$ dBならば球に近い状態の降水粒子であると判断できる。水滴や雪片などにより粒子の形状がかなり異なっているので、 Z_{DR} 値にそれらの影響が現れるはずである。

LDR からは降水粒子の振動の情報が得られる。すなわち、 $Z_{DR} = 0$ dBでも球とは限らず、偏平した降水粒子が振動している可能性がある。その場合には LDR が0 dBに近くなる (通常ではマイナス数10 dB程度である)。英国チルボルトンレーダの観測例では、ブライトバンド (融解層) で LDR 値が大きくなる (0 dBに近づく) ことが示されている。

本節では、DNDレーダによる降雪観測結果を報告するとともに、降水粒子の状態 (降水粒子の種類、降水強度) が直交二偏波レーダ観測値に与える影響について述べる。

4. 2 降水粒子の反射特性

直交二偏波レーダにより、降水粒子特性を正確に捉えるためには高速に偏波面を切り替えることが必要である。DNDレーダは、1パルスごとに偏波面を切り替えることができ、表-4. 1に示すような偏波切り替えパターンで運用できる。すなわち、次の4つの測定値が1パルスごとに得ることができる。

- ① Z_{HH} : 水平偏波で送信し、水平で受信する。
- ② Z_{HV} : 水平偏波で送信し、垂直で受信する。
- ③ Z_{VH} : 垂直偏波で送信し、水平で受信する。
- ④ Z_{VV} : 垂直偏波で送信し、垂直で受信する。

これらから、反射因子差 Z_{DR} と直線偏波抑圧度比 LDR が得られる。

Z_{DR} からは降水粒子の形状に関する情報が得られる。すなわち、 $Z_{DR} > 0 \text{ dB}$ ならば横長、 $Z_{DR} < 0 \text{ dB}$ ならば縦長、 $Z_{DR} = 0 \text{ dB}$ ならば球に近い降水粒子であると判断できる（図-4.1）。

LDR は降水粒子の傾きの大小を表すもの（図-4.2）で、このデータから降水粒子の振動に関する情報が得られる。すなわち、 $Z_{DR} = 0 \text{ dB}$ でも球とは限らず、扁平した降水粒子が振動している可能性がある。その場合には、 LDR 値が通常値（ $-20 \sim -30 \text{ dB}$ ）より大きくなる。

Z_{DR} 、 LDR の値は、降水粒子ごとに異なり、理論計算では、図-4.3のようになることが示されている¹⁾。

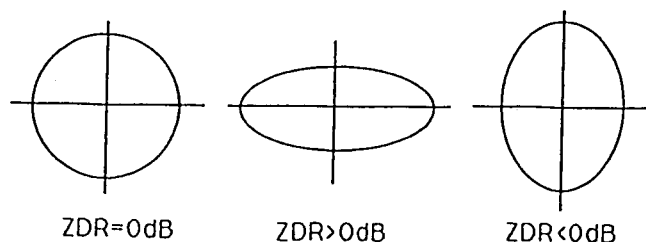


図-4.1 降水粒子の形状と Z_{DR}

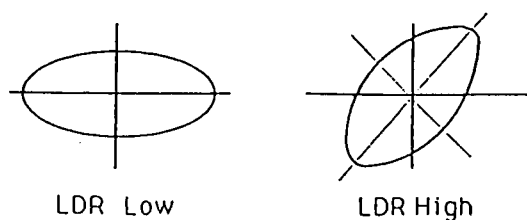


図-4.2 降水粒子の形状と LDR

表-4.1 パルス切替パターン

パルス No	パルス 1		パルス 2		パルス 3		パルス 4		パルス 5		パルス 6	
	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信
n+1	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
n+2	H	V	V	V	V	H	V	V	H	V	V	H
n+3	V	H	V	H	H	V	H	V	V	V	V	V
n+4	V	V	H	V	V	V	V	H	V	H	H	V
パルス No	パルス 7		パルス 8		パルス 9		パルス 10		パルス 11		パルス 12	
	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信
n+1	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H
n+2	H	V	V	V	V	H	V	V	H	V	H	V
n+3	H	H	V	H	H	V	H	V	V	H	V	V
n+4	V	V	V	V	V	V	V	V	V	H	H	V
パルス No	パルス 13		パルス 14		パルス 15		パルス 16		パルス 17		パルス 18	
	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信
n+1	H	H	H	V	H	H	H	H	V	H	H	H
n+2	V	H	V	V	V	V	H	V	V	V	V	H
n+3	V	V	V	H	H	H	H	H	V	V	H	H
n+4	V	H	V	V	V	V	H	V	V	H	V	H
パルス No	パルス 19		パルス 20		パルス 21		パルス 22		パルス 23		パルス 24	
	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信
n+1	H	V	H	V	H	H	H	V	V	H	V	V
n+2	V	V	V	H	H	H	H	V	V	H	V	V
n+3	H	V	H	V	H	H	H	V	V	H	V	V
n+4	V	V	V	H	H	H	H	V	V	H	V	V

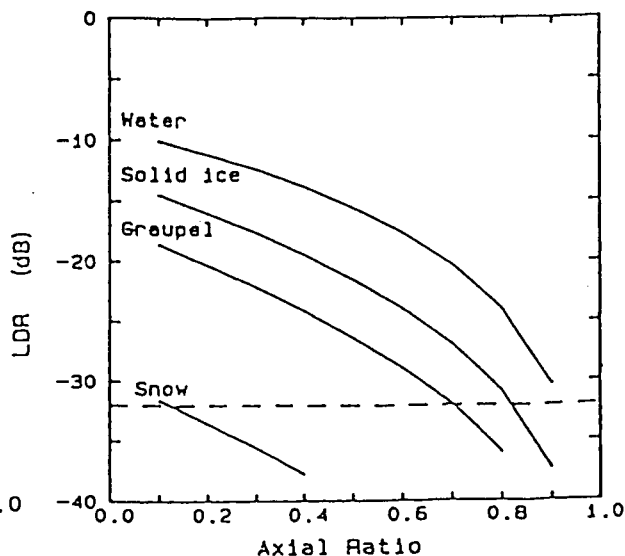
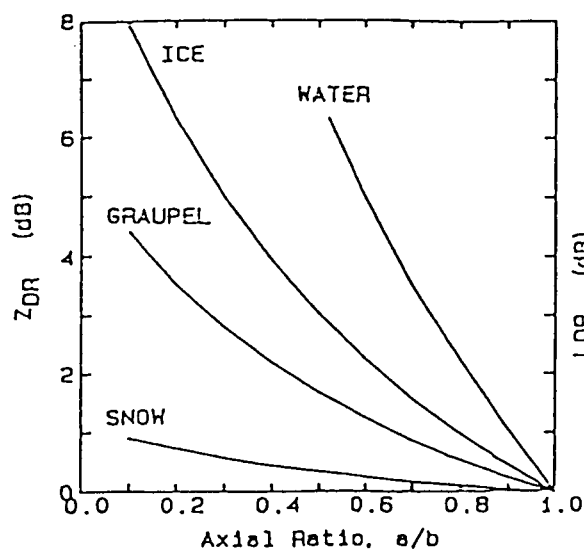


図-4.3 降水粒子の軸比と Z_{DR} 、 LDR

4. 3 観測結果

4. 3. 1 観測地点

建設省酒田工事事務所（山形県酒田市）の庁舎屋上にDNDレーダを設置し、降雨及び降雪の観測を実施した。図-4. 4にレーダサイトの位置と観測範囲を示す。観測期間は、平成元年12月20日から平成2年3月3日までの間である。また、レーダ観測に併せて、地上において、降雪粒子の粒径分布の測定（ろ紙観測による）を行った。測定地点は、レーダサイトから南南西約20kmの地点である。

4. 3. 2 解析対象データ

解析対象データは、表-4. 2のとおりである。

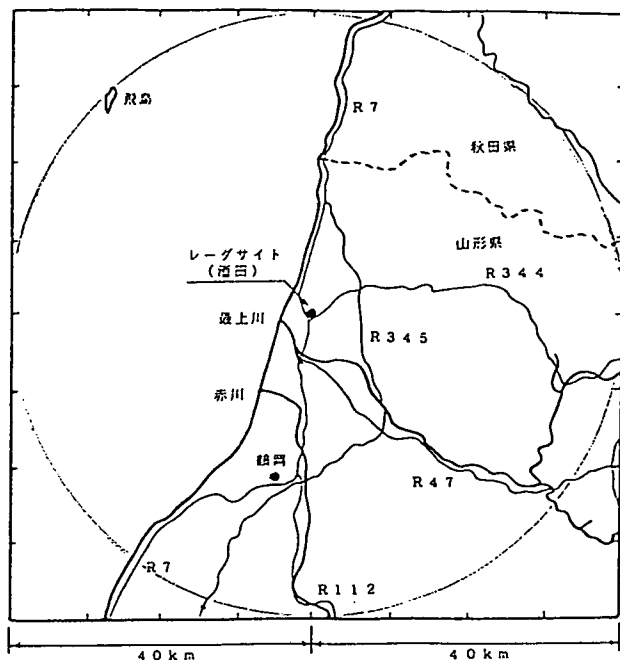


図-4. 4 レーダサイト位置図

表-4. 2 解析対象データ

NO	期 間	レーダ運用方法
雨①	1990年1月10日 16:39~17:04	AZ:315°, EL:2-15° (9仰角), 1パルス平均
雨②	1990年1月18日 22:43~23:07	AZ:180°, EL:2-15° (9仰角), 1パルス平均
雨③	1990年2月11日 08:46~08:56	AZ:310°, EL:2-15° (9仰角), 1パルス平均
雪①	1990年1月13日 15:58~16:13	AZ:315°, EL:2-15° (9仰角), 1パルス平均
雪②	1990年1月24日 06:21~06:37	AZ:190°, EL:2-27° (15仰角), 9パルス平均
雪③	1990年1月29日 09:56~10:24	AZ:270°, EL:2-15° (9仰角), 1パルス平均

(注) 雨と雪のデータ区分は、レーダサイトでの気象状況から決定した。

4. 3. 3 観測結果

(1) 1月10日降雨（雨①、16:39~17:04）

気象状況

1月10日の午後から夜にかけて、東北地方一帯を前線が通過し、それに伴い山形県地方でも降雨となった。

レーダサイトでは、9:30ごろから雨が降り始め、20:30ごろまで続いた。降雨強度は、最も強い時で3.0mm/h（19:00、転倒ます雨量計）であった。解析対象としたレーダ観測時間付近では1mm/h以下の弱い雨であった。

降雨中の風向は南南東で、風速は2~3m/s程度であった。

気温は、比較的高く、最高気温は7.8°C（17:00）であった。

レーダエコー

図-4. 5(a)にレーダPPI図及びRHI図を示す。これらの図の説明と特徴的なことを以下に述べる。

① P P I 図

この P P I 図は、17:09から1分間観測し平均した Z_H データである。仰角は 5° である。

レーダ観測範囲全域にエコーがあり、約 20 km の付近で円形に強いエコーが見られる。特に、北東～西にかけて円弧状に強くなっている。これは、ブライバンド（融解層）と考えられる。

10 km より近い所（高度の低いところ）で反射強度が強く、 25 km より遠いところ（高度の高い所）で反射強度が弱くなっている。ブライバンドの上下で降水粒子の種類が異なっているためと考えられる。

② R H I 図 (Z_H)

方位角を 315° （北西）に固定して観測したものである。

高度 1.8 km 付近に強いエコーの層が見られる。すなわち、ブライバンドと考えられる。また、下層では、レーダサイトからの距離が 10 km と 20 km 付近に相対的に強いエコーがあることがわかる。

③ R H I 図 (Z_{DR})

Z_{DR} 値は、ブライバンドの高度付近と下層の 10 km と $15\sim20\text{ km}$ 付近で相対的に大きくなっている。これは、 Z_H の R H I 図における結果とほぼ同じである。

(2) 1月18日降雨（雨②、22:43～23:07）

気象状況

1月18日の夕方から夜間にかけて、東北地方一帯を前線が通過した。降雨の中心は東北北部であるが、山形県庄内地方でも $18\sim20$ 時にかけてまとまったエコーが通過した（白鷹山レーダの情報）。

レーダサイトでは、 $10:00$ ごろからみぞれがばらつき始め、 $11:50$ ごろから雨が降り始めた。降雨強度は最も強い時で 5.0 mm/h （ $20:00$ 、転倒ます雨量計）であった。また、 $19:10$ ごろに雷鳴・雷光が確認できた。解析対象としたレーダ観測時間では 1 mm/h 程度の雨であった。 $23:30$ ごろ雨は止んだ。

風向風速は、 $16:00$ ごろまで南南東～南の風で $2\sim5\text{ m/s}$ 程度であったが、それ以降は南西～西の風に変わり、風速も $5\sim10\text{ m/s}$ と強くなった。 $21:00$ 以降は、北西～北北西の風となり、風速は若干弱まり $5\sim7\text{ m/s}$ であった。

気温は、最高で 8.9°C （ $20:00$ ）で、解析対象としたレーダ観測時間付近では 6.3°C （ $23:00$ ）であった。

レーダエコー

図-4. 5 (b)にレーダ P P I 図、R H I 図を示す。

① P P I 図

この P P I 図は、22:35から1分間観測し平均した Z_H データである。仰角は 3° である。

観測範囲の南半分にのみエコーが見られる。北東方向の孤立した強いエコーは鳥海山である。南西～南東の $5\sim20\text{ km}$ の範囲に相対的に強いエコーがある。

② R H I 図 (Z_H)

方位角を 180° （南）に固定して観測したものである。

高度 1.5 km 以下の下層部が相対的に強くなっており、距離 15 km と 30 km 付近で局所的に強いエコーが見られる。

③ RHI 図 (Z_{DR})

Z_H の RHI 図と同様に下層部 (1.0 km 以下) で Z_{DR} が大きくなっている。また、距離 $25\text{ km} \sim 30\text{ km}$ では、高度 $2\text{ km} \sim 3\text{ km}$ にかけて Z_{DR} が大きくなっている。下層部 (高度 1.5 km 以下) では、 Z_{DR} がマイナスになっている。

(3) 2月11日降雨 (雨③、8:46~8:56)

気象状況

2月11日明け方から昼過ぎにかけて東北地方を前線が通過した。山形県庄内地方でも9:00~10:00にかけてまとまったエコーが通過した (白鷹山レーダの情報)。

レーダサイトでは、1:00ごろから雨が降り始め、12日の13:00ごろまで断続的に雨が降り続き、それ以降数時間は雪となった。降雨強度は弱く、 1 mm/h 前後の雨が降り続いた (転倒ます雨量計)。最も強い時で、 2.5 mm/h (10:00、11:00、転倒ます雨量計) であった。

風向風速は、13:00ごろまでは南~南東の風で $2 \sim 4\text{ m/s}$ 程度、21:00ごろまでは西~南西の風で $3 \sim 7\text{ m/s}$ 程度、それ以降は西~北西の風で $5 \sim 10\text{ m/s}$ 程度であった。

気温は、最高で 10.0°C (13:00、14:00) で、解析対象としたレーダ観測時間付近では、 5.8°C (9:00) であった。

レーダエコー

図-4.5(c)にレーダ PPI 図、RHI 図を示す。

① PPI 図

この PPI 図は、8:39から1分間観測で平均した仰角 4° のデータのデータである。

この図からは、西及び南西方向約 30 km の地点に強いエコーがあることがわかる。仰角 6° の PPI 図で見ると、それが円弧状になっており、ブライトバンドであることがはっきりとわかる。

② RHI 図 (Z_H)

方位角を 310° （北西）に固定して観測したものである。

高度 2 km 付近のエコーが相対的に強くなっており、ブライトバンドであることがわかる。また、ブライトバンドより上と下では、エコーの強度がはっきりと異なっていることがわかる。

③ RHI 図 (Z_{DR})

Z_H の RHI 図と同様に、高度 2 km 付近が相対的に Z_{DR} が大きくなっている。また、高度 2 km より下の高度でも局所的に Z_{DR} の大きいところが見られる。ブライトバンドより上と下での Z_{DR} 値の差は、 Z_H の場合ほど顕著ではないが、下層の方が上層より大きくなっている傾向が見られる。

(4) 1月13日降雪（雪①、15:58～16:13）

気象状況

1月12日夕方から夜間にかけて東北地方を前線が通過し、13日からは冬型気圧配置となった。そのため、山形県庄内地方でも15日まで断続的に雪が降り続いた。

レーダサイトでは、3:00ごろまで雨であったが、それ以降は断続的な雪となった。降雪状態は、雪片、あられの状態あるいは吹雪の状態など、観測期間中さまざまに変化した。積雪深は、最大で17cmとなった。

風向は北西前後で激しく変化し、風速は10m/s程度であった。

気温は、 $-1.0 \sim -2.0^{\circ}\text{C}$ 程度（13日のみ）で、解析対象としたレーダ観測時間付近では、 -1.1°C （16:00）であった。

レーダエコー

図-4.5(d)にレーダPPI図、RHI図を示す。

① PPI図

このPPI図は、15:48から3分間観測し平均した Z_H データである。仰角は 4° である。

北北東10～30km付近、北西10～30km付近、南20～30km付近にまとまったエコーが見られる。それぞれのエコーに局部的に強いところがあることがわかる。

② RHI図（ Z_H ）

方位角を 315° （北西）に固定して観測したものである。

距離5～10km、高度1.0～1.5km付近が局部的に強くなっている。また、距離5kmより近いところで高度0.5kmより下ではエコーがなくなっている。

③ RHI図（ Z_{DR} ）

全体一様に Z_{DR} 値は小さく、雨の場合のような変化はない。ただし、下層部（高度0.5kmより下）で少し Z_{DR} が大きくなる傾向が見られる。

(5) 1月24日降雪（雪②、6:21～6:37）

気象状況

1月22日に前線が通過し、それ以降31日まで冬型気圧配置が続いていた。

レーダサイトでは、2:30ごろから雪が降り始め8:30で一旦降り止んだ。16:00ごろからまた降り始めた。積雪深は平均的には2cm程度であったが、風の影響を受けない物陰では8cm程度であった。4:00～8:00にかけてかなり激しく降り、雪片の大きさも大きいものであった。

風向は南西～北西の間で変動し、風速は3～4m/s程度であった（0:00～8:00）。

気温はかなり低く、 $-6.0 \sim -7.0^{\circ}\text{C}$ 程度（0:00～8:00）で、解析対象としたレーダ観測時間付近では、 -6.8°C （6:00）であった。

レーダエコー

図-4.5(e)にレーダPPI図、RHI図を示す。

① P P I 図

この P P I 図は、6:13から3分間観測し平均した Z_H データである。仰角は 4° である。

観測範囲の主に南にエコーが存在している。南東から南にかけての距離 20 km 以内の範囲に比較的強いエコーが存在している。

② R H I 図 (Z_H)

方位角を 190° (ほとんど南) に固定して観測したものである。

高度 1 km より下で反射強度が強くなっている。特に、距離 20 ~ 30 km の範囲で強くなっている。このような強いエコーが出るのは、雪の場合では、非常に珍しい。

③ R H I 図 (Z_{DR})

Z_{DR} の値は、全体的に弱い。また、 Z_H の強い部分がかならずしも Z_{DR} 値の変化となって現れてはいない。むしろ、 Z_H の弱い部分 (高度の高いところ) で Z_{DR} 値が若干大きくなる傾向が見られる。

(6) 1月29日降雪 (雪③、9:56~10:24)

気象状況

レーダサイトでは、10:30ごろから雪が降り始め、18:30ごろまで弱い雪が降り続いた。積雪深は 2 cm 程度であった。

風向は南~南西でほとんど一定しており、風速も弱くほとんど風のない状態であった。

気温は高く、 $-0.4 \sim -1.6^\circ\text{C}$ 程度である。解析対象としたレーダ観測時間付近では、一時的に気温が上昇し、 $+0.4^\circ\text{C}$ (10:00) であった。その前後の時間では、9:00で -1.6°C 、11:00で -1.0°C である。

レーダエコー

図-4.5(f)にレーダ P P I 図、R H I 図を示す。

① P P I 図

この P P I 図は、9:49から1分間観測し平均した Z_H データである。仰角は 4° である。

距離 15 km 円内にはエコーがなく、それより遠いところ (高度が高いところ) に弱いエコーが見られる。西南西 20 km 付近に帯状に相対的に強いエコーがあることがわかる。

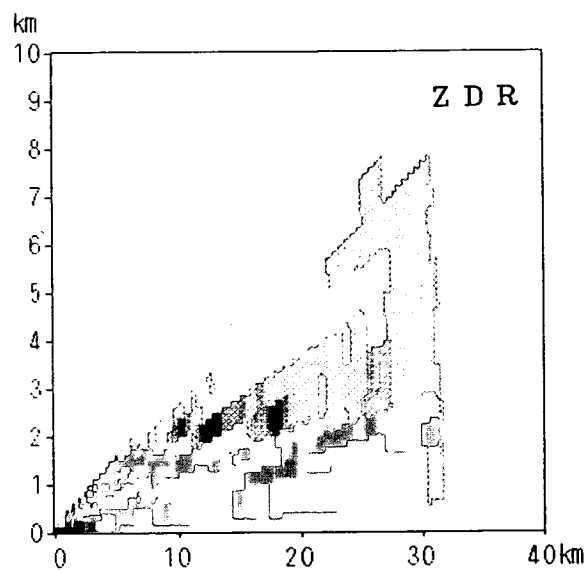
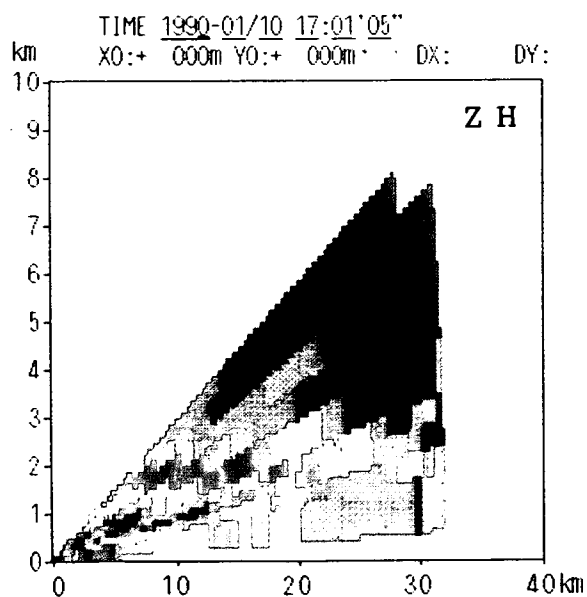
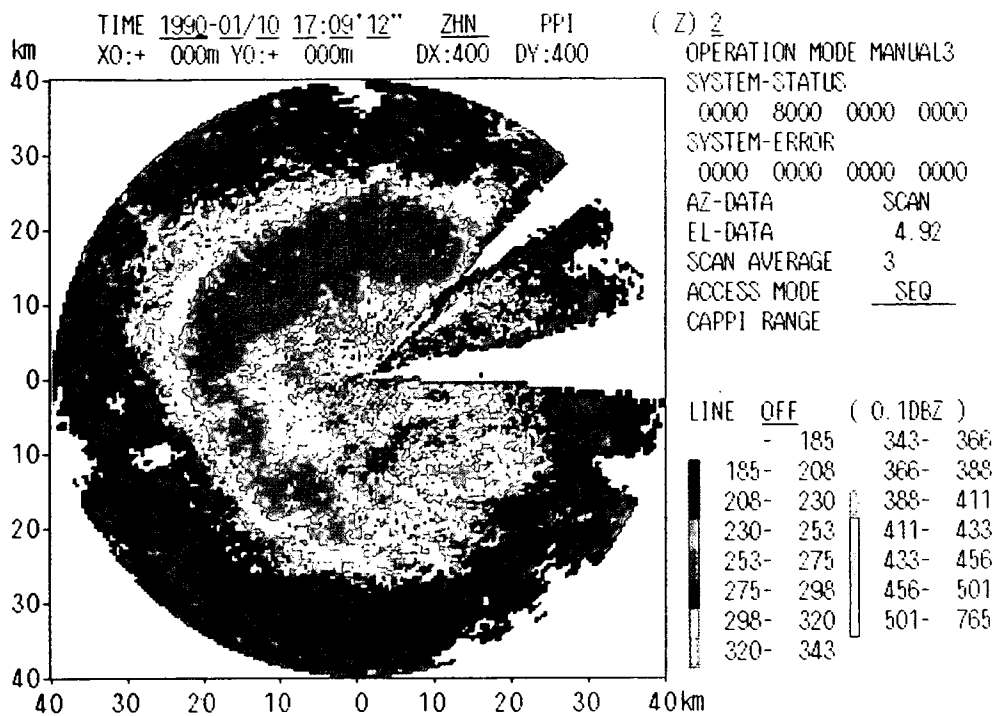
② R H I 図 (Z_H)

方位角を 270° (西) に固定して観測したものである。

全体的に弱いエコーであるが、距離 5 ~ 20 km で高度 0.5 ~ 1.0 km に相対的に強いエコー、及び距離 20 ~ 30 km で高度 0.3 ~ 1.0 km 相対的に強いエコーが見られる。この時の降雪は、気温が比較的高く、雨か雪か微妙な状態であるので、この層状のエコーはブライトバンドのくずれた形ではないかと考えられる。また、高度が 0.5 km より下で、距離が 10 km より小さいところではエコーがなくなっている。

③ R H I 図 (Z_{DR})

Z_{DR} の値に大きな変化はないが、 Z_H の値が大きかった部分と距離が 15 km 以下で高度が 0.5 km より高いところで Z_{DR} の値が相対的に大きくなっている。

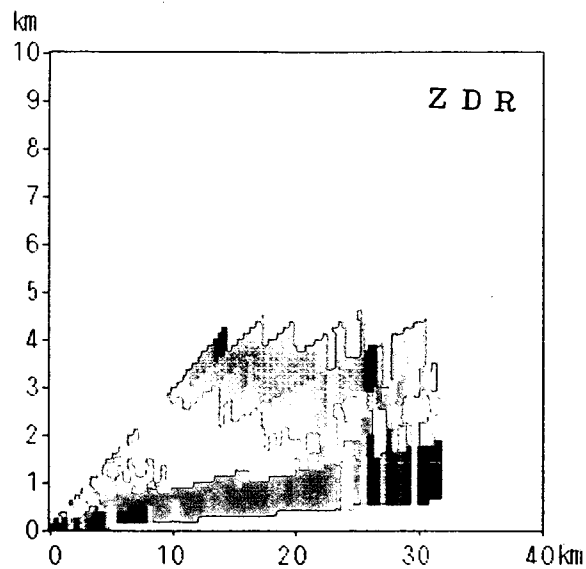
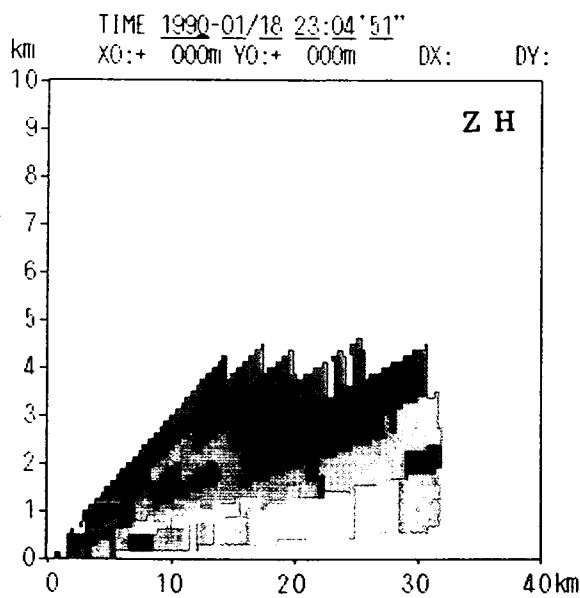
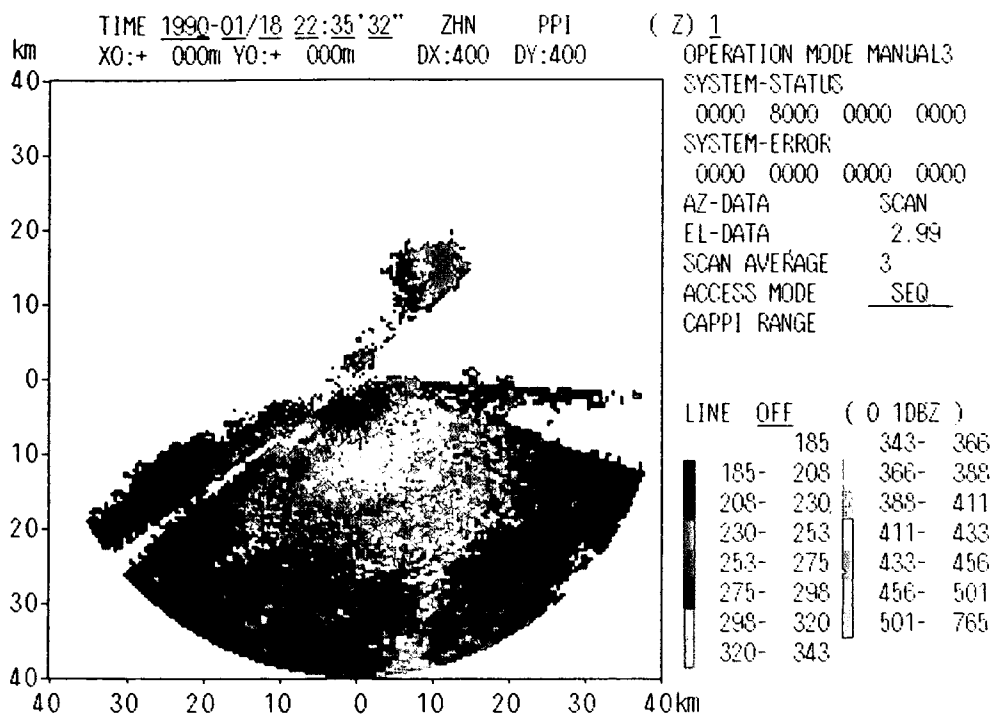


LINE	OFF	(0.1DBZ)
-	110	320- 350
110-	140	350- 380
140-	170	380- 410
170-	200	410- 440
200-	230	440- 470
230-	260	470- 500
260-	290	500- 580
290-	320	

OPERATION MODE MANUAL5
SYSTEM-STATUS
0000 0000 0000 0000
SYSTEM-ERROR
0000 0000 0000 0000
AZ-DATA 315.00
EL-DATA
SCAN AVERAGE 1
ACCESS MODE REV
CAPPI RANGE

LINE	OFF	(0.1DB)
-	-50	12- 15
-50-	-20	15- 18
-20-	-10	18- 21
-10-	-3	21- 24
-3-	3	24- 27
3-	6	27- 30
6-	9	30- 45
9-	12	

图-4. 5(a) 1月10日降雨(雨①)



LINE OFF (0.1DBZ)

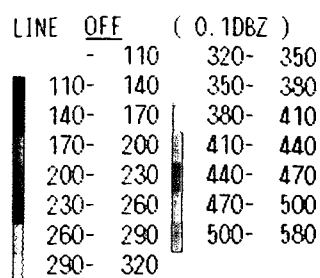
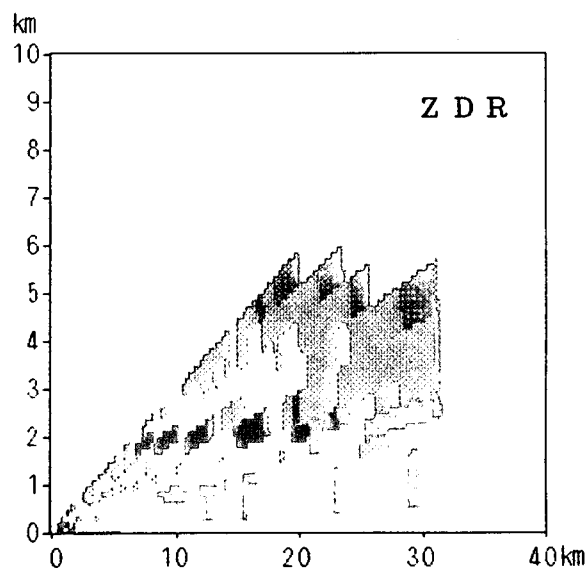
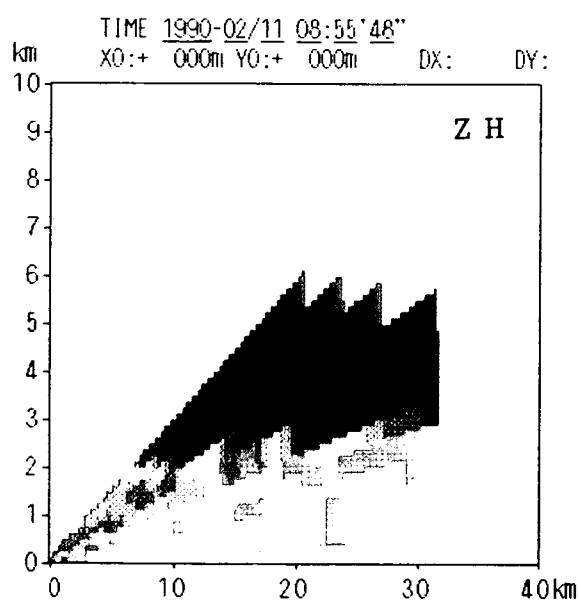
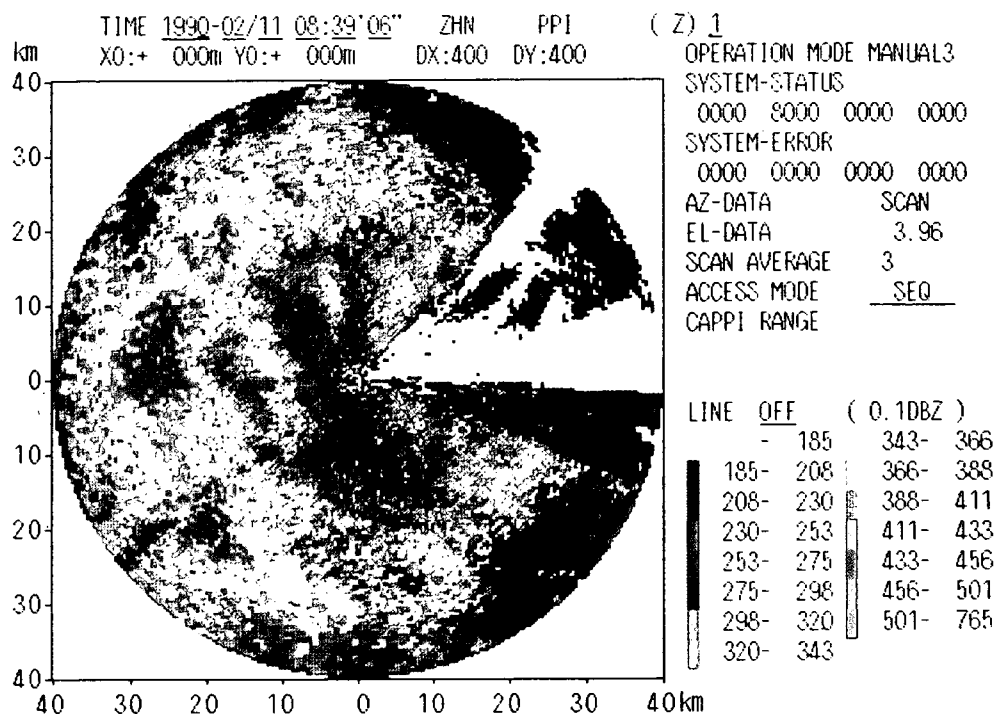
-	110	320-	350
110-	140	350-	380
140-	170	380-	410
170-	200	410-	440
200-	230	440-	470
230-	260	470-	500
260-	290	500-	580
290-	320		

OPERATION MODE MANUAL5
 SYSTEM-STATUS
 0000 0000 0000 0000
 SYSTEM-ERROR
 0000 0000 0000 0000
 AZ-DATA 180.00
 EL-DATA
 SCAN AVERAGE 1
 ACCESS MODE SEQ
 CAPPI RANGE

LINE OFF (0.1DBZ)

-	-50	12-	15
-50-	-20	15-	18
-20-	-10	18-	21
-10-	-3	21-	24
-3-	3	24-	27
3-	6	27-	30
6-	9	30-	45
9-	12		

图 - 4. 5 (b) 1 月 1 8 日降雨 (雨②)



OPERATION MODE MANUAL5
 SYSTEM-STATUS
 0000 0000 0000 0000
 SYSTEM-ERROR
 0000 0000 0000 0000
 AZ-DATA 310.00
 EL-DATA
 SCAN AVERAGE 1
 ACCESS MODE SEQ
 CAPPI RANGE

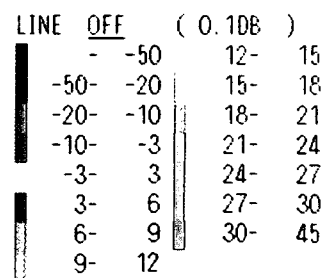


图-4. 5(c) 2月11日降雨(雨③)

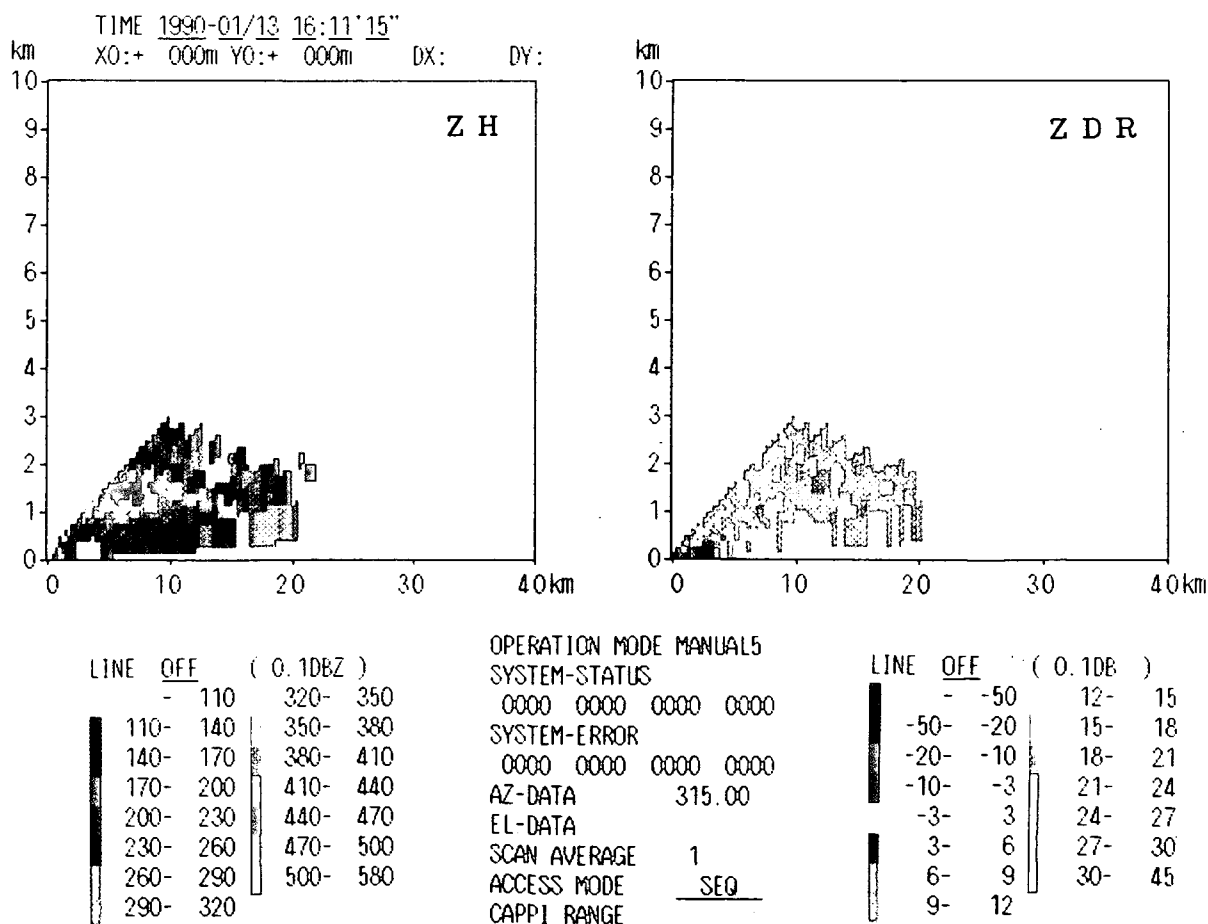
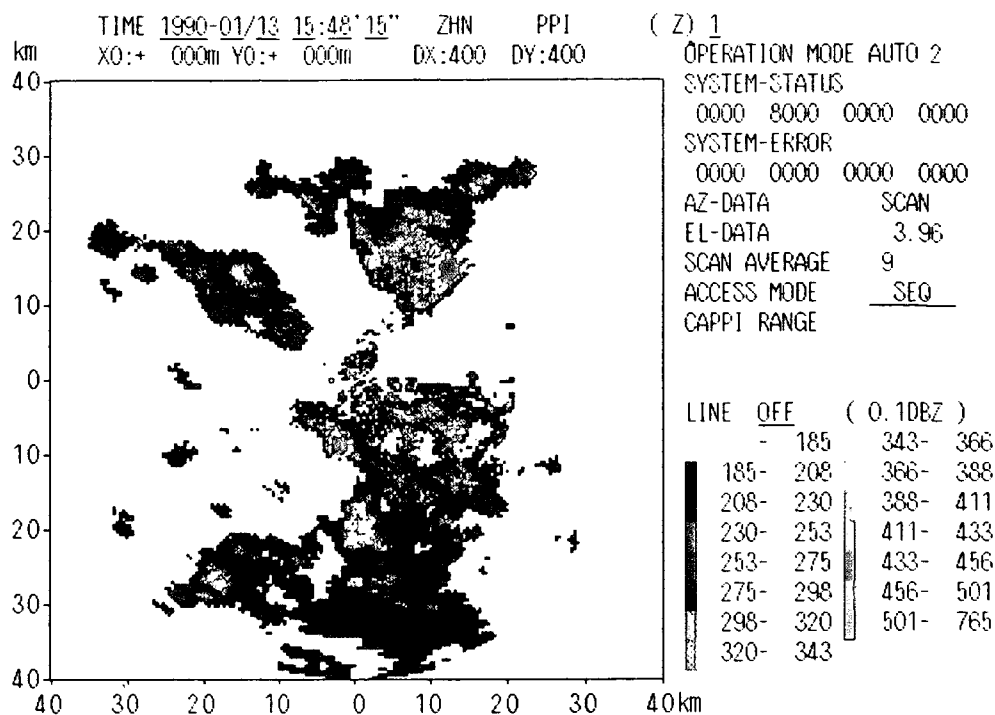
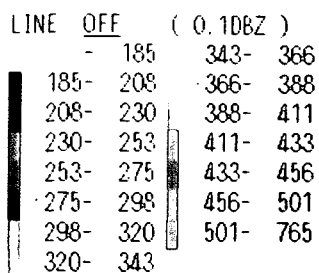
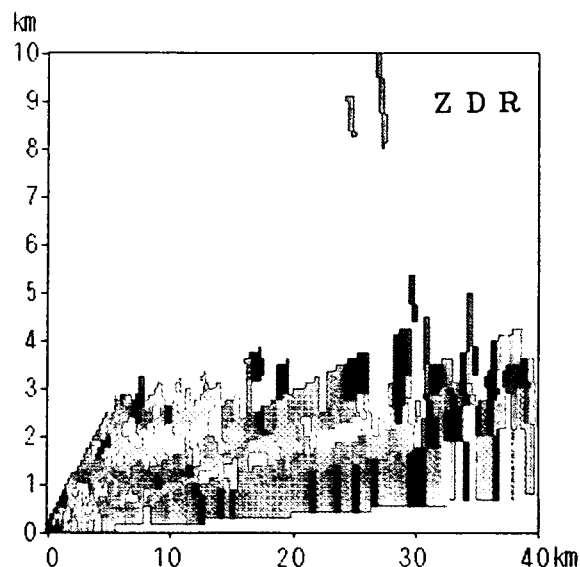
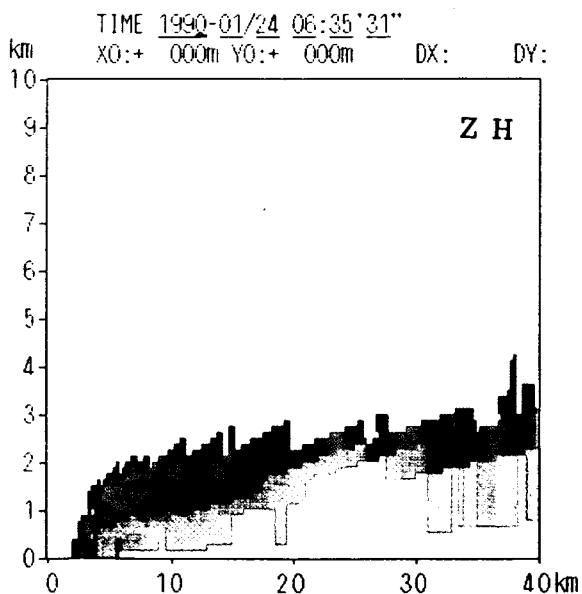
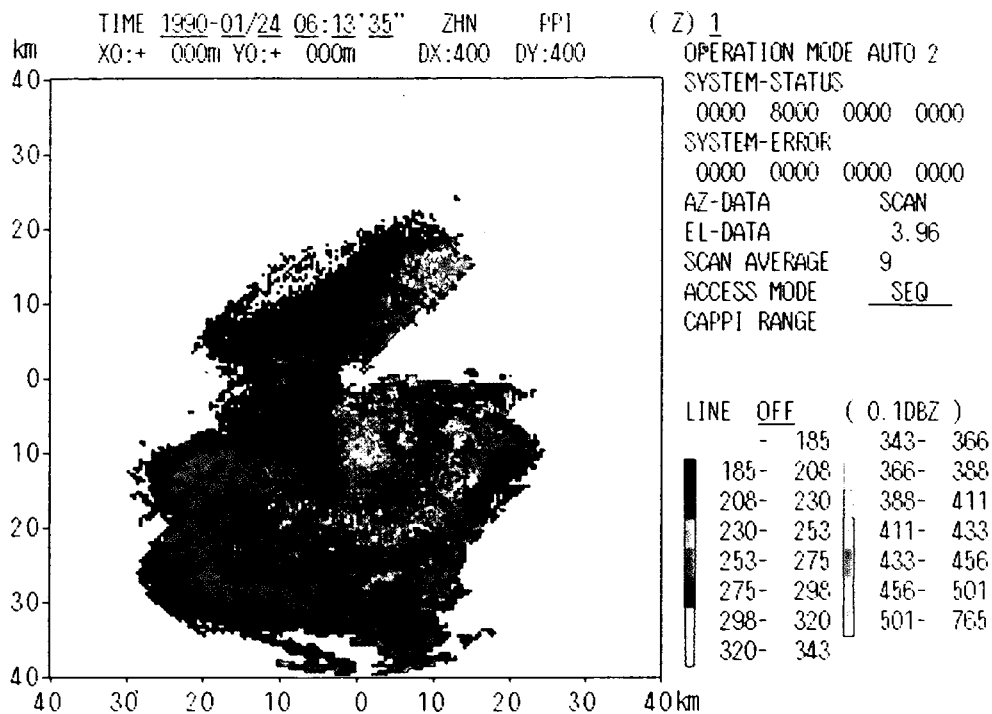


图-4. 5(d) 1月13日降雪(雪①)



OPERATION MODE MANUAL5
SYSTEM-STATUS
0000 8007 0001 0000
SYSTEM-ERROR
0000 0000 0000 0000
AZ-DATA 189.76
EL-DATA
SCAN AVERAGE 1
ACCESS MODE SEQ
CAPPI RANGE

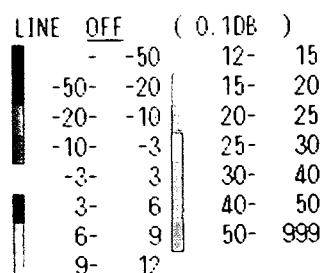
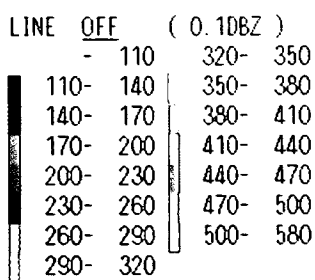
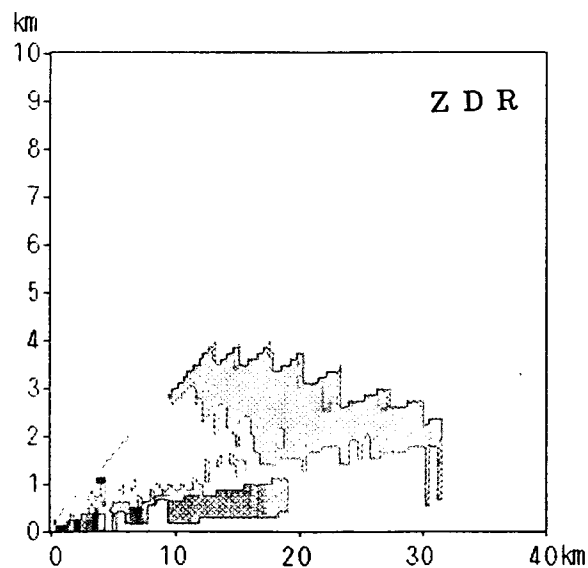
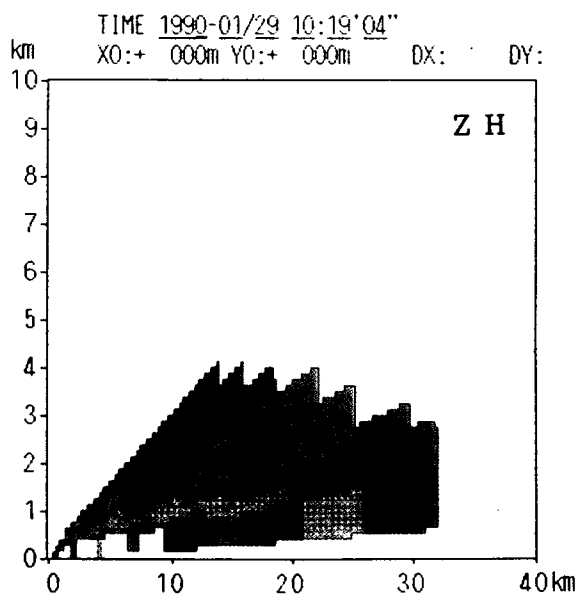
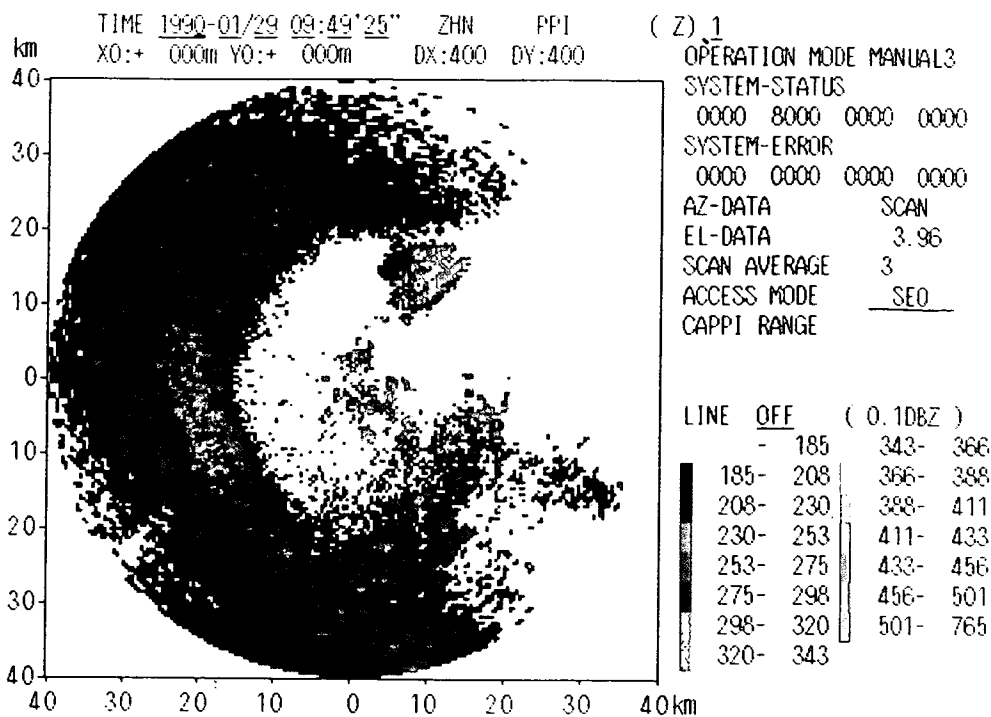


图 - 4. 5 (e) 1 月 2 4 日降雪 (雪②)



OPERATION MODE MANUAL5
SYSTEM-STATUS
0000 0000 0000 0000
SYSTEM-ERROR
0000 0000 0000 0000
AZ-DATA 270.00
EL-DATA
SCAN AVERAGE 1
ACCESS MODE SEQ
CAPPI RANGE

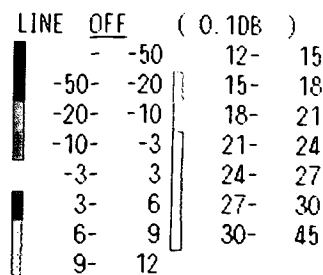


图-4. 5(f) 1月29日降雪(雪③)

4. 4 Z_H 、 Z_{DR} 、 LDR の高度変化

レーダサイトからの距離が10 km、15 km、20 km、25 kmの地点（距離幅5 km）における、 Z_H 、 Z_{DR} 、 LDR の高度変化を調べた。図-4. 6～4. 11にその結果を示す。

これらから次のことがわかる。ただし、冬の偏波切替器の較正を行っていないので、 Z_H 、 Z_{DR} 、 LDR の値自体にはあまり意味がなく、その相対的な変化のみについて述べることとする（特に Z_{DR} 値は、昨年の結果と比較した場合、1 dB程度大きくなっている）。

雨①:

非常に顕著なブライトバンドが見られる。距離10 kmの高度変化図では、 Z_H のピーク高度は1.7～1.8 km、 Z_{DR} のピーク高度は、1.4～1.5 kmである。距離15 kmでは、 Z_H のピーク高度が2 km付近、 Z_{DR} のピークははっきりしていない。 Z_H のピークが距離により若干異なるのは、RHI観測の仰角設定の粗さによる影響であるためである。したがって、距離が短いほど密な観測データが得られるので、10 km地点でのピーク高度の方が正確な値を示していると考えられる。 Z_{DR} のピークがはっきりしないのは、15 km地点での下層（ブライトバンドより下）の Z_H が若干大きくなっており降雨強度が強くなっていることが推定されるので、それに伴い Z_{DR} も大きくなっていると考えられる。また、 LDR の変化はほとんど見られない。

雨②:

Z_H 、 Z_{DR} とも高度0.5～0.6 km付近にピーク（ブライトバンド）が見られる。特に、 Z_{DR} のピーク値が大きく約2 dB程度増加している。また、 Z_H は、高度2.0 km～2.3 km付近に2つめの緩やかなピークが見られ、 LDR は、高度1.3 km付近に小さなピークが見られる。

雨③:

Z_H 、 Z_{DR} とも高度1.8～1.9 kmにピーク（ブライトバンド）が見られる。また、距離10 kmでは、0.5 km付近に2つめの緩いピークが見られる。これは、部分的に降雨強度が強くなっているためと考えられる。距離20 kmでも下層部で Z_H が大きくなって降雨強度が強くなっていることを伺わせるが、 Z_{DR} の方は小さくなっている。 LDR の値は、ブライトバンド付近まではほぼ一定値であるが、それより上の高度で急激に増大（0に近くなる）している。

雪①:

距離10 kmでは、高度1.2 kmと2.5 kmに Z_H のピークが見られる。 Z_{DR} 、 LDR にはほとんど変化はない。

雪②:

典型的な降雪時の観測結果であると言える（昨年の結果と比較して）。 Z_H は、高度が高くなるにつれ減少し、 Z_{DR} はほぼ一定値となっている。

雪③:

高度1.7～1.8 kmに Z_H のピークが見られる。ブライトバンドと考えられるが、 Z_{DR} の方には顕著なピークが現れていない。また、 LDR 値は、ブライトバンドより下の高

度で値が大きくなっているが、これは、その高度でのエコーがほとんどなかったことによる影響であると考えられる（RHI図からの判断）。

今回の観測で、LDRの値にほとんど変化が現れなかった原因は、水平偏波と垂直偏波間の分離比が不足している（現状で20 dB程度）ためと考えられる。そこで、LDRの測定に必要な空中線系の性能についての検討を行った。

図-4. 12にLDRの真値と分離比Kを考慮した場合のLDRとの関係をKをパラメーターとして示す。これから、次のことがわかる。

- ① KによるLDRへの影響は、 Z_H 、 Z_{DR} の値にはほとんど依存しない。
- ② LDRの測定能力は分離比Kによって決定される。
- ③ LDRを-30 dB以下まで測定するには、分離比は40 dB程度必要となる。

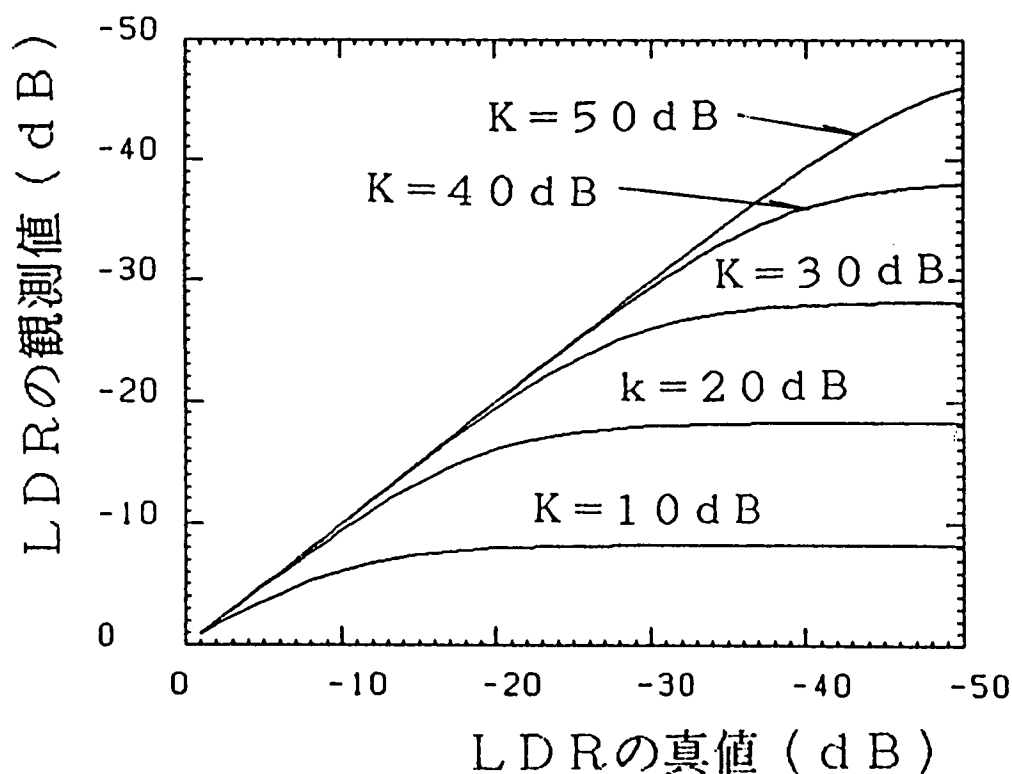


図-4. 12 LDRの誤差と分離比の関係

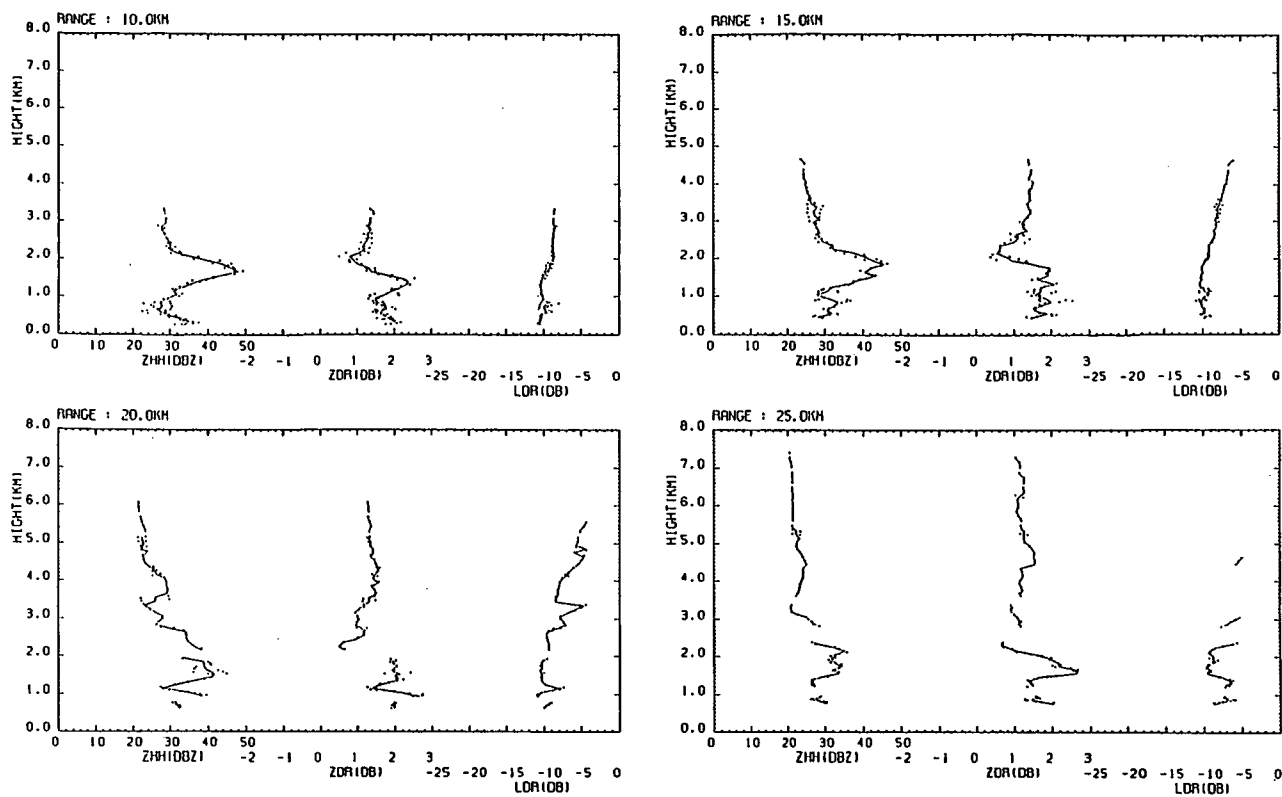


図 - 4. 6 高度変化図 (雨①)

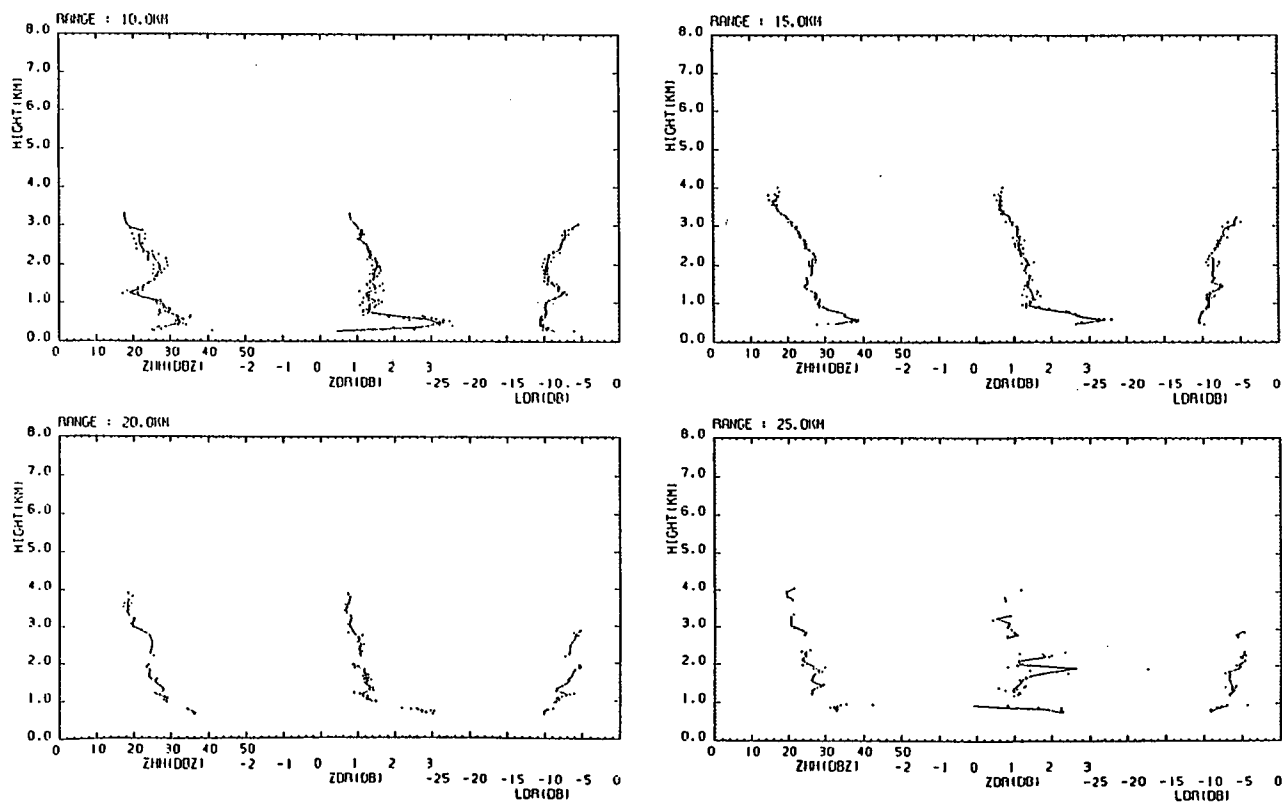


図 - 4. 7 高度変化図 (雨②)

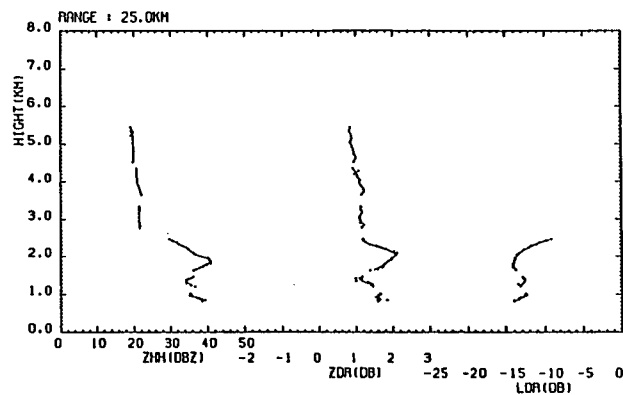
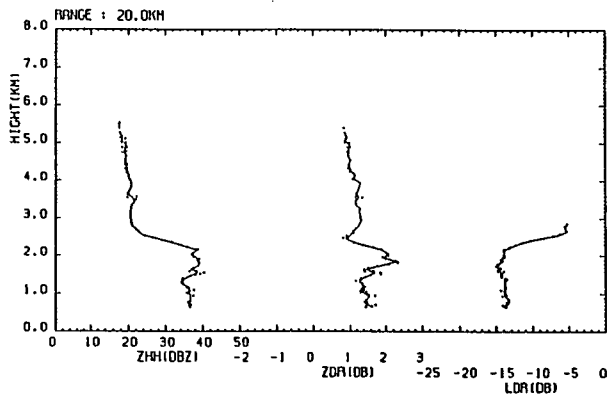
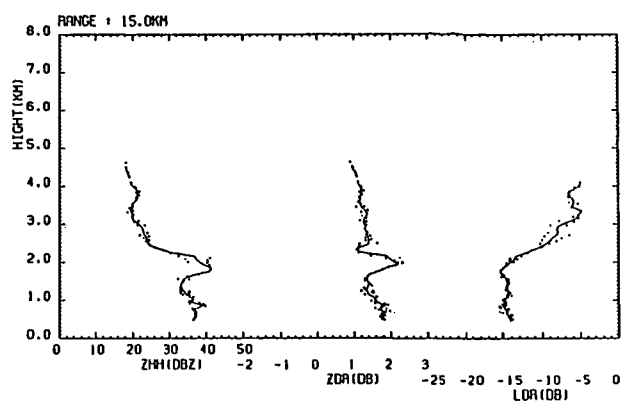
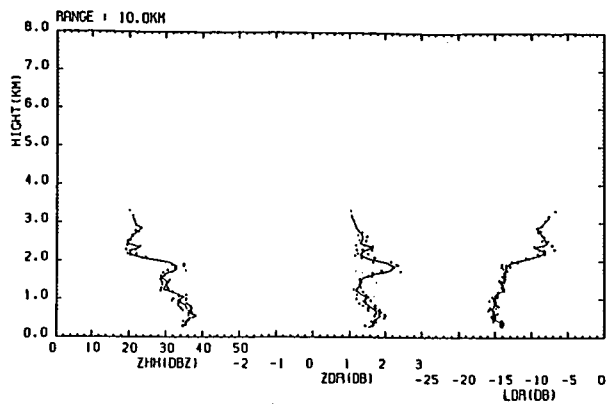


图 - 4. 8 高度变化图 (雨③)

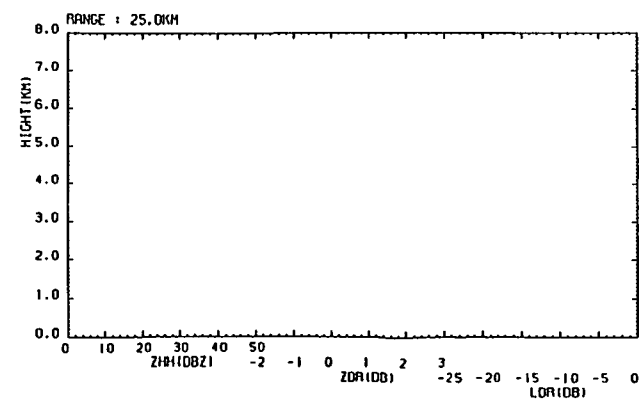
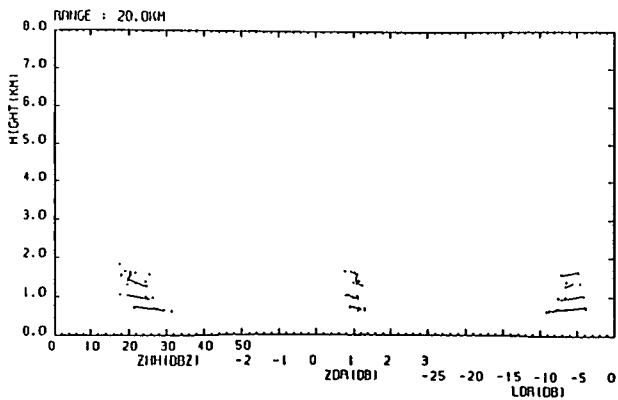
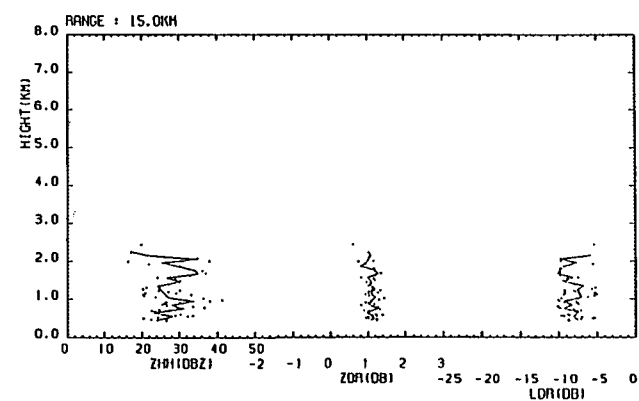
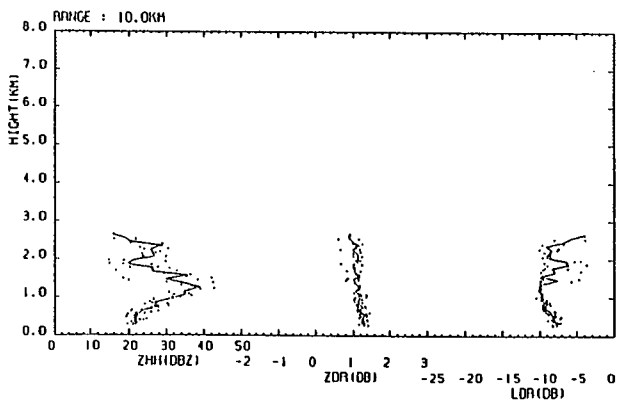


图 - 4. 9 高度变化图 (雪①)

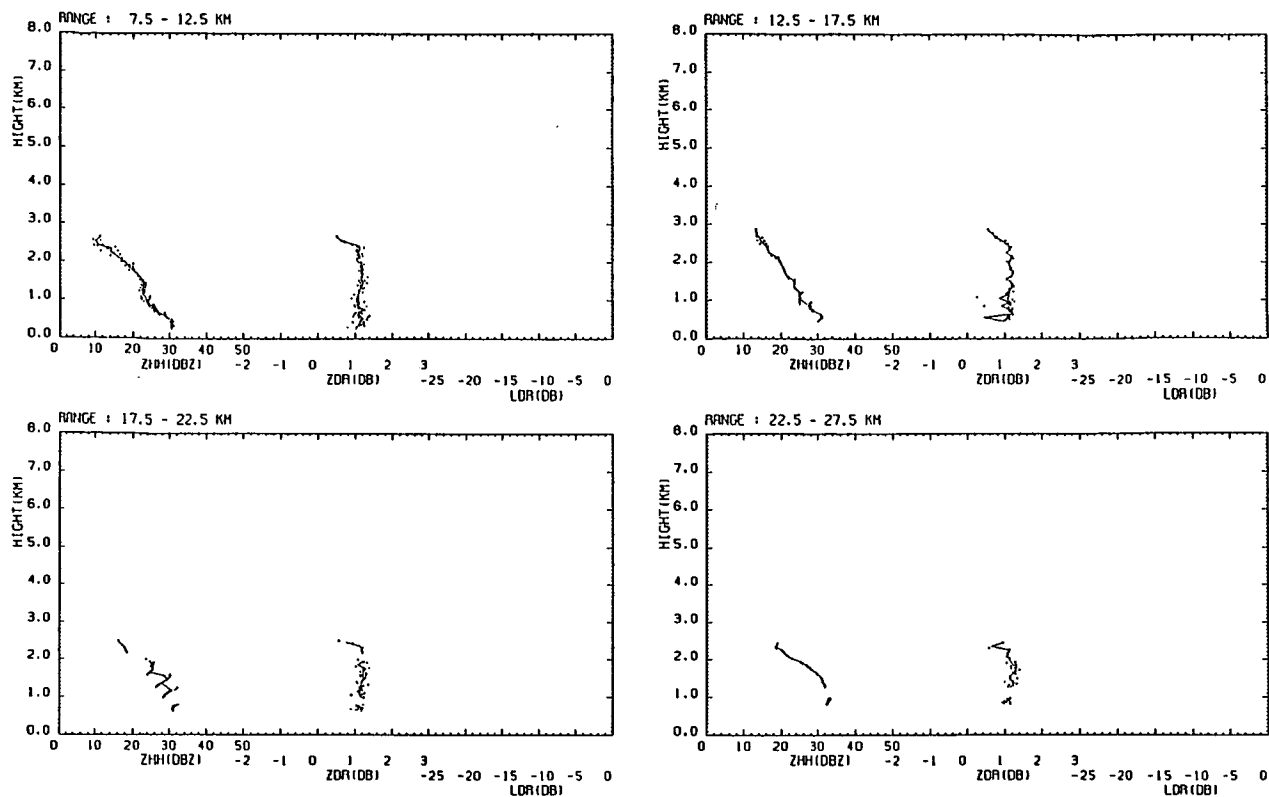


図 - 4. 1 0 高度変化図 (雪②)

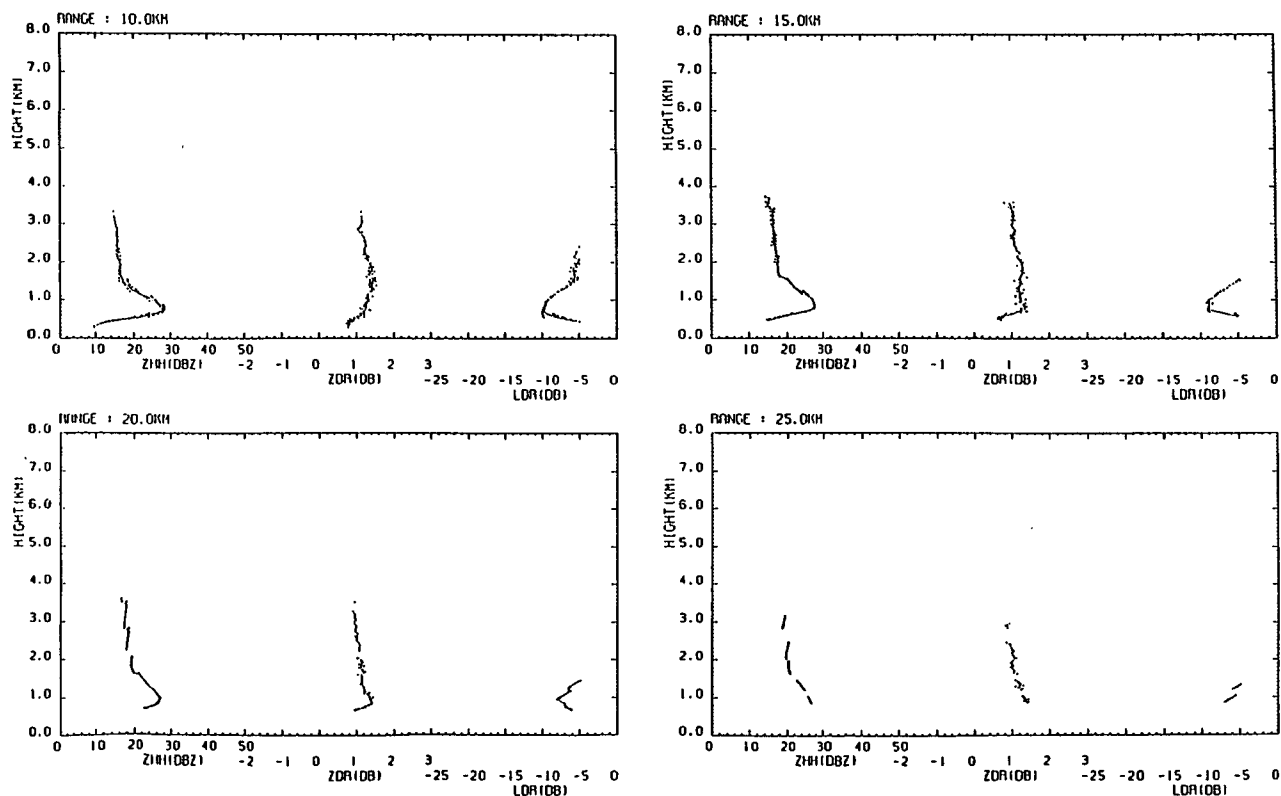
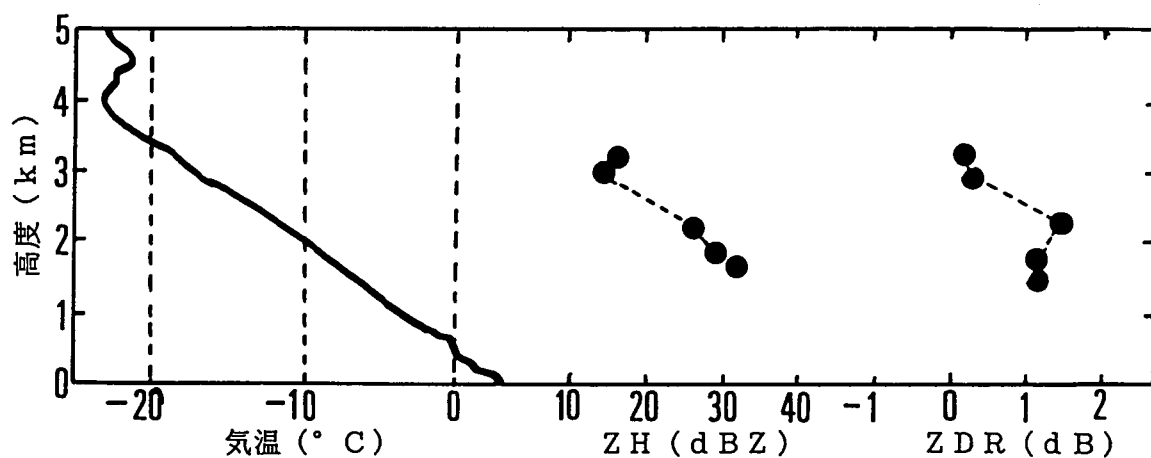


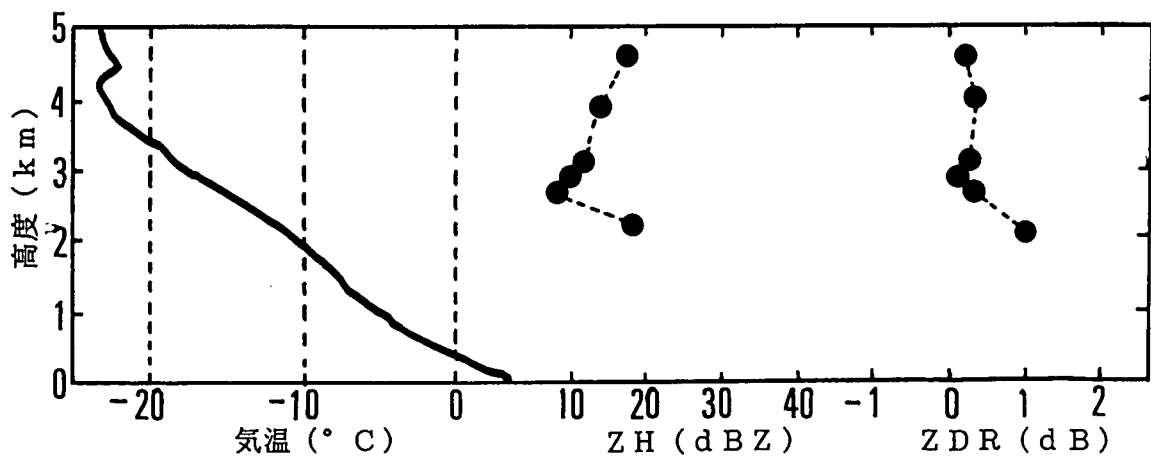
図 - 4. 1 1 高度変化図 (雪③)

4. 5 ゾンデとの協同観測

ゾンデ観測との協同観測を1990年2月1日～12日まで行った。ゾンデは、DNDレーダサイトからレーウィンゾンデとビデオゾンデの2種類が放球された。ゾンデ観測時のレーダの運用は、リアルタイムで示されるゾンデ位置（方位角、仰角）をレーダで追跡するという方法で行った。すなわち、レーダサイトとゾンデとの距離がゾンデ観測結果からわかるので、ゾンデ観測地点と同地点のレーダメッシュを特定でき、より厳密な比較ができる。表-4. 3に観測結果を示す。また、図-4. 13にゾンデデータとの対比の一例を示す。図中の気温がゾンデ観測値である。 -10°C 付近で Z_{DR} 値が大きくなることがわかる。



(a) ゾンデNo. 18 (2/12, 8:38放球)



(b) ゾンデNo. 19 (2/12, 9:42放球)

図-4. 13 ゾンデデータとの対比

表-4. 3(a) ゾンデNo. 13 (RS1, 2月8日9時41分放球)

時 間	A Z (°)	E L (°)	ゾンデ距離 (km)	高度 (km)	Z H (dBZ)	Z D R (dB)
9:46:20 - 9:46:45	112.85	39.73	2.87 (6)	1.8	***	***
9:47:36 - 9:47:36	112.85	43.07	3.71 (8)	2.6	0.72	-4.38
9:48:37 - 9:49:02	98.00	38.06	4.96 (10)	2.9	3.36	0.55
9:49:51 - 9:50:16	102.83	32.34	6.36 (13)	3.4	***	***
9:51:04 - 9:51:30	104.24	30.06	7.73 (16)	3.9	***	***
9:52:25 - 9:52:50	106.44	26.98	9.51 (20)	4.4	***	***
9:53:38 - 9:54:03	106.44	24.70	11.21 (23)	4.7	10.93	0.40

表-4. 3(b) ゾンデNo. 17 (RS9・H3, 2月12日7時46分放球)

時 間	A Z (°)	E L (°)	ゾンデ距離 (km)	高度 (km)	Z H (dBZ)	Z D R (dB)
8:00:54 - 8:01:57	79.54	11.07	18.47 (37)	3.3	***	***
8:02:37 - 8:03:37	77.43	8.96	24.05 (49)	4.7	***	***
8:03:48 - 8:04:26	77.43	7.38	25.34 (51)	4.0	***	***
8:04:31 - 8:05:33	77.43	8.26	28.00 (56)	3.6	***	***
8:05:40 - 8:06:41	76.11	8.26	31.85 (64)	4.6	***	***
8:06:50 - 8:07:50	76.11	7.29	36.27 (**)	***	***	***
8:08:01 - 8:09:02	74.97	6.15	42.18 (**)	***	***	***
8:09:14 - 8:10:13	77.08	7.03	43.91 (**)	***	***	***

(注) ① A Z, E Lは、レーダ観測値である。

② ゾンデ距離は、当該時間におけるゾンデデータから算出したものである。

カッコ内はレーダレンジを示す。

③ 高度は、レーダレンジとレーダ観測仰角から求めたものである。

表-4. 3(c) ソンデNo. 18 (RS10・H4, 2月12日8時38分放球)

時 間	A Z (°)	E L (°)	ゾンデ距離 (km)	高度 (km)	Z H (dBZ)	Z D R (dB)
8:45:02 - 8:45:27	102.92	12.57	7.15 (15)	1.6	31.56	1.15
8:46:19 - 8:46:44	100.28	12.57	8.39 (17)	1.8	29.94	1.13
8:47:38 - 8:48:03	94.48	13.01	10.22 (21)	2.3	26.24	1.44
8:48:54 - 8:49:20	91.49	13.01	12.04 (25)	2.8	***	***
8:50:13 - 8:50:39	86.31	11.60	14.11 (29)	2.9	***	***
8:51:33 - 8:51:58	83.94	10.46	16.49 (33)	3.0	13.99	0.25
8:52:49 - 8:53:14	81.65	10.46	19.36 (39)	3.5	***	***
8:54:06 - 8:54:32	77.87	9.14	20.47 (41)	3.3	15.91	0.17

表-4. 3(d) ソンデNo. 19 (RS11・H5, 2月12日9時42分放球)

時 間	A Z (°)	E L (°)	ゾンデ距離 (km)	高度 (km)	Z H (dBZ)	Z D R (dB)
9:48:39 - 9:49:05	105.38	20.57	6.17 (13)	2.2	18.14	1.00
9:50:03 - 9:50:28	94.39	18.72	8.28 (17)	2.7	8.62	0.31
9:51:30 - 9:51:55	87.01	16.00	10.22 (21)	2.9	10.05	0.17
9:52:45 - 9:53:11	83.85	14.94	11.86 (24)	3.1	11.35	0.32
9:54:12 - 9:54:38	79.19	15.73	14.56 (30)	4.0	14.19	0.32
9:55:28 - 9:55:53	76.99	14.85	18.25 (37)	4.7	17.63	0.17

(注) ① A Z, E Lは、レーダ観測値である。

② ソンデ距離は、当該時間におけるゾンデデータから算出したものである。

カッコ内はレーダレンジを示す。

③ 高度は、レーダレンジとレーダ観測仰角から求めたものである。

4. 6 地上観測との対比

地上では、降雪粒子観測装置による粒径分布・落下速度の測定及び”ろ紙法”による粒径分布の測定を行った。

4. 6. 1 ろ紙法による測定結果

ろ紙法による雪の粒径分布の測定を、1990年1月24～26日の3日間実施した。測定地点は、酒田工事事務所鶴岡国道維持出張所構内である。1月24日は、比較的風が弱く雪片のデータが収集できた。25日は、風が強く（5～10m/s程度）地吹雪の状態であり、データとしてはあまり良くない。26日も風が強かったが、あられのデータが収集できた。

(1) 降水粒子によるB, β の違い

ろ紙法による雪の粒径分布の測定結果（25日の地吹雪のデータは除く）から、理論計算によりZ-R関係を求め、それを用いて雪のB, β が得られた。図-4. 14にZ-R関係を示す。これから、同じ降水強度に対してあられ（1月26日観測）の方が雪片（1月24日観測）より少しZ値が大きくなることがわかる。雪片の場合のB, β は、 $B = 1172$, $\beta = 1.56$ となり、あられの場合のB, β は、 $B = 2488$, $\beta = 1.46$ となった。

これらから、あられの場合は、雪片に比べて、同じ降水強度でも3dB程度大きくなることがわかった。あられと雪片では、降水粒子の密度が異なる（すなわち、水・氷・空気の体積比が異なる）ので、当然のことながら誘電率が違ってくる。その影響が3dBの差となって現れたと推察できる。

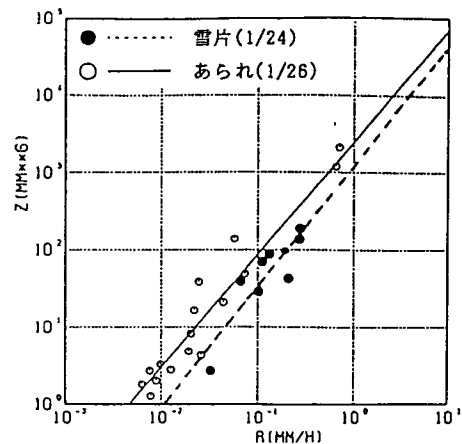


図-4. 14 雪のZ～R関係

(2) レーダ観測結果と粒径分布

ろ紙観測による粒径分布とその時のレーダ観測値（雨の誘電率を与えている）を図-4. 15に示す。これから、レーダの観測値は大きく変動しているのに対し、粒径分布の方はあまり変化していないことがわかる。また、15：30あたりからレーダ反射因子が増加しているが、その時には、粒径分布の全体の個数も増加している。Z_{DR}は、0dB以下に減少している。

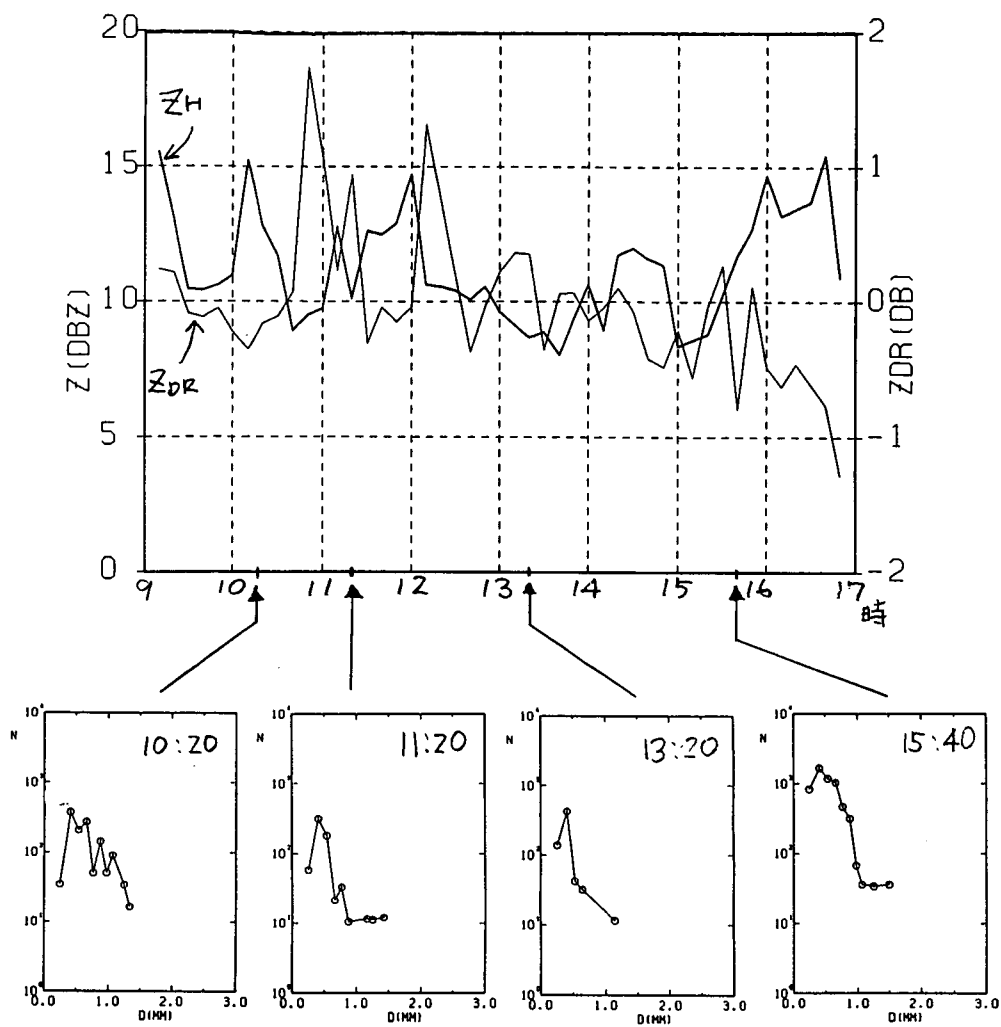


図-4. 15 レーダ観測値と粒径分布

4. 6. 2 降雪粒子測定装置による測定結果

1989年12月～1990年3月の間、図-4. 16に示す降雪粒子測定装置を鶴岡国道維持出張所に設置して、降雪粒子の粒径分布及び落下速度の測定を行った。

1月23日0:00～4:00の観測結果と、その時のレーダ観測結果を図-4. 17に示す。この観測例では、落下速度が0.5～2.0 m/s程度、粒径は0～15 mmの間に分布し、2～3 mmの粒径の雪片が最も多い。この結果から、雪片の密度は0.02～0.05 g/cm³程度であり、乾雪であると推定できる。

レーダの観測結果を見ると、雪片の分布数が増加する時間(2:00～3:00)でZ_Hも増加している。この時のZ_{DR}は、ろ紙の観測結果との対比したケースと同様、0 dB以下に小さくなっている。

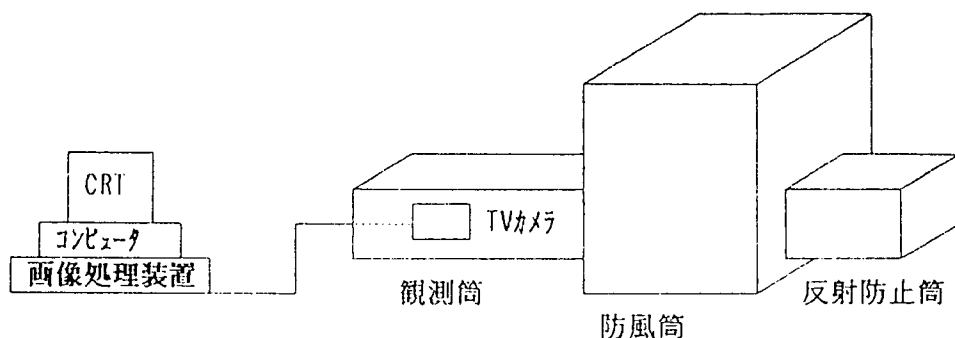


図-4. 16 降雪粒子観測装置

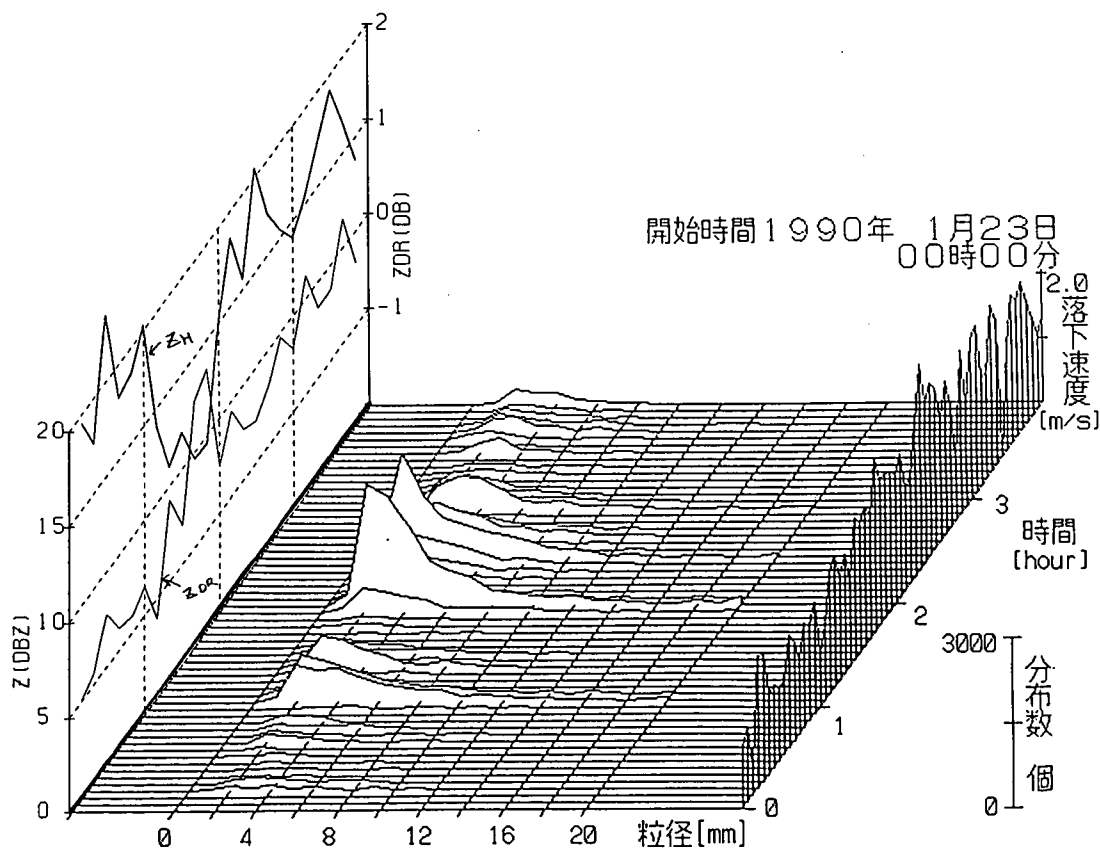


図-4. 17 観測結果

4. 7 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ①降水粒子の高度変化を見てみると、 Z_H 、 Z_{DR} については、降水粒子の変化に対応した変化が見られるが、 LDR については変化が見られなかった。
- ②今回の観測で、 LDR の値にほとんど変化が見られなかった原因は、水平偏波と垂直偏波の分離比が不足しているためと考えられる。 LDR を -30 dB 以下まで測定するには、 40 dB の分離比が必要である。
- ③ゾンデとの協同で降雪雲観測を行った結果、 -10°C 付近で Z_{DR} が大きくなることがわかった。大気中の降水粒子の変化を捉えていると考えられる。
- ④ろ紙観測により雪の粒径分布を測定した結果を用いて、雪片とあられとで $Z-R$ 関係が異なることを示した。
- ⑤雪片の分布数が増加する時間帯でのレーダ観測値 Z_{DR} は、 0 dB 以下となる傾向があった。

参考文献:

- 1)Hopper S E, Illingworth A J and Caylor I J, BRIGHT BAND ERRORS IN RAINFALL MEASUREMENT : IDENTIFICATION AND CORRECTION USING LINEARLY POLARIZED RADA RETURNS, International Symposium on Hydrological Applications on Weather Radar, 1989.8

第5章 DNDレーダ絶対校正作業

5. 1 はじめに

直交二偏波レーダによる降雨量への換算は、レーダ情報 (Z_H , Z_{DR}) のみを用いて行うので、レーダ方程式上の補正係数 F 値を正確に設定する必要がある。

レーダの補正係数 F には、レーダ装置の特性から決まる F 値と Unknown な F 値の 2 つが含まれている。Unknown な F 値は、降水粒子群からの散乱に対するレーダ方程式上の仮定や近似により生じるもので、この値を測定する方法は現在のところ確立されていない。本研究では、地上観測値とレーダ観測値とを比較することにより決めている (第3章参照)。レーダ装置の特性から決まる F 値には導波管等のロスと晴天時伝搬ロスがある。導波管等のロスは、あらかじめ測定することができるので正確な値が設定できる。晴天時伝搬ロスは何かの方法で求めておく必要がある。すなわち、絶対校正を行う必要がある。

本研究では、既存の研究用レーダでよく用いられる、反射体を上空に釣り上げてそれをレーダで観測することにより晴天時伝搬ロスを求める方法を用いて、DNDレーダ絶対校正を実施した。特に、本レーダの場合、 Z の補正值だけでなく、 Z_{DR} の補正值についても得る必要があるので、反射体は正確な球である必要がある。

5. 2 作業方法

5. 2. 1 作業上の制約

①測定距離

DNDレーダの場合、偏波切り替え器が正常に作動する (収束値からのずれが 0.01 dB 以内) のは、距離が 10 km 以上 (レンジ 20 以上) である (図-5. 1 参照)。観測時には、目標物を 10 km 程度離すことが必要である。

②気温

偏波切り替え器は、温度によりその特性が変化する。夏の観測の場合は、 30°C を標準値として設定してあるので、観測時の気温がこの温度に近い ($25 \sim 35^\circ \text{C}$) ことが望ましい。

③仰角

DNDレーダのビーム幅は、 1.8 度であるので、観測仰角を最低 2 度以上とする必要がある。

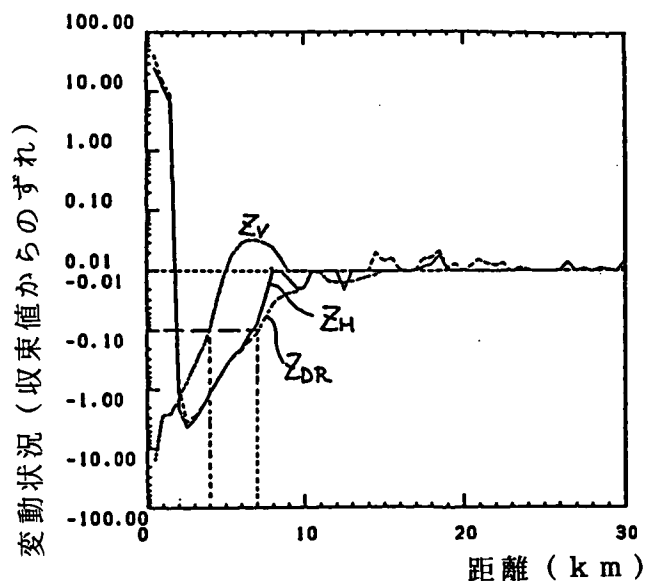


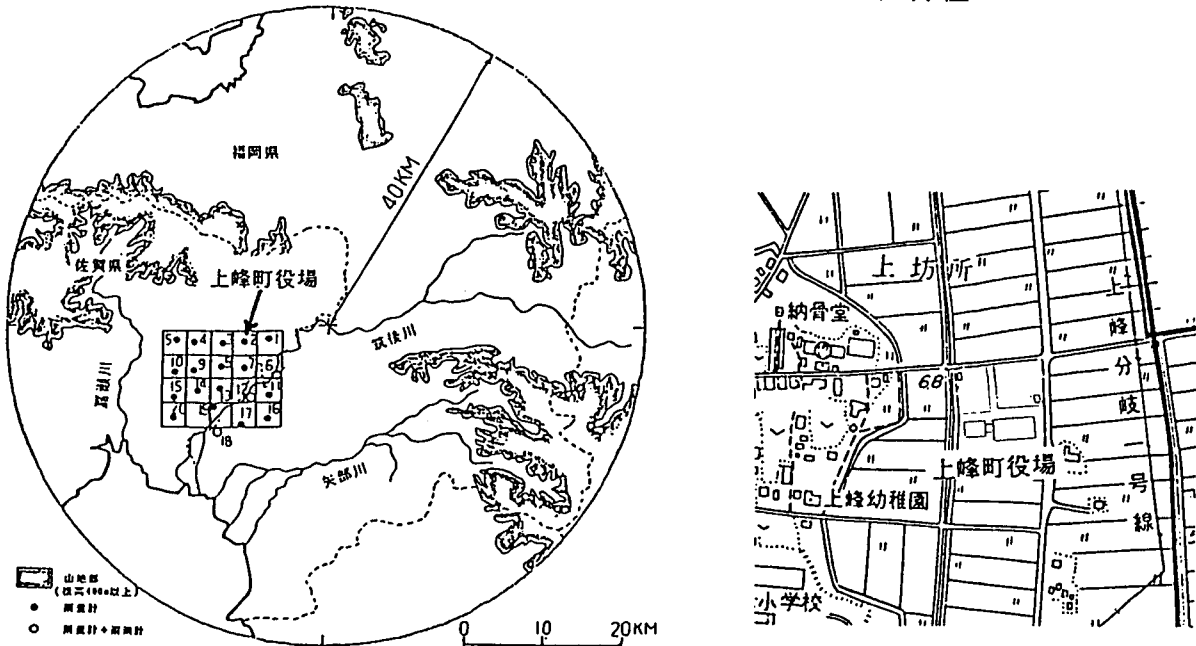
図-5. 1 観測値の変動状況

5. 2. 2 測定場所

レーダ・・・筑後川ダム統合管理事務所

目標物・・・上峰町役場前広場（図－5. 2 参照）

レーダサイトからの位置：距離 9. 51 km、方位 261. 2°



図－5. 2 上峰町役場の位置図

5. 2. 3 測定方法

(1)概要

目標物をバルーンにより上空につり上げ、レーダによりそれを観測する（図－5. 3 参照）。

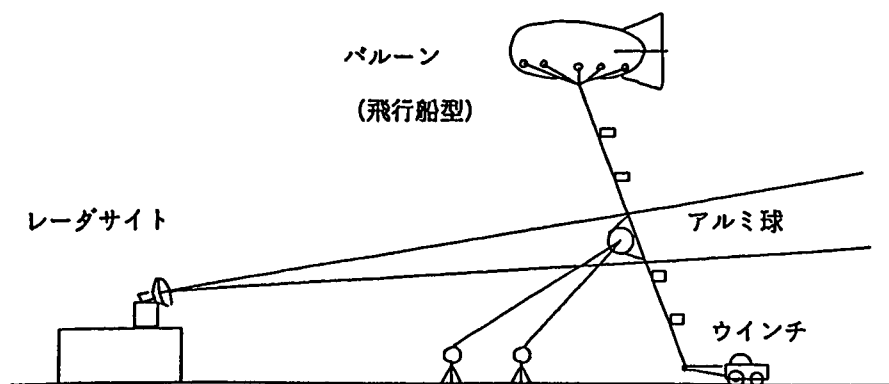
①使用機器

バルーン：気象観測用の係留ゾンデに用いる気球を使用する。

目標物：直径 1. 5 m のアルミ箔球を用いる。



あらかじめ直径を計測し、散乱断面積 σ （目標物の直径に比べてレーダの波長が十分小さいので σ はみかけの断面積に等しい）を算出しておく。



図－5. 3 測定方法略図

②目標物のつり上げ高度とレーダ観測仰角

目標物の地上距離が9.51kmであるので、レーダの観測仰角により、以下の高度に目標物をつり上げる必要がある。

観測仰角2.0°の場合：約350m

観測仰角2.5°の場合：約440m

観測仰角3.0°の場合：約520m

ただし、

- a. これらの高度は、ビーム中心高度であり、ビーム幅を考慮すると、±140mの幅がある。
- b. バルーンは、垂直に上がらず、若干傾くので、気球を係留するロープは、これらの距離より長くする必要がある。たとえば、30°傾くとすると、15%増となる。

である。

観測方法は、グラウンドクラッター、サイドロープの影響を考えて、以下のとおりとする。

◎レーダ観測仰角は2.0～2.5°とする。

◎目標物は、400m程度もち上げる。

◎バルーンと目標物との間は200m以上離すものとする。

(2)アンテナを目標物に合わせる方法

あらかじめ、地図上で、目標物設置地点の距離・方位角を求めておく。観測時に、初期状態として、仰角2.5°、地図上で求めた方位角に合わせておく。電波を発射して目標物を観測し、PPIスコープ、Aスコープを見て、最も強度が強くなるように、仰角・方位角を微調整する。

(3)レーダと目標物の距離の測定

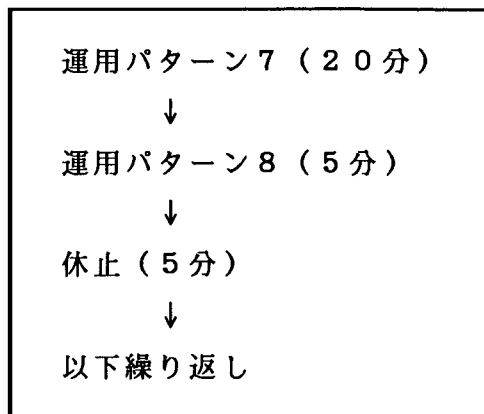
目標物の位置を計測する。計測は、レーダにより目標物を観測している期間中、1分おきに行う。

測定方法は、上峰町役場近くに目標物計測地点を2地点設け、そこから、トランシットにより目標物を観測するというものである。レーダサイト～目標物地点間の測定は、1万分の1の地図で行った。そのため、全体の測定誤差は、距離10m以内、方位0.1度以内となる。

(4)レーダ運用方法

運用パターン：運用パターン7及び8により観測する。

観測時間：2時間観測する。



(5)人員配置

レーダ操作：土研職員1人（水野）、メーカー2人

バルーン操作、監視：土研職員1人（井川）、気象協会の作業員3人

測 量：気象協会の作業員2人

5. 2. 4 F値の計算方法

目標物が1個の場合のレーダ方程式は、次式で表される。

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \sigma \cdot \lambda^2 \cdot F}{(4\pi)^3 \cdot r^4} \quad (5.1)$$

ここで、 P_r ：送受信器の入力電力、 P_t ：送受信機の出電力、 G ：アンテナ利得、 λ ：波長、 σ ：後方散乱断面積、 r ：レーダと目標物の距離、 F ：補正係数（導波管ロス+その他のロス）

P_t 、 G 、 λ は、レーダシステムにより決まり既知である。 P_r 、 r は観測結果から得られ、 σ は目標物の断面積であり測定できる。したがって、(1)式から補係数 F を求めることができる。

ただし、導波管ロスがあらかじめ測定されているので、その値を F_2 とすると、レーダ較正に必要な F の値 F_1 は、

$$F_1 = F - F_2 \quad (5.2)$$

となる。

5.3 作業実施状況

5.3.1 第1回絶対校正作業

(1) 作業日時 平成2年9月26日(水)～27日(木)

(2) 作業経過

9月26日 15:30～16:00 DNDレーダ電源投入, 試運転
筑後川ダム統管指令室で作業内容の打ち合わせ
16:30～17:00 バルーン設置地点(上峰町役場)とレーダサイト
間でトランシーバーによる通話連絡試験を実施
17:00～17:30 観測仰角の調査
17:30～19:30 距離平均回路を絶対校正用に改造、動作確認
9月27日 7:30～ 8:00 バルーン、アルミ球にヘリウムガスを充填
8:00～ 9:50 所定の高度にまでバルーンとアルミ球を上げる
(レーダの立ち上げ、点検、試運転)
9:50～10:50 第1回観測実施(反射体有)
10:50～11:00 休憩
11:00～12:10 第2回観測実施(反射体有)
12:10～12:50 反射体取り外し
12:50～13:20 第3回観測実施(反射体無)
13:20～13:50 バルーン撤去
13:50～14:00 第4回観測実施(バルーン無)
14:00～15:00 観測結果の検討
15:00～15:50 距離平均化回路を元に戻す
16:00 作業終了

(3) 校正作業時の人員配置

a. レーダサイト

・連絡調整、作業指示 1名 (土研:水野)
・レーダ操作 1名 (JRC:上野)
・操作状況記録、Aスコープ監視・撮影 1名 (三菱:奥田)

b. バルーン設置場所

・連絡調整、作業指示 1名 (土研:井川)
・バルーン操作、測量、操作状況記録 5名 (気象協会:日隈他4名)
・ビデオ撮影 1名 (東芝:野川)

(4) バルーン及び標準反射体の設置高度

・バルーン…約550m ・標準反射体…約350m

(5) 校正作業時の天候

作業準備から終了の間 快晴、風速も常時5 m以下、気温は日中には30℃近くまで上昇し、校正作業には最良の状態であった。

なお、地上気温測定結果は次の通りであった。

表-5. 1 地上気温測定結果

時刻	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30
気温℃	22.2	23.2	—	24.5	25.5	26.3	26.7	27.2	27.7	28.9	29.2

(6) バルーンの設置撤去作業

バルーン設置時は、風のため30°程度西方向に傾いていたが、レーダ観測時は風が弱まりほとんど垂直の状態であった。

また、50 m毎に障害標識(赤旗)をロープに取り付ける必要があるために、当初考えていたより作業時間がかかった。今回の高度では1時間半程度であることが分かった。

(7) 方位角、仰角の調整

今回の実験では、直接反射体のエコーを捉えた訳ではなく、バルーンのエコーを反射体のエコーと誤認し方位角と仰角の調整作業を行った。バルーンからのエコーはその形状から変動が大きく、エコーのピークを捉えるのはかなり困難であったが、調整作業の状況から約0.2°程度の精度で調整できていると思われる。

(8) 平均化回路の改造

今回の実験では測定結果の正確さを期するために、運用パターン8の場合において一切のデータ平均を行わず、生のサンプルデータの収集を試みた。そのためには平均化回路の改造が必要となるが、改造作業は順調に行われ、約1時間程度で改造及び改造後の動作確認を行うことができた。

なお、運用パターン8以外のデータにおいては距離平均スキャン平均等の処理が施されているため、記録データの解析を行う際には注意する必要がある。

(9) レーダの操作

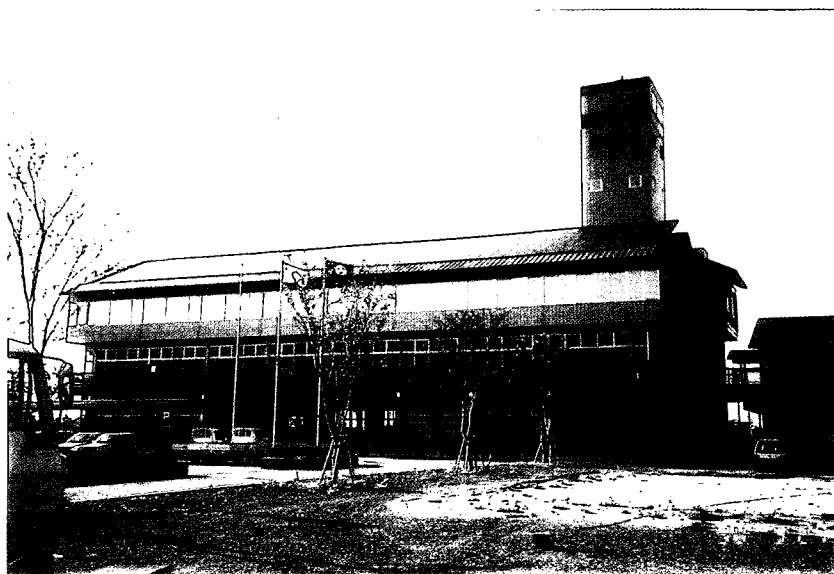
表-4. 2にレーダの運用操作状況を示す。

(10) 作業状況

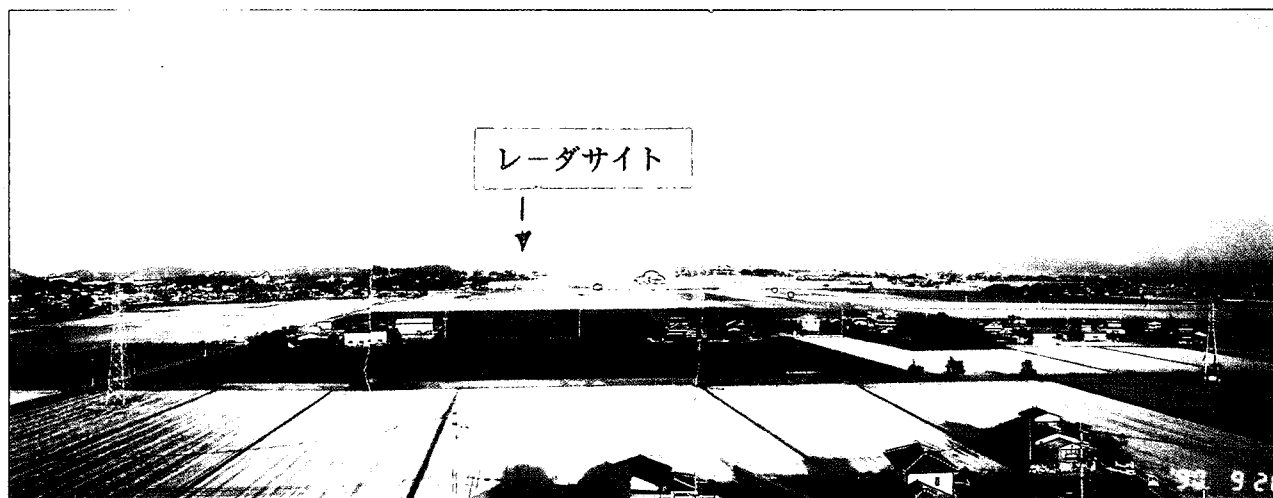
写真-5. 1～写真-5. 8に作業状況を示す。

表-4. 2 DNDレーダ運用操作記録(9月27日)

	運用パターン	仰角	方位角	データ平均時間	開始時間-終了時間
第一回観測 (反射体有り)	7-1(205)	2.1	262.3	(9パルス)	09:51:09-10:01:17
	7-6(205)	2.1	262.3	(9パルス)	10:03:14-10:13:21
	5(204)	2.1	SCAN	SCAN	10:15:18-10:23:36
	6(202)	〃	〃	1分	10:25:00-10:33:40
	8-1(206)	2.0	263.3	(1パルス)	10:38:24-10:42:32 *10:45:35 MT交換
第二回観測 (反射体有り)	7-1(205)	2.1	263.0	(9パルス)	11:06:48-11:16:57
	7-6(205)	〃	〃	(9パルス)	11:18:35-11:28:45
	5(204)	2.1	SCAN	SCAN	11:29:46-11:38:37
	6(202)	2.3	SCAN	1分	11:44:26-11:53:13
	8-1(206)	2.3	263.5	(1パルス)	11:57:11-12:01:33 *12:04:32 MT交換
第三回観測 (反射体なし)	7-1(205)	2.3	263.5	(9パルス)	13:00:36-13:02:26
	7-6(205)	〃	〃	(9パルス)	13:03:26-13:05:04
	5(204)	2.3	SCAN	SCAN	13:06:01-13:07:13
	6(202)	〃	〃	1分	13:08:03-13:11:16
	8-1(206)	2.3	263.5	(1パルス)	13:14:32-13:15:55
第四回観測 (バルーンなし)	8-1(206)	2.3	263.5	(1パルス)	13:54:08-13:55:15



写真－5. 1 上峰町役場



写真－5. 2 上峰町役場展望台からレーダサイト方向を見る



写真-5.3 気球の設置 (H=550m)



写真-5.4 ヘリウムガス

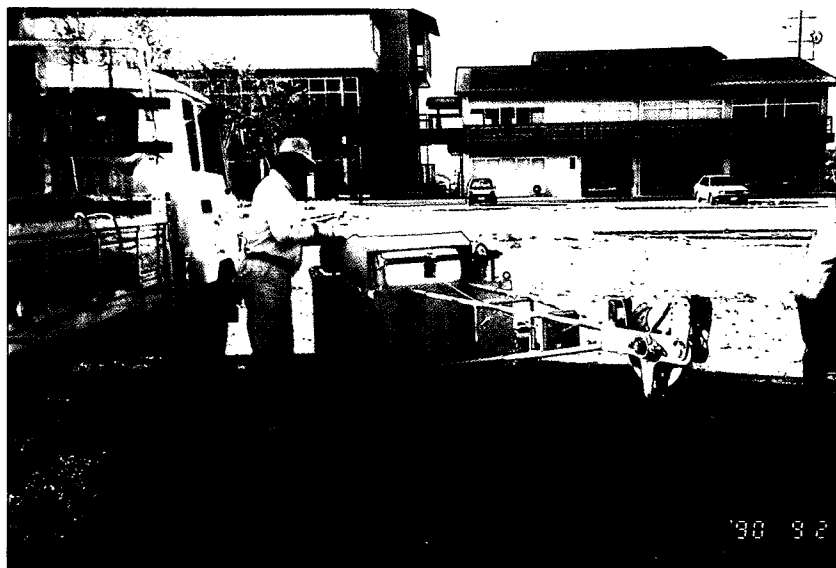


写真-5.5
気球係留用ウインチ



写真-5.6
障害標識の設置(50mごと)

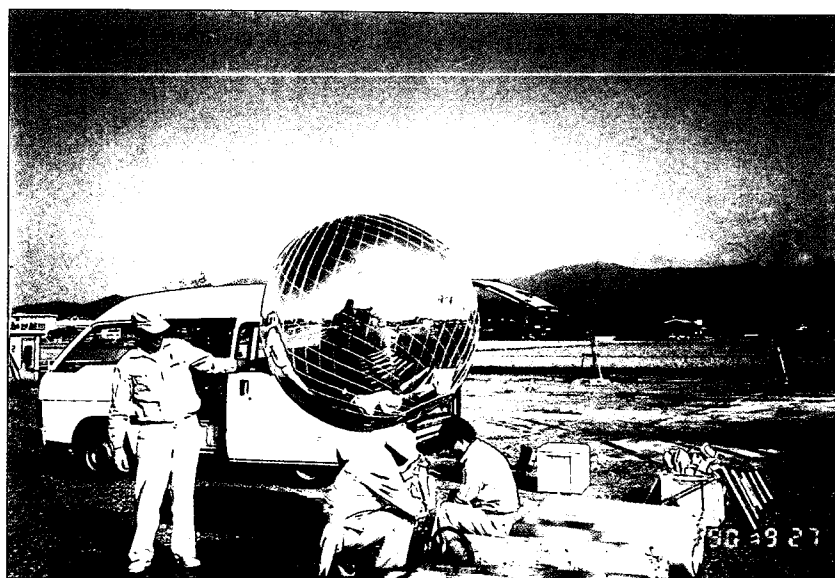


写真-5. 7 アルミ箔球 (直径1. 5 m)

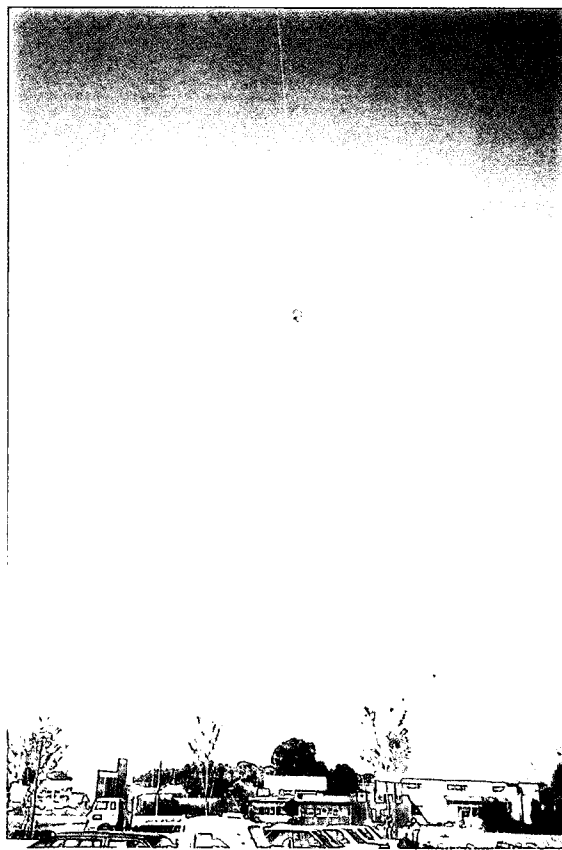


写真-5.8 アルミ箔球の設置 (H=350m)

5. 3. 2 第2回絶対較正作業

(1) 作業日時 平成2年10月16日(水)～17日(木)

(2) 作業経過

10月16日	16:00～17:00	事前打合わせ, レーダの動作確認
10月17日	7:30～8:15	レーダ立上げ, 点検
	8:15～8:30	G. Cの観測, 観測仰角の決定
	8:30～9:40	バルーン設置(高度850m)
	9:40～10:20	アンテナパターンの測定(反射体なし)
	10:20～11:10	第1回観測(反射体なし)
	11:10～12:30	アルミ球の取付け作業
	12:30～13:30	昼休み及び準備
	13:30～14:50	第2回観測(反射体有り)
	14:50～16:00	第3回観測(")
	16:00～16:15	アンテナパターンの測定(")
	16:15～17:10	バルーン撤去
	17:10～17:50	第4回観測(バルーン及び反射体なし)

(3) 較正作業時の人員配置 第1回絶対較正作業時とほぼ同様

(4) バルーン及び標準反射体の設置高度

バルーン…約850m 標準反射体…約400m

(5) 較正作業時の天候

午前中晴れ、午後から曇り始める。風速は常時5m以下、気温は日中には20℃程度。

(6) 観測仰角の決定(バルーン及び反射体無し)

上峰町役場方向($AZ = 262^\circ$)で仰角を 1.7° から 3.2° まで変化させて観測を行った結果、前回(第1回)の作業時とは異なり 2° 付近においても強いエコーが見られた。その結果、反射体の設置位置を仰角 2.5° 相当の位置に決定する。

(7) アンテナパターンの測定

反射体を取り付けずに、バルーン単体を高度約850m付近(仰角 5.2° 相当)に設置し、仰角を 10.2 (目標物:バルーン+ 5.0°)から 2.0° (目標物- 3.2°)まで変化させて運用パターン8-1により Z_{HH} , Z_{VV} , Z_{HV} , Z_{VH} の測定を行なった。

(8) レーダの操作

表-4. 3にレーダの運用操作状況を示す。

(9) 作業状況

写真-5. 9～写真-5. 16に作業状況を示す。

表-4.3 DNDレーダ運用操作記録(10月17日)

	運用パターン	仰角	方位角	データ平均時間	開始時間-終了時間
GCの観測 (仰角決定)	7-1(205)	1.70	262.0	(9パルス)	08:17:42-08:18:25
	"	2.0	"	"	08:18:52-08:19:36
	"	2.3	"	"	08:19:53-08:20:37
	"	2.6	"	"	08:21:16-08:21:59
	"	2.9	"	"	08:22:20-08:23:04
	"	3.2	"	"	08:23:23-08:24:06
アンテナ パターン測定	8-1(206)	10.2	262.0	(1パルス)	09:49:18-09:49:42
	"	9.67	"	"	09:50:38-09:51:01
	"	9.32	"	"	09:51:40-09:52:01
	"	8.96	"	"	09:52:35-09:52:56
	"	8.70	"	"	09:53:30-09:53:49
	"	8.53	"	"	09:54:22-09:54:38
	"	8.09	"	"	09:55:15-09:55:34
	"	7.82	"	"	09:56:03-09:56:20
	"	7.47	"	"	09:56:51-09:57:09
	"	7.21	"	"	09:57:41-09:57:59
	"	6.68	"	"	09:58:30-09:58:50
	"	6.24	"	"	09:59:22-09:59:39
	"	5.71	"	"	10:00:10-10:00:29
	"	5.19	"	"	10:01:11-10:01:29
	"	4.75	"	"	10:02:15-10:02:35
	"	4.13	"	"	10:04:21-10:04:39
	"	3.69	"	"	10:05:35-10:05:56
	"	3.16	"	"	10:06:30-10:06:50
	"	2.90	"	"	10:07:21-10:07:59
	"	2.64	"	"	10:11:25-10:11:44
	"	2.46	"	"	10:12:16-10:12:35
	"	2.29	"	"	10:13:06-10:13:25
	"	2.02	"	"	10:14:00-10:14:14
第一回観測 (アルミ球無し)	7-1(205)	2.6	262.0	(9パルス)	10:25:31-10:31:09
	7-6(205)	"	"	"	10:33:30-10:39:15
	5(204)	"	SCAN	SCAN	10:40:33-10:44:44
	6(202)	"	"	1分	10:46:22-10:51:04
	8-1(206)	2.5	262.1	(1パルス)	10:56:57-11:00:03
第二回観測 (アルミ球有り)	7-1(205)	2.4	262.4	(9パルス)	13:47:07-13:57:19
	7-6(205)	"	"	"	13:59:01-14:09:13
	5(204)	"	SCAN	SCAN	14:10:13-14:18:23
	6(202)	"	"	1分	14:19:19-14:28:16
	8-1(206)	"	262.4	(1パルス)	14:35:35-14:40:38
第三回観測 (アルミ球有り)	7-1(205)	2.4	263.1	(9パルス)	15:04:38-15:14:47
	7-6(205)	"	"	"	15:16:29-15:27:27
	5(204)	"	SCAN	SCAN	15:28:35-15:36:48
	6(202)	"	"	1分	15:37:20-15:46:10
	8-1(206)	"	263.1	(1パルス)	15:52:22-15:57:32
アンテナ パターン測定	8-1(206)	2.4	263.1	(1パルス)	16:04:29-16:04:51
	"	2.6	"	"	16:05:29-16:05:51
	"	3.1	"	"	16:06:50-16:07:10
	"	3.6	"	"	16:07:41-16:08:03
	"	4.1	"	"	16:09:32-16:09:56
	"	4.6	"	"	16:10:31-16:10:54
	"	5.1	"	"	16:11:29-16:11:52
	"	5.3	"	"	16:12:25-16:12:49
第四回観測 (バルーン無し)	7-1(205)	2.4	263.1	(9パルス)	17:12:20-17:17:22
	7-6(205)	"	"	"	17:18:55-17:23:58
	5(204)	"	SCAN	SCAN	17:24:34-17:28:41
	6(202)	"	"	1分	17:29:34-17:34:16
	8-1(206)	"	263.1	(1パルス)	17:37:10-17:40:17

第2回絶対校正作業写真（1990年10月17日）

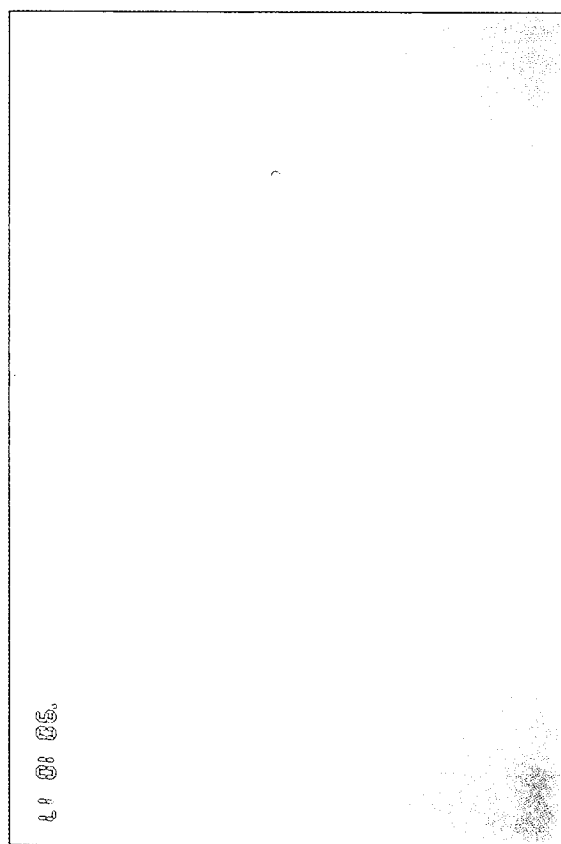


写真-5.9 気球の設置 (H=800m)

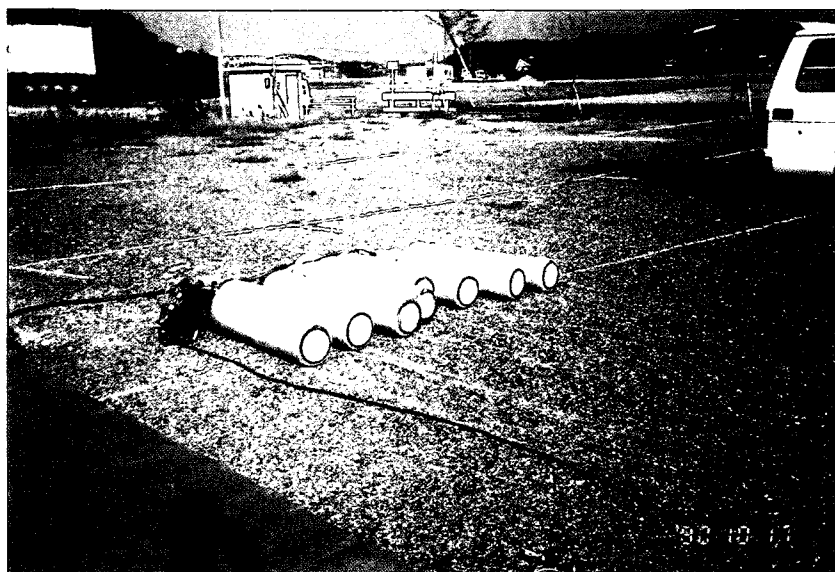


写真-5. 10 ヘリウムガス



写真-5. 11
気球係留用ウインチ

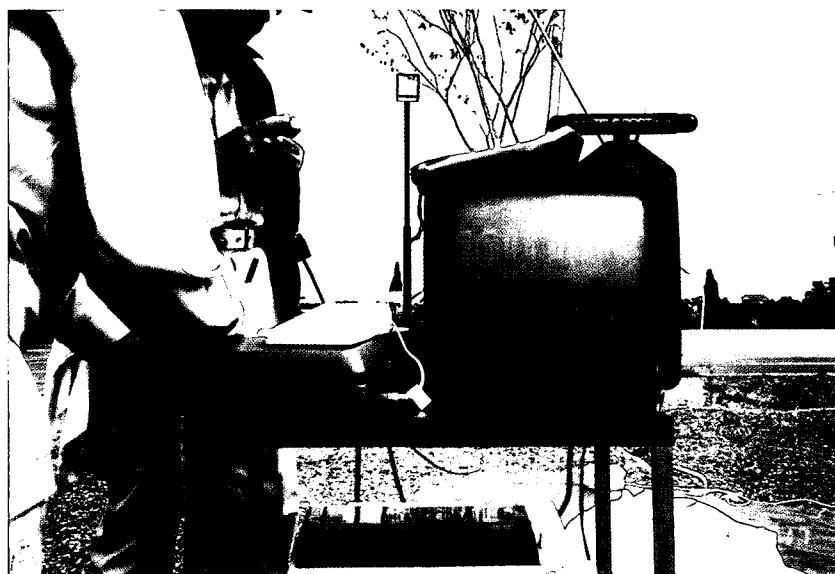


写真-5. 12 気球位置の測量

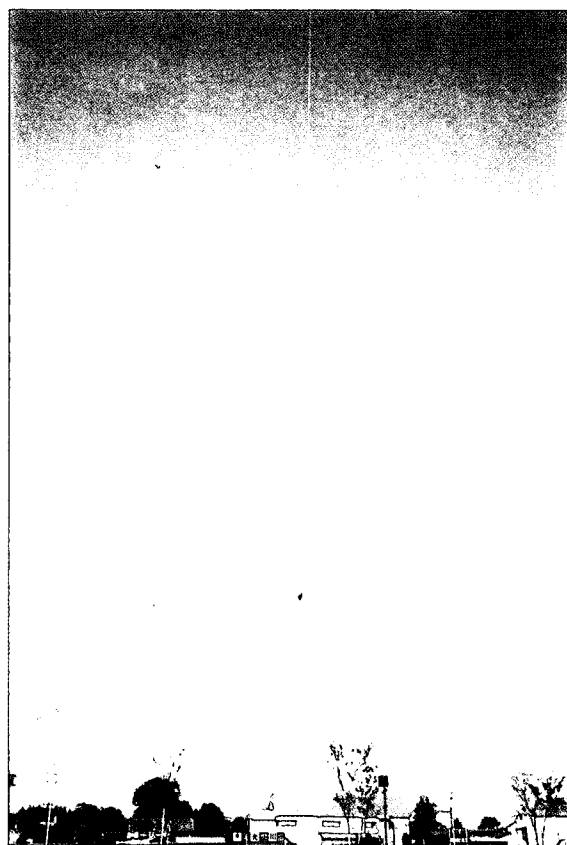


写真-5. 13 障害標識の設置(100mごと)



写真-5. 14 アルミ箔球（直径1. 5 m）

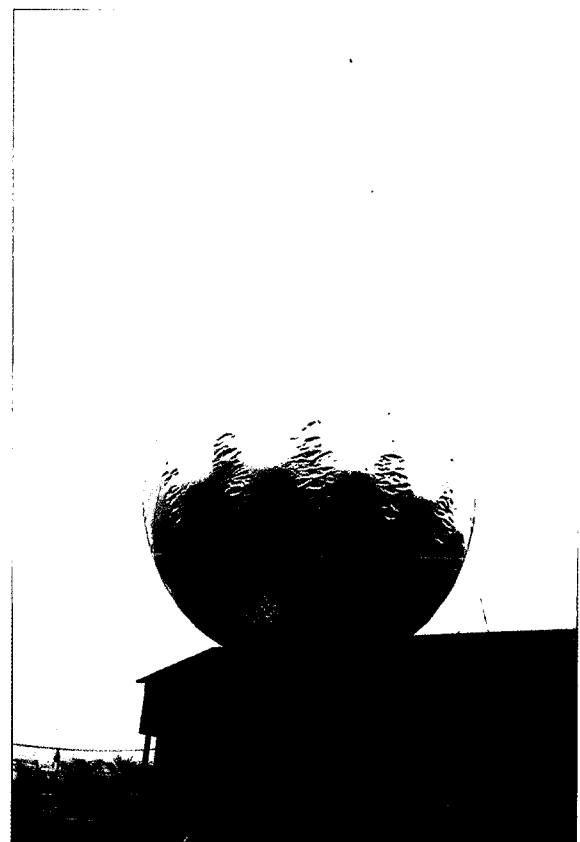
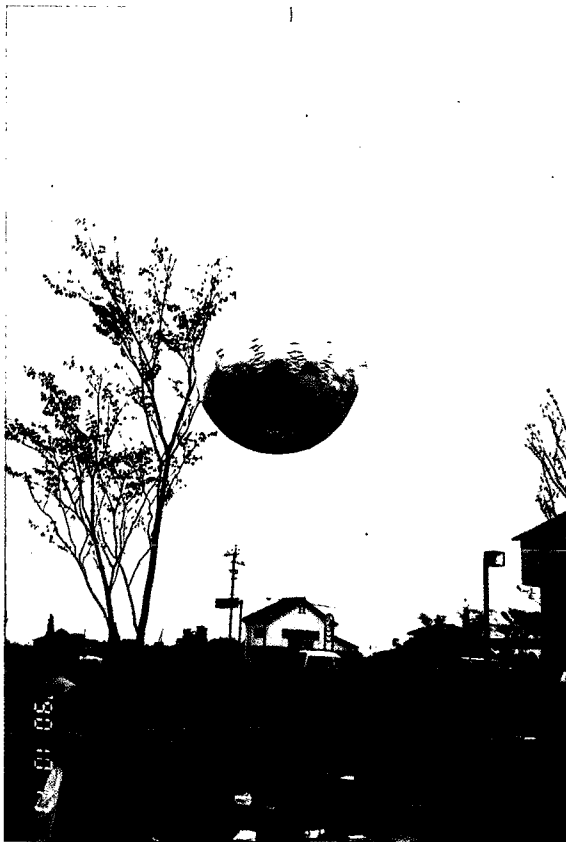


写真-5. 15 アルミ箔球の設置 (H=400m)

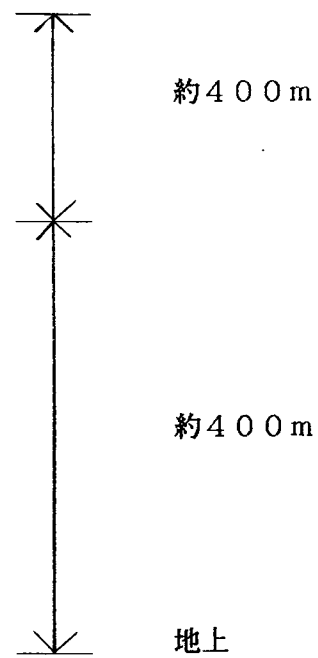
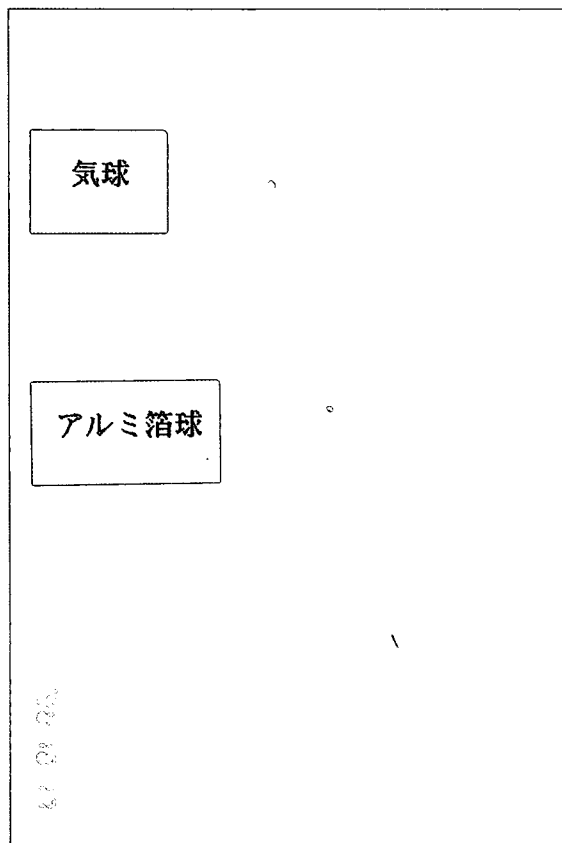
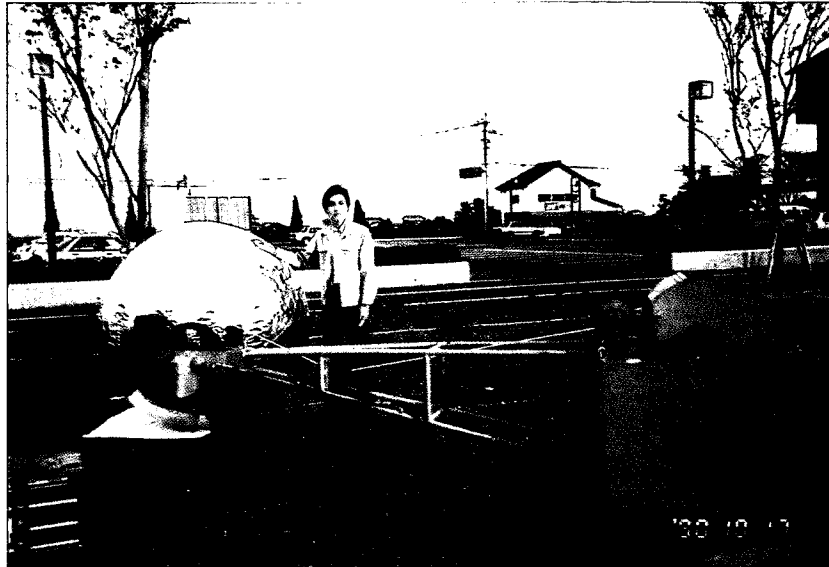


写真-5.16 アルミ箔球の設置 ($H=400\text{ m}$)

5.4 データ解析結果

5.4.1 アンテナパターンの測定

第2回絶対較正作業時に、バルーン単体を高度約850m付近に設置し、仰角を変化させて測定を行なった結果得られたアンテナパターンを図-5.4(a)に示す。これらの値は、各々の仰角において観測された最大値を示している。アンテナパターンのピークは4.7°~5.2°付近で-63.5dBmが観測されている。また、ピークから-2.7°(仰角2.5°)で-94.5dBmが得られている。この仰角2.5°における受信電力値は反射体からの予想受信電力値-63.5dBmより31dB小さい値であり、仰角2.5°付近に反射体を設置することによってバルーンによる影響を排除することができると思われる。

次に、参考データとしてバルーンに反射体を取り付けた状態で仰角2.5°~5.2°までの受信電力の測定を行なった結果を図-5.4(b)に示す。この図では約3.6°~4°付近にレベルの低下が見られ、その前後で受信電力が増大している。これは、それぞれ反射体(仰角2.5°付近に設置)及びバルーン(仰角5.2°付近に設置)からの反射によるものである。このことから、仰角2.5°付近で反射体の後方散乱測定値はバルーンの影響をほとんど受けていないと推定される。

5.4.2 標準反射体の後方散乱強度測定

(1) 第1回絶対較正作業結果

第1回絶対較正作業時(9月27日)には、以下に示す観測を行っている。

- ①第1回観測：標準反射体を取り付けた状態で、その後方散乱強度を測定
 - ②第2回観測：同 上
 - ③第3回観測：反射体を取り付けずにバルーンだけを所定の高度に上げて、ワイヤー等の背景からの散乱強度を測定
 - ④第4回観測：バルーン撤去後、何も無い状態でグラウンドクラッタの強度を測定
- これらのデータを用いて解析を行った結果を以下に示す。

a. 標準反射体の位置測量結果

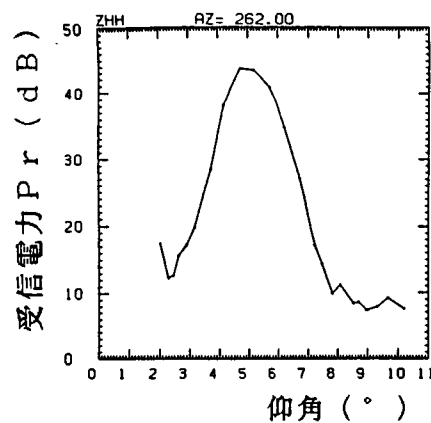
表-5.4及び図-5.5に標準反射体の位置を地上において測量を行った結果を示す。

(a)はレーダサイトから見た方位角、仰角を、(b)は距離と高度を示している。

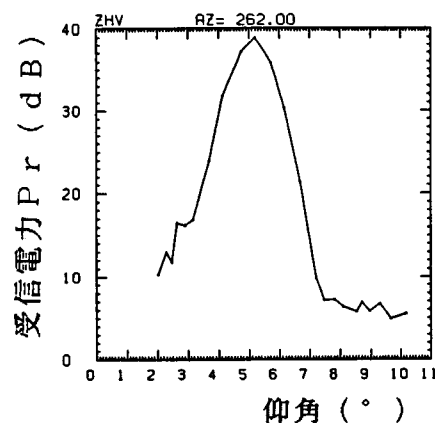
これらの図から、方位角及び仰角は観測期間中はほぼ一定の値であるが、距離は9,400m~9,300mの間で大きく変化していることが分かる。

b. 距離方向のプロファイル

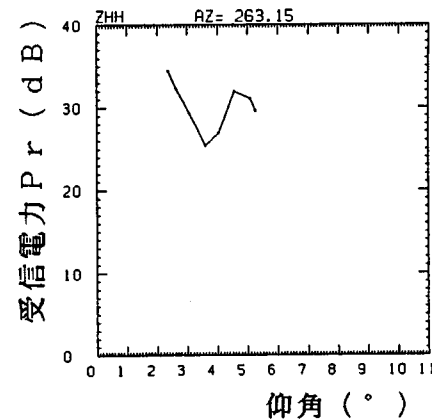
図-5.6に距離方向の受信電力値(観測時間中の最大値)の変化を示す。ただし、距離方向の分解能は絶対較正作業のために信号処理装置の改造を行い250mピッチとしてあるため、1レンジは250mに相当する。また、シンクロスコープによる観測結果を写



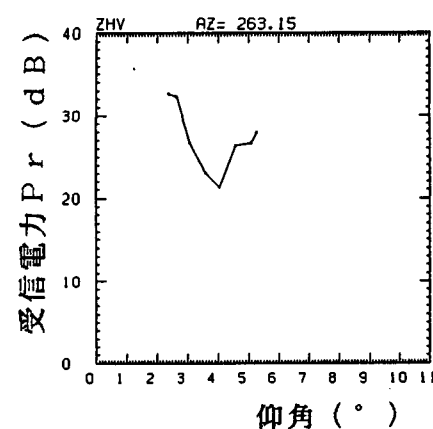
① $P_{r_{HH}}$



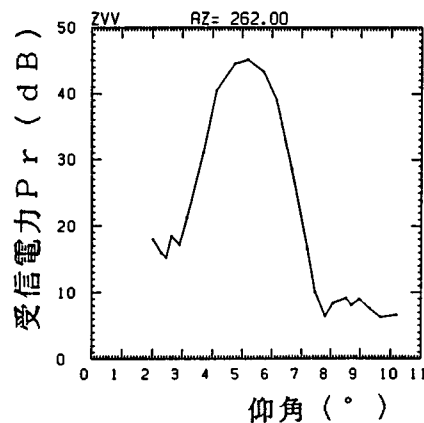
② $P_{r_{HV}}$



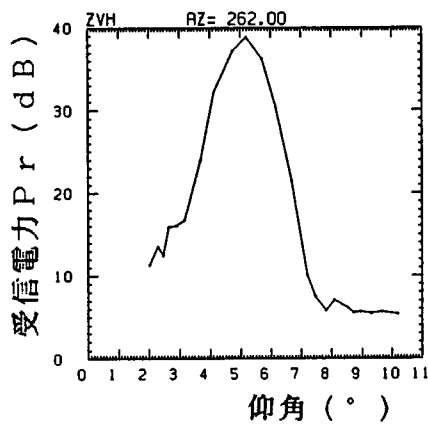
① $P_{r_{HH}}$



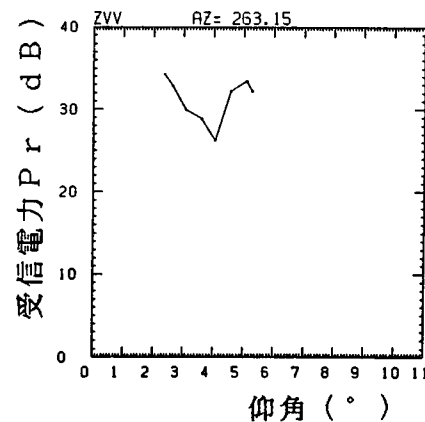
② $P_{r_{HV}}$



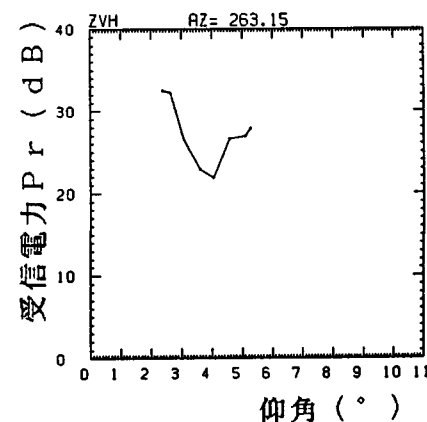
③ $P_{r_{VV}}$



④ $P_{r_{VH}}$



③ $P_{r_{VV}}$



④ $P_{r_{VH}}$

(a) バルーン単体

(b) バルーン+反射体(アルミ球)

図-5.4 アンテナパターン測定結果 ($S_{min}=-107.5\text{dBm}$)

測定日時: 1990.10.17 レンジNo: 34

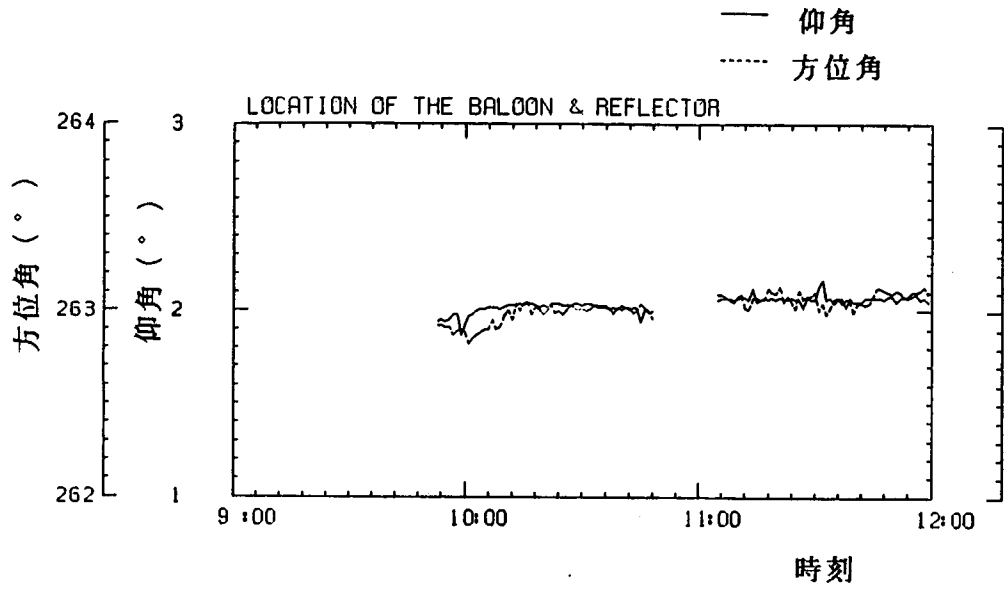
表-5.4 標準反射体の位置測量結果(1)

時間	D N D レーダー・気球間			平成2年 9月 27日 上峰町役場地点の気球DATA			
	斜距離	方位	角度	高さ	S1角度	S1仰角	S2角度
09:53:00	9397.2	262.92	1.94	349.16	53.4	32.4	68.9 (111.1)
09:54:00	9401.6	262.92	1.95	350.46	53.6	32.3	69.2 (110.8)
09:55:00	9399.1	262.91	1.94	348.56	53.3	32.2	69.3 (110.7)
09:56:00	9395.4	262.91	1.95	350.60	53.1	32.5	69.1 (110.9)
09:57:00	9380.6	262.87	1.98	354.49	51.5	33.1	69.4 (110.6)
09:58:00	9378.3	262.89	1.98	354.55	51.6	33.3	68.9 (111.1)
09:59:00	9385.0	262.90	1.87	337.11	52.3	31.8	68.9 (111.1)
10:00:00	9390.3	262.88	1.93	346.56	52.3	32.2	69.6 (110.4)
10:01:00	9383.9	262.82	1.97	352.82	51.1	32.6	70.5 (109.5)
10:02:00	9376.7	262.85	1.98	355.20	51.0	33.2	69.6 (110.4)
10:03:00	9368.1	262.87	2.00	357.70	50.6	33.8	68.9 (111.1)
10:04:00	9361.2	262.88	2.01	358.50	50.3	34.2	68.3 (111.7)
10:05:00	9358.7	262.90	2.01	358.83	50.3	34.4	67.9 (112.1)
10:06:00	9348.9	262.90	2.02	360.31	49.6	34.9	67.4 (112.6)
10:07:00	9356.6	262.95	2.02	360.67	50.8	34.9	66.8 (113.2)
10:08:00	9359.1	262.90	2.02	359.92	50.4	34.5	67.8 (112.2)
10:09:00	9357.2	262.91	2.01	359.49	50.4	34.6	67.5 (112.5)
10:10:00	9354.4	262.97	2.02	360.68	50.9	35.1	66.3 (113.7)
10:11:00	9345.0	263.00	2.03	362.49	50.6	35.8	65.2 (114.8)
10:12:00	9346.4	262.95	2.03	361.55	50.1	35.4	66.2 (113.8)
10:13:00	9343.3	263.04	2.03	361.99	51.1	36.1	64.2 (115.8)
10:14:00	9340.5	263.00	2.04	363.80	50.3	36.1	64.9 (115.1)
10:15:00	9349.4	263.04	2.03	361.64	51.5	35.8	64.6 (115.4)
10:16:00	9353.7	263.05	2.04	363.51	51.9	35.8	64.7 (115.3)
10:17:00	9344.0	262.98	2.04	363.37	50.3	35.8	65.5 (114.5)
10:18:00	9346.1	263.02	2.03	362.65	51.0	35.9	64.8 (115.2)
10:19:00	9354.4	263.01	2.02	361.18	51.5	35.4	65.4 (114.6)
10:20:00	9348.0	262.98	2.03	361.48	50.6	35.5	65.7 (114.3)
10:21:00	9341.9	263.00	2.02	360.70	50.4	35.8	65.0 (115.0)
10:22:00	9339.6	263.03	2.04	363.76	50.6	36.3	64.3 (115.7)
10:23:00	9343.4	262.99	2.04	362.77	50.3	35.8	65.4 (114.6)
10:24:00	9340.5	263.00	2.04	363.80	50.3	36.1	64.9 (115.1)
10:25:00	9342.5	262.98	2.03	362.47	50.2	35.8	65.4 (114.6)
10:26:00	9345.5	263.01	2.03	361.91	50.8	35.8	65.0 (115.0)
10:27:00	9345.8	263.03	2.03	361.74	51.1	35.9	64.6 (115.4)
10:28:00	9338.1	263.02	2.04	362.75	50.3	36.2	64.5 (115.5)
10:29:00	9342.5	263.00	2.04	362.62	50.4	35.9	65.1 (114.9)
10:30:00	9345.2	263.02	2.03	362.34	50.9	35.9	64.8 (115.2)
10:31:00	9345.6	263.00	2.04	363.09	50.6	35.8	65.3 (114.7)
10:32:00	9342.5	263.01	2.04	362.77	50.6	36.0	64.8 (115.2)
10:33:00	9336.2	263.03	2.03	360.97	50.3	36.2	64.2 (115.8)
10:34:00	9336.5	263.03	2.02	360.66	50.4	36.2	64.1 (115.9)
10:35:00	9336.8	263.02	2.03	361.56	50.3	36.2	64.3 (115.7)
10:36:00	9340.9	263.03	2.02	359.35	50.7	35.9	64.4 (115.6)
10:37:00	9344.8	263.01	2.02	359.98	50.8	35.7	64.9 (115.1)
10:38:00	9340.5	263.02	1.99	355.70	50.6	35.6	64.5 (115.5)
10:39:00	9343.9	263.01	2.02	359.68	50.7	35.7	64.9 (115.1)
10:40:00	9340.9	263.03	2.01	358.03	50.7	35.8	64.4 (115.6)
10:41:00	9339.8	263.02	2.02	360.68	50.5	36.0	64.5 (115.5)
10:42:00	9342.1	263.02	2.01	359.22	50.7	35.8	64.6 (115.4)
10:43:00	9339.8	262.99	2.02	360.40	50.1	35.8	65.1 (114.9)
10:44:00	9332.4	263.00	2.02	360.00	49.6	36.1	64.6 (115.4)
10:45:00	9320.6	263.04	1.94	347.09	49.2	35.8	63.2 (116.8)
10:46:00	9347.5	263.02	2.01	358.24	51.1	35.5	64.9 (115.1)
10:47:00	9347.1	263.00	1.99	355.74	50.8	35.2	65.3 (114.7)
10:48:00	9354.0	262.96	2.00	356.95	50.8	34.8	66.4 (113.6)

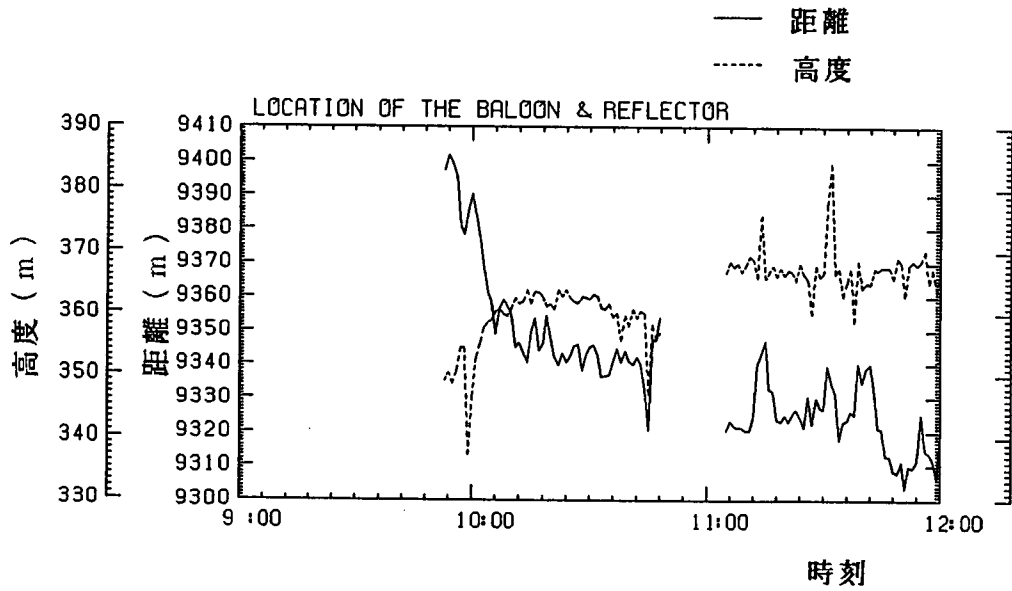
表-5. 4 標準反射体の位置測量結果(2)

平成2年 9月 27日

時間	D N D レーダー・気球間			上峰町役場地点の気球 D A T A			
	斜距離	方位	角度	高さ	S1角度	S1仰角	S2角度
11:05:00	9320.4	263.09	2.06	366.63	49.9	37.7	62.0 (118.0)
11:06:00	9323.3	263.09	2.07	368.35	50.1	37.7	62.2 (117.8)
11:07:00	9321.9	263.08	2.07	367.44	49.8	37.6	62.4 (117.6)
11:08:00	9321.4	263.06	2.07	368.10	49.6	37.6	62.6 (117.4)
11:09:00	9321.3	263.05	2.06	366.70	49.4	37.4	62.9 (117.1)
11:10:00	9320.5	263.08	2.07	367.90	49.7	37.7	62.3 (117.7)
11:11:00	9320.5	263.09	2.08	369.28	49.9	37.9	62.0 (118.0)
11:12:00	9324.7	263.02	2.08	368.81	49.2	37.2	63.8 (116.2)
11:13:00	9339.9	263.01	2.06	365.87	50.3	36.3	64.8 (115.2)
11:14:00	9343.4	263.07	2.12	375.93	51.4	37.3	63.7 (116.3)
11:15:00	9347.1	263.07	2.05	365.65	51.8	36.4	63.8 (116.2)
11:16:00	9332.9	263.06	2.06	366.77	50.5	37.0	63.3 (116.7)
11:17:00	9332.1	263.06	2.07	367.82	50.4	37.1	63.3 (116.7)
11:18:00	9323.8	263.12	2.06	366.04	50.6	37.7	61.6 (118.4)
11:19:00	9322.9	263.10	2.07	367.41	50.2	37.7	62.0 (118.0)
11:20:00	9324.8	263.09	2.06	366.23	50.3	37.5	62.2 (117.8)
11:21:00	9323.0	263.13	2.07	367.11	50.7	37.9	61.3 (118.7)
11:22:00	9325.5	263.05	2.06	366.62	49.7	37.2	63.2 (116.8)
11:23:00	9326.5	263.08	2.06	365.38	50.3	37.3	62.5 (117.5)
11:24:00	9324.5	263.05	2.07	368.09	49.7	37.4	63.0 (117.0)
11:25:00	9321.3	263.01	2.06	366.40	48.8	37.1	63.8 (116.2)
11:26:00	9330.6	263.11	2.06	365.46	51.0	37.3	62.2 (117.8)
11:27:00	9322.2	263.06	2.02	360.05	49.6	36.9	62.8 (117.2)
11:28:00	9330.0	263.08	2.07	367.74	50.5	37.3	62.8 (117.2)
11:29:00	9327.1	263.08	2.06	365.98	50.3	37.3	62.6 (117.4)
11:30:00	9326.7	263.10	2.06	366.42	50.6	37.5	62.1 (117.9)
11:31:00	9339.5	263.00	2.13	377.75	50.2	37.2	64.8 (115.2)
11:32:00	9334.7	263.04	2.17	384.19	50.3	38.1	63.8 (116.2)
11:33:00	9331.4	262.98	2.06	366.51	49.2	36.5	65.0 (115.0)
11:34:00	9317.8	263.02	2.07	367.22	48.7	37.4	63.3 (116.7)
11:35:00	9323.1	263.06	2.04	362.93	49.7	37.1	62.8 (117.2)
11:36:00	9323.5	263.07	2.06	365.25	49.8	37.3	62.7 (117.3)
11:37:00	9326.1	263.04	2.07	367.21	49.7	37.2	63.3 (116.7)
11:38:00	9325.2	263.06	2.02	358.80	49.9	36.7	62.9 (117.1)
11:39:00	9340.2	263.06	2.07	368.59	51.0	36.8	63.8 (116.2)
11:40:00	9334.6	262.99	2.05	364.10	49.7	36.3	64.8 (115.2)
11:41:00	9338.7	263.04	2.05	364.91	50.7	36.5	64.0 (116.0)
11:42:00	9339.9	263.04	2.05	364.79	50.7	36.4	64.2 (115.8)
11:43:00	9331.2	263.03	2.07	367.34	49.9	36.9	63.9 (116.1)
11:44:00	9321.1	263.04	2.07	367.03	49.3	37.4	63.0 (117.0)
11:45:00	9320.8	263.08	2.07	367.57	49.8	37.7	62.2 (117.8)
11:46:00	9312.8	263.12	2.07	367.48	49.7	38.3	60.9 (119.1)
11:47:00	9312.8	263.12	2.07	367.48	49.7	38.3	60.9 (119.1)
11:48:00	9308.3	263.11	2.06	365.70	49.2	38.3	60.8 (119.2)
11:49:00	9307.9	263.10	2.08	369.05	49.0	38.5	61.0 (119.0)
11:50:00	9311.3	263.09	2.08	368.28	49.1	38.2	61.5 (118.5)
11:51:00	9303.5	263.11	2.05	363.04	48.8	38.3	60.5 (119.5)
11:52:00	9309.7	263.10	2.07	367.83	49.1	38.3	61.2 (118.8)
11:53:00	9309.3	263.07	2.08	368.49	48.7	38.2	61.7 (118.3)
11:54:00	9311.6	263.08	2.07	367.89	49.0	38.1	61.7 (118.3)
11:55:00	9325.1	263.10	2.08	368.54	50.4	37.7	62.1 (117.9)
11:56:00	9314.8	263.10	2.09	370.23	49.6	38.3	61.4 (118.6)
11:57:00	9313.6	263.11	2.06	365.08	49.6	38.0	61.2 (118.8)
11:58:00	9312.0	263.13	2.07	367.24	49.8	38.4	60.6 (119.4)
11:59:00	9306.0	263.09	2.05	363.68	48.7	38.1	61.1 (118.9)
12:00:00	9319.2	263.13	2.07	366.81	50.3	38.0	61.2 (118.8)
12:01:00	9314.5	263.11	2.07	367.95	49.7	38.2	61.2 (118.8)
12:02:00	9314.9	263.12	2.08	368.57	49.9	38.3	61.0 (119.0)
12:03:00	9315.8	263.11	2.08	368.80	49.8	38.2	61.3 (118.7)

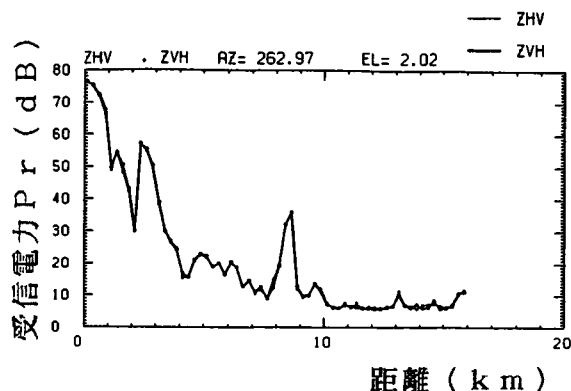
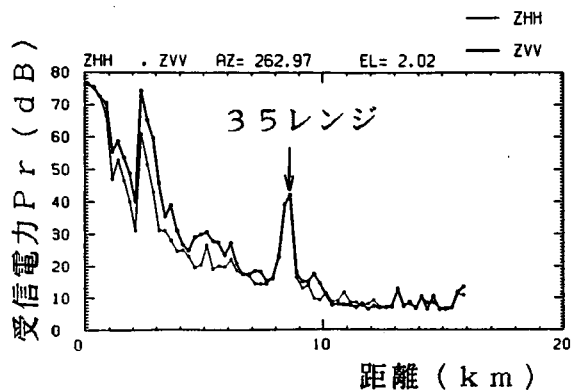


(a) 方位角及び仰角

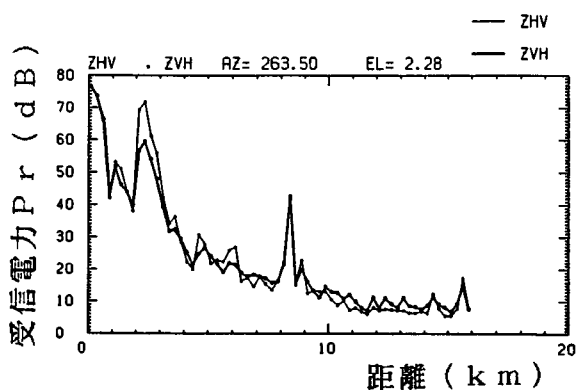
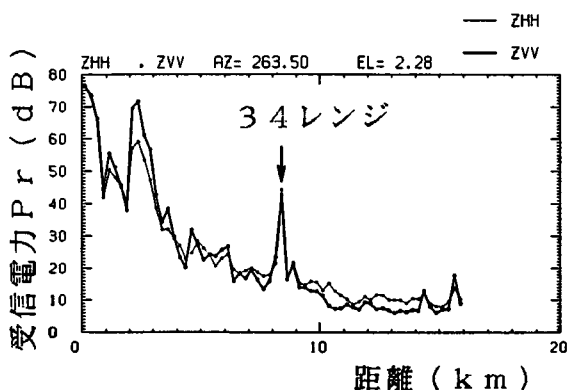


(b) 距離及び高度

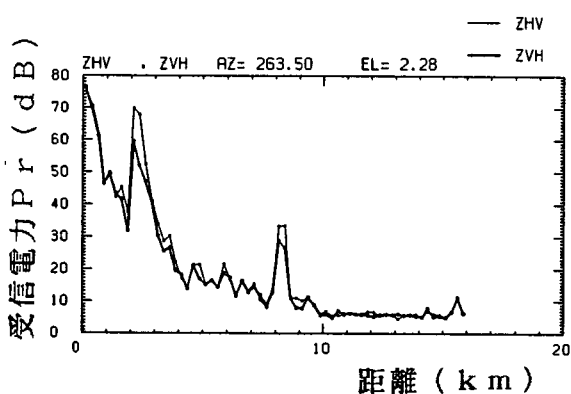
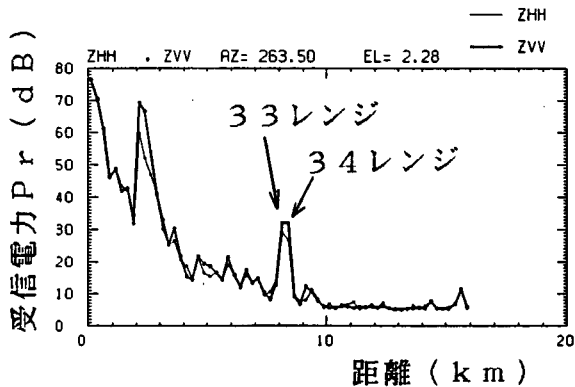
図-5.5 標準反射体の位置測量結果 (1990.9.27)



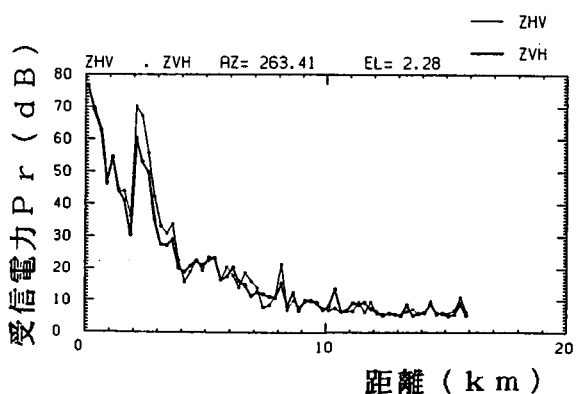
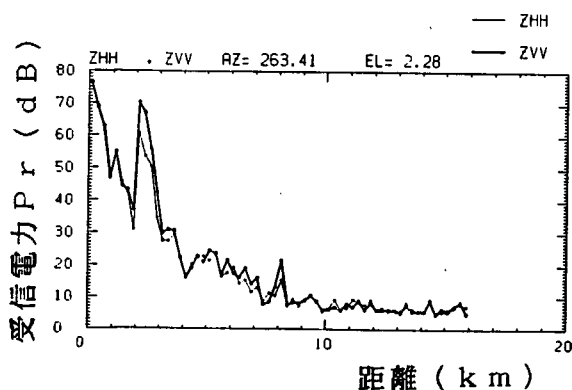
(a) 第1回観測 (反射体あり)



(b) 第2回観測 (反射体あり)

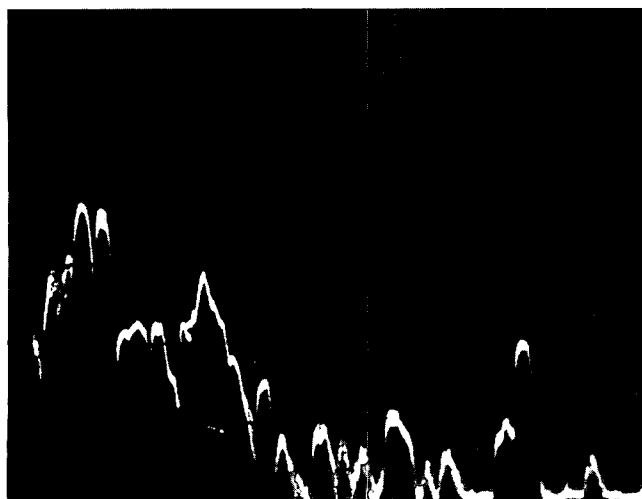


(c) 第3回観測 (バルーンのみ)

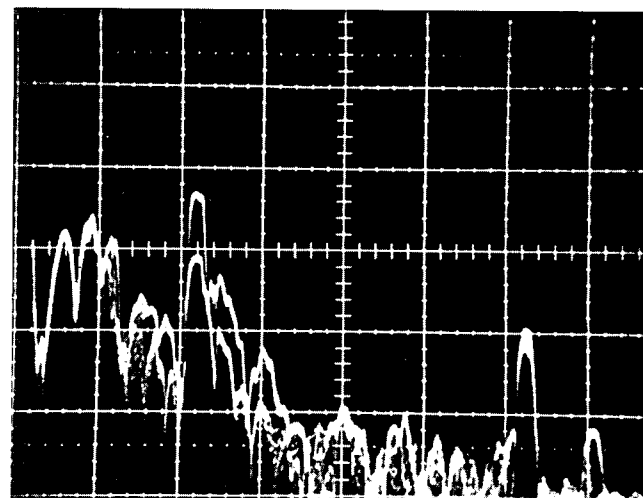


(d) 第4回観測 (グランドクラッタ)

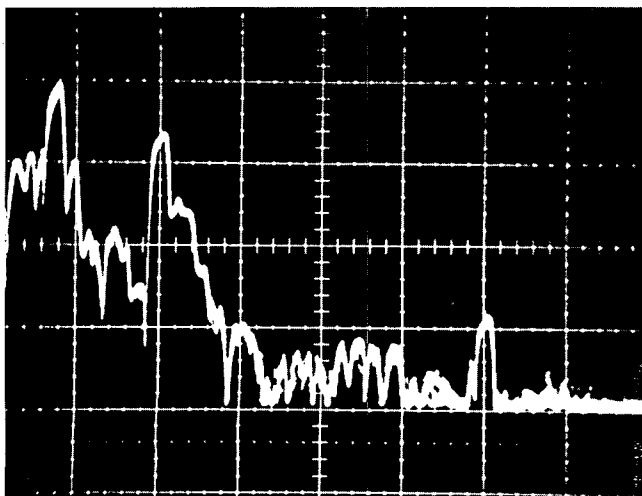
図-5.6 距離方向の受信電力値の変化 (1990.9.27)
($S_{min} = -107.5 \text{ dBm}$)



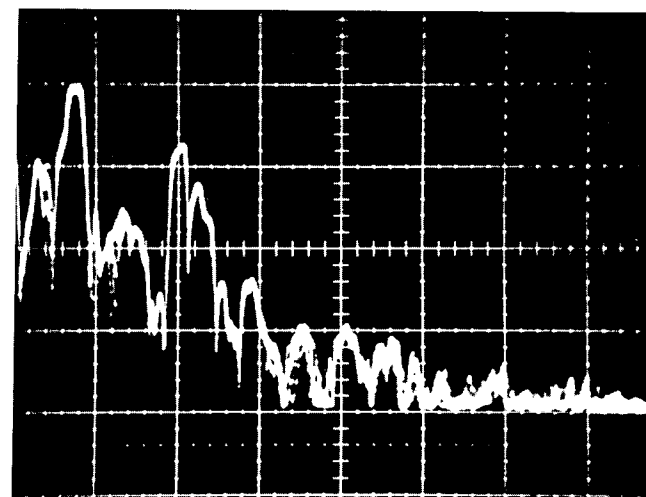
(a) 10:13 第1回観測 (反射体あり)



(b) 11:16 第2回観測 (反射体あり)



(c) 13:14 第3回観測 (バルーンのみ)



(d) 13:55 第4回観測 (グランドクラッタ)

写真5. 17 第1回絶対較正時シンクロスコープ像 : 1990. 9. 27
(X軸 : $10 \mu\text{sec/div}$ Y軸 : 1V/div)

真-5.17に示す。

反射体に取り付けられている状態（第1回及び第2回観測）と、外した状態（第4回観測）とを比較すると、第1回観測では33～34レンジに、第2回観測では34レンジに反射体による約-65.5dBmの受信電力値が観測されている。距離にすると8,125m（33レンジ）～8,375m（34レンジ）となる。

なお、バルーンだけの状態（第3回観測）においても第1回及び第2回観測と同様に、33及び34レンジ付近に反射が見られる。ただし、受信電力は第1回及び第2回観測に比べて約10dB低い値が観測されている。このときバルーンの高度は約550mであり仰角3.0°に相当し、ビーム中心からの離角は1.0°であった。このエコーはバルーンからのものと思われる。

c. 時間変動

第1回及び第2回観測時の受信電力値の時間変化を図-5.7に示す。両者ともに受信電力値は常に変動している。これは、反射体の位置が常に変化していたためと思われる。

Z_{HH} と Z_{VV} 及び Z_{HV} を比較した場合、両者の間に相関が見られ、また Z_{HH} は Z_{VV} にほぼ等しく Z_{HV} は Z_{HH} より約10dB低い値となっている。

d. 受信電力値の頻度分布

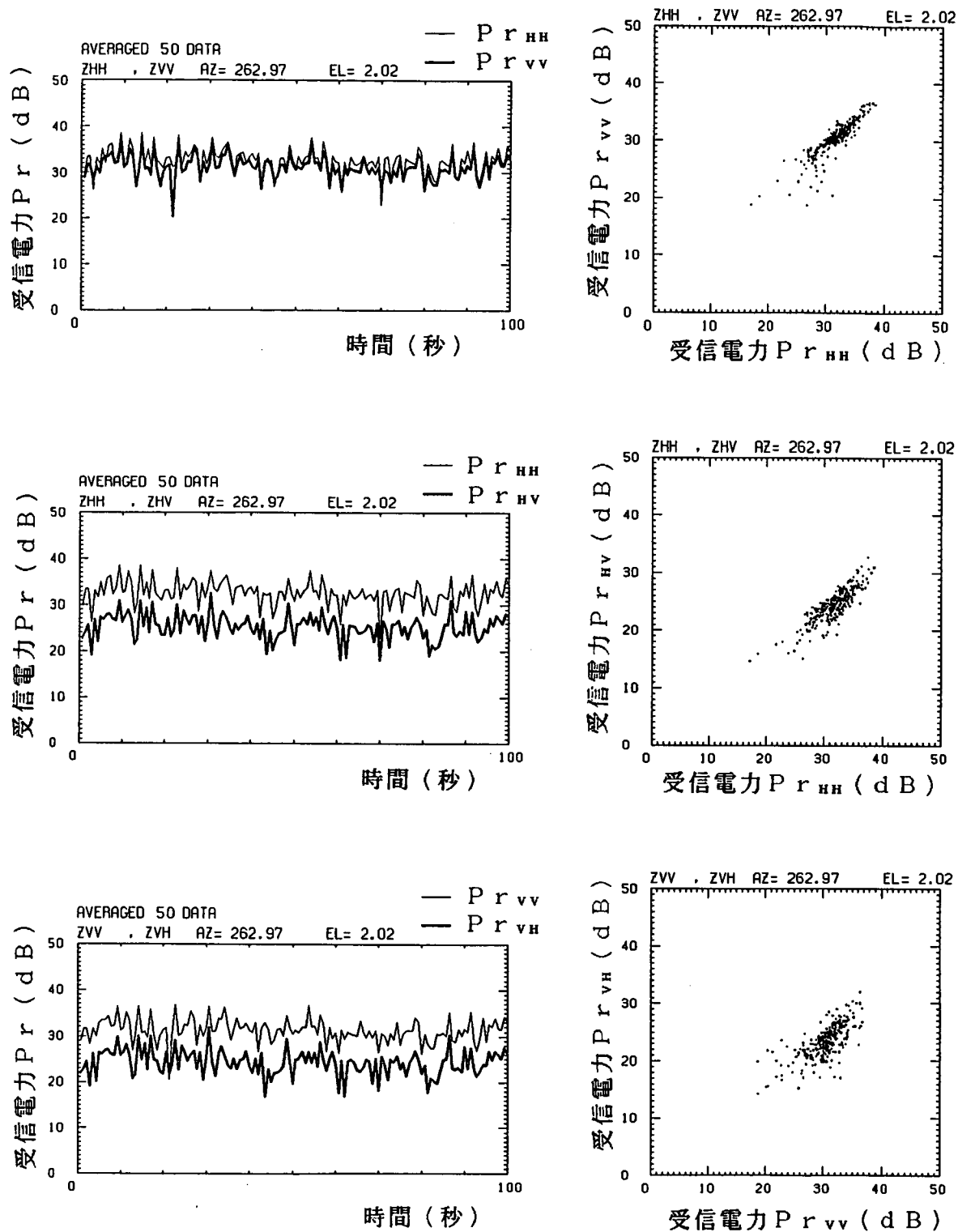
第1回及び第2回観測時における $P_{r_{HH}}$ 、 $P_{r_{HV}}$ 、 $P_{r_{VV}}$ 、 $P_{r_{VH}}$ それぞれのパルス毎の受信電力値の頻度分布図を図-5.8に示す。この図から、 $P_{r_{HH}}$ 、 $P_{r_{VV}}$ は-107.5dBm～-63.0dBmまで、 $P_{r_{HV}}$ 、 $P_{r_{VH}}$ は-107.5dBm～-65.0dBmまで広く分布していることがわかる。それぞれの最大値は、 $P_{r_{HH}}=-63.2\text{dBm}$ 、 $P_{r_{VV}}=-64.9\text{dBm}$ 、 $P_{r_{HV}}=-65.8\text{dBm}$ 、 $P_{r_{VH}}=-64.9\text{dBm}$

が得られた。これらの値から求めた補正值 F は次のとおりとなる。

$$F_H = -1.484\text{dB}, \quad F_V = +0.535\text{dB}$$

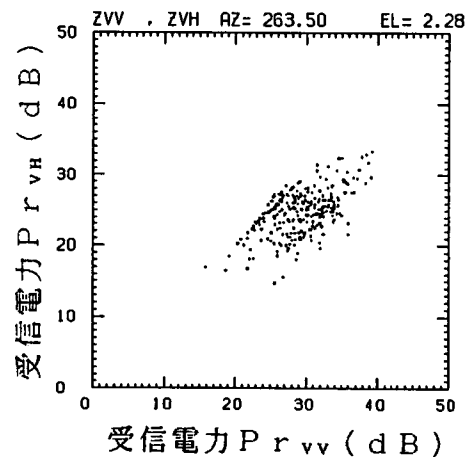
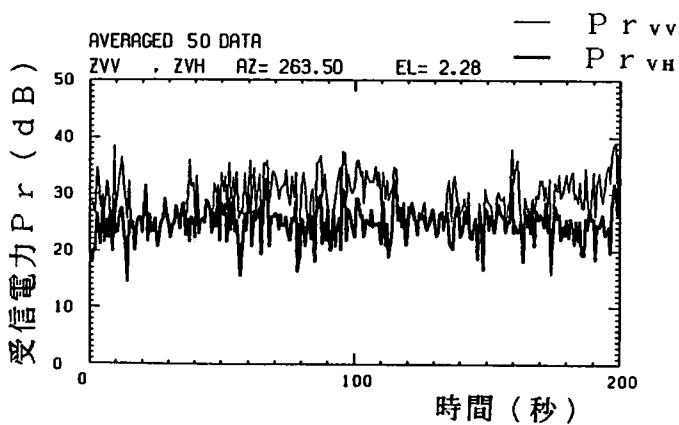
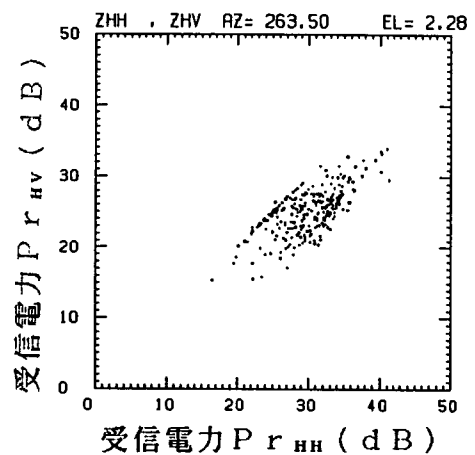
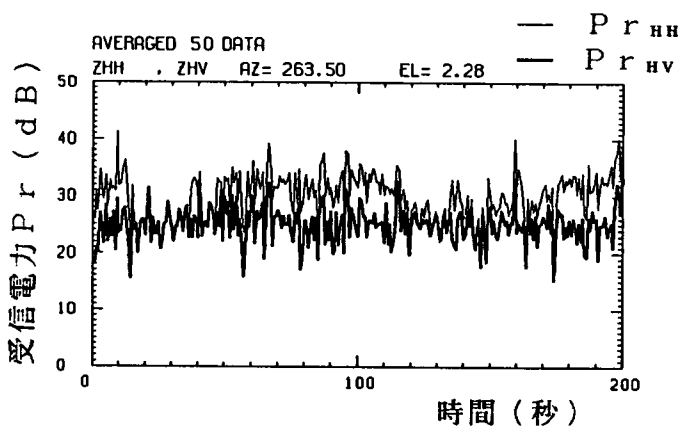
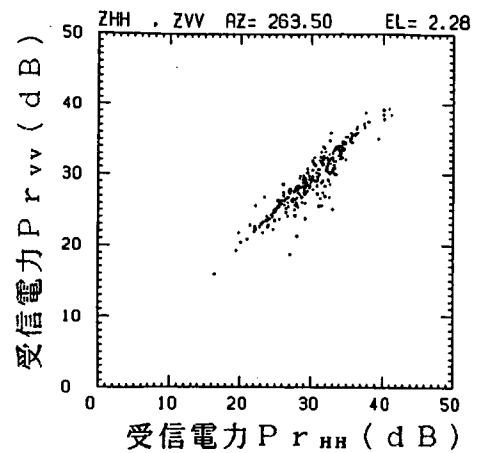
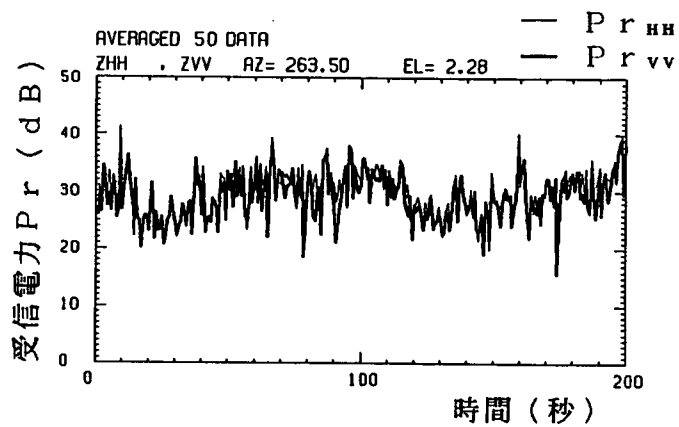
ただし、上記 F には導波管口スは含まれていない。

なお、b.における検討結果から、この値にはバルーンによる影響が含まれていると推定されるので注意を要する。



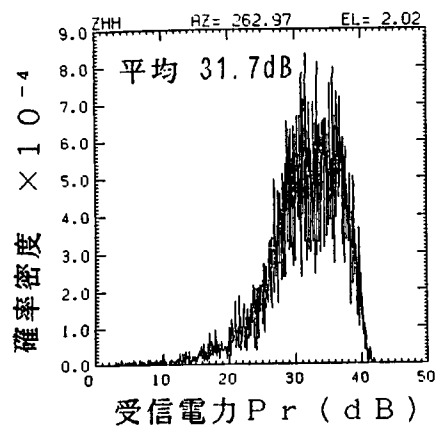
(a) 第1回観測

図-5.7 受信電力値の時間変化(1) :1990.9.27
($S_{min}=-107.5\text{dBm}$)

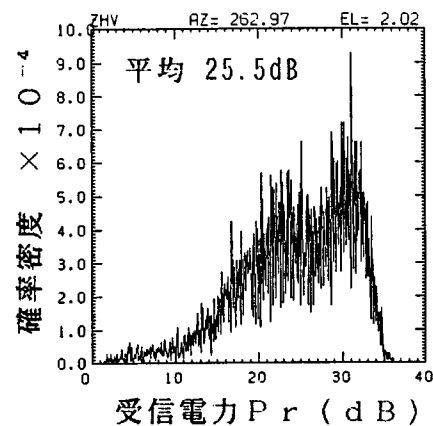


(b) 第2回観測

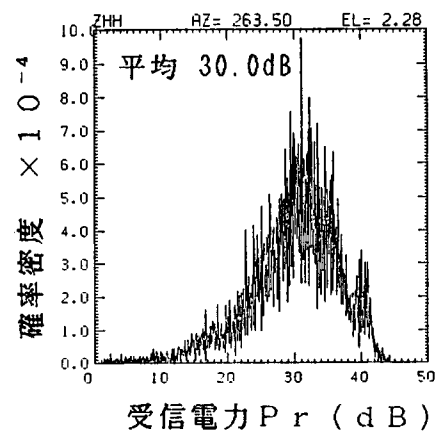
図-5.7 受信電力値の時間変化(2): 1990.9.27
($S_{min} = -107.5 \text{ dBm}$)



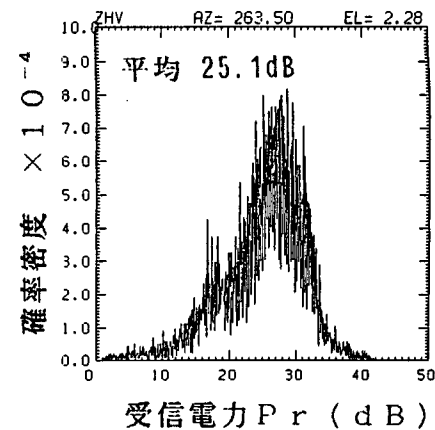
① P_{rHH}



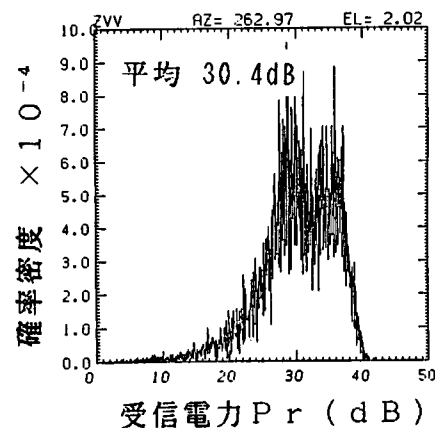
② P_{rHV}



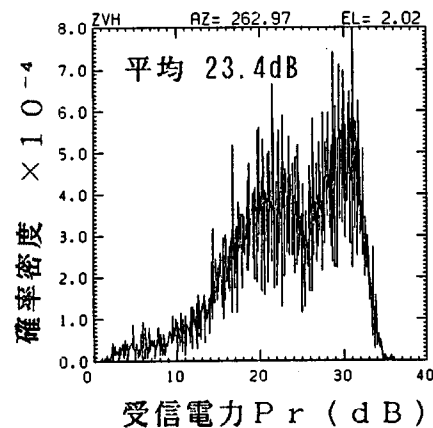
① P_{rHH}



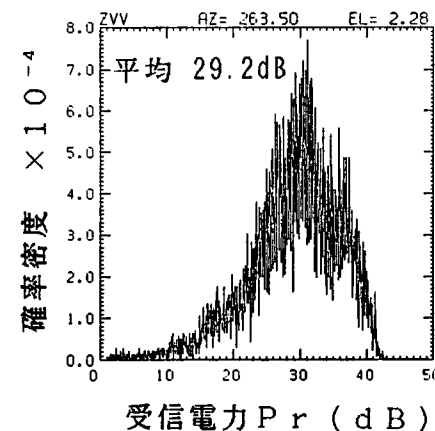
② P_{rHV}



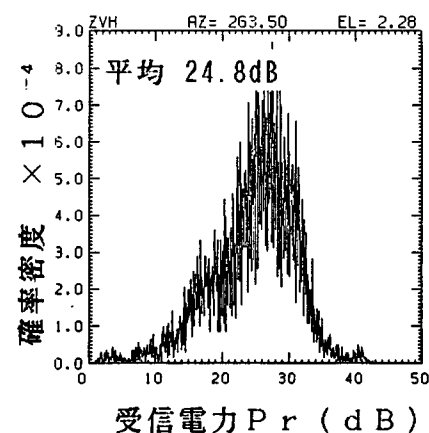
③ P_{rVV}



④ P_{rVH}



③ P_{rVV}



④ P_{rVH}

(a) 第1回観測 (35レンジ)

(b) 第2回観測 (34レンジ)

図-5.8 受信電力値の頻度分布
($S_{min} = -107.5\text{dBm}$)

(2) 第2回絶対校正作業結果

第2回絶対校正作業時には、以下に示す4回の観測を行っている。

- ①第1回観測：反射体を取り付けずにバルーンだけを所定の高度に上げて、ワイヤー等の背景からの散乱強度を測定
 - ②第2回観測：標準反射体を取り付けた状態で、その後方散乱強度を測定
 - ③第3回観測：同 上
 - ④第4回観測：バルーン撤去後、何もない状態でグラウンドクラッタの強度を測定
- これらのデータを用いて解析を行った結果を以下に示す。なお、解析には主に運用パターン8-1により観測を行ったデータを用いる。

a. バルーン及び標準反射体の位置測量結果

表-5.5及び図-5.9にバルーンと標準反射体の位置を地上において測量を行った結果を示す。(a)はレーダサイトから見た方位角、仰角を、(b)は距離と高度を示している。

これらの図から、仰角及び高度は観測期間中安定しているが、距離は9,100m~9,200m、方位角は262.4°~263.1°の間で大きく変化しているのが分かる。

b. 距離方向のプロファイル

図-5.10に距離方向の受信電力値(観測時間中の最大値)の変化を示す。反射体に取り付けられている状態と、外した状態とを比較すると、33~34レンジ付近に反射体による受信電力値約-66.5dBmの信号が観測されている。1レンジが250mに設定されているため、距離にすると8,125m(33レンジ)~8,375m(34レンジ)となる。また、シンクロスコープによる観測結果を写真-5.18に示す。

c. 時間変動

第2回及び第3回観測時の受信電力値の時間変化を図-5.11に示す。図から分かるように受信電力値は短時間で大きく変動している。この変動の原因は、今回測定に用いた反射体が当初期待していたとおりの単一の導体球ではなく、複数の反射体片から構成された球として作用し、それぞれの反射体の位置関係が球の震動、回転、位置変化などによって時間とともに変化し、相互の干渉によって受信電力の変動が生じているものと推定される。また、この変動を短時間で見た場合、図-5.12に示すように第2回観測に比べて、第3回観測のほうが短周期で大きな変動を見せている。これは、第3回観測時には風速が強まり、反射体の震動が激しくなったためと推測される。

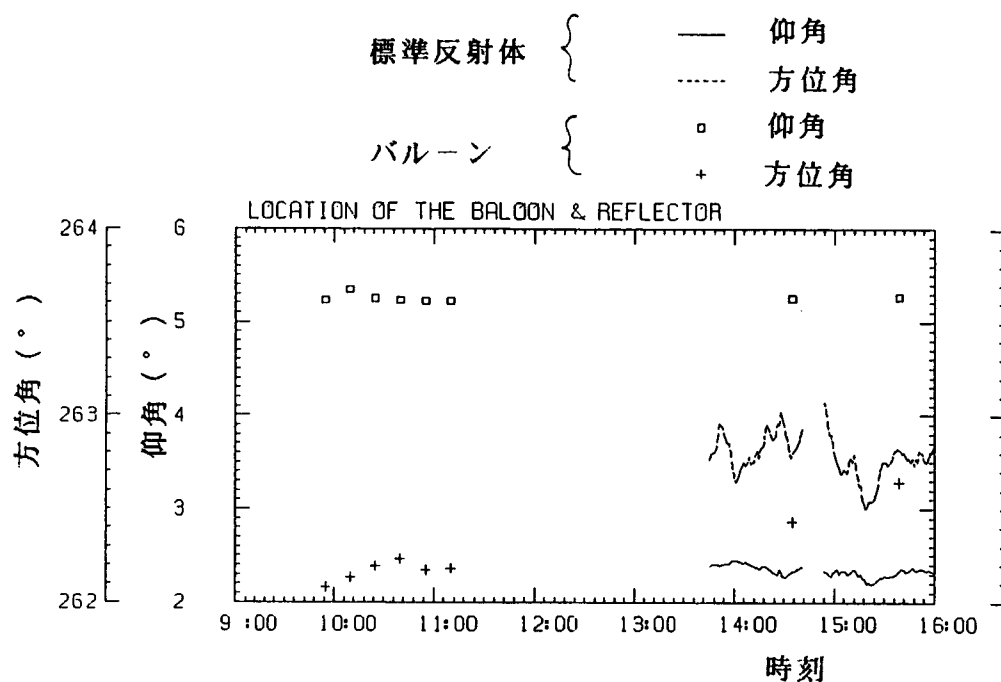
次に、 $P_{r_{HH}}$ と $P_{r_{VV}}$ を比較した場合、第2回観測時と第3回観測時では両者の大小関係が異なっており、第2回観測では $P_{r_{VV}}$ が大きく、第3回観測では $P_{r_{HH}}$ が大きく現われている。 $P_{r_{HH}}$ と $P_{r_{HV}}$ 、 $P_{r_{VV}}$ と $P_{r_{VH}}$ とを比較すると、両者の間には顕著な相関は見られなかったが、 $P_{r_{HH}}$ は $P_{r_{HV}}$ に対して約5dB、 $P_{r_{VV}}$ は $P_{r_{VH}}$ に対して約3から10dBのレベル差が見られた。また、第2回観測に比べて第3回観測のほうが受信電力

表-5. 5 バルーン, 標準反射体の位置測量結果(1)

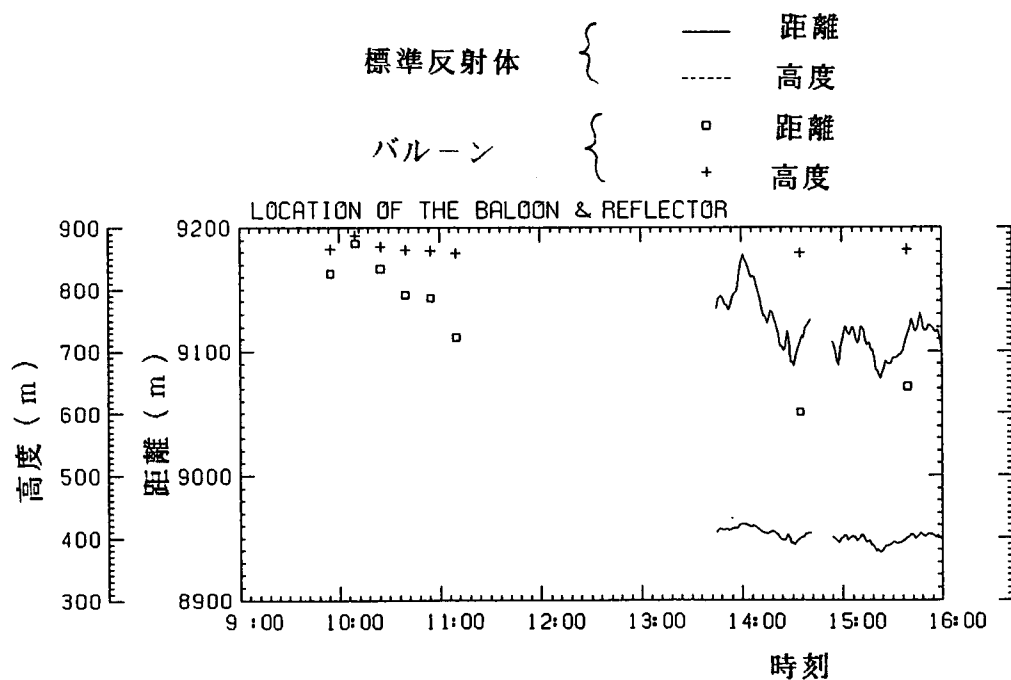
時間	D N D レーダー・気球間			上峰町役場地点の気球 D A T A				
	斜距離	方位	角度	高さ	S1角度	S1仰角	S2角度	
09:55:00	9163.3	262.08	5.23	865.19	20.9	59.4	83.6	(96.4)
10:10:00	9187.3	262.13	5.35	887.26	23.5	60.0	82.0	(98.0)
10:25:00	9166.8	262.19	5.25	868.93	21.9	60.3	78.2	(101.8)
10:40:00	9145.6	262.23	5.23	864.57	19.8	60.8	75.0	(105.0)
10:55:00	9143.2	262.17	5.22	863.16	19.2	60.3	78.3	(101.7)
11:10:00	9111.6	262.18	5.22	859.34	15.7	60.7	75.3	(104.7)
13:45:00	9134.5	262.76	2.37	408.72	25.8	44.9	54.1	(125.9)
13:46:00	9142.2	262.79	2.39	412.39	27.0	45.2	54.3	(125.7)
13:47:00	9143.5	262.80	2.40	413.30	27.3	45.4	53.9	(126.1)
13:48:00	9144.2	262.80	2.40	413.60	27.4	45.4	54.0	(126.0)
13:49:00	9142.6	262.82	2.40	412.66	27.3	45.5	53.4	(126.6)
13:50:00	9137.7	262.88	2.40	413.24	27.3	46.4	50.5	(129.5)
13:51:00	9137.0	262.96	2.40	413.40	27.9	47.2	48.2	(131.8)
13:52:00	9133.5	262.95	2.39	411.03	27.4	47.1	47.8	(132.2)
13:53:00	9135.9	262.94	2.40	412.44	27.6	47.0	48.5	(131.5)
13:54:00	9141.9	262.90	2.40	414.08	28.0	46.5	50.6	(129.4)
13:55:00	9146.4	262.88	2.41	414.55	28.4	46.2	51.8	(128.2)
13:56:00	9147.5	262.85	2.41	414.69	28.2	45.8	53.1	(126.9)
13:57:00	9148.6	262.85	2.41	415.48	28.4	45.9	53.0	(127.0)
13:58:00	9159.9	262.80	2.43	419.45	29.3	45.3	56.1	(123.9)
13:59:00	9168.8	262.73	2.44	420.22	29.7	44.4	59.4	(120.6)
14:00:00	9174.6	262.68	2.44	421.06	29.9	43.8	61.7	(118.3)
14:01:00	9178.3	262.64	2.44	421.41	30.0	43.4	63.2	(116.8)
14:02:00	9174.0	262.66	2.44	421.20	29.7	43.7	62.1	(117.9)
14:03:00	9170.0	262.68	2.43	419.98	29.4	43.9	61.1	(118.9)
14:04:00	9166.1	262.71	2.43	419.02	29.2	44.2	59.8	(120.2)
14:05:00	9161.7	262.73	2.42	418.10	28.9	44.5	58.5	(121.5)
14:06:00	9159.4	262.75	2.42	417.32	28.8	44.7	57.6	(122.4)
14:07:00	9160.6	262.73	2.43	418.58	28.7	44.5	58.6	(121.4)
14:08:00	9158.0	262.74	2.42	417.24	28.5	44.6	57.9	(122.1)
14:09:00	9151.9	262.78	2.41	415.05	28.1	45.0	55.9	(124.1)
14:10:00	9147.0	262.74	2.40	413.45	27.2	44.7	56.4	(123.6)
14:11:00	9141.7	262.75	2.39	411.86	26.6	44.8	55.5	(124.5)
14:12:00	9134.4	262.75	2.38	410.01	25.7	44.9	54.4	(125.6)
14:13:00	9128.8	262.79	2.37	408.08	25.3	45.3	52.3	(127.7)
14:14:00	9128.6	262.81	2.37	407.37	25.4	45.4	51.8	(128.2)
14:15:00	9122.9	262.77	2.36	405.55	24.4	45.1	52.0	(128.0)
14:16:00	9127.4	262.82	2.36	407.00	25.4	45.6	51.0	(129.0)
14:17:00	9132.3	262.83	2.38	409.31	26.1	45.7	51.5	(128.5)
14:18:00	9132.1	262.84	2.38	409.95	26.2	45.9	51.0	(129.0)
14:19:00	9127.2	262.93	2.38	409.42	26.3	46.9	47.6	(132.4)
14:20:00	9123.3	262.95	2.37	408.07	26.0	47.2	46.2	(133.8)
14:21:00	9119.1	262.93	2.36	406.10	25.2	46.9	46.3	(133.7)
14:22:00	9113.4	262.89	2.34	402.56	24.1	46.4	46.5	(133.5)
14:23:00	9104.4	262.87	2.31	398.32	22.7	46.1	45.6	(134.4)
14:24:00	9104.4	262.88	2.31	397.81	22.8	46.2	45.2	(134.8)
14:25:00	9100.1	262.90	2.30	395.73	22.3	46.3	44.0	(136.0)
14:26:00	9101.0	262.96	2.30	396.31	22.9	47.0	42.3	(137.7)
14:27:00	9116.3	262.95	2.35	404.55	25.0	47.1	45.2	(134.8)
14:28:00	9109.9	263.02	2.33	400.99	24.7	47.8	42.1	(137.9)
14:29:00	9091.4	262.99	2.27	391.28	21.8	47.3	39.4	(140.6)
14:30:00	9091.1	262.96	2.28	392.31	21.5	47.0	40.3	(139.7)
14:31:00	9088.0	262.90	2.26	388.79	20.6	46.1	41.6	(138.4)
14:32:00	9095.2	262.88	2.28	392.46	21.5	46.0	43.6	(136.4)
14:33:00	9100.9	262.83	2.30	395.36	21.9	45.5	46.4	(133.6)
14:34:00	9104.1	262.77	2.31	397.10	21.9	44.9	49.1	(130.9)
14:35:00	9050.9	262.43	5.25	858.35	9.0	63.2	44.0	(136.0)
14:36:00	9112.7	262.81	2.33	401.61	23.3	45.4	49.3	(130.7)
14:37:00	9111.0	262.82	2.33	401.55	23.2	45.6	48.5	(131.5)
14:38:00	9119.0	262.84	2.36	405.91	24.4	45.9	49.2	(130.8)
14:39:00	9121.8	262.86	2.36	405.86	25.0	46.1	48.8	(131.2)
14:40:00	9123.4	262.90	2.37	407.13	25.5	46.5	48.0	(132.0)
14:41:00	9125.3	262.93	2.37	407.61	26.1	46.9	47.1	(132.9)

表-5.5 バルーン、標準反射体の位置測量結果(2)

時間	D N D レーダー・気球間			平成2年 10月 17日 上峰町役場地点の気球 D A T A				
	斜距離	方位	角度	高さ	S1角度	S1仰角	S2角度	
14:54:00	9107.7	263.07	2.33	400.44	24.9	48.5	40.1	(139.9)
14:55:00	9104.9	263.02	2.32	399.83	24.0	47.9	41.1	(138.9)
14:56:00	9099.3	262.95	2.31	397.79	22.6	47.1	42.1	(137.9)
14:57:00	9091.6	262.90	2.29	394.00	21.1	46.4	42.3	(137.7)
14:58:00	9088.9	262.90	2.28	391.97	20.7	46.3	41.8	(138.2)
14:59:00	9102.2	262.85	2.32	398.52	22.2	45.9	46.0	(134.0)
15:00:00	9108.5	262.79	2.32	400.00	22.6	45.2	49.2	(130.8)
15:01:00	9116.1	262.76	2.35	403.70	23.4	45.0	51.4	(128.6)
15:02:00	9120.4	262.74	2.35	404.28	23.8	44.7	52.9	(127.1)
15:03:00	9115.2	262.72	2.30	395.87	23.0	44.0	52.9	(127.1)
15:04:00	9113.1	262.69	2.32	399.15	22.5	44.0	53.6	(126.4)
15:05:00	9118.5	262.69	2.33	400.76	23.2	44.0	54.4	(125.6)
15:06:00	9119.5	262.71	2.33	402.03	23.5	44.3	53.7	(126.3)
15:07:00	9115.9	262.70	2.33	400.55	22.9	44.1	53.8	(126.2)
15:08:00	9108.5	262.69	2.30	395.42	21.9	43.8	53.0	(127.0)
15:09:00	9106.1	262.75	2.30	395.62	22.0	44.5	50.3	(129.7)
15:10:00	9108.9	262.77	2.31	397.97	22.5	44.8	50.1	(129.9)
15:11:00	9119.6	262.75	2.34	403.48	23.8	44.8	52.3	(127.7)
15:12:00	9119.5	262.79	2.35	404.71	24.1	45.3	50.9	(129.1)
15:13:00	9117.6	262.73	2.33	401.42	23.4	44.5	52.7	(127.3)
15:14:00	9108.7	262.67	2.29	395.16	21.8	43.6	53.7	(126.3)
15:15:00	9104.9	262.62	2.29	393.81	21.0	43.1	55.0	(125.0)
15:16:00	9107.1	262.63	2.30	395.31	21.3	43.2	55.2	(124.8)
15:17:00	9100.5	262.55	2.25	387.73	20.0	42.0	57.5	(122.5)
15:18:00	9100.9	262.53	2.25	388.22	19.9	41.8	58.6	(121.4)
15:19:00	9094.8	262.50	2.22	383.50	19.0	41.3	58.9	(121.1)
15:20:00	9084.7	262.51	2.19	378.50	17.8	41.2	56.7	(123.3)
15:21:00	9084.2	262.54	2.21	380.64	17.9	41.7	55.0	(125.0)
15:22:00	9080.4	262.54	2.19	377.48	17.4	41.5	54.4	(125.6)
15:23:00	9078.8	262.54	2.19	376.90	17.2	41.5	54.0	(126.0)
15:24:00	9083.3	262.55	2.20	379.80	17.8	41.7	54.6	(125.4)
15:25:00	9086.5	262.58	2.22	382.53	18.4	42.2	53.6	(126.4)
15:26:00	9092.2	262.61	2.24	386.49	19.3	42.7	53.3	(126.7)
15:27:00	9090.5	262.68	2.25	387.18	19.5	43.5	50.1	(129.9)
15:28:00	9089.6	262.72	2.26	388.24	19.6	44.0	48.4	(131.6)
15:29:00	9090.3	262.75	2.26	389.15	19.9	44.4	47.3	(132.7)
15:30:00	9093.8	262.75	2.28	392.20	20.4	44.6	47.8	(132.2)
15:31:00	9094.8	262.75	2.28	393.32	20.5	44.6	48.2	(131.8)
15:32:00	9094.8	262.73	2.27	391.53	20.4	44.3	48.8	(131.2)
15:33:00	9095.4	262.74	2.27	391.27	20.5	44.3	48.8	(131.2)
15:34:00	9097.0	262.75	2.28	392.55	20.8	44.5	48.6	(131.4)
15:35:00	9097.3	262.77	2.28	391.96	21.0	44.7	47.8	(132.2)
15:36:00	9099.2	262.81	2.29	394.20	21.5	45.2	46.9	(133.1)
15:37:00	9103.9	262.81	2.30	395.98	22.2	45.3	47.5	(132.5)
15:38:00	9109.6	262.82	2.31	398.45	23.0	45.4	48.3	(131.7)
15:39:00	9071.8	262.64	5.27	864.07	12.4	65.0	39.5	(140.5)
15:40:00	9118.9	262.81	2.35	403.84	24.2	45.5	50.0	(130.0)
15:41:00	9125.9	262.79	2.36	406.13	24.9	45.2	52.0	(128.0)
15:42:00	9123.5	262.80	2.35	404.77	24.7	45.3	51.2	(128.8)
15:43:00	9117.1	262.78	2.32	400.23	23.7	44.9	51.0	(129.0)
15:44:00	9116.5	262.76	2.32	399.30	23.5	44.7	51.4	(128.6)
15:45:00	9118.5	262.77	2.33	401.91	23.8	44.9	51.5	(128.5)
15:46:00	9125.4	262.75	2.35	405.02	24.5	44.7	53.4	(126.6)
15:47:00	9130.4	262.77	2.37	408.10	25.3	45.0	53.4	(126.6)
15:48:00	9124.8	262.73	2.35	404.34	24.3	44.5	53.9	(126.1)
15:49:00	9117.8	262.77	2.34	403.13	23.7	45.0	51.4	(128.6)
15:50:00	9116.7	262.75	2.34	402.72	23.4	44.8	51.9	(128.1)
15:51:00	9117.2	262.81	2.35	404.44	23.9	45.5	50.0	(130.0)
15:52:00	9121.3	262.80	2.36	405.56	24.4	45.4	50.9	(129.1)
15:53:00	9120.4	262.80	2.36	405.99	24.3	45.5	50.6	(129.4)
15:54:00	9119.3	262.76	2.35	405.19	23.8	45.0	52.0	(128.0)
15:55:00	9116.5	262.75	2.34	402.36	23.4	44.8	51.8	(128.2)
15:56:00	9114.9	262.75	2.33	401.64	23.2	44.8	51.5	(128.5)
15:57:00	9117.0	262.78	2.35	403.68	23.7	45.2	50.8	(129.2)
15:58:00	9114.3	262.79	2.33	401.64	23.4	45.2	50.1	(129.9)
15:59:00	9106.0	262.82	2.32	398.76	22.5	45.5	47.7	(132.3)
16:00:00	9100.2	262.84	2.31	397.19	21.9	45.8	45.8	(134.2)
16:03:00	8999.7	262.34	5.49	891.21	1.8	63.5	14.4	(165.6)

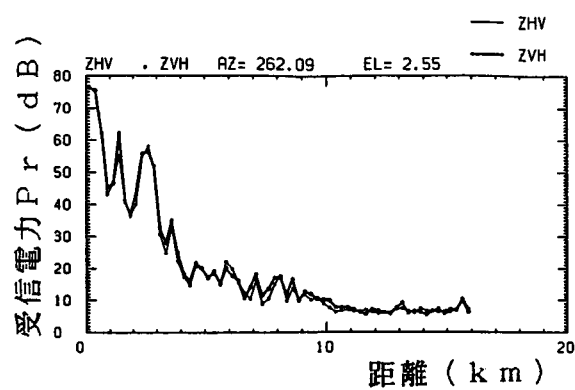
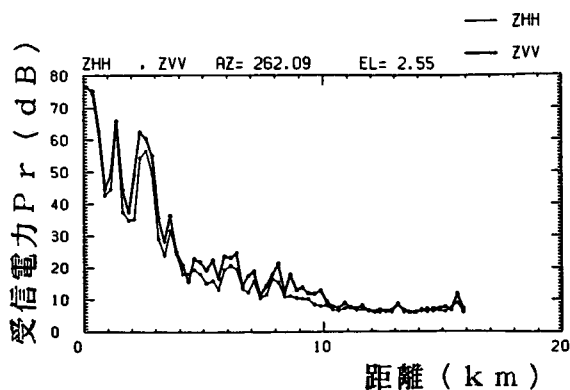


(a) 方位角及び仰角

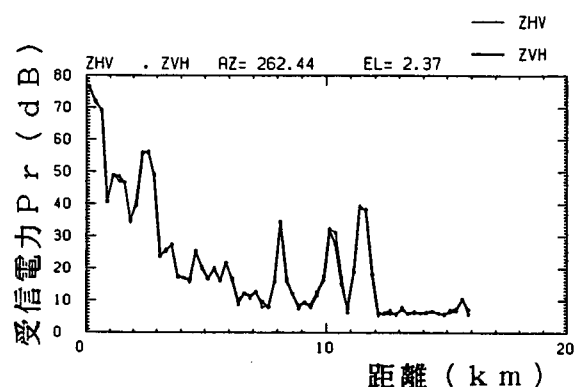
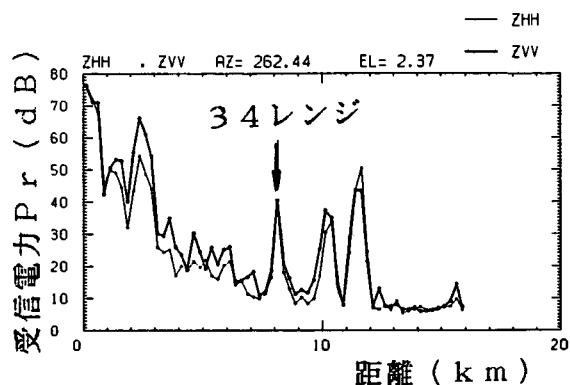


(b) 距離及び高度

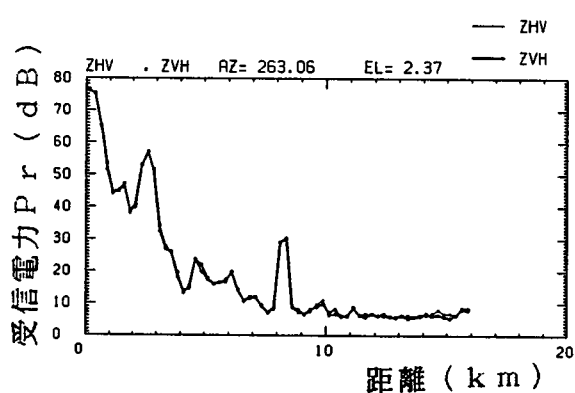
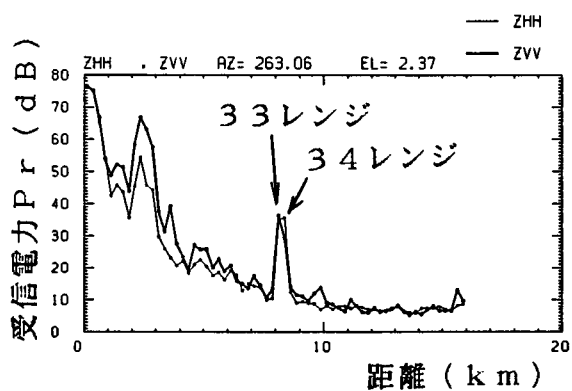
図-5. 9 バルーン, 標準反射体の位置測量結果 (1990.10.17)



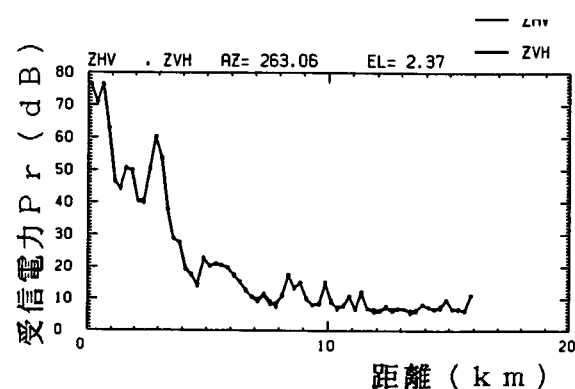
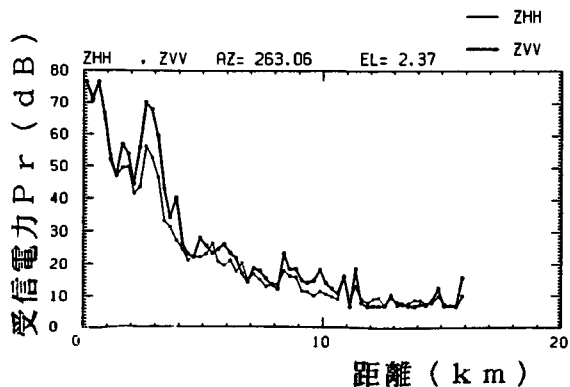
(a) 第1回観測 (バルーンのみ)



(b) 第2回観測 (反射体あり)



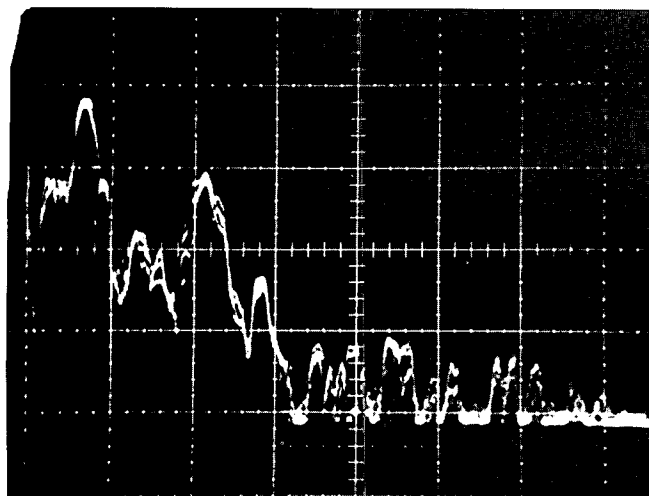
(c) 第3回観測 (反射体あり)



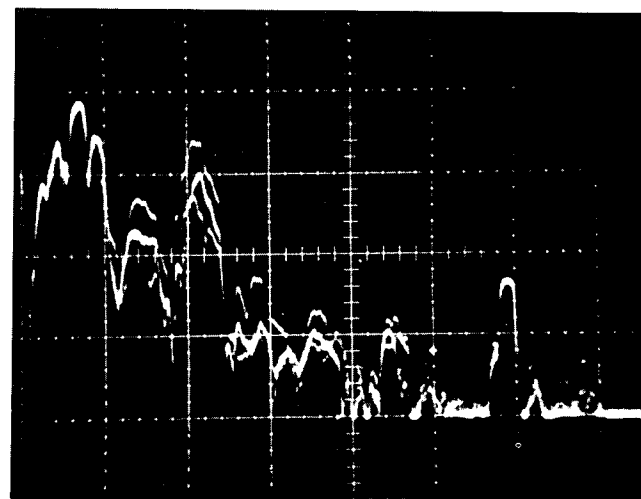
(d) 第4回観測 (グラウンドクラッタ)

図-5. 10 距離方向の受信電力値の変化 (1990. 10. 17)

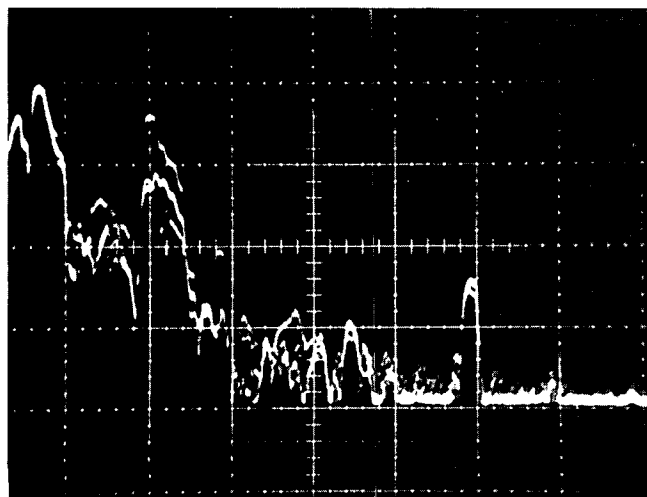
($S_{min} = -107.5 \text{ dBm}$)



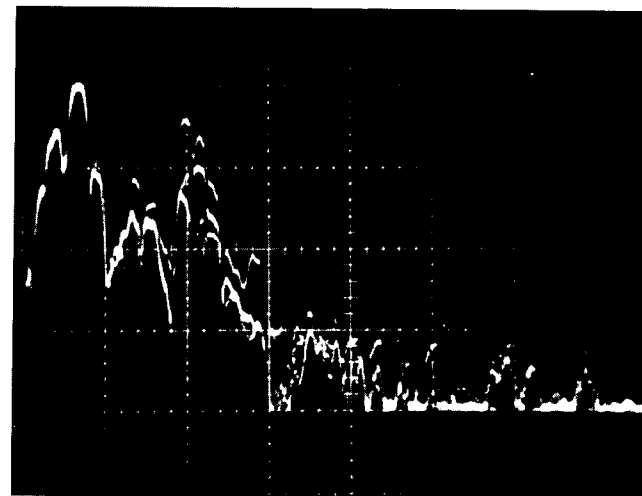
(a) 10:59 第 1 回 観 測 (バルーンのみ)



(b) 14:37 第 2 回 観 測 (反射体あり)



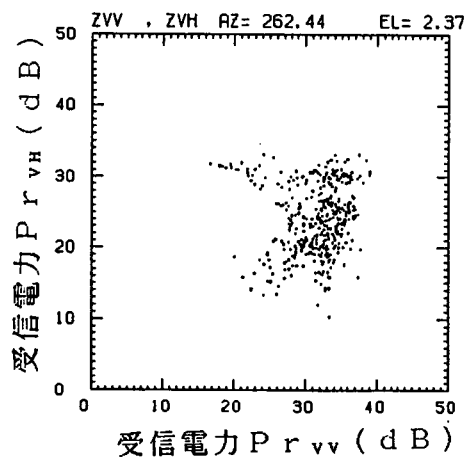
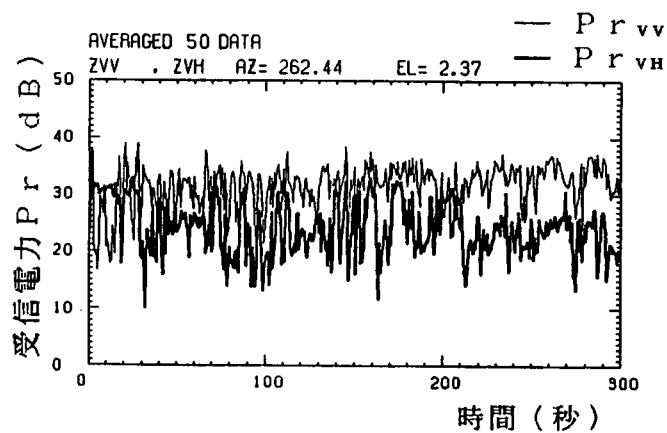
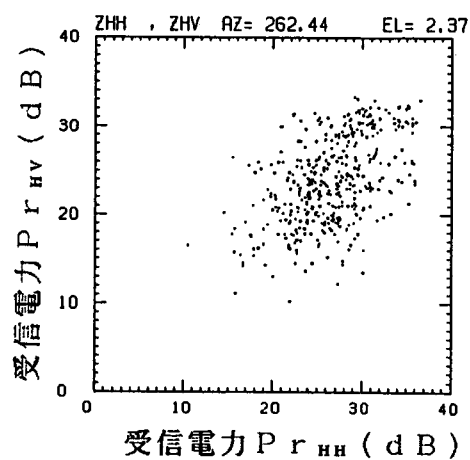
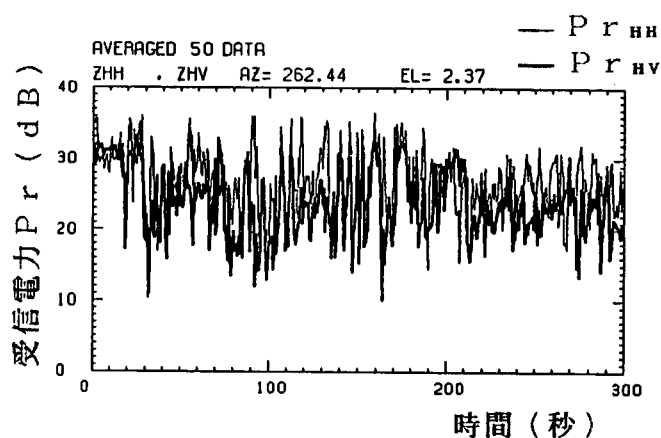
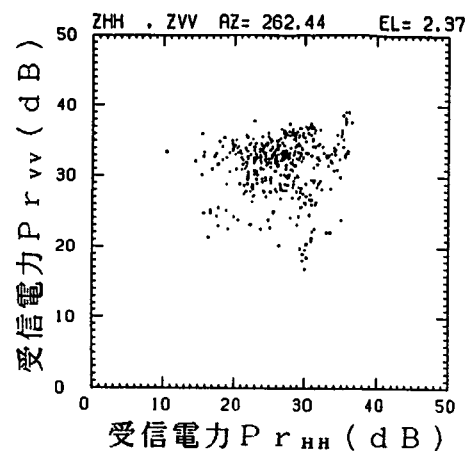
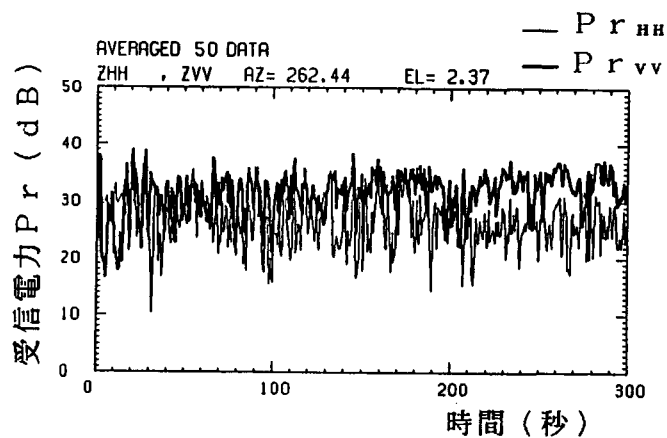
(c) 15:54 第 3 回 観 測 (反射体あり)



(d) 17:41 第 4 回 観 測 (グラウンドクラッタ)

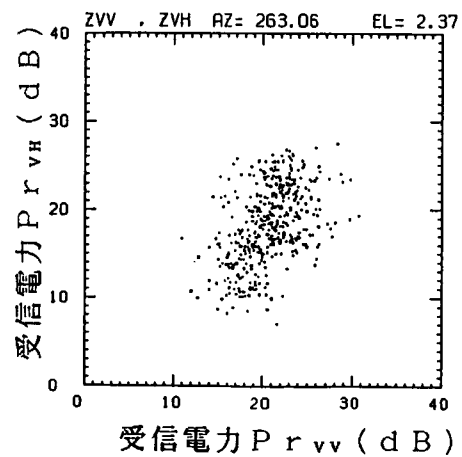
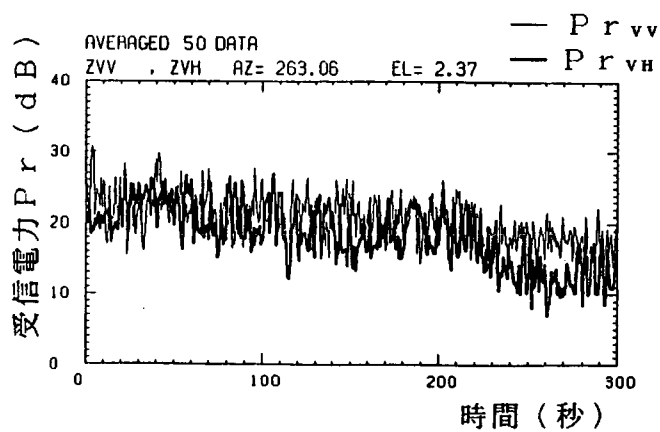
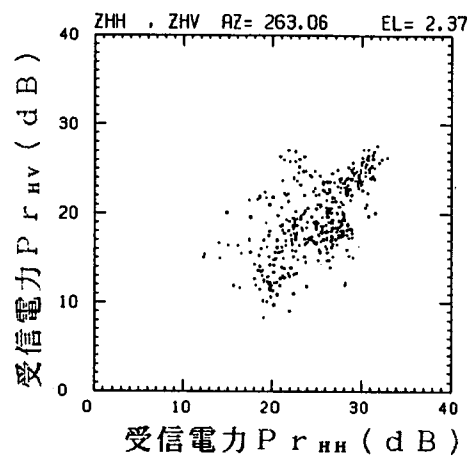
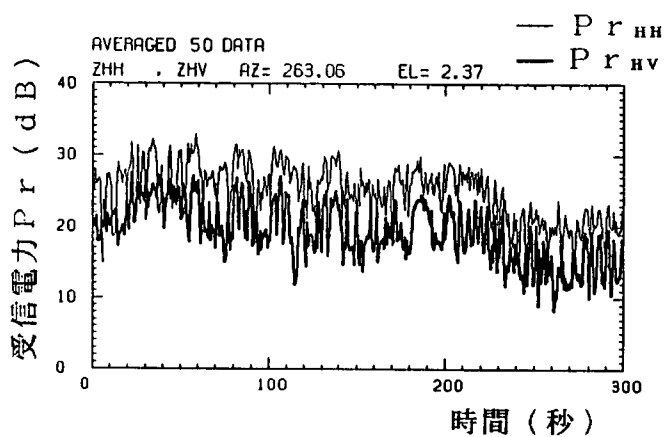
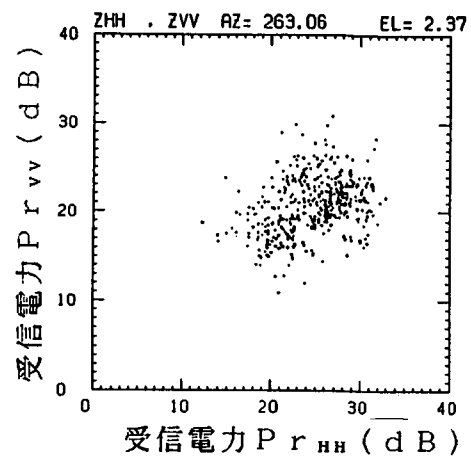
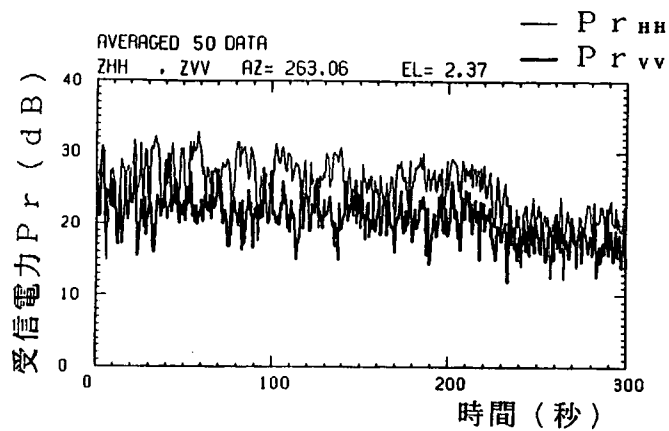
写真 5 . 1 8 第 2 回 絶 対 較 正 時 シンクロスコープ 像 : 1990.10.17

(X 軸 : 1 0 μ sec/div Y 軸 : 1 V/div)



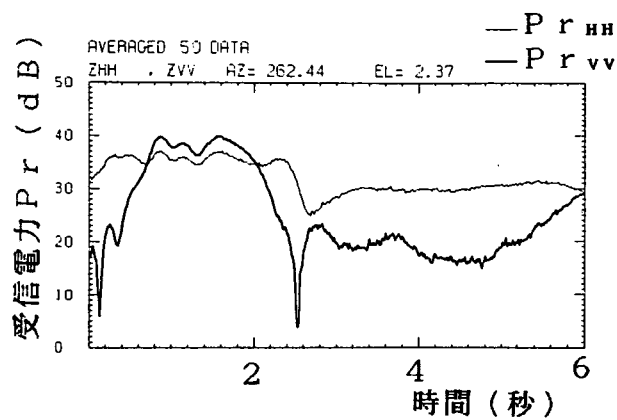
(a) 第2回観測

図-5.11 受信電力値の時間変化(1):1990.10.17
($S_{min} = -107.5\text{dBm}$)

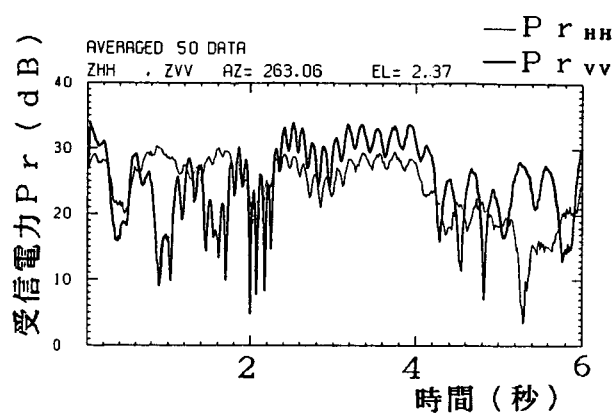


(b) 第3回観測

図-5.11 受信電力値の時間変化(2) : 1990.10.17
($S_{min} = -107.5 \text{ dBm}$)

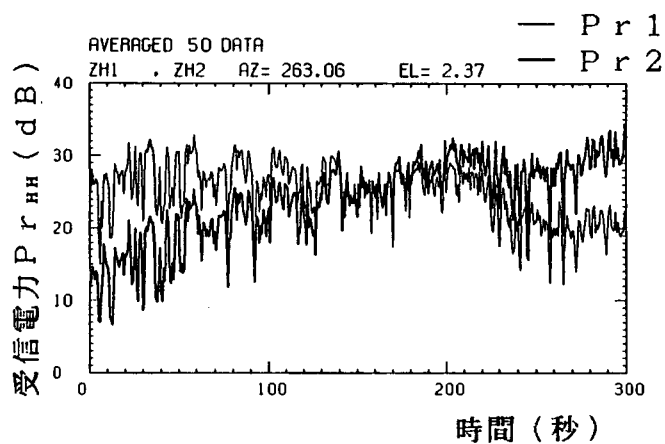


(a) 第2回観測

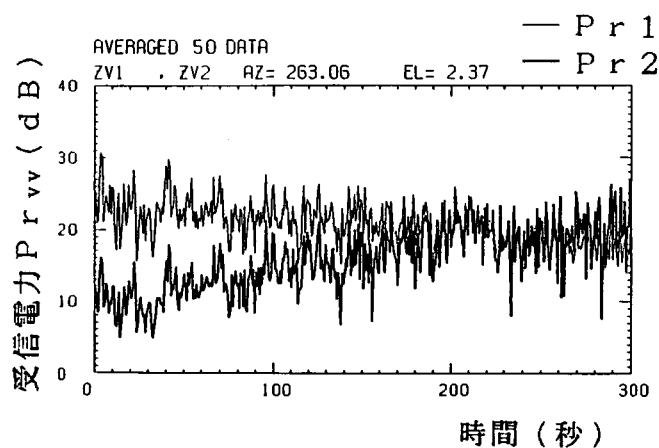
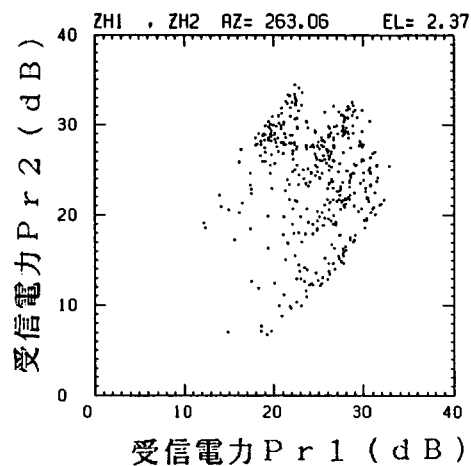


(b) 第3回観測

図-5.12 短時間で見た受信電力値($S_{min}=-107.5\text{dBm}$)の時間変化



(a) 水平偏波



(b) 垂直偏波

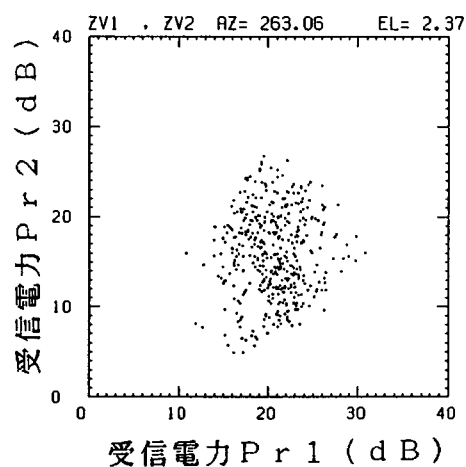


図-5.13 レンジ別の受信電力値($S_{min}=-107.5\text{dBm}$)の時間変化
(Pr1: 33レンジ、Pr2: 34レンジ)

が小さくなっている。これは、図-5. 13に示すように第3回観測時には33レンジと34レンジに同程度の反射が見られ、このことから、バルーンが33レンジと34レンジの中間に位置していたためと推測される。

d. 受信電力値の頻度分布

第2回観測時における $P_{r_{HH}}$, $P_{r_{HV}}$, $P_{r_{VV}}$, $P_{r_{VH}}$ それぞれのパルス毎の受信電力値の頻度分布図を図-5. 14に示す。この図から、 $P_{r_{HH}}$, $P_{r_{VV}}$ は $-107.5\text{dBm} \sim -67.5\text{dBm}$ まで、 $P_{r_{HV}}$, $P_{r_{VH}}$ は $-107.5\text{dBm} \sim -72.5\text{dBm}$ まで広く分布していることがわかる。それぞれの最大値、として次の値が得られた。

$P_{r_{HH}} = -68.0\text{dBm}$, $P_{r_{VV}} = -67.0\text{dBm}$, $P_{r_{HV}} = -72.8\text{dBm}$, $P_{r_{VH}} = -73.1\text{dBm}$
これらの値から求めた補正值 F は次のとおりとなる。

$$F_H = -3.82\text{dB}, \quad F_V = -3.15\text{dB}$$

ただし、上記 F には導波管ロスは含まれていない。

e. 運用パターン7による観測結果

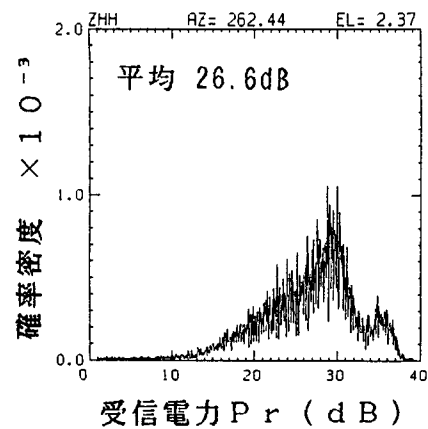
運用パターン7-1, 7-6により $P_{r_{HH}}$, $P_{r_{VV}}$, $P_{r_{HV}}$, $P_{r_{VH}}$ の各データが得られている。しかし、この場合データ収録時に距離方向に2レンジビンの平均が行われており、これによって $\{(-63.5) - (-107.5)\} / 2 =$ 約22dBのあいまいさが生じる。したがって、ここでは参考までに運用パターン7で観測された値の解析結果を紹介する。

まず、図-5. 15に距離方向の受信電力値の変化を示す。反射体を取り付けた場合(a)第2回観測, (b)第3回観測と、反射体のない場合(c), (d)を比較すると、(a)の17レンジめに反射体からの反射約 -79.5dBm が認められるが(b)には顕著な反射は見られない。これは、次の理由によると推定される。送信時のパルス幅が300mであるのに対してサンプリング間隔が250mであり、観測条件によって2レンジビンにわたり反射が観測される場合と、1レンジビンだけに反射がみられる場合とがあり、データの平均処理により前者の場合は本来の反射強度が、後者の場合は本来の $1/2$ の反射強度が記録される。今回の観測例では(a)が前者に(b)が後者に相当し、(b)において $1/2$ に平均化された値 -93.5dBm が観測されていると思われる。

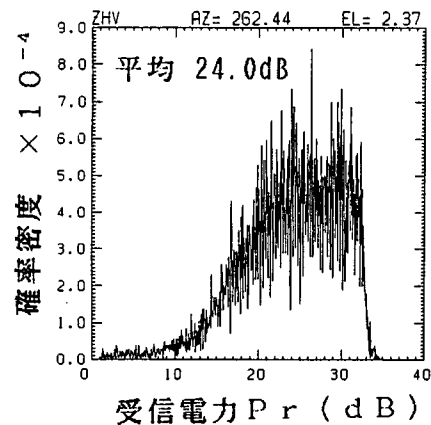
次に、図-5. 16に受信電力値(50データ平均値)の時間変化を、図-5. 17に受信電力値(各データ毎)の頻度分布図を示す。これらの場合も、上記と同様に第2回観測では反射が観測されており、第3回観測では顕著な値が見られない。また、第2回観測では $P_{r_{VV}}$ よりも $P_{r_{HH}}$ が大きく、更に $P_{r_{HH}}$ より $P_{r_{HV}}$ が大きな値が観測されている。

f. 運用パターン5による観測結果

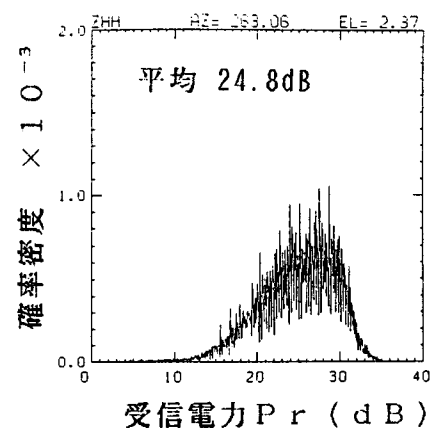
アンテナをスキャンさせながら観測を行う運用パターン5では、観測の結果から反射体の反射を特定することができなかった。これは、距離方向に2レンジビンの平均を行うとともに方位方向に9パルスヒットの平均を行っているため、データの平均化によって観測値が減少したためと推定される。



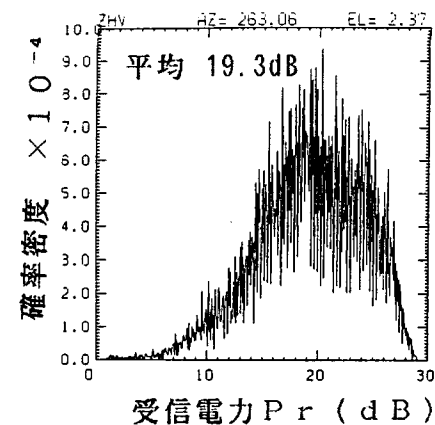
① $P_{r_{HH}}$



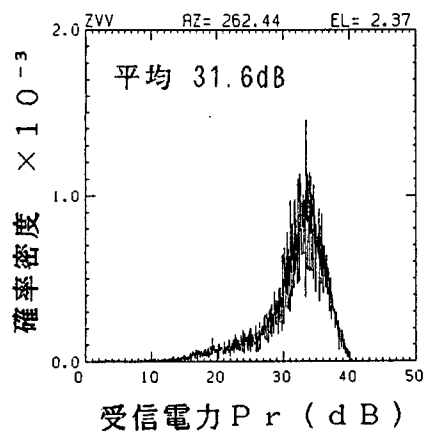
② $P_{r_{HV}}$



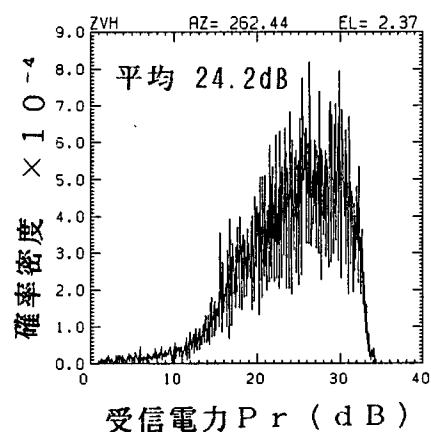
① $P_{r_{HH}}$



② $P_{r_{HV}}$

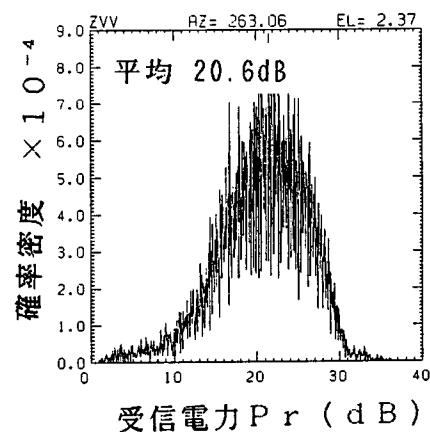


③ $P_{r_{VV}}$

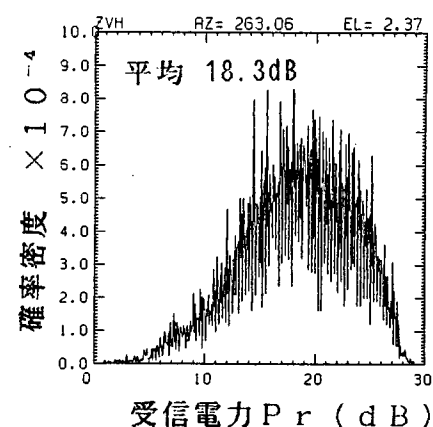


④ $P_{r_{VH}}$

(a) 第2回観測 (34レンジ)



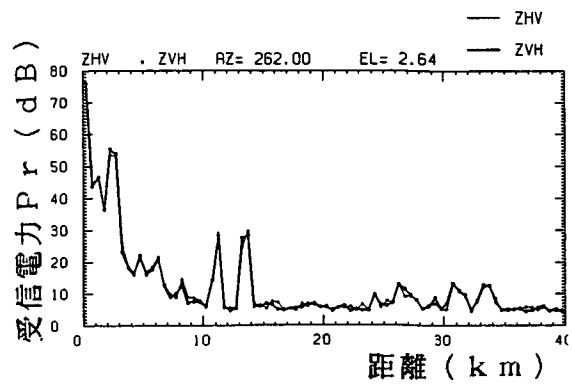
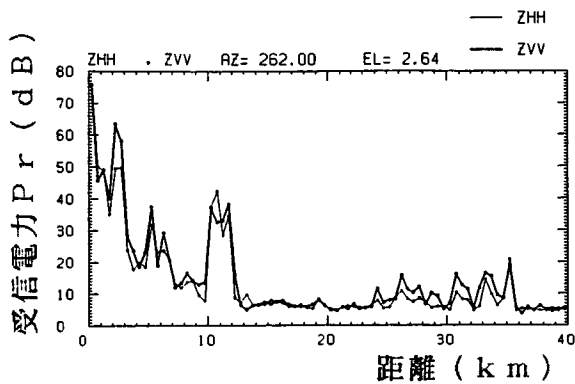
③ $P_{r_{VV}}$



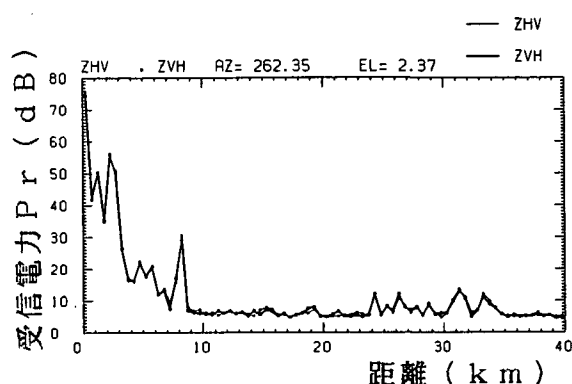
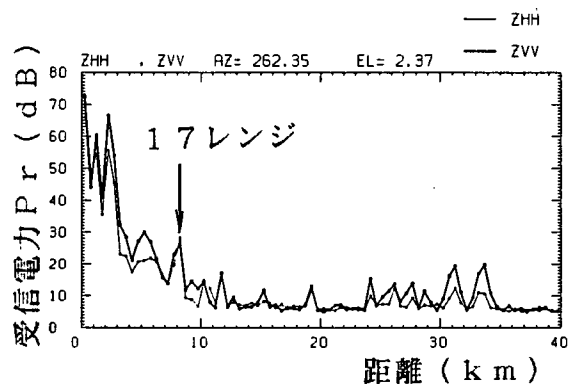
④ $P_{r_{VH}}$

(b) 第3回観測 (34レンジ)

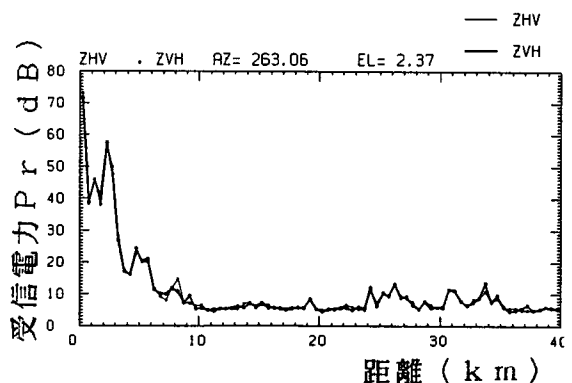
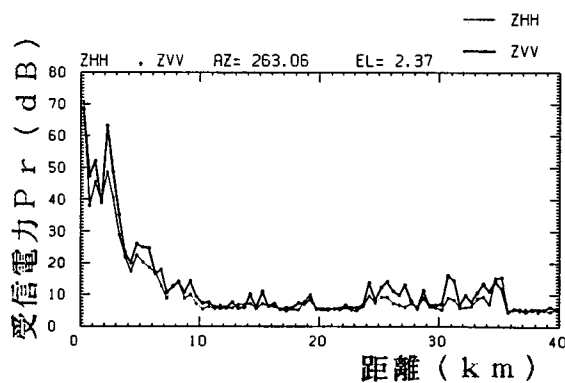
図-5.14 受信電力値の頻度分布
($S_{min} = -107.5\text{dBm}$)



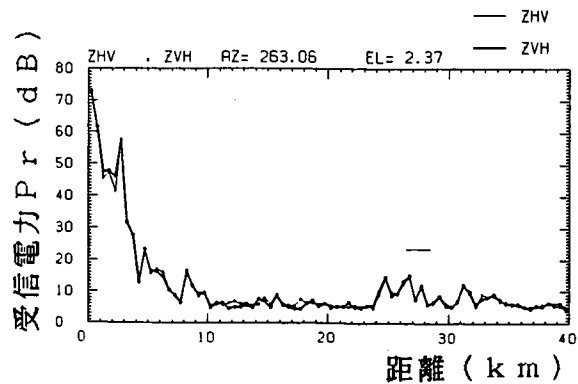
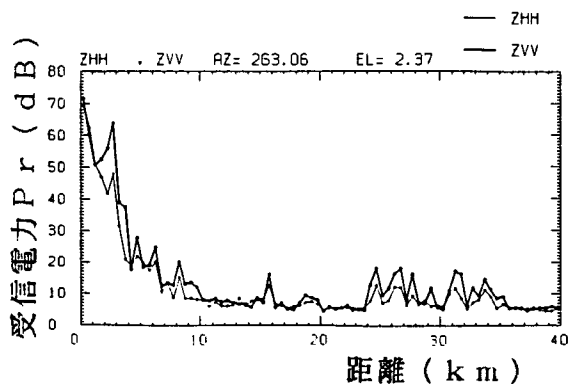
(a) 第1回観測 (バルーンのみ)



(b) 第2回観測 (反射体あり)

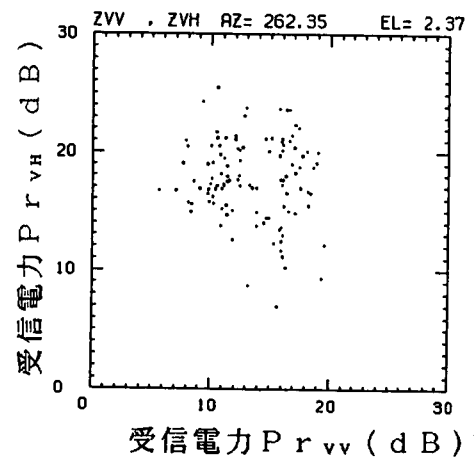
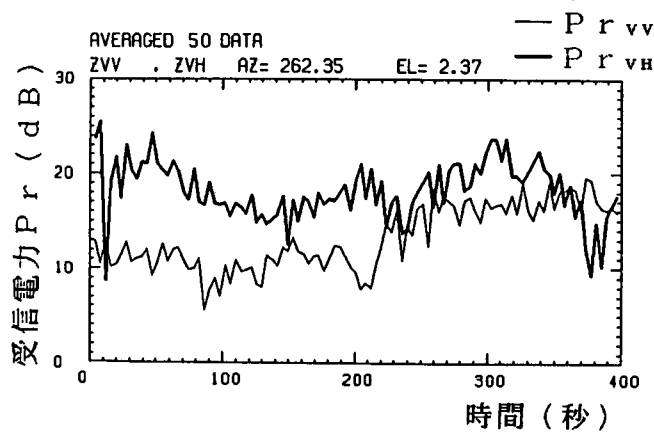
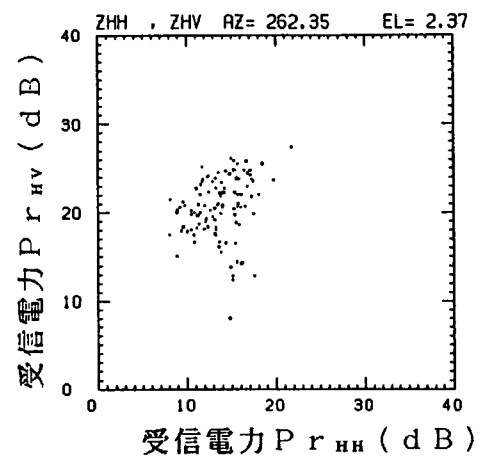
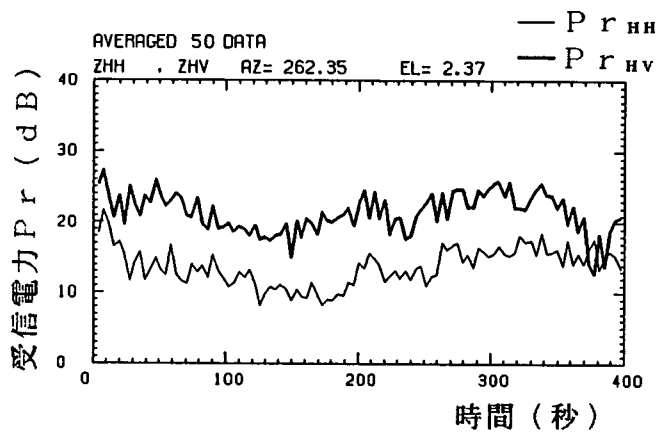
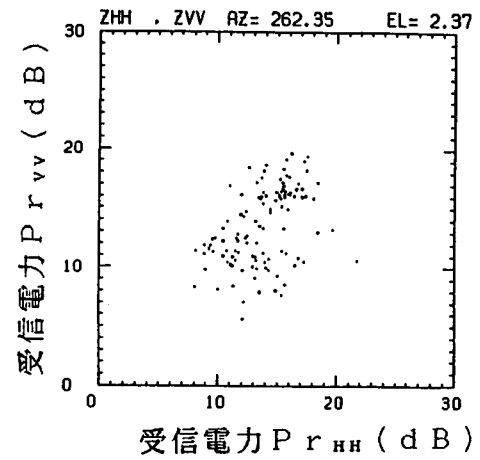
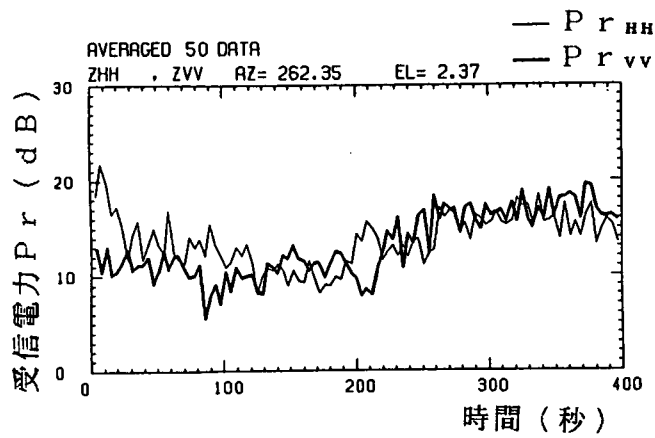


(c) 第3回観測 (反射体あり)



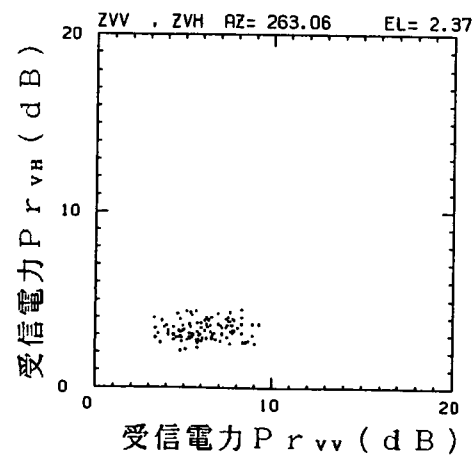
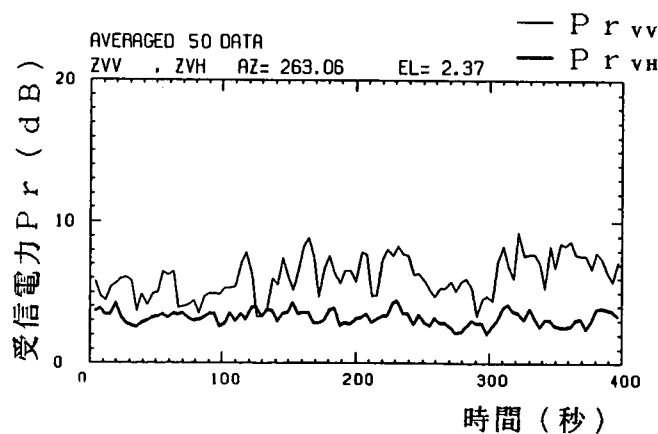
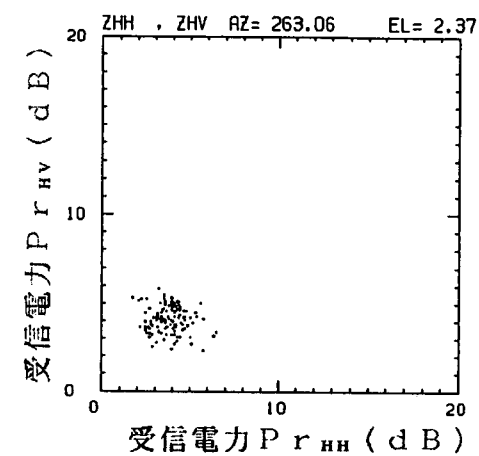
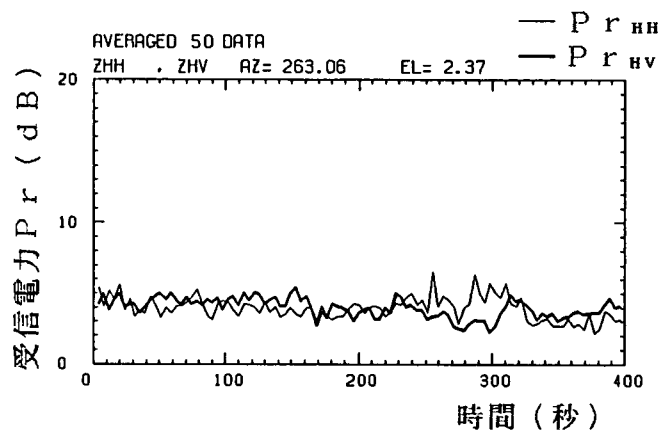
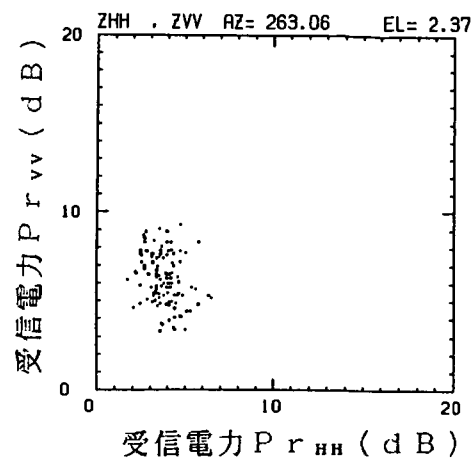
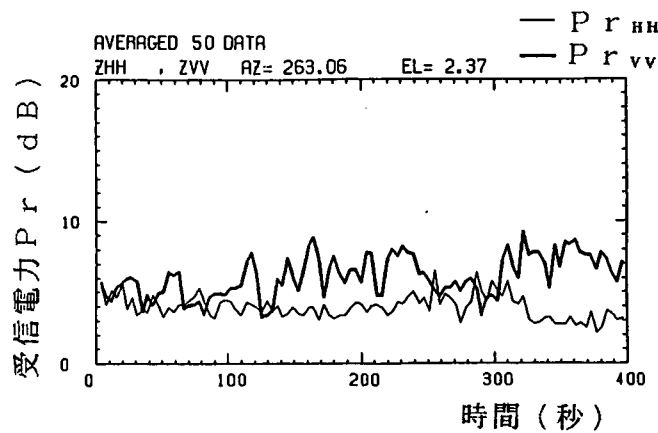
(d) 第4回観測 (グランドクラッタ)

図-5. 15 運用パターン7での距離方向の受信電力値の変化 :1990.10.17
($S_{min} = -107.5\text{dBm}$)



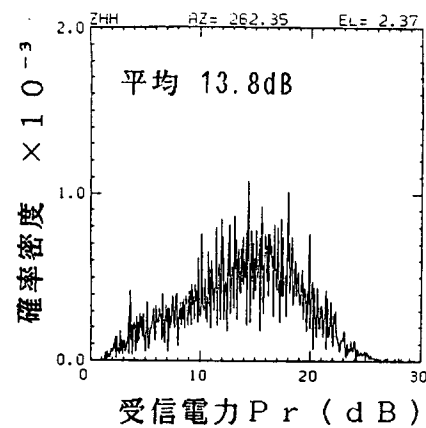
(a) 第2回観測

図-5.16 運用パターン7での受信電力値の時間変化(1) :1990.10.17
($S_{min} = -107.5 \text{ dBm}$)

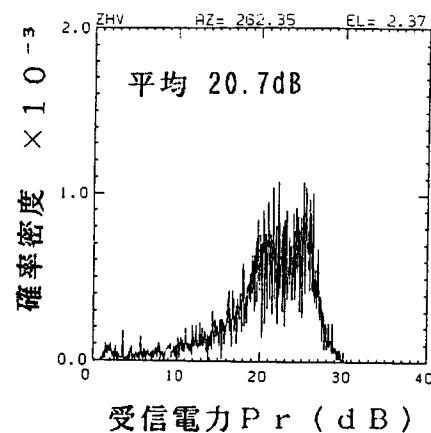


(b) 第3回観測

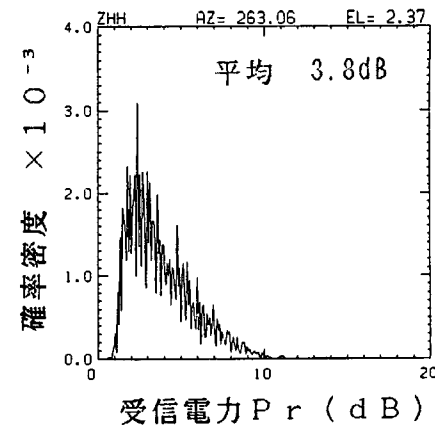
図-5.16 運用パターン7での受信電力値の時間変化(2) :1990.10.17
($S_{min}=-107.5\text{dBm}$)



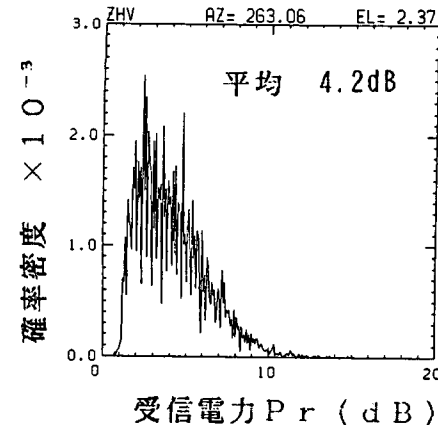
① $P_{r_{HH}}$



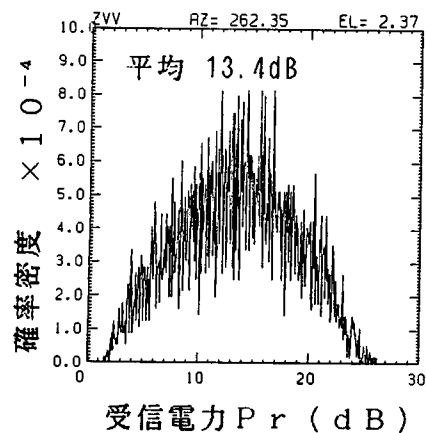
② $P_{r_{HV}}$



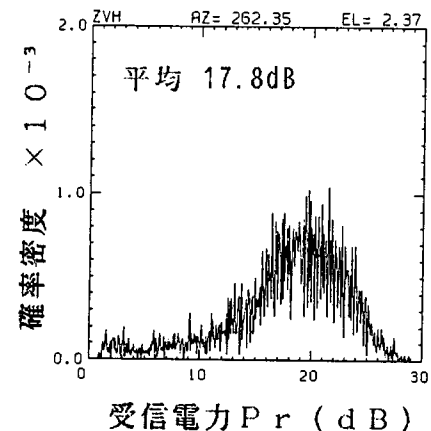
① $P_{r_{HH}}$



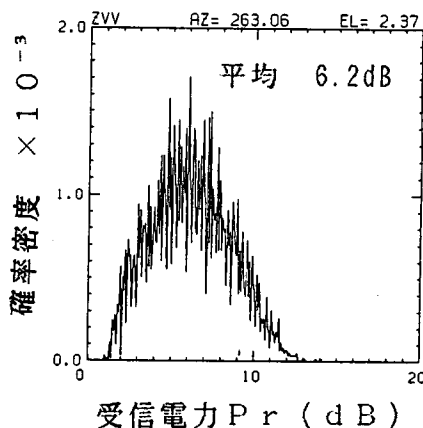
② $P_{r_{HV}}$



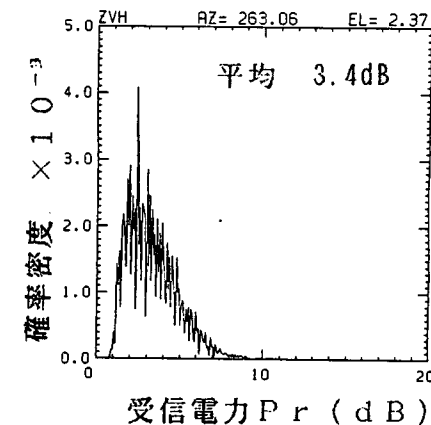
③ $P_{r_{VV}}$



④ $P_{r_{VH}}$



③ $P_{r_{VV}}$



④ $P_{r_{VH}}$

(a) 第2回観測 (34レンジ)

(b) 第3回観測 (34レンジ)

図-5.17 運用パターン7での受信電力値の頻度分布
($S_{min} = -107.5\text{dBm}$)

5.5 考 察

今回の作業により、標準反射体からの後方散乱強度が得られ、水平偏波と垂直偏波それぞれに対する補正值を得ることができた。

しかし、観測結果には次に示す疑問点及び問題点が含まれている。

5.5.1 受信電力値

標準反射体からの受信電力値は図-5.11に示す様に第2回、第3回の観測ともに大きく変動している。この変動の原因として反射体の製作精度の他に次の2点が挙げられる。

①風による影響で標準反射体の位置が移動している。

②送信出力が、パルス幅 $2\mu\text{sec}$ の間で変化し、均一な値となっていない。

図-5.9が示すように反射体及びバルーンの位置は、仰角方向には非常に安定しているが、方位角方向に大きく変化しており 0.6° 程度の変化が見られる。また、同様にレーダからの距離も大きな変化を見せている。ここで、図-5.4のアンテナパターンから、ビーム中心より $\pm 0.6^\circ$ の変化では利得の減少は 3dB 以内である。ところが、アンテナパターンに示されるメインローブの肩の部分では $\pm 0.6^\circ$ の変化に対して受信電力は大きく変化する。したがって、位置の変化により受信電力が変動するには、観測時の AZ 、 EI の設定値が目標中心方向からずれていた事が考えられる。

また、第3回目の観測ではピークが33レンジと34レンジとにまたがっており、パルス幅 $2\mu\text{sec}$ の端近くでの反射であったことが予想される。したがって、図-5.11(b)に示される受信電力値の変化には目標物の距離方向の位置の変化により生じたパルス端での送信出力の変化が、含まれているものと考えられる。

5.5.2 H, V間のアイソレーション

5.4.2(2)によれば $P_{r_{HH}}$ 、 $P_{r_{HV}}$ 間及び $P_{r_{VV}}$ 、 $P_{r_{VH}}$ 間の受信電力差は、 4.8dB 及び 6.1dB であり水平偏波と垂直偏波間のアイソレーションが低く、 Z_{DR} の測定には不十分である。しかし、図-5.11の散布図から平均的には $P_{r_{HH}}$ 、 $P_{r_{HV}}$ 間で約 10dB 程度の差が認められる。ただし、今回得られた受信電力値には上記のように不明な点があるため更に検討を要する。

5.5.3 レーダ、反射体間の距離

5.4.3(a)で明らかな様にレーダと反射体間の距離は、レーダ観測値と地上測量値で 1Km 近い差が生じている。地上測量値は 10m 程度の精度があり、レーダ観測値が異常であると思われ、レーダの調整を要する。

5.5.4 まとめ

これまでの検討の結果から、今回の第1回及び第2回絶対較正作業を通して DND レーダの較正を行うのに十分な結果が得られたとはいえない。今後、測定方法について更に検討を行い、 DND レーダの較正值を得る必要がある。

第6章 DNDレーダの実用化 に向けての検討

6. 1 はじめに

DNDレーダによる降水現象観測の研究は、昭和60年度から始まり、平成2年度に至るまでの間、①DNDレーダの開発、②偏波切替器等ハードウェアの改良、及び③DNDレーダによる降水観測手法の開発及び精度評価等を行ってきた。以上の基礎研究の成果を踏まえて、平成3年度からDNDレーダの実用化に関する研究が開始される。それに先立ち、現在のDNDレーダを実用化する場合の技術的課題とその見通しをここで明らかにしておく必要がある。DNDレーダの観測方法のうち、ドップラーモードによる観測は、ハードウェア面での技術的な課題はなく、実運用における利用方法を今後検討していくのみである。今後、さらに実用面での技術的検討が残されているのは、直交二偏波モードによる観測である。したがって、本節では、直交二偏波レーダを実用化する上での技術的課題について整理し、今後の見通し及び問題点等を明確にするものとする。

6. 2 空中線系

6. 2. 1 アンテナパターン

直交二偏波レーダを用いた降水現象の観測には、 Z_{DR} の測定精度に対しきわめて厳しい条件が課せられ、水平／垂直各偏波での高い均一性、対象性、直交性の確保が必要である。

また、サイドローブからのエコーが、メインローブによるエコーと混ざった場合には測定誤差の要因となるため、低サイドローブレベル化を計る必要がある。

図-6. 1に示す現行アンテナ方式から別方式に変更することもある必要になることが予想される。オフセットアンテナ、サブリフレクタ方式等が考えられるが、現時点では、どの方式が最適かの結論は出ていない。

また、パラボラ面精度が性能に直接関係するため、製作精度の向上を考える必要がある。

サイドローブレベルの目標値を設定する必要がある。

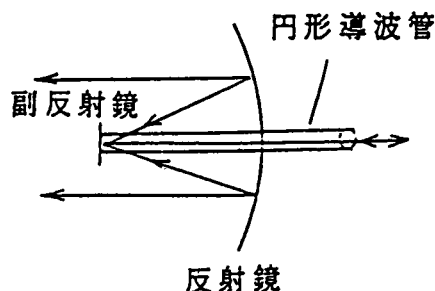


図-6. 1 現行アンテナ方式

6. 2. 2 偏波切替器

(1)切替特性

水平／垂直各偏波での切替特性の均一性及び十分なアイソレーション（分離比）を確保する必要がある。

現行のラッチ型サーキュレータ＋トランスデューサによる簡易型から、ラッチ型サーキュレータ＋4ポートサーキュレータ＋トランスデューサ等の構成に変更することにより可能である。図－6. 2に偏波切替器簡易等価回路を、図－6. 3に偏波切替器実構成図を示す。

ただし、容積、重量等が現行品に比べて非常に大きくなるため、実装方法の検討が必要である。

(2)温度特性

切替器の材料であるフェライトの温度依存性が高いため、切替器の周囲温度を安定させ、通年運用を可能とする手段が必要である。

偏波切替器を冷却することにより温度を一定に保つ場合は、構造が大きくなるため、ヒータにより高温域で温度を一定に保つ方法が考えられる。

(3)耐電力特性

実用機における送信電力（250kw程度）に耐えることを目標とする。

250kwに耐える偏波切替器の開発は可能である。

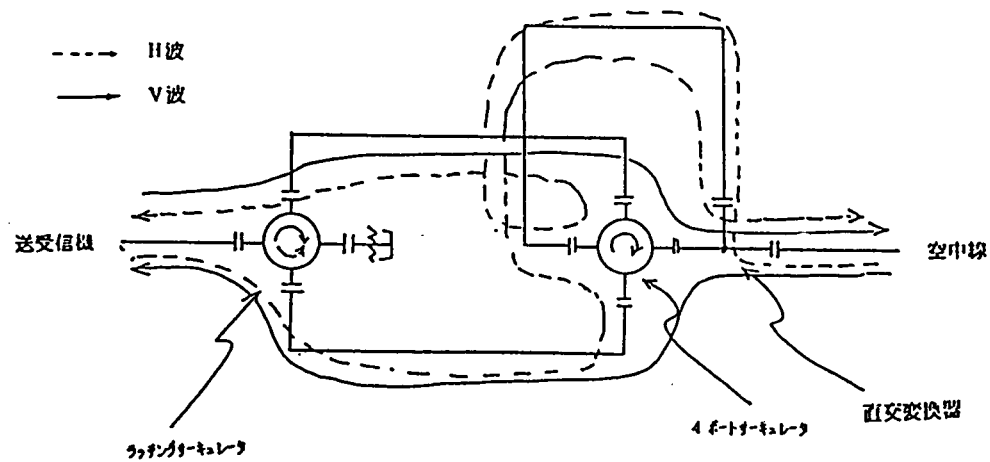


図 - 6. 2 偏波切替器簡易等価回路

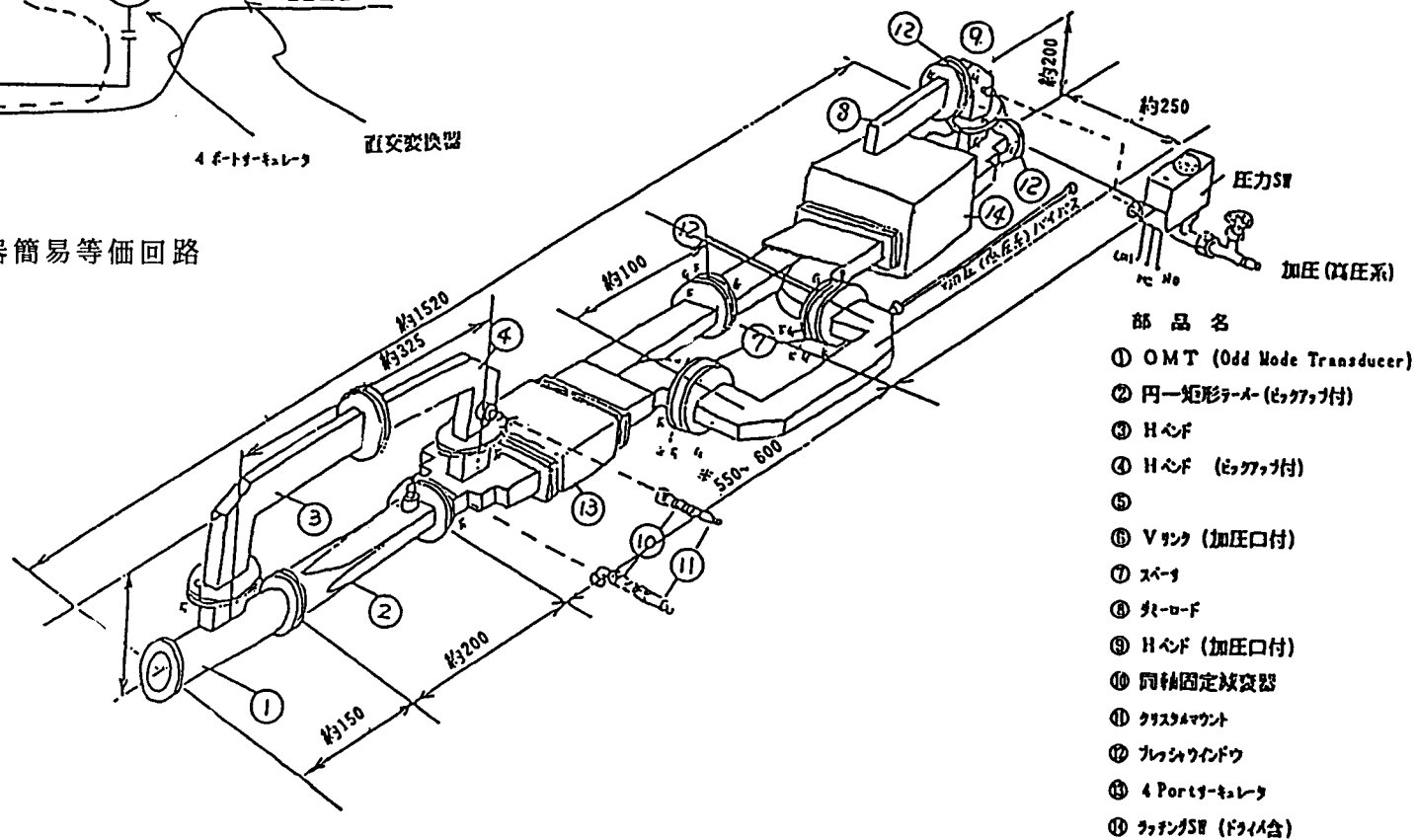


図 - 6. 3 偏波切替器実構成図

6. 3 レドーム

実用機には、レドームが必要である。レドームを設置した場合に、アンテナビームパターンの均一性、対称性、直交性の劣化を実用上支障のないレベルにまで抑える。

また、レドームへの着雪氷によりアンテナビームパターンが劣化するため、着雪氷防止対策が必要である。

アンテナビームパターンに対する影響の程度を、現用のレドームも含め各タイプのレドームについて検討する必要がある。現在、国内外を含めて、主に用いられているレドームのタイプは、次の3つである。

①スペースフレーム型

②スイカ型

③風船型

また、着雪氷防止対策についても検討する必要がある。

6. 4 キャリブレーションの方法

Z_H , Z_{DR} のキャリブレーション方法を確立する必要がある。

アンテナを真上に向けて水平／垂直偏波系のキャリブレーションを行う方法は、定期点検時に無風でかつ降雨があるとは限らず実用的ではない。リフレクタを含めたキャリブレーションが実運用においても必要となるのか、方法と併せて検討する必要がある。

6. 5 グラウンドクラッターの除去方法

実運用では、グラウンドクラッターによる観測データへの影響が避けられない。

現用のMTI処理により Z_H , Z_V 信号を処理した場合、元信号レベルへの復元誤差を0.2dB (Z_{DR} の現行偏差値) 以下に抑えることは困難である。すなわち、MTI処理を行った場合、観測誤差を増加させてしまう結果となる。

したがって、元信号レベルへの復元誤差が Z_{DR} の偏差値に対して無視できるような新しいMTI処理方式を開発しなければならない。

◎ 直交二偏波レーダMTI処理

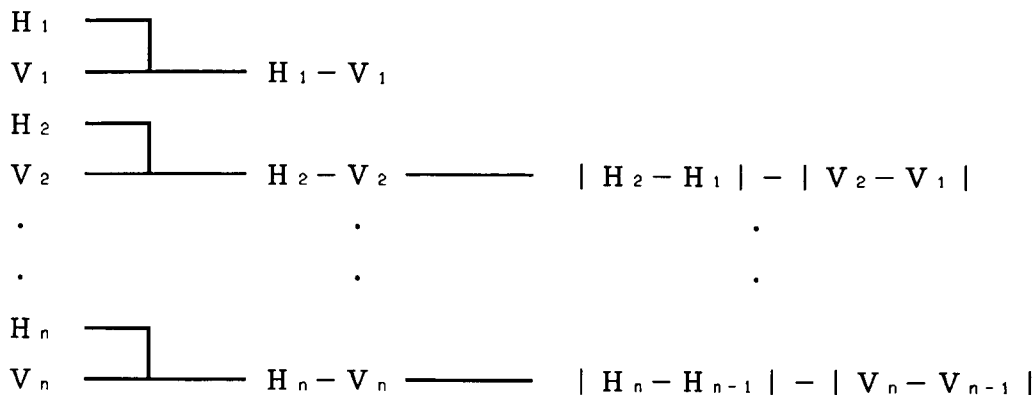
直交二偏波レーダで現行MTI処理を行った場合、

送信パルス

Z_{DR}

NORMAL

MTI



となり、MTI処理結果には補正不可能な誤差が含まれてしまう。

また、これまでの検討結果から、 Z_{DR} の誤差 $\pm 0.1\text{dB}$ で降雨強度に約25%の誤差を与える。現行MTIは、グラントクラッター重畳域、近距離において誤差を含んでおり、このMTIを用いて Z_{DR} 観測精度を $\pm 0.1\text{dB}$ 以下とするのは困難である。

6. 6 観測レンジ

実用化においては、観測レンジの拡大が必要である。

観測レンジを拡大した場合には、遠距離におけるビームの広がり、及び相関低下による Z_{DR} の誤差増加をあらかじめ理論計算し、サンプリングパルス数の確保のための繰り返し周波数、アンテナ回転数、サンプリング間隔の再検討が必要である。

第7章 まとめ

本報告は、土木研究所水文研究室が降雪観測用レーダ研究会（会員：（株）東芝、日本無線（株）、三菱電機（株））と共同で開発したDNDレーダ（直交二偏波・ドップラーレーダ）による降水現象観測研究の成果・第4報としてとりまとめたものである。

この研究は、本年度で基礎的な研究を終了し、来年度からはDNDレーダの実用化に向けての研究を始める予定である。そこでここでは、第1報～第4報全体の研究成果と今後の課題をとりまとめておくこととする。

7. 1 データ処理に関する研究

(1) サンプルング方法の検討

レーダで観測される降水エコーの変動特性についての検討を行い、その結果をもとにして直交二偏波レーダにおける偏波切替方法及びデータ平均方法等が反射因子差 Z_{DR} の測定精度に及ぼす影響について検討した。その結果、次のことがわかった。

- ① 水平偏波と垂直偏波の切替間隔は、9パルスごとに切り替える場合に比べて1パルスごとに切り替える場合の方が Z_{DR} の測定精度は高くなる。
- ② 1パルスごとに偏波面を切り替える場合には、パルス繰り返し数が多いほど Z_{DR} の測定精度が高く、また、単位時間当りのデータ数が多くとれるため、直交二偏波観測には有効な運用方法である。
- ③ 検波方式は、偏波切替方式にかかわらず、対数特性受信機を用いる場合よりも自乗則検波器を用いる場合の方が精度良く Z_{DR} を測定できる。
- ④ 1パルスごとに偏波面を切り替える場合には、送信周波数が低いほど、 Z_{DR} の測定精度は良い。

(2) データ収集間隔の検討

SCANモードにより観測を行う場合の最適平均時間について検討した。

- ① 標本化誤差は主にデータ収集間隔に比例して増加し、総データ収集時間の減少につれて増加する。また、自己相関の低い降水ほど標本化誤差は大きくなる。
- ② 複数仰角運用に伴う測定誤差を10%以下にし、5仰角で運用を行うにはデータ収集間隔を5分以下にする必要がある。

(3) グラウンドクラッター除去の検討

MTIフィルタが Z_{DR} の測定に及ぼす影響について検討した。

- ① MTIフィルタを用いることによりデータの分散が約1.5倍程度となるため、データ取得時間も約1.5倍程度必要となる。
- ② 水平・垂直偏波間で電気特性に相違がある場合には、MTIフィルタの飽和特性が Z_{DR} の値に大きく関与してくる。
- ③ グラウンドクラッターが偏波面によって異なる場合には、グラウンドクラッターの消え残り及びレイリーガウス分布への移行による誤差が Z_{DR} の測定誤差をもたらす。

(4)補正係数F値の検討

直交二偏波レーダによる降雨観測の場合には、レーダ情報 (Z_H , Z_{DR}) のみから降雨強度を算出するので、レーダ方程式上の補正係数F値を正確に設定する必要がある。これまでの研究からは、まだF値を決定するまでには至っていないが、観測結果からは次のようなことがわかっている。

- ①地上雨量値と比較した結果、F値（導波管ロスを除いたUnknownな値）は降雨ごとに変化している。平均的な Z_H の補正值は、1.9 dB程度である。
- ②F値が降雨ごとに変動する原因としては、偏波切替器の温度特性の影響と考えられる。
- ③レーダを真上に向けた降雨観測から、 Z_{DR} の補正值は1.2 dB程度である。

7. 2 上層風の観測に関する研究

ドップラーモードによる観測結果を用いて、上層風の測定精度及び雨滴の粒径分布の推定手法についての検討を行った。その結果、次のようなことがわかった。

- ①ゾンデ観測とレーダ観測を比較すると、風向・風速はほぼ一致し、ドップラーレーダによる上層風の測定は可能である。
- ②アンテナを真上に向けたドップラー観測値（速度分散と反射強度）を用いて、雨滴の粒径分布の推定が可能である。ただし、速度分散値及びパラメーター D_{max} , m の与え方によっては粒径分布が求まらない場合がある。

7. 3 降雨観測に関する研究

(1)直交二偏波レーダを用いた降雨観測手法の検討

直交二偏波レーダから得られる情報 (Z_H , Z_{DR}) を用いて、降雨強度に変換する手法についての検討を行った。その結果、次の成果が得られた。

- ①理論計算により高度方向の雨滴の形状差は、ほとんどないことがわかった。すなわち、散乱断面積は高度方向に一定であるとして、降雨強度の計算をすることができる。
- ②雨滴の粒径分布は、ディスドロメーターでの観測結果から次式で表すことができる。

$$N(D) = N_0 \cdot D^m \cdot \exp(-\Lambda \cdot D)$$

- ③ Z_H , Z_{DR} から降雨強度を計算する場合は、2つのパラメーター m と D_{max} を決定する必要がある。本研究では、ディスドロメーターによる観測結果及び理論計算から、 $m = 2$ 及び $D_{max} = 7 \text{ mm}$ と設定することとした。

- ④降雨強度 R と Z_H , Z_{DR} は、近似的に次の関係があることがわかった。

$$Z_H = B \cdot R, \quad B = a \cdot Z_{DR}^b$$

定数 a , b については、理論計算 ($m = 2$, $D_{max} = 7 \text{ mm}$) から、

$$a = 2.650, \quad b = 0.885 \quad (Z_{DR} \leq 0.4 \text{ dB})$$

$$a = 2.792, \quad b = 1.211 \quad (Z_{DR} > 0.4 \text{ dB})$$

となる。この式から、簡単にかつ精度よく降雨強度が計算でき、実運用上も有効であると考えられる。

⑤ Z_H 、 Z_{DR} の測定誤差が降雨強度に与える影響については、後者の方がはるかに大きい。たとえば、 Z_{DR} の誤差が真値に対して $\pm 0.1\%$ であるならば降雨強度に変換した時点で約25%の誤差が生じる。すなわち、 Z_{DR} については、高い測定精度が要求される。

⑥ Z_H 、 Z_{DR} を用いて、降雨強度と同様に、近似式から減衰量を計算することができる。

(2) 直交二偏波レーダによる降雨強度の測定精度

地上値と比較することにより、直交二偏波レーダの精度評価を行った。その結果を以下に示す。

① ディスドロメーターの観測結果から求めた Z_H を用いて、レーダ観測の Z_H の精度を調べると非常に良い精度で観測されていることがわかった。 Z_{DR} については、定量的にはなかなかうまく合わないが、変化傾向はうまく捉えていることがわかった。

② 直交二偏波レーダで推定した雨滴の粒径分布と地上で観測した粒径分布は、よく合う。しかし、気象条件等（上昇流の存在等）により、異なった粒径分布を推定するケースがある。

③ 現在のハードウェアシステムでは、 $Z_H \geq 45 \text{ dB}$ または $Z_{DR} > 0.5 \text{ dB}$ の範囲で従来のレーダ以上の降雨観測精度が得られる。

④ Z_{DR} が 0.5 dB 以上のデータを用いて $B\beta$ 法と Z_{DR} 法の降雨観測精度比較をすると次のとおりとなった。

相関係数	$B\beta$ 法: 0.722	Z_{DR} 法: 0.836
自乗平均誤差	$B\beta$ 法: 9.116	Z_{DR} 法: 8.173 (mm/h)

(地上値は、ディスドロメーターデータと転倒ます雨量計データ)

⑤ Z_{DR} 法の場合は、減衰を考慮しても降雨観測精度への効果はほとんどない。

7. 4 降雪観測に関する研究

(1) 降雪観測の測定精度の検討

地上値と比較することにより、降雪観測の測定精度及び精度向上方策の検討を行った。その結果、次のことが得られた。

① 地域平均した降雪量を用いて地上値と比較すると、相関係数が0.8以上であり、降雪量の定量観測は可能である。

② ドップラー観測により上層風のデータを用いて、雪片の移流を考慮した場合の観測精度を調べた結果、この方法により精度の向上が可能であることがわかった。

③ 雪片とあられの場合の $Z-R$ 関係を調べた結果、両者に3 dB程度の差があることがわかった。

④ 雪質別に降雪モデルを設定し、次の降水量と減衰係数との関係を求めた。

$$\begin{aligned} K r &= 0.0023 \cdot R^{1.00} && (\text{乾雪}) \\ &= 0.0035 \cdot R^{0.91} && (\text{湿雪}) \end{aligned}$$

$$= 0.025 \cdot R^{0.90} \quad (\text{濡雪})$$

$$= 0.021 \cdot R^{0.95} \quad (\text{水雪})$$

(2) 降水粒子の形態識別の検討

降水粒子の反射特性から、形態識別の可能性について検討した。その結果を以下に示す。

- ① 雨の場合には、常に $Z_{DR} > 0 \text{ dB}$ であり、測定値のばらつきも平均値 $\pm 0.5 \text{ dB}$ と小さい。それに対して、雪の場合には、 Z_{DR} の平均値がほとんど 0 dB となり、そのばらつきも $\pm 1.0 \text{ dB}$ と大きい。この反射特性の違いから、概略の形態識別図を作成することができた。
- ② ゾンデとの協同観測で降雪雲の観測を行った結果、 -10°C 付近で Z_{DR} が大きくなることがわかった。これは、大気中の降水粒子の変化を捉えていると考えられる。
- ③ 降雨の観測結果から、ブライトバンド高度で Z_{DR} が増加することがわかった。
- ④ 雪片の分布数が増加する時間帯での Z_{DR} 値は、 0 dB 以下となる傾向がある。

7. 5 今後の課題

実用化へ向けた今後の主な課題としては、次の項目が挙げられる。

(1) 技術的課題

① レドーム

アンテナビームパターンの均一性、対称性、直交性の劣化が最も少なくなるようなレドームの形式について検討する必要がある。

② キャリブレーション

Z_H 、 Z_{DR} のキャリブレーション方法を確立する必要がある。

③ グラウンドクラッターの除去方法

現在の MTI 処理では、 Z_{DR} の観測精度が悪くなる。

④ 雪の電波減衰

雪質により電波減衰が異なるので、レーダ方程式にどのように組み入れるか検討する必要がある。

(2) 観測精度に関する課題

① 気象要因が観測精度に及ぼす影響

粒径分布の空間変動及び上昇流・下降流の有無に対する観測精度への影響を明らかにする必要がある。

② 偏波切替器の温度特性の影響

通年で観測を行う必要がある。

③ ビーム充填率の影響（おもに雪の場合）

複数の仰角データからビーム充填率を求め、メッシュ平均 Z を補正する方法を確立する。

④ 降水粒子の形態識別

さらにデータを蓄積し、さまざまな降水粒子に対応できるようにする必要がある。

⑤ 雪の誘電率

雪の場合の温度の違いによる誘電率の設定方法を検討する必要がある。

(3)運用方法に対する課題

- ① 直交二偏波とドップラーの併用方法
- ② オンライン処理及びデータ表示の方法

おわりに

本研究のなかで、散乱断面積の計算に郵政省通信総合研究所の小口室長から提供して頂いた計算プログラムを使用した。また、本報告書第4章の中で示したゾンテデータは、北海道大学低温科学研究所の遠藤助教授に提供していただいたものである。第5章の絶対較正作業では、運輸省気象研究所の青柳室長から助言をいただいた。ここに記して謝意を表します。

DNDレーダによる降水現象の
観測に関する共同研究報告書
(第4報)

共同研究報告書第55号
平成3年3月(1991年)

益倉克成, 吉野文雄, 松崎典夫
深見和彦, 水野秀幸, 井川貴史

要 旨

洪水時の河川管理及び積雪地域の冬期の道路管理を適切に行うには、広域・面的でかつ正確な降水量の情報を入手する必要がある。この情報を入手することのできる測定器として、降水粒子群から得られる情報を複数にした、より精度の良い観測が可能となるレーダの1つである直交二偏波・ドップラーレーダがある。土木研究所では、(株)東芝、日本無線(株)、三菱電機(株)の3社と共同して、直交二偏波・ドップラーレーダ(DNDレーダと称する)を試作し、降水量の観測手法の開発研究を行っている。本報告書では、第1報～第3報の成果を踏まえ、①信号処理方法、②降雨観測精度、③降水粒子の反射特性について述べるとともに、④DNDレーダの実用化に向けての検討結果について報告する。

キーワード：レーダ、降雨観測、降雪観測、直交二偏波、ドップラー

郵便はがき

305-□□

41円切手
を貼る
下は
さい
い

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

河川部水文研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所共同研究報告書第55号 部

上記のとおり受領しました。

所 属(住所)

氏 名 印

