

土 木 研 究 所 資 料

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

建設省土木研究所
河川部水文研究室

Copyright ©(1989)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2報)

建設省土木研究所水文研究室	室長	吉野文雄
	主任研究員	石井典夫
		水野秀幸
		井川貴史
建設省国土地理院企画調整課		水野雅光*
(株) 東芝・小向工場		中野悟孝
		丸山吉道
日本無線(株)・三鷹製作所		岡川武弘
		吉田勝博
		長屋勝嗣
三菱電機(株)・通信機製作所		長田正護
		萩原護也
		浜津享助
		大木健一

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つである二重偏波・ドップラレーダがある。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、二重偏波・ドップラレーダ(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、昨年(1988年)の第1報の成果を踏まえ、DNDレーダの改良後の仕様を報告するとともに、降雨及び降雪観測方法及び観測精度について検討した結果について紹介する。

キーワード：レーダ、降雨観測、降雪観測、二重偏波、ドップラ

*前水文研究室研究員

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)

(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：東芝、日本無線、三菱電機) と実施中の共同研究課題「降雪観測用レーダの開発研究」による研究の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雪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雪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下に行われ、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およ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、データの処理方法、等であった。この様な諸問題を解決するには高能力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の進歩には限界があった。

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。一方この当時には電子計算機の実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年にレーダ降雨量の実用一号機を導入できるまでに至った。

このようにレーダ降雨量の開発に当たって長年月の努力が為され、現在見られるようなレーダ降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では、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 $Z=BR^\beta$ 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 レーダの情報だけでは定数 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電波の反射強度が弱いこと
- ② 雪片は風の移流をう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覚ましいものがあり、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が競って研究を進めている Multiparameter Radar のひとつである二重偏波・ドップラレーダである。この分野の研究はまだ緒についた段階にあり、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。すでに共同報告書第一報を土木研究所資料 No. 2594 で報告した。本報告は 63 年度に実施した二重偏波・ドップラレーダの改造内容と降雨観測、降雪観測等について研究結果を取りまとめた。この研究は昭和 65 年度で一応の成果を出して終了する予定である。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。

この共同研究の実施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。建設経済局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、北陸地方建設局本局及び富山工事事務所、東北地方建設局、九州地方建設局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。

平成元年 3 月

土木研究所河川部水文研究室

目 次

第1章 序 論	1
第2章 二重偏波・ドップラレーダ (DND レーダ) の改造	13
2.1 改造の必要性と概要	13
2.2 信号処理部の性能と動作原理	20
2.3 データ収録部の性能と動作原理	34
2.4 表示部の性能と動作原理	43
2.5 久留米での設置工事について	48
2.6 ま と め	53
第3章 DND レーダによる降雪観測と予測	54
3.1 降雪による電波減衰について	54
3.2 雪片の移流を考慮した降雪量の測定	80
3.3 レーダによる降雪予測の可能性について	96
3.4 ま と め	128
第4章 DND レーダによる降雨観測の精度	129
4.1 雨滴の粒径分布の測定	129
4.2 Z_{DR} 法による降水強度の測定精度	140
4.3 ドップラレーダを用いた雨滴の粒径分布の推定	179
4.4 レーダ反射電力のサンプリング間隔について	191
4.5 ま と め	215
第5章 結 論	216

第1章 序 論

1.1 研究目的

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、広域的でかつ面的でかつ正確な降雨量及び降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降水粒子の形態の判別が不可能、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つである二重偏波・ドップラレーダ（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。

すでに共同研究の成果を第一報として報告してあるので、土木研究所資料 No. 2594 の目次を参考として示す。

本報告において、63年度に実施した DND レーダの改造仕様並びに降雨及び降雪の観測結果を紹介する。

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 観測計画

二重偏波・ドップラレーダによる降雨観測及び降雪観測手法を開発するため、DND レーダを用いて降雪観測及び降雨観測を行い、同時に地上降水量の測定も行う。図—1.2.1に観測の全体計画を示す。

(1) 降雪観測

① 観測期間 昭和61～平成2年度の毎年12月16日～3月15日迄とする

② レーダ観測の範囲

昭和61～63年度は建設省富山工事事務所三郷出張所（富山県中新川郡立山町）を、平成元年度～2年度は建設省酒田工事事務所（山形県酒田市上安町）をレーダサイトとし、半径40 km以内の地域の降雪量（水当

量)を測定する。図-1.2.2に降雪観測範囲を示す。

③ 地上降雪量の観測

3 km×3 kmの1メッシュあたり1台の割合で合計約17台の自記雨雪量計を設置して時間降雪量(水当量)を観測する。自記雨雪量計は上下部ヒーター付の0.5 mmピッチの転倒ます雨量計で、記録は、メモリーパックを用いて、1分間単位で降水量が記録されるようになっている。

④ 降雪粒子の特性の観測

ビデオゾンデによる上空の降雪粒子の粒子形状及び粒径分布の測定、また、地上において降雪粒子落下速度粒径分布測定装置を用いて降雪粒子の落下速度、粒子形状及び粒径分布の測定を実施する。

⑤ 高層気象の観測

レーウィンゾンデを用いて、上空の風向・風速及び気温の測定を行う。

⑥ 気象データの収集

DNDレーダの観測エリア内にあるテレメータ観測所の時間降水量、AMeDAS観測所の気温、風向、風速、降水量、積雪深、各観測施設の日積雪量、並びに輪島の高層気象データを収集整理する。

⑦ 降雪による電波の減衰量の測定

降雪時に、DNDレーダから20～100 km離れた地点で、DNDレーダの電波を受信し、降雪による電波の減衰について検討する。

(2) 降雨観測

① 観測期間 昭和62～平成2年度の毎年6月1日～9月31日迄とする

② レーダ観測範囲

昭和62年度は建設省富山工事事務所三郷出張所(富山県中新川郡立山町)をレーダサイトとし、昭和63～平成2年度は建設省筑後川ダム統会管理事務所(福岡久留米市)をレーダサイトとし、半径40 km以内の降水量を測定する。九州における観測範囲を図-1.2.3に示す。

③ 地上降雪量の観測

3 km×3 kmの1メッシュあたり1台の割合で合計約20台の自記雨量計を設置して時間降雨量を観測する。自記雨量計は上下部ヒーター付の0.5 mmピッチの転倒ます雨量計で、記録は、メモリーパックを用いて、1分間単位で降水量が記録されるようになっている。また、1地点で雨滴計数式降雨強度計を用いて、1分間毎の降水強度を測定する。

④ 降雨粒子特性の観測

ビデオゾンデによる上空の降水粒子の粒子形状及び粒径分布の測定、また、地上において4箇所雨滴の粒径分布測定装置を用いて雨滴の粒径分布の測定を実施する。

⑤ 高層気象の観測

レーウィンゾンデを用いて、上空の風向・風速及び気温の測定を行う。

⑥ 気象データの収集

DNDレーダの観測エリア内にあるテレメータ観測所の時間降水量、AMeDAS観測所の風向、風速、降水量、並びに福岡の高層気象データを収集整理する。

⑦ 降雨による電波の減衰量の測定

降雨時に、二重偏波・ドップラレーダから 20～100 km 離れた地点で、二重偏波・ドップラレーダの電波を受信し、降雨による電波の減衰について検討する。

(参 考)

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)

目 次

はじめに

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

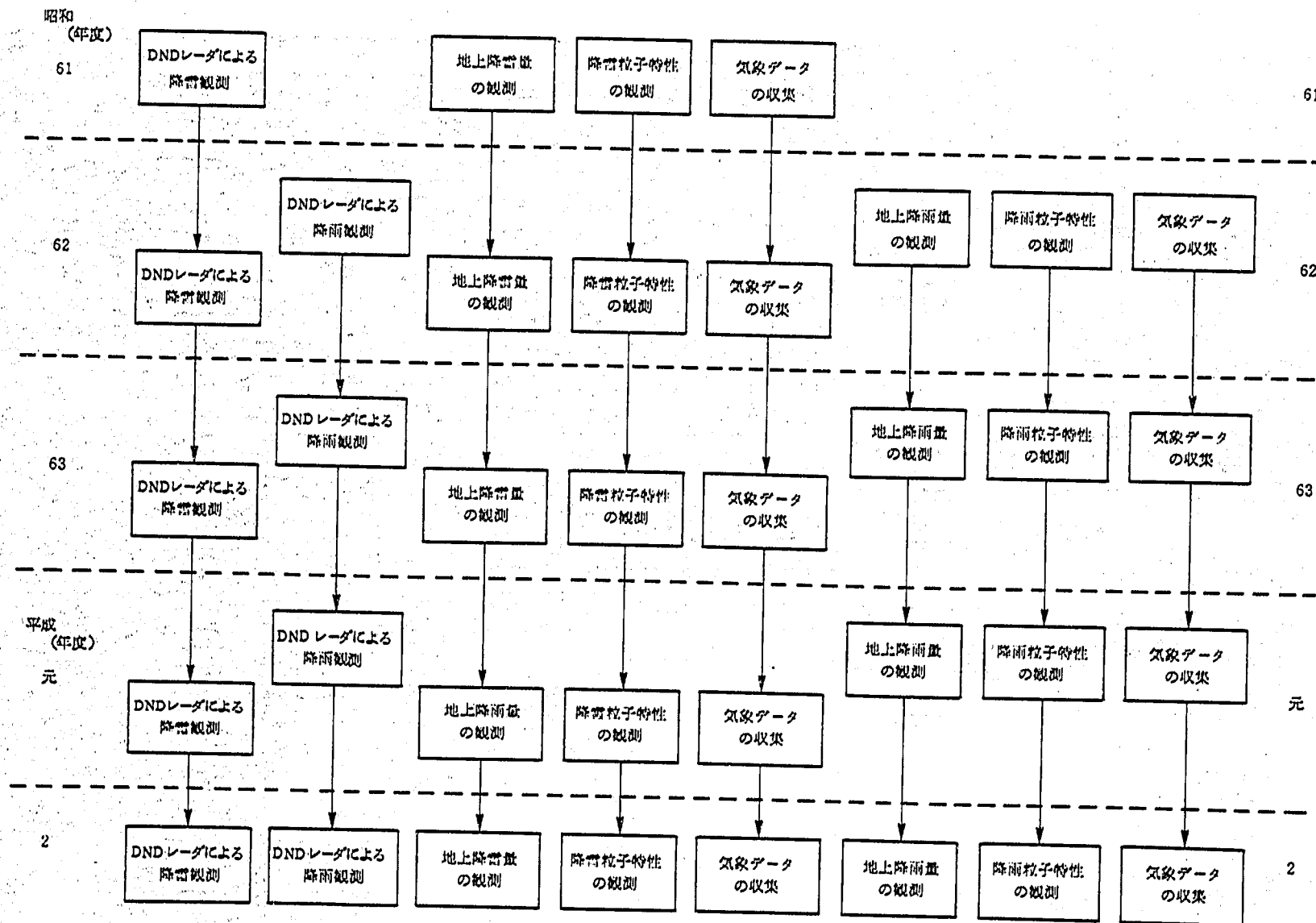
4.4 降雨観測における反射電力のサンプリング時間

4.5 Z_{DR} による降水強度の測定精度

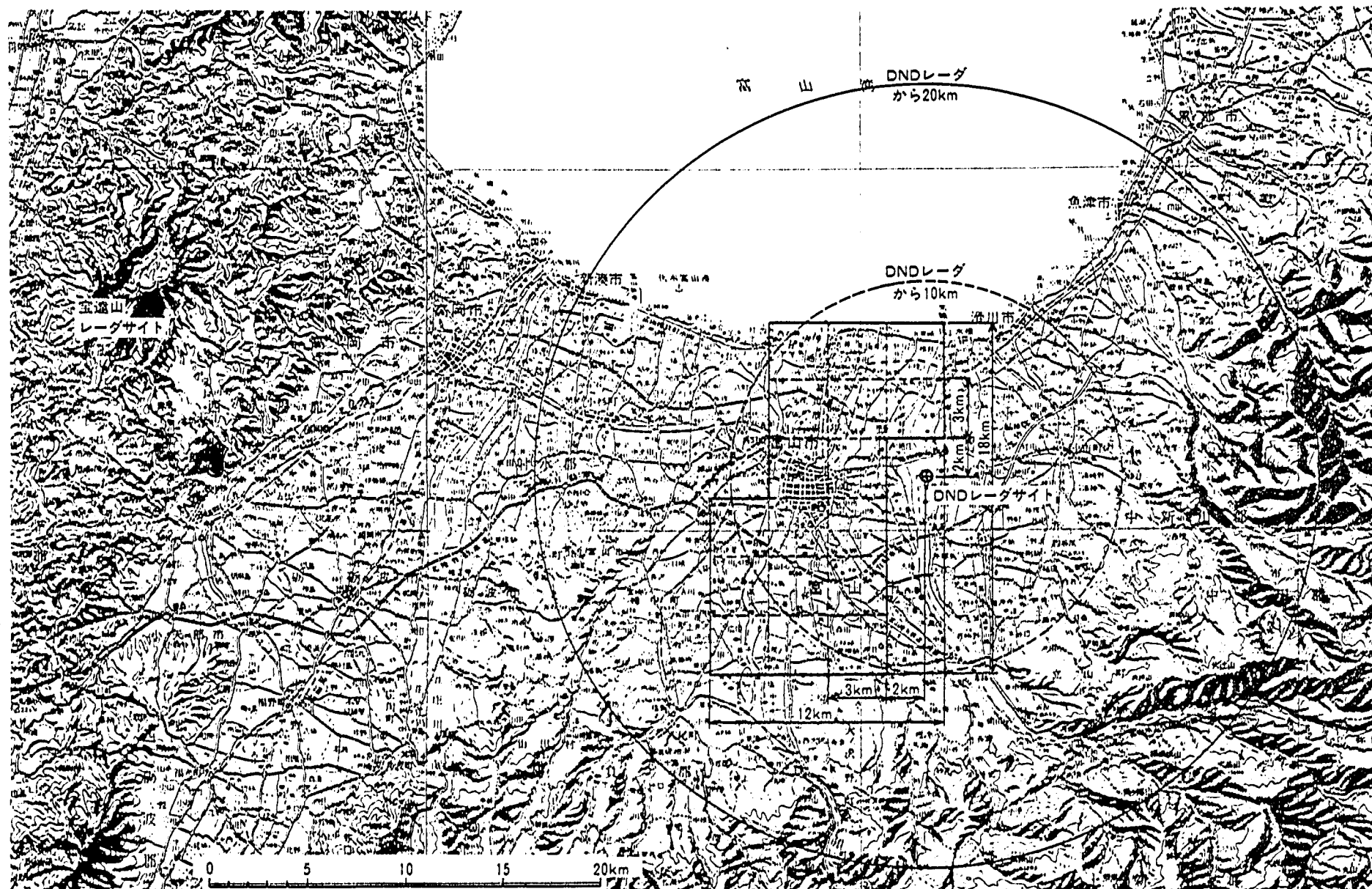
4.6 ドップラモードの観測精度

4.7 ま と め

第5章 結 語



図一1.2.1 観測の全体計画



図一1.2.2 降雪観測位置図

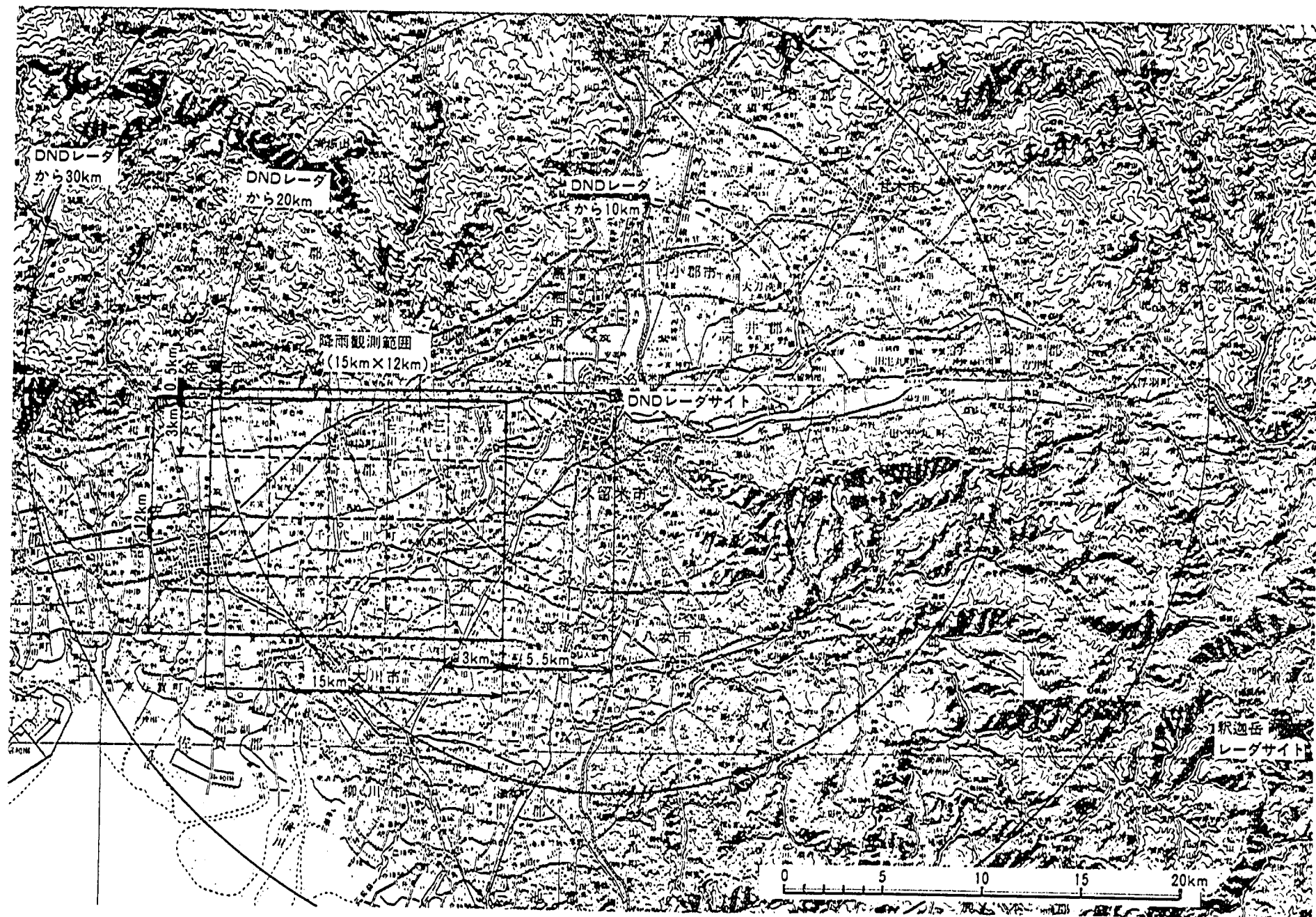


図-1.2.3 降雨観測位置図

1.3 解析計画

二重偏波・ドップラレーダ (DND レーダ) による降雨観測及び降雪観測手法を開発するために行う解析の全体計画を図-1.3.1 に示す。

二重偏波・ドップラ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、降水物質の形態判別手法の開発を行う。

また、二重偏波・ドップラ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。

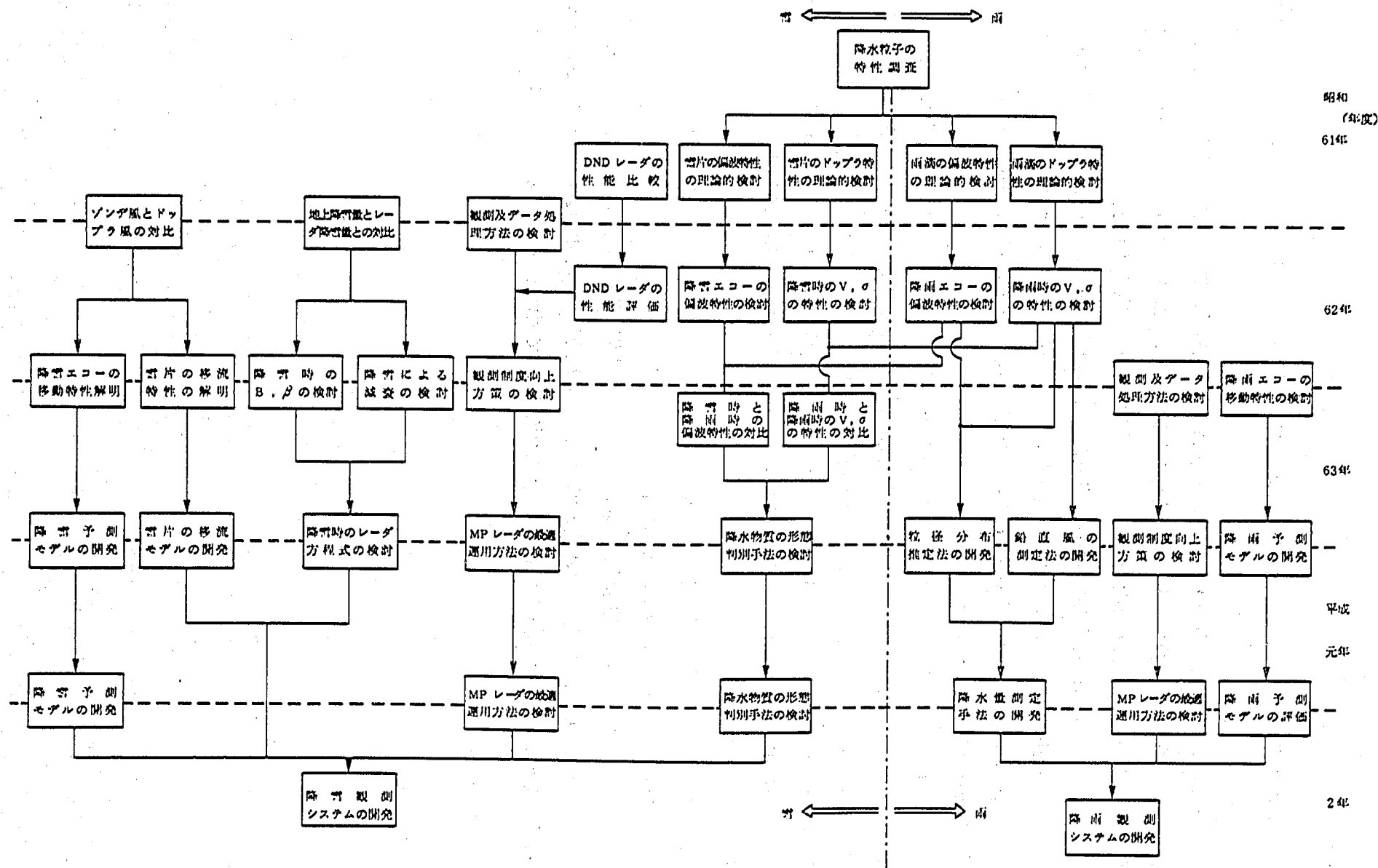


図-1.3.1 解析の全体計画

1.4 研究の経緯

土木研究所水文研究室が行っている二重偏波・ドップラレーダによる降水観測手法の開発研究の経緯を表一1.4.1に示す。

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年度から二重偏波・ドップラ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 SMASS 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、二重偏波・ドップラ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、二重偏波・ドップラレーダの仕様の検討を行い、製作を開始した。昭和61年12月に二重偏波・ドップラレーダが完成し、昭和62年1月から降雪観測を富山で開始した。昭和62年度に富山で降雨観測と降雪観測、昭和63年度に久留米市で降雨観測、富山で降雪観測を実施した。

二重偏波・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、表一1.4.2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。

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、道路管理並びに富山工事事務所の皆様に、久留米における降雨観測で、九州地方建設局河川管理課、電気通信課、筑後川工事事務所、筑後川ダム統管理事務所の皆様に多大な協力をして頂いた。ここに謝意を表します。

表一1.4.1 二重偏波・ドップラレーダによる降水観測手法の開発研究の経緯

年 度	試 験 研 究 費	道 路 事 業 調 査 費	河川総合事業調査費	そ の 他
61	・ DNDレーダの性能比較 ・ 現地の降雪観測施設の整備	・ DNDレーダによる降雪観測の実施 ・ ドップラ風とゾンデ観測の対比		(施設整備費) ・ 二重偏波・ドップラレーダの空中線装置及びシェルターの製作
62	・ DNDレーダの性能評価 ・ 降雪エコーの偏波特性の検討 ・ 雨滴の粒径分布測定装置の購入	・ レーダによる降雪観測の実施 ・ 降雪エコーの移動特性の解明	・ DNDレーダによる降雨観測の実施 ・ 地上降雨量観測の実施	
63	・ 降雪時と降雨時の偏波特性の対比 ・ 降雪時と降雨時のドップラ特性の対比	・ レーダによる降雪観測の実施 ・ 雪片の移流特性の検討	・ Z_{DR} 法による降水観測精度の検討 ・ エコーの移動と上層風との関係の検討	
元年	・ 降水粒子の形態判別法の開発	・ レーダによる降雪観測の実施 ・ 降雪予測手法及び雪片の移流予測モデルの検討	・ 雨滴の粒径分布の推定法の検討 ・ DNDレーダによる降雨観測手法検討 ・ DNDレーダによる降雨予測手法の開発	
2 年	・ 降水粒子の形態判別法の開発 ・ 降雪観測システムの開発	・ 降雪予測手法及び雪片の移流予測モデルの開発	・ DNDレーダによる降雨観測手法開発 ・ DNDレーダによる降雨予測手法の開発	

表-1.4.2 特殊レーダ研究会委員名簿

氏 名	所 属
(委員長) 雄	科学技術庁国立防災科学技術センター第一研究部長
(委員) 平	科学技術庁国立防災科学技術センター第一研究部異常気候防災研究室長
八木 柳 二 郎	運輸省気象研究所気象衛星研究部第二研究室長
青田 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
阿波加 純	" " 電波部大気圏伝搬研究室主任研究官：63年度
井原 俊 夫	" " 鹿島支所第一宇宙通信研究室長：63年度
一 宮 邦 夫	61年～62年度：(前) " 電波部大気圏伝搬研究室主任研究官
	建設省建設経済局調査情報課電気通信室長：63年度
	61年～62年度：(前) " 電気通信室建設専門官
松橋 下 守 夫	建設省建設経済局調査情報課電気通信室建設専門官：63年度
吉野 文 宏	建設省土木研究所河川部長
中野 武 雄	" " 河川部水文研究室長
吉田 武 弘	(株)東芝・小向工場レーダ技術部技術第二担当課長：62年度～
吉浜 津 亨	日本無線(株)・三鷹製作所技術第二部特殊レーダ専門課長
(前委員) 助	三菱電機(株)・通信機製作所電波部システム第二課主幹：62年度～
藤田 正 晴	61年～62年度：(前) 郵政省通信総合研究所鹿島支所第一宇宙通信研究室長
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
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) 典 夫	63年度～：建設省土木研究所水文研究室主任研究員
石井 秀 幸	62年度～：建設省土木研究所水文研究室技官
水川 貴 史	62年度～：建設省土木研究所水文研究室技官
(前幹事) 光	61年～63年度：(前) 建設省土木研究所水文研究室研究員
水野 雅 祐	61年度：(前) 建設省土木研究所水文研究室技官
河関 大 局	
(事務局) 彦	(社)建設電気技術協会専務理事
高岡 山 澄 弥	" 事務局

第2章 二重偏波・ドップラレーダの改造

2.1 改造の必要性和概要

2.1.1 改造の必要性

(1) DNDレーダの改造が必要な理由は以下の通りである。

- ① 偏波切り替え間隔が11パルス毎、0.04sであると、水平偏波と垂直偏波とでは、測定している対象が異なることが予想される。そこで、偏波切り替え間隔を短くする必要がある。また、現象を詳細に捉えるには、パルス毎のデータを評価する必要がある。
- ② Z_{DR} を0.1dBの精度で測定するには現在の方法では500以上という膨大なデータを平均する必要がある。これは、 $Z_H, Z_H, Z_H, \dots, Z_H, Z_V, Z_V, Z_V, \dots, Z_V$ と連続してデータを平均しているため個々のデータの独立性が低い。これを、 $Z_H, Z_V, Z_H, Z_V, \dots, Z_H, Z_V$ というようにパルス毎に偏波面を切り替えたデータを用いると、 Z_H 間の時間が長くなるため、個々のデータの独立性が高くなり、平均するデータ数が減少する。したがって、偏波切り替えをパルス毎に行う必要がある。
- ③ 雨滴等の降水粒子の形状を推定するには、降水粒子の落下中の振動等を把握する必要がある、散乱マトリックス（交差偏波成分）を測定する必要がある。

(2) 改造の内容

次の項目が可能になるようにDNDレーダを改造する。

- ① パルス毎の偏波切り替え
- ② 散乱マトリックス（要素は $Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VH}, Z_{VV}$ の4つ）の計測
- ③ パルス毎のデータ収録
- ③ 運用パターンの変更
- ① 他の運用パターンと併用して観測を行う場合（昭和63年度）

現在の運用パターン7（1方向固定、11パルス毎の偏波切り替え、収録データは9パルス平均値）をベースにして、1方向固定観測で、偏波切り替え間隔をパルス毎にして、9パルス平均データを収録する。収録データは、 $Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VH}, Z_{VV}$ のうち任意の2つである。なお、1シーケンスを実行するには約1分間要すると考えられる。なお、この場合の実観測時間は20秒以下である。

② 他の運用パターンと併用して観測を行わない場合

レーダの運用システムを全て替える。観測は1方向固定で、偏波切り替えはパルス毎にすることが可能、データ収録は1パルス毎とする。収録データは $Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VH}, Z_{VV}$ のすべて、または、4つのうち任意の2つ、または、任意の1つである。

2.1.2 DNDレーダの仕様

DNDレーダの仕様は次の通りである。

(1) 観測範囲	40 km, 32 km (パルス毎収集時)
(2) 運用モード	表-2.1.1 による
(3) 空中線装置	
・空中線径	2 mφ 円形パラボラ
・偏波	水平 (H)/垂直 (V)
・主方向利得	36.6 dB (H)/36.7 dB (V)
・ビーム幅	1.8°
・副ビーム減衰量	23.8 dB (H)/23.7 dB (V)
・VSWR	1.17
・給電方式	Rear feed 方式
・耐風強度	観測時: 15 m/s, 停止時: 40 m/s
(4) 偏波切替器	
・周波数帯	5,280 MHz
・帯域幅	20 MHz
・入力電力	75 kW
・切替間隔	スキャン毎又は、パルス毎
・偏波切替モード	水平偏波送信に対して、水平偏波受信又は垂直偏波受信 垂直偏波送信に対して、垂直偏波受信又は水平偏波受信
(5) 空中線制御装置	
・制御方式	トランジスタ制御方式
・制御範囲	0~360° (AZ), 0~90° (EL)
・PPI-SCAN 速度	1 rpm (ドップラ), 6 rpm (二重偏波)
・垂直停止精度	±0.3°以下
・制御項目	PPI SCAN 及び EL 手動, EL プログラム制御
(6) 送受信装置	
・周波数	5,280 MHz
・尖頭出力	75 kW
・電波の型式	P0N
・送信パルス幅	0.5 μs (ドップラ), 2.0 μs (二重偏波)
・繰り返し周波数	1,120 pps (ドップラ), 280 pps (二重偏波)
・中間周波数	30 MHz
・受信帯域幅	2.8 MHz (ドップラ), 0.7 MHz (二重偏波)
・雑音指数	5 dB 以下
・最小受信電力	-107.5 dBm
・出力ビデオ	LIN (I, Q) ビデオ/LÖG ビデオ

(7) 指示装置

- ・CRT 直径, 特性 約 30 cm, P-7
- ・距離範囲, 距離目盛 40 km, 8 km 毎の目盛
- ・ノースマーク 画面の 0° 方向にフラッシュ表示
- ・入 力 最大 2 V_{OP} (75 Ω)
- ・輝度調整 可 能

(8) 導波管加工装置

- ・充填圧力上限 150 ± 20 g/cm²
- ・充填圧力下限 50 ± 20 g/cm²

(9) 信号処理装置

- ・入力ビデオ LIN (I, Q) ビデオ/LOG ビデオ
- ・量子化 10 ビット, 1.67 μs 毎 (LOG ビデオ)
8 ビット, 1.67 μs 毎 (LIN ビデオ)
- ・信号処理 LIN ビデオを使用したパルスペア方式 (ドップラ)
LOG ビデオを使用した NORMAL 系及び MTI 系の並列処理 (二重偏波)
距離が 2 レンジビン (0.5 km), 方位が 9 ヒット (1.4°) の平均 (二重偏波)
パルス毎収集時, 距離が 2 レンジビン (0.5 km) の平均 (二重偏波)
距離が 2 レンジビン (0.5 km), 方位が 256 ヒット (1.4°) の平均 (ドップラ)
- ・出力 ① ドップラモード時 $\bar{V}$, σ_V , Z_{HH}
② 二重偏波モード時
 - ・SCAN モード時 Z_{HH} , Z_{VV} (NORMAL/MTI)
 - ・方位固定モード時 9 ヒット平均時, Z_{HH} , Z_{HV} , Z_{VH} , Z_{VV} のうち任意の 2 つ (NORMAL/MTI)
パルス毎収集時, 任意の Z_{HH} , Z_{HV} , Z_{VH} , Z_{VV} (NORMAL)③ メッシュデータ 10 ビット (二重偏波)
8 ビット (1 ビット符号ビット) (ドップラ)

(10) データ収録装置

- ・処理装置 512 KB
- ・磁気テープ装置 1 C × 2 H, 1600 BPI, 2,400 フィート, 9 トラック
- ・フロッピーディスク装置 1 C × 2 D (1 MB × 2)
- ・磁気ディスク装置 30 MB
- ・コンソール 14 インチ, プリンタ付

(11) 装置装置

- 制 御 部 4MB
- グラフィックディスプレイ 14 インチ, カラー
- カラーハードコピー 6 ドット/mm

表-2.1.1 二重偏波・ドップラレーダの運用パターン

運用 パターン	モード 切換方法	運用モード	1サイクル の時間(分)	偏波切換間隔	空中線 回転数	仰角の設定法 仰角の設定数	データ平均時間	収 録 デ ー タ	表 示 デ ー タ
1	自 動	二重偏波	(5)	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	5分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
		ドップラ	(8)	水平のみ	1rpm	自動, 8仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (8仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
2	自 動	二重偏波	(3)	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	3分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
		ドップラ	(1)	水平のみ	1rpm	自動, 1仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (1仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
3	手 動	二重偏波	5	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 4仰角	1分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (4仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
4	手 動	ドップラ	10	水平のみ	1rpm	自動, 8仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (8仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
5	手 動	二重偏波	任 意	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	スキヤン, 1分 3分, 5分, 10分, 15分	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
6	手 動	ドップラ	任 意	水平のみ	1rpm	手動, 1仰角	スキヤン, 1分 3分, 5分, 10分, 15分	V, σ_v, Z_{HH} (1仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
⑦ (改造前)	手 動	二重偏波	任 意	11パルス毎 (0.04 S)	一方向 固 定	手動, 1仰角	9パルス平均	Z_{HH}, Z_{VV}	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
7 (改造後)	手 動	二重偏波	任 意	1パルス毎 (0.0035 S)	一方向 固 定	手動, 1仰角	9パルス平均	$Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VV}, Z_{VH}$ のうちの任意の2つ	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
8 (改造後)	手 動	二重偏波	任 意	1パルス毎 (0.0035 S)	一方向 固 定	手動, 1仰角	1パルス平均	$Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VV}, Z_{VH}$	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}

2.1.3 DNDレーダの系統

DNDレーダの系統を図-2.1.1に示す。

(1) 空中線系

空中線制御装置において、計算機からの指令角度信号と空中線の現在角度信号との誤差電圧を検出し、この電圧をモータの駆動電流に変換し、モータを駆動することにより空中線を制御する。尚、AZ系及びEL系についてこの機能を有する。

(2) 送受信系

送信機のマグネトロンで発振されたマイクロ波送信電力は偏波切替器で水平偏波、又は垂直偏波に切り替えられ、その偏波のまま空中反射面に給電され、空中に放射される。この気象目標からの反射波は偏波切替器で水平偏波、又は垂直偏波に切り替えられた後、受信機へ入力され、ローノイズ増幅器で増幅された後、ミキサーで30 MHzの中間周波信号となり、対数増幅器及び直線増幅器に供給される。直線増幅器の出力信号は位相検波(I, Qビデオ)された後、対数増幅器の出力信号(LOGビデオ)と共に信号処理装置に供給される。

(3) 信号処理系

送受信装置から入力されたI, Qビデオ及びLOGビデオは、デジタル量に変換される。この後、I, Q信号からパルスペア処理により降水粒子の平均速度(V)と分散(σ)が求められ、LOG信号から反射因子としてMTI処理したもの(Z_{HHM} , Z_{HVM} , Z_{VVM} , Z_{VHM})とMTI処理しないもの(Z_{HHN} , Z_{HVN} , Z_{VVN} , Z_{VHN})が求められ、これらの信号はデータ収録装置へ供給される。

(4) データ収録系

信号処理装置から入力されるデータは、二重偏波モード時には反射因子(Z_{HHM} , Z_{HVM} , Z_{VVM} , Z_{VHM} , Z_{HHN} , Z_{HVN} , Z_{VVN} , Z_{VHN})であり、またドップラモード時には平均速度(V)と分散(σ)及び反射因子(Z_{HHN})であり、これらのデータは磁気テープに記録されると共に、表示装置に表示される。

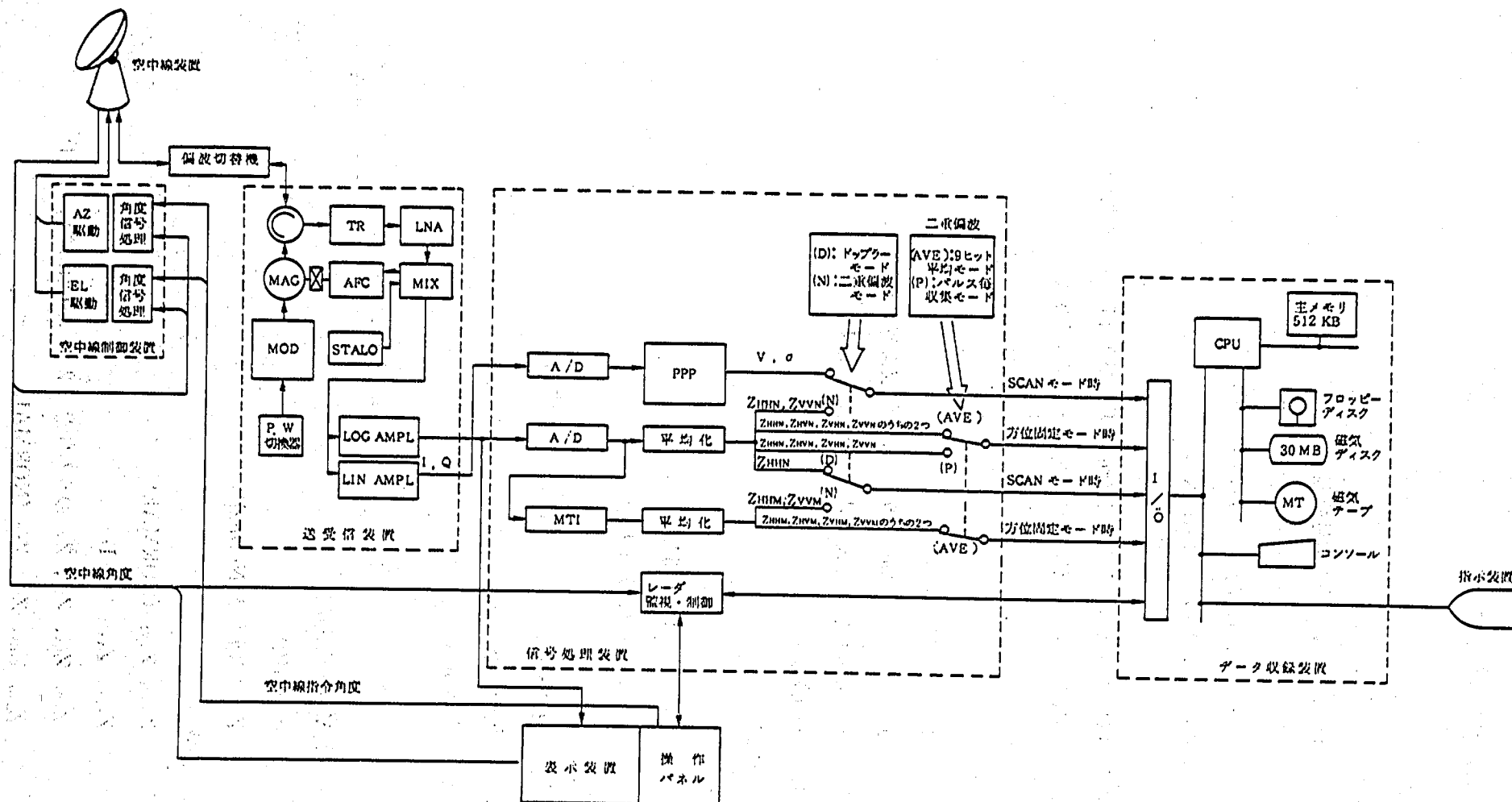


図-2.1.1 DNDレーダ系統図

2.2 信号処理部の性能と動作原理

2.2.1 性能

信号処理部の主要性能を以下に示す。

- (1) 入力 LOG ビデオ (強度信号処理系)
LIN ビデオ (ドップラー信号処理系)
- (2) 量子化 10 ドット, $1.67 \mu\text{s}$ 毎 (LOG ビデオ)
8 ビット, $1.67 \mu\text{s}$ 毎 (LIN ビデオ)
- (3) 信号処理
 - ・二重偏波モード時 LOG ビデオを使用した Normal 系及び MTI 系の並列処理
 - ・ドップラモード時 LIN ビデオ (I, Q) を使用したパルスペア方式
- (4) 二重偏波モード処理
 - ① メッシュ平均
 - ・距離平均 2 レンジビン (0.5 km)
 - ・方位平均 9 ヒット ($360^\circ/256$), 但しパルス毎収集時は平均なし
 - ② 距離補正 20 km 減算加算方式 (但し, 距離補正 ON の場合)
 - ③ MTI 消去比 20 dB 以上
- (5) ドップラモード処理
 - ① メッシュ平均
 - ・距離平均 2 レンジビン (0.5 km)
 - ・方位平均 256 ヒット ($360^\circ/256$)
 - ② 分解能
 - ・平均速度 12.5 cm/s
 - ・分散 5.6 cm/s
 - ③ 最大測定速度 $\pm 16 \text{ m/s}$
- (6) 出力
 - ① トリガー
 - ② ドップラモード時 $\bar{V}$ (平均速度)
 σ_V (分散)
 Z_{HH} (水平偏波 Normal)
 - ③ 二重偏波モード時
 - ・SCAN モード Z_{HHN} , Z_{VVN} (NORMAL)
 Z_{HHM} , Z_{VVM} (MTI)
 - ・パターン 7 Z_{HH} , Z_{HV} , Z_{VV} , Z_{VH} のうち任意の 2 つ (NORMAL, MTI)
 - ・パターン 8 Z_{HH} , Z_{HV} , Z_{VV} , Z_{VH} (NORMAL)

④メッシュデータ 10ビット (二重偏波)

8ビット (ドップラー, 但し sign ドットを1ドット含む)

2.2.2 各部の動作原理

(1) 強度信号処理系

① 降雨強度と受信電力

いま雨滴までの距離を r とし, レーダ反射因子を $Z=BR^\beta$, レーダの諸元にて決定される定数を C とする。また, 電磁波が空気中の大気(酸素)によって受ける減衰定数を K とすると, レーダの受信機の入力電力 P_r は

$$\overline{P_r} = \frac{C \cdot BR^\beta}{r^2} \times 10^{-0.2Kr}$$

いまこの式を対数変換し 10 倍すると,

$$10 \log \overline{P_r} = 10 \log C + 10 \log B + \beta 10 \log R - 20 \log r - 2Kr \dots\dots\dots (2.2.1)$$

と表すことができる。

更に基準点における降雨強度を R_0 としたときの受信電力を P_{r0} , また基準点までの距離を r_0 とすると下式が成立する。

$$10 \log \overline{P_{r0}} = 10 \log C + 10 \log B + \beta 10 \log R_0 - 20 \log r_0 - 2Kr_0 \dots\dots\dots (2.2.2)$$

(2.2.1), (2.2.2) 式より

$$10 \log \frac{\overline{P_r}}{\overline{P_{r0}}} = 10\beta \log \frac{R}{R_0} - 20 \log \frac{r}{r_0} - 2K(r - r_0)$$

$$10 \log \frac{R}{R_0} = \frac{1}{\beta} \left\{ 10 \log \frac{\overline{P_r}}{\overline{P_{r0}}} - 20 \log \frac{r_0}{r} - 2K(r_0 - r) \right\}$$

上記の受信電力から, $\left\{ 20 \log \frac{r_0}{r} + 2K(r_0 - r) \right\}$ の距離補正をすれば, 同じ降雨強度の目標から帰ってきた信号強度は, 距離に無関係となり降雨強度に対数的に比例した出力が得られる。

② デジタル積分による受信信号の処理

降雨からの反射は, 不規則に配列された非常に多くの雨滴からの反射で, それらの各々からのベクトル和が受信電力となる。雨滴の粒子の相対的位置からの信号は雑音のような変動をしており, 反射電力を測定するためには, 瞬間の値は意味がない。したがって何らの方法で平均値を求めないと, 有意な測定をすることはできない。この平均値を求めるために, 本装置では距離方向と方位方向について連続して積分し, より変動の少ない受信信号を得る。

まず, $1.67 \mu s$ でサンプリングして, A/D 変換された 250 m ごとのデータを 1 単位区間 (レンジビン) とし, 2 レンジビン (500 m) について平均される。この平均は, 0~40 km にわたって行われ, 500 m ごとに出力され, 更に方位方向に 9 スイープ分加算平均し, 1 スイープごとに出力される。

したがって, 出力される信号は, 距離方向に 2 個, 方位方向に 9 個の計 18 個のサンプリング信号から形成されていることになる。

これを概念的に示すと、図-2.2.1 のようになる。斜線内 9 スイープ、2 レンジビン分のデータ値が黒に集約されていることになる。

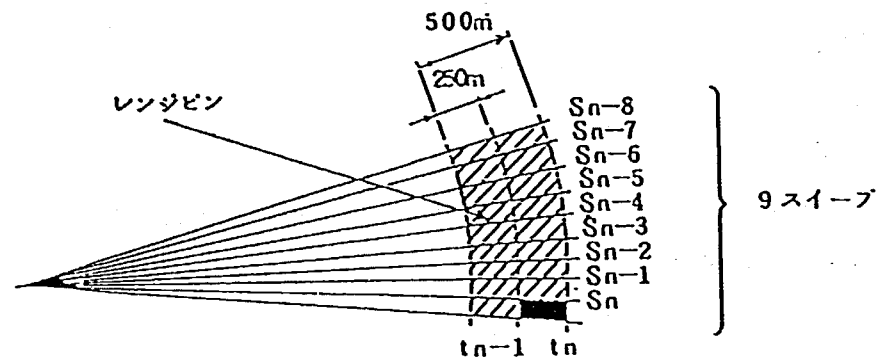


図-2.2.1 信号平均の概念

本システムでは、受信機の Minimum Discernible Signal を (S_{min}) と基準とし、約 80 dB 以上の対数応答特性を仮定している。

• Weather Echo 強度	0~35 dB	
• Range Correct (4~40 km)	0~36.24 dB	
• Noise	0~15 dB	+

0~86.2 dB

この約 80 dB の dynamic range のある出力特性を、10 ビットの A/D 変換器でデジタル変換にする。故に $2^{10}-1$ 個分に分解されるので、最小単位 (LSB) は

$$\frac{80}{2^{10}-1} = \frac{80}{1023} = 0.0782 \text{ dB}$$

となる。但し、降雪観測用レーダにおいては、受信機のダイナミックレンジが 76.5 dB の為最小単位 (LSB) は

$$\frac{76.5}{2^{10}-1} = \frac{76.5}{1023} = 0.0747 \text{ dB}$$

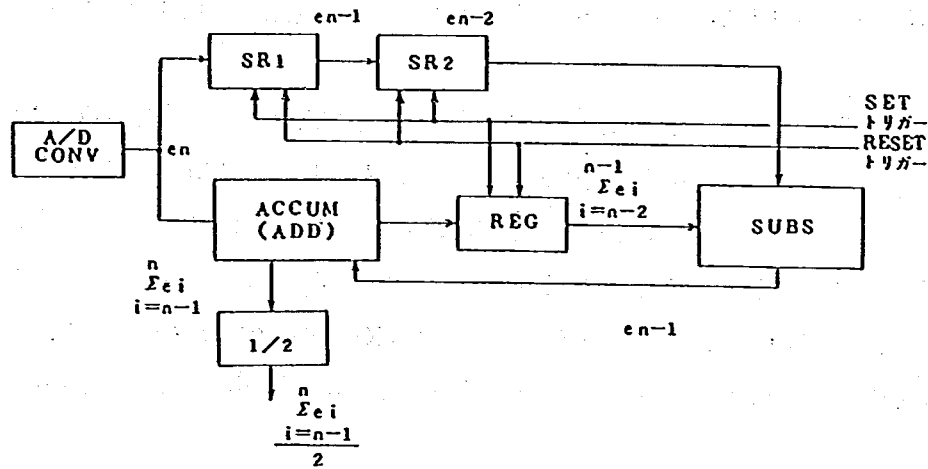
となっている。

③ 距離平均

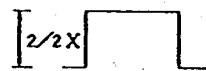
図-2.2.2 に示すように、 $1.67 \mu s$ ごとにサンプリングされ A/D 変換された信号が、加算器に入力されるとともに、順次、遅延回路 (Shift Register) によって 2 レンジビン分遅延される。

したがって、2 レンジビン分のデータが入れば、加算器には古いデータから順番に e_{n-2} 、 e_{n-1} が累算され ($e_{n-2} + e_{n-1}$) となっている。更に 2 番目の Shift Register には e_{n-2} のデータが記憶されている。

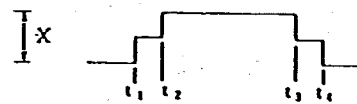
したがって、減算器によって e_{n-2} が引きさらられ、減算結果は (e_{n-1}) となり、新しく A/D 変換された e_n のデータが加算器によって加算され、その結果は ($e_{n-1} + e_n$) となり、最新のレンジビンを含めて 2 レンジビン分のデータが蓄積される。この蓄積データを $1/2$ 倍すれば ($e_{n-1} + e_n$)/2 という距離平均のデータが得られる。



(a) ブロック図



(b) ORIG入力波形



(c) Range Integ出力波形

図-2.2.2 単純加算方式による距離平均原理図

したがって、図-2.2.2のような強度データの入力信号が得られたとすると、その出力は単純加算方式の積分回路により、その出力は t_1 の区間は $1/2X$ 、 t_2 の区間は $2/2X$ 、この時間で入力は無くなるが、蓄積されたデータが t_3 では $1/2X$ 、 t_4 では 0 となる。このように、常に最新のデータから過去2個分のデータをデータが入力される度に平均する方式を移動方式という。

④ 方位 (スイープ) 平均

距離平均された16ビットのデジタル信号は、fluctuationを更に少なくするため、スイープ加算器 (9 sweeps storage) で各レンジビンごとに加算されると同時に1 Sweep data storage memoryに蓄積される。

各スイープのデータの内容を古い順番に、 S_{n-9} 、 S_{n-8} 、 S_{n-7} 、 S_{n-6} 、 S_{n-5} 、 S_{n-4} 、 S_{n-3} 、 S_{n-2} 、 S_{n-1} 、とする。と累積加算器 (ACM1) ではこれらの和が計算される。

$$\left(= \sum_{i=n-9}^{n-1} S_i \right)$$

この内容は、スイープメモリー (RAM1) に蓄積される。 S_n のデータが順次入力されると、 S_{n-9} のデータが (RAM2) から呼出されて (READ) されて加算器 (ACM2) で

$$\sum_{i=n-9}^{n-1} S_i - (S_{n-9}) = \sum_{i=n-8}^{n-1} S_i$$

という結果が得られる。更に加算器 (ACM1) で S_n のデータが加算され

$$\sum_{i=n-8}^{n-1} S_i + S_n = \sum_{i=n-8}^n S_i$$

が得られ、 $1/9$ 倍して $\sum_{i=n-8}^n S_i / 9$ のスイープ平均のデータが得られる。

一方、 S_n の内容は S_{n-9} がREADされた後に、各レンジごとに書込まれ(WRITE)次の9本目が来るまで蓄積されている。

このようにして、順次 $\sum_{i=n-9}^{n-1} S_i$ 及び S_{n-9} のデータがメモリー (RAM2) から呼び出され (READ), $\sum_{i=n-8}^n S_i/9$ のスィープ平均の演算がなされ、 S_n 及び $\sum_{i=n-8}^n S_i$ のデータがメモリー (RAM2) に書込まれる (WRITE)。したがって、このスィープ平均も距離平均同様に単純加算による移動平均化方式をとっている。

したがって、図-2.2.3に示すような入力Xが入ったものとする、スィープ平均された出力は、図-2.2.3のように S_1 では $1/9 X$, S_2 では $2/9 X$, S_3 では $3/9 X$ …… S_9 では $9/9 X$ となり、 S_{10} 後入力波形はなくなるが、累計加算器に蓄積されていたデータが順次 S_{10} では $8/9 X$, S_{11} では $7/9 X$ …… S の17では0になる。

⑤ RANGE CORRECT 機能

既に受信信号をデジタル化して積分処理をすることは述べたが、この信号にデジタル的に RANGE CORRECT すなわち距離減衰補正及び大気的气体による減衰補正を行い、いわゆる等雨量信号を作成する。

Range Correct の補正值は

$$\left\{20 \log \frac{r_0}{r} + 2K(r_0 - r)\right\} \text{dB}$$

の算式により (ただし $r \geq 40 \text{ km}$ は 40 km の値, $r \leq 4 \text{ km}$ は 4 km の値) $r_0 = 40 \text{ km}$ として計算する。

1LSB が 0.078 dB になるように2進信号に変換された信号を64 K ($8,192 \times 8$) Bit の READ ONLY MEMORY (ROM) に 0.25 km ごとに 0 km から 255.75 km までの値を記憶させる。受信信号から距離補正信号を差し引きして等雨量信号を作るときは、各レンジピンごとの ADDRESS 信号によって、その ADDRESS に書込まれた補正值を読み出して演算を行う。 198 km 以降は補正值が 0 dB であるので、ROM には0を書込んである。

⑥ ノンコヒーレント・パルス MTI (Noncoherent Pulse Moving Target Indicator)

降水エコーは、レーダの目標体積中の多数の降水粒子からの反射波の合成である。各降水粒子からの反射波の位相は、粒子個々の運動によって変化するので、その合成である降水エコーの振幅もランダムに変動する。

しかし、その振幅の出現確率は、目標体積の中に十分多数の降水粒子がランダムに分布しておけば、レーレー分布に従うことが導かれている。

$$W(A) = \frac{2A}{P} \exp\left(-\frac{A^2}{P}\right) \cdot A \geq 0 \quad \dots\dots\dots (2.2.3)$$

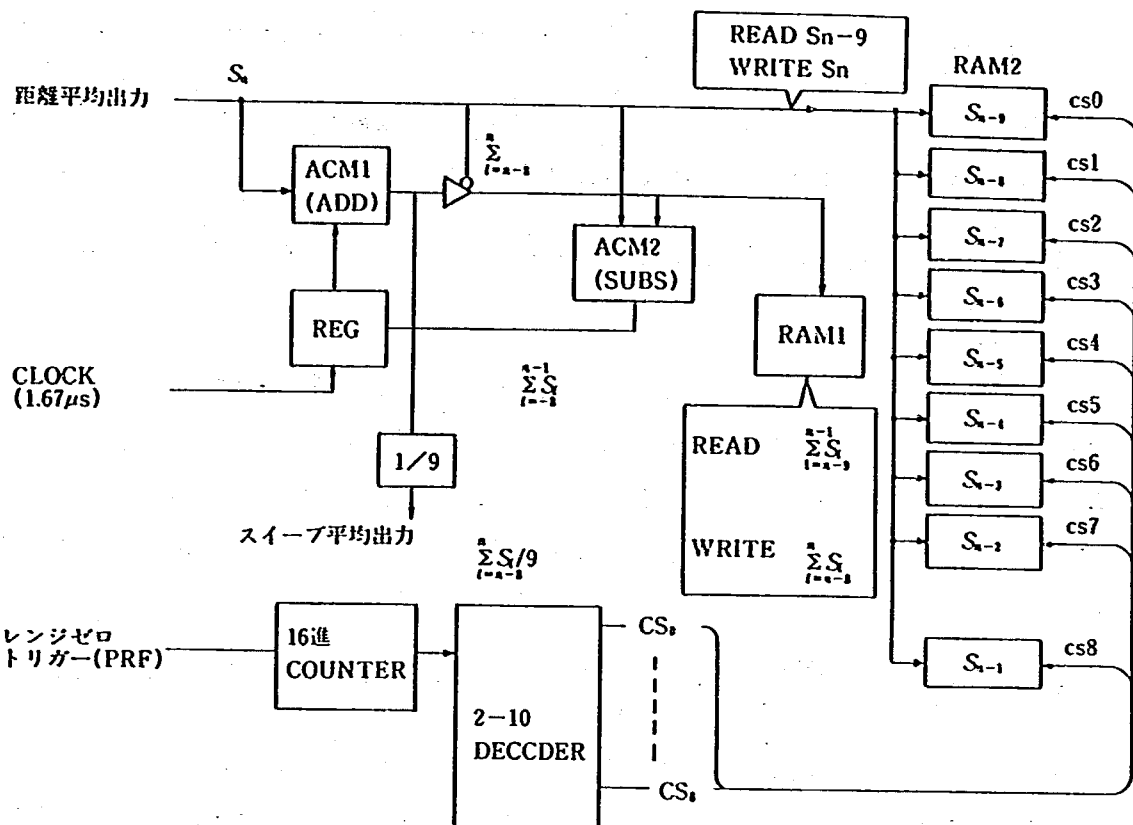
ここに、A； 降水エコーの振幅

$\bar{P}$ ；降水エコーの平均電力

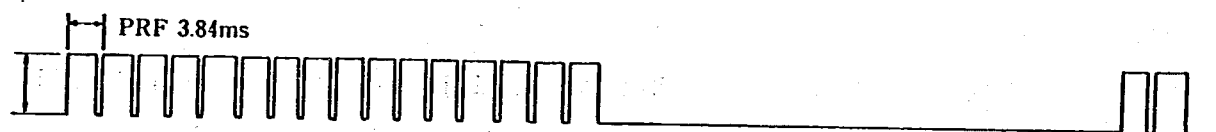
$W(A)$ ；A の確率密度

(2.2.3) 式の確率密度から降水エコーの振幅 A の平均値 $\bar{A}$ と分散 V を計算すると

$$\bar{A} = \int_0^\infty A \cdot W(A) \cdot dA = \frac{1}{2} \sqrt{\pi \bar{P}} \quad \dots\dots\dots (2.2.4)$$



(a) ブロック図



(b) ORG 入力波形

$S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6 S_7 S_8 S_9 S_{10} S_{11} S_{12} S_{13} S_{14} S_{15} S_{16} S_{17} S_{18}$

9スイープ



(c) SWEEP INTEG 出力波形

図-2.2.3 スイープ平均原理図

$$V = \int_0^\infty (A - \bar{A}) \cdot W(A) \cdot dA = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \bar{P} \quad \dots\dots\dots (2.2.5)$$

となり、この分散 V は降水エコーの時間変動成分（交流成分）の実効電力とみなすことができる。この交流電力 V と降水エコーの平均電力 $\bar{P}$ との比 R は (2.2.4) 式から

$$R = \frac{V}{\bar{P}} = 1 - \frac{\pi}{4} = 0.2146 (-6.68 \text{ dB}) \quad \dots\dots\dots (2.2.6)$$

となる。

一方、グラントクラッターは図-2.2.4 に示すように、周波数の低い部分にエネルギーが集中しており、それ以上の周波数ではエネルギーが非常に低下している。すなわち、グラントクラッターの周波数成分は、ほぼ直流項のみであり、一定振幅 G と考えられる。このような地形が同一目標体積の中に共存していると、合成コースの振幅 Y の確率密度は (2.2.3) 式のレーレー分布から (2.2.7) 式のレーレー・ガウス分布に変わることが導かれている。

$$W(Y) = \frac{2Y}{\bar{P}} \exp\left(-\frac{Y^2 + G^2}{\bar{P}}\right) \cdot I_0\left(\frac{2Y \cdot G}{\bar{P}}\right) \quad \dots\dots\dots (2.2.7)$$

ここでは I_0 の変形ベッセル関数である。(2.2.7) 式はグラントクラッターのない場合 ($G=0$) 当然 (2.2.3) 式のレーレー分布となり、グラントクラッターが降水エコーより十分大きいときは、ガウス分布になることが導かれる。このような G による分布の変化に対応して、合成エコー Y の交流電力 V_y と降水エコーの平均電力 $\bar{P}$ との比は、(2.2.6) 式のように一定量 (-6.68 dB) にならず、図-2.2.5 のように -6.68 dB から -3.01 dB まで変化する。

結局、地形と降水が重畳している場合、その合成エコーを HIGH PASS FILTR (MTI FILTER) を通してその交流電力 V_y を取り出して、上記の関係により $3.01 \text{ dB} \sim 6.68 \text{ dB}$ の補正を加えれば、降水エコーの平均電力 $\bar{P}$ が求まる。

本システムにおいて、帰還数による消去性能の検討を行えるようにするため、MTI FILTER として二導帰還形フィルターと一重帰還形フィルターを重ね合せた三重帰還フィルターを採用している。

MTI 部のブロックを図-2.2.6 に示す。

⑦ 強度信号処理系機能付加内容

(a) MTI 処理部平均回路

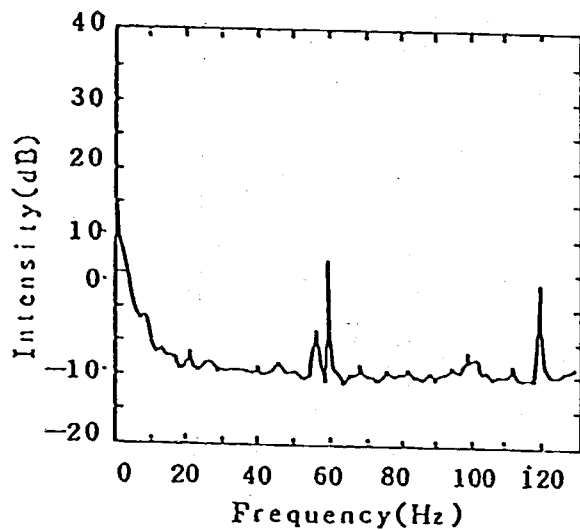
平均回路系を構成する方位メモリユニットの 9 スイープメモリ回路をパルス No1, No2 とで書き込み読み出しアドレスを制御することにより、別々に平均処理が行えるように機能付加をおこなった。図-2.2.7 に 9 スイープメモリの構成概略図を示す。又、図-2.2.8 に方位平均系のブロック図を示す。

尚、方位平均の原理については 2.2.2.(1).④項に述べてある。

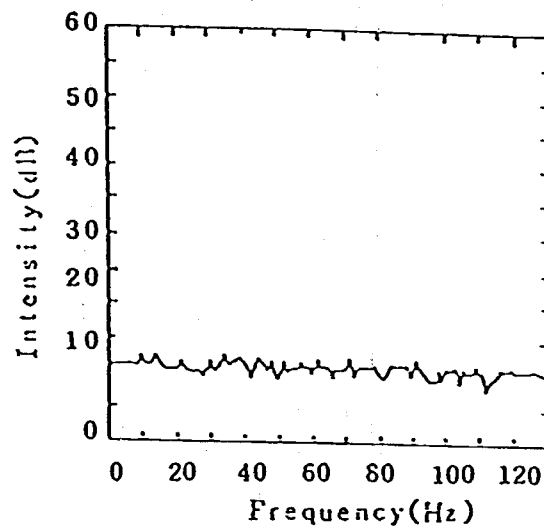
(b) MTI 処理系

パルス No1, パルス No2 系で、別々に MTI 処理が行えるように機能付加を行った。方法としては、平均系と同様にスイープメモリにパルス No1, パルス No2 で別々に書き込み読み出しが行えるようにした。(図-2.2.9)

図-2.2.10 に強度処理信号ブロック図を示す。



(a) グランドクラッター



(b) 降水エコー

図-2.2.4 グランドクラッター及び降水エコーの周波数スペクトラム

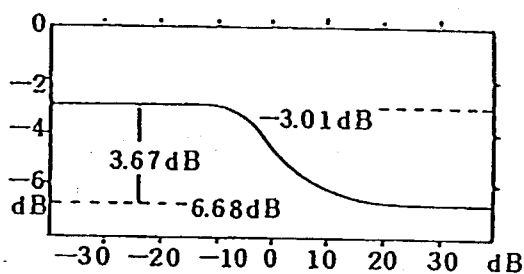


図-2.2.5 降水エコー(P)の地形エコー(G)に対する比率(横座標)による(合成エコーの交流電力 V_y / 降水エコーの平均電力 P)の変化

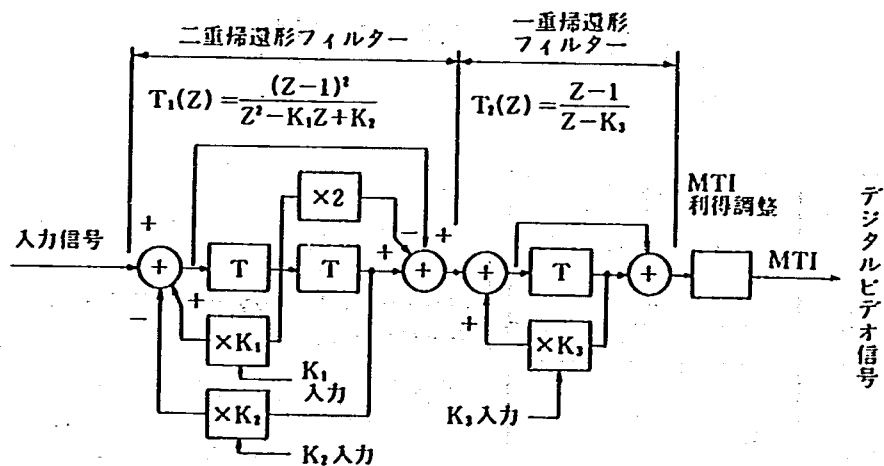


図-2.2.6 MTI 部ブロック図

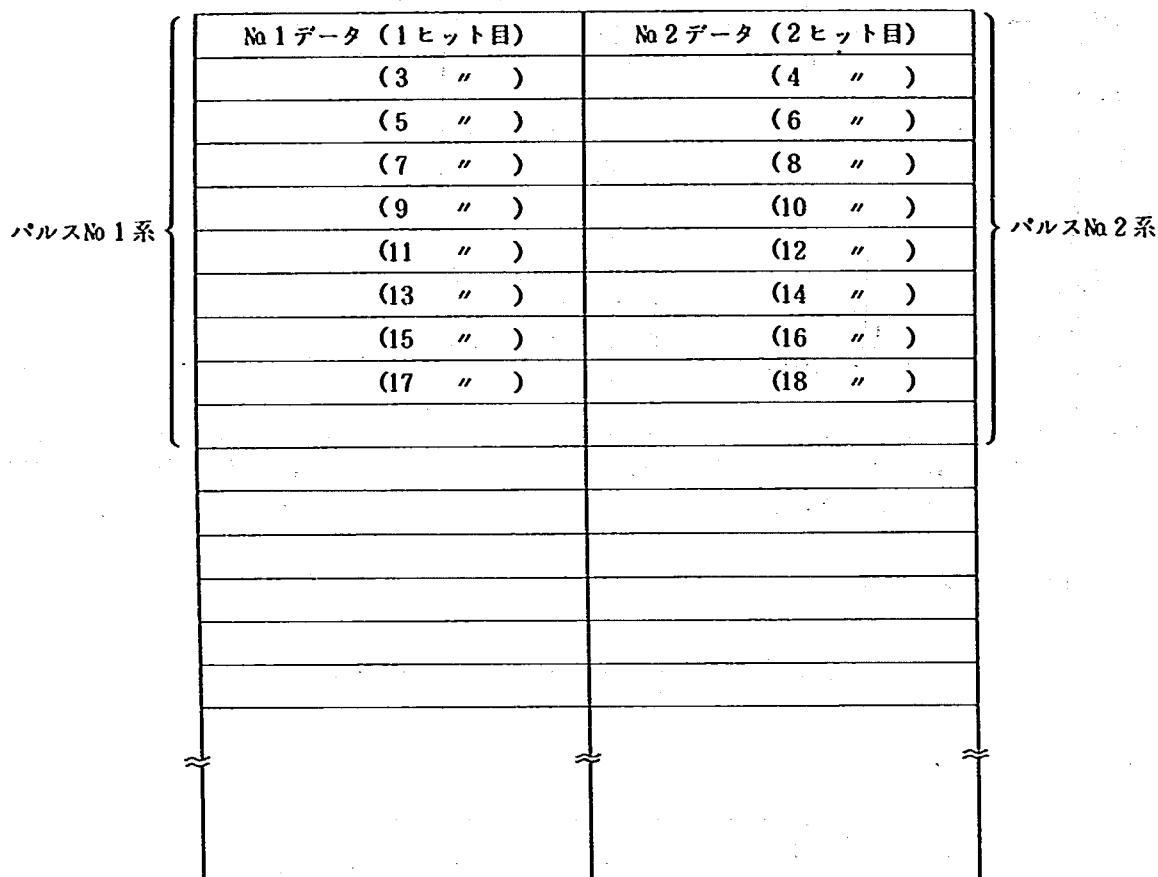
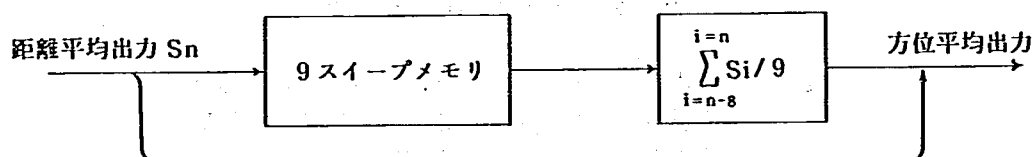


図-2.2.7 メモリ構成概略図



S_n : 現スイープのデータ
 S_i : i スイープ前のデータ

図-2.2.8 方位平均系ブロック図

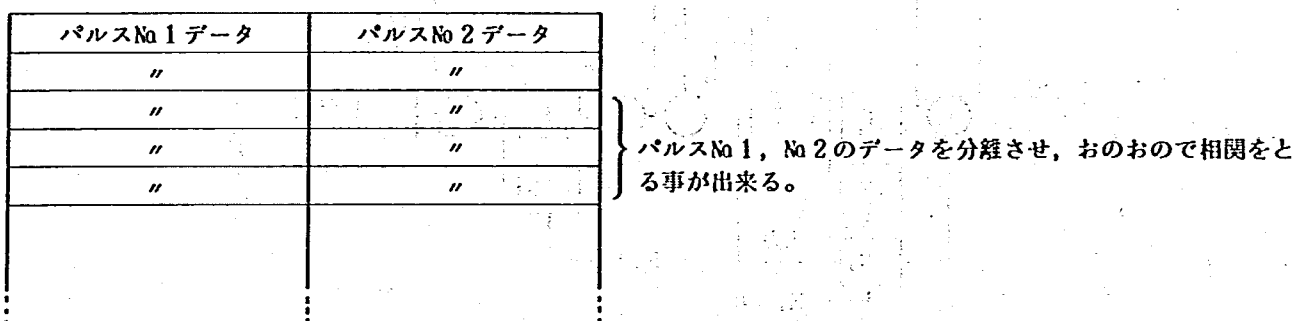
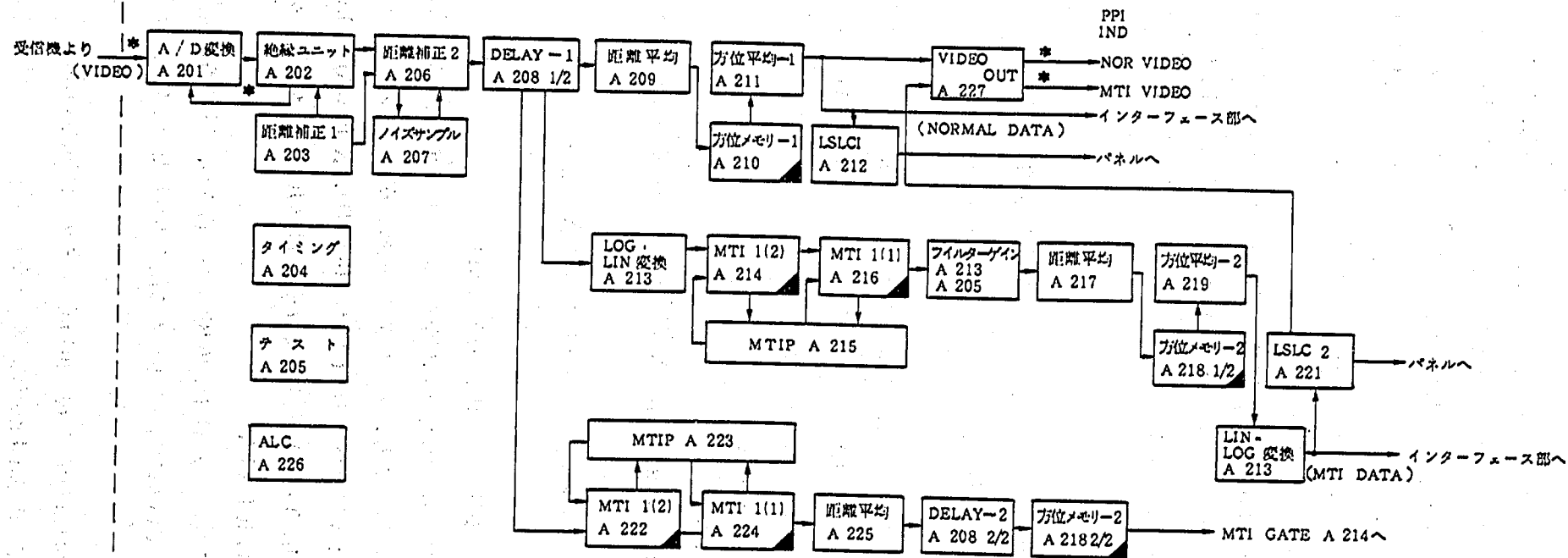


図-2.2.9 機能付加後 MTI 処理



(注) *印はアナログ信号

(注) 印のユニットは昭和63年度機能付加ユニット

図-2.2.10 強度信号処理ブロック図

(2) インターフェース部

バスインターフェース部は、データ収録装置とのインターフェース回路であり、雨量データ信号、レーダサイトの各機器からのアラーム及びステータス情報を、データ収録装置に送り出し、データ収録装置からのコントロール信号を送受信装置及び空中線制御装置に送出する機能を持つ。

バスインターフェース部は、アドレス発生ユニット、割込発生ユニット、BFMU1, BFMU2, IORU, ELVU, RDRINT の各ユニット及びシミュレータユニットより構成され、

① ADRU (アドレス発生ユニット)

データ収録装置からの DATA BUSS 及び WRITE, READ 等の CONTROL BUSS 信号を BUFFER を介して各ユニットに送る機能と各ユニットからの DATA 及び STATUS 情報を BUFFER を介してデータ収録装置に送る機能及び DATA BUSS の 8 ビットをデコードして選択された機器アドレスを各ユニットに出力する機能を持っている。

② INTRU (割込発生ユニット)

データ収録装置が本装置をアクセスする場合には、前述の機器アドレスによって行われるが、本装置がデータ収録装置のサービスを要求するときには、割込によって行われる。この割込みを発生する制御回路が、本ユニットである。

割込みの発生は、空中線が NORTH を通過したときと空中線の角度が $360^\circ/256$ (1 セクター) ごとに行う。

割込発生制御は、割込原因 (NORTH, セクター又はスイッチ) が起ると、データ収録装置に対し、割込信号 (ATN) と割込機器アドレスを送出し、割込原因が何であるかをデータ収録装置に知らせることにより、本装置とデータ収録装置との同期を取る。

③ IORU (I/O READ UNIT)

本ユニットは、送受信装置、空中線装置及び信号処理装置からの各ステータス情報を取り込み、データ収録装置に送る回路である。

各ステータス情報は、データ収録装置の READ DATA 命令を実行することにより、データ収録装置に送られる。

④ BFMU1, BFMU2 (BUFFER MEMORY UNIT)

本ユニットは、MTI 処理装置及び PPP 処理装置からレーダタイミング (500 m 単位) に送られてくる雨量データを 1 セクター分記憶した後、データ収録装置に送る為のバッファメモリである。

メモリは、V DATA 用及び σ^2 DATA 用 (BFMU1), NORMAL DATA 用及び MTI DATA 用 (BFMU2) の 2 組 (各 UNIT) を持っておりそれぞれ $4k \times 16$ Bit のメモリである。(V, σ^2 は 8 Bit DATA, NORMAL, MTI は 10 Bit DATA)

メモリへの書き込み及び読み出しは、10 Bit 同時に行うが、データ収録装置へのデータ転送時は、入出力バスが 8 Bit 構成となっているので、メモリから読み出されたデータ 10 Bit を MSB 側 2 Bit, LSB 側 8 Bit の順に送り出される。

又、強度データは、500 m 単位で (0~40 km) メモリに記憶される。

⑤ RADR INT UNIT (Radar Interface ユニット)

本ユニットは、次の機能を持っている。

- (a) データ収録装置より、各種制御記号を入力し、空中線制御装置、送受信装置に対しての制御信号を出力する。

空中線の回路速度の切換え	6 rpm/1 rpm
送信周波数の切換え	280 pps/1,120 pps
H/V 偏波の切換え	H/V

- (b) 空中線制御装置からの空中線方位角信号 (AZ) から NORTH 信号及び SECTOR 信号を発生する。

⑥ ELVU UNIT (A 114, A 116)

本ユニットは、空中線制御装置により、12 Bit の方位角信号 (Azimuth) (A 116)、及び、仰角信号 (Elevation) (A 114) を取り込み、データ収録装置に送る回路である。

各データは、データ収録装置の Read Date 命令を実行することによりデータ収録装置に送られる。

⑦ SIMU ユニット (シミュレーション)

本ユニットは、空中線方位角信号 (AZ 信号) の内部テスト用として発生するものである。

⑧ BFMU3 UNIT (A 107)

本ユニットは、MTI 処理装置からレーダタイミング (500 m 単位) に送られてくる雨量データを一セクタ分記憶した後、データ処理装置に送るためのバッファメモリである。

メモリーは、パルス№1 の NORMAL DATA 用及び MTI DATA 用、パルス№2 の NORMAL DATA 用及び MTI DATA 用から構成される。メモリーの書き込み及び読みだしは 10 Bit 同時に行うが、データ収録装置へのデータ転送時は、入出力バスが 8 Bit 構成となっているので、メモリーから読み出されたデータ 10 Bit を MSB 側 2 Bit, LSB 側 8 Bit の順に送り出される。

⑨ RADAR INT2 UNIT (A 117)

本ユニットは、方位固定モードでの偏波切り替え信号を発生するものである。偏波の切り替えは 280 PPS 毎に送信偏波、受信偏波の両方を同時に行う。

偏波切り替え信号は表-2.2.1 に示す 10 パターン及び表-2.2.2 に示す 24 パターンがある。このパターンは、データ収録装置から本ユニットに偏波切り替えパターン番号を入力し、選択を行うものである。

⑩ BFMU4 (A 109)

本ユニットは、MTI 処理装置からレーダタイミング (500 m 単位) に送られてくる NORMAL 系雨量データを 1 ヒット毎 (280 PPS) に 0~32 km 分記憶した後、データ処理装置に送るためのバッファメモリである。

メモリーへの書き込み読み出しは 16 Bit 同時に行うが、データ収録装置へのデータ転送時は、入出力バスが 8 Bit 構成となっているのでメモリーから読み出されたデータ 16 Bit を MSB 側 8 Bit, LSB 側 8 Bit の順に転送する。

尚、データ構成は、ステータスデータ 6 Bit 及び雨量データ 10 Bit からなっている。図-2.2.11 にインターフェース部ブロック図を示す。

表-2.2.1 偏波切替えパターン(運用パターン7)

パルスNo	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4		パターン5	
	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	V	H	H	H	H	V
n+2	V	V	H	V	V	V	V	H	V	V
パルスNo	パターン6		パターン7		パターン8		パターン9		パターン10	
	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	H	H	V	V	H	V	V
n+2	V	H	H	H	H	V	V	H	V	V

※ H 水平偏波
V 垂直偏波

表-2.2.2 偏波切替えパターン(運用パターン8)

パルスNo	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4		パターン5		パターン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	パターン7		パターン8		パターン9		パターン10		パターン11		パターン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	H	H	V	H	H	V	V
n+4	V	V	V	V	V	V	V	V	V	H	H	V
パルスNo	パターン13		パターン14		パターン15		パターン16		パターン17		パターン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	H	H	H
n+4	V	H	V	V	V	V	H	V	V	V	V	H
パルスNo	パターン19		パターン20		パターン21		パターン22		パターン23		パターン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

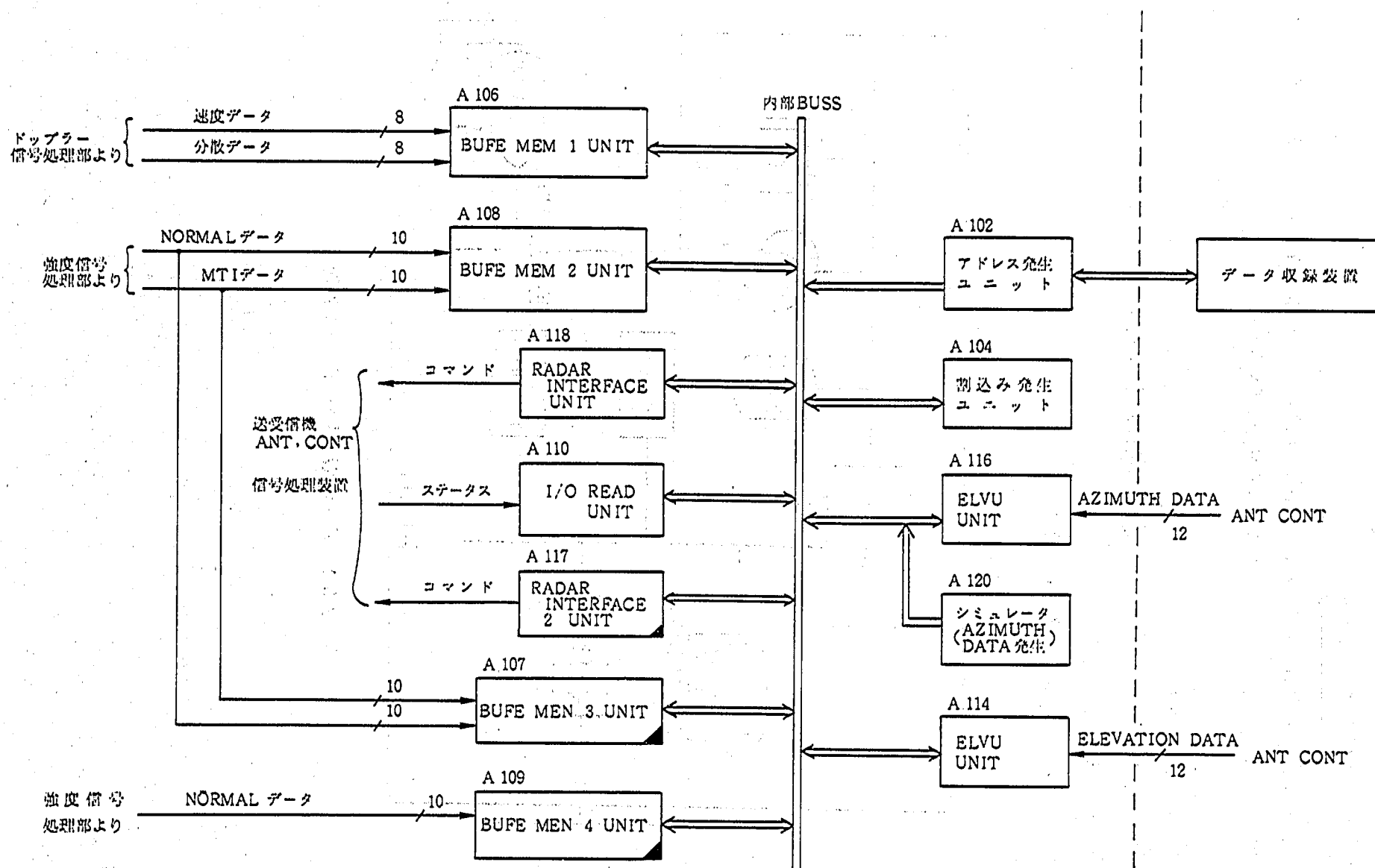


図-2.2.11 インターフェース部ブロック図

2.3 データ収録部の性能と動作原理

データ収録部は、信号処理部でリアルタイムに信号処理されたレーダ情報を磁気テープ装置に収録するとともに、空中線のリモート制御等、レーダシステムの運用管理を行う。

2.3.1 性能（ハードウェア）

データ収録部は、制御用ミニコンピュータ及びその周辺装置から構成される。

データ収録部の系統を図-2.3.1に示す。

各装置のハードウェア性能を表-2.3.1に示す。

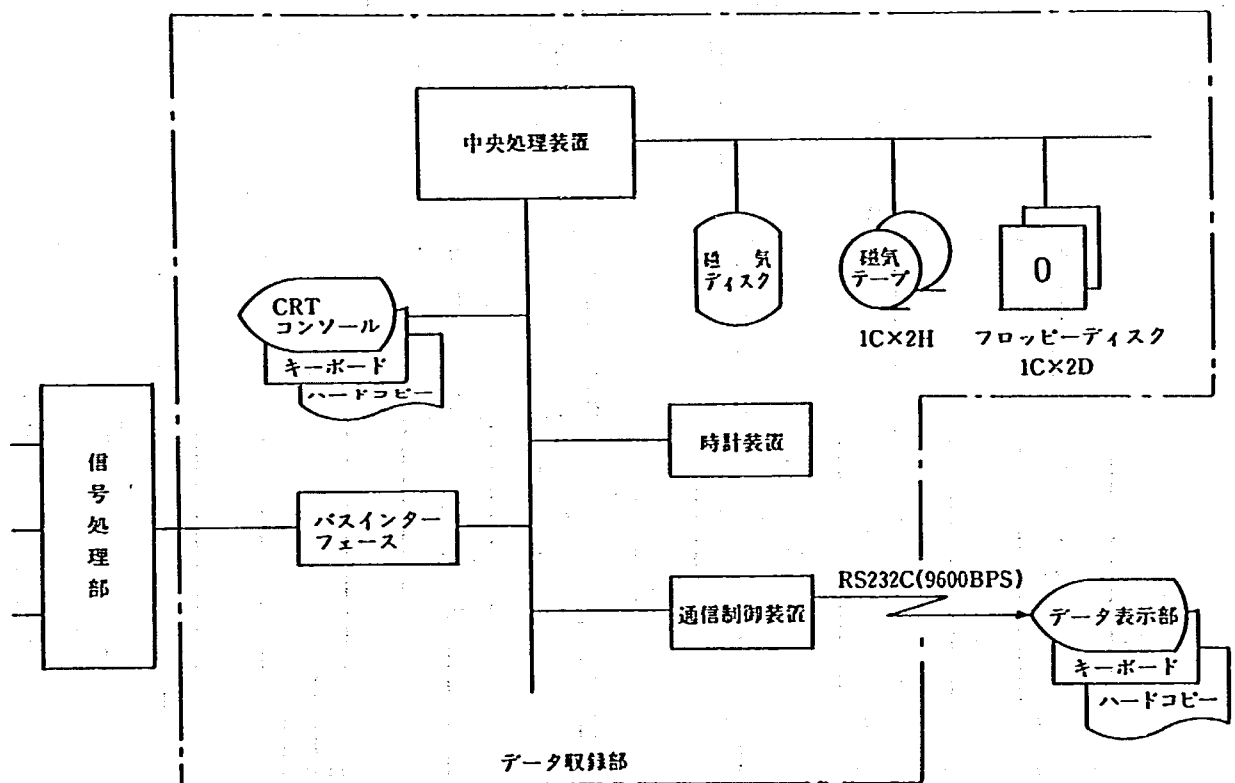


図-2.3.1 データ収録部ハードウェア系統

表-2.3.1 データ収録部の各装置の性能

装 置 名	形 名	性 能
(1) 中 央 処 理 装 置	TOSBAC-NEW · SUPER MICRO7	(i) 主記憶容量 = 512kBYTE (ii) サイクルタイム = 800ns 以下
(2) 磁 気 デ ィ ス ク 装 置	MK 830F	(i) 記憶容量 = 30MBYTE (ii) データ転送速度 = 1.2 MBYTE/sec (iii) 平均アクセスタイム = 48.3msec
(3) 磁 気 テ ー プ 装 置	MTF 1000	(i) 記録密度 = 1,600BPI (ii) データ転送速度 = 72kBYTE/sec (iii) 記録トラック数 = 9 トラック (iv) テープ長 = 2,400ft
(4) フロッピーディスク装置	FD-1024ES	(i) 記憶容量 = 1 MBYTE × 2 (ii) データ転送速度 = 62.5kBYTE/sec (iii) 平均アクセスタイム = 209msec
(5) CRT コ ン ソ ー ル	RS-2000	(i) 表示部 = モノクローム14インチ (ii) 表示文字数 = 1,920文字 (80字 × 24行) (iii) ハードコピー印字速度 = 100字/sec
(6) 時 計 装 置	TIMER	(i) 精 度 = 月差 ± 3sec 以内
(7) バスインターフェース	BDA	(i) 転送方式 = 16ビットパラレル転送 (ii) 転送速度 = 50kBYTE/sec
(8) 通 信 制 御 装 置	MLA-AB	(i) 通信速度 = 9,600BPS (ii) インターフェース = RS232C 仕様

2.3.2 各部の動作原理 (ソフトウェア)

データ収録部のソフトウェア構成は図-2.3.2に示す通り、オペレーティングシステム (POPS-II) と応用プログラムから成っている。

オペレーティングシステムは、

- ① プログラム管理
- ② メモリ管理
- ③ I/O 管理

等の機能を有し、これらの機能を介して応用プログラムの実行を行う。

応用プログラムは信号処理部からリアルタイムに得られるレーダ情報を収録するレーダ信号収録処理部と空中線のリモート制御等システムの運用管理を行うシステム運用管理処理部から成る。

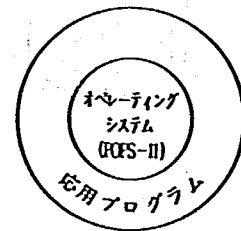


図-2.3.2 データ収録部ソフトウェア構成

さらにレーダ信号収録処理部は、レーダの運用パターンに合わせてそれぞれレーダ信号収録処理部—I（運用パターン1～7）及びレーダ信号収録処理部—II（運用パターン8）に分かれる。

なお、応用プログラムの構成を図-2.3.3に示す。

(1) レーダ信号収録処理部—I（運用パターン1～7）

① レーダ信号入力処理

信号処理部で処理されたレーダ情報を運用モードに応じて表-2.3.2に示す情報を入力する。

② 積算処理

レーダ信号入力処理にて入力された各レーダ情報を運用パターンに応じて表-2.3.3に示すデータを積算する。

③ 加工処理—I

積算処理で積算された各レーダ情報の平均値を算出するとともに、時刻データ及びレーダステータスを付加し、磁気テープに記録するフォーマットへの編集を行う。

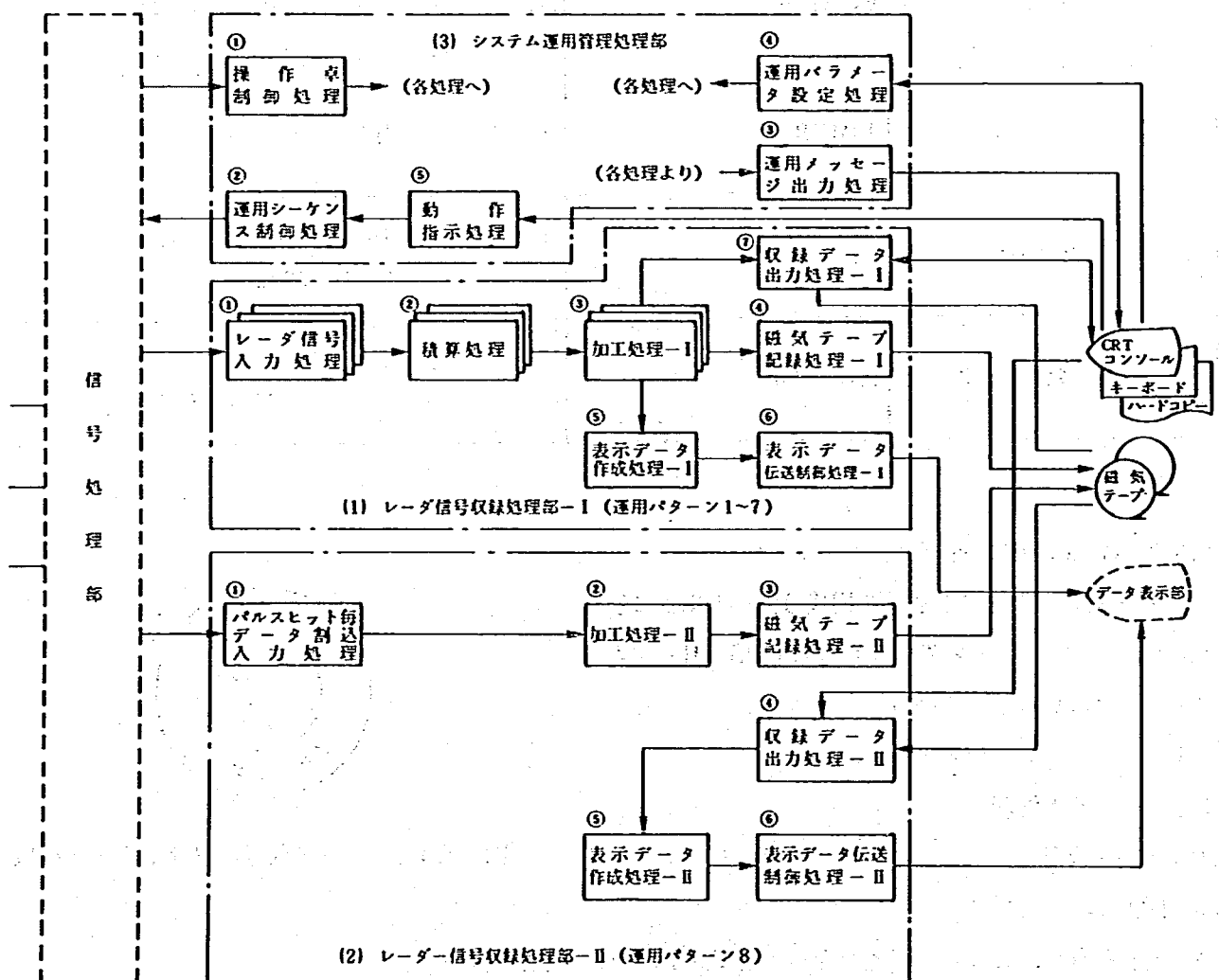


図-2.3.3 応用プログラム構成

表-2.3.2 入力レーダ情報

運用モード	入力レーダ情報
二重偏波モード	1. 水平偏波ノーマルエコー (Z_{HN})
	2. 水平偏波 MTI エコー (Z_{HM})
	3. 垂直偏波ノーマルエコー (Z_{VN})
	4. 垂直偏波 MTI エコー (Z_{VM})
ドップラーモード	1. 移動速度 (V)
	2. 分散 (σ)
	3. 水平偏波ノーマルエコー (Z)

表-2.3.3 積 算 算 デ ー タ

運用パターン	運用モード	積 算 算 デ ー タ
1	二 重 偏 波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM}$ (1 仰角分) の 5 分間積算データ
	ド ッ プ ラ ー	$V \cdot \sigma \cdot Z$ (8 仰角分) の 1 分間データ
2	二 重 偏 波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM}$ (1 仰角分) の 3 分間積算データ
	ド ッ プ ラ ー	$V \cdot \sigma \cdot Z$ (1 仰角分) の 1 分間データ
3	二 重 偏 波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM}$ (4 仰角分) の 1 分間積算データ
4	ド ッ プ ラ ー	$V \cdot \sigma \cdot Z$ (10 仰角分) の 1 分間データ
5	二 重 偏 波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM}$ (1 仰角分) の任意時間積算データ
6	ド ッ プ ラ ー	$V \cdot \sigma \cdot Z$ (1 仰角分) の任意時間積算データ
7	二 重 偏 波	任意セクターの $Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM}$ データ

④ 磁気テープ記録処理-I

加工処理-Iで編集された各レーダ情報を磁気テープに記録する。又、磁気テープ装置の異常検出を行い、必要に応じて磁気テープ装置の自動切替を行う。

⑤ 表示データ作成処理-I

加工処理-Iで編集された各レーダ情報から、データ表示部に伝送する表示データを作成する。

なお、表示データとして、レーダ信号入力処理で入力されたレーダ情報の他に、二重偏波モード時には、 Z_{DR} を作成する。また、各レーダ情報は、段階識別処理を行いデータ圧縮される。

⑥ 表示データ伝送制御処理-I

表示データ作成処理-Iで作成された表示データをデータ表示部にデータ伝送する。

なお、データ伝送は、単方向、無手順にてリアルタイムに行う。

⑦ 収録データ出力処理-I

磁気テープに収録された各種レーダ情報及び加工処理でリアルタイムに処理される各種レーダ情報を CRT コンソールからの指定により取り出し、CRT コンソール上に出力する。なお、出力形式として、極座標 (HEX 表示) 出力及び座標変換した直交座標 (イメージ表示) 出力の 2 つのモードが有る。

その他、磁気テープ装置の動作制御及びデータ表示部へのオフライン磁気テープ再生等を行う。

(2) レーダ信号収録処理部－II（運用パターン 8）

① パルスヒット毎データ割り込み入力処理

信号処理部より、各パルスヒット割り込み毎に表－2.3.4 に示すレーダ情報及び表－2.3.5 に示すステータス情報を同時に入力する。

② 加工処理－II

パルスヒット毎データ割り込み入力処理にて入力されたレーダ情報及びステータス情報に時刻データを付加し、磁気テープに記録するフォーマットの編集を行う。

③ 磁気テープ記録処理－II

加工処理－II で編集されたレーダ情報を高速に磁気テープへ記録する。又、磁気テープ装置の異常検出を行い、必要に応じて磁気テープ装置の自動切替を行う。

④ 収録データ出力処理－II

磁気テープに収録されたレーダ情報を CRT コンソールからの指示により取り出し、CRT コンソールに極座標（HEX 表示）形式で表示出力する。

その他、磁気テープ装置の動作制御及びデータ表示部へのオフライン磁気テープ再生を行う。

⑤ 表示データ作成処理－II

収録データ出力処理－II で磁気テープより取り込まれたレーダ情報をもとにデータ表示部で表示する表示データを作成する。

⑥ 表示データ伝送制御処理－II

表示データ作成処理－II にて作成された表示データをデータ表示部にデータ伝送する。

(3) システム運用管理処理部

① 操作卓制御処理

オペレーションパネルで設定された各種運用情報を取り込み、各処理部に運用パターン及び運用モード等の指示を行う。図－2.3.6 にオペレーションパネルの操作フローを示す。

表－2.3.4 入力レーダ情報

No	入力レーダ情報	備 考
1.	Z H H	水平偏波送信・水平偏波受信データ
2.	Z H V	水平偏波送信・垂直偏波受信データ
3.	Z V H	垂直偏波送信・水平偏波受信データ
4.	Z V V	垂直偏波送信・垂直偏波受信データ

表－2.3.5 入力ステータス情報

No	ステータス情報	備 考
1.	ハードウェアアラーム	信号処理装置 異常
2.	送信 可 / 不可	送信 異常
3.	受信 可 / 不可	受信 異常
4.	パルス番号	パルス番号（1 → 4）

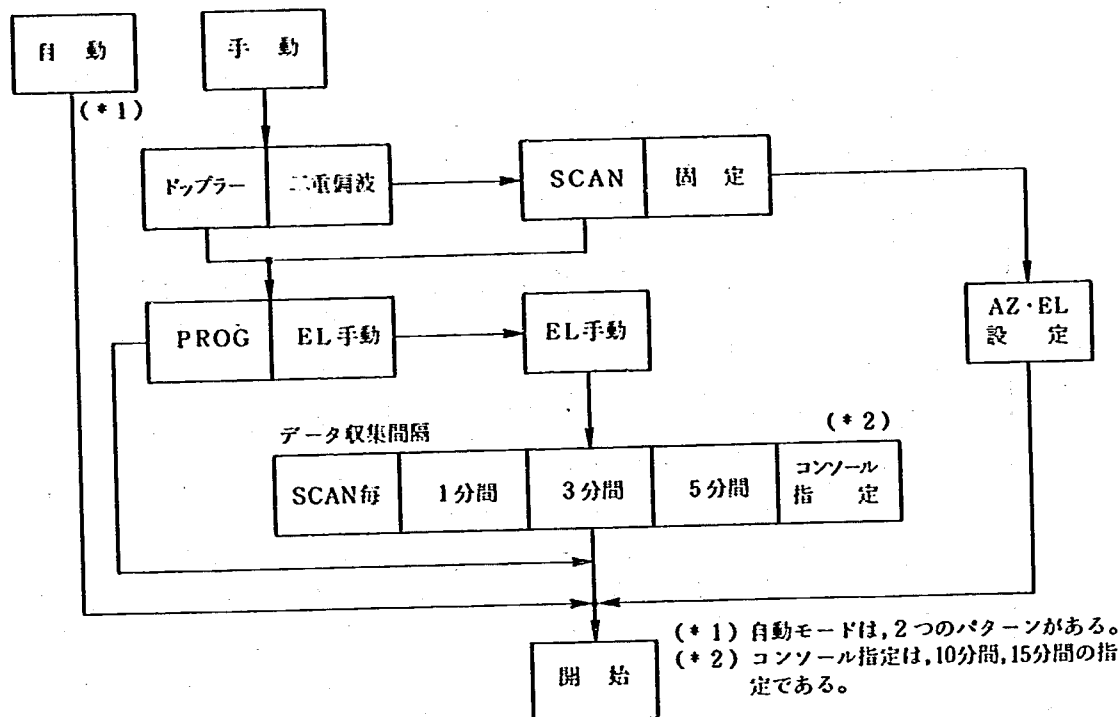


図-2.3.6 オペレーションパネルの操作フロー

② 運用シーケンス制御処理

操作卓処理より指示された表-2.3.6に示す運用パターンに従い、空中線のリモート制御及び運用モード、データ収集間隔等の切替制御を行う。

③ 運用メッセージ出力処理

システムスタートメッセージ及び磁気テープ記録メッセージ等、システムの動作に関するメッセージあるいは空中線回路数異常メッセージ、各装置異常メッセージ等システムの異常に関するメッセージをCRTコンソール上に出力する。

④ 運用パラメータ設定処理

表-2.3.7に示すようなシステム運用に必要な各種パラメータの変更及び表示を行う。運用パラメータの変更及び表示はすべてCRTコンソールを介して行う。

⑤ 動作指示処理

各運用パターン毎に設定された空中線制御情報及び運用モードあるいは、データ収集間隔等の切替情報の変更及び設定情報の表示を行う。各情報の変更及び表示はすべてCRTコンソールを介して行う。

表-2.3.6 二重偏波・ドップラレーダの運用パターン

運用 パターン	モード 切換方法	運用モード	1サイクル の時間(分)	偏波切換間隔	空中線 回転数	仰角の設定法 仰角の設定数	データ平均時間	収録データ	表示データ
1	自動	二重偏波	(5)	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	5分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
		ドップラ	(8)	水平のみ	1rpm	自動, 8仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (8仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
2	自動	二重偏波	(3)	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	3分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
		ドップラ	(1)	水平のみ	1rpm	自動, 1仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (1仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
3	手動	二重偏波	5	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 4仰角	1分間平均	Z_{HH}, Z_{VV} (4仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
4	手動	ドップラ	10	水平のみ	1rpm	自動, 8仰角	1分間平均	V, σ_v, Z_{HH} (8仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
5	手動	二重偏波	任意	SCAN毎(10S)	6rpm	自動, 1仰角	スキャン, 1分 3分, 5分, 10分, 15分	Z_{HH}, Z_{VV} (1仰角分)	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
6	手動	ドップラ	任意	水平のみ	1rpm	手動, 1仰角	スキャン, 1分 3分, 5分, 10分, 15分	V, σ_v, Z_{HH} (1仰角分)	V, σ_v, Z_{HH}
⑦ (改造前)	手動	二重偏波	任意	11パルス毎 (0.04 S)	一方向 固定	手動, 1仰角	9パルス平均	Z_{HH}, Z_{VV}	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
7 (改造後)	手動	二重偏波	任意	1パルス毎 (0.0035 S)	一方向 固定	手動, 1仰角	9パルス平均	$Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VV}, Z_{VH}$ のうちの任意の2つ	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}
8 (改造後)	手動	二重偏波	任意	1パルス毎 (0.0035 S)	一方向 固定	手動, 1仰角	1パルス平均	$Z_{HH}, Z_{HV}, Z_{VV}, Z_{VH}$	Z_{HH}, Z_{VV}, Z_{DR}

表-2.3.7 運用パラメータ

	運 用 パ ラ メ ー タ	内 容
1	運用パラメータ表示	運用パラメータの各設定値がCRTコンソール上に表示される。
2	自動モード選択	自動モード(1)あるいは、自動モード(2)のいずれかを選択する。
3	データ収集間隔選択	コンソール指定での10分あるいは15分のいずれかを選択する。
4	MTレコードフラグ選択	磁気テープの記録を行うか、行わないかの選択をする。
5	メッセージ出力フラグ選択	CRTコンソールへのメッセージ出力を行うか、行わないかの選択をする。
6	アジマスブランキングデータ設定	アジマスブランキングスタート及びアジマスブランキングエンドのデータを設定する。
7	エレベーションデータ設定	空中線の仰角データを各運用パターン毎に設定する。
8	収録データ・イメージ出力パラメータ設定	収録データのイメージ出力範囲を設定する。
9	表示データ伝送フラグ選択	データ表示部へ表示データを伝送するか、しないかの選択を行う。
10	偏波切替えパターン選択 (運用パターン7)	運用パターン7時の偏波切替えパターン (10パターン) の選択を行う。(注) 表-2.3.8 参照
11	偏波切替えパターン選択 (運用パターン8)	運用パターン8時の偏波切替えパターン (24パターン) の選択を行う。(注) 表-2.3.9 参照

表-2.3.8 偏波切替パターン (運用パターン7)

パルスNo	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4		パターン5	
	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	V	H	H	H	H	V
n+2	V	V	H	V	V	V	V	H	V	V
パルスNo	パターン6		パターン7		パターン8		パターン9		パターン10	
	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	H	H	V	V	H	V	V
n+2	V	H	H	H	H	V	V	H	V	V

* H 水平偏波
V 垂直偏波

表-2.3.9 偏波切替えパターン (運用パターン8)

パルスNo	パターン1		パターン2		パターン3		パターン4		パターン5		パターン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	パターン7		パターン8		パターン9		パターン10		パターン11		パターン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	H	H	V	H	H	V	V
n+4	V	V	V	V	V	V	V	V	V	H	H	V
パルスNo	パターン13		パターン14		パターン15		パターン16		パターン17		パターン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	H	H	H
n+4	V	H	V	V	V	V	H	V	V	V	V	H
パルスNo	パターン19		パターン20		パターン21		パターン22		パターン23		パターン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

2.4 データ表示部の性能と動作原理

データ表示部はデータ収録部で収録・加工されたレーダ情報をリアルタイム又は、オフライン磁気テープ再生で受信し、PPI 画像処理、RSI (Range Sweep Indicator) 画像処理を行い、カラーグラフィックディスプレイに表示する。

2.4.1 性能 (ハードウェア)

データ表示部は、中央処理装置に汎用のワークステーションを使用し、16 色カラーコピーの可能なカラーハードコピー装置及びデータ収録部とのデータ伝送に使用する変復調装置 (ベースバンドモデム) から構成される。

データ表示部の系統を図-2.4.1 に示す。

中央処理装置の性能は表-2.4.1 に示すとおりである。

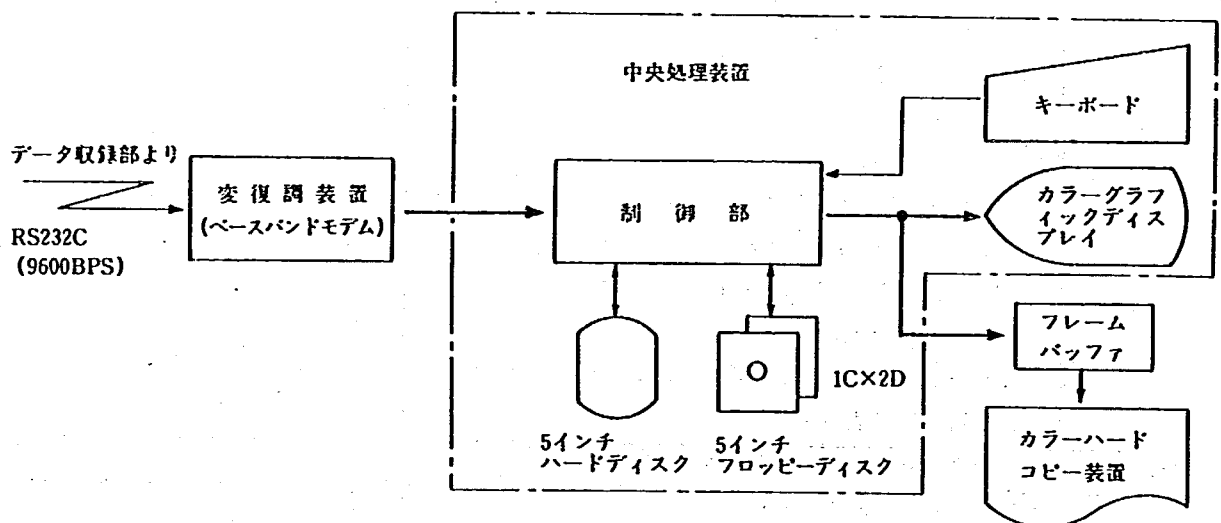


図-2.4.1 データ表示部系統図

2.4.2 各部の動作原理 (ソフトウェア)

データ表示部のソフトウェア構成は図-2.4.2 に示す通り、マルチタスク・リアルタイム制御の可能なオペレーティングシステム (日本語コンカレント DOS 286) とアプリケーションプログラムとから構成される。

オペレーティングシステムは、

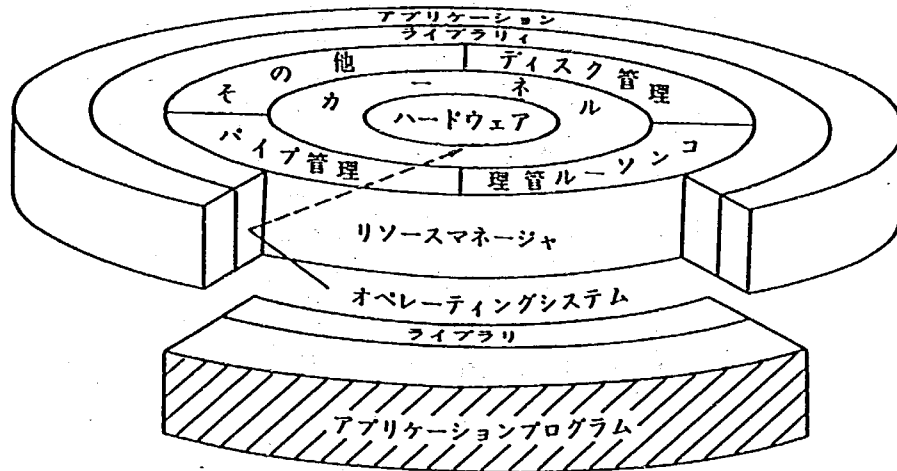
- ① プログラム管理
- ② メモリ管理
- ③ I/O 管理

等の機能を有し、これらの機能を介して、アプリケーションプログラムの実行を行う。

アプリケーションプログラムは、図-2.4.3 に示す通り、レーダ情報を表示する為のオンラインデータ入力

表-2.4.1 中央処理装置の性能

CPU	i80286-8 (8 MHz) i80287-8 (高速演算プロセッサ 8 MHz)	
主メモリ	パリティ付	
IPL ROM	32kB	BIOS, クイックテストを含む。
ビデオ RAM	テキスト用 4kB グラフィックス用 384kB ※拡張グラフィックカード追加によりグラフィックス最大 512kB	
漢字 ROM	24×24ドット 第1水準 新 JIS フォント 16×16ドット 第1, 第2水準	24×24ドット 第2水準
外字用 RAM	24×24ドットで最大 256字	
外部記憶装置	5 インチ FDD (1.2 MB) × 2 5 インチ HDD (20 MB) × 1	本体的に 5 インチ FDD × 2, 5 インチ HDD まで内蔵。
表示制御	テキスト表示: 英数カナ 80字×25行 漢 字 40字×25行 カラー 8色 グラフィックス表示: 960×700ドット表示モード 漢字は 24×24ドット表示 640×500ドット表示モード 漢字は 16×16ドット表示 カラー 8色, ただし拡張グラフィックカード追加により 256色中16色表示可	
内蔵機能	カレンダークロック (バッテリーバックアップ付)	
標準 インタフェース	キーボードインタフェース マウスインタフェース プリンタインタフェース RS-232Cインタフェース ディスプレイインタフェース	セントロニクス準拠 非同期 9,600 bps カラー用
電 源	AC 100V 50/60Hz 2.2 A (定常) 約 150 W	
環境条件	温度 5℃~35℃ 湿度 30%~80%	
外形寸法	本体: 470 (幅) × 400 (奥行) × 165 (高さ) mm 8 インチフロッピーディスクユニット: 470 (幅) × 400 (奥行) × 110 (高さ) mm	



- カーネル プロセスやメモリを管理し、プロセス間通信やマルチタスク環境での運用を容易にし、メモリ管理装置に従った特別なルーチンやタイマドライバを制御します。
- リソースマネージャ 各々のマネージャモジュールを持って資源を制御し、各々の装置の種類に対応したデバイスドライバの標準的なインタフェースを用意しています。

図-2.4.2 データ表示部のソフトウェア構成

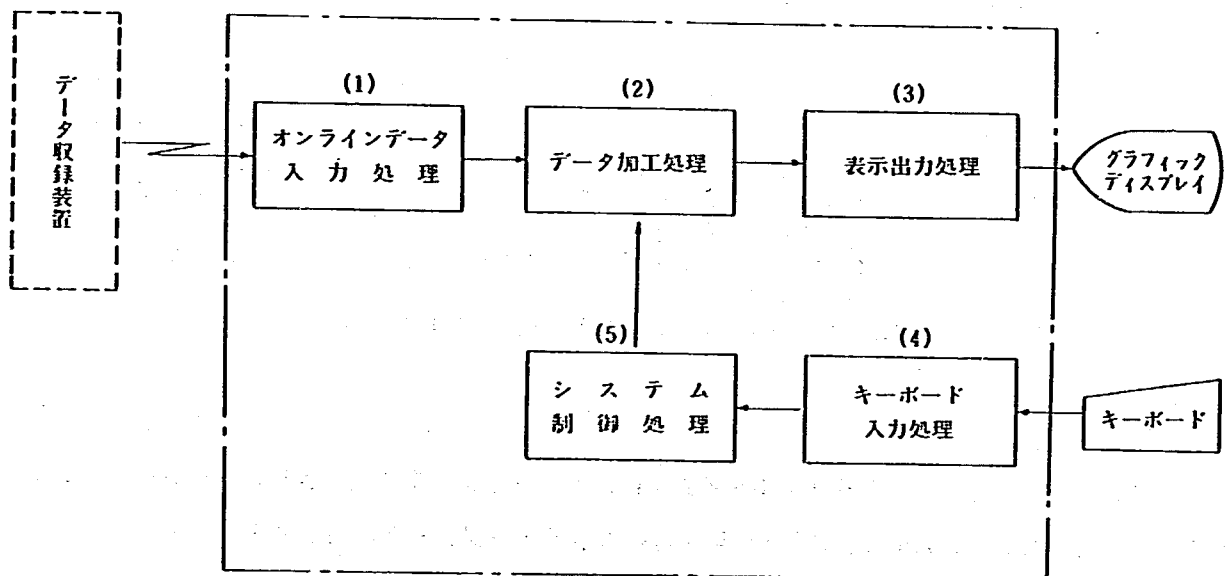


図-2.4.3 アプリケーションプログラム構成

処理、データ加工処理、表示出力処理及び表示画面の切換等、システムの動作を制御する為のキーボード入力処理、システム制御処理から構成される。

(1) オンラインデータ入力処理

データ収録部で収集加工された表-2.4.2に示すレーダー情報をリアルタイム又は、オフライン再生で受信する。また、受信データの誤り検出を行い、異常時にはディスプレイにメッセージを表示する。

なお、入力データは、すべて段階識別処理後の極座標形式で入力する。

表-2.4.2 受信データ

運用モード	受信データ	受信データサイズ
(1) 二重偏波モード	1. 水平偏波ノーマルエコー (Z_{HN}) * ¹	10,284 BYTE
	2. 水平偏波 MTI エコー (Z_{HM})	"
	3. 垂直偏波ノーマルエコー (Z_{VN}) * ²	"
	4. 垂直偏波 MTI エコー (Z_{VM})	"
	5. ノーマルエコー Z_{DR} (Z_{DRN}) * ³	"
	6. MTI エコー Z_{DR} (Z_{DRM})	"
(2) ドップラーモード	1. 移動速度 (V)	"
	2. 分散 (σ)	"
	3. 水平偏波ノーマルエコー (Z)	"

* 運用パターン8の場合を含む。

表-2.4.3 画像処理

運用パターン	画像処理	表示イメージ
運用パターン 1	PPI 画像処理 * ¹	ビットマップ表示 * ³
" 2	"	"
" 3	"	"
" 4	"	"
" 5	"	"
" 6	"	"
" 7	RSI 画像処理 * ²	"
" 8	"	"

*¹ PPI 画像処理：極座標形式のデータより表示画素（ドット）に対応した直交座標形式のデータに座標変換する。*² RSI 画像処理：任意セクターのレーダ情報を取り出し、各スィープ v_s レンジの表示イメージに表示加工する。*³ ビットマップ表示：ビットマップの表示方法を表-2.4.4に示す。

(2) データ加工処理

オンラインデータ入力処理によりリアルタイム又は、オフライン再生で入力された各種レーダ情報を、運用パターンに応じた表-2.4.3に示す画像処理を行い表示イメージデータに加工する。

(3) 表示出力処理

データ加工処理で表示イメージデータに加工された各種レーダ情報をグラフィックディスプレイ装置にグラフィック表示する。なお、表示画面は運用パターンに応じてキーボードより選択する。また、選択された表示画面は最新情報をデータ収録部より受信の都度自動更新する。各運用パターンの表示画面を表-2.4.5に示す。

(4) キーボード入力処理

データ表示部の運用状態に応じ、キーボードで選択された要求情報を入力する。

(5) システム制御処理

表-2.4.6に示すようにキーボード入力処理で入力された要求情報に従い各処理部に動作を指示する。

表-2.4.4 ビットマップの表示方法

画 像 処 理	表 示 範 囲	加 工 分 解 能
PPI 画 像 処 理	400ドット×400ドット (80km×80km)	2×2ドット
RSI 画 像 処 理	400ドット×256ドット (40km×256スweep)	2×1ドット

表-2.4.5 表 示 画 面

運用パターン	運用モード	表 示 画 面	更 新 周 期
1	二重偏波 ドップラー	$Z_{HN} \cdot H_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$ $V \cdot \sigma \cdot Z$	15分
2	二重偏波 ドップラー	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$ $V \cdot \sigma \cdot Z$	5分
3	二重偏波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$	5分
4	ドップラー	$V \cdot \sigma \cdot Z$	10分
5	二重偏波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$	3, 5, 10, 15分選択
6	ドップラー	$V \cdot \sigma \cdot Z$	3, 5, 10, 15分選択
7	二重偏波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$	2分20秒
8	二重偏波	$Z_{HN} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{DRN}$	3分*1

* オフライン再生表示

表-2.4.6 キーの機能

キ ー (要求情報)	機 能 (指示動作)
(BREAK)	実行 (オンライン表示モード) を終了, 初期設定画面のメニューに戻る。
(SETUP/HELP)	受信した入力情報をすべて自動更新表示する。
(PF1)	Z_{HN} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF2)	Z_{HM} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF3)	Z_{VN} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF4)	Z_{VM} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF5)	Z_{DRN} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF6)	Z_{DRM} 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF7)	V 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF8)	σ 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF9)	Z 画面を表示する。新しい情報を入力すると自動更新する。
(PF10)	画面スケールのON/OFFを行う。
(EXEC)	現在表示中の表示画面をホールドする。

2.5 久留米での設置工事について

2.5.1 概 要

レーダサイトは、筑後川ダム統合管理事務所本館の屋上(3階)に設けられている。レーダ機器は、昭和63年5月に設置された。

久留米での設置工事の主要なものは次の通りである。

- (1) 電源線及び電話線の引き込み
- (2) 空中線及びシェルタ設置
- (3) ケーブル布設

2.5.2 設置工事状況

筑後川ダム統合管理事務所での設置工事状況を以下の図面に示す。

図-2.5.1 レーダサイト現場案内図

図-2.5.2 屋上平面図

図-2.5.3 A-A 天視図

図-2.5.4 導波管ルート図

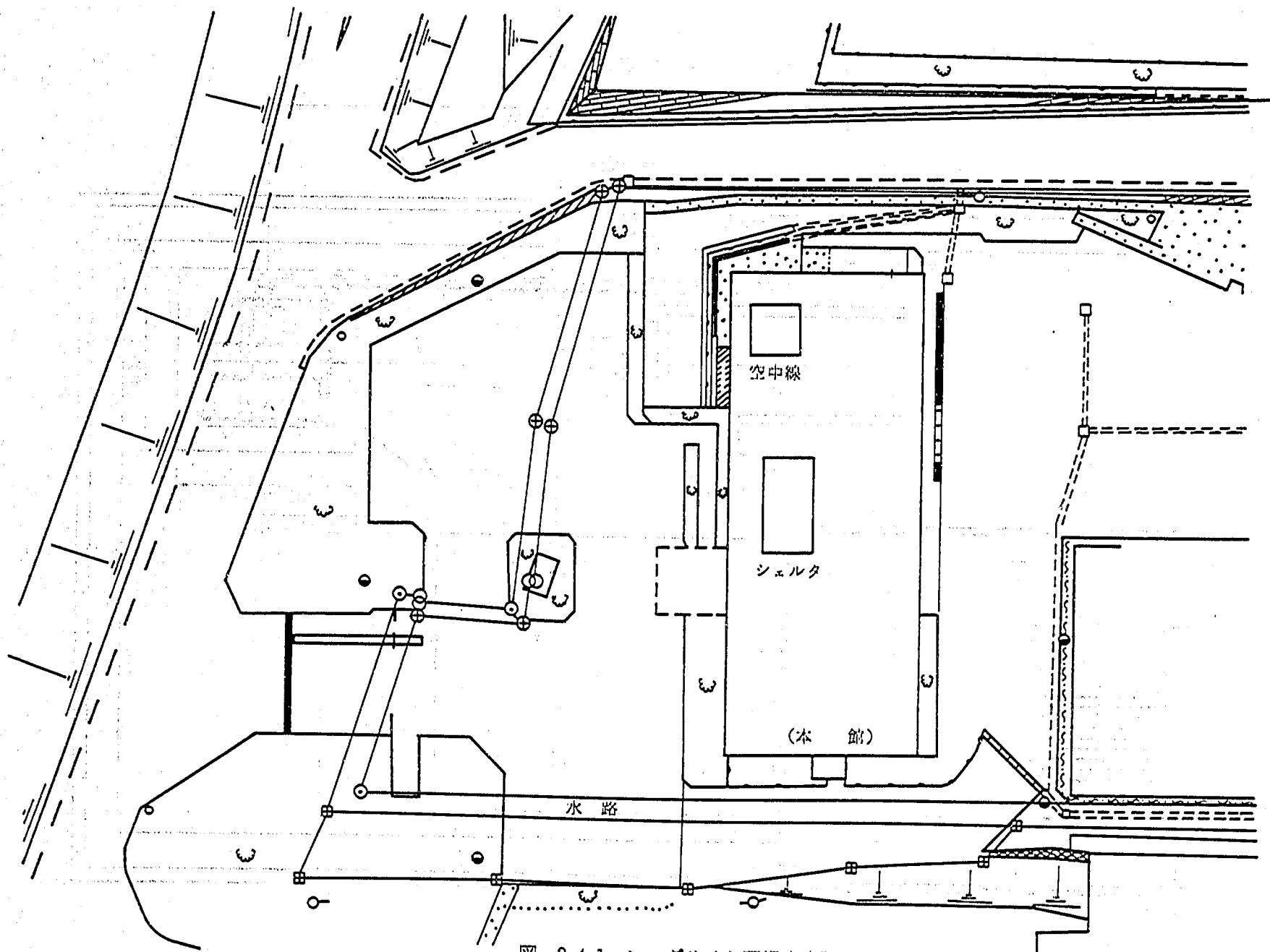
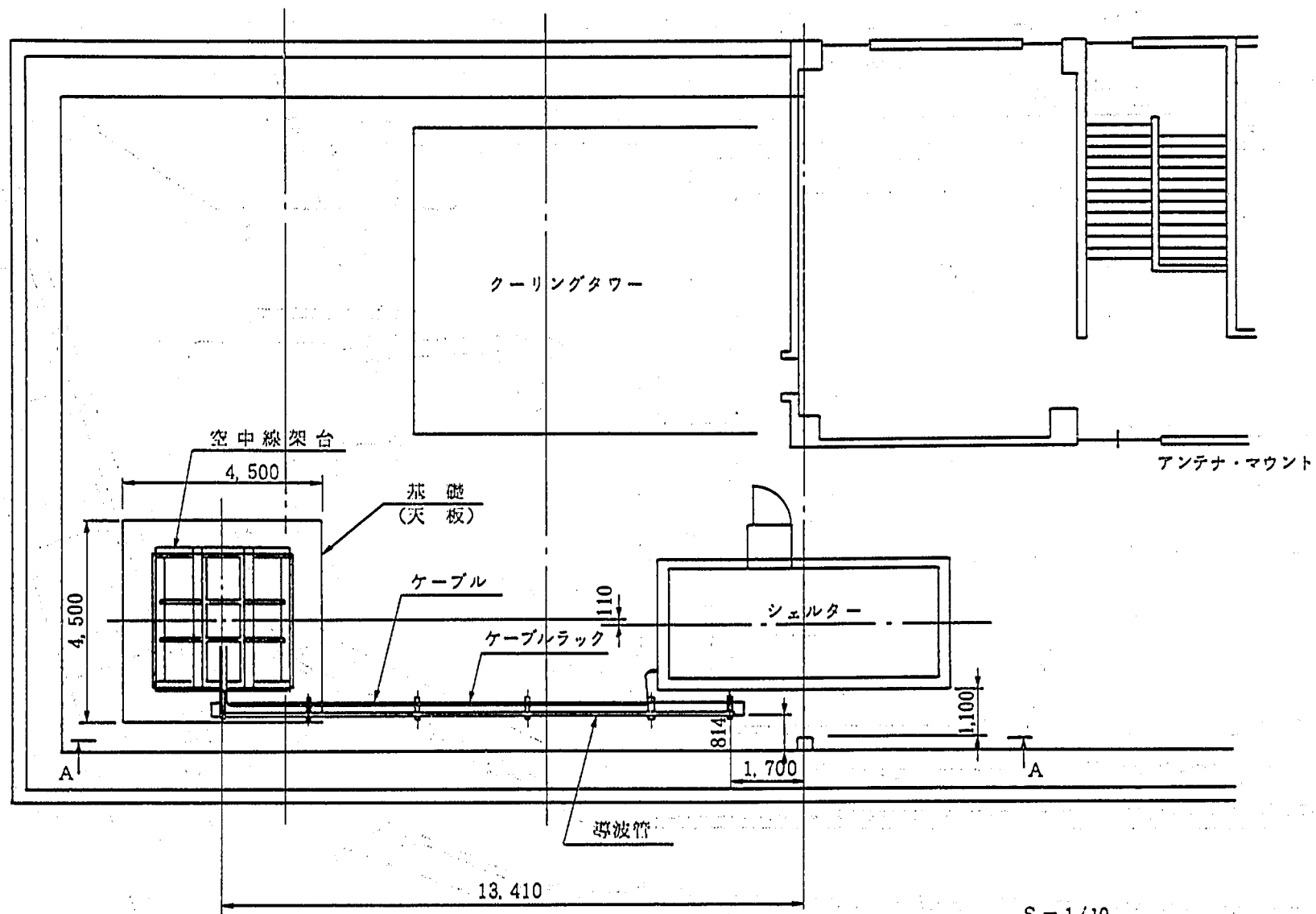
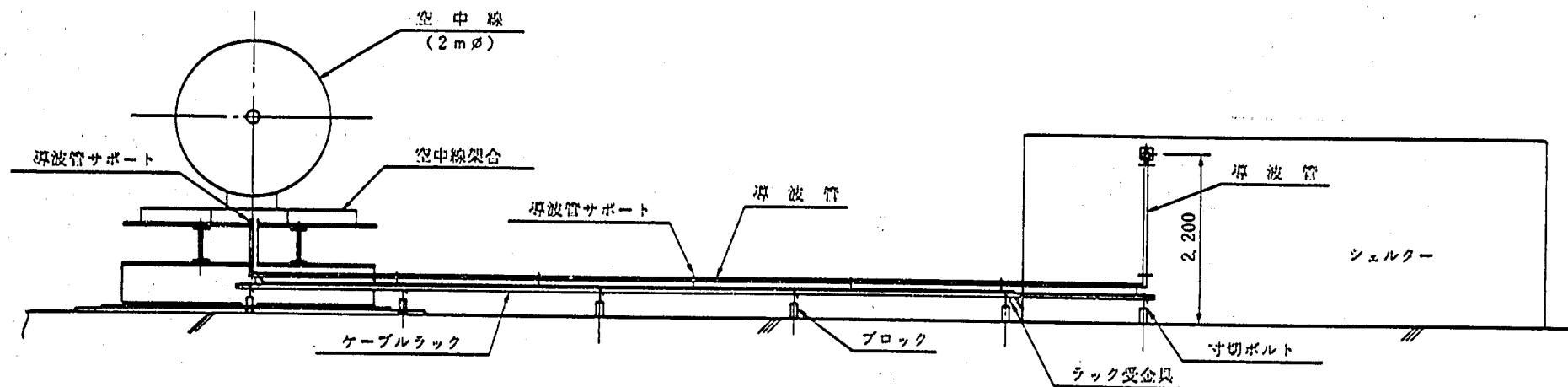


図-2.4.1 レーダサイト現場案内図



S = 1/10

図-2.5.2 屋上平面図



S-1/5

図-2.5.3 A-A天視図

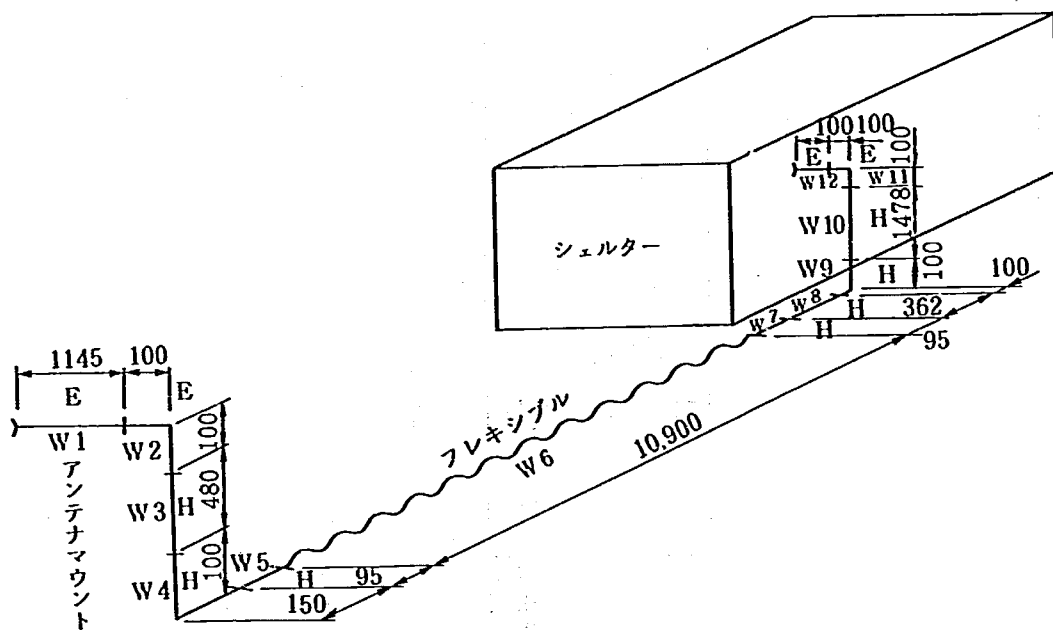


図-2.5.4 導波管ルート図

2.6 ま と め

本章は、昭和63年度に改造したDNDレーダの結果及び平成元年度の改造予定をまとめたものである。主な内容は次のとおりである。

- ① 運用パターン7として、1方向固定観測でパルス毎に偏波切り替えし、9パルス平均データを収録できる。
- ② 運用パターン8として、1方向固定観測でパルス毎に偏波切り替えし、パルス毎データを収録できる。
- ③ 運用パターン8において、送信偏波と受信偏波を任意に選択できるので雨滴等の降水粒子の形状によって起きると言われている散乱マトリックス（交差偏波成分）を観測できる。

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

3.1.1 はじめに

降雪粒子が電波の伝搬に与える影響は、通信に使用されるミリ波・マイクロ波帯の周波数域を対象として電電公社電気通信研究所や北海道大学応用電気研究所等で1970年頃に種々の調査・研究が行われた。その結果は同様の周波数を持つ気象レーダに応用が可能であり、本調査では気象レーダに用いられる5.7 cm 波の反射・減衰に対する特性を中心として、降雪粒子のレーダ観測に与える影響について理論のまとめとモデル計算、さらに実データを用いての検証等を行った。

3.1.2 電波減衰の理論の検討

降雪による電波の減衰を検討しモデル計算に行うに当たって、既往の文献等によりその理論をまとめ、必要な知識の整理を行った。

(1) 減衰定数の定義と計算式

強度 P のレーダ波が降水粒子による散乱・吸収を受け、距離 dx 進行する間に $-dp$ だけ減衰したとする。距離あたりの減衰量 $-dp/dx$ は一般に電波の強度に比例し、次の型に記述することができる。

$$\frac{dp}{dx} = -kP \quad \text{..... (3.1.1)}$$

k は一般に場所によって異なる値をとる。従って (3.1.1) 式より、

$$\ln \frac{P}{P_0} = - \int_0^x k dx'$$

P_0 は $x=0$ における電波強度である。これにより減衰比 P/P_0 の dB 表示は次の式で与えられる。

$$10 \log \frac{P}{P_0} = - \int_0^x 4.343 k dx' \quad \text{..... (3.1.2)}$$

降雨減衰の場合、通常 (3.1.2) 式中の $4.343 k$ ($\equiv K_R$) が減衰定数と呼ばれ、距離の単位は km とされることが多い。従って K_R の一般的な単位は dB/km である。

(3.1.1) 式における係数 k と1個の降水粒子の全吸収断面積 (散乱の断面積と吸収の断面積を合わせたもの) Q_t との間に次の関係が成り立つ。

$$k = \int_0^\infty N(D) Q_t(D) dD \quad \text{..... (3.1.3)}$$

$N(D)$ は粒子の空間粒度分布であり、単位体積中の粒径 D_1 以上、 D_2 以下の粒子の数が次式で計算されるような関数である。

$$N(D_1 < D < D_2) = \int_{D_1}^{D_2} N(D) dD$$

降水粒子では粒度分布を $N(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$ で近似できることが知られており、Marshall と Palmar によれば雨に対する N_0 , λ の平均的な値は次の通りである。

$$N_0 = 8,400 \text{ mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$$

$$\lambda = 4.1 R^{-0.21} \text{ mm}^{-1}$$

R : 降水強度 (mm/h)

一方 Q_t は断面積の名の通り面積の次元を持った量であり、 cm^2 の単位がよく使われている。

$N(D)$ に対して $\text{mm}^{-1} \text{ m}^{-3}$, Q_t に対して cm^2 , 粒径 D に対して mm の各単位を用いると、

$$\begin{aligned} k &= 10^{-4} \int_0^{\infty} N(D) Q_t(D) dD \quad (\text{m}^{-1}) \\ &= 0.1 \int_0^{\infty} N(D) Q_t(D) dD \quad (\text{km}^{-1}) \end{aligned}$$

従って K_R の計算式は、

$$K_R = 0.4343 \int_0^{\infty} N(D) Q_t(D) dD \quad (\text{dB km}^{-1}) \dots\dots\dots (3.1.4)$$

$N(D)$ の関数形と粒径毎の全吸収断面 Q_t を知ることができれば (3.1.4) 式 (3.1.2) 式を用いて減衰を計算することができるわけである。

(2) 全吸収断面の計算

降水粒子による全吸収断面 Q_t は Mie の理論によれば次のように表される。

$$Q_t = -\frac{\lambda^2}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(a_n + b_n) \dots\dots\dots (3.1.5)$$

ここに、 λ : レーダ波の波長

Re : 複素数の実数部を表す記号

a_n, b_n は次式に示す通りである。

$$\begin{aligned} a_n &= -\frac{j_n(m\rho)(\rho j_n(\rho))' - j_n(\rho)(m\rho j_n(m\rho))'}{j_n(m\rho)(\rho h_n^{(2)}(\rho))' - h_n^{(2)}(\rho)(m\rho j_n(m\rho))'} \dots\dots\dots (3.1.6) \\ b_n &= -\frac{m^2 j_n(m\rho)(\rho j_n(\rho))' - j_n(\rho)(m\rho j_n(m\rho))'}{m^2 j_n(m\rho)(\rho h_n^{(2)}(\rho))' - h_n^{(2)}(\rho)(m\rho j_n(m\rho))'} \end{aligned}$$

ここに、 $\rho: 2\pi r/\lambda$ (r : 降水粒子の半径)

m : 複素屈折率 ($m^2 = \epsilon$, ϵ : 複素誘電率)

j_n, h_n : n 次の球 Bessel 関数

$()'$: 変数で微分することを意味する。

球 Bessel 関数は Bessel 関数 J_ν , Neumann 関数 N_ν , Hankel 関数 H_ν に対して次のように定義される。

$$\begin{aligned} j_n(z) &= (\pi/2z)^{1/2} \cdot J_{n+1/2}^{(1)} & n_n(z) &= (\pi/2z)^{1/2} \cdot N_{n+1/2}^{(1)} \\ h_n^{(1)}(z) &= (\pi/2z)^{1/2} \cdot H_{n+1/2}^{(1)} = & & \\ & j_n(z) + i \cdot n_n(z) & (1=1) \\ & j_n(z) - i \cdot n_n(z) & (1=2) \end{aligned}$$

(3.1.6) 式において微分表示では計算機での計算に不便なので通常の表示に置き換えることを考える。
 J_ν , N_ν , H_ν はいずれも次の条件 (円筒関数の条件) を満たしている。

$$\frac{dJ_\nu(z)}{dz} - \frac{\nu}{z} J_\nu(z) = -J_{\nu+1}(z) \quad \dots\dots\dots (3.1.7-1)$$

$$\frac{dJ_\nu(z)}{dz} + \frac{\nu}{z} J_\nu(z) = -J_{\nu-1}(z) \quad \text{etc.} \quad \dots\dots\dots (3.1.7-2)$$

(3.1.7-2) 式を用いると微分型式は次のように n 次と $n-1$ 次の結合で表される。

$$\frac{d}{dz}(z j_n(z)) = z j_{n-1}(z) - n j_n(z)$$

この関係より a_n , b_n を次のように書くことが出来る。

$$a_n = -\frac{U_1 - U_2}{V_1 - V_2} \quad b_n = -\frac{m^2 U_1 - U_2}{m^2 V_1 - V_2}$$

$$U_1 = \rho j_{n-1}(\rho) j_n(m\rho) - n j_n(\rho) j_n(m\rho)$$

$$U_2 = m\rho j_n(\rho) j_{n-1}(m\rho) - n j_n(\rho) j_n(m\rho)$$

$$V_1 = \rho h_n^{(2)}(\rho) j_n(m\rho) - n h_n^{(2)}(\rho) j_n(m\rho)$$

$$V_2 = m\rho h_n^{(2)}(\rho) j_{n-1}(m\rho) - n h_n^{(2)}(\rho) j_n(m\rho)$$

以上のように微分表示を通常の型式に置き換えることができたので、後は Bessel 関数の具体的な計算を行えばよい。球 Bessel 関数 $j_n(z)$, $n_n(z)$ は $(1/Z)$ のべきと $\sin(z)$, $\cos(z)$ の組み合わせであるが、 n が大きくなると非常に複雑になるので計算機では次の漸化関係を用いて計算するのが普通である。

$$J_n(z) = \frac{2n-1}{z} j_{n-1}(z) - j_{n-2}(z) \quad \text{etc.} \quad \dots\dots\dots (3.1.8)$$

注) (3.1.7-1), (3.1.7-2) を辺々差し引くと

$$\frac{2\nu}{z} J_\nu(z) = J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)$$

この式と球 Bessel 関数の定義式から (2.1.8) の関係が導かれる。

計算に必要な球 Bessel 関数の最初の数個は次の通りである。

$$j_0(z) = \frac{\sin z}{z}$$

$$n_0(z) = -\frac{\cos z}{z}$$

$$j_1(z) = \frac{\sin z}{z^2} - \frac{\cos z}{z}$$

$$n_1(z) = -\frac{\cos z}{z^2} - \frac{\sin z}{z}$$

$$j_2(z) = \left(\frac{3}{z^3} - \frac{1}{z}\right) \sin z - \frac{3\cos z}{z^2}$$

$$n_2(z) = -\left(\frac{3}{z^3} - \frac{1}{z}\right) \cos z - \frac{3\sin z}{z^2}$$

$n=1\sim 5$ に対する j_n と $h_n^{(2)}$ のグラフを図-3.1.1 に示す。 $z=0$ は両者とも特異点となるが、 $n\geq 1$ では j_n は 0 に収束し、 $h_n^{(2)}$ は発散する。さらに $n \gg z$ において、

$$j_n(z)/j_{n-1}(z) \approx z/2n \quad h_n^{(2)}(z)/h_{n-1}^{(2)}(z) \approx -(2n-1)/z$$

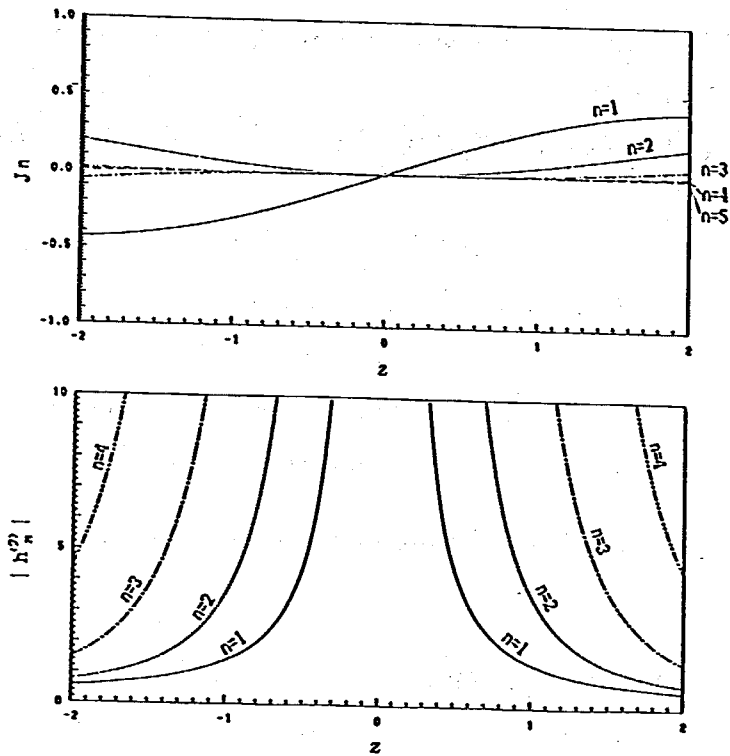


図-3.1.1 球 Bessel 関数 $J_n(Z)$ (上) 及 $|h_n^{(2)}(Z)|$ (下)

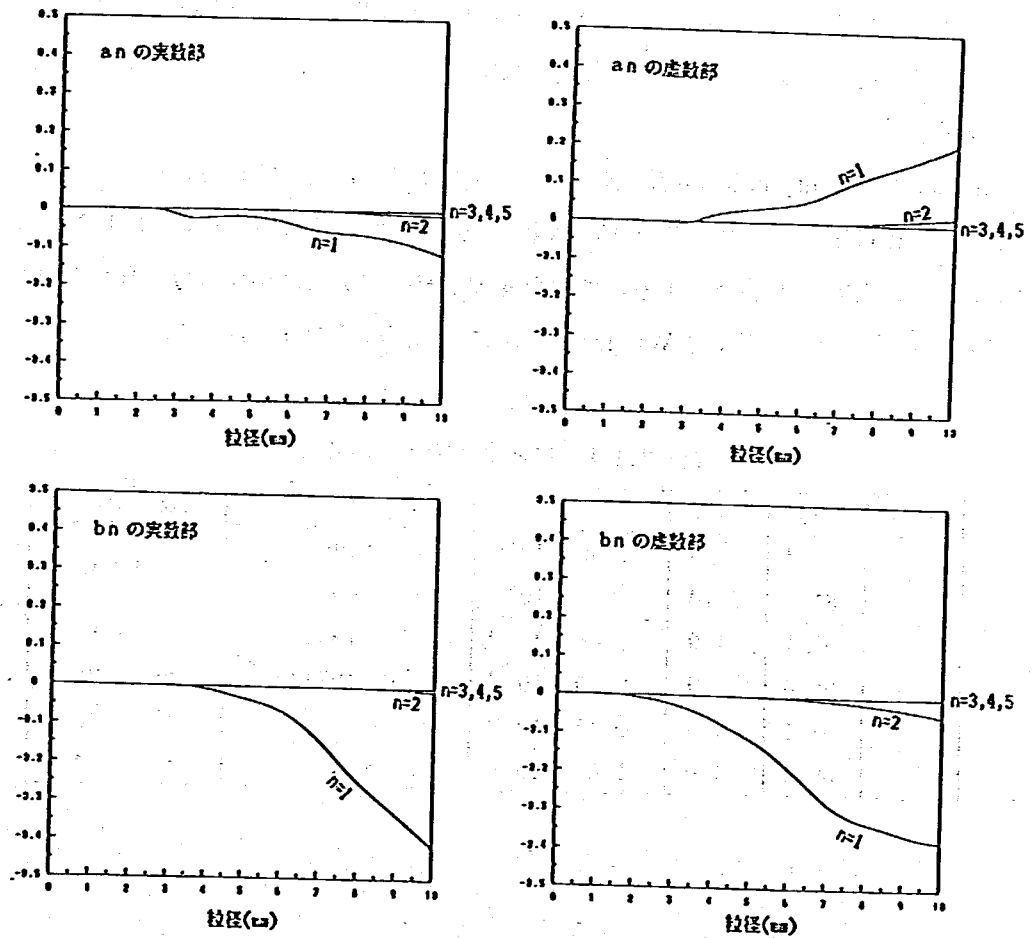


図-3.1.2 複素屈折率 $8.4-1.7i$ における粒径と a_n , b_n の関係

であり、 z の小さいところで $\sum_{n=1}^{\infty} j_n$ が速やかに収束することがわかる。また(6)式によれば $\sum_{n=1}^{\infty} a_n, \sum_{n=1}^{\infty} b_n$ は j_n 以上に速やかに収束することがわかる。

1例としてCバンド(波長5.7 cm), 10°Cにおける水の複素屈折率($\approx 8.4 - 1.7i$)を用いて計算した a_n, b_n の値を図-3.1.2に示す。

このように n が大きくなれば a_n, b_n は急速に0に収束するため、(3.1.5)式の全吸収断面積 Q_t の計算では n に関して最初の数個のみを計算すれば大抵の場合十分である。

(3) 降雪粒子の誘電率の検討

(3.1.5)式で全吸収断面積を計算するには降雪粒子の誘電率を知らねばならない。

周波数と複素誘電率 $\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$ との関係について Debye は次の分散式を与えている。

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} + \epsilon_\infty, \quad \epsilon_2 = \frac{(\epsilon_0 - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.1.9)$$

ここに、 ϵ_0 : 静的誘電率

ϵ_∞ : 光学領域($\sim 10^6$ GHz)での誘電率

ω : 角周波数(振動数 $\times 2\pi$)

τ : 誘電緩和時間

氷と水についての $\epsilon_0, \epsilon_\infty, \tau$ の値は表-3.1.1に示すとおりである。

ϵ は周波数とともに温度の関数でもあるが、氷の場合温度の影響は少なく、また水は雪粒のように氷と共存する場合はほぼ0°Cと考えて良い。西辻の雪質別の数値は降雪粒子中の水分の微妙な温度の違いをも考慮にいったものである。

ここでは氷については Auty-cole の値、水については西辻の雪質別の値を用いるものとして、(3.1.9)式より5.7 cm波(5.28 GHz)に対する氷と水の誘電率を計算した。その結果を表-3.1.2に示す。

降雪粒子は氷と水と空気の複合体であり、乾いた雪でも結晶内部に僅かな水分を含むものと考えられている。このような複合体の複素誘電率は Wiener の理論によれば次式で与えられる。

表-3.1.1 氷と水に関する誘電定数

物質	ϵ_0	ϵ_∞	τ	提唱者	温度・その他
水	77	3	1.85×10^{-5}	西辻(1968)	-0.1°C
	81.5	3.10	2.2×10^{-5}	Auty-Cole	
氷	88.1	4.9	1.85×10^{-11}	西辻(1968)	0°C
	92.6	4.9	2.80×10^{-11}	西辻(1971)	乾雪
	88.1	4.9	2.15×10^{-11}	"	湿雪
	88.1	4.9	1.85×10^{-11}	"	濡雪・水雪

表-3.1.2 5.7cm 波に対する降雪粒子中の
氷と水の誘電率

物 質		ϵ_1	ϵ_2
氷		3.1	0.000107
水	乾 雪	52.0	43.7
	湿 雪	60.0	39.3
	濡雪・水雪	65.3	37.1

$$\frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + u} = P_w \frac{\epsilon_w - 1}{\epsilon_w + u} + P_i \frac{\epsilon_i - 1}{\epsilon_i + u} + P_a \frac{\epsilon_a - 1}{\epsilon_a + u} \quad (3.1.10)$$

ここに、 ϵ_s ：降雪粒子の複素誘電率

ϵ_w ：水の複素誘電率

ϵ_i ：氷の複素誘電率

ϵ_a ：空気の複素誘電率

u ：形状因子

P_w, P_i, P_a ：水、氷、空気の体積比 ($P_w + P_i + P_a = 1$)

形状因子 u は電場の方向と氷の形状及び向きとの関係で決まり、氷が柱状になって電場の方向と平行に並んだ場合に ∞ 、垂直にならんだ場合に 0、球状になって一様に分散した場合は 2 の値をとる。この形状因子については体積含水率 P_w との間に図-3.1.3 に示すような関係が報告されている。

(3.1.10) 式において $\epsilon_a \approx 1$ なので右辺第 3 項は省略できる。また西辻に倣って降雪粒子の密度 ρ_s と体積含水率 P_w との間に $P_w = \rho_s^2$ の関係を仮定すると、

$$P_i = \frac{P_w^{1/2} - P_w}{0.92}$$

注) 氷の比重を 0.92 とすると 1 cm^3 の雪の重さ (g) は $0.92 P_i \times P_w$ 、これは密度に他ならず、 $P_w = \rho_s^2$ の仮定より上式が求まる。

さらに図-3.1.3 より u の値も決まるため、(3.1.10) 式を使って降雪粒子の密度 ρ_s と複素誘電率 ϵ_s との関

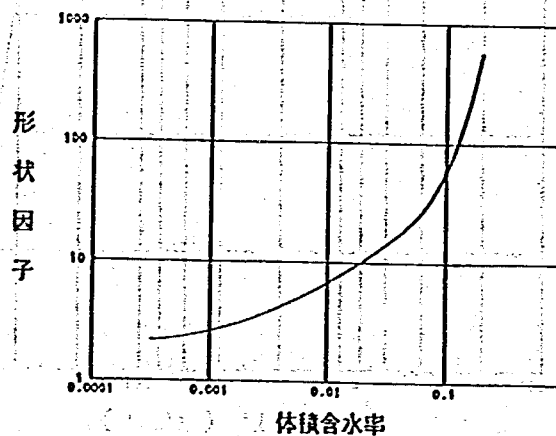


図-3.1.3 形状因子と体積含水率との関係

係が求められる。図-3.1.4は、このようにして求めた ρ_s と ϵ_s との関係である。なお雪質と密度との対応は下表のとおり設定した。

密度が高くなるとともに誘電率の絶対値は急激に大きくなる。これは密度 ρ_s と体積含水率 P_w との間に $P_w = \rho_s^2$ の関係を仮定したためであって、誘電率が增大する直接の原因は含水率の増加である。ただし西辻によれば電波の減衰に影響の大きい高密度域において $P_w = \rho_s^2$ の関係は近似が良いとされている。

表-3.1.3 雪質と密度の関係

雪 質	密 度 (g / cm ³)
乾 雪	~0.09
湿 雪	0.09~0.16
濡 雪	0.16~0.36
水 雪	0.36~

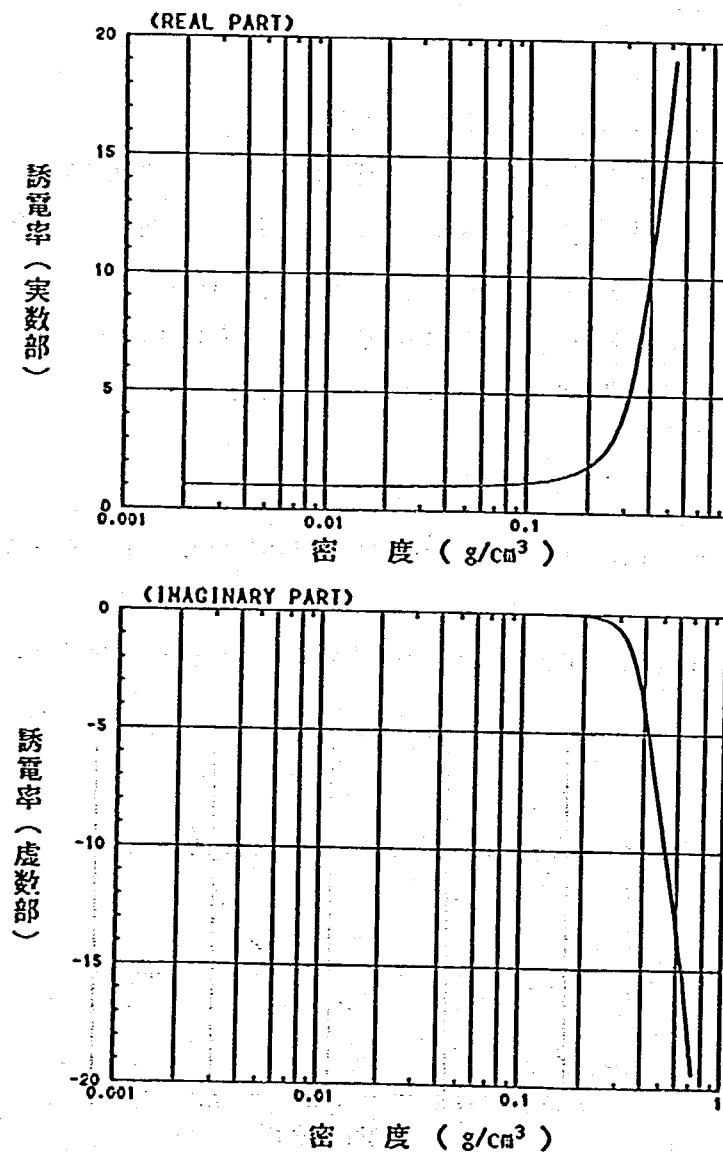


図-3.1.4 雪の密度と複素誘電率の関係 (波長: 5.7cm)

(4) 降雪粒子の粒径分布の検討

融解直径 D とする降雪粒子の空間粒度分布 $N(D)$ は、一般に指数関数を仮定して、

$$N(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \quad (3.1.11)$$

で表現される。 N_0 は $D=0$ を仮定した場合の $N(D)$ の値であり、 Λ は粒径分布が広がりを表す (Λ が小さいほど分布が広い)。

空間粒度分布の実測はウォーターブルール紙上のしみの直径から水滴の粒径を求め、さらに落下速度を推定または実測して空間の粒度分布に置き換えることによって行われる。

表—3.1.4 は既往の調査による降雪粒子の N_0 , Λ およびその条件等をまとめたものである。

西辻は平均して $1 \text{ mm}/10 \text{ min}$ 程度の降雪について、雪粒の水滴換算半径 r に対する半径 0.025 cm 幅の粒子数 $n(r)$ (個/ m^3) を、

$$n(r) = k \cdot 10^{(b - e \cdot r)}$$

の形で与えている。表—3.1.4 の値は他の調査と比較するために、係数 k , b , e を N_0 , Λ に置き換えたものである。

図—3.1.5 は降雪強度を 6 mm/h に揃えてこれらの分布を比較したものである。

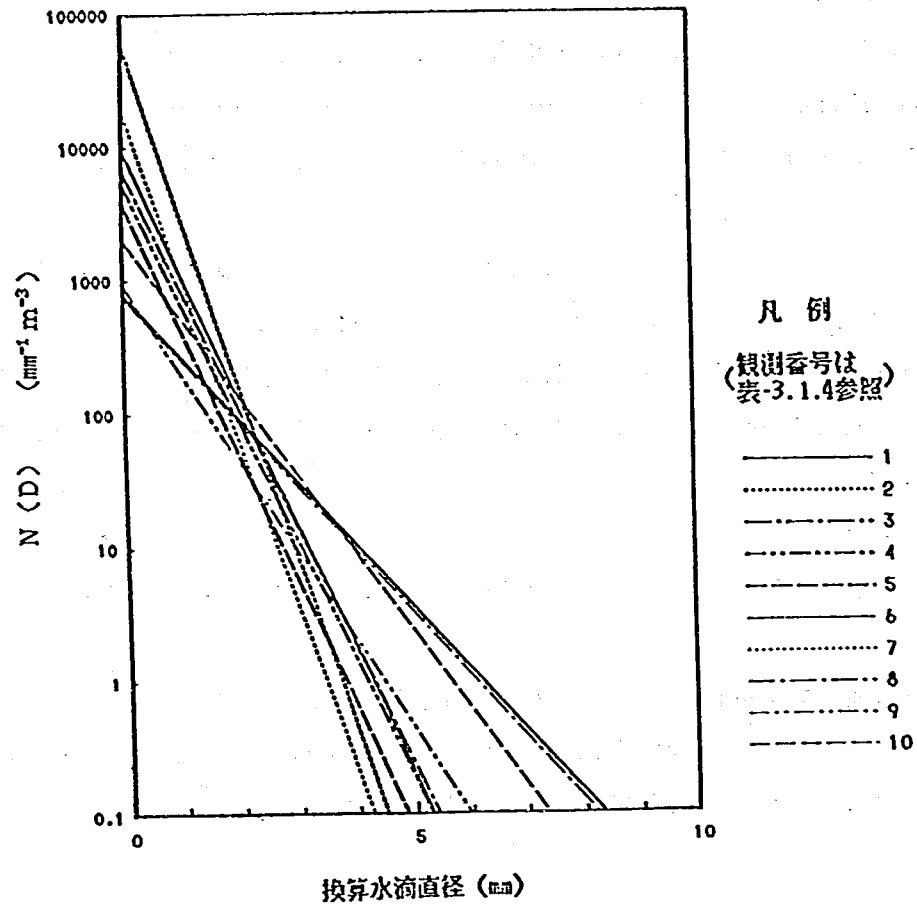
Gunn-Marshall と八木・上田の雪片の分布はほぼ等しく、分布幅が広い (Λ が小さい)。西辻の得た分布やあられの分布はいずれも似たような傾向を示し、 $N_0 \cdot \Lambda$ ともに Gunn-Marshall らの値よりも大きい。また土

表—3.1.4 降雪粒子の空間粒度分布

No	N_0 ($\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)	Λ (mm^{-1})	雪 質	観 測 地	落 下 速 度	出 典
1	$3800 R^{-0.87}$	$2.55 R^{-0.48}$	雪片集合	カナダ		Gunn, Marshal (1958)
2	66000 ^{注)}	2.99 ^{注)}	乾 雪 0.08 g/cm^2	札幌	光学式落下 速度計による実 測値	西辻, 平山 (1971)
3	7000	2.07	湿 雪 0.1 g/cm^2	札幌		
4	5600	2.07	濡 雪 0.26 g/cm^2	札幌		
5	4000	2.19	水 雪 0.5 g/cm^2	札幌		
6	$3700 R^{0.57}$	$2.6 R^{-0.1}$	雪 片	長岡	梶川 (1975) に よる秋田での実 測値	八木, 清野 (1979)
7	$3600 R^{0.98}$	$2.9 R^{-0.002}$	あ ら れ	長岡		
8	$1500 R^{-0.33}$	$2.0 R^{-0.34}$	雪 片	長岡		八木, 上田 (1980)
9	$970 R^{-0.01}$	$2.2 R^{-0.2}$	あ ら れ	長岡		
10	$1280 R^{0.27}$	$1.97 R^{-0.21}$	雪 片	長岡	上田・八木の観 測値 (1980)	土木研究所 (1988)

注) R は降水量 (mm/h)。

No 2~5 の N_0 , Λ は $R \approx 6 \text{ mm/h}$ における値である。



図—3.1.5 降雪強度6mm/h に対する空間粒度分布

研の雪片の調査結果は両者の中間に位置している。例外はあるが、これらの傾向をごく大雑把に言えば、湿雪やあられでは N_0 が大で分布の幅は狭く、雪片の分布はその逆ということになる。降雪粒子の空間粒度分布と落下速度がわかれば次式によって降水強度を計算することができる。

$$P = 0.0036 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot N_0 \int D^3 V \exp(-\Delta D) dD \quad (3.1.12)$$

P：降水強度 (mm/h)

D：雪片の水滴換算直径 (mm)

V：雪片の落下速度 (m/s)

落下速度式は種々のものが提唱されているが、主なものは以下のとおりである。

(Langleben)

$$V = k \cdot D^n \quad (3.1.13)$$

D：融解直径

k, n：定数 (V を m/s, D を cm とした場合に k は 0.87~7.87, n は 0.3—0.33 の範囲の値をとる)

k	n	雪 質	Author
9.8	0.8	あられ, ひょう	Auer
13.7	0.83	あ ら れ	梶川 (1975)
2.09	0.29	雪 片	上田・八木 (1980)

(鈴木道也他 (1981))

$$V = 2.005 \rho^{0.29} D^{0.233}$$

V : m/s

ρ (密度) : g/cm³

D : mm

Magono and Nakanura (1965))

$$a. V = 3.30(\rho_s - \rho_a)^{1/4} \dots \dots \dots (3.1.14)$$

$$b. V = 8.80[(\rho_s - \rho_a) \cdot D_s]^{1/2} \dots \dots \dots (3.1.15)$$

V : 雪片の落下速度 (m/s)

ρ_s : 雪片の密度 (g/cm³)

ρ_a : 空気の密度 (g/cm³)

Ds : 雪片の直径 (cm)

西辻の粒度分布 (表-3.1.4, 2~5) は N_0 , Λ が降水強度の関数として表されていないが, 実測と良く合うとされた孫野・中村の b 式によって Λ と (3.1.12) 式で計算される降水量との関数を求めると図-3.1.6 のとおりとなる。このとき N_0 は降水強度に係わらない固定値とした。

図より $\log \Lambda$ に対する $\log P$ の勾配はおよそ -0.22 である。すなわち西辻の粒度分布は $N_0 = a$, $\Lambda = bR^{-0.22}$ (a, b は定数) として降水強度と関係づけることが可能である。

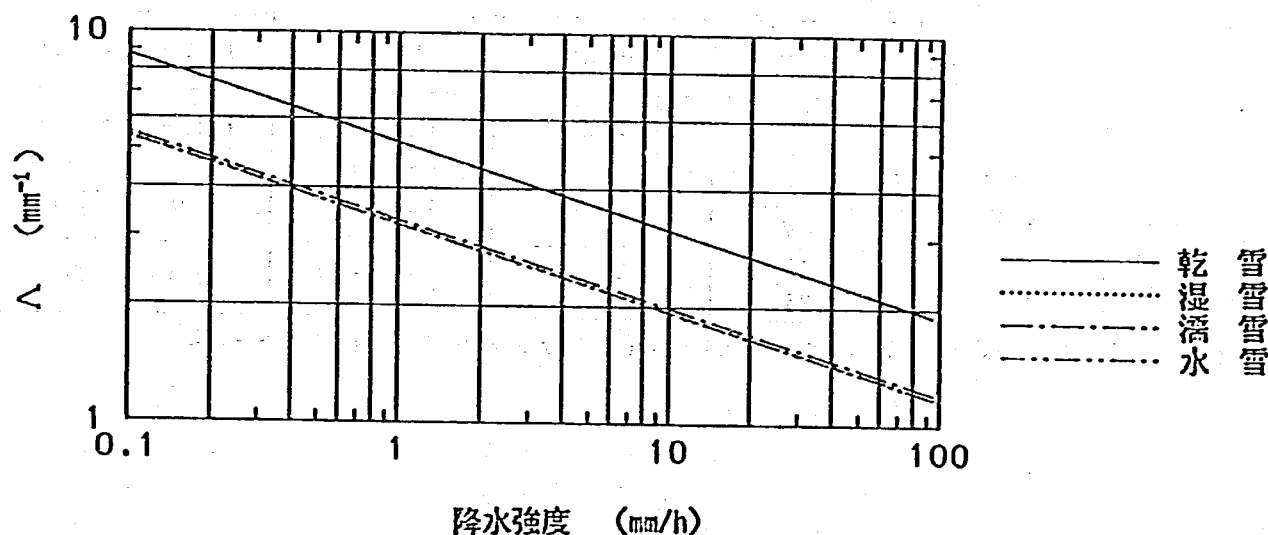


図-3.1.6 Λ と降水強度との関係

表-3.1.5 R=6mm/hとして計算した No, Λ から求められた降水強度

No	出典	No ($\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)	Λ (mm^{-1})	雪質 密度 片集合	降水量 (mm/h)		
					孫野式	Auer式	上田式
1	Gunn, Marshal (1958)	$3800 R^{-0.87}$	$2.55 R^{-0.43}$	0.07	14.8		10.2
2	西辻, 平山 (1971)	66000	$5.20 R^{-0.22}$	乾雪 0.08	12.5		10.6
3		7000	$3.22 R^{-0.22}$	湿雪 0.10	7.5		5.5
4		5600	$3.29 R^{-0.22}$	濡雪 0.26	8.2	8.9	4.4
5		4000	$3.21 R^{-0.22}$	水雪 0.50	5.7	4.9	2.5
6	八木, 清野 (1979)	$3700 R^{0.57}$	$2.6 R^{-0.1}$	雪片 0.07	8.2		6.5
7		$3600 R^{0.53}$	$2.9 R^{-0.002}$	霰 0.20	6.3	6.7	
8	八木, 上田 (1980)	$1500 R^{-0.33}$	$2.0 R^{-0.34}$	雪片 0.07	13.6		9.3
9		$970 R^{-0.01}$	$2.2 R^{-0.2}$	霰 0.20	4.9	6.3	
10	土木研究所 (1988)	$1280 R^{0.27}$	$1.97 R^{-0.21}$	雪片 0.07	13.9		10.1

注) No 2 ~ 5 の Λ は 3.1 (4) の検討結果から R の関数としたものである。

密度は西辻・平山のものを除き、実測時と関係無く適当に設定した値である。

表-3.1.6 降雪モデル

雪質	密度 (g/cm^3)	含水率	No ($\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$)	Λ (mm^{-1})	誘電率
		体積含水比			
乾雪	0.07	$\frac{0.07}{0.0035}$	$3700 R^{0.57}$	$2.6 R^{-0.1}$	$1.14 - 0.00140i$
湿雪	0.10	$\frac{0.10}{0.01}$	7000	$3.22 R^{-0.22}$	$1.24 - 0.00417i$
濡雪	0.26	$\frac{0.26}{0.068}$	5600	$3.29 R^{-0.22}$	$3.01 - 0.251i$
水雪	0.50	$\frac{0.50}{0.25}$	4000	$3.21 R^{-0.22}$	$17.4 - 8.87i$

注) 体積含水比 $P_w = \rho_s^2$ としているため (liquid water) / (total water) = ρ_s (重量ベース) である。

3.1.3 降雪モデルによるレーダ波の吸収・散乱特性の検討

前節の検討結果より適当な降雪のモデルを設定して、それに対する 5.7 cm 波の吸収・散乱特性の検討および含水比の変化に対する吸収・散乱の感度分析等の検討を行った。

(1) 降雪モデルの設定

電波の減衰量は湿った雪ほど大きく、またかなり強い降雪でないと実際の影響が現れないものと思われる。したがってモデル降雪の粒度分布は 5~10 mm/h 程度の降水強度にも適用可能なものでなければならない。この点を検証するために表-3.1.4 の 10 個の粒度分布測定結果に対して $R=6$ mm/h とし、(3.1.12)式を用いて降水強度を求めた。その結果が 6 mm/h と大きく食い違うものは強雪時を扱うモデルとしては適当でないと考えられる。落下速度式は Langleben の式 $V=k \cdot D^n$ (あられの場合は Auer の係数 $\langle k=9.8, n=0.8 \rangle$, その他の場合は上田・八木の係数 $\langle K=2.09, n=0.2 \rangle$) および孫野・中村の式 (3.1.15) の 2 とおりを用いた。結果を表-3.1.5 に示す。

表-3.1.5 より雪片および乾雪のときに降水強度計算値が想定値 (6 mm/h) を大きく上回る場合の多いことが分かる。すなわちこれらの雪質の場合には観測時の降水強度が小さく、得られた粒度分布モデルを 6 mm/h 程度の強度まで外挿して用いることが適当でないケースが多い。しかしその中では八木・清野の雪片の粒径分布が強雪時でも適用可能と考えられこれを乾雪・雪片のモデルとして用いるものとした。含水率は大きな幅があると考えられるが、ここでは $P_w=\rho s^2$ の関係が成り立つものとして 0.0 を与えた。湿雪のモデルは西辻・平山の湿雪・濡雪・水雪の各モデルを用いるものとし、また穀は密度や含水率の関係で不明な部分が多いため検討対象から除外した。

これらの降雪モデルと (3.1.10) 式で計算される誘電率を併せて表-3.1.6 に示す。

(2) 電波減衰の計算

① 1 個の粒子による減衰

表-3.1.6 の降雪モデルを用いて (3.1.4) 式による減衰定数 K_R を計算することができるが、その前に全吸収断面積 Q_t と粒径との関係を把握しておく。

図-3.1.7 は表-3.1.6 の誘電率を持った各降雪粒子の Q_t と粒径の関係を表したものである。この図より全吸収断面積が粒径の 3~4 乗に比例すること、含水率の高い雪粒の吸収が大きいことが分かる。

② 減衰定数

表-3.1.6 の降雪モデルに対する降水強度と電波減衰定数との関係を図-3.1.8 に示す。

濡雪・水雪の減衰定数はほぼ同じで、また乾雪・湿雪の減衰定数もほぼ同じ値である。しかし濡雪・水雪の値は乾雪・湿雪のほぼ 10 倍近くあり、減衰定数は湿雪と濡雪の間に大きなギャップが認められる。

降水強度と K_R との関係は細かく見れば直線ではないが、実質的に重要な意味を持つ 5~10 mm/h 近辺を重視して直線近似すると次の関係式が得られる。

$$K_R=0.0023 \times R^{1.00} \quad (\text{乾雪})$$

$$0.0035 \times R^{0.91} \quad (\text{湿雪})$$

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

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

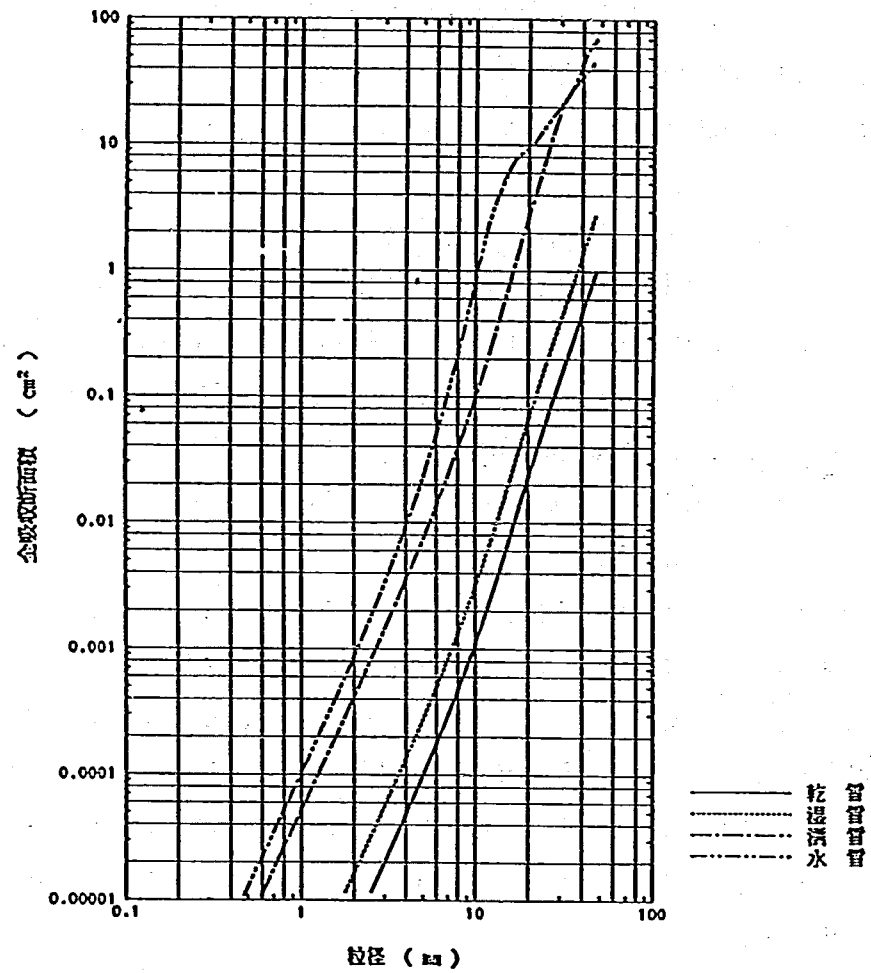


図-3.1.7 モデル降雪粒子の粒径と全吸収断面積の関係

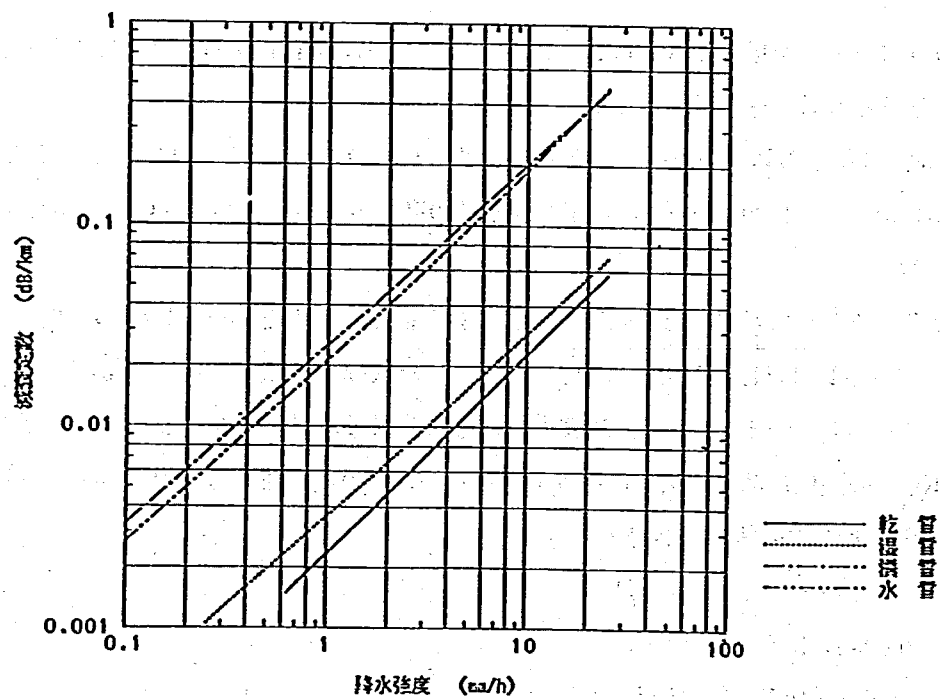


図-3.1.8 モデル降雪による降水強度と減衰定数の関係

これらを雨の場合の減衰定数、例えば Gunn-East の $0.0022 R^{1.7}$ と比較すると、乾雪・湿雪で同じレベル、濡雪・水雪では1桁大きいレベルの数字となる。雪は雨と比較して降水強度は一般に小さいが、水分の多い場合は電波 (5.7 cm 波) の減衰が無視できないものとなる。

(3) 減衰定数の推定誤差の検討

減衰定数とそれに係る諸量との関係を再整理して下に示す。

雪質によって大きく変わるのは全吸収断面積 Q_t であり、 Q_t に影響する因子のうちでは誘電係数が雪質によってもっとも大きく左右されると考えられる。誘電係数 ϵ_s の推定誤差を生み出す要因は密度 ρ 、含水率 w (または体積含水率 P_w) および形状因子 u の推定誤差である。

一方、前項で雪質別の減衰定数を降水量との関係で定式化した、これらは種々の経験的な関係等を用いてモデル化された降雪に対するもので、実際の減衰は同じ降水量に対してもかなりの幅を持っているものと考えられる。従ってここでは密度および含水率、形状因子に対する感度分布を行って、各雪質について減衰定数のとりうるおよその範囲を把握するものとした。

図-3.1.9(1)~(4)は密度と含水率を変数とする減衰定数の感度分析図である。粒度分布は降雪モデルの湿雪の N_0 , Λ を用い、降水強度は 1, 2, 5, 10 mm/h の4とおりを与えた。また図-3.1.10 は各モデル降雪における形状因子と減衰定数の関係を表したものである。

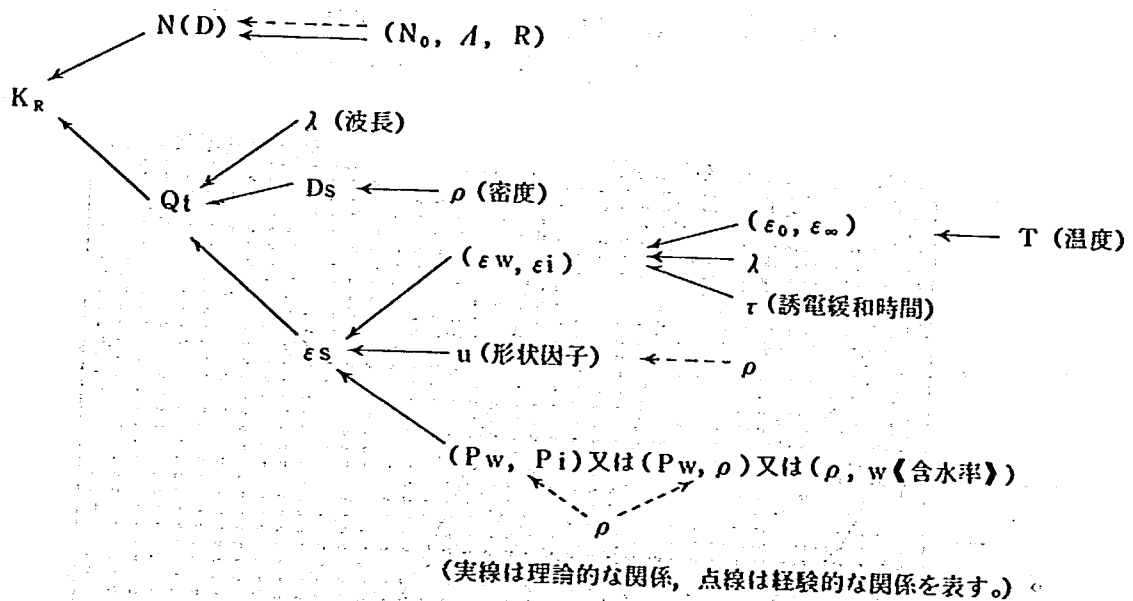
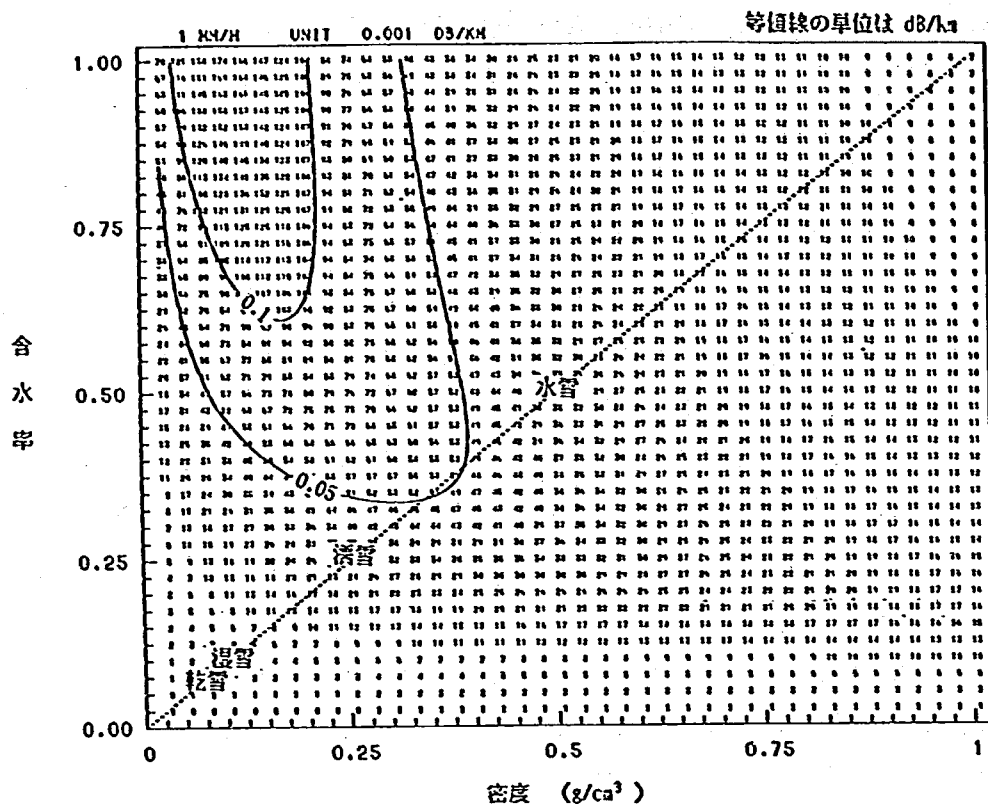
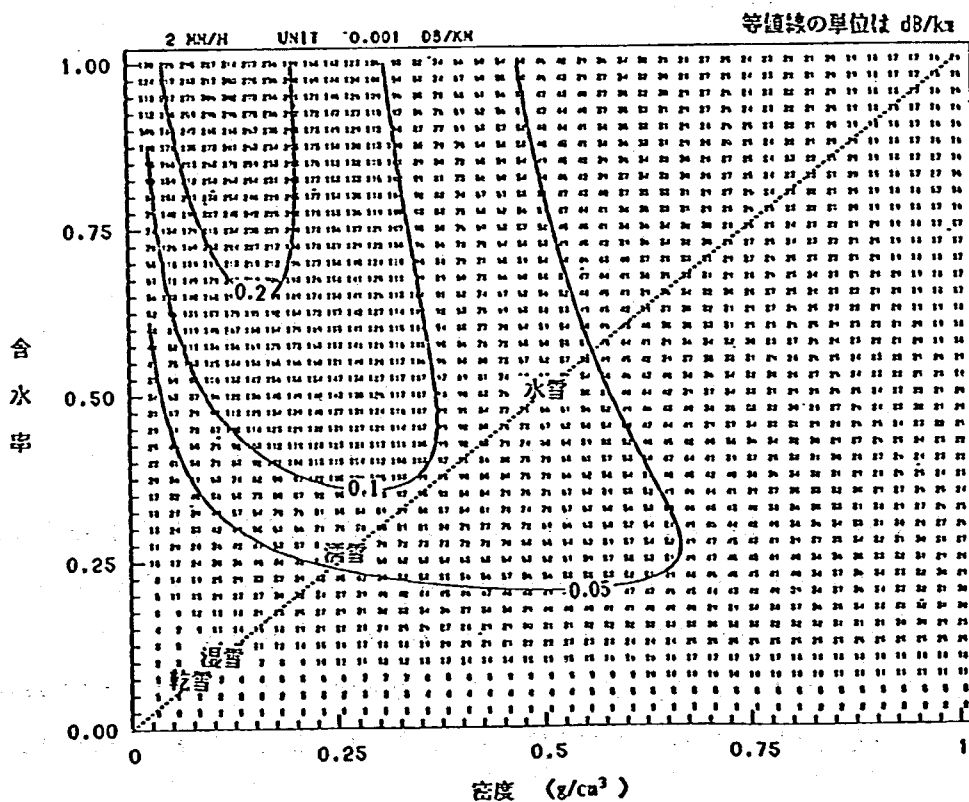


図-3.1.9に見られるような減衰の大きくなる領域は密度が小さく含水率の大きい領域である。しかし実際の降雪粒子は含水率 $w = \rho$ (図の点線) の関係を大きく外れることはない。この関係においては濡雪と水雪の中間、密度 0.35 のあたりで減衰は最大となることが分かる。また密度が 0.3 より小さな雪では含水率の変化に対する減衰定数の変化が大きく、密度がそれ以上になると変化は小さい。すなわち密度が小さく乾いた雪では減衰が水分量の変化に対してシャープに反応するが、ある程度湿ってしまうと減衰はあまり大きくは変化しない。

形状因子 u に対する減衰定数の変化は各雪質とも $u=100$ 前後を境として u がそれより小さい領域で大きく、 u が大きければ変化は小さい。ただし雪質によって u のとりうる数値はほぼ定まっているため、図



図—3.1.9(1) 減衰定数の密度・含水率に対する感度分析図
(降雨強度1mm/h, No=5600, $\Lambda=3.22$)



図—3.1.9(2) 減衰定数の密度・含水率に対する感度分析図
(降雨強度2mm/h, No=5600, $\Lambda=2.76$)

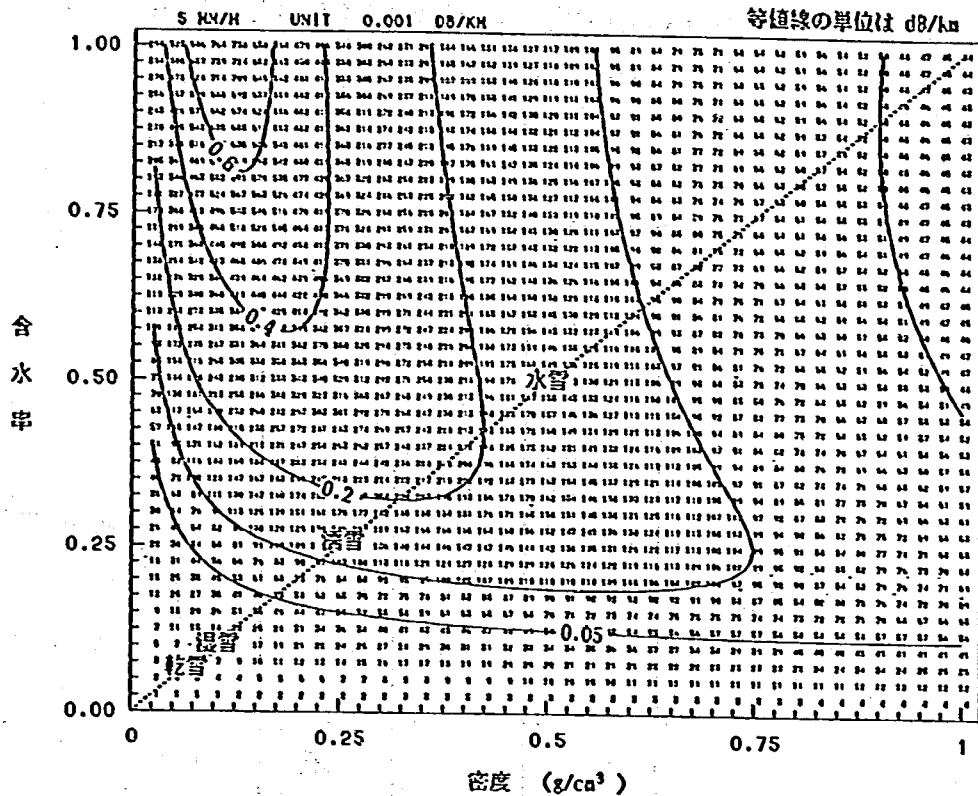


図-3.1.9(3) 減衰定数の密度・含水率に対する感度分析図
(降雨強度5mm/h, $N_0=5600$, $\Lambda=2.26$)

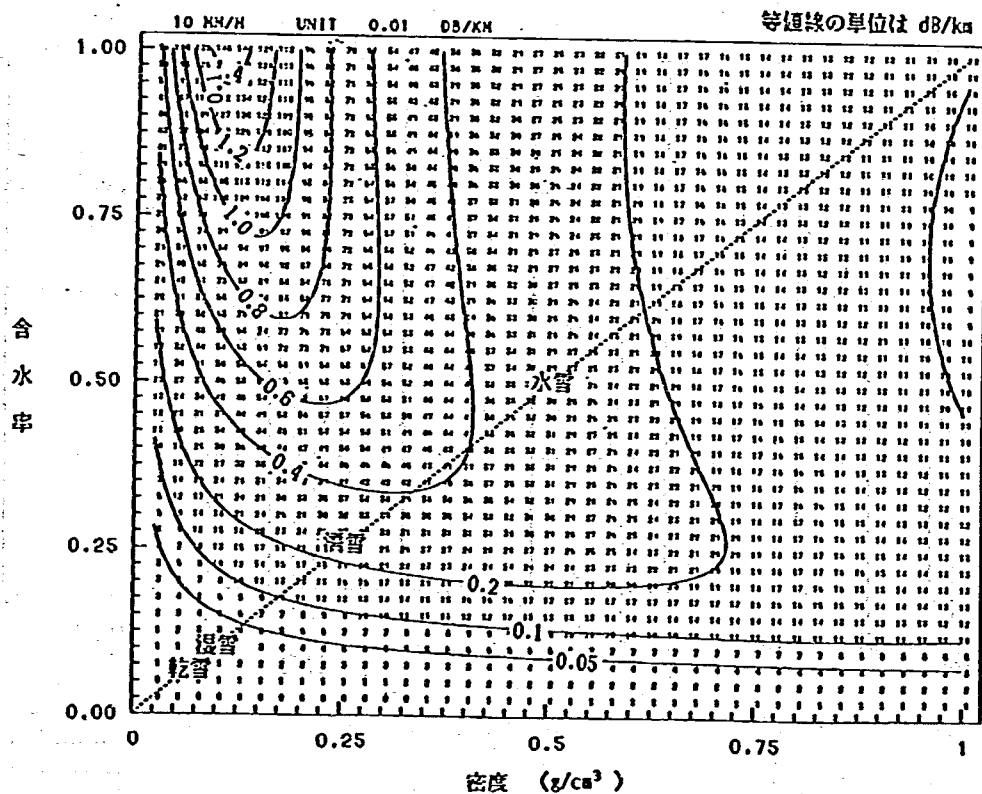
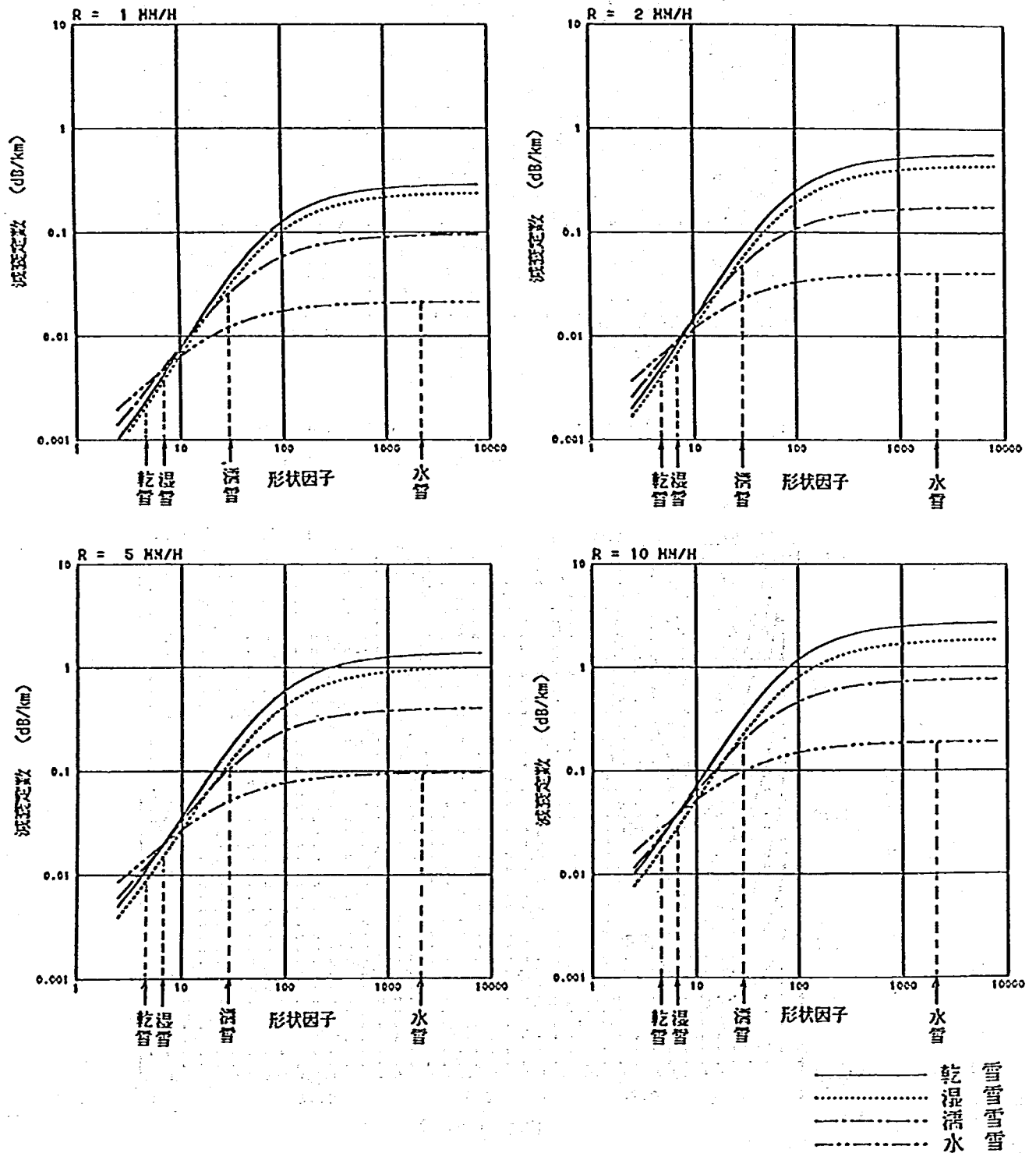


図-3.1.9(4) 減衰定数の密度・含水率に対する感度分析図
(降雨強度10mm/h, $N_0=5600$, $\Lambda=1.94$)

—3.1.10に見られるとおり乾雪・湿雪では u の変化による減衰の変化が大きく、濡雪ではこれよりも変化はやや小さ目、水雪になるとほとんど変化しないことがわかる。

(4) レーダ定数 B , β の含水雪に対する特性の検討

前節までの検討で湿雪では電波の吸収が大きくなることを示されたが、同時に反射の断面積も大きくなり、ブライトバンドと呼ばれるような強い信号が観測される。このような状態で雨または雪に対するレーダ定数



図—3.1.10 形状因子と減衰定数との関係
(矢印はモデル降雪各雪質の形状因子の値)

B, β を使用すると降水量を過大に評価することになる。ここでは吸収の検討に用いた降雪モデルで、レーダ定数の含水雪に対する特性の把握を行うものとした。

① 後方散乱断面積とレーダ方程式

降水粒子の後方散乱断面積は Mie の理論によれば (3.1.6) の a_n , b_n を用いて,

$$\sigma_M = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2n+1}{2} (a_n - b_n) \right|^2 \dots\dots\dots (3.1.16)$$

粒径 D が波長 λ に対して十分小さければ次の近似 (Rayleigh 近似) が成り立つ。

$$\sigma_R = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 D_s^6 \dots\dots\dots (3.1.17)$$

D_s は降雪粒子の粒径である。モデル降雪の粒径と σ_R , σ_M の関係を図-3.1.11 に示す。

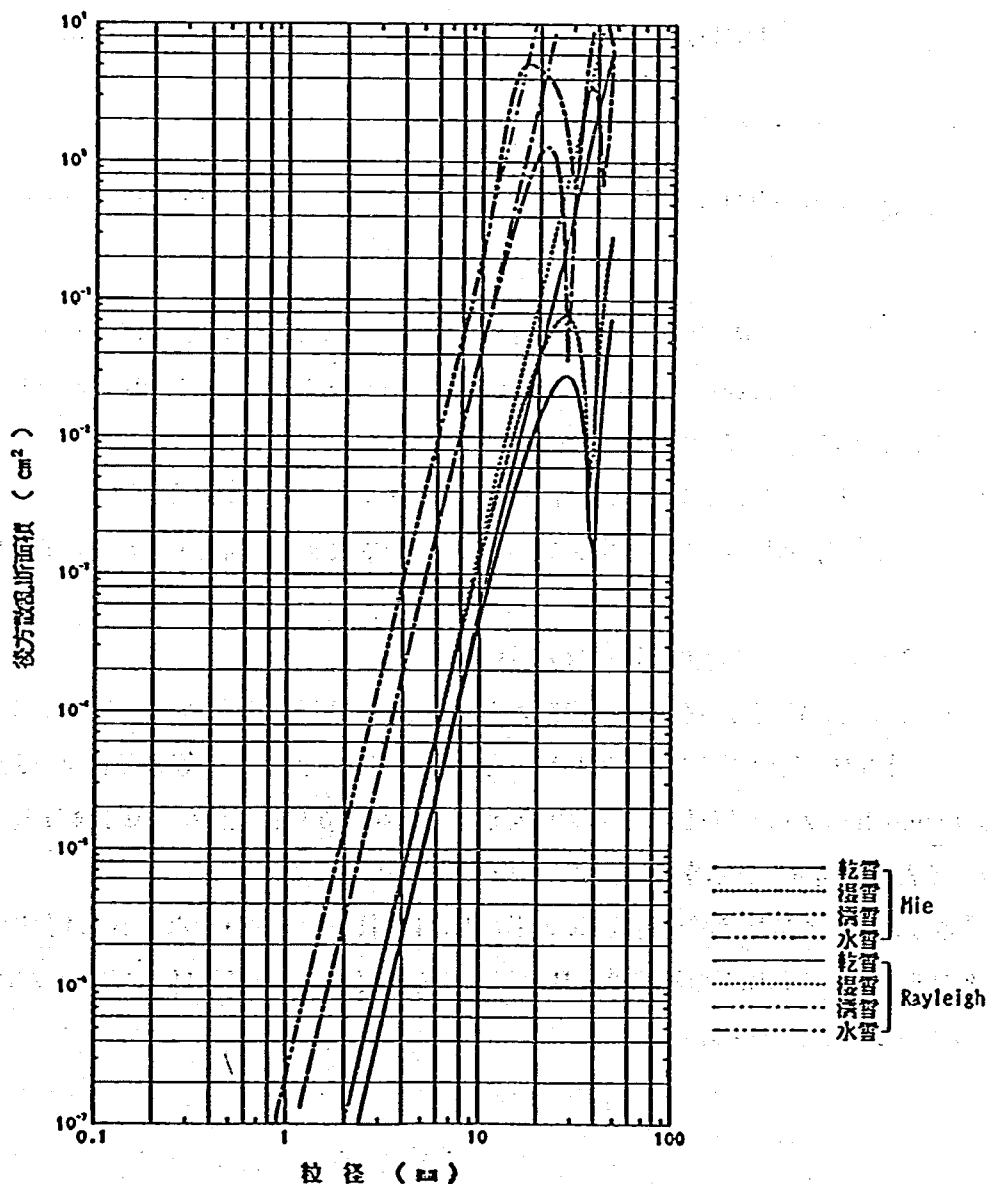


図-3.1.11 モデル降雪の粒径と後方散乱断面積の関係

レーダ方程式は Rayleigh 近似を仮定して、

$$Pr = \frac{1}{r^2} C \cdot F \cdot Z, \quad Z = \int N(D) D s^6 dD \quad \dots\dots\dots (3.1.18)$$

Pr: レーダ受信電力値

r: 距 離

C: 定 数

F: 補正係数

と書かれる。 $\frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2$ は C 項の中に含まれ、 $\left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2$ は雪の場合、通常 0.208 が使用される。

従って $\left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2$ の値がこれと異なる場合には次式で示す Ze を Z として観測していることになる。

$$Ze = \frac{1}{0.208} \left| \frac{\epsilon-1}{\epsilon+2} \right|^2 \int N(D) D s^6 dD \quad \dots\dots\dots (3.1.19)$$

Mie 散乱の領域では、Ze は次式で表される。

$$Ze = \frac{1}{0.208} \frac{\lambda^4}{\pi^5} \int \sigma_M N(D) dD \quad \dots\dots\dots (3.1.20)$$

② Z-R 関係

図 3.1.12 はモデル降雪の Z-R 関係 (実際には Ze-R 関係) である。降水強度は孫野の式 (3.1.15) を用いて計算したものである。(3.1.20) の Ze で計算したものと Rayleigh 近似 (3.1.19) で計算したものは大差無く、各雪質の B, β は表-3.1.7 のとおりである。

雪の B, β については表-3.1.8 のような値が報告されている。サンプルによってばらつきは大きい、本調査の含水雪モデルの反射特性は乾雪・湿雪でこれらよりもやや大きく、濡雪・水雪では 5 倍程度の大きさとなる。

③ 密度および含水率の変化に対する B, β の特性

降雪モデルのうち湿雪の粒度分布を用いて密度および含水率の変化に対するレーダ定数 B の感度分析図を作成した (図-3.1.13)。反射因子 Z は (3.1.19) 式の Rayleigh 近似による等価反射因子 Ze を使用し、1 mm/h および 10 mm/h の Ze の計算値から B の値を求めた。なお β は粒度分布の降水強度 R に対する関数形のみに依存するため、密度・含水率によらず一定値 (約 1.5) をとる。

B の密度・含水率に対する特性は減衰定数 K_R の場合とほぼ同じで、密度・含水率が 0.4 付近で最大値 (およそ 20000) となる。またこれ以下の領域では B は密度のみの変化によってはほとんど変わらず、専ら含水率の関数となっていることがわかる。

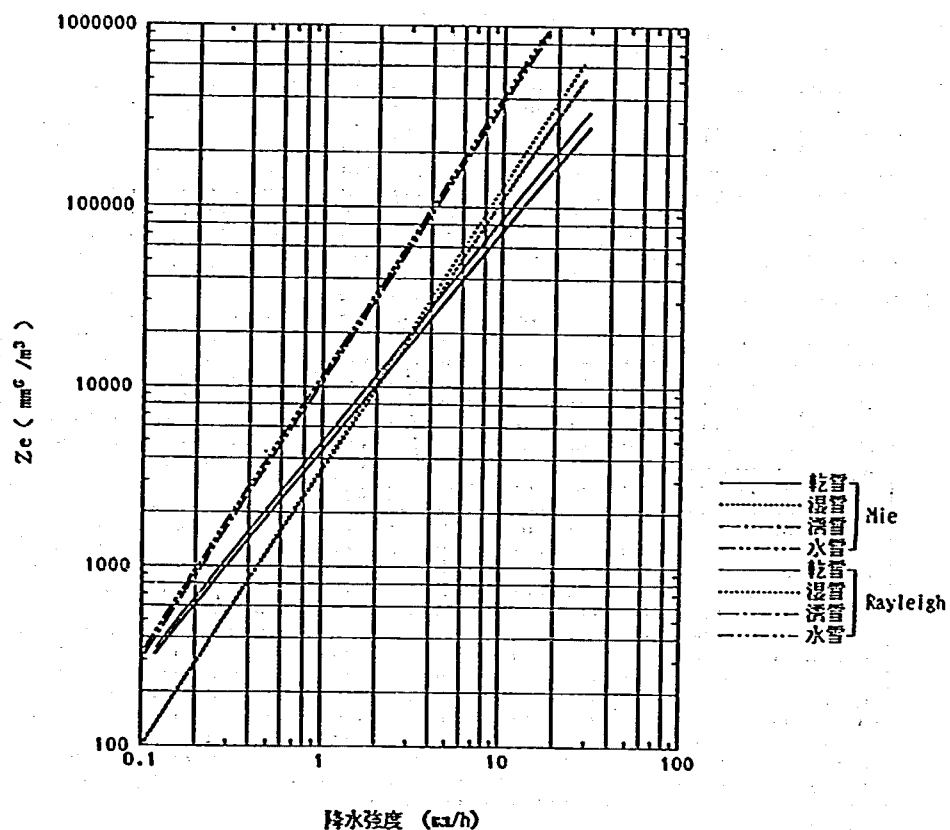


図-3.1.12 モデル降雪のZ-R関係

表-3.1.7 モデル降雪のB, β ($Z=BR^\beta$)

雪 質	B	β
乾 雪	4400	1.4
湿 雪	3500	1.5
濡 雪	11000	1.5
湿 雪	12000	1.5

表-3.1.8 雪のB, β 観測例

雪 質	観 測 者	観 測 地 点	B	β
雪 片	Imai et al (1955)	東 京	600 ~ 2400	1.8
	Gunn, Marshall (1958)	Montreal	2000	2.0
	Ohtake, Henmi (1970)	Alaske	400 ~ 3900	1.5 ~ 2.3
	藤 原 他 (1972)	金 沢 付 近	2000 ~ 2900	1.27 ~ 1.70
	武 田 他 (1972)	英 彦 山	350 ~ 650	2.0 ~ 2.7
	山 田 (1975)	札幌 周 辺	1400	1.1
	Harimaya (1978)	札幌 周 辺	280 ~ 1020	1.2 ~ 1.8
	八木・上田 (1980)	長 岡	1600	1.4
	土木研究所 (1988)	長 岡	4500	1.76
あ ら れ	梶川・木場 (1978)	秋田市周辺	793	1.25
	Harimaya (1978)	札幌 周 辺	110 ~ 520	1.2 ~ 1.5
	八木・上田 (1980)	長 岡	780	1.3

メッシュ数字の単位は 0.1dB (基準値は $1 \text{ m}^6 / \text{m}^3$)、等値線の単位は m^6 / m^3

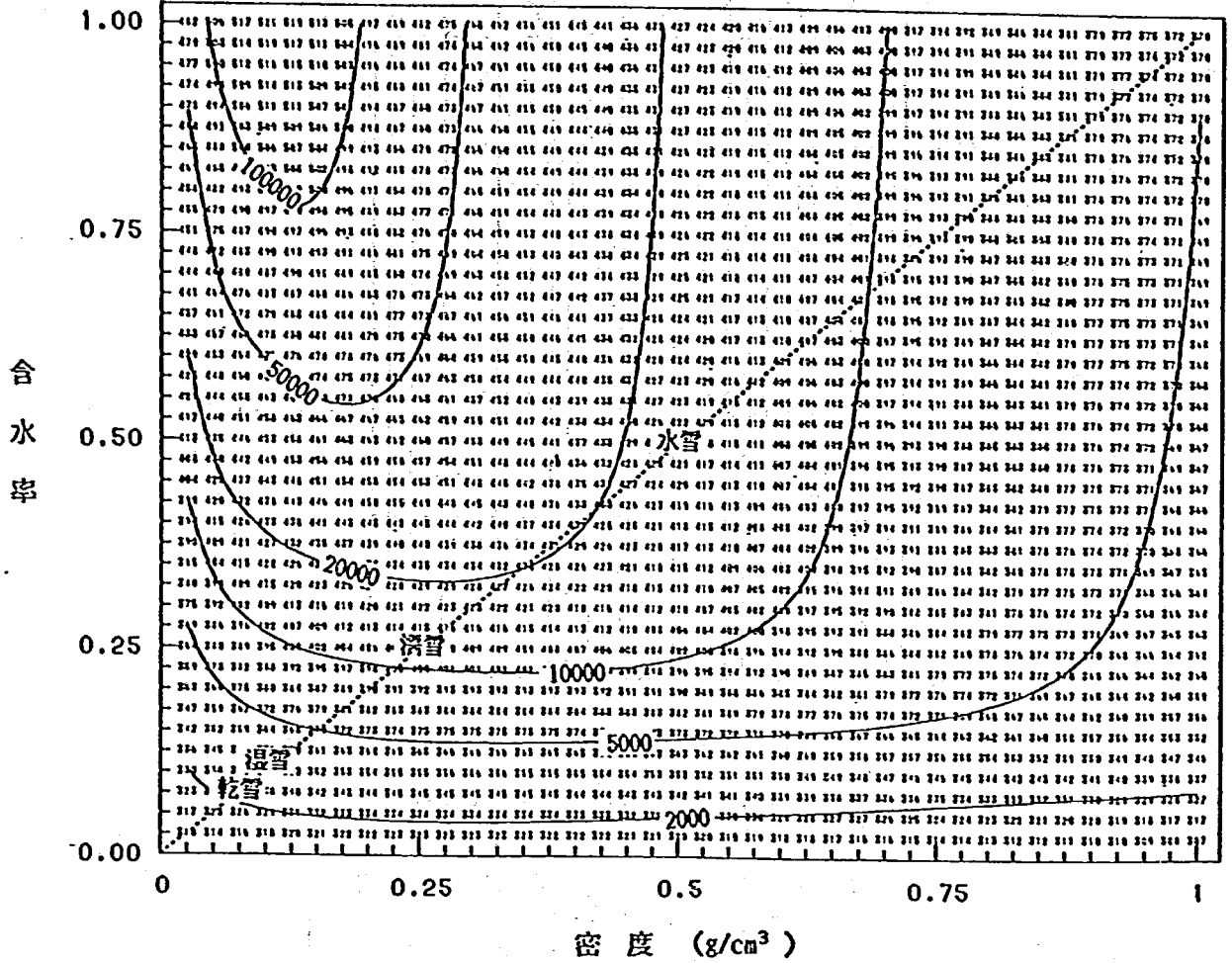


図-3.1.13 レーダ定数 B の密度・含水率に対する感度分析図 (湿雪モデル)

3.1.4 レーダによる観測データを用いた減衰の影響の評価

3.1.2, 3.1.3 の検討結果より、降雪時において減衰が問題となるのは含水率の高い雪の場合と予想される。そこで 1988 年冬季のデータより、影響が現われていると思われるケースを抽出し、レーダデータを用いて雪質と影響度の関係について調べるものとした。

対象とするケースは、

- ア. レーダビーム高さにおいて気温が 3°C 前後であること
- イ. レーダエコー及び地上で観測された降水強度がある程度強いこと
- ウ. 地形や遮蔽の影響がないこと

を基準に日時、地域を選定するものとした。その結果 1988 年 1 月 21 日 19:20 のエコーのうち図-3.1.14 に示す測線 A, B に沿ったデータを対象として扱うものとした。

このときの地上降水量は DND レーダサイト周辺では 21 日の 19~20 時にピークがあり、5 mm/h~10 mm/h を記録している。

また輪島上空の気温は次の通りである。

表-3.1.9 ソンデ観測による輪島上空の気温 °C

日	時	1000 mb	850 mb	700 mb
1 月 21 日	9 時	4.8	5.2	-3.4
1 月 21 日	21 時	8.4	7.8	-2.5
1 月 22 日	9 時	13.2	3.2	-6.8

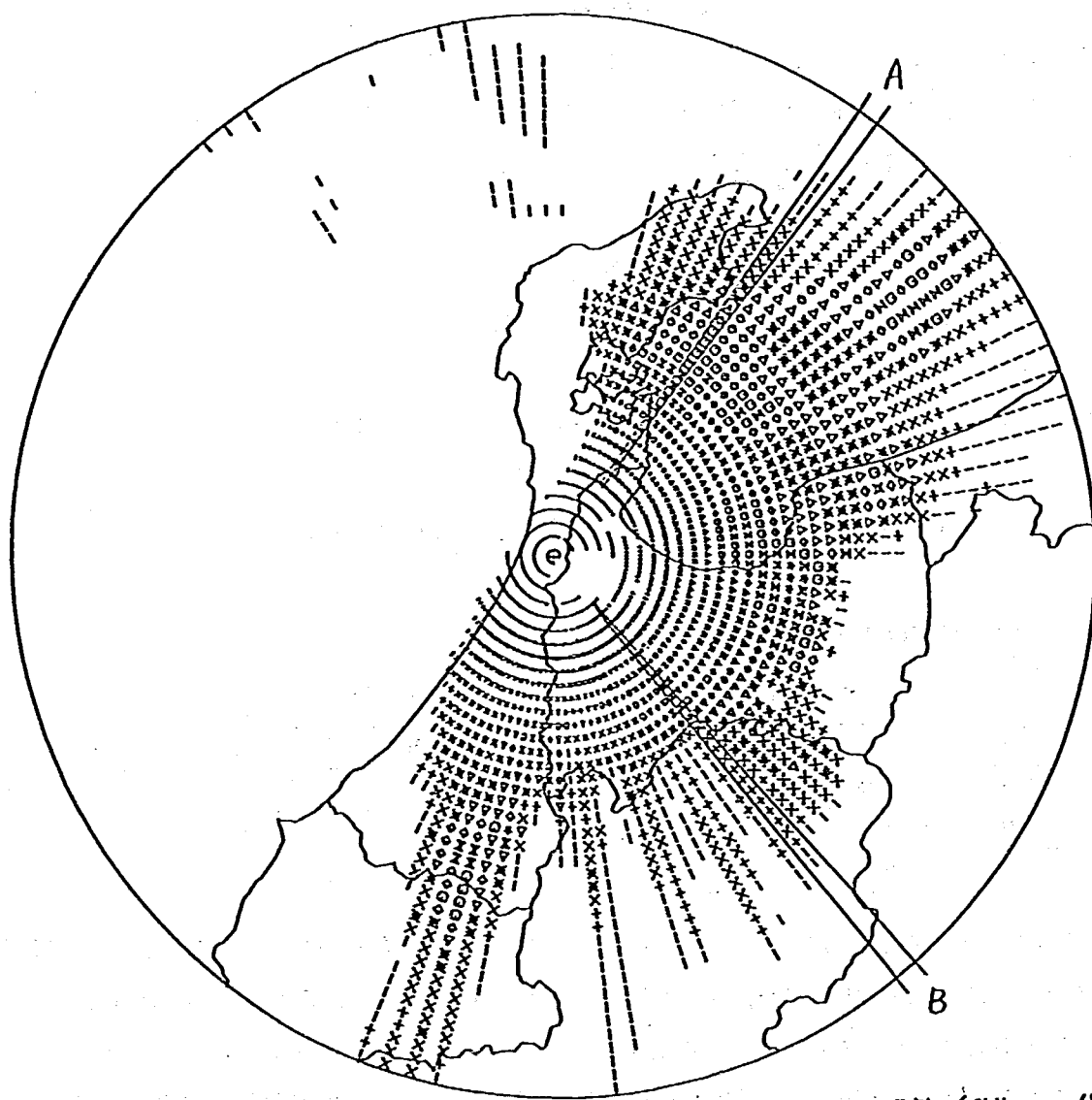
1 月 21 日は上空の気温が高く、高度 2000 m でも雪はかなり融けていたものと思われる。図-3.1.14 は当該時刻の宝達レーダによる降水強度分布、図-3.1.15 は同じく Z (dBz) の分布である。測線 A はほとんど海上にあり、測線 B は陸上部である。富山市東南東方に非常に強いエコーが出ているが、毛勝山系の山間部に位置し、グランドエコーや遮蔽が大きく解析には適さない地域である。測線 B は陸上部であるが、県境付近でも標高は最大 1500 m 程度であり、グランドエコーや遮蔽は比較的少ないと考えられる。

A, B 測線に沿った減衰量の計算結果を図-3.1.16 に示す。実線が z の観測値の変化であり、点線、1 点鎖線、2 点鎖線、破線はそれぞれ 3.1.3 で設定した各モデル雪質及び減衰定数を仮定した場合の、減衰を受ける前の反射因子の分布である。従って実線との差がレーダビームのパスにおける TOTAL の減衰量 (往復) である。減衰定数の計算には図-3.1.9 の関係を用いた。

測線 A では濡雪・水雪を仮定した場合に計算値が発散を起こしている。実際にはその遠方でもエコーは観測されており、これは減衰定数を過大に見積ったために起こったものである。

図-3.1.16 から得られる情報を要約すれば以下の通りである。

- ・測線 B ではレーダサイトから 35 km 付近に強いエコーがあり、その背後地における減衰量は乾雪・湿雪モデルを仮定すると約 2 dB、濡雪・水雪を仮定すれば約 8 dB である。従って β を 2.0 とすると背後地の降水強度はレーダによる観測値の 1.3 から 2.5 倍ということになり、 β が 2 よりも小さければ観測値との差はさらに大きなものとなる。ただし測線 A で計算値が発散していることから、対象降水の場合は濡雪・水雪の減衰定数を設定するのは過大評価であると判断できる。

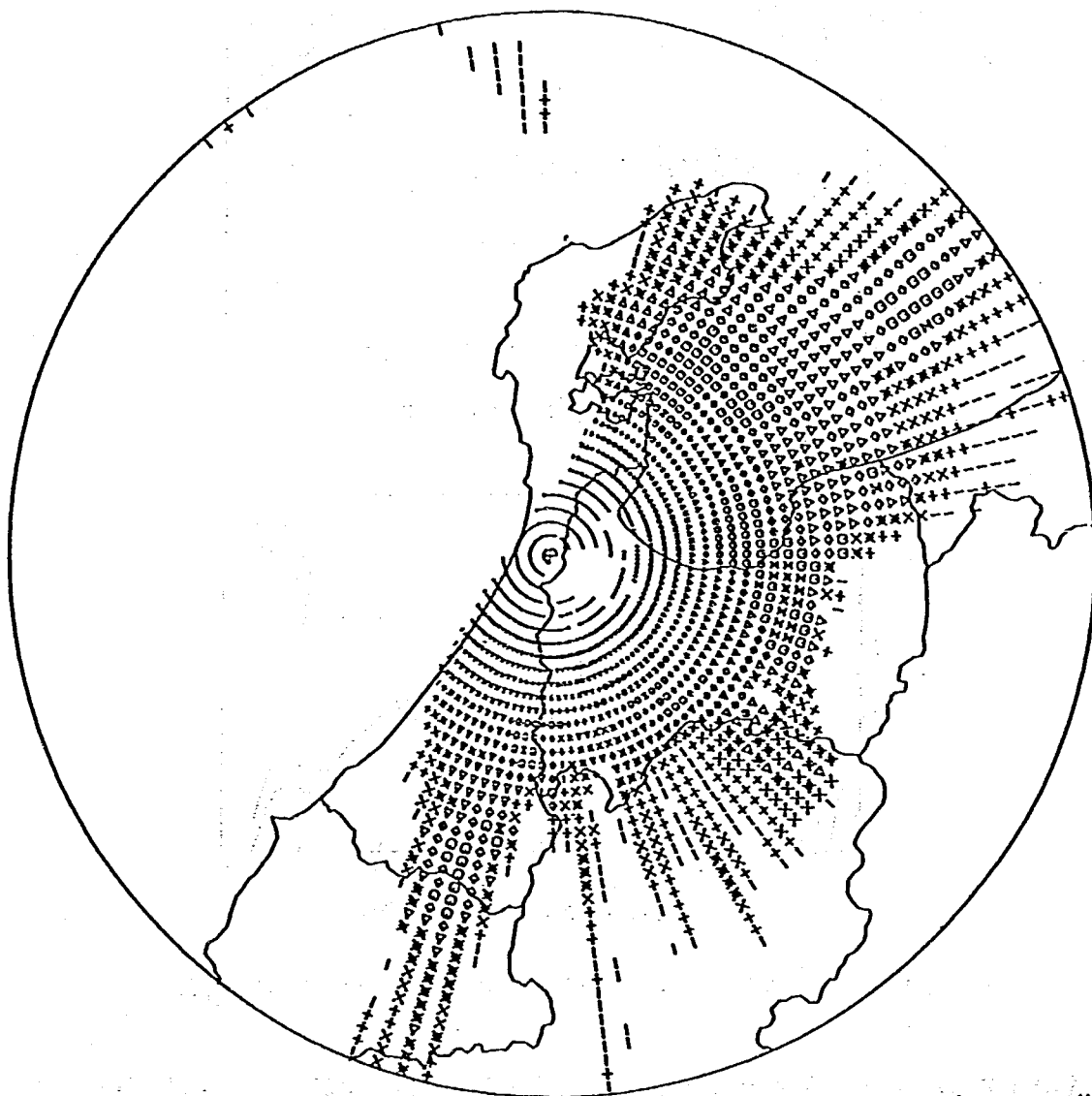


凡例 (単位: mm/h)

・	1.0 ~	3.0
+	3.0 ~	5.0
×	5.0 ~	10.0
*	10.0 ~	15.0
△	15.0 ~	20.0
◇	20.0 ~	25.0
○	25.0 ~	30.0
⊗	30.0 ~	40.0
⊘	40.0 ~	50.0
☆	50.0 ~	

YEAR=1988
 DATE= 121120
 θ= 50
 BET=2.00

図-3.1.14 対象降水時の降水強度の分布



凡例 (単位: mm/h)

!	: 30.0 ~ 33.0
+	: 33.0 ~ 36.0
X	: 36.0 ~ 39.0
*	: 39.0 ~ 42.0
△	: 42.0 ~ 45.0
◇	: 45.0 ~ 48.0
⊙	: 48.0 ~ 51.0
×	: 51.0 ~ 54.0
⋈	: 54.0 ~ 57.0
☆	: 57.0 ~

YEAR=1988
DATE= 121120
B= 50
BET=2.00

図-3.1.15 対象降水時の反射因子の分布

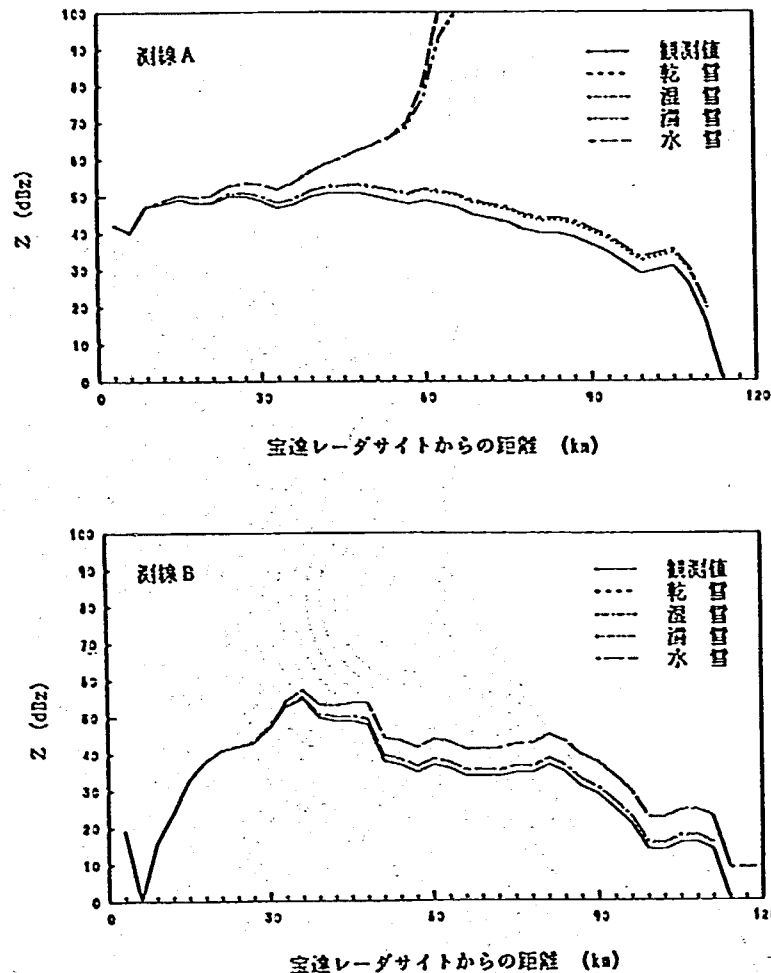


図-3.1.16 Z の観測値と各降雪モデルによって減衰を考慮した計算値

- ・ 測線 A では Z のピーク値は測線 B よりも小さいにも関わらず計算値が発散を起こしている。すなわち 45~50 dBZ の強い反射がビーム方向に長く存在する場合、トータル減衰量の計算は不安定になりやすい。
- ・ A, B とともに Z の観測値はピークの位置から遠距離になるにつれてなだらかな下降カーブを描いている。これについては、
 - ・ 実際に降水システムの活動が遠距離で弱くなっている
 - ・ ビームが上昇することによって降水粒子の充満度が低下している
 - ・ ビーム方向に降水粒子の反射特性が変化し、反射が弱くなっている
 - ・ 減衰の影響がある

等の理由が考えられ、特に 1 機のレーダ単独で減衰の影響と判定を下すことは通常困難である。しかしビームが水分の多い雪がブライトバンドを通過した背後で降雪粒子による減衰を受ける可能性があるということは常に注意しておく必要があるだろう。

3.1.5 ま と め

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

ア．含水率の異なる4種類の湿雪モデルを設定し、既存の調査結果や Mie の散乱理論によって適当と思われる密度、粒径分布、誘電率等を与えた。これらの降雪モデルより、降水量と減衰定数および反射因子と減衰定数との関係を求めた。降水強度 (Rmm/h) と減衰定数 (dB/km) の関係は次の通りである。

$$K_R = 0.0023 \times R^{1.00} \quad (\text{乾雪})$$

$$0.0035 \times R^{0.91} \quad (\text{温雪})$$

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

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

雪による減衰定数は同じ降水強度の降雨の場合と比較して同程度～10 倍の程度であり、含水率の高い雪ほど大きい値をとる。したがって湿った雪では減衰が無視できない。

イ．降雪粒子の密度と含水率をパラメータとする減衰定数の感度分析を行った。その結果、モデル降雪に関しては減衰定数は含水率が 0.35 のあたりで最大となり、また密度の低い領域では減衰定数は専ら含水率のみの関数となっていることが分かった。

ウ．宝達山レーダのデータより減衰の影響が特に大きいと思われるケースを抽出し、減衰量の評価を行った。各降雪モデルの減衰定数を与えたところ、強いエコーの背後で電波は 2～8 dB の減衰を受けているという結果が得られた。しかし強いエコーの連続するところでは計算値が発散する場合があります、このケースでは濡雪・水雪のモデルでは減衰定数をやや過大に見積もっていることが分かった。

3.2 雪片の移流を考慮した降雪量の測定

3.2.1 はじめに

レーダによる降雪観測は、一般に降雨観測に比べて精度が劣る。その主な原因の1つとして次の点が揚げられる。降雪粒子の落下速度は、雨滴の落下速度（約9m/s）に比べて約1m/sと小さいため、レーダで観測している高度面から地表面まで降下する間の水平距離が大きく、これにより空間的な観測精度が低下する。この降雪粒子の水平風による移流は、落下速度及び水平移動ベクトルが得られれば補正を行うことが可能である。

ここでは、DNDレーダによるVAD観測から求めた水平移動ベクトルを利用して、移流の効果を考慮した場合の降雪観測の精度について調べた。

3.2.2 降雪観測

レーダによる降雪観測は、富山県立山町芦原（東経137°17'08"、北緯36°41'27"）をレーダサイトとして実施した。観測期間は、昭和62年12月21日から昭和63年3月18日の間の61日間である。この期間中の地上降雪観測は、レーダサイトから約15Kmの地点に0.5mm転倒樹雨量計（ヒータ付き）を12台設置することにより実施した。図-3.2.1に観測所位置図を示す。また、表-3.2.1に観測所一覧表を示す。

検討に用いる降雪については、地上気温が0℃以下（AMeDAS富山）の降雪の中から表-3.2.2に示す5降雪を対象とした。

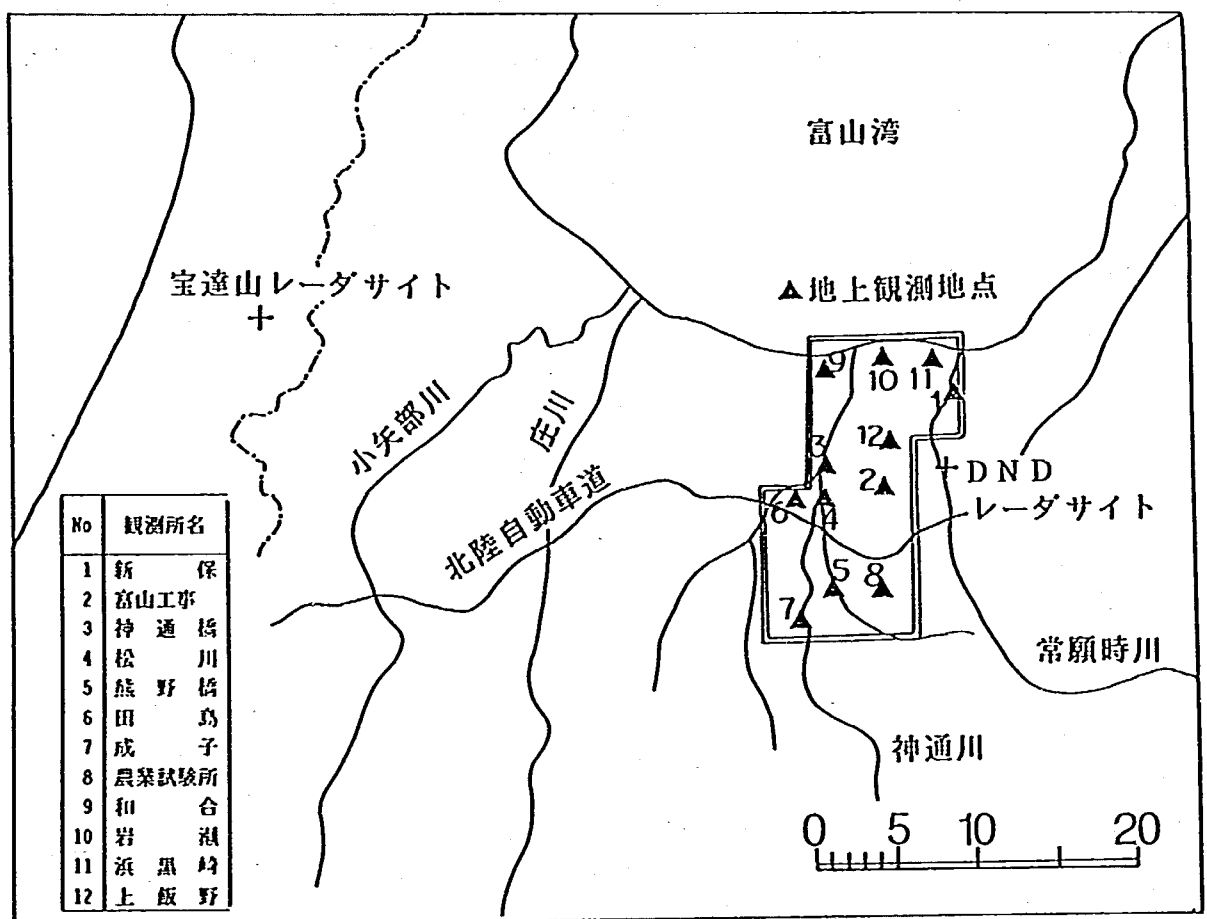


図-3.2.1 観測所位置図

表-3.2.1 観測所一覧表

No	観測所名	レーダサイトからの距離			方位角 (°)	メッシュNo	
		X (km)	Y (km)	L (km)		レンジ	セクタ
1	新保	0.57	5.18	5.21	6.29	11	5
2	富山工事	-4.10	-0.86	4.19	258.12	9	184
3	神通橋	-8.57	-3.14	9.12	249.87	19	178
4	松川	-7.60	-1.94	7.84	255.69	16	182
5	熊野橋	-6.63	-7.73	10.19	220.62	21	157
6	田島	-9.50	-2.25	9.76	256.68	20	183
7	成子	-9.12	-9.06	12.85	225.20	26	161
8	農業試験所	-4.10	-7.40	8.46	209.00	17	149
9	和合	-7.54	6.72	10.10	311.72	21	222
10	岩瀬	-4.54	6.87	8.24	326.57	17	233
11	浜黒崎	-0.97	7.18	7.25	352.33	15	251
12	上飯野	-2.95	2.00	3.56	304.14	8	217

(注) レーダサイトからの距離

X : 東西方向 (東が正)、Y : 南北方向 (北が正)、L : 実距離

表-3.2.2 対象降雪

No	期 間	時間数	レーダ仰角		地上雨量 (12地点平均)	
			偏 波	ドップラ	時間最大	累 加
1	1/ 9 23:00 ~ 1/10 9:00	1 1	3°	40°	0.4mm	2.7mm
2	1/10 19:00 ~ 1/11 9:00	1 5	3°	40°	0.6mm	4.2mm
3	2/ 2 20:00 ~ 2/ 3 8:00	1 3	3°	40°	0.4mm	2.3mm
4	2/ 3 12:00 ~ 2/ 4 9:00	2 2	3°	40°	0.5mm	3.5mm
5	2/ 7 19:00 ~ 2/ 8 7:00	1 3	3°	40°	0.5mm	2.7mm

3. 2. 3 地上観測地点における移流量

降雪観測においては、水平風による移流の影響を多分に受けるため、レーダ観測位置と地上観測位置のずれ、及び、落下所要時間による観測時刻のずれの考慮が必要である。図-3. 2. 2にレーダのビーム高度(仰角 3°)及び雪の落下速度を 1m/s と仮定したときの落下所要時間を示す。これから、レーダ観測の最遠端である 40km 地点では、ビーム高度は、約 2km となり、その高度から地上に到達するまでの所要時間は、36分程度要することがわかる。

そこで、ここでは、レーダ観測と地上観測の位置対応と落下時間による観測時間のずれの概略を検討するため、地上からレーダ観測地点の上空までを一様風、落下時間を 1m/s と仮定して、移流距離と落下時間を調べた。

計算ケースは、次のとおりとし、各観測所について計算した。

風向 西、南西、北西

風速 $0, 2, 5, 10, 15, 20\text{ m/s}$

なお、レーダメッシュについては、レーダサイトを中心とする 161×161 の直交メッシュ(1メッシュは、 $500\text{m} \times 500\text{m}$ である。)を用い、観測所位置等を表した。

表-3. 2. 3に観測所1~4の計算結果を一例として示す。

これらから、風速 20m/s では、ほとんどの観測所で観測不可能となることがわかった。また、表中の落下時間が36分を超えるものは、レーダ観測範囲外となるもので、実際には、観測不可能である。

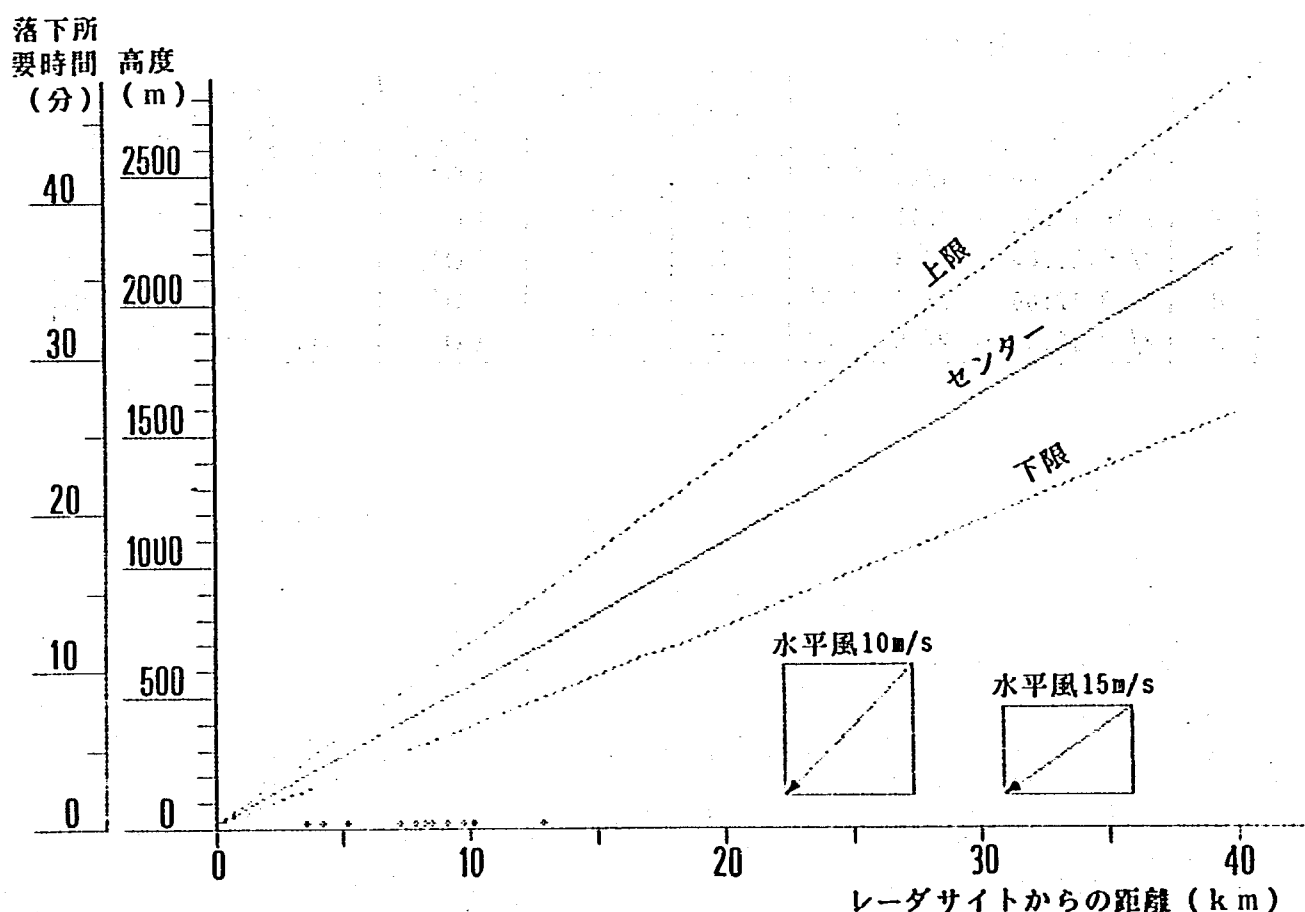


図-3. 2. 2 ビーム高度図

表-3. 2. 3 (a) 地上移流距離
(観測所1 (新保)、 $I_0=1$, $J_0=10$)

風向	風速 (m/S)	メッシュNo		移流距離 (Km)	落下時間 (分)
		I	J		
西	0	1	10	0.0	4.9
西	2	-1	10	1.0	4.8
西	5	-2	10	1.5	4.9
西	10	-5	10	3.2	5.4
西	15	-11	10	6.2	7.0
西	20	****	****	*****	*****
南西	0	1	10	0.0	4.9
南西	2	0	9	1.0	4.2
南西	5	-1	9	1.2	4.1
南西	10	-2	7	2.1	3.6
南西	15	-3	6	2.9	3.3
南西	20	-4	5	3.7	3.1
北西	0	1	10	0.0	4.9
北西	2	0	12	1.0	5.5
北西	5	-1	13	1.8	6.0
北西	10	-6	17	5.0	8.4
北西	15	-21	33	16.0	17.8
北西	20	****	****	*****	*****

表-3. 2. 3 (b) 地上移流距離
(観測所2 (富山工事)、 $I_0=-8$, $J_0=-2$)

風向	風速 (m/S)	メッシュNo		移流距離 (Km)	落下時間 (分)
		I	J		
西	0	-8	-2	0.0	4.0
西	2	-10	-2	1.0	4.8
西	5	-11	-2	1.6	5.3
西	10	-18	-2	5.0	8.3
西	15	-44	-2	18.0	20.1
西	20	****	****	*****	*****
南西	0	-8	-2	0.0	4.0
南西	2	-10	-3	1.0	4.7
南西	5	-10	-4	1.5	5.1
南西	10	-15	-8	4.5	7.6
南西	15	-31	-24	16.0	17.8
南西	20	****	****	*****	*****
北西	0	-8	-2	0.0	4.0
北西	2	-9	-1	0.6	4.2
北西	5	-10	0	1.4	4.8
北西	10	-14	4	3.8	6.4
北西	15	-25	15	12.0	13.3
北西	20	****	****	*****	*****

表-3. 2. 3 (c) 地上移流距離
(観測所3 (神通橋)、 $I_0=-17$, $J_0=-6$)

風向	風速 (m/S)	メッシュNo		移流距離 (Km)	落下時間 (分)
		I	J		
西	0	-17	-6	0.0	8.3
西	2	-19	-6	1.1	9.2
西	5	-24	-6	3.3	11.1
西	10	-38	-6	10.3	17.3
西	15	-107	-6	45.0	50.0
西	20	****	****	*****	*****
南西	0	-17	-6	0.0	8.3
南西	2	-19	-8	1.1	9.2
南西	5	-22	-11	3.3	11.1
南西	10	-31	-21	10.1	17.0
南西	15	-78	-67	43.0	47.8
南西	20	****	****	*****	*****
北西	0	-17	-6	0.0	8.3
北西	2	-20	-3	2.0	9.2
北西	5	-21	-2	2.9	9.7
北西	10	-28	4	7.6	12.8
北西	15	-50	26	23.0	25.6
北西	20	****	****	*****	*****

表-3. 2. 3 (d) 地上移流距離
(観測所4 (松川)、 $I_0=-15$, $J_0=-4$)

風向	風速 (m/S)	メッシュNo		移流距離 (Km)	落下時間 (分)
		I	J		
西	0	-15	-4	0.0	7.2
西	2	-17	-4	1.0	8.1
西	5	-21	-4	2.9	9.7
西	10	-33	-4	9.1	15.2
西	15	-89	-4	37.0	41.2
西	20	****	****	*****	*****
南西	0	-15	-4	0.0	7.2
南西	2	-17	-5	1.0	7.9
南西	5	-19	-8	2.8	9.4
南西	10	-27	-16	8.5	14.3
南西	15	-62	-51	33.0	36.7
南西	20	****	****	*****	*****
北西	0	-15	-4	0.0	7.2
北西	2	-17	-2	1.0	7.7
北西	5	-19	0	2.6	8.6
北西	10	-25	6	7.0	11.7
北西	15	-46	27	22.0	24.5
北西	20	****	****	*****	*****

3.2.4 上層風の設定

雪粒子の水平移動ベクトルを求めるためには、個々の対象降雪におけるドップラモードでの観測データを用いて上層風を設定する必要がある。風向・風速の推定は、VAD解析で256セクター中30セクター以上で観測値があるものを用い、風向・風速データとしての採択は、理論曲線にあてはめた場合の相関係数を判断指標とする。

(1) VAD解析

VAD解析は、従来の方式に加えて、次に示す新方式のVAD解析についても検討を行った。

すなわち、従来の方法では、水平風速が一樣であると仮定しているが、実際には、かならずしも一樣ではなく正弦曲線にあてはめるのが困難な場合がある。そのような場合は、以下の方法により計算ができる。

レーダ方位角を β 、仰角を α 、平均ドップラ速度を V_β 、水平風速を V_H 、落下速度を V_F 、風向を θ として、水平風速 V_H の x 、 y 成分 V_x 、 V_y を次式で表す。

$$V_x = V_{x0} + \frac{\partial V_x}{\partial x} x + \frac{\partial V_x}{\partial y} y \quad (3.2.1)$$

$$V_y = V_{y0} + \frac{\partial V_y}{\partial x} x + \frac{\partial V_y}{\partial y} y \quad (3.2.2)$$

ここで、 V_{x0} 、 V_{y0} は基準となる方位角における x 、 y 成分である。また、ドップラ速度 V_β は、次のように表される。

$$V_\beta = -V_x \cos \beta \cos \alpha - V_y \sin \beta \cos \alpha + V_F \sin \alpha \quad (3.2.3)$$

上式に(3.2.1)、(3.2.2)式を代入すると、

$$\begin{aligned} V_\beta = & -\frac{1}{2} r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + V_F \sin \alpha \\ & - V_{x0} \cos \alpha \cos \beta - V_{y0} \cos \alpha \sin \beta \\ & - \frac{1}{2} r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \cdot \cos 2\beta \\ & - \frac{1}{2} r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \cdot \sin 2\beta \end{aligned} \quad (3.2.4)$$

この式は、下式のように β を変数とするフーリエ級数の形に書ける。

$$V_\beta = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\beta + b_n \sin n\beta) \quad (3.2.5)$$

この場合、0でない係数は次のとおりである。

$$a_0 = -r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + 2 V_F \sin \alpha \quad (3.2.6a)$$

$$a_1 = -V_{x0} \cos \alpha \quad (3.2.6b)$$

$$b_1 = -V_{y0} \cos \alpha \quad (3.2.6c)$$

$$a_2 = -\frac{1}{2} r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) \quad (3.2.6d)$$

$$b_2 = -\frac{1}{2} r \cos \alpha \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) \quad (3.2.6e)$$

式(3.2.6b)、(3.2.6c)から水平風速 V_H 、風向 θ は、次のように求まる。

$$V_H = (V_{x0}^2 + V_{y0}^2)^{1/2} = -(a_1^2 + b_1^2)^{1/2} / \cos \alpha \quad (3.2.7)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{a_1}{b_1} \quad b_1 < 0 \quad (3.2.8a)$$

$$\theta = \frac{3\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{a_1}{b_1} \quad b_1 > 0 \quad (3.2.8b)$$

(2) 風向・風速データの検討

従来の方法のVAD解析では、0付近のデータを欠落補正した場合と無視した場合の両方について計算を行い、新VAD方式による結果と比較した。

また、風向・風速データの採択基準として、理論曲線にあてはめた場合の相関係数を高く設定すると、データの精度は良くなるが、データの欠測が多くなる。逆に、低く設定すると欠測は少なくなるが、データの精度は落ちる。

そこで、ここでは、VAD解析の方法を検討すると共に、風向・風速データとして採用する判断基準としての相関係数をどの程度に設定すればよいか、その検討を行った。

全体のデータ数に対して、相関係数が0.98以上のデータ、相関係数0.95以上のデータ及び、相関係数0.91以上のデータの占める割合を求めると次のようになる。

	0.98以上	0.95以上	0.91以上
従来のVAD解析(欠落補正有り)	17~53%	34~67%	45~73%
従来のVAD解析(欠落補正なし)	14~47%	30~62%	40~71%
新方式VAD解析	18~48%	34~63%	40~70%

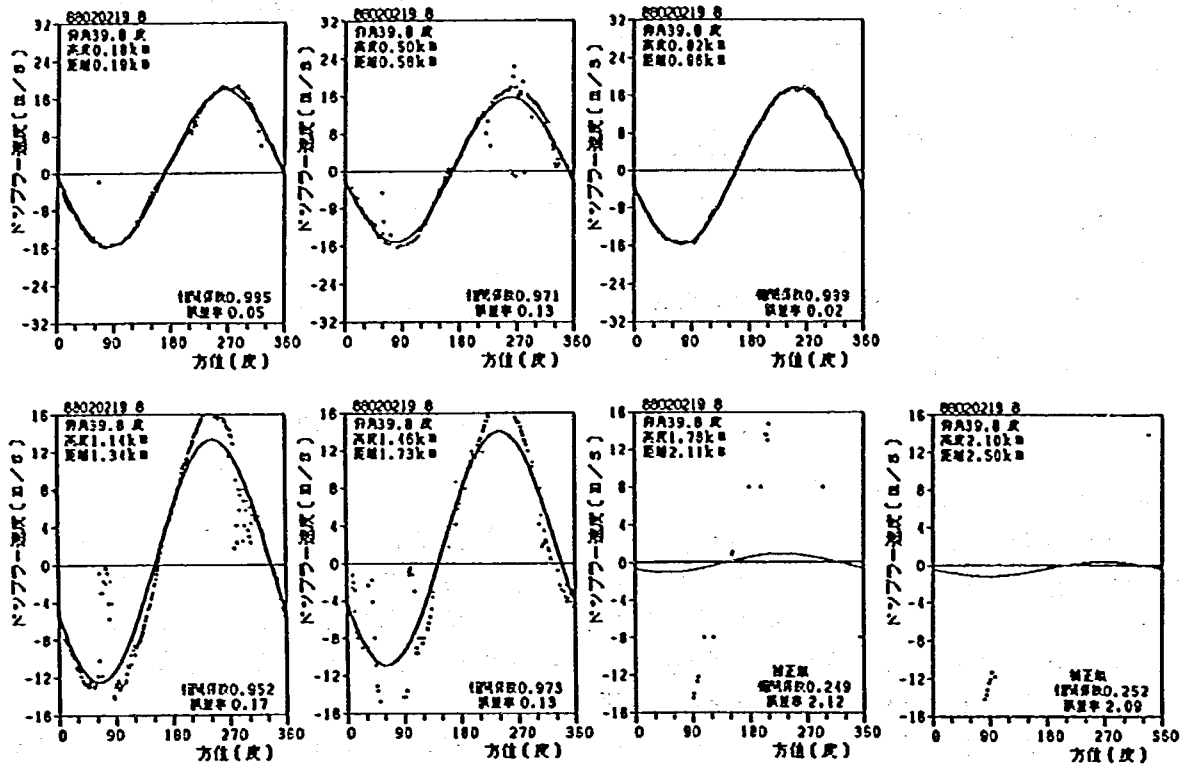
これを見ると、新方式のVAD解析は、従来のVAD解析に比べて、欠落補正なしの場合よりは精度は良いが、欠落補正有りの場合よりは劣ると言える。しかし、相関係数の分布自体は、大きな差はなく、5割程度のデータが採択できるのは、相関係数0.91以上となる。ただし、0.95以上との差はあまりない。

次に、VAD図から見た場合には、解析方法によりどの程度違いがあるか、また、どの程度の相関係数まで採択可能かを検討した。図-3.2.3にVAD図の一例を示す。従来のVAD解析図は、欠落補正を行った場合の図である。これらから、解析方法による大きな違いはなく、相関係数0.97以上であるなら理論曲線と非常によく合っており、精度良い風向・風速データが得られることがわかる。

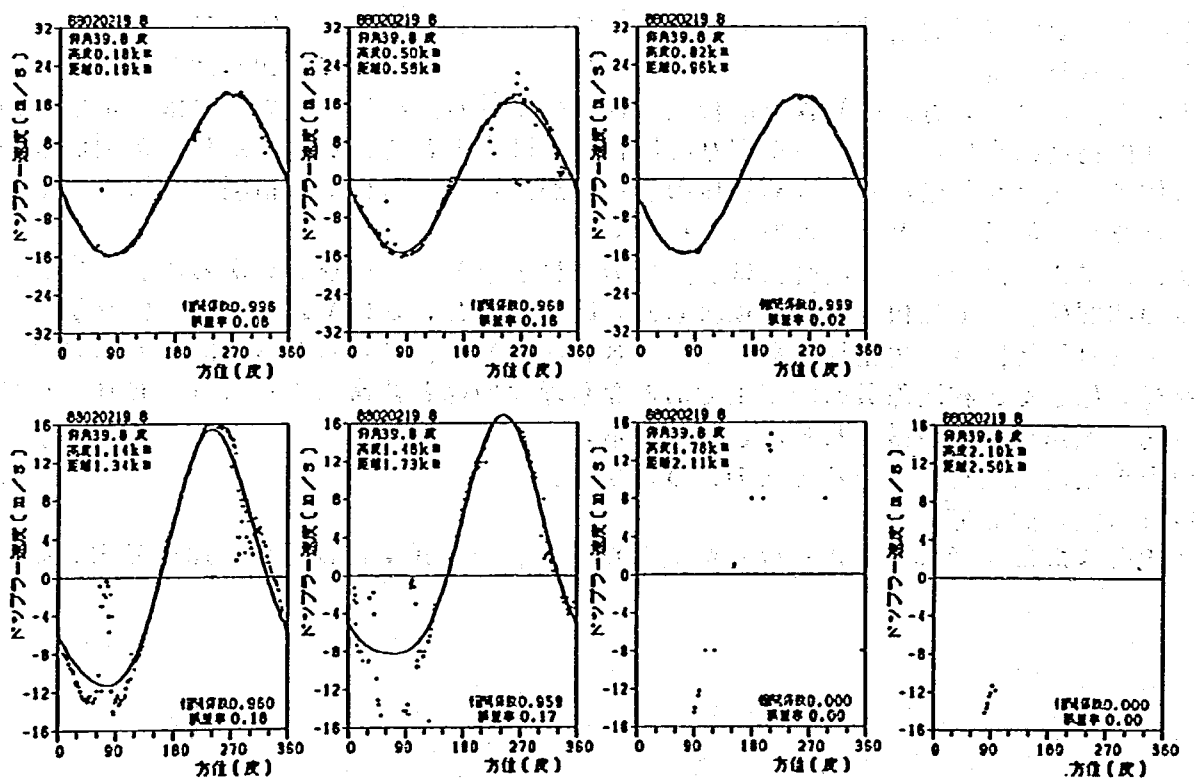
以上の検討結果をまとめると次のようになる。

(解析方法に関して)

①相関係数は、従来のVAD解析が最も良いが、新方式VAD解析と比べて大きな違い



(従来VAD解析)



(新方式VAD解析)

図-3.2.3 VAD図(降雪NO.3、2/2、19:08)

はない。

②VAD図の大きな違いはない。

(採択基準に関して)

①5割程度が採択できるのは、相関係数0.91以上である。

②相関係数0.97以上で、VAD図の精度が良い。

(3)水平風の設定

以上の検討結果から、次の条件により水平風を設定した。

①VAD解析の方法は、従来のVAD解析(欠落補正あり)と新方式VAD解析の両方を用い、どちらか良い方を採択する。

②VAD解析により理論曲線にあてはめた場合の相関係数が、0.97以上のデータを対象とする。

③ドップラ風のデータとして用いるのは、レンジNo1~7の7データとする。偏波モードでの観測仰角は、 3° であるので観測できる最大高度は、約2kmとなる。ドップラモードでの観測仰角 40° であるので、その高度に適應できるのは、レンジNoで7以下のデータとなる。

④欠測値については、レンジ方向及び時間方向について最も近隣のデータ3つの距離重み平均値とする。距離比は、レンジ方向：時間方向=1：1である。なお、レンジ方向は、対象レンジとその上下1レンジのみを用いた。

⑤データの時間間隔は、5分間とする。

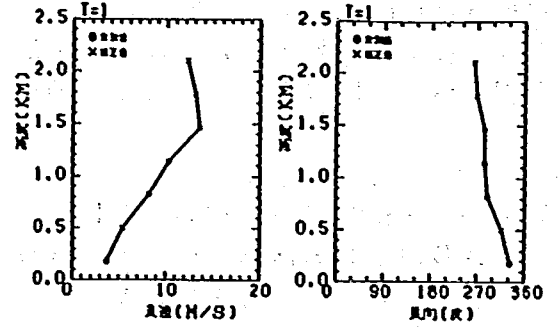
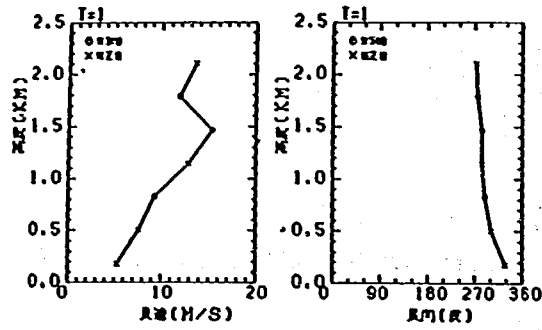
図-3.2.4に解析方法の違いによる風向・風速鉛直図の比較を示す。図中の○は実測値を示しており、×は補填した値を示す。これを見ると、新方式VAD解析の方が、なめらかな鉛直変化を示すことがわかる。特に、風速が大きい場合は顕著である。

図-3.2.5に風向・風速の散布図を示す。これを見ると、レーダ観測による風向・風速は、ゾンデ観測の値と比較的良く合っており、特に異常なデータは無いと考えられる。また、風速データの散布図では、新方式のVAD解析の方が相関係数、相対誤差とも良くなっている。

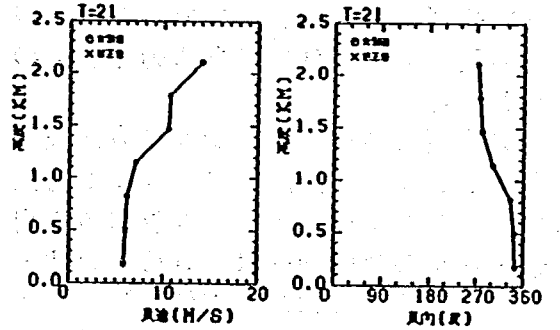
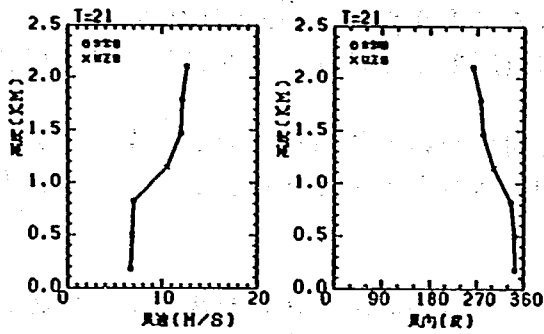
以上の結果から、水平風風としては、新方式のVAD解析により得られたデータを用いる方が適していると考えられる。

(従来のVAD解析)

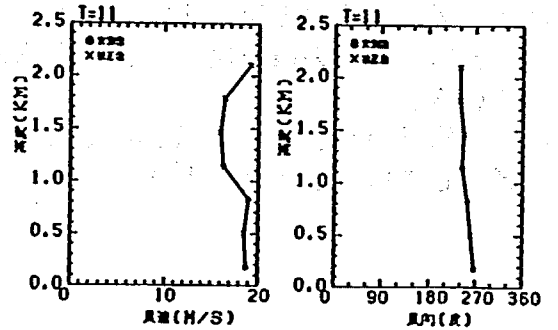
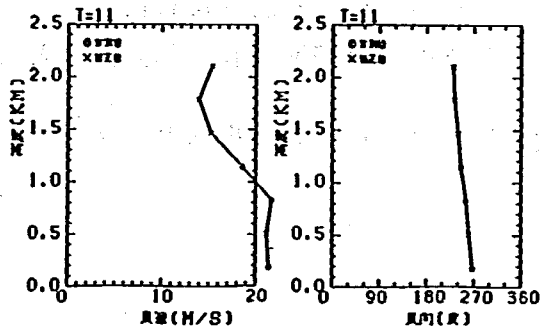
(新方式VAD解析)



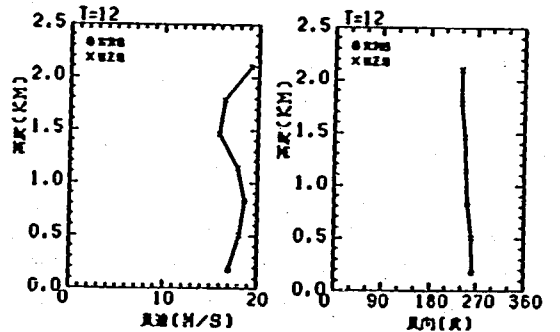
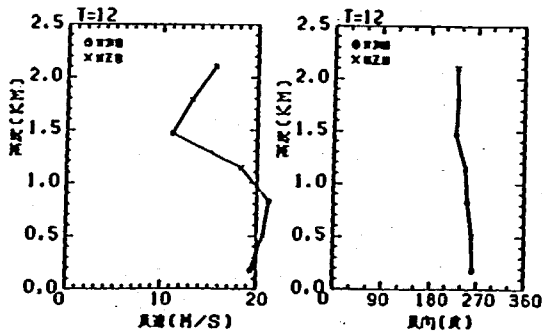
(a)降雪NO. 1



(b)降雪NO. 1

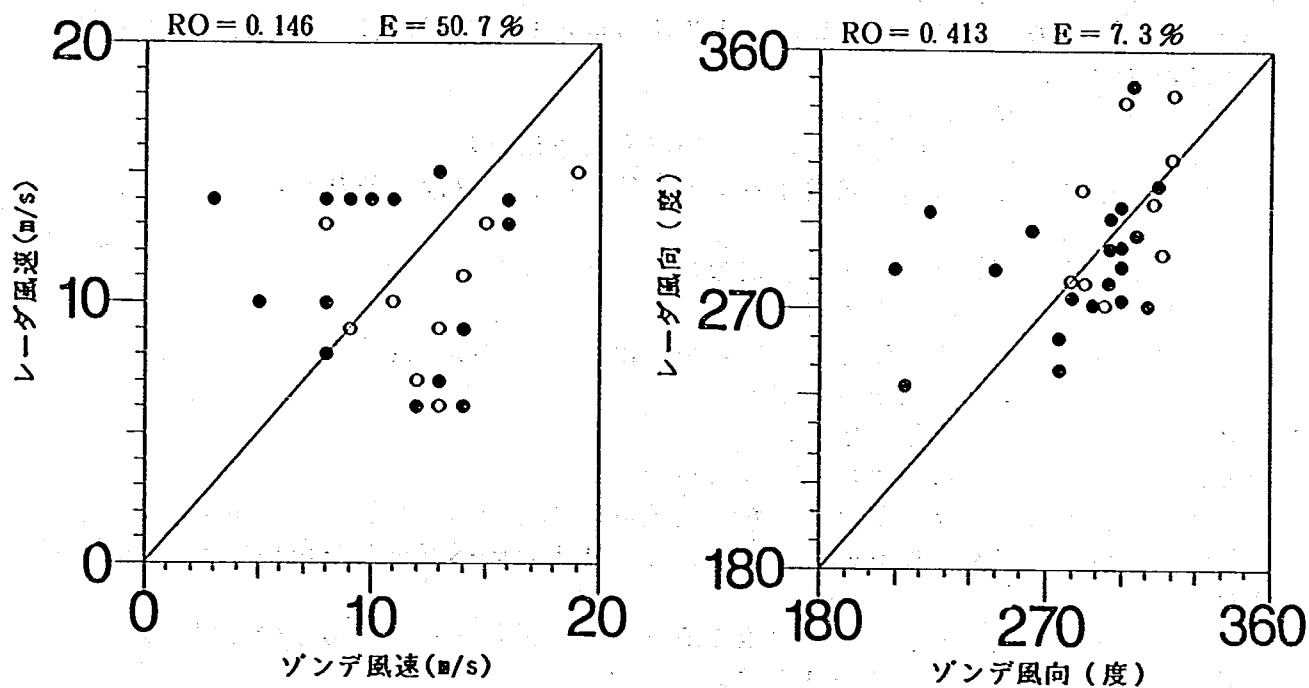


(c)降雪NO. 3

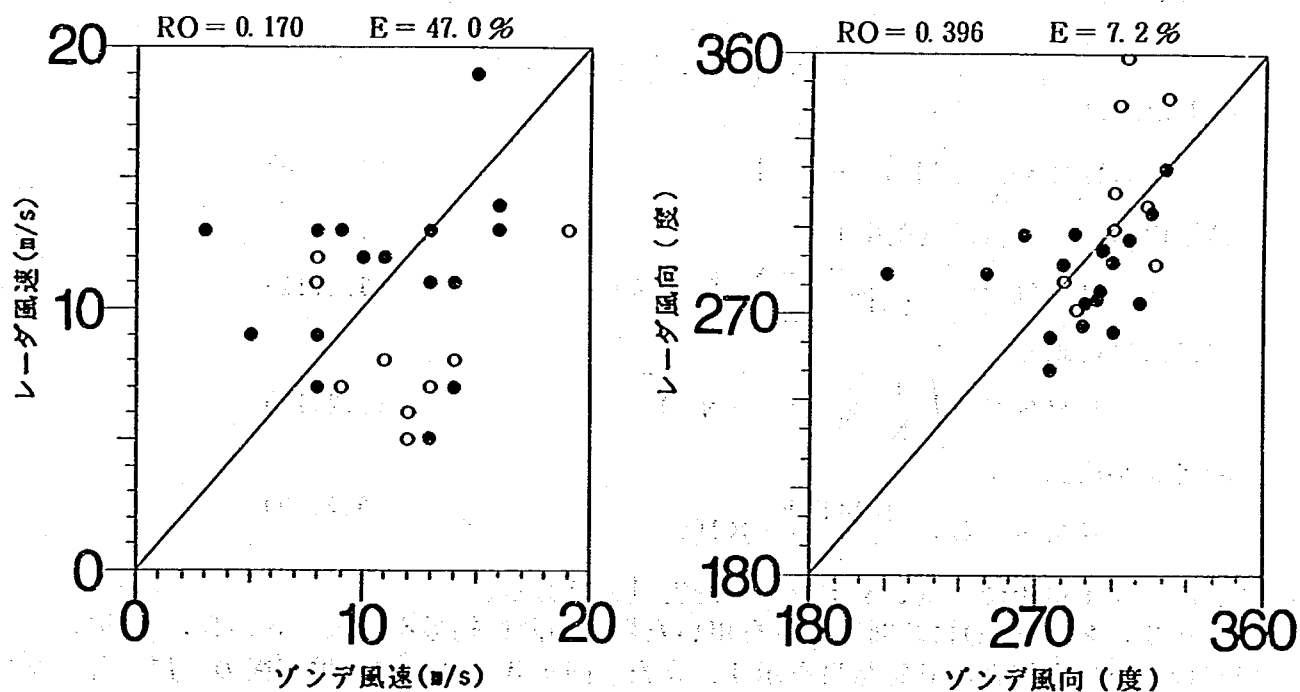


(d)降雪NO. 3

図-3. 2. 4 風向・風速鉛直分布図の比較



(a)従来のVAD解析



(b)新方式VAD解析

- 風向・風速データの補填なし
- 風向・風速データの補填有り

図-3.2.5 風向・風速の散布図

3.2.5 地上観測との対比

降雪観測精度の検討は、地上観測による降雪量とレーダ観測による降雪量を対比させることにより行った。

計算条件は、次のとおりである。

①降雪データは、1時間降雪量及び累加降雪量を用いる。

②反射因子Zから降雪量に変換する際の換算定数B、 β は、それぞれ、2000,2.0を用いる。

③レーダ降雪量の計算ケースは、次の3ケースとする。

ケース1 : 移流を考慮しない。

ケース2 : 移流は考慮しないが、落下時間のみ考慮する。

ケース3 : 移流を考慮する。

④落下速度は、1m/sと仮定する。

なお、移流の考慮は、次の手順により行った。

①4節で設定したドップラデータから高度300mごとの水平移動ベクトルを求める。

②降雨強度データを高度300mごとに分割し、①の移動ベクトルを用いて各高度面を移動させる。

③次データと合成する。データが重なる部分は、最新データの方を優先する。

④5分ごとに上記①～③を繰り返す。

なお、精度評価の指標は、相関係数・平均誤差（相対誤差）・平均誤差率（相対誤差率）・自乗平均誤差・自乗平均誤差率を用いた。それぞれの定義式を以下に示す。

a)相関係数

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2.9)$$

b)平均誤差（相対誤差）

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (3.2.10)$$

c)平均誤差率（相対誤差率）

$$ME(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right| \times 100 \quad (3.2.11)$$

d)自乗平均誤差

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.2.12)$$

e)自乗平均誤差率

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.2.13)$$

ここに、x：地上降雪量、y：レーダ降雪量、である。

表-3.2.4(a)に時間降雪量を用いた場合の計算結果を、表-3.2.4(b)に累加降雪量を用いた場合の計算結果を示す。また、図-3.2.6に散布図の一例（降雪NO.1のケース）を示す。

これらから、時間降雪量、累加降雪量両者とも、わずかではあるが、移流による効果が

見られる。落下時間のみを考慮した場合は、全く考慮しない場合に比べて、若干良くなる程度でほとんど変わらない。また、累加降雪量の降雪NO. 3が、最も移流の効果が見られたケースであるが、この降雪は、ドップラデータの欠測が少なく、また、風速も強かったためではないかと考えられる。全体的な評価としては、今回の観測結果からは、移流を考慮したことによる顕著な精度改善は見られなかった。その原因として次のことが挙げられる。

- ①風速が小さい場合は、ドップラデータから推定する測定誤差が大きい。
- ②落下中の雪片の上下層間の混合がある。
- ③地上雨量計自体の測定精度に問題（ヒータ熱による蒸発、時間のずれ等）がある。
- ④DNDレーダの観測高度が低い。

表-3. 2. 4 (a) 降雪量観測精度（時間降雪量）

降雪 No	区 分	相関係数	平均誤差 (mm)	平均誤差率 (%)	自乗誤差 (mm)	自乗誤差率 (%)
1	1	0.448	0.358	46.4	0.491	146.7
	2	0.467	0.358	46.7	0.496	142.9
	3	0.435	0.343	46.1	0.462	136.7
2	1	0.302	0.452	67.9	0.568	152.8
	2	0.309	0.451	66.4	0.563	151.4
	3	0.336	0.410	60.3	0.534	145.4
3	1	-0.085	0.420	43.3	0.504	243.2
	2	-0.072	0.431	41.2	0.520	214.7
	3	-0.115	0.357	49.9	0.446	183.6
4	1	0.066	0.370	69.8	0.491	214.3
	2	0.165	0.352	63.5	0.458	193.4
	3	-0.057	0.354	76.6	0.458	185.8
5	1	-0.138	0.466	62.2	0.589	199.0
	2	-0.083	0.456	63.0	0.579	195.5
	3	-0.149	0.411	59.2	0.532	176.8

(注) 区分1：移流なし、区分2：移流なし（落下時間のみ考慮）

区分3：移流あり

表-3. 2. 4 (b) 降雪量観測精度（累加降雪量）

降雪 No	区 分	相関係数	平均誤差 (mm)	平均誤差率 (%)	自乗誤差 (mm)	自乗誤差率 (%)
1	1	0.505	2.182	98.6	3.391	105.1
	2	0.589	2.249	102.0	3.399	99.7
	3	0.525	2.106	139.3	3.072	92.6
2	1	-0.200	3.709	272.5	4.784	98.4
	2	-0.185	3.726	270.0	4.771	98.1
	3	-0.334	2.910	253.2	4.147	86.9
3	1	-0.070	2.491	280.4	3.118	201.7
	2	-0.125	3.683	373.2	4.253	148.5
	3	-0.118	2.155	222.4	2.675	111.0
4	1	-0.273	2.692	73.7	3.528	117.6
	2	0.336	3.419	90.4	4.347	106.3
	3	-0.288	2.496	63.2	3.151	91.2
5	1	-0.132	2.900	154.5	3.777	107.9
	2	-0.096	2.909	155.9	3.751	107.2
	3	-0.212	2.442	140.6	3.076	87.9

(注) 区分1：移流なし、区分2：移流なし（落下時間のみ考慮）

区分3：移流あり

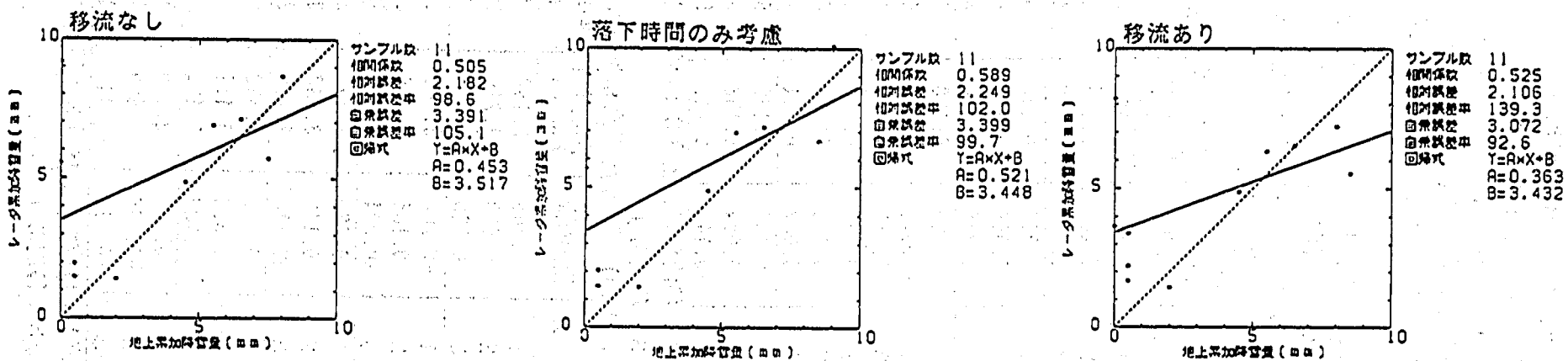
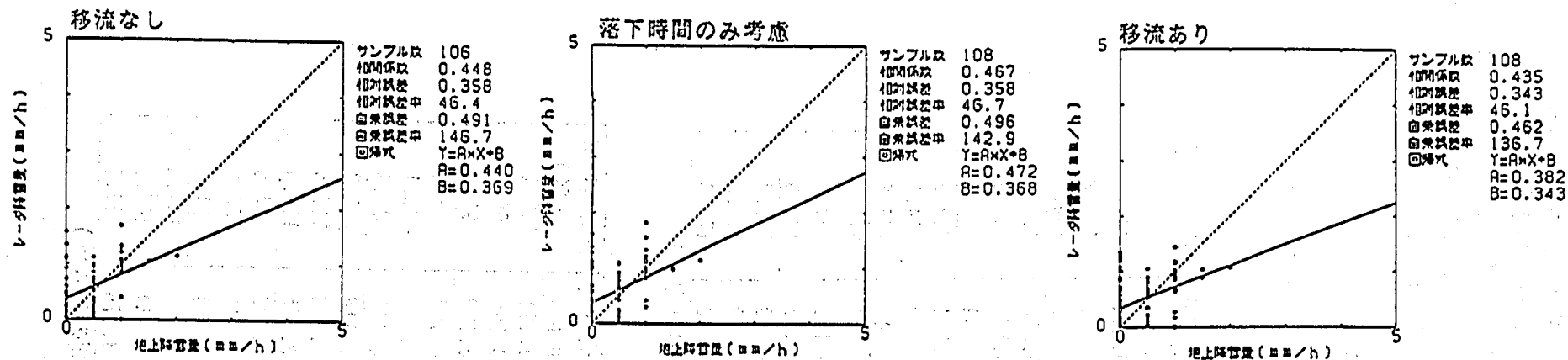


図-3.2.6 散布図(降雪NO.1)

3. 2. 6 宝達山レーダデータを用いた場合の移流の効果

以上のように、DNDレーダデータでは、観測範囲も狭く、観測高度も低いため移流の効果がわかりにくいので、ここでは、宝達山レーダデータを用いて同様の計算を行い移流の効果の検討を行った。

表-3. 2. 6に対象降雪を示す。また、地上地点は、DNDレーダデータによる検討に用いた地上雨量計観測の12地点に加えて、アメダス観測の22地点のデータを用いた。なお、宝達山レーダの降雪換算定数 B 、 β は、1000, 1.5を用いた。

表-3. 2. 7に地点ごと全降雪の1時間降雪量のデータを用いた場合の結果を示す。また、図-3. 2. 7に全地点、全降雪の1時間降雪量のデータを用いた場合の散布図、図-3. 2. 8に6時間平均降雪量のデータを用いた場合の結果を示す。

これらから、次のことが言える。

- ①移流を考慮した場合の方が、移流を考慮しない場合に比べて精度が向上する傾向がみられる。
- ②時間降雪量においても移流の効果がみられるが、時間的に平均した方がより精度が向上する。

表-3. 2. 6 対象降雪 (宝達山レーダ)

ケース	対 象 期 間					継続時間 (hour)	最大降水 強度 (puls)	気温 (° C)	
	開 始				終 了			MAX	MIN
S 1	1988	1/9	16:00	1/11	11:00	43	6 (8)	1.2	-1.6
S 2	1988	1/23	14:00	1/25	8:00	42	6 (8)	1.1	-1.3
S 3	1988	2/2	20:00	2/4	5:00	33	4 (6)	0.0	-4.0
S 4	1988	2/9	6:00	2/9	24:00	18	4 (6)	2.8	-2.0
S 5	1988	2/18	16:00	2/19	10:00	18	4 (6)	0.4	-2.5
S 6	1987	2/25	7:00	2/25	21:00	14	4 (6)	1.1	-1.7

注) 最大降水強度は富山(アメダス)の各期間内最大時間雨量($\times 0.5\text{mm/h}$)を示す。()内はその他の地点での最大値を示す。
気温は富山、八尾(アメダス)の値から各期間の最大と最小値を示した。

3. 2. 7 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ①DNDレーダデータを用いると風速 20m/s 以上の風速がある場合は、レーダ観測と地上観測の対応がとれない。
- ②VAD観測から上空の風向・風速データを得るには、理論曲線との相関が、0.97以上が良い。
- ③解析方法による大きな違いはないが、新方式VAD解析による方が若干良いと言える。
- ④移流を考慮することにより、観測精度の向上が見られた。特に、宝達山レーダデータを用いた場合に比較的顕著に確認できた。
- ⑤DNDレーダデータによる解析結果によると、落下時間のみ考慮した場合は、全く移流を考慮しない場合と比べて、精度がほとんど変わらなかった。

表-3.2.7 降雪量観測精度(全降雪、1時間降雪量)

地点 番号	地点名	移流を無視した場合		移流を考慮した場合		判定
		相関係数	データ数	相関係数	データ数	
1	熊野橋	-0.05	44	0.20	44	○
2	浜黒崎	0.26	83	0.20	83	×
3	岩瀬	0.16	79	0.30	79	○
4	新保	0.30	55	0.08	55	×
5	富山北消防署	0.03	15	0.00	15	×
6	成子	0.15	105	0.07	105	×
7	松川	0.21	86	-0.16	86	×
8	和合	999.99	1	999.99	1	
9	富山工専	-0.12	52	-0.13	52	×
10	富山工事事務所	0.14	96	-0.04	96	×
11	農業試験所	0.05	56	-0.17	56	×
12	国道維持出張所	0.11	47	0.04	47	×
13	河合	0.19	79	0.35	79	○
14	神岡	0.47	67	0.32	67	×
15	泊	0.32	48	0.34	48	○
16	氷見	0.17	62	0.36	62	○
17	魚津	-0.21	40	0.43	40	○
18	宇奈月	0.36	77	0.42	77	○
19	伏木	0.14	74	0.42	74	○
20	富山	0.02	72	0.17	72	○
21	砺波	0.17	68	0.04	68	×
22	大山	0.07	80	0.25	80	○
23	上市	0.19	85	0.42	85	○
24	福光	0.24	86	0.32	86	○
25	八尾	0.04	92	0.43	92	○
26	立山	999.99	0	999.99	0	
27	平	0.34	108	0.41	108	○
28	細入	0.28	88	0.25	88	×
29	七尾	-0.08	45	0.16	45	○
30	羽咋	-0.25	30	0.43	30	○
31	宇ノ気	0.11	37	0.34	37	○
32	宝達山	999.99	0	999.99	0	
33	金沢	0.23	63	0.57	63	○
34	医王山	999.99	0	999.99	0	
****	全観測点	0.08	2020	0.29	2020	○

凡例：○ 移流を考慮して相関係数がよくなった場合
 × " " 悪くなった場合
 - 移流を考慮しても相関係数に変化がなかった場合
 空欄 どちらかの相関係数が求まらなかった場合

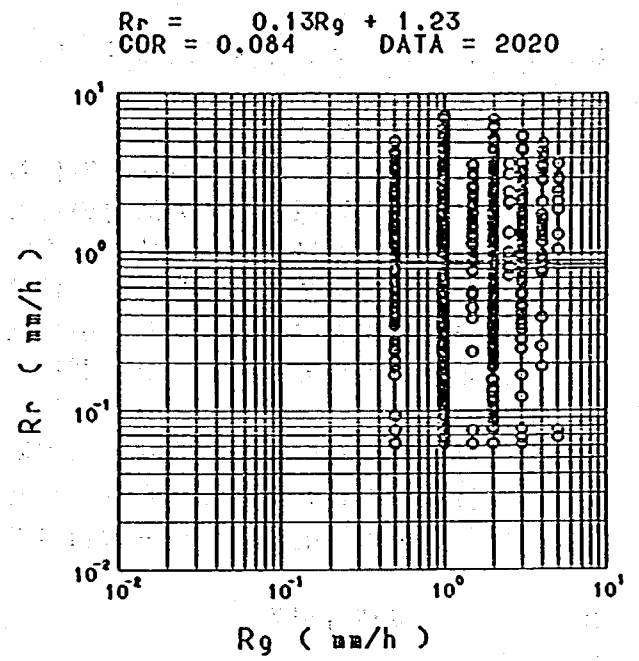
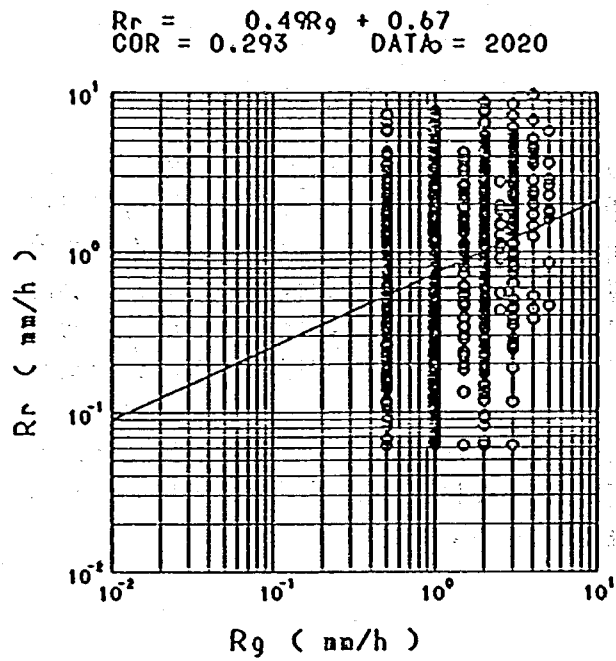


図-3.2.7 散布図 (全地点、全降雪、1時間降雪量)
左: 移流あり, 右: 移流なし

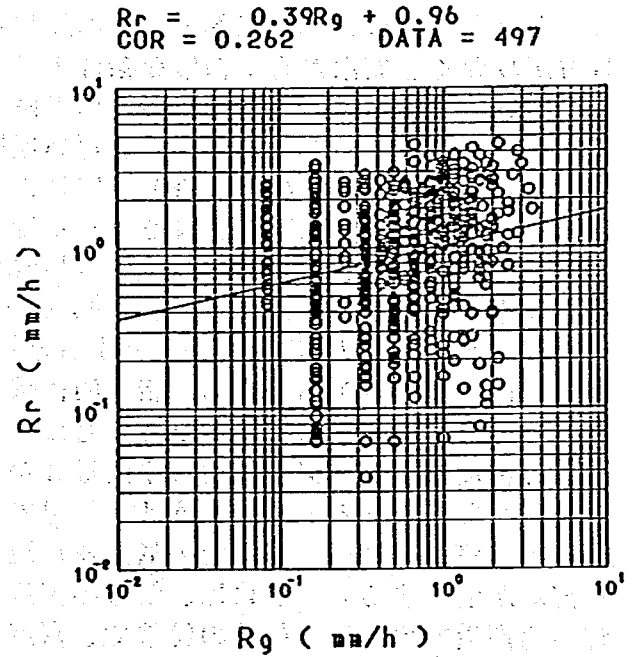
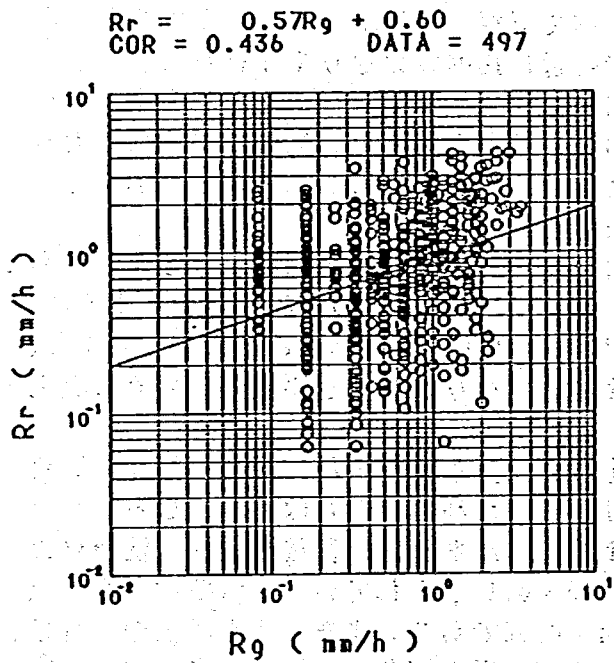


図-3.2.8 散布図 (全地点、全降雪、6時間平均)
(全ケース、全地点、6時間平均)
左: 移流あり, 右: 移流なし

3.3 レーダによる降雪予測の可能性について

3.3.1 はじめに

降積雪に関する情報は、積雪寒冷地における安全な社会生活の維持に不可欠であるのみならず、貴重な水資源としての活用のためにも重要である。特に、豪雪地帯は山岳部周辺に多く、山岳部における降積雪情報の適切な把握は、道路管理及び河川管理の両面から重要な課題となっている。しかし、積雪量はその地形特性に容易に影響されるため、地点降雪量の代表性に限界がある。また、山岳部での観測網の設置及び維持は非常に困難であり、この面から見てリモートセンシング技術の活用による広域的な降雪観測法の開発が望まれる。

本調査は、これらの点を考慮し、降雪観測及び予測にレーダを導入しその実用化を図るための研究の一環として、DNDレーダ及び宝達山レーダによる観測データを用いて降雪予測手法及びその可能性についての検討を行うものである。

3.3.2 降積雪現象

(1)概要

日本は、世界有数の多雪国であると言える。このような日本の多雪は、その地理的条件、すなわち、大陸の東岸に海を隔てて位置し、冬期には、大陸方面からの季節風が卓越することに起因している。

多雪地域での積雪分布を見ると、海岸よりの地域よりも内陸の山間部、平野部の方が積雪が多い。これは、①内陸部では、海岸付近に比べて気温、地温がやや低いため降雪の融け方が少なく、②雨か雪か微妙な条件下では海岸付近に比べ雪になりやすいため、及び、③季節風の強い時は、風と地形の関係で降雪が内陸に収束し降雪量そのものが海岸付近に比べ多くなるため、である。また、短い期間内の降雪分布を見ると、局地性がかなり大きい。これは、雪雲独特の筋（帯）状雲により局地的な降雪がもたらされることに加えて、降雪そのものが地形による影響を大きく受けるためと考えられる。

雪の落下速度は、1 m/s程度（雨の場合は、9 m/s程度）であり、上層風による移流の影響を大きく受ける。したがって、2000mの上空から地上に落下するのに30分程度要することになり、水平方向の風速を10m/sとすると横方向に20kmは吹き流されることになる。また、海上では、上昇流があるため、相対的に落下速度が遅くなり、同じ水平風の速度でも海上と陸上では、移流距離に差が出ることになる。

雪の密度は、レーダや転倒ます雨量計から測定された降水量から積雪深に換算する場合の重要な要素である。雪の密度は、低温であれば小さく、高温であれば大きくなる。したがって、降雪の時期、降雪時の気温及び地域による違いがあり、積雪後の雪は、沈降により密度が変化する。一般には、新雪の密度は、0.05～0.15とされている。厳冬期の季節風の北海道での雪は、乾性の粉雪で、密度は0.04～0.06である。また、太平洋側の降雪は、平野部では、雨か雪かの判定が微妙な気温の比較的高い場合が多く、湿性の高い雪で、密度は0.1～0.2である。

(2)降雪の型

降雪の型は、季節風下の寒気場にかかる季節風型と総観スケールの低気圧に伴って起こる暖気場の低気圧型に分けることができる。季節風型の降雪は、北陸地方などの日本海側に起こり、低気圧型は、主に太平洋側が影響を受ける。また、降雪全体の約7割は、季節風型が占めている。

a)季節風型の降雪

典型的な冬型の西高東低の気圧配置により、シベリア大陸から吹き出した季節風に伴う寒気により生ずる降雪である。この型による降雪の発生システムは、次のとおりである。

季節風によりシベリヤ大陸から冷たい空気が、日本海上に運ばれる。

↓

日本海を北上する対馬暖流により、その上を通過する冷たい空気が暖められる。

↓

暖められた空気は、同時に、温度差(10℃以上ある)によって蒸発する水蒸気の供給を受け軽くなり上昇する。

↓

上層の乾燥した寒気は、重いので下降する。

↓

上層と下層のはげしい対流が起こり、対流雲の高さが2000mを超え3000m程度に達すると、降雪現象が発生する。

季節風型の降雪は、筋状雲や带状雲(日本海収束带状雲)のような独特な雪雲を形成し、持続性があり、「山雪」や「里雪」に代表されるような局地的な降雪をもたらす。

山雪・里雪のそれぞれの特徴は、次のとおりである。

山雪・・・①带状雲の上陸点は石川県より南である。

②北陸より北では、筋状雲が海岸線に直交して進入する。

③陸上の収束量が、山雪に比べ大きい(海上では、両者の収束量は同じ)。

④風速が強く、陸上へ入っても上昇流により雪片の落下速度は小さい。

⑤地上風は、北寄りで6～7 m/s以上のことが多い。

里雪・・・①带状雲の軸は、日本海上でゆるく曲がり、海岸線に沿って北上する。

②带状雲の上陸点は、能登半島西側の付け根より北である。

③上陸して北上する途中で、きまった所で定常的に発達する。

④南からの暖かい気塊が移流してくるため含水量が多い。

⑤地上風は、南寄りの成分が入り、風速は弱く、海岸付近で5 m/s以下である。

b)低気圧型の降雪

日本海上で発達した低気圧の影響により生じる降雪である。この型による降雪の発生システムは、次のとおりである。

低気圧により規模の大きい渦が発生し、南北の空気の移流が大きくなる。

↓

南の暖かい大量の水蒸気を含んだ気流が北上する。

↓

南の下層の暖気が、北の上層の寒気の下へ進入する。

↓

大気的不安定度が増大する。

↓

不安定の解消の形で降雪をもたらす。

低気圧型の降雪は、通常の雨の生成のしくみと同じであり、雨と雪の判別が微妙な場合が多い。また、季節風型と異なり、降雪域が広範囲に及び、大気自体が大量の水分を含んでいるため降雪量の絶対値は大きい。

(3) レーダエコー

レーダにより降雪観測を行った場合、点エコー、線状（带状）エコー、渦状エコーと呼ばれる特有のエコーが観測されている。北陸地方の例では、これらのエコーが次の順序で現れる。

海上で小さな点エコー群が発生する。

↓

エコーセルの形がやや大きくなって、北西から南東に配列する線状エコーが形成される。

↓

沿岸沿いに線状または带状エコーが現れる（渦状エコーが現れることもある）。

↓

エコーは、次第に消滅する。

以下にそれぞれのエコーの主な特徴を示す。

点エコー・・・①海岸から約200～250Km以内に発生する。

②発生条件は、次のとおり。

a. 北西季節風の吹走下である。

b. 1000～850mbのごく下層が対流不安定。

c. 850mbの気温が低い。

③海上で発生する点エコーの寿命は、20～30分。中には、2時間以上の寿命を持ち、太平洋側へ抜けるものもある。（抜け道は、会津盆地、上越線や信越線に沿った地帯、関ヶ原地域。）

④850～700mbの下層の風に流されて拡散して降雪をもたらす。海上で発生した点エコーが下層風に流されて内陸で降雪をもたらすとする、海上で広範囲に出現しているほど降雪量が多くなり、また、エコーの出現範囲は、850mb・700mbの気温が低いほどその範囲が広い。

線状エコー・・・①線の間隔は、一般には、20～40Km。

（带状）

②季節風最盛期や末期にW-E、SW-NEの走向を持つ带状エコーが現れた時

は、里雪や混合型の雪を降らせる。

- ③北陸地方の線状・带状エコーの走向は、ほとんど850~700mbのシアークトルの方向か、あるいは、単純に700mbの風向と一致する。
- ④地形の関係でエコーが特定地域に集中する傾向もある。
- ⑤带状エコーの高さは、点エコーより高く4600m、最大で6000mである。
- ⑥带状エコーの停滞は、大雪になる。
- ⑦エコーパターンが停滞していてもセルや強度は、刻々と変化し移動する。

渦状エコー・・・①小低気圧によるものである。

- ②局地的・時間的に強風雪を集中させる。
- ③北海道から九州までの広い範囲でしばしば観測される。
- ④海上や沿岸で発生したエコーが通過する地点やその付近では、気圧の急下降、突風、風向の急変、雷、強雪、悪視程などが起こり、強雪は、じょう乱の中心よりやや離れた所で降る傾向がある。
- ⑤規模50~200km、寿命数時間~20時間、気圧変化量1~数mb、速度60~90km/h



3.3.3 使用データ

予測に用いるレーダデータは、1988年の宝達山レーダの記録データを使用する。レーダデータの取り扱い、次のとおりとする。

- ①宝達山レーダの定量観測範囲（半径120km円内）全域を用いる。図-3.3.1に観測範囲を示す。
- ②降雨強度に変換する際の換算定数 B 、 β は、2000, 2.0とする。
- ③レーダメッシュは、宝達山レーダサイトを中心とする80×80の直交メッシュ（1メッシュは、3Km×3Km）を用いる。
- ④1時間雨量値を用いる。
- ⑤グランドクラッタの減算は、晴天時のデータから下記に示す期間の値の最大値を用いて行う。

1988年 2/22 11:00 ~ 2/22 15:00

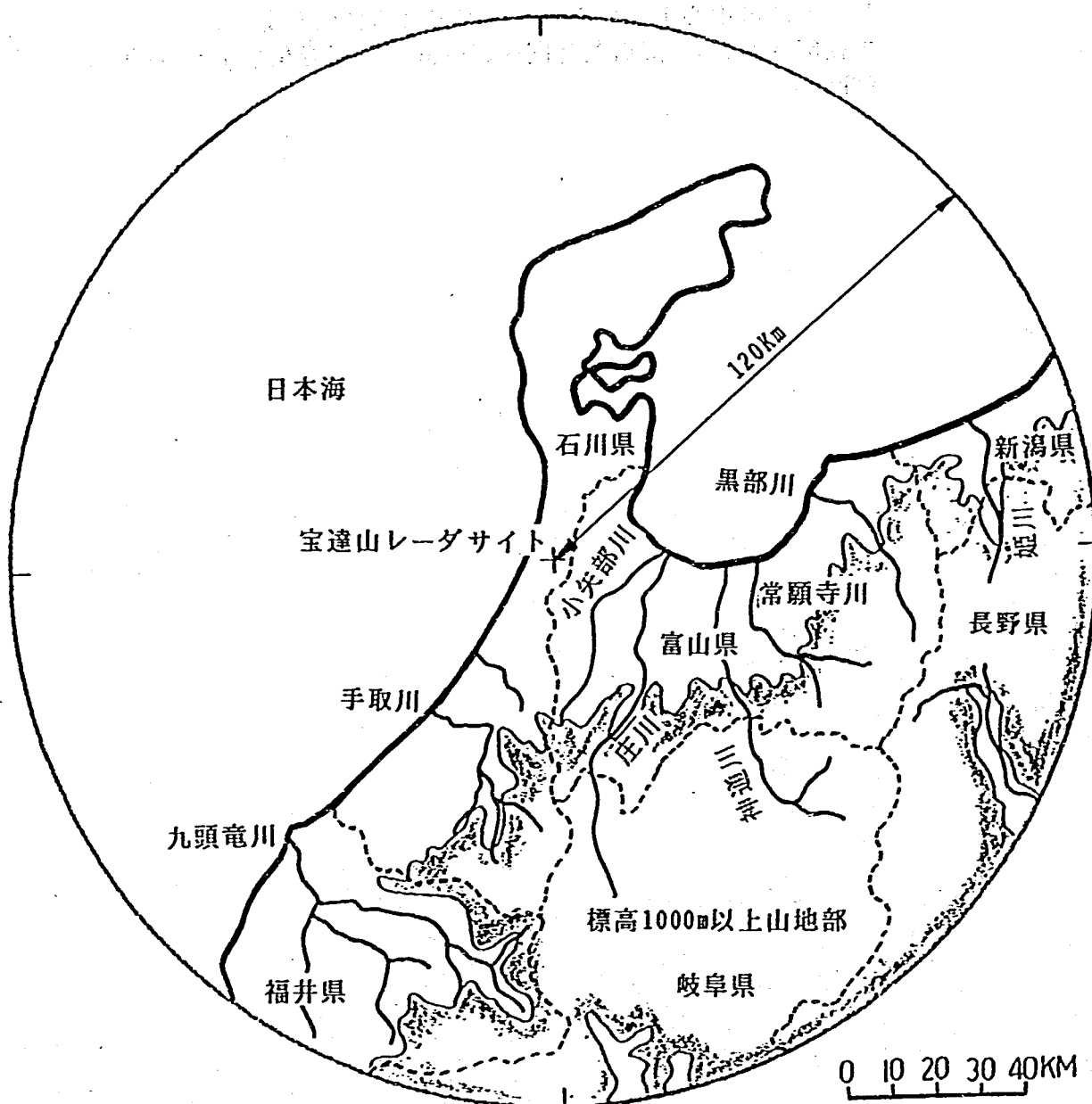


図-3.3.1 宝達山レーダ観測範囲

3.3.4 対象降雪

(1)対象降雪群の選定

降雪予測に用いる降雪データの期間を設定するための前段階として、ここでは、対象とする降雪群の選定を行う。選定にあたっては、次に示す地上観測データを用いた。また、これらの観測位置は、図-3.3.2に示すとおりである。

- ①AMeDAS降雨量 9箇所
- ②AMeDAS積雪深 6箇所
- ③AMeDAS気温 9箇所
- ④DNDレーダサイトの天候

これらのデータを用いて、次の条件により降雪群の選定を行った。

- ①AMeDAS 9箇所の平均気温が、 2°C 以下である。
- ②降雪群の継続時間が、10時間以上である。
- ③AMeDAS 9箇所の平均降雨量が、10mm以上である。
- ④AMeDAS 6箇所の積雪深のうち1箇所でも積雪がある。
- ⑤DNDレーダサイトで、対象となる期間中に、降雪が観測されている。
- ⑥エコーの発生から消滅までを日単位で一連の降雪群とする。

以上より、1988年のデータから6降雪群を選定した。表-3.3.1にそれらの期間を示す。

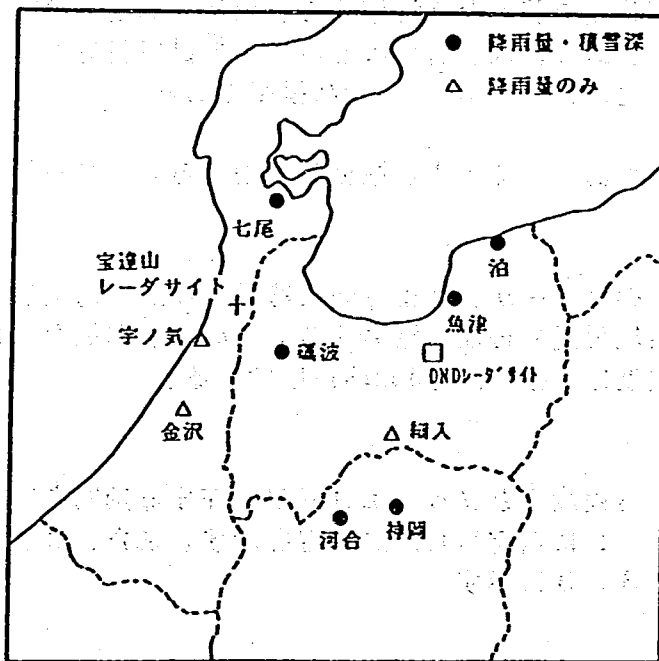


図-3.3.2 地上観測位置

表-3.3.1 対象降雪群

降雪群NO	期 間	時間数	備 考
88-I	1988 01/09 06:00 ~ 01/12 00:00	66	
88-II	1988 01/23 00:00 ~ 01/27 00:00	96	01/25 18:30 欠測
88-III	1988 02/02 00:00 ~ 02/05 00:00	72	
88-IV	1988 02/06 00:00 ~ 02/12 00:00	144	02/07 01:15 欠測
88-V	1988 02/15 00:00 ~ 02/18 00:00	72	
88-VI	1988 03/07 00:00 ~ 03/10 00:00	72	

(2)対象降雪群のエコーの動き

各降雪群ごとのエコーの動きを以下に示す。

〔88-Ⅰ〕

東方向に移動しながら、海上部から陸上部へとエコーが南下してくる。エコーの形は、海上部では東西方向に伸びる帯状であるが、南下するにつれて大きな集団となる。また、最終的には、石川県と富山県の県境付近でエコーが停滞し、そのまま減衰する。エコー強度は、強雨域でも5mm/h以下が多い。

〔88-Ⅱ〕

北東方向に、同方向に伸びるかなり幅の広い帯状エコーが、能登半島上を移動したのち、雨域が大きく広がった弱いエコーの一団が北東方向に通り過ぎる。これらの一団は、強雨域が帯状になっており、また、雨域全体もしだいに分裂して帯状になって消滅する。

〔88-Ⅲ〕

北東方向に、同方向の帯状のエコーが、海上部から陸上部へ南下しながら移動する。これらのエコーの強雨域は、5mm/h程度である。このエコーが通り過ぎたあと、弱い帯状のエコー（形は、あまりはっきりしない）が、東方向へ南下しながら移動する。最終的には、石川県と富山県の県境付近にエコーが残り、消滅する。

〔88-Ⅳ〕

比較的幅の広い帯状のエコーが、北東から南西方向に向けて移動してくるが、能登半島の付け根付近にエコーがかかった時点で弱くなり消滅する。以後、海上部のまとまったエコーが、東方向に移動していくが、最後には、石川県と富山県の県境付近にエコーが残り消滅する。これら一連のエコー強度は、強い所で、3mm/h程度である。

〔88-Ⅴ〕

陸上部と海上部の境界にエコーがあり、そのまま減衰して消える。エコー強度は、強い所で5mm/h程度である。

〔88-Ⅵ〕

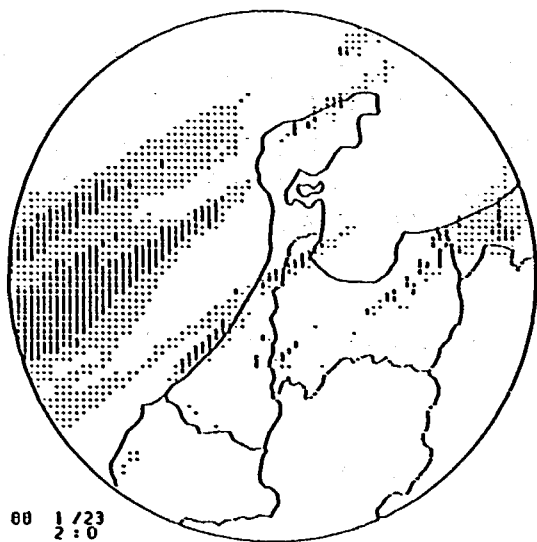
北東方向に伸びる幅の広い帯状のエコーが、北東方向に移動しながら海上部から陸上部へと南下し、富山県と岐阜県の県境付近で停滞し減衰する。その後、同様なエコーが、再度同じ過程を繰り返す。エコー強度は、強い所で5mm/h程度である。

(3)対象降雪

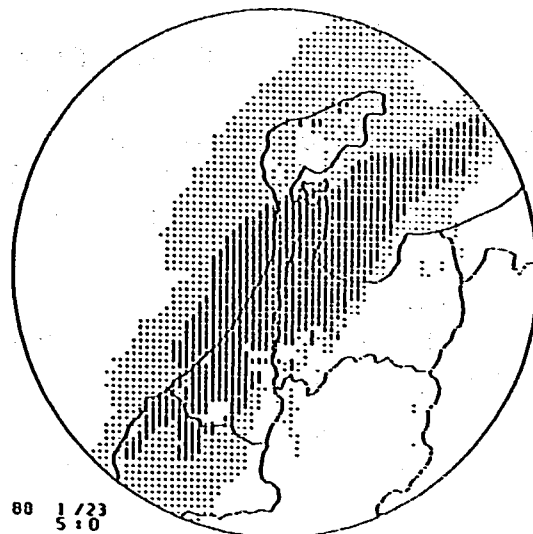
対象降雪群のPPI図から、ある程度まとまったエコーが存在する期間を選び出し、それを対象降雪とした。表-3.3.2に選定した対象降雪を示す。また、最も頻度が高く代表的なエコーの動きを図-3.3.3に示す。

表-3.3.2 対象降雪

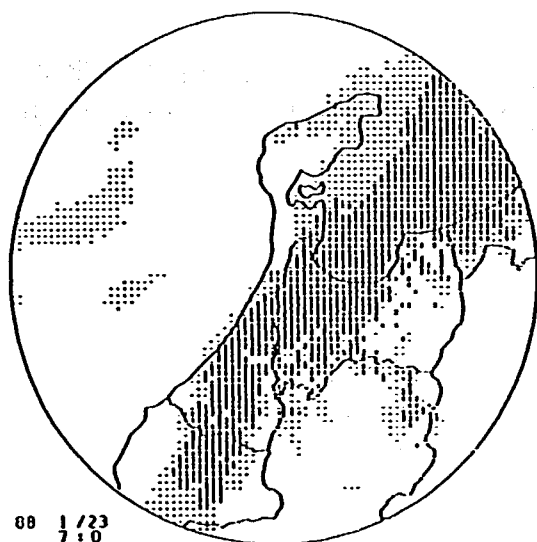
降雪NO	期 間	時間数	備 考
88-①	1988 01/09 06:00 ~ 01/10 03:00	22	
88-②	1988 01/23 02:00 ~ 01/24 08:00	31	
88-③	1988 01/25 01:00 ~ 01/25 18:00	18	
88-④	1988 02/02 06:00 ~ 02/02 17:00	12	
88-⑤	1988 02/06 03:00 ~ 02/07 05:00	27	
88-⑥	1988 02/09 01:00 ~ 02/10 06:00	30	
88-⑦	1988 02/15 22:00 ~ 02/16 05:00	8	
88-⑧	1988 03/07 02:00 ~ 03/07 14:00	13	
88-⑨	1988 03/08 10:00 ~ 03/08 18:00	9	



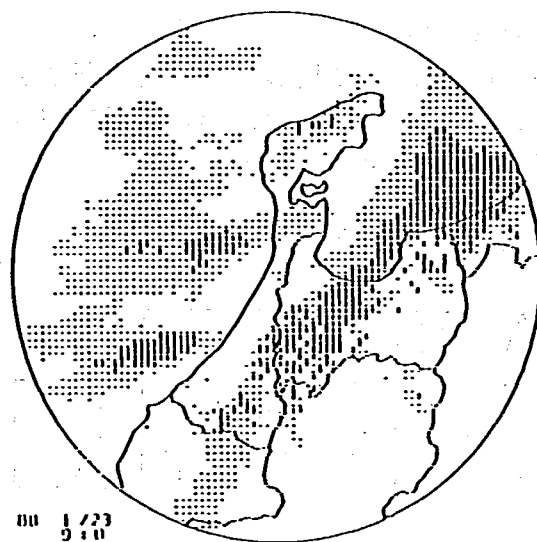
①海上部からE方向に比較的速い速度で移動してくる。



②能登半島の付け根付近でエコーの移動速度が遅くなる。



③山地部付近で停滞する。



④NE方向に移動する。又は、減衰消滅する。

図-3.3.3 代表的なエコーの動き (88-②降雪)

3.3.5 予測手法

予測手法は、降雨予測に用いられている手法を流用する。現在、短時間降雨予測に用いられている予測モデルは、運動学的手法に基づくものがほとんどで、その中の代表的なものとして、雨域追跡法を用いる方法（以下「雨域追跡法」と呼ぶ）と移流方程式を用いる方法（以下「移流モデル」と呼ぶ）がある。本検討では、これら2つのモデルを用いて降雪予測を行うこととする。以下にそれぞれの手法の概要を紹介する。

(1) 移流モデル

移流ベクトル (u, v) 、発達減衰項 w を (x, y) の一次関数として、降雨強度 Z の変動を移流方程式により表す。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + u \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial Z}{\partial y} = w \quad (3.3.1)$$

$$\begin{cases} u = C_1 x + C_2 y + C_3 \\ v = C_4 x + C_5 y + C_6 \\ w = C_7 x + C_8 y + C_9 \end{cases} \quad (3.3.2)$$

過去 n 時刻 ($n \geq 2$) 分のエコーパターンを用いて、最小自乗法により $C_1 \sim C_9$ を求め、これらが予測期間中一定であるとして移流方程式から降雨を予測する。

(2) 雨域追跡法

Δt 時間離れた2枚のエコー図を閾値を用いて、メッシュごとに0, 1に2値化する。2値化したパターン間で式(3.3.3)により関連係数 C, A を算出し、最大値を示す方向、距離で移動ベクトルを決める。

$$C, A = \frac{n_{11}n_{44} - n_{12}n_{33}}{\sqrt{n_{12}n_{34}n_{13}n_{24}}} \quad (3.3.3)$$

$\begin{matrix} T-\Delta t \\ T \end{matrix}$	1	0	計
1	n_{11}	n_{12}	n_{12}
0	n_{31}	n_{34}	n_{34}
計	n_{13}	n_{24}	N

設定された移動ベクトルを用いて $T - \Delta t$ 時刻のエコーを移流させて、 T 時刻のエコー図と重ね合わせることにより、 $E(T) - E'(T - \Delta t)$ を求め Δt 間の発達・衰弱量とする。最後に、 T 時刻のエコーを移動ベクトルを用いて移流させるとともに、発達・衰弱量も定値外挿し、各時刻のエコー図を予測する。

3.3.6 予測精度の検討

(1) 計算条件

それぞれのモデルについて、計算条件を次のとおりとして予測計算を行った。

①予測時間は、30分、1時間、2時間、3時間とする。

②時間間隔 Δt は、既存の検討結果から得られている次の値を用いる。

移流モデル 5分

雨域追跡法 15分

③雨域追跡法における閾値の設定は、エコー図のうち大きい方から並べて1/3番目にあたる降雨強度を用いることとする。

④予測精度の評価指標は、次の項目を用いる。

a) 相関係数

$$\rho = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.3.4)$$

b) 平均誤差 (相対誤差)

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (3.3.5)$$

c) 平均誤差率 (相対誤差率)

$$ME(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right| \times 100 \quad (3.3.6)$$

d) 自乗平均誤差

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.3.7)$$

e) 自乗平均誤差率

$$RMSE(\%) = \frac{RMSE}{\bar{x}} \times 100 \quad (3.3.8)$$

以上a)~e)において、 x : レーダ予測値、 y : レーダ実測値、である。また、サンプルは、0.25mm/h以上のデータを用いる。

f) C. S. I (Critical Success Index)

$$C. S. I = \frac{X}{X + Y + Z} \times 100 \quad (3.3.9)$$

実測 0.5mm	予測0.5mm	
	W	Y
Z	X	

g) 表現率

$$\text{表現率} = \frac{X}{X + Z} \times 100 \quad (3.3.10)$$

h)一致率

$$\text{一致率} = \frac{X}{X + Y} \times 100 \quad (3.3.11)$$

i)ランク一致度

予測と実測の降雨強度のランク差ごとに求める。

$$\text{ランク一致度} = \frac{\text{あるランク差におけるサンプル数}}{\text{全サンプル数}} \quad (3.3.12)$$

ランクは、次の10ランクである。(単位mm/h)

ランク1 : 0.25未満	ランク2 : 0.25以上0.5未満
ランク3 : 0.5以上1.0未満	ランク4 : 1.0以上2.0未満
ランク5 : 2.0以上3.0未満	ランク6 : 3.0以上4.0未満
ランク7 : 4.0以上5.0未満	ランク8 : 5.0以上8.0未満
ランク9 : 8.0以上10.0未満	ランク10 : 10.0以上

㊟評価対象面積は、 $9 \times 9 = 81 \text{Km}^2$ ($3 \times 3 = 9$ メッシュ)とする。

(2)予測結果

表-3.3.3に移流モデルによる精度、表-3.3.4に雨域追跡法による精度を示す。表-3.3.5には1時間予測におけるランク一致度の比較を示す。図-3.3.4に88-①降雪における散布図と信頼限界図を示す。

どの対象降雪においても、30分、1時間までは予測精度は良く、十分実用になると考えられる。1時間予測では、相関係数が0.6~0.8程度あり、自乗誤差でも全て0.9mm以下、一致率では75%以上である。また、比較的精度(自乗誤差)が良いのは、88-⑦のようなエコーがほとんど停滞している降雪であり、精度が悪いのは、88-④のようなはっきりとしたSW-NE方向に伸びる帯状エコーが海から陸地にかけて移動してくる降雪である。精度が悪くなる原因として、NE方向へのエコーの移動がかなりあるにもかかわらず、E方向からNE方向への変化が、移動ベクトルとしてうまく捉えられていないと考えられる。これらの移動ベクトルと予測エコーを図-3.3.5(a),(b)に示す。

モデルによる精度の違いについては、全体的には、移流モデルの方が精度が良いと言える。その理由として、88-⑨降雪に示すような海上と陸上に動きのことなる2つのエコーがある場合にその動きを正しくとらえることができるがあげられる。図-3.3.5(c)に移動ベクトルと予測エコーを示す。

表-3.3.3(a) 移流モデルによる精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	自乗誤差	自乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ①	30分	4706	0.738	0.32 mm	42.5 %	0.22 mm	30.9 %	66.7 %	77.1 %	83.2 %
	1時間	5659	0.680	0.66 mm	51.9 %	0.45 mm	40.5 %	76.4 %	83.4 %	90.1 %
	2時間	4017	0.226	1.07 mm	83.1 %	0.78 mm	79.7 %	60.0 %	72.4 %	77.8 %
	3時間	3005	0.085	1.21 mm	93.5 %	0.89 mm	95.1 %	52.5 %	67.4 %	70.3 %
88 ②	30分	8372	0.771	0.35 mm	42.5 %	0.24 mm	31.3 %	70.8 %	79.7 %	86.4 %
	1時間	9064	0.722	0.73 mm	49.3 %	0.49 mm	38.2 %	83.6 %	88.8 %	93.5 %
	2時間	6528	0.314	1.22 mm	80.7 %	0.85 mm	71.0 %	70.1 %	79.8 %	85.2 %
	3時間	4736	0.192	1.32 mm	88.3 %	0.96 mm	89.8 %	61.0 %	73.4 %	78.3 %
88 ③	30分	3570	0.719	0.27 mm	41.1 %	0.19 mm	29.9 %	64.9 %	77.4 %	80.0 %
	1時間	4459	0.693	0.53 mm	48.7 %	0.37 mm	39.8 %	77.2 %	88.3 %	86.0 %
	2時間	3251	0.261	0.86 mm	77.6 %	0.64 mm	78.4 %	59.8 %	81.5 %	69.2 %
	3時間	2393	0.030	0.99 mm	91.6 %	0.74 mm	98.9 %	51.2 %	77.9 %	59.9 %

表-3.3.3(b) 移流モデルによる精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	自乗誤差	自乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ④	30分	1648	0.786	0.42 mm	41.7 %	0.31 mm	35.3 %	72.4 %	80.0 %	88.3 %
	1時間	1969	0.748	0.86 mm	51.3 %	0.62 mm	41.8 %	75.2 %	79.5 %	93.2 %
	2時間	1412	0.324	1.42 mm	79.8 %	1.04 mm	73.8 %	60.2 %	66.1 %	87.1 %
	3時間	1092	0.030	1.70 mm	95.1 %	1.30 mm	103.2 %	50.1 %	56.7 %	81.1 %
88 ⑤	30分	5167	0.743	0.31 mm	40.6 %	0.21 mm	30.3 %	66.3 %	77.0 %	82.7 %
	1時間	6470	0.671	0.64 mm	51.5 %	0.45 mm	43.1 %	72.6 %	80.6 %	88.0 %
	2時間	4703	0.175	1.03 mm	83.9 %	0.76 mm	83.6 %	51.9 %	65.9 %	71.0 %
	3時間	3591	0.005	1.15 mm	94.3 %	0.85 mm	96.7 %	44.3 %	61.8 %	61.0 %
88 ⑥	30分	5447	0.792	0.32 mm	39.0 %	0.22 mm	29.9 %	69.9 %	80.2 %	84.5 %
	1時間	7165	0.734	0.64 mm	50.9 %	0.45 mm	41.4 %	72.8 %	80.8 %	88.0 %
	2時間	5126	0.176	1.16 mm	90.5 %	0.85 mm	89.0 %	51.0 %	63.9 %	71.7 %
	3時間	3781	-0.098	1.30 mm	107.3 %	0.97 mm	117.3 %	40.0 %	54.2 %	60.5 %

表-3.3.3(c) 移流モデルによる精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	自乗誤差	自乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ⑦	30分	1228	0.867	0.20 mm	30.2 %	0.14 mm	21.4 %	70.7 %	80.7 %	85.1 %
	1時間	1516	0.809	0.46 mm	41.4 %	0.33 mm	32.8 %	79.7 %	87.7 %	89.7 %
	2時間	1180	0.401	0.87 mm	73.8 %	0.63 mm	69.4 %	60.5 %	74.0 %	76.8 %
	3時間	937	0.233	1.02 mm	86.1 %	0.74 mm	85.0 %	50.7 %	68.3 %	66.2 %
88 ⑤	30分	2614	0.873	0.30 mm	31.9 %	0.21 mm	24.2 %	77.1 %	83.0 %	91.6 %
	1時間	2852	0.809	0.71 mm	42.7 %	0.49 mm	32.6 %	82.1 %	85.2 %	95.8 %
	2時間	1996	0.363	1.30 mm	74.6 %	0.94 mm	63.3 %	67.2 %	72.3 %	90.6 %
	3時間	1431	0.113	1.53 mm	88.3 %	1.15 mm	86.8 %	56.2 %	61.6 %	86.5 %
88 ⑤	30分	1344	0.821	0.30 mm	36.1 %	0.22 mm	28.8 %	72.1 %	79.7 %	88.4 %
	1時間	1600	0.807	0.60 mm	41.7 %	0.44 mm	34.9 %	79.3 %	83.4 %	94.1 %
	2時間	1158	0.366	1.15 mm	75.3 %	0.85 mm	65.6 %	65.4 %	70.7 %	89.7 %
	3時間	873	0.134	1.32 mm	94.8 %	0.96 mm	90.2 %	53.3 %	59.2 %	84.3 %

表-3.3.4(a) 雨域追跡法による精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	白乗誤差	白乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ①	30分	4878	0.733	0.30 mm	40.4 %	0.20 mm	28.9 %	69.6 %	83.0 %	81.1 %
	1時間	5465	0.640	0.64 mm	51.4 %	0.44 mm	45.0 %	74.9 %	91.7 %	80.4 %
	2時間	3151	0.174	1.02 mm	78.2 %	0.73 mm	77.4 %	57.4 %	85.7 %	63.4 %
	3時間	1395	0.167	1.08 mm	82.2 %	0.78 mm	85.0 %	50.0 %	87.9 %	53.7 %
88 ②	30分	8222	0.780	0.33 mm	40.1 %	0.21 mm	28.7 %	73.4 %	86.2 %	83.1 %
	1時間	7785	0.672	0.73 mm	51.7 %	0.49 mm	46.4 %	80.6 %	94.2 %	84.8 %
	2時間	4186	0.357	0.96 mm	69.3 %	0.71 mm	71.6 %	68.0 %	91.1 %	72.8 %
	3時間	1881	0.208	1.14 mm	88.7 %	0.84 mm	90.7 %	62.9 %	84.1 %	71.4 %
88 ③	30分	3419	0.687	0.27 mm	40.6 %	0.19 mm	30.0 %	62.4 %	76.9 %	76.7 %
	1時間	3823	0.576	0.58 mm	54.9 %	0.41 mm	51.4 %	70.7 %	89.8 %	76.8 %
	2時間	1949	0.016	0.88 mm	81.2 %	0.65 mm	78.9 %	50.9 %	82.2 %	57.2 %
	3時間	690	-0.069	0.99 mm	81.6 %	0.76 mm	74.1 %	47.2 %	80.5 %	53.3 %

表-3.3.4(b) 雨域追跡法による精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	自乗誤差	自乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ④	30分	1551	0.778	0.41 mm	40.7 %	0.29 mm	34.1 %	74.4 %	84.5 %	86.2 %
	1時間	1492	0.701	0.88 mm	52.8 %	0.62 mm	49.1 %	76.4 %	87.8 %	85.5 %
	2時間	564	0.274	1.31 mm	77.7 %	1.04 mm	83.3 %	71.7 %	81.7 %	85.5 %
	3時間	4	*****	***** mm	***** %	***** mm	***** %	***** %	***** %	***** %
88 ⑤	30分	5164	0.773	0.28 mm	36.4 %	0.19 mm	27.7 %	68.2 %	80.6 %	81.6 %
	1時間	6039	0.704	0.57 mm	47.0 %	0.40 mm	42.8 %	72.8 %	87.1 %	81.6 %
	2時間	3544	0.312	0.85 mm	70.8 %	0.63 mm	70.9 %	57.3 %	79.9 %	66.9 %
	3時間	1803	0.128	0.92 mm	78.5 %	0.70 mm	81.8 %	49.0 %	75.0 %	58.6 %
88 ⑥	30分	5590	0.794	0.31 mm	38.2 %	0.22 mm	30.5 %	69.5 %	82.1 %	81.9 %
	1時間	7494	0.741	0.60 mm	49.1 %	0.42 mm	42.7 %	73.2 %	85.1 %	83.9 %
	2時間	5399	0.242	1.06 mm	84.4 %	0.78 mm	86.0 %	51.8 %	72.1 %	64.8 %
	3時間	3776	0.050	1.16 mm	93.5 %	0.87 mm	95.7 %	42.4 %	66.0 %	54.3 %

表-3.3.4(c) 雨域追跡法による精度

降雪NO	予測時間	データ数	相関係数	自乗誤差	自乗誤差率	平均誤差	平均誤差率	C. S. I.	表現率	一致率
88 ⑦	30分	1270	0.857	0.21 mm	31.6 %	0.41 mm	21.6 %	70.0 %	82.5 %	82.2 %
	1時間	1640	0.804	0.46 mm	42.7 %	0.31 mm	33.5 %	79.0 %	90.1 %	86.5 %
	2時間	1404	0.381	0.85 mm	77.9 %	0.60 mm	70.6 %	64.0 %	85.0 %	72.1 %
	3時間	1129	0.236	0.97 mm	90.1 %	0.69 mm	85.8 %	51.4 %	82.5 %	57.7 %
88 ⑧	30分	2682	0.845	0.32 mm	35.3 %	0.21 mm	26.9 %	76.2 %	87.7 %	85.4 %
	1時間	2956	0.739	0.78 mm	50.8 %	0.53 mm	46.6 %	78.7 %	90.0 %	86.2 %
	2時間	2027	0.336	1.26 mm	82.1 %	0.90 mm	85.6 %	68.3 %	86.9 %	76.2 %
	3時間	1178	0.371	1.13 mm	80.4 %	0.84 mm	85.5 %	61.1 %	85.8 %	68.0 %
88 ⑨	30分	1352	0.810	0.29 mm	35.4 %	0.20 mm	28.0 %	75.5 %	85.8 %	86.3 %
	1時間	1464	0.705	0.69 mm	49.6 %	0.47 mm	48.9 %	78.8 %	93.3 %	83.5 %
	2時間	852	0.224	1.11 mm	79.8 %	0.82 mm	84.1 %	67.3 %	88.6 %	73.7 %
	3時間	349	0.016	1.13 mm	84.5 %	0.87 mm	88.4 %	68.8 %	89.7 %	74.7 %

表-3.3.5(a) ランク一致度の比較 (1時間予測)

降雪NO	ランク差	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
88 ①	移 流 モデル	3989 65.6 %	2831 36.7 %	707 9.2 %	157 2.0 %	22 0.3 %	4 0.1 %	1 0.0 %			
	雨 域 追跡法	3470 48.6 %	2671 37.4 %	736 10.3 %	225 3.2 %	29 0.4 %	5 0.1 %				
88 ②	移 流 モデル	5902 50.9 %	4525 39.0 %	933 8.0 %	192 1.7 %	42 0.4 %	7 0.1 %				
	雨 域 追跡法	4676 47.8 %	3653 37.4 %	1059 10.8 %	314 3.2 %	59 0.6 %	11 0.1 %	1 0.0 %			
88 ③	移 流 モデル	3558 56.5 %	2299 36.5 %	400 6.4 %	37 0.6 %	1 0.0 %					
	雨 域 追跡法	2606 48.5 %	2067 38.4 %	585 10.9 %	115 2.1 %	5 0.1 %					
88 ④	移 流 モデル	2136 56.9 %	1135 30.3 %	379 10.1 %	83 2.2 %	16 0.4 %	2 0.1 %				
	雨 域 追跡法	1440 54.6 %	842 31.9 %	278 10.5 %	69 2.6 %	8 0.3 %					
88 ⑤	移 流 モデル	5175 51.5 %	3850 37.9 %	928 9.1 %	181 1.8 %	20 0.2 %	3 0.0 %				
	雨 域 追跡法	4691 51.5 %	3424 37.6 %	801 8.8 %	154 1.7 %	26 0.3 %	5 0.1 %				

表-3.3.5(b) ランク一致度の比較 (1時間予測)

降雪NO	ランク差	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
88 ⑥	移流 モデル	6363 54.0 %	4165 35.4 %	1036 8.8 %	197 1.7 %	14 0.1 %	2 0.0 %				
	雨域 追跡法	6225 53.1 %	4308 36.8 %	946 8.1 %	215 1.8 %	15 0.1 %	4 0.0 %				
88 ⑦	移流 モデル	1348 61.3 %	737 33.5 %	102 4.6 %	12 0.5 %	1 0.0 %					
	雨域 追跡法	1437 61.2 %	760 32.4 %	131 5.6 %	21 0.9 %						
88 ⑧	移流 モデル	2165 55.6 %	1334 34.2 %	309 7.9 %	79 2.0 %	10 0.3 %					
	雨域 追跡法	2044 51.2 %	1368 34.2 %	423 10.6 %	132 3.3 %	22 0.6 %	4 0.1 %	2 0.1 %			
88 ⑨	移流 モデル	1429 57.3 %	872 35.0 %	167 6.7 %	23 0.9 %	1 0.0 %					
	雨域 追跡法	1188 54.9 %	745 34.4 %	181 8.4 %	42 1.9 %	7 0.3 %	2 0.1 %				

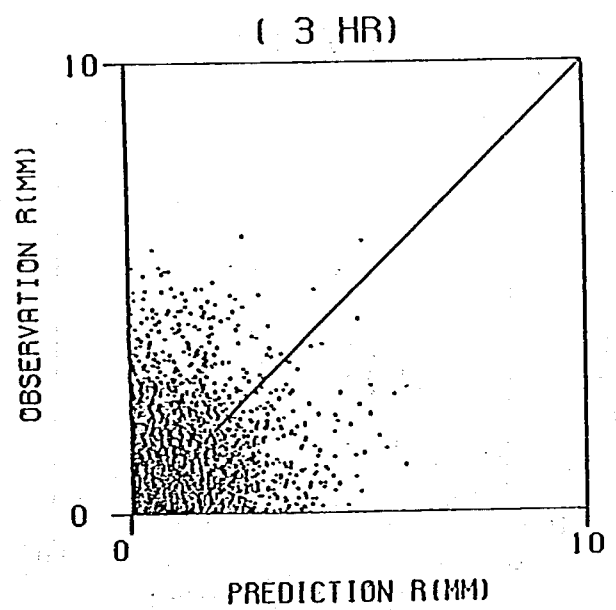
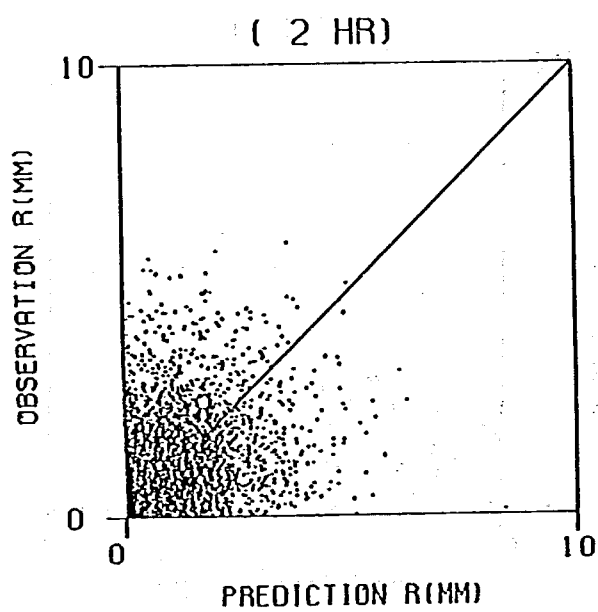
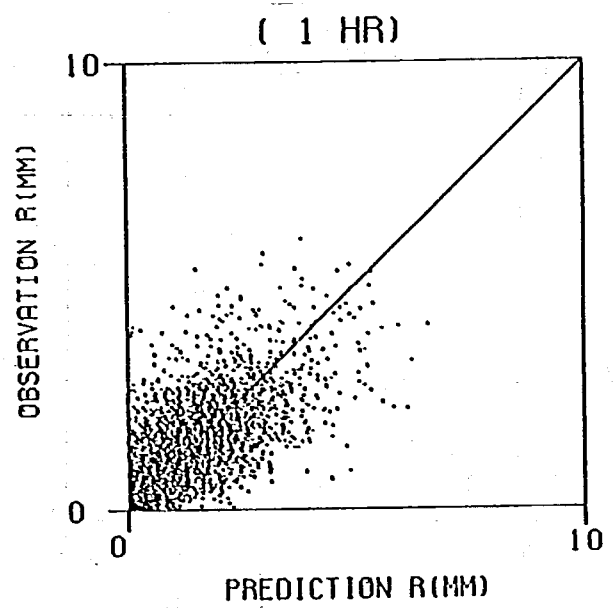
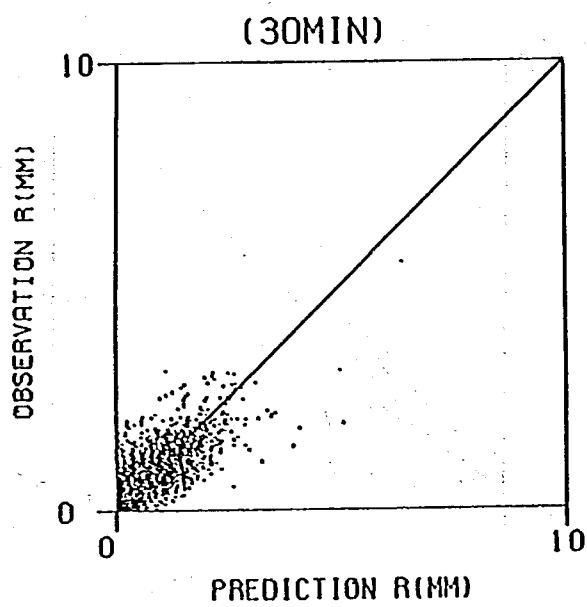
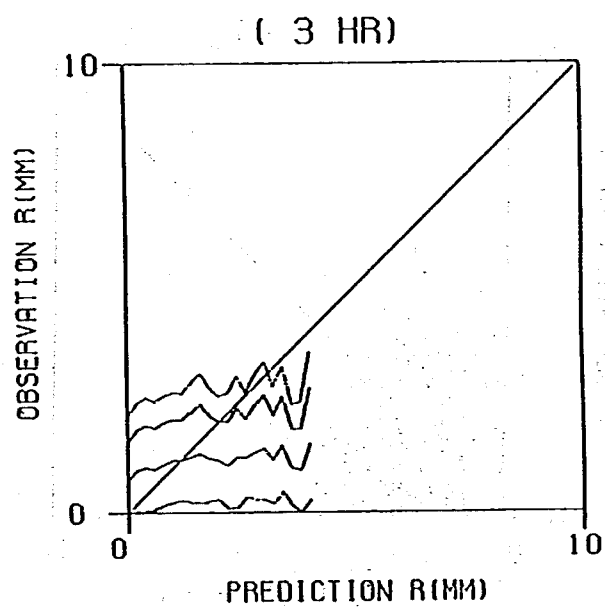
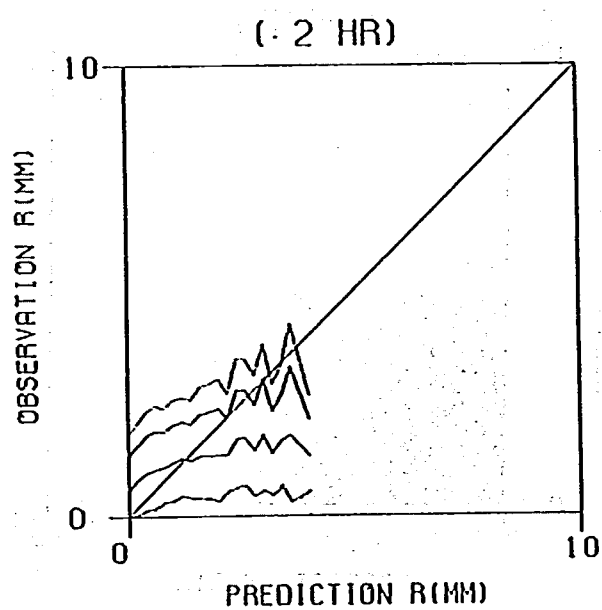
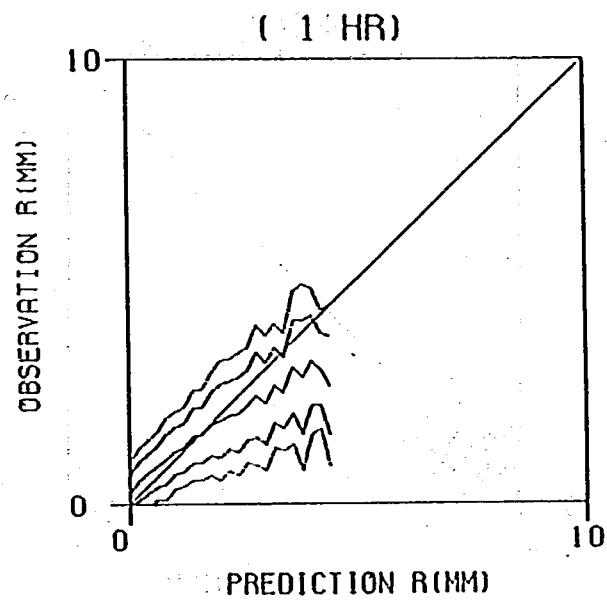
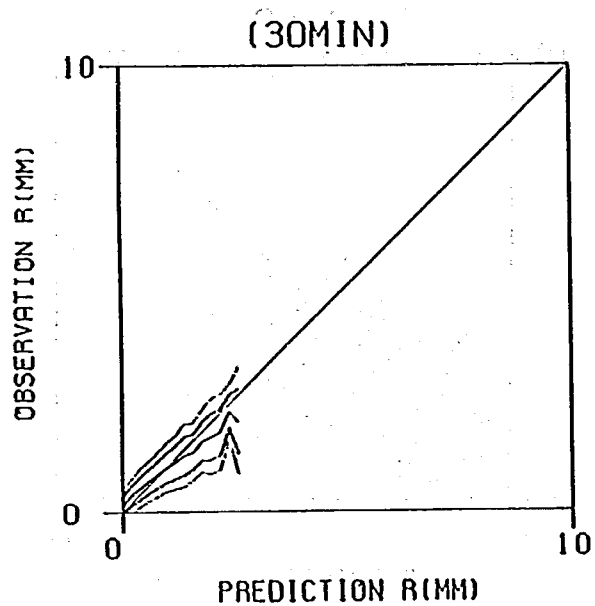


図-3.3.4(a) 移流モデル・散布図(88-①降雪)



—— 予測平均値
 - - - - 68.3%
 - - - - 90.0%

図-3.3.4(b) 移流モデル・信頼限界(88-①降雪)

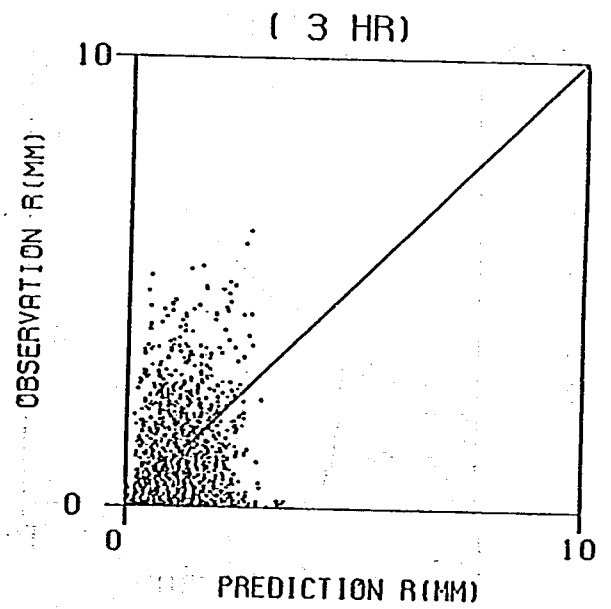
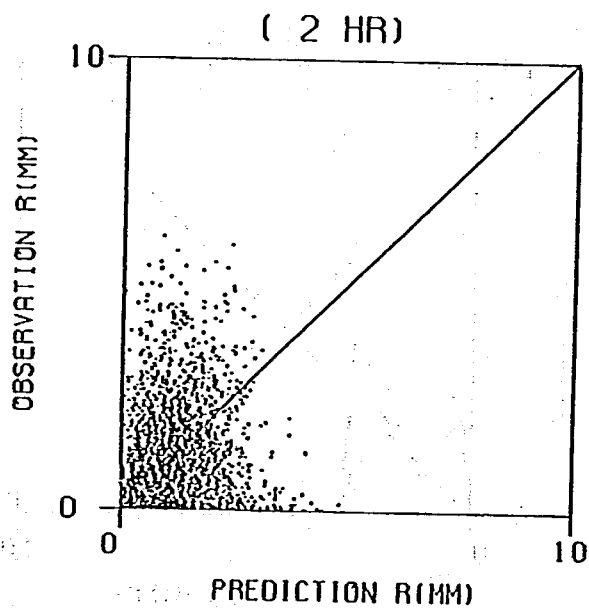
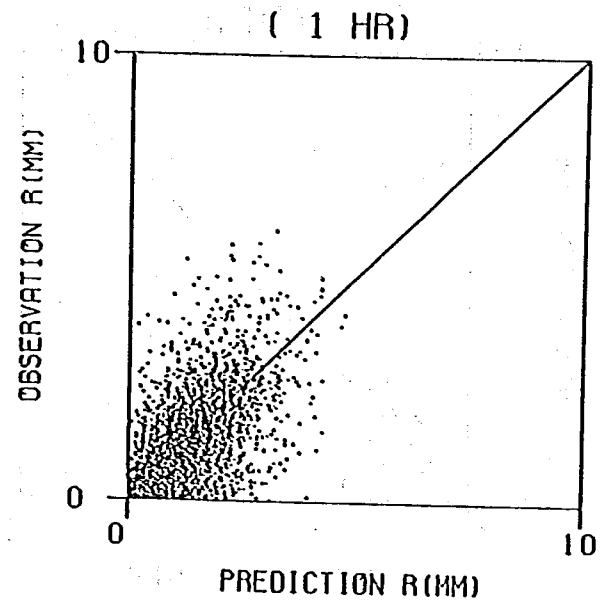
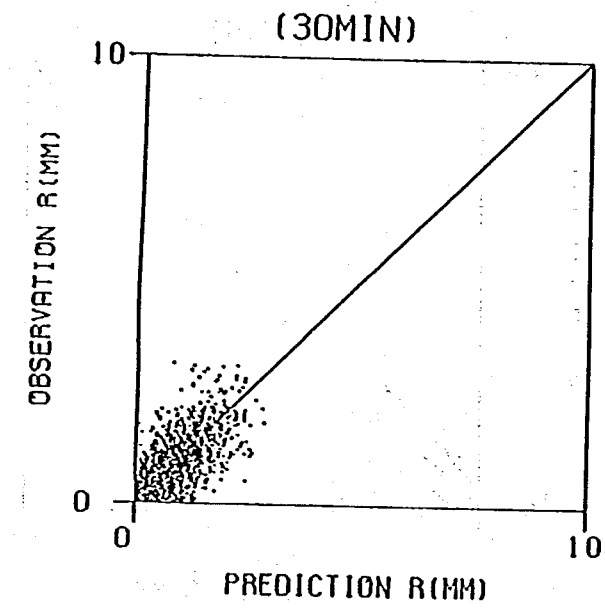


図-3.3.4(c) 雨域追跡法・散布図 (88-①降雪)

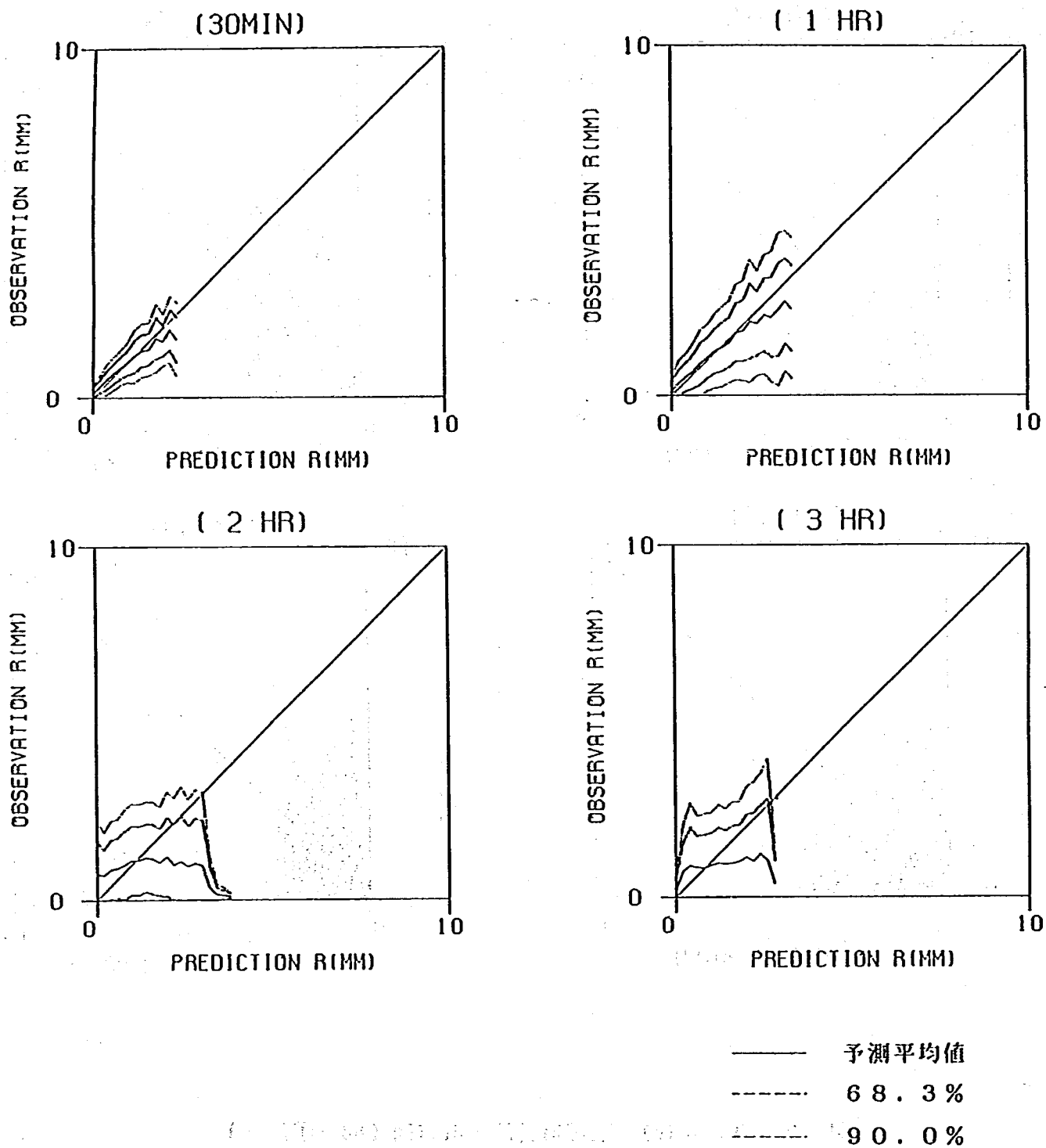
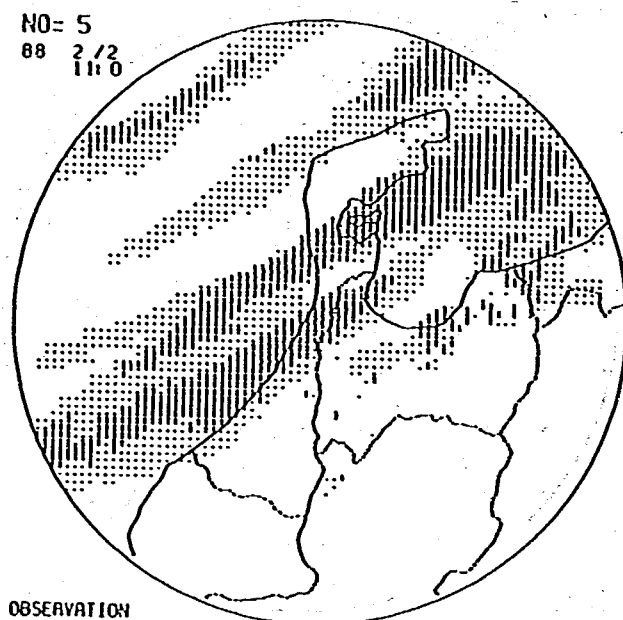
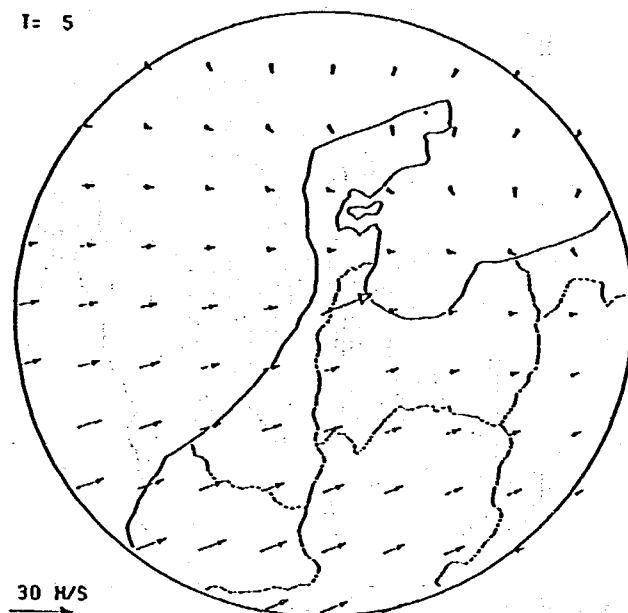


図-3.3.4(d) 雨域追跡法・信頼限界(88-①降雪)

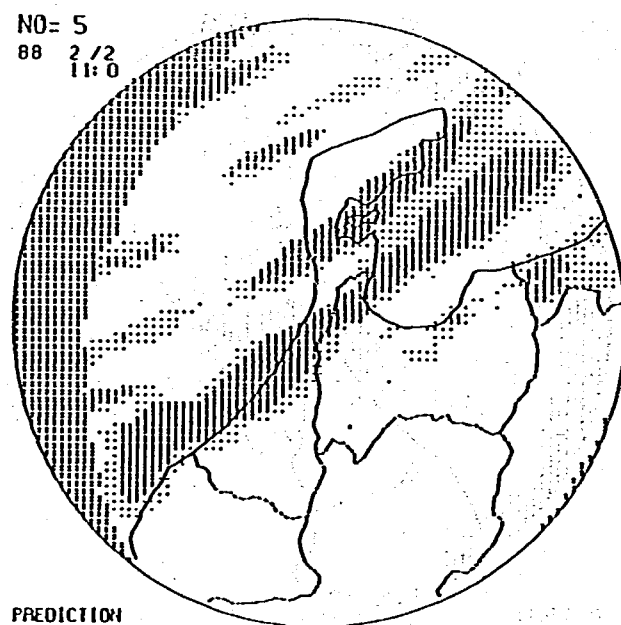


(a) 実測エコー

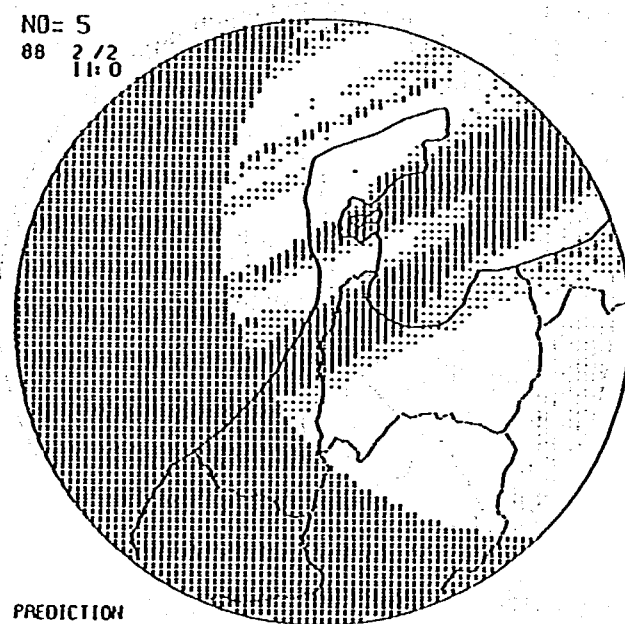


(b) 予測に用いた移動ベクトル

→ 移流モデル → 雨域追跡法



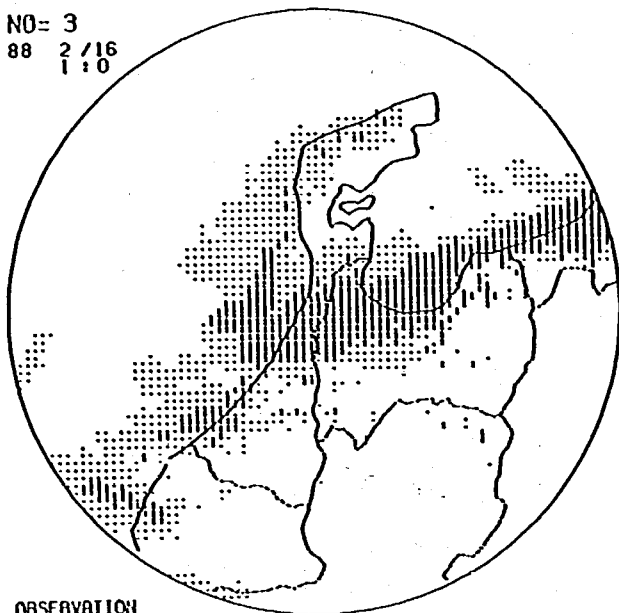
(c) 予測エコー (移流モデル)



(d) 予測エコー (雨域追跡法)

図-3.3.5 (a) 移動ベクトルと予測エコー (88-④)

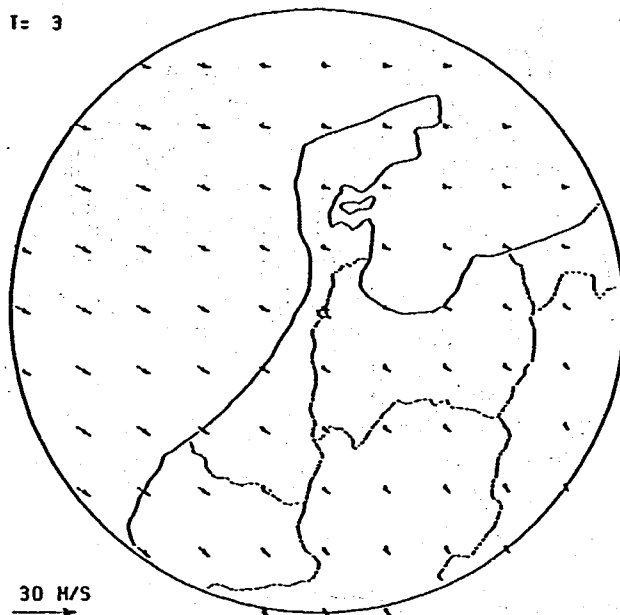
NO= 3
88 2 / 16
1 : 0



OBSERVATION

(a) 実測エコー

T= 3

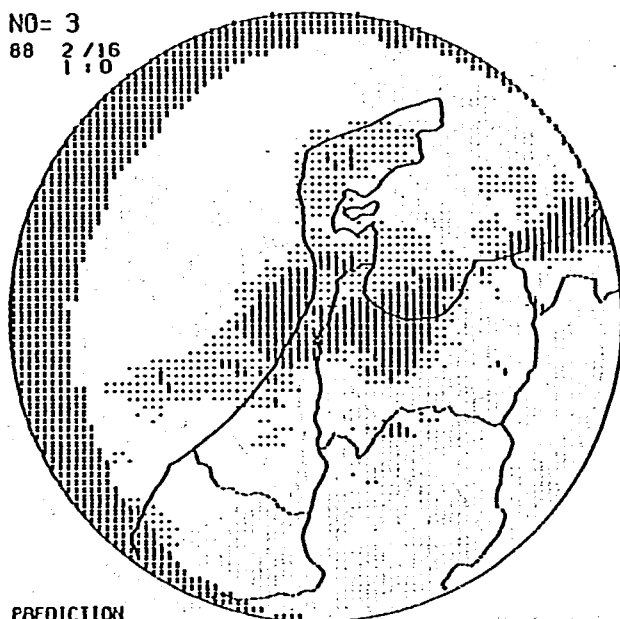


30 H/S

(b) 予測に用いた移動ベクトル

→ 移流モデル → 雨域追跡法

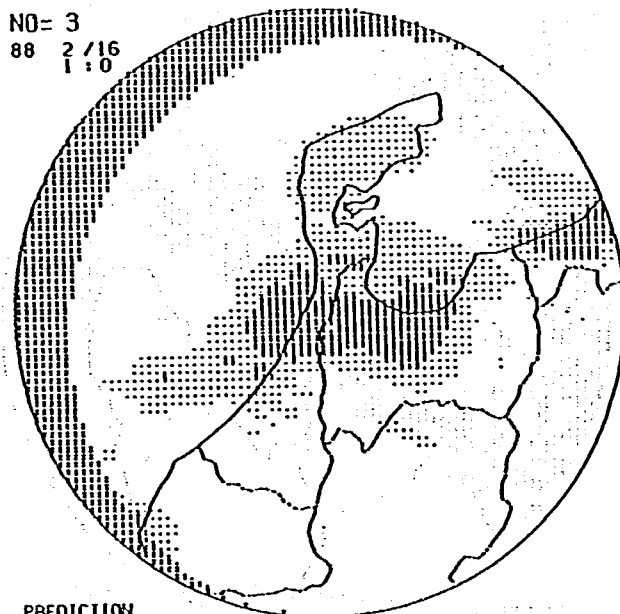
NO= 3
88 2 / 16
1 : 0



PREDICTION

(c) 予測エコー (移流モデル)

NO= 3
88 2 / 16
1 : 0

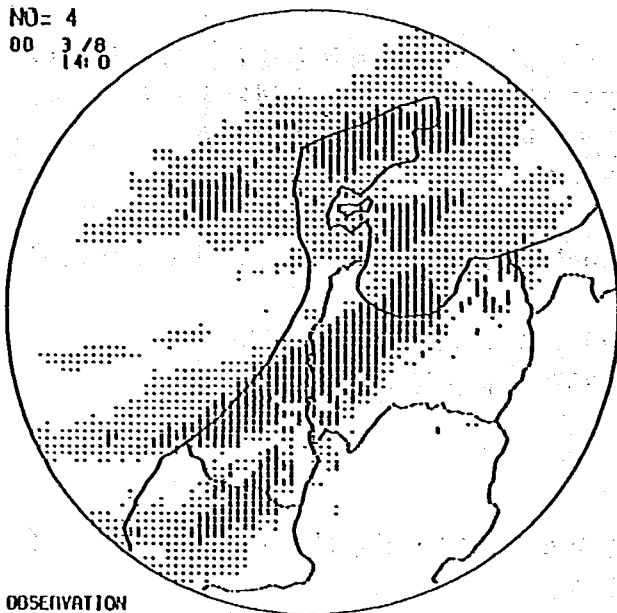


PREDICTION

(d) 予測エコー (雨域追跡法)

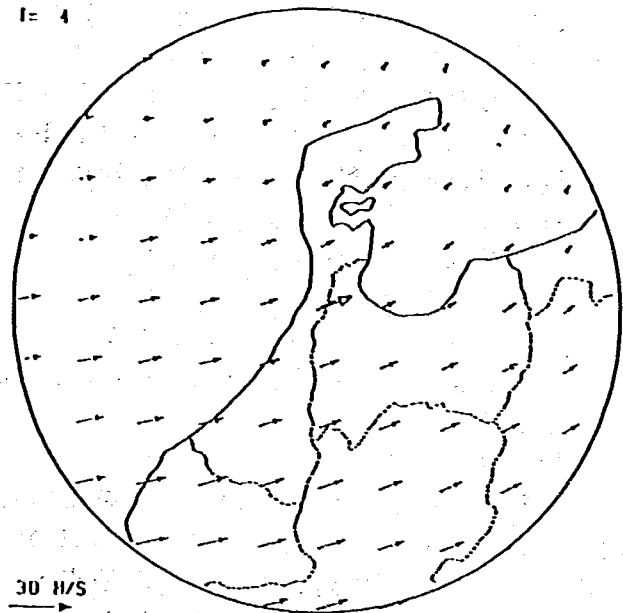
図-3.3.5(b) 移動ベクトルと予測エコー (88-⑦)

NO= 4
00 3/8
14:0



(a) 実測エコー

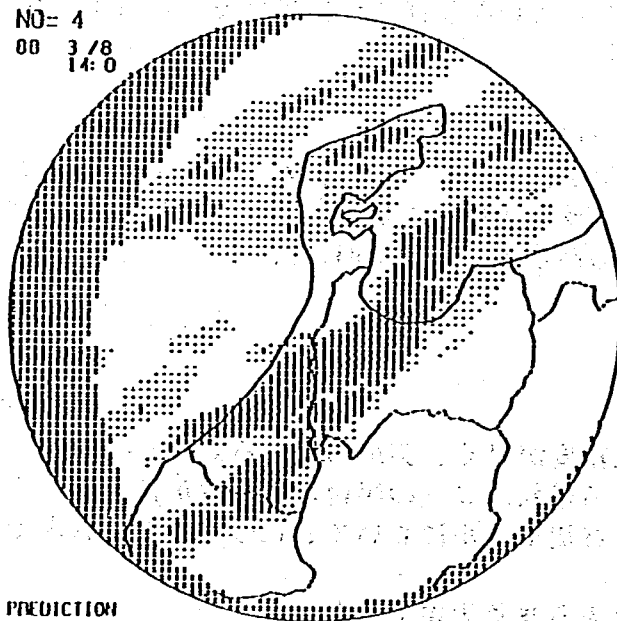
I= 4



(b) 予測に用いた移動ベクトル

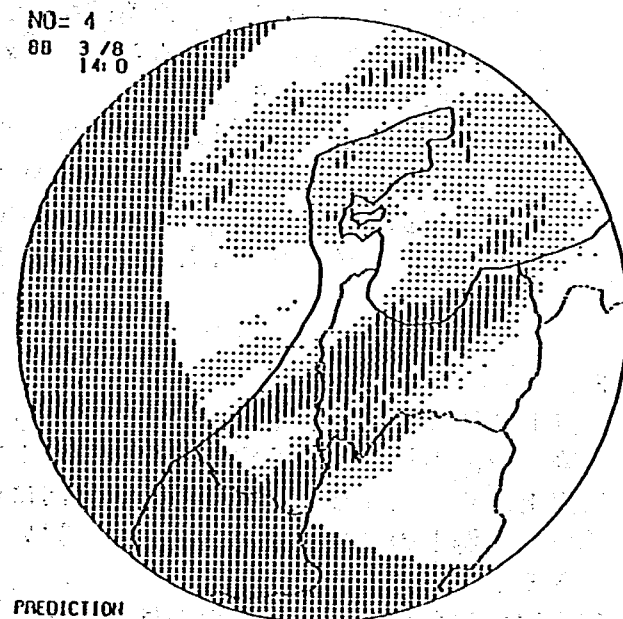
→ 移流モデル → 雨域追跡法

NO= 4
00 3/8
14:0



(c) 予測エコー (移流モデル)

NO= 4
00 3/8
14:0



(d) 予測エコー (雨域追跡法)

図-3.3.5(c) 移動ベクトルと予測エコー (88-㉔)

3.3.7 移動ベクトルと上層風の比較

雪雲は、上層の風に流され移動してくるので、レーダエコーの動きもそれに対応していると考えられる。そこで、ここでは、レーダエコーの移動ベクトルと上層風を比較することにより、上層風をエコーの移動ベクトルとして外挿可能かどうかを検討した。

比較に用いる上層風のデータは、次のとおりである。

①DNDレーダのドップラ観測データ

仰角40°での観測データを用い、VAD解析により風向・風速を設定する。使用するレーダレンジ（観測高度）は、

レンジ2 高度502m, レンジ3 高度823m, レンジ4 高度1144m

レンジ5 高度1466m, レンジ6 高度1787m, レンジ7 高度2109m

である。

②輪島ゾンデのデータ

850mb（高度1500m）のデータを用いる。

図-3.3.6に散布図を示す。この図の移流モデルの風向・風速は、DNDレーダサイトの地点の値及び輪島ゾンデの観測地点の値である。

エコー移動方向はどちらのデルにおいても、DND及びゾンデの風向値と良く合っている。エコー移動速度は、移流モデルとDND風速との対応が悪い。これは、陸上部のエコーが地形の影響によりほとんど停滞するためと考えられる。雨域追跡法とDND風速は、非常に良く合っており、最も良いのがレンジ4（高度1144m）の風速との比較である。ゾンデ風速との比較では、両モデルの差はなく、どちらもかなりばらついている。これは、ゾンデの観測精度によるものであると考えられる。

以上より次のことが言える。

①エコーの移動方向と上層の風向とは、良く一致する。

②雨域追跡法のエコー移動速度とDNDの風速が比較的良く合うことから、平均的なエコー移動速度としてレーダ観測によるドップラ風が使用可能である。

③エコー移動ベクトルと最も良く合う上層風の高度は、1000m前後である。

3.3.8 まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

①降雪予測の精度は、予測時間1時間以下では精度が良く、実用的である。

②海上から陸上に移動してくるNE方向に伸びる帯状エコーの場合は、精度が落ちる。

③陸上と海上のエコー移動ベクトルの違いは、移流モデルにおいて、比較的うまく表現できる。

④山地部におけるエコーの停滞は、両モデルともうまく表現できない。

⑤予測精度の向上には、地形の影響の考慮が必要である。

⑥移動ベクトル（特に雨域追跡法）と上層風は、よく合っている。

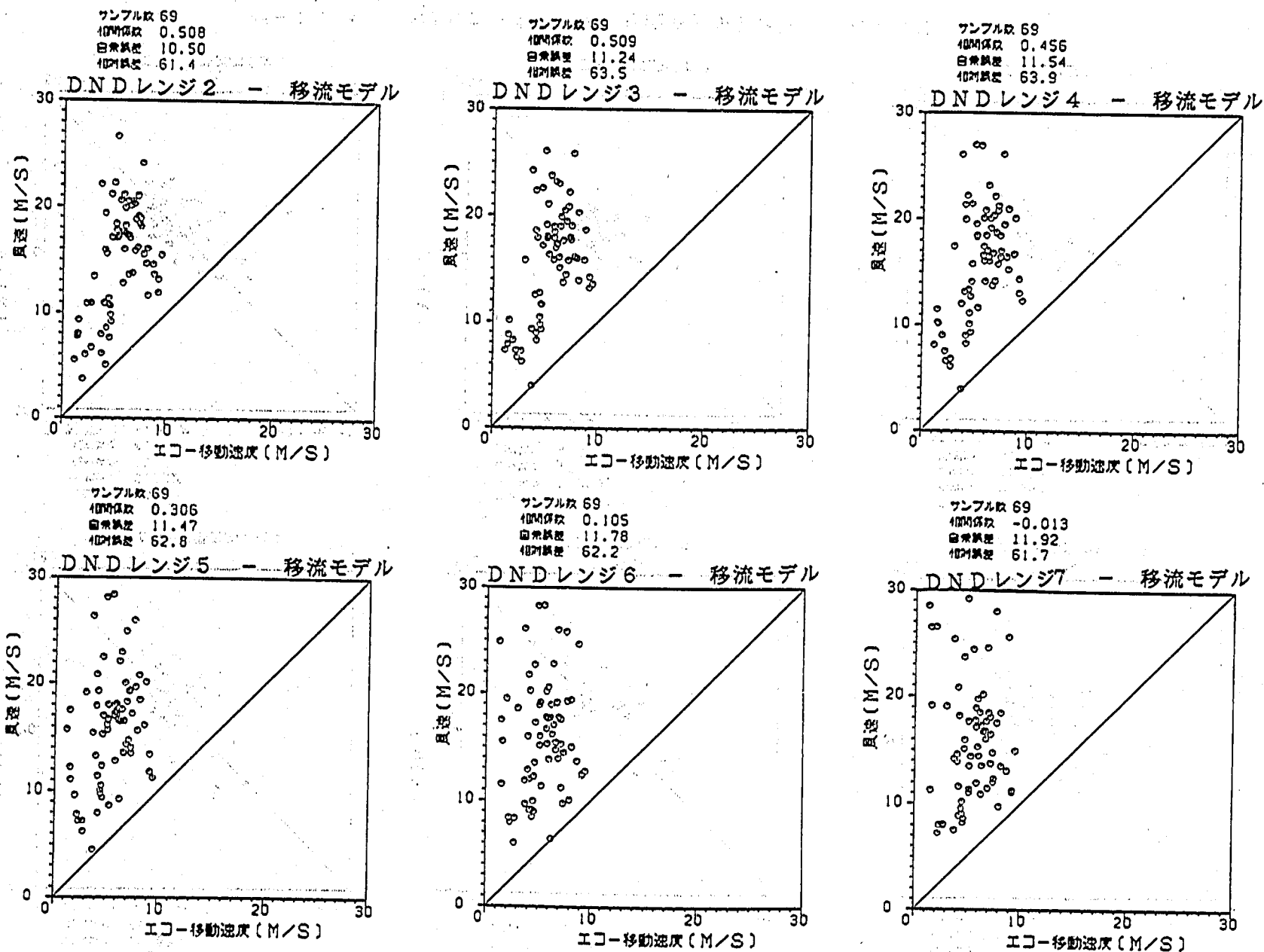


図-3.3.6(a)エコー移動速度(移流モデル)と上層風速(DNDレーダ)

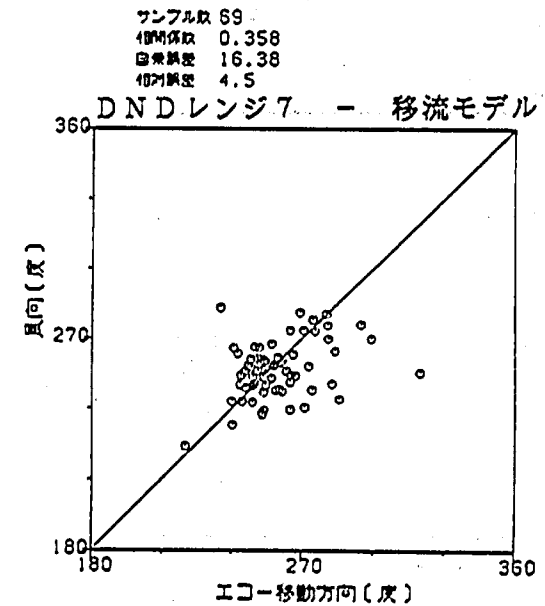
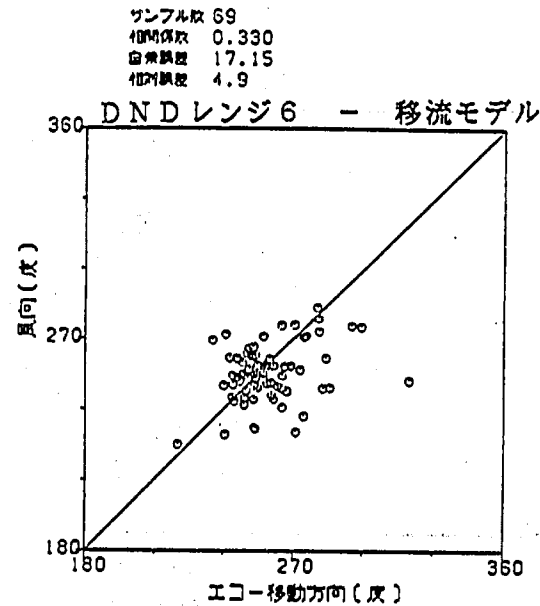
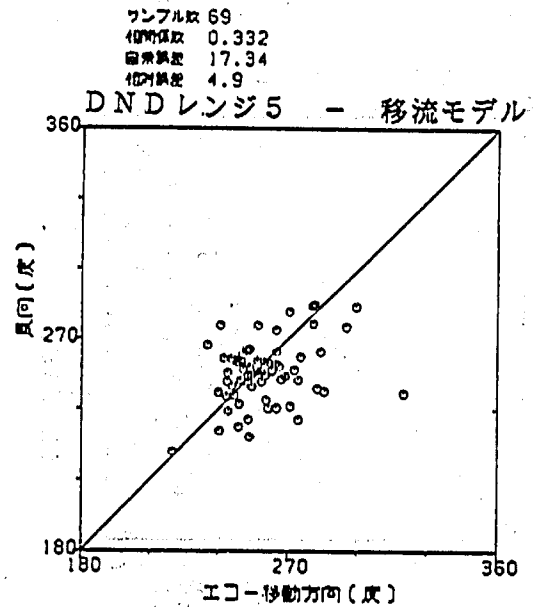
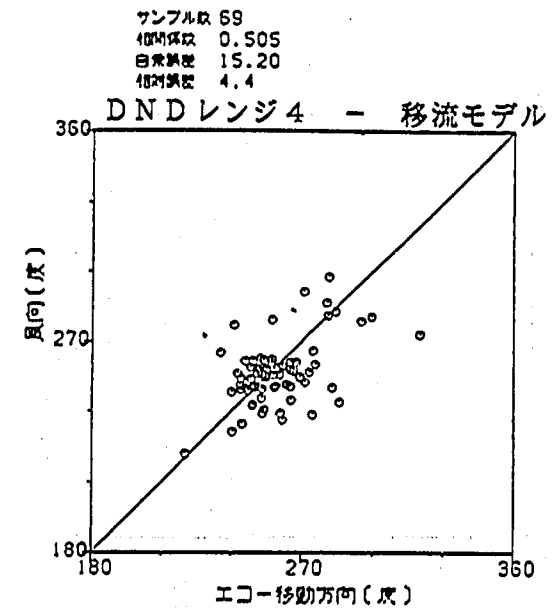
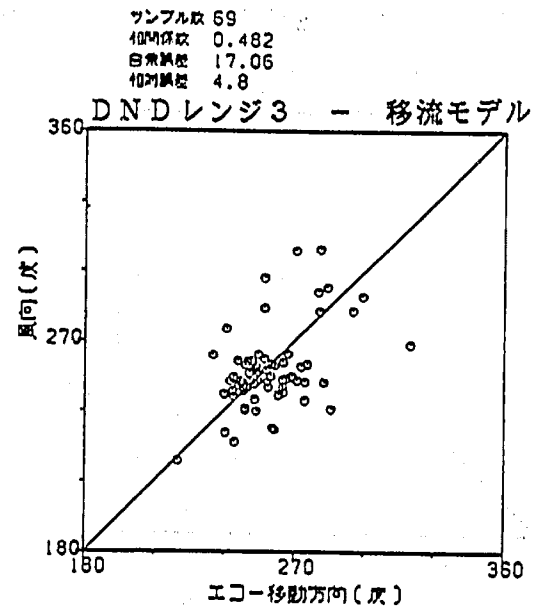
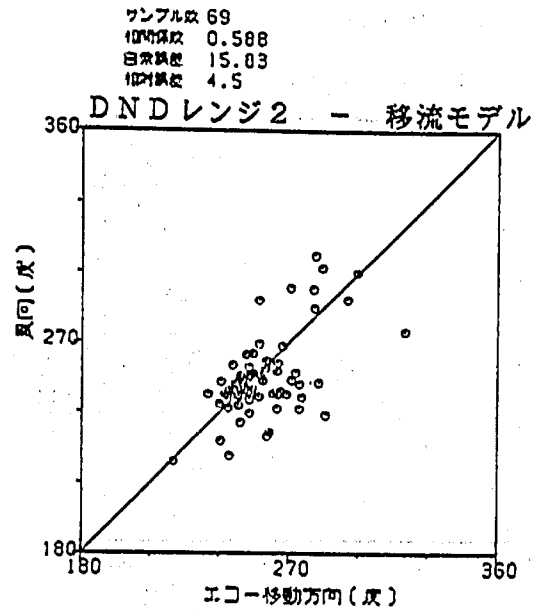


図-3.3.6(b)エコー移動方向(移流モデル)と上層風向(DNDレーダ)

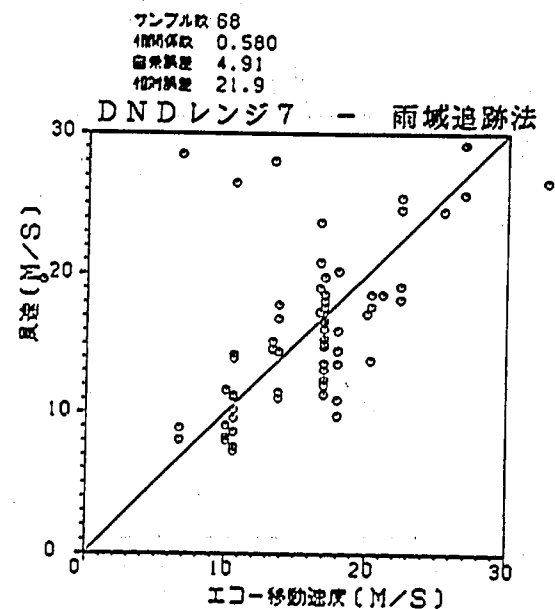
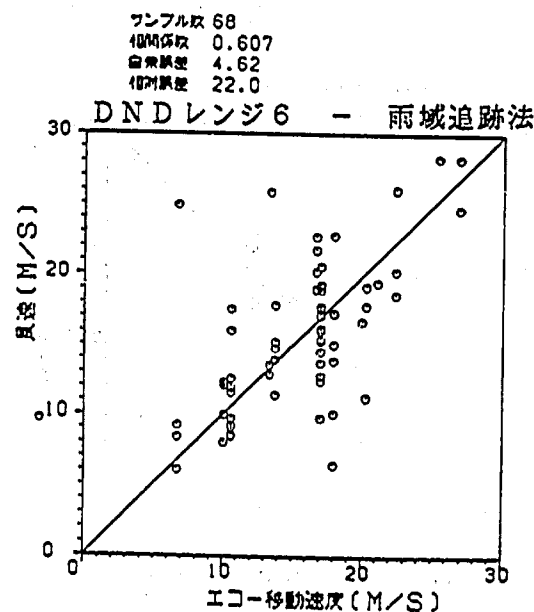
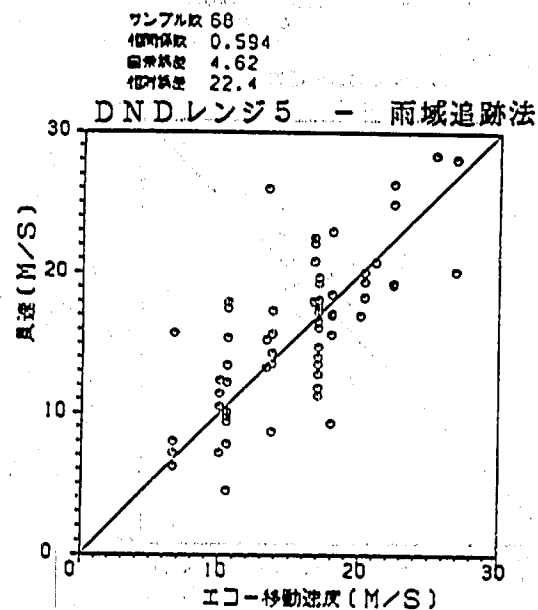
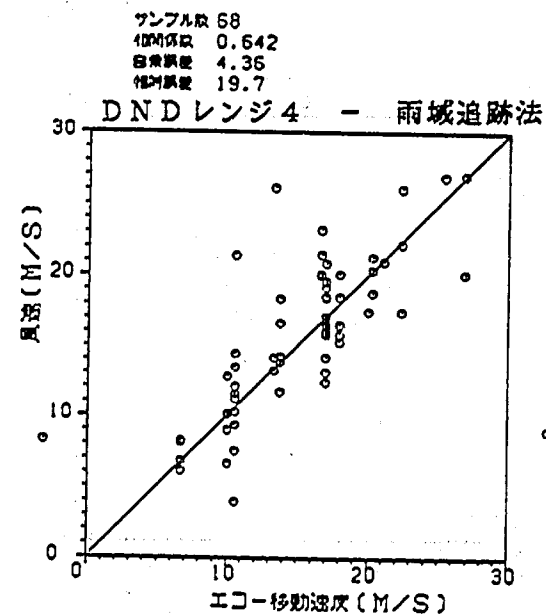
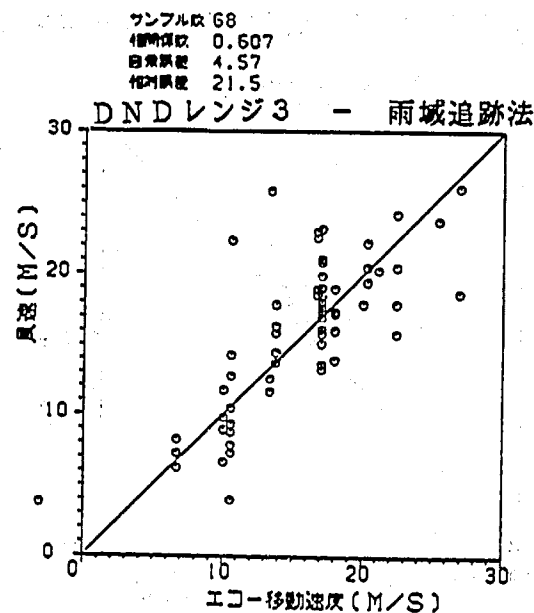
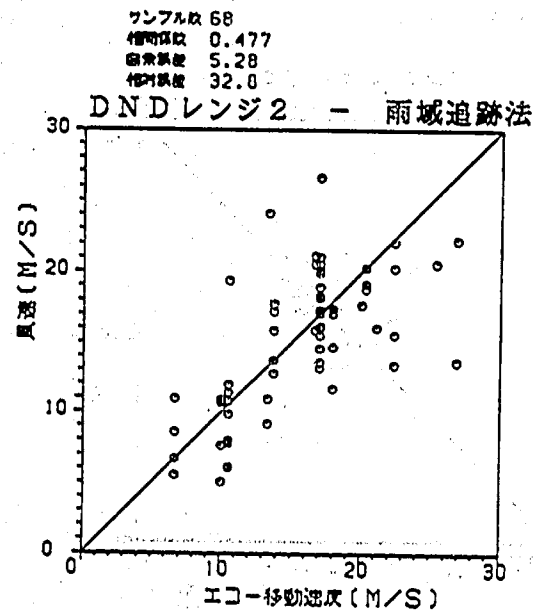


図-3.3.6(c) エコ-移動速度 (雨域追跡法) と上層風速 (DNDレーダ)

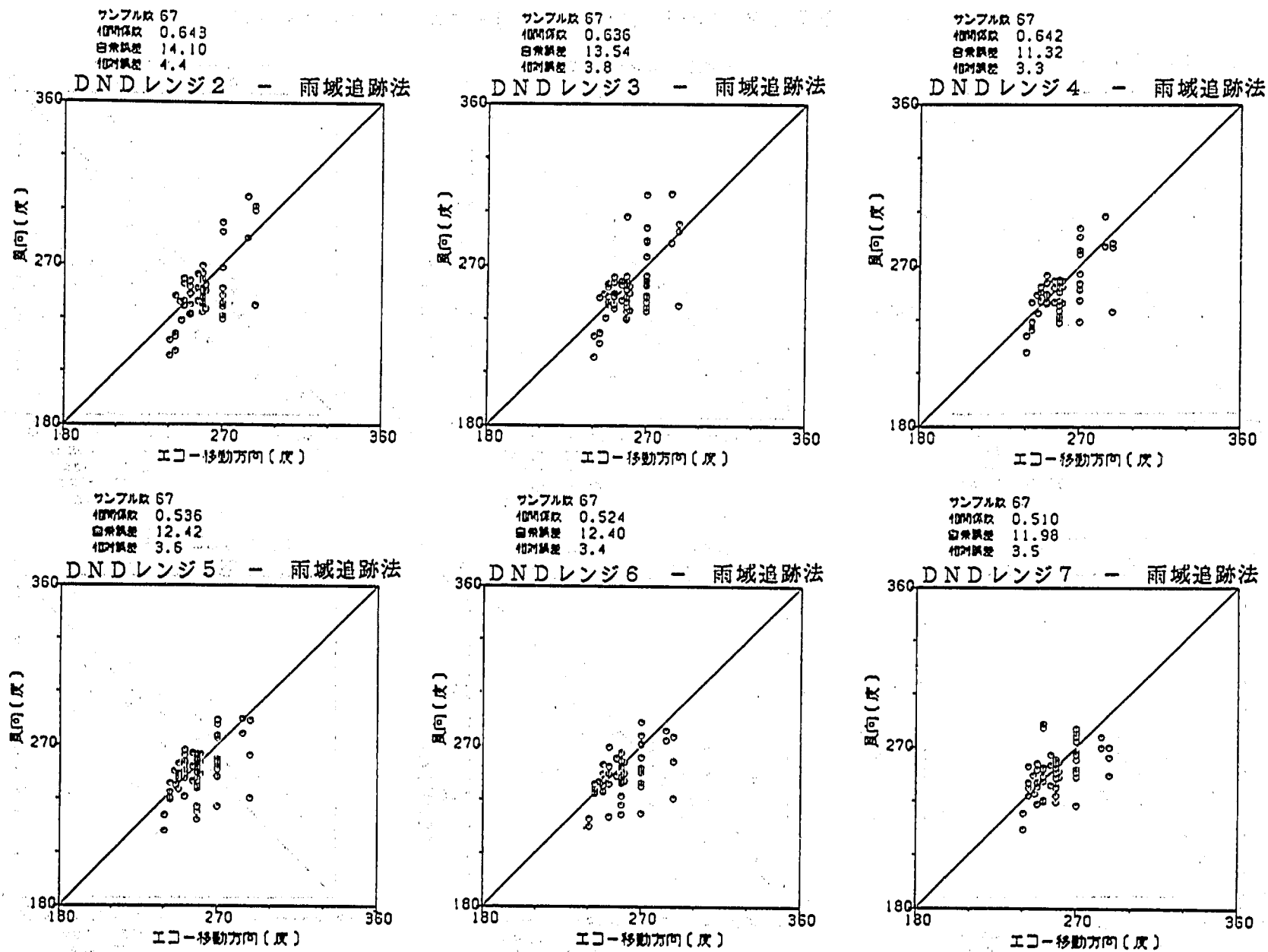


図-3.3.6(d)エコー移動方向(雨域追跡法)と上層風向(DNDレーダ)

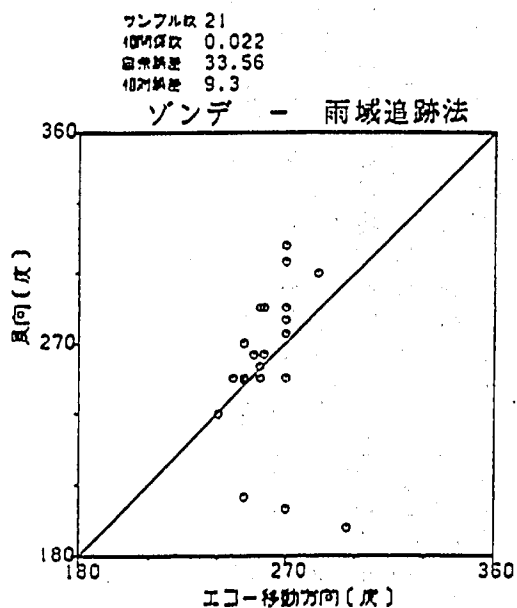
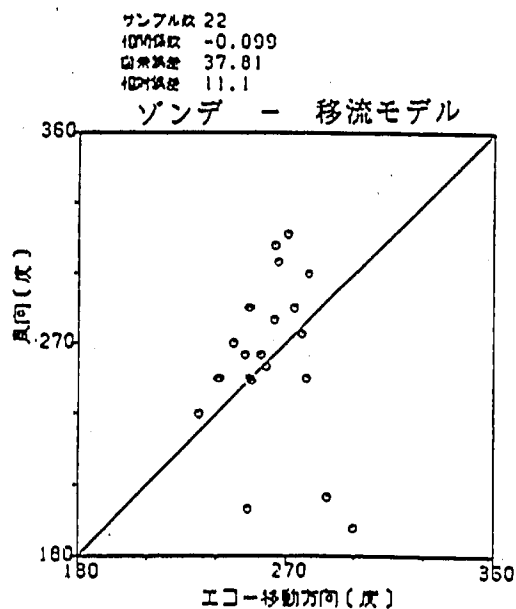
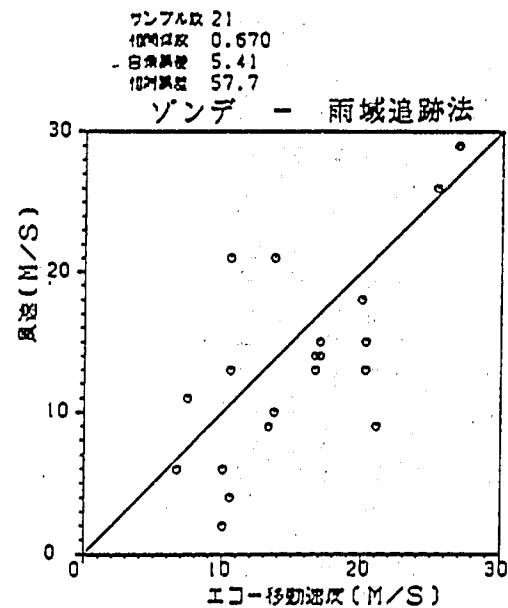
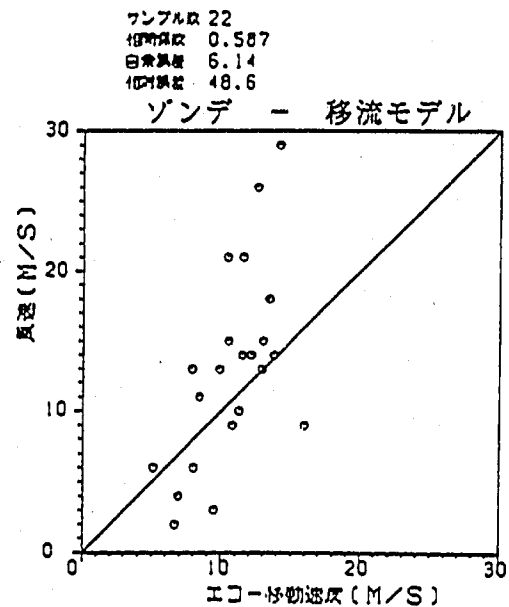


図-3.3.6(e)エコー移動ベクトルと上層風(ゾンデ)

3.4 まとめ

第3章では、降雪による電波減衰の検討、雪片の移流を考慮した場合の降雪観測の精度評価及びレーダを用いた降雪予測の可能性について検討を行った。これらの結果をまとめると次のようになる。

①含水率のことなる4種類の湿雪モデルを設定し、降水強度と減衰定数の関係を求めると、降雨の場合と比較して、同程度～10倍程度の減衰が見込まれ、含水率の高い雪ほど大きな値をとることがわかった。また、実際のエコーでの減衰を求めてみると、強いエコーの背後で2～8 dBの減衰を受けていることがわかった。

②移流を考慮した降雪観測については、DNDレーダを用いた結果では、その観測高度が低いことや、観測範囲も狭いこともあって、移流の考慮による観測精度の向上は顕著ではなかったが、宝達山レーダを用いた例では、移流による影響を考慮することにより、観測精度が向上することを確認できた。今後は、移流の方法を改良することによりさらに精度を向上させることが必要である。

③宝達山レーダデータを用いて降雪予測の計算を行った結果、1時間以下の予測時間では、精度が良く実用的であることがわかったが、山地部におけるエコーの停滞等地形の影響を考慮してさらに精度を向上させ、予測時間も延ばすことが必要である。また、2枚のエコー図から求めた移動ベクトルとDNDレーダのドップラ観測から求めた上層風は良く対応しており、今後の課題として、ドップラデータを利用した降雪予測の検討が考えられる。

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

4.1.1 はじめに

二重偏波レーダによる降水強度の測定は、雨滴が球でなく偏平していることを利用し、降水強度を求める方法を用いている。つまり、雨滴が球でないことにより生じる「水平偏波の電波で測定した反射因子 Z_H と垂直偏波の電波で測定した反射因子 Z_V との差（反射因子差 Z_{DR} ）」から粒径分布を推定し、これによって降水強度を求めようというものである。粒径分布、すなわち、「何ミリの大きさの雨滴が 1 m^3 中に何個あるか」がわかれば、雨滴の落下速度を考慮することにより、降水強度を求めることができるというものである。

したがって、レーダによる観測値と比較する前に、雨滴の粒径分布の形状等をあらかじめ把握しておく必要がある。そこで、ここでは、DNDレーダ観測範囲内の4ヶ所で雨滴の粒径分布の地上観測を行った結果について報告する。

4.1.1 雨滴の粒径分布の測定方法

雨滴の粒径分布の測定には、ディストロメーターを用いた。

(1)測定原理

一般に制止大気中を直径 D の雨滴が自然落下するとき、雨滴に働く重力と空気による抵抗力とが平衡する速度に達した以降は、定速度で落下してゆく。この速度を終末速度と言い、これは気温気圧等にも若干の影響を受けるが、主に雨滴の直径 D によって決まるとされている。したがって、雨滴の落下速度あるいは落下運動量を計測することにより雨滴の大きさを求めることができ、その個数をカウントすることにより雨滴の粒径分布が推定できる。

今回の雨滴粒径分布測定に用いるディストロメーター（スイスDistromet社の製品名、一般的には、マイクロフォン型雨滴粒径分布測定器）は、速度感応である可動コイル型マイクロフォンの振動コーンに雨滴を衝突させ、その運動量を測定することにより雨滴の粒径分布を測定するものである。

いま、質量 m 、終末速度 v の雨滴が質量 M （ m に比べて十分大きい）の物体に付着して速度 V が生じたとき、運動量保存則によって、

$$mv = (m + M)V \sim MV \quad (4.1.1)$$

となり、雨滴付着後の運動量 MV を測定すれば、雨滴の運動量すなわち雨滴の直径がわかる。

(2)システム構成

図-4.1.1にセンサー部の構造を、図-4.1.2にシステム構成図を示す。雨滴が衝突する笠型振動コーンに2つのコイルが固定されており、一方のコイル (Sensing Coil) からの出力を増幅して信号を得る。また、この信号を他方のコイル (Driving Coil) に流して制動をかけ、1個の雨滴の衝突に対してコーンの振動を1往復に制限し、次の雨滴の衝突に備える (コーン面積は50cm²であるので、2個以上の雨滴が全く同時にコーンに衝突する可能性は極めて少ないと考えられる)。このセンサーからの出力は、処理器 (パルス波高計) に接続され波高値が読み取られる。したがって、(4.1)式におけるVが波高値として与えられることになる。質量Mは一定であるので、波高値を別の分析器に出力し、波高値に応じて雨滴の直径Dの0.3mmから5.0mmまでを19チャンネル、5.0mm以上は分割せずまとめて1チャンネル、合計20チャンネルに分割し、それぞれの個数をカウントする。なお、波高値と雨滴の直径との関係は、次式を用いている。

$$U_{\text{conpr}} = 0.94 \cdot D^{1.47} \quad (4.1.2)$$

ここに、 U_{conpr} : 波高値 (V)

D : 雨滴の直径 (mm)

(3)粒径分布等の計算方法

a)雨滴の粒径分布

ディストロメーターによる測定結果から、雨滴の空間分布 N_d が次式により求まる。

$$N_d = \frac{N_i}{V_i \cdot T \cdot S \times 10^{-6}} \cdot \frac{1}{\delta D_i} \quad (4.1.3)$$

ここに、 D_i : i 番目のランクの雨滴の直径 (mm)

N_i : 直径 D_i の雨滴の個数

S : 測定器のセンサー部面積 (mm²)

T : 測定時間間隔 (s)

V_i : 直径 D_i の雨滴の落下速度 (m/s)

δD_i : 雨滴の直径巾 (mm)

これから、次に示す粒径分布式を求めることができる。

$$N_d(D) = N_0 D^m \exp(-\Lambda D) \quad (4.1.4)$$

ここに、 N_0, m, Λ : 降雨状態を示す定数

D : 雨滴の等価直径 (mm)

b) 反射因子Zの計算方法 (レーレー近似)

反射因子Z (mm⁶/m³) は、その定義から

$$Z = \sum \sigma = \sum D^6 = \sum N_d D^6 dD = \sum (N_d \cdot D_i^6 \cdot \delta D_i) \quad (4.1.5)$$

ここに、D : 雨滴の直径 (mm)

N_d : 直径Dの雨滴の単位直径巾当たりの空間密度 (/m³ · mm)

δD : 雨滴測定時のi番目のランクの雨滴の直径巾 (mm)

となる。

c) 反射因子差Z_{DR}の計算方法

Pruppacher and Pitterと同じ方法で雨滴形状を求めることにより、後方散乱断面積 $\sigma_{H,U}$ が計算できる。これを用いて反射因子Z_{H,U}が、次式により求まる。

$$Z_{H,U} = C \sum \sigma_{H,U} \cdot N_d \cdot \delta D_i \quad (4.1.6)$$

ここに、C : レーダシステムによって定まる定数

$\sigma_{H,U}$: 後方散乱断面積 (cm²)

したがって、反射因子差Z_{DR} (dB) は、次式により計算できる。

$$Z_{DR} = 10 \log (Z_H / Z_U) \quad (4.1.7)$$

d) 降水強度Rの計算方法

降水強度R (mm/hr) は、1個の雨滴の体積が、

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_i}{2} \right)^3 = \frac{\pi}{6} D_i^3 \quad (\text{mm}^3) \quad (4.1.8)$$

であるから、1時間雨量は、

$$R = \frac{\sum \frac{\pi}{6} D_i^3 N_i}{S} \cdot \frac{3600}{T} = 600 \times \frac{\pi}{S \cdot T} \sum (D_i^3 \cdot N_i) \quad (4.1.9)$$

で求めることができる。

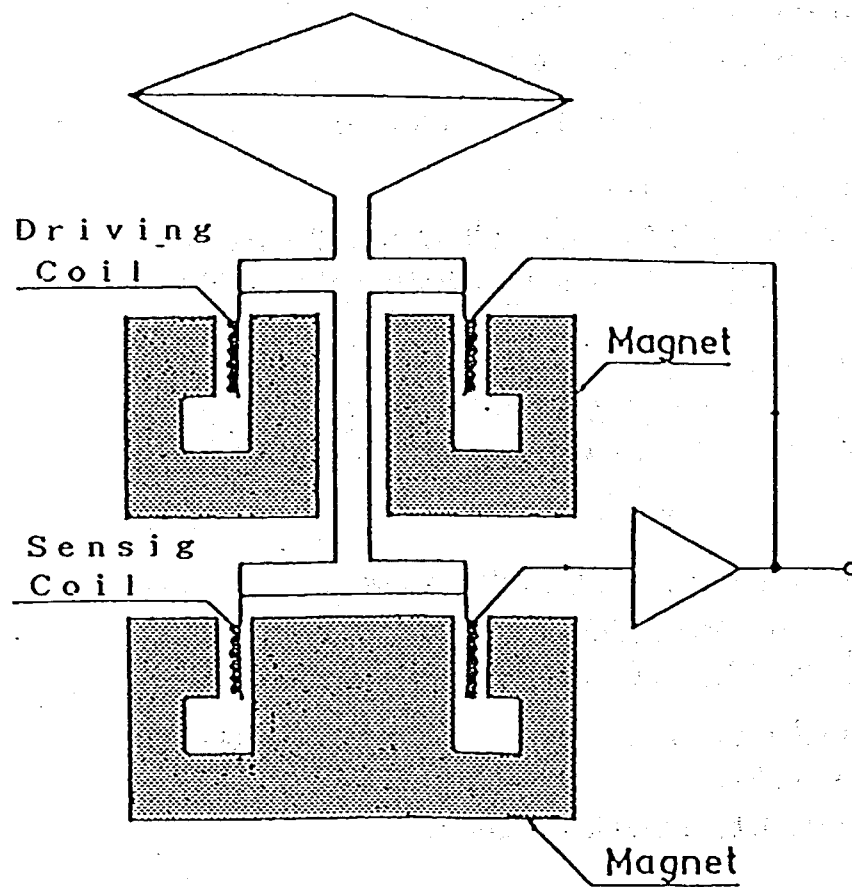


図-4.1.1 センサー部の構造

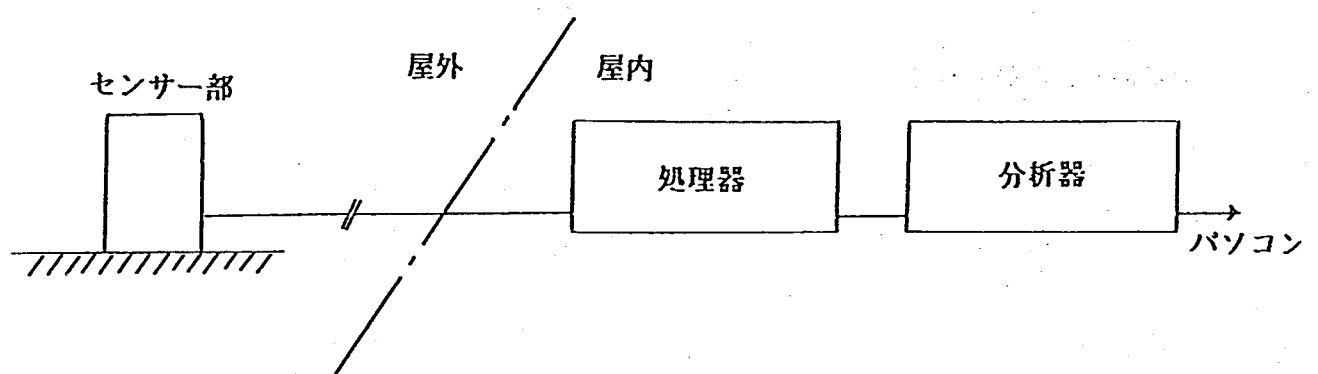


図-4.1.2 システム構成図

4. 1. 3 測定結果

下記観測期間に九州久留米において収集されたディストロメーターデータを用いて、雨滴の粒径分布の推定を推定し、その分布形について検討した。

1988 6/1 ~ 6/3 低気圧による降雨
 1988 6/23 ~ 6/24 梅雨前線、低気圧による降雨
 1988 6/28 ~ 6/30 梅雨前線による降雨
 1988 7/11 ~ 7/19 梅雨前線による降雨

また、測定地点は、次の4地点である。

ダム統管 (DNDレーダサイト地点、筑後川上流約30km)

元筑邦出張所 (レーダサイトから約8.7km)

山ノ井排水機場 (レーダサイトから約12.1km)

大川出張所 (レーダサイトから約18.2km)

なお、ディストロメーターから得られる粒径分布は、1分間隔であるが、以下の解析では全て5分間平均を用いることとする。

(1) $N_0 \cdot \Lambda$ の特性

図-4. 1. 3に各mごとの N_0 ~降雨強度関係、 Λ ~降雨強度関係、 Λ ~ N_0 関係を示す。なお、これらの図は全地点(4地点)の測定結果を用いたものである。

これらから次のことがわかる。

① $N_0 \cdot \Lambda$ の出現範囲

$N_0 \cdot \Lambda$ の出現範囲を表-4. 1. 1に示す。mが大きくなるほど $N_0 \cdot \Lambda$ も大きくなっている。

② 降雨強度と $N_0 \cdot \Lambda$ の関係

Λ の値は、降雨強度が大きくなるほど小さくなっている。すなわち、粒径の大きな雨滴の占める割合が増している。 N_0 では、mが小さい時は正の相関、mが大の時は負の相関が見られるが、あまり顕著ではない。

③ N_0 ~ Λ の関係

$N_0 \cdot \Lambda$ の間には強い正の相関が見られ、mが大きくなるほど相関が強くなっている。

表-4. 1. 1 N_0, Λ の出現頻度

m	N_0	Λ
-2	$10^0 \sim 10^4$	$\sim 10^{0.6}$
0	$10^1 \sim 10^5$	$10^{0.0} \sim 10^{0.8}$
2	$10^2 \sim 10^6$	$10^{0.2} \sim 10^{1.0}$
4	$10^3 \sim 10^7$	$10^{0.4} \sim 10^{1.1}$
6	$10^4 \sim 10^9$	$10^{0.6} \sim 10^{1.2}$
8	$10^5 \sim 10^{10}$	$10^{0.8} \sim 10^{1.3}$

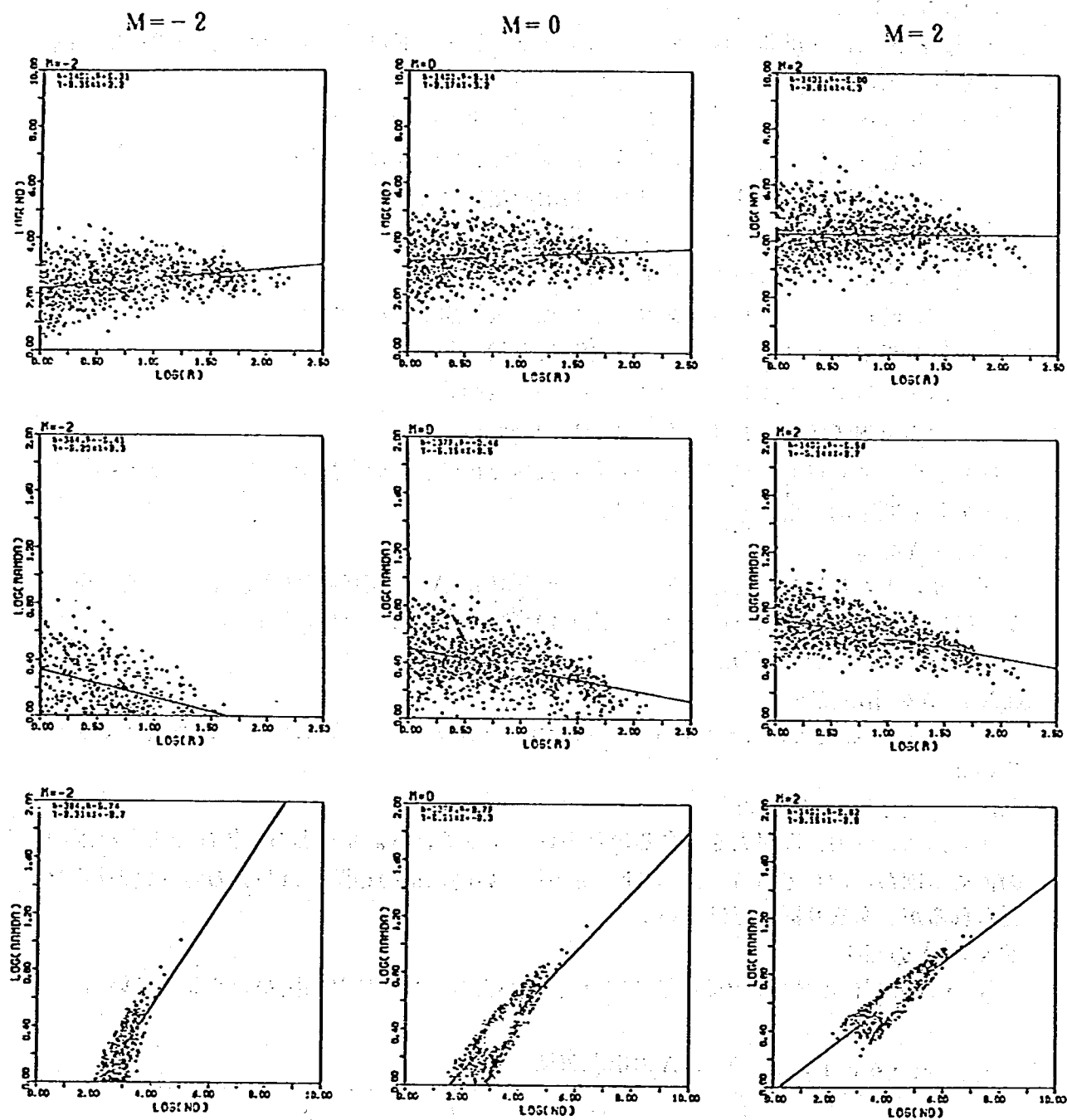


図-4. 1. 3 (a) $N_0 \sim \Lambda \sim R$ 関係

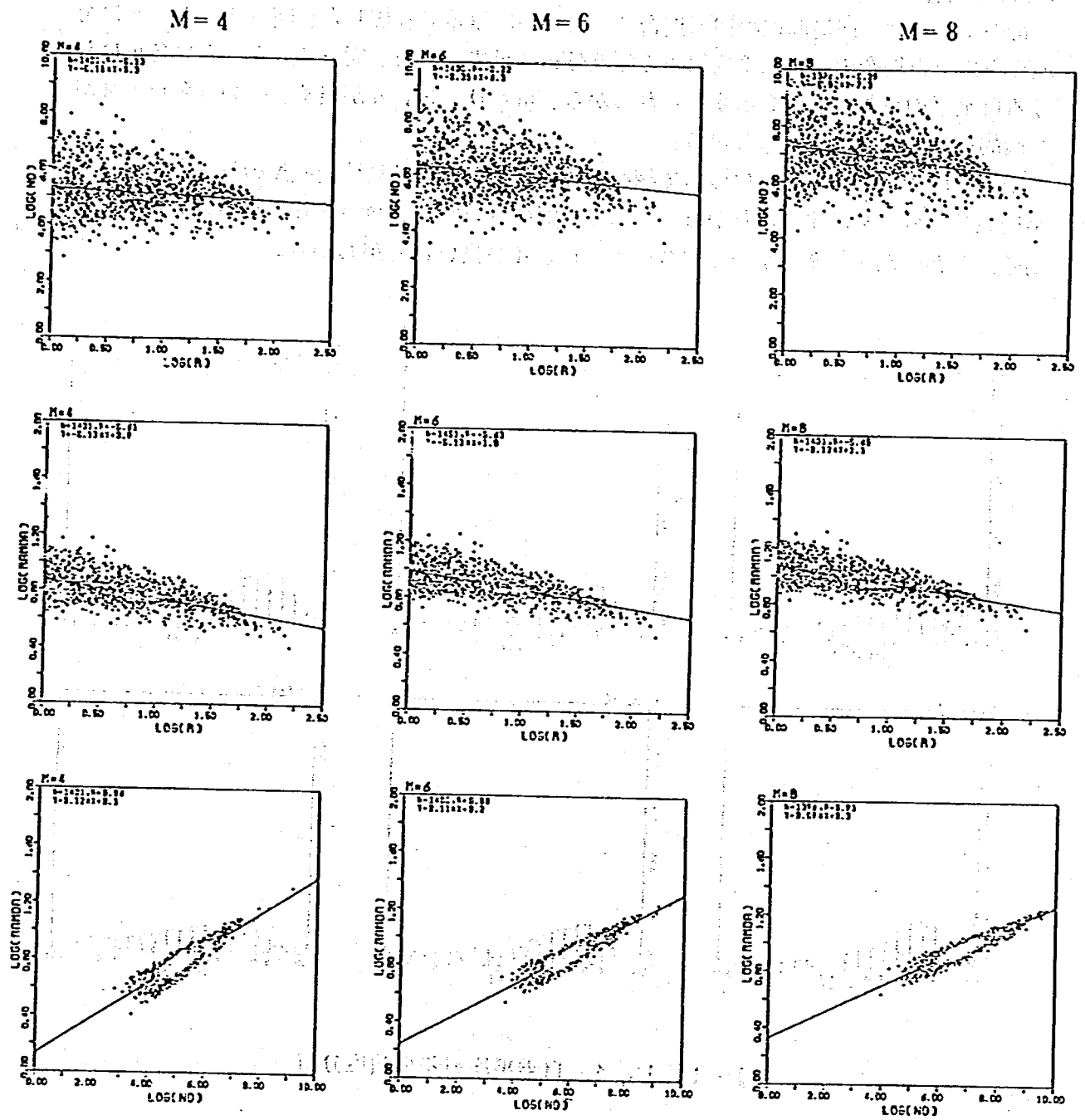


図-4. 1. 3(b) $N_a \sim A \sim R$ 関係

(2)mの検討

mのケース別に回帰曲線の回帰度合を、自乗平均誤差で評価した。図-4.1.4に全地点を用いた場合の、自乗平均誤差の頻度分布を示す。また、図-4.1.5に各mにおける自乗平均誤差の変化を示す。これらから、 $m=0, 2, 4$ が良く、このうち $m=2$ が全般的に良好であることがわかる。

次に降雨強度による違いについて調べた。図-4.1.6に降雨強度のランク別の自乗平均誤差の分布を示す。これから、降雨強度が小さい時は、 $m=2$ 程度が最適であり、降雨強度が 30mm/h を超えるような場合には、 $m \geq 4$ が良いことがわかる。

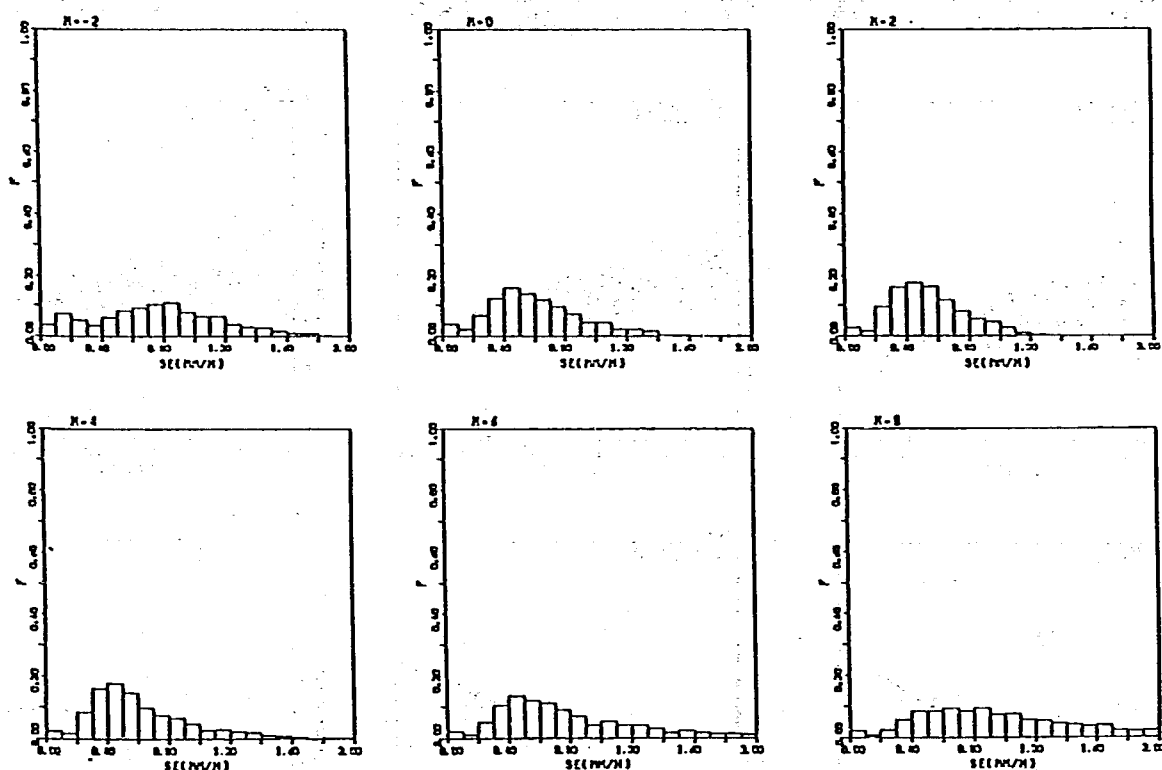


図-4.1.4 自乗平均誤差の頻度分布

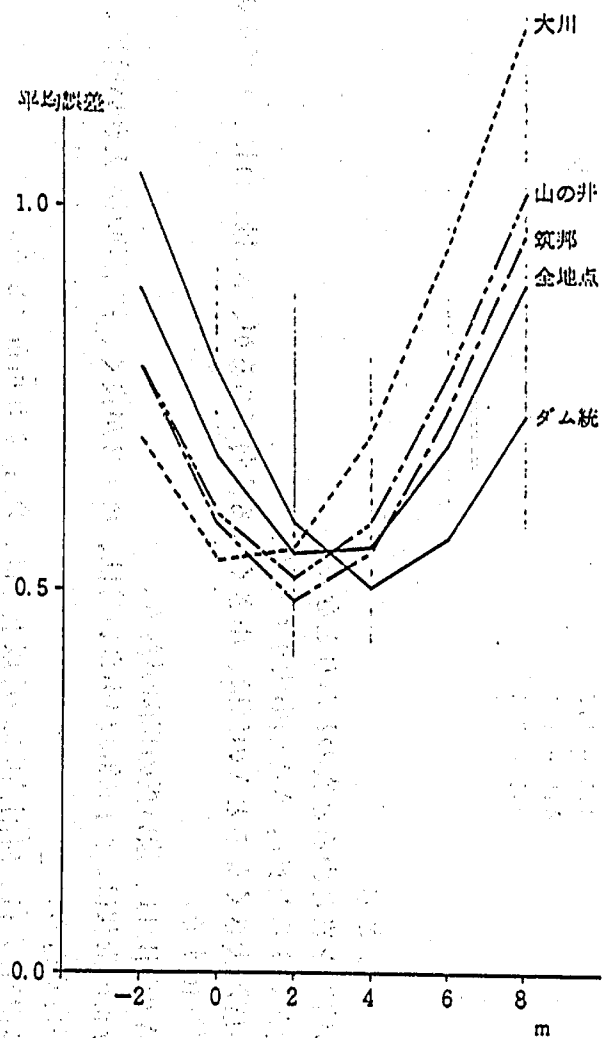


図-4.1.5 自乗平均誤差の変化

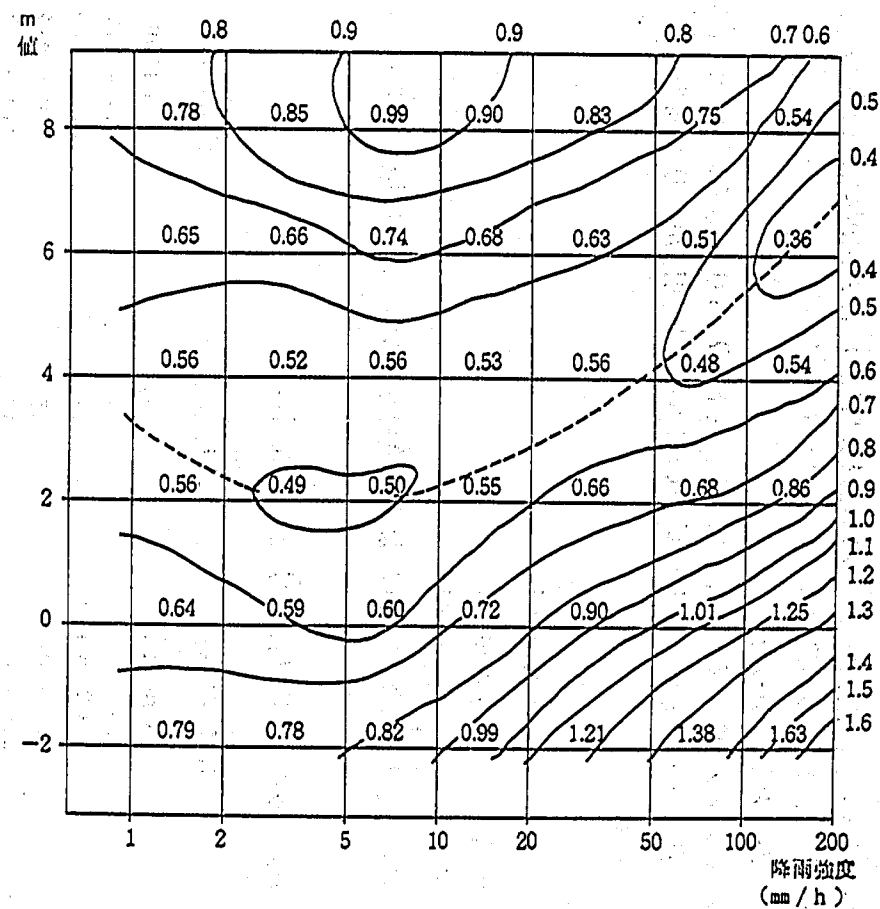


図-4.1.6 降雨強度別自乗平均誤差の分布

(3) 最大粒径 D_{max} の検討

1 分間データを用いて、降雨強度ランク別に最大粒径 D_{max} の出現頻度を調べた。図-4.1.7 にダム統管での測定値の頻度分布を一例として示す。

これらから、次のことがわかった。

- ① $D_{max} \geq 5 \text{ mm}$ (ランク20) となる降雨強度は、以下のとおりである。大川出張所の測定データのみ値が異なっているが、これは装置の設置場所に問題があり周囲の雑音等を拾ったためと考えられる。

ダム統管 $R > 5 \text{ mm/h}$

元筑邦出張所 $R > 5 \text{ mm/h}$

山ノ井排水機場 $R > 5 \text{ mm/h}$

大川出張所 $R > 2 \text{ mm/h}$

- ② $R \leq 10 \text{ mm/h}$ で、 $D_{max} \geq 5 \text{ mm}$ となる頻度は小さい。(大川出張所は除く)

なお、粒径のランクは、下記に示すとおりである。

粒径ランク	雨滴の直径	粒径ランク	雨滴の直径
No.	(mm)	No.	(mm)
1	0.3 - 0.4	13	2.4 - 2.7
2	0.4 - 0.5	14	2.7 - 3.0
3	0.5 - 0.6	15	3.0 - 3.3
4	0.6 - 0.7	16	3.3 - 3.7
5	0.7 - 0.8	17	3.7 - 4.1
6	0.8 - 1.0	18	4.1 - 4.5
7	1.0 - 1.2	19	4.5 - 5.0
8	1.2 - 1.4	20	5.0 -
9	1.4 - 1.6		
10	1.6 - 1.8		
11	1.8 - 2.1		
12	2.1 - 2.4		

4.1.4 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ① m を大きくすると N_0 , Λ の値も大きくなる。
 ② 降水強度が大きくなると Λ の値は、小さくなる傾向があるが、 N_0 は、 m によってその傾向が変化する。
 ③ N_0 , Λ の間には、強い正の相関がある。
 ④ 粒径分布の形状は、降雨強度が小さい時は、 $m = 2$ が良く、降雨強度が大きい時は、 $m \geq 4$ が良く合う。
 ⑤ 最大粒径 D_{max} は、降雨強度 5 mm/h 以上では、 $D_{max} \geq 5 \text{ mm}$ となる。

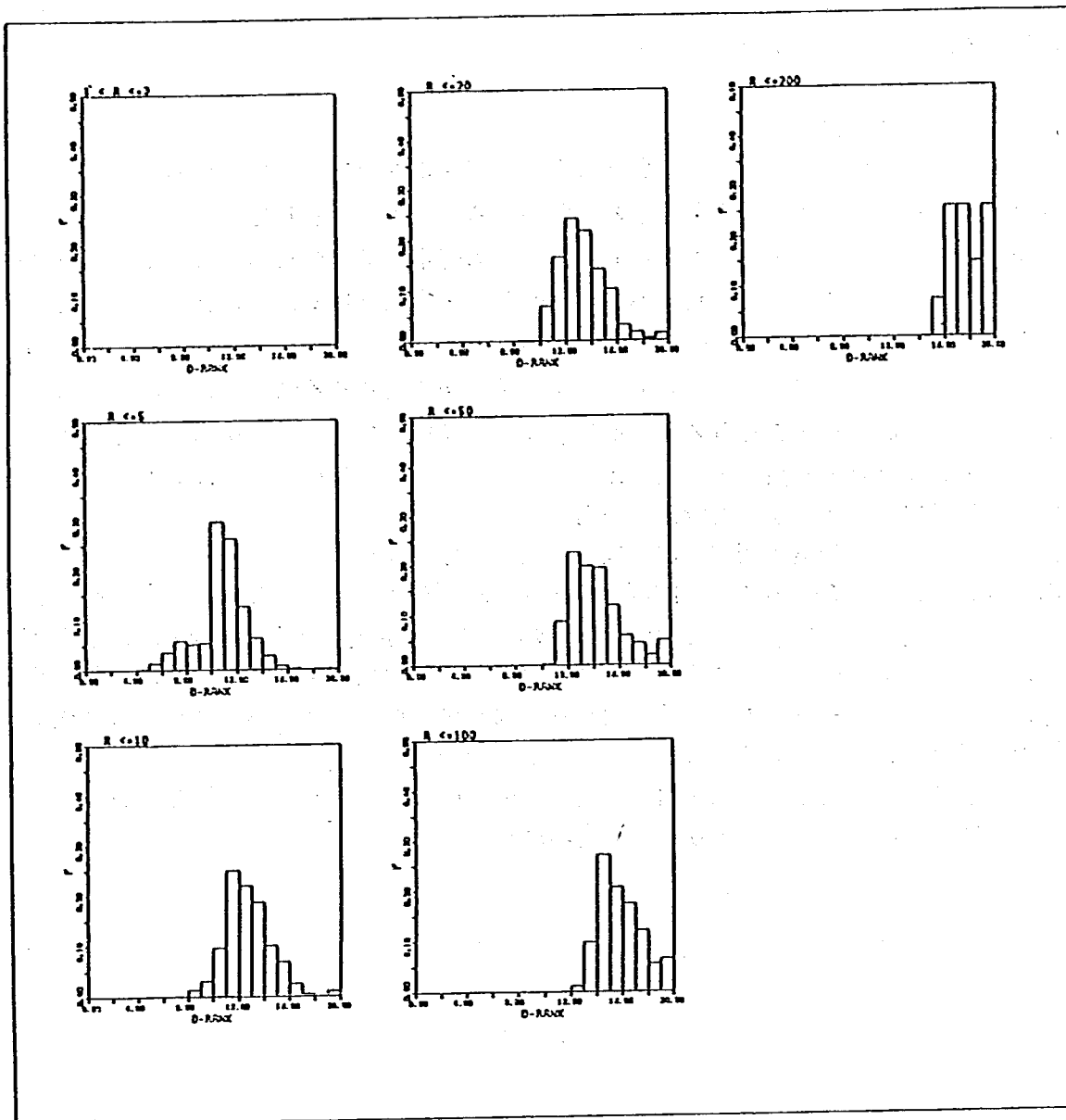


図-4. 1. 7 D_{max} の出現頻度 (ダム統管)

4. 2 Z_{DR} 法による降水強度の測定精度

4. 2. 1 はじめに

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を測定する技術を開発する必要がある。その一つとして気象レーダが上げられるが、既存型レーダによる降雨観測では、目標の降水粒子群から得られる情報が一つしかないため①降水粒子の形態判別が不可能、②レーダ定数だけでは B 、 β の推定が困難、という問題があり、観測精度の向上に限界がある。

これらの問題を解決する方法として、降水粒子群から得られる情報を複数にした二重偏波レーダによる観測が考えられる。二重偏波レーダを用いて降水強度を求める方法としては、従来の $Z = BR^{\beta}$ を用いる方法（以下「 $B\beta$ 法」と呼ぶ）に対し、反射因子差 Z_{DR} を用いる方法（以下「 Z_{DR} 法」と呼ぶ）がある。

Z_{DR} 法による降水強度の測定方法とは、「雨滴が球でなく偏平していることを利用し、降水強度を求める」方法のことである。つまり、雨滴が球でないことにより生じる「水平偏波の電波で測定した反射因子 Z_H と垂直偏波の電波で測定した反射因子 Z_V との差（反射因子差 Z_{DR} ）」から粒径分布を推定し、これによって降水強度を求めようというものである。粒径分布、すなわち、「何ミリの大きさの雨滴が 1 m^3 中に何個あるか」がわかれば、雨滴の落下速度を考慮することにより、降水強度がわかる。

本研究では、 Z_{DR} 法による降水強度を①雨滴の粒径分布、②転倒樹雨量計、から得られる降水強度と比較することによりその測定精度を調べた。

4. 2. 2 降雨観測

二重偏波レーダによる降雨観測は、建設省筑後川ダム統合管理事務所（福岡県久留米市高野町庁）をレーダサイト（庁舎屋上にレーダを設置）とし、半径40km以内の地域の降雨を観測した。また、地上雨量の観測は、レーダサイトから約20km以内の地点に、0.5mm転倒樹雨量計を20台、雨滴計（ディストロメーター）を4台設置することにより観測を行った。

図-4. 2. 1に観測所位置図を、表-4. 2. 1に観測所一覧を示す。

降雨観測期間は、昭和63年6月16日から10月15日の間の約60日間である。

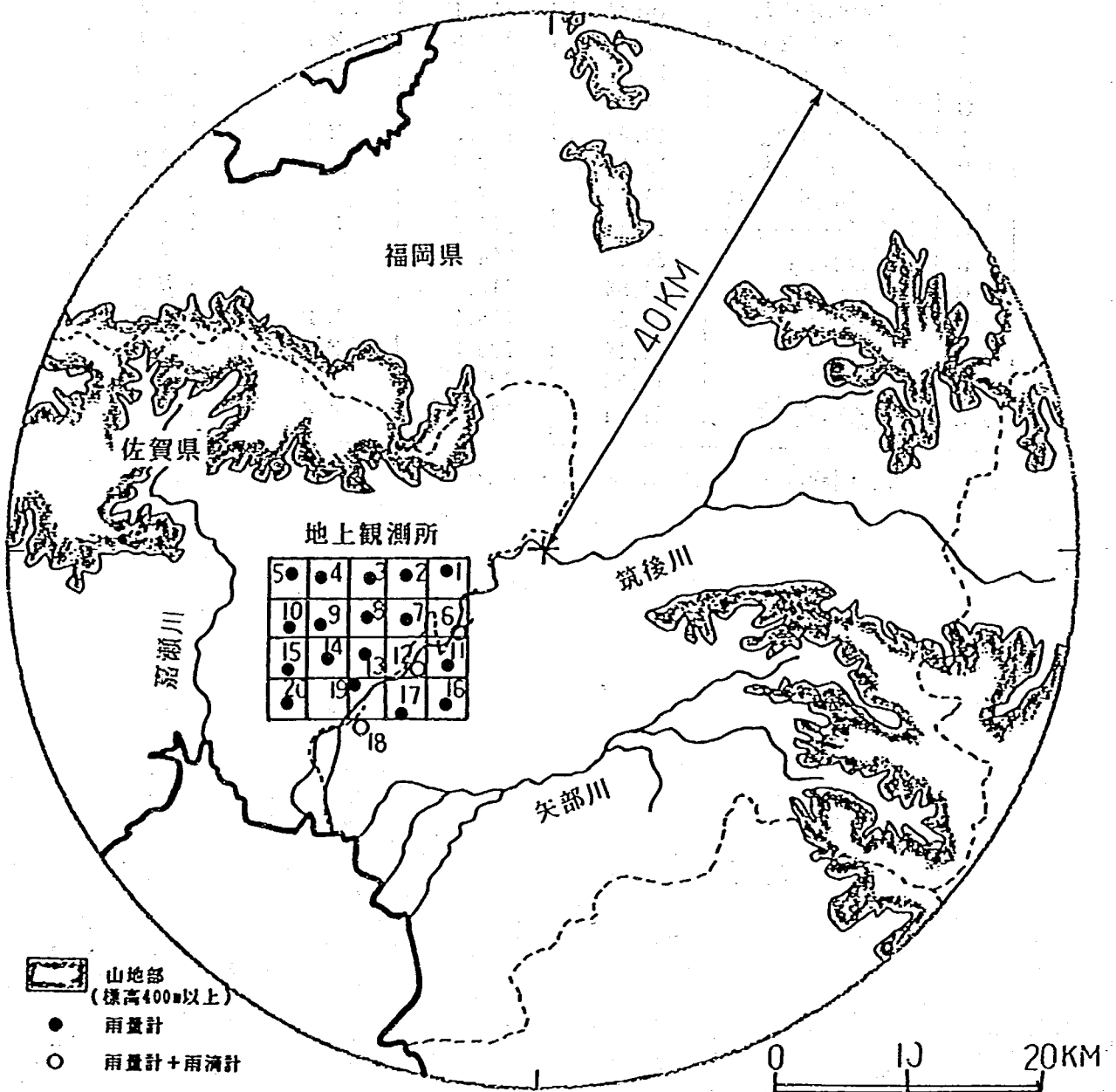


図-4. 2. 1 観測所位置図

表-4.2.1 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	13	186
2	上峰村役場	9.51	261.2	20	186
3	三田川町役場	12.16	263.3	25	187
4	ビーシー橋梁	16.15	265.4	33	189
5	久保泉小学校	18.65	265.6	38	189
6	* 元筑邦出張所	8.74	227.8	18	162
7	三根西小学校	10.86	242.1	22	172
8	蔵戸区長2P	13.61	249.5	27	177
9	宇部生コン	17.19	251.7	35	179
10	宝正幼稚園	19.17	255.3	39	182
11	筑後川土地改良区	10.03	218.5	21	155
12	* 山ノ井排水機場	12.10	229.9	25	163
13	千代田東部小学校	14.59	237.5	30	169
14	千代田西部小学校	17.89	244.2	36	174
15	巨勢小学校	20.27	244.2	41	174
16	筑後生コン	12.86	212.1	26	151
17	五反田公民館	15.59	219.7	32	156
18	* 大川出張所	18.19	226.3	37	161
19	諸富出張所	17.26	235.1	35	167
20	紫金山光源寺	21.61	238.6	44	170

(注) *は、雨滴計(ディスドロメーター)を併設

4. 2. 3 二重偏波レーダによる降水強度・粒径分布の推定原理

水平及び垂直偏波によって得られる反射因子 Z_H 、 Z_V はそれぞれ次の式で表される。

$$Z_H = C \int_0^{D_{max}} \sigma_H(D) N(D) dD \quad (4.2.1)$$

$$Z_V = C \int_0^{D_{max}} \sigma_V(D) N(D) dD \quad (4.2.2)$$

ここに、 C : レーダシステムによって定まる定数

D_{max} : 雨滴の最大粒径 (mm)

$\sigma_{H,V}$: 後方散乱断面積 (cm²)

$N(D)$: 雨滴の粒径分布 (1/mm³)

雨滴の粒径分布 N は、単位空間内に存在する雨滴の数を表すもので、次式のように表されることが知られている。

$$N(D) = N_0 D^m \exp(-\Lambda D) \quad (4.2.3)$$

ここに、 N_0, m, Λ : 降雨状態を示す定数

D : 雨滴の等価直径 (mm)

この粒径分布を用いると、 Z_H と Z_V との差 Z_{DR} は、次のようになる。

$$\begin{aligned} Z_{DR} &= 10 \log (Z_H / Z_V) \\ &= 10 \log \left(\int_0^{D_{max}} \sigma_H D^m \exp(-\Lambda D) dD / \int_0^{D_{max}} \sigma_V D^m \exp(-\Lambda D) dD \right) \end{aligned} \quad (4.2.4)$$

指数 m を設定し、 $\sigma_H \cdot \sigma_V$ をあらかじめ理論計算によって求めておけば、(4.2.4) 式により Λ が求められ、続いて (4.2.1) 式の Z_H または (4.2.2) 式の Z_V を用いて N_0 が得られる。したがって、上空の雨滴の粒径分布を推定できる。

粒径分布が得られれば、それから以下に示す関係より降水強度が計算できる。すなわち、降水強度 R は、

$$R = 3.6 \times 10^{-3} (4/3) \pi \int_0^{D_{max}} (D/2)^3 N(D) V(D) dD \quad (4.2.5)$$

ここに、 R : 降水強度 (mm/H)

D : 雨滴の等価直径 (mm)

D_{max} : 雨滴の最大粒径 (mm)

$N(D)$: 粒径分布 (1/mm³)

$V(D)$: 落下速度 (m/s)

で表されるので、 Z_H と R の比 Z_H/R は、次式のとおりとなる。

$$\frac{Z_H}{R} = \frac{10^6 (\lambda^4 / \pi^5) | (e+2)/(e-1) |^2 \int_0^{D_{max}} \sigma_H D^m \exp(-\Lambda D) dD}{3.6 \times 10^{-3} (4/3) \pi \int_0^{D_{max}} (D/2)^3 V(D) D^m \exp(-\Lambda D) dD} \quad (4.2.6)$$

これらの関係により、雨滴の粒径分布形状を示す指数 m 、雨滴の最大粒径 D_{max} 、雨滴の落下速度 $V(D)$ を設定すれば、(4.2.4)式と(4.2.6)式から $Z_{DR} \sim Z_H/R$ の関係が求められ、 Z_{DR} 、 Z_H の測定値から降水強度 R が計算できる。

4.2.4 レーダ計算条件

レーダ観測値の計算条件は、次のとおりとした。

(1) データの平均化時間

1分間及び5分間とする。

(2) Z_{DR} の補正

本解析では、原則として補正式は用いないこととする。

(3) 解析対象データ

反射因子 Z_H, Z_u を求める際に用いた受信電力の中に -102.5dBm 以下のものが含まれる場合及び反射因子差 Z_{DR} が 0.2dB 以下の場合には、その時のレーダ雨量(R_{ZDR}, R_{B3})は欠測とし、解析の対象からはずす。

(4) 後方散乱断面積

入射角 $=3^\circ$ 、高度 $=0\text{Km}$ 、温度 $=20^\circ$ で計算したものを用いる。

(5) 落下速度

落下速度式の代表的なものとして、次の3つが上げられる。

① Bestの式

$$V(D) = 958.0 (1 - \exp(-(D/0.0885)^{1.147})) \quad (\text{cm/s}) \quad (4.2.7)$$

ここに、 D : 雨滴の半径 (mm)

② Foote and Du Toitの式

$$V(D) = \sum a_j \cdot D^j \quad (\text{m/s}) \quad (4.2.8)$$

ここに、 D : 雨滴の直径 (mm)

a : 多項式の係数 (表-4.2.2に示す)

③ 藤原・柳原・高原の式

$$V(D) = 1400 \cdot \rho^{1/3} \cdot D^{1/2} \quad (\text{cm/s}) \quad (4.2.9)$$

ここに、 D : 雨滴の直径 (cm)

ρ : 密度 (g/cm^3)

これらの計算値を図-4.2.2に示す。これを見ると雨滴の直径が 5mm 以下では、ほとんど差がないことがわかる。ここでは、以下の計算をBestの式を用いて行うこととする。

表-4.2.2 多項式の係数

j	a_j		
	N = 3	N = 5	N = 9
0	-1.9274×10^{-1}	-3.1682×10^{-1}	$-8.5731540 \times 10^{-2}$
1	4.9625×10^0	5.4506×10^0	3.3265862×10^0
2	-9.0441×10^{-1}	-1.3806×10^0	4.3843578×10^0
3	5.6584×10^{-2}	2.3612×10^{-1}	-6.8813414×10^0
4		-2.8781×10^{-2}	4.7570205×10^0
5		1.6486×10^{-3}	-1.9046601×10^0
6			4.6339978×10^{-1}
7			$-6.7607898 \times 10^{-2}$
8			5.4455480×10^{-3}
9			$-1.8631087 \times 10^{-4}$
最大誤差	0.11 m/sec	0.07 m/sec	0.03 m/sec

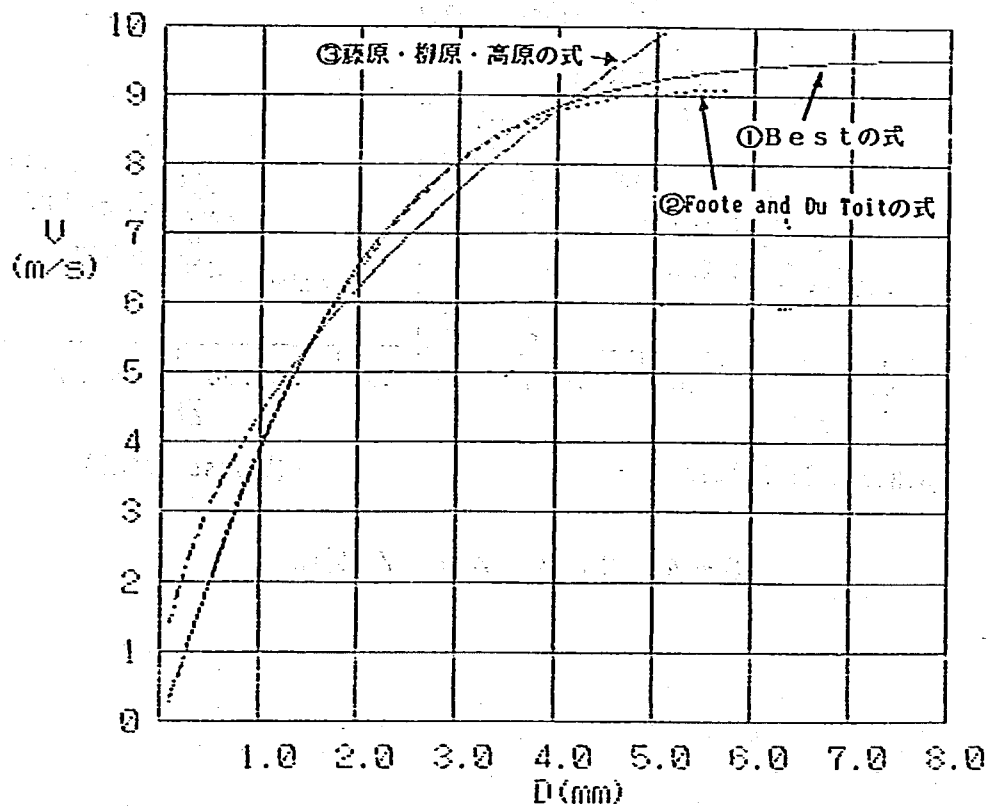


図-4.2.2 雨滴の落下速度

(6) 粒径分布の D_{max}

図-4.2.3に各 D_{max} における $Z_{DR} \sim Z_H$ の関係を示す。ただし、粒径分布式は、次の2つを用いている。

(a) Marshall-Palmer

$$N(D) = 8000 * \exp(-4.1 \cdot R^{-0.21} \cdot D) \quad (4.2.10)$$

(b) Joss (雷雨)

$$N(D) = 1400 * \exp(-3.0 \cdot R^{-0.21} \cdot D) \quad (4.2.11)$$

これを見ると、 D_{max} が 5 mm 以下では、 Z_{DR} の変化が少ないことがわかる。したがって、 D_{max} を小さくしすぎると Z_{DR} 法の効果があまり期待できないと考えられるので、以下のレーダーデータの解析には、 $D_{max} = 6 \text{ mm}$ を用いることとする。

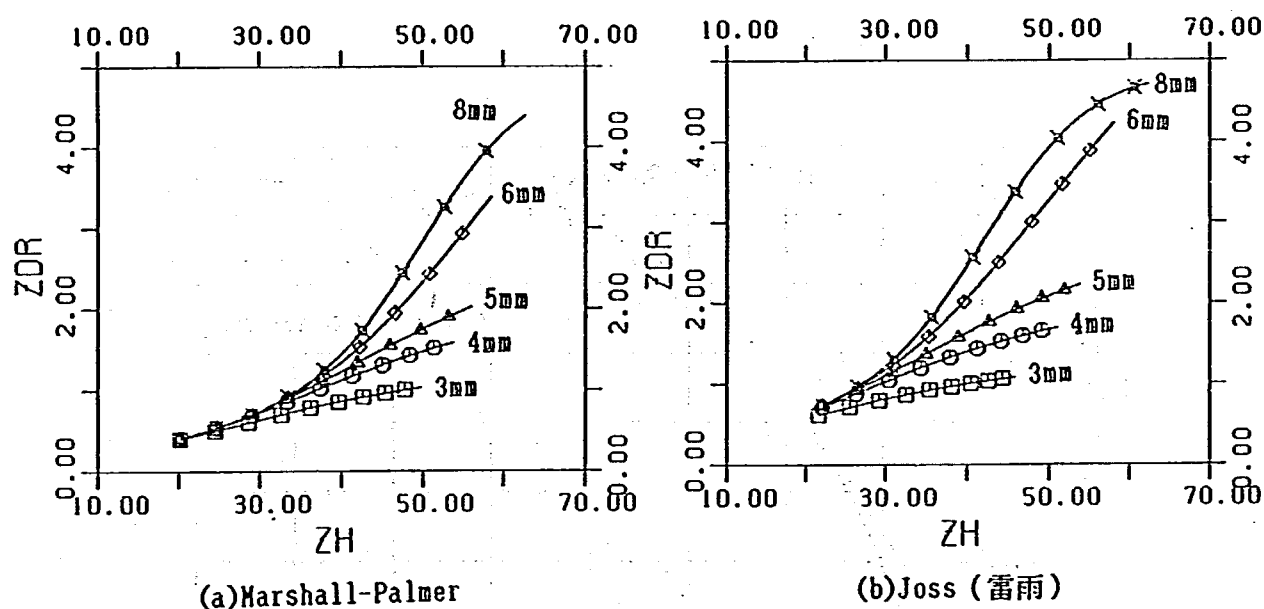


図-4.2.3 $Z_{DR} \sim Z_H$ 関係

(7) 雨滴の落下時間の考慮

地上観測値とレーダ観測値とを比較する場合には、その観測高度の違いから観測時間のずれが生じる。個々のデータの平均時間を長くするとあまり問題とならないが、1分間データを取り扱う場合は、観測時間のずれを修正する必要がある。図-4.2.4にレーダ観測距離と雨滴の落下所要時間との関係を示す。この図は、仰角 3° で観測した場合のビーム高度を用い、また、雨滴の落下速度は雨滴の平均粒径が 1 mm であるとして計算している。

これから、レーダのビーム幅も考慮に入れると、地上観測の範囲では、雨滴の落下所要時間が、1分～6分程度であることがわかる。また、ディストロメーターの観測地点の1つ、観測所No. 12（山ノ井排水機場）を例にとると次のようになる。

ビーム上限	落下時間 = 3.6分
ビームセンター	落下時間 = 2.7分
ビーム下限	落下時間 = 2.0分

以下の計算（1分間データを用いて地上と比較する場合）においては、実際の観測データを見て、最もその相関が良くなるように時間のずれを修正するものとする。

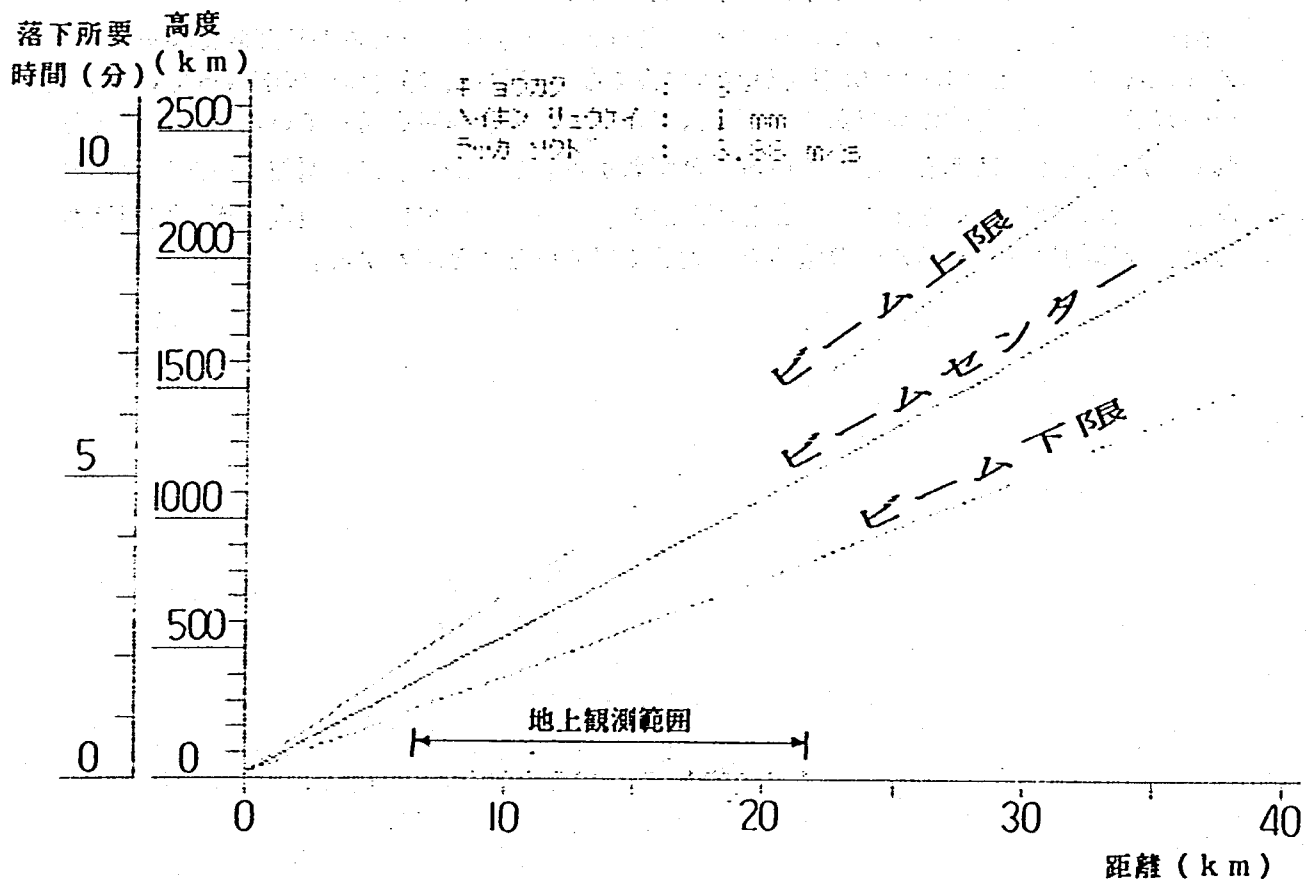


図-4.2.4 レーダ観測距離と雨滴の落下時間

4. 2. 5 粒径分布の測定結果から見た二重偏波レーダの性能評価

(1)二重偏波レーダの性能評価

レーダによる観測から得られた Z_H 、 Z_{DR} の値と粒径分布の観測から理論的に求めた Z_H 、 Z_{DR} の値とを比較することにより、二重偏波レーダの性能評価を行った。

計算条件は、次のとおりである。

①対象降雨は、次の期間のものを用いる。

昭和63年10月5日 17:00~20:20 (200分間)

なお、この期間のレーダ観測方法は、次のとおりである。

仰角 3° ，一方向固定 (229.5° 、粒径分布測定地点の方向)

データ平均化時間 9パルスごと

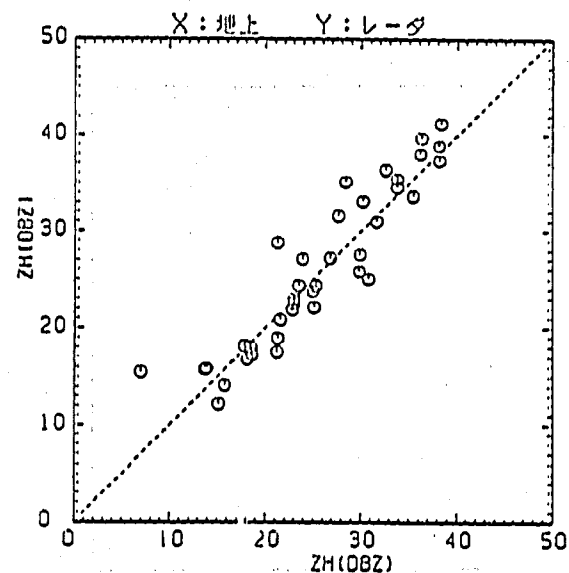
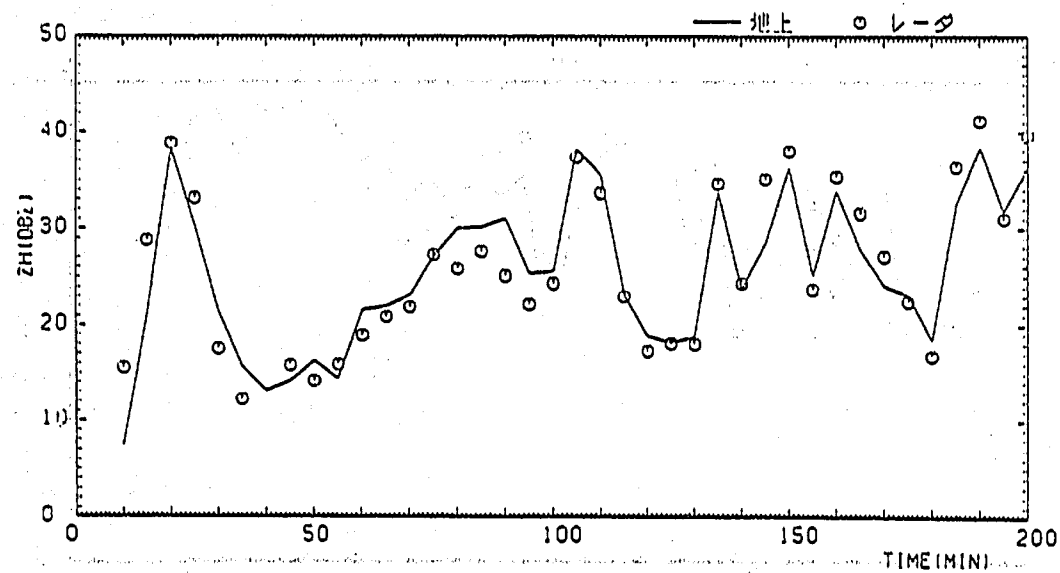
②レーダ雨量値は、粒径分布の観測地点の直上メッシュとそのレンジ方向に前後1つずつのメッシュを加えた3つのメッシュデータの平均値を用いる。

③比較に用いるデータは、5分間平均したものを用いる。

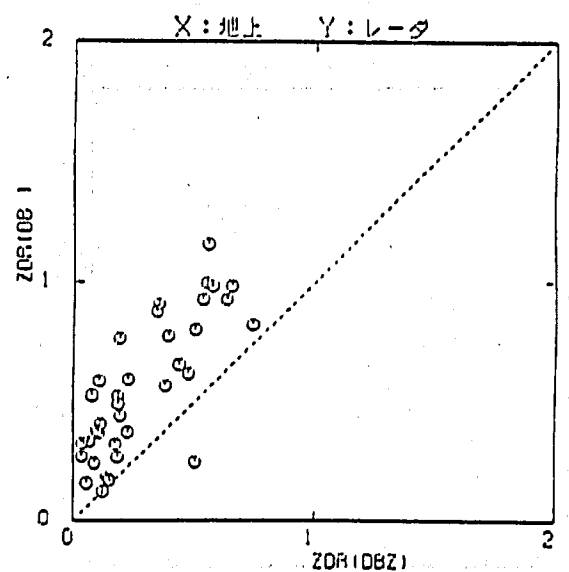
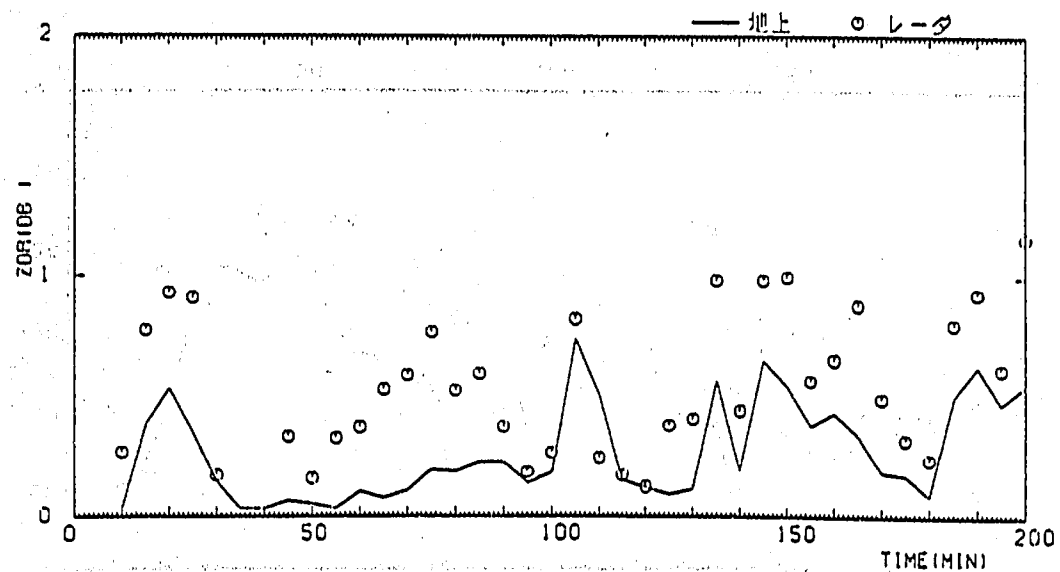
④ $m = 2$ ， $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$ とする。

⑤ディストロメーターのデータは、山ノ井排水機場（以下「山ノ井」）及び大川出張所（以下「大川」）の2地点の測定データを用いる。他の2地点（ダム統管と元筑邦出張所）は、装置の故障及び測定中の停電により上記期間のデータはなし。

図-4. 2. 5，図-4. 2. 6に Z_H 、 Z_{DR} の散布図及びそれらの時間変化図を示す。 Z_H については、山ノ井の方は相関が非常に良くなっており、絶対値もほぼ合っている。大川の方は、その値自体に差がある（ディストロメーターが雑音を拾っているためと考えられる）が時間変動はうまく捉えていることがわかる。これから、二重偏波レーダは降雨の反射を非常に精度良く捉えていることがわかる。 Z_{DR} については、両地点とも、相関はあるが、全体的にレーダの Z_{DR} の値の方が大きく出ていることがわかる。

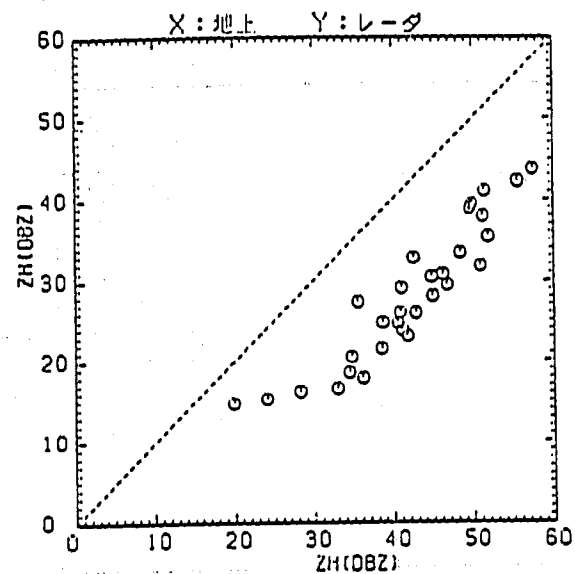
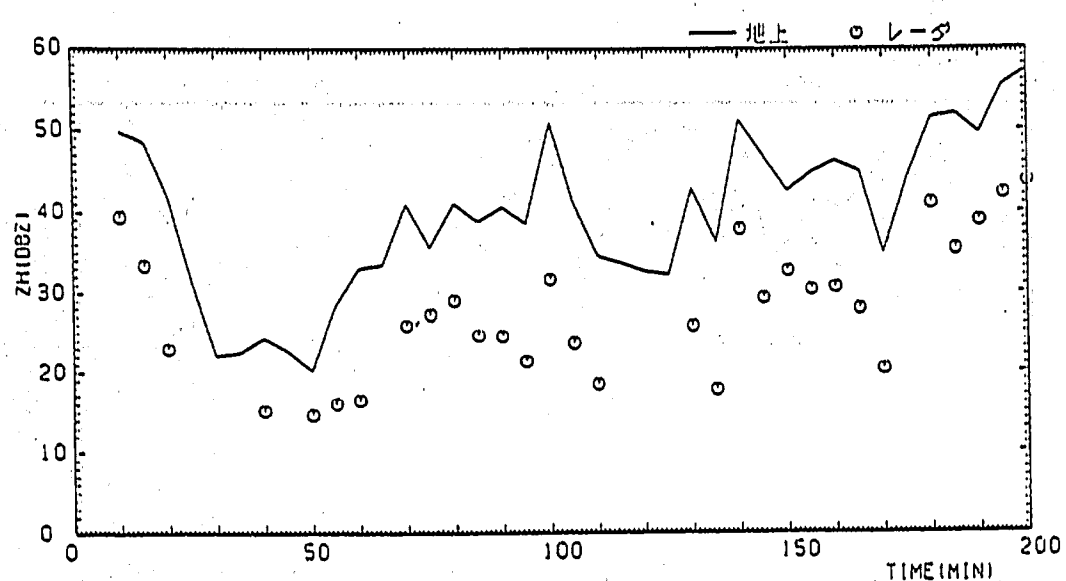


サンプル数	38
相関係数	0.927
相対誤差	2.363
相対誤差率	6.2
偏差値	3.100
偏差値率	12.1

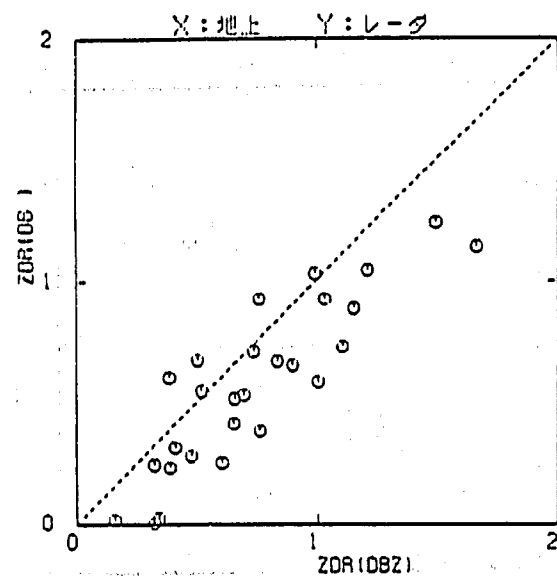
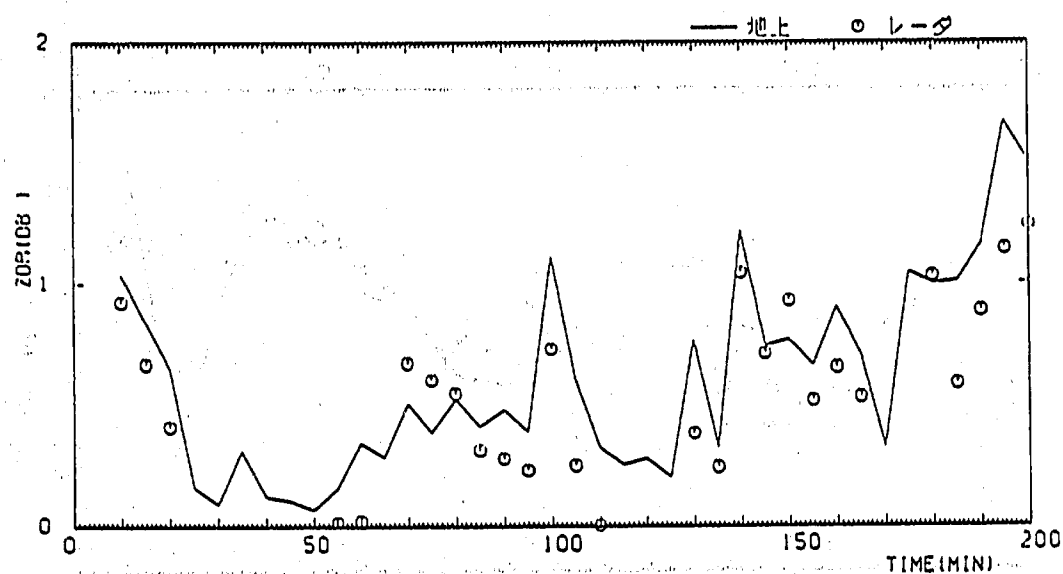


サンプル数	37
相関係数	0.782
相対誤差	0.280
相対誤差率	0.8
偏差値	0.323
偏差値率	113.6

図-4.2.5 Z_H , Z_{DR} の比較(山ノ井)



サンプル数	30
相関係数	0.923
10対誤差	14.067
10対誤差率	46.9
自然誤差	14.467
自然誤差率	34.4



サンプル数	27
相関係数	0.873
10対誤差	0.215
10対誤差率	0.8
自然誤差	0.248
自然誤差率	33.3

図-4.2.6 Z_H , Z_{DR} の比較(大川)

(2) Z_H , Z_U の補正

a) 山ノ井観測データ

レーダ観測の Z_{DR} 値が、1 dB程度であることから、ディストロメーターによる Z_{DR} 値との差は、 Z_H , Z_U の微妙な違いに影響していると考えられる。そこで、ここでは、 Z_H と Z_U の散布図を用いて、レーダ観測とディストロメーター観測間の Z_H 及び Z_U それぞれの値の偏差を求めた。

レーダ $Z_{H,U}$ のディストロメーター $Z_{H,U}$ に対する偏差は、次のとおりとなった。

$$Z_H = 0.245 \text{ dB}$$

$$Z_U = -0.005 \text{ dB}$$

これらの値を用いて補正した後の Z_{DR} の時間変化図及び散布図を図-4.2.7に示す。これより、 Z_{DR} 値が比較的良好に合っていることがわかる。以下の解析においては、補正後の $Z_{H,U}$ を用いることとする。

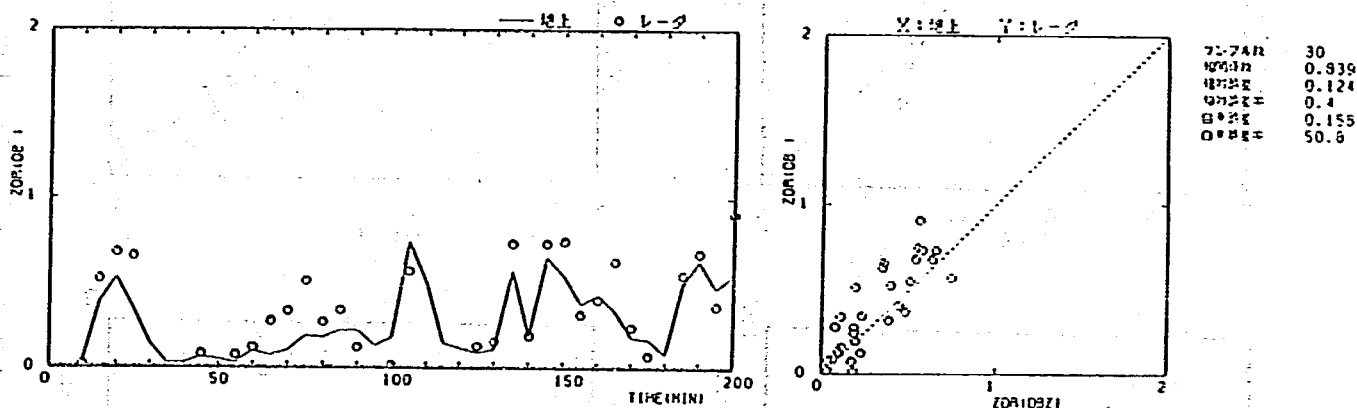
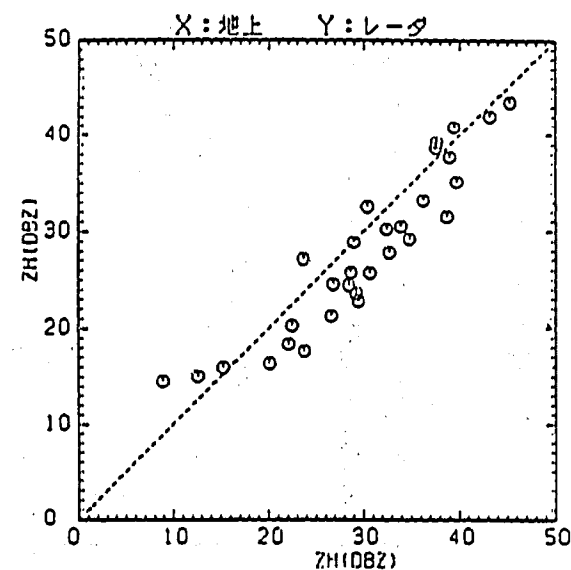
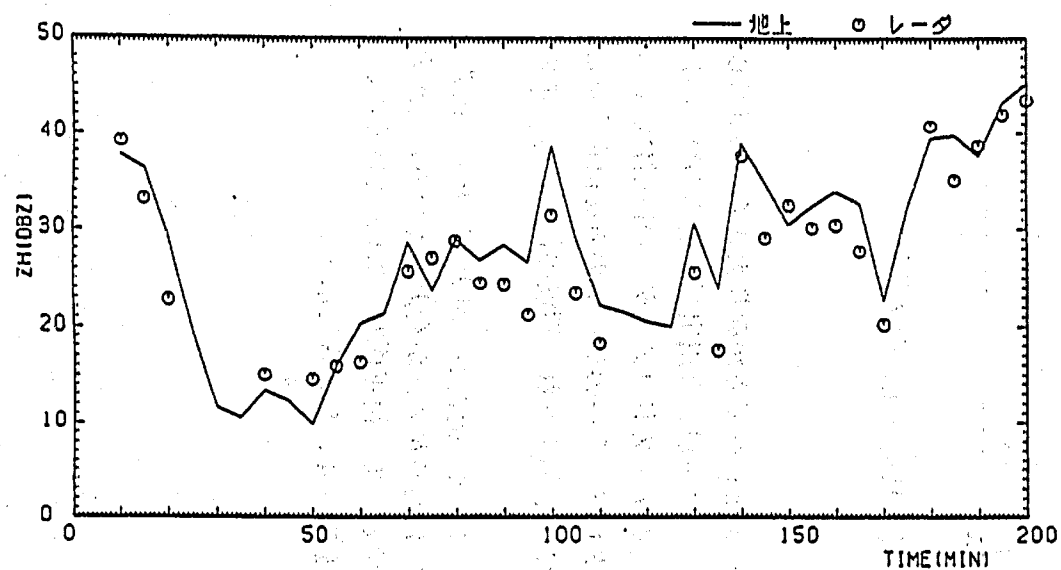


図-4.2.7 Z_{DR} の比較 (Z_H 補正後、山ノ井)

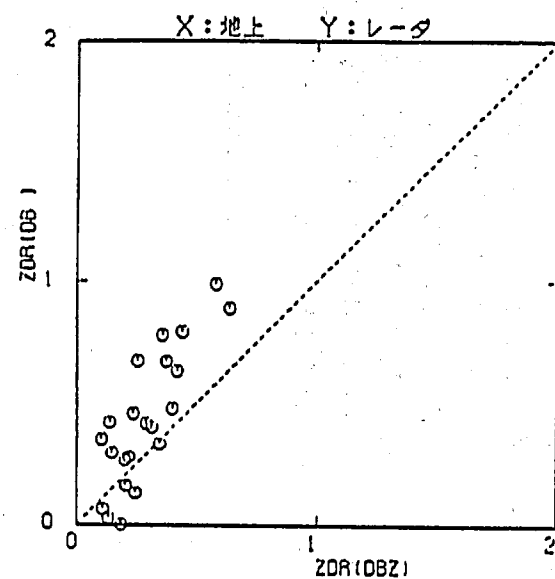
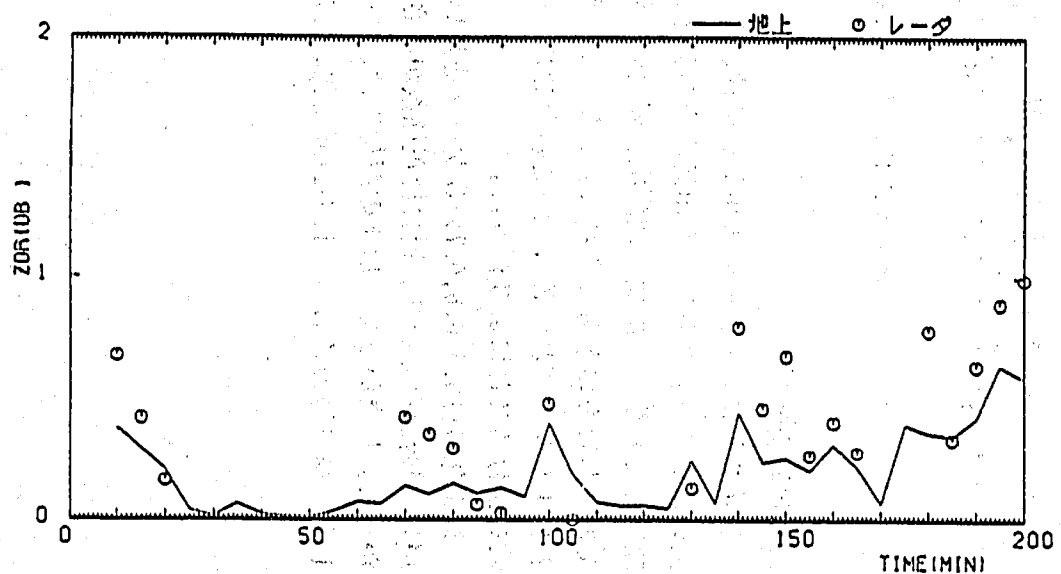
b) 大川観測データ

ディストロメーターの大川データは、山ノ井データと比べてもかなり大きく、10 dB以上の差がある。これは、大川観測所のディストロメーターが、大川出張所構内の駐車場に設置しており、降雨観測期間中、周囲の不要な雑音をディストロメーターが降雨に混じって収録したものと考えられる。ここでは、ディストロメーターのデータの方を補正することによりレーダとの Z_H , Z_U を合わせた。その方法は、測定された雨滴の粒径 D に補正係数を掛けることにより行った。

補正係数は0.5, 0.6, 0.7の3ケースを用いた。その結果、補正係数が大きいと Z_{DR} は合うが Z_H が合わなくなり、逆に補正係数が小さいと Z_H は合うが Z_{DR} が合わなくなることがわかった。したがって、以下の解析では、中間的な値として、補正係数は0.6を用いることとした。補正後の Z_H , Z_{DR} の時間変化図と散布図を図-4.2.8に示す。



サンプル数	30
相関係数	0.929
相対誤差	3.352
相対誤差率	11.2
自然誤差	3.845
自然誤差率	12.9



サンプル数	22
相関係数	0.823
相対誤差	0.191
相対誤差率	0.9
自然誤差	0.229
自然誤差率	79.9

図-4.2.8 Z_H , Z_{DR} の比較 (粒径補正後、大川)

4. 2. 6 Z_{DR} 法による粒径分布の測定精度

(1) N_0 , Λ の比較

レーダ観測から得られた N_0 , Λ と粒径分布 N_0 , Λ の値とを比較することにより測定精度の評価を行った。計算条件は、次のとおりである。

①対象降雨は、4. 2. 5節と同じ期間のものを用いる。

昭和63年10月5日 17:00~20:20 (200分間)

この期間のレーダ観測方法は、次のとおりである。

仰角 3° , 一方向固定 (229.5° 、粒径分布測定地点の方向)

データ平均化時間 9パルスごと

②レーダ雨量値は、粒径分布の観測地点の直上メッシュとそのレンジ方向に前後1つずつのメッシュを加えた3つのメッシュデータの平均値を用いる。

③比較に用いるデータは、5分間平均したものをを用いる。

④ $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$ とする。

⑤ $m = 0, 2, 5$ とする。

⑥ディストロメーターのデータは、山ノ井及び大川の2地点の測定データを用いる。

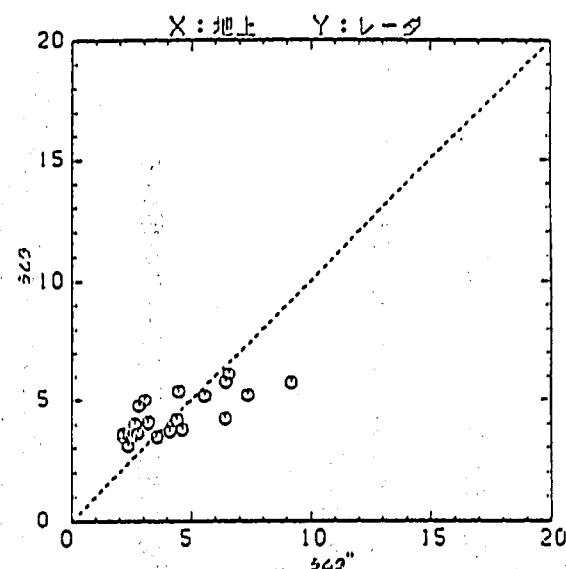
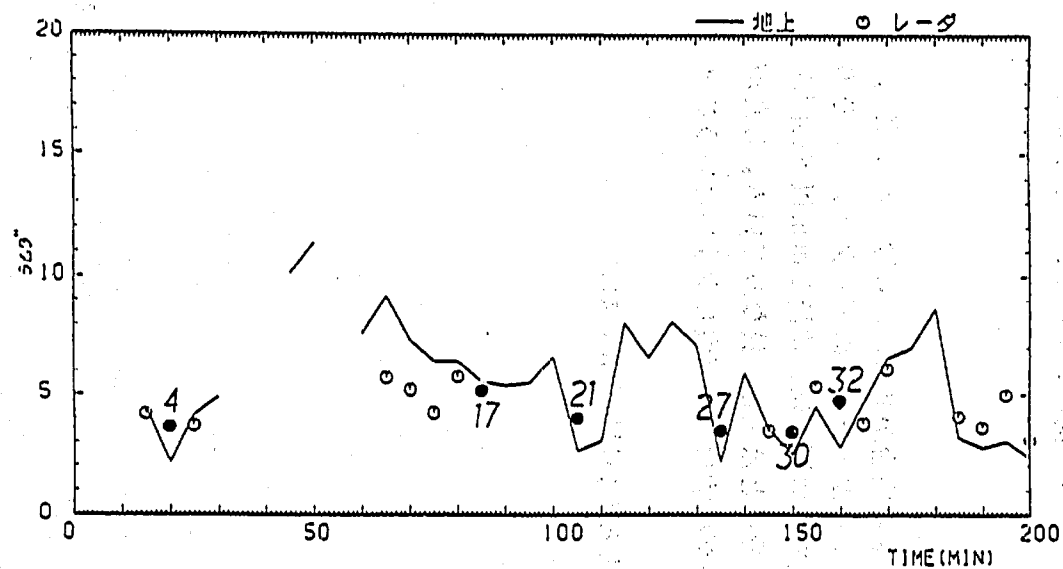
図-4. 2. 9に N_0 , Λ の時間変化図と散布図を示す。また、時間変化図(山ノ井)の●プロットの時間の粒径分布図を図-4. 2. 10に示す。図中の番号は、粒径分布図の N_0 に対応している。

これらから、次のことがわかる。

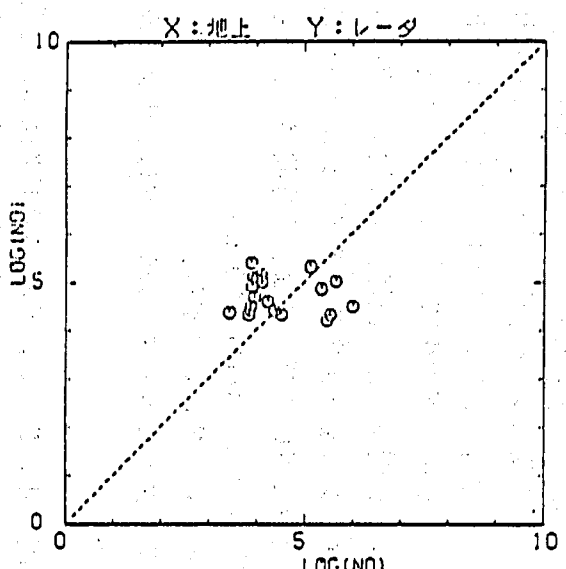
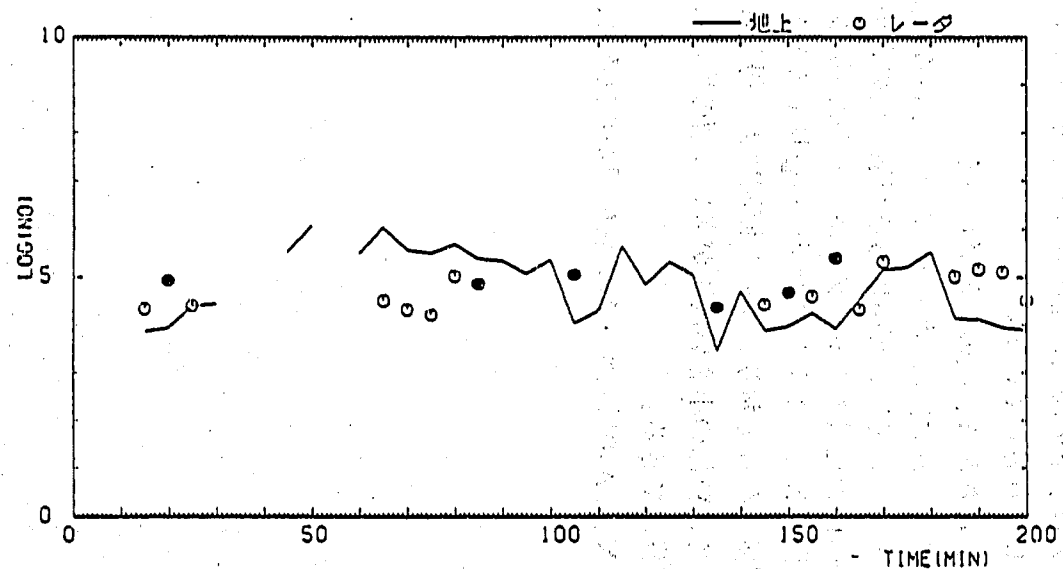
① N_0 については、オーダーが合っている程度である。

② Λ については、相関はあるが地上値の方が大きくなる場合がある。これは、 Z_H , Z_R , Z_{DR} 値の比較でもレーダと地上との対応があまり良くなかった時間のデータである。その時間(N_0 . 17)の粒径分布を見てみると、地上での観測値は、粒径1mm以下の雨滴が多くなっており、レーダ観測により得られた粒径分布とは大きく異なっている。したがって、粒径の小さい雨滴が多い降雨の場合は、レーダ観測に誤差が生じやすいということが推察できる。

③ N_0 ・ Λ の散布図・時間変化図から見ると、 m による違いはほとんどない。

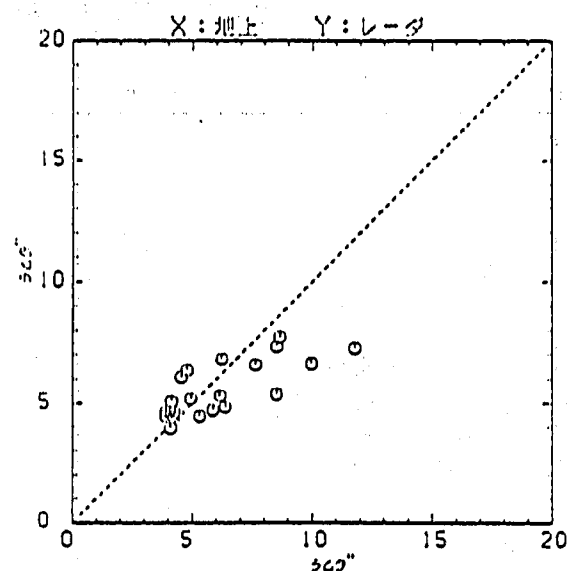
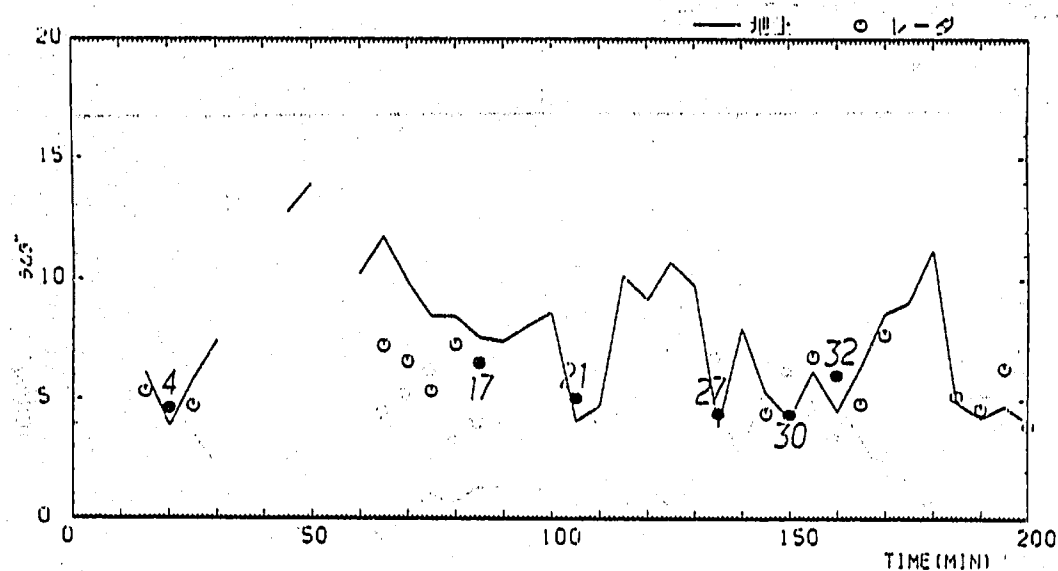


サンプル数 20
相関係数 0.743
相対誤差 1.165
相対誤差率 5.8
自乗誤差 1.421
自乗誤差率 32.9

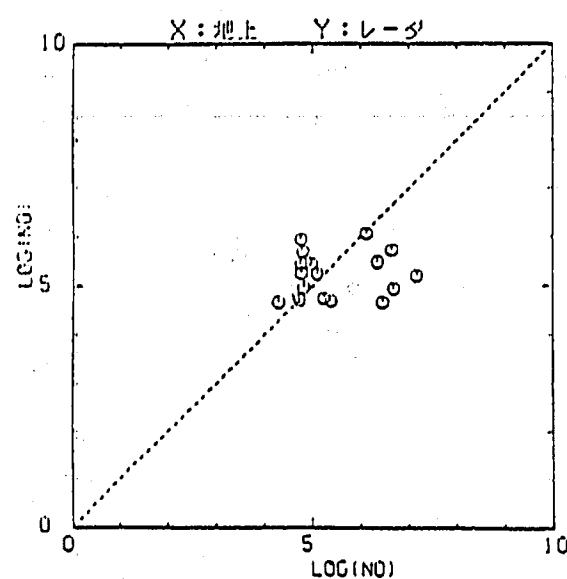
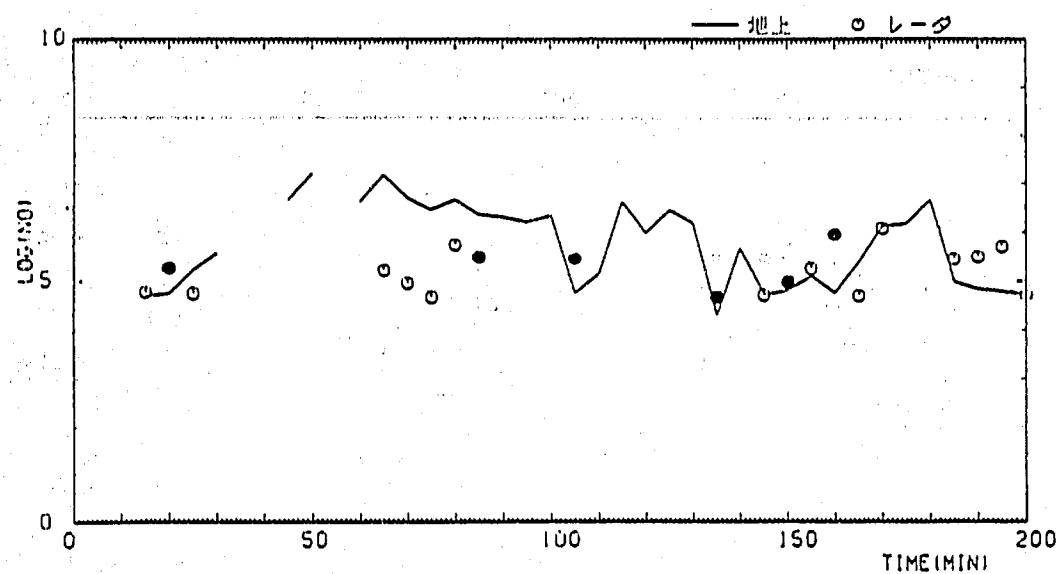


サンプル数 20
相関係数 -0.105
相対誤差 0.794
相対誤差率 4.0
自乗誤差 0.900
自乗誤差率 20.1

図-4.2.9(a) N_a , Λ の比較 (山ノ井、 $m=0$)

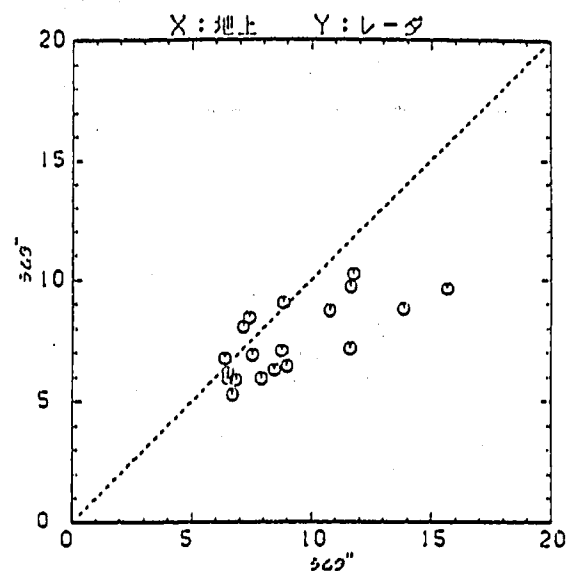
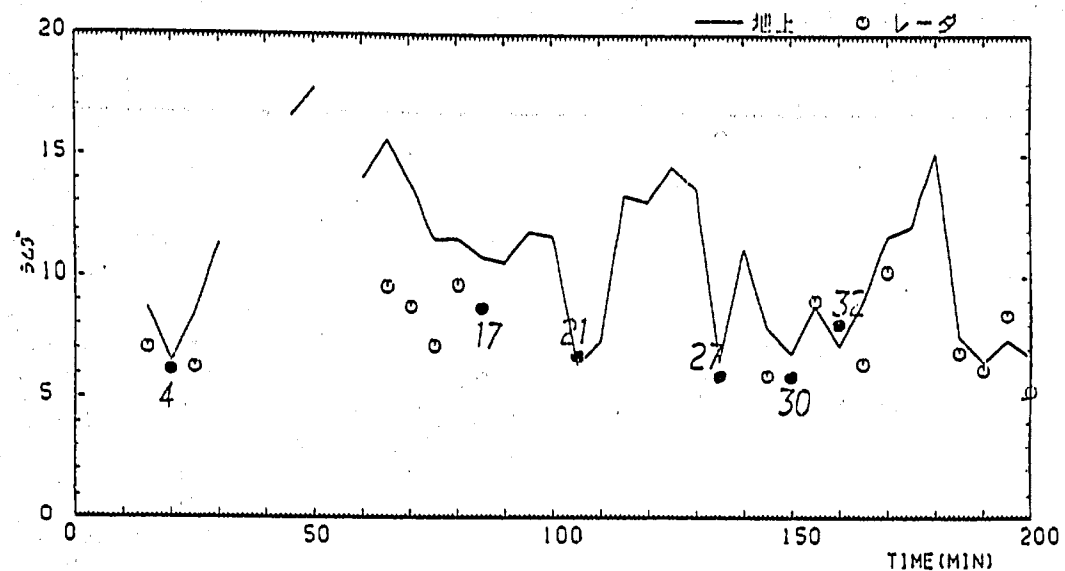


サンプル数	20
相関係数	0.740
相対誤差	1.266
絶対誤差率	6.3
相対誤差率	1.679
絶対誤差率	27.2

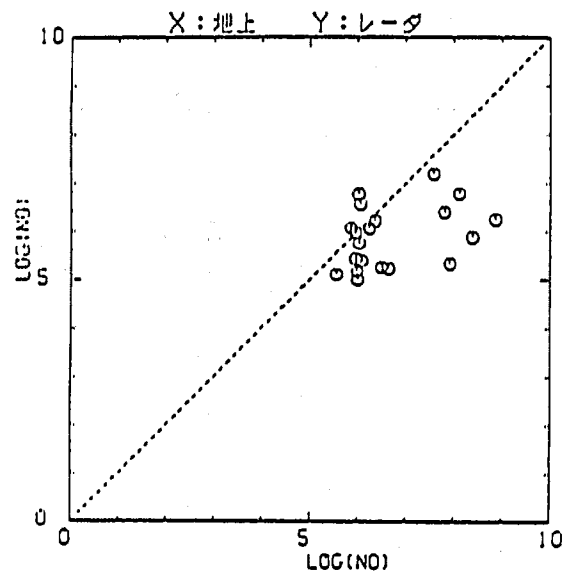
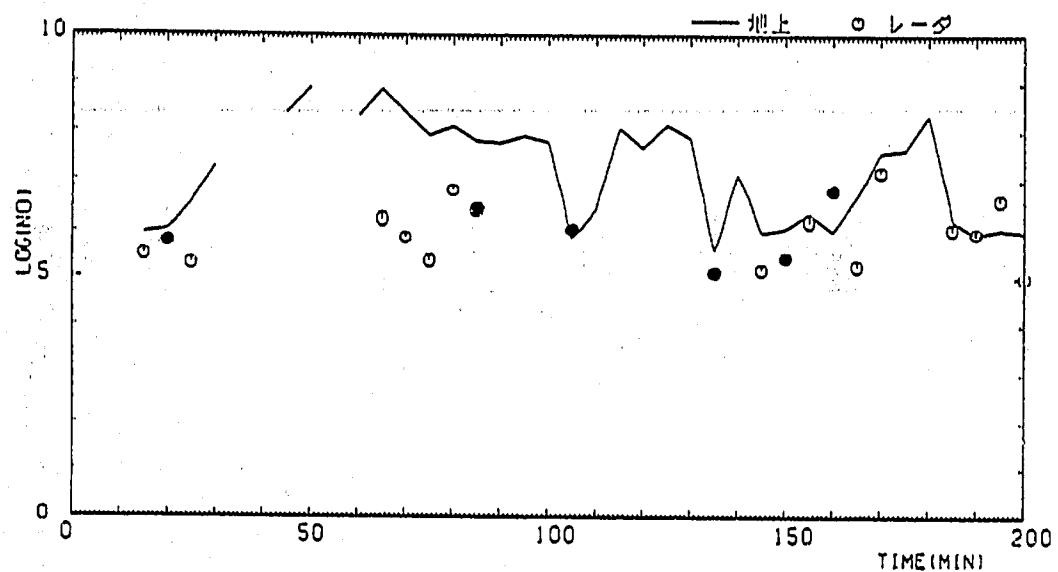


サンプル数	20
相関係数	0.154
相対誤差	0.686
絶対誤差率	3.4
相対誤差率	0.900
絶対誤差率	16.8

図-4. 2. 9(b) N_0 , Λ の比較 (山ノ井、 $m=2$)

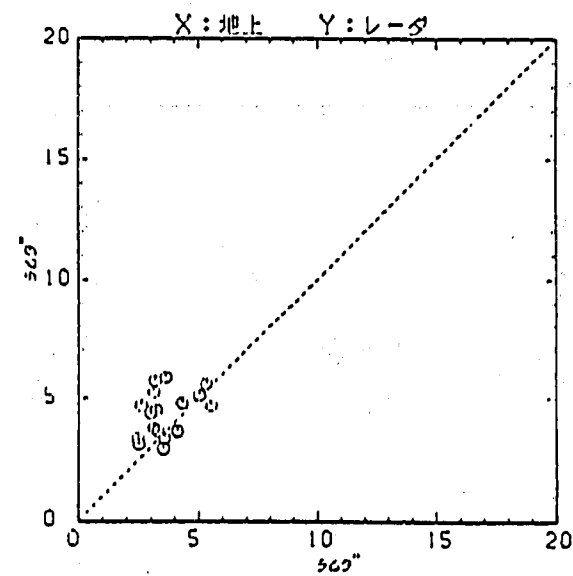
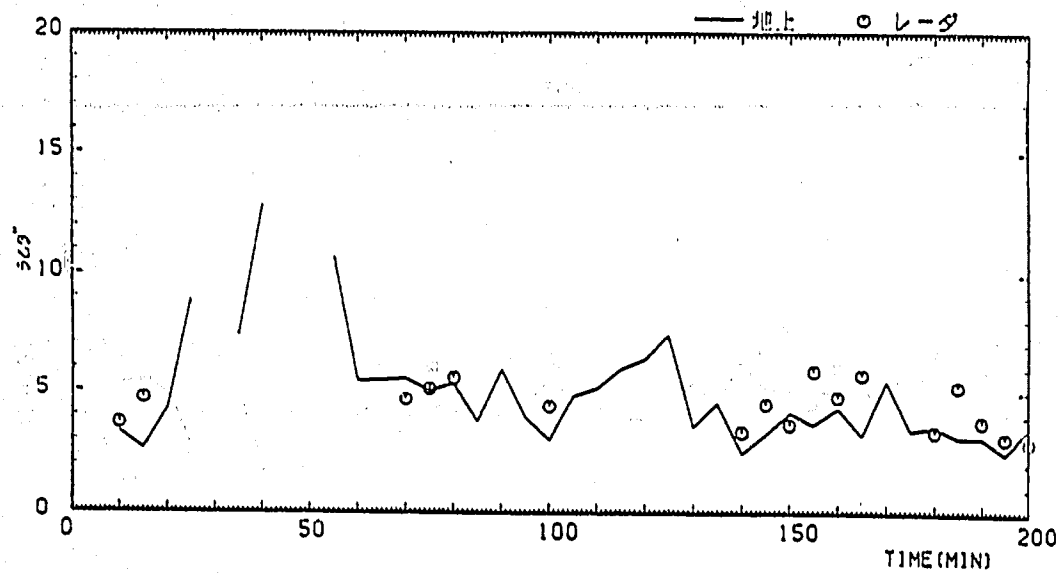


サンプル数	20
相関係数	0.733
相対誤差	1.807
相対誤差率	9.0
自来誤差	2.406
自来誤差率	26.8

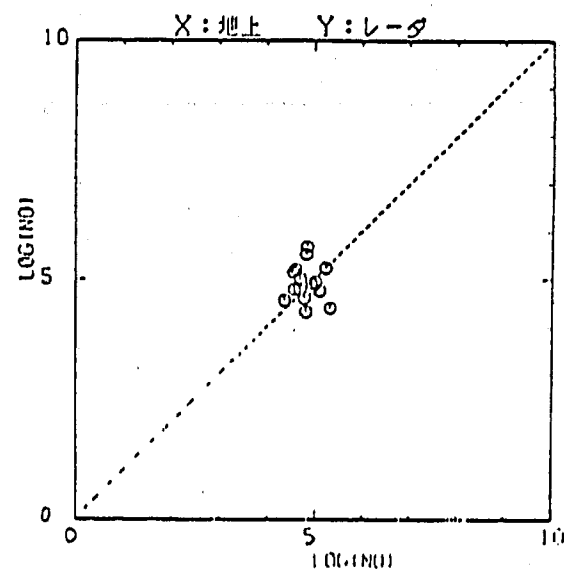
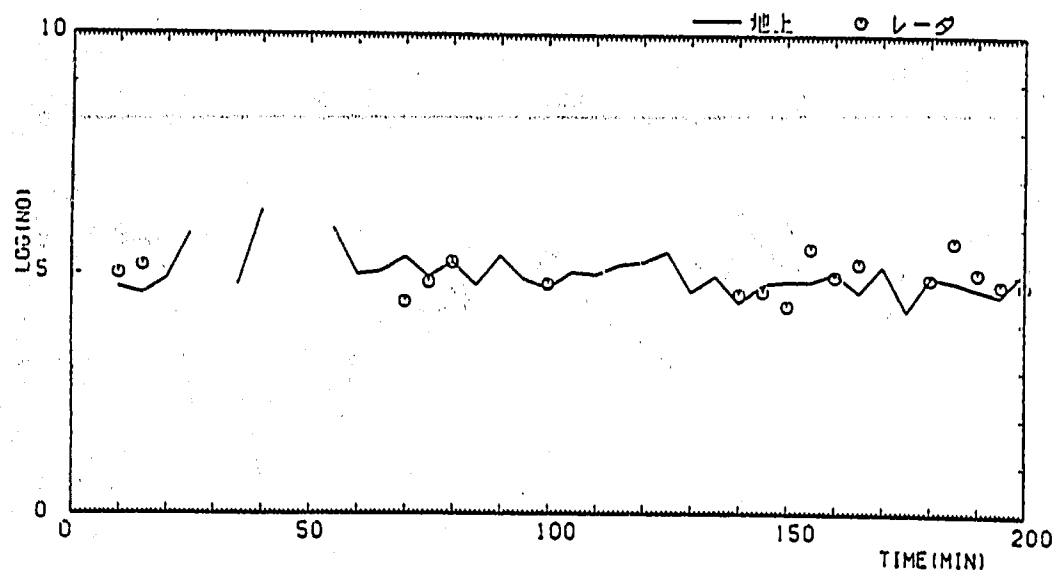


サンプル数	20
相関係数	0.370
相対誤差	0.956
相対誤差率	4.8
自来誤差	1.245
自来誤差率	18.6

図-4.2.9(c) N_a , Λ の比較 (山ノ井、 $m=5$)

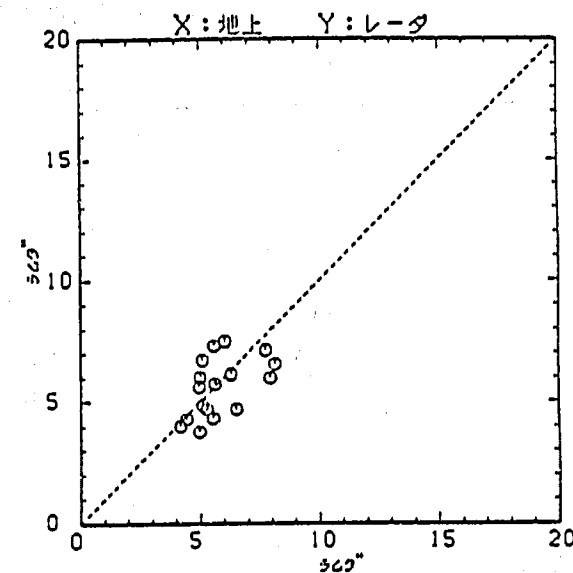
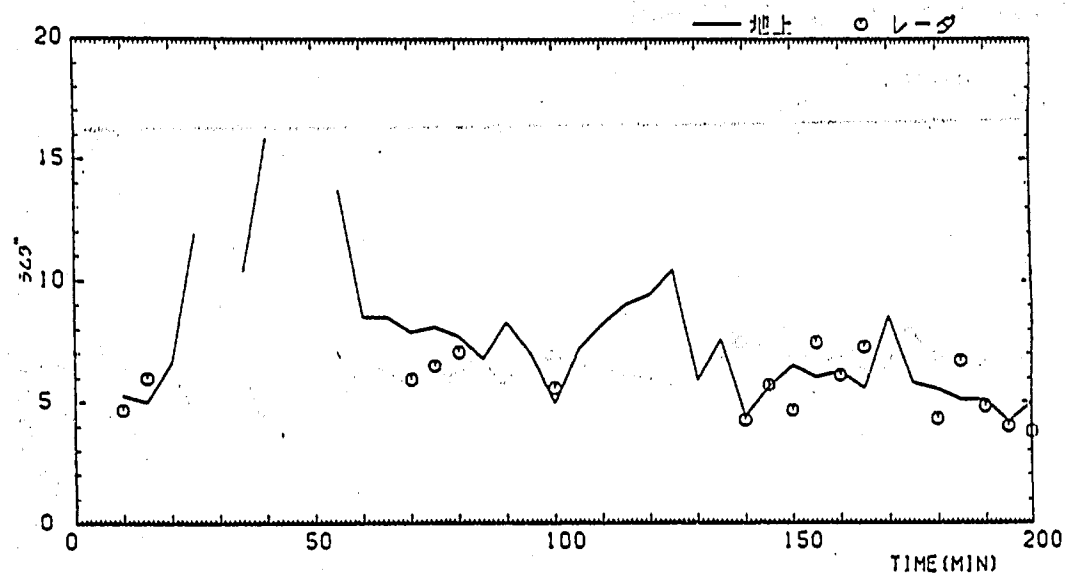


サンプル数	17
相関係数	0.388
相対誤差	1.006
相対誤差率	5.9
自乗誤差	1.270
自乗誤差率	35.0

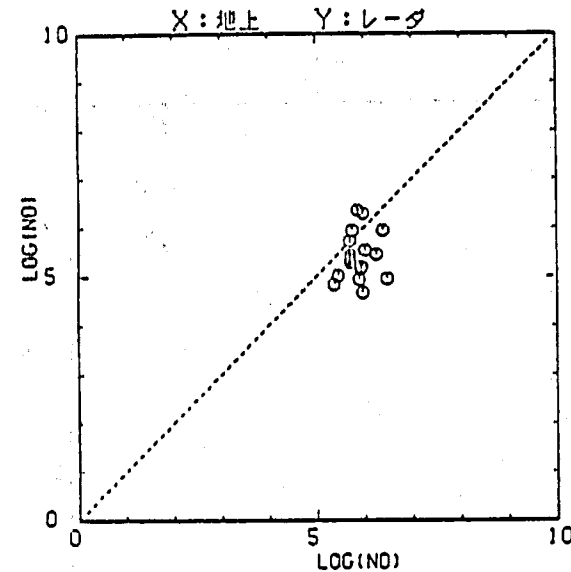
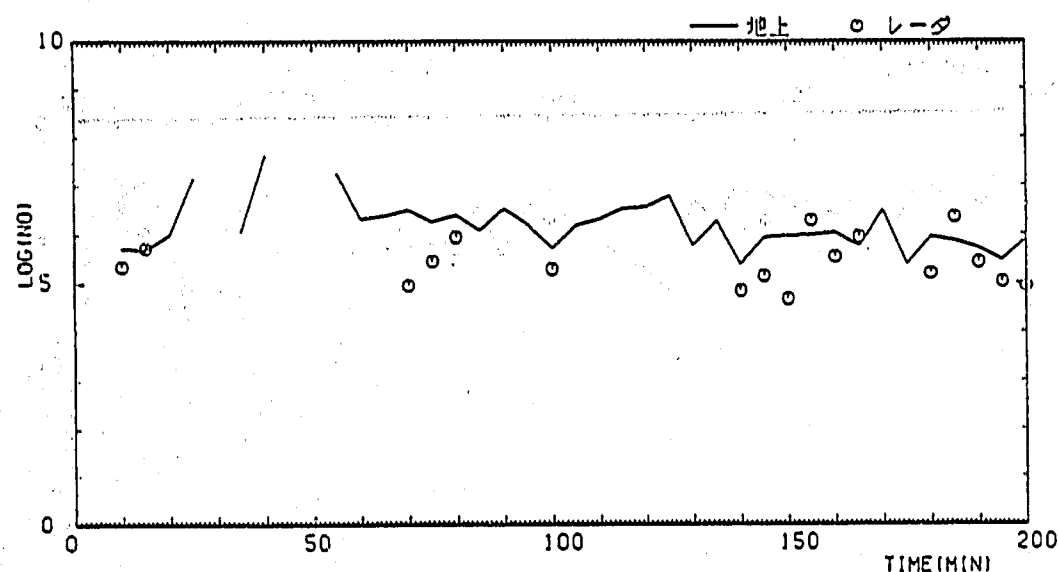


サンプル数	17
相関係数	-0.056
相対誤差	0.357
相対誤差率	2.1
自乗誤差	0.455
自乗誤差率	9.4

図-4.2.9(d) N_0 , Λ の比較 (大川、 $m=0$)

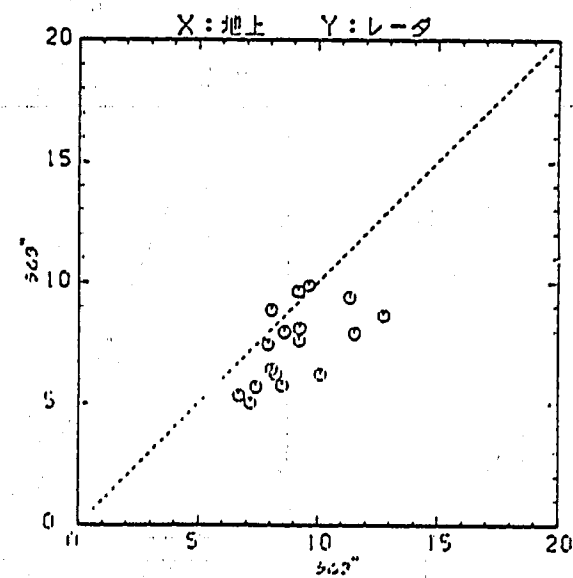
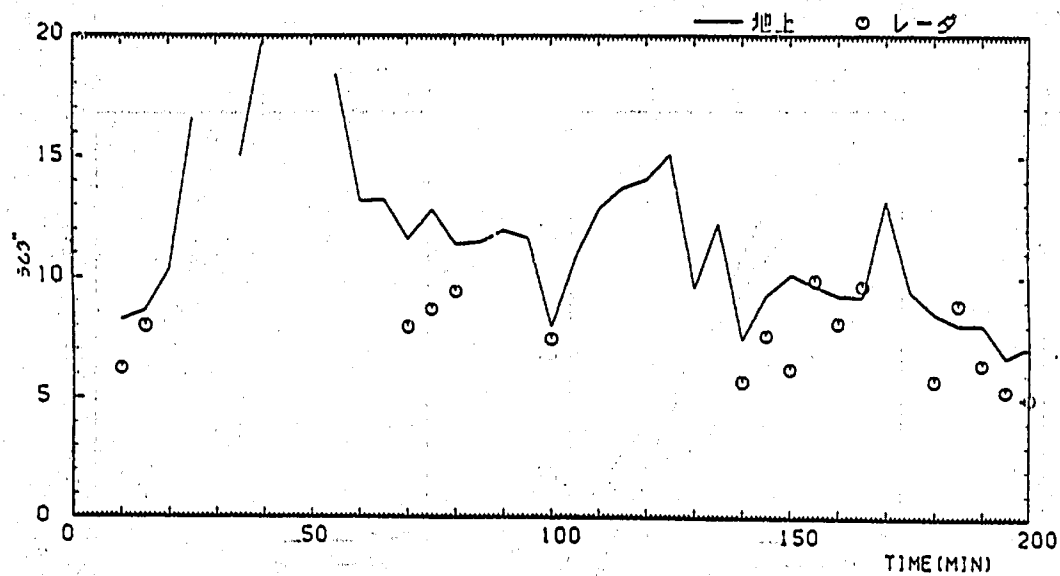


サンプル数	17
10分平均	0.514
10分誤差	0.963
10分誤差率	5.7
全量誤差	1.156
全量誤差率	20.0

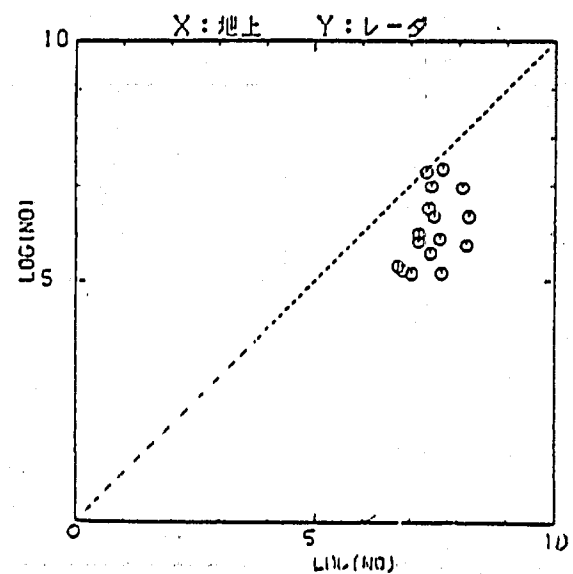
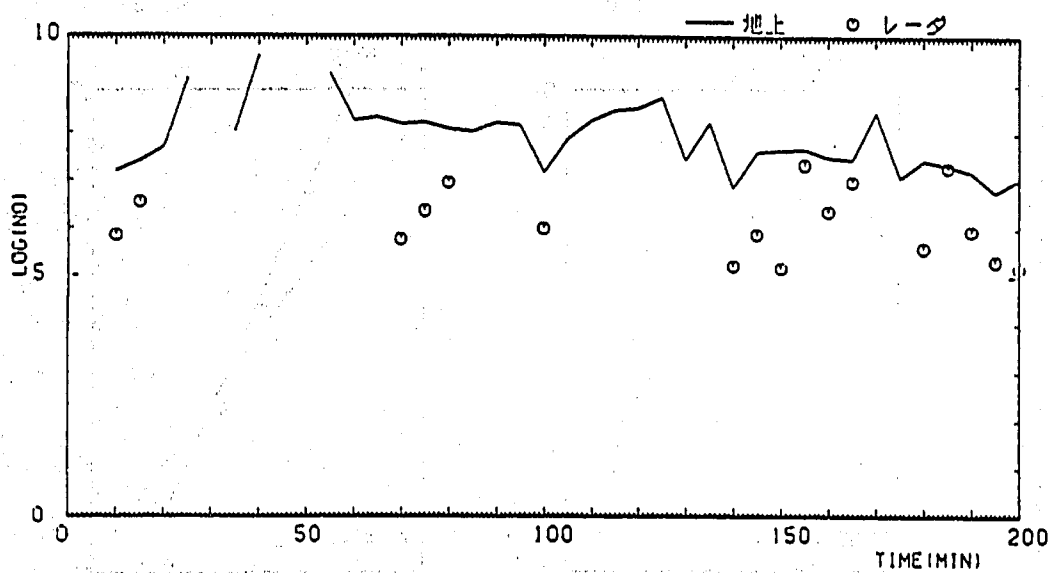


サンプル数	17
10分平均	0.153
10分誤差	0.595
10分誤差率	3.5
全量誤差	0.704
全量誤差率	12.0

図-4.2.9(e) N_a , Λ の比較 (大川、 $m=2$)



サンプル数	17
10%偏差	0.594
10%偏差	1.805
10%偏差率	10.6
自乗偏差	2.150
自乗偏差率	23.8



サンプル数	17
10%偏差	0.401
10%偏差	1.358
10%偏差率	8.0
自乗偏差	1.510
自乗偏差率	20.2

図-4.2.9(f) N_0 , Λ の比較 (大川、 $m=5$)

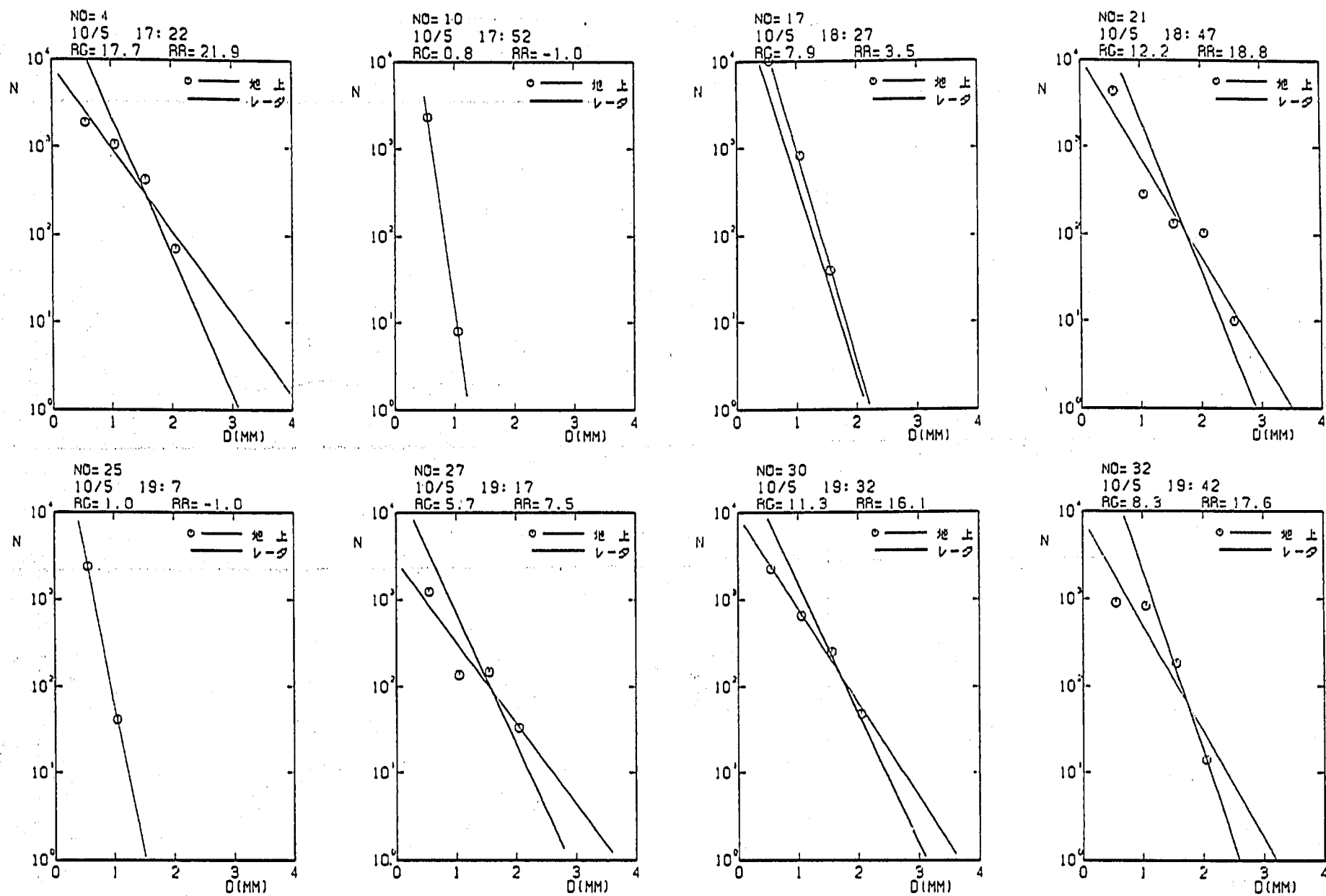


図-4.2.10(a) 粒径分布図(山ノ井、 $m=0$)

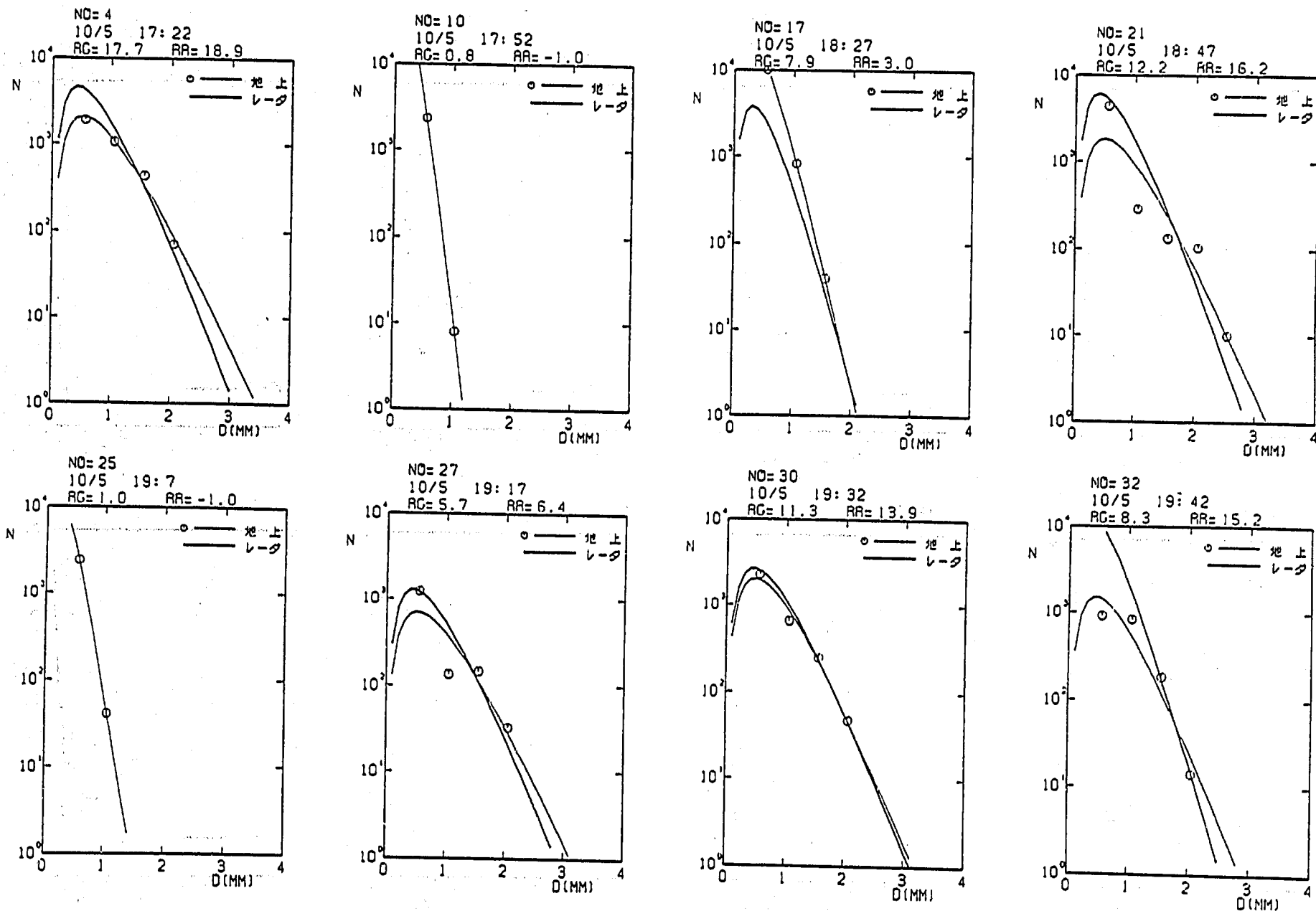


図-4.2.10(b) 粒径分布図(山ノ井、 $m=2$)

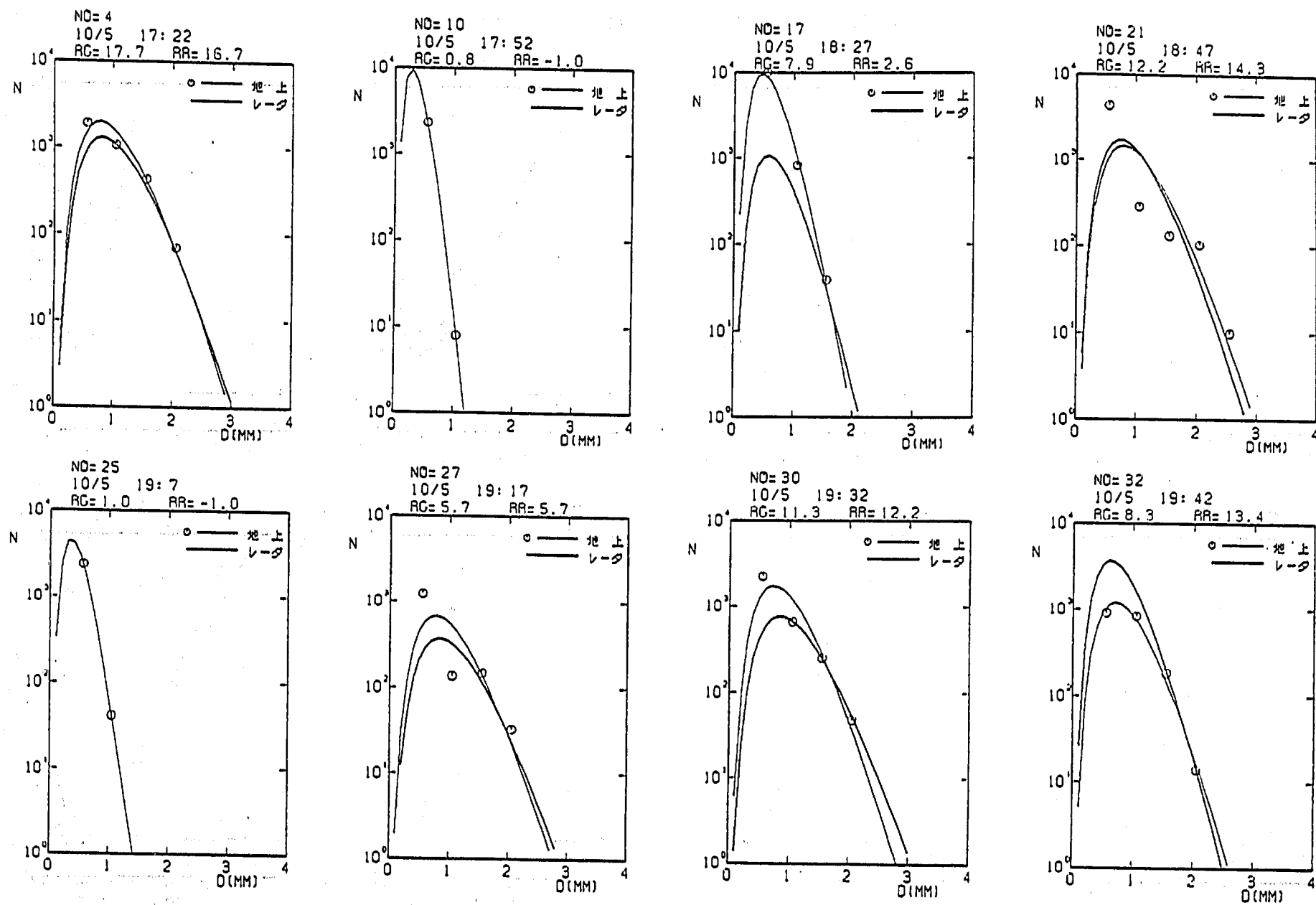


図-4.2.10(c) 粒径分布図(山ノ井、m=5)

(2) Z_{DR} と平均粒径 D_0 の関係

雨滴の粒径分布が指数分布に従うとすると、反射因子差 Z_{DR} は、雨滴の平均粒径 D_0 の関数となることが知られている。ここで、 D_0 の定義は、次式のとおりである。

$$\int_0^{D_0} D^3 \cdot N(D) dD = \int_{D_0}^{D_{max}} D^3 \cdot N(D) dD \quad (4.2.12)$$

イギリスのラザフォード・アップルトン研究所のS.M. CherryとJ.W.F. Goddardらは、 D_0 と Z_H 、 Z_{DR} 、 N_0 の理論的な関係を求めている。周波数が3 GHzと5 GHzの2種類のレーダ（DNDレーダは、5.28 GHz）について計算しており、雨滴形状については、Pruppacher and Beardのモデルを用いている。図-4.2.11の結果を示す。 D_0 が大きくなるに従い、 Z_{DR} や Z_H/N_0 も大きくなることからわかる。また、3 GHzのレーダに比べて、5 GHzのレーダの方が、 $Z_{DR} \sim D_0$ 曲線の勾配が急になることがわかる。

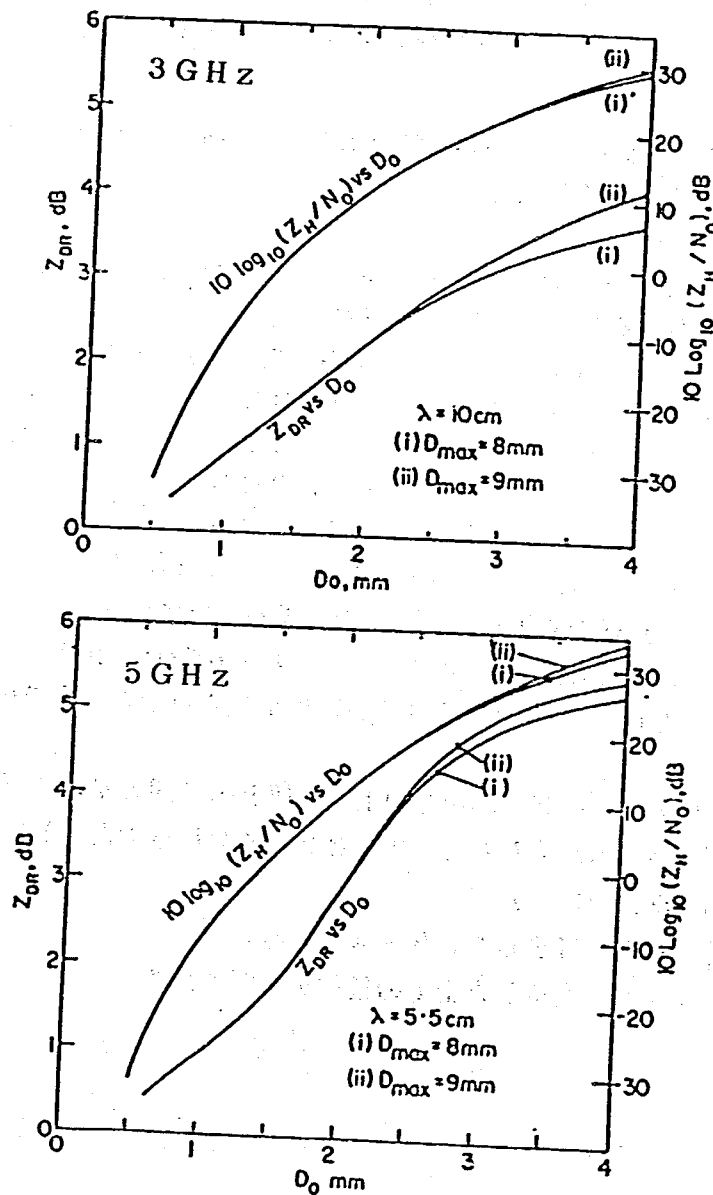


図-4.2.11 D_0 と Z_{DR} 、 Z_H/N_0 の関係

本解析では、実際のレーダ観測から得られる Z_{DR} 値及び粒径分布の平均粒径 D_0 とディストロメーターから得られる粒径分布の平均粒径 D_0 を、それぞれ比較することによりその関係を調べた。

計算条件は、次のとおりである。

①対象降雨は、4.2.5節と同じ期間のものを用いる。

昭和63年10月5日 17:00～20:20 (200分間)

この期間のレーダ観測方法は、次のとおりである。

仰角 3° , 一方向固定 (229.5° 、粒径分布測定地点の方向)

データ平均化時間 9パルスごと

②レーダ雨量値は、粒径分布の観測地点の直上メッシュとそのレンジ方向に前後1つずつのメッシュを加えた3つのメッシュデータの平均値を用いる。

③比較に用いるデータは、1分間及び5分間平均したものをを用いる。

④ディストロメーターのデータは、山ノ井及び大川の2地点の測定データを用いる。

図-4.2.12に Z_{DR} (レーダ) $\sim D_0$ (ディストロメーター) 及び D_0 (レーダ) $\sim D_0$ (ディストロメーター) の散布図を示す。

これらから、次のことがわかる。

① Z_{DR} (レーダ) $\sim D_0$ (ディストロメーター) 間及び D_0 (レーダ) $\sim D_0$ (ディストロメーター) には、相関が見られるが、それほど強くはない。

② Z_{DR} (レーダ) $\sim D_0$ (ディストロメーター) の関係式は、次のとおり。

(山ノ井, 1分平均) $Z_{DR} = 0.689 D_0 - 0.023$

(山ノ井, 5分平均) $Z_{DR} = 0.707 D_0 + 0.019$

(大川, 1分平均) $Z_{DR} = 0.893 D_0 - 0.063$

(大川, 5分平均) $Z_{DR} = 1.157 D_0 - 0.238$

なお、オハイオ大、T.A.Seligaらの研究(1982年)では、二偏波レーダ(CHILLレーダ, 3GHz)を用いて同様の解析を行い、次の結果を導いている。

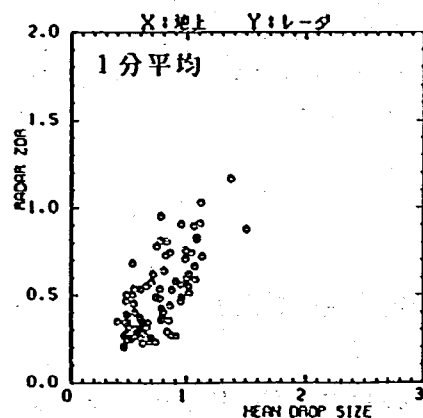
$$Z_{DR} = 0.942 D_0 - 0.42 \quad (\text{相関係数 } 0.96)$$

本解析において、 Z_{DR} と D_0 との間にあまり強い相関が見られなかったその理由として次のことが挙げられる。

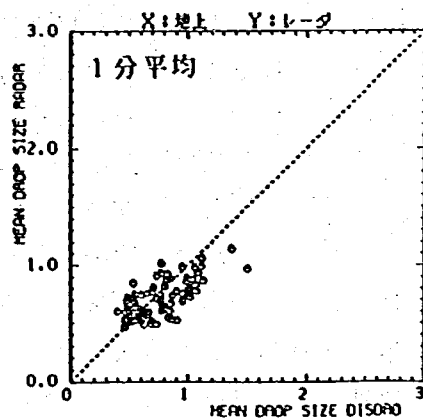
①1分間データを用いて、レーダ観測値と地上観測値との時間のずれを調べると6分程度もあった(レーダのビーム高度から計算すると2～4分程度である)。この時間のずれの大きさが両者の相関に影響した。

②粒径分布が指数分布にあてはまらないケースがある。

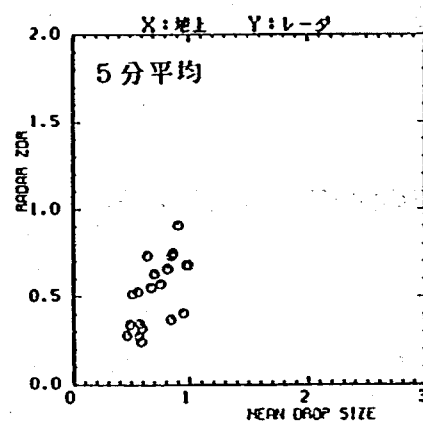
これらのことは、今後データを増やした上での検討が必要である。



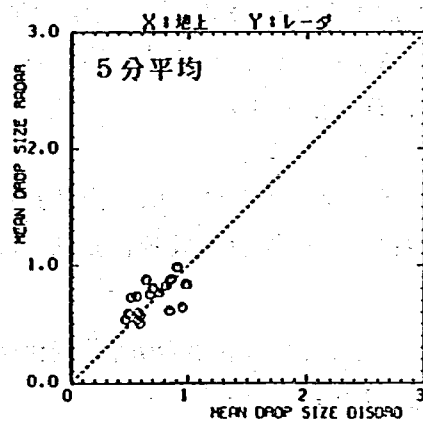
サンプリング回数
92
0.711



サンプリング回数
92
0.706
0.134
0.1
0.166
22.1

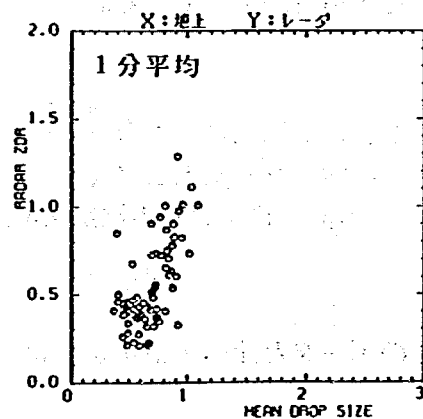


サンプリング回数
20
0.626

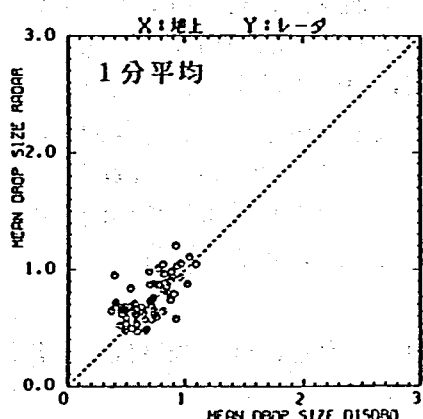


サンプリング回数
20
0.626
0.105
0.5
0.135
18.8

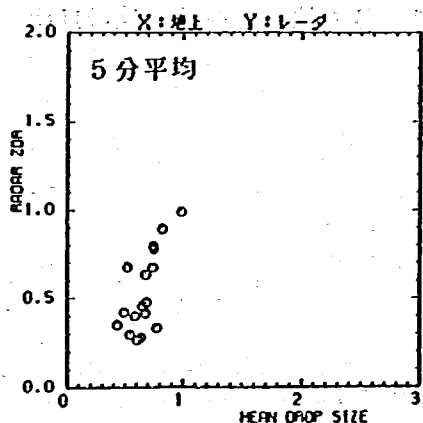
(a) 山ノ井



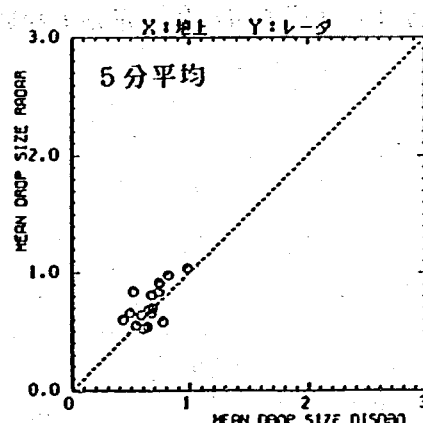
サンプリング回数
72
0.632



サンプリング回数
72
0.626
0.123
0.2
0.159
23.2



サンプリング回数
17
0.678



サンプリング回数
17
0.661
0.112
0.7
0.136
20.4

(b) 大川

図-4. 2. 12 Z_{DR}~D₀関係、D₀の散布図

4. 2. 7 粒径分布の測定結果から見た Z_{DR} 法の降水強度の測定精度

レーダ観測から得られた降水強度と粒径分布の測定から得られた降水強度とを比較することにより測定精度の評価を行った。計算条件は、次のとおりである。

①対象降雨は、4. 2. 5節と同じ期間のものを用いる。

昭和63年10月5日 17:00~20:20 (200分間)

この期間のレーダ観測方法は、次のとおりである。

仰角 3° , 一方向固定 (229.5° 、粒径分布測定地点の方向)

データ平均化時間 9パルスごと

②レーダ雨量値は、粒径分布の観測地点の直上メッシュとそのレンジ方向に前後1つずつのメッシュを加えた3つのメッシュデータの平均値を用いる。

③比較に用いるデータは、5分間平均したものをを用いる。

④ $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$ とする。

⑤ $m = 0, 2, 5$ とする。

⑥ディストロメーターのデータは、山ノ井及び大川の2地点の測定データを用いる。

⑦ $B\beta$ 法における降雨換算定数 B, β は、200, 1.6とする。

図-4. 2. 13に降水強度の時間変化図と散布図を示す。

これらから、次のことが言える。

(山ノ井)

① Z_{DR} 法の降水強度は、異常値が生じているため、 $B\beta$ 法に比べ精度が劣っている。

②異常値を除くと Z_{DR} 法の精度は、比較的良い。

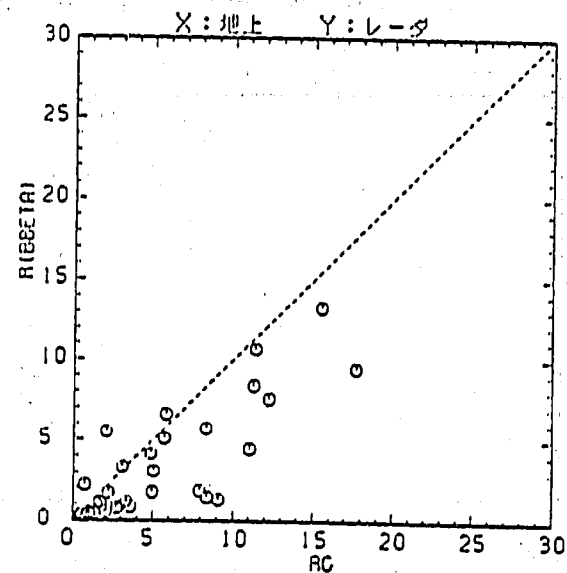
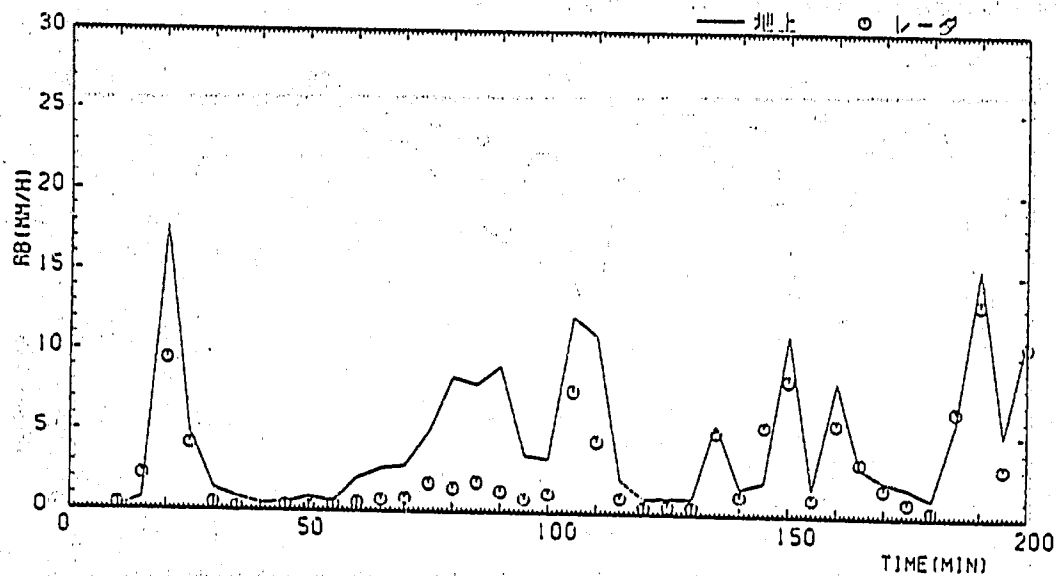
③ $m = 5$ の場合が最も測定精度が良い。

Z_{DR} 法の降水強度に生じているときの粒径分布を調べてみると、 Λ は地上と良く合っているのに N_0 がかなり違っている。すなわち、 Z_H の違いに大きく影響された結果と言える。これから、 Z_{DR} 法により降水強度の測定を行う場合には、 $Z_{H,U}$ の測定にかなりの測定精度が要求されることがわかる。

(大川)

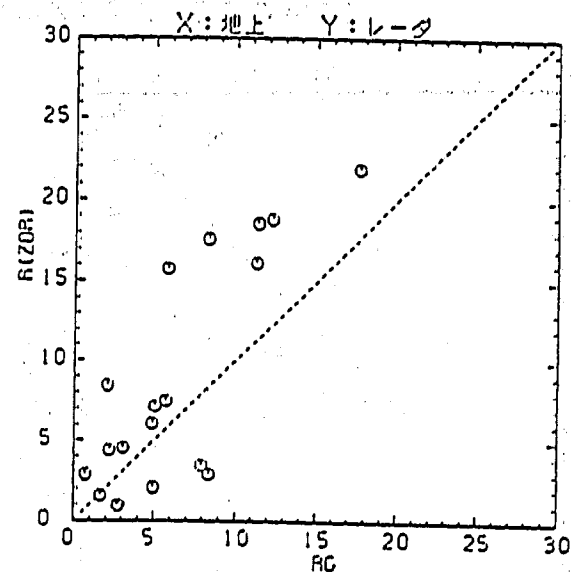
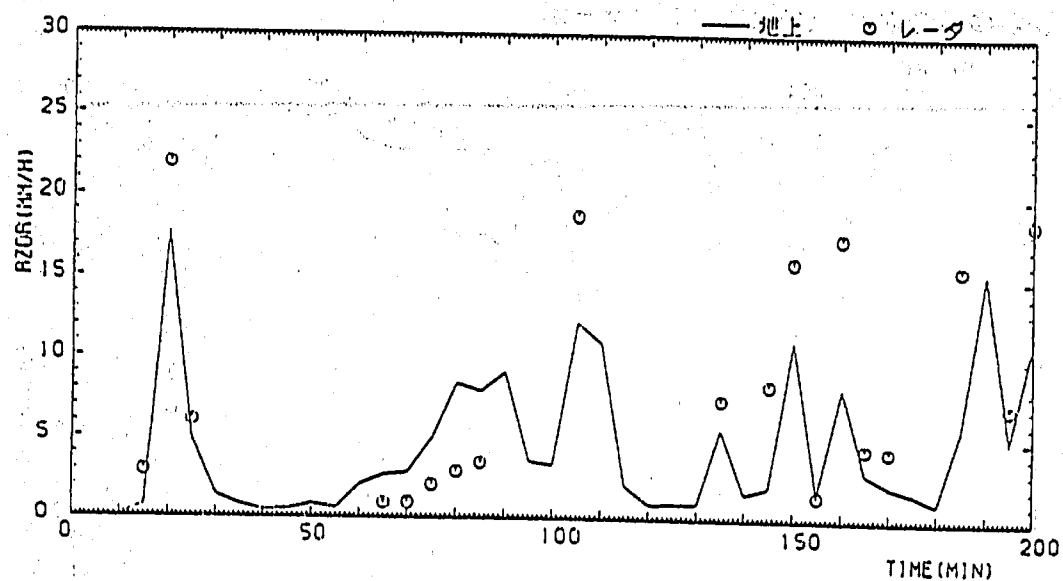
①ディストロメーターの降水強度は、非常に大きく、山ノ井のデータと比べてもかなり大きくなっている。

②ディストロメーターの値自体が正確でないと思われるので、 $B\beta$ 法と Z_{DR} 法の比較は困難である。



サンプル数	37
100%係数	0.834
10%偏差	2.162
10%誤差率	5.8
0%誤差	3.106
0%誤差率	64.9

図-4.2.13(a) 降水強度の比較 (山ノ井、B β 法)



サンプル数	20
100%係数	0.825
10%偏差	4.915
10%誤差率	24.6
0%誤差	6.871
0%誤差率	102.4

図-4.2.13(b) 降水強度の比較 (山ノ井、Z_{DR}法、m = 0)

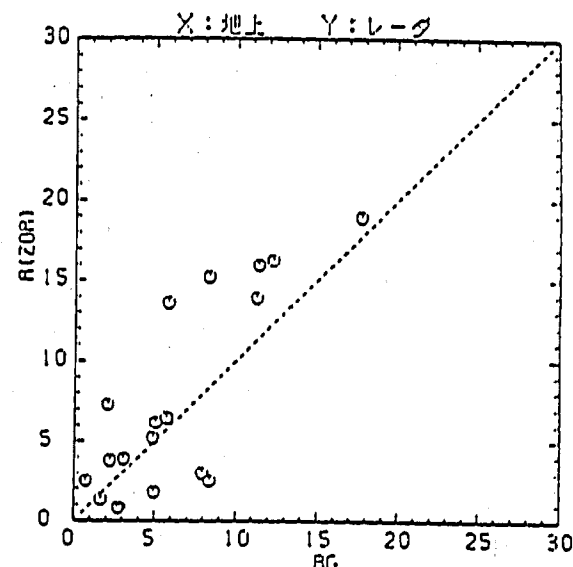
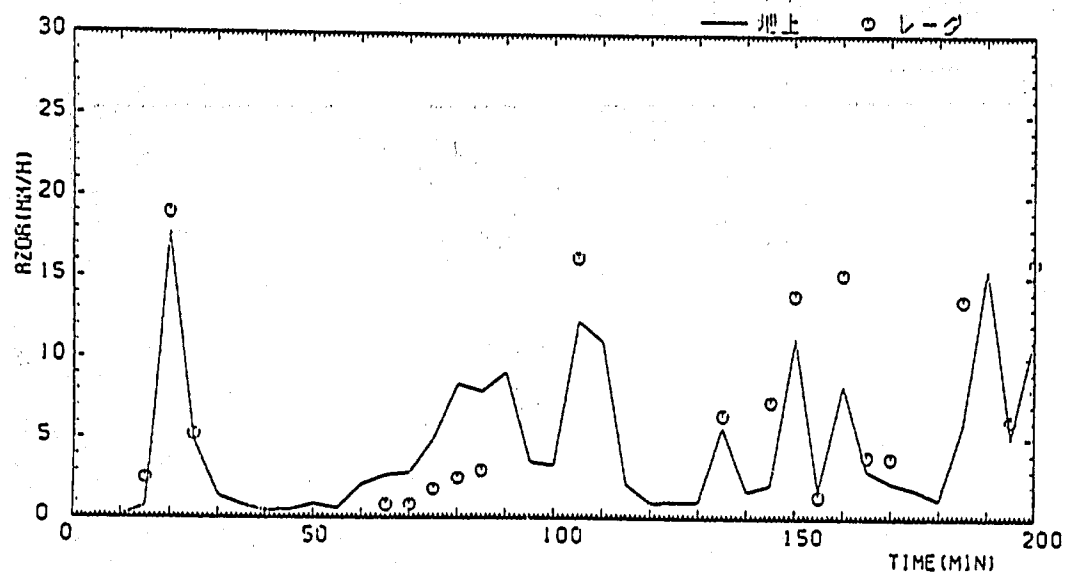


図-4. 2. 13 (c) 降水強度の比較 (山ノ井、Z_{DR}法、m = 2)

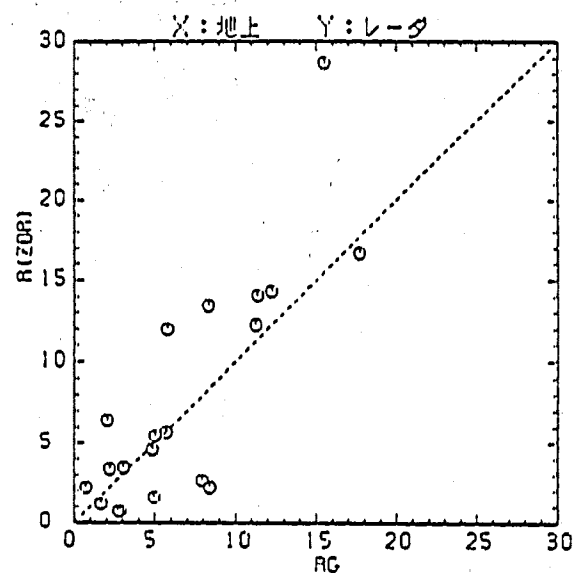
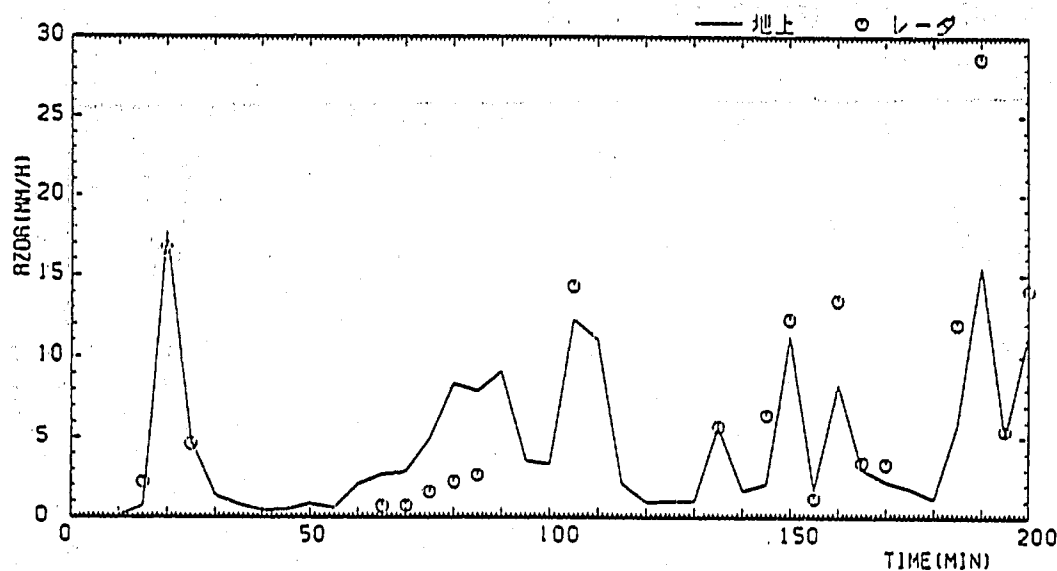
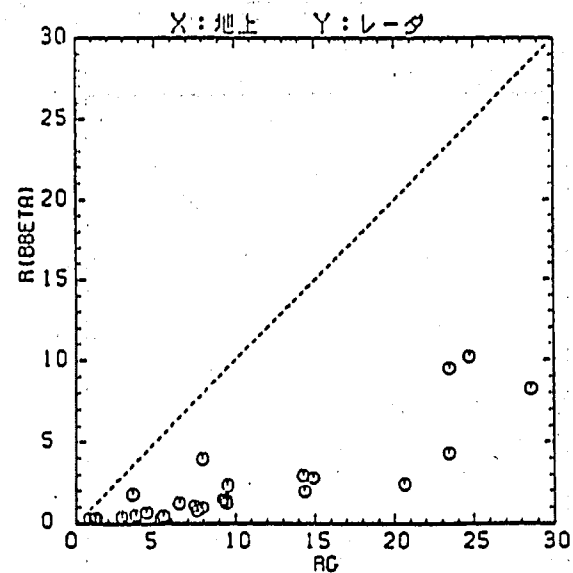
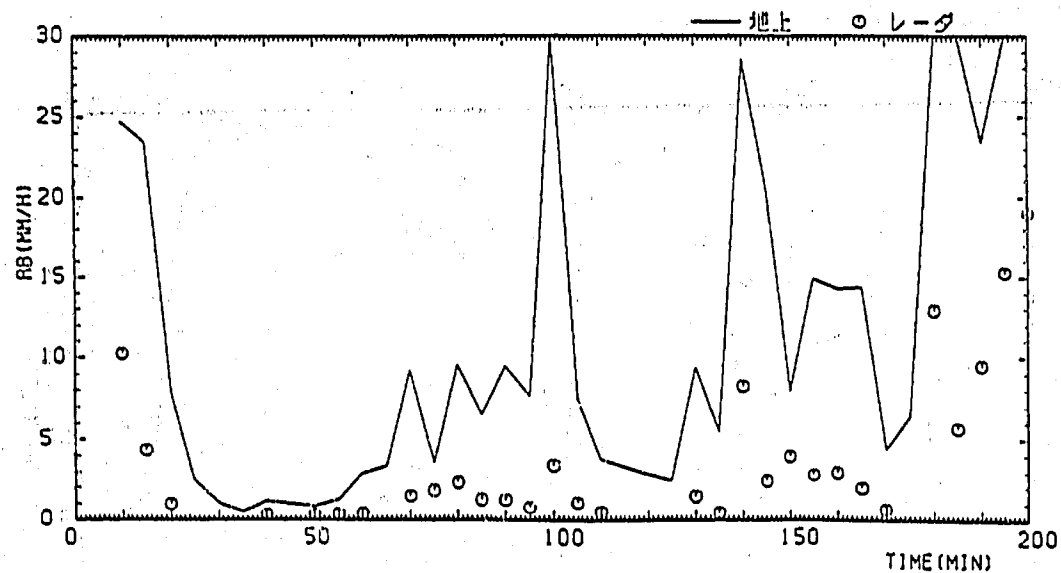
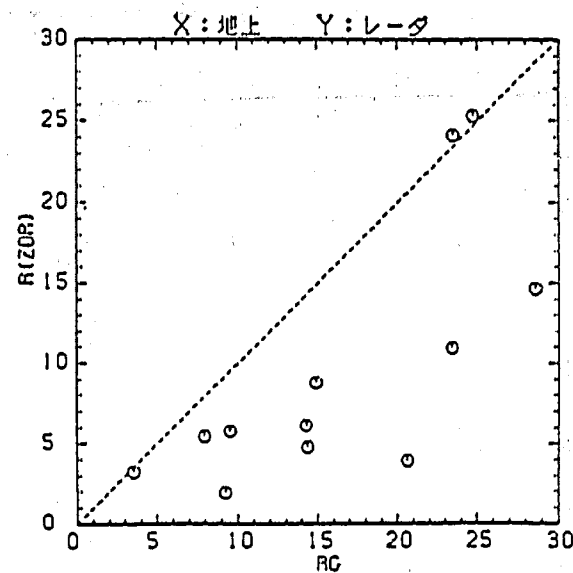
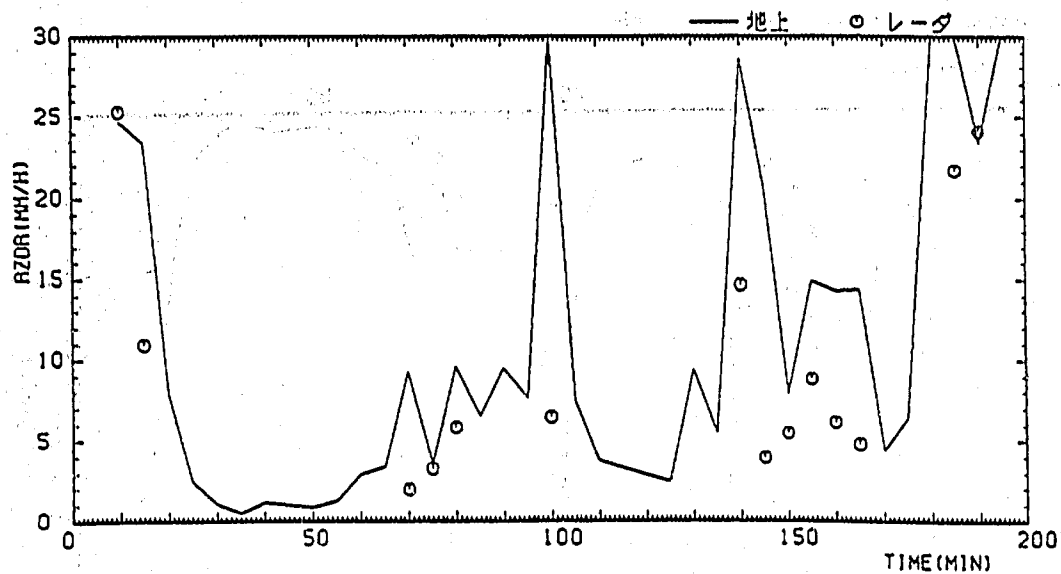


図-4. 2. 13 (d) 降水強度の比較 (山ノ井、Z_{DR}法、m = 5)



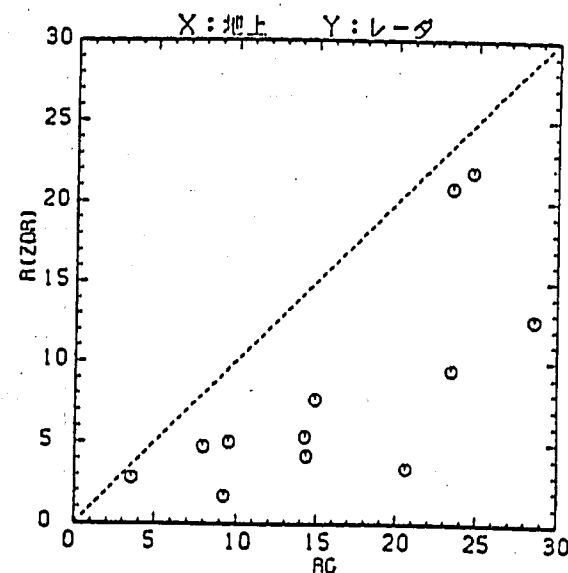
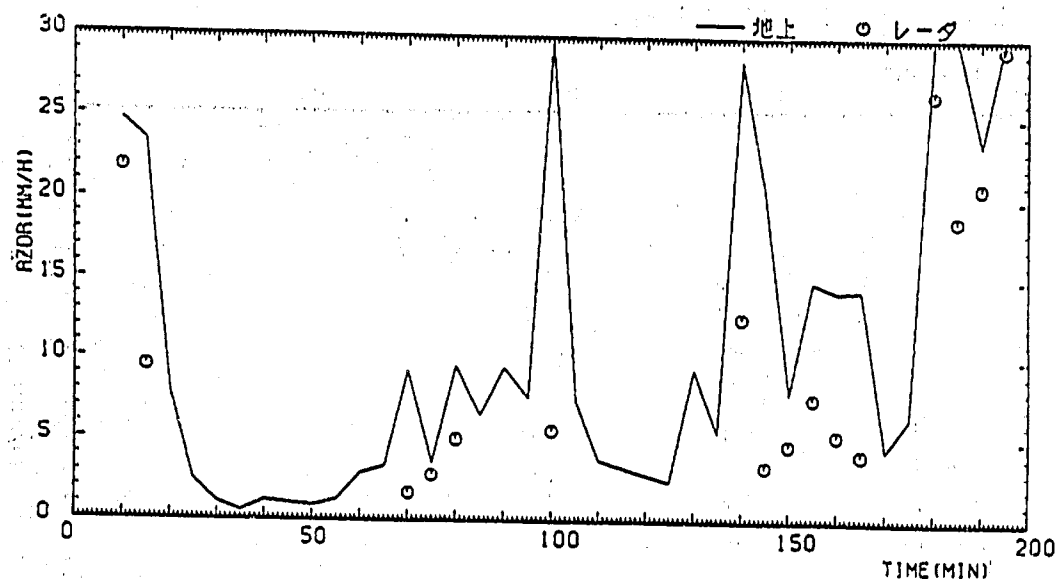
サンプル数	30
相関係数	0.905
相対誤差	13.068
相対誤差率	43.6
自乗誤差	18.923
自乗誤差率	111.3

図-4.2.13(e) 降水強度の比較 (大川、Bβ法)



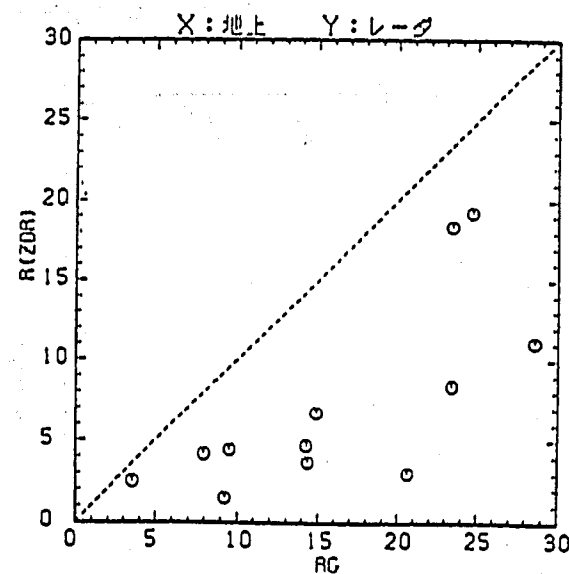
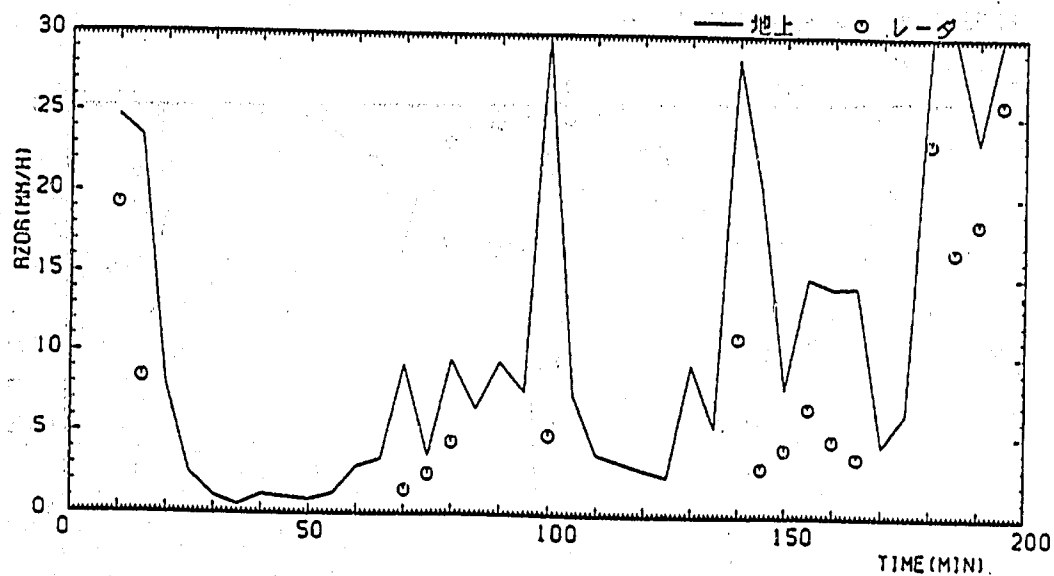
サンプル数	17
相関係数	0.868
相対誤差	11.414
相対誤差率	67.1
自乗誤差	15.434
自乗誤差率	59.3

図-4.2.13(f) 降水強度の比較 (大川、ZDR法、m=0)



サンプル数	17
相関係数	0.867
相対誤差	13.302
相対誤差率	78.2
偏差誤差	17.528
偏差誤差率	67.4

図-4.2.13(g) 降水強度の比較 (大川、Z_{DR}法、m=2)



サンプル数	17
相関係数	0.867
相対誤差	14.805
相対誤差率	87.1
偏差誤差	19.149
偏差誤差率	73.6

図-4.2.13(h) 降水強度の比較 (大川、Z_{DR}法、m=5)

レーダ観測から得られた降水強度と地上雨量計よる観測から得られた降水強度とを比較することにより測定精度の評価を行った。計算条件は、次のとおりである。

昭和63年9月10日 6:00~8:00 (2時間)

仰角 3° ，方位 SCAN

データ平均化時間 1分

③比較に用いるデータは、10分間平均したものをを用いる。

④ $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$ とする。

⑤ $m = 0, 2, 5$ とする。

⑥評価指標は、相関係数・相対誤差・自乗誤差する。

⑦B β 法における降雨換算定数B， β は、200,1.6とする。

表-4.2.3に計算結果を示す。図-4.2.14に観測所No.8における降水量及び $Z_H \cdot Z_{DR}$ の時間変化図と降水強度の散布図を一例として示す。また、図-4.2.15に全観測所データを用いた場合の散布図を示す。

これから、次のことがわかる。

①Z_{DR}法は、観測降雨強度の一部に大きな値が生じ、そにより全体的な測定精度が悪くなっている。

②Z_{PR}法の一部の大きな値を除いても、Bβ法による測定精度とほとんどかわらない。

③mによる大きな違いはないが、平均的には $m = 2$ の場合が良いと言える。

④降雨強度が小さい場合は $m = 0$ 、降雨強度が大きい場合は $m = 5$ が良く合う。

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
0.32	0.32	0.32	0.32	0.32
0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
0.34	0.34	0.34	0.34	0.34
0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
0.43	0.43	0.43	0.43	0.43
0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
0.49	0.49	0.49	0.49	0.49
0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
0.56	0.56	0.56	0.56	0.56
0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
0.59	0.59	0.59	0.59	0.59
0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
0.69	0.69	0.69	0.69	0.69
0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
0.71	0.71	0.71	0.71	0.71
0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
0.73	0.73	0.73	0.73	0.73
0.74	0.74	0.74	0.74	0.74
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
0.76	0.76	0.76	0.76	0.76
0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
0.79	0.79	0.79	0.79	0.79
0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
0.91	0.91	0.91	0.91	0.91
0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
0.97	0.97	0.97	0.97	0.97
0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

表-4.2.3(a) 降水強度の測定精度(相関係数)

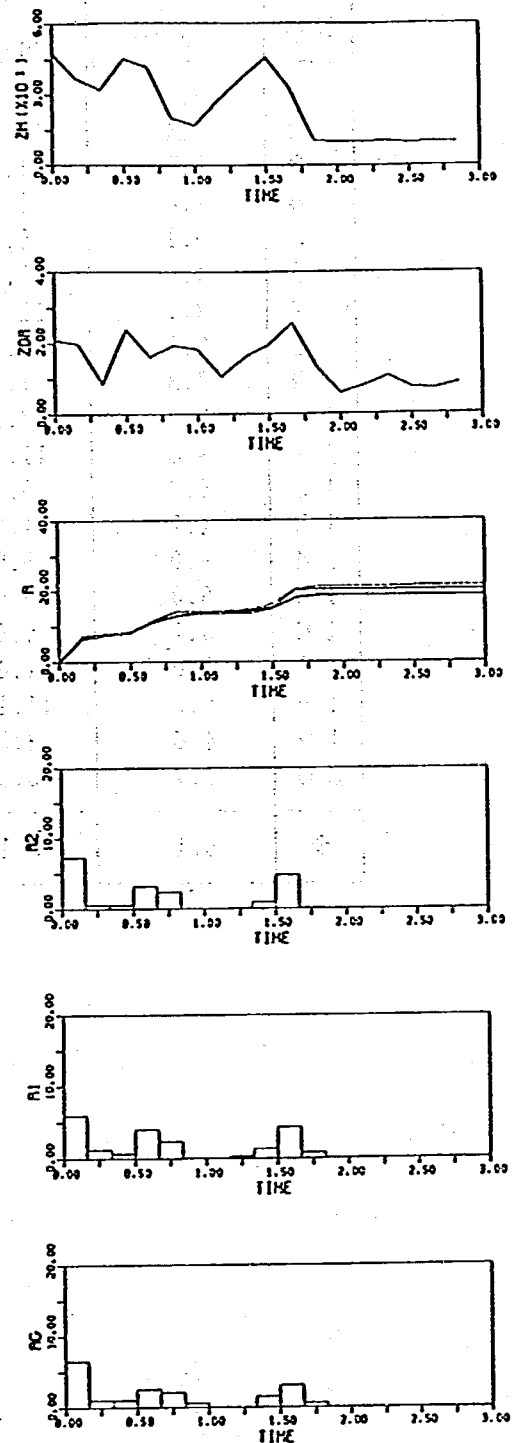
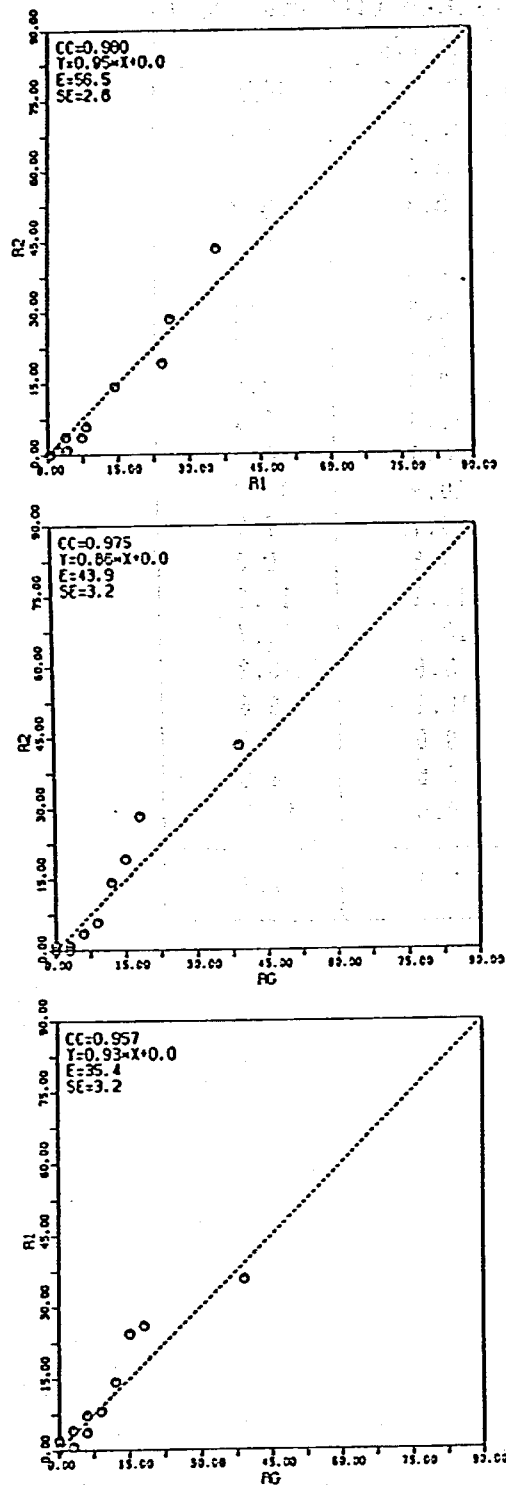
No	B β 法	Z _{DR} 法		
		m = 0	m = 2	m = 5
1	0.990	0.985	0.986	0.986
2	0.921	0.704	0.706	0.711
3	0.876	0.717	0.719	0.720
4	0.985	0.945	0.946	0.946
5	0.917	0.869	0.869	0.868
6	0.910	0.908	0.909	0.910
7	0.992	0.925	0.930	0.933
8	0.957	0.975	0.976	0.976
9	0.610	0.633	0.633	0.632
10	0.588	0.633	0.632	0.633
11	0.637	0.561	0.561	0.561
12	0.837	0.876	0.872	0.868
13	0.953	0.949	0.949	0.948
14	0.896	0.893	0.894	0.895
15	0.848	0.808	0.808	0.808
16	0.846	0.832	0.833	0.833
17	0.739	0.606	0.609	0.610
18	0.869	0.802	0.803	0.802
19	0.893	0.953	0.955	0.955
20	0.730	0.730	0.729	0.729
全	0.849	0.790	0.791	0.792

表-4.2.3(b) 降水強度の測定精度(相対誤差、%)

No	B β 法	Z _{DR} 法		
		m = 0	m = 2	m = 5
1	22.0	22.0	32.5	41.2
2	38.6	50.9	45.4	44.9
3	46.9	71.0	66.3	64.3
4	15.8	34.4	39.6	43.6
5	31.6	38.5	43.7	47.6
6	44.3	41.1	38.6	40.1
7	20.6	43.6	40.0	38.9
8	35.4	43.9	40.2	42.3
9	63.6	51.7	48.2	48.5
10	51.1	48.1	46.9	49.7
11	30.7	34.2	29.0	29.6
12	48.9	29.8	28.7	29.7
13	42.6	53.6	54.3	56.7
14	35.7	49.5	51.8	55.1
15	31.3	53.5	53.2	54.8
16	53.0	42.3	34.8	30.0
17	45.8	54.0	47.6	45.0
18	36.7	62.7	53.7	50.1
19	39.0	29.1	32.0	35.8
20	36.2	53.3	56.5	58.9
全	39.0	45.4	43.9	44.9

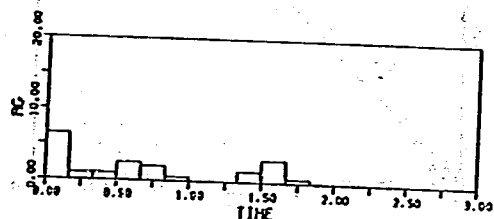
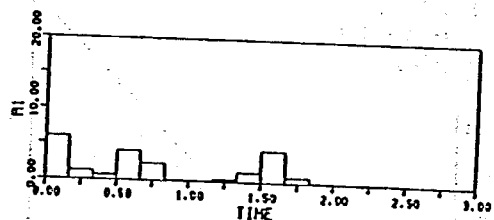
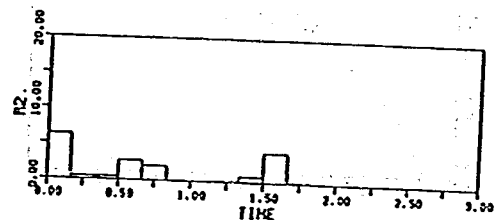
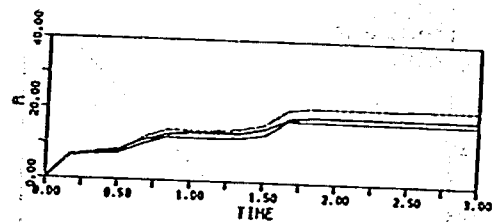
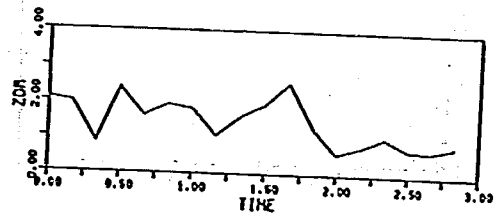
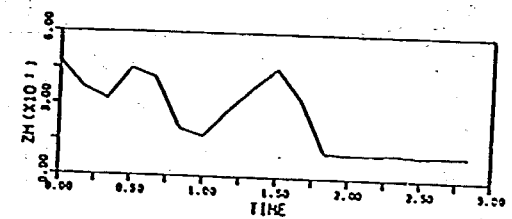
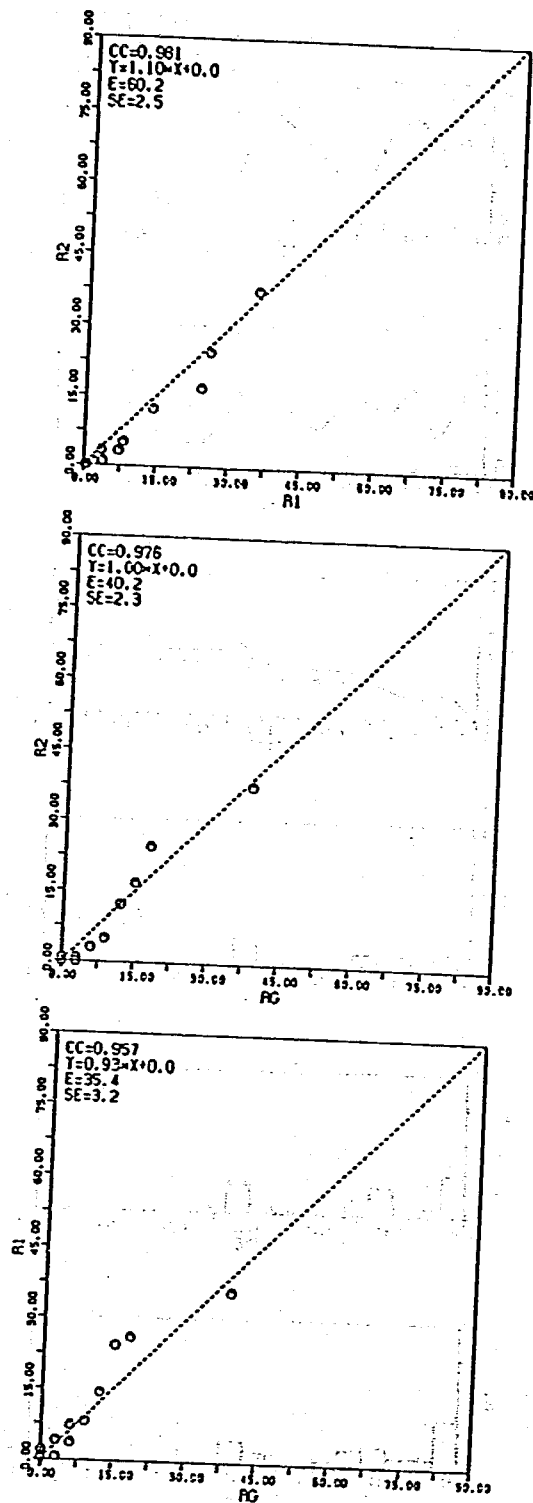
表-4.2.3(c) 降水強度の測定精度 (自乗誤差、mm/h)

No	B β 法	Z _{DR} 法		
		m = 0	m = 2	m = 5
1	2.7	2.6	4.2	5.9
2	4.4	10.5	8.6	7.7
3	5.3	11.2	9.3	8.3
4	1.8	5.6	4.3	4.2
5	5.1	5.6	6.5	7.4
6	4.6	5.0	4.7	5.4
7	3.1	11.6	8.4	6.7
8	3.2	3.2	2.3	2.5
9	7.8	7.7	7.9	8.1
10	7.3	7.9	8.4	8.8
11	9.8	11.1	10.9	11.2
12	5.8	5.3	6.4	7.7
13	4.2	4.3	4.8	6.0
14	9.0	8.9	10.1	11.3
15	9.3	10.0	10.8	11.7
16	5.2	5.6	5.6	6.2
17	7.0	11.4	10.1	9.6
18	5.5	11.1	9.0	7.9
19	4.8	3.2	3.6	4.8
20	8.7	9.3	9.9	10.6
全	6.1	8.1	7.7	7.9



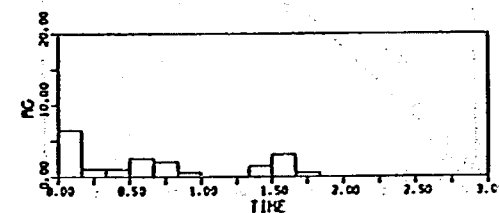
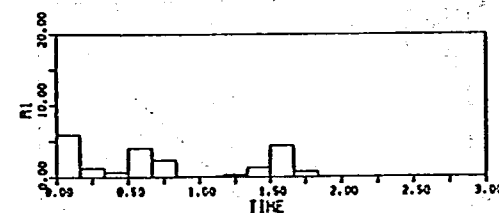
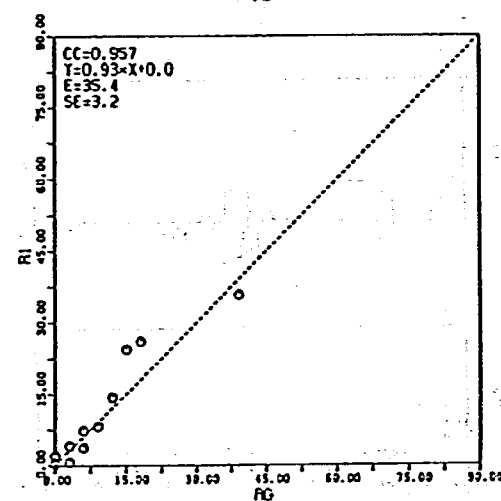
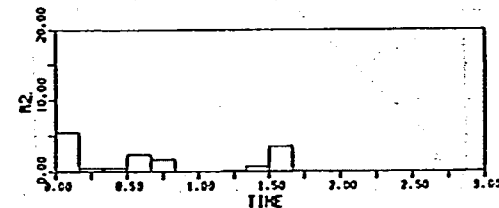
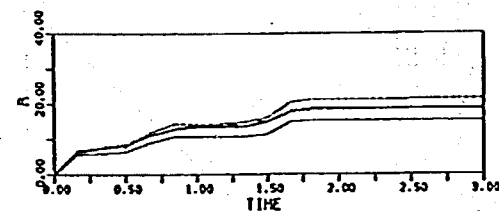
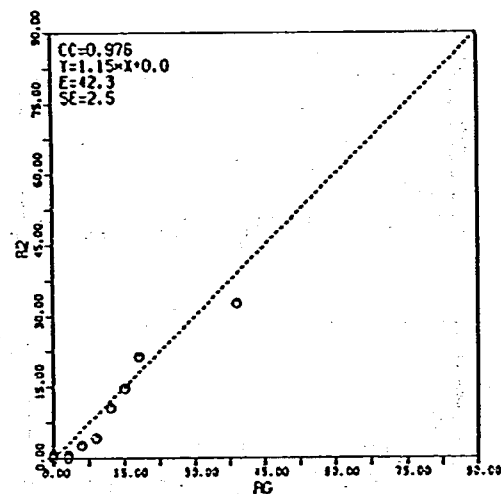
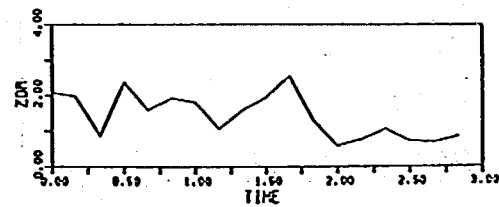
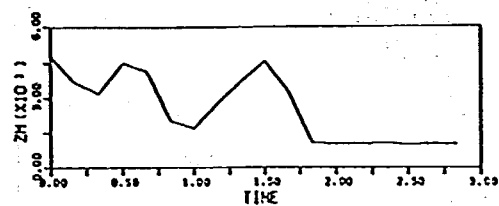
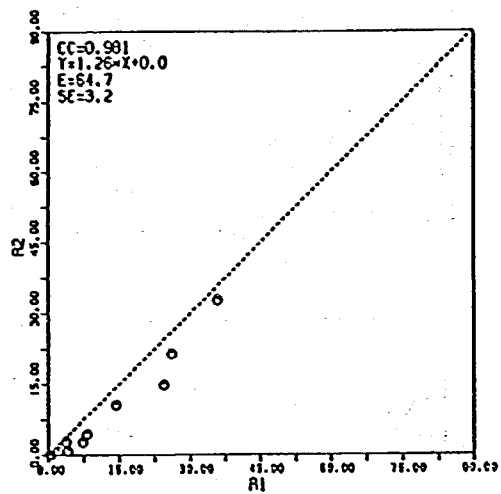
RG : 地上雨量(mm/h)
 R1 : レーダ雨量 (Bβ法) (mm/h)
 R2 : レーダ雨量 (ZOR法) (mm/h)
 — 地上雨量
 ---- レーダ雨量 (Bβ法)
 — レーダ雨量 (ZOR法)

図-4.2.14(a) 地上値との比較 (観測所No. 8、m=0)



RG : 地上雨量(mm/h)
 R1 : レーダ雨量 (Bβ法) (mm/h)
 R2 : レーダ雨量 (ZDR法) (mm/h)
 — 地上雨量
 - - - レーダ雨量 (Bβ法)
 — レーダ雨量 (ZDR法)

図-4.2.14(b) 地上値との比較 (観測所No. 8、m=2)



RG : 地上雨量(mm/h)

R1 : レーダ雨量 (Bβ法) (mm/h)

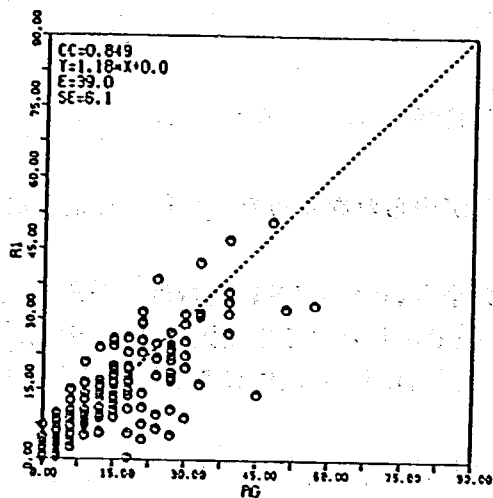
R2 : レーダ雨量 (ZDR法) (mm/h)

— 地上雨量

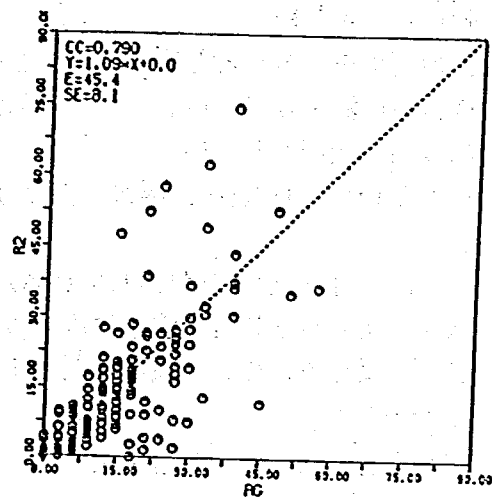
--- レーダ雨量 (Bβ法)

— レーダ雨量 (ZDR法)

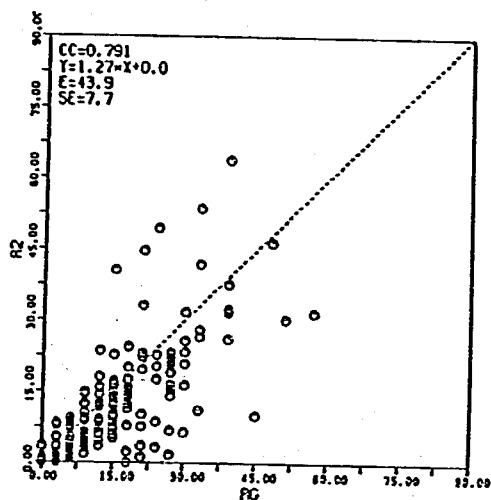
(図-4.2.14(c) 地上値との比較 (観測所No. 8、m=5))



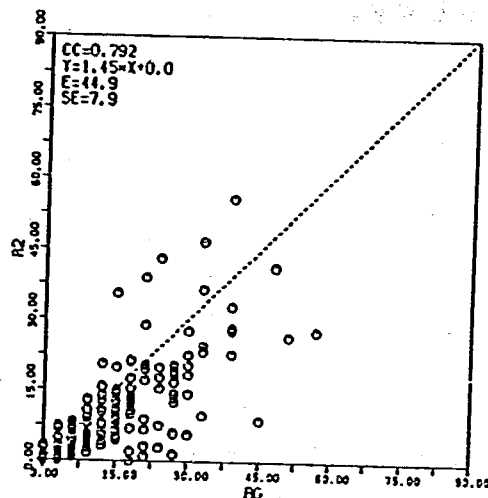
(a) B β 法



(b) Z_{DR}法 (m = 0)



(b) Z_{DR}法 (m = 2)



(c) Z_{DR}法 (m = 5)

図-4.2.15 降水強度の散布図 (全観測所)

4. 2. 9 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

①粒径分布の測定結果を用いて、二重偏波レーダの性能評価を行うと、 $Z_{H,V}$ 、 Z_{DR} とも比較的精度良く観測されている。

② Z_{DR} と平均粒径 D_0 との関係は、あまり強い相関が得られなかった。今後、検討が必要である。

③ N_0 、 Λ は、ほぼ地上と対応しているが、粒径の小さい雨滴が多い場合は、誤差が大きい。

④ Z_{DR} 法による降水強度の測定精度については、③で示したような要因や $Z_{H,V}$ の微妙な誤差に影響を受けるため、全観測期間で良いとはいえないが、平均的にみれば $B\beta$ 法と同程度の精度である。

⑤粒径分布の m は、降水強度の大きい時は $m = 5$ 程度で測定精度が良くなるが、平均的には、 $m = 2$ が良いと言える。

〔謝辞〕 Z_{DR} 法による降水強度の計算に当たり、郵政省通信総合研究所第三特別研究室の小口室長に提供して頂いた後方散乱断面積の計算プログラムを使用した。ここに記して謝意を表します。

4.3 ドップラレーダを用いた雨滴の粒径分布の推定

4.3.1 はじめに

降水粒子群からのレーダ反射電力を降水強度に変換するには、雨滴の粒径分布が必要である。また、レーダ観測から雨滴の粒径分布を推定するには、従来型のレーダでは不可能であるため、情報量を増やした特殊レーダによる観測が必要である。粒径分布を推定するには、二重偏波レーダを用いた方法が代表的であるが、別の方法として、ドップラレーダによる観測データを用いて粒径分布を推定する方法がある。すなわち、ドップラレーダによる観測データは、上空の平均的な風向・風速を求めることに利用されるが、レーダビームを真上に向ける（仰角90度にする）ことにより、雨滴の落下速度が測定できる。ここでは、その速度分散を利用して雨滴の粒径分布を推定した結果と、ディストロメーターによる測定結果とを比較することにより、その測定精度を調べた。

4.3.2 計算方法

レーダからの情報として、速度分散 σ_v^2 が与えられたとき、それを用いて粒径分布を計算する方法を以下に示す。ただし、鉛直風は無いと仮定する。

ここで、粒径分布式は、

$$N(D) = N_0 D^m \exp(-\Lambda D) \quad (4.3.1)$$

で与えられるものとする。

ドップラー速度スペクトラム $S(v)$ は、

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(v) dv = k_1 Z \quad (4.3.2)$$

$$S(v) dv = k_2 \sigma(D) N(D) dD \quad (4.3.3)$$

$$Z = C \int_0^{\infty} \sigma(D) N(D) dD \quad (4.3.4)$$

で表される。また、

$$\begin{aligned} \int S(v) dv &= \int k_2 \sigma(D) N(D) dD \\ &= \frac{K_2}{C} C \sigma(D) N(D) dD \\ &= \frac{K_2}{C} Z \end{aligned}$$

であるので、

$$K_1 = \frac{K_2}{C} \quad (4.3.5)$$

という関係があることがわかる。ここで、 $S(v)$ を規準化すると、

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} S^-(v) dv &= \frac{\int S(v) dv}{k_1 Z} = \frac{\int k_2 \sigma(D) N(D) dD}{k_1 Z} \\ &= \frac{C \int \sigma(D) N(D) dD}{Z}\end{aligned}\quad (4.3.6)$$

となる。したがって、

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \int v(D) S^-(v) dv \\ &= \frac{C \int v(D) \sigma(D) N(D) dD}{Z} \\ &= \frac{C \int v(D) \sigma(D) N(D) dD}{\int \sigma(D) N(D) dD}\end{aligned}\quad (4.3.7)$$

$$\begin{aligned}\overline{v^2} &= \int v(D)^2 S^-(v) dv \\ &= \frac{C \int v(D)^2 \sigma(D) N(D) dD}{Z} \\ &= \frac{C \int v(D)^2 \sigma(D) N(D) dD}{\int \sigma(D) N(D) dD}\end{aligned}\quad (4.3.8)$$

で表されるので、速度分散 σ_v^2 は、

$$\sigma_v^2 = \overline{v^2} - (\bar{v})^2 \quad (4.3.9)$$

となる。

粒径分布式の m を与えることにより、(4.3.7)～(4.3.9) 式より Λ が求まり、(4.3.4) 式より N_0 が求まる。すなわち、粒径分布が推定できる。

4.3.3 速度分散と粒径分布の関係

ここでは、速度分散と粒径分布との理論的な関係について調べた。具体的には、(4.3.7)～(4.3.9)式及び(4.3.4)式を用いて、

$$\textcircled{1} \Lambda \sim \sigma_v$$

$$\textcircled{2} \Lambda \sim Z/N_0$$

$$\textcircled{3} \sigma_v \sim Z/N_0$$

の関係を求めた。

(1) 計算条件

計算条件は、次のとおりとした。

① Λ は、0～8とする。

② D_{max} は、3, 4, 5, 6 mmとする。

③ m は、0, 2, 5とする。

④雨滴の落下速度は、次に示すBestの式を用いる。

$$V(D) = 958.0(1 - \exp(-D/0.0885))^{1.147} \quad (\text{cm/s}) \quad (4.3.10)$$

ここに、 D ：雨滴の半径(mm)

(2) 計算結果

計算結果を図-4.3.1～4.3.4に示す。これらから、 $\Lambda \sim \sigma_v$ 、 $\sigma_v \sim Z/N_0$ 関係においては、 σ_v の値にピーク値が生じ、一義的には粒径分布が求まらないことがわかる。 σ_{vmax} とその時の Λ 、 Z/N_0 の値を表-4.3.1にまとめた。これから、次のことがわかる。

① D_{max} が大きいほど σ_{vmax} は大きくなる。

② m が小さいほど σ_{vmax} は大きくなる。

③ σ_{vmax} が大きくなると、 $\Lambda \cdot Z/N_0$ の値も大きくなる。

したがって、ドップラレーダによる観測から粒径分布の推定を行うには、 σ_{vmax} となる Λ の値以下の領域のみを用いなければならない。また、 σ_v 、 D_{max} および m の値によっては、粒径分布が求まらないケースも出てくるといえる。

表-4.3.1 速度分散と粒径分布の関係

D_{max}	m	σ_{vmax}	Λ	Z/N_0
3	0	1.37	4.6	0.016
	2	1.24	5.8	0.005
	5	1.10	7.5	0.001
4	0	1.43	4.0	0.044
	2	1.29	5.1	0.017
	5	1.13	6.7	0.005
5	0	1.45	3.8	0.064
	2	1.29	4.9	0.025
	5	1.13	6.5	0.007
6	0	1.45	3.7	0.077
	2	1.29	4.9	0.025
	5	1.13	6.5	0.007

D_{MAX} = 3.0

M= 0.0 SVMAX= 1.37
 RAMDA= 4.6
 Z/NO = 0.016

M= 2.0 SVMAX= 1.24
 RAMDA= 5.8
 Z/NO = 0.005

M= 5.0 SVMAX= 1.10
 RAMDA= 7.5
 Z/NO = 0.001

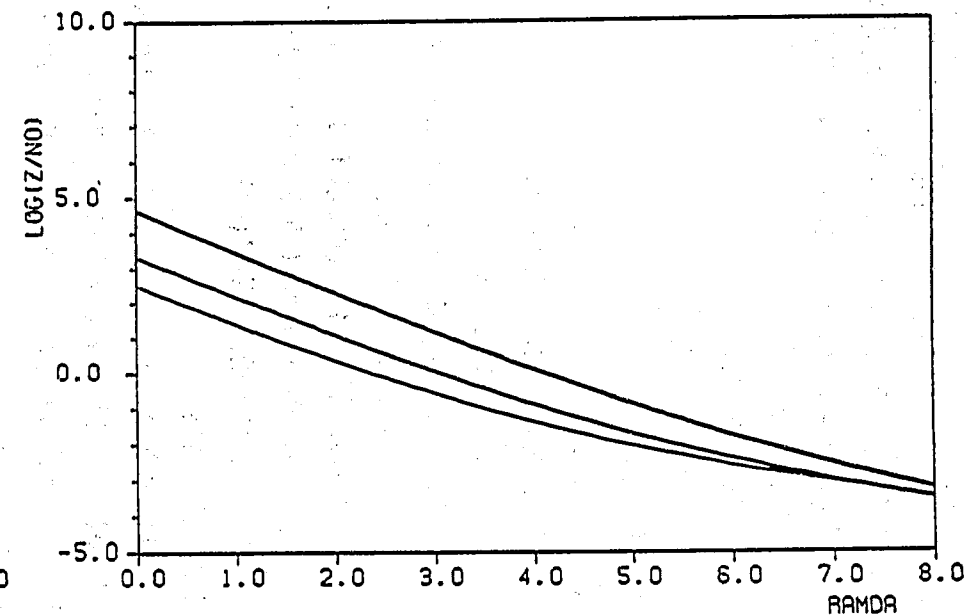
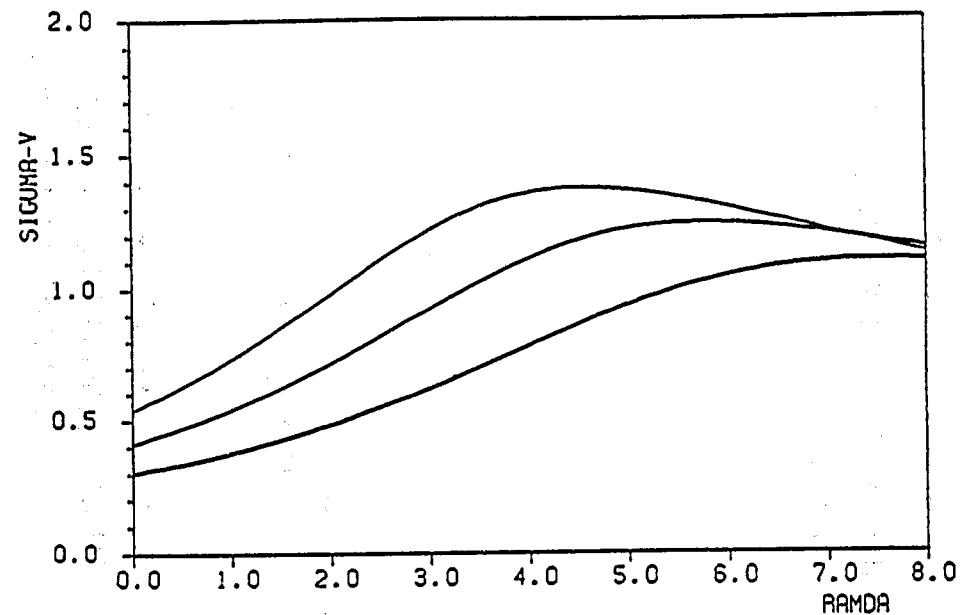
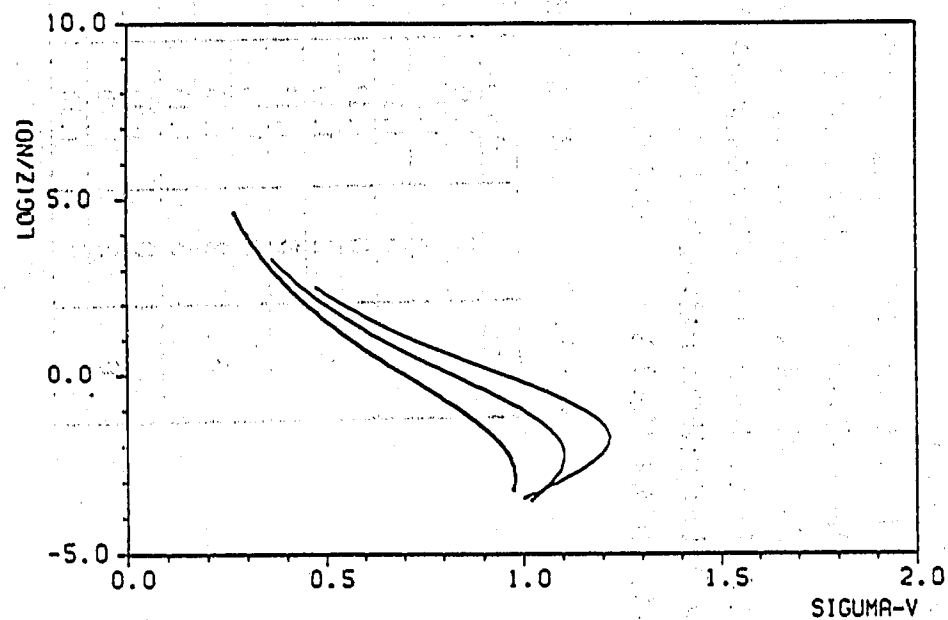


図-4. 3. 1 速度分散と粒径分布の関係 (D_{MAX} = 3. 0 mm)

D_{MAX} = 4.0

M= 0.0 SVMAX= 1.43
RAMDA= 4.0
Z/NO = 0.044

M= 2.0 SVMAX= 1.29
RAMDA= 5.1
Z/NO = 0.017

M= 5.0 SVMAX= 1.13
RAMDA= 6.7
Z/NO = 0.005

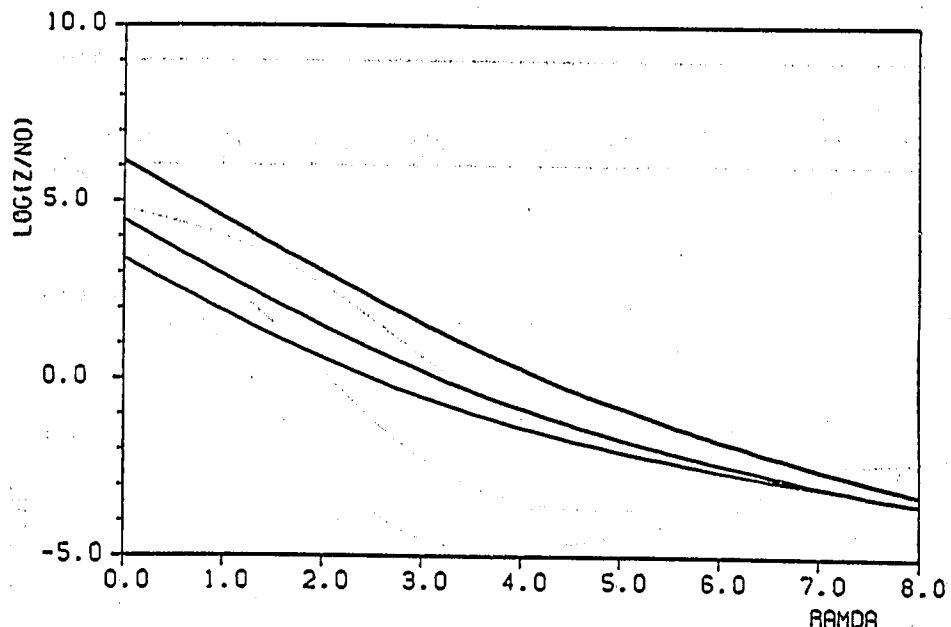
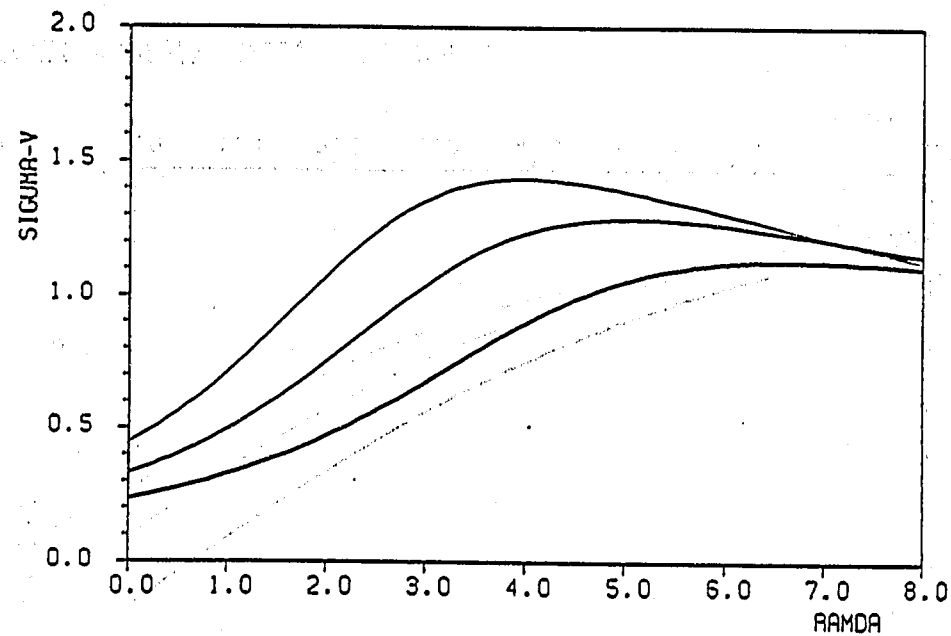
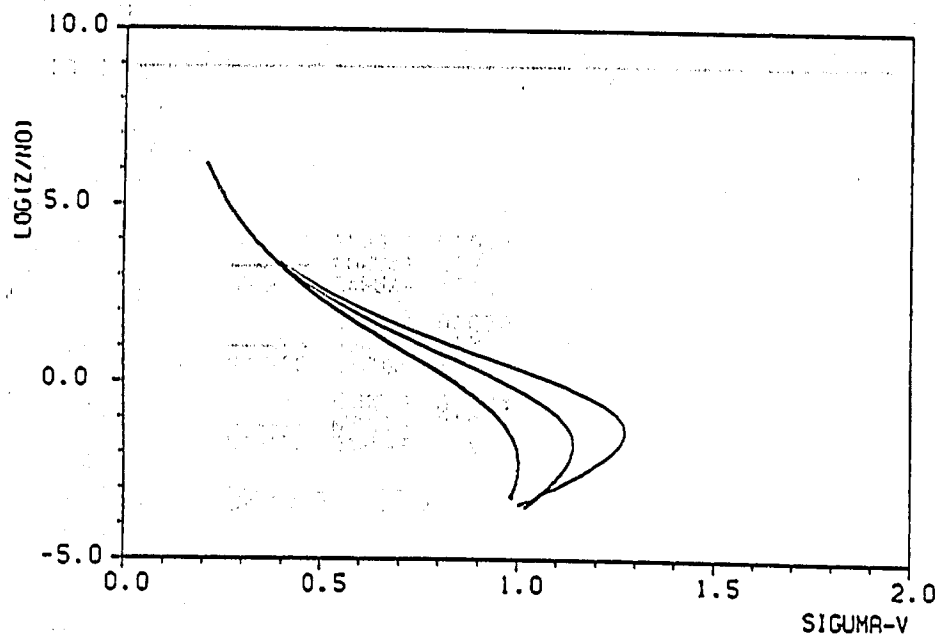


図-4.3.2 速度分散と粒径分布の関係 (D_{MAX} = 4.0 mm)

$D_{MAX} = 5.0$

$M = 0.0$ $SV_{MAX} = 1.45$
 $RAMDA = 3.8$
 $Z/NO = 0.064$

$M = 2.0$ $SV_{MAX} = 1.29$
 $RAMDA = 4.9$
 $Z/NO = 0.025$

$M = 5.0$ $SV_{MAX} = 1.13$
 $RAMDA = 6.5$
 $Z/NO = 0.007$

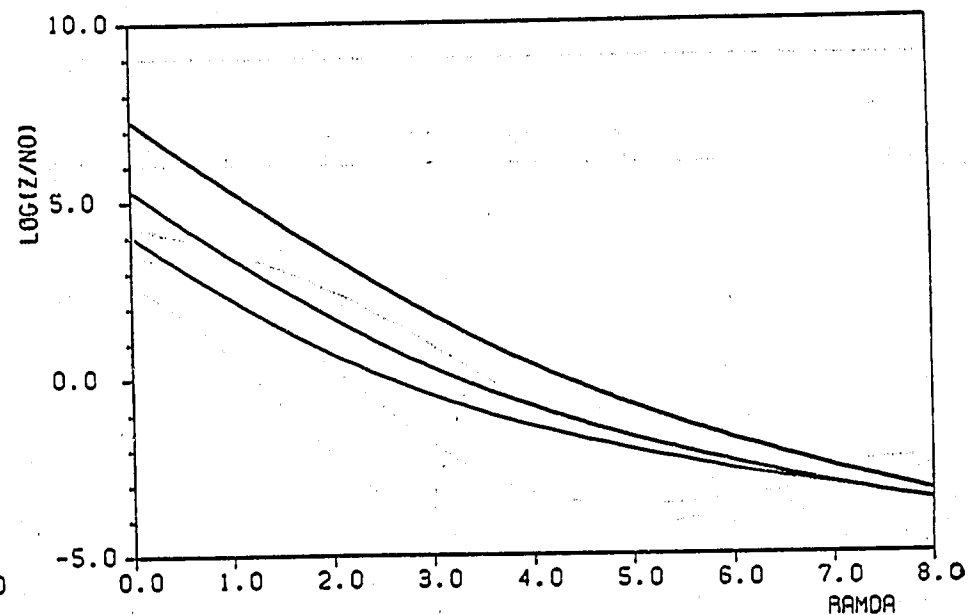
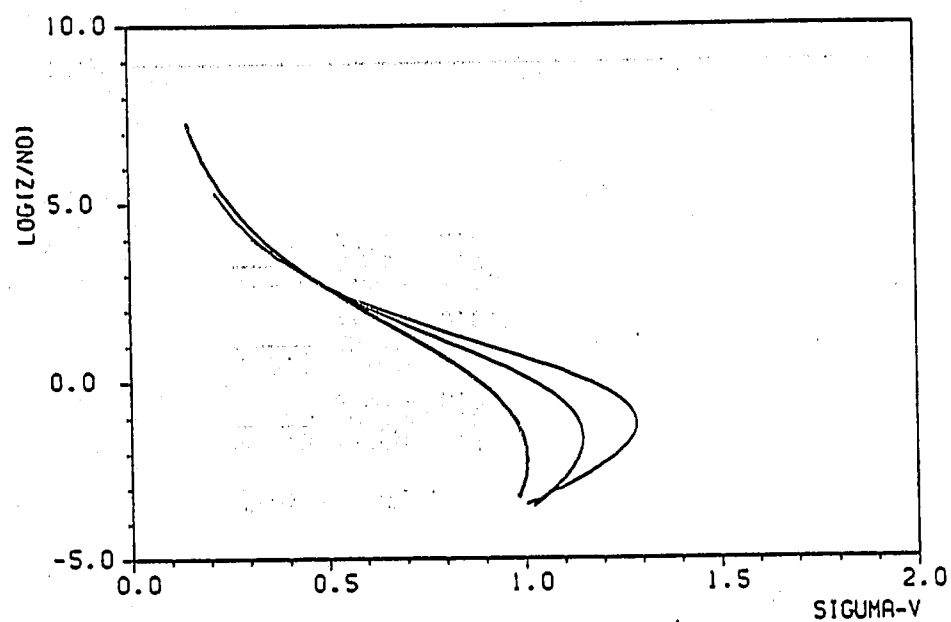
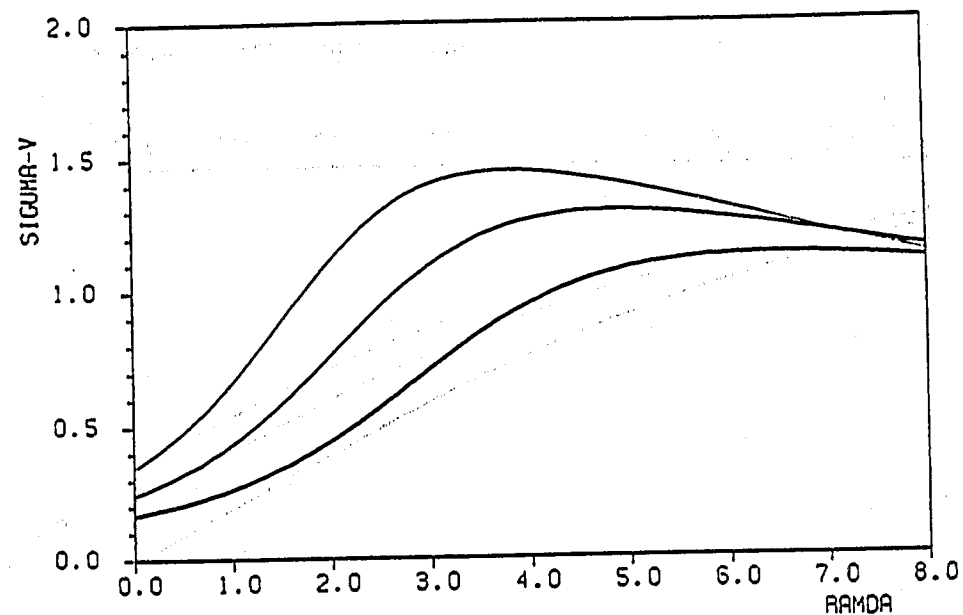


図-4.3.3 速度分散と粒径分布の関係 ($D_{max} = 5.0 \text{ mm}$)

D_{MAX} = 6.0

M= 0.0 S_VMAX= 1.45
 R_{AMD}= 3.7
 Z/NO = 0.077

M= 2.0 S_VMAX= 1.29
 R_{AMD}= 4.9
 Z/NO = 0.025

M= 5.0 S_VMAX= 1.13
 R_{AMD}= 6.5
 Z/NO = 0.007

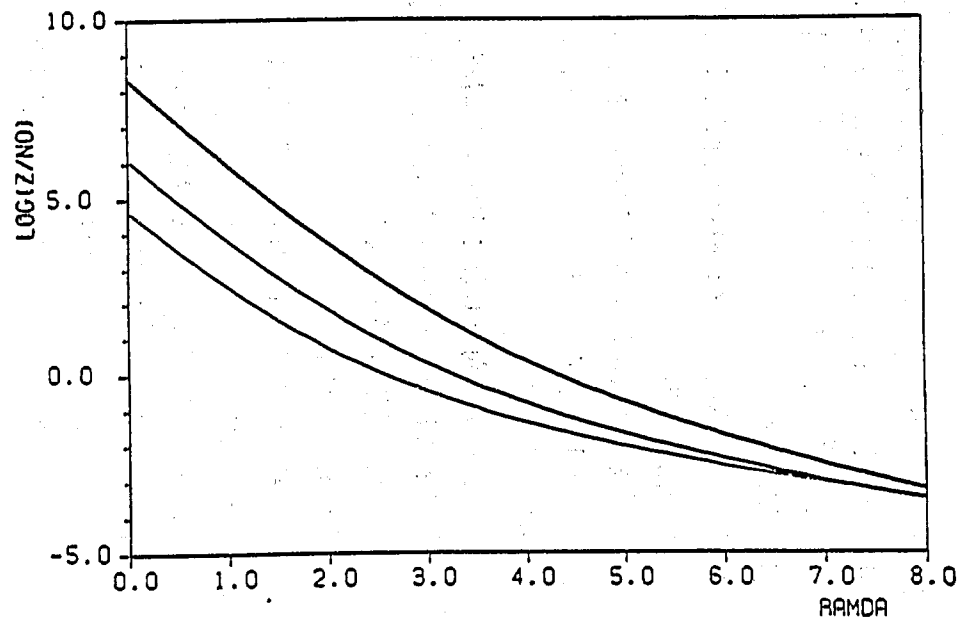
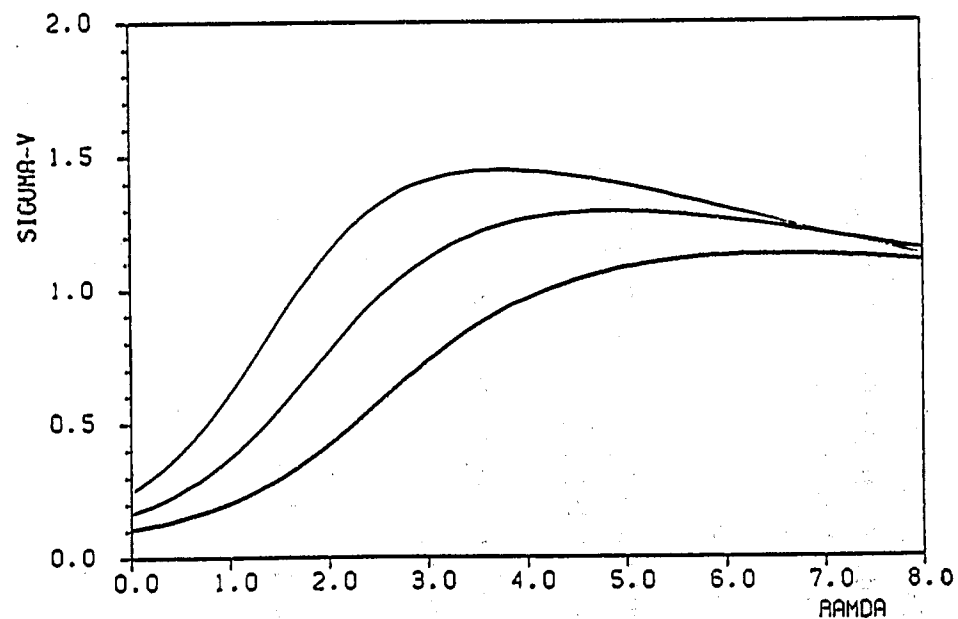
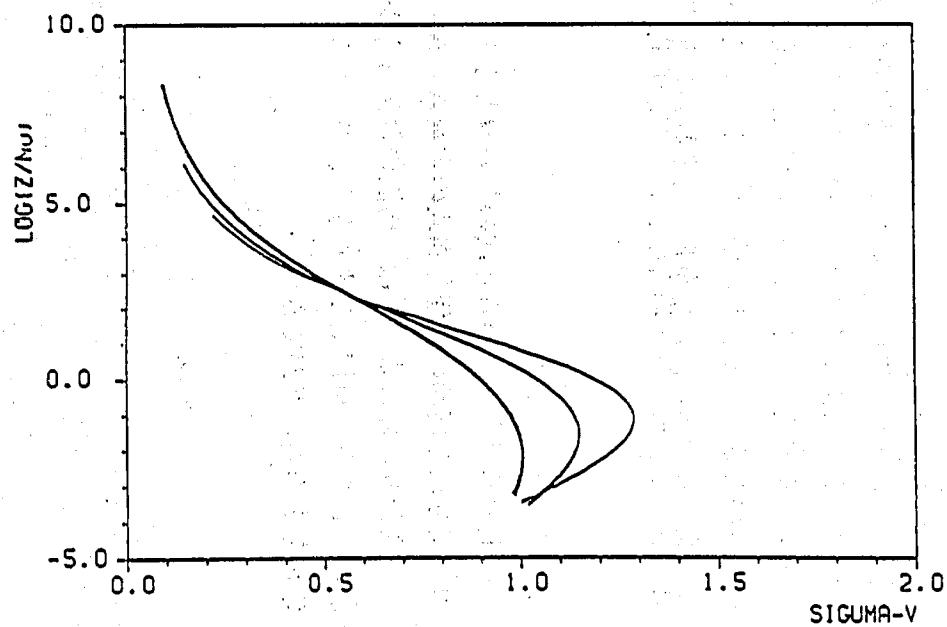


図-4.3.4 速度分散と粒径分布の関係 (D_{MAX} = 6.0 mm)

4. 3. 4 ドップラデータによる雨滴の粒径分布の推定

ドップラレーダにより降雨観測を行った結果を用いて、雨滴の粒径分布の推定を行い、地上におけるディストロメーターによる測定値と比較した。

(1) 使用データ

次に示す観測データを用いて計算を行うものとする。

①降雨観測地

建設省筑後川ダム統合管理事務所（福岡県久留米市高野町）の庁舎屋上をレーダサイトとするとともに、ディストロメーターも同時に設置

②レーダ観測

レーダ仰角90度でドップラ観測、データ平均時間は1分である。

③ディストロメーターによる雨滴の粒径分布の測定

測定時間間隔1分で測定

④対象降雨期間

昭和63年7月15日 17:05:42~17:46:12 の約40分

(2) 計算条件

①レーダレンジは、レンジ2を用いる。

② D_{max} は、3, 4, 5, 6 mmとする。

③ m は、0, 2, 5とする。

④雨滴の落下速度は、Besliの式を用いる。

(3) 計算結果

図-4. 3. 5に $m=2$ の場合の粒径分布の定数 N_0 , Λ の比較を示す。実線がディストロメーターによる結果で、プロットがレーダによる結果である。レーダ値とディストロメーター測定値が、オーダー程度ではあるが、比較的良く合っているのは、 $D_{max}=5, 6$ mmのときである。したがって、 D_{max} を5 mm以上とするなら、ドップラレーダによる観測でも雨滴の粒径分布を、ある程度は推定できると言える。 $m=0$ の場合も同様の結果であった。 $m=5$ の場合は、レーダから得られる値が少なく、比較ができなかった。

4. 3. 5 まとめ

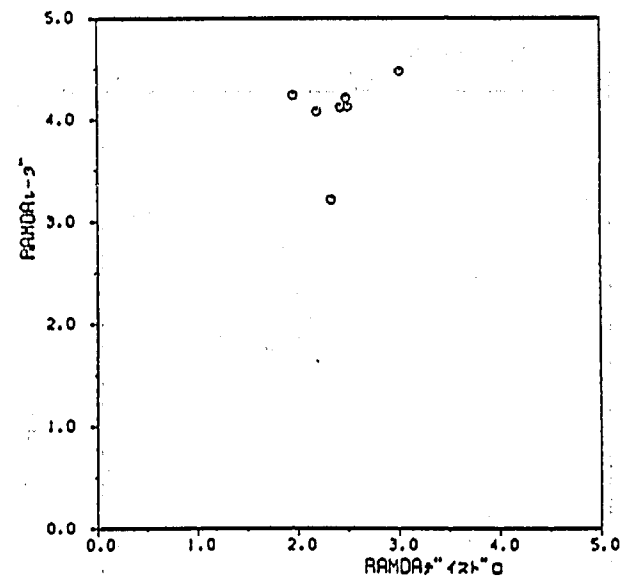
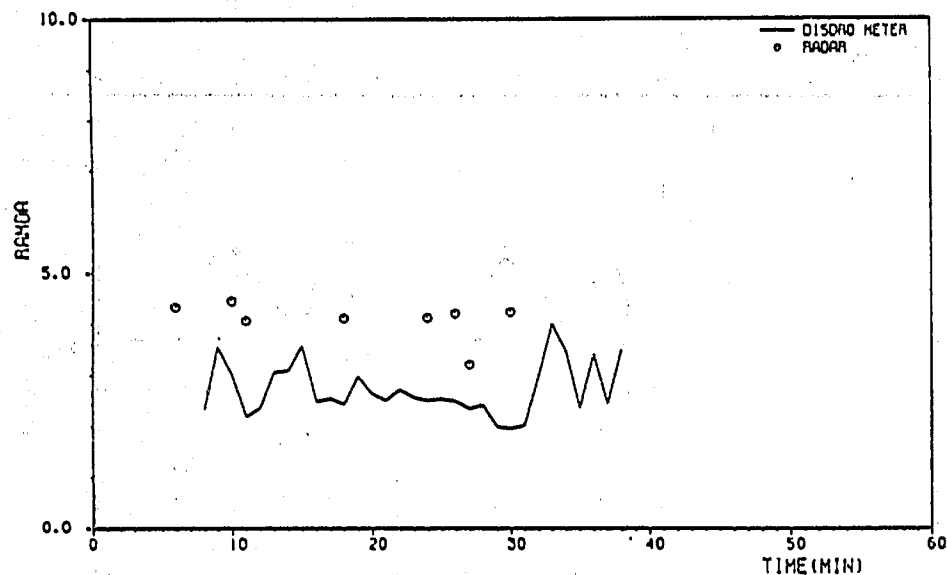
以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

①速度分散と雨滴の粒径分布式の定数 Λ , N_0 との関係は、一義的ではない。

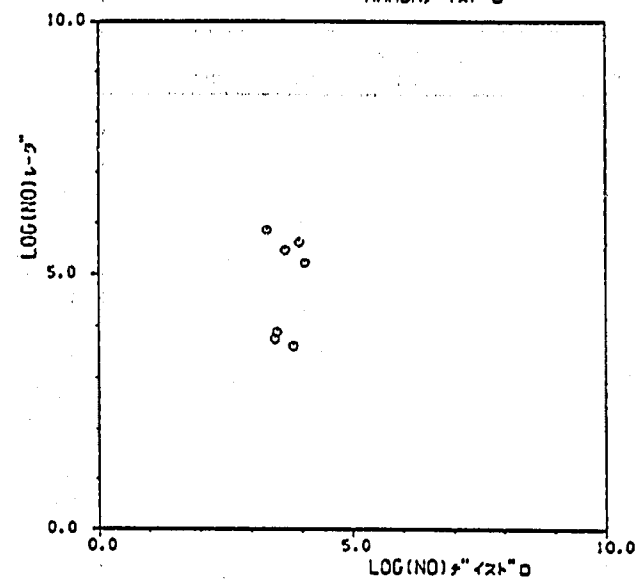
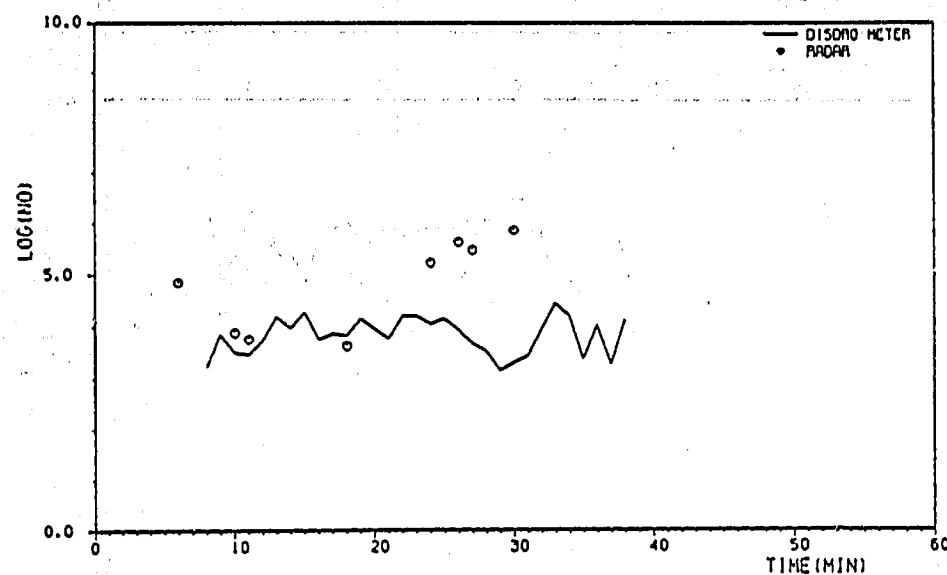
②速度分散の値によっては、雨滴の粒径分布が求まらない場合がある。

③ D_{max} を5 mm以上とするなら、ドップラレーダによる観測データを用いて雨滴の粒径分布を求めることができる。

M=2.0 DMAX= 3.0 RADAR RANGE= 2

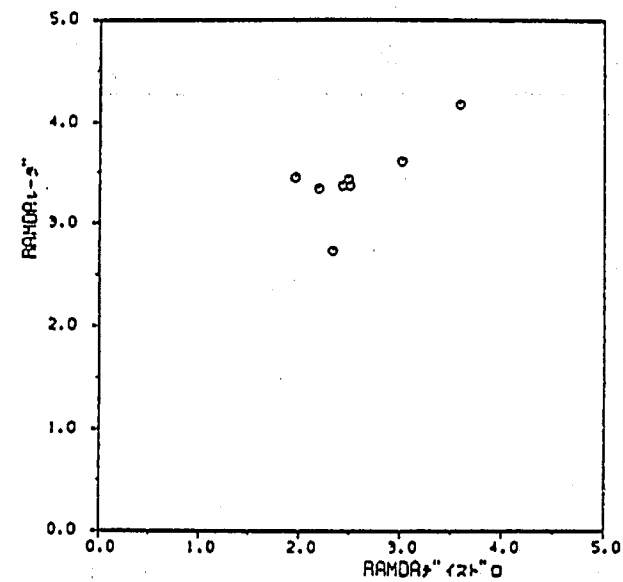
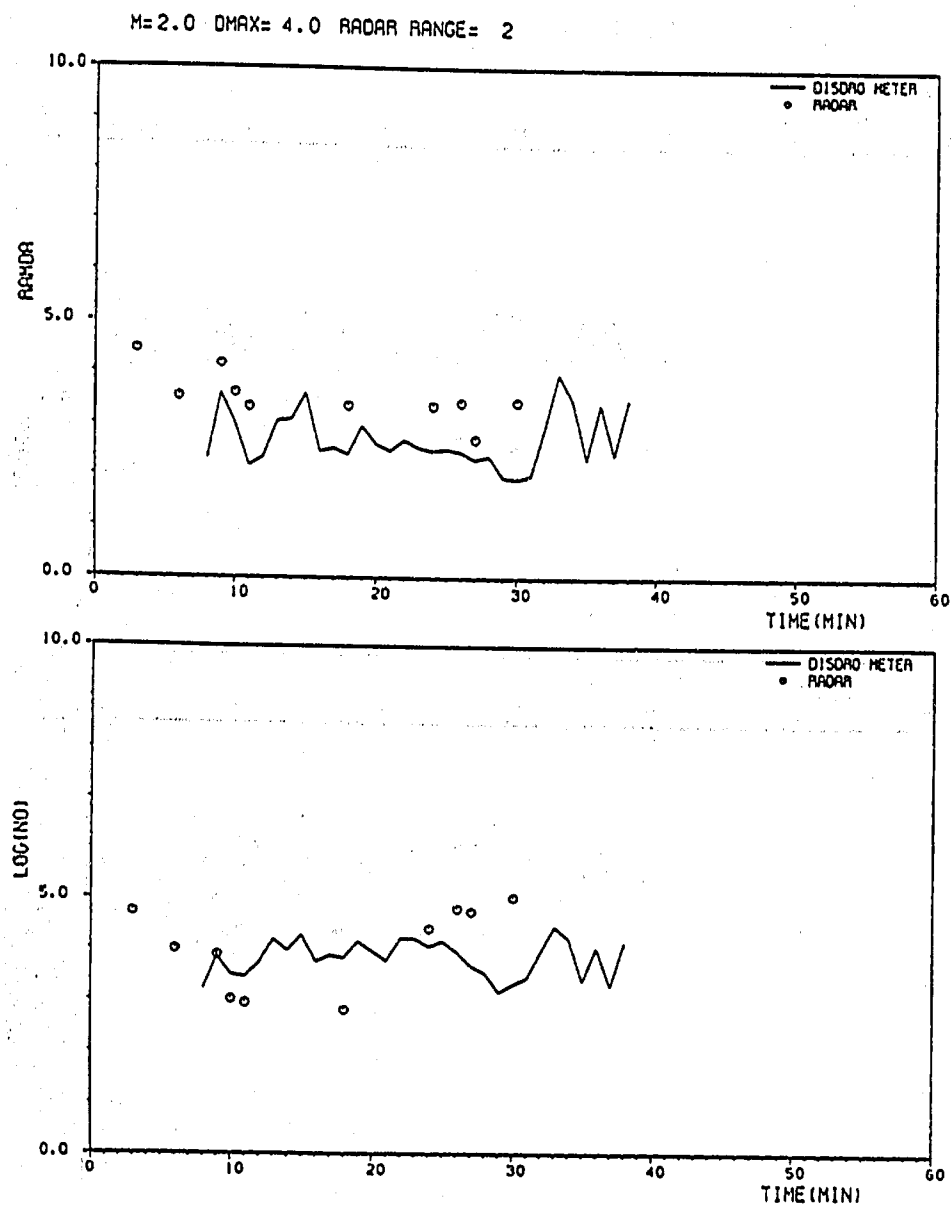


サンプル数 7
10分係数 0.319
10分誤差 71.0
標準誤差 1.707

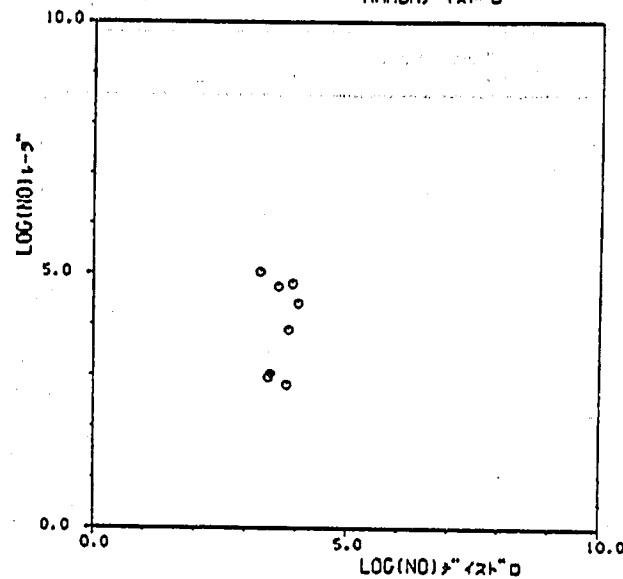


サンプル数 7
10分係数 0.117
10分誤差 31.8
標準誤差 1.428

図 4.3.5(a) N_0 , Λ の比較 ($m=2$, $D_{max}=3.0 \text{ mm}$)

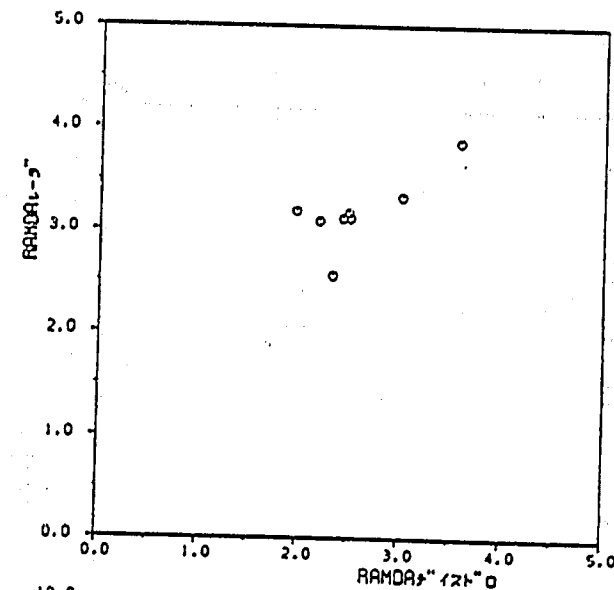
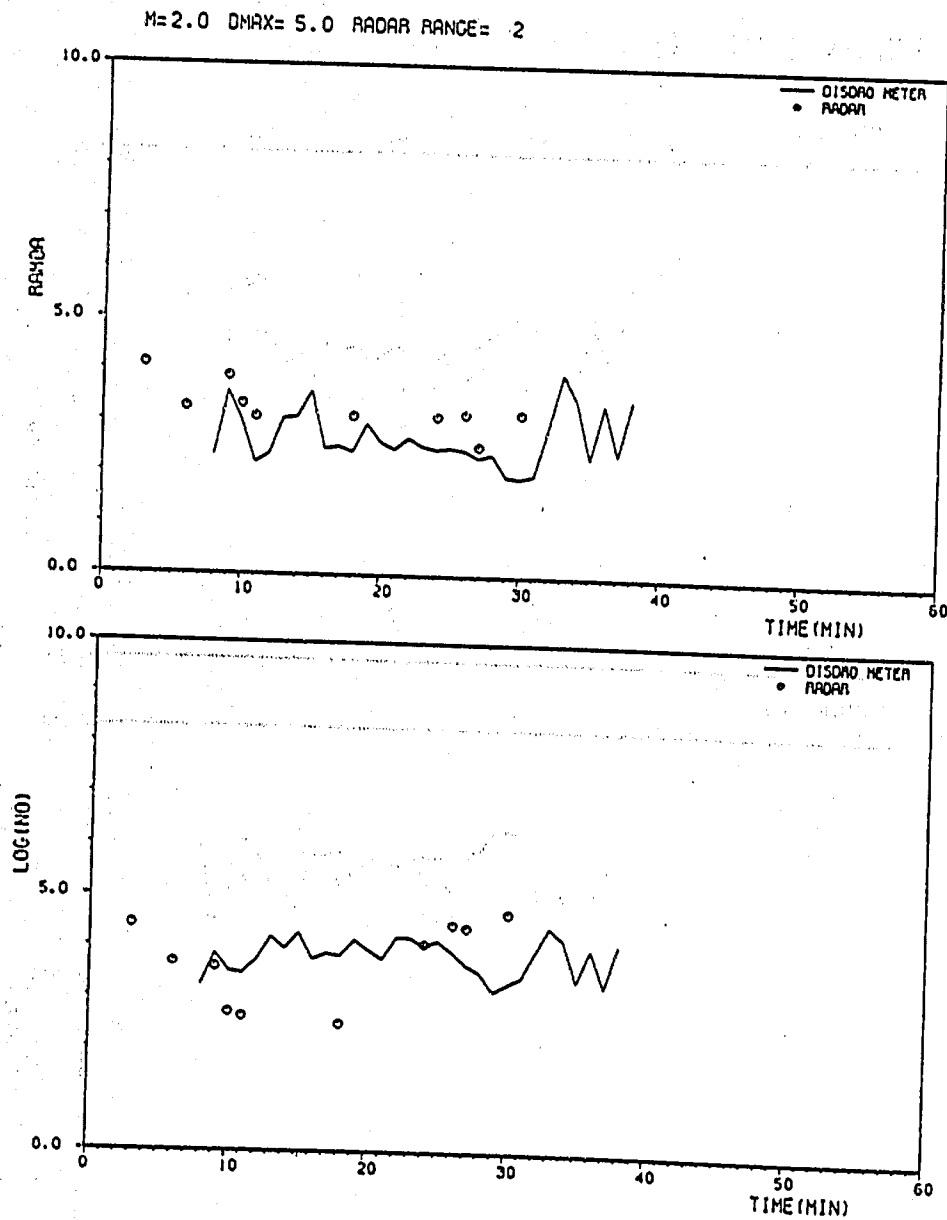


サンプル数 8
10分間平均 0.730
10分間最大 36.9
相関係数 0.936

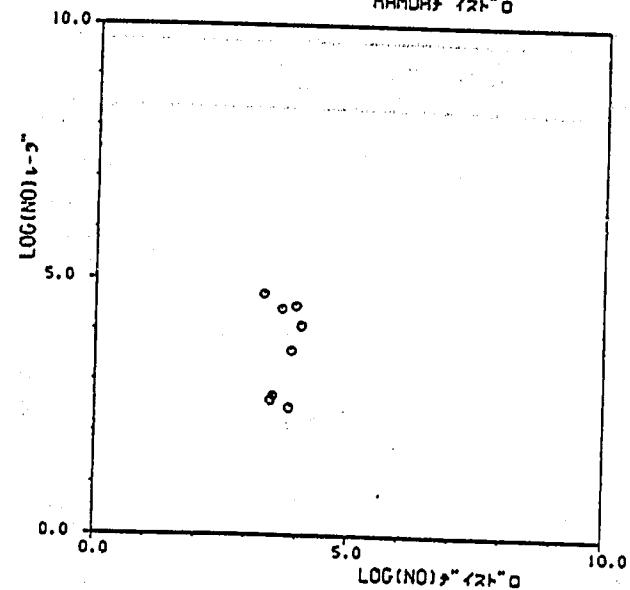


サンプル数 8
10分間平均 0.110
10分間最大 20.8
相関係数 0.899

図-4. 3. 5 (b) N_0 , Λ の比較 ($M=2$, $D_{max}=1.0$ in III)



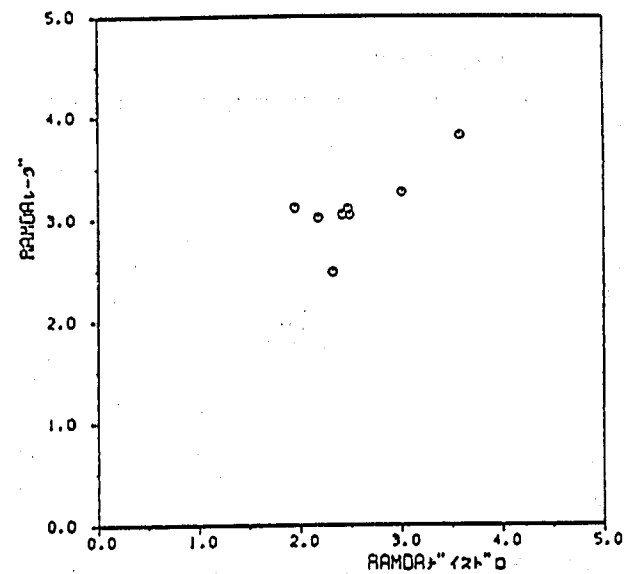
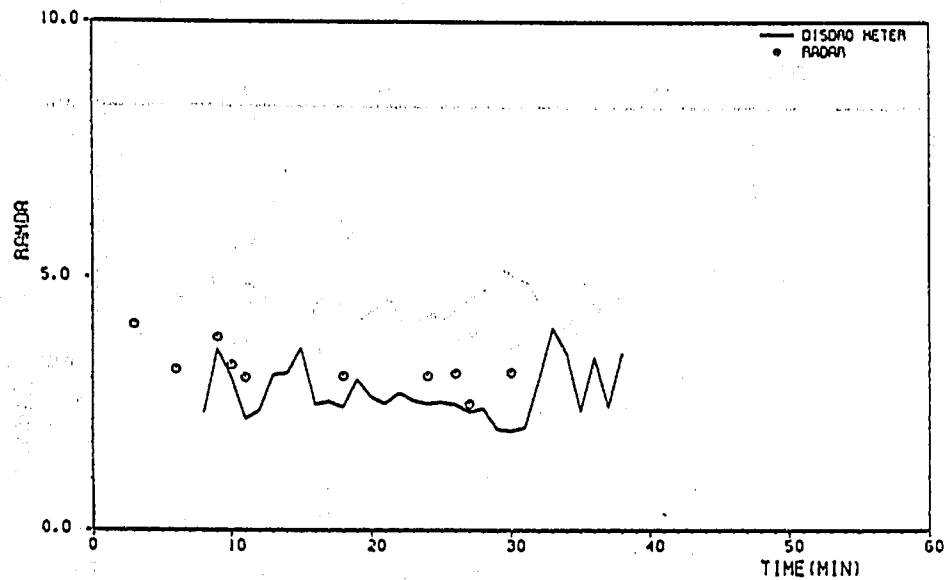
サンプル数 8
相関係数 0.741
相対誤差 27.1
自乗誤差 0.708



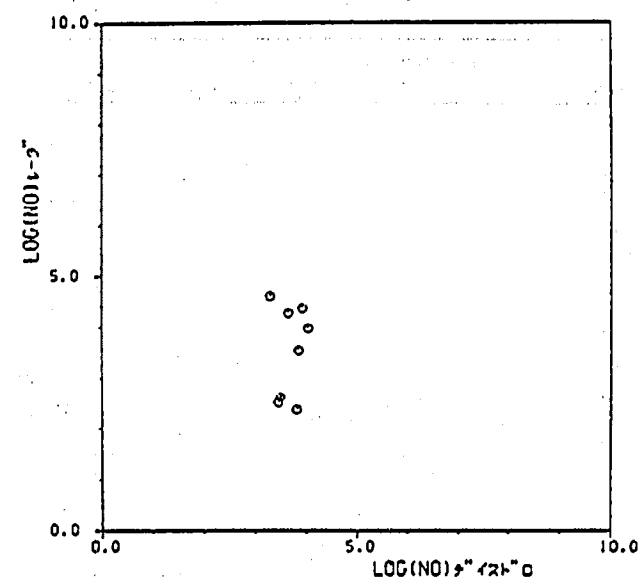
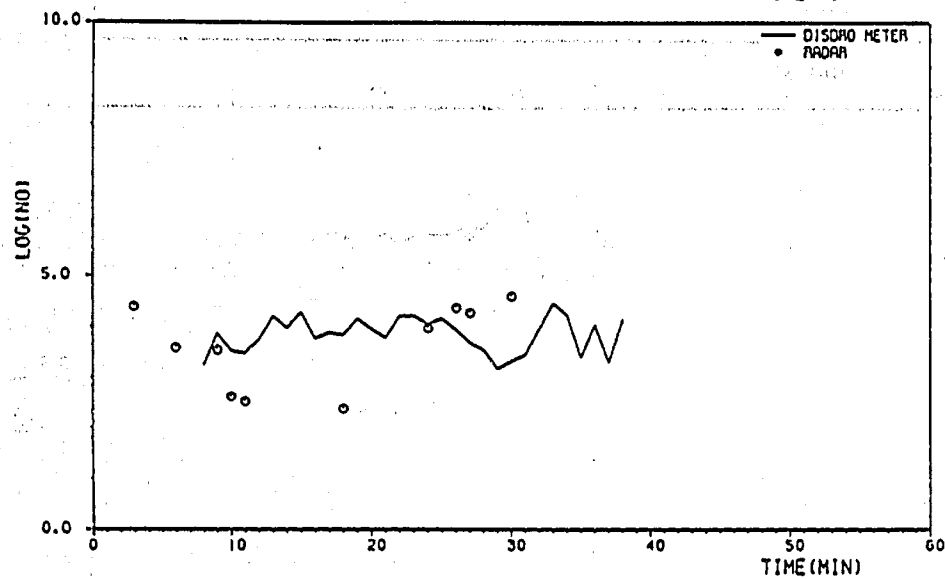
サンプル数 8
相関係数 0.111
相対誤差 20.6
自乗誤差 0.865

図-4. 3. 5(c) N_0 , Λ の比較 ($m=2$, $D_{max}=5.0\text{mm}$)

M=2.0 DMAX= 6.0 RADAR RANGE= 2



サンプル数 8
 100%値 0.752
 100%値 23.9
 0.636



サンプル数 8
 100%値 0.115
 100%値 20.9
 0.876

図-4. 3. 5 (d) N_0 , Λ の比較 ($m=2$, $D_{max}=6.0 \text{ mm}$)

4. 4 レーダ反射電力のサンプリング間隔について

4. 4. 1 はじめに

レーダを用いて精度良い観測を行うには、

①観測距離に応じてビーム仰角を変える。

②降雨域の立体構造を把握するために、複数の仰角で観測を行う。

③降雨予測、あるいは降雪予測のため、上空の風向・風速をドップラーモードで観測する。

が必要である。

したがって、このようなことを行うには、各地点の降水強度を測定する時間、つまり反射電力をサンプリングする時間を短くする必要がある。

そこで、ここでは、どの程度までサンプリング間隔を短くできるか、また、どのような誤差特性があるかを調べた。

この解析の一部は、「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）」において行われている。そこでは、サンプリング方法を1/2, 1/3, 3/5, 1/5, 5/10, 1/15（たとえば、3/5では、5分間のうち最初の3分間のみデータ収集する）として計算を行い、次の結論が得られている。

①測定誤差は、データ収集総時間とは一義的な関係はない。

②測定誤差とデータ収集間隔（データを収集しない時間）とは線形の関係がある。

たとえば、降雨観測データを用いた結果では、次のとおり。

$$E_R = 2.8 \quad T, \quad \sigma_R = 0.15 T \quad (1 \text{ 時間平均値、1 地点データ})$$

$$E_z = 0.62 T, \quad \sigma_z = 0.17 T \quad (1 \text{ 時間平均値、1 地点データ})$$

ここに、 E_R [%] は降水強度を測定する場合の相対誤差、 σ_R [dBZ] は降水強度を測定する場合の標準偏差、 E_z [%] は反射因子を測定する場合の相対誤差、 σ_z [dBZ] は反射因子を測定する場合の標準偏差である。

③平均（積分）時間を増やすことにより、測定誤差を減少させる効果がある。

④平均（積分）地点を増やしても測定誤差の減少効果は少ない。

ここでは、これらの結果をふまえ、前回とは異なったサンプリング方法により、測定誤差がサンプリング時間間隔に比例することを検証した。

4.4.2 検討方法

(1) 検討対象地区

降雨観測および降雪観測における反射電力のサンプリング時間（積分時間）の検討の対象とした地区は次の条件で選定した。

- ①検討対象地区は、 $1.4^{\circ} \times 500\text{m}$ の極座標メッシュとする。
- ②レーダサイトから500m以内の地区は、数密に測定できない（送信中に反射電力が戻ってくる）ので、検討対象地区から除外する。
- ③降水現象からの反射のみ対象とするため、大地クラッタが降水強度換算（ $B=200$ ， $\beta=1.6$ を使用）で、 0.2mm/h 以下の地点とする。
- ④同様に、最小測定可能降水強度が、 $B=200$ ， $\beta=1.6$ で、 0.2mm/h 以下の地点とする。

(2) 検討対象降雨・降雪

検討対象降雨及び降雪は、表-4.4.1に示すとおりである。

表-4.4.1 対象降雨・降雪

NO	期 間	種別	時間数	仰角	平均時間
①	1988 06/01 20:00 ~ 22:00	雨	2	3°	1 分間
②	1988 06/23 17:00 ~ 19:00	雨	2	3°	SCANごと
③	1988 07/17 13:00 ~ 15:00	雨	2	3°	1 分間
④	1988 07/27 12:00 ~ 14:00	雨	2	3°	SCANごと
⑤	1988 01/10 13:00 ~ 14:00	雪	1	3°	1 分間
⑥	1988 01/24 00:08 ~ 01:08	雪	1	4°	1 分間

(3) 使用データ

サンプリング方法による測定誤差を評価するのに用いたデータの選択条件は、次により行った。

- a. 平均（積分）する全ての受信電力が、 -102.5dBm 以上
 - b. 各種サンプリング方法による平均（積分）後の降水強度が 0.2mm/h 以上（反射因子で 12.53dBZ 以上）
- a. は、レーダの最小受信電力が -107.5dBm で、雑音指数が 5dBm 以下であるので、雑音による影響を取り除くために設けた条件である。b. は、降水強度が弱いデータは、雑音や大地クラッタ等の信号が入っているのでそれらを取り除くために設けた条件である。

(4) 評価方法

サンプリング方法の1/1の反射因子(又は降水強度)を真値 Z_o (R_o)とし、各種のサンプリング方法で求めた Z (又は降水強度 R)と比較し、サンプリング方法による測定誤差を算出し、その誤差特性を調べた。

測定誤差の評価指標は、相対誤差、標準偏差、相関係数を用いた。それぞれの計算式を以下に示す。

$$\text{相対誤差} = \frac{|\sum Z - \sum Z_{oi}|}{\sum Z_o} \times 100 \quad (4.4.1)$$

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z_i - Z_o)^2} \quad (4.4.2)$$

$$\text{相関係数} = \frac{\frac{1}{N} \sum (Z_i - \bar{Z}) (Z_{oi} - \bar{Z}_o)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z_i - \bar{Z})^2 \frac{1}{N} \sum (Z_{oi} - \bar{Z}_o)^2}} \quad (4.4.3)$$

ここに、 N : 対象地点数

$\sum$: 累加は $i = 1 \sim N$

Z_i : あるサンプリング時間の i 地点の反射因子 [dBZ]

Z_{oi} : サンプリング方法 (1/1) の i 地点の反射因子 [dBZ]

$\bar{Z}$: あるサンプリング時間の全地点の反射因子の平均値 [dBZ]

$\bar{Z}_o$: サンプリング方法 (1/1) の全地点の反射因子の平均値 [dBZ]

なお、評価データが降水強度の場合は、上記 (4.4.1) ~ (4.4.3) の式において、 Z_{oi} を R_{oi} に、 Z_i を R_i に、 $\bar{Z}_o$ を $\bar{R}_o$ に、 $\bar{Z}$ を $\bar{R}$ に置き換える。ここで、 R_i は、あるサンプリング時間の i 地点の降水強度 [mm/h]、 R_{oi} はサンプリング方法 (1/1) の i 地点の降水強度 [mm/h]、 $\bar{R}$ はあるサンプリング時間の全地点の降水強度の平均値 [mm/h]、 $\bar{R}_o$ はサンプリング方法 (1/1) の全地点の降水強度の平均値 [mm/h] を表す。

4. 4. 3 サンプルング方法

サンプルングの方法を図-4. 4. 1に示す。検討の対象としたサンプルング方法は、次のとおりである。

(1) 1分間平均データを用いる場合

①データ収集総時間が1/2

1/2, 2/4, 3/6, 5/10, 6/12, 10/20, 15/30, 30/60

②データ収集総時間が1/3

1/3, 2/6, 4/12, 5/15, 10/30, 20/60

③データ収集総時間が1/5

1/5, 2/10, 3/15, 4/20, 6/30, 12/60

(2) SCANごと(20秒ごと)のデータを用いる場合

①データ収集総時間が1/2

1/2, 2/4, 3/6, 5/10, 6/12, 9/18, 10/20, 15/30, 18/36, 30/60, 45/90, 90/180

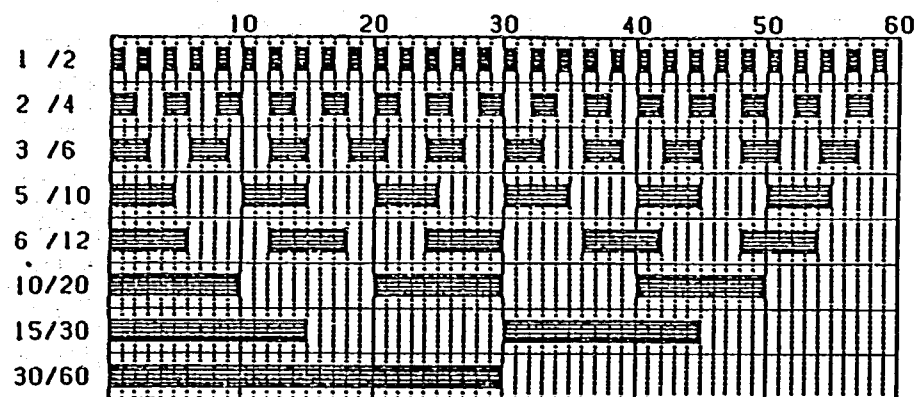
②データ収集総時間が1/3

1/3, 2/6, 3/9, 4/12, 5/15, 6/18, 10/30, 12/36, 15/45, 20/60, 30/90, 60/180

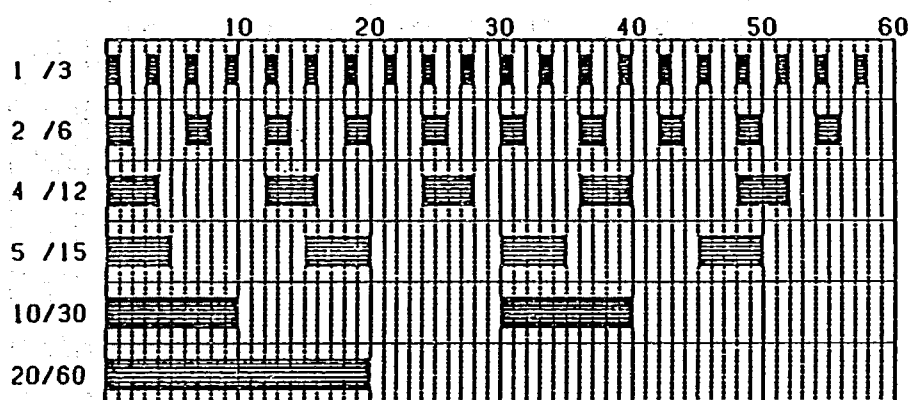
③データ収集総時間が1/5

1/5, 2/10, 3/15, 4/20, 6/30, 9/45, 12/60, 18/90, 36/180

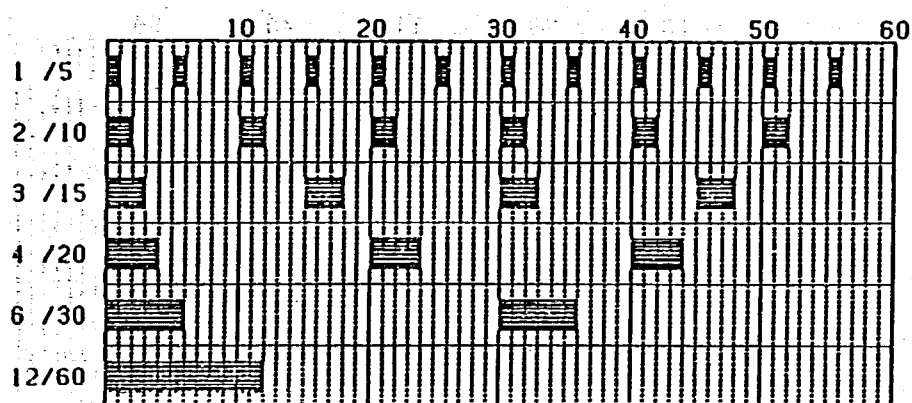
ここで、たとえば、10/20とは、20個のデータの内最初の10個のみ収集し平均することを意味する。



①データ収集総時間が1/2

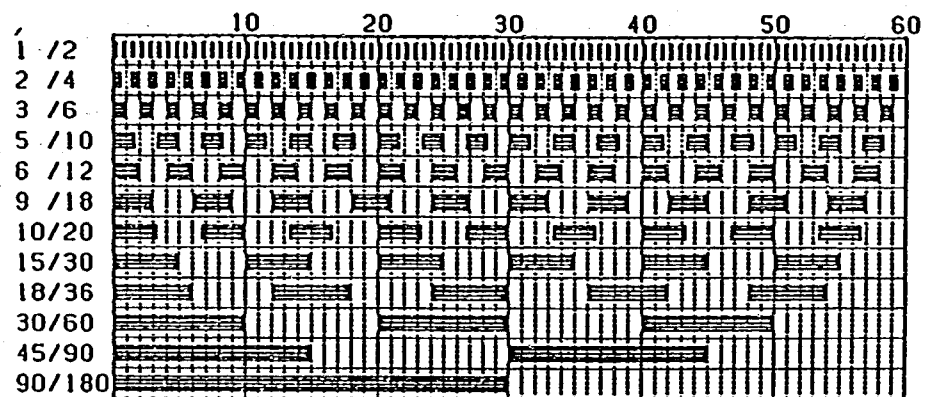


②データ収集総時間が1/3

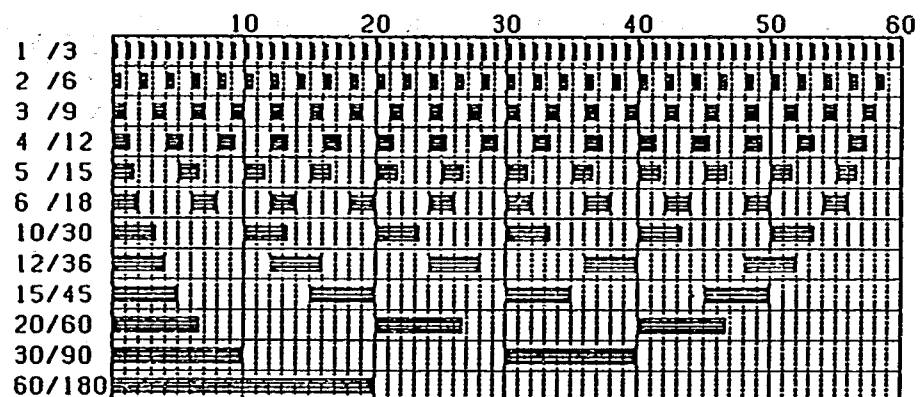


③データ収集総時間が1/5

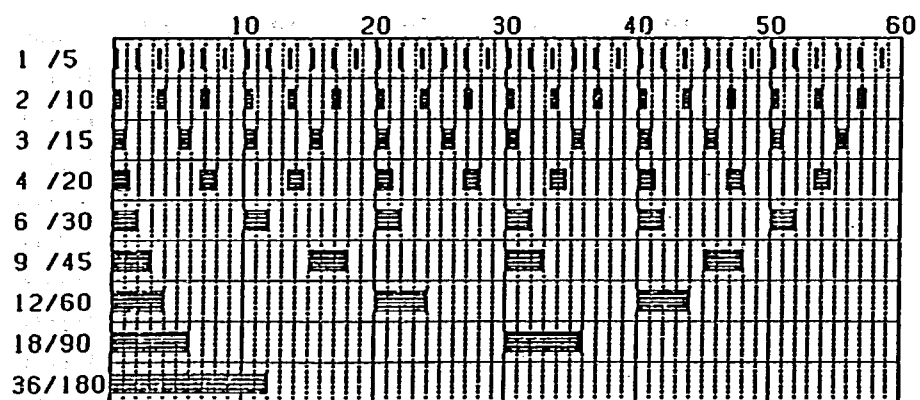
図-4. 4. 1 (a) サンプルング方法 (1分間平均データ)



①データ収集総時間が1/2



②データ収集総時間が1/3



③データ収集総時間が1/5

図-4.4.1(b) サンプルング方法 (SCANごとのデータ)

4. 4. 4 検討結果

表-4. 4. 2~4. 4. 7に計算結果を示す。図-4. 4. 2に降雨No. 1におけるRの散布図を一例として示す。また、図-4. 4. 3~4. 4. 8にデータ収集間隔と測定誤差との関係を示す。

これらから、次のことがわかる。

- ①データ収集総時間は、測定誤差にほとんど影響しない。
- ②データ収集間隔（データを収集しない時間）と測定誤差の間には、比例関係がある。
- ③1分間平均データを用いた場合とSCANごとのデータを用いた場合では測定誤差に大きな差はない。

これらの結果のうち、①、②については前回の解析結果と同様の結果である。また、今回の結果から、降水強度の測定誤差（相対誤差）を10%以内にするためには、データ収集間隔を3~10分程度にする必要があることがわかる。

ここで、データ収集間隔を3分以内とした場合には、どのようなサンプリング方法が可能かを以下に示す。

(1) 1分間平均データを用いる場合

a) データ収集総時間が1/2

1/2, 2/4, 3/6

b) データ収集総時間が1/3

1/3, 2/6

c) データ収集総時間が1/5

1/5

(2) SCANごとのデータを用いる場合

a) データ収集総時間が1/2

1/2, 2/4, 3/6, 5/10, 6/12, 9/18, 10/20

b) データ収集総時間が1/3

1/3, 2/6, 3/9, 4/12, 5/15, 6/18

c) データ収集総時間が1/5

1/5, 2/10, 3/15

4. 4. 5 まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりとなる。

- ①データ収集総時間は、測定誤差にほとんど影響しない。
- ②データ収集間隔（データを収集しない時間）と測定誤差の間には、比例関係がある。
- ③1分間平均データを用いた場合とSCANごとのデータを用いた場合では測定誤差に大きな差はない。
- ④降水強度の測定誤差を10%以内に押さえるには、データ収集間隔を3~10分程度以内にする必要がある。

表-4. 4. 2 (a) 降水強度の測定誤差 (降雨NO. 1)

サンプリング 方 法		サンプル 数	R _o 平均値 [mm/h]	R'平均値 [mm/h]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [mm/h]
1 / 2	1/2	7904	6.22	6.20	0.999	1.8	0.150
	2/4			6.19	0.998	2.2	0.178
	3/6			6.17	0.997	3.0	0.240
	5/10			6.14	0.994	4.5	0.339
	6/12			6.09	0.990	5.7	0.441
	10/20			6.12	0.982	9.3	0.606
	15/30			5.95	0.967	12.2	0.763
	30/60			5.40	0.941	20.3	1.114
1 / 3	1/3	7904	6.22	6.19	0.997	2.7	0.223
	2/6			6.15	0.994	4.1	0.326
	4/12			6.03	0.983	7.4	0.558
	5/15			6.12	0.985	7.0	0.541
	10/30			5.70	0.937	16.9	1.008
	20/60			4.99	0.888	26.8	1.437
	1 / 5			1/5	7904	6.22	6.15
2/10		6.05	0.983	7.8			0.572
3/15		6.09	0.978	8.6			0.658
4/20		6.12	0.951	15.1			1.017
6/30		5.56	0.924	19.2			1.106
12/60		4.53	0.828	34.2			1.585

表-4. 4. 2 (b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 1)

サンプリング 方 法		サンプル 数	Z ₀ 平均値 [dBZ]	Z'平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1 / 2	1/2	8000	33.75	33.72	1.000	0.3	0.143
	2/4			33.71	0.999	0.5	0.185
	3/6			33.68	0.999	0.7	0.262
	5/10			33.66	0.997	1.0	0.410
	6/12			33.62	0.995	1.3	0.499
	10/20			33.59	0.986	2.2	0.825
	15/30			33.40	0.977	2.8	1.072
	30/60			32.69	0.958	4.7	1.530
1 / 3	1/3	7999	33.75	33.71	0.999	0.6	0.223
	2/6			33.67	0.997	0.9	0.356
	4/12			33.58	0.992	1.7	0.640
	5/15			33.62	0.992	1.6	0.633
	10/30			33.11	0.960	3.9	1.428
	20/60			32.23	0.922	6.4	2.032
1 / 5	1/5	7999	33.75	33.67	0.997	0.9	0.380
	2/10			33.55	0.990	1.8	0.702
	3/15			33.57	0.988	2.0	0.780
	4/20			33.64	0.966	3.4	1.316
	6/30			32.93	0.950	4.5	1.604
	12/60			31.69	0.869	8.5	2.482

表-4. 4. 3 (a) 降水強度の測定誤差 (降雨NO. 2) (SCANごと平均)

サンプリング 方 法	サンプル 数	R ₀ 平均値 [mm/h]	R'平均値 [mm/h]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [mm/h]
1 / 2	8192	13.24	13.19	0.999	2.0	0.387
			13.23	0.999	2.3	0.418
			13.15	0.999	3.1	0.515
			13.17	0.998	4.8	0.736
			13.13	0.997	5.6	0.823
			13.01	0.994	7.4	1.155
			13.01	0.992	8.7	1.262
			12.80	0.987	11.8	1.614
			12.84	0.981	13.3	1.996
			12.38	0.972	18.3	2.333
			12.69	0.930	22.8	3.310
			11.76	0.688	37.9	5.926
1 / 3	8192	13.24	13.15	0.999	3.1	0.568
			13.09	0.998	4.3	0.708
			13.03	0.996	6.0	0.947
			13.11	0.994	7.5	1.110
			12.95	0.992	8.7	1.300
			12.90	0.989	10.0	1.532
			12.65	0.975	16.0	2.223
			12.68	0.965	18.0	2.673
			12.32	0.957	20.0	2.787
			11.87	0.952	24.5	2.901
			12.24	0.871	32.0	4.456
			11.84	0.360	50.1	7.543
1 / 5	8192	13.24	13.18	0.997	4.7	0.852
			13.15	0.993	7.9	1.226
			13.02	0.988	10.7	1.610
			12.94	0.980	14.1	2.017
			12.58	0.961	19.6	2.774
			13.27	0.938	24.2	3.359
			11.56	0.925	29.4	3.482
			11.61	0.816	40.8	5.324
			11.59	0.213	62.6	8.876

表-4. 4. 3 (b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 2) (SCANごと平均)

サンプリング 方 法	サンプル 数	Z ₀ 平均値 [dBZ]	Z' 平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1 / 2	8192	34.58	34.80	0.999	0.8	0.241
			34.35	0.999	0.9	0.296
			34.79	0.999	0.9	0.281
			34.32	0.998	1.3	0.481
			34.31	0.997	1.5	0.560
			34.77	0.996	1.7	0.656
			34.27	0.992	2.2	0.892
			34.21	0.984	3.0	1.258
			34.26	0.982	3.2	1.353
			34.45	0.970	4.1	1.707
			34.94	0.951	5.6	2.130
			35.10	0.830	10.0	4.116
1 / 3	8191	34.59	35.02	0.998	1.5	0.455
			35.01	0.998	1.6	0.486
			34.99	0.997	1.8	0.583
			34.31	0.995	1.8	0.713
			34.98	0.994	2.2	0.787
			34.97	0.992	2.5	0.904
			34.13	0.972	4.0	1.678
			34.24	0.968	4.1	1.793
			34.04	0.960	4.9	2.023
			34.49	0.947	5.5	2.243
			34.96	0.887	8.3	3.331
			35.80	0.726	12.6	4.993
1 / 5	8191	34.59	34.33	0.998	1.2	0.430
			34.31	0.995	1.8	0.709
			34.30	0.991	2.4	0.973
			34.22	0.981	3.4	1.391
			34.10	0.961	4.8	2.003
			33.98	0.945	5.8	2.378
			33.66	0.911	7.2	3.000
			33.85	0.803	11.0	4.793
			36.06	0.613	16.4	5.927

表-4. 4. 4 (a) 降水強度の測定誤差 (降雨NO. 3)

サンプリング 方 法	サンプル 数	R _o 平均値 [mm/h]	R'平均値 [mm/h]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [mm/h]
1 / 2	7998	6.83	6.73	0.994	4.3	0.469
			6.70	0.987	6.7	0.688
			6.76	0.973	8.9	0.987
			6.63	0.949	13.3	1.394
			6.46	0.943	14.6	1.426
			6.25	0.853	21.4	2.295
			6.50	0.836	25.3	2.733
			4.96	0.752	41.0	3.273
1 / 3	7998	6.83	6.80	0.980	7.6	0.841
			6.72	0.953	12.0	1.311
			6.53	0.897	20.3	2.028
			6.19	0.871	22.1	2.206
			6.24	0.747	33.3	3.501
			4.81	0.574	54.5	4.646
1 / 5	7799	6.73	6.58	0.942	13.4	1.439
			6.42	0.847	22.7	2.444
			6.15	0.818	26.9	2.642
			5.96	0.694	34.3	3.605
			5.73	0.642	39.5	3.949
			5.05	0.426	65.3	5.923

表-4. 4. 4 (b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 3)

サンプリング 方 法	サンプル 数	Z _o 平均値 [dBZ]	Z'平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1 / 2	7991	32.48	32.16	0.986	2.6	0.758
			33.10	0.984	2.7	0.805
			31.55	0.983	3.3	0.899
			32.94	0.969	3.1	1.118
			32.84	0.968	3.0	1.119
			32.59	0.939	4.0	1.584
			32.47	0.890	5.4	2.275
			30.22	0.868	9.1	2.691
1 / 3	7992	32.48	31.60	0.985	3.1	0.841
			31.48	0.978	3.5	1.006
			31.24	0.954	4.8	1.471
			33.29	0.905	5.4	1.933
			32.98	0.797	7.5	3.103
			30.32	0.713	12.1	4.354
1 / 5	7989	32.49	31.46	0.977	3.7	1.040
			31.19	0.950	5.1	1.552
			30.91	0.916	6.3	2.023
			30.70	0.871	7.7	2.504
			34.23	0.626	11.8	4.217
			31.87	0.500	15.1	6.196

表-4.4.5(a) 降水強度の測定誤差(降雨NO.4) (SCANごと平均)

サンプリング 方 法		サンプル 数	R _o 平均値 (mm/h)	R'平均値 (mm/h)	相関係数	相対誤差 (%)	標準偏差 (mm/h)
1 / 2	1/2	8162	4.50	4.48	0.999	1.9	0.128
	2/4			4.52	0.999	2.0	0.132
	3/6			4.47	0.999	2.4	0.145
	5/10			4.51	0.999	3.2	0.178
	6/12			4.46	0.998	3.9	0.206
	9/18			4.45	0.997	5.5	0.270
	10/20			4.44	0.996	5.9	0.300
	15/30			4.53	0.992	7.9	0.407
	18/36			4.47	0.989	9.5	0.472
	30/60			4.42	0.977	14.0	0.666
	45/90			4.45	0.955	19.0	0.923
	90/180			4.34	0.904	28.8	1.335
1 / 3	1/3	8159	4.51	4.51	0.998	2.7	0.187
	2/6			4.51	0.998	3.2	0.199
	3/9			4.45	0.997	4.3	0.235
	4/12			4.44	0.996	5.4	0.280
	5/15			4.49	0.995	6.2	0.319
	6/18			4.42	0.994	7.5	0.366
	10/30			4.44	0.986	10.9	0.547
	12/36			4.49	0.978	12.9	0.647
	15/45			4.46	0.971	14.9	0.757
	20/60			4.51	0.958	18.4	0.906
	30/90			4.40	0.913	26.5	1.244
	60/180			4.49	0.786	42.4	1.963
1 / 5	1/5	8014	4.58	4.58	0.997	4.1	0.262
	2/10			4.58	0.995	5.5	0.324
	3/15			4.56	0.992	7.6	0.407
	4/20			4.53	0.988	9.5	0.498
	6/30			4.49	0.978	13.4	0.673
	9/45			4.43	0.958	18.1	0.924
	12/60			4.40	0.936	22.8	1.112
	18/90			4.32	0.869	33.2	1.529
	36/180			4.44	0.628	56.0	2.572

表-4.4.5 (b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 4) (SCANごと平均)

サンプリング 方 法		サンプル 数	Z ₀ 平均値 [dBZ]	Z'平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1 / 2	1/2	8098	28.47	28.70	1.000	1.0	0.253
	2/4			28.23	0.999	1.1	0.281
	3/6			28.69	1.000	1.0	0.252
	5/10			28.22	0.999	1.4	0.357
	6/12			28.67	0.999	1.2	0.314
	9/18			28.66	0.999	1.4	0.409
	10/20			28.65	0.999	1.5	0.433
	15/30			28.64	0.996	2.4	0.719
	18/36			29.08	0.996	2.3	0.710
	30/60			29.03	0.992	3.4	1.034
	45/90			28.68	0.973	6.0	1.800
	90/180			28.43	0.923	9.7	3.120
1 / 3	1/3	8082	28.51	28.26	0.999	1.2	0.305
	2/6			28.25	0.999	1.3	0.341
	3/9			28.94	0.998	2.0	0.483
	4/12			28.92	0.998	2.1	0.519
	5/15			28.22	0.998	2.0	0.555
	6/18			28.90	0.997	2.4	0.619
	10/30			28.15	0.993	3.1	0.941
	12/36			29.50	0.993	3.2	0.976
	15/45			29.44	0.988	3.8	1.252
	20/60			28.79	0.980	5.0	1.533
	30/90			28.80	0.949	7.9	2.371
	60/180			29.12	0.825	14.0	4.474
1 / 5	1/5	7844	28.93	28.68	0.999	1.4	0.379
	2/10			28.68	0.998	1.7	0.492
	3/15			28.66	0.997	2.2	0.642
	4/20			28.62	0.995	2.7	0.791
	6/30			28.55	0.990	3.6	1.125
	9/45			28.48	0.979	5.0	1.599
	12/60			28.44	0.970	6.1	1.927
	18/90			28.73	0.927	9.4	2.807
	36/180			29.53	0.713	17.9	5.420

表-4. 4. 6 (a) 降水強度の測定誤差 (降雨NO. 5)

サンプリング 方 法		サンプル 数	R _o 平均値 [mm/h]	R'平均値 [mm/h]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [mm/h]
1 / 2	1/2	2592	0.88	0.88	0.999	1.7	0.018
	2/4			0.88	0.998	1.9	0.022
	3/6			0.89	0.997	2.5	0.029
	5/10			0.89	0.991	4.3	0.050
	6/12			0.89	0.985	5.5	0.064
	10/20			0.89	0.945	11.9	0.123
	15/30			0.91	0.882	20.1	0.201
	30/60			0.96	0.689	31.2	0.305
1 / 3	1/3	2541	0.89	0.89	0.997	2.5	0.028
	2/6			0.90	0.994	3.4	0.040
	4/12			0.91	0.973	7.3	0.085
	5/15			0.90	0.954	10.6	0.109
	10/30			0.92	0.837	22.5	0.241
	20/60			0.99	0.455	42.1	0.468
				1 / 5	1/5	2563	0.89
2/10	0.90	0.976	6.9		0.081		
3/15	0.90	0.934	12.8		0.133		
4/20	0.91	0.866	18.6		0.191		
6/30	0.91	0.800	24.3		0.268		
12/60	0.98	0.396	46.2		0.540		

表-4. 4. 6 (b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 5)

サンプリング 方 法		サンプル 数	Z ₀ 平均値 [dBZ]	Z'平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1 / 2	1/2	2592	29.27	29.29	0.999	0.4	0.139
	2/4			29.31	0.999	0.5	0.175
	3/6			29.35	0.998	0.7	0.245
	5/10			29.41	0.994	1.3	0.442
	6/12			29.40	0.991	1.5	0.529
	10/20			29.49	0.963	3.1	1.071
	15/30			29.66	0.899	5.8	1.908
	30/60			30.06	0.635	10.5	3.355
1 / 3	1/3	2592	29.27	29.32	0.998	0.6	0.218
	2/6			29.37	0.996	1.0	0.329
	4/12			29.46	0.984	2.0	0.685
	5/15			29.49	0.966	3.1	0.994
	10/30			29.79	0.863	6.4	2.194
	20/60			30.31	0.509	13.3	4.657
	1 / 5			1/5	2592	29.27	29.36
2/10		29.48	0.983	2.1			0.703
3/15		29.52	0.952	3.6			1.187
4/20		29.66	0.905	5.1			1.673
6/30		29.89	0.823	7.0			2.420
12/60		30.50	0.517	13.9			4.936

表-4.4.7(a) 降水強度の測定誤差 (降雨NO. 6)

サンプリング 方 法	サンプル 数	R _o 平均値 [mm/h]	R'平均値 [mm/h]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [mm/h]
1/2	2000	1.15	1.18	0.995	2.9	0.032
			1.14	0.986	3.9	0.053
			1.18	0.979	4.8	0.067
			1.14	0.953	6.9	0.100
			1.20	0.943	9.3	0.110
			1.14	0.848	13.2	0.172
			1.10	0.779	24.2	0.299
			1.23	0.761	15.9	0.232
			1.11	0.981	5.2	0.062
1/3	4650	0.93	1.18	0.962	6.4	0.091
			1.20	0.907	11.1	0.144
			1.19	0.844	13.8	0.195
			1.22	0.602	36.0	0.457
			1.18	0.722	29.2	0.394
			1.21	0.949	7.2	0.105
			1.10	0.874	11.9	0.166
1/5	1874	1.18	1.21	0.774	15.6	0.228
			1.11	0.653	18.6	0.258
			1.39	0.391	45.3	0.553
			1.31	0.703	33.9	0.410

表-4.4.7(b) 反射因子の測定誤差 (降雨NO. 6)

サンプリング 方 法	サンプル 数	Z _o 平均値 [dBZ]	Z'平均値 [dBZ]	相関係数	相対誤差 [%]	標準偏差 [dBZ]
1/2	2000	32.38	30.98	0.998	4.4	0.189
			33.87	0.992	4.6	0.384
			31.02	0.990	4.3	0.437
			33.94	0.970	4.9	0.764
			31.20	0.961	3.9	0.833
			34.28	0.889	6.7	1.661
			30.10	0.724	10.8	3.233
			35.42	0.713	10.0	2.497
			35.33	0.991	9.2	0.418
1/3	2000	32.38	31.05	0.981	4.2	0.602
			31.22	0.935	4.1	1.098
			31.18	0.910	4.9	1.361
			31.40	0.517	13.2	4.692
			31.29	0.632	12.8	4.438
			31.10	0.977	4.0	0.665
			38.38	0.932	18.7	1.195
1/5	2000	32.38	31.18	0.874	5.3	1.633
			38.97	0.723	20.7	2.602
			32.72	0.394	14.6	5.225
			31.85	0.617	14.6	5.391

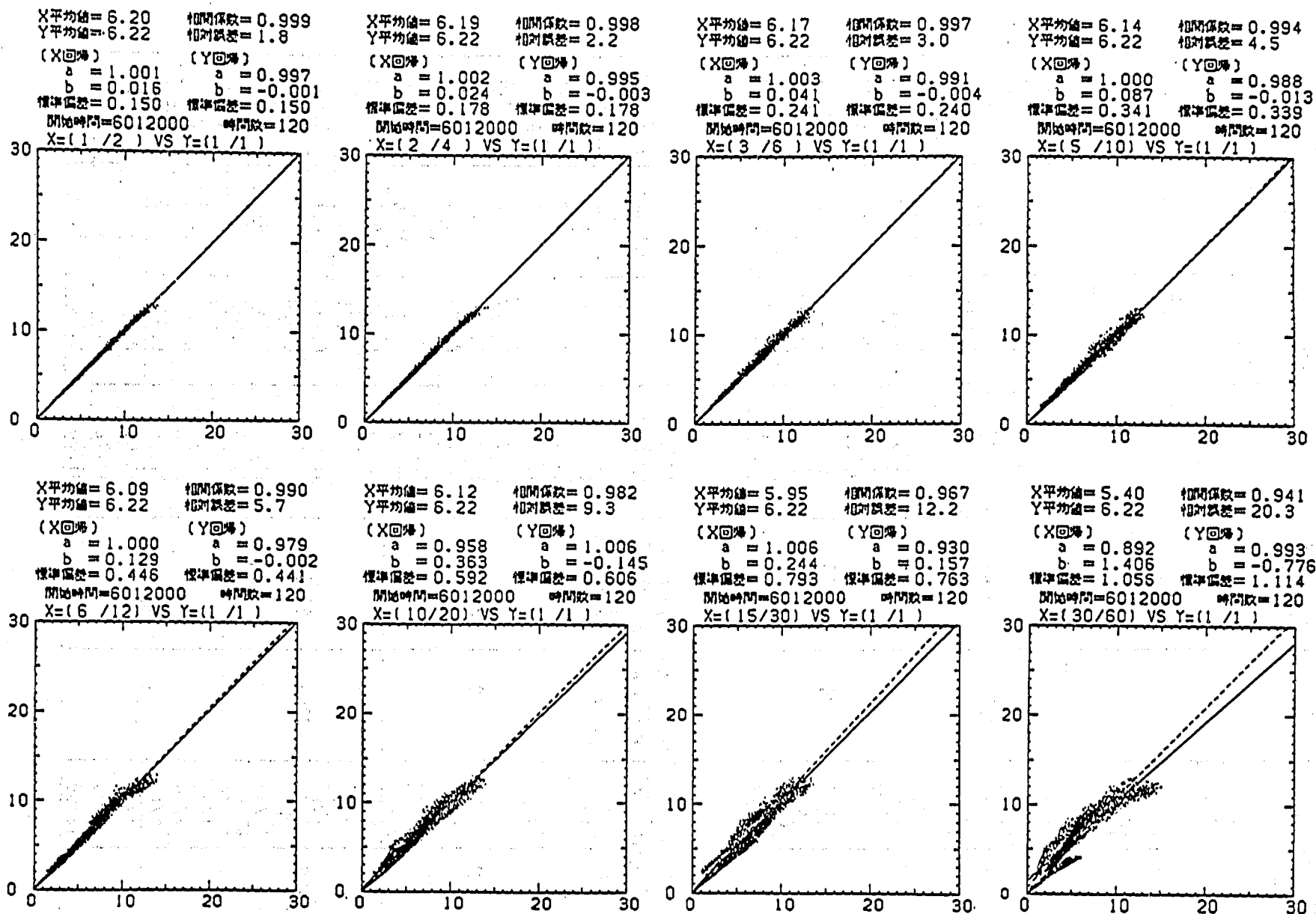


図-4.4.2 (a) 降水強度 R による比較

(データ収集総時間1/2, 降雨NO. 1)

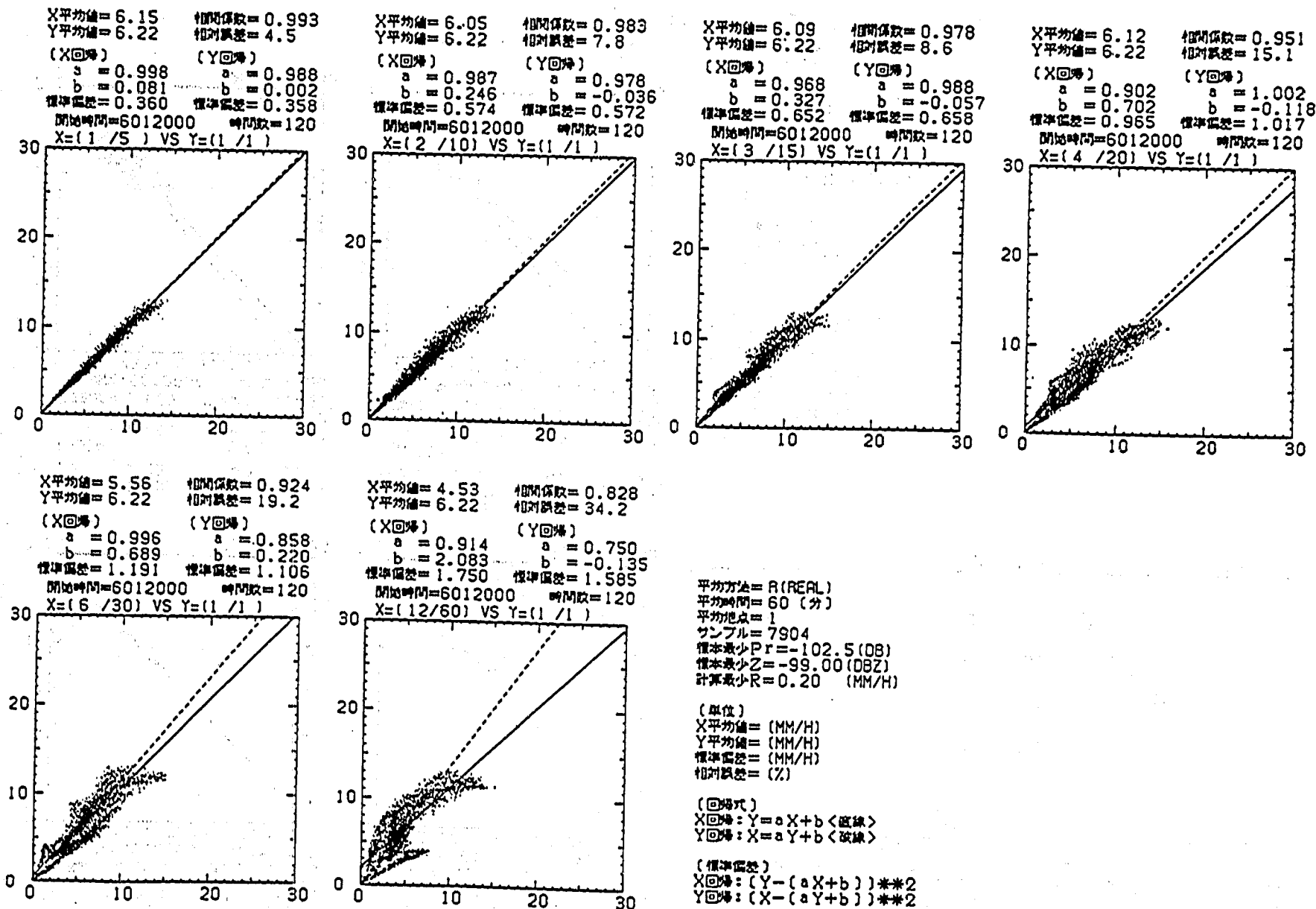


図-4.4.2(c) 降水強度Rによる比較

(データ収集総時間1/5, 降雨NO. 1)

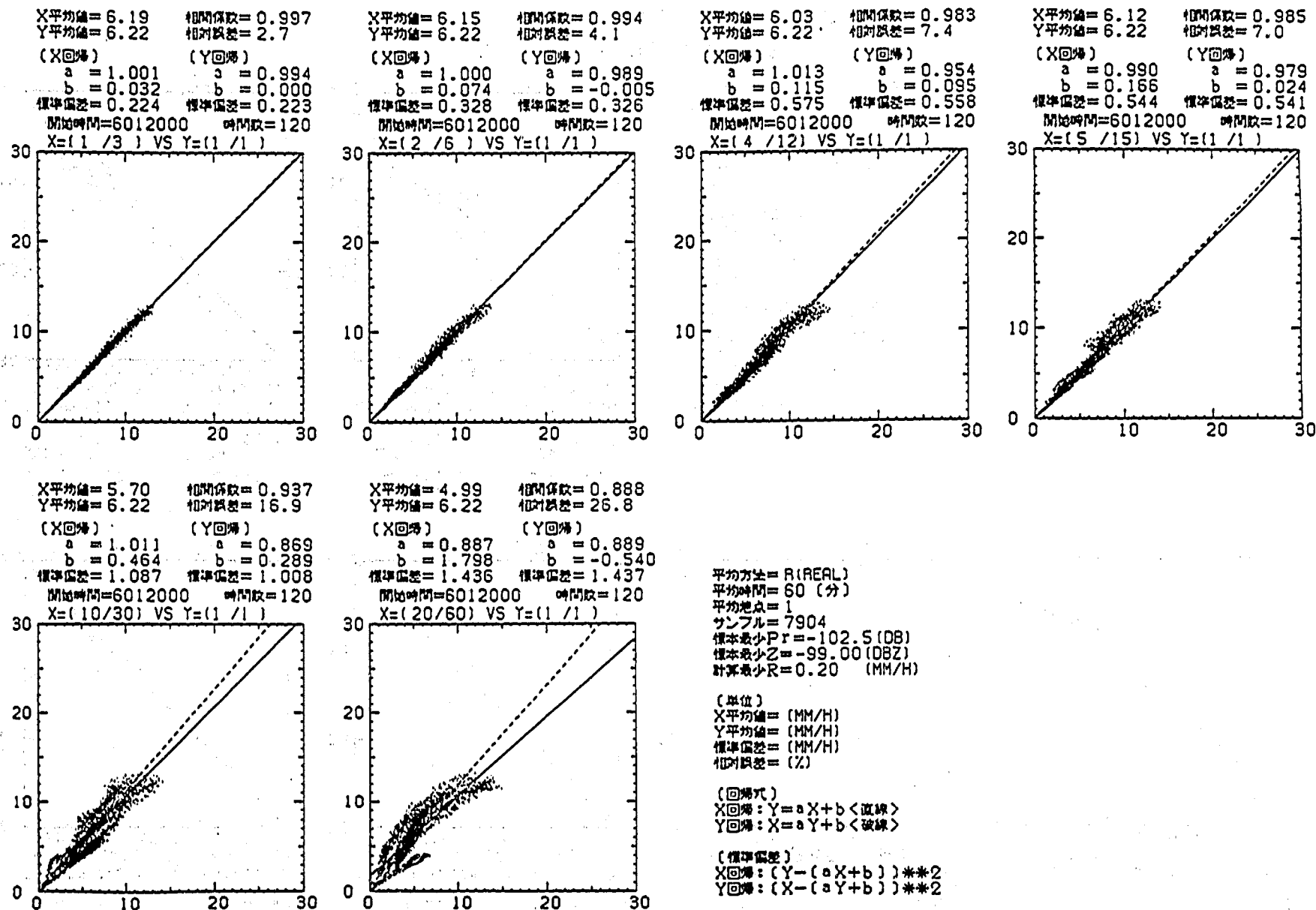


図-4.4.2 (b) 降水強度Rによる比較

(データ収集総時間1/3, 降雨NO. 1)

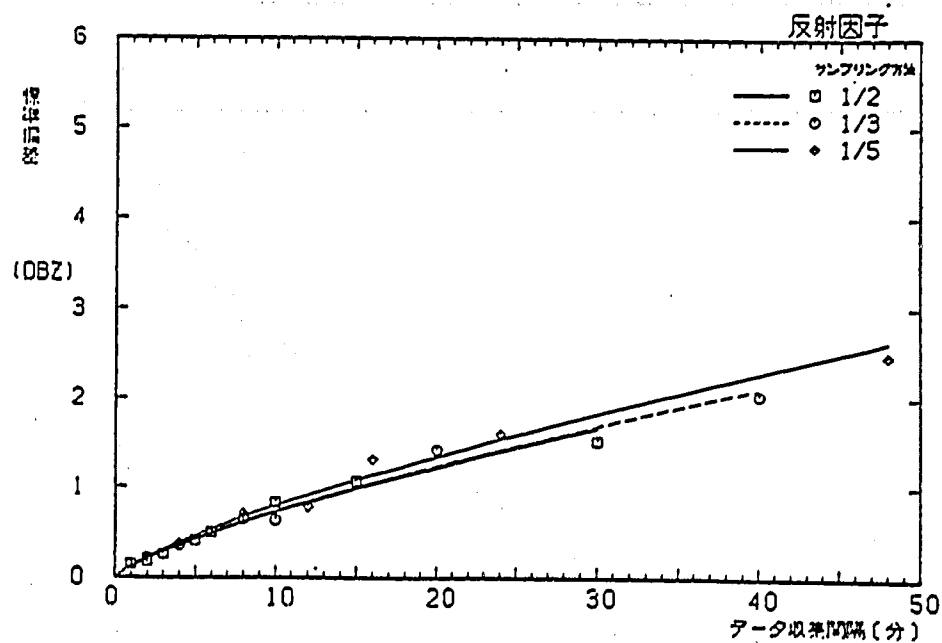
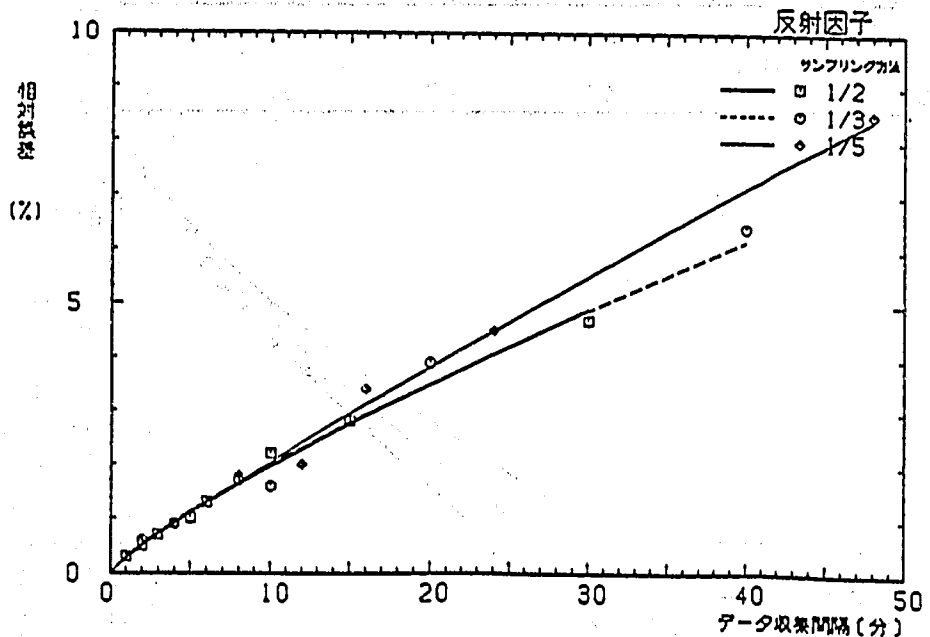
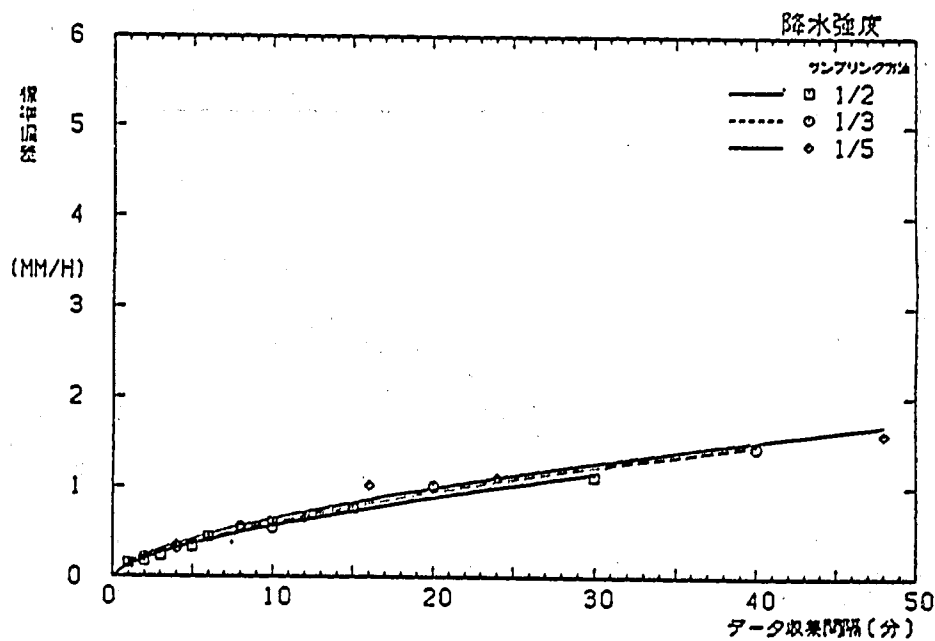
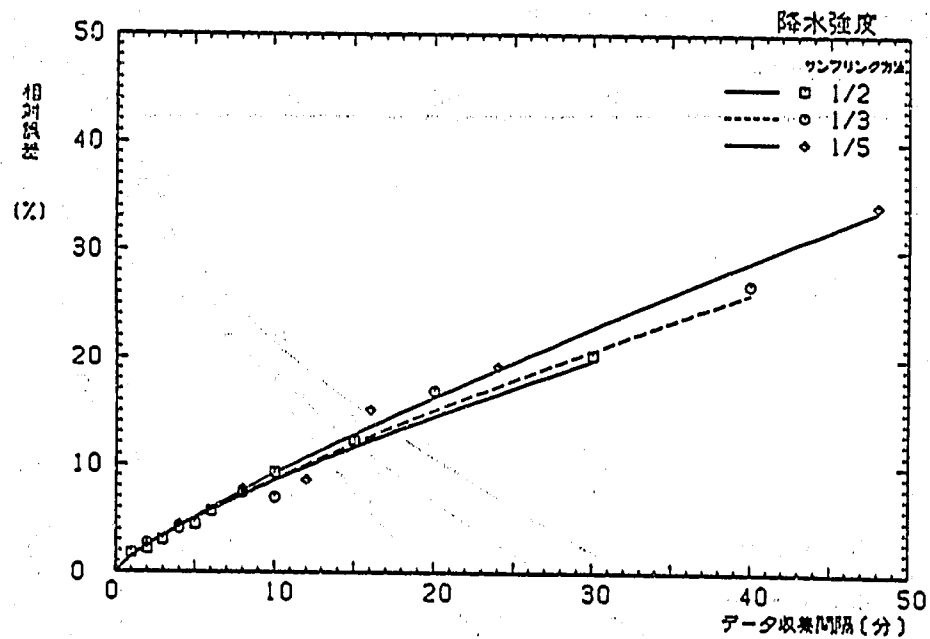


図--4.4.3 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨 NO. 1)

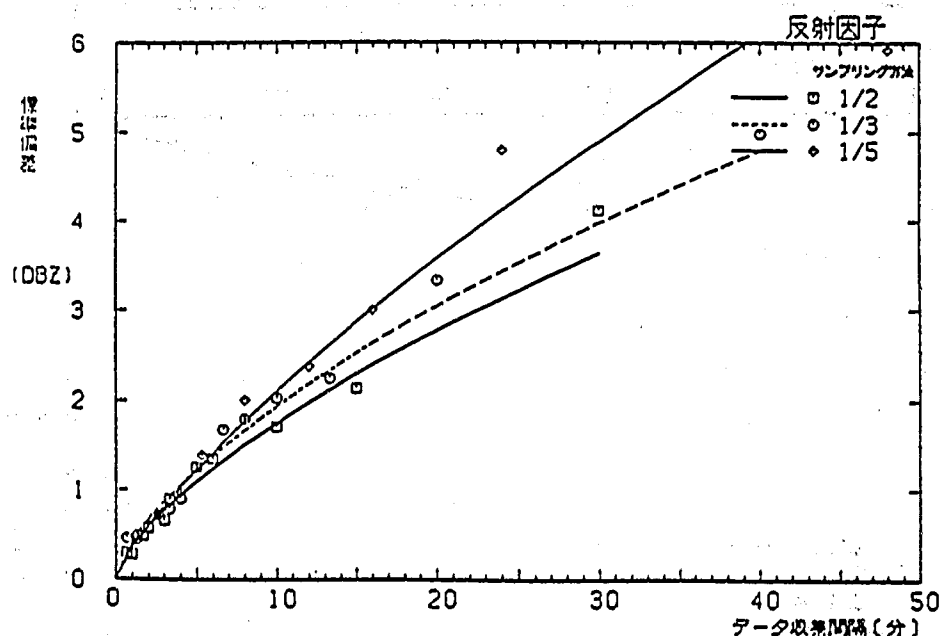
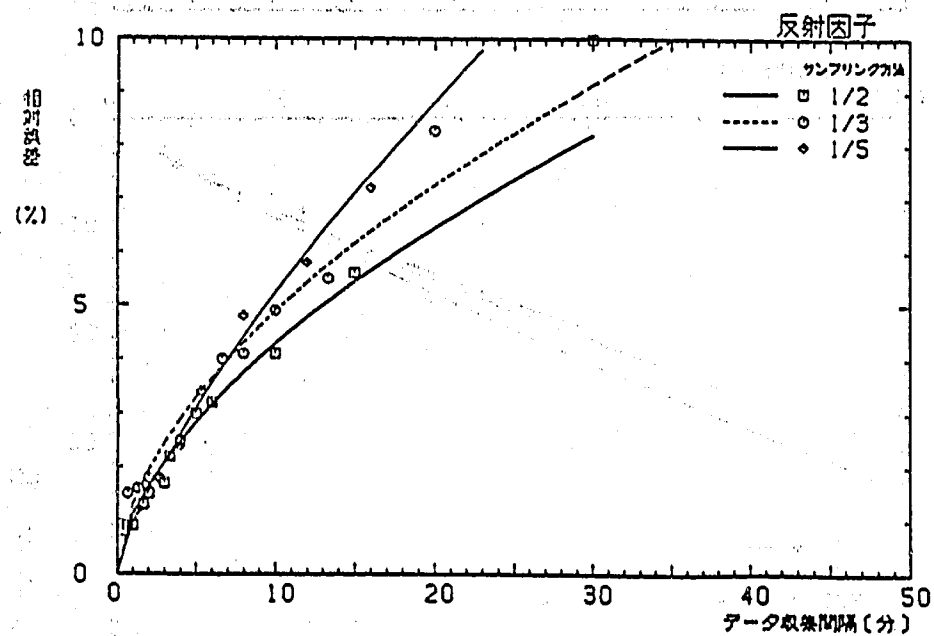
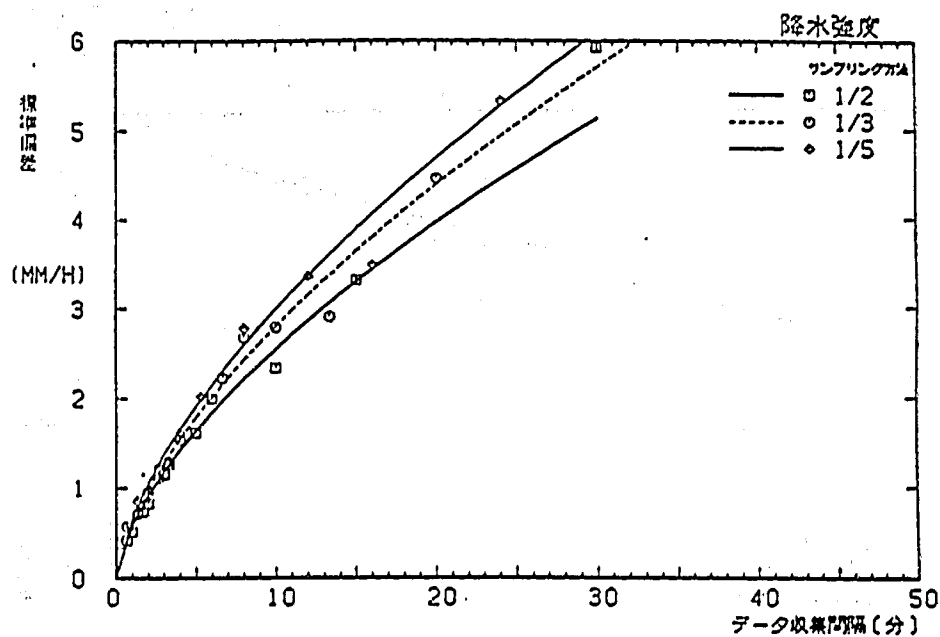
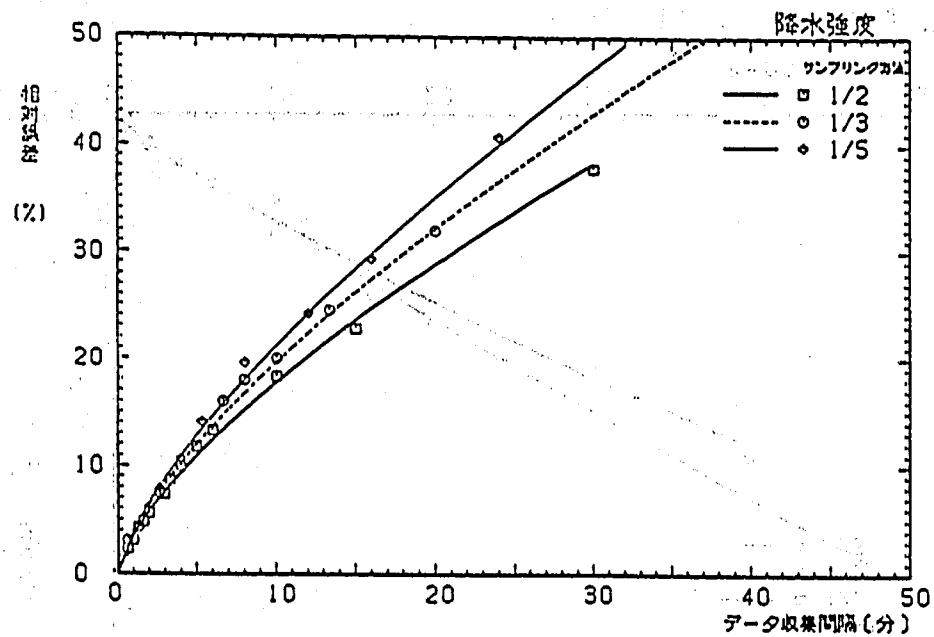


図-4.4.4 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨NO. 2)

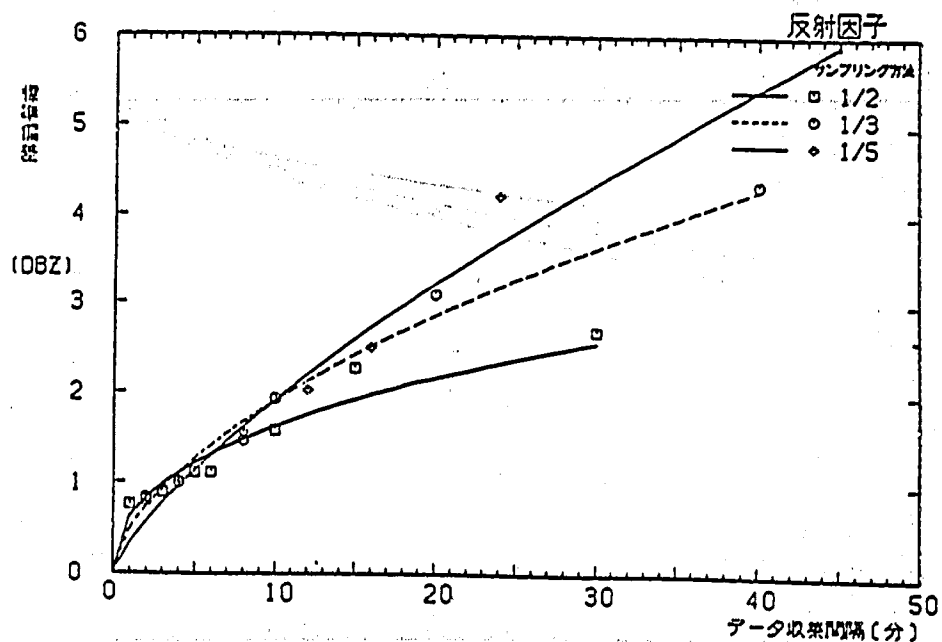
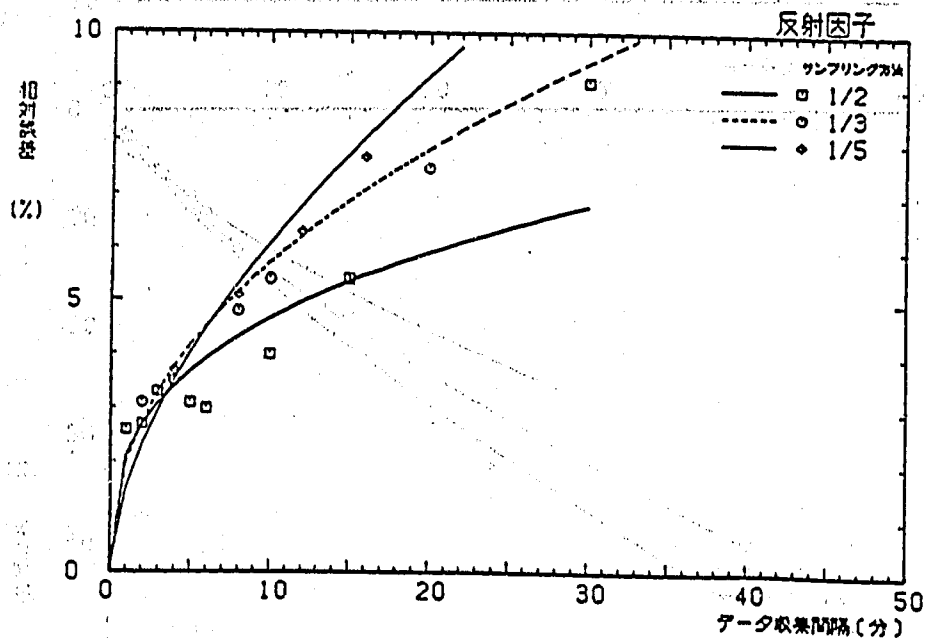
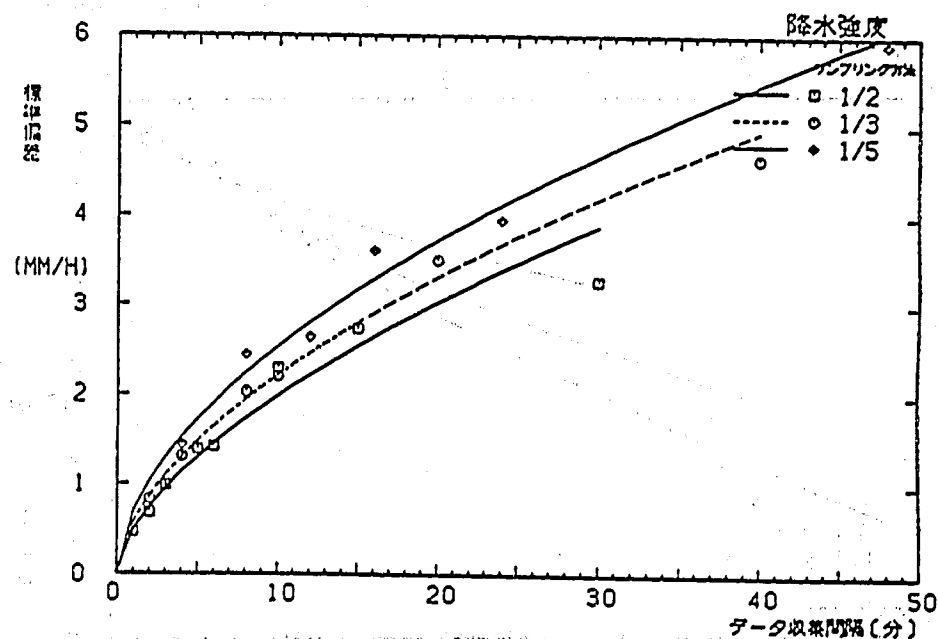
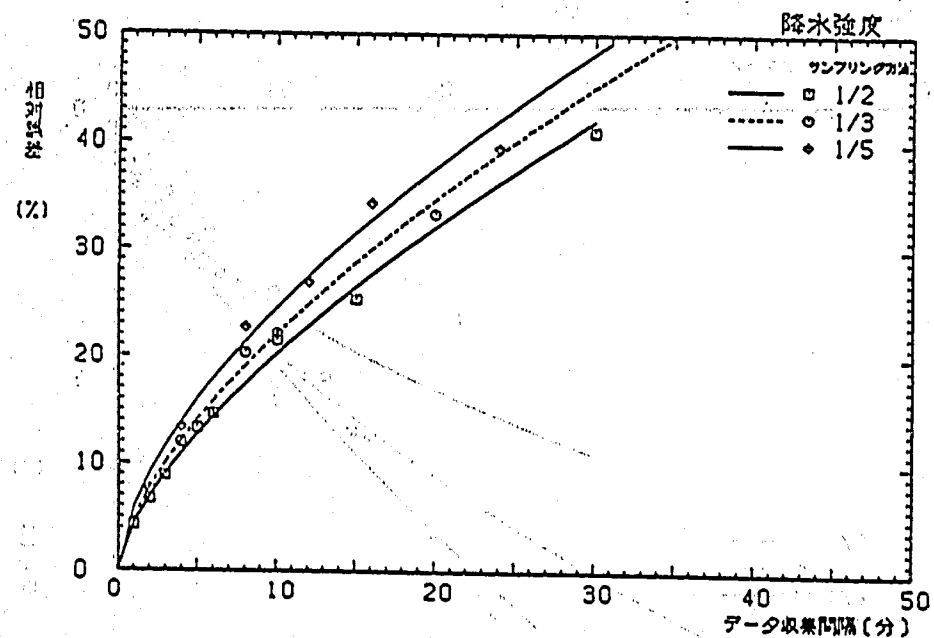


図-4.4.5 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨NO. 3)

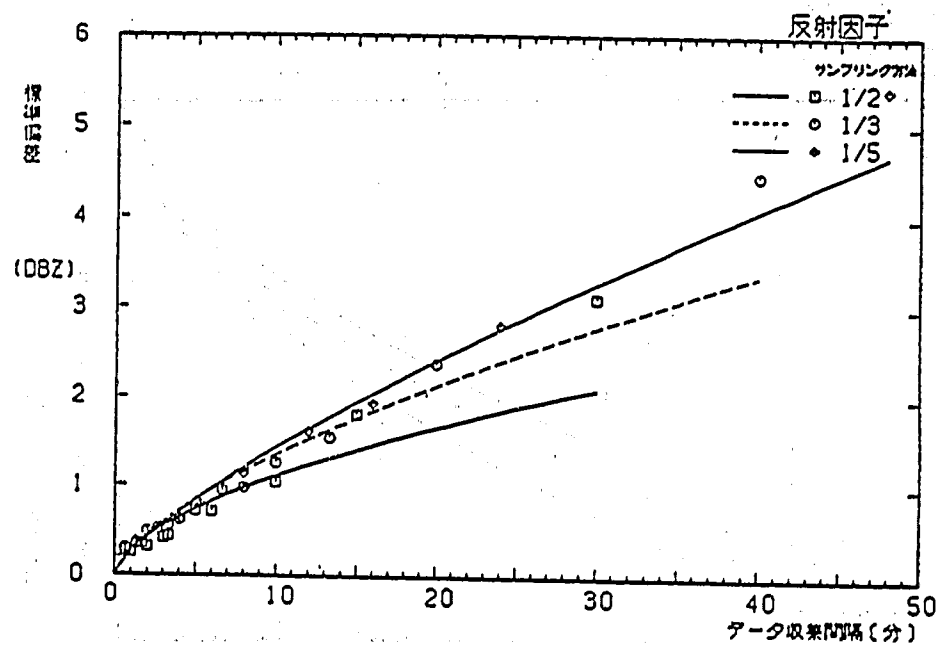
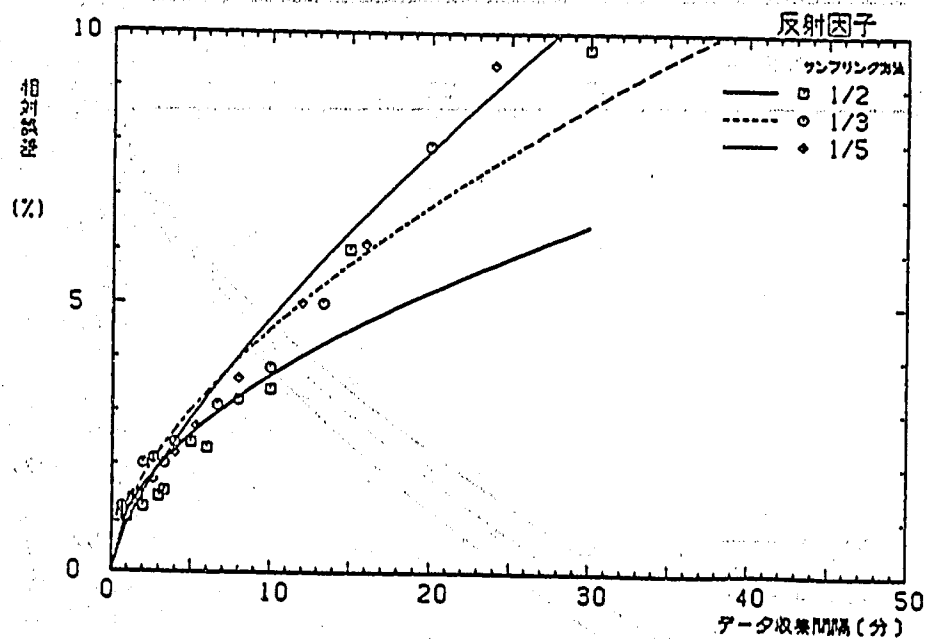
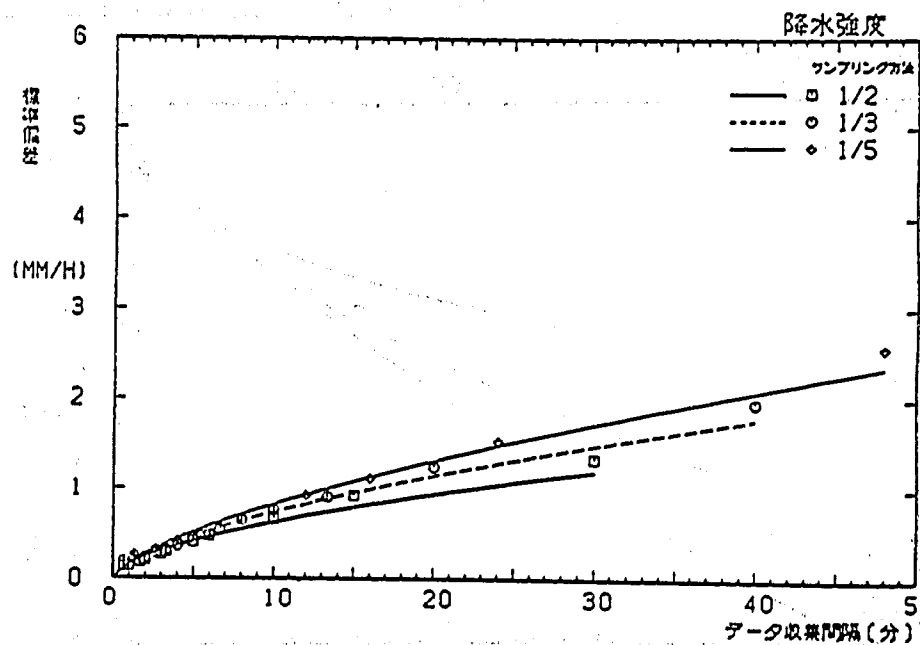
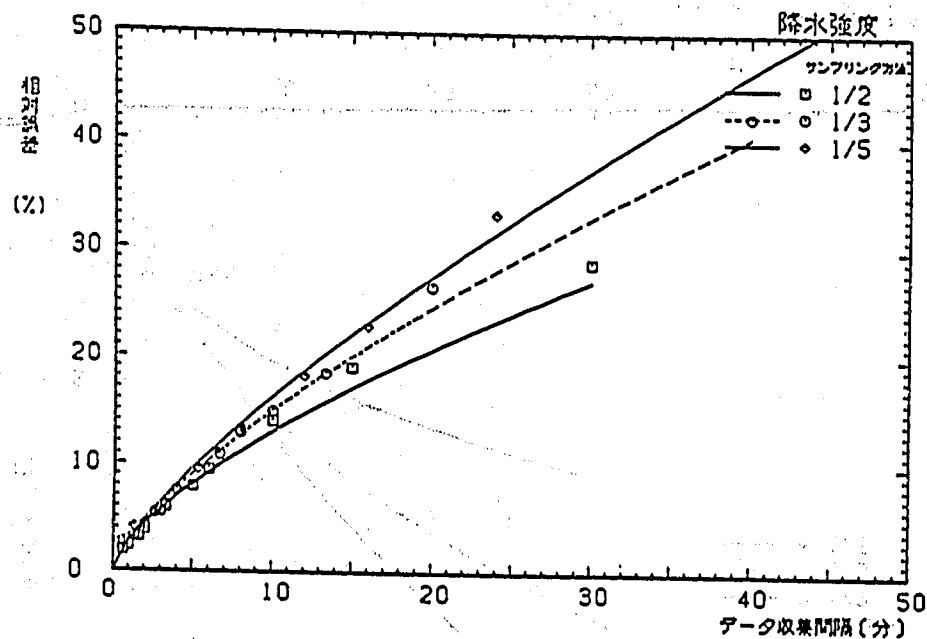


図-4.4.6 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨NO. 4)

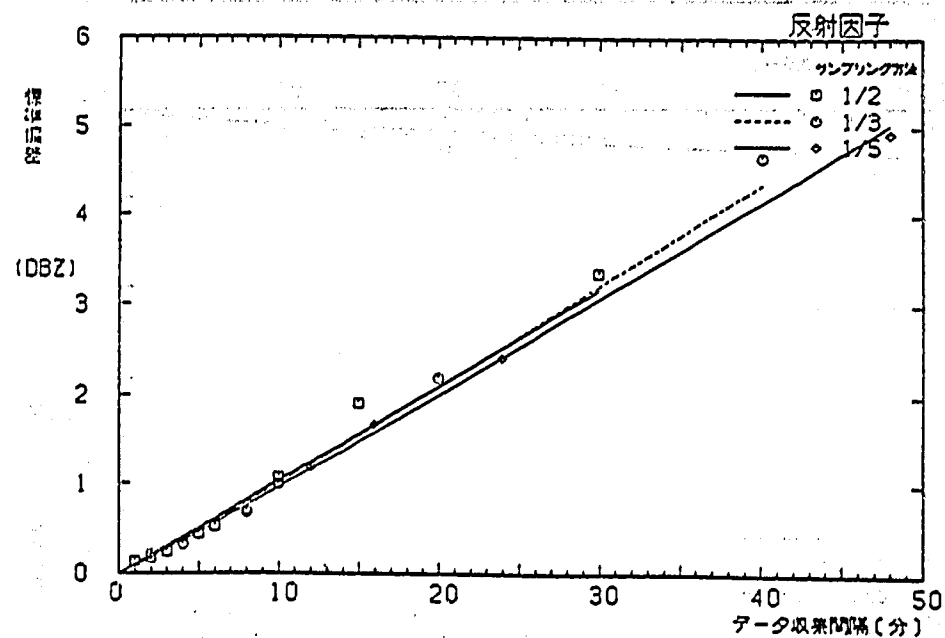
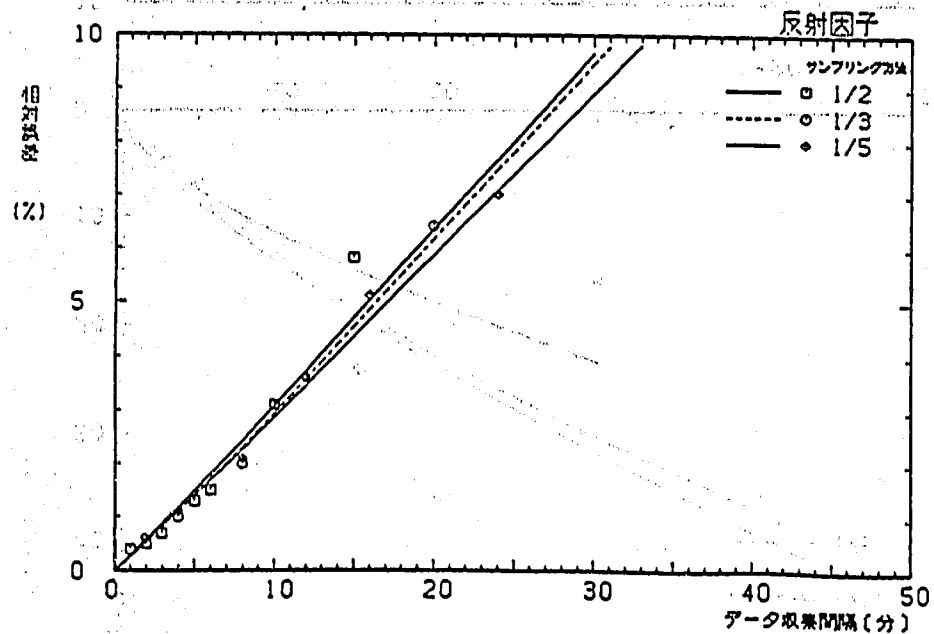
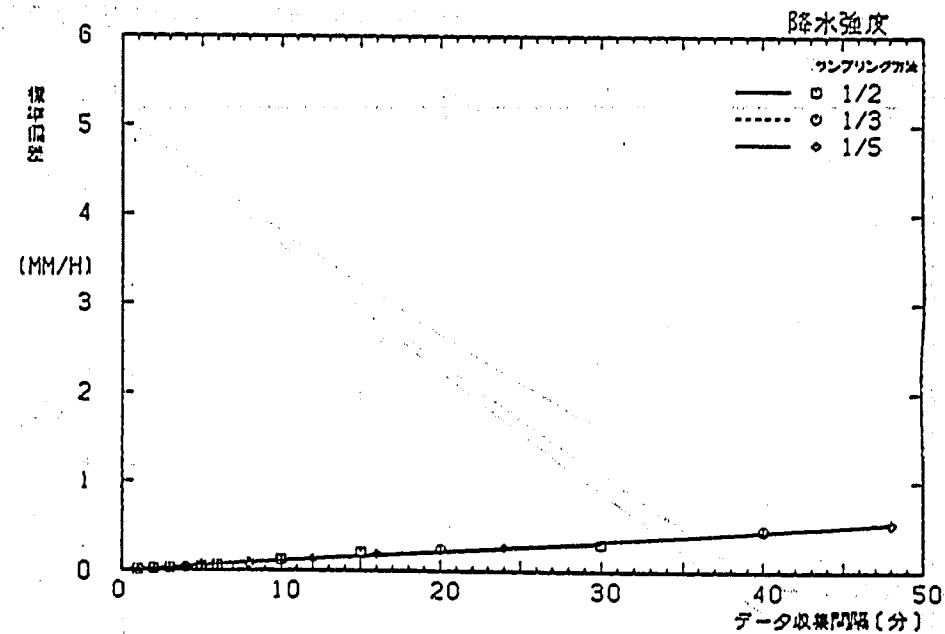
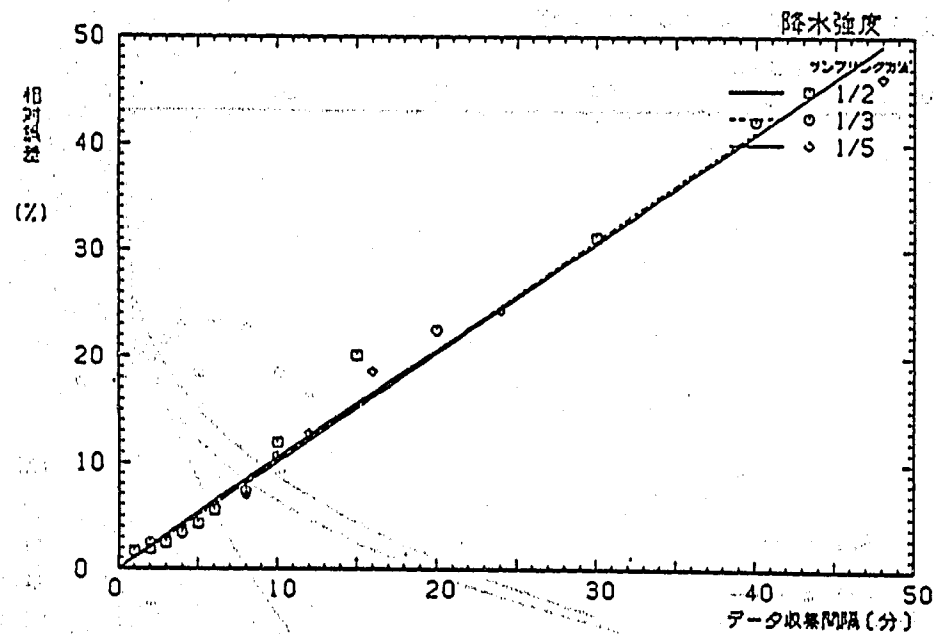


図-4.4.7 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨 NO. 5)

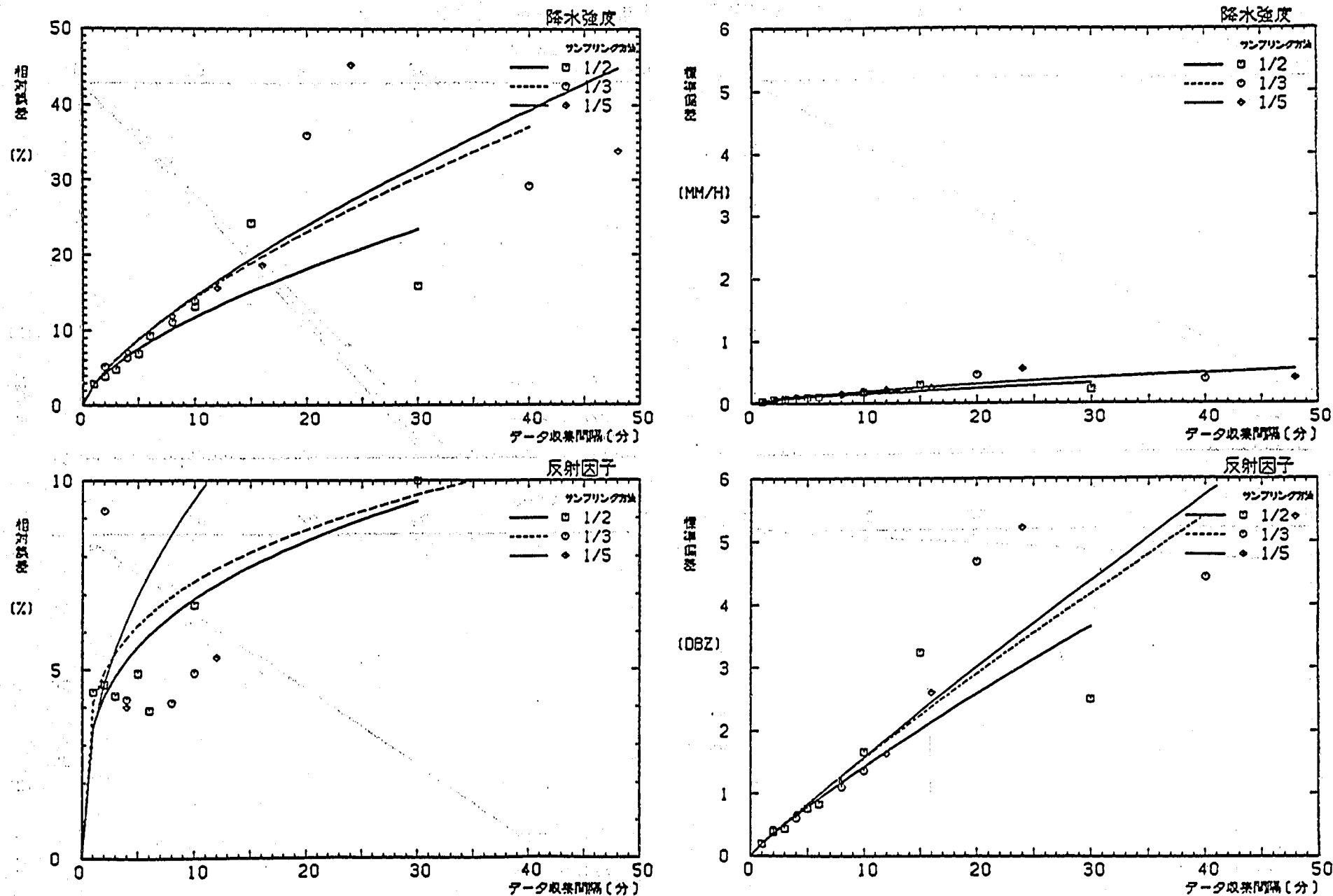


図-4.4.8 データ収集間隔と測定誤差の関係 (降雨NO. 6)

4.5 まとめ

第4章では、雨滴の粒径分布の検討及び地上データ対比させた場合の Z_{DR} 法による降水強度の測定精度の評価を行った。また、ドップラデータを用いた場合の粒径分布の推定方法及びレーダ反射電力のサンプリング間隔についての検討を行った。これらの結果をまとめると次のようになる。

- ①雨滴の粒径分布形状は、粒径分布式の m を2とすると平均的にみて実測値と良く適合する。しかし、最適な m の値は降水強度ごとにことなり、降水強度が大きい場合は、 $m = 4, 5$ 程度が良い。また、雨滴の最大粒径 D_{max} は、降水強度が 5mm/h 以上で $D_{max} \geq 5\text{mm}$ となることがわかった。
- ②ディストロメーターの測定結果を用いてDNDレーダ（二重偏波モード）の性能評価を行うと、 $Z_{H,U}$ 、 Z_{DR} とも比較的精度良く観測されていることがわかった。
- ③二重偏波モードでの観測データから雨滴の粒径分布を求め、ディストロメーターによる測定結果と比較すると、両者の値はほぼ対応がとれていたが、地上の観測で粒径の細かい雨滴が多かったケースでは、両者の誤差が大きかった。
- ④ Z_{DR} 法による降水強度の測定精度については、 Z_H 、 V の微妙な観測誤差に大きく影響されるケースがあるため、全観測期間で観測精度が良くはならなかったが、平均的には $B\beta$ 法と同程度の精度であった。
- ⑤ドップラデータを用いた雨滴の粒径分布の推定では、観測されたドップラ速度分散の値によっては、雨滴の粒径分布が求まらない場合があるが、 $D_{max} 5\text{mm}$ 以上では、ある程度地上値と対応がとれることがわかった。
- ⑥レーダ反射電力のサンプリング間隔の検討では、データ収集間隔と測定誤差の間に比例関係があり、データ総収集時間は測定誤差に影響しないことが確認できた。また、1分間平均データとSCANごとのデータとでは、その測定誤差に大きな差がないことがわかった。

第5章 結 論

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））と共同で開発した二重偏波・ドップラレーダ（DNDレーダ）の構造及びその性能、並びにDNDレーダによる降雨観測・降雪観測の方法及び精度の検討結果について述べたものである。その主な研究内容は、昭和63年度に「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）」として成果報告がなされているが、今回の報告はその結果を踏まえて、降雪観測については電波減衰や雪片の移流の影響を加味した観測方法について検討し、また、降雪予測の可能性についても調べ、降雨観測については、主に雨滴の粒径分布や Z_{DR} 法による降水強度の測定精度について検討した。これらから得られた結果は、次のとおりである。

- ①雪による電波減衰は、降雨の場合と比較して、同程度～10倍程度の減衰が見込まれ、含水率が高い雪ほど大きな減衰がある。
- ②レーダによる降雪観測において、雪片の移流の影響を考慮することにより、観測精度が向上することがわかった。
- ③降雪予測では、予測時間1時間以下では、比較的精度が良く実用的であったが、山地部におけるエコーの停滞等、地形の影響を考慮して精度の向上を図る必要がある。また、2枚のエコー図から求めた移動ベクトルとDNDレーダのドップラ観測から求めた上層風は良く対応しており、今後は、ドップラ風を利用した降雪予測の方法についての検討が必要である。
- ④ディストロメーターによる測定結果を用いて、雨滴の分布形状について調べてみると、雨滴の粒径分布式（ $N(D) = N_0 D^m \exp(-\Lambda D)$ ）の m の値を2にすると全般的にはうまく分布形状を表現できるが、降水強度が大きくなると、 $m = 4, 5$ 程度が良いことがわかった。
- ⑤DNDレーダの二重偏波モードでの観測値を用いて雨滴の粒径分布を求めてみると、ディストロメーターを用いた地上での観測結果とほぼ対応していたが、粒径が小さい雨滴が多い降雨では、精度が悪くなっていた。これは、今後も検討が必要である。
- ⑥ Z_{DR} 法による降水強度の観測精度は、平均的には $B\beta$ 法と同程度の精度であった。これは、レーダ反射因子から降水強度を求める時の種々の誤差（ $Z_{H,0}$ そのものの誤差、粒径分布式推定の誤差等）が考えられ、更にデータを増やして、精度を向上させるための最適な降水観測手法の検討が必要である。

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)

ISSN 0386-5878
土研資料 第2757号
平成元年3月 (1989)

吉野文雄、石井典夫、水野秀幸、井川貴史、水野雅光、中野 悟、丸山吉孝
岡川道裕、吉田武弘、長屋勝博、長田正樹、萩原護也、浜津享助、大木健一

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入手する必要がある。この情報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つである二重偏波・ドップラレーダがある。土本研究所では、阪東芝、日本無線㈱、三菱電機㈱の3社と共同して、二重偏波・ドップラレーダ(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、昨年(1997)の第1報の成果を踏まえ、DNDレーダの改良後の仕様を報告するとともに、降雨及び降雪観測方法及び観測精度について検討した結果について紹介する。

キーワード：レーダ、降雨観測、降雪観測、二重偏波、ドップラ

郵便はがき

郵便切手をはって下さい

3 0 5 -

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 行

No. _____

No.

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第2757号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印