

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1報)

昭和63年3月

建設省土木研究所
河川部水文研究室

Copyright © (1988) 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1報)

建設省土木研究所水文研究室	室長	吉野 文雄
〃	研 究 員	水野 雅光
〃		水野 秀幸
〃		井川 貴史
〃	部外研究員	五十嵐久敬
(株)東芝・小向工場		畑 浩靖
〃		中野 悟
〃		丸山 吉孝
日本無線(株)・三鷹製作所		吉田 武弘
〃		長屋 勝博
〃		長田 正嗣
三菱電機(株)・通信機製作所		山本 悌三
〃		萩原 護也
〃		浜津 享助

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、広域的でかつ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することにより、より精度の良い降水量の観測が可能なレーダの一つとして二重偏波・ドップラレーダ(DNDレーダと称する)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、DNDレーダを試作し、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。本報告書において、DNDレーダの性能を仕様から評価した結果を報告するとともに、DNDレーダによる降雨及び降雪の現地観測を行い、DNDレーダによる降雨及び降雪の観測方法、データ処理方法及び観測精度について検討した結果を紹介する。

キーワード：レーダ、降雨観測、降雪観測、二重偏波、ドップラ

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)

〔まえがき〕

本報告書は土木研究所が降雪観測用レーダ研究会(会員：(株)東芝、日本無線(株)、三菱電機(株))と実施中の共同研究課題「降雪観測用レーダの開発研究」による研究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査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法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飛躍的向上があり、またデータ通信技術も発展したため、1975年にレーダ雨量計の実用一号機を導入できるまでに至った。

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

しかしながら現在のレーダシステムでは以下のような問題点も指摘できる。現在のレーダによる降水量の観測方法では、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者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が、現在までに進められた研究結果を取りまとめて本報告書を作製した。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。記して感謝の意を評したい。

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。建設省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及び筑後川工事事務所の関係者に厚く感謝の意を表したい。

昭和 63 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 DND レーダ (二重偏波・ドップラレーダ) の製作	11
2.1 DND レーダの仕様とその決定の経緯	11
2.2 空中線部の構造とその性能	17
2.3 送受信部の構造とその性能	32
2.4 信号処理部の構造とその性能	49
2.5 偏波切替器の構造とその性能	72
2.6 データ収録部の構造とその性能	75
2.7 データ表示部の構造とその性能	82
2.8 二重偏波モードの性能評価	91
2.9 ドップラモードの性能評価	95
2.10 富山での設置工事について	103
2.11 ま と め	114
第3章 DND レーダによる降雪観測	115
3.1 降雪観測における反射電力のサンプリング時間	115
3.2 DND レーダ及び宝達山レーダによる降雪観測	123
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	143
3.4 降雪粒子の特性観測	154
3.5 レーダによる降雪観測のための基礎調査	158
3.6 ま と め	160
第4章 DND レーダによる降雨観測	161
4.1 降雨観測事例	161
4.2 DNDレーダの校正	168
4.3 Z_{DR} の算出方法と測定精度	173
4.4 降雨観測における反射電力のサンプリング時間	189
4.5 Z_{DR} による降水強度の測定精度	206
4.6 ドップラモードの観測精度	250
4.7 ま と め	258
第5章 結 論	259

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。

本報告書において、DNDレーダの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、(株)東芝、日本無線(株)、三菱電機(株)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雪観測を行い、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61～64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

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、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 ～ 65 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 ～ 65 年度は建設省筑後川ダム統合管理事務所（福岡県久留米市）をレーダサイトとし、半径 40 km 以内の地域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 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。

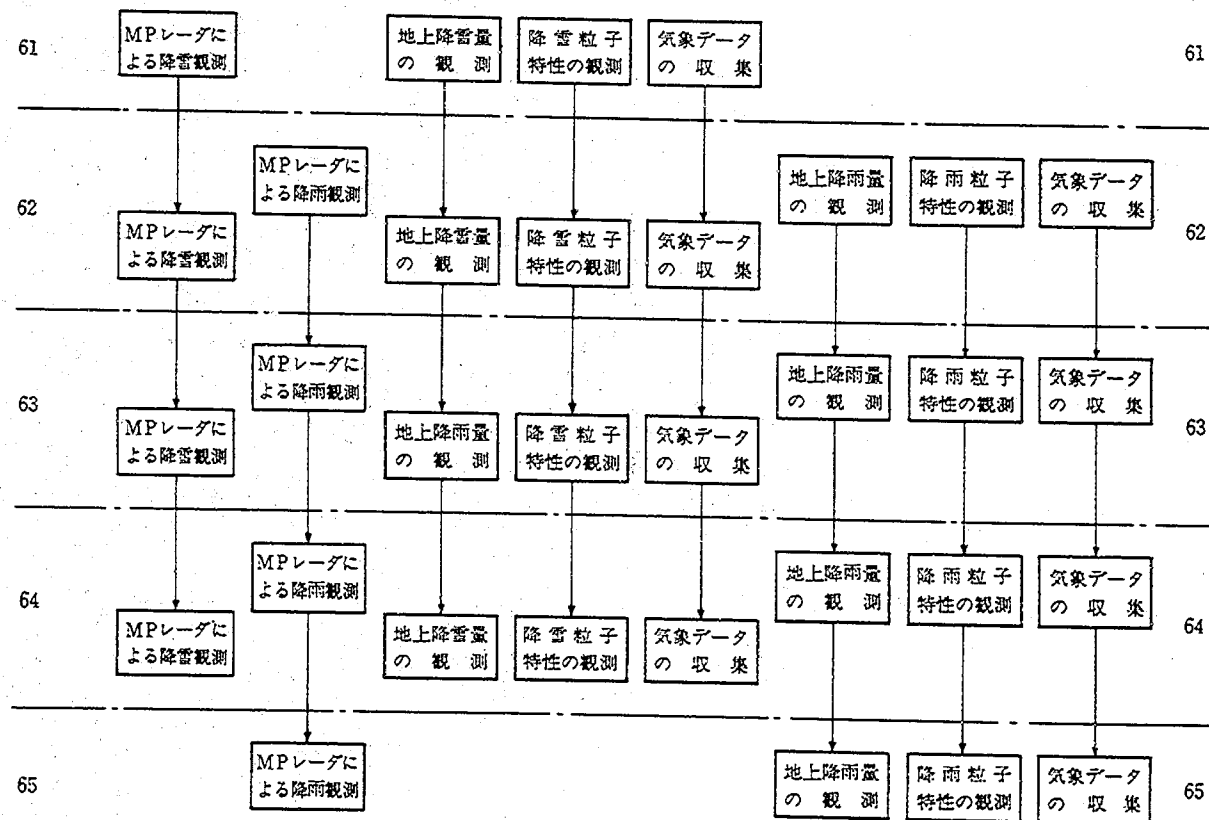


図-1.2.1 観測計画

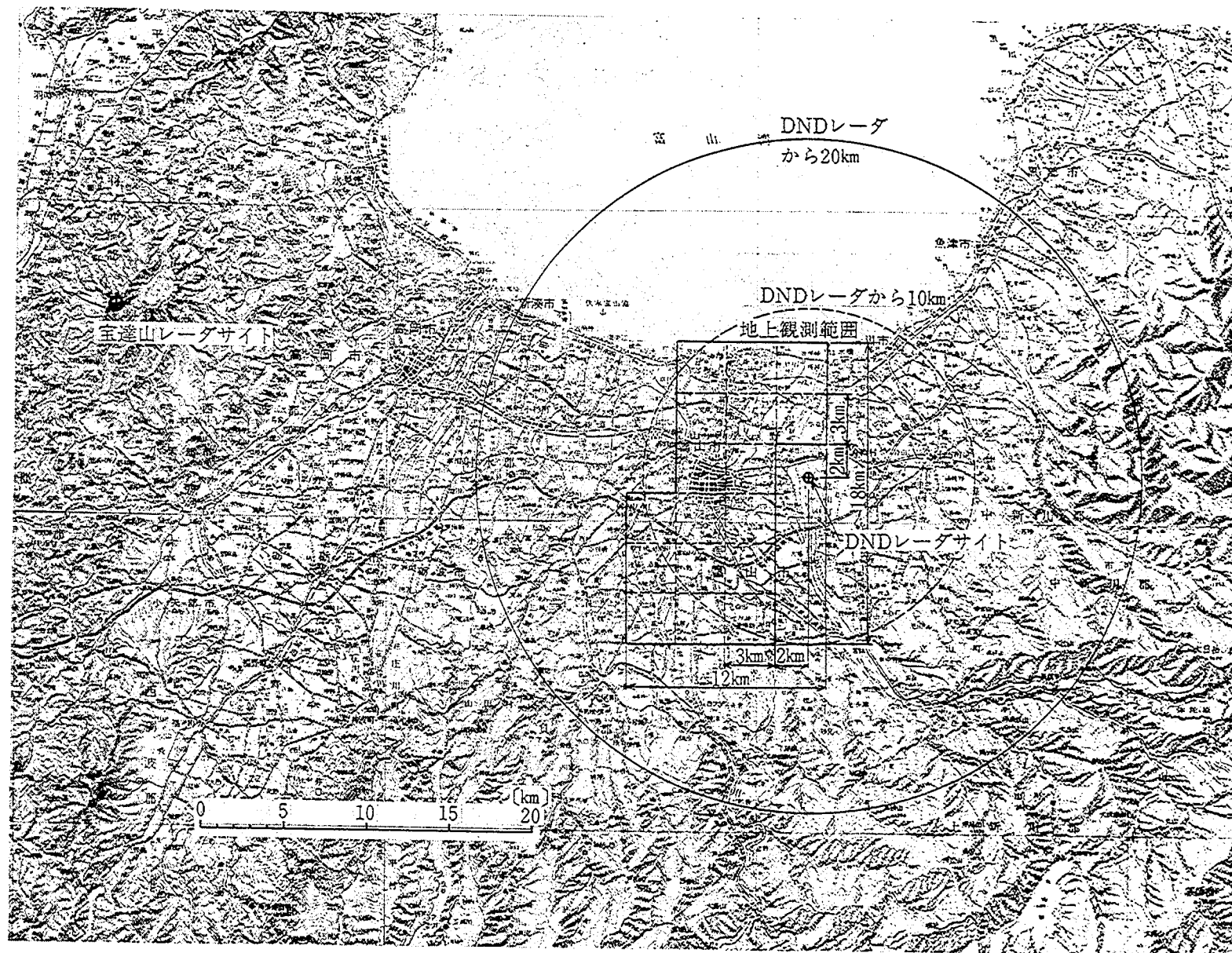


図-1.2.2 降雪観測位置図

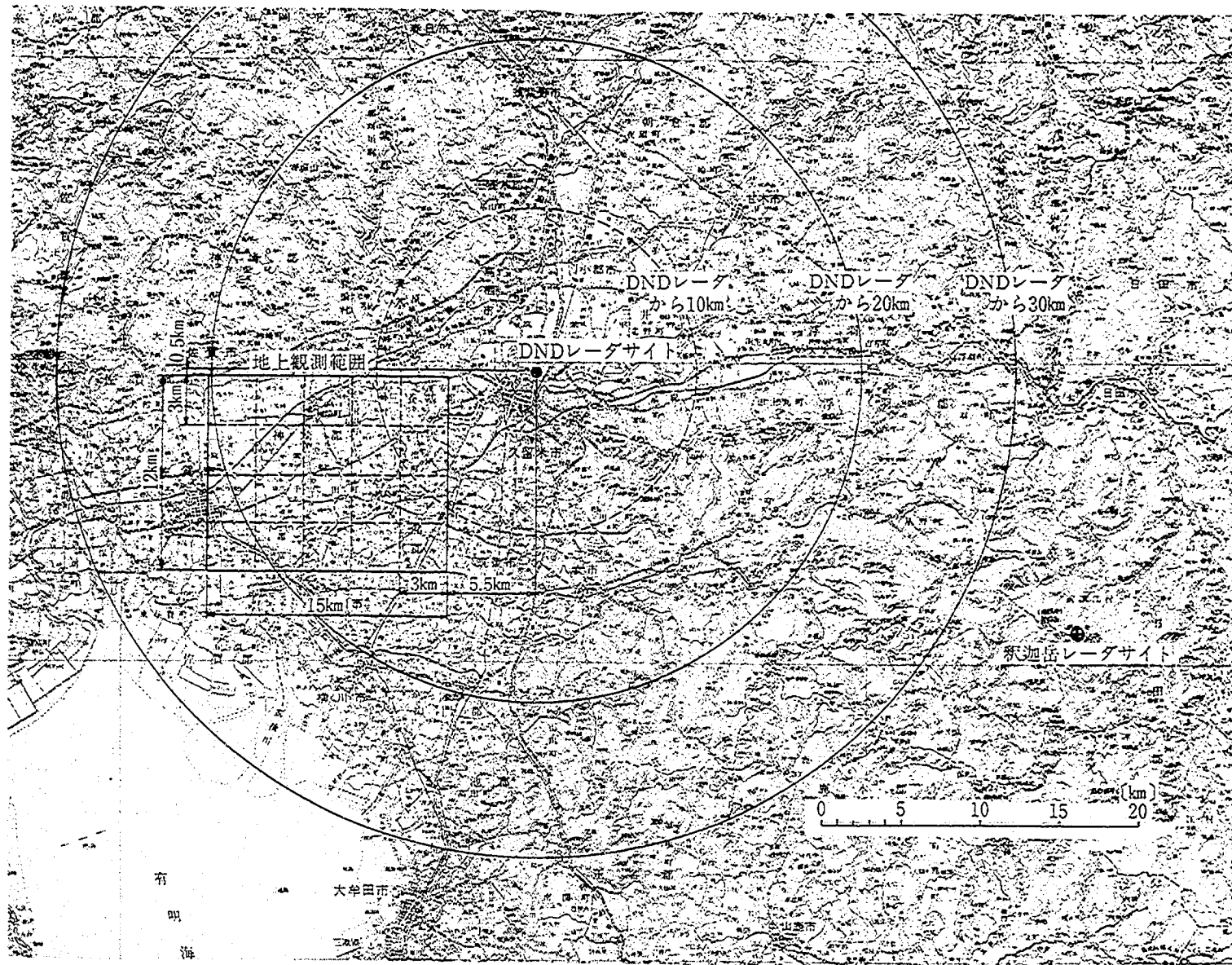


図-1.2.3 降雨観測位置図

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。

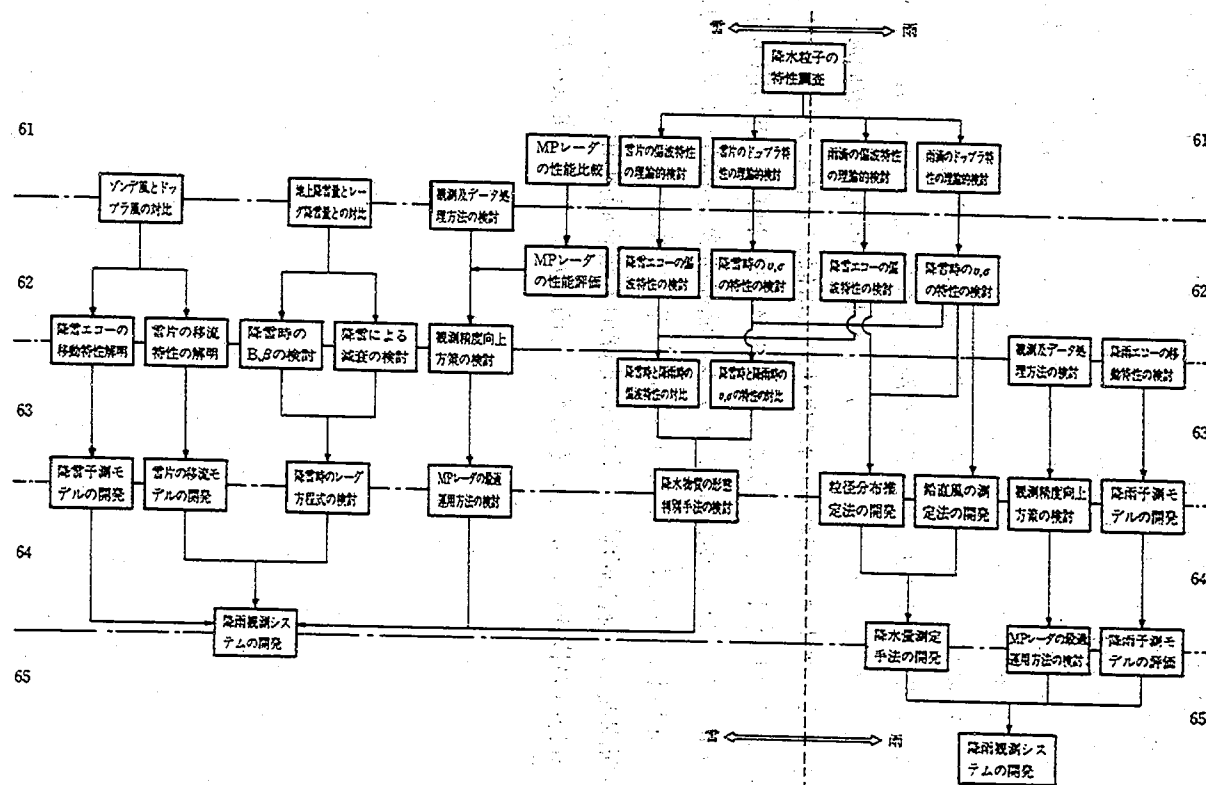


図-1.3.1 解析の全体計画

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

特殊レーダによる降水観測システムの開発研究は昭和59年度から開始した。昭和59年度は、海外における特殊レーダによる降水観測に関する研究現況を調査した。これから、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。さらに、昭和62年度には富山で降雨観測も実施した。

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-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預いた。

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、道路管理課並びに富山工事事務所の皆様に、多大な協力をして頂いた。ここに謝意を表します。

表-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	地建依頼（北陸）	地建依頼（東北）	河川総合開発事業調査費	施設整備費	科技厅振興調整費
59		・特殊レーダによる降水粒子の形態判別（雨滴か氷晶か）の研究状況の調査		・既存型レーダによる降雪観測の可能性の検討			
60		・降雪観測用レーダの仕様の検討 ・降水粒子特性の数値モデルの調査	・既存型レーダによる降雪観測の可能性の検討	・東北地方における降雪時の特性（エコー高度、気温、風向風速）の調査			
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	・地上降雪量観測の実施 ・DNDレーダによる降雪観測の実施	・地上降雪量とレーダ降雪量の対比 ・降雪粒子特性の観測及び特性の把握		・二重偏波・ドップラレーダの空中線装置及びシールドの製作	
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	・地上降雪量観測の実施 ・DNDレーダによる降雪観測の実施	・降雪時の B 、 β の検討 ・降雪による電波の減衰量の検討	・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 (予定)	・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	・地上降雪量観測の実施 ・DNDレーダによる降雪観測の実施	・降雪時の B 、 β の検討 ・降雪による電波の減衰量の検討	・DNDレーダによる降雨観測の実態 ・エコーの移動と上層風との関係の検討		・DNDレーダ改良 ・降雪機構の解明
64 以降 (予定)	・降水粒子の形態判別方法の開発	・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開発	・地上降雪量観測の実施 ・DNDレーダによる降雪観測の実施	・降雪時のレーダ方程式の確立	・DNDレーダによる降雨観測の実施 ・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		・複数のレーダによる降雪観測 ・降雪機構の解明 ・降雪観測システムの開発

表- 1.4.2 特殊レーダ研究会委員名簿

氏 名	所 属
(委員長)	
木 下 武 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)	
八 木 鶴 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
青 柳 二 郎	運輸省気象研究所気象衛星研究部第二研究室長
田 畑 明	“ “ 台風研究部第三研究室研究員
小 口 知 宏	郵政省電波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
藤 田 正 晴	“ “ 鹿島支所第一宇宙通信研究室長
堀 重 信	建設省建設経済局調査情報課電気通信室長
一 宮 邦 夫	“ “ “ 電気通信室建設専門官
橋 本 宏	“ 土木研究所河川部長
吉 野 文 雄	“ “ 河川部水文研究室長
中 野 悟	62年度～：(株)東芝，小向工場レーダ技術部技術第二担当課長
畑 浩 靖	61年度：現在，(株)東芝・小向工場無線機設計部長
吉 田 武 弘	日本無線(株)・三鷹製作所技術第二部特殊レーダ課長
浜 津 享 助	62年度～：三菱電機(株)・通信機製作所電波部システム2課主幹
萩 原 護 也	61年度：現在，三菱電機(株)・通信製作所電波部システム2課長
(幹 事)	
水 野 雅 光	建設省土木研究所水文研究室研究員
水 野 秀 幸	62年度～：建設省土木研究所水文研究室技官
井 川 貴 史	62年度～：建設省土木研究所水文研究室技官
河 関 大 祐	61年度：現在，自治省消防研究所通報設備研究室研究員
(事務局)	
高 山 一 彦	(社)建設電気技術協会専務理事
岡 部 澄 弥	“ 事務局

第2章 DNDレーダ（二重偏波ドップラレーダ）の製作

2.1 DNDレーダの仕様とその決定の経緯

建設省レーダ雨量計は、降雨観測に対するその有効性から、全国的な導入が実施されつつある。これに伴い、降雪対策が重要な問題となっている地域では、レーダ雨量計による降雪観測の期待が高まっている。

レーダによる降雪観測を実現するための主な問題として

- (1) 降雨と降雪の判別
- (2) 雪片の風による移流検出

がある。これらを解決するため、実験用システムとして二重偏波・ドップラレーダを製作し、観測データを蓄積しながら評価を行うことにした。

システムの製作に際しては、Xバンドレーダ及びCバンドレーダについて検討したが、現用レーダ雨量計と同じCバンドレーダとした。さらに、降雪観測及び降雨観測が任意の場所で行える様にするため、可搬型レーダとした。

2.1.1 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 |
| (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 | 23.8dB(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 | 5280 MHz |
| ・帯域幅 | 20 MHz |
| ・入力電力 | 75 kW |
| ・切替間隔 | スキャン毎又は11パルス毎 |
| (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 $\pm 0.3^\circ$ 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 5280 MHz
 - ・尖頭出力 75 kW
 - ・電波の型式 P0N
 - ・送信パルス幅 $0.5 \mu\text{s}$ (ドップラ), $2.0 \mu\text{s}$ (二重偏波)
 - ・繰り返し周波数 1120 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/LOG 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 $2 V_{OP}(75 \Omega)$
 - ・輝度調整 可能
- (8) 導波管加圧装置
- ・充填圧力上限 $150 \pm 20 \text{ g/cm}^2$
 - ・充填圧力下限 $50 \pm 20 \text{ g/cm}^2$
- (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, $1.67 \mu\text{s}$ 毎 (LOG ビデオ)
8 ビット, $1.67 \mu\text{s}$ 毎 (LIN ビデオ)
 - ・信号処理 LIN ビデオを使用したパルスベア方式 (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)
 - ・平均化 (単位データ) 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)
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 $\bar{V}, \sigma_V, Z_H$
 - ② 二重偏波モード時 Z_{HM}, Z_{VN} (NORMAL 系)
 Z_{HM}, Z_{VM} (MTI 系)
 - ③ メッシュデータ 10 ビット (二重偏波)
8 ビット (1 ビットは符号ビット) (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, 2400 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) 表示装置

- ・制御部 4 MB
- ・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 運用モード

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)	空中線回転数 (r. p. m)	仰角の設定法 仰角の設定数	収 録 デ ー タ	表 示 デ ー タ
1	自動	二重偏波	(5)	6	自動, 1 仰角	5 分間平均の Z_H, Z_V (1 仰角分)	Z_H, Z_V, Z_{DR}
		ドップラ	(8)	1	自動, 8 仰角	1 分間平均の V, σ_V, Z_H (8 仰角分)	V, σ_V, Z_H
2	自動	二重偏波	(3)	6	自動, 1 仰角	3 分間平均の Z_H, Z_V (1 仰角分)	Z_H, Z_V, Z_{DR}
		ドップラ	(1)	1	自動, 1 仰角	1 分間平均の V, σ_V, Z_H (1 仰角分)	V, σ_V, Z_H
3	手動	二重偏波	5	6	自動, 4 仰角	1 分間平均の Z_H, Z_V (4 仰角分)	Z_H, Z_V, Z_{DR}
4	手動	ドップラ	10	1	自動, 8 仰角	1 分間平均の V, σ_V, Z_H (8 仰角分)	V, σ_V, Z_H
5	手動	二重偏波	任意	6	手動, 1 仰角	スキャン毎, 1 分間平均, 3 分間平均, 5 分間平均, 10 分間平均, 15 分間平均の Z_H, Z_V (1 仰角分)	Z_H, Z_V, Z_{DR}
6	手動	ドップラ	任意	1	手動, 1 仰角	1 分間平均(スキャン毎), 3 分間平均, 5 分間平均, 10 分間平均, 15 分間平均の V, σ_V, Z_H (1 仰角)	V, σ_V, Z_H
7	手動	二重偏波	任意	一方向固定	手動, 1 仰角	11パルス毎の Z_H, Z_V (1 仰角分) 偏波切換間隔は, 11 パルス毎	Z_H, Z_V, Z_{DR}

注) パターン 1, 2, 3, 5 の二重偏波モードの偏波切換間隔はスキャン毎

2.1.2 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、垂直偏波に切り換えられ、その偏波のまま空中線の反射面に給電され、空間に放射される。この気象目標からの反射波は同一経路で受信機へ入力され、ローノイズ増幅器で増幅された後、ミキサで 30MHz 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へ供給される。

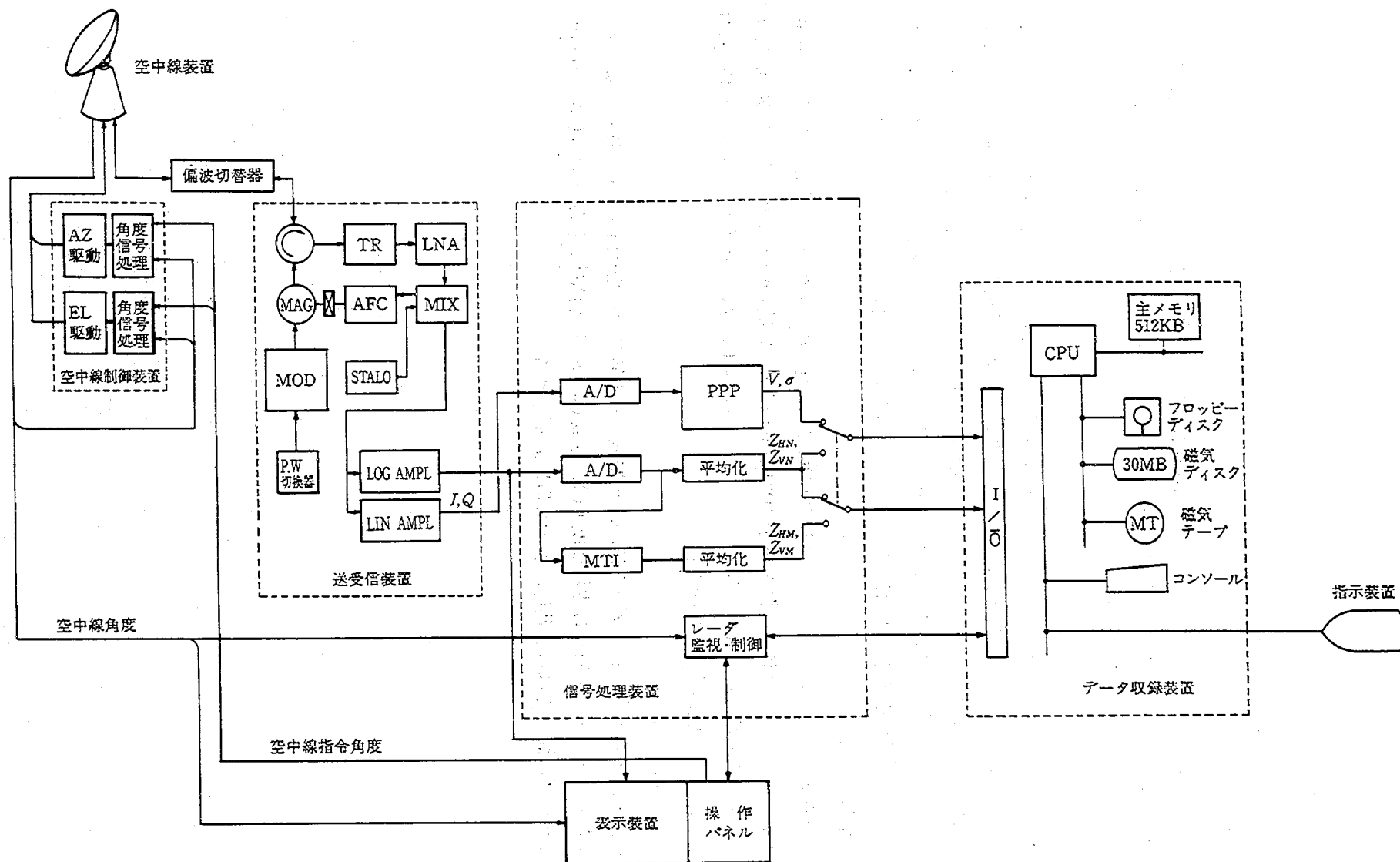
(3) 信号処理系

送受信装置から入力された I , Q ビデオ及び LOG ビデオはディ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 ($\bar{V}$) 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_{HM} , Z_{VM}) と MTI 処理しないもの (Z_{HN} , Z_{VN}) 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_{HM} , Z_{VM} , Z_{HN} , Z_{VN}) であり、またドップラモード時には平均速度 ($\bar{V}$)、分散 (σ) 及び反射因子 (Z_{HN}) 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 空中線部の構造とその性能

2.2.1 構造

空中線装置空中線部(アンテナ)の構造は図-2.2.1の空中線部外形図に示す通りである。

2.2.2 性能

(1) 仕様

空中線装置の主要規格の仕様値は次の通りである。

- | | |
|---------------------|------------------------------|
| 1) 空中線形状 | 2 mφ円形パラボラ |
| 2) 偏波面 | 水平及び垂直 |
| 3) 主方向利得 | 36 dB以上 |
| 4) ビーム幅(3 dB 電力低下点) | 2.0°以下 |
| 5) 副ビーム減衰率 | 23 dB以上 |
| 6) 定在波比 | 1.2以下 |
| 7) 回転数 | 強度観測時 6 rpm
ドップラ観測時 1 rpm |
| 8) 角度情報量子化 | 14 bit |
| 9) 角度制御範囲 | AZ 0°～360°
EL 0°～+90° |
| 10) 耐風強度 | 最大風速 15 m/s
瞬間最大風速 25 m/s |
| 11) 給電方式 | リア・フィード方式 |

(2) 品質検査結果

空中線装置の検査データを表－2.2.1に示す。また、アンテナパターン図を図－2.2.2に、そのときの偏波と観測面の関係を図－2.2.3に示す。

表－2.2.1(1) 空中線装置検査データ

項 目	規 格 ・ 仕 様	結 果	備 考
1. 外観・構造			
1.1 空中線装置 及び形状	2 mφ円形パラボラ	<u>2002 mm</u> <u>良</u>	
1.2 構 造			
(1)	空中線付近は危険防止のため安全 スイッチを設けるものとする。	<u>良</u> <u>良</u>	
(2)	空中線は、防滴型とし起動停止及 び回転中に機械的な振動や歪みを 生じない構造とする。	<u>良</u> <u>良</u>	
2. 性 能			
2.1 空中線形式 及び形状	2 mφ円形パラボラ	<u>2002 mm</u> <u>良</u>	
2.2 偏波面	水平及び垂直	<u>水平及び垂直</u> <u>水平及び垂直</u>	
2.3 主方向利得	36 dB以上	<u>水平 36.6 dB</u> <u>垂直 36.7 dB</u> <u>良</u>	

表一 2.2.1(2) 空中線装置検査データ

項 目	規 格 ・ 仕 様	結 果	備 考
2.4 ビーム幅 ア. 3dB 電力低下点	2.0° 以下 (E面, H面共)	水平偏波 水平面 1.8° <u>垂直面 1.8°</u> 垂直偏波 水平面 1.7° <u>垂直面 1.8°</u> 水平偏波 水平面 1.80° <u>垂直面 1.76°</u> 垂直偏波 水平面 1.78° <u>垂直面 1.82°</u>	
イ. 対称性及び ビームについて	E面・H面ともに対称であり、ペンシルビームであること。	<u>良</u> <u>良</u>	
2.5 副ビーム 減衰量	23 dB以上	水平偏波 水平面 23.8 dB <u>垂直面 23.8 dB</u> 垂直偏波 水平面 23.7 dB <u>垂直面 24.1 dB</u> 水平偏波 水平面 23.8 dB <u>垂直面 24.0 dB</u> 垂直偏波 水平面 23.8 dB <u>垂直面 24.0 dB</u>	
2.6 定在波比	1.2 以下 (単体で)	<u>1.17</u> <u>良</u>	

表- 2.2.1(3) 空中線装置検査データ

項 目	規 格 ・ 仕 様	結 果	備 考
2.7 空中線 回転数	6 rpm $\pm$ 5 % 1 rpm $\pm$ 5 %	<u>6.1 rpm</u> <u>1.0 rpm</u> 良	
2.8 回転方法	時計方向	<u>CW</u> 良	
2.9 角度情報 ア. 量子化	14 bit	<u>14 bit</u> 良	
イ. 角度分解能	0.1° 以内	<u>0.1°</u> 良	
2.10 制御範囲 ア. AZ	0° $\sim$ 360°	<u>0°$\sim$360°</u> 良	
イ. EL	0° $\sim$ 90°	<u>0°$\sim$90°</u> 良	
2.11 駆動電源	DC電源	<u>良</u> 良	
2.12 耐風強度 ア. 最大風速	15 m/sec	<u>良</u> 良	
イ. 瞬間最大 風速	25 m/sec	<u>良</u> 良	
2.13 給電方式	Rear feed 方式	<u>良</u> 良	
2.14 周波数	5300 MHz の 1 波 (fo = 5280 MHz)	<u>5280 MHz</u> <u>5280 MHz</u>	

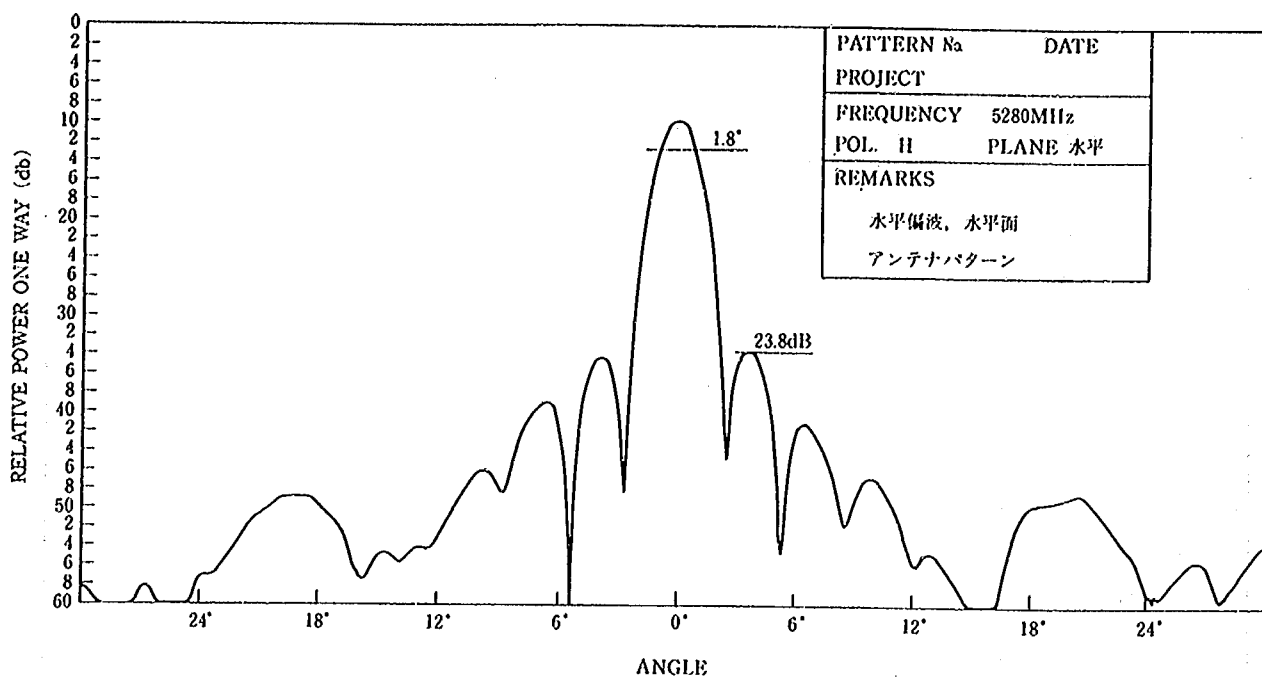


図- 2.2.2(1) アンテナパターン図 (水平偏波, 水平面)

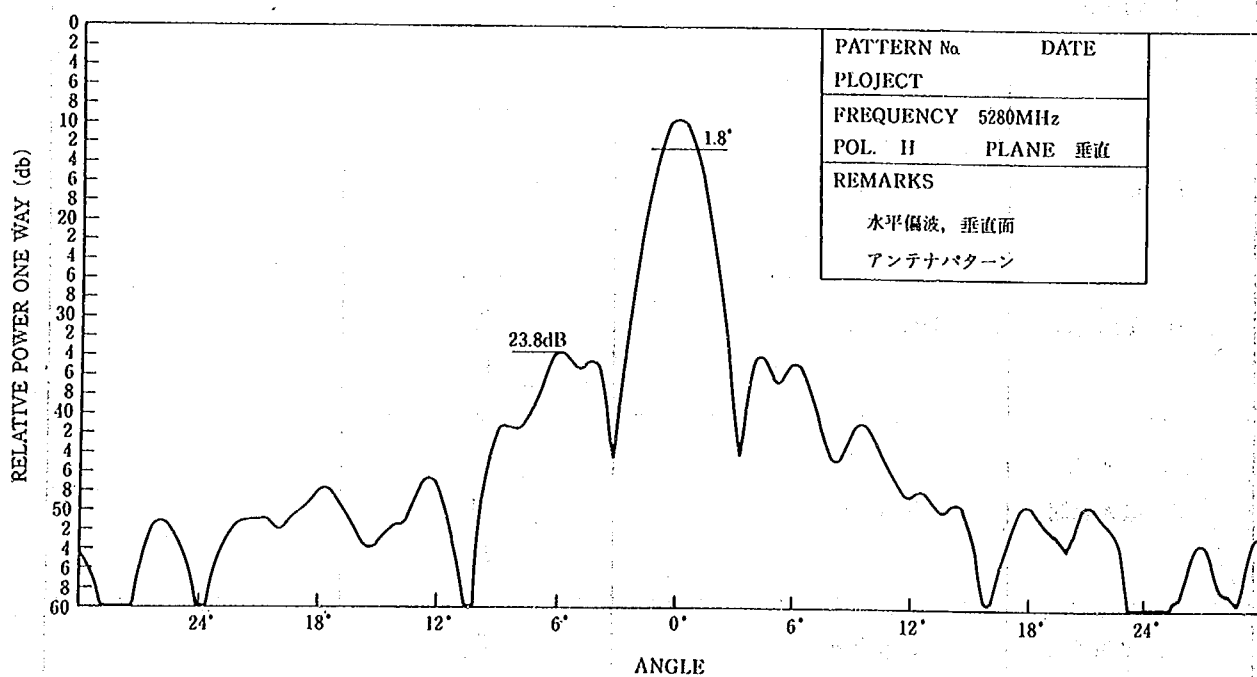


図- 2.2.2(2) アンテナパターン図 (水平偏波, 垂直面)

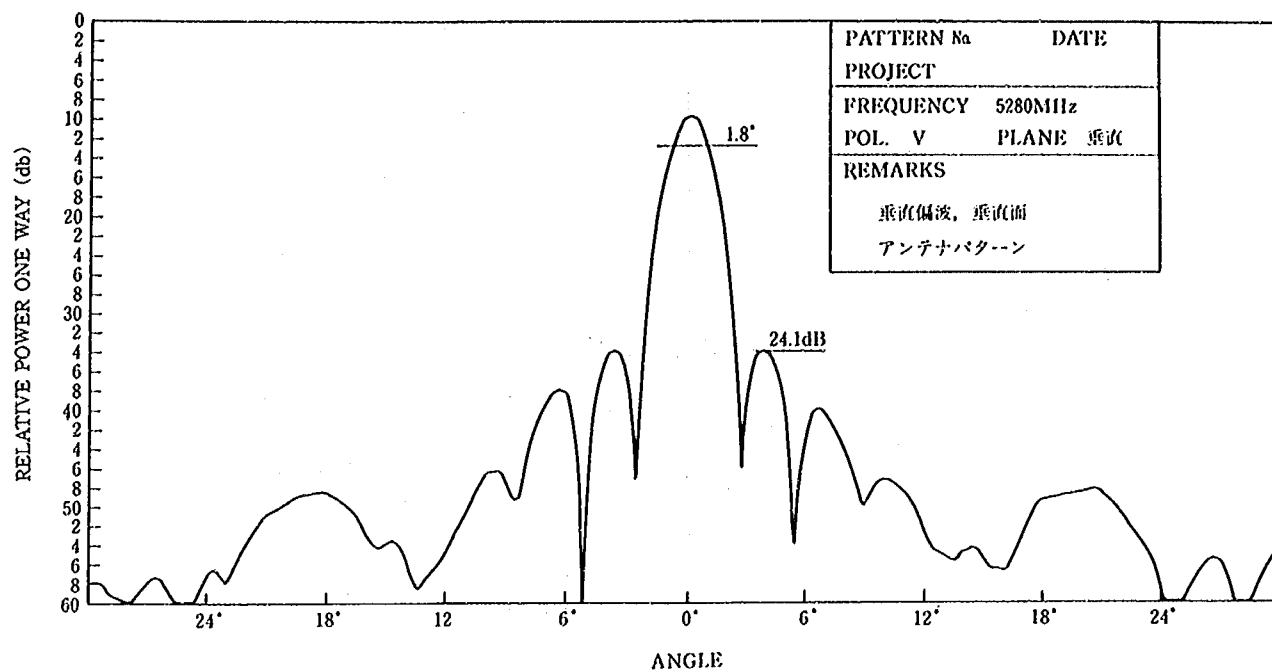


図- 2.2.2(3) アンテナパターン図(垂直偏波, 垂直面)

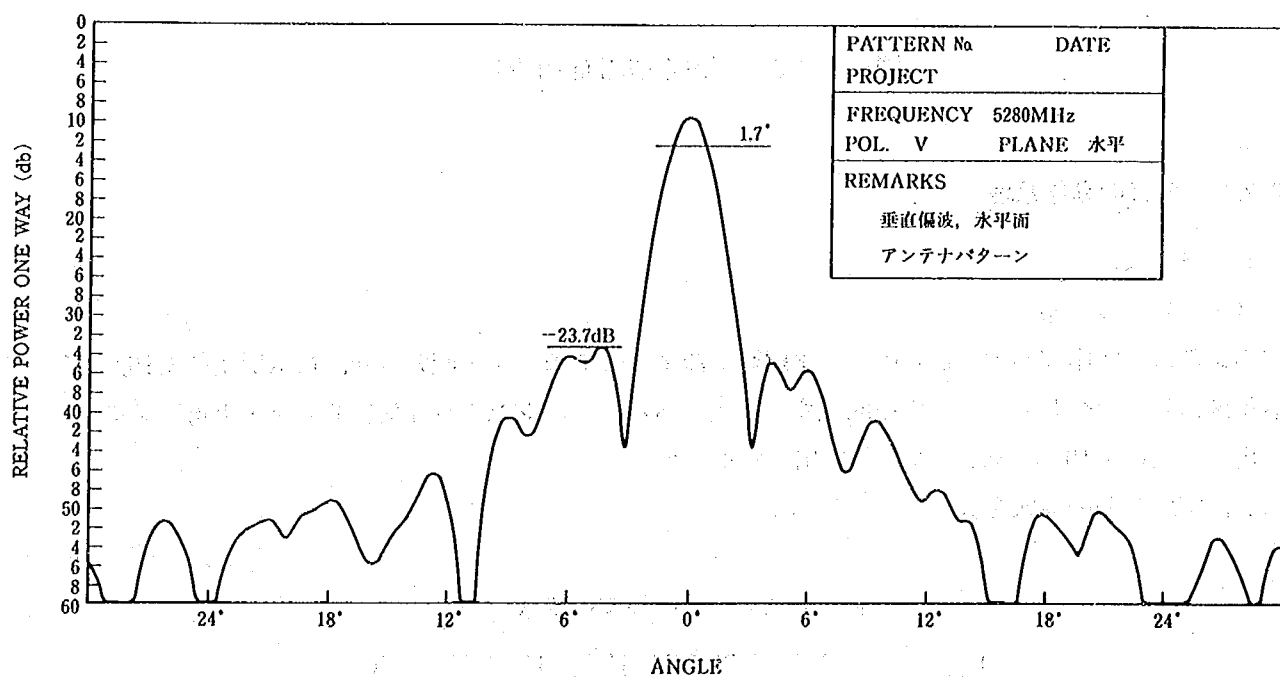
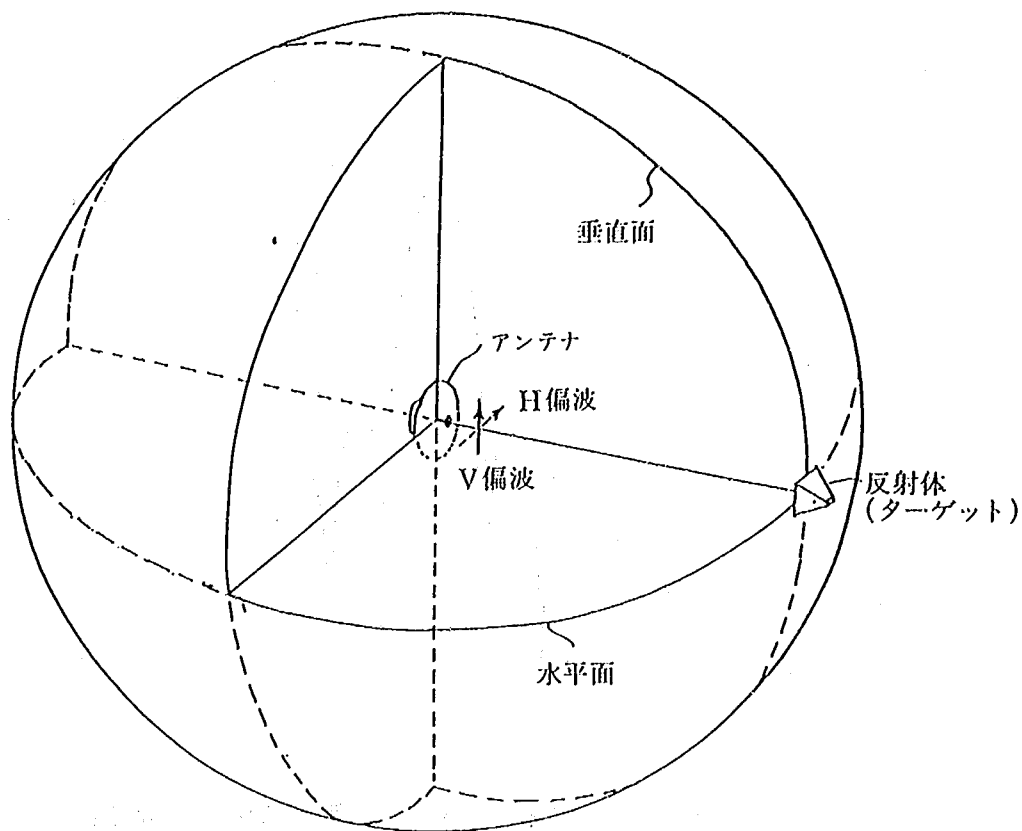


図- 2.2.2(4) アンテナパターン図(垂直偏波, 水平面)



図－ 2.2.3 偏波と観測面の関係

2.2.3 各部の動作原理

(1) 空中線部

(1.1) 概 略

空中線部は、空中線制御部からのモータ駆動電流によってモータを回転させ、指示器及び CPU の命令角度信号に追従してアンテナを回転する装置である。又、シンクロ発信機でアンテナ角度を検出し、指示器及び CPU に表示角度として出力する。

なお、空中線部の構成を表－ 2.2.2 に示す。

表－ 2.2.2 空中線部の構成

項目	品 名	数量	諸元番号
1	シンクロ発信機	2	B 3 , B 4
2	モータ	2	B 1 , B 2
3	ブレーキ	1	Z 1
4	スリッピング	1	SL1
5	W/G スイッチ	1	Z 2

(1.2) 動作原理

(I) マイクロ波系

(i) 放射系及び導波管系

1) 送信装置内のマグネトロンで発振されたマイクロ波送信電力は、大電力サーキュレータを通り、装置外のスプリアスフィルタ、双方向性結合器、導波管回路を通り、空中線装置へ入る。

空中線部内で水平、垂直ロータリジョイントを通り、W/Gスイッチに入る。W/Gスイッチにより水平偏波、垂直偏波に切り換え、後段のトランスデューサーに入る。ここで水平・垂直偏波をその偏波のまま円形W/Gを通して、先端の一次ホーンに放射する。この一次ホーンより出た電波は、反射鏡にRearfeedされ、ビーム幅約 1.8° のペンシルビームとして空間に放射される。

2) 空中線で受信した反射信号は、双方向性結合器、大電力サーキュレータを含む導波管回路を通して受信装置へ導かれる。

(ii) マイクロ波回路(図-2.2.4参照)

1) 空中線は、水平、垂直共に回転するので、マイクロ波伝送線路は、矩形導波管から軸対称の形状及び軸対称のモードを有する伝送系に変換しなければならない。これは、円形導波管もしくは、同軸線路を用いることにより実現でき、回転結合部の構造を簡単にできる。本空中線装置では同軸線路を採用しており、水平ロータリジョイント、垂直ロータリジョイント共に同じ構造である。

2) 図-2.2.4はロータリジョイント(回転部伝送系)の説明である。

3) 送信部からのマイクロ波出力は、立体回路部を経て、矩形導波管で入ってくる。ここで軸対称伝送系として同軸線路に変換される。変換部は、図-2.2.5(a)に示す様に、固定部、回転部とも同じである。固定部と回転部の同軸外導体及び内導体は、各々チャックにより結合されている。

4) 同軸線路の伝送モードはTEMモードである。TEMモードは図-2.2.5(c)に示す通り軸対称であるから、回転によって各部のモード及び結合の状態が変化することはない。

同軸線路中における耐電力性を増すために、特性インピーダンスはそのままにして、同軸線路の直径を大にしていくと、遂には、同軸線路内に高次のモードが発生するようになる。従って、同軸線路の直径は高次モードが発生しない範囲にとどめてある。この状態で十分なる耐電力性をうるために、空中線装置内の導波管回路及び同軸回路はすべて 300 g/cm^2 (絶対圧)に空気加圧してある。

5) 同軸-導波管変換部は、ドアノブ形変換を用いて耐電力性を保たせている。アイリスは整合のためのものである。

6) チャックは、折返し同軸線路の一部と考えられる。AB、BCの長さは各々 $\lambda/4$ でありC点は短絡されているから、B点のインピーダンスは無限大である。この点に直列に入るインピーダンスは無視できるから、B点で固定部と回転部を完全に接触させる必要はなく、その間隙が小さければよい。B点から更に $\lambda/4$ 離れたA点においては、インピーダンスは主同軸線路に直列に入るが、このインピーダンスは零であるから、

ここで完全な接触は必要でなくなり、小さな間隙を設けることができる。A点及びB点で完全な接触が必要でないから、ロータリージョイントの構造は、チョーク結合部を設けることにより簡単となり、又マイクロ波の伝送が、回転中でも円滑に行える。内導体チョークは、bc区間の一部にラジアル線路を用いてあるが、原理は外導体のチョークと同じである。

7) W/Gスイッチは、フェライトタイプのサーキュレータであり、空中線制御装置からの水平・垂直切替信号により、PORT 1 → PORT 2 又は、PORT 1 → PORT 3 への切替を行う。

8) トランスデューサーは、水平及び垂直偏波入力を、それぞれ丸角変換器に、送出する機能を有している。即ち前項の PORT 2 からの偏波を水平モードとしてトランスデューサーに入力し、PORT 3 からの電波をツイストで 90° ひねり垂直モードとしてトランスデューサーに入力する。

一次ホーンより出たマイクロ波電力は反射鏡で反射され、約 1.8° のビーム幅のペンシルビームとなって空中に放射される。

9) 水平及び垂直偏波成分は、丸角変換器から円形W/Gを通して一次ホーンに放射される。

(II) 電気回路

(i) 制御系

スイッチ(S 1)を「LOCAL」にすることにより、空中線制御装置の制御信号であるアンテナアクションは断となる。

又、スイッチ「ブレーキ開放」(S 4)を押すことにより、アンテナの回転は自由になる。この時、AZ回転は手で押すことで回転可能であり、EL回転は、ハンドルを使って回転できる。

(ii) 空中線角度検出部

空中線表示角度の検出はシンクロ発信機によってなされる。シンクロ発信機軸は、空中線の水平及び垂直の回転に対応して回転し、その回転角に一致した角度信号が出力される。水平角度表示に於ては軸の一回転を $0^\circ \sim 360^\circ$ に対応させて検出し、又、垂直角度表示に於ては、これを $-90.0^\circ \sim 90^\circ$ に対応させて各々出力している。

空中線部内の角度検出部の構成は、図-2.2.6.に示す通りである。

1) 水平角度表示

角度検出はシンクロ発信機によって行われる。これを空中線制御装置内で14ビットの分解能をもつS/Dコンバータ(シンクロ対デジタル変換)で変換し、これを指示器及びCPUに出力している。

なお、角度信号の表示方式、処理等は空中線制御部内空中線水平信号処理に述べる通りである。

2) 垂直表示角度

角度検出は水平表示角度系と同様に行われる。検出された角度信号は、4重接点のスリップリングを経て出力される。これらの角度信号の表示方式、処理等は前出の空

中線制御部内空中線垂直信号処理に述べる通りである。

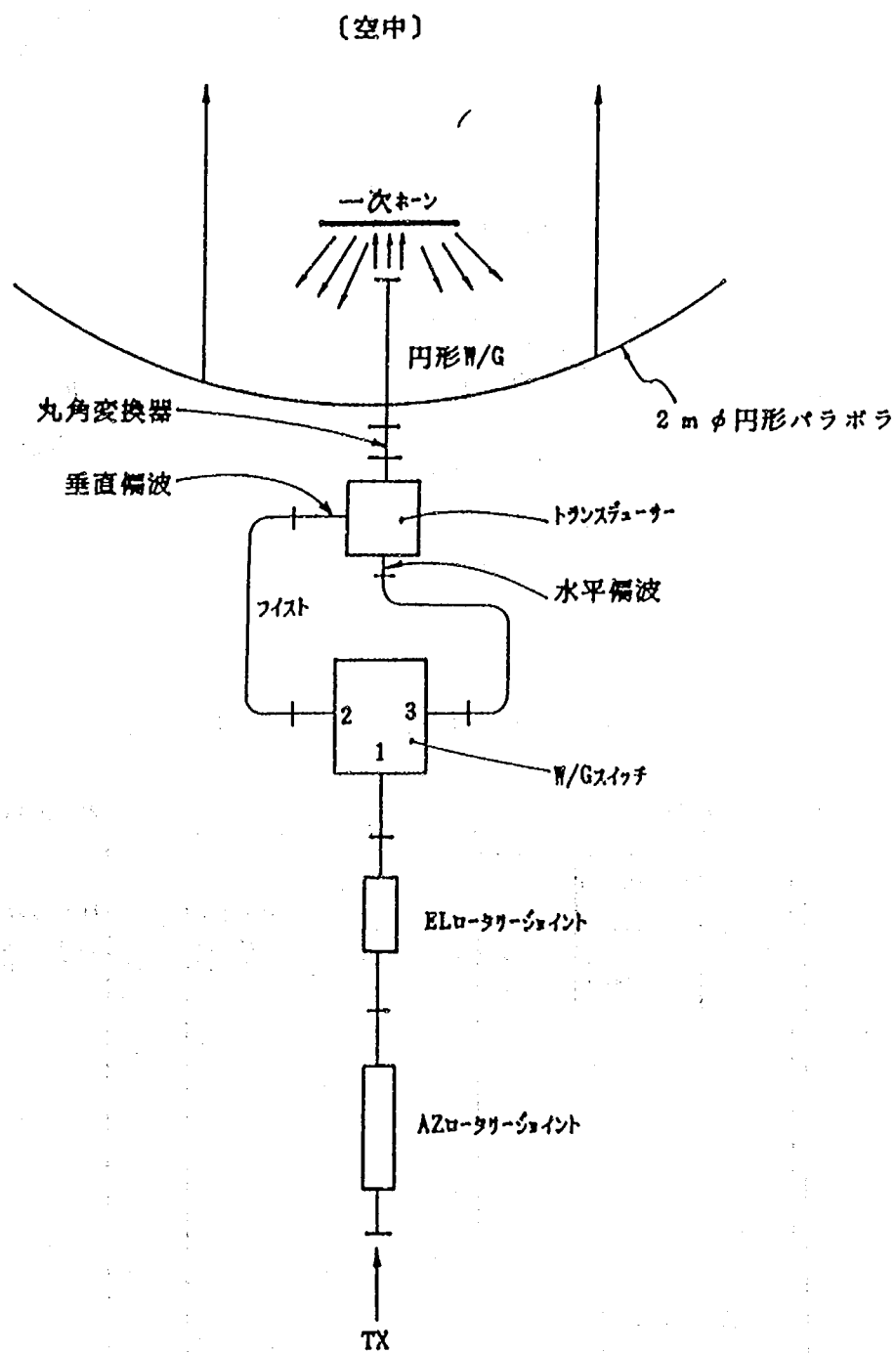


図-2.2.4. W/G 系統図

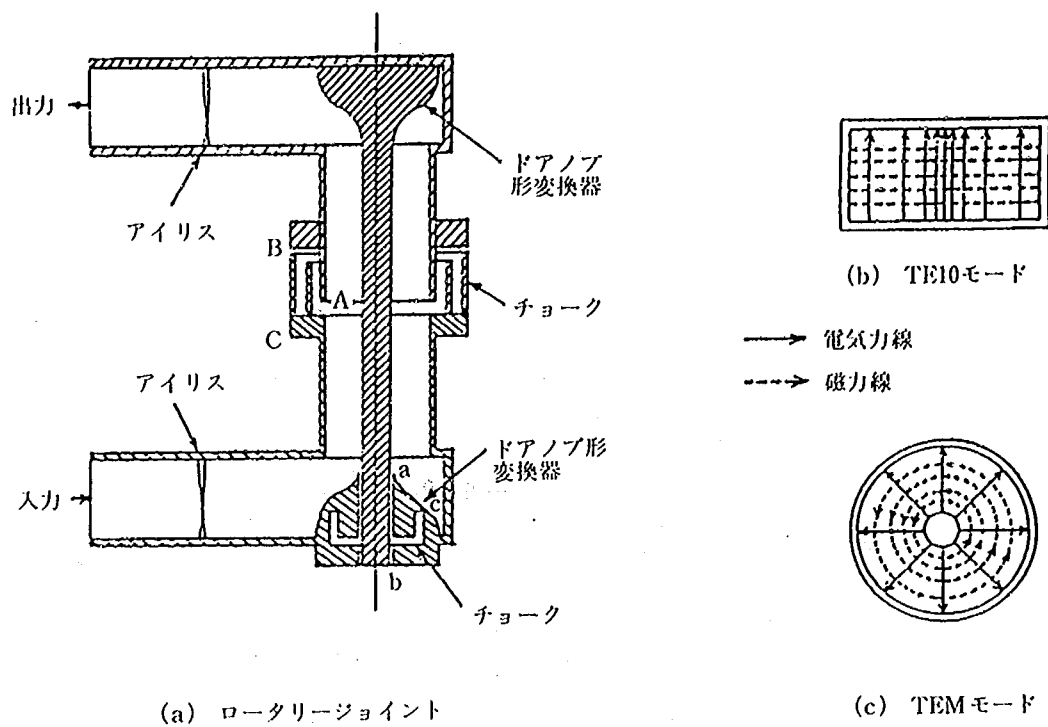


図- 2. 2. 5 ロータリージョイント説明図

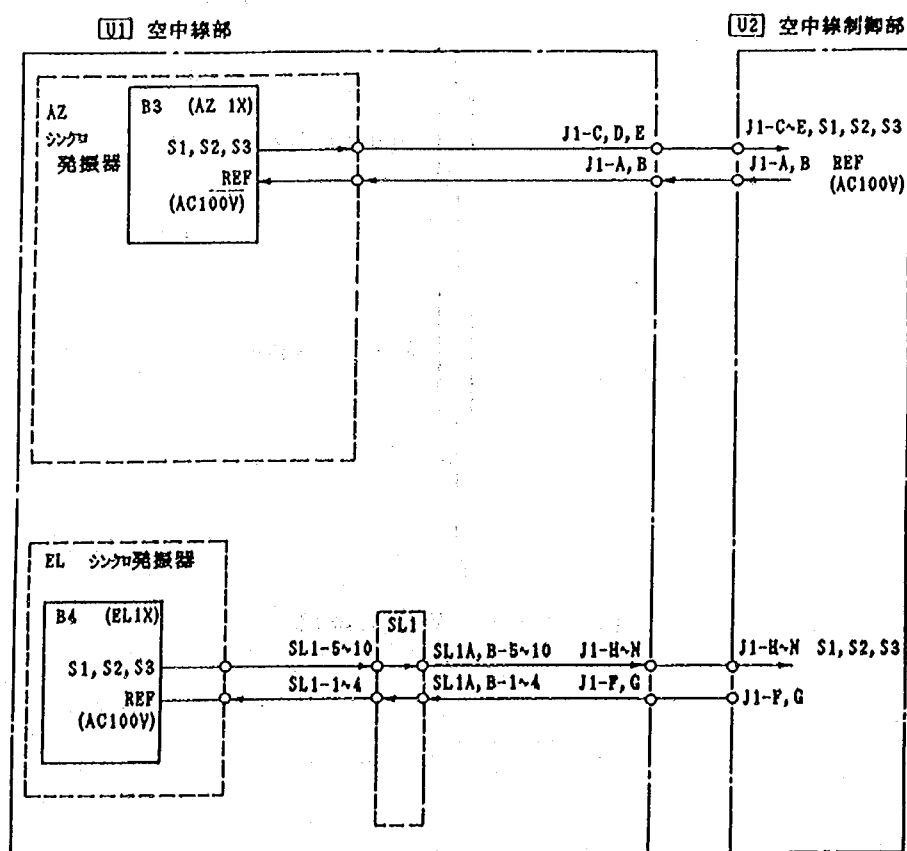


図- 2. 2. 6 空中線装置角度検出部

(III) 機 械 系

空中線部機械系は下記の部分より構成されている。

- ① 反射鏡部
- ② 一次ホーン及び導波管系統
- ③ 水平駆動部
- ④ 垂直駆動部

(I) 反射鏡部

反射鏡は直径 2 m の焦点距離 1 m の回転放物面である。

反射鏡背部にはカウンタウェイトがとりつけてあり、水平、垂直回転の制御を円滑にするようにしてある。

(II) 一次ホーン及び導波管系

一次ホーン及び導波管系内には約 0.3 kg/cm^2 G で乾燥空気が加圧されている。

水平、垂直ロータリージョイントにはオイルシール、導波管のフランジ部にはOリングを設けることにより乾燥空気の洩れを防いでいる。

(III) 水平駆動部

水平駆動部は空中線制御部からの指令に従い、反射鏡部及び垂直駆動部を水平軸回りに連続回転させ、かつ方位角度と回転速度を検出する。

1) 駆動機構部

直流サーボモータを使用し、減速機にて減速する。減速機のピニオンは施回歯車に噛み合って水平回転を行う。

2) 角度検出機

角度検出機は水平回転軸(施回軸受)と噛合っていて、方位角度の検出を 1 : 1 で行っている。

3) スリップリング及びブラシ

水平主軸に設置されたスリップリングと水平筐体に設置されたブラシの滑りにより、垂直駆動部へ信号及び電力を供給する。

スリップリングとブラシは信号用と電力用とに分かれ構造を異にしている。

なおブラシは四重に設置しアーク発生を防ぐ構造をとっている。

(IV) 垂直駆動部

垂直駆動部はサーボアンプの指令に従って反射鏡部を垂直軸回りに $-0^\circ \sim +90^\circ$ の範囲で回転させ、かつその高低角を検出する。

1) 駆動機構

直流サーボモータを使用し、歯車箱にて減速され、出力軸の回転により反射鏡を回転させる。歯車箱には電磁ブレーキがついており、モータが回転しない時はブレーキがかかって自走を防いでいる。

2) 角度検出機

角度検出機は垂直回転軸に直結されている垂直ロータリージョイントにあり、空中線部の高低角を読み取る。

3) リミットスイッチ

垂直回転の可動範囲は $-3^\circ \sim +93^\circ$ であり、これ以上動けば破損のおそれがある。

このため可動範囲を越えればスイッチが動き、動作を停止する。

スイッチは2段になっており、第1リミットはアクションを切り、ブレーキをかける。

第2リミットは EMERGENCY となり、空中線制御装置の電源を断とする。

第1リミットは -1° , 91°

第2リミットは -3° , 93°

(2) 空中線制御部

(2.1) 概 略

空中線制御部は、下記する2つの機能を有している。

① 指示器からの、制御信号で、空中線部を操作する。

② 指示器からの命令角度信号を、カード部で制御し、サーボエラー電圧を出力する。このサーボエラー電圧を、モータ駆動電流に変換して、空中線部のモータを駆動する。

(I) 構 成

空中線制御部の構成を表-2.2.3に示す。

表-2.2.3 空中線制御装置の構成

項目	ユニット名	数量	諸元番号
1	電源-A062	1	A 1
2	カード・ユニット	1	A 2
3	オペレーティング・パネル	1	A 3
4	モータドライバ(AZ)	1	A 4
5	モータドライバ(EL)	1	A 5

。モータドライバ(SERVO PACK)

AZ系、EL系共に、モータドライバ(SERVO PACK)(A4A1)、(A5A1)があるが、同一のものである。

サーボエラー電圧と、空中線部のモータからの TACH GEN 電圧とを制御し、モータ駆動電流に変換する機能を有する。又、タコジェネ異常検出、過電流検出、過電圧検出、過負荷検出を行い、空中線の暴走を防止する機能も有している。

(2.2) 動作原理

電源-A061を表-2.2.4に示す。

電源-A061は、DC電圧(REG)を出力する。

表-2.2.4 DC電圧

項目	DC電圧の種類	電流容量	備 考
1	+24 V	2.5 A	
2	+15 V	1.5 A	
3	+5 V	20 A	
4	-15 V	1.5 A	

(II) カードユニット

カードユニットはカード及びパネル部に分かれ、前者は、空中線制御に必要な信号処理を行い、後者は空中線の LOCAL 制御を行う為のスイッチ等を有している。本ユニットにおける空中線制御関係の信号処理は下記に分類される。

① 角度誤差信号系

② 角度表示系

①角度誤差信号系は、ハンドル(エンコーダ)からの命令角度信号によって空中線を制御するサーボエラーの演算を行う。又②角度表示系では、空中線表示角度の、バイナリ信号を数字表示信号(BCD)に変換する。

(i) 構 成

カードユニットの構成を表-2.2.5.に示す。

表-2.2.5 カードユニット構成表

アッセンブリ(カード)名称	アッセンブリ番号
W-ANT CONT 1-01	U2A2A2
W-ANT CONT 1-02	U2A2A1

1) 角度誤差信号系

表示・制御装置からの命令信号と空中線角度信号を比較し、この結果によって空中線の制御を行うサーボループの演算を行う系統である。

① 水平角度誤差信号系

空中線水平角度信号は、シンクロ発信機で検出され、S1, S2, S3, R1, R2の信号として空中線制御装置に入力される。

このS1, S2, S3, R1, R2信号は、カード「W-ANT CONT 1-01」のS/D CONVERTERにより、14ビットのデジタル信号に変換され、カード「ANT CONT 2-01(AZ)」に入る。ここでは、命令方位角度信号[AZ COM, 12ビット]と空中線水平角度信号の12ビット[AZ IND, 12ビット]を比較し、角度誤差信号[AZ ERROR, 12ビット]を得る。角度誤差信号をデジタル-アナログ変換、増幅が行われ、アナログ角度誤差信号[AZ SERVO ERROR]としてモータドライバに出力される。

又、方位角自動モードに於ては、パネル前面の「SPEED」用可変抵抗にて設定されたDC電圧が、カード「W-ANT CONT 2-01」に入り、アナログ角度誤差信号と切り換えてモータドライバへ一定電圧を出力する。

② 垂直角度誤差信号系

空中線仰角角度信号は、水平角度信号と同じようにカード「W-ANT CONT 2-01」で14ビットのデジタル信号に変更され、同様の処理を経てアナログ角度誤差信号[EL SERVO ERROR]としてモータドライバに出力される。

仰角自動モードに於ては、アンテナ回転数(STEP NO)に応じてROMの中に仰角命令信号が書き

込まれており、それを読み出して LIMITER 回路 (LOWER LIMIT, 12 ビット) (UPPER LIMIT, 12 ビット) にリミットされた後、空中線仰角信号と比較し、AZ 角度誤差信号と同様の処理を経て、アナログ角度誤差信号 (EL SERVO ERROR) としてモータドライバに出力される

2.3 送受信部の構造とその性能

2.3.1 概 要

送受信装置は 5 G 帯の高電力マイクロ波を発生し、空中線装置に供給すると同時に、空中線からの受信信号を受け、降雨強度及び降雨の平均移動速度の測定のためのデータ処理に必要な信号に変換して、信号処理装置に出力する機能がある。

本装置では、送信管にマグネトロン (M 1344) を使用しパルス幅 $2\ \mu\text{s}$ (二重偏波観測モード) 及び $0.5\ \mu\text{s}$ (ドップラ観測モード) の 2 種類の 5280 MHz, 尖頭出力 75 kW の安定した高周波電力を発生させる。

空中線で受信された雨雪粒子等からの反射信号は高性能ローノイズ増幅器で増幅され、のちミキサで 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送られる。対数増幅器の出力信号は降雨強度検出用、及び直線増幅器の出力信号は位相検波処理され平均速度検出用として信号処理装置に出力される。

2.3.2 本装置の構成

本装置の主な構成は次の 8 つで、外形図を図-2.2.1, 2.2.2 に、系統を図-2.3.3 に示す。

- 電源部-1
- 電源部-2
- 制御部
- 高周波増幅部
- 変調部 (MODULATOR 含)
- 立体回路部 (RF 増幅アッセンブリ含)
- AFC 駆動部

2.3.3 各部の構造

A. 電源部-1

電源部-1 は、本装置に必要な、表-2.3.1 に示す直流電圧 (DC) を発生する。

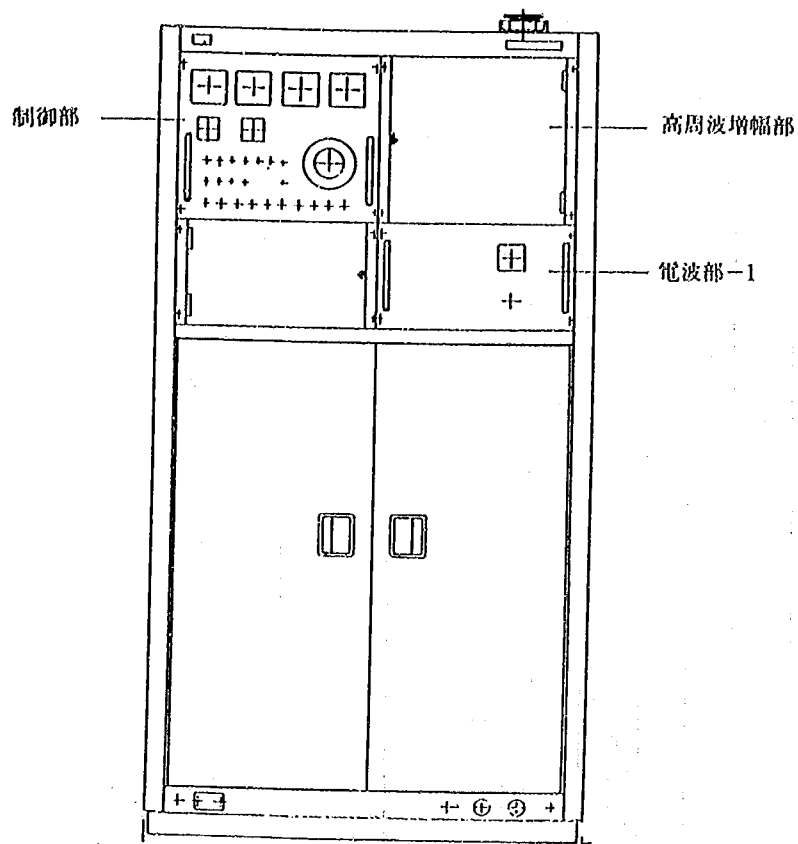


図- 2.3.1 送受信装置外形図

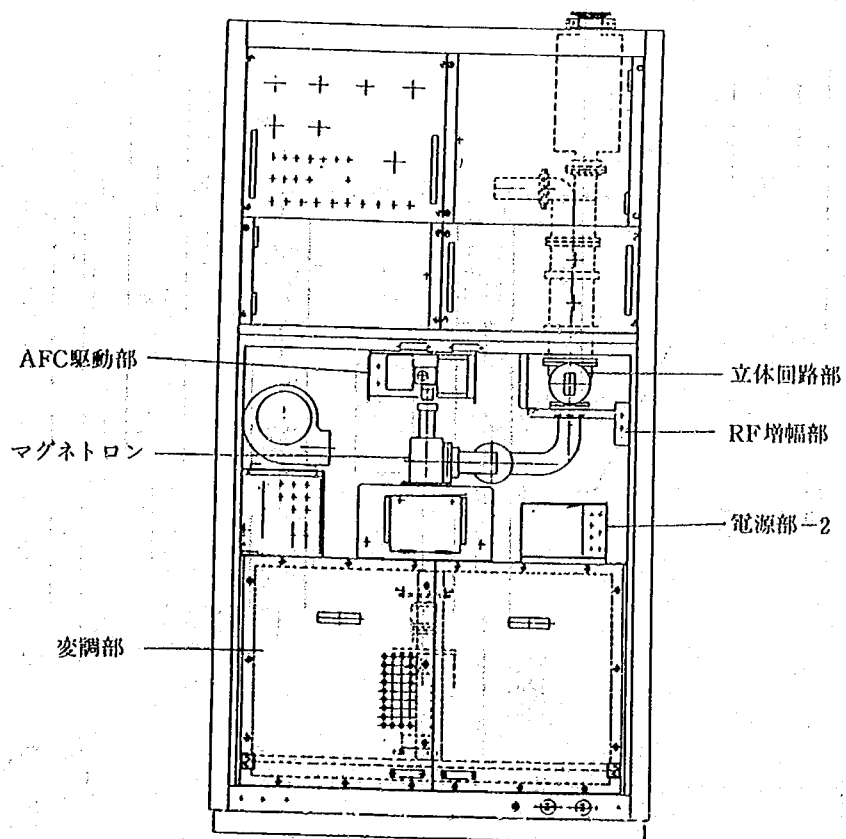


図- 2.3.2 送受信装置外形図

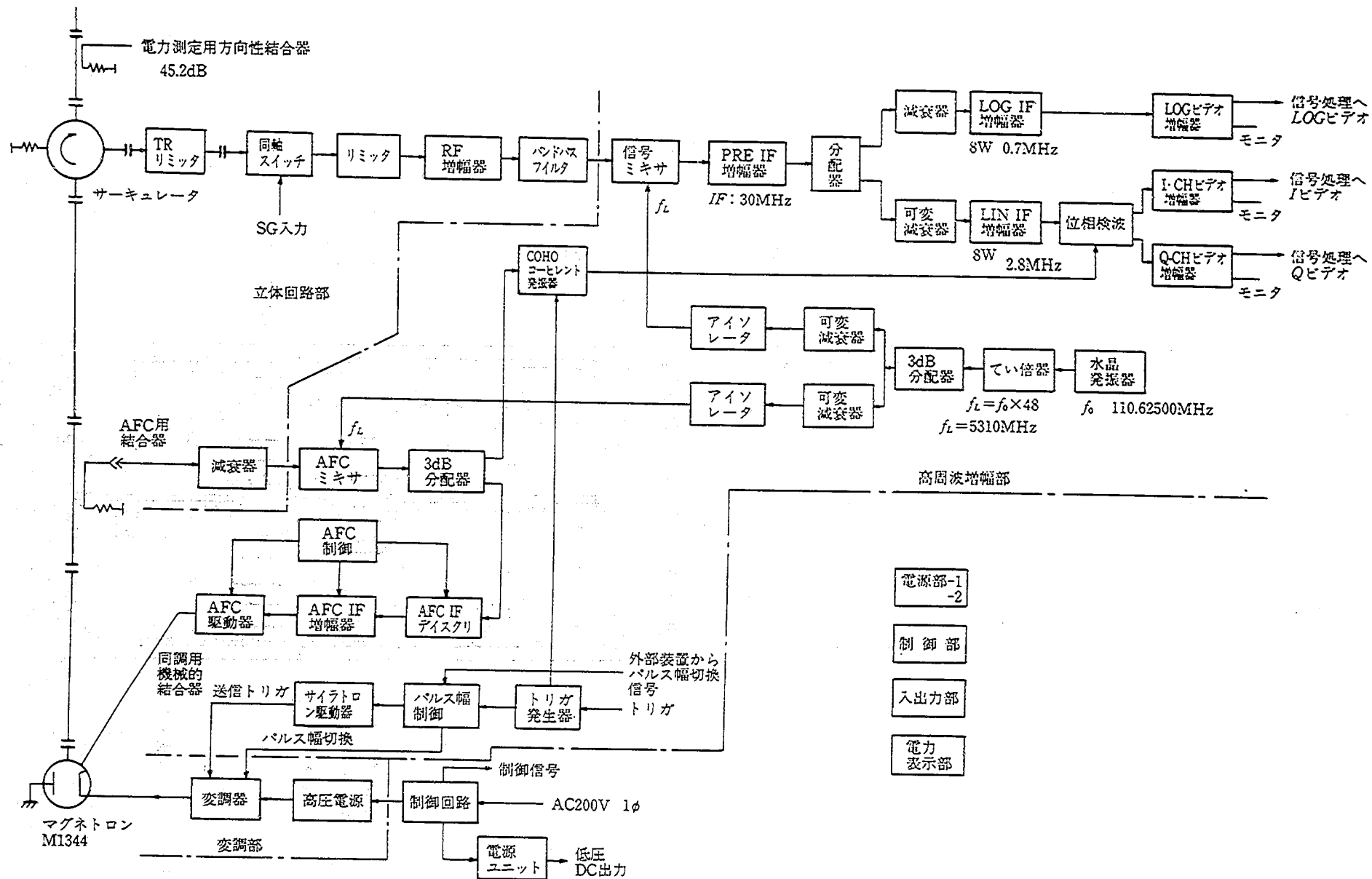


図- 2.3.3 送受信装置系統図

表- 2.3.1 電源部- 1 出力電圧

ユニット名	出力電圧 ()内は電源ユニット形名	主な使用箇所
PS- 1	± 12 V (100 VE 1210 W)	高周波増幅部 RF 増幅器
PS- 2, 3	± 24 V (VHR- 10 - 24)	マグネトロン発振周波数調整用モータ 電源部- 2 の THY DRIVER ユニット
PS- 5	+ 24 V - R, + 5 V (VED- 5 - 2405)	送受信装置全体のリレー及び LED (発光ダイオード)
PS- 4	+ 20 V (VHR- 9 - 20)	高周波増幅部 STALO ユニット

B. 電源部- 2

電源部- 2 は KEEP ALIVE PS ユニットと THY DRIVER ユニットで構成されている。

KEEP ALIVE PS ユニットは立体回路部にある TR リミッタ管に必要なキープアライブ電圧を発生する

TR 管に流れる KEEP ALIVE 電流値は制御部パネルにあるメータで監視することができる。

C. 制御部

制御部は本装置における

- 電源制御
- 送信制御
- 動作監視

を行う機能がある。図- 2.3.4 に制御スイッチ、監視メータを示す。

(1) 制御系

分電盤からの AC 200 V を受電し、本装置で AC 200 V を必要とする箇所に供給する。又、本装置にはマグネトロンを発振させるために高電圧が使用されており送信操作および保守点検時において取扱者の生命保護、ならびに送信異常時における装置の保護を目的として HV インターロック回路が設けてあり、インターロック回路が閉ループの時のみ送信(電波発射)ができるようになっている。

制御系の各スイッチの機能を表- 2.3.2 に示す。

(2) 監視系

制御パネルで送信動作状態の監視ができる。

監視機能を表- 2.3.2 に示す。

D. 高周波増幅部

高周波増幅部は STALO, COHO, SIG AMP, IF AMP の各アッセンブリ, AFC DISCRI, TRIGGER, PW CONT, AFC CONT, AFC AMP, RELAY 及び VD AMP ユニットから構成されて

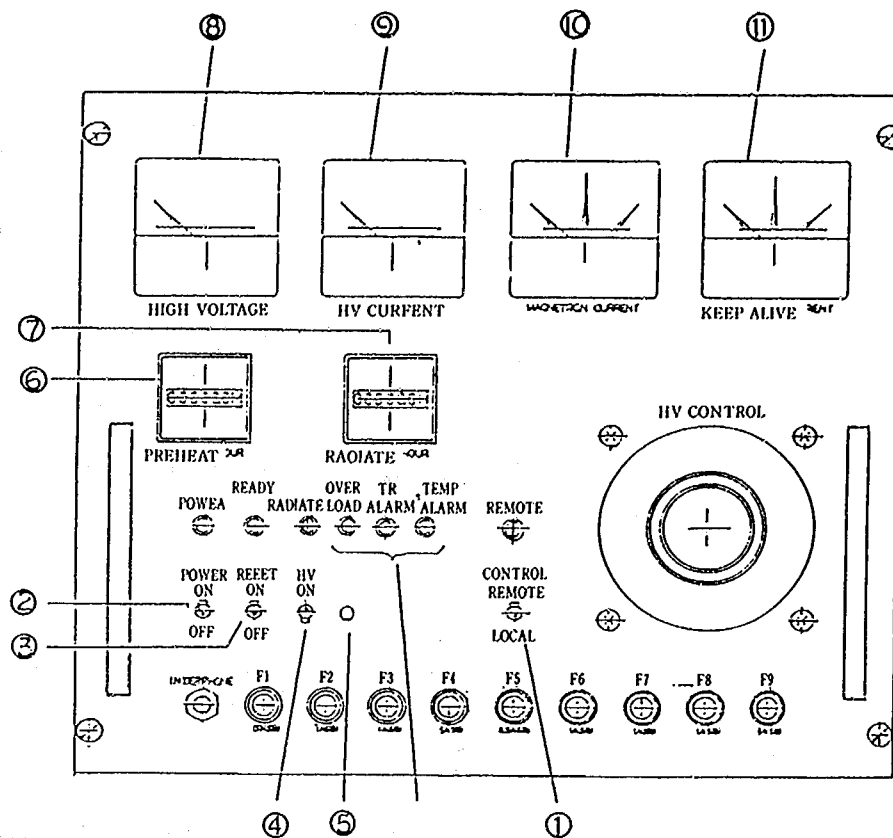


図- 2. 3. 4 制御部パネル図

表- 2. 3. 2 制御部スイッチ機能

操作箇所	表 示	機 能
①	CONTROL REMOTE LOCAL	送受信装置の操作の遠隔操作，局部操作の切換えを行う
②	POWER ON OFF	電源の投入，切断を行う。
③	STAND-BY ON OFF	送受信装置で使用する + 5 V 及び + 24 V - R 以外の低圧電源の接，断を行う。
④	HV ON OFF	ON スイッチで送信を開始し，OFF スイッチで送信停止する。
⑥	RESET	変調部の高圧電源が過負荷になり過負荷リレーが動作した時，このスイッチを押せば復帰する。

表- 2.3.3 制御部監視機能

部 番	名 称	機 能
⑥ M 1	PRE HEAT HOUR	送受信装置の総動作時間を指示する。
⑦ M 2	MAGNETRON HOUR	送信の総時間を指示する。
⑧ M 3	HIGH VOLTAGE	変調部 MODULATOR ユニットで発生する高圧電圧を指示する。
⑨ M 4	HV CURRENT	変調部 MODULATOR ユニットで送信時に流れる高圧電流を指示する。
⑩ M 5	MAGNETRON CURRENT	マグネトロン発振時のマグネトロン陽極平均電流を指示。
⑪ M 6	KEEP ALIVE CURRENT	TR 管に流れるキープアライブ電流値を指示する。

いる。

高周波増幅部では、降雨雪粒子から反射してきた信号から受信強度及びドップラ周波数成分を検出する機能がある。高周波増幅部のアッセンブリ及びユニットの配置図を図- 2.3.5 に示す。図- 2.3.6 の系統図にもとづいて主なアッセンブリとユニットの説明を行う。

(1) STALO-ASSY

STALO (Stable Local Oscillator) ユニットは送信周波数 f_t (5280 MHz) より 30 MHz 高い周波数 f_L (5310 MHz) で発振する高安定局部発振器である。本 ASSY は水晶発振器、通倍器及び 3 dB 分配器で構成されている。水晶発振器では原周波数として 110,62500 MHz を発生させ、さらにフェイズロック発振器で 48 通倍し 5310 MHz の極めて安定した連続波を発生する。周波数安定度は 0.0005 m/o 以下である。

STALO ASSY からの出力は 3 dB 分配器により 2 分割され、SIG ASSY 及び COHO ASSY に送られる。SIG ASSY では局部発振信号として、COHO ASSY では位相検波用の周波数基準信号として使用される。

(2) COHO ASSY

降雨雪粒子からの反射受信信号の中から、その移動成分すなわちドップラ周波数 f_d の検出は、送信電波 (f_t) と受信電波 ($f_r \pm f_d$) 間の周波数偏差又は位相差を測定することにより出来る。

本 ASSY は送信波と受信波との位相差を検出するために、送信波の位相に合った 30 MHz の連続波を発生する機能がある。マグネトロンはパルス幅 0.5 μ s の短い時間内で発振し、かつ各パルス繰返し毎に発振の位相が変わるので、COHO はパルス繰返し時間内 (約 960 μ s) にわたり連続に発振する。COHO ASSY の系統図を図- 2.3.7、発振のタイミングチャートを図- 2.3.8 に示す。

(3) SIG AMP ASSY

本 ASSY は降雨雪からの受信信号を 30 MHz の IF (中間周波数) 信号に変換し、IF AMP ASSY へ出力する機能がある。立体回路部の RF AMP ASSY を通った受信信号 ($f_r \pm f_d$) はミキサの RF 入力端に印加される。ミキサの LO 入力端には STALO ASSY からの局部信号 f_L が印加される。それらの 2 つの信号はミキサーで周波数変換され 30 MHz の IF 信号となり、プリ IF 増幅器へ出力される。

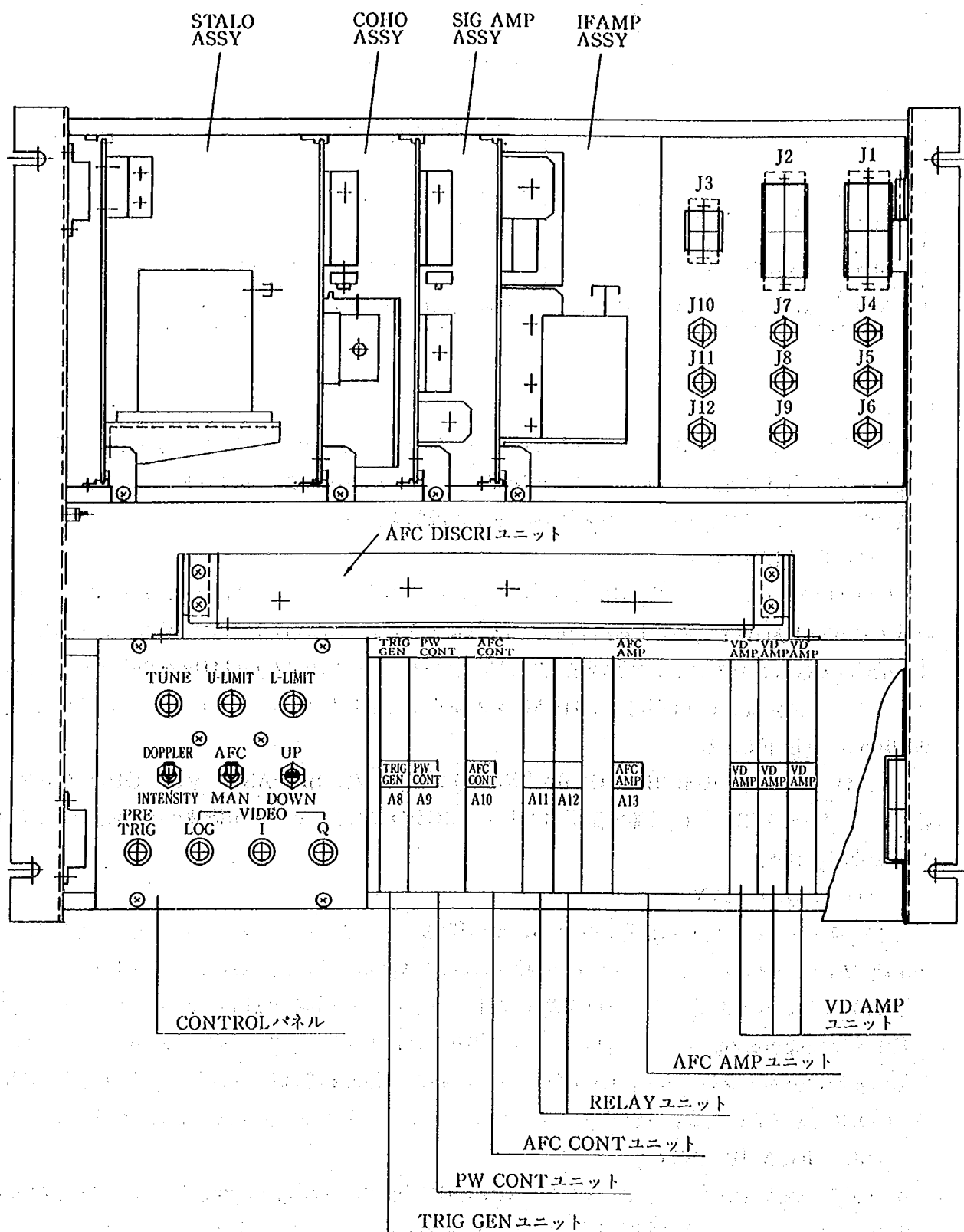


図- 2.3.5 高周波増幅部配置図

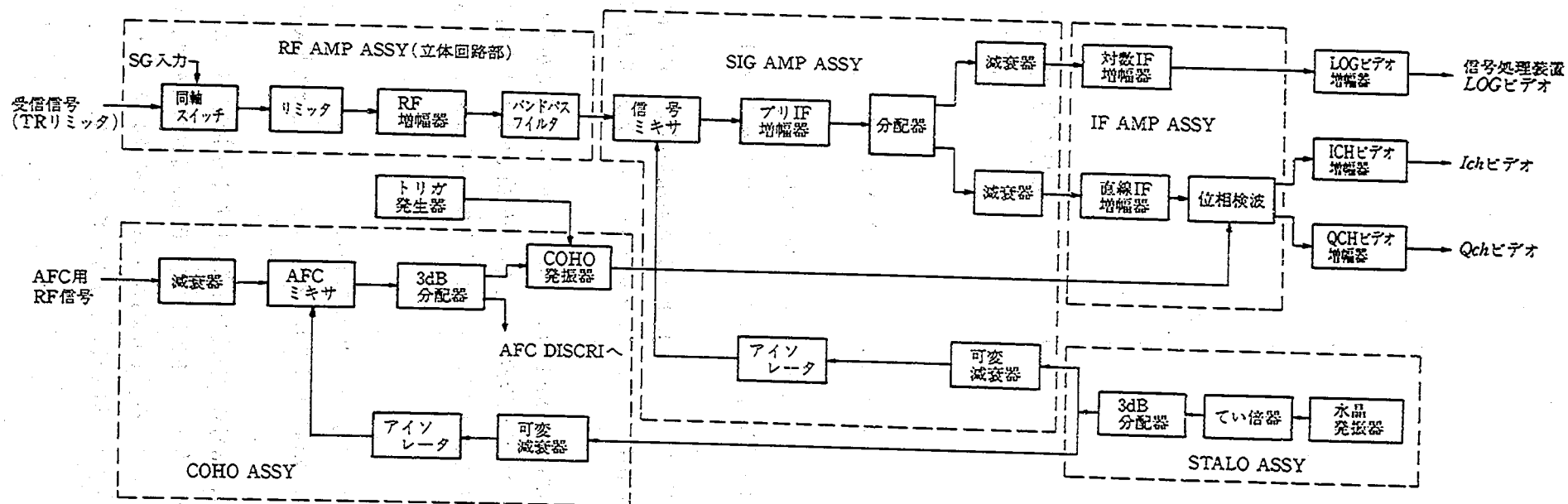


図-2.3.6 高周波増幅部系統図

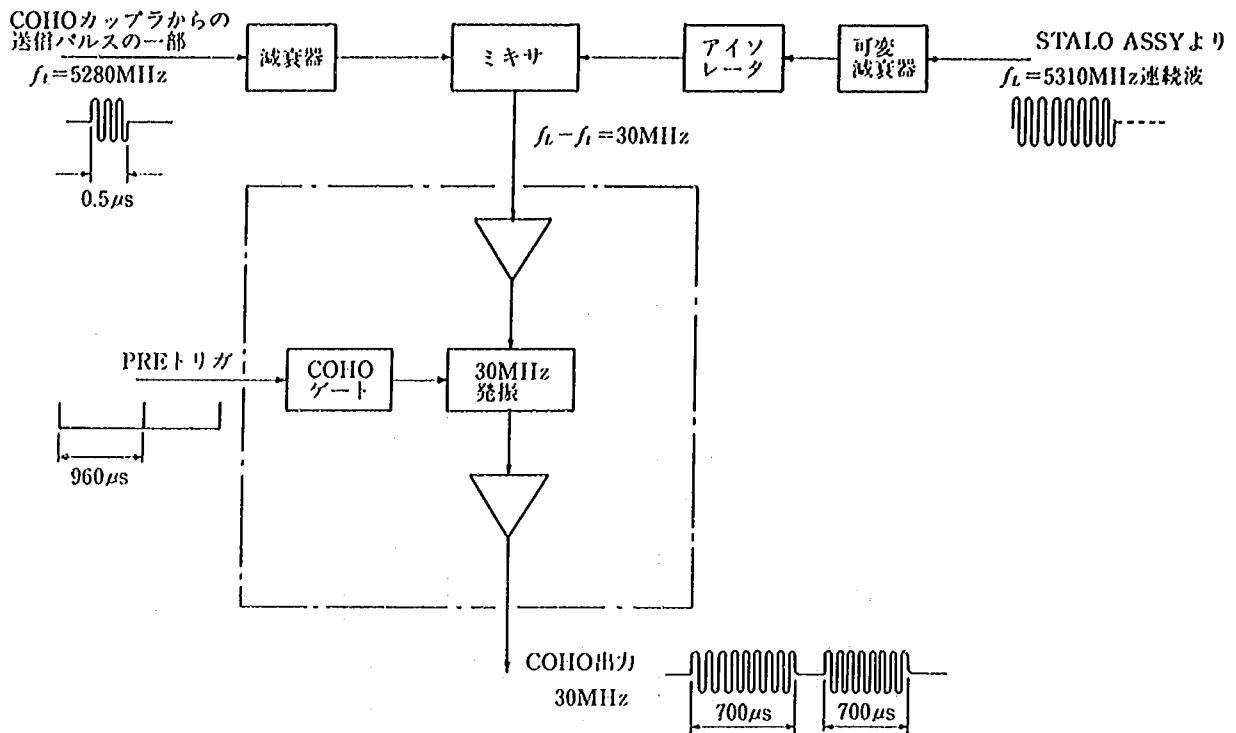


図- 2.3.7 COHO ASSY 系統図

$$f_L - f_i \pm f_d = 5310 - 5280 \pm f_d = 30 \text{ MHz} \pm f_d$$

増幅された IF 信号は 3 dB 分配器を通り、減衰器でレベル調整され IF AMP ASSY に送られる。

(4) IF AMP ASSY

SIG AMP ASSY からの 2 分岐された IF 信号は対数増幅器及び直線増幅器へ入力される。

対数増幅器は対数特性 80 dB のダイナミックレンジをもち受信入力電力に応じたビデオ出力を出力する。

直線増幅器は IF 信号を増幅し位相検波に必要なレベルにする機能がある。位相検波器は直線増幅器からの出力を COHO 信号で位相検波し、両信号の位相差に比例した出力を発生させる。出力信号は互に 90° 位相差をもつ I 及び Q 信号でビデオ増幅ユニットを通して信号処理装置に送られる。位相検波の出力を図- 2.3.9 に示す。

(5) ビデオ増幅器ユニット

ビデオ増幅器は IF AMP ASSY から出力される。

対数、I 及び Q ビデオを増幅し低インピーダンス駆動し、信号処理装置へ出力する。

(6) TRIG GEN ユニット

TRIG GEN ユニットは、信号処理装置から送られてくる PRE トリガを受け波形整形した後、各回路へ供給する機能がある。本ユニットには、送受信装置を単体で動作させる場合に必要な内部トリガを発生する機能がある。水晶発振器で 6 MHz の基準周波数を発生させ、カウンタを用いて、280 Hz 及び 1120 Hz のパルス繰返し周波数のトリガを発生させる。

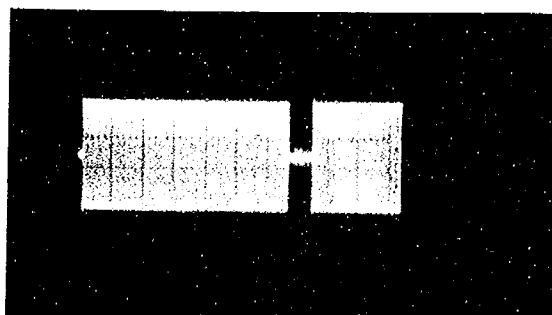
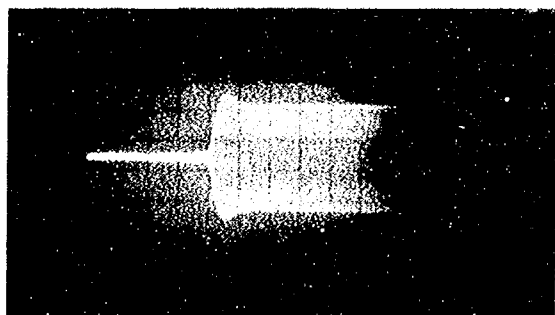
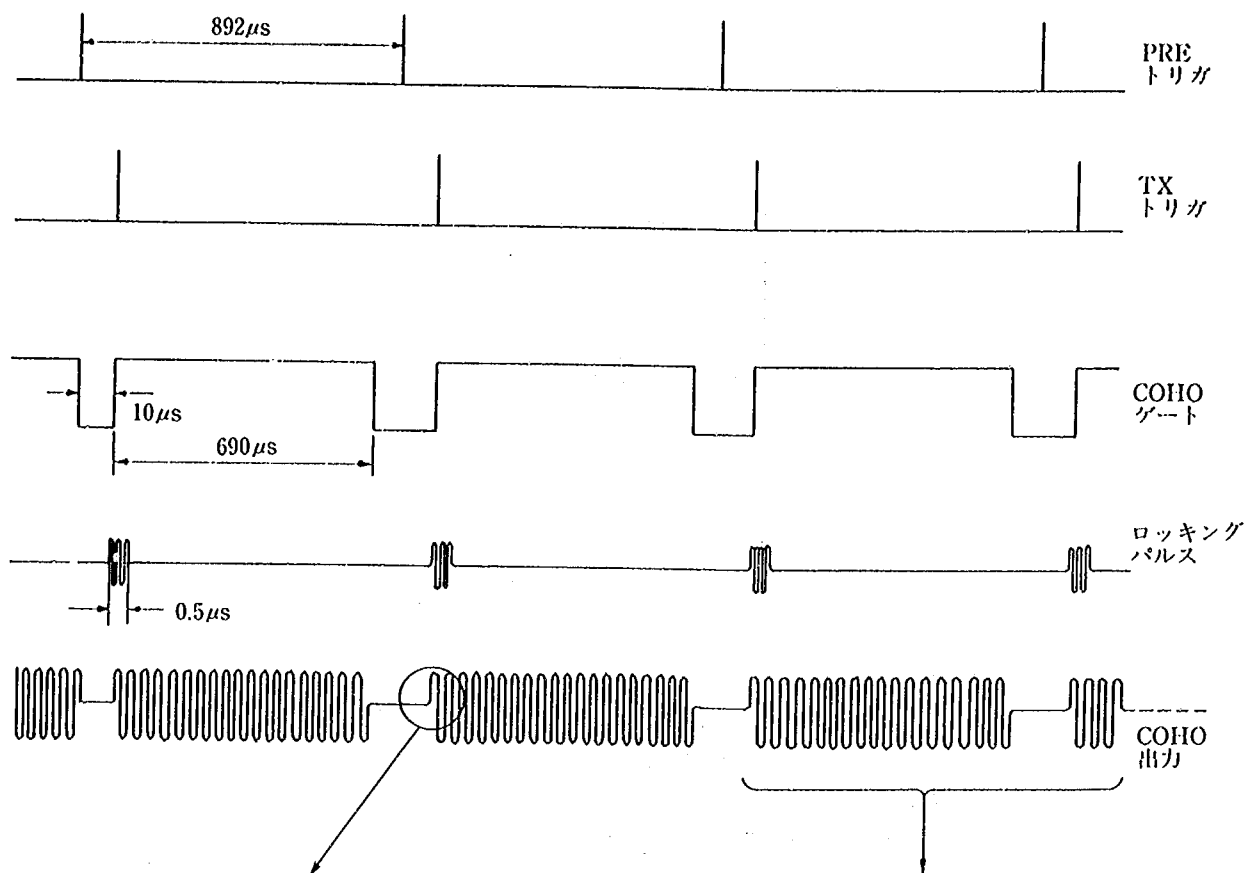


図-2.3.8 COHO ユニットタイミングチャート (ドップラモード時)

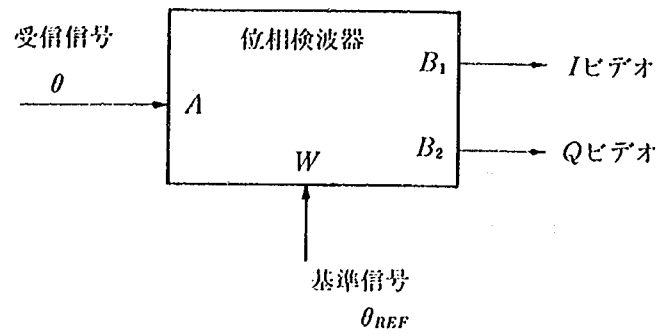
(7) PW CONT ユニット

PW CONT ユニットは次の機能を有す。

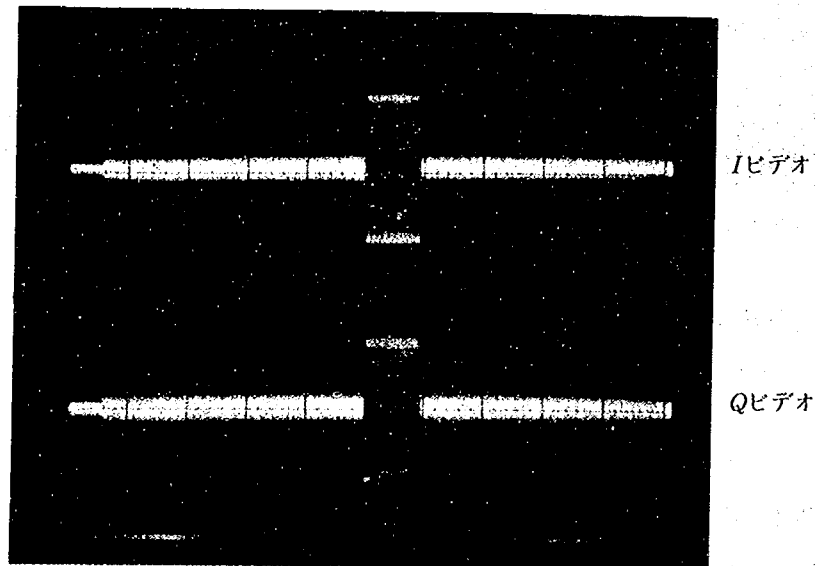
- ① TRIG ユニットからの PRE TRIG を受け、高周波増幅部の COHO ASSY 及び指示装置へ出力する。
- ② PRE TRIG に 10 μ s の時間遅延を与え TX (送信)トリガを発生し、高周波増幅部の AFC DISCRI ユニット電源部-2 の THY DRIVER ユニットへ出力する。
- ③ 空中線制御装置から、偏波切換信号を受け、送信の制御を行う。
- ④ 指示装置からの観測モード (ドップラ/強度) の制御信号を受け、パルス繰返し周波数の選択、パルス幅切換及び送信の制御を行う。

(8) AFC 機能

本装置にはマグネトロンの発振周波数を自動的に一定に制御する。AFC (Automatic Frequency



A : 位相 θ をもった受信信号
 W : 基準位相 θ_{REF} の $COHO$ 信号
 B_1 : $X = K \sin (\theta_{REF} - \theta) \cdots \cdots I$ ビデオ
 B_2 : $Y = K \cos (\theta_{REF} - \theta) \cdots \cdots Q$ ビデオ



SG (標準信号発生器) の信号を RF 増幅器から入力し
 位相検波した波形 (パルス幅 $20 \mu s$)

図一 2.3.9 位相検波出力図

Control) 機能があり、常に受信機の同調を最高感度に保つことができる。系統を図- 2.3.10 に示す。

立体回路部からの送信パルスの一部は STALO の出力と AFC ミキサーで混合され、30 MHz の IF 信号に変換される。この信号は AFC デイスクリユニットに送られ、30 MHz の中心周波数からの離調分が検出され、その差分に比例した誤差電圧が発生しパルス繰返し周波数毎にサンプリングホールドされる。誤差電圧は AFC AMP ユニットへ送れる。電力増幅され、マグネトロンの同調駆動

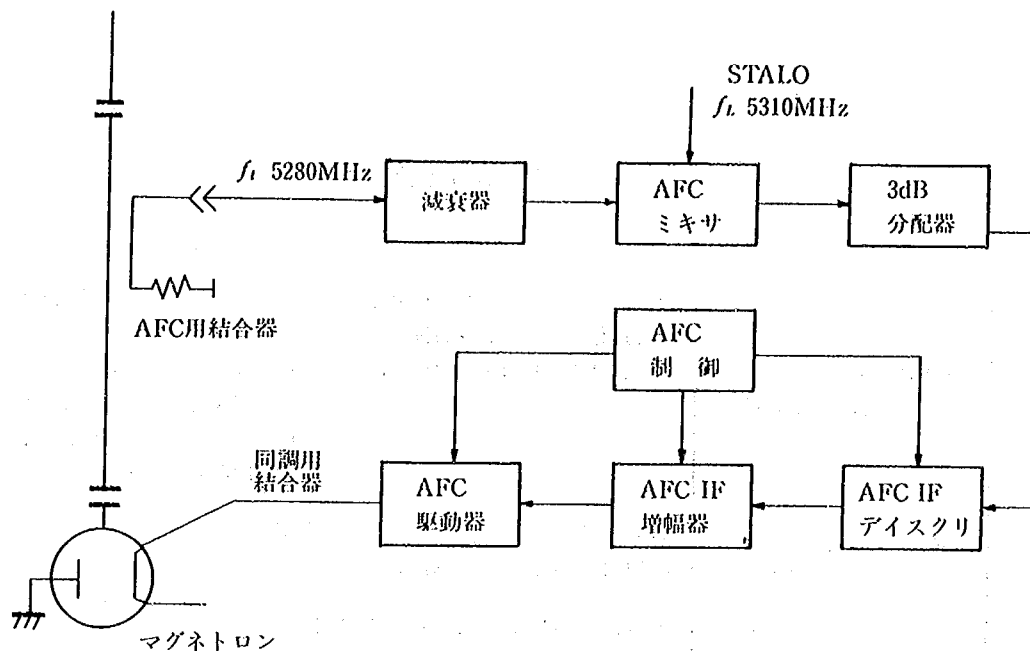


図- 2.3.10 AFC 系統図

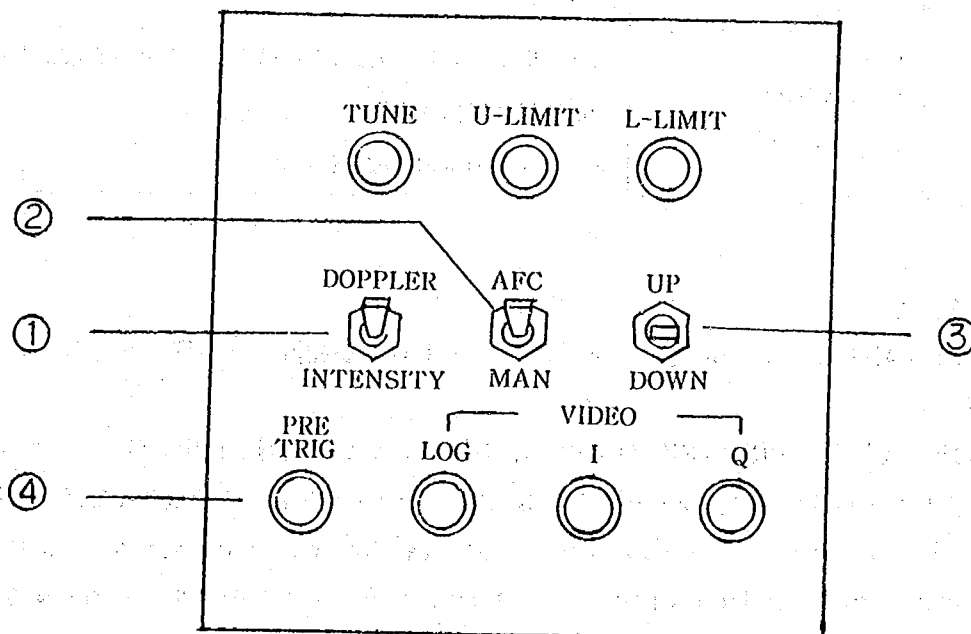


図- 2.3.11 CONTROL パネル図

用のモータを制御する信号として AFC 駆動器へ出力される。マグネトロン M1344 は機械的に周波数を可変することができ、AFC 駆動器内の直流モータにより AFC ディスクリの誤差電圧が零、すなわち、マグネトロンの発振周波数が 5280 MHz になるように機械的同調が行われる。

AFC 駆動器のクラッチ切換スイッチにより、マグネトロン駆動回路を自動から手動モードに切換えることができ、マグネトロン同調つまみを廻らすことにより手動にて、マグネトロンの発振周波数を可変することができる。

(9) CONTROL パネル

CONTROL パネルには、制御スイッチ、モニタ端子があり、受信系の動作制御及び監視ができる。(図-2.3.11, 表-2.3.4)

表-2.3.4 表示機能

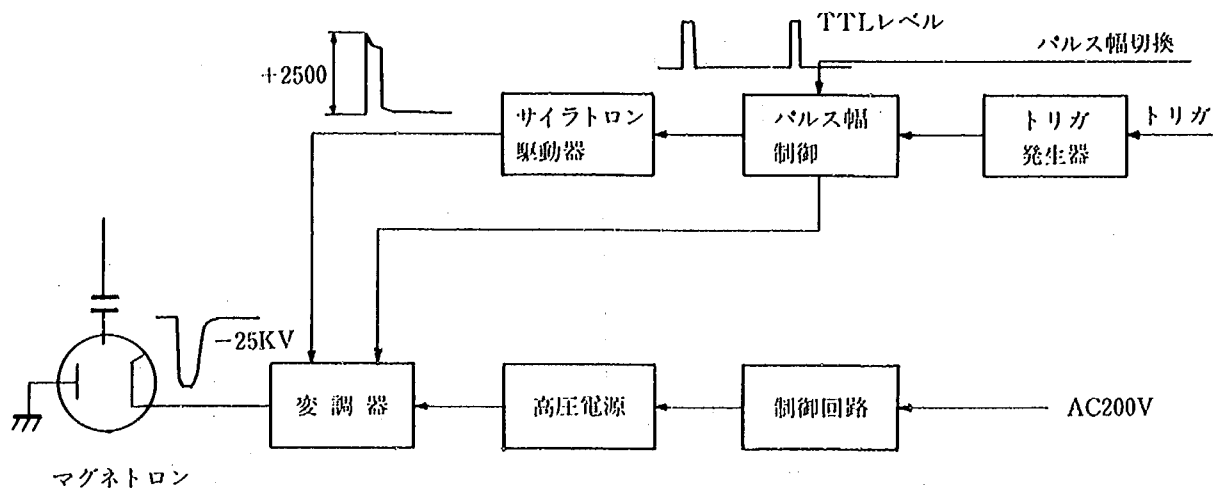
操作箇所	表 示	機 能	備 考
①	DOPPLER / INTENSITY	送受信装置が“LOCAL”の状態にて送信パルス幅の切換を行う。通常は DOPPLER 側にしておく。	送信繰返し周波数は通常信号処理装置にて切換えられるので、このスイッチにてメンテナンスを行う場合には TRIG ユニット内の EXT/INT 切換スイッチを INT 側にすること。
②	AFC / MAN	AFC: 自動的に受信同調を行う。 MAN: 手動にて受信同調を行う。	通常 AFC にしておくこと。
③	UP / (ニュートラル) / DOWN	② AFC / MAN スイッチが MAN の時 (手動同調時) に同調周波数を UP (上) / DOWN (下) させ、同調をとる。 左上の“TUNE” LED が同調時に点灯する。	
④	PRE TRIG LOG VIDEO I } VIDEO Q	先行トリガ (信号処理装置より送られたトリガを波形整形したもの) 受信機対数増幅器出力モニタ (二重偏波系) ドップラ系の位相検波されたビデオモニタ	

E. 変 調 部

変調部内の MODULATOR ユニットは、マグネトロンを発振させる機能があり、送信系統を図-2.3.12 に示す。

信号処理装置からの PRE TRIG は高周波増幅部のトリガ発生器 (TRIG GEN ユニット) 及びパルス幅制御 (PW CONT ユニット) を経て、電源部-2 のサイラトロン駆動器 (THY DRIVER ユニット) へ送られてサイラトロンを駆動するのに必要な振幅 250 V、パルス幅 6 μ s の高圧トリガとなる。

変調部内の変調器 (MODULATOR ユニット) は、マグネトロンをパルス変調発振させるのに必要なパルス幅 2 μ s 又は 0.5 μ s の負極性の高圧パルスをラインタイプ変調方式により発生させる。



図－ 2. 3. 12 送信系統図

F. 立体回路部

(1) 立体回路系

立体回路系は、図－ 2. 3. 13 に示す構成になっており、マグネトロンで発生されたマイクロ波電力を空中線に伝送し、目標物からの反射信号を空中線から、受信系へ伝送する機能がある。

1) フレキシブル導波管(W1)

マグネトロンの出力は、フレキシブル導波管に接続され、機械的振動によりマグネトロン出口が破損しない様にするものである。

2) AFC カップラ(W2)

AFC 基準信号として、マイクロ波電力の一部(－ 70 dB) を主導波管より取り出して、AFC MIXER に出力する機能がある。

3) フェライト・サーキュレータ(W3)

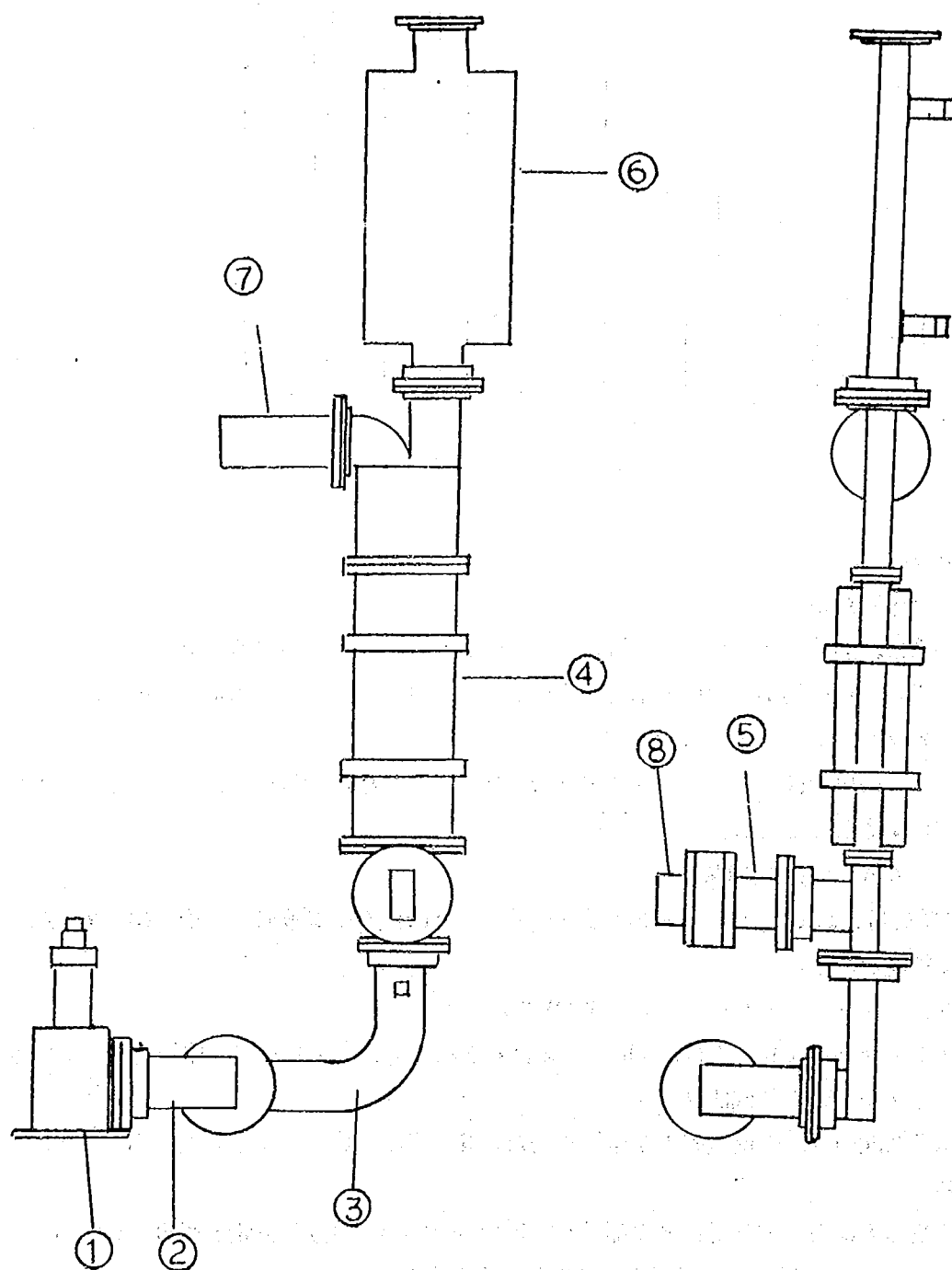
フェライト・サーキュレータは、TR 管と組合わされてデュプレクサの機能を持っている。

デュプレクサの主な機能は

- (イ) 送信期間中は、送信装置と空中線を結合させ、発生されたマイクロ波電力を空中線へ伝送させる。
- (ロ) 送信の大電力により受信系の部品(クリスタルダイオード)が破損を受けないように送信時間(2 μ sec)の間送信系と受信系を切離し、大電力が受信系に漏れるのを防ぐ。
- (ハ) 近距離の目標を探知するために2 μ sec の送信パルスの終りで急速に空中線と受信系の結合を行う。
- (ニ) デュプレクサを挿入したことにより、送信、受信パルスの双方に減衰を及ぼさない。

以上の考慮した場合、フェライト・サーキュレータは従来の TR / ATR 方式のガス放電管によるデュプレクサに比べて

- (イ) 回復時間が短い。
- (ロ) 寿命は半永久的。
- (ハ) アイソレータの動作もかねるので負荷の状態によりマグネトロンの動作が影響されることが



- | | | |
|-----------------|------|----------------|
| ① マグネトロン M1344 | (V1) | ⑥ 双方向性結合器 (W4) |
| ② フレキシブル導波管 | (W1) | ⑦ ダミーロード (W6) |
| ③ AFCギャップ | (W2) | ⑧ アダプタ (W7) |
| ④ フェライト・サーキュレータ | (W3) | |
| ⑤ TRリミッタ TL375 | (V2) | |

図-2.3.13 立体回路構成図

ない。

(二) 挿入損失が 0.5 dB 以下である。

等のすぐれた特長をもっている。

4) TR リミッタ管(V2)

TR 管は、フェライトサーキュレータと組合せてデュープレクサを構成する。フェライトサーキュレータのみでは送信と受信の開口間のアイソレーションは約 25 ～ 30 dB 程度で送信出力の一部が受信系に漏れることや、空中線の定在波による反射電力が受信系に反射してきて、ミキサのクリスタルダイオードを焼損する恐れがあるので、これを防ぐために TR リミッタ管を使用する。

TR 管のキープアライブ電圧は電源部-2 から供給され、その電流値は制御部の「KEEP ALIVE CURRENT」メータに指示される。

5) 双方向性結合器(W4)

双方向性結合器には 2 つの出力接栓があり、FORWARD 側接栓からは送信電力の約 45 dB 減衰した電力が出力されており、送信電力、周波数の測定ができる。

BACKWARD 側接栓からは、空中線の定在波(VSWR)による反射電力の 35 dB 減衰した電力が出力される。

双方の出力電力を測定することにより、空中線の VSWR が算出される。

6) ダミーロード(W6)

空中線の VSWR によるわずかな反射電力がフェライトサーキュレータへ反射してくる。この反射電力を吸収し、反射電力がマグネトロンへ戻らない様にする。

7) アダプタ(W7)

アダプタは、同軸導波管変換器で、矩形導波管で作られている立体回路系を同軸系路に変換するものである。

(2) RF 増幅系

本系統は雨や雪等の目標から反射してきた受信信号をマイクロ波で増幅する機能がある。

1) COAX SW ユニット(A1)

本ユニットはマイクロ波同軸スイッチで受信系へ受信信号を入力するか、標準信号発生器からの基準信号を入力するかを切り換えを行う。高周波増幅部パネルの RF TEST スイッチを ON にすると SG RF IN から標準信号発生器の基準信号を入力することができる。

2) RF AMP ユニット(A2)

本ユニットは、マイクロ波増幅器で、微弱な受信信号を増幅すると共に雑音指数を向上させている。性能は次の通りである。

周波数帯 5.0 ～ 6.0 GHz

利 得 25 dBmin

NF 4 dBmax

3) BPF ユニット(A3)

受信信号には色々な周波数が含まれるため、5280 MHz 以外の不要な周波数成分を除去するためのバンドパスフィルターである。

フィルタ特性を図-2.3.14 に示す。

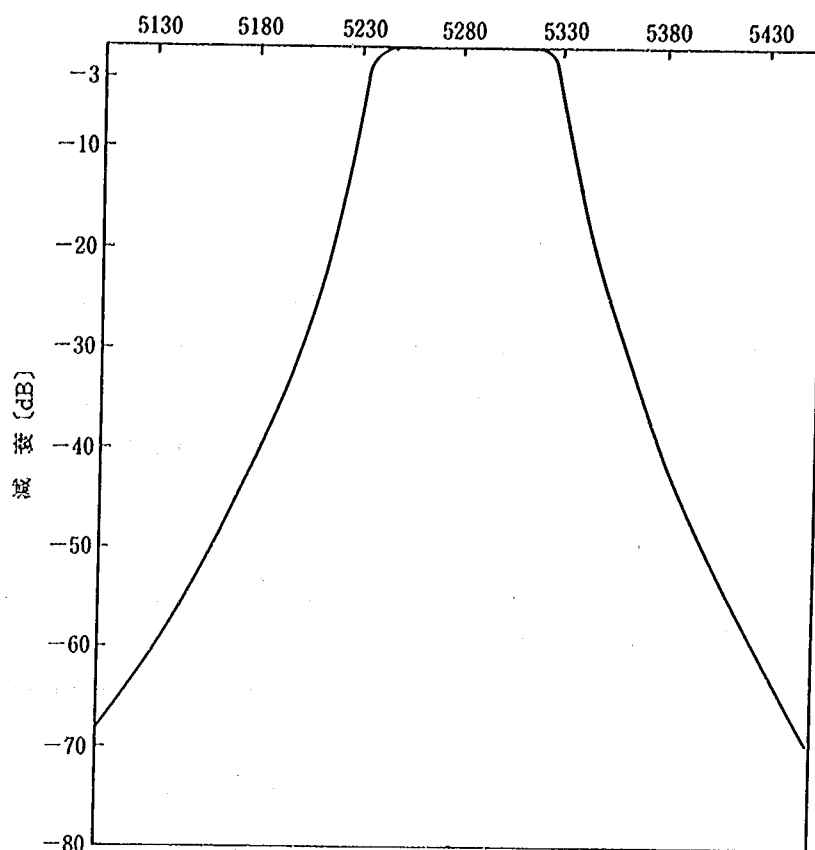


図- 2.3.14 BPF ユニット特性図

2.3.4 主要性能

- | | |
|----------------|--|
| (1) 周波数 | 5280 MHz |
| (2) 尖頭出力 | 75 kw |
| (3) パルス幅 | 2 μ s (二重偏波)
0.5 μ s (ドップラ) |
| (4) 繰返し周波数 | 280 pps (二重偏波)
1120 pps (ドップラ) |
| (5) マグネトロン | M1344 (Special Modified) |
| (6) 中間周波数 | 30 MHz |
| (7) 受信帯域幅 | 0.7 MHz (二重偏波)
2.8 MHz (ドップラ) |
| (8) 雑音指数 | 5 dB 以下 |
| (9) 最小受信電力 | -107.5 dBm (信号処理上) |
| (10) 受信機直線性 | 76.5 dB |
| (11) AFC カバー範囲 | 指定周波数 $\pm$ 2 MHz |

2.4.1 構造

本装置の前面及び背面はそれぞれ片開きの1枚扉になっている。

- (1) ドップラー信号処理系パネル
- (2) 強度信号処理系パネル
- (3) ドップラー信号処理部
- (4) 強度信号処理部
- (5) インターフェース部
- (6) ノーヒューズブレーカ

2.4.2 性能

(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 ビット, $1.67 \mu\text{s}$ 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
ドップラーモード時 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 ($360^\circ / 256$)

② 距離補正 40 km 減算方式

③ MTI 消去比 20 dB 以上

(5) ドップラーモード処理

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

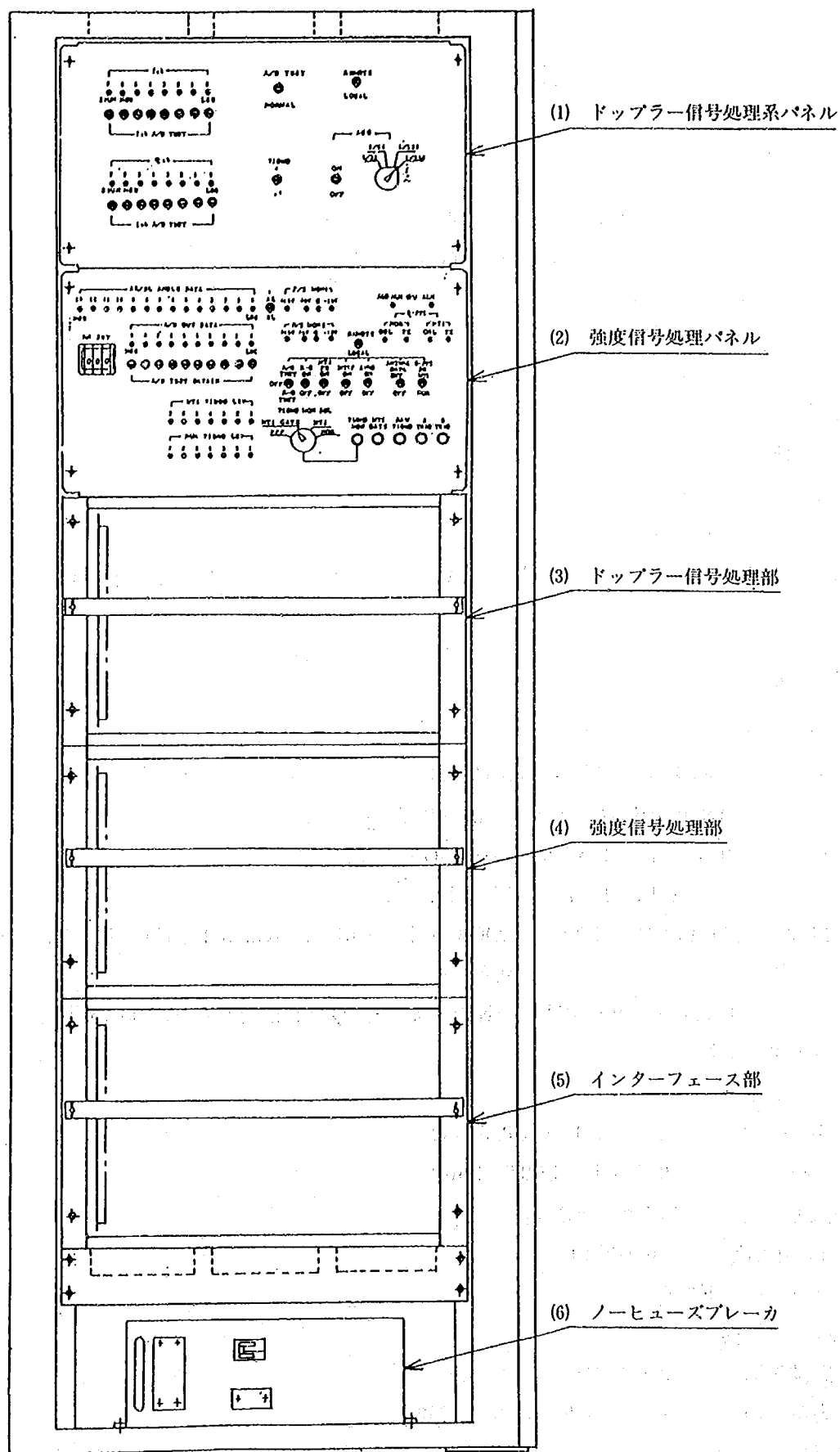


図- 2.4.1 信号処理部外観図

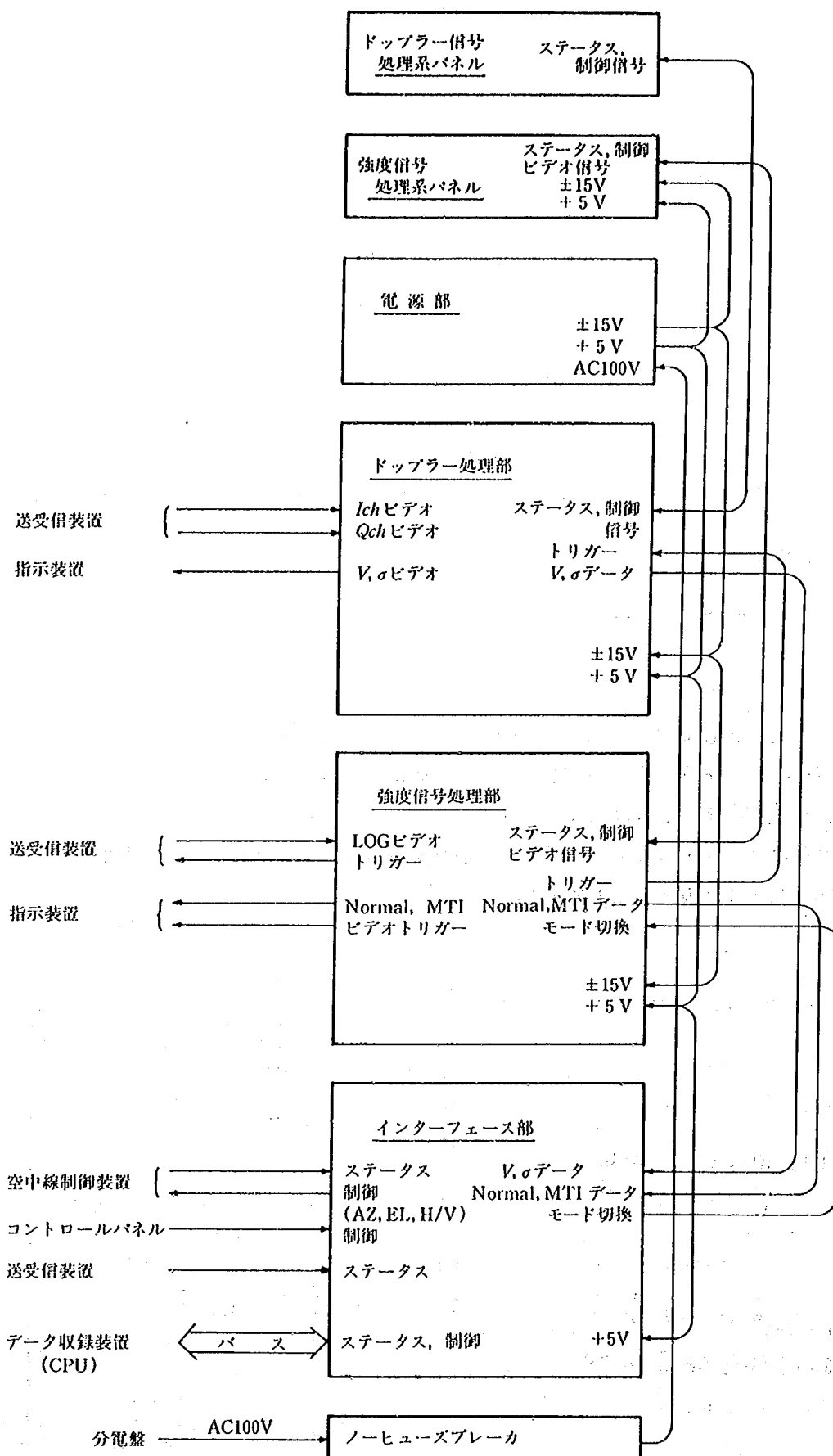


図-2.4.2 信号処理部ブロック図

③ 最大測定速度 $\pm 16 \text{ m/s}$

(6) 出力

① トリガー

② ドップラーモード時 $\bar{V}$ (平均速度)

σ_v (分散)

Z_H (水平偏波 Normal)

③ 二重偏波モード時

Z_{HN} (水平偏波 Normal)

Z_{VN} (垂直偏波 Normal)

Z_{HM} (水平偏波 MTI)

Z_{VM} (垂直偏波 MTI)

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 ビットを1ビット含む)

2.4.3 各部の動作原理

(1) ドップラー信号処理系パネル

ドップラーモード時に

① LIN ビデオのモニター

② Auto Gain Control の ON/OFF 切換え及び応答速度の選択

③ 指示装置への V (平均速度), σ (分散) アナログビデオの切換え

を可能にする, 発光ダイオード及びスイッチからなる。

発光ダイオード及びスイッチのステータス信号及び制御信号は, ドップラー信号処理部に入る。

主たる機能を図-2.4.3, 表-2.4.1 に示す。

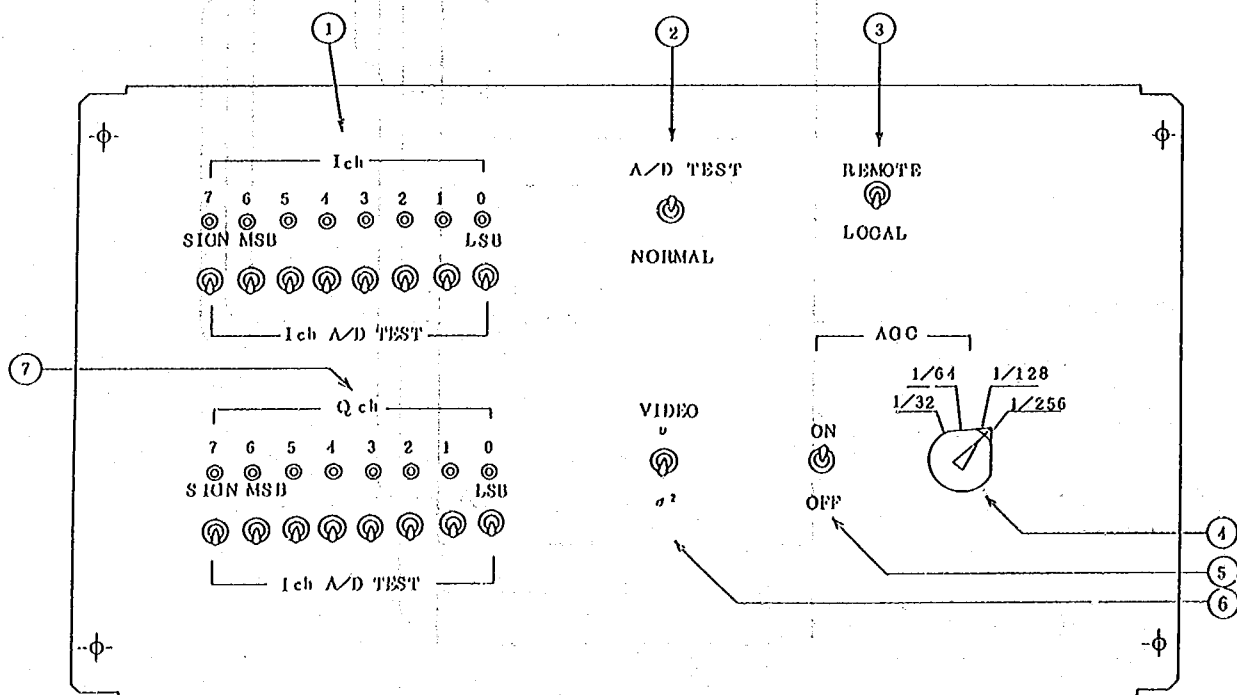


図-2.4.3 ドップラ信号処理系パネル

表-2.4.1 ドップラー信号処理系パネルのスイッチ等の機能

区分 No	スイッチ, 発光ダイ オード類の名称	機 能	LOCAL/ REMOTE	備 考
1	REMOTE/ LOCAL	信号処理装置 (PPP 処理部) の REMOTE/LOCAL 切換		③
2	A/D TEST/ NORMAL	A/D TEST の ON/OFF		②
3	ICH (A/D OUT DATA 0~7)	ICH A/D OUT DATA のモニター		①
4	QCH (A/D OUT DATA 0~7)	QCH A/D OUT DATA の モニター		⑦
5	ICH A/D TEST (DATA IN)	ICH A/D TEST DATA の 入力	LOCAL	
6	QCH A/D TEST (DATA IN)	QCH A/D TEST DATA の 入力	LOCAL	
7	AGC ON/OFF	AUTO GAIN CONTROL の ON/OFF 切換え		⑤
8	AGC	AGC の応答速度の切換 (1/32, 1/64, 1/128, 1/256)		AGC ON/OFF が ON の時有効: ④
9	VIDEO V/ σ^2	PPP 処理ビデオ V/ σ^2 の切換え		PPI 表示装置へ出 力: ⑥

(2) 強度信号処理系パネル

ドップラーモード, 二重偏波モードにおける強度信号処理時に

- ① LOG ビデオのモニター
- ② 送信トリガーのモニター
- ③ 空中線装置の Azimuth, Elevation 角度のモニター
- ④ Normal, MTI の処理ビデオのモニター
- ⑤ 直流電源の電圧モニター
- ⑥ 信号処理系のアラーム
- ⑦ 受信機レベルのアラーム
- ⑧ 距離補正 (RANGE CORRECTION) の ON/OFF
- ⑨ 指示装置への Normal, MTI アナログビデオの切換え

を可能にする, 発光ダイオード, スイッチ, コネクタからなる。

発光ダイオード, スイッチ及びコネクタのステータス信号, 制御信号及びビデオ信号は, 強度信号処理部に入る。

主たる機能を図-2.4.4, 表-2.4.2 に示す。

表- 2.4.2 強度信号処理系パネルの各スイッチ等の機能(1/3)

区分 No	スイッチ, 発光ダイ オード類の名称	機 能	LOCAL / REMOTE	備 考
1	P/S MON 1 「-15V」	ANALOG 電源 -15Vのモニタ ー		
2	P/S MON 1 「G」	ANALOG 電源 GND のモニタ ー		
3	P/S MON 1 「+5V」	ANALOG 電源 +5Vのモニタ ー		
4	P/S MON 1 「+15V」	ANALOG 電源 +15Vのモニ ター		
5	P/S MON 2 「-15V」	DIGITAL 電源 -15Vのモニ ター		
6	P/S MON 2 「G」	DIGITAL 電源 GND のモニタ ー		
7	P/S MON 2 「+5V」	DIGITAL 電源 +5Vのモニタ ー		
8	P/S MON 2 「+15V」	DIGITAL 電源 +15Vのモニ ター		
9	CPU ALM	信号処理系のアラーム表示		
10	ALC ALM	受信機レベルのアラーム表示		アラーム点灯時受信 機レベルが±1dB 変動したことを示す。
11	REMOTE/ LOCAL	信号処理装置の REMOTE/ LOCAL 切換え		
12	A/D TEST/OFF/ R・C TEST	A/D TEST, R・C TEST の選 択	LOCAL	
13	R・C ON/OFF	RANGE CORRECTION の ON/OFF		
14	VIDEO MON SEL	VIDEO MONITOR の PPP, MTI GATE, MTI NORの選択		J19の「VIDEO MON」に出力される。
15	VIDEO MON	VIDEO の MONITOR		S2の「VIDEO MON SEL」で選択 したVIDEO
16	MTI GATE	MTI GATE のモニター		
17	RAW VIDEO	RAW VIDEO のモニター		
18	A TRIG	A TRIGGER のモニター		

表-2.4.2 強度信号処理系パネルの各スイッチ等の機能(2/2)

区分 No	スイッチ, 発光ダイ オード類の名称	機 能	LOCAL/ REMOTE	備 考
19	B TRIG	B TRIGGER のモニター		S2の「VIDEO MON SEL」で選択 した VIDEO に同期 した B TRIGGER
20	AZ/EL	AZIMUTH/ELEVATION ANGLE DATA モニターの AZ/ EL 切換え		注) AZ DATA の モニターは不可
21	AZ/EL ANGLE DATA 0~13	AZIMUTH/ELEVATION ANGLE DATA のモニター		
22	A/D OUT DATA 0~9	A/D OUT DATA のモニター		「A/D TEST」時, 「A/D TEST DATA IN」データ表示
23	A/D TEST DATA IN	A/D TEST DATA の INPUT	LOCAL	「A/D TEST」時 有効
24	RN SEL (km)	VIDEO LEVEL のモニター距離 設定	LOCAL	「R・C TEST」時 有効
25	MTI VIDEO LEV 0~7	MTI VIDEO のLEVEL 表示		「R・C TEST」時, RN SET 距離表示
26	NOR VIDEO LEV 0~7	NORMAL VIDEO の LEVEL 表示		「R・C TEST」時, RN SET 距離表示

(3) ドップラ信号処理

気象観測用レーダにおいて得られる情報には, 従来の受信電力強度の他に目標(雨・雪などの降水物質)の移動速度に関する情報も含まれている。このドップラ信号処理系においては, Pulse Pair Processor (以降 PPP と略す)方式を用いて, ドップラ平均速度及び分散をリアルタイムに算出し, 又, 同時に強度信号処理系において強度信号(NORMAL系)もリアルタイムで算出し磁気テープに収録している。また, 磁気テープに収録されたデータを後に大型計算機にて解析を行うことを目的としている。

① ドップラレーダ

ドップラレーダは, ドップラ効果を利用して上層の水平風・鉛直風の測定並びに降水物質の形態の判別及び降水粒子群の粒径分布の推定等が可能である。

レーダで測定できるのは, 速度がビーム方向成分のみに限定される。

ドップラ平均速度 V_D は

$$V_D = V_h \cdot \cos \theta_e \cdot \cos (\varphi - \theta_e) + V_f \sin \theta_e \quad \cdots \cdots (2.4.1)$$

で表わされる。

V_h : 水平風速

V_f : 降水の平均落下速度

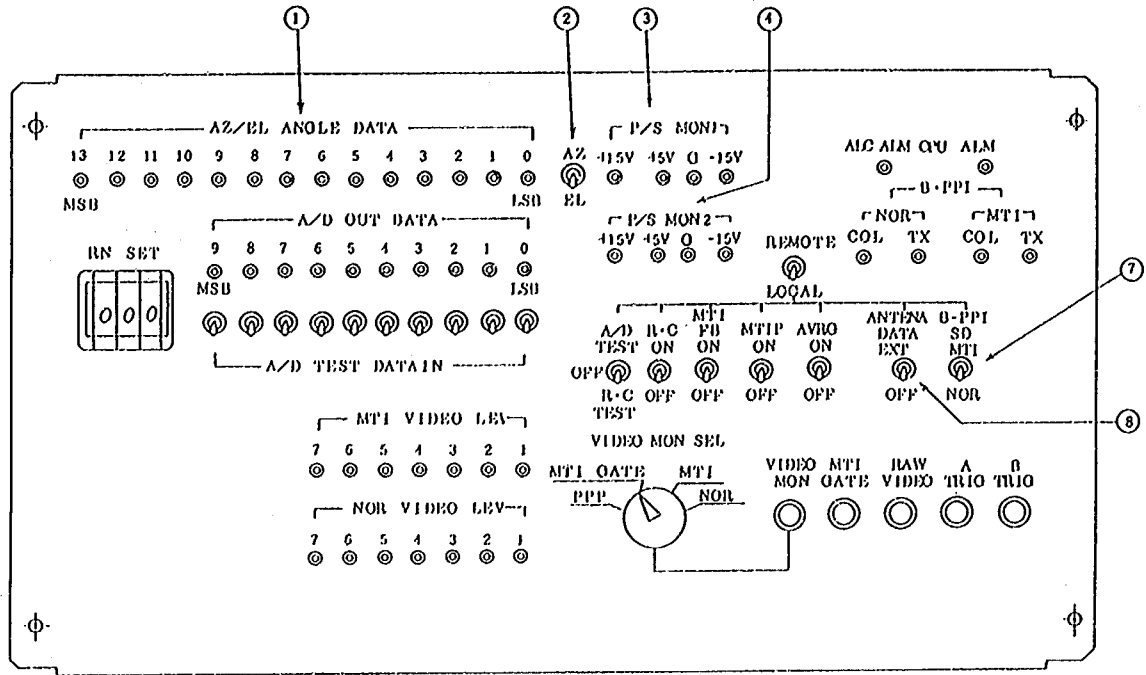


図- 2.4.4 強度信号処理系パネル

θ_e : レーダ仰角

φ : 風 向

θ_a : レーダ方位

(2.4.1) 式を図示すると図- 2.4.5 で表わすことができる。

又, V_D を φ の関数として VAD 表示 (Velocity Azimuth Display) すると図- 2.4.6 となる。

$$V_{max} = V_h \cos \theta_e + V_f \sin \theta_e \cdots (2.4.2)$$

$$V_{min} = V_h \cos \theta_e - V_f \sin \theta_e \cdots (2.4.3)$$

(2.4.2), (2.4.3) 式より, 任意の高度における V_h , V_f は次式のようになる。

$$V_h = (V_{max} + V_{min}) / 2 \cos \theta_e \cdots (2.4.4)$$

$$V_f = (V_{max} - V_{min}) / 2 \sin \theta_e \cdots (2.4.5)$$

今, Z を複素信号とすると自己相関関数 $R(\tau)$ は次式で表わされる。

$$R(\tau) = \dot{Z}_1^* \cdot \dot{Z}_2 \cdots (2.4.6)$$

τ : レーダ周期 $\dot{Z}_2$: $\dot{Z}_1$ より 1 レーダ周期遅れた信号

$\dot{Z}_1$: ドップラ複素信号 $\dot{Z}^* : \dot{Z}$ の共役複素信号

$R(\tau)$ の実数部と虚数部を, それぞれ R_e , I_m

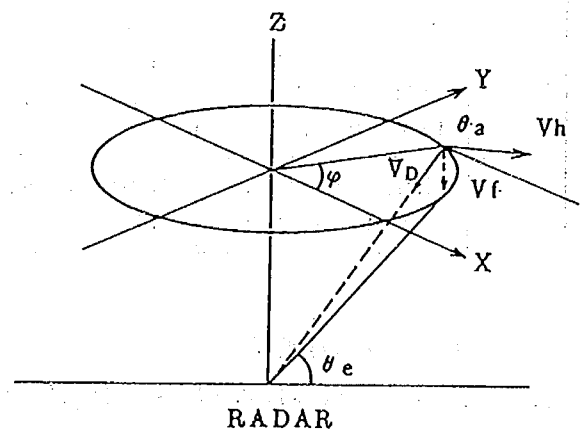


図- 2.4.5 水平風を得るためのレーダ走査

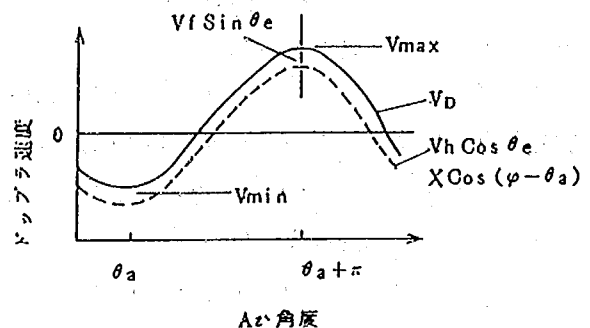


図- 2.4.6 VAD パターン

と表せば平均速度 V ，分散 σ^2 は次式となる。

$$V = \frac{\lambda}{4\pi r} \tan^{-1} \left(\frac{I_m R(r)}{R_o R(r)} \right) \dots\dots\dots (2.4.7)$$

$$\sigma^2 = \frac{\lambda^2}{2(2\pi r)^2} \left(1 - \frac{|R(r)|}{R(o)} \right) \dots\dots\dots (2.4.8)$$

ここで， $R(o)$ は $r = 0$ の時の自己相関関数であるが AGC 回路を用いることによりドップラ複素信号は正規化され，その結果 $R(o) \simeq 1$ となり (2.4.8) 式は次式のようになる。

$$\sigma^2 = \frac{\lambda^2}{(2\pi r)^2} (1 - |R(r)|) \dots\dots\dots (2.4.9)$$

又，ドップラ複素信号を

$$\dot{Z}_1^* = x_1 - jy_1 \dots\dots\dots (2.4.10)$$

$$\dot{Z}_2 = x_2 + jy_2 \dots\dots\dots (2.4.11)$$

とすると，(2.4.7)，(2.4.9) は次式のようになる。

$$V = \frac{\lambda}{4\pi r} \tan^{-1} \left(\frac{-x_2 y_1 + x_1 y_2}{x_1 x_2 + y_1 y_2} \right) \dots\dots\dots (2.4.12)$$

$$\sigma^2 = \frac{\lambda^2}{2(2\pi r)^2} \left(1 - \sqrt{(x_1 x_2 + y_1 y_2)^2 + (-x_2 y_1 + x_1 y_2)^2} \right) \dots\dots (2.4.13)$$

受信装置の位相検波器で位相検波され 90° 位相がずれた信号， I チャンネル， Q チャンネル信号は下記のように表わされる。

$$Z_i = x_i + jy_i \quad x_i = I \text{ チャンネル} \quad jy_i = Q \text{ チャンネル}$$

次に 1 レーダ周期遅れたドップラ複素信号は

$$Z_{i+1} = x_{i+1} + jy_{i+1}$$

に分離される。

以上から 4 つの成分

$$x_i \cdot x_{i+1}, y_i \cdot y_{i+1},$$

$$x_i \cdot y_{i+1}, x_{i+1} \cdot y_i$$

を求める。

次に方位方向の平均化が行われる。本信号処理においては，方位方向に 256 ヒットを行う。図 2.4.7 に概念図を示す。

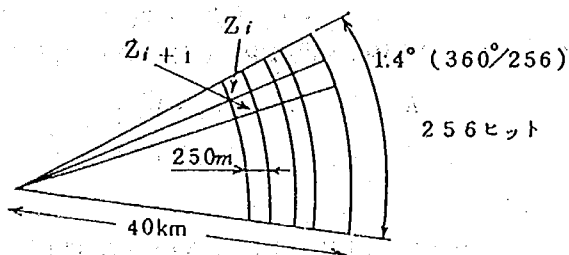


図 2.4.7 方位平均概念図

ドップラ平均速度 V と分散 σ^2 は 1 rpm (アンテナ回転数 … 60 秒/回転) の間に処理を行う。算出する V ， σ^2 はあらかじめ ROM に書き込まれてある。

出力は，8 bit (但し， V は sign bit + 7 bit) のデジタル値で信号収録装置に送られる。又，D/A 変換を行い PPI 表示装置にも送られている。

② パルスペア処理 (図 2.4.8 参照)

(a) A/D CONV (A/D 変換器)

受信機より，位相検波され 90° 位相の異なった I ch 信号 (A 302)， Q ch 信号 (A 304) を入力する。

I, Qch の各信号は A/D 変換器により, 10bit のデジタル値に量子化され2の補数表示で出力される。
 又, 「A/D TEST/NORMAL」スイッチを TEST 側にドップラー信号処理パネルで選択すると,
 パネルの TEST DATA IN (I, Qch) の内容を D/A コンバータによってアナログ変換した出力が A
 /D コンバータに入力されていく。

(b) DELAY UNIT (A 307)

入力された I, Q 信号 (8bit デジタル値) は, バッファで受けた後メモリー (RAM) で 1 PRF
 分のデータを記憶している。

(c) MULTI UNIT (掛算器) (A 308, A 309, A 313)

任意の点における前回のデータと今回のデータをそれぞれ

$$X_1(I_1) + jY_1(Q_1)$$

$$X_2(I_2) + jY_2(Q_2)$$

とすると, これらの信号をマルチプライヤーで

$$\left. \begin{array}{l} X_1 \cdot X_2 \\ X_1 \cdot Y_2 \end{array} \right\} \text{A 308}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_1^2 \\ Y_1^2 \end{array} \right\} \text{A 313}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_1 \cdot Y_2 \\ X_2 \cdot Y_1 \end{array} \right\} \text{A 309}$$

の演算を行う。

但し, 演算は各入力データ (X_1, X_2, Y_1, Y_2) の絶対値を取ってから行う。

(d) ADDER UNIT (加算器) (A 310)

MULTI UNIT (A 308, A 309) からの出力信号

$$X_1 \cdot X_2, Y_1 \cdot Y_2, X_1 \cdot Y_2, X_2 \cdot Y_1$$

を用いて次の演算を行う。

$$R = X_1 \cdot X_2 + Y_1 \cdot Y_2 \dots\dots\dots \text{実数成分}$$

$$I = X_1 \cdot Y_2 + X_2 \cdot Y_1 \dots\dots\dots \text{虚数成分}$$

又, スイープ平均 (SWEEP AVE) への出力を R, I 又はゼロ出力切換え信号によって,

$$\left. \begin{array}{l} R = X_1 \cdot X_2 + Y_1 \cdot Y_2 \\ I = X_1 \cdot Y_2 + X_2 \cdot Y_1 \end{array} \right\} \text{or } 0$$

に切換える。

(e) SWEEP AVE UNIT (A 311)

ADDER UNIT で算出された R, I は 256 回加算積算を行い, $1/256$ とし, 平均化を計る。アンテナ
 ナ方位信号が $1.40625^\circ (360^\circ / 256)$ 毎に 256 回の平均を行う。

アンテナ 1 PRF の時, 有効ヒット数は

$$\{ 60 (\text{sec}) / 256 \} \times 1120 = 2625 \text{ 本}$$

$$\bar{R} = \left(\sum_{i=0}^{255} R_i \right) / 256$$

$$\bar{I} = \left(\sum_{i=0}^{255} I_i \right) / 256$$

(f) PROC UNIT (A 312)

SWEEP AVE で算出された $\bar{R}, \bar{I}$ によって, 平均速度 V , 及び分散 σ^2 を算出する。

ここでの処理は, 次の算式に基いてあらかじめ ROM に書き込んである $\bar{R}, \bar{I}$ を変換して V, σ^2 を

を求めている。

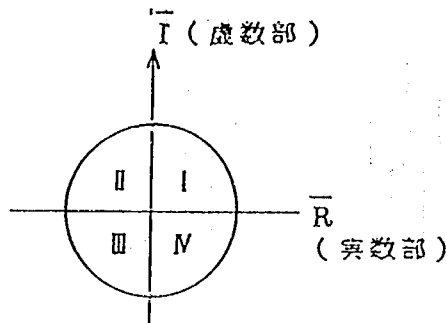
$$\left\{ \begin{array}{l} V = \tan^{-1} (\bar{I} / \bar{R}) \\ \text{ROM には } 90^\circ \text{ まで書き込んであり} \\ V = \tan^{-1} \bar{I} / \bar{R} / (90 \times 64 + 0.5) \end{array} \right\}$$

四捨五入の為
バイナリー表示の為の係数

$$\sigma^2 = 1 - \sqrt{\bar{R}^2 + \bar{I}^2}$$

(ROM には $\sqrt{\bar{R}^2 + \bar{I}^2} + 0.5$ を書き込んである。)

V は、ROM 内に $0^\circ \sim 90^\circ$ までの $\tan^{-1} (\bar{I} / \bar{R})$ しか求めているない為各 $\bar{I}$, $\bar{R}$ は処理の前段で絶対値をとり、 $\tan^{-1}$ を求める各符号により、次の表の結果を最終値として出力している。



象現	$\bar{R}$	$\bar{I}$	V の 値
I	+	+	ROM 値 (極性・正)
II	-	+	128 - ROM 値 (正)
III	-	-	128 - ROM 値 (負)
IV	+	-	ROM (負)

σ^2 は ROM に $\sqrt{\bar{R}^2 + \bar{I}^2}$ が書き込んであるが、 $1 - \sqrt{\bar{R}^2 + \bar{I}^2}$ を出力する為、出力時に 1 の補数表示としている。

(g) AGC 回路 (A 314, A 315, A 316)

受信機より入力された I , Q ch の各信号は再び受信機のゲインをコントロールする為 AGC 回路に入力される。

掛算機 (A 313) で算出された I^2 , Q^2 は掛算機 (MULTI UNIT), 加算器 (AGC-1) により、

$$P = I^2 + Q^2$$

を求めている。

比較器 (AGC-1) で算出された " $P = I^2 + Q^2$ " と基準パワー (POWER REF, DIPスイッチ) と比較を行い、AGC エラーを求める。

AGC エラーと現在の AGC 量と加算し、積分器 (AGC-2) に入力し次の AGC 量を求めている。

なお、積分回路は重み付き移動スウィープ平均回路で構成されており、再帰形フィルタの構成となっている。 λ は、外部 (ドップラー信号処理パネル) より $1/32$, $1/64$, $1/128$, $1/256$ の係数が与えられ、これにより積分定数が決定される。

(4) 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 $Z = BR^6$, 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

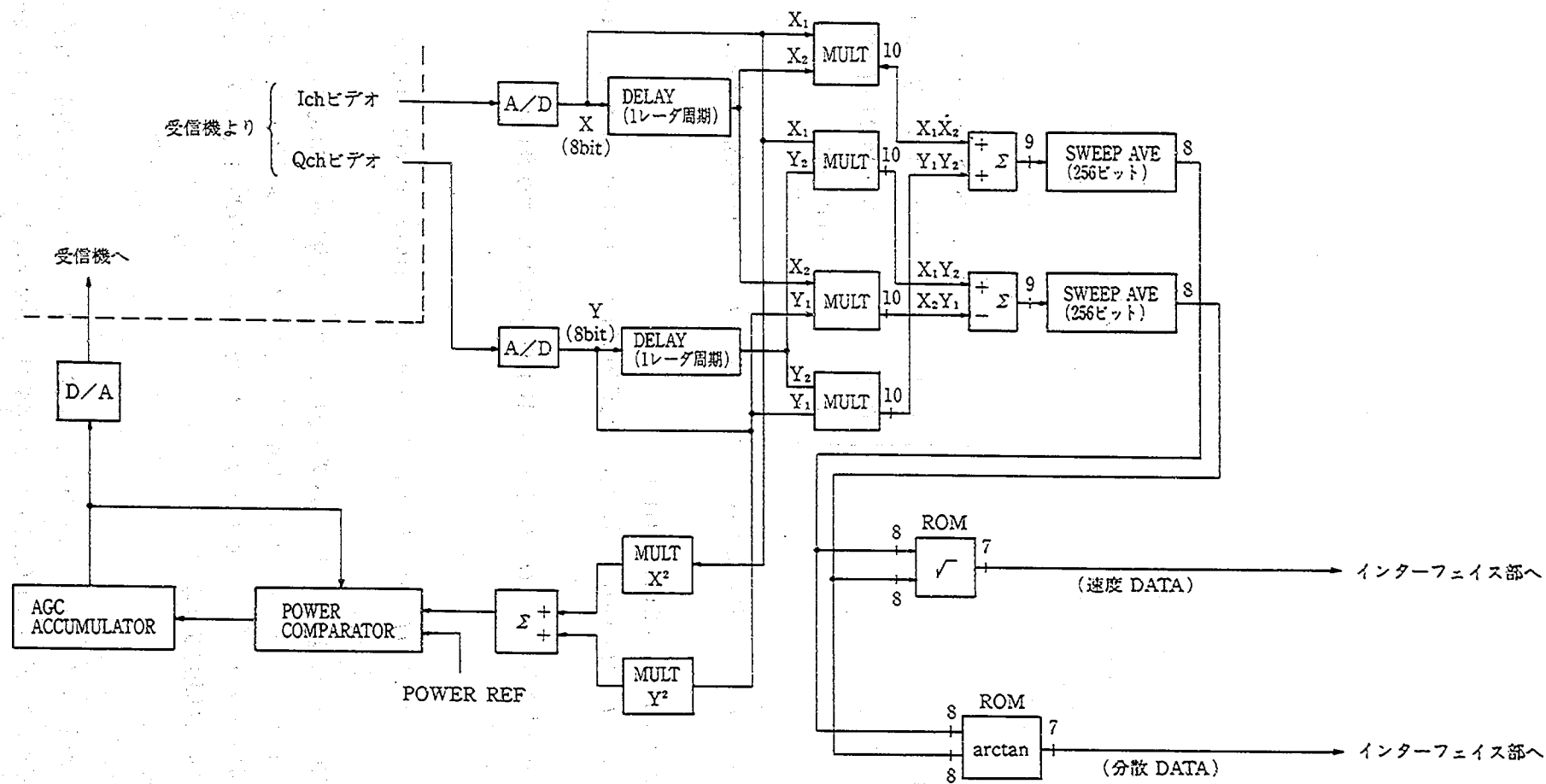
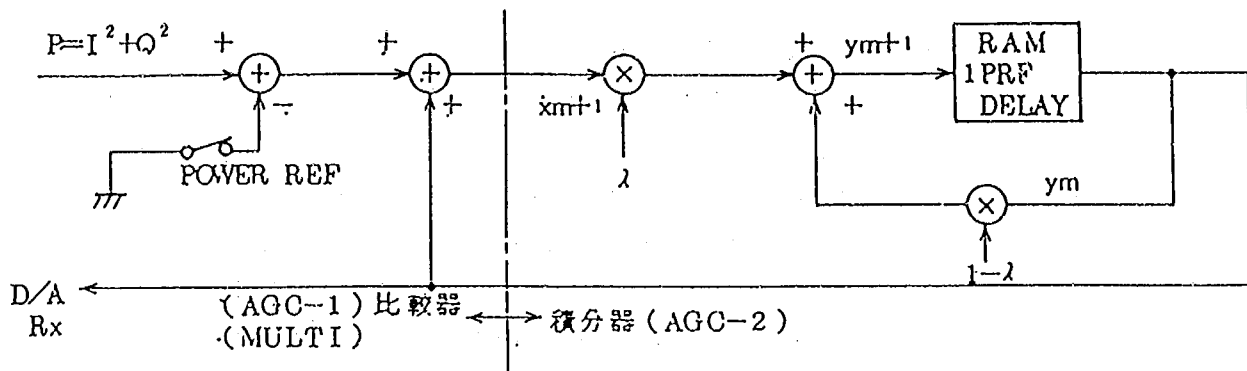


図-2.4.8 PPP (Pulse Pair Processor) 処理ブロック図



A G C 回 路

$$y_{m+1}^{(n)} = \lambda x_{m+1}^{(n)} + (1 - \lambda) y_m^{(n)}$$

λ : 定数 $0 \sim 1$ $y_m^{(n)}$: m 回目のサンプルデータの積分

$x_{m+1}^{(n)}$: サンプル入力 (n 番目)

図 2.4.9 A G C 回路図

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

いまこの式を対数変換し 10 倍すると、

$$10 \log \overline{Pr} = 10 \log C + 10 \log B + \beta 10 \log R - 20 \log r - 2 Kr \dots\dots (2.4.14)$$

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 Pr_0 、また基準点までの距離を r_0 とすると下式が成立する。

$$10 \log \overline{Pr_0} = 10 \log C + 10 \log B + \beta 10 \log R_0 - 20 \log r_0 - 2 Kr_0 \dots\dots (2.4.15)$$

(2.4.14), (2.4.15) 式より

$$10 \log \frac{\overline{Pr}}{\overline{Pr_0}} = 10 \beta \log \frac{R}{R_0} - 20 \log \frac{r}{r_0} - 2 K(r - r_0)$$

$$10 \log \frac{R}{R_0} = \frac{1}{\beta} \{ 10 \log \frac{\overline{Pr}}{\overline{Pr_0}} - 20 \log \frac{r}{r_0} - 2 K(r - r_0) \}$$

上記の受信電力から、 $\{ 20 \log \frac{r_0}{r} + 2 K(r_0 - r) \}$ 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、何らか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、 $1.67 \mu\text{s}$ 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、 $0 \sim 40 \text{ km}$ 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-2.4.10 のようになる。図中の斜線内 9 スイープ、2 レンジビン分のデータ値が図中の黒い長方形に集約されていることになる。

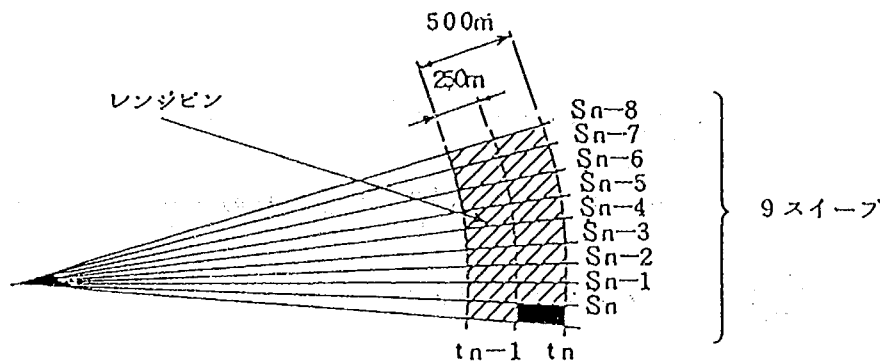


図-2.4.10 信号平均の概念

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

• Weather Echo 強度	$0 \sim 35 \text{ dB}$
• Range Correct ($4 \sim 40 \text{ km}$)	$0 \sim 36.24 \text{ dB}$
• Noise	$0 \sim 15 \text{ dB}$
	$0 \sim 86.2 \text{ dB}$

この約 80 dB の dynamic range のある出力特性を、10 ビットの A/D 変換器でデジタルに変換する。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

$$\frac{76.5}{2^{10} - 1} = \frac{6.5}{1023} = 0.0747 \text{ dB}$$

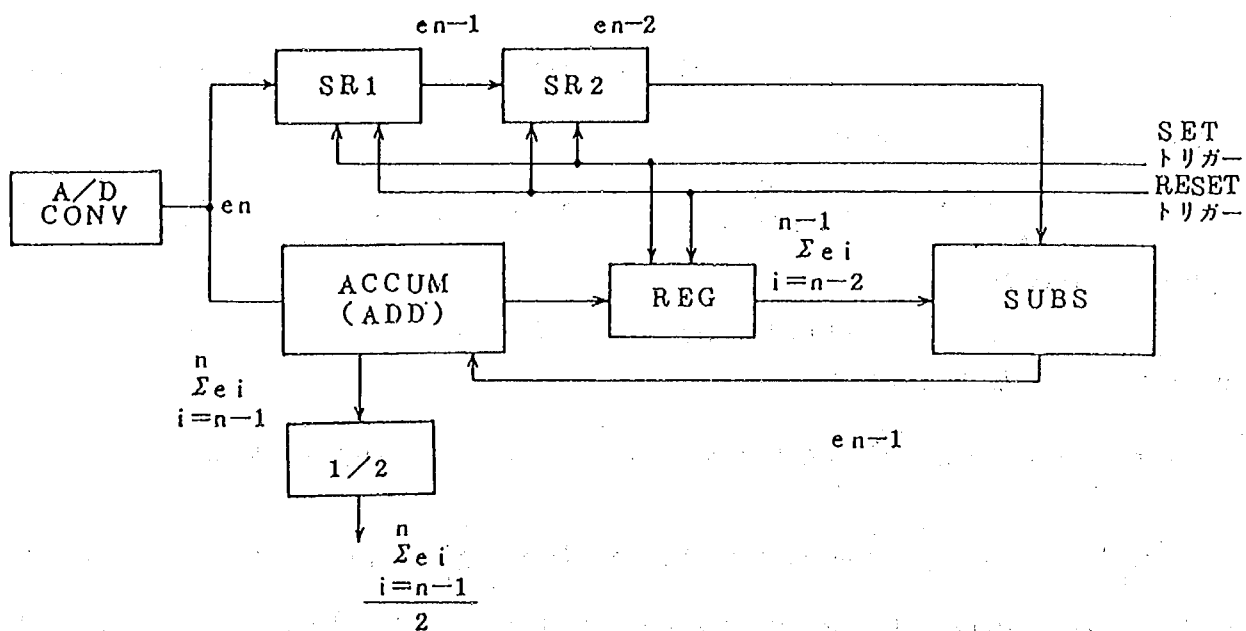
となっている。

③ 距離平均

図 2.4.11 に示すように、 $1.67 \mu\text{s}$ 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。

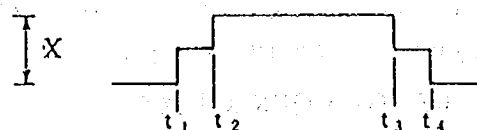
したがって、減算器によって e_{n-2} が引きさられ、減算結果は (e_{n-1}) となり、新しく A/D 変換された e_n のデータが加算器によって加算され、その結果は $(e_{n-1} + e_n)$ となり、最新のレンジビンを含めて 2 レンジビン分のデータが蓄積される。この蓄積データを $1/2$ 倍すれば $(e_{n-1} + e_n) / 2$ という距離平均のデータが得られる。



(a) ブロック図



(b) ORIG入力波形



(c) Range Integ 出力波形

図一 2.4.11 単純加算方式による距離平均原理図

したがって、図一 2.4.11 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より、その出力は t_1 の区間は $1/2 X$, t_2 の区間は $2/2 X$, 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 $1/2 X$, 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(READ)されて加算器(ACM2)で

$$\sum_{i=n-9}^{n-1} S_i - (S_{n-9}) = \sum_{i=n-8}^{n-1} S_i \text{ という結果が得られる。更に加算器(ACM1)}$$

(ACM1)で S_n のデータが加算され

$$\sum_{i=n-8}^{n-1} S_i + S_n = \sum_{i=n-8}^n S_i \text{ が得られ、} 1/9 \text{ 倍して、} \sum_{i=n-8}^n S_i / 9 \text{ のスイープ平均}$$

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、各レンジビンごとに書込まれ(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)から呼出され(READ),

$\sum_{i=n-8}^n S_i / 9$ のスイ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、このスイ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。

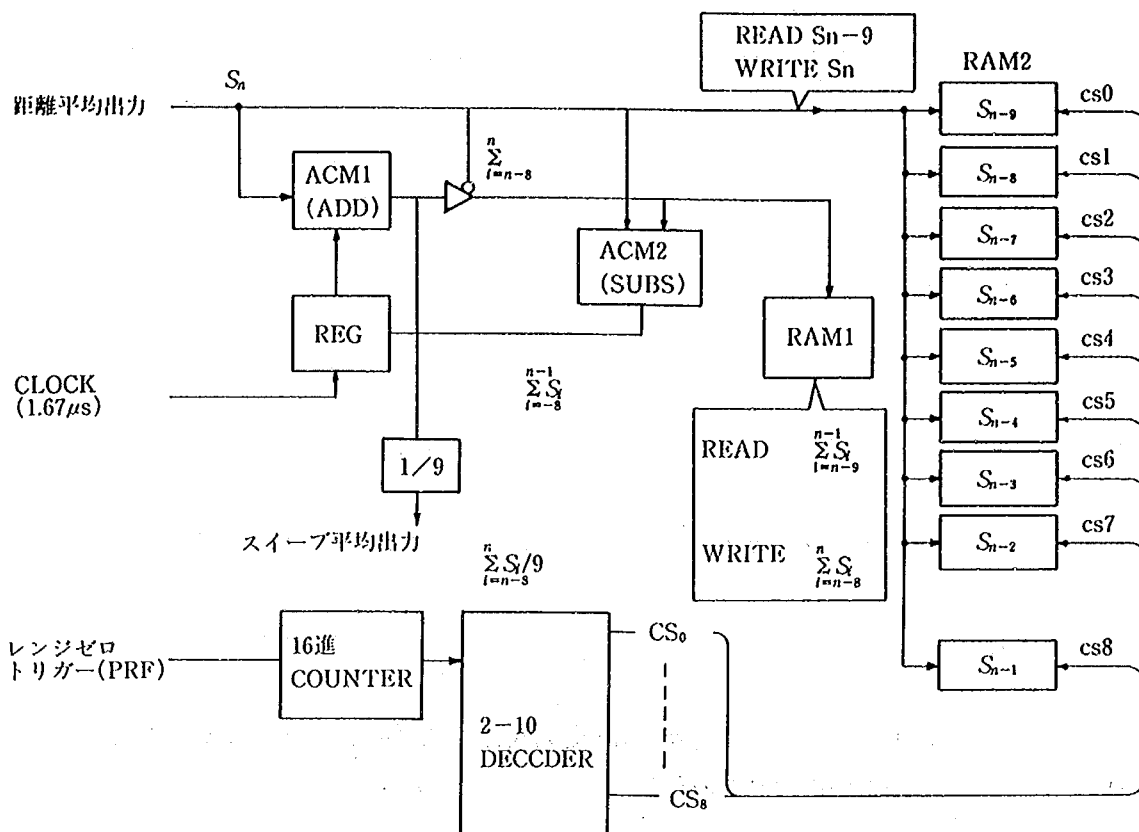
したがって、図-2.4.12に示すような入力Xが入ったものとする、スイープ平均された出力は、図-2.4.12のように S_1 では $1/9X$, S_2 では $2/9X$, S_3 では $3/9X$ S_9 では $9/9X$ となり、 S_{10} 後入力波形はなくなるが、累計加算器に蓄積されていたデータが順次 S_{10} では $8/9X$, S_{11} では $7/9X$ S_{17} では0になる。

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の補正値は $\{ 20 \log \frac{r_0}{r} + 2K(r_0 - r) \}$ dB の算式により(ただし $r \geq 40$ km は40 kmの値, $r \leq 4$ km は4 kmの値) $r_0 = 40$ km として計算する。

1 LSB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(8192×8)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、各レンジビンごとの ADDRESS 信号に



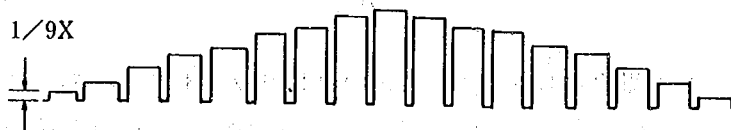
(a) ブロック図



(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

図一 2.4.12. スイープ平均原理図

よって、そのADDRESS に書込まれた補正值を読出して演算を行う。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れば、レーレー分布に従うことが導かれている。

$$W(A) = \frac{2A}{\bar{P}} \exp\left(-\frac{A^2}{\bar{P}}\right) \cdot A \geq 0 \quad \dots\dots\dots (2.4.16)$$

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

(2.4.16) 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

$$\bar{A} = \int_0^\infty A \cdot W(A) \cdot dA = \frac{1}{2} \sqrt{\pi \bar{P}} \quad \dots\dots\dots (2.4.17)$$

$$V = \int_0^\infty (A - \bar{A})^2 \cdot W(A) \cdot dA = \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \bar{P} \quad \dots\dots\dots (2.4.18)$$

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(2.4.18) 式から

$$R = \frac{V}{\bar{P}} = 1 - \frac{\pi}{4} = 0.2146 \quad (-6.68\text{dB}) \quad \dots\dots\dots (2.4.19)$$

となる。

一方、グラントクラッターは図-2.4.13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、合成エコーの振幅 Y の確率密度は(2.4.16) 式のレーレー分布から(2.4.20) 式のレーレー・ガウス分布に変わることが導かれている。

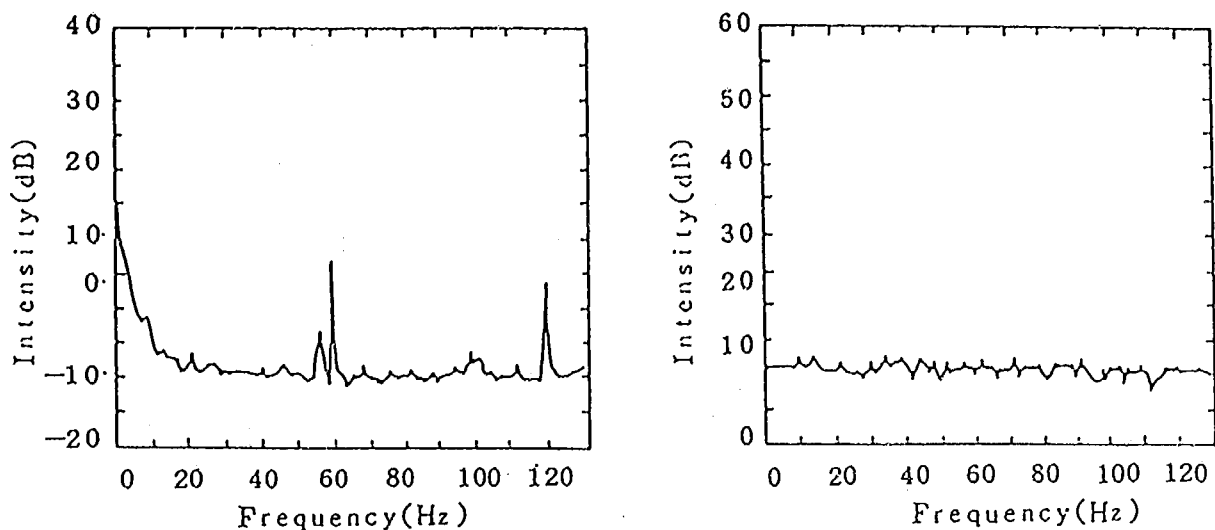
$$W(Y) = \frac{2Y}{\bar{P}} \exp\left(-\frac{Y^2 + G^2}{\bar{P}}\right) \cdot I_0\left(\frac{2Y \cdot G}{\bar{P}}\right) \quad \dots\dots\dots (2.4.20)$$

ここでは I_0 は変形ベッセル関数である。(2.4.20) 式はグラントクラッターのない場合($G=0$) 当然(2.4.16) 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、(2.4.19) 式のように一定値(-6.68 dB) にならず、図-2.4.13 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 FILTER (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 dB ~ 6.68 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 として二重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 部のブロック図を図- 2. 4. 15 に示す。



(a) グラウンドクラッター

(b) 降水エコー

図- 2. 4. 13 グラウ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. 4. 14 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_r / 降水エコーの平均電力 P)の変化

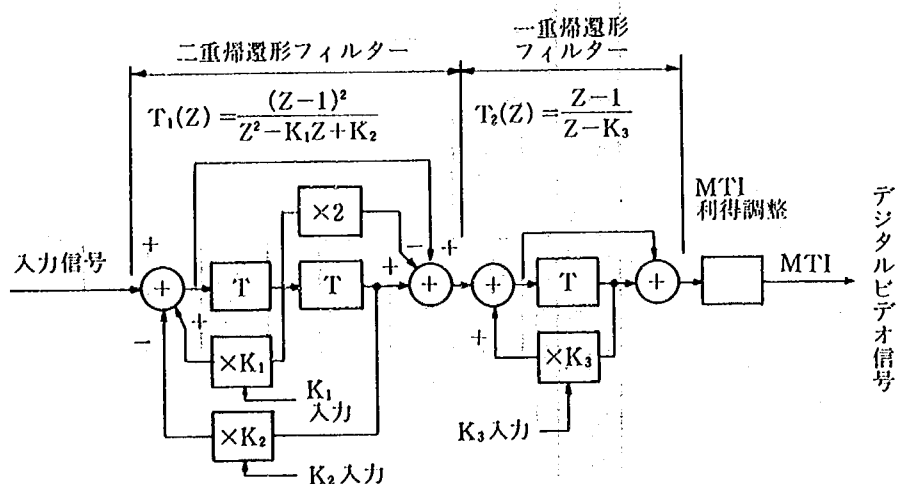
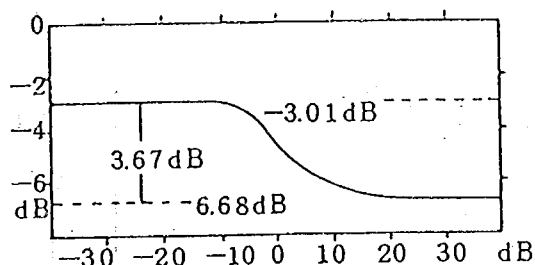
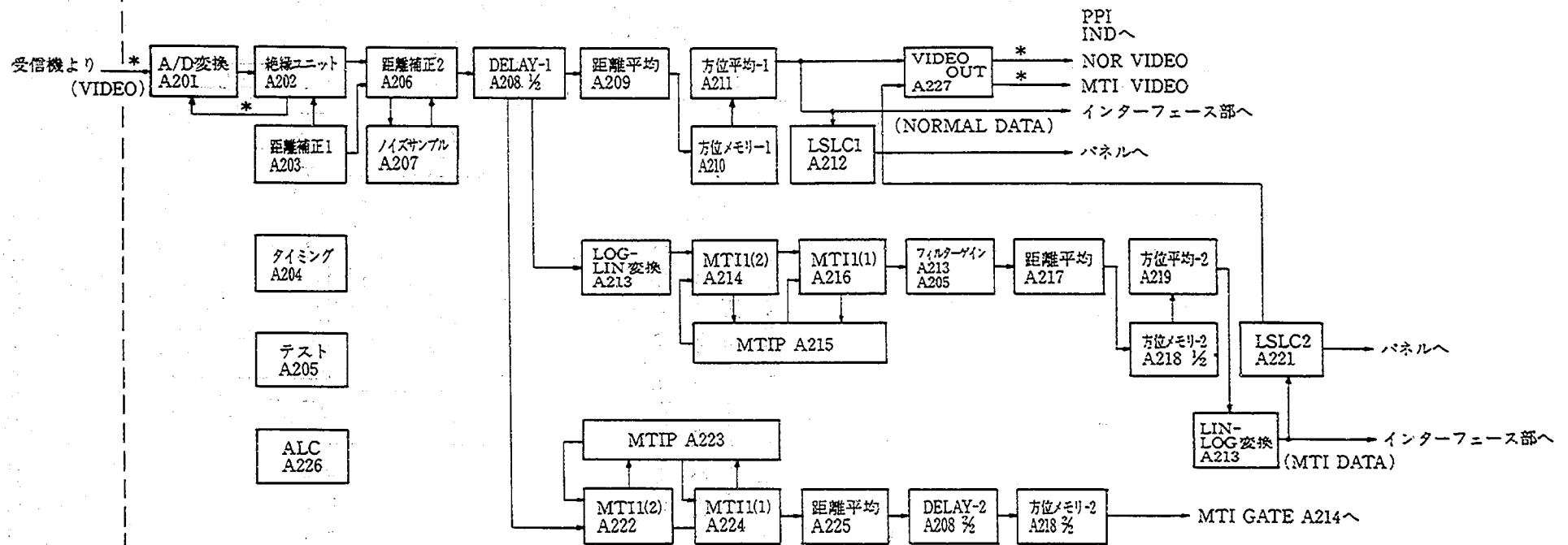


図- 2. 4. 15 MTI 部ブロック図

図- 2. 4. 16 に強度信号処理ブロック図を示す。



(注) *印はアナログ信号

図-2.4.16 強度信号処理ブロック図

(5) 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、BFMU 1, BFMU 2, 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) が起こると、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, BFMU 2 (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ーである。

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

メモリー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。

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

⑥ RADR INT UNIT (Rader 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、各種制御信号を入力し、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。

空中線の回転速度の切換え	6 rpm / 1 rpm
送信周波数の切換え	280 pps / 1120 pps
空中線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。

図-2.4.17 にインターフェース部ブロック図を示す。

(6) ノーヒューズブレーカ

直流電源に供給する AC 100 V, 50/60 Hz の ON/OFF を行う。

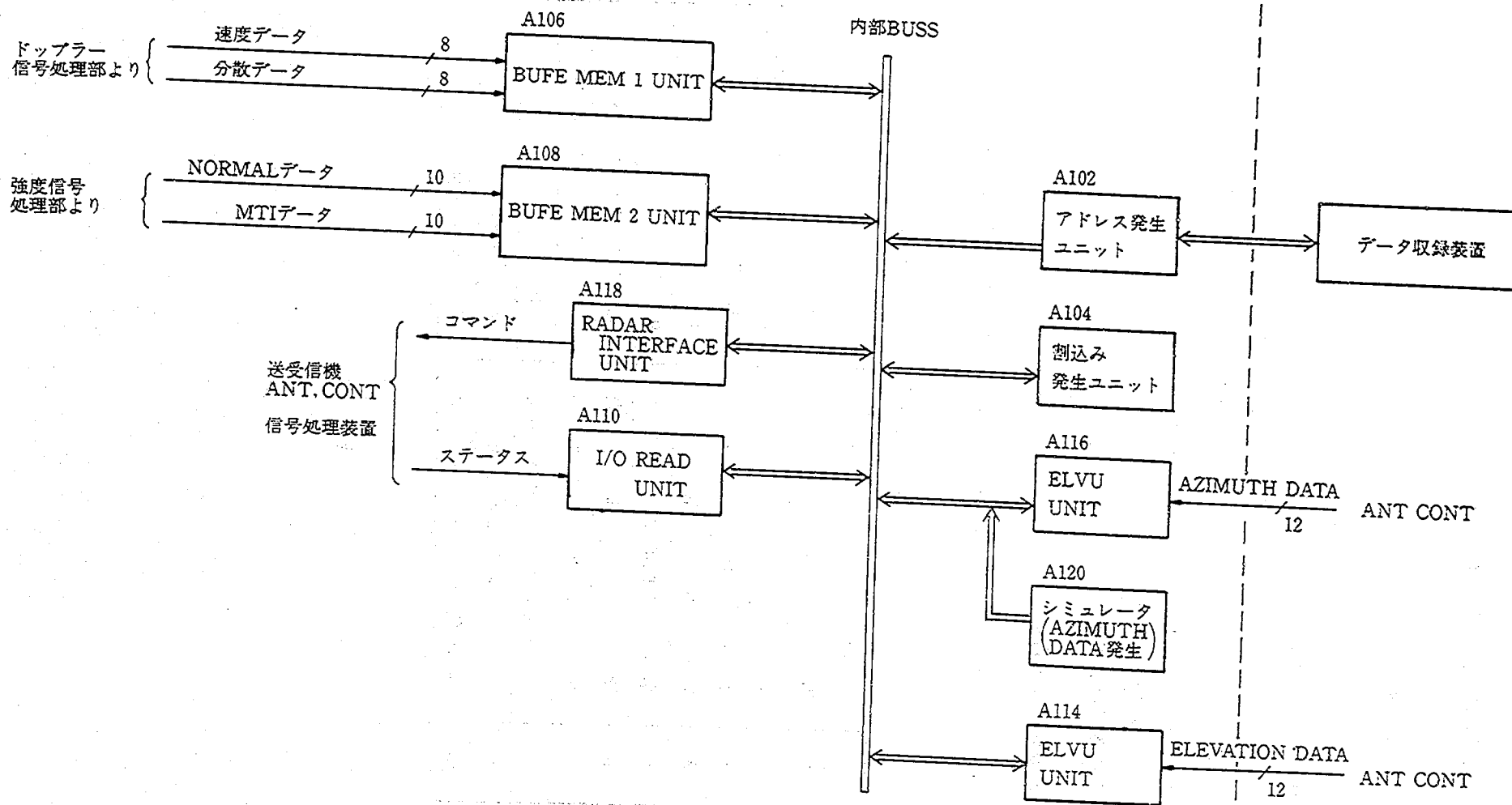


図-2.4.17 インターフェイス部ブロック図

2.5 偏波切替器の構造とその性能

2.5.1 偏波切替器の構造

偏波切替器は、ラッチ型の導波管スイッチ及びトランスデューサーから構成される。

マグネトロンで発振されたマイクロ波送信波を導波管スイッチで水平偏波、垂直偏波に切り換え、後段のトランスデューサーに入れる。ここで、水平・垂直偏波をその偏波のまま円形導波管を通して空中線の反射面に給電する。また、受信時は同一径路を経て反射波を受信する。

導波管スイッチはフェライトタイプのサーキュレータで、空中線制御装置からの水平/垂直切替信号により遠隔切替が可能である。

図-2.5.1に外観を示す。

2.5.2 偏波切替器の性能

偏波切換器の主構成部品である導波管スイッチの性能は表-2.5.1に示す通りである。

表-2.5.1 導波管スイッチの性能

	項 目	性 能
1	周 波 数	5,280 MHz $\pm$ 10 MHz
2	電 力	75 kW (ピーク), 40 W (平均)
3	ア イ ソ レ ー シ ョ ン	30 dB 以上
4	V S W R	1.2 以下
5	水 平 / 垂 直 偏 波 バ ラ ン ス	0.1 dB 以下
6	挿 入 損 失	0.5 dB 以下 (H, V と も)
7	ス イ ッ チ ン グ 時 間	10 μ s 以下 (図-2.5.2 参照)
8	ス イ ッ チ ン グ ・ ト リ ガ パ ル ス 幅	最小 5 μ s
9	ス イ ッ チ ン グ 繰 返 し 周 波 数	最小 2,000 Hz
10	電 気 的 イ ン タ フ ェ ー ス	表-2.5.2 による。

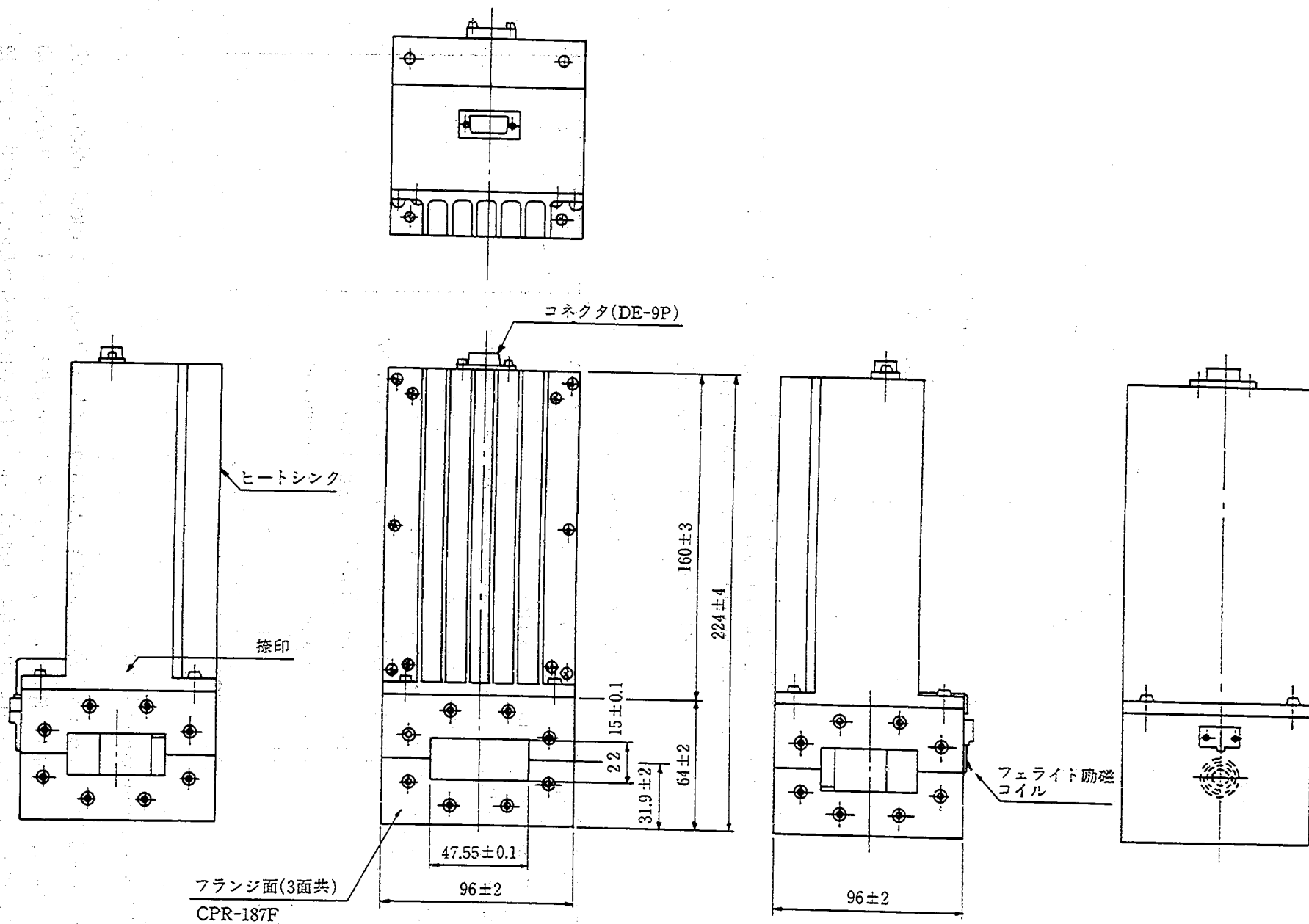
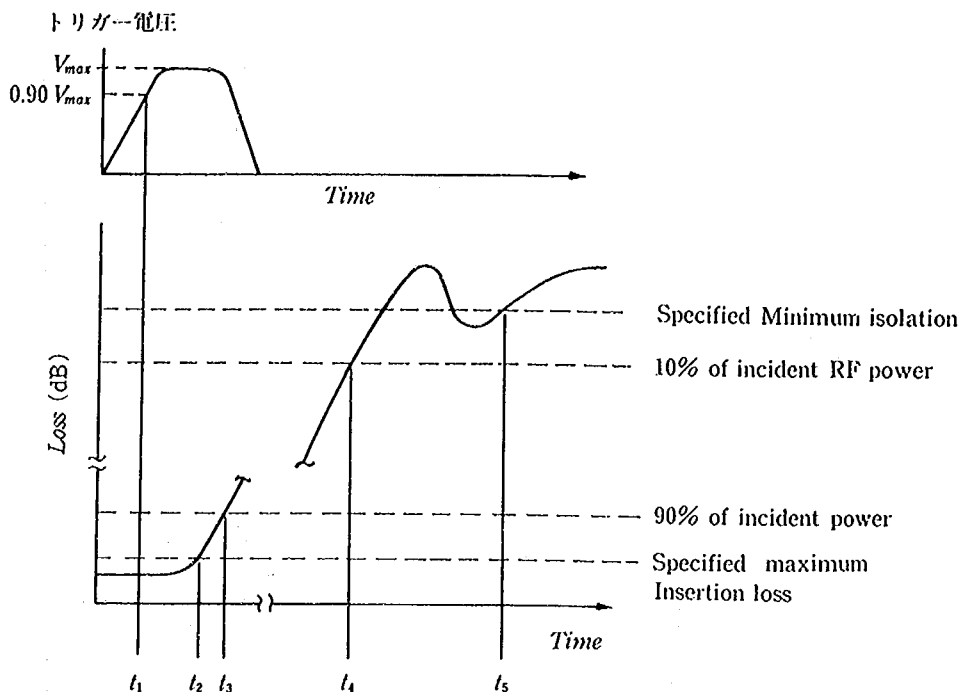


図 - 2.5.1 導波管切換器外觀



$T_s = t_5 - t_1$ Switching Time : length of time required for the
 $T_r = t_4 - t_3$ Rise Time : 10 to 90% time for transmitted RF power

} スイッチング時間

図- 2.5.2 スイッチング時間

表- 2.5.2 電氣的インターフェース

項 目	性 能	備 考
(1) 電源電圧, 電流	+ 15 V, 3 A 以内	
(2) ラッチング方式	トリガ入力 1 パルス毎に, 回転方向が時計方向, 反時計方向に変化すること。	
(3) インタフェース ピン接続	コネクタ NJW-207-RM Pin 1 : 15 V, 3 A Pin 5 : 1 → 3 信号出力 Pin 2 : 1 → 2 信号出力 Pin 6 : Common Pin 3 : Common Pin 7 : Common Pin 4 : トリガ入力 (オープンコレクタ 5 μ s)	

2.5.3 偏波切換器の動作原理

偏波切換器及び空中線ミラー部の系統は図- 2.5.3 の様になっている。ここで偏波切換の主たる機能を果すのはフェライトを使用したラッチ型導波管スイッチである。このスイッチはトリガ入力を印加する都度スイッチング方向が時計方向, 反時計方向に変化する性質をもつもので, 水平 / 垂直切

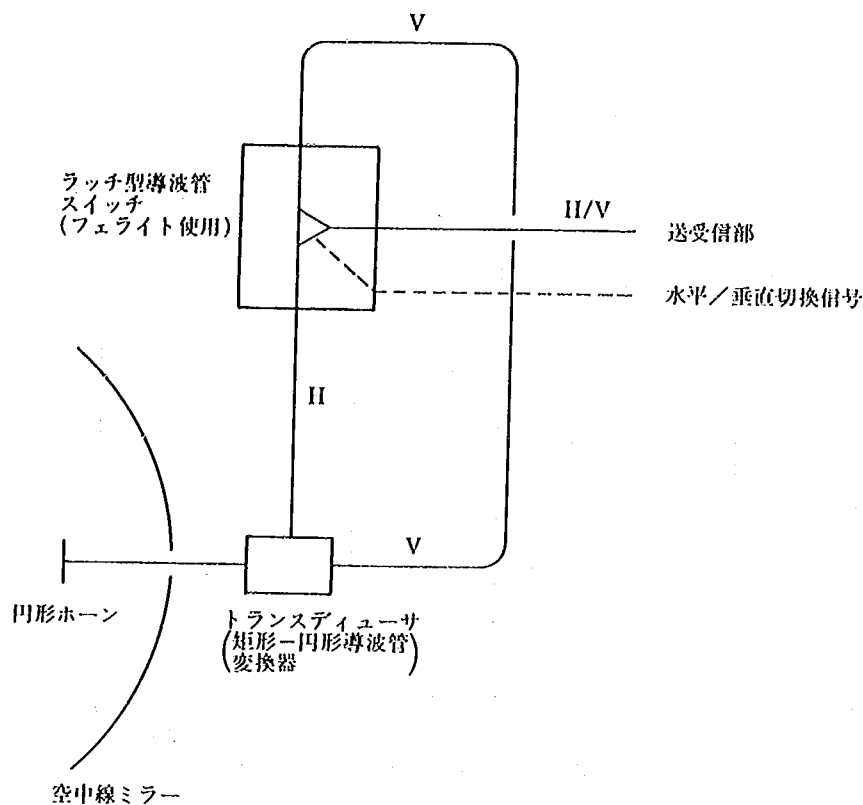


図- 2.5.3 空中線ミラー部の系統図

信号は上記のトリガ信号に変換して使用される。垂直偏波による送受信時は、導波管スイッチを経由して図の〔V〕の系路で行なわれる。

同様に水平偏波による送受信は図の〔H〕の系路で行なわれる。

2.6 データ収録部の構造とその性能

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。

2.6.1 構 造

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- 2.6.1 に示す。

データ収録部の外形を図- 2.6.2～図- 2.6.5 に示す。

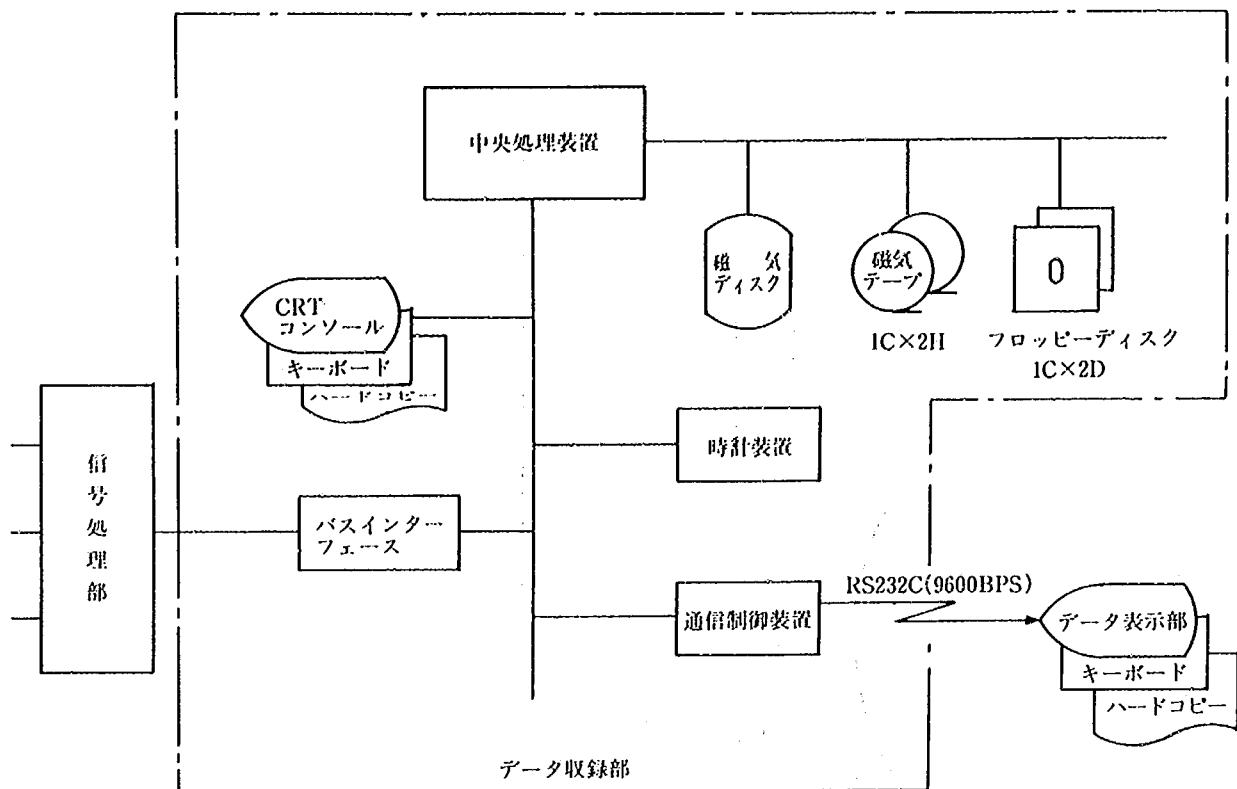


図- 2.6.1 データ収録部ハードウェア系統

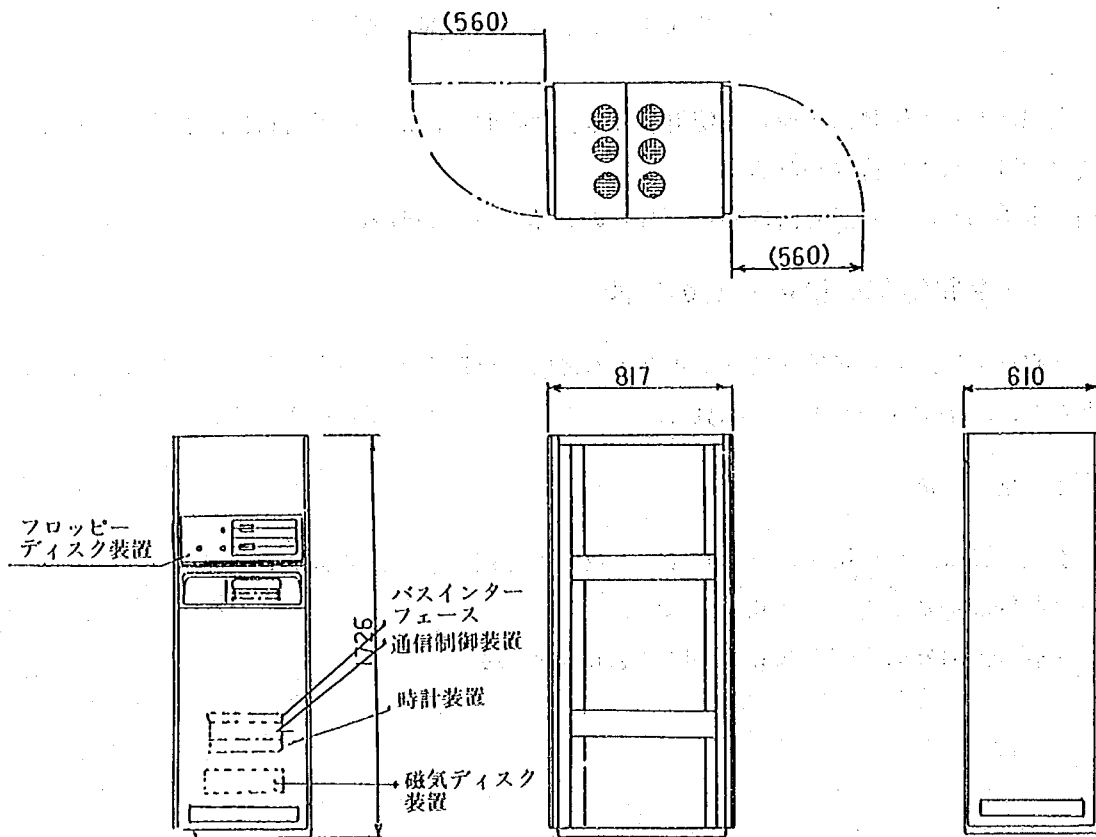


図- 2.6.2 データ収録部外形図

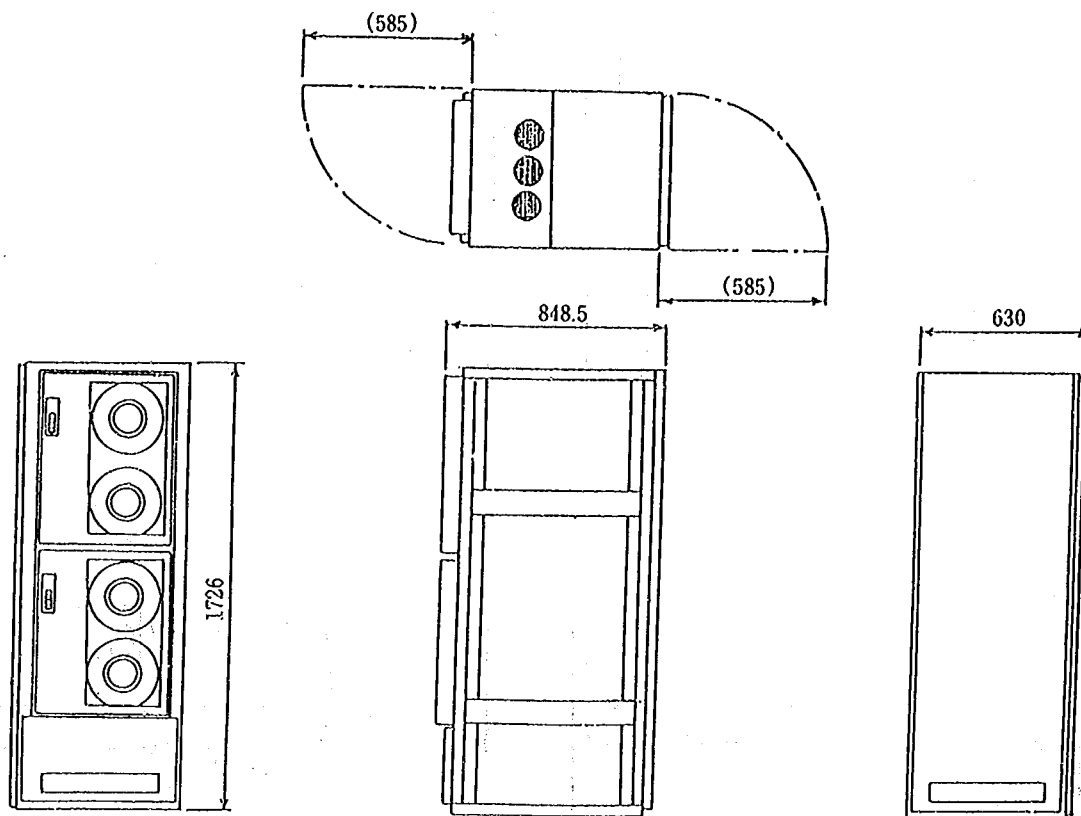


図- 2.6.3 磁気テープ装置外形図

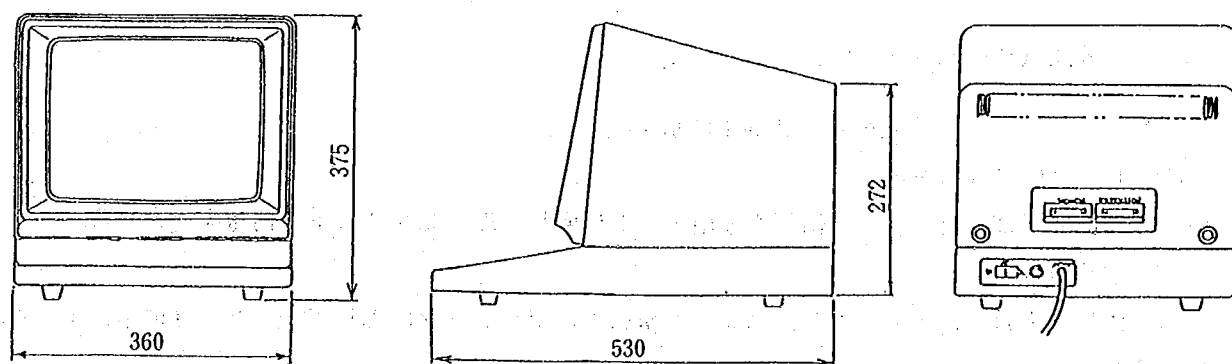


図- 2.6.4 CRT コンソール外形図

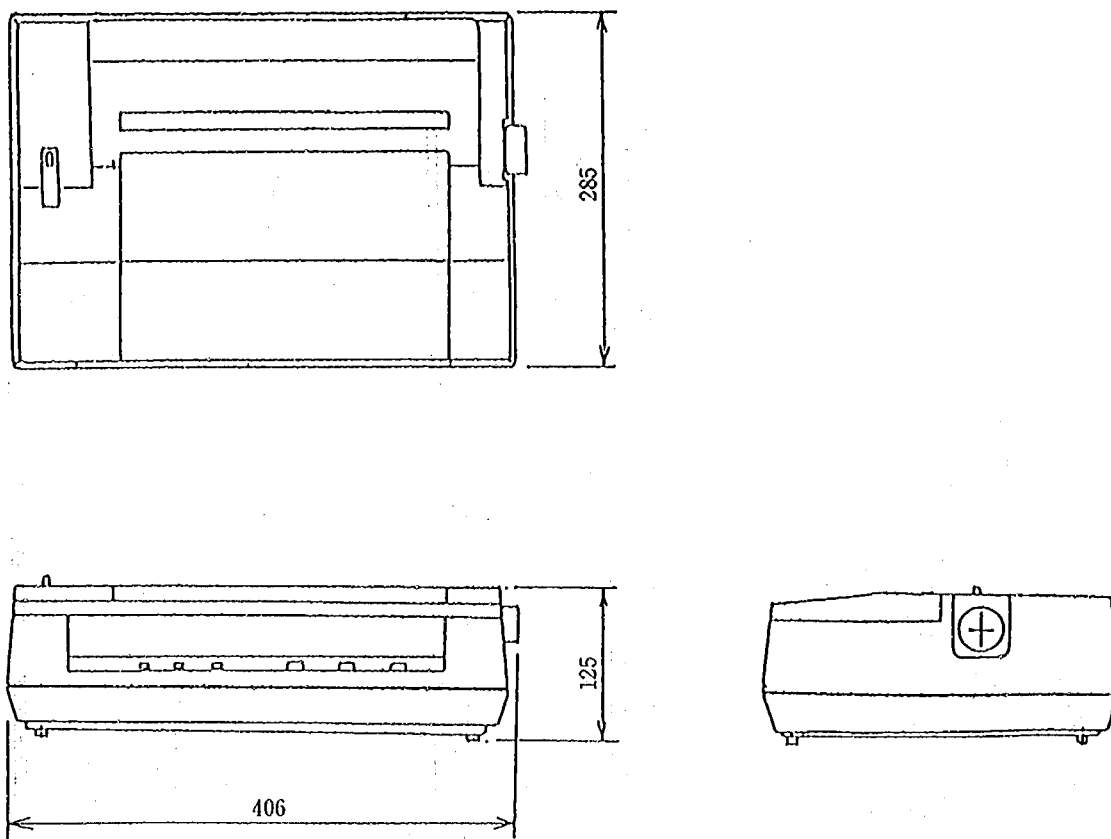


図- 2.6.5 ハードコピー外形図

2.6.2 性能（ハードウェア）

各装置のハードウェア性能を表- 2.6.1 に示す。

(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- 2.6.2 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- 2.6.3 に示すデータを積算する。

(3) 加工処理

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。

(4) 磁気テープ記録処理

加工処理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換を行う。

(5) 表示データ作成処理

加工処理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。

表- 2.6.1 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 MICRO 7	(I) 主記憶容量= 512 kBYTE (II) サイクルタイム= 800 ns 以下
(2) 磁 気 デ ィ ス ク 装 置	MK 830 F	(I) 記憶容量= 30 MBYTE (II) データ転送速度= 1.2 MBYTE/sec (III) 平均アクセスタイム= 48.3 m sec
(3) 磁 気 テ ー プ 装 置	MTF 1000	(I) 記録密度= 1,600 BPI (II) データ転送速度= 72 kBYTE/sec (III) 記録トラック数= 9 トラック (IV) テープ長= 2,400 ft
(4) フロッピーディスク装置	FD-1024 ES	(I) 記憶容量= 1 MBYTE × 2 (II) データ転送速度= 62.5 kBYTE/sec (III) 平均アクセスタイム= 209 msec
(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± 3 sec 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= 50 kBYTE/sec
(8) 通 信 制 御 装 置	MLA-AB	(I) 通信速度= 9,600 BPS (II) インターフェース= RS 232 C仕様

表- 2.6.2 入力レダ情報

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- 2.6.3 積算データ

運用パターン	運用モード	積算データ
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

(6) 表示データ伝送制御処理

表示データ作成処理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なう。

(7) 収録データ出力処理

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) 出力及び座標変換処理した直交座標 (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。

(8) 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- 2.6.6 にオペレーションパネルの操作フローを示す。

(9) 運用シーケンス制御処理

操作卓制御処理より指示された表- 2.6.4 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換制御を行う。

(10) 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転数異常メッセージ、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。

(11) 運用パラメータ設定処理

表- 2.6.5 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。

(12) 動作指示処理

各運用パラメータ毎に設定された空中線御情報及び運用モード・データ収集間隔等の切換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。

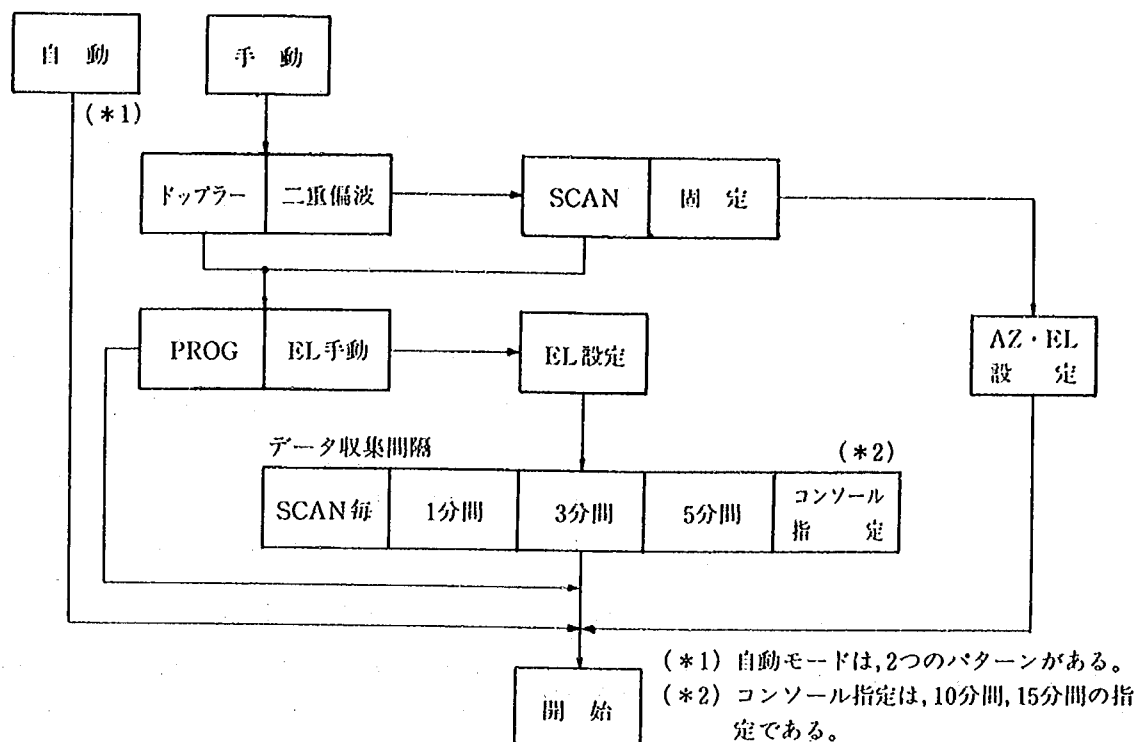


図- 2. 6. 6 オペレーションパネルの操作フロー

表- 2. 6. 4 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)	空中線回転 数(r.p.m)	仰角の設定法 仰角の設定数	収 録 デ ー タ	表示データ
1	自 動	二重偏波	(5)	6	自動, 1 仰角	5 分間平均の Z_H , Z_V (1 仰角分)	Z_H , Z_V , Z_{DR}
		ドップラ	15 (8)	1	自動, 8 仰角	1 分間平均の V , σ_V , Z_H (8 仰角分)	V , σ_V , Z_H
2	自 動	二重偏波	(3)	6	自動, 1 仰角	3 分間平均の Z_H , Z_V (1 仰角分)	Z_H , Z_V , Z_{DR}
		ドップラ	5 (1)	1	自動, 1 仰角	1 分間平均の V , σ_V , Z_H (1 仰角分)	V , σ_V , Z_H
3	手 動	二重偏波	5	6	自動, 4 仰角	1 分間平均の Z_H , Z_V (4 仰角分)	Z_H , Z_V , Z_{DR}
4	手 動	ドップラ	10	1	自動, 8 仰角	1 分間平均の V , σ_V , Z_H (10 仰角分)	V , σ_V , Z_H
5	手 動	二重偏波	任 意	6	手動, 1 仰角	スキャン毎, 1 分間平均, 3 分間平均, 5 分間平均, 10 分間平均, 15 分間平均の Z_H , Z_V (1 仰角分)	Z_H , Z_V , Z_{DR}
6	手 動	ドップラ	任 意	1	手動, 1 仰角	1 分間平均 (スキャン毎), 3 分間平均, 5 分間平均, 10 分間平均, 15 分間平均の V , σ_V , Z_H (1 仰角)	V , σ_V , Z_H
7	手 動	二重偏波	任 意	一方向固定	手動, 1 仰角	11パルス毎の Z_H , Z_V (1 仰角分) 偏波切換間隔は, 11パルス毎	Z_H , Z_V , Z_{DR}

注) パターン 1, 2, 3, 5, の二重偏波モードの偏波切換間隔はスキャン毎

表-2.6.5 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	アジマスプランキングデータ設定	アジマスプランキングスタート及びアジマスプ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。

2.6.3 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-2.6.7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。

応用プログラムは図-2.6.8に掲げる構成であり、主に信号処理部から得られたレーダ情報の収録処理及び空中線のリモート制御等、システムの運用監理処理から成っている。

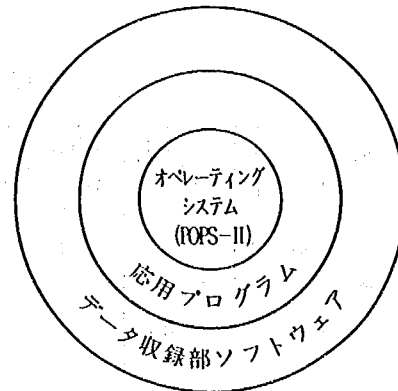


図-2.6.7 データ収録部ソフトウェア構成

2.7 データ表示部の構造とその性能

データ表示部はデータ収録部で収集・加工されたレーダ情報をリアルタイムに受信し、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。

2.7.1 構 造

データ表示部は、中央処理装置に凡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

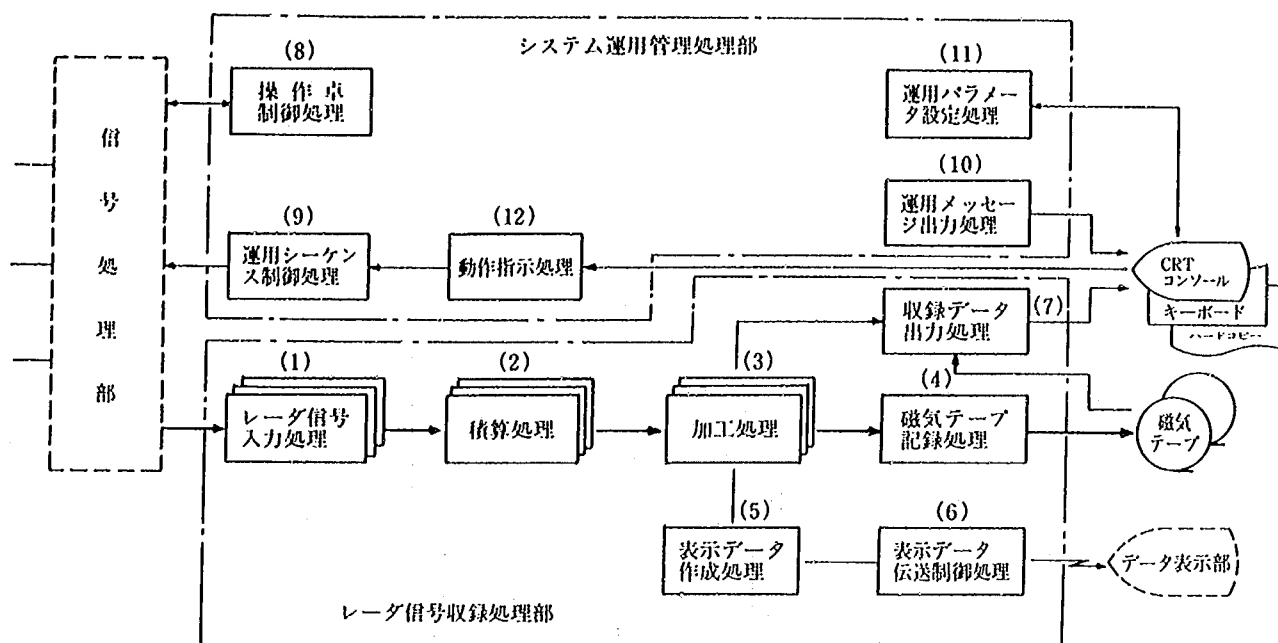


図- 2.6.8 応用プログラム構成

ム) から構成される。

データ表示部の系統を図- 2.7.1 に示す。

データ表示部の外観を図- 2.7.2 に示す。

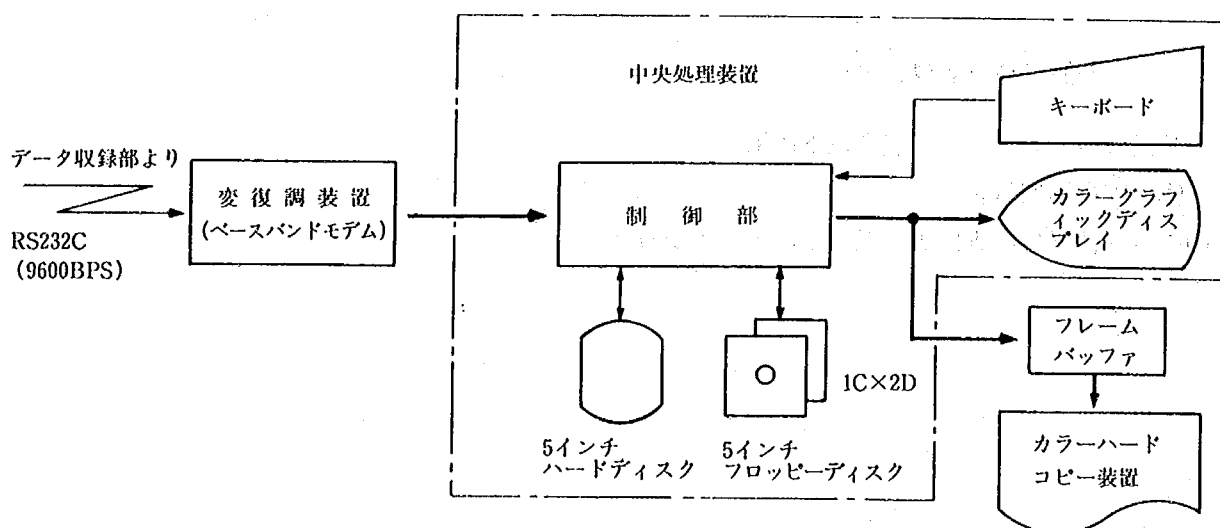


図- 2.7.1 データ表示部系統図

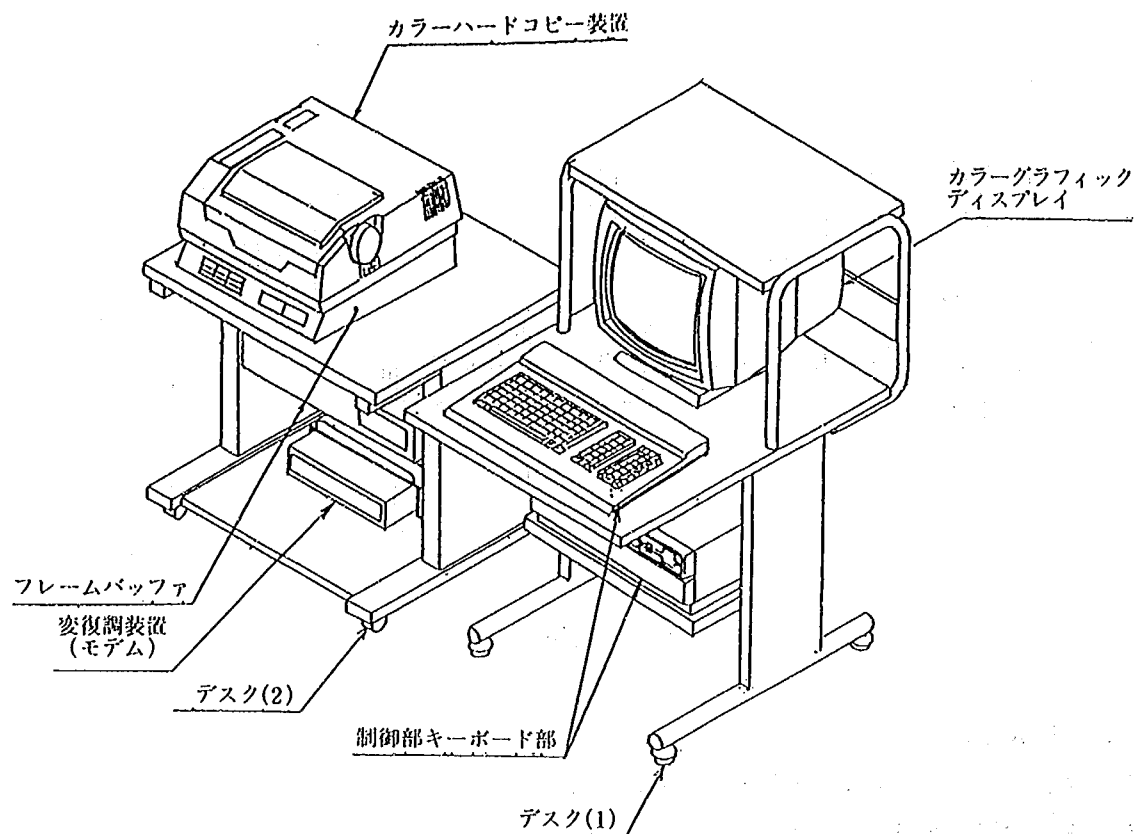


図- 2.7.2 データ表示部鳥かん図

2.7.2 性能 (ハードウェア)

各装置のハードウェア性能を以下に示す。

(1) 中央処理装置

中央処理装置の性能は表- 2.7.1 に示すとおりである。

表- 2.7.1 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	32 kB	BIOS, クイックテストを含む
ビデオRAM	テキスト用 4 kB グラフィックス用 384 kB ※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 512 kB	
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	本体内に 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 9600 bps カラー用
電 源	AC 100 V 50/60 Hz 2.2 A (定常) 約 150 W	
環境条件	温度 5 °C ~ 35 °C 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	

(2) カラーハードコピー装置

カラーハードコピー装置の性能は以下の通りである。

① フレームバッファ

取込可能ビデオ周波数	7.5 ~ 125 MHz
画像データ取込時間	0.5 秒 (7 色) ~ 6 秒 (27 万色)
バッファメモリ容量	3 M バイト
表 現 色 数	274,625 色
プリント枚数設定	最大 99 枚
インターフェース	入力: ビデオ (RGB) 出力: セントロニクス準拠
取込データ表示方式	液晶ディスプレイ表示
外形寸法 / 重量	CHC-325/335 用 400 (W) × 540 (D) × 98 (H) mm 13 kg
	CHC-635 用 570 (W) × 540 (D) × 98 (H) mm 15 kg

② カラーハードコピー

形 式	CHC-325
解 像 度	6 ドット/mm
印 字 速 度	約 60 秒
表 現 色	基本 7 色 (最高 27 万 4,625 色)
印 字 幅	211 mm (最大 1,280 × 1,575 ドット)
用 紙	10" 幅ロール紙
紙 送 り 方 式	スプロケットピンフィード
インターフェース	セントロニクス準拠
動 作 音	55 dB 以下
電 源	AC 100 ~ 120 V 50/60 Hz
消 費 電 力	230 W (印字時)
使 用 条 件	5 °C ~ 35 °C 30 % ~ 70 % (RH)
外 形 寸 法	490 (W) × 416 (D) × 164 (H) mm
重 量	約 16 kg

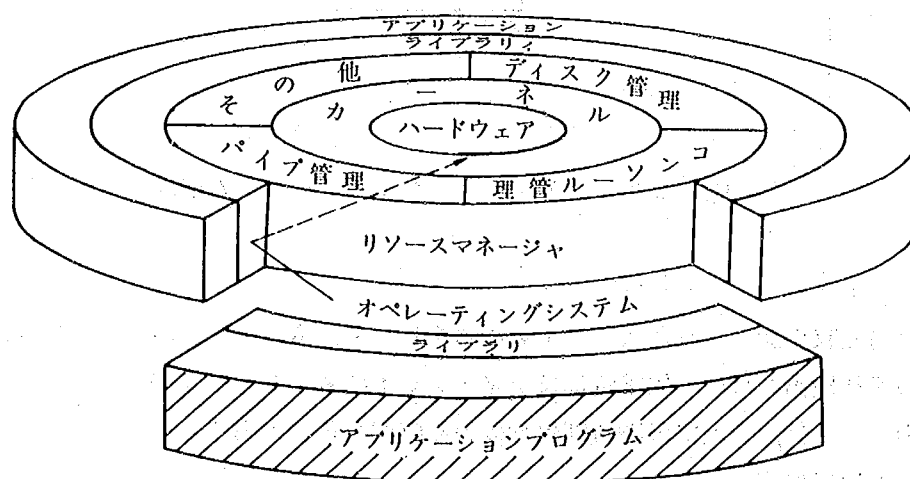
(3) 変復調装置 (ベースバンドモデム)

変復調装置の性能は以下に示すとおりである。

適 用 回 線	4 線式構内私設回線
デ ー タ 速 度	非同期式 9,600 bps 以下
通 信 方 式	全二重/半二重
伝 送 路 と の 結 合	フォトカプラ結合
テ ス ト 機 能	REMOTE/LOCAL テスト
DTE インタフェース	JISC 6361 (CCITT V 24) 準拠
直 流 入 力 信 号 電 圧	± (3 ~ 15) V
直 流 出 力 信 号 電 圧	± (5 ~ 15) V
制 御 信 号 入 力 電 圧	± (3 ~ 15) V
制 御 信 号 出 力 電 圧	± (5 ~ 15) V
直 流 入 力 お よ び 出 力 負 荷 抵 抗	(3 ~ 7) kΩ
符 号 歪	± 15 % 以下
環 境 条 件	温度 (0 ~ + 45) °C, 湿度 (40 ~ 85) %
電 源 電 圧	AC (100 ± 10) V, (50 ~ 60) Hz
消 費 電 力	約 8 VA
寸 法 お よ び 重 量	幅 250, 奥行 280, 高さ 65 (mm), 重量 約 3 kg

2.7.3 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-2.7.3 に示す通り, マルチタスク・リアルタイム制御の可



- 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-2.7.3 データ表示部のソフトウェア構成

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-2.7.4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。

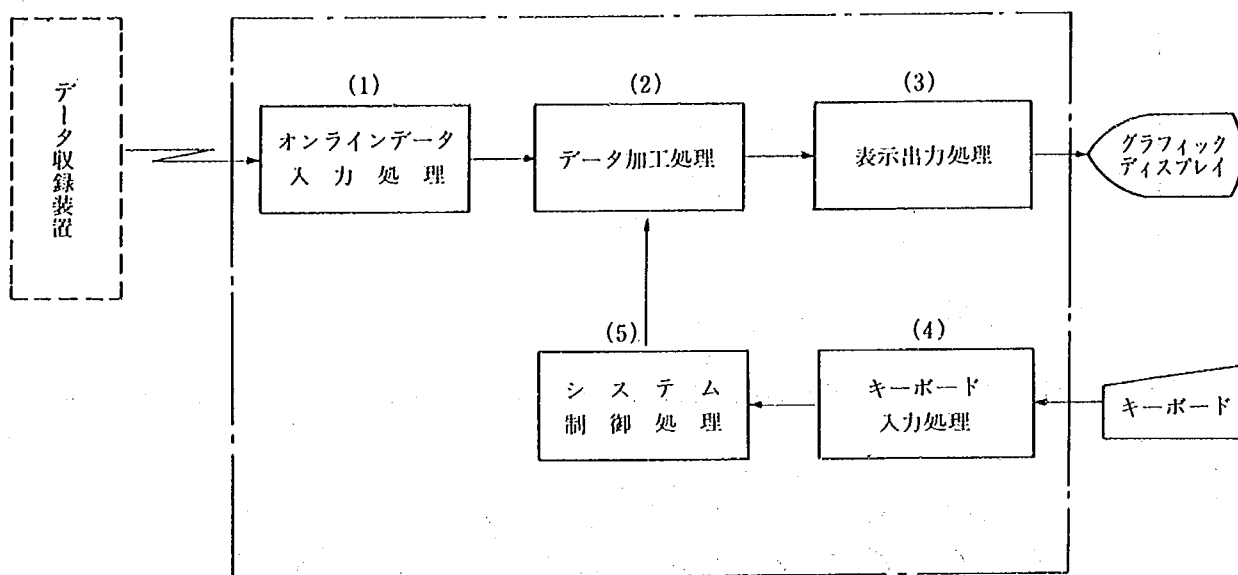


図-2.7.4 アプリケーションプログラム構成

(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-2.7.2に示すレーダー情報をリアルタイムに受信する。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。

(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に入力された各種レーダ情報を、運用パターンに応じた表-2.7.3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-2.7.5に示す。

表- 2.7.2 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})	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})	"
	4. 垂直偏波MTI エコー (Z_{VM})	"
	5. ノーマルエコー Z_{DR} (Z_{DRN})	"
	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 コー (Z)	"

表- 2.7.3 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	"

* 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vs 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- 2.7.4 に示す。

表- 2.7.4 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 (80 km × 80 km)	2 × 2 ドット
RSI 画像処理	400 ドット× 256 ドット (40 km × 256 スィープ)	2 × 1 ドット

表- 2.7.5 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	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$	15分
	ドップラー	$V \cdot \sigma \cdot Z$	
2	二重偏波	$Z_{HN} \cdot Z_{HM} \cdot Z_{VN} \cdot Z_{VM} \cdot Z_{DRN} \cdot Z_{DRM}$	5分
	ドップラー	$V \cdot \sigma \cdot Z$	
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

(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- 2.7.6 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- 2.7.6 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) を終了し、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。
(PF 1)	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。
(PF 2)	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。
(PF 3)	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。
(PF 4)	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。
(PF 5)	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。
(PF 6)	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。
(PF 7)	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。
(PF 8)	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。
(PF 9)	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。
(PF 10)	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。

2.8 二重偏波モードの性能評価

土木研究所のDNDレーダの二重偏波モードに関する性能（観測精度，分解能）を評価した。

2.8.1 二重偏波レーダの測定原理

二重偏波レーダは，水平偏波及び垂直偏波を交互に送信し，水平及び垂直偏波それぞれの反射因子を測定することにより，この反射因子の比から降水粒子の種類を判別することができる。

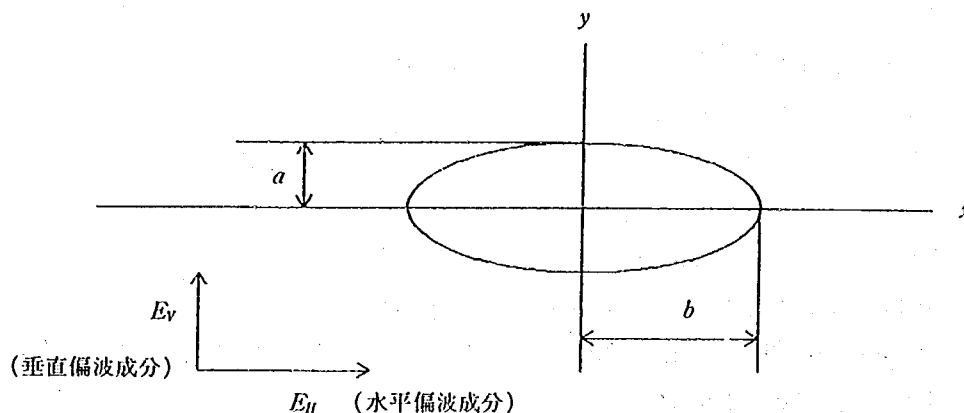
雨滴は大気中を落下するとき，空気の抵抗を受けて偏平になるが，ひょう等の氷粒はそうはならない。図－2.8.1に雨滴が偏平な状態が示されているが，偏平度（ a と b の比）は雨滴が大きい程大きく，

$$a/b = 1.03 - 0.62 D$$

D : equivolumic spherical diameter (cm)

$$0.1 \leq D \leq 1.0$$

と表される。



図－2.8.1 雨滴の形状

このような目標物の落下中の形状の相違に着目して，水平，垂直偏波を交互に送信して，それぞれの反射因子 Z_H ， Z_V を測定し次式で定義される differential reflectivity Z_{DR}

$$Z_{DR} = 10 \log Z_H / Z_V$$

を求めることで雨滴と氷粒の識別を行う。すなわち Z_{DR} が大きい所（ $Z_{DR} > 2$ dB）では降雨域，小さい所（ $Z_{DR} \approx 0$ dB）では降ひょう域となる。

2.8.2 DNDレーダの二重偏波系の性能諸元

(1) 最小受信感度（ S_{min} ）及びダイナミックレンジ

DNDレーダでは，最小受信感度（受信機ノイズ点）は -107.5 dBm であり，受信機飽和点は -31 dBm であるから，ダイナミックレンジは 76.5 dB となっている。

(2) 処理分解能

DNDレーダでは，ダイナミックレンジ 76.5 dB に対して振幅量子化を 10 ビットで行っているので，

1 LSB の分解能は

$$\frac{76.5 \text{ dB}}{2^{10}} = \frac{76.5 \text{ dB}}{1,024} = 0.0747 \text{ dB}$$

となっている。

2.8.3 DNDレーダの二重偏波モードにおける降水強度と受信電力

DNDレーダの二重偏波モードにおける諸元を表-2.8.1に示す。この諸元での水平偏波及び垂直偏波における雨及び雪の場合の降水強度と受信電力との関係を図-2.8.2(1), (2)及び図-2.8.3(1), (2)に示す。

(1) 水平偏波

① 降雨観測 (図-2.8.2(1))

- 0.2 mm/hr 相当の降雨を 17 km まで観測可能
- 0.4 mm/hr " 30 km "
- 0.6 mm/hr 以上の降雨を 40 km "

② 降雪観測

- 0.2 mm/hr 相当の降雪を 19 km まで観測可能
- 0.5 mm/hr 以上の降雪を 40 km "
- 67 mm/hr 以上の降雪は受信機飽和レベルに達し定量的測定ができない。

(2) 垂直偏波

① 降雨観測 (図-2.8.3(1))

- 0.2 mm/hr 相当の降雨を 16 km まで観測可能
- 0.7 mm/hr 以上の降雨を 40 km "

② 降雪観測 (図-2.8.3(2))

- 0.2 mm/hr 相当の降雪を 17 km まで観測可能
- 0.5 mm/hr 以上の降雪を 40 km "
- 73 mm/hr 以上の降雪は受信機飽和レベルに達し定量的測定ができない。

表-2.8.1 二重偏波モードにおける諸元

	水平偏波		垂直偏波	
	雨	雪	雨	雪
Power (kW)	75	同 左	同 左	同 左
Pulse Width (μs)	2.0	同 左	同 左	同 左
Frequency (MHz)	5,280	同 左	同 左	同 左
Ant Gain (dB)	36.6	同 左	36.7	同 左
Beam Width - H (deg)	1.80	同 左	1.78	同 左
Beam Width - V (deg)	1.76	同 左	1.82	同 左
Feeder Loss (dB)	14.59	同 左	15.67	同 左
Attenuation - Gas (dB/km)	0.01	同 左	同 左	同 左
K ²	0.93	0.21	0.93	0.21
B	200	2,000	200	2,000
β	1.6	2	1.6	2

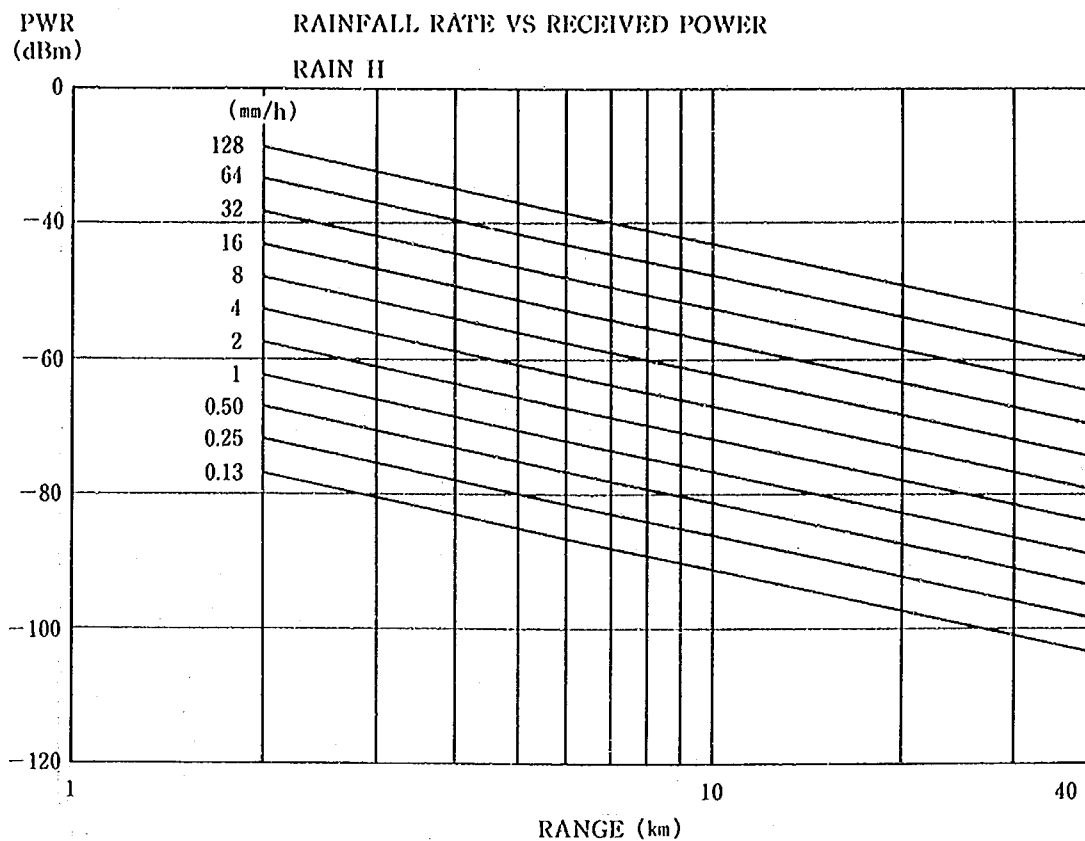


図- 2. 8. 2 (1) 水平偏波の測定性能 (降雨時)

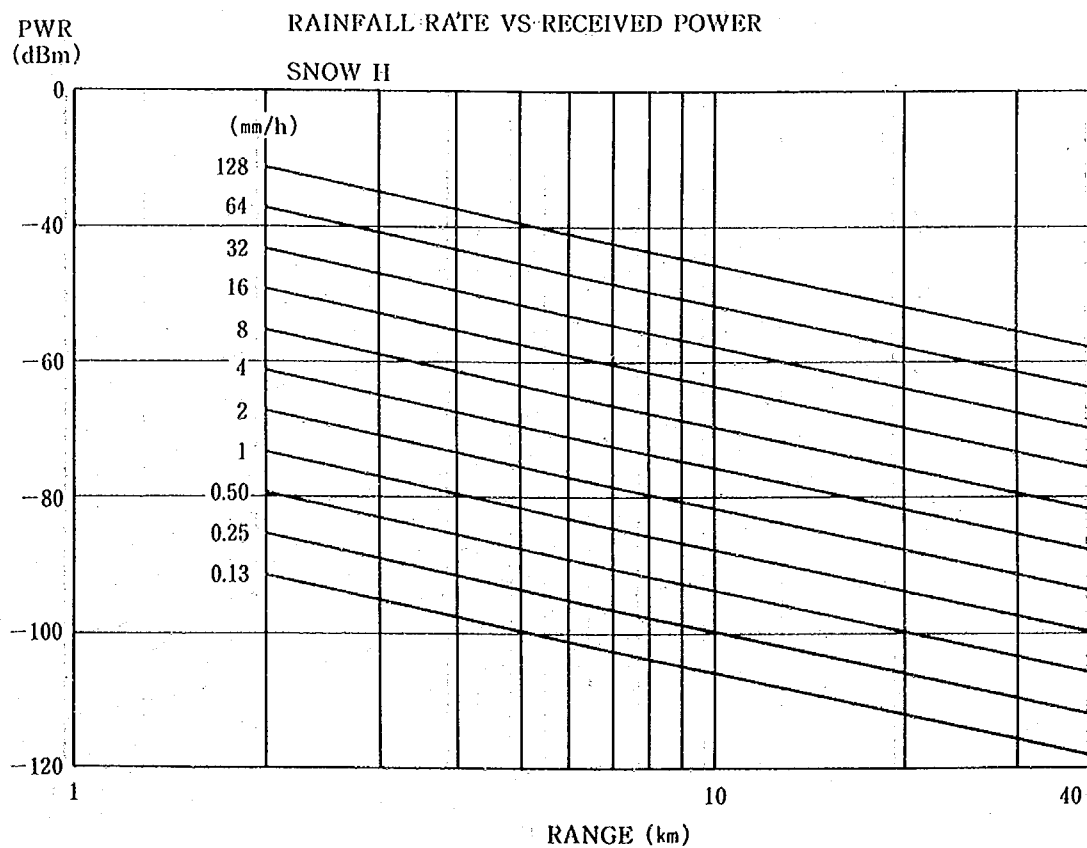


図- 2. 8. 2 (2) 水平偏波の測定性能 (降雪時)

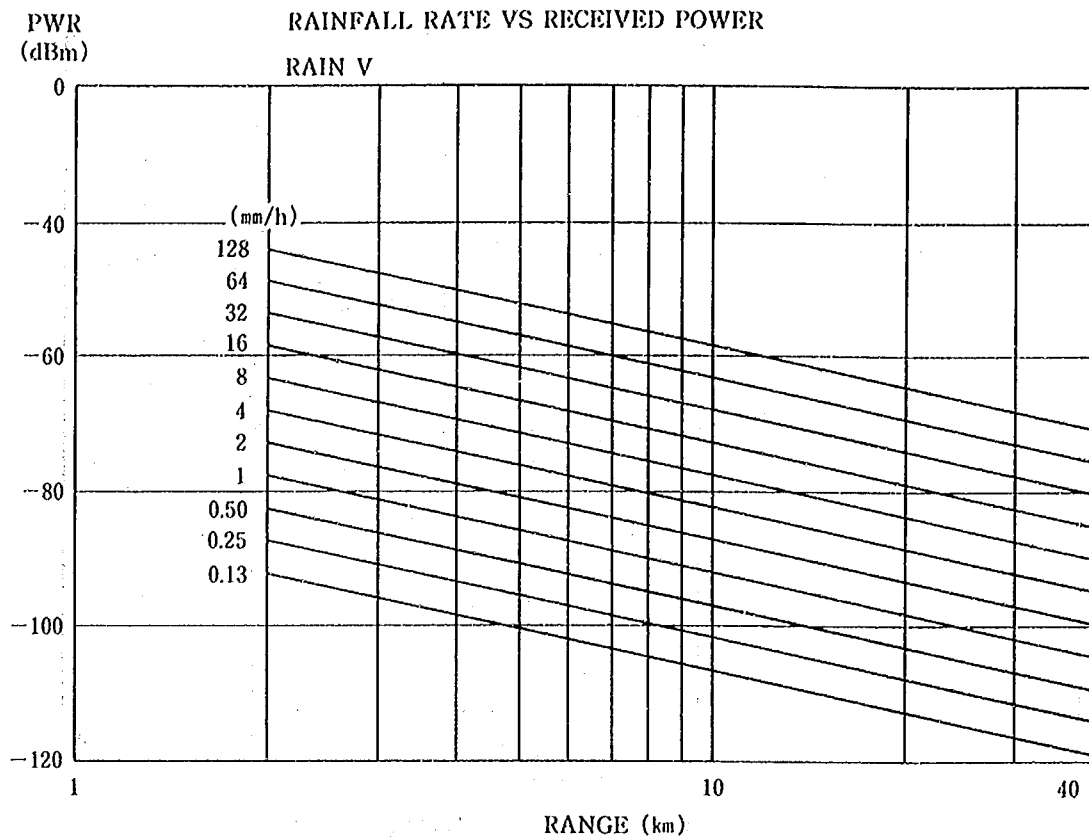


図- 2.8.3 (1) 垂直偏波の測定性能 (降雨時)

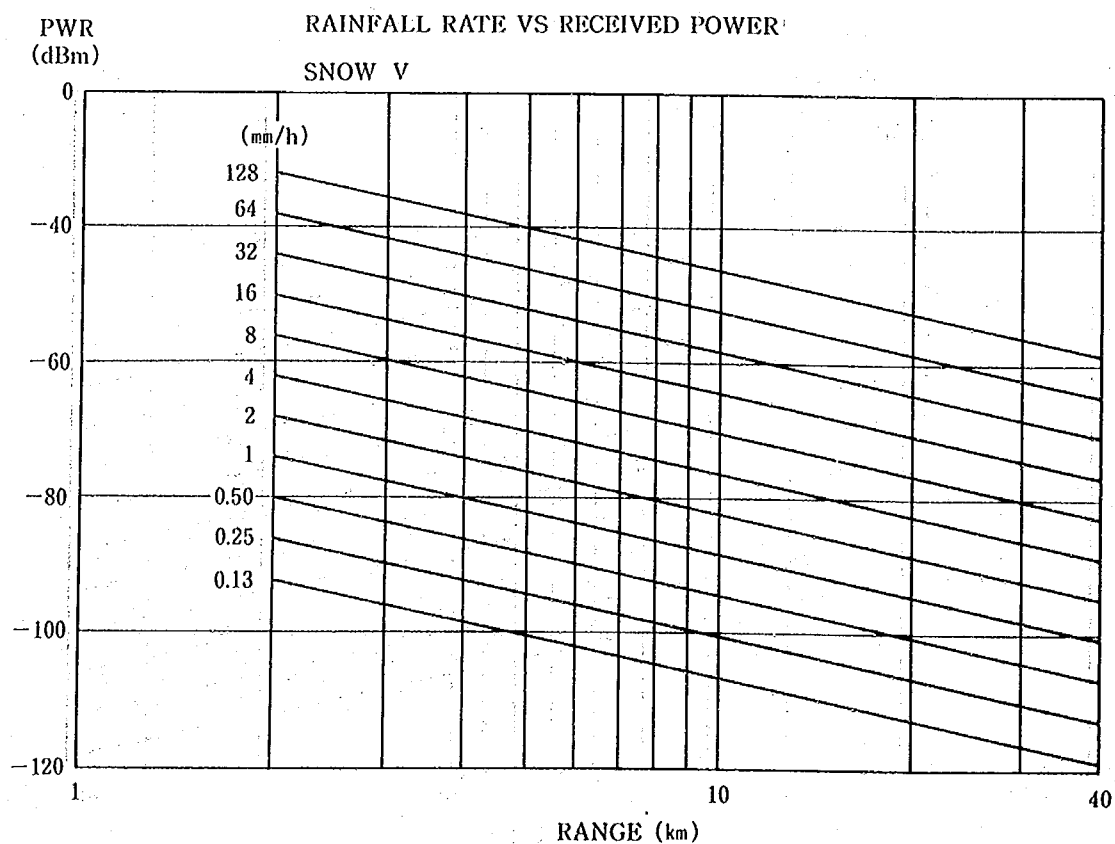


図- 2.8.3 (2) 垂直偏波の測定性能 (降雪時)

2.9 ドップラモードの性能評価

2.9.1 ドップラレーダ

ドップラレーダとは、移動しつつある目標から散乱される電波のドップラ効果を利用して目標のレーダ方向に対する速度を測定する測器である。

空中線から大気中に放射された電波（周波数を f_i 、波長を λ とする）は、降水粒子に当たると、そのレーダ方向に対する移動速度に応じた周波数偏移 f_d をうけ $f_i \pm f_d$ の周波数になって空中線に戻ってくる。この $\pm f_d$ をドップラ周波数といい、ドップラレーダではこの f_d を検出し、信号処理して速度を測定することができる。

f_d の正の符号は目標がレーダに近づくものであり、負の符号はレーダから遠ざかることを意味する。ドップラ周波数（ f_d ）と速度（ v ）の関係は次式であらわされる。

$$f_d = -\frac{2v}{\lambda} \text{ (Hz)} \quad \dots\dots\dots (2.9.1)$$

ここで、 λ ：波長（cm）

2.9.2 パルスドップラレーダで測定できる速度

DNDレーダはパルスドップラレーダであり、パルスレーダによって得られるドップラ情報は、ドップラ周波数 f_d そのものではなく、パルス繰返し周波数（ f_r ）毎にサンプリングしたものである。サンプリング率（ f_r ）は、シャノンのサンプリング定理から少なくとも測定しようとするドップラ周波数の2倍はなければならない。すなわち、パルスレーダで測定可能な最大ドップラ周波数 f_{max} は $f_r/2$ であり、又（2.9.1）式から測定可能な最大速度 v_{max} は

$$v_{max} = \frac{\lambda f_{max}}{2} = \frac{\lambda f_r}{4} \quad \dots\dots\dots (2.9.2)$$

となる。

2.9.3 パルスレーダの目標の最大測定可能距離

一般に、パルスレーダの最大測定可能距離 r_{max} はパルス繰返し周波数（ f_r ）で決まり、次式であらわされる。

$$r_{max} = \frac{1}{2} \times \frac{C}{f_r} \quad \dots\dots\dots (2.9.3)$$

C：光速 3×10^8 m/sec

2.9.4 パルスドップラレーダの測定可能な速度と距離の関係

パルスドップラレーダを使用する場合、（2.9.2）、（2.9.3）式から v_{max} と r_{max} の間には、次の関係が成立つ。

$$v_{max} = \frac{\lambda}{8} \cdot \frac{C}{r_{max}} \quad \dots\dots\dots (2.9.4)$$

つまり、 v_{max} と r_{max} は反比例の関係があり、測定速度を大きくすると、観測できる距離が短くなることである。

以上の(2.9.3)、(2.9.4)式の関係は、図-2.9.1のように表わされ、パルス繰返し周波数と送信周波数を設定することにより、ドップラレーダで測定可能となる最大平均速度及び最大探知距離が得られる。

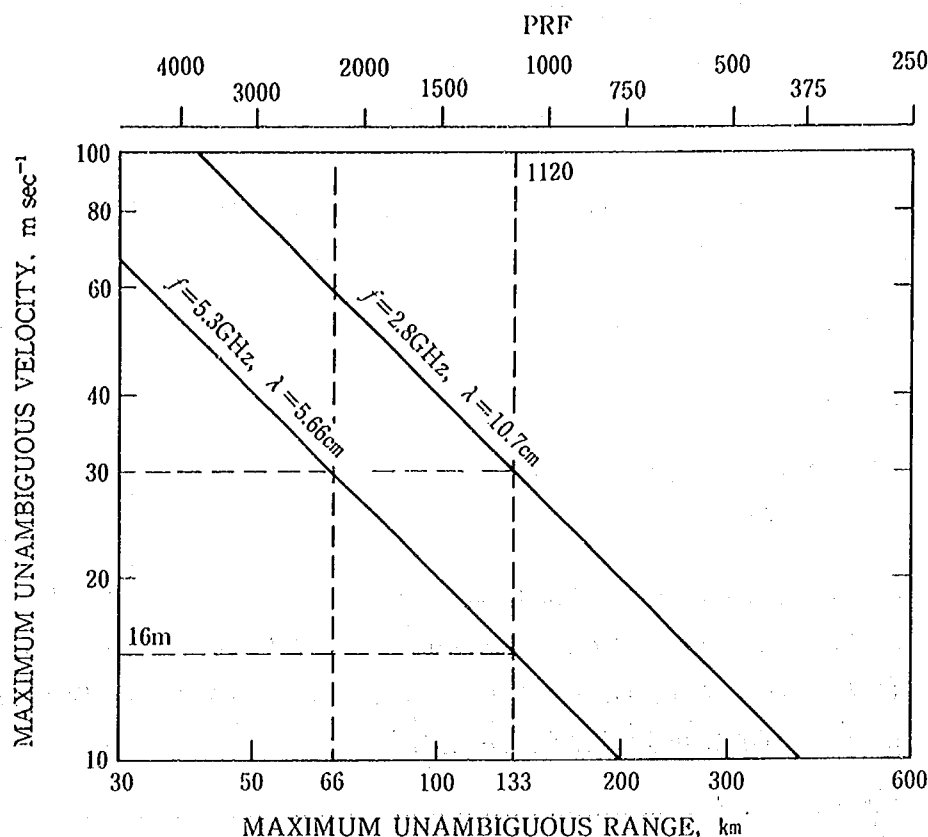


図-2.9.1 最大平均速度対最大探知距離

2.9.5 DNDレーダのドップラ系の仕様諸元

(1) ドップラ検出方式

ドップラ周波数 f_d を検出するには、次の方式がある。

- マグネトロンを用いた自励発振方式 (図-2.9.2)
- クライストロン等を用いた増幅方式 (図-2.9.3)

両方式の比較、検討を行った結果

- 増幅方式は測定精度が良く、回路構成も単純であるが、気象レーダで必要とされる大出力を得るにはコストが非常に高くなる。
- 増幅方式(クライストロン)の出力効率はマグネトロンに比べ悪く、冷却系の装置などの付帯設備が必要となり、装置全体としておおがかりなものとなる。
- マグネトロン方式は精度はやや落ちるが比較的安価であり、航空機のような点目標の検出

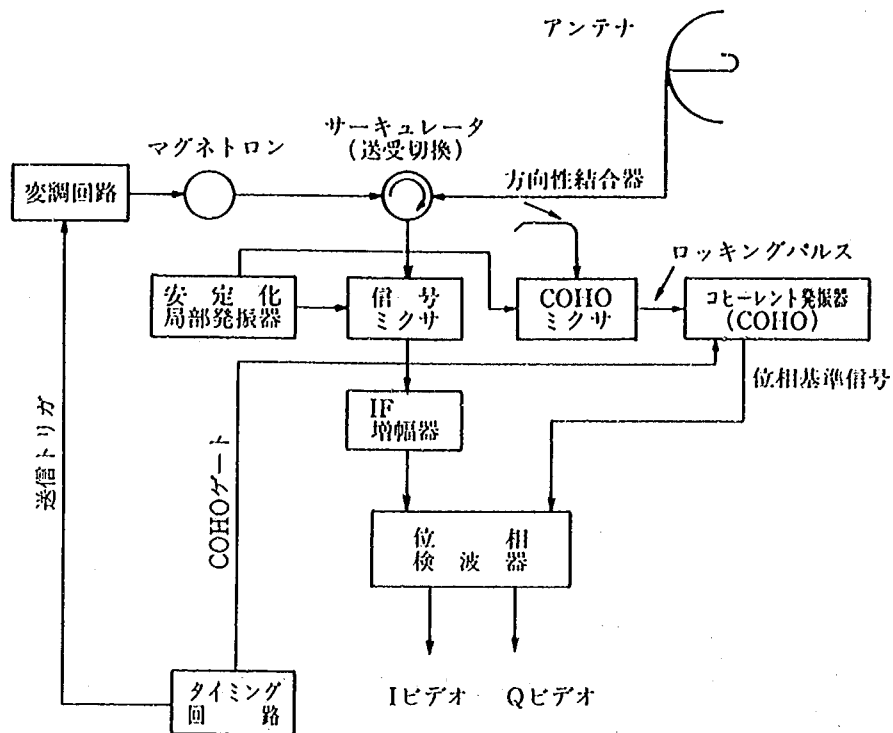


図- 2.9.2 マグネトロン方式

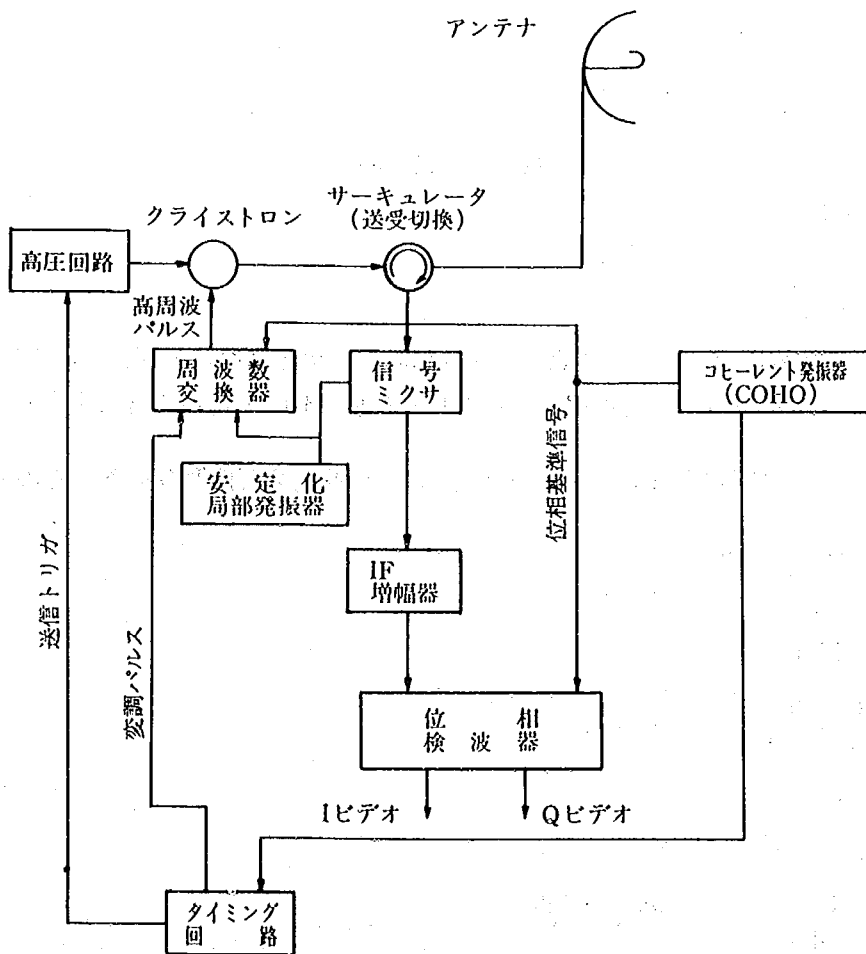


図- 2.9.3 クライストロン方式

(MTI) が目的ではなく、降水粒子群のドップラスpekトラムの平均速度とその分散を検出するには十分である。

- ④ 既設のレーダ雨量計の送信管にマグネトロン方式が採用されており、ドップラ機能の増設に伴う大がかりな変更が困難である。

等のことからDND レーダにはマグネトロン方式を採用した。

(2) パルス繰返し周波数

パルス繰返し周波数は3項で述べたようにレーダの最大測定可能距離を決定する定数であるが、主に、電波の発生源に用いられているマグネトロンの動作定格のうちパルス率（パルス幅×パルス繰返し周波数）で決定される。

建設省レーダ雨量計の場合、マグネトロンのパルス率は

パルス幅 $2 \mu s$

パルス繰返し周波数 260 PPS

の条件で

$$2 \times 10^{-6} \times 260 = 5.2 \times 10^{-4} \text{ となる。}$$

このパルス率に準拠し、かつマグネトロンが安定して動作するに必要な最小パルス幅及び最大測定可能速度を 16 m/sec と設定し、パルス繰返し周波数を決定した。

パルス幅を $0.5 \mu s$ に設定した場合

パルス繰返し周波数は

$$f_r = \frac{5.2 \times 10^{-4}}{0.5 \times 10^{-6}} = 1,040 \text{ Hz}$$

となるが、次に述べるレーダの送信周波数により最終的に

$$f_r = 1,120 \text{ Hz}$$

に決定した。

(3) レーダ周波数

レーダの送信周波数については、既設レーダ雨量計とのデータ照合の都合上、電気通信監理局へ $5,300 \text{ MHz}$ 帯の許可を申請し、実験局周波数として $5,280 \text{ MHz}$ の電波の許可を得た。

2.9.6 DNDレーダで測定可能な最大速度 (v_{max}) 速度分解能及び標準偏差の分解能

(1) 最大測定速度 v_{max}

DNDレーダで測定できる最大速度 v_{max} は

$$f_t = 5,280 \text{ MHz}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{10}}{5,280 \times 10^6} = 5.68 \text{ cm}$$

$$f_r = 1,120 \text{ Hz}$$

の条件のもとで(2.9.2)式から

$$v_{max} = \frac{\lambda \times f_r}{4} = \frac{5.68 \times 1,120}{4} = 15.9 \approx 16 \text{ m/sec}$$

従って、最大 $\pm 16 \text{ m/sec}$ の速度が測定できる。

(2) 速度分解能

速度分解能はパルス・ペア・プロセッサ (PPP) で速度演算を8ビット(正・負速度判別ビット含)で行っているので1 LSBの分解能は

$$\frac{32 \text{ m/sec}}{2^8} = \frac{32}{256} = 12.47 \text{ cm/sec} \text{ となっている。}$$

(3) 速度の標準偏差 (σ)

パルス・ペア・プロセッサで測定できる速度の標準偏差 σ は次式であらわされる。

$$\sigma = \frac{\lambda}{2\sqrt{2}\pi T} (1 - \sqrt{R^2 + I^2}) \dots\dots\dots (2.9.5)$$

$$\lambda = 5.68 \text{ (cm)}$$

$$T = \frac{1}{1,120} \text{ (sec)}$$

を代入すると

$$\sigma = 7.1616 \times (1 - \sqrt{R^2 + I^2})$$

σ の分解能 (1 LSB) は

$$\frac{7.1616}{2^7} = \frac{7.1616}{128} \Rightarrow 5.6 \text{ cm/sec} \text{ となる。}$$

2.9.7 DNDレーダのドップラモードにおける降水強度と受信電力

DNDレーダをドップラモードで動作させた場合、パルス幅、パルス繰返しが変わるので、強度系における最小及び最大測定降水強度をレーダ方程式にもとづき算出し、図-2.9.4、2.9.5及び表-2.9.1、2.9.2に結果を示した。

但し、受信系の条件は次の通りである。

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

$$\text{ダイナミックレンジ } 76.5 \text{ dB}$$

(1) 降雨観測

- 0.1 mm/hr 相当の降雨を 12 km まで観測可能
- 0.2 mm/hr " 20 km "
- 0.4 mm/hr 以上の降雨を 40 km "
- 256 mm/hr 以上の降雨は受信機飽和レベルに達し定量的測定ができない。

(2) 降雪観測

- 0.1 mm/hr 相当の降雪を 12 km まで観測可能
- 0.2 mm/hr " 22 km "
- 0.4 mm/hr 以上の降雪を 40 km "
- 64 mm/hr 相当の降雪は受信機飽和レベルに達し定量的測定ができない。

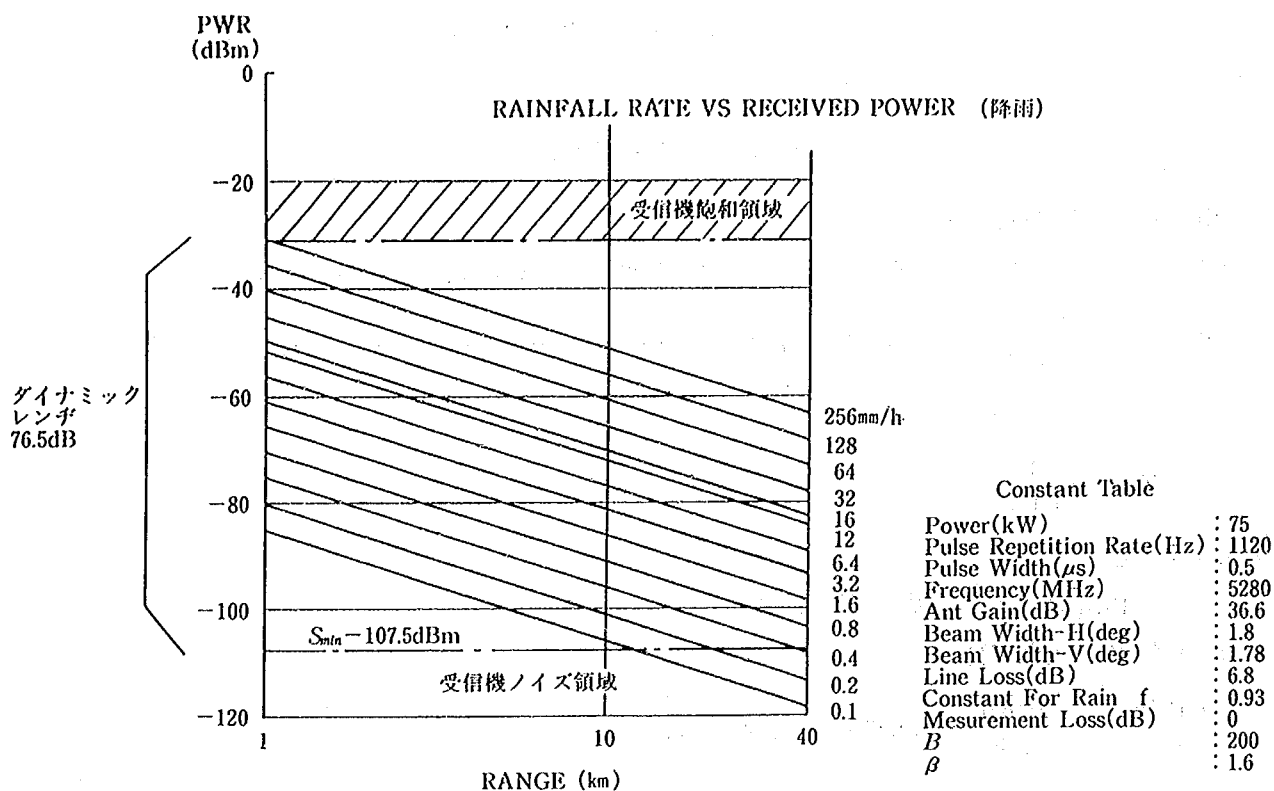


図- 2.9.4 ドップラレーダの測定性能 (降雨)

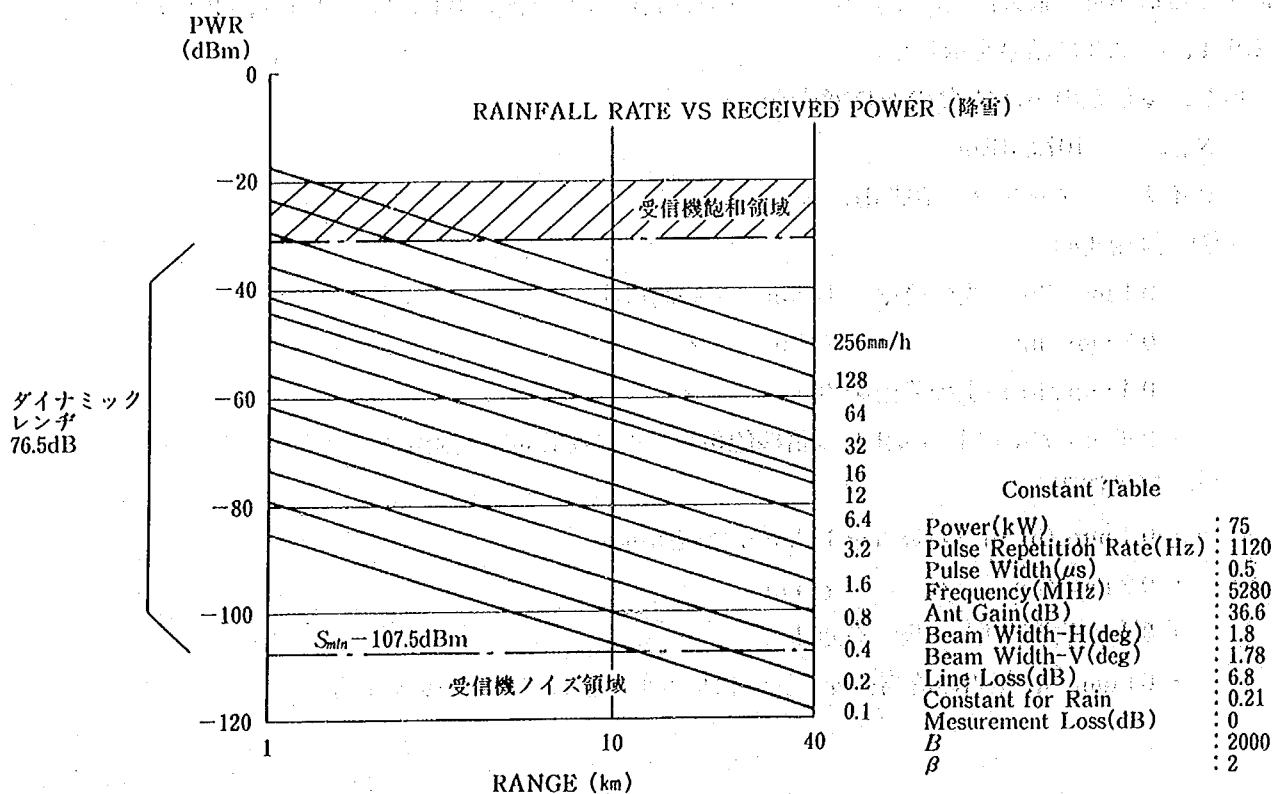


図- 2.9.5 ドップラレーダの測定性能 (降雪)

表-2.9.1 降水強度对受信電力(降雨)

Range (km)	Time (us)	0.1 (mm/hr)	0.2 (mm/hr)	0.4 (mm/hr)	0.8 (mm/hr)	1.6 (mm/hr)	3.2 (mm/hr)	6.4 (mm/hr)	12.0 (mm/hr)	16.0 (mm/hr)	32.0 (mm/hr)	64.0 (mm/hr)	128.0 (mm/hr)	256.0 (mm/hr)
1	6.7	-85.2	-80.4	-75.6	-70.8	-65.9	-61.1	-56.3	-51.9	-49.9	-45.1	-40.3	-35.5	-30.7
2	13.3	-91.2	-86.4	-81.6	-76.8	-72.0	-67.2	-62.3	-58.0	-56.0	-51.2	-46.3	-41.5	-36.7
3	20.0	-94.8	-90.0	-85.2	-80.3	-75.5	-70.7	-65.9	-61.5	-59.5	-54.7	-49.9	-45.1	-40.3
4	26.7	-97.3	-92.5	-87.7	-82.9	-78.0	-73.2	-68.4	-64.0	-62.0	-57.2	-52.4	-47.6	-42.8
5	33.3	-99.3	-94.5	-89.6	-84.8	-80.0	-75.2	-70.4	-66.0	-64.0	-59.2	-54.4	-49.6	-44.7
6	40.0	-100.9	-96.1	-91.2	-86.4	-81.6	-76.8	-72.0	-67.6	-65.6	-60.8	-56.0	-51.2	-46.3
7	46.7	-102.2	-97.4	-92.6	-87.8	-83.0	-78.1	-73.3	-69.0	-67.0	-62.1	-57.3	-52.5	-47.7
8	53.3	-103.4	-98.6	-93.8	-89.0	-84.1	-79.3	-74.5	-70.1	-68.1	-63.3	-58.5	-53.7	-48.9
9	60.0	-104.5	-99.6	-94.8	-90.0	-85.2	-80.4	-75.6	-71.2	-69.2	-64.4	-59.6	-54.7	-49.9
10	66.7	-105.4	-100.6	-95.8	-90.9	-86.1	-81.3	-76.5	-72.1	-70.1	-65.3	-60.5	-55.7	-50.9
11	73.3	-106.2	-101.4	-96.6	-91.8	-87.0	-82.2	-77.3	-73.0	-71.0	-66.2	-61.3	-56.5	-51.7
12	80.0	-107.0	-102.2	-97.4	-92.6	-87.7	-82.9	-78.1	-73.7	-71.7	-66.9	-62.1	-57.3	-52.5
13	86.7	-107.7	-102.9	-98.1	-93.3	-88.5	-83.6	-78.8	-74.5	-72.5	-67.6	-62.8	-58.0	-53.2
14	93.3	-108.4	-103.6	-98.8	-93.9	-89.1	-84.3	-79.5	-75.1	-73.1	-68.3	-63.5	-58.7	-53.9
15	100.0	-109.0	-104.2	-99.4	-94.6	-89.7	-84.9	-80.1	-75.7	-73.7	-68.9	-64.1	-59.3	-54.5
16	106.7	-109.6	-104.8	-100.0	-95.1	-90.3	-85.5	-80.7	-76.3	-74.3	-69.5	-64.7	-59.9	-55.1
17	113.3	-110.1	-105.3	-100.5	-95.7	-90.9	-86.1	-81.2	-76.9	-74.9	-70.1	-65.2	-60.4	-55.6
18	120.0	-110.7	-105.8	-101.0	-96.2	-91.4	-86.6	-81.8	-77.4	-75.4	-70.6	-65.8	-60.9	-56.1
19	126.7	-111.1	-106.3	-101.5	-96.7	-91.9	-87.1	-82.2	-77.9	-75.9	-71.1	-66.2	-61.4	-56.6
20	133.3	-111.6	-106.8	-102.0	-97.2	-92.3	-87.5	-82.7	-78.3	-76.3	-71.5	-66.7	-61.9	-57.1
21	140.0	-112.1	-107.2	-102.4	-97.6	-92.8	-88.0	-83.2	-78.8	-76.8	-72.0	-67.2	-62.3	-57.5
22	146.7	-112.5	-107.7	-102.8	-98.0	-93.2	-88.4	-83.6	-79.2	-77.2	-72.4	-67.6	-62.8	-57.9
23	153.3	-112.9	-108.1	-103.2	-98.4	-93.6	-88.8	-84.0	-79.6	-77.6	-72.8	-68.0	-63.2	-58.4
24	160.0	-113.3	-108.5	-103.6	-98.8	-94.0	-89.2	-84.4	-80.0	-78.0	-73.2	-68.4	-63.6	-58.7
25	166.7	-113.6	-108.8	-104.0	-99.2	-94.4	-89.6	-84.7	-80.4	-78.4	-73.6	-68.7	-63.9	-59.1
26	173.3	-114.0	-109.2	-104.4	-99.6	-94.7	-89.9	-85.1	-80.7	-78.7	-73.9	-69.1	-64.3	-59.5
27	180.0	-114.4	-109.5	-104.7	-99.9	-95.1	-90.3	-85.5	-81.1	-79.1	-74.3	-69.5	-64.6	-59.8
28	186.7	-114.7	-109.9	-105.1	-100.2	-95.4	-90.6	-85.8	-81.4	-79.4	-74.6	-69.8	-65.0	-60.2
29	193.3	-115.0	-110.2	-105.4	-100.6	-95.7	-90.9	-86.1	-81.7	-79.7	-74.9	-70.1	-65.3	-60.5
30	200.0	-115.3	-110.5	-105.7	-100.9	-96.1	-91.2	-86.4	-82.1	-80.1	-75.2	-70.4	-65.6	-60.8
31	206.7	-115.6	-110.8	-106.0	-101.2	-96.4	-91.6	-86.7	-82.4	-80.4	-75.6	-70.7	-65.9	-61.1
32	213.3	-115.9	-111.1	-106.3	-101.5	-96.7	-91.8	-87.0	-82.7	-80.7	-75.8	-71.0	-66.2	-61.4
33	220.0	-116.2	-111.4	-106.6	-101.8	-97.0	-92.1	-87.3	-83.0	-81.0	-76.1	-71.3	-66.5	-61.7
34	226.7	-116.5	-111.7	-106.9	-102.0	-97.2	-92.4	-87.6	-83.2	-81.2	-76.4	-71.6	-66.8	-62.0
35	233.3	-116.8	-112.0	-107.1	-102.3	-97.5	-92.7	-87.9	-83.5	-81.5	-76.7	-71.9	-67.1	-62.2
36	240.0	-117.0	-112.2	-107.4	-102.6	-97.8	-93.0	-88.1	-83.8	-81.8	-77.0	-72.1	-67.3	-62.5
37	246.7	-117.3	-112.5	-107.7	-102.8	-98.0	-93.2	-88.4	-84.0	-82.0	-77.2	-72.4	-67.6	-62.8
38	253.3	-117.5	-112.7	-107.9	-103.1	-98.3	-93.5	-88.6	-84.3	-82.3	-77.5	-72.6	-67.8	-63.0
39	260.0	-117.8	-113.0	-108.2	-103.3	-98.5	-93.7	-88.9	-84.5	-82.5	-77.7	-72.9	-68.1	-63.3
40	266.7	-118.0	-113.2	-108.4	-103.6	-98.8	-93.9	-89.1	-84.8	-82.8	-77.9	-73.1	-68.3	-63.5

Constant Table

Power(kW)	: 75
Pulse Repetition Rate(Hz)	: 1120
Pulse Width(μ s)	: 0.5
Frequency(MHz)	: 5280
Ant Gain(dB)	: 36.6
Beam Width-H(deg)	: 1.8
Beam Width-V(deg)	: 1.78
Line Loss(dB)	: 6.8
Constant For Rain f	: 0.93
Mesurement Loss(dB)	: 0
B	: 200
β	: 1.6

表- 2.9.2 降水強度对受信電力 (降雪)

Range (km)	Time (us)	0.1 (mm/hr)	0.2 (mm/hr)	0.4 (mm/hr)	0.8 (mm/hr)	1.6 (mm/hr)	3.2 (mm/hr)	6.4 (mm/hr)	12.0 (mm/hr)	16.0 (mm/hr)	32.0 (mm/hr)	64.0 (mm/hr)	128.0 (mm/hr)	256.0 (mm/hr)
1	6.7	-85.7	-79.6	-73.6	-67.6	-61.6	-55.6	-49.5	-44.1	-41.6	-35.6	-29.5	-23.5	-17.5
2	13.3	-91.7	-85.7	-79.7	-73.6	-67.6	-61.6	-55.6	-50.1	-47.6	-41.6	-35.6	-29.6	-23.5
3	20.0	-95.3	-89.2	-83.2	-77.2	-71.2	-65.1	-59.1	-53.7	-51.2	-45.1	-39.1	-33.1	-27.1
4	26.7	-97.8	-91.8	-85.7	-79.7	-73.7	-67.7	-61.6	-56.2	-53.7	-47.7	-41.6	-35.6	-29.6
5	33.3	-99.7	-93.7	-87.7	-81.7	-75.6	-69.6	-63.6	-58.1	-55.6	-49.6	-43.6	-37.6	-31.6
6	40.0	-101.3	-95.3	-89.3	-83.3	-77.3	-71.2	-65.2	-59.7	-57.3	-51.2	-45.2	-39.2	-33.2
7	46.7	-102.7	-96.7	-90.7	-84.6	-78.6	-72.6	-66.6	-61.1	-58.6	-52.6	-46.6	-40.5	-34.5
8	53.3	-103.9	-97.9	-91.8	-85.8	-79.8	-73.8	-67.7	-62.3	-59.8	-53.8	-47.7	-41.7	-35.7
9	60.0	-104.9	-98.9	-92.9	-86.9	-80.8	-74.8	-68.8	-63.3	-60.8	-54.8	-48.8	-42.8	-36.8
10	66.7	-105.9	-99.8	-93.8	-87.8	-81.8	-75.7	-69.7	-64.3	-61.8	-55.7	-49.7	-43.7	-37.7
11	73.3	-106.7	-100.7	-94.7	-88.6	-82.6	-76.6	-70.6	-65.1	-62.6	-56.6	-50.6	-44.6	-38.5
12	80.0	-107.5	-101.5	-95.4	-89.4	-83.4	-77.4	-71.4	-65.9	-63.4	-57.4	-51.4	-45.3	-39.3
13	86.7	-108.2	-102.2	-96.1	-90.1	-84.1	-78.1	-72.1	-66.6	-64.1	-58.1	-52.1	-46.0	-40.0
14	93.3	-108.9	-102.8	-96.8	-90.8	-84.8	-78.7	-72.7	-67.3	-64.8	-58.7	-52.7	-46.7	-40.7
15	100.0	-109.5	-103.5	-97.4	-91.4	-85.4	-79.4	-73.3	-67.9	-65.4	-59.4	-53.3	-47.3	-41.3
16	106.7	-110.1	-104.0	-98.0	-92.0	-86.0	-79.9	-73.9	-68.5	-66.0	-59.9	-53.9	-47.9	-41.9
17	113.3	-110.6	-104.6	-98.6	-92.5	-86.5	-80.5	-74.5	-69.0	-66.5	-60.5	-54.5	-48.5	-42.4
18	120.0	-111.1	-105.1	-99.1	-93.1	-87.0	-81.0	-75.0	-69.5	-67.0	-61.0	-55.0	-49.0	-43.0
19	126.7	-111.6	-105.6	-99.6	-93.5	-87.5	-81.5	-75.5	-70.0	-67.5	-61.5	-55.5	-49.5	-43.4
20	133.3	-112.1	-106.1	-100.0	-94.0	-88.0	-82.0	-75.9	-70.5	-68.0	-62.0	-55.9	-49.9	-43.9
21	140.0	-112.5	-106.5	-100.5	-94.5	-88.4	-82.4	-76.4	-70.9	-68.4	-62.4	-56.4	-50.4	-44.3
22	146.7	-112.9	-106.9	-100.9	-94.9	-88.9	-82.8	-76.8	-71.4	-68.9	-62.8	-56.8	-50.8	-44.8
23	153.3	-113.3	-107.3	-101.3	-95.3	-89.3	-83.2	-77.2	-71.8	-69.3	-63.2	-57.2	-51.2	-45.2
24	160.0	-113.7	-107.7	-101.7	-95.7	-89.7	-83.6	-77.6	-72.2	-69.7	-63.6	-57.6	-51.6	-45.6
25	166.7	-114.1	-108.1	-102.1	-96.0	-90.0	-84.0	-78.0	-72.5	-70.0	-64.0	-58.0	-52.0	-45.9
26	173.3	-114.5	-108.4	-102.4	-96.4	-90.4	-84.4	-78.3	-72.9	-70.4	-64.4	-58.3	-52.3	-46.3
27	180.0	-114.8	-108.8	-102.8	-96.8	-90.7	-84.7	-78.7	-73.2	-70.7	-64.7	-58.7	-52.7	-46.7
28	186.7	-115.2	-109.1	-103.1	-97.1	-91.1	-85.1	-79.0	-73.6	-71.1	-65.1	-59.0	-53.0	-47.0
29	193.3	-115.5	-109.5	-103.4	-97.4	-91.4	-85.4	-79.4	-73.9	-71.4	-65.4	-59.4	-53.3	-47.3
30	200.0	-115.8	-109.8	-103.8	-97.7	-91.7	-85.7	-79.7	-74.2	-71.7	-65.7	-59.7	-53.6	-47.6
31	206.7	-116.1	-110.1	-104.1	-98.0	-92.0	-86.0	-80.0	-74.5	-72.0	-66.0	-60.0	-54.0	-47.9
32	213.3	-116.4	-110.4	-104.4	-98.3	-92.3	-86.3	-80.3	-74.8	-72.3	-66.3	-60.3	-54.2	-48.2
33	220.0	-116.7	-110.7	-104.6	-98.6	-92.6	-86.6	-80.6	-75.1	-72.6	-66.6	-60.6	-54.5	-48.5
34	226.7	-117.0	-110.9	-104.9	-98.9	-92.9	-86.9	-80.8	-75.4	-72.9	-66.9	-60.8	-54.8	-48.8
35	233.3	-117.2	-111.2	-105.2	-99.2	-93.1	-87.1	-81.1	-75.6	-73.1	-67.1	-61.1	-55.1	-49.1
36	240.0	-117.5	-111.5	-105.5	-99.4	-93.4	-87.4	-81.4	-75.9	-73.4	-67.4	-61.4	-55.4	-49.3
37	246.7	-117.8	-111.7	-105.7	-99.7	-93.7	-87.7	-81.6	-76.2	-73.7	-67.7	-61.6	-55.6	-49.6
38	253.3	-118.0	-112.0	-106.0	-99.9	-93.9	-87.9	-81.9	-76.4	-73.9	-67.9	-61.9	-55.9	-49.8
39	260.0	-118.3	-112.2	-106.2	-100.2	-94.2	-88.1	-82.1	-76.7	-74.2	-68.1	-62.1	-56.1	-50.1
40	266.7	-118.5	-112.5	-106.5	-100.4	-94.4	-88.4	-82.4	-76.9	-74.4	-68.4	-62.4	-56.3	-50.3

Constant Table

Power(kW)	: 75
Pulse Repetition Rate(Hz)	: 1120
Pulse Width(us)	: 0.5
Frequency(MHz)	: 5280
Ant Gain(dB)	: 36.6
Beam Width-H(deg)	: 1.8
Beam Width-V(deg)	: 1.78
Line Loss(dB)	: 6.8
Constant for Rain	: 0.21
Mesurement Loss(dB)	: 0
B	: 2000
β	: 2

2.10 富山での設置工事について

2.10.1 概 要

現在、レーダサイトは富山工事事務所三郷出張所構内に設けられている。レーダ機器は現地据付に先立って、全て土木研究所構内に搬入され、組立て及び動作確認試験を経たのち、昭和 62 年 12 月中旬に冬期の設置場所である富山に搬入された。富山での設置工事の主要なものは次の通りである。

- (1) 土盛工事及び土盛上層のコンクリート張り
- (2) 電源線及び電話線の引込み
- (3) 第 1 種接地工事
- (4) 避雷針取付け用パンザマストの設置
- (5) 空中線装置及びシェルトの設置
- (6) ケーブル布線
- (7) 観測小屋の設置 等

尚、本装置の設置場所は冬期用、夏期用の 2 カ所が予定されているため、機器間ケーブル及び機器間導波管を両方で流用できる様配慮している。

2.10.2 工事工程

富山での設置工事の工程を図- 2.10.1 に示す。

2.10.3 設置工事状況

三郷出張所での設置工事状況を以下の図面で示す。

図- 2.10.2 レーダサイト現場案内図

図- 2.10.3 土盛及びコンクリート張り施工図

図- 2.10.4 避雷針取付図

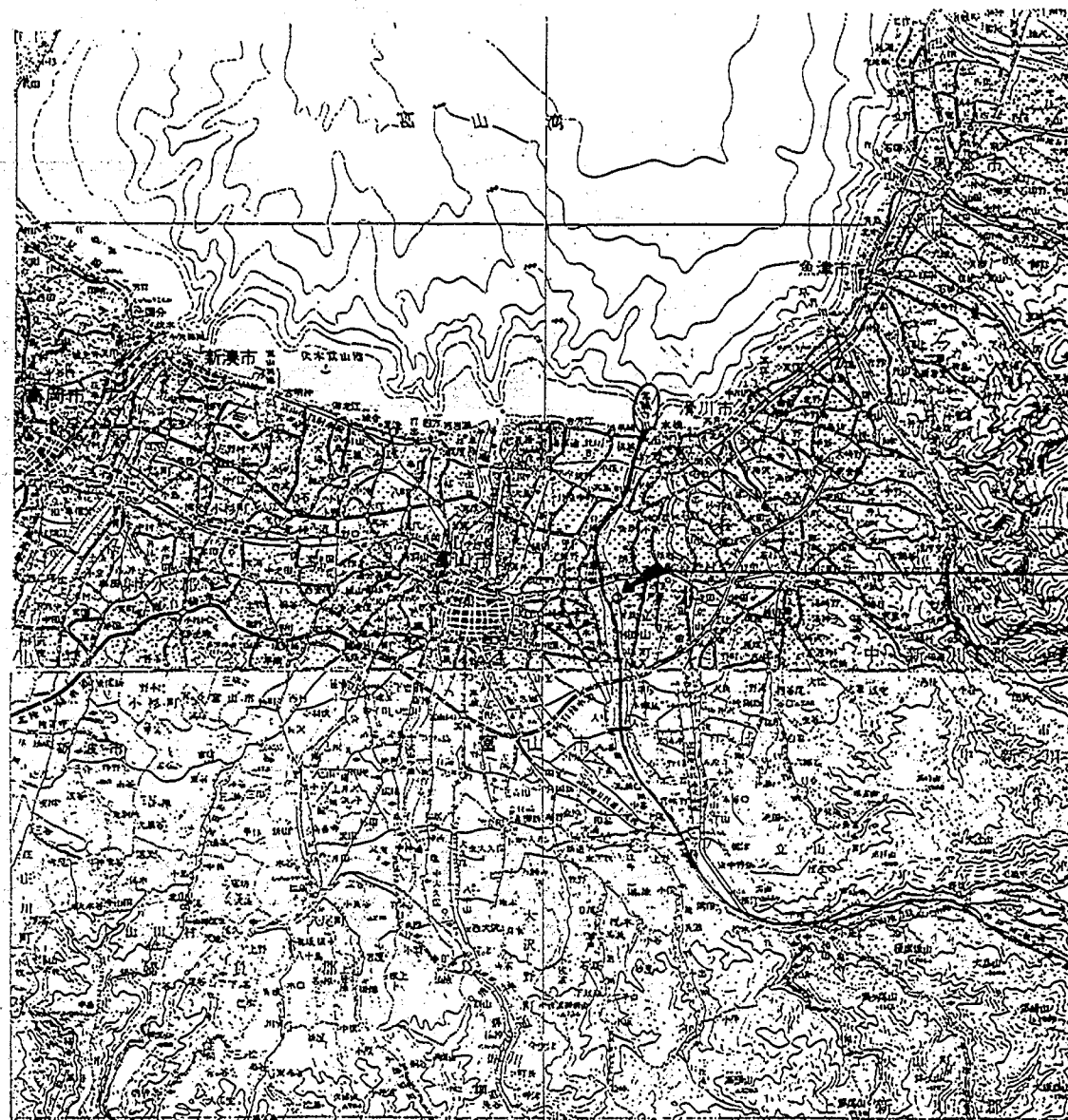
図- 2.10.5 ケーブル・W/G 用ラック設置図

図- 2.10.6 電源引込図

図- 2.10.7 シェルター観測小屋内機器据付図

[illegible]

図-2.10.1 設置工事の工程



富山県中新川郡
立山町芦原
建設省富山工事事務所
三郷出張所

図- 2.10.2 (1) レーダサイト (三郷出張所内) 現場案内図 (1/3)

立 山 町

曾 我

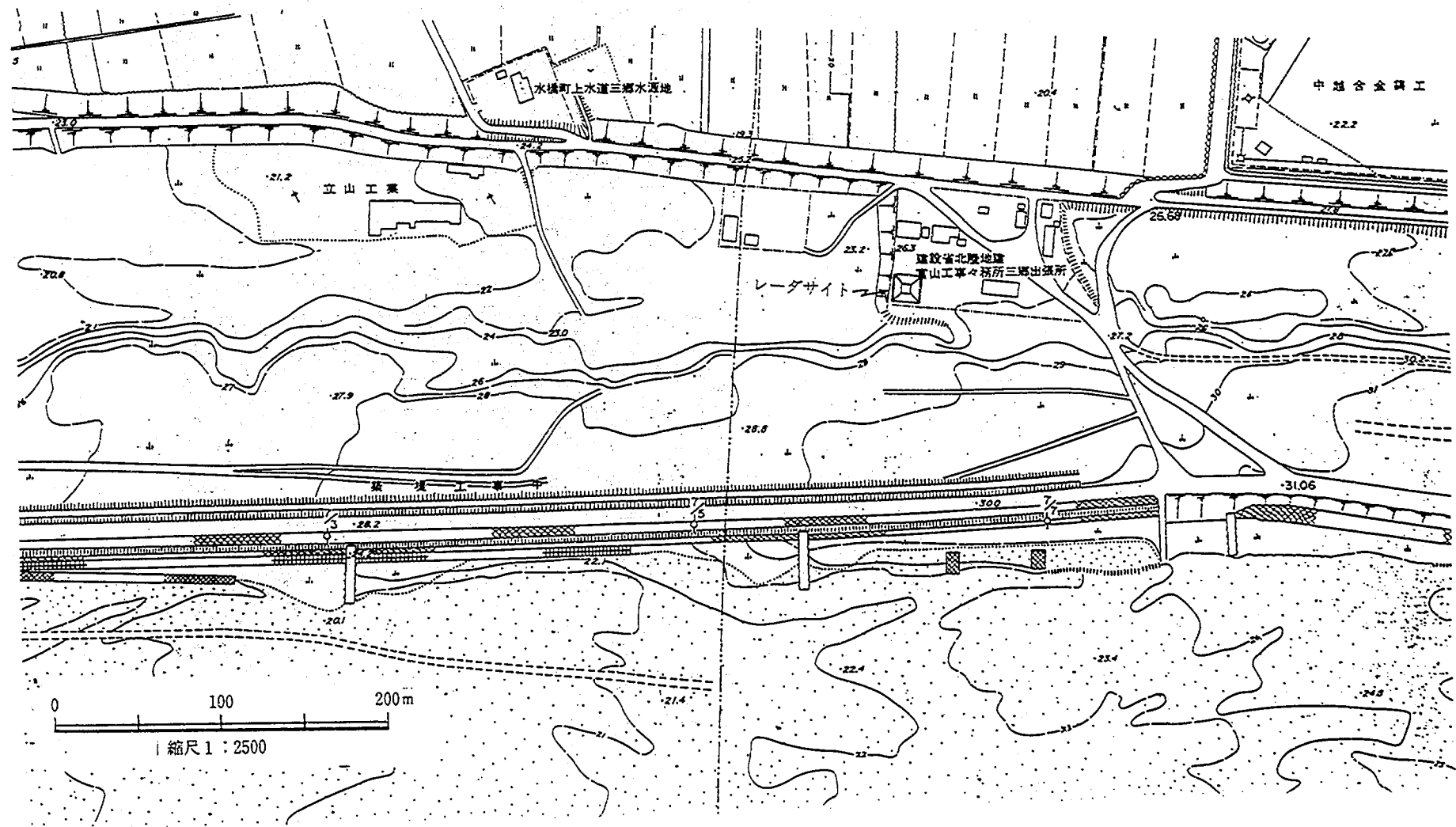


図- 2.10.2 (2) レーダサイト (三郷出張所内) 現場案内図 (2/3)

図-2.10.2(3) レーダサイト(三郷出張所内)現場案内図(3/3) [工事概要図]

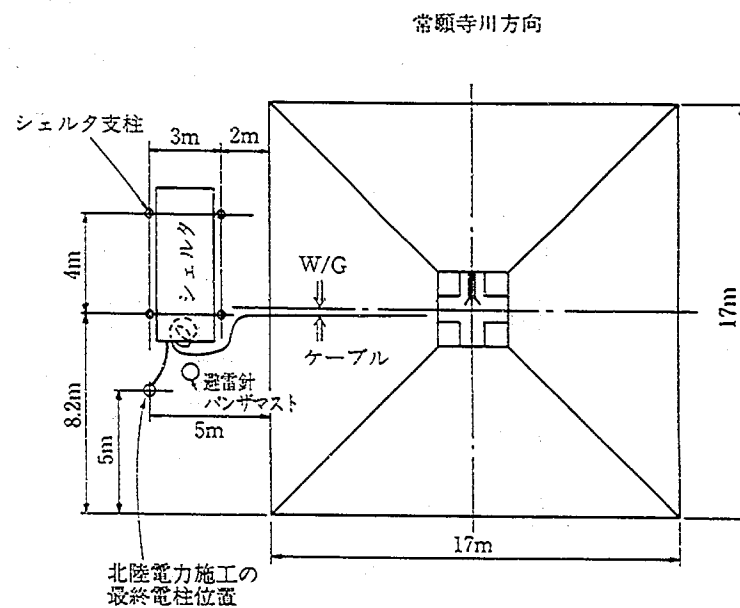
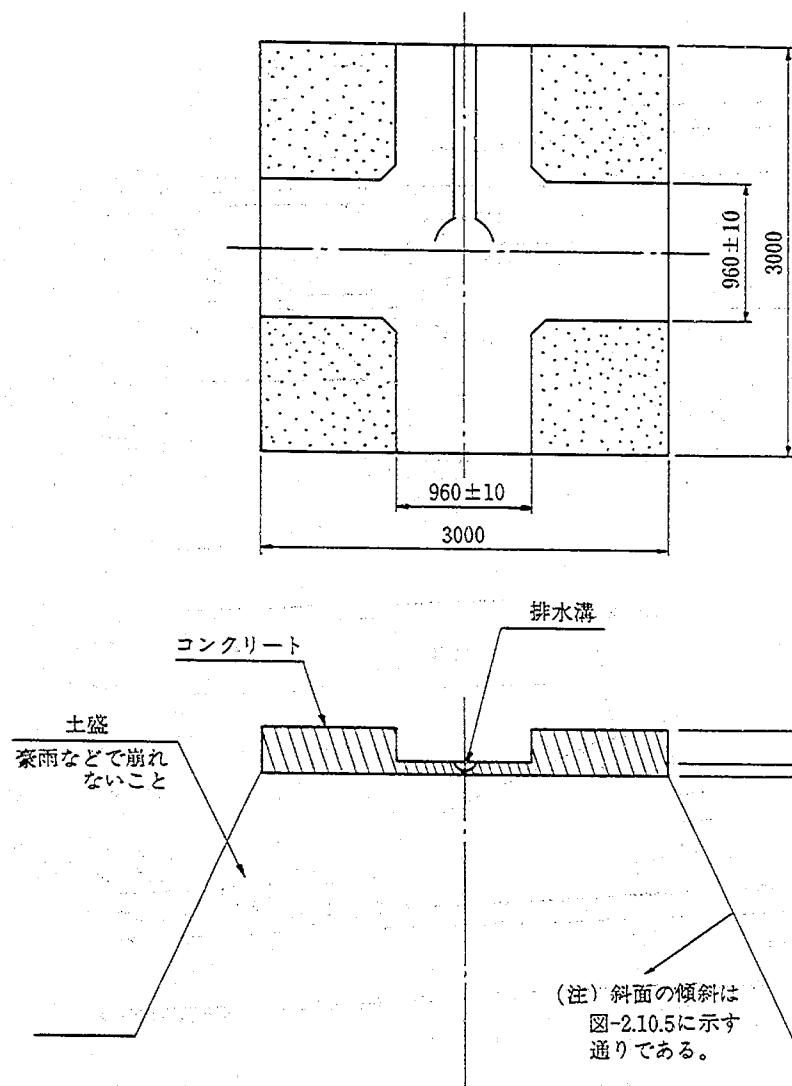


図- 2.10.3 土盛及びコンクリート張施工図

番号	部 材 名	規 格	備 考
1	避雷針突針	JIS大型突針	
2	支持管	外径38φ 内径32φ L=1500	
3	支柱取付金具	OHT-32	
4	共用バンド	OET-18	
5	硬質ビニール電線管	VE28	ℓ = 12m
6	鬼撚線	38mm ²	ℓ = 15m
7	ステンレスバンド	SFBT-10	ℓ = 15m
8	ステンレスバンド・締付金具	SUC-304	
9	リングサドル	SFW-110	
10	端子接続線	硬質塩ビ製	1702
11	コンクリート基礎	σ=180kg/cm ²	1m×1m×2m
12	接地銅線	銅板加工品半田ろう付	2023
13	バンザマスト	R312	

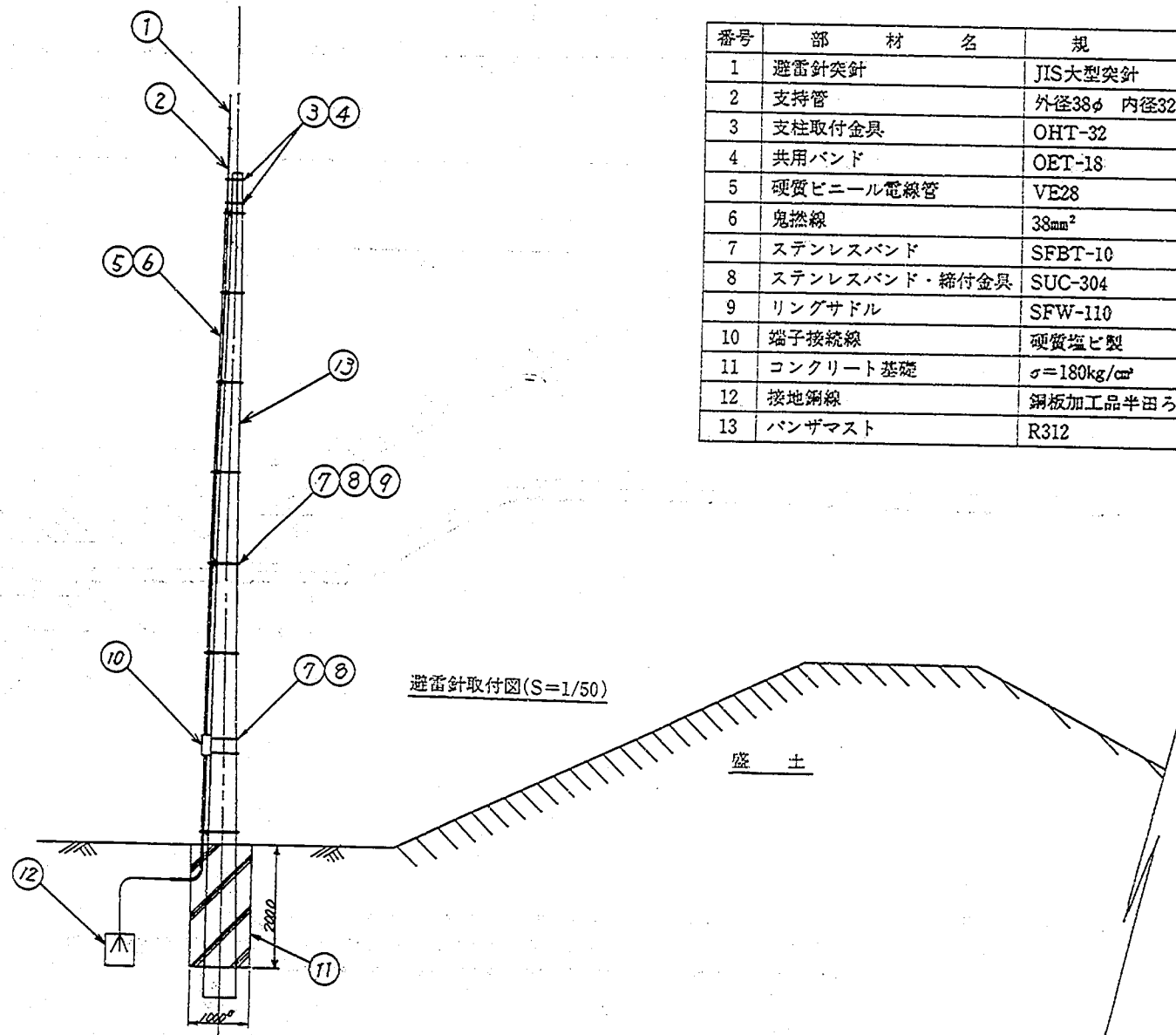


図- 2.10.4 避雷針取付図

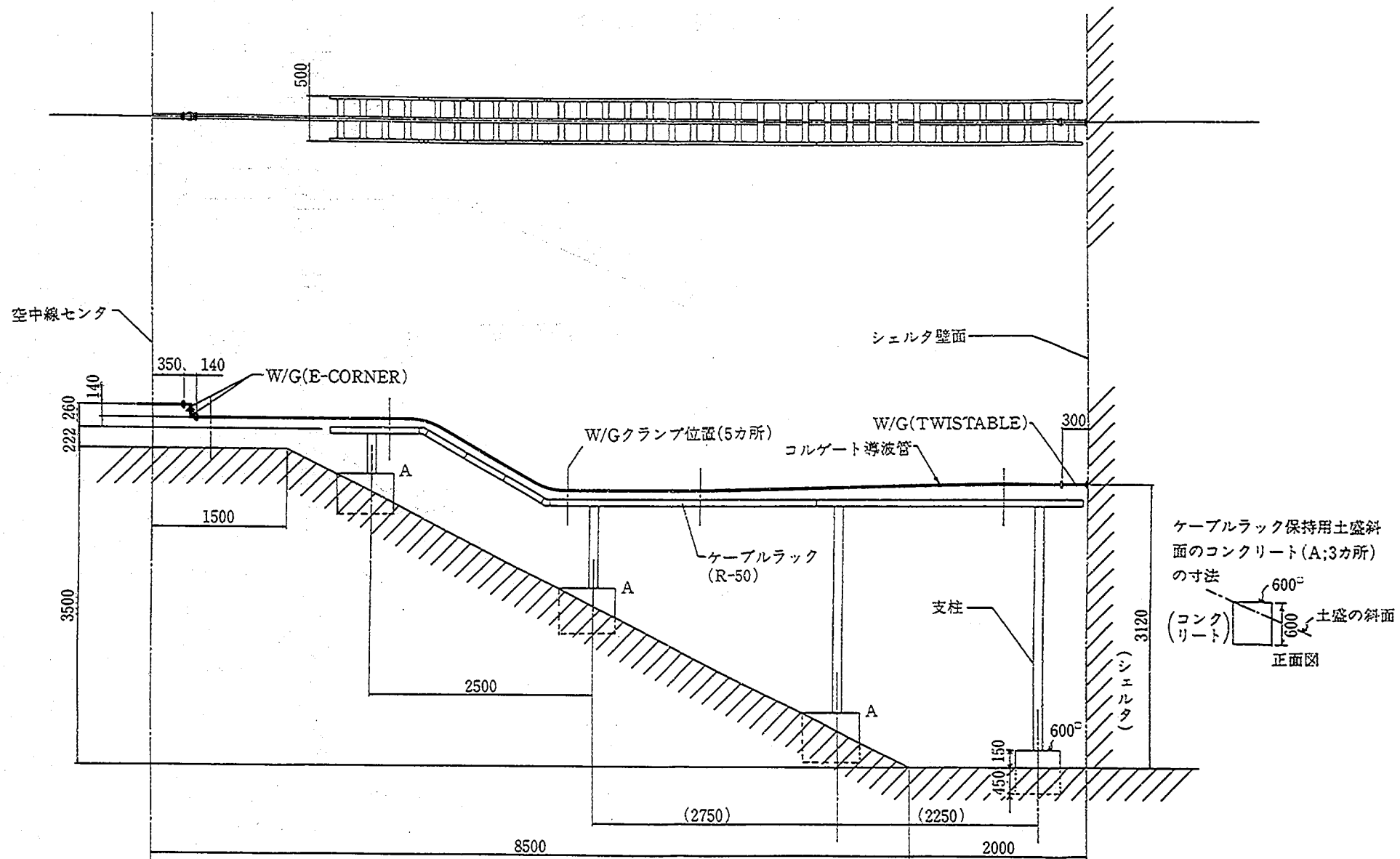
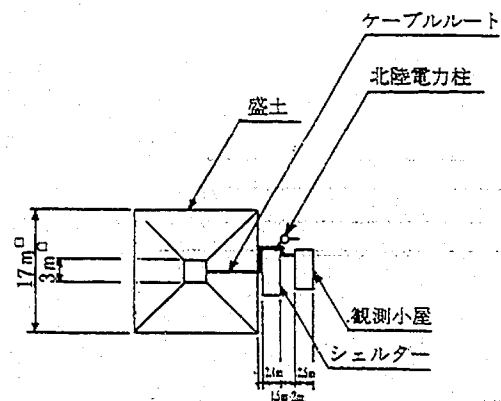


図- 2.10.5 ケーブルW/G用ラック設置図



ケーブルルート図(S=1/500)

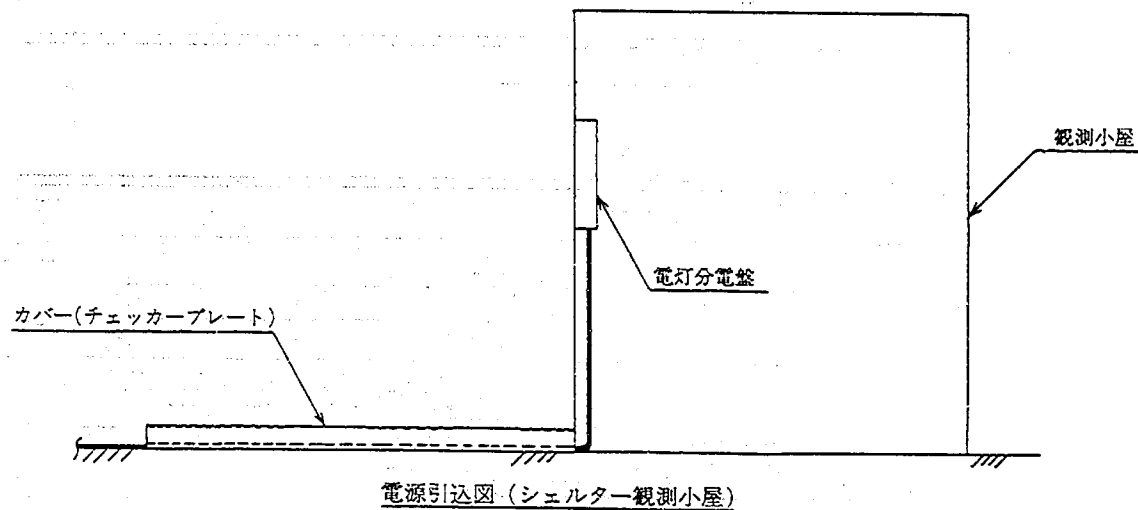
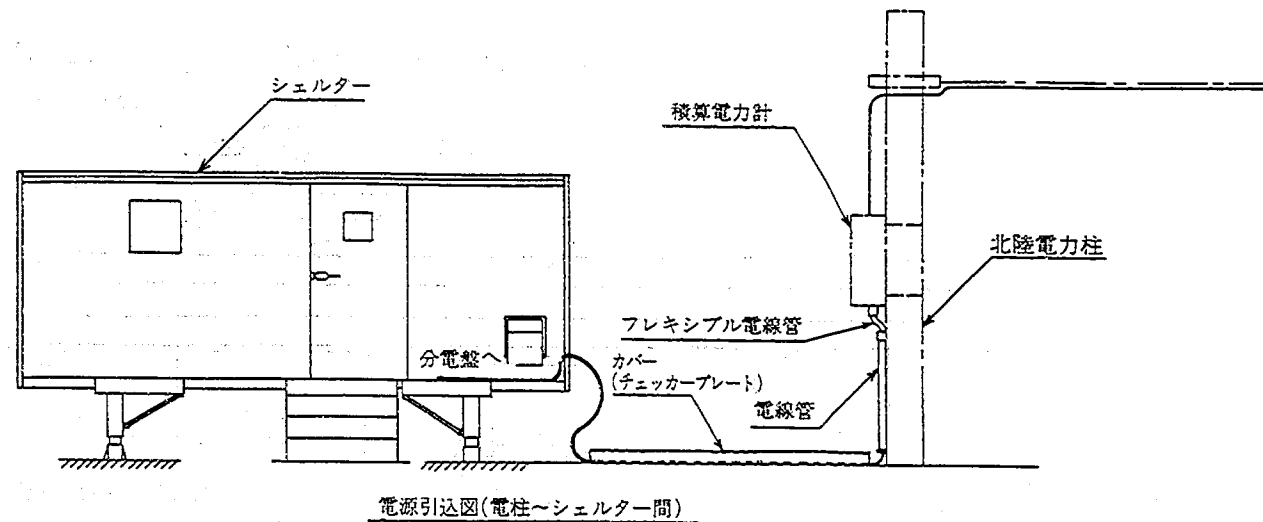
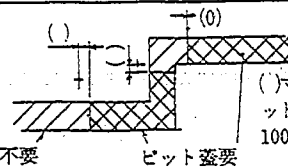
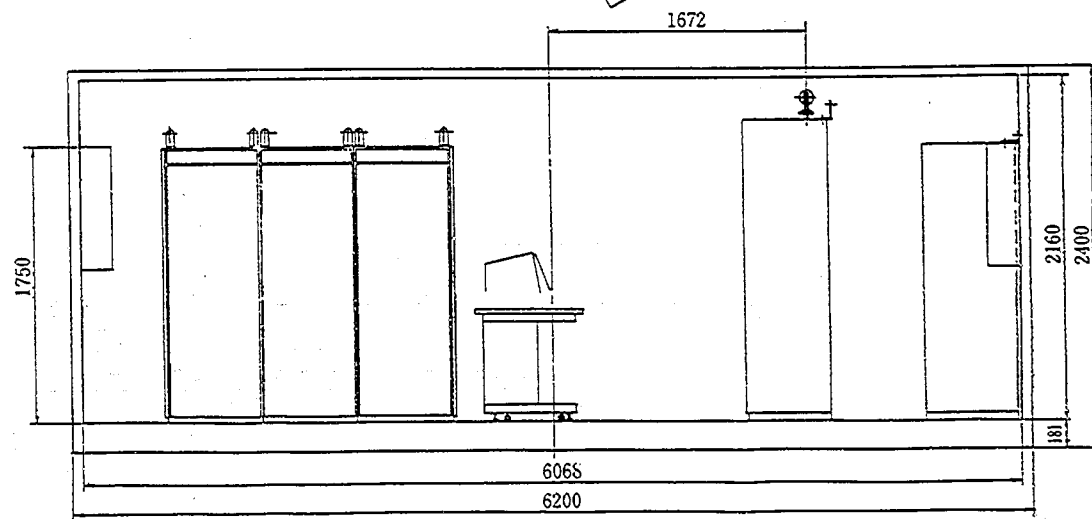
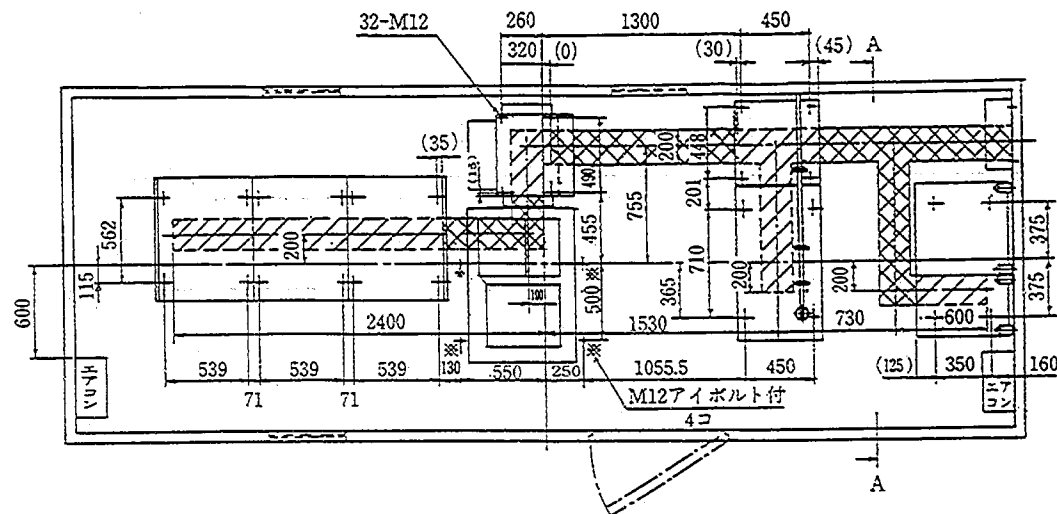
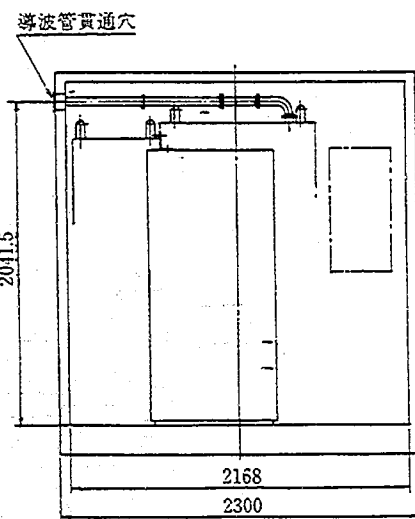
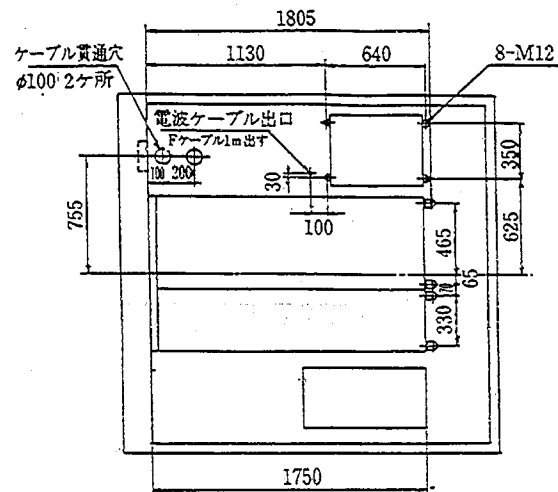


図-2.10.6 電源引込図



() 寸法はアンカボルトからビット蓋の端までの寸法を示す。
1000以上の蓋は2分割とする。

○エアコンは耐振性を考慮して取付のこと

図-2.10.7(1) シェルター観測小屋内機器据付図 (1/2)

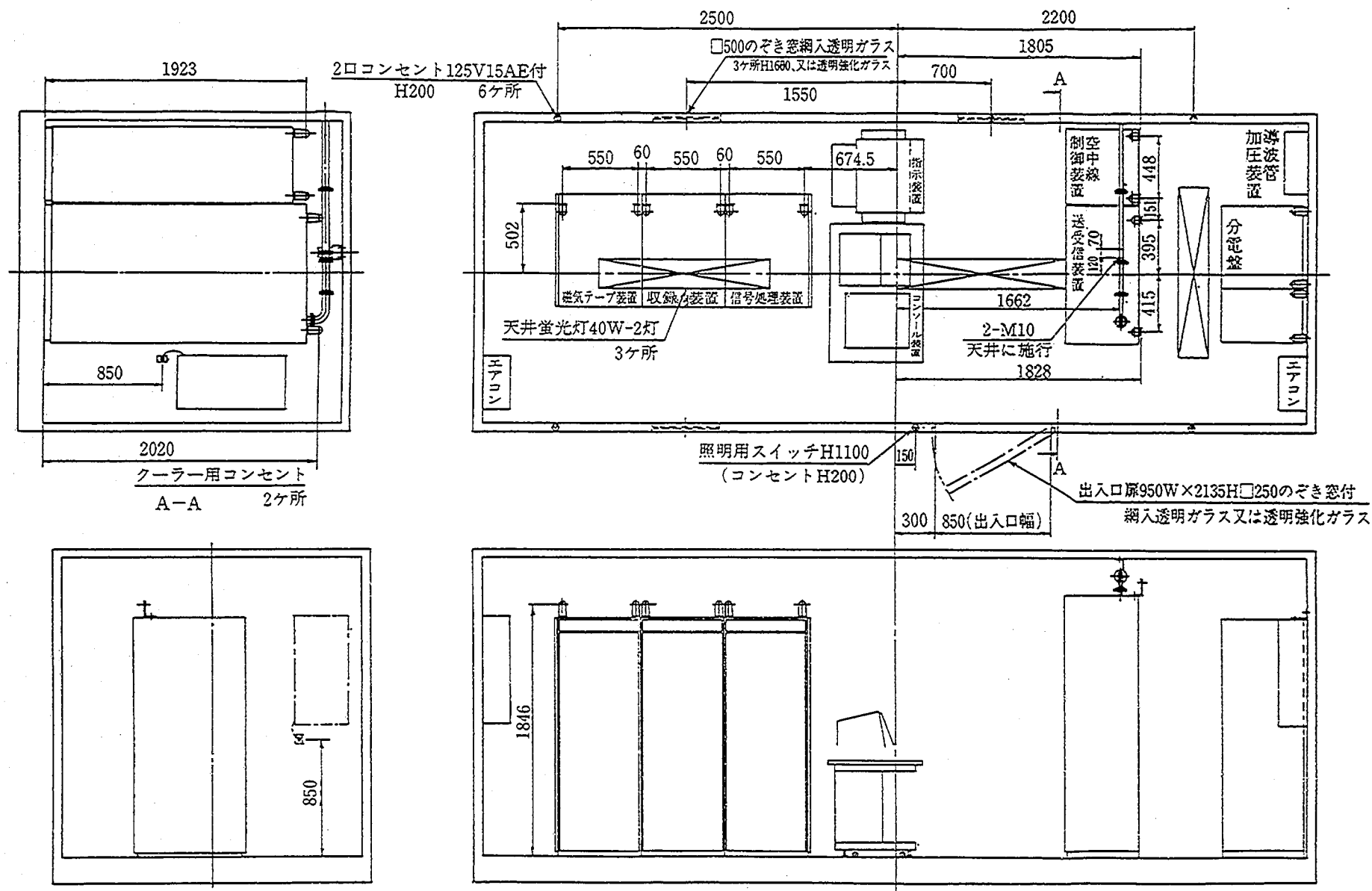


図- 2.10.7 (2) シェルター観測小屋内機器据付図 (2/2)

2.11 ま と め

本章では、昭和 62 年 1 月に完成した DND レーダについてまとめたものであり、主な特長は次の通りである。

- ① 時分割により、1 台のレーダで二重偏波モードとドップラモードの二つのモードによる観測が可能である。
- ② DND レーダの最小受信電力 (S_{min}) は -107.5 dBm, ダイナミックレンジは 76.5 dB である。
- ③ 二重偏波モードにおいて、水平偏波で 0.6 mm/hr 以上の降雨を、また垂直偏波で 0.7 mm/hr 以上の降雨を 40 km まで測定できる。
- ④ 二重偏波モードにおいて、水平及び垂直偏波とも 0.5 mm/hr 以上の降雪を 40 km まで測定できる。
- ⑤ ドップラモードにおいて、 12.47 cm/sec の分解能で最大 ± 16 m/sec の速度が測定できる。

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

3.1.1 はじめに

現行の赤城山レーダ等建設省のレーダ雨量計は、5分間連続して観測し、その値をその期間の降水強度として表示している。

降雪観測を行うにはビーム高度を低くする必要がある。しかし、ビームの仰角を低くするとレーダサイトから遠距離でもビーム高度は低くなるが、レーダサイトから近距離地点で大地クラッタが大きくなる。ビームの仰角を高くするとレーダサイトから近距離地点で大地クラッタが小さくなるが、レーダサイトから遠距離でビーム高度が高くなる。したがって、近距離は高仰角で観測し、遠距離は低仰角で観測すると言うように、複数の仰角で観測する必要がある。また、雪片の移流を算出するためドップラモードで上層風を観測する必要もある。したがって、既存の方法とは違い、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が現行より短くなる。

また、DNDレーダは降水強度の測定と同時に上層風の測定を行うため、5分間の内3分間は降水強度の測定を行い、1分間は上層風の測定を行っている。したがって、3分間の観測で5分間の降水強度を代表している。そこで、3分間の観測で5分間の降水強度を代表できるかどうかを把握する必要がある。

そこで、本調査では降雪観測を行う場合の最適な反射電力のサンプリング時間の検討を行った。

3.1.2 検討方法

(1) 対象降雪及び地区

対象とした降雪は、レーダサイト近傍で降雪量が大きく観測時間が1時間以上である、1月31日10時～11時（レーダの観測仰角 3° ）、2月25日12時～13時（レーダの観測仰角 4° ）、2月27日10時～11時（レーダの観測仰角 3° ）、3月1日10時～11時（レーダの観測仰角 3° ）の4降雪とした。

使用したデータは、反射因子が10 dBZ以上のデータを用いた。この時の最大の反射因子は30 dBZ程度であった。したがって、対象とした降雪強度は0.4～4.5 mm/h程度である（ $B=50$, $\beta=2.0$ で換算）。

対象としたメッシュは、仰角 2° で大地クラッタが降雨量換算で0.1 mm/h以下の400メッシュである。

(2) 検討方法

各種サンプリング時間の15分間平均及び1時間平均の反射因子を算出し、平均時間中の全てデータをサンプリングした反射因子を真値として、この真値と各種サンプリング時間の反射因子との誤差を指標として最適なサンプリング時間を検討した。

具体的な検討方法は次の通りである。

- ① 反射因子 Z の1分間平均データの時系列を用いる。レーダの運用方法は、運用パターン5

(二重偏波, 1 仰角連続観測) である。

② 各種サンプリング時間の 15 分間平均並びに 1 時間平均の反射因子を算出する。

サンプリングの方法を図-3.1.1 に示す。ここで, 15 分間または 1 時間内のすべてのデータを用いて求めた 15 分間並びに 1 時間平均の反射因子を $1/1$ と表す。また, 2 分間の内最初の 1 分間だけデータ収集する方法を繰り返して求めた 15 分間並びに 1 時間平均の反射因子を $1/2$ と表す。3 分間の内最初の 1 分間だけデータ収集する方法を繰り返して求めた 15 分間並びに 1 時間平均の反射因子を $1/3$ と表す。同様に, 5 分間の内 1 分間だけデータ収集する方法の反射因子を $1/5$, 5 分間の内最初の 3 分間だけデータ収集する方法の反射因子を $3/5$, 15 分間の最初の 1 分間のデータ収集の反射因子を $1/15$, 15 分間の内最初の 5 分間のデータ収集する方法の反射因子を $5/15$ と表す。

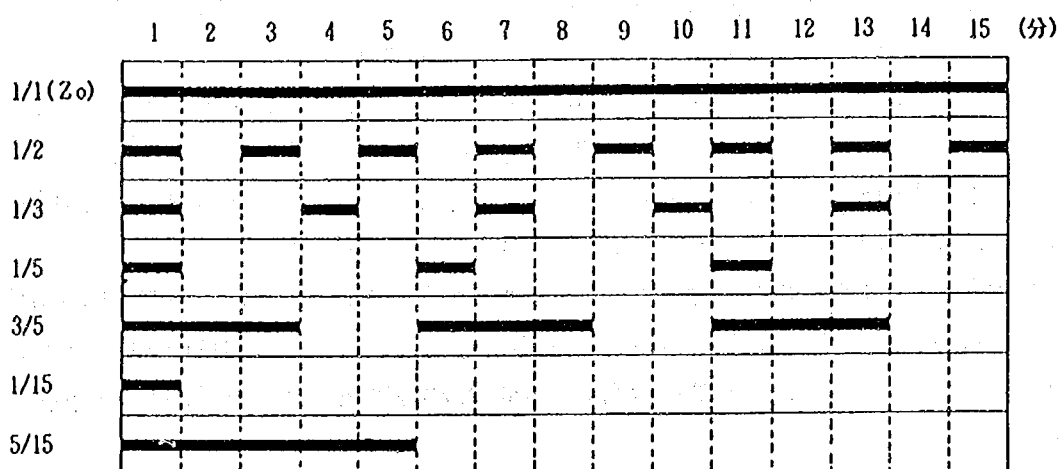


図-3.1.1 サンプリング方法

③ $1/1$ の反射因子を真値とし, 各種のサンプリング間隔で求めた反射因子と比較し, 3 分間の観測で 5 分間の降水強度を代表できるかどうか及び最適なサンプリング間隔を検討する。

評価単位時間は, 15 分間と 1 時間の 2 種類である。比較は $10 \cdot \text{Log} Z$ の値 (単位は dBZ) で行う。また, 評価指標は, 相対誤差, 標準偏差, 相関係数を用い, それぞれの計算式は (3.1.1) ~ (3.1.3) に示す通りである。

$$\text{相対誤差} = \frac{\sum |Z_i - Z_{oi}|}{\sum Z_{oi}} * 100 \quad \dots\dots\dots (3.1.1)$$

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z_i - Z_{oi})^2} \quad \dots\dots\dots (3.1.2)$$

$$\text{相関係数} = \frac{\frac{1}{N} \sum (Z_i - \bar{Z}) (Z_{oi} - \bar{Z}_o)}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z_i - \bar{Z})^2 \cdot \frac{1}{N} \sum (Z_{oi} - \bar{Z}_o)^2}} \quad \dots\dots\dots (3.1.3)$$

ここで, 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} : サンプリング時間 ($1/1$) 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]

$\bar{Z}_0$: サンプリング時間 (1/1) の全地点の反射因子の平均値 [dBZ]

3.1.3 検討結果

図-3.1.2～3.1.5, 表-3.1.1に検討結果を示す。

表-3.1.1は1時間平均値で評価した各降雪毎のサンプリング時間の違いによる評価指標値を表している。図-3.1.2, 3.1.3は, 15分平均値と1時間平均値で評価した場合のサンプリング時間と誤差の関係を表している。図-3.1.4はサンプリング時間の違いによる15分平均値の反射因子 Z の $10\text{Log}Z$ [dBZ] の散布図を表している。図-3.1.5はサンプリング時間の違いによる1時間平均値の反射因子 Z の $10\text{Log}Z$ [dBZ] の散布図を表している。

これから, 次のことがわかった。

- ① 15分平均値の方が, サンプリング時間の相違によって, 反射因子 Z の散布図のばらつきが大きくなる。
- ② 1/3と5/15を比較すると, 5/15の方がばらつきが大きい。したがって, データの収集間隔を短くしてデータを収集する方が良い。
- ③ 相対誤差及び標準偏差はデータを収集しない時間間隔と線形の関係がある。
- ④ 相対誤差及び標準偏差はデータ収集時間の合計とは一義的な関係がない。
- ⑤ 現行のDNDレーダの観測システムである5分間の内3分間観測, 2分間休みという観測方法で, 1時間降水強度は十分な精度で算出できることが分かった。
- ⑥ 降水強度の観測を行うには, 1/2, 1/3, 3/5のサンプリング時間が限度である。したがって, 降雪量を観測する仰角は3仰角までである。

3.1.4 ま と め

本調査から降水強度の観測を行うには, 3分間の内1分間データ収集, 5分間の内3分間データ収集というサンプリング間隔が限度であるということが分かった。ただし, 今回用いたデータは反射因子が30dBZ以下, 降雪強度で約5 mm/h以下と弱い降雪のみを対象としている。したがって, 今後観測データを増やして検討を行う必要がある。

表 3.1.1 サンプルング時間の違いによる誤差評価
(評価単位：1 時間平均値)

対象降雪	サンプリング間隔 指 標	1 / 2	1 / 3	1 / 5	3 / 5	1 / 15	5 / 15	1 / 10
S 62, 1. 31	相 対 誤 差(%)	0.72	1.07	1.70	0.74	4.76	3.06	2.90
	標 準 偏 差(dB)	0.09	0.13	0.20	0.09	0.54	0.33	0.34
	相 関 係 数	0.999	0.998	0.994	0.999	0.969	0.992	0.986
	サ ン プ ル 数	400	400	400	400	400	400	400
S 62, 2. 25	相 対 誤 差(%)	1.04	1.95	4.27	2.33	10.81	8.00	8.79
	標 準 偏 差(dB)	0.09	0.16	0.34	0.18	0.84	0.62	0.69
	相 関 係 数	0.997	0.990	0.956	0.987	0.794	0.937	0.859
	サ ン プ ル 数	338	338	338	338	338	338	338
S 62, 2. 27	相 対 誤 差(%)	0.75	1.22	1.97	0.86	10.93	8.70	5.49
	標 準 偏 差(dB)	0.06	0.09	0.15	0.06	0.81	0.63	0.42
	相 関 係 数	0.997	0.993	0.982	0.997	0.553	0.790	0.880
	サ ン プ ル 数	296	296	296	296	296	296	296
S 62, 3. 1	相 対 誤 差(%)	0.81	1.46	2.64	1.27	9.76	7.61	5.32
	標 準 偏 差(dB)	0.06	0.12	0.21	0.10	0.78	0.61	0.42
	相 関 係 数	0.997	0.991	0.969	0.994	0.679	0.802	0.870
	サ ン プ ル 数	331	331	331	331	331	331	331
全 体	相 対 誤 差(%)	0.82	1.38	2.54	1.24	8.43	6.28	5.26
	標 準 偏 差(dB)	0.15	0.25	0.46	0.23	1.47	1.10	0.95
	相 関 係 数	0.999	0.997	0.988	0.997	0.892	0.940	0.950
	サ ン プ ル 数	1600	1600	1600	1600	1600	1600	1600

注 1) サンプルング間隔 1/2 …… 2 分間のうち最初の 1 分データ収集を行う。

1/3 …… 3 分間のうち最初の 1 分データ収集を行う。

以下同様

注 2) 相対誤差 $\Sigma |Z_i - Z_o| / \Sigma Z_o \times 100$ Z_o : 60 分間平均値

注 3) 標準偏差 $\sqrt{\Sigma (Z_i - Z_o)^2 / n}$

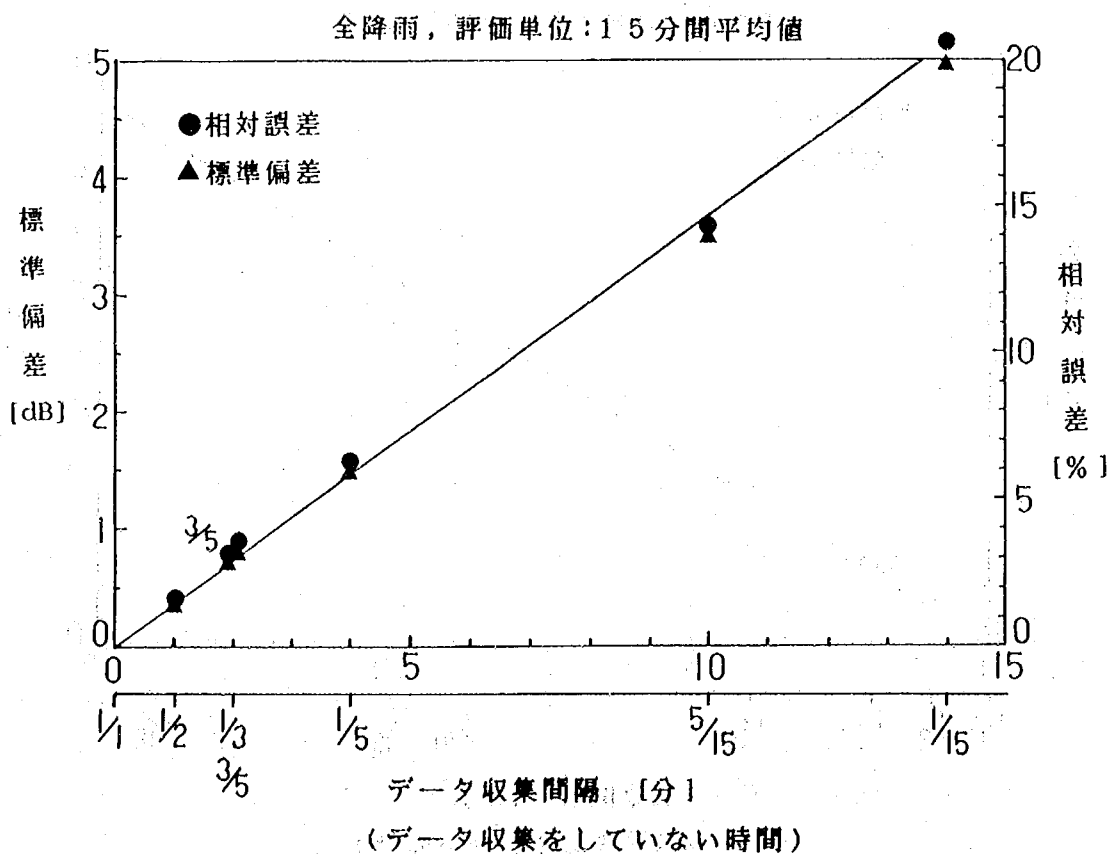
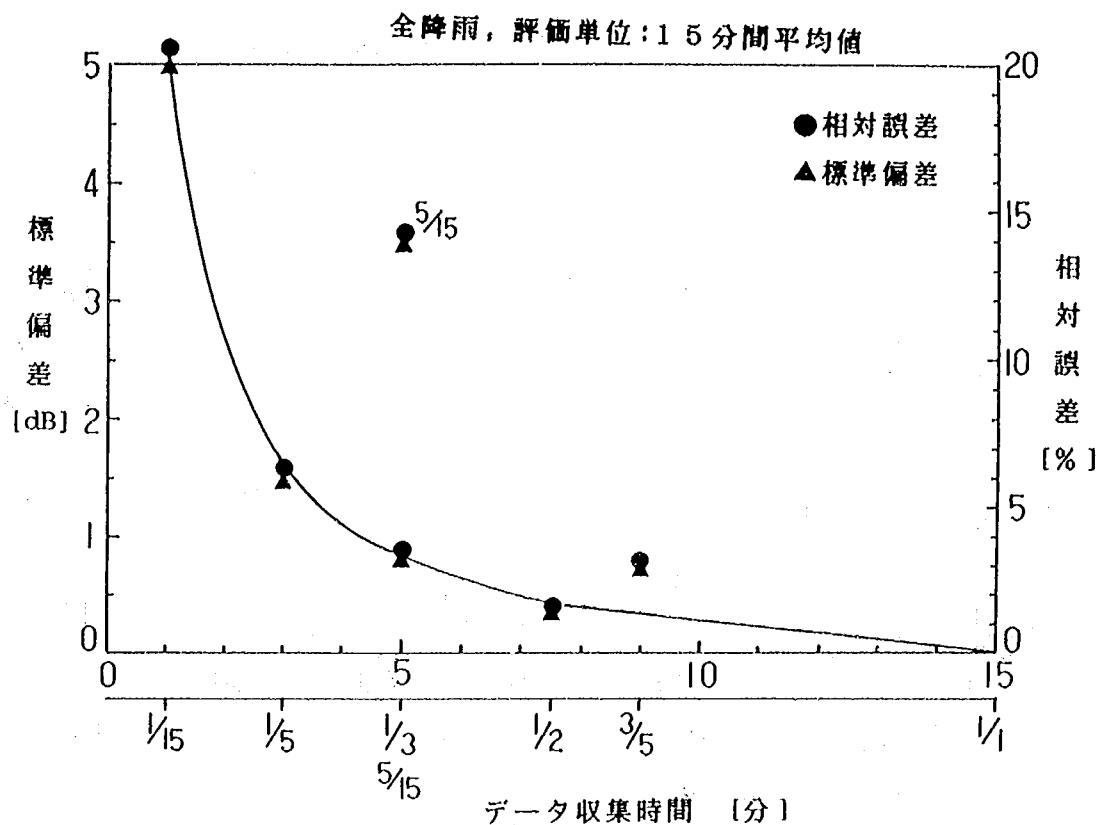


図-3.1.2 サンプル時間と誤差の関係

(全降雪，評価単位：15分間平均値)

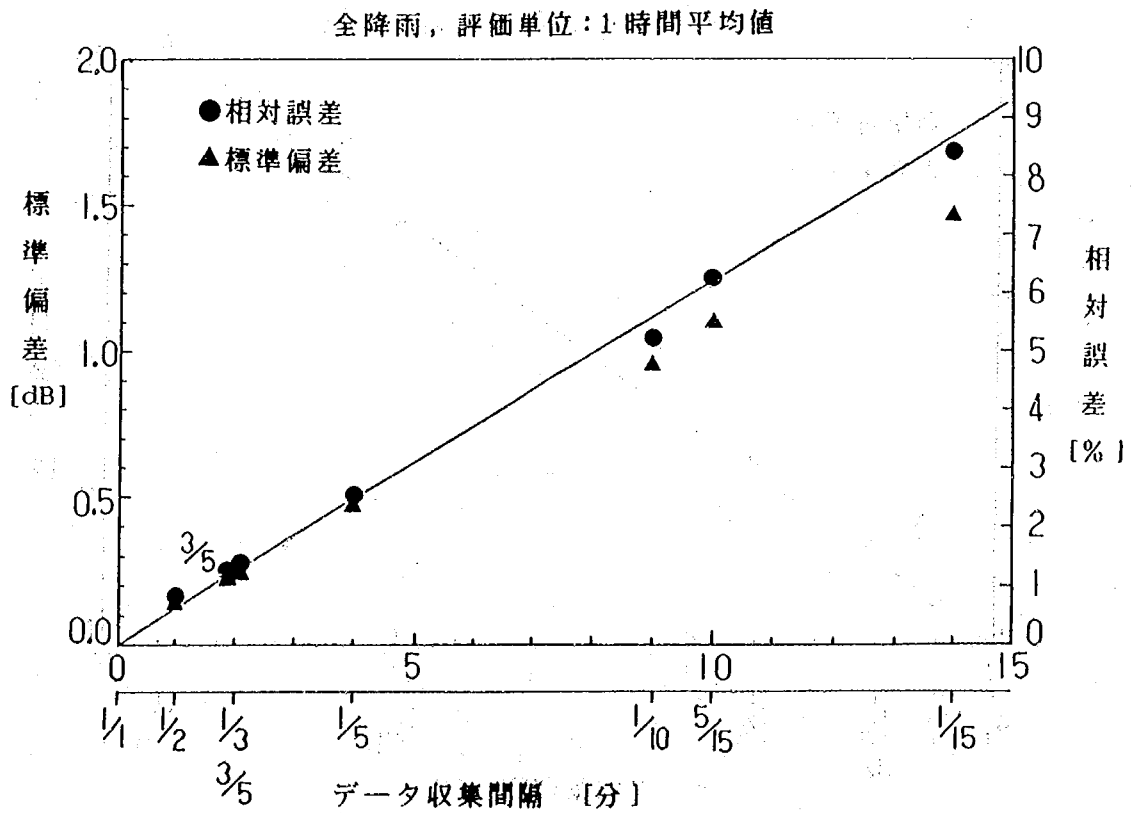
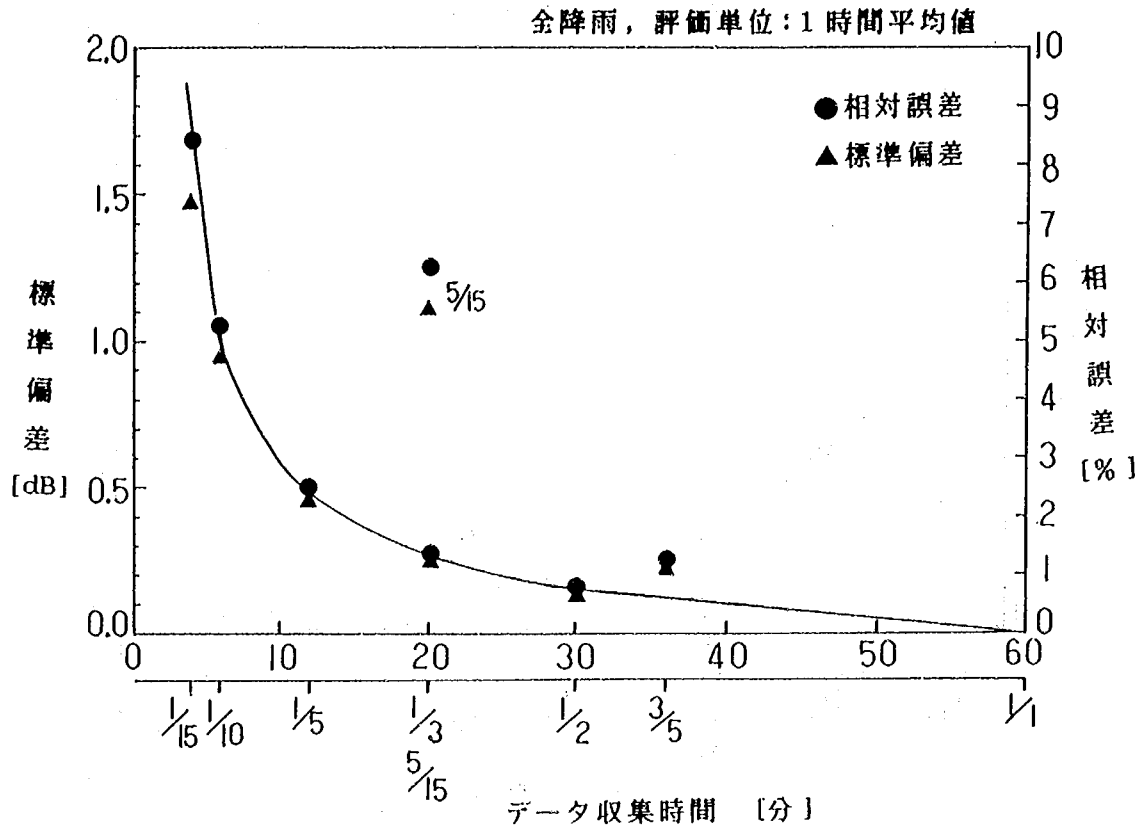


図-3.1.3 サンプル時間と誤差の関係

(全降雪，評価単位：1 時間平均値)

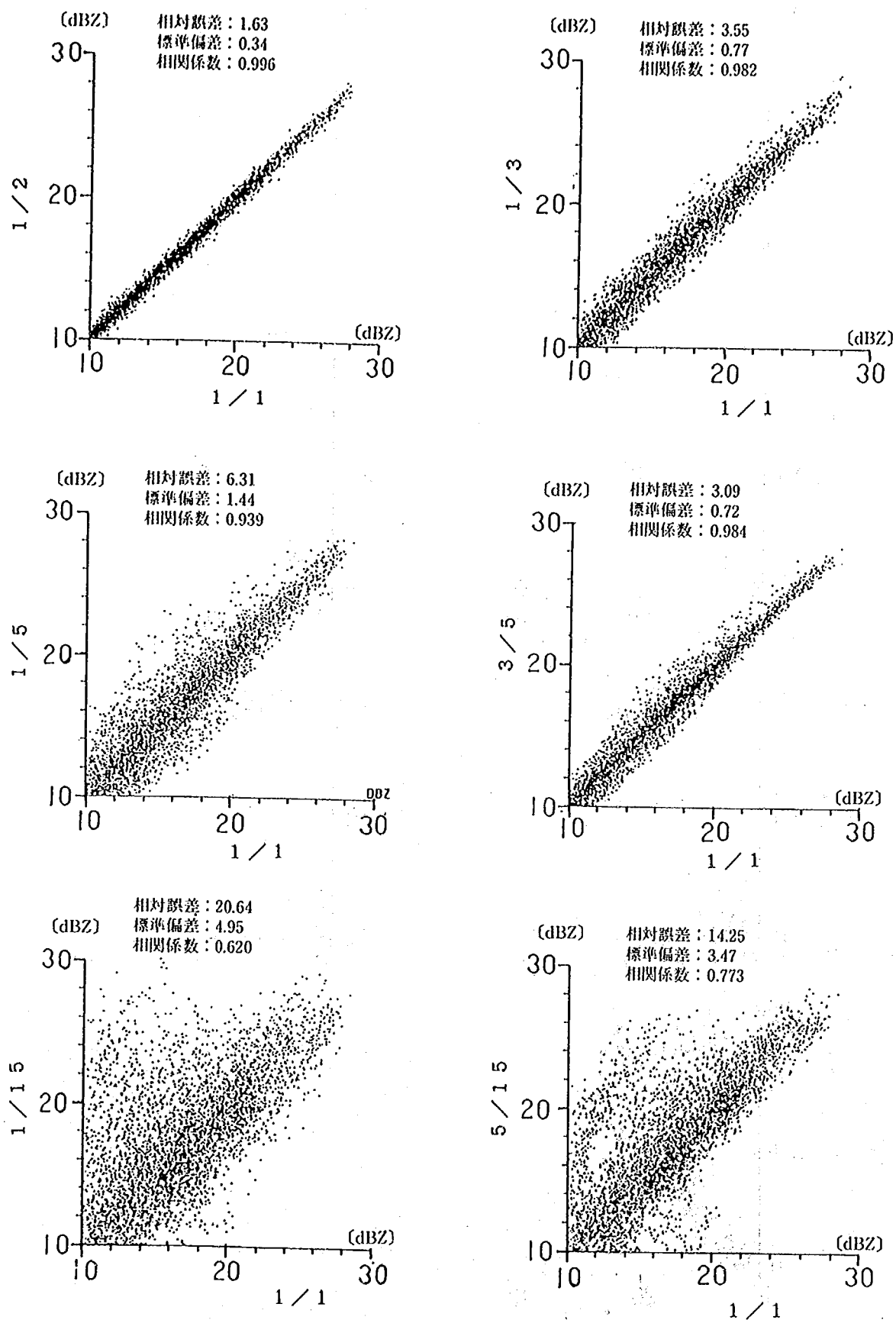


図-3.1.4 サンプルング時間の違いによる反射因子Zの散布図
(全降雪, 評価単位: 15分間平均値)

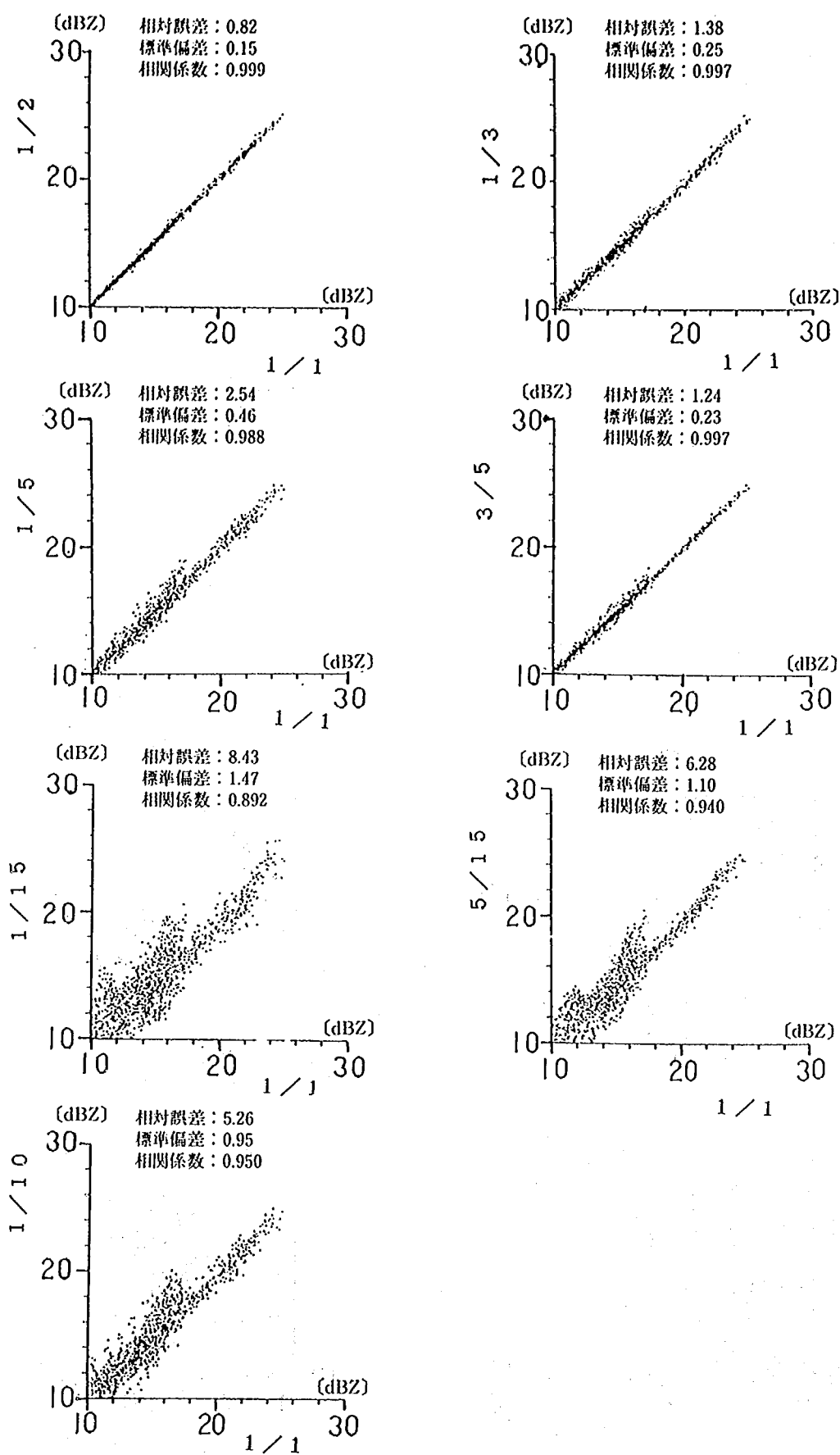


図- 3.1.5 サンプルング時間の違いによる反射因子 Z の散布図
(全降雪, 評価単位: 1 時間平均値)

3.2 DNDレーダ及び宝達山レーダによる降雪観測

3.2.1 はじめに

降雪量に関する情報は、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、山岳部における積雪量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、地点降雪量の観測値の代表性に限界がある。また、山岳地での観測網の設置及び維持は非常に困難であり、この面からみても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、降雪観測にレーダを導入しその実用化をはか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降雪観測データを用いて、レーダ反射因子 Z と降水強度 R との関係 $Z = B \cdot R^{\beta}$ を用いて降雪量を算出する方法の観測精度について調査した。

3.2.2 降雪観測期間

昭和61年度のDNDレーダによる降雪観測実験は、昭和62年1月17日から3月7日までの50日間実施した。図-3.2.1にこの期間の降雪状況を示す。昭和61年度は、非常に雪の少ない年で、レーダサイトにおける最大積雪深は3月1日の58 cmであった。DNDレーダによる降雪観測は、24時間連続観測の体制で行った。

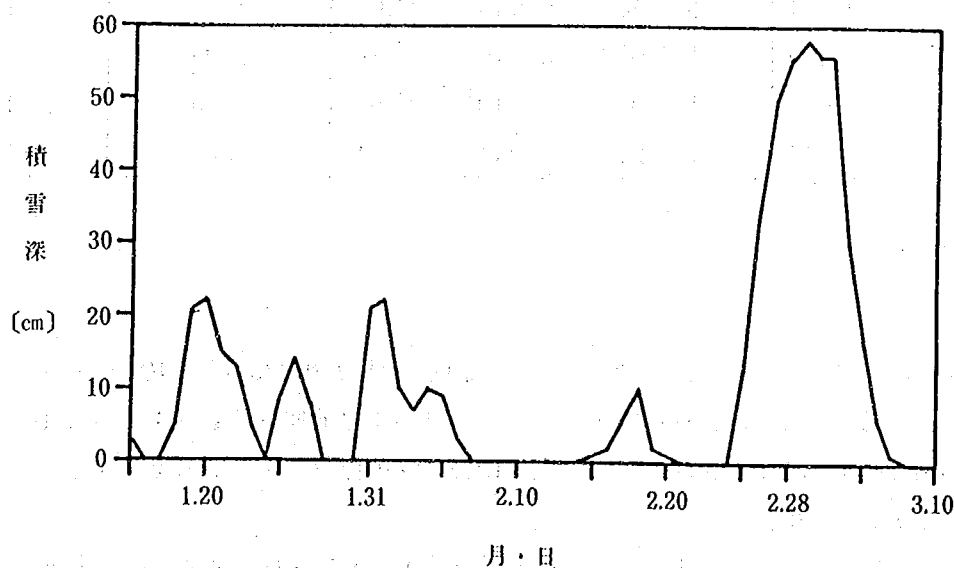


図-3.2.1 昭和61年度の富山の日最大積雪深の変化
(DNDレーダサイトにおける観測結果)

3.2.3 レーダによる降水強度の測定原理

レーダ方程式は次のように表示される。

$$P_r = C \cdot F \cdot Z / r^2 \quad \dots\dots\dots (3.2.1)$$

ここに、 P_r ：降水粒子群からの反射電力

C ：レーダ定数（レーダ装置の諸元で決まる）

F ：補正定数

Z ：反射因子

r ：レーダからの距離

降水粒子群からの反射電力 P_r から算出される反射因子 Z と降水強度 R の間には次の関係がある。

$$Z = B \cdot R^\beta \quad \dots\dots\dots (3.2.2)$$

ここで、 B 、 β は降水量換算定数で、降水粒子の形態（雨か雪か）や降雨原因（台風性、前線性等）で異なる。

したがって、 B 、 β を正しく設定できれば、レーダの受信電力から降水強度が推定できる。

降雪時の B 、 β は、既往の研究で表-3.2.1に示すように各種提案されている。

表-3.2.1 各種提案されている降雪時の B 、 β

出典	観測場所	降水強度 [mm/h]	B	β
今井他 (1955)	東京		600 ~ 2400	1.8
ガン・マーシャル (1958)	モントリオール		2000	2.0
大竹他 (1970)	アラスカ		400 ~ 3300	1.5 ~ 2.3
藤原他 (1972)	金沢付近		2000 ~ 2900	1.27 ~ 1.70
武田他 (1972)	福岡		300 ~ 650	2.0 ~ 2.7
由田 (1975)	札幌		1400	1.1
八木・清野 (1978)	長岡	0.013 ~ 11.0	1200	1.3
八木・上田 (1979)	長岡	0.031 ~ 4.3	2600	1.8
八木・上田 (1980)	長岡	0.013 ~ 11.0	1600	1.4
筆者等 (1981)	長岡	0.063 ~ 1.94	4500	1.76

3.2.4 検討条件

(1) レーダサイト

DNDレーダのレーダサイトは、北緯 $36^{\circ}41'27''$ 、東経 $137^{\circ}17'08''$ の北陸地建三郷出張所内に位置し、標高は20mである。また、宝達山レーダのレーダサイトは北緯 $36^{\circ}46'43''$ 、東経 $136^{\circ}48'59''$ に位置し、標高は667mである。DNDレーダと宝達山レーダの位置を図-3.2.2に示す。

(2) 対象とした地上観測所

地上観測所は、DNDレーダサイトから15km以内にあり、DNDレーダにおいて大地クラッタの小さい13箇所とした。なお、この地上観測所の位置は宝達山レーダでも大地クラッタは少ない地区である。13地上観測所のうち富山は気象庁のAMeDAS観測所で、それ以外の12箇所はこの実験のため新設したヒータ付き0.5mmの転倒樹雨量計である。図-3.2.2にレーダサイトと地上降雪観測所の位置関係を示す。

この地点のレーダのビーム高度は、DNDレーダが300m~800m、宝達山レーダが約1000mである。図-3.2.3にビーム高度を示す。

(3) レーダ観測の諸元

DND レーダと宝達山レーダの主な仕様を表- 3.2.2 に示す。

(4) データ収集方法

DND レーダのデータ収集方法は、5 分間の内 3 分間だけ降水強度の測定を行い、その値を 5 分間の平均降水強度としている。

宝達山レーダのデータ収集方法は、5 分間連続して降水強度の測定を行い、その値を 5 分間の平均降水強度としている。

(5) 検討対象降雪

対象降雪は、地上降雪の激しい期間で、かつ DND レーダの運用パターンが 1 あるいは 2 で連続的に観測を行っている次の 3 降雪とした。

① S.62, 1/19～20降雪, 降雪期間: 1/19. 00:00～1/20. 00:00, 観測時間: 20時間

② S.62, 1/31～2/1降雪, 降雪期間: 1/31. 23:00～2/1. 3:00, 観測時間: 12時間

③ S.62, 2/27～28降雪, 降雪期間: 2/27. 13:00～2/28. 10:00, 観測時間: 22時間

(6) レーダデータの平均化

対象とした地上降雪量は、1時間降雪量(水当量)である。また、対象としたレーダの反射因子及び降雪量は、DND レーダは極座標(1メッシュ= $1.4^{\circ} \times 0.5 \text{ km} \approx 0.25 \text{ km} \times 0.5 \text{ km}$)で 3×3 メッシュ=9メッシュの空間平均した1時間平均値、宝達山レーダは直交座標(1メッシュ= $3.0 \text{ km} \times 3.0 \text{ km}$)で 3×3 メッシュ=9メッシュの空間平均した1時間平均値である。

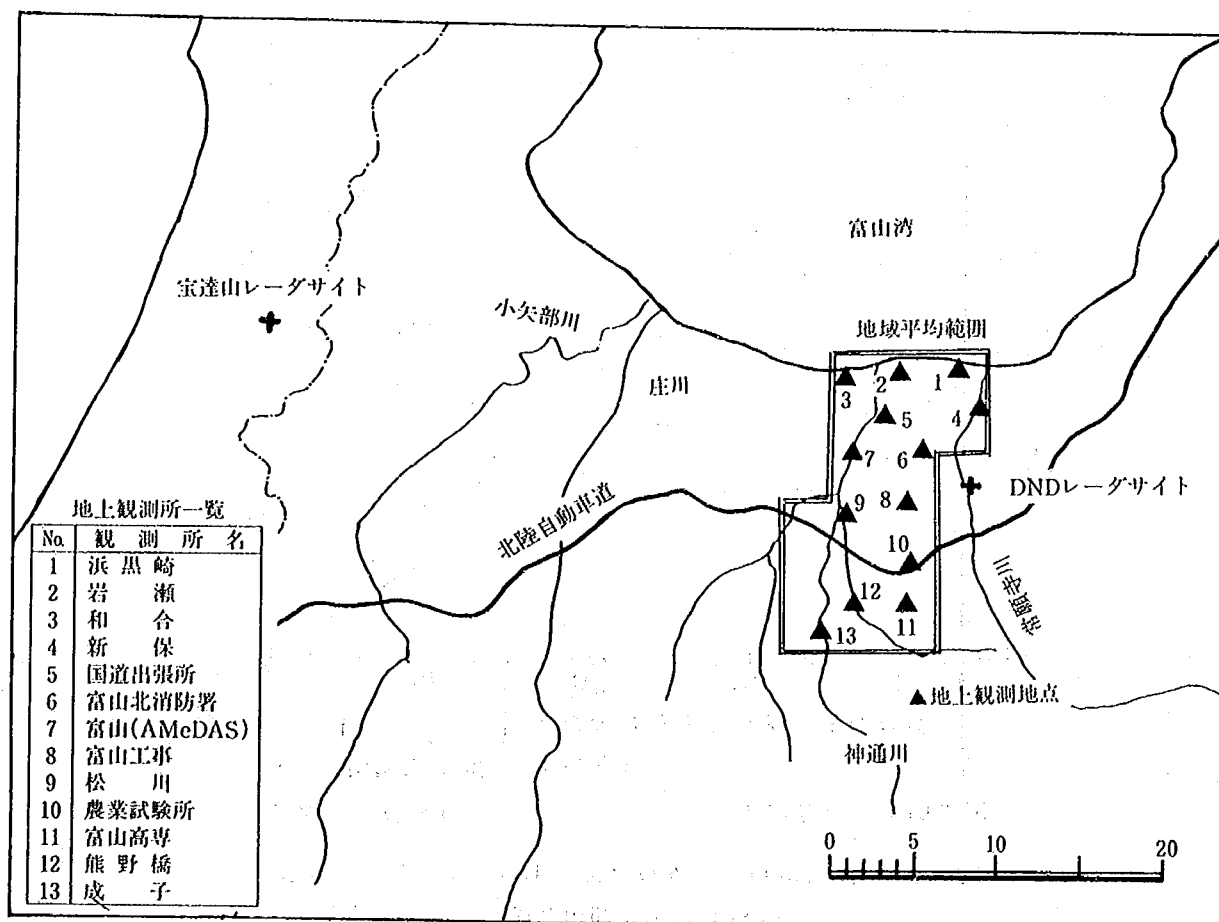


図- 3.2.2 降雪観測位置図

表-3.2.2 DND レーダ及び宝達山レーダの主な仕様

項 目	D N D レーダ		建設省レーダ雨量計 (宝達山レーダ)
	二重偏波レーダ	ドップラレーダ	
送信尖頭出力	75kw	75kw	250kw
定量観測範囲	40km	40km	120km
送信周波数	5280MHz	5280MHz	5260MHz
空中線径	2 m	2 m	4 m
ビーム幅	1.8°	1.8°	1.2°
主方向利得	36dB 以上	36dB 以上	42dB 以上
副ビーム減衰量	23dB 以上	23dB 以上	28dB 以上
偏 波 面	水平, 垂直	水平	水平
偏波切替間隔	10秒, 0.032秒	——	——
送信パルス幅	2.0 μ s	0.5 μ s	2.0 μ s
繰返し周波数	280 pps	1120 pps	260 pps
空中線回転数	6 rpm	1 rpm	5 rpm
最小測定可能降雪量	0.25mm/h	0.25 mm/h	0.20mm/h
観測分解能	降水強度の 1 %	降水強度の 3 %	降水強度の 3 %
大地クラッタ除去法	MTI, Log 減算	Log 減衰	MTI, Log 減算

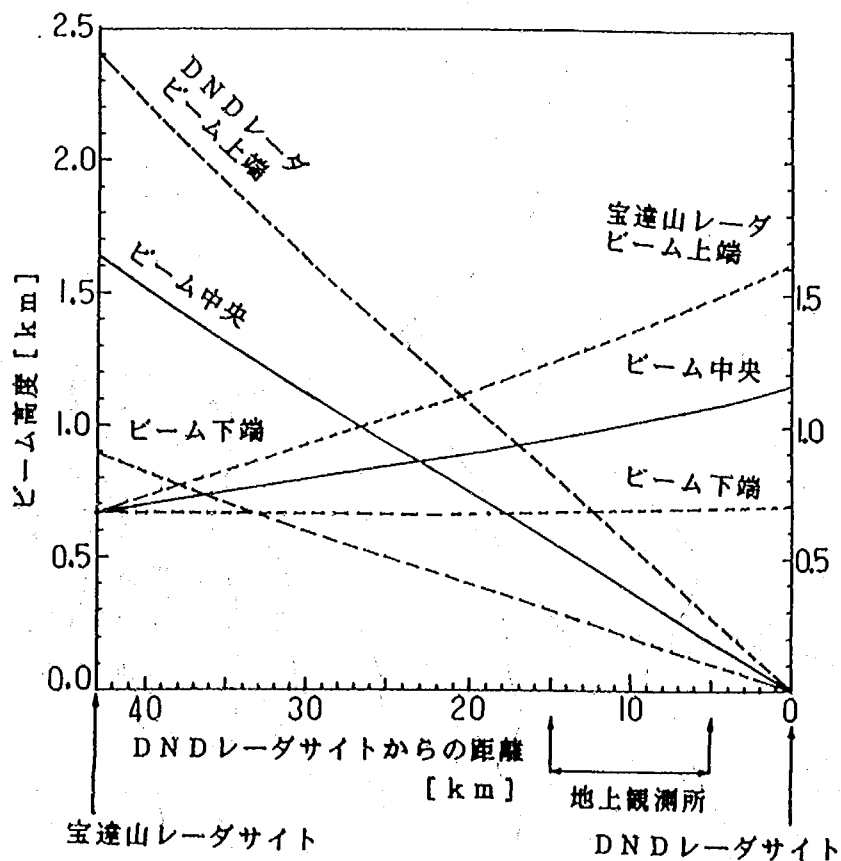


図-3.2.3 DND レーダ及び宝達山レーダのビーム高度
DND レーダ：仰角 2.0°，ビーム幅 2.0°
宝達山レーダ：仰角 0.5°，ビーム幅 1.2°

3.2.6 検討結果

(1) DND レーダの B , β

地上降雪量とレーダ降雪量の相関係数の低い観測所は、地上観測になんらかの問題があると考えられるので、 B , β の同定は、地上降雪量とレーダ降雪量の相関係数を対象降雪別、観測所毎に求め、相関係数の低い観測所を除外して行った。

表-3.2.3に、各地上観測所毎のDNDレーダ降雪量と地上降雪量の相関を示す。レーダ降雪量は地上観測所の直上1メッシュ（極座標、1メッシュ = $1.4^\circ \times 0.5 \text{ km}$ ）と直上9メッシュ平均の2種類で検討した。一般に、空間平均メッシュを多くすると相関係数は大きくなる傾向があるが、ここでは、見られなかった。これは、サンプル数が少ない、降水強度が弱いためと考えられる。これらを考慮し、今後の検討は、空間平均は9メッシュ平均とし、相関係数が0.6以上の地点を用いて行った。ただし、2/27~28降雪は相関係数が低かったので0.4以上とした。

図-3.2.4に、各降雪毎の反射因子 Z と地上降水量 R （1時間値）の相関図を示す。データが非常にばらついているため、目視で回帰式を引き、1月19日降雪の B , β は $B=40$, $\beta=1.94$, 1月31日降雪の B , β は $B=50$, $\beta=1.92$, 2月27日降雪の B , β は $B=96$, $\beta=2.04$ とした。一般に、降雪の B , β は、 $B=2000$, $\beta=2.0$ と言われているが、今回は非常に小さくなった。これは、 B にシステム全体の補正係数が含まれているためと考えられる。

図-3.2.5に、1月19日降雪の $Z \sim R$ 関係の時間変化を示す。(a)図は相関係数が0.6以上の全観測所の $Z \sim R$ 関係の時系列、(b)図、(c)図は、レーダ値と地上値の相関が高くその上時系列のデータがある熊野橋観測所と富山高専観測所の $Z \sim R$ 関係の時系列を示している。(a)図、(b)図の $Z \sim R$ 関係は1時間毎に大きく変化しており、この動きはかなりランダムである。しかし、(c)図の富山高専地点は、 $Z \sim R$ 図は時計回りのループを描いている。これは、一般に言われている、降り始めは降水粒子の形状が大きく降水強度が小さい、最盛期は降水強度が大きい、降り終わりは降水粒子の形状が小さく降水強度が小さい、という現象を表していると考えられる。

(2) 宝達山レーダの B , β

(1)と同様に、地上降雪量とレーダ降雪量の相関係数の低い観測所は、地上観測になんらかの問題があると考えられるので、 B , β の同定は、地上降雪量とレーダ降雪量の相関係数を対象降雪別、観測所毎に求め、相関係数の低い観測所を除外して行った。

表-3.2.4に、各地上観測所毎の宝達山レーダ降雪量と地上降雪量の相関を示す。レーダ降雪量は地上観測所の直上1メッシュ（直交座標、1メッシュ = $3.0 \text{ km} \times 3.0 \text{ km}$ ）と直上9メッシュ平均の2種類で検討した。一般に、空間平均メッシュを多くすると相関係数は大きくなる傾向があるが、ここでも、見られなかった。これは、サンプル数が少ない、降水強度が弱いためと考えられる。これらを考慮し、今後の検討は、空間平均は9メッシュ平均とし、相関係数が0.6以上の地点を用いて行った。ただし、2/27~28降雪は相関係数が低かったので0.4以上とした。

図-3.2.6に、各降雪毎の反射因子 Z と地上降水量 R （1時間値）の相関図を示す。データが非常にばらついているため、目視で回帰式を引き、1月19日降雪の B , β は $B=5000$, $\beta=1.45$, 1月31日降雪の B , β は $B=2000$, $\beta=2.0$, 2月27日降雪の B , β は $B=2000$, $\beta=2.0$ とした。これは、一般に言われている $B=2000$, $\beta=2.0$ 、または、長岡での降雪粒子の測定結果の $B=4500$, $\beta=1.76$

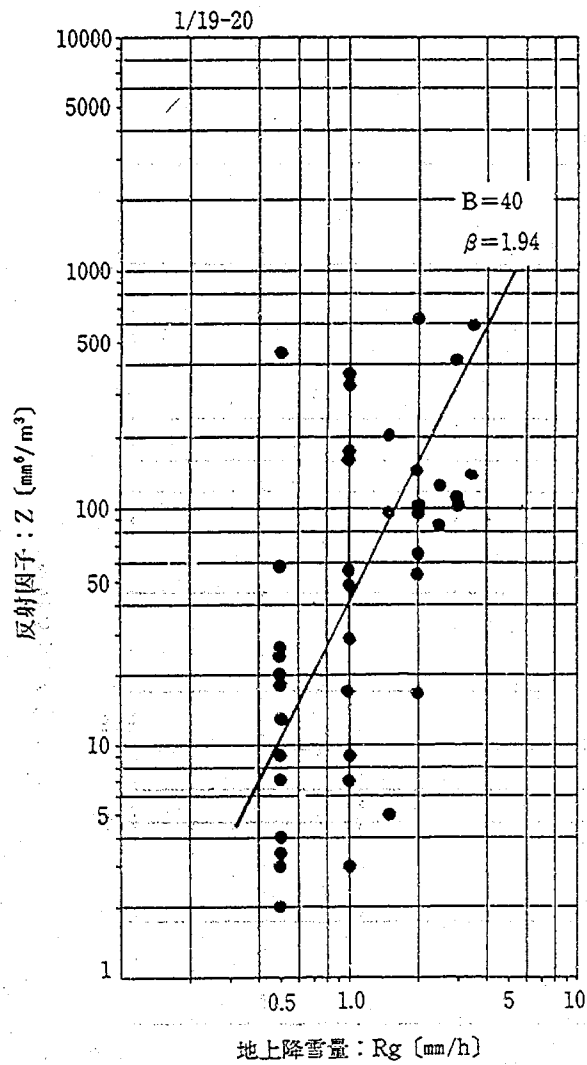
表- 3.2.3 DND レーダ降雪量と地上降雪量の相関係数

No.	観測所	S. 62, 1 / 19 ~ 20		S. 62, 1 / 31 ~ 2 / 1		S. 62, 2 / 27 ~ 28	
		1メッシュ	9メッシュ	1メッシュ	9メッシュ	1メッシュ	9メッシュ
1	熊野橋	0.650 14	● 0.656	0.632 14	● 0.605	0.491 19	● 0.464
2	浜黒崎	— 2	—	0.710 9	● 0.754	0.449 15	● 0.476
3	岩瀬	— 3	—	0.140 7	0.145	- 0.060 17	0.161
4	新保	— 1	—	0.686 5	● 0.679	0.556 12	● 0.570
5	富山北消防	0.683 6	0.258	0.482 7	0.450	0.113 8	- 0.115
6	成子	0.672 17	● 0.665	0.471 12	0.474	0.275 19	0.260
7	松川	0.390 13	0.444	0.163 14	0.162	— 0	—
8	和合	— 2	—	0.318 6	0.335	0.511 18	● 0.523
9	富山工専	0.870 19	● 0.862	0.641 11	● 0.652	- 0.011 10	- 0.049
10	富山工事	欠測	欠測	0.663 9	0.546	0.207 13	- 0.235
11	農業試験場	欠測	欠測	欠測	欠測	0.377 6	0.309
12	国道出張所	— 6	—	0.710 9	● 0.823	0.293 12	0.301
13	富山	0.781 6	● 0.796	0.758 9	● 0.783	0.160 13	0.129

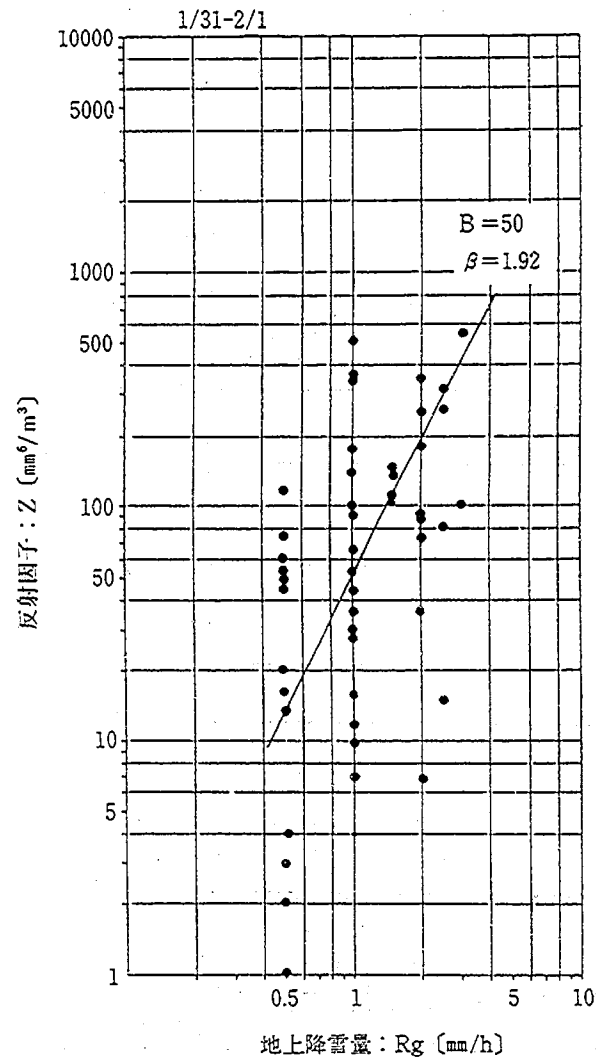
注1) 上段……相関係数 下段……データ数

注2) レーダ降水量は、 $B = 50$, $\beta = 2.0$ で算定

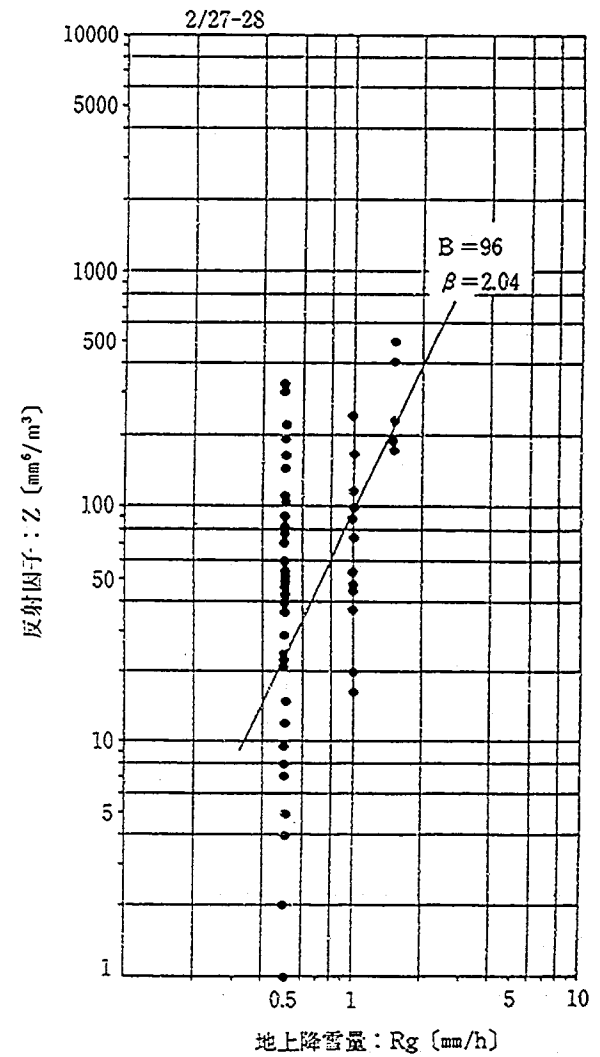
● B , β の検討に使用した地点



(a) S.62.1/19~20

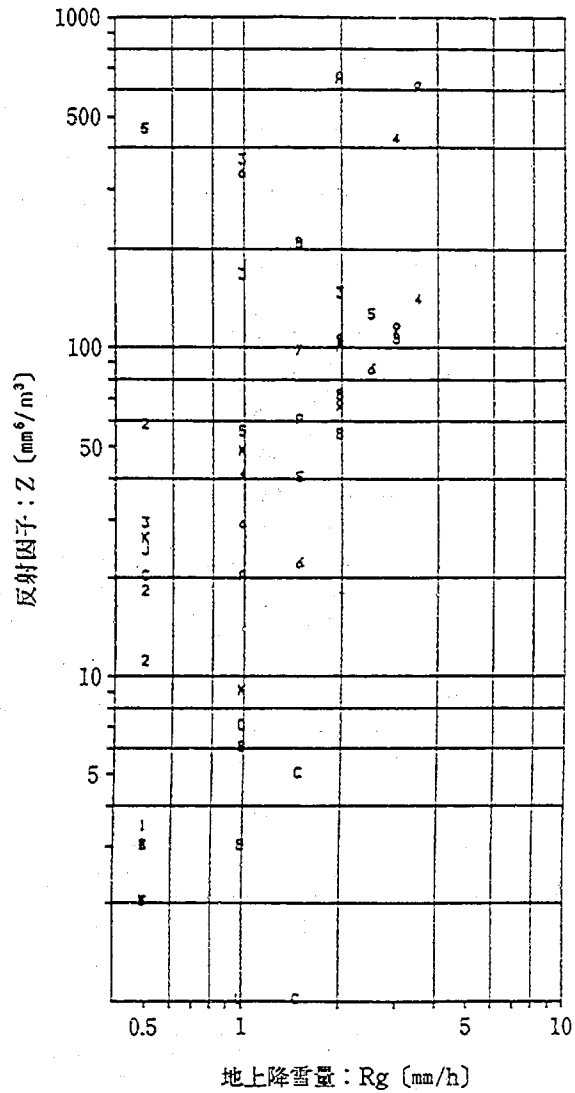


(b) S.62.1/31~2/1

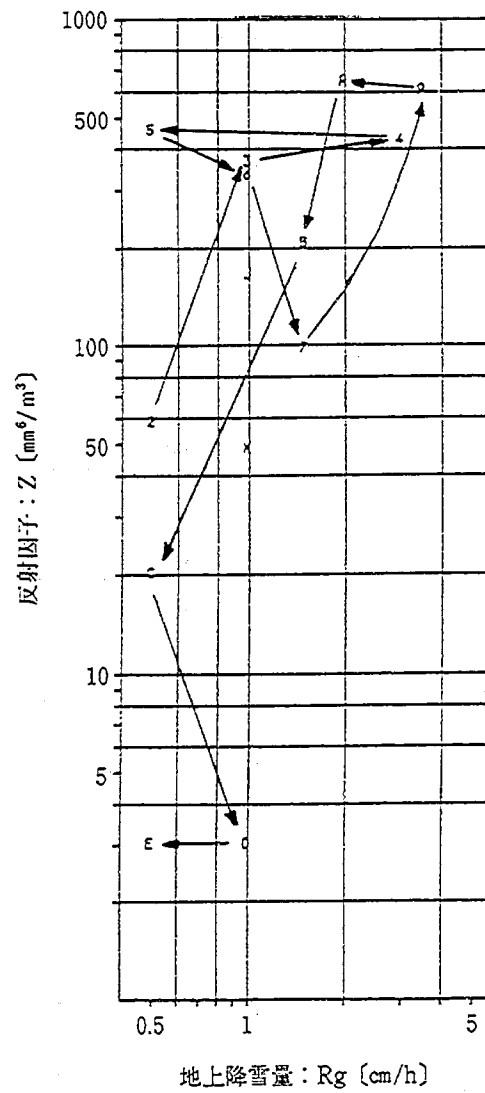


(c) S.62.2/27~28

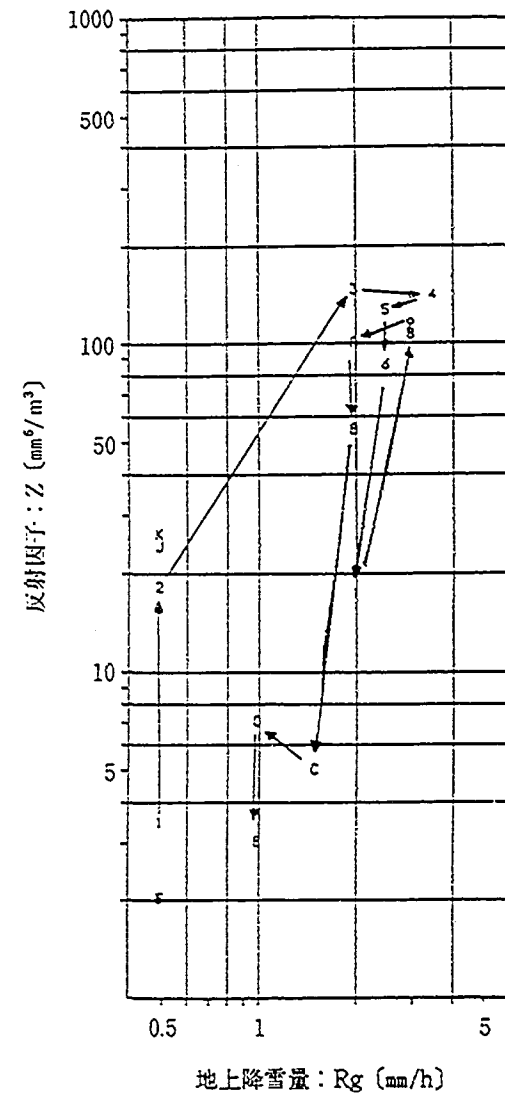
図-3.2.4 DND レーダの $Z \sim R$ 相関図 (相関係数 0.6 以上の地点)



(a) 全観測所 (相関係数が0.6以上)



(b) 熊野橋



(c) 富山高専

図-3.2.5 DND レーダの $Z \sim R$ 関係の時間変化 (S.62, 1 / 19~20)

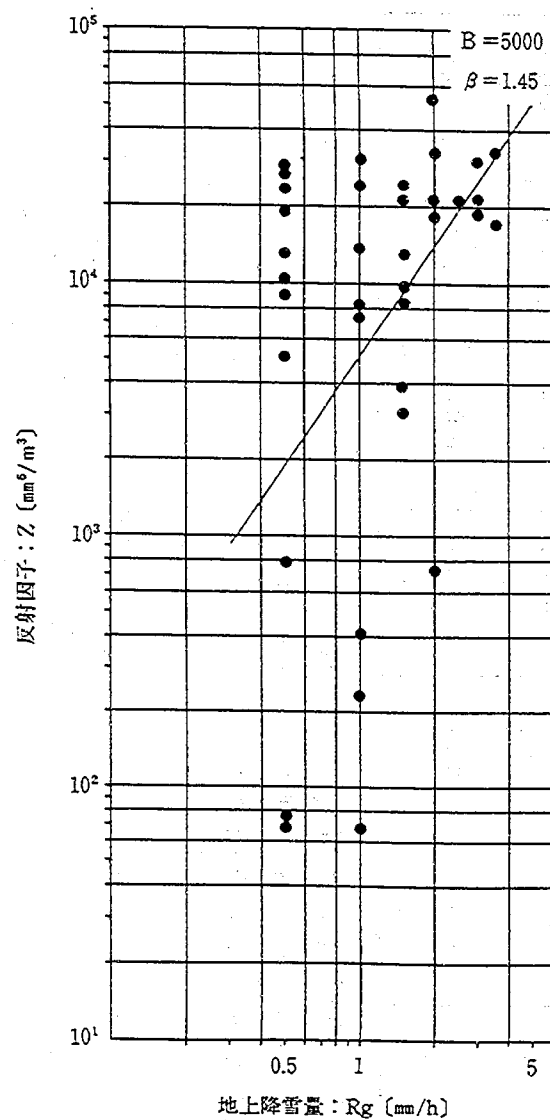
表- 3. 2. 4 宝達山レーダ降雪量と地上降雪量の相関係数

No.	観測所	1 / 19~20		1 / 31~2 / 1		2 / 27~28	
		1メッシュ	9メッシュ	1メッシュ	9メッシュ	1メッシュ	9メッシュ
1	熊野橋	0.677 14	● 0.603	0.915 12	● 0.930	- 0.066 19	- 0.000
2	浜黒崎	— 2	—	0.103 9	0.060	0.252 15	0.308
3	岩瀬	— 3	—	- 0.195 7	- 0.156	0.219 17	0.259
4	新保	— 1	—	- 0.427 5	- 0.292	- 0.110 12	- 0.120
5	富山北消防	0.526 6	0.315	- 0.503 7	- 0.433	- 0.421 8	- 0.459
6	成子	0.601 17	● 0.634	0.815 12	● 0.844	- 0.155 19	- 0.019
7	松川	0.240 13	0.274	0.700 14	● 0.758	— 0	—
8	和合	— 2	—	0.210 6	0.144	0.416 18	● 0.427
9	富山工専	0.857 19	● 0.887	0.053 11	0.035	0.039 10	- 0.012
10	富山工事	欠測	欠測	- 0.483 9	- 0.463	0.227 13	0.261
11	農業試験場	欠測	欠測	欠測	欠測	- 0.011 6	0.041
12	国道出張所	— 6	—	- 0.053 9	0.108	- 0.104 12	- 0.128
13	富山	- 0.019 6	0.318	0.144 9	0.047	0.520 13	● 0.559

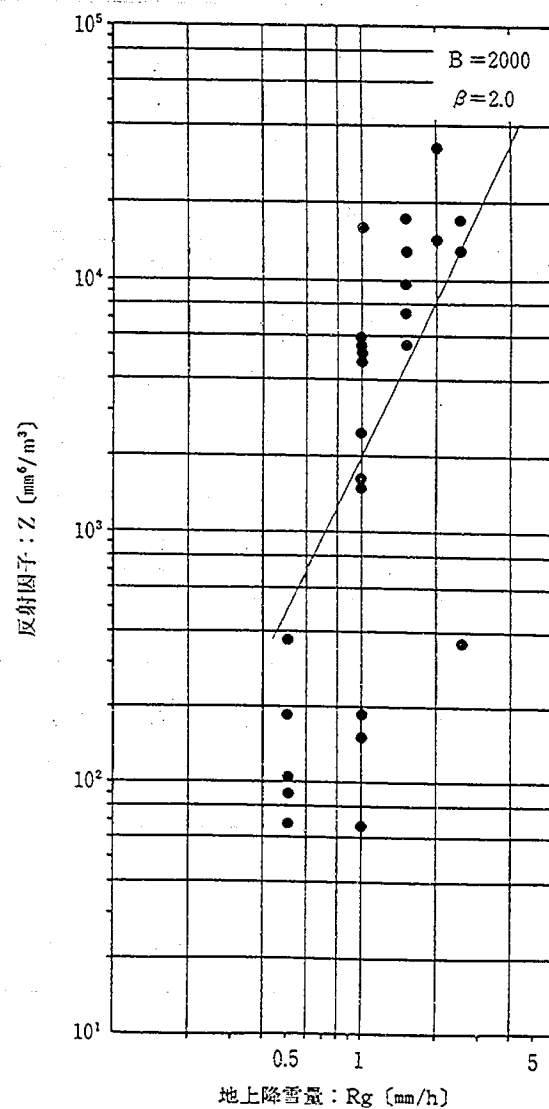
注1) 上段：相関係数， 下段：サンプル数

注2) レーダ降水量は $B = 2,000$ ， $\beta = 2.0$ で算定

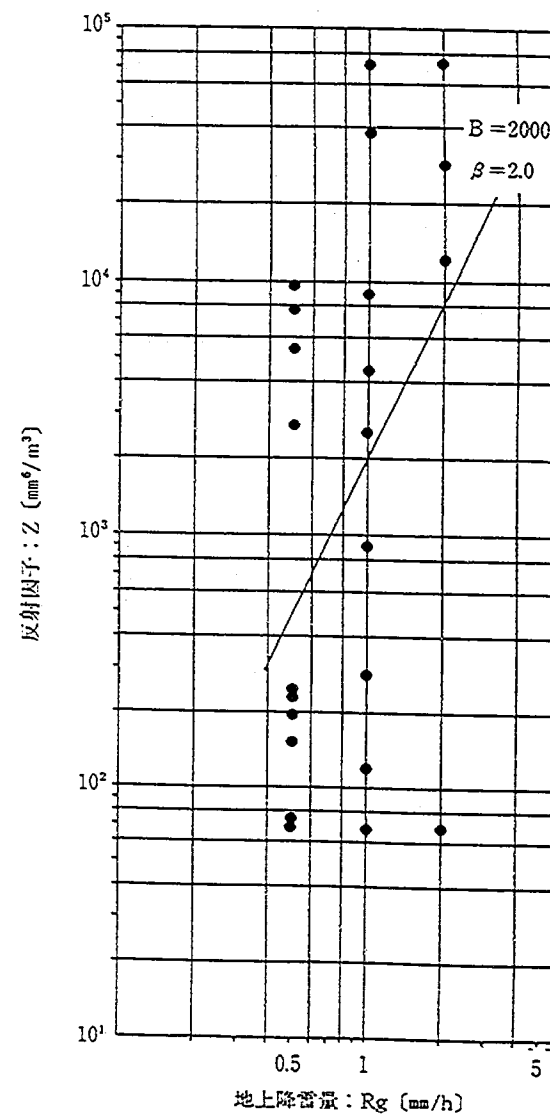
● B ， β の検討に使用した地点



(a) S.62.1/19~20



(b) S.62.1/31~2/1



(c) S.62.2/27~28

図-3.2.6 宝達山レーダの $Z \sim R$ 相関図 (相関係数 0.6 以上の地点)

に良く一致している。

(3) 地上降雪量とレーダ降雪量の対比

図- 3. 2. 7 に 1 / 31 降雪の地上降雪量と DND レーダ降雪量の相関図を、図- 3. 2. 8 に 1 / 31 降雪の地上降雪量と宝達山レーダ降雪量の相関図を図- 3. 2. 9 に各降雪の DND レーダ降雪量と宝達山レーダ降雪量の相関図を示す。図- 3. 2. 10 に各降雪の地上降雪量とレーダ降雪量の時間変化図及び累加曲線を示す。

これから、次のことが言える。

- ① 地上降雪量とレーダ降雪量の相関係数を見ると、非常に悪い地点がある。これは、地上降雪量観測器が、ヒータ付き 0.5 mm の転倒樹雨量計を用いているため、測定分解能が 0.5 mm と大きい、ヒータで雪を融かすため遅れ時間及び蒸発が生じるためである。また、雨量計が雪で埋没しないように地上から 1.5 ～ 2.0 m の高さに設置しているため、雪の捕捉率が悪いためと考えられる。
- ② 地上降雪量とレーダ降雪量の相関図を見ると、比較的降水強度の大きい時は、両者の対応はかなり良い。これは、地上観測所の分解能が 0.5 mm であることと降水強度の低いときは雪の捕捉率が悪いと考えられる。
- ③ 相関図を見ると、3 降雪の中では 2 月 27 日降雪が最も地上値とレーダ値の対応が悪い。これは、この降雪の降水強度が、他の降雪の降水強度に比べ小さいためと考えられる。
- ④ DND レーダ降雪量と宝達山レーダ降雪量の相関図を見ると、レーダ値と地上値の相関係数よりも大きい場合もあれば小さい場合もある。これは、観測高度の相違、空間平均の相違のためと考えられる。
- ⑤ 時間変化図及び累加曲線図を見ると、地上降雪量と DND レーダ降雪量は比較的良く一致していると言える。特に、2 月 27 日降雪の成子観測所は、地上値とレーダ値の相関係数は 0.1 と低いが、累加曲線は非常に良く一致する。
- ⑥ 時間変化図及び累加曲線図を見ると、地上降雪量と宝達山レーダ降雪量は比較的良く一致していると言える。
- ⑦ DND レーダの方が宝達山レーダに比べ、地上降雪量と良く一致する。これは、DND レーダの方がビーム高度が低い、地上観測地点がレーダに近い、等のためと考えられる。
- ⑧ DND レーダと宝達山レーダの総降水量分布を見ると、DND レーダの大地クラッタが大きい右下半分を除けば、非常に良く一致していると言える。
- ⑨ 各降雪毎に地上観測所の総降雪量が 10mm 以上の場合の総降水量のレーダ値と地上値の相対誤差を見ると、DND レーダの場合は相対誤差の最大は 80 %、平均 27 % である。宝達山レーダの場合は相対誤差の最大は 150 %、平均は 38 % である。これからも、Z ～ R 関係による降雪強度の測定精度が良いことが分かる。

3. 2. 6 地域平均値による地上降雪量とレーダ降雪量の対比

(1) 検討条件

地上値の空間代表性の問題、レーダ値の移流の問題を解消するため、地域平均値による地上値とレーダ値の対比を行った。

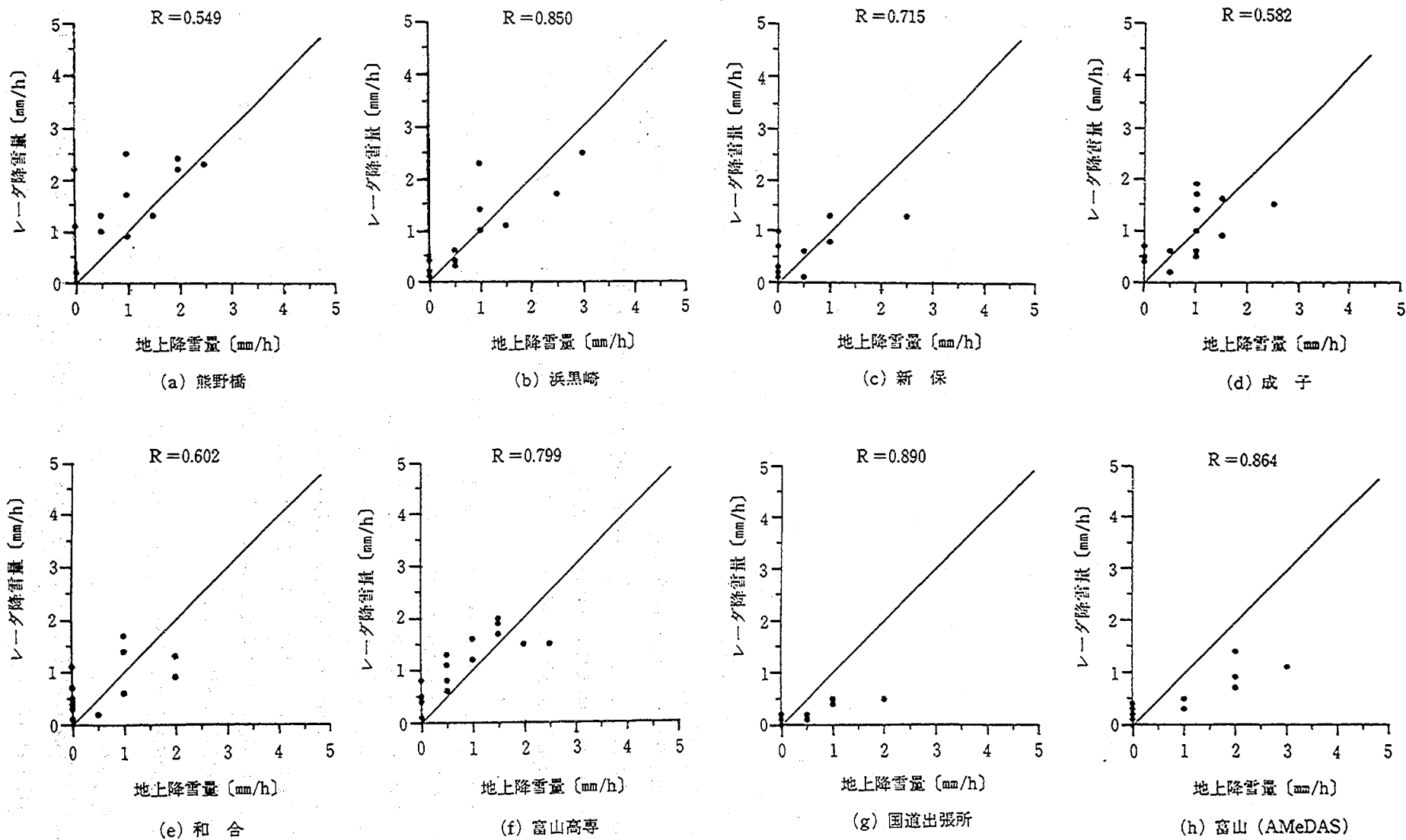


図-3.2.7 DND レーダ降雪量と地上降雪量の相関図 (S.62, 1/31~2/1)

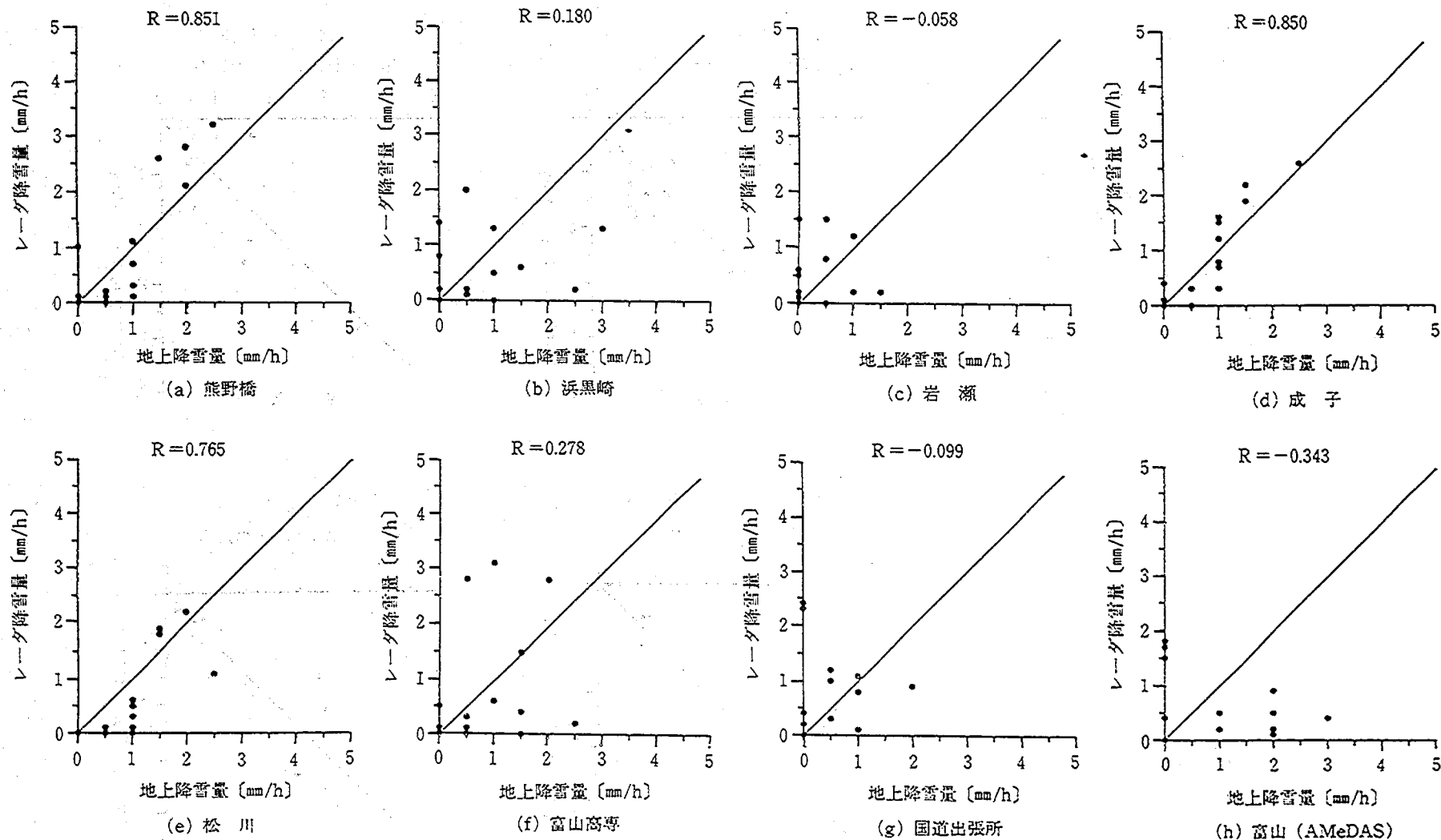
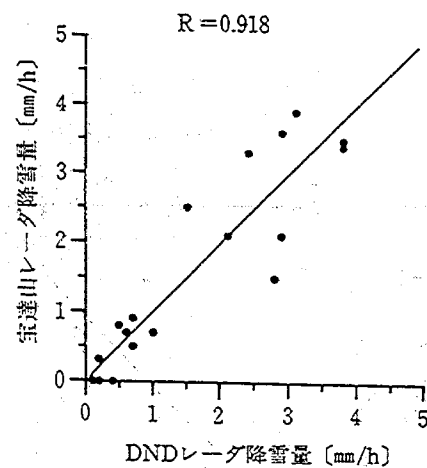
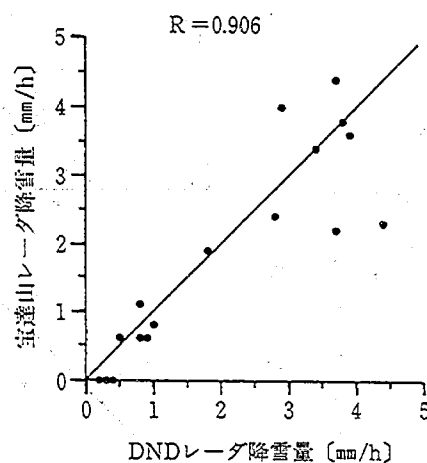


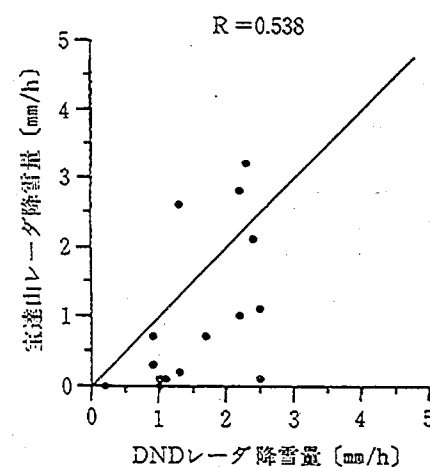
図-3.2.8 宝達山レーダー降雪量と地上降雪量の相関図 (S.62. 1/31~2/1)



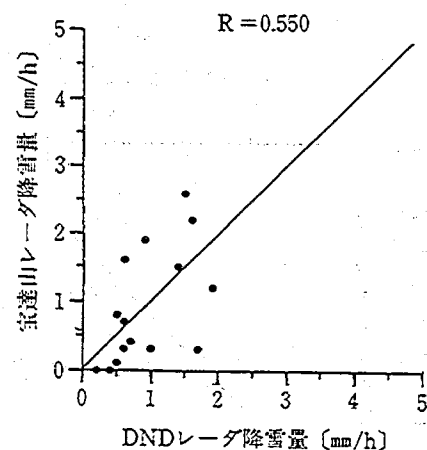
(a) 熊野橋 (1/19~20)



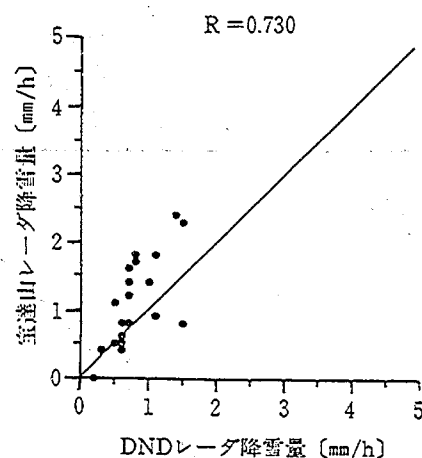
(b) 農業試験所 (1/19~20)



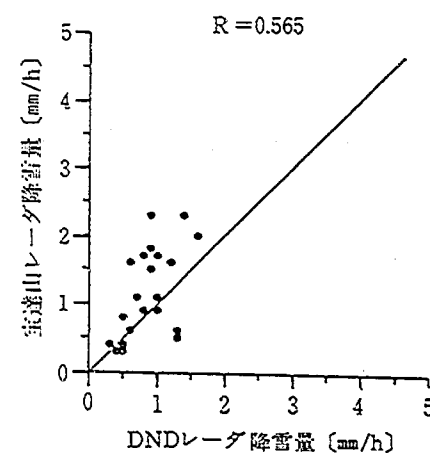
(c) 熊野橋 (1/31~2/1)



(d) 成子 (1/31~2/1)



(e) 成子 (2/27~28)



(f) 富山高専 (2/27~28)

図-3.2.9 DND レーダ降雪量と宝達山レーダ降雪量の相関図 (S.62, 1/31~2/1)

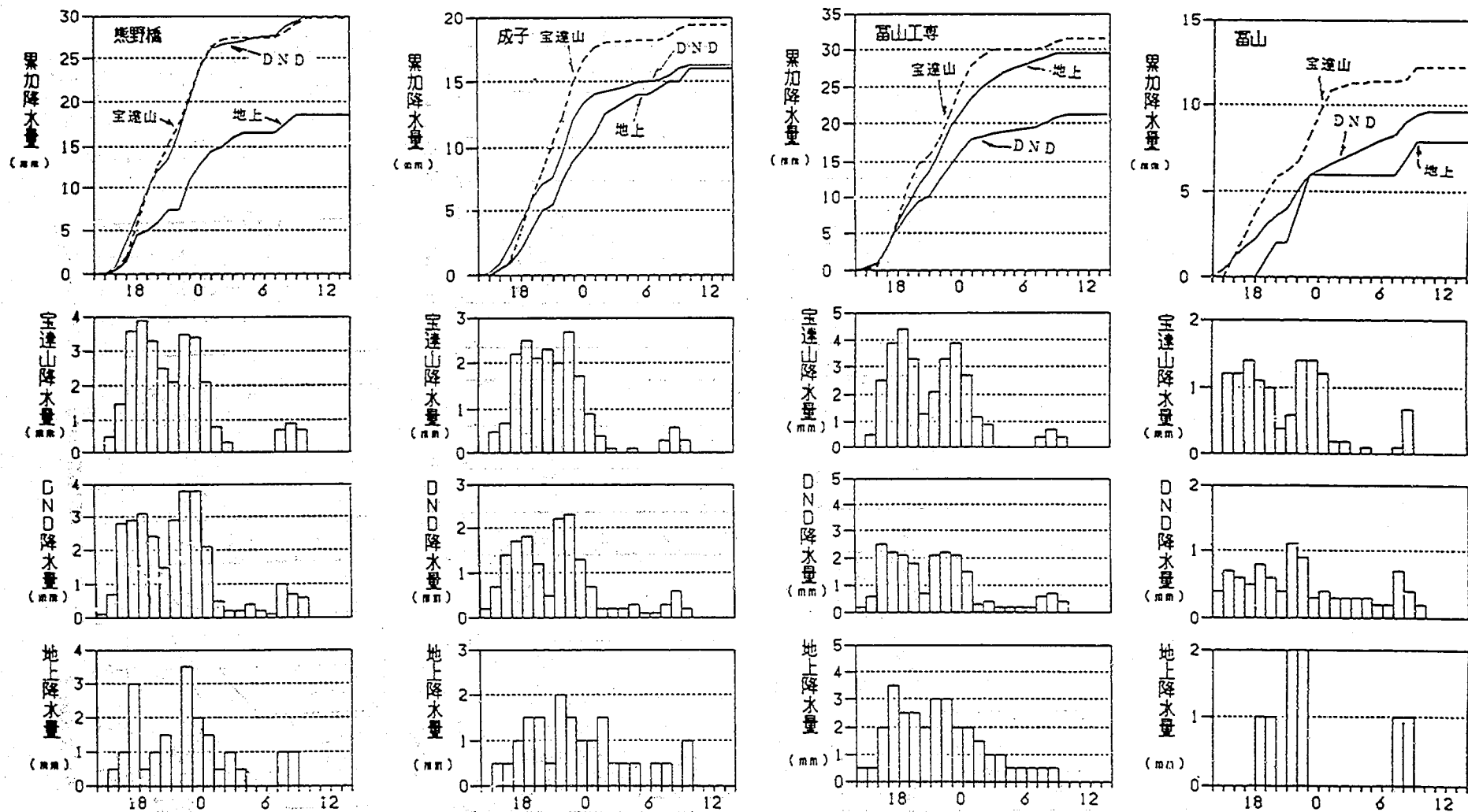


図- 3.2.10(1) レーダ降雪量と地上降雪量の比較 (S. 62, 1 / 19~20)

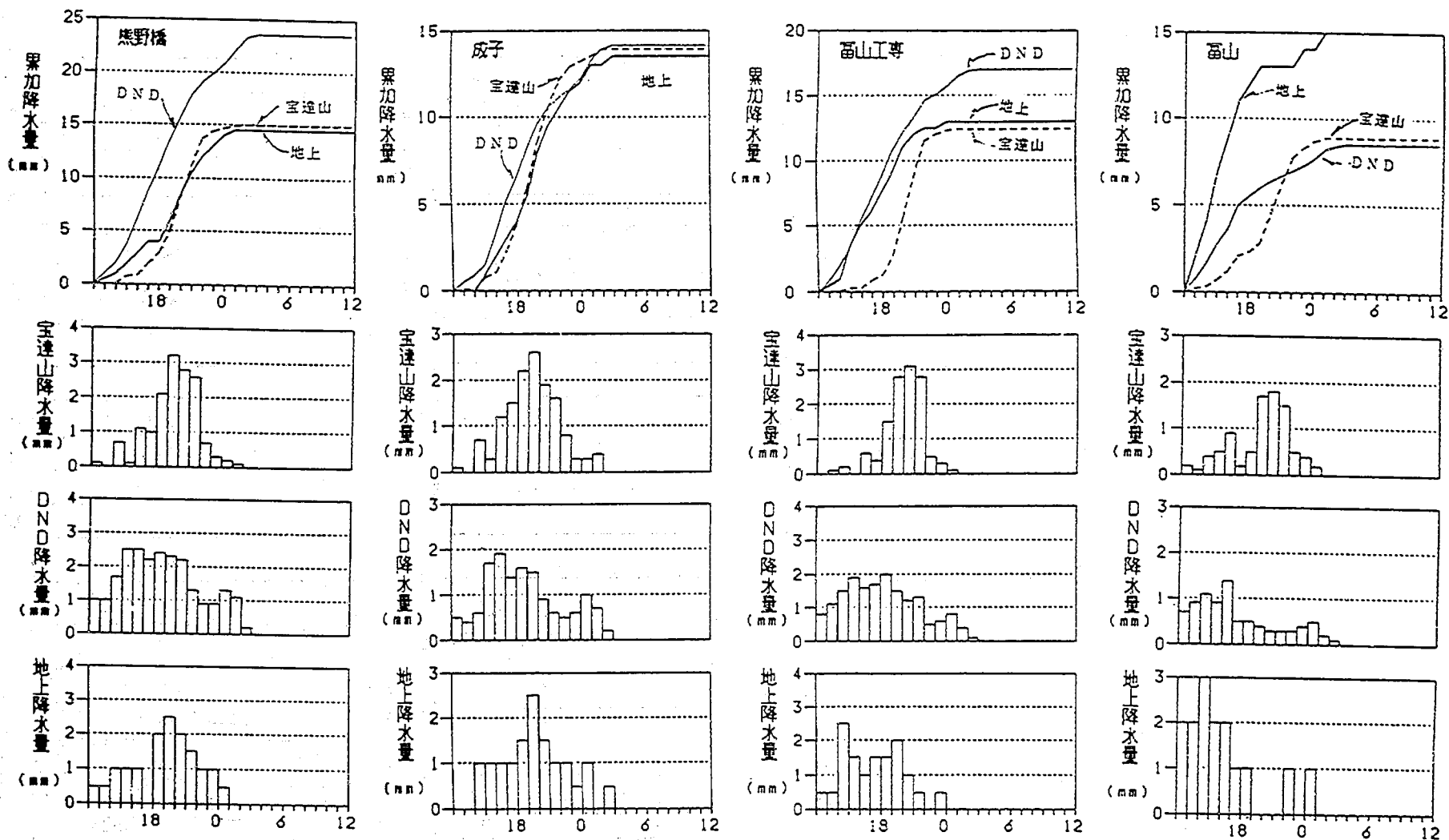


図- 3.2.10(2) レーダ降雪量と地上降雪量の比較 (S. 62, 1/31~2/1)

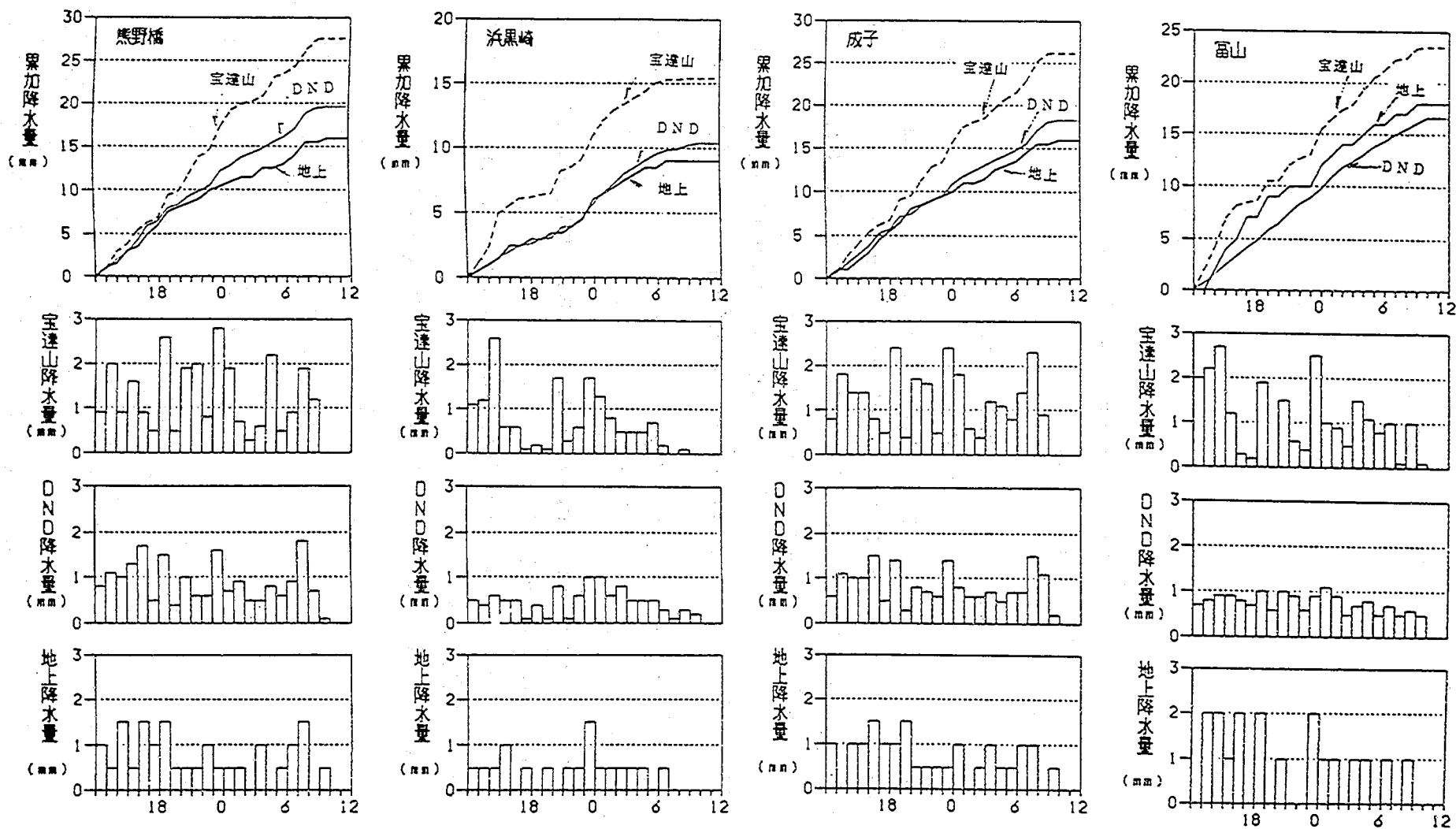


図-3.2.10(3) レーダ降雪量と地上降雪量の比較 (S. 62, 2 / 27~28)

(a) 地域平均の領域

図-3.2.2に示す通り、レーダの地域平均の領域は約 150km^2 である。地上観測所は前記3.2.5で用いた平均領域内にある13観測所である。

(b) 対象降雪

対象降雪は、前記3.2.5と同じS.62.1/19~20降雪、S.62.1/31~2/1降雪、S.62.2/27~28降雪の3降雪とした。

(c) 降雪量換算 B , β

レーダ降雪量を求めるのに用いた B , β は前記3.2.5で求めた降雪毎の B , β を用いた。

(2) 検討結果

図-3.2.11に各降雪の地上降雪量とレーダ降雪量の相関図を、図-3.2.12に各降雪の地上降雪量とレーダ降雪量の時間変化図及び累加曲線を示す。

これから次のことが言える。

- ① DNDレーダ降雪量と地上降雪量の相関は、非常に良い。
- ② 宝達山レーダ降雪量と地上降雪量の相関は、1/31~2/1降雪を除けば比較的良いと言える。しかし、DNDレーダに比べると相関は良くない。これは、地点別の比較で説明したDNDレーダの方がビーム高度が低い、地上観測点がレーダに近い、ためと考えられる。
- ③ 時間降雪量変化図を見ると、地上降雪量値とDNDレーダ降雪量値は良く一致している。また、宝達山レーダ降雪量もそこそこ一致している。
- ④ したがって、広域の面積平均降雪量は、DNDレーダで定量観測が可能である。また、宝達山レーダでも適切な領域で平均すれば、定量観測が可能になると考えられる。

3.2.7 ま と め

本調査から次のことが分かった。

- ① 宝達山レーダの降雪観測の B , β は取り合えず2000, 2.0でよい。なお、今後データを蓄積し詳細に検討する必要がある。
- ② DNDレーダによって降雪観測の定量観測は行える。また、DNDレーダは降水強度の弱い雪まで観測可能である。
- ③ 宝達山レーダでも、降雪観測の定量観測が可能になると考えられる。

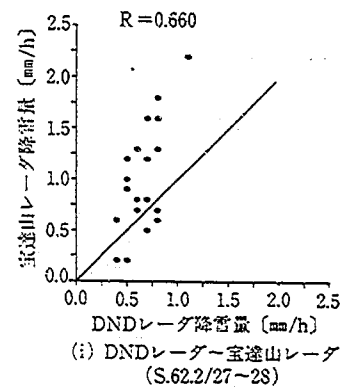
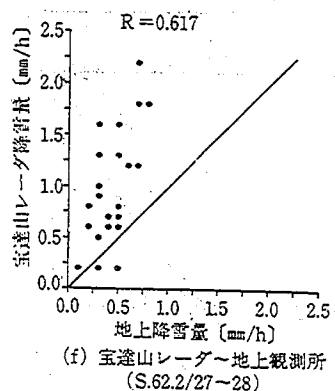
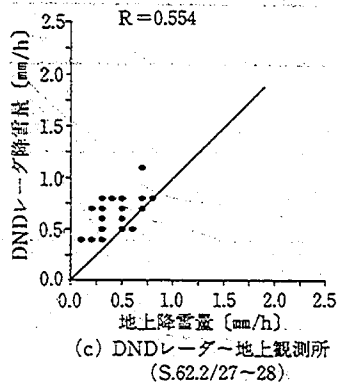
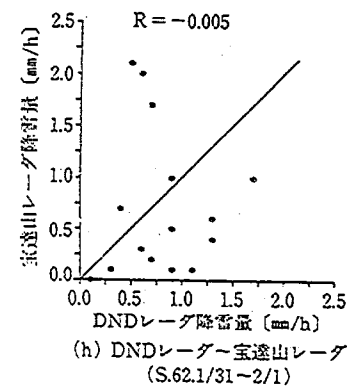
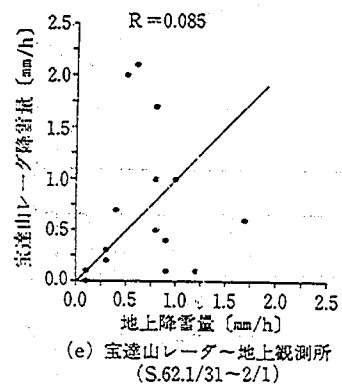
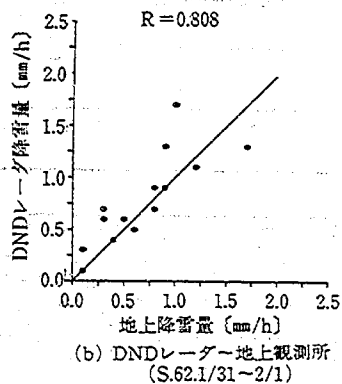
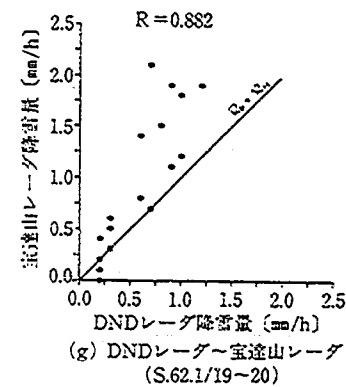
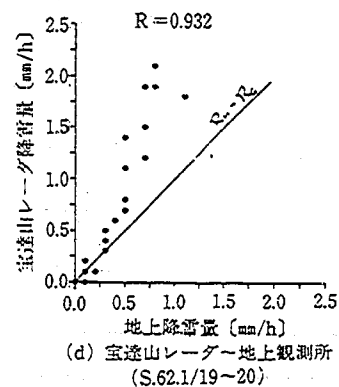
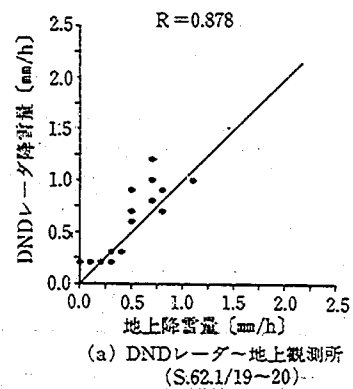
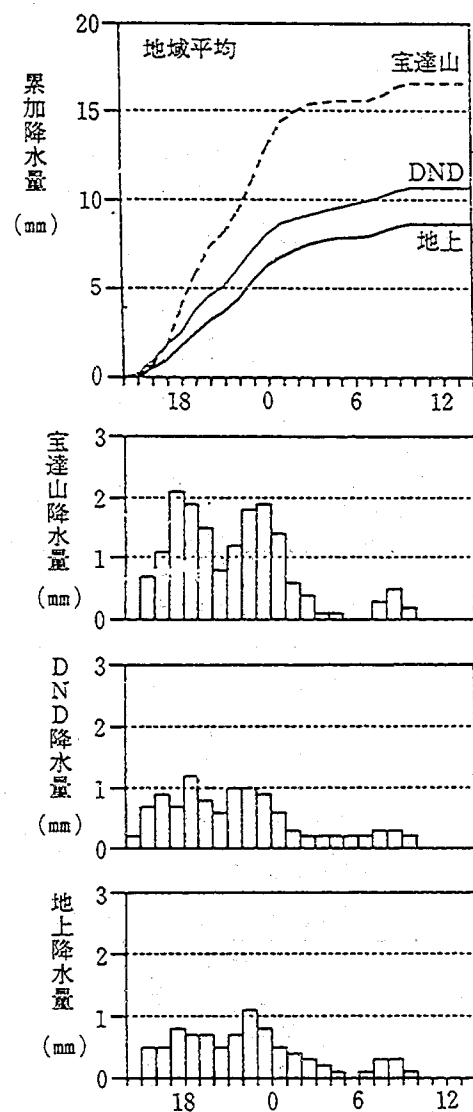
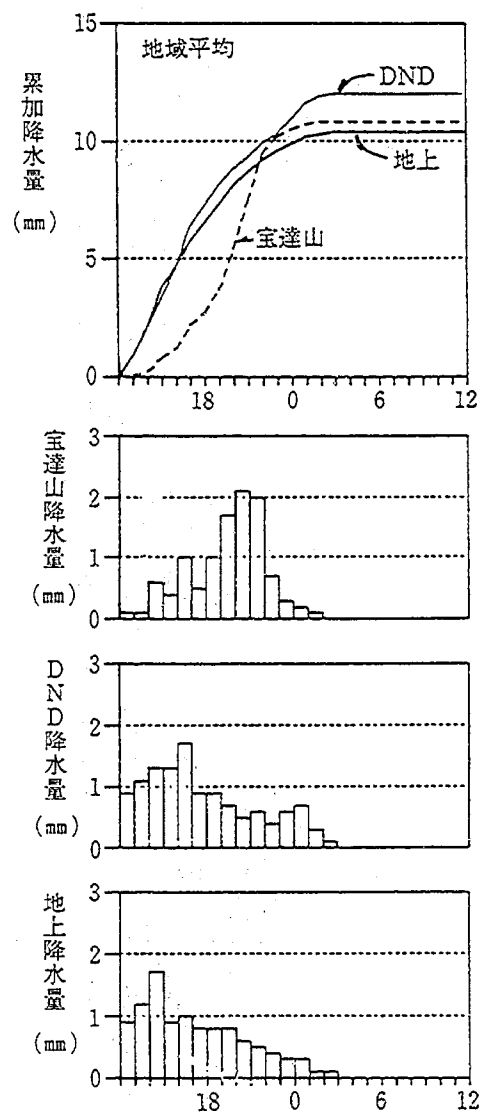


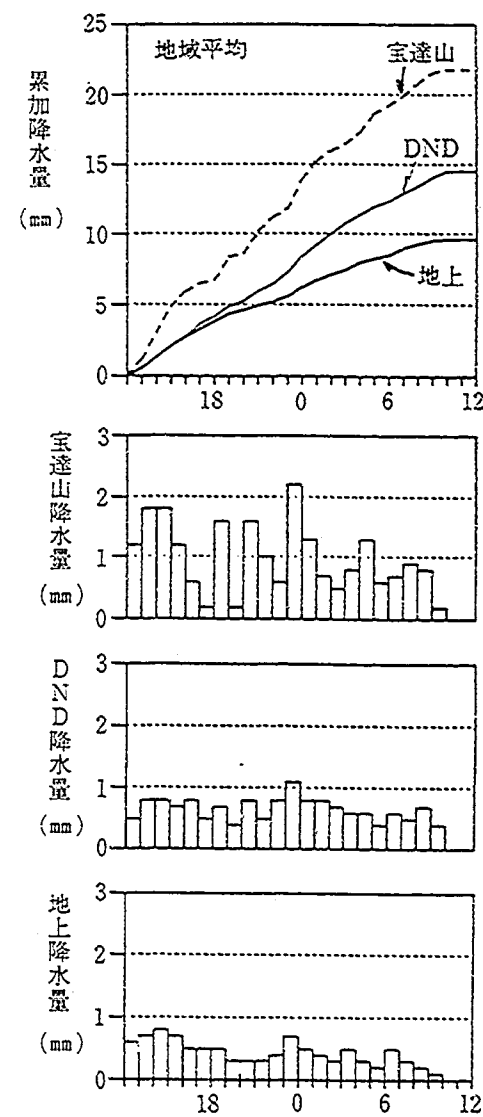
図- 3.2.11 地域平均降水量の比較



(a) S.62.1/19~20



(b) S.62.1/31~2/1



(c) S.62.2/27~28

図- 3.2.12 地域平均降雪量の散布図

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

3.3.1 概 要

パラボラ面に雪が付着することによって、パラボラ面で反射する電波の減衰、ビーム軸のずれ等の影響が生じることが予想される。この影響は、観測によって得られるデータの信頼性に係わる重要なことである。そこで、この影響の程度について昭和62年1月～2月の間に三郷レーダサイト（富山県中新川郡立山町）で行われた降雪観測によるデータを用いて検討を行った。

3.3.2 着雪による影響

パラボラ面に雪が付着した場合に次のような影響が考えられる。

- (1) 雪により、電波が散乱・吸収を受け減衰を生じる。
- (2) 雪による散乱で、ビームの拡散が生じる。
- (3) 偏った着雪があった場合、ビーム軸のずれが生じる。

3.3.3 影響の検討

着雪によりこれらの影響が生じるならば、パラボラ面の除雪を行った前後のデータに違いが生じるはずである。そこで、本観測中に行われたパラボラ面の除雪前後のデータを抽出し、その比較を行った。

比較検討には、除雪前後で継続して観測がなされた例が多かった二重偏波モード（仰角 3° 又は 2° ，データ平均時間3分間）の反射因子 Z_{VW} （垂直偏波，ノーマルモード）のデータを用いた。比較検討に用いた観測例を下記に示す。

観測例	除 雪 日 時	天 候	降雪量(mm)	気 温 ($^\circ\text{C}$)	風 速(m/s)
1	87. 1. 9 23:00	雪	2.5	-0.8	1.0
2	87. 1. 31 17:00	雪	0.5	-0.4	5.0
3	87. 1. 31 18:00	雪	0.5	-1.0	1.0
4	87. 1. 31 19:00	雪	0.0	-1.0	0.0
5	87. 2. 18 1:00	雪	4.0	0.0	0.0
6	87. 2. 18 3:00	雪	1.5	0.0	0.0
7	87. 2. 18 5:00	雪	0.0	0.0	0.0
8	87. 2. 26 6:00	雪	0.5	-2.2	2.0
9	87. 2. 28 1:00	小雪	3.0	-1.1	—
10	87. 2. 28 19:00	湿雪	0.5	0.0	4.0

注) 降雪量は、前回除雪した時点から、上記に示す除雪までに降った降雪量を示し、そのデータはレーダサイトから最も近い富山北消防の地上データを掲げた。

3.3.4 雪による電波の減衰の検討

- (1) 観測される反射因子の時間的変化を把握するため、降雪による反射因子の変動が比較的小さいグラウンドクラッタからの反射を指標として用いて検討を行った。

(参考) 晴天時グラウンドクラッタからの反射が 50 dBZ ある地点では、0~35 dBZ の降雪がある場合には、50.0~50.13 dBZ の変動として観測されることとなる。

検討に用いたグラウンドクラッタを下記及び図-3.3.1に示す。

地点No.	セクタ番号	レンジ番号
1	6 4	3 5
2	6 9	5 7
3	8 6	2 4

これらの地点を中心とした前後1レンジ、左右1セクタ(3レンジ×3セクタ)内の反射因子を平均し、その値の時間的変化を追った。その結果を、図-3.3.2に示す。

時間的な変動がかなり見られるが、除雪による変動がこの中に含まれているとすれば、各地点のデータに共通して除雪前後で同じ変動が見られるはずである。しかし、このような傾向は今回のデータからは見出すことができなかった。

このような結果から次のことが言える。

- (a) 除雪の前後において、反射因子 Z (dBZ) に顕著な変化は生じていない。
(b) 仮に変化があったとしても反射因子の時間的変動に比して無視出来る程度のものであると考えられる。
- (2) 次に、(1)で見られたような短時間内のデータの変動を抑え、全空間にわたって見られる除雪による反射因子の変化を把握するために全メッシュのデータを平均したものを指標として除雪前後のデータの比較を行った。

雪の付着によるデータの変動は全メッシュに等しく表れるものであるため、全メッシュを平均した値もその変動に従うことが予想される。

この結果を図-3.3.3に示す。

ここでも、除雪前後でパラボラ面に付着した雪による影響は見られず、反射因子の値の連続性が保たれている。

一部のデータにおいて、除雪後急激に反射因子の値が低下している例(観測例2, 4, 5, 6)が見られる。これは、除雪によりパラボラ面の特性が何らかの理由により変化したものと思われる。

3.3.5 雪によるビームの拡散の検討

雪がパラボラ面に付着することにより、パラボラ面の面精度の低下が予想される。このことは、観測結果においてセクタ方向の分解能の低下という形で表れる。そこで、同一レンジ内のデータをセクタ方向にスキャンすることによって得られる反射因子が除雪前後でどのように変化するかについて検討を行った。

この反射因子像の時間変化を図- 3.3.4 に示す。

次に、この反射因子像の変化を把握する指標として次のものを用いて検討を行った。

(1) 波高率

セクタ方向の分解能の低下により反射因子像もその尖鋭さを失うことが予想される。この尖鋭さを表すためにこの反射因子像を一つの波形と見なしその波形の特徴を表す波高率を一つの指標とした。

波高率は、次の式により表され、その波形の鋭さを表す。

$$\text{波高率} = \frac{\text{最大値}}{\text{実効値}}$$

(2) (1)と同様にして波形率の変化についても検討した。

波形率は、次の式により表され、その波形のなめらかさを表す。

$$\text{波形率} = \frac{\text{実効値}}{\text{平均値}}$$

ここでいう実効値、平均値は次の式により定義したものである。

$$\text{実効値} = \left(\frac{1}{j-i} \sum_{n=i}^j Z_n^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{平均値} = \frac{1}{j-i} \sum_{n=i}^j Z_n$$

ただし i 及び j はセクタ番号、 Z_n はセクタ n のときの反射因子を表す。

ここでも 3.3.4 (1)と同様の理由によりレンジ番号 24 (レーダサイトより 12km 地点) を選びその中でグランドクラッタの存在するセクタ番号 78~88, 89~99 及び 134~144 間のデータを用いて検討を行った。その地点を図- 3.3.1 及び図- 3.3.4. に示す。

このデータによる波形率及び波高率の時間的変化を図- 3.3.5 及び図- 3.3.6 に示す。

図から分かるように、波形率、波高率ともに変動しているため、除雪による効果を認めるのは難しい。

以上の事から、今回の観測において雪の付着によるビームの拡散という影響はほとんど無いものと見られる。

3.3.6 着雪によるビーム軸への影響について

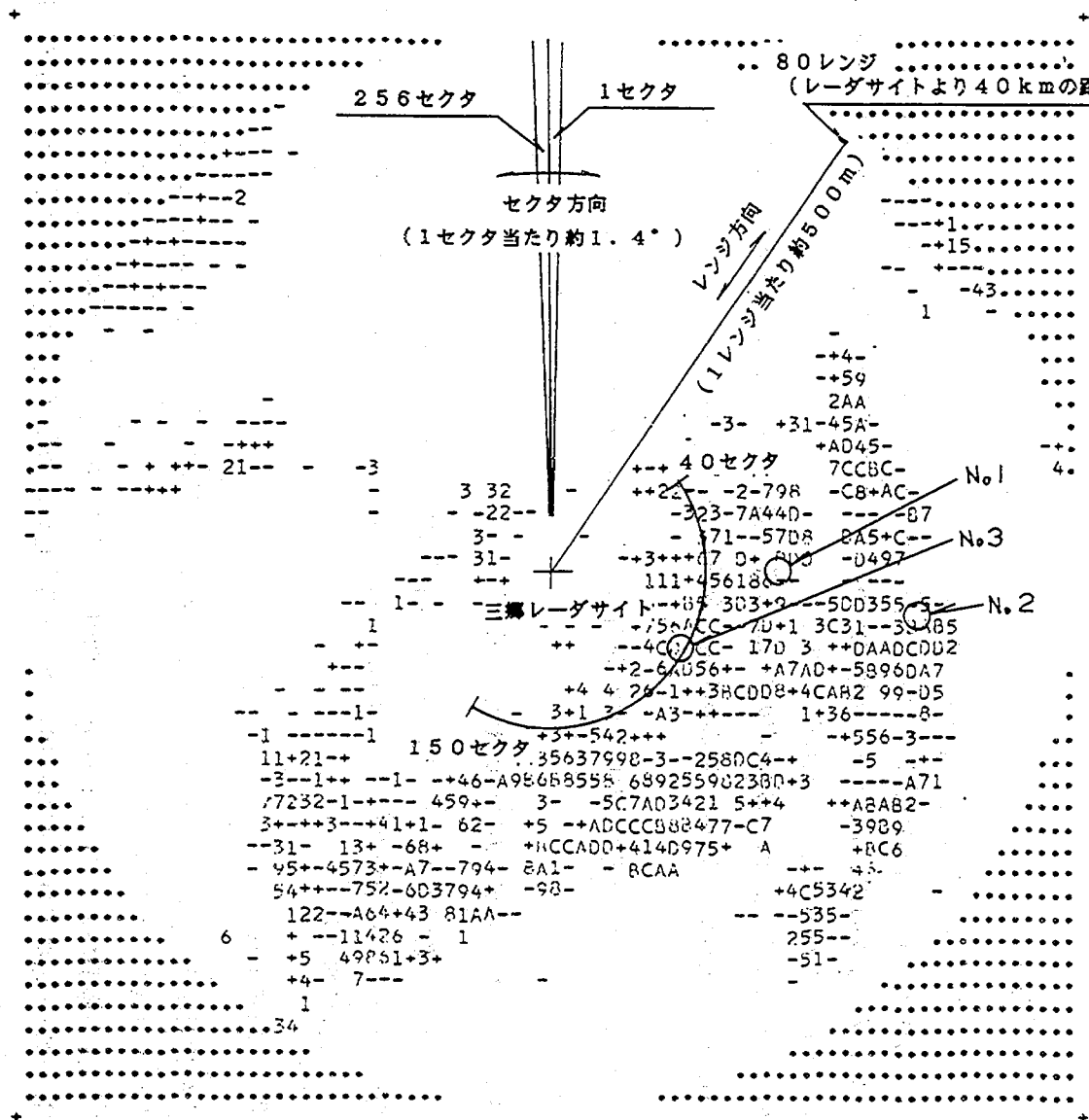
パラボラ面への着雪の仕方は、主にパラボラ面下部に偏っている場合が多い。これによりビーム軸は上方にずれることが予想される。しかし、今回の観測データでは、それを確かめることが出来ないためここでは省略する。

3.3.7 検討結果

以上の検討結果から、今回の観測データによる限りでは、パラボラ面の着雪による観測結果への影響はないと見なすことが出来る。

着雪による影響がデータに表れなかった理由として次の事が考えられる。

(1) 今回の観測では、観測員が小まめに除雪を行い、観測データに着雪による影響が出ないようにしていた。



1987-02-08 08:22 16'00 DUAL

MANU-4 (MODE 5):ZVM
SCAN COUNT: 15
AZIMUTH : SCAN
ELEVATION : 2.99
AZ. BLANKING START-END : 90.00 - 92.81

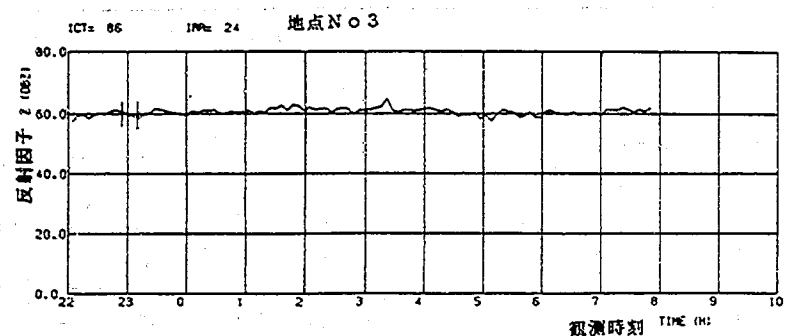
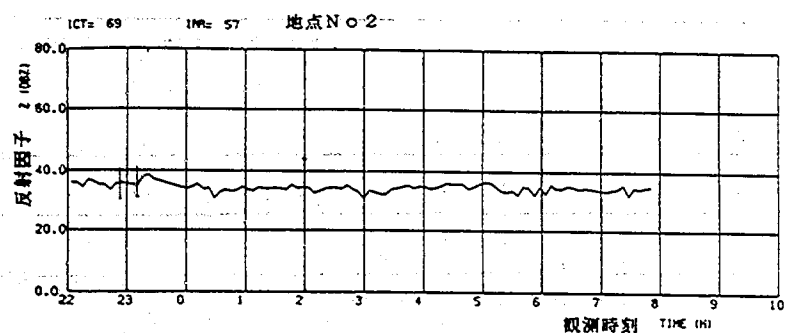
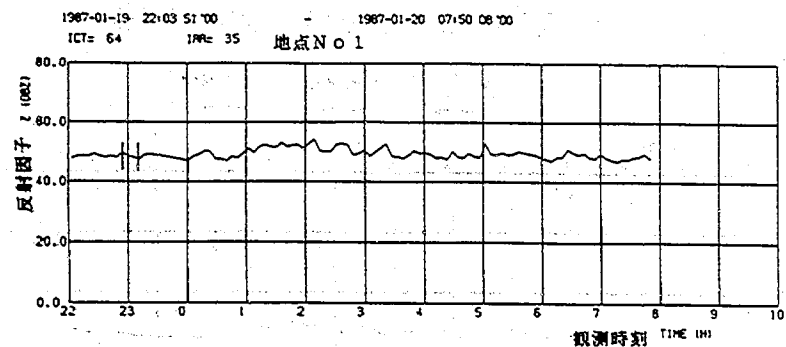
SYSTEM STATUS : 0000 0000 0000 0000

晴天時のPPI図 (グランドクラッタマップ)

観測日時 1987年 2月 8日 8時 22分

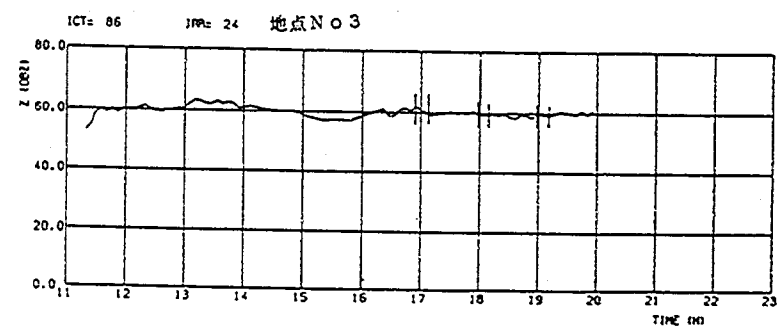
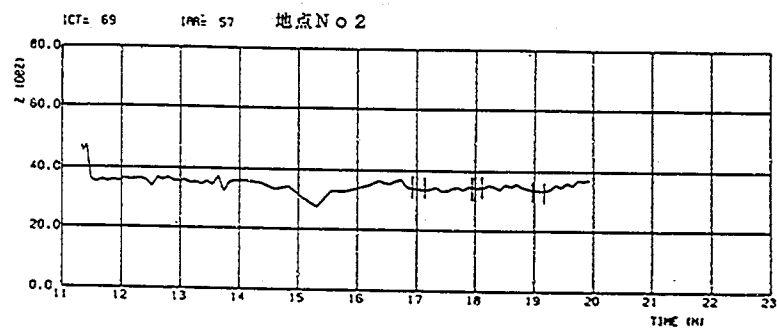
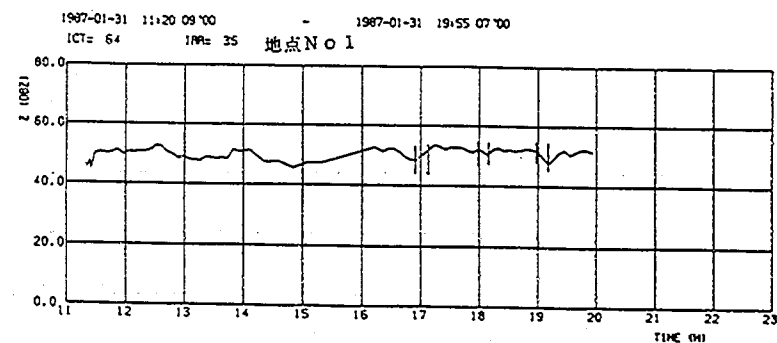
反射因子 Z		UNIT : DBZ	
> REMARKS			<
19.1	6:	42.6	45.1
25.1	7:	45.1	48.6
28.6	8:	48.6	51.1
31.1	9:	51.1	53.1
33.1	A:	53.1	56.6
36.6	B:	56.6	59.1
39.1	C:	59.1	62.6
42.6	D:	62.6	

図-3.3.1 検討に用いた地点



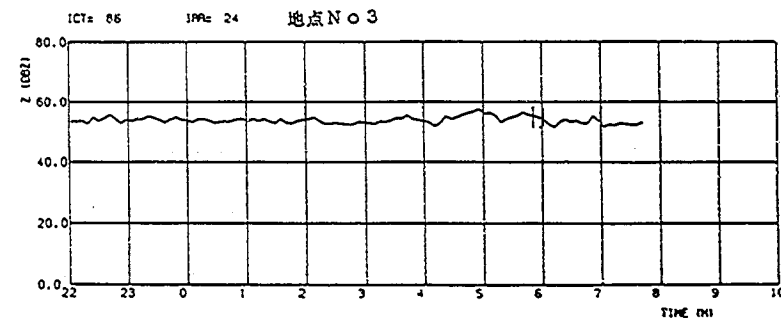
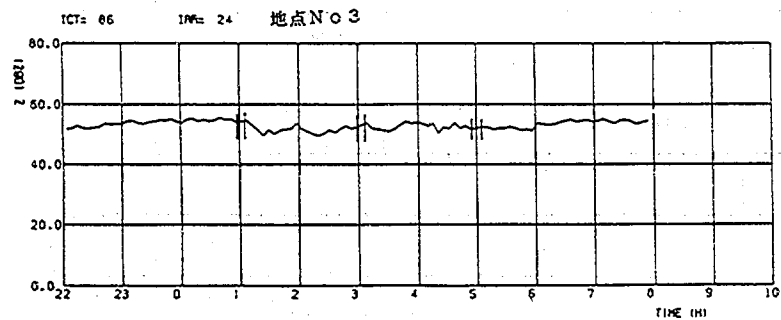
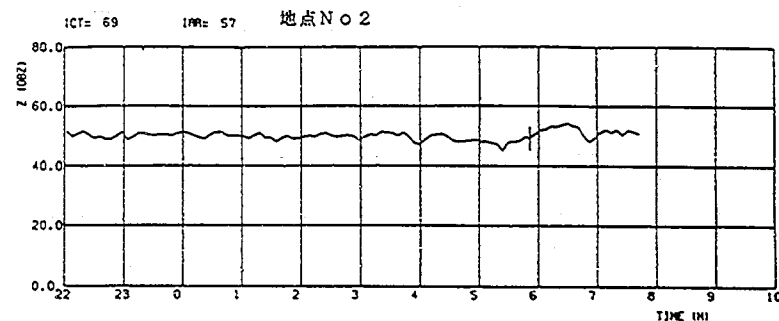
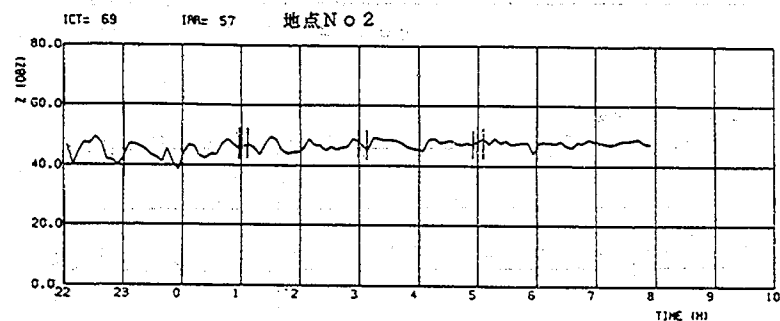
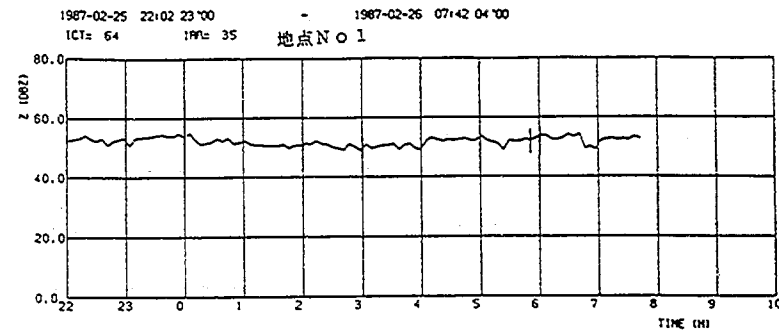
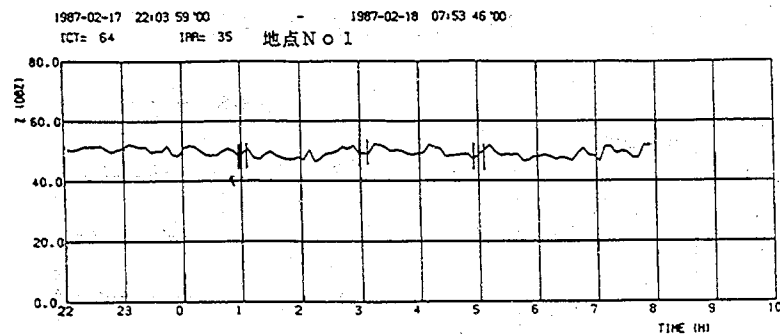
観測例1

図-3.3.2(a) 反射因子の時間的変化 (1987.1.19)



観測例2 観測例3 観測例4

図-3.3.2(b) 反射因子の時間的変化 (1987.1.31)

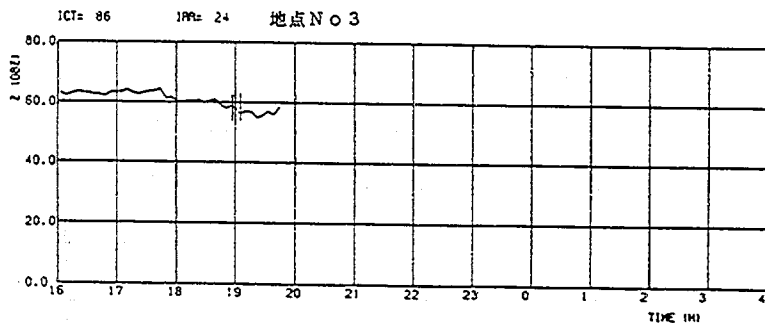
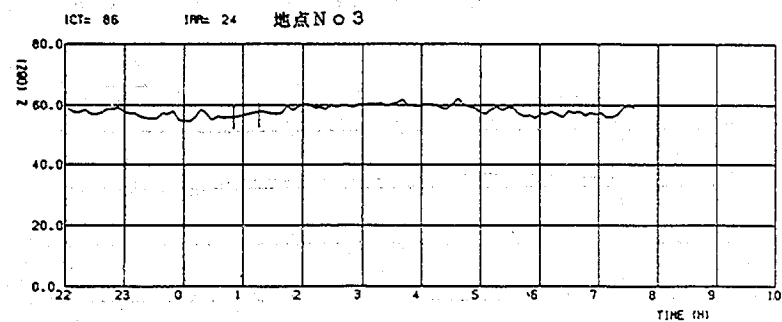
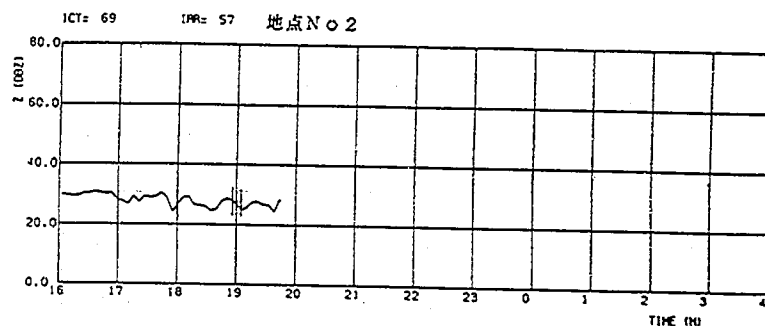
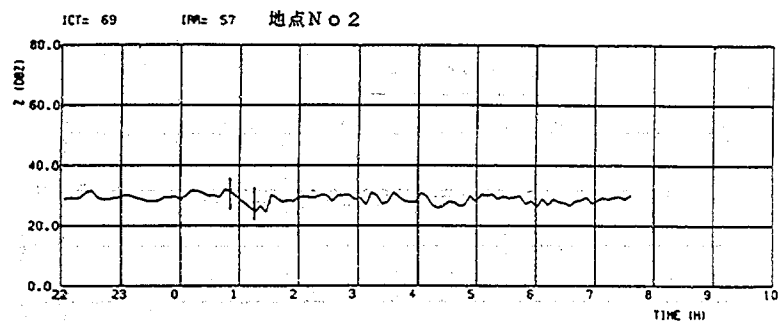
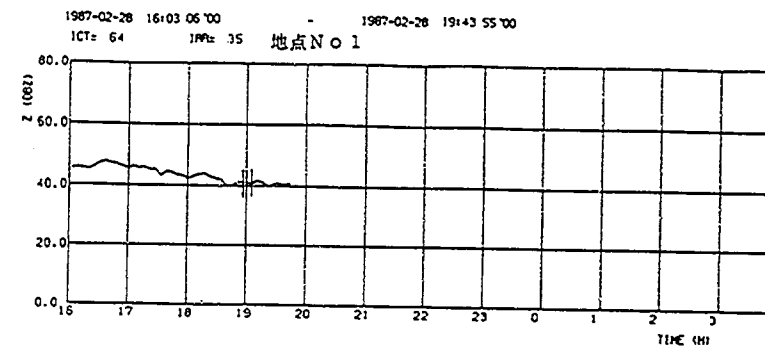
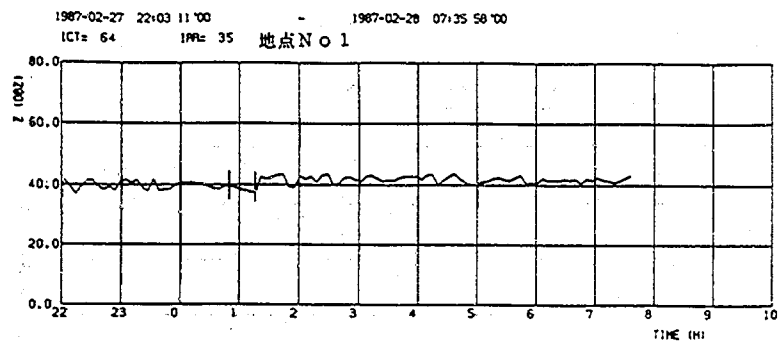


観測例5 観測例6 観測例7

観測例8

図-3.3.2(c) 反射因子の時間的变化 (1987.2.17)

図-3.3.2(d) 反射因子の時間的变化 (1987.2.25)



観測例 9

観測例 10

図- 3.3.2(e) 反射因子の時間的变化 (1987.2.27)

図- 3.3.2(f) 反射因子の時間的变化 (1987.2.28)

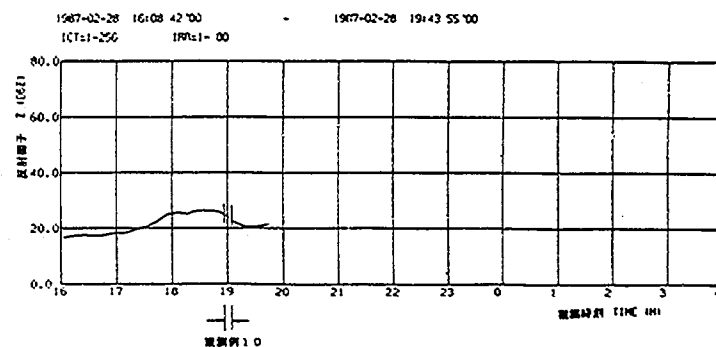
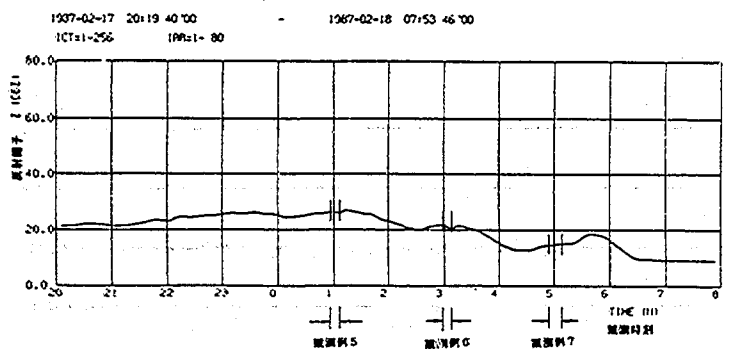
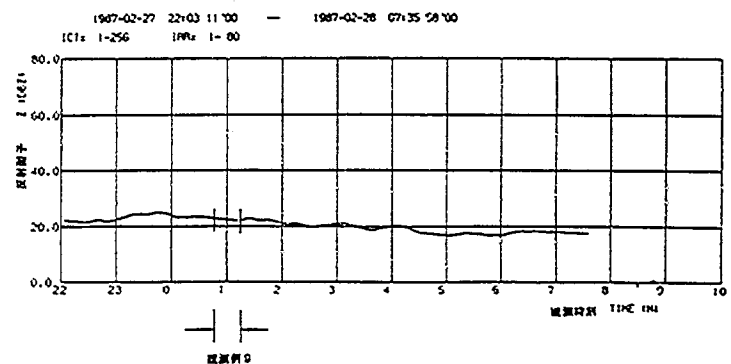
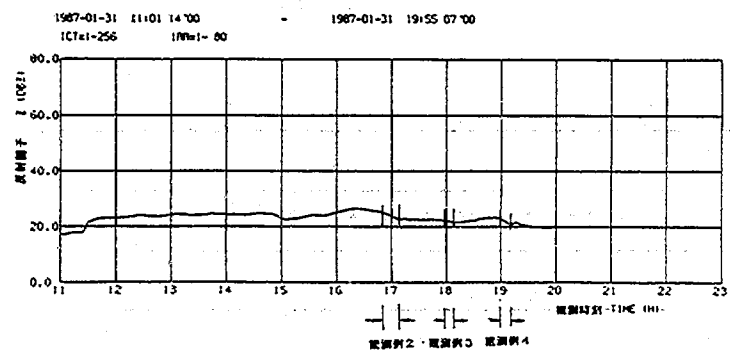
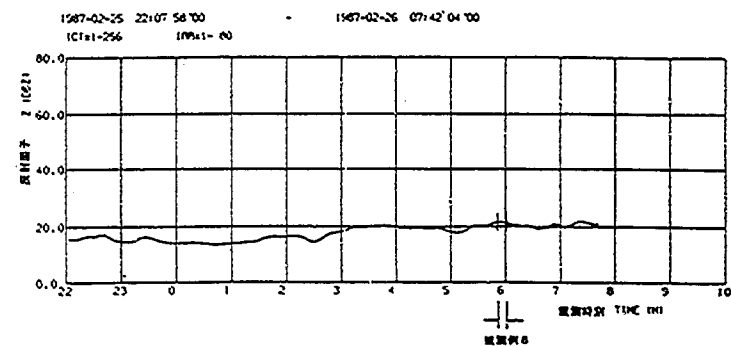
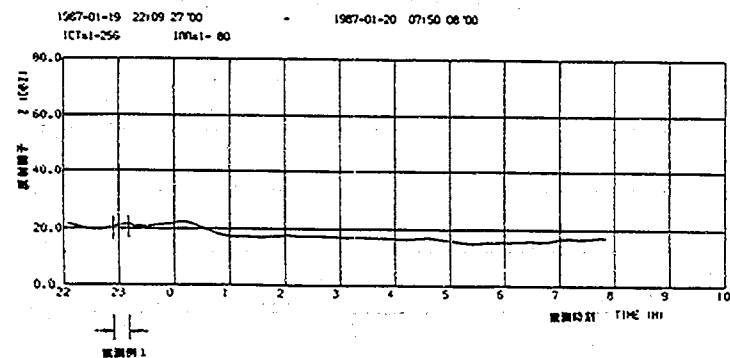


図- 3.3.3 全メッシュ平均値の時間的变化

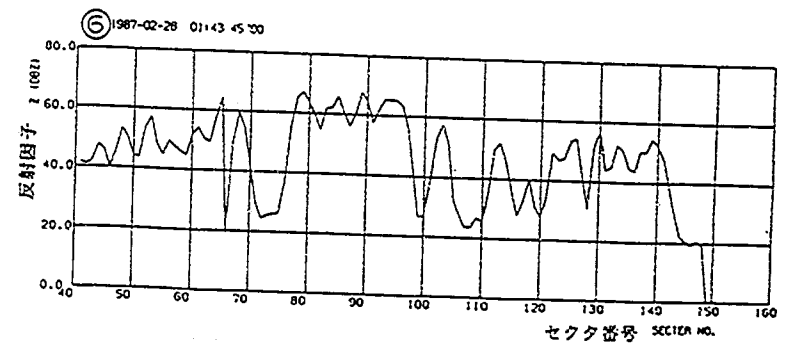
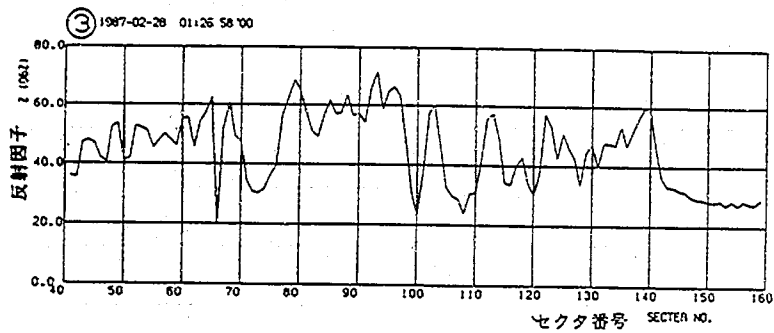
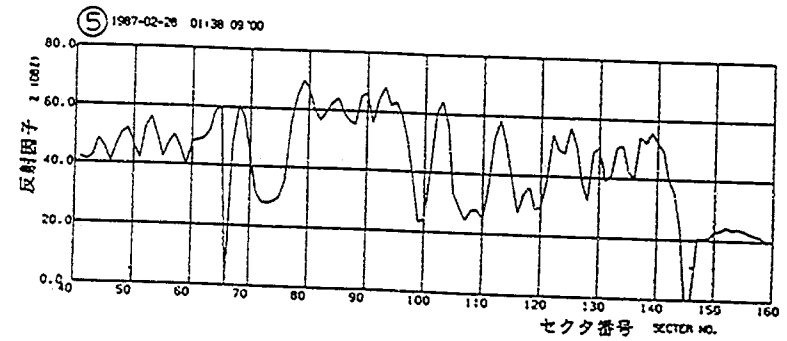
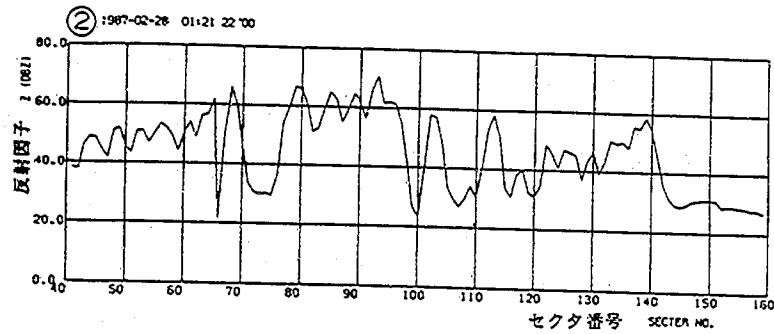
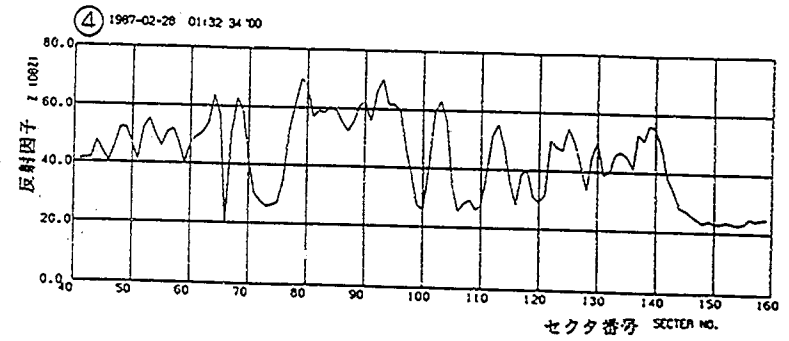
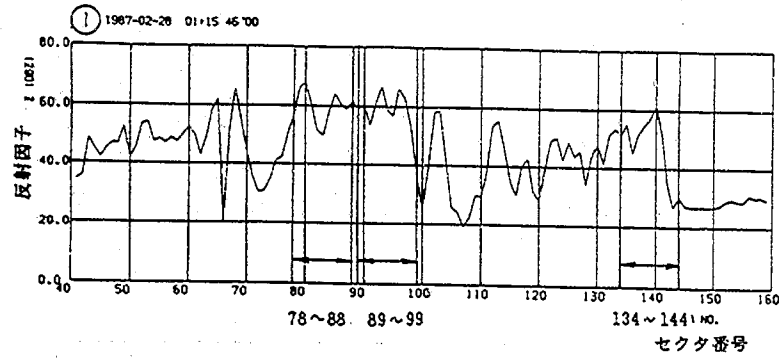
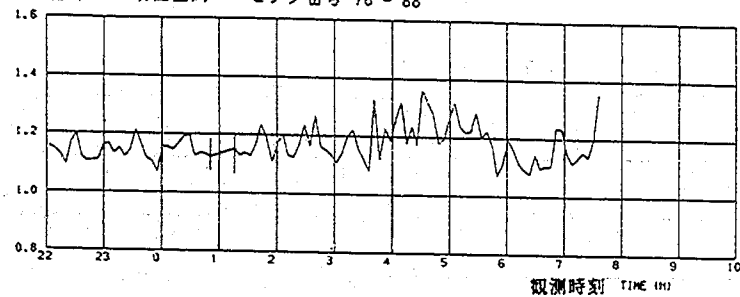


図-3.3.4 セクタ方向の反射因子像の時間的变化 (①→⑥)

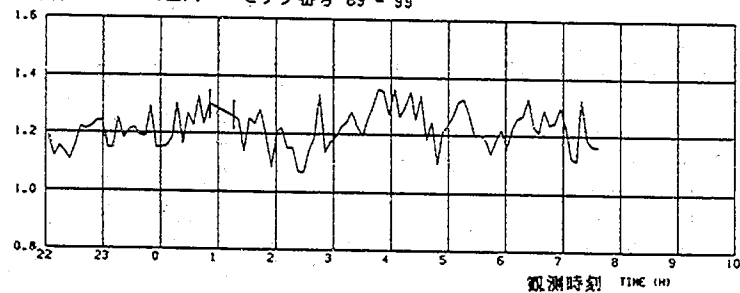
1997-02-27 22:03 11'00 - 1987-02-28 07:35 58'00

RANGE=24

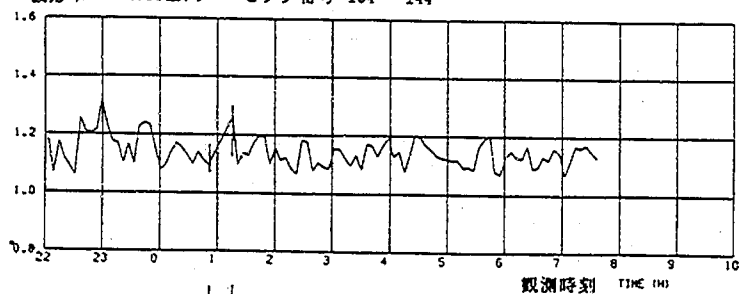
波形率 切出区間 セクタ番号 78 - 88



波形率 切出区間 セクタ番号 89 - 99



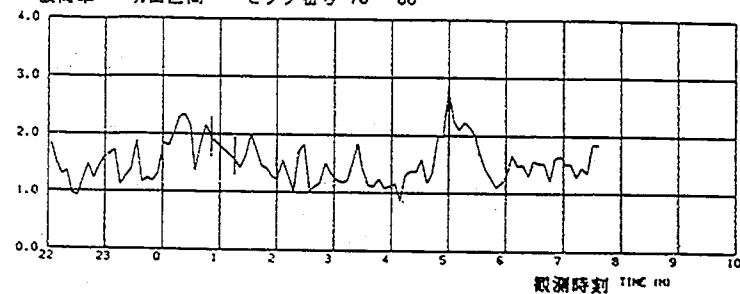
波形率 切出区間 セクタ番号 134 - 144



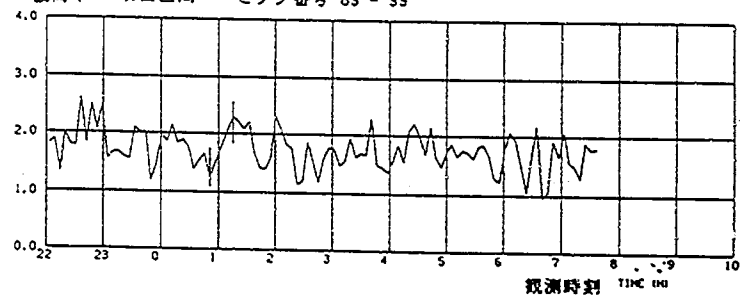
観測例 9

図-3.3.5 波形率の時間的変化 (1987.2.28)

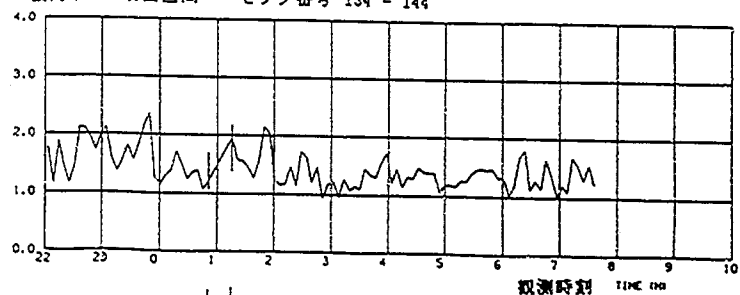
波高率 切出区間 セクタ番号 78 - 88



波高率 切出区間 セクタ番号 89 - 99



波高率 切出区間 セクタ番号 134 - 144



観測例 9

図-3.3.6 波高率の時間的変化 (1987.2.28)

(2) 元来、雪は比重も小さく、また誘電率も小さいため、電波に及ぼす影響が水、氷等比べて少ない。

以上の様に、今回の観測では雪の付着による影響が見られなかったが、今後パラボラ面に付着した雪により、どの程度の電波の減衰、散乱が生じるのか定量的な検討を行う必要があると思われる。

3.4 降雪粒子の特性観測

3.4.1 まえがき

建設省レーダ雨量計は、その有効性から全国的に導入が実施されつつある。これに伴い克雪対策が必要な地域ではレーダ雨量計による降雪観測を必要とする。したがって、レーダ雨量計を用いた降雪観測手法の開発を行う必要がある。このためには、①気温による降雪・降雨の判別手法の検討、②降雪時の B 、 β の検討、③雪片の移流システムの解明、等を行わなければならない。

そこで、本調査は降雪粒子の粒径分布の観測を行い、降雪粒子の粒径分布の特性及び降雪時の B 、 β の検討を行った。

3.4.2 調査方法

(1) 雪片の粒径分布の観測場所と日時

雪片の粒径分布の測定は、新潟県長岡市周辺にある長岡国道工事事務所中之島除雪ステーションで、昭和61年1月29日10時～16時に行った。雪片の粒径分布の測定は約10分間隔で35サンプル採取した。図-3.4.1に1月29日9時の天気図を示す。この日の天候は、前半は前日から的大雪が続いていたが、後に小降になり、移動性高気圧に覆われた夕方には晴天になった。

(2) 降雪粒子の測定方法

降雪粒子の $Z-R$ 関係を求めるためには、レーダ反射因子が融解水滴の大きさに直した理論に基づいているため、融かして水滴とした場合の粒径（融解直径）による空間粒径分布が必要である。この観測では融解直径の固定に一般に利用されているろ紙法を用いた。この方法による観測の手順は次のようになる（図-3.4.2）。あらかじめ、板に貼った黒い布（毛羽立ったビロード、B4判）にシリコンで防水処理をほどこしたものを用意しておく。この黒布を戸外で降雪に晒し、適当量の降雪粒子を受け、その露出時間を正確に計時する。これを弱い電熱で暖められた密閉加湿箱の中で、できるだけ蒸発を抑えた状態で降雪粒子を融かし水滴とする。この水滴を water blue 処理したろ紙に、均一に吸収させ、青いしみとして残す。

(3) 解析方法

降雪時のレーダで受信される電波の受信電力 P_r は、目標の降水粒子の直径が波長に対して十分小さくレーレー近似が成立する時は、 $P_r = C \cdot \{(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)\}^2 \cdot Z/r^2$ で表され、これをレーダ方程式と呼ぶ。ここで、 C はレーダ諸元に関わる定数、 r は目標物までの距離、 ϵ は水の複素誘電率である。 Z は降水強度に関係する項で前に述べたようにレーダ反射因子である。これは降雪粒子の空間粒径分布 N_D と融かして水滴にした時の直径（融解直径） D の6乗で決まり、

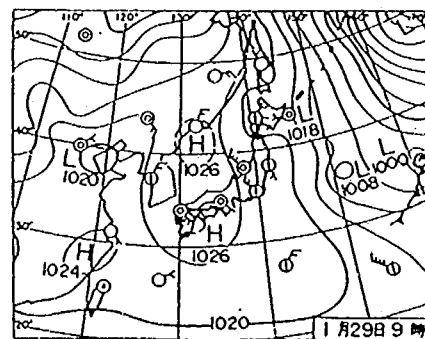


図-3.4.1 天気図(1986. 1. 29)

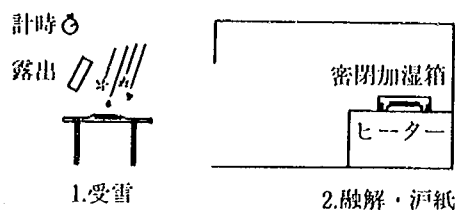


図-3.4.2 観測の手順

$$Z = \int N_D \cdot D^6 dD \quad \dots\dots\dots (3.4.1)$$

となる。また降水強度 R は

$$R = (\pi/6) \cdot \int V \cdot D^3 \cdot N_D dD \quad \dots\dots\dots (3.4.2)$$

で表される。ここで、 V は降雪粒子の落下速度である。この時レーダ反射因子と降水強度の関係は、

$$Z = B \cdot R^\beta \quad \dots\dots\dots (3.4.3)$$

で表現することができる。ここに B および β の値は降水の型や降水粒子の種類によって決まる定数である。

ろ紙の読み取りは、1 mm 間隔の円定規を用いて、ろ紙上の痕跡の大きさと階級ごとの個数を計数することにより行った。痕跡の大きさ d はあらかじめ実験的に定めた検定曲線により水滴径 D に変換した。今回用いた変換式は、 $D = 0.5455 d^{0.6101}$ である。ろ紙上の読み取り幅は 1 mm であるが、融解直径に変換した読み取り幅は $\Delta D = 0.1 \sim 0.3$ mm であり、 $D > 2$ mm では $\Delta D \approx 0.1$ mm となる。ここで、 ΔD を一定にするため、上記の方法で読み取った後、 $\Delta D = 0.3$ mm となるように個数を比例配分した。

それぞれのろ紙について得られた融解直径 $D_i \sim D_i + \Delta D$ の水滴の個数 N_i と露出時間 T 、露出面積 S (25.7 cm × 36.4 cm)、読み取り幅 ΔD を用いると、直径 $D_i \sim D_i + \Delta D$ の水滴の単位体積あたりの個数 N_{Di} およびレーダー反射因子、降水強度は次式のようになる。

$$N_{Di} = N_i / (S \cdot T \cdot V_i \cdot \Delta D) \quad \dots\dots\dots (3.4.4)$$

$$Z_{Di} = N_i \cdot D_i^6 / (T \cdot S \cdot V), \quad Z = \sum Z_{Di} \quad \dots\dots\dots (3.4.5)$$

$$R_{Di} = (\pi/6) \cdot (N_i \cdot D_i^3) / (T \cdot S), \quad R = \sum R_{Di} \quad \dots\dots\dots (3.4.6)$$

ここで、(3.4.5) 式は (3.4.1) 式に、(3.4.6) 式は (3.4.2) 式に対応する。以上の計算に必要な落下速度は、八木・上田の長岡での観測結果 $V = 107 \cdot D^{0.29}$ を用いた。また、以上の計算に用いた変数・定数の単位は、 N_D : mm⁻¹ · m⁻³, R : mm · hr⁻¹, Z : mm⁶ · m⁻³, S : cm², T : sec, V : cm · sec⁻¹, D : mm である。

3.4.3 研究結果

(1) 降雪強度

雪片の粒径分布の測定結果から式(6)を用いて算出した 10 時 06 分～15 時 32 分までの降水強度を図-3.4.3 に示す。この間の降水強度は 0.06 ～ 1.94 mm/h で、積雪深に換算すると 0.08 ～ 2.42 cm/h になる。10 時～12 時の降水強度は平均 0.18 mm/h と弱かったが、14 時～16 時の降水強度は平均 1.1 mm/h と並程度の雪であった。

(2) 雪片の粒径分布

一般に雪片の空間粒径分布は雨滴の場合と同様に、

$$N_D = N_0 \exp(-A \cdot D) \quad \dots\dots\dots (3.4.7)$$

の指数関数で表されることが多い。ここで、 N_0 は $D = 0$ を仮定した場合の N_D の値であり A は回帰直線の勾配である。図-3.4.4 は降水強度は最も大きかった 15 時 52 分の観測データの N_D 分布である。これからも分かるように、どのサンプルも点の数は 10 個程と少ないが相関係数はほとんど場合 0.95

以上あった。

図-3.4.5に、35サンプルについて求めた N_0 と A の散布図を示す。 N_0 は330~4200、 A は1.3~3.8で、 N_0 と A の間には相関関係はなかった。

図-3.4.6、3.4.7は、 N_0 と A が降水強度 R とどのような関係があるかを表している。相関係数はあまり大きくないが、 $N_0 = 1280 \cdot R^{0.27}$ 、 $A = 1.97 \cdot R^{-0.21}$ という関係があった。これは、雪片の空間の粒径分布は、降水強度が大きくなれば、分布の幅が広がり、全体的にも個数が増加することであることを表している。この傾向は、八木等の長岡での観測結果と一致する。

(3) 降雪時の B 、 β

雪片の粒径分布の測定結果から式(3.4.5)、(3.4.6)を用いて算出した10時06分~15時32分までの反射因子 Z と降水強度 R の散布図を図-3.4.7に示す。 Z と R の間には $Z = 4500 \cdot R^{1.76}$ という関係があり、相関係数は0.97であった。今回の B 、 β と既往の観測値との比較を表-3.4.1に示す。今回の B は既往の観測値より少し大きめの値になっている。これは、今回観測した降水強度が0.06~0.94 mm/hと小さいためと考えられる。

3.4.4 ま と め

今回の調査で次のことがわかった。

- ① 雪片の粒径分布は、 $N_D = N_0 \exp(-A \cdot D)$ という指数分布であり、 N_0 、 A と降水強度 R には、 $N_0 = 1280 \cdot R^{0.27}$ 、 $A = 1.97 \cdot R^{-0.21}$ という関係があることがわかった。
- ② 降雪時の B 、 β は、4500、1.76であることが分かった。

なお、本調査は八木・上田の「長岡における降雪粒子の $Z-R$ 関係及び粒度分布の特徴I」国立防災科学技術センター研究報告、第22号、1979年10月、に準じて実施した。

表-3.4.1 観測された B 、 β の比較

出典	観測場所	降水強度 [mm/h]	B	β
今井他 (1955)	東京		600 ~ 2400	1.8
ガン・マーシャル (1958)	モントリオール		2000	2.0
大竹他 (1970)	アラスカ		400 ~ 3300	1.5 ~ 2.3
藤原他 (1972)	金沢付近		2000 ~ 2900	1.27 ~ 1.70
武田他 (1972)	福岡		300 ~ 650	2.0 ~ 2.7
由田 (1975)	札幌		1400	1.1
八木・清野 (1978)	長岡	0.013 ~ 11.0	1200	1.3
八木・上田 (1979)	長岡	0.031 ~ 4.3	2600	1.8
八木・上田 (1980)	長岡	0.013 ~ 11.0	1600	1.4
筆者等 (1981)	長岡	0.063 ~ 1.94	4500	1.76

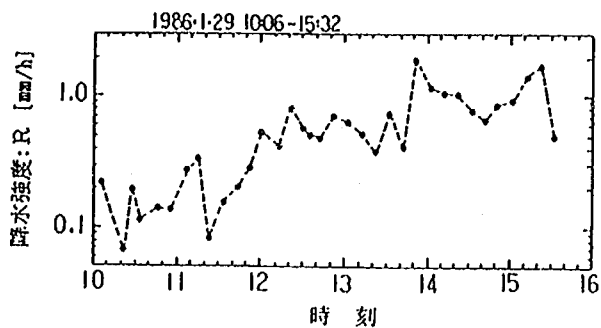


図-3.4.3 降水強度の時間変化図

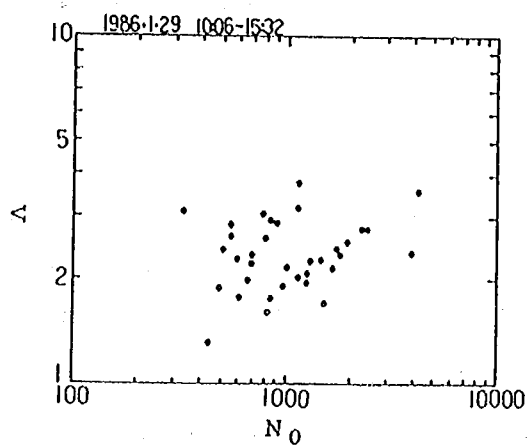


図-3.4.5 N_0 と A の散布図

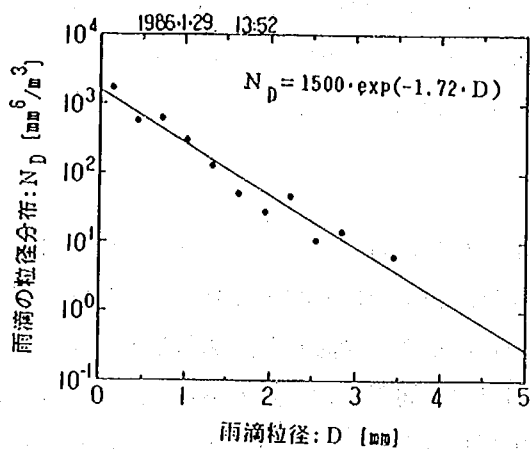


図-3.4.4 雪片の粒径分布 (13時52分)

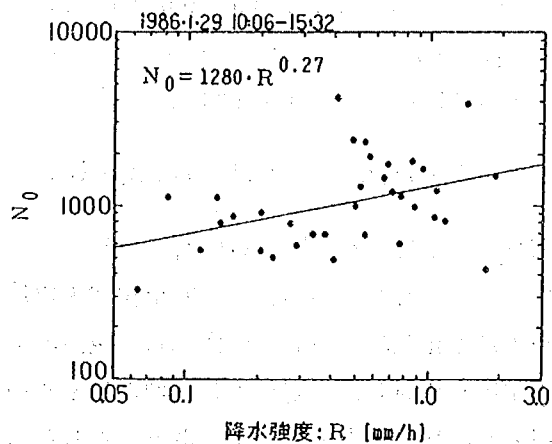


図-3.4.6 N_0 と降水強度 R の関係

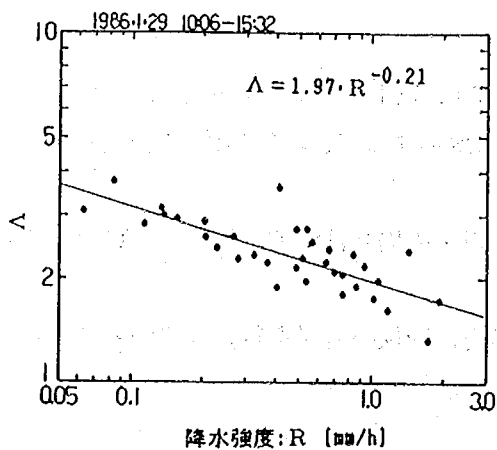


図-3.4.7 A と降水強度 R の関係

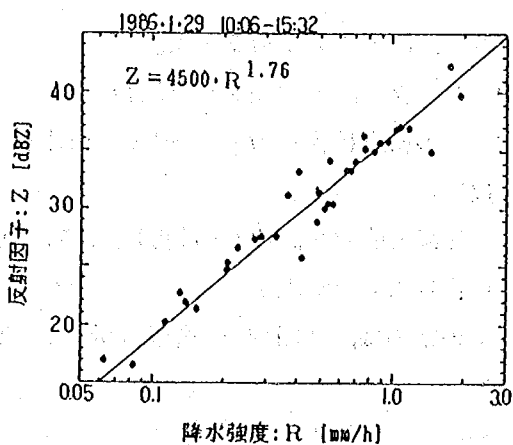


図-3.4.8 反射因子 Z と降水強度 R の関係

3.5 レーダによる降雪観測のための基礎調査

3.5.1 はじめに

降雪エコー頂は、降雨エコー頂に比べ、低いと言われている。そこで、レーダで降雪観測を行う場合の適切なビーム高度の検討を行う必要がある。また、レーダで観測する降水量から現業で必要としている積雪深に変換するため、雪の密度を検討する必要がある。さらに、降雨と降雪では B 、 β が異なるためその判別基準について検討する必要がある。ここでは、これらのレーダによる降雪観測を行うための基礎調査を行った。

3.5.2 レーダのビーム高度の検討

気象庁秋田レーダの観測結果を用いて、降雪時におけるエコー頂高度の頻度分布を作成し、降雪観測を行う場合のレーダのビーム高度の検討を行った。

図-3.5.1がエコー頂の頻度分布である。平均エコー頂高度は、降水強度が $0.6 \sim 2.0 \text{ mm/h}$ の場合 $2800 \pm 700 \text{ m}$ 、降水強度が $2.0 \sim 6.0 \text{ mm/h}$ の場合 $3700 \pm 900 \text{ m}$ 、降水強度が $6.0 \sim 18.0 \text{ mm/h}$ の場合 $4700 \pm 800 \text{ m}$ であった。これから、降水強度 0.6 mm/h 以上の降雪時に正確にレーダで降雪量を測定するにはビーム高度を 2000 m 以下にする必要があることがわかった。

3.5.3 雨雪の判別基準及び雪の密度の検討

降雪時と降雨時は同じ降水量に対するレーダ反射電力が異なるため、レーダで観測する場合は雨か雪の判別を行う必要がある。そこで昭和58年12月～59年3月、59年12月～60年3月の8ヶ月間の降水量と積雪深の相関図を気温別に作成し、気温による雨雪の判別基準を検討した。あわせて、相関図より雪の密度も検討した。対象とした地点は東北地方のAMeDAS観測所10地点である。図-5.3.2は秋田県本荘の観測地点の相関図である。これから、気温が 0°C 以下の場合は雪である。気温が $3^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ の間の場合は雪 or 雨であることがわかる。表-5.3.1は温度別の降雪深～降水量の相関図より求めた雪の密度の一覧表である。雪の密度はほぼ 0.07 g/cm^3 であることがわかる。

3.5.4 まとめ

本調査で、次のことが分かった。

- ① レーダで降雪観測を行う場合、ビーム高度は 2000 m 以下にする必要がある。
- ② 雪の密度は約 0.07 g/cm^3 で、降水量を積雪深に変換する場合は約14倍($1/0.07$ 倍)すれば良い。
- ③ 気温で降雪か降雨かの判別ができ、気温が 0°C 以下の場合は雪で、気温が $3^\circ\text{C} \sim 0^\circ\text{C}$ の間の場合は雪 or 雨である。

ここでの結論は、秋田地方の結果であり、他地方の場合は同様の検討を行えば求めることができる。

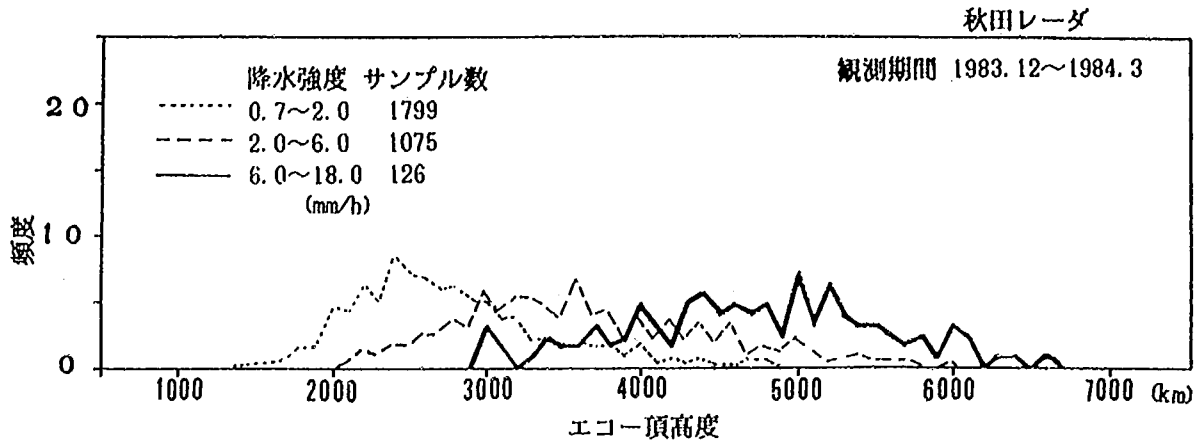


図-3.5.1 エコー頂頻度の頻度分布

表-3.5.1 AMeDAS 地点での雪の密度 (東北地方)

気 温	1~0	0~-1	-1~-2	-2~-3	-3~-4	-4~-5	-5~
今 別	0.13	0.08	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07
碓 ケ 関	0.13	0.07	0.06	0.07	0.07	0.05	0.06
本 荘	0.16	0.07	0.06	0.06	0.07	0.04	0.05
横 手	0.08	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05
奥 中 山	0.09	*	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06
川 渡	0.12	0.07	0.07	0.07	0.07	*	*
狩 川	0.13	0.07	0.07	0.05	0.05	0.04	0.06
左 沢	0.08	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06
猪 苗 代	0.10	0.06	0.06	0.07	0.05	0.06	0.05
只 見	0.11	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.07

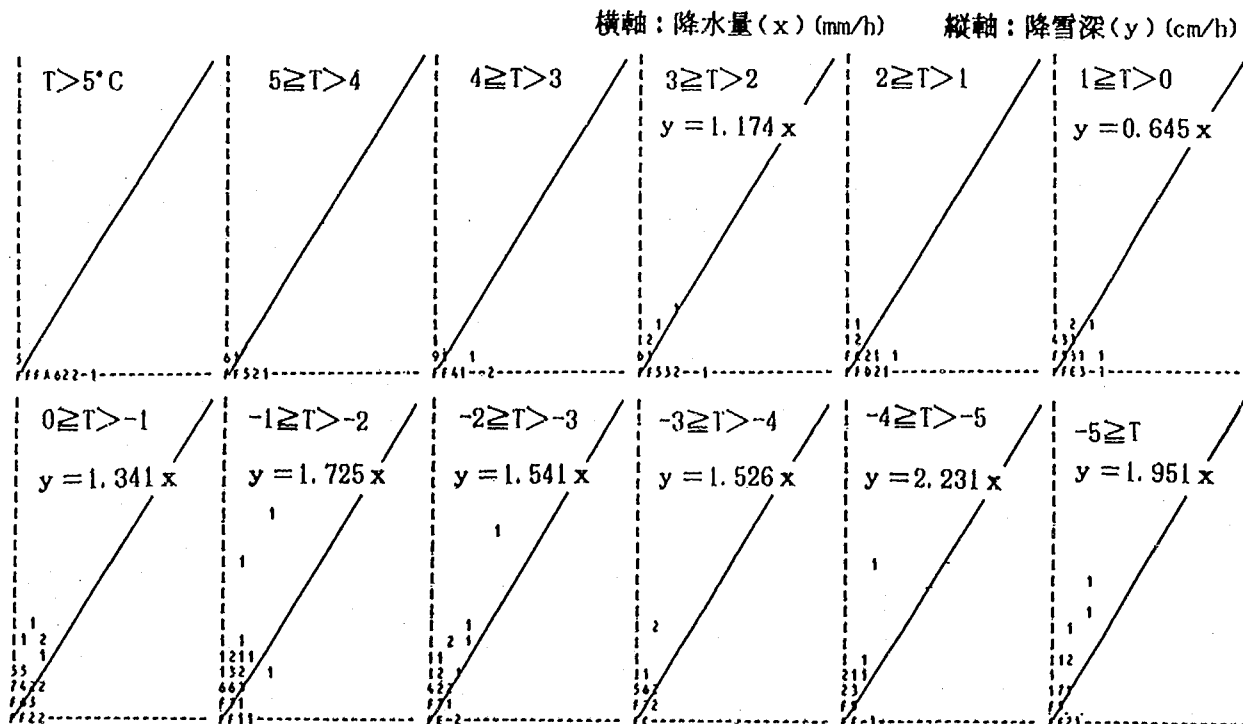


図-3.5.2 降水量と積雪深の気温別相関図 (秋田県本庄)

3.6 ま と め

第3章では、レーダによる降雪観測手法の開発を行うため、降雪観測時のサンプリング方法の検討、DNDレーダと宝達山レーダの降雪量の測定精度の評価、パラボラ面への着雪の影響の検討、降雪粒子特性からみた B 、 β の検討、レーダによる降雪観測を行うための基礎調査を行った。これらから、次のことが分かった。

- ① サンプリング方法による反射因子の測定誤差（相対誤差及び標準偏差）は、データ収集時間の合計とは一義的な関係がないが、データを収集しない時間間隔と線形の関係がある。また、反射因子を10%の精度で測定するには、データ収集間隔（データを収集しない時間間隔）を3分間以内にする必要がある。
- ② 地域平均した降雪量で、DNDレーダ値と地上値を比較すると、相関係数は0.8以上と良く、DNDレーダで降雪量の定量観測は可能であると言える。
- ③ パラボラ面への着雪の影響は、電波の減衰という面では見られなかった。しかし、アンテナパターンが変形することもあると考えられるので、今後パラボラ面への着雪が減少する対策が必要である。
- ④ 降雪粒子から見た B 、 β は、4500、1.8であった。また、降雪粒子の粒径分布は指数分布に従うことが分かった。
- ⑤ 精度の良い降雪観測を行うには、レーダのビーム高度を2000 m以下にする必要がある。また、降水量から積雪深に換算するには $1/0.07$ 倍（= 14倍）すれば良い。

現在までに得られたデータが少なく、第3章で得られた結論はある数事例による結論である。したがって、今後、DNDレーダによる降雪観測を継続し、解析結果を見直す必要がある。また、偏波特性やドップラ特性を生かした観測方法を検討する必要がある。

第4章 DNDレーダによる降雨観測

4.1 降雨観測事例

4.1.1 はじめに

昭和62年6月17日から7月30日の梅雨入り期間に、富山県立山町で行った、DNDレーダによる降雨観測のうち主な観測事例を紹介する。ここで、紹介する観測例は次の通りである。

- ① 偏波モードによる晴天時の観測（6月17日10時）
- ② 偏波モードによるブライトバンドの観測（7月14日16時）
- ③ ドップラモードによる前線性降雨の観測（6月20日9時）

4.1.2 偏波モードによる晴天時の観測例

偏波モードの晴天時の観測結果は、大地クラッタの大きさを表し、これから降水強度の測定可能範囲が分かる。データの表示範囲は80 km * 80 kmである。

図-4.1.1は6月17日10時17分の仰角3°の Z_H のPPI図（5分間平均値）である。レーダサイトは標高約30 mの平野部に位置するため、仰角3°で観測するとレーダサイトの西側に立山連峰、南側に県境の山岳が位置するため、レーダ画像の右下半分は大きな大地クラッタがある。直接、山岳に電波が衝突しているため、大地クラッタは50 dBZ以上になる。また、サイドローブからの反射電力のため、富山市内に最高40 dBZ程度の大地クラッタがある。したがって、地上値とレーダ値の降水強度の比較は、レーダサイトから南西部の平野部が望ましい。

表-4.1.1は、 $B=200$ 、 $\beta=1.6$ として求めた、反射因子 Z のランク分けと降水強度の関係を示している。ランクが1つ上がる毎に降水強度は $\sqrt{2}$ 倍になる。

表-4.1.1 反射因子 Z のランクと降水強度の関係

ランク	反射因子強度 [dBZ]	降水強度 [mm/h]	ランク	反射因子強度 [dBZ]	降水強度 [mm/h]
1	～18.5	～0.50	9	34.3～36.6	5.7～8.0
2	18.5～20.8	0.50～0.71	10	36.6～38.8	8.0～11.3
3	20.8～23.0	0.71～1.00	11	38.8～41.1	11.3～16.0
4	23.0～25.3	1.00～1.41	12	41.1～43.3	16.0～22.6
5	25.3～27.5	1.41～2.00	13	43.3～45.6	22.6～32.0
6	27.5～29.8	2.00～2.83	14	45.6～50.1	32.0～64.0
7	29.8～32.0	2.83～4.00	15	50.1～	64.0～
8	32.0～34.3	4.00～5.66			

4.1.3 偏波モードによるブライトバンドの観測例

7月14日16時～17時において、高度4000 m～5000 mの地帯にブライトバンドが発生した。この

とき、偏波面を高速（1秒間に約30回）に切り替えて、RHI観測を行ったので紹介する。反射因子 Z のランク分けと降水強度の関係は、表-4.1.1に示す通りである。

図-4.1.2は7月14日16時13分の仰角 11° の Z_H のPPI図（1分間平均値）である。レーダサイトから約20 km地点（高度約4000 m）にブライトバンドが発生していることが分かる。反射因子は40～50 dBZである。

図-4.1.3は7月14日16時26～33分の仰角 $3 \sim 21^\circ$ 方位 226° の Z_H のRHI図である。観測は、偏波面を高速（1分間に約30回）に切り替えて、仰角 $3 \sim 21^\circ$ を 2° 刻みで行った。表示したデータは9パルス平均データを256個平均したものである。1仰角のデータを収集するのに約1分間要した。これから、高度4000 m～5000 m地点にブライトバンドがあることが分かる。ブライトバンド地点の反射因子は40～50 dBZである。ブライトバンドの下の降水強度は2.0～10.0 mm/h程度である。

図-4.1.4は7月14日16時26～32分の仰角 $3 \sim 21^\circ$ 方位 226° の Z_{DR} のRHI図である。図-4.1.3と同時刻データである。 Z_{DR} の値は0.3～1.5 dBで、ブライトバンド地点で Z_{DR} の値が変化するという傾向はなかった。これは、降水強度が弱いためと考えられる。

4.1.4 ドップラモードによる前線性降雨の観測例

6月20日8時30分頃、北西から冷たい空気が下層に吹き込み降雨が発生するという前線性降雨が発生した時に、ドップラモードで観測を行ったので紹介する。データの表示範囲は40 km * 40 kmである。

図-4.1.5は6月20日8時40分の仰角 20° の V のPPI図である。レーダサイトから5 km以上離れた地点では、風は南風で、速度の折り返し現象が現れているので、風速は16.0 m/s以上であることが分かる。

図-4.1.6は6月20日8時35～41分の高度800 mの V のCAPPI図である。これは、仰角 $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ の7仰角の観測結果から作成したものである。高度800 mでの風向・風速は、北西10 m/s程度で、仰角 20° の観測結果と異なる。

図-4.1.7は6月20日8時35分～41分の方位 315° （北西）の V のRHV図である。これは、仰角 $3^\circ, 5^\circ, 7^\circ, 9^\circ, 12^\circ, 20^\circ, 50^\circ$ の7仰角の観測結果から作成したものである。これから、高度1000 m以下と2000 m以上で風向が逆転していることが分かる。

図-4.1.8は6月20日8時35～41分の上空の水平風の鉛直プロファイルである。これは、VAD解析から求めた各仰角の高度毎の風向・風速である。これから、高度1000 m以下では風向が北北西、風速が5 m/sで、高度2000 m以下では風向が南、風速が10～35 m/sであることが分かる。

したがって、このときの降雨は寒冷前線によるものであることが分かる。

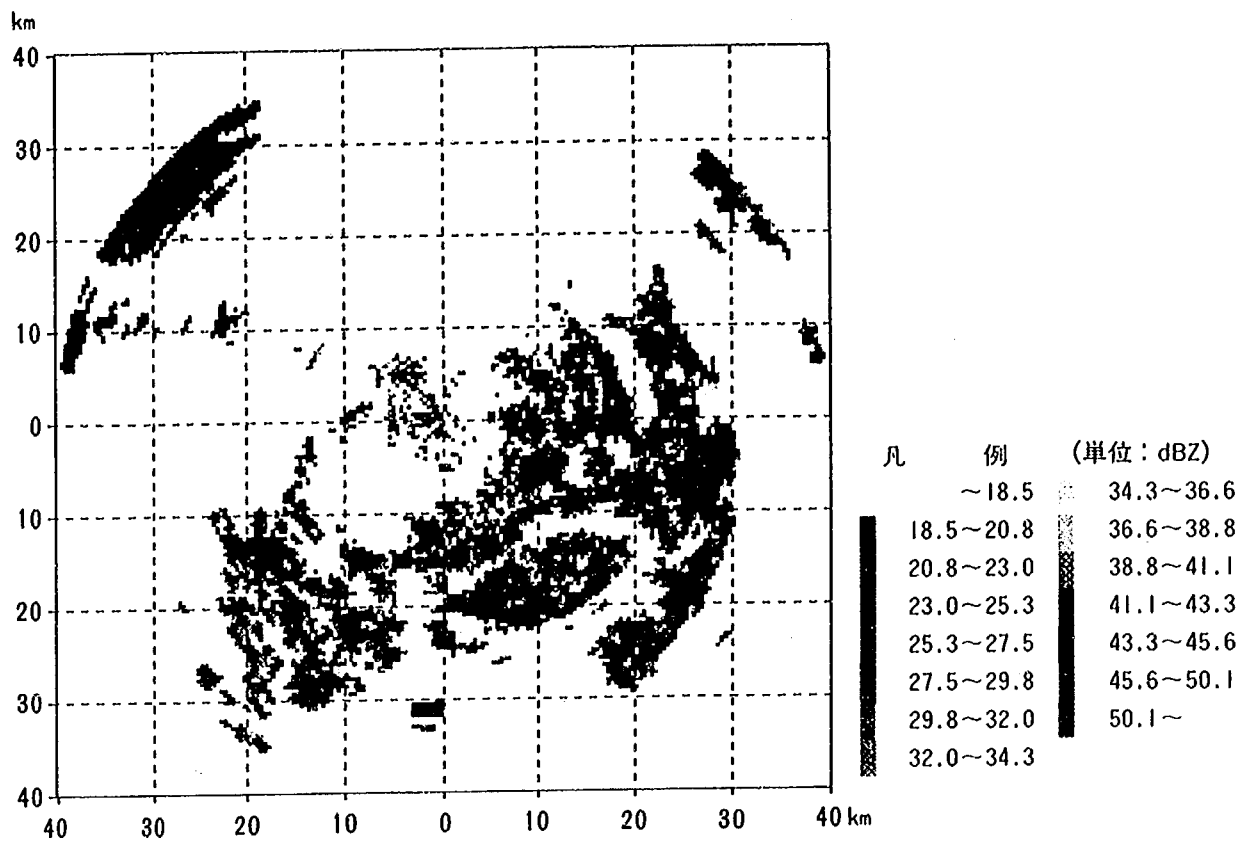


図-4.1.1 Z_H の P P I 図

(昭和62年6月17日10時17分, 仰角 3°, 5 分間平均値)

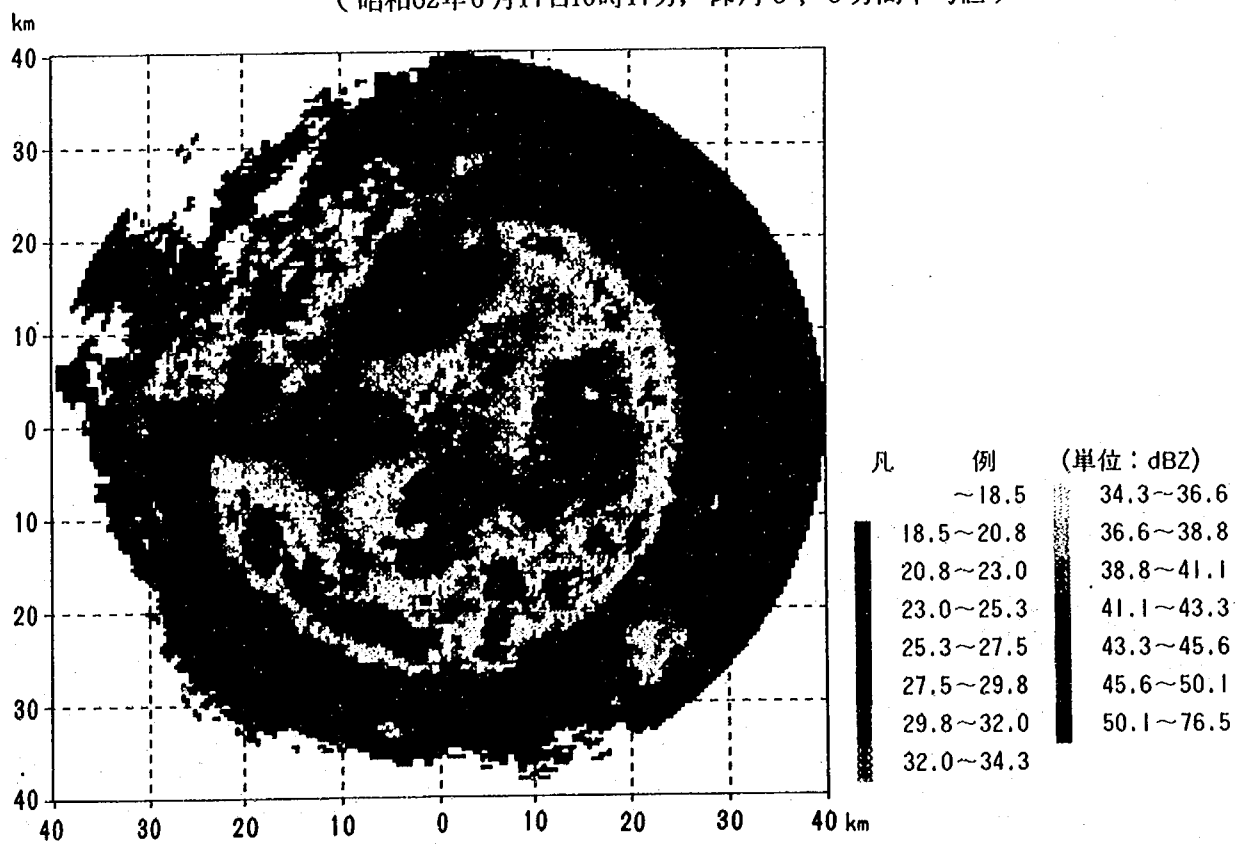
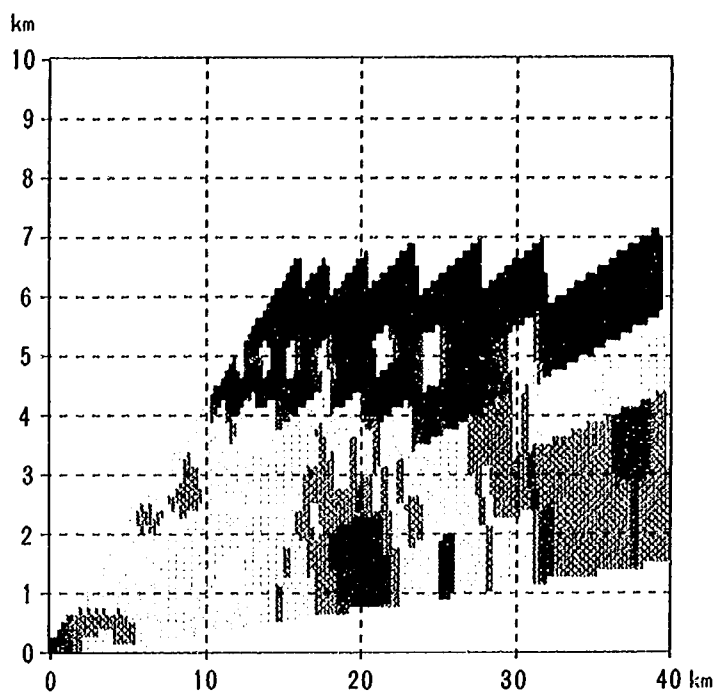


図-4.1.2 Z_H の P P I 図

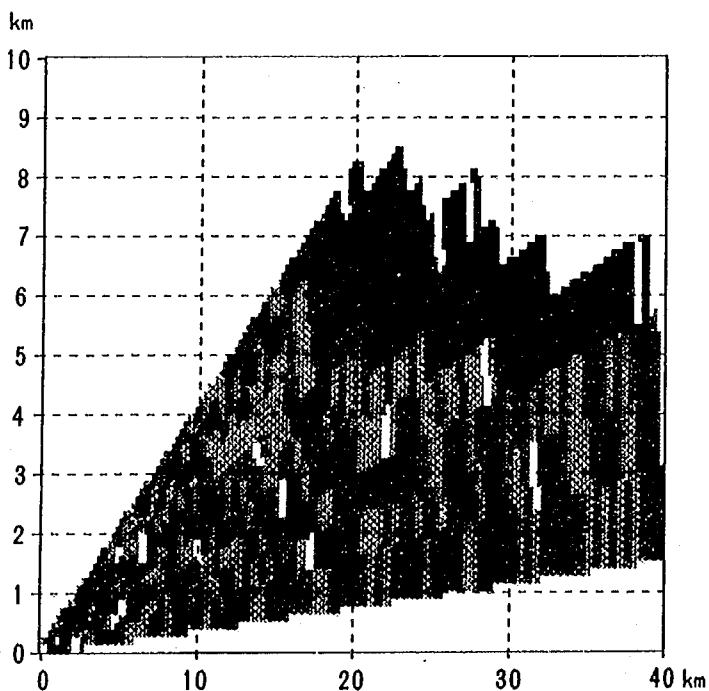
(昭和62年7月14日16時13分, 仰角 11°, 1 分間平均値)



凡	例	(単位: dBZ)
	~18.5	34.3~36.6
	18.5~20.8	36.6~38.8
	20.8~23.0	38.8~41.1
	23.0~25.3	41.1~43.3
	25.3~27.5	43.3~45.6
	27.5~29.8	45.6~50.1
	29.8~32.0	50.1~
	32.0~34.3	

図-4.1.3 Z_H のRHI図

(昭和62年7月14日16時26~32分, 仰角 3~21°, 方位 226°)



凡	例	(単位: dB)
	~-5.0	1.2~1.5
	-5.0~-2.0	1.5~2.0
	-2.0~-1.0	2.0~2.5
	-1.0~-0.3	2.5~3.0
	-0.3~0.3	3.0~4.0
	0.3~0.6	4.0~5.0
	0.6~0.9	5.0~
	0.9~1.2	

図-4.1.4 Z_{DR} のRHI図

(昭和62年7月14日16時26~32分, 仰角 3~21°, 方位 226°)

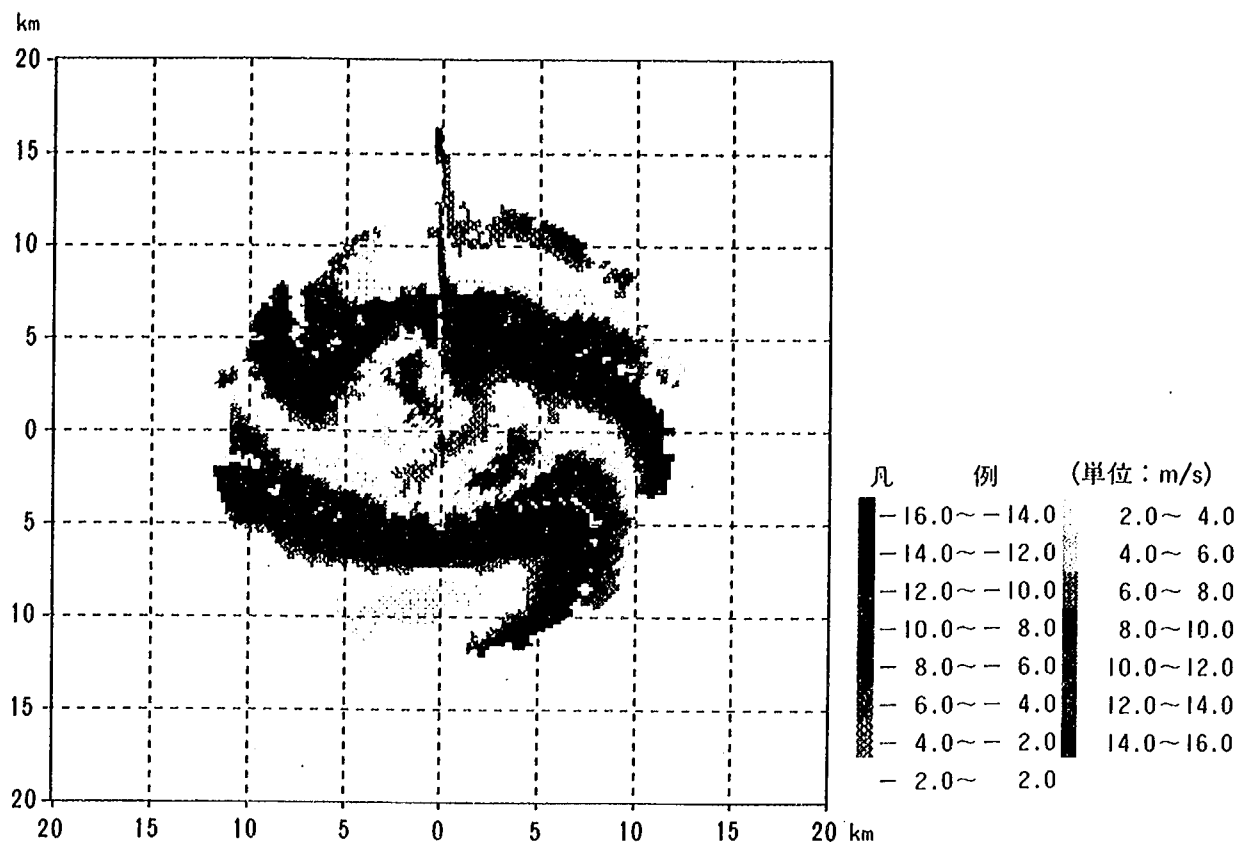


図-4.1.5 VのPPI図

(昭和62年6月20日8時40分, 仰角 20°)

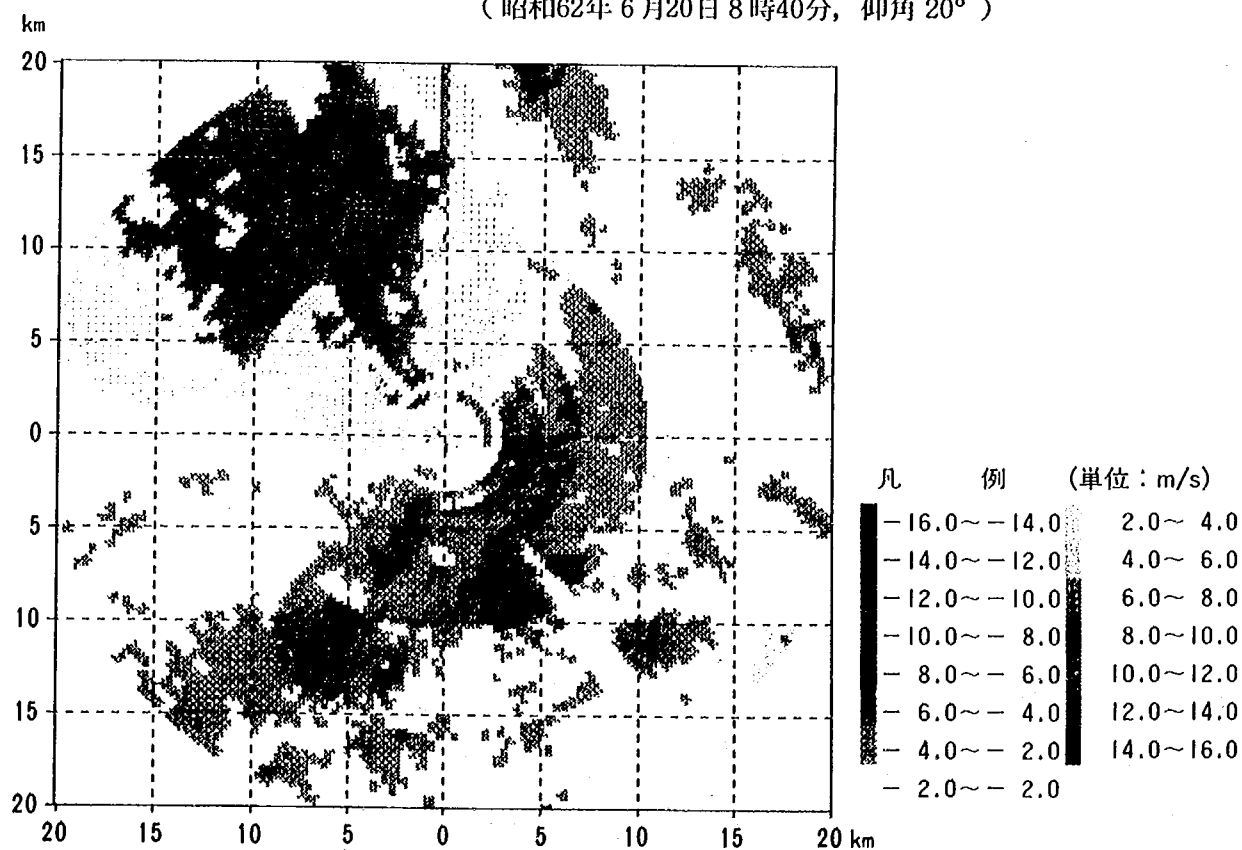
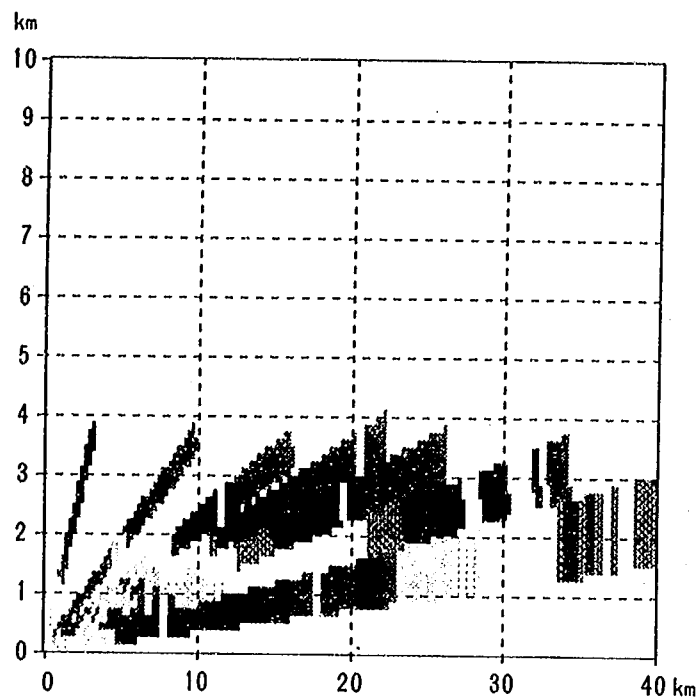


図-4.1.6 VのCAPPPI図

(昭和62年6月20日8時35~41分, 高度 800 m)



凡	例	(単位: m/s)
-16.0~-14.0	2.0~ 4.0	
-14.0~-12.0	4.0~ 6.0	
-12.0~-10.0	6.0~ 8.0	
-10.0~- 8.0	8.0~10.0	
- 8.0~- 6.0	10.0~12.0	
- 6.0~- 4.0	12.0~14.0	
- 4.0~- 2.0	14.0~16.0	
- 2.0~- 2.0		

図-4.1.7 VのRHV図

(昭和62年6月20日8時35~41分, 方位 315°)

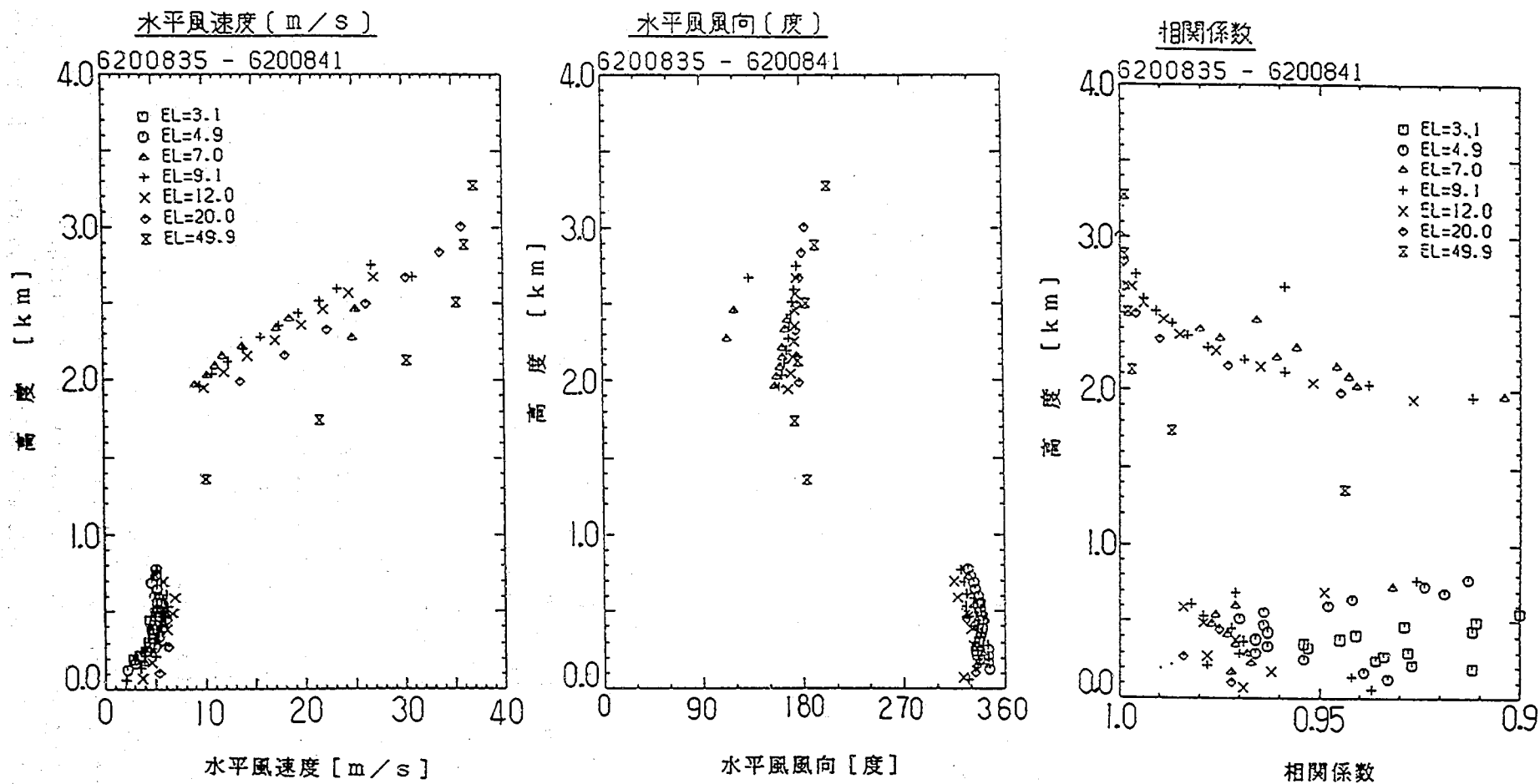


図-4.1.8 上空の水平風の鉛直プロファイル (6月20日8時35~41分)

4.2 DNDレーダの較正

4.2.1 はじめに

レーダ方程式は、一般に次式で表される。

$$P_r = C \cdot F \cdot Z / r^2 = C \cdot F \cdot B \cdot R^\beta / r^2 \quad \dots\dots\dots (4.2.1)$$

ここで、 C はレーダ定数、 F は補正係数、 Z は反射因子、 B 、 β は降雨換算定数、 r はレーダサイトからの距離である。

補正係数は、レーダビームが完全に雨域に覆われていても、次の5つのレーダ方程式上の仮定及び近似のため、おおよそ $1/2 \sim 1/8$ になると言われている。

- ① 雨滴の後方散乱は、レーレ近似が成り立つ。
- ② 雨滴は、球形である。
- ③ 雨滴はエコー体積中でまったくでたらめに配置している。
- ④ Z は地上からレーダビームまで一様である。
- ⑤ 雨滴は自由落下する。

既存型レーダ雨量計で降雨量を算出する場合は、 $B' = F \cdot B$ として、地上降雨量とレーダ降雨量を対比して、 B' 、 β を推定しているため、補正係数を厳密に求める必要がない。

しかし、二重偏波レーダによる降雨量の測定は、 Z_H と Z_{DR} の値を用いて行うため、 C 項及び F 項を厳密に求めておく必要がある。そこで、 C 項及び F 項について検討した。その上で、 Z_{DR} の値は0.1dBの精度で測定する必要があるので、 C 項及び F 項を求めたのち、 Z_{DR} のオフセットについて検討し、 Z_V の F 項を修正した。

4.2.2 C 項

C 項は、導波管等の損失も含めると、次式で表される。

$$C = \frac{P_t \cdot G_0^2 \cdot h \cdot \theta \cdot \phi \cdot \pi^3}{2^{10} \cdot (\log_e 2) \cdot r^2 \cdot \lambda^2} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \cdot L \quad \dots\dots\dots (4.2.2)$$

ここで、 P_t : 送信尖頭電力

G_0 : 空中線利得

h : 送信パルス幅

θ : メインローブにおける G_0 の半値角 (水平面内)

ϕ : メインローブにおける G_0 の半値角 (垂直面内)

r : 目標体積までの距離

λ : 波長

ϵ : 複素誘電率

L : 導波管等の損失

C 項はレーダ固有の諸特性及び降水粒子の電気的性質により決まる値である。導波管等の損失を図-4.2.1に、DNDレーダにおけるこれらの値を表-4.2.1に示す。これから、 C 項は、水平偏波(二重偏波モード)で153.58 dB、垂直偏波(二重偏波モード)で154.07 dB、水平偏波(ドップラモード)

で 147.56 dB である。

4.2.3 F 項

レーダ方程式における補正係数は、①雨滴の後方散乱はレーレー近似が成り立つ、②雨滴は球形である。③雨滴はエコー体積中でまったくでたらめに配置している、④Zは地上からレーダビームまで一様である。⑤雨滴は自由落下する、等のレーダ方程式を導出する上での仮定（近似）によって生ずる項である。したがって、受信電力からレーダ方程式を用いて反射因子を知ろうとする場合には、こ

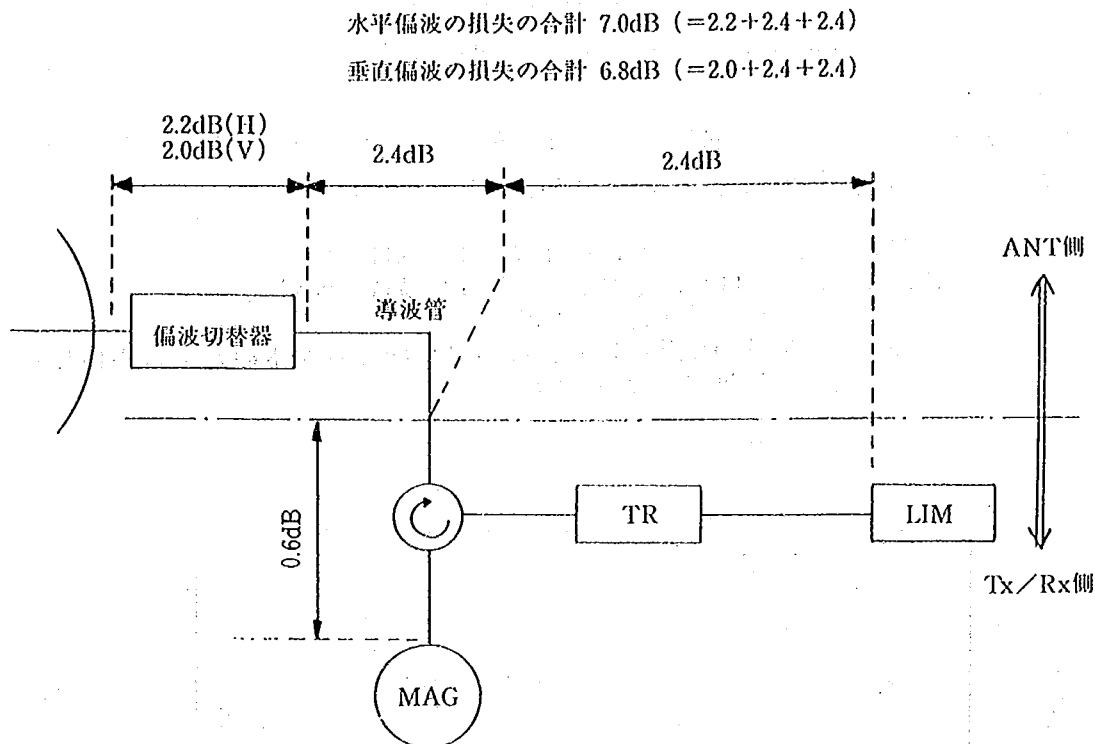


図-4.2.1 導波管等の損失

表-4.2.1 DNDレーダのC項

項 目	水平偏波 二重偏波	垂直偏波 二重偏波	水平偏波 ドップラ
P_t : 送信尖頭電力 (kw)	75.0	75.0	68.2
G_0 : 空中線利得 (dB)	36.6	36.7	36.6
h : パルス幅 (m)	600	600	150
θ : 水平ビーム幅 ($^{\circ}$)	1.80	1.78	1.80
ϕ : 垂直ビーム幅 ($^{\circ}$)	1.76	1.82	1.76
λ : 波長 (cm)	5.68	5.68	5.68
$ \epsilon - 1 / \epsilon + 2 ^2$	0.93	0.93	0.93
導波管等の損失 (dB)	-7.0	-6.8	-7.0
C 項 (dB)	153.58	154.07	147.56

の項を予め求めておく必要がある。ここでは、地上雨量とレーダ雨量値を対比することにより、補正

係数 F を算出する。

(1) $Z \sim R$ 図

図-4.2.2 は、1987年6月から9月の観測データを用いて作成した水平偏波による反射因子 Z_H と降水強度 R の散布図である。

これより、 Z_H と R との間には、次式の関係がある。

$$Z_H = 34.811 R^{1.6}$$

なお、使用したデータは、昭和62年6月20日、7月12日、9月18日の3降雨48時間の8観測所の1時間降雨量を用いた。また、レーダ降雨量は、地上観測所直上の5*5メッシュ平均値を用いた。1メッシュは1.4°*500mの極座標である。10km地点で0.25 km*0.5 kmになる。

(2) 補正係数

一般に B 、 β は降雨要因によって異なった値を示すが、多くの場合 $B = 200$ 、 $\beta = 1.6$ になることが多い。したがって、今回の観測においても、この値になるとして補正係数を決定すると、補正係数 F

- +印 : 反射因子 Z_H 及び降水強度 R の対数平均、
- 直線 ℓ_1 : 最小自乗法で B 、 β を求めた場合の回帰式
($B=36.536$, $\beta=1.540$)
- 直線 ℓ_2 : $\beta=1.6$ と固定して、最小自乗法で B を求めた場合の回帰式
($B=34.811$, $\beta=1.6$)

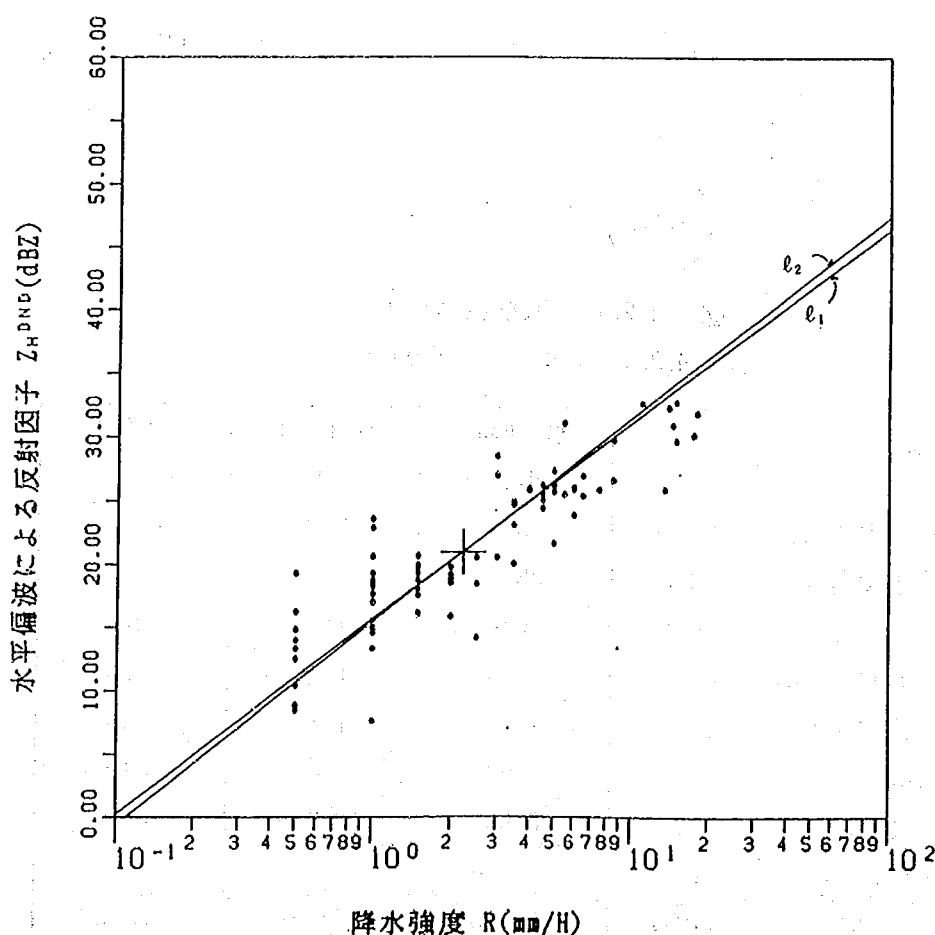


図-4.2.2 $Z \sim R$ 図

は $1/5.74 (= 34.811/200)$, つまり -7.59 dB になる。

4.2.4 Z_{DR} の較正值

(1) 概 要

二重偏波レーダを用いて水平偏波と垂直偏波の反射因子 Z_H と Z_V 間の反射因子差 Z_{DR} を測定しようとする場合、水平偏波時と垂直偏波時での観測機器の特性の相違等から Z_{DR} 値にオフセット値が生じる。この場合、真の Z_{DR} 値は、観測によって得られる値からこのオフセット値を取り除いたものである。従って、 Z_{DR} 値を利用しようとする場合、予め Z_H と Z_V 間に存在するオフセット値を同定することが必要となる。

(2) オフセット値の同定方法

二重偏波レーダにより観測される Z_{DR} 値は、上空より落下する雨滴の偏平率を把えるものであるから、アンテナを真上 ($EL=90^\circ$) に向けて観測を行った場合には、受信強度は偏波面に依らず一定の値となり、そこから得られる Z_{DR} 値は 0 になる。従って、もしこの時、 Z_H と Z_V の値に相違が生じる場合には、その差が観測機器固有のオフセット値を表す。

このことにより、次に述べる方法を用いてオフセット値の測定を行った。①まず、アンテナを真上に向け、水平、垂直偏波を高速に (1 秒間に約 30 回) 切換えながら上空より落下する雨滴の観測を行う。②また、風の影響により雨滴がある特定の方向に傾斜する場合を考慮して、方位角を一定の速度 (約 0.42 r.p.m) で変化させながらデータの収集を行う。③このようにして得られた Z_{DR} 値を平均することによってオフセット値を求める。

(3) 観測結果

上記の方法に従い、1987 年 10 月 17 日 12 時 56 分より同 15 時 21 分までの間約 2 時間 25 分にわたり降雨

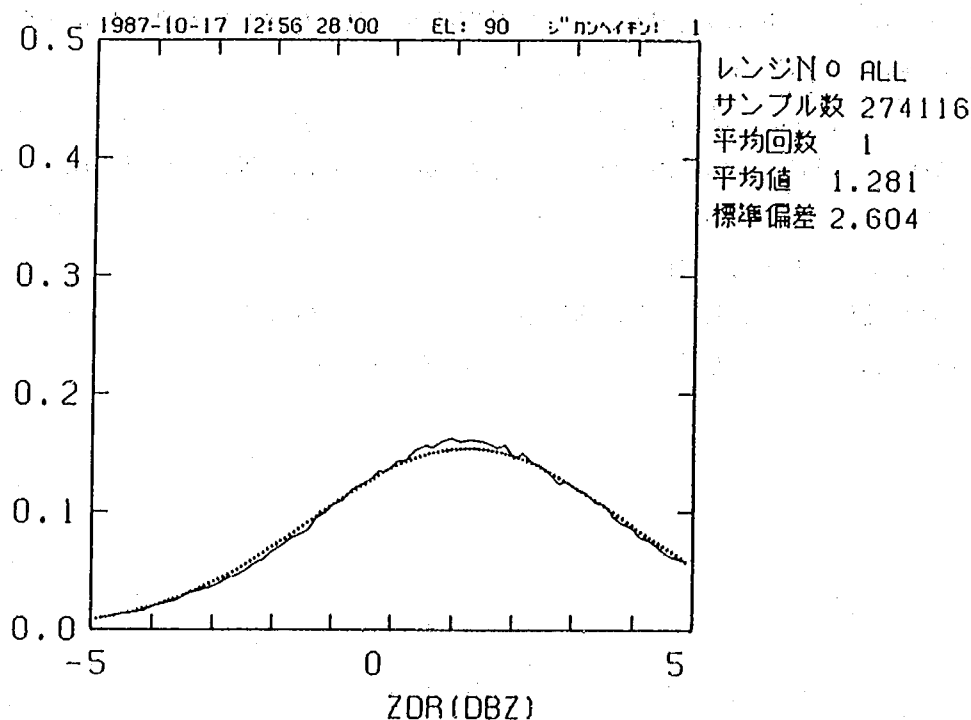


図-4.2.3 Z_{DR} 値の確率密度分布

の観測を行った。観測時の気象状況は、天候：雨、当日 13 時から 15 時までの降水量：1.5 mm，風速：7～13m，風向：WSW であった。

使用したデータは、降水強度が 0.2 mm/h 以上、受信電力が -100 dB 以上、観測高度が 500 m～3500 m の条件を満足するもののみ用いた。

Z_{DR} 値の確率密度分布図を図 4.2.3 に示す。データ数は 274116 個であり、その平均値は 1.28 dB，風速：7～13m，風向：WSW であった。

図中点線で示した曲線は、正規分布曲線である。

本来ならば、アンテナを真上に向けて Z_{DR} の観測を行った場合、 Z_{DR} の平均値は 0 でなければならない。しかし、実際にはこのデータに示されているように約 1.28 dB の Z_{DR} 値が観測された。この値は即ち Z_H と Z_V の間に存在するオフセット値であるといえる。したがって、 Z_{DR} 値を扱う場合には 1.28 dB の補正を行う必要がある。

4.2.5 ま と め

以上の結果から得られた DND レーダにおける補正係数 F は、表 4.2.2 に示すとおり、水平偏波が 7.59 dB，垂直偏波が 8.87 dB である。

表 4.2.2 補正係数

	水平偏波 二重偏波	垂直偏波 二重偏波	水平偏波 ドップラ
地上値とレーダ値の対比 (dB)	7.59	7.59	7.59
Z_{DR} 値のオフセット (dB)	—	1.28	—
F 項 (dB)	7.59	8.87	7.59

なお、ここで行った補正係数の同定方法は気象及び観測状況に左右される要素が大きく、ここで求めた補正係数は必ずしも絶対的な値では有り得ない。

Z_H の補正值について言えば、地上降雨量を対比して求めた B ， β の値が 200，1.6 になるとして決定している。しかし、本来 B ， β は降雨条件により値が異なる。検討に用いた降雨の B ， β がこの値と大きく異なる場合には、今回求めた補正係数が真の値とは異なった値となる。その意味から、更に多くの観測を行った上で補正係数の見直しを行う必要がある。

また、 Z_{DR} の補正值においては、鉛直方向に落下してくる雨滴から得られる Z_{DR} 値の統計的な値から求めたものであり、 Z_H の補正值と同様に、更にその観測データを増す必要がある。

4.3 Z_{DR} の算出方法と測定精度

4.3.1 はじめに

レーダを用いて降水強度を測定しようとする場合、降水粒子に向けて電波を発射し、その後方に散乱される電波の受信強度を測定することになる。しかし、降水粒子の位置は時間と共に不規則に変動しているため、そこから得られる受信信号もパルス毎に不規則に変動した値となって表れる。このように、パルス毎に異なるレーダ受信信号を用いて、水平偏波による反射因子 Z_H と垂直偏波による反射因子 Z_V の差 Z_{DR} を算出する場合、 Z_{DR} の変動は、 Z_H 、 Z_V それぞれの変動が加算されて、更に大きな値となる。もともと Z_{DR} の値自体が小さいものであるため、この変動値は、 Z_{DR} を用いて降水強度の算出を行う際の誤差の大きな要因となる。

現在、これらの値 (Z_H 、 Z_V 、 Z_{DR}) の変動を取り除くために、降水強度は短時間内では一定であると見なしてデータの平均を行っているが、この問題は測定誤差に関わることであり、データの平均によってどの程度の観測精度が得られるのか調べておく必要がある。本節では、所定の精度で Z_{DR} 値を得るのに必要とされるデータ平均個数について検討を行い、また、データ平均後の Z_H と Z_{DR} との間の相関について述べる。

なお、検討に用いたデータは、昭和62年7月～10月の間土木研究所二重偏波ドップラレーダを用いて行った降雨観測によるものである。

4.3.2 レーダ受信信号の変動特性について

(1) パルス毎に得られる受信信号の特性

レーダにより降雨を観測する場合、降雨から得られるレーダ受信信号はレーダビーム内に存在する個々の雨滴によって反射された信号の和として与えられる。また、これらの雨滴は空間に不規則に分布していると考えられるため、そこから得られる受信信号は、ランダムに変動する雑音信号として与えられる。この信号を周波数変換、中間周波増幅、直線検波した後得られる出力信号が取る値の確率密度分布は、レイリー分布によって表される。一方、空間に分布する雨滴の位置は時間と共に変化するため、レーダパルス毎に見た雨滴の空間分布は、相互に相関が無く独立したものであると見なしてよい。従って、パルス毎に得られるレーダ受信信号も、それぞれ独立した不規則に変化する値となる。よって、その値の取る確率密度分布もレイリー分布により表される。

一般に、ある確率密度分布を持つ値は、平均数を増すと共に正規分布に近づいていく。従って、パルス毎に異なる値を持つレーダ受信信号も、データの平均化によって正規分布に近くなると考えられる。DNDレーダでは、データを収録する際にあらかじめ、9パルス、2レンジビン毎に平均を行っている。つまり、そこから得られるデータは18個のサンプル値の平均値となる。このことから、DNDレーダにより得られるデータが取る値の確率密度分布は、正規分布に近いものであると考えられる。

なお、以下検討を行うデータはこの平均後のデータを1データとして取り扱っている。

(2) レーダ受信信号の時間変化

まず、DNDレーダによって得られるデータが、どの程度変動するのかを調べるために、次に示す方法により降雨の観測を行った。

- ① 降雨からの連続データを得るために、アンテナを降雨域方向に向けて、方位角と仰角を固定する。
- ② アンテナから発射される電波の偏波面を、水平方向と垂直方向に9パルス毎（約0.04秒毎）に切り替えて観測する。
- ③ データは、9パルスの平均値とし、そのサンプリング間隔は、約0.08秒である。

以下に述べるデータは、全てこの方法によって観測されたものを用いている。

観測によって得られた、反射因子 Z_H 、 Z_V 及びその差 Z_{DR} の時間変動を図-4.3.1に示す。この値は、レーダサイトからある距離の地点を選び出し、その地点における受信信号の時系列データを示したものである。この図から分かるように、降雨から得られたレーダ受信信号は、緩やかに変化する降水強度信号にデータ毎に変動する不規則な雑音信号が加った値となって表れている。

一方、 Z_{DR} においては、雑音信号の振幅が卓越しており、ほとんど降水強度信号による変動が認められない。このことから、 Z_{DR} 値を扱う場合には、レーダ受信信号に含まれる雑音信号の除去が是非とも必要であることが分かる。

通常、この雑音信号を取り除くためにデータを平均する方法が用いられている。そこで、データの平均によってレーダ受信信号がどの様に変化するかを調べるために、時間軸方向に移動平均を行った場合の信号の時間変動を調べた。その結果を、図-4.3.2に示す。これより、移動平均を行うデータ数を増すことにより、雑音信号の振幅が減少していくのが分かる。また、雑音信号による変動は、256個のデータを平均することにより、ほとんど取り除かれている。

(3) レーダ受信信号の周波数解析

次に、レーダ受信信号の変動の特徴を把握するために信号の周波数解析を試みた。

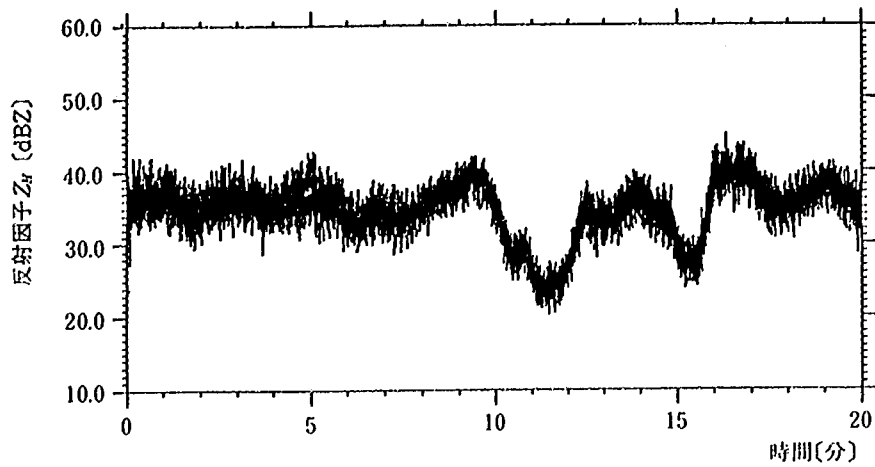
周波数解析とは、時間とともに変化する量の変動特性を知るための方法の一つであり、その変動にはどのような周波数成分がどの程度含まれているかを知るものである。いま、時間 t を変量とした関数を $g(t)$ とし、また、角周波数 ω ($\omega = 2\pi f$, f : 周波数) を変量とした $g(t)$ の周波数成分を表す関数を $G(j\omega)$ とすると、次式に示すフーリエ変換によって $g(t)$ から $G(j\omega)$ を求めることができる。

$$\mathcal{F}[g(t)] = G(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt$$

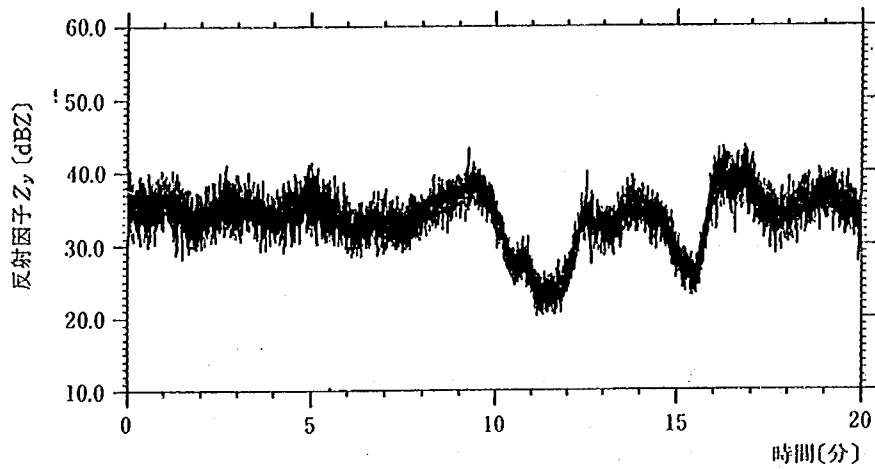
この式では、 $g(t)$ の値が $[-\infty, \infty]$ の間で求まっていなければ $G(j\omega)$ は得られないが、実用上、ある区間の信号を切り出しその区間内でのスペクトルの算出が行われている。

図-4.3.1の Z_H の時間変動を周波数解析した結果得られた振幅スペクトルを、図-4.3.3に示す。なお、ここではあらかじめトレンドの除去を行い、ハミング窓による信号の切り出しを行った後、FFTにより周波数解析を行っている。

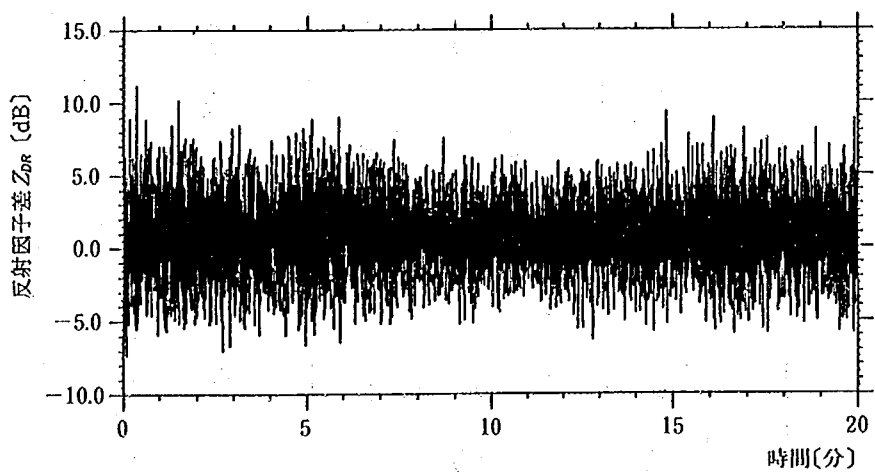
図から分かる様に、0.05 Hz 付近より高い周波数領域に平坦なスペクトルが見られる。この様な特徴は、ガウス雑音（ホワイトノイズ）特有のものである。このことから、レーダ受信信号に見られるデータ毎の不規則な変動は、このガウス雑音に起因していることが分かる。一方、0.0 ~ 0.05 Hz にかけて大きな値が見られる。このスペクトルは、レーダ受信信号の時間変化図において比較的緩やかな変動をみせていた降雨強度信号に該当するものである。その振幅は、雑音信号成分の振幅に比べて



(a) Z_H の時間変化



(b) Z_V の時間変化



(c) Z_{DR} の時間変化

図-4.3.1 レーダ受信信号 (Z_H , Z_V , Z_{DR}) の時間変化

観測日時 1987年7月12日7時55分

水平偏波, 仰角 3° , 方位角 0° , レーダサイトから 17 km 地点

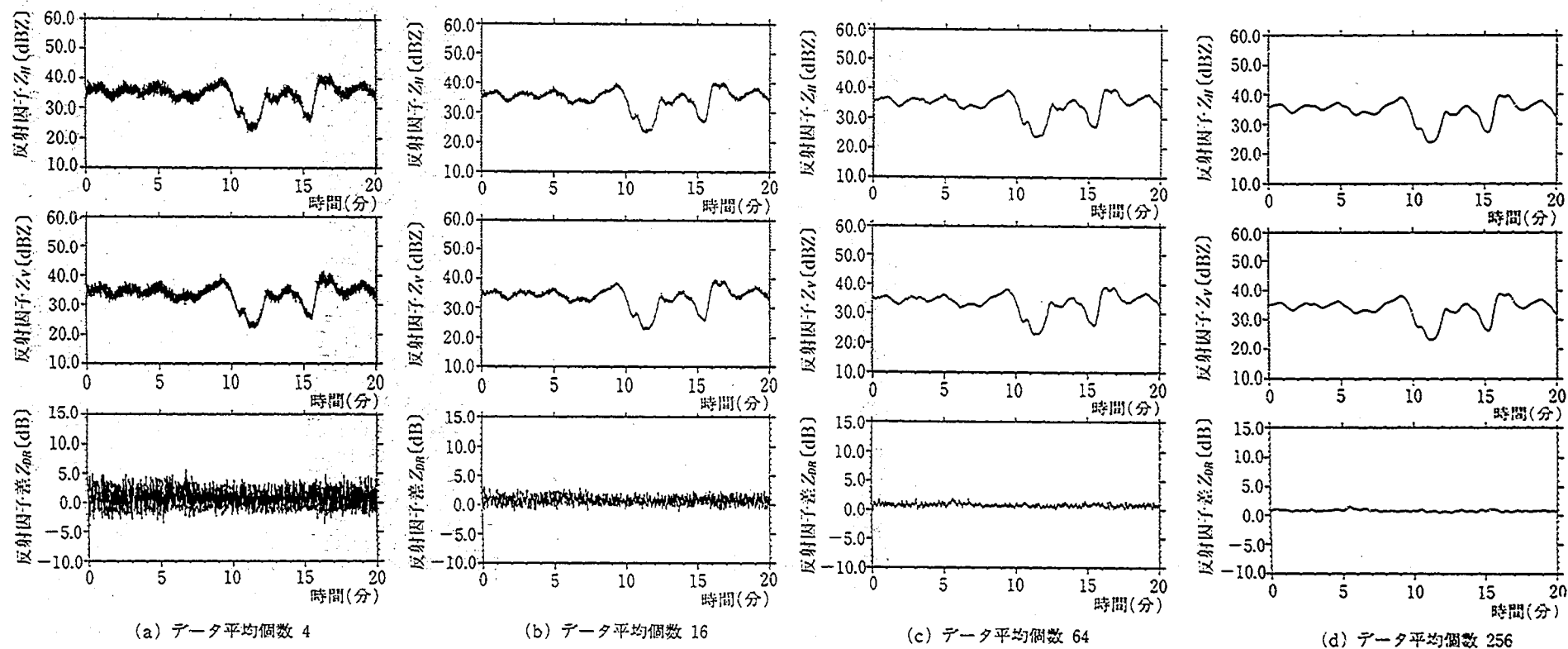


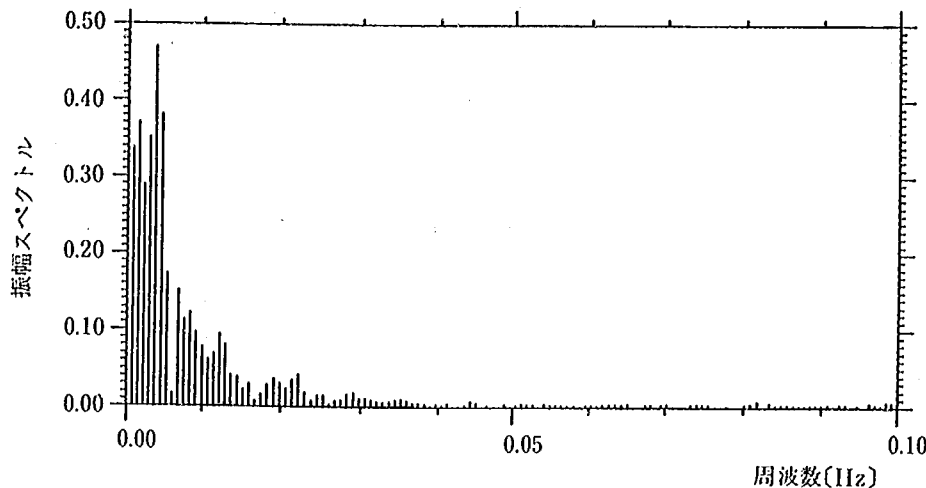
図- 4.3.2 移動平均後のレーダ受信信号の時間変化

図- 4.3.1 に示すデータの移動平均を行ったもの

かなり大きな値となって表れている。

(4) 雑音成分の抽出

ここで、レーダ受信信号の雑音による変動を定量的に扱うために、レーダ受信信号から、その変動成分のみを取り出すことを考える。



図－4.3.3 レーダ受信信号の振幅スペクトル図

図－4.3.1 に示すデータをトレンドの除去、ハミング窓による切り出しを行った後、FFTにより処理
データ切出区間 約22分、周波数分解能 7.6×10^{-4} Hz
サンプリング間隔 0.08 秒、周波数上限 6.25 Hz

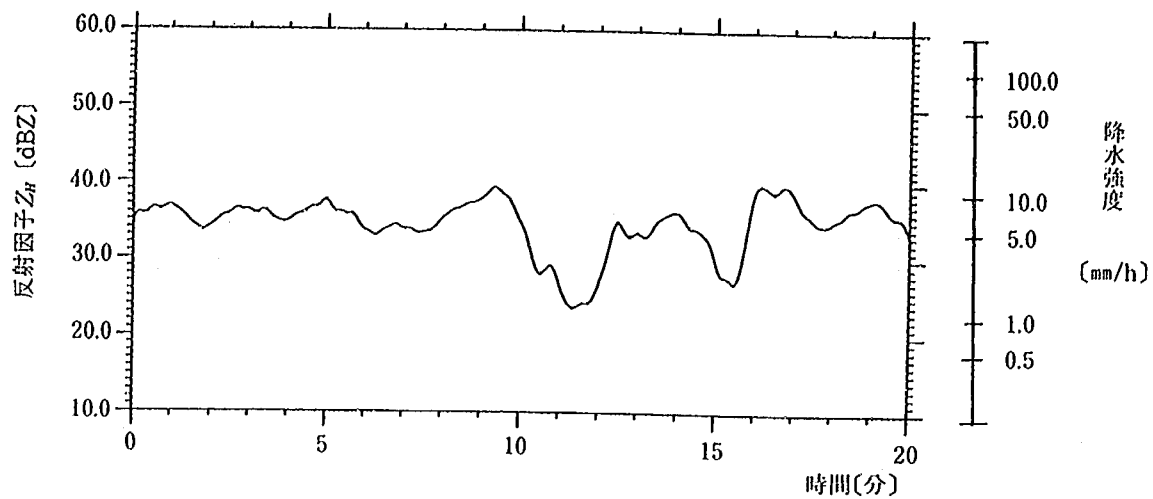
前述の周波数解析の結果から、降水強度信号成分はほとんどが低い周波数領域に集中して表れていることが分かった。従って、この特性を利用して、レーダ受信信号の低周波成分または高周波成分のみを取り出すことによって、降水強度信号成分と雑音信号成分の分離が可能である。

一方、(2)で見たように 256 個のデータを平均することにより、雑音による信号の変動はほとんど見られなくなる。時間軸方向に 256 個のデータの移動平均を行うことは、概ね、 $1 / (\text{データ間隔 } 0.08 \text{ 秒} \times 256 \text{ データ}) = 0.0488 \text{ Hz}$ 以上の周波数成分を低減し、そこに含まれている雑音成分を取り除くことに相当する。従って、この 0.0488 Hz を、レーダ受信信号を降水強度成分と雑音成分とに分離するための分離点として考えることが出来る。

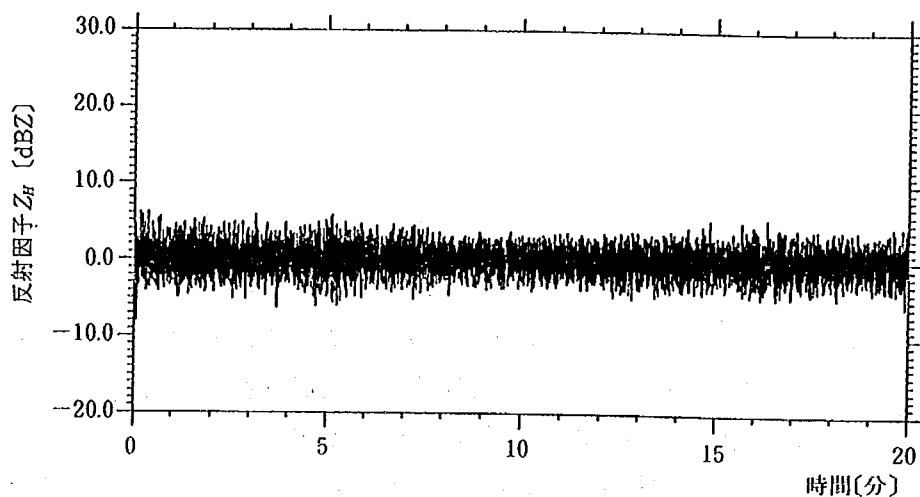
この周波数分解点によって、レーダ受信信号を降水強度成分と雑音信号成分とにそれぞれ分離した信号を図－4.3.4 に示す。

4.3.3 データの平均個数と Z_{DR} の測定精度

水平偏波と垂直偏波の反射因子差 Z_{DR} を利用して、降水強度を 10% 以下の精度で求めるためには、 Z_{DR} を 0.1 dB 以下の精度で測定する必要がある。しかし、前にも述べた通りレーダ受信信号は、そこに複合されたガウス性の雑音によってデータ毎に大きく変動しており、その変動は Z_{DR} の測定精度に大きな影響を及ぼしている。ここでは、データの平均によってどの程度雑音成分を取り除くことが出来るか、また、 Z_{DR} を所定の精度で測定するためにはどの程度のデータ平均個数が必要であるかについて検討を行う。



(a) 周波数分解点以下の信号 (降水強度信号成分)



(b) 周波数分解点以上の信号 (雑音信号成分)

図-4.3.4 周波数分解点で分離を行った後の信号

図-4.3.1 に示すデータを周波数分解点 0.049 Hz で分離

(1) 雑音成分の時間変動

雑音による変動が Z_{DR} の測定精度に及ぼす影響について調べるために、まず、次の方法によって Z_{DR} に含まれる雑音信号の抽出を行った。① 4.3.2 で述べた周波数分解点を用いる方法により、水平偏波及び垂直偏波信号からそれぞれの雑音信号成分のみを取り出す。②そこで得られたレーダ受信信号の雑音信号成分を用いて両信号間の差をとり、反射因子差 Z_{DR} を求める。③これにより Z_{DR} に含まれている、雑音信号による変動成分を取り出すことが出来る。

図-4.3.5 に、この Z_{DR} の時間変動を示す。

この図から分かるように、 Z_{DR} の雑音成分はデータ毎に不規則に変動しており、その値は、はば -5 dB から +5 dB までの間約 10 dB 近くの変動幅をみせている。この値は、 Z_{DR} の取り得る 0 dB ~ 4 dB という値と比較してかなり大きな値であることが分かる。

(2) 雑音成分の統計的性質

変動する信号の統計的性質を調べることによって、その変動の持つ特徴を知ることができる。そこ

で、(1)によって得られた変動成分が取りうる値の、確率密度分布を求めて、その統計的性質について以下検討を行った。

図-4.3.6に、(1)により得られた値の確率密度分布を示す。図中、実線により、この値の確率密度分布曲線を示してある。点線は、この Z_{DR} の平均及び標準偏差によって求めた正規（ガウス）分布曲線である。両者は、非常に良く一致しており、この変動信号のとり値は、ほぼ正規分布に従っていると見なせる。また、ガウス雑音も正規分布に従う値を取ることから、この雑音成分がガウス性の雑音であることが分かる。

次にこの Z_{DR} の移動平均を行い、データの平均個数によって確率密度分布が変化する様子を図-4.3.7に示す。また、平均個数と Z_{DR} 値の標準偏差の関係を図-4.3.8及び表-4.3.1に示す。

正規分布の標準偏差 σ は、データの平均に従って小さくなり、 N 個のデータを平均した場合の標準偏差 σ_N は、平均個数 N との間に次式の関係がある。

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad \dots\dots\dots (4.3.1)$$

表-4.3.1の結果が上式と良く一致しているのが分かる。ただし、128個及び256個平均値で急に標準偏差の減少がみられる。これは、先に雑音部分を抽出する際に、降水強度信号成分の除去と同時に、低周波域にも存在しているガウス雑音成分を取り除いたことにより生じたものである。式(4.3.1)の関係をを用いることにより、 Z_{DR} 値の標準偏差が0.1以下となるには $N = (2.15 / 0.1)^2 \approx 463$ 個以上のデータによる平均化が必要であることが分かる。

これまでは、1観測地点の時系列データの変動成分について検討を行ってきた。しかし、この場合観測データに、地域的な特性が含まれる可能性がある。そこで、レーダの観測範囲内全般にわたる Z_{DR} の測定精度が、どの程度であるか以下検討を行う。

DNDレーダでは、方位角を固定して観測を行った場合、レーダサイトから500mに1地点ずつ40kmまで合計80地点での、連続した時系列データを得る事ができる。そこで、上記の検討で行ったのと同様の方法で、各地点での Z_{DR} の変動成分のみを取り出し、全地点、全時刻での変動値の総合的な標準偏差を求めた。その結果を表-4.3.2に示す。

変動値の標準偏差は、1.50~2.48であり、 Z_{DR} の標準偏差を0.1dB以内の精度で求めるためには、最大で約620個以上のデータを平均しなければならないことが分かる。このことは、データのサンプリング間隔が約0.08秒であるので、1つの変動のない Z_{DR} 値を得るのに最大で50秒近い時間を要することを意味している。

(3) 雑音信号の分散と受信電力との関係

先に、降雨によって得られるレーダ受信電力値のパルス毎の値が、レイリー分布にしたがって変動する事について述べたが、その分散は、MTI装置の原理から明らかなように平均電力に比例した値となって表れる。従って、これまで検討を行ってきた Z_{DR} 値の変動も、受信電力値との間に何等かの関係があると思われる。そこで、以下両者の関係についての検討を行った。

これまで行ってきた検討の結果から、レーダ受信信号の雑音変動は正規分布に従っていると見なせまた、 Z_H と Z_V は独立した値であることから Z_{DR} の分散 σ_{ZDR}^2 は、 Z_H の分散 σ_{ZH}^2 及び Z_V の分散 σ_{ZV}^2 の和と等しくなると考えられる。 Z_H と Z_V の分散が近似的に等しいと考えた場合、 Z_{DR} の標準偏差 σ_{ZDR} と Z_H の分散 σ_{ZH}^2 との間に $\sigma_{ZDR} = \sqrt{2\sigma_{ZH}^2}$ の関係が成り立つ。よって、 Z_H の分散の性質を調べることに

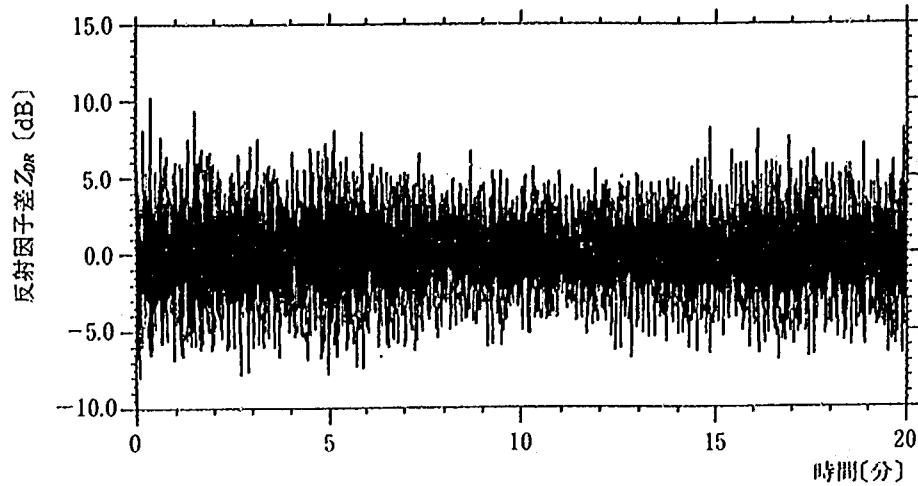


図-4.3.5 Z_{DR} 値に含まれている雑音信号成分

図-4.3.1 に示す Z_H 信号の雑音成分と、同様にして得られた Z_V 信号の雑音成分とから求めた Z_{DR} 値

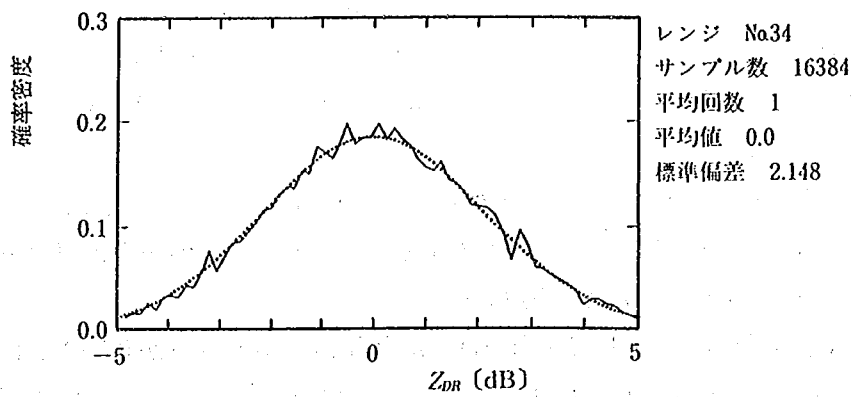


図-4.3.6 Z_{DR} 値の確率密度分布図

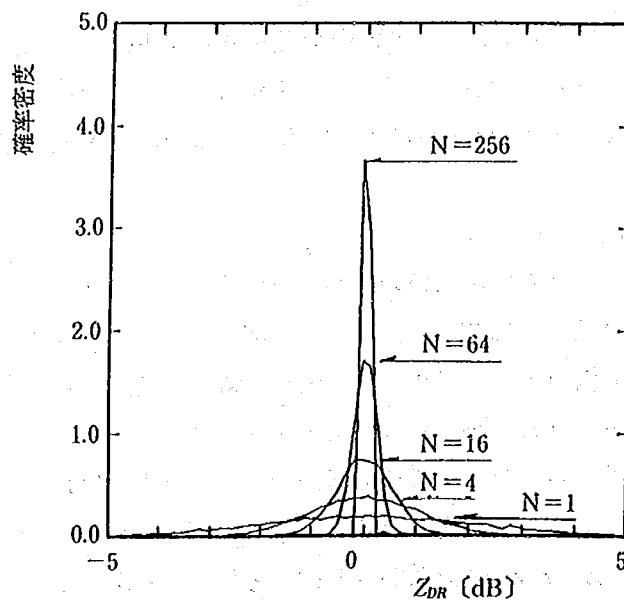


図-4.3.7 データ平均値個数と Z_{DR} 確率密度

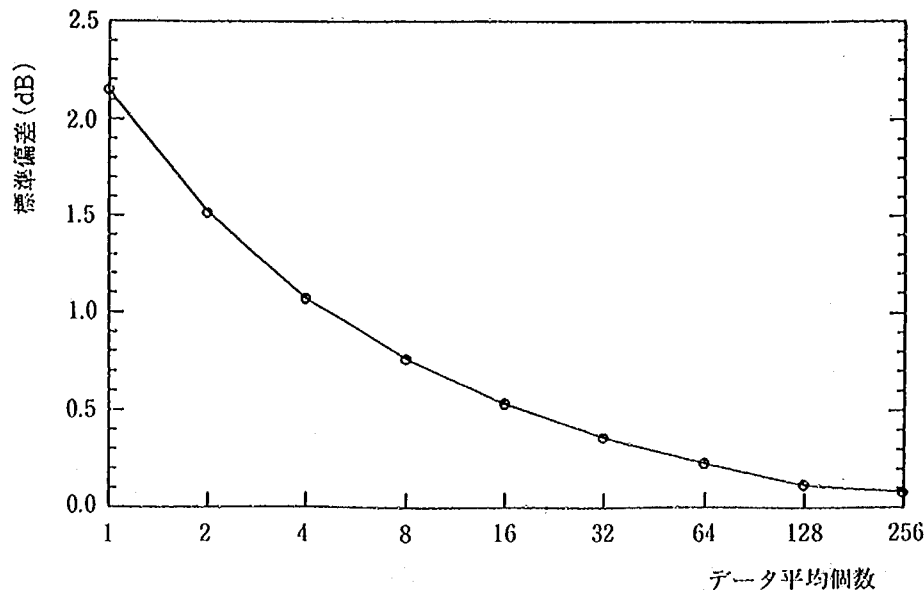


図- 4.3.8 データ平均個数と Z_{DR} 標準偏差

データ平均個数	1	2	4	8	16	32	64	128	256
データサンプル数	16384	16384	16384	16384	16384	16384	16384	16384	16384
Z_{DR} 標準偏差	2.15	1.52	1.07	0.76	0.53	0.36	0.23	0.12	0.08

表- 4.3.1 データ平均個数と Z_{DR} 標準偏差

観測日時 1987 年 7 月 12 日 7 時 55 分

水平偏波, 仰角 3° , 方位角 0°

レーダサイトから 17 km 地点

観 測 日 時	1987.7 / 12 7 : 55	1987.7 / 6 16 : 47	1987.7 / 6 17 : 17	1987.9 / 18 18 : 26	1987.10 / 17 15 : 43
仰 角 , 方 位 角	$3^\circ, 0^\circ$	$3^\circ, 258^\circ$	$5^\circ, 258^\circ$	$3^\circ, 40^\circ$	$5^\circ, 258^\circ$
データサンプル数	1,196,031	999,424	1,032,088	1,179,633	1,032,188
Z_{DR} 標準偏差	2.199	1.794	1.493	2.403	2.483

表- 4.3.2 全地点での Z_{DR} の標準偏差

グラントクラッタ信号強度 $G.C < 0.2 \text{ mm/h}$ (雨量換算)

の地点のデータを用いている。

より Z_{DR} の標準偏差の特性も分かる事となる。 Z_H の分散は, つまり受信電力値の分散でもあり, 次の方法によって受信電力の平均値と, その変動成分の分散との関係について調べた。①まず, 受信信号から 4.3.2 で述べた方法により雑音成分のみを取り出し, 受信電力値とその雑音成分の 2 つの値を用意する。②次に, 受信電力値の 256 個の平均を求める。③また, その雑音信号の 256 個の分散を求める。④この方法によって, 時系列データの中から受信電力値の平均と, その雑音成分の分散を求める。

これによって得られた受信電力値の平均と分散の関係を図- 4.3.9 に示す。この結果から次のことが言える。

- ① 受信電力の雑音信号による分散は、平均受信電力値に比例する。このことは、ある地点でのデータは、降雨強度が大きいほどその分散は大きくなり、また、降雨強度が同一の場合には、レーダサイトからの距離が近いほどその分散が大きくなることを意味する。
- ② 受信電力の分散と平均値との関係は、降雨によって異なる。また、同一の降雨においても、ある平均電力値に対する分散は拡がりをもって分布している。
- ③ 分散の値は、最高で10に近い大きな値が見られる。これを Z_{DR} の標準偏差に換算した場合には約 4.5 dB となり、所定の精度により Z_{DR} 値を得るには約 2000 個近いデータが必要となることが分かる。

この検討結果から、 Z_{DR} 値の標準偏差は、降雨強度が強いほど、また、レーダサイトに近い地点ほど大きな値となり、条件によっては 4.5 dB という大きな値となる。そして、それに伴って、所定の精度で Z_{DR} を得るためにはより多くのデータ平均個数が必要となる事が分かった。

4.3.4 データの平均個数と $Z_H \sim Z_V$, $Z_H \sim Z_{DR}$ の間の相関

データ毎に -5 dB から +5 dB という大きな変動をみせている Z_{DR} 値も、データの平均個数を増すことによりその標準偏差を 0.1 dB 以下に抑えられることが分かった。そこで、ここではデータの平均化により Z_H と Z_V , Z_H と Z_{DR} との間の相関がどの様に変化するのか、また、そこで得られる Z_H と Z_V , Z_H と Z_{DR} の関係はどの様なものであるかについて述べる。

なお、ここでは次のデータを用いて検討を行った。①観測によって得られた全地点（80 地点）のデータのうちグラウンドクラッターからの反射が降雨に換算して 0.2 mm/h 以下の地点を選び出す。②各地点での時系列データのうち、受信電力値が -100 dBm 以上の値であり、かつ降雨に換算して 0.2 mm/h 以上のデータを用いる。③平均は、各時系列データから、平均を行う個数ずつ切り出したものを単純に平均している。④これにより得られた全地点、全時間のデータを 1 観測例として取り扱う。

4.3.3 での検討により、 Z_{DR} を精度良く求めるには最大で 600 個近いデータを必要とする結果が得られた。しかし、降水強度の変動周期は、図-4.3.3 の振幅スペクトルから分かるように約 20 秒近くの短い周期まで含んでいるため、降水強度の変化をとらえるには約 250 個のデータを平均するのが限度である。このことから、ここではデータ平均個数は最大で 256 個までとした。

(1) Z_H と Z_V の間の関係

Z_H と Z_{DR} を用いて降水強度を算出するには、その前提として Z_H と Z_V が良く対応していなければならない。そこで、まず Z_H と Z_V がどの程度対応しているのかその相関関係を調べた。

図-4.3.10 にデータ平均個数を変化させた場合の Z_H と Z_V の相関図を示す。また、平均個数の変化に伴う Z_H と Z_V 間の相関係数、標準偏差の変化を図-4.3.12 及び表-4.3.3 に示す。

これらの結果から次のことが言える。

- ① データ平均個数の増加と共に、 Z_H と Z_V の間のばらつきは無くなってその相関は高くなる。32 個以上のデータを平均することにより相関係数を 0.995 以上とすることができ（1987.10.17 観測例を除く）、また、256 個の平均では相関係数はほとんど 1 に近く Z_H と Z_V は 1 対 1 に対応していることが分かる。
- ② データ平均個数 (N) の増加と共に Z_H に対する Z_V の標準偏差は小さくなり、ほぼ式 (4.3.1) に従って変化する。

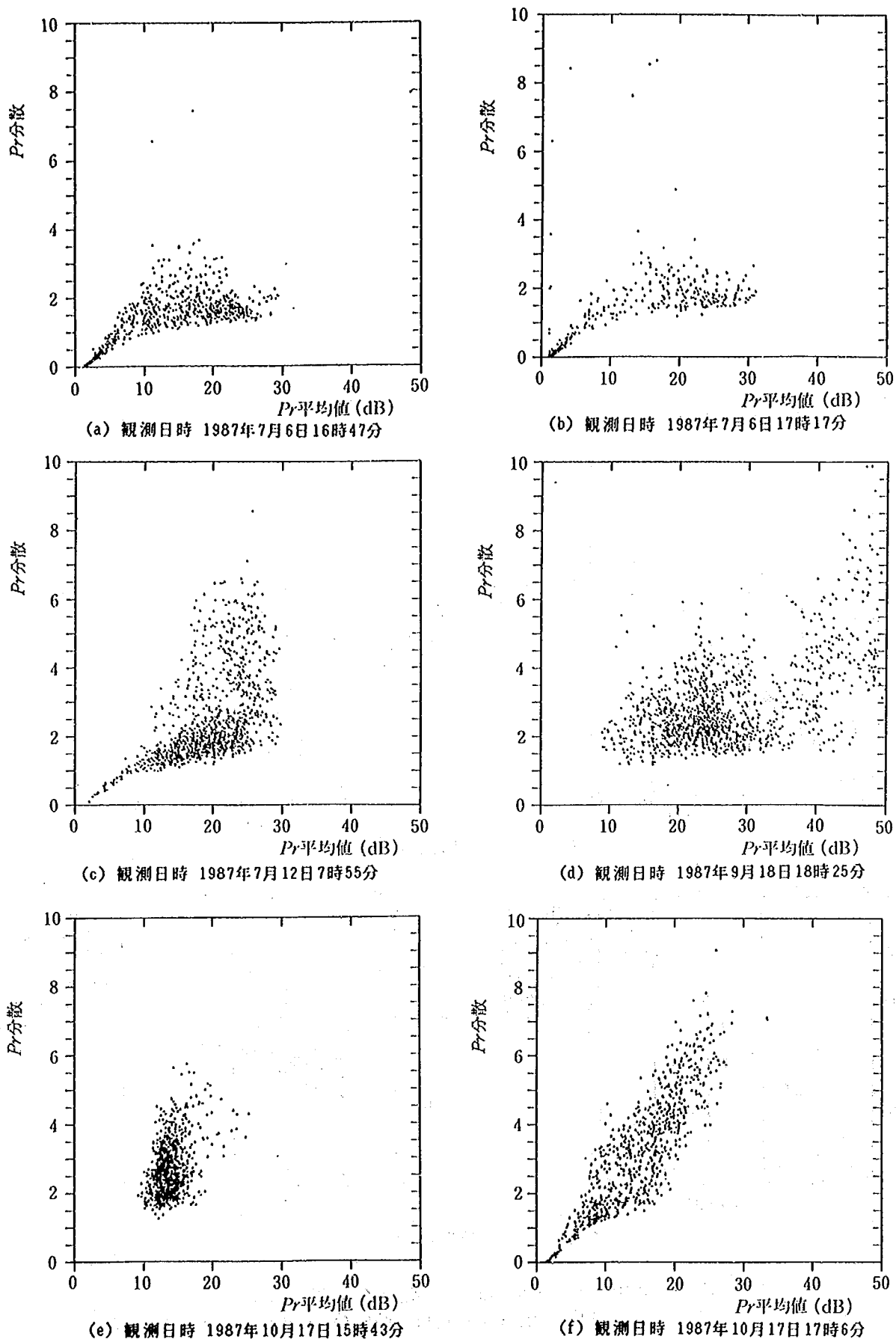
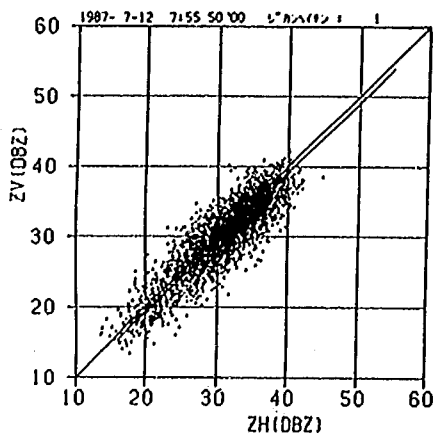
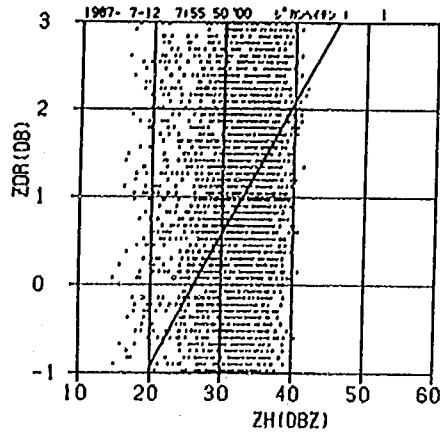


図-4.3.9 受信電力値 (Pr) とその変動成分の分散との関係

Pr 平均値は、 -107.5 dBmを基準とした値を示している。

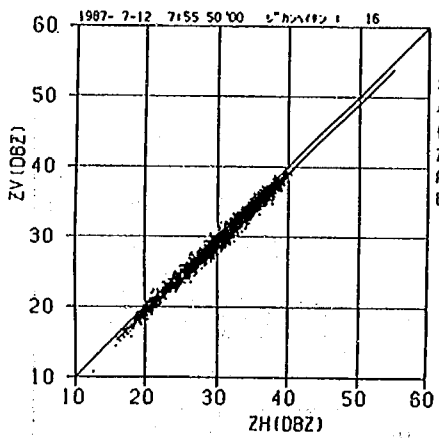


レンジN° ALL
サンプル数 1357446
平均回数 1
相関係数 0.888
標準偏差 1.569
 $ZV = A \times ZH + B$
A 0.991
B -0.543

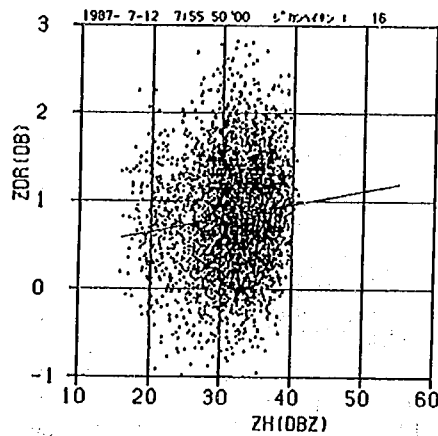


レンジN° ALL
サンプル数 1357446
平均回数 1
相関係数 0.253
標準偏差 2.128
 $ZDR = A \times ZH + B$
A 0.151
B -3.935

(a) データ平均個数 1

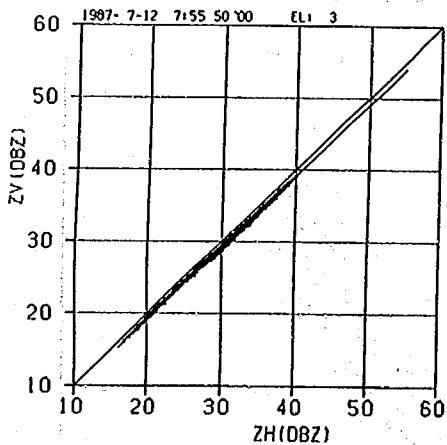


レンジN° ALL
サンプル数 83614
平均回数 16
相関係数 0.992
標準偏差 0.399
 $ZV = A \times ZH + B$
A 0.993
B -0.597

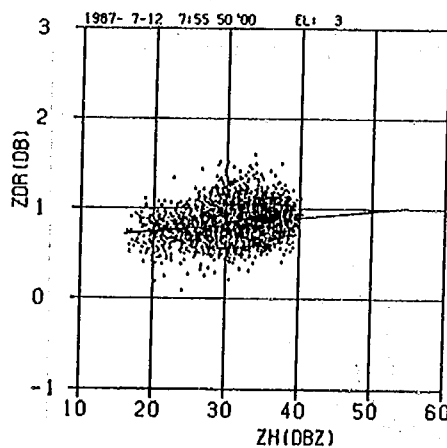


レンジN° ALL
サンプル数 83614
平均回数 16
相関係数 0.122
標準偏差 0.560
 $ZDR = A \times ZH + B$
A 0.016
B 0.332

(b) データ平均個数 16



レンジN° ALL
サンプル数 5086
平均回数 256
相関係数 0.999
標準偏差 0.113
 $ZV = A \times ZH + B$
A 0.993
B -0.612



レンジN° ALL
サンプル数 5086
平均回数 256
相関係数 0.204
標準偏差 0.159
 $ZDR = A \times ZH + B$
A 0.008
B 0.591

(c) データ平均個数 256

図-4.3.10 データ平均個数と Z_H-Z_V , Z_H-Z_{DR} 相関図

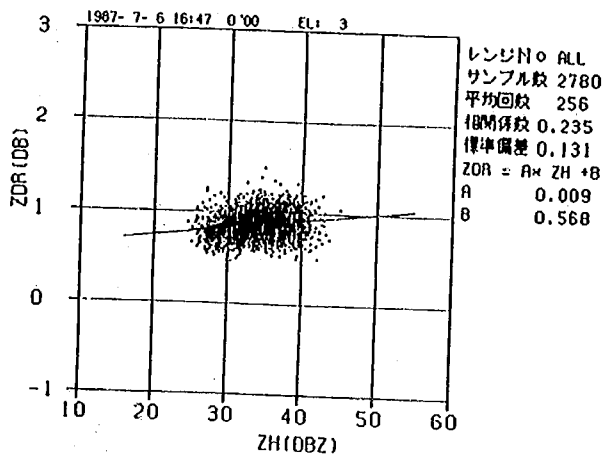
観測日時 1987年7月12日7時55分 水平偏波, 仰角 3° , 方位角 0°
ただし, ここでは, 降水強度 $R > 0.1 \text{ mm/h}$, 受信電力 $Pr > -100 \text{ dBm}$,
グラウンドクラッタ信号強度 $G.C < 0.2 \text{ mm/h}$ (雨量換算) の地点の
データを用いている。

(2) Z_H と Z_{DR} の関係

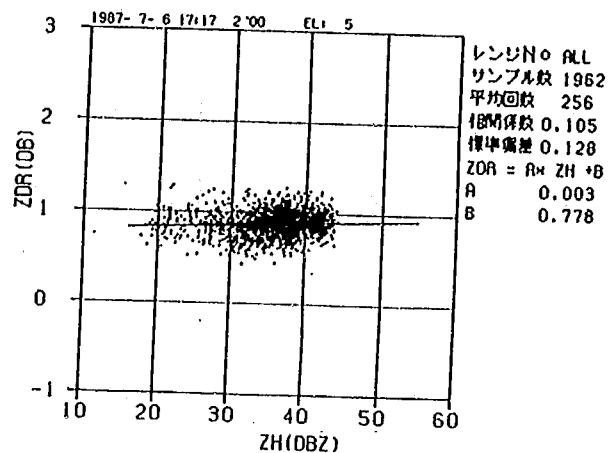
Z_H と Z_{DR} の関係は、降雨条件によって異なるが、同一の降雨においてはほぼ対応が取れていると考えられる。そこで、この Z_H と Z_{DR} の関係について調べた。

Z_H と Z_{DR} の相関図を図-4.3.10及び図-4.3.11に、また、データ平均個数と Z_H と Z_{DR} 間の相関係数、標準偏差の関係を図-4.3.12に示す。この結果から次のことが言える。

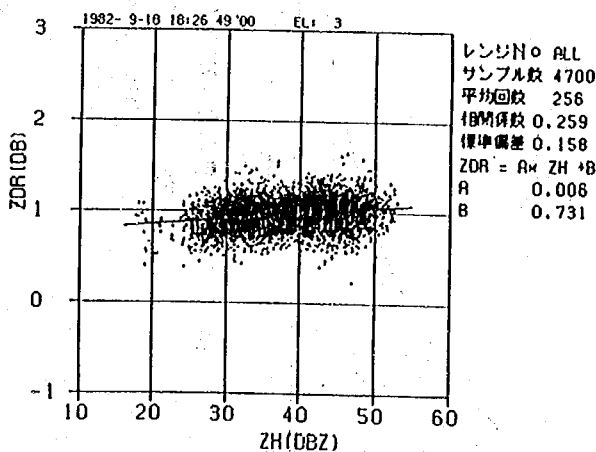
- ① Z_H と Z_{DR} の間の相関係数は、データ平均個数が少ない場合にはデータ平均個数の増加に従って減少する傾向にあるが、あるデータ平均個数を越えると増加する傾向にある。その値は約0.08から0.38の間で変化している。256個の平均を行った時の相関は約0.10～0.26という値であり、あまり良い相関とは言えない。このことから、データ平均個数は256個では不十分であることが分かる。



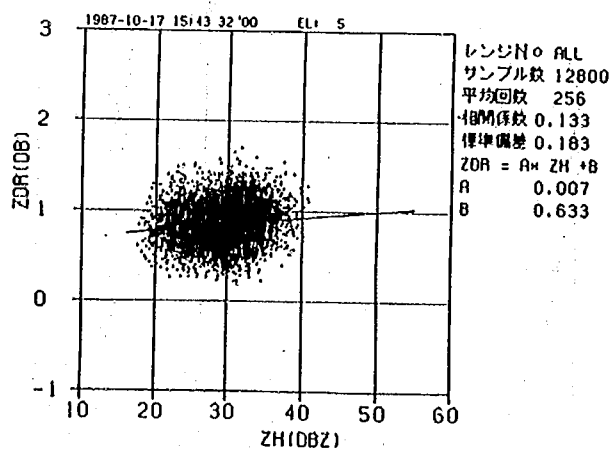
(a) 観測日時 1987年7月6日16時47分
仰角 3°、方位角 258.2°



(b) 観測日時 1987年7月6日17時17分
仰角 5°、方位角 258.2°



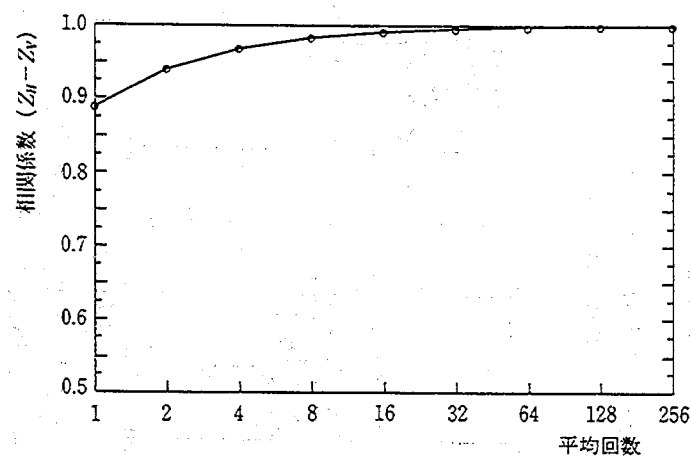
(c) 観測日時 1987年9月18日18時25分
仰角 3°、方位角 40.1°



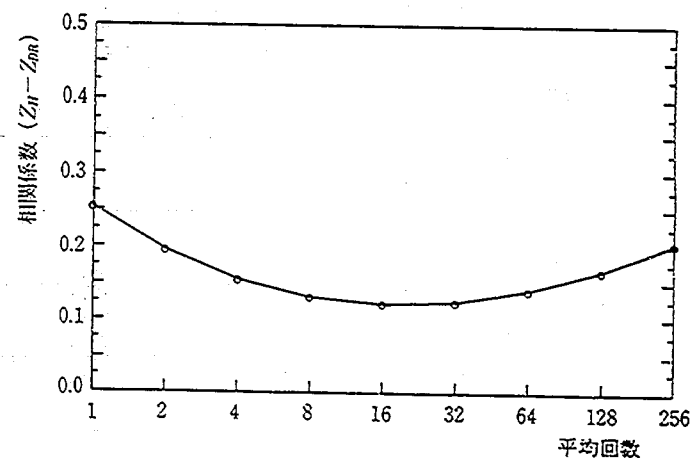
(d) 観測日時 1987年10月17日15時43分
仰角 5°、方位角 258.2°

図-4.3.11 256個平均後の Z_H - Z_{DR} 相関図

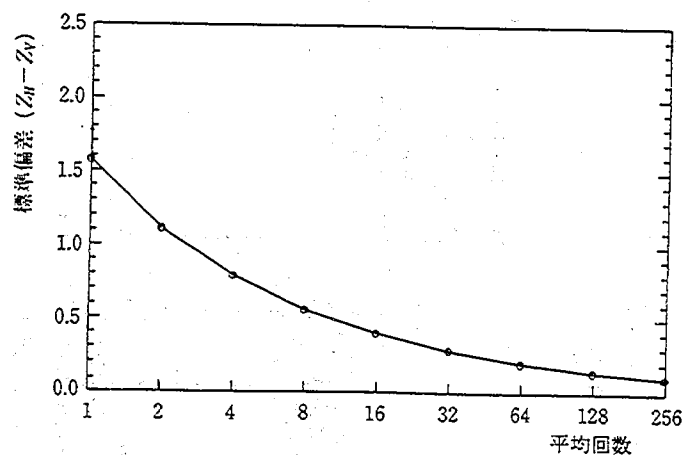
ただし、ここでは 降水強度 $R > 0.1$ mm/h, 受信電力 $Pr > -100$ dBm, グランドクラッタ信号強度 $G.C < 0.2$ mm/h (雨量換算) の地点のデータを用いている。



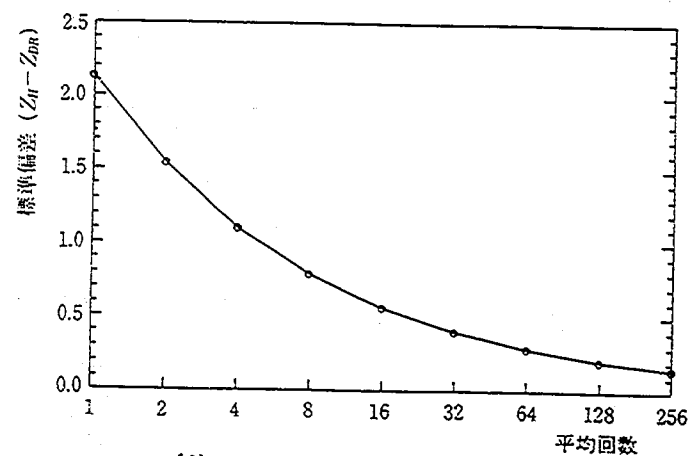
(a) $Z_H - Z_V$ 間の相関係数



(b) $Z_H - Z_{DR}$ 間の相関係数



(c) Z_H に対する Z_V の標準偏差



(d) Z_H に対する Z_{DR} の標準偏差

図-4.3.12 データ平均個数と相関係数及び標準偏差の関係

観測日時 1987年7月12日7時55分 仰角 3° , 方位角 0°

ただし, ここでは 降水強度 $R > 0.1 \text{ mm/h}$, 受信電力 $P_r > -100 \text{ dBm}$,

グラントクラッタ信号強度 $G.C < 0.2 \text{ mm/h}$ (雨量換算)の地点の

データを用いている。

1987- 7-12 7:55 50'00		EL: 3					
	XMEAN	YMEAN	SDY	RY	SDZ	RZ	NUM
データ平均個数	Z _u 平均値	Z _v 平均値	Z _u 標準偏差	Z _v 相関係数	Z _u 標準偏差	Z _u 相関係数	データサンプル数
1	31.6605	30.8302	1.5689	0.8875	2.1277	0.2532	1357446
2	31.6789	30.8474	1.1106	0.9402	1.5369	0.1952	676372
4	31.6974	30.8649	0.7868	0.9690	1.0989	0.1549	337025
8	31.7167	30.8834	0.5595	0.9840	0.7854	0.1312	167924
16	31.7387	30.9048	0.3986	0.9918	0.5604	0.1217	83614
32	31.7646	30.9301	0.2847	0.9958	0.4011	0.1242	41605
64	31.7926	30.9576	0.2044	0.9978	0.2893	0.1407	20691
128	31.8273	30.9917	0.1487	0.9988	0.2126	0.1672	10275
256	31.8728	31.0365	0.1127	0.9993	0.1594	0.2039	5086

1987- 7- 6 16:47 0'00		EL: 3					
	XMEAN	YMEAN	SDY	RY	SDZ	RZ	NUM
1	33.2656	32.4268	1.3993	0.8946	1.8944	0.2620	810774
2	33.3687	32.5239	0.9922	0.9425	1.3695	0.2099	399590
4	33.4668	32.6169	0.7039	0.9694	0.9812	0.1741	197006
8	33.5590	32.7054	0.4990	0.9840	0.6985	0.1537	97166
16	33.6506	32.7938	0.3543	0.9916	0.4975	0.1466	47920
32	33.7404	32.8812	0.2515	0.9956	0.3542	0.1538	23630
64	33.8397	32.9779	0.1790	0.9977	0.2526	0.1708	11632
128	33.9620	33.0972	0.1273	0.9988	0.1793	0.1989	5699
256	34.0933	33.2261	0.0918	0.9993	0.1306	0.2346	2780

1987- 7- 6 17:17 2'00		EL: 5					
	XMEAN	YMEAN	SDY	RY	SDZ	RZ	NUM
1	35.0772	34.2103	1.4265	0.9335	1.9714	0.1993	534228
2	35.1591	34.2887	1.0112	0.9645	1.4127	0.1525	265229
4	35.2311	34.3583	0.7173	0.9814	1.0074	0.1191	131773
8	35.2943	34.4200	0.5080	0.9904	0.7154	0.0981	65511
16	35.3597	34.4840	0.3600	0.9950	0.5076	0.0851	32560
32	35.4275	34.5506	0.2551	0.9974	0.3603	0.0813	16178
64	35.5020	34.6241	0.1804	0.9987	0.2560	0.0842	8033
128	35.6113	34.7325	0.1288	0.9993	0.1820	0.0902	3974
256	35.7149	34.8354	0.0903	0.9996	0.1282	0.1048	1962

1982- 9-18 18:26 49'00		EL: 3					
	XMEAN	YMEAN	SDY	RY	SDZ	RZ	NUM
1	38.0915	37.1258	1.7171	0.9445	2.3801	0.1888	1256757
2	38.1518	37.1843	1.2156	0.9711	1.6993	0.1501	625631
4	38.2206	37.2512	0.8596	0.9851	1.2071	0.1257	311250
8	38.2906	37.3197	0.6092	0.9924	0.8577	0.1152	154826
16	38.3584	37.3860	0.4319	0.9961	0.6085	0.1154	77021
32	38.4289	37.4557	0.3070	0.9980	0.4328	0.1289	38303
64	38.5036	37.5295	0.2197	0.9990	0.3101	0.1544	19040
128	38.5844	37.6096	0.1574	0.9995	0.2220	0.1961	9459
256	38.6604	37.6851	0.1115	0.9997	0.1575	0.2592	4700

1987-10-17 15:43 32'00		EL: 5					
	XMEAN	YMEAN	SDY	RY	SDZ	RZ	NUM
1	28.6180	27.8164	1.7905	0.7282	2.2007	0.3814	1571076
2	28.6378	27.8333	1.2684	0.8428	1.6821	0.2964	775934
4	28.6648	27.8580	0.8994	0.9147	1.2328	0.2273	381141
8	28.7038	27.8934	0.6395	0.9553	0.8901	0.1757	185593
16	28.7533	27.9383	0.4566	0.9771	0.6396	0.1399	89399
32	28.8069	27.9870	0.3257	0.9885	0.4579	0.1171	42536
64	28.8654	28.0405	0.2338	0.9942	0.3303	0.1069	19934
128	28.9129	28.0832	0.1680	0.9971	0.2371	0.1078	9194
256	28.9534	28.1173	0.1222	0.9986	0.1726	0.1170	4152

表- 4.3.3 データ平均個数と相関係数及び標準偏差の関係

ただし、ここでは 降水強度 $R > 0.1 \text{ mm/h}$, 受信電力 $Pr > -100 \text{ dBm}$,

グラウンドクラッタ信号強度 $G.C < 0.2 \text{ mm/h}$ (雨量換算) の地点の

データを用いている。

② データ平均個数 (N) の増加と共に Z_H に対する Z_{DR} の標準偏差は小さくなり、ほぼ式 (4.3.1) に従って変化する。

③ いずれの観測結果も Z_H と Z_{DR} 間には正の相関があることを示している。しかし、 Z_H に対する Z_{DR} の応答は、データ平均個数が 256 個の場合でも Z_H 値の 15~50 dBZ の変化に対して、 Z_{DR} 値は 0.5 ~ 1.5 dB 程度の変化しか見られない。この値は、 Z_{DR} が取り得る値 0~4dB と比較してかなり小さなものであることが分かる。

4.3.5 ま と め

レーダを用いた降雨観測の特性上、そこから得られるデータには必ず雑音による変動が含まれている。従来のレーダ雨量計のように反射因子だけを扱う場合には、降水強度の変化が雑音による変動に比べて十分に大きいため、データの平均によってこれを取り除くことは容易に出来た。しかし、水平偏波と垂直偏波の反射因子差 Z_{DR} を用いて降水強度を算出する場合には、その値自体が小さいためにデータの変動が観測精度に与える影響は大きく、精度良く降水強度を求めるには、これまでの検討によって明らかになったように、かなりの数のデータを平均する必要がある。その数は降雨条件、観測条件等によって異なるが、最大で約 620 個以上のデータが必要となり、そのデータを取得するには方位角を固定した状態で約 50 秒間観測を行う必要がある事を意味する。これは、降雨の変動周期に比較して非常に長い時間であり、 Z_{DR} を精度良く観測するには降雨の時間変化をある程度犠牲にしなければならないことになる。これを改善するには、次の方法が有効であると思われる。

- (1) DND レーダでは 500 m × 500 m メッシュのデータが得られるが、 Z_{DR} を扱う場合には複数のメッシュを平均した値を用いる。
- (2) 現在は、データを収録する際に 250 m 毎にサンプリングを行って得られた 2 データの平均値を 500 m 毎の値として用いているが、更にそのサンプリング間隔を狭くして平均を行うデータ数を増す。
- (3) データのサンプリングを行う前に、受信機からの強度ビデオ信号をフィルター回路等を用いて、その変動を取り除いておく。

一方、 Z_{DR} の測定精度は、受信電力値に依存する傾向が見られる。したがって、今後、次の手順によって Z_{DR} を所定の精度で求めるためのデータ平均個数と受信電力値との関係を明らかにしておく必要があると思われる。①更に多くの観測データから、受信電力値とその値の分散との関係について調べ、回帰式を求める。②その関係式を用いて、平均的に Z_{DR} を所定の精度で得るためのデータ平均回数について検討を行う。③また、その回帰式から 50%、80%、100% 等の範囲内で所定の精度が得られるデータ平均回数についても検討を行う。これによって、より確かに、 Z_{DR} を所定の精度で得るために必要なデータ平均個数を知ることができるであろう。 Z_H と Z_V との関係について検討を行った結果、データの平均によって Z_H と Z_V との間で非常に良い関係を得ることが出来た。一方、 Z_H と Z_{DR} との間の相関については、いずれの観測結果においても正の相関が認められたが、その相関係数はデータ平均個数が 256 個の場合で 0.26 以下であり、あまり相関が良いとは言えない。これは、 Z_H に対する Z_{DR} の応答が非常に小さな値であることにもよるが、やはり、 Z_{DR} のばらつきが大きな原因となっていると思われる。前述の方法等によってそのばらつきを小さく抑えることが出来れば、 Z_H と Z_{DR} の更により良い相関が期待される。

4. 4 降雨観測における反射電力のサンプリング時間

4.4.1 はじめに

現行の赤城山レーダ等建設省のレーダ雨量計は、5分間連続して観測し、その値をその期間の降水強度として表示している。

精度良い降雨観測を行うにはビーム高度を低くして観測する必要がある。しかし、ビームの仰角を低くするとレーダサイトから遠距離ではビーム高度が低くなり精度良い降雨観測ができるが、レーダサイトから近距離地点では大地クラッタが大きくなり精度良い降雨観測ができなくなる。また、ビームの仰角を高くするとレーダサイトから近距離地点ではビーム高度が低くなり過ぎず大地クラッタが小さくなるので精度良い降雨観測ができるが、レーダサイトから遠距離ではビーム高度が高くなり精度良い降雨観測ができなくなる。したがって、近距離は高仰角で観測し、遠距離は低仰角で観測するように、複数の仰角で降雨観測する必要がある。

また、降雨域の立体構造を把握し、より精度の高い降雨予測等のため、複数の仰角で降雨観測を行う必要もある。

更に、上空の風向・風速を把握し、より精度の高い降雨予測等のため、ドップラモードで観測する必要もある。

したがって、既存の方法とは違い、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現行より短くする必要がある。

また、DNDレーダは降水強度の測定と同時に上層風の測定を行うため、5分間の内3分間は降水強度の測定を行い、1分間は上層風の測定を行っている。したがって、3分間の観測で5分間の降水強度を代表している。そこで、3分間の観測で5分間の降水強度を代表できるかどうかを把握する必要がある。

そこで、本調査では降雨観測を行う場合の最適な反射電力のサンプリング時間の検討を行った。

4.4.2 検討方法

各種サンプリング方法の15分間平均及び1時間平均の反射因子（又は降水強度）を算出し、平均時間中の全てのデータをサンプリング（積分）した反射因子（又は降水強度）を真値として、この真値と各種サンプリング方法の反射因子（又は降水強度）との誤差（相対誤差及び標準偏差）を指標として最適なサンプリング時間について検討した。なお、使用したデータは、反射因子Zの1分間平均データの時系列である。

具体的な検討を行った条件及び方法は以下の通りである。

(1) 検討対象地区

降雨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、 $14^{\circ} \times 500\text{m}$ 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、厳密に測定できない（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 ($B=200.0$, $\beta=1.5$ を使用) で、 0.2 mm/h 以下の地点とする。

④ 同様に、最小測定可能降水強度が、 $B=200.0$, $\beta=1.5$ で、 0.2 mm/h 以下の地点とする。

⑤ 16 メッシュ (=4 メッシュ * 4 メッシュ) 平均と 1 メッシュ 平均の検討対象地区が同じになるように、上記②~④の条件を 16 メッシュ 全てで満足する地区とする。

①~⑤の条件で選定した検討対象地区を、図-4.4.1 に示す。検討対象地区は、全てレーダサイトから 20km 以内となった。検討対象地区数は、1 地点平均 ($1.4^\circ * 500 \text{ m}$) で 10240 メッシュ、4 地点平均 ($2.8^\circ * 1000 \text{ m}$) で 2720 メッシュ、16 地点平均 (= $5.6^\circ * 2000 \text{ m}$, 20km 地点で $2 \text{ km} * 2 \text{ km}$ の面積平均) で 170 メッシュである。仰角 3° で降雨観測を行っているので、ビーム高度は、10km 地点で 540m, 20km 地点で 1080m と低く降雨観測に適している。

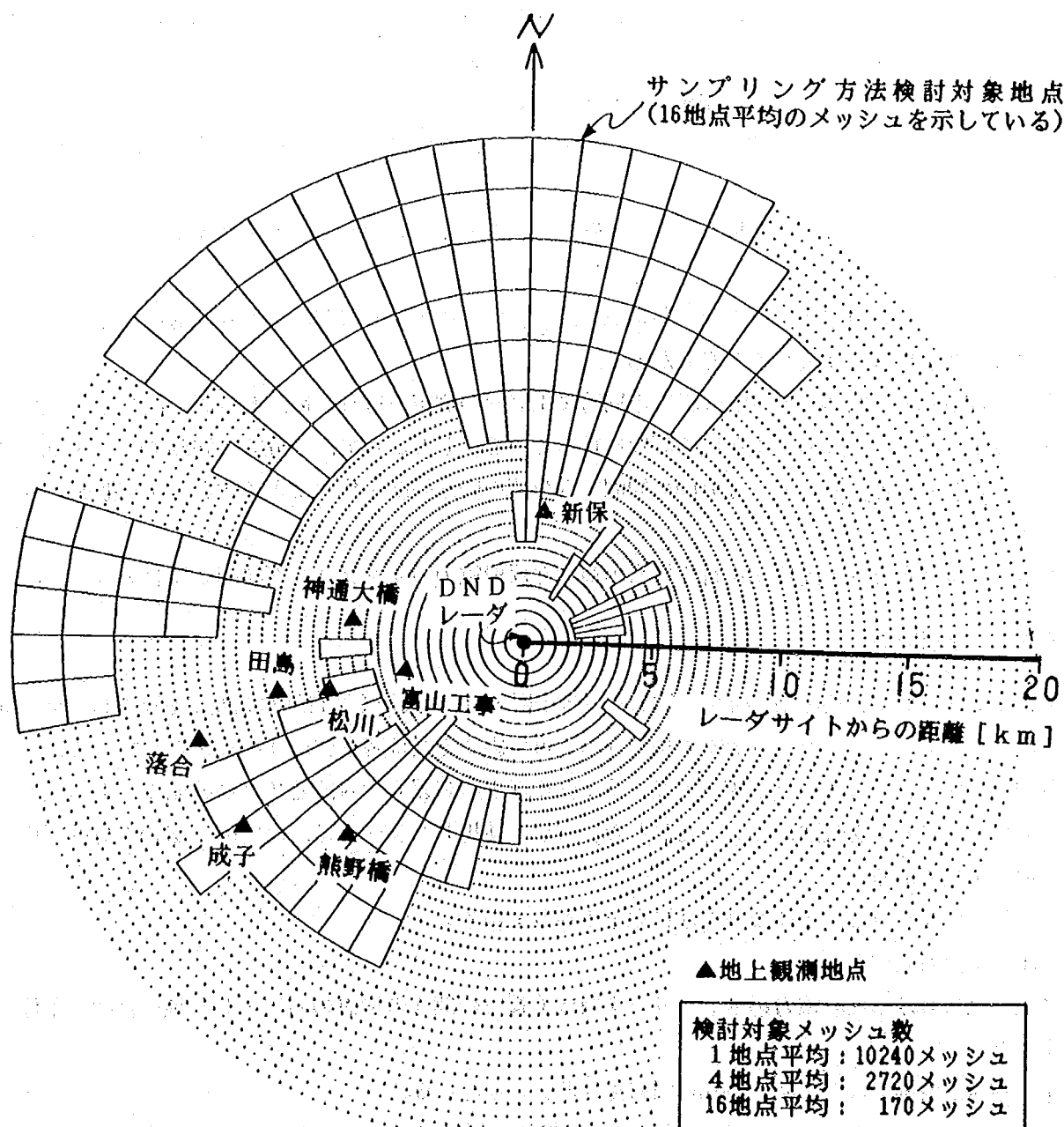


図-4.4.1 検討対象地区

なお、大地クラッタは、昭和62年6月17日10時～11時に観測された5分間平均値4セットを用いた。

(2) 検討対象降雨

検討の対象とした降雨は、9月18日12時～18時の計6時間の降雨とした。この時の地上観測降雨量及びレーダ観測降雨量を、図-4.4.2に示す(図は、9月18日10時からの降雨状況を示している)。観測所の位置は、図-4.4.1に示す通りである。1時間降水量で10mm/h以上になった時があり、比較的検討するのに良い降雨である。

使用したデータの最大の反射因子は50dBZ程度であった。したがって、対象とした降雨強度は0～70mm/h程度である($B=200$, $\beta=1.5$ で換算)。

(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、次の2種類で行った。

① 条件1

- 平均(積分)する全てのデータの受信電力が、-102.5dBm以上
- 15分間又は60分間の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(反射因子では12.53dBZ以上)

② 条件2

- 平均(積分)する全てのデータの受信電力が、-102.5dBm以上
- 15分間又は60分間の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(反射因子では27.53dBZ以上)

a.は、レーダーの最小受信電力が-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。

条件2は、平均後の値が、降水強度換算で2.0mm/h以上で、少雨を取り除いて検討する場合である。

(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反射因子 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、最適なサンプリング時間について検討した。

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。それぞれの計算式は(4.4.1)～(4.4.3)に示す通りである。

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

$$\text{標準偏差} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Z'_i - Z_{oi})^2} \quad \dots\dots\dots (4.4.2)$$

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

ここで、 N : 対象地点数

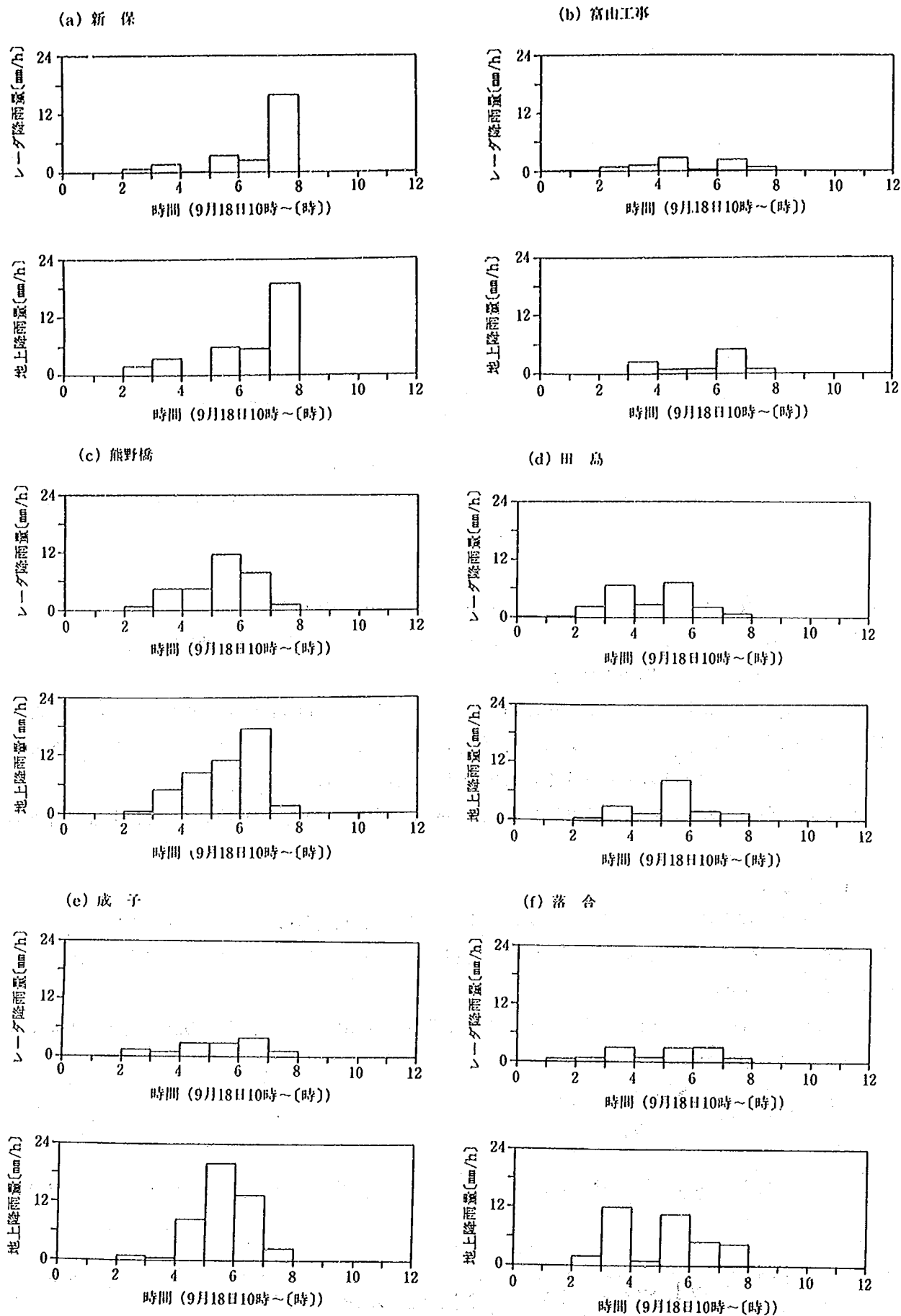


図-4.4.2 9月18日10時以降の降雨状況

Σ : 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. サンプリング方法

サンプリングの方法を図-4.4.3に示す。ここで、検討の対象としたサンプリング方法は、1/1、1/2、1/3、1/5、3/5、1/10、1/15、5/15の8通りである。

ここで、1/1とは、15分または1時間内のすべてのデータを収集(積分)する方法である。また、1/2とは、2分間の内最初の1分間だけデータを収集(積分)することを繰り返す方法である。1/3とは、3分間の内最初の1分間だけデータを収集することを繰り返す方法である。同様に、1/5とは5分間の内1分間だけ、3/5とは5分間の内最初の3分間だけ、1/15とは15分間の内最初の1分間だけ、5/15とは15分間の内最初の5分間だけ、データを収集することを繰り返す方法である。

したがって、1時間平均値の場合、データ収集総時間は、1/1で60分間、1/2で30分間、1/3で20分間、1/5で12分間、3/5で36分間、1/10で6分間、1/15で4分間、5/15で20分間である。

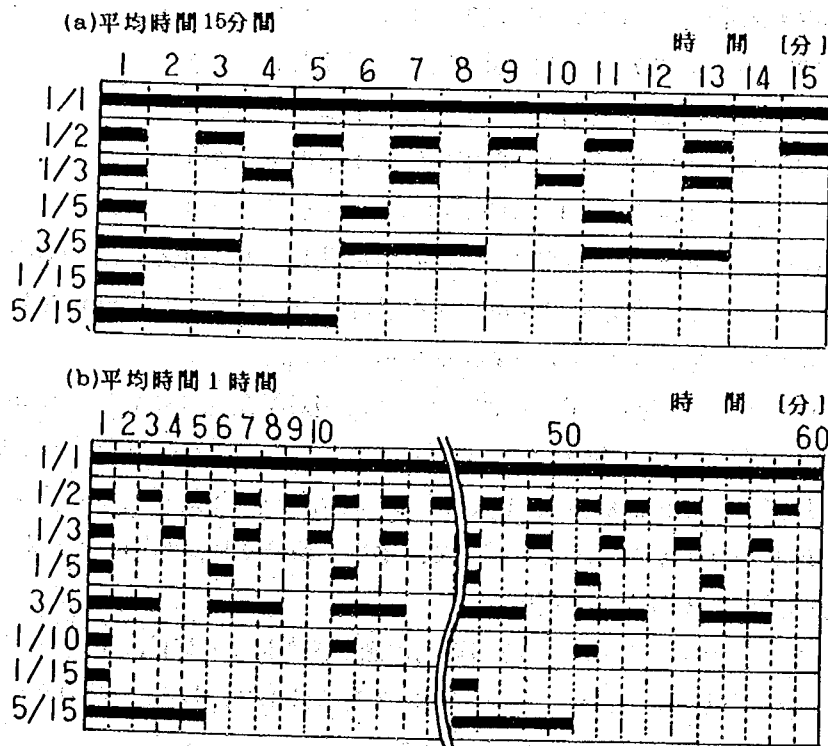


図-4.4.3 サンプリング方法

また、データ収集間隔（データを収集しない時間）は、1/1で0分間、1/2で1分間、1/3で2分間、1/5で4分間、3/5で2分間、1/10で9分間、1/15で14分間、5/15で10分間である。

4.4.4 サンプルング方法の検討結果

検討結果を表一4.4.1～4.4.2、図一4.4.4～4.4.7に示す。

表一4.4.1は、サンプルング時間による反射因子の測定誤差の一覧を表している。表一4.4.2は、サンプルング時間による降水強度の測定誤差の一覧を表している。図一4.4.4は、サンプルング方法の違いによる反射因子 Z の $10\log Z$ [dBZ] の散布図を表している。図一4.4.5はサンプルング時間の違いによる降水強度の散布図を表している。図一4.4.6(1)～(3)は、サンプルング方法と反射因子の測定誤差の関係を表している。図(1)は、データ収集総時間から見たサンプルング方法と反射因子の測定誤差の関係を、図(2), (3)はデータ収集間隔（データを収集していない時間）から見たサンプルング方法と反射因子の測定誤差の関係を表している。図一4.4.7(1)～(4)は、データ収集間隔（データを収集していない時間）から見たサンプルング方法と降水強度の測定誤差の関係を表している。図(1), (2)は平均時間の相違による測定誤差の変化を表している。

これから、次のことがわかった。

- ① 相対誤差及び標準偏差はデータ収集総時間とは一義的な関係がない。例えば、サンプルング方法(1/3)と(5/15)は、データ収集総時間は同じであるが、相対誤差及び標準偏差は、(5/15)に方が(1/3)より4～5倍程度大きい。
- ② 相対誤差及び標準偏差はデータ収集間隔（データを収集しない時間）と線形の関係がある。例えば、サンプルング方法(1/3)と(3/5)は、データ収集総時間が1時間平均値の場合で20分間と36分間と大きく違うが、相対誤差及び標準偏差はほぼ同じである。
- ③ データ収集間隔と測定誤差の間には次の関係がある。

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

$$E_z = 1.4 T, \sigma_z = 0.39 T \quad (15 \text{ 分間平均値, } 1 \text{ 地点データ})$$

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

$$E_R = 5.0 T, \sigma_R = 0.36 T \quad (15 \text{ 分間平均値, } 1 \text{ 地点データ})$$

ここで、 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、 E_R [%] は降水強度を測定する場合の相対誤差、 σ_R [mm/h] は降水強度を測定する場合の標準偏差、 T [分] はデータ収集間隔である。

- ④ 平均（積分）時間を、15分間から1時間にすると、相対誤差及び標準偏差は45～60%減少する。したがって、平均（積分）時間を増やすことによって測定誤差を減少させる効果がある。
- ⑤ 平均（積分）地点を、1地点から16地点にすることにより、相対誤差および標準偏差は、平均で20～30%程度しか減少しない。したがって、平均（積分）地点を増やすことによって測定誤差を減少させる効果はあまり大きくない。
- ⑥ 上記①～⑤から、1時間降水強度を10%以内の測定誤差にするには、データ収集間隔を、1地点平均の場合で3分間以内（つまり、サンプルング方法は1/2, 1/3, 3/5）、4地点平均で4分間以内、16地点平均で5分間以内にする必要がある。
- ⑦ また、降水強度を正確に測定するには、頻繁に観測することが望ましい。

表- 4.4.1 サンプルング時間による反射因子の測定誤差 (1 時間平均値)

サンプリング 方 法	平 均 地点数	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	11343	23.20	23.19	1.000	0.7	0.201
	4	2885	23.03	23.02	1.000	0.5	0.154
	16	730	22.90	22.89	1.000	0.5	0.126
1/3	1	11343	23.20	23.19	0.999	1.3	0.358
	4	2885	23.03	23.01	0.999	1.0	0.283
	16	730	22.90	22.89	1.000	0.8	0.229
3/5	1	11343	23.20	23.19	0.999	1.2	0.325
	4	2885	23.03	23.01	0.999	1.0	0.271
	16	730	22.90	22.89	1.000	0.8	0.223
1/5	1	11343	23.20	23.19	0.996	2.4	0.674
	4	2885	23.03	23.01	0.997	2.0	0.560
	16	730	22.90	22.88	0.998	1.7	0.454
5/10	1	11343	23.20	23.12	0.978	5.5	1.530
	4	2885	23.03	22.93	0.982	4.9	1.359
	16	730	22.90	22.80	0.988	4.1	1.131
5/15	1	11343	23.20	23.15	0.976	5.7	1.586
	4	2885	23.03	22.97	0.979	5.3	1.476
	16	730	22.90	22.82	0.985	4.6	1.258
1/15	1	11343	23.20	23.13	0.950	8.2	2.315
	4	2885	23.03	22.94	0.958	7.4	2.104
	16	730	22.90	22.79	0.969	6.4	1.784

[計算条件]

① 観 測 時 間 : 昭和 62 年 9 月 18 日 12 時 00 分 ~ 18 時 00 分の 6 時間

② 平 均 方 法 : log 平均

③ 平均 (積分) 時間 : 60 分間

④ 使 用 デ ー タ : 受信電力 $P_r > -102.5 \text{ dBm}$

平均反射因子 $Z_0, Z' > 12.53 \text{ dBZ}$ (降水強度 $R > 0.2 \text{ mm/h}$)

[記号説明]

① Z_0 : 真の平均反射因子

② Z' : 各種サンプリング方法による平均反射因子

③ 相対誤差 : $\{ \sum (|Z' - Z_0| / Z_0) \} / N$

④ 標準偏差 : $\{ \sum (Z' - Z_0)^2 \} / N$

⑤ N : サンプル数

表-4.4.2 サンプルング時間による降水強度の測定誤差(1時間平均値)

サンプリング 方 法	平 均 地点数	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	1	12267	3.19	3.17	0.998	3.7	0.221
	4	3128	3.13	3.12	0.999	2.5	0.137
	16	805	3.05	3.04	1.000	1.8	0.084
1/3	1	12267	3.19	3.17	0.995	6.6	0.386
	4	3128	3.13	3.12	0.997	4.7	0.286
	16	805	3.05	3.04	0.999	3.4	0.176
3/5	1	12267	3.19	3.17	0.996	5.6	0.333
	4	3128	3.13	3.12	0.998	4.2	0.256
	16	805	3.05	3.04	0.999	3.1	0.170
1/5	1	12267	3.19	3.17	0.984	12.0	0.639
	4	3128	3.13	3.11	0.991	9.1	0.524
	16	805	3.05	3.03	0.995	6.7	0.350
1/10	1	12267	3.19	3.10	0.941	24.5	1.332
	4	3128	3.13	3.05	0.958	20.6	1.029
	16	805	3.05	2.97	0.798	16.3	0.747
5/15	1	12267	3.19	3.10	0.946	24.1	1.262
	4	3128	3.13	3.05	0.955	22.2	1.121
	16	805	3.05	2.97	0.972	18.4	0.844
1/15	1	12267	3.19	3.12	0.871	35.9	2.045
	4	3128	3.13	3.06	0.897	31.3	1.758
	16	805	3.05	2.98	0.939	25.7	1.278

[計算条件]

- ① 観 測 時 間：昭和62年9月18日12時00分～18時00分の6時間
- ② 平均(積分)時間：60分
- ③ 使 用 デ ー タ：受信電力 $P_r > -102.5\text{dBm}$
平均降水強度 $R_0, R' > 0.2\text{mm/h}$

[記号説明]

- ① R_0 ：真の平均反射因子
- ② R' ：各種サンプリング方法による平均反射因子
- ③ 相対誤差： $\{ \sum (|R' - R_0| / R_0) \} / N$
- ④ 標準偏差： $\{ \sum (R' - R_0)^2 \} / N$
- ⑤ N ：サンプル数

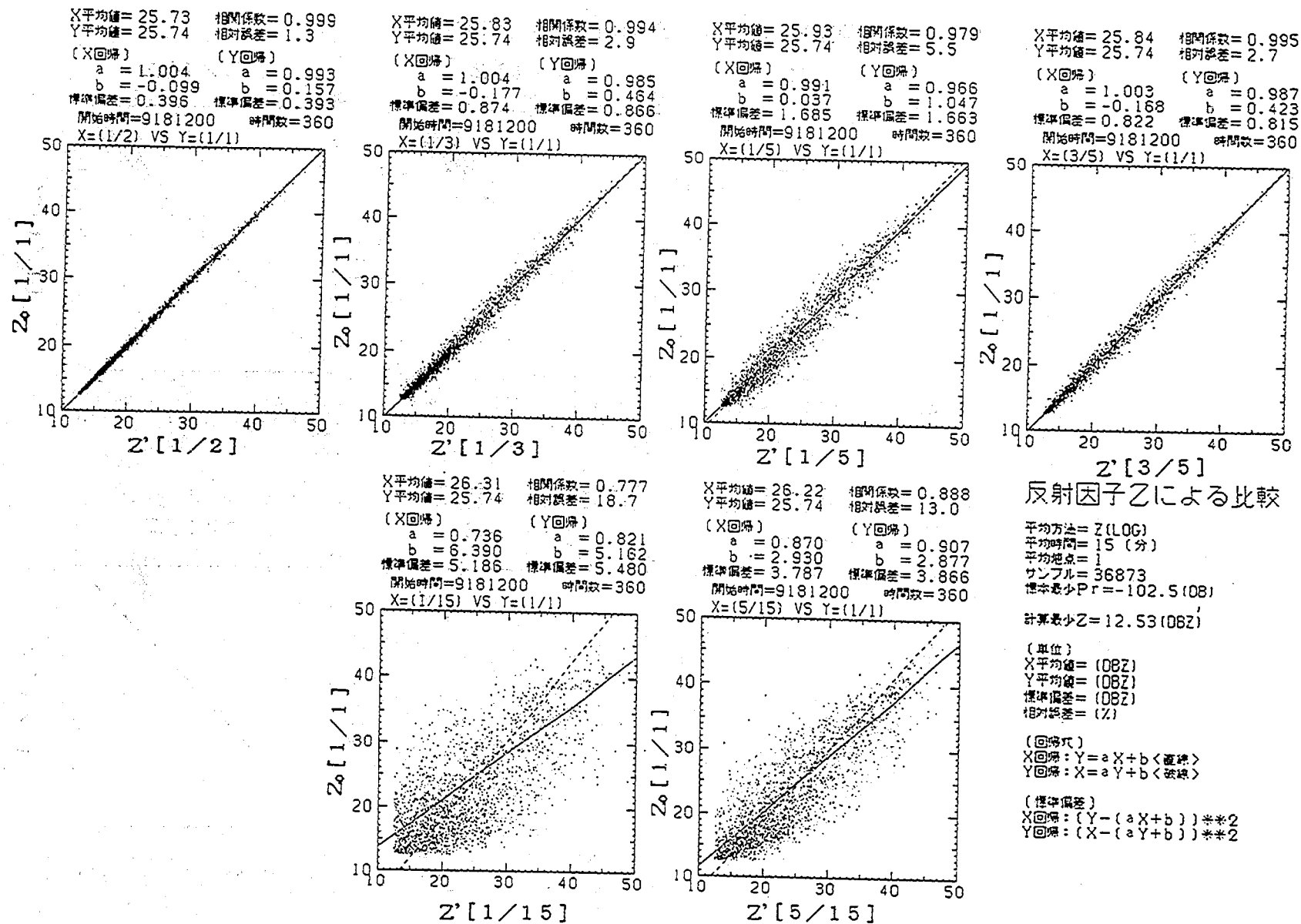


図-4.4.4(1) サンプル方法の違いによる反射因子の散布図

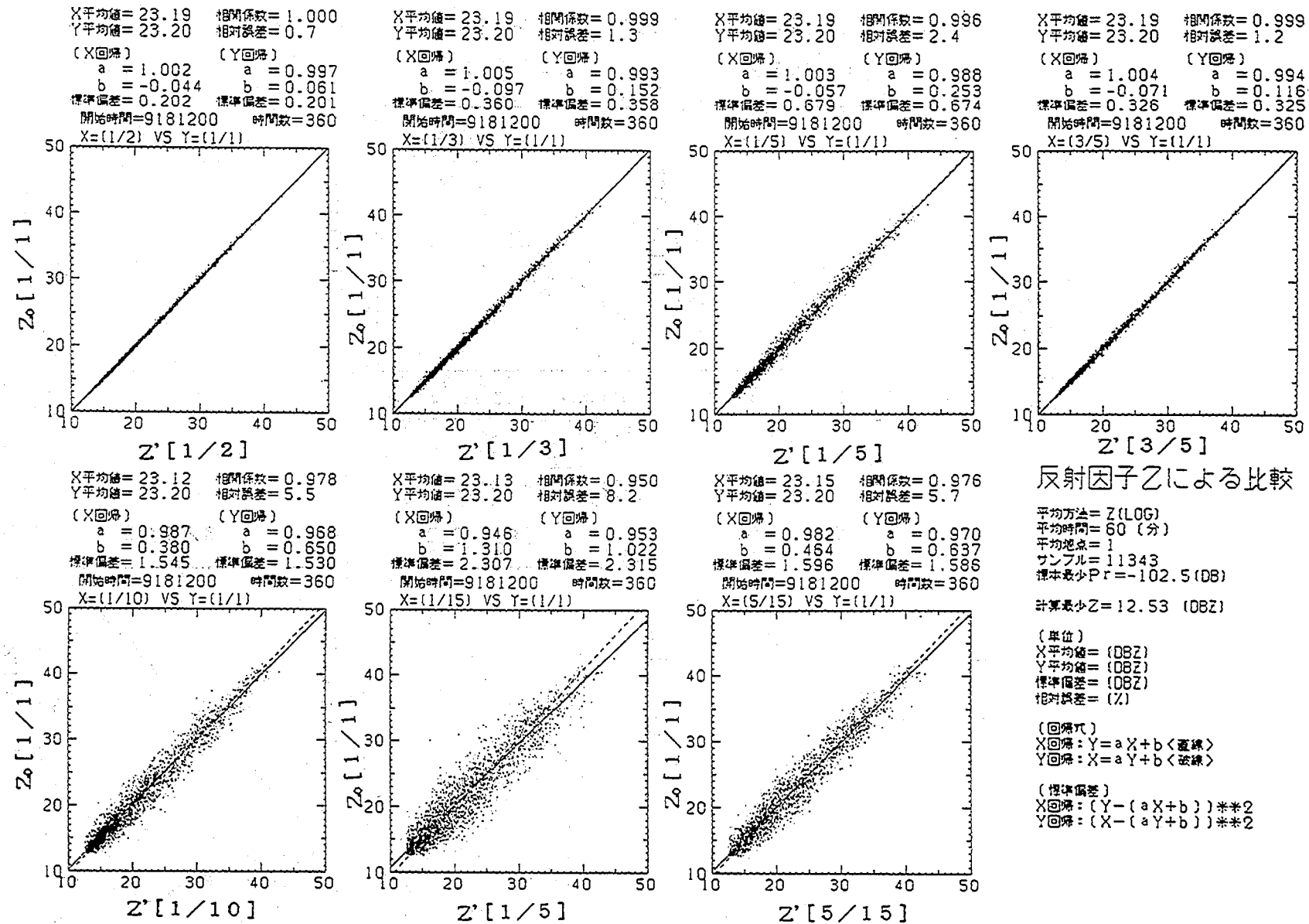


図-4.4.4(2) サンプルング方法の違いによる反射因子の散布図

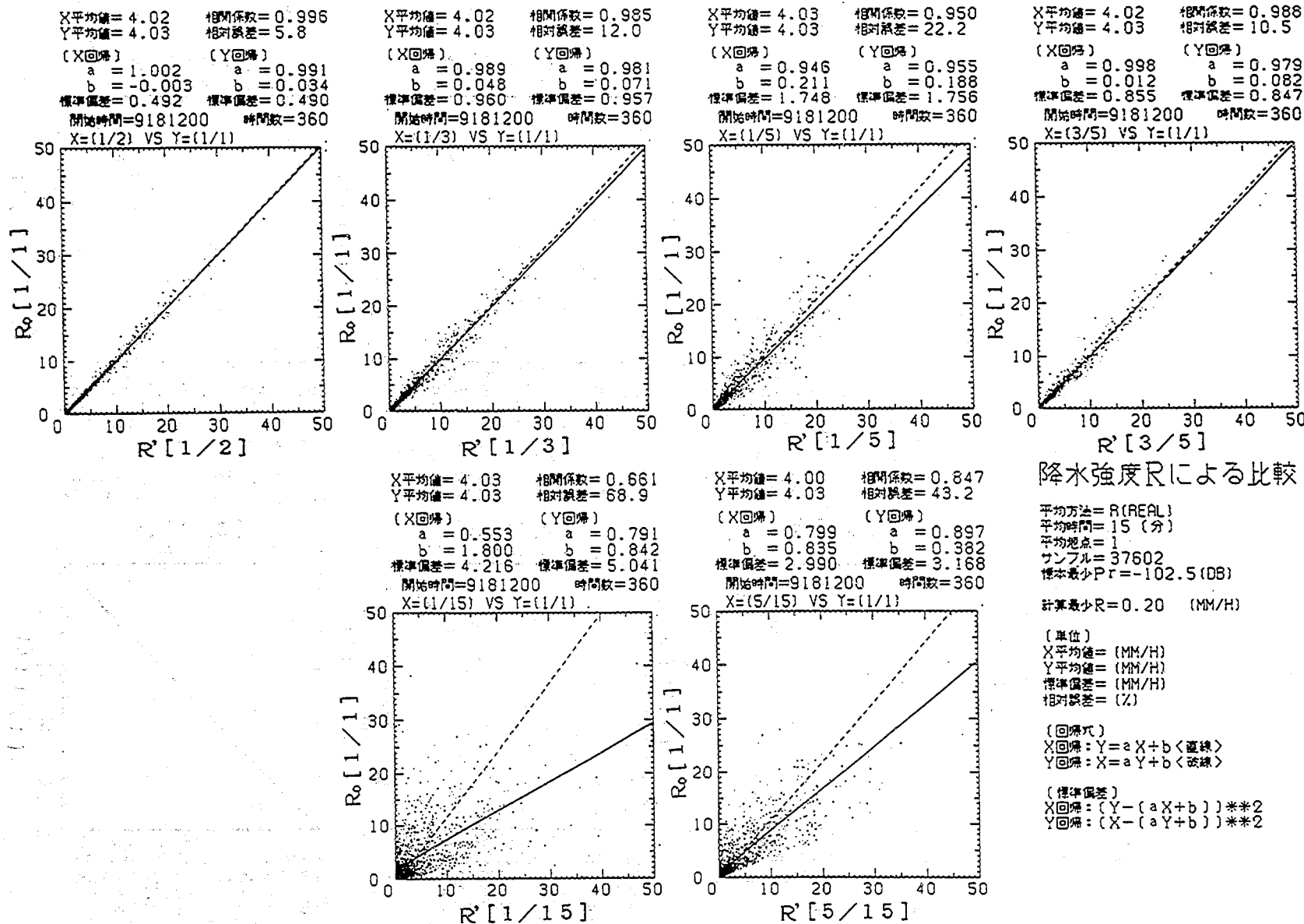


図-4.4.5(1) サンプリング方法の違いによる降水強度の散布図

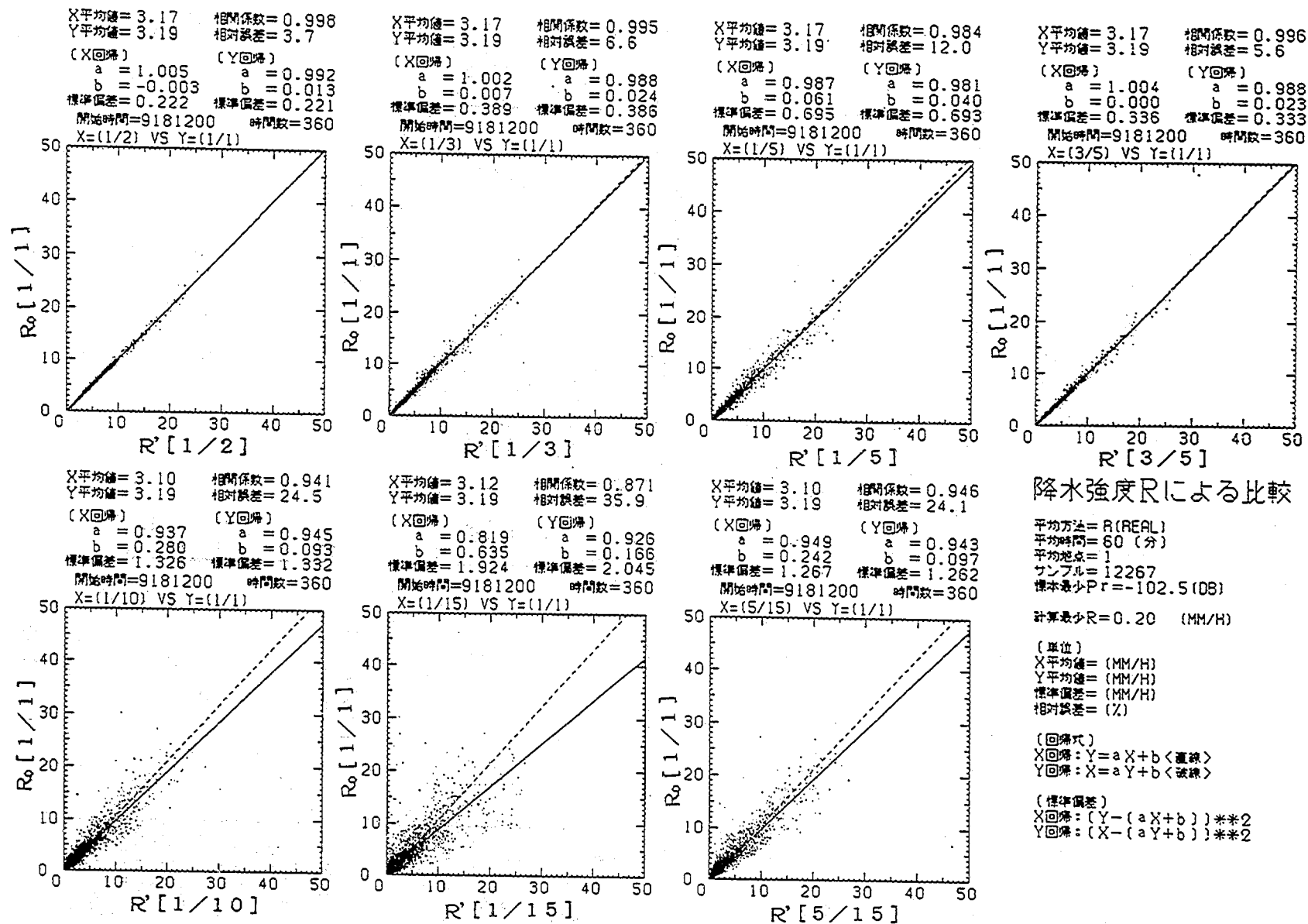
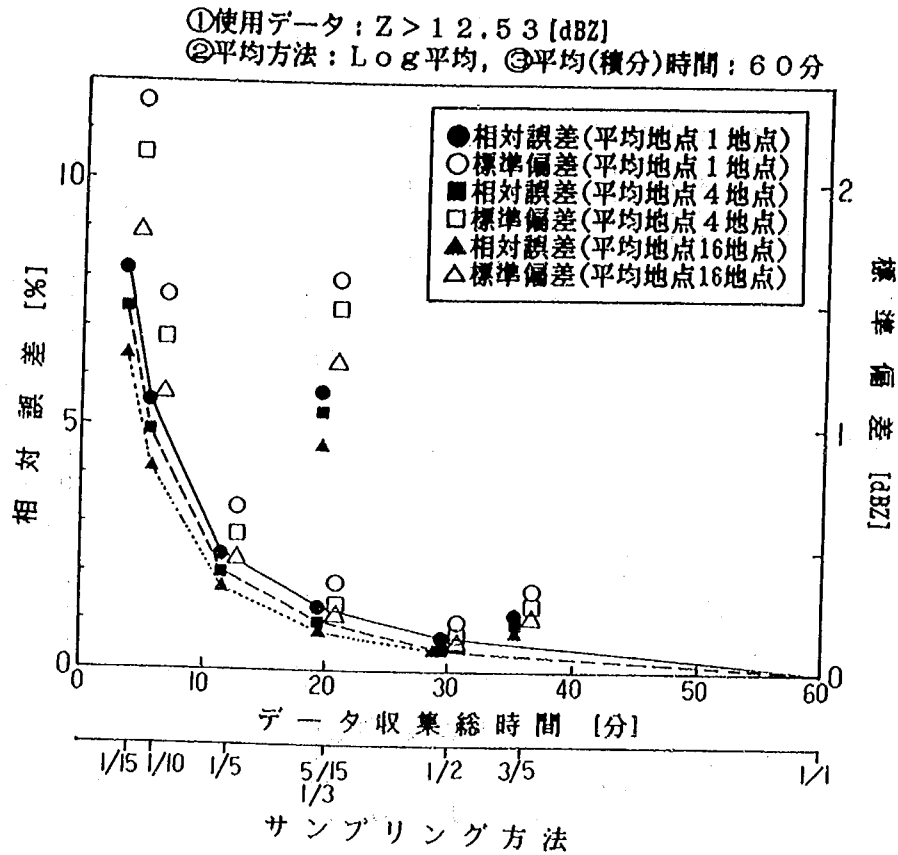
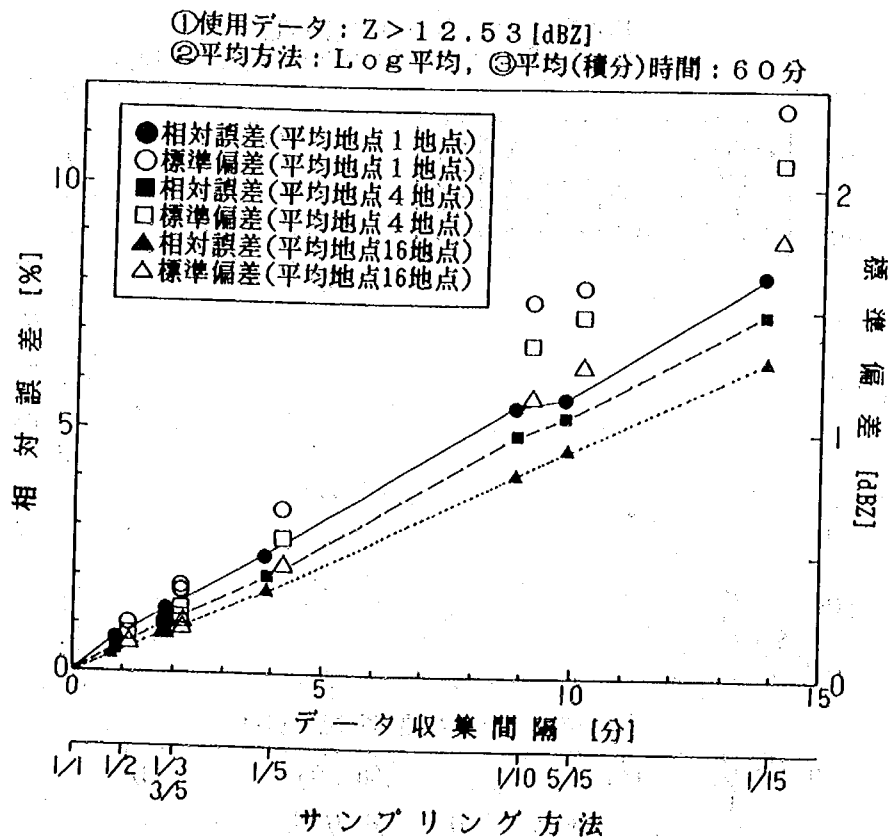


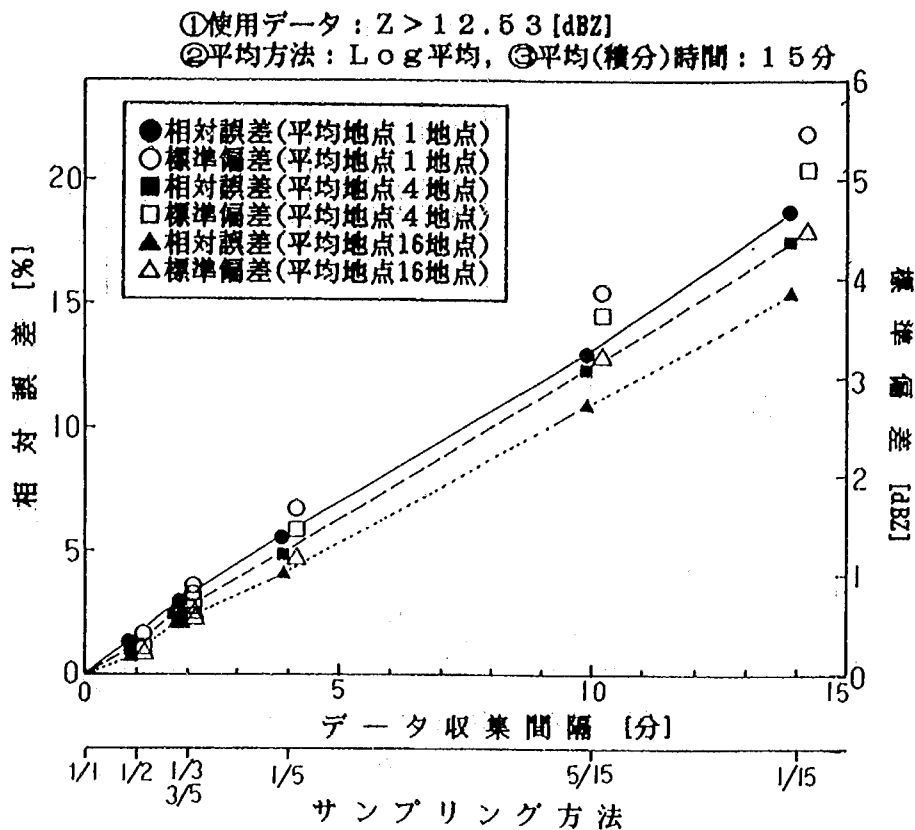
図-4.4.5(2) サンプリング方法の違いによる降水強度の散布図



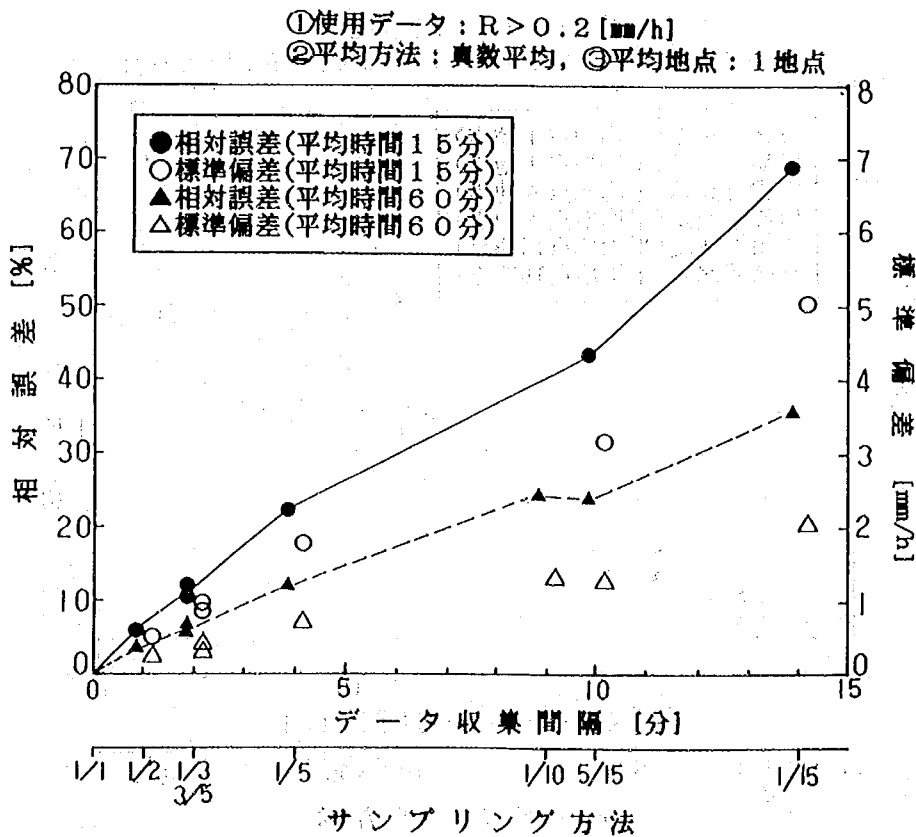
図一 4.4.6(1) サンプリング方法と反射因子の測定誤差の関係



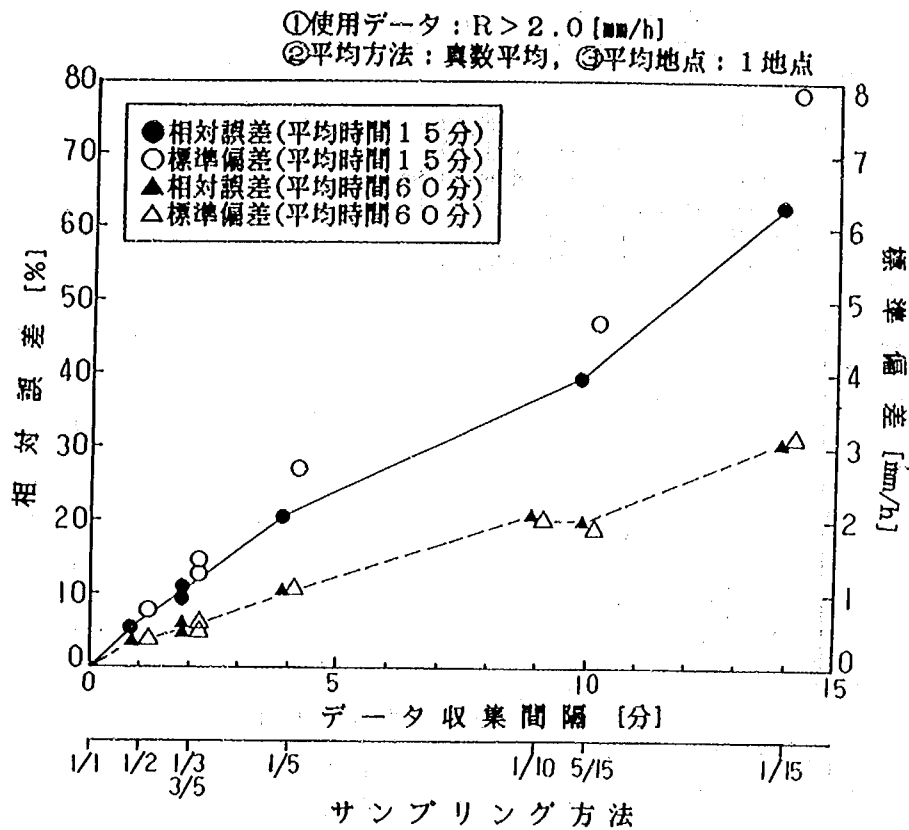
図一 4.4.6(2) サンプリング方法と反射因子の測定誤差の関係



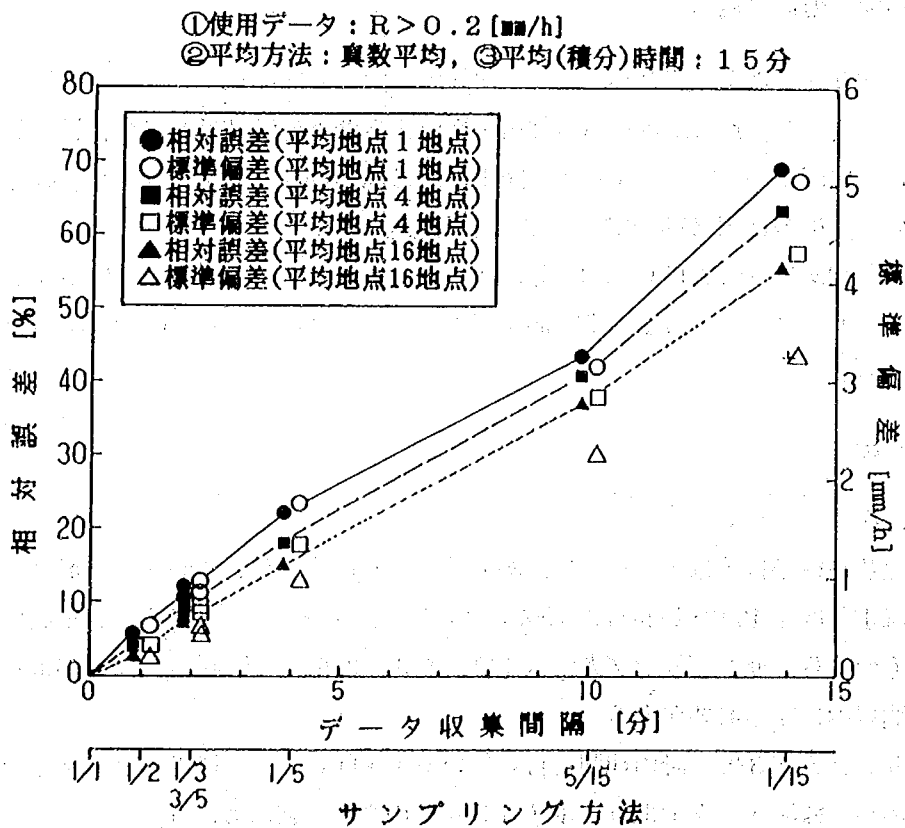
図一 4.4.6 (3) サンプリング方法と反射因子の測定誤差の関係



図一 4.4.7 (1) サンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係



図一 4. 4. 7 (2) サンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係



図一 4. 4. 7 (3) サンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係

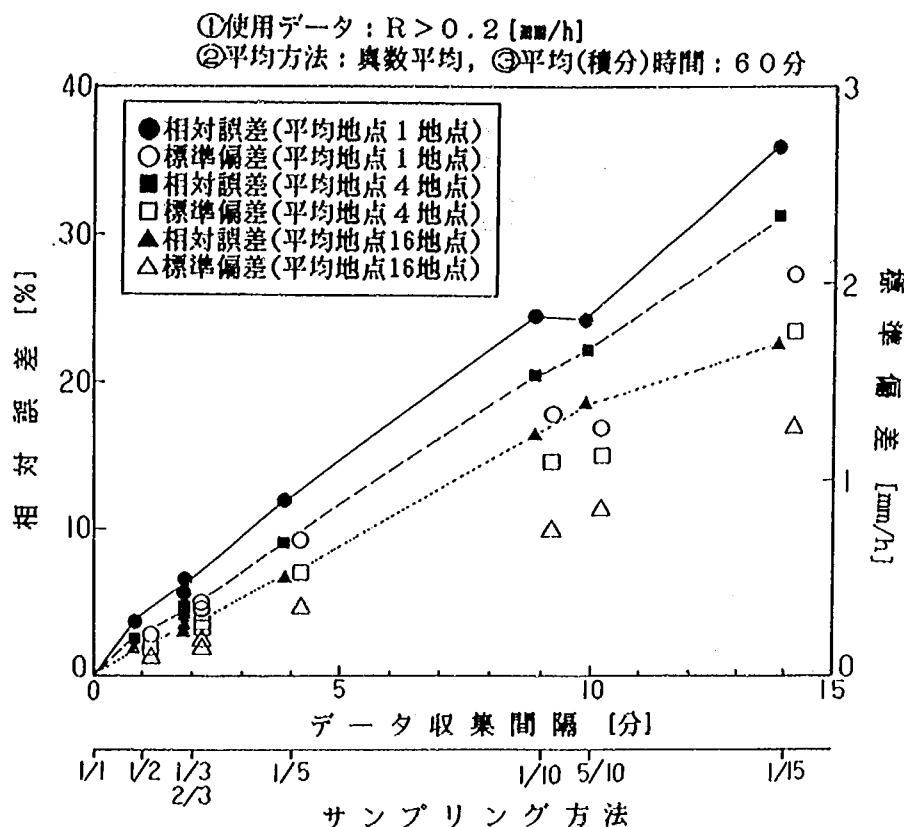


図 4.4.7 (4) サンプリング方法と降水強度の測定誤差の関係

4.4.5 反射因子の自己相関

ここで、サンプリングによる誤差が、データ収集総時間にではなく、データ収集間隔（データを収集しない時間）に対して線形の関係がある理由を検討するため、反射因子 Z の自己相関を求めた。

図 4.4.8 に反射因子の自己相関を示す。図中の点は 15 分毎に求めた値を示す。直線は全データを用いて求めた値を、破線は 15 分毎に求めた値の平均値を示す。

これから、自己相関は 5 分後に 0.6、10 分後に 0.4 になるように時間が経つにつれて急激に悪くなる。したがって、サンプリング方法による測定誤差は、データを収集していない時間間隔に比例することが理解される。

4.4.6 まとめ

本調査から、次のことが分かった。

- ① 相対誤差及び標準偏差はデータ収集間隔（データを収集しない時間）と線形の関係がある。
- ② 1 時間降水強度を 10 % 以内の測定誤差にするには、データ収集間隔を、1 地点平均の場合で 3 分間以内（つまり、サンプリング方法は $1/2$, $1/3$, $3/5$ ）、4 地点平均で 4 分間以内、16 地点平均で 5 分間以内にする必要がある。
- ③ サンプリング方法 $3/5$ で降雨観測を行っている DND レーダの運用パターン 2 の観測データは、十分精度の良い観測データであり、1 メッシュそのまま利用できる。

- ①観測日時：昭和62年9月18日12時00分～18時00分
 ②使用データ：1分間平均値， $Z > 12.53$ [dBZ]
 ③平均地点：1地点
 ④サンプル数：18512

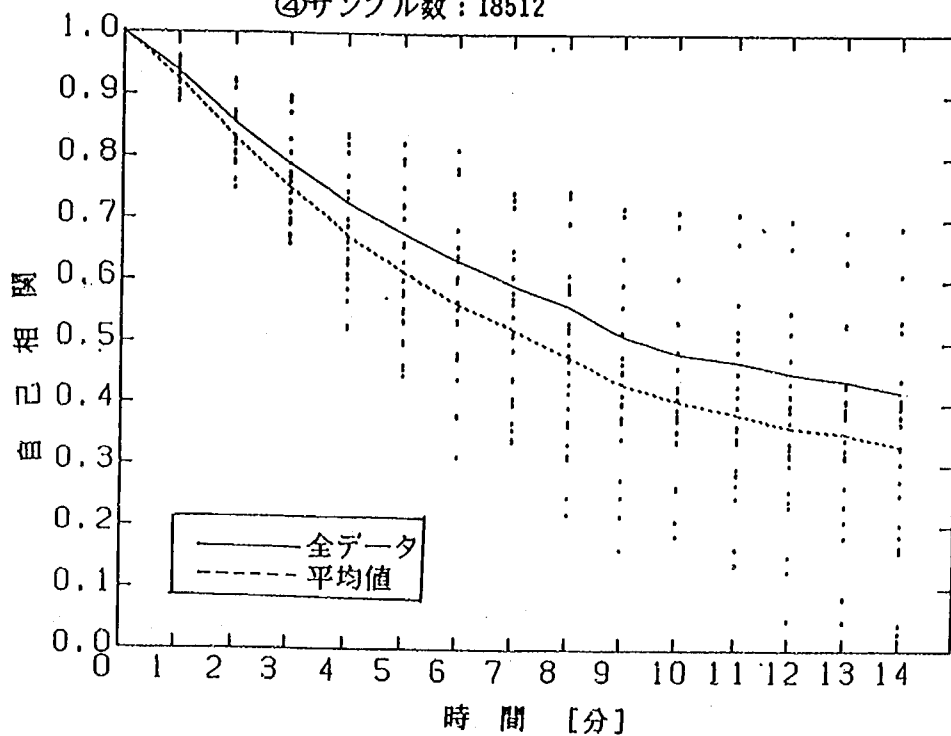


図-4.4.8 反射因子の自己相関係数

4.5 Z_{DR} による降水強度の測定精度

Z_{DR} 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 に何粒あるか」が分かれば、雨滴の落下速度を考慮することにより、降水強度が分かる。

つまり、雨滴が球でないことにより生じる「水平偏波で測定した反射因子 Z_H と垂直偏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 に何粒あるか」が分かれば、雨滴の落下速度を考慮することにより、降水強度が分かる。

本報告書は、

- ① Z_{DR} を用いた降水強度測定的基础事項である「雨滴の形状」及び「後方散乱断面積」についてのレビュー（4.5.1 及び 4.5.2）
- ② Joss 等によって測定された粒径分布を利用した「理論的な Z_H と Z_{DR} の関係」の調査（4.5.3）
- ③ Z_{DR} による降水強度の測定の具体的な方法とその問題点の把握（4.5.4）
- ④ 実際の観測データを用いた Z_{DR} による降水強度の測定精度の検定（4.5.5）

の結果を記述するものである。

4.5.1 雨滴の形状

Pruppacher and Beard の風洞実験¹等から、「大気中を一定の速度（終端速度）で落下する雨滴は偏平しており、粒径が大きくなるに従いその偏平の度合も大きくなる」ことが、知られている。

*1：垂直な風洞の中に水滴を浮遊させ、それを撮影する実験。

ここでは、Pruppacher and Pitter [1971] によって用いられた雨滴の形状の計算の方法とその結果を示す。

(1) 計算方法

(a) つりあいの式

大気のような粘性体の中を重力に従い落下する雨滴は、その表面で、内部からの力と外部からの力とがつりあう形状になる。

大気の乱れ等を見れば、雨滴に働く力は重力方向について対称なもののみとなり、形状は、その方向について対称になると考えることができる。

Pruppacher and Pitter は、雨滴に働く力のつりあいをこの対称軸（重力方向を向き、雨滴の中心を通る軸）を含む断面上（図-4.5.1 参照）

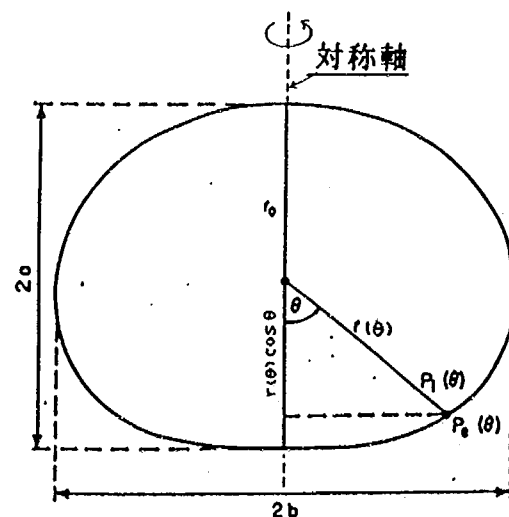


図-4.5.1 雨滴の横断面

で考え、次に示す関係を導いた。

$$\sigma [1/R_1(\theta) + 1/R_2(\theta)] = P_i(\theta) - P_e(\theta) \quad \dots\dots\dots (4.5.1)$$

ここで、

- σ : 水の表面張力
- R_1, R_2 : 主たる曲率半径
- P_i : 雨滴の内部からの圧力
- P_e : 雨滴の外部からの圧力

そして、内部からの圧力 $P_i(\theta)$ を

$$P_i(\theta) = P_i(\theta=\pi) + g(\rho_w - \rho_a)(r_0 + r(\theta) \cos \theta) + P_{ic}(\theta) \quad \dots\dots\dots (4.5.2)$$

ここで、

- g : 重力加速度
- ρ_w : 水の密度
- ρ_a : 空気の密度
- P_{ic} : 雨滴の内部での水の循環による圧力への寄与分

とし、静圧 P_∞ を加減することにより、つりあいの式を次のように求めた。

$$\begin{aligned} \sigma [1/R_1(\theta) + 1/R_2(\theta)] &= g(\rho_w - \rho_a)(r_0 + r(\theta) \cos \theta) \\ &\quad - [P_e(\theta) - P_\infty] + P_{ic}(\theta) + [P_i(\theta=\pi) - P_\infty] \quad \dots\dots\dots (4.5.3) \end{aligned}$$

(b) 数値計算のテクニック

雨滴の表面 $r(\theta)$ は、

$$r(\theta) = a_0 \left(1 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos n\theta \right) \quad \dots\dots\dots (4.5.4)$$

ここで、

- a_0 : 等価半径
- C_n : 雨滴の変形率。 a_0 により異なる値を持つ。

と、表すことができる。

変形率が分かれば、それを当該式に代入することにより、雨滴の形状が求まる。

以下に、Pruppacher and Pitter が、前述のつりあいの式((4.5.3)式)からこの変形率をどのように求めたかを示す。

まず、彼らは、(4.5.3)式中の、

(ア) 曲率に関する項 $\sigma [1/R_1(\theta) + 1/R_2(\theta)]$ を

$$\begin{aligned} \sigma [1/R_1(\theta) + 1/R_2(\theta)] &= (\sigma/a_0) \left[2 + \sum_{n=0}^{\infty} (n^2 - 2) C_n \cos n\theta \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^{\infty} n C_n \sum_{m=1}^n \cos(n-2m)\theta \right] \quad \dots\dots\dots (4.5.5) \end{aligned}$$

(イ) 空気の動圧(Aerodynamic Pressure)及び水の内部での循環に関する項 $[P_e(\theta) - P_\infty] - P_{ic}(\theta)$ を

$$[P_e(\theta) - P_\infty] - P_{ic}(\theta) = (1/2) \rho_a V_\infty^2 \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cos n\theta \quad \dots\dots\dots (4.5.6)$$

ここで、

- V_∞ : 落下速度
- q_n : 圧力の分配に関する係数(Pressure distribution coefficients)

(ウ) 内部の圧力の超過分 $[P_i(\theta=\pi) - P_\infty]$ を

$$[P_i(\theta=\pi) - P_\infty] = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (4.5.7)$$

と変形し、圧力のつりあいの式を

$$\begin{aligned} & -N_{Bo} \left\{ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cos n\pi + \cos \theta \right. \\ & \quad + 1/2 \sum_{n=0}^{\infty} C_n [\cos(n+1)\theta + \cos(n-1)\theta] \} \\ & \quad + [2 + \sum_{n=0}^{\infty} (n^2 - 2) C_n \cos n\theta \\ & \quad + \sum_{n=0}^{\infty} n C_n \sum_{m=1}^n \cos(n-2m)\theta] \\ & = -N_{We} \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cos n\theta + K \quad \dots\dots\dots (4.5.8) \end{aligned}$$

ここで、

N_{Bo} : Bond Number

$$\begin{aligned} N_{Bo} &= a_0^2 (\rho_w - \rho_a) g / \sigma \\ &\doteq a_0^2 \rho_w g / \sigma^{*1} \end{aligned}$$

*1 : ρ_a は、 ρ_w に比して充分小さい

N_{We} : Weber Number

$$N_{We} = 1/2 a_0 \rho_a V_\infty^2 / \sigma$$

K : 定数

$$K = [P_i(\theta=\pi) - P_\infty] / \sigma$$

の形にまとめた。

このつりあいの式は、

$$\sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos n\theta = 0 \quad \dots\dots\dots (4.5.9)$$

とみなせるが、この式が、雨滴の任意の表面上(すべての $\theta : 0 \leq \theta < 2\pi$) で成立する条件は、

$$A_n = 0 \quad (n=0, 1, 2, 3, \dots) \quad \dots\dots\dots (4.5.10)$$

となるので、 n についての総和を N で打ち切ったとすると、 $N+1$ 本の連立方程式を解くことによって、変形率 C_n ($n=0, 1, 2, \dots, N$) が求まることになる。

実際は、『変形率 C_0 は、 $C_2, C_4, C_6, \dots$ を用い次式(4.5.11)のように表すことができ』また、『 C_1 は 0 とおくことができる』ので、 $N-1$ 本の連立方程式を解けばよいことになる。

$$C_0 = \sum_{n=1}^{\infty} C_{2n} / (4n^2 - 1) \quad \dots\dots\dots (4.5.11)$$

なお、彼らの研究では $N=9$ としているが、この場合連立方程式は式のとおりとなる。

$$\begin{bmatrix} 4 & A & 8 & 0 & 12 & 0 & 16 & 0 \\ A & 10 & A & 10 & 0 & 14 & 0 & 18 \\ 0 & A & 18 & A & 12 & 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & A & 28 & A & 14 & 0 & 18 \\ 0 & 0 & 0 & A & 40 & A & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A & 54 & A & 18 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A & 70 & A \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A & 88 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \\ C_8 \\ C_9 \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ q_6 \\ q_7 \\ q_8 \\ q_9 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.5.12)$$

ここで,

$$A = -1/2 N_{80}$$

$$B = -N_w$$

(2) 計算結果

(a) 等価半径 a_0 と長軸長 b , 短軸長 a との比 a/b の関係

(ア) 図-4.5.2 に前述の方法によって求めた雨滴の a/b と Green の式(下式)から得られる a/b の関係を示す。

$$a_0 = \{ \sigma / (g \rho_w) (e^{-2} - 2e^{-1/3} + 1) e^{-1/3} \}^{1/2} \dots\dots\dots (4.5.13)$$

ここで, $e = a/b$

この図から, Green の式により得られる a/b は, Pruppacher and Pitter の方法によるものと良く一致していることが分かる。

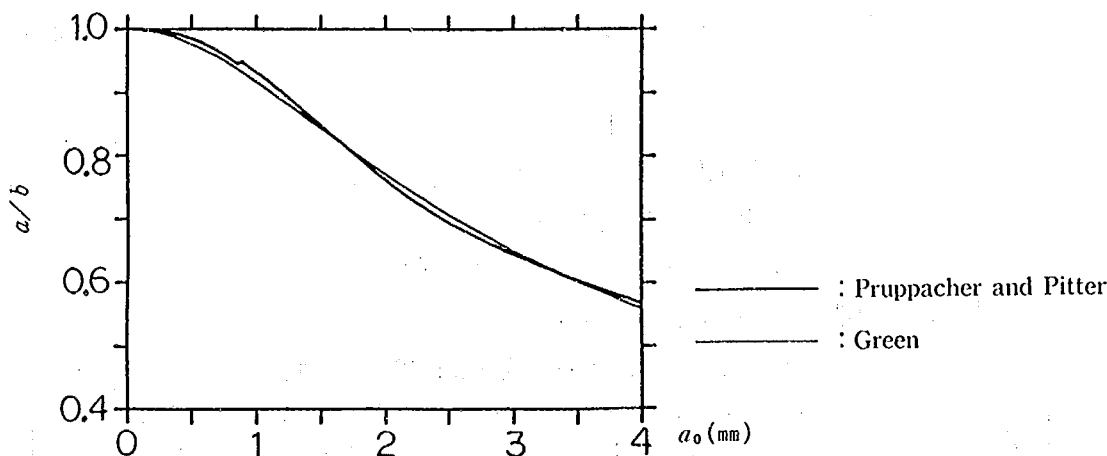


図-4.5.2 等価半径 a_0 と長軸長 b , 短軸長 a との比 a/b の関係

なお, 今回の計算では, 等価半径 a_0 が, 0.05 ~ 4.00mm の 80 個の雨滴を対象とした。そして, 水の密度 ρ_w として $0.99820 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 空気の密度 ρ_a として $1.188 \times 10^{-3} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 重力加速度 g として $980.665 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-2}$, 水の表面張力 σ として $72.75 \text{ erg}\cdot\text{cm}^{-3}$, 落下速度 V_∞ として Best の式(下式)を用いて計算した。

$$V_\infty(a_0) = 958.0 \{ 1 - \exp [-(a_0/0.0885)^{1.147}] \} \dots\dots\dots (4.5.14)$$

また, 圧力の分配に関する係数 q_n は, Le Clair et al. [1970] によって計算された, もしくは, Fage [1936] によって測定された

$$[P_s(\theta) - P_\infty] / (\rho_a V_\infty^2 / 2) = \sum_{n=0}^{\infty} q_n \cos n\theta \dots\dots\dots (4.5.15)$$

の値を用いて計算した(最小自乗法による)。特に, 等価半径が 0.85mm 以下の雨滴の q_n は Le Clair et al. によって計算された値を用いて求めた。この時, (4.5.15) 式における総和は $n=9$ で打ち切った。また, 0.90mm 以上の雨滴の q_n は Fage によって測定された値を用いて求めた。この時は, $n=19$ で打ち切った。

(イ) 図-4.5.3 に, 雨滴が存在する位置(高度)の違いによって, どの程度 a/b が変わるかを示す。

この図から, 位置(高度)による a/b の差はほとんどないと考えられる。

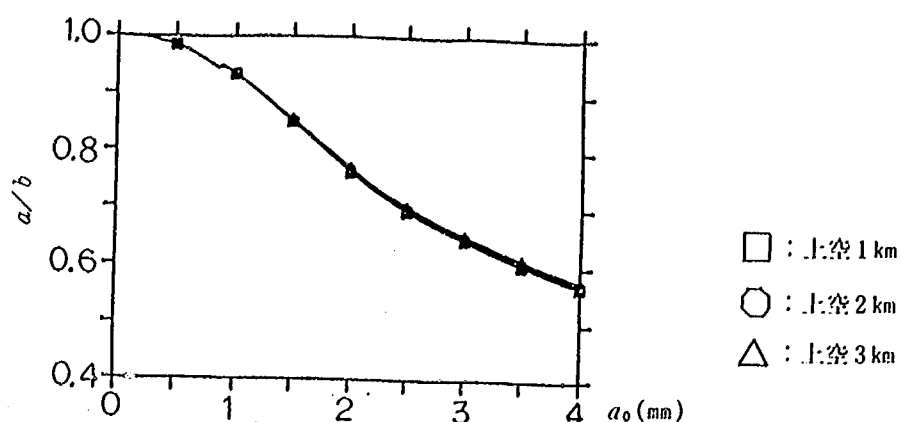


図-4.5.3 等価半径 a_0 と長軸長 b , 短軸長 a との比 a/b の関係
 なお, 上空での落下速度は, 下式により求めた。

$$V(a_0) = V_0(a_0) (\rho_0/\rho)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (4.5.16)$$

ここで,

V : 上空での落下速度

V_0 : 地上付近での落下速度 (式 (4.5.14))

ρ : 上空での空気の密度

ρ_0 : 地上付近での空気の密度

また, その他の定数は下表のとおりとした。

表-4.5.1 雨滴の形状計算に用いた定数

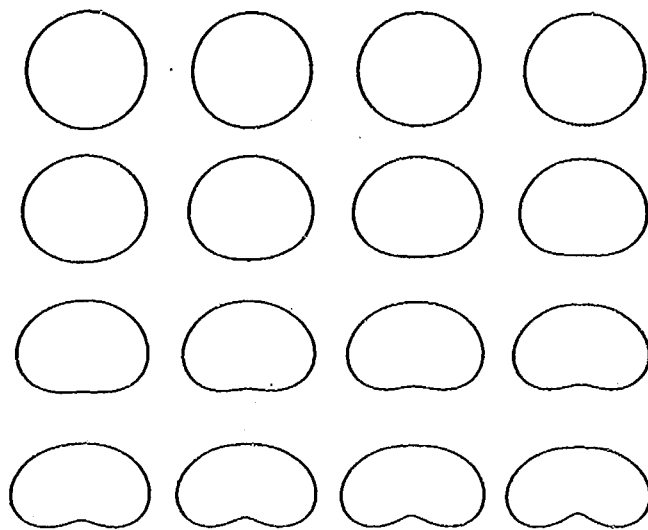
定数 \ 高度	1 km	2 km	3 km
空気の密度 ρ_a [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1.1116×10^{-3}	1.0065×10^{-3}	0.9091×10^{-3}
重力加速度 g [$\text{cm}\cdot\text{sec}^{-2}$]	980.360	980.050	979.740

厳密には, 圧力の分配に関する係数も位置 (高度) によって変わると考えられるが, 今回の計算ではこれは無視した。(ア) と同じ値を用いた。

(b) 横断面

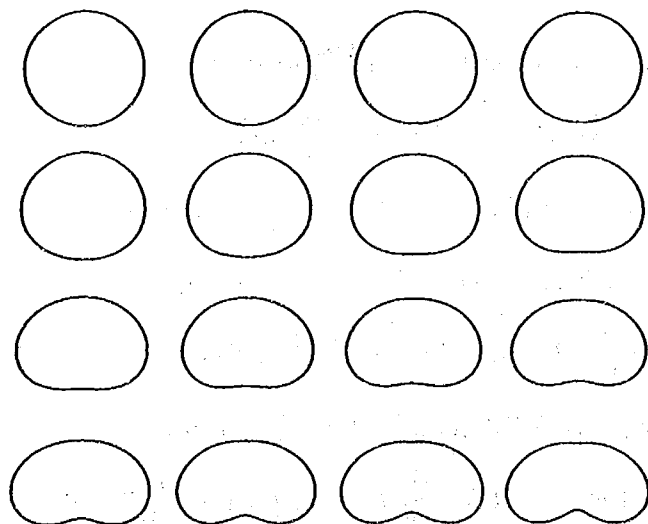
図-4.5.4, 図-4.5.5 に, 今回計算した雨滴の横断面を数例示す。これらの図から, 位置 (高度) による形状の差はほとんどないと考えられる。

なお, これらの図では, 偏平の度合の比較しやすさを考え, 表面 $r(\theta)$ を $1/a_0$ 倍している。



(ア) に示した定数による雨滴
等価半径 0.05~4.00mm
(左上から横並びで)

図- 4. 5. 4 雨滴の横断面



上空 3 km の雨滴
等価半径 0.05~4.00mm
(左上から横並びで)

図- 4. 5. 5 雨滴の横断面

4. 5. 2 後方散乱断面積

後方散乱断面積は、その散乱の対象である雨滴の形状に大きく影響を受ける。雨滴を球形とした場合の後方散乱断面積は、Rayleigh によりその近似解が、また、Mie によって厳密解が導かれた、また、雨滴を回転楕円体とした場合は、Gans によってその近似解が導かれた。

ここでは、Pruppacher and Pitter と同じ方法で求めた雨滴（以後、P-P 雨滴と呼称する。）の後方散乱断面積の計算の方法とその結果を示す。

一般に、球形でない雨滴は『変形雨滴』と呼ばれ、その散乱断面積を計算する方法については数多くの方法が考案されているが、ここでは、Morrison and Cross によって考案された『最小自乗法と組み合わせたポイントマッチング法』について記述する。

『最小自乗法と組み合わせたポイントマッチング法』とは、雨滴の表面上の数点をサンプルし、それらの点で最も良く電磁界の連続の条件が満たされるように散乱波及び透過波の展開係数を求める方

法である。展開係数が求まれば、それから散乱マトリクスが求まり、後方散乱断面積が計算できる。

(1) 計算方法

(a) 入射波、散乱波及び透過波の展開

任意の電磁場をベクトル C で表すと、ベクトル波動方程式は、

$$\nabla \nabla \cdot C - \nabla \times \nabla \times C + k^2 C = 0 \quad \dots\dots\dots (4.5.17)$$

ここで、

C : 任意の電磁場を表すベクトル

k^2 : $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j \omega \mu \sigma$

ω : 角周波数

ϵ : 誘電率

μ : 透磁率

σ : 導電率

となる。

この方程式を球面座標において解けば、

$$\begin{aligned} L_{\theta mn} = & \left[\frac{\partial}{\partial R} Z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\cos}{\sin} m \phi i_r \right] \\ & + \left[\frac{1}{R} Z_n(kR) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\cos}{\sin} m \phi i_\theta \right] \\ & + \left[-\frac{m}{R \cdot \sin \theta} Z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\sin}{\cos} m \phi i_\phi \right] \quad \dots\dots (4.5.18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{\theta mn} = & \left[-\frac{m}{\sin \theta} Z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\sin}{\cos} m \phi i_\theta \right] \\ & + \left[-Z_n(kR) \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\cos}{\sin} m \phi i_\phi \right] \quad \dots\dots (4.5.19) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{\theta mn} = & \left[\frac{n(n+1)}{kR} Z_n(kR) P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\cos}{\sin} m \phi i_r \right] \\ & + \left[\frac{1}{kR} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \{ R \cdot Z_n(kR) \} \frac{\partial}{\partial \theta} P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\cos}{\sin} m \phi i_\theta \right] \\ & + \left[-\frac{m}{kR \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \{ R \cdot Z_n(kR) \} P_n^m(\cos \theta) \right] \cdot \left[\frac{\sin}{\cos} m \phi i_\phi \right] \\ & \dots\dots\dots (4.5.20) \end{aligned}$$

ここで、

Z_n : n 次の球 Bessel 関数

P_n^m : Legendre 陪関数

という独立な解が得られる。

今、雨滴に水平偏波もしくは垂直偏波の電磁波が入射したとする。電界と磁界の直交性等の物理的な性質を考慮すると、入射波、散乱波及び透過波の電磁界ベクトルは、次式のように展開される。

$$\vec{E}^i = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (a_{\theta mn}^i M_{\theta mn}^{(i)} + b_{\theta mn}^i N_{\theta mn}^{(i)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.21)$$

$$\vec{H}^i = \frac{jk}{\omega \mu} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (b_{\theta mn}^i M_{\theta mn}^{(i)} + a_{\theta mn}^i N_{\theta mn}^{(i)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.22)$$

$${}^V_H E^s = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (a_{\theta mn}^s M_{\theta mn}^{(4)} + b_{\theta mn}^s N_{\theta mn}^{(4)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.23)$$

$${}^V_H H^s = \frac{jk}{\omega \mu} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (b_{\theta mn}^s M_{\theta mn}^{(4)} + a_{\theta mn}^s N_{\theta mn}^{(4)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.24)$$

$${}^V_H E^t = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (a_{\theta mn}^t M_{\theta mn}^{(1)} + b_{\theta mn}^t N_{\theta mn}^{(1)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.25)$$

$${}^V_H H^t = \frac{ik_1}{\omega \mu} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} (b_{\theta mn}^t M_{\theta mn}^{(1)} + a_{\theta mn}^t N_{\theta mn}^{(1)}) \quad \dots\dots\dots (4.5.26)$$

ここで、右上添字 i, s 及び t は、それぞれ入射波、散乱波及び透過波を表す。また、左上添字 H, V は偏波状態を表し、それぞれ水平偏波、垂直偏波を意味する。例えば、 ${}^V_H E^t$ は、垂直偏波の入射波による電界を表すことになる。なお、(4.5.25)式及び、(4.5.26)式の場合、その M 及び N の中の k ((4.5.19), (4.5.20)式参照)は、 k_1 と考えるものとする。

$a_{\theta mn}, b_{\theta mn}$ は、展開係数と呼ばれるもので、特に、入射波に関するもの($a_{\theta mn}^i, b_{\theta mn}^i$)は解析的に解くことができる。

また、 $M_{\theta mn}, N_{\theta mn}$ の右上の添字(1)及び(4)は、 $M_{\theta mn}, N_{\theta mn}$ が、それぞれ第1種及び第4種の球 Bessel 関数で表されることを意味している。

(b) 境界条件

雨滴の内部及び外部の電磁界を E^{in}, H^{in} 、及び E^{out}, H^{out} とすると、それぞれ次のようになる。

$${}^V_H E^{out} = {}^V_H E^i + {}^V_H E^s \quad \dots\dots\dots (4.5.27)$$

$${}^V_H H^{out} = {}^V_H H^i + {}^V_H H^s \quad \dots\dots\dots (4.5.28)$$

$${}^V_H E^{in} = {}^V_H E^t \quad \dots\dots\dots (4.5.29)$$

$${}^V_H H^{in} = {}^V_H H^t \quad \dots\dots\dots (4.5.30)$$

P-P 雨滴は、回転対称軸を有しており、この軸について対称な形状を持つので、その表面 r は、図-4.5.6 のような球面座標を用いて $r=f(\theta)$ と表すことができる。

境界条件とは、境界面(雨滴と接する平面)に平行な電界及び磁界の成分が、雨滴の内部と外部とで連続なことである。

雨滴の内部及び外部の電界を球面座標の各成分に分け、それぞれ $E_{\phi}^{in}, E_{\phi}^{out}, E_r^{in}, E_r^{out}, E_{\theta}^{in}, E_{\theta}^{out}$ とすると、

(ア) 水平方向(ϕ 方向)について(その対称性から)

$${}^V_H E_{\phi}^{in} = {}^V_H E_{\phi}^{out} \quad \dots\dots\dots (4.5.31)$$

(イ) 縦方向(θ 方向)について

$${}^V_H E_r^{in} \sin \tau - {}^V_H E_{\theta}^{in} \cos \tau = {}^V_H E_r^{out} \sin \tau - {}^V_H E_{\theta}^{out} \cos \tau \quad \dots\dots\dots (4.5.32)$$

となり、磁界についても同様に

$${}^V_H H_{\phi}^{in} = {}^V_H H_{\phi}^{out} \quad \dots\dots\dots (4.5.33)$$

$${}^V_H H_r^{in} \sin \tau - {}^V_H H_{\theta}^{in} \cos \tau = {}^V_H H_r^{out} \sin \tau - {}^V_H H_{\theta}^{out} \cos \tau \quad \dots\dots\dots (4.5.34)$$

が、得られる。

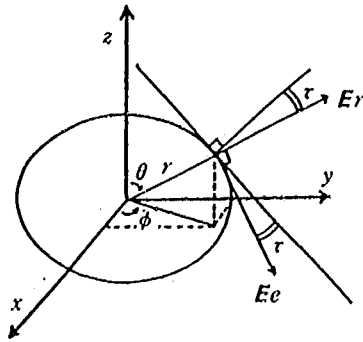


図-4.5.6 座標系

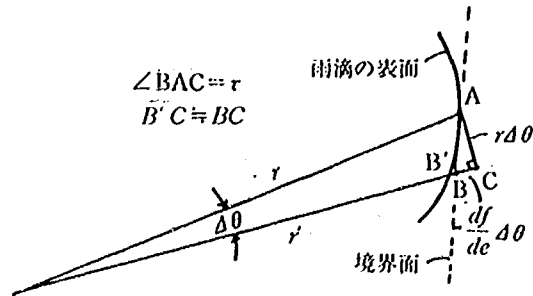


図-4.5.7 τ と r との関係

図-4.5.7の三角形ABCを見て頂きたい。

BC (r と r' との差) は,

$$BC = f(\theta) - f(\theta + \Delta\theta) = -\frac{df}{d\theta} \cdot \Delta\theta \quad (4.5.35)$$

と近似することができる。

また、 AC は、 $\Delta\theta$ が充分小さいとすると、

$$AC = r\Delta\theta \quad (4.5.36)$$

となる。

(4.5.35) 式と (4.5.36) 式から、

$$\tan \tau = -\frac{1}{r} \cdot \frac{df}{d\theta} \quad (4.5.37)$$

となり、(4.5.31) ~ (4.5.34) 式は、次のようになる。

$${}^{\vee}E_{\phi}^{\text{out}} = {}^{\vee}E_{\phi}^{\text{in}} \quad (4.5.38)$$

$${}^{\vee}H_{\phi}^{\text{out}} = {}^{\vee}H_{\phi}^{\text{in}} \quad (4.5.39)$$

$${}^{\vee}E_{\theta}^{\text{out}} + \frac{1}{r} \cdot \frac{df}{d\theta} {}^{\vee}E_r^{\text{out}} = {}^{\vee}E_{\theta}^{\text{in}} + \frac{1}{r} \cdot \frac{df}{d\theta} {}^{\vee}E_r^{\text{in}} \quad (4.5.40)$$

$${}^{\vee}H_{\theta}^{\text{out}} + \frac{1}{r} \cdot \frac{df}{d\theta} {}^{\vee}H_r^{\text{out}} = {}^{\vee}H_{\theta}^{\text{in}} + \frac{1}{r} \cdot \frac{df}{d\theta} {}^{\vee}H_r^{\text{in}} \quad (4.5.41)$$

ここで、下添字 r, θ, ϕ は、球面座標での各成分を表す。例えば、 ${}^{\vee}E_{\theta}^{\text{in}}$ は、直線偏波の電波が入射した時に雨滴内部にできる電界の θ 成分を表すことになる。

(4.5.21) ~ (4.5.26) 式を (4.5.27) ~ (4.5.30) 式に代入すれば、雨滴の内部及び外部の電磁界の球面座標における各成分 (r, θ, ϕ 成分) が容易に求まり、これを (4.5.38) ~ (4.5.41) 式に代入することにより境界条件は、各 m について展開係数を用いて次のように変形される。

$$\begin{aligned} \sum_{n=m}^{\infty} [& \left\{ -\frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} j_n(k_1 r) \right\} \cdot a_{\phi mn}^i + \left\{ \frac{m P_n^m}{k_1 r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial [r j_n(k_1 r)]}{\partial r} \right\} \cdot b_{\phi mn}^i \\ & + \left\{ -\frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} h_n^{(2)}(kr) \right\} \cdot a_{\phi mn}^s + \left\{ \frac{m P_n^m}{-kr \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial [r h_n^{(2)}(kr)]}{\partial r} \right\} \cdot b_{\phi mn}^s \\ & + \left\{ \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} j_n(kr) \right\} \cdot a_{\phi mn}^i + \left\{ \frac{m P_n^m}{-kr \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial [r j_n(kr)]}{\partial r} \right\} \cdot b_{\phi mn}^i] = 0 \end{aligned} \quad (4.5.42)$$

$$\sum_{n=m}^{\infty} \left[\left\{ +\frac{mP_n^m}{-k_1 r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial [rj_n(k_1 r)]}{\partial r} \cdot \frac{k_1}{\mu_1} \right\} \cdot a_{\theta mn}^t + \left\{ -\frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} j_n(k_1 r) \cdot \frac{k_1}{\mu_1} \right\} \cdot b_{\theta mn}^t \right. \\
+ \left\{ +\frac{mP_n^m}{\sin \theta} \cdot \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial [rh_n^{(2)}(kr)]}{\partial r} \cdot \frac{k}{\mu} \right\} \cdot a_{\theta mn}^s + \left\{ \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} h_n^{(2)}(kr) \cdot \frac{k}{\mu} \right\} \cdot b_{\theta mn}^s \\
+ \left\{ \frac{-mP_n^m}{\sin \theta} \cdot \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial [rj_n(kr)]}{\partial r} \cdot \frac{k}{\mu} \right\} \cdot a_{\theta mn}^t + \left\{ \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} j_n(kr) \cdot \frac{k}{\mu} \right\} \cdot b_{\theta mn}^t \Big] = 0 \quad \dots\dots\dots (4.5.43)$$

$$\sum_{n=m}^{\infty} \left[\left\{ +\frac{mP_n^m}{\sin \theta} \cdot j_n(k_1 r) \right\} \cdot a_{\theta mn}^t \right. \\
+ \left\{ \frac{1}{k_1 r} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rj_n(k_1 r)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{k_1 r} \cdot j_n(k_1 r) P_n^m \right\} \cdot b_{\theta mn}^t \\
+ \left\{ -\frac{mP_n^m}{\sin \theta} \cdot h_n^{(2)}(kr) \right\} \cdot a_{\theta mn}^s \\
- \left\{ \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rh_n^{(2)}(kr)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{kr} \cdot P_n^m h_n^{(2)}(kr) \right\} \cdot b_{\theta mn}^s \\
+ \left\{ \frac{-mP_n^m}{\sin \theta} \cdot j_n(kr) \right\} \cdot a_{\theta mn}^t \\
- \left\{ \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rj_n(kr)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{kr} \cdot P_n^m j_n(kr) \right\} \cdot b_{\theta mn}^t \Big] = 0 \quad \dots\dots\dots (4.5.44)$$

$$\sum_{n=m}^{\infty} \left[\left\{ \frac{1}{k_1 r} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rj_n(k_1 r)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{k_1 r} \cdot P_n^m j_n(k_1 r) \right\} \cdot \frac{k_1}{\mu_1} \cdot a_{\theta mn}^t \right. \\
+ \left\{ \frac{-mP_n^m}{\sin \theta} \cdot j_n(k_1 r) \right\} \cdot \frac{k_1}{\mu_1} \cdot b_{\theta mn}^t \\
- \left\{ \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rh_n^{(2)}(kr)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{kr} \cdot P_n^m h_n^{(2)}(kr) \right\} \cdot \frac{k}{\mu} \cdot a_{\theta mn}^s \\
+ \left\{ +\frac{mP_n^m}{\sin \theta} \cdot h_n^{(2)}(kr) \right\} \cdot \frac{k}{\mu} \cdot b_{\theta mn}^s \\
- \left\{ \frac{1}{kr} \cdot \frac{\partial P_n^m}{\partial \theta} \cdot \frac{\partial [rj_n(kr)]}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dr}{d\theta} \cdot \frac{n(n+1)}{kr} \cdot P_n^m j_n(kr) \right\} \cdot \frac{k}{\mu} \cdot a_{\theta mn}^t \\
+ \left\{ +\frac{mP_n^m}{\sin \theta} \cdot j_n(kr) \right\} \cdot \frac{k}{\mu} \cdot b_{\theta mn}^t \Big] = 0 \quad \dots\dots\dots (4.5.45)$$

ここで、 P_n^m は、 $P_n^m(\cos \theta)$ を省略したものである。

(c) 最小自乗法と組み合わせたポイントマッチング法

(4.5.42)～(4.5.45)式において、 m を固定し n に関する総和を N で打ち切ると、未知の展開係数($a_{\theta mn}^t$, $a_{\theta mn}^s$, $b_{\theta mn}^t$ 及び $b_{\theta mn}^s$)の数は $4(N-m+1)$ 個となる。

これらの式は、雨滴の表面上の総ての点で成立する筈である。従って、 θ として $N-m+1$ 種類の値を選び(4.5.42)～(4.5.45)式に代入すれば、 $4(N-m+1)$ 本の連立方程式が得られ未知の展開係数が求まる。(この方法による未知の展開係数の導出をポイントマッチング法という。)

しかし、この(4.5.42)～(4.5.45)式には、これを導出する際の近似化による誤差が含まれているので、選ばれなかった θ でもこれらの式が成立するとは限らない。

そこで、 n に関する総和を N で打ち切った時の(4.5.42)～(4.5.45)式の左辺を θ と未知の展開係数の関数と考え、これらの式を次のように表し、

$$F_{(1)}(\theta, a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}, b_{\theta mn^s}) = \sum_{n=m}^N [(4.5.42) \text{ 参照}] \dots\dots\dots (4.5.46)$$

$$F_{(2)}(\theta, a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}, b_{\theta mn^s}) = \sum_{n=m}^N [(4.5.43) \text{ 参照}] \dots\dots\dots (4.5.47)$$

$$F_{(3)}(\theta, a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}, b_{\theta mn^s}) = \sum_{n=m}^N [(4.5.44) \text{ 参照}] \dots\dots\dots (4.5.48)$$

$$F_{(4)}(\theta, a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}, b_{\theta mn^s}) = \sum_{n=m}^N [(4.5.45) \text{ 参照}] \dots\dots\dots (4.5.49)$$

θ として, $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots\dots\dots, \theta_X$ ($X \geq N-m+1$) を選び, これらを用い, 次式で表される量 Q を考える。

$$Q(a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}, b_{\theta mn^s}) = \sum [|F_{(1)}|^2 + |F_{(2)}|^2 + |F_{(3)}|^2 + |F_{(4)}|^2] \dots\dots\dots (4.5.50)$$

この量 Q を最小化する $a_{\theta mn^t}, a_{\theta mn^s}, b_{\theta mn^t}$ 及び $b_{\theta mn^s}$ は, 選ばれた X 個の点で最も良く (4.5.42) ~ (4.5.45) 式の境界条件を満たすものと考えることができ, これは,

$$\frac{\partial Q}{\partial a_{\theta mn^t}} = 0 \dots\dots\dots (4.5.51)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial a_{\theta mn^s}} = 0 \dots\dots\dots (4.5.52)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b_{\theta mn^t}} = 0 \dots\dots\dots (4.5.53)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \theta} = 0 \dots\dots\dots (4.5.54)$$

から, 求めることができる。

(4.5.51) ~ (4.5.54) 式で示される偏微分方程式から得られる連立方程式を解いて展開係数を求める方法を最小自乗法と組み合わせたポイントマッチング法と呼ぶ。

(d) 後方散乱断面図

図-4.5.8の座標系を考える。

この時, 入射波と散乱波の関係は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_H^s \end{bmatrix} = e^{-jkr} r^{-1} R(\alpha_1) f R(\alpha_1 - \pi/2) \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_H^i \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.5.55)$$

ここで,

E_v : 電界の垂直成分

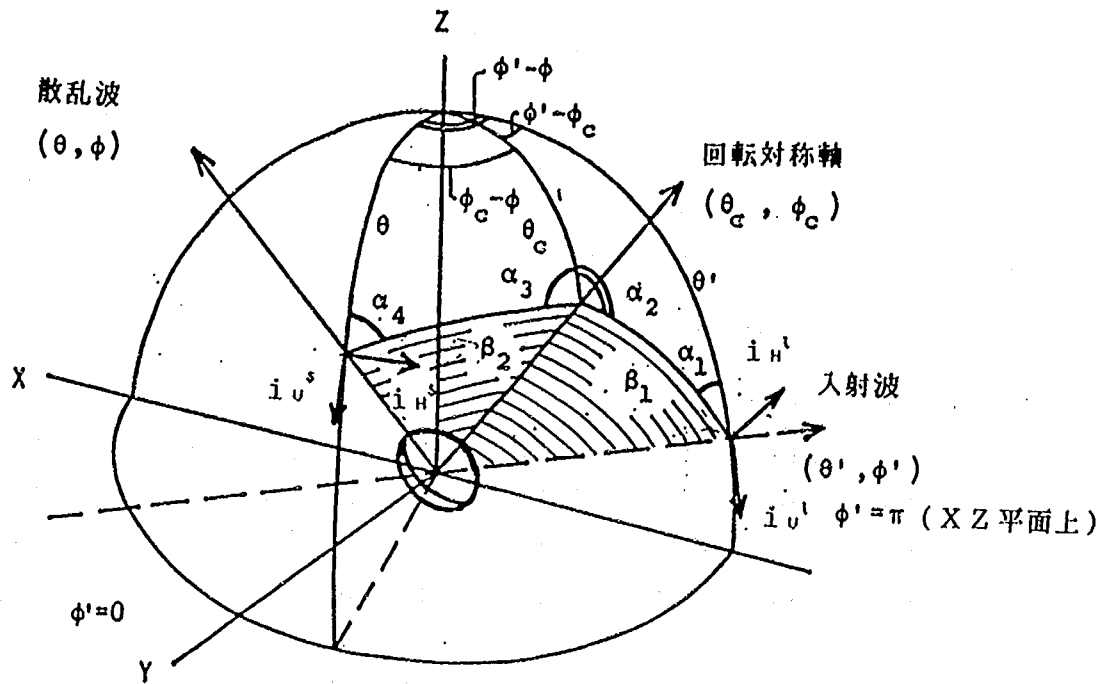
E_H : 電界の水平成分

k : 波数

r : 受信アンテナから雨滴までの距離

R : 座標回転のマトリクス

$$R(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.5.56)$$



i_v^s : 散乱波の垂直成分 (θ 成分)

を示す単位ベクトル

i_h^s : 散乱波の水平成分 (ϕ 成分)

を示す単位ベクトル

i_v^i : 入射波の垂直成分 (θ' 成分)

を示す単位ベクトル

i_h^i : 入射波の水平成分 (ϕ' 成分)

を示す単位ベクトル

図-4.5.8 座 標 系

f : 散乱マトリクス

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.5.57)$$

$$f_{11} = 1/k \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} j^n \{ -j a_{e mn}^s m P_n^m(\cos \theta_s) / \sin \theta_s + b_{o mn}^s d P_n^m(\cos \theta_s) / d \theta_s \} \sin m \phi_s \quad \dots\dots\dots (4.5.58)$$

$$f_{12} = 1/k \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} j^n \{ j a_{o mn}^s m P_n^m(\cos \theta_s) / \sin \theta_s + b_{e mn}^s d P_n^m(\cos \theta_s) / d \theta_s \} \cos m \phi_s \quad \dots\dots\dots (4.5.59)$$

$$f_{21} = 1/k \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} j^n \{ -j a_{e mn}^s d P_n^m(\cos \theta_s) / d \theta_s + b_{o mn}^s m P_n^m(\cos \theta_s) / \sin \theta_s \} \cos m \phi_s \quad \dots\dots\dots (4.5.60)$$

$$f_{22} = 1/k \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=m}^{\infty} j^n \{ -j a_{0mn}^s dP_n^m(\cos \theta_s)/d\theta_s - b_{0mn}^s m P_n^m(\cos \theta_s)/\sin \theta_s \} \sin m\phi_s \quad \dots\dots\dots (4.5.61)$$

P_n^m は Legendre 陪関数

$$\theta_s = \beta_2$$

$$\phi_s = \alpha_2 + \alpha_3 - \pi$$

今, $A = R(\alpha_4) f R(\alpha_1 - \pi/2) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4.5.62)$

とすると, 散乱断面積は,

$$\sigma_{HH} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |E_H^s|^2 / |E_H^i|^2 = 4\pi |a_{22}|^2 \quad \dots\dots\dots (4.5.63)$$

$$\sigma_{HV} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |E_V^s|^2 / |E_H^i|^2 = 4\pi |a_{12}|^2 \quad \dots\dots\dots (4.5.64)$$

$$\sigma_{VV} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |E_V^s|^2 / |E_V^i|^2 = 4\pi |a_{11}|^2 \quad \dots\dots\dots (4.5.65)$$

$$\sigma_{VH} = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 |E_H^s|^2 / |E_H^i|^2 = 4\pi |a_{21}|^2 \quad \dots\dots\dots (4.5.66)$$

と, 求まる。

後方散乱断面積は, それが散乱波の方向が入射波と逆な場合の散乱断面積であるということとを上式に反映させれば, 簡単に求まる。

(2) 計算結果

図-4.5.9 ~ 4.5.11 に, 周波数を 5.28 GHz とした場合に, 高度, 入射角及び温度の差が, 後方散乱断面積にどの程度影響を与えるかを示す。

これらの図から, 次のことが分かる。

- (a) 高度の差が, 後方散乱断面積に及ぼす影響はほとんどない。
- (b) 等価半径が 1.0 mm 以上になると入射角の違いによる後方散乱断面積への影響が顕著になる。また, 入射角 3° と 7° とでは, それほど差がなく, 15° になってようやく差が見え始める。
- (c) 等価半径が 2.0 mm 以上になると温度の違いによる後方散乱断面積への影響が顕著になる。
- (d) 雨滴の形状からの直感的な判断,

$$\frac{\partial [\sigma_{HH}/\sigma_{VV}]}{\partial a_0} \geq 0$$

ここで, σ_{HH}, σ_{VV} : 後方散乱断面積

a_0 : 等価半径

とは異なり,

等価半径 a_0 の増加 (雨滴が大きくなる) に従い, σ_{HH}/σ_{VV} が増加するとは限らない。

なお,

(ア) 複素誘電率 ϵ は, 次式 (P.S.Ray による式) を用いて計算した。 ϵ_r 及び ϵ_i は, ϵ の実数部及び虚数部を表す。 ($\epsilon = \epsilon_r - j\epsilon_i$)

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \{ 1 + (\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) \}}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\alpha)}} \quad \dots\dots\dots (4.5.67)$$

$$\epsilon_i = \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty)(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \cos(\alpha\pi/2)}{1 + 2(\lambda_s/\lambda)^{1-\alpha} \sin(\alpha\pi/2) + (\lambda_s/\lambda)^{2(1-\alpha)}} + \frac{\sigma\lambda}{18.8496 \times 10^{10}} \quad \dots\dots\dots (4.5.68)$$

ここで、 λ は波長 (cm) を表し、その他のシンボルは温度 $t(^{\circ}\text{C})$ を用いて次のように表される。

$$\epsilon_s = 78.54 [1.0 - 4.579 \times 10^{-3} (t - 25.0) + 1.19 \times 10^{-5} \times (t - 25.0)^2 - 2.8 \times 10^{-8} (t - 25.0)^3]$$

$$\epsilon_\infty = 5.27137 + 0.0216474t - 0.00131198t^2$$

$$\alpha = -16.8129 / (t + 273) + 0.0609265$$

$$\lambda = 0.00033836 \cdot \exp [2513.98 / (t + 273)]$$

$$\sigma = 12.5664 \times 10^8$$

(イ) n 及び m に関する総和は、表— 4.5.2 に示す値で打ち切った。

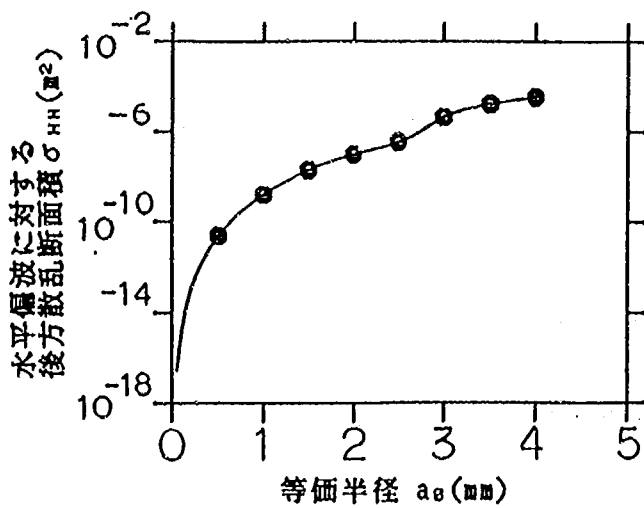
(ウ) 図— 4.5.9 の後方散乱断面積は、入射角及び温度をそれぞれ 3° 及び 20°C として計算した。

図— 4.5.10 の後方散乱断面積は、図— 4.5.4 に示す雨滴のもので、温度を 20°C として計算した。

また図— 4.5.11 の後方散乱断面積も、図— 4.5.4 に示す雨滴のもので、入射角を 3° として計算した。

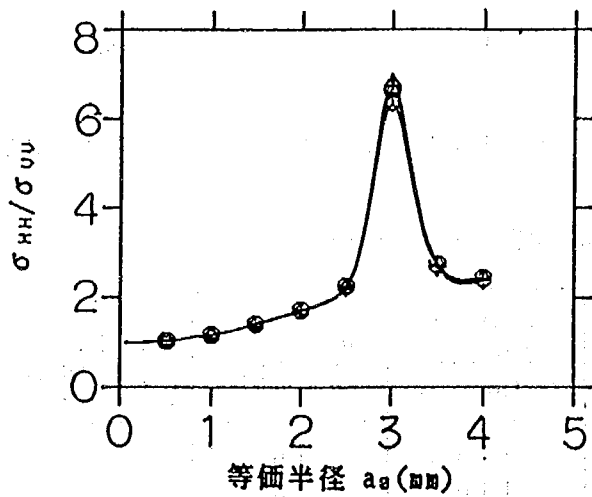
表— 4.5.2(a) n 及び m の総和の打ち切り数

雨 滴 の 等価半径 (mm)	n に関する 打 ち 切 り	m に関する 打 ち 切 り	雨 滴 の 等価半径 (mm)	n に関する 打 ち 切 り	m に関する 打 ち 切 り
0.05	8	3	1.05	16	3
0.10	10	3	1.10	16	3
0.15	10	3	1.15	16	3
0.20	10	3	1.20	16	3
0.25	10	3	1.25	16	3
0.30	12	3	1.30	16	3
0.35	12	3	1.35	16	3
0.40	12	3	1.40	16	3
0.45	12	3	1.45	16	3
0.50	12	3	1.50	16	3
0.55	12	3	1.55	16	3
0.60	12	3	1.60	16	3
0.65	12	3	1.65	16	3
0.70	12	3	1.70	16	3
0.75	12	3	1.75	18	3
0.80	14	3	1.80	18	3
0.85	14	3	1.85	18	3
0.90	14	3	1.90	18	3
0.95	14	3	1.95	18	3
1.00	14	3	2.00	18	3



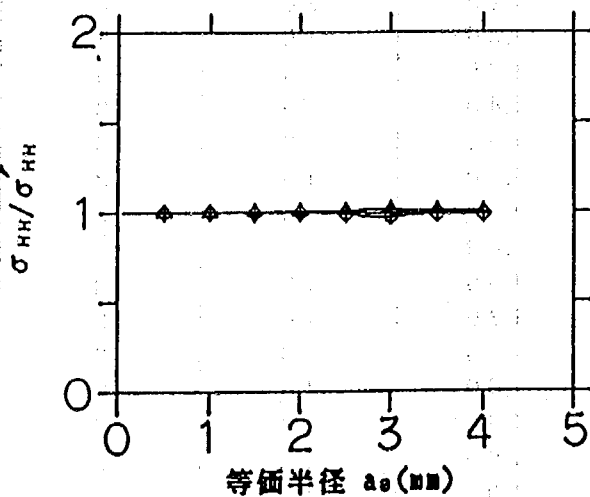
(a) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH}

- : 地上付近
- △ : 上空 1 Km
- ⊕ : 上空 2 Km
- ◇ : 上空 3 Km



(b) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH} と
垂直偏波による後方散乱断面積 σ_{VV} との比

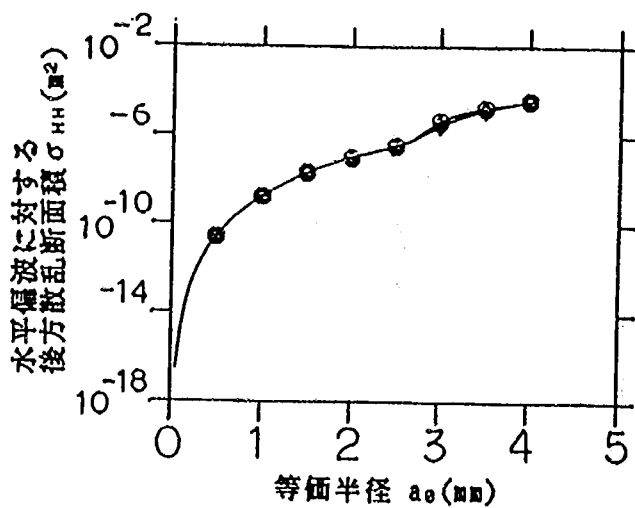
- : 地上付近
- △ : 上空 1 Km
- ⊕ : 上空 2 Km
- ◇ : 上空 3 Km



(c) 地上付近の後方散乱断面積 σ'_{HH}
との比 (水平偏波)

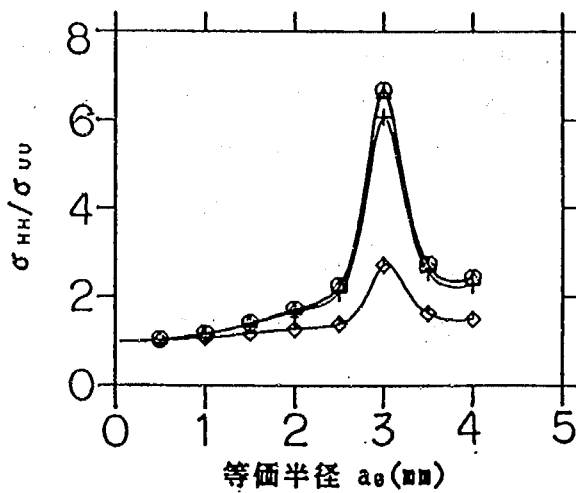
- △ : 上空 1 Km / 地上付近
- ⊕ : 上空 2 Km / 地上付近
- ◇ : 上空 3 Km / 地上付近

図-4.5.9 高度の差が後方散乱断面積に及ぼす影響 (入射角 = 3°, 温度 = 20°C)



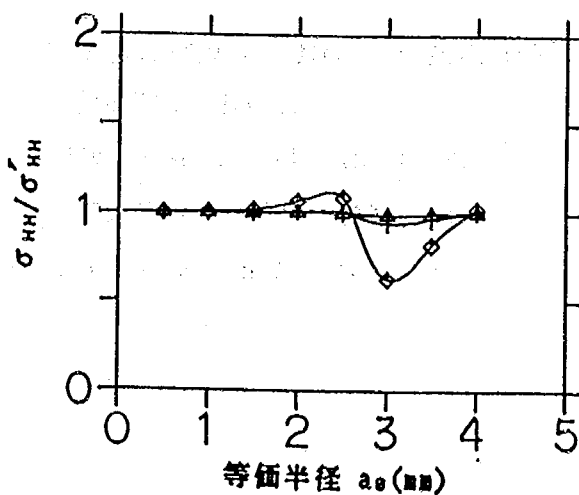
(a) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH}

- : 入射角 = 3°
- △ : 入射角 = 7°
- ⊕ : 入射角 = 15°
- ◇ : 入射角 = 45°



(b) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH} と
垂直偏波による後方散乱断面積 σ_{VV} との比

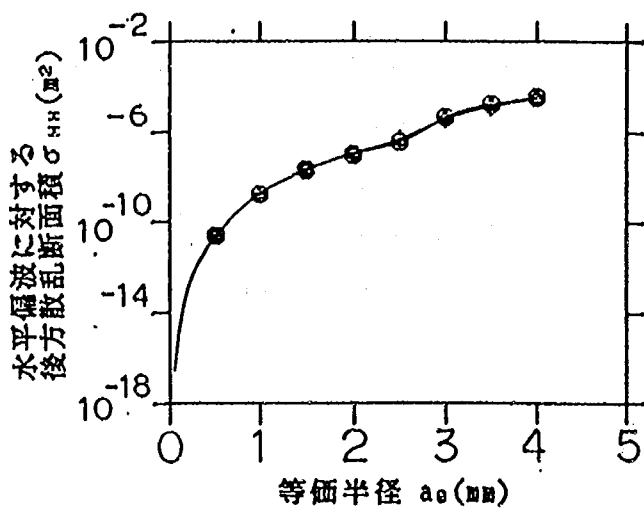
- : 入射角 = 3°
- △ : 入射角 = 7°
- ⊕ : 入射角 = 15°
- ◇ : 入射角 = 45°



(c) 入射角 3° の後方散乱断面積 σ'_{HH}
との比 (水平偏波)

- △ : 入射角 7° / 入射角 3°
- ⊕ : 入射角 15° / 入射角 3°
- ◇ : 入射角 45° / 入射角 3°

図-4.5.10 入射角の差が後方散乱断面積に及ぼす影響 (高度 = 1 km, 温度 = 20°C)



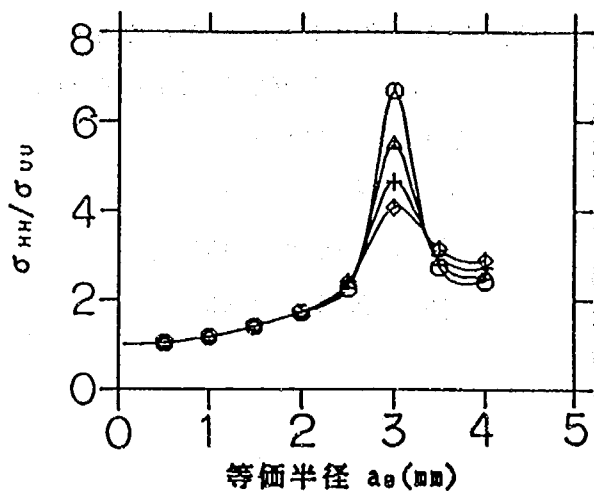
(a) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH}

○ : 温度 = 20°C

△ : 温度 = 15°C

十 : 温度 = 10°C

◇ : 温度 = 5°C



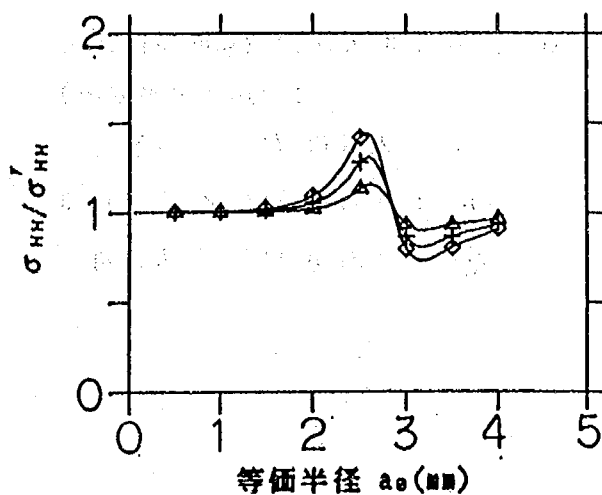
(b) 水平偏波による後方散乱断面積 σ_{HH} と
垂直偏波による後方散乱断面積 σ_{VV} との比

○ : 温度 = 20°C

△ : 温度 = 15°C

十 : 温度 = 10°C

◇ : 温度 = 5°C



(c) 温度 20°C の後方散乱断面積 σ_{HH}'
との比 (水平偏波)

△ : 温度 15°C / 温度 20°C

十 : 温度 10°C / 温度 20°C

◇ : 温度 5°C / 温度 20°C

図-4.5.11 温度の差が後方散乱断面積に及ぼす影響 (高度 = 1 km, 入射角 = 3°)

表-4.5.2(b) n 及び m の総和の打ち切り数

雨 滴 の 等価半径 (mm)	n に関する 打ち 切り	m に関する 打ち 切り	雨 滴 の 等価半径 (mm)	n に関する 打ち 切り	m に関する 打ち 切り
2.05	18	3	3.05	20	4
2.10	18	3	3.10	20	4
2.15	18	3	3.15	20	4
2.20	18	3	3.20	20	4
2.25	18	3	3.25	20	4
2.30	18	3	3.30	20	4
2.35	18	3	3.35	20	4
2.40	18	3	3.40	20	4
2.45	18	3	3.45	20	4
2.50	18	3	3.50	20	4
2.55	18	3	3.55	20	5
2.60	18	3	3.60	20	5
2.65	18	3	3.65	20	5
2.70	18	3	3.70	20	5
2.75	18	3	3.75	20	5
2.80	20	3	3.80	20	5
2.85	20	3	3.85	20	5
2.90	20	3	3.90	20	5
2.95	20	3	3.95	20	5
3.00	20	3	4.00	20	5

4.5.3 $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係

降雨の状態を表すものの中に粒径分布というものがある。これは、ある単位空間の中に存在する雨滴の数を表すもので、下式のように表されることが知られている。

$$N(D) = N_0 D^m \exp(-\lambda D) \quad \dots\dots\dots (4.5.69)$$

ここで、

N : 粒径分布 ($1/\text{mm} \cdot \text{m}^3$)

N_0, m, λ : 降雨状態を表すパラメータ

D : 雨滴の等価直径 (mm)

ここでは、降雨状態を表すパラメータとして、Joss et. al. 及び Marshall-Palmer によって測定された値を設定した場合に Z_H と Z_{DR} の関係がどのようなようになるかを示す。

図-4.5.3 粒径分布

	N_0	m	λ
Marshall-Palmer	8000	0.0	$4.1 \times R^{-0.21}$
Joss (霧雨)	30000	0.0	$5.7 \times R^{-0.21}$
Joss (地雨)	7000	0.0	$4.1 \times R^{-0.21}$
Joss (雷雨)	1400	0.0	$3.0 \times R^{-0.21}$

表中の R は降水強度 (mm/h)

(1) 計算方法

垂直偏波及び水平偏波による反射因子 Z_v 及び Z_H は、次のように表される。

$$Z_H = 10^6 (\lambda^4 / \pi^5) |e+2|/(e-1)|^2 \int_0^{D_{max}} \sigma_{HH} N(D) dD \quad \dots\dots\dots (4.5.70)$$

$$Z_v = 10^6 (\lambda^4 / \pi^5) |e+2|/(e-1)|^2 \int_0^{D_{max}} \sigma_{vv} N(D) dD \quad \dots\dots\dots (4.5.71)$$

ここで、

λ : 波長 (cm)

e : 複素誘電率

σ_{HH}, σ_{vv} : 後方散乱断面積 (cm²)

D_{max} : 雨滴の最大粒径 (mm)

また、反射因子差 Z_{DR} は、 Z_H と Z_v の比で次のように表される。

$$\begin{aligned} Z_{DR} &= 10 \log_{10} (Z_H / Z_v) \\ &= 10 \log_{10} \left(\int_0^{D_{max}} \sigma_{HH} D^m \exp(-AD) dD / \int_0^{D_{max}} \sigma_{vv} D^m \exp(-AD) dD \right) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4.5.72)$$

雨滴の傾きを無視すれば、雨滴への入射角は仰角によって決定され、雨滴の位置 (高度) 及び温度を定めることにより、前節までに記述した方法で後方散乱断面積を計算することができる。

今、 R をある値に定めたとすると、表-4.5.3 より A の値が求まる。これと、後方散乱断面積 N_0 、 D_{max} 及び m の値を (4.5.70) 式及び (4.5.72) 式に代入することにより、特定の R に対する Z_H と Z_{DR} が求まる。

(2) 計算結果

(a) 図-4.5.12 に、粒径分布により $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係がどの様になるかを示す。

この図から、

(ア) Marshall-Palmer と Joss (地雨) とは、ほぼ同じ傾向を持つ。

(イ) Z_H を固定して見ると、Joss (雷雨) の Z_{DR} が最も大きく、以下、Joss (地雨)、Marshall-Palmer、Joss (霧雨) の順番になっている。

(ウ) Z_H と Z_{DR} には、正の相関があると考えられる。

ということが分かる。

(b) 図-4.5.13 に、高度、仰角、温度及び雨滴の最大粒径の差が、 $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係にどの程度影響するかを示す。

これらの図から、

(ア) 高度及び温度の違いによる $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係の差は殆ど無い。

(イ) 仰角が小さい場合 (15°以下の場合)、 $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係の差は殆ど無い。

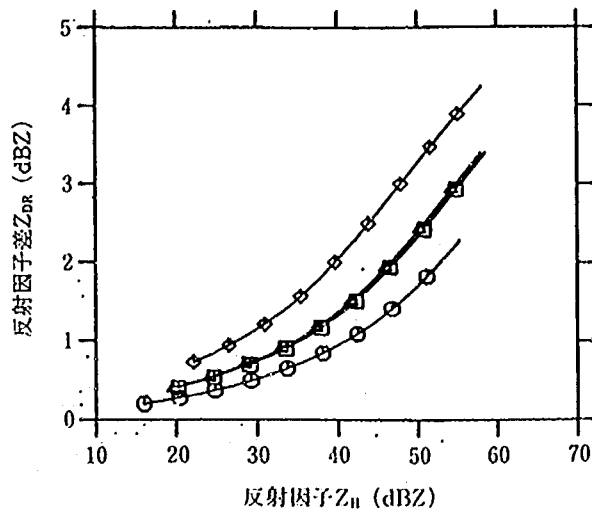
(ウ) 仰角が 45° の場合の $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係は他のものとは大きく違う。

(エ) 雨滴の最大粒径の違いによる $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係の差は、比較的大きい。但し、 Z_H (Z_{DR}) が小さいところでは、その差は殆ど無い。

ということがわかる。

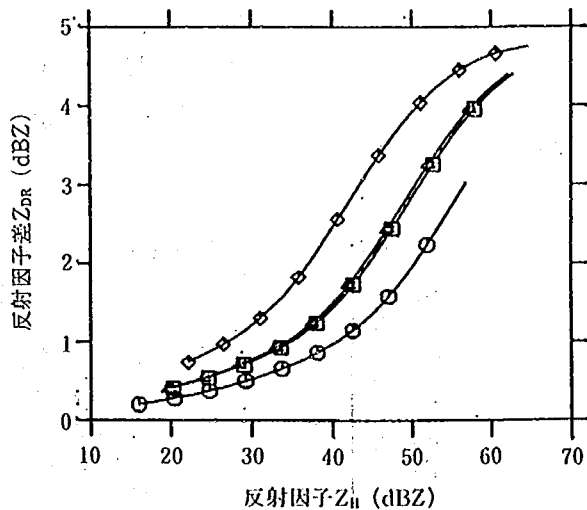
なお、

(ア) (4.5.70) 及び (4.5.72) 式の積分は、雨滴等価直径 0.1 mm 毎の台形近似により求めた。(下式参照)



(a) 雨滴の最大粒径=6.0mmの場合

- : Marshall-Palmer
- : Joss (霧雨)
- △ : Joss (地雨)
- ◇ : Joss (雷雨)



(b) 雨滴の最大粒径=8.0mmの場合

- : Marshall-Palmer
- : Joss (霧雨)
- △ : Joss (地雨)
- ◇ : Joss (雷雨)

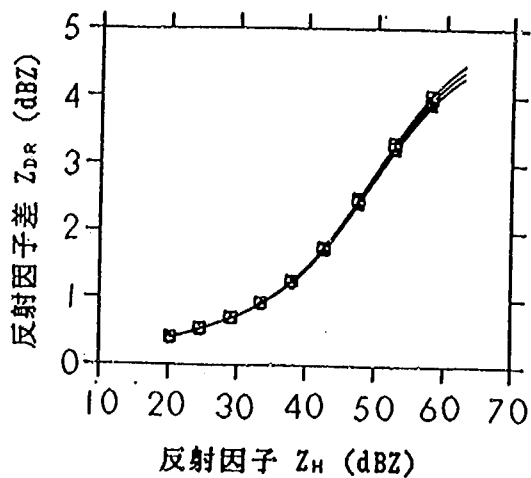
図-4.5.12 粒径分布の差が $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係に及ぼす影響
(高度=0 km, 仰角=3°, 温度=20°C)

$$\int_0^{D_{max}} f(x) dx = \sum_{x_i=X_i}^{X_{max}} (f(x_i) + f(x_{i-1})) / 2 \cdot \Delta x \quad \dots\dots\dots (4.5.73)$$

ここで,

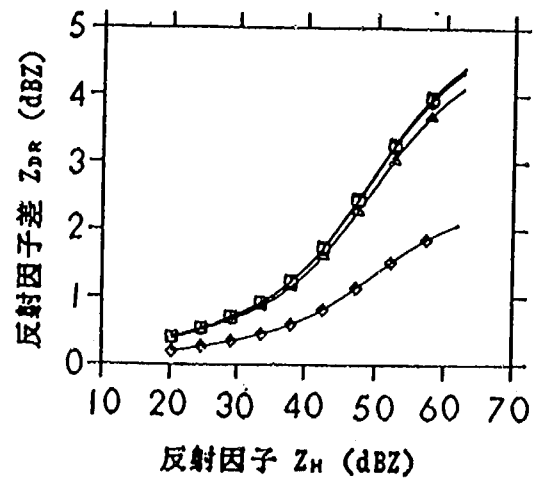
$X_0, X_1, X_2, \dots, X_{max} : 0.0, 0.1, 0.2, \dots, D_{max} \text{ (mm)}$
 $\Delta x : 0.1 \text{ mm}$

- (イ) 図-4.5.12 は, 雨滴の位置(高度), 仰角及び温度をそれぞれ 0 km, 3°及び 20°Cと
して求めたもので, (a)は雨滴の最大粒径として 6.0 mm を, また(b)は 8.0 mm を採用した。
- (ウ) 図-4.5.13(a)は, 仰角, 雨滴の温度及び最大粒径をそれぞれ 3°, 20°C 及び 8.0 mm
として求めた。
- (エ) 図-4.5.13(b)は, 高度, 雨滴の温度及び最大粒径をそれぞれ 0 km, 20°C 及び 8.0 mm
として求めた。



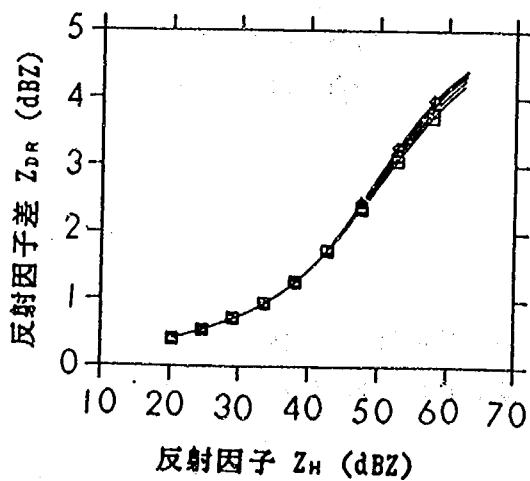
(a) 高度の差による影響

- : 高度 = 1Km
- : 高度 = 2Km
- △ : 高度 = 3Km



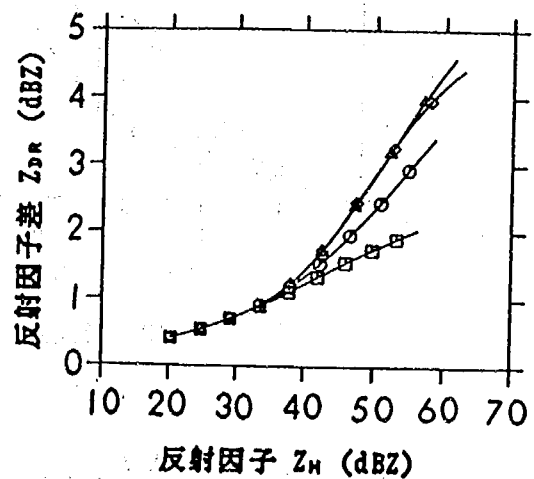
(b) 仰角の差による影響

- : 仰角 = 3°
- : 仰角 = 7°
- △ : 仰角 = 15°
- ◇ : 仰角 = 45°



(c) 温度の差による影響

- : 温度 = 20°C
- : 温度 = 15°C
- △ : 温度 = 10°C
- ◇ : 温度 = 5°C



(d) 雨滴の最大粒径の差による影響

- : 最大粒径 = 5.0mm
- : 最大粒径 = 6.0mm
- △ : 最大粒径 = 7.0mm
- ◇ : 最大粒径 = 8.0mm

図-4.5.13 高度・仰角・温度・雨滴の最大粒径の差が $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係に及ぼす影響
(Marshall-Palmer)

(オ) 図-4.5.13(c)は、高度、仰角及び雨滴の最大粒径をそれぞれ0 km, 3°及び8.0mmとして求めた。

(カ) 図-4.5.13(d)は、高度、仰角及び温度をそれぞれ0 km, 3°及び20°Cとして求めた。

4.5.4 Z_{DR} による降水強度の推定

ここでは、レーダによって測定された水平偏波による反射因子 Z_H と反射因子差 Z_{DR} から降水強度 R を求める方法とその問題について記述する。

なお、 Z_{DR} を用いて降水強度 R を求める方法には、

(a) $R = a \cdot Z_H \cdot Z_{DR}^b$ の関係を用いる方法

(b) 反射因子及び降水強度の理論的な式から求める方法

の2つの方法があるが、ここでは、後者について記述する。

(1) 降水強度の計算方法

一般に、降水強度 R は次式のように表される。

$$R = 3.6 \times 10^{-3} (4/3) \pi \int_0^{D_{max}} (D/2)^3 N(D) V(D) dD \quad \dots\dots\dots (4.5.74)$$

ここで、

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 : 粒径分布 (1/mm · m³)

V : 落下速度 (m/s)

従って Z_H と R の比 Z_H/R は (4.5.70) 及び (4.5.74) 式より

$$\begin{aligned} Z_H/R = & 10^6 (\lambda^4/\pi^5) |(e+2)/(e-1)|^2 \int_0^{D_{max}} \sigma_{HH} D^m \exp(-\Lambda D) dD / \\ & 3.6 \times 10^{-3} (4/3) \pi \int_0^{D_{max}} (D/2)^3 V(D) D^m \exp(-\Lambda D) dD \dots (4.5.75) \end{aligned}$$

となる。

降水強度を求める方法を簡単に示せば次のようになる。

『あらかじめ、雨滴の後方散乱断面積 (σ_{HH} , σ_{VV}) と落下速度 (V) の値を計算しておけば m 及び D_{max} を定めることにより、

(ア) (4.5.72) 式に測定された Z_{DR} を代入することにより、 Λ が求まり、

(イ) この Λ を (4.5.75) 式に代入することにより、 Z_H/R が求まる。

(ウ) Z_H/R が求まれば、測定された Z_H から R が計算できる。』

(2) Λ の算出に関する問題

前項では、『測定された Z_{DR} を (4.5.72) 式に代入することにより、 Λ が求まる。』と、記述した。(4.5.72) 式に Λ を代入すれば、確かに Z_{DR} が求まるが、この逆が成立するか否かはこの式からは分らない。

本項では、『前項に示した方法による降水強度の計算が可能になるのが、どの様な時か、また、不可能になるのが、どの様な時か』を Λ の計算の可能性の見地から説明する。

図-4.5.14 ~ 4.5.17 を見て頂きたい。これらの図は、仰角、温度、並びに D_{max} 及び m ((4.5.69) 式参照) を変化させたときの Z_{DR} と Λ の関係を表したものである。

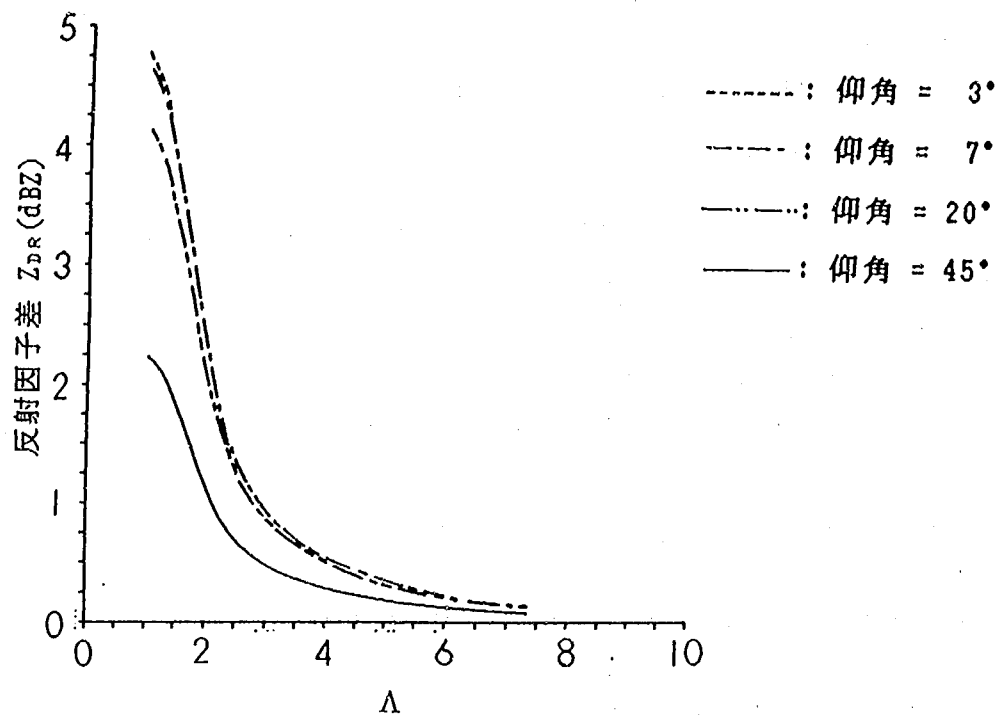


図-4.5.14 仰角と $Z_{DR} \sim \Lambda$ 関係

(温度 = 20°C , $D_{max} = 8.0\text{ mm}$, $m = 0.0$ として計算)

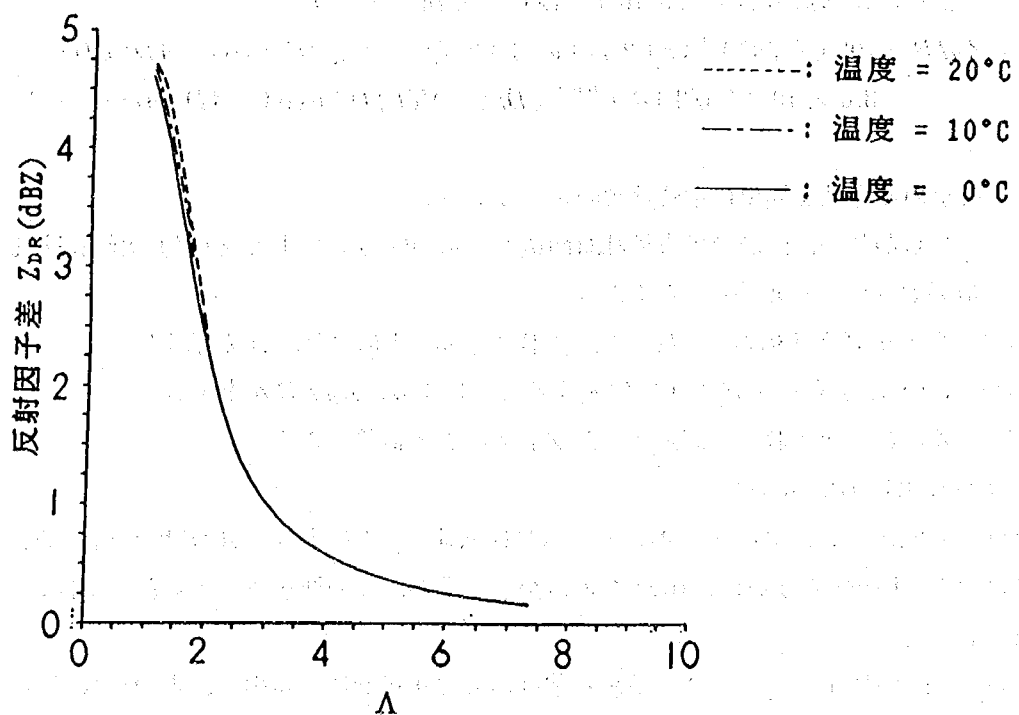


図-4.5.15 温度と $Z_{DR} \sim \Lambda$ 関係

(仰角 = 3° , $D_{max} = 8.0\text{ mm}$, $m = 0.0$ として計算)

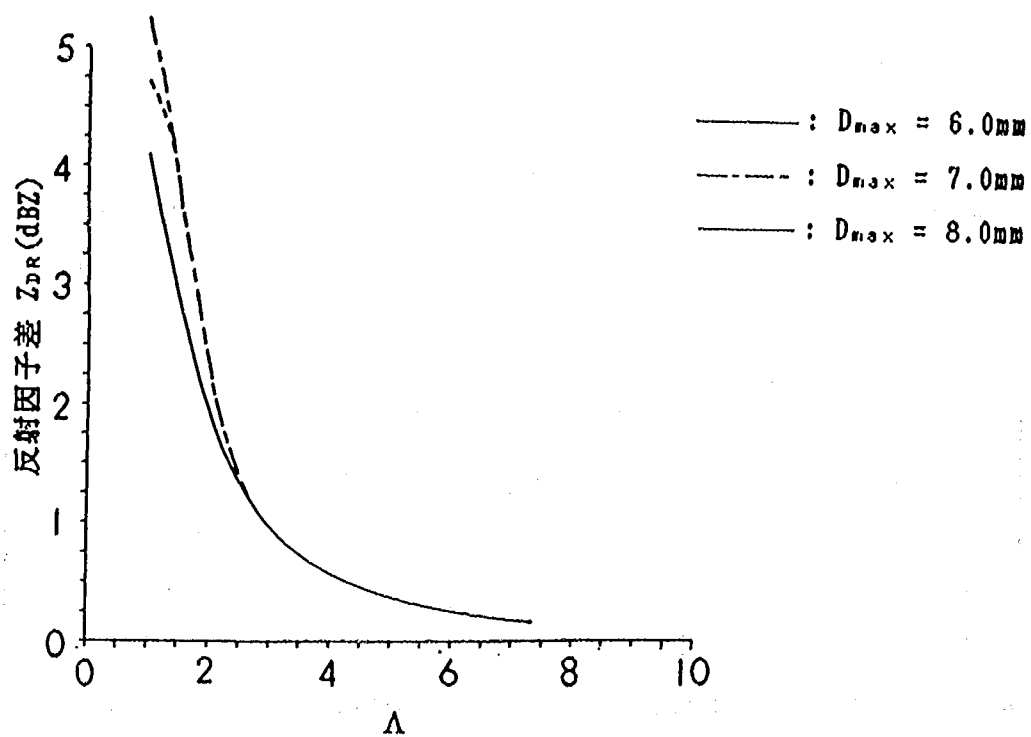


図-4.5.16 D_{max} と $Z_{DR} \sim \Lambda$ 関係
(仰角=3°, 温度=20°C, $m=0.0$ として計算)

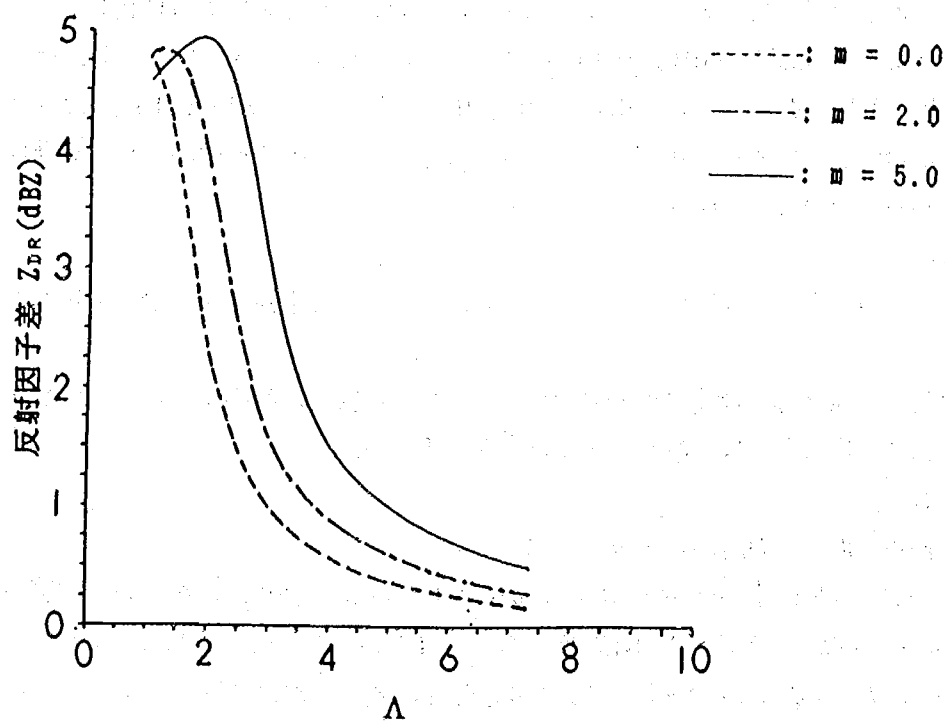


図-4.5.17 m と $Z_{DR} \sim \Lambda$ 関係
(仰角=3°, 温度=20°C, $D_{max}=8.0\text{mm}$ として計算)

図-4.5.17を見ると、 Z_{DR} が大きい場合（ A が小さい場合）、1つの Z_{DR} に対し2つの A が対応しており、

(a) $m=5$ の場合、測定された Z_{DR} が大きい時には、(1)に示す方法では降水強度の計算が行えない。

(b) $m=2$ の場合、厳密には $m=5$ の場合と同じだが、『同一の Z_{DR} を示す A の範囲が狭いこと、また、その値が1.0程度と非常に小さいこと*1』を考えれば、実際上の問題は殆ど無い。

*1：表-4.5.3に示すどの粒径分布の場合でも、 A が1.0になるには降水強度 R は、非常に大きな値でなければならない。

図-4.5.4 $A=1.0$ の場合の降水強度

	A	$R(\text{mm/h})$
Marshall-Palmer	$4.1 \cdot R^{-0.21}$	8 2 8.0
Joss (霧雨)	$5.7 \cdot R^{-0.21}$	3 9 7 5.6
Joss (地雨)	$4.1 \cdot R^{-0.21}$	8 2 8.0
Joss (雷雨)	$3.0 \cdot R^{-0.21}$	1 8 7.1

(c) $m=0$ の場合、 Z_{DR} の値に関わらず(1)の方法により降水強度を求めることができる。ということが分かる。

(3) 反射因子 Z_H 及び反射因子差 Z_{DR} の測定精度が降水強度 R に及ぼす影響

図-4.5.18を見て頂きたい。これは、降水強度 R を1, 2, …, 10 mm/hと変化させた時に $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係を表す曲線がどの様になるかを示したものである。

表-4.5.5は、 Z_{DR} の変動及び Z_H の変動が、降水強度 R に及ぼす影響を数値化して表したものである。 Z_{DR} は、0.5, 1.0及び1.5 (dB)の3通りの値を中心とし変動させることとし、その範囲は±0.1 (dB)とした。また、 Z_H は、35.0 (dBZ)の値を中心として*1、±1.0 (dBZ)の範囲とした。

*1：降水強度に与える影響を百分率で考える分には、どの値を中心として変動させても変わらないので、1通りについて行えばよい。

この図表から、

(ア) Z_{DR} の値が小さければ小さいほど、その測定精度が降水強度 R に及ぼす影響が大きくなる。

(イ) 反射因子差 Z_{DR} の測定精度が降水強度に及ぼす影響と反射因子 Z_H の測定精度が降水強度に及ぼす影響とでは、前者の方がはるかに大きい。

ことが予想される。

(4) 高度、仰角、温度、 D_{max} 及び m の影響

図-4.5.19～4.5.23に降水強度 R を10.0 mm/hとし、高度、仰角、温度、 D_{max} 及び m を変化させた時に、 $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係、 $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係がどの様になるかを示す。

これらの図から、 D_{max} 及び m の変化が $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係、 $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係に与える影響が他のものに比べ大きいことが分かる。

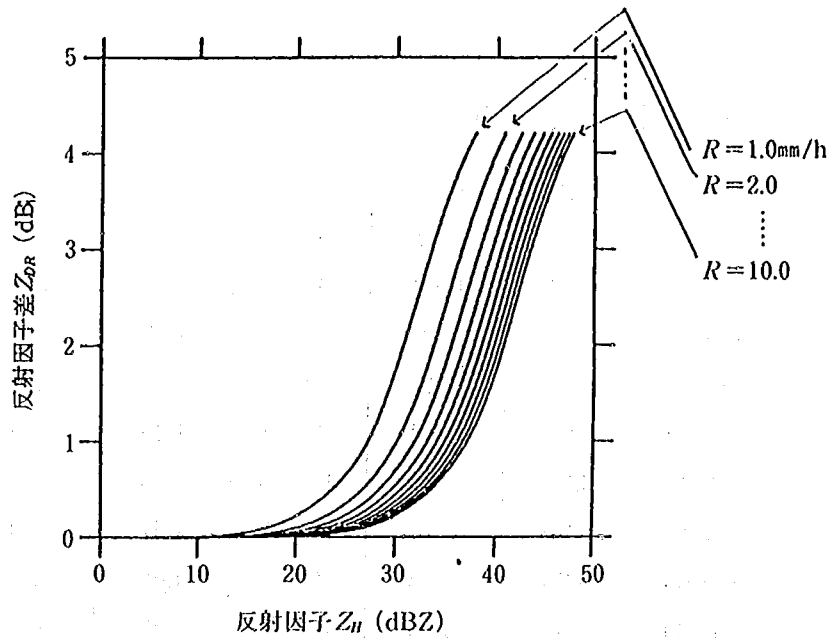


図-4.5.18 降水強度と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係

表-4.5.5 (a) Z_H の変動と降水強度

Z_H (dBZ)	$Z_{DR}=0.5$ (dB) R		$Z_{DR}=1.0$ (dB) R		$Z_{DR}=1.5$ (dB) R	
	(mm/h)	(%)	(mm/h)	(%)	(mm/h)	(%)
34.0	10.84	79.43	4.71	79.43	2.79	79.43
34.1	11.09	79.28	4.82	79.28	2.86	79.28
34.2	11.35	83.18	4.93	83.18	2.92	83.18
34.3	11.62	85.11	5.04	85.11	2.99	85.11
34.4	11.89	87.10	5.16	87.10	3.06	87.10
34.5	12.17	89.13	5.28	89.13	3.13	89.13
34.6	12.45	91.20	5.40	91.20	3.20	91.20
34.7	12.74	93.33	5.53	93.33	3.28	93.33
34.8	13.04	95.50	5.66	95.50	3.36	95.50
34.9	13.34	97.72	5.79	97.72	3.43	97.72
35.0	13.65	100.00	5.93	100.00	3.51	100.00
35.1	13.97	102.33	6.06	102.33	3.60	102.33
35.2	14.29	104.71	6.20	104.71	3.68	104.71
35.3	14.63	107.15	6.35	107.15	3.76	107.15
35.4	14.97	109.65	6.50	109.65	3.85	109.65
35.5	15.32	112.20	6.65	112.20	3.94	112.20
35.6	15.67	114.82	6.80	114.82	4.03	114.82
35.7	16.04	117.49	6.96	117.49	4.13	117.49
35.8	16.41	120.23	7.12	120.23	4.22	120.23
35.9	16.79	123.03	7.29	123.03	4.32	123.03
36.0	17.18	125.89	7.46	125.89	4.42	125.89

* 高度 = 0 km, 仰角 = 3°, 温度 = 20°C, $m = 0.0$, $D_{max} = 6.0$ として計算

表- 4.5.5 (b) Z_{DR} の変動と降水強度 $Z_H = 35.0$ (dBZ)

Z_{DR} (dB)	R		Z_{DR} (dB)	R		Z_{DR} (dB)	R	
	(mm/h)	(%)		(mm/h)	(%)		(mm/h)	(%)
0.40	17.42	127.66	0.90	6.77	114.21	1.40	3.85	109.46
0.41	16.97	124.33	0.91	6.67	112.64	1.41	3.81	108.44
0.42	16.53	121.13	0.92	6.58	111.11	1.42	3.78	107.45
0.43	16.12	118.10	0.93	6.49	109.61	1.43	3.74	106.47
0.44	15.72	115.19	0.94	6.41	108.14	1.44	3.71	105.50
0.45	15.34	112.40	0.95	6.32	106.71	1.45	3.67	104.55
0.46	14.98	109.71	0.96	6.24	105.30	1.46	3.64	103.61
0.47	14.62	107.14	0.97	6.16	103.93	1.47	3.61	102.69
0.48	14.29	104.66	0.98	6.08	102.60	1.48	3.58	101.78
0.49	13.96	102.29	0.99	6.00	101.28	1.49	3.54	100.88
0.50	13.65	100.00	1.00	5.93	100.00	1.50	3.51	100.00
0.51	13.35	97.80	1.01	5.85	98.75	1.51	3.48	99.13
0.52	13.06	95.68	1.02	5.78	97.52	1.52	3.45	98.27
0.53	12.78	93.63	1.03	5.71	96.32	1.53	3.42	97.42
0.54	12.51	91.66	1.04	5.64	95.14	1.54	3.39	96.59
0.55	12.25	89.75	1.05	5.57	93.99	1.55	3.36	95.77
0.56	12.00	87.91	1.06	5.50	92.86	1.56	3.34	94.95
0.57	11.76	86.14	1.07	5.44	91.76	1.57	3.31	94.15
0.58	11.52	84.42	1.08	5.37	90.67	1.58	3.28	93.36
0.59	11.30	82.76	1.09	5.31	89.61	1.59	3.25	92.58
0.60	11.08	81.15	1.10	5.25	88.58	1.60	3.23	91.82

* 高度 = 0 km, 仰角 = 3°, 温度 = 20°C, $m = 0.0$, $D_{max} = 6.0$ として計算

4.5.5 地上雨量との対比による精度検定

ここでは、前節で示した方法（以降、この方法を Z_{DR} 法と呼称し、その方法により求めた降水強度を R_{ZDR} という記号で表すものとする。）を用いて求めた降水強度の測定精度と従来通りの方法（降雨換算定数 B, β を用いる方法のこと。以降、この方法を $B\beta$ 法と呼称する。また、 R_{ZDR} に対し $R_{B\beta}$ という記号です。）を用いて求めた降水強度の測定精度の検定・比較の結果及び、精度の面から見た、 m 及び D_{max} の降水強度の算出に与える影響を示す。

なお、測定精度は、地上で測定した降水強度（以降、地上雨量と呼称し、 R_{OND} という記号で表す。）との関連の深さを

- (a) 相関係数などの統計量により定量的に、
- (b) ハイエト・マスカーブ図により定性的に、

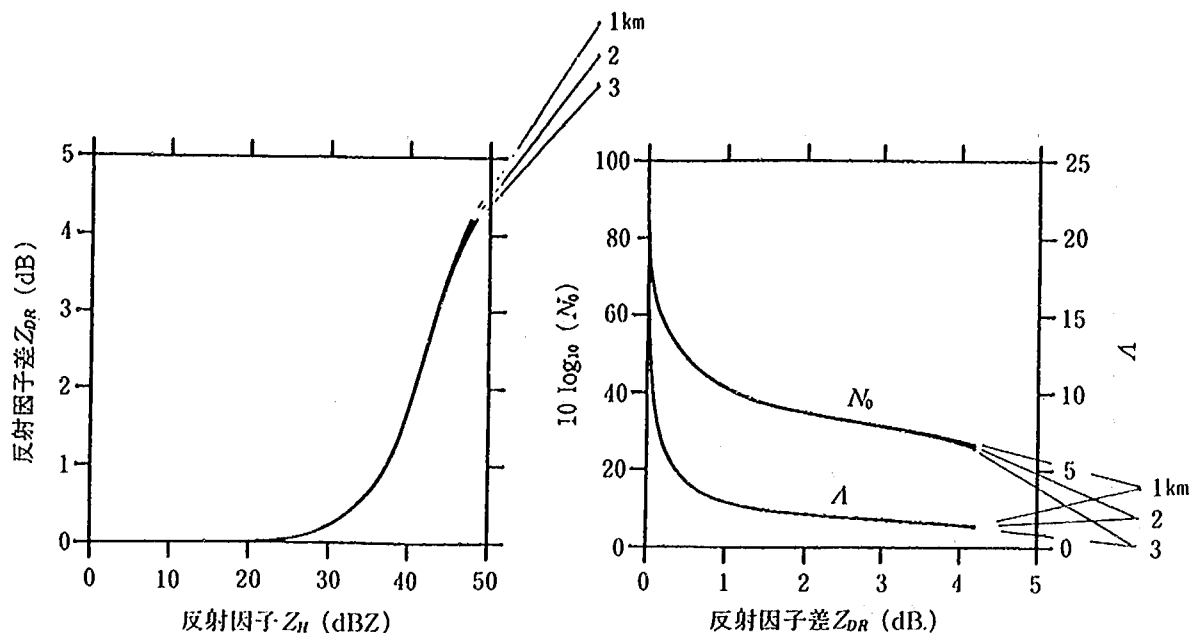


図-4.5.19 高度と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係, $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係
 ($R=10.0\text{mm/h}$, 仰角 = 3° , 温度 = 20°C , $D_{max} = 8.0\text{mm}$, $m = 0.0$)

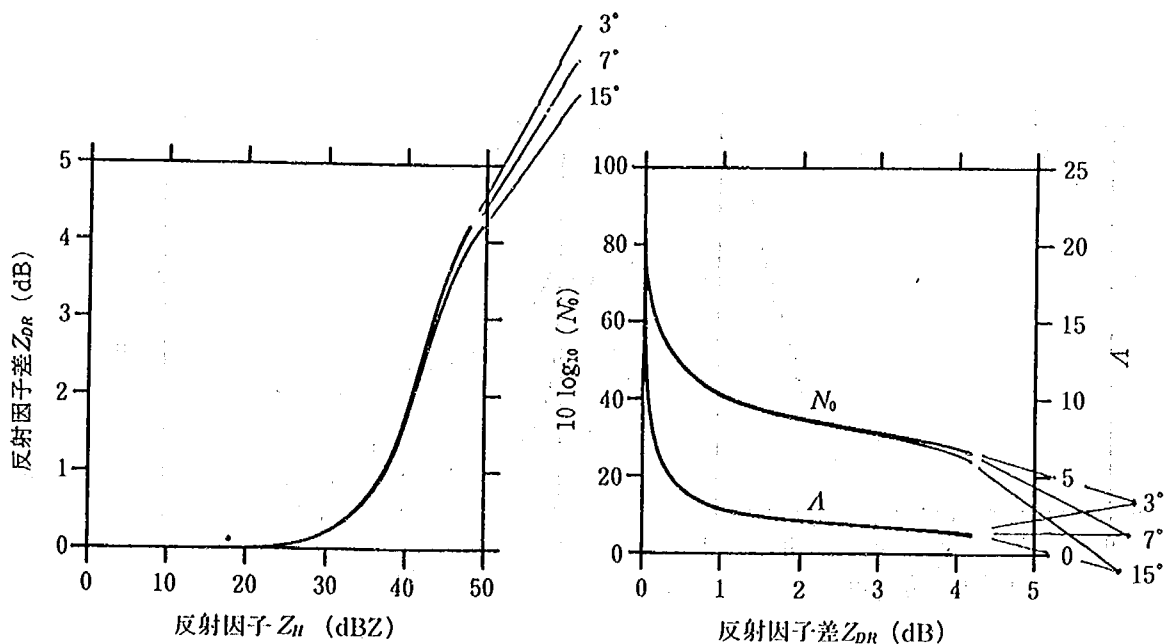


図-4.5.20 仰角と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係, $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係
 ($R = 10.0\text{mm/h}$, 高度 = 0 km , 温度 = 20°C , $D_{max} = 8.0\text{mm}$, $m = 0.0$)

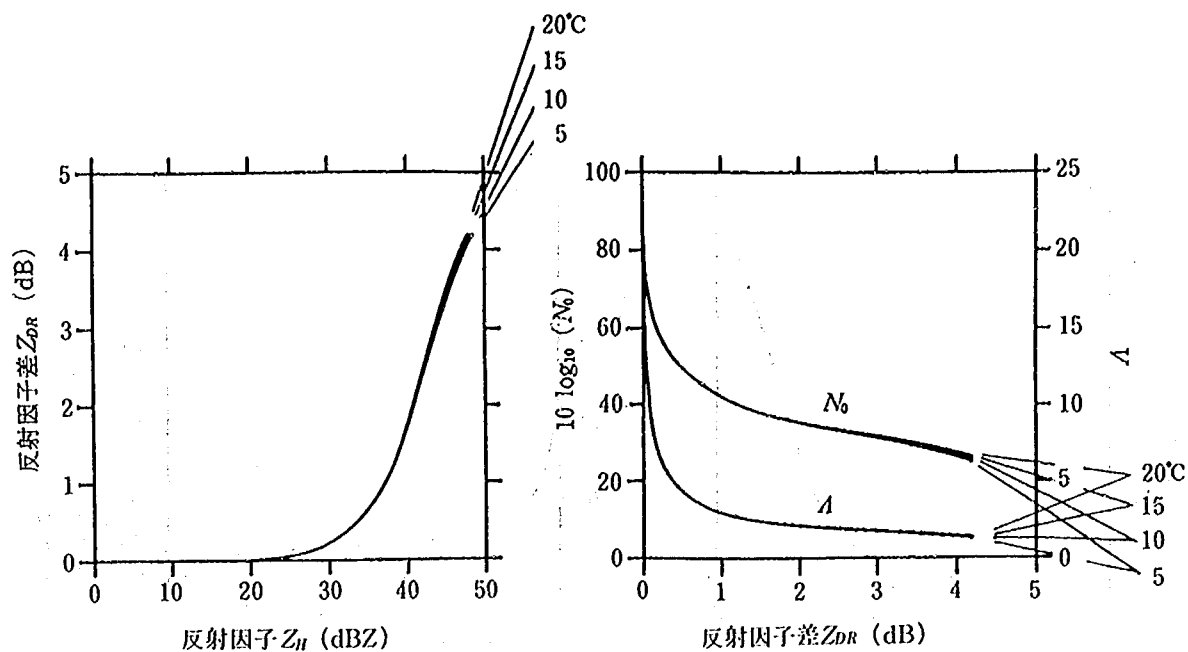


図-4.5.21 温度と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係, $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係
($R = 10.0 \text{ mm/h}$, 高度 = 0 km, 仰角 = 3° , $D_{max} = 8.0 \text{ mm}$, $m = 0.0$)

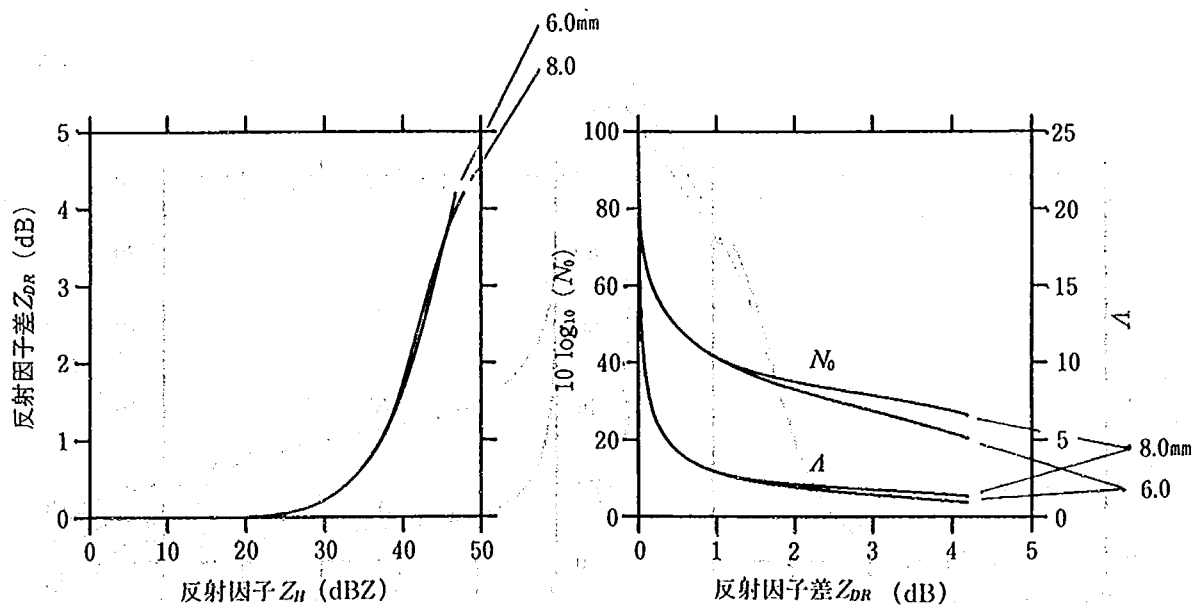


図-4.5.22 D_{max} と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係, $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim A$ 関係
($R = 10.0 \text{ mm/h}$, 高度 = 0 km, 仰角 = 3° , 温度 = 20°C , $m = 0.0$)

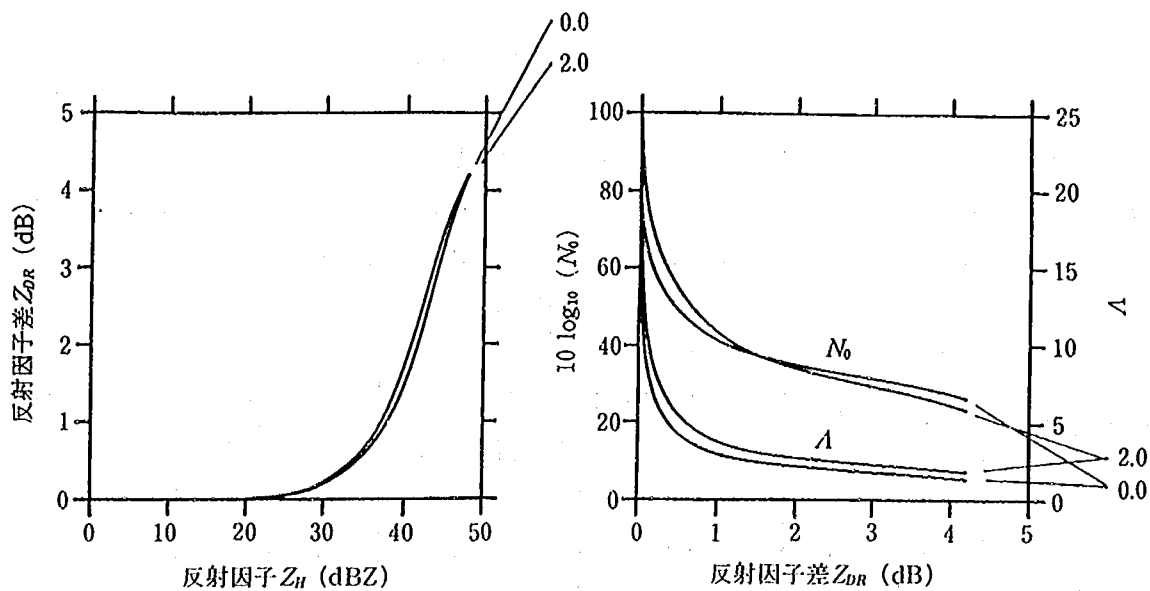


図-4.5.23 m と $Z_H \sim Z_{DR}$ 関係, $Z_{DR} \sim N_0$ 関係及び $Z_{DR} \sim \Lambda$ 関係

($R = 10.0 \text{ mm/h}$, 高度 = 0 km, 仰角 = 3° , 温度 = 20°C , $D_{\max} = 8.0 \text{ mm}$)

調べることにより評価することとした。

(1) 検定条件

(a) 検定対象データの選定

6月～9月の観測データの中から、

- ① 比較的降雨が激しいこと
- ② 仰角 3° で運用していること
- ③ 運用モードが2または5であること。

の3つの条件を満足するものを選び、それを対象データとすることとした。その一覧を表-4.5.6に示す。

表 4.5.6 検定対象データ

観 測 期 間	運用モード	仰角 ($^\circ$)
87 6/20 12:00～6/20 20:00	2	3
87 7/12 10:00～7/12 20:00	2	3
87 9/18 00:00～9/19 06:00	2,5	3

(b) B , β の決定

降雨換算定数 B 及び β は、それぞれ200及び1.6とした。

(c) 地上雨量観測所

地上雨量 R_{GND} は、表-4.5.7に示す観測所のデータを用いることとした。そして、この観測所の直上25メッシュ*1(5×5メッシュ)のデータを用いて(平均して), R_{ZDR} 及び $R_{B\beta}$ を求めること

とした。但し、グラウンドクラッタが降雨換算^{*2}で、0.2mm/h以上のメッシュのデータは使用しないこととした。

*1：極座標系メッシュ（1メッシュ＝1.4°×500m）

*2： $B=200$ ， $\beta=1.6$ で換算

DNDレーダの場合、メッシュ構成は図－4.5.24の通りとなっているので、各観測所の直上メッシュは表－4.5.7に示す通りとなり、5×5メッシュの大きさはレーダサイトから10km付近ではおよそ2500×1250mとなる。また、各観測所には0.5mm転倒マス雨量計が設置されている。

表－4.5.7 観測所一覧

観測所番号	名 称	レーダサイトからみた位置		対応メッシュ	
		距離(km)	方位(°)	レンジ番号	セクタ番号
1	新 保	5.10	8.2	11	6
2	富山工事	4.05	256.7	9	183
3	神通大橋	6.85	276.9	14	197
4	松 川	7.75	254.1	16	181
5	熊 野 橋	10.20	220.0	21	157
6	田 島	9.75	256.7	20	183
7	成 子	12.85	235.1	26	168
8	落 合	12.15	253.0	25	180

(d) 検定パターン

次の3パターンにより検定することとした。

- ① 反射因子の10分間平均値から10分間雨量(R_{ZDR} , $R_{B\beta}$)を算出し、これを用いて検定する方法
- ② ①で求めた10分間雨量を1時間分平均して1時間雨量を算出し、これを用いて検定する方法
- ③ 反射因子の1時間平均値から1時間雨量を算出し、これを用いて検定する方法

(e) 反射因子及び反射因子差の計算方法

(ア) 反射因子差 Z_{DR} は、水平偏波及び垂直偏波の反射因子の平均値の差から求めることとした。

また、この反射因子差が $-0.3 \leq Z_{DR} \leq 1.5$ dBの場合は、R.C.Lipshutz等の提案に従い

$$Z_{DR}(\text{補正值}) = 0.62 \cdot Z_{DR}(\text{測定値}) + 0.6 \quad \dots\dots\dots (4.5.76)$$

により、その値を補正することとした。

(イ) 反射因子 Z_H 、 Z_V の平均値が降雨換算^{*1}で0.2mm/h以下の場合、反射因子 Z_H 、 Z_V を求める際に用いた受信電力の中に -102.5 dBm^{*2}以下のものが含まれる場合及び補正((4.5.76)式)にも関わらず、反射因子差 Z_{DR} が零以下の場合には、その時のレーダ雨量(R_{ZDR} , $R_{B\beta}$)は欠測とし、検定の対象から外すこととした。

*1： $B=200$ ， $\beta=1.6$ で換算

*2：DNDレーダの場合、受信電力が -102.5 dBm以上であれば、そのリニアリテ

ィが保証される。

(f) 後方散乱断面積

入射角 = 3° ，高度 = 0 km，温度 = 15° で計算したものを用いることとした。

(g) 落下速度

Best の式を用いることとした。（（4.5.14）式参照）

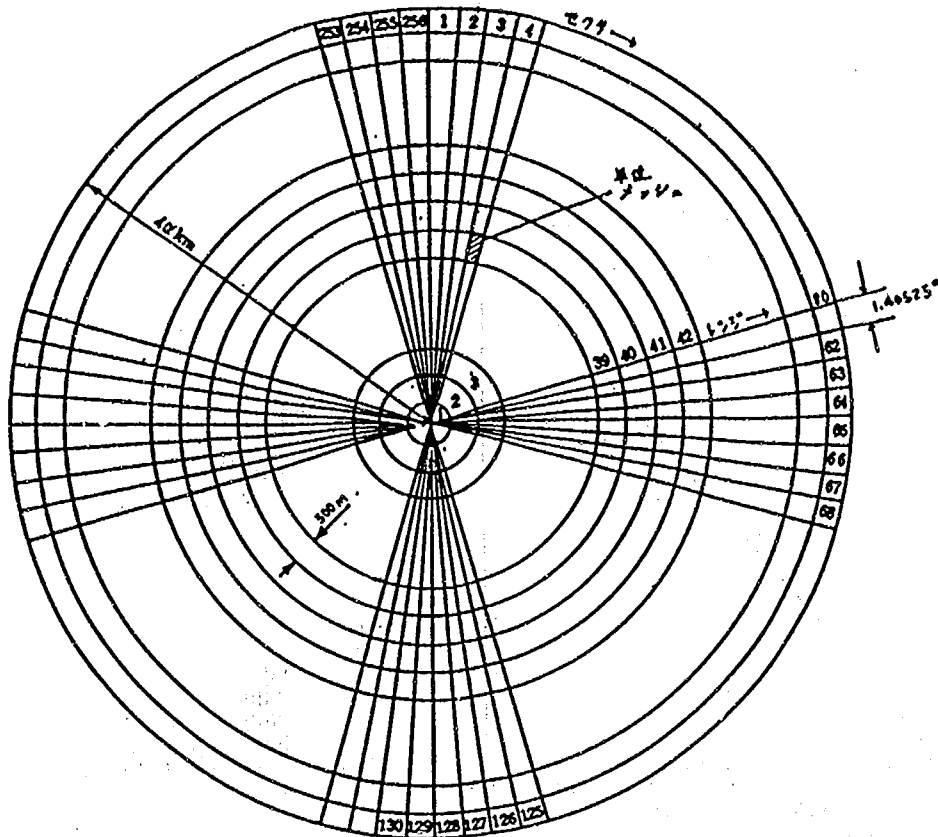


図-4.5.24 メッシュ構成

(2) 定性的な検定・比較

(a) 指標

指標として、

ハイエト・マスカーブ図

相関図 ($R_{GND} - R_{ZDR}$ 相関図, $R_{GND} - R_{\beta\beta}$ 相関図)

を用いることとした。

(b) 結果

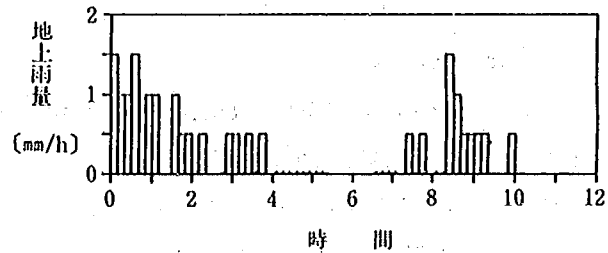
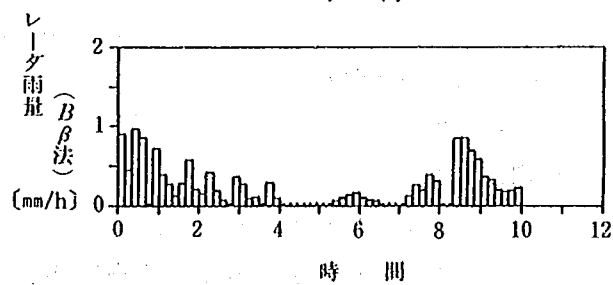
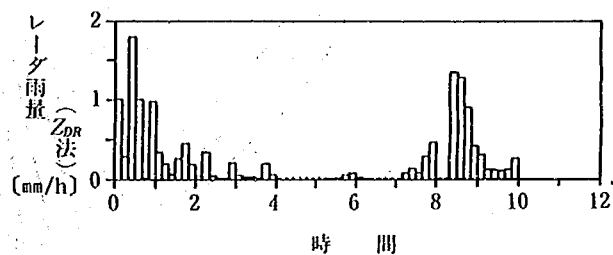
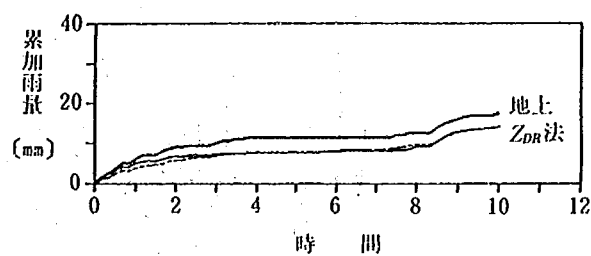
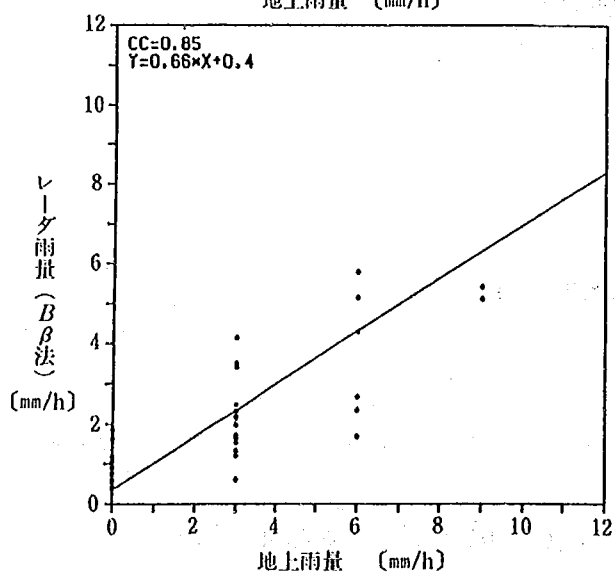
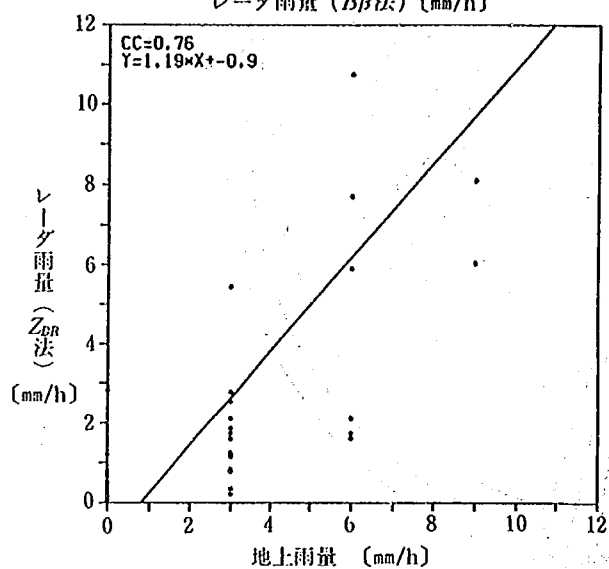
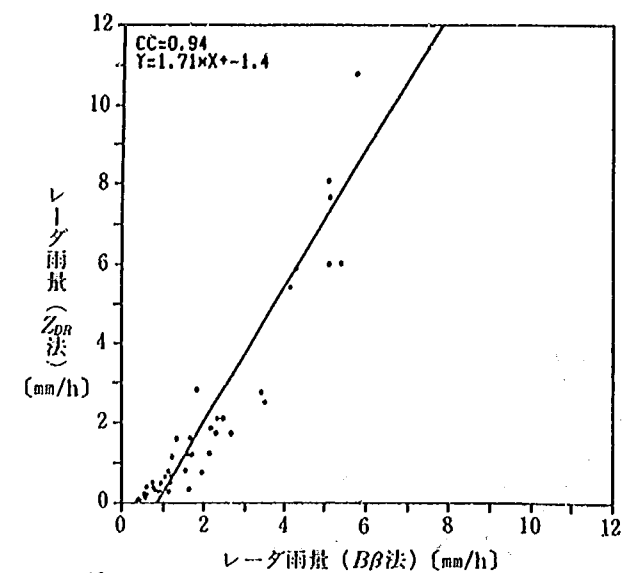
図-4.5.25 に $m = 0.0$ ， $D_{max} = 6.0$ mm とした場合の相関図及びハイエト・マスカーブ図を示す（パターン①，観測所別・降雨別）

また，図-4.5.26～4.5.28 に相関図を示す（パターン①，②及び③，全観測所・全降雨）。

これらの図から，次のことが分かる。

(ア) $B\beta$ 法による降水強度と地上雨量との相関は， Z_{DR} 法によるものと同程度。

(イ) $B\beta$ 法による降水強度は， Z_{DR} 法によるものに比べ小さい。



図一 4.5.25 (a) 相関図及びハイト・マスカーブ図 $m=0.0$ $D_{max}=6.0\text{ mm}$ (観測例1)

観測所：富山工事

観測期間：1987年7月12日 10:00 - 20:00

● 凡例 ●

ハイト・マスカーブ図

- R0 : 地上雨量(mm)
- R1 : Bβ法による雨量(mm)
- R2 : ZDR法による雨量(mm)
- TIME : 時間(hr)
- : 地上累加雨量(mm)
- - - : Bβ法による累加雨量(mm)
- : ZDR法による累加雨量(mm)

相関図

- R0 : 地上雨量(mm/h)
- R1 : Bβ法による雨量(mm/h)
- R2 : ZDR法による雨量(mm/h)
- CC : 相関係数
- 直線 : R0 の R1 に関する回帰直線
R0 の R2 に関する回帰直線
R2 の R1 に関する回帰直線

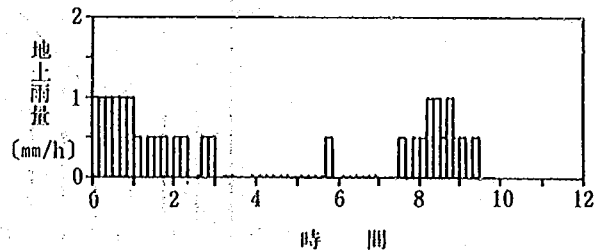
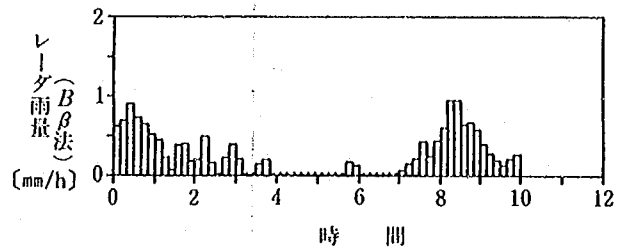
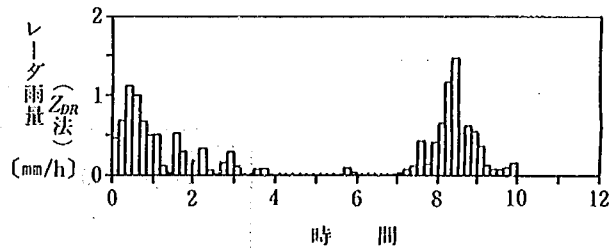
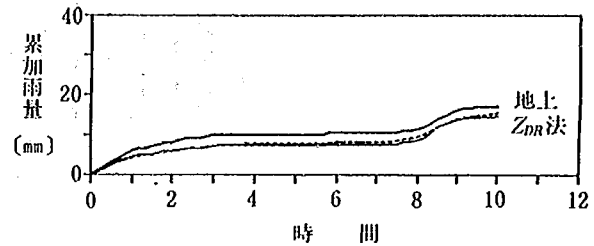
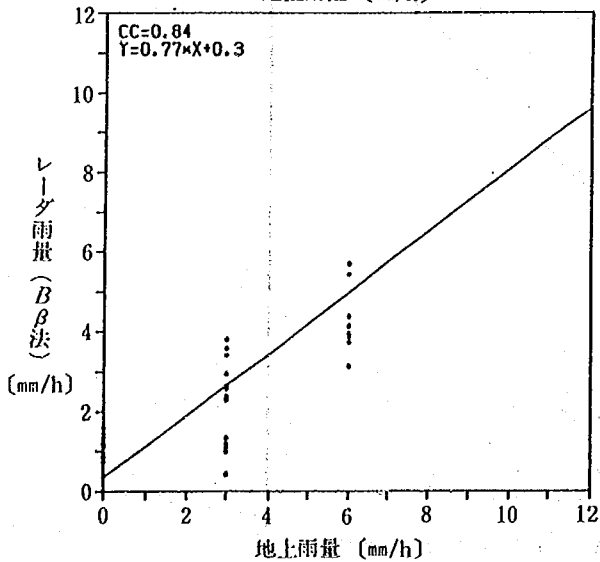
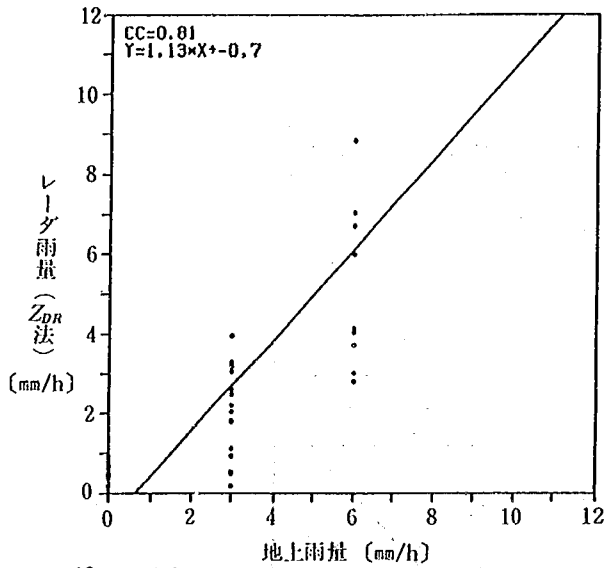
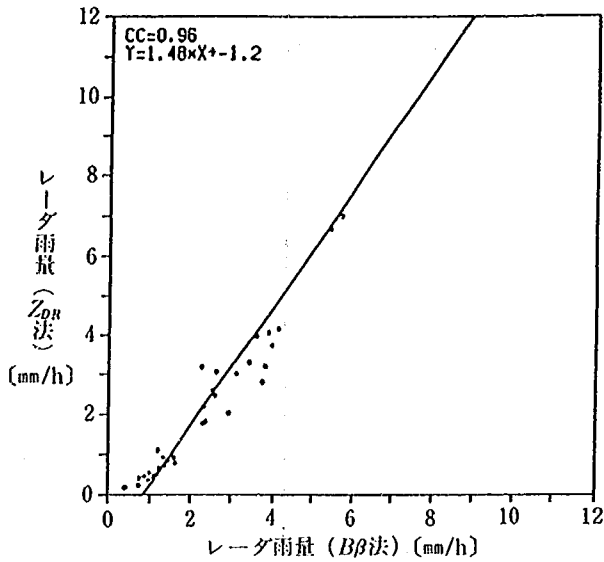


図-4.5.25(b) 相関図及びハイト・マスカーブ図 $m=0.0$ $D_{max}=6.0$ mm (観測例1)

観測所: 松川

観測期間: 1987年7月12日 10:00-20:00

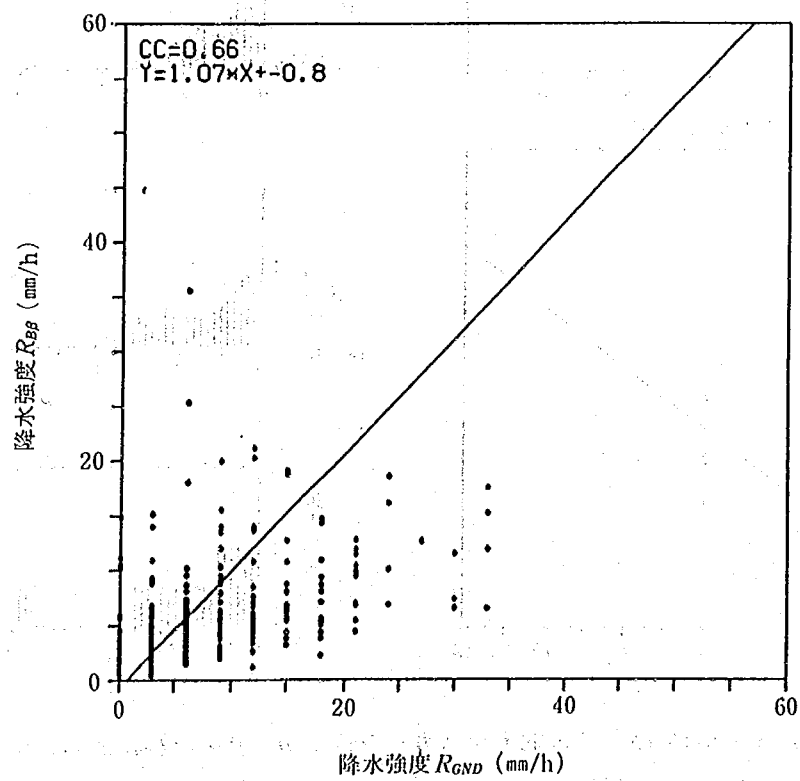
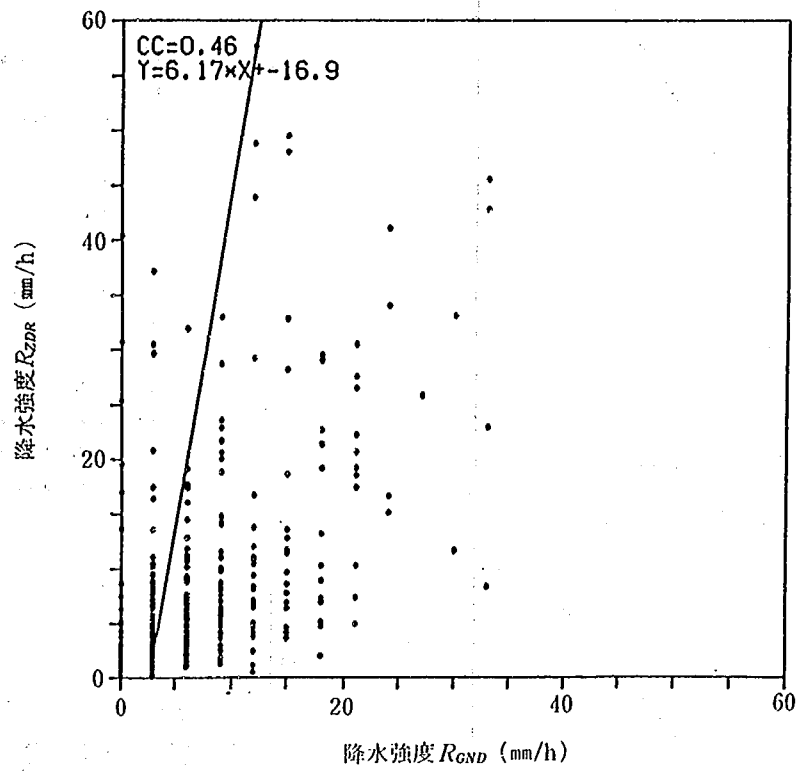


図-4.5.26 相関図 $m = 0.0$ $D_{max} = 6.0$ mm, パターン①, 全観測所・全降雨

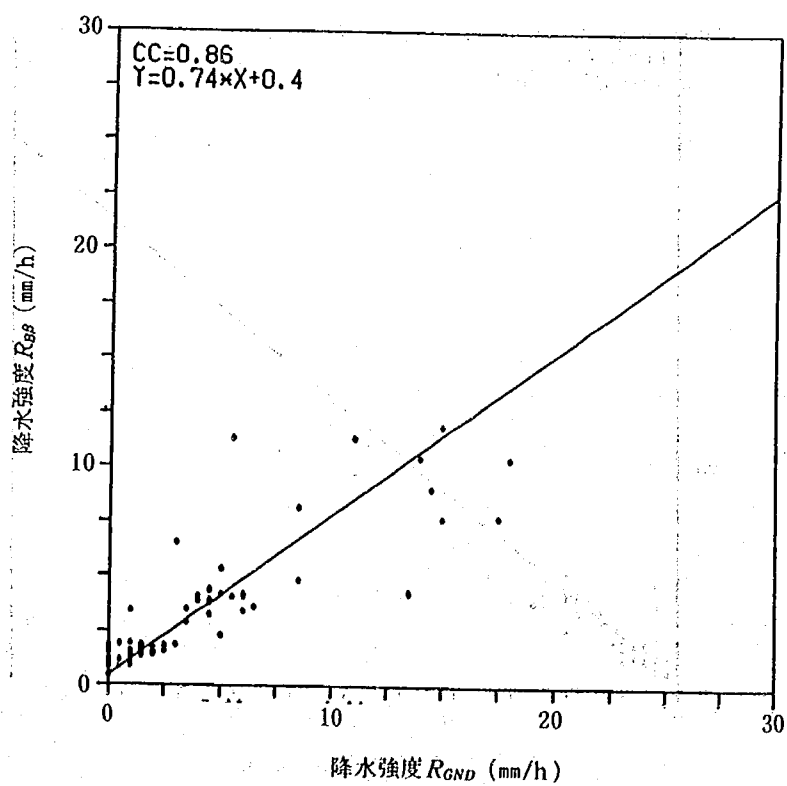
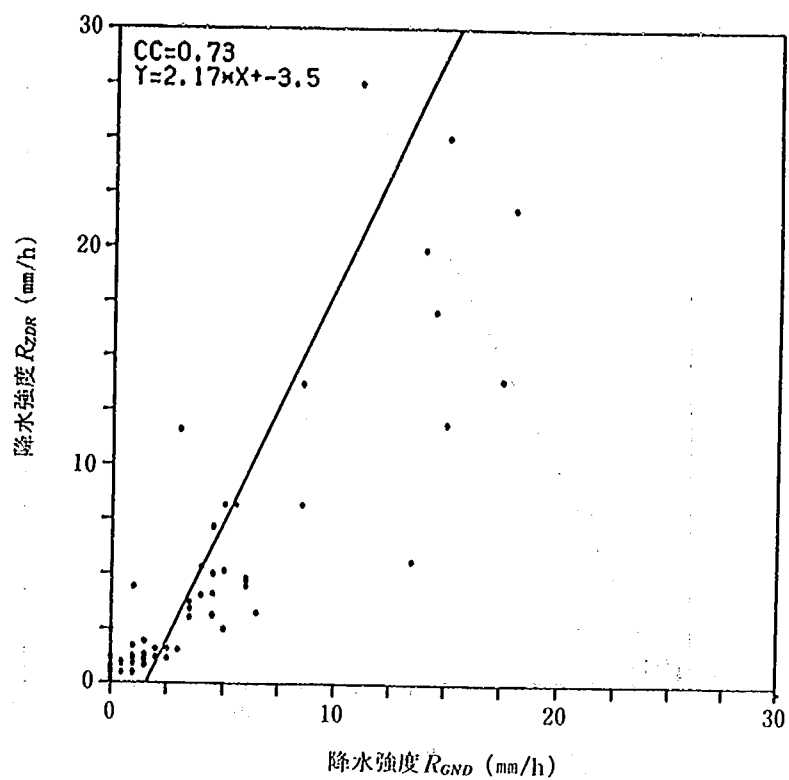


図-4.5.27 相関図 $m=0.0$ $D_{max}=6.0$ mm, パターン②, 全観測所・全降雨

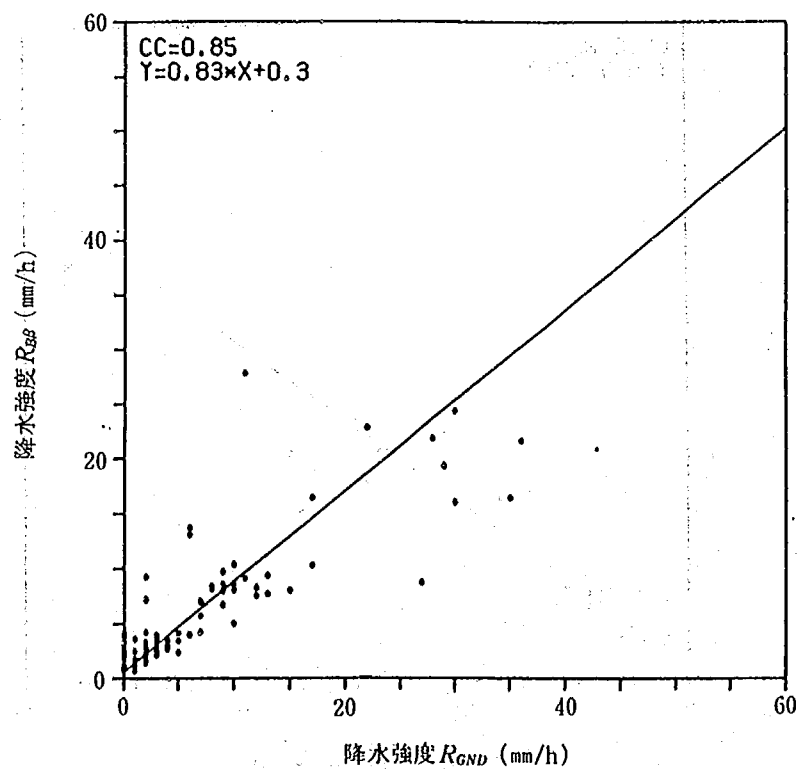
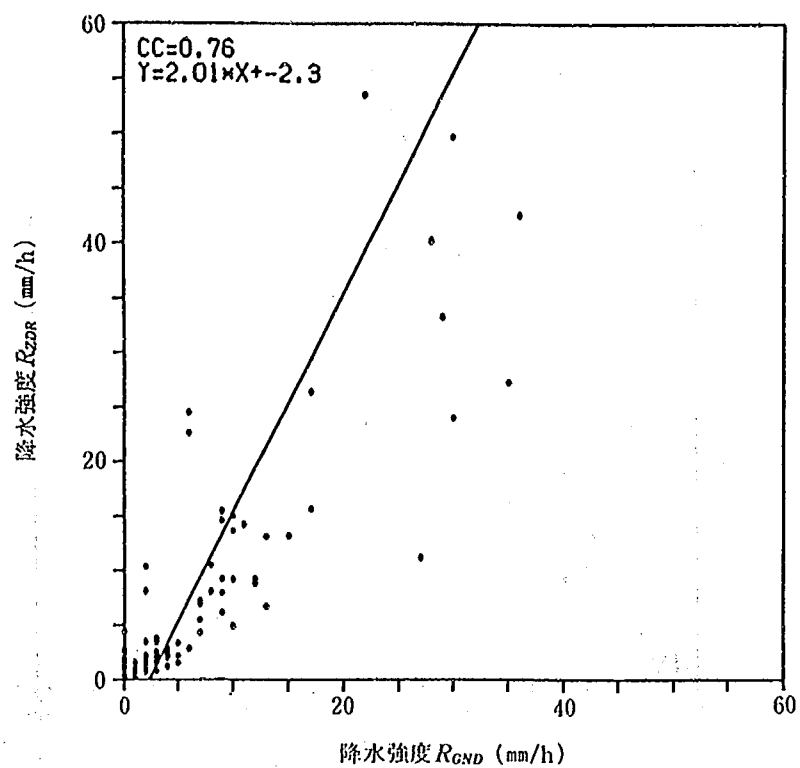


図-4.5.28 相関図 $m = 0.0$ $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$, パターン③, 全観測所・全降雨

(3) 定量的な検定・比較

(a) 指 標

指標として、次式で表される3つの量を用いることとした。

$$\text{相関係数 } \rho = \frac{\sum_{i=1}^N (R_{GND} i - \overline{R_{GND}}) (Ri - \bar{R})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R_{GND} i - \overline{R_{GND}})^2 \sum_{i=1}^N (Ri - \bar{R})^2}} \quad \dots\dots\dots (4.5.77)$$

$$\text{誤差平均 } e = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (|R_{GND} i - Ri|) \quad \dots\dots\dots (4.5.78)$$

$$\text{変動係数 } \epsilon = \frac{1}{R_{GND}} \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (R_{GND} i - Ri)^2} \quad \dots\dots\dots (4.5.79)$$

ここで、

$R_{GND} i$: 地上雨量の測定値

$\overline{R_{GND}}$: 地上雨量の平均値

Ri : 検定対象の降水量 (R_{ZDR} , $R_{B\beta}$) の測定値

$\bar{R}$: 検定対象の降水量 (R_{ZDR} , $R_{B\beta}$) の平均値

(b) 結 果

表-4.5.8 ~ 4.5.10 に $m = 0.0$, $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$ とした場合の各指標の値を示す (3つの検定パターンすべてについて)。

これらの表から、次のことが分かる。

(ア) Z_{DR} 法よりも $B\beta$ 法のほうが精度が良い。

(イ) パターン①より②のほうが精度が良い。また、パターン②より③のほうが精度が良い。

表-4.5.8 観測所別・全観測所の相関係数・誤差平均・変動係数

(検定パターン①, 全降雨)

観測所	データ数	相 関 係 数 ρ		誤 差 平 均 e		変 動 係 数 ϵ	
		Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法
新 保	128	0.58	0.54	7.72	2.86	9.62	1.47
富山工事	150	0.42	0.58	1.73	1.48	2.63	1.31
神通大橋	113	0.72	0.84	1.76	1.51	1.66	0.92
松 川	115	0.80	0.83	2.32	1.99	1.28	0.81
熊 野 橋	118	0.57	0.69	4.79	2.85	2.21	0.97
田 島	115	0.82	0.79	2.41	2.03	1.22	1.01
成 子	90	0.46	0.52	4.33	4.13	1.26	1.12
落 合	93	0.79	0.81	2.23	2.84	0.95	1.18
全観測所	922	0.46	0.66	3.42	2.38	3.90	1.17

($m = 0.0$, $D_{max} = 6.0 \text{ mm}$, 温度 = 15°C として計算)

表一 4.5.9 観測所別・全観測所の相関係数・誤差平均・変動係数
(検定パターン②, 全降雨)

観測所	データ数	相 関 係 数 ρ		誤 差 平 均 e		変 動 係 数 ϵ	
		Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法
新 保	8	0.59	0.69	4.82	1.37	3.65	0.72
富山工事	9	0.74	0.83	1.25	1.08	0.84	0.71
神通大橋	11	0.94	0.96	1.62	1.08	0.71	0.47
松 川	10	0.96	0.96	0.98	1.23	0.44	0.61
熊 野 橋	6	0.67	0.76	3.67	2.58	0.88	0.55
田 島	13	0.92	0.91	1.77	1.50	0.87	0.70
成 子	5	0.75	0.78	3.96	2.51	0.76	0.58
落 合	7	0.99	0.98	0.87	1.75	0.36	0.80
全観測所	69	0.73	0.86	2.15	1.52	1.31	0.67

($m=0.0$, $D_{max}=6.0\text{mm}$, 温度 = 15°C として計算)

表一 4.5.10 観測所別・全観測所の相関係数・誤差平均・変動係数
(検定パターン③, 全降雨)

観測所	データ数	相 関 係 数 ρ		誤 差 平 均 e		変 動 係 数 ϵ	
		Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法
新 保	18	0.55	0.64	2.85	1.27	3.01	2.98
富山工事	33	0.82	0.81	0.83	0.76	0.91	0.75
神通大橋	13	0.94	0.97	1.46	0.97	0.75	0.47
松 川	12	0.96	0.96	0.88	1.03	0.42	0.56
熊 野 橋	7	0.73	0.83	3.16	2.15	0.91	0.55
田 島	13	0.92	0.91	1.70	1.50	0.82	0.69
成 子	5	0.76	0.78	3.89	2.47	0.76	0.57
落 合	7	1.00	0.99	0.87	1.78	0.35	0.77
全観測所	108	0.76	0.85	1.65	1.22	1.34	0.73

($m=0.0$, $D_{max}=6.0\text{mm}$, 温度 = 15°C として計算)

(4) m 及び D_{max} の影響

ここでは, この影響を(2)及び(3)の指標を用いて示す。

図一 4.5.29 に, ハイエトグラフ及び相関図が m 及び D_{max} によってどの程度変わるかを示す。また, 表一 4.5.11 に, 相関係数, 誤差平均及び変動係数の変化を示す。

前節までに示したように m 及び D_{max} は, Z_{DR} 法によって降水強度を求める際に大きな影響を与える筈であるが, これらの図表からは, この影響は殆ど無いように見える。

これは、図-4.5.30の反射因子 Z_H と反射因子差 Z_{DR} の相関図及び時系列変化図に示すように、今回観測された反射因子差 Z_{DR} が非常に小さいことによるものと考えられる。(図-4.5.12, 図-4.5.13 参照)

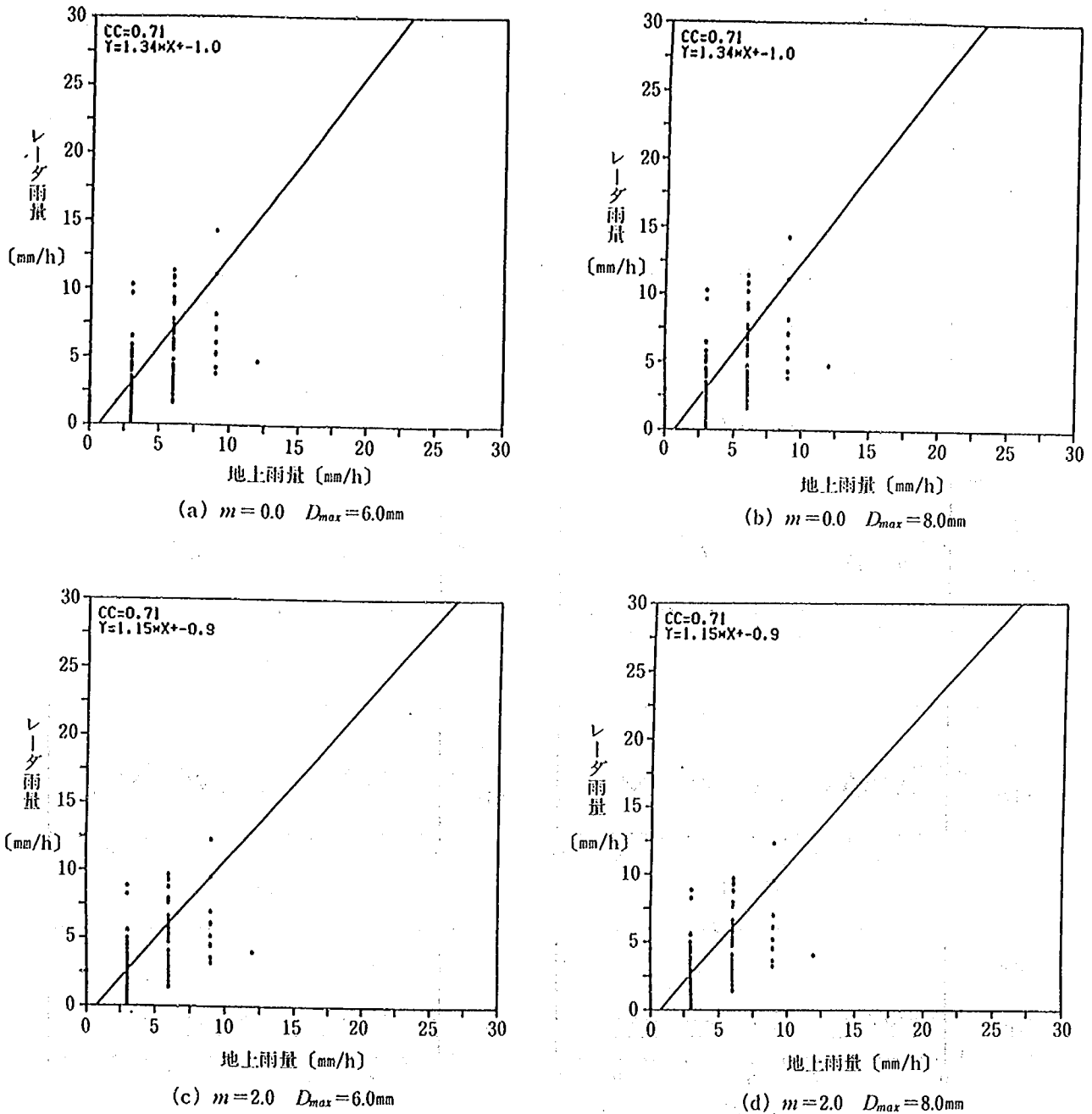


図-4.5.29 Z_{DR} 法における m 及び D_{max} による影響 ——相関図(全観測所)

観測期間：1987年7月12日 10:00 - 20:00

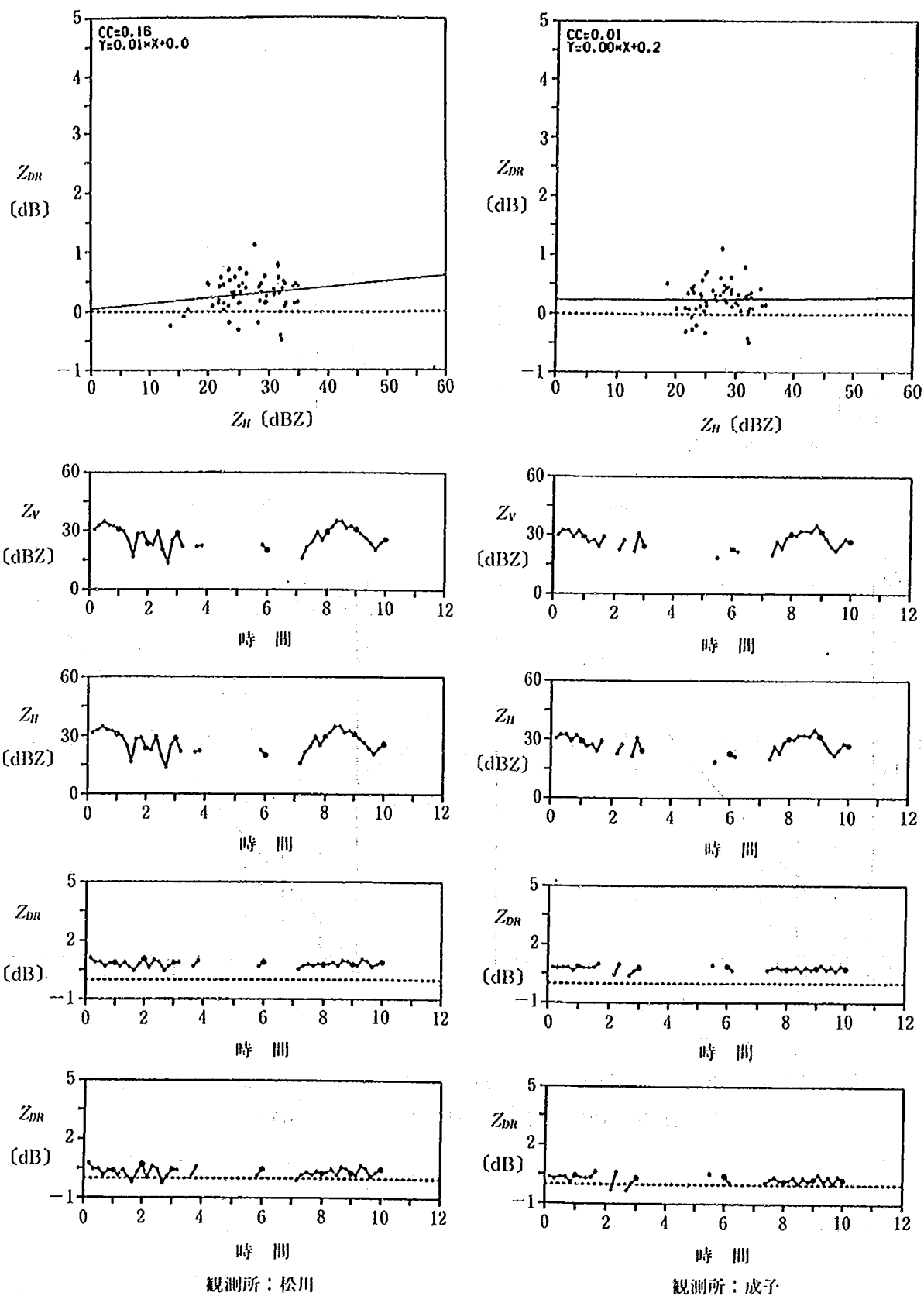


図-4.5.30 反射因子 Z_H , 反射因子差 Z_{DR} の相関図及び時系列変化図

表一 4.5.11 m 及び D_{max} の違いによる精度の差

パラメータ		データ数	相 関 係 数 ρ		誤 差 平 均 e		変 動 係 数 ϵ	
m	D_{max}		Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法	Z_{DR} 法	$B\beta$ 法
0.0	6.0mm	326	0.71	0.77	1.40	1.34	0.77	0.68
2.0	6.0		0.71		1.39		0.76	
0.0	8.0		0.71		1.40		0.76	
2.0	8.0		0.71		1.39		0.76	

4.5.6 まとめ

今回の調査により次のことが分かった。

- ① 高度による雨滴の形状の差はほとんどない。
- ② 高度、入射角及び温度の差が後方散乱断面積に与える影響は下図のとおり。

		影響小	→	中	→	影響大
高 度	0 km VS.	1 km 2 km 3 km				
入射角	3° VS.	7°		15°		45°
温 度	20°C VS.			15°C 10°C		5°C

- ③ 雨滴の形状からの直感的な判断,

$$\frac{\partial [\sigma_{HH}/\sigma_{VV}]}{\partial a_0} \geq 0$$

ここで,

σ_{HH}, σ_{VV} : 後方散乱断面積

a_0 : 等価半径

とは異なり,

等価半径 a_0 の増加 (雨滴が大きくなる) に従い, σ_{HH}/σ_{VV} が増加するとは限らない。

- ④ 「粒径分布が, Marshall-Palmar, Joss (霧雨), Joss (地雨), または Joss (雷雨) で表されること」及び「雨滴の傾き・振動がないこと」を仮定すれば, 水平偏波の反射因子 Z_H と反射因子差 Z_{DR} との間には正の相関がある。
- ⑤ 反射因子差 Z_{DR} の測定精度が降水強度に及ぼす影響と反射因子 Z_H の測定精度が降水強度に及ぼす影響とでは, 前者の方がはるかに大きく, 特に Z_{DR} が小さい場合にはより顕著になる。
- ⑥ 本報告書に示す方法 (条件・仮定) により計算する場合, Z_{DR} 法による降水強度と $B\beta$ 法による降水強度とでは, 後者の方が精度が良い (地上雨量と合っている)

[追記]

Z_{DR} 法による降水強度の測定精度が $B\beta$ 法より劣った理由として, 次の様なことが考えられる。

(ア) Z_{DR} 法の場合, Z_H の測定精度が降水強度に及ぼす影響が, $B\beta$ 法の場合より大きい。

つまり、 Z_{DR} 法の場合 Z_H の測定誤差がそのまま降水強度の誤差となるのにたいし、 $B\beta$ 法の場合は Z_H の測定誤差が $1/\beta$ 乘される ($\beta > 1$ なので、緩和される)。

(イ) Z_{DR} 法の場合 Z_{DR} の測定精度の影響を受ける。(一方、 $B\beta$ 法の場合はその影響を全く受けない。)

(ウ) Z_{DR} 法の場合、降水強度の算出が複雑なため、大きな計算誤差を含む可能性がある。

(エ) Z_{DR} 法により降水強度を計算するに先立ち仮定した事項(雨滴は傾いていない。雨滴は振動していない。等)と実際との違いが大きい。

Z_{DR} 法による降水強度の測定精度向上のためにも、今回の計算でなぜ Z_{DR} 法による降水強度が $B\beta$ 法によるものより劣ったのか(Z_H の測定誤差なのか、 Z_{DR} の測定誤差なのか、それ以外の理由によるものなのか)を調査する必要がある。

[参考文献]

[1] H.R.PRUPPACHER and R.L.PITTER

1971

A Semi-Empirical Determination of the Shape of Cloud and Rain Drops

JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES VOL. 28

[2] B.P.LeCLAIR, A.E.HAMIELEC and H.R.PRUPPACHER

1971

A Numerical study of the Drag on a Sphere at Low and Intermediate Reynolds Number

JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES VOL. 27

[3] A.FAGE

1936

Experiments on a Sphere at Critical Reynolds Number

REPORT AND MEMORANDA NO. 1766

[4] T.OGUCHI

1977

Scattering Properties of PRUPPACHER-and-PITTER Form Raindrops and

Cross polarization due to Rain: Calculations at 11, 13, 19.3 and 34.8 GHz

RADIO SCIENCE

[5] T.OGUCHI

1960

Attenuation of Electric Magnetic Wave due to Rain with Distorted Raindrops

JOURNAL OF THE RADIO RESEARCH LABORATORIES VOL. 7 NO. 33

[6] 阿波加 純

降雨散乱に関する理論及び実験研究(学位論文)

[7] 水野雅光ほか

1986

降水現象のレーダ観測に関する調査報告書

土木研究所資料 2352 号

[8] 吉野文雄ほか

1987

直交二重偏波レーダによる降水観測に関する調査報告書

土木研究所資料 2487 号

4.6 ドップラモードの観測精度

4.6.1 まえがき

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、ため降雨観測に比べ定量的な観測が難しい。したがって、雪片の移流を考慮したレーダによる降雪観測手法を開発する必要がある。そこで、本調査は雪片の移流を測定する道具であるドップラレーダの上空の風向風速の測定精度を評価した。

4.6.2 調査方法

富山県立山町にある富山工事事務所三郷出張所に設置した DND レーダ（二重偏波・ドップラレーダ）の観測結果とレーダサイトで放球した低層レーウィンゾンデによる上空の風速場の測定結果とを比較することによって、ドップラレーダの上空の風速場の測定精度を評価した。

4.6.3 ドップラレーダによる上層風の測定原理

図一 4.6.1 においてレーダ測定点の水平風速を V_H 、風向を ϕ 、ビーム内の降水粒子の平均落下速度を V_F 、とすると、その点におけるレーダ方位角 θ_a 、仰角 θ_e に対し、ドップラ平均速度 V_D は次式によってあたえられる。

$$V_D = V_H \cdot \cos \theta_e \cdot \cos (\phi - \theta_a) + V_F \cdot \sin \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.6.1)$$

未知数は V_H 、 ϕ 、 V_F の 3 個である。いまレーダ観測域内の測定高度面で、この 3 個の未知数が一定であるとする、(4.6.1) 式は図一 4.6.2 に示すような余弦曲線になる。 V_D はアンテナの向きが風上方向にあるとき、すなわち $\theta_a = \phi$ で最大値 V_1 をあたえる。また、風下方向、すなわち $\theta_a = \phi + \pi$ で最小値 V_2 をあたえる。 V_1 、 V_2 は次のように表すことができる。

$$V_1 = V_H \cdot \cos \theta_e + V_F \cdot \sin \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.6.2)$$

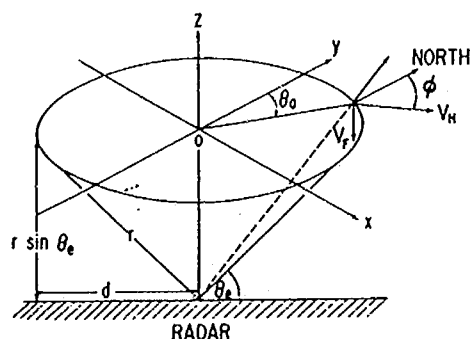
$$V_2 = -V_H \cdot \cos \theta_e + V_F \cdot \sin \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.6.3)$$

したがって、式(2)、(3)から、 V_H 、 V_F は次式のように表せる。

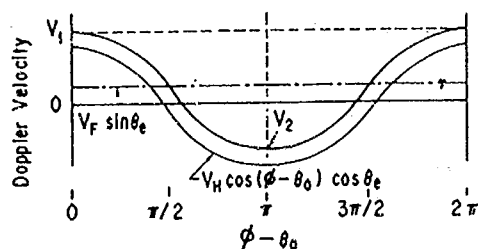
$$V_H = (V_1 - V_2) / 2 \cdot \cos \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.6.4)$$

$$V_F = (V_1 + V_2) / 2 \cdot \sin \theta_e \quad \dots\dots\dots (4.6.5)$$

しかし、実際の風速分布は空間的に変動しているから、常に式(4.6.1)に示す理論曲線に乗るとは限らないので、 V_D の観測データに最小自乗法を適用して得た理論分布から、 V_H 、 V_F 、 ϕ を求める。なお、この観測方法を VAD 観測という。



図一 4.6.2 VAD 観測方法



図一 4.6.2 VAD の理論分布図

VAD 観測の精度評価の指標として、標準偏差 σ 、誤差率、相関係数を用いた。標準偏差は、 V_0 の観測データと理論余弦曲線との差の 2 乗平均誤差の平方根 (Root Mean Square)。誤差率は、標準偏差 σ と水平風の速度 V_H の比 σ/V_H である。相関係数は、 V_0 の観測データと理論余弦曲線との相関係数である。

4.6.4 レーダ観測方法及びデータ処理方法

(1) レーダ観測方法

レーダによる上空の風速場の観測は、運用パターン 4 (8 仰角自動設定, 1 サイクル約 10 分間) で行った。観測仰角は、3°, 6°, 12°, 20°, 35°, 50°, 70°, 90° の 8 仰角である。仰角 3° で観測すると高度約 30m 毎の風速場が測定できる。仰角 6° で高度約 50m 毎, 仰角 12° で高度約 100m 毎, 仰角 20° で高度約 170m 毎, 仰角 35° で高度約 290m 毎, 仰角 50° で高度約 380m 毎, 仰角 70° で高度約 470m 毎の風速場が測定できる。

(2) データ処理方法

256 セクターデータのうち欠落データ (速度が 0.0 m/s のデータ) が 50 個以下の場合には欠落補正した。欠落補正の方法は、青柳が提案した逐次近似法を用いた。また、ゾンデと対比させるデータは相関係数が 0.9 以上のものを用いた。

4.6.5 ゾンデによる風向・風速の観測方法と観測時間

(1) ゾンデによる風向・風速の観測方法

気温計、高度計を内蔵した発信器を、ヘリウムガスを充填した直径 1.5m の気球 (ゾンデ) に吊り下げ放球する。今回用いたゾンデは高度約 3000m までの風向・風速を測定する低層レーウィンゾンデである。ゾンデは 1 分間に約 300m 上昇する。ゾンデの方位角と仰角の情報は、パラボラ型のアンテナによる自動追尾 (10 秒毎にゾンデの方位角と仰角を記録する) とレーボールを用いた人による追尾 (20 秒毎にゾンデの方位角と仰角を記録する) で収集する。高度の情報は、高度が 1000m 以下の場合には約 100m 毎に、高度が 1000m 以上の場合には約 300m 毎に、ゾンデから信号が送られてくる。高度、方位角、仰角のデータからゾンデの軌跡を算出し、水平面で見た移動方向及び距離から高度 100m 毎の風向・風速を算出する。したがって、ゾンデから求まる風向・風速は高度約 100m の平均値である。

(2) ゾンデによる風向・風速の観測時間

ゾンデによる風向・風速の観測は 4 回行った。その時間と観測できた高度は次の通りである。

- ① ゾンデ放球時間：7 月 15 日 16 時 45 分, 観測高度：0 ~ 1100m
- ② ゾンデ放球時間：7 月 15 日 17 時 52 分, 観測高度：0 ~ 1700m
- ③ ゾンデ放球時間：7 月 17 日 16 時 02 分, 観測高度：0 ~ 2600m
- ④ ゾンデ放球時間：7 月 17 日 17 時 21 分, 観測高度：0 ~ 3000m

4.6.6 ゾンデとレーダの対比結果

図— 4.6.3 に 17 時 22 分の仰角 20° の高度 0.27 ~ 4.02km の VAD 曲線を示す。7 月 17 日 17 時 21 ~ 24 分は、4 回目のゾンデ観測が行われた時間とほぼ同じである。欠落データが 50 個以下で逐次近似法で欠落補正をした場合、理論曲線と観測値の相関係数は 0.927 ~ 0.997, 誤差率は 0.04 ~ 0.27 であ

る。したがって、観測結果は余弦曲線に乗っておりドップラレーダによる上層風の観測は理論どおりになっており、上層では一様風の仮定が成り立つことが分かる。

図-4.6.4(1)に、7月17日17時9～15分の仰角 3° 、 6° 、 12° 、 20° 、 35° 、 50° 、 70° のレーダ観測値の水平風速度、水平風風向、鉛直風速度、標準偏差、誤差率、相関係数の鉛直プロファイルと誤差率と相関係数の関係を示す。また、水平風速度と水平風風向の鉛直プロファイルにはゾンデ観測値も示した。図-4.6.4(2)に7月15日16時43～49分のレーダ観測値とゾンデ観測値の水平風速度と水平風風向の鉛直プロファイル及びレーダ観測値の相関係数の鉛直プロファイルを、図-4.6.4(3)に7月15日17時46～53分のレーダ観測値とゾンデ観測値の水平風速度と水平風風向の鉛直プロファイル及びレーダ観測値の相関係数の鉛直プロファイルを、図-4.6.4(4)に7月17日16時2～9分のレーダ観測値とゾンデ観測値の水平風速度と水平風風向の鉛直プロファイル及びレーダ観測値の相関係数の鉛直プロファイルを示す。

これらのレーダによる観測結果及びゾンデとの対比結果から次のことが分かった。

- ① ゾンデ観測による風向とレーダ観測による風向は、良く一致する。
- ② ゾンデ観測による風速とレーダ観測による風速は、 $2\sim 3\text{ m/s}$ 程度の相違がある場合もあるがほぼ一致する。
- ③ ゾンデ観測による風速とレーダ観測による風速の鉛直プロファイルを比較すると、レーダ観測値は高度によって滑らかに変化するが、ゾンデ観測は変動が激しい。これは、ゾンデが地点観測であるのに対し、レーダは円周上の平均値であることと、ゾンデの観測精度によるものと考えられる。
- ④ 低仰角(3° 、 6°)のレーダ観測値は、相関係数が低く、水平風の良いデータが取り難い。低仰角だと低高度のところを測定しているため、その地点の風向・風速が地形の影響をうける、また、観測データが大地クラッタの影響をうけるので、観測精度が悪くなったと考えられる。
- ⑤ 高仰角(35° 、 50° 、 70°)のレーダ観測値は、相関係数が0.99以上と非常に高く、高精度の水平風の測定ができる。これは、高度が高くなっても狭い範囲を測定しているので一様風の仮定が成立する。大地クラッタの影響を受けないためと考えられる。
- ⑥ 高仰角(35° 、 50° 、 70°)のレーダ観測による鉛直風速度は、 $4\sim 7\text{ m/s}$ と雨滴の理論的な落下速度と一致しており、鉛直速度の測定に適している。これは、水平風の測定精度が良いことと、高仰角のため鉛直成分が多いことによる。
- ⑦ これから、ドップラレーダによる高層の風向・風速の測定精度は良いといえる。また、ドップラレーダによる測風結果を用いれば雪片の移流が予測できると考えられる。

4.6.7 まとめ

今回の調査で、ドップラレーダによる高層の風向・風速の測定精度は良いことが分かった。また、次の項目が今後の検討項目として挙げられる。

- ① ドップラレーダの観測による雪片の移流システムの解明
- ② ドップラ風による降雪予測システムの開発

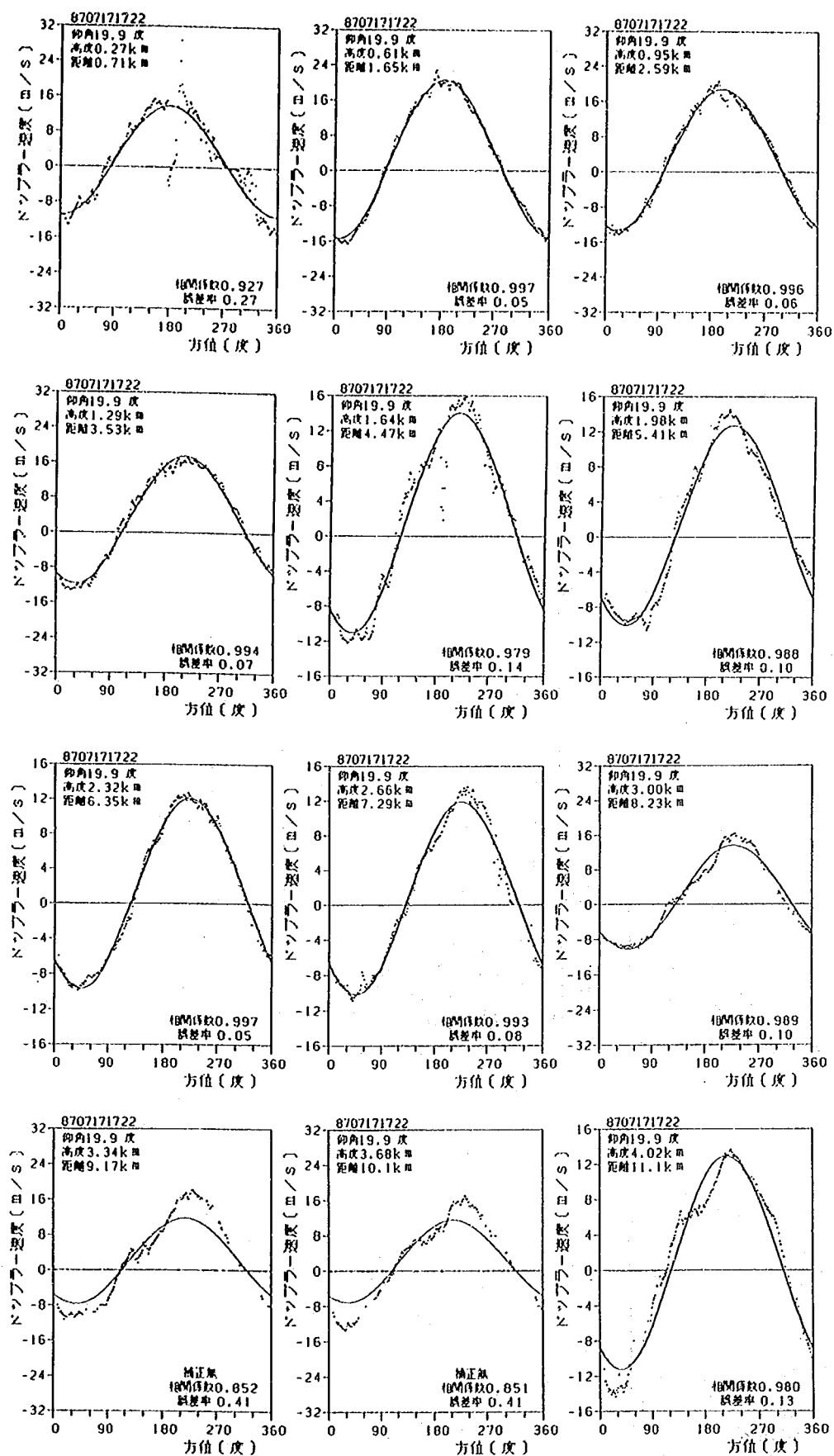


図-4.6.3 ゾンデ観測時のVAD図(仰角20°, 7月17日17時22分)

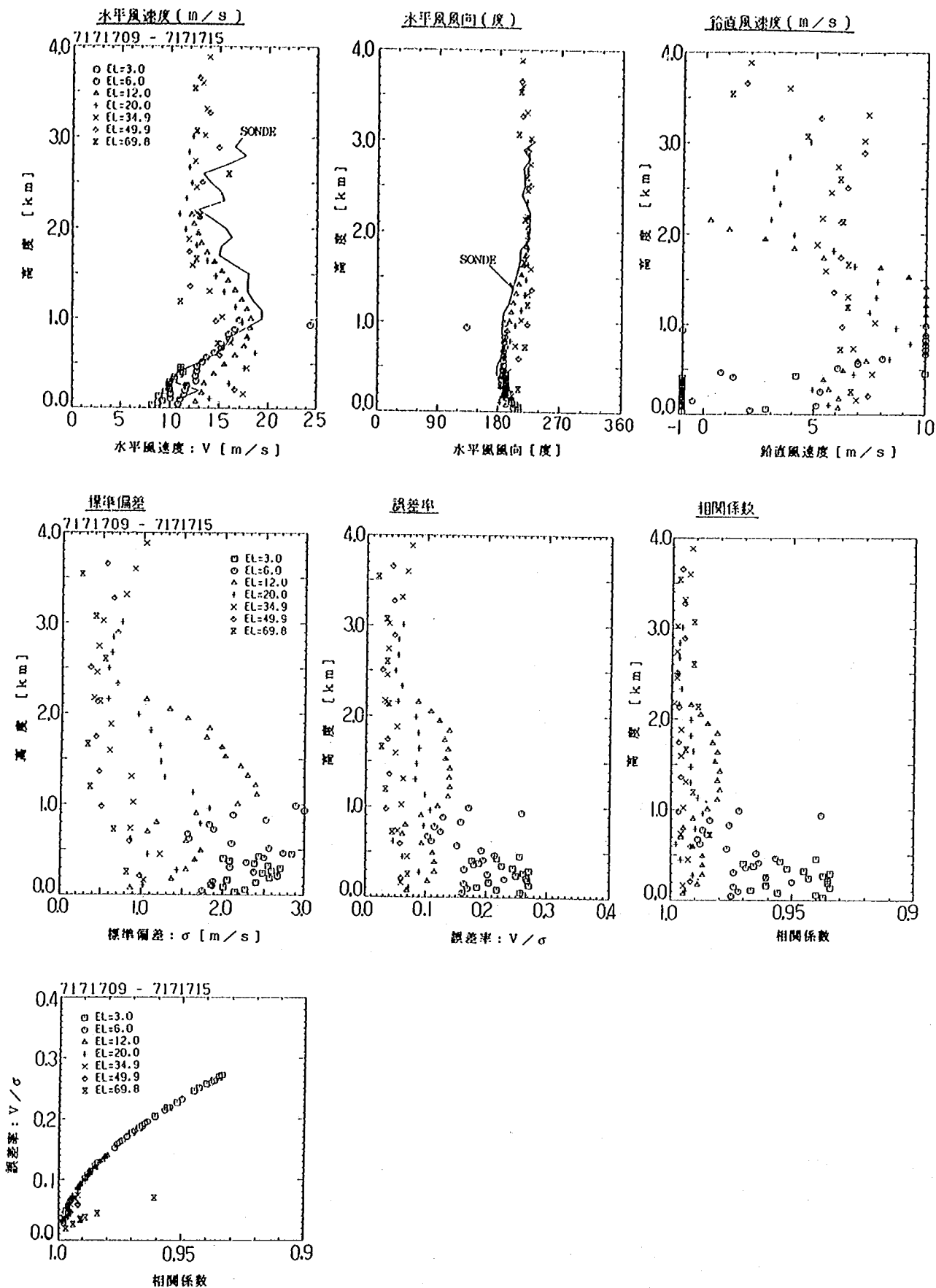


図-4.6.4(1) ゾンデとレーダの対比 (上層風の鉛直プロファイル)
(ゾンデ観測時間: 7月17日17時21分~)

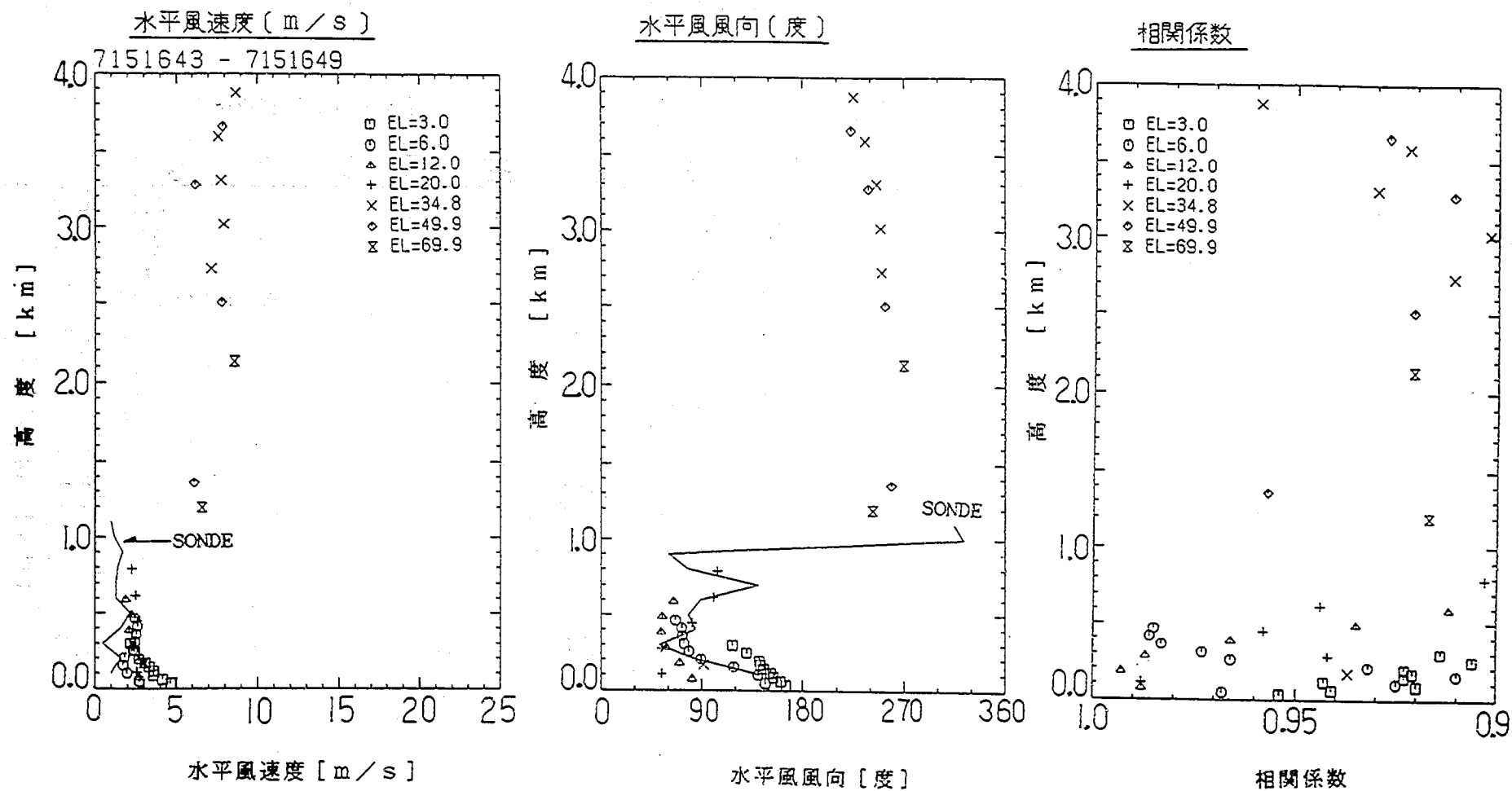


図-4.6.4(2) ゾンデとレーダの対比(上層風の鉛直プロファイル)
(ゾンデ観測時間: 7月15日16時45分~)

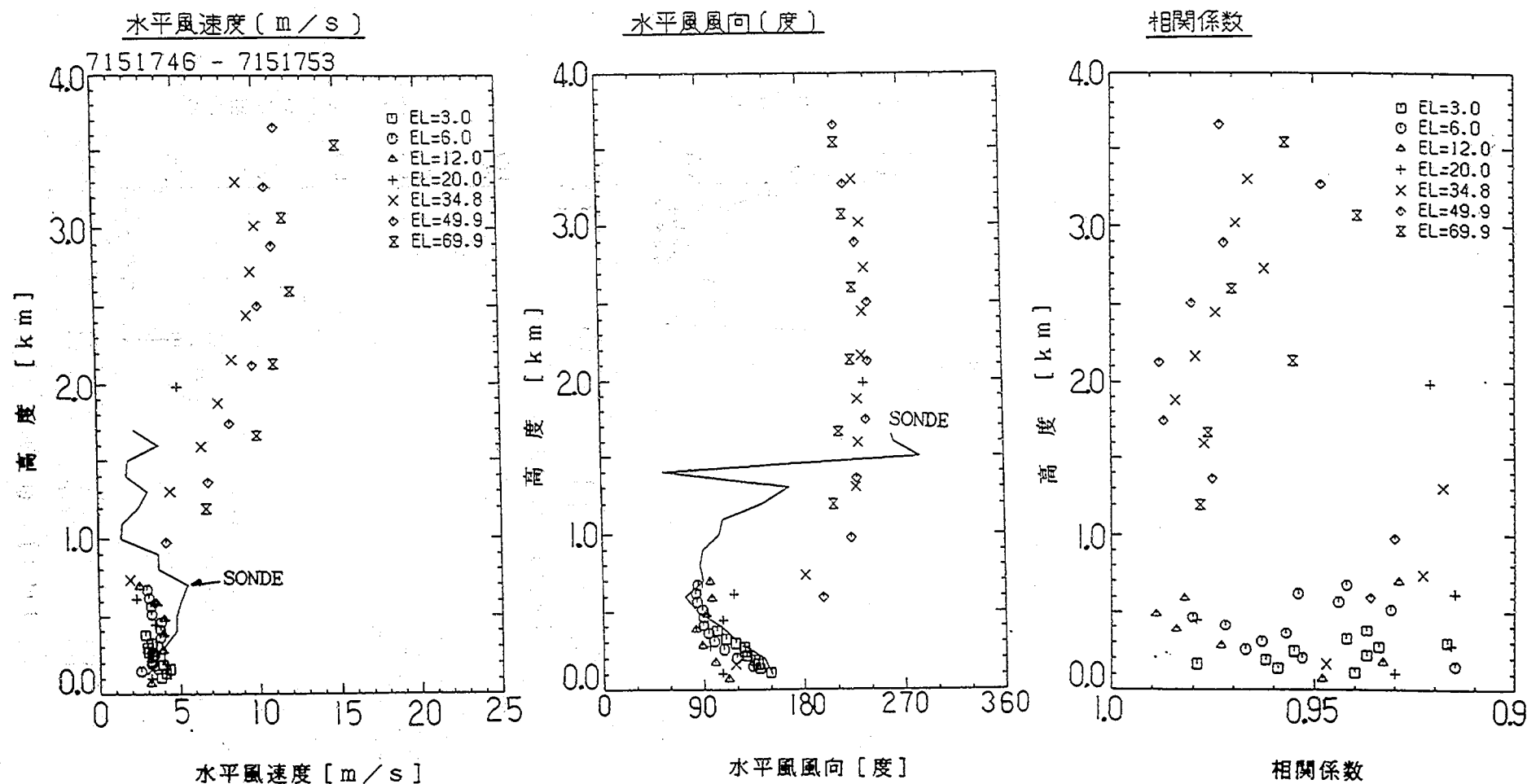


図-4.6.4(3) ゾンデとレーダの対比(上層風の鉛直プロファイル)
(ゾンデ観測時間: 7月15日17時52分~)

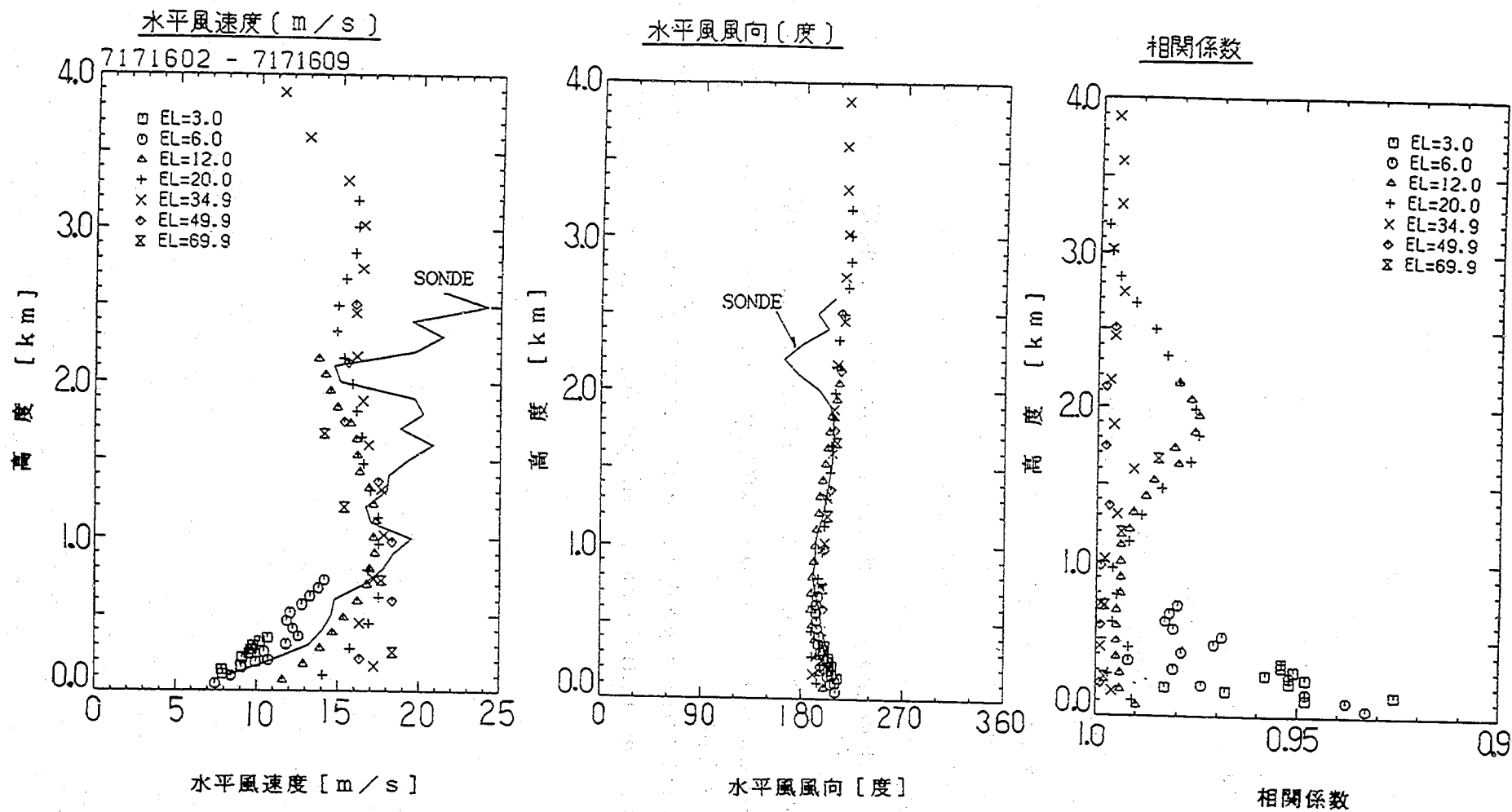


図-4.6.4(4) ゾンデとレーダの対比(上層風の鉛直プロファイル)
(ゾンデ観測時間: 7月17日16時02分~)

4.7 まとめ

第4章では、DND レーダによる降雨観測の事例を紹介するとともに、レーダによる降雨観測手法の開発を行うため、レーダシステムの性能から見たレーダの較正值の検討、 Z_{DR} の算出方法と測定精度の検討、降雨観測における反射電力のサンプリング方法の検討、 Z_{DR} による降水強度の測定精度の検討、及びドップラモードの上層風の測定精度の評価を行った。これらから、次のことが分かった。

- ① レーダ降雨量と地上降雨量との対比結果から、DND レーダのレーダ方程式自体の近似を補正するための較正值は 7.59 dB であることが分かった。また、水平及び垂直偏波の偏波切換器及びアンテナパターンの特性の差を補正する Z_{DR} の較正值は 1.28 dB であった。
- ② 降水粒子群のランダム配置によって生ずる Z_{DR} の変動成分は、平均値が 0.0 dB、標準偏差が約 2.15 dB の正規分布となる。したがって、 Z_{DR} の変動成分を 0.1 dB 以下にするには 450 個以上のデータを平均する必要がある。
- ③ サンプリング方法による反射因子の測定誤差（相対誤差及び標準偏差）は、データ収集時間の合計とは一義的な関係がないが、データを収集しない時間間隔と線形の関係がある。
また、降雨強度を 10 % の精度で測定するには、データ収集間隔（データを収集しない時間間隔）を 3 分間以内にしなければならない。
- ④ Z_{DR} の降水強度の測定精度は、地上降水量と対比してみると、相関係数が 0.76、自乗誤差が 4.0 mm/h であった。
- ⑥ ゾンデ観測とレーダ観測を比較すると、風向及び風速は、ほぼ一致する。したがって、ドップラレーダによる高層の風向・風速の測定精度は良いので、このデータを用いれば雪片の移流が予測できると考えられる。

現在までに得られたデータが少なく、第4章で得られた結論はある数事例による結論である。したがって、今後、DND レーダによる降雨観測を継続し、解析結果を見直す必要がある。

第5章 結 論

本研究では、土木研究所水文研究室が降雪観測用レーダ研究会（会員：㈱東芝、日本無線㈱、三菱電機㈱）と共同で開発した二重偏波・ドップラレーダ（DNDレーダと称する）の構造とその性能を述べるとともに、DNDレーダによる降雨及び降雪の観測特性について検討した。これから、得られた知見は次の通りである。

- ① 地域平均した降雪量で、DNDレーダ値と地上値を比較すると、相関係数は0.8以上と良く、DNDレーダで降雪量の定量観測は可能であると言える。また、雪片の移流を推定できれば、地点の降雪量の定量観測が可能になると考えられる。
- ② ゾンデ観測とレーダ観測を比較すると、風向及び風速は、ほぼ一致する。したがって、ドップラレーダによる高層の風向・風速の測定精度は良いので、このデータを用いれば雪片の移流が予測できると考えられる。
- ③ サンプルング方法による反射因子の測定誤差（相対誤差及び標準偏差）は、データ収集時間の合計とは一義的な関係がないが、データを収集しない時間間隔と線形の関係がある。
また、降雨強度を10%の精度で測定するには、データ収集間隔（データを収集しない時間間隔）を3分間以内にする必要がある。
- ④ Z_{DR} の降水強度の測定精度は、地上降水量と対比してみると、相関係数が0.76、自乗誤差が4.0 mm/hであった。したがって、 Z_{DR} 法を用いれば安定した精度で降雨観測が可能になると考えられる。

現在までに得られたデータが少なく、ここで得られた結論はある数事例による結論である。したがって、今後、DNDレーダによる降雨及び降雪観測を継続し、次の項目の研究を行う必要がある。

- ① 雪片の移流量の推定を導入した降雪量の測定方法の検討
- ② 降水粒子の形態判別手法の検討
- ③ 降雪予測手法の検討
- ④ Z_{DR} 法による降雨量測定法の精度向上方策の検討
- ⑤ Z_{DR} を用いた雨滴の粒径分布の推定法の検討

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)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2594号
昭和63年3月(1988)

水文研究室 室長 吉野文雄
研究員 水野雅光
水野秀幸
井川貴史

要 旨 洪水時の河川管理及び積雪地域の冬期の道路管理を適切に行うには、広域的でかつ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することにより、より精度の良い降水量の観測が可能なレーダの一つとして二重偏波・ドップラレーダ(DNDレーダと称する)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、DNDレーダを試作し、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。本報告書において、DNDレーダの性能を仕様から評価して結果を報告するとともに、DNDレーダによる降雨及び降雪の現地観測を行い、DNDレーダによる降雨及び降雪の観測方法、データ処理方法及び観測精度について検討した結果を紹介する。

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

いは40
円切
下手を
下さ

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所

河川部水文研究室 御中

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2594号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印