

4-10 沖縄偏波降雨レーダ(COBRA)の開発

4-10 Development of the CRL Okinawa Bistatic Polarimetric Radar

中川勝広 花土 弘 佐藤晋介 井口俊夫

NAKAGAWA Katsuhiko, HANADO Hiroshi, SATOH Shinsuke, and IGUCHI Toshio

要旨

通信総合研究所では、沖縄偏波降雨レーダ(通称、COBRA：CRL Okinawa Bistatic polarimetric Radar)の開発を行っている。COBRAは、偏波観測機能、モノスタティックドップラー観測機能、バイスタティックレーダ・ネットワーク機能を有するCバンド帯の降雨レーダシステムである。COBRAは、気象・水文観測技術の開発と現業の気象予報業務や防災業務支援データ収集などへの実用化を目的としている。観測対象は、台風、梅雨、亜熱帯域におけるメソスケールの降水現象である。詳細な雨滴の偏波特性を観測可能にするために、COBRAの主レーダは6種類の偏波をパルスごとに切り替えて送信することができ、水平・垂直偏波の2系統の受信系で同時に受信することができる次世代の降雨レーダである。

Communications Research Laboratory (CRL) has developed a new C-band multi-parameter Doppler radar system with a bistatic Doppler network to establish a next-generation technology of rain observation for meteorological and hydrological applications such as weather forecasts and run-off analysis in predicting floods. This new radar is named COBRA (CRL Okinawa Bistatic polarimetric Radar). COBRA has polarization, monostatic Doppler, and bistatic Doppler observation functions. The targets of this system are typhoons, Baiu-frontal rainfall, meso-scale precipitation in subtropical zones, and clear air turbulence. To measure the polarization characteristics of rainfall, the main radar can select one of six kinds of polarizations for every transmitting pulse, and then both the horizontal and vertical polarizations are measured simultaneously by two receiver systems.

【キーワード】

偏波観測, バイスタティックレーダ・ネットワーク, 信号処理, ストークスパラメータ
Polarization observation, Bistatic radar network, Signal processing, Stokes parameters

1 はじめに

我が国では毎年、集中豪雨、台風、大雪などの降水現象により、家屋の浸水、土砂崩れ、農作物への被害が発生し、尊い人命や貴重な財産を奪う災害が起こる。これらの降水現象は、空間的には数kmから数百km、時間的には数分から数日程度であり、メソスケール大気現象の典型的な例である。降雨レーダは、地上の一地点から半径数百kmの非常に広い範囲を瞬時かつ連続的に観測することができるリモートセンサであり、このようなメソスケール大気現象の監視、

現象そのものの解明に非常に有効な手段である。通常の降雨レーダは、地上から上空に向けて電波を送信し、降水粒子からの後方散乱を受信し、受信信号強度を計測することにより降水強度を計測することができる。

通信総合研究所沖縄亜熱帯計測技術センター(以下、CRL 沖縄)では、平成12年度より亜熱帯地球環境計測技術の開発プロジェクトの一環として、沖縄偏波降雨レーダ(通称、COBRA：CRL Okinawa Bistatic polarimetric Radar)の開発研究を進めてきた[1]。COBRAは、台風やメソスケールの降水や風速の3次元構造など亜熱帯域の

気象現象を高精度で計測することが可能な次世代の降雨レーダであり、メソ気象・水文観測技術の開発と現業の気象予報業務や防災業務支援データ収集などへの実用化を目的としている。

2 COBRAの構成

COBRAは、降水粒子からの詳細な偏波特性を観測可能にする偏波観測機能を有する主レーダと降水粒子からの側方散乱を受信するための受信機をネットワークにより結合したバイスタティックレーダ・ネットワーク機能を有する。主レーダと2台のバイスタティック受信機の配置を図1に示す。図1より、主レーダは沖縄県名護市の名護降雨観測施設（以下、CRL名護）に、バイスタティック受信局は、大宜味大気観測施設（以下、CRL大宜味）とCRL沖縄の2か所に設置する。各バイスタティック受信局とCRL名護は128kbpsの専用回線で、CRL名護とCRL沖縄は1.5Mbpsの専用線で接続されている。なお、CRL名護は無人でCRL沖縄より遠隔制御・監視され

る。

なお、COBRAの運用は、通常観測モード、詳細観測モード、特別観測モードの三つの観測モードを組み合わせる実験観測を行う。通常観測モードは、時系列解析等の統計解析を可能にするため5分又は10分ごとに、仰角0.4度、1.0度の2仰角観測を行う。詳細観測モードでは、必要に応じて観測範囲等を限定し、詳細な偏波観測等を実施する。さらに、通常観測モードで得られたデータから詳細観測モードに移行する時刻や観測範囲を決定する。特別観測モードは、台風襲来時の連続観測や共同観測等によるキャンペーン観測を実施する際に用いる。

2.1 主レーダ

COBRAの主レーダは、Cバンド帯の1波(5340MHz)を用いた地上設置型モノスタティックパルスドップラーレーダである。主レーダの主要諸元を表1に示す。アンテナは、直径4.5m、ビーム幅1.1度以下、レドーム直径8m、アンテナ走査速度は、水平方向には0.5～10rpm、垂直

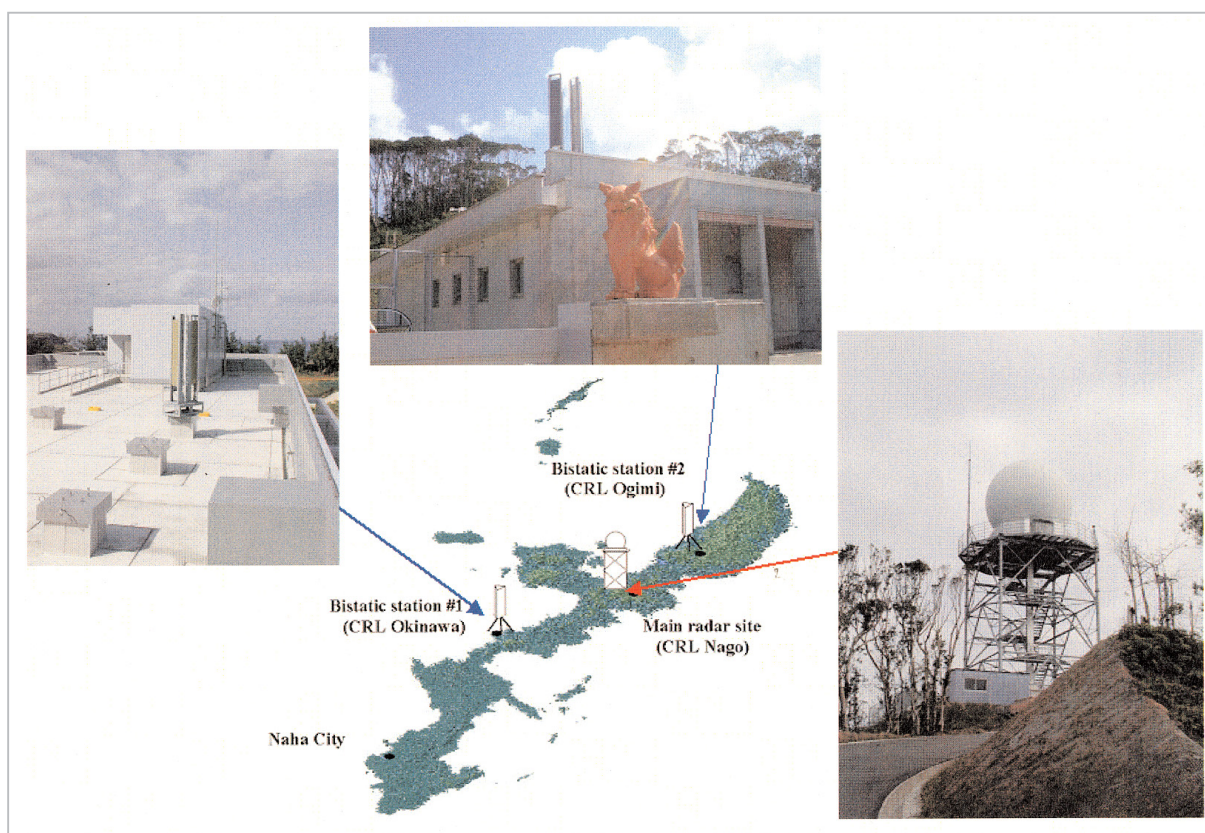


図1 COBRAシステムの配置図

表1 COBRA主レーダ主要諸元

Antenna	
Antenna diameter	4.5 m parabolic
Cross polarization ratio	> 36 dB (Integrated value in a beam)
Antenna gain	> 42 dBi (including radome)
Beam width:	< 1.1 degree
Sidelobe	< -25 dB (one way)
Antenna scan speed	0.5-10 rpm(PPI), 0.1-3.6 rpm(RHI), 0.1 rpm step
Transmitter	
Frequency	5340 MHz (one frequency)
Peak power	> 250 kW
Transmitter tube	Dual Klystron
Pulse width	0.5 μ s, 1.0 μ s, 2.0 μ s
PRF	250 Hz - 3000 Hz, 1 Hz step (staggered PRF)
Polarization	H, V, +45, -45, LC, RC (pulse by pulse)
Receiver (H and V)	
Noise figure	< 3 dB at the input of LNA
Dynamic range	> 90 dB
Data acquisition	
Doppler sift estimation	Pulse pair / FFT
Integration hits number	16, 32, 48, 64, 80, 96, 112, 128, 256, 512, 1024
Range bin number	>2000
Level-1	Stokes parameter, Complex mutual correlation(PPP), Doppler spectrum (FFT), and noise level of receivers.
Level-2	Z, Ze, ZDR, LDR, PhiDP, KDP, RhoHV(0), NCP, Vel, Wid, etc.

方向には0.1～3.6rpmの0.1rpmごとに可変であり、ユーザによる任意の観測が設定可能である。観測範囲は、繰返し周波数や送信パルなどに依存するが約半径300kmは探知可能である。空間分解能についてもパルス幅、オーバーサンプルに依存するが、37.5m～600mである。さらに、詳細な偏波観測を可能にするため、アンテナはサイドローブ特性が良く、レドームは、減衰量が小さいものを採用した。

主レーダは通常の気象レーダで行われている降水粒子からの反射強度(レーダ反射因子(Z))の測定により降水強度(R)を推定することに加え、降水エコーの偏波特性を利用した詳細な降水の偏波観測を行うことが可能である。偏波観測は2台の送信装置(クライストロン)を用い、図2に示すような水平・垂直偏波、偏波面 ± 45 度の直線偏波及び円偏波(右旋・左旋)の6種類の偏波をパルスごとに切り替えて送信し、水平・垂直偏波の2系統の受信系(図3参照)で降水エコーを同時観測し、その偏波特性を測定するフルポラリメトリックな降雨レーダである。

なお、6種類の偏波を用いた観測は、詳細観測モードで実施する。さらに、最適な偏波観測を実施するために、パルスごとの出力をモニターし、2系統の温度特性をも把握することが可能なシステム構成になっており、2系統のシステム差異を小さくすることができる。

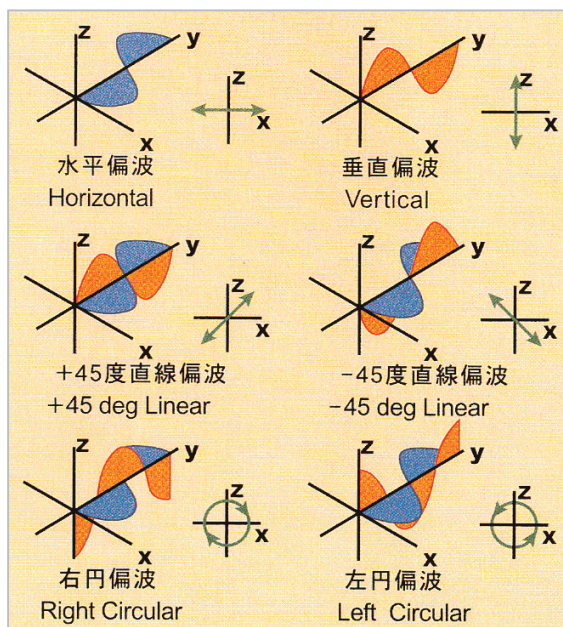


図2 送信される6種類の偏波

ドップラー観測は、観測対象に応じて、パルスペア法によるドップラー速度、スペクトラム幅の測定と、FFT法によるドップラー Spektrum の測定[2]を選択して実施することが可能である。また、ドップラーの折り返し補正を行うために、2重PRFをパルスごとに切り替えて設定することも可能である。

詳細な偏波観測を実施するために必要なアンテナ性能が十分実現されているか、アンテナパターン測定をCOBRAシステムの製造工場とレーダサイトの2回実施した。図4(a)に水平面のHポートにおけるアンテナパターンを、(b)に水平面のVポートにおけるアンテナパターンを示す。

なお、図中の青線は、製作工場でのレドーム無の状態での測定したもので、赤線はレーダサイトにおけるトレドーム実装状態で測定したものである。アンテナパターン測定の結果、レドーム実装後のレーダサイトにおいてもサイドローブレベルが最も悪い場合で-29.5dB、水平偏波に対する交差偏波比が-36.3dB、垂直偏波に対する交差偏波比が-39.3dBとなった。ビーム幅は、0.95度前後であり、開発当初の目標値を達成した。以上より、COBRA主レーダは、詳細な偏波観測を実施するために必要なアンテナ性能を有していることが確かめられた。

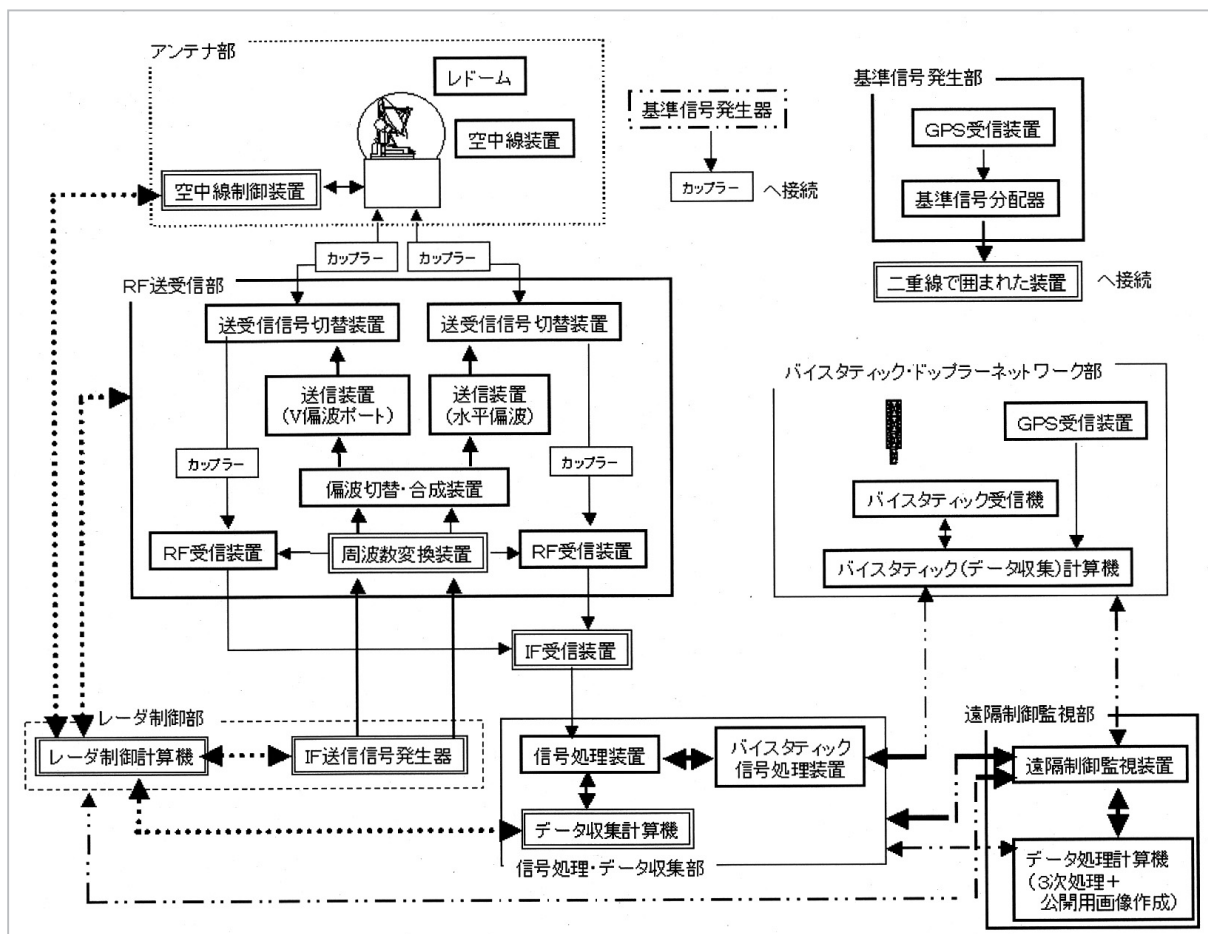


図3 COBRAシステムのブロックダイアグラム

実線はレーダ信号の流れを、点線は制御信号の流れを、2点鎖線はネットワークによるデータの流れをそれぞれ表している。

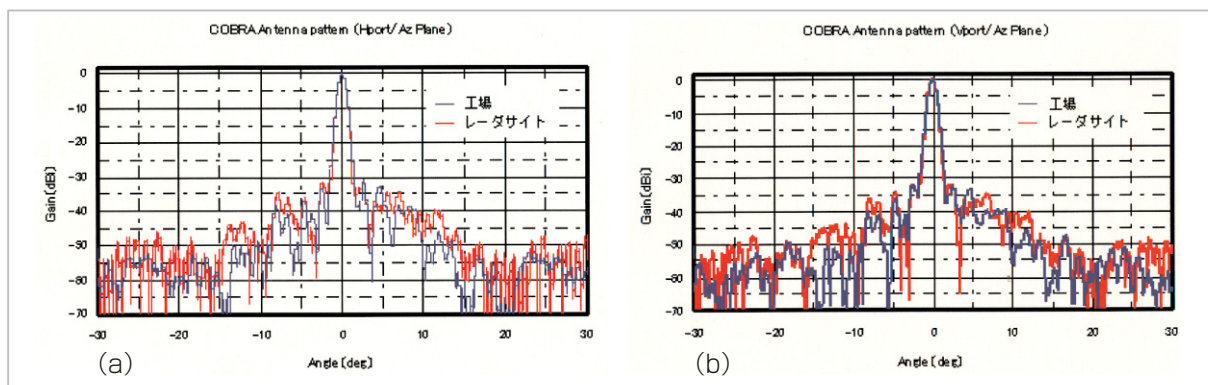


図4 製作工場及びレーダサイトにおいて測定されたアンテナパターン

- (a) 水平面／Hポートのアンテナパターン
- (b) 水平面／Vポートのアンテナパターン

2.2 バイスタティックレーダ・ネットワーク

COBRAの主レーダでドップラー観測を行い、降水の背景風を観測する。この情報と降水粒子からの側方散乱を受信する2台設置するバイスタティック受信機からのドップラー変移の測定を

組み合わせることにより、短時間かつ広範囲の正確な3次元風速場の観測を可能にする[3]。観測原理を図5に示す。バイスタティック受信機は、主レーダ方向に向かって右側の領域と左側の領域を観測するための2面のリニアスロットアレー

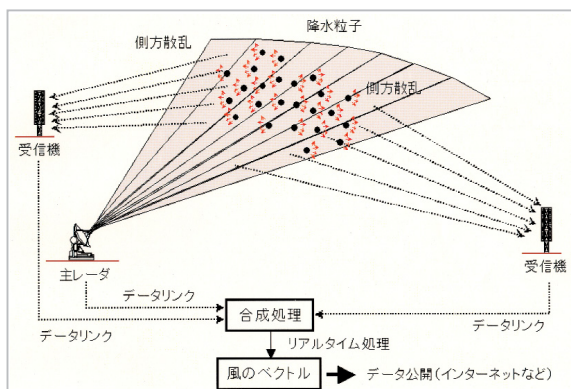


図5 バイスタティックレーダ・ネットワーク観測原理

アンテナで構成されている(図1参照)。

なお、主レーダに向かって右側の領域を観測するアンテナをアンテナR、左側の領域を観測するアンテナをアンテナLとする。バイスタティック受信機のアンテナのビーム幅について計測を行った。その結果、CRL沖縄に設置したバイスタティック受信機のアンテナRの水平及び垂直方向のビーム幅は、それぞれ14.6度、3.3度であった。アンテナLの水平及び垂直方向のビーム幅は、15.7度、3.2度であった。CRL大宜味に設置したバイスタティック受信機のアンテナRの水平及び垂直方向のビーム幅は、それぞれ16.0度、8.4度であった。アンテナLの水平及び垂直方向のビーム幅は、17.9度、7.9度であった。これらのビーム幅の値は、開発当初の目標を達成した。

バイスタティックレーダ・ネットワークの長所としては、従来の2あるいは3台のモノスタティックドップラレーダを組み合わせたデュアル観測と比較すると、価格が安価でシステムも手軽である。さらに、デュアル観測では、狭ビームのレーダ計測を行うため完全同期計測では広域3次元データを得るのに時間がかかり、完全同期を用いない場合においては、時間変動の激しいメソスケール気象現象に対しては信頼性が低い。バイスタティック方式は、主レーダで照射している部分からの信号がすべての受信機で同時に受信されることから完全同期性が保証され、短時間でのデータ取得が可能となる。さらに、デュアル観測において2台あるいは3台のモノスタティックドップラレーダを用いる場合、Cバンド帯の周波数が二つあるいは三つ必要になるが、バイスタティックレーダ・ネットワーク方

式では、必要な周波数は一つとなり、周波数の有効利用にもつながる。

3 信号処理

計測されたデータは、1次、2次、3次処理の3段階にレベル分けされ、リアルタイム処理される。

3.1 1次処理

1次処理では、入力される水平と垂直偏波の受信信号に対して、(1)フルポラリメトリックな偏波観測のための送受信信号のストークスパラメータ[4]、(2)パルスペア処理を行うための複素相互相関、(3)FFTで得られたドップラースペクトラム、(4)水平・垂直2系統の受信機でのノイズレベルが処理され1次処理データとして保存される。

3.2 2次処理

2次処理では、レーダ反射因子(Z)と Z - R 関係より求める降水強度(R)に加え、水平・垂直偏波での Z 因子の比(ZDR)、交差偏波抑圧比(LDR)、両偏波間の相関($\rho_{HV}(0)$)、両偏波間の伝搬位相差(ϕ_{DP})及びその空間微分(KDP)などの物理量が計算される。これらのデータから、降水粒子の形状の識別や雨滴粒径分布の推定[5][6]、バイスタティックレーダ・ネットワークによる風速ベクトルの処理を行う。さらに、通常用いられている Z - R 関係以外の推定手法である ZDR 、 KDP 及び k - R 関係などを用いた降水強度推定を行い[7][8]、2次処理データとして保存する。

3.3 3次処理

3次処理では、2次処理データである降水強度 R (Z)に関する統計処理を行う。具体的には、1時間積算雨量、1時間平均雨量、24時間積算雨量、24時間平均雨量、48時間積算雨量、48時間平均雨量などが処理される。さらに、防災支援データとして沖縄本島内設置ダムの集水域内の1時間積算雨量、1時間平均雨量、24時間積算雨量の処理も行う。

以上の処理データは、動画を含む画像データとしてリアルタイムにWeb上で公開する。

3.4 データ配布

データ量が膨大となる1次処理データ以外の2次、3次処理の画像データは、CRLのWeb上でリアルタイム表示される。一方、デジタルデータは、通信総合研究所の亜熱帯環境情報データベース[9]で保存され、共同研究等を必要な手続を済ませた研究者に配布される。デジタルデータは、netCDF形式で保存される。netCDFとは、Network Common Data Formの略で、Unidata Program Centerで開発されたものである(詳細は、<http://www.unidata.uc-ar.edu/package/netcdf/>を参照)。

4 データ検証

COBRA主レーダの偏波観測データは、CRL大宜味にある400MHzウィンドプロファイラ[10]や地上降水観測データを用いて検証を行う。400MHzウィンドプロファイラは、大気乱流エコーと雨滴からのエコーが同時に観測可能である。したがって、受信されるエコーパワースペクトルを解析することにより風速や大気乱流強度と同時に背景風の影響を除去した雨滴粒径分布を測定することができる。地上における雨滴粒径分布観測は、ディストロメータを用いて実施する。降水強度に関しては、1分間降水強度が観測できる光学式雨量計、転倒杵式雨量計などを用いて検証を行う(図6参照)。

バイスタティックレーダ・ネットワークによって観測される風のデータについては、400MHzウィンドプロファイラで観測される風のデータや那覇空港に設置されている空港ドップラーレーダを用いて検証を行う。

参考文献

- 1 K. Nakagawa, H. Hanado, S. Satoh, T. Iguchi, and S. Fujii, "Development of the Okinawa polarization rain radar: COBRA", Fifth International Sympo. on Hydro. Appli. of Weather Radar, 2001, 153-158.
- 2 R. J. Doviak and D. S. Zrnic, "Doppler radar and weather observations", 2nd ed., Chap. 5 Academic Press, 1993.
- 3 J. Wurman, S. Heckman, and D. Boccippio, "A Bistatic Multiple-Doppler Radar Network", J. Appl. Meteorol., 1993, 1802-1814, Vol. 32.
- 4 G. G. Stokes, "On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources", Trans, Comb. Phil. Soc., 1852, 399-416, Vol. 9.

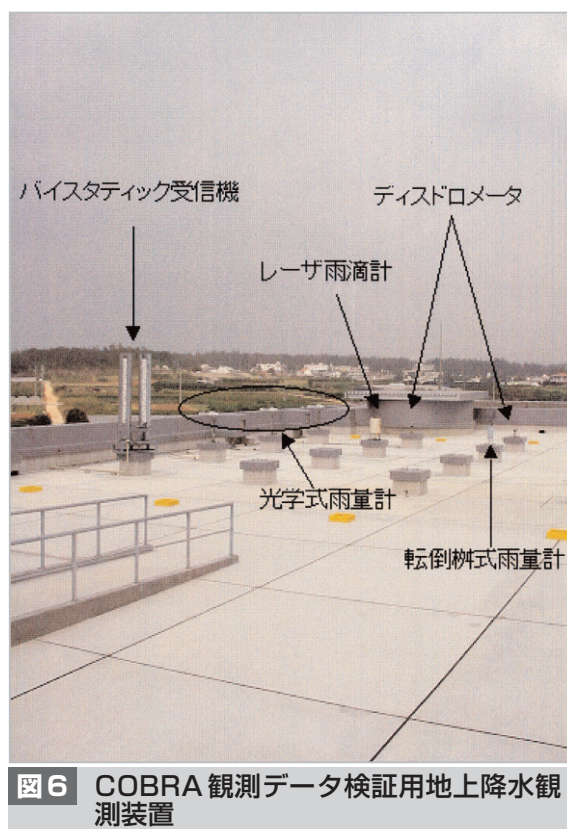


図6 COBRA 観測データ検証用地上降水観測装置

5 おわりに

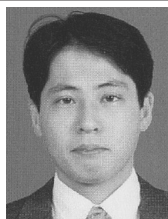
COBRAの主レーダ、バイスタティック受信機等は、既に各施設に設置が完了し、現在、主レーダの性能試験、バイスタティックレーダ・ネットワークの動作確認等、システム性能試験を実施しているところである。システム全体の性能確認後、実験観測を実施し、観測データの検証を行う予定である。

- 5 R. J. Doviak and D. S. Zrnic, "Doppler radar and weather observations", 2nd ed., Chaps. 6 and 8 Academic Press, 1993.
- 6 H. Kumagai, R. Meneghini, and T. Kozu, "Preliminary results from multiparameter airborne rain radar measurement in the Western Pacific", J. Appl. Meteorol., 1993, 431-440, Vol. 32.
- 7 T. A. Seliga and V. N. Bringi, "Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation", J. Appl. Meteorol., 1976, 69-76, Vol. 15.
- 8 M. Sachidananda and D. S. Zrnic, "Differential propagation phase shift and rainfall rate estimation", Radio Sci., 1986, 23-247, Vol. 21.
- 9 足立樹泰ほか, "亜熱帯環境計測ネットワーク・データシステムによる環境情報の発信", 平成13年電気学会 電気・情報・システム部門大会講演論文集, 2001, I-241-I-242.
- 10 T. Adachi, Y. Masuda, and Satoshi Fujii, "Development of a 400MHz-band Wind Profiler Radar in Okinawa", The third International Sympo. on Asian Monsoon System (ISAM3), 2001, 309-313.



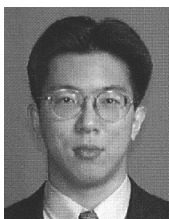
なかがわ かつひろ
中川勝広

電磁波計測部門亜熱帯環境計測グループ
研究員 博士(工学)
レーダ水文学



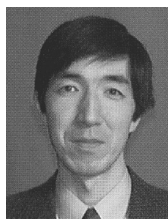
はなだ ひろし
花土 弘

電磁波計測部門降水レーダグループ主
任研究員
マイクロ波リモートセンシング



さとう しんすけ
佐藤晋介

電磁波計測部門降水レーダグループ主
任研究員 博士(理学)
レーダ気象学



いнокuchi しんいち
井口俊夫

電磁波計測部門降水レーダグループリ
ーダー Ph. D.
電磁波リモートセンシング