

## 4-2 EarthCARE衛星搭載CPR検証用地上設置W帯雲観測レーダーの開発

### 4-2 Development of the Ground-base W-band Cloud Profiling Radar for the Validation of EarthCARE/CPR

堀江宏昭 花土 弘 大野裕一 佐藤健治 川村誠治 高橋暢宏

Hiroaki HORIE, Hiroshi HANADO, Yuichi OHNO, Kenji SATO,

Seiji KAWAMURA, and Nobuhiro TAKAHASHI

NICTは地球温暖化予測モデルの最大の不確定要素である雲・エアロゾルの気候への影響を明らかにするため、日欧で協力して進められているEarthCARE衛星計画の搭載機器のひとつである雲観測レーダー(CPR)を、JAXAと協力して開発している。主な担当はEarthCARE/CPRの性能評価及び取得データから生成される雲水量などの物理量プロダクトの検証である。本稿では、EarthCARE/CPRのプロダクト検証に必要な地上設置雲観測レーダーの開発について、その概要を述べる。

The Cloud Profiling Radar (CPR) is one of key sensors on EarthCARE which is joint satellite mission between Europe and Japan, in order to measure three-dimensional distributions of aerosol and cloud and then to improve the understandings of Earth radiation budget. NICT has developed the CPR in cooperation with Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Major contribution of NICT are performance evaluation of EarthCARE/CPR and/or product evaluation of cloud physics quantities, for example liquid water content, from the obtained data. The development of the groundbased cloud profiling radar is needed to evaluate the product of EarthCARE/CPR, then the overview of the development is explained.

#### 1 まえがき

温暖化予測における最大の不確定要素は雲であり、気候モデルの改善には雲の鉛直分布、また雲とエアロゾル(大気微粒子)の相互作用の全球的な把握が必要とされていることから、雲・エアロゾルを観測するEarthCARE衛星ミッションが計画されている[1]。情報通信研究機構(NICT)は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と協力して、EarthCARE衛星搭載雲観測レーダー(CPR)を開発するほか、このEarthCARE/CPRの校正・検証のため、地上設置雲レーダーも開発している。

NICTは電波を用いた地球環境計測の研究を行っており、衛星搭載センサを含め次世代降雨レーダー/雲レーダーの研究・開発を行ってきた。X帯及びKa帯の雨域散乱計放射の開発[2]、Ku帯の航空機搭載降雨レーダーの開発[3]を実施するとともに、1997年打上げの熱帯降雨観測衛星(TRMM)[4]に搭載されたKu帯(14 GHz)降雨レーダー(PR; Precipitation Radar)の開発、また2014年打上げの全球降水観測衛星

GPM)[5]に搭載されたKu帯(14 GHz)及びKa帯(35 GHz)を用いた2周波降水レーダー(DPR)の開発を、JAXAと協力して実施した。これらの降雨レーダーの開発に並行して、雲観測レーダーの開発も着手した。雲粒は雨粒より粒径が小さく散乱断面積が小さいため、雲から反射した信号を受信するためには感度向上の必要がある。そこで、W帯(95 GHz)の周波数を用いることにし、航空機搭載雲観測レーダー(SPIDER: Super Polarimetric Ice-crystal Detection and Explication Radar)を開発した[6]。これらの成果がEarthCARE衛星搭載CPRの開発につながっている。

一方、衛星搭載センサの開発と同時に必要となるのが、衛星搭載センサが取得したデータを直接評価するための校正と、取得データから降雨量や雲水量といった物理量のプロダクトに変換するアルゴリズムの開発及び生成されたプロダクトの検証である。本稿では、この検証作業に必要な装置開発について記述する。衛星搭載降雨レーダーの検証に関しては、地上に張り巡らされた雨量計ネットワーク、各国が持っている降雨レーダー等、利用できる降水データが数多く存在し、

## 4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

これらのデータをどう利用するかが課題であった。しかしながら、雲に関しては静止気象衛星の雲画像等の情報は利用できるが、鉛直プロファイルを直接的に測定できる標準的な測器は無いことから、地上からの雲の鉛直プロファイル観測が必要になる。先にNICTが開発したSPIDERの観測性能は、EarthCARE/CPRの検証には不十分であることから、新たに検証用に地上設置雲レーダーを開発することになった。次章以降で検証に必要な機能・性能を定義し、開発した地上設置雲観測レーダーについて説明する。

## 2 EarthCARE/CPR の概要

EarthCARE 衛星搭載 CPR の観測概念図を図1に示す。EarthCARE/CPR は、SPIDER と同じく W 帯の周波数 94 GHz を使用する。観測範囲は地表から高度 20 km まで、高度分解能は 500 m (パルス幅 3.3 マイクロ秒) であるが、雲の高さをより詳しく調べるため 100 m オーバーサンプリングする。アンテナビームの瞬時地上投影径は 750 m であり、衛星の進行方向に 500 m (約 1/14 秒) 積分されるが、観測性能は 10 km 積分した値で評価される。EarthCARE/CPR の大気上端での感度は -35 dBZ\* であるが、2006 年打上げの国航空宇宙局 (NASA) の CloudSat 衛星搭載 CPR [7] の約 4 倍の観測感度であり、地球の放射収支に影響する氷雲の 98% のほか、層積雲 (水雲) の 50% を観測できるとされている [7]。また、雲の鉛直速度を観測するため、衛星搭載気象レーダーとしては世界初となるドップラ速度測定機能を有しており、-19 dBZ の雲における測定精度は 1 m/s となっている。この鉛直速度を用いた雲と弱い雨 (drizzle) の識別など雲水量算出アルゴリズムの改善が期待されている。衛星からのドップラ速度測定では、衛星進行方向の雲の水平不均一が測定誤差を生じさせることから [8]、雲の不均一の把握が必要とされている。また、パルス繰り返し周波数 (PRF) を高くすることで、測定精度を改善できることから、EarthCARE/CPR は観測位置の緯度により観測高度を 18 km または 16 km までに落とし、代わりに PRF を上げる運用が可能であり、緯度 60 度を境に変更する運用が計画されている。

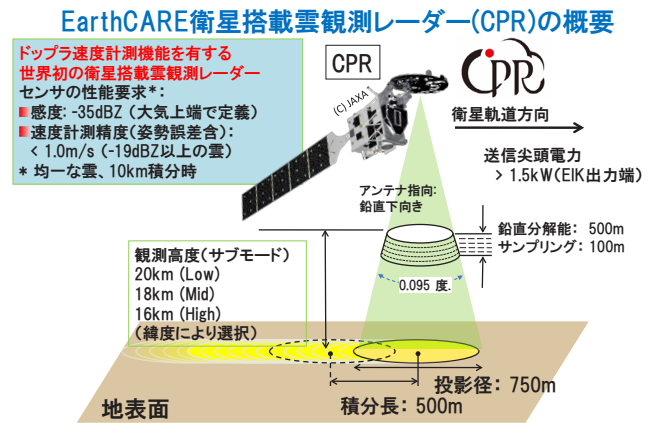


図1 Earth CARE/CPR の観測概念図と性能

## 3 検証用地上設置 W 帯雲観測レーダーの開発コンセプト

EarthCARE/CPR による観測性能のうち、他の装置が利用できない検証項目は大きく分けて2つある。1つ目の項目は、観測感度 -35 dBZ である。先に開発した SPIDER は航空機搭載型として開発されたため、アンテナ径が機体の大きさにより制限され、感度は -30 dBZ (パルス幅 1 us、1 秒積分時) 程度であり、EarthCARE/CPR の感度より劣る。そこで、EarthCARE/CPR よりも高感度の地上検証用 SPIDER を開発する。感度設定にあたり、日本付近で運用するため大気上端を 15 km と定義し、中緯度の大気減衰を 2 dB とし、測定マージン 3 dB を考慮した結果、1 秒積分時の要求感度を -40 dBZ とした。また、EarthCARE/CPR のサンプリング間隔は 100 m であるが、地上レーダーではより詳しく観測するため、パルス幅 3.3 マイクロ秒に合わせるのではなく、1 マイクロ秒で定義した。運用に当たっては、EarthCARE/CPR と比較することも想定しているが、衛星の観測幅 750 m、回帰日数 25 日であることから、直接比較する機会はあまり多くないと考えられる。また、アンテナビームのフットプリントも大きく異なるので、似たような対象の雲を測定し、統計的な比較をすることを考慮している。この目的に特化した検証用レーダーを、高感度雲観測レーダー (HG-SPIDER: High-sensitivity Ground-based SPIDER) と名付けて開発することとした。

2つ目の項目は、雲の鉛直速度の検証である。HG-SPIDER もドップラ速度を測定するが、前述のとおりアンテナビームフットプリント内の雲の水平不均一を把握するため、瞬時に水平面内を走査して観測できる必要がある。このため、HG-SPIDER とは別の検証用レーダーを開発することにし、走査に時間がかかる機

\*dBZ: Z 因子 (下記参照) の dB (デシベル) 表記

Z 因子: 気象レーダーは一般に雨や雲粒子の散乱断面積を測定するが、これを単位体積当たりの粒子の直径の 6 乗に比例する量に変換し、これを Z 因子と呼ぶ。Z = Σ D<sup>6</sup> (単位: mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>)

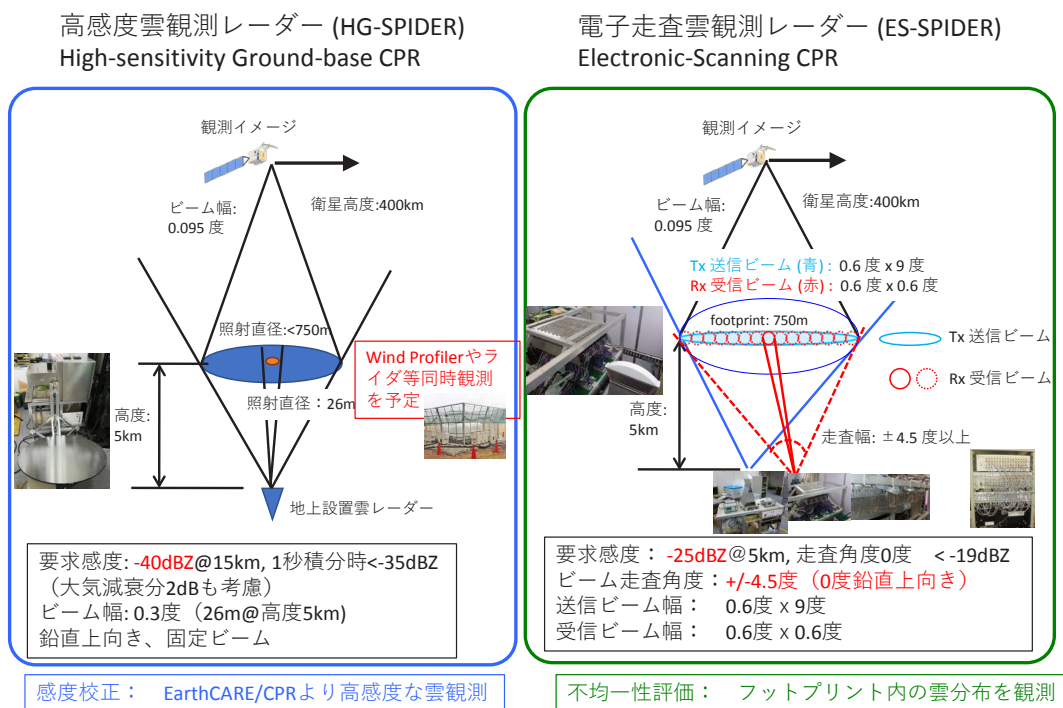


図2 検証用地上設置 W 帯雲観測レーダーの開発コンセプト  
左: 高感度雲観測レーダー、右: 電子走査雲観測レーダー

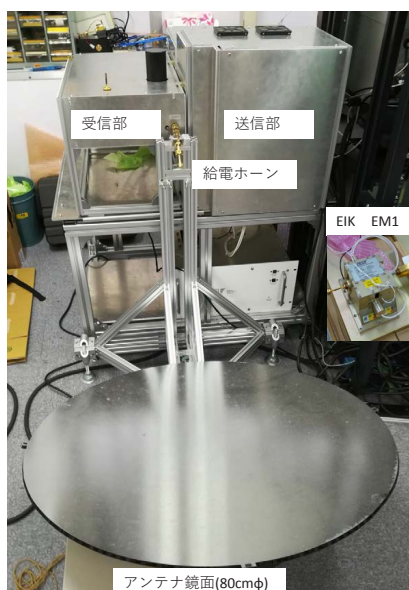


図3 高感度雲観測レーダー (HG-SPIDER)  
送信管 (EIK) とアンテナ鏡面は、衛星搭載センサ開発時の試作品を流用

表1 高感度雲観測レーダー (HG-SPIDER) の主要諸元

項目	性能
周波数(Frequency)	94.090GHz
送信出力(Tx Power)	EIK (peak電力1500W)
アンテナ利得 (Antenna Gain)	56.00dBi
ビーム幅(Beam Width)	0.293 度(0.266x0.322)
偏波(Polarization)	直線偏波(Linear Pol. )
パルス幅(Pulse Width)	0.5/1.0/2.0μs
繰返周期(PRF)	3,000 - 10,000 Hz
受信感度(Sensitivity)	-40dBZ@15km (1秒積分時, Integration 1sec.)
アンテナ走査 (Antenna Scanning)	無 (鉛直上向き) N/A (Nadir Pointing)
観測レンジ(Range)	150m(500m) - 20km
ドップラ速度計測 (Doppler Function)	パルスペア処理 (Pulse-Pair Processing)

械走査方式ではなく、瞬時に走査できる電子走査方式を採用することとした。要求仕様設定にあたり、EarthCARE/CPR のフットプリント 750 m を高度 5 km にて観測できるように走査角度を ± 4.5 度以上とした。また、電子走査方式ではアンテナが固定のため、送信／受信のそれぞれのアンテナ端で利得が 3 dB 落ちることから、アンテナ端で鉛直速度測定対象の -19 dBZ の雲が観測できるようにビーム中心における観測感度を -25 dBZ (1 秒積分時) とした。パル

ス幅は HG-SPIDER と同じく 1 マイクロ秒で定義した。この目的に特化した検証用レーダーを電子走査雲観測レーダー (ES-SPIDER: Electronic Scanning SPIDER) と名付けて開発することとした。

これら 2 式の地上検証用レーダーの開発コンセプト及び要求性能を図 2 に示す。



## 4 高感度雲観測レーダー (HG-SPIDER) の開発

HG-SPIDER は、SPIDER と比べて 10 倍感度を向上させるため、アンテナ径を大きくすることと、伝送路を極力短くして損失を抑えることとした。開発費用が限られることから、アンテナ鏡面や高価な大電力送信管 (EIK) は衛星開発時の試作品を流用して製作した。開発したハードウェアの外観を図 3 に示す。データ処理部は、ウィンドプロファイラーやその他のレーダーに使用しているソフトウェア無線機 (USRP) を利用して内作した。レーダーとして安定動作をさせるため SPIDER には無かった送信電力のモニタ機能やノイズダイオードを用いた受信器の校正機能を有している。表 1 に HG-SPIDER の主要諸元を記す。

図 4 は SPIDER と HG-SPIDER の同期観測時の比較である。横軸は時刻、縦軸は高度を示しており、時間 - 高度プロファイルを示している。SPIDER は高度 12 km までしか計測していない。赤丸で囲った箇所は感度の差が顕著に表れており、SPIDER では観測できなかった雲が、HG-SPIDER では観測できていることがわかる。なお、EIK は寿命品であり、試作品を流用した関係から、残された運用可能時間が余り多くない。残時間を考慮した EarthCARE 衛星の打上げまでの運用を計画している。

## 5 電子走査雲観測レーダー (ES-SPIDER) の開発

TRMM/PR や GPM/DPR は衛星搭載の電子走査レーダーであり、128 素子の導波管スロットアレイアンテナである。電子走査雲観測レーダー (ES-SPIDER)

の開発にあたり、同じ方式の導入を検討したが、電波の波長約 3 mm のスロットアンテナは容易に製造できないことがわかり断念し、2次元に小アンテナを配置する方法とした。また、送受兼用のアンテナ素子の作成は費用がかかることから、送信は広く電波を照射するファンビームとし、受信のみを狭いビームのフェーズドアレイアンテナで1次元に走査する方式を採用することにした。図 5 (左図) に全体の筐体と送受信アンテナを示す。送信は大電力送信管 (EIK) を用いるが、受信は各アンテナ直下に LNA とダウンコンバータで構成された受信モジュールを取り付け、中間周波数帯で信号を合成する方式とした。通常フェーズドアレイアンテナは、アンテナ素子間を波長より短くして、複数の等位相面すなわち意図しない方向のビーム (これをグレーティングローブと呼ぶ) の発生を避ける必要がある。しかしながら、開発費用の問題から素子数をできるだけ抑えることになり、走査範囲 ± 4.5 度の範囲外ではグレーティングローブを許容することで、波長の数倍の 20 mm 間隔で素子を配置する設計とした。送信のアンテナパターンと受信のアンテナパターンの合成になるので、グレーティングローブの寄与は相対的に小さくなる。また、走査方向のグレーティングローブを軽減するために、図 5 (中上図) の示すとおり、素子をずらして等価的に 10 mm 間隔とみなせる配置にしてある。形式としてはホーンアンテナアレイである。



図 5 電子走査雲観測レーダー (ES-SPIDER)  
左：送受信システム、中上：ホーンアンテナアレイ、  
中下：旧受信器、右：新受信器

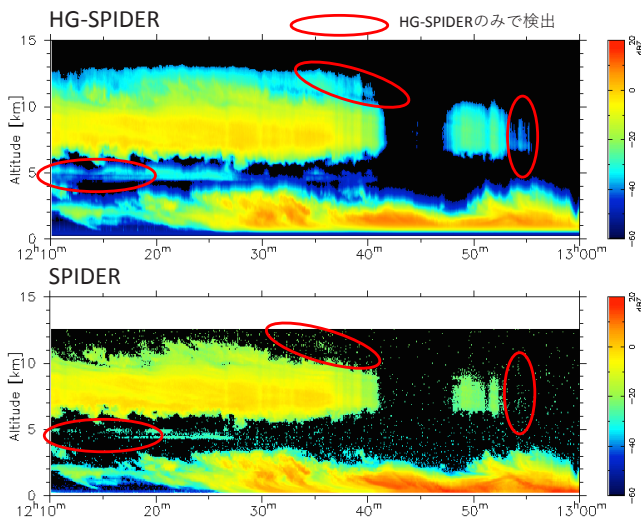
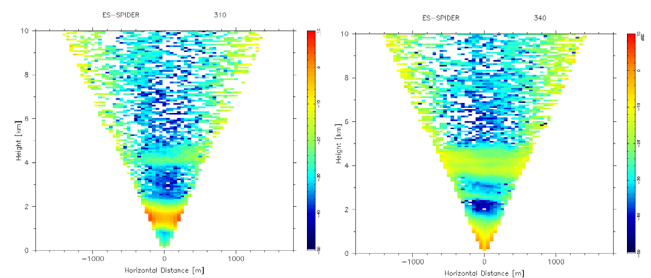


図 4 SPIDER と HG-SPIDER の感度比較  
上：HG-SPIDER による観測、下：SPIDER による観測



取得時間：7秒 (積分約0.1秒 x 63走査角度)

図 6 ES-SPIDER による観測例 (旧受信器 - 逐次走査)  
取得時間：約 7 秒 (積分時間 0.1 秒 x 63 走査角度)  
横軸：± 1800 m、縦軸：0 から 10 km  
左図と右図の時間間隔：210 秒

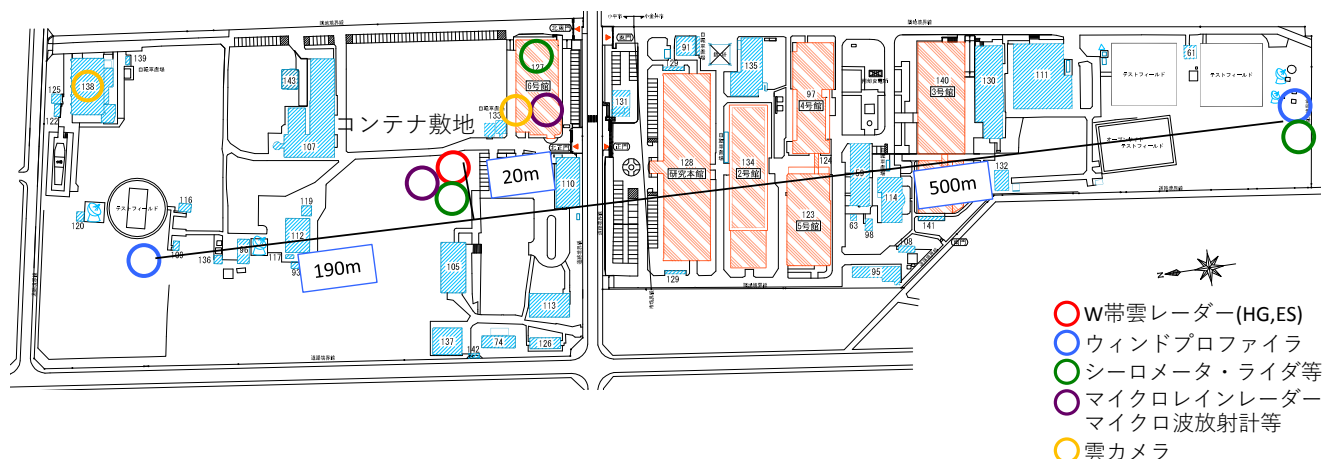


図7 NICT 雲観測サイト

表2 電子走査雲観測レーダー (ES-SPIDER) の主要諸元

項目	性能
周波数(Frequency)	94.02 GHz
送信出力(Tx Power)	EIK (peak電力1500W)
アンテナ利得 (Antenna Gain)	送信(Tx): 37.3 dBi * 受信(Rx): 48.4 dBi *
ビーム幅(度) (Beam Width: degrees)	送信(Tx): 0.63x8.84 度(deg.) 受信(Rx): 0.52x0.53 度(deg.)
アンテナ口径 (個数)	20x20mm, 8個x32列
パルス幅(Pulse Width)	0.5/1.0/2.0μs
繰返周期(PRF)	4,000 - 10,000 Hz
受信感度(Sensitivity)	-27.57 dBZ@5km **
アンテナ走査 (Antenna Scanning)	+/-4.5度 (1次元) +/-4.5deg.(1-Dimension.)
観測レンジ(Range)	150m(500m) - 20km
ドップラ速度計測 (Doppler Function)	パルスペア処理を想定 (Pulse-Pair Processing)

\* 走査角度0度方向(Boresight Direction)

\*\*1秒積分時(Integration 1 second)

り、ホーンアンテナ8個を合成してアンテナ1素子に、全体では32素子のフェーズドアレイアンテナである。現在は図5中下に示す32ch合成器とその前段にある位相器により走査方向を制御する逐次走査方式の電子走査レーダーであるが、W帯の周波数では世界初の電子走査雲レーダーとなる。観測例を図6に示す。横軸が水平方向の距離、縦軸は鉛直方向の距離であるが、横に拡大されている。各視線方向のデータ取得は約0.1秒であり、63走査角度で観測しているため、一枚の画像を作成するのに約7秒を必要とする。今後、図5右に示す32chデジタル受信器に移行する予定である。32chデジタル受信器を用いれば、計算処理により信号を合成するデジタルビームフォーミング(DBF)により同時に各走査方向からの信号を取得す

ることができる。図6に示したデータの取得は0.1秒で行えることになり、表2に示した観測感度は装置のDBF化を前提にしている。

この取得データを用いて、EarthCARE/CPRで取得するドップラ速度観測の誤差評価、積分処理アルゴリズム改善[9]につなげていく計画である。

## 6 今後の展望

今回開発した検証用レーダーは、衛星打上げ後の検証だけでなく、衛星打上げ前から処理アルゴリズム開発等にも有用なデータ取得を実施する計画である。NICT本部(東京都小金井市)を国内のEarthCAREの検証サイトと位置づけ、必要な機器を集める計画になっている。図7にNICT雲観測サイトを示す。雲レーダー以外の機器はNICTのほかの研究者が運用する機器であり、ライダの一部はEarthCAREの検証のため国立環境研究所がNICTで運用する観測機器である。今後、これらの機器を有効に活用して、衛星データ処理アルゴリズム開発に役立て、衛星打上げ後は衛星プロダクトの検証として有効に活用したい。また、ここで得られた知見から、次世代雲観測レーダーの開発につなげたい。

### 【参考文献】

- 1 A. J. Illingworth, H.W. Barker, A. Beljaars, M. Ceccaldi, H. Chepfer, N. Clerbaux, J. Cole, J. Delanoë, C. Domenech, D.P. Donovan, S. Fukuda, M. Hirakata, R.J. Hogan, A. Huenerbein, P. Kollias, T. Kubota, T. Nakajima, T.Y. Nakajima, T. Nishizawa, Y. Ohno, H. Okamoto, R. Oki, K. Sato, M. Satoh, M.W. Shephard, A. Velázquez-Blázquez, U. Wandinger, T. Wehr, and G. van Zadelhoff, "The EarthCARE Satellite: The Next Step Forward in Global Measurements of Clouds, Aerosols, Precipitation, and Radiation," Bull. Amer. Meteor. Soc., vol.96, pp.1311-1332, 2015.
- 2 岡本謙一, 尾嶋武之, 増子治信, 吉門信, 猪股英行, 畚野信義 "航空機搭載用マイクロ波雨域散乱計 / 放射計システムによる降雨のリモートセンシ

- ング.” 日本リモートセンシング学会誌, vol.2, no.3, pp.31-41. 1982.
- 3 Kumagai,H., K.Nakamura, H.Hanado, K.Okamoto, N.Hosaka, N.Miyano, T.Kozu, N.Takahashi, T.Iguchi, and H.Miyauchi, “CRL Airborne Multiparameter Precipitation Radar (CAMPR): System Description and Preliminary Results,” IEICE Trans. Commun., E79-B, no.6, pp.770-778. 1996.
  - 4 Kozu,T., T.Kawanishi, H.Kuroiwa, M.Kojima, K.Oikawa, H.Kumagai, K.Okamoto, M.Okumura, H.Nakatsuka, and K.Nishikawa, “Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite,” IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol.37, pp.102-116, 2001.
  - 5 M. Kojima et al., “Dual-frequency precipitation radar (DPR) development on the global precipitation measurement (GPM) core observatory,” Proc. SPIE Earth Observ. Missions Sens. Dev. Implement. Charact. II, vol.8528, p.85281A, 2012.
  - 6 Horie,H., T.Iguchi, H.Hanado, H.Kuroiwa, H.Okamoto, and H.Kumagai, “Development of a 95-GHz Airborne Cloud Profiling Radar (SPIDER) - Technical Aspects-,” IEICE Trans. Commun., E83-B, no.9, pp.2010-2020, 2000.
  - 7 Stephens G., D.Vane, R.Boain, G.Mace, K.Sasen, Z.Wang, A.Illingworth, E.O’Connor, W.Rossow, S.Durden, S.Miler, R.Austin, A.Benedeti, C.Mitrescu, and the CloudSat ScienceTeam, “The CloudSat Mission and the A-train,” Bull. Amer. Meter. Soc., vol.104, pp.171-1790, 2002.
  - 8 Schutgens N., “Simulated Doppler Radar Observations of Inhomogeneous Clouds: Application to the EarthCARE Space Mission,” J. Atmos. Oceanic Technol., vol.25, pp.26-42, 2008.
  - 9 O. Sy, S. Tanelli, N. Takahashi, Y. Ohno, H. Horie, “Simulation of Earth-CARE Spaceborne Doppler radar products using ground based and airborne data: Effect of aliasing and nonuniform beam-filling,” IEEE trans. Geosci. Remote Sens., vol.52, no.2, pp.1463-1479, Feb. 2014.

**佐藤健治** (さとう けんじ)

電磁波研究所  
企画室  
研究マネージャー  
レーダーリモートセンシング



**川村誠治** (かわむら せいじ)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員  
博士(情報学)  
レーダーリモートセンシング



**高橋暢宏** (たかはし のぶひろ)

名古屋大学  
宇宙地球環境研究所  
飛翔体観測推進センター  
教授  
博士(理学)  
レーダー気象学

**堀江宏昭** (ほりえ ひろあき)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員  
レーダーリモートセンシング



**花土 弘** (はなど ひろし)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
研究マネージャー  
理学修士  
マイクロ波リモートセンシング



**大野裕一** (おおの ゆういち)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員  
レーダー気象