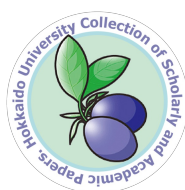




Title	SPIDER以降の雲レーダ開発戦略
Author(s)	堀江, 宏昭; 花土, 弘; 佐藤, 健治 他
Description	IV. リモートセンシングで観るエアロゾル・雲相互作用
Citation	低温科学, 72, 207-217
Issue Date	2014-03-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/55057
Type	departmental bulletin paper
File Information	LTS72_023.pdf



SPIDER 以降の雲レーダ開発戦略

堀江 宏昭, 花土 弘, 佐藤 健治, 大野 裕一, 川村 誠治, 高橋 暢宏

情報通信研究機構 (NICT) は, 航空機搭載あるいは衛星搭載の降雨レーダ開発の経験を生かして, 日本初の雲レーダ (SPIDER) を開発した. その後, 衛星搭載雲レーダ (EarthCARE/CPR) の開発につなげている. また, 衛星搭載レーダの開発と同時に, その性能を検証するための検証用レーダも開発してきた. これまで検証用レーダとして航空機搭載型のレーダを開発してきたが, 開発戦略は地上設置型の検証レーダに移行してきている. EarthCARE/CPR の検証用レーダの開発戦略, 及び次世代の雲レーダ開発について紹介する.

Development Strategy of NICT's Cloud Profiling Radar after SPIDER

Hiroaki Horie, Hiroshi Hanado, Kenji Sato, Yuichi Ohno, Seiji Kawamura, Nobuhiro Takahashi

National Institute of Information and Communications Technology (NICT) developed the first cloud profiling radar (SPIDER) in Japan taking advantage of experience of various airborne and spaceborne precipitation radar developments. Then NICT is developing the Cloud Profiling Radar on the EarthCARE satellite (EarthCARE/CPR).

Moreover, simultaneously with development of a spaceborne radar, the calibration and evaluation radar for verifying the performance has been also developed. Although, the airborne radar has been developed for the verification, a development strategy is shifting to a ground-based calibration/validation radar. The development strategy of the calibration/evaluation radar for EarthCARE/CPR and next generation cloud profiling radar development concept are introduced.

1. SPIDER 開発の背景

情報通信研究機構 (NICT^{*1}) は前身の電波研究所 (RRL^{*2}), 通信総合研究所 (CRL^{*3}) の時代から, 電波を用いた地球環境計測の研究を行っており, 衛星搭載用を含む次世代降雨レーダ/雲レーダや次世代ウィンドプロファイラーなどの研究・開発を行ってきた.

RRL の時代には X-band (10 GHz) 及び Ka-band (35 GHz) の 2 周波を用いた航空機搭載用マイクロ波雨域散乱計/放射計システムを開発した (岡本ほか (1982)). 搭載した航空機, 搭載状態を図 1 に示す. このシステムは 3 次元的に降雨を観測するために機械的なアンテナ走査機能を有していた. この開発は将来の衛星搭載降雨観測用能動型マイクロ波リモートセンサ開発の

第一歩と位置づけており, その後米国航空宇宙局 (NASA) ゴダード宇宙センター (GSFC) との共同研究を経て, 熱帯降雨観測衛星搭載降雨レーダ (TRMM/PR^{*4}) の開発 (Kozu et al. 2001) により実現した. TRMM 衛星のイメージと TRMM/PR の外観を図 2 に示す. TRMM/PR は, Ku 帯 (14 GHz) の電波を使用し, 128 素子の導波管スロットアレイアンテナを採用した電子走査型レーダである. 電子走査により約 200 km の観測幅を持ち, 検出感度は降雨強度 0.7 mm/h である. TRMM/PR は 1997 年 11 月に日本の H-II 型ロケットにより打ち上げられたが, 15 年以上経過した現時点でも運用を続けている. この TRMM/PR の機器校正や, 受信電力から降雨量に変換するアルゴリズムを検証するために, 同じく Ku 帯の電波を使用した航空機搭載降雨レーダ (CAMPR^{*5}) を新たに開発した

連絡先

堀江 宏昭

(独) 情報通信研究機構

電磁波計測研究所 センシングシステム研究室

National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan

e-mail: horie@nict.go.jp

^{*1} NICT: National Institute of Information and Communications Technology

^{*2} RRL: Radio Research Laboratory

^{*3} CRL: Communications Research Laboratory

^{*4} TRMM: Tropical Rainfall Measuring Mission,

PR: Precipitation Radar

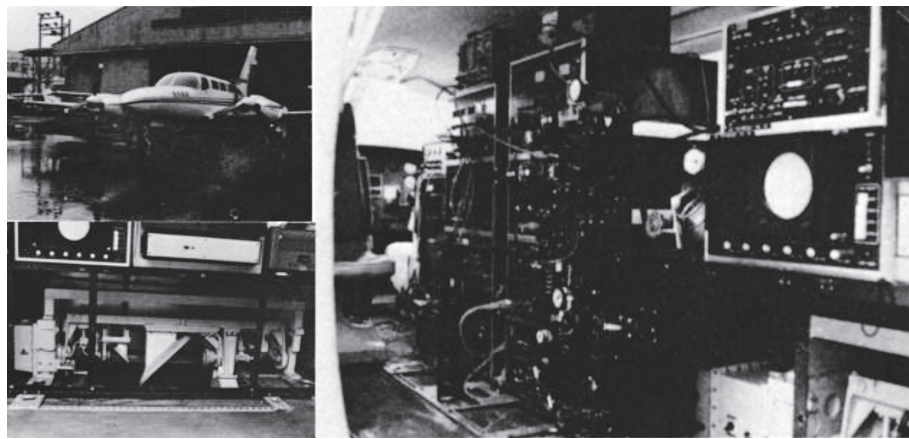


図1：雨域散乱計／放射計システム。左上：システムを搭載した航空機セスナ 404，左下：航空機の胴体にとりつけられた機械的走査が可能なアンテナ，右：航空機に搭載された雨域散乱計／放射計システム。

Figure 1: Airborne microwave rain-scatterometer/radiometer system. Top left: Cessna 404 airplane carrying the radar system, Bottom left: Mechanical scanning antenna system installed to the bottom of fuselage, Right: Airborne microwave rain-scatterometer/radiometer system installed in the airplane.

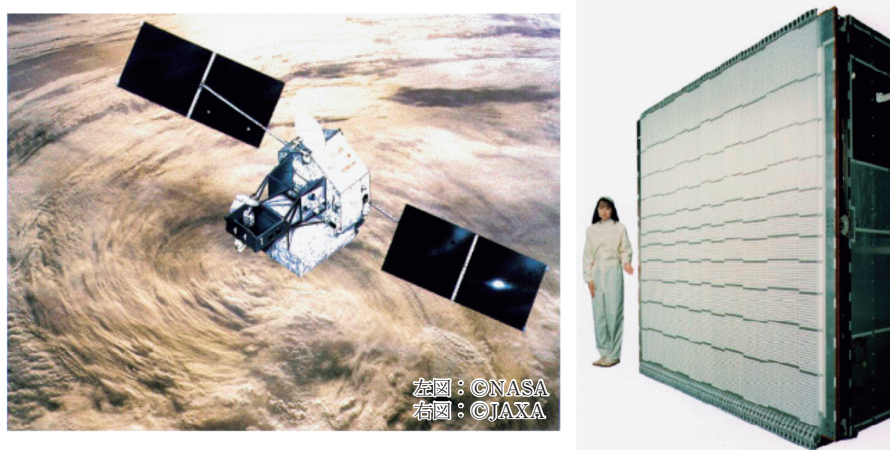


図2：TRMM 衛星のイメージと降雨レーダ（PR）。左：TRMM 衛星の観測イメージ，右：降雨レーダ（PR）の外観，PR は $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の開口を持ち 128 本の導波管スロットアンテナで構成されている。

Figure 2: Image of TRMM satellite and Precipitation Radar (PR). Left: Observation image of TRMM satellite, Right: Precipitation Radar with $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ antenna aperture composed of 128 of waveguide slotted antennas.

(Kumagai et al. 1996). CAMPR を搭載した航空機とアンテナの外観を図3に示す。このレーダは、前方ビーム／鉛直ビームの2つのビーム機能を持ち、さらに雨域散乱計／放射計システムと同様に機械的なアンテナ走査機能も有しており、降雨の3次元的な観測が可能である。

CAMPR による降雨観測と同時期に、今まで感度が足りずに観測対象外であった雲観測について、波長の短いW帯のミリ波（94-95 GHz）という新たな周波数の利用を開拓することにより、新たな雲観測レーダ開発に着手した。ミリ波の特徴として大気減衰・降雨減衰の影響が大きい、上空から観測すれば減衰の影響を軽減できるので、これまで大きかった装置を小型化して航空機搭載雲レーダ（SPIDER^{*6}）を開発した（Horie et al.

2000）。航空機搭載と名前が付いているが、地上設置型レーダとしても観測が可能であるため、SPIDER は搭載状態を問わず雲レーダとして認知されている。SPIDER の主要諸元を表1に、SPIDER を搭載した航空機と、アンテナを横向きにした状態のレーダポッドを図4に示す。ミリ波では減衰の影響が大きいためアンテナレドームを採用せず、アンテナは外部に露出している。SPIDER も機械的なアンテナ走査機能を有しているが、離着陸時のアンテナ保護のために格納することも機械走査の目的の一つである。アンテナの照射面積（フットプリント）が航空機の数に比べて小さいので、最早3次元的な雲観測とは言い難い。また、アンテナ走査は、有効な積分数が少なくなり、感度が低下する欠点がある。

SPIDER 開発当時は既に TRMM/PR という衛星搭

^{*5}CAMPR: CRL Airborne Multiparameter Precipitation Radar

^{*6}SPIDER: Super Polarimetric Ice-crystal Detection and Explication Radar



図 3：航空機搭載降雨レーダ (CAMPR)。上：航空機ビーチクラフト 200 に搭載された CAMPR，下：アンテナシステム（前方ビームと直下ビームがあり，機械的走査も可能）。

Figure 3: Airborne Multiparameter Precipitation Radar (CAMPR). Top: Beachcraft 200 airplane carrying the CAMPR, Bottom: Mechanical scanning antenna system (forward beam and nadir beam).



図 4：航空機搭載雲レーダ (SPIDER)。左：航空機 Gulfstream II に搭載された SPIDER，右：アンテナを横向きにしたレーダポッド，離着陸時にはアンテナを収納する。レーダポッド内に送受信部が収容されている。

Figure 4: Airborne Cloud Profiling Radar. Left: Gulfstream II airplane carrying the SPIDER, Right: Radar pod with antenna pointed horizontally. Antenna is covered by rotating backside during take-off and landing of the airplane. The transmitting and receiving unit is installed inside the radar pod.

表 1：SPIDER の主要諸元

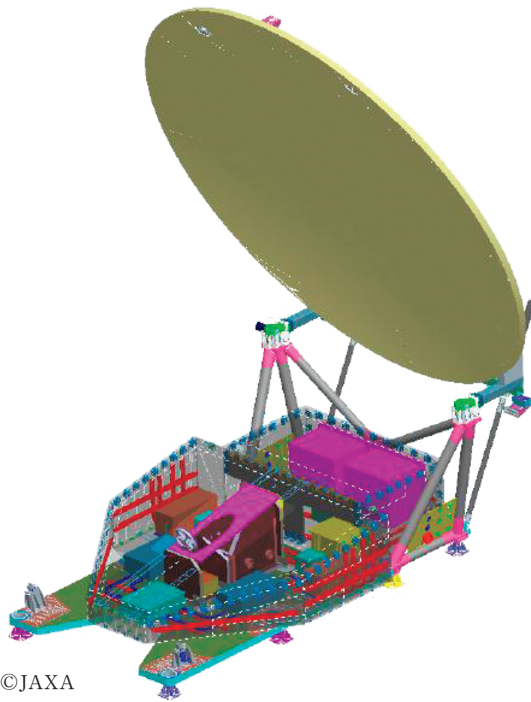
Table 1: Major Specification of SPIDER

項 目	仕 様 値
周波数	95.04 GHz
アンテナ利得	49.4 dBi
ビーム幅(アンテナ開口)	0.6 度 (40 cm ϕ)
送信尖頭電力	1500 W
パルス幅	0.5/1.0/2.0 μ s
パルス繰り返し周期	最大 Duty 比以下で任意
送信偏波	直線偏波(水平または垂直)
受信偏波	直線偏波(水平および垂直)
ドップラ速度計測	パルスペアまたは FFT
感度	-30 dBZ@大気上端, 1 秒積分
アンテナ走査	機械走査(-40 度から+90 度)

載降雨レーダが具体化しており，SPIDER も将来の衛星搭載雲観測レーダ開発につなげたいと考えていた．日本のミッション実証衛星 3 号機に応募し，最終 3 候補に採択されたが，計画自体が途中で中止になったため，米国航空宇宙局ジェット推進研究所 (NASA/JPL) が衛星搭載雲観測レーダ (CloudSat/CPR) を先に開発した．CloudSat は 2006 年に打ち上げられ，現在も運用されている．そして，欧州宇宙機関 (ESA) の Earth Explore ミッションの一つであるアースケア計画に日欧の科学者が参加する機会があり，宇宙航空研究開発機構 (JAXA^{*7}) と共同でアースケア衛星搭載雲観測レーダ

^{*7}JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency

^{*8}EarthCARE: Earth, Clouds, Aerosols and Radiation Explorer,
CPR: Cloud Profiling Radar



©JAXA

図5：EarthCARE/CPRの外観図（アンテナ展開時）。トップカバーを外した状態。

Figure 5: Outline of EarthCARE/CPR (antenna is opened). Top cover is removed to make it easier to look inside.

表2：EarthCARE/CPRの主要諸元

Table 2: Major specification of EarthCARE/CPR

項 目	仕 様 値
周波数	94.05 GHz
アンテナ利得(アンテナ開口)	65.5 dBi (2.5 m ϕ)
ビーム幅(フットプリント)	0.095 度 (750 m)
送信尖頭電力	1500 W @ EIK, EOL
パルス幅(距離分解能)	3.3 μ s (500 m)
パルス繰り返し周期	6100 Hz から 7500 Hz (衛星高度により可変)
送信偏波	円偏波(左旋)
受信偏波	円偏波(右旋)
ドップラ速度計測	パルスペア処理
感度	-35 dBZ @ 大気上端, 10 km 積分
アンテナ走査	無し(直下観測)
積分長	500 m
衛星高度	約 400 km (太陽同期)

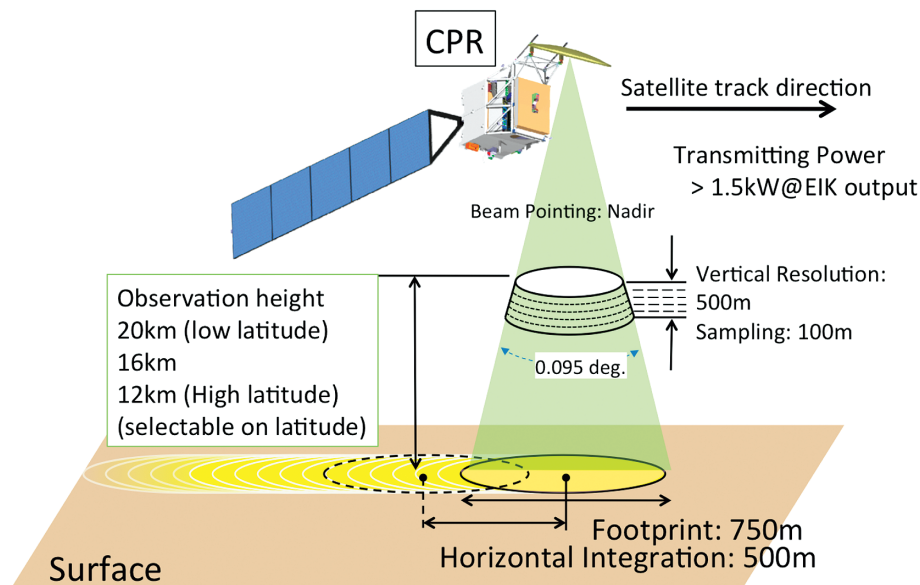


図6：EarthCARE/CPRの観測概念図。緯度により観測高度を切り替えることができる。

Figure 6: Observation concept of EarthCARE/CPR. Observation height is switchable according to latitude of the satellite.

(EarthCARE/CPR^{*})の開発を開始した。この雲観測レーダは世界で初めてドップラ速度観測機能を有する衛星搭載気象レーダである。CPRの外観を図5に、表2に主要諸元を示す。図6はCPRによる観測イメージであり、鉛直方向のみ観測する。同じ雨や雲を観測する衛星搭載レーダであるが、TRMM/PRは約200 kmの範囲を走査できるのに対し、CloudSatやEarthCAREに搭載されるCPRは、目的とする感度を達成するためにアンテナ走査機能を有しない大口径アンテナが必須であ

り、固定ビーム型のレーダとなる。EarthCARE衛星は2016年にESAが打ち上げる予定である。

蛇足ながら、衛星搭載降雨レーダの成功により、TRMM/PRと同じ枠組みによる全球降水観測(GPM)主衛星搭載2周波降水レーダ(GPM/DPR^{*9})の開発に引き継がれている。CPM主衛星のイメージを

^{*9}GPM: Global Precipitation Measurement (Mission)
DPR: Dual-frequency Precipitation Radar

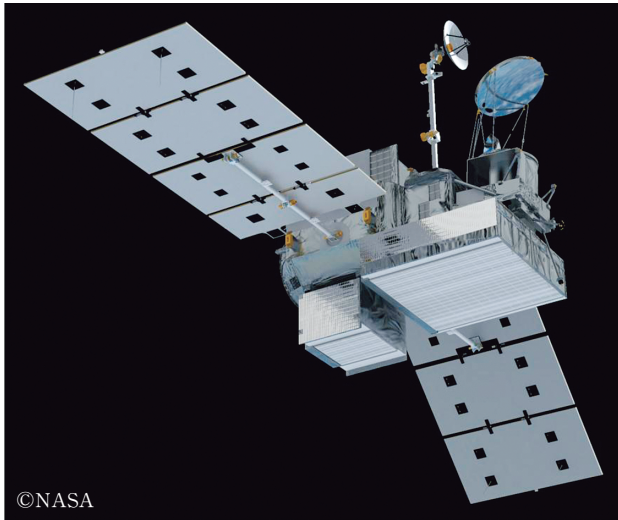


図 7：GPM 主衛星のイメージ図。

Figure 7：Observation image of GPM core satellite.

図 7 に、観測概念図を図 8 に示す。表 3 に主要諸元を示すが、高感度化のため Ka 帯のレーダが追加されており、TRMM/PR より弱い降雨強度 (0.2 mm/h) まで観測することができる。GPM 主衛星は 2014 年 2 月 28 日に打ち上げられた。

2. SPIDER の運用による検証手法の検討

SPIDER の開発当初は不具合が多発し関係者に迷惑をかけたが、保守・運用のノウハウを蓄積し、NICT 自ら修理・メンテナンスを実施した結果、安定した運用が可能となった。これまで実施した主な航空機観測は、梅雨期の九州・東シナ海観測 (X-BAIU)、冬季日本海観測 (WMO)、奄美大島付近の APEX-E3 実験、パラオ周辺海域の西部熱帯太平洋域観測、東シナ海観測、CloudSat 衛星同期観測、ドップラーライダー同時観測

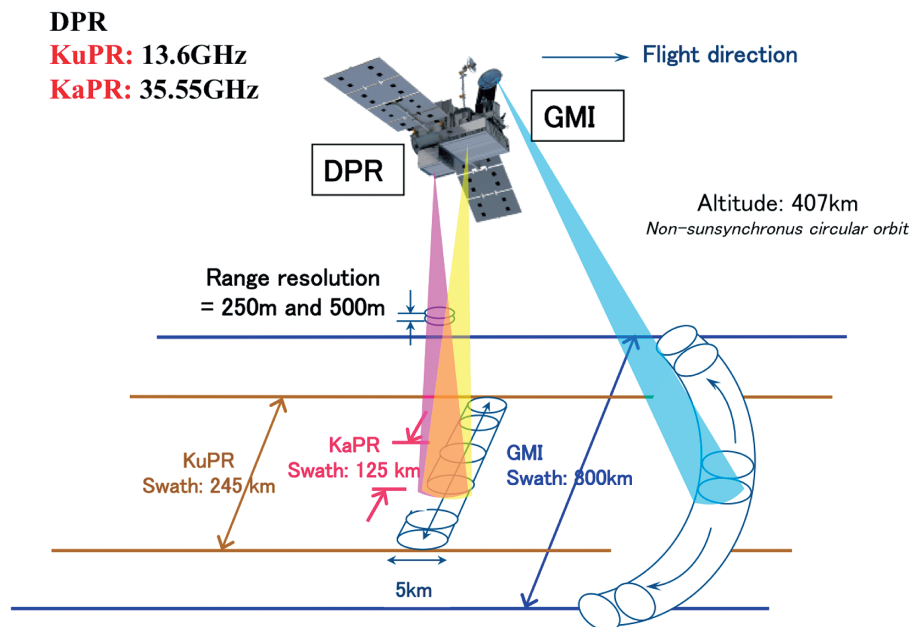


図 8：GPM 主衛星の観測概念図。

Figure 8：Observation concept of GPM core satellite.

表 3：GPM/DPR の主要諸元

Table 3：Major specification of GPM/DPR

項 目	Ku-PR	Ka-PR
周波数	13.6 GHz	35.55 GHz
アンテナフットプリント	5.2 km@nadir	5.2 km@nadir
送信尖頭電力@出力ポート	>1012 W	>146.5 W
距離分解能	500 m	500 m/250 m
パルス繰り返し周期	衛星高度・走査角度により可変	衛星高度・走査角度により可変
送受信偏波	直線	直線
ドップラ速度計測	無し	無し
感度(降雨量)	0.5 mm/h	0.2 mm/h (500 m), 0.5 mm/h (250 m)
アンテナ走査	245 km (+/-17 度)	125 km (+/-8.5 度)
衛星高度	407 km (太陽非同期, 軌道傾斜角 65 度)	

表 4：航空機観測実験リスト

Table 4：SPIDER airborne experiments summary

No	名 称	実施年月	フライト数*	備 考
1	梅雨期の九州・東シナ海観測 (X-BAIU)	1999/06	1	CREST** による「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明 (研究代表者 気象研究所 吉崎)」, X-BAIU 1999, WMO2000 は故障につき中止
2		2002/06	7	
3	冬季日本海観測 (WMO)	2000/02	1	
4		2001/01	6	
5		2002/02	8	
6		2003/01	5	
7	APEX-E3 実験 (奄美大島付近)	2003/03-04	14	CREST** による「アジア域の広域大気汚染による大気粒子環境の変調 (研究代表者 東京大学 中島映)」, 検査フライトを含む
8	西部熱帯太平洋域観測 (パラオ周辺海域)	2002/12	7	海洋研究開発機構 (JAMSTEC) 予算
9		2004/03	8	
10	東シナ海観測	2004/06	4	名古屋大学予算
11	ドップラーライダー同時観測	2001/02	2	NICT 予算
12		2004/06	2	NICT 予算
13	海面観測	2002/12	2	NICT 予算
14	CloudSat 衛星同期観測	2006/02	3	NICT 予算
15		2007/04	3	NICT 予算

*フライト数にはフェリーフライトを含む

**CREST：科学技術振興機構・戦略的想像研究推進事業



図 9：SPIDER による地上観測。左：レーダポッドの台車を使用した観測，右：送受信部とアンテナを取り出し，専用の台を使った観測。

Figure 9：Ground observation configuration of SPIDER. Left: Radar pod is mounted on the rotatable dolly. Right: Transmitting and receiving unit and antenna are removed from the radar pod and are installed on the pedestal.

などがある。表 4 にこれまで行った航空機観測実験リストを示す。航空機観測の中で NICT の予算による航空機観測頻度はあまり高くなく，外部資金が多い。一つの理由は航空機観測に多額の運航経費が必要なためである。

一方で雨域散乱計／放射計システムや CAMPR の開発当時から，航空機に搭載しない場合には地上観測が可能な装置構成としてきた。SPIDER も航空機から取り外した際に地上観測用として使用できる示す台車を用意した。その後，長期間の地上観測を安定して実施するために，航空機搭載用レーダポッドを分解して圧力容器内部の送受信部を取り外せるようにした。SPIDER の台車と地上設置の様子を図 9 に示す。送受信部とアンテナをレーダポッドから取り出したことにより，地球観測船「みらい」等での観測も可能となった。これまで実施し

た主な地上観測・船上観測実験リストを表 5 に示す。SPIDER の常置場所である NICT 小金井での観測は省略している。当然ながら航空機観測に比べると地上観測の頻度は高い。

衛星搭載レーダの検証を考えると，航空機観測による衛星との同期観測や別の航空機との同期観測が必要であり，数は少ないが実験を実施している。衛星と同期させた航空機観測のメリットは，同じ観測対象を同時に同じ向きに観測できることである。観測例を図 10 に示す (Ohno et al. 2012)。2007 年 4 月 26 日に実施した実験で，左図は衛星の軌道と航空機の航跡図を重ねたものである。右図は CloudSat 及び SPIDER により観測されたレーダ反射因子である。分解能の違いはあるが，ほぼ同じ値になっている。また，CloudSat の雲エコーの高度 9 km 付近にあるエコーは，通過時刻と位置から SPI-

表 5：地上観測（船上を含む）実験リスト

Table 5：Ground- and ship-borne SPIDER experiments summary

No	名 称（場所）	実施年月	日数	備 考
1	北太平洋（みらい）	2001/05	14	JAMSTEC MR01-K02 北太平洋亜熱帯・亜寒帯循環系の変動に関する観測研究
2	西太平洋（みらい）	2001/09-11	45	JAMSTEC MR01-K05 leg1,2 西部熱帯太平洋・インド洋の観測研究
3	西太平洋（みらい）	2001/11-12	32	JAMSTEC MR01-K05 leg3,4 大気-海洋相互作用に関わる観測研究
4	北極域（みらい）	2002/08-10	45	JAMSTEC MR02-K05 leg1 北極海域の観測研究
5	インドネシア（京都大学 EAR サイト）	2005/11	10	京都大学予算
6	人工降雨観測（高知県鏡ダム付近）	2008/06-07	50	科学技術振興調整費「渇水対策のための人工降雨・降雪に関する総合的研究（研究代表者 気象研究所 村上）」による夏期観測
7		2009/06-08	64	
8		2010/05-07	65	

* NICT 小金井観測分は除く

CloudSat/CPR と SPIDERの同期観測（2007/04/26）

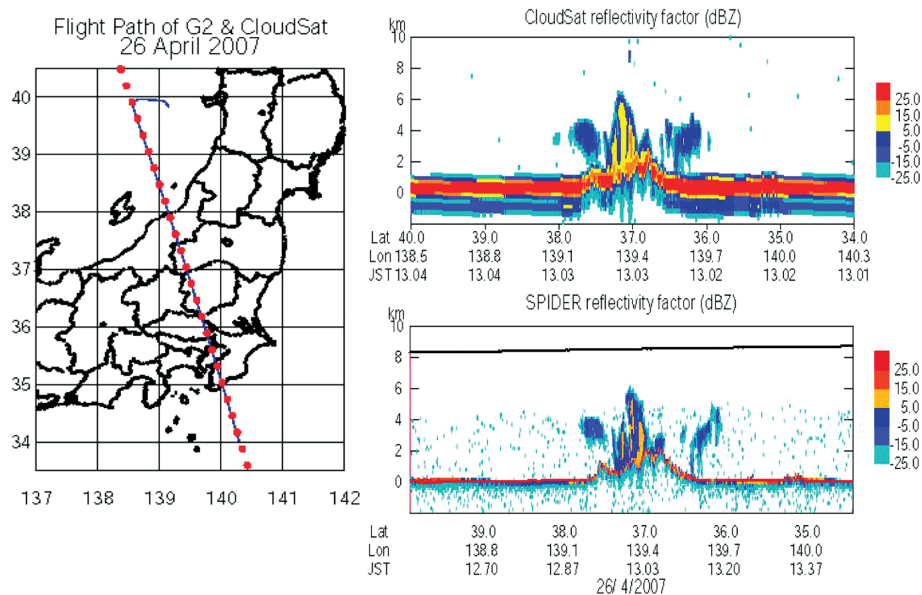


図 10：CloudSat/CPR と SPIDER の同期観測結果。観測 2007 年 4 月 26 日に実施した。左図は CloudSat 衛星の軌道と SPIDER のフライトパスで良く一致している。右上図は CloudSat により観測されたレーダ反射因子であり、右下図は SPIDER により観測されたレーダ反射因子である。分解能の違いはあるが、エコーの形は良く一致している。右上図の中央、高度 9 km あたりに SPIDER を乗せた航空機と思われるエコーがある。（Ohno et al. (2009) から引用）

Figure 10：Synchronous observation of SPIDER and CloudSat/CPR. The experiment was performed on Apr. 26, 2007. Left: The CloudSat satellite track and SPIDER flight path. Their paths are agreed with each other. Top right: Radar reflectivity of cloud observed by CloudSat. Bottom right: Radar reflectivity of cloud observed by SPIDER. They agreed with each other except the difference in resolution. The echo of the airplane carrying SPIDER is shown in the top right figure at the middle of latitude and 9km height. (Referred from Ohno et al. (2009))

DER を搭載している航空機のエコーと考えられる。厳密な意味での同時観測は、このエコーが記録された瞬間だけであり、他は近い時間の観測に過ぎない。また、CloudSat や EarthCARE/CPR はアンテナ走査機能が無いので軌道直下のみ観測するため、航空機の飛行経路が衛星軌道から少しでも外れると同期観測が成立しない可能性がある。そこで、同時に観測することを主眼におかず、しかしながら軌道直下に近い場所で連続的に観測し、統計的な比較をすることで検証を実施する考え方が主流になりつつある。実際に TRMM/PR の後継ミッ

ションである GPM/DPR では、検証用の航空機搭載降雨レーダを開発せず、地上観測・検証用の降雨レーダ開発を選択した。なお、GPM/DPR の検証用として 2 台の Ka 帯レーダが JAXA により開発された。2 台のレーダを対向させて運用することにより、融解層の振る舞い、降雨減衰の効果を確かめることもできる（Nakagawa et al. 2012）。なお、検証用レーダは JAXA の予算で開発されたが NICT のノウハウを生かして開発に貢献している。また、EarthCARE/CPR についても航空機観測による検証は採用しなかった。そこで、

NICT は EarthCARE/CPR の地上用検証レーダを開発することにした。

3. 衛星搭載雲レーダと検証用レーダ

EarthCARE/CPR の主要諸元は表 2 に示したとおり、アンテナビームの地上への照射面積（アンテナフットプリント）は約 750 m、鉛直分解能は 500 m で、水平 500 m 積分ごとにデータを出力する。10 km 積分時の最小受信感度は -35 dBZ であり、CloudSat の感度より 6 dB 良い要求仕様となっている。感度が -35 dBZ あれば、氷雲の 98%、層雲全体の 40% が探知できる (Stephens et al. 2002)。また、パルスペア法によるドップラ速度計測精度は、10 km 積分時に -19 dBZ の様な雲に対して 1.0 m/s であるが、現実の衛星とレーダを合わせたアンテナ指向方向の決定精度はこの値よりも悪くなるため、地上校正による補正後でも 1.3 m/s となる。通常のドップラ気象レーダと比べると精度が劣っているように見えるが、レーダのハードウェアによる計測精度は気象レーダよりも良く、アンテナビーム内でも衛星速度の寄与分が大きいためにスペクトラム幅が広がること、パルスと次のパルスを出す間にレーダ自身がアンテナ口径の半分近く移動するためコヒーレンスが悪化することなどから大きな誤差が生じる。この誤差は理論的限界と呼んでおり、0.8 m/s 程度ある (Kobayashi et al. 2002)。さらに、現実の雲は一様ではなく、衛星の進行方向に存在する雲のレーダ反射因子の変動に衛星速度の寄与分が混入することで、ドップラ速度測定に誤差が生じる (Schutgens 2008)。図 11 は模式的な図であるが、

衛星速度の混入によって、対象となる雲の鉛直方向の速度が 0 m/s でも、ビームの先端付近はこのレーダの折り返し速度とほぼ同じ 6.5 m/s の上昇流として計測されるのに対し、ビームの後端付近は 6.5 m/s の下降流として計測される。仮にビーム前方にのみ雲がありビーム後方に雲が無い場合には、雲が動いてなくても 1 積分単位としては上昇しているような速度を計測することになる。従ってビーム内のレーダ反射因子の非一様性が問題となる。この効果を現実の雲に適用して衛星搭載雲レーダでどのように観測できるかシミュレーション計算した結果が図 12 である (Horie et al. 2012)。SPIDER により観測されたデータを距離方向 50 m の分解能、鉛直方向 500 m の分解能で再構成したレーダ反射因子

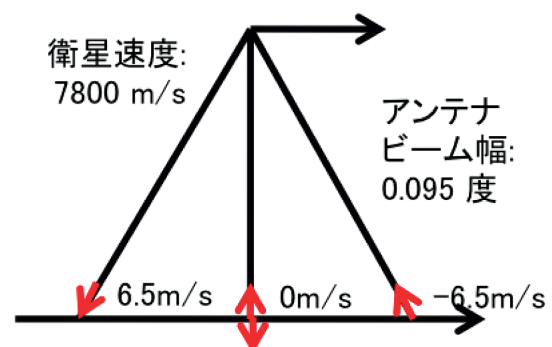


図 11：アンテナビーム内の衛星速度の混入イメージ。前方では 6.5 m/s の上昇流が観測されるのに対し、後方では 6.5 m/s の下降流が観測される。

Figure 11: Schematic concept for contamination due to satellite velocity within antenna beam. The upward draft of 6.5 m/s is observed at the front edge of antenna and the downward draft of 6.5 m/s is observed at the end edge of antenna.

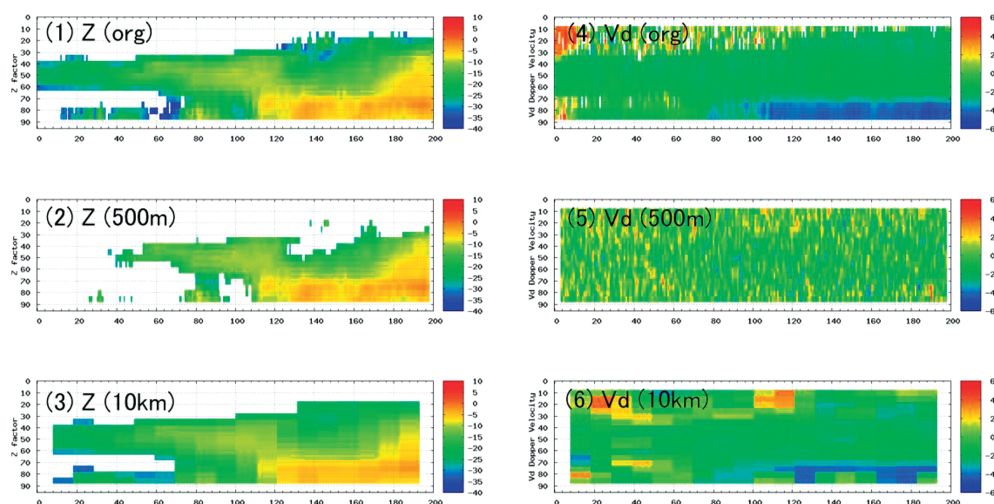


図 12：EarthCARE/CPR によるドップラ速度計測シミュレーション。(1)，(4) SPIDER により観測された Z 因子及びドップラ速度，これを真値とする。(2)，(5) EarthCARE/CPR の取得データのシミュレーション (500 m 積分値を表示)。(3)，(6) 10 km 積分した結果 (実際は移動平均を行うが，本図はしていない)。(Horie et al. (2012) より引用)

Figure 12: Simulation result of Doppler velocity measurement by EarthCARE/CPR. (1), (4) Z factor and Doppler velocity measured by SPIDER airborne experiment. They are used as truth data for this simulation. (2), (5) They are calculated by simulation for EarthCARE/CPR, which is equivalent to 500m integration performed on board. (3), (6) They are integrated results over the 10km (moving average will be performed for the actual processing, but they are not performed). (Referred from Horie et al. (2012))

(図 12(1)) 及びドップラ速度 (図 12(4)) を真値とし、アンテナ照射範囲をレーダ反射因子で重み付けし、ドップラ速度と上で述べた衛星速度の混入の効果を送信パルス 1 個毎に衛星が移動する効果を含めて積分し、衛星の移動 500 m 毎に計算したレーダ反射因子とドップラ速度が図 12(2) と (5) である。実際に衛星搭載雲レーダで観測されるデータになる。計算方法は Schutgens (2008) や Horie et al. (2012) で説明されている方法である。図 12(2) のレーダ反射因子については問題ないが、図 12(5) のドップラ速度については情報が失われているように見える。図 12(3) 及び (6) は、500 m 積分データを用いて 10 km 積分したレーダ反射因子及びドップラ速度である。10 km 積分後のドップラ速度は、誤差は存在するものの積分前のドップラ速度を反映しているように見える。なお、この計算では移動平均を実施していないので空間的な分解能があまりないように見えるが、EarthCARE/CPR の処理アルゴリズムでは移動平均することになっている。また、積分時に 500 m 毎の観測値を非一様性の効果により補正することを検討している。従って、このアルゴリズム検証のためには、アンテナビーム内のレーダ反射因子の分布を観測することが必要である。

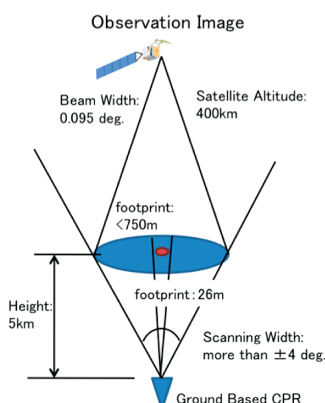
EarthCARE/CPR に検証が必要なのは、レーダ反射因子 (感度) とドップラ速度計測精度である。前者に関して検証するためには、大気上端で定義された EarthCARE/CPR の感度 -35 dBZ に加えて、地上から大気上端までの大気減衰分 2 dB を考慮する必要があり、細かく観測するため衛星搭載レーダの感度の 2 倍 (3 dB) を地上検証用レーダに要求することにした。従っ

て要求感度は -40 dBZ となる。後者のためにはアンテナフットプリント内のレーダ反射因子を観測する必要があるが、フットプリント 750 m を全高度で満たすことは難しいので、高度 5 km 以上で一致させることにした。従って、 ± 4.5 度のアンテナ (ビーム) 走査が必要となる。また、ドップラ速度の計測精度は -19 dBZ の雲に対して定義していることから、その 2 倍の感度の -22 dBZ を走査角度 0 度の時の要求感度とした。高感度の要求条件からは、SPIDER の感度 -30 dBZ より 10 倍改善した装置を開発する必要がある。また、走査の要求条件からは、距離 5 km で 50 m 程度である SPIDER のフットプリントでは 15 ビーム程度必要となる。SPIDER は機械走査方式であったが、感度と時間分解能を考慮すると電子走査方式が望ましい。

4. 次世代レーダの開発

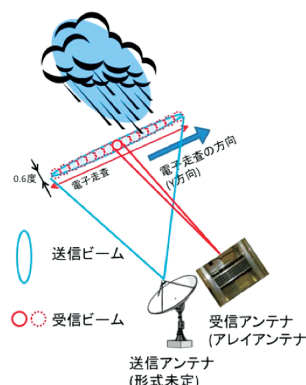
前章で説明した EarthCARE/CPR の検証用レーダの目標仕様全てを 1 式のレーダで実現する設計は不可能だったので、図 13 に示す 2 式のレーダを開発する計画を立てた。一式は地上設置型高感度雲観測レーダ (以降、高感度レーダまたは HG-SPIDER: High sensitivity Ground-based SPIDER と呼ぶ) で、 -40 dBZ の高感度を達成するレーダである。もう一式は、電子走査型雲観測レーダ (以降、電子走査レーダまたは ES-SPIDER: Electronic-Scanning SPIDER と呼ぶ) で、 ± 4.5 度の角度範囲の電子走査を実現するレーダである。以降に詳細を説明する。

高感度レーダ (HG-SPIDER) High-sensitivity Ground-base CPR



要求感度: -40 dBZ @ 1秒積分時 < -35 dBZ
(大気減衰分 2 dB も考慮)
ビーム幅: 0.3 度 (26 m @ 高度 5 km)
鉛直上向き、固定ビーム

電子走査レーダ (ES-SPIDER) Electronic-Scanning CPR 想定しているレーダのイメージ



要求感度: -22 dBZ @ 走査角度 0 度 < -19 dBZ
ビーム走査角度: ± 4.5 度 (0 度鉛直上向き)
送信ビーム幅: 0.6 度 $\times 9$ 度
受信ビーム幅: 0.6 度 $\times 0.6$ 度

図 13: 検証用レーダの開発コンセプト。左: 高感度レーダ, 右: 電子走査レーダ。

Figure 13: Development concept for the W-band cloud Profiling Radar for the calibration/evaluation. Left: High-sensitivity ground based Cloud Profiling Radar (HG-SPIDER), Right: Electronic scanning Cloud Profiling Radar (ES-SPIDER).

表 6：高感度レーダの目標仕様

Table 6：Requirements for HG-SPIDER

項 目	仕 様 値
周波数	94.09 GHz
アンテナ利得	55 dBi
ビーム幅(アンテナ開口)	0.3 度(80 cm ϕ)
送信尖頭電力(EIK)	1500 W
パルス幅	0.5/1.0/2.0 μ s
パルス繰り返し周期	3300-10,000 Hz
送信偏波	直線偏波
受信偏波	直線偏波
ドップラ速度計測	パルスペアまたは FFT
感度	-40 dBZ@大気上端, 1 秒積分
アンテナ走査	なし(真上観測)

表 7：電子走査レーダの目標仕様

Table 7：Requirements for ES-SPIDER

項 目	仕 様 値
周波数	94.09 GHz
送信アンテナ利得	35 dBi
送信アンテナビーム幅	9 度 $\times$ 0.6 度(ファンビーム)
受信アンテナ利得	47 dBi
受信アンテナビーム幅(アンテナ開口)	0.6 度(32 cm $\times$ 32 cm)
送信尖頭電力(EIK)	1500 W
パルス幅	0.5/1.0/2.0 μ s
パルス繰り返し周期	3300-10,000 Hz
送信偏波	直線偏波
受信偏波	直線偏波
ドップラ速度計測	パルスペアまたは FFT
感度(@走査角度 0 度)	-22 dBZ@ 5 km, 1 秒積分
アンテナ走査	電子走査(+/-4.5 度, 0.3 度ステップ)



図 14：高感度レーダの外観図

Figure 14：Photograph of HG-SPIDER

4.1 高感度レーダの開発

高感度レーダは SPIDER と比べて 10 倍感度の良いレーダであるが、技術的リスクは低いので、既開発品を用いるなど安価に製作する。具体的には、アンテナ及び高価な大電力送信管 (EIK) は衛星開発の試作品を流用する。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で使用しているソフトウェア無線機 (USRP) によるデータ処理・記録装置であり、NICT 内で開発する。データ処理ルーチンを自作するので、必

要に応じて内部の処理を自由に変更することができ、新たな処理手法を開発すれば簡単に検証できるメリットがある。高感度レーダの目標仕様を表 6 に示す。なお、安価とするため 2 偏波機能は削除した。製作中の高感度レーダの外観を図 14 に示す。ハードウェアとしては形ができていないが、現時点では運用が開始されていない。

4.2 電子走査レーダの開発

+/-4.5 度の狭い範囲とはいえ W 帯の電子走査型雲観測レーダは世界初の試みである。周波数が高く波長が短いことから、通常の導波管スロットアレイアンテナによる電子走査レーダは物理的な制約で製作できない。パッチアンテナを並べる方式も考えられるが、十分なアンテナ利得を稼ぐために大きなアンテナ開口にすると多数の素子が必要となり、この周波数帯では送受信器を構成する十分小さな素子がないこと、もし有ったとしても高額であることから難しい。そこで、EarthCARE/CPR のドップラ速度計測精度の前提値 -19 dBZ を考慮し、電子走査レーダに対する要求感度が走査角度 0 度で -22 dBZ であること、2 次元走査ではなく 1 次元走査に制限することで、実現可能な構成の設計が可能となった。具体的な仕様を表 7 に示す。送信は半導体デバイスでは十分な送信電力を確保できないので大電力送信管を用いたファンビームアンテナの構成とし、受信はホーンアンテナアレイとした。必要な素子数が多いこと、本方式の実現性を確かめる必要があることから、まず受信アンテナの部分モデルを試作した。試作した部分モデルを図 15 に示す。部分モデルを評価した結果、実現可能と判断し平成 25 年度から開発を開始した。

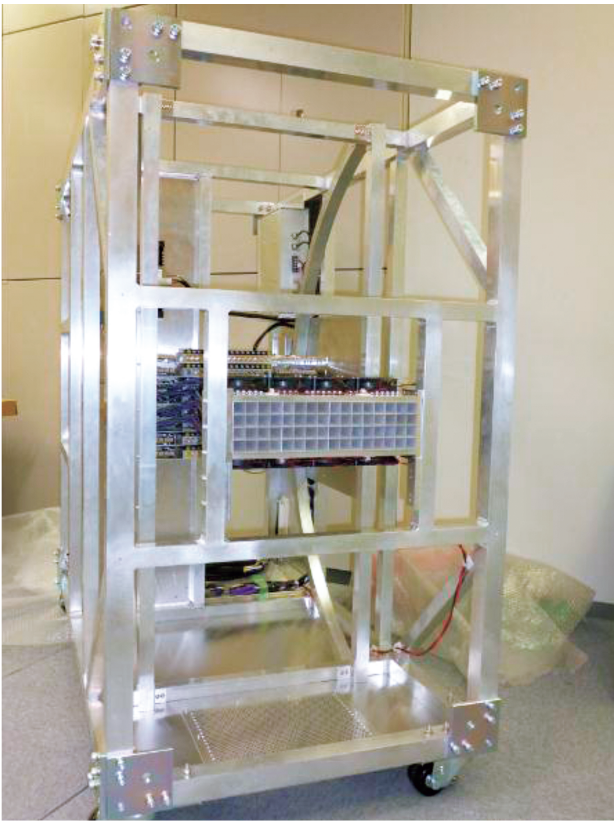


図 15：電子走査レーダ試作品

Figure 15: Partial model of antenna system for ES-SPIDER

5. まとめ

本稿では SPIDER 開発の背景から運用状況を紹介し、SPIDER 以降の雲レーダ開発として、衛星搭載雲レーダの検証用レーダの開発について説明した。2 種類の検証用レーダは開発中であるが、近い将来開発結果を報告する予定である。このうち、高感度レーダは、これまで観測できなかった薄い雲が観測できる可能性がある。また、データ処理技術の改善が期待できる。一方、電子走査レーダは 1 次元走査であるが雲の水平方向の分布を明らかにすることができ、EarthCARE/CPR のドップラ速度計測の検証に有効となる。電子走査レーダの構成は、その時点における W 帯のデバイス開発状況に依存することになるが、現在の技術でも十分実用可能な範囲で構成できる設計ができた。現在開発している電子走査レーダは位相器を用いて信号を合成しているので逐次走査機能しか有していないが、信号を計算機上で合成するデジタルビームフォーミング技術を用いれば、同時に複数の走査角度を観測できるので、将来はこの同時観測機能を追加する予定である。また、電子走査レーダの開発は、将来の電子走査型衛星搭載雲観測レーダにつながる技術になると考えている。これまで開発した衛星搭載雲レーダ及び検証用レーダなど次世代雲レーダによる観測が、雲・降水研究者の新たな知見へとつながることを期

待している。

参考文献

- 岡本謙一, 尾嶋武之, 増子治信, 吉門信, 猪股英行, 畚野信義 (1982) 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*, **2(2)**, 31-41.
- 岡本謙一他 (1986) 航空機搭載用マイクロ波雨域散乱計/放射計システムの開発と実験, *電波研究所季報*, **32(163)**, 55-152.
- Kumagai, H., K. Nakamura, H. Hanado, K. Okamoto, N. Hosaka, N. Miyano, T. Kozu, N. Takahashi, T. Iguchi, and H. Miyauchi (1996) CRL Airborne Multiparameter Precipitation Radar (CAMPR): System Description and Preliminary Results, *IEICE Trans. Commun.*, **E79-B**, No.6, 770-778.
- Horie, H., T. Iguchi, H. Hanado, H. Kuroiwa, H. Okamoto, and H. Kumagai (2000) Development of a 95-GHz Airborne Cloud Profiling Radar (SPIDER) - Technical Aspects -, *IEICE Trans. Commun.*, **E83-B**, No.9, 2010-2020.
- Kozu, T., T. Kawanishi, H. Kuroiwa, M. Kojima, K. Oikawa, H. Kumagai, K. Okamoto, M. Okumura, H. Nakatsuka, and K. Nishikawa (2001) Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, **37**, 102-116.
- Stephens G., D. Vane, R. Boain, G. Mace, K. Sassen, Z. Wang, A. Illingworth, E. O'Connor, W. Rossow, S. Durden, S. Miller, R. Austin, A. Benedetti, C. Mitrescu, and the CloudSat Science Team (2002) The CloudSat Mission and the A-train, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **104**, 1771-1790.
- Kobayashi S., H. Kumagai, and H. Kuroiwa (2002) A Proposal of Pulse-Pair Doppler Operation on a Spaceborne Cloud-Profiling Radar in W Band, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 1294-1306.
- Schutgens N. (2008) Simulated Doppler Radar Observations of Inhomogeneous Clouds: Application to the EarthCARE Space Mission, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 26-42.
- Ohno Y., K. Sato, H. Horie, N. Takahashi, and H. Kumagai (2009) Satellite-borne Cloud Radar Calibration using Airborne Cloud Radar and Ground Measurements, *Fourth Japan-China-Korea Joint Conf. on Meteorol.*, 173.
- Nakagawa, K., M. Nishikawa, K. Nakamura, K. Komachi, H. Hanado, S. Kawamura, S. Sugitani, H. Minda, S. Shimizu, and R. Oki (2012) Dual Ka-band radar field campaign for GPM/DPR algorithm development, *Geophysical Research Abstracts*, **14**, EGU 2012-2198-1.
- Horie, H., N. Takahashi, Y. Ohno, and K. Sato (2012) Simulation for Spaceborne Cloud Profiling Doppler Radar -- EarthCARE/CPR --, *Proc. of SPIE*, **8253**, 825318-1.