

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：25101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22540453

研究課題名（和文）次世代の衛星搭載複合型マルチパラメータ降水観測システムの開発に関する研究

研究課題名（英文）Research on the development of the next generation spaceborne combined multi-parameter precipitation observation system

研究代表者

岡本 謙一(Okamoto Ken'ichi)

鳥取環境大学・環境学部・教授

研究者番号：90326273

研究成果の概要（和文）：機械的走査方式の三周波共用パラボラアンテナを用いる降雨レーダ・マイクロ波放射計複合系(13.6GHz, 35.5GHz)と雲レーダ(94GHz)により降雨と雲を同時に観測する衛星搭載マルチパラメータ降水観測システムの検討を行った。アンテナ系については、三周波共用のために Jerusalem Cross 型の周波数選択板の利用を検討した。また、同システムによる降水観測シミュレーション実験を実施した。

研究成果の概要（英文）：System study of the spaceborne multi-parameter precipitation observation system is performed. The system utilizes a mechanical scan type offset parabolic antenna in which a single parabolic dish is commonly shared by three radio frequencies, and is composed of the combined rain radar/microwave radiometer (13.6 GHz, 35.5 GHz) and cloud radar (94GHz) to observe rain and cloud simultaneously. A Jerusalem Cross type frequency selective surface is examined to commonly share the single dish of the offset parabolic antenna by the three frequencies. The simulation experiment to observe precipitation by the system is also performed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：降雨・降雨レーダ・マイクロ波放射計・雲レーダ

## 1. 研究開始当初の背景

熱帯降雨観測衛星(TRMM)は、熱帯・亜熱帯の降雨を観測することを目的として1997年11月に打ち上げられて以来、16年目を迎えている現在も順調に観測データを取得して

いる。TRMM衛星の降雨観測センサには、降雨レーダ(PR)とマイクロ波放射計(TMI)がある。TRMM降雨レーダは、13.8GHzの一周波・単偏波のレーダであり、アンテナビームを高速に電子走査するために、128個の固体送受信

素子、移相器、アンテナ素子などからなる Active Phased Array 方式を採用している。このために、構造が複雑で重量が非常に重くなるという問題点を有している。TRMM/PR の場合の重量は 465 kg と重い。また、採用した導波管スロットアレーアンテナは、使用可能な周波数帯域幅が狭く、単一周波数と単偏波のみにしか使用できず、多周波・複偏波(水平・垂直偏波)の共用が不可能であり、各周波数および各偏波ごとに別のアンテナを用いなければならないという重量・寸法上の問題点をも有している。

TRMM を継承し 2014 年に打ち上げ予定の全球降水観測計画衛星(GPM)に搭載される TRMM/PR と同じ Active Phased Array 方式の二周波降水レーダ(DPR)の場合も、13.6 GHz 降水レーダの重量が約 410 kg、35.5 GHz 降水レーダの重量が約 320 kg と見積もられている。また、13.6 GHz 用、35.5 GHz 用の二面の導波管スロットアレーアンテナが用いられており、重量的、寸法的に大型なシステムになっている。この様な大掛かりなセンサは、限られた大型衛星にしか搭載することができなくなる。

さらに、TRMM の降水観測上の問題として、TRMM/PR と TRMM/TMI は、指向方向、アンテナビーム幅(水平分解能)が異なるため複合アルゴリズムによる降水強度算出の精度上に問題がある。このために、降水レーダとマイクロ波放射計は、同一のアンテナを用いて指向方向、アンテナビーム幅を揃えて観測することが望まれている。

また、94GHz の測雲レーダを搭載した CloudSat 衛星も 2006 年に打ち上げられ雲物理量に関する有意なデータを取得している。

TRMM 衛星、CloudSat 衛星の成功を踏まえ、降水プロセスの解明や降水の三次元構造のモデル化という目的を達成するために、同一の衛星に降水レーダ、マイクロ波放射計、雲レーダを搭載して降水と雲を同時に観測することの意義が指摘されている。

## 2. 研究の目的

本研究では、TRMM 衛星の Active Phased Array Antenna 方式の降水レーダの問題点である①装置の構成要素が多く複雑で重量が重いシステムになること、②導波管スロットアレーアンテナを用いているために各周波数・偏波ごとに個別のアンテナを用いる必要があり、重量が重く、寸法の大きいセンサになること、③降水レーダとマイクロ波放射計の指向方向とアンテナビーム幅が異なり、複合アルゴリズムによる降水強度算出精度上

に問題があることなどの問題点を解決するために、さらに、降雨と雲の同一衛星からの観測を実現することを目指して、機械的に走査する三周波・直交偏波共用反射鏡アンテナを用いる降雨レーダ・マイクロ波放射計複合系(13.6 GHz, 35.5 GHz)と雲レーダ(94 GHz)により降雨と雲を同時に観測する衛星搭載マルチパラメータ降水観測システムの検討を行う。

さらに、システム実現のためのキーとなるアンテナ系については、周波数共用オフセットパラボラアンテナにおいて、単一のパラボラ主鏡面を三周波で共用するために必要とされる周波数選択板について検討を行う。

また、雲解像数値モデルによってシミュレーションされた複数の降水システムを対象として、本研究で提案する二周波降水レーダ(13.6 GHz, 35.5 GHz)ならびに雲レーダ(94 GHz)による降雨・雲観測シミュレーションを実施し、システムの評価を実施する。

## 3. 研究の方法

三周波・直交偏波共用機械的走査方式の反射鏡アンテナを用いる降雨レーダ・マイクロ波放射計複合系(13.6 GHz, 35.5 GHz)・雲レーダ(94 GHz)のシステム検討を、送受信系を中心とするシステムパラメータの検討、アンテナ系の検討、降水物理モデルを用いたシミュレーションに分けて、研究代表者、研究分担者が分担して実施する。

送受信系を中心とするシステムパラメータの検討は、観測上の要求条件に基づき、仮定した降雨・雲モデルを対象とし、レーダ方程式を用いて実施する。また、マイクロ波放射計のシステムパラメータの検討と共に、複合系を実現するために、降水レーダとマイクロ波放射計の観測切り替えタイミングを検討する。アンテナ系の検討においては、三周波・直交偏波共用アンテナの周波数選択板の候補に Jerusalem Cross 型の多層構成を取り上げ、Maxwell方程式を時間領域で解く時間領域有限差分(FDTD)法によって解析した。雲解像数値モデルを用いたシミュレーションでは、Satellite Data Simulator Unit (SDSU[1])を適用することによりシミュレーションデータを作成し統計解析を実施する。

## 4. 研究成果

### 4. 1 システムパラメータの検討

共通のオフセットパラボラアンテナを使用する二周波降雨レーダ・マイクロ波放射計複合系(13.6 GHz, 35.5 GHz)のシステムパラメータを示す。13.6 GHz 帯と 35.5 GHz 帯は、アンテナビーム幅が同一なマッチドビームとし、35.5 GHz 帯は、鏡面の一部を使用するものとする。オフセットパラボラアンテナは、機械的に円錐状に走査する。走査においては、隣り合う地表面走査線に隙間が出ないように、一次放射器を天頂方向に指向させ、オフセットパラボラアンテナを、衛星と衛星の直下点を結ぶ方向を軸として回転させることによって円錐走査を行い、降雨域を覆って行く。衛星高度は、GPM 衛星と同じ 407 km とする。衛星地上軌跡の移動速度は 7.2 (km/s) である。アンテナの開口径は 1.6 m とし (13.6 GHz の有効開口径)、走査角 (アンテナの頂角) を 12.5° とする。35.5 GHz の有効開口径は、0.613 m となる。

走査幅 (外側) は 187.27 km、走査幅 (内側) は 173.67 km、フットプリントの長径は 6.797 km、短径は 6.636 km、走査周期は 0.9434 s、円錐走査の角速度は 381.6° /s、アングルピン数は 86 個である。

表 1 に複合型二周波 (13.6 GHz, 35.5 GHz) 降雨レーダ、マイクロ波放射計システムの主要パラメータを示す。

表 1 降雨レーダ・マイクロ波放射計複合系の主要パラメータ

	13.6 GHz	35.5 GHz
<b>降雨レーダ</b>		
有効開口径	1.6 m	0.613 m
ビーム幅	0.913°	0.913°
アンテナ利得	46.26 dB	46.26 dB
送信ピーク電力	1855.3 W	605.6 W
パルス幅	1.67 μs	1.67 μs
PRF	3480 Hz	3113 Hz
独立サンプル数	76	68
システム損失	2.4 dB	5.0 dB
Smin	-112.05 dBm	-110.05 dBm
ビーム重複率	0.6771	0.6771
<b>マイクロ波放射計</b>		
受信機雑音温度	290 K	627 K
アンテナ温度	290 K	290 K
RX 帯域幅	200 MHz	300 MHz
積分時間	2.42 ms	3.32 ms
受信感度	0.83 K	0.92 K

ここで、降雨モデルとしては、高さ 5 km の一様降雨モデルとし、降雨の層の上に厚さ 0.5 km のブライツバンドを仮定した。レーダ方程式を用いて、雨域の頂で降雨強度 0.5

mm/h の雨を観測するのに必要な送信ピーク電力を求めた。レーダ反射因子  $Z_e$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )、減衰係数  $k$  (dB/km) と降雨強度  $R$  (mm/h) の関係は、13.6 GHz のとき  $Z_e=234R^{1.59}$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )、 $k=0.0237R^{1.17}$  (dB/km) を、35.5 GHz のとき  $Z_e=270R^{1.29}$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )、減衰係数  $k=0.204R^{1.05}$  (dB/km) を用いた。また、降雨レーダの独立サンプル数 64 以上を確保すると共に、マイクロ波放射計の感度が 1 K 以下になるように積分時間を確保できるように、必要な最小の PRF を選択すると共に、降雨レーダについては、二周波アジリティを採用している。

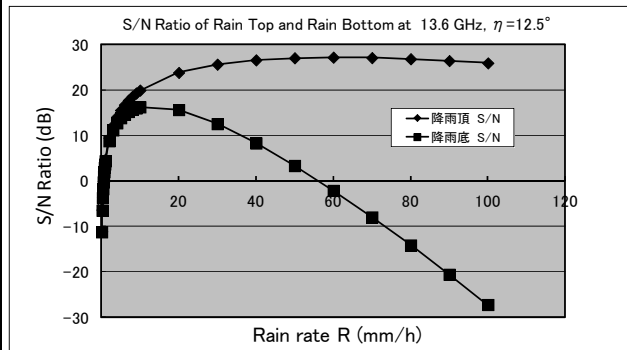


図 1 13.6 GHz、走査角 12.5° のときの雨域の頂きと雨域の底での S/N 比

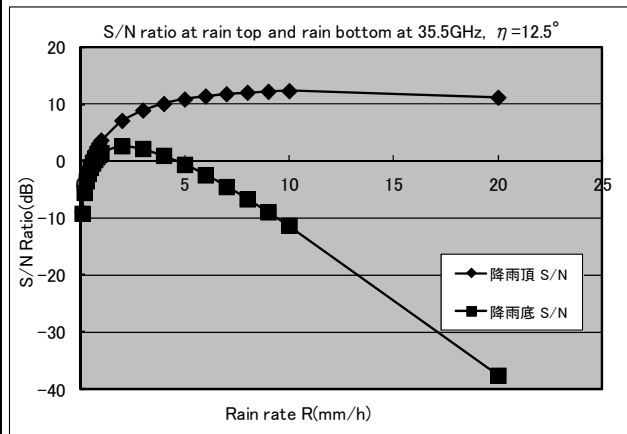


図 2 35.5 GHz、走査角 12.5° のときの雨域の頂きと雨域の底での S/N 比

図 1、図 2 に 13.6 GHz と 35.5 GHz のときの降雨頂と雨域底における S/N 比を示す。

表 1 の降雨レーダのパラメータは、単一パルスについての S/N 比が 0 dB となる条件から求められている。このときの検出可能な最小の  $Z_e$  の値は、 $R=0.5$  (mm/h) を  $Z_e$ - $R$  関係に代入することで、13.6 GHz のとき 18.9 dB, 35.5 GHz のとき 20.4 dB となる。独立サンプル数を考慮すると等価 S/N 比 ( $Y_e$ ) は、

$$Y_e = \frac{Y\sqrt{N}}{C_T\sqrt{(Y+1)^2 + (N/M)}}$$

で与えられる[2]。ここで、 $Y$ は、単一パルスのS/N比、 $N$ 、 $M$ は、それぞれ受信電力および雑音の独立サンプル数の平均回数である。 $C_T$ は、対数検波のとき $\pi/\sqrt{6}$ となる定数である。 $N/M=0.25$ と仮定すると、等価S/N比 $Y_e=3$  dBとなる単一パルスのS/N比 $Y$ の値は、13.6 GHzのとき $N=76$ より-3.4 dB、35 GHzのとき $N=68$ より-3.1 dBとなる。従って、等価S/N比 $Y_e=3$  dBを与える13.6 GHz、35.5 GHzの等価 $Z_e$ の値は、それぞれ、15.5 dB、17.3 dBと考えられる。

雲レーダ(94 GHz)については、雲粒のレーダ反射因子 $Z$ が雨滴の $Z$ に比べて非常に小さいので、独立サンプル数による積分により等価S/N比を上げる必要がある。高さ5 km、厚さ1 kmの雲モデルを考える。雲水量 $M(\text{g}/\text{m}^3)$ とレーダ反射因子 $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$ との関係は、水雲のとき $Z=0.068M^{1.9}$ で与えられるとする[3]。雲の頂きで $Z=-30$  dBZを等価S/N比 $Y_e=3$  dBで観測できるシステムを考える。今、アンテナ開口径の一部(0.231 m)を使い94GHzの雲レーダのアンテナビーム幅を13.6GHz、35.5 GHzの降雨レーダに揃え円錐走査する場合、アンテナ利得は46.26 dBと小さく、独立サンプル数は76と小さいため所要送信ピーク電力は、1513 kWと非常に大きな値となり現実的ではなくなる。このため、アンテナ開口径1.6 mを使い走査をしないで頂角12.5度のアンテナビームの指向方向を衛星の進行方向に固定したモードで運用することを検討する。瞬時のフットプリントの長径は0.9856 km、短径は0.9622 kmである。独立サンプル数を稼ぐために、6 kmの積分距離を考慮する。PRF=3920 Hzのとき、2周波アジリティを採用すると独立サンプル数は、6528となる。雲の頂きで $Z=-30$  dBZを等価S/N比 $Y_e=3$  dBで観測するとき、 $C_T=1$ 、 $N/M=0.25$ と仮定すると単一パルスS/N比 $Y=-15.5$  dBとなる。雲レーダの主要パラメータを表2に示す。

表2 雲レーダの主要パラメータ

周波数	94.05 GHz
有効開口径	1.6 m
ビーム幅	0.132°
アンテナ利得	62.68 dB
送信ピーク電力	2113 W
パルス幅	3.333 $\mu$ s
PRF	3920 Hz
独立サンプル数	6528
システム損失	6.0 dB
Smin	-114.41 dBm

#### 4. 2 アンテナ系周波数選択板の検討

アンテナ系については、円錐走査型三周波共用オフセットパラボラアンテナについて基礎検討を行った。

具体的には、単一のパラボラ主鏡面を三周波で共用するために、周波数選択板(FSS: frequency selective surface)による三周波のビーム給電系を合成する方式について検討した。三周波共用のためのFSSとして、斜め45°入射において直交偏波を共用できる図3に示すJerusalem Cross Slotを導体板に二次元的に配列したJerusalem Cross Slotアレイ(図4)[4]について検討した。

図5に、94GHz帯を選択的に透過する単層のJerusalem Cross Slotアレイ型FSSの透過および反射係数を計算した結果の例を示す。この図より、入射面に平行(TM)および直交(TE)する両偏波のいずれについてもほぼ同様の反射・透過特性が得られることが分かるが、単層であるため反射・透過のロールオフ特性の切れがあまりよくないことが分かる。一方、図6は同じFSSを3枚適当な間隔で配置して3層構造とした場合の反射・透過特性を示したものである。この図よりFSSを3層構造にすることにより、ロールオフ特性が改善され、35GHz帯以下の帯域との分離性能が大幅に改善していることが分かる。図7は、同様にして、35.5 GHz帯を分離するための、FSSとして3層のJerusalem Cross Slotアレイを設計し、その反射・透過特性を計算した結果を示したものである。

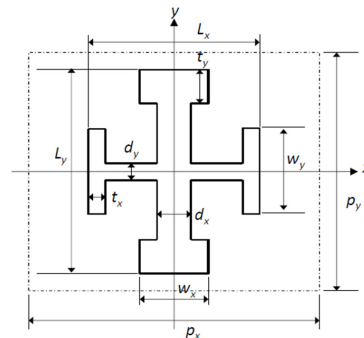


図3 Jerusalem Cross Slotの1セルの構造

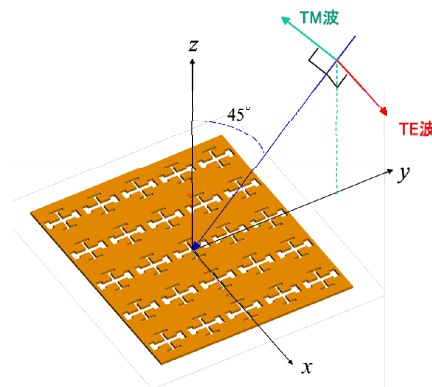


図4 Jerusalem Cross Slotアレイ

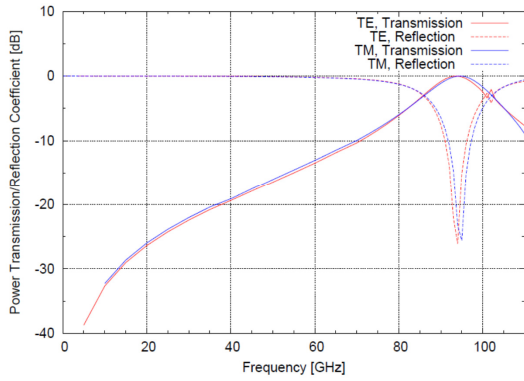


図5 単層の94 GHz 帯用 Jerusalem cross slot array の45°入射の場合の電力透過係数と反射係数の周波数依存性.

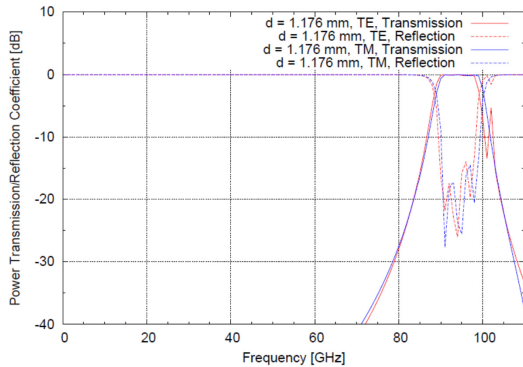


図6 3層の94 GHz帯用Jerusalem cross slot array の45°入射の場合の電力透過係数と反射係数の周波数依存性.

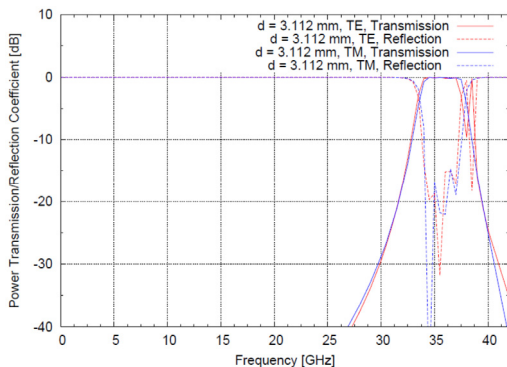


図7 3層の35.5 GHz 帯用 Jerusalem cross slot array の45°入射の場合の電力透過係数と反射係数の周波数依存性.

#### 4. 3 雲解像数値モデルを用いたシミュレーション

本研究で提案する二周波降雨レーダ (13.6 GHz, 35.5 GHz)、雲レーダ(94 GHz) のセンサパラメータ (アンテナパターン、最小受信感度) の雲・降水システムに関する科学的研

究に対する影響を評価した。複数センサの同時観測データを用いた科学的研究として、降水頂と雲頂の関係の統計解析が考えられる。そこで、雲解像数値モデルによってシミュレーションされた雲降水三次元データに対し、レーダ方程式や放射伝達方程式によって衛星観測データをシミュレーションする Satellite Data Simulator Unit (SDSU; [1]) を適用した。

GPM 主衛星搭載二周波レーダ[5]と CloudSat 衛星雲レーダ[6]のセンサパラメータを仮定した場合 (表3) と本研究で提案する三周波雲・降水レーダのセンサパラメータを仮定した場合 (表4) で比較した。比較は、熱帯雲降水システム (図8)と沖縄梅雨雲降水システム (図9)という異なる特徴をもった雲降水システムについて行った。両ケースともに本研究のセンサパラメータと GPM 主衛星搭載二周波レーダと CloudSat 衛星雲レーダのセンサパラメータの場合ではほぼ変わらない統計解析結果が得られた。

表3 GPM 主衛星搭載二周波レーダと CloudSat 衛星雲レーダのセンサパラメータ

周波数	Ku 13.6 GHz	Ka 35.5 GHz	W 94 GHz
最小受信感度 (dBZ)	18.0	18.0	-30.0
水平解像度 (km x km)	4.3 x 4.3	4.3 x 4.3	1.4 x 1.7

表4 本研究で提案する三周波雲・降水レーダのセンサパラメータ

周波数	Ku 13.6 GHz	Ka 35.5 GHz	W 94 GHz
最小受信感度 (dBZ)	15.5	17.3	-30.0
水平解像度 (km x km)	6.797 x 6.636	6.797 x 6.636	0.986 x 0.962

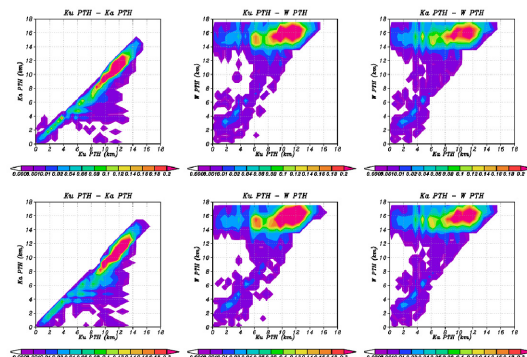


図8 熱帯雲降水システムのシミュレーション・データから得た周波数間の降水頂と雲頂の関係についての統計解析。(左) Ku(横軸)-Ka(縦軸), (中) Ku(横軸)-W(縦軸), (右)



Ka(横軸)-W(縦軸)で、(上)GPM 主衛星搭載二周波レーダと CloudSat 衛星雲レーダのセンサパラメータ(表3)を用いた場合、(下)本研究で提案する雲・降水レーダのセンサパラメータ(表4)を用いた場合。カラーは、頻度割合(%)を表す。

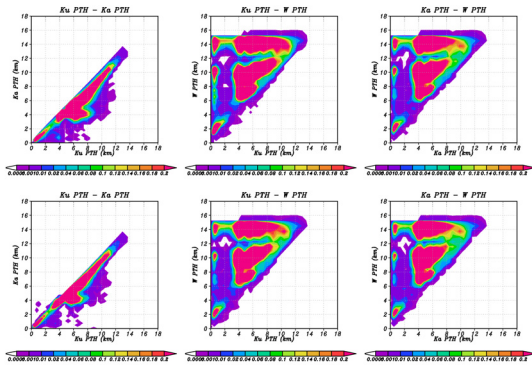


図9 図1と同じ、ただし、沖縄梅雨雲降水システムの場合。

#### 参考文献

- [1]H. Masunaga et al., “Satellite Data Simulator Unit (SDSU): A multi-sensor, multi-spectral satellite simulator package”, Bull. Amer. Meteorol. Soc., **91**, pp. 1625-1632, 2010.
- [2]岡本謙一編著、“地球環境計測”、p. 111, オーム社、1999.
- [3]H. Saurageot and J. Omar, “Radar reflectivity of cumulus clouds”, J. Atmos. Ocean Technol., **4**, pp. 264-272, 1987.
- [4] R. Dickie, et al., “664 GHz dual polarization frequency selective surface”, Electron. Lett., **46**, pp. 472-474, 2010.
- [5]花土弘, 二周波降水レーダ, 「全球降水観測(GPM)計画—科学的・社会的期待—」, (独)宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター, pp. 121-127, 2008
- [6]Tanelli, S. et al. “CloudSat’s Cloud Profiling Radar after two years in orbit: performance calibration, and processing”, IEEE GE-**46**, 11, pp.3560-3573, 2008.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6件)

- ① K. Okamoto, T. Manabe, and S. Shige, “Spaceborne Dual Frequency Radar/Radiometer Combined Rain

Observation System,” International Symposium on Remote Sensing 2013, 2013年5月16日, Narashino-shi

② 岡本謙一、真鍋武嗣、重尚一、“衛星搭載複合型マルチパラメータ降雨観測システム”、日本リモートセンシング学会第53回(平成24年度秋季)学術講演会、2012年11月20日、東広島市

③ 真鍋武嗣、菊池健一、西堀俊幸、落合啓、“直交偏波共用多層Jerusalem Cross Slot型サブミリ波帯周波数選択板についての検討”、2012年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2012年9月13日、富山市

④ 重尚一、“衛星搭載マイクロ波放射計観測データの利用入門”、日本気象学会2011年度春季大会(招待講演)、2011年5月18日、東京

⑤ K. Okamoto, T. Manabe, S. Shige, “A proposal of the spaceborne new precipitation observation system,” AP-RASC’10 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference, 2010年9月25日, Toyama

⑥ K. Okamoto, T. Manabe, S. Shige, “Spaceborne radar/microwave radiometer combined rain observation system”, ERAD 2010 - The Sixth European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, 2010年9月7日, Sibiu, Rumania

[その他]

<http://misc.kankyo-u.ac.jp/~kokamoto/kadai4.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岡本 謙一 (OKAMOTO KEN’ ICHI)  
鳥取環境大学・環境学部・教授  
研究者番号：90326273

##### (2) 研究分担者

真鍋 武嗣 (MANABE TAKESHI)  
大阪府立大学・工学研究科・教授  
研究者番号：50358991

重 尚一 (SHIGE SHOICHI)  
京都大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：60344264