

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540466

研究課題名（和文） 新しい衛星搭載複合型降雨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 new spaceborne combined radar-radiometer precipitation observation system

研究代表者

岡本 謙一（OKAMOTO KEN' ICHI）

鳥取環境大学・環境情報学部・教授

研究者番号：90326273

研究成果の概要：

宇宙から、降雨レーダとマイクロ波放射計が共通のアンテナにより、同一の瞬時視野の降雨を同時に観測する降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムの可能性を、TRMM 降雨レーダデータの解析ならびに複合型降雨観測システムのシステム検討により実証した。同システムを将来型の人工衛星搭載降雨観測システムとして提案する。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,800,000	540,000	2,340,000

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：地球観測，気候変動，降雨，降雨レーダ，マイクロ波放射計，複合型降雨観測センサ，熱帯降雨観測衛星

1. 研究開始当初の背景

熱帯降雨観測衛星（TRMM）搭載の降雨レーダ（PR）は、1997年11月の打ち上げ以来、世界初の宇宙機搭載降雨レーダとして、地球的規模の気候変動に重要な影響を及ぼす全世界の降雨の三次元分布を11年半近くも連続して観測し、多くの有意なデータを取得してきた。TRMM衛星には、宇宙からの降雨観測用センサとして長年の使用実績のあるマイクロ波放射計（TMI）も同時に搭載され、主に地表付近の降雨強度の水平分布を観測している。しかし、PRとTMIは、異なったアンテナを有

する独立したセンサであり、瞬時視野の大きさ、指向方向が異なり、走査方法もPRの往復走査、TMIの円錐走査と異なっており、瞬時視野の観測降雨域がそもそも完全には一致していない。このことは、瞬時視野の観測降雨強度のみならず、それらを平均した月平均降雨強度の値に於いても、PRで観測された降雨強度とTMIで観測された降雨強度の月平均値が異なる原因の一つと考えられる。

降雨レーダ、マイクロ波放射計共に、衛星からの降雨観測に有効なセンサであるが、降雨レーダが大電力を送信し、強い降雨散乱波

を受信するのに対し、マイクロ波放射計は降雨が自然に放射する極微弱な雑音を高感度で受信する全く異なるシステムである。このため、降雨レーダによる降雨散乱波のマイクロ波放射計への混入を恐れ、従来両者は、極力分離して使用されてきた。しかし、両者を組み合わせ、同一方向を同一の瞬時視野の大きさと眺め同時観測するメリットは大きく、降雨レーダエコーとマイクロ波放射計の受信波を同時に観測する新しい複合型降雨観測センサシステムの検討が望まれてきた。

国際的にも、TRMMを後継する新しい降雨観測衛星 GPM(全球降水観測計画)衛星の実現が期待されている。降雨観測において、降雨レーダとマイクロ波放射計データの複合的な利用についての重要性はますます認識されつつあるが、GPMにおいても、搭載降雨観測センサである二周波降雨レーダ(DPR)とマイクロ波放射計(GMI)は、独立したセンサである。また、将来的にも、国内外において、降雨レーダとマイクロ波放射計データを複合したセンサの研究ならびにそれに基づいたセンサの開発提案は、行われていない。しかし、降雨観測用の観測精度の優れた新しい観測システムの開発は期待を持って待たれており、両者を複合した降雨観測システムを提案する当該研究は、新規性を有している。

2. 研究の目的

本研究では、降雨レーダとマイクロ波放射計が共通のアンテナを用い、同じ方向と大きさの瞬時視野を共有する人工衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムを将来型の降雨観測センサとして提案し、そのシステム設計を行うことを目的とする。このため、降雨レーダとマイクロ波放射計の観測タイミングを考慮して、降雨レーダの送受信タイミングの空き時間を利用したマイクロ波放射計によるほぼ同時観測を可能にする複合型降雨観測システムのパラメータを計算機シミュレーションなどによって決定し、衛星搭載複合型降雨観測システムの概念設計を実施する。このことにより、両者の観測する降雨強度の値の差の減少を目指す。また、両者のデータを同時利用した複合アルゴリズムを開発すれば、観測降雨強度の観測精度を上げることが可能になると考えられる。TRMM/PRのような一周波降雨レーダの観測データは、従来は、各レンジビンにおける降雨減衰を含んだレーダ反射因子 Z 、ならびに降雨減衰補正のために表面参照法で用いる降雨域の背景の地表面の規格化レーダ散乱断面積の降雨による経路積分減衰量(PIA)であった。これらに加えて、マイクロ波放射計による独立な輝度温度の観測データが加わるならば、それらのデータを複合利用した新しい降雨強度算出アルゴリズム

の開発が考えられる。

3. 研究の方法

(1) TRMM/PR 観測データのデータ解析

TRMM/PR の受信機をマイクロ波放射計として利用することを試みる。このために、TRMM/PR 観測データの解析を通して、降雨に起因すると思われる雑音電力と PR で算出した降雨強度ならびに空間の雨滴粒子密度のレンジ方向の積算値との相関についてハリケーンなどの観測例を通して検証する。

(2) 衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムのシステムパラメータの決定。

最初に機械的走査型の降雨レーダによる降雨観測のシミュレーションを通して、妥当な降雨レーダのシステムパラメータの値を決定する。つぎに機械的走査型の降雨レーダのシステムパラメータをベースにして、降雨レーダの観測時間の隙間を使ってマイクロ波放射計の観測可能な時間を積算し、その所要積分時間の検討を行う。この結果、共通のアンテナを用いる衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムのシステムパラメータを決定する。

4. 研究成果

(1) TRMM/PR 観測データのデータ解析

将来の衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムの第一歩として、TRMM/PR の受信機をマイクロ波放射計として利用することを検討する。通常の衛星搭載のマイクロ波放射計の所要帯域幅は、受信感度を上げるために、約 100 MHz 程度以上の広い帯域幅を取っている。一方、TRMM/PR の受信機は、降雨レーダの送信パルスの降雨エコーを受信するために設計されているので、受信機の所要帯域幅は、送信パルス(1.67 μ s)の逆数程度の約 0.78 MHz と狭い。このために、TRMM/PR の受信機は、マイクロ波放射計としては、不十分なものであるが、アンテナからは降雨からの散乱波のエコーと共に降雨からの放射雑音をも受信しているため、降雨エコーが漏れ込んで来ないと考えられるレンジビンの受信雑音レベルを測定することによって降雨からの放射雑音を捉えられる可能性がある。

具体例として、1999年9月13日に米国フロリダ半島東沖のカリブ海を通過したハリケーン Floyd を含む TRMM/PR の 1B21 データの雑音受信電力から降雨観測の可能性の検討結果を示す。図1に Floyd の中心付近の直下方向観測アングルビンにて観測されたレンジプロファイルの一例を示す。レンジビン番号 77 付近の鋭いピークは海面からの反射エコーであり、レンジビン番号 30~77 の信号が降雨からのエコーである。またレンジビ

ン番号 77~85 には海面反射による降雨エコーの鏡映が見られる。これ等のレーダエコー信号以外の部分は受信機内部雑音にアンテナにより受信された大気、降雨、海面からの放射雑音が重畳した受信雑音である。

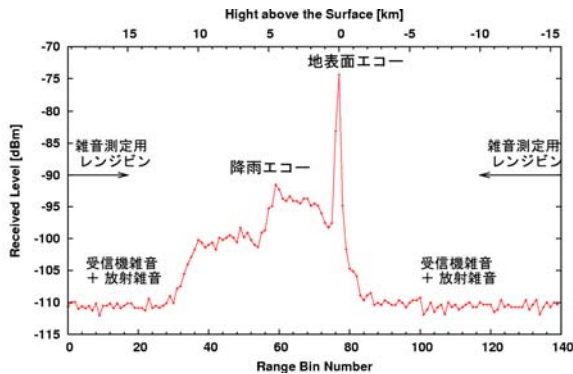


図 1： TRMM/PR によって観測された降雨の直下方向の受信電力レンジプロファイルの例

以下では海面反射エコーピークの前 60 レンジビン以前と後 40 レンジビン以降(図 1 の矢印の範囲) のレンジビンを降雨エコーの影響を受けていない範囲と考えこれらのレンジビンの受信電力の平均値を受信雑音電力と定義する。

図 2 はハリケーン Floyd の中心付近を通過した TRMM/PR のパスの走査範囲で観測されたデータから上記の方法で得られた平均受信雑音電力のパターンを地図上で示したものであり、ハリケーンの構造が明瞭に確認できる。

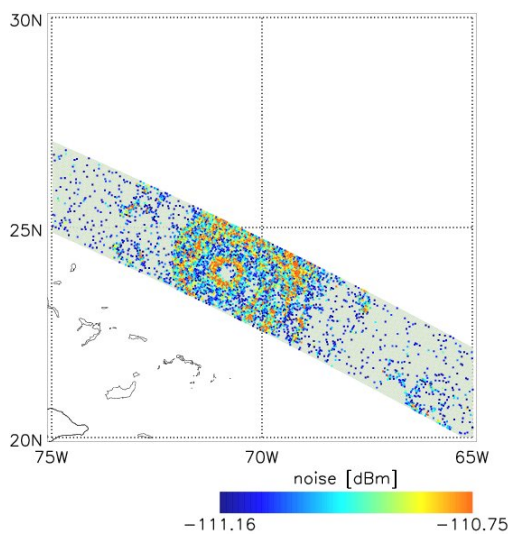


図 2： TRMM/PR 平均受信雑音電力パターン

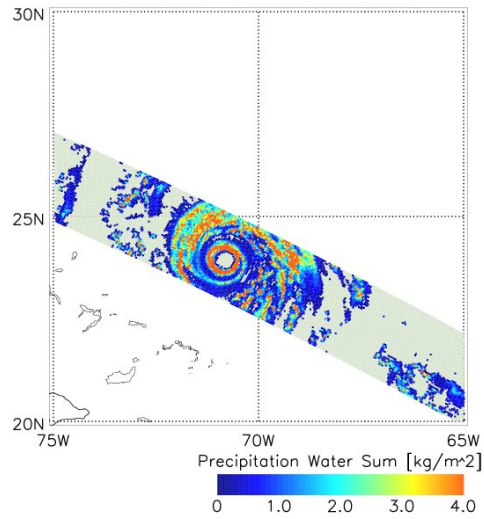


図 3： 雨滴粒子密度のレンジ方向の積算値のパターン

図 3 は、TRMM/PR 2A25 データの雨滴粒子密度のレンジ方向の積算値 (PWS: Precipitation Water Sum) である。両者には相関関係が観測され、平均受信雑音電力が空間の雨滴粒子からの放射雑音電力を反映していると考えられることができる。

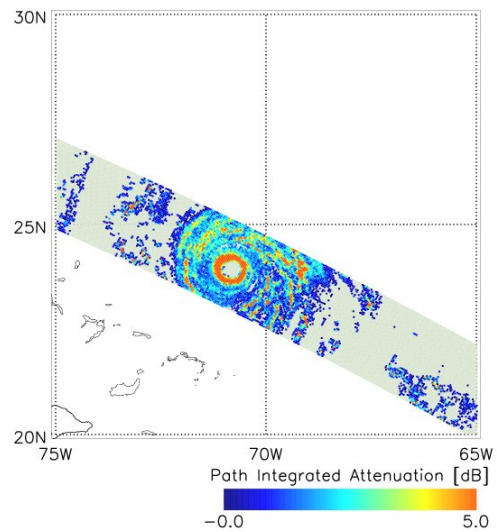


図 4： ハリケーン FLOYD 付近の PR で観測された経路積算減衰量 (PIA)

また、図 4 は、PR によって観測された経路積算減衰量 (PIA) を地図上で示したものである。図 2 と図 4 を比較すると、経路積算減衰量が大きい領域 (すなわち強降雨強度域) において、平均受信雑音電力が大きく、経路積算減衰量と良い相関があることを示している。

図5は図4に示したTRMM/PRのパスの直下方向観測時の平均受信雑音電力(PR Noise)と、PRによって観測された雨滴粒子密度のレンジ方向の積算値(PWS)、推定地表面降雨強度(E_SurfRain)、経路積分減衰量(PIA)の変動をTRMMの進行に伴う時間(Scan Number)の関数として時系列で示したものである。ハリケーンの強降雨強度域(Scan Number 5670-5800付近)で降雨強度の増大に対応して受信雑音電力が増大していることがわかる。

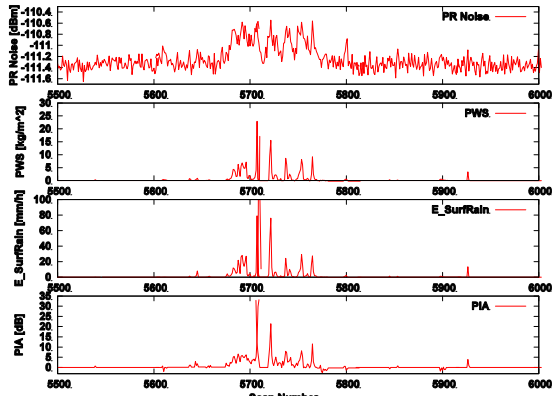


図5：Floydの直下方向で観測された平均受信雑音電力(PR Noise)、雨滴粒子密度のレンジ方向の積算値(PWS)、推定地表面降雨強度(E_Surf Rain)、経路積分減衰量(PIA)

図5に示したScan Number 5670-5800のデータのうち海面反射エコーの降雨減衰量に対応し経路積分減衰量(PIA)と平均受信雑音電力の関係を図6に示す。

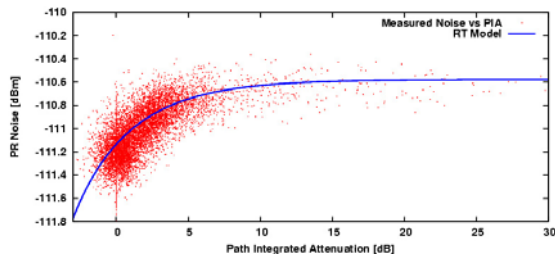


図6：FLOYDの観測された経路積分降雨減衰量(PIA)と平均受信雑音電力(PR Noise)の関係

この図より平均受信雑音電力の増加と経路積分降雨減衰量の良い相関があることが分かる。図中の曲線は、降雨の物理温度を高度によらず一定とした単純な放射伝達モデルを海面温度と降雨の温度を適当に仮定して当てはめたものである。実測値の放射伝達モデルからのばらつきの主要な原因はPR受信機の内部雑音である。実測値の放射伝達モデルからのばらつきの主要な原因はPR受信機の内部雑音である。

ハリケーンのような強降雨についてPRの受信電力雑音は経路積分降雨減衰量と良い相関があることが分かった、しかしながら既存のTRMM/PRなどのレーダでは受信機はレーダとして最適化されており降雨からの雑音放射を受信することは想定されていないため受信機雑音による大きなばらつきがある。このために、降雨レーダとマイクロ波放射計の複合システムを検討する必要がある。

(2) 衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムのシステムパラメータの決定。

図7に、衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システムのブロック図を示す。

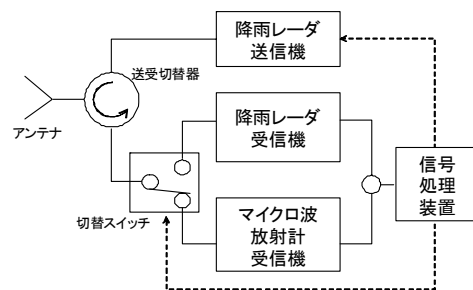


図7：衛星搭載降雨レーダ・マイクロ波放射計複合型降雨観測システム

降雨レーダの送信機からの送信パルスは、降水粒子によって散乱され降雨エコーとして降雨レーダ受信機で受信される。また降雨レーダの観測の空き時間を利用してマイクロ波放射計が降雨からの放射雑音を受信する。このとき、マイクロ波放射計の積分時間を確保すると共に、降雨レーダの送信パルス数に比例するレーダ受信独立サンプル数を確保する必要がある。このため、降雨レーダとマイクロ波放射計の観測タイミングを考慮しつつ、降雨レーダの送受信タイミングの空き時間を利用したマイクロ波放射計による降雨のほぼ同時観測を可能にする複合型降雨観測システムのパラメータを計算機シミュレーションなどによって決定し、同システムの概念設計を実施する。

降雨レーダとマイクロ波放射計の観測タイミングについて図8に示す。レーダが1つの送信パルスを打って、次の送信パルスを打つまでの時間の中でレーダの観測時間(融解層エコー、降雨エコー、地表面エコー)でない前後の時間帯には、マイクロ波放射計の観

測時間として活用することができる。この時間帯においては、非降雨時には受信機内部雑音と地表面放射が観測され、降雨時には受信機内部雑音と地表面放射に降雨から放射される雑音に加え合わさった雑音が受信される。マイクロ波放射計は、100MHz 程度の広帯域の雑音を受信できる高感度受信機であるが、感度よく降雨雑音を受信するには、広帯域と共に、十分の観測時間（積分時間）が必要になる。

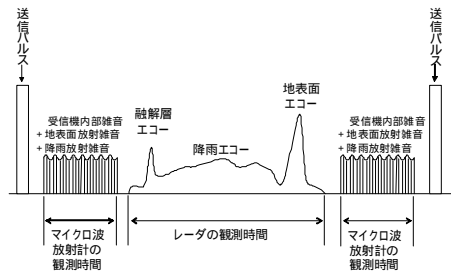


図 8：降雨レーダとマイクロ波放射計の降雨観測タイミング

①円錐走査型複合システム

衛星搭載の高速円錐走査型の複合システムでは、ADEOS-II 搭載のマイクロ波放射計 AMSR-E、あるいは TRMM 搭載のマイクロ波放射計 TMI のように、オフセットパラボラアンテナを円錐状に走査する。アンテナビームの走査においては、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反射鏡を天頂方向を軸として回転させることによって、衛星と衛星の直下点を結ぶ方向を軸とした円錐走査を行い、降雨領域を覆って行く。衛星高度としては、2013 年頃に打ち上げが予定されている GPM 衛星と同じ 407 km とする。このとき、衛星地上軌跡の移動速度は、7.205 km/s となる。複合システムの中心周波数は、GPM の降雨レーダと同じ 13.6 GHz とした。アンテナ開口径 1.0 m、走査角（円錐の頂角） 11° とした。このとき、アンテナ利得 42.2 dB、ビーム幅 1.46° 、フットプリントの長径 10.76 km、フットプリントの短径 10.57 km、走査幅 169 km、走査周期 1.49 s となる。

降雨レーダのパラメータとしては、送信パルス幅 $\tau=1.67 \mu\text{s}$ 、システム損失 $L=2.4 \text{ dB}$ 、最小受信電力 $S_{\text{min}}=-112.05 \text{ dBm}$ を用いた。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 のブライトバンドを仮定した。レーダ方程式を用いて、雨域の頂で降雨強度 1.0 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 $k(\text{dB}/\text{km})$ と

降雨強度 $R(\text{mm}/\text{h})$ の関係は、それぞれ $Z_e=234R^{1.59}$ 、減衰係数 $k=0.0237R^{1.17}$ を用いた。また、独立サンプル数 64 以上を確保するため必要な最小の PRF を選択すると共に、二周波アジリティを採用している。このとき、 $\text{PRF}=1289 \text{ Hz}$ 、一つのフットプリントを打つパルス数 40、独立サンプル数 80 となる。さらに、レーダ電波の伝搬遅延による送受信フットプリントのずれの影響を示すビーム重なり率の補正を行っている。ビーム重なり率は、0.89 となり、所要の送信ピーク電力は、1205 W となる。

マイクロ波放射計は、降雨レーダの送受信の隙間を縫って観測時間を確保するようにシステム設計を行うと、 $\text{PRF}=1289 \text{ Hz}$ のとき、PRF の逆数の 1 IPP (Inter Pulse Period) の時間間隔の間に送受切り替えマージンとしてレーダエコーの両側に $282.8 \mu\text{s} \times 2$ の時間を確保することができることになる。実際のマージンは、 $10 \mu\text{s}$ 程度で十分であるので、一つのフットプリント方向を観測するマイクロ波放射計の観測時間（積分時間）は、 $(282.8 - 10) \mu\text{s} \times 2 \times 40 = 21.82 \text{ ms}$ となる。マイクロ波放射計のシステム雑音温度を 290 K、またアンテナ温度を 290 K、受信帯域幅を 100 MHz と仮定すれば、マイクロ波放射計の最小受信感度は、受信機の利得変動を除けば、0.39 K となる。ここで全電力型放射計を仮定している。この結果、マイクロ波放射計で 1 K 以下の受信感度、降雨レーダで 64 以上の独立サンプル数を確保することのできる複合型システムが実現できるものと考えられる。

ただし、降雨レーダの降雨観測性能を向上させるために、アンテナ開口径 1.6 m、走査角（円錐の頂角） 17° とすると、独立サンプル数 64 以上を確保するため必要な最小の PRF は、4126 Hz、一つのフットプリントを打つパルス数 35、独立サンプル数 70 となる。このとき、一つのフットプリント方向を観測するマイクロ波放射計の観測時間（積分時間）は 0.25 ms しか確保できず、マイクロ波放射計の最小受信感度は、3.7 K となり、1 K 以下の受信感度を達成することはできなくなり、降雨レーダの要求条件とマイクロ波放射計の要求条件を共に満たす複合システムは実現できなくなる。これは、円錐走査で一回転するために、一つのフットプリント方向を観測する観測時間が短くなってしまふからであり、TRMM 並みの降雨レーダの観測性能を実現するためには、次に述べる往復走査の方が有利になってくる。

②往復走査型複合システム

TRMM 衛星搭載降雨レーダは、電子的にアンテナビームを走査する 128 素子からなるアクティブフェーズドアレー方式を採用してい

る。このために、128本の導波管スロットアンテナと128素子の送受信機から構成される同レーダを拡張しマイクロ波放射計と組み合わせた複合システムを形成することは、ほぼ不可能になっている。機械的な往復走査においては、衛星姿勢に対するインパクトがあるため、オフセットパラボラアンテナの主反射鏡を回転させるよりも副反射鏡を回転させるなどの工夫を検討する必要があるが、往復走査は、直下点方向を指向でき鉛直分解能の優れたデータが取得できること、一回転する円錐走査に比べて一つのフットプリントを観測する時間を長くとることができるなどの長所があるため機械的な走査についても検討を実施した。ただし、TRMM降雨レーダの降雨観測性能を維持するために、ベースとしては、TRMM降雨レーダを機械的に走査するものと仮定して複合システムのシステムパラメータを決定した。

衛星高度としては、1997年に打ち上げられたTRMM衛星と同じ350 kmとした。このとき、衛星地上軌跡の移動速度は、7.297 km/sとなる。複合システムの中心周波数、アンテナ開口径、走査角は、TRMM降雨レーダと同じ13.8 GHz、2.2 m、 $\pm 17.04^\circ$ とした。このとき、アンテナ利得47.7 dB、ビーム幅 0.71° 、直下点方向のフットプリントの大きさは、4.3 km \times 4.3 km、走査幅215 km、走査周期0.589 sとなる。

降雨レーダのパラメータとしては、送信パルス幅 $\tau = 1.67 \mu\text{s}$ 、システム損失 $L = 3.5 \text{ dB}$ 、最小受信電力 $S_{\min} = -112.6 \text{ dBm}$ を用いた。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 $k (\text{dB}/\text{km})$ と降雨強度 $R (\text{mm}/\text{h})$ の関係は、それぞれ $Z_e = 372R^{1.54}$ 、減衰係数 $k = 0.032R^{1.124}$ を用いた。また、独立サンプル数64以上を確保するため必要な最小のPRFを選択すると共に、二周波アジリティを採用している。このとき、 $\text{PRF} = 2773 \text{ Hz}$ 、一つのフットプリントを打つパルス数34、独立サンプル数68となる。さらに、レーダ電波の伝搬遅延による送受信フットプリントのずれの影響を示すビーム重なり率の補正を行っている。ビーム重なり率は、0.76となり、所要の送信ピーク電力は、754 Wとなる。

マイクロ波放射計は、降雨レーダの送受信の隙間を縫って観測時間を確保するようにシステム設計を行うと、 $\text{PRF} = 2773 \text{ Hz}$ のとき、PRFの逆数の1 IPP (Inter Pulse Period)の時間間隔の間に走査角度が $0^\circ \sim 17.04^\circ$ の間変化する間にマイクロ波放射計の観測時間(積分時間)として、5.40 ms \sim 4.63 msを確

保することができることになる。マイクロ波放射計のシステム雑音温度を290 K、またアンテナ温度を290 K、受信帯域幅を100 MHzと仮定すれば、マイクロ波放射計の最小受信感度は、受信機の利得変動を除けば、0.79 K \sim 0.85 Kとなる。ここで全電力型放射計を仮定している。この結果、走査角の全域の $\pm 17.04^\circ$ で、マイクロ波放射計で1 K以下の受信感度、降雨レーダで64以上の独立サンプル数を確保することのできる往復走査の複合型システムが実現できるものと考えられる。

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2件)

- ①宮本亘、重尚一、真鍋武嗣(大阪府大)、岡本謙一(鳥取環境大)、“TRMM/PRの受信雑音による降雨観測の可能性の検討”、平成20年電気関係学会関西支部連合大会、平成20年11月8日
- ②真鍋武嗣、宮本亘(大阪府大)、岡本謙一(鳥取環境大)、重尚一、木田智史(大阪府大)、“レーダ/放射計複合型降雨観測システムに関する基礎検討”、2009年電子情報通信学会総合大会、平成21年3月19日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡本謙一 (OKAMOTO KEN' ICHI)
鳥取環境大学・環境情報学部・教授
研究者番号：90326273

(2) 研究分担者

重尚一 (SHIGE SHOICHI)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号：60344264

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

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