

# 次世代の衛星搭載降雨レーダのシステム設計 System Design of the Next Generation Spaceborne Precipitation Radar

渡邊 圭太<sup>†</sup> 岡本 謙一<sup>†</sup> 重 尚一<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪府立大学 大学院 工学研究科 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1番1号

E-mail: <sup>†</sup>{k-watanabe, okamoto, shige}@aero.osakafu-u.ac.jp

あらまし 1997年に打ち上げられたTRMM(熱帯降雨観測衛星)搭載降雨レーダは、世界初の宇宙からの降雨レーダ(PR)として、現在に至るまで降雨の3次元観測を行っている。その成果は、2013年頃実現予定のGPM(全球降水観測計画)衛星搭載2周波降水レーダ(GPM/DPR)へと引き継がれようとしている。しかし降雨レーダの欠点である観測幅の狭さは、GPM/DPRにおいても改善されず狭いままに留まっている。本研究ではその欠点を改善するため、アンテナ走査角の拡大に伴い降雨観測にどのような影響が生じるのか、TRMM降雨レーダで観測した降雨データを用いたシミュレーションによって解析し、アンテナ走査角を拡大できる可能性を示した。

キーワード TRMM, 降雨レーダ, GPM, アンテナ走査角

## 1. はじめに

熱帯降雨観測衛星TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)は、地球的規模の気候変動に大きな影響を及ぼす熱帯および亜熱帯の降雨分布を観測する目的の衛星であり、日米共同で開発された。同衛星は1997年11月28日に打ち上げられ、その観測データの重要性から当初の3年の設計寿命を延長し、現在も観測を続けている。TRMMには、世界初の衛星搭載用の降雨レーダ(PR: Precipitation Radar), TRMMマイクロ波観測装置(TMI: TRMM Microwave Imager), 可視赤外観測装置(VIRS: Visible Infrared Scanner), 雲及び地球放射エネルギー観測装置(CERES: Clouds and the Earth's Radiant Energy System), 雷観測装置(LIS: Lightning Imaging Sensor)の5種類のセンサが搭載されている[1]。

従来、衛星から直接降雨観測が可能なセンサはマイクロ波観測装置であったが、鉛直方向の降雨強度分布の測定が困難であること、また陸上における降雨の定量的観測に問題がある、という弱点を抱えている。本研究で利用したPRは、上記2点の問題点を改善できるセンサであり、降雨の3次元構造の観測、海陸を問わない降水の高精度観測を可能としている。しかし、PRはアンテナ走査角の増加と共に鉛直分解能が急激に劣化すること、及びアンテナサイドローブから混入するグラウンドクラッタの影響を受けるために、その観測幅は215kmに過ぎず、マイクロ波観測装置の観測幅が760kmであるのに対して非常に狭いという問題点がある[2]。観測幅が狭いため、PRデータは、実用的な天気予報には利用できず、また台風のような大型の気象システムの全貌を一挙に捉えることが出来ない。しかし、TRMMの後継として2013年頃に打ち上げ予定の全球降水観測計画GPM(Global Precipitation

Measurement)衛星搭載の2周波降水レーダにおいても、観測幅は狭いままに留まっている。

従って本研究では、GPM以降の次世代の衛星搭載降雨レーダの観測幅を増大させるために、アンテナ走査角の拡大に伴い、降雨観測において生じる影響の評価を行った。その結果、アンテナ走査角を拡大できる可能性を示した。

## 2. TRMM搭載降雨レーダ(PR)

### 2.1. TRMM搭載降雨レーダ(PR)の概要

降雨レーダはパルス状の電波を発射して、降雨からの散乱によって戻ってくる電波を受信する能動型センサであり、その受信電力から降雨強度を推定している。降雨強度の鉛直分布は降雨レーダ以外の方法では直接的に求めることは出来ない。図1にTRMMによる降雨観測の概観図を示す。

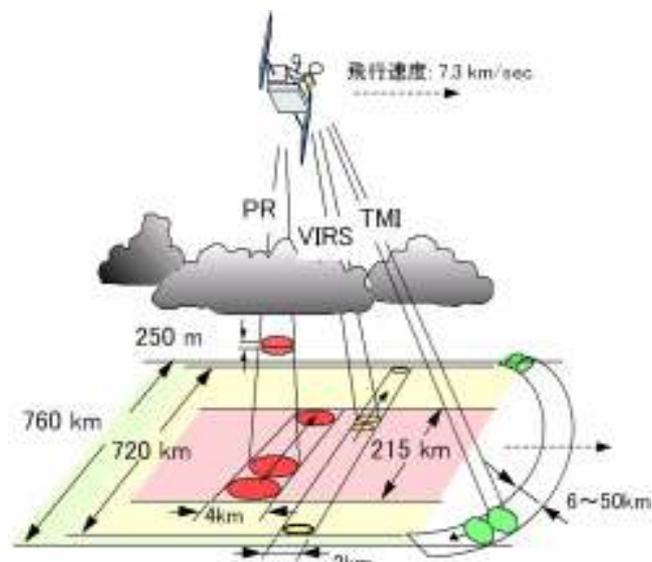


図1: TRMMによる降雨観測の概観図[2]

降雨レーダは 13.8GHz を中心周波数として用いている。この周波数は TRMM レーダ設計時に、衛星搭載の地球観測用のレーダのために使用を許可されていた周波数である。同周波数は降雨減衰の影響が比較的小さく、アンテナ開口径が大きくなり過ぎない妥当な周波数と言える。実際には 13.796GHz と 13.802GHz の 6MHz 離れた 2 つの周波数を用いている。これは、それぞれの周波数の送信パルスに対する受信信号を互いに独立なものともみなすことができ、1 つの周波数しか用いない場合の 2 倍の独立サンプル数を確保できるからである。これにより、1 つのアンテナビーム方向(アンテナビーム幅単位の指向方向)をヒットする独立サンプル数を 64 個確保できる。

図 1 に示すように、アンテナビームは鉛直下方向を中心にして衛星の進行方向に直行する平面内を往復する走査方式となっている。アンテナビームが走査範囲を隙間なく走査するには、衛星が 4.3km の水平分解能の距離を移動する時間(約 0.6 秒)に、 $\pm 17^\circ$  の範囲を走査する必要があり、この様に高速にアンテナビームを走査するために PR では電子走査を行うフェーズドアレイアンテナを採用している[2]。電子走査とは、アンテナを多数の素子に分割し移相器によってそれぞれの励振位相を変化させ、アンテナビームの指向する方向を電子的に制御する技術を用いた走査方法である。

## 2. 2. TRMM 搭載降雨レーダの問題点

図 2 に示すように、PR は降雨観測において、アンテナビーム幅とパルス幅で囲まれる斜線部の降雨散乱体積中の雨滴からの散乱電力を受信し、その大きさから降雨強度を推定する。アンテナ走査角が小さい時は、降雨散乱体積 A は降雨で充満しており、メインローブの降雨散乱体積中にアンテナサイドローブ領域の地表面エコー(グラウンドクラッタ)が混入することはなく、また観測体積の垂直分解能  $\Delta h_A$  も小さい値をとる。しかし、観測幅を増やすためにアンテナ走査角を大きく取ると、降雨散乱体積 B は降雨で充満しなくなり、またアンテナサイドローブ領域からのグラウンドクラッタが混入してくる。さらに観測体積の垂直分解能  $\Delta h_B$  も大きな値をとるようになる。これらの悪影響を避けるために、TRMM 及び GPM 搭載降雨レーダの走査幅は約  $\pm 17^\circ$  と小さな範囲に限定されている。

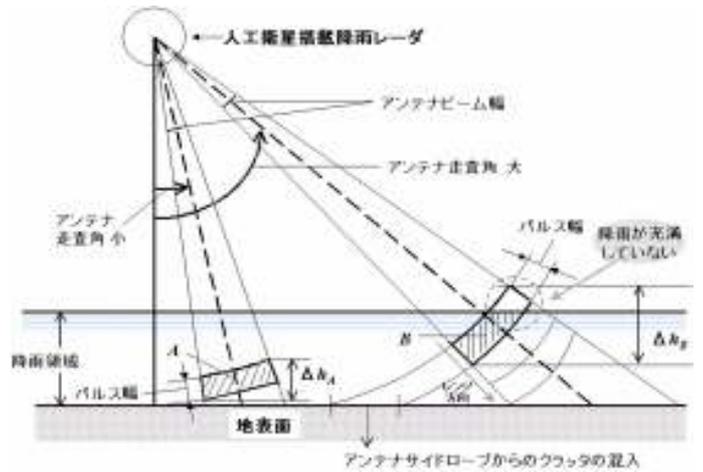


図 2 : 衛星搭載降雨レーダによる降雨観測の問題点

## 3. 降雨レーダパラメータの決定

TRMM の降雨レーダパラメータを表 1 に示す。

表 1 : TRMM/PR の各パラメータ

Frequency	13.8GHz
Satellite altitude	350km
Scan angle	$\pm 17.0^\circ$
Range resolution	250m
Minimum measurable rainfall rate	0.5mm/h at storm top
Number of independent samples	64
Antenna gain at nadir	47.4dB
Antenna beam width at nadir	$0.71^\circ$
Peak transmit power	708W

TRMM/PR の走査角は  $17^\circ$  であるが、本研究では走査角  $40^\circ$  まで拡大させた場合の解析を行う。走査角拡大によって変化する降雨レーダパラメータについて 3.1 で送信ピーク電力、3.2 でアンテナパターンについて説明する。また、3.3 では降雨レーダが感知できる最小の受信電力について述べる。

### 3. 1. 送信ピーク電力

TRMM/PR に要求される降雨受信感度は、降雨の頂で 0.5mm/h の降雨が観測できることである。これを達成するためにレーダ方程式に基づいて送信ピーク電力を求める必要がある。降雨モデルとして、高さ 5km の一様降雨強度の降雨の層の上に、厚さ 0.5km のブライトバンドを仮定している。このモデルを用いて、最大走査角  $40^\circ$  において降雨の頂で、単一パルスに対して  $S/N=0\text{dB}$  の条件で 0.5mm/h の降雨を観測するのに必要な送信ピーク電力  $P_t$  を計算する。アンテナビーム方向が直下点より  $\theta$  方向を指向するときの距離  $r$  での受信電力はレーダ方程式により、

$$P_r = \frac{P_t G_0^2 \theta_B \phi_B (c\tau) \pi^3}{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z_e \exp\left(-0.2 \int_0^r k(s) ds \cdot \ln 10\right)$$

$$= \frac{P_t G_0^2 \theta_0^2 \cos \theta (c\tau) \pi^3}{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z_e \exp \left( -0.2 \int_0^r k(s) ds \cdot \ln 10 \right) \quad (1)$$

で与えられる．ここで(1)式は Gauss 型のアンテナパターンを仮定している．またアンテナ走査角  $\theta$  により，アンテナ利得やビーム幅が変化する効果を考慮している．衛星直下方向のビーム幅  $\theta_0 = 0.71^\circ$ ，衛星進行方向のビーム幅を  $\theta_B$  ( $\theta_B = \theta_0$ )，アンテナ走査方向のビーム幅を  $\phi_B$  ( $\phi_B = \theta_0 / \cos \theta$ )，衛星直下方向のアンテナ利得  $G_0 = 47.4\text{dB}$ ，ビーム指向方向のアンテナ利得  $G_0'$  ( $G_0' = G_0 \cos \theta$ )，パルス幅  $\tau = 1.67 \mu\text{s}$ ，光速度  $C$ ，全システム損失  $L = 3.5\text{dB}$ ，波長  $\lambda = 0.0217\text{m}$ ， $|(\epsilon - 1)/(\epsilon + 2)|^2 = 0.9255$ ，衛星から観測点までの距離  $r = (350 - 15) / \cos 40^\circ = 437.31\text{km}$  である．

$S/N=0$  の条件から，(1)式に代入する受信電力の値は，最小受信電力となる．ここで最小受信電力  $S_{\min}$  は受信機の雑音指数  $N_F = 2.5\text{dB}$ ，ボルツマン定数  $k_B$ ，受信機の所要帯域幅  $B = 0.78\text{MHz}$ ， $T = 290\text{(K)}$  を用いて

$$S_{\min} = N_F k_B T B \quad (2)$$

で与えられる．これを計算すると  $-112.6\text{dBm}$  となる．

レーダ反射因子  $Z(\text{mm}^6/\text{m}^3)$  および減衰係数  $k(\text{dB/km})$  と降雨強度  $R(\text{mm/h})$  との関係は Marshall Palmer による

$$Z = 234R^{1.59} \quad (3)$$

$$k = 0.0237R^{1.17} \quad (4)$$

の関係を用いている[3]．ブライトバンドの減衰係数は，妥当な近似として，その下に存在する降雨の減衰係数の2倍を仮定している．これより  $R = 0.5\text{mm/h}$  のときの  $Z, k$  を求めている．

以上より，送信ピーク電力  $P_t$  を計算すると  $2142.83\text{W}$  となる．

### 3.2. アンテナパターン

TRMM/PR では，平面フェーズドアレイアンテナが使用され，サイドローブクラッタの影響を最小限に抑えるため，アンテナ面上の励磁電流分布はサイドローブレベル  $-35\text{dB}$ ， $\bar{n} = 6$  のテイラー分布に従うものとなっている[4]．アンテナパターンの計算では，励磁電流に含まれる誤差として，表2に示されるように，送受信機での振幅誤差と位相誤差が各々ランダム誤差として計算に含まれる．また，移相器で位相が  $5\text{bit}$  で量子化され，送受信機で振幅が  $1\text{dB}$  で量子化されていることを考慮する．

表2：アンテナパターンの計算条件

Antenna Size	2.1m*2.1m
Half power beam width	$0.71^\circ$
Number of waveguides	162
Interval between waveguides	13mm
Number of slot per waveguide	154
Interval between slot	13.65mm
Maximum main beam scanning angle	$40^\circ$
Taylor distribution	
Peak sidelobe level	$-35\text{dB}$
$\bar{n}$	6
Quantization level	
Amplitude	1.0dB
Phase	5bit
Random error	
Amplitude error	0.5dB
Phase error	$5^\circ$

走査角  $40^\circ$  までグレーティングローブが発生しない条件を満たす素子間隔として  $13\text{mm}$  を選んだ．また，ビーム幅  $0.71^\circ$  を満たすために必要な開口径から，導波管本数は  $162$  本とした．その他の諸元は TRMM/PR と同様である．計算結果の一例として，走査角  $20^\circ$  の場合について図3に示す．

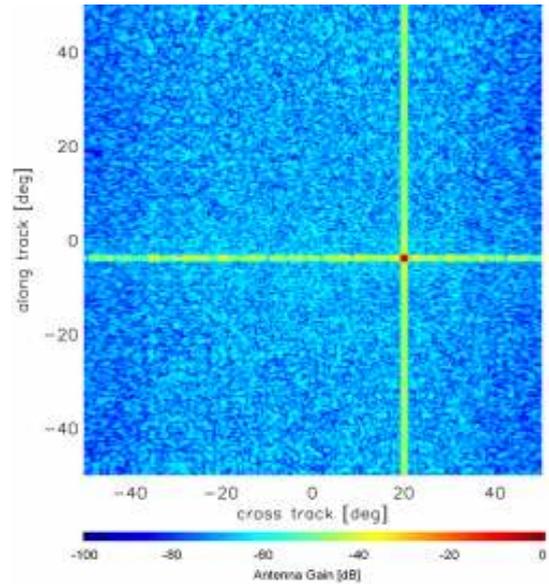


図3：アンテナパターン計算結果（走査角  $20^\circ$ ）

TRMM/PR では，広帯域化のために非共振型の導波管スロットアンテナが使用され，アンテナビームは導波管の管軸に垂直ではなく，図3のように管軸方向に約  $4^\circ$  傾くことになる．TRMM/PR ではこの傾きを補正するためにアンテナを機械的に傾けて取り付け，ビーム中心が衛星直下面内を掃引するようにしている．従って，シミュレーションにおいても，ビーム中心が衛星直下を向くように補正している．

### 3.3. 等価 S/N について

雑音および受信電力の独立サンプルの平均回数を  $M$ ， $N$  とおくと，等価  $S/N$  ( $Y_e$ ) は  $S/N$  ( $Y$ ) を用いて

$$Y_e = \frac{Y\sqrt{N}}{c_T\sqrt{(Y+1)^2 + (N/M)}} \quad , \quad c_T = \pi/\sqrt{6} \quad (5)$$

と表される[5].  $c_T$  は検波方式に依存する係数であり, 対数検波方式では(5)式ようになる.  $M=256$ ,  $N=64$  であるから  $S/N=0$  のときの等価  $S/N$  は(5)式より約 4.8dB となる. すなわち, 単一パルスの場合より, 64 個の独立サンプルを平均する場合の方が 4.8dB だけ感度が上がる. よって本シミュレーションでは, 検出可能な降雨の受信電力を求めるとき, (3)式の  $S_{min}$  から 4.8dB 下げた最小受信電力の値を用いる.

## 4. シミュレーション手法

### 4.1. シミュレーションの全体構成

シミュレーションの全体構成を図 4 に示す. TRMM により実際に観測されたレーダ反射因子  $Z_e$  を真値の降雨データとして, これより降雨による受信電力  $P_r$  を算出する. また海面の散乱係数よりクラッタによる受信電力  $P_s$  を算出する. 降雨とクラッタの受信電力を合計した  $P_r+P_s$  が観測によって得られる受信電力  $P$  となる. ここで, レーダは最小受信電力未満の電力を検出できないため,  $P$  が最小受信電力未満であれば降雨なしと判断し, 最小受信電力以上であれば  $P$  を用いてレーダ反射因子  $Z_m$  を求める. この  $Z_m$  は降雨減衰を含んだ値なので, 減衰補正を施し, 減衰の影響のないレーダ反射因子  $Z_e$  を求める. この観測値  $Z_e$  と真値とのずれの程度を評価するため, 両者の相関係数を算出する. その結果, 相関が良ければ, アンテナ走査角を大きくしても高精度な観測が出来ると言える.

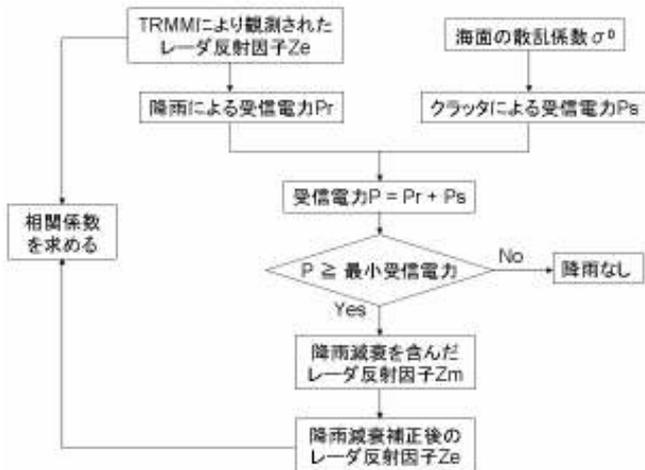


図 4 : シミュレーションの全体構成

観測シミュレーションの概念図を図 5 に示す. ある観測データ (V) を観測する場合, 図 5 の斜線部分で示される観測体積中の降雨データを積分することで, 降雨による受信電力  $P_r$  を計算する. このとき, ビーム中心は (V) の中心を通るとする. 計算式は 5.1 節の(9)式に示す. ここで, (V) の周囲に存在する降雨データ

が積分に含まれるため, 真値とのずれが生じることとなる.

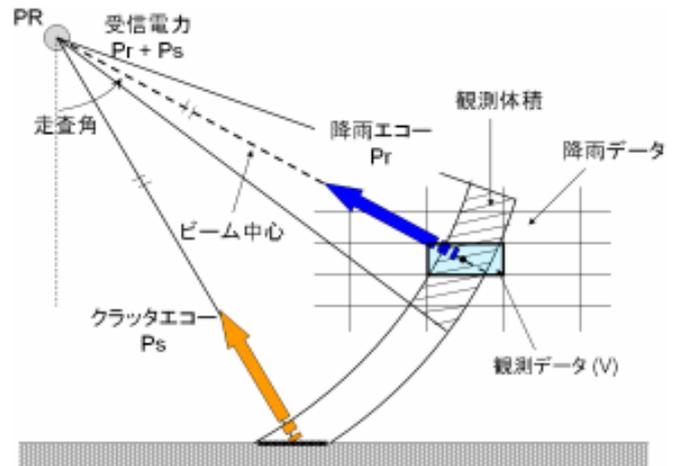


図 5 : シミュレーションの概念図 (アンテナ走査面)

### 4.2. シミュレーションに用いる降雨データ

TRMM の観測データを真値とする. 用いるデータは降雨減衰補正後のレーダ反射因子  $Z_e$  である. 図 6 に示すように, TRMM データから衛星進行方向に十分長いデータを取り出す. このデータに対して, 高度 350km から降雨観測シミュレーションを行う. ここで広走査角でのシミュレーションを実現するため, 実際のアンテナ走査方向ではなく, データの距離の長い方向に走査を行う. すなわち図 6 における AB 方向に走査を行い, 右図の斜線部分が走査面となる.

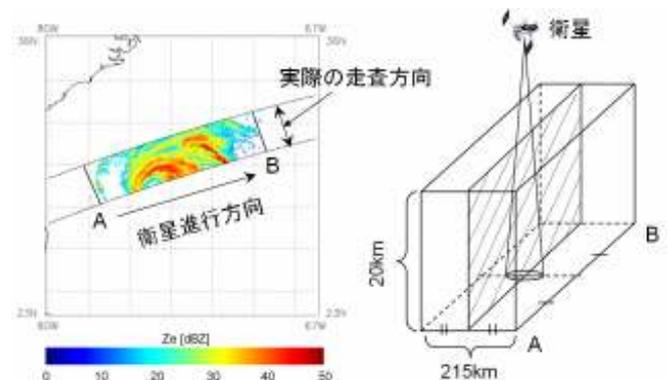


図 6 : アンテナ走査面

### 4.3. 海面の散乱係数データ

図 4 に示すように, 降雨観測体積と同一の距離にある地表面からの散乱電力がグラウンドクラッタとしてアンテナサイドローブ領域で受信されることになる.

海面の散乱係数を用いてクラッタによる受信電力  $P_s$  を算出する. この計算には, Wentz らが Seasat の観測データを用いて作成した 14.6GHz の海面の散乱係数データを利用した[6]. 計算条件として, 風向, 風速を与える必要があるが, 風向には最悪値を取る向かい風方向を用い, 風速には海上平均風速として 8.14m/s を用いた. 海上平均風速は QSCAT/SeaWinds のデータよ

り算出した[7]. 求めた海面の散乱係数データを図7に示す.

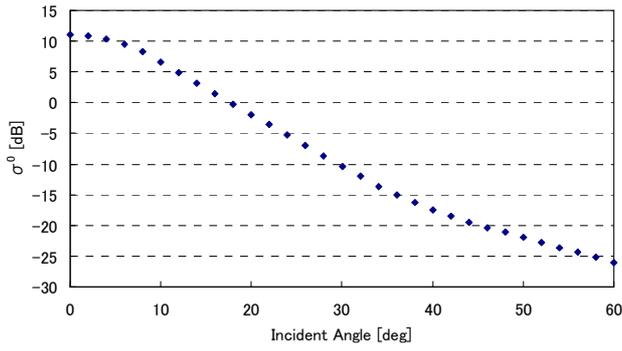


図7: 海面の散乱係数

## 5. レーダ反射因子 $Z_e$ の計算

### 5.1. 受信電力の計算

受信電力の算出にはレーダ方程式を用いた[8]. まず, 降雨による受信電力  $P_r$  は

$$P_r = \iiint_v \frac{P_t G^2(\theta, \phi) \lambda^2}{64\pi^3 r^4 L} (\sum \sigma(\theta, \phi)) dV \quad (6)$$

で与えられる. ここで,  $P_t$  は送信ピーク電力,  $\theta$  はビーム中心方向からの角度,  $\phi$  はビーム中心方向を軸とした方位角,  $G(\theta, \phi)$  はアンテナ利得,  $\lambda$  は波長,  $r$  はレーダから降雨散乱体積の中心までの距離,  $\sum \sigma$  は単位体積あたりの降雨散乱断面積,  $L$  は全システム損失である. また, 水の複素誘電率の値を  $\epsilon$ , 等価レーダ反射因子を  $Z_e$  とすると,

$$(\sum \sigma) = \pi^5 \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 \frac{1}{\lambda^4} Z_e \quad (7)$$

とおける. これより,

$$P_r = \iiint_v \frac{P_t G^2(\theta, \phi) \pi^2}{64\lambda^2 r^4 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z_e(\theta, \phi) dV \quad (8)$$

となる. 真値とした降雨データから, 降雨散乱体積中に含まれる  $Z_e$  を取り出し, アンテナパターンの重み付けを行い積分している. ここで, 実際に降雨を観測する場合, 途中の降雨によって減衰を受けるので(8)式は

$$P_r = \iiint_v \frac{P_t G^2(\theta, \phi) \pi^2}{64\lambda^2 r^4 L} \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2 Z_e(\theta, \phi) dV \times \exp\left(-0.2 \int_0^r k(s) ds \cdot \ln 10\right) \quad (9)$$

と書ける.  $k$ (dB/km) は減衰係数である. ここで減衰項((9)式2段目)の計算でレーダから降雨散乱体積中心までの積分経路上の減衰係数の値が必要になる. 今, 真値として用いているデータはレーダ反射因子  $Z$  であ

るから,  $k$ - $Z$  関係を用いて減衰係数を求める. (1)(2)式より

$$k = 0.000428Z^{0.736} \quad (10)$$

となる. これを用いて減衰項を計算する.

クラッタによる受信電力  $P_s$  は

$$P_s = \iint_A \frac{P_t G^2(\zeta, \chi) \lambda^2 \sigma^0(\zeta)}{64\pi^3 r^4 L} dA \quad (11)$$

で与えられる. ここでは最悪値(クラッタの影響が最も大きい場合)を考慮して, クラッタについては降雨減衰の影響を考慮していない.  $\zeta$  は海面に対する入射角,  $\chi$  は方位角,  $\sigma^0$  は海面の散乱係数である. (11)式を用いてクラッタ発生領域において積分を行う. このときの  $\sigma^0$  には, 図7の海面の散乱係数データを用いる. 各座標設定を図8に示す.

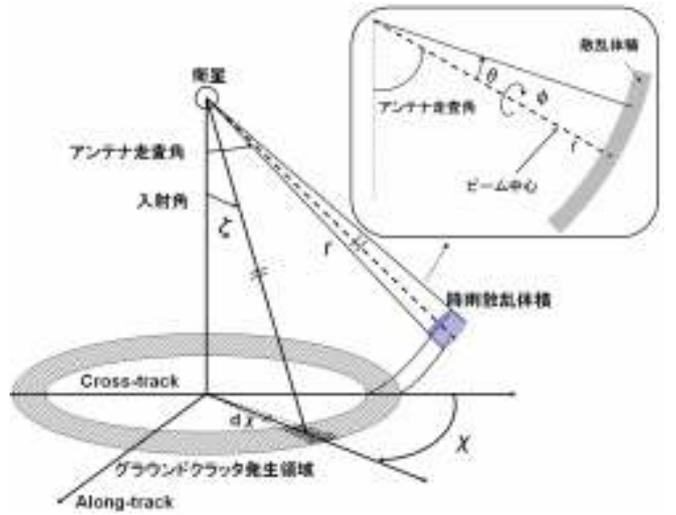


図8: 各パラメータの座標設定

$P_r$  と  $P_s$  を足し合わせた受信電力  $P$  から(12)式を用いてレーダ反射因子  $Z_m$  を求める.

$$Z_m = \frac{2^{10} (\ln 2) \lambda^2 r^2 L P}{P_t G_0^2 \theta_0^2 \cos \theta (c\tau) \pi^3 \left| \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2} \right|^2} \quad (12)$$

### 5.2. 減衰補正

次に減衰の無いレーダ反射因子  $Z_e$  を求めるため, 減衰補正を行う必要がある. 減衰補正には Hitchfeld Bordan の解を用いる.  $k$  と  $Z$  の関係を

$$k = \alpha Z^\beta \quad (13)$$

と仮定し

$$Z_m(r) = Z_e(r) \times \exp\left[-0.2 \int_0^r \alpha Z_e^\beta(s) ds \times \ln 10\right] \quad (14)$$

を微分方程式に変換し,  $r=0$  のとき  $Z_e(0)=Z_m(0)$  の境界条件を与えて解くと

$$Z_e(r) = \frac{Z_m(r)}{\left[1 - 0.2 \ln 10 \times \beta \int_0^r \alpha Z_m^\beta(s) ds\right]^{\frac{1}{\beta}}} \quad (15)$$

となる。(15)式を Hitchfeld Bordan の解という。(15)式にレーダ反射因子  $Z_m$  を代入して計算すれば、 $Z_e$  を算出できる。

## 6. 解析結果

TRMM/PR の観測値より作成した、アンテナ走査面内の真値のレーダ反射因子を図 9 に示す。これを高度 350km から観測した結果が図 10 となる。

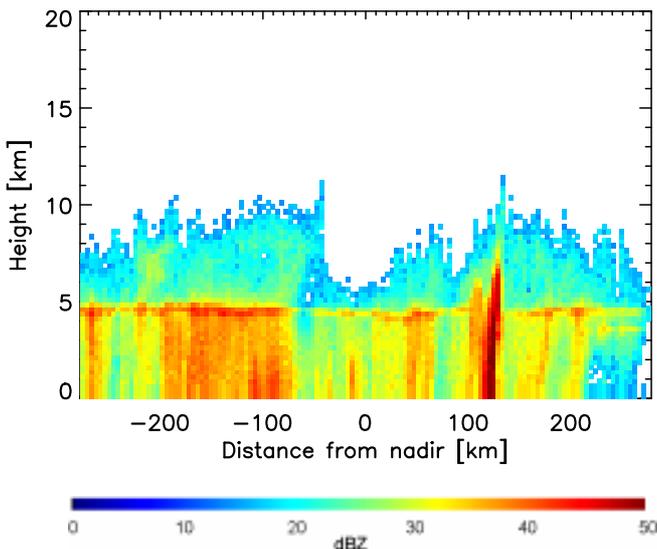


図 9：真値のレーダ反射因子 (アンテナ走査面)

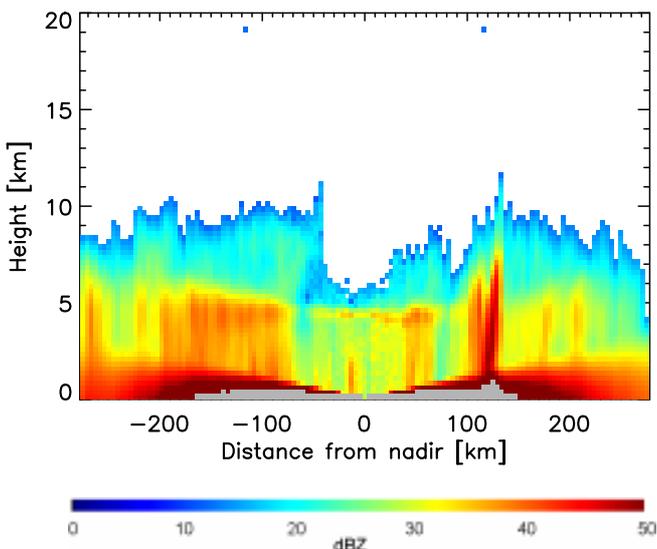


図 10：観測値のレーダ反射因子

クラッタの評価には S/C (Signal to Clutter Ratio ; Pr/Ps) を用い、Pr を最小受信電力の値とする。この S/C が 10dB 以下 (クラッタが最小受信電力に対して 10% 以上) の領域をクラッタの干渉が大きい領域として、

真値と観測値との相関係数を計算する際に省いている。

また図 9 の真値の降雨に対して、衛星の位置を移動させて同様のシミュレーションを行い、相関係数を計算するデータ数を増やした。算出した相関係数を図 11 に示す。

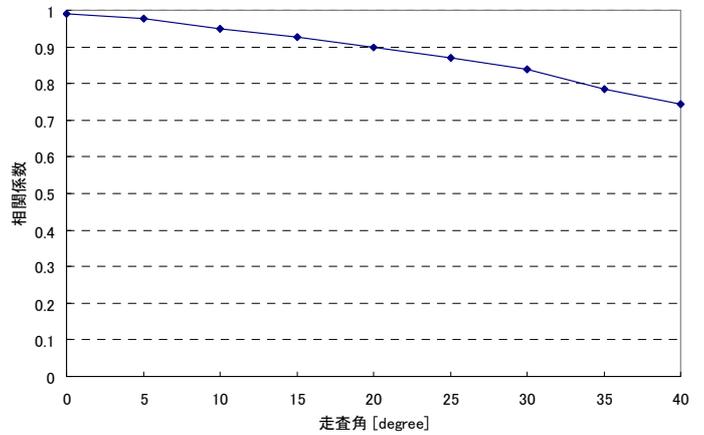


図 11：走査角と相関係数との関係

これより走査角が大きくなるに従ってクラッタ領域が高高度にまで及ぶものの、走査角を 17° より広げても観測精度の劣化はそれほど見られないことが分かった。

## 7. まとめ

TRMM/PR の設計段階において、走査角が大きい場合、低高度から高高度までの様々な降雨が同一の観測体積中に含まれてしまうこと、またクラッタの影響があることから、正確な観測が出来ないと考えられた。よって走査角は 17° までとなった。しかし本研究により、そのような影響を考慮した上で降雨観測を行った場合、走査角を大きくとっても高精度な観測が出来ることが分かった。従って走査角を広げることは可能であると言える。

今後は様々な降雨データに対して同様の解析を行い、シミュレーションデータを増やす予定である。また技術的にも実現可能な広走査角の降雨レーダの設計を行う予定である。

## 文 献

- [1] 岡本謙一, “リモートセンシングによる宇宙からの降雨観測”, 日本地球惑星科学連合ニュースレター, Vol.2, No.3, 2006.
- [2] 古津年章, 黒岩博司, “TRMM 搭載降雨レーダ”, 日本リモートセンシング学会誌, Vol.18, No.5, pp.28-39, 1998.
- [3] Marshall, J.S. and W.M. Palmer, “The distribution of raindrops with size”, J. Meteorol., 5, 165-166, 1948
- [4] 後藤尚久, “図説・アンテナ”, 社団法人電子情報

通信学会, 1995.

- [5] Toshiaki Kozu, Toneo Kawanishi, Hiroshi Kuroiwa, Masahiro Kojima, Hiroshi Kumagai, Ken'ichi Okamoto, Minoru Okumura, Hirotaka Nakatsuka, and Katsuhiko Nishikawa, "Development of Precipitation Radar Onboard the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Satellite", IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING, VOL.39, NO. 1, pp.104, JANUARY 2001
- [6] F.J.Wentz, S.Peteherych, L.A.Thomas, "A model function for ocean radar cross sections at 14.6 GHz", Journal of Geophysical Research, Vol.89, No.C3, pp.3689-3704, MAY 20, 1984.
- [7] Remote Sensing Systems / Home Page  
(<http://winds.jpl.nasa.gov/missions/quikscat/>)
- [8] 古濱洋治, 岡本謙一, 増子治信, "人工衛星によるマイクロ波リモートセンシング", 社団法人電子情報通信学会, 1986.