

題 目

学 士 論 文
MU レーダーとの
降雨同時観測による
TRMM 降雨レーダーの
地上較正
佐藤 亨 教授

指導教官

京都大学工学部 電気電子工学科

氏 名

阪本 卓也

平成 12 年 2 月 16 日

目次

第 1 章 序論	1
1.1 熱帯降雨観測衛星計画	1
1.2 MU レーダー	1
1.3 本研究の目的	2
第 2 章 各レーダーによる降雨観測	3
2.1 MU レーダー 19 ビーム法	3
2.2 レーダー反射因子 Z と降雨強度 R	3
2.3 TRMM PR の降雨強度推定時に生じる誤差	4
第 3 章 TRMM PR 及び MU レーダーによる降雨同時観測	5
3.1 降雨同時観測とそのデータ	5
3.2 レーダー反射因子 Z の比較	6
3.3 降雨強度 R の比較及び降雨の不均一性	8
第 4 章 データ比較方法の最適化	10
4.1 実データを用いた降雨モデルの作成	10
4.2 ビーム配置と内挿法	13
4.3 シミュレーションによる各種内挿法の比較	14
第 5 章 衛星搭載ドップラーレーダーの精度評価	16
5.1 衛星搭載ドップラーレーダーのビーム内降雨不均一による問題点	16
5.2 現実的な降雨モデルを用いたシミュレーションによる精度評価	17
第 6 章 結論	20
謝辞	21
参考文献	22

付録 A レーダーによる降雨推定の原理	23
A.1 レーダーによる降雨推定の原理	23
A.2 MU レーダーの降雨粒径分布推定原理	25
付録 B 等方関数の 2 次元フーリエ変換とハンケル変換	27
B.1 等方関数の 2 次元フーリエ変換とハンケル変換	27
付録 C 衛星搭載ドップラーレーダーのドップラー速度推定に関する提案 法	28
C.1 オーバーサンプリング観測モードにおけるスペクトル包絡線を利用したドップラー速度推定法	28

目 次

1.1	TRMM 衛星による観測概念図	33
1.2	降雨時に MU レーダーで観測されたドップラースペクトルの例	34
2.1	19 ビーム法の観測概念図	36
2.2	MU レーダー及び TRMM PR のビームサイズ及びビーム配置	37
2.3	MU レーダー及び TRMM PR のデータの関係図	38
3.1	MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値の比較	40
3.2	1999 年 6 月 23 日の TRMM PR 及び MU レーダーの Z 値の高度プロファイル及びその際のビームのフットプリント	41
3.3	1998 年 10 月 7 日の TRMM PR 及び MU レーダーの Z 値の高度プロファイル及びその際のビームのフットプリント	42
3.4	観測日時及び方向に対応する銀河背景雑音温度及びその際の降雨同時観測の両レーダーの Z 値の差	43
3.5	TRMM PR のデータを距離の逆数での重み付けを行った際の両レーダーの Z 値の比較	44
3.6	福岡レーダー及び TRMM PR の Z 値の比較	45
3.7	MU レーダー及び TRMM PR で観測された R 値の比較	46
3.8	両レーダーの Z 値の差の大きいケースを補正した効果を反映させた両レーダーの R 値の比較	47
3.9	MU レーダー 19 ビーム法の Z 値の水平方向の正規化標準偏差と TRMM PR 降雨強度推定における補正パラメータの関係	48
3.10	NUBF の影響を補正した両レーダーの R 値の比較結果	49
3.11	MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値のデータの水平方向の標準偏差	50
3.12	MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値のデータの垂直方向の標準偏差	51
3.13	MU レーダーで観測された Z 値のデータの水平方向及び垂直方向の標準偏差	52

3.14	TRMM PR で観測された Z 値のデータの水平方向及び垂直方向の標準偏差	53
4.1	Z のモデルの水平方向のパワースペクトルの概念図	54
4.2	Z のモデルの水平方向の電力スペクトルの半径方向の分布及び両レーダーのデータの分散の電力に寄与している部分	55
4.3	水平方向のカットオフ波長を求める計算過程	56
4.4	両レーダーの垂直方向のデータの平滑化及びサンプリング波数	57
4.5	Z のモデルの垂直方向の電力スペクトルの半径方向の分布及び両レーダーのデータの分散の電力に寄与している部分	58
4.6	垂直方向のカットオフ波長を求める計算過程	59
4.7	両レーダーのビーム及びデータサンプル点の関係	60
4.8	各重み付け法における重みと距離の関係	61
4.9	シミュレーションのビーム配置	62
4.10	各重み付け法による入射角に対する NSD	63
4.11	単純平均を用いたときの入射角に対する NSD	64
5.1	衛星搭載ドップラーレーダーとビーム内降雨不均一の概念図	65
5.2	ビーム半径を変えたときの観測されるスペクトルの変化	66
5.3	衛星設計上のパラメータの決定要因	67
5.4	インコヒーレント積分回数 1 回の場合の観測スペクトル	68
5.5	互いに重ならないビーム走査で観測されるスペクトル	69
5.6	ビーム半径を変えたときの誤差の標準偏差の変化	70
5.7	PRF(チャンネル数)を変えたときのビーム半径に対する誤差の標準偏差	71
5.8	インコヒーレント積分回数を変えたときのビーム半径に対する誤差の標準偏差	72
5.9	観測誤差を考慮した場合及び考慮しない場合のビーム半径に対する誤差の標準偏差	73
5.10	均一な降雨を仮定した場合と現実的な降雨モデルを用いた場合におけるビーム半径に対する誤差の標準偏差	74
C.1	ハイブリッド観測モードの概念図	75
C.2	ビーム移動がほぼ連続的なオーバーサンプリング観測でのスペクトル曲線群の例	76

C.3 オーバーサンプリングしているときの観測スペクトル	77
--	----

第 1 章 序論

1.1 熱帯降雨観測衛星計画

降雨は地球環境に大きな影響を与えている。特に熱帯域の降雨は地球全体の降雨の約 $2/3$ を占めると言われており、地球規模の大気循環の駆動源として重要である。一方、熱帯域の大部分が海洋によって占められていることにより、熱帯域全域の降雨の地上観測は困難である。このため、地球的規模の降雨データを取得するには人工衛星からの観測が必要不可欠であるといえる。

熱帯降雨衛星観測計画 (Tropical Rainfall Measuring Mission; 以下 TRMM と略す) は、これまで空白であった熱帯降雨の衛星観測により、地球的規模の気候変動の解明に貢献することを目的とする。TRMM 計画は軌道傾斜角 35° 、軌道高度 350km の衛星から熱帯域の降雨を観測しようとする日米共同の計画であり、1997 年に打ち上げに成功した。衛星に搭載されている主要な観測機器は、可視赤外放射計、マイクロ波放射計、そして降雨レーダーである。TRMM 計画の特徴は衛星に初めて降雨レーダー (Precipitation Radar; 以下 PR と略す) が搭載されていることである。TRMM 衛星の観測概念図を図 1.1 に示す。TRMM 搭載降雨レーダーの主要緒元を表 1.1 に示す。TRMM ではアンテナの大きさ、水平分解能の制約から 13.8GHz という比較的高い周波数のレーダーが用いられている。

TRMM 計画ではこれらの観測機器により熱帯域の降雨の観測を行っており、その主目的はセンサの走査幅を考慮した観測域である北緯 37° から南緯 37° の範囲において緯経度 $5^\circ \times 5^\circ$ (約 $600\text{km} \times 600\text{km}$) の領域内の月平均降雨強度を $\pm 10\%$ の精度で観測することであり、そのミッション寿命は 3 年である。

1.2 MU レーダー

滋賀県信楽に設置された京都大学 MU レーダーは TRMM 衛星の観測頻度の最も高い領域に属する。MU レーダーはアクティブフェイズドアレー方式の VHF 帯のパルスドップラーレーダーである。その主要緒元を表 1.2 に示す。ま

た MU レーダーは雨滴からのエコーと大気乱流からのエコーが同程度の強度で受信されるため、双峰性のスペクトルが観測される。図 1.2 に降雨時に観測されたドップラースペクトルの例を示す。左側のピークが雨滴からのエコースペクトルであり、右側のピークが大気乱流からのエコースペクトルである。エコースペクトルから直接大気運動による効果を補正した降雨粒径分布を求めることができるため、MU レーダーは TRMM PR の精密地上検証設備となる。TRMM PR の地上較正を目的として TRMM PR との降雨同時観測用の観測モードである 19 ビーム法が開発されている。

1.3 本研究の目的

衛星搭載の降雨レーダーは、TRMM 衛星が世界で初めての試みである。現在 TRMM PR のデータプロダクトは一般に公開されており、様々な研究分野で利用されている。精密な地上較正を行うことでその TRMM PR のデータプロダクトの精度を向上させることは非常に重要である。1998 年 4 月から TRMM PR の地上較正を目的として MU レーダーの 19 ビーム法を用いた TRMM PR との降雨同時観測が行われている。

本研究では 1998 年、1999 年の 2 年分の降雨同時観測のデータを用いて、TRMM PR のプロダクトの精度及びその誤差の原因について定量的に評価を行う。まず、レーダー反射因子 Z (データプロダクト 1C21) 及び降雨強度 R (データプロダクト 2A25) の各々の処理レベルのデータについて、それぞれに対応する MU レーダーの Z 値及び R 値と比較する。また、降雨強度の比較において、ビーム内の降雨不均一性 (non-uniform beam-filling error; 以下 NUBF と略す) の効果による誤差及び粒径分布の仮定による誤差の影響を各々調べる。更にデータ比較時のデータの内挿法の評価をシミュレーションを用いて検証する。その際、シミュレーションに用いる現実的な降雨モデルを実際の観測データを元に作成する。そして、同じ降雨モデルを用い、TRMM の後継機に搭載が検討されているドップラレーダーの精度をシミュレーションにより評価する。

第 2 章 各レーダーによる降雨観測

2.1 MU レーダー 19 ビーム法

MU レーダーのビーム高速走査能力を用いて衛星搭載降雨レーダーの地上検証を目的として 19 ビーム観測法が開発された。その概念図を図 2.1 に示す。その主要緒元を表 2.1 に示す。ビーム方向は各送信パルス毎に順に切り替えられ、各ビーム方向のデータは 10 回のコヒーレント積分後 128 点の FFT を用いてパワースペクトルに変換され、更に 5 回インコヒーレント積分される。この処理により 48.6 秒毎にエコーパワースペクトルが求められ、記録される。高度 3km では、19 ビーム観測法を用いた MU レーダーのビーム分布は図 2.2 に示すように TRMM PR の直下点のフットプリント (4.3km) とほぼ同じである。

2.2 レーダー反射因子 Z と降雨強度 R

本研究で用いる 2 種類の降雨データであるレーダー反射因子 Z 及び降雨強度 R について述べる。雨滴の直径を D [cm] としたときの単位体積中の雨滴の個数の分布を表す降雨粒径分布 $N(D)$ [cm^{-4}] を用いるとレーダー反射因子 Z [mm^6m^{-3}] は次式で表すことができる。

$$Z = 10^{12} \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD \quad (2.1)$$

ただし、これは D が波長 λ に比べて十分小さく Rayleigh 近似が成り立つときのみ成り立つ。MU レーダーはこの条件を満たす。詳細は付録に示す。降雨強度 R [mm/h] は雨滴の大気に対する相対速度 $v_r(D)$ [m/s] 及び大気鉛直風速 v_w [m/s] を用いて

$$R = 6\pi \times 10^5 \int N(D) D^3 |v_r(D) + v_w| dD \quad (2.2)$$

と表される。

MU レーダーは VHF 帯のドップラーレーダーであるため、風速の鉛直成分 v_w を雨滴の落下速度 $v_r(D) + v_w$ と同時に測定することが可能である。よって

大気風速の鉛直成分の補正をした正確な降雨粒径分布 $N(D)$ を求めることができる。MUレーダーの降雨推定原理を付録に示す。従って式(2.1)(2.2)によって正確な Z 及び R を求めることが可能である。これを TRMM PR の Z に対応するデータプロダクト 1C21、 R に対応するデータプロダクト 2A25 と比較することによって、TRMM PR の精度を評価することが可能である。そのデータ間の関係を図 2.3 に示す。

2.3 TRMM PR の降雨強度推定時に生じる誤差

降雨強度推定における誤差の原因として次のようなものがあげられる。まず、TRMM PR で観測されるのは Z 値のみであり、降雨粒径分布を観測することはできない。そこで、降雨粒径分布 $N(D)$ を適当に仮定した上で式(2.2)によって R を導出する。その際、 $N(D)$ の仮定に誤りがあれば当然 R には誤差が生じる。MUレーダーにおいては実際の降雨粒径分布を高い精度で求めることができるため、この誤差は小さい。

また、TRMM PR のように水平分解能が比較的低いレーダーによる降雨推定では、ビーム内の降雨不均一による推定誤差 NUBF が生じると考えられる。これは Z 値から R 値への変換が非線形であることにより、ビーム内の降雨を均一と仮定して導出した R 値には誤差を生じる現象である。NUBF による推定誤差は、常に降雨強度を実際の値より大きく見積もる方向に働く。MUレーダーの場合は、次節で述べるように 19ビーム法においては水平分解能が 170m 程度と比較的高いため、NUBF の効果はほとんど生じないと考えられる。また、19ビーム法では TRMM PR ビーム内の降雨不均一度を定量的に推定することができるので、NUBF の効果を推定し、他の原因の誤差を推定することも可能である。このように、19ビーム法を用いることで TRMM PR の降雨強度の推定時に生じる誤差をも地上較正によって推定することが可能である。

第 3 章 TRMM PR 及び MU レーダーによる降雨同時観測

3.1 降雨同時観測とそのデータ

TRMM PR の地上較正を目的として 1998 年 4 月から、TRMM 衛星通過時に MU レーダーによる定常的観測を開始した。MU レーダーの同時観測は、TRMM 衛星が信楽上空を通過する予測時間の 1 時間前から 30 分前の 30 分間の平均降雨強度が 0.5mm/h 以上であり、その時の地上気温が 12 度以上である場合に、予測通過時刻の前後 10 分間 19 ビーム法を用いた TRMM 地上較正モードの観測を行う。地上気温の条件は MU レーダーの最低観測高度が 1.5km であるため、雨滴からのエコーを観測するためには、融解層高度がそれより高いことが必要であるという要請に基づく。

1998 年 4 月から 2000 年 1 月末までの 22 ヶ月間に、この条件を満たしたのは 22 回であった。ただし、このうちの 7 回は MU レーダーで雨滴からのエコーが観測できなかった。また、1 回は TRMM 降雨レーダーのデータプロダクトが手に入らなかった。また、1 回は MU レーダーでドップラースペクトルが正常に観測されなかった。従って、残る 13 回をレーダー反射因子の解析の対象とする。また、そのうち 3 ケースは TRMM 降雨強度データが手に入らなかった。そのため、残る 10 回を降雨強度の解析の対象とする。表 3.1 に一覧を示す。

TRMM PR で観測されるのは、ビーム内のレーダー反射因子 Z の相加平均である。そのことを再現するため、MU レーダーの Z 値の水平方向の平均は Z の相加平均を用いているが、その他の Z 値の平均等の演算に関しては、 Z が対数正規分布をなしているという仮定の元に dB での平均を行っている。両レーダーの高度分解能が異なり、また、データ欠損も両レーダーデータに比較的多く見られる。そのため、MU レーダーデータ及び TRMM PR のデータは MU レーダーの鉛直ビームのデータサンプル点に相応する高度のデータへと内挿及び外挿を行って変換している。その際、実際にデータが存在する最も近い高度から高度分解能の 4 倍にあたる 600m を越える点のデータについて

は内挿及び外挿をせずに、欠損データとする。故に全データは MU レーダーの鉛直ビームのデータサンプル点と同様に 2.1km を最低高度とする 150m 間隔のデータとなる。更に、TRMM PR のデータを MU レーダー上空のデータへと変換するために、各高度で、TRMM PR データを適当な重み付け平均を行う。このことは第 4 章で詳しく述べる。ここでは、TRMM PR データを両レーダーの高度 3km におけるビームの共通部分の面積で重み付けをした平均 (Common-Area Weighted Mean; CAWM と以下略す。) を用いている。求まった両データを高度 2.1km から 3km まで平均して、その観測における両レーダーのデータとする。高度 2.1km から 3km までというのは全ケースに渡ってブライトバンドよりも下で、MU レーダーの観測可能範囲という条件を満たす。

3.2 レーダー反射因子 Z の比較

両レーダーでの Z 値の散布図を図 3.1 に示す。両者の差の 0 を中心とした標準偏差は 2.81dB である。両レーダーのデータの差が 4.5dB を越えるケースが 4 例ある。その 4 例を除くと両者の差の 0 を中心とした標準偏差は 1.16dB である。差の大きなケースが存在することは TRMM PR の地上較正上大きな問題であるため、これらの 4 例で大きな差を生じた原因について個別に考察する。

まず、両レーダーの内、いずれかの補正係数の調整に問題があるという可能性がある。大きく値の異なるケースの一つである 1999 年 6 月 23 日の高度プロファイルを図 3.2 に示す。ここで示されているのは MU レーダーのデータは 19 ビーム全てについて、TRMM PR のデータは MU レーダーから半径 9km の範囲内のビーム全てについての高度プロファイルである。両者の各ビームにおける Z 値は、いずれも 15~25dB の範囲に分布している。しかし、MU レーダーに最も近い TRMM ビームのみが大きな重みを持ち、結果として 4.77dB の差が生じた。誤差の原因として考えられるのは、両レーダーの観測時間の違いである。ここで、TRMM ビームを見ると、水平方向の高波数成分が非常に大きいことがわかる。水平方向の高波数成分の大きい降雨では、降雨の時間変化の高周波成分も大きいと考えられる。MU レーダーが 48 秒という比較的長い時間の観測の平均をデータとしているのに対し、TRMM PR のデータは一瞬のサンプルである。そのため、TRMM PR は降雨の時間変化の高周波成分の影響を強く受ける。そのために、このケースでは、両レーダーの観測

時間の違いがデータの差を生じさせた原因の一つとして考えうる。そこで、MUレーダーの時間平均を TRMM PR のビームのサンプル平均で代用することを試みる。これはある種のエルゴード性を仮定するのと同値である。MUレーダーから 9km 以内のビームを単純平均すると、差は 0.85dB とかなり小さくなる。しかし、同様のことを全観測データに対して行うと両レーダーでの Z 値の差の 0 を中心とした標準偏差は 3.99dB と大きな値となる。従って、この方法を全てのデータに適用するのは不適當と考えられる。

同様に大きく値の異なるケースの一つである 1998 年 10 月 7 日の Z 値の高度プロファイルを図 3.3 に示す。このケースでは、両者のビーム間の分散はそれぞれ小さいにも関わらず、全体として 5dB 程度の差がある。この原因については 1999 年 6 月 23 日のケースの説明は該当しない。MUレーダーが銀河雑音温度分布を用いた相対較正を行っているため、この場合には何らかの外来雑音に加わっていたということも考えうる。スペクトルのパワーは、ノイズレベルとの比をとっているため、その際には MUレーダーは Z 値を低く見積もることになる。個々のスペクトルには鏡像及びクラッタ以外の特殊な雑音が見当たらないため、外来雑音に加わっていたとするならば、この帯域で白色な雑音が混入したと考えられる。不一致の大きな他の 2 例及び先の 1999 年 6 月 23 日のケースもこの例と同様と考えられる。観測日時の銀河背景雑音温度と両レーダーデータの差との関係を図 3.4 に示す。横軸は 5500K を 0dB としている。差の大きい 4 ケースで、同じ強度のノイズが乗っていたとすると銀河雑音温度が大きいものほど両レーダーのデータの差は小さくなるはずである。図 3.4 ではそのような傾向は見られない。更に、実際に外来雑音による誤差であると仮定してそのパワーを求めてみると 5.0dB から 7.1dB までの値をとり、同一の雑音のみによる誤差とは判断しがたい。

また、TRMM PR のデータを MUレーダーからの距離の逆数での重み付け平均 (Inverse Distance Weighted Mean; IDWM と以下略す。) した場合の両レーダーでの Z 値の散布図を図 3.5 に示す。データの差の 0 を中心とした標準偏差は 3.1dB であり、CAWM を用いた場合より大きな分散を示している。

地上レーダーによる TRMM 降雨レーダーの較正は非常に難しく、MUレーダー以外のレーダーにおいても試みられているが、MUレーダーはそれらの試みの結果に比べて非常によく一致している。他のレーダーによる TRMM 降雨レーダーの地上較正の例として、福岡レーダーの例を図 3.6 に示す。¹⁾ 両レー

ダーのデータの差は 20dB にも及んでいるのが分かる。

3.3 降雨強度 R の比較及び降雨の不均一性

両レーダーでの降雨強度 R の散布図を図 3.7 に示す。ここで、Z 値が両レーダーで大きく異なる 4 ケースの値を先に述べたような外来雑音による誤差が生じていたものと仮定すると、R の比較の際には、MU レーダーの Z 値を補正した効果を反映させた上での考察が適切である。そのような補正をした後の両レーダーでの R 値の散布図を図 3.8 に示す。原点を通る回帰直線の傾きは 0.72 である。全体として MU レーダーの方が降雨強度を大きく見積もっていることが分かる。降雨強度推定における誤差の原因として、降雨強度のビーム内不均一による NUBF の効果は、TRMM PR の降雨強度推定値を実際の値より大きく見積もる方向に働くため、もう一つの大きな降雨強度推定時の誤差の原因である降雨粒径分布推定による誤差の方が大きいと考えられる。それらの誤差を以下定量的に評価する。誤差の原因の一つである NUBF はビーム内の降雨の水平方向の不均一によって生じる。ここではビーム内の降雨の水平方向の不均一の尺度のとして 19 ビーム法の各ビームの Z 値の分散及びその平方根の標準偏差を用いる。MU レーダー 19 ビーム法の分散の値は図 2.2 のように TRMM PR ビームのフットプリントとほぼ同じ大きさであり、19 ビーム法により TRMM PR のビーム内の降雨の不均一度を定量的に推定できるため、MU レーダーのビーム毎の Z 値の分散から NUBF の効果を推定することが可能である。 σ_Z を次式で定義する。ただし Z_i は各ビームで観測される Z 値であり、リニアでの値である。また \bar{Z} は 19 ビームの Z 値のリニアでの平均値である。

$$\sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{19} (Z_i - \bar{Z})^2}{19\bar{Z}^2}} \quad (3.1)$$

我が研究室で行われた研究によって、 σ_Z と真の R 値である R_{true} と TRMM PR で推定される降雨強度 R_{TRMM} の比との対応関係が既知である。²⁾ 図 3.9 にその対応関係を示す。横軸は σ_Z である。図より降雨同時観測時各ケースの σ_Z から R 値の補正パラメータを得ることができる。図 3.8 の比較結果の TRMM PR データをここで得られた補正パラメータで補正を行った結果が図 3.10 である。原点

を通る回帰直線の傾きは 0.68 である。この誤差は降雨粒径分布推定の誤りに起因するものと考えられる。NUBF の効果の補正前の散布図の原点を通る回帰直線の傾きは 0.72 であったから、TRMM PR は R 値を NUBF によって 6% 大きく見積もっていたと言える。以上より TRMM の降雨強度推定アルゴリズムの補正係数を約 1.5 倍する必要があるという結論が下せる。

以上のように TRMM PR のビーム内の降雨不均一度から NUBF の効果の補正が可能であるから、TRMM PR のビーム毎のデータの分散と MU レーダーのビーム毎のデータの分散との間に相関があると仮定すると、TRMM PR のビーム毎のデータの分散から NUBF の効果の補正が可能である。実際 TRMM の降雨強度推定アルゴリズムでは NUBF の効果の補正のために TRMM の各ビームの分散を用いてビーム内の降雨の不均一度を推定している。MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値の水平方向の標準偏差を図 3.11 に示す。相関係数は 0.35 であり、原点を通る回帰直線の傾きは 1.15 である。図には回帰直線から大きく離れた 1 点があり、データ数が少ないことからこの例外的な 1 データにより相関係数が小さくなったと考えられる。この 1 データを例外として考えると相関係数は 0.69 と比較的高くなることから、TRMM の降雨強度推定アルゴリズムの NUBF の効果の補正は適切であると判断できる。MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値の垂直方向の標準偏差を図 3.12 に示す。相関係数は 0.79 であり、原点を通る回帰直線の傾きは 0.74 である。以上 2 つの散布図から第 4 章で降雨モデルを作成する。

MU レーダーで観測された Z 値の水平方向及び垂直方向の標準偏差を図 3.13 に示す。相関係数は 0.88 とかなり高く、原点を通る回帰直線の傾きは 0.49 である。一方、TRMM PR で観測された Z 値の水平方向及び垂直方向の標準偏差の散布図を図 3.14 に示す。原点を通る回帰直線の傾きは 0.40 と MU レーダーの場合に近いが、その相関係数は 0.44 であり両者の相関は良くない。これは両レーダーの垂直方向のデータ間隔が約 200m であることを考えれば、MU レーダーの水平方向のデータはサンプリング周期が 1km と比較的小さいために垂直方向のデータとの相関が高く、TRMM PR の水平方向のデータはサンプリング周期が 4km と比較的大きいために垂直方向のデータとの相関が低いことが理由であると考えられる。

第 4 章 データ比較方法の最適化

4.1 実データを用いた降雨モデルの作成

MU レーダーのデータ及び TRMM PR のデータを用いて現実的な降雨モデルを作成する。前章と同様に、 Z 値は全て dB 値で議論する。前章で両レーダーで観測されたレーダー反射因子 Z の水平方向及び垂直方向の分散をそれぞれ比較した。その結果を用いて Z 値の空間分布のモデルを作成する手順を以下に述べる。

Z のモデルの 3 次元構造は次式のように水平方向の変化を表す関数と垂直方向の変化を表す関数の線形結合となり、直流成分を別に加えたものと仮定する。ここで x, y は直交座標系の水平方向の成分、 z は垂直方向の成分である。

$$Z(x, y, z) = Z_h(x, y) + Z_v(z) + Z_{DC} \quad (4.1)$$

$Z_h(x, y)$ 及び $Z_v(z)$ は、その波数スペクトルが負の勾配を持ち、空間的には対数正規分布に従うとする。水平方向に対応する正規乱数を要素とするマトリックス、垂直方向に対応する正規乱数を要素とする数列をそれぞれ作成する。ここではそれらをガウス関数によって平滑化することでモデルを実現する。

$Z_h(x, y)$ の作成について述べる。MU レーダー、TRMM PR の両方について以下の説明が成り立つ。以下、簡単のためビームの傾きを無視する。対象とする高度は 2.1km ~ 3km の範囲であり、ここでは高度 z を z_0 に固定して考える。議論に用いる位置ベクトルは $z = z_0$ の平面内で MU レーダーの中心の鉛直線上に原点をとったものである。

ここで位置ベクトル \boldsymbol{x} を用いて領域 D_h を次のように定義する。

$$D_h \equiv \{\boldsymbol{x} \mid \|\boldsymbol{x}\| < R_h\} \quad (4.2)$$

D_h に属するサンプル点のデータのみが Z 値の分散に寄与している。MU レーダーでは $R_h = 2.0\text{km}$ 、TRMM PR では $R_h = 9.0\text{km}$ である。 i 番目のビーム

の位置ベクトルを b_i と定義する。また、領域 D_h の面積を S とする。単位面積当りのゆらぎのエネルギー P_h と 水平方向の分散 σ_h^2 の間には 次の式が成立する。

$$P_h = \frac{1}{S} \sum_{b_i \in D_h} (Z_i - \bar{Z})^2 \quad (4.3)$$

$$= \frac{\sigma_h^2 N}{S} \quad (4.4)$$

ここで Z_i ($i = 1, 2, \dots, M$) は観測された Z 値であり、 $b_i \in D_h$ を満たす Z_i の個数及び平均をそれぞれ N 、 \bar{Z} としている。

パーセバルの定理により、ゆらぎのパワーはパワースペクトルの積分値と等しい。尤も、観測時に Z は平滑化され、窓関数がかかり、サンプリングされる。これに加えて DC 成分の除去により、分散に寄与する降雨のパワースペクトルは元のパワースペクトルとは異なったものとなる。今、式 (4.1) のモデルを仮定しているため、 Z 値の水平方向の分散は $Z_h(x, y)$ のみに依存し、垂直方向についてのゆらぎのパワーとは独立に議論できる。

ここで関数 $f(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} \in \mathbb{R}^2$) が等方性を持つ場合、極座標 (r, θ) を用いて $f(r)$ ($r > 0$) と表される。このとき、 $f(\mathbf{r})$ の 2 次元フーリエ変換 $F(\mathbf{k})$ もやはり等方であり、極座標 (k, ϕ) を用いて $F(k)$ と書ける。等方な関数 $f(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} \in \mathbb{R}^2$) についてその 2 次元フーリエ変換 $F(k)$ は

$$F(k) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{r}) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) dS = 2\pi \int_0^{\infty} J_0(kr) f(r) r dr \quad (4.5)$$

と表すことができる。ここで $J_0(\bullet)$ は 0 次の第一種ベッセル関数である。上式の右辺は Hankel 変換と呼ばれる。式 (4.5) の導出は付録に示す。

$Z(x, y, z)$ の水平方向のパワースペクトル $\Psi(k)$ は等方であると仮定して良いので $\Psi(k)$ と表すことができ、次式を仮定する。

$$\Psi(k) = \Psi_0 e^{-(\lambda_0 k)^2} + (Z_v(z_0) + Z_{DC})^2 \delta(k) \quad (4.6)$$

$\Psi(k)$ の概形を図 4.2 に示す。両レーダーでゆらぎのパワーに寄与するスペクトル $\Gamma(k)$ を以下の手順で求める。まず、空間平均及び標本化の効果を与えるスペクトル $\Gamma_p(k)$ は、次式で与える。

$$\Gamma_p(k) = \text{sinc}^2\left(\frac{\ell_h k}{2}\right) \sum_{n=-\infty}^{\infty} (\Psi(k - nk_s) F_1(k - nk_s)) \quad (4.7)$$

k_s は実効的なサンプリング波数である。 ℓ_h は 1 データが代表していると考えられる領域の水平距離である。TRMM PR では $\ell_h = 4\text{km}$ 、MU レーダーでは $\ell_h = 1\text{km}$ である。平滑化に対応するローパスフィルタが $F_1(k)$ であり、ビームパターンの 2 次元フーリエ変換である。等方性により $F_1(k)$ は半径方向のビームパターンの Hankel 変換である。位相の無相関性により、エリアジングの効果はパワースペクトルのインコヒーレント和となっている。 $\text{sinc}^2\left(\frac{\ell_h k}{2}\right)$ は、アパーチャ効果による歪みであり、瞬時標本化を行うことで生じたものである。実際には MU レーダーでは正六角形標本化格子、TRMM PR では正方形標本化格子での 2 次元のエリアジングが起きているため、上の議論は近似的にのみ成り立つ。^{*}

式 (4.7) によって求めた $\Gamma_p(k)$ を用いてゆらぎのパワーに寄与するスペクトル $\Gamma(k)$ は次式のように求まる。

$$\Gamma(k) = \frac{W}{S} * \Gamma_p(k) - \frac{W}{S} * \Gamma_p(0)\delta(k) \quad (4.8)$$

$$= \frac{W}{S} * \Gamma_p(k) - \frac{1}{S} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma_p(k)W(k)dk\delta(k) \quad (4.9)$$

$\frac{W(k)}{S}$ との畳み込みは $b_i \in D_h$ なる Z_i を扱うことを意味する。これは位相の無相関性を前提とする。 D_h に対応する窓関数の等方性により $W(k)$ はゲート関数の Hankel 変換である。また、式 (4.8) の右辺第 2 項は分散の計算において直流成分を除く操作に対応する。 $\Gamma_p(k)$ は次式のように直流成分のインパルス関数とそれ以外の部分に分けられる。

$$\Gamma_p(k) = \gamma_p(k) + (Z_v(z_0) + Z_{DC})^2\delta(k) \quad (4.10)$$

こうして求めた $\Gamma(k)$ とパワー P_h について次式が成り立つ。

$$P_h = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \Gamma(\mathbf{k})kdkd\phi \quad (4.11)$$

$$= 2\pi \int_0^{\infty} \Gamma(k)kdk \quad (4.12)$$

式 (4.9) の右辺第 2 項は式 (4.10) を考えると、式 (4.11) において、

$$\frac{1}{S} \int_{-\infty}^{\infty} \gamma_p(k)W(k)dk + (Z_v(z_0) + Z_{DC})^2$$

^{*} アパーチャ効果を表す項も実際には MU レーダーは正六角柱の 2 次元スペクトル、TRMM PR は正四角柱の 2 次元スペクトルである。

を除去するのに等しい。よって式 (4.9) の直流除去の操作はパワーという観点から見ると $\Gamma_p(k)$ から直流成分及び $W(k)$ の帯域幅に相当する低周波成分を遮断するハイパスフィルタと等価である。

式 (4.11) は MU レーダー及び TRMM PR の両レーダーについて成り立つ。これらを満たすような、 Ψ_0 及び λ_0 を数値計算により求める。式 (4.7) のうちアパーチャ効果を除いたものを図 4.2 に示す。スペクトルは $\Psi_0 = 1$ となるように規格化している。ここで $F_1(k)$ は半値幅がビーム直径であるようなレイズドコサインのパワースペクトルで近似している。更に $\text{sinc}^2\left(\frac{\ell_h k}{2}\right)$ を理想的なローパスフィルタ、直流除去を理想的なハイパスフィルタで近似すると、図 4.2 の斜線部分が各々のレーダーのゆらぎのパワーに寄与するパワースペクトルの断面となる。両レーダーに対応するパワースペクトルの断面を縦軸を中心に一回転させた立体の体積比 r_v が両レーダーの Z 値の水平方向のパワーの比 $r_p = \frac{P_{\text{TRMM}}}{P_{\text{MU}}} = 0.047$ と等しくなるカットオフ波長 λ_0 を求める。図 4.3 に計算結果を示す。グラフの縦軸は $a \equiv \sqrt{r_v} - \sqrt{r_p}$ である。図より $a = 0$ となるような λ_0 が現実的な変域において唯一のみ存在し、 λ_0 は 1.9km となることがわかる。

垂直方向についても同様の議論が可能である。図 4.4 のようにビームの高度分解能及びサンプリング波数は両レーダーで異なる。ただしビームは鉛直ビームと仮定する。その際に水平方向について行ったのと同様にデータの分散に寄与するパワースペクトルを数値計算によって求める。各々のレーダーの Z 値の垂直方向のパワーに対応する面積が図 4.5 の斜線部分である。 λ_0 を変化させながらこれらの図形の面積比がパワー比 $r_p = \frac{P_{\text{TRMM}}}{P_{\text{MU}}} = 0.444$ に対応する λ_0 を現実的な変域において全探索する。その結果を図 4.5 に示す。図より、 λ_0 は 80m と求まる。

4.2 ビーム配置と内挿法

降雨同時観測時の TRMM PR のデータを MU レーダーのデータと比較する際、両レーダーのビーム位置は一致していない (図 4.7)。そこで次式のように、TRMM PR ビームのデータを MU レーダー上空の値の推測値 Z_{est} へ変換する必要がある。

$$Z_{\text{est}} = \sum w_i Z_i \quad (4.13)$$

データ Z_i に与える重み w_i を最適化することを本節では考える。前章で主に用いた CAWM は、重み w_i を次式で与えるものである。ただし R_{TRMM} は 2.15km であり、 $D_h(R_h)$ は R_h に対応する D_h である。

$$w_i = \frac{\int \int_{\mathbf{r} \in D_h(2\text{km}), |\mathbf{r} - \mathbf{b}_i| < R_{\text{TRMM}}} dS}{\sum_{\mathbf{b}_i \in D_h(9\text{km})} \int \int_{\mathbf{r} \in D_h(2\text{km}), |\mathbf{r} - \mathbf{b}_i| < R_{\text{TRMM}}} dS} \quad (4.14)$$

ここで比較対象として、次式で表される IDWM を考える。

$$w_i = \frac{1}{|\mathbf{b}_i|} \quad (4.15)$$

また、IDWM を用いたときに、式 (4.13) で、 $\mathbf{r} \in D_h$ ($R_h = 6\text{km}$) なる条件を付けたものを制限付きの距離の逆数での重み付け平均 (Limited IDWM; 以下 LIDWM と略す。) とよび、これも比較対象とする。これら 3 種類の重み付け法は w_i を $|\mathbf{b}_i|$ の関数とすることで表すことができる。図 4.8 にそれを示す。また明らかに LIDWM に対応するのは、 $|\mathbf{b}_i| > 6\text{km}$ の場合に 0 となるような IDWM の曲線である。

4.3 シミュレーションによる各種内挿法の比較

4.1 節で水平及び垂直両方向についてのスペクトルのカットオフ波長が求まった。その降雨モデルを用いて図 4.9 のようなビーム配置でシミュレーションを行う。半値幅を実際のビーム半径 2.15km としたレイズドコサイン型のビームパターンのビームを実際のレンジ分解能である 250m でサンプリングする。比較は高度 2.0km ~ 4.0km までの 2.0km の範囲である。データの処理法は第 3 章と全く同様である。まず、 Z 値の直流近傍のエネルギー Ψ_0 を求める。そのために、実際に MU レーダーで観測された Z 値の水平方向の標準偏差の平均 2.9dB 及び垂直方向の標準偏差の平均 1.4dB をモデルで再現できるように Ψ_0 を決定する。 Ψ_0 を様々に変えながらシミュレーションで得られた各ビームの Z 値の水平方向及び垂直方向の標準偏差 σ が 2.9dB 及び 1.4dB となる Ψ_0 を全探索する。 σ は Ψ_0 の単調増加関数となり、その値は水平方向については $\Psi_0 = 2.56 \times 10^4$ となり、垂直方向については $\Psi_0 = 16.0$ となる。

こうして得られた現実的な降雨モデルを用いてシミュレーションを用いて前節で述べた各種の内挿法の評価を行う。MUレーダー上空の Z の平均高度プロファイル $Z_0(z)$ は次式の通りである。ただし、 R_h を2kmとする。

$$Z_0(z) = \text{rect}(z) * \left(Z_v(z) + \int \int_{D_h} Z_h(x, y) dx dy + Z_{DC} \right) \quad (4.16)$$

$\text{rect}(z)$ は次式の矩形窓関数である。ただし H はMUレーダーのレンジ分解能の150mである。

$$\text{rect}(z) = \begin{cases} \frac{1}{H} & (|z| \leq \frac{H}{2}) \\ 0 & (|z| > \frac{H}{2}) \end{cases} \quad (4.17)$$

推測された Z の高度プロファイル Z_{est} と $Z_0(z)$ との差の大きさの尺度として、次式で定義される正規化標準偏差NSDを用いて各重み付け法を評価する。

$$\text{NSD} = \sqrt{\frac{1}{M\sigma_h^2} \sum_{i=1}^M (Z_{\text{est}}(z_i) - Z_0(z_i))^2} \quad (4.18)$$

ここで σ_h は Z_h の標準偏差である。また、MUレーダーの鉛直ビームのサンプル点を z_i ($i = 1, 2, \dots$)としている。ビームの入射角をTRMM PRの走査角である0度~17度まで変化させ、各々の内挿法を用いたときのNSDを求める。前節の3種類の内挿法について比較を行った。これを20パターンの異なる乱数によって生成された降雨モデル毎について平均をとった。一般に乱数のパターンの種類が N_r 種類であれば、ランダム誤差の標準偏差は $1/\sqrt{N_r}$ に抑えられる。

結果を図4.10に示す。入射角が増えるにつれ、NSDが上がるのは高度分解能が低下するからである。図よりどの入射角においても3種類の内挿法の中でCAWMが適切な内挿法であるということがわかる。このことから第3章で主に用いたデータ比較法はこの3者の中では最も適切であるといえる。さらに単純平均及び制限付き単純平均($R_h = 6.0\text{km}$)についてのNSDを図4.11に示す。距離の逆数での重み付けより更にNSDは大きい。第3章において両レーダーでの Z 値の差の0を中心とした標準偏差が、CAWMを用いた場合よりもIDWMを用いた場合の方が大きく、単純平均については更に大きいことを示した。その結果は本章におけるシミュレーション結果と矛盾しない。

第 5 章 衛星搭載ドップラーレーダーの精度 評価

5.1 衛星搭載ドップラーレーダーのビーム内降雨不均 一による問題点

TRMM の後継機に降雨観測のためのドップラーレーダーの搭載が検討されている。衛星搭載ドップラーレーダーは、ビーム内の前方では正のドップラーシフトを、後方では負のドップラーシフトをうけたスペクトルが観測されるという特徴を持つ。観測対象である降雨のドップラー速度 v_0 が $5 \sim 10 \text{ m/s}$ であるのに対し、TRMM のような低軌道衛星の速度 v_s は 8 km/s という高速度であるため、その影響は顕著である。その詳細について以下で述べる。

以下 (x, y) を直交座標系の水平成分とし、衛星の進行方向を x とする。またビーム中心の座標を $(x_c, 0)$ とおく。この節では簡単のため $x_c = 0$ とする。位置 x におけるドップラー速度シフト量は次式で表される。ただし TRMM の地上高度を H とする。

$$v_d(x) = \frac{v_s}{\sqrt{\left(\frac{H}{x}\right)^2 + 1}} \quad (5.1)$$

$$\simeq \frac{v_s x}{H} \quad (H \gg x) \quad (5.2)$$

衛星搭載ドップラーレーダーによって観測されるドップラーспекトル $S(v)$ は次式の通りである。

$$S(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) S_0(v - v_d(x), x, y) dx dy \quad (5.3)$$

ただしビームパターンを $B(x, y)$ 、静止観測時の降雨のエコースペクトルを $S_0(v, x, y)$ としている。

ここでビーム内で均一な降雨を仮定すると、式 (5.3) は次のように書き換えられる。

$$S(v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x(v_d), y) dy S_0(v - v_d(x)) \frac{dx}{dv_d} dv_d \quad (5.4)$$

$$= \frac{H}{v_s} S_0(v) * \int_{-\infty}^{\infty} B(x(v), y) dy \quad (5.5)$$

ここで $x(v_d)$ は $v_d(x)$ の逆関数である。上式で、 $S_0(v)$ の半値幅が v_0 に対して十分小さければ、 $S(v)$ は $v = v_0$ において最大値をとる。このように均一な降雨においては比較的簡単な方法により降雨のドップラー速度を求められる。しかし、実際にはビーム内の降雨不均一性により、ドップラー速度推定に誤差を生じる。

5.2 現実的な降雨モデルを用いたシミュレーションによる精度評価

第4章で作成した Z 値のモデルを用いて降雨エコースペクトルのモデルを作成する。位置 \mathbf{x} における $Z(\mathbf{x})$ とそこでの降雨エコースペクトル $S_0(\mathbf{x}, v)$ の間には次式が成り立つ。

$$Z(\mathbf{x}) = \int_{-\infty}^{\infty} S_0(\mathbf{x}, v) dv \quad (5.6)$$

更に、 $v_0 = 1.0\text{m/s}$ として、

$$S_0(\mathbf{x}, v) = \zeta(\mathbf{x}) e^{-\left(\frac{v}{v_0}\right)^2} \quad (5.7)$$

と仮定すると、 $Z(\mathbf{x})$ から $\zeta(\mathbf{x})$ は一意に決定する。こうして降雨粒径分布のモデルを作成する。この降雨モデルを衛星搭載ドップラーレーダーで観測すると、式(5.3)で求まるスペクトル $S(v)$ へと変換される。ビームサイズを変化させたときに式(5.3)で求まる $S(v)$ の例を図5.2に示す。

衛星搭載ドップラーレーダーの推定精度を評価するに当たって、その精度を下げる要因として降雨の空間的ゆらぎ、観測の統計的ゆらぎ、エリアジング及び雑音が考えられる。本シミュレーションでは雑音は考慮せず、SNRを無限大と仮定する。ドップラーレーダーでは正弦波及び余弦波による同期検波で位相を観測するが、各々の電圧での観測誤差は正規分布に従うと考えられるため、 N 回の観測で得られるスペクトルのもつ統計的ゆらぎは自由度2の χ^2 分布に従い、その大きさは $\frac{1}{\sqrt{N}}$ に比例する。この統計的ゆらぎをシミュレーションで実現するために、インコヒーレント積分回数によって決まる χ^2 分布に従う乱数とインコヒーレント積分を無限回行った理想的な観測スペクトルとの積をとる。

衛星設計上の主なパラメータの決定要因の概念図を図 5.3 に示す。TRMM の速度は約 8km/s であり、その高度は約 350km と比較的低い地上におけるビームの移動速度も約 8km/s と考えられる。TRMM は進行方向に垂直な面内でビームを走査しており、単位スキャン毎のビーム数は 50 である。ここでは TRMM 後継機においても現在の TRMM PR と同様に単位スキャン毎のビーム数は 50 とし、4.3km 進む毎にビームスキャンする方式を採用すると考える。すると 1 ビーム当りの観測時間は 10.8ms となる。インコヒーレント積分回数を 1 回とすれば周波数分解能は約 92Hz であり、ドップラー速度の分解能は約 1m/s である。また、現在の TRMM のパルス繰り返し周波数 PRF は 2776kHz×2ch である。TRMM 後継機のドップラーレーダーの PRF を現在と同じ 2776kHz×2ch にすると、サンプリング周波数に対応するドップラー速度は約 60m/s である。よって、観測可能なのは±30m/s の範囲であり、ビームサイズの大きい場合はエリアジングの影響も強く受けると考えられる。

本シミュレーションでは観測時間、及び周波数分解能によって決まる生じる観測誤差及び DFT 点数を考慮した観測スペクトルの 1 次のモーメントをドップラー速度の推定値としている。*

降雨モデルを生成する乱数の種を r とし、 χ^2 分布を生成する 2 種類の正規乱数の種を χ_1 及び χ_2 としたときに計算される推定誤差 $\varepsilon(r, \chi_1, \chi_2)$ から次式のように推定誤差の標準偏差 σ_ε を求める。

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{12 \times 12} \sum_{\chi_1=1}^{12} \sum_{\chi_2=1}^{12} \sum_{r=1}^{100} \left(\varepsilon(r, \chi_1, \chi_2) - \frac{1}{100} \sum_{r=1}^{100} \varepsilon(r, \chi_1, \chi_2) \right) \quad (5.8)$$

ここで、ビームサイズ、インコヒーレント積分回数(波数分解能)、PRF(チャンネル数)の 3 種類のレーダーのパラメータを変化させたときに推定誤差の標準偏差を求める。まず、PRF(チャンネル数)を現在の TRMM と同じ 2776kHz×2ch とし、インコヒーレント積分回数を 1 回としたときの σ_ε のビームサイズに対する変化の様子を図 5.6 に示す。ビームサイズが小さくなるにつれて誤差の減る様子が図より分かる。同様にインコヒーレント積分回数を 1 回(ドップラー速度分解能 1m/s)に保ったままチャンネル数を変化させた場合の σ_ε の変化を図 5.7 に示す。図よりチャンネル数を増やすと推定誤差はかなり抑えることができることが分かる。また、PRF 及びチャンネル数を現在の TRMM と同じ 2776kHz×2ch

* これとは別のドップラー速度推定の提案法を、付録に示す。

とし、インコヒーレント積分回数を変化させた場合の σ_e の変化を図 5.8 に示す。同じデータ長でインコヒーレント積分回数を増やすとスペクトル領域のサンプル間隔が粗くなり、推定誤差が増加することが分かる。よって、インコヒーレント積分回数は 1 回 (ドップラー速度分解能 1m/s) が最適であることが分かる。

ここで観測誤差及びエリアジングを考慮しない場合の σ_e の変化を図 5.9 に示す。観測誤差を考慮しない場合、誤差に寄与するのは降雨のビーム内の不均一性のみである。図より降雨のビーム内の不均一性による誤差を小さくするにはビームの半径を 500m 以下にする必要があることが分かる。次に観測誤差は考慮し、降雨を均一だと仮定した場合の σ_e を図 5.10 に示す。降雨を均一だと仮定した場合、誤差に寄与するのは観測誤差及びエリアジングである。図より観測誤差及びエリアジングによる誤差はビームサイズを大きくすると急激に上昇することが分かる。また降雨が均一である場合の方がその影響は大きいと言える。

現在の TRMM PR と同じビームサイズ、及びチャンネル数でドップラーレーダーを衛星に搭載したと仮定すると推定精度は図 5.6 より 4.5mm/s となり、5 ~ 10m/s の降雨を観測する上で十分な精度とは言えない。そこでビームサイズ及びチャンネル数の設定により十分と考えられる推定精度を確保する必要がある。しかし、ビームサイズを小さくすることはビームサイズの 2 乗に反比例したサイズのアンテナを必要とする。また、チャンネル数を増やすことはレーダーの消費電力を上昇させる。これらは衛星搭載レーダーには大きな制約となる。今後、雑音の考慮などによる影響も考慮にいれ、更に詳細な検討を加える必要がある。

第 6 章 結論

本論文では衛星搭載降雨レーダー (TRMM PR) のデータの誤差を高精度な地上ドップラーレーダー (MU レーダー) を用いて精密に評価し、更に TRMM 後継機のドップラーレーダーの精度について検討した。

第 1 章及び第 2 章では本論文で扱う TRMM PR 及び MU レーダー 19 ビーム法について述べ、そのデータ間の関係及び誤差の原因などについて述べた。

第 3 章では、MU レーダーと TRMM PR の降雨同時観測データを解析し、それらを Z 値及び R 値の各段階で比較検討した。その結果、TRMM PR において問題となる降雨強度推定時の誤差としては、NUBF の影響よりもむしろ降雨粒径分布推定誤りによる降雨強度の過小評価の影響の方が大きいことが分かった。また、その影響により、TRMM PR の降雨強度推定においてその補正係数を 1.5 倍する必要があることが分かった。

第 4 章では第 3 章で得たデータから降雨の空間的ゆらぎの特性に基づいて降雨の 3 次元構造のモデルを作成した。降雨の水平方向のパワースペクトルのカットオフ波長は 1900m と、垂直方向のパワースペクトルのカットオフ波長の 80m に比べて約 24 倍と長いことが分かった。一方、直流近傍のゆらぎのエネルギーは水平方向は垂直方向の 1600 倍と大きいことが分かった。それを元に TRMM PR データを MU レーダーの 19 ビーム法のデータと比較するにあたって行う内挿法を評価するためにシミュレーションを行った。その結果、MU レーダーからの距離の逆数での重み付け平均 (IDWM) よりも高度 3km における両レーダーのビームの共通部分の面積での重み付け平均 (CAWM) の方が適切であることが分かった。これは第 3 章で得られた両レーダーでの Z 値の比較結果とも一致する。

第 5 章においては TRMM 後継機に搭載が検討されている衛星搭載ドップラーレーダーにおいて、その降雨エコー Doppler 速度の推定誤差を定量的に評価するために第 4 章で得られた降雨モデルを用いてシミュレーションを行った。その結果、ビームサイズ等の観測パラメータを現在の TRMM 降雨レーダーと同じとした場合は 4.5m/s という大きな誤差を生じることが明らかとなり、システム設計の変更が必要であることが分かった。

謝 辞

本研究を行なうに際して貴重な御意見を賜り、また直接丁寧な御指導を頂いた佐藤 亨 教授 に心から感謝致します。

日頃から、研究会等において貴重なご助言を頂いた 乗松 誠司 助教授、笠原 禎也 助手、松尾 敏郎 助手に感謝致します。

中間発表会、および目次発表会の際、超高層電波研究センターの 松本 紘 教授、深尾 昌一郎 教授、橋本 弘藏 教授、津田 敏隆 教授をはじめ諸先生方には貴重なご意見を頂き深く感謝致します。

また、本研究を進めるにあたって様々な相談に応じていただき、貴重な助言を頂いた 多田 有己 氏をはじめとするレーダーグループの方々に感謝致します。

最後に、本論文の作成に当たりご助力頂いた佐藤研究室の皆様に御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) M.Yoshizaki , Y.Tanaka, T.Kato, H.Seko, H.Takayama, K.Fujiyoshi,and X-BAIU-98 group “Comparison of TRMM Data with Precipitation Observation over the East Chinasea in the Baiu Season(X-BAIU-98),” *Proc. Symp. Precipitation Observation from Non-Sun Synchronous Orbit*, pp. 206-209, 1998.
- 2) 彭瑞椿, MUレーダーと航空機搭載レーダーを用いた衛星搭載レーダー降雨推定法に関する研究,
京都大学工学研究科 修士論文, 1997
- 3) 彭瑞椿, 佐藤 亨, 花土 弘, 堀江 宏昭, MUレーダーと航空機搭載レーダーによる降雨の同時観測,
信学技報,SANE96-85, Jan 1997
- 4) 寺岡 俊浩, MUレーダーと航空機搭載レーダーを用いた衛星搭載レーダー降雨推定に関する研究,
京都大学工学研究科 修士論文, 1995
- 5) T. Sato, T. Teraoka, I. Kimura “Validation and Ground Truth for TRMM Precipitation Radar Using the MU Radar,” *IEICE Trans. Commun.*, VOL. E79-B, No. 6 June 1996
- 6) T. Sato and P. Kishore, “Simultaneous Observations of Rain Events by TRMM Precipitation Radar and the MU Radar,” *Proc. 1999 IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, pp. 2066–2068, 1999.

付録 A レーダーによる降雨推定の原理

A.1 レーダーによる降雨推定の原理

レーダーによる降雨の観測は地上の気象レーダーを用いて広く行われている。地上の降雨レーダーに適用されている降雨強度の推定手法は原理的に衛星搭載レーダーにも適用できる。ここではレーダーによる降雨推定の原理について述べる。レーダーで降雨を観測した場合、その受信電力 P_r はレーダー方程式により次式で表される。

$$P_r = \frac{CA}{r^2} \eta \quad (\text{A.1})$$

ここで、 C はレーダーシステムによって決まる定数、 A は降水粒子による減衰、 $r(\text{km})$ はレーダーから測定点までの距離を表す。 $\eta(\text{cm}^2\text{m}^{-3})$ は体積反射率で単位体積当たりの雨滴の散乱断面積を表す。今、雨滴の直径 $D(\text{cm})$ が波長 $\lambda(\text{cm})$ に比べて十分小さく Rayleigh 近似が成り立つとき、球形雨滴の散乱断面積 $\sigma_R(\text{cm}^2)$ は

$$\sigma_R = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 D^6 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 D^6 \quad (\text{A.2})$$

で表される。ここで m は水の複素屈折率を表し、温度と波長の関数である。 K を誘電係数という。これより η は

$$\eta = \sum \sigma_R = \frac{\pi^5}{\lambda^4} |K|^2 \sum D^6 \quad (\text{A.3})$$

で与えられる。ここで \sum は単位体積中の全雨滴についての和を表す。したがって受信電力 P_r は $\sum D^6$ に比例し、降雨が受信電力に関係する項として $\sum D^6$ をレーダー反射因子 (Radar Reflectivity Factor) Z と呼ぶ。降雨減衰が無視できる場合、受信電力からレーダー反射因子 Z を求めることができる。単位体積中の雨滴の個数の分布を表す降雨粒径分布 $N(D)$ を用いるとレーダー反射因子 Z は次式で表すことができる。

$$Z = 10^{12} \int N(D) D^6 dD \quad (\text{A.4})$$

また、降雨強度 R は雨滴の落下速度 $v(D)$ を用いて

$$R = 6\pi \times 10^5 \int N(D)D^3|v(D)|dD \quad (\text{A.5})$$

と表される。ここで、 Z 、 $N(D)$ 、 R 、 $v(D)$ の単位はそれぞれ mm^6m^{-3} 、 cm^{-4} 、 mm/h 、 m/s である。降雨粒径分布 $N(D)$ を測定することができれば式 (A.5) により降雨強度を求めることができるが、ドップラー速度測定の機能を持たないレーダーでは降雨粒径分布を求める手法は確立されていない。そこで平均的な粒径分布から、或は地上での降雨強度とレーダー受信電力から、 Z と R の関係 ($Z-R$ 関係) を

$$Z = cR^d \quad (\text{A.6})$$

と近似し、観測されるレーダー反射因子 Z より式 (A.6) を用いて降雨強度を求めるという方法が用いられている。パラメータ c 、 d の値は降雨粒径分布により支配され、降雨の種類によって大きく変化することが知られているが、実際的には $c = 200$ 、 $d = 1.6$ の値が用いられることが多い。

しかし、TRMM 降雨レーダーのように 10 GHz 程度以上の高周波のレーダーでは、電波は降雨による減衰を受けるので、受信電力から得られる Z から $Z-R$ 関係を用いて計算した R は実際の値より小さく推定される。このため、伝搬路におけるレーダー波の減衰補正を行う必要がある。更に、波長が短くなるために Rayleigh 近似が成り立たなくなり、Mie の散乱理論に基づく厳密な取り扱いが必要となる。Mie の散乱理論を考慮したときのレーダー反射因子を実効レーダー反射因子 (Effective Radar Reflectivity Factor) と呼び、 Z_e で表す。Mie の理論による球形雨滴の散乱断面積を $\sigma_b(\text{cm}^2)$ とすると Z_e は

$$Z_e = \frac{10^{12}\lambda^4}{\pi^5|K|^2} \int \sigma_b(D)N(D)dD \quad (\text{A.7})$$

で表される。また、降雨による減衰 A は雨滴による減衰係数 $k(\text{dB/km})$ を用いて

$$A = \exp[-0.2 \ln 10 \int_0^r k(s)ds] \quad (\text{A.8})$$

と表すことができる。ここで減衰係数 k は雨滴の消失断面積 $\sigma_t(\text{cm}^2)$ を用いて次式で表される。

$$k = 4.343 \times 10^5 \int \sigma_t(D)N(D)dD \quad (\text{A.9})$$

また、高周波のレーダーの受信電力から得られるレーダー反射因子は降雨減衰を受けたみかけの実効レーダー反射因子であり、これを Z_m で表す。 Z_m は式 (A.7), (A.8) より

$$Z_m(r) = Z_e(r) \exp[-0.2 \ln 10 \int_0^r k(s) ds] \quad (\text{A.10})$$

と表される。衛星搭載レーダーによる降雨推定では、観測される Z_m から降雨減衰を補正した Z_e を求め、 R と Z_e の関係式 ($R - Z_e$ 関係) を用いて降雨強度を推定する方法が提案されている。

A.2 MUレーダーの降雨粒径分布推定原理

雨滴からのエコーのドップラースペクトル $S_p(v_p)$ は降雨粒径分布 $N(D)$ を用いて

$$S_p(v_p) = C \cdot N(D) D^6 / \left| \frac{d(v_p(D))}{dD} \right| \quad (\text{A.11})$$

と表される。ここで D (cm) は雨滴の直径、 C は MU レーダーの諸定数から決定される定数である。 $v_p(D)$ (m/s) は鉛直上向きを正とする雨滴の落下速度であり、次式により表される。

$$v(D) = -\{9.65 - 10.3 \exp(-6D)\} \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{0.4} \quad (\text{A.12})$$

ここで ρ_0 及び ρ はそれぞれ地上及び観測高度における大気の密度である。降雨粒径分布 $N(D)$ (cm^{-4}) のモデル関数としては次式で表されるガンマ分布を用いている。

$$N(D) = \begin{cases} N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) & (v_{\max} \leq v_p(D) \leq 0) \\ 0 & (v_p(D) < v_{\max}, 0 < v_p(D)) \end{cases} \quad (\text{A.13})$$

ここで、 N_0 ($\text{cm}^{-4-\mu}$), Λ (cm^{-1}), μ はそれぞれ降雨の種類によって決まる定数で降雨パラメータである。また、 v_{\max} (m/s) は雨滴の最大落下速度で雨滴の最大直径 D_{\max} (cm) を仮定することにより式 (A.12) を用いて計算することができる。一方、大気乱流エコーのドップラースペクトル $S_t(v)$ は

$$S_t(v) = P_0 \cdot \exp\left[-\frac{(v-w)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A.14})$$

というガウス関数で近似される。ただし P_0 はパワースペクトルの最大値, $w(\text{m/s})$ は視線方向平均風速, $\sigma(\text{m/s})$ はスペクトル幅を表す。

MU レーダーで降雨時に観測されるドップラースペクトル $S(v)$ は

$$S(v) = P_0 S_0(v) + S_p(v) * S_0(v) + P_n \quad (\text{A.15})$$

で表される。ここで $S_0(v)$ は $S_t(v)$ を正規化した関数

$$S_0(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(v-w)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (\text{A.16})$$

であり, P_n はノイズレベルである。しかし実際の観測においてはFFTを行うときにデータ長が有限であることによりスペクトルが歪み, 式 (A.15) の $S(v)$ とFFTの窓関数 $W(v)$ とのたたみこみ積分

$$S'(v) = S(v) * W(v) \quad (\text{A.17})$$

が観測されることになる。以上により式 (A.17) に含まれるパラメータは $P_0, w, \sigma, N_0, \Lambda, v_{\max}, \mu, P_n$ の8個である。 $S'(v)$ は大気乱流の情報とともに降雨粒径分布 $N(D)$ に関する情報も含んでいるので, 式 (A.17) から粒径分布パラメータを推定することができる。それには観測されたスペクトル $S_{\text{obs}}(v)$ と $S'(v)$ の対数を取り, その残差二乗和を非線形最小二乗法を用いて最小化することによりパラメータを推定する。ただし, 非線形最小二乗法のパラメータは $P_0, w, \sigma, N_0, \Lambda, v_{\max}, P_n$ の7個とし, μ については直接探索により決定する。ここでスペクトルの対数をとるのは, 大きさがエコー強度に比例する統計的ゆらぎの影響をスペクトル強度によらず同等とするためである。

以上のようにして, MU レーダーでは観測されるスペクトルから降雨粒径分布を求めることができる。またその際, 降雨粒径分布推定で重要な背景風や大気乱流といった大気のパラメータを同時に推定するので精度のよい推定が可能である。

付録 B 等方関数の 2 次元フーリエ変換とハンケル変換

B.1 等方関数の 2 次元フーリエ変換とハンケル変換

次の命題 P は真である。

命題 P

「等方な関数 $f(\mathbf{r})$ ($\mathbf{r} \in \mathbb{R}^2$) についてその 2 次元フーリエ変換 $F(k)$ は

$$F(k) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{r}) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) dS = 2\pi \int_0^{\infty} J_0(kr) f(r) r dr \quad (\text{B.1})$$

ここで $J_0(\bullet)$ は 0 次の第一種ベッセル関数である。上式の右辺は Hankel 変換と呼ばれる。」

命題 P を以下証明する。

証明

$$F(k) = \int \int_{-\infty}^{\infty} f(\mathbf{r}) \exp(-j\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) dS \quad (\text{B.2})$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-jk_x x) \exp(-jk_y y) dx dy \quad (\text{B.3})$$

実領域の変数 (x, y) を極座標 (r, θ) を用いて表現し、周波数領域の変数 (k_x, k_y) を極座標 (k, ϕ) を用いて表現する。

$$F(k) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f(r, \theta) \exp(-j(k_x x + k_y y)) r dr d\theta \quad (\text{B.4})$$

$$= \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} f(r, \theta) \exp(-j(kr \cos(\theta - \phi))) r dr d\theta \quad (\text{B.5})$$

ここで次の式を用いる。

$$\int_{-\pi}^{\pi} e^{jz \cos \theta} d\theta = 2\pi J_0(z) \quad (\text{B.6})$$

すると $F(k)$ は

$$F(k) = 2\pi \int_0^{\infty} J_0(kr) f(r) r dr \quad (\text{B.7})$$

となり、命題 P は証明された。(証明終)

付録 C 衛星搭載ドップラーレーダーのドップラー速度推定に関する提案法

C.1 オーバーサンプリング観測モードにおけるスペクトル包絡線を利用したドップラー速度推定法

本文中で述べた観測スペクトルの1次モーメントを用いる手法 (Moment Method ;MMと以下略す) を用いた広域の観測モードの他に、ビームを走査せずに衛星の鉛直下方にビームを固定し、互いに重複するビームで観測を行うオーバーサンプリングビーム観測モードを考える。両者を交互に行うハイブリッド観測モードを用いることで局所的な降雨エコーのドップラー速度及び広範囲の降雨エコー強度を観測することが可能であると考えられる。その観測概念図を図 C.1に示す。

以下ではオーバーサンプリング観測モードにおけるドップラー速度推定法の提案をする。オーバーサンプリング観測モードでは、ビームサイズは現在と同じサイズを考えるとすると、コヒーレント積分及びインコヒーレント積分の回数をそれぞれ N_{co} 、 N_{in} 、FFT 点数を N_F 、1ビーム当りの重なり回数 N_b 、チャンネル数 N_c としたときに次式が成り立つ。

$$N_{co}N_{in}N_FN_b = 1500N_c \quad (C.1)$$

ここで N_{co} 、 N_{in} 、 N_F 及び N_b を十分大きくできると仮定する。これは降雨の空間的ゆらぎによって生じる誤差の影響のみを考えることと同値である。

本文では0に固定していた x_c を本節では変数として扱う。式 (5.3) に式 (5.2) を代入し、次式を得る。

$$S(v, x_c) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x - x_c, y) S_0 \left(v - \frac{v_s}{H}(x - x_c), x, y \right) dx dy \quad (C.2)$$

以下、 $S(v, x_c)$ を単に S と書くことにする。また、降雨のドップラースペクトルを

$$S_0 \left(v - \frac{v_s}{H}(x - x_c), x, y \right) = \zeta(x, y) G(\beta(r - (x - x_c))) \quad (C.3)$$

と仮定する。ここで、 $G(v) = \exp\left(-\frac{v^2}{\sigma^2}\right)$ とし、 $\beta = \frac{v_s}{H}$, $r = \frac{v - v_0}{\beta}$ とおく。以上より式 (C.2) は次式のようになる。

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x - x_c, y) \zeta(x, y) G(\beta(r - (x - x_c))) dx dy \quad (C.4)$$

積分変数を $x \rightarrow X + x_c$ と変換する。

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(X, y) \zeta(X + x_c, y) G(\beta(r - X)) dX dy \quad (C.5)$$

ここで $\sigma \ll \beta(r - X)$ とし、次式を仮定する。

$$G(\beta(r - X)) \simeq \sqrt{\pi} \delta(r - X) \quad (C.6)$$

ここで $\delta(x)$ はディラックのデルタ関数である。

$$S = \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(X, y) \zeta(X + x_c, y) \delta(r - X) dX dy \quad (C.7)$$

$$= \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(r, y) \zeta(r + x_c, y) dy \quad (C.8)$$

ここで、次式のように関数 $f(S, r, x_c)$ を定義する。

$$f(S, r, x_c) = S - \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(r, y) \zeta(r + x_c, y) dy \quad (C.9)$$

ここで各曲線 $C_{x_c}: f(S, r, x_c) = 0$ による曲線群 $\{C_{x_c}\}$ を考える。 $f(S, r, x_c)$ は C^1 級であり、曲線 E が曲線群 $\{C_{x_c}\}$ の包絡線ならば、E の各点 (S, v) は次の連立方程式を満たす。

$$\begin{cases} f(S, r, x_c) = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial x_c}(S, r, x_c) = 0 \end{cases} \quad (C.10)$$

式 (C.9) を代入して、

$$\begin{cases} S = \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(r, y) \zeta(r + x_c, y) dy \\ \frac{\partial f}{\partial x_c}(S, r, x_c) = -\sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(r, y) \frac{\partial \zeta}{\partial r}(r + x_c, y) dy = 0 \end{cases} \quad (C.11)$$

式 (C.11) より

$$\frac{\partial S}{\partial r} = \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(r, y) \frac{\partial \zeta}{\partial r}(r + x_c, y) dy + \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial B(r, y)}{\partial r} \zeta(r + x_c, y) dy \quad (C.12)$$

式 (C.11) により次式が導かれる。

$$\frac{\partial S}{\partial r} = \sqrt{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial B(r, y)}{\partial r} \zeta(r + x_c, y) dy \quad (\text{C.13})$$

また、通常のビームパターンは次式を満たす。

$$\left. \frac{\partial B(r, y)}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \quad (\text{C.14})$$

よって、 $\left. \frac{\partial S}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$ である。つまり、曲線 E は $v = v_0$ において極値あるいは変曲点を持つ。この原理を利用したドップラー速度推定法を SEM (Spectrum Envelope Method) 法と呼ぶ。

上で述べた包絡線を求めるには N_b を無限大にする必要があるが、実際には x_c が離散化されているため、 C_{x_c} は有限集合となり、そこから包絡線を求める過程に誤差が生じる。 C_{x_c} の量子化単位を 100m/s と十分小さくした場合のドップラースペクトル曲線群を図 C.2 に示す。図には曲線群の包絡線がみられ、その最大値をとる速度は降雨のドップラー速度である -8m/s である。一方、ビーム中心の間隔を 500m としたオーバーサンプリング観測モードにおけるスペクトルを図 C.3 に示す。この場合、 C_{x_c} の量子化が粗く、包絡線を推定するのは難しい。

本文中で精度を評価した MM 法は推定する降雨ドップラー速度が確率的に決定され、その期待値が降雨のドップラー速度となる。アンサンブル平均によってランダム誤差を抑える手法であり、本文中でも述べたように N_a 回の試行平均によってランダム誤差は $\frac{1}{\sqrt{N_a}}$ 倍になるという特徴を持つ。一方、上で述べた SEM 法の特徴は MM 法のように降雨の空間的ゆらぎに起因する誤差が確率的に決まるのではないという点である。そのことにより、「有限要素の曲線群から包絡線を推定する」というアルゴリズムの改善によって MM 法よりも推定誤差を低くすることが可能であると考えられる。今後、雑音の影響や離散化の影響を定量的に調べ、SEM 法の推定誤差を詳細に評価していく必要がある。

表 1.1: TRMM 降雨レーダーの主要諸元

レーダー方式	アクティブファイズドアレイ方式
周波数	13.8 GHz
アンテナ開口	2.1 m × 2.1 m
送信出力	620 W (ピーク値)
パルス繰り返し周波数	2776 Hz *2ch
独立サンプル数	64
水平分解能	4.3 km (直下点において)
距離分解能	250 m
観測高度範囲	高度 15 km
走査幅	±17° (215 km)
検出感度	0.7 mm/h 降雨時に降雨頂で S/N 0 dB 以上

表 1.2: MU レーダーの主要諸元

中心周波数	46.5MHz
アンテナ実効面積	8330m ² (直径 103 m)
ビーム幅	3.6°
占有帯域幅	1.65MHz
送信電力	ピーク電力 1MW 平均電力 50kW
送信パルス幅	1 μsec – 512 μsec
ビーム走査範囲	1657 方向 天頂角 0° – 16° 1°ステップ 18° – 30° 2°ステップ 方位角 0° – 355° 5°ステップ
ビーム方向切換速度	最高 2500 回/sec
アンテナ分割使用	475 組の直交八木アンテナを 19 本ずつ 25 群に分け、各群ごとに送信の ON・OFF 及びビーム方向の指定ができる
偏波	右旋・左旋円偏波、東西・南北直線偏波
受信ダイナミックレンジ	70dB

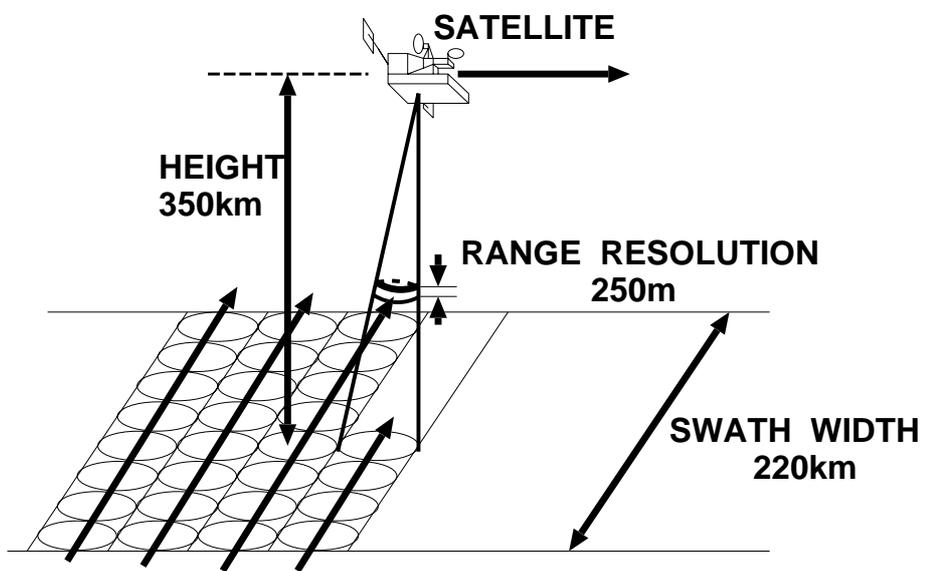


図 1.1: TRMM 衛星による観測概念図

表 2.1: 19 ビーム観測の観測パラメータ

送信パルス幅	1 μsec
パルス繰り返し周期	400 μsec
コヒーレント積分回数	10
インコヒーレント積分回数	5
FFT 点数	128
時間分解能	48 sec
高度分解能	約 150 m
ビーム走査方向 (azimuth,zenith)	(0, 0), (0, 15), (60, 15), (120, 15) (180, 15), (240, 15), (300, 15), (0, 30) (30, 26), (60, 30), (90, 26), (120, 30) (150, 26), (180, 30), (210, 26), (240, 30) (270, 26), (300, 30), (330, 26)

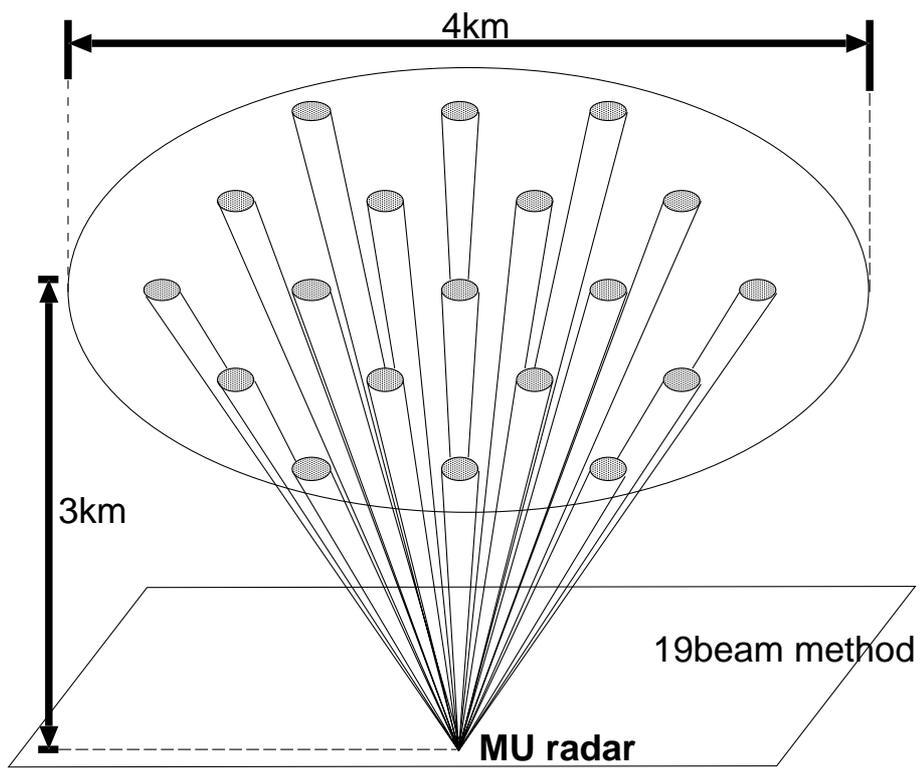


図 2.1: 19 ビーム法の観測概念図

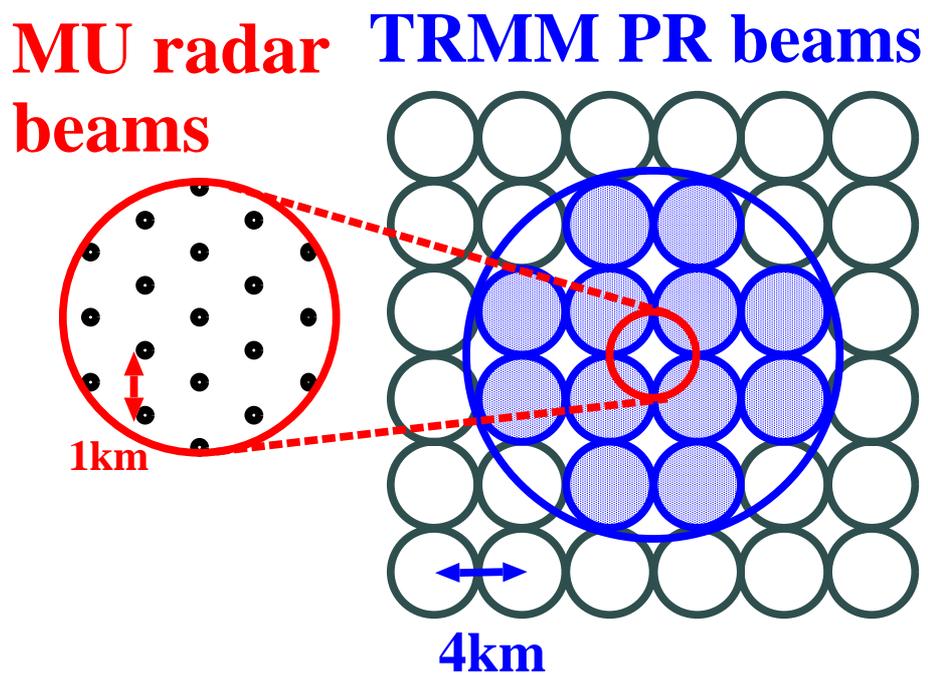


図 2.2: MU レーダー及び TRMM PR のビームサイズ及びビーム配置

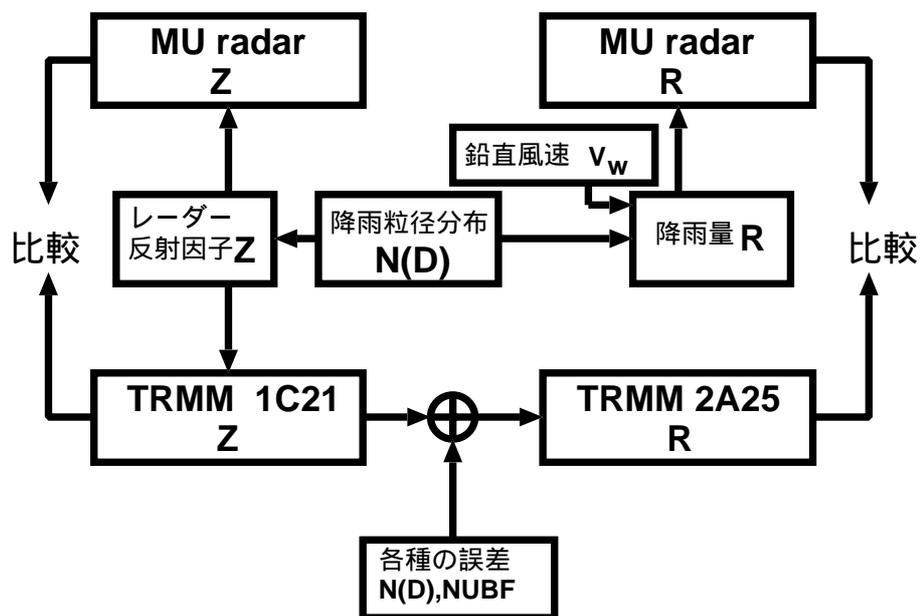


図 2.3: MU レーダー及び TRMM PR のデータの関係図

表 3.1: TRMM/MU 同時観測データ一覧

Date	TRMM Apex (JST)	MU Obs (JST)	Rain Rate (mm/hr)	Data Status
23-Apr-98	23:55:29	23:51:03-23:58:22	0.3-0.7	A
11-May-98	15:03:19	14:58:23-15:06:30	0.5-1.0	A
09-Jun-98	23:42:13	23:32:35-23:48:00	1.8-2.8	B
16-Jul-98	06:19:28	06:13:24-06:27:21	1.7-2.1	B
29-Jul-98	21:28:23	21:23:38-21:34:11	7.7-11.6	B
21-Sep-98	17:37:08	17:33:02-17:41:57	0.1-1.1	A
07-Oct-98	09:32:52	09:27:07-09:37:40	1.1-1.5	A
07-Oct-98	11:09:18	11:06:51-11:15:46	1.1-1.8	A
16-Oct-98	06:42:15	06:39:55-06:46:25	1.6-3.7	A
24-May-99	12:33:29	12:29:52-12:38:47	0.0-0.0	A
27-May-99	08:55:53	08:50:26-09:01:47	0.0-30.0	A
27-May-99	10:32:19	10:29:01-10:37:55	0.0-0.0	A
23-Jun-99	20:00:49	19:59:58-20:04:50	0.5-1.0	A

A:2A25 あり、B:2A25 なし

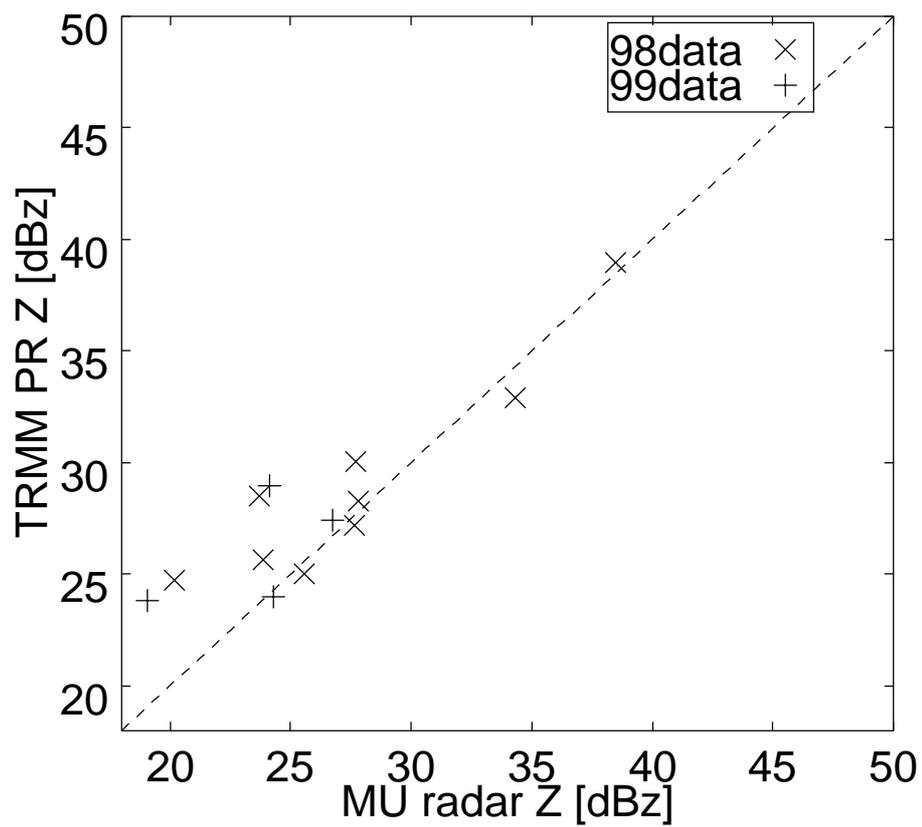


図 3.1: MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値の比較

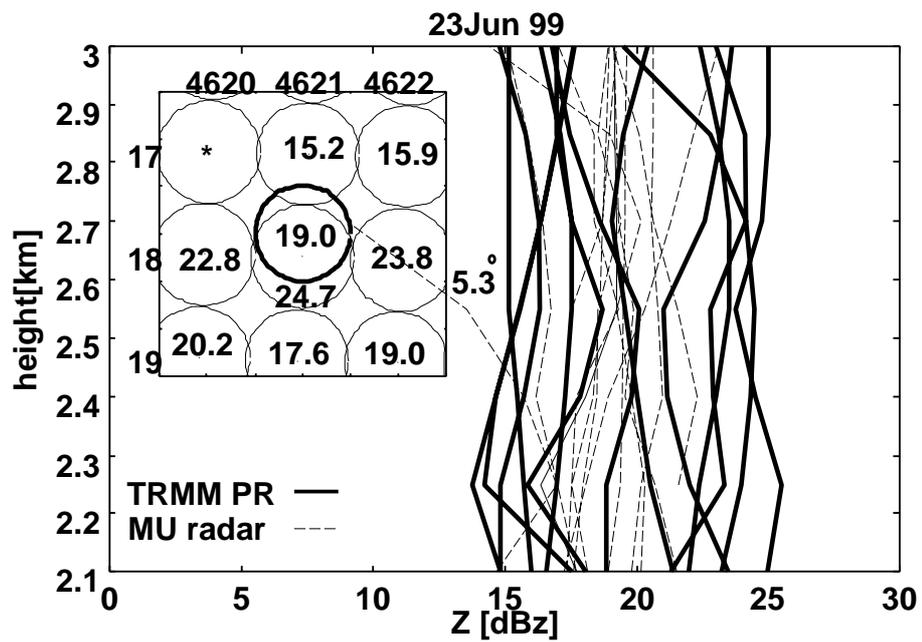


図 3.2: 1999 年 6 月 23 日の TRMM PR 及び MU レーダーの Z 値の高度プロファイル及びその際のビームのフットプリント

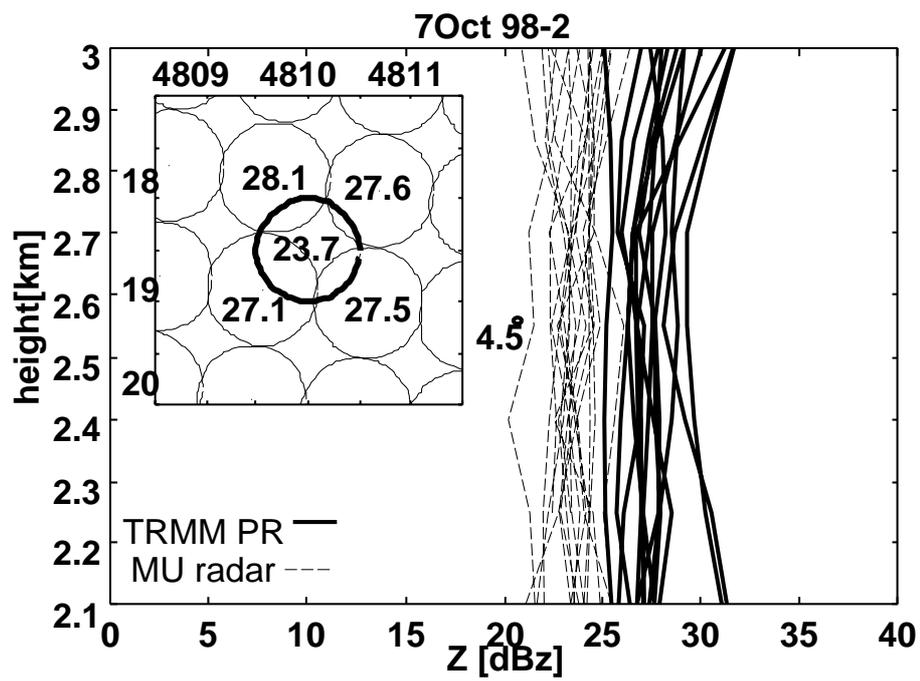


図 3.3: 1998 年 10 月 7 日の TRMM PR 及び MU レーダーの Z 値の高度プロファイル及びその際のビームのフットプリント

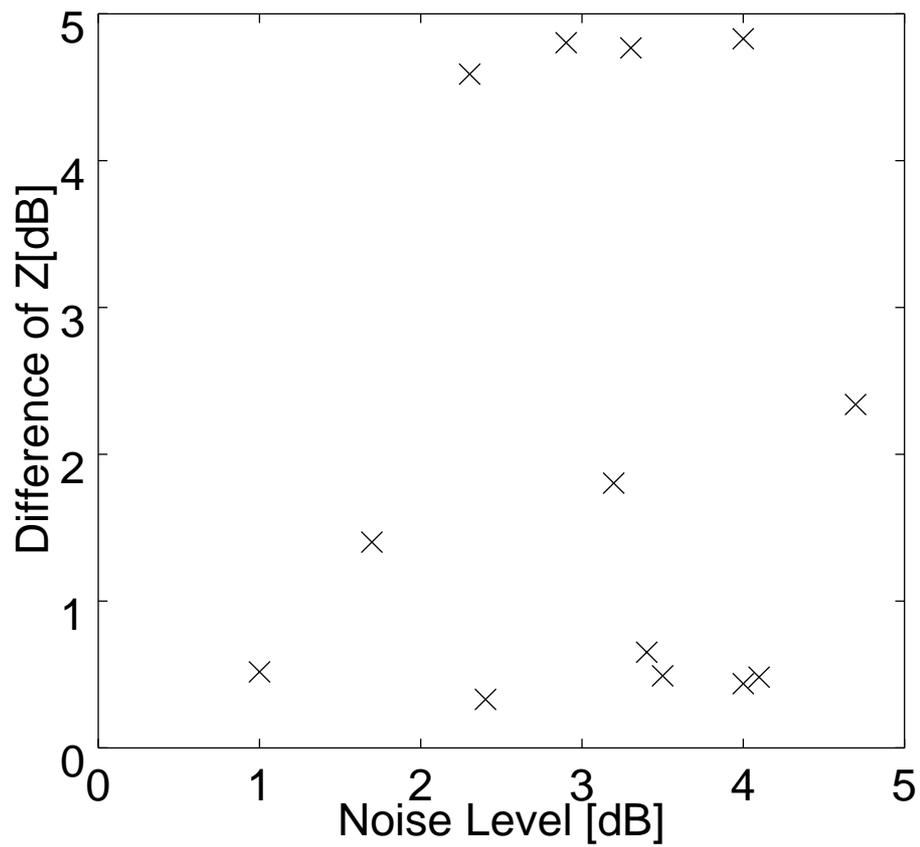


図 3.4: 観測日時及び方向に対応する銀河背景雑音温度及びその際の降雨同時観測の両レーダーの Z 値の差

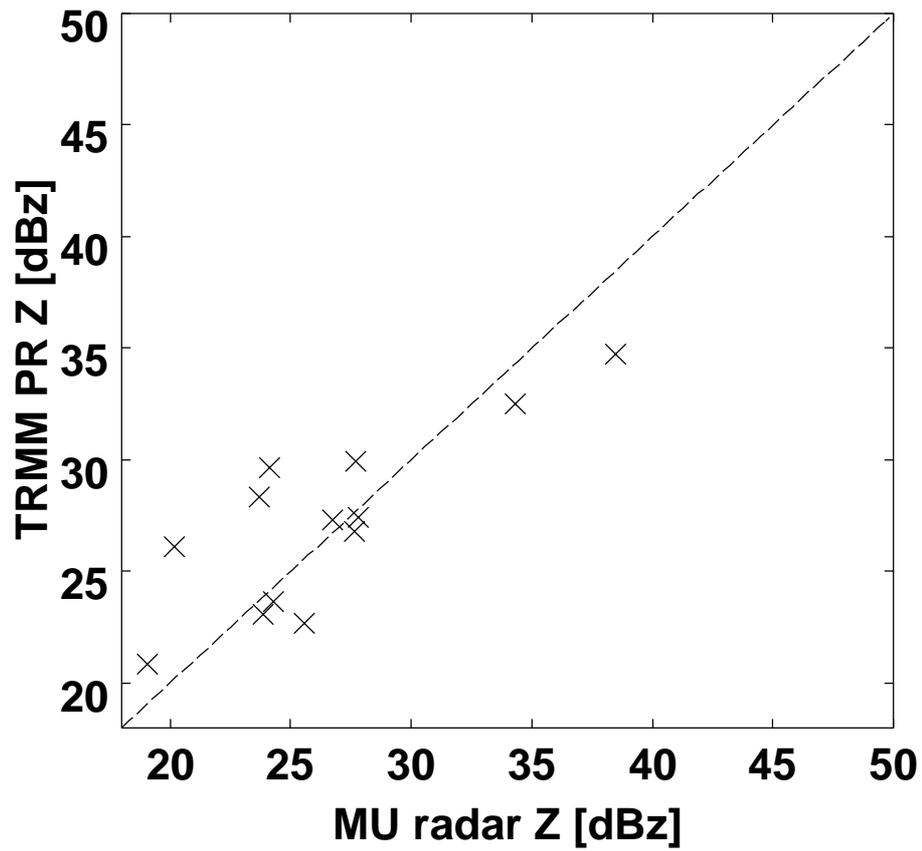


図 3.5: TRMM PR のデータを距離の逆数での重み付けを行った際の両レーダの Z 値の比較

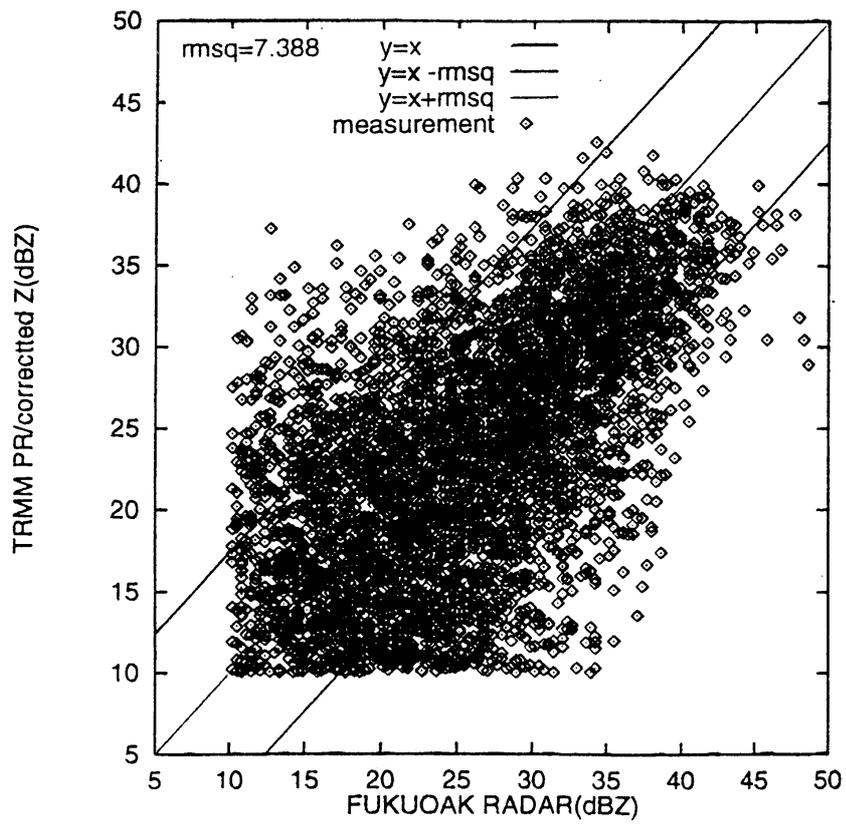


図 3.6: 福岡レーダー及び TRMM PR の Z 値の比較

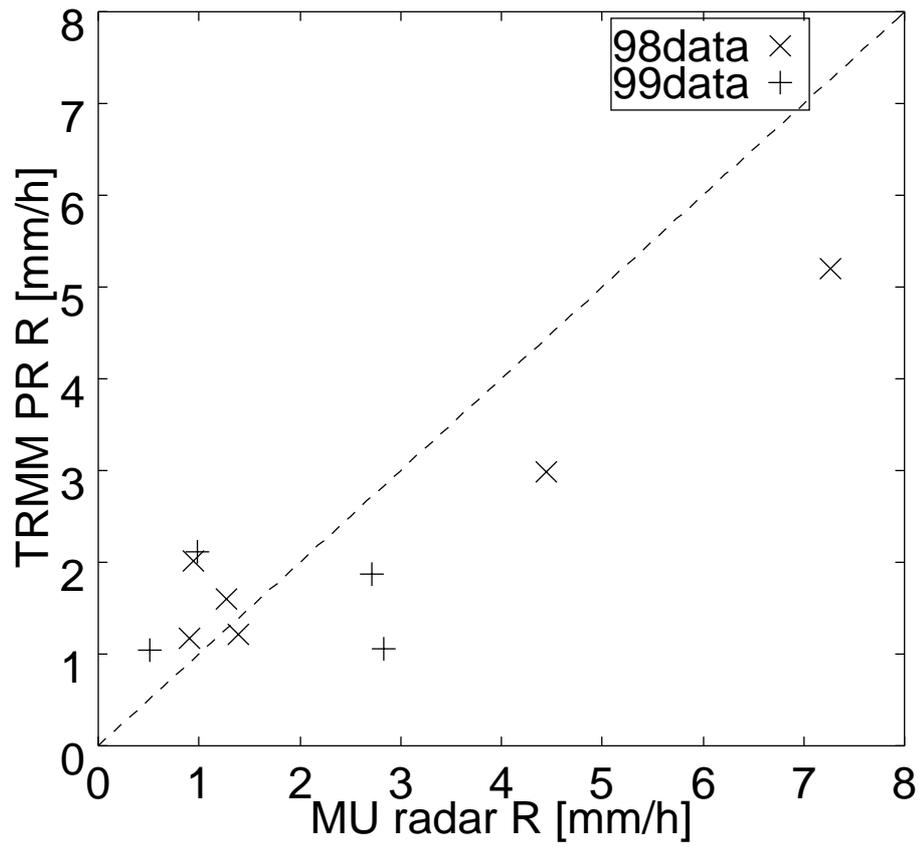


図 3.7: MU レーダー及び TRMM PR で観測された R 値の比較

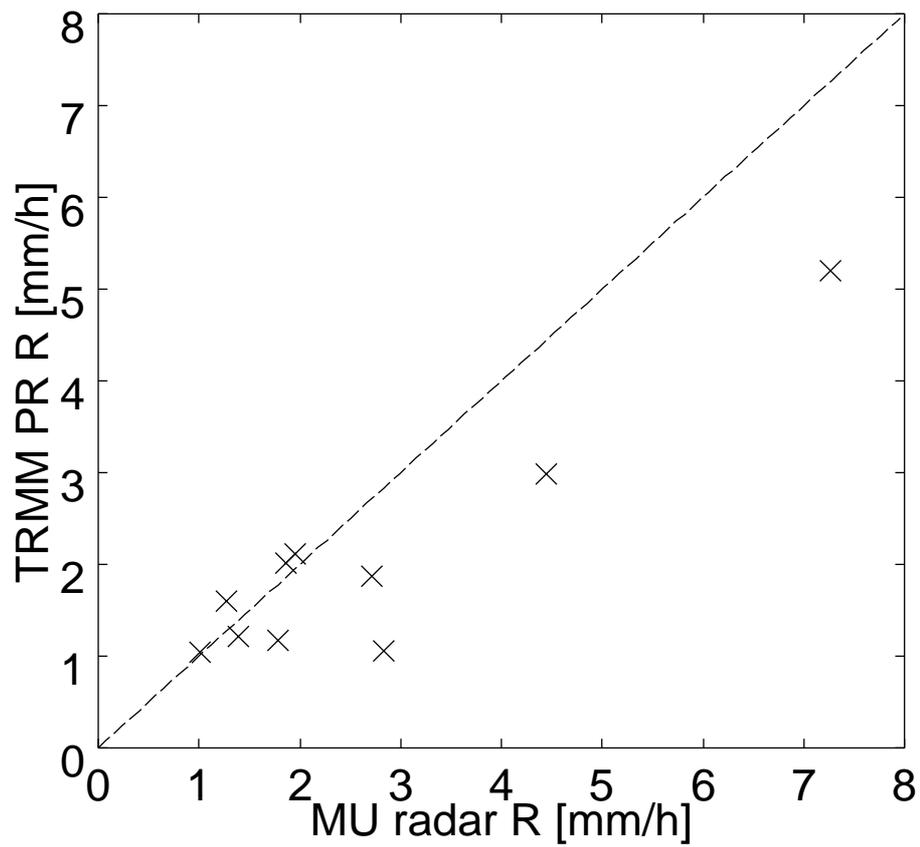


図 3.8: 両レーダーの Z 値の差の大きいケースを補正した効果を反映させた両レーダーの R 値の比較

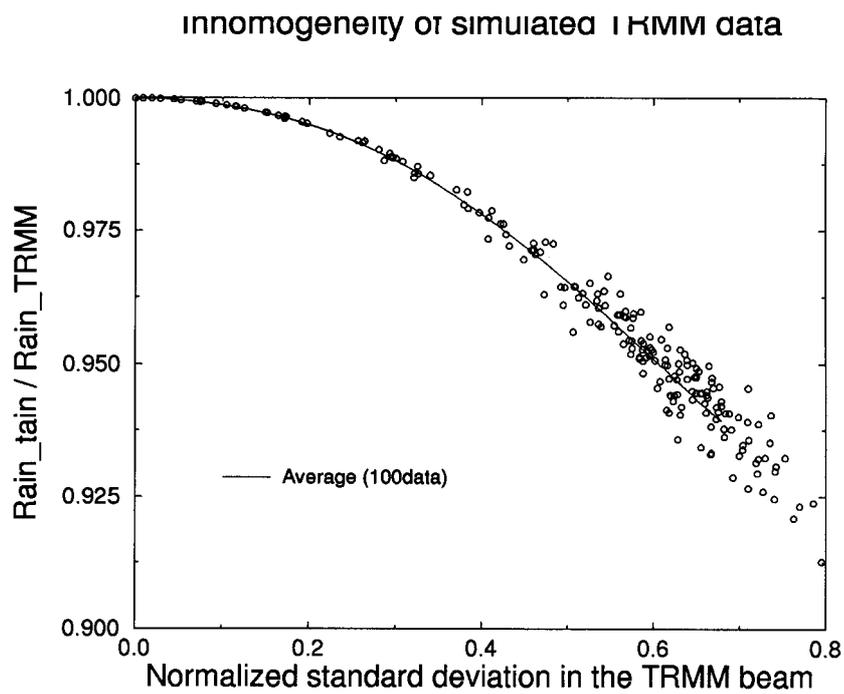


図 3.9: MU レーダー 19 ビーム法の Z 値の水平方向の正規化標準偏差と TRMM PR 降雨強度推定における補正パラメータの関係

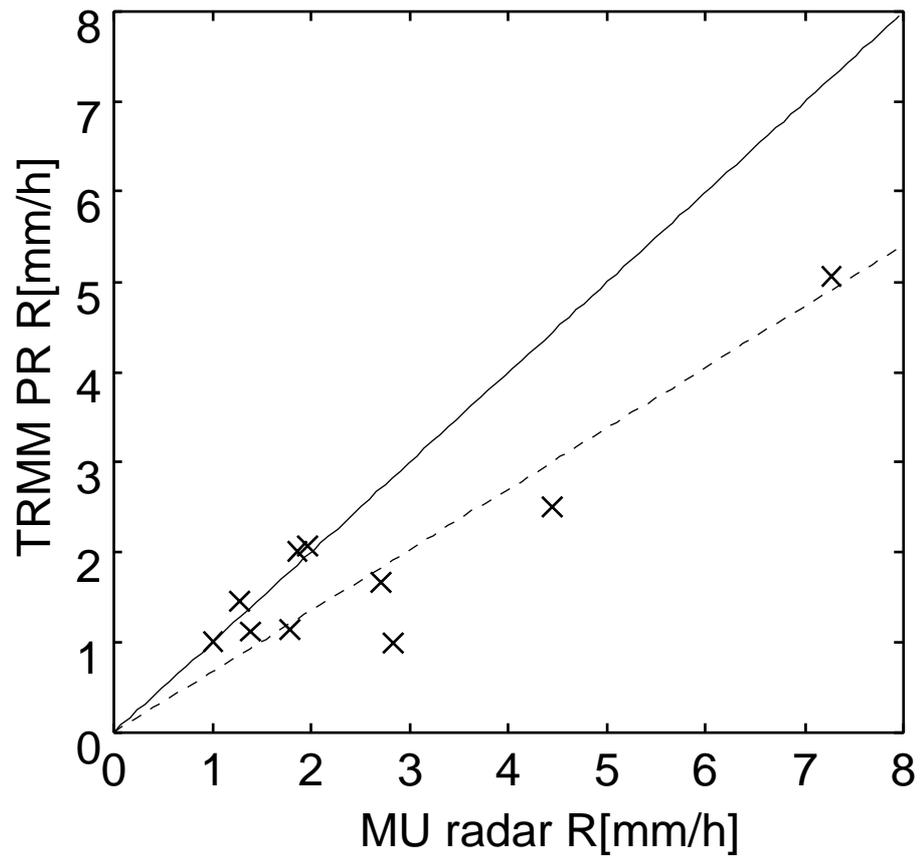


図 3.10: NUBF の影響を補正した両レーダーの R 値の比較結果

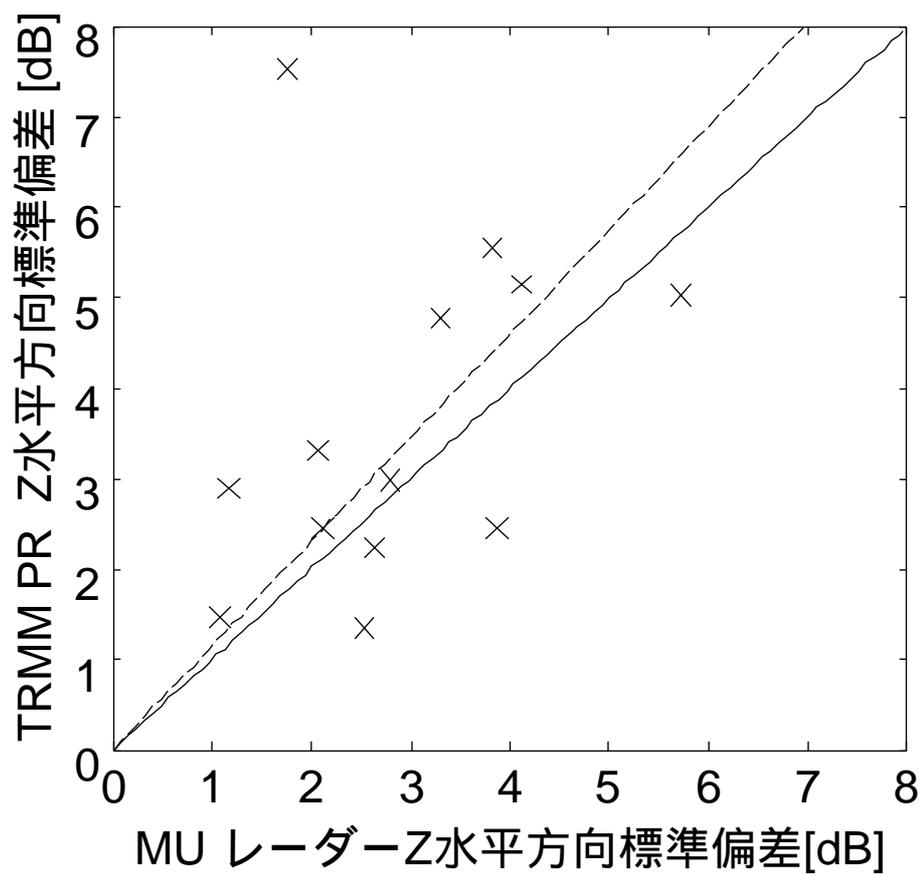


図 3.11: MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値のデータの水平方向の標準偏差

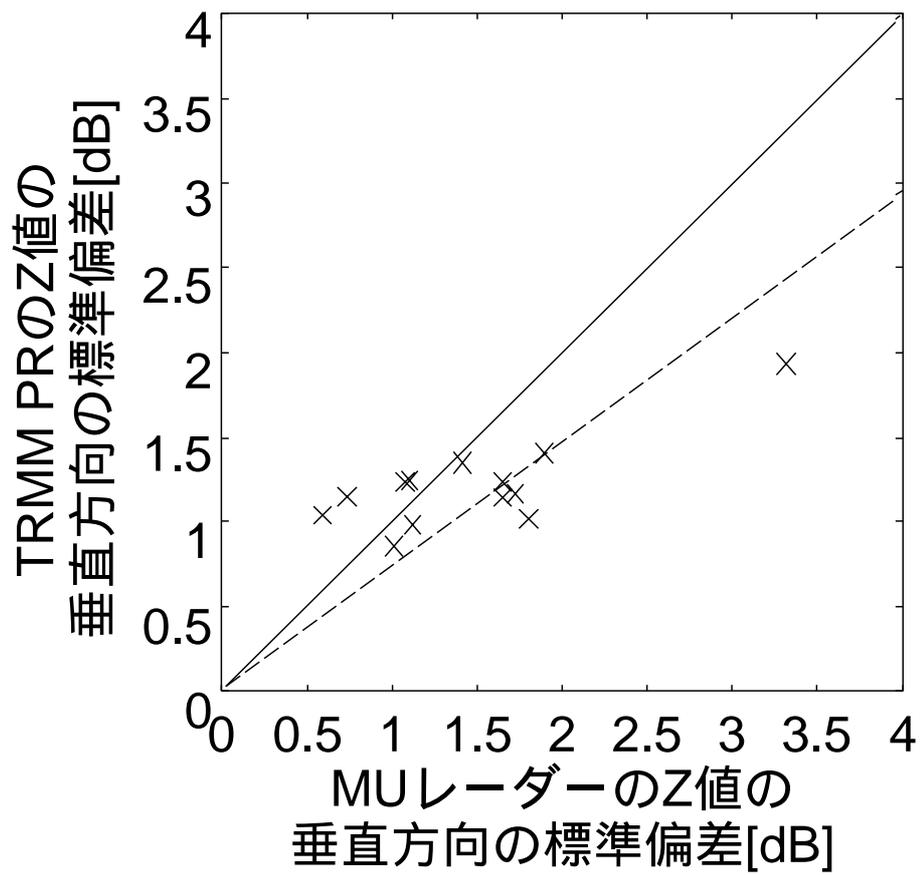


図 3.12: MU レーダー及び TRMM PR で観測された Z 値のデータの垂直方向の標準偏差

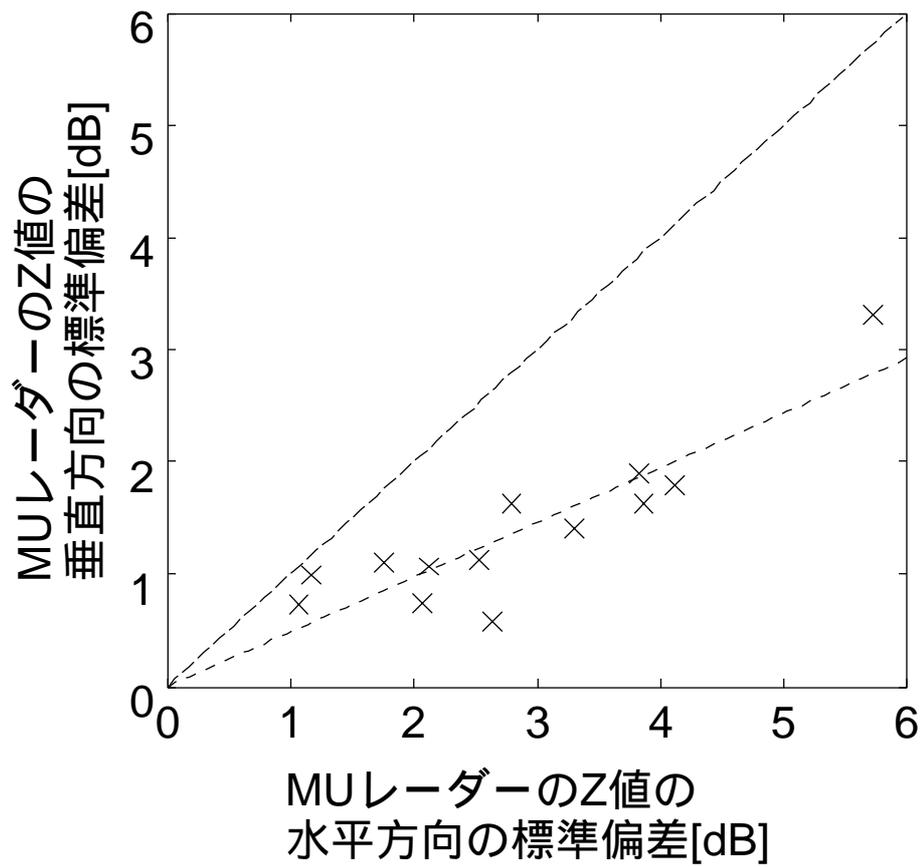


図 3.13: MU レーダーで観測された Z 値のデータの水平方向及び垂直方向の標準偏差

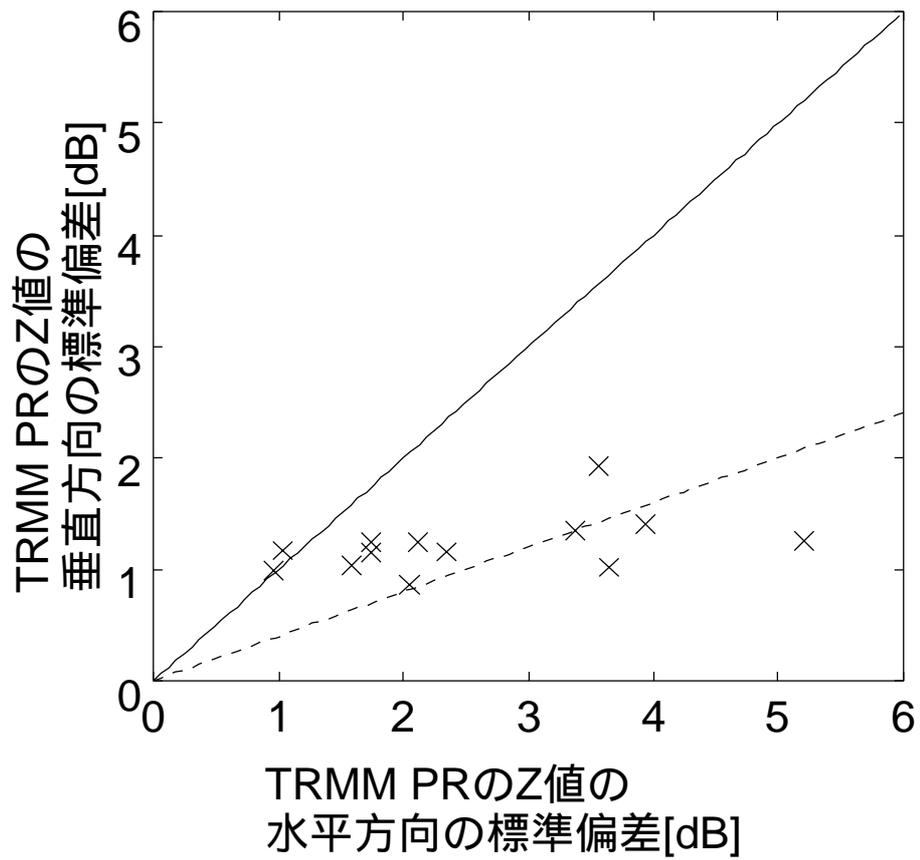


図 3.14: TRMM PR で観測された Z 値のデータの水平方向及び垂直方向の標準偏差

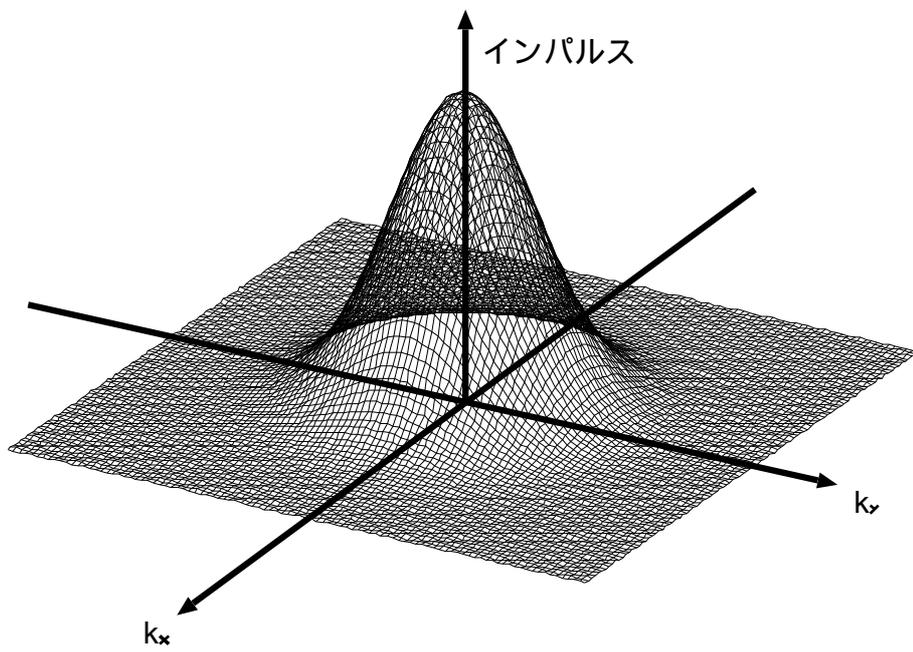


図 4.1: Z のモデルの水平方向のパワースペクトルの概念図

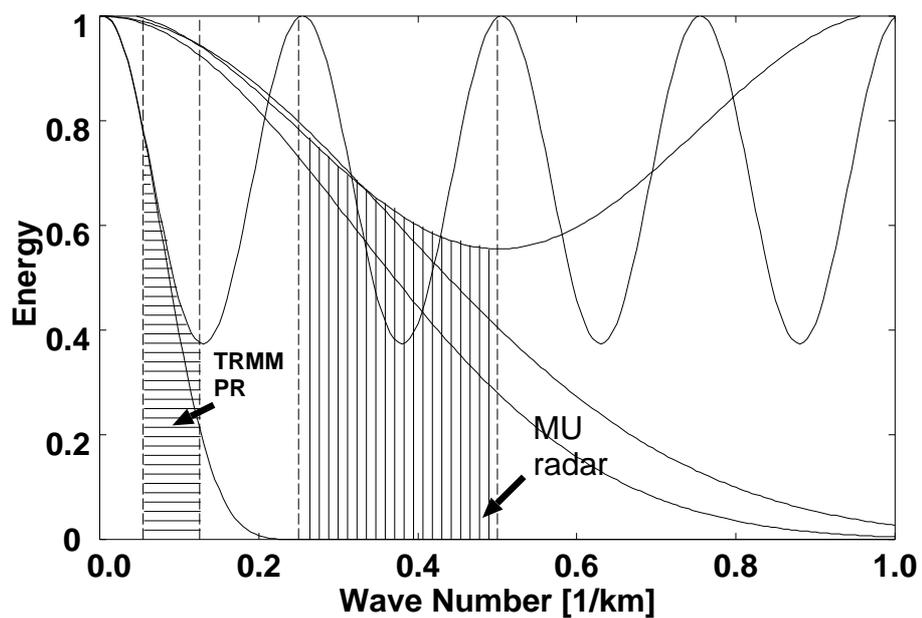


図 4.2: Z のモデルの水平方向の電力スペクトルの半径方向の分布及び両レーダーのデータの分散の電力に寄与している部分

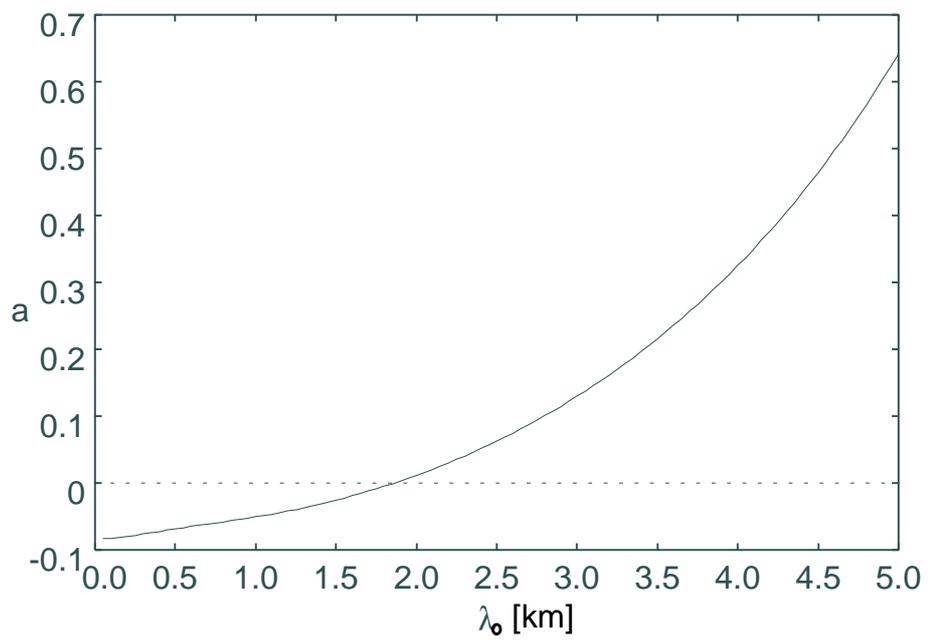


図 4.3: 水平方向のカットオフ波長を求める計算過程

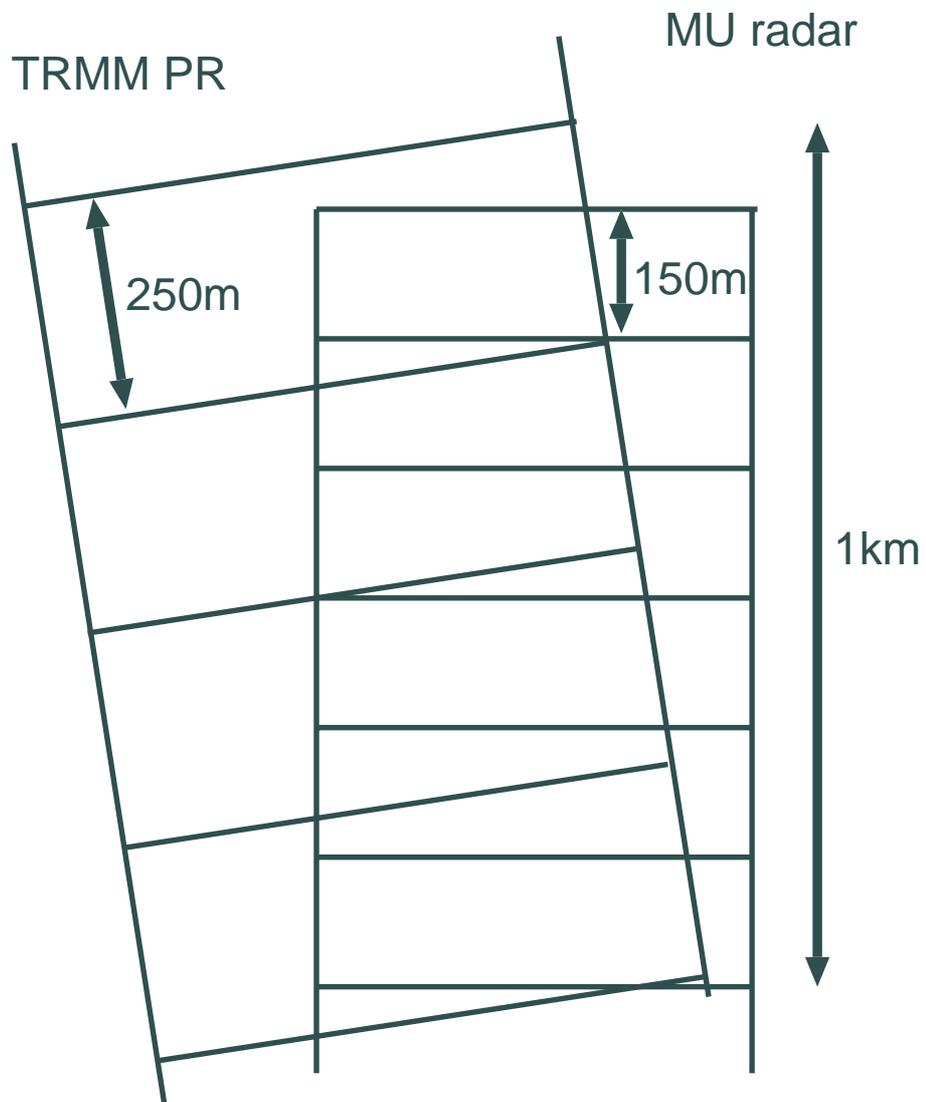


図 4.4: 両レーダーの垂直方向のデータの平滑化及びサンプリング波数

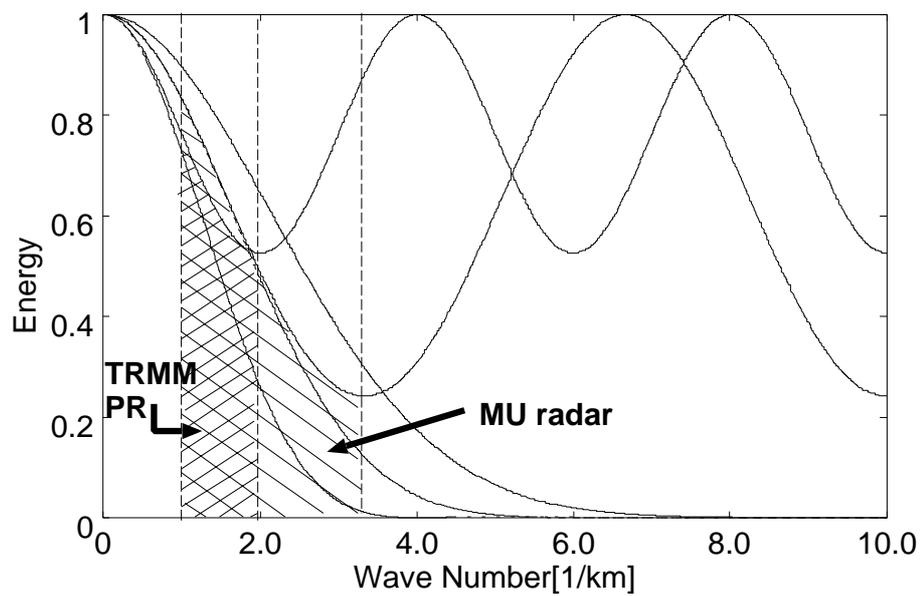


図 4.5: Z のモデルの垂直方向の電力スペクトルの半径方向の分布及び両レーダーのデータの分散の電力に寄与している部分

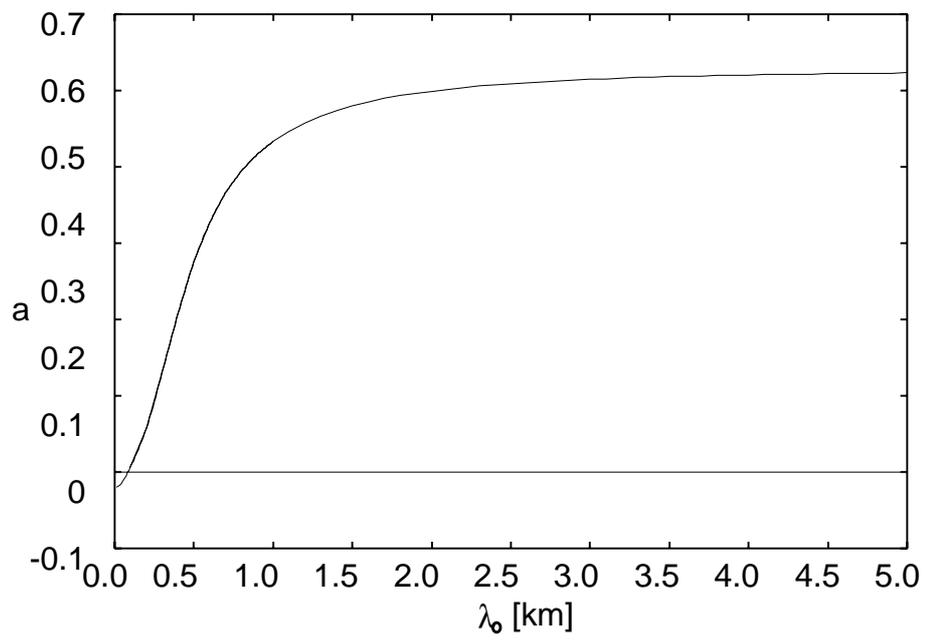


図 4.6: 垂直方向のカットオフ波長を求める計算過程

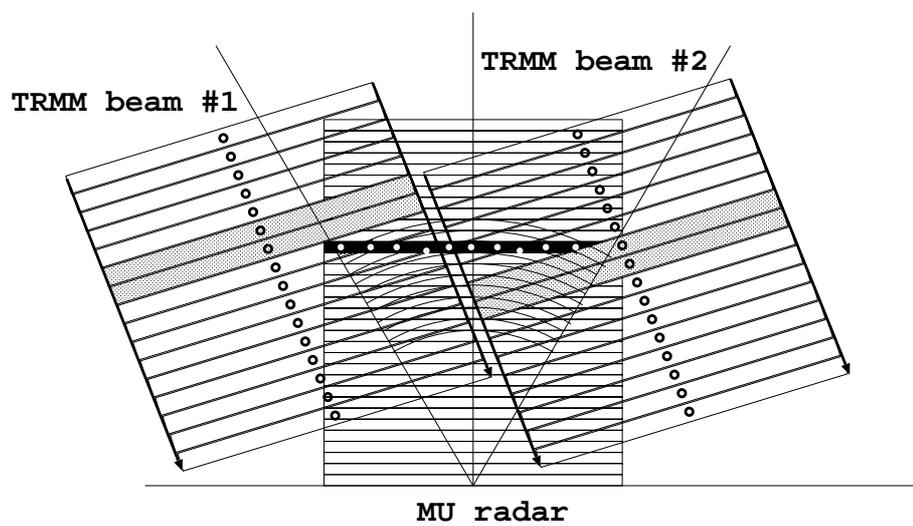


図 4.7: 両レーダーのビーム及びデータサンプル点の関係

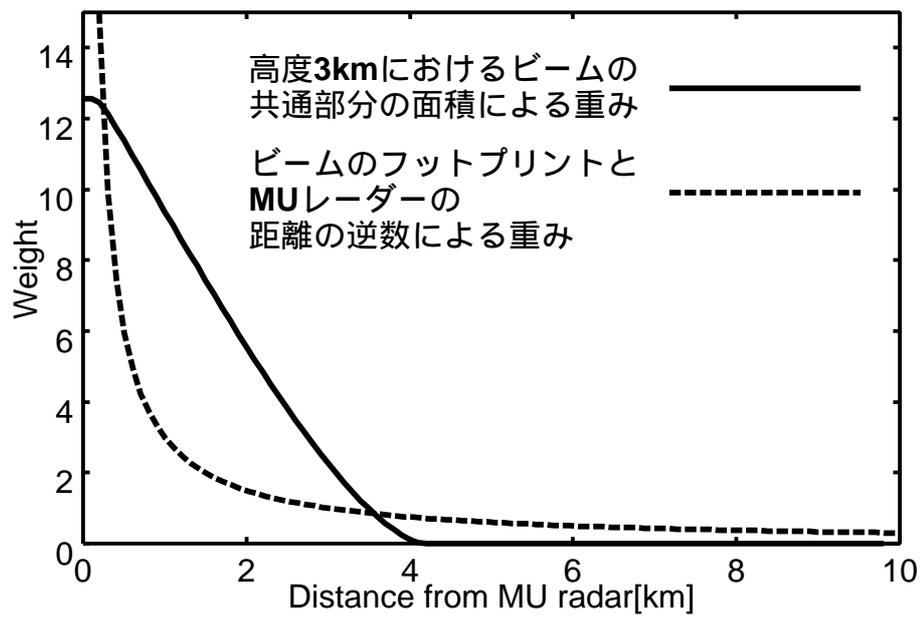


図 4.8: 各重み付け法における重みと距離の関係

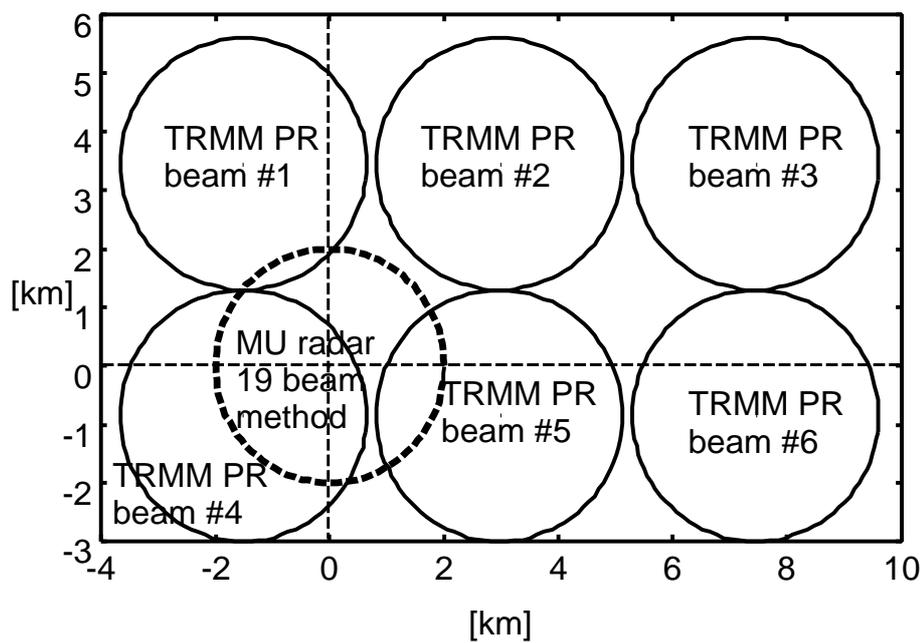


図 4.9: シミュレーションのビーム配置

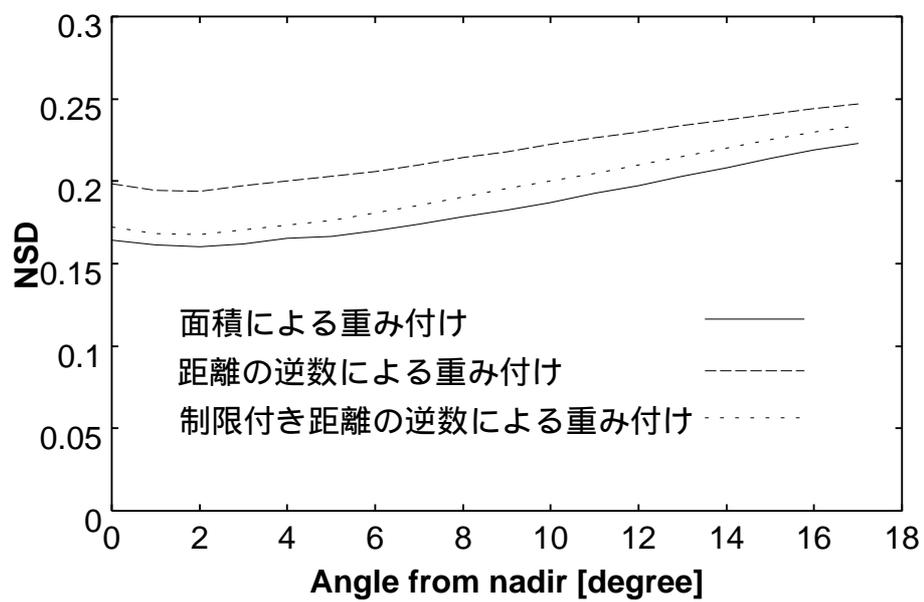


図 4.10: 各重み付け法による入射角に対する NSD

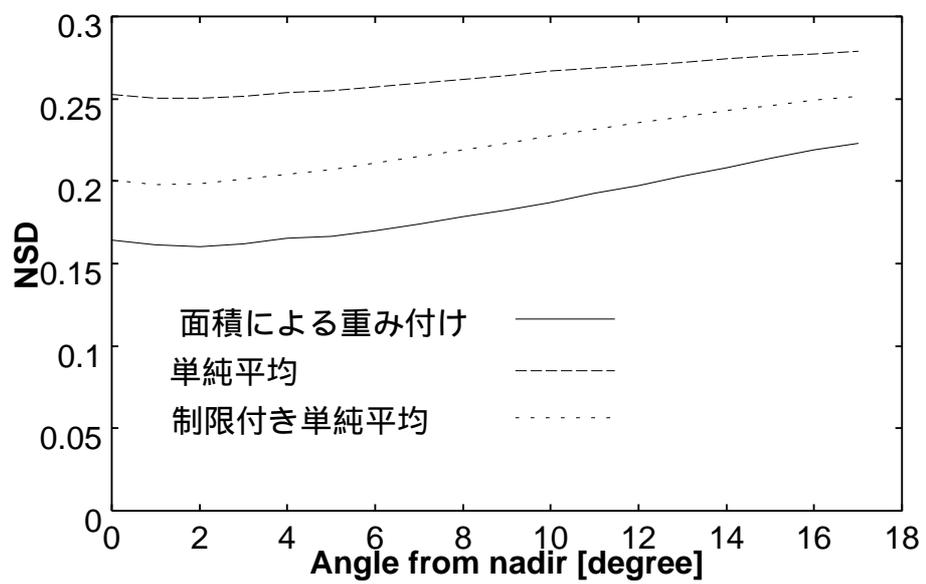


図 4.11: 単純平均を用いたときの入射角に対する NSD

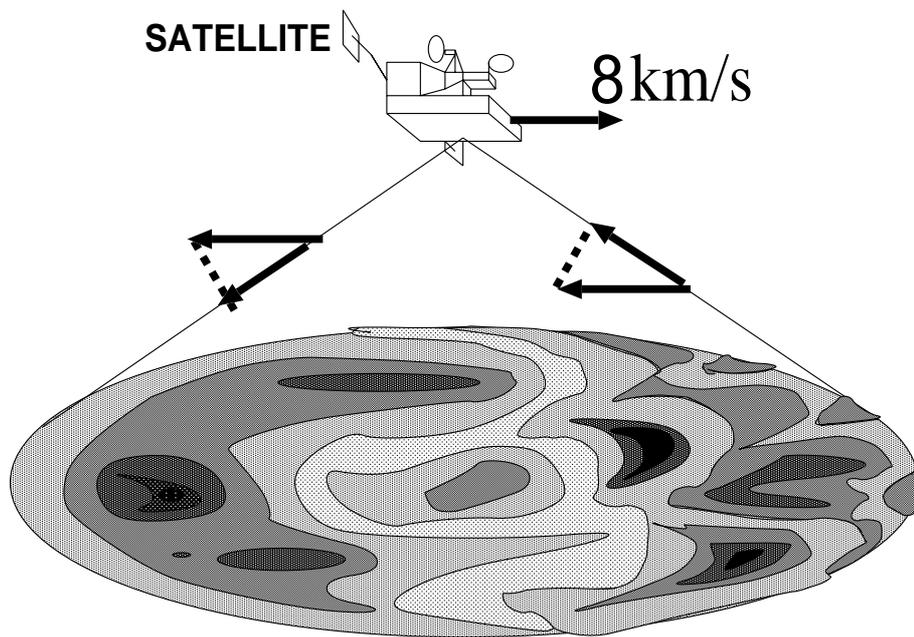


図 5.1: 衛星搭載ドップラーレーダーとビーム内降雨不均一の概念図

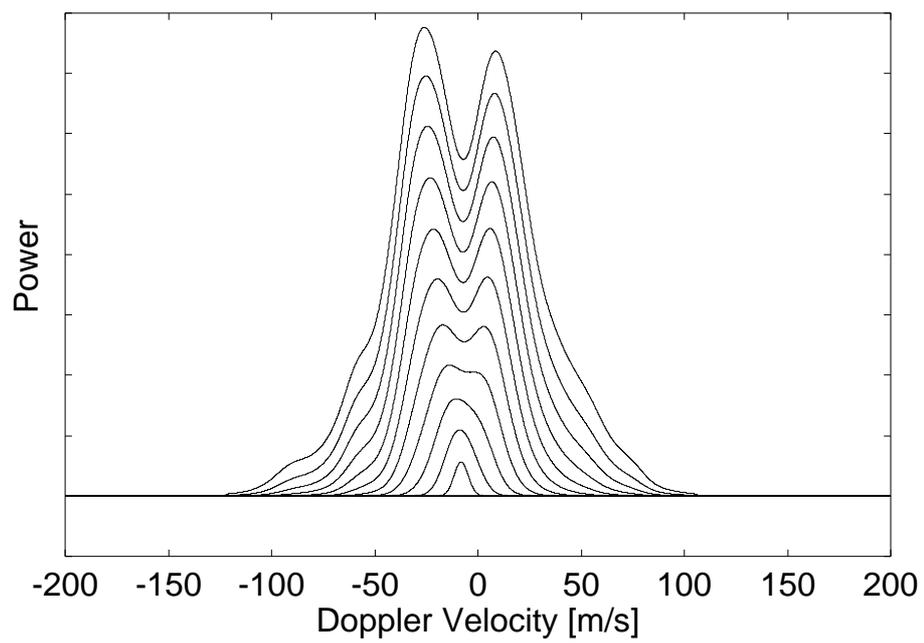


図 5.2: ビーム半径を変えたときの観測されるスペクトルの変化

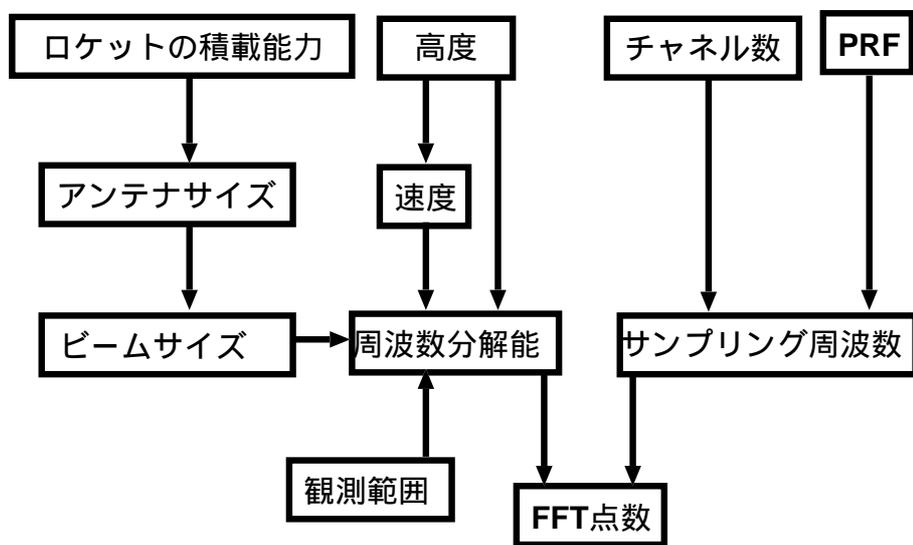


図 5.3: 衛星設計上のパラメータの決定要因

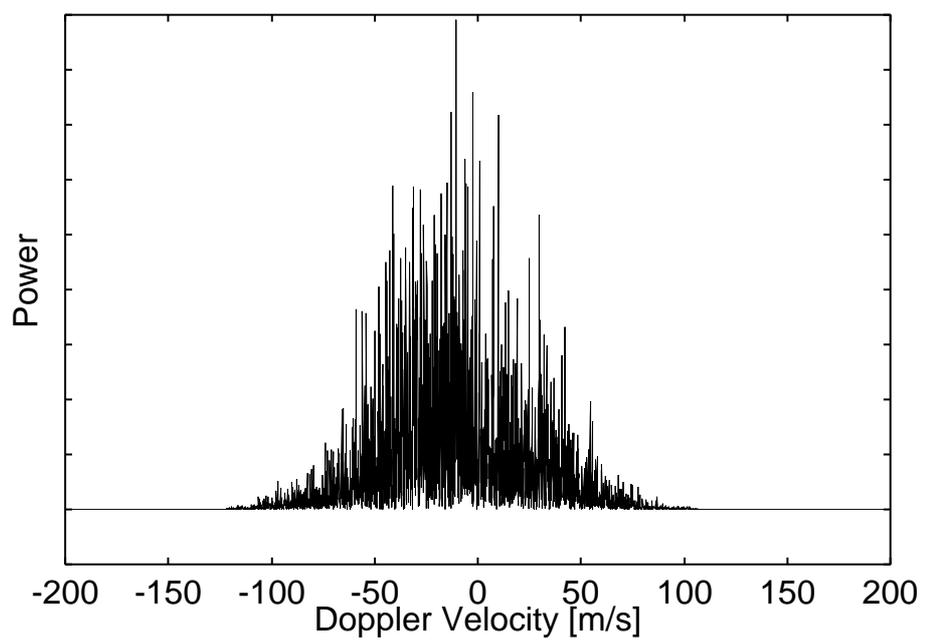


図 5.4: インコヒーレント積分回数 1 回の場合の観測スペクトル

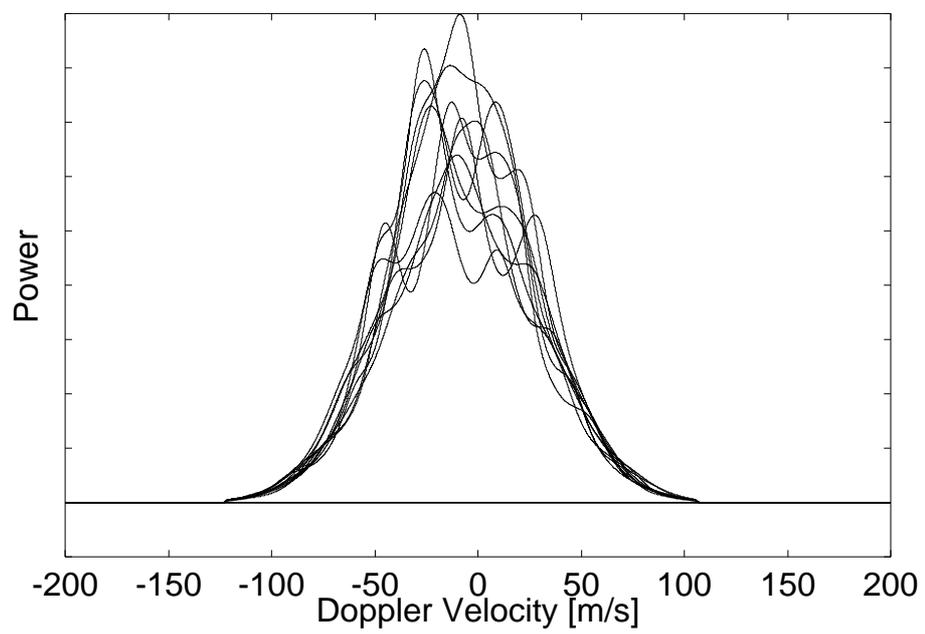


図 5.5: 互いに重ならないビーム走査で観測されるスペクトル

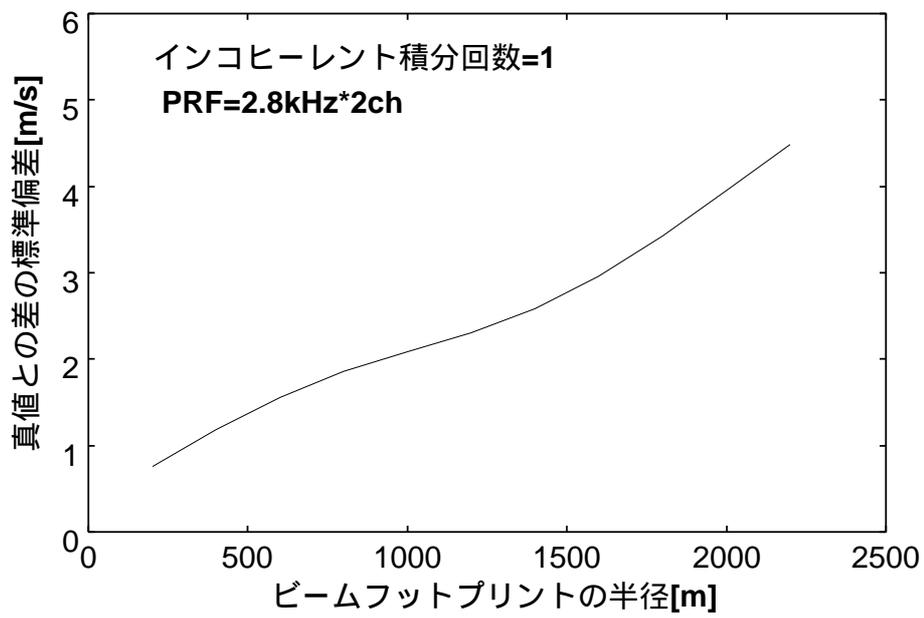


図 5.6: ビーム半径を変えたときの誤差の標準偏差の変化

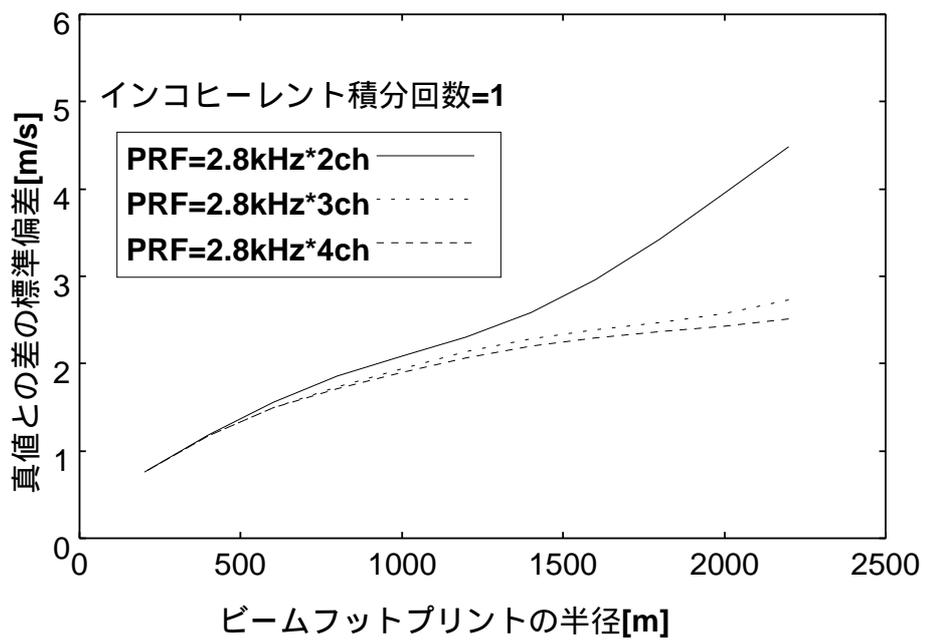


図 5.7: PRF(チャンネル数)を変えたときのビーム半径に対する誤差の標準偏差

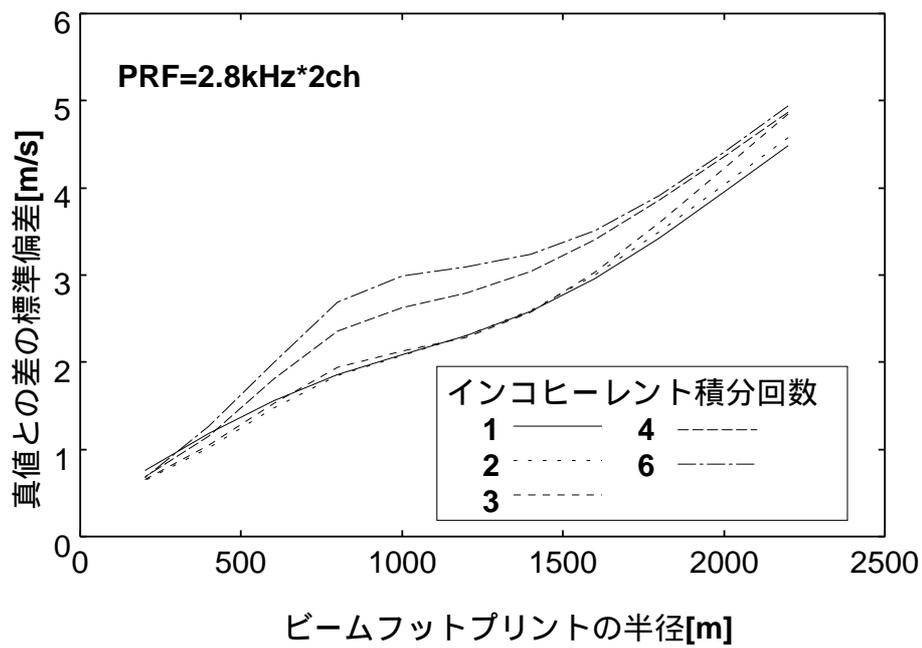


図 5.8: インコヒーレント積分回数を変えたときのビーム半径に対する誤差の標準偏差

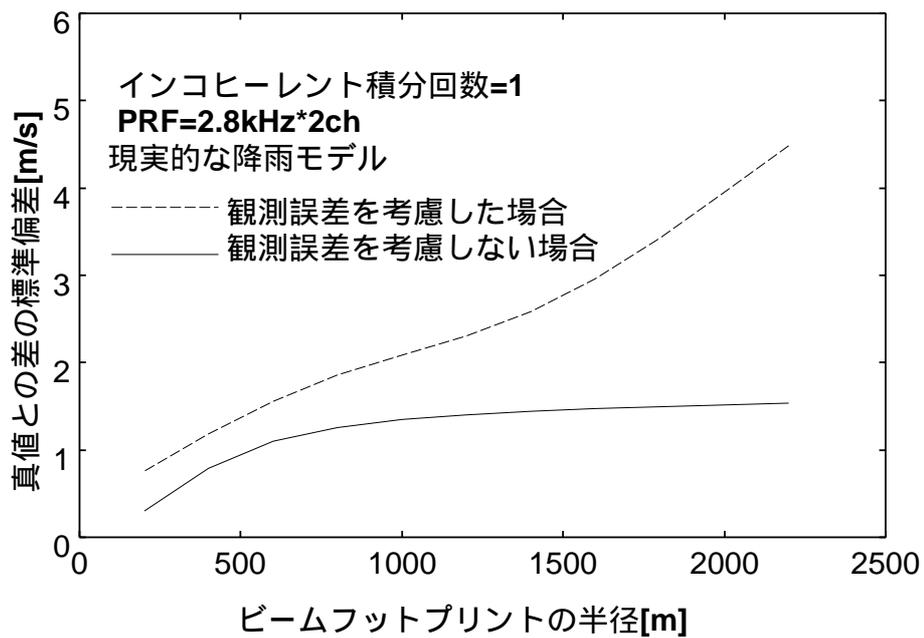


図 5.9: 観測誤差を考慮した場合及び考慮しない場合のビーム半径に対する誤差の標準偏差

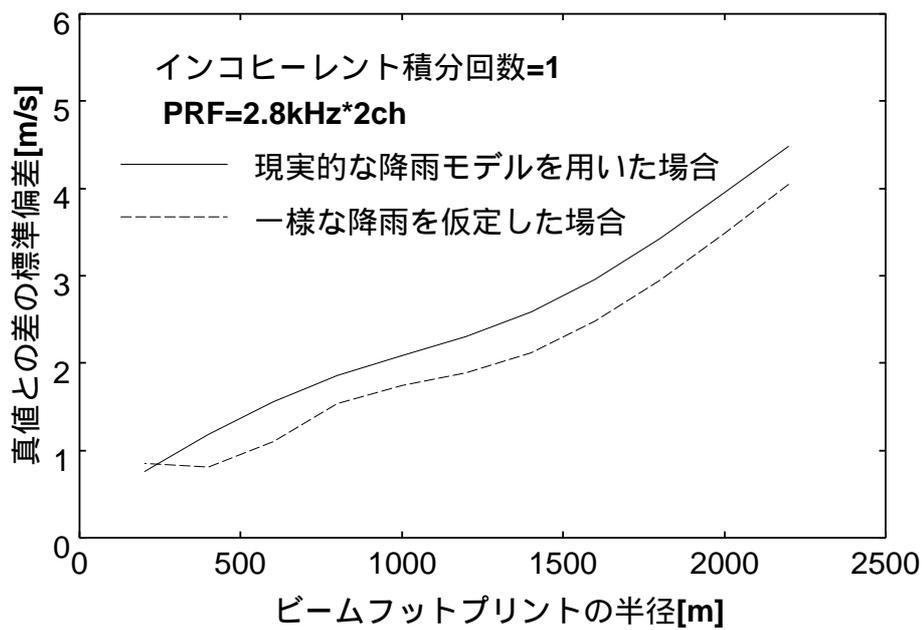


図 5.10: 均一な降雨を仮定した場合と現実的な降雨モデルを用いた場合におけるビーム半径に対する誤差の標準偏差

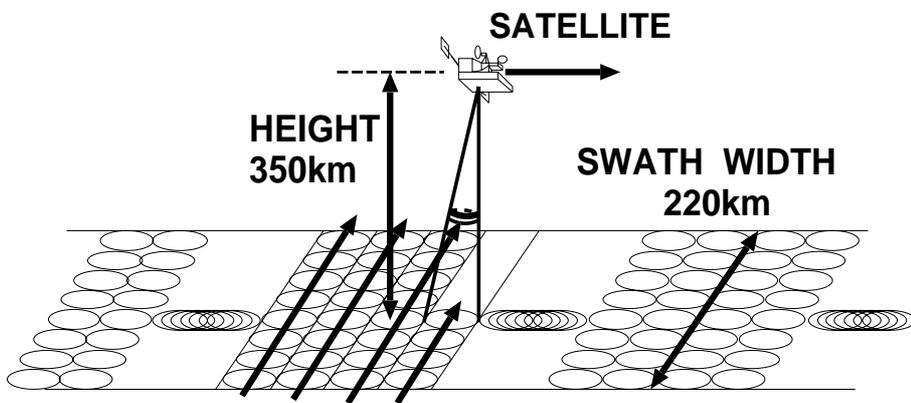


図 C.1: ハイブリッド観測モードの概念図

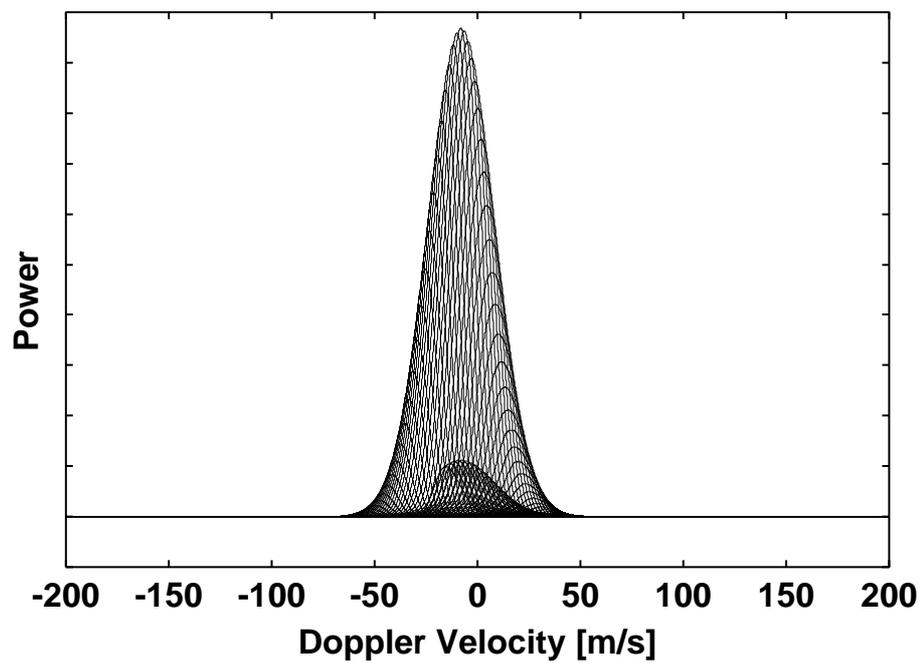


図 C.2: ビーム移動がほぼ連続的なオーバーサンプリング観測でのスペクトル曲線群の例

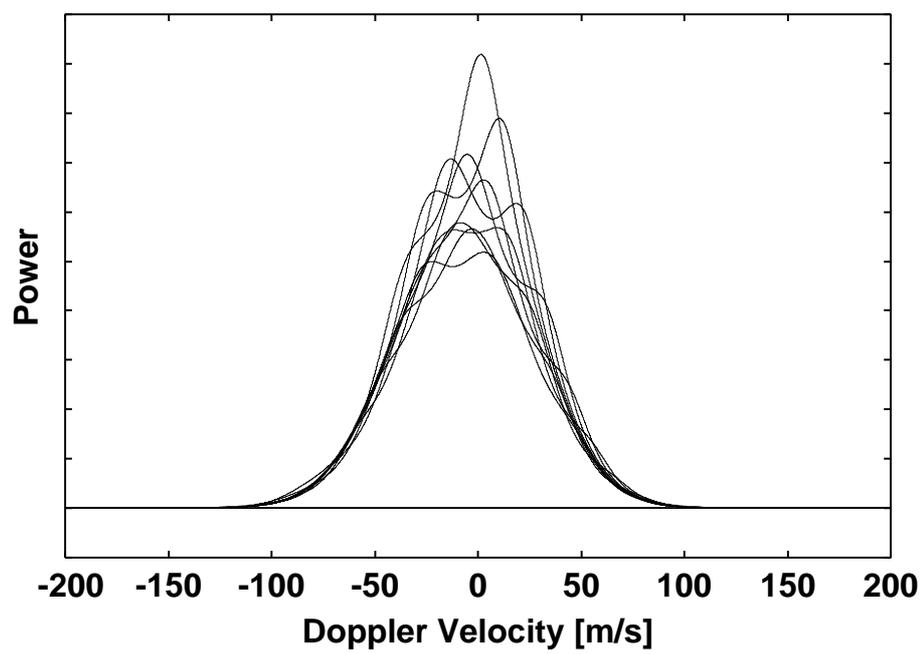


図 C.3: オーバーサンプリングしているときの観測スペクトル