

付録A Xバンド MP レーダシステム

付録A.1 システム構成

Xバンド MP レーダシステムは、レーダ基地局、監視制御局及び合成処理局で構成される(図 A-1)。レーダ基地局、監視制御局、合成処理局は専用伝送回線で接続され、レーダ基地局と監視制御局間では監視情報、レーダ基地局と合成処理局間では観測データが伝送される。

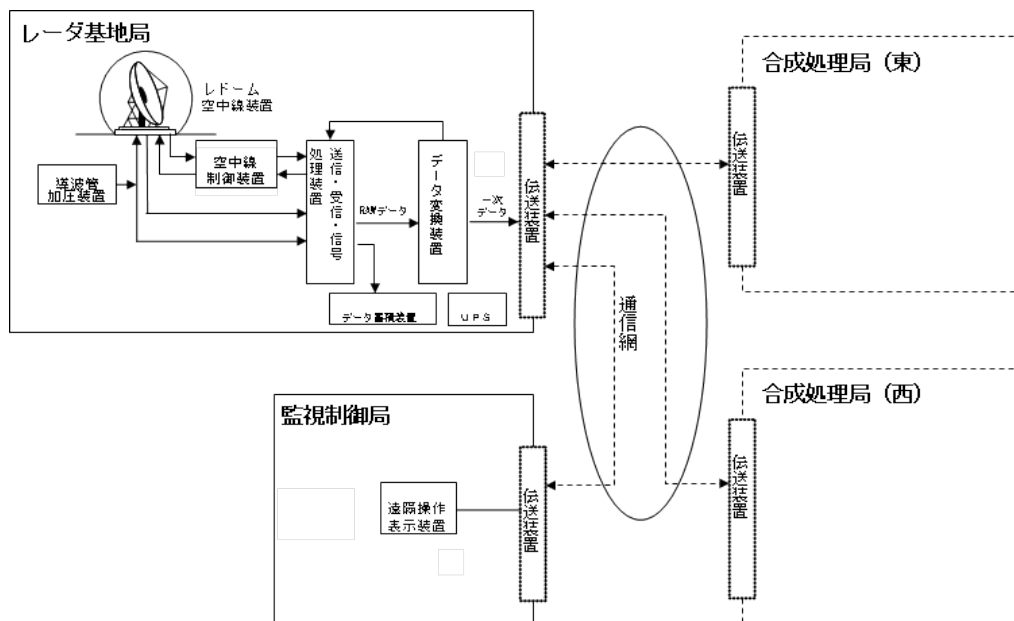


図 A-1 Xバンド MP レーダシステム構成概要

付録A.1.1 レーダ基地局

レーダ基地局は、主に空中線装置(アンテナ装置)、送信・受信・信号処理装置、データ変換装置で構成される。空中線から直交する水平・垂直の偏波面を有した2種類のパルス状の電波を発射し、降水粒子群からの反射エコーを受信する機能を有し、水平、垂直偏波の受信強度及び位相情報の信号処理を行う。

付録A.1.2 監視制御局

監視制御局は、遠隔操作表示装置で構成される。レーダ基地局からの監視情報(電波送出状況、障害の有無等)を受信・表示するとともに、レーダ基地局装置を遠隔制御する機能を有する。監視制御局は、レーダ基地局を管理する事務所、整備局に設置されている。

付録A.1.3 合成処理局

合成処理局は、受信・一次処理装置、合成処理装置、データ中継・蓄積装置、図化装置、Web装置、統合監視装置で構成される。レーダ基地局から伝送された観測データを受信し、観測データの品質管理、各種データの算出、降雨強度算定、合成雨量の作成等を行う機能を有する。合成処理局は、システムの冗長化のため関東地方整備局、近畿地方整備局に設置され、それぞれに同じデータが伝送され、同じデータ処理が行われる。

付録A.2 レーダ基地局

XバンドMPレーダのレーダ基地局設備は平成21年度から整備をしている。設置年度及び製造メーカーによりレーダ基地局のハードウェア構成、性能、信号処理方式等が異なっている。

レーダ基地局の仕様は、送信電波を発生させる方法としてクライストロンを採用する場合と多段半導体（固体素子）を採用する場合の2種類に大別される。送信方法の違いにより送信波の波形や出力が異なるため、不要電波を抑制するフィルタや送受信切替装置（T/Rリミッタ）等の機器構成が異なるとともに、送信装置形状（大きさ、重量等）が大きく異なる。

XバンドMPレーダのレーダ雨量計設備の主要諸元を表A-1に示す。送信機装置の違いによりいくつかの諸元が異なるものの、降雨観測における観測性能はほぼ同等である。

表 A-1 XバンドMPレーダ雨量計設備の主要諸元

項目	仕様	
	クライストロン型	多段半導体型
観測範囲	半径 80km 以上	
送信周波数	9.7~9.8GHz のうち 1 波	
送信パルス幅	1 μ s	1 μ s、28~32 μ s
送信尖頭電力	50kW または 100kW	200W 以上（水平偏波） 200W 以上（垂直偏波）
レドーム直径	4.5m 以下	
空中線直径	2.2m 以下	
空中線利得	41dB 以上	
ビーム幅	1.2deg 以下	
距離分解能	150m 以下	
グラウンドクラッタ除去	コヒーレント MTI	
生成データ	受信電力 (Ph_NOR、Ph_MTI、Pv_NOR、Ph_MTI) ドップラー速度 V 速度幅 W 偏波間位相差 ϕ_{dp} 偏波間相関係数 ρ_{hv}	

付録A.2.1 空中線装置（レドームを含む）

空中線（アンテナ）は、レーダの性能を確保する上で重要な装置である。XバンドMPレーダでは、レーダサイトから 80km で降雨強度 1mm/h の降雨を観測できる性能として規定しており、空中線の直径については仕様で規定していない（レドームサイズの制約から最大直径のみ規定）。しかし、ビーム幅を 1.2°以下と規定していることから、約 2m 径の空中線直径となる。

本レーダは、水平/垂直同時発射方式の二重偏波レーダのため、水平または垂直偏波の受信

系に垂直または水平偏波の受信波が混入することを抑制する必要がある。そのため、交差偏波抑圧度 30dB (1/1000) 以上と規定し、混信を抑止している。また、不要波の混入を最小限とするため、サイドローブ（指向方向と別な方向に発射される微弱な電波）レベルについては、23dB 以下になるように規定している。

また、空中線は送信時と受信時の両方で共用されており、送信装置と受信装置は空中線に接続される導波管の分岐部において接続されている。このため、パルス送信時における送信波が受信装置に回り込むことによる受信装置の損傷防止と微弱な受信パルスが送信機側に分岐されることによる受信性能の低下を防止するため、送信側と受信側を分離しておく必要がある。これを行うため、分岐部に送受信切替装置 (T/R リミッタ) を接続し、自動的に送信時には受信側を切り離し、受信時には送信側を切り離すこととしている。T/R リミッタにはガスを封入して使用しているものがあり、このガスの消耗等により性能が劣化する。T/R リミッタが劣化すると、送受切替時間が長くなり近傍の観測性能が低下することや、送信パルスの受信機への混入による機器障害につながる可能性があるため、このような消耗部材を使用している T/R リミッタは定期的な交換が必要である。

空中線制御装置は、初期性能確認のための天頂観測（仰角 90°の観測）、PPI (Plan Position Indicator) 観測（仰角を一定として方位方向に 360° 回転させる観測）、CAPPI (Constant-Altitude Plan Position Indicator) 観測（複数仰角で PPI 観測を行い一定高度のデータを得る観測）を組み合わせた観測モードで運用されることに対応できる機能を規定している。空中線回転速度は 1~6rpm の間で任意の設定を可能とし、仰角制御は -1~90° の間で任意の仰角の PPI 観測の設定を可能としている。また、仰角制御速度は 0~90° を 10sec 以内と規定し、天頂観測と PPI 観測を組み合わせた観測モードに対応可能としている。回転速度と仰角は独立したサーボモータで制御され、水平（方位角）、垂直（仰角）の角度情報は 14 ビット（精度 0.1°以下）で、観測データの一部に収録される。

本レーダは、その利用周波数の特性から降雨やレドーム水膜による電波の減衰の影響を大きく受ける。そのため、レドームには撥水塗装処理を施してレドーム上での水膜形成の防止を図っている。この撥水塗装は大気状態や日照等の環境要件にもよるが 2~3 年程度で劣化するとされており、定期的なメンテナンスが必要である。特に、都市部については大気中の不純物により劣化が早まる傾向があるので注意が必要である。撥水塗装の劣化状態を監視するため、レドーム設置場所周辺に試験片を設置しており、定期的に状態確認し、必要に応じて再塗装等の対応を行うことが望ましい。

付録A.2.2 送信・受信・信号処理装置

送信・受信・信号処理装置は、観測に使用する送信電波（マイクロ波）の生成、降水粒子群等の標的からの後方散乱された電波の受信、受信した電波の信号処理を行う装置である。物理的な機器構成については、製作者により分割されることがある。送信・受信・信号処理装置は、基地局の機械室内に設置されることが一般であるが、電波の受信感度を向上するた

めに、受信機能の一部または全体をレドーム内またはレドーム直下のコンテナに設置する場合がある。

送信機は、クライストロンまたは多段半導体素子により、一定のパルス幅とパルス繰り返し周波数（PRF: Pulse Repetition Frequency）を有したパルス状の電波を生成し、T/R リミッタ（送受信切替装置）を経由して空中線から電波を発射する。なお、パルス幅により動径方向の空間分解能、PRFにより最大観測距離が規定される。

受信機は、空中線で受信した電波を T/R リミッタを経由して受信し、増幅、位相検波を経て、一定のサンプリング周期で A/D 変換を行い、デジタル IQ 信号を得る。

信号処理装置は、干渉波等による混信除去、グラウンドクラッタ除去、二次エコー除去を行った上で受信電力（水平・垂直偏波、MTI (Moving Target Indicator) 処理 ON/OFF の 2 要素）、速度（水平偏波）、速度幅（水平偏波）、偏波間位相差、偏波間相関係数を生成する。

付録A.2.2.1 送信方式

従来から使用されている電子管（クライストロン、マグネトロン）を用いたレーダは、100kW 程度と非常に高いピーク電力の送信が可能だが、1~2.5 μ s 程度と極めて短い時間の送信しか行えない。

これに対して固体素子（多段半導体）タイプのレーダは、ピーク電力が 200W 程度と比較的小さいものの、従来の約 30 倍の 30 μ s 程度の長いパルス幅のパルスを送信することが可能であり、パルス圧縮を行うことにより従来と同等程度の観測性能を確保している。

固体素子型送信機は、電子管型送信機のものよりも格段に小型・軽量化が実現されているとともに、不要電波（スプリアス）が少なく電波資源の有効活用が可能である。また、（送信機の寿命が長く保守性が高いため、運用性や経済性の面で有利である。Xバンド MP レーダでは固体素子型送信機を採用により、クライストロン型送信機と比べ、設計値ベースで大幅な消費電力の削減を実現している。

(1) 電子管型送信機

電子管は、高周波・大出力の発信源として古くから利用されている。電子管は、電子流（電子ビーム）に電磁界を作用させることにより増幅、発振等を行い、その運動エネルギーを電波（マイクロ波）のエネルギーとして発振するものである。この増幅、発振作用は、ほぼ真空中に閉じ込められた電子に対して行われるため、真空管とも呼ばれる。

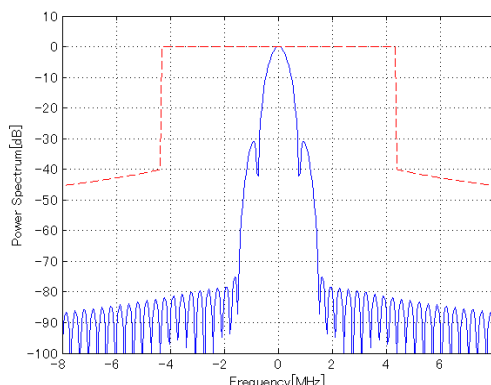
パルスレーダ方式の電子管としては従前マグネトロンが採用されてきたが、本レーダでは位相を検出する必要があり、コヒーレントな送信出力を実現できるクライストロンが採用されている。

本レーダは基地局から 80km 離れた地点において 1mm/h の降雨を検出できること、レンジ方向の分解能 150m と性能規定していることから、クライストロンの出力（ピーク電力）は設置状況等に応じて 100kw 又は 50kw のものが導入されており、パルス幅は 1 μ s の短パルス方式である。

クライストロンはマグネトロンより長寿命であるものの、それでも、実効寿命は 2～3 年程度（実機で確認中）であり定期的な交換が必要となる。また、大きいピーク電力のパルスの発射と受信を切り替えるための T/R リミッタについても大電力用のものが必要となる。このような T/R リミッタは電子管の一部で経年劣化が生じるため、一定期間（概ね 0.5～1 年程度）で交換が必要となる。その他に、ピーク電力が大きいことで、既存レーダ等への干渉や、干渉対策として送信フィルタの挿入等が生じる場合ある。



(a) クライストロン外観



(b) クライストロンの送信パルス波形例
(株式会社東芝提供)

図 A-2 クライストロンと送信波形

(2) 固体素子型送信機

気象レーダの送信機は観測範囲を確保するため高出力が必要であり、従来より電子管方式が主流であった。半導体を利用した固体素子方式は、船舶用小型レーダ等で出力が低いものの一部で採用され、その後、GaN 半導体パワーデバイスの出力向上、送信ユニットを多段に接続し出力を合成する多段半導体方式により出力の向上が図られ、多段半導体方式の X バンド気象レーダが実用化された。

半導体パワーデバイス、多段半導体方式により固体素子型送信機の出力向上が図られたものの、それでも実現可能な送信出力は数百 W 程度であり、このままでは数百 kW で送信する電子管方式と同様の観測範囲を確保できない。そのため固体素子型送信機では、送信パルス幅を長くすることにより必要な送信エネルギーを確保している。しかし、パルスレーダの距離分解能は送信パルス幅に比例するため、送信パルス幅が長くなるとその分距離分解能が粗くなる。

そこで、多段半導体方式の気象レーダではパルス圧縮方式を利用している。この方式ではまず図 A-3 に示すように、時間に対して直線的に周波数変調を施した送信パルス（チャープパルス）を生成して送信している。降雨などからの受信パルスは送信パルスとの相関をとること（パルス圧縮処理）により仮想的にパルス幅が狭く大振幅のパルスとして処理される。具体的には、図 A-4 のように送信パルスの変調方向と反対傾向で周波数に対して遅延時間が

直線的に変化するフィルタ（パルス圧縮フィルタ）に受信パルスを通すことにより、パルス幅が $1/\Delta f$ 、振幅が $\sqrt{T\Delta f}$ 倍のパルスを得ることができる。

多段半導体方式におけるパルス幅は、パルス圧縮の設計により異なるが、 $20\sim 50\mu\text{s}$ 程度である。このような長いパルスの送信時間中は反射波の受信もできないため、結果として近距離の観測ができなくなる（ $40\mu\text{s}$ の場合で 12km （光速 $\times 2\times 40\times 10^{-6}$ ）以内の観測を行うことができない）。そこで、大きな出力を要しない近距離の観測は、従来と同様の短パルス（ $1\mu\text{s}$ ）を利用する。このような観測を実現するために、短パルスと長パルスを交互に発射するが、同一周波数を利用すると混信の恐れがある。このため、短パルスと長パルスの送信周波数を割当周波数帯域内でずらして運用している。

固体型送信機は、送信帯域幅が電子管よりも狭く、不要電波（スプリアス）が抑制できているため、フィルタ等の利用の節減が可能となり、周波数の利用効率を容易に上げることができる。また、ピーク送信出力が低いため、T/R リミッタ等の構成部品についても大電力対応が不要となり、耐久性の向上などが期待できる。

さらに、電子管方式の場合、故障や特性の劣化があった場合は、電子管そのものを交換しなければならず、交換には時間と手間が必要となる。固体素子方式の場合、送信素子は多段構成されているため、一部の素子が故障したとしても出力を下げて運用を継続することが可能である。また、このような送信素子を含む部分をユニット化しておくことにより、障害時にはユニット単位での取替で機能を容易に復旧できる。

このように、固体型送信機は電子管方式のものよりも運用面においての利点が多い。また、送信出力は電子管方式に比べ劣るものの、主要構成機器を小型化し空中線近傍に設置することにより、送受信時における損失を低減している。

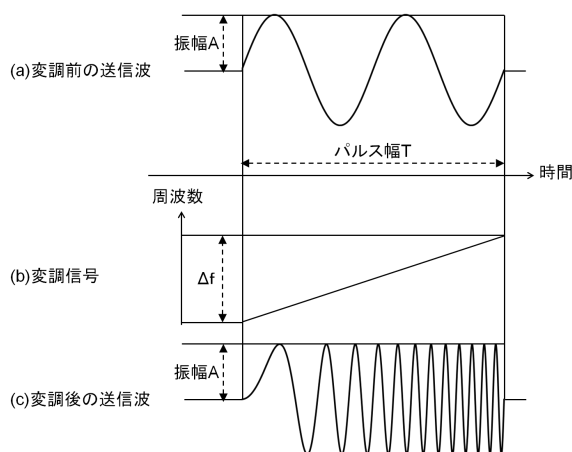


図 A-3 送信パルス（チャープパルス）

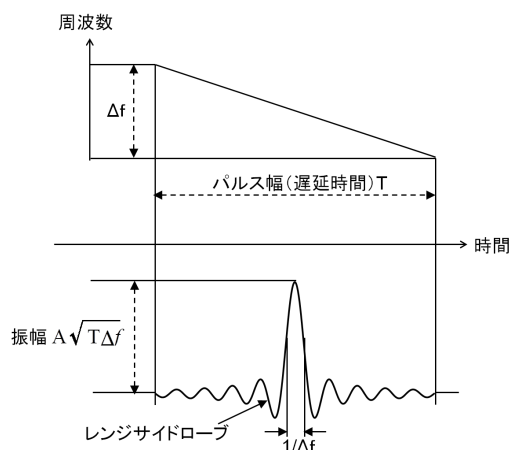
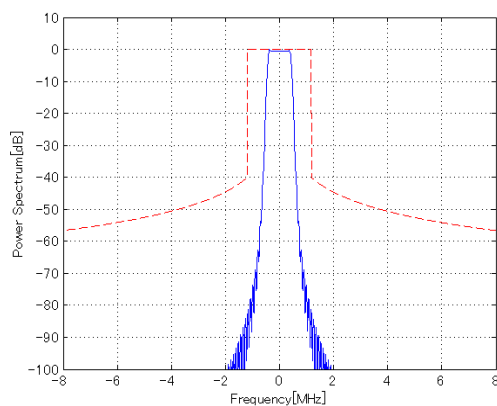


図 A-4 パルス圧縮処理



(a) 送信ユニット外観
(株式会社東芝提供)



(b) 固体素子型送信機の送信パルス波形例
(株式会社東芝提供)

図 A-5 固体素子型送信機と送信波形

付録A.2.2.2 信号処理

レーダ基地局の信号処理装置等で行われる各種信号処理の概要を示す。なお、信号処理の具体的方法は製造メーカーにより異なる場合があるため、各種信号処理方式の考え方を示し、閾値等は別途示すものとする。

(1) 干渉波除去

他の無線局による干渉波が受信装置に入力された場合に、干渉波の受信電力が降雨信号として扱われないように除去処理を行うものである。

一般的な干渉波は回転するアンテナに対してパルス性若しくはスパイク性と想定され、レーダから発射されるパルスヒットに対して時間的にランダムに混信すると考えられる。そのため、同一距離（レンジ）におけるヒット間のレベル差を比較して、当該パルスの受信波レベルに対して突出して大きなレベル（直接波）の場合には干渉波と見なして除去し、一つ前のパルスの受信波と置き換えを行うものである。

図 A-6 に干渉波除去処理の概要を示す。パルスヒット毎の同一距離にある受信電力レベルを当該ヒットの 2 つ前 (n-2) と 1 つ前 (n-1) のヒットレベルの差 (D_{n-1}) と 1 つ前 (n-1) と当該 (n) のヒットレベルの差 (D_n) を比較 (スイープ相関) し、一定の閾値以上の場合に干渉波と見なし、1 つ前 (n-1) のヒットレベル値に置き換え処理を行う。

閾値は十〜十数 dB 程度で設定される (一般的な降雨のヒットレベルの変動は数 dB 程度とされており、それ以上の値の干渉波を除去可能とする)。

多段半導体方式で長パルスの場合では、パルス圧縮前の受信信号に対して、干渉波除去処理を行うと共に、パルス圧縮後の観測値に対して再度干渉波除去処理を行う場合がある。

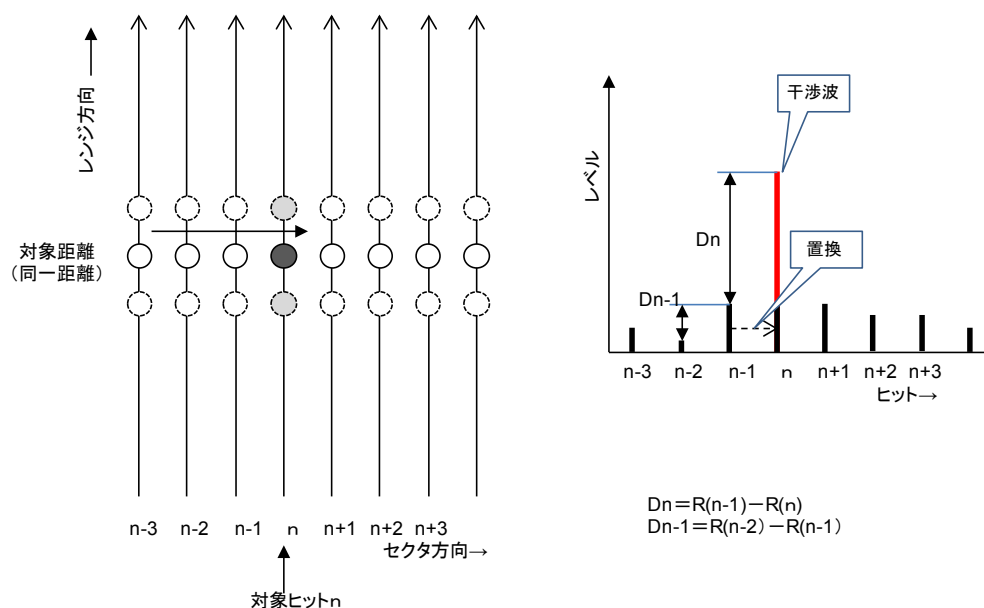


図 A-6 干渉波除去処理の概要

(2) グラウンドクラッタの除去処理

送信パルスの反射波として受信機に入力される受信電力には、降雨からの反射波の他に山地や構造物等からの不要波 (グラウンドクラッタ) が含まれる。グラウンドクラッタは降雨を表わしていないので除去する必要がある。

グラウンドクラッタを除去する方法として一般的に MTI (Moving Target Indicator)方式が使用される。これは、グラウンドクラッタの原因である地物は動かないため速度成分は小さいことを利用して、速度成分が 0m/s 付近の信号を除去するものである。本レーダは、位相を制御するコヒーレントレーダであるため、コヒーレント MTI 方式となっている。MTI 方式には様々な方式があるが、本レーダでは FFT (Fast Fourier Transform: 高速フーリエ変換) 方式及び IIR (Infinite Impulse Response: 無限インパルス応答) 方式が採用されている。

① FFT 方式グラウンドクラッタ除去

本方式は FFT を用いて速度 (周波数) スペクトルを算出し、速度成分が 0m/s 付近の速度

スペクトルを除去・補填することで、地形性エコーを除去するものである。具体的には、A/D変換された受信信号（デジタル IQ 信号）を FFT（高速フーリエ変換）により周波数成分解析により速度スペクトルを得る。そして、速度成分が 0m/s 付近のスペクトルを除去（FFT フィルタ除去）することで地形性エコーを除去する。なお、除去された区間のスペクトルレベルは、除去された速度の前後のスペクトルレベルから線形補間により補填される(図 A-7)。MTI 処理後の受信信号（デジタル IQ 信号）は、降雨のスペクトル（速度成分があるため除去されない）と補填されたスペクトルから逆 FFT（IFFT）を行うことで得られる。また、FFT は一定の時間内に受信した有限個の受信信号により行われるため、窓関数を用いることにより、スペクトル特性の改善を行っている。

この方式は、グラウンドクラッタの速度スペクトルが速度 0m/s 付近にあることを前提に除去処理を行うものであるが、降雨エコーの周波数スペクトルが速度 0m/s 付近に存在する場合は FFT フィルタで降雨エコーが除去される可能性がある。また、補填処理等によりエコーの S/N が低下し、S/N 判定により降雨エコーが棄却される場合がある。そのため、実際のグラウンドクラッタを周波数スペクトルから除去する速度（FFT フィルタ）を適切に設定する必要がある。

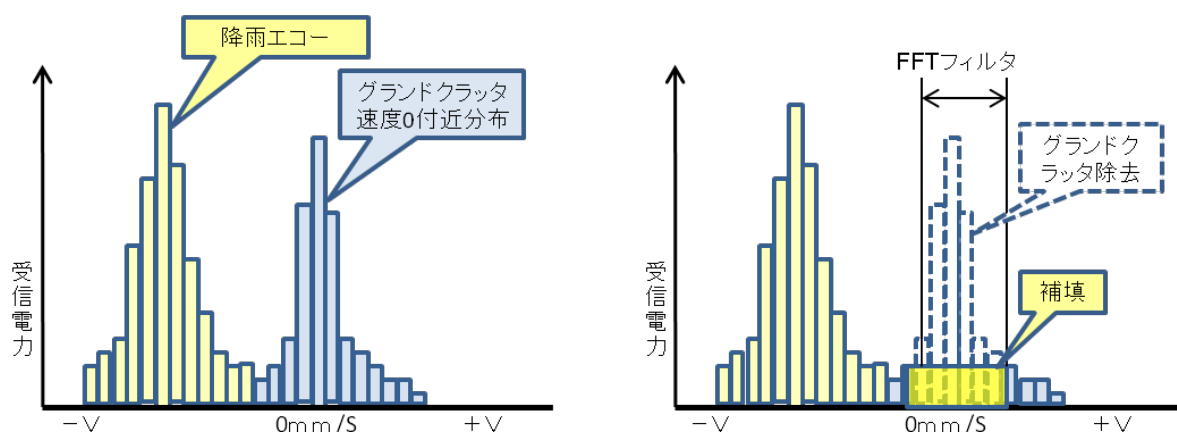


図 A-7 FFT 方式グラウンドクラッタ除去方式の概念

② IIR フィルタ方式グラウンドクラッタ除去

この方式もグラウンドクラッタの速度成分が 0m/s 付近であることを利用してグラウンドクラッタを除去するものであり、速度 0m/s 付近の信号を阻止して 0m/s 付近から離れた信号を通過させるバンドパスの IIR（Infinite Impulse Response）フィルタにより行うものである。

IIR フィルタはデジタル IQ 信号を時系列に処理する方式である。設計においては速度スペクトル上で、通過域、阻止域及び阻止域の減衰量等を定義して速度 0m/s 付近の地形性エコーを除去できるようにする。フィルタ設計に自由度があるもののグラウンドクラッタの状況に応じて適切に設定する必要がある。阻止域の減衰量の設定等のフィルタ設計が適切でない場合、グラウンドクラッタの消え残りや、ドップラー速度 0m/s を示す降雨域がグラウンドクラッタ

と誤認され棄却される場合がある（一様風がレーダサイト付近で吹いているとき、レーダサイトから見て向かい風から追い風になる付近でドップラー速度がゼロとなる領域が生じる）。

ある地域のレーダサイトで設定した IIR フィルタ値を他の地域のレーダサイトに適用した際にクラッタの消え残りが発生し、フィルタの再調整を要した場合等が確認されているため、レーダサイト毎の最適化が必要である。

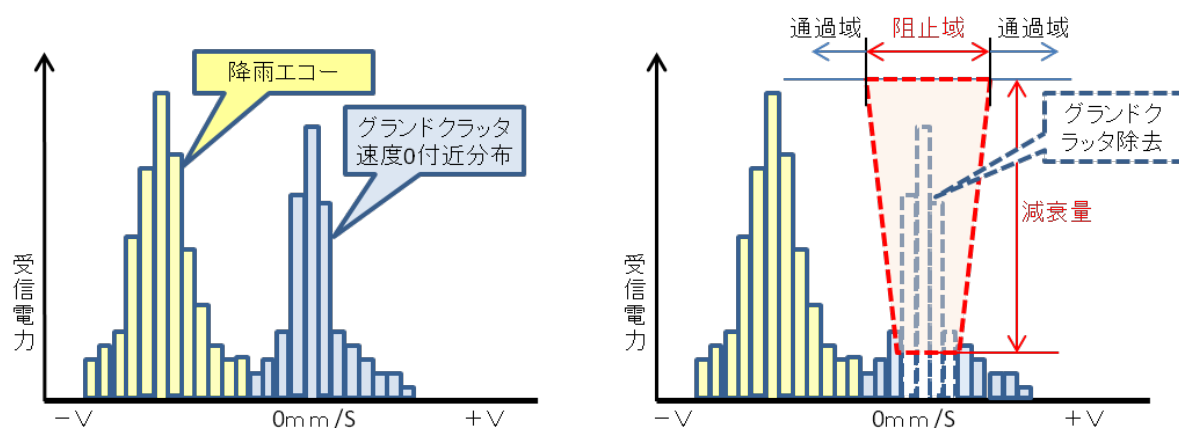


図 A-8 IIR 方式グラウンドクラッタ除去方式の概念

(3) 二次エコー除去処理

送信パルスが発射されて、雨滴等に反射して受信機に戻るエコー（受信電力）の内、観測範囲内（80km 以内）からのものを一次エコー、観測範囲外からのものを多次エコーと呼び観測範囲の概ね 2 倍以内の範囲からのエコーを二次エコーと言う。二次エコーが発生する原因は、観測範囲の先に豪雨やグラウンドクラッタ等の強い反射エコーがあった場合に、発射されたパルスがある一定の強さで受信機に戻るが、往復に要する時間の関係から次の発射パルスによる一次エコーと誤認されて処理されるためである。

例えば、パルス繰り返し周波数（PRF）を 1800Hz とした場合、レーダ基地局から 100km 地点に強い反射エコーが存在したとすると、その 100km 地点からの反射エコーの受信は 0.667ms ($=100\text{km} \times 2 / 300000\text{km/s}$) 後となる。一方でパルスの送信間隔は $1/1800\text{Hz} = 0.55\text{ms}$ であるため、100km 地点からの反射エコーは、次のパルス送信から 0.117ms 後に受信されることとなる。従って、100km 地点の反射エコーは、次の送信パルスの約 17.5km 付近（0.117ms 秒後）の反射エコーと誤認されて受信することとなり、二次エコーが発生する。

つまり、次の送信パルスの発射後に受信する反射エコーが二次エコーとなるため、パルスの送信間隔が大きく（PRF が小さく）なるほど二次エコーは発生しづらくなる。

二次エコーの除去方式には次の方式が採用されている。

① 位相制御方式

XバンドMPレーダシステムでは、送信パルスは連続波である基準信号をパルス幅相当の時間切り出したものであり、各送信パルスの間には相関がある。この送信パルスの初期位相をパルス毎に変動させた場合においても、受信時に受信パルスに対して変動分の位相を補正することにより、時系列信号における相関は担保することが可能である。一方で、二次エコーを受信した場合、一次エコーと二次エコーの位相変動量が異なる場合は、受信時の位相補正では本来の初期位相に戻らない。もし、この初期位相の変動がランダムであれば、二次エコーは他の受信パルスとの時系列における相関が生じない。従って、各受信パルスに対して送信時の位相変動を補正した上でFFT（高速フーリエ変換）を行うことにより、二次エコーは周波数領域上で白色雑音化できる。このようにして二次エコー対策を行う方式が、位相制御方式である。通常はランダムではなく、他の受信パルスの時系列の相関が小さくなるように適当な位相制御（例えば、 π と $-\pi$ の二値制御など）が行われる。

実際の信号処理の手法では、二次エコーを受信した場合、二次エコーは周波数領域で白色雑音化しているため、周波数（速度）スペクトル上において分散（速度幅）が広がることとなる。ここに着目し、速度幅の閾値で棄却すれば二次エコーが除去されることとなる（付録A.2.2.2(5)②参照）。

また、二次エコー送信時の位相で受信パルスを位相補正した上でFFTすることにより、二次エコーの周波数スペクトルを得ることができる（図A-9(b)）。ここで一定値以上のスペクトルを二次エコーと推定し、当該スペクトルを削除した上で（図A-9(c)）、逆FFTを実施することで、二次エコーが除去された一次エコーのみの受信電力値を得ることが理論上可能である。しかし、実際には一次エコーと二次エコーが必ずしも明確に分離して得られるとは限らず、一次エコー成分も同時に削除する懸念がある。このため位相制御方式については、製造者等により実装している手法が異なる。

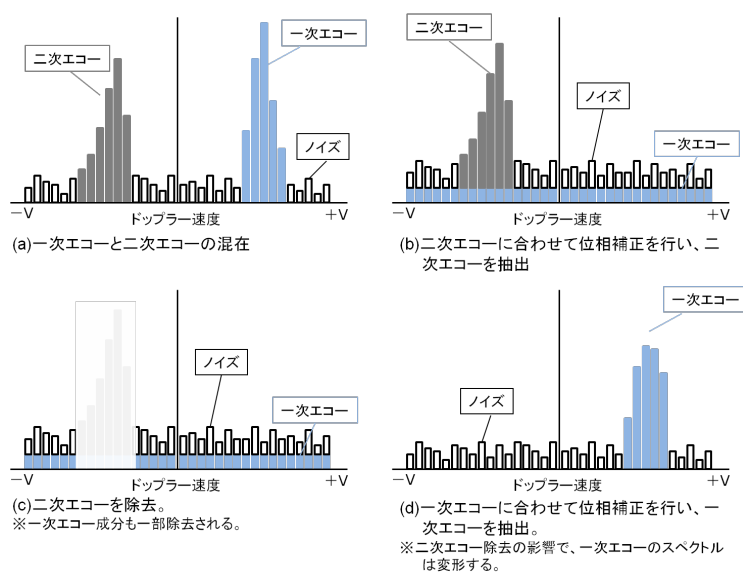


図 A-9 位相制御方式の概念

② 二重 PRF 方式

二重（デュアル）PRF 方式は、レイ毎に PRF を変化させるもので、X バンド MP レーダでは、1800Hz/1440Hz（クライストロン方式）及び 1500Hz/1200Hz（多段半導体方式）を採用している。

二次エコーは先に記述したように PRF によって出現位置が異なるため、二重 PRF 方式によって、同じ目標（同一距離）から反射される二次エコーは各レイの間で出現する位置が異なる。高い PRF では観測範囲の近距離側に、低い PRF では遠距離側に出現するため重なることはない。

二重 PRF 観測において、二次エコーがある場合には隣接する各レイの間で出現距離が異なるため、同一距離の隣接するメッシュ間のレベル差を比較し、レベル差が閾値以上の場合には二次エコーと判断して、両側のメッシュのレベルに合わせて補填することで、二次エコーを除去するものである。

レベル差の閾値が大きすぎると弱い二次エコーを除去しきれない場合や閾値が小さすぎると弱い一次エコーの端部などが除去されてしまう可能性がある。本レーダでは二重 PRF による二次エコー処理のレイ間のレベル差の閾値として 10dB 程度を採用している。なお、二次エコーと一次エコーが重畳する場合には二重 PRF 法での二次エコー除去が難しい。（一次エコーが強い場合は相対的に弱い二次エコーの観測精度への影響はほとんど無く、二次エコーが顕在化するの是一次エコーが無い晴天時などである。）

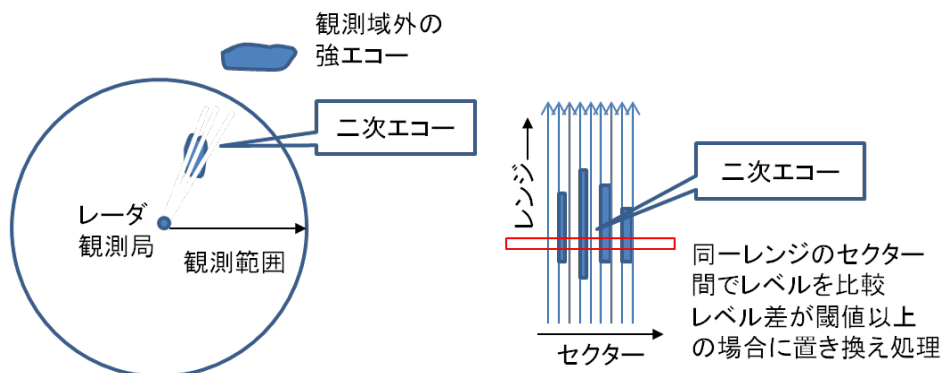


図 A-10 二次エコーのイメージと二重 PRF による二次エコー除去処理の概要

(4) ドップラー速度算定

本レーダではドップラー速度も観測可能（降雨域内のドップラー速度）である。ドップラー速度は、速度スペクトルの平均値である。なお、デュアル観測エリア（複数のレーダ基地局から観測が可能なエリア）では風向・風速分布の観測が可能である。

速度計測処理としては FFT 方式とパルスペア方式があり、製造メーカーによって採用している方式が異なる。

また、ドップラー速度は離散的なパルス信号から算定されるため、ナイキストのサンプリ

ング定理に基づき観測可能な速度の上限値が存在する。この観測限界を越えてドップラー速度測定範囲を拡大するため、観測された速度を折返し補正することも可能である。

① FFT 方式による速度計測処理

受信電力値（デジタル IQ 信号）を FFT（高速フーリエ変換）による周波数スペクトル（受信電力値を周波数順の分布を示したもの）の分布から、速度スペクトル（受信電力値を速度順の分布を示したもの）の最大値を検出し、速度 0m/s からの距離を速度として算定する方式である。スペクトル特性の改善を行うため、MTI の場合と同様に窓関数を用いる。

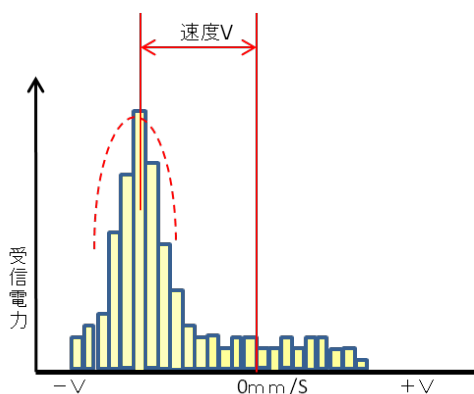


図 A-11 FFT 方式による速度算定

② パルスペア（PPP）方式による速度計測処理

パルスペア（Pulse Pair Processing）方式は 2 つの隣り合う送信パルスの受信信号（デジタル IQ 信号）の位相差を検出してドップラー速度を算定する方式で、図 A-12 で示す概念及び算出式で算定される。

図 A-11 によるドップラー速度は対象メッシュ内の平均速度として算出される。

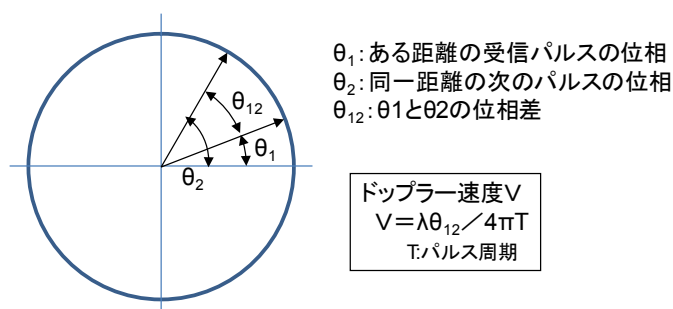


図 A-12 パルスペア方式による速度算定

③ 二重 PRF による速度計測

ドップラー速度の観測範囲はパルス繰り返し周波数に依存し、検出可能な最大ドップラー速度（ナイキスト速度）は $v_N = \lambda f_p / 4$ [m/s] で与えられる。しかし、移動速度が大きくなり

ナイキスト速度を超えると、送信波長の1周期を超える位相差が検出される場合があり、ドップラー速度の折返し（+速度から-又は-速度から+に折り返される）が発生する。理論上は高いパルス繰り返し周波数であるほど検出可能な速度の範囲が広がるが、それに伴い観測範囲が狭くなるため、ある程度の折返しの発生は許容しなければならない。

そこで、PRFによる速度折返し範囲の違いを利用して、二重PRFによる観測で高PRFによるドップラー速度と低PRFによるドップラー速度の観測範囲を合成して、仮想的に検出可能な速度の範囲を広くすることが可能となる。二重PRFを利用しない場合、検出可能な速度の範囲は±10m/s程度であるが、二重PRFにより観測した場合は、±50m/s程度まで観測可能な範囲が広がる。概念図を図A-13に示す。

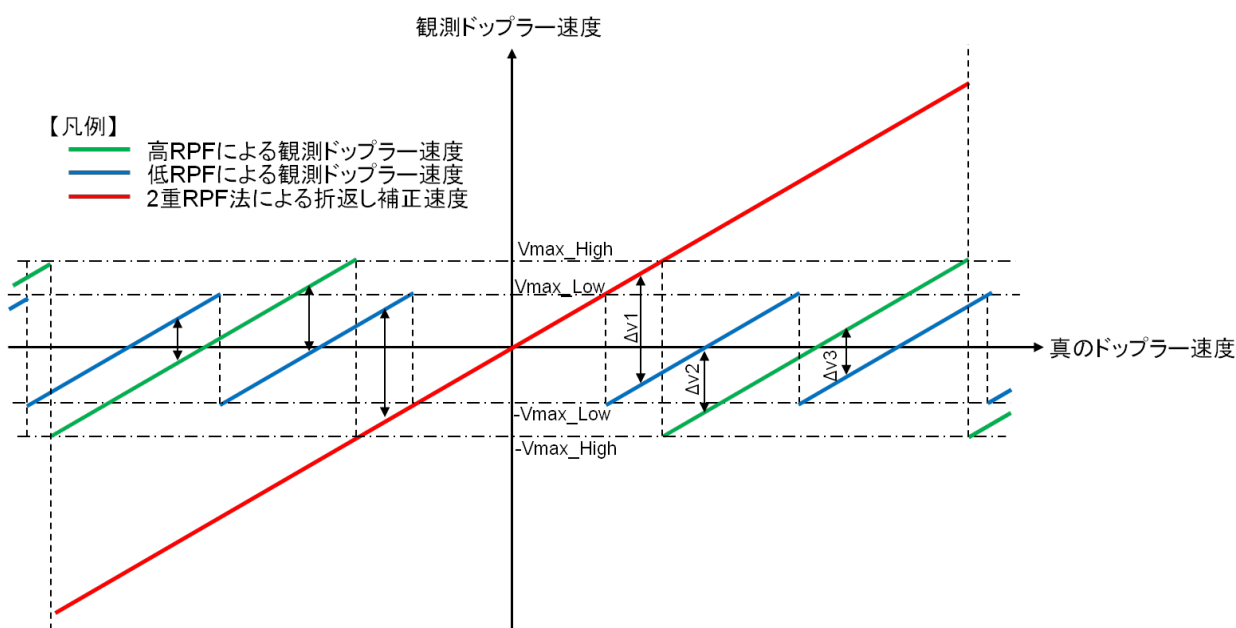


図 A-13 折返し補正処理の概念

④ 速度折返し再補正処理

二重PRF法による速度折返し補正では、シヤーなどにより隣接するメッシュの速度差が大きい場合や異常値またはデータが存在しない場合においては、原理上折返し補正ができない。このため、上記のような領域が存在する場合は、速度変化が不連続となる領域が生ずる。この領域において連続性を確保するために補正を数回程度繰り返す処理を行うものである。

速度折返し再補正処理は、製造メーカーにより実装されている。

(5) 異常値処理（データ品質管理）

本レーダの基地局処理においてデータ品質管理のための異常値判定棄却処理を実施している。なお、本レーダシステム全体では合成処理局においても各種品質管理を行っている。

基地局は複数の製造メーカーが設置しており、製造者毎、設置時期によりハードウェア性能

等が異なっている他、実装されている処理ソフトウェア、処理手法が異なる。一方、合成処理局では基本的に同一ソフトウェアで処理することでデータ品質の均一化を図っている。従って異常値処理の内、基地局、合成処理局の双方で行える同等の処理については、可能な限り基地局での判定棄却処理を少なくして、合成処理局側で統一的な考え方、他の要素と組み合わせた判定等を可能な範囲で採用することで品質確保を行うものとするが、基地局と合成処理局における品質管理処理の整合性や精度向上における合理性、有効性を十分考慮して設定を行う必要がある。

異常値処理の概要は以下に示すとおりである。

① 受信強度検定

レーダデータの検定処理として一般的に用いられる方式で、受信電力レベルが閾値以下の信号についてはノイズ等により信頼できない信号として無効とする処理で、ノイズスライス方式とも呼ばれる。受信強度検定で無効処理されると当該メッシュの全てのデータ（受信電力、 ϕ_{dp} 、 ρ_{hv} 、速度等）を棄却する処理となっているのが基本である。基地局側の受信強度検定はノイズレベルから数 dB 程度高い値を閾値としている場合が多く、ノイズレベルは基地局のハードウェア、周辺電波環境に依存するが可能な限り低い設定となるように調整されている。本レーダのノイズレベルは-104~-108dBm（製造メーカ、基地局で異なる）程度に設定されている。

一方、合成処理局でもノイズレベルに合わせた S/N 判定処理等を行っており効果的には同じである。合成処理局側ではレーダ基地局で設定するノイズレベルを基に S/N 判定処理を行っており、S/N が小さいデータは処理に用いない方式で、受信強度検定の S/N 判定方式に準じている。

② 速度幅検定

速度幅は、受信信号に含まれる速度成分の分散を示すパラメータである。一般に降水エコーに関する速度成分のスペクトルはほぼ正規分布を示すとされているが、受信信号スペクトルが弱く、ノイズ成分が多い場合は速度幅が広く算定される。この特性に着目し、速度幅が一定の閾値を超えた場合に異常値として無効化する処理が速度幅検定処理である。

速度幅算定イメージを図 A-14 に示す。速度幅算定手法は、FFT による方式と IIR による方式により異なり、結果として算出される速度幅の値が異なる。このため、速度幅検定方式を行う場合は算出方式毎に適切な閾値を設定する必要がある。

一般的な降雨エコーの速度幅は数 m/s 程度以下と言われているが、強風を伴う台風性の降雨や激しい擾乱を伴う降雨の場合には大きな速度幅を持つ場合があり、速度幅検定の閾値の設定によっては降雨エコーが棄却されてしまう場合があるため、閾値の設定においては十分に留意する必要がある。

また、グラントクラッタ除去処理や二次エコー除去処理に速度幅検定を使用している場合

は、閾値の設定でグラウンドクラッタの消え残りや二次エコーの消え残り等が生ずる場合がある。

本レーダは FFT 方式の場合、速度幅の閾値を 6m/s、HIR 方式の場合は 4.5m/s に設定しているが、降雨エコーが棄却される事例や逆に非降水エコーが消え残る事例があることから、閾値又は棄却処理の修正等を検討する必要がある。

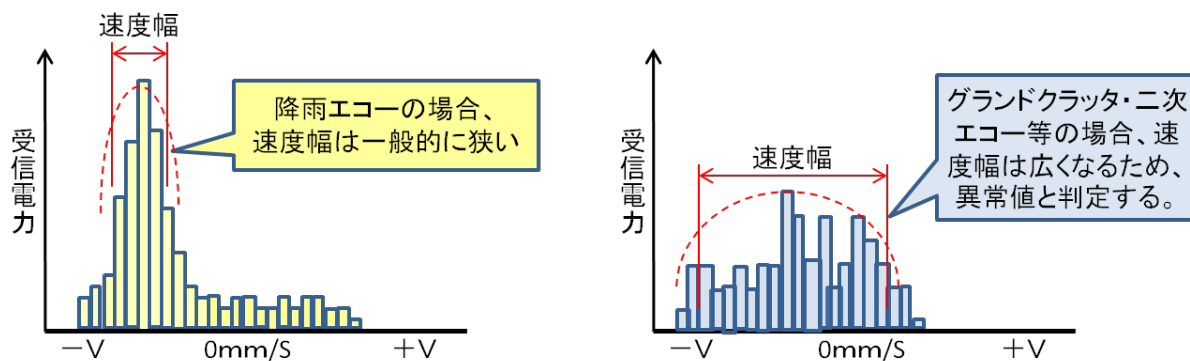


図 A-14 速度幅検定のイメージ

③ 孤立点除去処理

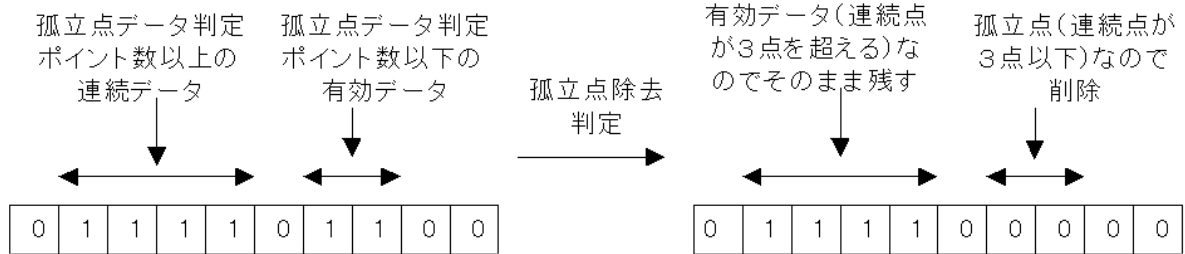
孤立点除去処理は、降雨現象は一定の空間スケールを伴うものと仮定し、ある有効値が入った極座標メッシュ（反射エコーを受信した極座標メッシュ）について、周辺メッシュと比較を行い、周辺に一定数以上の有効値がない場合については、孤立点（異常値）と判定して無効値に置き換える処理である。この処理は、動径（レンジ）方向のみで行う一次元孤立点除去処理とレンジ方向と方位(セクタ)方向で比較を行う二次元孤立点除去の2種類がある。

一次元孤立点除去処理では、レンジ方向に有効値が入っているメッシュがいくつ連続するかを判定している。レンジ方向に連続した有効値の数が閾値以下の場合、無効値と判断して棄却される。

二次元孤立点除去処理では、図 A-15 のようにレンジ方向のみではなくセクタ方向に隣接するメッシュも比較対象として判定している。

孤立点除去処理は、観測結果を画像化した際に不自然に見えるデータを排除するには非常に有効な手段であるが、メッシュサイズ程度のごく狭い領域で発生した気象現象を誤って除去する可能性がある。このため、閾値の設定にあたっては、十分に留意した上で適正な設定を行う必要がある。

孤立点データ判定
ポイント数=3の場合



孤立点除去の考え方
 ※対象レンジビン(■のセル)の周囲(前後左右の9メッシュ)を抽出する。
 ※9個のレンジビンのうち、有効値が入っている(反射エコーを受信した)メッシュ数をカウント
 ※カウントした数値が閾値を下回っていれば孤立点と判断し、無効化して除去する。

【例1】孤立点除去の例1	【例2】孤立点除去の例2	【例3】正常処理の例																											
<table border="1"> <tr><td>0 (無効値)</td><td>0 (無効値)</td><td>0 (無効値)</td></tr> <tr><td>0 (無効値)</td><td>-70dB ↓ 0</td><td>0 (無効値)</td></tr> <tr><td>0 (無効値)</td><td>0 (無効値)</td><td>0 (無効値)</td></tr> </table>	0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)	-70dB ↓ 0	0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)	<table border="1"> <tr><td>0 (無効値)</td><td>-80dB</td><td>0 (無効値)</td></tr> <tr><td>0 (無効値)</td><td>-70dB ↓ 0</td><td>0 (無効値)</td></tr> <tr><td>0 (無効値)</td><td>-50dB</td><td>0 (無効値)</td></tr> </table>	0 (無効値)	-80dB	0 (無効値)	0 (無効値)	-70dB ↓ 0	0 (無効値)	0 (無効値)	-50dB	0 (無効値)	<table border="1"> <tr><td>-65dB</td><td>0 (無効値)</td><td>-78dB</td></tr> <tr><td>-80dB</td><td>-70dB</td><td>0 (無効値)</td></tr> <tr><td>-75dB</td><td>-68dB</td><td>-72dB</td></tr> </table>	-65dB	0 (無効値)	-78dB	-80dB	-70dB	0 (無効値)	-75dB	-68dB	-72dB
0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)																											
0 (無効値)	-70dB ↓ 0	0 (無効値)																											
0 (無効値)	0 (無効値)	0 (無効値)																											
0 (無効値)	-80dB	0 (無効値)																											
0 (無効値)	-70dB ↓ 0	0 (無効値)																											
0 (無効値)	-50dB	0 (無効値)																											
-65dB	0 (無効値)	-78dB																											
-80dB	-70dB	0 (無効値)																											
-75dB	-68dB	-72dB																											

※閾値が6の場合

図 A-15 二次元孤立点除去のイメージ

付録A.2.2.3 BS/CS 放送への影響

9GHz 帯のレーダ波は、BS/CS 衛星放送の受信画像に影響を与える可能性がある。従って、X バンド MP レーダ観測局の配置にあたっては、周辺環境に配慮した上で配置計画を行わなければならない。

(1) 影響の要因

11.7～12.7GHz 帯の BS/CS 放送の電波は、衛星放送受信空中線 (BS/CS アンテナ) で受信された後、図 A-16 の赤丸内に示される局部発信器の変換用周波数により、中間周波数として 1GHz 帯 (1～1.5GHz) の周波数に変換され増幅器を通じてテレビ受信機に届けられる。

一方、9GHz 帯の気象レーダの送信波が BS/CS アンテナに入り込むと、本来の BS の周波数と 2GHz 以上離れているにもかかわらず混合器まで到達し、同様に変換用周波数により 1GHz 帯 (1～1.5GHz) の周波数に変換され増幅されてしまうため、BS/CS 放送と気象レーダの受信波が同じ中間周波数として受信機に出力され電波干渉を生じてしまうこととなる。

9GHz 帯気象レーダと干渉する衛星放送は、BS 放送および CS 放送であり、9GHz 帯気象レーダの周波数帯によって干渉する衛星放送に相違がある。

9GHz 帯のうち 9312MHz~9475MHz の周波数帯で送信する気象レーダは、BS 放送の一部のチャンネル (BS9~BS17) と干渉する。本レーダで利用している 9712MHz~9787MHz の周波数帯で送信する気象レーダは、CS 放送の一部のチャンネル (JD8~JD13) と干渉する。

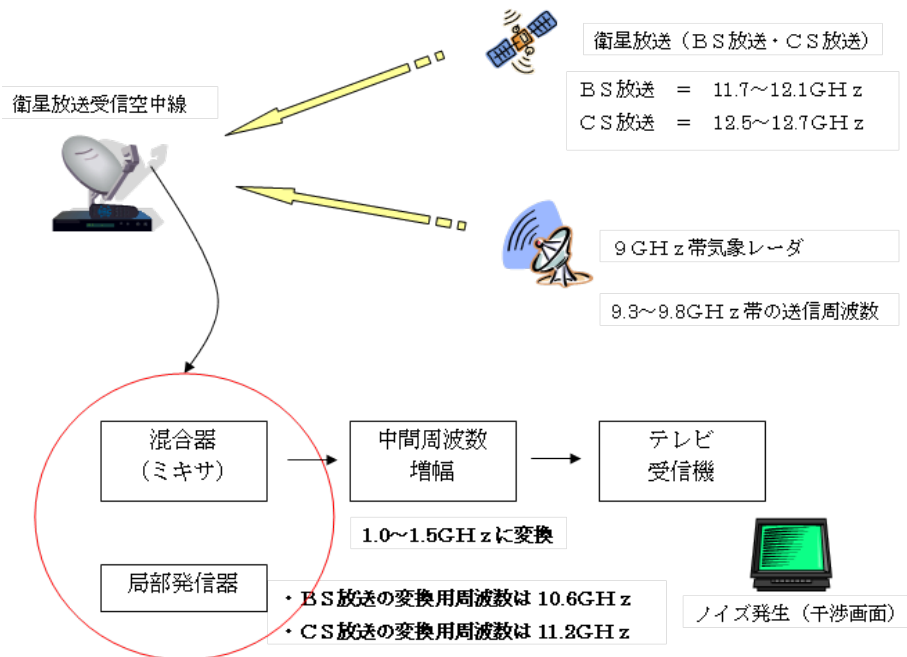


図 A-16 XバンドMPレーダと衛星放送の影響イメージ

(「平成22年度5GHz帯及び9GHz帯レーダの周波数有効利用技術に係る調査検討成果報告書」(平成22年3月、総務省技術試験事務)より)

(2) 影響回避のための対策

X帯のレーダ波とBS/CSの放送波は周波数帯として大きく離れているため、無線局の干渉回避方策としては、受信フィルタにより干渉波の混入を避けることが一般的である。しかし、BS/CS受信局は電波法上の無線局ではなく、汎用品として広く流通しているためこれに対応を行うことは現実的ではない。

このため、総務省総合通信基盤局では干渉軽減の当面の措置として以下の条件を満たして運用することを推奨している。

【影響回避のために留意すべき条件】

次の1.及び2.の条件を満足すること。ただし、3.に該当する場合はこの限りでない。

1. レーダの空中線から20mの範囲内に衛星放送の受信空中線がないこと。
2. レーダの空中線から式(2.1)により求めた距離範囲内に、衛星放送の受信空中線がないこと。

$$r=10^{\sqrt{(EIRP+Wt)/20}} \quad \text{式(2.1)}$$

$r(m)$: レーダの空中線からの距離

EIRP(dBm) : 衛星放送受信アンテナの方向に対してレーダの空中線から放射される電波の等価等方輻射電力 (尖頭電力)。レーダの空中線利得のほか、衛星放送受信空中線方向への指向減衰量 (水平・垂直)、給電線損失を考慮する。

Wt(dB) : レーダのパルス幅毎の干渉の影響度に関する定数 (表 A-2 参照)。

表 A-2 レーダのパルス幅毎の干渉の影響度に関する定数(Wt(dB))の値
(配慮すべき衛星放送受信設備がCS放送受信設備の場合)

送信パルス幅	送信周波数 9.712~
$0 < \tau \leq 1\mu s$	-69
$1 < \tau \leq 1.5\mu s$	-63
$1.5 < \tau \leq 2\mu s$	-56
$2 < \tau \leq 4\mu s$	-52
$4 < \tau \leq 8\mu s$	-45
$8 < \tau \leq 16\mu s$	-41
$16 < \tau \leq 32\mu s$	-40
$32 < \tau$	-40

3.次の場合には上記の条件を除く

- ア 当該受信空中線が免許人に所属する等、影響が許容されることが明らか、あるいは必要な調整がとられている場合にあっては、1.及び2.の条件を除く。
- イ 電磁界解析において、干渉を与えないことが計算により確認されている場合にあっては、2.の条件を除く。
- ウ レーダの空中線と当該受信空中線の上に遮蔽物が存在する場合又は当該受信空中線方向に対して、最も頻りにレーダの送信電波が照射される5分間において十分短い照射が5回以下である場合にあっては、2.の条件を除く。

付録A.2.3 データ変換装置

データ変換装置は、送信・受信・信号処理装置で生成された各データに対して、補正処理、異常値処理等を必要に応じて行い、定められたデータフォーマットに変換し、合成処理局にデータを送信する。補正処理、異常値処理については、製造メーカーによっては送信・受信・信号処理装置で行われる場合がある。また、監視制御局の遠隔操作・表示装置と連携して、基地局内の各装置の運用状態等の監視や運用モードの変更や各種機能の切替などの制御機能を有している。

本レーダシステムでは、降雨減衰補正処理は合成処理局で行うこととしており、レーダ基地局では機能を有するものの処理は行っていない。また、異常値処理については、合成処理

局でも同様の処理が可能な場合もあり、役割分担については留意しておく必要がある。

付録A.3 監視制御局

付録A.3.1 遠隔操作・表示装置

遠隔操作・表示装置は、レーダ基地局に設置されるデータ変換装置と連携してレーダ基地局内の各装置の運用状態等の監視や運用モードの変更や各種機能の切替などの制御機能を有している。

遠隔操作・表示装置は、障害発生時における原因切り分け作業や再起動等の軽易な対応作業が可能であるほか、レーダ基地局に設置されるデータ変換装置と連携して、レーダ基地局内の各装置の運用状態等の監視や仰角や回転速度などの空中線運用スケジュールの変更や各種機能の切替や設定値の変更が可能であり、職員がこれらの操作を実施可能となっている。

付録A.4 合成処理局

付録A.4.1 合成処理システムの概要

合成処理局は、受信・一次処理装置、合成処理装置、データ中継・蓄積装置（共有ストレージを含む）、図化装置、Web 装置、合成処理システム統合監視装置で構成されている。レーダ基地局から合成処理局へ伝送された Raw データは、受信・一次処理装置により受信されるとともに、各種のデータ処理が行われ、一次処理データプロダクトが生成される。一次処理データプロダクトは合成処理装置に転送され合成処理が行われ、合成雨量データが生成される。合成雨量データは、データ中継・蓄積装置を経て、合成処理局及びデータセンター内の図化装置へ転送される。図化装置は、合成雨量データを図化し、Web 装置へ雨量画像を転送する。合成処理局内の Web 装置の雨量画像は、国土交通省の防災 LAN 経由で閲覧することが可能となる。また、データセンター内の Web 装置の雨量画像はインターネット回線で閲覧することが可能となる(図 A-17)。

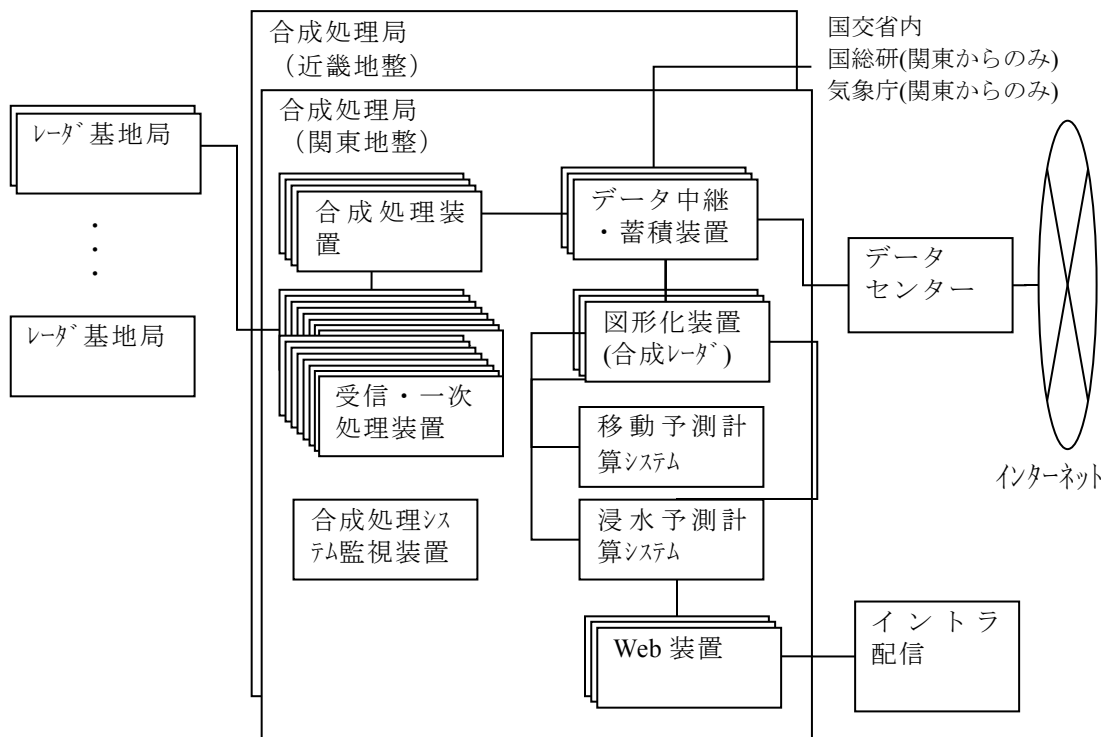


図 A-17 合成処理システムの全体概要図

統合監視装置とは、各処理装置等の運用状況を一元的に把握するために、SNMP (Simple Network Management Protocol) を用いた各サーバの稼働状況監視や各種ログ管理のほか、一次処理データプロダクトを図化した画像が閲覧可能であり、障害等の発生の監視や原因の切り分け作業を容易にしている。また、装置の諸元や IP アドレス等のネットワークに関するパラメータ情報や各種データ処理におけるパラメータ情報等の設定情報等を一元的に管理し、簡易な設定変更についてはwebインターフェースを介して設定項目の変更を行うことを可能としている。

合成処理局で受信された Raw データと合成処理局内で生成された各種データプロダクトは、データ中継・蓄積装置に集約され一元的に管理される。データ中継・蓄積装置は、データの中継、配信を行うとともに、共有ストレージに一時的 (概ね 3~6 ヶ月分程度) に蓄積を行う。蓄積されたデータは、LTO (Linear Tape-Open : コンピュータ用磁気テープの規格のひとつ) に保存される。

付録A.5 データ配信

合成処理局で生成された現況雨量値や予測雨量値のデータは、各事務所等で洪水予測などに活用するため、数値データとして配信する必要がある。しかし、この配信処理を個別処理装置毎に行う場合、配信状況管理の手間が増大するとともに、配信処理により処理遅延を生ずる可能性がある。このため、合成処理局からの数値データの配信処理はデータ中継・蓄積

装置において一括して処理される。

しかし、個別の利用側端末がデータ中継・蓄積装置よりデータを取得すると、端末側の数量が未確定であるため、将来的に重大な支障を生ずる恐れがある。このため、各地整等にデータ分配装置を設置し、各地整等管内の配信については、これを經由して配信を行うこととしている。これにより、データ中継・蓄積装置からは各地整等に対して1方路ずつと気象庁等の外部機関等への配信を行うこととなる。

データ中継蓄積装置からの配信は、Socket通信とFTPの二つの方式で可能であるが、不要パケットの抑制などの観点から、原則としてSocket通信を利用することが望ましい。

付録A.6 一般公開システム

合成処理局で生成された合成雨量データはデータセンターに配信され、インターネットを介してホームページで公開される。ホームページでは、ID/PASSWORDにより制限された管理者ユーザに提供される情報と情報内容が制限されるものの自由に閲覧できる一般ユーザ向けの情報の2種類の情報が提供されている。管理者ユーザ向けと一般ユーザ向けに提供されているコンテンツの違いを表A-3示す。

表 A-3 XバンドMPレーダインターネット向け提供コンテンツ

		一般向け	管理者向け	緊急版
広域雨量	現況	○	○	○
	過去(5日間)	×	○	×
	履歴動画(30分間)	○(5分間隔)	○(2分間隔)	×
	自動更新	×	○	×
詳細雨量	現況	○	○	×
	過去(5日間)	×	○	×
	履歴動画(30分間)	○(5分間隔)	○(2分間隔)	×
	自動更新	×	○	×
4画面表示		○	○	×

一般公開システムは、データ伝送装置、図化装置、Web装置から構成されており、障害時に備えて冗長化構成されている(図A-18)。また、Web装置のうち1台は緊急版として利用されており、何らかの理由により通常運用しているWeb装置に接続できなくなった場合、サービスを縮退して提供できるようになっている。通常版と緊急版の切替はロードバランサで行っている。ロードバランサと通常運用のWeb装置の通信が途絶した場合、Web装置へのリクエストはロードバランサにおいて自動的に緊急版Web装置に転送され、提供コンテンツが切り替えられることとなる。

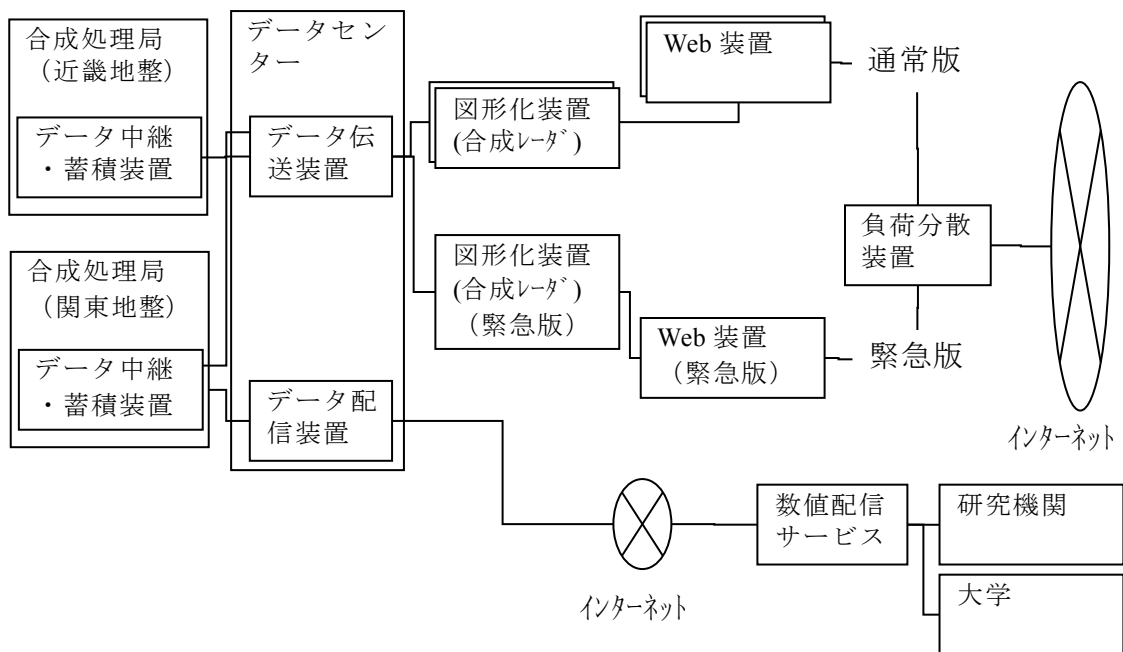


図 A-18 データセンターシステム構成図

付録B Xバンド MP レーダのデータ処理

付録B.1 観測範囲

国土交通省 Xバンド MP レーダの観測範囲は基地局を中心とする半径 80km である。基地局から遠方は減衰補正が不十分になること（後述）や観測高度が高くなること、 K_{dp} が適切な算定区間で算出できないこと（後述）等から半径 60km 以内を定量観測範囲としている(図 B-1)。

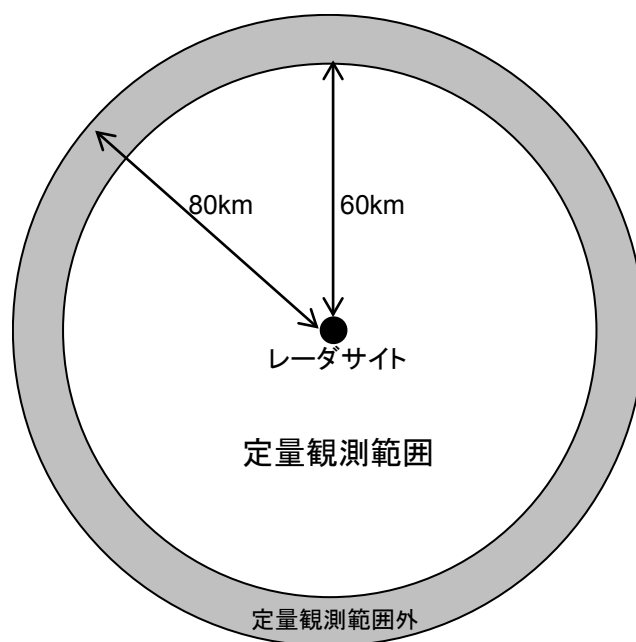


図 B-1 定量観測範囲と定量観測範囲外

付録B.2 データフォーマット

各レーダ基地局にて 8 種類の観測データが得られる。8 種類とは、水平偏波の受信電力 (P_{rh-NOR})、垂直偏波の受信電力 (P_{rv-NOR})、MTI 処理（クラッタエコーの除去）された水平偏波の受信電力 (P_{rh-MTI})、MTI 処理された垂直偏波の受信電力 (P_{rv-MTI})、偏波間位相差 (ϕ_{dp})、偏波間相関係数 (ρ_{hv})、水平偏波のドップラー速度 (V)、水平偏波のドップラー速度の分散 (W) である。この 8 種類のデータをまとめた総称を「Raw データ」と呼ぶ。合成処理局において各種のデータ処理（一次処理）が行われ偏波間位相差変化率 (K_{dp})、減衰補正済み水平偏波のレーダ反射強度 (Z_h)、レーダ反射強度差 (Z_{dr})、降雨強度 (R_r)、品質管理情報 (QF) の 5 種類のデータが生成される。この 5 種類のデータをまとめた総称を「一次処理データプロダクト」と呼ぶ。各レーダ基地局の降雨強度を地域単位で合成処理し、合成雨量データが生成される。合成雨量データには合成雨量値及び品質管理情報が含まれる。

Raw データと一次処理データプロダクトは、基地局を中心として距離と角度で表現される極座標形式のデータとして 1 仰角毎（1 スキャン毎）に動径方向：150m、方位角方向： 1.2°

の分解能で記録される(図 B-2)。これに対して、合成雨量データは標準地域メッシュに基づく4分の1地域メッシュ単位(約250mメッシュ)の直交座標データとして記録されている。

一次処理データプロダクトのQFデータには、マスク領域、異常値、地形遮蔽、電波消散、Kdpによる降雨強度推定、降雨層の6種類をそれぞれ識別した情報がメッシュ毎に格納されている。また、合成雨量データプロダクトのQF情報は、有効なデータ(異常値ではないデータ)、電波消散領域、Kdpによる降雨強度推定、降雨層の4種類をそれぞれ識別した情報がメッシュ毎に格納されている。合成雨量データプロダクトのQF情報の付加規則については後述する。

Rawデータ、一次処理データプロダクト、合成雨量データは、データヘッダ一部にそのデータの属性を記録したバイナリデータとして取り扱われる。フォーマットの詳細については、Rawデータ、一次処理データプロダクトは「国土交通省Xバンドレーダ雨量計観測データ共通フォーマット仕様書(案)」、合成雨量データは「国土交通省XバンドMPレーダデータフォーマット仕様(案)」に記載されている。

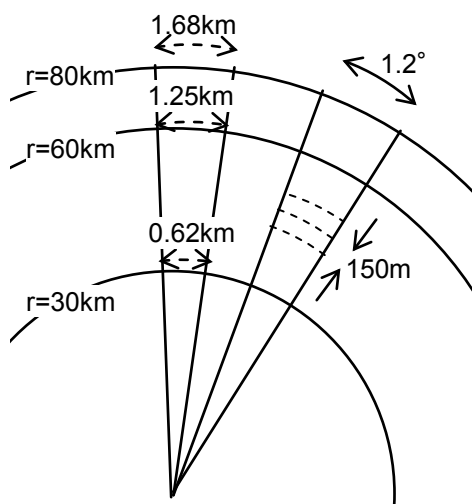


図 B-2 観測データの分解能

表 B-1 観測データ及び一次処理、合成雨量データプロダクトの一覧

観測データ	Prh-NOR	水平偏波の受信電力(MTI処理無し)	極座標形式	サイト単位
	Prv-NOR	垂直偏波の受信電力(MTI処理無し)		
	Prh-MTI	水平偏波の受信電力(MTI処理済み)		
	Prv-MTI	垂直偏波の受信電力(MTI処理済み)		
	ϕ_{dp}	偏波間位相差		
	ρ_{hv}	偏波間相関係数		
	V	ドップラー速度		
	W	ドップラー速度幅		
一次処理データプロダクト	Zh	減衰補正済み水平偏波のレーダ反射強度	直交座標形式	地域単位
	Zdr	レーダ反射強度差		
	Kdp	偏波間位相差変化率		
	Rr	降雨強度		
	QF	品質管理情報		
合成雨量データプロダクト	R	合成雨量(+品質管理情報)	直交座標形式	地域単位

付録B.3 一次処理

受信・一次処理装置により受信された観測データは、各種の品質管理、各種データの算出、降雨強度算出が行われる。図 B-3 に基地局単位の極座標形式のデータに関する用語を示す。品質管理、データ算出、降雨強度算出はレイを一つの単位にして各種処理が行われる（隣接するレイの情報を利用する処理はない。これにより計算処理の並列化効率が向上され、高速処理が実現されている）。

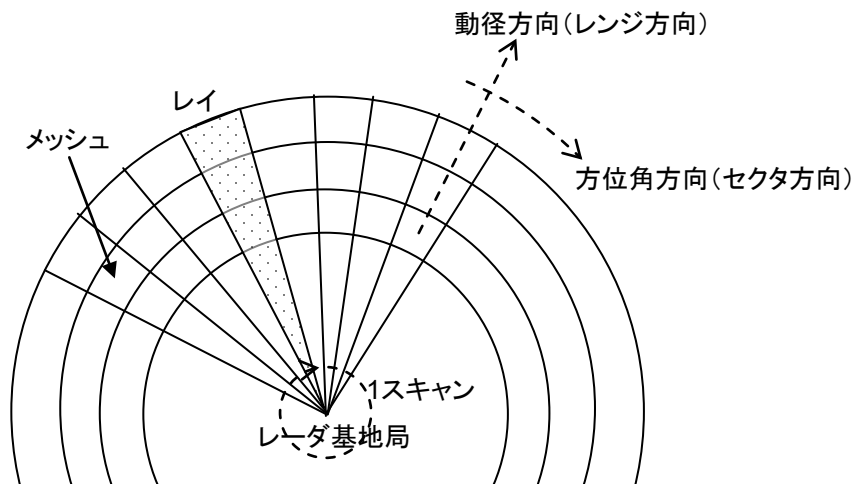


図 B-3 用語について

付録B.3.1 品質管理

品質管理では、レーダ基地局毎の Raw データの各種データについて、各メッシュの無効化、補正を行う。無効化とは降雨強度算出を行わないメッシュ（晴天域、マスクエリア、異常値、電波消散領域、地形遮蔽）、各種データの算出に使用しないメッシュ、強度系データによる雨

量算出(Z-R 関係式)を行う (偏波系データによる雨量算出(Kdp-R 関係式)を行わない) メッシュを特定することである。なお、晴天域を除いた降雨強度算出を行わないメッシュは、QF データに異常値、マスクエリア、地形遮蔽、電波消散と識別され、合成処理では欠測(0mm/h として合成しない)として合成される。

強度系データとは、Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI の総称、偏波系データとは、 ϕdp , ρhv の総称とする。また、内部パラメータとは統合監視装置で変更ができないパラメータ、外部パラメータとは統合監視装置により変更が可能なパラメータを示している。

品質管理は図 B-4 に示すフローで行われる。

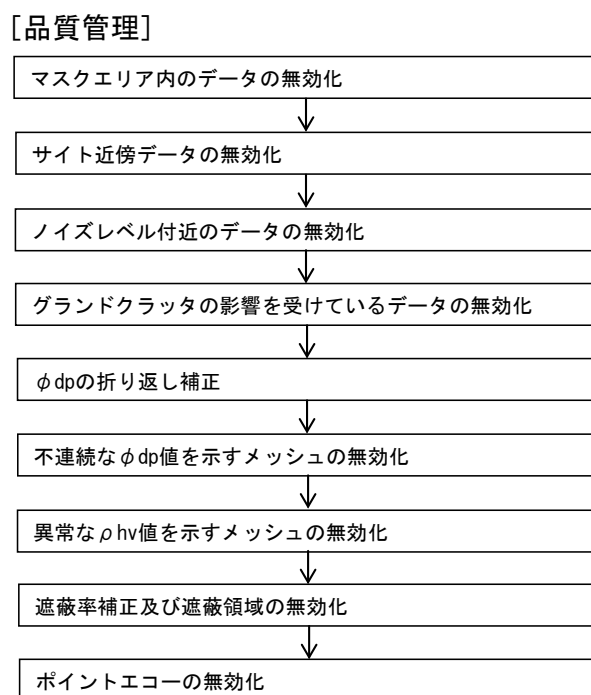


図 B-4 品質管理の処理フロー

付録B.3.1.1 マスクエリア内のデータの無効化

マスクエリア内の Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI, ϕdp , ρhv を無効値とする。ここで無効化されたメッシュは、強度系及び偏波系データが無効値となり、降雨強度算出は行われず、QF データにマスクエリアと識別される。

マスクエリアはレーダ基地局毎にポリゴン形式で設定する。なお、設定ファイルに仰角を2つ指定し、その仰角の間をマスクエリアとして設定することが可能である。

付録B.3.1.2 サイト近傍データの無効化

T/R リミッタの損失によりレーダ基地局の極近傍では正常な観測データが得られないことから、基地局近傍のデータの無効化を行う。具体的には、パラメータ `radarproc_range_avail_from[km]` で設定される半径内の Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI, ϕdp , ρhv を無効値とす

る。ここで無効化されたメッシュは強度系及び偏波系データが無効値となり、降雨強度算出は行われませんが、後述のレーダ基地局近傍の降雨強度内挿処理により雨量値が与えられる。

本システムでは、`radarproc_range_avail_from=1.0[km]`として内部パラメータで設定しているため、レーダ基地局から半径 1km 以内では降雨強度算出が行われず、降雨強度内挿処理による雨量値が与えられる。

付録B.3.1.3 ノイズレベル付近のデータの無効化

ノイズレベル付近の受信電力のデータは晴天域(ほぼ無降水)である可能性が高いため、またデータの信頼性が低いため、ノイズレベル付近と判定されるメッシュの無効化を行う。具体的には、Prh-NOR から計算した SNR (Signal Noise Ratio) がパラメータ `radarproc_snr_minimum[dB]`で設定される閾値以下と判定されるメッシュの Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI, ϕ_{dp} , ρ_{hv} を無効値とする。ここで無効化されたメッシュは、強度系及び偏波系データが無効値となり、無降水値 0[mm/h]が与えられる(正確には、降雨強度算出において無降水値を与える)。

なお、晴天域の他にノイズレベル付近と判定されるメッシュは、降雨減衰により著しく受信電力が低下している豪雨域の裏側で現れる。

SNR の計算方法を以下に示す。

$$Pr = Prh-NOR - 20 \log(r) + 20 \log(r_{nor}) - 2 A_{gas} \frac{r}{1000} \quad (\text{式 1.1})$$

$$SNR = 10 \log \frac{10^{Pr/10} - 10^{N/10}}{10^{N/10}} \quad (\text{式 1.2})$$

Pr: 距離補正、大気減衰補正をした水平電波の受信電力[dB]

r_{nor} : 正規化距離[m]※

A_{gas} : 大気による減衰率[dB/km] ※

r: レーダからの距離[m]

N: 水平偏波のノイズ電力値[dB]※

※データヘッダーに記述

国交省 Xバンド MP レーダの Prh-NOR は、(式 7.1)の右辺第 2 項の距離減衰、第 4 項の大気減衰の補正が行われたデータとなっているため Pr の計算は下記の(式 1.3)を用いる。

$$Pr = Prh-NOR + 20 \log(r_{nor}) \quad (\text{式 1.3})$$

一部のレーダでは距離減衰、大気減衰の補正が行われていないデータとなっているため、データヘッダーから補正の有無を確認し適宜、(式 1.1)、(式 1.3)を使い分ける必要がある。

付録B.3.1.4 グラウンドクラッタの影響を受けているデータの無効化

グラウンドクラッタの影響を強く受けているデータからの降雨強度算出は精度が悪いため、グラウンドクラッタの影響を強く受けていると判定されるメッシュの無効化を行う。具体的には、Prh-NOR と Prh-MTI の差がパラメータ `radarproc_clutter_remove[dB]` で設定される閾値以上と判定されたメッシュのデータを無効化する。ただし、レーダ基地局から 15km 以遠の場合は ϕ_{dp} , ρ_{hv} を無効値とし、基地局から 15km 以内の場合は、Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI, ϕ_{dp} , ρ_{hv} を無効値とする。基地局から 15km 以遠の場合は、偏波系データのみが無効値となるため、降雨強度算出では Z-R 関係式による雨量算出が行われる。レーダサイトから 15km 以内の場合は、強度系及び偏波系データが無効値となるため、降雨強度算出は行われず QF データに異常値と識別する。

Prh-NOR と Prh-MTI の比較において差が生じるケースは、クラッタまたはクラッタと降雨の混在したメッシュである。

晴天時のクラッタメッシュは、MTI 処理によりクラッタが除去され、Prh-MTI は No echo(データフォーマット上の最小値)を示すため、Prh-NOR と Prh-MTI を比較すると差が閾値以上となりデータが無効化される。そのため、基地局から 15km 以内では QF データに異常値、15km 以遠では、Z-R 関係式で降雨強度算出が行われるが Prh-MTI が No echo であるため無降水値が与えられる。

クラッタと降雨が混在したメッシュは、MTI 処理によりクラッタ信号の除去がされていても降水があるため Prh-MTI に何らかの値がある。このとき、Prh-NOR と Prh-MTI の差が閾値以上の場合(つまりクラッタの影響を強く受けている場合)、観測データが無効化され、基地局から 15km 以内では QF データに異常値、15km 以遠では、Z-R 関係式で降雨強度算出が行われる。

基地局から 15km 以内と以遠のクラッタで異なる処理を行っている理由は、基地局近傍ではドップラー速度が 0[m/s]を示し易く、MTI 処理において降雨域をクラッタと判定(降雨域を晴天域と誤判定)し、降雨域にもかかわらず Prh-MTI が No echo となり無降水値が与えられ、合成雨量において過小な雨量となることを回避するためである。

本システムでは、`radarproc_clutter_remove=5.0[dB]`として、外部パラメータで設定している。

付録B.3.1.5 ϕ_{dp} の折り返し補正

ϕ_{dp} は 0~360[°]の範囲の値で収録される。 ϕ_{dp} は降雨域内で動径方向に連続的に漸増するように変化するため 360[°]を越えて増加する場合に 0[°]に折り返された値が収録される。そのため、360[°]を超えて折り返しが発生した ϕ_{dp} を動径方向に連続するように補正する。

付録B.3.1.6 不連続な ϕ_{dp} 値を示すメッシュの無効化

ϕ_{dp} の動径方向のプロファイルは連続的に漸増する変化を示す。そのため、干渉やグラン

ドクラッタ等により不連続となった ϕdp データを判定し、無効化をする。具体的には、当該メッシュと当該メッシュの動径方向に前後 5 メッシュの合計 11 メッシュの ϕdp の平均値と当該メッシュの ϕdp との偏差（移動平均偏差）がパラメータ `radarproc_sdmdp_maximum[°]` で設定される閾値以上と判定されるメッシュの ϕdp , ρhv を無効値とする。ここで無効化されたメッシュは、偏波系データのみが無効値のため、Z-R 関係式による降雨算出が行われる。

移動平均偏差の算出方法を以下に示す。

$$\text{Dev} = \phi dp_i - \frac{1}{n} \sum_{j=i-5}^{j=i+5} \phi dp_j \quad (\text{式 1.4})$$

Dev: 移動平均偏差

n: 有効なデータ数

移動平均偏差を求める際に有効なデータ（無効化されていないデータ）の数が 6 未満の場合、当該メッシュは無効化される。

本システムでは、`radarproc_sdmdp_maximum=10.0[°]` として外部パラメータで設定している。

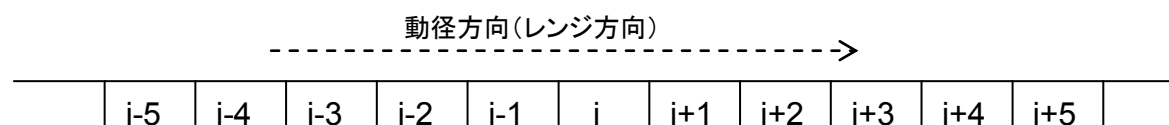


図 B-5 移動平均偏差の計算

付録B.3.1.7 異常な ρhv 値を示すメッシュの無効化

異常な ρhv データのメッシュを判定し無効化を行う。具体的には、 ρhv がパラメータ `radarproc_rhv_minimum` で設定される閾値以下と判定されるメッシュの ϕdp , ρhv を無効値とする。ここで無効化されたメッシュは、Z-R 関係式による雨量算出が行われる。

降雨以外の降水タイプ（雪、雹、霰など）では Kdp -R 関係式による雨量算出は難しいことから、ここでの品質管理は ρhv により降雨以外の降水タイプを判定し、Z-R 関係式による雨量算出を行うメッシュを特定する。通常、降雨の場合、 ρhv は 0.9 以上の値を示すが、実際は様々な降水タイプが混在しているため、降雨以外の降水タイプがある程度混在することを許容することと、 ρhv が 0.7 前後を示す降雨が観測されていることから、本システムは、`radarproc_rhv_minimum=0.6` として外部パラメータで設定している。

付録B.3.1.8 遮蔽率補正及び遮蔽領域の無効化

地形遮蔽による受信電力の減少を補正する。具体的には、 Prh -MTI を当該メッシュの地形遮蔽率に応じて補正する。ただし、地形遮蔽率がパラメータ `radarproc_blockrate_cutoff[%]` で設定される閾値以上と判定されるメッシュは、 Prh -NOR, Prh -MTI, Prv -NOR, Prv -MTI, ϕdp , ρhv

は無効値となる。ここで無効化されたメッシュは、降雨強度算出は行われず、QF データに地形遮蔽と識別する。

遮蔽率の補正方法を以下に示す。

$$\text{Prh-MTI} = 10 (\log (\text{Prh-MTI}) - \log(1.0 - \text{Br})) \quad (\text{式 1.5})$$

Br: 遮蔽率 (遮蔽率テーブルに記述)

本システムでは、`radarproc_blockrate_cutoff=50[%]` として、外部パラメータで設定しているため、遮蔽率が 50%以上の領域が遮蔽領域となる。

付録B.3.1.9 ポイントエコーの無効化

ポイントエコー (周囲から孤立したエコー) のメッシュの無効化を行う。具体的には、当該メッシュから動径方向に前後一定距離(`radarproc_ponitclutter1`)離れた区間(`radarproc_pointclutter2`)の Prh-MTI の平均値と当該メッシュの Prh-MTI との偏差がパラメータ `radarproc_pointclutter_threshold[dB]` で設定される閾値以上と判定されるメッシュの Prh-NOR, Prh-MTI, Prv-NOR, Prv-MTI, ϕ_{dp} , ρ_{hv} を無効値とする。ここで無効化されたメッシュは、降雨強度算出は行われず、品質管理情報で異常値と識別される。

偏差の算出方法を以下に示す。

$$\text{Dev} = (\text{Prh-MTI})_i - \frac{1}{2n} \sum_{j=i-n-m}^{j=i-1-m} (\text{Prh-MTI})_j - \frac{1}{2n} \sum_{j=i+1+m}^{j=i+n+m} (\text{Prh-MTI})_j \quad (\text{式 1.6})$$

Dev: 一定距離離れた区間の Prh-MTI の平均値と当該メッシュの Prh-MTI との偏差

n: 偏差を計算する区間のメッシュ数(`radarproc_ponitclutter1`)

m: 当該メッシュから算定区間までのメッシュ数(`radarproc_pointclutter2`)

本システムでは、`radarproc_ponitclutter1=2`、`radarproc_pointclutter2=3`、`radarproc_pointclutter_threshold=20.0[dB]` として、外部パラメータで設定している。

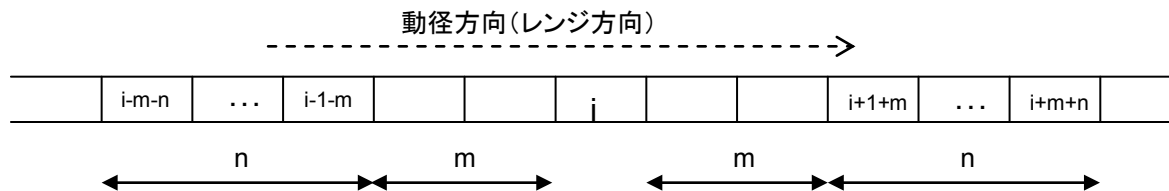


図 B-6 ポイントエコーの判別

付録B.3.2 各種データの算出

品質管理が行われた各データから、偏波間位相差変化率(Kdp)、レーダ反射強度(Zh)、レーダ反射強度差(Zdr)等のデータの算出を行う。

ϕ_{dp} の平滑化方法を以下に示す。

1. Wide パスの FIR フィルタ(次数が大きく、長い波長をカットオフ)から得られる ϕ_{dp} のフィルタ値と当該 ϕ_{dp} の差がパラメータ `radarproc_pdp_rfswitch[°]` で設定される閾値以上の場合、当該 ϕ_{dp} をフィルタ値に置き換える。
2. 1.を数回繰り返す。
3. 2.から得られた ϕ_{dp} の Narrow パスの FIR フィルタ(次数が小さく短い波長をカットオフ)値を ϕ_{dp} とする。

FIR フィルタは、(独)防災科学技術研究所の X-NET システムで用いられている FIR フィルタの周波数特性と同様になるように設計されており、Wide パスの FIR フィルタは、次数を 20 として、4km の波長で半減値を示す周波数特性でフィルタ係数を設定している。Narrow パスの FIR フィルタは、次数を 8 として、2km の波長で半減値を示す周波数特性でフィルタ係数を設定している(図 B-9)。また、Wide パスの FIR フィルタの繰り返し回数は 3 回としている。

本システムでは、内部パラメータ `radarproc_pdp_rfswitch=3[°]` と設定している。

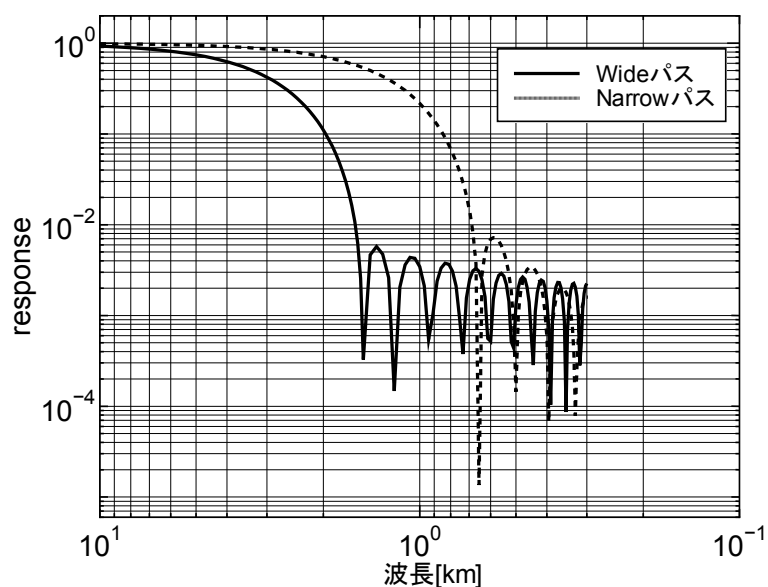


図 B-9 フィルタの周波数特性

(2) ϕ_{dp} の距離微分

K_{dp} は (式 1.7) で定義される単位距離あたりの ϕ_{dp} の変化率である。

$$K_{dp} = \frac{\phi_{dp}(r_2) - \phi_{dp}(r_1)}{2(r_2 - r_1)} \quad (\text{式 1.7})$$

K_{dp} : 偏波間位相差変化率[°/km]

ϕ_{dp} : 偏波間位相差[°]

r : レーダからの距離[km]

弱雨域では ϕ_{dp} の変化は微増であるため、Kdp の算定区間($r_2 - r_1$)が短い場合、適切な Kdp が算出されない可能性がある(小さい傾きが算出できない)。また、強雨域では ϕ_{dp} が急激に増大するため、Kdp の算定区間が長い場合、Kdp を過小に算出してしまう可能性がある。そのため、 ϕ_{dp} の変化率を算定する区間は、弱雨域では算定区間を長く、強雨域では算定区間を短くして ϕ_{dp} の変化率に応じて変化させている。そして、算定区間の ϕ_{dp} データから最小二乗法により回帰直線を求め、その傾きを Kdp とする。

Kdp の算出方法を以下に示す。

1. 当該メッシュ及び当該メッシュから動径方向に前後($nkdp_ini/2$)個の ϕ_{dp} データから回帰直線を求めその傾きを kdp_ini とする。
2. 以下に示す関係から kdp_ini に対応する n_kdp (四捨五入した整数値)を求める。
$$\left. \begin{array}{l} n_kdp=nkdp_low \quad (kdp_ini < kdp_low) \\ n_kdp=f(kdp_ini) \quad (kdp_low < kdp_ini < kdp_high) \\ n_kdp=nkdp_high \quad (kdp_high < kdp_ini) \end{array} \right\} \quad (式 1.8)$$
3. 当該メッシュ及び当該メッシュから動径方向に前後($n_kdp/2$)個の ϕ_{dp} データから回帰直線を求めその傾きを Kdp とする。

なお $f(kdp_ini)$ は、下記に示す($kdp_low, nkdp_low$), ($kdp_high, nkdp_high$)を通る双曲線としている。

$$\left. \begin{array}{l} f(kdp_ini) = \frac{A}{kdp_ini - \alpha} \\ \alpha = \frac{nkdp_low \times kdp_low - nkdp_high \times kdp_high}{nkdp_low - nkdp_high} \\ A = nkdp_low \times nkdp_high \frac{kdp_high - kdp_low}{nkdp_low - nkdp_high} \end{array} \right\} \quad (式 1.9)$$

なお、レーダサイト近傍の ϕ_{dp} データは、信頼性が低いためパラメータ $radarproc_range_start_km$ [km]で設定される半径内では Kdp の算出は行われませんが、Kdp の算出の区間データとしては使用される。

$nkdp_ini, nkdp_low, nkdp_high, kdp_low, kdp_high$ はそれぞれパラメータ $radarproc_nadp_ini, radarproc_nadp_low, radarproc_nadp_high, radarproc_kdp_adp_low, radarproc_kdp_adp_high$ で設定する。本システムでは、内部パラメータ $nkdp_ini=30, nkdp_low=75, nkdp_high=10, kdp_low=0.0, kdp_high=2.0$ と設定している。本システムの $f(kdp_ini)$ を図 B-10 に示す。また、本システムでは $radarproc_range_start_km=1.5$ [km]として外部パラメータで設定している。

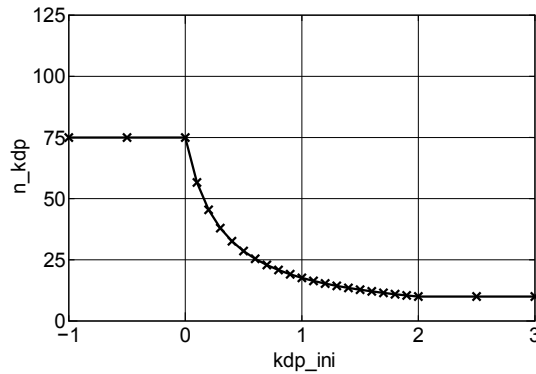


図 B-10 kdp_ini と n_kdp の関係

付録B.3.2.2 Zh の算出

Prh-MTI から Zh を算出する。Zh は下記の(式 1.10)で定義される。

$$Zh = Prh - MTI - Ch - 20 \log(r) + 20 \log(r_{nor}) - 2 A_{gas} \frac{r}{1000} \quad (\text{式 1.10})$$

Zh: 水平電波のレーダ反射強度[dBZ]

Ch: 水平電波のレーダ定数[dBZ]※

r_{nor}: 正規化距離[m]※

A_{gas}: 大気による減衰率[dB/km]※

r: レーダからの距離[m]

※データヘッダーに記述

国交省 Xバンド MP レーダの Prh-MTI は、(式 1.10)の右辺第 3 項の距離減衰、5 項の大気減衰の補正が考慮された値となっているため Zh の計算は下記の(式 1.11)を用いる。

$$Zh = Prh - MTI - Ch + 20 \log(r_{nor}) \quad (\text{式 1.11})$$

一部のレーダでは距離減衰、大気減衰の補正が行われていないデータとなっているため、データヘッダーから補正の有無を確認し適宜、(式 1.10)、(式 1.11)を使い分ける必要がある。

付録B.3.2.3 Zdr の算出

Prh-MTI、Prv-MTI から Zdr を算出する。Zdr は下記の(式 1.12)で定義される。

$$Zdr = 10 \log \frac{Zh}{Zv} \quad (\text{式 1.12})$$

Zdr: レーダ反射強度差[dBZ]

Zh: 水平電波のレーダ反射強度[dBZ]

Zv: 垂直電波のレーダ反射強度[dBZ]

なお、Zv は(式 1.11)あるいは(式 7.10)の Prh-MTI を Prv-MTI、Ch を Cv(垂直電波のレーダ定数)に置き換えた(式 1.13)を用いて算出する。

$$Z_v = Prv - MTI - C_v + 20 \log(r_{nor}) \quad (\text{式 1.13})$$

Zv: 垂直電波のレーダ反射強度[dBZ]

Ch: 垂直電波のレーダ定数[dBZ]*

※データヘッダーに記述

付録B.3.3 降雨減衰補正・品質管理・電波消散判定

Zh、Zdr の降雨減衰補正、Kdp の品質管理、電波消散領域の判定を行う。

付録B.3.3.1 初期降雨減衰補正

Kdp から各メッシュの降雨減衰量を推算し、レーダサイトから当該メッシュまでの降雨減衰量の積算値を Zh、Zdr に加算することで降雨減衰補正を行う。

(1) Zh の降雨減衰補正

Zh に対する各メッシュの降雨減衰量(Ah)は (式 1.14) より計算する。

$$Ah = ah1 \times Kdp^{ah2} \quad (\text{式 1.14})$$

Ah : 降雨減衰量[dB/km]

ah1, ah2 : 降雨減衰量算定パラメータ

$$ah1 = 0.2925 + 7 \times 10^{-4} \times EL + 1 \times 10^{-5} \times EL^2 + 3 \times 10^{-6} \times EL^3$$

$$ah2 = 1.1009 - 3 \times 10^{-5} \times EL - 4 \times 10^{-6} \times EL^2$$

EL = 仰角[°]

(2) Zdr の降雨減衰補正

Zdr に対する各メッシュの降雨減衰量(Adr)は (式 1.15) より計算する。

$$Adr = adr1 \times Kdp^{adr2} \quad (\text{式 1.15})$$

Adr : 降雨減衰量[dB/km]

adr1, adr2 : 降雨減衰量算定パラメータ

$$adr1 = 0.0298 + 5 \times 10^{-6} \times EL + 2 \times 10^{-6} \times EL^2 + 3 \times 10^{-8} \times EL^3$$

$$adr2 = 1.293$$

EL = 仰角[°]

付録B.3.3.2 Kdp による降雨減衰補正の品質管理

弱雨域のノイズ的な ϕ_{dp} により算出された過剰な Kdp を無効化するため (過剰な Kdp により過剰な降雨減衰補正がされることを回避するため)、初期降雨減衰補正から得られた Zh を用いて弱雨域の Kdp を無効化する。具体的には Zh がパラメータ radarproc_kdp_acswich[dB] で設定される閾値以下のメッシュの Kdp を無効化する。ここで無効化されたメッシュは Z-R 関係式による雨量算出が行われる。

付録B.3.3.3 最終降雨減衰補正

Kdp の品質管理で有効とされた Kdp から各メッシュの降雨減衰量を推算し、レーダサイトから当該メッシュまでの降雨減衰量の積算値を Zh に加算する (Prh-MTI から算出した Zh に加算する (初期減衰補正前の Zh)) ことで降雨減衰補正を行う。なお、降雨減衰量の算出方法は (式 1.14) を使用する。

付録B.3.3.4 電波消散領域の判定

降雨減衰の影響を強く受けていると、その地点から動径方向に後方の弱雨の信号 (受信強度) が検出されなくなる。レーダサイトからの動径方向に降雨減衰量を積算 (Kdp の品質管理で有効とされた Kdp を用いる) し、往復の積算減衰量がパラメータ radarproc_rr_critical[mm/h] 相当以下の降雨が検出できなくなるメッシュを電波消散と判定し、そのメッシュから動径方向に後方を電波消散領域とする。具体的には、以下の (式 1.16) を満たしたメッシュを電波消散と判定する。なお、電波消散領域のメッシュは QF データで電波消散と識別する。ただし、電波消散領域と判定されていても Kdp-R 関係式の使用条件を満たしている場合は、Kdp-R 関係式により雨量算定が行われる。

本システムでは、radarproc_rr_critical=3[mm/h] として外部パラメータで設定している。そのため、降雨減衰により 3[mm/h] 以下の降雨が検出不能と判定されるメッシュより後方が電波消散領域と識別される。

$$2PIA(r) > Z_{xmm}(r) - Z_{noise}(r) \quad (\text{式 1.16})$$

$$PIA(r) = \sum_{r=0}^r Ah(r) \delta r$$

$$Z_{xmm}(r) = 10 \log [B X(r)^\beta]$$

$$Z_{noise}(r) = N_h - C_h + 20 \log(r) - 2 A_{gas} \frac{r}{1000}$$

PIA(r): レーダから距離 r までの積算減衰量[dB]

Z_{xmm}(r): レーダから距離 r で X(radarproc_rr_critical)[mm] になる反射強度[dB]

Z_{noise}(r): レーダから距離 r で検出可能な最小反射強度[dB]

N_h: 水平電波のノイズレベル

C_h: 水平電波のレーダ定数[dBZ] (データヘッダーに記述)

r: レーダからの距離[m]

B, β: 雨量算定パラメータ

付録B.3.4 降雨強度算定

降雨強度算定は、当該メッシュが降雨層、雪層、融解層であるか判定し、対応する層において Z-R 関係式 (式 1.17)、Kdp-R 関係式 (式 1.18) により降雨強度を算定する。

$$Z_h = B R_r^\beta \quad (\text{式 1.17})$$

$$R_r = a_1 \times K_{dp}^{a_2} \quad (\text{式 1.18})$$

R_r : 降雨強度[mm/h]

Z_h : レーダ反射強度[dBZ]

B, β, a_1, a_2 : 雨量算定パラメータ

降雨強度算定は図 B-11 に示すフローで行われる。

[降雨強度算定]

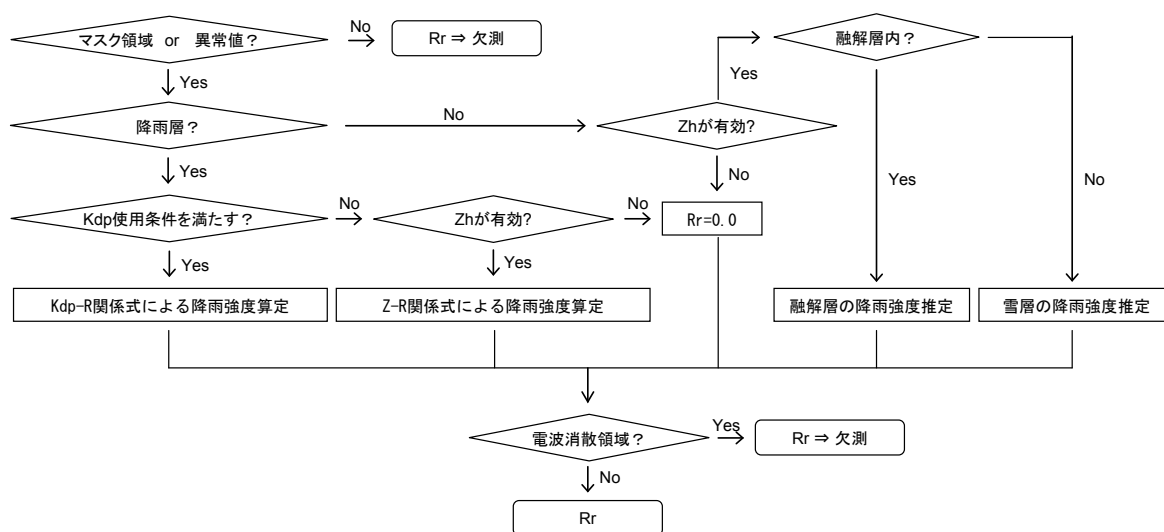


図 B-11 降雨強度の算定フロー

付録B.3.4.1 降雨層、雪層、融解層の判定

気象庁より受信するMSMデータを加工した0°C高度面データから当該メッシュが降雨層、雪層、融解層のいずれに属するか判定する。気温が0°C度となる高度からパラメータradarproc_meltlayer_depth[km]で設定する融解層厚さより下層を降雨層とする。雪層は気温0°Cとなる高度より上層とする(図B-12)。

本システムでは、radarproc_meltlayer_depth=1.0[km]として外部パラメータで設定している。

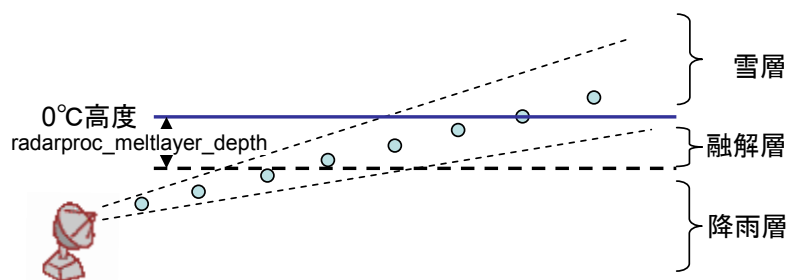


図 B-12 降雨層、融解層、雪層の判定

付録B.3.4.2 降雨層の降雨強度算定

降雨層と判定された場合、下記に示す使用条件において、(式 1.19)に示す仰角を考慮した Kdp-R 関係式により降雨強度が算定される。Kdp-R 関係式の使用条件以外の場合は、降雨層用雨量算定パラメータ(B、β)を設定した(式 1.17)の Z-R 関係式(最終降雨減衰補正から得られた Zhを使用)が用いられる。また、降雨層用 Z-R 関係式では、Zh=radarproc_zr_threshold [dB]を閾値として、異なる降雨層用雨量算定パラメータ(B、β)を用いている。

なお、(式 1.18)の Kdp-R 関係式で求められた 10分降雨強度を地上雨量計と比較すると全てのレーダで約 20~25 %程度の過小評価が認められた。そのため(式 1.19)は式(1.18)に雨量算定補正係数を乗じたものとなっている。

$$Rr=\alpha\times a1\times Kdp^{a2} \quad (\text{式 1.19})$$

ただし、Prh-NOR の SNR = radarproc_snr_minimum_rkdp[dB] 以上かつ Kdp = radarproc_kdp_minimum[°/km]以上かつ Kdp = radarproc_kdp_maximum[°/km]以下かつ Zh = radarproc_kdp_useswich[dB]以上(初期降雨減衰補正から得られた Zh)

α : 雨量算定補正係数

$$a1=19.6+2.71\times 10^{-2}\times EL+1.68\times 10^{-3}\times EL^2+1.11\times 10^{-4}\times EL^3$$

$$a2=0.815$$

EL=仰角[°]

付録B.3.4.3 雪層の降雨強度算定

雪層と判定された場合、雪層用雨量算定パラメータ(B、β)を用いて、Z-R 関係式により雨量を算定する。

付録B.3.4.4 融解層の降雨強度算定

融解層と判定された場合、(式 1.20)に示すように降雨用、雪用の Z-R 関係式から求めた降雨強度を線形補間して算定する。

$$Rr_{\text{melt}}=\frac{Rr_{\text{rain}}\times d+Rr_{\text{snow}}\times(\text{radarproc_meltlayer_depth}-d)}{\text{radarproc_meltlayer_depth}} \quad (\text{式 1.20})$$

Rr_{melt} : 融解層の降雨強度[mm/h]

Rr_{rain} : 降雨用 Z-R 関係で求めた降雨強度[mm/h]

Rr_{snow} : 雪用 Z-R 関係で求めた降雨強度[mm/h]

radarproc_meltlayer_depth : 融解層厚さ[km]

d : 0°C 高度との高度差[km]

付録B.3.4.5 レーダサイト近傍の雨量内挿処理

レーダサイトから radarproc_range_avail_from (=1[km])以内のデータは、品質管理において

強度系、位相系共に無効値としているため、雨量算定は行われず。そのため、この範囲の雨量値は、`radarproc_range_avail_from(=1[km])`から最初の1メッシュの雨量値を与えている(図 B-13)。

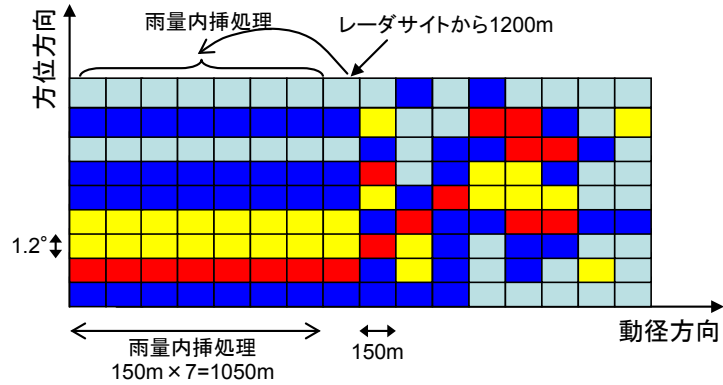


図 B-13 雨量内挿処理の概要

付録B.3.4.6 レーダサイト遠方の雨量算定処理 (H23年6月より追加)

レーダ観測範囲の外縁では、 ϕdp の平滑化や Kdp の算出において、適切な算定区間で処理、算出ができないため、異常に大きい Kdp が算出される場合がある。そのため、レーダ観測範囲の外縁からサイト側に一定距離の区間(レーダサイトから76.25~80kmまでの3.75kmの区間)では、Z-R関係により雨量算定をする。また、レーダ観測範囲の外縁からサイト側に一定距離離れた区間(レーダサイトから72.5~76.25kmまでの3.75kmの区間)では、 Kdp が得られている場合、Z-R関係式と Kdp -R関係式による雨量値を区間距離の線形重み付け平均値で雨量を算出する。重み付けはサイト側の区間末端で Kdp -R雨量の重み係数を1(Z-R雨量の重み付けは0)としている(図 B-14)。

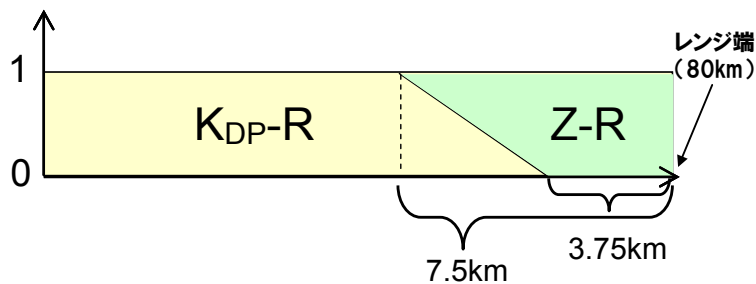


図 B-14 レーダ観測範囲外縁付近の雨量算定処理における重み付け

付録B.4 合成処理

合成処理では、一次処理で作成された降雨強度データの合成処理、フィルタ処理、減算処理を行い、合成雨量データを作成する。

付録B.4.1 合成処理

合成処理は、地域内の複数のレーダサイト、異なる仰角の観測で得られた降雨強度データを Cressman 内挿法により合成する手法を適用し、1/4 基準地域(3次)メッシュの中心点に内挿された 250m メッシュの合成雨量データを地域で1つ作成する。

下記の(式 1.21)より Cressman 内挿処理が行われ、極座標の Rr データから直角座標の合成雨量データが作成される。Rr の極座標点が代表する範囲を円形(影響円)として、レーダサイトからの距離に応じて線形で影響円半径が大きくなるようにしている。合成雨量は、求める格子点が影響円内となる Rr の極座標点を全て抽出して、格子点と Rr の極座標点との水平距離、鉛直高度の重み付け平均により算出される(図 B-15)。水平方向の重み係数は、合成雨量を求める格子点に対して水平距離に近い Rr 極座標点、鉛直方向に対しては下層の Rr 極座標点に重みが付けられる。

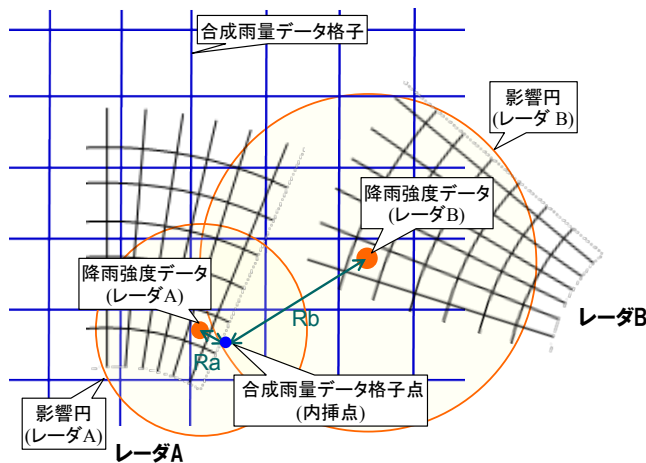


図 B-15 合成処理の概念図

$$R_{\text{comp}} = \frac{\sum_{(d_i < R, h_i < H)} W_i R_{r_i}}{\sum_{(d_i < R, h_i < H)} W_i} \quad (\text{式 1.21})$$

$$R = a \times r + b \quad (\text{式 1.22})$$

$$W_i = w_{h,i} \times w_{v,i} \quad (\text{式 1.23})$$

$$w_{h,i} = 1 / (1 + C_h (d_i / H)^2) \quad (\text{式 1.24})$$

$$w_{v,i} = 1 / (1 + C_v (h_i / H)^2) \quad (\text{式 1.25})$$

R_{comp} : 合成雨量を求める格子点の雨量[mm/h]

R_{r_i} : 合成雨量を求める格子点が影響円内となる Rr の極座標点の雨量[mm/h]

R : 影響円半径[m]

r : レーダからの距離[m]

d_i : 合成雨量を求める格子点と R_{r_i} との水平距離[m]

H: 内挿に用いるデータの最大高度[m]

h_i : Rr_i の高度[m]

W_i : 重み関数

$w_{h,i}$: 水平方向の重み関数

$w_{v,i}$: 鉛直方向の重み関数

C_h : 水平方向の重み定数

C_v : 鉛直方向の重み定数

本システムでは、内挿に用いられるデータの最大高度 H は `compradar1_maximum_height=5000[m]`、水平方向の重み定数 C_h は `compradar_weight_hor=0.5`、鉛直方向の重み定数 C_v は `compradar_weight_alt=20` として外部パラメータで設定され、水平及び垂直方向の重み関数は図 B-16 に示すとおりである。また、影響円に関するパラメータ a は `compradar_sample_radius_coeff_hor=0.013`、影響円に関するパラメータ b は `compradar_sample_radius_offset_hor=150[m]` として外部パラメータで設定され、影響円半径は、概ねビーム幅と一致している。

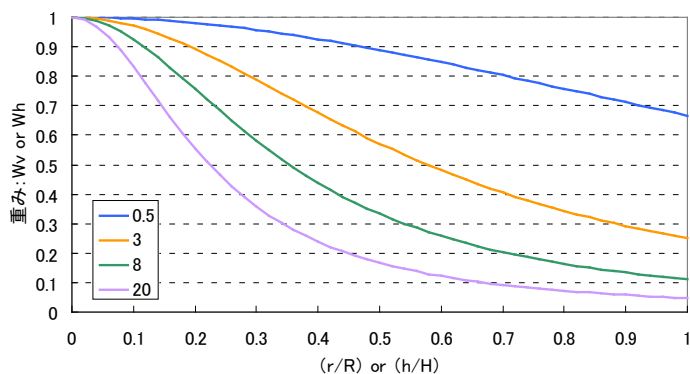


図 B-16 水平及び垂直方向の重み関数

付録B.4.1.1 合成処理の高度化 (H24年5月より実施)

レーダ基地局より遠方では、降雨減衰補正が不十分になり易く、 $Kdp-R$ 関係式の使用条件である Z_h を満たしにくくなり $Z-R$ 関係式で雨量算定がされることが多くなるとともに、 Z_h 過少評価であるため $Z-R$ 関係式の雨量算定精度が低下することで、基地局からの距離とともに過少評価傾向を示す。これにより、基地局の近傍で比較的精度良く降雨を観測されていても、別の基地局の精度の低下した遠方のデータと合成されることにより合成雨量の精度低下が生じる場合がある。そのため、(式 7.23)の重み関数に距離及び雨量推定式に関する重み関数を追加した(式 7.26)の重み関数により合成処理を行う。

$$W_i = w_{h,i} \times w_{v,i} \times w_s \quad (\text{式 7.26})$$

距離及び雨量推定式に関する重み関数を図 B-17に示す。Z-R 関係式の場合の重み関数は、基地局から 30km までは重み係数を 1 とし、30km から 60km では重み係数を 1 から線形的に 0.01 まで減少させ、60km 以遠では 0.01 としている。また Kdp-R 関係式の場合では、基地局から 45km までは重み係数を 1 とし、45km から 60km では重み係数を 1 から線形的に 0.01 まで減少させ、60km 以遠では 0.02 としている。Kdp-R 関係式の距離に応じた重みは、1 を超過しない範囲で Z-R 関係式の重みに対して 2 倍以内としている。

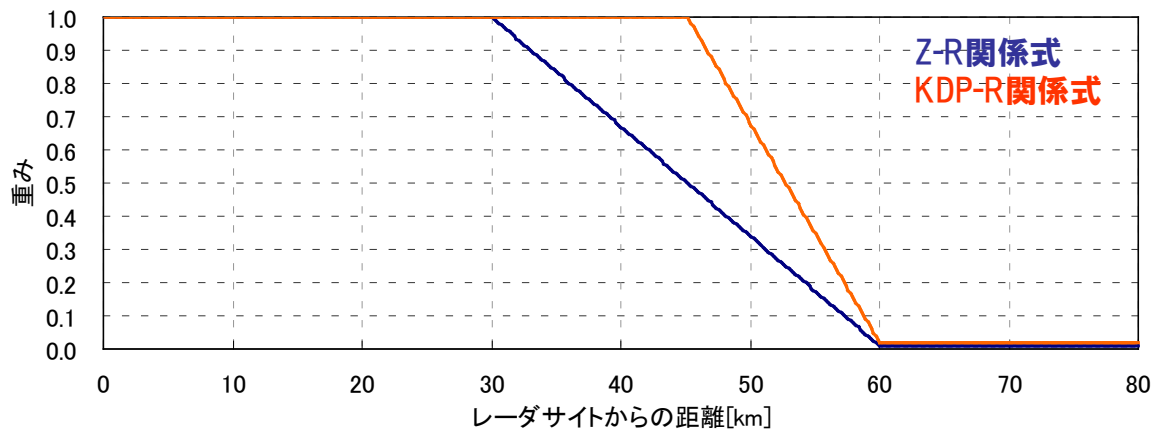


図 B-17 距離及び雨量推定式に関する重み関数

付録B.4.2 フィルタ処理

付録B.4.2.1 メディアンフィルタによる合成雨量データの平滑化

合成処理のみでは、周囲のメッシュデータと比較して異常な差異を示すメッシュが点在するため、3×3 のメディアンフィルタにより平滑化を行う(図 B-18)。

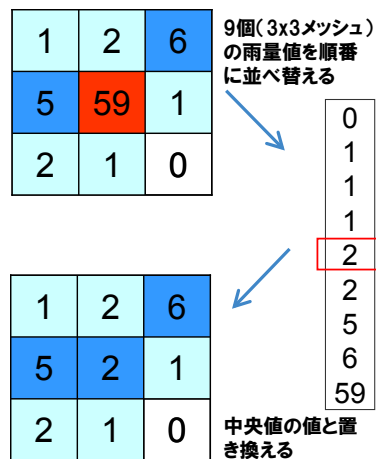


図 B-18 メディアンフィルタ処理の概要

付録B.4.2.2 ガウシアンフィルタによる欠測領域の補間

電波消散や地形、建物遮蔽により数メッシュ程度の欠測が生じている領域を、周囲のデータを用いて7×7のガウシアンフィルタにより補間する。

付録B.4.3 クラッタマップによる減算処理

クラッタマップの各メッシュのクラッタ値を合成雨量から減算することにより、クラッタの消え残りを消去する。

付録B.4.4 合成雨量データプロダクトのQF情報の付加規則

合成雨量データプロダクトのQF情報は、有効なデータ、電波消散領域、Kdpによる降雨強度推定、主に降雨層の4種類をそれぞれ識別した情報が合成雨量メッシュ毎に格納される。

付録B.4.4.1 有効なデータの識別情報の付加規則

有効なデータは、当該メッシュの合成雨量を算出するために用いるRrのメッシュから、1台以上のレーダで観測されている範囲内であり、いずれのレーダでもマスク領域と設定されていない、いずれのレーダでも遮蔽領域、異常値、電波消散領域と判定されていない場合に識別される。

付録B.4.4.2 電波消散領域の識別情報の付加規則

電波消散領域は、1台以上のレーダで観測されている範囲内であり、いずれかのレーダでマスク領域と設定されていない、遮蔽領域、異常値と判定されていないが、いずれかのレーダで電波消散領域と判定されている場合に識別される。つまり、有効なデータの中で、1台以上のレーダで電波消散領域と判定されている場合に、電波消散領域と識別される。

付録B.4.4.3 Kdpによる降雨強度推定の識別情報の付加規則

Kdpによる降雨強度推定は、有効なデータであり、当該メッシュの合成雨量を算出するために用いるRrの各メッシュの重み係数の全ての積算値と、そのRrメッシュの中でKdp-R関係式により算定されたRrメッシュの重み係数の積算値の比が0.5以上の場合に識別される。

付録B.4.4.4 降雨層の識別情報の付加規則

降雨層は、有効なデータであり、1台以上のレーダで降雨層と判定されている場合に識別される。

付録C Xバンド MP レーダ初期調整の手引き

付録C.1 観測仰角の設定

レーダサイト毎に設置標高や遮蔽状況が異なるため、観測仰角はサイト毎に設定する。また、観測仰角には合成雨量データを作成し雨量情報を配信するための観測（以下、配信用観測）として設定されている仰角（以下、配信用仰角）と CAPPI 観測のために設定されている観測仰角（以下、CAPPI 用仰角）がある。

付録C.1.1 配信用仰角

雨量情報を配信するための合成雨量は以下の理由により 2 仰角で観測されたデータから作成する。

レーダサイト近傍は、ドップラー速度が 0[m/s]を示し易く、MTI 処理において正常な降雨域をクラッタと判定してしまい Prh-MTI が No echo 示す場合（晴天クラッタメッシュと誤判定）がある。この場合、Prh-NOR と Prh-MTI の差が大きくなることから、レーダサイトより 15km 以内では雨量算出は行わず品質管理情報で異常値とし、15km 以遠では降雨算出を行うが Prh-MTI が No echo であるため 0[mm/h]が計算される。そのため、1 仰角のみの観測では、0m/s 付近のドップラー速度が観測されている領域で雨量値が 0[mm/h]または異常値となり降雨域が欠落してしまう。しかし、同じ場所の降雨でも観測仰角が異なれば（観測高度が異なれば）ドップラー速度 0m/s 付近の存在場所も異なる。そこで、複数仰角で降雨を観測し合成することで、ドップラー速度 0m/s 付近の雨量値の欠落を相互に補間するために配信用仰角は 2 仰角を設定する。

また、地上に到達する降水量を正確に観測するためには、可能な限り低高度を観測する仰角で観測することが望ましいが、観測高度が低すぎると地形や建物遮蔽による観測不能領域が拡大することやグラウンドクラッタの影響により観測データの品質が低下し、雨量算定精度が低下する。低い仰角の観測では、地形や建物遮蔽により観測不能となっている領域、グラウンドクラッタにより観測データの品質低下が推定される領域を高仰角の観測で補間するために配信用仰角は 2 仰角を設定する。

付録C.1.2 CAPPI 用仰角

CAPPI 観測は、豪雨の早期探知や降雨予測、豪雨の気象構造の分析に用いられることを踏まえると短時間に多仰角で仰角間隔を密にし、高い高度まで観測することが理想的である。しかし、配信用観測のための制約（合成雨量の 1 分間隔配信、2 仰角の観測データから合成雨量の作成）、アンテナ回転速度、仰角変更に要する時間等の制約がある。これらの制約を踏まえて、レーダサイト毎に 5 分間で 10 仰角（配信用仰角は含まない）の CAPPI データセットが得られるよう仰角を設定する。（これより長い時間をかけてさらに多くの仰角を観測することや観測仰角数を減らすことは、CAPPI データセットとして有効なものにならない）

付録C.2 アンテナ回転速度の設定

合成雨量を1分間隔で作成（更新）するために、配信用仰角の観測を1分間に少なくとも1回行う必要がある。また、5分間で10仰角のCAPPIデータセットを得るために、CAPPI用仰角の観測を1分間に2回行う必要がある。これらの要件から、1分間に3回の観測が必要となる。また、精度良く雨量算定するためには、パルスヒット数100以上を確保する必要があり、そのためにはアンテナ回転速度を3.5rpmより遅く設定することが必要となる。配信用仰角の観測は、精度良く観測することが求められるためにアンテナ回転速度は3.5[rpm]とする。CAPPI用仰角の観測は、配信用仰角の観測後の残りの時間で2回行うためにアンテナ回転速度を4.5[rpm]とする。

なお、パルスヒット数の計算方法は以下のとおりである。

$$N = \frac{60}{V \cdot n} PRF \quad (\text{式 1.1})$$

N :パルスヒット数[回/方位方向分解能]

V :アンテナ回転速度[rpm]

n :方位方向分割数[個]

PRF :繰り返し周波数[Hz]

付録C.3 観測仰角の変更順序

異なる2仰角の観測データから作成した合成雨量を1分毎に作成（更新）するためには、仰角変更順序として下記に示す方法が考えられる。

- ・連続2仰角合成

配信用仰角の低仰角と高仰角の観測を連続して行い、合成雨量を作成する。

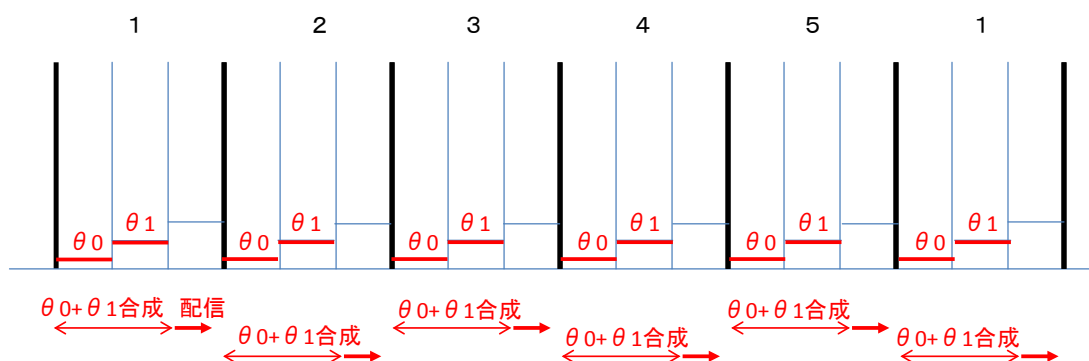


図 C-1 連続2仰角合成のイメージ

- ・1分間隔2仰角合成

配信用仰角の低仰角または高仰角の観測を1分毎に1回交互に行い、現時点の配信用仰角と1分前の配信用仰角の観測データから合成雨量を作成する。

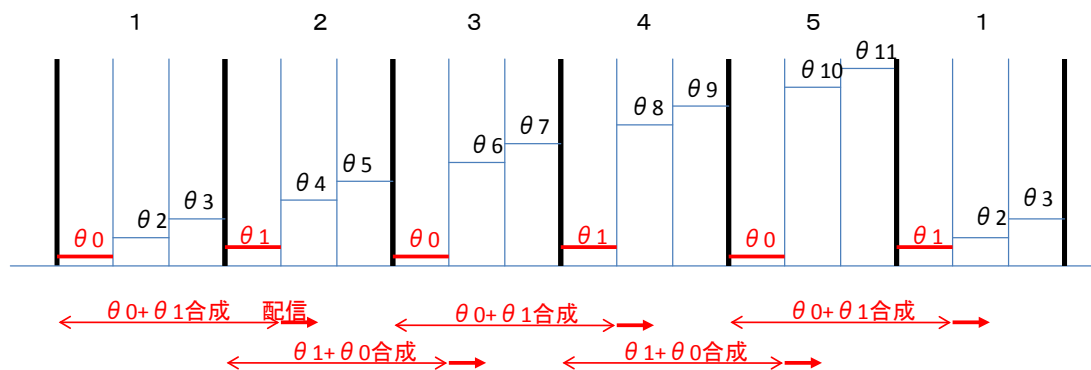


図 C-2 1分間隔 2 仰角合成のイメージ

連続 2 仰角合成では時間差がほぼ無い観測データによって合成雨量が作成されるため、時間変動の大きな降雨に対しても雨量を正確に観測できる利点がある。しかし、連続 2 仰角合成では、5 分間に 5 仰角程度の観測しかできないため、有効な CAPPI データセットが得られない。

1 分間隔 2 仰角により作成される合成雨量は、現時点と 1 分前の雨量値の平均であり、時間的な移動平均を行っていることと等しい。そのため、降雨が急激に変動をしている場合、雨量値のピーク(1 分間雨量のピーク)が平滑化され過小となることがある。しかし、5 分間に 10 仰角の CAPPI 観測データセットが得られるため、CAPPI 観測を実施するという観点では、1 分間隔 2 仰角合成の方が有効となる。

連続 2 仰角合成と 1 分間隔 2 仰角合成の雨量値の差異は図 C-3 に示すように小さく、また今後、X バンド MP レーダを豪雨の早期探知等の技術開発にも活用することを踏まえ CAPPI 観測を実施することとし、国土交通省 X バンド MP レーダは 1 分間隔 2 仰角合成を行うものとする。また、合成処理において低仰角の観測データに重みが付くように合成されているため 1 分間隔 2 仰角合成で作成された合成雨量は、2 分間隔毎に低仰角観測の影響を強く受ける。また、1 分間隔 2 仰角合成雨量を動画とした場合、遮蔽等により高仰角のみでしか観測されない地域は、2 分間隔に更新されることに留意する必要がある。

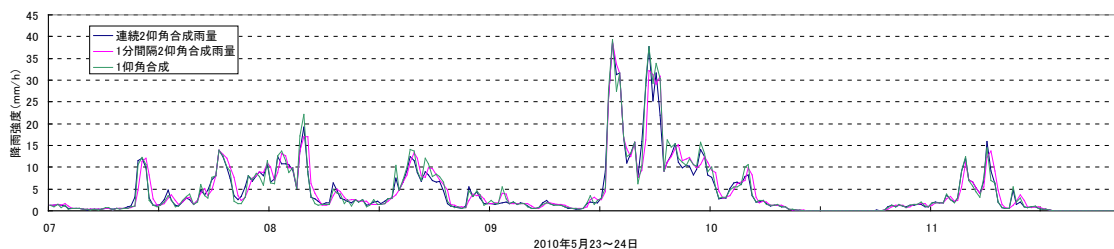


図 C-3 合成手法別の雨量値の比較

付録C.4 試験運用に向けた各種検討の方法

各サイトでレーダの設置、各種機器の整備、調整が一通り完了したものとして、試験運用の開始に向けて以下の項目を実施する。

1. 配信用仰角の設定
2. マスクエリアの設定
3. 観測データ品質の検証
4. 雨量算定パラメータの同定
5. 各サイトの観測精度の検証
6. 合成雨量の精度検証

検証において、問題等が抽出された場合は適宜、基地局のハード調整（MTI の調整、導波管ロスの見直し）や配信用仰角の見直し、雨量算定パラメータの見直し等を行う。

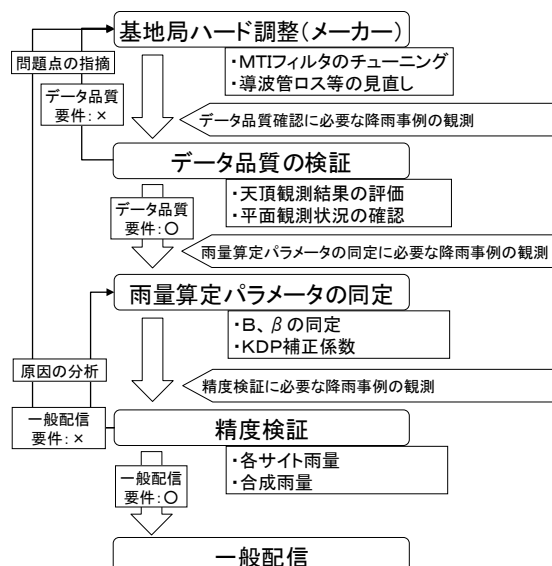


図 C-4 一般配信に向けた各種検討の流れ

付録C.4.1 配信用仰角の設定

配信用仰角は、クラッタや遮蔽状況を総合的に考慮し基本仰角から調整した上で設定する。

付録C.4.1.1 基本仰角の設定

2 仰角の配信用仰角の内、低仰角は基地局より半径 30km 以内の観測高度が 1000m となるように設定することを基本とする。また、高仰角は、半径 30km 以内の観測高度が 1500m となるように設定することを基本とする。これらの仰角を基本仰角と呼ぶ。なお、レーダの観測高度は、基地局の設置高度、地球の曲率、電波の屈折を考慮し、ビーム幅の中心とする。

付録C.4.1.2 基本仰角の例外

周辺の地形や建物により遮蔽領域が多い地域のレーダ基地局、遮蔽により合成雨量画像の

見栄えが悪くなる基地局、砂防目的等で山間部を観測するために仰角を高く設定する必要のある地域の基地局においては、前記の高仰角の基本仰角より高い仰角を基本仰角とすることを認めている。また、低仰角の観測可能な範囲が狭い地域についても、低仰角の基本仰角を上記よりも高い仰角とすることを認めている。

付録C.4.1.3 クラッタ状況を考慮した配信用仰角の調整

配信用仰角は可能な限り低く設定することが望ましい。そのため、配信用仰角を基本仰角より低い仰角とすることをクラッタ状況から検討し、配信用仰角を調整する。

(1) 調整の手順

1. 基本仰角を設定し、晴天時（観測範囲内に降雨域が一切存在しない時）のグランドクラッタを観測する。この観測は最低1スキャンのデータが得られれば十分である。
2. Pr-NOR のレーダ反射強度(Zh-NOR)¹が 20[dBZ]以上となるグランドクラッタ²の存在状況について、観測データを図化等することで確認する。
3. Zh-NOR が 20[dBZ]以上を示すグランドクラッタが存在する場合は、さらに低い仰角はグランドクラッタが増えるだけであるので、基本仰角を配信用仰角とする。
4. Zh-NOR が 20[dBZ]以上を示すグランドクラッタが存在しない場合は、さらに低い仰角に設定することが可能であるため低仰角、高仰角の基本仰角を基準に-1°程度の範囲で約 0.2°毎に仰角を変えて、晴天時のグランドクラッタを観測する。
5. 観測データの図化等を行い Zh-NOR が 20[dBZ]以上を示すグランドクラッタが存在しない最も低い仰角を配信用仰角とする。

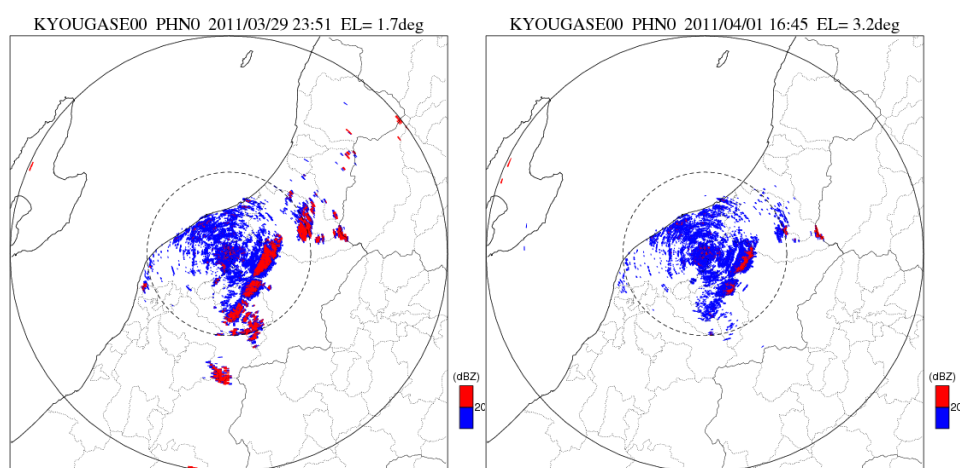


図 C-5 配信用仰角のグランドクラッタの状況の例

¹ Prh-NOR から(式 7.10)で求めたレーダ反射強度

² 降水とグランドクラッタが混在したエコーにおいて、グランドクラッタが位相情報に与える影響を 2° に抑えることとした場合、降水エコー対グランドクラッタエコーの強度比は 15dB 程度となる。レーダ反射強度 35dBZ 以上で位相情報を用いた雨量算定が可能とするとグランドクラッタ強度を 20dBZ 以下に抑えることが望ましい。

(京ヶ瀬サイト、左：低仰角、右：高仰角)

図 C-5 は京ヶ瀬基地局の配信用仰角のグランドクラッタの状況を示している。低仰角について、基本仰角は 1.7[°]である。基本仰角で 20[dBZ]のグランドクラッタが存在していることから、基本仰角を配信用仰角としている。高仰角については、2.7[°]が基本仰角であるが東南東方向に遮蔽領域が存在するため基本仰角の高仰角を例外とし 3.2[°]としている。

付録C.4.1.4 遮蔽状況を考慮した配信用仰角の調整

遮蔽域は観測可能領域、合成雨量画像の見栄えの観点から少ないことが望ましい。改善すべき遮蔽がある場合は、遮蔽率によるデータ除去判定の閾値の変更、仰角を高く設定することで遮蔽状況の改善を検討する。配信用仰角は低仰角の遮蔽域を高仰角で補間するために 2 仰角を設定していることから、仰角を高く設定し遮蔽状況を改善する場合は、高仰角の基本仰角を高く調整することで遮蔽状況の改善を行う。

(1) 調整手順

1. 観測範囲内に広範囲に広がる降雨を基本仰角により観測し図化することで遮蔽状況を確認する。(遮蔽には、地形遮蔽と建物遮蔽が存在する。地形遮蔽は地形データから判定されるため、晴天時、降雨時の観測データで遮蔽状況を確認できるが、建物遮蔽は降雨時に不自然に降雨域が欠落している領域として目視で確認する必要がある。そのため広範囲に広がる降雨の観測から遮蔽状況を確認する必要がある) この観測は高仰角の基本仰角で最低 1 スキャンのデータが得られれば十分である。
2. 遮蔽状況に問題がないと判断される場合は、基本仰角を配信用仰角とする。なお、サイト雨量を図化した際に見られる僅かな遮蔽は、合成処理における内挿処理、ガウシアンフィルタで補間される場合があるので、合成雨量データを図化し遮蔽状況を確認する。
3. 改善すべき遮蔽がある場合は、遮蔽率によるデータ除去判定の閾値(標準値 50[%])を変更(+5%程度を上限とする)し遮蔽状況の改善を確認する。遮蔽状況が大きく改善される場合は、その仰角を配信用仰角と設定する。
4. 遮蔽率によるデータ除去判定の閾値を変更し、合成処理による補間を行った上でも僅かな遮蔽が存在する場合は、高仰角の基本仰角よりさらに高い仰角を設定し、降雨観測を行い遮蔽状況の確認を行う。配信用仰角があまりにも高く設定されると観測精度が低下することから基本仰角より+0.3[°]程度を上限とする。
5. 遮蔽率によるデータ除去判定の閾値、仰角を変更しても、遮蔽状況が改善されない場合は、基本仰角を配信用仰角とし、マスクエリアの設定を行い、合成雨量画像の見栄えを調整する。

図 C-6 は京ヶ瀬基地局について遮蔽率によるデータ除去判定の閾値を変更した場合

の遮蔽状況（合成処理前）を示している。閾値を変更したことにより遮蔽の範囲が狭くなり遮蔽状況が改善されていることが確認できる。図 C-7は合成処理後の遮蔽状況を示している。図 C-6の左図、図 C-7の左図を比較すると合成処理により遮蔽が補間され遮蔽状況が改善されていることが確認できる。また、図 C-6の右図、図 C-7の右図を比較すると合成処理により遮蔽が解消されていることが確認できる。

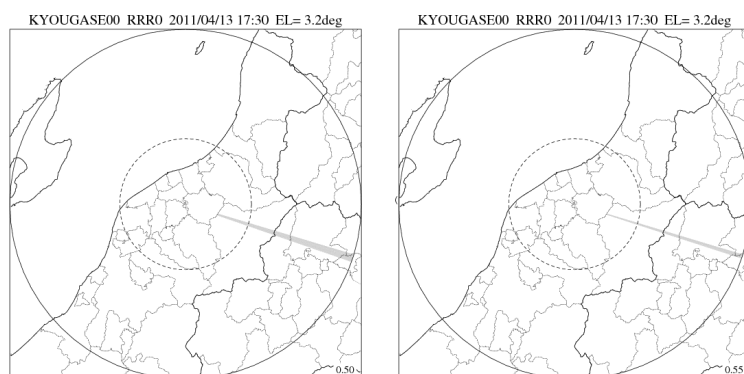


図 C-6 遮蔽率によるデータ除去判定の閾値の変更による遮蔽状況の改善例（合成処理前（京ヶ瀬サイト）、左：50%、右：53%）

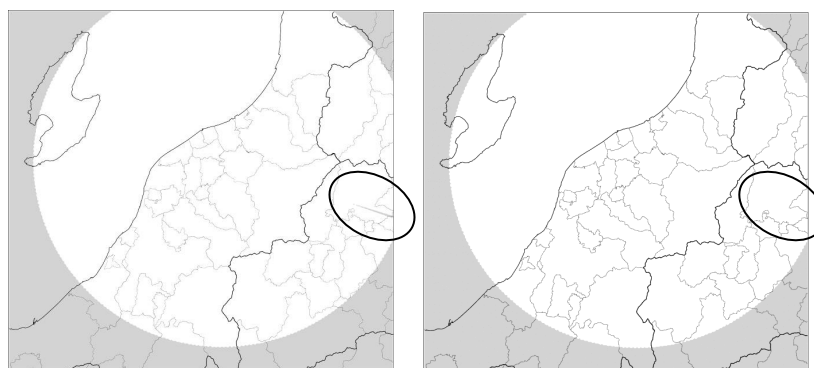


図 C-7 遮蔽率によるデータ除去判定の閾値の変更による遮蔽状況の改善例（合成処理後（新潟）、左：50%、右：53%）

図 C-8 は野貝原基地局について仰角を基本仰角から引き上げた際の遮蔽状況を示している。仰角を引き上げることにより遮蔽状況が改善されていることが確認できる。

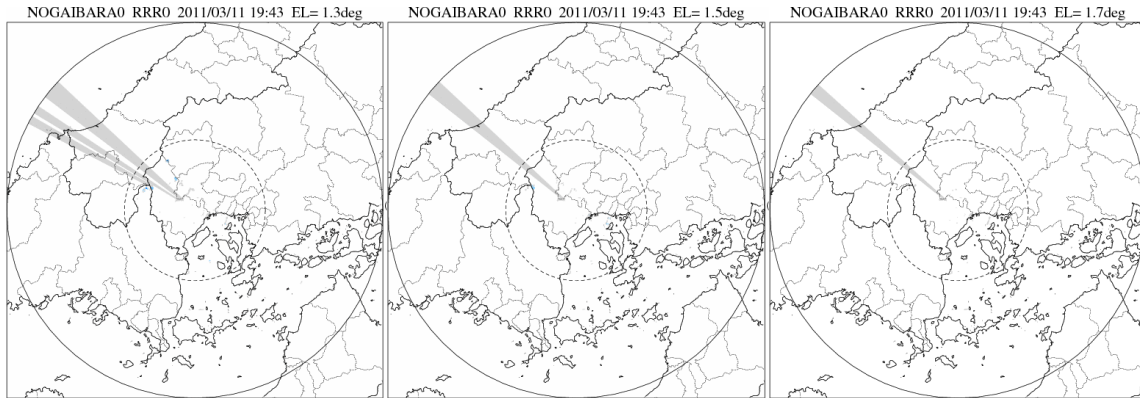


図 C-8 高仰角の引き上げによる遮蔽状況の改善例
(野貝原サイト、左：仰角 1.3°、中：1.5°、右：1.7°)

付録C.4.2 マスクエリアの設定

事前に想定される遮蔽状況（主に地形遮蔽とサイト近傍の建物）を踏まえてレーダの設置場所は検討されるが、実際にレーダで観測すると、建物遮蔽等により想定した遮蔽状況とは異なる場合がある。地形による遮蔽域は地形データより判定しているが、建物遮蔽は地形データでは判定できず、遮蔽と判定されていない遮蔽域は、降雨が存在していても No echo であるため晴天として扱われる。そのため、例えば低仰角では遮蔽（遮蔽と判定されていない遮蔽）、高仰角では正常に降雨観測がされている場合、合成処理（平均化）によって遮蔽領域が 0[mm/h] として扱われ過小評価となる。このことから、遮蔽と識別されていない遮蔽領域を特定してマスクエリアを設定する必要がある。（遮蔽領域と識別されている領域は、合成処理において雨量値なし(0[mm/h])ではない）として合成される）

(1) 設定手順

観測範囲内に広範囲に広がる降雨を基本仰角により観測、図化を行い不自然に雨域が欠落している領域をマスクエリアとして設定する。なお、マスクエリアは合成雨量画像とした際の見栄えを考慮して設定する。

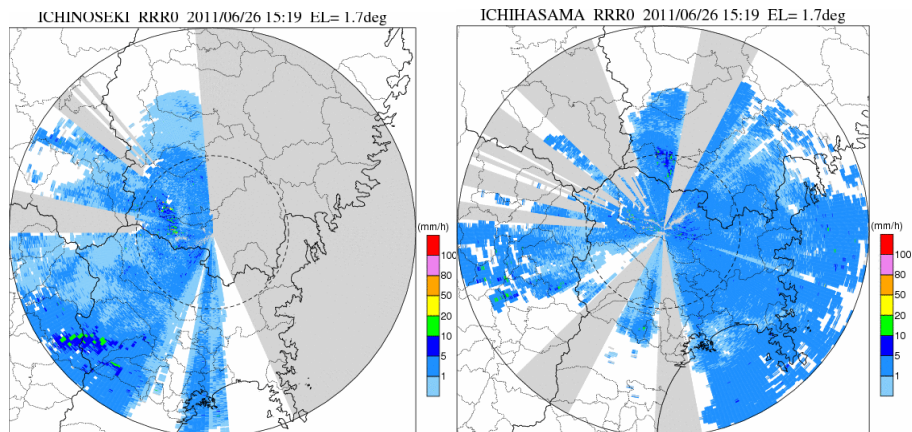


図 C-9 マスク追加前のサイト雨量の例（左：一関、右：一迫）

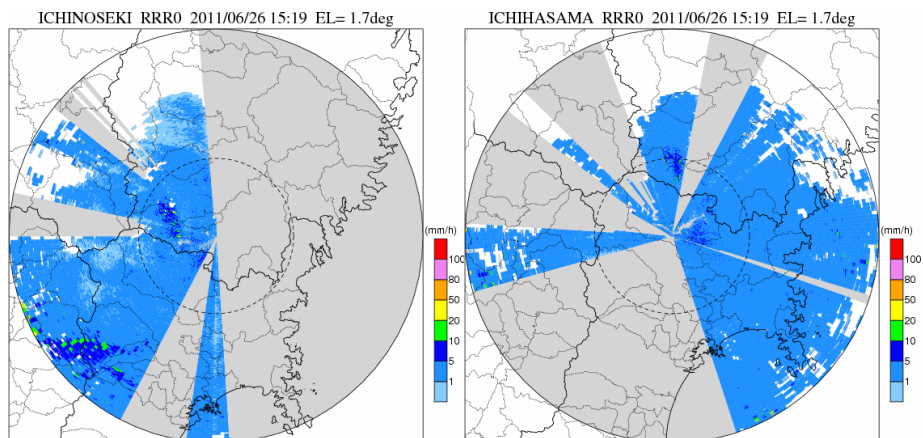


図 C-10 マスク追加後のサイト雨量の例（左：一関、右：一迫）

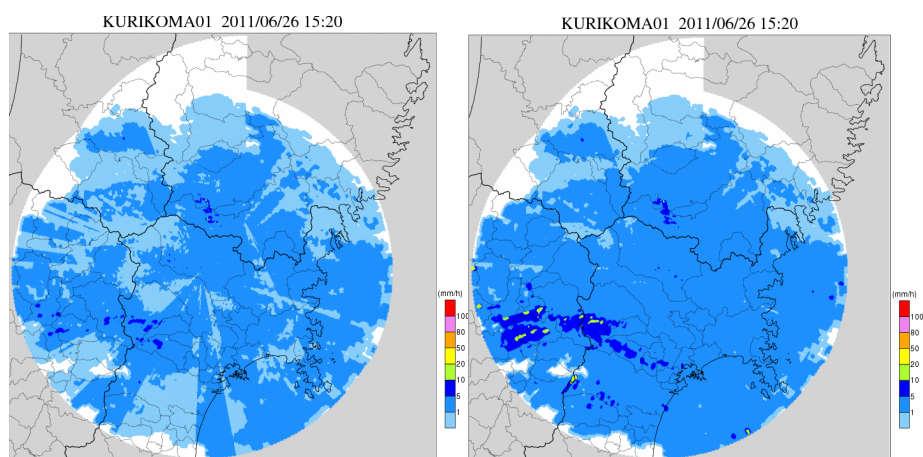


図 C-11 マスク追加前後の合成雨量の例（左：追加前、右：追加後）

付録C.4.3 観測データの品質検証

付録C.4.3.1 天頂観測による観測データの品質検証

偏波レーダの電波を横から雨粒に照射した場合、雨粒は横から見ると扁平して落下しているため水平と垂直の電波で異なる値を示す。しかし、電波を下から雨粒に照射した場合、雨粒は下から見ると円形となっているため、水平と垂直の電波でほぼ同じ値を示す。このことから天頂観測による品質検証とは、水平と垂直電波が同じ特性であるかを検証するものである。

(1) 天頂観測の設定

仰角を 90°に設定して降雨観測（天頂観測）を行う。なお、天頂観測時のアンテナ回転速度は、配信用観測と同条件(3.5[rpm])とする。

(2) 検証項目

偏波間の強度、位相に関するデータである Z_{dr} の平均と標準偏差、 ϕ_{dp} の標準偏差、 phv

の平均と標準偏差を検証項目とする。

(3) 検証対象降雨の条件

位相情報に関する ϕ_{dp} 、 ρ_{hv} は弱雨に対する感度が低いため、天頂観測で観測する降雨はある程度の強降雨である必要がある。そのため下記の方法で算定した Z_h の平均が 30[dBZ]以上の降雨を検証対象とする。

(4) 検証項目の算定方法

レーダ設置高度より 1[km]までのデータを除外し、融解層下端より低高度の全方位の観測データを対象とする。融解層下端の判定は、 ρ_{hv} の平均を下層から高度毎に求め、その平均が極端に小さく変化する高度とする。また、判定した融解層下端の高度の妥当性をドップラー速度、反射強度、近傍の高層気象観測の気温プロファイルにより確認する。

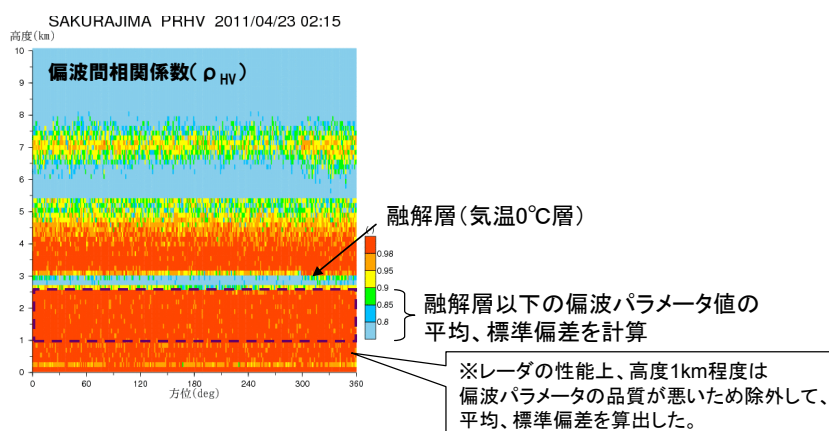


図 C-12 検証項目の算定対象

(5) 検証項目の要件

Z_{dr} の平均は 0[dB]、標準偏差は 0[dB]、 ϕ_{dp} の標準偏差は 0[°]、 ρ_{hv} の平均は 1、標準偏差は 0 となることが理想値である。しかし、上空の風の影響等により雨滴の落下軸が傾斜する等で雨粒を下から見たとき必ずしも円形でないことや、レーダの機器的な系統誤差等により理想値とはならない。そのため、要件値を設定しこれを満たすことを検証する。

また、要件値を満たしていても、天頂観測データを図化したときに、不連続な変化が見られる場合やノイズ的な図となっている場合は、データの品質として十分ではないため、対象とする範囲の観測データがほぼ一様であるかを確認する必要がある。

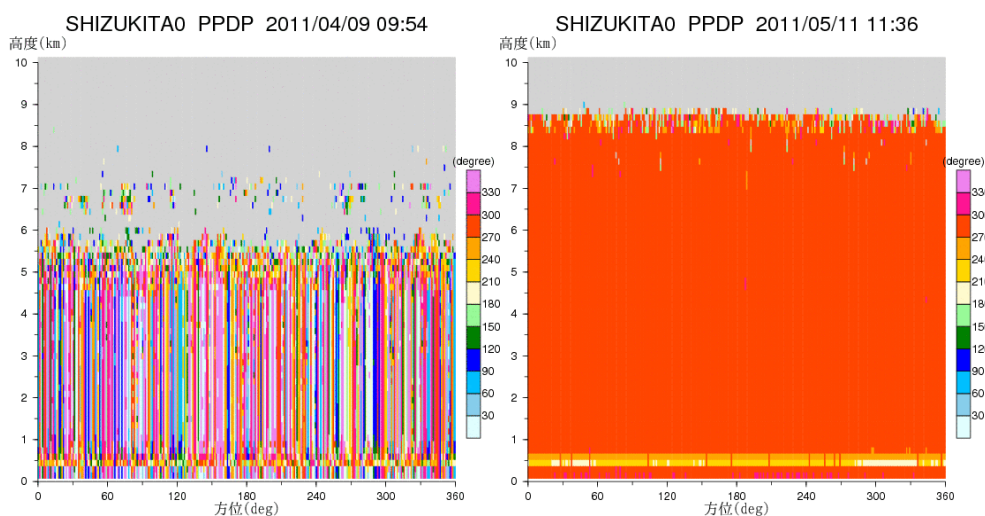


図 C-13 ϕ_{dp} の方位毎の不連続変化（左）とハード調整後の改善（右）の例

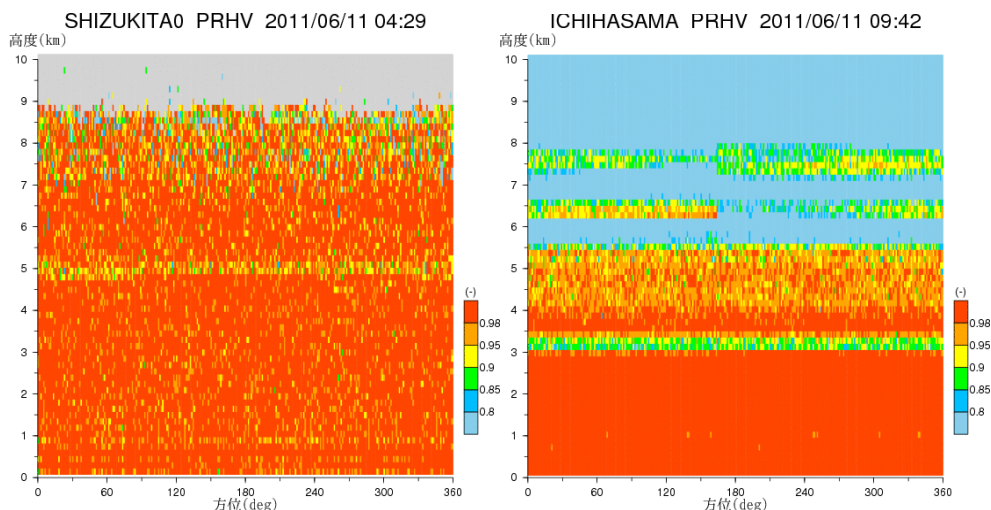


図 C-14 ノイジーな ρ_{hv} （左）と正常な ρ_{hv} （右）の例

付録C.4.3.2 平面観測による観測データの品質検証

配信用仰角で観測した時のデータの品質を確認する。

(1) 観測設定

配信用仰角に設定し降雨を観測する。アンテナ回転速度は、配信用観測と同じ 3.5[rpm]とする。

(2) 確認項目

MTI 処理が正常に行われていることを確認する。また、固体素子レーダについては、MTI 処理の確認と併せて、レーダ近傍で位相系データが不連続な変化をしていないか確認する。

(3) 確認対象降雨の条件

項目を確認するためには、サイト直上（近傍）に降雨があり、かつ観測範囲内で広範囲に

一様な弱雨であることが望ましい。

(4) 確認方法

① MTI 処理

Prh-NOR と Prh-MTI データを図化、比較しグラウンドクラッタが適切に除去されていること、過剰に降雨域が除去されていないことを確認する。

② 長短波の切替の不連続

ϕ_{dp} を図化し、レーダサイト近傍で不連続な変化をしていないことを確認する。

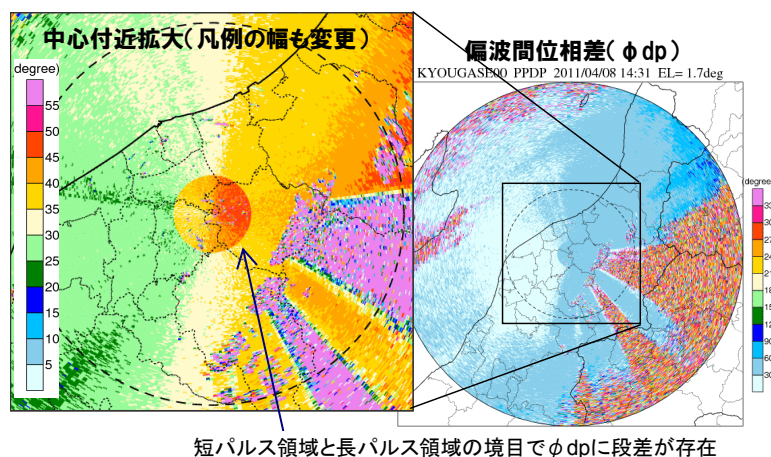


図 C-15 レーダサイト近傍の ϕ_{dp} の不連続な変化の例

付録C.4.3.3 要件を満たさない場合の対応：

天頂観測、平面観測による観測データの品質検証で要件を満たさない場合や不具合が確認された場合は、基地局のハード調整（MTI の調整、導波管ロスの見直し等）を行い、再度、観測、検証を行う。

付録C.4.4 雨量算定パラメータの同定

レーダサイト毎に Z-R 関係式の弱雨及び強雨用の雨量算定パラメータ B 、 β を、レーダ反射強度 Z_h -MTI と地上雨量の関係から同定する。同定の方法として、レーダ反射強度と地上雨量の関係から最小二乗法で直接に同定する方法と両者の層別平均値の関係を求めた上で最小二乗法により同定する方法（層別平均法）がある。また、同定に用いる地上雨量は、地上雨量計またはディストロメータ雨量計を用いる場合があるが、観測特性の違いのため同定方法が若干異なる。

付録C.4.4.1 同定対象事例

雨量算定パラメータの同定には、5 事例程度の観測事例が必要となる。弱雨用、強雨用の雨量算定パラメータを同定することから同定対象事例は、弱雨と強雨の降雨事例が必要とな

る。しかし、強雨用の雨量算定パラメータは K_{dp-R} 関係式の代用であり、基本的には強雨時は K_{dp-R} 関係式により降雨強度算出をすることから、弱雨用の雨量算定パラメータの同定を優先する。

付録C.4.4.2 地上雨量計による同定

地上雨量計では 10 分雨量が得られるが、多くの雨量計が 0.5mm を最小観測分解能としている。弱雨時の 10 分雨量に対して最小分解能が粗過ぎることから、弱雨時の 10 分雨量を地上雨量計では精度良く観測ができない（別な言い方をすると、感度が悪い、量子化誤差が 10 分雨量に対して大きい）。そのため、弱雨時の地上雨量の 10 分雨量とレーダ反射強度の対応が悪くなることから、弱雨と強雨では異なる方法で雨量算定パラメータを同定する。

(1) 弱雨用の雨量算定パラメータの同定

1. 地上雨量、レーダ反射強度の整理

配信用仰角の低仰角及び高仰角で観測可能である観測範囲内の全ての地上雨量計を対象に、地上雨量計の 60 分雨量とその雨量計に対応するメッシュのレーダ反射強度 $Z_h\text{-MTI}$ の 60 分平均値（地上雨量の 60 分に対応する時間）の関係を整理する（基地局毎に 1 つの散布図を作成する）。レーダ反射強度は、減衰補正された $Z_h\text{-MTI}$ を使用する（一次処理で得られる $Z_h\text{-MTI}$ ）。また、レーダ反射強度の 60 分平均値は、低仰角及び高仰角を用いて算出する（低仰角 30 分、高仰角 30 分間のレーダ反射強度を用いる）。

[電波消散による欠測の扱い]

電波消散により欠測が生じて 60 分間相当分のレーダ反射強度が得られない場合がある。その時は、得られた時間内の 1 分平均のレーダ反射強度を求めそれが 60 分間続いたものとしてレーダ反射強度の 60 分間平均を算出する（例えば 60 分間の内 3 分間の欠測があった場合、57 分間分の積算レーダ反射強度を $1/57$ にして 1 分平均のレーダ反射強度を求め、これを 60 倍したレーダ反射強度をこのときのレーダ反射強度の 60 分平均値とする）。ただし、欠測が対象時間内で 1 割を超える場合は、その時間のレーダ反射強度は散布図から除外する（つまり欠測が 7 分以上生じたら（連続して生じていなくてもよい）散布図から除外する）。

2.1. 層別平均法による同定

1. で整理した地上雨量、レーダ反射強度について、レーダ反射強度を $1[\text{dBZ}]$ の間隔で区切り、その区間内の地上雨量の平均値、レーダ反射強度の平均値を求めることを、全ての区間で行い、地上雨量とレーダ反射強度の関係を整理する。層別平均化された $\text{radarproc_zr_threshold}[\text{dBZ}]$ 以下の地上雨量、レーダ反射強度の関係に対して、 $Z=BRr^\beta$ で最小二乗法により近似させて B, β を得る。

2.2. 最小二乗法による直接同定

1.で整理した地上雨量、レーダ反射強度の関係から $\text{radarproc_zr_threshold}$ [dBZ]以下の地上雨量、レーダ反射強度の関係に対して $Z=BRr^\beta$ を最小二乗法で近似し B, β を得る。

※x 及び y 軸を対数軸とし、地上雨量を x 軸、レーダ反射強度を y 軸としたとき、 $Z=BRr^\beta$ は $\log Z = \beta \log Rr + \log B$ となるため、グラフ上では直線の近似曲線が得られる。その直線の傾きが β 、切片が B として得られる。

(2) 強雨用の雨量算定パラメータの同定

配信用仰角の低仰角及び高仰角で観測可能な範囲にある全ての地上雨量計の 10 分降雨強度(10分雨量×6)とその雨量計に対応するメッシュのレーダ反射強度の 10分平均値(地上雨量の 10分に対応する時間) の関係を整理し、以降、弱雨用の雨量算定パラメータの同定と同様にして $\text{radarproc_zr_threshold}$ [dBZ]以上の地上雨量とレーダ反射強度の関係から B, β を得る。

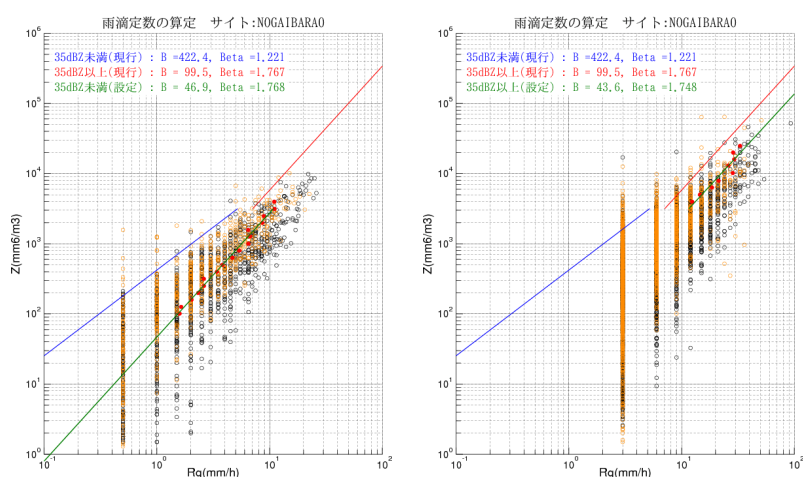


図 C-16 雨量算定パラメータ B, β の同定例 (左：弱雨、右：強雨)
(赤丸：層別平均値、緑線： $Z=BRr^\beta$ の近似線)

付録C.4.4.3 ディスドロメータ雨量計による同定

ディスドロメータ雨量では、最小分解能 0.1mm 以下(2DVD タイプ)の 1分雨量値が得られ、弱雨時の短時間雨量を精度良く計測することが可能である。しかし、ディスドロメータ雨量計は、地上に設置されて地表付近の降雨を観測するのに対して、レーダはその上空を観測していることから、雨滴が上空から地上に到達するまでの時間差によりディスドロメータの 1分雨量とそれに対応するメッシュの同じ時間のレーダ反射強度の関係性は悪い。そのため、ディスドロメータの 5分雨量とレーダ反射強度の 5分平均を整理し、以降、地上雨量計による同定方法と同様にして、弱雨用、強雨用の雨量算定パラメータを得る。

付録C.4.5 各サイトの精度検証

レーダサイト毎の雨量観測精度を算出し、一般配信要件を満たしていることを検証する。

付録C.4.5.1 雨量観測精度の算出方法

配信用仰角の低仰角及び高仰角で観測可能な範囲の全ての地上雨量計を対象に、地上雨量計の10分及び60分雨量とその雨量計に対応するメッシュのレーダ雨量（地上雨量に対応する時間の雨量）を比較し（レーダサイト毎に1つの散布図を作成）、精度指標を算出する。

(1) 10分雨量、60分雨量の算出方法

レーダ雨量は1分雨量が得られる（正確にはアンテナをスキャンした瞬間の降雨強度が得られる。ここでは、その瞬間の降雨強度が1分間継続したものと扱う。また、降雨強度として得られるため1分雨量とする場合は、降雨強度を1/60とする）。これを10分積算してレーダの10分雨量を得る。同様に60分積算してレーダの60分雨量を得る。

[電波消散による欠測の扱い]

電波消散により欠測が生じて10分間分の積算（または60分間分の積算）雨量が得られない場合がある。その時は、得られた時間内の1分平均雨量を求めそれが10分間（または60分間）続いたものとして10分雨量（または60分雨量）を算出する（例えば10分間の内3分間の欠測があった場合、7分間分の積算雨量を1/7にして1分間平均雨量を求め、これを10倍した雨をこのときの10分間雨量とする）。ただし、欠測が対象時間内で1割を超える場合は、その時間の雨量は散布図から除外する（つまり10分雨量では欠測が2分以上生じたら（連続して生じていなくてもよい）、60分雨量では7分以上生じたら除外する）。

(2) 精度指標の算出

地上雨量、レーダ雨量の比較から、精度指標として回帰係数、相関係数、雨量比、平均二乗誤差を算出する。精度指標の算出にあたり、地上雨量、レーダ雨量が共に0mm/hを示す場合は除外する。

なお、精度指標の算出には以下の式を使用する。

回帰係数：a

$$a = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i)^2}} \quad (\text{式 2.1})$$

相関係数：r

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}} \quad (\text{式 2.2})$$

総雨量比 : s

$$s = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i} \quad (\text{式 2.3})$$

平均二乗誤差 : RMSE

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2} \quad (\text{式 2.4})$$

付録C.4.5.2 一般配信要件

地上雨量を用いて Xバンド MP レーダ、国交省 Cバンドレーダ雨量の観測精度を算出し、X-MP レーダ雨量が国交省 Cバンドレーダ雨量と同等または同等以上の精度を有することが一般配信の要件とする。

(1) 国交省 Cバンドレーダ雨量の観測精度の算出

X-MP レーダが雨量観測精度の算出で対象とする範囲の地上雨量計とその雨量計に対応する Cバンドレーダのメッシュのレーダ雨量を比較し、精度指標を X-MP レーダと同様の方法で算出する (X-MP レーダのサイト毎に Cバンドレーダの精度指標を算出する)。

(2) 一般配信要件

精度指標は下記に示す定義により Cバンドレーダと同等または同等以上と判断する。

① 回帰係数

Cバンドレーダの回帰係数に対して X-MP レーダの回帰係数が±0.05 の範囲にある場合は、X-MP レーダは Cバンドレーダと同等。±0.05 を超えて精度が高い (回帰係数が 1 に近い) 場合は、同等以上とする。

② 相関係数

Cバンドレーダの相関係数に対して X-MP レーダの相関係数が±0.05 の範囲にある場合は、X-MP レーダは Cバンドレーダと同等。±0.05 を超えて精度が高い (相関係数が 1 に近い) 場合は、同等以上とする。

③ 平均二乗誤差

Cバンドレーダの最小二乗誤差に対して X-MP レーダの最小二乗誤差が 10分雨量で±0.25、

60分雨量で ± 0.5 の範囲にある場合は、X-MP レーダはCバンドレーダと同等。 $\pm 0.25(\pm 0.5)$ を超えて精度が高い(平均二乗誤差が0に近い)場合は、同等以上とする。

付録C.4.5.3 検証対象事例

精度検証には2事例程度の観測事例が必要となるが、検証対象とする降雨事例は、雨量算定パラメータの同定に用いた事例とは別事例とする。一般配信においては、弱雨から強雨までの範囲で要件を満たすべきであるため、検証対象事例には弱雨と強雨の降雨事例が含まれていることが望ましい。

付録C.4.5.4 雨量観測精度の検証

レーダサイト毎に以下に示す観測範囲別に雨量観測精度を算出し、一般配信要件を満たしていることを検証する。なお、レーダサイトから60km以遠は定量観測範囲外となることから検証の対象範囲とはしない。

- ・ レーダサイトから30km以内の範囲
- ・ レーダサイトから60km以内の範囲(30km以内を含む)
- ・ レーダサイトから30～60kmの範囲

(1) 雨量算定方式別の観測精度

雨量算定方式を識別して精度検証することは、要件を満たさない場合の原因特定に有効であることや、同定した雨量算定パラメータが適切であること、Kdp-R 関係式による雨量算定が正常であること等を確認するために有効であるため、以下に示すように雨量算定方式別の観測精度の検証も併せて行う。

① 雨量算定方式別の観測精度の算出方法

X-MP レーダ雨量は1分毎にKdp-R 関係式またはZ-R 関係式により雨量算定が行われる。X-MP レーダで求めた10分雨量に対してKdp-R 関係式、Z-R 関係式で算定された雨量の割合を整理した上で、地上雨量計(10分雨量)との比較から雨量算定方式別の観測精度の算出を行う(ある降雨継続時間内に観測された雨量のボリュームに対して何割がKdp-R 関係式またはZ-R 関係式で算定されたか)。

10分雨量で10割をKdp-R 関係式で求めたレーダ雨量をKdp-R 雨量、それ以外をZ-R 雨量と識別する。

付録C.4.5.5 要件を満たさない場合の対応

要件を満たさない場合は、概ね以下に示すことが原因として上げられる。

(1) データ不足

検証対象事例の事例数が少ない、対象事例の降雨期間が短いことや、検証対象範囲の雨量

計が少ないことで、精度指標の算出に用いるデータ数が不足することで有意な精度指標が得られないため要件を満たさない場合がある。このような場合は、事例を追加して検証する。

(2) サイト遠方の過小評価

以下のことが原因で、サイト遠方の精度が極端に低くなり要件を満たさない場合がある。

- ・ 仰角が高い

高仰角の配信仰角が高く設定されている場合は、遠方になる程、高い高度を観測することになり、雲長付近やブライトバンドを観測することになるため観測精度が低下する。このような場合、高仰角の再設定を検討する。

- ・ 検証対象事例の降雨の雲長が低い

冬季や春季の降雨は雲長や融解層が低く、仰角が低く設定されていても雲長付近やブライトバンドを観測する場合があります観測精度が低下する。このような場合は、そのような降雨事例を除外し、雲頂高度、融解層高度が高い事例を対象事例として検証する。

付録C.4.6 合成雨量の精度検証

合成雨量の精度を算出し、一般配信要件を満たしていることを検証する。検証方法、対象事例はサイト単位で行う精度検証と同じである。なお、合成雨量は、距離と観測台数の観点で領域を分けて、それぞれの領域で精度検証を行う。

領域 1：あるサイトから半径 30km 以内&異なるサイトから半径 60km 以内

領域 2：あるサイトから半径 30～60km&異なるサイトから半径 30～60km

or あるサイトから半径 30km 以内&異なるサイトから半径 60km 以遠（もしくは異なるサイトが存在しない）

領域 3：あるサイトから半径 30～60km&異なるサイトから半径 60km 以遠（もしくは異なるサイトが存在しない）

領域 4：どのレーダからも半径 60km 以遠（領域 1～3 以外）

付録D Xバンド MP レーダ運用管理システム

付録D.1 稼働監視

観測された雨量情報を提供するにあたっては、前述にもあるとおり①雨量を観測するためのレーダ基地局設備②データ処理を行うための合成処理局システム③データ提供を行うための一般公開システムに大別され、それぞれにおいて稼働状況の監視が行われており、障害の発生等を早期に発見し対応を行っている。以下に、それぞれのシステムにおける監視の概要について記載する。

付録D.1.1 レーダ基地局設備の稼働監視

レーダ基地局の稼働状態は、レーダ基地局を管理している事務所等と当該地域を管轄している地方整備局の本局それぞれに遠隔監視装置を設置し、相互に監視体制を補完しながら 24 時間稼働状況の監視を行っている。

遠隔監視装置においては、機器の運用状況、機器障害状態が把握できるようになっている他、レーダ基地局設備の仰角運用や観測データ処理の一部についても運用設定変更できるようになっており、レーダ基地局への入局を行うことなく迅速に運用変更を可能としている。

参考として、近畿地方整備局の遠隔監視画面を以下に示す。(図 D-1)

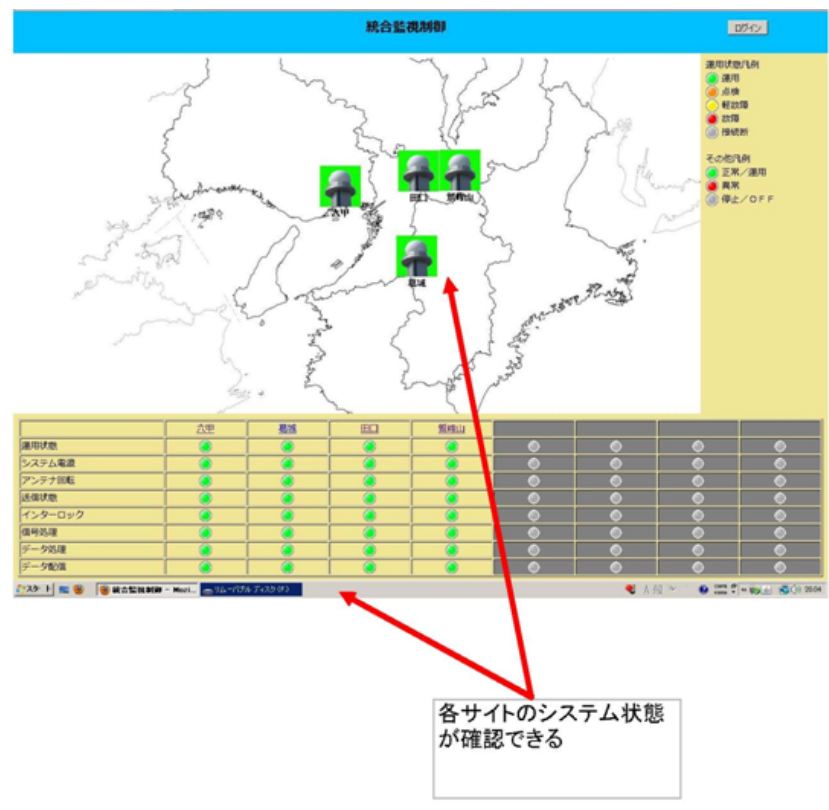


図 D-1 遠隔監視装置監視画面例（近畿地方整備局）

付録D.1.2 合成処理システムの稼働監視

各レーダ基地局からの観測データは、関東・近畿地方整備局に整備されている合成処理シ

システムにてデータ処理されており、それぞれ合成処理設備統合監視装置を配置し、各処理装置のデータ処理状況及び機器状態の監視を行っている。

合成処理設備統合監視装置においては、機器状態の監視の他、基地局毎の雨量データ（極座標）の確認、データの伝送先やデータ処理パラメータ等を統合的に管理・変更が可能となっており、基地局設備障害時の一時的なデータ処理停止や各種パラメータの修正を行うことが可能となっている。

監視画面の閲覧にあたっては、状況監視用の閲覧ユーザと定数変更等が行える管理ユーザがあり、ログイン時の ID、パスワードにより管理されている。

以下に、合成処理設備統合監視装置の画面の概要を示す。（図 D-2）

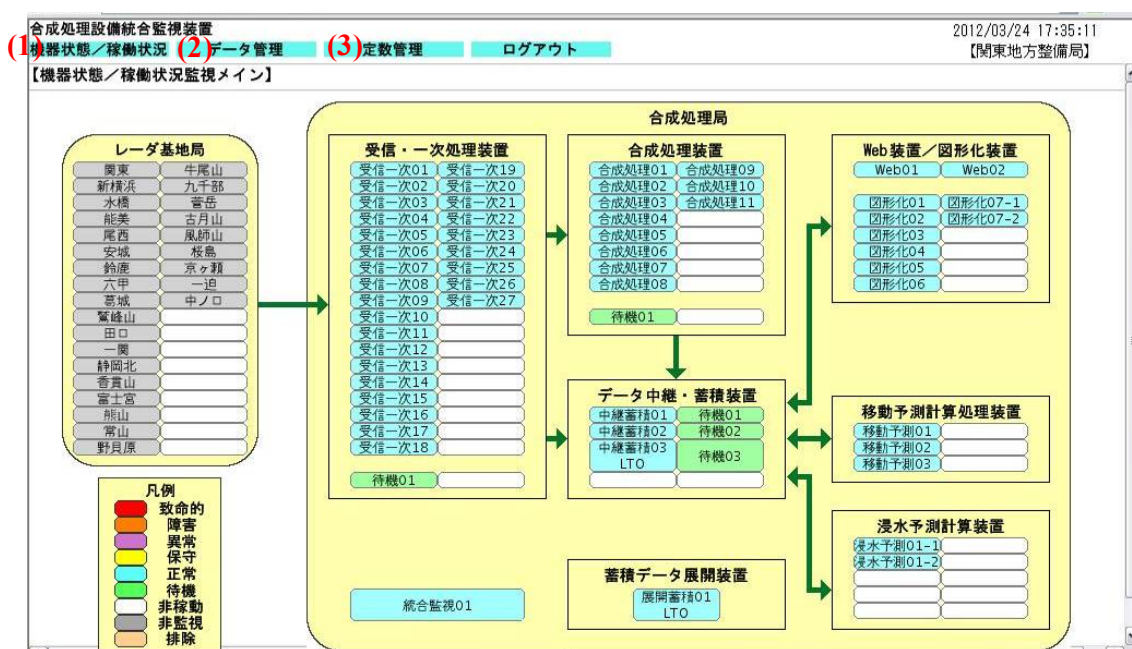


図 D-2 合成処理設備統合監視画面（機器状態／稼働状況）

付録D.1.2.1 機器状態／稼働状況

ハードウェア、アプリケーションプロセス状態、通信状態を監視する画面であり、障害発生時には当該装置を障害状態に応じた着色表示する他、警報音により障害発生を通知するようになっている。

各装置の名称をクリックすることにより、SNMPにより取得した機器状態等を確認できる他、データの処理ログ、異常ログも確認可能で、必要に応じ csv 形式でログ出力も可能である。（図 D-3）



図 D-3 各装置機器状態/稼働状況監視画面（例：受信・一次処理装置 01）

付録D.1.2.2 データ管理

各受信・一次処理装置から伝送される雨量データ(Rr)を監視し、データの受信状況や基地局毎の観測状況を確認可能となっている。（図 D-4）

雨量データの他、品質管理情報（Quality-Flag）やデータのヘッダ情報の可視化も可能であり、観測仰角の設定状況等も処理データから確認が可能となっている。

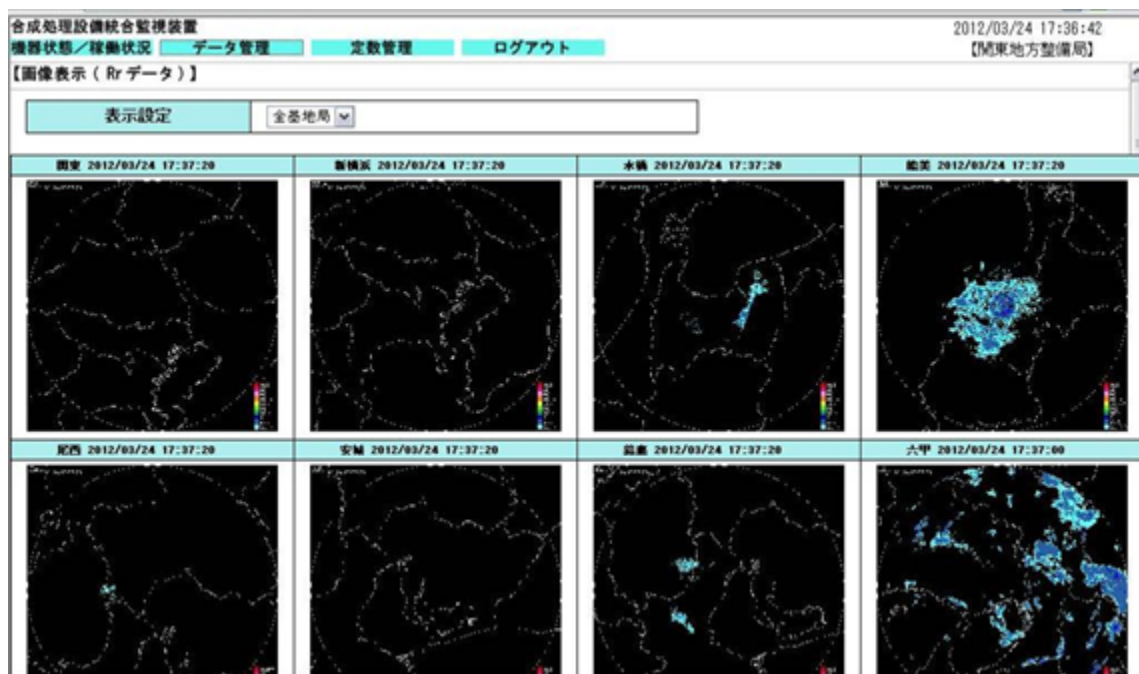


図 D-4 基地局毎の雨量データ(Rr)の監視画面

付録D.1.2.3 定数管理

合成処理システムにおける、機器名称やデータ定義等の共通設定項目、各処理装置個別の配信先やデータ処理パラメータ情報を統合的に管理しており、閲覧、修正（管理者権限が必要）を行うことが可能となっている。（図 D-5）

定数の修正を行った場合や、各処理装置の再起動を行った際に、統合監視装置にて管理しているパラメータ情報の配布を行う機能も備えている。

定数の表示においては、当該合成処理局側のほか、他方の合成処理局定数も定期的を取得し並べて表示されており、設定が異なる項目はピンクの表示で確認可能となっている。本機能により、本来同設定になっている必要がある処理パラメータの設定状況が確認できるため、設定変更時の変更漏れ確認に利用することが可能である。（図 D-6）



図 D-5 定数管理メニュー

合成処理設備統合監視装置
 機器状態/稼働状況 データ管理 定数管理 管理者メニュー ログアウト
 2012/03/24 18:06:32
 【関東地方整備局】

【受信・一次処理装置用定数表示】 戻る

機器名称 受信・一次処理装置01 編集

No.	項目名	パラメータ名	値 (関東地方整備局)
16	F T P通信01-有無(0:無効、1:有効)	ftp01_flg	1
17	F T P通信01-設置場所	ftp01_exp_site	71
18	F T P通信01-相手先	ftp01_exp_name	合成処理装置01(仮想)
19	F T P通信01-IPアドレス	ftp01_ip	合成処理装置01(仮想)
20	F T P通信01-ポート番号	ftp01_port	21
21	F T P通信01-ログイン	ftp01_user	receive01
22	F T P通信01-パスワード	ftp01_pwd	receive01
23	F T P通信01-ディレクトリ	ftp01_dir	/kyoku2/TOUKYOU001/KANTOU0000
24	F T P通信01-ログインタイムアウト	ftp01_timeout1	2
25	F T P通信01-ログインリトライ	ftp01_retry1	3
26	F T P通信01-転送タイムアウト	ftp01_timeout2	2
27	F T P通信01-転送リトライ	ftp01_retry2	3
28	F T P通信01-FTPmode(0:active、1:passive)	ftp01_mode	0
29	F T P通信01-通信データ:RAY	ftp01_product_RAY	00000000000000000000000000000000
30	F T P通信01-通信データ:R005	ftp01_product_R005	00000000000000000000000000000000

図 D-6 各装置定数表示画面（例：受信・一次処理装置 01）

付録D.1.3 一般公開システムの稼働監視

一般公開システムについては、外部のデータセンター（DC）に設置されていることから、ハードウェア及びネットワークの監視はデータセンター管理者により行われているが、別途インターネットへ配信されている画面に対し 24 時間体制で欠測や表示異常の画面監視を行い、管理関係者へメールリングリストにより対応依頼を行っている。

画面監視において表示異常確認の流れは以下の通りとなっている。

- (1) 異常表示が 30 分以上継続した場合、障害等と判定
- (2) 合成処理局の web 表示にも同様の異常表示の有無を確認（発生箇所の一次切り分け）
- (3) インターネット向けの場合、DC における障害としてメール周知の上、稼働状況の確認の上、復旧作業の実施
- (4) 合成処理局も同様の場合、基地局設備障害、合成処理局設備障害両方を視野に入れ、画面監視者より関係者へメール周知を行い、該当の担当者により障害状況の確認の上、復旧作業の実施

なお、DC および合成処理局に整備されているシステムにおいては、ハードウェア、ソフトウェアの構築、開発者が異なるため、どちらの障害であるかの切り分け作業が必要である。

付録D.2 運用および保守点検

基地局設備においては、システムとして安定的な正常動作を確保するため、機器の動作確認や清掃及び定期交換が必要な部位・部品の交換等により、機器単体での個別点検を 3～6 ヶ月周期で定期的に行っている。

また、サーバ等の汎用機器については、ハードウェア清掃、蓄積データ収集、デフラグ等を6ヶ月周期で行い、システム全体での一連動作に支障がないことを確認している。

本レーダにおいて、定期交換の必要な主な部位・部品は表 D-1 のとおり。

表 D-1 XバンドMPレーダの主要な交換部位・部品

部位・部品	周期		
	3ヶ月	6ヶ月～1年	2～3年程度
クライストロン			○
T/Rリミッタ		○	
超伝導フィルタの六フッ化硫黄ガス (SF6)		○	
スリップリングブラシ	○	(H24より6ヶ月周期を規定)	
レドーム撥水剤の再塗布			○

クライストロンの場合、真空管の中に不純物が発生することにより、スパークが生じることがある。これには周期性がなく劣化兆候もないため、点検等による予防保全が困難である。即時復旧させるためには、発生ガスが収まってから機器の再起動を行うことが必要である。交換周期としては、Cバンドの実績より2～3年の使用が可能であると見込んでいるが、メーカー推奨の運用可能時間は10,000時間程度である。クライストロンの劣化による障害に速やかに対応するため、予備管を用意して運用している。

T/Rリミッタは小電力用として固体素子化されているものと、大電力用として不活性ガスを用いたものがある。不活性ガスを使用しているT/Rリミッタは、不活性ガスが劣化するため定期的な交換が必要である。メーカー推奨の使用期限は6ヶ月であるが、平成21～22年度にかけて実機で使用しているT/Rリミッタの劣化状況を調査したところ、概ね1年程度は使用できることが確認されている。

超伝導フィルタは、平成21年度から22年度にかけて実施された総務省の技術試験事務である「5GHz帯および9GHz帯等レーダの周波数有効利用技術に係る調査検討」により開発された新技術であり、本レーダの一部において採用されている。この超伝導フィルタでは、空洞共振器内におけるアーキングを防止するため、六フッ化硫黄ガス(SF6)を充填して使用するものとしているが、ガスの劣化等によりフィルタ特性が低下するほか、超伝導フィルタの部品破損につながる恐れがある。このため6ヶ月周期でのガス交換を行わなければならないが、専用の治具を必要とするなど非常に作業費用が高価である。従って、超伝導フィルタの導入にあたっては慎重な検討が必要である。

空中線制御装置に使用されているスリップリングブラシは、空中線の回転に伴い徐々に摩耗する消耗品である。従って、摩耗に伴うブラシ圧の低下は機器停止につながるため、定期

的な調整が必要になる。また、スリップリングブラシの摩耗粉が電気回路に付着すると短絡（ショート）が発生し機器停止となるといった事象が発生するため、導入時には摩耗の少ないものを使用することが望ましい（平成 24 年度調達より 6 ヶ月以上無保守のスリップリングを調達予定）。

レドーム撥水剤については、2.1 で述べたレドーム付近に設置している試験片により、撥水性能が 30° 以上を満足しているかを定期的に確認するものであり、劣化が見られる場合においては再塗装を行うものである。（H24.3.30 現在では、まだ再塗装を行った実績はない。）

付録D.3 システム障害事例

X バンド MP レーダシステムの運用開始後これまでに、初期障害から偶発障害まで様々な障害が発生しており、それぞれに対応してきているところである。別紙 1 にその一覧をとりまとめる。

付録D.4 その他

付録D.4.1 伝送仕様

Raw データは、関東地整と近畿地整に整備された合成処理システムに伝送され、雨量データなどの一次処理データへの処理後、合成雨量データに変換される。合成雨量データは合成処理局で表示されるとともに、データセンターに伝送されてインターネット向けに公開される。

X バンド MP レーダシステムでは、1 分間に 1~3 仰角の観測を行うこととなっており、1 仰角毎に Raw データが発生することとなる。つまり、観測完了後、データを伝送し、処理を完了するまでに許容される時間は 20 秒に満たない。従って、データ伝送には信頼性・確実性よりも迅速性が求められることとなる。

データの発生頻度が高く、データ量が大きい極座標データの伝送においては、「国土交通省 X バンドレーダ雨量計レーダデータ伝送仕様書（案）」を用いてデータ伝送を行う。この仕様は、socket 通信による伝送仕様であり、伝送路の信頼性の確保と回線確立に要する時間を節減するため、TCP を利用した伝送路の常時確立を行っている。ただし、データ伝送については単向通信であり、迅速性を確保するため、伝送エラー等が発生した場合はデータを破棄し、再送を行う機能はサポートしていない。

一方、一般提供に利用されるなど比較的高い信頼性を求められる合成データの伝送においては「X バンド MP レーダ合成処理データ伝送仕様（案）」が利用される。この仕様も socket 通信による伝送仕様であるが、データ送信側の二重化に対応した伝送仕様である。複数箇所生成される同一のデータに対して、データ生成状況に応じて受信側で送信者を選択してデータ受信を行うことができる。

また、合成処理局内でのデータ送受は「X バンド MP レーダ合成処理局内装置間 FTP 通信手順」によっている。これは汎用プロトコルである FTP を利用してデータを送受する際のプ

ロトコルであり、実装が容易である。一方で、ネットワークセキュリティや回線効率等について考慮する必要があるため、この手順はネットワーク条件等を鑑みた上で採用すべきである。

付録D.4.2 レーダ諸元について

付録D.4.3 パルス繰り返し周波数

パルスレーダのパルス繰り返し周波数（PRF）は観測範囲、速度観測範囲により規定されるが、XバンドMPレーダにおいては、1メッシュあたりのヒット数を最大とするような設定としている。

観測範囲は80kmとしているが、観測原理上で電波の往復に要する時間を考えると

$$1 / \{80\text{km} \times 2(\text{往復}) \div 30 \text{万 km/s (光速)} + 1 \mu\text{s (パルス幅)}\} = 1871.5\text{Hz}$$

となり、1872以上のPRFでは観測範囲80km未満となるため、上限値を1800としている。

1メッシュ当たりパルスヒット数は、方位分解能（300分割）、回転数（PPI観測：3.5rpm）、PRF(1800)の場合、

$$N = 60/300/3.5 \times 1800 \text{ (PRF)} = 102.9 \text{ ヒット}$$

CAPPI観測においてはアンテナ回転数4.5rpmとしているため

$$N = 60/300/4.5 \times 1800 \text{ (PRF)} = 80 \text{ ヒット}$$

となる。デュアルPRFの場合、低周波数側を1440としているためPPI時に82ヒット、CAPPI時に64ヒットとなる。

多段半導体方式の長パルス方式の場合はパルス幅及び短パルス観測についての時間的考慮をする必要があり、最大PRFは

$$1 / \{80\text{km} \times 2(\text{往復}) \div 30 \text{万 km/s (光速)} + 30 \mu\text{s (パルス幅)} + 10 \text{ km} \times 2(\text{往復}) \div 30 \text{万 km/s (光速)} + 1 \mu\text{s (パルス幅)}\} = 1585\text{Hz}$$

となる。PRFを1500とした場合のパルスヒット数は

$$N = 60/300/3.5 \times 1500 \text{ (PRF)} = 85.7 \text{ ヒット} \quad \text{CAPPI時 } 66.7 \text{ ヒット}$$

となる。ただし、デュアルPRF時の低周波数側は1200であるので、PPI時に68ヒット、CAPPI時に53ヒットとなる。

付録D.4.4 レーダ定数

レーダ定数Cはレーダの周波数、パルス幅、送信出力、ビーム幅等のハードウェア仕様により決まる定数であり、システムマージンは、当該レーダシステムの性能を示す指標の1つで、ハードウェア設計条件又は実機の諸元により決まる。

XバンドMPレーダの場合は周波数9.7GHz帯（波長）、基地局から60km（80km）地点で1mm/hの降雨を検出するための諸元として、送信出力、空中線径（利得、ビーム幅）、パルス幅等からレーダ定数Cが定まる。

$$C = \frac{P_t G_0^2 \pi^3 h \theta \phi}{2^{10} (\log_e 2) \lambda^2 \left(\frac{\epsilon-1}{\epsilon+2}\right)^2} \times 10^{-14}$$

P_t : 送信尖塔電力[kW]

h : パルス幅 τ [s]の空間長[m]で、 C を光速= 3×10^8 [km/s]とするとき、 $h=c \times \tau \times 10^3$ で与えられる

λ : 送信波長[cm]

θ : 水平ビーム幅[rad]

ϕ : 垂直ビーム幅[rad]

G_0 : 空中線利得 $G_0=10^{(G/10)}$

G : 空中線利得[dB]

また、レーダ方程式から当該レーダの受信電力は以下の式で表される。

$$P_r = \frac{C F Z}{r^2} \quad Z = B \times R^{\beta}$$

F は補正係数としてレーダのハードウェアのロス等でレーダの諸元（設計又は実測）で定まる。

付録D.4.5 システムマージン

システムマージンは、上記レーダ定数 C 、受信電力 P_r を含めて、規定した条件（周波数、パルス幅、最小降雨検出、雨滴定数、自由空間損失、大気ガス減衰定数等）と設計値又は当該機器諸元（ビーム幅、送信電力、空中線利得及び導波管等のハードウェアロス（ F_h ）及びソフトウェアロス（ F_s ）等）から計算を行い、ローノイズアンプの雑音指数（ NF ）からシステムの最小受信感度（ S_{min} ）を求め、降雨検出レベル（ P_r ）と S_{min} の差がシステムマージンとなる。 NF 、 S_{min} が低レベルで F_h が小さいほどシステムマージンは大きくなり、当該ハードウェアの性能が高い（より小さい降雨を検出できる）ことを示す。システムマージン計算例を表 D-2 に示す。

表 D-2 システム性能 (システムマージンの算定例)

項目	単位	計算値	備考
1 送信周波数	f		計算値9.75MHz
2 送信パルス幅	τ		計算値1 μ s
3 検出降雨	R		1mm/h相当
4 雨滴常数	B、 β		B=200、 β =1.6
5 誘電係数			雨:0.93
6 ビーム幅	σ		設計値
7 自由空間損失	[dB]		観測距離60km (往復)
8 大気ガス減衰常数	Ka	[dB]	観測距離60km Ka=0.01dB/km (往復)
9 送信電力	Pt	[kw]	設計値:クライストロン出力(公称値)
10 空中線利得	G	[dB]	設計値(送信/受信)
11 分配ロス	[dB]		設計値:2分配3dB及び分配器ロスを含む
12 フィルター損失	[dB]		計算上は計上しない(送信/受信)
13 送信給電線損失	[dB]		設計値 ※1、※2、※3
14 送信アンテナ系ロス	[dB]		
15 送信系その他ロス	[dB]		設計値(ロータリージョイント、サーキュレータロス等)
16 レドーム透過損失	[dB]		設計値(往復値)
17 受信アンテナ系ロス	[dB]		
18 受信系その他ロス	[dB]		設計値(ロータリージョイント、サーキュレータロス等)
19 受信給電線損失	[dB]		設計値
20 TRリミッタロス	[dB]		
21 ロス合計	[dB]		11~17の合計
22 ハードウェア補正係数	Fh	[dB]	標準値[]dB-ロス合計
23 ソフトウェア補正係数	Fs	[dB]	標準値[]dB
24 レーダ常数	C	[dB]	標準計算式による
25 降雨検出レベル	Pr	[dBm]	標準レーダ方程式による
26 LNA雑音指数	NF	[dB]	設計値
27 最小受信感度	Prmin	[dBm]	設計値
28 システムマージン	[dB]		25-27

表 D-2 に示す計算例は設計諸元に基づく計算例であるが、実機の送信出力、アンテナ諸元(利得、ビーム幅等)及び送受信系のロスを設置後に測定して、測定値を代入して実機のシステムマージンを算定する。実機におけるシステムマージンを別紙-2 に添付する。

クライストロン方式と多段半導体方式では、送信出力等はクライストロン方式が優位となるが、多段半導体方式は送受信装置が小型軽量で鉄塔上等にアンテナと一体で設置可能なため、導波管等の送受信系ロスが小さく有利となる。

付録D.4.6 ダイナミックレンジ及びノイズレベル

受信機のハードウェア特性として送信機からの送信パルスが雨滴に反射して受信機から受信電力 Pr (dBm) として出力される。レーダサイトの受信電力は降雨の強さ (0.1~200mm/h) 及び降雨からの距離の関数となり、近くで強い雨は受信電力が大きく、遠くの弱い雨は受信電力が小さい、受信電力と雨の強さと距離の関係を図 D-7 (a) に示す。受信機は受信した受信電力に対して直線性(受信電力に対してリニアに)で出力する必要がある、受信機特性で直線性が必要な入力範囲をダイナミックレンジとして仕様書で規定している。最小受信感度は-110dBm 程度(最小降雨)必要であり、250mm/h の降雨が直近であった場合は-30dBm 程度の受信電力となることからダイナミックレンジは 80dB 程度必要となり、XバンドMPレーダの仕様では 85dB 以上と規定している。

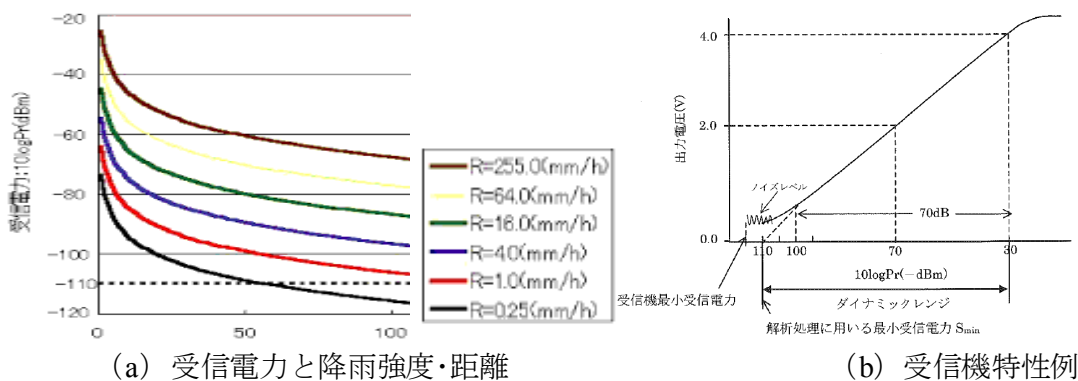


図 D-7 レーダ雨量計における受信電力とその特性

一般的な受信機の特性として、想定した降雨観測レンジである-30dB から-110dB 程度で直線性を確保するような調整が行われている。しかし、受信機の最小受信感度付近では外部及び内部からのノイズにより一般的には直線性が確保されていない (図 D-7 (b))

外部ノイズはレーダ設置場所の電波環境、内部ノイズは機器特性に影響され、必ずしも同じレベルとならないことが多い。レーダ基地局では、降雨からの受信電力と区別するためノイズレベルを設定し、合成処理局へ伝送している。合成処理局ではノイズレベルを基にデータの品質チェックを行い、棄却処理等を行っている。ノイズレベルの設定は特に弱い降雨若しくは遠距離の降雨の演算に対して大きく影響する。

ノイズの判定は上記のとおり解析処理段階でも可能であるため、ノイズレベルの設定は、受信機の出力特性、入力ノイズを確認してできる限り小さい値に設定することが望ましい。各基地局のノイズレベルを別紙-2 に示す。設置当初のオフセット値は-100~-104dBm程度であったが、チューニングにより-105~-108dBm 程度としている例が多い。

付録D.4.7 サンプリング周波数及び A/D 変換処理

X バンド MP レーダのパルス幅から決まる距離分解能は 150m であるが、実際にこの分解能で観測するためには、この距離分解能に相当する時間分解能でデータを取得する必要がある。距離分解能 150m に相当するサンプリング周波数は

$$1 / (150 \times 2 / 300000000) = 1 \times 10^6 \text{ となり } 1\text{MHz 以上が必要である。}$$

サンプリング周波数で出力されるアナログビデオ信号について、デジタル処理を行うために A/D 変換処理を行う必要がある。A/D 変換処理における表現ビット数は、取得したい信号のダイナミックレンジによって決まる。12.2.4 で述べたように受信電力を 85dB のダイナミックレンジで求めたい場合、受信信号 (電界強度) の A/D 変換処理のビット数 N は、 $20\log(2^N) > 85$ の関係を満たす必要がある。この関係を変形すると $N > 14.1$ となる。このため、X バンド MP レーダの A/D 変換処理では 14 ビット以上のデジタル値に変換することとしている