
解 説

固体素子二重偏波気象レーダーの導入と今後の展望

大気海洋部観測整備計画課¹

要 旨

気象庁では、全国 20 か所の一般気象レーダー及び全国 9 空港の空港気象ドップラーレーダーについて、電波増幅部に半導体を利用した C バンド固体素子二重偏波気象レーダーへの設備更新を進めている。固体素子送信機と二重偏波気象レーダーが有する数多くの利点は、それぞれが相まってこれまでの気象レーダー観測における課題の多くを打破するに留まらず、更なるブレイクスルーをもたらす可能性も秘めている。本稿では、導入した気象レーダーの概要とともに、更新による改善点（降水強度の推定精度向上、品質管理機能の強化、観測の高頻度化・高解像度化など）や偏波パラメータの校正・モニタリングに係る取組について解説する。また、今後の展望として、降水強度推定の更なる精度向上や各種ノウキャストの精度向上、数値予報への利用など二重偏波気象レーダーの導入により実現が期待される技術についても紹介する。

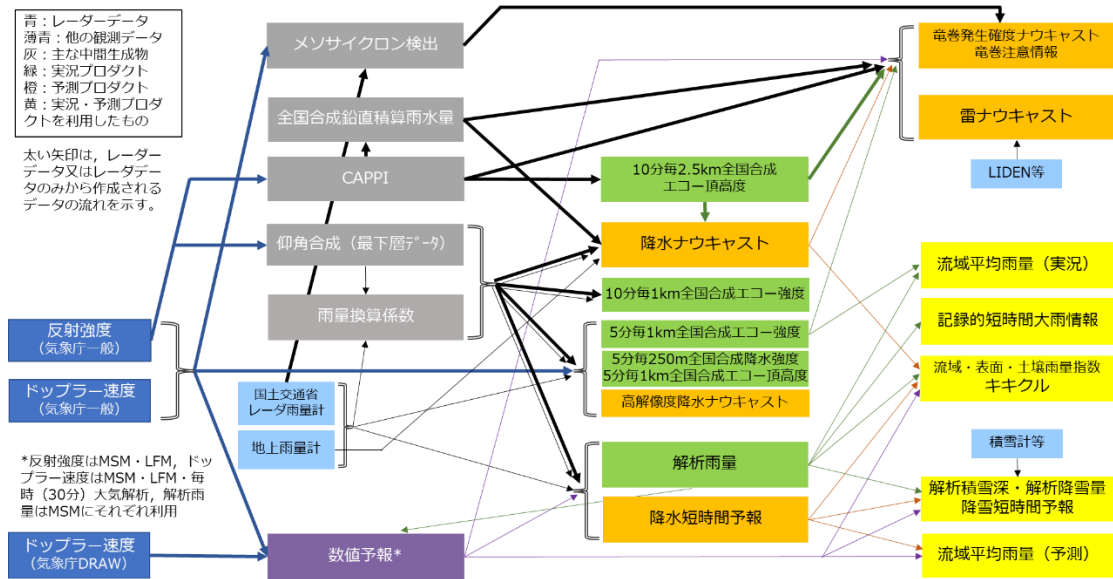
1. はじめに

気象レーダーは、アンテナを回転させながら電波（マイクロ波）を発射し、最大で半径数百 km にも及ぶ広範囲の降水粒子の分布とその状態を観測する装置である。発射した電波が戻ってくるまでの時間とアンテナの向きから降水分布を、戻ってきた電波（レーダーエコー）の強さから降水の強さを、ドップラー効果による周波数変化から降水粒子の動き（降水域の風）を推定できる。

気象庁では、全国 20 か所に気象ドップラーレーダーを設置し、我が国の陸上ほぼ全域とその周辺海域における降水の状況を監視している（後述する空港気象ドップラーレーダーと区別するため、以下、「一般気象レーダー」という）。これら

は台風・線状降水帯・局地的大雨等の実況監視における重要な観測手段であり、一般気象レーダーによる観測成果は、解析雨量や降水短時間予報、降水ノウキャストといった降水の解析・予測に利用されるだけでなく、大雨・洪水等の気象警報やキキクル（警報の危険度分布）の発表にもいまや不可欠である。加えて、解析雨量や反射強度・ドップラー速度のデータ同化を通じて、数値予報における解析・予測精度の向上にも寄与しており（幾田, 2015; 石川, 2015）、時空間的に密なデータが得られることから、他の観測と比較し、同化による修正量（インパクト）が大きいとの報告もある（Ikuta *et al.*, 2021）。このように気象業務における気象レーダーのデータ利用は多岐に及ん

¹ 梶原 佑介
(令和 6 年 1 月 9 日発行)



第 1 図 気象レーダーのデータ利用の概要 (2023 年 12 月時点)。

でおり、第 1 図にその概要を示す。

近年、大雨による災害は、局地化、集中化、激甚化の様相を示しており、住民の迅速かつ適時的確な避難行動支援のためには、予測精度向上の前提となる大雨等の実況監視能力の強化、すなわちこれまで以上に正確な降水量分布を迅速に把握することが必要とされている。これを実現できる観測装置は、気象レーダーをおいてほかにない。

しかしながら、単偏波のみを利用する従来の気象レーダーには、

- ・降雨減衰：レーダーから見て手前側に強い降雨域がある場合、それより遠方の雨雲から反射される電波が減衰し、降水が実際より弱く観測されてしまう。
- ・粒径分布の変動：レーダーエコーの強さから降水強度を推定する際に層状性降雨を仮定しているため、中程度の雨粒を大量に含む“対流性降雨”では降水強度を過小に、粒径が大きい“ひょう”や“融解層”では過大に推定してしまう。
- ・クラッタの混入：地形や海面、発電用風車等からの反射波（クラッタ）が品質管理をすり抜けて混入し、降水として誤検出してしまう。

といった大きな課題があった。1 点目及び 2 点目の課題への対応として、全国合成レーダーエコー強度（以下、「レーダー合成図」という。）や解析

雨量といった主要プロダクトでは、地上に設置した雨量計によりほぼリアルタイムで補正を行い、多くの場合には実用上十分な定量性を確保していた（解析雨量については、例えば Nagata (2011) など）。ただし、空間スケールが小さく、かつ降水強度が数分のうちに大きく変化する局地的大雨に対しては、地上雨量計による補正が間に合わない又は適切に行えない場合も多く、雨量計が存在しない海上から接近する大雨に対しては、補正自体が行えないといった技術上の限界もあった。

また、従来の気象レーダーには、予測の点でも課題があった。1 時間程度先までの降水予測には気象レーダー観測に基づく運動学的手法が有効とされており（永田, 2012；中北, 2010）、降水ナウキャストや降水短時間予報に利用されている。これらのプロダクトでは、降水の発達・衰弱の傾向を加味して予測を行っており、地形性降雨や降水系の中の強雨域の盛衰予測に対してはおおむね有効とされているものの、盛衰の激しい局地的大雨に対しては精度が十分とはいえない。その要因として、

- ・従来の一般気象レーダーによる観測では、低高度（仰角約 0°-数°）は 5 分ごとに観測しているものの、上空まで含めた三次元観測（仰角約 0°-25°）には 10 分を要すること。
- ・降雨減衰や粒径分布の変動により、局地的大

雨の予測に利用されることの多い VIL (鉛直積算雨量: Vertical Integrated Liquid water content) 等の精度が低下する場合があること。

- ・ 気象レーダーは降水粒子を横方向から観測しているため、積乱雲の発達をもたらす上昇流を直接観測できず、また、単偏波の気象レーダーでは上昇流の指標も得にくいこと。

などが考えられる。雷の激しさや雷の可能性を 1 km 格子単位で解析し、その 1 時間後までの予測を行う雷ナウキャストについても、 -10°C – -20°C 面の反射強度や VIL, エコー頂高度といった気象レーダーの観測データを利用して雷可能性の解析を行っているが、単偏波の気象レーダーでは予測に直結する指標を得ることが難しく、雷雲が発達する可能性のある領域を示す活動度 1 については、見逃しが少ない一方で空振りが多いためといった課題があった (笠原, 2011)。

このような従来の気象レーダー観測における課題の多くを打破できるものとして、二重偏波気象レーダー²が挙げられる。従来の気象レーダーは、水平方向に電界が振動する「水平偏波」を用いて観測を行っていたが、二重偏波気象レーダーは、水平偏波に加え、垂直方向に電界が振動する「垂直偏波」も同時に発射する。そして、雨粒などに反射して戻ってくる水平・垂直の 2 種類の電波の違いを解析することで、従来の気象レーダーでは分からなかった雨粒などの大きさや形を推定できる。これにより、雲の中の雨、雪、あられ、ひょうなど様々な種類の降水粒子の三次元分布を詳細に把握することが可能になり、降水の強さをより高精度に推定することができるようになる。また、これまで難しかったクラッタの判別・除去も飛躍的に改善する。

数多くの利点をもたらすことから、近年、国内外の気象・水文機関において急速に二重偏波気象レーダーの導入が進んでいる。国内では、近年増

加する集中豪雨や局地的な大雨による水害や土砂災害に対して、適切な河川管理や防災活動に役立てるため、国土交通省が X バンドの二重偏波気象レーダー観測網 (XRAIN) を主要都市等に展開し、2014 年から本運用を開始しており (土屋ほか, 2016)、C バンドレーダ雨量計についても二重偏波気象レーダーへの更新を順次進めている (山地ほか, 2016)。また、国外に目を向けると、アメリカの気象レーダー観測網である NEXRAD (Next Generation Weather Radar) において、2011-2013 年にかけて二重偏波機能を付加する工事が行われたほか、ヨーロッパにおいても、2013 年秋には二重偏波気象レーダーの数が約 30 基程度だったところ (Huuskonen *et al.*, 2014)、2023 年 12 月には全 214 基のうち 144 基³と 4 倍以上に急増している。世界気象機関 (WMO) の運用する気象レーダーのデータベースでは、2023 年 12 月現在で登録された各国約 1,100 基の気象レーダーのうち、二重偏波気象レーダーは 444 基⁴と約 4 割を占めており、世界的な潮流となりつつある。

他方、国内では、総務省やレーダーメーカー等の協同により、世界に先駆けて C バンド気象レーダー向けの固体素子送信機が開発・実用化された。電波増幅部に半導体を用いることで、従来の電子管送信機と比べ、電波資源の節約や保守性の向上、運営経費の低減だけでなく、高精度な二重偏波情報を得られることや観測の高速化が可能になったことが気象研究所による調査研究により明らかになっている (Yamauchi *et al.*, 2012)。

こうした背景を踏まえ、線状降水帯や局地的大雨の実況監視能力の向上、積乱雲の盛衰予測等による短時間予測の高精度化、正確な雨量の把握による予測精度の向上を実現し、防災気象情報の更なる適時的確な発表につなげるべく、老朽化する全国 20 か所の一般気象レーダーを固体素子二重偏波気象レーダーへ更新することとした。2020 年

² これまでの気象レーダーと比べて多様な観測パラメータを有する特徴に着目し、国内では MP (Multi Parameter) レーダーと呼ばれることもある。

³ http://eumetnet.eu/wp-content/themes/aeron-child/observations-programme/current-activities/opera/database/OPERA_Database/index.html, 2023.12.18 閲覧。

⁴ https://wrd.mgm.gov.tr/Stats/Parameter_Stats/POLARIZATION, 2023.12.18 閲覧。

3 月の東京レーダー更新を皮切りに順次整備を進め、2023 年 12 月までに半数を超える 13 基の更新が完了している（第 1 表）。

また、気象庁では、全国主要 9 空港に設置した空港気象ドップラーレーダー（DRAW : Doppler Radar for Airport Weather）への固体素子二重偏波気象レーダー導入も進めている。DRAW は、飛行場及びその周辺における降水域の降水と気流を捉え、得られたデータから降水、風の分布及び悪天時に発生するマイクロバースト及びシアラインを解析し、航空機の離着陸時の危険回避のための情報（低層ウィンドシア情報）を提供するものであり、航空機の安全運航に不可欠な装置である。一方、設置から年月が経過したことで老朽化が進んでおり、また、固体素子二重偏波気象レーダー導入による様々な恩恵が期待されたことから、一般気象レーダーに先駆けて 2016 年より更新整備を進めており、2022 年 3 月までに鹿児島を除く 8 空港の更新が完了した（第 1 表）。

固体素子送信機と二重偏波気象レーダーが有する数多くの利点は、それぞれが相まってこれまでの気象レーダー観測における課題の多くを打破するに留まらず、更なるブレークスルーをもたらす可能性も秘めている。そこで、本稿では、一般気象レーダー及び DRAW にそれぞれ導入した固体素子二重偏波気象レーダーの概要や更新による改善点、実現が期待される技術について解説する。第 2 章では一般気象レーダーに、第 3 章では DRAW に、それぞれ導入したレーダーの機器構成や機能、主な特徴について述べる。第 4 章では、観測事例を基に二重偏波情報の利用による観測精度の改善結果を示す。第 5 章では、二重偏波情報の精度を支える校正・モニタリングの取組について述べる。第 6 章では、今後の展望として、降水強度の更なる推定精度向上や各種ノウキャストの精度向上、数値予報への利用など二重偏波気象レーダーの導入により実現が期待される技術について紹介する。最後に、第 7 章で全体のまとめを行う。

	サイト名	運用開始日	備考
一般気象レーダー	東京	2020.03.05	
	福井	2020.11.05	
	大阪	2020.12.18	
	福岡	2021.01.14	
	広島	2021.02.26	
	名古屋	2021.02.26	
	仙台	2021.06.11	
	釧路	2021.12.23	
	種子島	2022.04.28	
	室戸岬	2022.06.02	
	沖縄	2023.04.28	
	松江	2023.06.01	
	新潟	2023.11.30	
DRAW	関西国際空港	2016.03.03	
	東京国際空港	2016.03.10	
	成田国際空港	2016.12.01	
	那覇空港	2018.12.13	
	中部国際空港	2019.11.28	
	福岡空港	2020.03.19	空港内で移転し、2023.3.20に運用開始。
W	新千歳空港	2020.10.29	
	大阪国際空港	2022.03.10	

第 1 表 固体素子二重偏波気象レーダーの運用開始日（2023 年 12 月時点）。今後の更新における運用開始日は、WMO レーダーデータベース (<https://wrd.mgm.gov.tr/Home/Wrd>) に掲載予定。

2. 一般気象レーダーへの導入

2.1 システムの概要

一般気象レーダーでは、全国 20 か所のレーダー（第 2.1 図）で日本の陸上ほぼ全域とその周辺海域を観測できる必要があり、最大で半径 400 km に及ぶ観測範囲が特徴の一つである。また、降水の立体構造の把握のため、複数仰角の PPI (Plan Position Indicator) により三次元観測（ボリュームスキャン）を行い、CAPPI (Constant Altitude PPI) やエコー頂高度、鉛直積算雨量等を作成している。加えて、竜巻等突風予測に資するメソサイクロン検出や数値予報の精度向上等のため、ドップラー速度の観測も行っている。

今般の気象レーダー更新では、このような従来の機能・性能を損なうことなく、次に掲げる多くの改善を実現した（詳細は、2.2 節～2.6 節で解説）。

- ・ 二重偏波観測機能の導入
- ・ 固体素子送信機の導入
- ・ 観測の高頻度化
- ・ 観測の高解像度化
- ・ 観測の高精度化

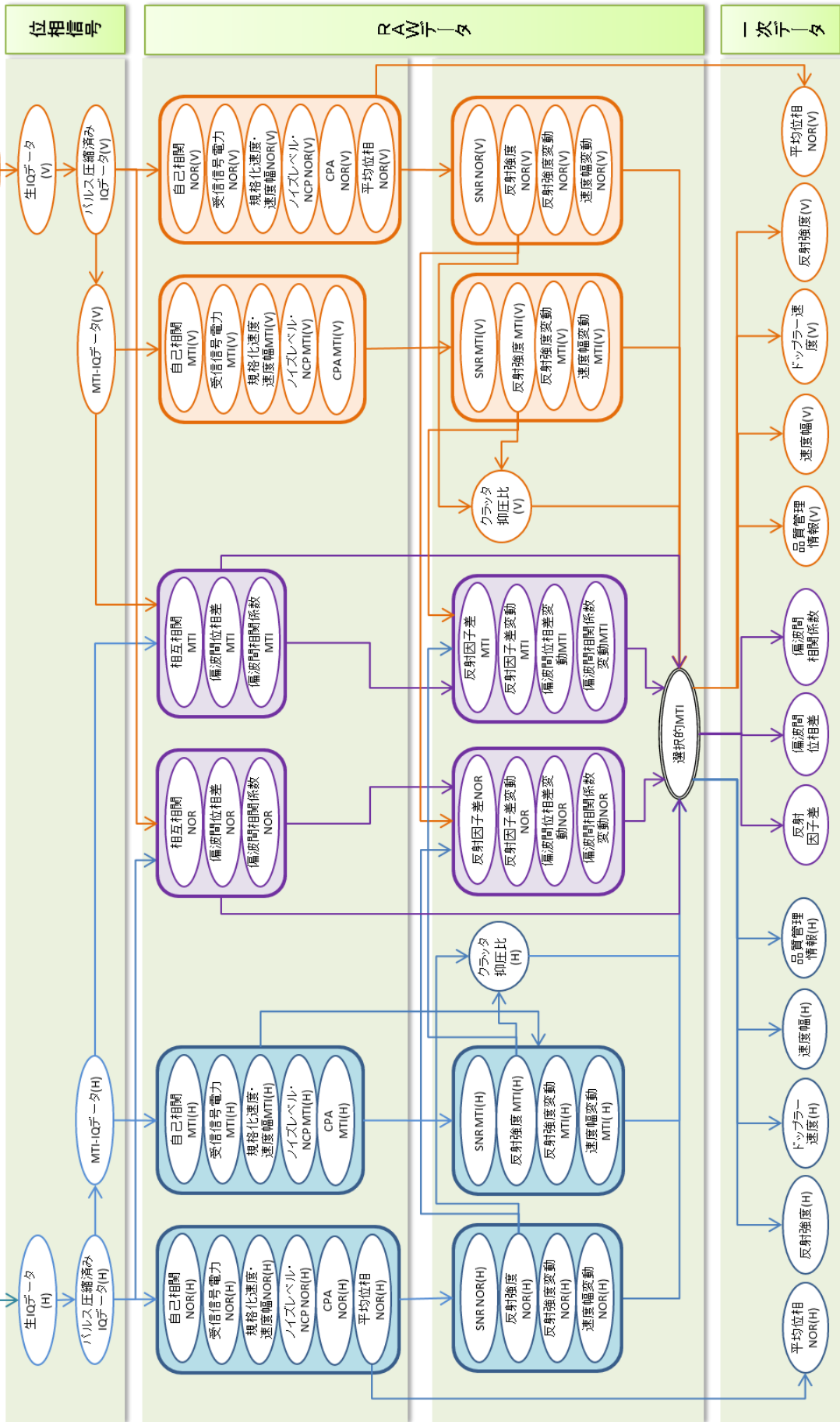


第 2.1 図 一般気象レーダーの配置図.

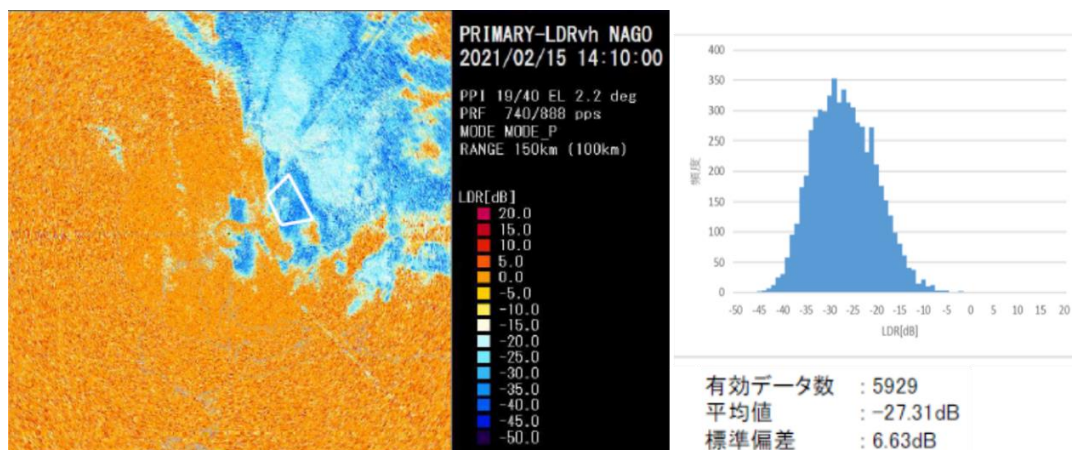
第 2.1 表 一般気象レーダーへ導入したシステムの主要諸元 (傍線は更新前からの変更箇所).

	更新後	更新前
送信周波数	C バンド (5,330 MHz-5,370 MHz のうち 1 波)	C バンド (5,300 MHz-5,370 MHz のうち 1 波)
空中線	パラボラ, 直径 4.3 m	パラボラ, 直径 4.0 m
ビーム幅, 空中線利得	1.1°以下, 44 dBi 以上	1.2°以下, 42 dBi 以上
アンテナサイドローブ	-26 dB 以下	-26 dB 以下
H/V の指向精度の差	ビーム中心: 0.1°以下, ビーム幅: 0.05°以下	—
交差偏波識別度	35 dB 以上	—
空中線制御	最大 10 rpm (AZ), 仰角-2°-+90°, PPI 又は RHI	最大 6 rpm (AZ), 仰角-2°-+45°, PPI のみ
送信 (増幅) 器	固体素子 (GaN HEMT)	クライストロン
送信電力	水平/垂直偏波とも各 3 又は 4 kW (メーカーによる)	水平偏波 250 kW
データサンプリング	距離方向: 125 m 方位角方向: 0.7°又は 0.35°	距離方向: 250 m 方位角方向: 0.7°
パルス幅	強度観測: 64 又は 128 us (圧縮後 0.83 us) 速度観測: 32 又は 64 us (圧縮後 0.83 us) 強度・速度観測: 32 us (圧縮後 0.83 us) ※いずれも近距離用に短パルス (1.0 us) を併用	強度観測: 2.5 us 速度観測: 1.0 us 強度・速度観測: 1.0 us
パルス圧縮	非線形周波数変調方式 (チャープ幅 2.0 MHz-2.6 MHz), レンジサイドローブ-60 dB 以下	—
パルス繰返周波数	10,000 Hz 以下で可変	1,500 Hz 以下で可変
探知範囲	強度観測: 半径 400 km 速度観測: 半径 150 又は 250 km 強度・速度観測: 半径 64 km-180 km	強度観測: 半径 400 km 速度観測: 半径 150 又は 250 km 強度・速度観測: 半径 150 km
主な観測項目 (*は, 気象レーダー観測処理システムに通常は伝送しない.)	反射強度 (水平, 垂直*) ドップラー速度 (水平, 垂直*) 速度幅 (水平, 垂直*) 反射因子差 (Z_{DR}) (又は直線偏波抑圧比 (LDR) *) 偏波間相関係数 (ρ_{HV}) 受信信号偏波間位相差 (ψ_{DP}) 品質管理情報 平均位相*	反射強度 (水平) ドップラー速度 (水平) 速度幅 (水平) *

実線矢印は生成に直接関係するデータの流れを示す。
 青色は水平偏波(H)、オレンジ色は垂直偏波(V)、紫色は両方の情報を生じたデータの流れを意味する
 NOR: Normalの略、MTI: Moving Target Indicatorの略
 表現の都合上、類似のデータを一つの流れで表現している箇所がある



第 2.3 図 IQ データ生成から一次データ作成までの信号処理の流れ。



第 2.4 図 名古屋レーダーにおける LDR の観測例(左)と左図白枠内のヒストグラム(右) (検査成績書抜粋) .

2.2 二重偏波観測機能の導入

ア 観測方式

二重偏波気象レーダーには主に二つの方式があり、一つは水平偏波と垂直偏波のパルスを交互に発射し、それらを交互（又は同時）に受信する「交互発射交互（同時）受信」（ALT：Alternate Transmitting and Receiving）、もう一つは水平偏波と垂直偏波を同時に発射・受信する「同時発射同時受信」（STAR：Simultaneous Transmitting and Receiving）である。世界的には多くの現業用二重偏波気象レーダーで、後者の STAR 方式が導入されており、気象庁でもこの方式を導入した。

STAR 方式には ALT 方式と比べ数多くのメリットがある。その中でも最大のメリットは、水平・垂直偏波の同時性が保たれかつパルス数を多く確保できるため、高精度な二重偏波情報が得られるという点である。また、偏波切替器（高額かつ耐久性に課題がある）が不要という点も、現業用途には好都合といえる。

もちろん STAR 方式にもデメリットはあったが、技術の進展により克服されてきた。以前は、送信波を二つに分けるため送信電力が半減し受信感度低下を招く、粒子判別に有用な直線偏波抑圧比（LDR：Linear Depolarization Ratio）の観測ができない⁵、偏波間の混信により偏波パラメータの精度低下を招く等のデメリットがあった。しかしなが

ら、アンテナ背面に受信機を搭載する等の受信ロス低減やパルス圧縮技術の導入、偏波間相関係数（ ρ_{hv} ）の利用技術の進展、交差偏波識別度の高いアンテナの開発、といった対策が行われてきた。

そして、STAR 方式にも水平偏波と垂直偏波で送信装置を共通とするか、独立に設けるかで2通りの実装方式が知られており、気象庁では後者を採用した。欧米をはじめ諸外国では、送信装置の増幅部に電子管（マグネトロン又はクライストロン）を利用することがほとんどであり、一つの電子管の送信出力を分岐する前者の方式が主に採用されている。これに対し、固体素子送信機を利用する場合には、もともと多数の素子出力を合成する仕組みのため、どちらの方式であってもコストには大きく影響しない。そこで、増幅前の種信号段階において送信位相調整（後述）が容易に実施でき、また片偏波送信により LDR 観測も実施できる特長を有する後者の方式を採用することとした。LDR 観測は通常運用では利用しないものの、弱い降雨時に観測される最小値は LDR System Limit と呼ばれ、後述する交差偏波識別度とよい対応を示すことが知られており（Darlington *et al.*, 2016）、経年変化の検証等に利用できる。第 2.4 図は、弱い降雨時の LDR 観測の一例を示したものであるが、 -40 dB 以下の最小値が得られており、高い二重偏波性能を有している証左といえる。

⁵ STAR 方式でも、特殊な符号列を用いた送信位相制御により LDR を観測する手法（Chandrasekar and Bharadwaj, 2009）や、LDR に似た性質を持つ DR（Depolarization Ratio）を求める手法（Ryzhkov *et al.*, 2017）が提案されている。

イ 二重偏波性能の確保

二重偏波気象レーダーによる高精度の降水強度推定や粒子判別等の実現には、これに見合った高精度の二重偏波情報が必要となる。このためには、アンテナに対し二つの性能要件が要求される。

一つは、水平偏波を水平偏波として、垂直偏波を垂直偏波としてそれぞれ送受信できる性能である。実際のアンテナでは、偏波間で若干の漏れ込みが生じてしまい、例えば水平偏波だけ送信（受信）しようとしても僅かに垂直偏波も送信（受信）されてしまう。この漏れ込みの度合いを表す指標を交差偏波識別度（XPD：Cross-Polarization Discrimination とも）といい、値が大きいほど二重偏波性能が高いアンテナといえる。

XPD が低いと、特に STAR 方式の場合には両偏波間の混信（結合）により偏波パラメータ（特に Z_{DR} ）の推定精度劣化を招き、二重偏波情報活用の大きな妨げとなる。また、降水粒子の形状によっては、反射因子差（ Z_{DR} ）に無視できない量のバイアスが生じることもある（Hubbert *et al.*, 2010a, b；詳細は 5.3 節にて後述）。国家気象水文機関における気象観測指針である WMO GIMO（Guide to Instruments and Methods of Observation；WMO, 2021）では、 Z_{DR} の要求精度を 0.2 dB としており、この確保には高い XPD が求められる。Wang and Chandrasekar (2006) は、 K_{DP} を 10 % 以内、 Z_{DR} を 0.2 dB 以内の誤差で得るには、前者は 30 dB 超、後者は 40 dB 超の XPD（ビーム内積分値）が必要となることをシミュレーションから示している。

そこで、諸外国における仕様も参考に、技術的に実現可能であった 35 dB 以上（レドームの影響を含む。）を XPD の規格値とした。この値は WMO GIMO において、気象レーダーの標準的な諸元（気象レーダーの性能と運用について定めた ISO 19926-1:2019 との共通標準）の「Achievable」（ハイエンドの意）の規格として採用されている⁶。

もう一つの性能要件として、水平偏波と垂直偏波のアンテナパターンの相似性がある。具体的には、両偏波のビーム中心やビーム幅に差異がない

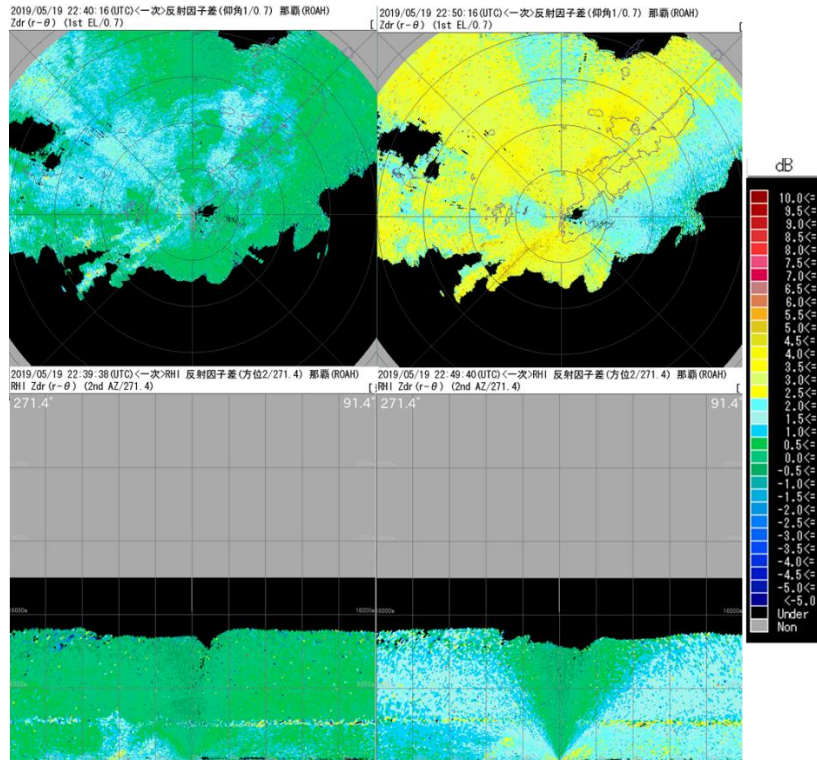
ことにより定義され、これらの差異が大きいと、偏波ごとの観測領域（サンプリング体積）がズレてしまい、特に遠方において Z_{DR} や ρ_{hv} の精度劣化に繋がるため、探知範囲の広い一般気象レーダーでは特に注意を要する。そこで、一般気象レーダーでは、両偏波のビーム中心の差を 0.1° 以下、ビーム幅の差を 0.05° 以下とした規格を設けている。

その他、レドームについても、二重偏波性能に配慮している。まず、レドームによる二重偏波情報の劣化を避けるため、偏波間の特性差が生じにくいサンドイッチ型を採用した（従来はソリッドラミネート型を多く採用）。また、2023 年以降に整備するレーダーでは、レドームに超撥水塗装（接触角 150° 以上）を施工することとした。これは、サイトでの強雨時に生じるレドーム水膜により、電波減衰による感度低下や Z_{DR} に正バイアスが生じる現象（Frech, 2009）を防ぐためである。2022 年以前に導入したレドームでは接触角 90° 以上の撥水性が確保されていたが、第 2.5 図のように 1 dB-2 dB の Z_{DR} バイアスが突如現れることがあった。RHI 観測の結果から、 Z_{DR} バイアスは仰角約 60° 未満で広範囲に発生しており、レドーム上を筋状に水が流れるために垂直偏波がより強く減衰していたと考えられる。なお、超撥水塗装により、着雪による電波減衰や気生藻等の繁茂による撥水性低下の予防効果も期待される。

ウ 効率的なデータ量子化

二重偏波機能の導入に伴い、観測パラメータ数はこれまでの 2 倍程度に増加する。また、後述するとおり、観測の高頻度化に伴いスキャン数もこれまでより増加し、レーダーサイトからセンターシステム（ROPS）へのデータ伝送量の増加は避けられない。一方、通信費の関係から、3 Mbps 程度の通信帯域に収める必要にも迫られていた。そこで、観測パラメータごとに値域や必要な分解能、許容される量子化誤差が異なる特徴を利用し、計 7 つの観測パラメータ別に bit 単位でデータ長を割当て、1 レンジビン当たり 64 bit で表現した。

⁶ その他、「Common」（ミドルレンジ）は 30 dB 超、「Threshold」（ローエンド）は 20 dB 超と規定している。



第 2.5 図 那覇 DRAW において、レドーム水膜により生じた Z_{DR} の正バイアスの例。上段は 0.7° の PPI，下段は RHI。左列は 22:40 頃，右列は 22:50 頃の観測を示す。右列の時間帯に水膜の影響が出現している。

第 2.2 表 各観測パラメータの量子化方法。

No.	要素	単位	割当ビット数	表現可能な範囲		
				最小値	最大値	ステップ
1	反射強度	dBZ	10	-25	77.2	0.1
2	規格化ドップラー速度	-	8	-1.016	1.016	0.008
3	規格化速度幅	-	7	0	1.008	0.008
4	反射因子差	dB	11	-20.46	20.46	0.02
5	規格化偏波間相関係数	-	8	0	1	非線形
6	受信信号偏波間位相差	deg	12	-204.7	204.7	0.1
7	品質管理情報	-	8	0	254	1

(i) $\rho_{hv,obs} < 1$

$$\rho_{hv,norm} = \text{MIN} \left\{ \alpha - 2, -\text{round} \left((\alpha - 1) \text{alog}_{10} \left(1 - \frac{\rho_{hv,obs}}{b} \right) \right) \right\}$$

(ii) $\rho_{hv,obs} \geq 1$

$$\rho_{hv,norm} = \alpha - 1$$

$\rho_{hv,norm}$: 規格化した ρ_{hv}
 α : 階調数 (8bit の場合, 255)
 a : 定数 1 (=0.4)
 b : 定数 2 (=1.0032)
 $\rho_{hv,obs}$: ρ_{hv} の観測値

第 2.2 表にパラメータごとの割当ビット数等を示す。ドップラー速度及び速度幅は、ナイキスト速度で正規化することで値域を圧縮した（折り返し補正処理は ROPS で実施）。また、受信信号電力 (P_r) のダイナミックレンジは約 110 dB (16 bit A/D のダイナミックレンジが 85 dB 程度、パルス圧縮で最大 25 dB 程度) に対し、C バンドにおける実用上の反射強度 (Z) の出現範囲は約 100 dB (-25 dBZ-75 dBZ) と若干少ないため、 Z を伝送

することとした。 Z_{DR} については、より少ない bit 数で 0.1 dB 未満の分解能を実現できるように、両偏波の Z (Z_H 及び Z_V) ではなく、 Z_H と Z_{DR} を伝送対象とした。 ρ_{hv} については、データ利用上、1 に近いほど高い分解能が求められる特徴を利用して、1 に近い領域の誤差低減を図れるよう、対数を利用した量子化を導入した。先述の WMO GIMO では、 ρ_{hv} に求められる精度として 0.001 を推奨しているが、8bit の線形量子化では分解能が約 0.004 となりこれを満たさない。一方、対数を用いることで、他の関数（二次関数、円など）と比較しても、 ρ_{hv} が 1 に近い領域でより多くの階級値を割り当てることができ、最大 0.0001 程度の刻みを確保した。

以上により量子化されたデータは、伝送先の ROPS にてデコード処理等が行われ、パラメータごとに 2 byte 表現の GRIB2 形式のデータが作成される。従来の反射強度やドップラー速度は 1 byte 表現であったため、表現可能な値域が不足し、0.32 dBZ 未満の反射強度は全て同一の値（データ代表値）とみなされる課題があったが、2 byte への拡張により負の値を適切に表現可能となった。

2.3 固体素子送信機の導入

ア 導入の経緯と利点

送信機の増幅部にはこれまで電子管の一種であるクライストロンを用いてきたが、様々な運用上の課題があった。例えば、異常発生により直ちにレーダーが運用休止となってしまう、高電圧を使用するため保守時の安全管理に留意が必要、高額にもかかわらず寿命が短く、3年程度で交換が必要、といったものである。また、近年、スマートフォン等の普及を背景として5GHz帯無線LANの利用が増大しており、更なる周波数利用効率向上も求められていた。

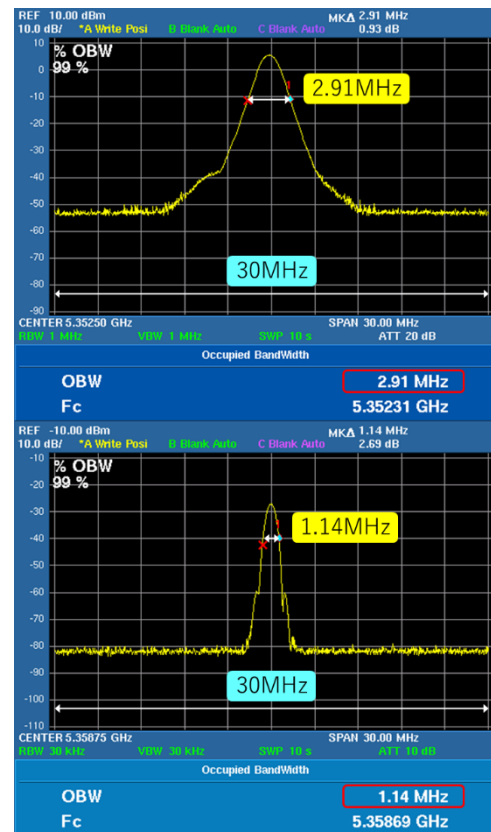
他方、世界に先駆けて気象レーダー用の固体素子送信機が国内で開発され、導入が進んでいた。総務省では、周波数有効利用の観点から「クライストロン送信機デジタル波形成形技術及び固体素子等を用いたレーダー技術の研究開発」(2005年-2007年)を進め、レーダーメーカーや各省庁の関係者の協力のもと、固体素子送信機によるCバンド(5GHz帯)二重偏波気象レーダーの開発に成功していた(和田ほか,2008)。これは送信機の増幅部に多数の固体素子、つまり半導体によるトランジスタ(GaAs FETやGaN HEMT等)を用いたもので、開発された気象レーダーは、2008年に気象研究所に設置され(以下、「気象研究所レーダー」という。),実用化のための課題克服に向けた取組が行われるとともに、二重偏波情報の利用技術の開発も進められた。また、国内では国土交通省がいち早く固体素子送信機を現業用Cバンド気象レーダーに導入し、2010年代前半から利用を開始していた(山地ほか,2016)。

そこで、これまでの研究開発や運用実績も踏まえ、DRAW及び一般気象レーダーに固体素子送信機を導入することとした。この導入効果は極めて大きく、可用性・保守性の向上、周波数利用効率の向上及び運営経費の低減を達成し、従来の課題を解決しただけでなく、機器室内装置の省スペース化(メーカーにもよるが約2割-4割減)や省電力化など多くの改善を実現した。

特に、可用性向上の効果は大きい。2016年以降、DRAWを含め数多くの固体素子気象レーダーを

運用しているが、一時的な停止を除き、これまで送信機増幅部の故障は一度も発生していない。仮に送信モジュールの一部が故障したとしても、送信出力が低下した縮退運用(-3dB以内を下限とする。)又は単偏波送信により運用の継続が可能であり、装置を運用した状態で送信モジュールの交換も可能としている。なお、送信電力を常時モニターし、短期的な送信電力の変動に対して動的にレーダー方程式から反射強度を算出する仕組みを備えているため、縮退運用時であっても、 Z_{DR} にバイアスが生じることはない。

また、固体素子送信機は、必要帯域外への不要発射量が少ないことから、隣接する気象レーダーの周波数を大きく離さずとも、レーダー間の混信を起こしにくい利点がある。第2.6図は、1.0usパルス幅の占有周波数帯幅を同一メーカーのクライストロン型と固体素子型で比較したものである。送信スペクトラムを狭くするためには、送信パルスを一部整形して、矩形の角を丸めればよい。



第 2.6 図 同一メーカーによる 1.0 us パルス幅の占有周波数帯幅(OBW)。(上)クライストロン、(下)固体素子。

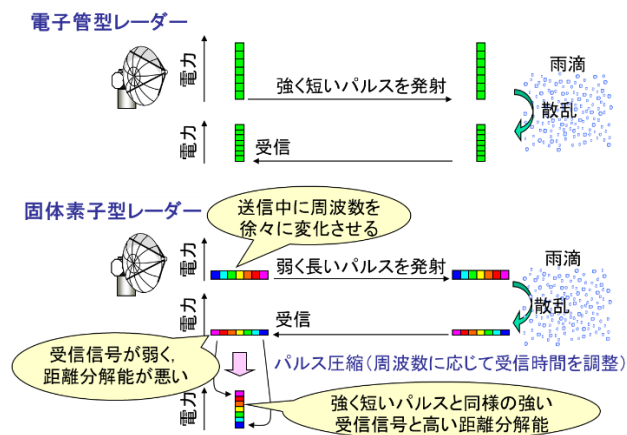
しかし、従来のクライストロンでは大電力に増幅する際に、パルス波形の制御が難しく、この結果、不要発射が多めに出てしまっていた。これに対し、固体素子では増幅時のパルス波形の制御が容易であり、同じパルス幅でも半分以下の帯域に狭帯域化できている。実際、東京国際空港と成田国際空港の DRAW は、距離が約 62 km と近いが、周波数が 5 MHz しか離れていないにもかかわらず、これまで相互干渉は見られていない(従前は 10 MHz 離す必要があった)。

さらに、二つの偏波を同時に発射することから、原理的には従来と比べ 2 倍相当の送信電力が必要となるにもかかわらず、消費電力が 3 割-4 割程度低減している。これは、固体素子送信機ではクライストロンを温めるヒーターや高周波エネルギーを集束するための電磁石、真空度を保つイオンポンプ等が不要であり、また、送信機の発熱量低下に伴い空調機の消費電力も低下したためと考えられる。省電力化は発動発電機の燃費向上にも寄与しており、雷災予防のため発動発電機の運転機会の多い一般気象レーダーでは、給油回数の低減等を通じて保守負担の軽減にも繋がっている。

そして、固体素子送信機は、高精度な二重偏波観測にも一役買っている。Yamauchi *et al.* (2012) は、気象研究所レーダーの観測結果から、ヒット数が 100, 40, 20 のいずれであっても、 ρ_{hv} の最頻値が 1 に極めて近く、 ψ_{DP} の空間的ばらつき(標準偏差)の最頻値も小さい(1°-2°程度)ことを示した。ヒット数が少なくとも高精度な二重偏波情報を得られる理由として、固体素子送信機による送信波では振幅・位相が安定しているためと考えられる。特にパルス圧縮を利用する長いパルスでは、振幅・位相が安定しにくいパルスの立ち上がり・立ち下り部分の割合が相対的に少ないため、より精度が高くなっている。

イ パルス圧縮の原理と効果

これまでの電子管送信機では 250 kW(DRAW は 200 kW) もの大電力を使用していたが、固体素子

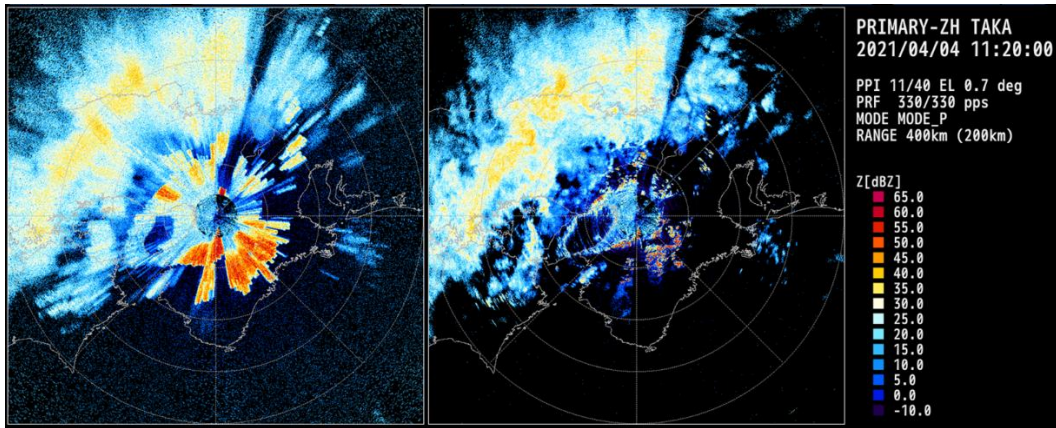


第 2.7 図 パルス圧縮の説明。

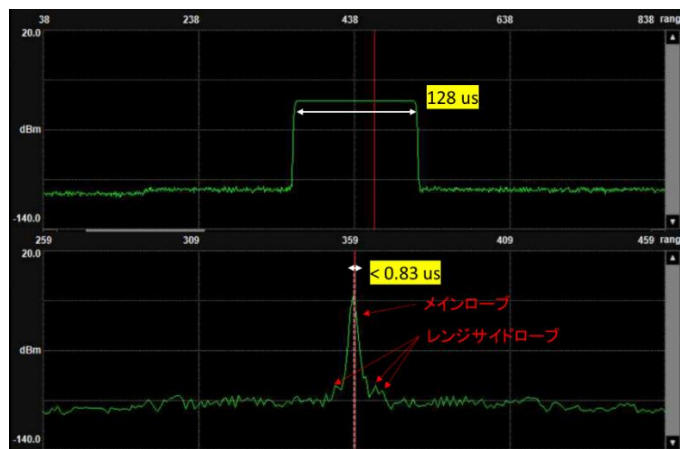
送信機の送信電力は通常数 kW が限度であり、従来比で 50-100 分の 1 程度に低下する(つまり、17 dB-20 dB の減)。電子管利用時には必須だったスプリアス低減のためのフィルタが不要となり、このロス分(2 dB-3 dB 程度)は補償できるものの、これだけでは受信感度が大幅に低下してしまう。そこで、従来の数 10-100 倍の長いパルスを送信するとともにパルス圧縮を行うことで、従来同等以上の受信感度と距離分解能を実現した。

パルス圧縮とは、周波数や位相⁷を変化させながら長いパルスを送信し、受信時に送信波との相関を取る復号処理を行うことで、距離分解能を高める技術である。弱く長いパルスが、復号処理後にはあたかも強く短いパルスに圧縮されたかのように見えることから、パルス圧縮と呼ばれる(第 2.7 図)。周波数を変化させる周波数変調方式の場合、圧縮されたパルスの幅は、送信周波数帯域量 B(チャープ幅という.)に反比例し、およそ 1/B となる。例えば、B=1.0 MHz の場合、理論的には 1 us に圧縮され、距離分解能は 150 m となる。ただし、圧縮の過程により生じる距離方向のサイドローブ(レンジサイドローブという.)の抑圧が実用上は不可欠であり、そのための処理(窓関数等)により距離分解能が劣化するため、実際にはチャープ幅は少し広め取る必要がある。パルス圧縮の原理の詳細については、伊藤(2015)などの専門書を参照されたい。

⁷ 位相を変化させる方式は、ウィンドプロファイラで利用されている。



第 2.8 図 反射強度の観測例．（左）パルス圧縮の復号処理前，（右）復号処理後．



第 2.9 図 パルス圧縮による距離分解能向上の効果．（上）復号処理前，（下）復号処理後．（検査成績書抜粋）

パルス圧縮による距離分解能向上の効果を具体例により見ていく．第 2.8 図（左）は、パルス圧縮復号前の反射強度の観測例である．パルス幅は 128 us（距離分解能 19.2 km 相当）であり、レンジ方向に降水エコーやクラッタが伸びて観測されている．また、細かな受信機ノイズも消え残っている．一方、同図（右）はパルス圧縮の復号処理を行ったもので、降水エコーやクラッタの細かな分布が明瞭になり、受信機ノイズの消え残りも無くなっている．また、第 2.9 図は、128 us の長パルスを受信機に直接入力して測定したパルス圧縮前後の送信波形である．長パルスに復号処理を行うことで、急峻なピークを持つ短いパルスに圧縮されていることが分かる（そして、メインローブのピークに対してレンジサイドローブは

60 dB 以下と十分小さい）．圧縮後のパルス幅は、ピーク付近の 3 点をガウス近似した際の半値幅から算出でき、規格である 0.83 us 以下（距離分解能 125 m 以下）を実際に満たしている．従来の強度観測⁸の距離分解能は 375 m 程度（パルス幅 2.5 us）であったが、パルス圧縮の利用により距離分解能を 3 倍に向上させることが可能となった．

パルス圧縮を利用すれば、長いパルスを用いても所要の距離分解能を得られることから、受信信号の S/N（信号対雑音比）を向上できる．レーダーで得られる受信信号の S/N は、パルスの持つ平均エネルギーに比例し、その最大値は次式で与えられる（伊藤，2015）．

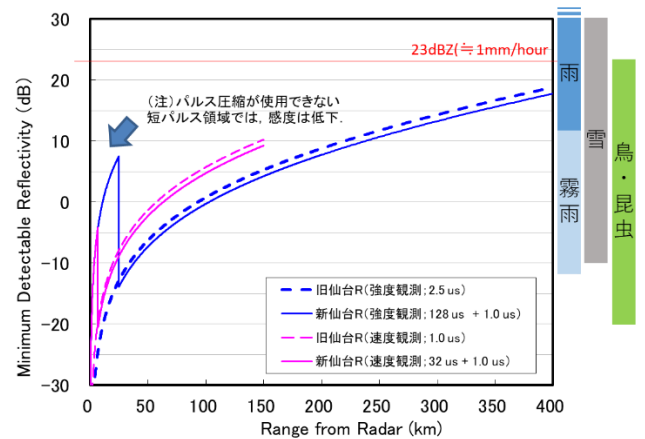
$$\frac{S}{N} = \frac{E}{N_{sd}} = \frac{P_r \tau}{k T_s} \quad (1)$$

⁸ 一般気象レーダーでは、PRF を落とすことで観測範囲を 400 km まで広げた「強度観測」、探知範囲が狭い代わりに PRF が高くドップラー速度の観測が可能な「速度観測」の 2 種類のスキャンを低仰角において行っている．これに対して、高仰角は必要な探知範囲が狭いため、1 種類の「強度・速度観測」のみ行う．

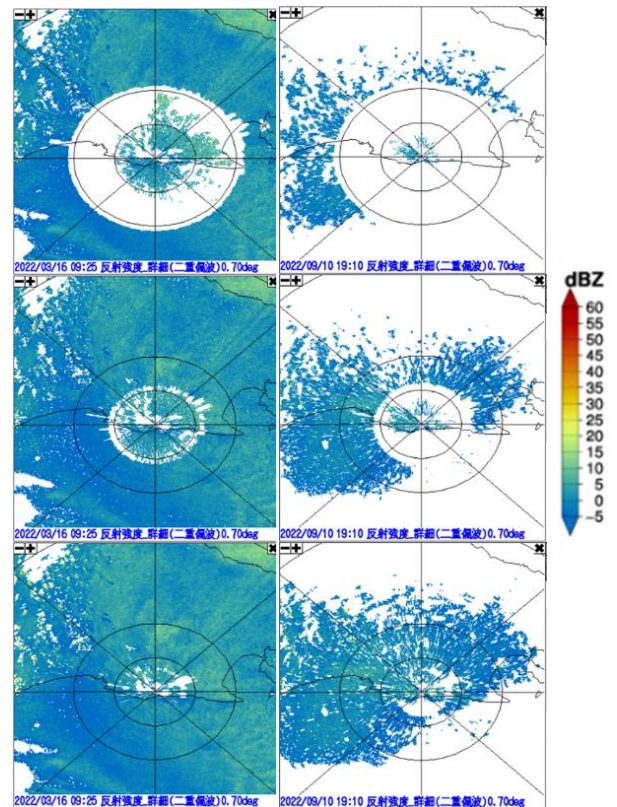
ここで、E は受信機への入力パルス信号のエネルギー (=パルス内平均受信電力 P_r ×パルス幅 τ)、 N_{sd} は雑音のスペクトル密度、k はボルツマン定数、 T_s はシステム雑音温度 (システム固有の値) である。例えば 100 us のパルスを利用した場合、1 us 利用時に比べ、S/N は 20 dB 向上する。

これにより、電子管型と比べて 100 分の 1 程度となる数 kW の送信電力であっても、従来同等のエコー検出が可能となる。例として、仙台レーダー更新前後の検出可能な最小の反射強度を第 2.10 図に示す。曲線が下方になるほど高感度を意味する。仙台レーダーの送信電力は、片偏波当たり 3 kW であるが、パルス圧縮の利用により、強度観測、速度観測ともに、遠方では更新前とほぼ同等の感度を実現している。

ただし、長パルスの送信時間に相当する近距離 (パルス幅によるが、レーダーから 7 km-25 km 程度以内) では、受信感度が不連続に低下し、かつこれまでより感度が低くなる。これは、送受共通のアンテナを用いるモノスタティックレーダーの原理上、パルス送信中は送信波の漏れ込みにより正しい受信処理ができず⁹、従来と同程度の短いパルス (短パルス) による観測¹⁰を併用して近距離を補完しているためである。近距離においては従来の電子管型レーダーでは必要以上の感度を有しており、近距離の感度が低下しても通常の降水観測には差し支えないが、反射強度が低いエコー (弱い霧雨・霧雪や虫・鳥など) では、感度差が顕在化して見える場合がある。第 2.11 図は、同一仰角における異なる長パルス幅の観測結果を示したもので、弱い降雪エコーと晴天エコーどちらの場合も、128 us や 64 us の観測では短パルス領域の感度不足によるエコー欠落が見られる。とはいえ、欠落は反射強度が 0 dBZ 以下のごく弱いエコーがほとんどであり、32 us の観測を併用することで補完もできるため、実用上は支障がない。



第 2.10 図 仙台レーダーの更新前後の受信感度 (導波管長が異なるため、他サイトでは数 dB の増減がある)。図右に降水エコー等の反射強度の目安 (VAISALA, 2011) を示す。



第 2.11 図 釧路レーダーで観測した弱い降雪エコー (左列) と晴天エコー (右列) における感度差の顕在化の例。(上段) 128 us, (中段) 64 us, (下段) 32 us, による仰角 0.7°の反射強度。

⁹ ただし、近年、部分的に受信できた長パルス信号を基に送信タイミングに当たる近距離の復号を行う手法も提案されている (Aquino *et al.*, 2021)。

¹⁰ 長パルスとの相互干渉を防ぐため、送信周波数を 2.5 MHz 離すオフセットパルス方式を採用している。

ウ 非線形周波数変調方式の導入

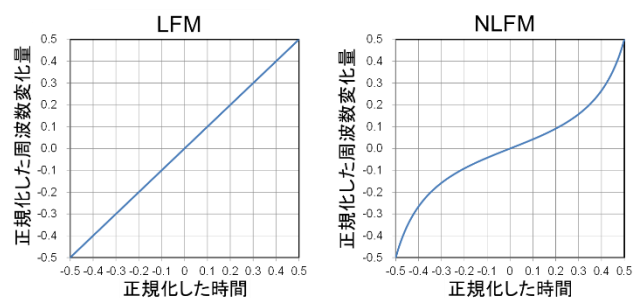
2016年に運用開始した3基のDRAW(関西, 羽田, 成田)では, 時間とともに線形的に周波数を変化させる線形周波数変調方式(LFM: Linear Frequency Modulation)を採用したが, その後レーダーメーカーによる研究開発が進み, 非線形周波数変調方式(NLFM: Non-Linear Frequency Modulation)導入の目処が立った(Gomi *et al.*, 2017). このため, 2018年の那覇DRAW更新を皮切りに, 以降に整備したDRAWや一般気象レーダーではNLFMを採用している.

NLFMは, LFMと比べて多くの利点を有する. 両者の違いを第2.12図に示す. NLFMは, レンジサイドローブ抑圧のための窓関数を必要とせず, S/N劣化やメインローブ幅増大(つまり距離分解能劣化)を抑えられるほか, 短めのパルスでもレンジサイドローブを抑圧しやすいといった特長がある. 那覇DRAWとそれ以前に導入したDRAWのパルス圧縮性能の比較を第2.3表に示すが, 上記で述べたNLFMの特長が見て取れる.

ただし, NLFMの実装は技術的難易度がやや高い. LFMと異なり, NLFMでは無数の周波数変化パターンが考えられるため, 遺伝的アルゴリズムなどを用い最適なものを見つける必要がある(Kurdzo *et al.*, 2014). また, 送信機増幅特性の非線形性を考慮した歪補正を行わないと性能が大きく劣化する. その他, LFMに比べ, ドップラーシフトによりレンジずれやレンジサイドローブ劣化, S/N劣化が生じやすい特徴もあるが(Kurdzo *et al.*, 2014; 伊藤, 2015), 5.3 GHz帯では, 台風等に伴い実際に想定されるドップラー速度60 m/sであってもドップラーシフト量は2 kHz程度であり, チャープ幅(1 MHz-2 MHz程度)に比して十分小さいため, 悪影響はほとんどない.

2.4 観測の高頻度化

更新前の一般気象レーダーは, 10分間でボリュームスキャンを行えるよう設計されており, 2008年の神戸都賀川の水難事故等を受け, 低仰角(数°以下)のみ5分に一度の観測が行えるよう観測シーケンスの改良が行われたものの, 中~高仰角ま



第 2.12 図 LFM と NLFM の周波数変調の違い.

第 2.3 表 LFM と NLFM の性能比較.

	那覇	羽田・関西・成田
パルス圧縮方式	NLFM	LFM
パルス幅	30 us	64 us
チャープ幅	1.63 MHz	1.2 MHz
S/N劣化量	~0.5dB	~3.1 dB
レンジサイドローブ	-65~-60 dB	-60~-55 dB
圧縮後のパルス幅	0.94~0.99 μs	~1.56 μs
距離分解能	141~148.5 m	234 m

で含めたボリュームスキャンは引き続き10分に一度としていた. しかし, 僅か数分のうちに大きく変化する積乱雲の状態を的確に把握するためには, 10分に一度のボリュームスキャンでは十分といえない. そこで, ボリュームスキャンを5分化し, 観測の高頻度化を図った.

まず, アンテナの回転速度の規格を従来の最大6 rpm(通常観測では4 rpm)から最大10 rpmへ増強した. ただし, 単純に回転速度のみを上げてしまうと, ①グラウンドクラッタのスペクトル幅が増えることでグラウンドクラッタ除去機能(以下, 「MTI」: Moving Target Indicator という.)が効きにくくなり, グラウンドクラッタの消え残りが増加, ②ヒット数の減少により反射強度等の推定誤差が増大, といった副作用がある. そこで, 高速化の対象をグラウンドクラッタの混入の少ない中~高仰角に限定するとともに, 2.6アで後述する二重偏波情報を利用した選択的MTIの導入により, グラウンドクラッタを確実に除去することで, ①の影響を抑えた. 更に②の影響を抑えるため, 降水エコーが存在する対流圏内の観測に支障を来さない範囲で中~高仰角スキャンのパルス繰返周波数(PRF: Pulse Repetition Frequency)を最大

2,000 Hz 近くまで増やし、ヒット数を確保した。

また、パルス圧縮を利用して推定誤差の低減を図った。更新前は距離分解能 150 m（速度観測、速度・強度観測）又は 375 m（強度観測）、サンプリング間隔 250 m であったところ、許容される占有周波数帯幅の範囲内で送信波のチャープ幅を広げることによっていずれも 125 m まで縮めるとともに、距離方向に隣り合うレンジビンを平均化することとした。これにより、従来同等のサンプリング間隔や回転速度を維持しつつ、推定誤差を低減させることができる。机上計算による各観測パラメータの推定誤差を第 2.4 表に示す。WMO GIMO による要求精度をほぼ満たしていることが分かる。

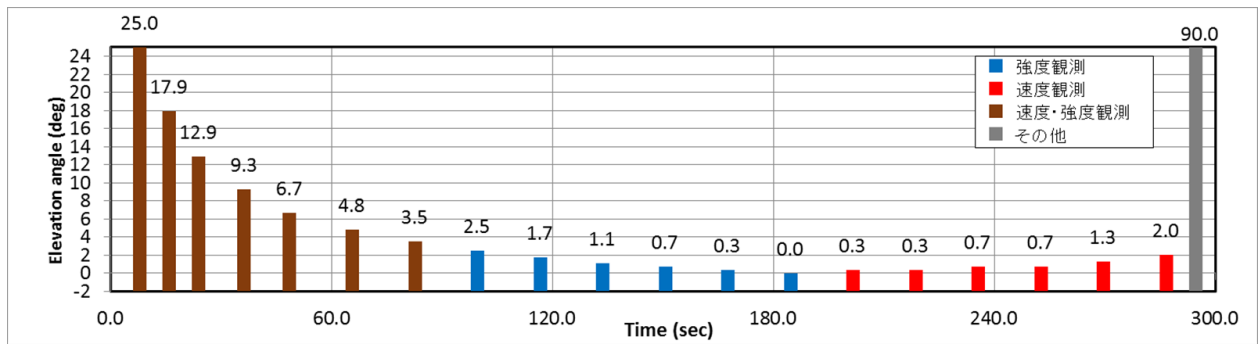
以上により、従来と同等のプロダクト作成を維持しつつ、第 2.13 図に示すとおり、ボリュームスキンの頻度を倍化（5 分化）させた。更新したレーダーの覆域内ではエコー頂高度や鉛直積算雨量といった三次元指数も 5 分ごとに作成可能となる。合わせて、二次エコーを利用して観測範囲を拡張した 250 km レンジ速度観測の 2 仰角化（従来は 1 仰角）や仰角の一部見直しも図った。

第 2.4 表 更新後の一般気象レーダーにおける観測精度の机上計算値。

要素	WMO GIMOによる 要求精度 (速度幅4.0 m/s未満)	机上計算による 推定精度
反射強度Z	1 dB	0.99~1.04 dB
ドップラー速度V	1.0 m/s	0.30~0.32 m/s
速度幅W	1.0 m/s	0.24~0.26 m/s
反射因子差Zdr	0.2 dB	0.05 dB
偏波間位相差Ψdp	-	0.30~0.35 °
偏波間位相差変化率Kdp	< 0.5 deg/km	0.10 deg/km
偏波間相関係数phv	0.001	0.00020~0.00021

- 計算条件は次のとおり。
- ✓ Ryzhkov and Zrníc(2019)によるパラメータ推定の標準偏差の式を利用 (S/Nは十分大きい)
 - ✓ 周波数5350 MHz
 - ✓ 球形の雨滴を仮定
 - ✓ 交差偏波識別度35 dB
 - ✓ 速度幅2.5 m/s
 - ✓ 回転速度4 rpm, 0.7°セクタ幅
 - ✓ 2レンジ平均 (125 m⇒250 m)

偏波パラメータの高精度な校正に不可欠な天頂観測（仰角 90°の PPI 観測）も 10 分に一度実施している。なお、1,500 Hz 以上の高い PRF の採用は固体素子送信機の導入により、推定誤差低減はパルス圧縮の導入によりそれぞれ実現した。固体素子送信機はこのように観測の高頻度化にも貢献している。



#	種別	仰角 (deg)	観測範囲 (km)	回転速度 (rpm)	PRF (Hz)	長パルス幅 (μsec)	超解像	探知範囲倍化
1	高PRF, 速度・強度観測	25.0	64.0	10.0	1830	1525	32	
2	高PRF, 速度・強度観測	17.9	64.0	10.0	1830	1525	32	
3	高PRF, 速度・強度観測	12.9	64.0	10.0	1830	1525	32	
4	高PRF, 速度・強度観測	9.3	120.0	5.8	1080	900	32	
5	高PRF, 速度・強度観測	6.7	120.0	5.8	1080	900	32	
6	高PRF, 速度・強度観測	4.8	180.0	4.0	756	630	32	
7	高PRF, 速度・強度観測	3.5	180.0	4.0	756	630	32	
8	低PRF, 強度観測	2.5	400.0	4.0	345		64	あり
9	低PRF, 強度観測	1.7	400.0	4.0	330		128	あり
10	低PRF, 強度観測	1.1	400.0	4.0	330		128	あり
11	低PRF, 強度観測	0.7	400.0	4.0	330		128	あり
12	低PRF, 強度観測	0.3	400.0	4.0	330		128	あり
13	低PRF, 強度観測	0.0	400.0	4.0	330		128	あり
14	高PRF, 速度観測	0.3	250.0	4.0	888	740	32	あり
15	中PRF, 速度観測	0.3	250.0	4.0	565		64	あり
16	中PRF, 速度観測	0.7	250.0	4.0	565		64	あり
17	高PRF, 速度観測	0.7	250.0	4.0	888	740	32	あり
18	高PRF, 速度観測	1.3	150.0	4.0	888	740	32	
19	高PRF, 速度観測	2.0	150.0	4.0	888	740	32	
20	高PRF, 速度観測	90.0	64.0	10.0	1830	1525	32	

#20は10分に1回。

第 2.13 図 更新後の一般気象レーダーにおける観測シーケンスの一例。

2.5 観測の高解像度化

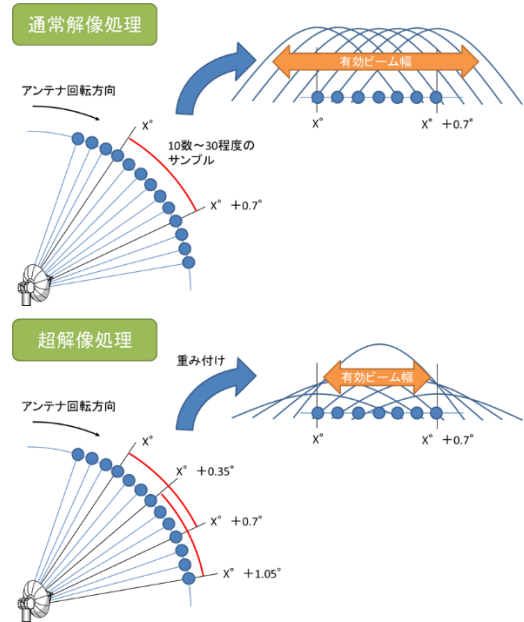
ア パラボラアンテナの大型化

パラボラアンテナは、直径が大きいほど利得が向上するとともにビーム幅が狭まり、遠方の観測精度向上に繋がる。その一方で、レドームの大型化と相まって製作コストや重量が増加し、レーダー局舎の耐荷重を超えないような配慮も必要となる。このため、性能とコストが見合う大きさとして、従来の一般気象レーダーでは直径 4.0 m としていた。しかし、海外の気象レーダーの規格はビーム幅 1°以内が主流であり、WMO GIMO でも推奨されている。そこで、実力値でビーム幅 1°以内を実現可能な直径 4.3 m のタイプを採用した。重量は従前と同等又は若干増えるものの、レドームの大型化も必要とせず、既存のレーダー局舎の耐荷重要件を満足できるものとしている。

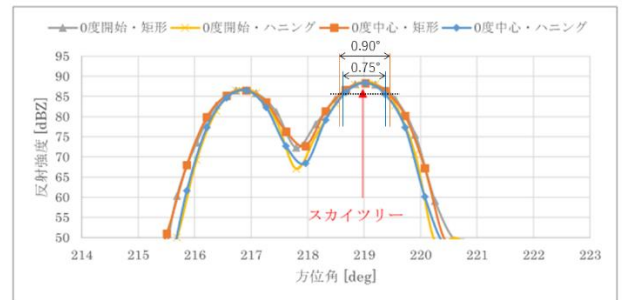
イ 超解像処理の導入

レーダーの方位分解能はアンテナのビーム幅によって決まり、ビームの広がる遠方では小さな空間スケールの現象を解像できない。また、アンテナを回転させながらパルスを多数送信し、そのサンプリングを行うことで更に分解能は低下する。しかし、各サンプルに重み付けする（窓関数を掛ける）ことで、実効的にビーム幅を狭めることが可能であり(第 2.14 図), NEXRAD では「Super resolution」という名称で現業導入している (Warning Decision Training Branch, 2008)。一般気象レーダーでは、この技術を単一 PRF のスキャンに適用し（窓関数としてハミング窓又はハニング窓を使用.），合わせて方位方向のデータサンプリングをこれまでの約 0.7°（360°を 512 分割）から約 0.35°（360°を 1024 分割）に向上させた。

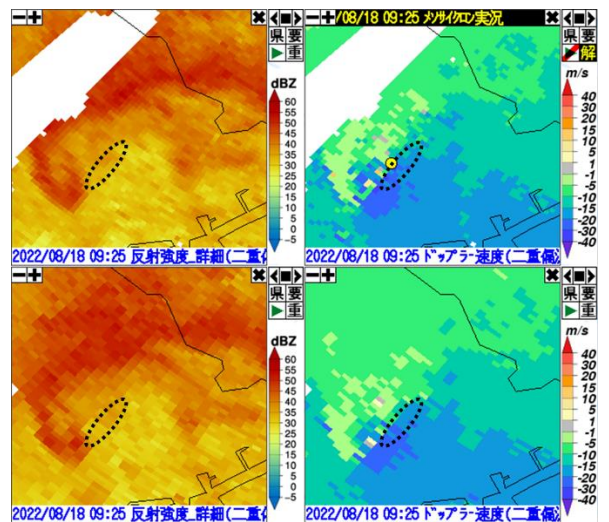
超解像処理により、エコー形状はより明瞭に映るようになる。第 2.15 図は、超解像処理の有無による孤立目標（スカイツリー）の見え方の違いを示したものである。ビーム幅の影響で方位方向に広がりを持つが、超解像処理（ハニング窓）では、超解像なし（矩形窓）に比べてよりシャープに映っており、その 3 dB 幅は約 0.75°（超解像なしでは約 0.90°）である。また、第 2.16 図は、2022 年



第 2.14 図 超解像処理の概念。



第 2.15 図 超解像処理による孤立目標の見え方の違い（検査成績書に加筆）。0 度開始と 0 度中心は、セクタ開始位置の違いを表している。



第 2.16 図 東京レーダーで観測したフックエコーとメソサイクロン。(上段) 超解像 (0.35°), (下段) 通常解像 (0.7°) による観測結果。破線は、突風被害が見られた位置を示す。

8 月 18 日 9 時 25 分頃に東京レーダーで捉えたフックエコーであり（図中黄丸で示すようにメソサイクロンも検出されている.），このとき竜巻と推定される突風被害も報告された（横浜地方気象台，2022）. 同図上段は，超解像によるスキャン，下段は通常解像によるスキャンであり，二つのスキャンは同一仰角かつ時間差は 15 秒である. 特に反射強度では，超解像処理により細かい構造が表現され，フックエコーが明瞭に映っている.

ただし，実効的なヒット数が半分程度に減少するため，超解像処理を行うと，推定誤差の増大や受信機ノイズのばらつき増大といった副作用も生じることには留意が必要である. 受信機ノイズのばらつきは $\sqrt{2}=1.5$ dB 程度大きくなり， P_r スレッシュホールドがこの分増加する. この結果，降水の端部など S/N の低いエコーが僅かに映りにくくなる.

2.6 観測の高精度化

ア グランドクラッタ除去の高度化

「クラッタ (clutter)」は，もともと「散らかった物」という意味の単語で，転じてレーダー観測において目標物以外からの反射電波を指す. 特に，気象レーダー観測においては，降水粒子以外の物体（地面，海面，波しぶき，虫・鳥，船・飛行機，建造物・風車など）からの反射電波は，全てクラッタである. 中でも，地面からの反射電波（グランドクラッタ）は，その強度も大きく，同一地点で時間的に連続して出現するため，観測へ与える影響が大きい. グランドクラッタが降水エコーに混入すると，反射強度は過大評価され，ドップラー速度は過小評価される. また，偏波パラメータも歪めてしまい，僅かな混入であっても影響を受ける厄介さもある.

多くの気象レーダーでは，グランドクラッタの影響を避けるため，混入したクラッタ成分を除去する「クラッタフィルタ」に通すことで，降水エコーのみを抽出する手法 (MTI) が行われている. 一般に，グランドクラッタのパワースペクトルは

速度 0 m/s を中心にシャープなピークを形成する. そこで，更新前の一般気象レーダー・DRAW においては，位相情報を用いるコヒーレントな MTI（コヒーレント MTI）として，時系列信号を高速フーリエ変換 (FFT: Fast Fourier Transform) し，速度 0 m/s 付近のスペクトルを除去するとともに，除去区間を線形補完する手法を採用してきた（石原，2001 など）.

しかしながら，この手法ではしばしば課題も生じていた. 具体的には，第 2.17 図に示すとおり，

- ① 強い風による樹木の揺れや FFT に起因するスペクトル漏れ等によりグランドクラッタのスペクトルが広がり，MTI によって速度 0 m/s 付近は除去したものの，一部が消え残る.
- ② 降水エコーとグランドクラッタの消え残りが重畳し，反射強度を過大評価する.
- ③ 速度 0 m/s 近くにある降水エコーも除去してしまい，反射強度の過小評価が生じるとともに，スペクトルのピークがずれてドップラー速度を過大評価する.

といったもので，特に①②については，解析雨量の過大値を招きやすく，影響が大きい.

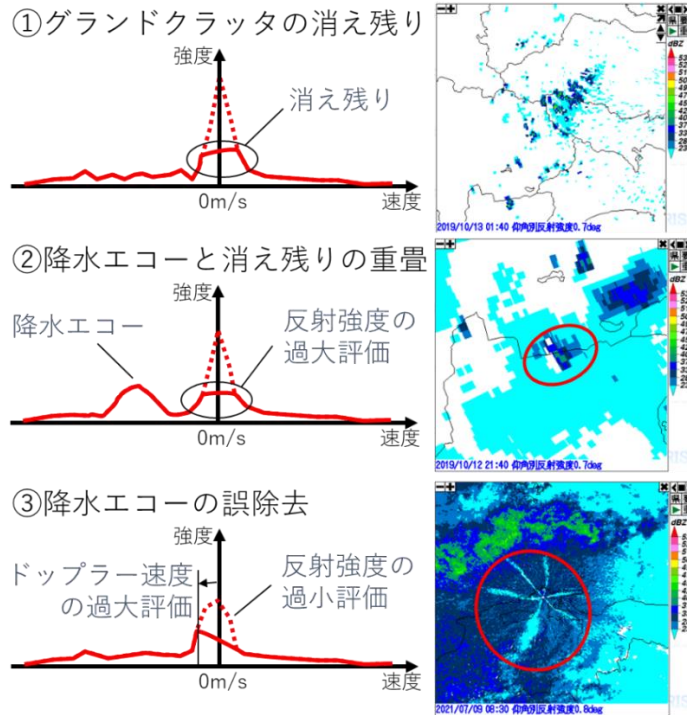
このような課題に対処するには，クラッタの混入した空間領域を動的に判別し，混入状況に応じた処理を行う，すなわち「選択的 MTI」が有効である. 具体的には，クラッタのみが混入した（又は強いクラッタが混入し精度劣化が不可避の）領域は無効化し，グランドクラッタと降水エコーが重畳した領域は MTI 後のデータ，降水エコーのみの領域は MTI 前のデータ (Normal の意で，以下「NOR」という.) をそれぞれ採用すればよい.

更新前の多くの気象レーダーにも選択的 MTI は実装されていたが，その精度は十分とは言えなかった. これは，単偏波気象レーダーでは，利用できる特徴量が限られるからである. 更新前の方式では，NOR のドップラー速度の絶対値及び速度幅がどちらも小さく (0 m/s に近い)，かつノンコヒーレント MTI¹¹によるクラッタ抑圧比が大きいビンのみ MTI を掛けるというものであった. し

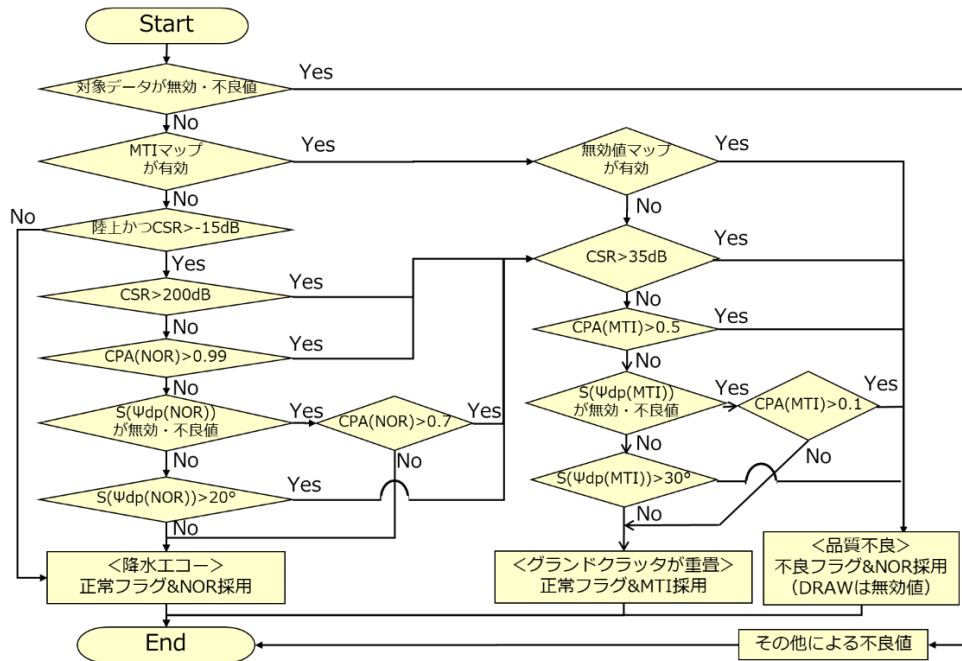
¹¹ ヒットごとに強度変動が少ない特徴を持つグランドクラッタをハイパスフィルターにより抑圧する手法.

かし、降水エコーでもクラッタ抑圧比が大きくなる
 ことがあり、折り返しとも相まってドップラー
 速度の小さい降水エコーを弱めてしまうことが
 あった。また、選択的 MTI 処理に NOR/MTI 判別
 しか含まれておらず、強いグラウンドクラッタが
 MTI で除去しきれずに消え残ることも多かった。
 そこで、気象研究所の開発した偏波パラメータ

を特徴量に取り入れた判別方式を、一般気象レー
 ダー・DRAW ともに導入した。第 2.18 図に処理フ
 ローを示す。判定結果は、その他のスレッショルド
 処理の結果とともに、品質管理情報（内容は付
 録 2 を参照）又は地形成分除去情報（DRAW の場
 合：選択的 MTI の判別結果のみ）に記録される。
 なお、通信帯域に余裕のない一部のサイトを除き、



第 2.17 図 従来のコヒーレント MTI による課題の模式図と観測事例。



第 2.18 図 二重偏波レーダーにおける選択的 MTI のフロー。記載した設定値は一例。

一般気象レーダーでは、クラッタのみが混入していると判断した場合でも、後の調査等で利用できるよう、不良フラグのみ付し、NOR データを格納している（ROPS で作成する一般利用向けデータでは無効値で埋めている）。

ここで、導入した選択的 MTI の判定に用いる特徴量の概要について概説する。

①CSR (Clutter Suppression Ratio)

CSR (dB) = Pr NOR (dBm) - Pr MTI (dBm) で定義¹²され、MTI による地形成分除去量が大きいほど値が大きくなるため、グラウンドクラッタ混入状況の判別指標の一つとなる。ただし、速度が 0 m/s に近い降水エコーでも CSR は増大するほか、 P_r が大きい降水エコーでは CSR が相対的に小さくなるため、後述する CPA や $S(\psi_{DP})$ によりクラッタが混入していると判別された場合のみ、不良フラグを付すか否かを判断するといった利用に留めている。海上や CSR が小さい場合にはクラッタ混入なしとみなし、NOR 判定する設定を当初行っていたが、船によるクラッタが負の CSR を持つことがあり、しばしば消え残りが見られたことから、この設定は無効化させている。高仰角に限り利用再開できないかは、今後の検討課題である。

②CPA (Clutter Phase Alignment)

サンプリング時間内における位相信号の位相の標準偏差であり、Hubbert *et al.* (2009a, b) で提唱された。IQ データのうち i 番目のヒットの I 成分を I_i 、Q 成分を Q_i と表すと、定義式は次式となる。

$$CPA = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N I_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N Q_i\right)^2} / \sum_{i=1}^N \sqrt{I_i^2 + Q_i^2} \quad (2)$$

降水エコーのようにヒットごとの位相がランダムに近い場合は小さな値を、グラウンドクラッタのように位相がほぼ同じ場合には 1 に近い値を取るため、1 に近いビンにはクラッタが混入していると判断できる。グラウンドクラッタの混入状況の判別には後述する $S(\psi_{DP})$ が特に効果的ではあるが、算出方法の制約から、1-2 ビン程度の孤立的なグ

ラウンドクラッタの判別が難しい。CPA はビンごとに独立に算出できるため、クラッタの見逃しを減らすことができる。なお、単偏波運用になった際は、主に CPA で NOR/MTI 判別を行うこととなる。

③ $S(\psi_{DP})$

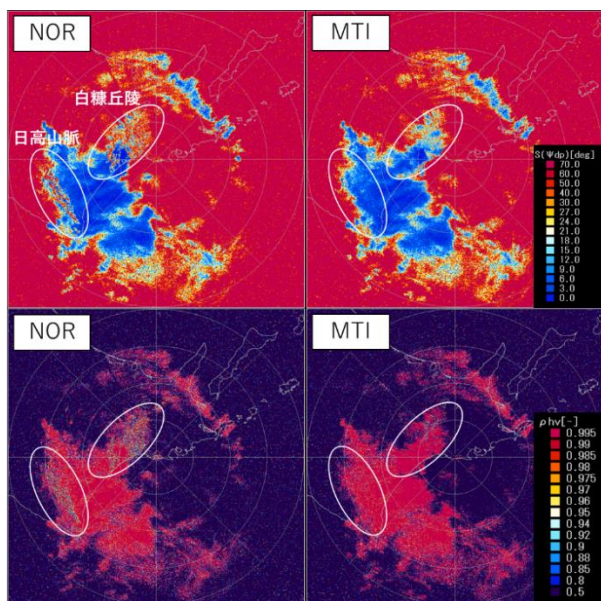
ψ_{DP} の空間的ばらつきを指標化したもので、ある区間で ψ_{DP} を距離方向に線形近似し、その標準誤差を求めたものである（具体的な算出式は付録 3 を参照）。降水エコーのように、サンプリング体積内が多数の降水粒子で満たされている場合は、 ψ_{DP} は距離方向に徐々に変化する、つまり水平偏波と垂直偏波の信号が、それぞれサンプリング体積の中心で反射されているとみなすことができる。これに対し、グラウンドクラッタでは、サンプリング体積内に散乱体が偏在しているため、 ψ_{DP} は距離方向にランダムに近い値をとる¹³、つまり水平偏波と垂直偏波の信号が、別々の距離から反射しているように見える。よって、グラウンドクラッタと降水エコーを容易に区別できる。

選択的 MTI 処理を更に有効なものとするためには、MTI 手法の選択も重要である。FFT による従来の手法では、特にヒット数が小さい場合、線形補完の影響により偏波間の特性を揃える事が難しく、偏波パラメータ（特に ρ_{hv} ）を劣化させてしまう傾向にある。一方、フィルタ特性を両偏波で揃えられる IIR (Infinite Impulse Response) のような時系列信号に対する MTI 方式では、偏波パラメータの品質劣化が比較的小さく、0m/s 付近の速度成分の損傷が大きいデメリットも選択的 MTI の併用により軽減できるため、ほぼ全てのサイトで採用されている。第 2.19 図は、釧路レーダーにおける MTI(IIR 方式)前後の $S(\psi_{DP})$ と ρ_{hv} を比較したものである。このときのヒット数は 10 程度であるが、日高山脈や白糠丘陵周辺でグラウンドクラッタにより劣化した偏波パラメータの精度を、MTI により回復できていることが分かる。

さらに、本節冒頭で述べた②の課題の更なる対策として、より高度な MTI 手法を導入している。

¹² 定義式右辺の項を逆にした CSR (Clutter to Signal Ratio) という同一のアクロニムもあることに留意。

¹³ Z_{DR} や ρ_{hv} も近い特徴を有するが、前者は S/N が低い場合に ψ_{DP} より値が増えやすく、後者はシークラッタに対して ψ_{DP} と比べて値が大きくなりやすいため、総合的には ψ_{DP} が最も性能が高い。



第 2.19 図 釧路レーダーにおける MTI 前後の偏波パラメータの例 (仰角 0.7°). 上段: $S(\psi_{DP})$, 下段: ρ_{hv} .

例えば、クラッタ成分を除去した後、クラッタと一緒に除去された降水エコー成分をガウシアン近似することでバイアスを抑える手法 (Gaussian Model Adaptive Processing : GMAP) が開発され、NEXRAD で現業利用されている (Siggia and Passarelli, 2004). また、周波数領域で処理を行う GMAP に対して、時間領域で同様の処理を行う手法 (GMAP-TD) も開発されている (Nguyen and Chandrasekar, 2013). GMAP-TD は、クラッタが降水エコーに対して卓越している困難な状況でも、GMAP 以上にドップラー速度や反射強度などのパラメータ算出時にバイアスが出にくいことが報告されている。一般気象レーダーではこれらに準じた手法を採用し、一部のサイトでは実際に利用してその効果を上げている。

以上述べてきた手法により、クラッタが混入した空間領域の判別精度及び除去性能が飛躍的に向上し、冒頭で述べた従来の課題のほとんどが解消した。ただし、単偏波運用時には偏波パラメータが利用できないため、CSR 及び CPA のみを特徴量として使用する。なお、ファジーロジックや機械学習による選択的 MTI 方式も実装しているが、パラメータ調整や学習に手間がかかる一方で、

決定木方式に比べて大幅な品質向上は確認できておらず、2023年12月時点では利用していない。

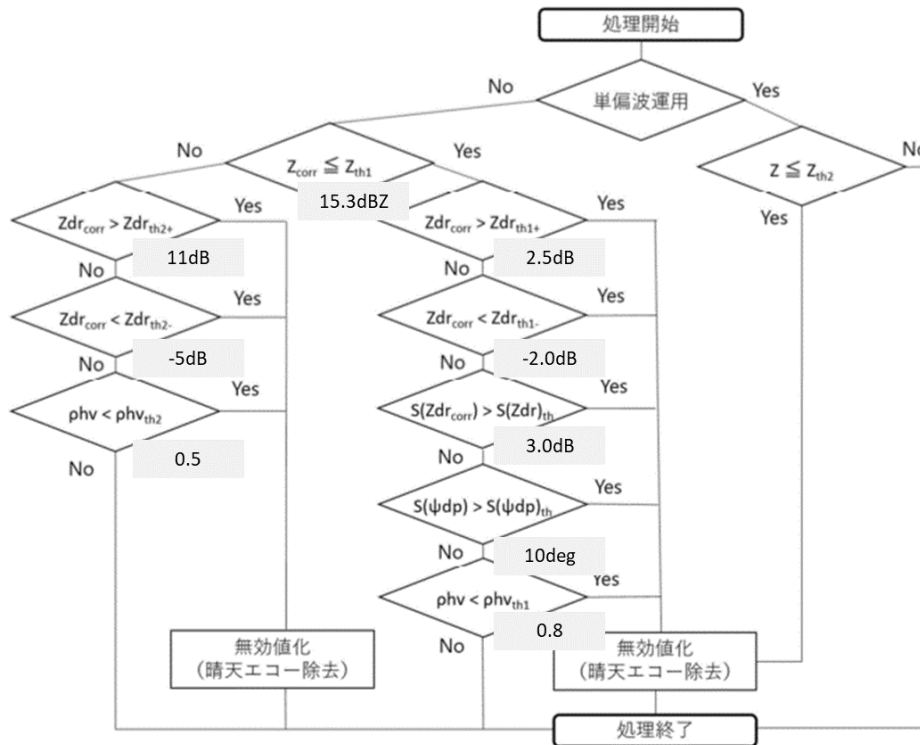
イ その他のクラッタ除去の高度化

アで述べた二重偏波方式の選択的 MTI は、グラウンドクラッタ以外の多くのクラッタに対しても有効に働く。例えば、シークラッタやチャフは、同様のサンプリング体積内の偏在性から $S(\psi_{DP})$ が大きな値を取り、選択的 MTI により不良判定される。詳細については、4.2 節で後述する。

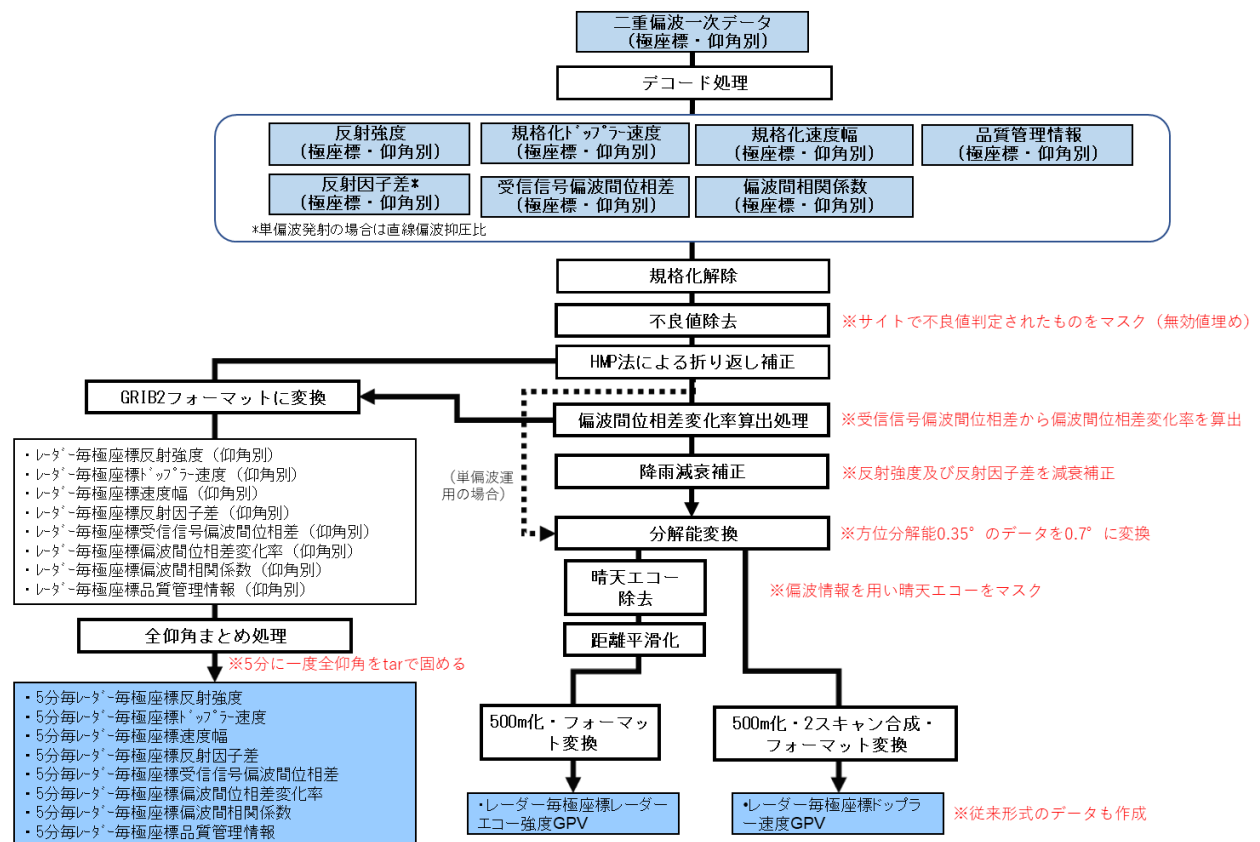
この例外として、虫・鳥といった生物起源の晴天エコーが挙げられる。これらのエコーは比較的 $S(\psi_{DP})$ が小さめの分布となることが知られており (Sugier and Tabary, 2006)、選択的 MTI だけでは除去が難しい。一方、 Z_{DR} が大きく、 ρ_{hv} が小さいといった降水エコーとは異なる特徴も見られる。

そこで、晴天エコーの除去処理を ROPS に実装した。第 2.20 図に示すとおり、偏波パラメータによる特徴量を組み合わせて除去を行う。また、晴天エコーは一般に反射強度が大きいいため、一定の閾値以下 (デフォルトは 15.3 dBZ 以下) の場合に強めに掛かるような処理としている。一般気象レーダーで観測される晴天エコーのドップラー速度は、過去の調査で高層気象観測と比較しても遜色ない品質が得られている (梶原・大野, 2015)。このため、晴天エコー除去処理は解析雨量等に利用するエコー強度データのみに対し実施している。晴天エコー除去を含め、ROPS における処理フローの概要を第 2.21 図に示す。

そして、各種クラッタのほか、二重偏波方式の選択的 MTI は受信機ノイズも効果的に除去できるため、受信感度向上に寄与する利点もある。一般的な気象レーダーには、受信機ノイズ (アンテナから入力される大気放射等の外来ノイズ含む。) の除去のため、あるスレッシュホールド以下の P_r を無効化する処理 (P_r スレッシュホールド) が備わっている。受信機ノイズはヒットごとに無相関のため、ヒット数が大きくなるとノイズ強度の分散は減少し、スレッシュホールドを引き下げることができる。例えば、更新前の一般気象レーダーでは、ヒット数 16 の強度観測ではノイズレベル+5 dB、ヒット



第 2.20 図 晴天エコー除去処理のフロー. 記載の数値はデフォルトの設定値. 単偏波運用時を除き, Z 及び Z_{DR} については, 降雨減衰補正後のものを用いる.



第 2.21 図 ROPS における二重偏波情報の処理フロー.

数 20-30 の速度観測では+3 dB の閾値としていた。一方、更新後は、強度観測ではノイズレベル+1 dB-+3 dB、速度観測では-3 dB-+1 dB の閾値におおよそ調整されており、どちらも従来と比べて引き下げが実現できている。これは、受信機ノイズを選択的 MTI でも除去できることにより、 P_r スレッシュホールド後の多少のノイズの消え残りが許容できるようになったためである。具体的には、受信機ノイズに伴う P_r (静的ノイズ減算後) の上位 0.2% をスレッシュホールド値に設定することとした (つまり 99.8% の受信機ノイズは P_r スレッシュホールドにより、残り 0.2% は選択的 MTI により除去される)。この結果、S/N が 0 dB に近いエコーの検出ができるようになり、感度向上に繋がっている。

ウ ノイズの影響を抑えたパラメータ算出

反射強度や偏波パラメータ等の推定精度は S/N に依存しており、S/N が低下すると相対的に受信機ノイズの影響が大きくなり、推定精度も悪化する。特に、受信信号の振幅を用いる Z や Z_{DR} 、 ρ_{hv} では S/N の低下による品質低下が顕著であり、静的なノイズレベルを別途求め、総受信電力 R_0 から差し引くことで補正する必要がある (Zhang, 2016)。これにより多くの場合では必要な品質が確保できるが、ノイズレベルは外的要因により増大することもあり、補正がうまくいかない場合がある。

ノイズの影響を抑えるもう一つのアプローチとして、マルチラグと呼ばれる手法が提案されている (Lei *et al.*, 2012)。時系列信号に重畳する各種ノイズはヒットごとに無相関であるため、ラグ k ($k \neq 0$) の自己相関¹⁴を求めるとノイズ成分は相殺し、0 となる。降水エコーのドップラースペクトルがガウシアン近似できる性質を利用し、ラグ 1 以上の自己相関ないし相互相関¹⁵から各パラメータを推定するのがマルチラグの基本原理である。一般気象レーダーでは、Lei *et al.* (2012) に基づき、 P_r 、ドップラー速度、速度幅、 ψ_{DR} 、 ρ_{hv} に対

して、最大ラグ 4 までの利用ができるようにしている (DRAW はラグ 2 まで)。

マルチラグを利用することで、低 S/N 時の観測精度を確保しつつ、受信機ノイズの抑圧による MDS (Minimum Detectable Signal) の引き下げや干渉波の抑圧といったメリットが期待される。一方で制約もあり、速度幅が大きい場合や PRF が低い場合にはサンプル間の相関が低くなり、マルチラグの P_r が低下する。これらの制約を踏まえ、2023 年 12 月現在では、①探知範囲倍加による二次エコー領域のみ S/N 算出にラグ 2 を利用 (一部サイトを除く)、②速度幅算出にラグ 2 を利用、といった限定的な利用にとどめ、 P_r 及び ρ_{hv} 算出時には、レーダーの取付調整時に測定した静的ノイズレベルを差し引くことで補正を行っている。ただし、PRF が高い観測に対しては、マルチラグの利用を拡大できる余地があり、今後の検討課題である。

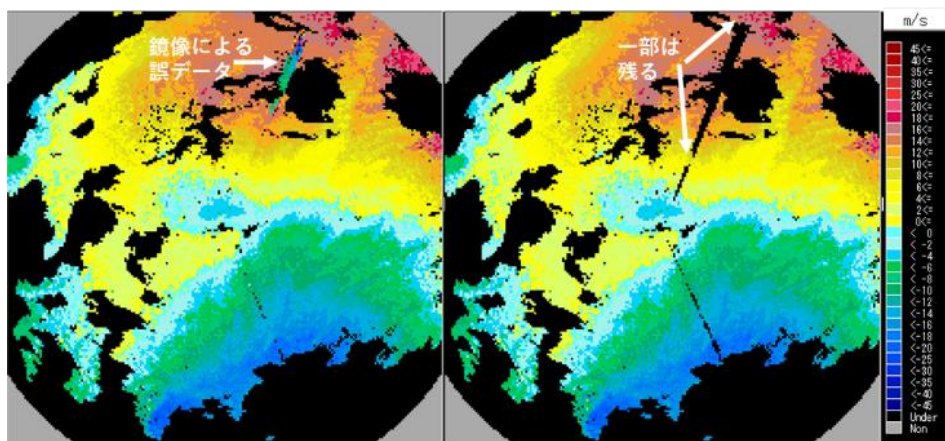
エ 鏡像判定の導入

レーダーから発射された電波 (の一部) が、近傍の建物によって鏡面反射された場合、その建物以遠のデータには、鏡面反射波の経路上にあるエコー (実像) が重畳し、鏡像として現れる。この鏡面反射は、純粋なビーム遮蔽とは異なり、反射強度だけでなくドップラー速度や偏波間位相差などの位相系のデータにも大きな影響を与える。特にドップラー速度は、全く異なる方位のデータが混入することで周囲のデータとの不連続が生じるため、折り返し補正に失敗し、著しく誤った値を生じることもある。

このような鏡像には、いくつかの特徴が見られる。まず、鏡像は、原因となる建物のある方位に必ず出現し、またその反射方向 (必ずしも 180° 逆向きとは限らない。) には実エコーが存在する。加えて、建物による反射率は通常 1 より小さいため、鏡像の反射強度は実像より小さくなる一方、ドップラー速度については、鏡像と実像で同程度の値が得られるといった特徴もある。

¹⁴ 水平偏波、垂直偏波それぞれの位相信号を一定時間シフトした際の元の信号との類似度を示す量。

¹⁵ 水平偏波と垂直偏波の位相信号の類似度を示す量。



第 2.22 図 ドップラー速度への鏡像判定処理結果（成田 DRAW）。左：判定前，右：判定後。

第 2.5 表 更新前後の折り返し速度の違い。仰角はサイトにより異なるため，目安である。

	更新後				更新前			
	仰角[°]	PRF比	PRF [Hz]	折返し速度[m/s]	仰角[°]	PRF比	PRF [Hz]	折返し速度[m/s]
DRAW (関西・羽田・成田)	0.7-10	5:4	1040/832	~58	0.7-45.9	4:3 又は 5:4*	1120/840 又は 1200/960*	~48 又は ~68*
	10-17	5:4	1365/1092	~76				
DRAW (那覇以降)	0.7-10	6:5	1116/930	~78				
	10-17	5:4	1500/1200	~84				
一般気象レーダー	0.0-2.5	6:5	888/740	~62	0.7-25.0	5:4	940/752	~53
	2.5-5	6:5	756/630	~53				
	5-10	6:5	1080/900	~75				
	10-25	6:5	1830/1525	~128				

* 那覇及び鹿児島に限る。

そこで，このような特徴を利用して鏡像を判定し，無効化する処理を一部のサイトに実装した。判定結果の例を第 2.22 図に示す。これまでは建物以遠を全て無効化する方法を取っていたが，常時欠測となってしまう課題があった。鏡像判定は，鏡像の発生しやすい都市部域の気象レーダーにおいて，データ取得率の向上に寄与する。

オ ドップラー速度の折り返し速度向上

2.3 節で述べたとおり，固体素子気象レーダーでは，長パルスのブラインドレンジを補完するため，短パルスの送受信時間も必要となる。これに伴い，電子管型に比べ，同一探知範囲であっても PRF が若干低下する。先行して開始していた DRAW の更新整備において，4 号機となる那覇

DRAW では，台風対策のため，更新前においてもドップラー速度の測定範囲（折り返し速度）の規格を±64 m/s 以上（二重 PRF を利用した折り返し補正後）と高めていたが，1-3 号機（関西・羽田・成田）で採用した 5:4 の PRF 比では 58 m/s 程度しか確保できず，120 km の探知範囲を維持しつつ規格を満足させる方策が必要となった。

このため，6:5 の PRF 比を導入し，折り返し速度の向上を図ることとした。PRF 比を上げるとドップラー速度の観測範囲は広がるが，ドップラー速度の観測誤差に脆弱となる。このため，疑似データによるシミュレーションを行い，マイクロバースト等の検出に支障がないことを確認するとともに，気象研究所レーダーによる実観測を行い，HMP 法¹⁶との組合せにより実用上の問題がない

¹⁶ Hybrid Multi-PRI 法：気象研究所で開発された高精度のドップラー速度折り返し補正手法（Yamauchi *et al.*, 2006）。気象庁レーダーではあまねく採用。

ことをあらかじめ確認した。固体素子気象レーダーは高い位相安定度を備えており、これによりドップラー速度の測定精度も高く、問題が生じない結果に繋がったと考えられる。

那覇 DRAW の実績を踏まえ、以降に更新整備した DRAW 並びに一般気象レーダーでは、いずれも 6:5 の PRF 比を採用している。更新前後の折り返し速度について、第 2.5 表にまとめた。更新前の一般気象レーダーでは 53 m/s 程度であったため、台風接近時の低仰角観測や冬期の高仰角観測では折り返しが発生することがあったが、更新後は同等以上の折り返し速度を確保できた。

2.7 その他

ア 可用性・保守性の向上

近年、気象業務における気象レーダーが果たす役割はますます高まっており、これまで以上の可用性向上が求められている。その一方で、保守の負担軽減も実現しなければならない。固体素子送信機の採用により可用性・保守性は大きく向上したが、他の装置についても合わせて改善を図った。

まず、回転機構を有するため保守の手間が多かった空中線装置関係について述べる。同装置内には、回転部においてブラシの接触により電気・信号を伝えるスリップリングと呼ばれる部品があり、定期的な清掃やブラシ交換が必要であった。そこで、ブラシ部分に摩耗の少ない素材を使用したメンテナンスフリータイプのスリップリングを採用した。これにより、15 年程度の長期にわたり清掃やブラシ交換が不要となり、保守性が大きく向上した。また、空中線装置の一次ホーン～ELロータリージョイント間に方向性結合器又はモニタポートを具備し、偏波間位相差の経年変化等に対して定期点検を容易に行えるようにした。さらに、太陽を追尾して、方位角・仰角の校正値を自動算出する機能を設けた。気象レーダーでアンテナの方位角や仰角を校正する手法として、太陽ノイズを利用する手法が広く知られているが、これまでは取付調整時に太陽ノイズを利用した調整を行ってきたものの、経年変化は確認できていなかった。太陽追尾機能の導入により校正が容易

となったため、定期点検項目に組み込み、空中線指向精度の確保に万全を期した。

次に、送信波から受信機を保護するための T/R リミッタについて述べる。更新前は送信電力が大きかったこともあり、送信タイミングのみ保護を行うアクティブタイプが多くのサイトで採用されていた（長田ほか、2010）。しかし、送信タイミング以外に混入する反射波や外来波等に脆弱であり、T/R リミッタの後段にあるダイオードリミッタが故障して受信感度の低下を起すことがしばしばあった。そこで、15 年以上の寿命を持ち、故障リスクも低いパッシブタイプの T/R リミッタを規格に採用した。DRAW でも同種の T/R リミッタが採用されているが、2016 年の導入以降、いずれのレーダーでも故障は発生していない。

その他、汎用計算機は従来同様二重化（手動操作にて数分で切り替え可能なウォームスタンバイ方式）を図ったほか、信頼性が高く長期間の保守が可能な産業用 PC の採用やネットワーク機器の電源冗長化等により、可用性を高めている。また、各装置の異常・警告等のステータス監視はもとより、低雑音増幅器等の異常監視のためパイロット信号による BITE (Built-In Test Equipment) 機能も備え、偏波ごとの信号レベルや偏波間位相差が正常の範囲内にあるかについても常時監視を行っている。

イ 柔軟な観測シーケンス設定

空中線制御装置の機能として、PPI のほか、RHI やセクタ PPI、ラスタスキャン、ポイントスキャンなど、多様な走査が可能な仕組みを有している。これらは通常の観測シーケンスでは実施してないものの、後述するアンテナパターン測定等に利用している。また、事前に登録した観測シーケンスを、観測を停止せず手動又は自動で変更できる機能も新たに設けた。これにより、例えば、探知範囲内に降水エコーがない場合にパルス幅を広げてより遠方まで晴天エコーを検出可能とする晴天モードへ切り替える、といった気象条件に応じた動的なスキャンも可能となり、将来的な拡張性を持たせた。

3. 空港気象ドップラーレーダーへの導入

3.1 システムの概要

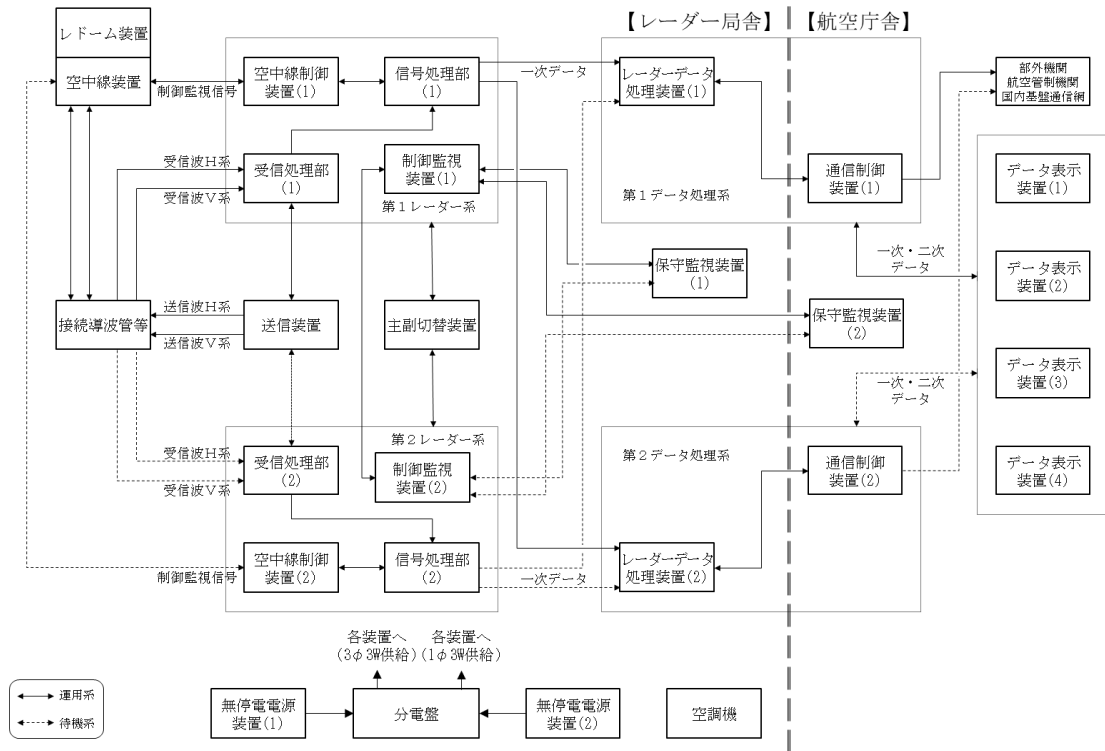
DRAW 更新前後の主要諸元を第 3.1 表に示す。DRAW の特徴を端的に述べると、大型パラボラアンテナによる鋭いビームの実現、高い PRF による高精度なドップラー速度観測、高頻度（～1 分ごと）の低仰角観測、そしてこれらに裏打ちされた低層ウィンドシアアの検出機能にある。高い PRF 採用のトレードオフとして、探知範囲は一般気象レーダーの最大 400 km に比べ 120 km と狭めではあるが、空港周辺の気象監視という目的と照らし合わせると支障はない。また、低層ウィンドシアアの検出を通じた航空機の安全運航支援を、空港ごとの単一のレーダーにより遂行できる必要が

あるため、そのシステムには高い可用性が求められ、一部を除きほとんどの装置を二重化している。DRAW の目的や基本的な考えは石原ほか（2001）に詳しいため、必要に応じて参照されたい。

一般気象レーダーだけではなく、DRAW 更新においても、二重偏波観測機能の導入、固体素子送信機の導入、観測の高頻度化・高精度化など多くの改善を実現した。また、固体素子送信機の導入に伴い、送信装置の構成を見直した。更新前の送信装置は二重系の冗長構成とし、どちらかの系に障害が発生した場合は自動かつ即座に切り替わるホットスタンバイとしていた。一方、固体素子送信機では、2.3 節で述べたとおり、仮に一つの送信モジュールが故障しても、送信電力が若干減少

第 3.1 表 DRAW へ導入したシステムの主要諸元（傍線は更新前からの変更箇所）。

	更新後	更新前
送信周波数	Cバンド (5,330 MHz-5,370 MHz のうち 1 波)	Cバンド (5,250 MHz-5,370 MHz のうち 1 波)
空中線	パラボラ, 直径 7.0 m	パラボラ, 直径 7.0 m
ビーム幅, 空中線利得	0.7°以下, 47 dBi 以上	0.7°以下, 47 dBi 以上
アンテナサイドローブ	-27 dB 以下	-27 dB 以下
交差偏波識別度	35 dB 以上	-
空中線制御	最大 7 rpm (AZ), 仰角-2°-+90°, PPI 又は RHI	最大 6 rpm (AZ), 仰角-2°-+90°, PPI のみ
送信 (増幅) 器	固体素子 (GaN HEMT)	クライストロン
送信電力	水平/垂直偏波とも 5 kW	水平偏波 200 kW
データサンプリング	距離方向: 150 m 方位角方向: 0.7°	距離方向: 150 m 方位角方向: 0.7°
パルス幅	羽田・成田・関西: 64 us (圧縮後 1.56 us) 上記以外: 30 us (圧縮後 1.0 us) ※いずれも短パルス (1.0 us) を併用	1.0 us
パルス圧縮	羽田・成田・関西: 線形周波数変調方式 (チャープ幅 1.4 MHz) 上記以外: 非線形周波数変調方式 (チャープ幅 1.63 MHz) いずれもレンジサイドローブ-55 dB 以下	-
探知範囲	半径 64 km-120 km	半径 120 km
主な観測項目	反射強度 (水平, 垂直) ドップラー速度 (水平, 垂直) 速度幅 (水平, 垂直) 反射因子差 (Z_{DR}) 偏波間相関係数 (ρ_{HV}) 受信信号偏波間位相差 (ψ_{DP}) 偏波間位相差 (Φ_{DP}), 偏波間位相差変化率 (K_{DP}) 地形成分除去情報 平均位相	反射強度 (水平) ドップラー速度 (水平) 速度幅 (水平)



第 3.1 図 固体素子二重偏波 DRAW の機器構成.

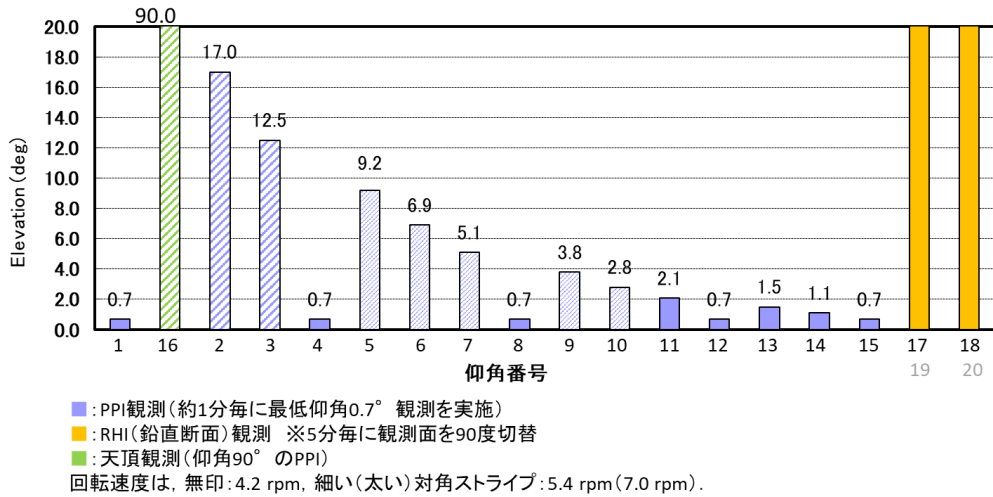
するだけで、運用にはほとんど影響がない。また、予備の送信モジュールも有しており、複数の送信モジュールが同時に故障する可能性は低い。このため、更新後の送信装置は 1 台とし、コスト低減を図った。その他、DRAW 特有の改善点については、3.2 節～3.3 節で解説する。

DRAW の機器構成を第 3.1 図に示す（主要装置の外観写真は付録 1 に示した）。システムは、レーダー局舎及び航空庁舎に分かれて配置されており、前者には空中線（アンテナ）装置、空中線制御装置、送信装置、受信信号処理装置（受信処理部、信号処理部）、制御監視装置、レーダーデータ処理装置といった主要装置が、後者には部内外の各種システムとのデータ送受信を行うための通信制御装置や DRAW の各種データを閲覧可能な表示装置などがそれぞれ設置されている。DRAW は、設置空港において航空管制機関と直接データの送受信を行う都合上、空港内でデータ処理が完結している必要がある。このため、信号処理部で生成した極座標形式の各種一次データを基に、レーダーデータ処理装置において低層ウィンドシアア検出を含む各種二次データが作成され、通信

制御装置において所要のフォーマット変換等が行われたのち（空港気象ドップラーライダー（LIDAR）設置空港では、LIDAR により検出した低層ウィンドシアアとの合成も実施）、航空管制機関や航空会社、DRAW の制御監視等を集約処理する空港気象ドップラーレーダー観測処理システム（ADRAS: Airport Doppler Radar Administration System）に各種データが送信される。ADRAS では、更に空港低層風情報（ALWIN: Airport Low-level Wind INformation）等のプロダクトが作成され、二次データとともに航空気象情報提供システム（MetAir）を通じて利用者に提供されている。

3.2 観測の高頻度化

DRAW では、レーダーから 10 km の位置にある直径 500 m のマイクロバーストを検出できるよう、ビーム幅 0.7°以下となる直径 7 m のパラボラを採用している。このため空中線装置の重量が大きく、これを高速回転させながら仰角遷移させるのは駆動部への負荷が大きい。そこで、更新前の DRAW では、マイクロバースト及びシアアラインを 6 分ごとに検出する通常時用の「空域モード」



第 3.2 図 更新後の DRAW の観測シーケンス (飛行場モード). 所要時間は 5 分.

及びマイクロバーストを 1.2 分ごとに検出可能な擾乱接近時用の「飛行場モード」の 2 種類の観測シーケンスを気象状況に応じて自動で切り替えていた。しかし、空域モード中にマイクロバーストが発生した場合に最初の検出が遅れるおそれがあることや、モード変更により仰角含め観測シーケンスが大きく変わるため、時間的に均質なプロダクト作成が難しいといった課題があった。

この課題解決のため、従来 2 種類あった観測シーケンスを第 3.2 図に示す新しい飛行場モードに一本化し、マイクロバーストの検出に用いる最低仰角の観測頻度を、最短 1.2 分から常時 1 分 (観測シーケンスは約 6 分から 5 分) へ短縮した。これは、固体素子送信機の採用により、回転速度を上げられる見通しが立ったことを受けたものであり、空中線装置の規格も最大 7 rpm (従来は最大 6 rpm) に見直している。さらに、観測シーケンスの最後には RHI 観測も実施し (主要滑走路に平行又は直交する方位を交互に観測)、実況監視の参考データが得られるように工夫した。

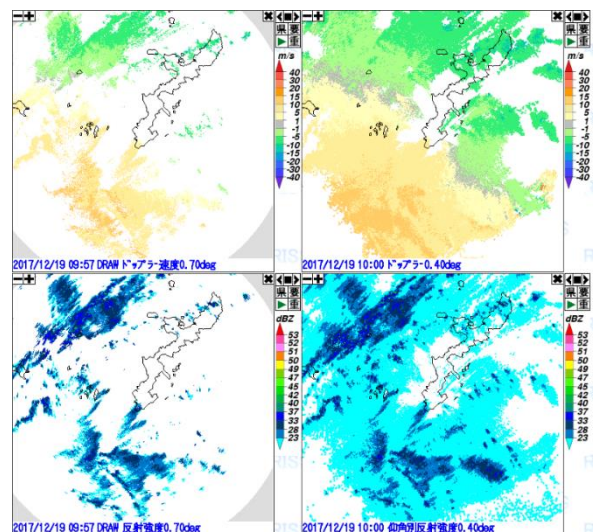
3.3 観測の高精度化

ア 品質管理機能の改善

飛行場モードでは、仰角 0.7° の PPI によりマイクロバーストを約 1 分ごとに検出しつつ、高仰角も含めたボリュームスキャンを 5 分間 (更新前は 6 分間) で実施している。よって、一般気象レーダーのように、複数仰角の合成によりグランドク

ラッタやシークラッタ等を避けるといった対処が困難であり、DRAW ではスキャンごとに厳しい品質管理が要求される。例えば、沿岸部にありシークラッタが混入しやすい那覇 DRAW では、従来、反射強度が小さいエコーを除去するといった対応を行っていたが、弱い降水エコーが大幅に欠落してしまう副作用も見られていた (第 3.3 図)。

これに対して、更新後の DRAW では、選択的 MTI や晴天エコー除去処理等の導入により、データ品質や降水エコー欠落は大きく改善された。



第 3.3 図 更新前の那覇 DRAW (左列) 及び沖縄レーダー (右列) におけるほぼ同時刻の観測データ. (上段) ドップラー速度, (下段) 反射強度. 沖縄レーダーでは、仰角別データに対し弱い反射強度を除去する処理は未実施.

イ 受信感度の改善

2016年に運用開始した3基のDRAW(関西, 羽田, 成田)では, パルス幅 64 us を採用した. これは, 気象研究所レーダーによる LFM の評価¹⁷⁾の結果, パルス幅が長いほどレンジサイドローブを抑圧でき, 反射強度が 50 dBZ を超える降ひょうや強雨時の影響を避けるためには, 60 dB 程度の抑圧が可能なパルス全長 67 us (パルス幅 64 us におおむね相当) の利用が適切とされたためである. ただ, この設定は受信感度には優れているものの, 短長パルスの切替え距離が 12 km となり, 運用開始以降に第 2.10 図で示したような感度差がしばしば見られた. また, 低層ウィンドシアアの検出条件はマイクロバーストで反射強度 5 dBZ 以上, シアアラインで 0 dBZ 以上としており, 空港に近い距離においてできるだけ弱いエコーを検出できることが望ましかった.

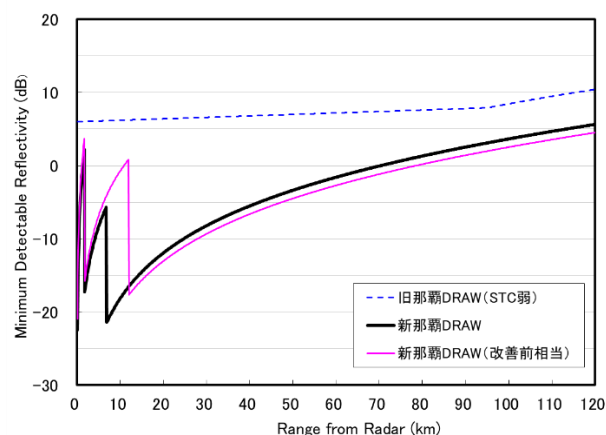
そこで, 那覇空港以降の DRAW では, 低損失ケーブルの採用等により受信ロスを低減させるとともに, 2.3 ウで述べたように NLFM を採用することでパルス幅を 30 us まで狭め, 空港近くの感度を向上させた. NLFM の採用により短長切替え距離は 6.9 km まで縮まり, 短長パルスの感度差はほとんど見えなくなった. また, 短パルス領域の受信時間が縮小したことで PRF も 7 % 向上した.

空港近くの感度向上については, 特に距離 6.9 km-12 km で効果が大きい. 第 3.4 図に示すとおり, 改善前相当(ピンク実線)に比べ, 改善後(黒実線)は約 17 dB 感度が向上し, 弱い降水エコーが検出できるようになった. 距離 6.9 km 以内も, 受信ロス低減の効果で, 若干感度が向上している. 遠方の受信感度は 1 dB 程度低下したが, もともと十分な感度を有しているため, 許容範囲内である. なお, この 1 dB 低下の内訳は, 受信ロス低減及び NLFM に伴うパルス圧縮ロス低減による S/N 向上(+4.1 dB), パルス幅縮小による S/N 低下(-3.3 dB), サンプルング体積縮小による S/N 低下(-1.9 dB) である. 3 点目であるが, 気象レーダーのように連続分布型標的に対するレーダー方程式で

は, 受信信号電力はサンプルング体積の大きさに比例するため, パルス圧縮前のパルス幅が同じであれば, 圧縮するほど S/N は低下する. NLFM 採用により圧縮後のパルス幅が 1.56 us から 1.0 us に縮小したため, この分, S/N が低下している.

固体素子送信機の採用により受信機の飽和対策も改善し, これによる受信感度向上効果も大きい. DRAW では空中線利得や送信電力が大きく, グランドクラッタの混入もしやすいため, サイト近くでは受信機が飽和レベル(約-30 dBm)に達しやすい. このため, 更新前は STC (Sensitivity Time Control) 回路を組み込むことで飽和を防ぎつつ, 所要のダイナミックレンジを確保しており, 例えば弱の設定では, レーダーから 1 km, 12 km, 50 km の減衰量は, それぞれ 40 dB, 18 dB, 6 dB であった. 一方, 固体素子気象レーダーでは, 送信電力減(16 dB 減)により STC が不要となり, 更新前と比べ, 近距離を中心に感度が向上した.

ただし, レーダーからごく近傍ではなお飽和のおそれがあるため, 別の対策を行っている. 従来の STC では偏波パラメータの精度劣化が懸念されるため, 受信系統を約 1:100 に不等分配することで, ほぼ減衰がない受信系(Lo 領域)と約 20dB 減衰した受信系(Hi 領域)の二系統が得られる仕組みが備わっている. 切替距離は, サイトの環境に応じて調整しているが, 1-2 km 程度としている. 第 3.4 図において, ごく近傍の距離にも感度の不連続が生じているのはこの仕組みによる.



第 3.4 図 那覇 DRAW の受信感度.

¹⁷⁾ https://www.mri-jma.go.jp/Research/evaluation/Assignment/assign_fy2013_25.html, 2023.12.18 閲覧.

4. 二重偏波情報の利用による観測精度改善

4.1 偏波パラメータの概要

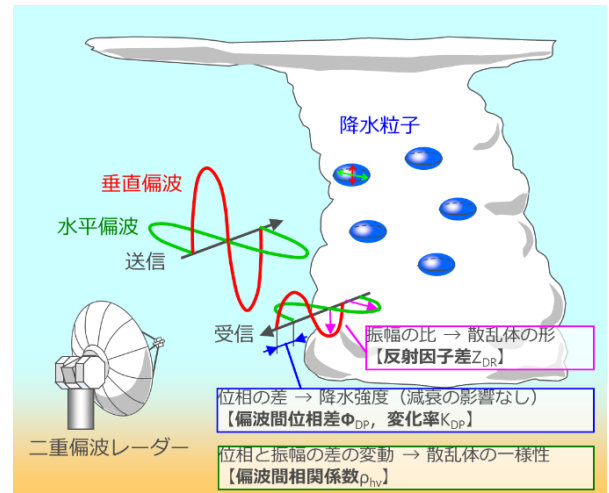
二重偏波気象レーダーでは、従来の単偏波気象レーダーで得られる水平偏波反射強度 (Z_H)、水平偏波ドップラー速度 (V_H)、水平偏波速度幅 (W_H) に加え、垂直偏波反射強度 (Z_V)、垂直偏波ドップラー速度 (V_V)、垂直偏波速度幅 (W_V)、反射因子差 (Z_{DR})、受信信号偏波間位相差 (ψ_{DP})、偏波間相関係数 (ρ_{hv}) といった新たなパラメータを数多く得ることができる。また、 ψ_{DP} の距離変化率からは、偏波間位相差変化率 (K_{DP}) が得られる。これらのパラメータを活用することで、

- ・非降水エコー判別による高度な品質管理
- ・高精度の降水強度推定
- ・降水粒子判別

を実現できる。本節では、特に重要な偏波パラメータ (第 4.1 図) について概説する。

●反射因子差¹⁸ (Z_{DR}) (単位: dB)

- ・水平偏波と垂直偏波の反射強度の差。
- ・散乱体の縦横比を表し、球形に近いほど値が 0 dB に近く、扁平になるほど値が大きい。雨滴の場合、空気抵抗の影響を受け、粒径が大きいほど扁平 (回転楕円体) となり、値が増加する。
- ・降水粒子の形態判別や粒形分布の情報が得られ、品質管理や降水粒子判別、降水強度推定に有効。
- ・同じ粒子形状であっても、氷や雪では比誘電率が小さいため、0 dB に近くなる (Ryzhkov and Zrnica, 2019)。
- ・仰角が高くなると、扁平な粒子であっても、レーダーからの見かけの形状が変化し、値が小さくなる。一般気象レーダーの最高仰角である 25° の場合、真横から見たときと比べて 0.8 倍程度の大きさとして観測される。



第 4.1 図 二重偏波気象レーダーで得られる主な偏波パラメータの概要。

●受信信号偏波間位相差 (ψ_{DP}) (単位: °(deg))

- ・水平偏波と垂直偏波の位相変化の差。
- ・扁平な雨滴が多数存在する場合、水平偏波による位相の遅れが垂直偏波の場合に比べて大きくなる。このため、強雨域を通過するほど位相差が大きくなる。
- ・位相情報のため、降雨減衰や地形による部分遮蔽の影響を受けない。
- ・ひょうなど大粒径の粒子では、ミー散乱により誤推定が生じることがあり、この影響 (後方散乱位相差 δ) や推定誤差 ϵ を除去する必要がある。つまり、観測された ψ_{DP} と真の偏波間位相差 Φ_{DP} は次式の関係にある。

$$\psi_{DP} = \Phi_{DP} + \delta + \epsilon \quad (3)$$

●偏波間位相差変化率 (K_{DP}) (単位: deg/km)

- ・ ψ_{DP} (Φ_{DP}) の距離変化率。
- ・雨滴粒子の縦横比と雨水量 (集中度) を表し、理論的には下式で表わされる (Bringi and Chandrasekar, 2001)。

$$K_{DP} = \left(\frac{180}{\lambda}\right) 10^{-3} CW(1 - \bar{r}_m) \quad (4)$$

¹⁸ 反射因子差によく似たパラメータとして、 Z_{DP} (Golestani *et al.*, 1989) が提案されている。 Z_{DP} は真値で表現した Z_H と Z_V の差分を対数表記したものであり、雨滴と氷粒子が混在する場合に、氷粒子の影響を除去する用途に用いられることがある (Bringi and Chandrasekar, 2001)。

ここで、 λ はレーダー波長 (m)、 C は定数 (≈ 3.75)、 W は雨水量 ($g\ m^{-3}$)、 \bar{r}_m は質量重み付き平均した雨滴の縦横比である。

- ・位相情報のため、降雨減衰や地形による部分遮蔽の影響を受けない。
- ・粒径分布の変化による影響を受けにくく、強雨時の降水強度推定に特に有効。
- ・(送信波長が長いほど)弱い雨や氷相の粒子に対して感度が悪く、利用が難しくなる。

●偏波間相関係数 (ρ_{hv}) (単位:なし)

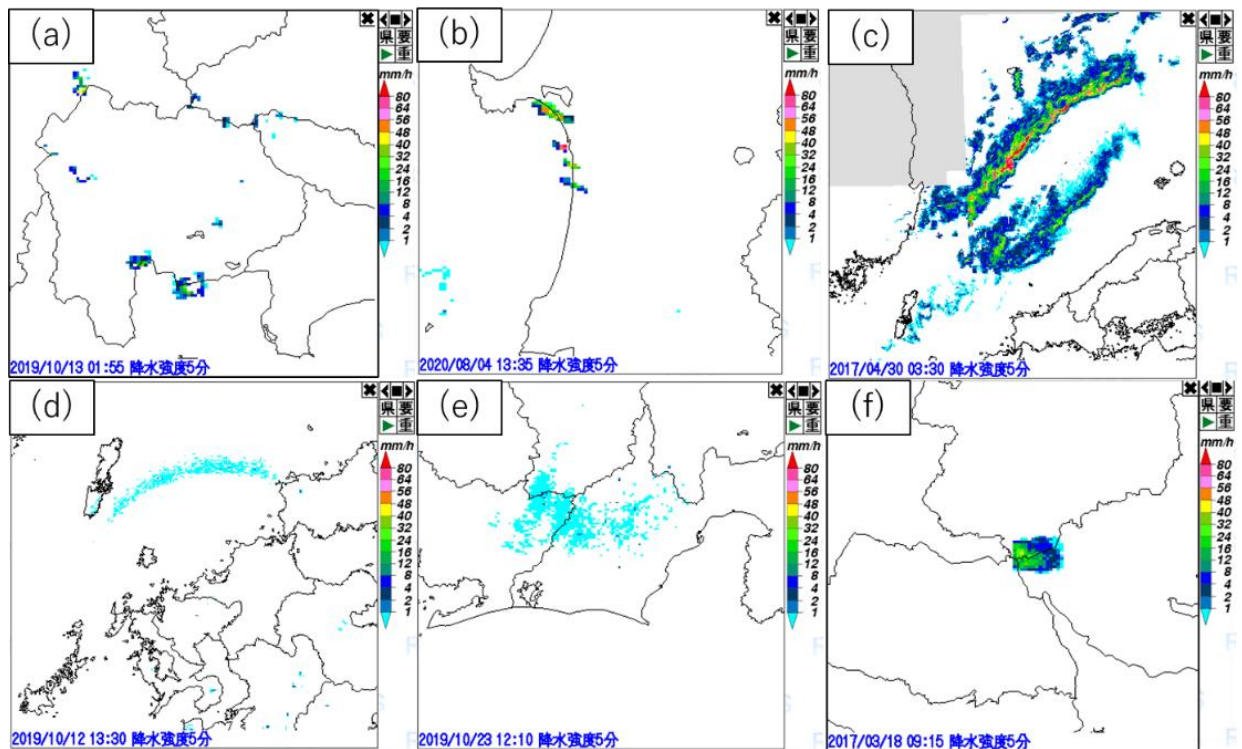
- ・水平偏波と垂直偏波の受信信号の相関係数。
- ・観測ボリューム内の散乱体の一様性を表し、1に近いほど一様性が高い。
- ・品質管理、降水粒子判別に有効。

4.2 非降水エコー除去による品質改善

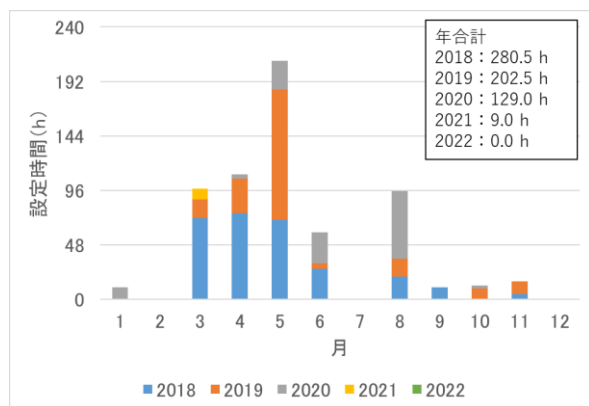
従来の単偏波気象レーダーでは、しばしば映り込む非降水エコーに長く悩まれてきた。第 4.2 図に顕著な非降水エコーの例を示す。解析雨量に悪影響を及ぼす非降水エコーが見られた場合に

は、処理範囲内のエコーを全て無効化する「強制 NO-ECHO」と呼ばれる処理を現業当番者が手動で ON に切り換えていたが、探知範囲内に降水エコーも存在する場合には、見逃しを防ぐ観点から切り換えは行わず、関係部署への注意喚起に留めていた。

これに対し、二重偏波気象レーダーでは、2.6 節ア及びビイで述べた除去手法の高度化により、これらの課題がほぼ解消する。第 4.3 図に、福岡レーダーにおける更新前後の強制 NO-ECHO を実施した時間の推移を示す。更新前は、年によりばらつきはあるものの年間 100-300 時間も実施していたが、更新後 (2021 年以降) はほぼ実施されなくなったことが分かる。2021 年 3 月に 9 時間だけ実施例があるが、これは更新後の信号処理パラメータ調整が不十分であったためにグラウンドクラッタの消え残りが生じたことによるもので、現在はパラメータ再調整により解消している。なお、福岡レーダー以外では、更新後の強制 NO-ECHO 処理の実施時間はいずれも 0 である (図略)。



第 4.2 図 単偏波気象レーダーで観測され、レーダー合成図に映りこんだ顕著な非降水エコーの例。(a) 降雨後の強風時に見られるグラウンドクラッタの消え残り、(b) 風車によるクラッタ、(c) 異常伝搬によるシークラッタ、(d) 強風時のシークラッタの消え残り、(e) 晴天エコー、(f) 野焼きエコー。

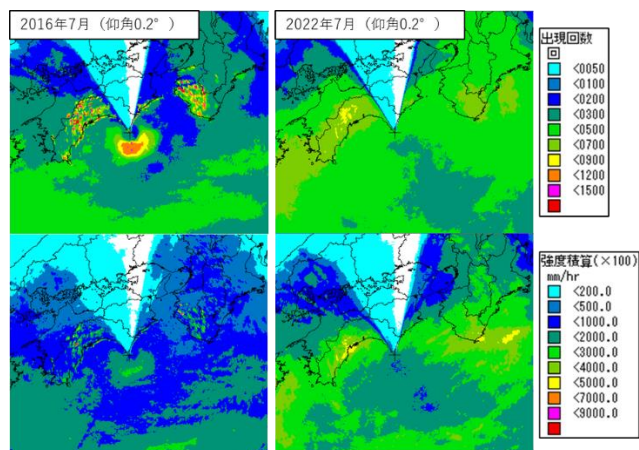


第 4.3 図 福岡レーダーにおける強制 NO-ECHO の実施時間。

ア グラウンドクラッタ

地形や構造物等からの反射であるグラウンドクラッタは速度成分を持たないため、MTI によっておおむね除去可能であるが、降雨後の強風時に山地で長時間消え残る事があり（揺れる樹木又は水滴等によるものと推定される.），解析雨量において過大値が算出されてしまうことがしばしばあった。また、近年、再生可能エネルギーの導入推進に伴い、日本の各地に大型の発電用風車が建設されてきている。風車のレーダー観測への影響は主に両者間の距離に依存するため、レーダー近傍への風車の設置を避けることで影響を回避しているが、レーダーから遠方の風車であっても異常伝搬時に低仰角のスキャンに映り込み、誤った解析雨量やキキクルが算出されてしまうことがある。風車のブレードは回転に伴うドップラー速度を持つため、既存の MTI では除去が困難であり、風車クラッタに相当する電力を減算するクラッタマップにより過大値の出現抑制をこれまでも試みてきたが、副作用として同等の電力を持つ降水エコーも抑圧してしまうため、強雨の見逃しに繋がってしまうおそれがあった。

しかし、二重偏波気象レーダーでは、偏波パラメータを活用した選択的 MTI 及び晴天エコー除去により、これらの課題をおおむね解決できた。室戸岬レーダーの仰角 0.2°におけるエコー出現回数及び強度積算の分布を第 4.4 図に示す。レーダー更新前の 2016 年 7 月に、和歌山県や高知県西部に見られる出現頻度と強度積算が大きい領域



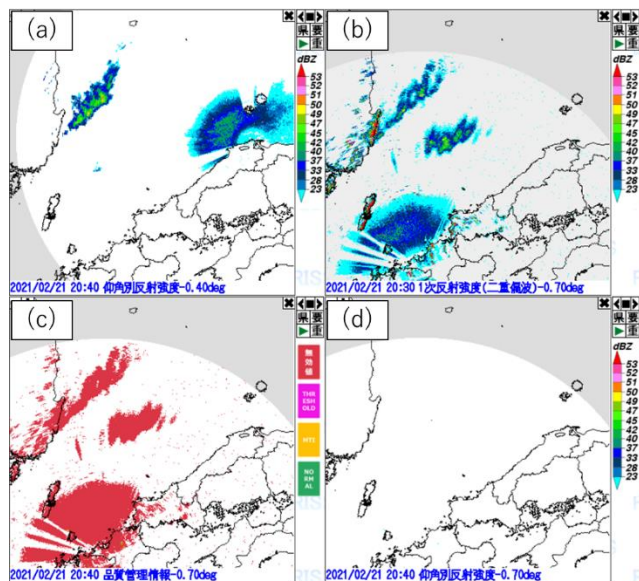
第 4.4 図 室戸岬レーダーの仰角 0.2°におけるエコー出現回数と強度積算の分布. 左列：更新前（2016 年 7 月）、右列：更新後（2022 年 7 月）。

は、グラウンドクラッタの消え残りに起因するものと考えられる。これに対し、更新後の 2022 年 7 月には、これらが解消していることが分かる（なお、サイト南側の海上に現れていたシークラッタの影響も解消している）。これにより、更新後は仰角 0.2° の観測結果を利用できる範囲が拡大したといえる。より地上に近い仰角が利用可能となることで、降水強度推定の精度向上にも寄与する。

風車クラッタについても、更新後は選択的 MTI によりほぼ無効化できており、更新前に設定していたクラッタマップは一部サイトを除き解除した。これまでのところ、解析雨量の過大値に繋がるような目立った事例は見られないが、ときおり消え残りが生じることもある。どのような条件においてこのような消え残りが生じるのか、また、信号処理パラメータ再調整による対処が可能かどうかなどについては、今後調査が必要である。

イ シークラッタ

気象レーダーの仰角は、山上のサイトであっても最も低くて-0.7°程度であり、ビーム中心が海面に当たらない。しかし、ビームの下方やサイドローブで海面を捉え、シークラッタとして観測されることがしばしばある。ビーム幅や海上風速等にもよるが、仰角 1°程度以上ではシークラッタが映りにくいため、一般気象レーダーのように複数仰角による観測を行っていれば、レーダーサ



第 4.5 図 異常伝搬発生時の松江レーダー及び福岡レーダーの各観測結果. (a) 松江レーダーの仰角 -0.4° による Z_H , 並びに福岡レーダーの仰角 -0.7° による (b) 無効化前の Z_H , (c) 品質管理情報, (d) 無効化後の Z_H .

イト付近は高めの仰角を採用することで、レーダー合成図へのシークラッタの混入を避けることが可能である. ただし、先述したように DRAW ではこのような対処が困難であり、反射強度の閾値を引き上げることで対応していた.

このように従来の気象レーダーでもある程度の緩和措置はできていたが、その例外として異常伝搬によるシークラッタが挙げられる. 第 4.5 図に、異常伝搬発生時の松江レーダー及び福岡レーダーの観測結果を示す. 単偏波方式 (当時) の松江レーダーでは、仰角 -0.4° の観測において、サイトから 100 km 以内にシークラッタが現われているほか、300 km 遠方の山陰沖でも 40 dBZ 以上の強いエコーが見られる (第 4.5 図(a)). 時刻の近い松江の高層気象観測では、地上付近 (~高度 100 m) に修正屈折指数の逆転層が見られ、接地型ラジオダクトが存在していた (図略). この結果、負仰角のビームがこの高度に到達するとダクト内にトラップされ、遠方まで伝搬し、海面にビーム

が当たるような状況が生じていたと考えられる.

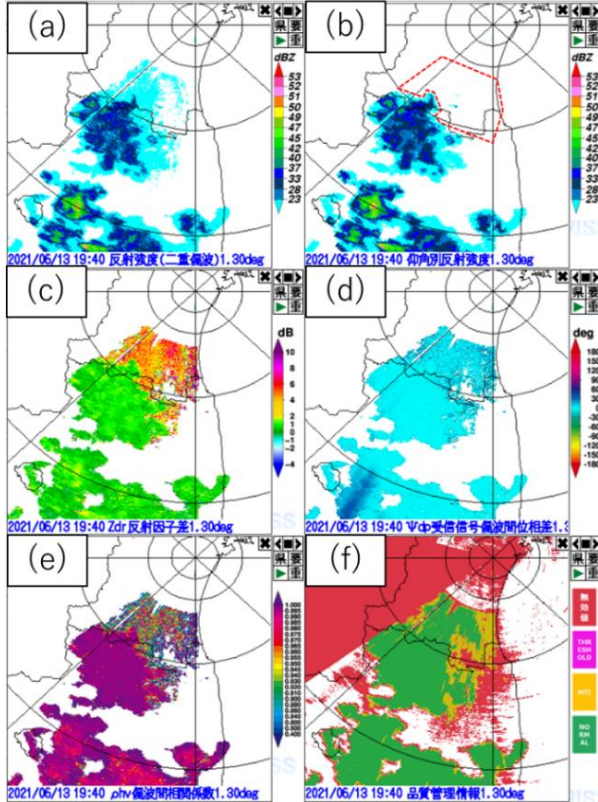
一方、二重偏波方式の福岡レーダーでは、同様にサイト付近のシークラッタや遠方の強エコーが映っているものの (第 4.5 図(b)), いずれも不良判定されており (同図(c)), 最終的な反射強度データ (同図(d)) では無効化されている. これは、いずれのエコーも ψ_{DP} のばらつきが大きく、選択的 MTI により除去されたためである. ドップラー速度や ρ_{hv} 等の偏波パラメータでは、近距離のシークラッタも遠方の強エコーも同様の特徴が見られることから (図略), いずれもシークラッタが映り込んだものと推定される. 先述の福岡レーダーにおける強制 NO-ECHO の実施回数が激減したのも、この異常伝搬によるシークラッタを除去できるようになったところが大きい.

ウ 晴天エコー (昆虫・鳥等)

気象レーダーでは、降水粒子が存在しない晴天時にも陸上を中心にエコーが検出されることがある. これらはエンゼルエコーとも呼ばれ、C バンドの場合¹⁹, 偏波パラメータの特徴などからそのほとんどが昆虫や鳥などの空中を浮遊する生物に起因すると考えられている (Wilson *et al.*, 1994 など). また、一部のエコーは海上を移動する様子も見られ、生物の渡りを示唆している. 実際、渡り鳥の監視手段として、気象レーダーを含む各種レーダーを用いた例が多数報告されている (ヨーロッパでは Dokter *et al.* (2011), 日本では Minda *et al.* (2008) など).

いずれの晴天エコーも、シークラッタ同様に出現範囲が広くかつ速度成分を持つため MTI で除去できない特徴を有するが、実際に上空に散乱体があるため、仰角を高くしても映り込む点でシークラッタ以上に厄介な存在である. 従来は、レーダー合成図に映り込むのを防ぐため、合成処理において反射強度 15.3 dBZ 以下の弱いエコー (降水エコーを含む.) を一律除去せざるを得なかった. また、大規模に出現した場合には、第 4.2 図 (e)

¹⁹ 波長の長い S バンドでは、ウィンドプロファイラと同様に、ブラッグ散乱による大気乱流エコーもしばしば観測される. 乱流は等方性のため、 Z_{DR} がほぼ 0 dB という特徴を持つ.

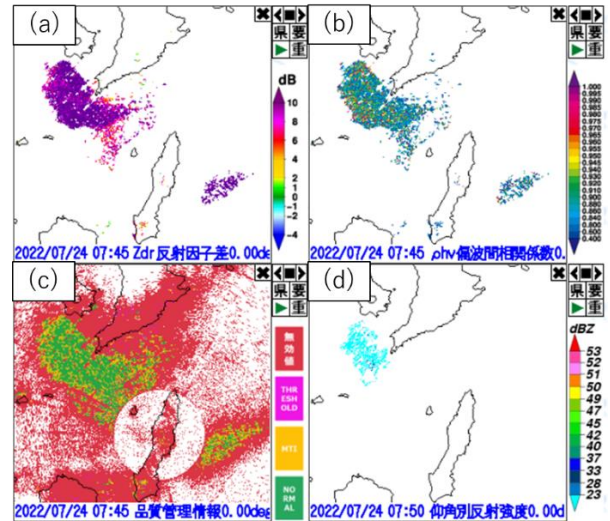


第 4.6 図 仙台レーダーによる晴天エコーの観測とその除去例. (a) Z_H (晴天エコー除去前), (b) Z_H (晴天エコー除去後), (c) Z_{DR} , (d) ψ_{DP} , (e) ρ_{hv} , (f) 品質管理情報. (b)図中の赤破線は、晴天エコーが除去されたエリアを示す.

のように消え残りが生じることもあった.

だが、二重偏波情報を活用すれば、効果的に晴天エコーを除去でき、昆虫と鳥の区別もある程度可能である。これは、両者の形状の相違に加え、Cバンドでは、小型の昆虫はおよそレイリー散乱、鳥はミー散乱となることから、偏波パラメータの特徴に違いが生じるためである。例えば、Zrnich and Ryzhkov (1999) は、Sバンド気象レーダーの観測結果を基に、昆虫では後方散乱位相差 δ が小さく Z_{DR} が大きい一方、鳥(小型の鳴禽類)はその逆の特徴を持つことを報告している。移動速度が小さく、上空でほぼ風に乗って流されているとみなせる昆虫と、移動速度を無視できない鳥を区別することは、ドップラー速度の利用の際に有用である。

そこで、昆虫エコーについては、反射強度のみを除去し、ドップラー速度は除去しない処理とした。第 4.6 図に仙台レーダーによる観測と除去例

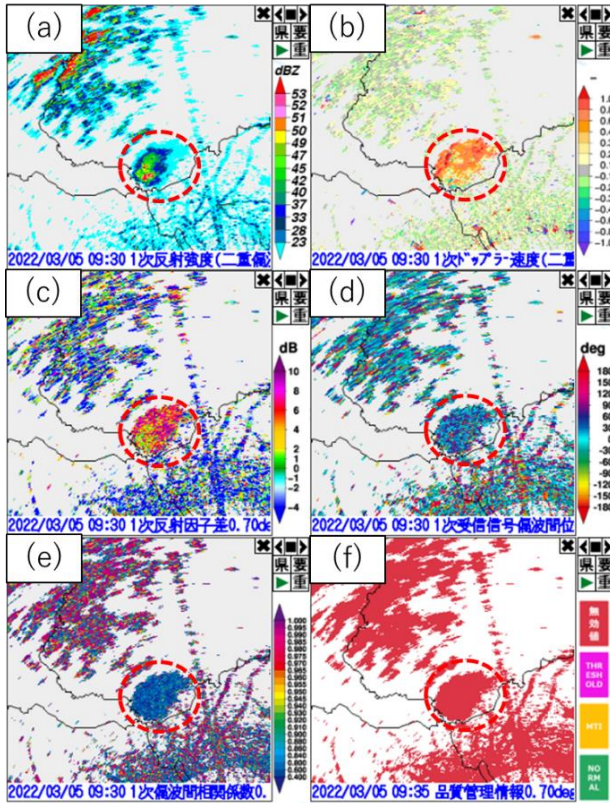


第 4.7 図 種子島レーダーによる晴天エコーの消え残り例. (a) Z_{DR} , (b) ρ_{hv} , (c) 品質管理情報, (d) Z_H (晴天エコー除去後).

を示す。除去前の反射強度では全て降水エコーのように見えるが(同図(a))、一部のエコーは日没後に陸上で急速に広がる様子を見せ、2 dB以上の大きな Z_{DR} を持つとともに(同図(c))、 ρ_{hv} も若干低い傾向があることから(同図(e))、小型の昆虫によるものと考えられる。 ψ_{DP} のばらつきがあまり大きくない(δ が小さい、同図(d))ため、選択的MTIでは不良値判定されていない(同図(f))が、同図(b)のとおり 2.6 イで示した晴天エコー除去処理により反射強度データが除去されている。

一方、鳥エコーについては、ドップラー速度も含め、全てのパラメータが除去される。沿岸部にあるレーダーでは、日没とともに海上に向かって晴天エコーが移動する様子がしばしば春秋に見られる(図略)。移動時間・方向や $S(\psi_{DP})$ がやや大きい特徴を鑑みると、渡り鳥によるものと推測される。これらのエコーは、選択的MTIにより除去されることが多いが、消え残った場合でも、晴天エコー除去処理(対反射強度)や折り返し補正処理(対ドップラー速度)により除去される。

ただし、ときおり晴天エコーの消え残りが見られることもある。第 4.7 図に、種子島レーダーで見られた晴天エコーを示す。このエコーは、日の出(05:30頃)の後、佐多岬周辺及び種子島北部から移動しながら海上に大きく広がっていた。

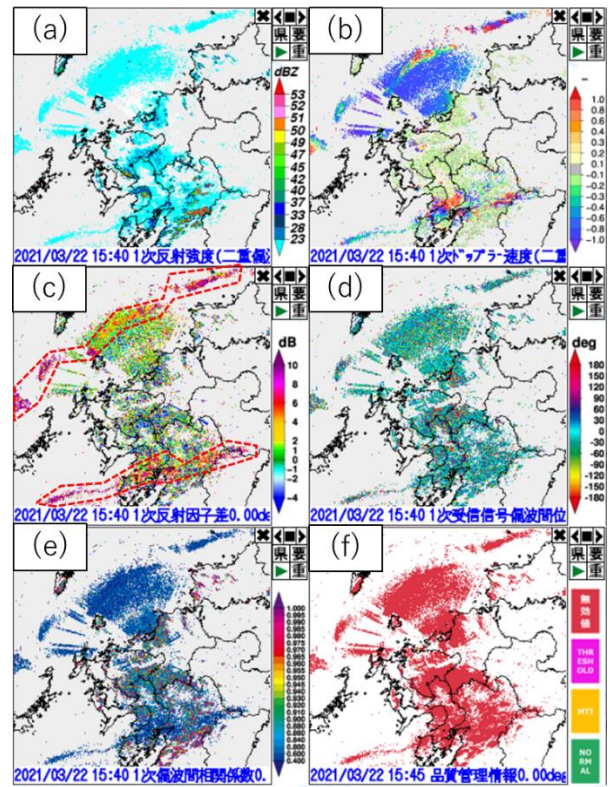


第 4.8 図 東京レーダーによる野焼きエコー（赤破線内）の観測とその除去例. (a) Z_H , (b) V_{NH} , (c) Z_{DR} , (d) ψ_{DP} , (e) ρ_{hv} , (f) 品質管理情報. (a)～(e)はいずれも無効化前のデータ.

$S(\psi_{DP})$ が小さめで選択的 MTI により除去されず、また、反射強度が 15 dB-25 dB と晴天エコーにしてはやや高めの領域があり、晴天エコー除去処理が強く掛からなかった結果、消え残りが生じた。 Z_{DR} が 10 dB 以上あり、また、 Z_{DR} の方位依存性が見られない（小型の昆虫・鳥の場合、その胴体が主要な散乱体と考えられ、方位によって Z_{DR} が増減する特徴が見られる（Melnikov *et.al*, 2015).）ことから、胴体が扁平な円筒形に近い昆虫の群れや翼開長の大きな大型の鳥類等の可能性があるが、詳細は不明である。

エ 野焼き・チャフ

野焼きは、草地を維持するために主に春先に各地で行われ、渡良瀬遊水池や阿蘇などが有名である。野焼きにより発生し上空に巻き上げられた灰は、しばしば気象レーダーで観測される。第 4.8 図に、東京レーダーで捉えた渡良瀬遊水池の野焼



第 4.9 図 福岡レーダーによるチャフエコー（赤破線内）の観測とその除去例. (a) Z_H , (b) V_{NH} , (c) Z_{DR} , (d) ψ_{DP} , (e) ρ_{hv} , (f) 品質管理情報. (a)～(e)はいずれも無効化前のデータ.

きエコー（無効化前のデータ）を示す。エコーは 08:30 過ぎに出現し始め、それから 1 時間後の様相である。53 dBZ を超える高い反射強度が見られることから、大きな灰が混じっているものと考えられる。エコーの分布も対流性のエコーに近く、従来紛らわしい存在でもあった（日程は事前に公表されることがほとんどのため、警戒はできた）。一方、偏波パラメータを見ると、 ψ_{DP} のばらつきが大きく、選択的 MTI で無効化されていることが分かる。また、 Z_{DR} が大きく、 ρ_{hv} が小さいことから、様々な形状を持つ扁平な灰が上空に巻き上げられていると考えられる。中でも ρ_{hv} の低さ（おおむね 0.5 以下）は特徴的で、Melnikov *et al.* (2008) は、S バンド二重偏波気象レーダーによる野火の観測結果から、 ρ_{hv} を下げる三つの要因、①散乱体の形状が不規則、②散乱体の向きがランダム、③粒径分布が広い、の全てが野火によるブルーム内に存在する可能性が高く、 ρ_{hv} の低さが Z_{DR} や ψ_{DP} の

ばらつきを増大させていると報告している。

チャフは、軍用又は気象等の観測用に航空機から散布された電波散乱体である。第 4.9 図に、福岡レーダーで捉えたチャフと考えられるエコー（以下、単に「チャフ」という。）を示した。同図にはグラウンドクラッタ、シークラッタ、チャフがそれぞれ映っており、いずれも ψ_{DP} が大きいいため選択的 MTI により無効化されているが、その他のパラメータでは特徴に違いも見られる。グラウンドクラッタはドップラー速度が 0 に近い一方、シークラッタとチャフは非 0 のドップラー速度となっている（かつそれぞれ異なる速度を持つ、同図 (b)）。また、チャフは Z_{DR} が 5 dB 以上の値となっており、扁平な形状を有することが分かる（同図 (c)）。また、野焼きエコー同様、 ρ_{hv} がかなり低い特徴も見られる（同図 (e)）。

野焼きエコーもチャフエコーも風に流されているため、ドップラー速度としては利用価値がある（梶原・大野，2015）。現状は ROPS において全て無効化しているが、他のクラッタと区別し、利用可能とできるかどうかは今後の課題である。

オ サンノイズ

太陽から放射される電波は非常に広帯域であり、C バンドも含まれるため、アンテナが太陽方向を向くと、直線状のエコー（サンノイズ、サンスパイク）として観測される。太陽の位置は正確に導出でき、その視直径も約 0.53° とビーム幅と同程度以下であるため、アンテナの方位・仰角調整によく利用されるほか、近年は電波天文分野で観測された太陽フラックスの値を利用し、受信系の校正にも用いられることもある（Gabella *et al.*, 2016）。太陽電波は無偏波であるため、 Z_{DR} が 0 dB、 ρ_{hv} が低い、 ψ_{DP} がランダムといった特徴がある。従来の気象レーダーでは朝夕の太陽高度が低い時間帯にしばしばサンノイズがレーダー合成図やエコー頂高度に取り込まれることがあったが、二重偏波気象レーダーでは、 $S(\psi_{DP})$ が大きい特徴から選択的 MTI により無効化される。

カ サイドローブ

原理上、空中線装置の指向方向以外にも微弱な電波が送受信されるのは免れない。このようなアンテナサイドローブは位置標定の誤差やデータ品質の劣化を招くため、従来から、メインローブに対して -26 dB 以下（DRAW では -27 dB 以下）の規格を設け、その抑圧を図ってきた。しかしながら、高い反射強度を持つグラウンドクラッタやひょうに対しては、サイドローブが消え残ることがあった（観測部観測課観測システム運用室，2009）。例えば -26 dB のサイドローブレベル（電波の送受信を合わせて -52 dB の抑圧）を確保できていても、60 dBZ のひょうがあると、方位方向に最大 8 dBZ の微弱なサイドローブエコーが消え残る。また、固体素子気象レーダーでは、距離方向にレンジサイドローブが出現する問題にも直面する。こちらでも規格を -60 dB 以下（アンテナサイドローブ -30 dB 以下に相当）とすることで抑圧を図っているが、高い反射強度に対しては消え残りが生じうる。

二重偏波情報は、このようなサイドローブの除去にも有効である。固体素子気象レーダーでは、ひょうのような高い反射強度が観測された際、方位方向にアンテナサイドローブが、距離方向にレンジサイドローブがそれぞれ出現しうるが、いずれも偏波間でサイドローブ特性に相違があることから、 ρ_{hv} が低く、 ψ_{DP} もランダムとなり、選択的 MTI 等で無効化できる。なお、ひょうの発生時、距離方向に TBSS (Three-Body Scatter Spike; Lemon, 1988) と呼ばれる特異エコーが出現することがこれまでであったが（観測部観測課観測システム運用室，2009）、地面での反射時に偏波間の相関が崩れることから、同様に除去されると考えられる。

キ 弱い降水エコー

従来の気象レーダーでは、上記で述べた各種非降水エコーの混入を避けるため、レーダー合成図のプロダクト作成時には反射強度に対し、15.3 dBZ (0.33 mm/h の降雨に相当) の閾値を設けていた。レーダー合成図では、地形等の影響を避けるため主に 2 km 付近の高度を利用していたことと相まって、エコー頂が低く、弱い降雨や降雪エコー

ーが除去されてしまうことがあった。更新後の二重偏波気象レーダーでは、各種品質管理により非降水エコーの除去が可能となったため、閾値を 5 dBZ (0.1 mm/h の降雨に相当) に引き下げた。これにより、弱い降水エコーを映しやすくなった。

4.3 降水強度推定の精度向上

第 1 章で述べた従来の単偏波気象レーダーにおける課題のうち、各種クラッタの混入については、4.2 節で述べてきたようにほぼ解消した。残りの課題である降雨減衰と粒径分布の変動への対応について、本節で述べる。

二重偏波気象レーダーでは、粒径分布の影響を受けにくい K_{DP} と降水強度 R の経験式 (K_{DP} - R 法) が一般的に用いられる。反射強度 Z は粒径の 6 次モーメントであるのに対し、Atlas and Ulbrich (1977) による雨滴の終端速度 V_t と等価体積直径 D の近似式 ($V_t = 3.78D^{0.67}$) を導入すると、 R は D の 3.67 次モーメントに比例する。両者の次数が大きく異なるため、粒径分布が変わると Z - R 関係が変化する。第 4.10 図に単一粒径を仮定した場合の Z - R 関係を示すが、粒径と数濃度の違いにより、同じ Z であっても R が変化することが分かる。一方、 K_{DP} は近似的に D の 4-5 次モーメントに比例することが知られており (Van Lier-Walqui *et al.*, 2016 など)、 R に近い次数となることから、 Z - R 法より粒形分布の変化の影響を受けにくく、これまでより高精度の降水強度推定が可能となる。

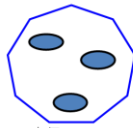
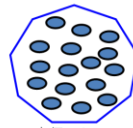
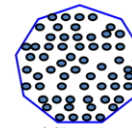
また、 K_{DP} は降雨減衰の補正にも効果を発揮する。 K_{DP} を用いた Z の降雨減衰の補正式を第 5 式に示す (Bringi and Chandrasekar, 2001)。

$$Z_{CH} = Z_H + 2\alpha \int_0^r (K_{DP}(s))^b ds \quad (5)$$

Z_{CH} : 減衰補正後の Z_H

α, b : 定数²⁰ ($\alpha = 0.073, b = 0.99$)

ψ_{DP} の変化量が小さい弱い雨では、S/N が低いため ψ_{DP} がノイズの影響を強く受け、その微分値で

種別	大粒だが少数の雨	中間的な雨	小粒だが多数の雨
雨粒の大きさと数	 直径=4mm 数濃度=2.4	 直径=2mm 数濃度=156.3	 直径=1mm 数濃度=10000
反射強度	40 dBZ	40 dBZ	40 dBZ
降水強度	3 mm/hour	14 mm/hour	71 mm/hour

第 4.10 図 単一粒径を仮定した場合の、 Z と R の関係の一例。

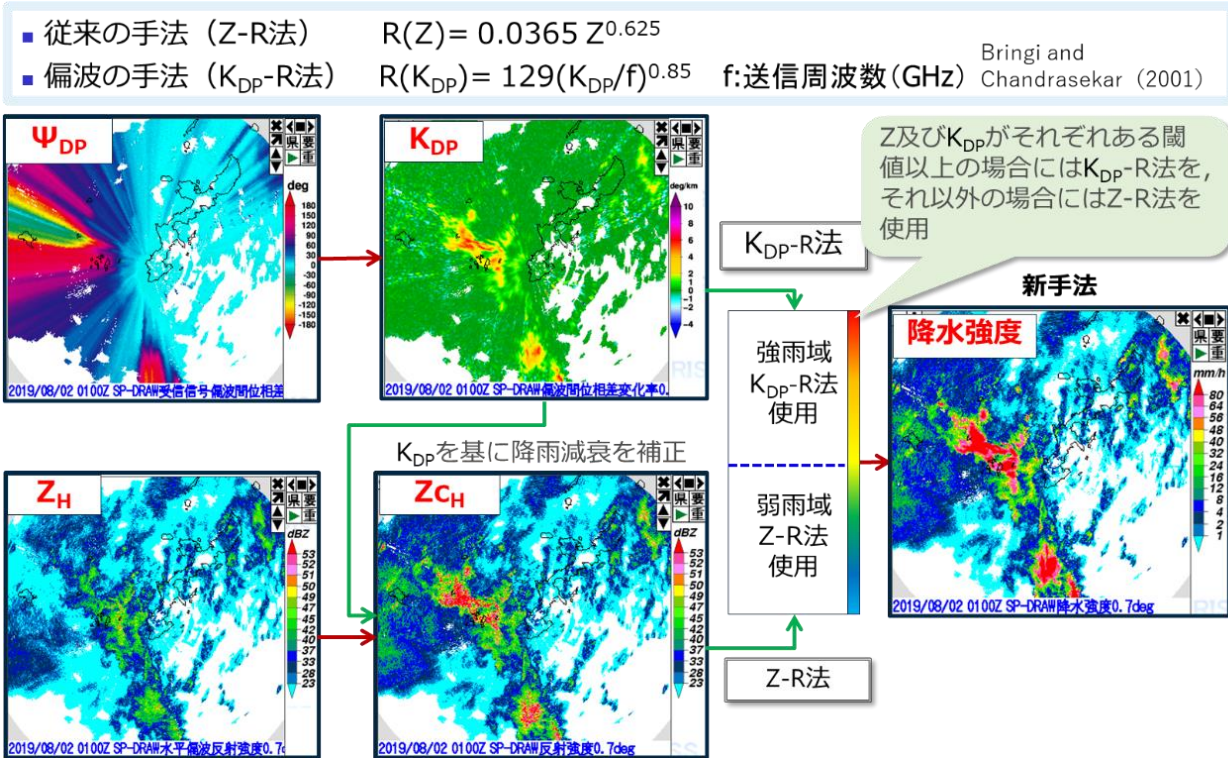
ある K_{DP} の測定精度が大幅に低下する。このため、弱い雨では K_{DP} による降水強度推定は困難であり、従来の Z - R 法を用いる必要がある。ただし、このときに用いる Z として降雨減衰を補正したものをを用いることで、降水強度推定精度の更なる向上が可能である。

このように、二重偏波気象レーダーでは、 K_{DP} - R 法と降雨減衰補正した Z - R 法を最適に組み合わせることで、高精度の降水強度推定を実現できる。具体的な流れを第 4.11 図に示した。強い雨の領域は K_{DP} - R 法により、また、弱い雨の領域は減衰補正後の Z_{CH} を用いた Z - R 法により、それぞれ降水強度を求める。この強い雨、弱い雨は、減衰補正後の Z_{CH} と K_{DP} の二つの閾値により切り替えられ、二つの閾値をともに満たすとき、 K_{DP} - R 法を、それ以外では Z - R 法を採用する。第 4.11 図に示すとおり、降雨減衰の影響を受けた Z_H からは、沖縄本島西海上のエコーは強いところでも 50 mm/h 程度 (Z_H が 50 dBZ) と推定されていたところ、偏波パラメータを利用することで、80 mm/h を超える強雨域が広範囲にあることが分かる。

K_{DP} - R 法と Z - R 法の切替閾値は、できる限り K_{DP} - R 法の利用範囲を確保しつつ、融解層等の影響を受けにくいように設定した。利用可能な K_{DP} の下限値は、 K_{DP} の計算手法やレンジビン間隔、 ψ_{DP} の推定誤差の大きさにもよるが、第 2.4 表の机上計算結果と照らし合わせても、0.2 deg/km (C バンドでは約 8 mm/h 相当²¹) 程度と考えられる。DRAW

²⁰ C バンド (5.5 GHz) における散乱シミュレーションから得られた平均的な値 (Bringi and Chandrasekar, 2001) であり、粒径分布や雨滴の水温にも依存する。

²¹ 4.1 節第 4 式のとおり、同じ K_{DP} であってもレーダーの送信周波数が高いほど R は小さくなる性質がある。

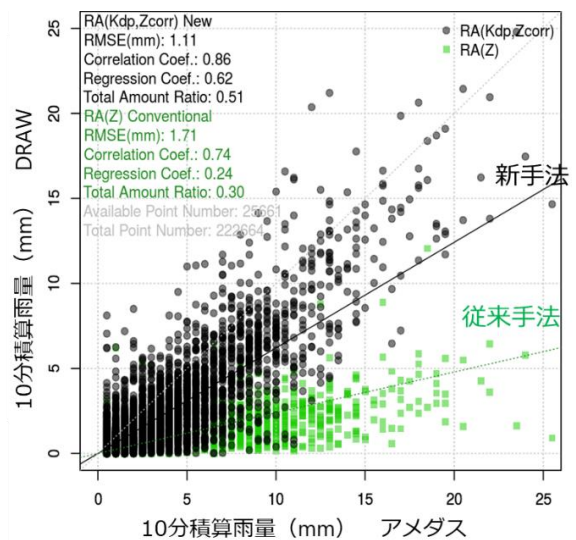


第 4.11 図 偏波パラメータを利用した降水強度推定の流れ。

では、2016年3月に導入した2サイト(羽田・関西)を対象として翌年度に評価を行い、 K_{DP} の計算区間を1.5 km(この区間で最小二乗法により傾きを求める.)とした上で、 K_{DP} -R法を採用する条件を「 $K_{DP} > 0.6 \text{ deg/km}$ & $Z_{CH} > 38 \text{ dBZ}$ 」とした。 0.6 deg/km の K_{DP} は約20 mm/hの雨に相当し、やや高めの間値としているが、融解層において後方散乱位相差 δ より誤った K_{DP} が算出され、ノイズ状の降水強度が顕著に現れないよう考慮した結果である。 K_{DP} の計算に先立ち、 δ を除去した Φ_{DP} を求めるためHubbert and Bringi (1995)によるFIRフィルタを掛けているが、完全な除去は難しい。より小さい降水強度でも K_{DP} -R法を利用できるようにするためには、 δ 等のノイズに対してロバストな Φ_{DP} や K_{DP} の算出手法が必要となる。

以上のとおり K_{DP} -R法とZ-R法を組み合わせた手法(以下、新手法という。)で求めた10分積算雨量の推定結果を地上雨量計と比較したところ、従来のZ-R法のみを用いた手法(以下、従来手法という。)に比べ誤差が減少した。羽田DRAWにおける比較検証結果の例を第4.12図に示す。同図の作成に当たり、1時間雨量が30 mmを越える事

例を中心に、深い対流性降水、台風通過による降水、前線通過による降水の各事例を、また、強雨以外の精度を確認する目的で層状性降水及び降雪事例を解析対象として選定した(計22例)。こ



第 4.12 図 羽田 DRAW 及びアメダスからそれぞれ求めた 10 分積算雨量の散布図。羽田 DRAW の積算雨量は、1 分ごとの最低仰角 (0.7°) を利用し、雨滴の落下を考慮してアメダス観測値から 3 分ずらして積算した。

第 4.1 表 第 4.12 図における従来手法と新手法の統計指標.

$$\text{※改善比} = (\text{新手法}) / (\text{従来手法})$$

<5mm	従来手法	新手法	改善比
RMSE	0.96	0.85	0.89
相関係数	0.65	0.67	1.03
回帰係数	0.30	0.47	1.57
総雨量比	0.33	0.45	1.36
有効点数	24584	24584	
>5mm	従来手法	新手法	改善比
RMSE	7.42	3.74	0.50
相関係数	0.45	0.76	1.69
回帰係数	0.20	0.71	3.55
総雨量比	0.21	0.69	3.29
有効点数	903	903	

これらの事例に対し、新手法及び従来手法の降水強度からそれぞれ 10 分積算雨量を求め（ただし、どちらの手法も雨量計による補正は行わない）、アメダス（観測範囲内の 77 地点）の 10 分積算雨量と比較したところ、回帰係数が 0.24 から 0.62 へ大幅に向上した。また、10 分積算雨量 5 mm を境としてグループ分けし、それぞれの統計指標を求めた（第 4.1 表）。その結果、10 分積算雨量が 5 mm を超える強雨では、新手法を用いることで、従来手法に対し新手法の誤差（RMSE）が 1/2 に抑えられるとともに、総雨量比も 2 割から 7 割に大きく改善した。特に、RMSE の改善率、相関係数、回帰係数、総雨量比の上位半数は「激しい雨」（1 時間雨量 30 mm-50 mm）以上の事例で占められており、強雨に対してより大きく改善する傾向が見られた（表略）。

この結果を受け、DRAW では、2018 年 10 月から羽田・関西・成田において本手法をルーチン利用開始し、その後更新が行われたサイトについても、運用開始時から同手法を利用している。DRAW では、即時的なデータ配信が求められることから、雨量計による降水強度の補正は困難であり、地上雨量計に対する過小評価が過去にも報告されていたが（比嘉ほか、2009）、 K_{DP} の利用により大幅な改善が実現した。

また、一般気象レーダーにおいては、 K_{DP} 算出手

法等を改良したうえで、2022 年 2 月より高解像度降水ナウキャストにおいて K_{DP} -R 法の利用を開始した（配信資料に関する技術情報第 580 号）。解析雨量への導入については、下流のプロダクトが多数あることから、特性を評価してから導入を進めることとしており、その端緒として 2022 年 3 月から速報版解析雨量において東京レーダーに限り K_{DP} -R 法の利用を開始している（配信資料に関する技術情報第 586 号）。また、2023 年 5 月には 2020-2022 年度に整備した 9 サイトについても速報版解析雨量への利用を開始した。速報版解析雨量においては、他機関の雨量計データの集信が間に合わず精度が低下しやすい直近 10 分間の積算時のみ K_{DP} -R 法を利用しているが、引き続き開発や評価を進め、正規版解析雨量を含め、今後更なる導入を進める計画としている。

5. 偏波パラメータの校正・モニタリング

5.1 校正・モニタリングの必要性

気象レーダーにより降水の分布を正確に捉えるためには、降水強度等の推定精度だけでなく、降水域の位置精度を確保する必要がある。従来、前者については、反射強度の測定精度の確保と雨量計による補正により担保しており、システムの送受信ロスを実測し、レーダー方程式を通じて受信信号電力からより確からしい反射強度の導出に努めてきた。後者については、空中線指向精度と測距精度の確保が必要であり、古くは周囲の高い山などを利用した調整(校正)が行われてきた。

従来の気象レーダーにおけるプロダクトのメッシュサイズは1-数 km 程度であり、局地的な降水や海上を除けば、雨量計による補正がおおむね可能という前提のもとでは校正やモニタリングへの要求は厳しくなかった。これまでの一般気象レーダーの校正・モニタリング手法は第 5.1 表に示すとおりで、機器設置時には要素ごとの校正を行ってきたものの、設置以降は総合的かつやや定性的なモニタリング手法に留まっている。ただ、この手法や頻度でも実用上困ることはなく、また、エコー出現回数や積算強度の変化にはサイト周辺における樹木等の成長の影響が明瞭に現われ、環境整備にも活用してきた。

しかし近年、レーダープロダクトはより高精度化、高解像度化が求められるようになったことで、校正に求められる要件は一変した。まず、二重偏波情報の活用によりレーダー単体でも降水強度を高精度に推定でき、かつ粒子判別の特徴量(例: ひょうやあられの判別)としても直接利用されることから、これまで以上に正確な反射強度が必要となった。次に、 Z_{DR} や ψ_{DP} といった適切な校正が

必要な偏波パラメータが増えた。第 2.4 表で示したとおり Z は 1 dB、 Z_{DR} は 0.2 dB と高い精度が求められており、経年変化も考慮するとこの実現と維持は容易でない。実際に、機器障害 (TR リミッタの故障) により数 dB の Z_{DR} バイアスが生じた事例も報告されている (Frech and Hubbert, 2020)。

さらに、レーダープロダクトの高分解能化に伴い、位置標定に対する要求精度も以前より高まっている。例えば、方位角の 0.1° の誤差は、150 km 先で約 260 m の誤差となり、250 m メッシュのプロダクトでは1メッシュずれることになる。このため、サンノイズや鉄塔・ビル等を利用したより高精度な手法が必要となる。

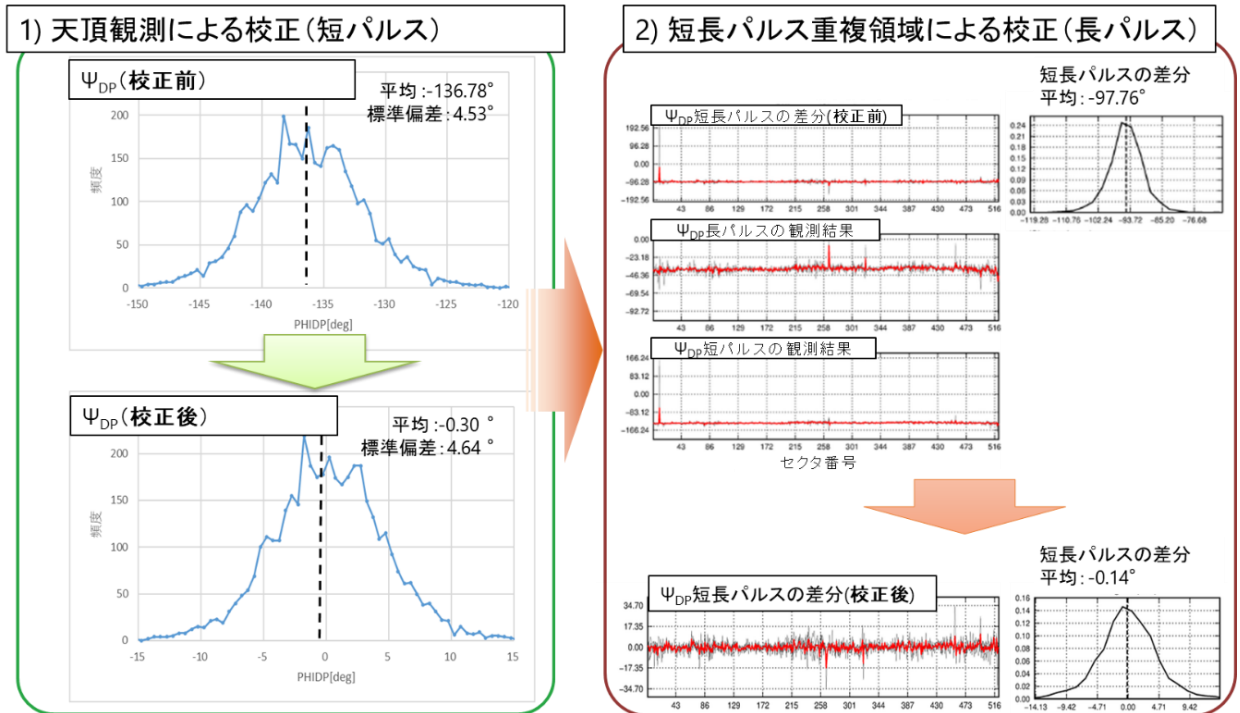
このように近年のレーダープロダクトの改善には、二重偏波気象レーダーの有効な利活用が不可欠であり、従来型レーダーにはない非常に高い精度での校正や品質監視の確立に向けた取組が各国で精力的に進められている。これらの知見の共有及び効果的・効率的な手法の確立を目的として、2017年、2019年、2021年の3回にわたり、気象レーダーの校正及びモニタリングに関するワークショップが開催され(第1-2回はドイツ気象局主催、第3回はフランス気象局主催)、気象庁を含む多くの気象機関が参加した。この第1回ワークショップでは、校正及びモニタリングを次のとおり定義しており、本稿でもこれに即して解説する。

校正 (Calibration) : 要求されるデータ品質が得られるよう、(レーダー) システムのセットアップやオフセットの設定を行うこと。

モニタリング (Monitoring) : システムの故障発見や新しいオフセット値設定のため、(自動的に) (統計的に) システム性能をチェックすること。

第 5.1 表 これまでの一般気象レーダーにおける校正・モニタリング手法と頻度。

分類	要素[単位]	校正		モニタリング	
		主な手法	頻度	主な手法	頻度
分布	距離[m]	・ハードターゲット (地形 → 鉄塔・ビル)	設置時のみ	・グランドクラッタレベルの時系列変化 ・ノイズレベルの時系列変化 ・グランドクラッタ位置と地図の比較 ・エコー出現回数、積算強度	毎週 毎週 毎月 毎月
	方位角[°]	・サンノイズ	設置時のみ		
	仰角[°]	・サンノイズ	設置時のみ		
状態	反射強度[dBZ]	・レーダー定数の設定 (各種ロス測定等)	設置時のみ		
	ドップラー速度 (速度幅) [m/s]	・なし (校正不要)	-	・なし	-



第 5.1 図 固体素子気象レーダーにおける ψ_{DP} の校正の流れ (検査成績書の図を加工して使用)。

5.2 Z_{DR} , ψ_{DP} バイアスの校正

Z_{DR} 及び ψ_{DP} の最も簡便かつ一般的な校正手法は、仰角 90° の PPI 観測、いわゆる天頂観測を用いるものである。雨粒を真下から観測するため、粒径 (扁平率) によらず雨滴は円形として映り、 Z_{DR} は 0 dB 、 ψ_{DP} は 0° になることが期待される。実際には、方位方向に波数 2 の正弦波状の変動が見られることが多く、天頂付近のレドームパネル接合部の影響などがその原因として報告されている (Figueras i Ventura *et al.*, 2021)。一方で、 360° の周回平均によりこの変動はキャンセルできるため、天頂観測の結果から主に融解層以下の降雨層を抽出し、その周回平均値をバイアスとしてオフセットすることで校正が実現する。

ただし、固体素子気象レーダーでは、天頂観測のみでは校正が完了しない。2.3 節目で述べたとおり、固体素子気象レーダーでは長短二つの異なるパルスの観測結果を距離により使い分けている。一般気象レーダー、DRAW とともに長パルス領域の開始距離は最小でも $6\text{-}7 \text{ km}$ であり、天頂観測により融解層以下の雨を抽出することは難しい。校正が適切に行われていないと、観測領域の境界に強度や位相差の不連続が生じ、誤った降水強度

算出に繋がってしまう。

そこで、長パルス領域の校正は、天頂観測で校正済みの短パルス領域を基準として行う。第 5.1 図に ψ_{DP} を例とした校正の流れを示す。長短パルスは、数レンジビンを重複して観測している領域があり、どちらも IQ データとして収録されている。一般気象レーダーではこれを利用して簡易にオフセット量を算出可能なツールを整備した。同図の例では、長短パルスに平均約 98° の差があり、この量を長パルスから差し引くことで校正が完了する (なお、同図において ψ_{DP} 短パルスの観測結果が 0° 付近となっていないのは、オフセット前の値を示しているため)。

5.3 Z_{DR} , ψ_{DP} バイアスのモニタリング

天頂観測及び長短パルス重複領域を利用した校正は、その精密性において比肩するものがないが、何らかの変化 (バイアス) が生じた場合に速やかに検出する目的には不向きといえる。なぜなら、天頂観測はサイト直上に降雨がある場合かつ短パルス領域のみ有効なためである。DRAW では、運用開始当初、たびたびバイアス等が発生し、その対応に悩まされてきた。2016 年-2018 年に発生

第 5.2 表 DRAW における主なバイアス発生事例 (2016 年-2018 年).

発生 (覚知) 時期	サイト	系	要素	影響
2016年6月	羽田	1,2	Z_{DR}	長短パルス境界での段差
			Ψ_{DP}	全体的に30-40° の正バイアス
2016年7月	羽田	2	Z_{DR}	長短パルス境界での段差
2016年7月	関西	2	Z_{DR}	長短パルス境界での段差
2017年3月	羽田	1	Z_{DR}	長パルス領域に負バイアス
2017年3月	関西	1,2	Z_{DR}	長短パルス境界での段差
			Ψ_{DP}	全体的に20° の正バイアス
2017年3月,5月	成田	2	Z_{DR}	不自然な時間変動 (2スキャン分のみ)
2017年9月	関西	1,2	Ψ_{DP}	全体的に顕著な正バイアス
2017年9月	羽田	1	Z_{DR}	短パルス領域で負バイアス
2017年9月	成田	1,2	Z_{DR}	短パルス領域で負バイアス
			Ψ_{DP}	全体的に負バイアス
2018年3月	羽田	2	Z_{DR}	全体的に負バイアス
2018年4月	羽田	2	Ψ_{DP}	HI領域で約60° の正バイアス
2018年8月	関西	1,2	Ψ_{DP}	全体的に10-20° の正バイアス

第 5.3 表 有効データの抽出条件. 以下の全てを満たすピンを抽出する. $S(Z_{DR})$, $S(\rho_{hv})$ は, Z_{DR} , ρ_{hv} のテクスチャで, 周辺約 2 km 四方のレンジピンの中央絶対偏差を表す.

有効データ条件 (Z_{DR})			有効データ条件 (Ψ_{DP})		
$ Z_{DR} $	<	5.0	$ Z_{DR} $	<	5.0
0.99	< $\rho_{hv} \leq$	1.0	ρ_{hv}	>	0.95
10	< $Z_H \leq$	15			
$S(Z_{DR})$	<	0.3			
$S(\rho_{hv})$	<	0.01			

したバイアス事例を第 5.2 表に示す. 機器調整作業に起因するものもあれば, 観測中に突然生じたものもあり, バイアス発生 of 準即時的な把握は急務であった. そこで, Z_{DR} や Ψ_{DP} が 0 に近くなる弱い降水等を低仰角の PPI 観測から抽出・利用したモニタリング手法を開発し, 試行している.

手法の概要を以下に示す.

①有効データの抽出

有効データの抽出条件を第 5.3 表に示す. Z_{DR} については, テクスチャも利用して晴天エコーを除き, 弱い降水のデータのみを抽出した. 一方, Ψ_{DP} については, より多くのデータが活用できると判断し, 有効データの条件を緩めている.

②統計値の出力

1 分ごとの最低仰角 (0.7°) の観測データから①の条件を満たすピンを全て抽出し, 5 分ごとに統計値 (5 分間の全ての最低仰角の有効データを対象とした平均, 標準偏差, 有効データ数) を出力する. Z_{DR} は短・長パルス領域でいずれも 0 dB 程度, また, Ψ_{DP} は短・長パルス領域が連続 (境界を

またいで差が 0°でない)と, 誤った K_{DP} が算出される)であることを確認しやすいよう, 次のとおり出力対象を若干変えている.

Z_{DR} : 長パルス領域, 短パルス Lo 領域, Hi 領域 (Lo 及び Hi 領域については, 3.3 節イを参照.)

Ψ_{DP} : 長パルス領域, 短・長パルス領域の差 (外側-内側), Lo・Hi 領域の差 (外側-内側)

③品質管理と結果の描画

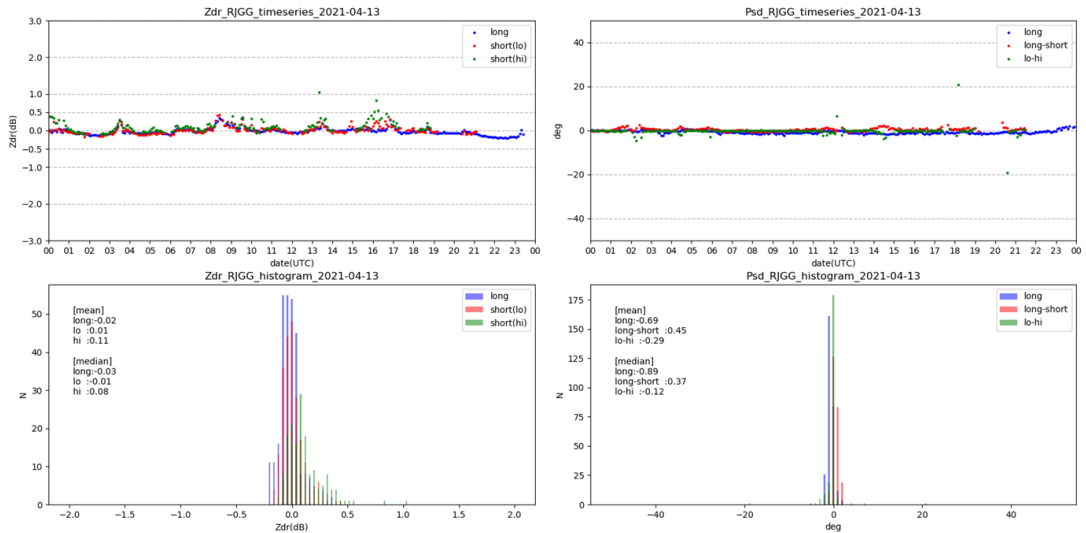
次に示す品質管理により外れ値等を除外した上で, ②の結果を時系列プロット及びヒストグラムの形で準リアルタイムに描画する.

Z_{DR} : 有効データ数 10 未満又は標準偏差 1 dB 以上のデータを除外.

Ψ_{DP} : 有効データ数 50 未満又は標準偏差 20°以上のデータを除外.

まず, 中部国際空港の DRAW における一日分の描画例を第 5.2 図に示す. この例では, いずれの領域においても, Z_{DR} は 0 dB 前後, Ψ_{DP} は 0°付近を推移しており, バイアスは見られない. なお, 弱い降水を抽出しているとはいえ, 粒子が完全に球形とはいえない場合もあり, 事例 (粒径分布)により Z_{DR} が 0.2 dB-0.3 dB 程度となることもある.

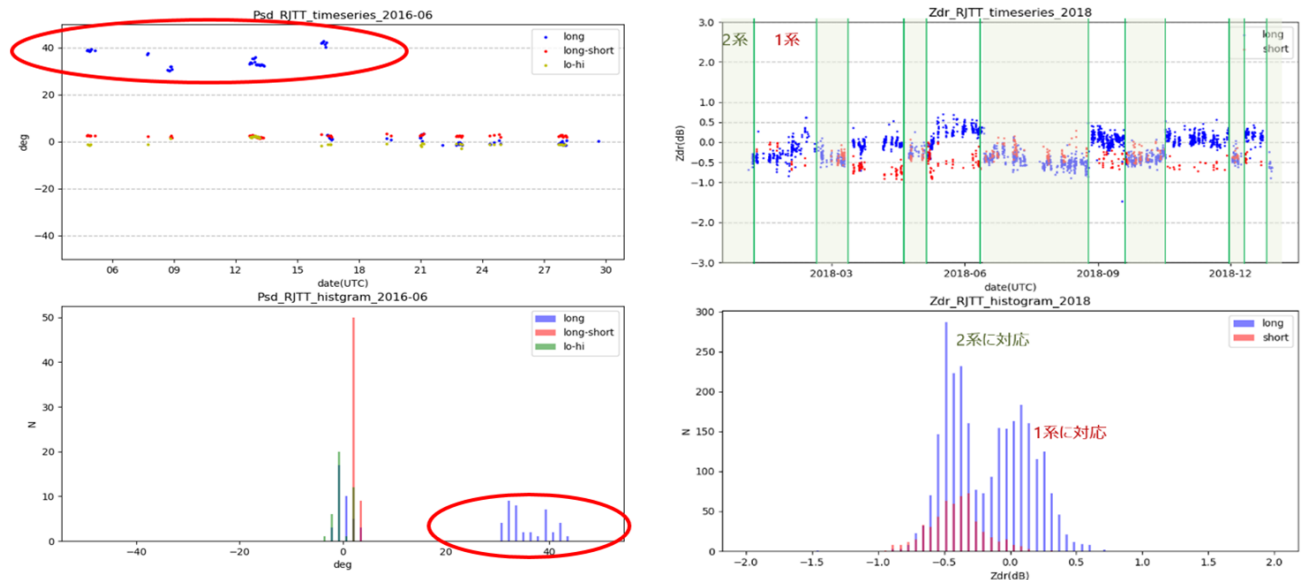
次に, 実際にバイアスが発生した事例に適用した描画例を示す. 第 5.3 図 (左) は, 2016 年 6 月 2 日の羽田 DRAW 夜間作業において, 垂直偏波の種信号ケーブルを交換したことにより経路長が変わり Ψ_{DP} バイアスが発生したときのもので, 6 月 16 日夜間に再調整を行うまで, 長・短パルスともに 30°-40°の Ψ_{DP} バイアスが生じていたことが分かる. また, 第 5.3 図 (右) に, Z_{DR} バイアスの事例



第 5.2 図 2021 年 4 月 13 日 1 日分の時系列データ (上段) 及びヒストグラム (下段) の表示例 (中部 DRAW)。

左列： Z_{DR} による結果。長パルスは青，短パルス Lo 領域は赤，短パルス Hi 領域は緑で示す。

右列： ψ_{DP} による結果。長パルスは青，長短パルスの差は赤，Lo-Hi 領域の差は緑で示す。



第 5.3 図 バイアス発生時の時系列データ (上段) 及びヒストグラム (下段) の表示例 (羽田 DRAW)。

左列：2016 年 6 月の ψ_{DP} による結果。表示は第 5.2 図右列と同様。

右列：2018 年の Z_{DR} による結果。表示は第 5.2 図左列と同様だが，加えて上段では 1 系運用を白背景，2 系運用を緑背景として示す。

第 5.4 表 2019 年 9 月-12 月の各サイトにおける Z_{DR} 、 ψ_{DP} の中央値。-0.2 dB+0.5 dB の Z_{DR} を太字とした。

Z_{DR} 中央値 (dB)	羽田		成田		那覇	
	1系	2系	1系	2系	1系	2系
長パルス	0.16	-0.52	-0.05	0.00	0.24	-0.23
短パルスLo	-0.53	-0.24	-0.58	-0.43	0.30	-0.07
短パルスHi	-0.70	-0.18	-0.64	-0.48	0.30	0.15

ψ_{DP} 中央値 (°)	羽田		成田		那覇	
	1系	2系	1系	2系	1系	2系
長パルス	-1.50	-3.14	-0.69	-0.74	0.35	0.66
短パルス-短パルス	1.16	-1.04	0.03	-0.61	-0.11	0.25
Lo-Hi	0.34	0.66	0.00	2.12	0.35	-0.80

を示す。運用系を切り替えた際に長パルスにおけるバイアスの傾向が変わり、ヒストグラムでも二峰性として現れている。さらに、 Z_{DR} 、 ψ_{DP} の中央値を運用系ごとに算出した結果を第 5.4 表に示す。粒径分布による変動も考慮し、 Z_{DR} の許容範囲を仮に $-0.2 \text{ dB} + 0.5 \text{ dB}$ とすると、これを超えているサイト・系が多く見られ、校正が必要と考えられる。一方、 ψ_{DP} は、全サイトで長パルス領域のバイアス、各領域間の差とともに $\pm 5^\circ$ 以内に収まっており、顕著なバイアスは見られていない。

以上のとおり、開発したモニタリング手法により、バイアス発生（解消）の容易な検出とバイアス量の概算把握が可能となった。バイアス発生を検出した際は、5.2 節で述べた手法により正確なオフセット量を求めることが望ましい。

5.4 空中線特性検証装置を用いた校正

ア 装置の目的と概要

高精度な二重偏波情報を得るために重要な点を再整理すると、次の三つが挙げられる。

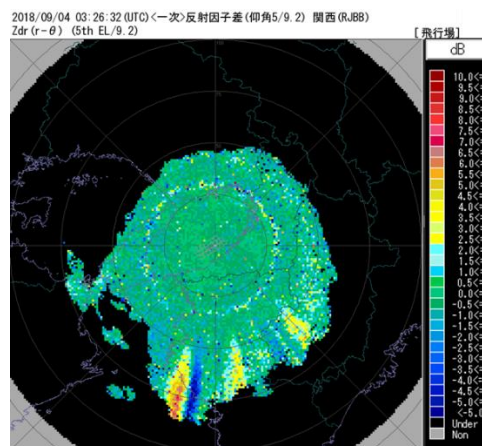
- ・アンテナの二重偏波性能は十分高いか。
- ・水平・垂直偏波の送信位相が揃っているか。
- ・反射強度（送受信ロス）の測定が正確か。

1 点目の必要理由は、偏波パラメータの推定精度を確保するためである。これは、2.2 節イで述べたとおり、XPD や偏波間の指向精度の差に係る仕様を設けていることで、十分担保されているように見える。しかし、製作時の工場検査では、水平面と垂直面の一次元アンテナパターンのみを実測しており、例えばステーのある 45° 面の確認は実施していない。また、レドームの影響もシミュレーション結果しか考慮できていない。よって、レーダーサイトへの設置後に二次元のアンテナパターンとそれに基づくアンテナの性能指標を実測する必要がある。

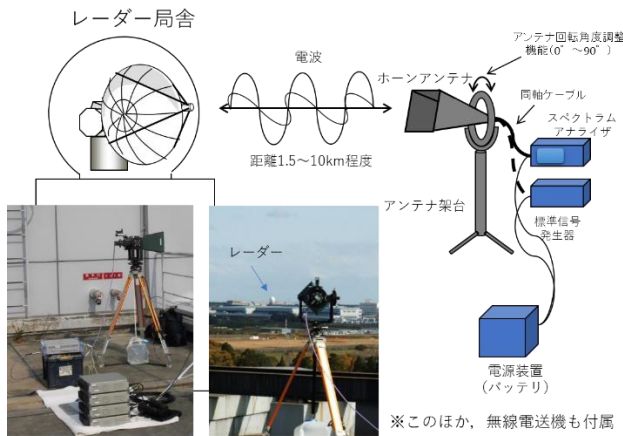
2 点目の必要理由は、偏波間の混信（クロスカップリング）による Z_{DR} バイアスの発生を防ぐためである。STAR 方式では、空中線装置の一次ホーン直前にある OMT で水平偏波と垂直偏波が合成され、空間に放射される。このとき、送信位相差が 0° の場合は偏波面 45° の直線偏波に、送信位

相差が 90° の場合は円偏波となるが、送信位相差が大きくなる場合（特に円偏波時）には、クロスカップリングにより Z_{DR} に大きなバイアスが生じることが報告されている（Hubbert *et al.*, 2010a, b）。雷雲内の電界により非 0° の様な傾斜角をもった氷晶が多数存在し、Depolarization（偏波解消）が起こる際にこのバイアスが発生すると考えられており、正負の Z_{DR} が放射状に交互に出現する特徴がある。実際、運用中に突如 ψ_{DP} バイアスが発生した（後日、測定したところ、送信位相差が 42° ずれていた）後の関西 DRAW で、同種の Z_{DR} バイアスが融解層高度より上で見られている（第 5.4 図）。これを防ぐため、送信位相を調整可能な機構をレーダー本体部にあらかじめ設けており、適切な手順により送信位相差を調整する必要がある。

3 点目の必要理由は、5.1 節で述べたとおり、これまで以上に正確な反射強度の測定が必要となったためである。レーダー方程式の各パラメータのうち、送信電力、空中線利得、ビーム幅、距離はほぼ正確に得ることができるが、送受信ロスの正確な測定は容易ではない。送受信ロスは、送受信の経路上を測定が容易な区間に分割し、それぞれ測定したロス値を積算して求めるのが一般的であるが、測定困難な部位における設計値との相違といった不確実性が残るからである。不正確な送受信ロスは反射強度のバイアスを招き、高度なデータ利用に支障を来たしかねないため、校正を行う必要がある。



第 5.4 図 関西 DRAW で見られたクロスカップリングによる Z_{DR} バイアス。仰角は 9.2° 。



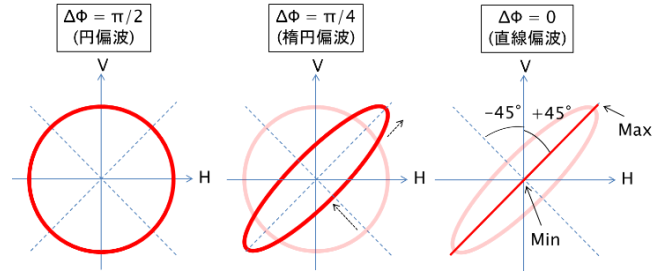
第 5.5 図 空中線特性検証装置の機器構成及び写真。

以上 3 点を調整・検証可能な可搬型装置（空中線特性検証装置，以下，単に「検証装置」という。）を新たに製作し，合わせて実験試験局の無線局免許を取得した．装置の機器構成・写真を第 5.5 図に示す．空中線装置として利得 20 dBi の標準ホーンを利用した．ホーンの XPD が低いと適切な調整が困難になるが，標準ホーンは一般に 40 dB 程度以上の XPD を有しており，これまでの測定結果からも問題は見られていない．ホーンアンテナの架台はチルト機構を有しており，方位角・仰角ともに 0.1°単位で微調整が可能である．また，送信装置として標準信号発生器（送信電力-10 dBm），受信装置としてスペクトラムアナライザを利用している．その他，野外で使用することを想定し，電源装置や無線電送機も付属している．本検証装置を用い，一般気象レーダー・DRAW とともに，次の作業を機器設置時に全サイトで実施している（運用開始後も必要に応じて実施）．

- ・ 偏波間の送信位相差の調整
- ・ 二次元アンテナパターンの測定
- ・ 送受信ロス（反射強度）の校正

イ 偏波間の送信位相差の調整手順

情報通信研究機構（NICT）の C バンド二重偏波気象レーダー（COBRA）における取組（杉谷ほか，2009）に準拠し，偏波間の送信位相差を調整した．第 5.6 図（左）はレーダーから発射された電波が円偏波の状態で，この時にホーンアンテナにおける受信電力はホーンの傾き（回転角）によらず



第 5.6 図 送信位相差により，ホーンアンテナの回転角と受信電力の関係が変化する様子を示した模式図．

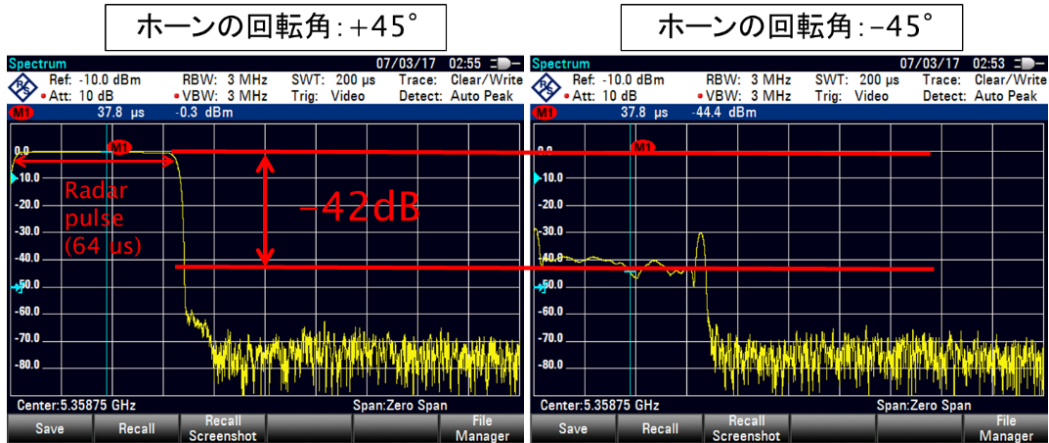
定となる．送信位相差が徐々に小さくなると，第 5.6 図（中）のように楕円偏波となり，45°及び 225°方向の受信電力が徐々に大きくなる．そして，位相差が 0°になると直線偏波となり，45°及び 225°方向の受信電力が最大値を取るとともに，直交する方向では最小値となる．これが目指すべき状態である．具体的な調整手順を次に示す．

- ① レーダーとホーンアンテナを対向させる．
- ② レーダーから片偏波のみ電波を発射し，H：水平と V：垂直の受信電力をそれぞれ測定することで，偏波面角度 θ を算出する（約 45°となる）．
- ③ レーダーから両偏波を長パルスのみ同時発射する．ホーンアンテナを + θ に傾け，その時の受信電力を $P_{+\theta}$ とする．次に，ホーンアンテナを + $\theta + 90^\circ$ に傾け，その時の受信電力を $P_{+\theta+90^\circ}$ とする．この時の偏波間の送信位相差 $\Delta\Phi_{Before}$ は次式により求まる．

$$\Delta\Phi_{Before} = 2 \tan^{-1}\left(10^{(P_{+\theta+90^\circ}-P_{+\theta})/20}\right) \quad (6)$$

- ④ ホーンアンテナを + θ に傾け，レーダーの位相調整ダイヤル（スクリュー）により V の送信位相を徐々に変化させ，受信電力が最大になるよう位相調整する．この時の受信電力を P_{MAX} とする．
- ⑤ ホーンアンテナを + $\theta + 90^\circ$ に傾け，レーダーの位相調整ダイヤルにより受信電力が最小になるよう位相調整する．また，ホーンアンテナを僅かに回転させ，最小値を更に探索する．レーダー側の位相調整とホーンアンテナの回転を交互に繰り返し，最小値を P_{MIN} とする．
- ⑥ この時，送信位相差 $\Delta\Phi_{After}$ は最小となり，次式により求まる．

$$\Delta\Phi_{After} = 2 \tan^{-1}\left(10^{(P_{MIN}-P_{MAX})/20}\right) \quad (7)$$



第 5.7 図 ホーンアンテナで受信したレーダー送信パルスの波形。

⑦ Φ_{After} が規格 (DRAW : 10° 以内, 一般レーダー : 5° 以内) に収まっていることを確認する。

第 5.7 図に, P_{MAX} 及び P_{MIN} が得られた際のレーダー送信パルス波形を示す。この例では, 送信位相差は $2 \tan^{-1}(10^{(-42)/20}) = 0.9^\circ$ に調整できている。

ウ 二次元アンテナパターンの測定手順

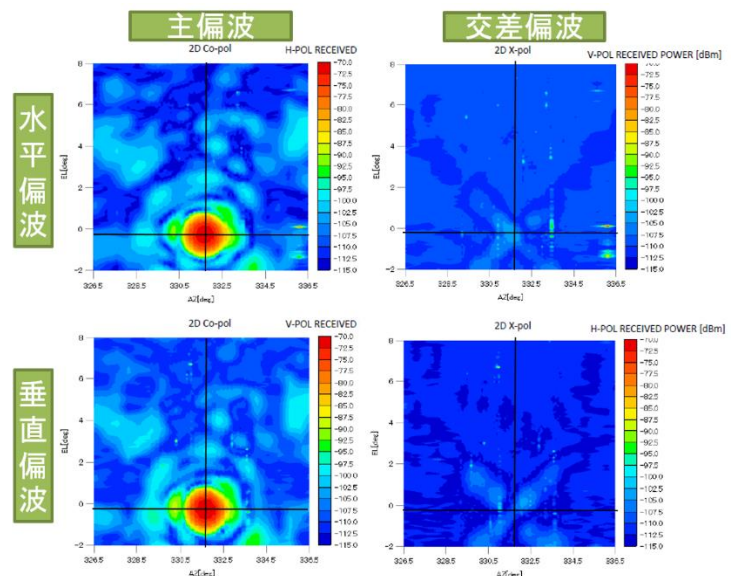
ドイツ気象局の取組 (Frech *et al.*, 2013) を参考とし, 二次元アンテナパターンを測定した。ただし, ドイツ気象局では送信アンテナとしてパラボラを使用しているのに対し, 本検証装置ではホーンアンテナを利用している点で相違がある。

具体的な測定手順を示す。まず, ホーンアンテナから水平偏波の連続波を放射し, レーダー側で一定範囲 (方位角幅 \times 仰角幅) をセクタ PPI 又はセクタ RHI により走査するラスタスキャンを行う。これにより, 水平偏波の受信系では主偏波の, 垂直偏波の受信系では交差偏波の二次元アンテナパターンが得られる。次に, ホーンからの電波放射を垂直偏波に変えて同様の測定を実施することで, 計 4 種のアンテナパターンが得られる。また, このパターン図を基に XPD や偏波間のビーム中心の差などが算出できる。

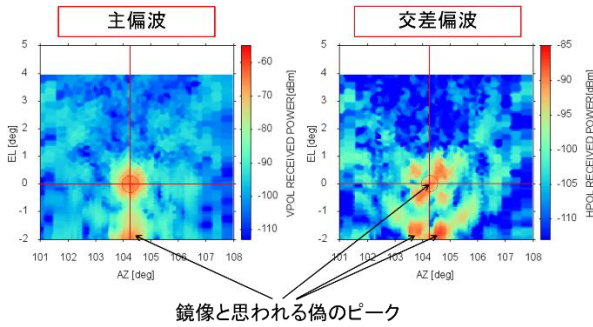
例として, 東京レーダーのアンテナパターンを第 5.8 図に示す。ビーム幅内の主偏波の受信電力と交差偏波の受信電力 (積算値) の比から求めた XPD は, ICPR (Integrated Cross-polar Ratio) とも呼ばれ, 偏波パラメータの品質指標の一つとされる。同図の結果から求めた ICPR は, 水平偏波

33.7 dB, 垂直偏波 38.1 dB と 35 dB 程度が得られており, 高い精度で偏波パラメータを推定できると考えられる。また, 両偏波のビーム中心の差は方位角・仰角とも 0.0° であり (図略), この点からも二重偏波性能に問題がないと判断できる。

同様の実測は, レーダー設置時に全サイトで実施しており, 第 5.5 表に示すとおり, その多くで同等の結果が得られている。ただし, 羽田 DRAW の測定では, 第 5.9 図のように偽のピークが生じ, ICPR の測定値が悪化した。これは, レーダーとホーンアンテナ間に滑走路が広がっており, 地面反射により鏡像が生じたためと考えられる。よって, 測定場所の選定の際には, 平らな地面が間にある場所は避ける必要がある。



第 5.8 図 東京レーダーのアンテナパターンの実測結果 (検査成績書の図を加工して使用)。



第 5.9 図 羽田 DRAW のアンテナパターンの実測結果 (検査成績書の図を加工して使用)。

第 5.5 表 各サイトにおける ICPR の測定結果。

	水平偏波	垂直偏波	単位はdB
釧路	33.7	33.0	
仙台	32.1	29.5	
東京	33.7	38.1	
名古屋	33.7	33.4	
福井	32.1	32.7	
大阪	28.1	31.8	
松江	33.2	38.2	
広島	32.1	33.0	
室戸岬	38.6	33.0	
福岡	37.1	30.7	
種子島	30.3	32.3	
沖縄	36.7	40.6	
新千歳空港	32.2	35.4	
成田国際空港	31.0	32.4	
東京国際空港	27.4	22.6	
中部国際空港	33.4	36.2	
関西国際空港	35.9	34.2	
大阪国際空港	33.0	35.6	
福岡空港	34.7	35.4	
那覇空港	37.7	41.3	

エ 送受信ロスの校正手順

送受信ロスの正確な測定, すなわち反射強度の絶対校正のためには, いくつかの手法が知られているが, いずれも一長一短がある. 例えば, 金属球 (理論的に散乱断面積が求まる) を用いる手法は, 金属球を空中に浮遊させることが容易ではなく, 費用対効果の観点からも困難が伴う. また, 二重偏波レーダーでは, 偏波パラメータ間の自己整合性を利用した手法 (Goddard *et al.*, 1994 ; Ryzhkov *et al.*, 2005a など) が利用できるが, C バンドでは降雨減衰の影響を慎重に除去しつつ, 大きな K_{DP} を伴う降雨事例を含むデータの十分な蓄積が必要であり, 3 週間程度の限られた機器調整期間では実現が困難である.

そこで, 検証装置を利用して正確な送受信ロスを求める手法 (対向方式) を考案した. これは, レーダーの送受信ロスを除き, レーダー及び検証装置の各利得やロスがいずれも実測可能であることを利用したものである. また, イ項及びウ項で述べた送信位相差の調整やアンテナパターン測定と同時に実施できるため, 作業負担も少ない.

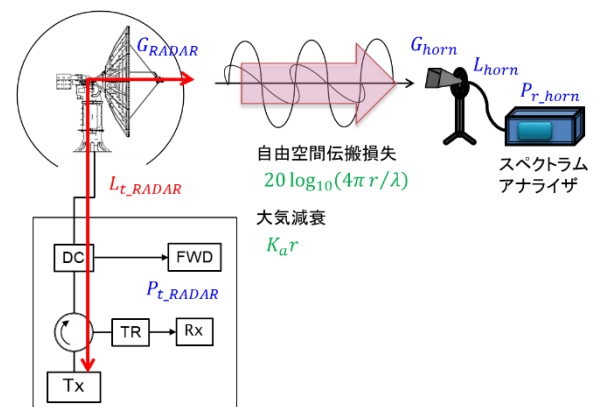
まず, 送信系ロスは, レーダーから水平偏波又は垂直偏波のパルス波を発射し, ホーンアンテナを介してスペクトラムアナライザで受信することで測定できる. 第 5.10 図に示すように, レーダーの送信電力を P_{t_RADAR} , スペクトラムアナライザの受信電力を P_{r_horn} , 気象レーダー及びホーンアンテナの利得を G_{RADAR} , G_{horn} , 検証装置のケーブルロスを L_{horn} , レーダーと検証装置間の距離を r , 波長を λ , 大気減衰率を K_a とすると, 次式から送信系ロス L_{t_RADAR} が求まる.

$$L_{t_RADAR} = P_{t_RADAR} - P_{r_horn} + G_{RADAR} + G_{horn} - L_{horn} - K_a r - 20 \log_{10}(4\pi r / \lambda) \quad (8)$$

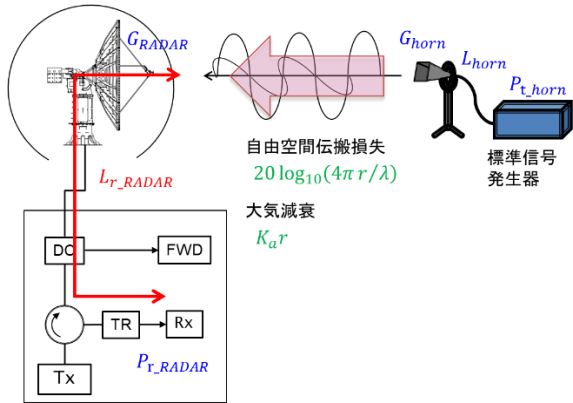
また, 受信系ロスは, ホーンアンテナを介して標準信号発生器から水平偏波又は垂直偏波の連続波を発射し, レーダーで受信することで測定できる. 第 5.11 図に示すように, 標準信号発生器の送信電力を P_{t_horn} , レーダーの受信電力を P_{r_RADAR} とすると, 次式から受信系ロスが求まる.

$$L_{r_RADAR} = P_{t_horn} - P_{r_RADAR} + G_{RADAR} + G_{horn} - L_{horn} - K_a r - 20 \log_{10}(4\pi r / \lambda) \quad (9)$$

求めた送受信ロスにより校正された反射強度を, 地上測器の観測結果と比較したところ, よ



第 5.10 図 送信系ロス測定の説明図. 青字は実測可能, 緑字は理論等から精度良く導出可能.

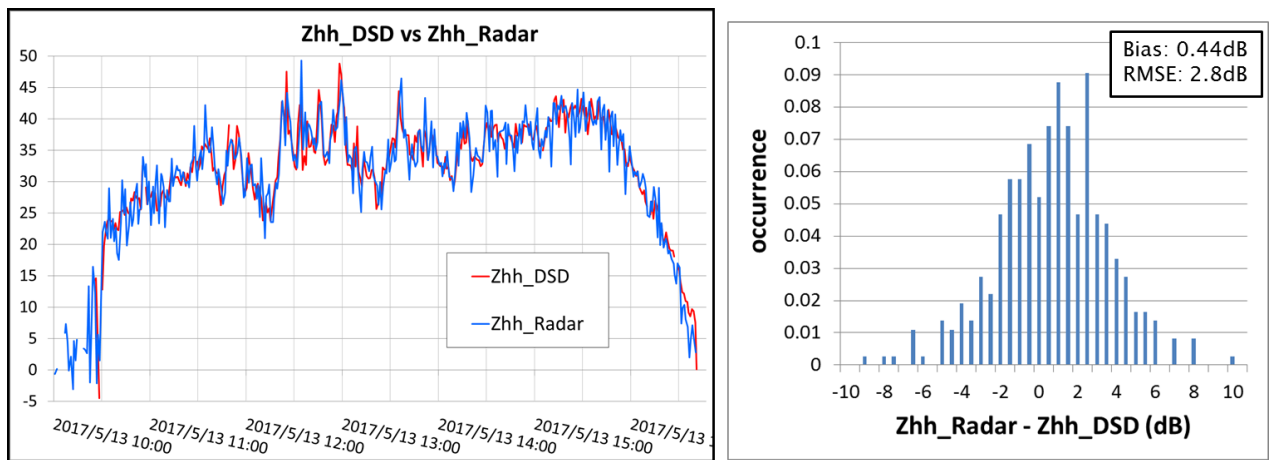


第 5.11 図 受信系ロス測定の説明図. 青字・緑字は第 5.10 図に同じ.

く一致した結果が得られた. 第 5.12 図は, レーダーサイトからおよそ 3.4 km 離れた場所に設置されている光学式ディストロメータ (Parsivel2) による反射強度と, その上空 (ビーム中心が地上高約 80 m) でレーダーが観測した反射強度を時系列で比較したものである. レーダーによる観測は瞬間的なものである一方, ディストロメータによる

観測は 1 分平均したものであるため, 前者の方がばらつきは大きい, 両者の変化傾向はよく一致しており, バイアスは 0.44 dB に収まっている. また, 水平偏波の送信ロス校正前後で 1.2 dB 増加していることから, 校正後の方がディストロメータに近い反射強度が得られている.

これまで更新を完了した DRAW の 8 サイトにおいて, 従来方式と本方式の測定結果を比較したものを第 5.6 表に示す. 羽田, 関西, 成田, 中部, 福岡については, 水平・垂直偏波ともに, 差は 1 dB-2 dB 程度に収まっている. ただし, 新千歳の対向方式では垂直偏波のみ差が大きく, 大阪・那覇の対向方式では両偏波ともかなり差が大きい結果となった. この原因として, 第 1 フレネルゾーンの遮蔽, マルチパスによる干渉, 従来方式の測定に何らかの見落としがある, といった可能性が考えられる. このため, これらのサイトでは, 測定場所を変えるなどの切り分けが必要であり, 今後の課題である.



第 5.12 図 成田 DRAW (仰角 0.7°) と光学式ディストロメータで観測された反射強度の比較. (左) 2017 年 5 月 13 日 10~16 時の時系列変化, (右) 両者の差分のヒストグラム.

第 5.6 表 DRAW における送受信ロス合計値の測定結果. いずれも 1 系の値で, 単位は dB. 赤字は, 従来方式と対向方式の差が 2 dB を超えるもの.

サイト	設計値	水平偏波			垂直偏波		
		従来方式	対向方式	差	従来方式	対向方式	差
羽田	7.6	10.0	10.3	0.3	9.9	10.3	0.4
関西	8.2	11.2	10.0	-1.2	11.9	11.6	-0.3
成田	7.6	9.9	11.1	1.2	10.0	12.0	2.0
那覇	5.8	5.9	8.2	2.3	6.1	8.5	2.4
中部	8.1	10.9	10.6	-0.3	10.0	10.3	0.3
福岡	9.1	9.9	10.1	0.2	9.7	10.7	1.0
新千歳	8.6	9.8	9.6	-0.2	10.2	12.6	2.4
伊丹	8.0	9.6	15.3	5.7	9.8	14.3	4.5

6. 実現が期待される技術

第 4 章では、固体素子二重偏波気象レーダーの導入により既の実現した観測精度改善について解説したが、これらは二重偏波情報の利用技術のごく一部を利用しているに過ぎず、更なる改善が期待できる技術がこれまでに数多く提案されている。また、偏波パラメータの校正・モニタリング手法やパルス圧縮技術についても、改善・改良の余地が残されている。本章では、今後の展望として、実現が期待される技術等について紹介する。

6.1 降水強度推定精度の更なる向上

4.3 節で述べた二重偏波情報を利用した降水強度推定手法は、従来手法と比べ大幅に降水強度推定の精度を向上させることができる。しかし、正確な降水強度推定を妨げる要因はなお存在し、例えば次のような場合には推定精度が低下する。

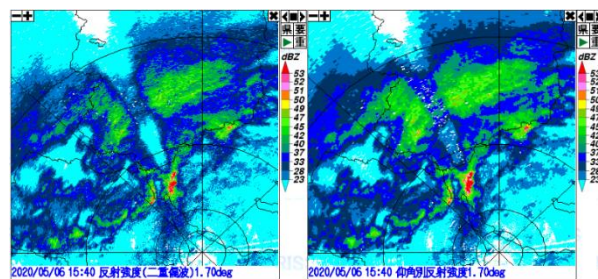
- ア 反射強度が不正確な場合
- イ 粒径分布が仮定から大きく異なる場合
- ウ レーダーの観測高度と地上で降水粒子の状態が異なる場合
- エ 降水粒子が雨ではない場合

アの例としてレーダー定数のミスキャリブレーションや降雨減衰補正の過不足、レドーム水膜による電波減衰、地形によるビーム遮蔽が、イの例として海洋性／大陸性といった降水粒子の生成・成長過程の相違が、ウの例として降水粒子の相変化（融解、蒸発）や地形性の降水強化が、エの例として固形降水がそれぞれ挙げられる。

レーダーから遠方ではビームの広がり（ビーム内不均一）やビーム高度上昇の影響が大きくなるため限界はあるものの、これらの誤差要因に応じた対策を丁寧に実施していくことで、レーダーから一定の範囲内では地域・季節によらない高精度の降水強度推定が実現できると考えられる。以降では、これらの対策について具体例を挙げる。

ア 反射強度が不正確な場合

レーダー定数のミスキャリブレーション対策の一つとして、偏波パラメータ間の自己整合性を利用した校正手法が提案されている。Goddard et



第 6.1 図 東京レーダーにおける降雨減衰補正前後の反射強度の例。左：補正前、右：補正後。同心円の中心は東京レーダーを表わす。

al. (1994) は、 K_{DP}/Z が Z_{DR} の関数として表せることを利用して、降雨による電波減衰の小さい S バンド二重偏波気象レーダーの Z の校正ができることを示した。これは位相情報である K_{DP} は校正不要かつ Z_{DR} は天頂観測等により校正できることを利用したもので、 Z_{DR} と Z の観測値から理論的な K_{DP} を算出し、これを距離方向に積分して求めた理論的な ψ_{DP} と観測値の ψ_{DP} の相違を Z のバイアスに起因するものと考えることで、Z の校正を行うものである。また、Gourley et al. (2009) は、降雨減衰等の影響を受けた Z や Z_{DR} を除去した上で、現業用 C バンド二重偏波気象レーダーに同手法を適用し、自動化しつつ 0.6 dB 以内に Z を校正できることを示した。このように、C バンドの場合、減衰の影響が無視できないデータを除去するか、あるいは適切な（過不足のない）降雨減衰補正が不可欠である。

降雨減衰補正の過不足に対しては、粒径分布の変動を加味した補正方法が提案されている。4.3 節で述べた降雨減衰補正手法は、同節の脚注で述べたとおり粒径分布や雨滴の温度の影響を受け、第 6.1 図のように、減衰補正後にも周囲の方位と比べて Z が過小となっている事例が見られることがある（降雨減衰を生じさせた強雨の平均粒径が大きいと推測される）。このような課題への解決手法として、ZPHI 法 (Testud et al., 2000) の適用が考えられる。減衰量 A が Z のべき乗で表せる ($A = az^b$) と仮定した補正手法 (Hitschfeld and Bordan, 1954) では、減衰量が大きくなると補正量が不安定になるという課題があったが、ZPHI 法

では ψ_{DP} を拘束条件とすることで安定的に補正を行えるようにしている。また、Adachi *et al.* (2015) は、Goddard *et al.* (1994) の方法を基に、 A_H/Z_H 及び A_{DP}/Z_H を Z_{DR} の関数として表し、減衰の影響を受けていないレーダー近傍のレンジビンから順に補正を行うことで、 Z_H と Z_{DR} の減衰補正を行えることを示した。ここで A_H は水平偏波の減衰量、 A_{DP} は偏波間の減衰量差である。

C バンドにおけるレドーム水膜による電波減衰は、15 mm/h の雨でも往復 3 dB に及ぶことが報告されており (Kurri and Huuskonen, 2008)、降水強度推定において無視できない大きさである。また風向風速によってはレドーム水膜が一様に生じず、減衰量が方位によって変わりうる。この減衰は、扁平な雨滴による減衰ではないため、先述の降雨減衰補正手法は直接的には適用できない。この対応策の一つとして、放射を利用した補正手法が提案されている (Thompson *et al.*, 2011)。この手法は、電波をより吸収するものは、より多くの電波を放射するという事実に基づく。降水がない場合、気象レーダーは 1 チャンネルのマイクロ波放射計として振る舞い、その受信強度 (ノイズレベル) は大気分子からの放射の強さを反映したものとなる。しかし、サイト直上で強い降水があり、レドーム水膜が形成されて送信電波が吸収される場合は、レドーム水膜からの放射が加わるため、ノイズレベルが上昇する。よって、方位別のノイズレベル上昇量から、方位別のレドーム水膜による減衰量を求めることができる。あるいは、降雨減衰補正を行った後に Goddard *et al.* (1994) の校正手法を適用することでレドーム水膜による減衰量を求めることができ、Adachi *et al.* (2015) で利用されている。

地形によるビーム遮蔽については、DEM (Digital Elevation Model) データ及び標準大気を仮定した伝搬経路を用いてビーム遮蔽率を机上計算し、これを反射強度計算時に加味する手法がよく用いられている (Fulton *et al.*, 1998 など)。DEM データに現れない構造物や植生の補正ができない欠点については、二重偏波気象レーダーの場合、 $R(K_{DP})$ の利用範囲拡大や後述する $R(A)$ の利

用によりある程度回避できる。ただし、前者のためには、できるだけノイズ (推定誤差や後方散乱位相差 δ) の影響を避けられる K_{DP} 算出アルゴリズムが必要となる。これまでに提案されている代表的な K_{DP} 算出アルゴリズムの精度については、Reimel and Kumjian (2021) に詳しい。

イ 粒径分布が仮定から大きく異なる場合

$R(K_{DP}) = a(K_{DP}/f)^b = a'K_{DP}^b$ の関係式は、 $R(Z)$ より粒径分布の変動の影響を受けにくいものの、全く受けにくいわけではない。一般に海洋性の雨では小粒径が、大陸性の雨では大粒径が比較的多い。これは、暖かい雨の機構によるものが多い海洋性の雨では、融解層以下の衝突・併合過程により雨滴が成長するため大粒径の雨は生じにくいのに対し、冷たい雨の機構によるものが多い大陸性の雨では、融解層以上で成長した大きな雪片やひょう・あられが融解することで大粒径の雨が生成しやすいからである (Ryzhkov and Zrnica, 2019)。

同じ降水強度であっても、大粒径の割合が多いほど Z と K_{DP} は大きくなることから、 $R(Z)$ や $R(K_{DP})$ の定数は地域や季節により変わりうる。例えば、C バンドの場合、比較的低緯度の沖縄や台湾における観測 (Bringi *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2013) からは、 a として 120-140、 b として 0.8-0.85 程度の値が報告されており、気象庁で利用している $a = 129$ 、 $b = 0.85$ と同等である。一方、高緯度のイギリスやフィンランドでは、ディストロメータによる観測結果から、 a として 70-100、 b として 0.7-0.8 程度を最適とする報告もある (Bringi *et al.*, 2011; Leinonen *et al.*, 2012)。このことから、南北に長く、また季節変化の大きい日本では、粒径分布変動への対応策の導入が望まれる。

粒径分布変動への一つの対応策として、動的に推定式を変更する手法が提案されている。粒径分布として修正ガンマ分布 (Ulbrich, 1983) を仮定すると、雨滴の数密度 $N(D)$ は次式で表わされる。

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\Lambda D) \quad (10)$$

ここで、 D は雨滴の等価体積直径、 N_0 は分布曲線の切片を示すパラメータ (intercept parameter)、 μ はガンマ分布の形状を修正するパラメータ (shape

parameter), Λ は分布曲線の傾斜を示すパラメータ (slope parameter) である. また, Tetstud *et al.* (2001) や Illingworth and Blackman (2002) が導入した規格化した切片パラメータ N_w 及び質量重み付き平均粒径 D_m を導入すると, 次式のように書き直すことができる (Ryzhkov and Zrnich, 2019).

$$N(D) = N_w f(\mu) (D/D_m)^\mu \exp[-(4 + \mu) D/D_m] \quad (11)$$

$$f(\mu) = \frac{\Gamma(4) (4 + \mu)^{(4+\mu)}}{4^4 \Gamma(4 + \mu)} \quad (12)$$

ここで, Γ はガンマ関数を表わす. D_m は, 大粒径が比較的多い場合には大きく, また小粒径が多い場合には小さくなる特徴があることから, 真木ほか (2017) は, Z と Z_{DR} から D_m を推定し, D_m の大きさに応じて $R(Z)$ 及び $R(K_{DP})$ の定数を調整することで降水強度推定精度を改善できることを報告している. また, N_w についても, Z と Z_{DR} の組み合わせ (Illingworth and Thompson, 2005 など) や前述の ZPHI 法の結果として推定でき, K_{DP} と N_w を組み合わせる R を推定する関係式 $R(K_{DP}, N_w) = a N_w^b K_{DP}^c$ も提案されている (Ryzhkov and Zrnich, 2019). いずれの手法も D_m や N_w の推定精度が降水強度推定の精度を左右し, Z_{DR} を高精度に得ることができなければ, このような高度な推定手法の利用は困難といえる.

また, 別のアプローチとして, 粒径分布の変動の影響をより受けにくい推定手法も提案されている. Ryzhkov *et al.* (2014) が提案した $R(A)$ 法では, 降雨減衰を受けた Z の距離方向のプロファイル及び往復の PIA (Path Integrated Attenuation) から降雨減衰量 A を求め, A と R の関係式 (べき乗則) を利用して降水強度を推定する. $R(A)$ 法は特に S バンドにおいて有望視され, 現業用 S バンド二重偏波気象レーダーの QPE として $R(A)$ 法と $R(K_{DP})$ を組み合わせた手法が提案され (Wang *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020), Multi-Radar/Multi-Sensor System (MRMS) における QPE 手法として 2020 年 10 月に現業的な利用が開始されている (Ryzhkov *et al.*, 2022). ただし, 大きな雨滴 (ミー散乱) による共鳴効果を受けると $R(A)$ の精度が悪化するため, C バンドや X バンドの場合, 強雨時には $R(K_{DP})$ が最適との報告もある (Ryzhkov *et al.*, 2022).

et al., 2022).

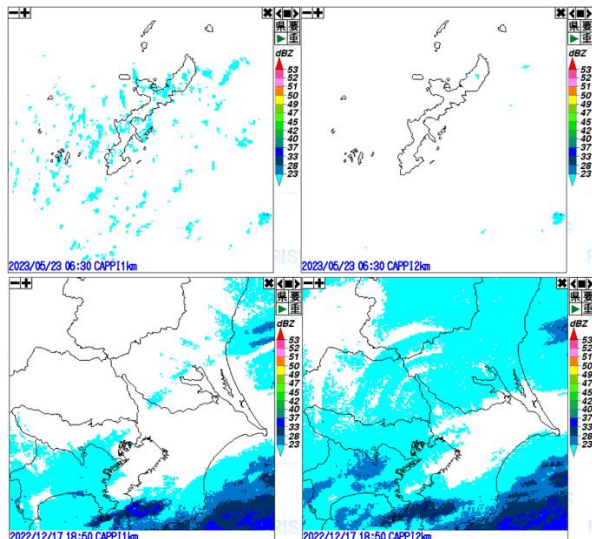
さらに, 偏波パラメータから粒径分布を特徴付けるパラメータをすべて求めることができれば, 直接降水強度を導出できるため, 原理的には高い推定精度が得られる. 代表的なものとして, β 法 (Gorgucci *et al.*, 2002) や Constrained Gamma 法 (Zhang *et al.*, 2001; Brandes *et al.*, 2004) と呼ばれる手法がこれまでに提案されてきているが, 粒径と扁平率の関係式, 粒径分布パラメータ間の関係式といった仮定が必要となる. そこで, Adachi *et al.* (2015) は, 前述のように減衰補正を行った偏波パラメータ等から修正ガンマ分布の三つのパラメータ (N_0 , Λ , μ) を求め, $R(K_{DP})$ より高精度に雨量強度を求めた. このようなアプローチにおいても, やはり Z_{DR} の精度が手法の成否を分けると考えられる.

以上の留意点として, いずれの手法も雨のみに適用できるものであるため, 降水粒子判別等により雨の領域のみ抽出する技術も不可欠といえる. 気象庁では, ベイズ推定を利用した降水粒子判別手法を開発し (小池, 2021), 様々なプロダクトへの応用に向けた開発も順次進めている.

ウ レーダーの観測高度と地上で降水粒子の状態が異なる場合

これまでの一般気象レーダーでは, 各種クラッタの混入や地形によるビーム遮蔽を避けるため, およそ高度 2 km 付近の仰角データを領域別に選択・合成する Pseudo CAPPI と呼ばれる手法を採用してきた. この副作用として, レーダーの観測高度から地上へ降水粒子が落下する間にその状態が変化し, 大きな誤差要因となることがある.

二重偏波気象レーダーでは, 4.2 節で述べたとおりクラッタの混入はほぼ回避できるため, ビーム遮蔽による影響に留意しつつ, レーダーの観測高度を下げる, つまりできるだけ低い仰角を利用することができる. 低仰角となるほどビーム高度が下がり, 反射強度の高度変化やブライトバンドの混入による影響を避けられるほか, エコー頂高度が 1 km 程度の背の低い降水も捕捉しやすくなり, 地上雨量計との対応は良くなる. また, 地上



第 6.2 図 高度 1 km (左列) 及び高度 2 km (右列) の CAPPI 比較例。上段は沖縄レーダー更新後、下段は東京レーダー更新後の事例を示す。

付近が乾燥している場合、降水粒子の蒸発・昇華のため、上空にエコーが映っても地上まで降水が達しないことがあるが、これも防ぎやすくなる。第 6.2 図に高度 1 km 及び 2 km の CAPPI を比較した事例を示す。上段は沖縄本島付近でごく背の低い弱い降水が出現した事例であるが、高度 2 km の CAPPI にはほとんどエコーが映らない一方、高度 1 km ではシークラッタを除去しつつ、多くの降水エコーを映すことができている。また、下段の事例では、高度 1 km の CAPPI は、高度 2 km に比べ、グランドクラッタの混入を起こすことなく地上に達していない上空エコーを回避できている。

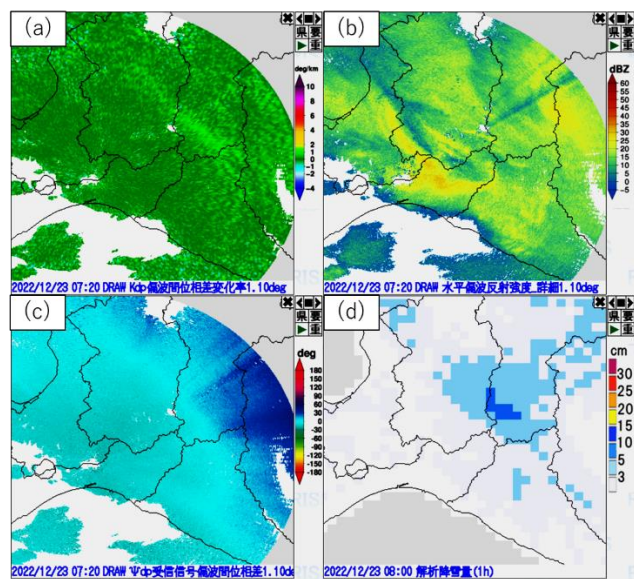
ただし、必ずしも観測高度が低ければ低いほど良いという訳ではないことには留意が必要である。強いグランドクラッタやシークラッタが混入する領域は、降水があってもほぼ常時観測できないか、観測できても品質劣化していることが多い。よって、仰角別積算データ等を用いた統計的な評価により、領域ごとに利用できる最低仰角に一定の制限を掛けることが望ましい。また、寒候期にかけては融解層高度が低下するため、ブライトバンド判別と反射強度の鉛直プロファイル (VPR: Vertical Profiles of Reflectivity) の推定を組み合わせる (Hanft *et al.*, 2023 など) ことで、ブライトバンドの影響を除去した推定を行う必要がある。

エ 降水粒子が雨ではない場合

降水粒子が雨以外の場合、誘電係数 (比誘電率) や粒径分布、落下速度などの違いにより、原理的に雨を仮定した推定手法をそのまま適用できない。レーダーで観測される Z は、雨 (つまり水) の誘電係数 ($|K|^2 = 0.93$) を仮定した等価レーダー反射因子であり、降水粒子があらゆる純粋な氷の場合、誘電係数は $|K|^2 = 0.176$ であることから、同じ粒径であっても実際の反射強度より 7.2 dB 小さく求まる。雪の場合には、密度を考慮すると $|K|^2 = 0.208$ となる (深尾・浜津, 2005) ので、反射強度は 6.5 dB 小さくなる。さらに、粒径と密度が反比例の関係にあり、反射強度はおおよそ粒径の 4 次モーメントとなる。この二つの要因により、雪片は雨滴より大きいにもかかわらず、雨より小さな Z として観測される。このほか、粒径分布や落下速度の違いもあり、 Z - R 関係や K_{DP} - R 関係は雨とは異なるものとなる。

降水粒子判別の結果が雪の場合には、 $R(Z)$ の定数を動的に変える手法がまず考えられる。降雪強度 (単位時間に単位面積に降った雪の重さに等しい水の深さ) を S (mm/h) とすると、等価レーダー反射因子 Z との間には Z - R 関係同様に $Z = aS^b$ のべき乗則が経験的に成り立ち、乾雪の場合には a は 40-800 程度、 b は 2 程度が報告されている (Ryzhkov and Zrnice, 2019)。 a の値域が広いのは、粒径分布の変動の影響を強く受けるためで、地域特性により異なってくる。アメリカの場合、例えば、五大湖周辺では $a = 180$ に対し、西部山間部では $a = 40$ が現業的に用いられている。雨の Z - R 関係では $a = 200, b = 1.6$ と値が比較的近いいため、降雪強度が小さい場合には、雨雪を区別せずに Z - R 関係式から S を求めても大差はない。しかし、降雪強度が大きい場合には、地域特性に応じて a, b を適切に選択しないと、誤差が増大してしまう。

$S(Z)$ に伴う粒径分布の影響を抑えるため、 Z 及び K_{DP} を組み合わせた手法が提案されている (Bukovčić *et al.*, 2018)。これは、 $S(K_{DP}, Z) = \gamma K_{DP}^\alpha Z^\beta$ として降雪強度を推定するもので、ディストロメータによる比較から、 $S(Z)$ より高精度な推定結果が得られることが報告されている。第 6.3



第 6.3 図 新千歳 DRAW における降雪の観測事例。

(a) K_{DP} , (b) Z_H , (c) ψ_{DP} , (d) 解析降雪量。

図に、新千歳 DRAW の観測と解析降雪量(1時間)の比較例を示す。Zは 20 dBZ 程度とあまり大きくないものの、 K_{DP} が 1 deg/km 程度の帯状の領域が上川南部を中心に見られ、解析降雪量で 1 時間 5 cm 程度の強い雪が見られることと整合的である。固形降水の場合、受水口付近の風の乱れにより、地上雨量計では降水量(降雪強度)の過小評価が生じやすい。助炭(風よけ)及びヒーター付(RT-4)であっても、風速 3 m/s では 7 割程度、風速 8 m/s では 5 割程度の捕捉率とされており(横山ほか, 2003)、レーダーによる降雪強度の推定精度向上が望まれる。

その他、ひょうやあられが混在する雨については、 K_{DP} の利用により適切な降水強度推定につながることも期待される。ひょうやあられは雨に比べて扁平度が小さく、 K_{DP} があまり高くない。この結果、4.3 節の推定手法では $R(Z)$ が採用されてしまうものの、降水粒子判別結果に応じて $R(K_{DP})$ を採用できれば、解析雨量の課題の一つである過大推定の抑止に繋がる。なお、近年、これらの粒子が融解又は表面が水に覆われかつ大量に存在することで、高い K_{DP} が出現する事例も報告され、ひょうの混入が疑われる場合、 $R(K_{DP})$ の定数を変更する提案もある(Ryzhkov *et al.*, 2022)。

6.2 ナウキャストの精度向上

気象庁では、降水、雷、竜巻発生確度の三つのナウキャストを発表し、それぞれ 1 時間先までの 5 分ごと(降水)又は 10 分(雷及び竜巻発生確度)の予測情報を提供している。このいずれも、二重偏波情報の利用により予測精度を向上させられる可能性がある。

ア 降水ナウキャスト

降水ナウキャストのボトルネックは盛衰予測が困難なことである。予測精度向上のための一つのアプローチとして、 Z_{DR} カラムの盛衰予測への利用が挙げられる。 Z_{DR} カラムは、環境場における 0 °C 高度より上空で Z_{DR} の高い領域が鉛直方向にカラム(柱)状に存在する現象であり、大きく扁平した雨滴(高高度では過冷却状態となる)又は水で覆われたひょうが存在することを意味し、強い上昇流の存在を示唆している。実際に Z_{DR} カラムの高さと上昇流の大きさには明瞭な相関が見られ(Kumjian *et al.*, 2014 など)、 Z_{DR} カラムが存在する降水セルはその後発達するとされており、国内においても、地上における強雨に 10 分-15 分程度先行して Z_{DR} カラムが出現していたと報告がある(Adachi *et al.*, 2013 ; 増田・中北, 2016 など)。また、 Z_{DR} カラムが高くなるほど、その後生じた地上降水の強度が大きくなる傾向があるとの報告もある(Otsubo and Adachi, 2024)。このため、 Z_{DR} カラムを自動検出し(Snyder *et al.*, 2015 など)、降水ナウキャストの盛衰予測パラメータの一つとして取り込むことで、10-15 分程度先までの予測精度向上が見込まれる。また、増田・中北(2016)では、0 °C 高度より上空におけるカラム状の高い K_{DP} 、すなわち K_{DP} カラムにも着目している。4.1 節第 4 式に示したとおり、 Z_{DR} と違い K_{DP} は雨水量にも依存するため、強雨発生までのリードタイムは減少するものの、降雨減衰や大粒径のひょうの混入の影響を受けにくい利点もあり、 Z_{DR} カラムと K_{DP} カラムの併用が望ましいとする報告もある(Van Lier-Walqui *et al.*, 2016)。

もう一つの降水ナウキャスト改善のアプローチとして、VIL の利用が挙げられる。VIL はこれまでも利用されている三次元指標の一つであ

るが、単偏波レーダーにおいて反射強度のみから推定する場合、降雨減衰や粒径分布の変動の影響を受け、対流性降雨の場合には必ずしも精度が高いとは言えなかった。一方、二重偏波気象レーダーでは、降雨減衰補正や K_{DP} を利用することで推定精度を大きく向上させることができる。これにより、地上における強雨に先行して上空に生成する大量の雨を早期に検出し、短時間の予測精度を向上させることが期待される。例えば、Xバンドレーダ雨量計のVILを入力値として開発されたVILナウキャスト(Hirano and Maki, 2018; Iwanami *et al.*, 2019)は、20分先までの予測精度が高解像度降水ナウキャスト(2015年当時)より高く、特に10分先までは、孤立した対流セルによる強雨に対して優れた予測精度を持つと報告されている。

イ 雷ナウキャスト

雷の発生要因を説明する上で最も有力とされる着氷電荷分離機構(Takahashi, 1978)では、あられと氷晶の接触により電荷分離が起こるとされている。このため、気象レーダーにより雷の先行指標を得るためには、あられや氷晶をいかにして検出するかが鍵といえる。単偏波レーダーでしばしば用いられてきた -10°C - -20°C 面の反射強度はあられ検出の一つの指標であるが、診断的なものに過ぎず、予測精度にも限界があった。

二重偏波気象レーダーでは、降水粒子判別の一つとしてあられや氷晶を同定することが可能であり、予測精度の向上が見込まれる。例えば、Kouketsu *et al.* (2017)は、Xバンドレーダ雨量計のデータに対して降水粒子判別を適用し、 -10°C 高度より上空で乾いたあられが大量に検出される場合、負極性の対地雷が観測され、 -10°C より低温となる上空では霰は負に帯電するとした先行研究と整合的であることを示した。また、Hayashi *et al.* (2021)は、二重偏波化された成田DRAWのデータを用いて夏期の孤立性雷雨に対して降水粒子判別を行い、氷粒子(氷晶、雪、あられ、ひょう)かつ反射強度 35 dBZ 以上となる空間の体積を予測指標とすると、粒子判別を行わ

ない従来指標に比べ、対地雷や雲放電に対して高い相関係数が得られるとともに、30分先の雷に対しても相関係数の低下が小さく、雷ナウキャストの指標として適していることを報告している。なお、雷雲内の強い電場により氷晶が縦方向に揃い、上空に負の K_{DP} 域が出現することが知られている(Ryzhkov and Zrnić, 2007)。このような負の K_{DP} 域は放電後にまもなく解消するため(Caylor and Chandrasekar, 1996)、先行指標としては利用し難いものの、雷活動の活発さを推し量ることはできるものと考えられる。

ウ 竜巻発生確度ナウキャスト

竜巻発生確度ナウキャストでは、ドップラー速度から自動検出したメソサイクロンとともに、メソ・局地モデルの予測値及び気象レーダーの観測データから計算される突風危険指数を組み合わせて、総合的な判定を行っている(瀧下, 2011)。しかし、メソサイクロンが検出されたとしても、実際に竜巻等の突風が発生する確率は必ずしも高くない。

これに対し、二重偏波気象レーダーでは、 Z_{DR} アーク(Kumjian and Ryzhkov, 2008)や K_{DP} フット(Romine *et al.*, 2008)といったスーパーセルが起きる環境場における低層のシアーやSRH(Storm Relative Helicity)の強さを示唆する特徴が見られることがある。竜巻を起こすスーパーセルかどうかを区別できる可能性もあることから、 Z_{DR} アーク等を自動検出するアルゴリズムも提案されている(Wilson and Van Den Broeke, 2021)。また、Kuster *et al.* (2021)は、ダウンバーストの先行指標として K_{DP} コアを提案し、強度の定量的な予測までは難しいものの、融解層付近の K_{DP} コアがダウンバースト発生を示す信頼性の高い指標であり、また、 K_{DP} コアは比較的ゆっくり(通常15分以上)成長するため、5分のボリュームスキャンでも容易に観測可能であることを示した。これらの特徴を活用することで、竜巻発生確度ナウキャストの精度を向上できる可能性がある。

その他、今まさに竜巻が発生していることを示す指標として、TDS(Tornadic Debris Signature)が

提案されている (Ryzhkov *et al.*, 2005b). これは、竜巻に巻き上げられた飛散物をレーダーが捉えたもので、顕著に低下した ρ_{hv} や 0 dB に近い Z_{DR} で特徴づけられ、高い Z を伴うこともある。アメリカにおける報告は多数あるが、日本においても 2012 年のつくば竜巻 (Yamauchi *et al.*, 2013) や 2019 年の市原竜巻 (Umehara *et al.*, 2021) で TDS の発生が報告されている。TDS の面積や高さ と EF (Enhanced Fujita) スケールの大きさに相関があるとした報告もあり (Van Den Broeke and Jauernic, 2014), 検出可能な領域は気象レーダーから 100 km 程度に限られるものの、高精度な自動検出が実現すれば、竜巻被害発生の即時的な把握や被害に関する現地調査への活用が期待される。

いずれのナウキャストにおいても、予測対象は短時間のうちに様相を大きく変化させる現象であり、より精度を高めるためには、十分高い時空間分解能の確保が求められる。フェーズドアレイレーダーの導入はその一つの解決策であるが、パラボラタイプであってもスパイラルスキャン等により三次元的な鉛直分解能や観測頻度を向上させられる余地がないかといった技術開発も期待される。ただし、二重偏波情報の利用で予測精度の改善が見込めるのは最大でも 1 時間程度先までと考えられ、予報時間がこれより長くなると、運動学的手法のみでは改善が難しい。

6.3 数値予報への利用

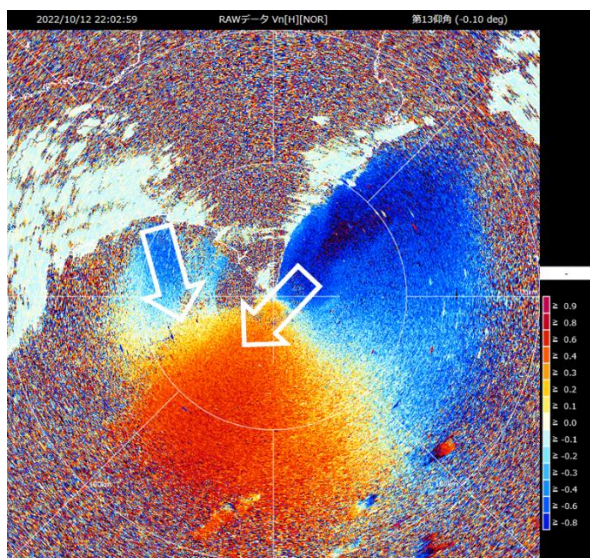
近年、二重偏波情報を数値予報へ利用しようとする取組が活発に行われている。幾田 (2021) によると、現業数値予報システムにおけるレーダー観測の利用には、検証データとしての利用と同化データとしての利用があり、前者は数値予報モデルの雲微物理スキームの改良を通じて、後者は初期値の改善を通じて、それぞれ予報の改善に資するとしている。2023 年現在、ULTIMATE (ULtra-sIte for Measuring Atmosphere of Tokyo metropolitan Environment) と冠した学官連携プロジェクトが進行しており、この一環として、二重偏波情報を利用した雲微物理スキームの改良に向けた取組が重点的に行われている (Satoh *et al.*, 2022)。また、

観測演算子により二重偏波情報を同化する試みも進められており、例えば Kawabata *et al.* (2018) は、C バンド二重偏波気象レーダーに対する複数の観測演算子を精度評価し、モデル内で予報された雨水量混合比と数濃度から偏波パラメータ (Z , Z_{DR} , K_{DP}) を推定する手法、又はレーダーで観測された K_{DP} のみから雨水量混合比を推定する手法が適していると報告している。

他方、既に同化利用されている反射強度やドップラー速度の品質向上や利用範囲拡大への期待も見逃せない。相対湿度に変換する形で同化されている反射強度については、降雨減衰補正が新たに掛かることで観測値と第一推定値の対応が改善したことが報告されている (気象庁数値予報開発センター, 2022)。また、更新前はクラッタ等の混入により 0 m/s 付近 (-5 m/s $-+5$ m/s) のドップラー速度の利用が難しかったが、更新後は第 4 章で述べたとおりクラッタの除去ができるようになったため、QC の見直しによる利用範囲拡大も期待される。高仰角 (仰角 5.9° 以上) のドップラー速度についても、降水粒子の落下速度の成分が無視できないために現在は利用されていないが、 Z_{DR} から推定した降水粒子の平均直径を利用して落下速度を求めることで利用できるようになる可能性もある。

6.4 その他の利用

二重偏波情報を利用した IWC (Ice Water Content) の推定が航空機の安全運航に寄与できる可能性もある。近年、高高度を巡航中の航空機が高濃度氷晶を吸い込むことでエンジン内に着氷を起こす事例が報告されており、ICI (Ice Crystal Icing) と呼ばれその回避方法が模索されている。二重偏波情報を利用して IWC をより正確に推定する手法が提案されており (Bukovčić *et al.*, 2018 など)、国内でも関東以南で ICI の発生報告があることから (Boeing, 2007)、実況監視や現象のメカニズム解明などに応用できる可能性がある。例えば、Nguyen *et al.* (2019) は、熱帯の対流雲を対象とした航空機による直接観測及び航空機搭載 X バンド二重偏波気象レーダーの観測結果から、 K_{DP} 及



第 6.4 図 室戸岬レーダーにおける水平偏波の規格化ドップラー速度 (NOR) の観測例. 白矢印はドップラー速度の分布から推定した風向.

び Z_{DR} を利用することで、従来の Z のみから求める手法と比べて IWC の推定誤差を大幅に低減できることを報告している.

また、第 4 章で述べた品質管理で不良判定された非降水エコーの有効活用も考えられる. Forget *et al.* (2016) は、X バンド二重偏波気象レーダーで観測されたシークラッタについて、水平偏波のドップラー速度と海上風の間に関係が成り立つことを報告している. 入射角が大きい (水平に近い方向から入射) 場合は、海面によるブラッグ散乱が寄与しているとみられ、水平偏波と垂直偏波でドップラー速度の大きさに差が見られるなど散乱機構の詳細についてはまだ十分に解明されていないものの、二重偏波情報によりシークラッタを抽出することで、レーダーサイトから 50 km-100 km 程度の範囲で海上風の推定ができる可能性がある. 一例として、第 6.4 図に室戸岬レーダーで捉えたシークラッタの規格化ドップラー速度を示す. ドップラー速度の分布からは、室戸岬の北東～南東～南西方向にかけては北東風であるのに対し、土佐湾内では北北西の風とみられ、LFM 初期値ともおおそ対応している (図略). また、Forget *et al.* (2016) 同様、水平偏波の方が大きなドップラー速度が得られていた (図

略). 定量的に風速が得られるかどうかについて、今後の調査が望まれる. このほか、噴煙エコーを抽出することで噴火規模の推定や火山灰監視に役立てたり (新堀ほか, 2013; Maki *et al.*, 2021 など)、二重偏波情報から生物起源のエコーを抽出・分類 (Stepanian *et al.*, 2016; Gauthreaux and Diehl, 2020 など) して Radar Aeroecology (Kelly and Stepanian, 2020) として生態学へ利用したりするなど、気象以外の分野も含めると非降水エコーの応用範囲の裾野はかなり広い.

さらに、二重偏波情報を直接利用するものではないが、地表付近の屈折率分布推定への期待も大きい. Fabry *et al.* (1997) では、グランドクラッタを利用して地表付近の屈折率 (水蒸気) 分布を高頻度かつ高分解能で推定する手法を提案しており、現実的に利用できるよになれば、GNSS 可降水量データと相まって、実況監視や局地的大雨の予測等に資すると考えられる. 国内においても、一般気象レーダーから得られた屈折率分布の時間変化を数値予報モデルに同化した結果、予測された降雨分布がより観測値に近くなったことが報告されている (Seko *et al.*, 2017). 更新前のレーダーでも、特別な装置の接続により取得した IQ データから屈折率分布推定に必要な平均位相を求めることができたが、今回導入した固体素子二重偏波気象レーダーでは、一般気象レーダー及び DRAW とともに平均位相データを標準出力できるようにしており、このデータを利用した研究開発が現在進められている (瀬古ほか, 2023).

6.5 校正・モニタリング手法の高度化

ここまで述べてきたデータ高度利用技術の実用化には、その入力値となる偏波パラメータの観測精度の確保が欠かせない. 偏波パラメータにバイアスが生じると利用の妨げとなることから、第 5 章で述べた校正・モニタリング手法の知見を蓄積させ、いずれ自動で補正が可能な仕組みの構築が望まれる.

また、近年、レドーム内の温度変化に伴い Z_{DR} に無視できないバイアス (12°C の変化につき 0.2 dB) が生じ、空中線構成部品の熱膨張がその原因と報

告されている (Frech and Hubbert, 2020). この克服には, 空調によりレドーム内の温度変化を抑えるか (又は熱膨張が起りにくい設計とするか), 温度に応じた補正が必要となるため, Frech and Hubbert (2020) では, 同一型式の研究用レーダーによる太陽ボックススキャンを行うことで補正式を導出している. 国内に導入した二重偏波気象レーダーで同様のバイアスが見られるかどうかやその補正手法については, 今後の調査が待たれる.

6.6 二次エコー対策の高度化

気象レーダー観測でしばしば混入する二次エコーを除去するため, 従前より, パルスごとに初期位相を擬似ランダムに変調させるとともに, 二次エコー成分をスペクトル上で除去 (石原, 2001) あるいは規格化コヒーレント電力を用いたスレッショルド処理 (山内・鈴木, 2012) といった対処が行われている. これらは, 一次エコーではパルス間の相関が高く, 二次エコーでは相関が低くなる性質を利用しているが, PRF が低い場合には一次エコーであってもパルス間の相関が低くなりやすいため, 有効に作用しにくい. PRF が低い場合には二次エコーの混入頻度自体は少ないものの, 頂高度の高いエコーや異常伝搬を要因として, 南西日本を中心にしばしば無視できない二次エコーの混入が見られることがある.

二次エコーの混入を防ぐため, パルスごとの初期位相の変調に加え, パルス間の分離度をより高める別の技術の導入が望まれる. 例えば, 周波数を ± 1.25 MHz オフセットした長パルスをパルスごとに交互発射する手法が考えられる. ただし, 周波数割当ての観点から短パルスの発射は困難なため, 長パルスのブラインドレンジ復号技術 (Aquino *et al.*, 2021) との併用が不可欠である. また, パルス間の相関を小さくできるようにパルスごとに変調方法を変える手法も考えられる. 例えば, アップチャープとダウンチャープを交互送信する (合成開口レーダーでは利用例あり), チャープ信号に更に符号変調を掛ける (Kumar and Chandrasekar, 2020) といった手法が考えられるが,

観測精度劣化や周波数帯域増加を起こさずに有効な結果が得られるかは不明であり, 今後の技術開発が望まれる.

7. まとめ

近年, 豪雨災害が局地化, 集中化, 激甚化の様相を示す中, 気象業務における気象レーダーが担う役割はますます高まってきている. 本稿では, 2016 年以降, 気象庁が全国 20 か所の一般気象レーダー及び全国 9 空港の空港気象ドップラーレーダーに導入を進めている C バンドの固体素子二重偏波気象レーダーについて, 導入背景やシステム概要, 導入に当たり工夫した点, 実現した観測精度の改善, 偏波パラメータの校正・モニタリング手法, 実現が期待される技術をそれぞれ解説した.

二重偏波気象レーダーはこれまでの気象レーダー観測における課題の多くを打破することができ, その導入による主な効果として, ①非降水エコー判別による高度な品質管理, ②高精度の降水強度推定, ③降水粒子判別, が挙げられる. ②については主に「偏波間位相差変化率 (K_{DP})」を降雨減衰補正及び降水強度推定式に利用することで, ①③については「受信信号偏波間位相差 (ψ_{DP})」のほか, 粒子の縦横比を示す「反射因子差 (Z_{DR})」と粒子の一様性を示す「偏波間相関係数 (ρ_{hv})」も併せて活用することでそれぞれ実現できる. 本稿執筆時点では, 更新した気象レーダーの運用開始とともに①を適用しつつ, 高解像度降水ナウキャストや速報版解析雨量への②の利用を順次開始している. 今後も評価・開発作業を進め, 段階的に改善を目指す計画としている.

二重偏波情報の応用範囲は広く, 今後, 降水強度推定手法のさらなる改善や③を利用したナウキャストの精度向上をはじめとして, 数多くのプロダクト改善や新たな情報提供が期待される. ただし, そのためには偏波パラメータの精度確保が欠かせない. 特に粒径分布の情報を多く含む Z_{DR} については, 精度確保の難易度が高く, 気象レーダーの導入に当たり, 仕様作成や取付調整には多くの注意を払った. 今後, 他機関においても固体

素子二重偏波気象レーダーの導入や機器更新を進める機会もあると考えられるが、その際に本稿がその仕様検討や運用の参考となれば幸いである。

最後に、固体素子二重偏波気象レーダー導入のための予算要求、仕様作成、調達手続き、更新作業、利用技術開発に際しては、本庁各部、各管区・地方気象台、そして気象研究所の関係者に多大なるご尽力を賜った。また、レーダーの周波数調整や技術試験事務の実施等に際しては総務省総合通信基盤局電波部基幹・衛星移動通信課基幹通信室の御担当者に、仕様検討の参考とするためのCバンドMPレーダ雨量計の見学に際しては本省電気通信室及び地方整備局の御担当者に、それぞれ多くのお力添えをいただいた。そして、受注いただいたレーダーメーカーの皆様には、限られた時間の中で世界に誇れる優れた気象レーダーを製作・設置いただき、感謝の念に堪えない。この紙面をお借りし、改めて関係者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- Adachi, A. *et al.* (2013) : Detection of potentially hazardous convective clouds with a dual-polarized C-band radar. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2741–2760.
- Adachi, A., *et al.* (2015) : Estimation of raindrop size distribution and rainfall rate from polarimetric radar measurements at attenuating frequency based on the self-consistency principle. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 359–388.
- Atlas, D. and C. W. Ulbrich (1977) : Path-integrated and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1–3 cm band. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 1322–1331.
- Aquino, S. *et al.* (2021) : Progressive Pulse Compression: A Novel Technique for Blind Range Recovery for Solid-State Radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **38**(9), 1599–1611.
- Boeing (2007) : Engine Power Loss in Ice Crystal Conditions. *Aero magazine*, Quarterly 04, 12–17.
(https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_07/AERO_Q407_article_3.pdf, accessed 2023-6-26)
- Brandes, E. A. *et al.* (2004) : Drop Size Distribution Retrieval with Polarimetric Radar: Model and Application. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **43**, 461–475.
- Bringi, V.N. and V. Chandrasekar (2001) : Polarimetric Doppler Weather Radar Principles and Applications. Cambridge University Press, Cambridge, New York.
- Bringi, V. N. *et al.* (2006) : Rainfall estimation from C-band polarimetric radar in Okinawa, Japan: Comparisons with 2D-video disdrometer and 400 MHz wind profiler. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 705–724.
- Bringi, V. N. *et al.* (2011) : Rainfall Estimation with an Operational Polarimetric C-Band Radar in the United Kingdom: Comparison with a Gauge Network and Error Analysis. *J. Hydrometeorol.*, **12**, 935–954.
- Bukovčić, P. *et al.* (2018) : Polarimetric radar relations for quantification of snow based on disdrometer data. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **57**, 103–120.
- Caylor, I. and V. Chandrasekar (1996) : Time-varying ice crystal orientation in thunderstorms observed with multiparameter radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **34**, 847–858.
- Chandrasekar, V. and N. Bharadwaj (2009) : Orthogonal Channel Coding for Simultaneous Co- and Cross-Polarization Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 45–56.
- Darlington, T. *et al.* (2016) : Designing an operational C-band radar to realise the benefits of dual-polarization. Met Office, 48 pp.
(<https://digital.nmla.metoffice.gov.uk/downl>

- oad/file/IO_2d8307eb-dfb4-4d6e-8ead-4df70259325e, accessed 2023-6-26)
- Dokter, A.M. *et al.* (2011) : Bird migration flight altitudes studied by a network of operational weather radars. *J. R. Soc. Interface*, **8**, 30–43.
- Fabry, F. *et al.* (1997) : On the Extraction of Near-Surface Index of Refraction Using Radar Phase Measurements from Ground Targets. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **14**, 978–987.
- Figueras i Ventura, J. *et al.* (2021) : On the Effect of Radome Characteristics on Polarimetric Moments and Sun Measurements of a Weather Radar. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, **18**(4), 642–646.
- Forget, P. *et al.* (2016) : On the Use of X-Band Weather Radar for Wind Field Retrieval in Coastal Zone. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **33**, 899–917.
- Frech, M. (2009) : The effect of a wet radome on dualpol data quality. Preprints, 34th Conf. on Radar Meteorology, Williamsburg, VA, Amer. Meteor. Soc., P13.15.
- Frech, M. *et al.* (2013) : Influence of a Radome on Antenna Performance. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 313–324.
- Frech, M. and J. Hubbert (2020) : Monitoring the differential reflectivity and receiver calibration of the German polarimetric weather radar network. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 1051–1069.
- 深尾昌一郎, 浜津享助 (2005) : 気象と大気のレーダーリモートセンシング. 京都大学学術出版会, 491pp.
- Fulton, R. A. *et al.* (1998) : The WSR-88D Rainfall Algorithm. *Wea. Forecasting*, **13**, 377–395.
- Gabella, M. *et al.* (2016) : Calibration Accuracy of the Dual-Polarization Receivers of the C-Band Swiss Weather Radar Network, *Atmosphere*, **7**(6), 76.
<https://doi.org/10.3390/atmos7060076>.
- Gauthreaux, S. and R. Diehl (2020) : Discrimination of Biological Scatterers in Polarimetric Weather Radar Data: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing*, **12**(3), 545.
<https://doi.org/10.3390/rs12030545>.
- Goddard, J. *et al.* (1994) : Technique for calibration of meteorological radars using differential phase. *Electron. Lett.*, **30**, 166–167.
- Golestani, Y. *et al.* (1989) : Intercomparison of multiparameter radar measurements. Preprints, 24th Conf. on Radar Meteorology, Tallahassee, FL, Amer. Meteor. Soc., 309–313.
- Gomi, K. *et al.* (2017) : Pulse Compression Weather Radar with Improved Sensitivity, Range Resolution, and Range Sidelobe. 38th Conf. on Radar Meteorology, Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc., P131.
- Gorgucci, E. *et al.* (2002) : Estimation of Raindrop Size Distribution Parameters from Polarimetric Radar Measurements. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 2373–2384.
- Gourley, J. J. *et al.* (2009) : Absolute Calibration of Radar Reflectivity Using Redundancy of the Polarization Observations and Implied Constraints on Drop Shapes. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 689–703.
- Hanft, W. *et al.* (2023) : Dual-Pol VPR Corrections for Improved Operational Radar QPE in MRMS. *J. Hydrometeor.*, **24**, 353–371.
- Hayashi, S. *et al.* (2021) : The relationship between lightning flash rate and ice-related volume derived from dual-polarization radar. *Atmos. Res.*, **248**, 105–166.
- 比嘉ほか (2009) : アメダス雨量による那覇空港気象ドップラーレーダー雨量強度の比較調査. 沖縄管内気象研究会誌, (37), 33.
- Hirano, K. and M. Maki (2018) : Imminent nowcasting for severe rainfall using vertically integrated liquid water content derived from X-band polarimetric radar. *J. Meteor. Soc.*

- Japan*, **96A**, 201–220.
- Hitschfeld, W. and J. Bordan (1954) : Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wave-lengths. *J. Meteor.*, **11**, 58–67.
- Hubbert, J. and V. N. Bringi (1995) : An Iterative Filtering Technique for the Analysis of Copolar Differential Phase and Dual-Frequency Radar Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **12**, 643–648.
- Hubbert, J. C. *et al.* (2009a) : Weather Radar Ground Clutter. Part I: Identification, Modeling, and Simulation. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**(7), 1165–1180.
- Hubbert, J. C. *et al.* (2009b) : Weather Radar Ground Clutter. Part II: Real-Time Identification and Filtering. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**(7), 1181–1197.
- Hubbert, J. C. *et al.* (2010a) : Modeling, Error Analysis, and Evaluation of Dual-Polarization Variables Obtained from Simultaneous Horizontal and Vertical Polarization Transmit Radar. Part I: Modeling and Antenna Errors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**(10), 1583–1598.
- Hubbert, J. C. *et al.* (2010b) : Modeling, Error Analysis, and Evaluation of Dual-Polarization Variables Obtained from Simultaneous Horizontal and Vertical Polarization Transmit Radar. Part II: Experimental Data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **27**(10), 1599–1607.
- Huuskonen, A. *et al.* (2014) : The operational weather radar network in Europe. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **95**(6), 897–907.
- 幾田泰醇 (2015) : レーダー反射強度. 数値予報課報告・別冊, (61), 40–42.
- 幾田泰醇 (2021) : レーダーデータ利用の課題. 第 13 回気象庁数値モデル研究会, オンライン, 2021 年 1 月.
(http://pfi.kishou.go.jp/Presen2020/8_ikuta.pdf, 2023 年 12 月 18 日閲覧)
- Ikuta, Y. *et al.* (2021) : Variational data assimilation system for operational regional models at Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.
- Illingworth, A.J. and R.J. Thompson (2005) : The Estimation of Moderate Rain Rates with Operational Polarisation Radar. Preprints, 32nd Conf. on Radar Meteorology, Albuquerque, NM, Amer. Meteor. Soc., P9R.
- Illingworth, A.J. and T. Mark Blackman (2002) : The Need to Represent Raindrop Size Spectra as Normalized Gamma Distributions for the Interpretation of Polarization Radar Observations. *J. Appl. Meteor.*, **41**, 286–297.
- 石原正仁 (2001) : ドップラー気象レーダーの原理と基礎. 気象研究ノート, (200), 1–38.
- 石原正仁ほか (2001) : 空港気象ドップラーレーダー. 気象研究ノート, (200), 197–216.
- 石川宜広 (2015) : ドップラーレーダーのドップラー速度データの数値予報での利用. 数値予報課報告・別冊, (61), 29–35.
- 伊藤信一 (2015) : レーダシステムの基礎理論. コロナ社, 360 pp.
- Iwanami, K. *et al.* (2019) : Statistical validation of the predicted amount and start time of heavy rainfall in 2015 based on the VIL nowcast method. *J. Disaster Res.*, **14**, 248–259.
- 観測部観測課観測システム運用室 (2009) : レーダーデータの品質管理と新しいレーダー観測資料の利用—平成 19 年度観測データ高度利用技術担当者会議報告—. 測候時報, **76**, 1–113.
- 笠原真吾 (2011) : 雷ナウキャストにおける雷の解析・予測技術と利用方法. 測候時報, **78**, 95–140.
- 梶原佑介, 大野洋 (2015) : 気象ドップラーレーダーから算出される VAD 風の品質管理手法の開発及びデータ特性の調査. 測候時報, **82**, 15–53.
- Kawabata, T. *et al.* (2018) : Evaluation of forward

- operators for polarimetric radars aiming for data assimilation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96A**, 157-174.
- Kelly, J. F. and P. M. Stepanian (2020) : Radar Aeroecology, *Remote Sensing*, **12**(11), 1768. <https://doi.org/10.3390/rs12111768>.
- 気象庁数値予報開発センター (2022) : メソ解析・局地解析における二重偏波レーダーの利用. 数値予報開発センター年報 (令和3年), 112-116.
- 小池哲司 (2021) : ベイズ分類を用いた二重偏波気象レーダーによる降水種別判別 クラスタ分析による教師データの作成. 測候時報, **88**, 1-18.
- Kouketsu, T. *et al.* (2017) : Relationship between cloud-to-ground lightning polarity and the space-time distribution of solid hydrometeors in isolated summer thunderclouds observed by X-band polarimetric radar. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **122**, 8781– 8800.
- Kumar., M. and V. Chandrasekar (2020) : Intrapulse Polyphase Coding System for Second Trip Suppression in a Weather Radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **58**(6), 3841-3853.
- Kumjian, M. R. and A. V. Ryzhkov (2008) : Polarimetric signatures in supercell thunderstorms. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **47**, 1940–1961.
- Kumjian, M. *et al.* (2014) : The Anatomy and Physics of ZDR Columns: Investigating a Polarimetric Radar Signature with a Spectral Bin Microphysical Model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 1820–1843.
- Kurdzo, J. M. *et al.* (2014) : A Pulse Compression Waveform for Improved-Sensitivity Weather Radar Observations. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **31**(12), 2713-2731.
- Kurri, M. and A. Huuskonen (2008) : Measurements of the Transmission Loss of a Radome at Different Rain Intensities. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **25**, 1590–1599.
- Kuster, C. M. *et al.* (2021) : Using KDP Cores as a Downburst Precursor Signature. *Wea. Forecasting*, **36**(4), 1183-1198.
- Lei, L. *et al.* (2012) : Multilag Correlation Estimators for Polarimetric Radar Measurements in the Presence of Noise. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **29**(6), 772-795.
- Leinonen, J. *et al.* (2012) : A Climatology of Disdrometer Measurements of Rainfall in Finland over Five Years with Implications for Global Radar Observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 392–404.
- Lemon, L. R. (1998) : The Radar “Three-Body Scatter Spike”: An Operational Large-Hail Signature. *Wea. Forecasting*, **13**(2), 327-340.
- 真木雅之ほか (2017) : X-バンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発及び社会実装—2016年度岸保賞受賞記念講演—. 天気, **64**, 849-872.
- Maki, M. *et al.* (2021) : Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **412**, 107178. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107178>.
- 増田有俊, 中北英一 (2016) : Xバンド偏波レーダーを用いた発達する降水セルの検出に関する研究. 土木学会論文集, B1 (水工学), **72**, 193-198.
- Melnikov, V. M. *et al.* (2008) : Radar polarimetric signatures of fire plumes in Oklahoma. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14815. [doi:10.1029/2008GL034311](https://doi.org/10.1029/2008GL034311).
- Melnikov, V. M. *et al.* (2015) : Asymmetric Radar Echo Patterns from Insects. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **32**(4), 659-674.
- Minda, H. *et al.* (2008) : Bird migration echoes observed by polarimetric radar. *IEICE Trans. Commun.* **E91-B**(6), 2085-2089.
- 中北英一 (2010) : 集中豪雨のモニタリングと予

- 測. ながれ, **29**, 203-210.
- Nagata, K. (2011) : Quantitative precipitation estimation and quantitative precipitation forecasting by the Japan Meteorological Agency. *Technical Review of RSMC Tokyo*, (13), 37-50.
- 長田正嗣ほか (2010) : 気象庁向け気象ドップラーレーダー. 日本無線技報, (58), 17-20.
- 永田雅 (2012) : 2010 年度春季大会シンポジウム「災害軽減に向けたシビア現象予測の将来」の報告 1. 豪雨等予測の現状と取り組み. 天気, **59**, 526-532.
- Nguyen, C. M. and V. Chandrasekar (2013) : Gaussian Model Adaptive Processing in Time Domain (GMAP-TD) for Weather Radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**(11), 2571-2584.
- Nguyen, C. M. *et al.* (2019) : Determination of ice water content (IWC) in tropical convective clouds from X-band dual-polarization airborne radar. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 5897-5911.
- Otsubo, A and A. Adachi (2024) : Short-term Predictability of Extreme Rainfall Using Dual-Polarization Radar Measurements. *J. Meteor. Soc. Japan*, in press.
- Reimel, K. J. and M. Kumjian (2021) : Evaluation of KDP Estimation Algorithm Performance in Rain Using a Known-Truth Framework. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **38**, 587-605.
- Romine, G. S. *et al.* (2008) : A dual-polarization-radar-based assessment of the 8 May 2003 Oklahoma City area tornadic supercell. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2849-2870.
- Ryzhkov, A. V. *et al.* (2005a) : Calibration Issues of Dual-Polarization Radar Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**(8), 1138-1155.
- Ryzhkov, A. V. *et al.* (2005b) : Polarimetric tornado detection. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 557-570.
- Ryzhkov, A. V. and D. S. Zrnić (2007) : Depolarization in Ice Crystals and Its Effect on Radar Polarimetric Measurements. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **24**, 1256-1267.
- Ryzhkov, A. *et al.* (2014) : Utilization of specific attenuation for rainfall estimation, mitigation of partial beam blockage, and radar networking. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **31**, 599-619.
- Ryzhkov, A. *et al.* (2017) : Estimation of Depolarization Ratio Using Weather Radars with Simultaneous Transmission/Reception. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **56**, 1797-1816.
- Ryzhkov, A. and D. Zrnić (2019) : Radar Polarimetry for Weather Observations. 10.1007/978-3-030-05093-1.
- Ryzhkov, A. *et al.* (2022) : Polarimetric Radar Quantitative Precipitation Estimation. *Remote Sensing*, **14**(7), 1695. <https://doi.org/10.3390/rs14071695>.
- Satoh, M. *et al.* (2022) : Evaluation of cloud and precipitation processes in regional and global models with ULTIMATE (Ultra-Site for Measuring Atmosphere of Tokyo Metropolitan Environment): A case study using the dual-polarization Doppler weather radars. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **9**, 51. <https://doi.org/10.1186/s40645-022-00511-5>.
- Seko, H. *et al.* (2017) : Data Assimilation Experiments of Refractivity Observed by JMA Operational Radar. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrologic Applications*, **3**, 327-336.
- 瀬古弘ほか (2023) : レーダー屈折率時間変化量の推定時のパラメータと観測高度. 日本気象学会 2023 年度春季大会講演予稿集, P101.
- Siggia, A. D. and R. E. Passarelli (2004) : Gaussian model adaptive processing (GMAP) for improved ground clutter cancellation and moment calculation. Proc. Third European Conf. on Radar Meteorology, Visby, Sweden, ERAD, 67-73.
- 新堀敏基ほか (2013) : 気象レーダー・衛星による火山噴煙観測—2011 年霧島山 (新燃

- 岳) 噴火の事例—。 験震時報, **77**, 141-216.
- Snyder, J. C. *et al.* (2015) : A ZDR Column Detection Algorithm to Examine Convective Storm Updrafts. *Wea. Forecasting*, **30**, 1819–1844.
- Stepanian, P. M. *et al.* (2016) : Dual-polarization radar products for biological applications. *Ecosphere*, **7**(11), e01539.
<https://doi.org/10.1002/ecs2.1539>.
- Sugier, J. and P. Tabary (2006) : Evaluation of dual-polarisation technology at C-band for operational weather radar network. EUMETNET Opera 2 Rep., 44 pp.
- 杉谷茂夫ほか (2009) : 沖縄偏波降雨レーダ COBRA の送信偏波校正作業の省力化と高精度化. 日本気象学会 2009 年度秋季大会講演予稿集, D359.
- 高尾謙次ほか (2019) : 気象レーダー観測処理システム (ROPS) の開発. MSS 技報, **30**, 1-6.
- Takahashi, T. (1978) : Riming Electrification as a Charge Generation Mechanism in Thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**(8), 1536-1548.
- 瀧下洋一 (2011) : 竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について—突風に関する防災気象情報の改善—. 測候時報, **78**, 57-93.
- Testud, J. *et al.* (2000) : The Rain Profiling Algorithm Applied to Polarimetric Weather Radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 332–356.
- Testud, J. *et al.* (2001) : The Concept of “Normalized” Distribution to Describe Raindrop Spectra: A Tool for Cloud Physics and Cloud Remote Sensing. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **40**, 1118–1140.
- Thompson, R. *et al.* (2011): Emission: a simple new technique to correct rainfall estimates from attenuation due to both the radome and heavy rainfall. 8th International Symposium on Weather Radar and Hydrology, Exeter, UK, International Association of Hydrological Sciences, 39-44.
- 土屋修一ほか (2016) : XRAIN 雨量観測の実用化技術に関する検討資料. 国土技術政策総合研究所資料, (909).
- Ulbrich, C. W. (1983) : Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **22**, 1764–1775.
- Umehara, A. *et al.* (2021) : Analysis of the tornadic debris signatures of the Ichihara tornado in a typhoon environment using two operational C-band dual-polarization weather radars. *SOLA*, **17**, 196–201.
- VAISALA (2011) : Catching Storms and Insects at Long Ranges.
(https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/vn186_06_catching-storms-and-insects-at-long-ranges.pdf, accessed 2023-6-26)
- Van Den Broeke, M. S. and S. T. Jauernic (2014) : Spatial and temporal characteristics of polarimetric tornadic debris signatures. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 2217–2231.
- Van Lier-Walqui, M. *et al.* (2016) : On Polarimetric Radar Signatures of Deep Convection for Model Evaluation: Columns of Specific Differential Phase Observed during MC3E, *Mon. Wea. Rev.*, **144**(2), 737-758.
- 和田将一ほか (2008) : 電波資源を有効に利用する 5GHz 帯固体化気象レーダ. 東芝レビュー, **63** (7), 48-51.
- Wang, Y. and V. Chandrasekar (2006) : Polarization isolation requirements for linear dual-polarization weather radar in simultaneous transmission mode of operation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**(8), 2019-2028.
- Wang, Y. *et al.* (2013) : C-Band Polarimetric Radar QPE Based on Specific Differential

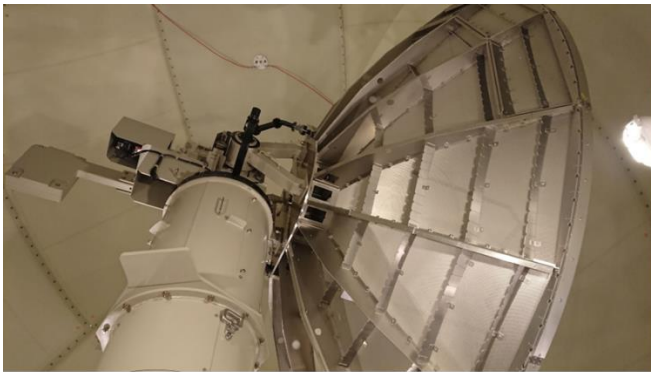
- Propagation Phase for Extreme Typhoon Rainfall. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 1354–1370.
- Wang, Y. *et al.* (2019) : A Prototype Quantitative Precipitation Estimation Algorithm for Operational S-Band Polarimetric Radar Utilizing Specific Attenuation and Specific Differential Phase. Part I: Algorithm Description. *J. Hydrometeor.*, **20**, 985–997.
- Warning Decision Training Branch (2008) : RDA/RPG Build 10.0 Training, 41 pp.
- Wilson, J. W. *et al.* (1994) : Boundary Layer Clear-Air Radar Echoes: Origin of Echoes and Accuracy of Derived Winds. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **11**(5), 1184–1206.
- Wilson, M. B. and M. S. Van Den Broeke (2021) : An Automated Python Algorithm to Quantify ZDR Arc and KDP–ZDR Separation Signatures in Supercells. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **38**, 371–386.
- World Meteorological Organization (WMO) (2021) : Guide to Instruments and Methods of Observation. *WMO No.8. Volume III – Observing Systems*. 2021 edition.
- Yamauchi, Y. *et al.* (2006) : A hybrid multi-PRI method to dealias Doppler velocities, *SOLA*, **2**, 92-95.
- 山内洋, 鈴木修 (2012) : 規格化コヒーレント電力 NCP を用いたドップラー気象レーダーの品質管理. 測候時報, **79**, 39-52.
- Yamauchi, H. *et al.* (2012) : Precipitation estimate of a heavy rain event using a C-band solid-state polarimetric radar. 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Toulouse, France, 201SP.
- Yamauchi, H. *et al.* (2013) : Vertical structure of the Tsukuba F3 Tornado on 6 May 2012 as revealed by a polarimetric radar. 36th Conf. on Radar Meteorology, Breckenridge, CO, Amer. Meteor. Soc., 320.
- 山地秀幸ほか (2016) : Cバンド MP レーダ雨量計と XRAIN による高精度広域雨量観測. 土木技術資料, **58** (7), 26-29.
- 横浜地方気象台 (2022) : 令和 4 年 8 月 18 日に神奈川県横浜市で発生した突風について (第 2 報) ~気象庁機動調査班による現地調査の報告~.
(https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/new/20220818/20220830_yokohama.pdf, 2023 年 12 月 18 日閲覧)
- 横山宏太郎ほか (2003) : 冬期における降水量計の捕捉特性. 雪氷, **65**, 303-316.
- Zhang, G. *et al.* (2001) : A method for estimating rain rate and drop size distribution from polarimetric radar measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **39**, 830–841.
- Zhang, G. F. (2016) : Weather Radar Polarimetry. CRC Press, 304 pp.
- Zhang, J. *et al.* (2020) : A Dual-Polarization Radar Synthetic QPE for Operations. *J. Hydrometeor.*, **21**, 2507–2521.
- Zrnic, D. S. and A. V. Ryzhkov (1999) : Polarimetry for Weather Surveillance Radars, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **80**(3), 389-406.

付録 1. 機器の外観写真

1. 一般気象レーダー



付録写真 1 一般気象レーダーの主要装置の主な外観（三菱電機株式会社製）

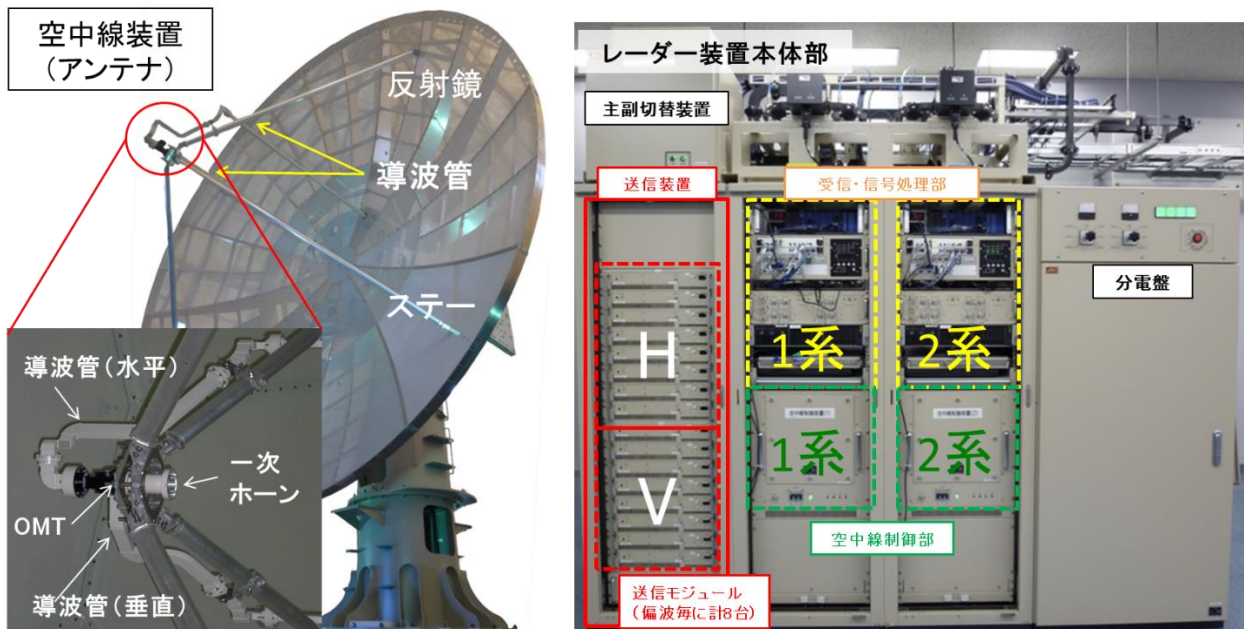


付録写真 2 一般気象レーダーの主要装置の主な外観（東芝インフラシステムズ株式会社製）



付録写真3 一般気象レーダーの主要装置の主な外観（日本無線株式会社製）

2. DRAW



付録写真4 空港気象ドップラーレーダーの主要装置の主な外観。

付録 2. 品質管理情報について

レーダーサイトにおける各種品質管理（選択的 MTI を含む.）の結果については、付録第 2.1 表に示す 8 ビット表現の品質管理情報に記録している。各スレッシュールド処理は、水平偏波と垂直偏波のそれぞれのデータに対して適用されるため、水平偏波系と垂直偏波系の 2 種類の品質管理情報（二重偏波系データ品質と選択的 MTI による結果は同一内容を格納）をサイトで作成し、どちらかを ROPS に伝送する（通常は水平偏波系）。

まず、上位 6-8 ビットには選択的 MTI による結果を格納する。選択的 MTI で不良となったものにはシークラッタやチャフなど将来的に利用できる可能性があるデータが含まれるため、Normal データを格納している。付録第 2.1 表中に記載のある陸水マップとは、グランドクラッタの存在しない海上とそれ以外を区別するためのマップ情報であるが、選択的 MTI がシークラッタ等にも有効であることが判明したため、現在は利用していない。また、MTI マップはグランドクラッタの影響

が生じやすい領域を強制的に MTI 又は不良値とするマップ情報である。

次に、上位 1-3 ビットに単偏波系のデータ品質を格納する。受信信号電力スレッシュールドの対象となる受信機ノイズは利用価値が乏しいため、データ圧縮が有効となるよう無効値で埋める。それ以外は本ビットに品質管理結果を記録し、ROPS に伝送する。なお、複数のフラグに該当がある場合は、数字の大きいフラグを格納する。

最後に、上位 4-5 ビットに二重偏波系のデータ品質として、水平偏波と垂直偏波の単偏波系データ品質のうち、数値が大きい方を格納する。よって、各単偏波のデータ品質がどちらも正常の場合のみ二重偏波系は正常とみなしている。

データは gzip 圧縮するため、圧縮効率が上がるよう、正常な気象エコーであれば全ビット 0、観測領域内でエコーが検出できない場合（受信信号電力スレッシュールド処理に該当）には全ビット 1 となるようにした。

付録第 2.1 表 品質管理情報の内容と出力データの関係.

上位1~3ビット (値0~7)	【単偏波系データ品質】	出力データ
0	正常	Normal 又は MTI
1	不良値 (NCPスレッシュールド)	Normal 又は MTI
2	不良値 (速度幅・CSR・反射強度 (変動) スレッシュールド)	Normal 又は MTI
3	不良値 (その他品質管理: 選択的MTI、無効値マップ、特異点除去、孤立点除去等)	Normal 又は MTI
4	予備	—
5	予備	—
6	無効値 (観測範囲外) <small>(ブランキング、距離倍化時のブラインド領域、長パルス観測時の最小探知距離内なども含む。短パルスを含む観測時の最小探知距離内は含まれない)</small>	無効値
7	無効値 (受信信号電力スレッシュールド)	無効値

上位4~5ビット (値0~3)	【二重偏波系データ品質】	出力データ
0	正常	Normal 又は MTI
1	不良値	Normal 又は MTI
2	無効値 (観測範囲外)	無効値
3	無効値 (受信信号電力スレッシュールド)	無効値

上位6~8ビット (値0~7)	【選択的MTIによる結果】	出力データ
0	気象エコー (陸水マップが無効)	Normal
1	気象エコー (陸水マップが有効)	Normal
2	地形エコーが重畳した気象エコー (MTIマップが無効)	MTI
3	地形エコーが重畳した気象エコー (MTIマップが有効)	MTI
4	選択的MTIによる不良 (MTIマップが無効)	Normal
5	選択的MTIによる不良 (MTIマップが有効)	Normal
6	予備	—
7	選択的MTI不能	無効値

付録 3. $S(\psi_{DP})$ の算出手法

$S(\psi_{DP})$ は ψ_{DP} の空間的ばらつきを指標化したもので、ある区間で ψ_{DP} を距離方向に線形近似し、その標準誤差を求めたものである。 ψ_{DP} は -180° から $+180^\circ$ の値域をとり、これを超える値は折り返されて観測される。このため、 ψ_{DP} が通常は単調増加する性質を利用した折り返し補正を行った上で線形近似を行うか、角度統計を利用する必要がある。本付録では、折り返しを考慮する必要のない後者の手法について示す。

まず、線形近似区間を $k = n - M, \dots, n, \dots, n + M$ とし、 k 番目のレンジビンの ψ_{DP} を ψ_k と表すと、線形近似後の標準誤差は、 $\psi_{k+1} - \psi_k$ の標準偏差を求めることに近似できる（なお、 $\psi_{k+1} - \psi_k$ の平均は K_{DP} に相当）。ここで、角度統計を用いると、複素平面上の単位円において平均合成ベクトル $R(n)$ は次式で表される。

$$R(n) = \frac{1}{2M} \sum_{k=n-M}^{n+M-1} e^{i(\psi_{k+1} - \psi_k)}$$

$$= \frac{1}{2M} \sum_{k=n-M}^{n+M-1} \{ \cos(\psi_{k+1} - \psi_k) + i \sin(\psi_{k+1} - \psi_k) \}$$

また、 $R(n)$ の長さを平均合成ベクトル長 (Mean resultant length) と呼び、次式で表すことができる。

$$|R(n)| = \sqrt{\left(\frac{\sum_{k=n-M}^{n+M-1} \cos(\psi_{k+1} - \psi_k)}{2M} \right)^2 + \left(\frac{\sum_{k=n-M}^{n+M-1} \sin(\psi_{k+1} - \psi_k)}{2M} \right)^2}$$

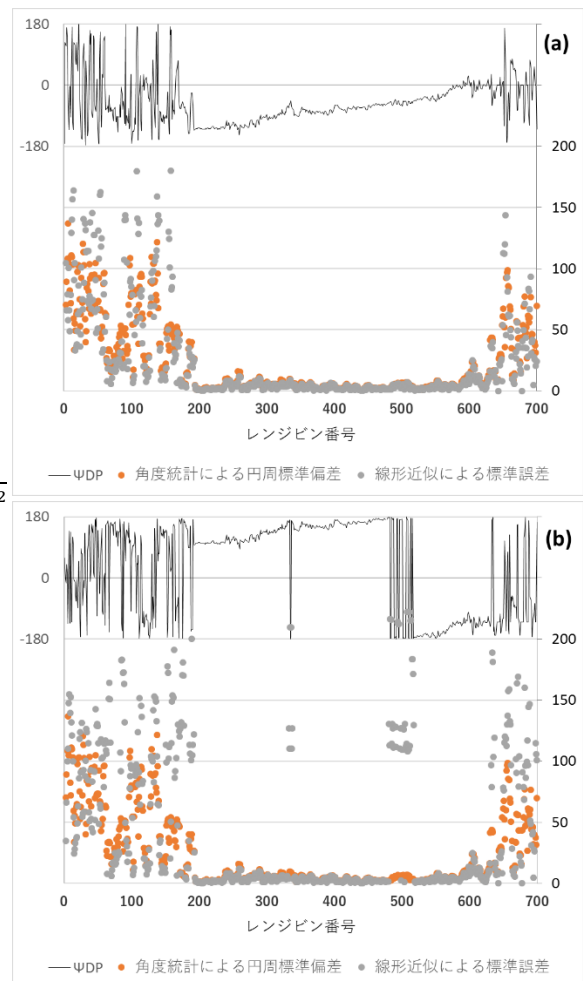
最後に、角度統計の公式から円周標準偏差 $V(n)$ を次式により求める。

$$V(n) = \sqrt{-2 \ln |R(n)|}$$

付録第 3.1 図(a)に、線形近似による標準誤差(折り返し補正なし)と角度統計による円周標準偏差を比較した結果を示す。グランドクラッタや受信機ノイズ等の影響により ψ_{DP} がばらついているレンジでは、その大きさに差異はあるものの、 $S(\psi_{DP})$ が大きい特徴は同様に表れている。また、降水エコーに伴う ψ_{DP} のばらつきが小さいレンジではほぼ同等の値が得られている。付録図第 3.1 図(b)は、(a)図の ψ_{DP} に人為的にオフセットを加えた結果である。500 レンジ前後で折り返しが生じているが、角度統計を利用した手法では、折り返しの影響を

受けていないことが分かる。このように本手法は、折り返し補正を行うことなく(補正ミスの影響も受けずに) $S(\psi_{DP})$ を算出できるメリットがある。

なお、本手法ではなく、中央絶対偏差を用いて $S(\psi_{DP})$ を算出し、利用している処理もある。例えば、本文の第 2.19 図が該当する。強雨に伴う ψ_{DP} は方位方向に大きく変化することがあるため、強雨を含む場合でも適切に ψ_{DP} の空間的ばらつきを求める際には、距離方向のみを対象とするのが適当である。一方、晴天エコー除去では、このような心配がなく、データ点数を稼ぎやすく、また計算手法がより簡便なため、粒子判別手法(小池, 2021) で実績のある中央絶対偏差を用いている。



付録第 3.1 図 (a) ψ_{DP} 及び 2 種類の手法により求めた $S(\psi_{DP})$ を比較した例。(b) (a)図において ψ_{DP} に 230° を加えた場合。いずれも $M=2$ として算出。