

# 気象レーダの観測性能向上技術の開発

## Development of Technology for Improving Observation Performance of Weather Radar

藤城 佑太 嶋村 重治 栗原 沙織  
Yuta Fujishiro Shigeharu Shimamura Saori Kurihara

### 要 旨

近年、豪雨災害の被害軽減を目的とした気象予測の重要性が高まっている。気象予測には気象レーダの観測データも用いられており、高精度な気象予測の実現には質の高い観測データが必要となる。気象レーダにおいては、観測データへの二次エコーやグラウンドクラッタなどの不要信号の混入により観測誤差が生じるケースがある。正確な気象予測の妨げとなる二次エコーおよびグラウンドクラッタを除去することを目的として、当社は「二次エコー除去・探知距離倍加処理」および「グラウンドクラッタ抑圧処理」の手法に係る技術を開発し、実観測データを用いて評価を行った上で、気象庁へ納入した。本開発により、二次エコーおよびグラウンドクラッタを高いレベルで抑圧し、高精度な観測データの取得を実現した。さらに、抽出した二次エコーの再配置による探知距離の拡大を実現した。

### Abstract

In recent years, the importance of weather prediction for the purpose of mitigating damage from heavy rainfall disasters has increased. Since weather prediction uses observation data from weather radar, high-quality observation data is required to realize highly accurate weather prediction. In weather radar, there are cases where observation errors occur by mixing unwanted signals such as second-trip echoes and ground clutter in the observation data. With the aim of removing second-trip echoes and ground clutter that hinder accurate weather prediction, JRC has developed technologies related to the methods of "second-trip echo removal and range doubler processing" and "ground clutter suppression processing", and evaluated them using actual observation data from the weather radar delivered to the Japan Meteorological Agency. This development has realized the acquisition of highly accurate observation data by suppressing second-trip echoes and ground clutter at a high level. Furthermore, the rearranging of the extracted second-trip echoes has realized the expansion of the detection distance.

### 1. まえがき

近年、台風や線状降水帯による豪雨災害の頻発および激甚化の傾向が強まっている。気象庁は、豪雨災害の被害軽減を目指し、豪雨を予測する気象観測の強化に取り組んでおり、この一環として、全国に配備した気象レーダの高精度型への更新を進めている<sup>(1)</sup>。気象レーダは、アンテナを回転させながら電波（マイクロ波）を送信して半径数百キロメートル圏内に存在する降水を観測し、降水の強度、および降水粒子の移動速度を測定する。取得した観測データは気象予測や防災気象情報の発表に利用され、豪雨災害の回避に役立っている。観測データの誤差は予測情報の誤りや意図しない警報につながるため、観測データには高い精度が要求される。

観測データの誤差要因である不要信号には「二次エコー」（探知距離外にある物標からの反射波）や「グラウンドクラッタ」（山や高層建築物からの反射波）などが挙げられ、従来はこれら不要信号の十分な抑圧は困難であった。また、台風やその他の激しい気象現象において、高速で動く降水粒子の速度を捉えるためには、送信の繰返し周波数を増やし、送信間隔を短くする必要がある。しかし、送信から受信までの時間が短くなるため、遠方からの反射波を受信することができなくなり、その結果、探知距離が短くなってしま

うという弊害があった。

本稿では、これら問題の解決を目的として気象レーダに搭載する「二次エコー除去・探知距離倍加処理」および「グラウンドクラッタ抑圧処理」に関する技術の開発、および実観測データによる評価の結果について紹介する。

### 2. 二重偏波気象レーダシステムの概要

二重偏波気象レーダは、水平偏波と垂直偏波の両成分の電波を同時に送受信し、受信した両偏波成分の振幅と位相により雨粒の特徴（形や大きさなど）を捉えることができるため、従来の単偏波気象レーダと比べて降水量の推定精度が高い。受信信号処理部において直交検波、パルス圧縮などの処理が施されたレーダ受信信号（以下「受信信号」）は、不要信号処理部において「二次エコー除去・探知距離倍加処理」および「グラウンドクラッタ抑圧処理」が施される。二次エコー除去・探知距離倍加処理は、受信信号から一次エコー信号（探知距離内にある物標からの反射波）と二次エコー信号の各々を抽出する。グラウンドクラッタ抑圧処理は、抽出した一次エコー信号と二次エコー信号に混入するグラウンドクラッタを抑圧し、処理後の一次エコー信号と二次エコー信号を観測データとして出力する。これらの信号処理プログラムをFPGAおよびDSPに実装し、リアルタ

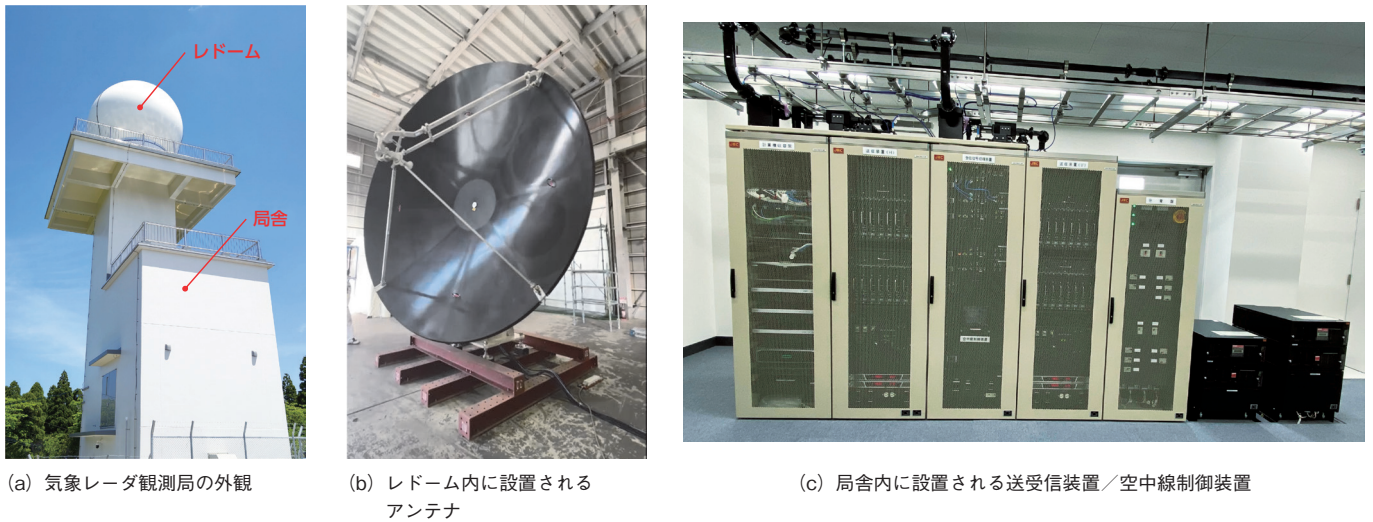


図1 設置した二重偏波気象レーダの外観  
Fig1. Appearance of the installed dual-polarization weather radar

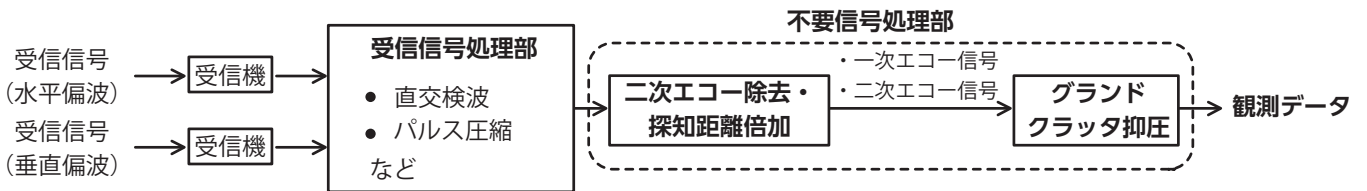


図2 二重偏波気象レーダの信号処理フロー  
Fig2. Signal processing flow of dual polarization weather radar

イムの信号処理を可能とする。

2022年に当社が気象庁へ納入した二重偏波気象レーダについて、気象レーダ観測局の外観、レドーム内のアンテナおよび局舎内の装置群を図1に示す。また二重偏波気象レーダの信号処理フローを図2に示す

エコーとは、レーダが送信したパルス信号のうち、レーダの最大探知距離内に存在する物標で反射した電波（受信したい電波）に、その一つ前に送信されて最大探知距離以遠の物体で反射した電波（受信したくない電波）が重なって受信される現象であり、「降水域が実在する距離」から「レーダの最大観測距離」を減じた距離 $\Delta R$ の位置に偽像を生じさせる。

### 3. 二次エコー除去・探知距離倍加処理

#### 3.1 二次エコー除去・探知距離倍加処理の概要

二次エコーによる偽像発生のイメージを図3に示す。二次

二次エコーの除去手法として、送信するパルス信号の始点における位相（初期位相）をランダムに変えることで各々

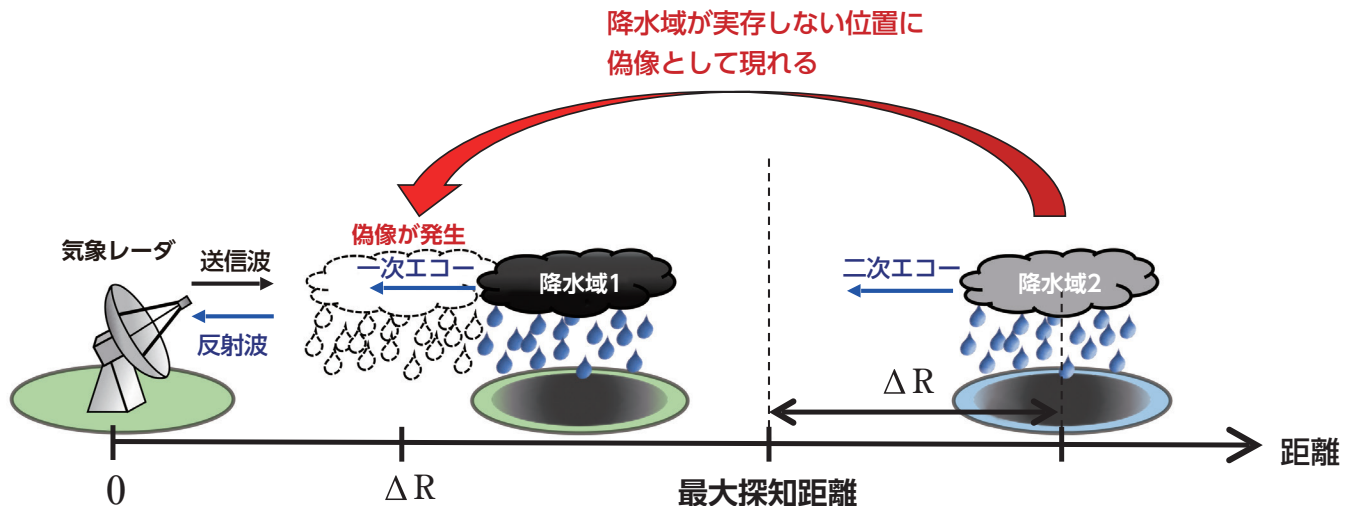


図3 二次エコーによる偽像発生のイメージ  
Fig3. Image of false echo generating by second-trip echo

のパルス信号間に位相差を設ける「位相変調方式」<sup>(2)</sup>が知られている。本処理は、物標の移動速度を表す速度スペクトル上で二次エコー信号を判別し、二次エコー信号に該当する速度成分を除去することにより、必要とされる一次エコー信号のみを抽出する。二次エコー信号除去の概念（物

標の移動速度に応じた受信信号のスペクトル図）を図4に示す。

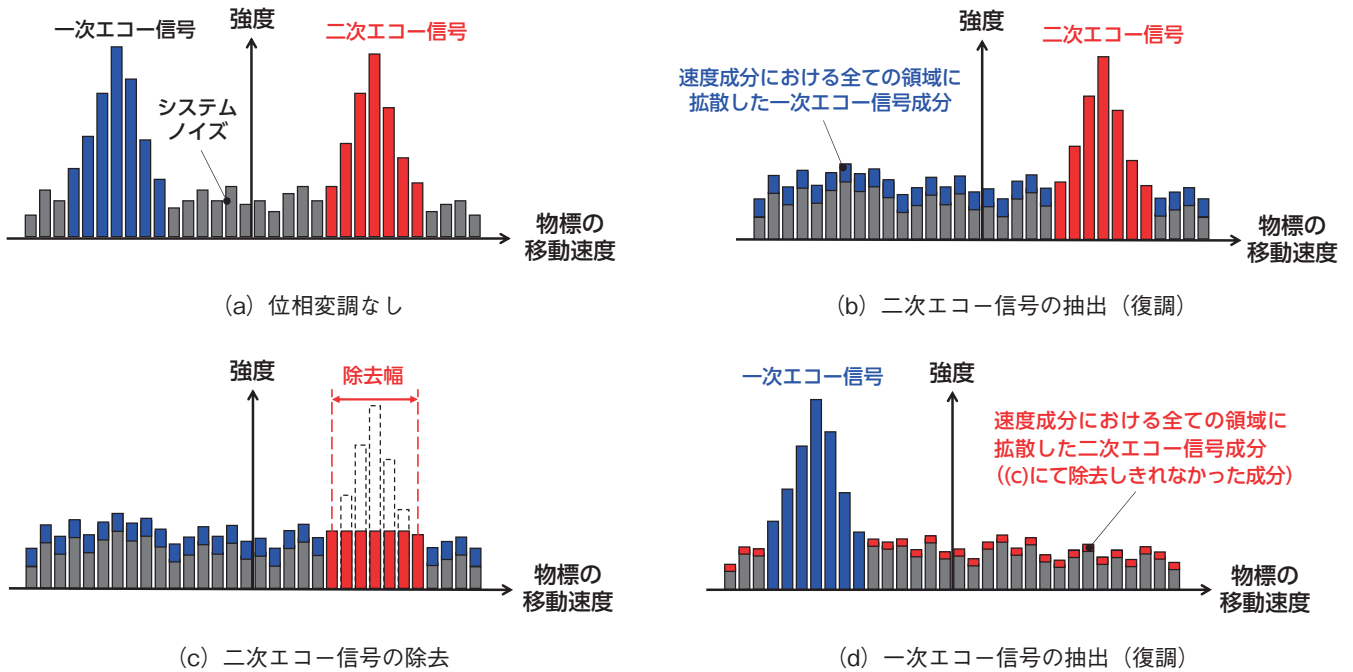


図4 位相変調方式による二次エコー信号の除去

Fig4. Removal of second-trip echo signal by the phase modulation technique

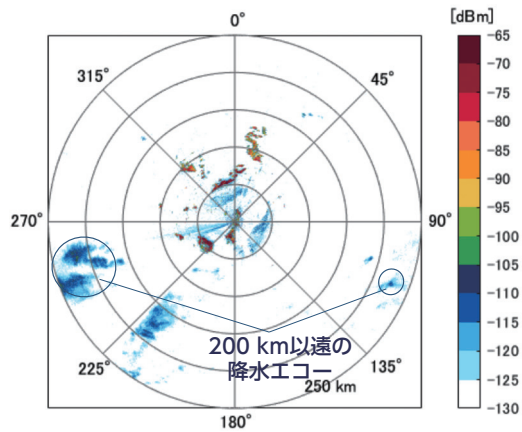
位相変調を行わないと初期位相が同一になり、一次エコー信号と二次エコー信号の各々のピークが出現するが、各々のピークがいずれの信号に属するかの判別が困難となる（図4 (a)）。送信するパルス信号を位相変調することにより、受信したパルス信号（反射波）に対し一つ前の送信パルス信号に合わせた位相補正を施すと二次エコー信号のみが抽出され、一次エコー信号は速度成分における全ての領域に拡散される（図4 (b)）。この状態で、二次エコー信号に該当する成分を除去し（図4 (c)）、直近の送信信号に合わせた位相補正処理を施すことにより、一次エコー信号のみが抽出できる（図4 (d)）。また、一次エコー信号を除去して二次エコー信号のみを抽出することも可能であり、二次エコー信号を抽出した位置までの距離にレーダの最大探知距離を加算した位置に信号を配置することにより、レーダの最大探知距離以遠にある物標の探知を可能とする。

一次エコー信号を抽出する際は、二次エコー信号成分の抑制に加え、広範な速度領域に存在するノイズ（拡散されたエコー信号）のレベル上昇を抑制する必要がある。これらの抑制効果を高めるため二次エコー信号成分の除去帯域を広くすると、所望の一次エコー信号も抑制され、減衰してしまう。これを防ぐため、二次エコー信号成分の除去帯域幅を信号強度に応じて適正化する必要がある。ここで、二次エコー信号の強度が一次エコー信号と比較して十分に小さく、二次エコー信号の拡散によるノイズレベル上昇が無視できる場合は、二次エコー信号成分を抑制せず一次エ

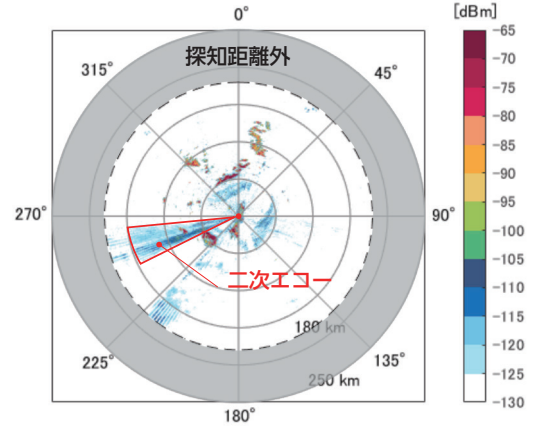
コー信号の減衰回避を優先する手法が理想である。これを実現するため、二次エコー信号のスペクトルに応じ除去幅を動的に変化させる手法、および二次エコー信号成分除去の要否判定手法を開発し、位相変調の二次エコー信号除去アルゴリズムへ導入した。

### 3.2. 評価結果

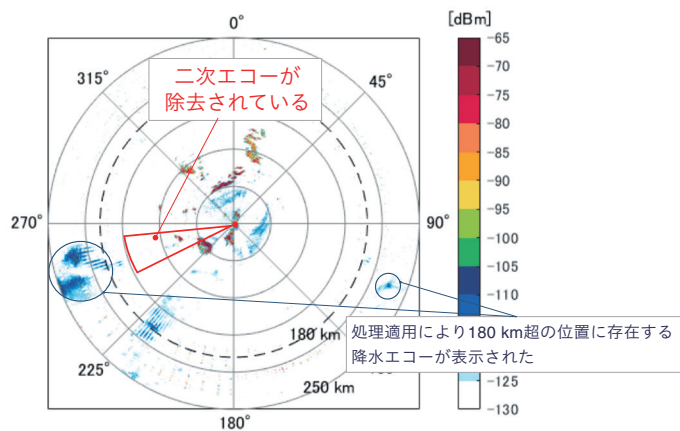
設置した二重偏波気象レーダの実観測データを用いて、二次エコー除去・探知距離倍加処理の動作を納入前に評価した。レーダはパルス信号の送信間隔を短くすることで、高速で動く降水粒子の速度を捉えられるようになる一方、探知距離が短くなる。観測点から200 km以遠の位置に存在する降水域を観測する場合、レーダの探知距離設定を250 kmモードから150/180 kmモードに変更すると、探知距離範囲外に存在する降水エコーは本来であればスコープ上に表示されないはずだが、実際には二次エコー信号が（降水域が実存しない位置に）出現する。しかし「二次エコー除去・探知距離倍加処理」を適用するとスコープの表示距離範囲が拡がるとともに二次エコー信号が除去され、降水エコーが実存する位置に所望の一次エコー信号が表示される。ここで表示される降水エコー（一次エコー信号）は、送信間隔の短いパルス信号によって観測されたものであるため、高速で動く降水粒子の速度を測定できる。「二次エコー除去・探知距離倍加処理」の適用効果のイメージを図5に示す。



(a) 探知距離設定250 kmモード時  
 (「二次エコー除去・探知距離倍加処理」非適用)



(b) 探知距離設定150/180 kmモード時  
 (「二次エコー除去・探知距離倍加処理」非適用)



(c) 探知距離設定150/180 kmモード時  
 (「二次エコー除去・探知距離倍加処理」適用)

※ 表示結果には信号の強度と相関に基づき、しきい値処理を適用

図5 「二次エコー除去・探知距離倍加処理」の適用効果イメージ

Fig5. Application effect image of "second-trip echo removal and range doubler processing"

## 4. グラウンドクラッタ信号抑圧処理

### 4.1 グラウンドクラッタ信号抑圧処理の概要

気象レーダの観測誤差要因であるグラウンドクラッタに対し、従来の当社製レーダはMTI (Moving Target Indicator) による抑圧処理が全観測点に対し施されていたが、MTIは以下に挙げる問題点を有していた。

- グラウンドクラッタが強い場合の抑圧効果が不十分
- グラウンドクラッタが生じていない地点における観測データへの悪影響 (降水エコーの歪み)

上記の問題点を解決するため、当社は以下に述べる信号処理技術を開発し、気象レーダへ採用した。

上記 a) に対し、観測点ごとにグラウンドクラッタの強度に応じた時系列デジタルフィルタを形成・適用する「GMAP-TD (Gaussian Model Adaptive Processing in Time Domain) <sup>(4)</sup> 法」により最適化を行う。また b) の対策として、観測デー

タへのグラウンドクラッタの混入の有無を判定し、MTI処理データと未処理データを動的に割り当てる「選択的 MTI 処理」が挙げられ、クラッタであるか否かの判断を有意な特徴量の入力によって行う「ファジーロジックによる選択的 MTI 処理」が特に有効と考えられることから、本方式を採用した。ここで、前述したGMAP-TD法は、従来の手法と比べて計算量が大きく、ハードウェアの負荷が著しく増大するという問題点を有し、また、ファジーロジックによる選択的MTI処理においては、あらかじめ観測されたグラウンドクラッタと降雨信号の両データに基づくパラメータ調整を必要とする一方、実データにグラウンドクラッタ成分と降水エコー信号成分が混在しているため、正確なパラメータ調整が困難であったが、当社が開発した技術により、これらの問題点を解決した。

以下、「GMAP-TD法」および「ファジーロジックによる選択的MTI処理」の概要と評価結果について述べる。

## 4.2 GMAP-TD法

### 4.2.1 GMAP-TD法の概要

GMAP-TD法は、グラウンドクラッタの統計的性質を生かした信号処理手法である。観測データから算出したグラウンドクラッタ信号の電力値をもとにして信号強度に合わせたフィルタリング行列を作成し、フィルタリング行列を用いてグラウンドクラッタ信号を抑圧する。この際に降水エコー信号の一部も抑圧されるため、本処理後に降水エコー信号の回復処理を施し、グラウンドクラッタ信号レベルのみを低減させる。本手法は、フィルタリング行列作成時に受信信号の自己相関行列を用いた逆行列演算が全観測点において必要とされることによる莫大な計算負荷が避けられず、こ

の軽減が課題とされていたが、当社は以下に述べる手法によりこれを解決した。

### 4.2.2 計算負荷の軽減

当社は、フィルタリング行列作成時の計算負荷を軽減するため、フィルタリング行列テーブルをあらかじめ用意し、観測データから算出したグラウンドクラッタの電力値に最も近いフィルタリング行列を選択し、観測点ごとの逆行列演算を不要とする手法を確立した<sup>(6)</sup>。本手法により、ハードウェアの計算能力に依存しないリアルタイム処理を可能とした。GMAP-TD法によるクラッタ信号抑圧処理の流れを図6に示す。

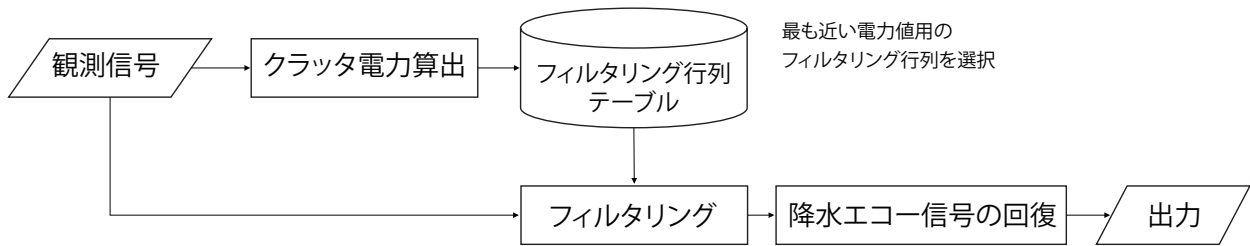


図6 リアルタイム処理を可能としたGMAP-TD法によるクラッタ信号処理の流れ

Fig6. Flow of clutter signal processing by GMAP-TD method that enables real-time processing

## 4.3 ファジーロジックによる選択的MTI処理

### 4.3.1 ファジーロジックによる選択的MTI処理の概要

本処理は、観測データが「降雨」または「グラウンドクラッタ」のいずれに近い特徴を持つかを判定するため、観測データにおける複数の特徴量を用いて計算し、0以上1以下の範囲内の値に変換する。この値が0に近いほど「降雨らしさ」が高く、1に近いほど「グラウンドクラッタらしさ」が高いことを意味する。特徴量ごとに変換された値の重み付け平均値を用いて、観測データが総合的に降雨またはグラウンドクラッタのいずれに近いかを判定し、判定結果により「MTI処理データ」「未処理データ」「無効値」のいずれかを観測点ごとに割り当てる。ここで、特徴量により降雨とグラウンドクラッタの判別能力が異なるため、あらかじめ取得したデータから特徴量ごとの信頼度を学習することが重要となる。ファジーロジックによる選択的MTI処理の流れを図7に示す。

### 4.3.2 観測データによる学習方法

特徴量ごとの信頼度は、あらかじめ取得する学習用のデータを基にして決定する。学習用のデータは、晴天時に取得するグラウンドクラッタデータと、雨天時に取得する降雨データをそれぞれ複数用意する。また、同一の観測地点において降雨とグラウンドクラッタが混在する場合を考慮し、降雨データとグラウンドクラッタデータを直交検波して得た複素IQデータ上において合算することにより両者の重量データを作成し、これを信頼度の学習および評価に用いる。ここで、あらかじめ取得可能なデータの数には限りがあるため、観測した降雨データに対し複数角度の回転処理を行い、複数方位の実存しない降水域から到来したエコー信号データ（複数の異なる降雨状況を模したデータ）を擬似的に生成し、これらをグラウンドクラッタデータと合算することにより両者の重量度合いが異なる複数のデータを生成し、これらを学習および評価に供する。選択的MTIにおける信頼度の学習および評価に用いるデータの生成過程を図8に示す。

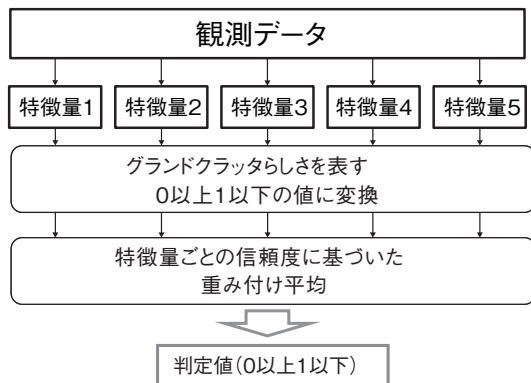


図7 ファジーロジックによる選択的MTI処理の流れ

Fig7. Flow of selective MTI processing by fuzzy logic

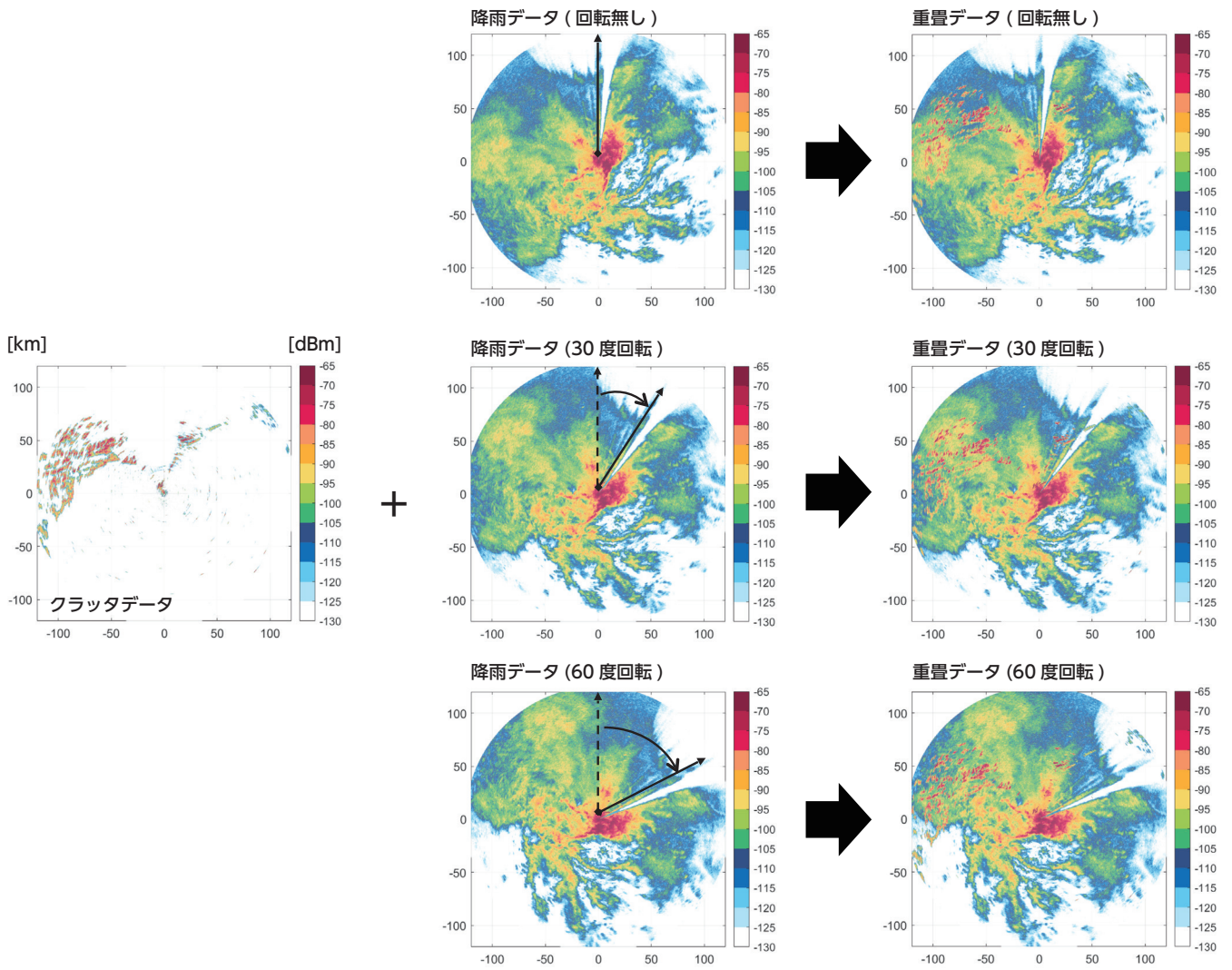


図8 選択的MTIにおける信頼度の学習および評価に用いるデータの生成過程

Fig8. Data generation process used for learning and evaluation of confidence in selective MTI

#### 4.4 評価結果

以上に述べたグラウンドクラッタ信号抑圧処理アルゴリズムを、設置した二重偏波気象レーダの実観測データに適用し、従来の当社製レーダにおけるMTI処理結果と比較して降水強度の観測精度を評価した。従来のMTI処理ではグラウンドクラッタ信号レベルが十分に抑制されておらず、また観測対象である降水エコー信号が一律に抑圧処理の影響を受けてレベルが低下し、降水強度が過小値で出力されている。選択的MTI処理では、全観測点において取得したデータに対しMTI処理の要否が判断され、MTI処理が必要と判断された観測点のデータについて、MTI処理によりグラウンドクラッ

タ信号を抑圧したデータと置き換える。MTI処理を適用してもクラッタ信号が十分に抑圧できないと判断された観測点のデータは無効値として当該データを非表示とする。以上により、グラウンドクラッタ信号レベルが高い観測点のデータに対してはクラッタ抑圧処理が適切に施され、その他の観測点のデータにおいては抑圧処理を無効化することにより降水強度の観測精度が従来と比べ向上することを確認した。

従来のMTI処理を適用した降水強度の観測結果を図9に、また選択的MTI処理を適用した降水強度の観測結果を図10にそれぞれ示す。

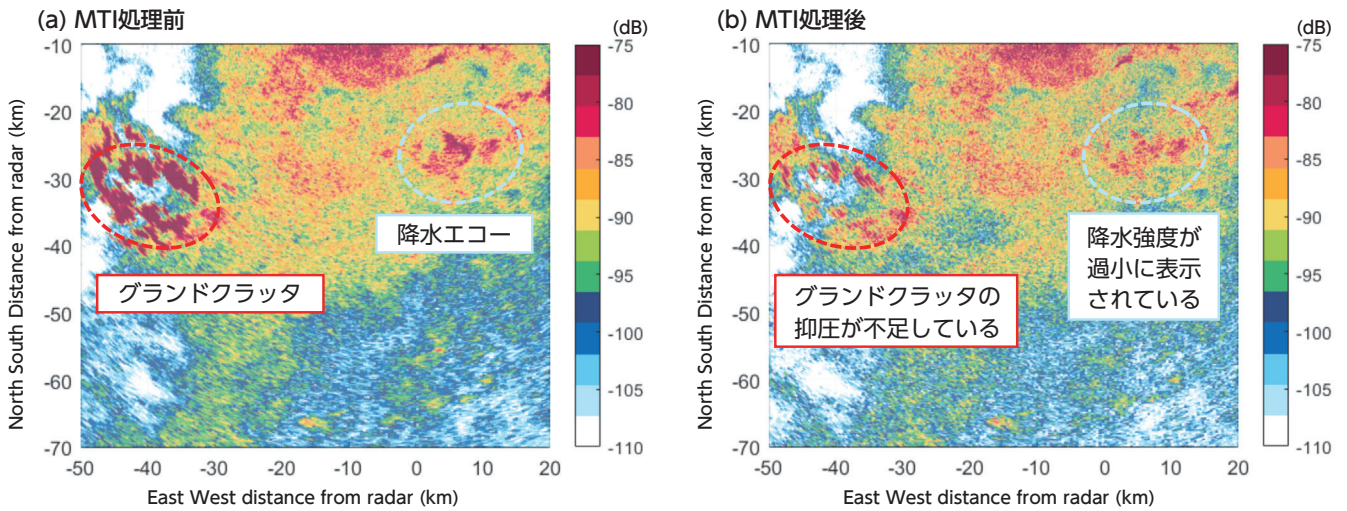


図9 従来のMTI処理を適用した降水強度の観測結果

Fig9 Observation result of rainfall intensity applying conventional MTI processing

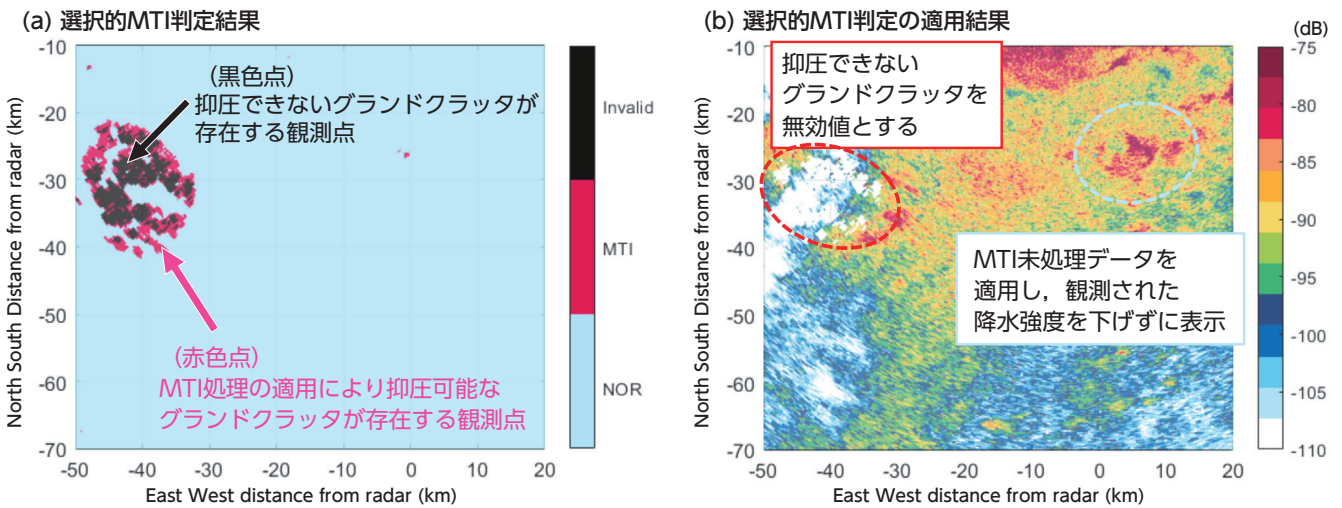


図10 選択的MTIを適用した降水強度の観測結果

Fig10 Observation result of rainfall intensity applying selective MTI

## 5. あとがき

気象レーダに搭載する「二次エコー除去・探知距離倍加処理」および「グランドクラッタ抑圧処理」に関するアルゴリズムの開発により、気象観測データに誤差を引き起こす二次エコーおよびグランドクラッタを適切に除去し、高精度の降水エコー信号観測の実現に加え、気象レーダの高い観測精度と探知距離拡大の両立に成功した。開発した信号処理アルゴリズムは気象レーダの高性能化を目的としたが、他のレーダシステムへの応用も可能であり、多種多様なレーダシステムに対する高性能化への応用が期待される。気象予測精度を更に向上させるためには、極端気象（局地的に大きな被害をもたらす気象現象）のメカニズムの究明が重要であることから、気象レーダには、高い観測精度に加え、時間・空間の両面において高密度な観測性能が求められる。当社は、気象レーダの観測精度向上技術の開発と併せ、時間分解能および空間分解能に優れたフェーズドア

レイ気象レーダの開発を進めている<sup>(7)</sup>。今後も高性能な気象レーダシステムの開発に鋭意取り組み、防災・減災を通じて社会の安全・安心に貢献してゆく。

## 謝辞

今回の技術開発にあたり、ご助言いただいた気象庁の皆様、深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- (1) 気象庁, 線状降水帯の予測精度向上, [https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jma\\_suigai/jma\\_suigai.html](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/jma_suigai/jma_suigai.html)
- (2) 石原, “気象研究ノート”, No.200, pp.27-29 (2001)
- (3) Doviak, R. J. (2006). Doppler radar and weather observations. Courier Corporation.
- (4) Nguyen, C. M., & Chandrasekar, V. (2013). Gaussian model adaptive processing in time domain (GMAP-TD) for weather radars. Journal of Atmospheric and Oceanic

Technology, 30(11), 2571-2584.

- (5) Gourley, J. J., Tabary, P., & Du Chatelet, J. P. (2007). A fuzzy logic algorithm for the separation of precipitating from nonprecipitating echoes using polarimetric radar observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24(8), 1439-1451.
- (6) 特許第7217147号
- (7) 柏柳, 佐藤, 諸富, 菅原, “短時間3次元観測を可能にするフェーズドアレイ気象レーダの開発”, *日本無線技報*, No.68, pp.13-16 (2017)

### 用語一覧

一次エコー：レーダの探知距離内に位置する物標からの反射波

二次エコー：レーダの探知距離外に位置する物標からの反射波

グラウンドクラッタ：山, 地面, 建物などからの反射波

FPGA：field-programmable gate array

(設計者がフィールドにおいて回路の構成をプログラムできる集積回路)

DSP：Digital Signal Processor

(デジタル信号処理に特化した演算処理装置)

二重偏波気象レーダ：水平偏波と垂直偏波の両成分の電波を同時に送受信するレーダ

MTI：Moving Target Indicator

(静止物標からの反射波信号を抑圧し, 移動物標からの反射波信号のみを抽出する信号処理)

速度スペクトル：観測対象である物体の移動速度を表すスペクトル

特徴量：分析対象であるデータの特徴や特性を定量的に表す値

ファジロジック：分析対象とするデータが有する曖昧さを評価する論理であり, 人工知能の基盤となる

極端気象：局地的に大きな被害をもたらす気象現象

フェーズドアレイ気象レーダ：

複数のアンテナ素子が規則的に配列されるアレイアンテナを用い, 各アンテナ素子の位相走査により機構的な動作をなくし, 任意方向への電波の送信および受信を可能とする気象レーダ