

ウィンドプロファイラにおけるNICTでの近年の取り組み

～晴天域の風を測るレーダーの高度化を目指して～

晴天域における風速の高度プロファイルを連続測定するレーダーであるウィンドプロファイラにつき、NICTが近年取り組んだISO規格の策定と不要エコー（クラッタ）を低減する観測技術の高度化を紹介する。

国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）
電磁波研究所 電磁波伝搬研究センター
リモートセンシング研究室
総括研究員 山本 真之、室長 川村 誠治



ウィンドプロファイラ LQ-13

ウィンドプロファイラ

気象は、日常の暮らしから地球温暖化対策に至るまで、人間生活に大きく影響する。ウィンドプロファイラ（Wind Profiler Radar；WPR）は、晴天域における風速の高度プロファイルを優れた時間分解能及び高度分解能（多くの場合、それぞれ10分～1時間・数100m～1km）で連続測定するレーダーである[1]。晴天域で風速の高度プロファイルを連続測定する手段は限られているため、WPRは気象に関する学術研究のみならず、気象状況の把握と予測を行う気象業務にとっても貴重な観測機器である。日本では、WPRを用いた風速の定常観測網である局地的気象監視システム（WIInd profiler Network and Data Acquisition System；WINDAS）が運用されており、WPRによる風速観測データがきめ細かな天気予報のもととなる数値予報などに利用されている[2]。

乱流などが引き起こす気温や水蒸気の変動は、大気の電波屈折率擾乱を発生させる。WPRは上空に向けて電波を放射し、電波波長の半分のスケール（ブルーブルースケール）に相当する電波屈折率擾乱が散乱した電波（大気エコー）を受信する。WPRでは、乱流が生成も消滅もせずに大きな渦から小さな渦に受け渡される領域にある（慣性小領域にある）50MHz（波長6m）から3GHz（波長10cm）までの周波数が広く用いられる。

大気の電波屈折率擾乱は風に流されるため、風速のアンテナビーム視線方向成分が、大気エコーのドップラー速度となる。多くの場合、WPRは天頂及び東西

南北方向に指向したアンテナビームで測定した大気エコーのドップラー速度から、風速3成分（東西風・南北風・鉛直流）を得る（図1）。ドップラー速度は、WPRから得た大気エコーのドップラースペクトル（パワースペクトル）のドップラーシフトから得る。一般的に、アンテナビーム1方向あたり数千回程度の送受信を行うことで、WPRは微弱な大気エコーを検出する。

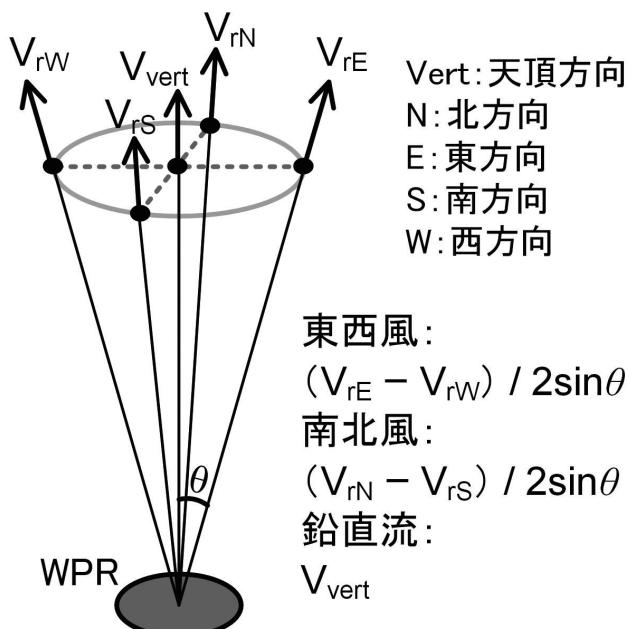


図1 WPRのアンテナビーム方向におけるドップラー速度と風速の関係。 θ は天頂角である。

ウィンドプロファイラの ISO 規格策定

気象観測データは、世界各国の気象業務・研究活動等に広く利用される。気象観測データの精度を確保するため、国際標準化機構 (International Organization for Standardization; ISO) は、世界気象機関 (World Meteorological Organization; WMO) との連携のもと、気象測器に関する国際規格の策定を進めている。ISO では、「大気の質」の専門委員会 (TC 146) の下に設置された「気象」の分科委員会 (SC 5) が気象測器に関する ISO 規格を担当し、WMO において気象観測手法や測器の標準を検討する観測・インフラ・情報システム委員会 (INFCOM) と連絡調整を行なながら、必要な技術基準を ISO 規格として定めている。WPR の ISO 規格策定に取り組む WG8 (TC 146/SC 5/WG 8) は、2017 年 11 月に発足した。WG8 の Convenor (コンビーナ) はドイツ気象局の Volker Lehmann 氏が務め、Expert (技術専門家) として各国からの研究者と技術者が参加した。TC 146/SC 5/WG 8 が策定に取り組んだ ISO 規格は、作業原案 (WD)、委員会原案 (CD)、国際規格案 (DIS)、最終国際規格案 (FDIS) の各段階を経て、2022 年 12 月に ISO23032:2022 として発行された ([3] 及び図 2)。



図 2 ISO23032:2022 のホームページ [3]

ISO 規格の策定に取り組む日本の国内審議委員会には、気象庁、企業、研究機関が参加した。NICT は国内審議委員会の関係者と密接な情報交換を行い、さらに NICT が持つ WPR についての技術的知見や運用経験を生かすことで、国内審議委員会からの ISO 規格に関する提案の実施における中心的な役割を果たした。さらに、本報告の著者である山本は Expert として WG8 が開催した全ての国際会議に参加し、国内審議委員会からの提案を基にした各国の Expert との調整を行うことで、ISO 規格における技術基準を定めることに大きく貢献した。

WG8 では、測定品質に優れる風速観測データを国際的に提供する日本の WINDAS が高く評価されていた。研究機関及び企業による研究開発成果や WINDAS の運用経験をもとにした日本からの提案は、WPR の技術基準として定めるべき項目である設計・製造・設置・運用・保守の全てにわたった。これらの提案は高く評価され、ほとんどが ISO 規格における技術基準として採用された。NICT が WPR の観測性能を向上させる基盤技術として高度化に取り組んだアダプティブクラッタ抑圧 (Adaptive Clutter Suppression; ACS) やレンジイメージングも、それぞれ非所望エコー (クラッタ) の低減とレンジ (高度) 分解能を向上させるための ISO 規格における推奨技術となった。日本が培った WPR に関する技術と経験が、WPR における ISO 規格の策定に生かされた。

クラッタを低減する技術の高度化

WPR の受信信号には、地表にある樹木・構造物・車両のほか、空中に存在する航空機・鳥・虫などの様々な散乱源からのクラッタが混入する。大気エコーは微弱であるため、アンテナのサイドローブで検出されるクラッタであってもクラッタの受信強度は大気エコーよりも大きくなる場合が多い。そのため、クラッタは大気エコーの検出を妨げることで、風速の測定精度を低下させる原因となる。また、WPR における従来の品質管理手法の多くはクラッタが混入した受信信号を欠測とするため、クラッタは風速のデータ取得率を低下させる原因となる。クラッタの低減により風速の測定精度とデータ取得率を向上させることは、WPR における長年の課題である。

ACS は、クラッタを低減することで大気エコーの検出を可能とする技術である。図 3 に ACS の概要を示す。ACS は、アンテナサブアレイ (以下、「サブアレイ」と表記) のそれぞれから取得した受信信号の重み付き和を計算する (図 3a)。各サブアレイにおける重み付け (重みベクトル) の決定には、受信アンテナの指向方向におけるアンテナ利得を保つ方向拘束のもと受信電力を最小とする、方向拘束付き電力最小化 (Directionally Constrained Minimization of Power; DCMP) に基づいた適応信号処理を用いる。方向拘束により受信アンテナの主ローブで検出される大気エコーの強度低下が抑えられるため、電力最小化は受信アンテナの指向方向以外から検出されるクラッタを低減させる (クラッタ到来方向における受信アンテナの感度を低下させる) よう働く (図 3b)。NICT が有す

る 1.3GHz 帯 WPR である LQ-13 は、図 3a に示すような、主アンテナを構成するサブアレイと低仰角から到来するクラッタを検出するサブアレイを用いた ACS が可能である [4]。

時間方向に連続した受信信号のドップラースペクトルに対する中央値フィルタリング (Median Filtering; MF) は、ドップラースペクトルへの混入時間が限られるクラッタを低減する手段である。方向拘束がある ACS は、メインロープあるいはその近傍から到来するクラッタを十分に低減できない場合がある。一方、メインロープあるいはその近傍から到来するクラッタの発生源は空中を移動するため、ACS の適用後に消え残ったクラッタを MF により低減することが期待できる。LQ-13 による観測結果から、ACS と MF の組み合わせがクラッタを低減する有効な手段であることが示されている [5][6]。

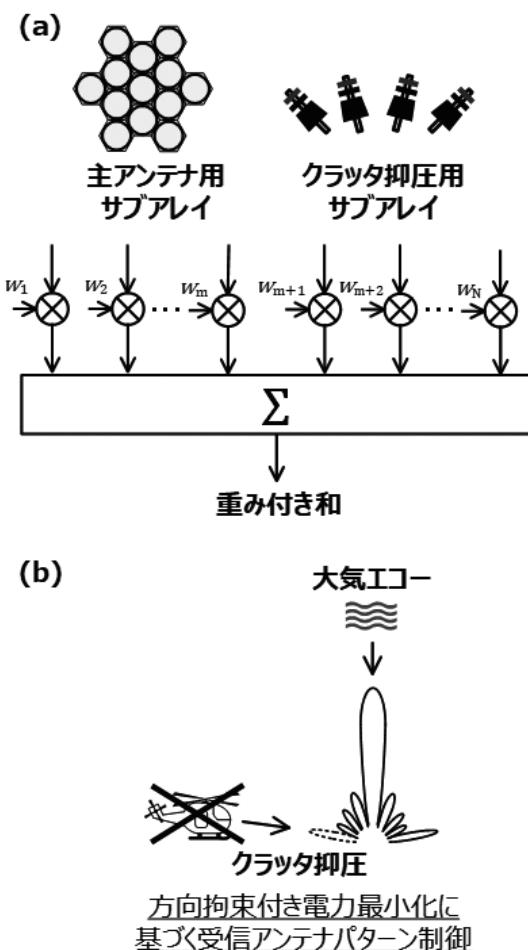


図 3 (a) ACS における信号処理
(b) ACS における受信アンテナパターン制御の概要図

LQ-13 による、ACS と MF を用いた水平風の観測例を示す。風速を得るためのデータ処理は [6] と同じであり、以下の手順である。

- ①鉛直及び東西南北のアンテナビーム方向のそれぞれで、13 台の主アンテナ用サブアレイと 11 台のクラッタ抑圧用サブアレイから得た 256 点の複素時系列受信信号を入力とした ACS を行う（各ビーム方向における複素時系列受信信号の取得時間は 0.4096 秒）。
- ②各ビーム方向で、ACS 適用後の複素時系列受信信号からドップラースペクトルを得る（取得間隔は 2.048 秒 (= 0.4096 秒 × 5 方向)）。
- ③各ビーム方向で、時間方向に連続した 29 個のドップラースペクトルに対して MF を適用することで、ドップラースペクトルの代表値を得る（取得間隔は 59.392 秒 (= 2.048 秒 × 29)）。
- ④各ビーム方向において、ドップラースペクトルの代表値からドップラー速度を得る。
- ⑤各ビーム方向のドップラー速度から風速を得る（図 1）。風速の取得間隔はドップラースペクトルの代表値の取得間隔と同じ（59.392 秒）である。

観測では、 $2\mu\text{s}$ 送信サブパルス幅（レンジ間隔 300m に相当）に対して 2 倍のオーバーサンプリング（レンジ間隔 150m に相当）を行った。LQ-13 の東・西・南・北方向ビームの天頂角は 14° であるため、水平風の高度間隔は 146m (= 150m × cos14°) であった。水平風の最低観測高度は 291m であった。

図 4 に、LQ-13 による水平風の観測結果の例を示す。ACS と MF のいずれも適用しない場合（図 4a）は、クラッタが受信信号に混入することで大気エコーが正しく検出できないために、風速の誤測定が発生した。そのため、時間及び高度方向の風速変化における不連続が見られる。ACS と MF を適用した場合（図 4b）では、クラッタの低減により大気エコーを正しく検出することで、正しい（時間及び高度方向に連続した）風速の観測結果が得られている。図 4 に示す観測結果は、ACS と MF の組み合わせが、クラッタを低減することで風速の測定精度とデータ取得率を向上できる手段であることを示している。

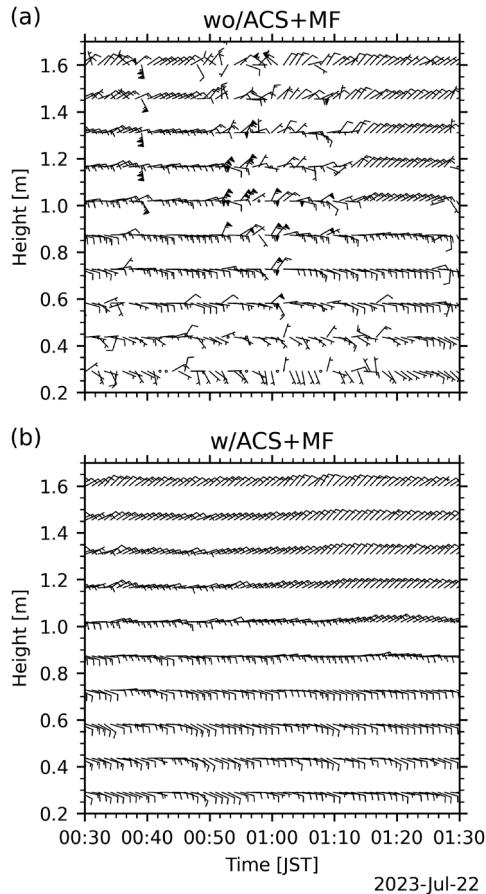


図4 2023年7月22日の00:30～01:30の期間における、
LQ-13による水平風の観測結果。

(a)はACSとMFのいずれも適用しない場合を、
(b)はACSとMFを適用した場合の観測結果をそれぞれ示す。
短い矢羽は1ms⁻¹を、長い矢羽は3ms⁻¹を、旗矢羽は6ms⁻¹をそれぞれ示す。

まとめ

WPRは、晴天域における風速の高度プロファイルを観測する貴重な観測手段である。本報告では、最初にWPRの概要を述べた。次に、WPRによる風速観測データの精度を国際的に確保することを目的としたISO23032:2022の策定において、日本とNICTが大きく貢献したことを紹介した。

NICTでは、WPRに関する観測技術の高度化に取り組んでいる。本報告では、ACSとMFの組み合わせがクラッタを低減することで風速の測定精度とデータ取得率を向上できる手段であることを示す例として、1.3GHz帯WPRであるLQ-13を用いた観測結果を紹介した。WPRに関するNICTでの取り組みは、WPRのさらなる高度利用に資すると考えている。

謝辞

本件は、国立研究開発法人情報通信研究機構の高度通信・放送研究開発委託研究（住友電設株式会社）において製作されたLQ-13のACSシステムを使用し、総務省から受託した「電波伝搬の観測・分析等の推進」の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1]深尾昌一郎, 浜津享助, 気象と大気のレーダリモートセンシング(改訂第2版), 京都大学学術出版会, 京都, 2009.
- [2]気象庁, ウィンドプロファイラ, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/windpro/kaisetsu.html> (2025年9月2日閲覧).
- [3]ISO23032:2022, Meteorology — Ground-based remote sensing of wind — Radar wind profiler, <https://www.iso.org/standard/74365.html> (2025年9月2日閲覧).
- [4]Yamamoto, M. K., S. Kawamura, K. Imai, H. Yamaguchi, K. Saito and K. Nishimura, Aerial clutter suppression in a wind profiler radar with antenna subarrays, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 60, 1-14, Art no. 5107414, 2022. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3127208>
- [5]Yamamoto, M. K. and S. Kawamura, Clutter mitigation for wind profiler radar using adaptive clutter suppression and median filtering for Doppler spectra, IEICE Communications Express, 13(7), 231-234, 2024. <https://doi.org/10.23919/comex.2024XBL0032>
- [6]山本真之・川村誠治, アダプティブラッタ抑圧とドップラースペクトルの中央値フィルタリングを用いたウィンドプロファイラレーダにおけるクラッタ抑圧, 電子情報通信学会論文誌B, 108-B(7), 361-362, 2025. <https://doi.org/10.14923/transcomj.2024BLL0002>

山本 真之



●略歴：1998年京都大学工学研究科電子通信工学修士課程修了。企業・大学での勤務を経て、2015年NICTに入所。現在、電磁波研究所・電磁波伝搬研究センター・リモートセンシング研究室 総括研究員。2007年京都大学博士（情報学）。

●研究内容：非所望エコー（クラッタ）による風速の測定精度やデータ取得率の低下は、ウィンドプロファイラにおける長年の課題である。ウィンドプロファイラの観測性能向上を目指した、クラッタを低減する技術の実証に取り組んだ。

●今後の展望：複数のアンテナサブアレイから得た受信信号の振幅や位相を巧みに操るアダプティブラッタ抑圧技術を用いることで、大気観測用レーダーの観測性能を大幅に向上させる取り組みを引き続き行なっていくたい。