

気象予報向けレーダ・ライダ

中溝尚道* 柿元生也*
 今城勝治** 柳澤隆行***
 廣澤賢一**

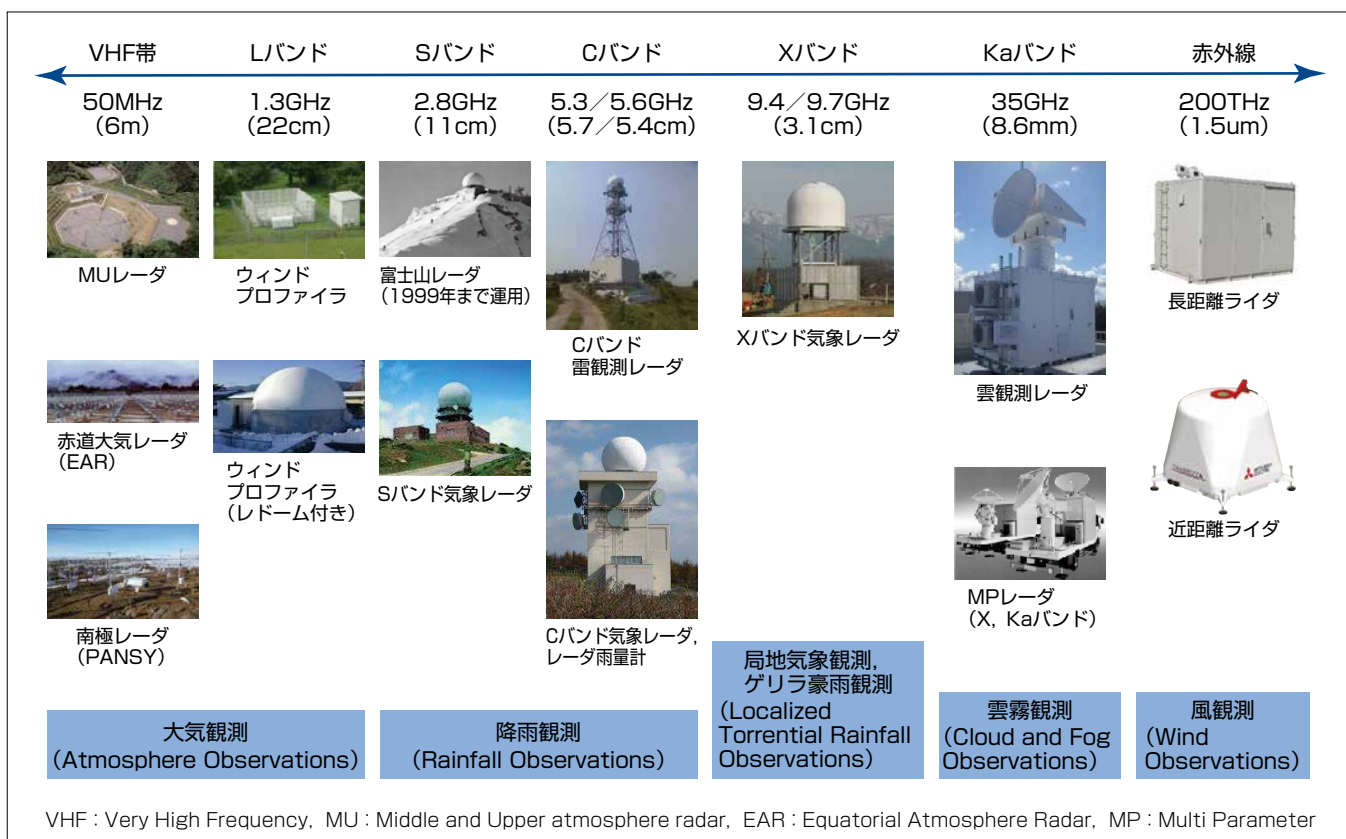
Radar and Lidar for Weather Forecasting

Takamichi Nakamizo, Masaharu Imaki, Kenichi Hirotsawa, Ikuya Kakimoto, Takayuki Yanagisawa

要旨

三菱電機は1955年から気象観測用の各種レーダの開発・製造を行っている。レーダの周波数帯域は50MHz～35GHzの広範囲に及び、2015年から200THzの光波レーダであるライダもラインアップに加えている。ラインアップとしてVHF帯(50MHz)の大気観測用のMUレーダ、赤道大気レーダ、南極レーダ(PANSY)、Lバンド(1.3GHz)の風観測用のウィンドプロファイラ、Sバンド(2.8GHz)、Cバンド(5.3/5.6GHz)及びXバンド(9.4/9.7GHz)の広域・局地気象観測用気象レーダ、Kaバンド(35GHz)の雲観測レーダ、近距離ライダ、空港気象観測向けの風計測ライダ及び航空機搭載型ライダからなる製品群を持ち、日本及び海外の気象観測・予報業務及び研究に貢献している。

現在、気象予報の更なる精度向上に貢献するために、新型気象レーダ及び水蒸気ライダを開発している。新型気象レーダは信号処理の高度化によって受信データの品質を向上させ、より正確な降雨データを予報計算に初期値として使用することによって、予報精度の向上に貢献することが期待される。水蒸気ライダは、風計測ライダに、送信光の波長を水蒸気の吸収線に一致させる波長安定回路を付加して、水蒸気の吸収量から大気中の水蒸気量を計測するようになったもので、水蒸気量の鉛直プロファイルを計測できる。この装置によって、雲になる前の水蒸気の動きを捉えることで、これまで早期予測が困難であったゲリラ豪雨の予測に貢献できる。



当社の気象観測関連システム

当社の大気レーダ・気象レーダ・ライダの製品ラインアップを示す。

1. ま え が き

当社はパルス状の電波をアンテナから照射して降水粒子や雲・霧の粒子の後方散乱波を受信することで、その位置と移動速度、強度を測定する気象レーダと、光波をスカナから照射して大気中のエアロゾルを観測し、大気の間風、風速や乱気流を観測するライダーの開発・製造を行っている。

気象レーダは、降雨の兆候を検知してゲリラ豪雨等の突発的な気象現象を予測することに効果を発揮することが期待される。

2. 気象予報用途の現業レーダ

この章では、24時間365日安定運用を行い日々の気象予報に必要な降雨強度・風速等のデータ提供に貢献している現業レーダについて述べる。気象予報用の気象レーダのマイルストーンとして代表的な当社製レーダに、1964年から1999年の期間に運用した富士山レーダが挙げられる。富士山レーダは富士山頂に据え付けられ、半径800kmの範囲を観測することが可能であり、予報だけでなく台風の早期警戒に貢献した。

気象庁は全国に20台のCバンド気象レーダを配備し、全国をくまなく降雨強度の観測を行っている。2000年頃までは送信機にマグネトロンを採用していたが、2006年からクライストロンを採用してドップラー速度の観測も開始し、気象予報に供する情報を拡充した⁽¹⁾。2018年には、送信機に固体素子を採用し、水平・垂直の偏波を同時に送受信することによって高精度な観測を行える二重偏波気象レーダを当社が初めて受注した。2020年から新たな東京レーダとして運用が開始される予定で、更なる観測精度向上が期待される。

また、2000年にはおよそ10km上空までの高層風の風向風速を観測できるウィンドプロファイラを実用化し、2001年からWINDAS(Wind profiler Network and Data Acquisition System)として実運用が開始され、気象予報精度向上に大きく貢献している。

3. 二重偏波観測による精度向上

この章では先に述べた二重偏波気象レーダについて述べる。気象レーダの近代化で、近年最も代表的なものとして二重偏波観測が挙げられる。国内で二重偏波観測を行っている現業レーダとして、国土交通省のXバンドMPレーダが挙げられる。全39台中、当社製のものが16台導入されている。Xバンドを気象観測に用いることでの課題として、降雨減衰特性が挙げられる。10mm/hrの降雨に対する送信波の減衰量は、Cバンドが0.09dB/km程度であるのに対し、Xバンドは0.65dB/km程度と約7倍であり、影響が無視できない。二重偏波化に伴い観測が可能になる偏波

間位相差(ϕ_{DP})は位相情報のため強度の減衰の影響を受けないため、 ϕ_{DP} を採用した降雨強度算出方法を適用することでこの課題を解決し、Xバンドの現業用気象レーダが実用化された。

また二重偏波観測は降雨減衰の影響を受けにくいCバンドレーダにも有効である。先に述べた強度減衰の影響が比較的少ないことに加え、二重偏波観測データによって粒子の判別や地形エコー等の非降水エコーの弁別による観測データの品質管理に効果を発揮する。例えば、 ϕ_{DP} の空間変動量は小さいほど降水エコーであることを示す特性を持つため、降水エコーの弁別に役立つ。観測データの品質管理は重要な課題の一つであり、特に地形エコーの除去が課題となる。地形エコー除去手法としてエコーのドップラー速度を利用するMTI(Moving Target Indication)が挙げられるが、地形エコー強度が強い場合除去しきれないケースが発生し得る。一方で、ドップラー速度が0m/sに近い降水エコーを大幅に誤って除去し、気象予報に悪影響を与えるケースも発生し得る。

この課題に対して、現在製造中の東京レーダ向けに、二重偏波観測データを用いた新たな品質管理手法を開発した。これまでの単偏波レーダでは単偏波でも得られる観測パラメータ(反射強度、ドップラー速度等)を用いて決定木によって①降水エコー、②地形エコー、及び③エコーなしを判定していたが、降水エコーかつそのドップラー速度が0m/sに近い場合、地形エコーと誤って除去することがあった。この課題を解決するために二重偏波観測データを含めたファジィ論理による品質検定手法を開発した。この手法によって、先に述べた①～③に加え「④地形エコーと降水エコーの重畳」を加えることで降水エコーの弁別能力を向上させ、降水エコーのドップラー速度が0m/sに近い領域でのMTIによる誤除去を改善できる。従来手法との比較を図1に示す。

さらに新機能として特殊位相符号を用いた観測範囲倍化機能を開発した。パルスを送受信するレーダでは、ドップラー速度を計測する風速の強弱範囲は原理上パルス繰り返し周期に反比例し、周期が短いほど範囲を拡大できる。一方で観測範囲(レーダからの距離)は周期に比例するため、風速の強弱範囲と観測範囲はジレンマの関係にある。これを解決する手段として、送信パルスごとの位相を疑似的にランダムにする、ランダム位相変調という技術を用いて、レンジダブラという観測距離を倍化する処理を行っていた。これは、送信時にランダム位相変調を行った上で、観測範囲外から反射されて戻ってくるエコー(以下「二次エコー」という。)が抽出できるように受信時に位相を変換すれば、観測範囲内からの反射信号(以下「一次エコー」という。)が二次エコーの周波数スペクトル軸上で拡散されることを利用している。しかしこの手法では、レンジダブラを行って

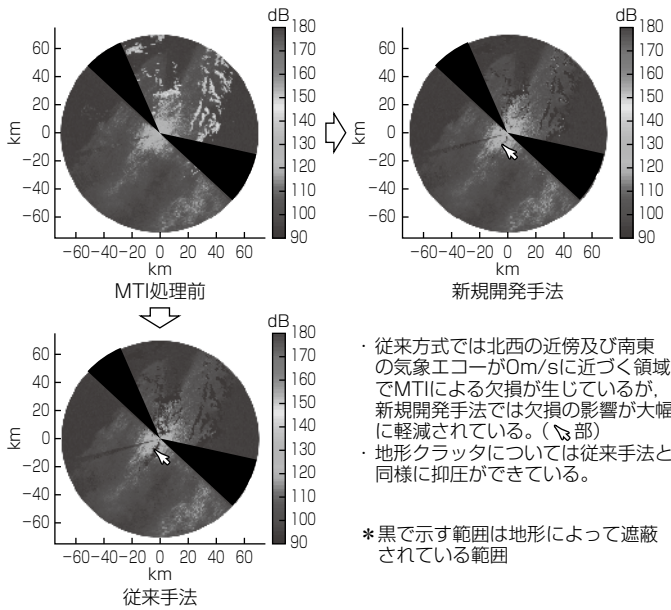


図1. 従来手法と新規開発手法の比較

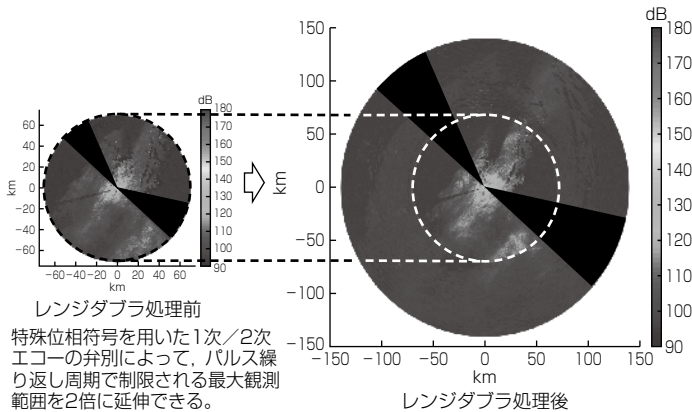


図2. 特殊位相符号を用いたレンジダブラ機能

も一次エコーがノイズとして拡散されるだけで、除去されないため、二次エコーの信号を抽出する上で精度に限界があった。今回、新機能として一次エコーと二次エコーをそれぞれほぼ完全に分離できる特殊な位相符号を用いることで、一次エコーが強い場合でもより正確に二次エコー成分を抽出できる手法を開発した。実際に観測されたエコーを用いて新機能を適用した結果を図2に示す。

この新機能によって、精度の高い広範囲の観測結果を提供することで、更なる気象予報への貢献が期待される。

4. より正確なナウキャストへ

4.1 Kaバンド雲観測レーダによるゲリラ豪雨予測

近年、ゲリラ豪雨による土砂災害や洪水などによる被害が増加している。僅か30分から1時間で無降雨の雲又は水蒸気の状態から豪雨が発生・消滅するケースもあり、1時間先までの降雨予測、いわゆるナウキャストが要請されている。

図3に降雨の生成過程を示す。気象レーダの観測対象は

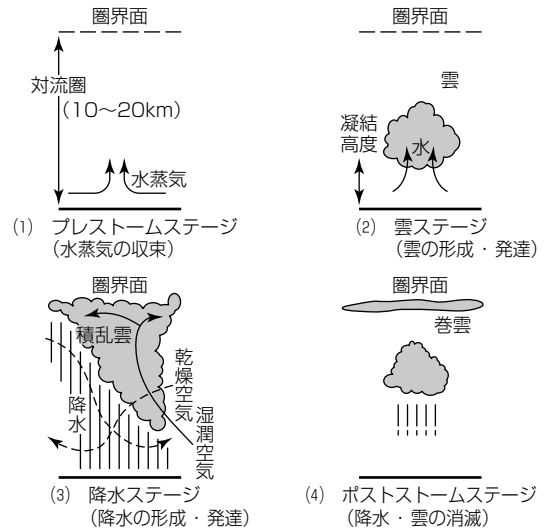


図3. 降雨の生成過程

降雨であるため、(3)の降水ステージで初めて観測できるが、避難等の処置に要する時間を考慮すると、観測時点で手遅れになるケースもあり得る。このような局地的大雨に対応したナウキャストを実現するための手段として、降水の前段階のステージでの観測が挙げられる。微小な雲粒子を観測するためにはC、Xバンドより更に高い周波数での観測が必要となる⁽²⁾。

この課題を解決するため、当社は雲粒子や水晶粒子を観測できるKaバンド(35GHz)の雲観測レーダを開発・製造し、(2)の雲ステージの観測を実現した。図4はゲリラ豪雨のような局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想図である。積乱雲の発達前ではドップラーライダーとマイクロ波放射計、発達段階ではKaバンド雲観測レーダを用いることによって、ゲリラ豪雨等に対応したナウキャストに貢献できると考えている。

4.2 水蒸気ライダー

通常的气象予報では困難な、ゲリラ豪雨予測への要求が高まっている。従来のS、C、Xバンドの気象レーダでは、その波長特性から、雲や雨滴が発生して初めて豪雨の前兆を観測することが可能になる。しかし、ゲリラ豪雨は、雲が発生してから15~30分程度の短時間で豪雨となる場合が多いため、警報発表後に安全に避難する時間の確保が困難であった。積乱雲は、大気中の水蒸気が上昇気流に乗って上空で冷やされ、凝結することで発生する。水蒸気の分布と動き(=風)を計測することによって、約90分から120分前に予報が可能になるとされている⁽³⁾。そこで、ゲリラ豪雨の早期予報を可能にする風計測ライダーを応用した風と水蒸気の高高度分布を同時に計測可能なライダーの開発を行った。

図5に、開発した水蒸気ライダーの構成を示す。HCN(シアン化水素)の吸収線に同調した基準光に対し、基準光と種光を合波して発生する周波数差をモニタして、種光の波長を制御する。種光は水蒸気が吸収する波長(ON波長)

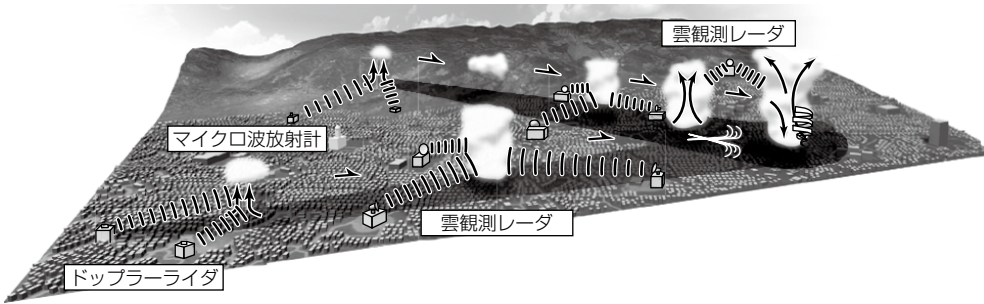


図4. 局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想

路型高出力レーザー増幅器⁽⁷⁾を、水蒸気観測に適した波長1.531nmに利得範囲を拡張することで実現した。この構成では、単一周波数パルスレーザーとして世界最高となる出力15.8mJ(繰り返し500Hz)を実現し、水蒸気ライダーの高性能化を図った。

図6に水蒸気測定結果を示す。(a)はON波長とOFF波長の信号光強度、(b)は(a)から得られた水蒸気量、(c)はドップラーシフトから得られた風速分布を示している。雲底で制限された最大高度2,500m以下の範囲で、風と水蒸気分布の同時計測を実現した。

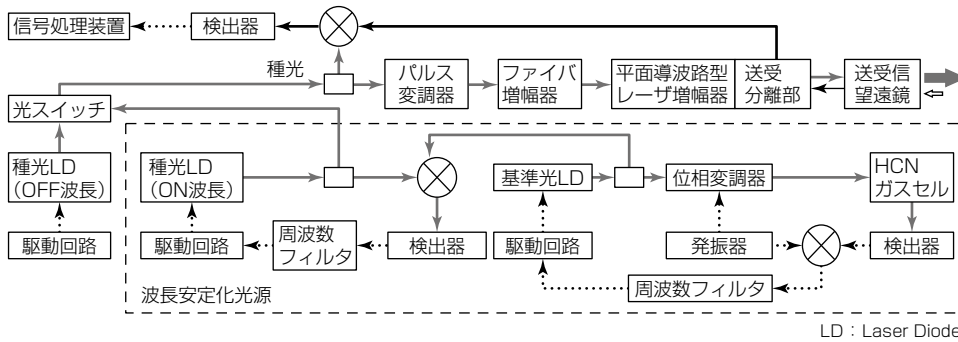


図5. 水蒸気ライダーの構成

5. むすび

当社の気象予報向けレーダ・ライダーについて、観測・予報精度向上に対する追求の歴史と最新の開発動向について述べた。3章で述べた二重偏波気象レーダは2019年度から運用を開始する予定で、開発の最終段階にある。4.2節に述べた水蒸気ライダーについては、早期実用化に向け製品化開発に取り組む必要がある。

参考文献

- (1) 石原正仁, ほか: 気象レーダー60年の歩みと将来展望, 気象研究ノート, No.237 (2018)
- (2) 柿元生也, ほか: 雲観測用Kaバンドレーダ, 三菱電機技報, 90, No.2, 139~142 (2016)
- (3) 山口弘誠, ほか: 水蒸気量の鉛直分布のデータ同化による降水予測精度へのインパクト評価, 京都大学防災研究所年報, No.54B (2011)
- (4) Kawamura, S., et al.: Water vapor estimation using digital terrestrial broad casting waves, Radio Science, 52, 367~377 (2017)
- (5) 小司禎教: 水蒸気観測技術の発達とこれから, 天気, 54, 13~18 (2007)
- (6) Browel, E. V. et al.: Water vapor differential absorption lidar development and evaluation, Appl. Opt., 18, 3474~3483 (1979)
- (7) Sakimura, T. et al.: 1.5- μm high average power laser amplifier using an Er, Yb: glass planar waveguide for coherent Doppler LIDAR, Proc. of SPIE, 8526, 852604-1 (2012)

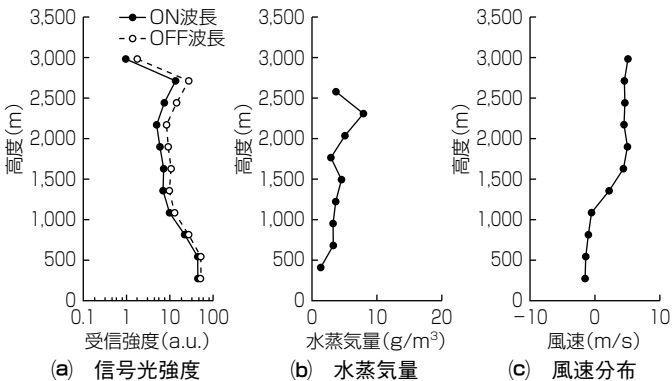


図6. 水蒸気測定結果

と吸収しない波長(OFF波長)に制御し、種光を交互に切り替えて増幅して大気中に照射し、エアロゾルによる散乱光を受信する。受信光には、エアロゾルの移動によるドップラーシフトと、水蒸気の吸収による強度変化が発生する。従来の風計測ライダーと同様にドップラーシフトから風速を導出するとともに、ON波長とOFF波長の受信強度の比から水蒸気量を導出する。

この方式では、GPS(Global Positioning System)やUHF(Ultra High Frequency)の電波遅延時間を用いた方式⁽⁴⁾やマイクロ波放射計⁽⁵⁾では計測困難な水蒸気の高高度分布を、遠隔からリアルタイムに計測できるという特長がある。また、種光との干渉によるヘテロダイン検出を用いるため、従来の直接検波方式ライダー⁽⁶⁾で課題となる背景光の影響を受けず、昼夜問わず高精度観測が可能になる。

ライダー実現にとって技術的に大きな課題となる高出力レーザーは、風計測ライダーの製品で用いている平面導波