

雲観測用Kaバンドレーダ

松田知也*
柿元生也*

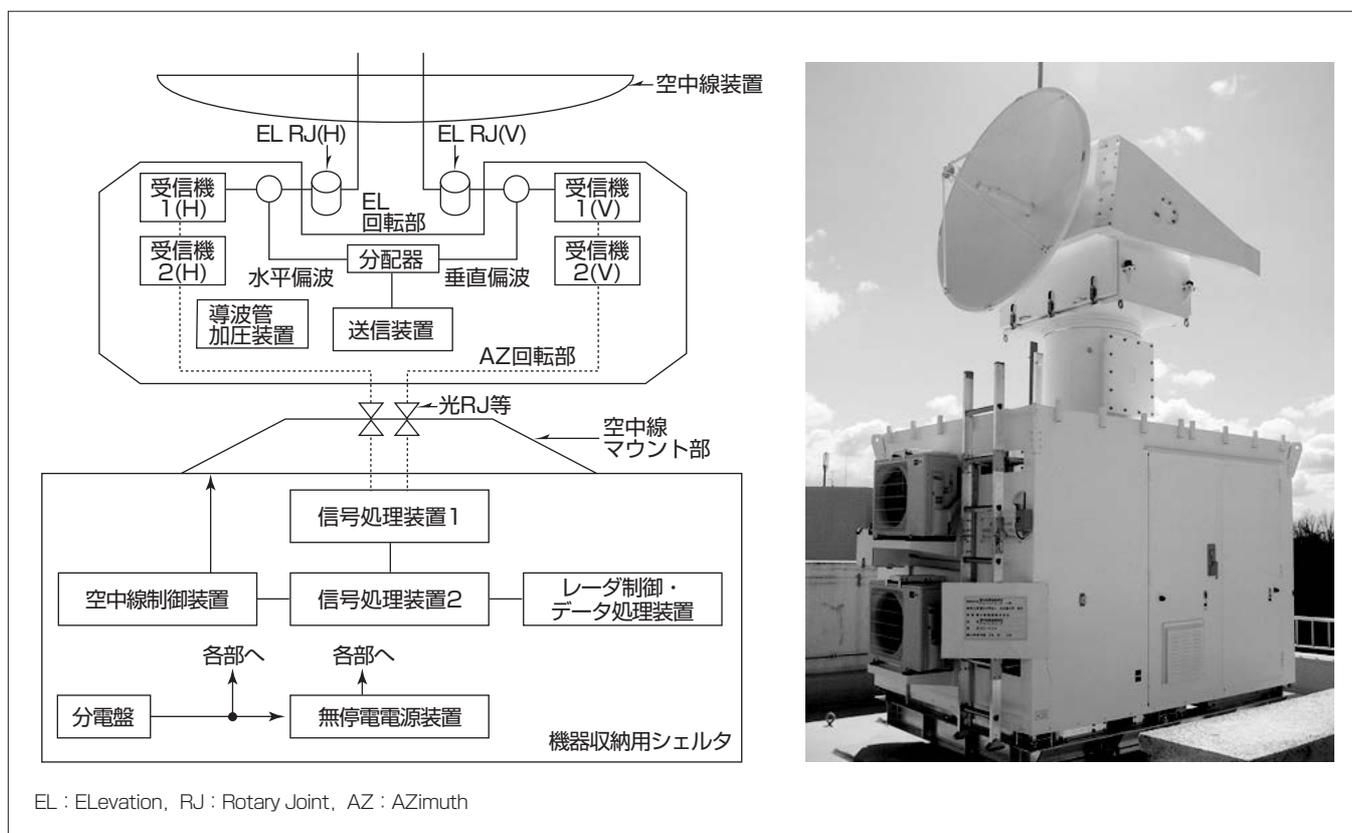
Cloud Radar

Tomoya Matsuda, Ikuya Kakimoto

要旨

気象レーダは、パルス状の電波をアンテナから照射して、同じアンテナで降水粒子の後方散乱波を受信することで、その位置・降雨強度及び移動速度を測定する装置である。国内では、主にCバンド(5GHz帯)の周波数を用いることで、レーダ中心から半径200~300kmのエリアを測定している。また、最近では、都市域を中心としたゲリラ豪雨の早期観測用としてXバンド(9GHz帯)の周波数を用いたレーダが整備され、レーダ中心から半径80kmまでの距離を測定しており、人口が集中している地域により高精度な降雨情報をほぼリアルタイムで配信することが可能になってきた。

一方、Cバンド・Xバンドの周波数では降水粒子より小さいターゲットを捕らえることができないため、ゲリラ豪雨を事前に察知するために必要な発達中の積雲などの雲を捉えることができない。三菱電機では、この問題を解決するため、雲の発達段階から雲粒子や氷晶粒子を捉えることができるKaバンド(35GHz帯)の周波数を用いた雲観測用Kaバンドレーダの開発を行ってきた。ゲリラ豪雨発生前の積乱雲の様子を事前に測定可能なKaバンドレーダを活用することで、降雨前の予報精度の向上に貢献し、更なる防災・減災ニーズに役立つことが期待される。



雲レーダのシステム構成と外観

左の図は当社が開発した雲レーダのシステム構成を示し、右の図はその外観を示す。アンテナ背面に送信装置・受信装置を配置することで、アンテナと送信・受信装置間の損失を従来機より低減している(2013年度に名古屋大学に納入)。

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の後方散乱波を受信することで、その位置と移動速度を測定する気象レーダの開発・製造を行っている。

気象レーダは、国内では主にCバンド(5GHz帯)の周波数を用いることで、レーダ中心から半径200~300kmにわたるエリアの降雨強度、及び降雨のドップラー速度を測定することが可能であり、気象庁では20台のCバンド気象レーダを配置して日本全国をカバーしている。また、最近では、ゲリラ豪雨の早期観測用として国土交通省が“X-RAIN”というXバンド(9GHz帯)の周波数を用いたレーダを都市域を中心に配備することで、人口が集中している地域を中心に、より精密な降雨情報を配信することが可能になってきた。

2. Kaバンドレーダの必要性

2.1 気象レーダで使用する周波数とMPレーダ

先に述べたとおり、気象レーダは、国内では主としてCバンドとXバンドの周波数が用いられているが、どちらを用いるかは1台のレーダの観測範囲及びレーダシステムの規模との関係で決定される。また、電波は周波数が高くなると降雨の減衰の影響を受けやすくなり、電波が遠くまで到達しない。このため、降雨粒子をターゲットとする気象レーダは、高い周波数ほど長距離観測には適さない。Xバンドレーダも降雨減衰の影響を受けやすい周波数とされているが、一方でCバンドレーダに比べて波長が短い分、電波が降雨を伝播(でんぱ)する途中で受ける位相の変化に敏感であるという特徴がある。近年、水平偏波と垂直偏波を同時に発射して受信した両偏波の振幅比や位相差を用いることで、単に受信強度だけで雨量強度を測定するよりも格段に高い精度でこれを測定できる方式が実用化された。日

本では、この技術を用いたレーダをマルチパラメータレーダ(MPレーダ)と呼んでおり、Xバンドレーダではこの技術を適用することで観測精度を高めている。また、MPレーダは偏波の比の特徴を用いて雨と雪の判別も行うことができ、Cバンドレーダにも適用されつつある。

2.2 降雨ステージとKaバンドレーダの役割

一般的な降雨現象の流れは、図1に示すとおり大きく4つのステージに分類される。

(1) プレストームステージ

上昇気流が発達して水蒸気が対流圏上部に供給される。

(2) 雲ステージ

供給された水蒸気によって、雲が形成される。

(3) 降水ステージ

更に下層から水蒸気が供給されることで雲から降水粒子が生成され、降雨をもたらす。

(4) ポストストームステージ

雲が衰退して降雨が消滅する。

降水ステージでは、気象レーダの降雨観測によって1~10分間隔で降水情報を取得できるが、特にゲリラ豪雨のような局地的大雨では、強降雨が観測できた時点で既に手遅れである事象も起き得る。これを回避するためには、降水粒子を観測する前、つまり雲ステージでその兆候を捉えることが解決手段の1つとして有効である。

当社は、雲ステージの状態を捉える最も有効なレーダとしてKaバンド(35GHz帯)レーダの開発を行ってきた。Kaバンドレーダは、雲・霧といった直径数十μmの粒子を捉えることが可能な反面、先に述べたとおり周波数が高いため降雨の減衰の影響を受けやすい。そのため、アンテナ開口及び送信電力を可能な限り大きくすることでレーダ中心から半径30kmの雲及び降水粒子を捉えるコンセプトで開発を行ってきた。

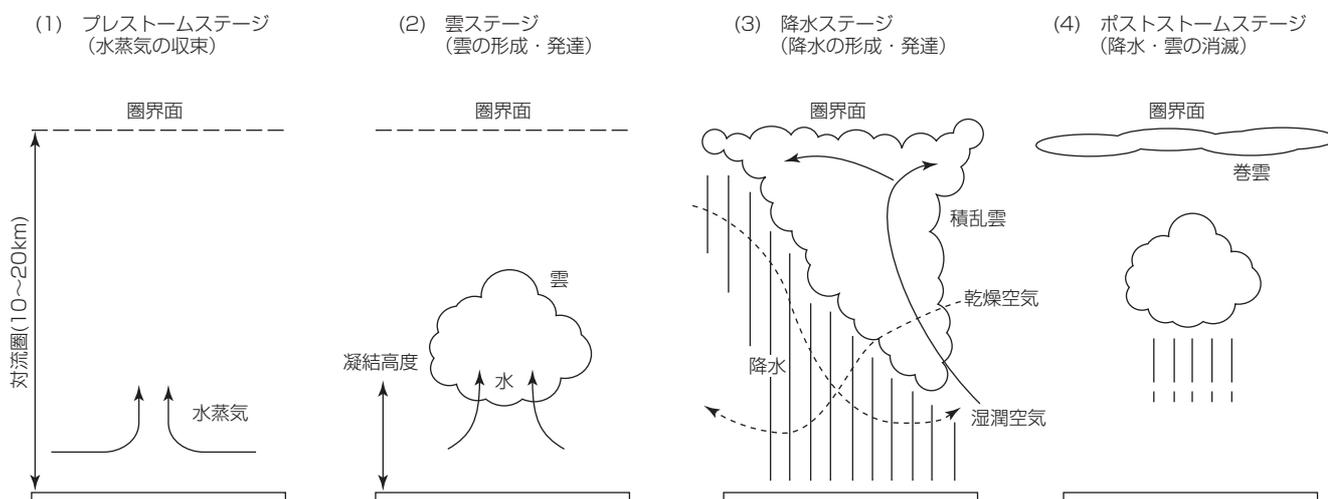


図1. 降雨の生成ステージ



図2. 2000年度に開発したKaバンドレーダ

3. Kaバンドレーダの開発

3.1 1990年代での開発

当社は、1990年代末から2000年代初めにそれぞれ独立に京都大学との共同研究でKaバンドレーダ(ミリ波ドップラーレーダ)の開発(図2), 及び防災科学技術研究所向けのXバンド・Kaバンド・Wバンド(95GHz帯)多周波観測レーダの開発を行ってきた。当時では、アンテナ開口が2mのKaバンド(35GHz帯)としては大きなアンテナに加えて、100kWの高い送信出力を得るためにマグネトロン管を採用した。図3は、当社が開発したKaバンドレーダを用いて釧路で実施した海霧を観測した例である。

3.2 2010年代での開発

当社が開発したKaバンドレーダは積乱雲・霧の観測を主用途としていたが、注目度は決して高くなかった。しかし、近年、Xバンドで二重偏波レーダ(MPレーダ)の普及によって粒子判別方法の技術が確立され始め、この成果をKaバンドでも活用すれば雲ステージの正確な観測も可能になることから、再び注目を集めるようになってきた。その結果、名古屋大学が1式(2013年度納入)、防災科学技術研究所が5式(2014年度納入)のKaバンドレーダの調達を行うこととなり、当社がこれを受注・開発することとなった。

新たに開発したKaバンドレーダの主な諸元を表1に示す。今回開発したレーダは、初代と比較して大きく2点の改良を行っている。まず1点目は、送信管に性能が安定しているEIK(Extended Interaction Klystron)を採用したことである。EIKの出力は3kWであり、初代で用いていたマグネトロン(100kW)と比較すると1/30以下の出力となるが、Xバンドレーダで培ったパルス圧縮方式を採用することで、比較的low出力な送信電力にもかかわらずマグネトロンと同等出力の性能を発揮させることに成功した。次に2点目として、Kaバンドという高い周波数で問題となるレーダ装置内の伝送ロスを極力軽減するために、送信機及び受信機とアンテナ間の距離を可能な限り近づける工夫を

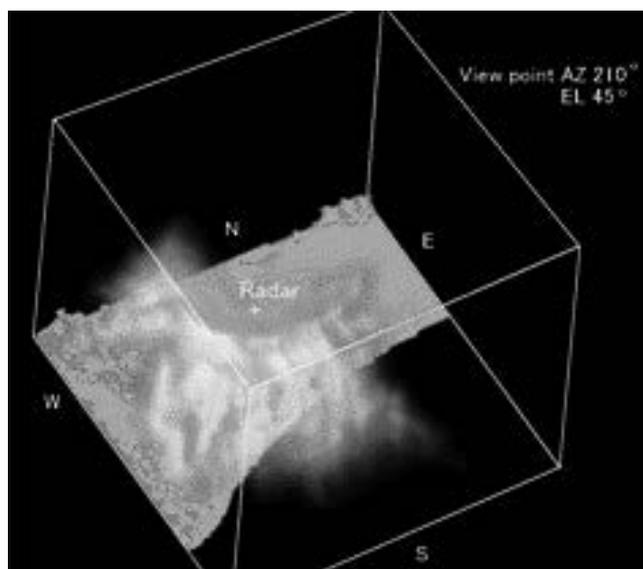


図3. 2001年8月にKaバンドレーダで観測(釧路の海霧を三次元で表示)

表1. 雲レーダの主な諸元

レーダ・タイプ	二重偏波ドップラーレーダ	
観測範囲	半径30km	
送信周波数	34.815~34.905GHzのうち1波	
送信パルス幅	短パルス	0.5μs/1.0μs
	長パルス	30μs/55μs/80μs/100μs (短パルス相当にパルス圧縮)
送信管, 送信尖頭電力	EIK, 3kW(EIK出力端)	
感度	二重偏波モード: -17dBZを距離20kmでS/N>3dBで検出可能	
空中線駆動範囲, 駆動速度	水平方向: 360°, 最大36deg/s, 仰角方向: 180°, 最大12deg/s	
ビーム幅	0.4°以下	
距離分解能	75/150m	
出力データ	受信強度・レーダ反射因子(水平偏波・垂直偏波), 速度・速度幅, 偏波間位相差・偏波間相関係数	
消費電力, 質量	12kVA以下, 4t以下	

S/N : Signal-to-Noise ratio

行ったことである。具体的には、アンテナの背後に送受信機を配置するという、気象レーダとしてはユニークな構造を採用した。これら2点によって、初代と比較して約10dBの能力向上を図っている。なお、今回開発したKaバンドレーダでは、送信機・受信機とこれらを動作させる電源部もアンテナ背面に配置して、水平方向にアンテナと一緒に駆動する装置構成となっている。

4. Kaバンドレーダでの観測例

図4, 図5に名古屋大学で観測した例(受信強度)を示す。図4はPPI(Plan Position Indicator)方式, つまりアンテナ方向を仰角20度に保ちながら方位角方向に360度のスキャンを行って得られた観測例である。また図5はRHI(Range Height Indicator)方式で、アンテナ方向を方位角270度(西方向)から鉛直経路で90度(東方向)に垂直スキャンして得られた観測例である。これらの観測によって、地

◇ 一般論文 ◇

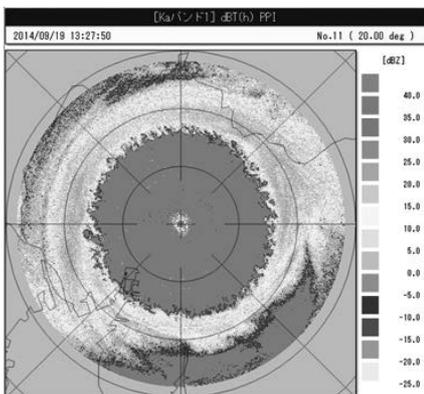


図 4. 名古屋大学での観測例
(受信強度・PPI表示画面)

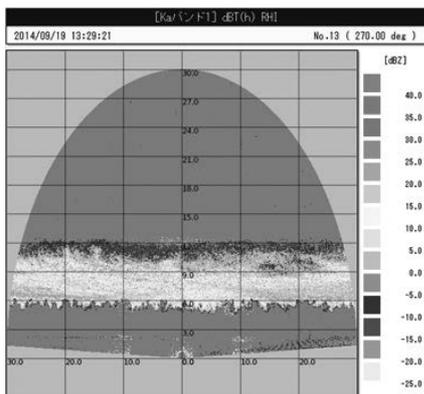


図 5. 名古屋大学での観測例
(受信強度・RHI表示画面)

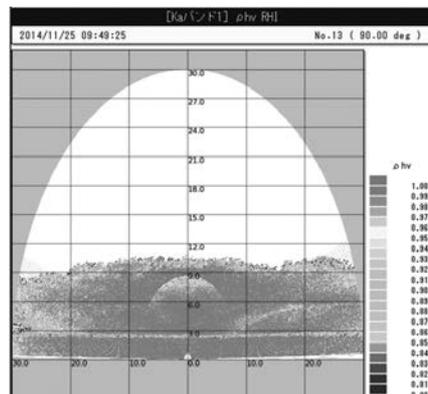


図 6. 名古屋大学での観測例
(偏波間相関係数・RHI表示画面)

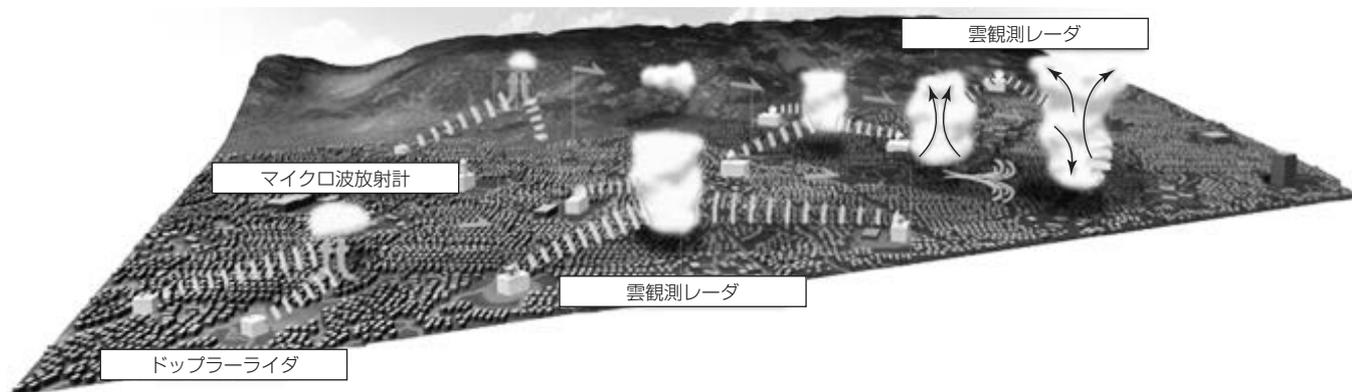


図 7. 局地的大雨が発生するメカニズムを捉えるための将来構想

上付近では降水がなく、高度6~12kmに存在する粒子(つまり雲粒子)を的確に捉えていることが分かる。

図 6 は、RHI方式で観測した二重偏波パラメータ(垂直偏波と水平偏波との相関係数)の例である。高度2.5km前後で相関係数が低い層が観測されていることが分かるが、これは氷の粒と融(と)けた水滴が混在する融解層(0℃層)と呼ばれる部分である。この観測結果は、二重偏波技術を用いることで雲とは異なった粒子(氷・雪など)の判別が可能になることを示している。

5. む す び

気象レーダは、近年の降雨災害の増加をきっかけに二重偏波レーダによる定量観測化技術が発達したことで高機能化が進んでいる。この高機能化の動きに伴い、降雨観測用途である気象レーダの応用となる、雲観測用Kaバンドレーダも注目をあびるようになってきた。

さらに、同じく当社が開発しているドップラーライダー(パルス状の光を送信して、空気中のエアロゾル(塵(ちり))からの反射光を受信して観測を行う装置)は、晴天時の気

流を観測することが可能である。これによって、湿った上昇流の発生などを検知できる可能性が広がる。

図 7 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実験構想図である。積乱雲の発達前ではドップラーライダー、発達段階ではKaバンドレーダを用いて非降水時の状態を観測し、Xバンド及びCバンドレーダによる降雨観測に引き渡すことで、降雨ステージの生成から消滅までを捉える観測システムが構築できる。この観測システムを用いた研究成果として、局地的大雨の1時間前予測の実現など、防災・減災社会の実現の一助になれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) Hamazu, K., et al.: A 35-GHz Scanning Doppler Radar for Fog Observations, J. Atmos. Oceanic Technol., **20**, 972~986 (2003)
- (2) 篠田太郎, ほか: 名古屋大学Kaバンド雲レーダの諸元と初期観測結果, 日本気象学会2015年度春季大会講演予稿集, D158 (2015)