

3-3 航空機搭載雲レーダ(SPIDER)の観測

3-3 Cloud Observation with CRL Airborne Cloud Rader (SPIDER)

堀江宏昭 黒岩博司 大野裕一

HORIE Hiroaki, KUROIWA Hiroshi, and OHNO Yuichi

要旨

雲は放射エネルギーの伝播などに重要な役割を果たすが、その役割は未知のまま残されている。そこで、雲の3次元分布を観測することが求められている。雲の観測は通常の気象レーダでは難しいので、CRLでは航空機搭載雲観測レーダ(SPIDER)を開発した。このレーダは5kmの地点で-35dBZの感度となっている。このレーダの観測原理や、観測方法について説明する。そして、航空機観測を行った際の収束雲のデータを紹介し、雲レーダ観測の有用性を示す。

Cloud plays an important role of the transmission of radiation energy, but it was still remains with uncertainty. It is expected to observe three-dimensional distribution of cloud. Although it is difficult with usual weather radar, Communications Research Laboratory developed an Airborne Cloud Profiling Radar (SPIDER). Its sensitivity is -35 dBZ at 5km range. In this paper, observation theory and method are discussed. Effectiveness of cloud profiling radar is explained with cloud data, which was obtained with airborne measurement.

[キーワード]

雲レーダ, ミリ波レーダ, 航空機搭載レーダ, マルチパラメータレーダ, 雲観測

Cloud profiling radar, Milimeter wave radar, Airborne radar, Multiparameter radar, Cloud observation

1 はじめに

地球温暖化など地球規模の気候を考える上で、雲の果たす役割は重要である。雲は降水を作り出すほかに地球の放射エネルギーの伝搬などに主要な役割を果たすが、その役割は未知のまま残されている。特に雲の高度分布が大気加熱・冷却に重要な働きをしており、地球規模で放射収支推定の高精度化を行うためにも、雲の3次元分布を観測することが求められている[1]。

一般にはマイクロ波帯の降雨レーダでは雲を観測することは難しい。これは、レーダで使用している電波の波長が雲粒子の直径と比較して大きいことに由来する。雲粒子は雨粒子の直径の100分の1程度である。そこで、波長を短くすることで雲粒子からの散乱強度を大きくし、雲粒子についての感度を高める必要がある。現在

使用されている雲観測レーダには、35GHz帯(波長8mm)や95GHz帯(波長3mm)の電波が使用されている。95GHz帯のレーダは、35GHz帯のレーダに比べてあまり送信電力は大きくできないが、装置が小型化できるという特徴を持ち、航空機への搭載、ひいては人工衛星への搭載に向いている。このため、通信総合研究所では、1995年から雲を観測するレーダの開発に取り掛かり、周波数95GHz帯のミリ波を使用した航空機搭載雲レーダ(愛称: SPIDER)を開発した[2]。

なお、このレーダは航空機に搭載されていないときでも、地上に設置し、上向きに電波を送信して使用することが可能である。SPIDERは、雲のリモートセンシングに対する様々な可能性を探るために、直交する2偏波の送受信機能や、ドップラ速度検出のための機能を付加したマルチパラメータレーダとなっている。観測モード

も複数あり、そのパラメータを目的に合わせて自由に変更可能になっている。アンテナの指向方向は、直下方向から航空機の進行方向に直交な面内に左側は95度、右側は40度まで走査することができる。このアンテナ走査機能は95GHz帯の航空機搭載雲レーダとしては、他に例がない。

レーダによる雲観測では、雲に含まれている水・氷の量の高さ分布、構成粒子の大きさの分布などの情報を取得することが求められている。SPIDER観測では、直交する2直線偏波のZ因子、ドップラ速度、FFTによるスペクトラムなどのデータ取得が可能であり、これらを組み合わせることによって、雲の3次元分布測定、雲頂・雲底高度推定、雲と雨の判別、雲の組成(水、氷)の区別、粒子分布の測定、雲(氷)水量の推定、伝播損失補正、風の水平・垂直成分などのデータを取得することが望まれている。雲レーダ単独での検出は難しい場合には他のセンサデータとの組み合わせにより、検出することになっている。SPIDERの完成からここまで様々な観測を行ってきたが、主な観測を表1に示す。運用していなかった期間もあるが、最近は観測が順調に行えるようになっている。なかでも2001年9月から12月に行われた観測船“みらい”での船上観測では、述べ2000時間以上にわたりほぼ連続稼働している。ここまでの運用時間は他に例を見ない。

本稿では、雲観測の原理とSPIDER性能について述べ、運用パラメータについて考察する。その後、最近行った航空機観測のデータ処理結果を示す。

表1 SPIDERによる観測のまとめ(主なもののみ)

時期	観測	内容
1998年1月	航空機観測	完成後のテスト観測
1998年3月	航空機観測	初雲観測 故障した
1999年6月	航空機観測	メソ戦略観測 故障した
2000年2月	地上観測	B200(粒子プローブ)との同期
2000年2月	航空機観測	圧力漏れによる故障
2000年9月—12月	地上観測	ライダー、ラジオメータとの同期観測
2001年1月	航空機観測	メソ戦略 B200(CAMPR)との同期
2001年2月	航空機観測	B200(粒子プローブ)との同期
2001年3月	地上観測	B200(粒子プローブ)との同期
2001年5月	船上観測	観測船みらい
2001年9月—12月	船上観測	観測船みらい
2002年2月	航空機観測	メソ戦略、海面観測(CRL単独)

2 雲観測の原理

2.1 レーダ方程式

3次元的にランダムに広がっている雨や雲とい

った降水粒子を、鋭いアンテナパターンを持つレーダで観測したときのレーダ方程式は一般に次のようになる[3]。

$$P_r = \frac{1}{\pi^2 2^{10} \ln 2} \frac{P_t G^2 \lambda^2 h \theta^2}{r^2 L} \eta \cdot 10^{-0.2 \int_0^r k dr} \quad (1)$$

ここで、

P_r ：受信電力 (mW)

P_t ：送信電力 (mW)

G ：アンテナ利得(無次元)

λ ：電波の波長 (m)

h ：パルス幅 (m)

θ ：アンテナ半値幅(ラジアン、radian)

r ：レーダからの距離 (m)

η ：単位体積当たりの降水粒子の散乱断面積 (1/m)

L ：システム損失

$k = k_{vv} + k_{cl}$ ：減衰係数 (dB/km)

k_{vv} ：大気中の水蒸気や酸素分子などによる減衰 (dB/km)[4]

k_{cl} ：雲中の水、氷粒子による減衰 (dB/km)[5]

である。

このとき、降水粒子の大きさが電波の波長に比べて小さく、Rayleigh 散乱を仮定できればレーダ散乱断面積 (η) は次の式で与えられる。

$$\eta = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} 10^{-18} Z \quad (2)$$

ここで、

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} : \text{誘電率、}(m \text{ は複素屈折率})$$

Z ：レーダ反射因子 (Z) (mm^6/m^3)

である。

このうち、レーダ反射因子 Z は次の式で定義される。

$$Z = \int N(D) D^6 dD \quad (3)$$

ここで、

D ：粒子の直径 (mm)

$N(D)$ ：単位体積 (m^3) 当たりに存在する直径 D の粒子の個数 ($1/\text{m}^3$)

である。

レーダ反射因子は Z 因子とも呼ばれ、散乱断面積から電波の波長に依存した項を取り除き、降水粒子のみに依存した量となる。レーダによる測定では通常はこの Z 因子を用いて表される。ま

た、Z 因子の対数を取った量 (dBZ) が良く使われる。(2)、(3) 式より、散乱断面積は、粒子の 6 乗に比例し、波長の 4 乗に逆比例することが分かる。雨の平均的な直径が 2mm であるのに対し、雲粒子の平均的な直径は 0.01mm であり、100 倍以上違う。粒子 1 個当たりの感度でいえば、雨に比べて 10 の 12 乗倍 (120dB) 以上も感度が悪くなる。一方、(2) 式からは、電波の波長を小さくすれば感度が向上できることも分かる。10GHz 帯 (X-バンド、波長 3cm) に比べ、35GHz 帯 (Ka-バンド、波長 8mm) では 22dB、95GHz 帯 (W-バンド、波長 3mm) では 39dB の感度向上が可能となる。さらに (1) 式からは、受信電力が距離の 2 乗に逆比例することも分かり、同じ Z 因子でもレーダに近いレンジからの散乱は検出しやすい。例えば、距離 1km では距離 5km の時に比べて 14dB (25 倍) 感度が良くなる。そこで、航空機により上空から雲に近づいて観測を行うことも利点となる。

2.2 観測パラメータ

偏波レーダにより観測できる量は、それぞれの偏波の Z 因子、偏波間の Z 因子の差 (Z_{DR} ; Differential Reflectivity factor)、交差偏波識別度 (L_{DR} ; Linear Depolarization Ratio) などがあげられる[3]。パルスペア処理を行えば、ドップラ速度、スペクトラム幅、偏波間位相差 (Φ_{DP})、偏波間相関度 ($\rho_{HV}(0)$) などの情報が取得できる。また、パルスペア処理の代わりに FFT 処理を行えば、ドップラスペクトラムが取得できる。ドップラ速度の垂直成分からは雲と雨の識別が、 L_{DR} や Z_{DR} の値や Z 因子の減衰、 Φ_{DP} 、 $\rho_{HV}(0)$ などから、水雲と氷雲の識別ができる可能性がある。

一方、レーダで求められる Z 因子と、求めたい雲水量 (LWC ; Liquid Water Content) や氷水量 (IWC ; Ice Water Content) とは一対一に対応できない。層雲など水雲に対する LWC や巻雲など氷雲に対する IWC を M (g/m^3) とすると、次の式で表される。

$$M = \frac{\pi \rho}{6 \cdot 10^6} \int_0^{\infty} D^3 N(D) dD \quad (4)$$

ここで、 ρ は水又は氷の密度 (g/m^3) である。Z が D の 6 乗に比例する量なのに対して、M は D の 3 乗に比例する量であるので、対応させるには粒子のサイズ分布 ($N(D)$) を求める必要がある。

サイズ分布を実験的に求めて Z と M の関係式を導き出している例もある[6][7]が、雲の組成が水か氷か、あるいはそのほかの条件によって関係式との差が大きい。そこで、氷雲に対してレーダとライダーの散乱機構の違いから粒径分布をもとめる方法や、氷雲に対してマイクロ波ラジオメータによる積分雲水量を拘束条件に雲水量のプロファイルを求める方法などがある[8][9][10]。

2.3 観測機器とその性能

雲観測のために CRL で開発した航空機搭載雲レーダ[2]は、高周波部とアンテナを収容したレーダポッドを航空機の外側に搭載し、IF 部、データ処理・記録を航空機内で行う構成となっている。航空機搭載雲レーダの航空機への搭載写真を図 1 に、アンテナを横向きに開いた状態のレーダポッドの写真を図 2 に示す。実際には、離着陸時にアンテナは格納している。SPIDER の主なシステムパラメータを表 2 に載せる。詳細は参考文献[2]を参照されたい。

なお、他に例を見ない特徴として、航空機の進行軸方向に直行する面内でアンテナを走査することができる。このことにより、飛行しながら下方の広い領域を観測することができる。ところで、SPIDER には直交する直線偏波観測が可能のように二つの受信機を備えているが、アンテナを走査して横向き (90 度) にしたときに垂直偏波となる偏波方向、受信機を V 偏波、V 受信機とし、水平偏波となる偏波方向、受信機を H 偏波、H 受信機と定義する。

開発にあたっては、Z 因子で -30dBZ の感度を設定した。これは、Z 因子で -30dBZ の雲が観測できれば、中緯度帯では放射収支に関係する雲の 84% を観測できるという報告がある[11]。また別の報告では 99% が観測できるとされている[1]。そこで、雲レーダの一般的な運用パラメータにおいて、レーダから距離 5km の時点で感度 -30dBZ を達成することがレーダ開発の目標となった。

一般に、気象粒子からの散乱のように位相がランダムな場合の平均受信電力 (P_r) は、 P_s を信号電力 (粒子からの散乱電力)、 P_n を雑音電力として、次のように表される[8]。

$$\bar{P}_r = \bar{P}_s + \bar{P}_n \quad (5)$$



図1 航空機 Gulfstream II に搭載された SPIDER

航空機の左脇に搭載されているのがレーダポッドであり、データ処理部などは航空機内に搭載される。



図2 アンテナを開いた状態のレーダポッド

レーダポッド内には、RF部とアンテナが搭載される。アンテナは航空機の機軸に垂直な面内で走査ができる。

逆に実際の信号電力は受信電力から雑音電力を差し引くことにより求められる。一方、雑音電力 P_n は次のように受信機の実特性値から計算できる。

$$P_n = kT_{rec}B \quad (6)$$

ここで、 k はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} J/K)、 T_{rec} は受信機雑音等価温度 (K)、 B は受信機帯域幅 (Hz) である。 T_{rec} は、低雑音増幅器 (LNA) の雑音指数を NF とし、アンテナ端から LNA までの導波管損失を L 、アンテナ及び導波管の温度を T_0 (K)、受信機 (LNA) の温度を T_p とすると、受信機の等価雑音温度 T_{rec} は次の式で表される。

$$T_{rec} = (L-1)T_0 + L(NF-1)T_p \quad (7)$$

SPIDER の場合には、導波管損失 L は約 4dB、受信機雑音指数 NF は 4.5dB であり、 $T_p = T_0 = 300$ (K) とすると (7) 式より等価雑音温度は 1823 度となる。

表2 SPIDERのシステムパラメータ

周波数 (波長)	95.040 GHz (3.16mm)
アンテナ開口長	40cm
アンテナビーム幅	0.6度
アンテナ利得	49.4 dBi
EIRP送信電力	1600W
最大デューティ比	1 パーセント
パルス幅	0.25, 0.5, 1.0, 2.0 マイクロ秒
パルス繰り返し周期	最大デューティ比以下で 任意設定
パルスシーケンス	1,4,6から選択
受信機NF	4.5dB (LNA)
受信機ダイナミックレンジ	75dB
送信偏波	直線(水平または垂直) パルスごとに切替
受信偏波	直線(水平及び垂直) 同時受信
データ処理	実時間処理 FFT またはパルスペア
アンテナ走査	-40度~95度 (垂直下向きを0とする)
航空機観測高度	最大13km
航空機速度	100-250m/sec

送信パルスとして 1μ 秒のパルスを使用した場合には、(6) 式を用いると雑音電力は -102dBm となる。このときの想定される受信電力を Z 因子をパラメータに表示したものを図3に示す。(5) 式から雲がなくても受信電力は雑音電力より小さくならない。ここで、信号対雑音電力比 (S_n) は SN 比又は SNR (Signal to Noise Ratio) ともいい次の式で表す。

$$S_n = P_s / P_n \quad (8)$$

S_n も dB 表記を行うことが多い。ここでまず、 S_n が 0dB のとき、すなわち信号と雑音電力が同じ値のときが検出限界と考える。この最小検出 Z のグラフも同時に図3に表示した。例えば、図3から -30dBZ の検出限界は約 5km となる。一方、5km における -30dBZ の受信電力は -99dBm である。この検出限界の設定では、受信電力より 3dB 大きい受信電力が限界となる。雑音電力を差し引きすれば、 S_n が 0dB より小さく、信号電力より雑音電力が大きい状態でも、検出可能と考えられる。また、気象粒子からの散乱の場合にはある程度のパルス数を平均することが必要であ

る。そこで、平均後に雑音電力を差し引きできるかどうか、検出限界と考える。そのためには平均化後の電力値の分散を用いることにする。受信電力の分散 σ_{rdN} と雑音電力の分散 σ_{ndN} は、積分数をそれぞれ N_r 、 N_n とすれば、次式で表される。

$$\sigma_{rdN} = \frac{\bar{P}_s}{\sqrt{N_r}} \left(1 + \frac{1}{S_n} \right) \quad (9a)$$

$$\sigma_{ndN} = \frac{\bar{P}_n}{\sqrt{N_n}} \quad (9b)$$

これらの式から、(5)式と分散の関係式を用いると、信号電力の分散 σ_s を信号電力 P_s で正規化して

$$\frac{\sigma_s}{P_s} = \sqrt{\frac{1}{N_r} \left(1 + \frac{1}{S_n} \right)^2 + \frac{1}{N_n} \left(\frac{1}{S_n} \right)^2} \quad (10)$$

と表される。ここでは、積分後の信号電力の分散が信号電力の2分の1以下なら検出できると考える。よって、(10)式の左辺を1/2とおいて解けばよい。検出できる S_n は、信号と雑音に対する積分数により、決定される。実際には、雑音電力を安定させるために、雑音の積分数は信号の積分数より多くとるのが普通である。その個数を N として、 $N_n = N \cdot N_r$ としたとき、 N をパ

ラメータとして検出限界の S_n をプロットしたものを図4に示す。この図より、積分数を100、雑音の積分数を8倍とすれば、検出可能な S_n は-5.8dBになる。よって、上記の例に当てはめれば、5kmのレンジで-35dBZの雲が検出できる。

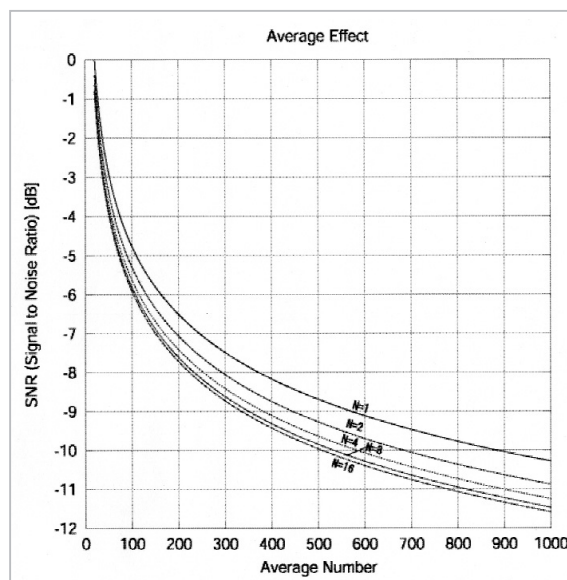


図4 積分数と検出可能なSN比のグラフ

雑音電力のサンプル倍数をパラメータに取っている。式(10)を参照する。

2.4 観測モードの考察

SPIDERを使った研究では、アルゴリズム開発を行うこと、それに伴ういろいろな観測を行うことを想定された。そこで、観測モードとして、大別して(1)パルスペアモード、(2)FFTモード、(3)RAWデータ記録モードの3種類を用意した。(1)パルスペアモードには、単一送信偏波のみのSPPMAGモード、四つのパルス列を一区切りにしたPPMAG4モード、六つのパルス列を一区切りにしたPPMAG6モードがある。どのパルスについても送信偏波をHとVの自由に設定できる。また、受信機は常に両方動いているので、主偏波成分、交差偏波成分の両方のデータを取得できる。また、パルスペア処理は、主偏波成分を用いるか交差偏波成分を用いるかの指定ができる。(2)FFTモードは二つあり、FFTモードとDPFFTモードである。いずれも選択した送信偏波によるFFTデータを取得するが、FFTモードは主偏波成分のみに対して、DPFFTモードは主偏波に加えて交差偏波成分のFFTデータも併せ

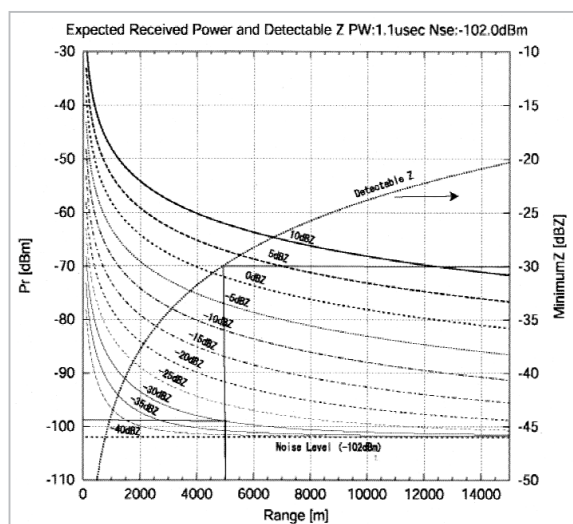


図3 レーダからの距離における受信電力と、最小受信Z因子

あるZ因子に対する受信電力を示している。レーダ方程式(式(1))に従って、レンジが離れると受信電力が小さくなる。ノイズ電力と信号電力が等しくなる時のZ因子をプロットした。縦軸の右側を参照する。

て取得する。(3) RAW データモードはPPMAG4モードと設定する項目が同じだが、積分後のデータを取得するのではなく、全ヒットのデータをそのまま記録するモードである。これは、同一データからFFT解析とパルスペア解析といった別の解析を行って比較したり、一発のパルスごとのデータを使った解析に使用するモードである。

すべてのモードに対して、パルスとパルスの間隔は1 μ 秒単位で自由に設定が可能である。ただし、これらのモードすべてにバッファメモリの容量からくる制限があり、用途に応じて使い分ける必要がある。具体的には積分数 N_{av} 、取得レンジ数 N_{rg} 、取得ノイズ数 N_n 、FFTモードの場合のFFTビン数 N_{bin} とすれば、表3に示すように、これらの積に最大数が決まっている。例えば、PPMAG6モードで1 μ 秒のパルス送信し、2倍オーバーサンプリングで15kmまでのデータ取得をした場合には、ノイズサンプル数を8とすれば、積分数は32が上限となる。

表3 観測モードの制限

MODE	計算式	制限数
SPPMAG	$Nav*(Nrg+Nn+1)$	53376
PPMGA4	$Nav*(Nrg+Nn+1)$	8896
PPMGA6	$Nav*(Nrg+Nn+1)$	5930
FFT	$Nav*(Nrg+Nn+1)*Nbin$	53376
DPFFT	$Nav*(Nrg+Nn+1)*Nbin$	35584
RAWDATA	$Nav*(Nrg+Nn+1)$	2048

これらを踏まえて、使用している主な観測モードを紹介する。

(1) PPMAG4モード 偏波パターン HHVV

パルス間隔 (μ sec) 110、110、110、550

このモードは、LDR・ZDRなどが観測しやすい。また、H、V両偏波とも主偏波のドップラを取得できる。パルス間隔のうち最後の550 μ secは、Duty比を落とす、独立サンプル数を増やすために時間をあけるなどといった目的に使用できる。また、積分数の制限のために長時間観測時にはデータ量を減らすために積分時間を大きくするなどの理由によっても利用できる。

(2) PPMAG4モード 偏波パターン VHVV

パルス間隔 (μ sec) 110、110、110、550

このモードは、偏波間の相関 ($\rho_{HV}(0)$) が観測しやすい。そのかわりH主偏波のドップラは取

得できない。

(3) PPMAG4モード 偏波パターン VHHH

パルス間隔 (μ sec) 110、110、130、550

このモードは、スタaggerドパルスを含んだモードである。スタaggerドパルスとはパルス間隔を変えることにより、ドップラ速度の折り返し点を違えて、補正をしやすくするものである。例えば、パルス間隔が110 μ 秒のときには約7.2m/secが折り返し点となり、航空機の実速度成分や風向の水平成分が含まれる場合には簡単に折り返し点を超えてしまう。

(4) PPMAG6モード 偏波パターン VHHHV

パルス間隔 (μ sec) 110、110、130、110、110、550

このモードは上記(1)から(3)までのモードすべてを網羅したものである。ただし、前述のバッファの制限により、積分数をあまり増やせない。

アンテナ走査については、(1)ポインティングモード、(2)スキャンモード、(3)ステップ走査モードの三つがある。それぞれの動作時間を設定し、組み合わせて使用することもできる。基本的にはポインティングモードを使用して、航空機から下向き観測、地上においては上向き観測、雲の中を観測するときに横向き観測を行うことが多い。また、雲の3次元分布を取得するため、あるいは校正データとして使用する海面散乱の入射角依存性を取得するためにスキャンモードを使用する。

アンテナの移動速度として30度/秒に設定できるが、アンテナ角度情報は30ミリ秒ごとにしか取得できない。最高速に設定すると30ミリ秒間に0.9度移動し、アンテナ半値幅(0.6度)以上動いてしまう。よって、アンテナ移動速度は20度/秒以下に設定している。また、データの積分時間を考えて、アンテナ移動速度を決定する必要がある。よく使用するのは-30度から+30度までのスキャン走査で、このときのアンテナ移動速度を10度/秒としている。

3 航空機観測の詳細

—寒気の吹き出しに伴う筋状雲と収束雲の観測—

航空機観測データの中から2002年2月11日に

行った観測を紹介する。これは、戦略的基礎研究「メソ対流系の構造と発生・発達メカニズムの解明」(代表：吉崎正憲)の一環として実施した2002年冬季日本海観測(WMO-02)の中で行われたものである。2001年も同様の観測を行っている[12]。地上や海上に様々な測器を展開して総合的な観測を予定していたが、航空機単独での観測となった。航空機GulfStreamIIには、雲レーダのほかに、ドロップゾンデ、雲粒子を直接観測する粒子プローブ、マイクロ波ラジオメータなどが搭載された。

この日は、日本海で比較強い寒気の吹き出しがあり、収束雲が発生した。このときの気象衛星ひまわりの可視画像を図5に示す。航空機のフライトコースも示したが、収束雲と交差する方向に観測を行った。この中で、北緯36度30分の線上東経133度から136度が観測ラインである。この区間を高度を変えながら4回にわたって観測した。観測の概念図を図6に示す。四通りの高度を取った理由は、航空機に様々な測器が搭載されていて、それぞれの高度で目的が違ったからである。最初に高度7500mで雲の上空からレーダ観測を行った。この際、観測ラインの端ではドロップゾンデを落とした観測を行っている。次には、雲頂高度付近の3800mで観測を行った。この際にはレーダ観測と、雲頂付近の風を観測している。高度1500mは雲の中であり雲の直接観測を行っている。レーダはアンテナを横向きにして、水平方向の雲の広がり、速度変化を観測している。また、高度300mは雲底付近に対応していて、ここでもレーダはアンテナを横向きに観測している。ここで取得されたZ因子を図7に示す。横軸は水平距離であり、4枚の図の下に置いた日本地図の経度に対応させている。縦軸はレーダからの距離であり、(A) 高度7500m、(B) 高度3800mでは直下方向を示す。図の中に見える赤い水平線は海面を示している。(C) 高度1500m、(D) 高度300mは水平方向を示していて、航空機の進行方向左側に照射している。よって、高度1500mの時には南側を、高度300mのときには北側を観測していることになる。低高度での飛行については気流の乱れで航空機の姿勢が乱されることが度々あった。高度300mでの飛行時に遠いレンジから強いエコーが返ってくること

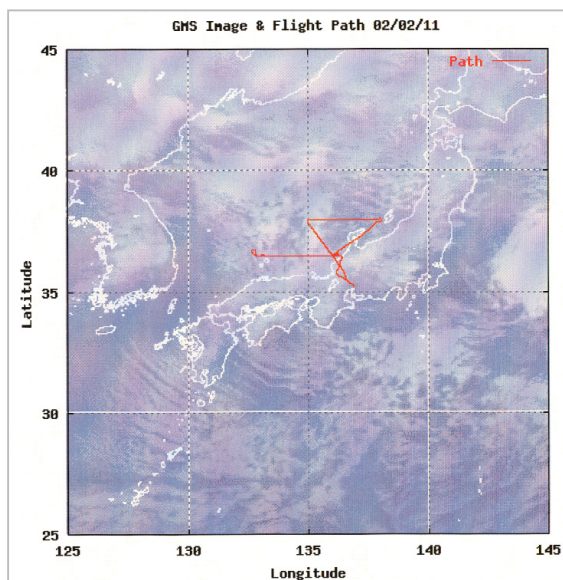


図5 2002年2月11日14JSTのひまわり可視画像(高知大学作成)と、それに合わせて表示した航空機のフライトコース

北緯36度30分東経133度から136度が観測線になり、この間を4高度飛行した。

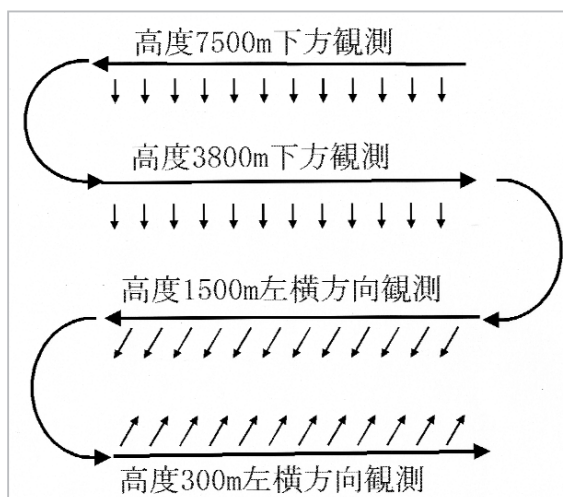


図6 観測概念図

- A) 高度7500mにて東から西へ飛行し、下方を観測した。
- B) 高度3800mにて西から東へ飛行し、下方を観測した。
- C) 高度1500mにて東から西へ飛行し、左横方向(南側)を観測した。
- D) 高度800mにて西から東へ飛行し、左横方向(北側)を観測した。

があるが、これは航空機の姿勢の乱れにより海面からの散乱を捕えたことを示す。これらのデータは航空機の姿勢変動の補正はしていない。

高度7500mは西行きのコースであり、高度3800mの観測は東行きのコースである。観測ラ

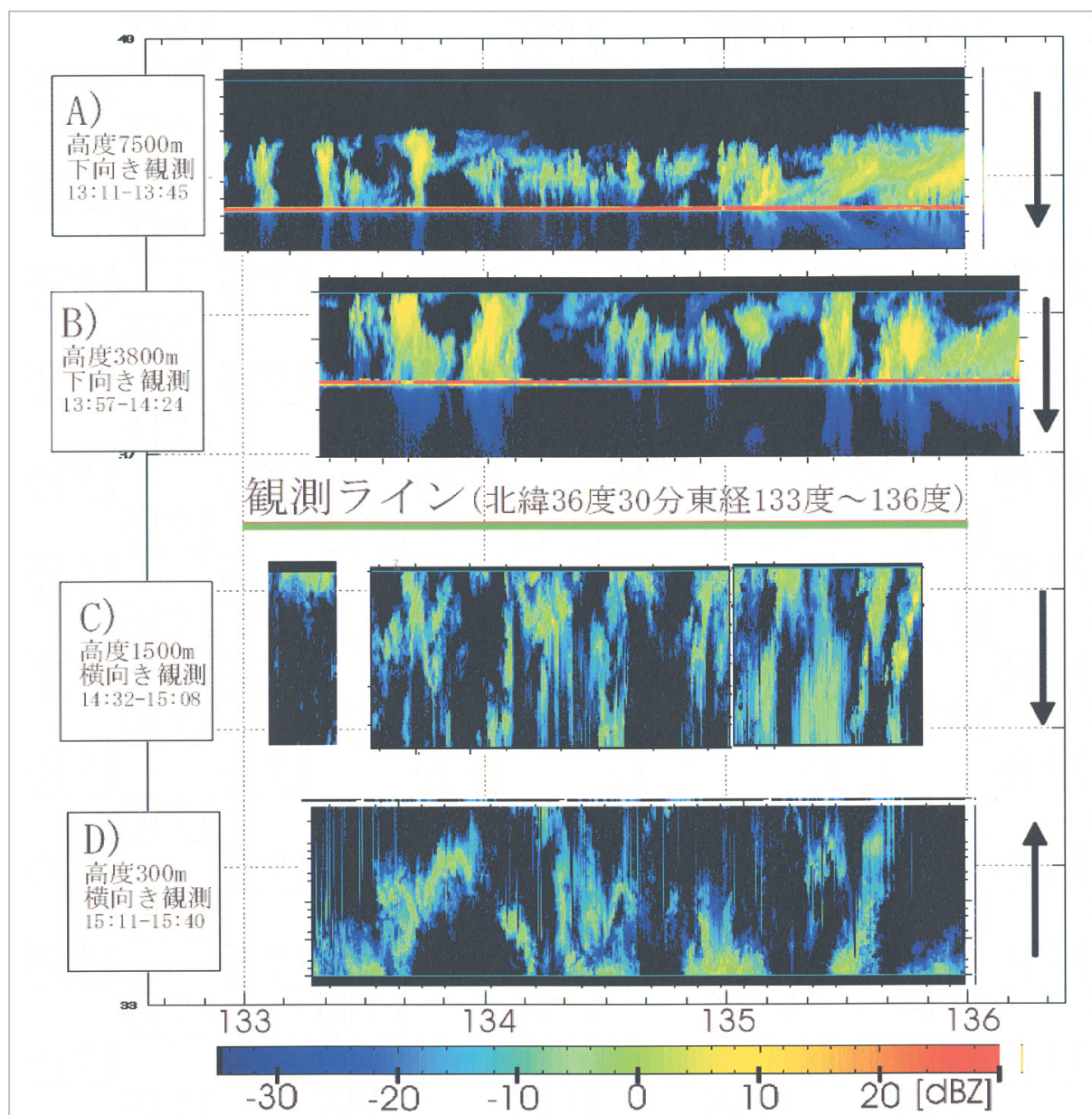


図7 2002年2月11日の観測で取得されたZ因子

PPMAG6モード、パルス幅1 μ 秒で取得されたデータを1秒平均している。図6のA)、B)、C)、D)、に対応している。積分数はそれぞれA)528、B)720、C)300、D)360である。東西方向は縮尺を下の地図の経度線にあわせている。A)とB)については、鉛直下向き観測を行っている。図の中から下にある赤い線は海面を示している。C)については、観測ラインから南側を観測している。図の上辺が観測ラインに相当する。観測幅は23km。D)については、観測ラインから北側を観測している。図の下辺が観測ラインに相当する。観測幅は23km。

インの東側では、高度7500mでの観測から高度3800mでの観測まで1時間以上経過している。図7のそれぞれのデータは経度線に合わせて配置しているが、(A)と(B)の二つの画像をみると、強いエコーがあるセルの場所は東側に移動しているし、弱いエコー領域の形もそのまま東側に移動しているのが分かる。これはひまわりの画像(ここでは示さない)の時間経過に伴った雲の

動きと合わせても妥当である。

これらのセルの一つを取り出し、時間にして13時34分から38分までのZ因子とドップラ速度を図8に示す。Z因子(図8a)をみると13時36ごろにはエコーが海面にまで到達している。レンジ7500m付近にある水平の白い線は海面を示している。海面からの散乱はZ因子に直して25dBZより大きいので、白色で表示している。

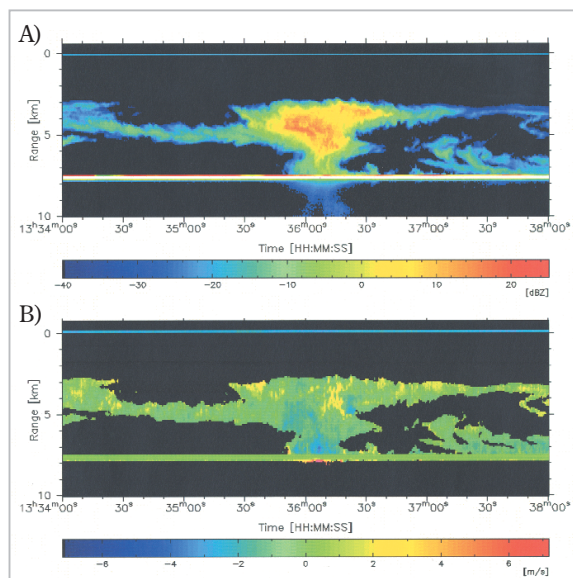


図8 雲の拡大図

13時34分から38分に観測された雲のA) Z因子B) ドップラ速度である。図7A)の一部を切り出したものである。積分時間は0.5秒であり、積分数に直すと264となる。

25dBZより小さければ、赤色で表示している。13時36分あたりに一部赤くなっている場所が見受けられる。これは伝播路上で減衰を受けたためと考えられる。それと、この部分の海面から2kmくらいまでは、それより上のエコーと比べると弱くなっている。同じ時間のドップラ速度(図8b)をみると、強い下向きを示している。下向きの速度が大きい、場合には終端速度との関係式により粒子が大きいと考えられ、Z因子は大きくなる。よって、途中の電波の減衰が起こっているからと考えられる。また、図8bでは雲の上層では上昇気流と見られる上向きのドップラ速度が検出できている。これらを詳細に見ていけば、雲の中での粒子の振る舞いが把握できる。上空から観測したレーダデータと、後で雲の中に入って直接測定したデータとの比較は、時間

経過による雲の移動を考慮しながら行う必要がある。横向き観測データについては偏波データ解析を行う。

4 おわりに

航空機搭載雲レーダの開発概念と機能を説明し、実際に即した運用パラメータの説明を行った。SPIDERでの観測は自由度が非常に大きく、観測目的に応じた適切なパラメータ設定を行えば様々な目的のために利用できる。そのため、地上、船上から、航空機観測に至るまで、様々な観測を行っている。内外の気象研究者からの注目も大きい。また、SPIDER自身は当初目的としていた感度を十分達成できている。

今回冬季メソ気象観測に参加した時の航空機観測実験のデータを紹介した。雲の垂直分布を約300kmにわたり観測した。同じ観測線上にて2度の観測を行った際には、時間経過による雲の移動を確認できた。また、雲のセルを取り出してみれば、その中での上昇、下降の速度検出ができ雲の中でどんな振る舞いがあるかを観察することが可能になる。今後の詳細な解析が待たれる。

謝辞

SPIDER開発や観測に当たり、助言や討論を重ねていただいた通信総合研究所の関係者や、気象研究所、環境研究所や名古屋大学をはじめとする共同研究者の皆様、航空機観測においては航空機の運行をしていただいたダイヤモンドエアサービス株式会社の皆様、その他かかわっていただいた皆様に感謝します。

参考文献

- 1 P. R. Brown, A. J. Illingworth, A. J. Heymsfield, G. M. McFarquhar, K. A. Browning, and M. Gosset, "The role of spaceborne millimeter-wave radar in the global monitoring of ice cloud", J. Appl. Meteor., vol.34, pp. 2346-2366, 1995.
- 2 H. Horie, T. Iguchi, H. Hanado, H. Kuroiwa, H. Okamoto and H. Kumagai, IEICE Trans. Commun., Vol. E83-B, pp.2010-2020, No.9 Sep. 2000.
- 3 R. J. Doviak and D. S. Zrnic, Doppler Radar and Weather Observation, 2nd Ed., Academic Press., 1993.

- 4 F. T. Ulaby, R. J. Moor, and A. K. Fung, Microwave Remote Sensing — active and passive —, Artech House Inc., 1981.
- 5 R. Lhermitte, "Attenuation and scattering of millimeter wavelength radiation by clouds and precipitation", J. Atmos. Ocean. Technol., Vol. 7, pp. 464-479, 1990.
- 6 H. Sauvageot and J. Omar, "Radar reflectivity of cumulus clouds", J. Atmos. Ocean. Technol., Vol.4, pp. 264-272, 1987.
- 7 K. Sassen, "Ice cloud content from radar reflectivity", J. Climate Applied Meteor., Vol.26, pp.1050-1053, 1987.
- 8 S. Y. Matrosov, A. J. Heymsfield, R. Kropfli, B. E. Martner, R. F. Reinking, J. B. Snider, P. Piironen, and E. W. Eloranta, "Comparison of ice cloud parameters obtained by combined remote sensor retrievals and direct methods", J. Atmos. Ocean. Technol., Vol.15, pp.184-196, 1998.
- 9 H. Kumagai, H. Horie, H. Kuroiwa, H. Okamoto, and S. Iwasaki, "Retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and microwave radiometer", Proc. SPIE, Vol. 4152, pp.364-371, 2000.
- 10 H. Okamoto, S. Iwasaki, M. Yasui, H. Horie, H. Kuroiwa, and H. Kumagai, "An algorithm for retrieval of cloud microphysics using 95-GHz cloud radar and lidar", submitting J. Geophys. Res. — Atmos., 2001.
- 11 D. Atlas, S. Y. Matrosov, A. J. Heymsfield, M-D Chou, and D. B. Wolf, "Radar and radiation properties of ice clouds", J. Appl. Meteor., Vol.34, pp. 2329-2345, Nov. 1995.
- 12 吉崎正憲, 加藤輝之, 永戸久喜, 足立アホロ, 村上正隆, 林修吾, WMO-01 観測グループ, 「[冬季日本海メソ対流系観測—2001(WMO-01)]」の速報, 天気, Vol.48, No.2, pp.33-43,2001.



ほり え ひろ あき
堀江宏昭

電磁波計測部門雲レーダグループ主任
研究員
リモートセンシング



くろいわ ひろし
黒岩博司

電磁波計測部門雲レーダグループリー
ダー
リモートセンシング

おお の ゆう いち
大野裕一

電磁波計測部門雲レーダグループ主任
研究員
気象学、レーダーリモートセンシング