

3 航空機からの地球環境計測技術

3 Air-borne Measurement Technologies

3-1 航空機搭載降雨レーダ (CAMPR) による降雪雲内の風速場の観測

3-1 Airborne Multiparameter Precipitation Radar (CAMPR) Observation of Wind Fields in Snow Clouds

佐藤晋介 花土 弘 中川勝広 井口俊夫 中村健治 吉崎正憲

SATO Shinsuke, HANADO Hiroshi, NAKAGAWA Katsuhiko, IGUCHI Toshio,

NAKAMURA Kenji, and YOSHIZAKI Masanori

要旨

通信総合研究所の航空機搭載マルチパラメータレーダ (CAMPR-D) は、降水内の 3 次元風速場を観測するためのデュアルドップラー機能を持つ。本研究では、CAMPR-D で風速ベクトルを算出する方法と問題点について述べ、実際のデュアルドップラー解析の結果を示す。使用した観測データは、2001 年 1 月の冬季日本海メソ対流系観測 (WMO-01) で得られたもので、日本海上の降雪雲の構造を観測することを目的としている。最初に、観測飛行データから前方及び後方アンテナビームの軌跡を求めたところ、航空機に対する風向風速によって、ビームフットプリントにすき間ができ、風下側で前方ビームと後方ビームが重ならない領域ができることが確認された。次に、光ファイバージャイロと DGPS による POS データを用いて、観測されるドップラー速度データに含まれる機体速度成分の除去を精度良く行えることを示した。最後に、日本海収束帯を形成する筋状雲の観測データから、航空機の進行方向に沿った鉛直断面内の風速ベクトルを求めた。その結果、海上では発達中の対流セルが多く上昇流域が支配的であることや、ロール状対流を示唆するような上昇流、下降流の繰り返しが見つかった。また、北～北東側にアンビル状エコーが伸びる構造が一般的であることが示唆された。

The CRL airborne multiparameter precipitation radar (CAMPR-D) is equipped with a dual-beam antenna to measure three-dimensional wind fields in precipitation. This paper describes the methods and related problems of wind-vector calculation, and shows the results of dual-Doppler analysis. The observation data was obtained through the WMO-01 (Winter MCSs Observations over the Japan Sea 2001), the objective of which was to reveal the structure of snow clouds over the Japan Sea. First, the trajectories of the front- and rear-antenna beam were investigated. The results showed that there were some gaps between the two beam footprints due to the speed and direction of the wind relative to the aircraft, and that the front beam did not overlap the rear beam in some regions on the leeward side. The investigation also demonstrated that the data from a flight-information system (POS) consisting of an optical-fiber gyroscope and a differential GPS is effective in removing the aircraft velocity component from the measured Doppler velocity. Finally, some distributions of the wind vectors in the along-track vertical sections are shown. The wind vectors were analyzed using the observation data for linear clouds in the JPCZ (Japan Sea Polar-airmass Convergence Zone). The distributions showed that updrafts were dominant over the sea because of developing convective cells, and that the repetition of updrafts and downdrafts seemed to indicate roll convections. The distributions also showed a common structure of anvil echoes that extended northward or northeastward.

【キーワード】

航空機搭載レーダ, デュアルドップラー, 風速場, 降雪雲

Airborne radar, Dual Doppler, Wind field, Snow cloud

1 はじめに

通信総合研究所では、1990年から1995年にかけて航空機搭載降雨レーダ(CAMPR: CRL Airborne Multiparameter Precipitation Radar)の開発を行ってきた[1]。このレーダは、熱帯降雨観測衛星(TRMM)に搭載されている降雨レーダの観測技術を確認することを一つの目的として開発され[2]、TRMM打ち上げ後はその検証実験に用いられた[3]。また、TRMM検証実験以外にも、多くの国内研究機関との共同実験として、CAMPRによるメソ対流系の観測を行ってきた[4]~[7]。さらに、1996年及び1997年には、それまでのスロットアレイ型アンテナとは別に、デュアルドップラー機能及び2重偏波コヒーレント送受信機能を実現するためのアンテナ部を新たに開発し、多くの観測飛行を実施してきた[8][9]。便宜上、最初のスロットアレイ型アンテナを搭載したレーダをCAMPR-Aと呼び、デュアルビームアンテナを搭載したものはCAMPR-Dと呼んでいる。また、地上観測のためのオフセットパラボラアンテナを用いたシステムはCAMPR-Gと呼んでいる。CAMPR-Aは比較的鋭いアンテナビームを持つが、水平・垂直偏波それぞれのアンテナ間のコヒーレンシーが保てないなどの欠点があったので、1997年以降の観測飛行実験ではCAMPR-Dを用いている。一方、航空機による観測時以外は、CAMPR-Gとして地上観測を行っている[10]。

航空機搭載のデュアルドップラーレーダは、日本国内ではCAMPR-Dが唯一のものであるが、米国では幾つかの例がある。例えば、米国大気研究所(NCAR)のELDORA(Electra Doppler Radar)は、中型プロペラ機の尾部に取り付けられたレドームの中に設置された2枚のスロットアンテナを360°回転させることによって、全方向のデュアルドップラー観測を行うことができる[11][12]。このレーダはX-band(10GHz帯)のレーダであり、比較的低高度での雲内飛行を行うことによって雲物理量の直接観測を行いながら、3次元風速場と3次元降水分布を求めることができる。また、ほぼ同じ仕様のレーダは、米国海洋大気庁(NOAA)のP-3という航空機にも搭載され、Electraとともに多くの野外観測に用いられ

てきた。他の例としては、NASAのER-2という小型ジェット機に搭載されるEDOP(ER-2 Doppler Radar)があり、二つの小型オフセットパラボラアンテナによるデュアルドップラー観測を行うことができる[13][14]。ER-2は、高高度(約20km)を高速で飛行する航空機であり、アンテナは真下方向と前方方向に固定されている。一方、CAMPR-Dは、ビーチクラフトB-200という小型プロペラ機に搭載され、航空機胴体下部に取り付けられたレドーム内の二つの小型レンズホーンアンテナにより、デュアルドップラー観測を行うことができる。B-200は、最大飛行高度が約9km、継続飛行時間が約3時間という制限があるが、小さな飛行場での離発着が可能であり、小回りをきかした観測を行うことができる。このように、それぞれの航空機搭載デュアルドップラーレーダは、搭載される航空機に合わせた機能を持つように設計されており、それぞれの長所や短所がある。しかしながら、降水域内の3次元風速分布を求めるための基本的な考えは同じであり、二つのアンテナにより前方ビームと後方/真下ビームを生成し、二つのレーダビームが同じ場所で重なるまでの時間の風の定常性を仮定することによって、2方向のドップラー速度ベクトルを合成する。定常性を仮定する時間は、最大でも数分以内であるが、厳密にいうとこれは疑似デュアルドップラー観測である。ところで、ELDORAについては多くの3次元風速場の解析例が報告されておりデュアルドップラーの解析手法はほぼ確立しているが、レーダシステム構成が全く異なるCAMPR-Dについては、これまで実際の風速分布を算出した例はない。

本研究では、CAMPR-Dの持つデュアルドップラー機能に焦点を当てて、メソスケール降水の3次元構造、特に降水内の風速場を解析する方法と問題点について述べる。使用した観測データは、2001年1月の冬季日本海メソ対流系観測(WMO-01)という総合的な野外実験プロジェクトの一環として行われたものである[9]。WMO-01におけるCAMPR-Dの観測目的は、これまで観測例がほとんどない日本海上沖合の雪雲の構造とメカニズムの解明や、地上レーダでは観測が困難である山岳部における雪雲の観測である。

また、衛星搭載2周波レーダ設計開発に必要な雪雲の雲物理データの収集も目的とした。さらに、雲粒子や降雪粒子の直接観測及び雲レーダ(SPIDER)観測を行った別の航空機(ガルフストリームII)との同時観測や、CAMPR-Dで求められる風速場の検証のために地上ドップラーレーダ観測網内での観測も行った。ここで、気象学的に興味深い問題は、激しい対流活動を伴い日本海地方に大雪をもたらす日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)内で形成される対流雲の構造であり、特に、海上の対流雲の3次元気流構造を鉛直分解能が良いCAMPR観測データを用いて調べることは重要である。本研究では、そのためのドップラー速度データの解析手法を確立するとともに、風速場算出の際の問題点を明らかにすることを目的とする。

2 CAMPR-Dの構成

図1にCAMPR-Dのアンテナ部の概念図と写真を示す。デュアルドップラー機能を実現するために、2台のレンズホーンアンテナと反射鏡を組み合わせて2方向のビームを作る構成となっている。2台のアンテナとミラー全体はモータで回転させることができ、真下方向を 0° としてロール方向に $-60^\circ \sim +85^\circ$ の範囲でアンテナ走査を行うことができる。スキャン速度は $1 \sim 17^\circ/\text{sec}$ と可変で、任意角度毎のステップ走査も可能である。前方のアンテナビームは、真下から航空機進行方向に対して $+31^\circ$ 前方に、後方ビームは -4° 後方に傾くように反射鏡を取り付けてある。両者のアンテナビーム角度の差は 35° であり、これはデュアルドップラーの風速ベクトル合成の精度を良くするという要請と、二つのビームの観測時間差をなるべく短くするという相反する要請から決められた角度である。米国の航空機搭載デュアルドップラーレーダの場合も、二つのビーム角度の差は $30 \sim 35^\circ$ となっている。後方ビームの角度は、アンテナ走査角度が 0° の時に、降水粒子の鉛直速度(終端落下速度と鉛直流の和)を直接測定できるように決められた。 -4° という角度は、観測飛行時の平均ピッチ角($+1 \sim 3^\circ$)とピッチ基準角とアンテナ回転軸角のオフセットによるものである。アンテナ部以

外のレーダ諸元等については他の文献を参照されたい[1][4][5]。

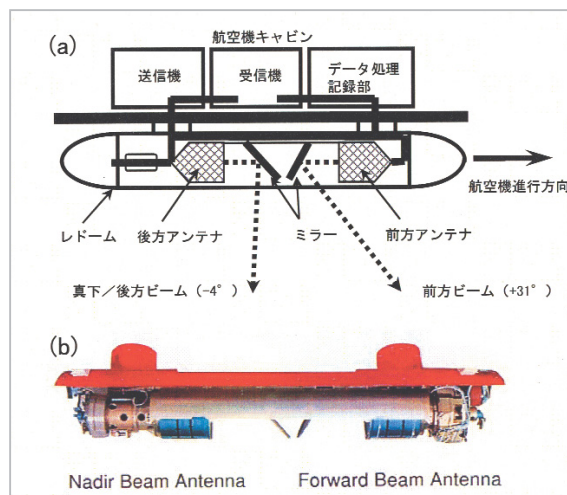


図1 (a) CAMPR-Dの構成及びアンテナ部の概念図
(b) レドームを取り外した状態のアンテナ部写真

3 観測飛行方法

図2は、デュアルビームアンテナによる dual-Doppler 観測の模式図である。観測飛行方法は基本的に直線飛行であり、前方ビームアンテナと後方ビームアンテナを同時にスキャンし、通常は2パルスごとに前方アンテナと後方アンテナを交互に使って送信する。2パルスごとに切り換える理由は、パルスペア方式でドップラー速度を求める際のパルス繰り返し周期を短くするためである。アンテナ走査範囲は、風向によって航空機の対地速度が2～3倍変わるため、向かい風の時は大きな範囲(例えば $\pm 60^\circ$)、追い風の時は小さな範囲(例えば $\pm 35^\circ$)でアンテナ走査を行う。航空機の対地速度は $80 \sim 140\text{m/s}$ 程度であり、飛行高度は $6 \sim 8\text{km}$ なので、二つのビームが同じ位置を観測するまでの時間差は、航空機真下の鉛直断面内(図2a)であれば、最大70秒程度($8000 \times \tan 35^\circ / 80$)である。アンテナスキャン角度が大きい場合でも、有効観測範囲は 20km 程度なので、その時間差は3分以内であり、大抵の場合は降水エコーや風速場の時間変化は無視できると考えられる。

図3は、冬季日本海メソ対流系観測(WMO-01)期間中に行われたCAMPR-Dによるすべての観

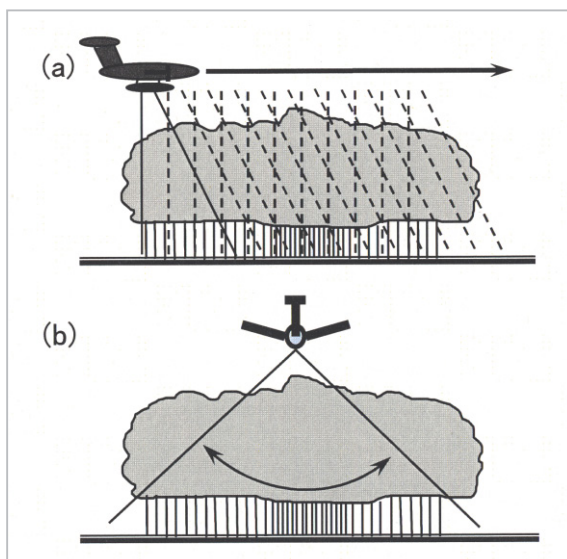


図2 CAMPRデュアルビームアンテナによるデュアルドップラー観測の模式図

(a) 進行方向右手から見た図
(b) 後方から見た図

測飛行コースを示したもので、1月6日から30日の間に12回の観測飛行を行った。1月27日以前は名古屋空港、それ以降は新潟空港をベースとした観測飛行である。航空機の飛行時間の制限(3時間以内)と、自衛隊訓練域内における平日の飛行制限のために、海岸線から離れた日本海沖合での観測は限られたものになっている。次に、二つのアンテナによるデュアルビームの軌跡を、実際の観測飛行時のデータを用いて調べる。図4は、1月14日2回目の観測飛行時のデータで、初めに $\pm 60^\circ$ スキャンで西北西そして北東へ、次に $\pm 35^\circ$ スキャンに変更して南東へ、最後に $\pm 60^\circ$ スキャンで南西方向へ飛行した例である。この時、航空機の飛行高度は約7kmであり、その高度での風向はほぼ西風であり、風速は50m/sに近い強風であった。北東へ向かうときの飛行レグのように、追い風の時に $\pm 60^\circ$ スキャンを行うと、連続するスキャンのフットプリントにすき間が生じてしまうので、本来はもっと小さな範囲でスキャンを行うべきである。それ以上に問題なのは、強い風を横から受ける場合に機首方向と進行方向が異なる(ドリフト角が大きくなる)ことである。その場合、前方ビームと後方ビームの観測範囲がずれて、同じ目標エコーが観測できなくなる恐れがある。図4の例では、特に北東に向かうレグと南西に向かうレグで、ドリ

フト角が大きく、コニカルスキャンとなる前方ビームの軌跡が風下側で大きく曲げられていることが分かる。航空機が風向に対して平行に飛行している時は、このような問題は生じないが、雲を追いかけて興味深い降水域の観測を行う飛行実験では、風向に対して直交する方向にも飛行しなければならない。しかし、その場合は、航空機の進行方向に対して機首を風上に向けなければならないので、風速が大きい場合には、風下側のデュアルドップラー観測が行えなくなる

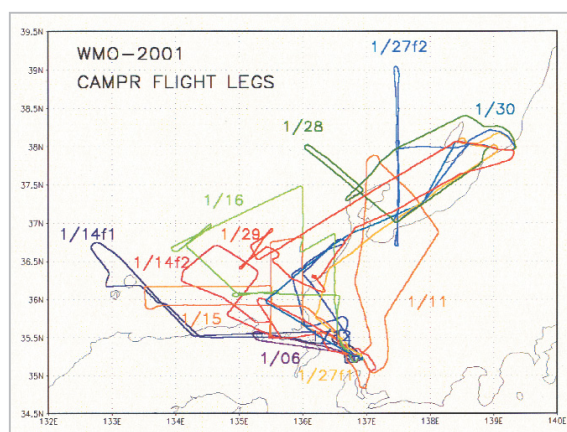


図3 WMO-01 観測期間中に行った12回のCAMPR観測飛行コース

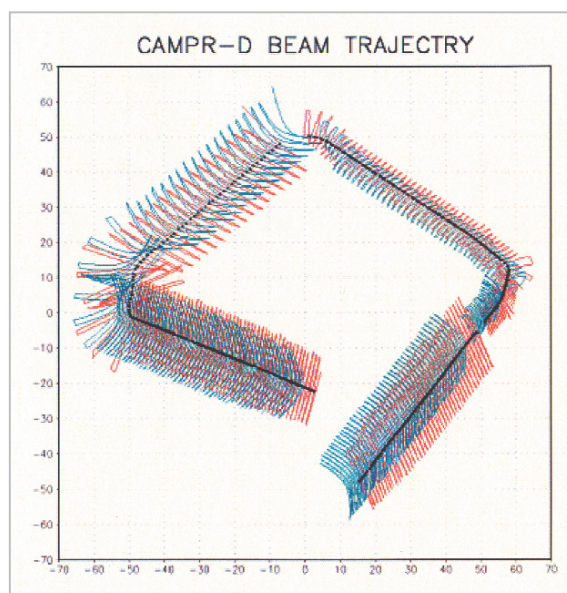


図4 高度1 kmの水平断面における前方アンテナビーム中心の軌跡(青線)と、真下/後方アンテナビーム中心の軌跡(赤線)

黒点はアンテナが真下を向いた時の航空機の位置を示す。飛行方向は時計回りで、2001年1月14日F2の観測飛行データを例として用いた。

ことを念頭においておく必要がある。

ここまで、デュアルドップラー観測のための基本的な飛行方法を説明してきたが、その他にも多くの観測方法がある。参考のために紹介すると、例えばB200で飛び越せないほど雲頂高度が高い対流雲の場合は、雲の側壁を左に見るように沿って飛行しながら左方向のみのスキャンを行う。降水域が広範囲に及ぶ時には、長い直線飛行を行うこともあるが、逆に目標とする雲が小さい場合には、その雲を取り囲むような飛行コースや、十字に横切るような飛行を行うこともある。また、同じコースを1往復以上する場合や真下にエコーが続く場合には、アンテナを真下に固定して後方アンテナのみを使って2重偏波送信を行い、2台の受信機の全パルスヒットを記録するIQモードでも観測を行う。離着陸時など飛行高度が変わる時には、ほぼ水平方向(+85°)にアンテナを固定して、2重偏波観測を行うこともある。

4 ドップラーデータの解析方法

CAMPで観測されたドップラー速度データの解析のためには、(1)ドップラー速度に含まれる機体速度成分の除去と折り返し補正、(2)観測されたデータの3次元格子への座標変換、(3)前方ビームと後方ビームのドップラー速度の合成、という三つの手順が必要となる。図5は、これらの解析に用いる航空機に対する座標系である。機首方向(ヘディング方向)をX軸として、すべてのデータを右手座標系で統一することが重要で

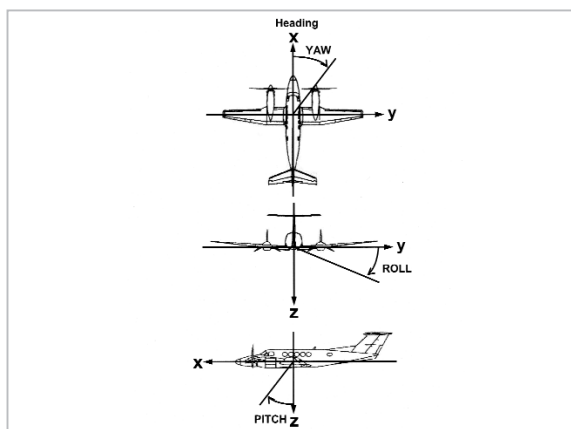


図5 POSデータと速度データ解析のための航空機に対する座標系

ある。ここでは、詳細な計算式は省略して、それぞれの手順における問題点などについて詳しく述べることにする。

ドップラー速度データに含まれる機体の速度成分の除去するためには、まず航空機の対地速度を知る必要がある。航空機の対地速度3成分が分かれば、アンテナビーム方向の速度成分を求めるのは容易である。しかし、B200の姿勢、位置、速度情報は、少なくとも1998年以前の観測データではFDSと呼ばれる機械式ジャイロ・気圧高度計・GPS(1秒間隔)の情報しかなく、特にGPSの位置情報と時刻から計算する航空機の対地速度の精度が悪いことが大きな問題であった。本観測では、POSと呼ばれる光ファイバージャイロとDifferential-GPS(DGPS)によるシステムで計測された高精度のロール・ピッチ・ヘディング、ヨー角度に加え、2方向再解析で得られる航空機の北・東・下向き速度、緯度・経度・高度データが50Hz(0.02秒間隔)で得られている。このPOSデータをCAMPデータに含まれる0.01秒単位のシステム時刻(GPS時刻に対して推定補正を行う)と合わせて用いることにより、積分パルス時間ごと(例えば、パルス繰返し周波数4kHz、積分パルス数256の場合0.064secごと)に、ドップラーの機体速度成分の補正が可能になった。しかしながら、航空機の速度は追い風の時は130m/s以上にもなるので、ピッチ角度の誤差については注意する必要がある。例えば、ピッチ角が1°増えると、下方ビームに対しては2.3m/s、35°傾けた前方ビームに対しては76.4m/sといった大きな機体速度成分が混入する。これは、0.1m/s以下の精度で測定しているドップラー速度に対して、ピッチ角のわずかな誤差が無視できないドップラー速度誤差になることを意味している。ただし、これは全データに対する一定の誤差であるので、統計的に地表面で速度0となるような補正を行うことによって、このオフセット誤差は取り除くことは可能である。今回の解析では、幾つかの個々のデータについては地表面で速度がほぼ0になっていることを確認したが、サイドローブの問題や地表面の状態によってすべてのビームに対して地表面の速度が必ずしも0になるとは限らないという問題が残されている。一方、機体速度成分を含

む観測された生のドップラー速度は、特に前方ビームの場合には二重三重の折り返しを含むことがあり、真のドップラー速度が全く想像できないことも多い。しかし、上に述べた方法で機体速度成分を除去した後は、ドップラー速度の折り返し補正は比較的簡単になる。ただし、例えば真下方向の地表面で折り返しがないと仮定して、その点からの速度連続性から折り返し補正を行うといった単純なアルゴリズムでは正確な補正ができないデータが多いので、現在は高層ゾンデ等他の手段で観測された風速の鉛直プロファイルのリファレンスとして与えて、折り返し補正処理を行っている。

次に、観測されたデータを3次元グリッド(x、y、z)に落とすための座標変換は、

$$\begin{aligned}x &= r \sin(P) \\y &= r \cos(P) \sin(R) \\z &= r \cos(P) \cos(R)\end{aligned}$$

で表される。ここでrはレンジ方向の距離、Pはピッチ角+アンテナ取付角、Rはロール角+アンテナスキャン角である。3次元グリッドにおける2方向のドップラー速度の合成は、基本的に地上レーダによるデュアルドップラー合成と同じである。しかし、スキャン角度が小さい場合は(おおよそ±15°以下)、観測されるドップラー速度に含まれる水平風速成分の割合が小さいため、航空機のヘディング方向に直交する方向の水平風速ベクトルを算出することは困難である。逆に鉛直風速成分と航空機のヘディング方向に沿った水平風速ベクトルは、降水粒子の終端落下速度の分離に関する問題を除けば、比較的精度良く算出することができる。なお、スキャン角度の大きな速度データから直交方向の速度ベクトルを求めれば、ヘディング方向に沿った水平風速ベクトルと合わせることによって、水平風速の鉛直プロファイルを求めることは比較的容易に行える。ところで、3次元風速ベクトルを算出するためには大気の流れの式を用いる必要があるが、アンテナ角度によって水平風速と鉛直風速に対する適当な重み付けを行った上で、地上と雲頂高度で鉛直風速0という境界条件の下で変分法による解を求めなければならない。本研究では、容易に速度ベクトルの合成が可能な、航空機のヘディング方向に沿った鉛直断面内の

風速ベクトルを求めることとする。R=0の時のデータのみを使うと、ヘディング方向の水平風速成分をU、鉛直風速をW(下向き正)は以下のように表される。

$$\begin{aligned}U &= \{ V_F \cos(P_H) - V_H \cos(P_F) \} / \\&\quad \sin(P_F - P_H) \\W &= \{ V_H \sin(P_F) - V_F \sin(P_H) \} / \\&\quad \sin(P_F - P_H) - W_t\end{aligned}$$

ここで、Vは観測されたドップラー速度であり、下付のF、Hはそれぞれ前方ビーム、後方ビームを表す。W_tは降水粒子の終端落下速度であり、反射強度Zの関数として表される。ここでは、降雪粒子に対する経験式、

$$W_t = 0.75 \times Z^{0.0714}$$

を用いた。

5 解析結果

図6は、今回解析を行った1月16日、13時の気象衛星ひまわりの赤外面像である。大陸から南東へ伸びる発達した雲の帯が日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)で、その北東側には、季節風の吹き出し方向に直交する筋状雲(いわゆるTモードの雲)が見られる。山陰沖には渦状擾乱が見られ、その南側では西側からの筋状雲(Lモードの雲)と合流し、若狭湾では特に発達した雪雲を形成している様子が見られる。図7は、解析を行った三つのCAMPR観測飛行航路(LEG-A、LEG-B、LEG-C)とその観測時刻及びそれらの観測飛行航路を気象庁地上レーダ合成図に合わせたものである。LEG-Aでは、JPCZに合流するTモードの雲、あるいは渦状擾乱を構成するスパイラルバンドに伴うエコーを観測したと考えられる。図8、9、10は、それぞれの観測飛行航路に沿った鉛直断面内のエコー強度分布と水平・鉛直風速ベクトルを示し、下図は高度1.5kmの水平断面内のエコー強度分布を示す。鉛直断面内の水平風速は実際にはヘディング方向の風速成分であるが、航空機の進行方向とヘディング方向はほぼ一致するので(大抵の場合、ドリフト角は10度以内)、これらの図は鉛直断面内の風速ベクトルを表していると考えられる。図8によると、西側のエコーは高度とともに北東方向にエコーが伸びており、風速ベクトルも北東方向への上昇流となっ

ている。このような北東方向へ伸びるアンビル状エコーは、他のデータでも頻繁に見られており(例えばLEG-Bのクロストラック方向、図略)、今回観測したJPCZ付近の降雪雲では共通の構造であると思われる。また、高度1.5kmの水平断面によると、この二つのエコーはそれぞれ20～30kmの大きさの塊状エコーであることが分かる。次に、LEG-Bに沿った鉛直断面は、JPCZに沿った観測であり、水平断面を見ると水平距離50kmより南東側でエコーが連続している(図9)。鉛直断面を見ると、エコーは上流側で北西側に傾いているように見られるが、気流構造は南東方向へ上昇するベクトルとなっている。ただし、対流セルに相対的な流れを考えると、下層より上層の風速が小さいということは上層の相対風速が北西方向に向かっていることを示唆するので、エコーの傾きと矛盾はしない。エコー頂は、約4.5kmで本観測データの中では、最も発達している。また、エコーが連続している水平距離50kmから南東側では、高度3kmより下層において5～10km間隔で上昇流域と下降流域が交互に現れていることが特徴的である。これはバンド状エコー内部の対流セル循環を現していると考えられ、恐らくロール状循環の断面を示しているものと思われる。図10に示したLEG-Cは、東西に伸びる強いバンドエコーのすぐ北側を飛行したものであるが、高度1.5kmの水平断面における水平距離30～40kmに見られる強いエコーの北側では、鉛直断面を見るとエコーが地上に達しておらず、南側の対流セルから北側へ伸びる

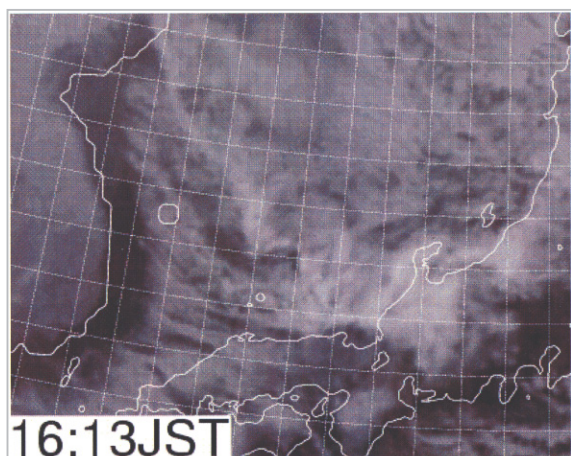


図6 2001年1月16日、13時の気象衛星ひまわり赤外画像

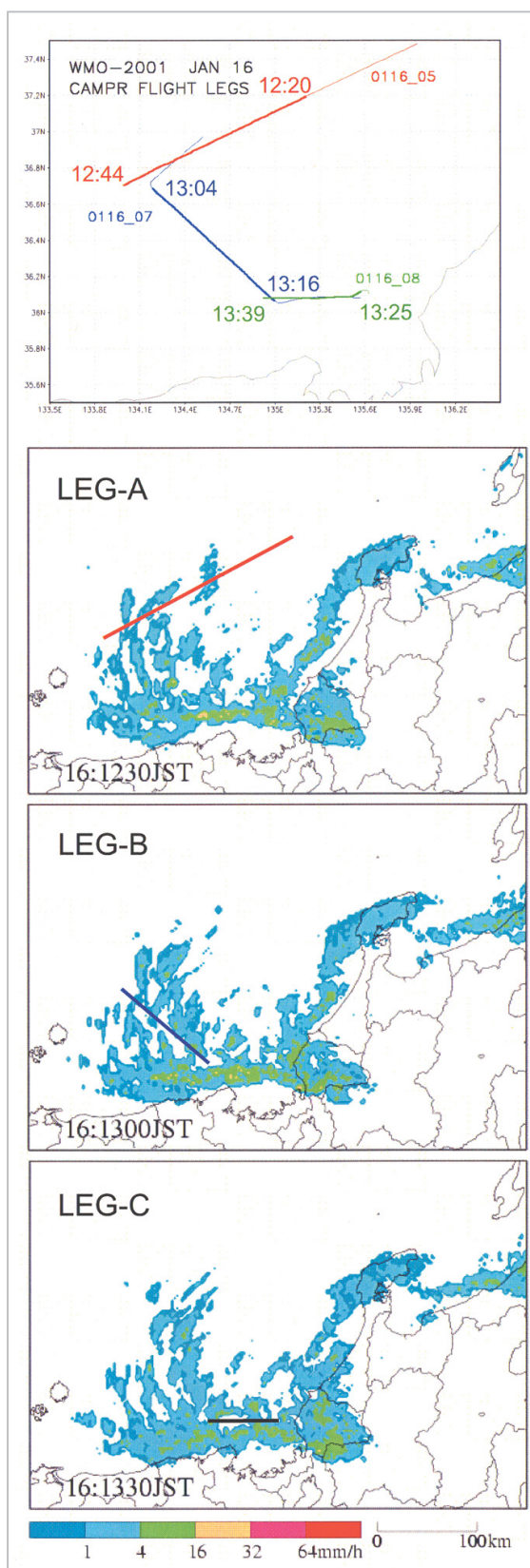


図7 解析を行った三つの観測飛行レグと、その時刻における気象庁レーダの西部北陸合成図

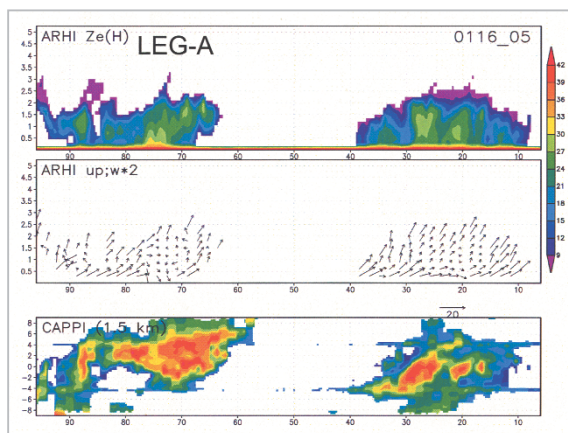


図8 LEG-Aに沿った鉛直断面内の反射強度(上図)、風速ベクトル(中図)、高度1.5 kmの水平断面内の反射強度(下図)

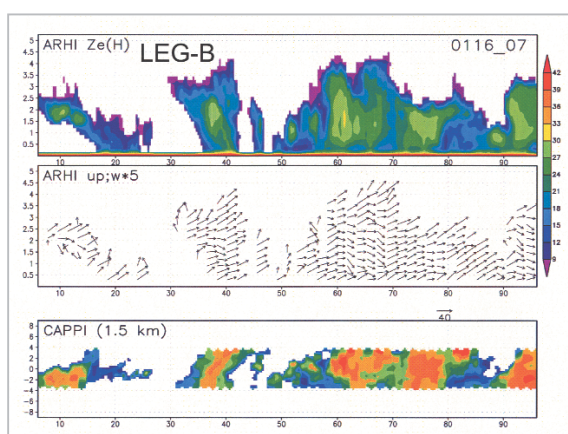


図9 図8と同じ、ただしLEG-Bに沿った断面

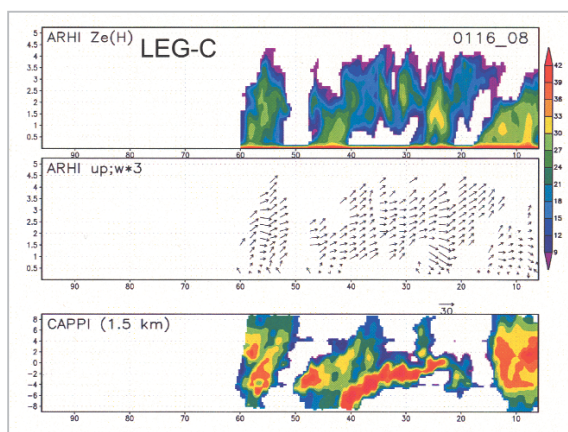


図10 図8と同じ、ただしLEG-Cに沿った断面

アンビル状エコーであることが示唆される。ただし、この地上に達していないエコーは、大きな上昇流が見られることから、降雪粒子が流されるアンビルというよりも発達期のエコーが大きく傾いていると考えることができる。なお、距離15km以東のエコーは陸地の影響を受けたも

のと考えられ、その水平分布はなだらかに広がり、エコー頂も低くなっている。

6 まとめと今後の課題

本論文では、CAMPR-Dのデュアルドップラー機能について紹介するとともに、その基本的なデータ解析方法と問題点について述べた。最初に、デュアルビームアンテナの機械的な構造を説明して、実際の観測飛行のデータを用いて前方及び後方ビームの軌跡を示した。追い風時と向かい風時で航空機の対地速度は大きく変わるので、ビームのフットプリントにすき間ができないようアンテナ走査範囲を調整する必要がある。また、横風を受ける飛行方向の場合は、ドリフト角によって、風下側で前方ビームと後方ビームが重ならない領域ができることに注意が必要である。次に、光ファイバージャイロとDGPSによるPOSデータを用いて、観測されるドップラー速度データに含まれる航空機速度成分の除去を行えることを示した。これは、機械式ジャイロと通常のGPSデータでは成し得なかったことであり、今後のドップラーデータ解析が更に進むものと思われる。しかしながら、ピッチ角度のわずかな誤差によって、大きな機体速度成分が観測されるドップラー速度に誤差として混入するので、ピッチ角の精度については、地表面でのドップラー速度の統計値などを用いた更なる検討が必要と思われる。また、CAMPR-Dのアンテナビーム幅は約7°と非常に広く、ビーム内のエコーの不均一性がもたらすエコー強度及びドップラー速度の誤差は無視できない大きな問題で、今後の詳細な検討が待たれる。

今回の解析で求めた進行方向に沿った鉛直断面内の風速ベクトルは、全体として上昇流域が多いという傾向が見られたが、その原因は日本海上では発達期のエコーが支配的であることを反映していると考えられる。また、今回の解析では、降水粒子の落下速度は雪片のZ-Wt関係式を仮定したが、反射強度の大きなエコーは霰粒子によるものと考えられるので、その落下速度はより大きくなる。したがって、解析された鉛直風速は、実際には更に大きいと考えられる。

日本海収束帯に伴う対流雲の構造としては、概念モデルを作成するまでは解析が進んでいない。しかし、海上の対流性エコーの全体的な特徴として、傾いた上昇流に伴うアンビル状エコーが顕著に見られ、その方向は北東から北側、すなわちTモードエコーの伸びる方向のことが多いことが分かった。また、収束帯に沿った鉛直断面内には、ロール状対流を示唆するような上昇流、下降流の繰り返しが5～10km間隔で見られた。今後は、それぞれのエコーを形成する個々の対流セルの発達段階も考慮した上で解析事例を増やし、日本海収束帯に伴う対流雲の構造を明らかにしていく予定である。

今回の解析では飛行経路に沿った鉛直断面内の気流構造の解析しか行わなかったが、それに直交するクロストラック方向(アンテナスキャン方向)の断面内の風速ベクトル及び3次元空間内の風速ベクトルも連続の式を用いることによっ

て解析可能である。ただし、それらの風速ベクトルを算出するためには、ドップラー速度の重み付けと変分法を用いた連続の式の積分方法などを開発しなくてはならず、今後の課題とした。

謝辞

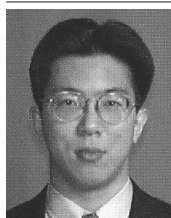
観測飛行実験時の航空機運用やPOSデータの収集処理に関しては、中日本航空株式会社の関係各位に大変お世話になりました。また、観測飛行の実施に当たっては、戦略基礎の多くの観測メンバーにお世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。本観測実験は、科学技術振興事業団、戦略基礎研究「メソ対流系の構造と発生・発達のメカニズムの解明」の補助を受けました。

参考文献

- 1 H. Kumagai, K. Nakamura, H. Hanado, K. Okamoto, N. Hosaka, N. Miyano, T. Kozu, N. Takahashi, T. Iguchi, and H. Miyauchi, "CRL airborne multiparameter precipitation radar (CAMPR): System description and preliminary results", IEICE Trans. Com., E79-B, No.6, pp. 770-778, 1996.
- 2 佐藤晋介, "航空機と衛星からの降雨レーダ観測技術の実現", 情報通信ジャーナル, Vol.16, No.3, pp.19-21, 1998.
- 3 R. Oki, K. Furukawa, S. Shimizu, Y. Suzuki, S. Satoh, H. Hanado, K. Okamoto, and K. Nakamura, "Preliminary results of TRMM: Part 1, A comparison of PR with ground observations", Marine Tech. Soc. J., Vol. 32, No.4, pp. 13-23, 1999.
- 4 N. Takahashi, H. Kumagai, H. Hanado, T. Kozu, and K. Okamoto, "The CRL airborne multiparameter precipitation radar (CAMPR) and the first observation results", Proc. 27th Conf. on Radar Meteor., Vail, pp. 83-85, 1995.
- 5 N. Takahashi, H. Hanado and S. Satoh, "Measurement of kinematics and precipitations of stratiform rainfall with airborne multiparameter rain radar", Proc. 12th Int. Conf. on Cloud and Precip., Zurich, Switzerland, pp. 450-453, 1996.
- 6 S. Satoh, T. Iguchi, H. Hanado, N. Takahashi, H. Horie, H. Kumagai, and T. Kozu, "Airborne multiparameter radar observation of Baiu-frontal precipitation during TREX in 1996", Proc. 28th Conf. on Radar Meteor., Austin, TX, pp. 71-72, 1997.
- 7 TREX 観測グループ, "九州南部豪雨観測実験報告", 天気, Vol.45, No.2, pp.137-144, 1998.
- 8 吉崎正憲, 瀬古弘, 加藤輝之, 小司禎教, 永戸久喜, 別所康太郎, 郷田治稔, X-BAIU-99 観測グループ, "1999年東シナ海・九州梅雨特別観測(X-BAIU-99)報告", 天気, Vol.47, No.3, pp.217-224, 2000.
- 9 吉崎正憲, 加藤輝之, 永戸久喜, 足立アホ口, 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.12, pp.893-903, 2001.
- 10 K. I. Timothy, T. Iguchi, Y. Ohsaki, H. Horie, H. Hanado, and H. Kumagai, "Test of the specific differential

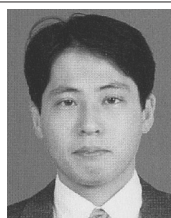
propagation phase shift (KDP) technique for rain-rate estimation with a Ku-band rain radar", J. Atmos. Ocean. Tech., Vol. 16, pp. 1077-1091, 1999.

- 11 P. H. Hildebrand, C. A. Walther, C. Frush, J. Testud, and F. Baudin, "The ELDORA/ASTRAIA airborne Doppler weather radar: Goals, design, and first field tests", Proc. IEEE, Vol. 82, pp. 1873-1890, 1994.
- 12 P. H. Hildebrand, W.-C. Lee, C. A. Walther, C. Frush, M. Randall, E. Loew, R. Neitzel, R. Parsons, J. Testud, F. Baudin, and A. LeCornec, "The ELDORA/ASTRAIA airborne Doppler weather radar: High-resolution observations from TOGA COARE", Bull. of the Amer. Meteor. Soc., Vol. 77, No. 2, pp. 213-232, 1996.
- 13 G. M. Heymsfield, S. W. Bidwell, I. J. Caylor, S. Ameen, S. Nicholson, W. Boncyk, L. Miller, D. Vandemark, P. E. Racette, and L. R. Dod, "The EDOP radar system on the high-altitude NASA ER-2 aircraft", J. Atmos. Ocean. Tech., Vol. 13, pp. 795-809, 1996.
- 14 G. M. Heymsfield, J. B. Halverson, and I. J. Caylor, "A wintertime Gulf coast squall line observed by EDOP airborne Doppler radar", Mon. Wea. Rev. Vol. 127, pp. 2928-2950, 1999.



佐藤 晋介

電磁波計測部門降水レーダグループ主任研究員 博士（理学）
レーダ気象学



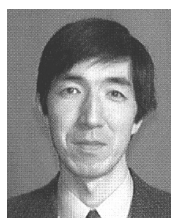
花土 弘

電磁波計測部門降水レーダグループ主任研究員
マイクロ波リモートセンシング



中川 勝広

電磁波計測部門亜熱帯環境計測グループ研究員 博士（工学）
レーダ水文学



井口 俊夫

電磁波計測部門降水レーダグループリーダー Ph. D.
電磁波リモートセンシング



中村 健治

名古屋大学地球水循環研究センター長
教授 理学博士
レーダ気象学



吉崎 正憲

気象研究所予報研究部室長 理学博士
メソ気象学