

航空機からのチャフ散布とドップラーレーダを組み合わせた 水平風の3次元分布の測定法について

藤吉康志*・中村健治**

1. はじめに

通常の気象ドップラーレーダでは、雨滴や雪粒子が存在するいわゆる雨域内しか観測できない。一方、走査型ドップラーライダーでは晴天大気中の風の3次元分布を測定することが可能であるが、探知距離が10 km程度以下であり、かつ走査速度がレーダに比べて数倍以上も遅い。これらの短所は、時間変動や移動速度が大きく、かつある程度の空間スケールをもつ雲システムを観測する際には大きな制約となる。また、パフを散布してそれを複数の赤外ビデオカメラで追跡する拡散実験なども試みられているが (Min *et al.* 2002), メソスケールの風の分布を求めるには適していない。観測用航空機を用いれば、雲内外の水平風を直接測定できるが、航空機のみでは飛行した線上のデータしか得られないことと、長時間にわたる3次元分布の連続測定は困難である。このように、雲が発生する前から消滅までの風の3次元分布をシームレスに測定することは未だに困難である。

実は、名古屋大学大気水圏科学研究所 (当時) では、1995年度前後の数年にわたって、研究所特別事業「メソスケール降水雲系の水・物質循環に関する研究」の一環として、雲と周辺大気との相互作用を明らかにするため、航空機の利点とドップラーレーダを組み合わせた水平風の3次元分布の観測方法を検討した。即ち目的とする観測域にチャフと呼ばれる電波散乱物質を航空機から散布し、このチャフの動きを2台のドップラーレーダで測定した。同様な手法はMETROMEX (Metropolitan Meteorological

Experiment) の際に、セントルイスで大気境界層の流れの測定に用いられ (Kropfli and Kohn 1978), 我が国でも気象研究所が筑波山周辺の気流 (ただし2次元の水平風分布のみ) を測定する際に用いられた (栗田ほか 1984, 1985)。また, Moninger and Kropfli (1987) は, 2重偏波レーダによって降水粒子とチャフとが区別できることを利用して, 雲のエントレインメント率を測定している。

1995年度当時に比べて, 近年偏波機能も有したドップラーレーダが我が国でも数多く設置されつつあり, また, 現在, 観測用航空機を導入したいという機運が再び高まっている。そこで本稿では, 以前行った観測データを整理し, 今後の観測研究に役立つ情報として提供することを目的とした。

2. 実験方法

市販品のチャフは5万本が一束で, 1本は幅0.25 mm, 長さ32mm, 厚さ0.015mm, 重さ1.3mgのアルミ箔である。落下速度は, ダイヤモンドエアーサービス (株) が実施した測定では $0.5\sim 1.5\text{ms}^{-1}$ の範囲 (平均 0.76ms^{-1}) であった。用いた航空機はダイヤモンドエアーサービス (株) の三菱式 MU-2B-36型で, 胴体後部扉に投下装置を取付けた。飛行方法, 投下場所の指示と投下開始の合図は, レーダ観測基地に配置された地上班からトランシーバーによって行った。もう一方のレーダ観測点とは電話で連絡をとると共に, 航空機のパイロットの無線を傍受させて現在の作業段階を把握させた。

3. 実験結果

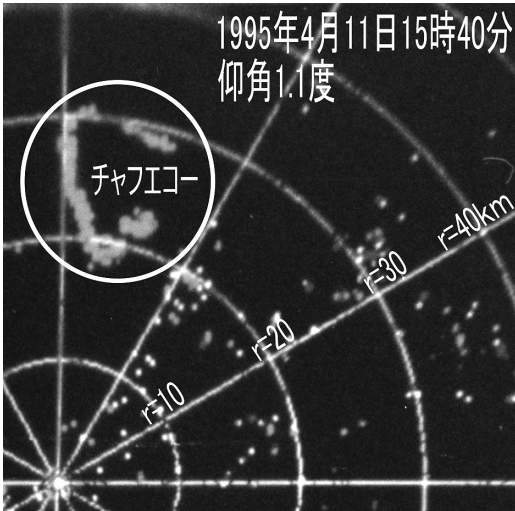
3.1 若狭湾で行った実験

散布実験は, 1995年4月11日午前と午後の2回行った。午前は高さ7000フィート (約2100m) から計3回

* Yasushi FUJIYOSHI, 北海道大学低温科学研究所。

** Kenji NAKAMURA, 名古屋大学地球水循環研究センター。

© 2012 日本気象学会

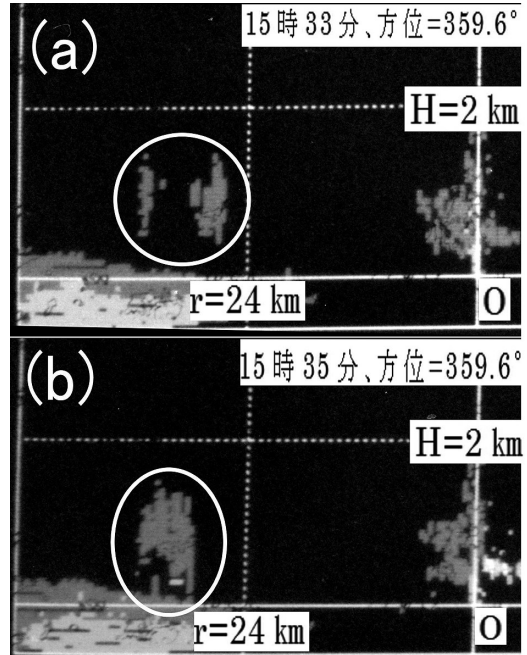


第1図 1995年4月11日15時40分に撮影した仰角1.1度の Velocity Azimuth Display (VAD) 画面. 白丸で囲った3角形がチャフエコー.

チャフを散布した. 1回目と2回目は散布したチャフを実際にレーダで捉えることが可能かどうかを調べることを目的として, それぞれ5万本(即ち1束)と10万本をほぼ1地点にまとめて投下した. レーダでは初め上空の1点にチャフエコーが現れ, その後上下に広がる様子を捉えることが出来た. 3回目は風向に直角な方向に直線状に2分間かけて10万本散布したが, 空中でうまく広がらなかったため, レーダでは直線状ではなく3つのドットとして映った.

午後高さ7000フィートから計3回チャフを散布した. 1回目は三角形を描いた飛行をしながら約9分間で計10万本散布したが, レーダではチャフを捉えることが出来なかった. 2回目は同じ地点に同じ時間をかけて20万本を投下し, レーダでチャフエコーを捉えることが出来た. 3回目も同じ領域に15時04分~15時13分まで90万本散布し, 明瞭な三角形をしたチャフエコーが出現した(後で聞くと, 3回目の散布は投下装置を使用せず手で散布したとのことである). 三角形の一辺の長さは約13kmで全長は約40kmである.

第1図は3回目の観測中に撮影した15時40分の仰角1.1度のドップラー速度の水平分布画像である. 散布後約30分近く経過しても三角形が形を変えずに存在している. 第2図a, bは, それぞれ15時33分と15時35分のエコーの鉛直断面を示したものである. 図に白丸

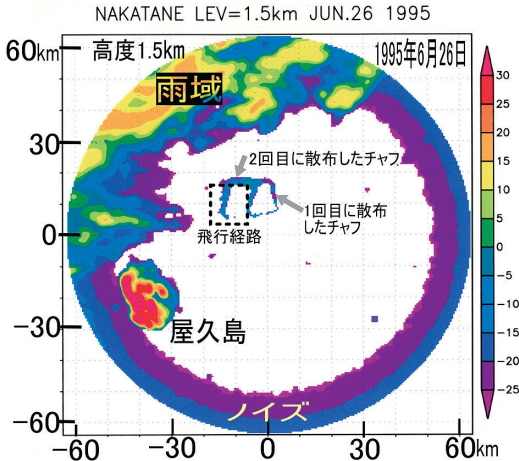


第2図 1995年4月11日に撮影した, (a)15時33分と(b)15時35分の Range Height Indicator (RHI) 画面. 白丸でチャフエコーを囲んだ.

で囲んだエコーがチャフである. 第2図a, bの左下に見えるエコーは海面からの反射エコーである. チャフエコーのレーダ反射強度は0 dBZ以下と極めて弱い, ドップラー速度は十分検出可能であった. 散布してから20分後(15時33分)には, チャフエコーの上端は1.5kmで下端は0.35kmであったことから, チャフの落下速度は $0.5 \sim 1.45 \text{ms}^{-1}$ と推定でき, この値は室内での測定結果とほぼ一致する.

3.2 種子島周辺で行った実験

散布実験は1995年6月26日午後, 種子島周辺海域で行った. 航空機は14時44分から14時59分まで, 東経 $130.730^\circ \sim 130.850^\circ$, 北緯 $30.580^\circ \sim 30.670^\circ$ の範囲を高度3kmでほぼ矩形に回りながら2回チャフを散布した. 第3図は高度1.5kmでのレーダエコーの水平分布であり, チャフ, 屋久島, 及び雨域も映っている. 1回目と2回目では散布した場所は同じであったが約8分の時間差があり, この間にチャフが水平風によって移動したためチャフによる矩形エコーが2つ映っている. また2つの矩形エコーの幅がほとんど変化していないことから分かるように, チャフは航空



第3図 1995年6月26日の高度1.5kmのConstant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI) 画像。破線で示した矩形はチャフを散布した際の飛行経路。

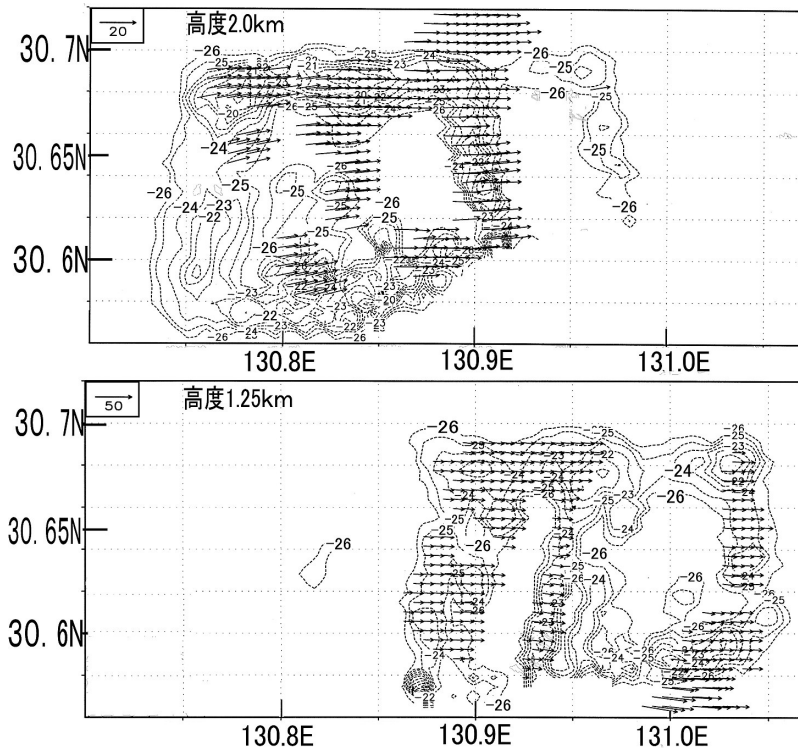
機から投下された直後に航空機周辺の風の乱れによって水平方向に拡散された後はほとんど水平方向には広がらなかった。

チャフエコーの鉛直方向の広がり具合と散布後の経過時間から計算したチャフの落下速度は、 $0.6\sim 0.94\text{ ms}^{-1}$ であった。またチャフによるレーダエコー強度は散布直後でも最大3dBZであり、時間と共に水平および鉛直方向に拡散するため、ほとんどの領域で0dBZ以下であった。

第4図に、種子島の中種子町と西之表市に設置した2台のドップラーレーダから求めた海拔高度1.25kmと2kmの水平風とチャフエコーの水平分布を示した。ただし広い範囲の水平風分布を示すために、14時46分から15時28分までに測定された全データを重ね合わせた。チャフエコー及び水平風を作ることができた領域は、チャフが風に流されたため下層ほどより東側に移動している。

4. まとめと提案

若狭湾での散布実験を基に、レーダでとらえることが可能なチャフの空間数濃度を見積る。三角形の全長約40kmの長さの間に90万本散布したので、散布量は $90\text{万本}/40\text{km}=22.5\text{本}/\text{m}$ 程度、散布速度は1束(5万本)/30秒であった。チャフが投下された直後の分散は、主に航空機が作る後方乱気流によって生じる。後方乱気流の拡がりの幅は翼幅の2倍、深さは翼幅に等しいことが実験的に知られている。MU-2B-36型の場合、翼幅12mとしてチャフは2分後には幅約24m、鉛直長さ約12mの拡がりとなる。そこで、航空機から散布した直後は、横幅及び鉛直共に約10m程度の範囲に存在しているとすると、 $22.5\text{本}/(1\times 10\times 10\text{ m}^3)$ である。これが時間と



第4図 1995年6月26日14時46分～15時28分の間に、2台のドップラーレーダを用いて観測した海拔高度1.25と2.0kmの水平風と、15時28分時のチャフのレーダ反射強度(dBZ)の水平分布。各図の左上隅に水平風ベクトルの長さのスケール(単位は ms^{-1})を示した。

共に水平及び上下に拡散し、20分後には鉛直方向には約1000m、横幅方向には約100m程度となるので、チャフの空間数濃度は $22.5\text{本}/(1 \times 100 \times 1000\text{m}^3)$ となる。言い換えれば、1辺約16mの立方体中に1本程度となる。この値はKropfli and Kohn (1978)が報告した約50m立方で1本よりも少し高密度であるが、レーダの性能の違いが大きい。

チャフのレーダ散乱断面積は、Pouliguen *et al.* (2005)がMitchell and Short (1980)の情報を参考に計算を行っているが、今回の散布量で得られるエコーの強さ(数dBZ)は霧雨かそれよりも弱い雨程度の反射強度であった。散布したアルミチャフは長さが3cmであり、波長3cmのXバンドレーダで最も有効反射断面積が大きく、波長5cmの気象庁Cバンドレーダや航空機用レーダではさらに有効反射断面積が小さくなる。従って気象庁レーダや航空管制レーダにほとんど障害を与えることの無い程度のチャフ散布量で観測実験が可能である。一方、Xバンドを使った偏波レーダには多少の影響が出るが、Moninger and Kropfli (1987)が述べているように降水粒子とチャフとは区別できる。

散布高度から地表までの間にチャフが連続して存在していなければ、散布した高度から地表までの高度範囲の水平風を測定できない。鉛直方向のチャフの拡散はほぼ事前の実験データ通りであり、落下速度は $0.5 \sim 1.5\text{ms}^{-1}$ の範囲で、平均落下速度は 1ms^{-1} である。従って現有のチャフでは高度2.5kmから散布しても40分経過しないとチャフは地上に到達しない。通常の雲の寿命は30分以内であるので、このままではチャフが地上に達する前に雲が消滅してしまう。また、鉛直方向の広がりも、高度7.5kmから散布した場合でも高々3km程度にしか(しかも2時間以上後)ならない。仮に、落下速度が $0.6 \sim 4\text{ms}^{-1}$ の範囲にあるチャフを高度5kmから散布したとすると、散布開始から20分後で既に散布高度以下のほぼ全領域で水平風の測定が可能である。従って、現有のチャフにより速い落下速度を持つチャフを混ぜるといった改良は有効であろう。

さらに、雲外の風を作成するためには、雲の周囲にカーテンのようにチャフの幕を作る散布方法にも工夫が必要である。雲頂上で等高度で円を描きながらチャフを散布する場合、航空機が一周する間に落下速度の速いチャフがちょうど地面に到達すると効率が良い。散布高度を H 、飛行円の半径を r 、航空機の水平速

度を V_a とすれば、航空機が一周する間にちょうど地面に到達するチャフの落下速度は、

$$V = HV_a/2\pi r \quad (1)$$

となる。仮に $H = 5\text{km}$ 、 $r = 10\text{km}$ 、 $V_a = 100\text{ms}^{-1}$ とすると $V = 8\text{ms}^{-1}$ となり、通常のチャフを使う限りは、このような飛行方法でチャフのカーテンを作るとは難しい。短時間に鉛直方向と雲の周囲にチャフを広げる方法として、円を描きながら上昇するスパイラル状の飛行方法とが考えられる。円の半径を r 、水平速度を V_a 、上昇速度を U 、スパイラルの鉛直ピッチを Δh とすると、航空機が円を一周する時間 Δt は、

$$\Delta t = 2\pi r / V_a = \Delta h / U \quad (2)$$

となり、半径 r と Δh の間には、

$$r = V_a \cdot \Delta h / 2\pi U \quad (3)$$

という関係が成り立つ。 $U = 5\text{ms}^{-1}$ 、 $V_a = 100\text{ms}^{-1}$ とすると $r \sim 3\Delta h$ となる。仮に $r = 10\text{km}$ とすると一周するのに約10分かかり、 Δh は約3kmとなる。落下速度が航空機の上昇速度に等しいようなチャフを散布できるならば、スパイラルも実戦向きの飛行方法の一つであろう。しかし、現有のチャフ程度の落下速度範囲では、スパイラル飛行ではチャフが存在する高度にギャップが生じ、かつ、螺旋状にチャフが存在するため、水平断面内の水平風速の測定ができなくなってしまう。

結局、METROMEXのように直線上に散布するだけであれば飛行方法に工夫はいらないが、我々のように風の3次元分布を測定し、かつ1台しか航空機が使えない場合には、雲底下から雲頂まで下から順番に数高度で水平に雲の回りを周回し、その後雲頂上で周回しながらチャフを散布する飛行方法が現実的であろう。

今回の実験によって、対流～メソ γ スケールの非降水域内の水平風測定に本手法が有効であることが確認されたが、散布方法やチャフの選択など改良が必要である。さらに、実際の観測時には地方自治体、国土交通省、防衛省などに申請して、交通、人体、環境への安全性を十分理解してもらった後許可を受けなければならぬことは言うまでもない。

謝辞

観測にあたっては、名古屋大学大気水圏科学研究所

(当時)の石坂 隆, 加藤喜久雄, 民田晴也各氏, 大学院生の耿 驪(現:海洋研究開発機構), 末吉惣一郎(現:グローバルオーシャン(株))両君, さらに, ダイヤモンドエアサービス(株)の皆様(特に, 北原国治, 脇屋貞和両氏)には大変お世話になりました。記して感謝致します。本事業は, 共同利用の観測用航空機の導入を実現するための布石として, 故武田喬男所長(当時)の下, 企画・実施された。陸に車, 海に船が必要なように, 大気観測には航空機が不可欠である。今後も, 無人・有人, 大型・小型を問わず観測用航空機の導入実現を強く願うものである。

参 考 文 献

- Kropfli, R. A. and N. M. Kohn, 1978: Persistent horizontal rolls in the urban mixed layer as revealed by dual-Doppler radar. *J. Appl. Meteor.*, 17, 669-676.
- 栗田 進, 里村雄彦, 吉川友章, 1984: 2台のドップラーレーダによる筑波山周辺のトレーサ観測 I. 日本気象学会春季大会講演予稿集, (45), No.202.
- 栗田 進, 里村雄彦, 吉川友章, 1985: 2台のドップラーレーダによる筑波山周辺のチャフの観測 II. 日本気象学会春季大会講演予稿集, (47), No.206.
- Min, I. A., R. N. Abernathy and H. L. Lundblad, 2002: Measurement and analysis of puff dispersion above the atmospheric boundary layer using quantitative imagery. *J. Appl. Meteor.*, 41, 1027-1041.
- Mitchell, P. K. and R. H. Short, 1980: Chaff: Basic characteristics and application detailed. *International Countermeasures Handbook*, 316-324.
- Moninger, W. R. and R. A. Kropfli, 1987: A technique to measure entrainment in cloud by dual-polarization radar and chaff. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 4, 75-83.
- Pouliguen, P., O. Béchu and J. L. Pinchot, 2005: Simulation of chaff cloud radar cross section. *Antennas and Propagation Society International Symposium, IEEE*, 3A, 80-83.