



天 気

1989年9月
Vol. 36, No. 9

501:602 (下部対流圏; プロファイリング; ソーダー)

シンポジウム “下部対流圏のプロファイリング: Needs and Technologies”・国際 Sodar 比較観測報告*

森 征 洋・津 田 敏 隆・中 根 英 昭
堀 口 光 章・増 田 悦 久・竹 久 正 人

1. はじめに

1988年5月31日～6月3日、米国コロラド州ボルダーにおいて、シンポジウム“下部対流圏のプロファイリング: Needs and Technologies”が開催された。

このシンポジウムは、1986年に米国気象学会 (AMS) によって開催された Short Course on “Probing the Atmospheric Boundary Layer” に引き続いて行われたもので、下部対流圏の観測の進歩についての要求とそれによってもたらされる利益を議論し、現在および計画中の技術 (レーダー、ライダー、音響探査装置、気球搭載、航空機搭載の装置など) の適切さを評価することを目的としている。米国気象学会 (AMS)、米国国立大気研究センター (NCAR) および米国商務省海洋大気庁 (NOAA) の共催である。ポスターセッションを含めて全部で124件の発表があり、参加者は244名、日本からはこの報告に名を連ねる6名が参加した。

また、このシンポジウムに引き続いて、1988年8月28日～9月24日、同じ米国コロラド州ボルダーにおいて国際 Sodar 比較観測が行われたので、その紹介も含め

て簡単に述べる。

このシンポジウムのプロシーディングは米国気象学会より購入することが出来るし、発表論文の一部は Journ. Atmos. Oceanic Technology に特集として印刷される予定である。

2. シンポジウム “下部対流圏のプロファイリング: Needs and Technologies” 報告

2.1 Sessions I & II: Scientific Needs

森 征 洋*

セッション I, II では招待論文6, 発表論文8, ポスター31の計45篇の論文の発表が行われた。

下部対流圏の大気の状態を時間的にも空間的にも高い分解能で観測することができるようになるならば、メソスケールの気象現象の理解を飛躍的に向上させることができることは言うまでもないことであろう。このセッションの招待講演、口頭発表ではリモートセンシングの技術で風・気温・湿度を測定するプロファイラー (profiler) に対する期待がさまざまな観点から述べられた。

その1つの期待はナウキャストや短期予報において果

* Report on the symposium on “Lower Tropospheric Profiling: Needs and Technologies”, and the International Sodar Intercomparison Experiments.

* Yukihiro Mori, 香川大学教育学部。

たす役割である。雷，斜面滑降暴風 (downslope wind-storm)，着氷性降水，吹雪，大気汚染の面 (Schlatter) や大気拡散モデルによる予測の向上の面 (Lewellen) からの期待が述べられた。メソスケールの現象に関するプロファイラーデータの適用についてはオクラホマで展開されているプロファイラーネットワークによる観測例の報告があった (Maddox)。

もう1つの期待は各種の大気研究プロジェクトにおけるデータの提供である。衛星データによって陸地と大気との相互作用を研究するプロジェクトにおいて比較のための野外実験が広いフィールド (15 km×15 km) に多数の観測地点を設けて行われているが，熱や水蒸気などのフラックスの空間平均測定データがプロファイラーの進歩によって提供されるようになれば，このようなプロジェクトにとって大きな助けになる (Sellers・Hall)。また風力エネルギーを得るための風の場の調査や，さらに一般的に障害物の周りの3次元的な流れの研究に利用できることへの期待などが述べられた (MaCarthy)。複雑地形における大気研究など，フィールド観測において使用される次世代のリモートセンシングシステムとしては，自動車 (バン) に搭載することができるものであって，数 kW 以下の電力消費で稼働でき，水平方向には何 km にもわたり，鉛直方向には約 3 km までのデータを収集することができる機能を持つものであることが期待されている (Hosker)。

ポスターセッションでは航空機による観測，衛星および航空機に搭載したリモートセンシング機器による観測，各種のゾンデによる観測，係留気球による観測などの発表があった。筆者はプロベラ型風速計を用いて塔によって風のプロファイルを求める際の問題点について発表した (Mori・Mitsuta)。

下部対流圏の風や気温をリモートセンシングによって測定することの理論的可能性については以前より指摘されていたが，現在それが実用化される黎明期にあることをシンポジウム全体を通じて感じさせられた。筆者の出席は香川大学教育学部学術基金の援助を受けたことを記し，関係各位に謝意を表する。

2.2 Sessions III & IV : Profiling Technology Session V : Wind Profiler Technology and Applications

津田 敏 隆*

これらのセッションでは対流圏における風速，温度，微量気体，湿度などを地上からリモートセンシングする観測技術についての招待講演5件と一般講演があったが，ここでは対流圏・下部成層圏の風速プロファイル観測用レーダー (Wind Profiler) について報告する。

1970年代初めにペルーのヒカマルカにある電離層観測用の VHF 帯大型レーダーを用いて，電離していないと考えられる成層圏からのエコーを試みに受信してみたところ，乱流による屈折率変動に起因すると思われる散乱信号が検出された。以来，既存のレーダーを改良したり，新たに中間圏 (M: 60~90 km) および下部成層圏 (S)・対流圏 (T) (地表付近~25 km) を観測対象とする VHF・UHF 帯のレーダー (MST レーダー) が盛んに建設された。わが国でも京都大学超高層電波研究センターが1984年に MU レーダーを建設し，中層・超高層大気の研究を行っている。ところで，一般にウィンドプロファイラーは高度 20 km 程度以下を観測対象としており，中間圏をも測定できる MST レーダーと区別されているが，これは主にレーダーの送信出力やアンテナ開口面積の大小によっており両者のシステム構成は同じである。

当シンポジウムが開催されたボウルダーには NOAA の AL (Aeronomy Laboratory) と WPL (Wave Propagation Laboratory) があり，コロラド大学などと協力してサンセットレーダー，プラッタビルレーダーあるいはステイプルトン空港レーダーを運用している他，アラスカ，イリノイ，さらに太平洋や南米の赤道域にもレーダーの建設を進めている。またボウルダーにはウィンドプロファイラーを市販している Tycho Tech. (ヴァイサラ株式会社の子会社) の工場もあり，レーダーによる大気観測のメッカの感がある。

レーダーでは一般に送信中はもちろん送信終了後しばらくは大出力の送信信号の漏れ込みによって受信機が飽和し機能しなくなる。MST レーダーでは高々度まで観測するために送信機出力を大きくしているため，受信

* Toshitaka Tsuda, 京都大学超高層電波研究センター。

機の回復時間が長くなり高度数 km 以下の観測はできないという難点がある。そこで MST レーダーと原理や機器構成はほぼ同じであるが送信出力を 100W 程度に小さくし受信機の回復時間を短縮し高度 100 m~1.5 km の境界層中の風速プロファイルを観測できるようにした UHF 帯 (915 MHz) のレーダー (Boundary Layer Radar) が NOAA/AL のグループによって考案された。MST レーダーに比べて小型で容易に移動観測可能であるためこのレーダーを複数台配置して風系の水平構造を含めた観測をすることが提案されている。

一方、NOAA/WPL では 1990 年 4 月までに 30 台の UHF 帯ウィンドプロファイラーをロッキー山脈の東部に広がる中央平地帯に設置し、高度 0.5~16 km の風速の 3 成分を高度分解能 250 m で定常観測し、データを 1 時間ごとに衛星通信によってボウルダーにある管制センターに集め、NWS (National Weather Service) が行う天気予報に役立てる計画が進行中である。また RASS (Radio Acoustic Sounding System) をこのウィンドプロファイラーに組み込んで温度も定常観測することが考えられている。

2.3 Session VI: Lidar and Optical Profiling

中根 英昭*

Lidar and Optical Profiling のセッションの中心はライダーによる気温、湿度、オゾンの観測であったが、種々の微量物質、風、大気構造のライダー観測、赤外分光法 (FTIR) やマイクロ波分光法を用いたパッシブのプロファイラーにも興味ある発表があった。気温、湿度のプロファイリングに関しては、ウィンドプロファイラーとの対応を考慮してのことと思われるが、時間・高度分解能の高い観測による時間-高度 2 次元データを得るための技術開発に重点が置かれていた。それに対して、微量物質のプロファイリングは対流圏化学への寄与が前提となっていた。

湿度(水分子の数密度、あるいは混合比)に関しては、ラマン法と DIAL (差分吸収ライダー) 法の競演が興味を引いた。ラマン法は、レーザー光を大気中に発射し、水と窒素のラマン散乱光強度の比をとることによって水の混合比を求める方法である。NASA ゴダードの Melfi らは、夜間に高度 7 km までの混合比の鉛直分布 (高度

分解能 100 m) を得るとともに、前線の通過に伴う混合比の変化を時間-高度 2 次元画像の中に見事に描き出していた。技術的にはより困難な DIAL 法では、西独マックス-プランク研究所 (MPI) の Bosenberg らの日中の混合層内外の湿度や、絹雲中の湿度の測定が面白かった。NASA ラングレーや西独航空宇宙研究所 (DFVLR) では航空機に H₂O DIAL を搭載して観測している。「ラマンライダーも意外に行けるじゃないか」という感じではあるが、「ラマンライダーの連中はエアロゾルから生ずる誤差を過小評価している」という批判や「日中でできなくては面白くない」という声も聞かれた。

対流圏微量成分のプロファイリングに対するニーズについての Albritton (NOAA) の講演は面白かった。微量物質濃度の変動の鉛直分布を求めることの重要性に触れた後に、測定精度をどのように保証するかという問題に言及した。非常に異なった測定方法を比較する、典型的な野外観測条件のデータを比較する、同時、同一場所で比較するなどが必要であり、さらに、厳しい要求で実現困難かもしれないが、ブラインドテストをやる、第三者が測定を行う、一流の学会誌に測定のすべての詳細を書く、ということが測定を確かにする道であると述べた。観測技術の開発に携わる研究者がノウハウを公開する努力をすること、ノウハウの交換や討論の機会が保証されることの大切なことを改めて痛感した。

エアロゾルをトレーサーにした大気構造・運動のライダー観測では、米国 ウィスコンシン大学の Eloranta が熱ブリュームの運動の 3 次元ディスプレイをビデオを使って見せていたのが目を引いた。Nakane and Sasano による海風前線構造に関するポスターも結構にぎわった。特に、NOAA のドップラーライダーを使って海風発生時の風ベクトル鉛直面内分布の観測をやったという大学院生が待ち受けていたのは嬉しかった。海風前線が捉えられなかったと言って残念そうであったが、私の方は、海岸から海側、陸側それぞれ 15 km の風の鉛直 2 次元分布を観測できるドップラーライダーというのは、やはり大したものだと感じた。

オゾンライダーに関する情報交換もできたし知り合いも増えて、実に楽しい会議であった。

* Hideaki Nakane, 国立公害研究所.

2.4 Session VII : Radar, Sodar, and In Situ Profiling

堀 口 光 章*

このセッションではレーダー、ソーダー（音響探査装置）、および気球搭載、航空機搭載の装置に関する発表が計14篇あった。

レーダーについては、従来型のドップラーレーダーによる大気境界層内の風と気流の乱れの測定結果の発表などのほかに、湿度傾度、晴天乱流、雲粒子などを測定対象とするドップラー機能を持ち偏波測定可能なFM-CWレーダー（周波数変調連続波レーダー）や、波長 1.4 mm のレーダー（霧や雲など反射係数の低いものも測定できる）の開発に関する発表があった。

ソーダーについては、実用的な研究（モデリングのためのデータ収集）や、気温逆転がある時のデータの質の評価に関する発表のほか、フェイズドアレイ（合成開口方式のアンテナ）を使ったドップラーソーダーについての発表が著者らのグループによるものを含めて計3篇あった。

20～30個のホーンを並べ、各ホーンからの音波に位相差を与えてビームの方向を制御するこの方式のドップラーソーダーは、高出力のわりに小型軽量で移動容易であり、研究開発が進み、実用段階に入りつつあるのを感じた。

この他、ソーダーについてはポスターセッションにおいても数篇の発表があった。

Thomson ら (Pennsylvania State Univ.) は、ドップラーソーダー（フェイズドアレイ使用）、UHF 帯ウィンドプロファイラー（周波数 404 MHz）、シーロメーター、ラジオメーター（9周波数で、気温と湿度のプロファイルを測定）などに、大気境界層のモデルを組み合わせた総合的な観測システムの開発について紹介し、大気境界層の研究のためにはそのようなシステムが重要であることを強調した。

気球搭載、航空機搭載の装置に関しては、係留気球のケーブルに据える乱流測定装置、航空機用気象要素測定システム (METEOPD) などの紹介があった。

2.5 Session VIII : RASS and Microwave Radiometry

増 田 悦 久*

当研究集会に参加し通信総合研究所における気温高度分布を測定する電波音波共用探査装置、すなわち RASS (Radio Acoustic Sounding System) 研究の成果を発表する機会を持つことが出来たので、RASS 関連の発表について紹介する。

RASS 開発は、1969年にStanford大学のJ.M. Marshall が流星レーダーと周波数 85 Hz の音波源を組合せて気温高度分布測定に成功したことに始まっている。その後10カ国で RASS の研究開発が取り組まれている。

研究集会では、4カ国7件の研究成果の発表があった。この第8セッションは、最終日最後に行われたにもかかわらず朝8時15分にほとんどの人が集まり開始されたのが印象に残っている。発表は、ドイツのG. Petersのグループ、日本のY. Masuda、イタリーのG. Bonino、米国 Remtech社のJ.M. Fageの順で行われた。G. Petersのグループは、従来のCWまたはパルスドップラーレーダーと異なるLバンド(600 MHz)の高分解能FM-CWレーダーを使ったRASSと信号処理法、またヒートフラックスの高度分布の測定法を紹介した。私は、RASSの開発で問題視されてきた風の影響に起因する探査高度限界について音波のレイトレースを使って解明した結果と、京都大学MUレーダー/RASSで測定した成層圏22 kmまでの気温高度分布を示し、風が強くても対流圏および成層圏の測定が可能であることを発表した。その他、G. Boninoによる信号処理法と比較した探査高度拡大の可能性、J.M. Fageによるアレー型音波空中線を音波源に使ったRASSの測定結果の発表があった。米国NOAAのグループの発表は、レーダー(ウィンドプロファイラー)のセッションで行われた。同グループは、成層圏下部までの風速高度分布を測定する目的で404.37 MHzと915 MHzのレーダーの開発を行っており、1990年までに同レーダーを30台使ったデモンストレーションのネットワークをロッキー山脈の東に張り巡らし短期予報に役立てようとの計画を実施しつつある。NOAAのAeronomy Lab.のW.L. EcklundとWave Propagation Lab.のR.G. Strauchの2名

* Mitsuaki Horiguchi, 京都大学防災研究所。

* Yoshihisa Masuda, 郵政省通信総合研究所。

ループは、このレーダーに気温高度分布を測定する機能を持たせるために RASS の研究に取り組んでいる。2 グループからは、それぞれ 404.37 MHz と 915 MHz のレーダーを利用した RASS の気温高度分布測定データの発表があった。最大探査高度は、風の比較的弱い時間のデータと思われるが、3.2 km (測定精度は、0.3°C 以下) までとなっている。第8セッションではその他、中国とマサチューセッツ大学グループのラジオメーターの発表があった。

RASS の特徴は、第1にゾンデのように風によって測定点が大きく流されることなく真上の測定が可能、第2に曇天、降雨、降雪中の測定が可能、第3に気温高度分布の連続測定が可能なことである。RASS の問題点は、日本においては郵政省通信総合研究所と京都大学超高層電波研究センターの共同研究グループによりほぼ解明されており、応用段階に入ったといえる。今後の RASS 開発は、ウィンドプロファイラーと音波源を組み合わせたものが多くの利点を持つことから主流になるとと思われる。

3. 国際 Sodar 比較観測報告

竹久正人*

1988年の8月から9月にかけて米国コロラド州のBAO (Boulder Atmospheric Observatory) で行われたソーダーの国際比較観測 (ISIE) に参加したので、以下にその様子を簡単に述べることにする。

観測地のBAOは、コロラド州の州都デンバーから北へ30マイル程に位置し、西にはロッキー山脈が横たわり、東には広大なプレーリーが続いている。BAOには高さ300mの気象観測塔があり8高度に風向、風速、気温、湿度、気圧などの測器が取付けられている。またサイト内にはレーダーも何機か設置されており、大気境界層内の観測を行っている (写真1)。

今回の比較観測の目的は、ソーダーによって測定される風向、風速やその乱流量が、観測塔に設置されている測器の測定値とどの程度合致するかを調べることである。参加したソーダーは全部で6機あり、市販機として参加したものは、Xontechの合成開口方式 (3ビーム) のものと、Remtech と Aero Vironment の monostatic 方式のもの3機であり、これらは観測塔から150m程

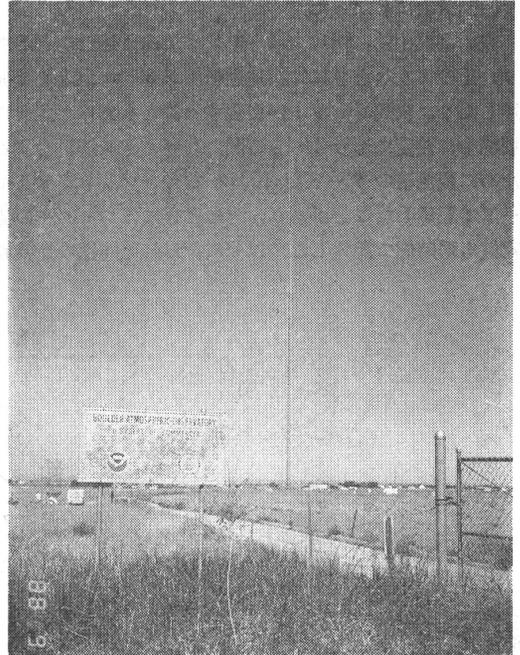


写真1 BAOサイトを南より望む。中央の鉄塔は、高さ300mの気象観測塔。

離して設置され、またトラブルが発生した時以外は、参加者側は機械の調整などを行ってはいけないことになっていた。これに対し Remtech の bistatic 方式のものと monostatic 方式のものおよびわれわれが持参した合成開口方式 (5ビーム) のものは、開発中または研究用機としての参加でソフトウェアなどの変更が許されていたが、観測塔からは600m程離れて設置することになった。monostatic 方式とは送信機と受信機を同一の場所に設置する形式であり、これに対し bistatic 方式では送信機と受信機の間100~300mの基線をとる。毎朝9時にその直前24時間分の20分平均のデータを主催者であるNOAAに渡し、それと引き換えにその期間における観測塔のデータのハードコピーを見ることが許された。

比較観測の行われる数カ月前から、BAOから500km以上離れたイエローストーン国立公園でかなり大規模な山火事が続いており、風向によってはBAOまで煙がやって来て視程が著しく悪くなり、普段ならばはっきりと見通せるロッキーの山々がまったく見えなくなることもあった。また、今世紀最大と言われメキシコ湾をすっぽり覆うほどに発達したハリケーン「ゲルバート」もこの観測期間中に上陸しており、暴風雨下でのソーダー

* Masato Takehisa, 京都大学防災研究所。

の性能試験にもなった。

観測期間中は、明け方 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ まで冷え込むことがあり、そのようなときには接地逆転層が 300m 以上まで発達したり、夜間ジェットが出現することもあった。また期間中に数度に渡り $4\sim 5$ 時間、スペクトル解析をするために観測塔のデータを 10Hz でサンプリングするモードで記録したことがあり、そのときにはソーダーの測定値も瞬時値で記録した。以前に行われた同様の比較観

測においても、平均の風向、風速はソーダーとその他の測器の間で良い一致が得られており、これからの課題は乱流量やスペクトルがどこまで正確に見積ることができるかを調べ、補正の方法を見付け出すことにあると思われる。われわれの持参したソーダーのデータも観測塔のデータとよく合致しており、解析の結果は秋の学会で発表する予定である。