

大気上層の乱れを探る ——MST レーダの話——

加藤 進*

1. MST レーダ, その歴史と現状

1982年より1985年まで、4年計画で MAP (中層大気国際協同観測計画) が実施された。MAP は中層大気研究の最近のめざましい発展に貢献をしたことは疑いのない事実である。従来、未知圏と言われて来た中層大気—成層圏・中間圏・熱圏下部を含む地上 20—120 km の大気と日本 MAP 特別委員会は定義した—の観測技術として、新しく登場して来たのが大型レーダ観測であり、MAP 遂行上、国際的柱の1つとなっている。この種のレーダの観測対象が M (Mesosphere, 中間圏) S (Stratosphere, 成層圏) に加えて T (Troposphere, 対流圏) であるので MST レーダと呼ぶ。

1970年代の初め、ペルーの首都リマ市の北東約 50 km の所にあるヒカマルカ村——といってもアンデス山脈の麓の砂漠の中の寒村——にある大型レーダ観測所で、ウッドマン (R.E. Woodman) 氏がたまたま、高度 70 km 辺りからレーダ・エコーが戻って来るのを発見した。もともと、このレーダは電離層プラズマ観測用のものであり、電離層より下を観測高度から通常は外していたのだ。この新しいエコーが、中間圏の乱流による“電波屈折率のゆらぎ”で散乱したエコーと判明したのは1974年頃だった。そして、この“ゆらぎ”がその点の大気の流れと共に移流してゆくのだからこれをレーダ電波のドップラー変動として追尾し、大気の流れをリモート・センシングできることが1975年頃から次第に明らかになってきた。成層圏・対流圏も同種のレーダで観測できることがじきに判明した。これには、私達がプエルトリコのアレシボに向いて大型レーダで行った観測の成功も貢献している。よく考えてみると、対流圏の乱流で時折電波の散乱が起きることは、晴天乱流エコーとし

て、電波気象屋には、それまでに知られていたことであった。ヴァイスコフとビラー (Weisskopf, Villars) 氏により1950年代、乱流源による対流圏電波伝播の研究が行われていた。

1970年代中頃から、MAP 計画が ICSU (国際科学連合会議) と WMO (世界気象機構) の共同で立案される動きが出て来た。これは、学術的な要請の他に、超音速飛行や自動車の排気ガス、スプレーに用いるフロンガス等による人工的自然汚染の問題解決への社会的要請によるものであった。そして中層大気運動によるこれらの物質の輸送を知る上で、様々のスケールの大気運動の観測が重要となった。風、大気波動、乱流は重要な観測対象だった。その頃、実用化していた人工衛星による気温分布の観測から運動を推定するのではなく、直接運動が観測できる可能性を秘めたレーダ技術には魅力があった。このレーダ観測では、高さ分解能が数百メートル、時間分解能は数分になり得るということに、大きな意義があったのだ。電離層プラズマ観測用に作られたヒカマルカやアレシボのレーダの様に、超大型のものでなくとも、MST レーダとしては通用することも私達の興味をそそった。

西ドイツのマックス・プランク研究所では、いち早くソージイ (SOUSY) と呼ばれる計画が進められた。これは Sounding System の略であり、第二次大戦後しばらく、米軍が台風につけた様な女性名ではない。このレーダは研究所員の手作りの設備であったが、後に私達が計画した日本の MU レーダの1つのモデルである。東ドイツとの国境に近いハルツの山の近くに設置されたこのシステムは、その後、改良を重ね現在も活動している。成層圏内の風のシャワー不安定で重力音波が発生するダイナミックな姿を明らかにしたこのレーダの観測は私達を大いに刺激した。

* Susumu Kato, 京都大学超高層電波研究センター。

米国のコロラド州ボルダーの NOAA では、アラスカ州のフェアバンクス郊外のポーカーク・フラットに MST レーダを設置した。これも手作りの要素を持つシステムであったが、図体——アンテナを並べた土地の面積——は $200\text{m} \times 200\text{m}$ でかなり大きい。極寒の地にきわめて速かに作られたこのレーダは様々の新しい観測結果をもたらした。その中で特に興味を引いたのは、従来の気象観測にみられなかった垂直風の実測、しかも、数ヶ月間の連続測定だった。風の季節変化、プラネタリー波、大気潮汐、重力音波と盛り沢山の観測結果もレーダ観測の意義を明らかにする点で大きな貢献をしたと言えよう。大型レーダは中層大気力学に正に必要な装置となった。

1983年夏、フェアバンクスより約 50 km 離れた山中で、小さな国際的会合が開かれた。リンゼン (Lindzen) 氏 (現 MIT)、ホルトン (Holton) 氏 (ワシントン大)、フリッツ (Fritts) 氏 (アラスカ大)、シュエーベル (Schoeberl) 氏 (NASA)、ゲラー (Geller) 氏 (NASA)、廣田氏 (京大) といった気象学者、ボルスレイ (Balsley) 氏 (NOAA)、ウッドマン (Woodman) 氏 (ヒカマルカレーダ観測所)、筆者 (京大)、ヴィンセント (Vincent) 氏 (アデレイド大) といったレーダ学者の他にシャナン (Chanin) 女史 (フランス超高度大気研究所) というライダー学者が参加した会であった。中層大気力学の問題点とその解明に必要な観測について論じ、結果は論文となって米国の気象学会誌に発表された。この時、レーダの観測技術に対する気象屋の信頼は、ほぼ確立して来た事を、私達レーダ屋は実感した。

日本における MU レーダ設立の歴史も可成り長い。そもそも中層大気力学の研究に興味を持つものが集り、沢田氏 (現九大名誉教授) を代表者とした文部省科研費のグループが誕生したのは1970年以前であった。電離層屋と気象屋の面々で、筆者や廣田氏も含まれていた。このグループが MU レーダ設立推進のグループに発展した。この様に早くから気象学者で先駆的見識を持つ人が日本にいたことが MU レーダ計画の成功に大きな力となった。MU レーダは、中層大気 (M) と超高度大気 (Upper Atmosphere) の U で示す様に、MST レーダとしてだけでなく、電離層プラズマも観測対象としている。昭和56年度より、4カ年計画で建設され、滋賀県南端の信楽町に属する国有林内にあり、京都大学超高度電波研究センターが、全国共同利用センターとして、MU レーダの管理と運用を行っている。さらに、このセンターは、外国人客員研究部門を有しており、MU レーダ

を広く国際協力に用いることにしている。昭和60年度以来、全システムが活動しているが、観測可能な最低高度は、約 2 km である。上限としては約 400 km までの電離層電子密度分布を観測できた。建設以前より待ちに待っていた中層大気力学の観測をいろいろ実施している他に、思わぬ新しい観測にも成功している。その1つは第3章で詳述するが、雨滴の散乱エコーを受けることができたことだった。この様に大気と雨滴の動きを同時に観測できることは、新しい技術と言える。また、音波レーダと MU レーダと併用して、打ち上げた音波を MU レーダで追尾し、音速を決定することから、気温分布を 20 km まで決定できたという最近の朗報もある。

以上、MST レーダが新しい観測法として、大気力学に登場して来た様相を簡単に説明した。しかし、MST レーダは、飽くまでも点観測に過ぎないので、ネットワーク作りが望ましい。現在、世界のいくつかの国で MST レーダが完成し、ネットワークが次第に整っている。また MST レーダは、費用の点からもそう簡単に作れないので、ST レーダという小型のシステムが、成層圏、対流圏観測用に作られつつある。最近、台湾にもこのシステムが完成した。米国では、数十台の ST レーダを建設し、広く配布しようと計画している。これにより、ジェット気流の予報が的確にできれば、航空機の航路の決定を有効に行うことができ、莫大な航空燃料の節約につながると思っている。

2. MST レーダ観測の原理

上述した様に、MST レーダの電波の散乱源は、晴天乱流である。この点をもう少し詳しく述べよう。乱流は大気運動場の状態でありこれが直接電波の散乱源になる筈はない。電波の屈折率は、水蒸気圧、大気密度、電子密度の関数であり、このいずれの量も高さと共に変化する (静的) 分布を持っている。大気乱流によって上下に混合されるとこれらの量の分布に乱流スケールに相当する乱れが発生する。これが電波の屈折率の“ゆらぎ” (乱れ) を作り、レーダ電波の散乱源となる。対流圏の中部以下では水蒸気のゆらぎが支配的であるが、それより上部では大気密度自身のゆらぎが支配的となる。さらに上の中間圏では (60 km 以上) 太陽放射の電離作用で発生する自由電子の存在が屈折率の“ゆらぎ”の主要因となる。しかし、太陽放射のない夜間には自由電子は消滅するから夜間には大気乱流はあっても、散乱源をつくれない。幸い流星が作る航跡はプラズマのガスであるので

これを散乱源とする観測が 80 km 以上の高度では可能である。成層圏の散乱源で充分有効なもの 30 km 以下にあり、30-60 km の高度は現在 MST レーダ観測では困難な領域となっている。これは、大気密度が不十分となるためであろう。

乱流に起因する電波の散乱源が存在する他にレーダ観測が可能となる必要条件がある。それは散乱にあずかる屈折率のゆらぎは電波の波長の半分のスケールのものだけだという理由に基づいており、結晶光学におけるブラッグ条件と同じである。結局、このスケールの乱流スペクトル強度が充分大きいことが必要となる。乱流論の教える所では、乱流のスペクトル強度は、スケールがある特性長以下になると粘性のために急速に弱くなる。この特性長は粘性率と乱流エネルギー消散率の関数として知られている。一般に知られた大気モデルを用いてこの特性長を求めると、高さと共に単調に増加する分布となる。概略の値は地上近くで 1 cm、成層圏下部で、10 cm、中間圏で 1 m 以上となる。従って、MST レーダは、波長 2 m 以下の電波では実現できない。これは周波数では 150 MHz 以上は駄目ということに対応する。

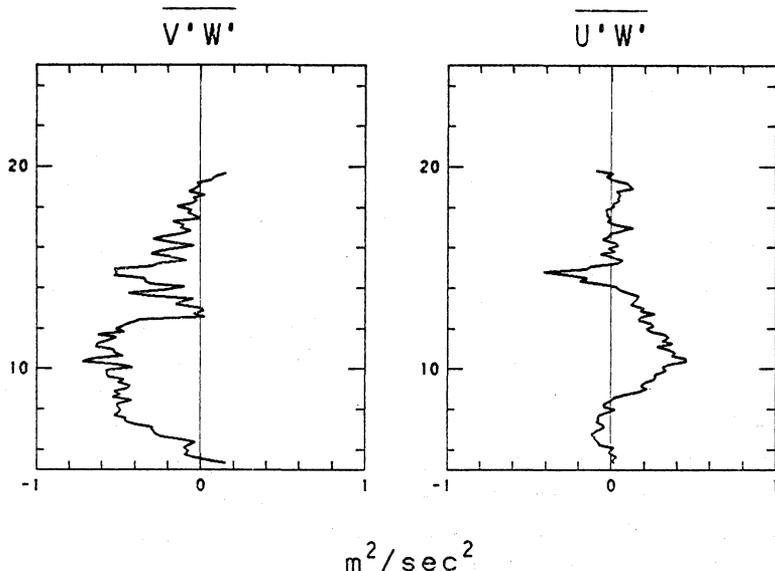
次にゆらぎをつくる乱流が、屈折率のゆらぎのパラメータ、蒸気圧、大気密度、自由電子密度と一体どんな関数形で結ばれているのかが問題となる。1950年代の乱流散乱の研究はこの点の仮定が誤っていた様だ。詳しい話はさけるが、蒸気圧と大気密度のゆらぎのスペクトルは、乱流スペクトルと同形であるのに反し、電子密度のゆらぎには、電波の波長の 4 乗に比例する要因が積となって入って来る。結局、対流圏と成層圏では散乱率は $\lambda^{-1/3}$ (λ は電波の波長) に比例し、中間圏では $\lambda^{1/3}$ に比例することになる。この条件のみから言えば、中間圏では周波数が低い程よく、対流圏、成層圏ではその逆となる。勿論これは波長が乱流の特性長より長いことを前提としている。さらに、レーダのハードウェアに関する問題、用地入手の容易さなどが考慮されなければならない。しかし、“一般的常識”から、MST レーダとしては 50 MHz、つまり波長 6 m 位が“おすすめ品”となっている。ちなみに我が MU レーダは 46.5 MHz である。これは最終的には、電波監理局の周波数割当て決めるものである。

MST レーダの電波散乱源が風と共に移流していることも観測の必要条件である。これに関し、一般的で正確な証明があることを筆者は知らないが、ある条件の下では正しいことが理論的にも証明されている。実際には、

他の方法、例えばバルーンやロケットによる観測結果とレーダの観測結果を比較することにより、充分正しいことが現在では証明されたと筆者は信じている。

次に測定の問題に少し立ってみよう。電波は連続的に送り出されるのではなく、短い時間だけパルス状に打ち上げられる。この電波はいろいろな高度にある散乱源に当たって極くわずか ($\leq 10^{-3}$ ppb) 散乱され再びレーダに戻って来る。この戻って来るまでの時間は、高度によって決まっている。それは、パルスが光速で飛んでゆくからである。従って、いろいろの高度からのエコーを、パルスを打ち上げてから受信までの時間でサンプルできる。勿論、必要な高度のエコーがすべて戻って来るまで、次のパルスを打ち上げるのを待つ必要がある。また巨大なパルスを打ち出してから、しばらくの間はその“余韻”があるので、受信を待たなければならない。この待時間内に戻って来る様な低高度は従って観測できない。これが観測の最低高度を決める。MU レーダでは約 2 km である。かくして、様々の高度毎に信号の分類が可能となる。通常、1秒間に 1,000 個位のパルスを打つ。

中層大気の散乱エコーの相関時間は 0.1 秒以上である。つまり、この間では同じ高度から得られるエコーは互いに相関がよい。そこでこの時間内得られるエコーを積分すれば、互いに無相関のノイズに対して信号の強さを大きく増加させることができる。この様にさまざまな高さで“coherent 積分”された信号がデータとして得られる。これがある時間にわたって次々と求めると時系列データが得られる。このデータは各高度の運動に対応するドップラー変位を示している。この時系列データを用いて (FFT) スペクトルを求める。これが各高度のドップラー・スペクトルであり、原理的には、スペクトルのピークの位置に対応するドップラー速度が、レーダ・ビーム方向の大気速度に等しくなる筈である。実際には、いろいろ面倒なことが起こって来る。例えば、対流圏や成層圏を観測していると妙なピークが速度零の辺に現れる。これは山からの反射波である。レーダ・ビームの主方向ではない横方向にも極くわずかに電波が出ているためであり、有限の大きさのアンテナでは止むを得ない。この電波が、山肌の様強い反射体に当たると結構強いエコーとなって戻って来る。この様な“クラッタ”を除く工夫をしなければならぬ。また、スペクトルを求めた後、得られたスペクトルをある時間平均し、ノイズレベルを下げ得るのは、統計学的有効な手段である。結



第1図 運動量束の観測 U' , V' , W' はそれぞれ東向き, 北向き, 上向き
の重力波速度を表す。—は時間平均, 縦軸は高度 (km) を示す。

局, 最終の時間分解能は1分位となる。

パルス幅の時間内は散乱が継続するので, 対応する距離だけ, レーダの測定はあいまいになる。1 μ s (最短) のパルスを使う MU レーダの場合, これは 150 m の高さ分解能となる。1 μ s より短いパルスは MU レーダでは用いない。電波監理局から許された周波数帯域は 1.65 MHz で, これは 1 μ s のパルスをつくるために必要な帯域幅である。

観測データに関しては, レーダで得られるドップラー速度は常にレーダの視線方向速度であることを充分理解する必要がある。しかし, 充分長い時間スケールの大気運動では, 垂直速度は, 水平方向に対して無視できるから, 視線方向速度を水平速度の投影として考えてもよい。また, 空間的に充分大きいスケールの運動では, 異なった3方向で同時に視線方向速度を観測すれば, ベクトルの的に風が分かることになる。MU レーダではパルスとパルスの間に, つまり最高 (1/2500秒) で, ビーム方向を天頂より 30° の範囲で自由に変え得るので, 殆ど同時に多方向観測が可能である。

ドップラー・スペクトルのピークの位置から速度を知る他に, スペクトルの幅から散乱源に関する情報を得ることができる。詳しいことは割愛するが, 大気乱流の研究に役立つことを述べておく。スペクトルの持つ情報を

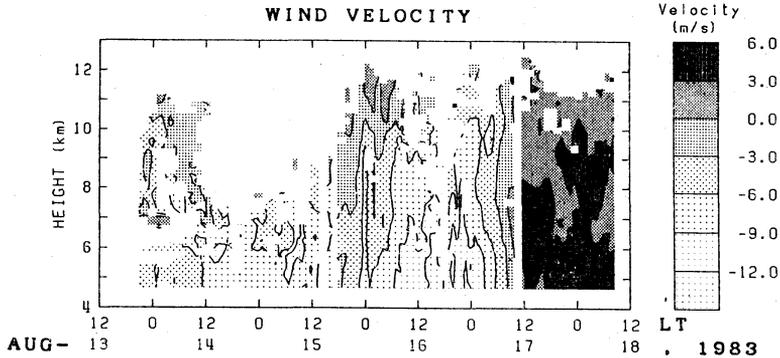
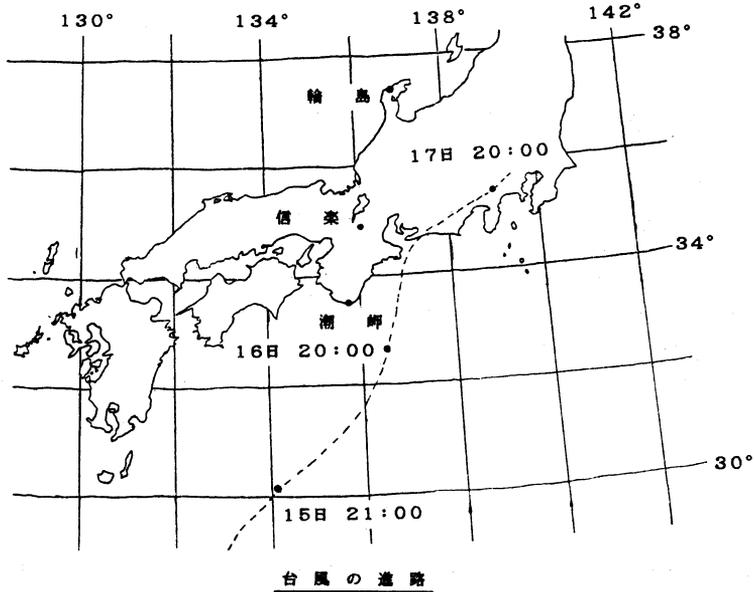
より多く取り出すことは, 今後の研究に待つ興味ある問題であろう。

3. MU レーダ, その気象学への貢献

上述した様に, MU レーダは MST レーダとして機能する他, 電離層でランダムに熱運動している個々の電子を散乱源とする非干渉性 (incoherent) エコーを受信できる。つまり IS (Incoherent Scatter) レーダでもある。しかし, ここでは MST レーダとしての MU レーダの働きについてのみ述べる。

当然とは言え, レーダ観測は点観測であり人工衛星観測の様なグローバル観測ではない。しかし, バルーン, ロケットの点観測にはない時間連続性および高さ方向の広範囲な連続性が得られる。さらに, 今まで実現できなかった3次元の風ベクトルの決定も可能な技術である。逆に, この新技術をいかに役立てるのが新しい気象学上の1つの研究テーマかも知れない。

例えば, 中間圏では 60 km 辺の高度を中心に夏は東風, 冬は西風が吹いているのはよく知られている。この風が上部中間圏で弱まっている事実の説明に, 大気重力波が碎波し, 逆向きの運動量が波から得られるつまり重力波がブレイキ作用として働いているという説が松野氏 (東大) その他の学者により提唱されている。そこで,

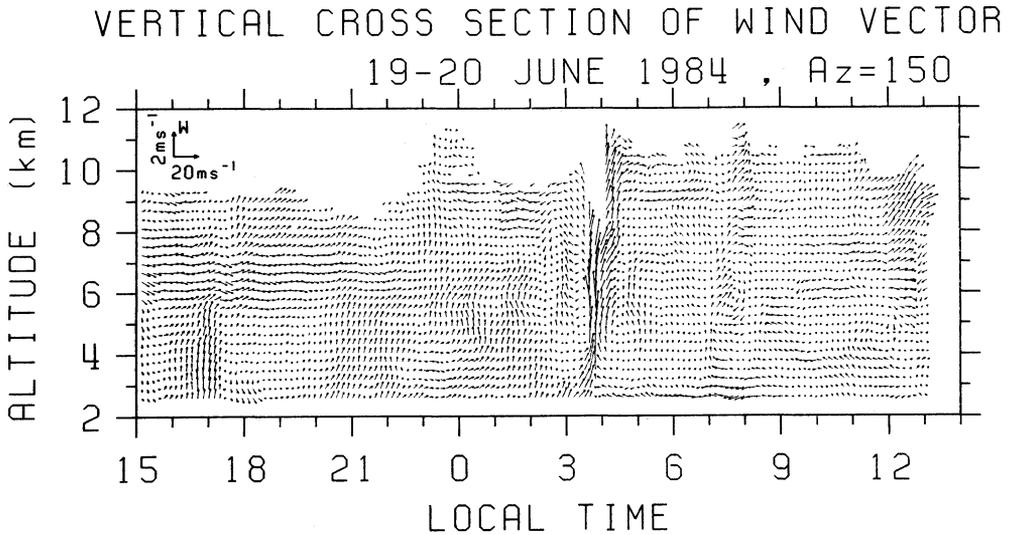


第2図 1983年8月の台風5号の観測 上図は台風の進路、下図はMUレーダによる風速観測、等高線の値は右側のスケールに従う。正は西風、負は東風に対応している。

理論的には粘性や熱損失の係数としてパラメータ化された重力波の碎波作用の実体を観測で明らかにする必要がある。これは、きわめて興味あるレーダ観測のテーマであろう。つまり運動量フラックス $U'W'$ (U' , W' は重力波のそれぞれ東西、垂直速度) を高度の関数として測定し、その高さ変化を求めて重力波が風に与える運動量を求めるのである。このいわば3次の微量量を測定より求めるには高い精度が要求される。これはMUレーダが最近スタートを切った問題で、ビームの高速走査というMUレーダの特長を生かせる研究である。同様な運動量フラックスの測定は成層圏以下についても行われて

いる。上述の風の加速、減速の他に重力波が碎けて乱流をつくるメカニズムは重要な力学上の未知の問題である。第1図に観測結果の1つを紹介する。これは新しい気象学の発展ではないだろうか。

もう少し実際的な成果としては台風時の観測がある。第2図に1983年8月の台風5号の観測例を示す。この頃、MUレーダは完成時の約1/100の能力しか持たなかった。アンテナ数が完成時の475本に比して57本、面積は3/25であったので能力としては $(57/475) \times (3/25) = 0.014$ 倍。話はここで少しレーダ・システムに関係するが、レーダの能力は出力とアンテナの面積の積で表され



第3図 風のベクトル観測 北より時計回り150°の垂直面内の風ベクトル(矢印)の時間変化を示す。午前4時付近に上昇流がみられる。

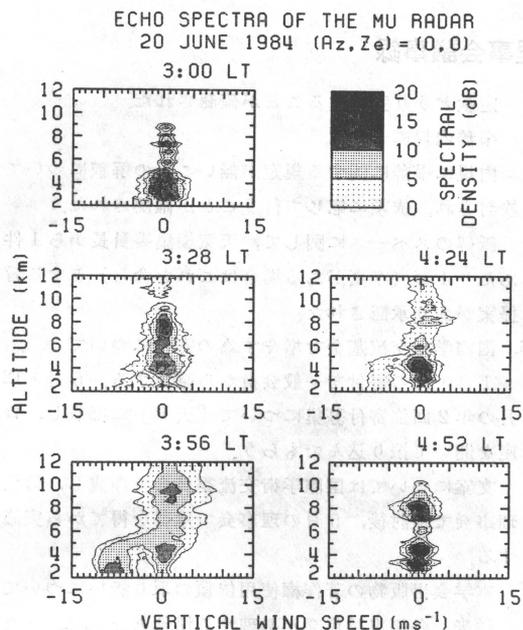
るのでこの様になる。出力は同じでも、アンテナ面積に比例してレーダのビームは細くなり、パワーが集中するので検出力が増すという訳だ。1984年秋の完成後、残念ながら(?)、台風の来訪はなかったのでフルパワーの観測は未だない。

台風5号の時、信楽の上空4—15kmの風が刻々変わってゆく有様を観測できた。レーダ・ビームは天頂より30°だけ東に傾けてあったので、負の速度は東風、正は西風に対応している。但し、レーダの視線方向の風の成分を測っていることに注意。10kmの高度まで台風に伴って東向きの変わるのがよく分かる。さらに詳しい解析をしてみると、図の様な風に重畳して、周期約10分、振幅1m/sの波が発見された。これは昔から言われていた台風による重力波の発生を捉えたことになる。

3次元の風の観測の例を示そう。丁度寒冷前線が信楽を通過した時の観測であった。通過の折(1984年6月20日午前4時)、予想通り大きな上昇流2m/sが認められている。この観測の時間分解能は10分、高度分解能300mであり、従来の気球観測より優れている。第3図は前線に直交する垂直面内での風のベクトルの時間変化を表している。

MUレーダは大気乱流に起因する屈折率のゆらぎによる電波の散乱エコーの他に、雨滴の集合である降雨域からの散乱エコーも捉えうる事が最近分かった。雨滴が風に吹き飛ばされつつ落下して来る様子を正確に観測

できたのだ。雨滴の大きさと静止大気中の落下速度の関係は昔から分かっているので、実測した垂直風と実測した雨滴落下速度から逆にそのときの降雨を構成する雨滴の様々の大きさの分布が決定できる。従来、気象ドップラー・レーダはマイクロ波を使用しており、雨滴のエコーを受信し、雨滴速度を測定できるが、風速の測定はできない。従って、予想される垂直風を仮定し、降雨の雨滴の大きさの分布を求めているのに対し、MUレーダは同時に風と雨滴の速度を実測できるのである。これは雲物理で役立つことであろう。また、cm、mmの波長を用いた電波通信で問題となる「降雨による伝播障害」の研究にも貢献できるのでであろう。第4図に、降雨時にみられたMUレーダ・エコーのドップラー・スペクトルを示しておく。2つの山のうち(3:56, 4:24LTのもの)幅の広い負の速度側の低いピークは雨滴によるもの、幅の狭い高いピークは垂直風によるものである。この時、弱い上昇風が存在していた。雨滴は一般に大きなもの程、数は少ないが、個々の電波のレイリー散乱強度は強く、また落下速度も大きくなる。これが左のピーク発生理由であるが、これに乱流によって雨滴が乱される速度が重畳し幅広いピークとなる。この時は第3図の場合と同じで、寒冷前線の通過時であった。信楽のMUレーダの70km西には、深山気象レーダ(5260MHz)があり降雨の状況をモニターしていた。それによると、前線通過に伴って雷雨があり、信楽上空の雨雲は9km上空に



第4図 降雨時のドップラー・スペクトルの高さ分布等高線のスケールは上部のスケール表示に従う。3時56分および4時24分の図に、負の側に新しくピークが出現している。これが雨滴の散在エコーのドップラー変位を示す。速度は垂直方向成分に対応する。

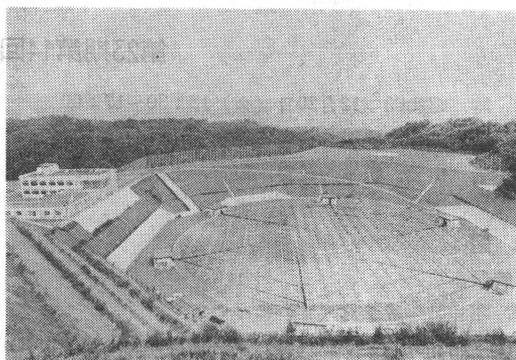
まで達していたという。

現在、世界で77台の MST, ST レーダが計画中であると聞いている。このうち30台は米国のもので (ST レーダ) で、適当に国内に配置し、気象観測網を形成しようというのである。また、MST レーダ、ライダー、バルーン観測を行う国際赤道観測所をつくらうという計画が国際 MAP 運営委員会が進められている。どうやら新しい時代が MST レーダ技術の発展と共にやって来ている様だ。

4. おわりに

直径 100m の円形の地に並べられた 475 本の八木アンテナ、それを 15m の高さより見下す様に取り囲む台地、そしてその台地に沿って建てられた 10m の高さの金網のフェンス (第5図)。この写真を見てある新聞記者は「これは UFO の基地でないかね」と言った。「甲子園球場の様だ」という人もいる。MU レーダのアンテナとはこれである。

本設備を用いて研究に意欲を燃やす研究者のグルー



第5図 MU レーダ (滋賀県信楽町三郷山) 19本を単位とするアンテナ群が六角形状に25群配列されている。アンテナ用地の周囲の6つの家屋には各アンテナに対する475台の送受信機が分散格納されている。左手のビルディングは観測棟と宿泊棟。右上上方のフェンスの外に見える円形はヘリポート。

プ、その研究成果の一端を簡単に紹介した。センターの“レーダ専任者”は筆者の他に、深尾、津田、佐藤氏といった面々で、新しい大気物理学の分野をレーダで開拓して行こうという意気込みを持つ。「レーダ大気物理学」というこの新分野を担当する研究部門も本センターに昭和60年4月に新設された。でもセンターのレーダ専任スタッフの数は少ない。一方、MU レーダには上述した様に、その設立計画を建てた頃から、幅広い協力研究者のグループがあり、完成後は MU レーダの共同利用者の中心となって活動している。共同利用というのは、センター外の人がセンターを利用するのみではなく、逆にセンターが広く、必要なプレーンを外に求め、これと共同して研究を進めて行くことができるすばらしい組織なのである。松野氏 (東大)、廣田氏 (京大)、田中氏 (名大) と言った気象力学者の協力などは国際的に羨望的となっている。

また、大学のセンターということも利点である。毎年、新鮮で優秀な大学院生を迎えることができる。若さは新しい研究・開発に大きな力である。卒業生もいる。その1人は、以上説明した雨滴反射の研究者。今は京都工芸繊維大学の教官となっている本邦の MST レーダ博士第1号の若杉君である。

最後に、本拙文が MU レーダの紹介に加えて、MU レーダ利用に幾分でも読者の御理解と興味を高めるのに役立つことができたならば望外の喜びであることを申し上げたい。