

気象レーダーの新しい傾向

(M. I. T. における2カ年間の出張を終って)

小平 信彦*

1. 緒 言

昭和30年12月より2カ年余りを米国 M. I. T. (Massachusetts Institute of Technology) の Department of Meteorology (仮に気象学科と訳す) において気象レーダーの研究に従事し本年2月に帰国したのでその間に体験した事柄について気象レーダーに関する問題を中心として述べることにする。

2. M.I.T. の気象学科について

M. I. T. は米国における有数の工科大学でその構成は第1表のようになっていて昨年大統領の特別技術顧問に

めとして J.M. Austin, D.P. Keily, E.N. Lorenz, M.G. Wurtele, F. Sanders がいるほか H.H. Lettan, E.A. Murphy, N. Phillips, P. Austin, H. Kuo, A. Fleisher などがスタッフとしている。

この中でレーダーの section は P. Austin (J.M. Austin 夫人) を長 A. Fleisher, R. Newell, 私はその他大学院の学生が数名と Technician, 秘書2人, 製図手1名などである。A.C. Bemis は一応ここに席はあるがなかば引退といった形で Seminar などに出てくるだけで第一線の研究には携っていない。

M. I. T. は戦争中米国のレーダー研究の総本山であっただけに種々のレーダーが気象用に使われている。現在

第 1 表

M. I. T.	School of Architecture and planning	}	Department of Aeronautical Engineering
			Department of Chemical Engineering
	School of Engineering		Department of Civil and Sanitary Engineering
			Department of Electrical Engineering
			Department of Mechanical Engineering
			Department of Metallurgy
			Department of Meteorology
			Department of Naval Architecture and Marine Engineering
			Acoustic Laboratory
	Research Laboratory of Electronics		
	School of Humanities and Social Studies		
	School of Industrial Management		
	School of Science		Department of Biology
			Department of Chemistry
			Department of Food Technology
Department of Geology and Geophysics			
Department of Mathematics			
Department of Physics			
Laboratory of Nuclear Science			
Spectroscopy Laboratory			
Lincoln Laboratory			

なった J.R. Killian, Jr. が総長であったが彼のあとには電磁気学で有名な J.A. Stratton が総長となっている。気象学科は Prof. H.G. Houghton を長として教授連には V.P. Starr, J.G. Charney, H.C. Willett を始

運転されているのは波長3cmの CPS-9, 円偏波実験用 3cm レーダー, 波長10cmの SCR-658, などであって Echo の観測できる時は必ず CPS-9 を運転して PPI の 35mm 映画による自動撮影を行うことになっているので, その記録は戸棚に一杯たまっていて使いたい人が好きな所を取出して解析を行っている。Radar 観測と同

* 気象研究所—1958年7月7日受理—

時に必要に応じて高層観測も行われるがこの時は Radar section の連中全員が放球を手伝う。観測装置は GMD-1 で水素の代りにヘリウムを使う所がいかにもアメリカらしいと思った。

研究費の大部分は軍から出ているが、その使用目的はほとんど制約を受けない。研究テーマはそれが新しい idea であることに重点がおかれることは当然であるが、つまらないようなことでも誰もしていないことには十分の尊敬をもって見まもっている。

僅か数人のスタッフに秘書が2人と製図手がいるということは研究者の雑用を少くする上に非常に役立っていて、あらゆる事務的事項は名実共に老練な秘書によって処理されてゆくし、研究発表のためのタイプ、図面などもこれらの人々によって全部行われている。

予算が豊かであるため学会へ出席するための旅費も、何か自分の研究を発表する場合は必要経費の全額を出してくれ、しかも M.I.T. では必要であった額をあとで申請すると支払ってくれる。食事代、タクシー代などわれわれは一寸遠慮し勝ちだが向うの連中はそういう点はさっぱりしている。別に受取などは必要でないが実際にかかった額以上申請するようなことはなく大変良心的で気持がよい。したがって旅費を余らせるということは原則としてないわけだが唯一つの例外は自分で車を drive して行く場合でこの時は車の種類にかかわらず 1 mile 当り 7セントと規定してありそれにはガソリン代、油代の外、車の消却費が多少入っているのでこの場合はガソリンの 1 mile 当りの消費の少い車だとかなり余ることになる。

レーダー関係の仕事は前に述べた M.I.T. の Staff のほか G.R.D. (Geophysics Research Directory, Air Force) の D. Atlas や Havard の R. Wexler が時々現れて共同研究などもしている。最近迄は M. Stone が主として装置の方の研究を担当していたが、現在は M. I.T. の軍関係の研究所である Lincoln Lab. に転出し時々相談に現れる程度である。これらの人々によって行われているテーマは P. Austin が Synoptic 関係を、R. Newell, A. Fleisher が円偏波を用いて楕円率などの測定、その他 Echo の Fluctuation から Turbulence をだすことを R. Rogers が卒業論文に行っていた。こういった構成の所で私が受持ったのは最初の1年間に等雨量線装置、次の1年には水晶遅延回路を用いて反射波の平均値を作る装置の研究であった。

Seminar は定期的に行われているものは気象学科で

月1回、Boston 地区気象学会 (A. M. S.) と M.I.T. の共同のが月1回、(これは夜8時頃から始るので G.R.D., Harvard などからの人も大抵出席できる) その他 Woods Hole の海洋研究所と共同のが隔週に行われている。Radar section では不定期に発表事項がある時にだけ開かれる。これら総ては Original または総合報告で文献の紹介といったものがない。文献は自分に直接関係のあるものだけ読んで他は余り関心がなく、日本程外国文献を一生懸命勉強する所はないらしい。

3. 気象レーダーの傾向について

気象レーダーは割合新しい測器ではあるが、最初に雨からの反射を PPI 上に観測してからすでに12年を経過している。PPI を観測して Echo の形状、移動、強さなどを求めあるいは RHI から高さを知ってきたのであるが、最近になって種々新しい方向を開拓しようとしている傾向が見られるのでルーチンとしてはまだ使われていないが近く使われるものあるいは目下研究段階にあるものなどについて思いつままに記してみる。

3・1. 新しい気象レーダー

最近の電子工学の発達にともないあらゆる方面にこれが取入れられてきたが、気象用レーダーの面も種々改良されてきている。気象用レーダーの初期においては軍用の Search Radar あるいは船舶用の航行用レーダーなどをそのまま、あるいはごく僅かの改良を加えただけで気象用に使われてきたのであるが根本的にそれらのレーダーと使用目的が異なる点があるので最近になって気象専用のものが設計製作され初めてきた。主な相異点は目標が点目標でなくビーム幅およびパルス長にくらべて非常に大きいこと、反射波強度の測定が重要であること、気象現象特有の Fluctuation をしていることなどで気象用として専用のレーダーを作るとなると当然新しい設計が必要となってくるわけであるが、現在これらの相異点を利用して気象用としてどのようなものが最も利用価値があるかという点で未解決の問題があるためまだ全面的には採用されていない。しかしながら現在 Raytheon 社で製作中の新しい気象レーダーは波長を 10cm とし途中の減衰の少い所を用い反射強度の測定精度を上げ波長の長くなったことによる感度の低下を出力 (1 Meg-watt) および空中線 (直径約 4 m, ビーム幅 1.7°) で補っている。またこのレーダーの受信機には対数特性中間周波増幅器を予め組込んでおき将来反射波強度の定量的測定装置を付属させる時、広範囲の測定が容易に実施

できるよう考慮が払われている。また冬期雪の多い地方では波長を10縞帯より3.2縞帯を用いた方が感度が良くかつ雪の場合は減衰が少いので送受信機をPlug-in型として簡単に取換えられる構造になっている。このためには送受信機が空中線と一緒に廻転しないと具合が悪いがRaytheonのレーダーは現用(3.2cm)のでも送受信機を空中線パラボラの後に取付けて一緒に廻転しているので問題はない。

3.2. 反射波の変動

雨からの反射波はその反射に寄与する体積中の雨滴一つ一つからの反射波のVector Sumであることは多くの文献に明かにされているところであるが、雨滴の配列は時間と共に変化しているので、ある時間経過した後の配列は前と全く異り、したがって反射波の大きさも変わってくる。この配列の変る時はその時の気象状態によっても変り、反射波に関係してくる程度は波長にも関係して大体数ミリ秒の程度である。

したがって一地点からの反射波を観測すると雑音と同じような不規則な変動をしており反射波の強さを定めるためには何等かの方法で平均値を求めないと、測定値はある値のまはりにばらついたものになって真の値を決定することは困難となる。通常PPIの残光性陰性線管で観測する場合は蛍光物質である程度の平均化が行われさらに肉眼でも平均化が行われるが、強さを電気的に表示する場合には平均値を作らないと精度を上げることはできない。一地点からの値だけを取扱う場合はその信号だけを取り出して時定数の大きい回路を通して簡単に平均することができるがPPI全面にわたって行うことはできない。PPI全面について時間的平均値を作るには反射波を、繰返し間隔だけ遅らせて次の信号に加え合せるということは何回か繰返して行われる。

以上は時間的な平均値であるが、雨の分布が数100mの範囲で一様な場合、あるいはその範囲内の変化を必要としない時には空間的平均値を使ってもその結果は時間的平均と全く同じでしかも装置が非常に簡単になる。

このように雨量の絶対値に対する誤差については未解決の問題が残っているが、今迄のPPIが定性的なものに対して定量的なInformationを得る方向へ進んでいるということは重要なことであると思う。

これらの場合は反射波の変動をSmoothにしてその平均値を求めるための努力であったが、逆にこの変動からその部分の風の状態を測定しようというのがR-meterであって、これは平均のレベルから単位時間に反射強度が上下する回数を数えてその部分における風のshear,

gustiness, 落下速度の差などのvarianceを求めるための装置であって、M.I.T.においてR. RogersおよびA. Fleisherなどにより研究が進められて同時観測のRawinとの比較なども行われている。この一つの応用として現在米国で問題になっているTornadoの判定に使おうという案がある。Tornadoは毎年米国において相当大きな被害をおよぼしておりその発見は直接人命に関係するので重要な問題となっている。Tornadoからのechoはその拡がり非常に小さいので一般の雷雨との区別はなかなか困難でカギ状の形をしている点があるといわれているが決定的なものではない。所がTornadoの中のTurbulenceは他の部分に較べて大きいので上に述べたEchoのFluctuationをしらべれば他のEchoと区別できるだろうということが予報される。現在のR-meterは空中線を一方向に向け一地点のEchoについてのみ観測が行われるものであるからPPI全面の様子が分らない。そこでWeather Bureauで現在考えられているのは、C. W. Radarを用い距離は測定できないから方向だけをつかみ、これと通常のレーダーのPPIと同時に観測してTornadoを発見しそのFrequencyからTornadoの強さも知ることができるといいう方法である。さらに進んでCoherent Radarを用いれば完全であることは勿論である。

3.3. Storage tubeの応用

雨量の測定は等雨量線のように各瞬時値をだすほかに、ある時間、例えば30分とか1時間の総降水量があると便利である。一定の区域に平均していくら降ったかをあらわすのは装置としては割合簡単であるが、総降水量のパターンをPPIの上に現わそうとするとStorage tubeのような特殊な記憶装置が必要となってくる。Storage tubeというのはブラウン管のような形をしていてその蛍光面の所に映像に比例したChargeを蓄えある時間の後それを取り出して再び映像信号を得るといものである。これを用いて1分間に約1回映像信号をこれに蓄え30~60回の合計を作って、それをPPIに現わすという試みがTex.のA. M.において行われている。この場合問題となるのはこのtubeに蓄え得る量にある限度がありそれ以上は飽和してしまうので余り数多くの平均を作れないことで更に動作範囲の広い方法が必要となってくる。

3.4. 定高度PPI.

現在使われているPPIは高さに関するデータは全然はいっていない。ビームを水平に向けた時は高さ0のEchoが現れていることになるが仰角をかけた場合は距

離によって現れている像の高度が異っている。定高度というのは仰角を種々変えた数多くの PPI から一定高度の部分を取り出して例えば 5000ft, 10000ft, 15000ft... といったレベルの断面を PPI として現すものでその方法としては仰角を変えた多くの PPI の像を一度写真にしてそれから一定高度の部分抜きだす方法と電氣的に Storage tube に蓄えて行う方法と 2つの方法がカナダの McGill Univ. で行われている。この方法によると従来の一方向きり観測できなかった RHI と高さの分らない PPI の 2者と一緒にして全方向の高度分布が観測できる長所がある。

3.5. 雨量ロボットの組合せ

レーダーによる雨量測定では雨の種類、性質によってレーダー反射因子 Z の係数が異り絶対値の測定は雨滴の大きさの分布がわからないと誤差が多くなる恐れがある。その一つの対策としてロボット雨量計の観測値を PPI 上に現して等雨量線を較正する方法が Washington の Weather Bureau で実験されている。これでは Robot の観測データは Transponder により Radar Pulse がくるとそれに引続いて雨量に比例した時間の遅れたパルスを送信する。したがって PPI 上には雨量計の位置に一点とそれから半径方向に少し距離をおいて一点と 2つの輝点が現れて、その間隔が雨量を示すことになる。このようにして数カ所で実測値を用いて較正することは雨の性質による Z の係数を求められることになり総降水量を求める場合に精度を向上させる有効な手段である。

3.6. 通報手段

Radar の観測結果を通報する方式は種々考えられており、Microwave による Radar Relay, 工業用テレビを用いる方法は結果は非常に良いが費用の点、マイクロ波回線を必要とする点などで全面的実施は行われていない。現在米国で広く行われているのは電報になおしてテレタイプで送るといふごく原始的方法で、ちかく Polaroid Land Camera (撮影後 1 分間で陽画に焼付けられた画像が出てくる写真機) の大型 (四切) のものを特に製作し、それで PPI を撮影して天気図を送る Faximil によって通報する方式を採用することであった。Faximil が発達している米国ではこの方式が最も手近かなししかも経費のかからないものであろう。

Radar Echo の性質として PPI Scanning 毎に全部の像をそのまま送る必要はなく何回かに 1 枚の像を送れば十分である。したがって 1 枚の画を送る時間を長くすれば、それに必要な最高周波数は低下するので、既設の電話機あるいは短波の無線にのせて送ることが可能とな

り一枚の画を送るのに相当の時間がかかっても文章に直したものに較べたらはるかに利用価値はある。3.3 節に述べた Storage tube を用いるとこのように周波数をさげて簡単に送ることができるので、わが国の現状としては、この方式の研究が必要と思われる。ただし、この便利な Storage tube はわが国では製造されておらず、しかも 1 本数 10 万円という高価なのが欠点である。

3.7. 円偏波レーダー

通常のレーダーに使われている電波は直線偏波であるが、これを円偏波とすると相手が完全な球状ならば反射波は 0 となる。したがって偏波面を直線と円とに切換えて円偏波の時の減衰量を測定すると雨滴あるいは雪片の楕円率を測定できる。Newell などの測定によると最大の変形は Melting Layer の中に生じていることが観測されている。

4. 結言

以上気象レーダーについて新しく試みられている点について述べたが、一方蝙蝠はこれら人間の作ったものよりある点においてはすぐれたレーダーを使用していることが最近明かになってきた。蝙蝠の種類により使われるレーダーの種類も種々であるが、A. M., F. M., Frequency shift keying, Two-tone emission などで使用周波数は 20~120K.C. の超音波帯であってわれわれのレーダーより変化に富んでいる。またパルス幅、繰返しなどは自由に可変でき自分の測定しようと思う距離に最適のものを選ぶと同時にこれによって混信から脱れる一つの手段としている。混信に対する選択性についてはすばらしいものがあって、100~1000匹もの蝙蝠が一つの洞穴の中を飛び廻っていてもお互に干渉し合うことなく自由に動き廻ることができる。実験室でこのレーダーの周波数帯全部をカバーするような雑音を蝙蝠の送信出力と同程度の強さで出してやっても、なお自分のレーダーを使える点はわれわれのレーダーの受信機よりはるかにすぐれた識別能力をもっていることになる。まだその原理は不明であるが、この感度、混信に対する能力、0.18 mm 位の細い線を判別しうる分解能などはわれわれがまだ動物に学ばねばならない点であろう。軍用レーダーが高度の電子技術を用いてあらゆる必要な測定およびそのデータ処理が可能となっているのに対して、レーダーの最も Primitive な型式である PPI によっている気象レーダーは既存の電子技術をもってしても開発可能の分野が数多く残されており、今後の発展に期待する所が大きい。