

# ミリ波レーダによるエンジェル エコーの観測 (I)\*

柳 沢 善 次\*\*

## 要 旨

鉛直ビームを使用している波長 8.6mm の測雲用レーダによる晴天時のエコーの発生数・発生高度と気象条件との関係について解析した。このエンジェルエコーは干渉性のパルス状エコーで、パルスの持続時間は高度によって異なり、大体 2~3 秒の間に分布している。今回解析した冬から春の期間では、発生時間は昼間に集中して、地上気温の高い日に多く発生する。発生高度は 200~500m 付近にもっとも多く分布し、最大高度は 2000m 付近にまで達することもある。この期間の 1 時間平均での最大発生数は 2~3 秒に 1 個程度で、高度とともに減少する傾向がある。エコーの発生数・発生高度は地上気温、日射量、湿度等と関係していることが結果として得られた。

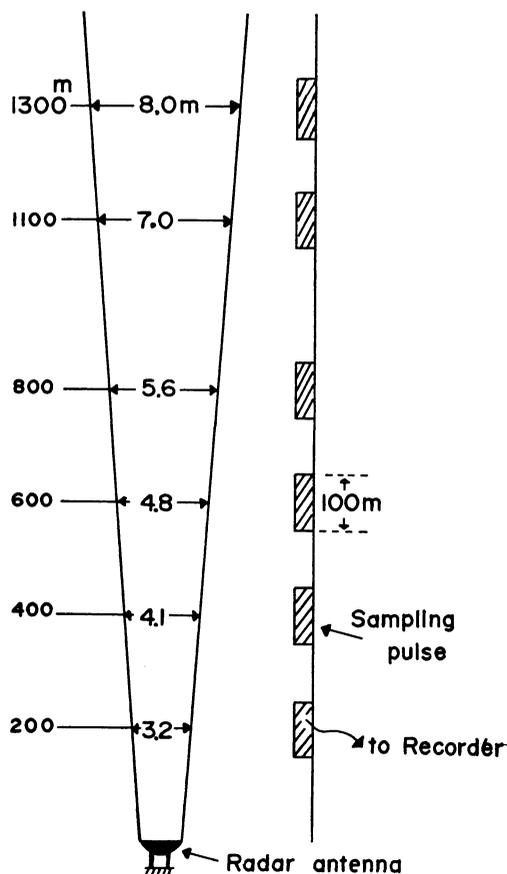
## 1. ま え が き

一般に、レーダは水滴・雪片等の降水粒子からの後方散乱エネルギーを受信する装置であるが、ときにはこのような反射物体の見えないような晴天時に、下層においてレーダエコーを観測することがある。このようなエンジェルエコーは近年各地で観測され、晴天乱気流や地面付近の熱対流の研究に利用されている。使用される波長もメートル波からミリ波帯にまでおよび、ドップラーレーダの観測結果等も報告されている。Atlas (1964) は多くの観測結果を要約し、エコーの持続時間 ( $t$ ) とビーム幅 ( $\theta$ ) との間には  $t = 6\theta$  の関係があり、レーダ反射断面積 ( $\sigma$ ) と高度 ( $r$ ) との間には  $\sigma = Kr^2$  の関係のあることを示した。また、Battan (1963) によると、ドップラーレーダの観測結果では、エンジェルエコーは平均 1m/sec 以下の上昇速度を持っていることを示した。

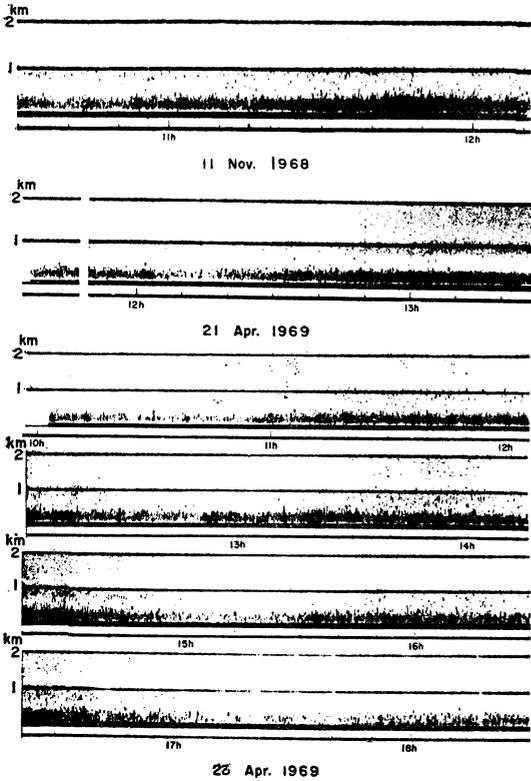
エンジェルエコーの反射機構としては空中に浮遊している塵埃・昆虫や鳥、屈折率の変化等が考えられていて、エコーの特徴としての多数の粒子の相対運動によって起こる非干渉性散乱に比較し、変動の少ない干渉性散乱の性質を持っていることである。Plank (1956) は昆虫、鳥等の習性を考慮し、長期間のレーダ観測結果から、屈折率の大きな勾配の存在の可能性について論じて

\* The Observation of Angel Echoes by a 8.6 mm Cloud Detection Radar (I)

\*\* Z. Yanagisawa 気象研究所台風研究部  
—1970年1月14日受理—



第1図 レーダビーム幅・ペン記録用サンプリングパルスと高度との関係



第2図 ファックス記録例

いる。また、Atlas (1964)は多くの観測結果から、パブル状の熱対流によるエコー発生の問題について論じている。解析した結果は一つの波長のみによるものであるが、反射機構を明らかにするためには、種々の波長による同時観測が是非必要である。

2. 観測方法と観測例

観測に使用した測雲用レーダの各定数は次の通り。

送信周波数	34.860MHz.
波長	8.6mm
送信出力	40kw
パルス幅	0.5 $\mu$ s
ビーム幅	0.25°

高度とビーム幅との関係は第1図のようになり、これにパルス幅を加えたレーダ反射域の大きさは高度4,000mにおいて2,000m<sup>3</sup>, 8,000mでは4,000m<sup>3</sup>となる。

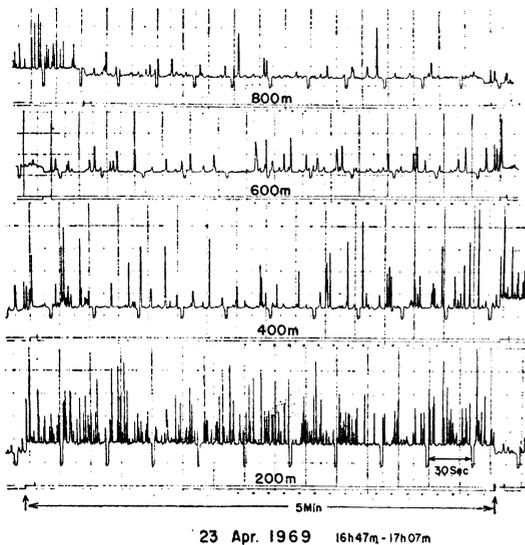
記録の方法は発生数、発生高度の概要を知るためのファックス記録と、エコー強度と特定高度の発生数を記録するためのペン記録を用いた。そのほか、エコーの波形をしらべるため時々Aスコープの写真記録を行なった。ファックス記録のペンは約3秒に1回転するのでこの時間より持続時間の短いエコーは記録されないこともあり、ファックス記録のエコー数は実際の発生数より少なくなる傾向にある。ただし、ビーム幅に関係し高度が高くなるほどエコーの持続時間は長くなり、さらに風速の弱い場合もこの時間は長くなるので、実際の発生数とほぼ一致することになる。ペン記録の方法は第1図に示したように高度幅約100mのサンプリングパルスを用い、このパルスを5分間一定高度に固定してその層に発生したエコーを記録する。

第2図にファックスの記録例を示した。横線は高度目盛で1km, 2kmをあらわし、エンジェルエコーは500m以下の高度に多数発生している。1968年11月11日の観測例では、11時20分から12時10分の間に高度300m以下の層に多数のエコーを観測し、1969年4月23日14~15時、16~17時の間では高度1,000m付近でも比較的多くのエコーが観測された。

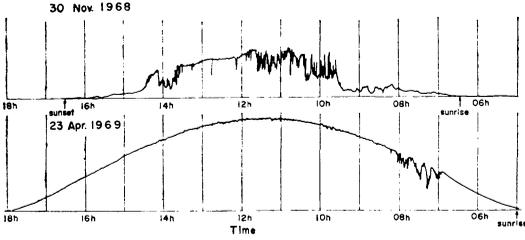
第3図はペン記録の例である。サンプリングパルスの位置を高度200, 400, 600, 800mに選定し各高度とも5分間ごと記録した。高度が高くなるほどエコー発生数、エコー強度が減少しているが、これはレーダ波の距離による減衰を考慮する必要がある。

3. エコー発生と気象条件

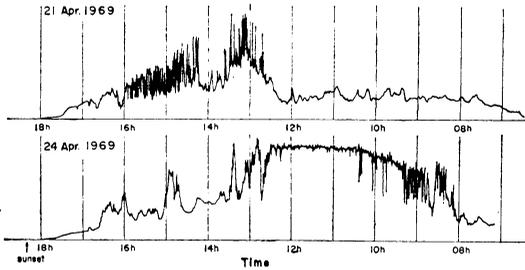
1968年11月から1969年4月までの間に約10日間の観測



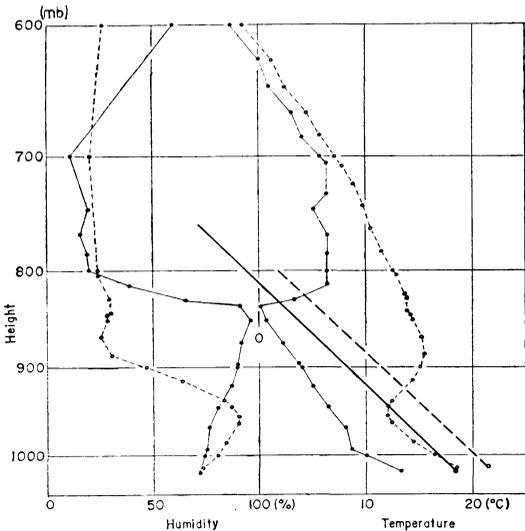
第3図 ペン記録例



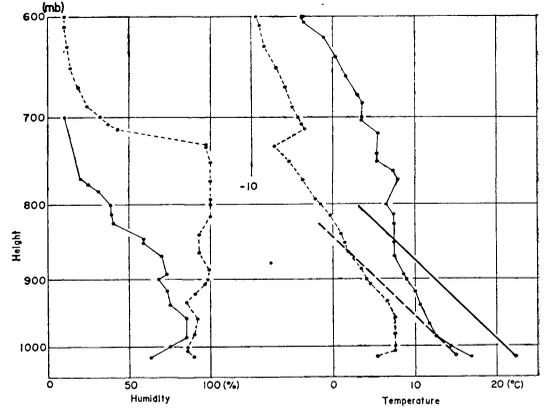
第4図 高層気象台において観測した全天日射量の時間変化  
 上図 1968年11月30日  
 下図 1969年4月23日



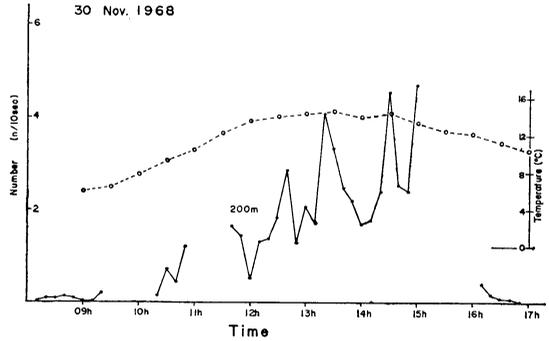
第5図 第4図に同じ  
 上図 1969年4月21日  
 下図 1969年4月24日



第6図 高層気象台において観測した気温・湿度の垂直分布  
 — 1968年11月30日09時  
 ..... 1969年4月23日09時



第7図 第6図に同じ  
 — 1969年4月21日  
 ..... 1969年4月24日

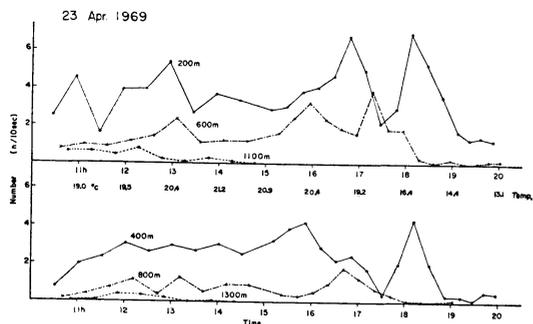


第8図 エンジェルエコーの発生数(実線)と地上気温(点線)の時間変化

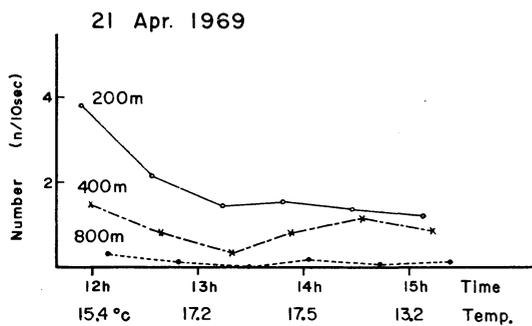
例があり、そのうち代表的4例について解析した。レーダ観測は茨城県の館野高層気象台構内で行なった。

エンジェルエコーの発生数、発生高度は日射量、地上気温、湿度等に関係することが結果として得られた。冬期季節風が強く地上気温 $10^{\circ}\text{C}$ 以下の日では、快晴であっても発生数は非常に少なくなる。もちろん、雲量10のような場合はほとんど観測されない。このように低温で快晴の日の平均(3日間)では10秒間に0.1以下の発生数で発生高度は200m以下の層に集中する。また雲量10で日射のほとんどないような日でも、地上気温が $20^{\circ}\text{C}$ 以上のような場合には(例えば夏期降雨のやんだ直後等)発生数は多くなる傾向を示した。

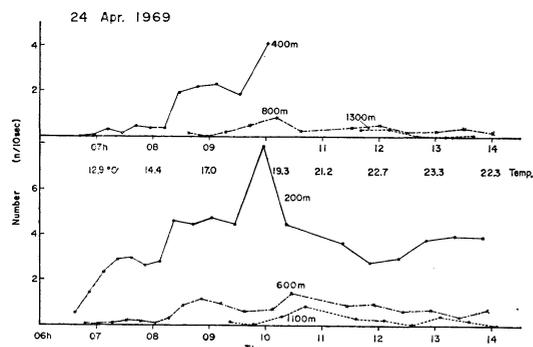
第4, 5図に今回解析した4例の日の高層気象台において観測した全天日射量の時間変化を示した。また第6, 7図は9時のゾンデ観測結果で、太い実、点線はその日の最高気温から乾燥断熱線にそって地上の空気が上



第9.1図 1969年4月23日



第9.2図 1969年4月21日



第9.3図 1969年4月24日

第9図 エンジェルエコーの高度別発生数の時間変化

昇したと考えた場合の状態をあらわす。

第8図には1968年11月30日のエンジェルエコーの発生数(実線)と地上気温(点線)の時間変化を示した。地上の最高気温は約15°Cで、全日日射量は第4図に示した通りである。この日のエコーの発生高度はほとんど200m以下で、発生数は時々4/10sec程度の極大があらわれているが、1時間平均では2.5/10sec程度となる。

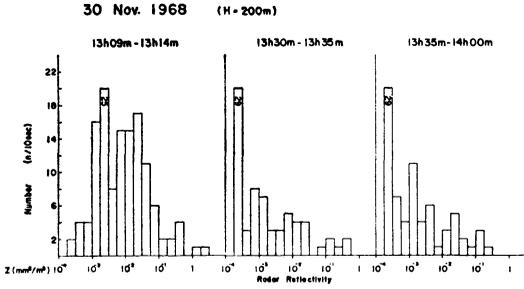
第8図の発生数は10分間の値を10秒間に換算して示したものである。1時間平均の発生数と気温の時間変化はよい対応を示し、15時以後はどちらも急速な下降を示している。この下降は日射量の減少に関係しているものと思われる。エコーの持続時間は風速に関係しているようである。同様の観測は12月1日も引続いて実施したが、各気象要素とエコーの発生との関係は第8図と同じような結果が得られた。

第9.1図は1969年4月23日の観測例で、今回解析した期間中ではもっともエコーの発達を示した日である。最大発生数は6/10sec以上で、Aスコープの目視観測による最大発生高度は約2,000mにまで達した。この日の地上最高気温は21.5°C(14時18分)で、日出前、日没後の湿度は90%程度であった。第9.1図は各高度別の発生数を示し、高度1,000以上では午前中に最大発生数がある。このことは日射と水蒸気量とに関係し、筆者(1961)が解析した夏期山ぞいにおいて強い日射によって発生する積雲の発生時間とほぼ一致することが認められる。図でわかる通り、電波の距離による減衰の影響をうけ高度が高くなるほど発生数は減少している。また図には毎時の地上気温が示してあり、日没時(18時40分)頃より発生数は急速に減少しはじめ、20時以後は高度200mにおいて時々発生する程度にまで減少した。地上気温は18時に16.4°C、20時には13.1°Cまで下降している。

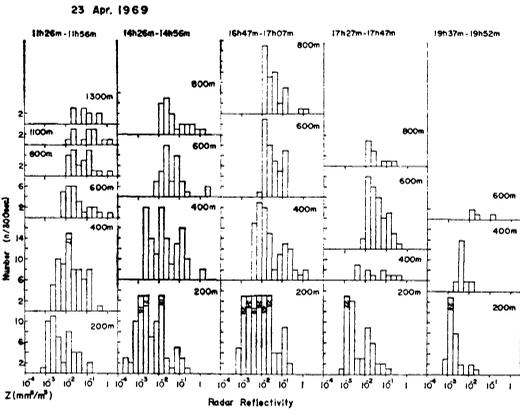
第9.2, 9.3図には1969年4月21, 24日の例を示した。21日の観測例は12~15時の間であるが、第9.1図に比較して発生数は非常に少ない。この日の日射量は第5図に示した通りで、最高気温は18°C(13時20分頃)程度である。第9.3図は早期からの観測のある例で、日出(5時30分)約1時間30分後にエコー発生しはじめ、下層から順々に発生数が増加している。地上気温は23日に比較して高く、20時でも17.6°Cを示したが、エコー発生数は23日より少ない。湿度の変化はほとんど同じである故、その差は日射量の差に原因するものと思われる。

#### 4. エコーの強度分布

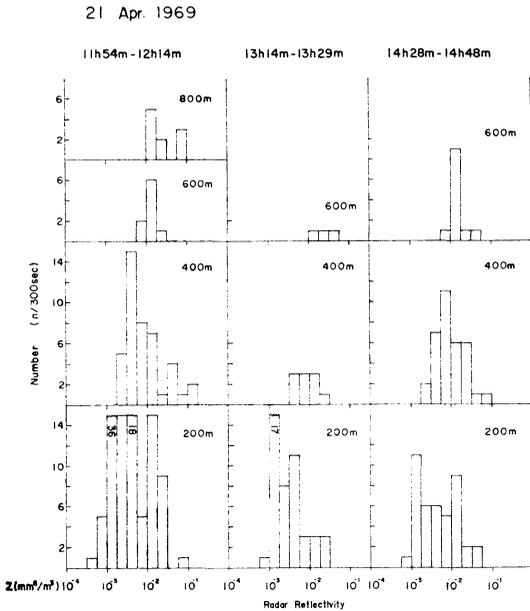
エンジェルエコーの強度はペン記録の結果を用いて求めた。前にも述べたように、エコーの持続時間は2~4秒程度であるので、第1図に示したビーム幅と高度との関係や各高度における水平風速から反射体の大きさを推定すると、反射体がビームを満たさない場合と満たす場合とが考えられる。このようにエコー強度の観測から反射体または反射機構を推定することの可能性について解



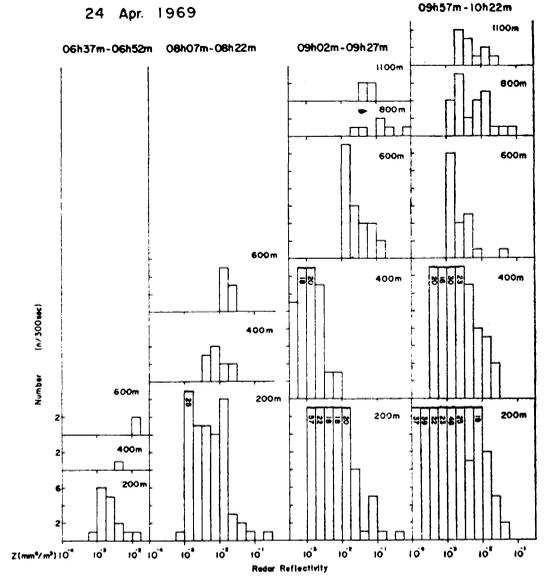
第10.1図 1968年11月30日



第10.2図 1969年4月23日



第10.3図 1969年4月21日



第10.4図 1969年4月24日

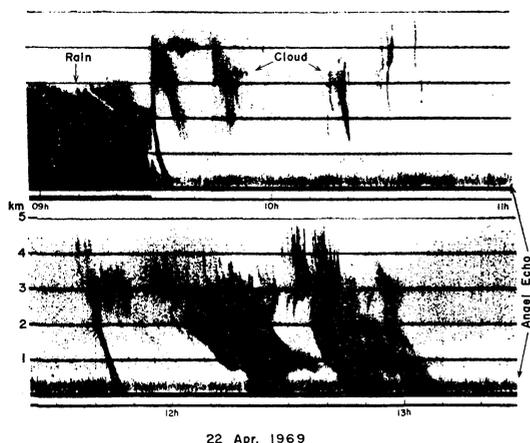
第10図 エコー強度から求めたレーダ反射因子 (mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>)の高度別分布とその時間変化

第1表

Zの値 mm <sup>6</sup> /m <sup>3</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-1</sup>	1
粒子の 大きさ(μ)					
100	1	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup> × 2.5
50	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup> × 7.1
30	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup> × 3.7
1	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>7</sup>	10 <sup>8</sup> × 3.0

析した。もし直径0.1cm以上の粒子が風速2~3m/secで流されているとすれば、高度200mではエコー持続時間は約1秒となり、高度1,300mでは3秒程度になる。また直径4~5mの団塊状の反射体を考えても持続時間はほぼ同じ値となる。

反射体がビームを満たしていない場合を考えると、エコー強度は1/r<sup>4</sup> (rは高度をあらわす)に比例することになり、レーダ方程式を用いて計算したレーダ反射断面積σは10<sup>-4</sup>~1cm<sup>2</sup>の間に分布している。このσの値から粒子の直径Dを求めると0.1~0.4cmとなり、空中に浮遊する塵埃等の大きさの観測値と比較すると大きすぎる値である。また昆虫・鳥等を考えた場合にはあまりにも発生数が多いため、このような大きさの反射体が少



第11図 降雨のやんだ直後に発生したエンジェルエコーの観測例

数個存在することは考えられない。この観測に用いたミリ波レーダの場合、高度を200mとすると、最小受信可能は粒子の大きさは約0.1cmの直径となる。

次に考えられる反射体としては、ビーム幅を満たす程度の体積内に多数の微粒子が存在する場合である。エコー強度は $1/r^2$ に比例し、計算は降水粒子からの反射の場合と同じようにレーダ反射因子 $Z$  ( $\text{mm}^6/\text{m}^3$ )を用いて行ない、その結果を第10.1~10.4図に示した。4例とも $Z$ の値は $10^{-4}$ ~ $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ の間に分布している。いま粒子の直径を $100\mu$ ,  $50\mu$ ,  $30\mu$ ,  $1\mu$ と仮定して、各 $Z$ 値に対応する粒子の単位体積内の数( $n/\text{m}^3$ )を求めると第1表のようになる。

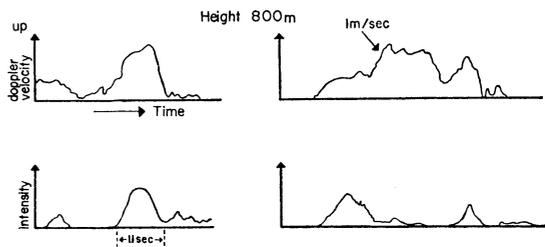
塵埃等空中に浮遊している粒子の観測では、 $1\sim 10\mu$ 程度の大きさのものは $10^3\sim 10^6/\text{m}^3$ の個数となっており、計算結果とほぼ一致している。これらの結果から、小さい粒子が輻射熱による地面付近の対流によって空中に吹き上げられ、この粒子がビーム幅程度の大きさの塊となって空中を浮遊していることに原因することも推定される。しかし第10.2~10.4図の値を各高度ごとに比較すると、 $Z$ の最高値は高度が高くなるほど大きくなる傾向がある。もし粒子が対流によって吹き上げられているとすれば、大きい粒子ほど上昇高度は低くなるはずである故この結果は矛盾することになる。

さらに次のような観測結果もある。第11図は1969年4月22日のファックスの観測例であるが、この日は早期の3時頃強い降雨があってその後弱雨となり、9時30分に降雨がやむと同時に高度200m付近にエンジェルエコーがあらわれた(矢印)。高度2,000~4,000mのエコーは

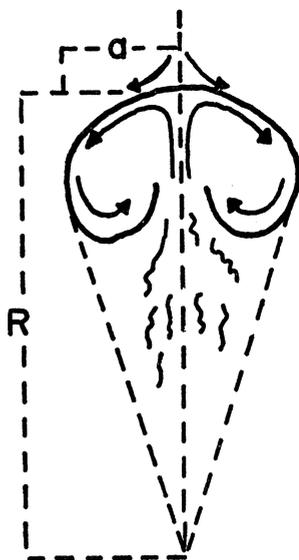
雲のエコーである。9時の地上気温は $15.6^\circ\text{C}$ で、夏の気温の高いときは、降雨のやんだ直後にほとんどの例についてエンジェルエコーを観測している。このような強い降雨の続いた直後に、前に示したような粒子が空中に存在することは考えられない故、他の原因をも考慮せねばならない。

### 5. 屈折率の勾配による反射

前項で述べた粒子による反射以外では、大気中の気温、湿度の急激な変化によって起こる電波屈折率の大きな勾配による反射である。一般に、乾燥空気の屈折率は電磁スペクトルの全領域にわたって同じ値を持っているが、大気は常に水蒸気を含んでいるので、水蒸気の屈折率に対する影響を考慮する必要がある。光のように周波数の高い場合は水の分子は電子的に分極するが、電波のように周波数が低くなると分極だけでなく電場の変化に



第12図 ドップラーレーダ(波長3.2cm)で観測したエンジェルエコーのエコー強度(下)とドップラー速度(上)



第13図 熱対流モデル (Atlas, 1964)

従って分子が運動する。その結果水蒸気の屈折率は光の振動数に対するより電波の振動数に対して大きくなる。

電波に対する屈折率の  $n$  単位は次式であらわされる。

$$N = (n-1)10^6 = \frac{K_1}{T} \left( \frac{K_2 e}{T} - \frac{e}{7} \right)$$

$n$ : 屈折率,  $T$ : 絶対温度,  $K$ : 常数,  $e$ : 水蒸気圧,  
波長 2 cm 以上の電波に対しては次のようになる。

$$N = \frac{79}{T} \left( P - \frac{e}{7} + \frac{4.800e}{7} \right)$$

$P$ : 気圧

上式を用いて屈折率を求める場合、屈折率が一波長の距離において急激な変化をしているときのみ、その層から部分的反射が起り得る。ミリ波帯でのエコーを生ずるに必要な屈折率の勾配は  $30N/\text{cm}$  となるが、このような大きな勾配の屈折率は観測例がない。もし、ゾンデ資料から得られる温度、湿度の急変する層（逆転層）からの反射があるとなれば、夜間に多く発生するはずであるが夜間の発生数は非常に少ない。前にのべたように、エンジェルエコーの発生は昼間日射によって昇温した地面付近の空気がバブル状となって上昇するものと思われる。このような事実はドップラーレーダ（波長 3.2cm, ビーム幅  $1.8^\circ$ ）の観測結果からも示された。第12図に A スコープによる受信波形とドップラー速度を示した。このときのエコーの持続時間は約 11 秒で、2 種類のレーダから求めた持続時間 ( $t$ ) とビーム幅 ( $\theta$ ) との間には  $t = 6\theta$  の関係となる。

ドップラー速度は平均 1 m/sec 程度の上昇流で、そのスペクトラムは降水粒子の場合に比較し非常に狭い分布を示した。これらの種々の観測結果から、エンジェルエコーは多くの粒子を含むある層からの反射ではなく、ある単一面からの反射であるような特性を表わしている。

## 6. 考察

晴天時に発生するエンジェルエコーは主として日射の強い昼間に集中し、発生数、発生高度は地上気温、日射量、水蒸気量等に関係することを示した。また、これらのエコーは多数の散乱粒子の相対運動によって起る非干渉性散乱とは異なり、安定した干渉性パルス状エコーである。このことはドップラー速度のスペクトラムの狭い分布によっても示された。さらに、夏期気温の高いときは、降雨のやんだ直後にもエコーの発生がみとめられたこと等から、粒子による反射ではなく屈折率の大きな勾配による反射であると考えられる。しかし、波長 1 cm 以下の非常に短い波長帯における反射機構については実験的にも理論的にも明らかにされていない。

Atlas (1964) は第 13 図に示したようなバブル状の熱対流モデルを考え、このバブルの天頂付近では地面付近からの熱、水蒸気の補給によって集積現象があり、周囲の外気との間の屈折率が大きな勾配となることを理論的に求めた。この計算結果では高度差 0.43cm において  $\Delta N = 20N$  とすれば、波長 3.2cm に対するレーダ断面積は  $3\text{cm}^2$  となる。この場合のエコー発生高度は 1,000m であるが、高度の低い場合には波長 8.6mm の断面積が 10 db 程度小さくなくても観測可能な値である (4.参照)。

以上エンジェルエコーの発生機構を明らかにするため、気象要素との関係やエコー強度分布等の観測結果について解析した。このような機構の解明には、長期間の観測、異なった波長のレーダの使用、特殊気象測器の併用等が必要である。

筆者 (1968) は積雲対流の日変化について解析し、このような日変化は雲底以下の層における熱と水蒸気の補給量に関係することを示した。Konrad, Kropfli (1968) は波長 3.3, 10.7, 71.5cm のレーダを用い、気温が海水温に比較し非常に低い日 (温度差  $15^\circ\text{C}$ ) に発生したエンジェルエコーを海上で観測した。その後このエコーは発達して小さい積雲を形成した。もし、エンジェルエコーの発生機構が熱対流モデルで説明できるとすれば、夏期の日射によって発生する積雲に何らかの関係があるものと思われる。こんごさらに観測を続けこれらの関係について解析を進める予定である。

なお、今回のレーダ観測は館野高層気象台において実施したものであり、観測や種々の気象資料の利用について御便宜を頂き、高層気象台各位に謝意を表する。

## 参考文献

- Atlas, D., 1964: Angels in focus. Proc. 11th Weather Radar Conf., 2~5.  
 Battan, L.J., 1963: The vertical velocities of Angel echoes. Proc. 10th Weather Radar Conf., 390-315.  
 Konrad, T.G. and R.A. Kropfli, 1968: Radar observation of clear-air convection over the sea. Proc. 13th Weather Radar Conf., 262-269.  
 Plank, V.G. 1956: A meteorological study of radar angels. Geophys. Res. Paper No. 52, Air Force Cambridge Research Labs, 117.  
 柳沢善次, 1961: レーダより求めた雷雨発生分布. 天気, 8, 185-192.  
 柳沢善次・神林慶子, 1968: レーダ観測による積雲対流の日変化について, 秋季気象学会発表.