

ミリ波レーダによるエンジェルエコーの観測 (II)*

柳 沢 善 次** 神 林 慶 子***

要 旨

高度200~2,000mの自由大気の下層において、ミリ波レーダで観測される晴天時のパルス状エンジェルエコーについて解析し、日出後日射量の増加とともにエコーの発生高度が時間的にどのように変化するかについてしらべた。このようなパルス状エコーは日出から約2時間後に高度200mの最下層に発生しはじめ、高度600mでは約3時間後に発生しはじめて発生高度は時間とともに徐々に上昇している。このようにして求めたエコー発生高度の平均上昇速度は4m/minとなり、11時頃1,000m以上の最高高度に達する。

さらにこれらの資料を用い、エコー発生高度の上昇と日射量の増加に伴う地表面付近の熱・水蒸気の鉛直輸送との関係について解析した。地表面付近の露点の減少とエコーの発生とはよい対応を示し、また日出後の気温逆転層の解消時間やゾンデ観測による下層における水蒸気量の鉛直分布等ともよい対応のあることが示された。

1. ま え が き

筆者(1970)は波長8.6mmレーダで観測されたパルス状エンジェルエコーの発生数・発生時間等と各気象要素(気温・湿度・日射量等)の時間変化との関係について解析した。この解析結果からレーダ波の反射機構としては大部分が熱対流による屈折率の勾配による反射であることを示した。このような屈折率の変化は大気中の乱れとしてあらわれ、これら乱れの大きさとレーダ反射との関係についてはTatarski(1961)の理論的研究がある。ミリ波レーダにおける反射では乱れの最小の大きさが問題となり、その大きさはmmからcmの範囲に分布している。これらの理論的考察結果ではミリ波レーダを用いての乱れの観測は不可能とされている。ミリ波帯における晴天時のエコーを説明するため、Atlas(1964)はパブル状の熱対流モデルを考え、このパブルの天頂付近では地面からの熱・水蒸気の補給によって集積作用の起っていることを示した。

Hardy等(1966, 1969)は波長3.2cm, 10cm, 57cmの3種類のレーダを用いて晴天対流の同時観測を行ない、10cmレーダでは明瞭な逆U型エンジェルエコーを観測

した。Konrad(1970)はこれらの資料を用いて解析し、このような逆U型エコーは時間とともに上昇しその速度は約5m/minで、高度約1,000m付近まで上昇した頃その付近に積雲の発生が目視観測で認められた。3cmレーダではこの逆U型エコーはエコー頂付近のみがあらわれ点エコーとなっている。(気象研究ノート対流特集号第109号 p. 143~152参照)

今回の解析では、各高度におけるパルス状エンジェルエコーの最初の発生がどのような気象条件に対応しているかをしらべるため、入手し得る種々の気象資料を用いて解析を行なった。

2. レーダ観測

観測に使用したレーダは波長8.6mmの鉛直ビームを持つ測雲用レーダで、観測高度は200, 400, 600, 800, 1,100, 1,300, 1,500mに選定した。

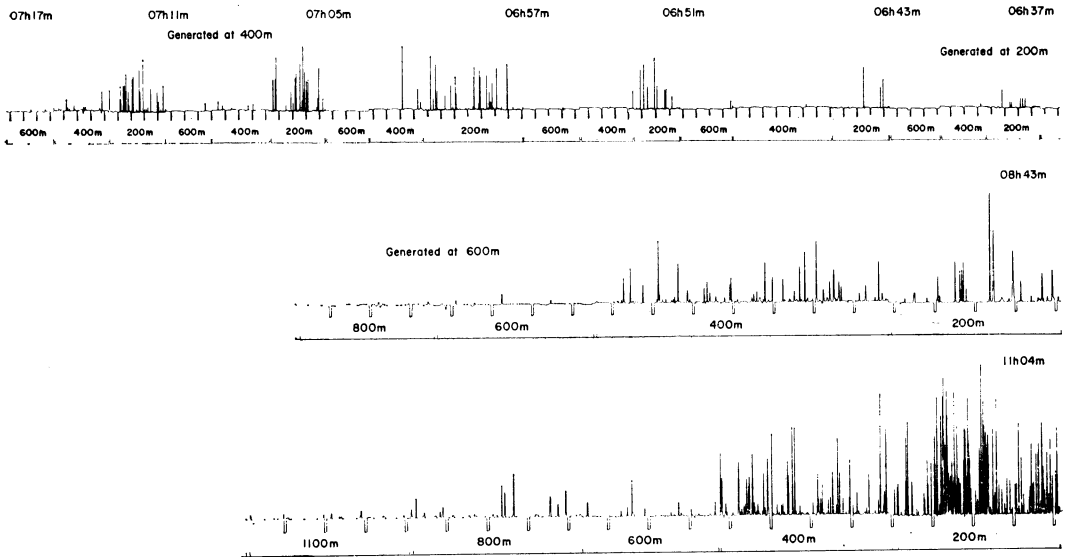
今回の解析は日出から正午頃までの間におけるエンジェルエコーの時間的変化を目的としたので、早朝からの観測のある資料を用いて解析した。第1図は1971年4月21日の観測例でこの日の日出の時間は5時である。観測は5時50分より開始したが6時37分までは各高度ともエコーの発生が認められなかった。その後高度200mに弱いエコー発生しはじめ時間とともにエコー数・強度とも徐々に増加し、7時頃には高度400mにエコーが発生しはじめた。高度600mでは8時43分、高度800mでは9時10分、1,100mでは10時10分のように順次時間とともにエコー

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

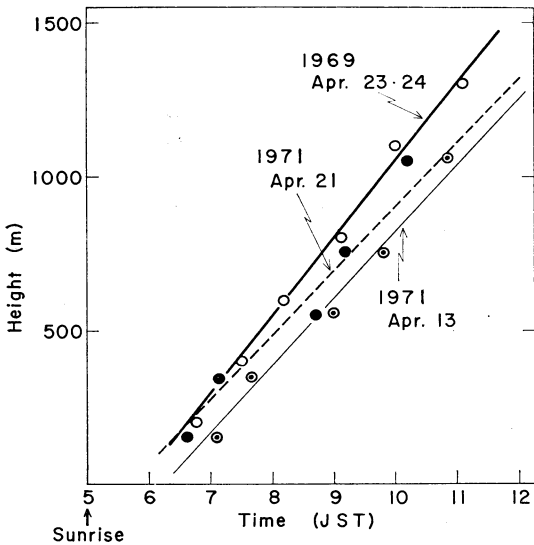
** Z. Yanagisawa 気象研究所台風研究部

*** N. Kanbayashi //

—1972年5月20日受理—

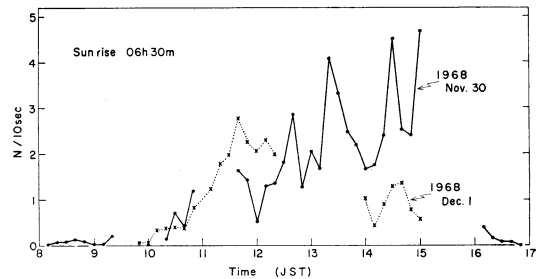


第1図 1971年4月21日ミリ波レーダで観測したパルス状エンジェルエコーの記録



第2図 最初にエンジェルエコーを観測した高度と時間との関係

一発生高度が上昇している。他の観測例(1969年4月23, 24日, 1971年4月13日)でもほぼ同じような傾向が見られた。第2図にはそれらの結果をグラフで示した。すなわちエンジェルエコーは日出後約1時間50分頃高度200m付近の接地層に発生しはじめ, 日射量が増加する



第3図 冬期におけるエンジェルエコー発生数の時間変化

とともに発生高度が上昇し, 11時頃ほぼ最高高度に達する。第2図に示した3日間ともほぼ快晴で平均的なエコー発生高度の上昇速度は4m/min程度で, Konrad(1970)の示した逆U型エコーの上昇速度とほぼ一致していることは興味がある。

第3図は冬期の観測例で観測場所は館野高層気象台構内である。エコーの発生は両日とも高度200mのみでそれ以上の高度ではほとんどエコーの発生が認められなかった。エコーの発生しはじめる時刻は8~10時の間に分布し日出から2~3時間後になる。午後になると11月30日の例のように発生数の変動が大きくなる。一般にこのような大きい変動は弱いじょう乱の通過に対応し風向・風速の変化を伴うことが多い。

1971年12月の気象研究所構内での観測では高度 600m までエコーの発生があり、ブラウン管上での目視では 1,000m にまで達していた。第3図と比較すると発生高度は非常に高いが、館野と東京における地上の最高気温はほぼ同じであることから、最低気温の差に原因するものと思われる。

となっている。このような特性は熱対流を説明するための有力な証拠を示すものであり、第3図の発生数の増加とはほぼ同じ傾向を示すことは興味あることである。

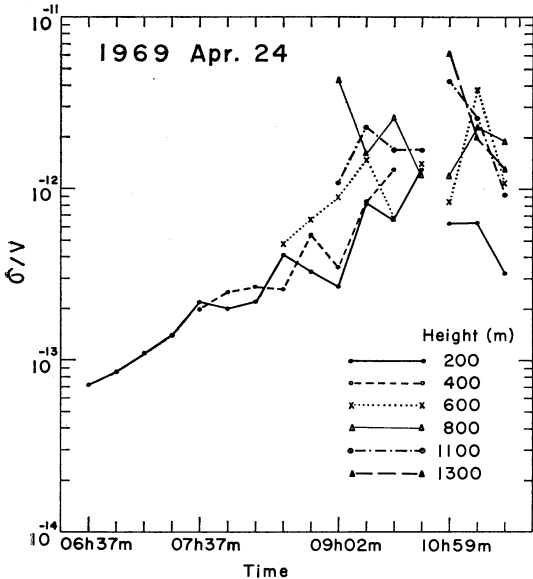
第5図はエコー発生頻度をパーセントであらわしたもので横軸はエコー発生時間間隔を秒で示した。6時37分から7時27分のエコー発生初期では1~2秒間隔での発生は全体の16%で10秒間隔の発生も5%程度ある。しかし10時前後の時間では1秒間隔の発生がもっとも多く全体の27%となっている。この図では午後には多少この間隔が大きくなる傾向にあることを示している。エンジェルエコーの反射が大気の流れに原因するとすれば、高度200mにおける大気の流れは10~11時頃から激しくなることを示している。

3. エコー発生気象条件

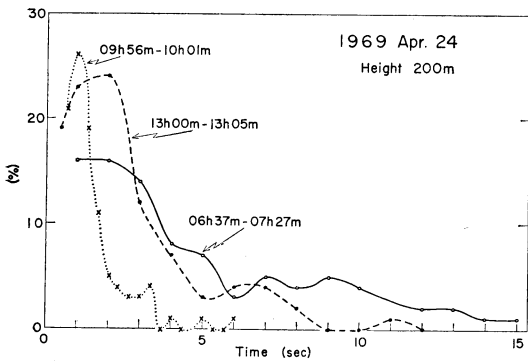
各高度におけるエンジェルエコーの発生しはじめる時の各気象要素の変動をしらべ、エコーの発生機構を明らかにすることが目的である。

3.1 地上気象要素の変化との関係

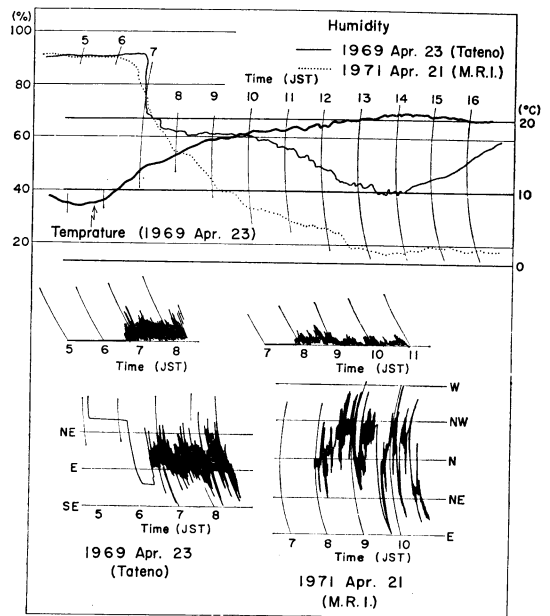
最初に高度200mにエンジェルエコーが発生しはじめる早朝7時頃の気象要素の変化についてしらべた。第2図に示したようなエコー発生高度の上昇を示す日は高気圧圏内に入り快晴である。このような日は日出頃の時刻では地上風は無風に近い状態である。低気圧・前線等の



第4図 各高度におけるエンジェルエコー強度の時間変化



第5図 高度200mにおけるエンジェルエコーの発生頻度

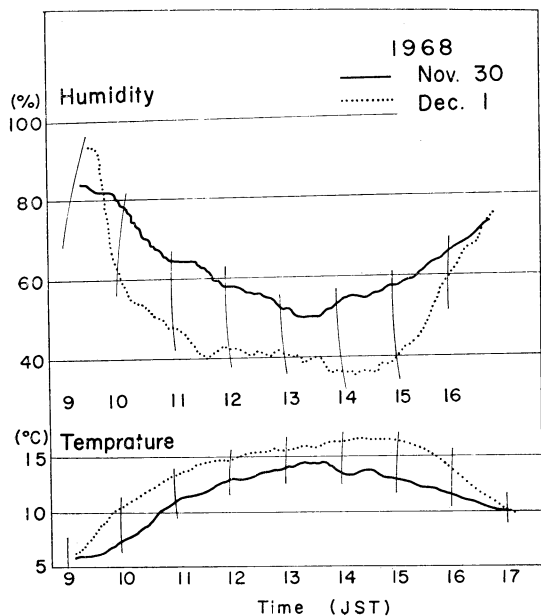


第6図 エンジェルエコー発生時における地上の気温・湿度・風向・風速の変化

第4図は単位体積内の5分間平均エコー強度の時間変化を示した図である。各高度とも時間とともにエコー強度が増加し、発生高度が高いほどエコー強度も大きい値

じょう乱が近くにあって早朝から比較的風の強い日はほぼ快晴に近い状態でも発生高度の上昇は直線とならない場合が多い。今回の解析では主として日射の影響を見るため前者の状態の場合について解析した。

第6図は第2図に対応した日の地上の気温・湿度・風の時間変化を示す図で、気温は日出後1時間頃より徐々に上昇しはじめるが湿度は7時頃より急速に減少しはじめる。露点温度の時間変化をしらべると、日出直後気温の上昇によって地表面の水分が蒸発して露点温度が増加するが、7時頃より急激な減少が起りこの減少の傾向は正午頃まで続く。この露点温度の減少は日射量による地表面付近の熱対流によって水蒸気が上方へ輸送されることが原因で起こる。エコーの増加と露点温度の減少はよい対応を示した。第7図は第3図に対応した冬期



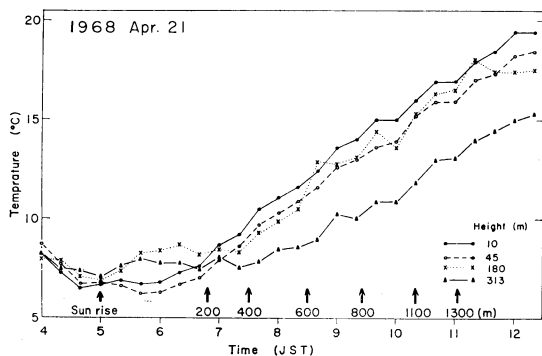
第7図 エンジェルエコー発生時における地上の気温・湿度の変化 (冬季の例)

の例で9~10時の間に湿度の急激な減少が認められる。

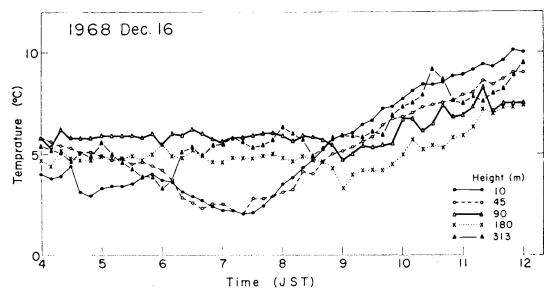
第6図の下図は風向・風速の時間変化を示した図でエコー発生時の7時頃より風速の増加していることが示された。このことは目視によっても確認され、無風の状態から微風の吹き出した時刻にエコーの発生が認められた。このことは夜間強い沈降によって安定化していた地表面近くの大気が日射の増加によって熱対流が発達して大気の乱れを生じたことを示すものである。

3.2 逆転層の解消との関係

晴天時夜間冷却によって地表面付近では気温が下降し高度200~300m付近の層に気温逆転面が生ずる。逆転面から地表面までの層は日出後日射によって気温が上昇し、やがて逆転層は解消し地表面付近の下層は強い日射をうけて対流不安定となる。エンジェルエコーの発生と逆転層の解消時間との関係をしらべるため、NHK川口塔における観測結果について解析した。



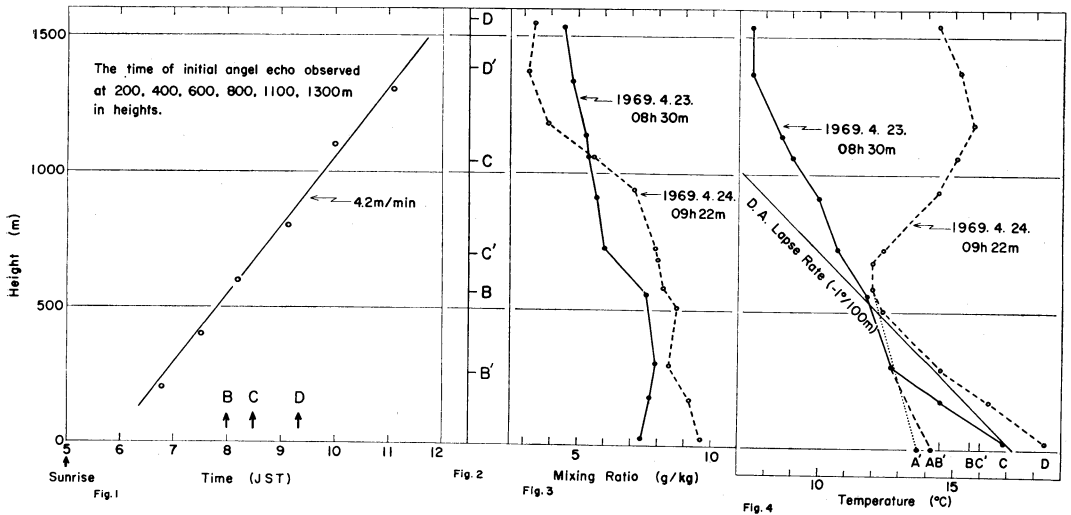
第8図 NHK川口塔で観測した気温の時間変化 (春季の例)



第9図 NHK川口塔で観測した気温の時間変化 (冬季の例)

第8図は1968年4月中で快晴の日の観測例を示した図で、6時頃は強い逆転を示しているが7時頃にこの逆転は解消し、高度313mの気温は高度400mのエコーが発生しはじめる7時30分頃より上昇しはじめている。図中矢印は各高度における4月中の平均的なエコー発生時間を示したものである。この図からも高度200mにおけるエコー発生時間は地表面と高度180mとの間に生じた逆転層の解消時間とよい対応を示している。

第9図は第3図に対応する観測例で川口塔の観測が11月は欠測のため12月の資料を冬季の例として使用した。地表面と高度45mの気温は7時30分頃最低を示しその後



第10図 エンジェルエコー発生高度とゾンデ資料から求めた気温・混合比鉛直分布との関係

日射の影響をうけて急激に上昇しているが、高度90m以上は気温の変化が少ない。地表面付近と高度180mの間の逆転層は8時30分頃解消しているが、高度313mの気温は9時以後も地表面とほぼ同じ値を示し高度180mとの間には強い逆転層が持続していることを示している。

高度90mと180mの気温は9時から10時の間に上昇しはじめる。この時刻は第3図のエコーが発生しはじめる時刻とよい対応を示している。高度400m以上にエコーの発生が認められないのは、高度180mと313mの間の強い逆転層に原因しているものと思われる。

3.3 水蒸気の鉛直分布との関係

今回の解析ではエコーの発生源をバブル状の熱対流によって起こる屈折率の変化であるとしたが、この屈折率の変化は温度・水蒸気量・気圧の微小変化に関係するが、もっとも影響をうけるのは水蒸気量である。エコーの発生と地表面からの日射による水蒸気の鉛直輸送との関係をしらべるため、高度2,000m付近までの水蒸気量の連続観測がないので、今回の解析ではゾンデの観測資料を用いて比較を行なった。

第10図にその比較を示した。図に示した日時はレーダ観測を館野で行った日で、4月23日はほぼ快晴であったが4月24日は早朝よりうす曇の状態であった。水蒸気量は混合比 (g/kg) で示した。気温の状態曲線を示す図でA, B, Cは23日、A', B', C', Dは24日の地上気温の時間的変化を示した。おのおのの時間は左図のエコー発生高度の上昇図のB, C, Dの時間に対応する。

4月23日の場合、地上気温は7時頃A (14.3°C) まで上昇して逆転層が解消し(第8図)この時刻に高度200mにエコー発生した。8時には地上気温はB (15.6°C) まで上昇しゾンデ観測開始時刻の8時30分にはC (16.9°C) まで上昇した。この時刻の混合比の鉛直分布をみると高度700mまで増加しており、エコー発生高度も同じように700mにまで達している。熱対流の周囲に対する地表面の超過温度はA-C=2.6°C上昇し、この超過温度から求めたCの気塊の上昇は図中に示したように高度1,040mまで上昇する。しかしこの気塊は上昇している間に周囲との空気の混合によって上昇高度は減少するのでこの混合を考慮すればC気塊の上昇は700~800mとなる。

4月24日の場合はゾンデ観測時間が9時22分で、超過温度 A'-D=4.7°C から求めた D 気塊の上昇高度は1,500mとなるが周囲との混合を考慮すれば約1,000mとなる。Dの時刻である9時22分にはエコー発生高度は約900mとなり、図に示した混合比の鉛直分布もほぼ同じ高度を示している、もちろん24日の状態曲線では、1,000m付近に強い温度逆転があり、早朝から雲が発生していたので、エコーの発生高度と比較するのは困難である。

エンジェルエコーの発生と気象要素の変動との関係を明らかにするためには日射量の増加にとまって2,000m以下の層で熱・水蒸気量の鉛直分布が時間的にどのように変化するかを知る必要がある。

4. 考察

筆者(1970)はミリ波レーダで観測されるパルス状エ

ンジェルエコーの大部分は種々の観測結果から屈折率の変化に原因することを示した。このような屈折率の変化は水蒸気量・温度・風の変動と関係がある。この研究の第一段階の目的は、各高度で観測される上記各気象要素の変動とエンジェルエコーの発生との関係を明らかにすることにある。気象要素の変動は大気中の乱れとして取扱われ、乱れと屈折率の変動との関係については Tatarski (1961) の理論がある。

一般に屈折率とレーダ反射断面積(σ)との関係は次の式のようになり、屈折率のパワースペクトラム ($\Phi(K)$) を求める必要がある。

$$\sigma = 128\pi^6 \Phi_n(4\pi/\lambda)/\lambda^4 \quad (1)$$

λ はレーダ波長で、 $K=4\pi/\lambda$ は乱れの波数でレーダ反射を生ずる場合の条件となる。

乱れの性質と屈折率変化との関係は次のようになる。

$$\Phi(K) = 0.033 C_n^2 K^{-11/3} \quad K_0 < K < K_m \quad (2)$$

$$= 0 \quad K > K_m$$

$K_0 = 2\pi L_0$ で L_0 は渦の大きさの最大値をあらわす。 K_m は発生しうる最小の大きさの渦の波数をあらわし、波数が K_m 以上になると粘性によって渦は急速に減少する。レーダ波長に対する渦の波数 (K)・大きさ (l) との関係は第1表のようになる。

第1表

λ (cm)	K (cm ⁻¹)	l (cm)
10	1.25	4.4
3.2	3.9	1.4
0.86	14.6	0.4

大気中の最小の乱れの大きさ l_m は動粘性係数 $\nu = 0.17\text{cm}^2/\text{sec}$, 単位時間に逸散されるエネルギー $\varepsilon = 5\text{cm}^2/\text{sec}^3$ とすれば、 $l_m = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$ の関係より $l_m \approx 1\text{cm}$ となる。多くの観測結果もほぼ同じ大きさの値を示し、5mm 程度の値も発表されている。(2)式の条件と第1表の値から、一般にミリ波レーダでは $K > K_m$ となって(2)式は成立しないことになる。しかし波長 3.2cm レーダでは $K < K_m$ となり、これら2種類のレーダ観測結果を比較するとある時間内でほぼ同じ程度のパルス状エコーを観測している故、これらの関係式や渦の性質についてさらに検討する必要がある。

(2)式の C_n は次のようにあらわされる。

$$C_n^2 = a^2 L_0^3 \overline{(dn/dz)^2} \quad (3)$$

a は定数で dn/dz は屈折率の鉛直勾配の平均値を示す。標準大気での C_n^2 の最大値は $10^{-14}\text{cm}^{-2/3}$ 程度である。 C_n と σ との関係は次のようになる。

$$\sigma = 0.39 C_n^2 \lambda^{-1/3} \quad K_0 < K < K_m \quad (4)$$

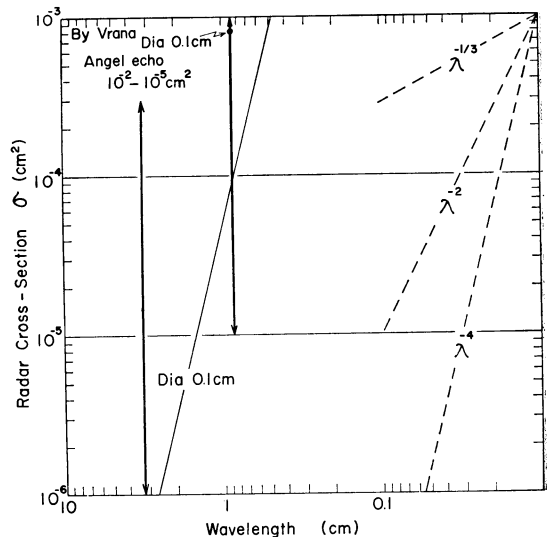
$$= 0 \quad K > K_m$$

レーダ定数を代入して距離 (r) との関係を求めれば次のようになる。

$$C_n^2 > 3 \times 10^{-15} r^2 \lambda^{1/3} \quad (5)$$

$$C_n^2: \text{cm}^{-2/3}, r: \text{km}, \lambda: \text{cm}$$

$r=1\text{km}$ とすればレーダ波長 0.86cm, 3.2cm の場合の C_n^2 の値はおおの 3.2cm $10^{-15}\text{cm}^{-2/3}$, 0.86cm $6 \times 10^{-15}\text{cm}^{-2/3}$ となり、 $r=500\text{m}$ ではほぼ $10^{-15}\text{cm}^{-2/3}$ 程度になるので一応検出可能な値となっている。



第11図 エンジェルエコー反射断面積の波長別分布

第11図は波長 3.2cm ドップラーレーダと 0.86cm ミリ波レーダで観測したエンジェルエコーのレーダ反射断面積の最大・最小値を示したもので、細い実線は直径 1mm の雨滴がレーダビームを満たした場合の値である。右端の点線は反射断面積と波長との関係を示す。 λ^{-2} , λ^{-4} はレーレ散乱を示しおののレーダビームを反射物体が満たさない場合と満たしている場合に対応し、細い実線は λ^4 に対応している。 $\lambda^{-1/3}$ の線は屈折率の変化によって

起る反射の場合で、観測値は λ^{-2} と $\lambda^{-1.3}$ の間にほぼ分布している。レーダ反射強度と波長との関係を求めることによって反射物体を明らかにすることが可能となる。しかし今回の解析は2種類の波長のみであったので、さらに詳しい関係を求めるため5cm, 10cm帯の波長を用いることが必要となる。2レーダによる反射断面積の値は Vrana (1961) の示した値とほぼ一致している。

5. 結語

晴天時にレーダで観測されるパルス状エンジェルエコーの発生条件について気象資料を用いて解析し、エコーの発生は日射量に関係し発生高度は日射量の増加に伴って上昇することが明らかになった。さらに逆転層の解消時間、水蒸気の鉛直分布の時間的変化等から乾いた熱対流の特性と似ている結果が得られた。

T.G. Konrad (1970) によれば、10cmレーダで観測されるパルス状エコーはその発生高度における気温、水蒸気量の変動とほぼ一致していることを示した。エンジェルエコーの反射機構を明らかにするためには、エコー発生高度における気温、水蒸気量、風の時間的変化とパルス状エコーの発生との関係がどのようになっているかを明らかにする必要がある。

今回の解析はまえがきで述べたように、午前中各高度におけるエンジェルエコーの発生しはじめる気象的条件について主として述べたものであるが、午後は発生数の変動が非常に大きい例がしばしば観測された。このような発生数の変動は地上風の風向・風速の変化に対応し小規模じょう乱の通過に原因するものと思われる。ときには目視による帯状に配列した雲の通過時にもエコーの変動が観測された。発生数の急激な増減は一定高度だけで

なくある層内で起っていることが新しい観測装置によって明らかになった。層の厚さは気象条件によって異なるがほぼ500m前後で水平の広がりも同じ程度である。これらの問題については今回5つの高度において同時観測を行なうための装置を試作したので、これらの装置による観測を続け、下層大気構造の研究のためのレーダ利用の可能性について検討を行なう予定である。

最後に、この解析に際しNHK川口塔の観測資料を提供して下さった気象研究所応用気象研究部第一研究室の方々に謝意を表します。

文 献

- 1) Atlas, D., 1964: Angels in focus. Proc. 11th Weather Radar Conf., p. 2.
- 2) Hardy, K. R., D. Atlas and K.M. Glover., 1966: Multiwavelength backscatter from the clear atmosphere. J. Geophys. Res., **71**, 7, p. 1537.
- 3) Hardy, K.R., and I. Katz. 1969: Probing the clear atmosphere with high power, high resolution radar. Proc. IEEE., p. 468.
- 4) Konrad, T.G., 1970: The dynamics of the convective process in clear air as seen by radar. J. Atmos. Sci. **27**, p. 1138.
- 5) Tatarski, V. I., 1961: Wave propagation in a turbulent medium. McGraw-Hill Book Company, New York.
- 6) Vrana, N., 1961: Some characteristics of radar angel echoes. Center for Radio Physics and Space Research Report No. 32, Cornell Univ., p. 29.
- 7) 柳沢善次, 1970: ミリ波レーダによるエンジェルエコーの観測(I). 天気 **17**, pp. 434-440.