

## 第8章 エンゼルエコーの観測\*

### 8.1 はじめに

晴天時に観測されるレーダエコーはエンゼルエコーと呼ばれ、近年高度1,500 m以下の境界層内に発生するエンゼルエコーの観測が盛んに行われている。

Hardy (1969)、Konrad (1970)、Rowland (1972)等は、これらの資料を用いて、晴天時における境界層内での地表面からの熱・水蒸気の鉛直輸送の機構について解析している。

柳沢 (1970、1972)は波長8.6 mmレーダで観測されるパルス状エンゼルエコーの発生数・発生高度の時間変化について調べ、各気象要素の時間変化との比較から、レーダ観測結果は、境界層内の熱・水蒸気の鉛直輸送と関係していることを示した。

このようなエンゼルエコーは海・陸風前線に伴って発生することも報告されている。Atlas (1960)は、波長1.25 cmのレーダを用い、海上から陸地の方向に移動している海風前線に伴うエンゼルエコーを観測し、前線の移動速度は、9 mile/hourであることを報告している。またMeyer (1971)は、Wallops島のJAFNAにある波長10.7 cmの高性能レーダ(出力3 MW)を用いて、海・陸風前線付近に発生する線状のエンゼルエコーについて三次元的な詳しい観測を行い、飛行機等による気象観測を同時に行って、海・陸風前線のモデル的三次元構造を示した。その外、Geotis (1964)による海・陸風に伴うエンゼルエコーの反射機構に関する研究等がある。ドップラーレーダを用いたエンゼルエコーの観測も報告されている。Battan (1963)、Lofgren (1960)等は、エンゼルエコーは1 m/sec程度の上昇・下降速度を持っている事を報告している。また、Frisch等 (1976)は、2台のドップラーレーダを用い、チャフをとばして境界層内晴天対流の風の場の鉛直構造について観測している。

著者等は、3 cm波のドップラーレーダを用いて晴天時のエンゼルエコーを観測して、境界層内の風の場、海風前線に伴う線状エコーなどについて調べた。またドップラーレーダを用いてトンボなど昆虫・鳥の観測なども行った。

### 8.2 電波屈折率が急変している層からの反射

#### 8.2.1 エンゼルエコーのレーダ観測

大気下層のエンゼルエコーは、電波屈折率が急変している高度2,000 m以下の境界層内で発生しているが、センチメートル波帯で電波反射を生じるためには、センチメートルオーダーの細かいスケールで、気温・湿度が変動していることが必要である。このような反射は、地表面近くの泡状の熱対

\* 柳沢善次：台風研究部

流によって起こると考えられており、理論的にも、観測によってもこの説はほぼ確認されている (Konrad, 1970)。

晴天時に 3 cm 波ドップラーレーダによる観測を行うと、暖候期には距離 10 km 以内に熱対流からの反射と思われるエンゼルエコーが観測される。このようなエンゼルエコーは早朝日出後 1 時間ぐらいで発生しはじめ、午後、発生数発生領域とも最大となり、夕方日没後減少して夜半にはほとんど消滅するが多い。このようなエンゼルエコーの反射強度は非常に弱く、かつ発生高度も地表面から高度 1,000 m 以内の場合が多いためグラウンドエコーとの区別が非常に難しい。したがってドップラー速度表示を用いることによって固定反射体との分離が容易となり、反射体が各高度の風で流されている様子を観測出来る。観測例を口絵写真 8.1 に示す。口絵写真 8.1 は江戸川の堤防上に設置した 3 cm 波ドップラーレーダで観測したエンゼルエコーのドップラー速度をカラーディスプレイに表示したものである。距離マーカー 2 km ごと、仰角 3.0 度で観測しているので、距離 2 km でのビーム高度は 105 m、4 km では 209 m となる。レーダサイトで観測したこの日の 18 時の地上風は東南東 3 m/s で、ドップラー速度では YEL(-) から SKY(+) の方向に 2~5 m/s の風が吹いていることになる。高度 100 m 付近では 10 m/s 近い東南東風がドップラー速度にあらわれている。

次に、気象研究所構内に設置したドップラーレーダで 1981 年 9 月 28 日に観測したエンゼルエコーから求めた風向・風速 (黒点) と気象観測鉄塔の高度 213 m で観測した風向・風速 (実線) との比較を図 8.1 に示す。図からわかるように、ドップラー速度から求めた風向・風速と鉄塔で観測した値とほぼ一致している。この日、天気は晴で、午前中から北西の弱い風が吹いていたが、15 時 37 分頃風速 10 m/s 程度の突風が吹き、16 時 45 分頃にはレーダサイトを海風前線が通過している。

図 8.2 は、気象研究所周辺の地形図である。地上風のデータ (図省略) をみると、海風前線はレーダサイトの北東 12 km の石岡を約 1 時間前の 15 時 42 分に通過している。この前線の移動速度は 13 km/hour となる。

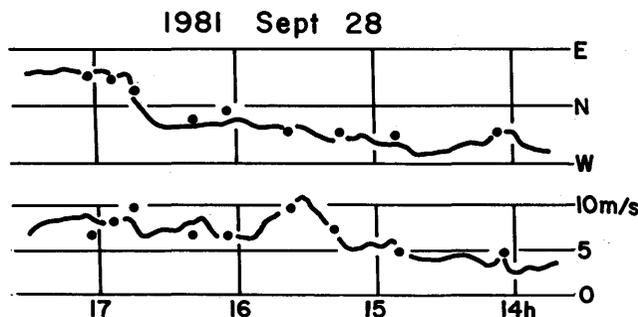


図 8.1 気象観測鉄塔の高度 213 m で観測した風向 (上)、風速 (下) の時間変化。  
黒点は、ドップラー速度から求めた約高度 200 m の風速と風向の値。

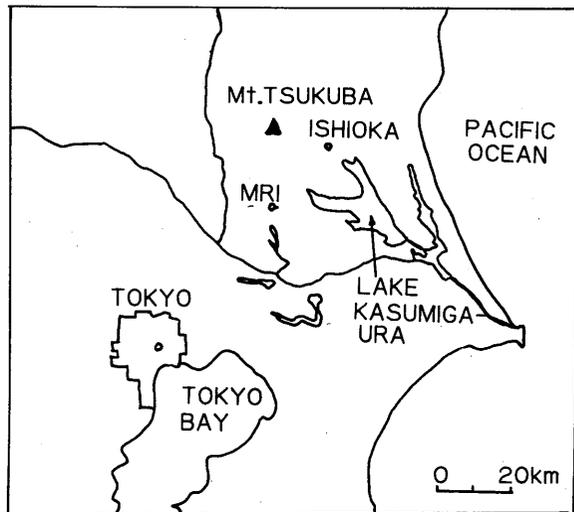


図 8.2 筑波周辺の地形図。

図 8.3 には、9 月 28 日 9 時の地上天気図を示した。関東地方は北東からの高気圧圏内にあつて一般に風の弱い気圧配置になっていた。

図 8.4 には 16 時 45 分頃レーダサイトを通過した海風前線に伴う線状エンゼルエコーのドップラー速度の時間変化を示した。エコー強度は弱いためほとんど線状の型としてあらわれていなかったが(図省略)、ドップラー速度で見ると、はっきりした線状エコーとしてあらわれている。図 8.4 から線状エンゼルエコーの移動速度を求めると 12 km/hour となり、前述の値と一致している。移動方向は北東から南西である。

この線状エコーがレーダサイトを通過した時の鉄塔の風データを見ると、図 8.1 に示したような風向の北西から北東への急変がおきている。また、気温下降、湿度増加などの前線通過時の特徴も鉄塔のデータにあらわれていた。

図 8.5 には、線状エコーの REI 観測結果をドップラー速度で示した。この図は線状エコーがレーダサイトを通過した、13 分後に観測したエコーの鉛直断面図である。距離 3 km 付近の線状エコーの部分の高度は 1,000 m 程度で、距離 1 km 付近の泡状エコーの高度は 500 m で線状エコーのそれに比べて低い。一般に、秋期の日中にあらわれている泡状のエンゼルエコーのエコー頂高度は 500 m 程度で、今回観測した線状エコーはその 2 倍程度エコー頂高度が高くなっていることがわかる。

### 8.2.2 エンゼルエコーの反射機構

センチメートル波帯のレーダで観測されるエンゼルエコーは、下層大気中に起る気温、水蒸気量の変動に伴う電波屈折率の変化に原因していることが明らかになっている。これらの気象要素の変動は大気の乱れとして取り扱われ、乱れと屈折率の変化との関係については、Tatarski (1961) などの理論があり、理論的にもほぼ説明されている。

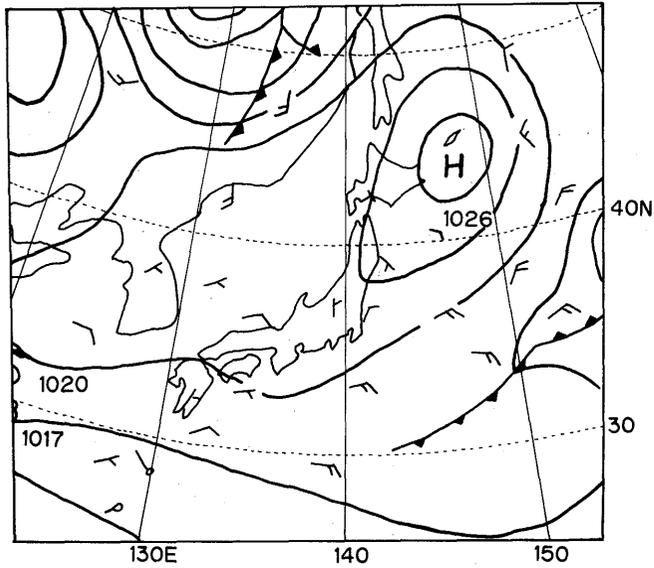


図 8.3 1981年9月28日09時の地上天気図。

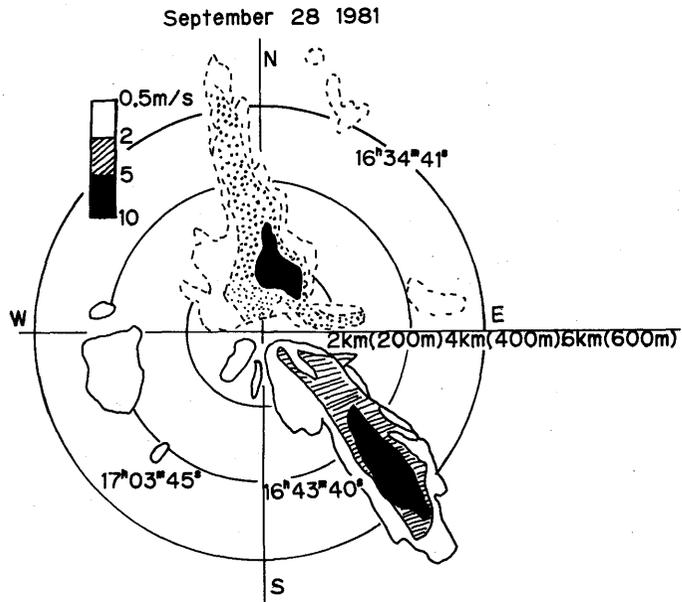


図 8.4 1981年9月28日に観測した線状エコーのドップラー速度表示によるPPI像の時間変化。括弧内の数字はビーム高度(m)を示す。実線はプラス域、点線はマイナス域を示す。

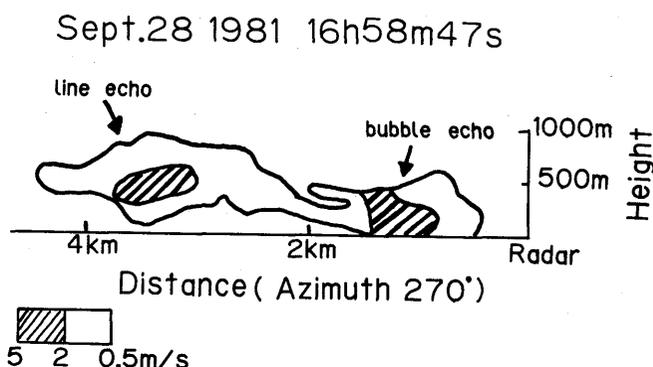


図8.5 REI観測によるドップラー速度表示の断面図。距離3km付近は線状エコーで、距離1km付近は泡状エコーである。

これらの理論で、第1に問題となるのは、使用されたレーダの波長と乱れの波数(K)との関係である。いま、使用した波長は3.1cmなので、この波長( $\lambda$ )に対する乱れの波数は、 $K \approx 4\pi/\lambda$  から  $4\text{ cm}^{-1}$  となる。大気中の最小の乱れの大きさ(L)は、理論的には  $L \approx 1\text{ cm}$  程度なので、この時の波数は  $K = 2\pi/L$  から  $6.3\text{ cm}^{-1}$  となる。したがって、レーダ波長に対する波数は乱れの最大波数より小さい値となり、理論的にも、屈折率の変化に伴うレーダ反射を観測できることになる。

次に問題となるのは、レーダの探知能力と反射体のもつ反射強度との関係である。一般に、乱流理論から求めたエンゼルエコーの反射強度の値は  $10^{-15}\text{ cm}^{-1}$  の前後に分布している。Hardy等の観測結果でも、この反射強度の値は  $10^{-14} \sim 10^{-16}\text{ cm}^{-1}$  の間に分布しており、ドップラーレーダは、距離5kmで反射強度  $10^{-15}\text{ cm}^{-1}$  程度まで探知できる能力を持っているので、エンゼルエコーの観測が可能である。

### 8.3 昆虫・鳥等による反射

昆虫、鳥などからのレーダ反射についても多くの観測例があり、これらのレーダ反射に必要な体の大きさや含水量等について調べられている。ただ、これらの反射体は形状が複雑で誘電率も一定でないので水滴のように理論的に反射断面積を求めることは困難である。

口絵写真8.2は、利根川堤防上に設置した3cm波ドップラーレーダを用いて観測した昆虫からのエコーのドップラー速度の1例である。1982年10月4日の昼間は5m/s前後の東寄りの風が吹き、口絵写真8.1に示したようなエンゼルエコーが観測されていたが、15時頃より風速が弱まるとともにエンゼルエコーも減少した。16時すぎには地上風は、ほとんど静穏に近い状態になり、口絵写真8.2に示したような点エコーが16時20分から17時10分頃までに観測された。口絵写真8.2のドップラー速度をみると、レーダに近づく風をあらわしている YEL ( $-2\text{ m/s} \sim -5\text{ m/s}$ ) とレー

ダから遠ざかる風をあらわしている SKY (+2 m/s~5 m/s) が、全方位に混在している。このことは、反射体が風に流されているのではなく、飛んでいることを示している。事実、地上風が静穏になると、レーダサイト付近に無数のトンボがあらわれ、堤防上は歩行困難になるほどである。レーダの空中線仰角 1.5 度で観測しているので、距離 15 km ではビーム高度は 400 m になり、昆虫が地表面から高度 400 m の層内で飛んでいることになる。17 時 30 分頃地上風が 3 m/s 程度になると、トンボも居なくなり、レーダ画面も口絵写真 8.1 に示したようなエンゼルエコーの画面となる。口絵写真 8.2 のようなドップラー速度は他の日でも数回観測しており、ほとんど 16 時から 17 時の間の地上風が静穏になる時間帯にあらわれている。その外、鳥の反射と思われるドップラー速度 10 m/s 前後の点エコーもしばしば観測しており、目視によって鳥を確認できた時もある。

Glover 等 (1966) は、表 8.1 に示したような特性をもつ虫などを空中に飛ばしてレーダ観測を行い、図 8.6 のようなレーダ波長別の反射断面積の値を求めている。

反射断面積は、波長 10 cm レーダでトンボ、密蜂で  $10^{-2} \text{cm}^2$  程度、3 cm 波では  $10^{-1} \text{cm}^2$  程度となり 1 匹の探知距離は 10 km 程度になる。鳥では 3 cm 波で  $1 \text{cm}^2$  程度の反射断面積となる。

図 8.6 から、反射断面積  $\sigma$  ( $\text{cm}^2$ ) とレーダ波長  $\lambda$  (cm) との間には、トンボでは  $\sigma = C\lambda^{-2}$  で、鳥では  $\sigma = C\lambda^{-3}$  の比例関係にあることがわかる。

レーダによる鳥、昆虫などの探知技術は各国で開発中であり、レーダ波の偏波面を変化できるレーダの利用なども今後検討する必要がある。

#### 8.4 まとめ

波長 3 cm のドップラーレーダを用いて観測した晴天時のエンゼルエコーについて解析した。外国でも、数年前からドップラーレーダを用いた観測が盛んに行われるようになってきた。ドップラーレーダを用いることによって、反射強度のみしか観測できなかった従来のレーダに比較し、観測精度の向上、情報の増大がもたらされ、利用面も広がってきている。すなわち、ドップラー速度データを用いることによって、グランドエコーは無くなり、エコーの移動速度、方向を即時に観測できるので、反射機構を調べる上で有効なデータであることがわかった。

ドップラーレーダデータと鉄塔の風データの比較をみても、面状エンゼルエコーの反射体は、風とともに移動し、鉛直方向の動きも非常に小さいと考えられる。このような観測結果を解析するこ

表8.1 昆虫・鳥の特性

種 類	羽の長さ (cm)	胴体の長さ (cm)	重 量 (g)	含 水 量 (%)
鷹	10.0	5.0	1.0~1.5	64.1
蛾	3.0	1.9	0.14	60.0
密蜂	1.0	1.5	0.08~0.11	66.3

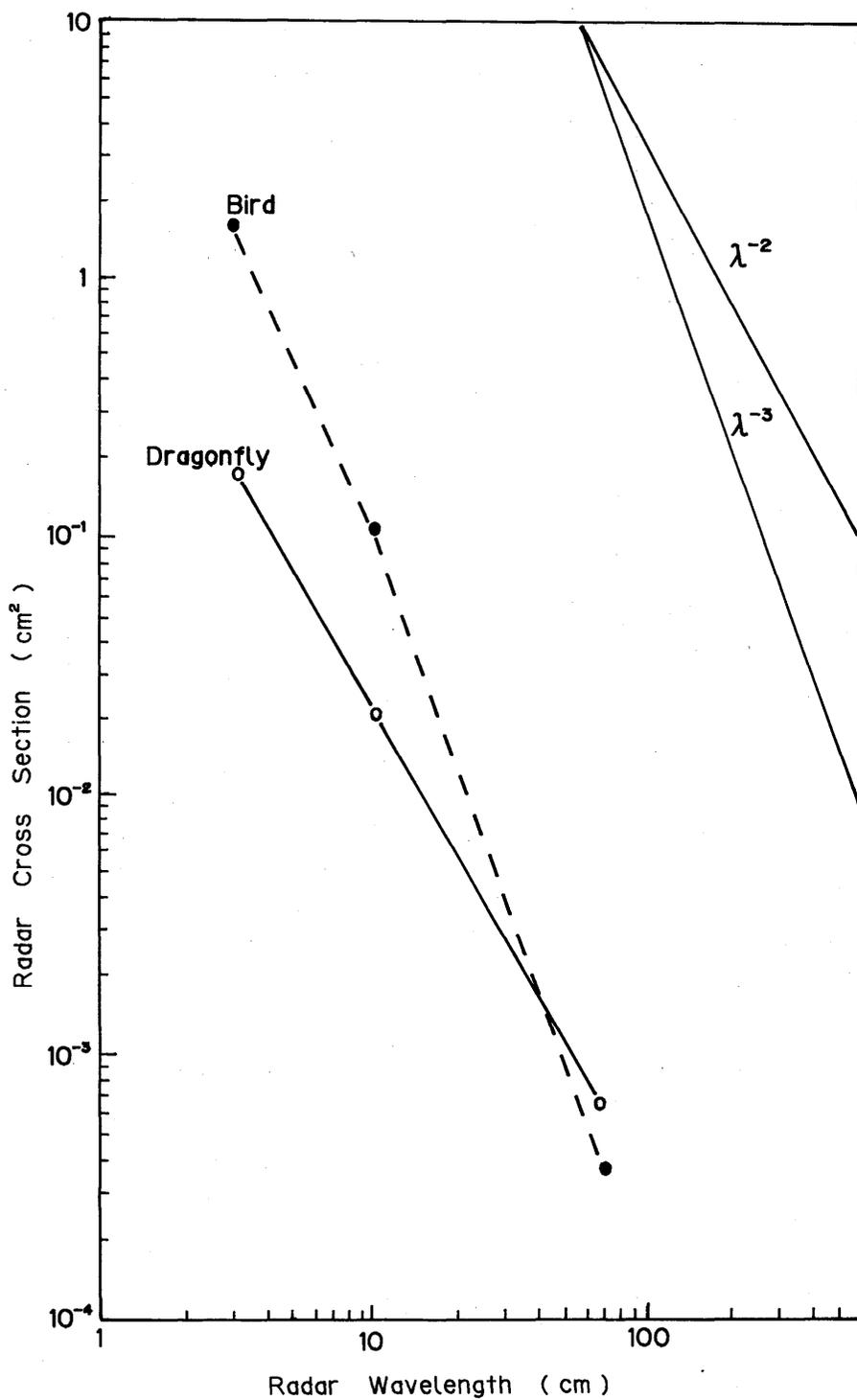


図 8.6 レーダ波長別であらわした昆虫類のレーダ反射断面積。

とによって、前に示した2種類の反射機構の解明が容易に可能となる。

事実、口絵写真8.1、8.2を比較すると、泡状熱対流からの反射と昆虫、鳥などからの反射は明らかに異なることがわかる。境界層内の泡状熱対流からの反射は、前述したように日射量、気温とよい相関のあることがわかっているが、ドップラーレーダ観測結果などからも、電波屈折率の急変によって反射が生じていると考えるのが妥当であろう。

世界各国の研究によって、昆虫、鳥などのレーダ反射断面積の大きさもほぼわかってきており、レーダ観測が盛んに行われている。今後、これら昆虫類の行動を調べるための有効な観測手段としてレーダ観測が利用されてくると思われる。

### 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., 309-315.
- Frisch, A. S., R. B. Chadwick., W. R. Moninger. and J. M. Young, 1976: Observation of boundary-layer convection cells measured by dual-Doppler radar and echosonde and by microbarograph array. Boundary-Layer Meteor., 10, 55-68
- Geotis, S. G., 1964: On sea breeze "Angles", World Cont., Radio Met. Inc, 11 the Weather Radar Conf. 6-9
- Glover, K. M., K. R. Hardy, T. G. Konrad, W. N. Sullivan, and A. S. Michaels, 1966: Radar observations of insects in free flight. Science, 154, 967-972
- Hardy, K. R., and I. Katz., 1969: Probing the clear atmosphere with high power, high resolution radar. Proc. IEEE., 57, 468-480.
- Konrad, T. G., 1970: The dynamics of the convective process in clear air as seen by radar. J. Atmos. Sci., 27, 1138-1147.
- Lofgren, G. R., and L. J., Battan, 1969: Polarization and vertical velocities of dot angel echoes. J. Appl. Meteor., 8, p. 948.
- Meyer, J. H., 1971: Radar observations of land breeze fronts, J. Appl. Met., 10, 1224-1232.
- Rowland, J. R., 1972: Intensive probing of clear air convective fields by radar and instrumented drone aircraft. Proc. 15th Radar Meteor. Conf., 321-326
- Tatarski, V. I., 1961: Wave propagation in a turbulent medium. McGram-Hill Book Company, New York.
- Yanagisawa, Z., 1970: Observation of angel echoes by 8.6-mm radar. Proc. 14th Radar Meteor. Conf., 79-81.
- Yanagisawa, Z., 1979: Observation of angel echoes by 8.6-mm radar. Pap. Met. Geophys., 30, 111-121
- Yanagisawa, Z., 1978: Radar observation of sea breeze fronts. Proc. 18th Radar Meteor. Conf., 45-48