

夏季に発生するエンゼルエコーについて*

長谷川 隆 司**

要 旨

夏季土佐湾に発生したエンゼルエコーを室戸岬レーダーでとらえた。エンゼルは夏型の気圧配置の午後には発生し、日没後まで存在した。エコー頂高度は1.0~2.5 kmで線状(波状, ひも状)および層状である。エンゼル発生気象条件は、(1) 最高気温が高い、(2) 海陸風が発達している、(3) 下層での気温の逆転がある、(4) 大気のごく下層が湿っており、湿度、大気屈折率に不連続層があることである。

1. はし が き

気象レーダーで探知される降水エコーに対して、降水その他の反射物体が存在しないのに、レーダーでエコーが観測されることがある。その形状は小さい斑点の集まり、層状にぼやけたもの、線状(波状)になっているものなどがあり、これらはエンゼルエコーとして分類されている。このエコーは強度が一般に弱く、高度は2 km以下のものが多く、レーダーサイトから比較的近距离にしか探知されない。

エンゼルエコーは発生頻度が少ないために、今までに調査された例は少なく、その発生原因もまだはっきりと解明されていない。鳥や昆虫の群による散乱であるという例もあるが、現在では、大気の屈折率の垂直分布に不連続層があるというのが有力な原因とみなされている。ここでは、室戸岬レーダー(出力600 kw, 波長10.9 cm)でとらえた夏季における5例について考察した結果をのべる。

2. エコーの特徴

観測されたエコーの特徴をまとめたのが第1表である。エコーが観測された時刻はいずれも午後(12~15時)で継続時間は消滅した時刻がはっきり確認されていないので不明であるが、いずれも17時の観測時にはまだ存在している。例4の場合には、22時すぎに消滅していることから、かなり長時間存在しているとみられる。発生場所はいずれも土佐湾内で、海岸線から比較的近い所に現われている。

エコーの形状は粟状エコーが群となって線状にみえるもの(第1-a図)、曲がりくねった数本のエコーが波状になったもの(第1-b図)、粟状のエコーで見かけ上は層状エコーにみえるが、よくみると何本かの線エコーの形態を示しているもの(第1-c図)、などでいずれも海岸線にほぼ直角に位置している。さらに、レーダーサイト付近には層状のエコーがみられる。(第1-a, b図) エコー頂高度は海拔1,500m前後で、エコーの動きには一貫したものは認められない。線状エコーの場合でも両端の動きは異ってみられるし、層状エコーの場合にはよ

第1表 エンゼルエコーの特徴

発生年月日	発時 生刻	エコー頂高度(km)	エコーの形状	ダクトの有無および存在場所
41. 7. 19	14h ~	1.0 ~ 1.4	線状, 層状	強ダクト
7. 20	12h ~	1.0 ~ 1.9	波状, 層状	並ダクト
7. 21	12h ~	1.1	線状	強ダクト
42. 8. 23	14h ~ 22h	1.5 ~ 2.5	ひも状, 層状	強ダクト
8. 29	15h ~	?	ひも状, 層状	?

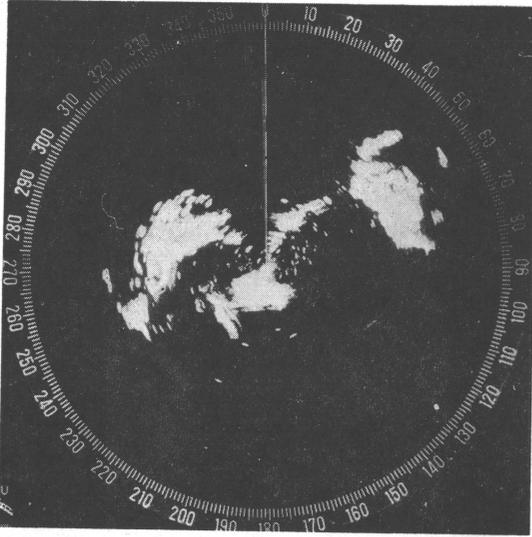
宮崎方面

* On the Angel Echo Observed over the Tosa-Bay in Summer

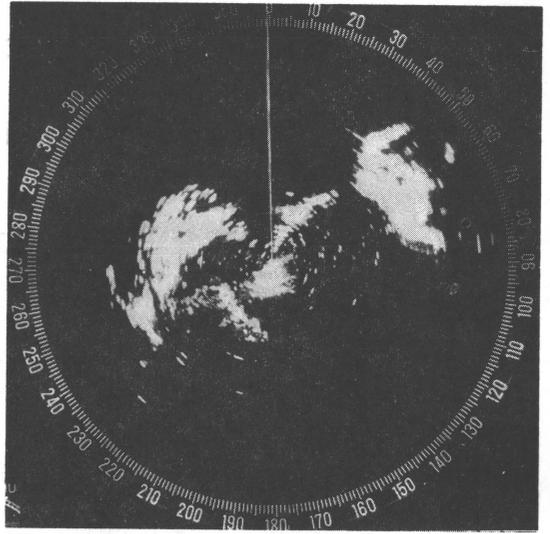
** R. Hasegawa 広島地方気象台

—1969年6月20日受理—

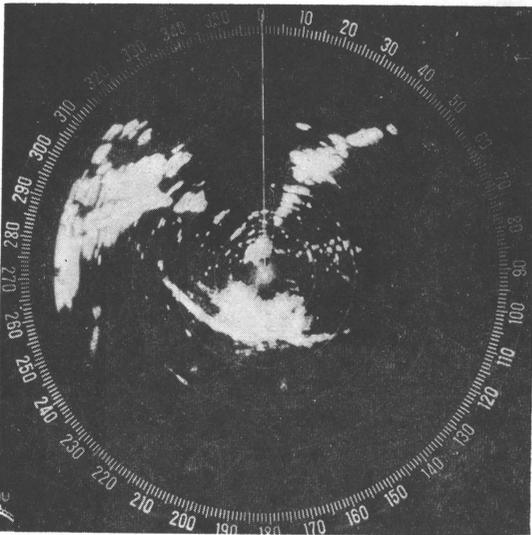
—1970年7月4日改稿受理—



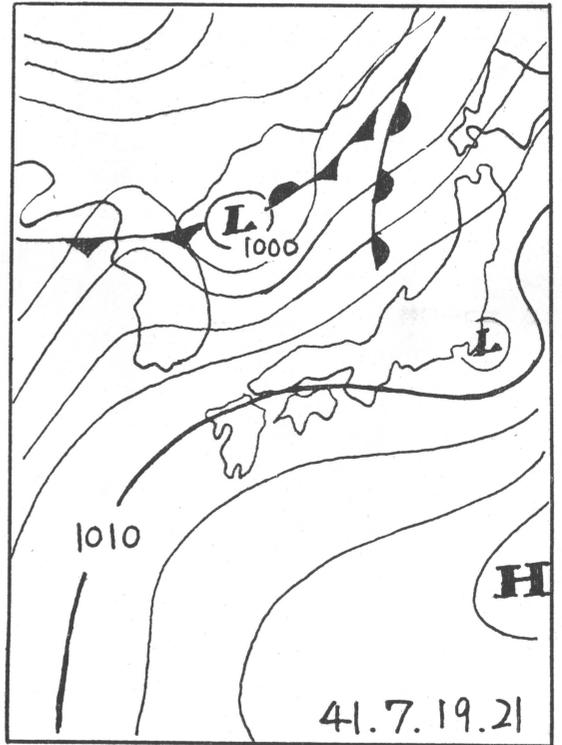
第1-a 図 粟状になった線状エンゼルと中心付近の層状エンゼル
41年7月19日14時00分, レンジマーク50km
毎, 仰角0度



第1-b 図 波状エンゼルと層状エンゼル
41年7月20日12時10分, レンジマーク50km
毎, 仰角0度



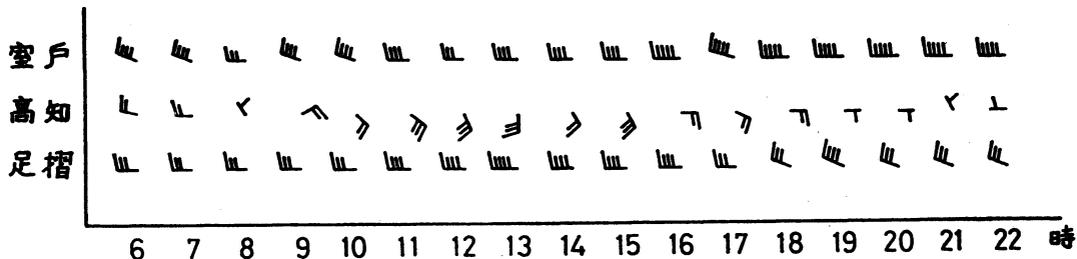
第1-c 図 線状エンゼル
41年7月21日13時49分, レンジマーク20km
毎, 仰角1度



第2 図 地上天気図

41.7.19.21

り at random である。これらのことからみてエンゼルエコーの場合には降水エコーのようにその運動がある高度の上層風に支配されるようなことはないと考えられる。なお、同時に存在しているが線状(ひも状)エコーとレーダーサイト付近の層状エコーとはみかけ上多少特



第3図 土佐湾域各地の毎時風向, 風速 (41年7月9日)

性が違って見える。

3. 地上気象状況

(1) 地上天気図

エンゼルの現われた日の地上天気図をみるといずれの場合でも西日本地方は太平洋高気圧におおわれており、気圧傾度はゆるやかである。(第2図)

(2) 気温

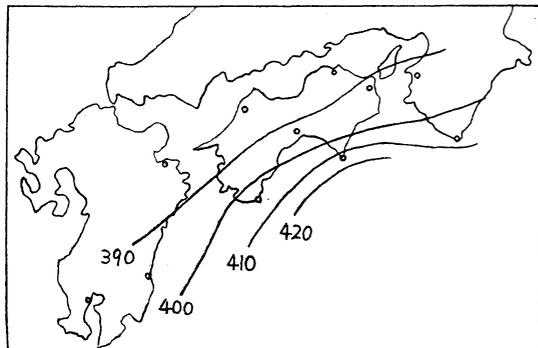
(1)で示されたように、いわゆる夏型の気圧配置のため、気温の日変化も典型的なもので、特に変わったものではないが、最高気温が非常に高いが目立つ。例えば42年8月24日の場合、高知で35.0°C、中村で35.6°Cになっている。

(3) 地上風

土佐湾域の地上風の時間変化をみると、室戸、足摺では終日西寄りの風がやや強い(5~10 m/s)。一方、高知では8時頃を境として西寄から南分を持った東寄の風になり、また21時頃には西寄の風に戻っている。これは海陸風が発達しているとみてよいであろう。(第3図)

(4) 大気屈折率平面分布

大気の屈折率 N^* を求め、その平面分布を描いてみると第4図のようになり、太平洋岸が大きく、陸地に近づ



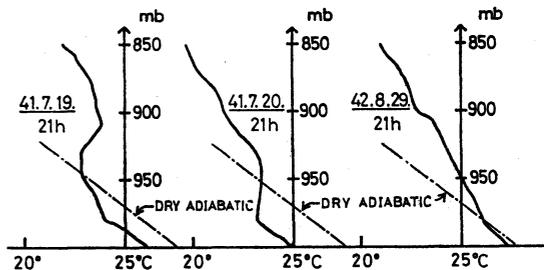
第4図 大気屈折率平面分布 (41年7月20日21時)

くにつれて小さくなっている。* 4.(2)参照。

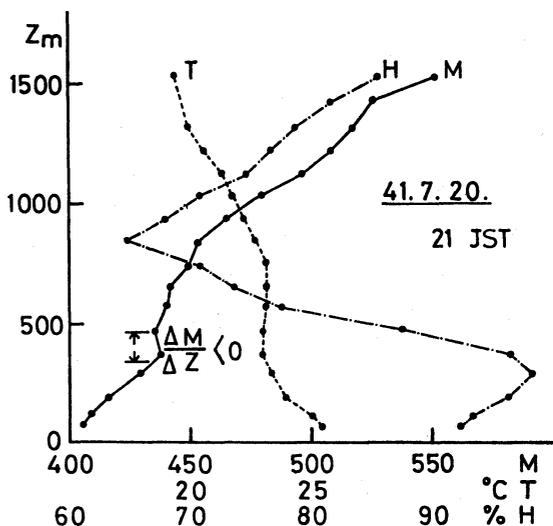
4. 高層気象状態

(1) 気温, 湿度の垂直分布

潮岬における状態曲線(第5図)をみると、ごく下層の地上~970 mbが不安定となっている。さらに第6図にて詳しく調べてみると、5例中4例については気温の



第5図 潮岬におけるエマグラム



第6図 潮岬におけるゾンデ資料の垂直分布
M: 修正屈折率, T: 気温, H: 湿度

逆転があり、その高度は1,000m以下の所でおきている。次に湿度の垂直分布をみるといずれの場合もごく下層が湿っており、500m付近を境にしてそれよりも上層では急激に乾燥している。この高度はのちに述べるM不連続層にあたっている。

(2) 大気の垂直屈折率分布

電波が大気中を通過する場合、大気成層状態すなわち大気屈折率分布によって電波は曲げられる。大気と屈折率Nの間には次の実験式が知られている。

$$N = (n-1) \times 10^6 = \frac{79}{T} \left(P + \frac{4,800}{T} e \right) \quad (1)$$

ここに、n：電波屈折率

P：気圧 (mb)

T：絶対温度 (°K)

e：水蒸気圧 (mb)

Tは高さとともに比較的ゆっくり減少するのに対し、Pおよびeは高さとともに急速に減少する。

さらに、電波の屈折率の垂直分布を知るために修正屈折率Mが使われる。

$$M = N + \frac{Z}{a} \times 10^6 \quad (2)$$

$$= \frac{79}{T} \left(P + \frac{4,800}{T} e \right) + \frac{Z}{a} \times 10^6 \quad (3)$$

$$= \frac{79}{T} \left(P + \frac{4,800}{T} e \right) + 0.157 Z \quad (4)$$

ここに、a：地球の半径

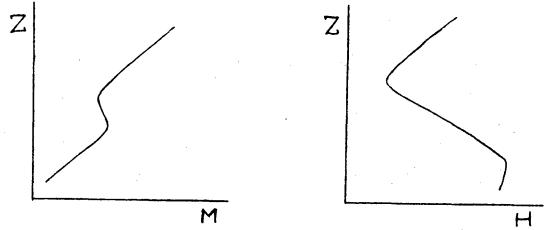
Z：地上高 (m)

Mは標準大気内では高さとともに増加する。第6図に潮岬のゾンデ観測からえられた修正屈折率Mの垂直分布に不連続層がみられるが、これをまとめてみると第2表のようになる。

Mの不連続層はその日の気象条件（主に水蒸気圧）によって異なるが、いずれにしても大気はかなり下層（200～1,000m）において、Mの逆転する層（その厚さ100～300m）がある。 $\Delta M/\Delta Z = -0.020 \text{ m}^{-1}$ 程度のごく小さい量であるが、この層は大体、湿度不連続高度と気温の

第2表 大気成層状態

発生年月日	Mの逆転層とその厚さ(m)	$\Delta M/\Delta Z$ (m^{-1})	湿度不連続高度(m)	気温逆転高度(m)
41. 7. 19	610～940(330)	-0.020	750	750
7. 20	350～470(120)	-0.016	290	370
7. 21	200～300(100)	-0.016	210	210
42. 8. 23	630～770(140)	-0.027	580	—
8. 29	360～590(230)	-0.019	400	—



第7図 エンゼルエコー発生の際のM, HとZのモデル図、左：Z-Mモデル図、右：Z-Hモデル図

逆転する高度とに相当している。第6図および第2表からエンゼル発生の際のM, HとZのモデル曲線を描いてみると、第7図のようになる。このM分布はいわゆるダクト離地S型と同類のものともみなされる。

5. エンゼル発生気象条件と原因

以上の考察からエンゼルが夏季に発生するための気象条件をならべてみると次のようになる。

(1) 太平洋高気圧におおわれた夏型の気圧配置のときである。

(2) かなり地上気温が高いときで、大体最高気温の出る頃に発生する。

(3) (土佐湾に) 海陸風が存在する。

(4) 大気のごく下層が湿っており、500m付近を境にして湿度の不連続層がみられる。

(5) 気温の逆転がみられる。

(6) 大気屈折率に逆転層がみられ、その厚みは100～300mで、高さは200～1,000mの比較的低い層である。

エンゼルエコーは同時にダクトエコーも共存しているが、第7図からも考えられるように、これはいわゆる沈降性ダクトと同類のものともみられる。D.B. Rai (1964) はエンゼル発生はラジオダクトがレーダーエネルギーをtrapすることにあり、大気屈折率が不均一になりやすい海面上にその現象が顕著になるとのべているが、筆者はエンゼル発生の原因を次のように考えた。すなわち、太平洋高気圧圏内で、沈降に伴う空気は非常に乾燥しているが、これが日射の強い日中に蒸発の盛んな海面に近づくると下層が多湿となって不安定化し、上昇気流となるが上部を逆転層でおさえられる。これに加えて海陸風による気流の混合が下層で乱流現象を生じていると考えられる。そして下層が顕著に多湿となり、湿度の不連続が生じ、電波の大気屈折率が不連続となり、レーダー電波を異常散乱することによりエンゼルが発生すると考えられる。

なお、この調査は昭和42年度四国地区研究会で発表し

たものに若干の検討を加えたものである。終りにこの調査にあたり御指導いただいた柳島前室戸岬（現宇和島）測候所長、中島室戸岬レーダー係長、御校閲いただいた北観測課長に感謝の意を表します。また御多忙の所資料を送っていただいた鹿児島、潮岬、高知、清水、足摺、中村の各気象官署の方々にお礼申し上げます。

参考文献

Hans Ottersten, 1964: Occurrence and Characteristics of Radar Angles Observed with a Vertically-Pointing Pulse Radar, Proc. 11 th Weather Radar

Conf.

- 春日 信, 1965: 海風によるエンゼルエコー, 天気, 12, 51-54.
 小花隆司, 1968: レーダーで探知された晴天気中の逆転層, 天気, 15, 463-464.
 小花隆司, 1969: 風向に並行する多数の線状エンゼルエコー, 天気, 16, 66-73.
 大貫益夫, 1958: レーダーに現われた異常伝播, 研究時報, 10, 517-524.
 D.B. Rai, 1964: A Theory of Offshore Radar Angel, Proc. 11 th Weather Radar Conf., 28-33.
 当舎万寿夫, 1955: 関東地方の異常伝播について, 研究時報, 7, 446-454.

日本気象学会誌

気象集誌

第 II 輯 第 48 卷 第 6 号 1970 年 12 月

- 荒井 康: 超長波の統計的研究……………469—478
 松本 誠一・吉住禎夫・竹中衛夫: 梅雨前線とこれに付随する
 下層大気中の中間規模擾乱の構造……………479—491
 佐々木義和: 大気中の細胞状対流に及ぼす境界層の熱学的な
 効果について……………492—502
 時岡 達志: 非地衡風・非静力近似下の傾圧モデルの不安定……………503—520

要報と質疑

- 山崎 武・孫野長治: 雲の全天写真の歪の簡単な除去方法……………521—523
 新田 勲: 熱帯擾乱の有効位置エネルギーの成生と運動エネルギー
 への変換……………525—528
 正誤表……………