

5.6 cm 波レーダによる海風前線の観測¹

柳 沢 善 次** 神 林 慶 子*** 桜 岡 勉****

要 旨

仙台管区気象台の 5.6 cm 波気象レーダを用いて、エンゼルエコーの観測を実施し、仙台の北から北東の平野部に発生する、線状のエンゼルエコーと海風前線との関係について解析を行なった。

晴天時にレーダ観測を行なうと、午前中は、広い地域に面状のエンゼルエコーが観測され、正午過ぎには、仙台の北東方向に線状エコーが現われ始める。この線状エコーは、毎時 10 km 前後の速度で北西に移動し、夕方、内陸に入って消滅する。

この線状エコーが通過する際の、各気象観測所の気象要素の変化を見ると、気温下降、湿度上昇、風向の変化など、海風前線の通過する時の現象と一致している。

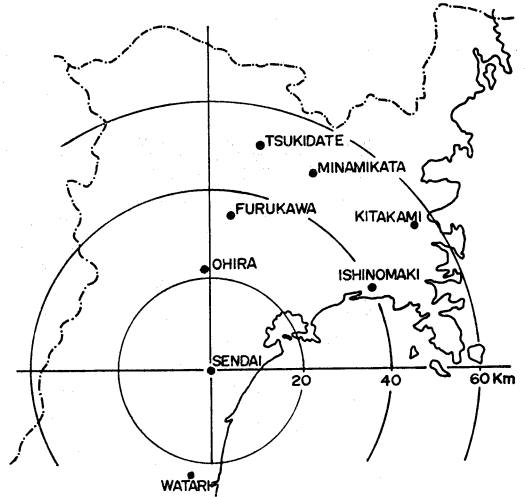
このようなレーダ観測から、海風前線の発生、移動や前線の 3 次元構造を調べる事が可能となる。今回の観測から、前線の高度は 1 km 以下で、水平幅平均 5 km の線状構造となっていることが明らかになった。

1. まえがき

晴天時に、mm 波帯から 10 cm 波帯のレーダを用い、地表面からの熱・水蒸気の鉛直輸送や海・陸風前線に原因して発生するエンゼルエコーについての報告が多く発表されている。筆者等 (1972, 1976) は、8.6 mm 波レーダで観測されるパルス状エンゼルエコーの発生数・発生高度は、境界層内の熱・水蒸気の鉛直輸送に関係し、海風前線の通過時には急激に発生数が増加し、発生高度も上昇することを示した。このように、海・陸風前線に伴って発生するエンゼルエコーの観測例は、Atlas (1960), Geotis (1964), Meyer (1971) 等の報告がある。

5 cm 波レーダを用いた場合に、海風前線に伴ってエンゼルエコーがどのように現われるかを調べるため、昭和 49 年より 3 年間、仙台レーダを用いて特別観測を実施した。

今回の解析は、平野部に発生するエンゼルエコーについて、面状から線状に変化する過程での地上風との関係、線状エコー通過時における地上気象要素の変化など



第 1 図 レーダ観測地域と気象観測所配置図。

について行なった。

2. 発生域と発生の気象条件

午前中に現われる面状のエンゼルエコーの発生域は、ほぼレーダ距離約 40 km 内の全域（陸上のみ）に分布しているようであるが、地形エコーなどの影響から、最もはっきり現われる区域は平野部である。また、線状エコーもこの地域に最も多く観測される。仙台レーダの場合のエンゼルエコーの最大探知距離は、約 50 km である。

解析を行なったエコー発生域と気象観測所の位置を第

* The Observation of Sea Breeze Front by a 5.6-cm Radar.

** Z. Yanagisawa, 気象研究所台風研究部

*** N. Kanbayashi, 気象研究所台風研究部 (現気象庁測候課)

**** T. Sakuraoka, 仙台管区気象台観測課 (現東京管区気象台技術課)

—1978年6月29日受領—

—1978年10月25日受理—

1図に示す。気象解析は、仙台管区気象台、石巻測候所のほか、大衡、古川、南方、築館、北上、亘里の各観測所の資料を用いて行なった。

エンゼルエコーの観測される日は、東北地方が高気圧におおわれて日射が強く、日中、内陸部の気温が上昇して海風が発達するような気象条件の時に多い。季節的には7～9月の夏季に集中し、春の季節には少ない。

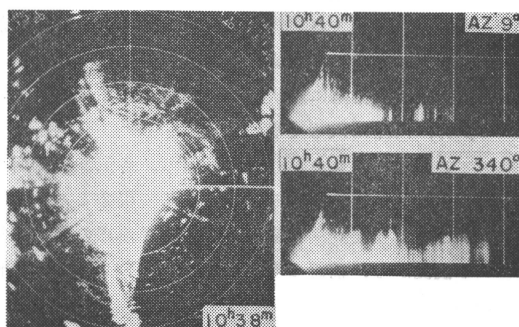
3. エンゼルエコーの特徴

5.6 cm 波レーダによるエンゼルエコーの観測によると、朝9時頃より面状エコーが現われ、地上風が弱い時は濃淡のはっきりした泡状や小さい団塊状のエコーとなり、地上風が強い時は一様なパール状エコーとなることが多い。エコー頂高度は1 km 以下で、移動は北から南の場合が大部分で、地上風とはほぼ一致している。第2図に面状エコーの観測例を示した。

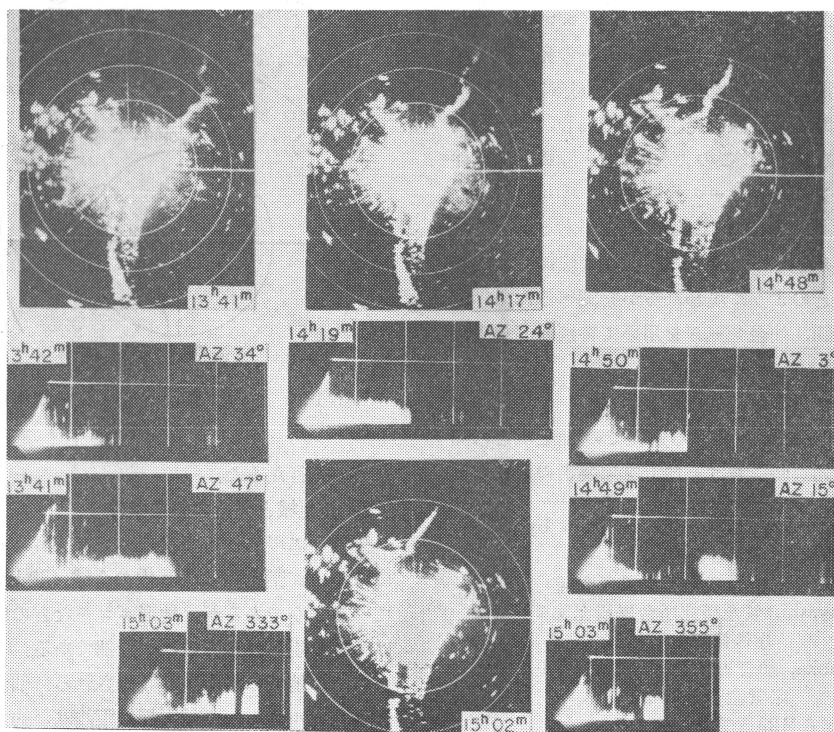
線状エコーは、昼頃から塩釜-石巻の海岸線に沿って発生し、発生後徐々に北西方向に移動し始める。発生初期は移動速度5 km/hr 程度であるが、その後10 km/hr 程度にまで速度を早めて移動することが多い。エコー頂高度は約1 km 程度で、面状エコーに比較して多少高く

なっている。第3図は線状エコーの観測例である。

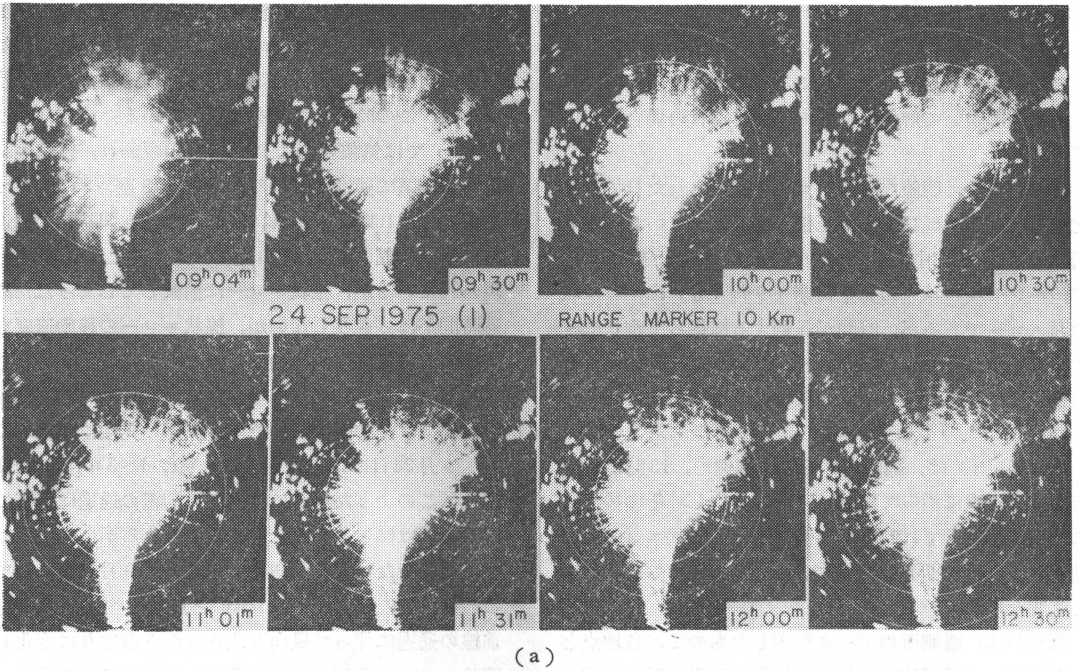
7月末から8月の、最高気温が30°C 以上になるような真夏日には、仙台の北10 km 付近に線状エコーを観測することがある。この線状エコーの移動速度は約5 km/hr と非常に遅く、仙台の北20 km 付近の丘陵地帯に達すると、線状エコーの近傍で積雲型エコーの発生を観測したこともある。



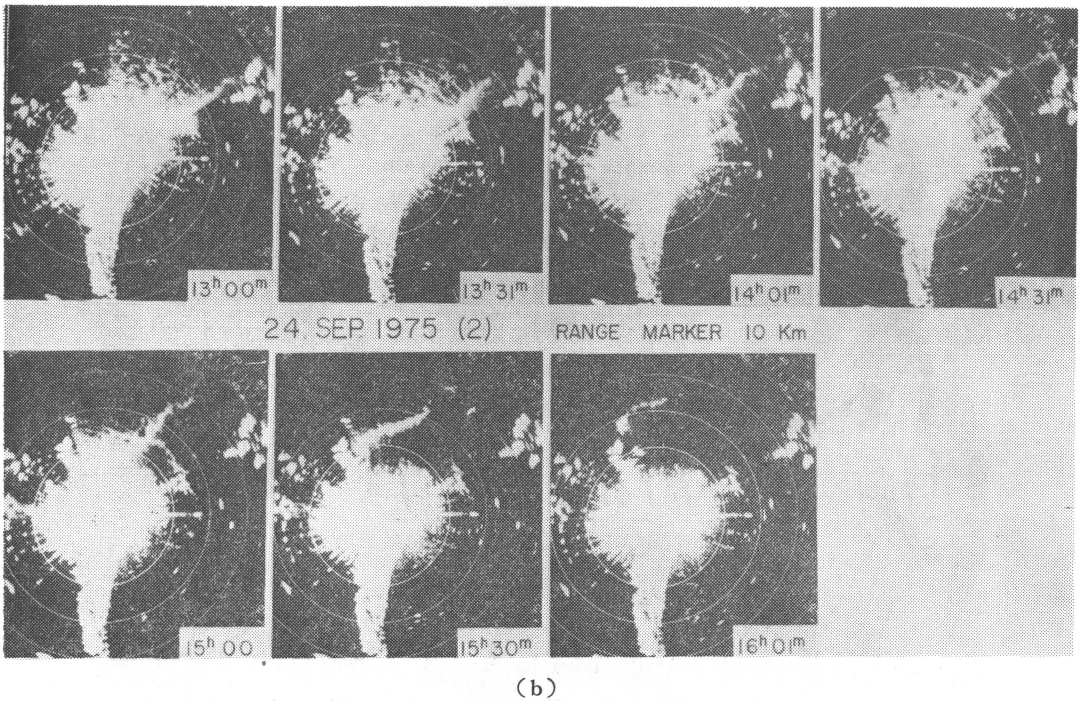
第2図 1975年9月12日に観測した面状エコーのPPI像(距離マーカー10 km)とPHI像(高度マーカー2.5 km)。



第3図 1975年9月28日に観測した線状エコーのPPI像とPHI像。



第4図(a) 1975年9月24日午前に観測した面状エコーの時間的变化.



第4図(b) 第4図(a)と同じ日の午後に観測した線状エコーの時間的变化.

4. 線状エコーの解析

5.6 cm 波レーダで観測される線状エコーと海風前線との関係を見るため、第1図に示した観測点の資料を用い、数例について解析したので、9月24日の場合について次に示す。

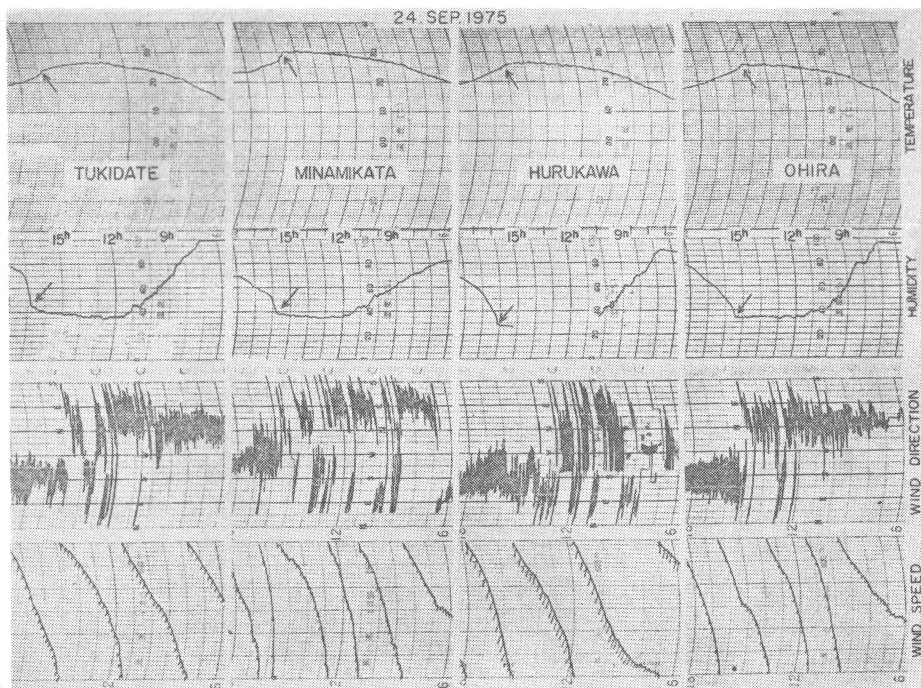
9月24日は、明瞭な線状エコーの観測された日で、東北地方は東西に延びる高気圧帯におおわれていた。第4図(a)は、午前中面エコーの観測されたことを示す図で、エンゼルエコーの発生初期(9時4分)はペール状の面エコーであるが、時間が経過するに従って泡状に変化している。これらの面エコーは北から南に移動し、その移動速度は2~4 m/sec 程度で地表付近の風と一致していた。

第4図(b)は、線状エコーの観測例で、13時に北東方向の海岸線に沿って線状エコーが発生し、その後徐々に北西に移動して16時過ぎに消滅した。線状エコーの移動速度は発生初期 8 km/hr で、15時頃からは 15 km/hr と速度を増している。

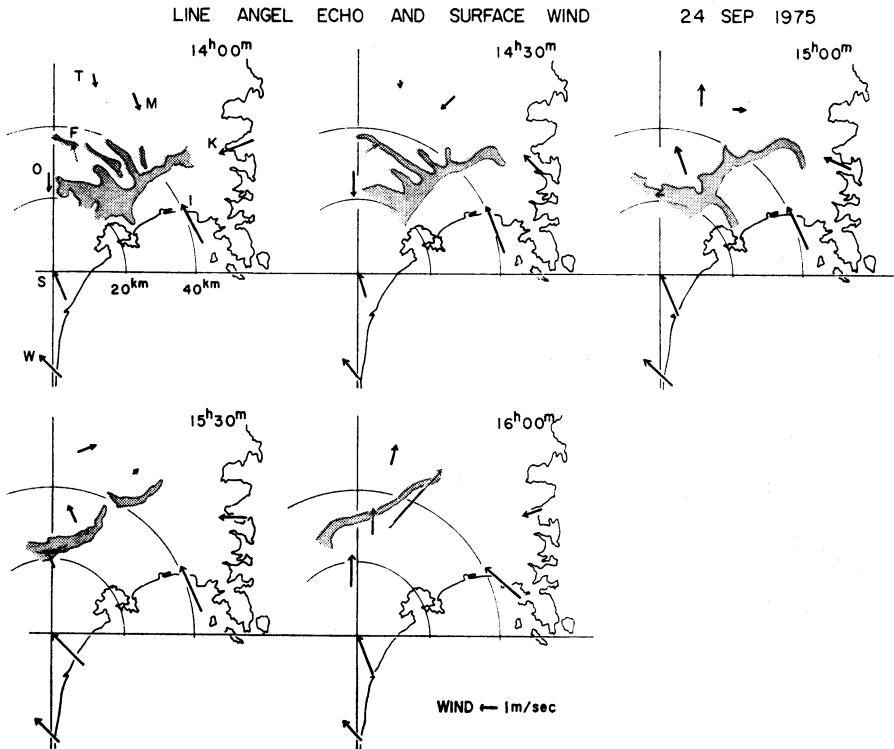
第5図は、観測所のデータを示したもので、各地点とも海風前線の通過時に現われる気温の下降、湿度の増加が明瞭に記録されている。大衡(方位351度、距離 22 km)

では、15時20分頃気温、湿度の変化と、地上風も北風から南風に変化して風速も増加し、海風前線通過時の気象変化が明瞭に現われている。第4図(b)に示した線状エコーは、この時刻に大衡を通過している。南方(30度、50 km)では気象変化は15時50分頃現われ、線状エコーも同時刻頃に通過している。古川(8度、35 km)では気象変化は16時頃現われ、線状エコーも同時刻に通過している。築館(13度、52 km)では気象変化は16時50分に現われているが、線状エコーは消滅してしまったため通過時間がはっきりしないが、線状エコーの移動速度を考慮するとほぼ同時刻に通過したことになる。

第6図は、線状エコーの移動に伴う地上風の変化を示した図で、図中観測所の位置は矢印の先端に対応している。9月24日は、内陸部の地上風は1~3 m/sec 程度で弱く、このような場合には、海風前線の通過に伴って気温、湿度ははっきりした変化が現われるが、地上風の変化は明瞭でない場合がある。第7図は9月14日の例で、この日は地上風が3~5 m/sec と比較的強い日で、海風前線の通過に伴って風向も北寄りから南寄りに変化し、線状エコーの北側と南側で明瞭な風向の違いが現われている。



第5図 1975年9月24日の、気象観測所 築館、南方、古川、大衡における、気温、湿度、風向、風速の自記記録。矢印は海風前線の通過した時間。



第6図 1975年9月24日に観測した線状エコーの移動に伴う地上風の変化。

T: 築館, M: 南方, K: 北上, F: 古川,
O: 大衡, I: 石巻, S: 仙台, W: 亶理。

このような気象要素の変化と線状エコーの移動の解析から、5 cm 波レーダで観測される線状エコーは、海風前線付近で起きている大気の乱れからの反射であることが明らかになった。

5. 地上気温分布

晴天時のエンゼルエコーの発生は、日射量に関係し、気温が高くて変動の大きいほど、エンゼルエコーも活発であることが明らかになっている。エンゼルエコーの発生と地上気温との関係を見るため、観測地域内の地上気温分布を調べた。しかし、気温の観測は、大部分の観測所で毎日9時1回の所が多く、そのほか日最高気温値があるのみである。

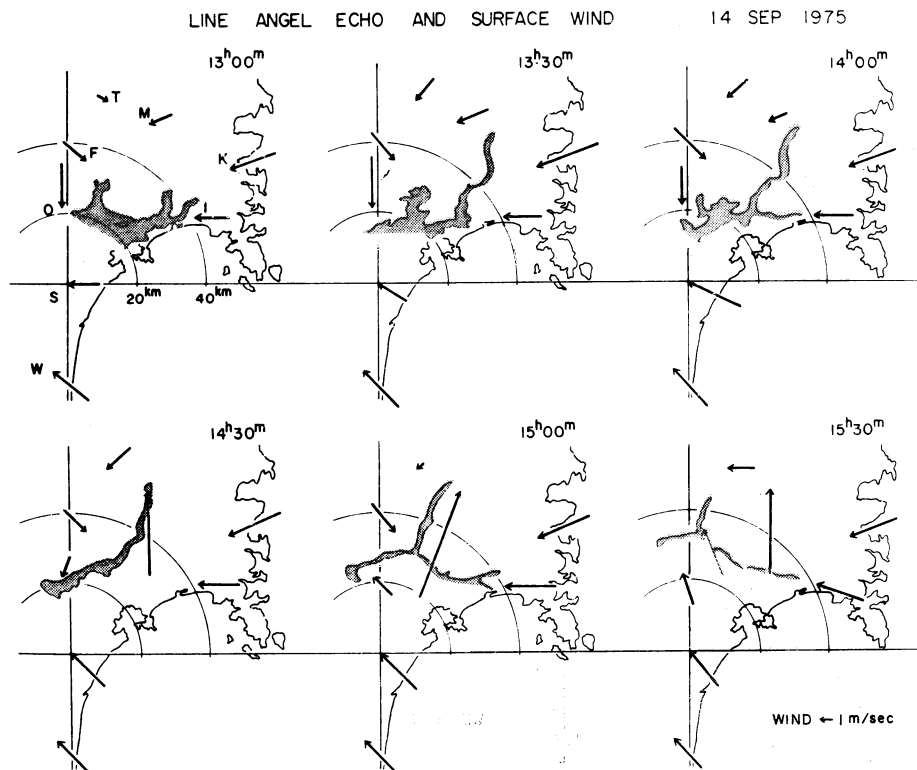
第8図には、9時の気温 (T_9)、日最高気温 (T_{max})、昇温値 ($T_{max}-T_9$) の分布を示した。9月14日、24日は、代表的な海風前線に伴う線状エコーの観測された日で、エコーの発生域は、日最高気温の高い地域に一致し、昇温値も大きい地域となっている。9月24日にはっきりし

た特徴が現われている。天気図から見ると、24日はほぼ快晴で日射が強く、地表面付近の熱対流が活発であったことが推定される。この日の午前中の面状エコーの分布(第4図(a))を見ると、北側20~30 kmの範囲には比較的強い面状エコーが観測されたが、9時の気温の低い北東30 km付近にはエコーは現われない。しかし、気温が上昇するに従ってエコーも広がり、11時頃には、逆にこの地域が強いエコー域となっている。

6. 考察

波長 mm 波から cm 波帯のレーダで観測されるエンゼルエコーは、一般に、下層大気中に起こる気温、水蒸気量の変動に伴う電波屈折率の変化に原因することが明らかになっている。これら気象要素の変動は、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、Tatarshi (1961) などの理論があり、理論的にはほぼ説明されている。

これらの理論で、第1に問題となるのは、使用された



第7図 1975年9月14日に観測した線状エコーの移動に伴う地上風の変化。

レーダの波長と乱れの波数との関係である。使用した気象レーダの波長は5.6 cmであるので、この波長(λ)に対する乱れの波数(K)は、 $K \approx 4\pi/\lambda$ から 2.2 cm^{-1} となり、乱れの最大波数に比較して小さい値となり、理論式は成立する。

観測に用いたレーダの受信電力 P_r (dBm) と屈折率係数 η (cm^{-1}) との関係式は次のようになる。

$$P_r = 5.14 \times 10^4 \frac{\eta}{r^2}$$

r の単位は km で、距離を現わす。

この式を図示すると、第9図のようになり、レーダの最小受信電力 (S_{\min}) は -105 dBm なので、エンゼルエコー観測範囲を 50 km 以内であるとする、 η が 10^{-13} ~ 10^{-14} cm^{-1} 以上の値であれば探知可能となる。また、乱流理論から求めた η の値は 10^{-13} ~ 10^{-17} cm^{-1} となるので、充分観測可能な反射強度を生ずる。とくに、海風前線付近は、高温で乾燥した陸風と低温で湿潤な海風との混合している領域であるので、屈折率の変動も大きくなるが推定される。

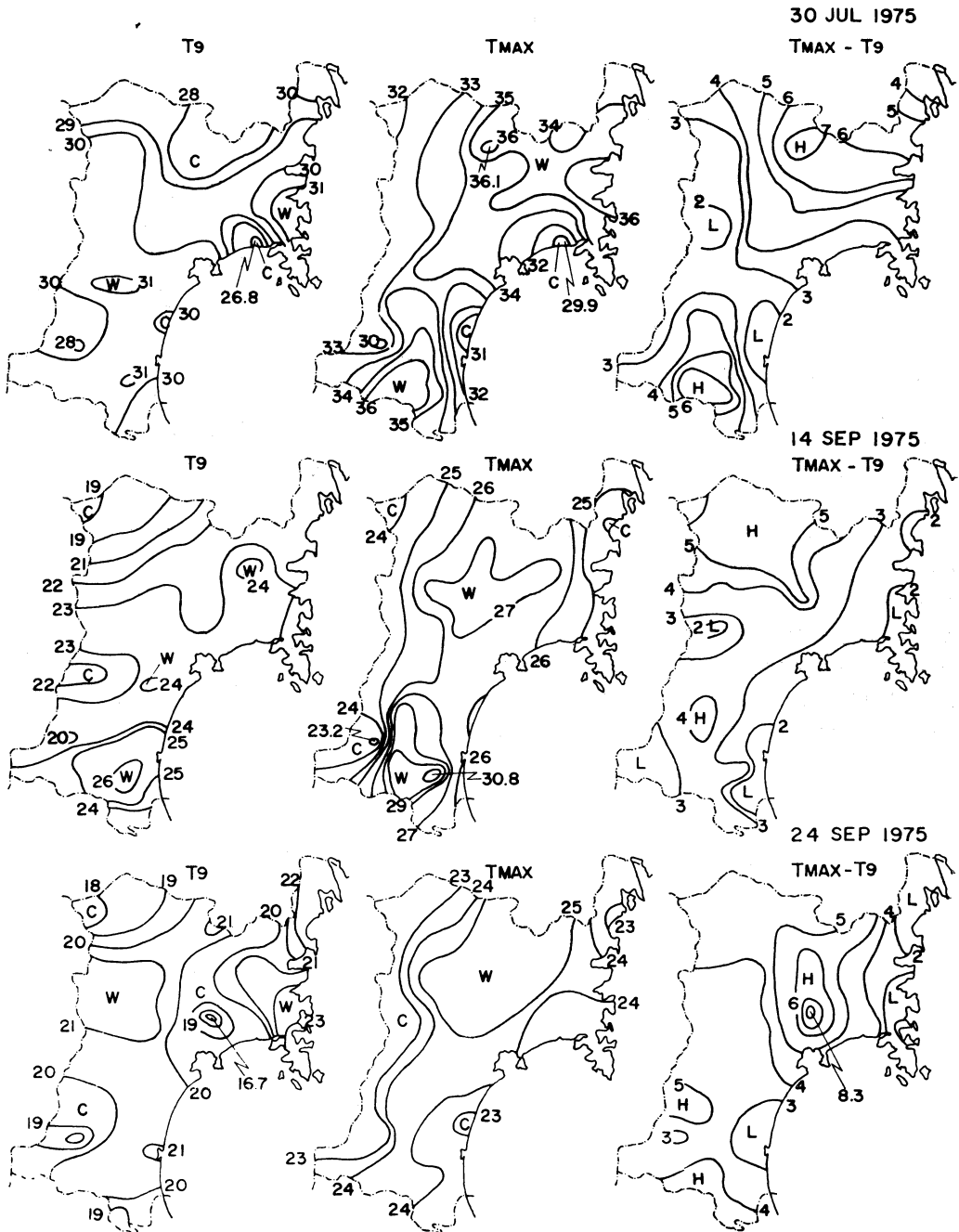
筆者等 (1976) は、ミリ波レーダと係留気球を用いた観測で、海風前線に伴うパルス状エンゼルエコーの発生と前線の鉛直構造との関係について解析し、600 m 以下の低層内で、気温、水蒸気量、地上風の急変に伴って、パルス状エコーが急激に増加していることを示した。

Atlas (1960) も、レーダエコーの発生域は、海風前線の前面にあって、気温、水蒸気量の急な変化する領域に対応していることを報告している。

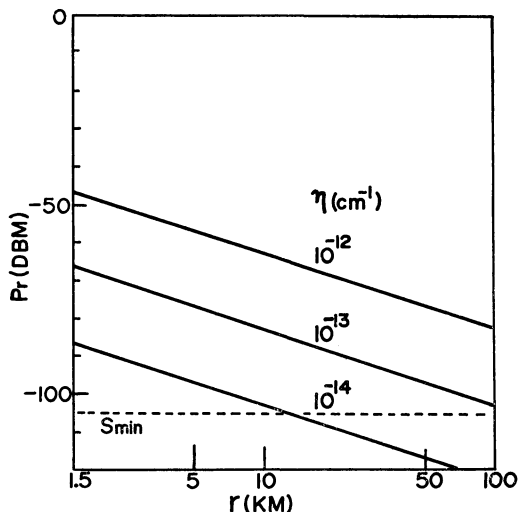
仙台管区気象台 (1975) の調査によると、仙台平野における海風前線の特徴は、12時頃より海風域が海岸線付近で広がり始め、その後、この海風域は内陸に侵入して、18時には岩手県境付近にまで到達している。前線の移動速度は $6 \sim 8 \text{ km/hr}$ で、レーダ観測から求めた線状エコーの移動速度とはほぼ一致している。

7. あとがき

この研究は、下層大気構造の研究への気象レーダの利用の可能性を検討するとともに、このようなレーダ観測資料を用いて、海風前線の構造を解明する目的で実施した。5.6 cm 波レーダで観測される線状エコーは、海風

DISTRIBUTION OF TEMPERATURE (T_9 , T_{MAX} , $T_{MAX} - T_9$)

第8図 1975年7月30日, 9月14日, 24日における9時の気温 (T_9), 日最高気温 (T_{max}), 昇温値 ($T_{max} - T_9$) の分布.



第9図 仙台レーダの場合の屈折率係数(η)と受信電力(P_r), レーダ距離(r)との関係.

前線に対応していることが明らかとなり, 移動速度, 水平・鉛直構造などもレーダ観測から解明できることが立証された.

ミリ波レーダで観測した海風前線付近におけるパルス状エコーの急激な増加現象なども考慮すると, 前線付近では, 高度約1 km 以下の低層において屈折率の大きな変動, すなわち, 気温・水蒸気量が細かいスケールで変

動していることが推定される. レーダ資料から定量的にこれらの変動量を求めることは困難であり, 係留気球, 飛行機などによる気象観測を同時に行なうことが望まれる.

最後に, 気象研究所の地方共同研究として, レーダ観測と気象資料集収にご協力いただいた, 仙台管区気象台観測課レーダ関係職員各位に謝意を表します.

文 献

- Atlas, D., 1960: Radar detection of sea breeze, J. Met., 17, 244-258.
- Geotis, S.G., 1964: On sea breeze "Angles", World Cont. Radio Met. Inc, 11 the Weather Radar Conf. 6-9.
- Meyer, J.H., 1971: Radar observations of land breeze fronts, J. Appl. Met., 10, 1224-1232.
- Tatarshi, V.I., 1961: Wave propagation in a turbulent medium, McGraw-Hill Book Company, New York.
- 仙台管区気象台, 1975: 宮城県の気温の相関ならびに地上風系の分類と日変化, 研究時報, 27, 11-28.
- 仙台管区気象台レーダ班, 1976: 内陸に発生する線状エンゼルエコーについて, 仙台管区調査研究会資料, 33-36,
- 柳沢善次, 1972: ミリ波レーダによるエンゼルエコーの観測 (II), 天気, 19, 423-429.
- , 大塚 伸, 神林慶子, 1976: レーダと係留気球による海風前線の観測, 天気, 23, 43-48.