

## レーダと係留気球による海風前線の観測\*

柳 沢 善 次\*\* 大 塚 伸\*\* 神 林 慶 子\*\*

## 要 旨

1972年3月館野高層気象台において、海風前線の通過に伴うパルス状エンジェルエコーの急激な増加を波長8.6mmの測雲用レーダで観測し、同時に係留気球等による境界層内の気象観測も行った。地上では、16時頃南東風の突風と混合比の急激な増加等の気象現象が観測され、周辺の気象官署の資料を解析した結果、このような現象は午前中鹿島灘付近に発生した海風前線が内陸に移動し、16時頃館野付近を通過した時に起きている。係留気球による観測では、高度400mまでの境界層内で、気温の上昇・下降、混合比の増加、強い下降気流等を観測した。

レーダで観測したパルス状エンジェルエコーは、高度800mまでの層内で、15時頃よりエコー数が増加しはじめ、15時45分からさらに増加して約1時間持続した。このようなエコー数の顕著な増加は、気温の下降、混合比の増加、強い下降流等に対応しており、海風前線内で気温・水蒸気量などの変動が非常に大きいことを示唆している。

## 1. ま え が き

晴天時に観測されるレーダエコーはエンジェルエコーと呼ばれ、近年高度1,500m以下の境界層内に発生するエンジェ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8.6mmレーダで観測されるパルス状エンジェルエコーの発生数・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。

このようなエンジェルエコーは、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1.25cm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ジェルエコーを観測し、海岸線付近に設置した塔などで観測した気象資料を

用いてレーダ波の反射機構について解析している。レーダ観測結果から求めた前線の移動速度は、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10.7cmの高性能レーダ(出力3MW)を用いて、海・陸風前線付近に発生する線状のエンジェ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・陸風に伴うエンジェルエコーの反射機構に関する研究等がある。

筆者等は、1972年3月と5月の2回、高層気象台構内に設置したミリ波レーダを用いて、晴天時におけるパルス状エンジェルエコーの連続観測を実施した。レーダ観測期間中同時に係留気球による境界層内の気象観測が気象研究所境界層グループおよび高層気象台職員によって行われた。これらの資料を用いて、エンジェルエコー発生と境界層における気温・水蒸気・風等の時間的変化との関係について調査した。今回の報告では、これらの調査のうち特に海風前線の通過とパルス状エコーの発生数の変化との関係について解析した結果である。

## 2. レーダ観測

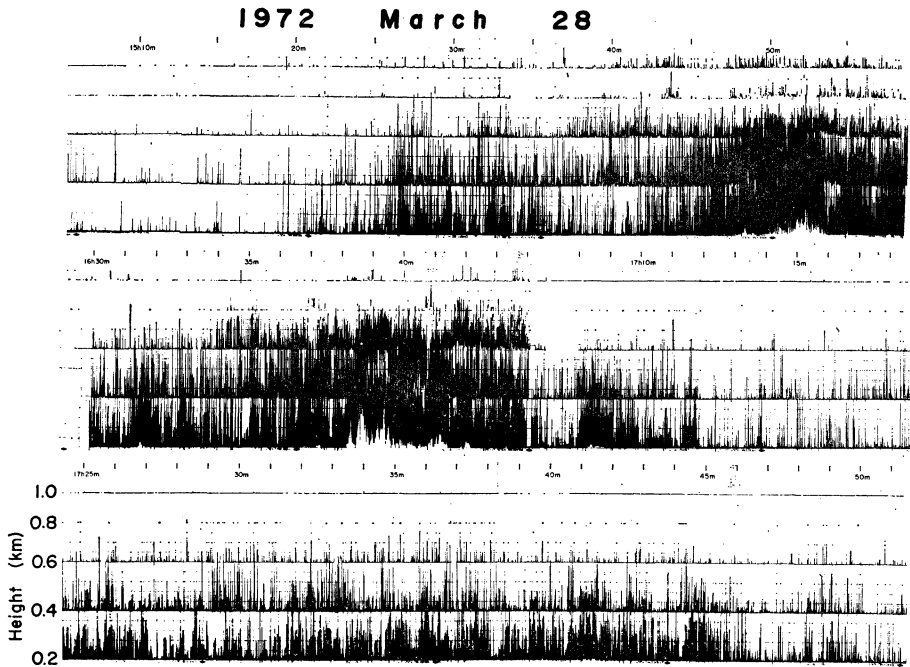
エンジェルエコー観測のため高層気象台に設置したレーダは波長8.6mm、送信出力35KW、パラボラアンテ

\* The Observation of Sea Breeze front by 8.6 mm Radar and Ballon.

\*\* Z. Yanagisawa, S. Otuka, N. Kambayashi (所属 気象研究所, 台風研究部)

—1975年5月27日受領—

—1975年12月23日受理—



第1図 ミリ波レーダで観測したパルス状エンジェルエコーの高度別発生数の時間変化 (1972年3月28日)。

ナの直径2.6m(鉛直方向に固定)の測雲用のもので、観測高度は200, 400, 600, 800, 1,000mに固定し、各高度を中心に75m層内に発生するパルス状エコーを5高度同時にペン記録した。

3月27, 28日は、正午頃よりエコーの発生数が各高度とも急激に変動しはじめ、午後には顕著なエコー発生現象があらわれた。第1図は、3月28日に観測したパルス状エンジェルエコーのペン記録を示したもので、エコーは、15時25分頃より増加しはじめ、15時50分、16時40分付近の約10分間には各高度で顕著な増加があらわれている(15時58分から16時30分と、16時44分から17時8分の間は、エコー発生数が非常に多いため、ペン記録は不能となり欠測)。最高発生高度は、15時25分から15時58分までの間で高度1,000mまでに達しているが、16時30分からの観測では高度800mでも発生数は減少した。17時以後の時間帯では発生数の変動は小さくなって、ほぼ一定となり、発生高度も600mまでに下降している。また個々のパルス状エコーの反射強度も発生数の増加するとともに強くなっており、とくにこのような現象は、15時50分頃と16時40分頃に顕著にあらわれている。第2図は、3月27日の観測例で、14時50分頃よりエ

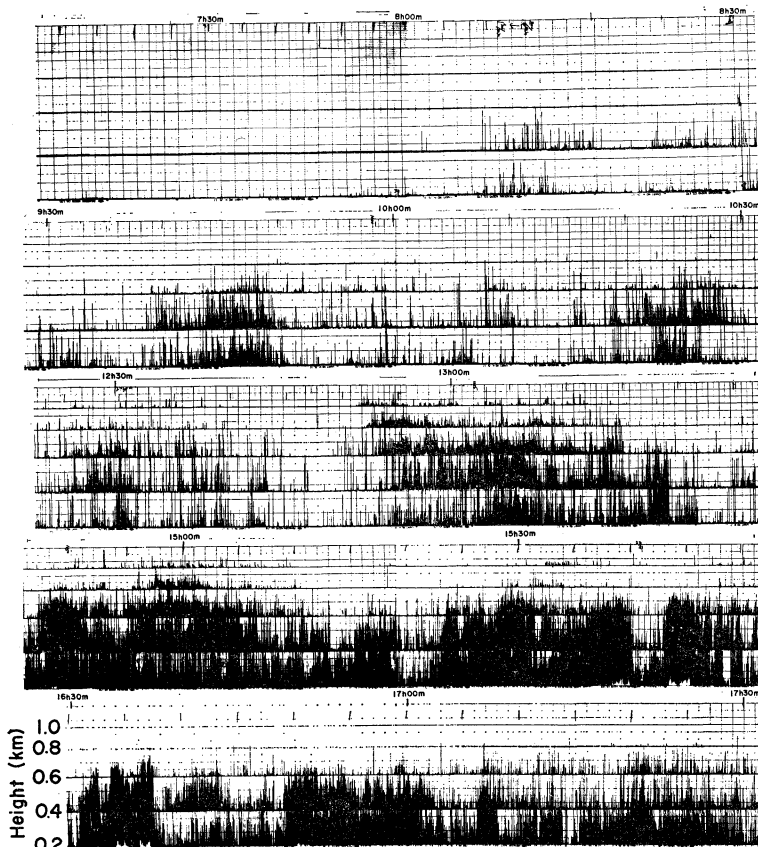
コー発生数が急激に増加している。この2日とも、エコー発生数が変動しはじめた時刻に地上風とも風速強まり、風向も急変していることが認められた。第3図は、発生数の変動が少ない日の例で、一日中ほぼ一定数のエコーが観測された。この5月25日の地上風は、風速3~5m/sで変動も少なく、風向も10時30分頃西風から南寄りに変わったあとはほぼ一定方向の風が吹いていた。

このように、パルス状エコーの急激な増加は、午前中は比較的風速が弱くて風向の変動が激しいような日の午后に観測されることが多く、地上風の風向、風速の急変と対応して起ることが多い。

### 3. 地上気象解析

第1, 2図に示したようなエコー発生数の急激な変化と気象現象の変化との関係を見出すため、27, 28日の茨城県内の気象官署(水戸地方気象台、柿岡地磁気観測所、筑波山測候所、館野高層気象台)の地上資料を集収して解析を行った。

3月27, 28日は大きな移動性高気圧におおわれて全国的に晴のところが多く、関東各地の日最高気温は約15°Cに達した。第4図は、レーダを設置した館野高層気象台における3月28日の地上風の記録で、15時50分頃よ



1972 Mar. 27

第2図 第1図に同じ、観測日は1972年3月27日。

り急激な風速の増加が起り、風向も東寄りとなりほぼ一定になった。この日午前中は風向・風速とも大きく変動して熱対流的な変化を示していた。第5図は、地上気温、混合比と、15 m 塔の気象資料から求めた地表付近の Heat Flux の時間変化を示したもので、16 時頃より地上気温は下降しはじめて、Heat Flux も減少し、混合比は16時30分頃より急速に増加しはじめています。

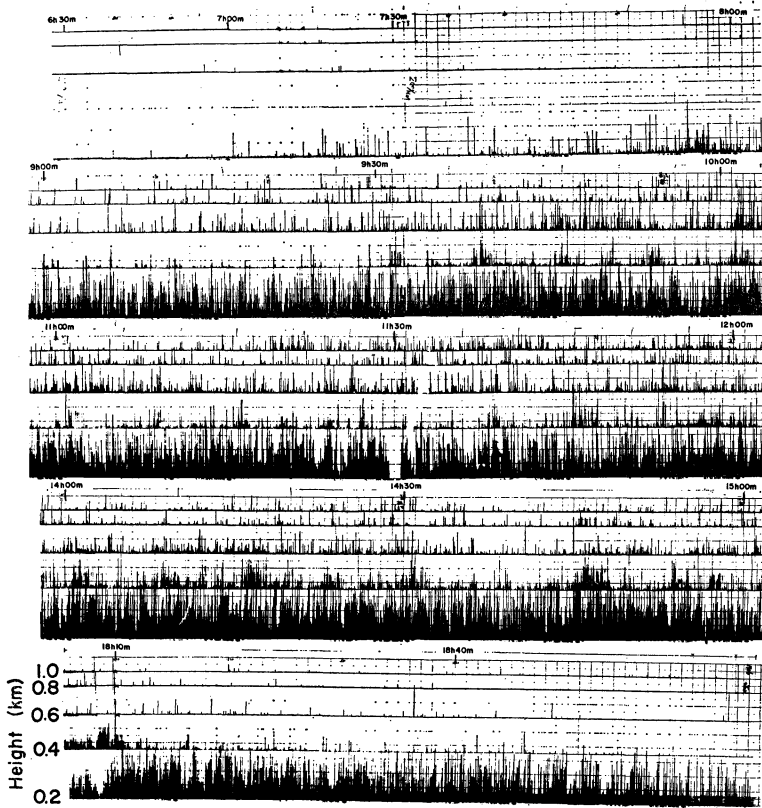
この2日間ともエコー発生数が大きく変化しはじめて15 時頃より第4、5 図に示したような気象変化があらわれている。各地点の地上気象資料をみると、ほとんど高層気象台と同じような変化が、水戸では11時頃、柿岡では14時30分頃、筑波山では16時頃におきていることがわかった。これらの解析結果から、この2日間は海風前線が11時前に海岸線付近に発生し、約 8 km/hour の速度で西に移動し、16時頃内陸の高層気象台付近に到達したことが明らかになった。

第1、2 図にあらわれている エコー数の急激な増加は海風前線内における気温、水蒸気量のはげしい乱れによって起ったことを示唆していると思われる。

#### 4. 鉛直構造の解析

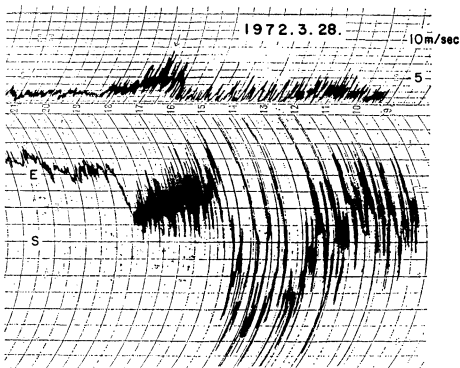
第1 図に示したエコー発生数の変化と、層内の気象要素の時間的变化、すなわち、海風前線の構造との関係を調べるため、係留気球等の気象資料を用いて解析を行った。

第6 図に係留気球の観測時間と高度との関係を示した。3 月の観測では、係留気球を2 個使用し、鉛直分布の観測を行った。気球の上昇・下降の様相をみると、早朝6 時30分から9 時頃の観測では、気球はほぼ順調に上昇して高度 500~600 m まで上昇したが、昼頃より気球の上昇は不安定となり、特に、15 時頃の高度 450 m 付近では、係留索が延びるにもかかわらず気球の上昇は止り、150 m 程度気球の高度が急速に下降する現象が起きた。このような気球の下降は16時10分から20分の間に

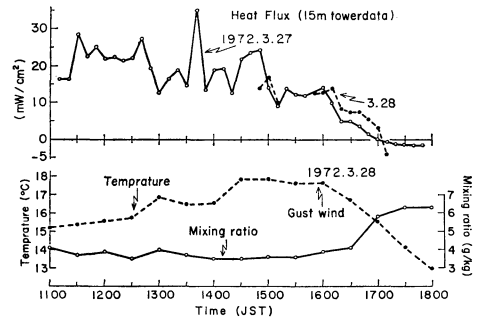


1972 May 25

第3図 第1図と同じ、観測日は1972年5月25日。



第4図 地上における風速(上), 風向(下)の記録(1972年3月28日)。

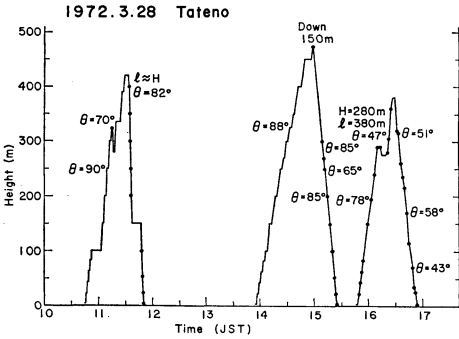


第5図 高さ15mの塔の気象データから求めたheat fluxの時間変化(1972年3月27日, 28日)と, 地上における気温・混合比の時間変化(1972年3月28日)。

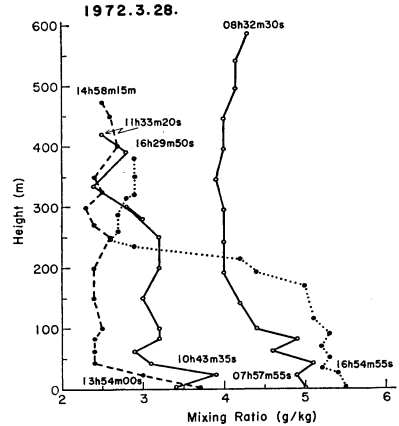
も高度290m付近で起り, これらの結果から, このような気球の上昇ストップや急速な下降現象は強い下降流の存在することを示すものであると推定した。このよう

な下降流の層は, 時間とともに徐々に低い高度に下がっていることも観測から明らかになった。

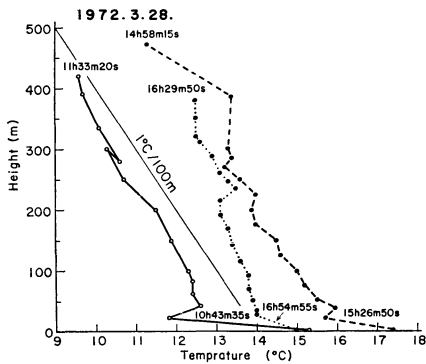
第7図は, 係留気球の観測から得られた気温の鉛直分



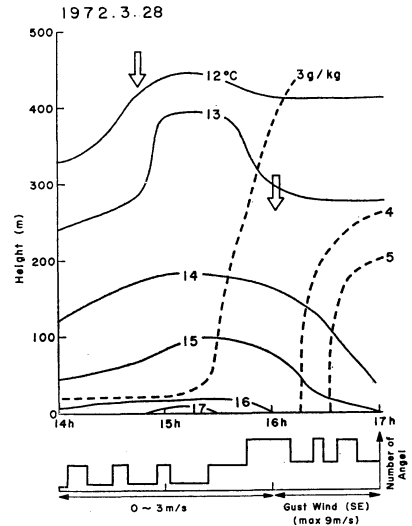
第6図 係留気球の観測時間とその高度および気球の上昇・下降の状況。



第8図 係留気球の観測データから得られた混合比の鉛直分布とその時間変化 (1972年3月28日)。



第7図 係留気球の観測データから求めた気温の鉛直分布とその時間変化 (1972年3月28日)。



第9図 係留気球から得られた気温・混合比の鉛直断面と強い下降流 (上), レーダのエンジェルエコーの相対的発生数 (中), 地上の風速の変化傾向 (下)。

布で、15時頃の観測が日最高気温を示し、300~400 mの層に安定層が観測された。15時頃の強い下降流は、この安定層の上にあらわれている。地上で最大風速 (8.5 m/s) を観測した16時40分頃の鉛直分布は、230 m 付近に逆転層面があらわれ、地表面近くほど気温の下降は激しく、不安定解消の傾向を示している。16時10分頃観測した強い下降流はこの逆転面の上に対応している。すなわち、50 m から200 m までの層では15時頃乾燥断熱減率に近い値を示していたが、16時過ぎにはほぼ湿潤断熱減率に等しい値 (0.5°C/100 m) にまで減少した。

第8図は、混合比の鉛直分布で、15時頃には各高度とも2.5 g/kg 程度の値であったが、16時過ぎの観測では逆転面以下の層 (高度200 m 以下) で急激な増加を示し、その値は5 g/kg 以上に達した。これらの結果から、16時頃より地表面近くの低い層に低温で湿潤な空気の流入のあったことを示し、これらの現象は地上解析で示したように海風前線の通過によるものである。

第9図は、レーダ・地上・係留気球の観測資料を用いて解析した海風前線の構造とエンジェルエコーの発生数との関係をモデル的に示した。下より地上風の風速変化の特徴、棒グラフはパルス状エンジェルエコーの相対的な発生数、実曲線は気温、点線は混合比を示し、強い下降流は矢印であらわした。エンジェルエコーの増加した時間は突風の吹出し、気温の下降、混合比の急増、強い下降流の存在等に対応し、これらの結果から、エンジェ

ルエコー発生数の特徴的な増減は海風前線の通過に伴って発生した現象であることが明らかになった。

## 5. 考察

係留気球の観測から得られた気温・混合比・下降流等の海風前線の鉛直構造は、浅井 (1973) によって紹介された Estoque の数値シミュレーションの結果とよく似た構造を示している。まえがきでも述べたようにレーダによる海・陸風前線の観測結果は多くの研究者によって報告されており、その使用波長も 1 cm~10 cm 帯の範囲におよんでいる。1973年12月の気象学会月例会「レーダ気象」には、仙台管区気象台の気象レーダを用いて観測した晴天時における線状のエンジェルエコーについての報告が行われた。この報告によると、この線状エコーは正午から16時頃にかけての風速の強い時に観測され、天気パターンは海・陸風の発達しやすい状態に多いようである。また、線状エコーは海風が内陸部に侵入した先端部分（海風前線）に対応しているようである。

仙台での気象レーダによる線状エンジェルエコーの発生状況は、第1, 2図に示した観測結果とよい一致を示し、ミリ波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の増加も海風前線に対応している。また、Atlas (1960) の報告でも、エコーの発生域は海風前線の前面に位置していて、気温・水蒸気量の急激な変化と対応している。このように、エンジェルエコーの発生は、気温と水蒸気が急激に変化するような気層内で起ることを示している。

一般に、降水粒子のない晴天時の電波反射は、大気中の気温・湿度の急激な変化によって起る電波屈折率の大きな勾配に原因する。

電波に対する屈折率の  $N$  単位は次のようになる。

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

$T$ : 絶対温度,  $P$ : 気圧,  $e$ : 水蒸気圧, いま,  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $e=10\text{ mb}$ ,  $P=100\text{ mb}$  の標準大気を考えると、これらの気象要素の変化量と屈折率の変化量との関係式は次のようになる。

$$\Delta N = -1.4\Delta T + 4.2\Delta e + 0.26\Delta P \quad (2)$$

上式でわかるように、電波屈折率の変化は、水蒸気圧の変化にもっとも大きく関係し、海風のように、水蒸気圧は増加して気温が減少するような気塊の場合に屈折率は大きくなる。

16時40分から17時までの地上気温は  $1.2^\circ\text{C}$  下降し、湿度は18%増加しており、水蒸気圧は  $2.7\text{ mb}$  増加したことになる。これらの値を用いて (2) 式より求めた屈

折率の変化量は  $13N$  単位となる。

Atlas (1960) による海風前線に伴うエンジェルエコー発生時の実測による屈折率の変化量はほぼ同じ値を示しているが、筆者が前の論文 (1972) に示したように、レーダ波長と鉛直ビームのレーダでは屈折率の鉛直勾配  $dN/dZ$  の値が重要となる。一般に大気中の乱れによって屈折率の変化を生じ、この変化がレーダ反射を生ずる原因となるのであり、海・陸風前線内で気温・水蒸気量の変化が秒単位のスケールでどのように分布しているかを明らかにすることが、今後観測上の問題点として取り上げなければならない。

## 6. 結語

海風前線の通過に伴って観測されたパルス状エンジェルエコーの特徴的な発生数の変動と、地上・塔・係留気球等で観測した前線内の気象要素の変動との関係を明らかにするため解析を行った。これらの研究は、レーダを用いて海・陸風前線を探知することと、さらに、レーダ反射機構を明らかにすることによって、海・陸風前線の構造を研究するためのレーダ利用等の可能性を検討することが目的である。

最後に、レーダ観測にご協力いただきました館野高層気象台職員各位と、資料を提供して下さった気象研究所境界層グループの方々に謝意を表します。

## 参考文献

- 浅井富雄・吉門 洋, 1973: 海陸風に関する理論モデルとその問題点, 天気, 20, 119-129.
- Atlas, D., 1960: Radar detection of sea breeze. J. Meteor., 17, 244-258.
- Geotis, S.G., 1964: On sea breeze "Angles" World Cont. Radio Meteor. Inc. 11th Weather Radar Conf. 6-9.
- Hardy, K.R. and J. 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 convection process in clear air as seen by radar. J. Atmos. Sci., 27, 1138-1147.
- Meyer, J.H., 1971: Radar observations of land breeze fronts. J. Appl. Meteor., 10, 1224-1232.
- Rowland, J.R., 1972: Intensive probing of a clear air convective fields by radar and instrumented drone aircraft. J. Appl. Meteor., 12, 149-155.
- 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, 434-440.
- 柳沢善次・神林慶子, 1972: ミリ波レーダによるエンジェルエコーの観測 (II), 天気, 19, 423-429.