

## レーダーによる小松周辺の冬季雷の研究\*

遠峰 菊郎\*\* 道本光一郎\*\* 阿部 成雄\*\*

## 要 旨

航空機の被雷を予測するために、小松周辺の冬の雷を調査した。その結果を以下に示す。

- 1) 航空機の被雷はそのほとんどが自然発雷が観測されている時に発生している。しかし、ごくまれに自然発雷が観測されずに被雷のみが発生することがある。
  - 2) 冬の雷も夏の雷と同様に、エコー頂の気温がある一定値以下になる過程を経なければ発雷しない。
  - 3) 冬の大気不安定域の中には、エコー頂の気温が十分に低くなくても発雷しないものが多数存在する。
- このような現象は特に厳冬季である1月後半から3月にかけて多く観測される。

## 1. はじめに

日本海沿岸特に北陸地方では、冬季にも比較的に低い積乱雲から発雷が観測され、しばしば航空機が被雷を受けることで注目されて来た。夏の雷に比べると冬の雷についての研究は少ないので、これを行う。

対流性セルが発雷するかどうかを判定する方法については、これまでに多数の研究が行われている。これらの研究は大きく2つに分けられる。その1つは総観場のデータを用いて判定するもので、Rackliff (1962), Jefferson (1963), Boyden (1963) 等により研究され、Saunders (1966) により比較、検討されている。彼らの研究は主に大気の安定度に注目し、湿球温位や層厚と発雷の関係を調べている。これらの方法によりおおむね60%から80%の精度で発雷を予測し得る。

もう1つはレーダーエコーを用いて判定する方法で、Tosha・Ichimura (1961) らにより解析されている。彼等の研究によると、エコー頂の気温が $-15.6^{\circ}\text{C}$ 以下であるかどうかを雷雨としゅう雨の判定基準になり、その精度は90%となることが示されている。

我々は主にレーダーエコーから判定する後者の方法に従い、小松周辺の冬の雷を調査する。本研究に用いられたデータはステップトゥ PPI と方向探知機によるもの

であり、これらの説明は2章で行う。観測データを解析した結果といくつかの議論をそれ以後の章に示す。本研究においては、当初、航空機に対する発雷とその他の発雷(以後、これを自然発雷と呼ぶ)を分けて考える。その理由は、自然発雷が観測されない時でも、航空機に対する被雷のみが観測されたことがあるからである。この両者は同質の現象であると考えられるが、航空機に対する被雷は重要なので、当初はこれを分けて調査してみる。本研究はこれらの発雷を予測する方法を開発するための予備調査である。しかし、冬の雷についてレーダーエコーから見た解析が少ないので、その結果をここに示す。

## 2. 本研究に用いられた測器の説明

本研究では、小松におけるステップトゥ PPI により磁気テープに取り込まれたレーダーエコーの解析を行う。このステップトゥ PPI の性能諸元を第1表に示す。これにより水平方向に1 km、鉛直方向にレーダーからの距離50 kmの地点において1 kmの分解能を持つエコーの立体的な像を得ることができる。ここではエコー強度を第2表に示すように10段階に分け、強度レベル0のエコーの高さをエコー頂の高さとする。又、100 km以内のエコーについて論じる。

方向探知機により、エコーからの発雷の有無を決定する。この方向探知機は4枚の変形八木アンテナを東西南北方向に向けて設置したもので、空電が発生した時各アンテナに誘起された電圧の比により、空電の発生方向を決定する装置である。真上から見た様子を第1図に示

\* Studies on thunderstorm in winter in the area surrounding Komatsu by radar.

\*\* Kikuro Tomine, Kouichi Michimoto, Shigeo Abe, 防衛大学校地学教室。

——1986年2月20日受領——

——1986年7月29日受理——

す。Nとなす角度 $\theta$ の方向で $E \sin \omega t$ なる電界の空電が発生した時、各アンテナに誘起される電圧を $E_N, E_E, E_S, E_W$ とする。各アンテナは同一特性で、その指向係数を $D(\theta)$ とすれば、次式が成り立つ。

$$E_N = D(\theta) \times E \sin \omega t$$

$$E_E = D(90^\circ - \theta) \times E \sin \omega t$$

$$E_S \approx 0$$

$$E_W \approx 0$$

この場合、 $E_N$ と $E_E$ の比を $E_\theta$ とすれば

$$E_\theta = E_N / E_E = D(\theta) / D(90^\circ - \theta)$$

となり、 $E_\theta$ は空電発生方向 $\theta$ のみの関数となる。これより角度 $\theta$ を求める。その性能諸元を第3表に示す。この方向探知機の測定精度は約 $\pm 2$ 度である。小松の航空自衛隊はこの方向探知機を3台所有しており、それらはそれぞれ小松、獅子吼、刈安にある。この3地点の位置、海岸線、及びレーダーを中心とした半径50 kmと100 kmの円周を第2図に示す。本研究ではこの3台の方向探知機により、それぞれ発雷した方向を決定し、そ

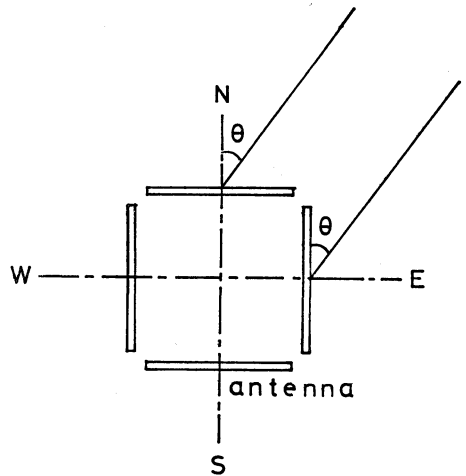
の3本の直線の交点付近に存在するエコー強度が大きいセルから発雷したものとする。これはエコー強度が大きいセルから発雷することが多い (Marshall J.S. and S. Radhakant, 1978), 又はその近傍からの発雷が多い (Geotis S.G. and R.E. Orville, 1984) という観測を基にしている。ここでは1つのエコー強度レベルの極大値は、1つのセルに対応するとする。この方向探知機の有効範囲は100 km以上であり、小松周辺の雷を、海上に存在するものも含めてほぼ全部確認することが可能である。これまでの眼と耳による観測では分からなかった遠方の発雷も、この装置を用いることにより、確認が可能である。

3. 航空機の被雷

航空機は着陸する際に、エコーをよけきれずに被雷することが多い。又、このような飛行場の近くはレーダー

第1表 小松におけるステップトゥ PPI の性能諸元

項目	諸元
周波数	5,300 MHz
パルス繰り返し周波数	260 pps
送信パルス幅	2 $\mu$ S
送信出力	250 kW
アンテナ・ビーム幅	
水平	1.3 度
垂直	1.4 度
最小受信感度	-105 dBm 以下



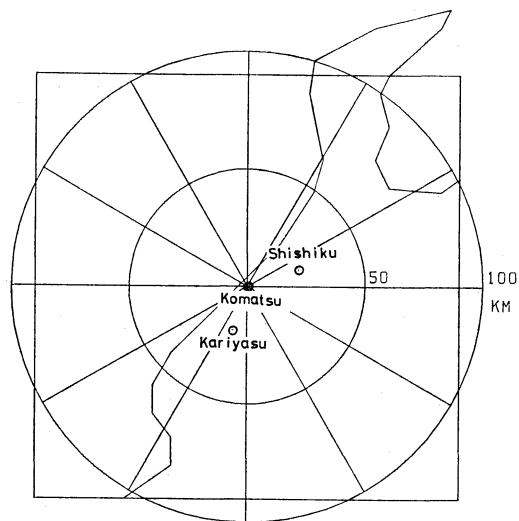
第1図 真上から見た方向探知機の見取図。

第2表 エコー強度と強度レベル

強度レベル	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
受信電力 100 km (dBm)	-93.75 }	-92.5 }	-90.0 }	-85.0 }	-80.0 }	-75.0 }	-70.0 }	-65.0 }	-60.0 }	-55.0 以上
受信電力 1 km (dBm)	-51.75 }	-50.5 }	-48.0 }	-43.0 }	-38.0 }	-33.0 }	-28.0 }	-23.0 }	-18.0 }	-13.0 以上
等価降雨量 (mm/hr)	0.625 }	0.75 }	1.0 }	2.1 }	4.2 }	8.7 }	17.6 }	36.5 }	75.0 }	154.0 以上

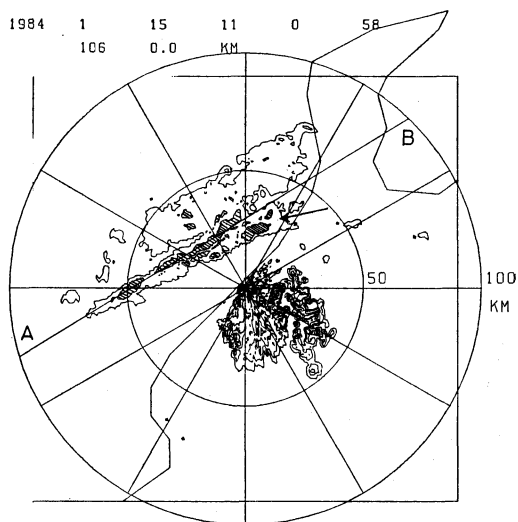
第3表 方向探知機の性能諸元

空中線形式	変形八木アンテナ
空中線利得	4 dB 以上
数 量	4 (東, 西, 南, 北分)
受信周波数	100.5 MHz ± 1 MHz
雑音指数	5 dB 以下
利 得	15 dB 以上
チャンネル数	4 (東, 西, 南, 北分)

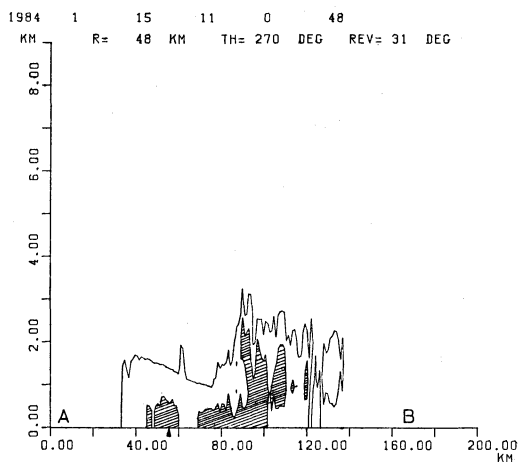


第2図 3台の方向探知機の位置.

の死角となっているために、被雷した時のエコーデータは極めて少ない。ここでは比較的遠いところで被雷した時のエコーを示す。1984年1月15日11時08分に被雷している。同日11時00分の仰角0.7°におけるレーダーエコー強度の水平分布を第3図に示す。図中の等値線はエコー強度0, 3, 6に対応する。被雷は小松基地北北東、約30 km 付近で発生し、図中矢印で示してある。飛行高度は約1,200 m であり、降下中であった。この時、エコー強度6以上のストロングエコーは存在していなかった。第2図中A—Bで示されている断面図を第4図とする。最も高いエコー頂高度は3.2 km であり、09時の輪島における高層観測データにより、この時のエコー頂の気温は-15°C であることが分かる。この時、方向探知機によると、11時06分の自然発雷と11時08分の被雷を受



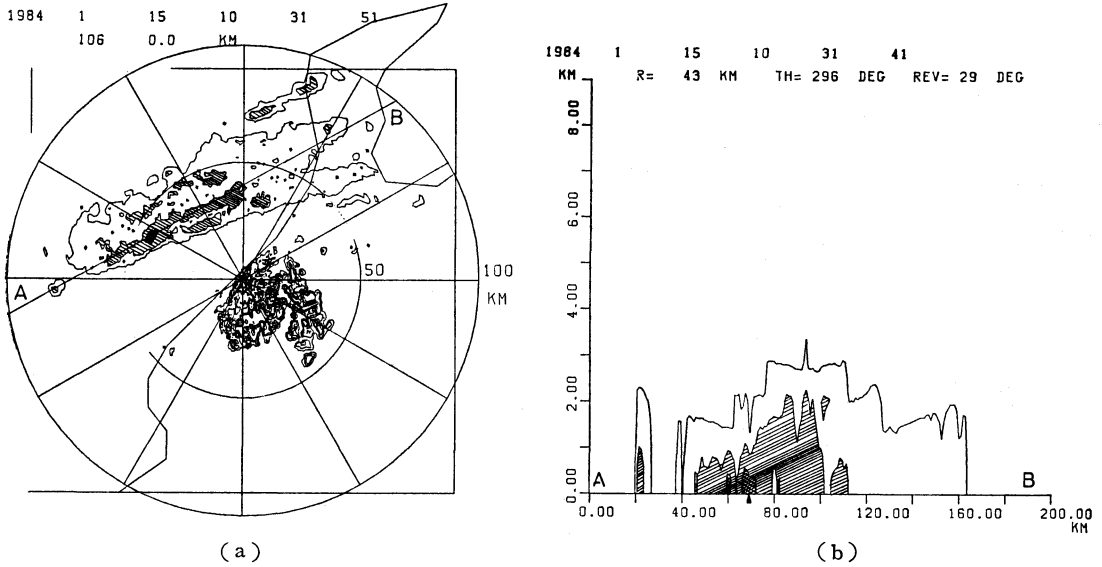
第3図 1984年1月15日11時00分における高さ0 km のレーダーエコー強度の水平分布。図中の等値線はエコー強度, 0, 3, 6 を示す。図中の矢印は被雷が発生した位置を示す。A—Bは断面図の位置を示す。



第4図 第3図A—Bにおける断面図.

信している。この航空機の被雷は、方向探知機により確認された時間と位置がパイロットレポートによるものと一致していることから、それと分かる。その後は全く、発雷を受信していない。

この時より30分前、10時31分のエコー強度の水平分布と図中A—Bで示されている断面図を第5図(a), (b)



第5図 1984年1月15日10時31分におけるエコー強度の(a)水平分布図と(b)鉛直分布図. その他は第2, 3図と同様.

に示す. この時はストロングエコーも存在し, エコー頂も高く, 方向探知機はこれらのエコーからの発雷を受信している. 以上のことから, この時の被雷は対流セルが減衰期にある時に発生していることが分かる. このように, もう発雷しそうにない減衰期のセルから, 又は雲の外でも航空機の被雷は起こり得るので, 自然発雷を調べても航空機の被雷を理解することにはならないのではないかと疑問が生じた. ここで当然のことながら, 方向探知機によれば, ほとんど全ての航空機の被雷を確認することができる. これにより航空機の被雷のみが発生し, 自然発雷が発生しない日も確認できる.

両者の関係を次のように調べてみる. 1983年の1, 2, 3, 12月, 1984年の1, 2, 3, 12月, 1985年の1, 2, 3月の計11カ月間において, 航空機の被雷が観測された日数は42日あった. このうち, 自然発雷を伴っていた日が39日, 被雷のみしか観測されなかった日は3日しか存在しなかった. 又, 自然発雷又は被雷が発生した日は119日, 両者共発生した日は116日存在した. これらのデータから, 被雷が発生した日には, ほとんど自然発雷も観測されていることが分かる. つまり, 自然発雷が発生しそうな条件が分かれば, 被雷に関してもある程度予知することができる. 又, 被雷のみが発生し, 自然発雷が観測されない日が存在することから, 被雷の方が自然発雷よりも発生し易いのではないと思われる. 自然発雷のみ観測され, 被雷が発生しない日が多数存在する

が, これは航空機が対流性セルを避けるように飛行していることを考えれば当然のことである. 被雷の方が自然発雷よりも発生し易い理由としては, 高電圧実験でよく知られているように, ある電場内に物体を挿入するとその物体が大きい方が電場の乱れが大きく, 絶縁破壊を起し易いからであろう. 以下の章では自然発雷について調べる.

4. レーダーエコーの時間変化と発雷

1つの対流性エコーの時間変化と発雷の関係を調べる. 第6図に1つの対流性エコーのエコー強度0, 3, 6の高さの時間変化と, このセルから発雷した時間を示す. これを見ると Workman・Reynolds (1949) に述べられているように, エコー強度0の高さ, すなわちエコー頂高度が最大値に達するのとほとんど同時に発雷が始まっていることが分かる. 又, Reynolds・Brook (1956) は, レーダーに出るような降水があるだけでは発雷せず, これが速い上昇発達を伴う時に, はじめて電光放電をおこすようになると述べている. 第6図についてこのことを調べると, エコーが初期に伸びる速度は確かに速い. しかし第7図に発雷を伴わなかったエコーの高さの時間変化を示すが, このエコーが初期に伸びる速度もかなり速い. 今回調査した範囲では, 発雷の有無にかかわらず, 対流性エコーの初期の成長速度はかなり速いことが分かる. このことは対流性エコーの速い上昇発達も, 発雷の

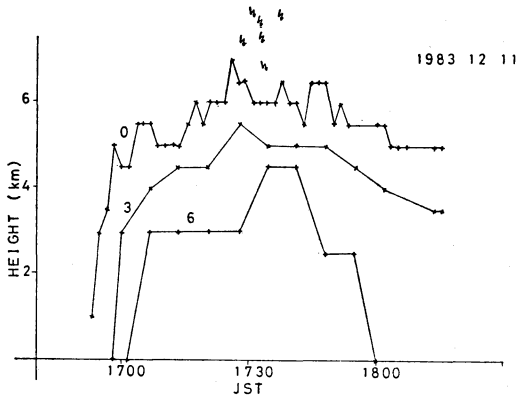
ための1つの必要条件にすぎないことを示している。

第8図に多数発雷したエコーの高さの時間変化を示す。この図を見ると、Workman・Reynolds (1949) に

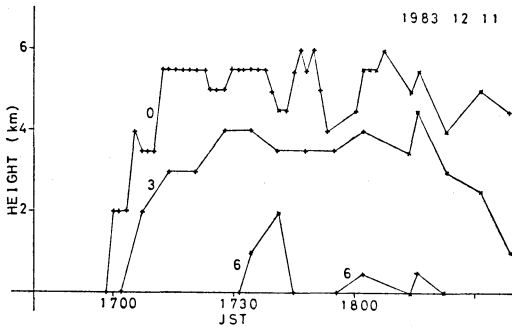
述べられているように、エコーの高さが下がりながら発雷していることが分かる。

5. エコー頂の気温と発雷

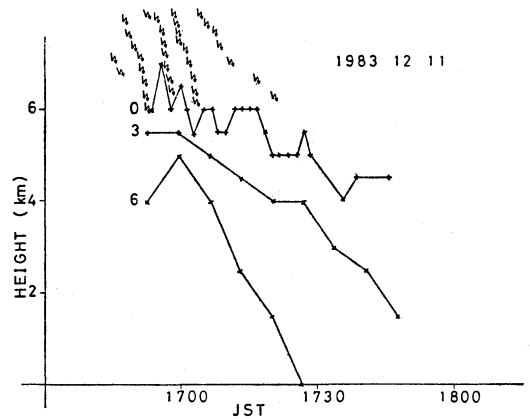
対流性セル中の雷荷分離機構の中で、過冷去水滴と氷晶が重要な役割をしているということが多くの人々によりよく言われている (Magono C., 1980). Toshi・Ichimura (1961) は対流性セルからの発雷の有無に対してエコー頂の気温を用いて判定し、90%程度の精度を示した。ここでは冬の雷についても上と同様のことを試みる。第4, 6図に示されているように、1つのセルから多数発雷する場合、エコー頂が最高になった時点で発雷が始まり、エコー頂が下がりながら次々と発雷していくので、上の判定に用いるエコー頂の気温としてそのセルから最初の発雷が観測された時点のものを用いる。このようにして1983年12月1日から1984年2月7日までの間



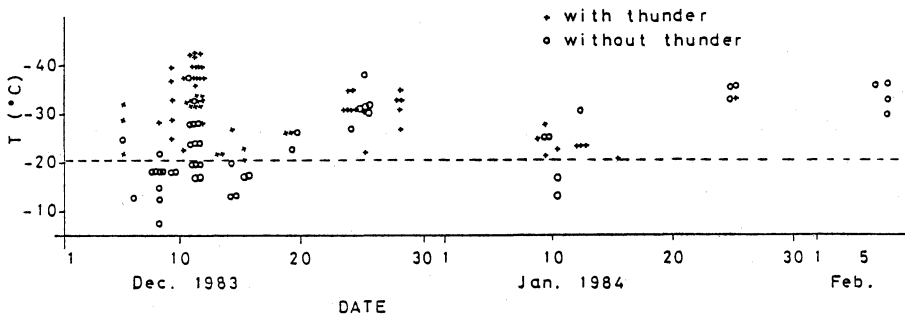
第6図 エコーの高さの時間変化と発雷。図中のパラメータはエコー強度を示す。矢印により発雷した時間を示す。図中の数字は日付を示す。



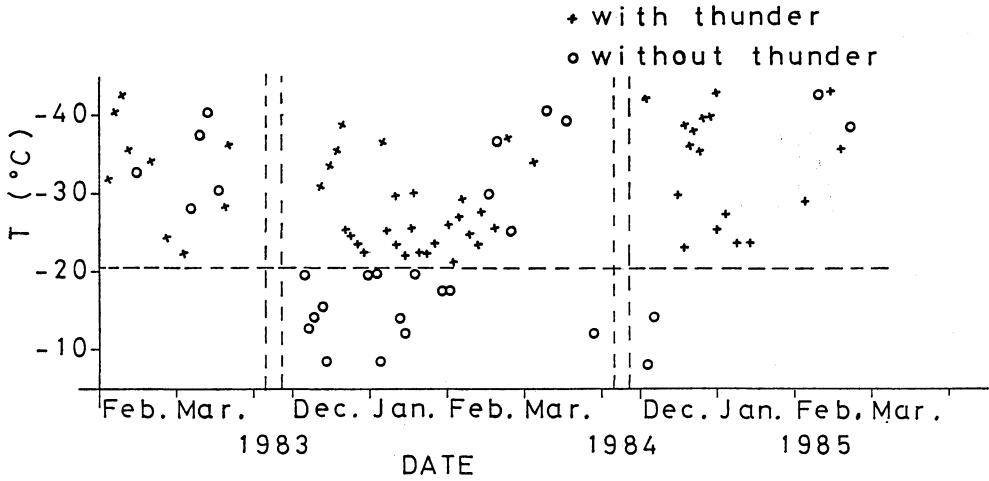
第7図 第5図と同じ。ただし発雷を伴わないエコーについて。



第8図 第5図と同じ。多数発雷したエコーについて。



第9図 各エコー毎のエコー頂気温と発雷の有無。×印と○印により、発雷、非発雷を示す。図中の破線は-20.5°Cの高さを示す。

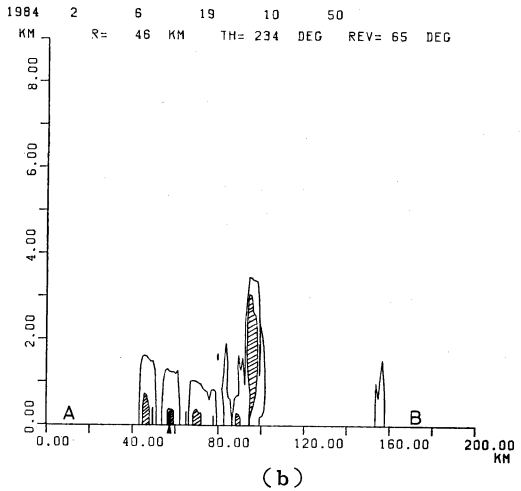
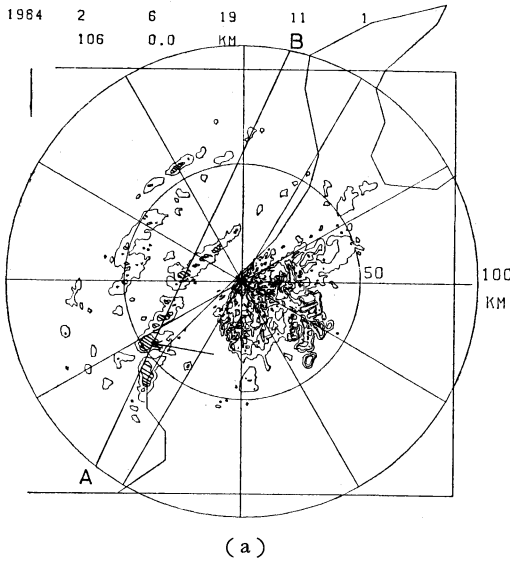


第10図 各エコー群毎のエコー頂気温と発雷の有無. その他は第8図と同様.

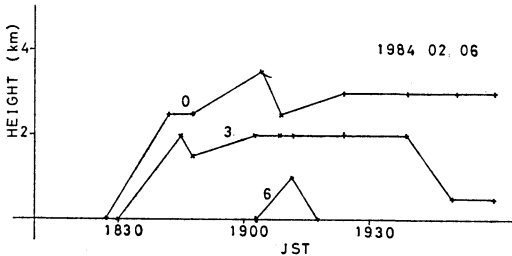
の各エコー毎のエコー頂気温と発雷の有無を調査した結果を第9図に示す. ×印と○印はそれぞれ発雷したエコーと非発雷のエコーを示す. エコー頂の気温は、レーダーによる強度0のエコーの高さと、輪島における高層観測データより決める. 発雷したエコー頂の高さは、そのエコーから最初の発雷が観測された前後10分間以内で最高のもとする. 非発雷エコーのエコー頂高度は、そのエコーのライフサイクル内で示された最高のエコー頂を用いる. 第9図を見ると、エコー頂の気温だけからでは、各セルからの発雷の有無を判定できないことが分かる. しかし、発雷したセルのエコー頂気温は  $-20.5^{\circ}\text{C}$  以下であることも分かる. このように冬の雷については夏の雷と異なり、エコー頂の気温だけから発雷の有無を判定することはむずかしいことが調べられている(飯塚, 中田, 1973). しかし上の結果より、エコー頂の気温が十分に低いことは、発雷のための必要条件になり得るのではないかと考えられる.

ここで我々は個々のセルではなく、1つのセル群からの発雷を調べてみる. 一般的に、前線に伴ってセル群が存在する場合、前線の前面には発雷するセルが多く、後面には発雷しないセルが多いが、セル群としてとらえることにより、このセル群は発雷を伴う群であると考えることができる. 1つのセル群は、この群が現れる前後6時間以内に発雷が認められなければ独立しているものとする. このセル群についてエコー頂気温と発雷の有無の関係を調べたものを第10図とする. この時、発雷した群のエコー頂気温はその群の中で最初に発雷したセルのエ

コー頂気温を用い、非発雷のエコー群に対しては最も低いエコー頂気温を用いる. このようにして、1983年2, 3, 12月, 1984年1, 2, 3, 12月, 1985年1, 2, 3月について調査した結果を示す. すると、発雷を伴う群のエコー頂気温は  $-20.5^{\circ}\text{C}$  以下であることが分かる. 又、発雷を伴わない群のエコー頂気温が  $-20.5^{\circ}\text{C}$  より低くなるのは、各年とも2, 3月に多くなることが分かる. この発雷しないエコー群の例として1984年2月6日19時11分のエコーを第11図に示す. このようにわずかではあるがエコー強度6のストロングエコーも存在している. エコー頂の高さが低いが、これは圏界面が下がっているためであり、エコー頂の気温は十分に低くなっている. 図中矢印で示されているエコーの各強度毎の高さの時間変化を第12図に示す. この図に示されているように、このエコーについては強度6のストロングエコーが存在している時間が非常に短かく20分以内であることが分かる. これはエコー中の液水量が少なく、不活発なエコーであることを示している. この時期のエコーは発雷の有無にかかわらず、このような特徴を持つものが多い. このような時は又、北西気流の場になっており、北西気流の時には発雷が少ないと言われていることと一致する. この時も対流性セルが存在しているわけであるから、鉛直方向の安定度はあまり良くない. Tosha・Ichimura (1961) が夏の雷について調べた結果と比較する. 基準となるエコー頂の気温は、彼等の  $-15.6^{\circ}\text{C}$  に対して我々は  $-20.5^{\circ}\text{C}$  になっている. これは主にデータ処理の方法の相違によるものであると考えられる. 彼等は



第11図 1984年2月6日19時11分のエコー強度の (a) 水平分布図と (b) 鉛直分布図。その他は第4図と同様。



第12図 第10図中矢印で示されているエコーの高さの時間変化。

目と耳で発雷を確認して、そのエコーの高さを RHI より求めている。我々は方向探知機により発雷を確認し、エコーセルが最初に発雷した時点での高さをステップト、PPI より求めている。第4章で述べたように、エコー頂の高さは最初の発雷が観測された時点で一番高く、以後そのエコー頂は降下する。故に発雷した総てのエコーのエコー頂の温度を求めれば、最初の発雷が観測された時点でのエコー頂の気温よりも高い値になり易いことになる。又、エコー頂の気温が  $-20.5^{\circ}\text{C}$  以下にならず、たとえば  $-18^{\circ}\text{C}$  位で発雷しないエコーと、 $-25^{\circ}\text{C}$  位で発雷して発雷しながらエコー頂が降下しているエコーが混在している場合、Tosha・Ichimura (1961) の方法では判定の精度が悪くなり易いであろうと思われる。

冬の雷について考えると、前線の後面の下降気流の場  
1986年9月

であろうと思われる領域、2月、3月頃の地表気温が低くストロングエコーの発現時間が短いエコーが現れやすい時期等のエコーは、エコー頂の気温が十分に低くても発雷しにくいようである。このようなエコーが、エコー頂温度から発雷の有無を判定することの精度を悪くしている。これを Tosha・Ichimura (1961) による判定精度、90%と比較してみると、夏にはエコー頂の気温が低くても発雷しないエコーが非常に少ないのではないと思われる。

### 6. 考察および謝辞

これまでの調査により、夏の雷と冬の雷の間には多数の共通点が存在することが分かった。これはエコー頂の時間変化、又はエコー頂気温と発雷の関係である。しかし夏の雷と大きく異なる点は、Tosha・Ichimura (1961) によると、大部分のエコー頂気温が低い対流性セル付近では発雷が観測されるのに対して、冬季にはエコー頂気温が十分に低くても発雷しないセルが多数存在することである。このことが冬の雷を予測することをむずかしくしている。

ここまで述べてきたことは、小松気象隊、並びに金沢地方気象台等によく言われてきたことであるが、ここでは時間間隔が小さいレーダーエコーを用いて上記のことを確認した。

本稿関連の資料収集に当たり、小松気象隊、金沢地方

気象台におられる多くの方々に御協力いただいたことを感謝いたします。

### 文 献

Geotis, S.G. and R.E. Orville, 1984 : Simultaneous observations of lightning ground strokes and radar reflectivity patterns, 22th Radar Met. Conf. 57-58.

飯塚利雄, 中田英実, 1973 : 小松地域冬季の雷探知に関する考察, 防衛庁技術研究本部技報, 25, 1-13.

Magono, C., 1980 : Thunderstorms, Developments in Atmospheric Science 12, Elsevier Scientific Publishing Company, pp.78.

Marshall, J.S. and S. Radhakant, 1978 : Radar precipitation maps as lightning indicators, J. Appl. Meteor, 17, 206-212.

Reynolds, S.E. and M. Brook, 1956 : Correlation of the initial electric field and the radar echo in thunderclouds, Journ. Met., 13, 376-380.

Saunders, W.E., 1966 : Tests of thunderstorm forecasting techniques, Bull. A.M.S., 95, 204-210.

Tosha, M. and I. Ichimura, 1961 : Studies on shower and thunderstorm by radar, Pap. Met. Geophys., 12, 18-29.

Workman, E.J. and S.E. Reynolds, 1949 : Electrical activity as related to thunderstorm cell growth, Bull. A.M.S., 30, 142-144.

## NEWS

### 世界の異常天候とその影響評価 (29)

(Climate Impact Assessment, July, 1986, NOAA/NESDIS)

#### 1. 合衆国・南東部——早ばつ

高温と乾燥による苛酷な干ばつが継続し、農作物への被害と給水能力の減少をもたらしている。8カ月にわたる全農作物の被害は20億ドルと報告されている。早ばつはメリーランド、バージニア、ノースカロライナ、サウスカロライナ、ジョージア、テネシーの各州で最もひどい。7月末になって、冷氣と散発的な豪雨を伴った雷雨があり、多少救いにはなったが、より一層の降雨を必要とする。この地域での今年上半期の早ばつは少なくとも111年来のものであり、熱波による死者は100名を越えるといわれている。

#### 2. セネガル——乾燥

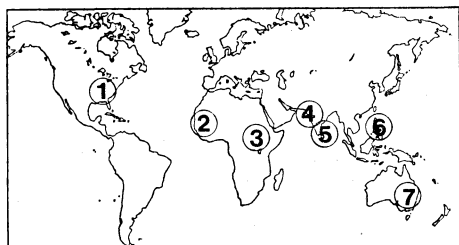
7月の苛酷な乾燥により、穀物と落花生の収穫可能量は大幅に減少した。

#### 3. スーダン南部・エチオピア西部——乾燥

スーダン南部とエチオピア西部の4～5月の乾燥により、早い時期に植付けられた主要農作物は大幅な減収となった。6月と7月の大雨で農作物の成育条件は好転したが、損害の大多数は回復不能である。天候問題を除いても、スーダン南部では軍事衝突のため主要食糧の不足に直面している。

#### 4. インド・パキスタン——乾燥

7月の乾燥天候により、パキスタンとインド西部の雨を必要とする農作物に損害があった。



#### 5. スリランカ——乾燥

7月もまた乾燥した天候が続きヤラ期\*の稲の収穫は減少した。

#### 6. フィリピン——台風

台風 Peggy (台風7号) は7月8～9日にルソン島を襲い、多くの被害が発生した。西海岸沿岸での600～700mmの雨で、多くの地滑りが発生し、少なくとも62名の死者が出た。

#### 7. オーストラリア——早ばつの解消

沿岸地域を除き、7月の平年を上回る降雨は南東部の早ばつを救済した。クイーンズランド州南東部とニューサウスウェールズ州の小麦を救済するに必要な土壌水分がもたらされた。(8月初旬の豪雨で海岸沿いの早ばつも終了した)

注：上記各項目の番号は図中の番号に対応している。

\* ヤラ期：前号参照

(気候変動対策室 重原好次)