

レーダーエコーによる冬季襲雷予測のための雷雲判定法*

道本 光一郎**

要旨

レーダーエコーから襲雷予測を行うために冬季雷の事例解析を行った。その結果を以下に示す。

- 1) レーダーエコー頂高度の盛衰と発雷は比較的よく一致している。
- 2) 半径 100 km 以内の CAPPI 情報をもとに、発雷実況の把握とその後の襲雷に対する予測がある程度可能である。
- 3) すなわち、CAPPI により得られるエコー頂高度をエコー頂気温に置き換えることにより、その日の発雷の目安となるエコー頂気温が設定でき、上記 2) 項に示した予測が可能となる。

1. はじめに

冬季北陸地方の雷は、非常に特異な気象現象である。全天が下層雲に覆われ、どれが雷雲なのか区別できないことが、夏の雷と著しく異なる点である。そして、頭上で突然発雷する。これら目視ではとらえにくい冬季の発雷現象を、レーダーエコーのデータを用いて予測できないかという観点から、本事例研究を行った。今後、発雷の予報則を整備していくための予備的な解析である。

さて、レーダーエコーを用いた雷の研究には、夏雷に関しては Tosha and Ichimura (1961) による雷雨としゅう雨の判別の解析がある。彼らによると、その基準はエコー頂気温にして -15.6°C である。これにより約 9 割の精度で雷雨としゅう雨を判別できることが示されている。

冬雷に関しては遠峰・道本・阿部 (1986) により、エコー頂気温と発雷の関係が調査されている。彼らによると、発雷の直前もしくは直後から 1~2 時間程度のレーダーエコーの観測データをもとにして、発雷か非発雷かのエコー頂気温の臨界値を -20°C 付近とした。

発雷および襲雷の短時間予測を半日ほどの間に何回も行うことは、飛行場およびその周辺の空域における航空機の安全運航という点で非常に有益と考えられる。

今回は、小松空港を中心とした半径 100 km 以内のレーダー観測データ (約 30 分に 1 回) を用いて、発雷開始~発雷中~発雷終了後までの十数時間にわたるエコーの変化と発雷状況について解析した結果を報告する。

2. 観測器材の説明

本研究では、小松飛行場周辺に設置されている「雷電探知システム」のうち、Stepped PPI 機能 (PPI を行いながらビーム幅ずつステップアップする) を有する気象レーダーと、空電方向探知機の 2 つのデータを使用した。測器についての詳細は、遠峰・道本・阿部 (1986) を参照されたい。ここでは、気象レーダー系と空電方向探知機系の性能諸元の要約を第 1, 2 表に示す。また、各センサーの位置関係および気象レーダーの有効範囲について第 1 図に示す。

3. 解析方法

CAPPI 機能を有する気象レーダーと空電方向探知機により、レーダーエコーの時間変化と発雷位置を求めた。

第 2 図は約 30 分おきの観測によって得られたレーダーエコー頂高度の時間変化を示す。矢印で示した発雷の起きている時には、発雷しているもののエコー頂高度を求めた。また発雷の起きている時 (観測時刻を基準にして ± 15 分以内) には、その画面の中で最もエコー頂の高いものの高度を求めた。方向探知機の有効範囲が半径約 100 km であるので、レーダーエコーについてもこの範

* A method of prediction of thunderstorms in winter by radar echo.

** Koichiro Michimoto. 防衛大学校地学教室.

——1987年12月3日受領——

——1988年9月9日受理——

第1表 気象レーダー系の性能諸元

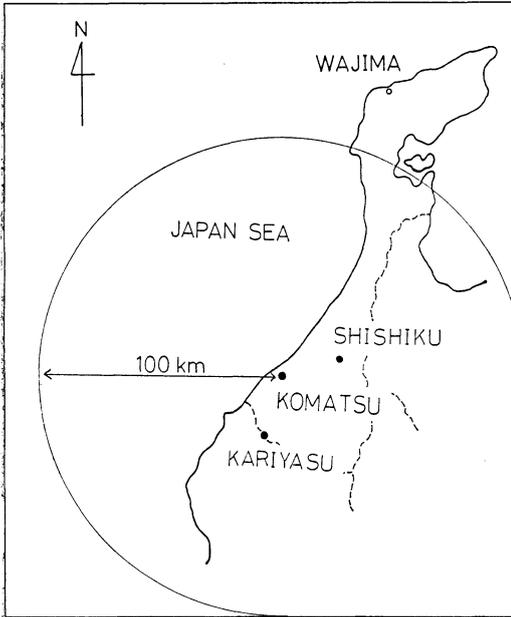
気象レーダー系	
項目	諸元
周波数	5,300 MHz (5.7cm 波)
送信パルス幅	2 μ S
送信出力	250 KW
最小受信感度	-105 dBm 以下
アンテナ・ビーム幅	
水平	1.3度
垂直	1.4度

垂直ビーム幅 (1.4度) ずつ Step up しながら PPI を行いデータを MT に取り込むことができる。

第2表 空電方向探知系機の性能諸元

空電方向探知機系	
項目	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, 北各1)
受信周波数	100.5 MHz \pm 1 MHz
雑音指数	15 dB 以下
利得	15 dB 以上

上記諸元を持つアンテナが3ヶ所に設置されており, 交会法により発雷点を求める。



第1図 各センサーの位置関係および気象レーダーの有効範囲

KOMATSU (小松): 気象レーダー, KOMATSU (小松), SHISHIKU (獅子吼), KARIYASU (刈安): 方向探知機アンテナを示す。(●印)

おのおのの有効範囲は, 半径 100 km 以内。WAJIMA (輪島): 高層観測地点を示す。(○印)

圈内のものを用いて解析した。なお, ここで用いたエコー頂は等エコーレベル (10段階) のうちのゼロレベルのものである。等エコーレベルと等価降雨量の関係は第3表に示す。

第2図からわかるように, 発雷が集中的に起きている時間帯, 比較的ばらつきがある時間帯, そして発雷していない時間帯の3つに分けられる。図中に示したI~Vまでの5つのステージに分けて, 以下で詳しく述べる。

なお, CAPPI 画面は高度 2 km と 4 km の2つを示した。2 km のものは, グランドエコーが比較的少なく, 降水エコーの広がりがよくわかるために示した。4 km のものは, 気温にして -20~-25°C 付近であり, 発雷と何らかの関係がありそうなところと考えられるので示した。また, 4 km の画面の中には, その観測時刻の \pm 15分以内に受信した発雷点を黒丸印 (●) で記入した。

4. 各ステージごとの解析結果

4.1 発雷の多い時期 (ステージ I, III)

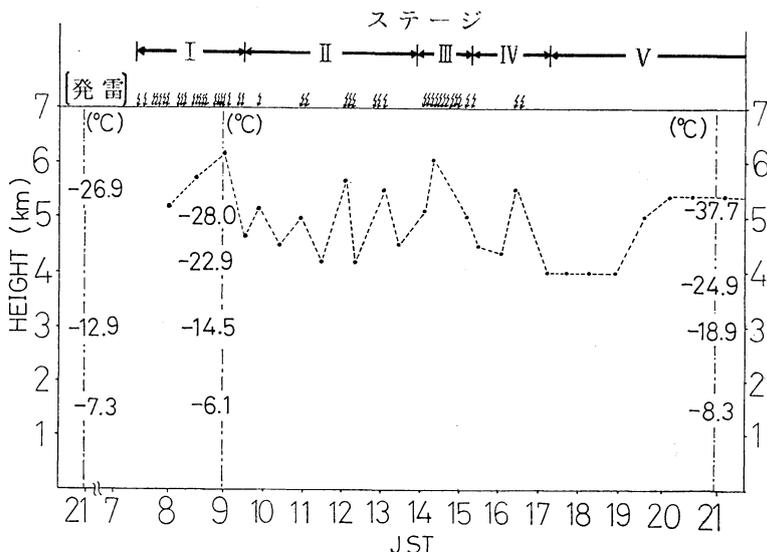
08~09時と14~15時にかけての2回にわたり, 集中的に発雷している。

第3図にはこの時期の高度 2 km と 4 km の CAPPI 画面を示す。第4図には, 特にエコー頂の高かった0900 I と1429 I の鉛直断面図を示す。

ステージ I とステージ III に共通にみられる特徴は, 北東から南西にかけてライン状のエコーとなっている点である。さらに, 発雷が最も集中している0900 I と1430 I には, 並から強 (斜線, 黒) で示す) のエコーが, 高度

第3表 等エコーレベルと降雨量の関係

等エコーレベル	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
等価降雨量 (mm/hr)	0.625 } 0.75	0.75 } 1.0	1.0 } 2.1	2.1 } 4.2	4.2 } 8.7	8.7 } 17.6	17.6 } 36.5	36.5 } 75.0	75.0 } 154.0	154.0 } 以上



第2図 レーダーエコー頂高度の時間変化,

縦軸はエコー頂高度 (km), 横軸は時刻 (JST), 上部には各ステージ (I~V) と発雷 (↓印) をそれぞれ示す. 1点鎖線上には12月27日21時, 12月28日09時と21時の輪島の高層観測により得られた気温 (°C) を示す.

4 km の画面にも現われている.

レーダーエコーの移動は, ステージ I では70~80度方向へ約 50 km/時であったが, ステージ III では, 90度方向へ約 40 km/時であった.

4.2 発雷の少ない時期 (ステージ II, IV)

0930~1330 I と1530~1630 I にかけては, 発雷が比較的少なかった.

第5図にはこの時期の高度 2 km と 4 km の CAPPI 画面を示す.

ステージ II とステージ IV では, それぞれ前ステージでみられたライン状のエコーが海岸線から内陸へと移動し, 衰弱していった. エコー強度も弱まり, 全体的なエコー頂高度も低くなった.

0956 I に受信した発雷は, 小松空港北東にて発生した航空機の被雷である.

その後, 11時前後には南西の海岸線付近で発雷している. この時にはやはり, 高度 4 km の画面に並以上の強さのエコーがみられ, その高度も 5 km を越えていた.

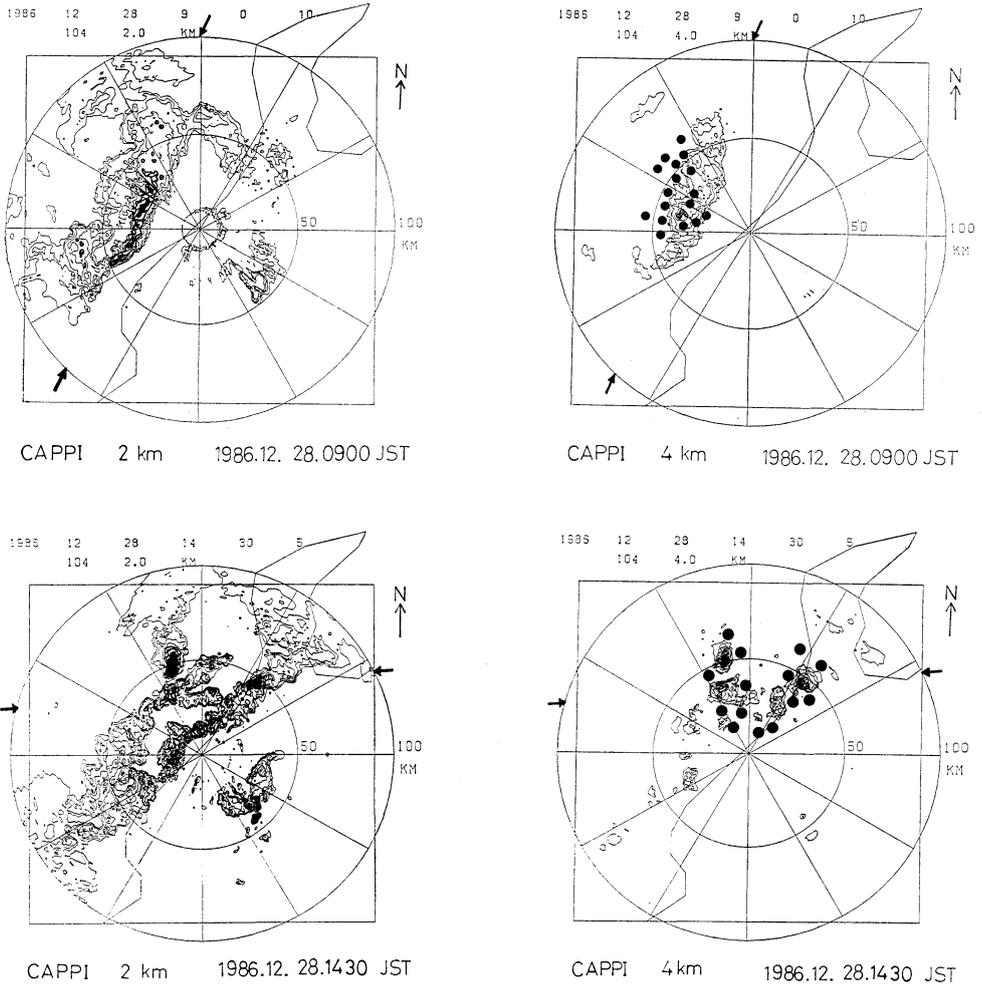
12時過ぎには, 西海上 75 km 付近での発雷をとらえているが, この時にも高度 4 km には並の強さのエコーが確認されている.

13時ごろには, 北東の海岸線付近での発雷に対して同様のことが認められた.

ステージ II の特徴としては, 比較的小さな単一のエコー (セル状のもの) が海上や海岸線で発雷していることである.

ステージ IV では, ステージ II に比べて海上のエコーは少なくなり, 全体的に弱まってきているのがわかる.

1630 I 前後に東 75 km 付近で発雷している. 方向探



第3図 レーダーエコー平面図 (2 km, 4 km)

ステージⅠとⅢの各観測時刻の CAPPi 画面. エコー強度は□ (0~3), ▨ (4, 5), ■ (6~9) の等エコーレベルをそれぞれ示す. (第3表参照)

知機の空電受信位置において、エコーが一部発達していることがわかる。(1635Ⅰの高度4kmの画面参照)

レーダーエコーの移動は、ステージⅡではほぼ90度の約40km/時であったが、ステージⅣでは、100~110度方向へと変化している。

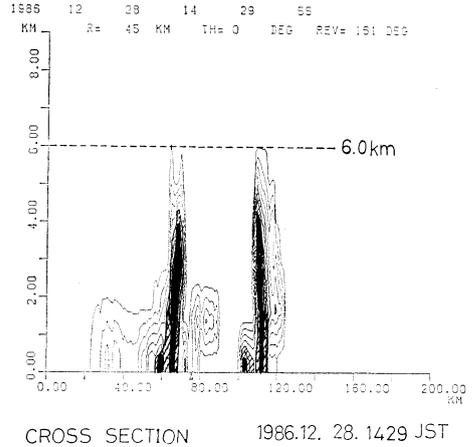
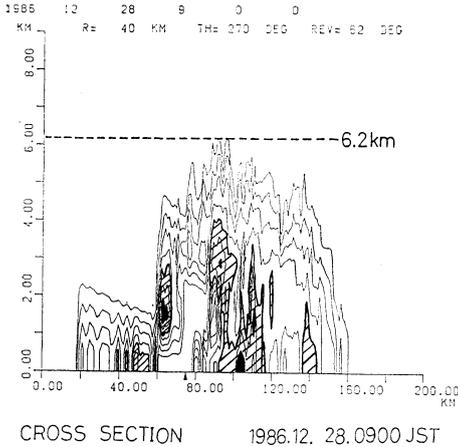
4.3 発雷の終わった後の時期 (ステージⅤ)

17時以降は発雷は受信されていない。第2図からわかるように、1930Ⅰごろまでは4km程度のエコー頂高度であった。しかし、20時を過ぎると、高度5kmを越えるエコーがいくつか出現している。(第6図(a), (b)

参照)

これらのエコーは、高度4km付近でもステージⅡやⅣでみられた大きさではない。しかし並の強さのエコーが高度4kmでも確認されている。そしてエコー頂も5kmを少し越えている。

レーダーエコーの移動は、120度方向へ50km/時と、完全に北西流場になってきている。23時以降は、ほぼ4km以下のエコー頂高度であった。



第4図 レーダーエコー断面図

0900 I と 1429 I の断面図。それぞれ第3図中の矢印方向の断面を示す。その他は第3図と同様。

5. 考察

今回解析した1986年12月28日は、山陰沖に発生した低気圧がゆっくりと東進して、小松周辺では早朝から夕刻まで終日雷雨に見舞われた。夜に入ってからには雪に変わり、翌日まで断続的に降り続いた。日中は小松空港離着陸の航空機6便中、実に3便被雷し、午後の後半には悪天候のために最終便まで全便が欠航となった。ひと冬に何回かしかない悪天日であった。

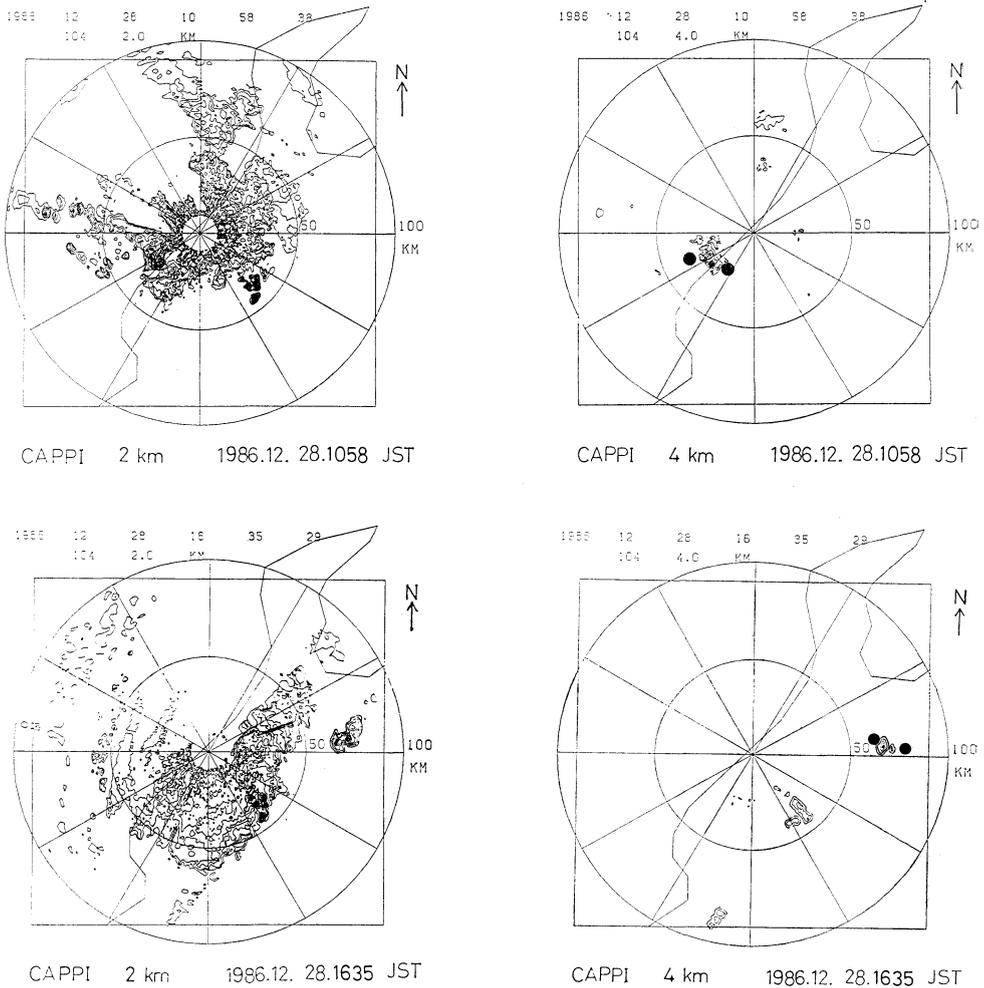
まず、解析結果として特徴的なことは、発雷しているときの観測において高度4km付近にまで強いエコー（等エコーレベル4以上）が存在しているということである。特に集中的に発雷した0900 I と 1430 I では、高度4kmのCAPPI画面内においてエコーの面積が他に比べて大きくなっていることがわかる。この高度4km付近は気温 $-20\sim-25^{\circ}\text{C}$ であり、この気温における並強エコーの存在と発雷が非常によく対応していることが確認できた。

Workmanら(1949)が言っているように、レーダーエコーが最も高いところまで成長し、それが下降しはじめるころに最初の放電が観測され、そのエコー頂高度は $-28\sim-30^{\circ}\text{C}$ 付近であるという。今回の解析結果は、この観測結果と比べると並以上のエコーの存在している気温においてよく似ている。このことは、発雷現象と $-20\sim-25^{\circ}\text{C}$ 気温における並以上のエコーの存在が何らかの関係があるものと考えられる。

次に、襲雷予測について検討する。当日の最初の雷を

小松空港で観測者が観測したのは、0846 I であった。発雷エコーの位置は北西約40kmと推定される。これに対して、空電方向探知機が最初の雷を受信したのは、0726 I であった。発雷エコーの位置は西北西約90kmと推定される。このように、眼と耳による従来の気象観測に比べて、距離にして約50km遠方から、時間にして1時間以上前から発雷現象と発雷エコーを捕えることが可能である。このことは、飛行場周辺における航空気象上の予・警報という観点からも非常に重要な意味があると思われる。すなわち、半径100km以内にエコーが接近してくるような場合には、メソスケールの天気現象を気象レーダーを用いることにより降水領域として捕えることができる。さらに、空電方向探知機により発雷の有無が確認できる。これらのデータをもとにして、飛行場から半径50km以内の空域に対して発雷実況とエコーの移動をもとにした、その後の飛行場に対する襲雷予測をすることが可能となろう。

ところで、どのエコーセルがいつ発雷するか？また、いつ発雷が止むか？という問題が考えられる。これらの判別のためには30分に1回程度のレーダー観測では不十分であり、やはり数分に1回程度の細かい間隔の観測を行う必要があろう。このような観測により、エコーの成長速度や強雨域の持続時間と発雷との関係についてより一層はっきりとしてくるのではないかと思われる。そして個々のエコーセルの発雷予測へと発展していく可能性もある。



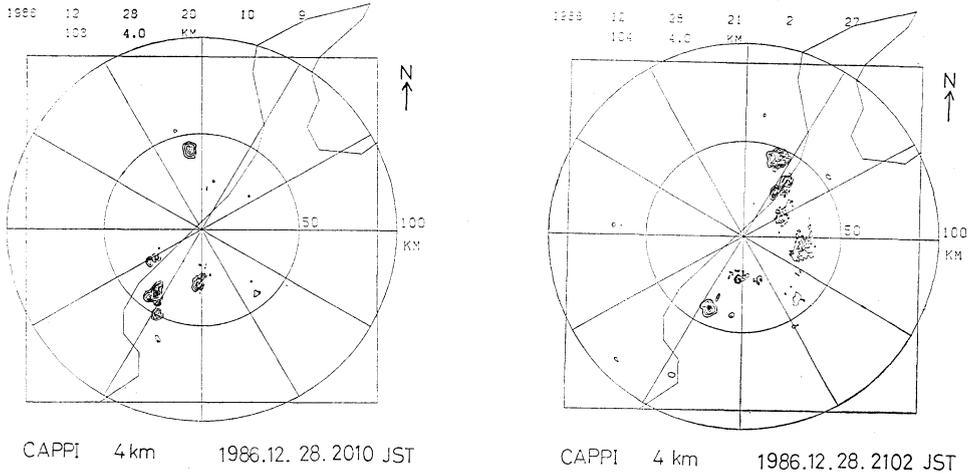
第5図 レーダーエコー平面図 (2 km, 4 km).
 ステージⅡとⅣの CAPPi 画面. その他は第3図と同様.

さて、今回の解析でもうひとつ興味ある結果が得られた。発雷が終了した後のステージⅤの段階で、エコー頂気温が -35°C 以下であり高度 4 km 付近に並以上のものがみられるエコーが出現した (20~21時)。しかしこの時間帯に発雷は受信されていないのである。遠峰ら (1986) の調査によると、厳冬期 (2月~3月はじめ) には決まってエコー頂気温が十分に低く (-30°C 以下) でも非発雷なものが多数あることが報告されている。今回、低気圧通過後の北西流場のときに同様な非発雷エコーが観測された。高橋 (1987) によれば、強い寒気が下層まで入って来た場合、地表 (海表) 面付近の気温が

$-4\sim-5^{\circ}\text{C}$ ぐらになり -10°C 層が雲底に近い位置まで下降したような場合には、発雷するのに十分な電荷蓄積が起きにくいと述べている。また、雷雲内の電気の活動度が、あられや氷晶の濃度分布に著しく依存するとも述べている。このようなことが非発雷セルの出現と関係があるのではないかと考えられるが、今後調べる必要がある。

6. おわりに

レーダーエコー頂気温から発雷を判定することはある程度可能である。そして30分に1回程度のレーダー観測



第6図 レーダーエコー平面図 (4 km),
ステージVのCAPPI画面. その他は第3図と同様.

でも発雷の判定と時間外挿によるエコーの移動予測を組み合わせることによって、襲雷予測が可能となる。すなわち、半径 100 km 以内の発雷実況とその時のレーダーエコー頂高度（気温に置き換える）により発雷判定を行い、その移動を監視することにより飛行場やその周辺空域に対する襲雷予測ができる。

ただし、発雷を予測するためにはより時間間隔の短いデータの収集が必要である。さらに、エコー頂気温が十分に低くても非発雷なものについても今後の調査研究が必要である。

本稿関連の資料収集にあたり、小松気象隊の多くの方々に御協力いただいたことを感謝いたします。また、貴重な助言をいただいた遠峰・阿部両先生にも感謝いたします。

文 献

畠山久尚・川野 実, 1956: 気象電気学, 地人書館, 92-94.
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, J. Met., 13, 376-380.
Saunders, W.E., 1966: Tests of thunderstorm forecasting techniques, Bull. A.M.S., 95, 204-210.
高橋 劭, 1987: 雲の物理, 東京堂書店, 149-155.
竹内利雄・仲野 貢, 1983: 北陸における冬の雷の研究. 天気, 30, 13-18.
竹内利雄, 1987: 雷放電現象, 名古屋大学出版会, 69-72.
遠峰菊郎・道本光一郎・阿部成雄, 1986: レーダーによる小松周辺の冬季雷の研究. 天気, 33, 445-452.
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.