Meteorological Society of Japan

レーウィンゾンデによる冬季雷の観測*

遠峰菊郎[*1]・小林文明[*2]・道本光一郎[*3]・緒方秀明[*4]
和田保徳[*5]・郷津寿夫[*6]・酒井　勉[*7]

要　旨

3，4時間先の冬季雷予測の可能性を探るために，1992年1月22日から同月24日まで，レーウィンゾンデによる3時間間隔の観測を実施した。観測期間中に雷活動が活発であった時間帯は3回あった。これらの雷活動の中にはいわゆる気団雷も含まれるが，それぞれ熱的に不安定な小領域や小さい収束線が観測された．このことから，これらの小擾乱の存在を確認することができれば，冬季雷の予測はより精度が高まると考えられる．

1．はじめに

冬季日本海収束帯の帯状雲の構造に関しては，これまでに多くの研究がなされており(Hozumi and Magono, 1984；八木，1985；Nagata, *et al.*, 1986；八木他，1986)，多くのことが分かってきた．しかし，これらの研究は主に豪雪の予測のための研究である．日本海側の冬季雷は特に顕著な帯状雲が観測されない場合でも頻繁に発生するので，これの予測という立場から，メソスケール現象の観測を試みた．

北陸の冬季雷を予測するためにはいくつかの方法があり，その目的により使いわけられなければならない．例えば，翌日の発雷の有無を予測するためには，寒冷前線の襲来や寒気の吹き出しを予測し，ショワルターインデックス等を用いて大気の安定度を表わし，予測することができる．この予測法は予想天気図の精度，すなわち，定点観測網のデータ密度と，それを用いて実施される数値予報の精度に大きく依存している．しかし北陸の冬季雷雲は日本海上で発生発達することが多く，また，本邦に上陸してから発生する雷雲についても日本海は大きな影響を与えている．そこで現在，日本海上に気象観測点がほとんど存在していないことが，冬季雷の予測を困難にしていることは容易に推測できる．

航空機のための冬季雷予測のためには，主に，レーダー，方向探知機，電界計ネットワークが使用されている（遠峰他，1986；鈴木他，1987；遠峰他，1987)．レーダーや方向探知機のデータからは，およそ1時間から30分後に発雷する可能性が高い雷雲が何処を通過するかを予測することができる．地上電界計ネットワークでは，電界計付近に存在する危険な雷雲を感知することができる．これらの予測法について考えると，航空機運用のためには比較的に短時間で高精度，広範囲の発雷予測が必要とされているので，さらに精度の向上が必要である．

一方，電力保護のための雷予測については，その対策を構じるために，3時間ないし4時間先の予測が必要とされている．このためにはメソスケール現象も表現されている予想天気図を作成することが重要であると考えられるが，このことは現時点では困難である．そこで本論文では，さらに細かい観測網を使用した際に冬季雷がどのように観測されるのかを確認するために，レーウィンゾンデをおよそ3時間間隔で飛揚した．

---

* An observational study on winter thunderstorms with RAWIN-SONDE.

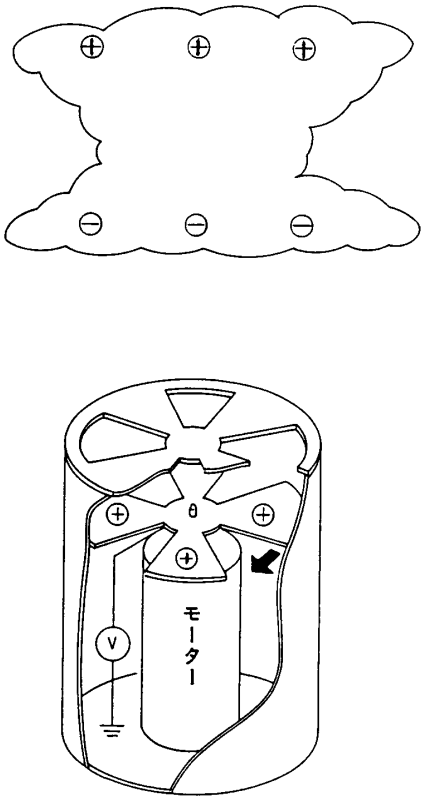
*1 Kikuro Tomine, 防衛大学校地球科学科.
*2 Fumiaki Kobayashi, 防衛大学校地球科学科.
*3 Koichiro Michimoto, 防衛大学校地球科学科.
*4 Hideaki Ogata, 防衛大学校地球科学科.
*5 Yasunori Wada, 防衛大学校地球科学科.
*6 Toshio Gouzu, 北陸電力技術研究所.
*7 Tsutomu Sakai, 北陸電力技術研究所.

——1993年2月12日受領——
——1993年8月26日受理——

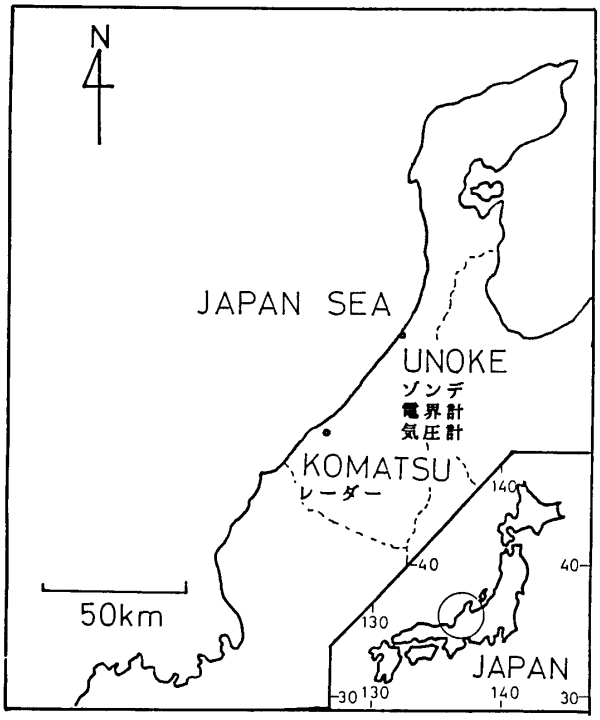
© 1994　日本気象学会

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第1図　電界計の構造の略図.



第2図　観測点の位置. 小松にレーダーを設置し, 宇ノ気でレーウィンゾンデその他の観測を実施した.

2．観測場所と使用器材

石川県小松飛行場に可搬型レーダーを設置し，同県宇ノ気の石川県砂丘地農業試験場で Vaisala 社のレーウィンゾンデを飛揚し，電界計（第1図）と気圧計を配置した．これらの観測地点を第2図に示す．このゾンデは1992年1月22日10時44分から同月24日12時24分まで，およそ3時間間隔で飛揚した．地上設置の器材については，21日9時より稼働した．また，宇ノ気の試験場の敷地内にアメダスが設置してあるので，このデータも使用した．

3．観測期間の天気概況

当観測期間内においては，22日8時から14時にかけて，22日23時30分から23日3時30分まで，また，23日15時から同日19時30分までの間，雷が聴目観測され，電界計が大きな値を示した．この間の地上天気図を見ると，22日9時には寒冷前線が北陸地方に上陸した（第3a図）。その後，22日21時（第3b図），23日9時の地上天気図では，北陸地方では北または北西流の場になっていた．22日21時の 850 hPa の天気図を見ると（第4図），大陸からの寒気が日本上空を覆い，太平洋側にまで及んでおり，ごく弱い高度のトラフが日本海上に位置している．これらの天気図から分かることは，北陸地方は22日の午前中には寒冷前線の影響下にあり天気は悪化しやすい状態であった．それ以降は寒気団の支配下であったが，弱い高度のトラフの存在から悪天を伴う可能性が予想される．

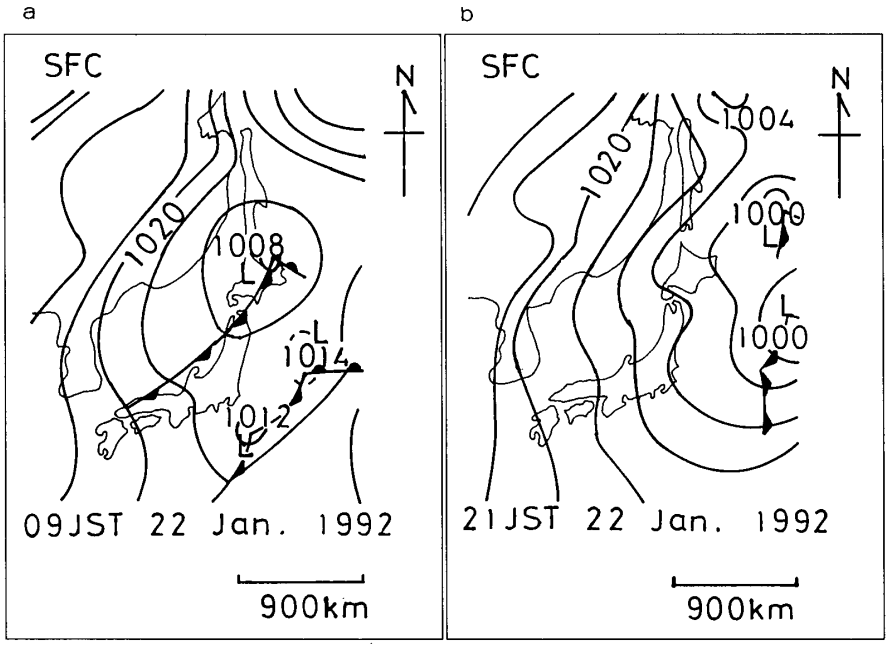
22日から23日にかけて，雷が観測された時間帯は大きく3つに分けられる．冬季北陸地方では弱い高度のトラフでも容易に降雪や雷雲をもたらすので，最初の寒冷前線にともなう悪天は容易に予測することができる．しかし，それ以降の2つの悪天は第4図中の弱いトラフに対応するものである可能性も考えられるが，この上層天気図から悪天の発生時刻を3ないし4時間の精度で予測することは困難である．

4．地上気象要素の時間変化

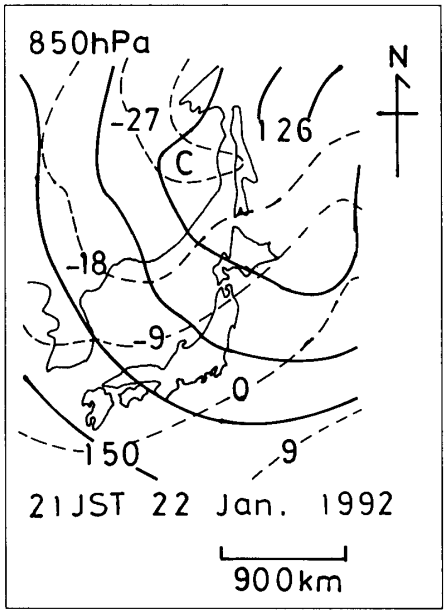
雷発生時刻の予測精度を高めるために，地上気圧変化，一時間当たり降水量，地上気温変化，地上電界値を調べた（第5図）．地上電界値が大きい値（絶対値が 20 kv/m 以上）を示した時間帯を図中（←E→）で示す．また，縦の矢印で発雷を示す．この気圧変化を見ると，22日14時と23日16時にピークを持つ2つの局所低圧部に気が付く．これらの局所低圧部と22日23時か

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第3図　1992年1月22日9時(a)と21時(b)の地上天気図（気圧分布），単位はhPa.



第4図　1992年1月22日21時の850 hPaにおける天気図．実線により等高度線（10 m），破線により等温線（C）を表わす．

ら23日4時にかけて気圧が細かく振動する時間帯が強い地上電界値を示す3つの時間帯，22日の8時から13時50分，同日23時30分から23日3時30分そして23日15時から19時30分，に対応していることが分かる．これら3つの気圧擾乱に対応して，1時間当たり降水量は2 mm/hから4 mm/hと比較的に大きな値を示し，このことからも擾乱が通過していることが確認できる．

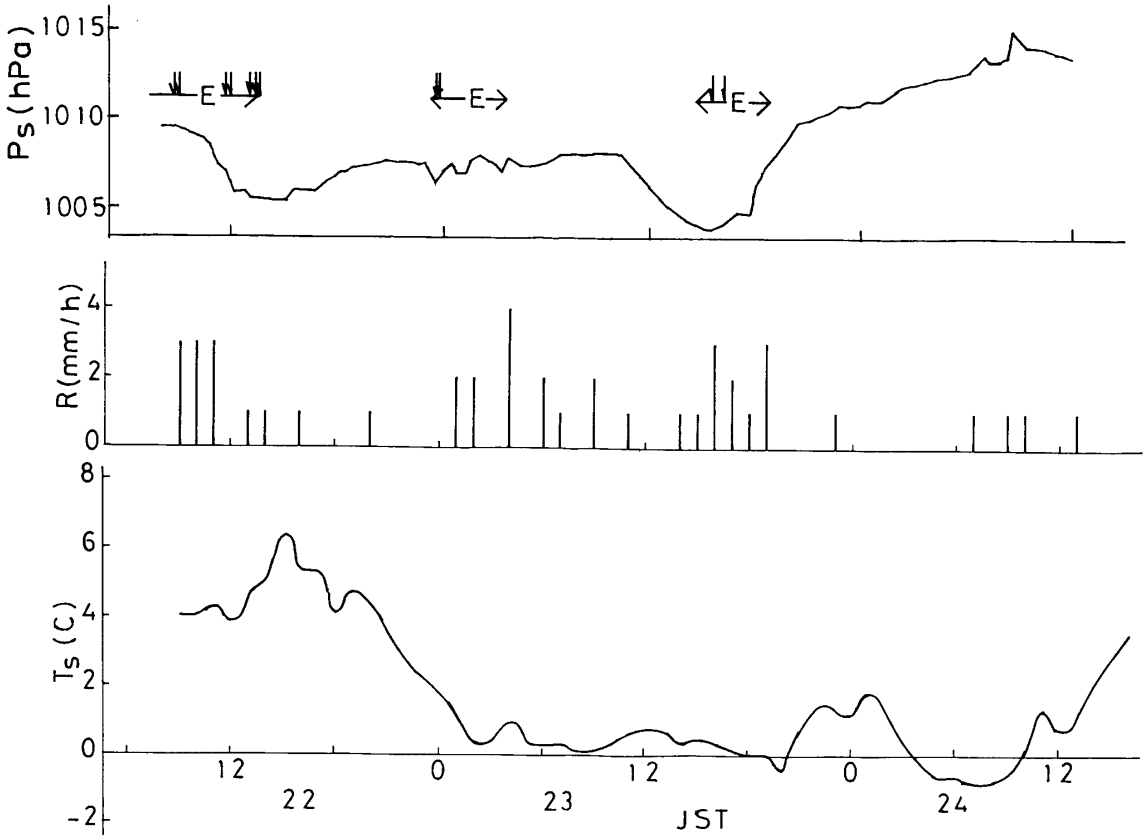
地上気温の時間変化を見ると，22日15時から23日2時にかけて急速な寒冷化に気がつくが，これは寒冷前線の通過にともなうものである．地上電界値が大きくなるのは，この気温低下が始まる直前と終わり頃の時間帯，そして気温が下がりきった寒気団の中である．

5．アメダスの風とレーダーエコー

1月22日9時から23日7時までの，北陸地方におけるアメダスの地上風を示す（第6図）．地上風の変化に注目して収束域を解析すると，9時には能登半島の付け根で比較的に強い，6 m/sから8.5 m/sの南から南西風であるが，その北側では風速は小さくなっているので，ここに一つ存在していると考えられる（第6a図）．もう一つの収束域は山地から吹き降ろして来る南風成分が卓越した風と能登半島の少し下方の弱い南西風との間に形成されている．第6a図中，下方の収束城は，南下後不明瞭になってしまうが，能登半島の付け根にあった収束域は13時頃までは次第に南下し（第6c図），その後停滞する（第6d図）．この収束域は21時には衰退し（第6e図），その後新しい収束域が南下しひろがった（第6f，g図）．22日9時と14時30分のレーダーエコーを第7図に示す．9時には東西に100 km以上にも延びた大きなエコーが襲来してきた．この位

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第5図 地上気圧 (Ps)，一時間降水量 (R)，地上気温 (Ts) の時間変化．地上電界値が 20 kv/m 以上の変化を示す時間帯は（←—E—→）で示す．発雷時刻は縦矢印で示す．

置はアメダスによる能登半島の付け根にある収束域に当たる（第6a図）．14時30分にはこのような大きいエコーは見られなくなり，小さいヒョウ紋状のエコーが散在し，次々と襲来した．この時収束域は停滞していた．

気圧が振動していた時間帯に当たる22日23時から23日5時までのアメダス風の分布を見ると（第6f，g図），風は弱く，能登半島西岸部においてこれまで卓越していた西風成分に代わり東風成分が卓越するようになった．

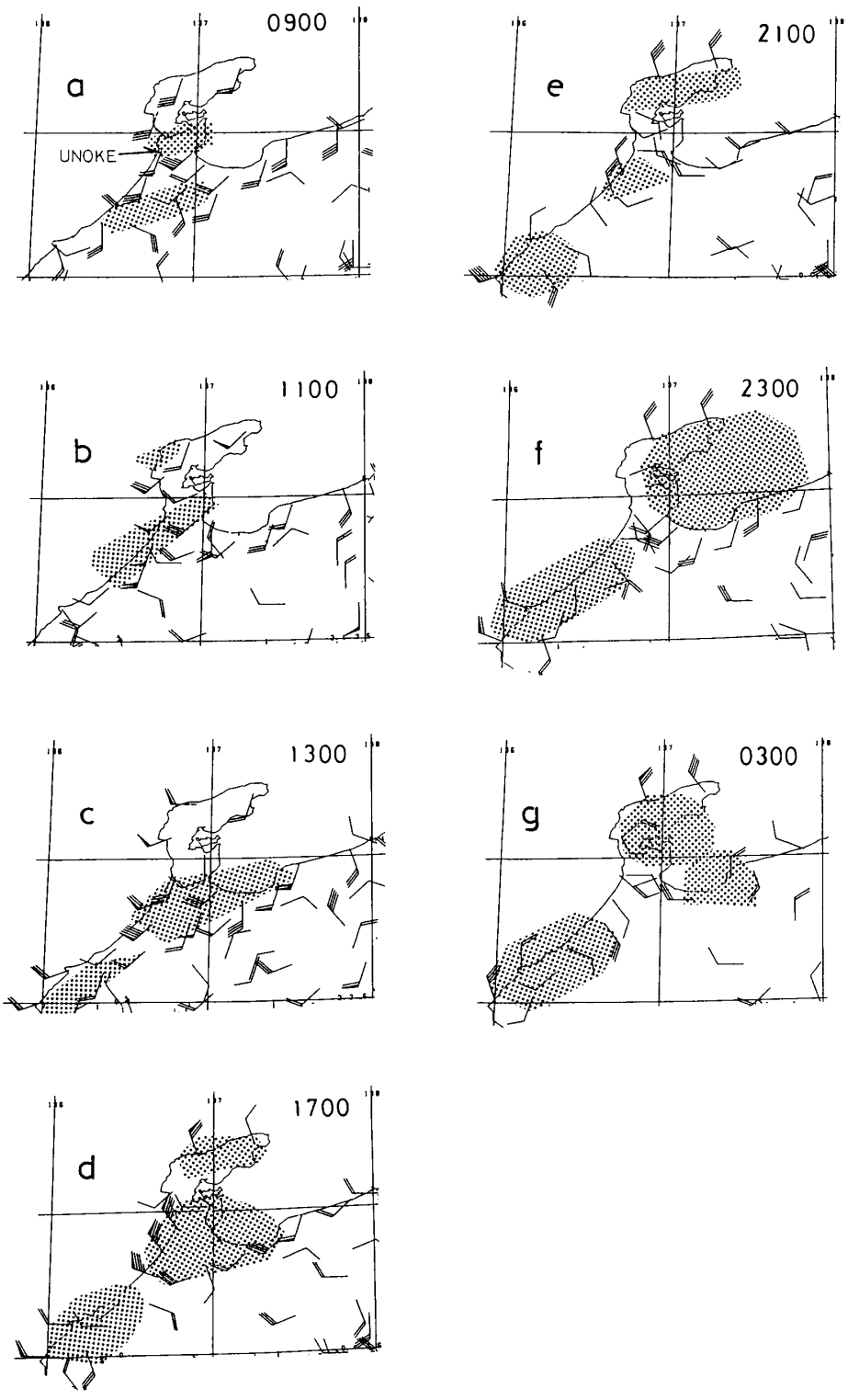
23日11時から21時の間のアメダス風の分布を第8図に示す．この地上風により決定される収束域は，当初（第8a図）図中左下部にのみ小さく確認されたが，その後急速にこの収束領域は大きくなり（第8b，c図），南下し，内陸に入った．宇ノ気において遠雷が聞こえた16時27分のレーダーエコーを第9図に示す．このエコーも収束域上空に存在しているが（第8b図），エコーインテンシティの強い部分がほとんど見られず，層雲系のエコーである．この層雲の中に局所的に小さな対流雲が形成され，発雷したものである．

6．レーウィンゾンデのデータ

アメダスによる地上風の解析によれば（第6，8図），収束域はほぼ東西に延び南下しているので，この地上収束域の上層における風の収束の様子を調べるために宇ノ気上空における風の南北成分の時間変化を第10図に示す。ここでは北風成分を正，南風成分を負符号で表す。地上電界値が大きくなった3つの時間帯について考えると，1番目と2番目の時間帯は上空の南風成分が北風成分にゆっくりと変化する一つの時間帯の初期と末期に対応しており，3番目の時間帯は南風成分から北風成分への短期間での変化に対応している．東西に延びた収束帯が南下してくる際，一地点における風の南北成分はこのような時間変化を示す．それ故，アメダスの地上風から検出された収束帯は上空にも存在していることが推測され，これらの収束帯の中で雷活動は発生していることになる．上層風の南北成分の時間変化率から考えると，1番目と3番目に電界値が大きくなった時間帯に対応する収束場では収束が大きく，2番目は小さい。この1番目と3番目の時間帯は局所低圧部が現れた時間帯に対応している．2番目の

NII-Electronic Library Service

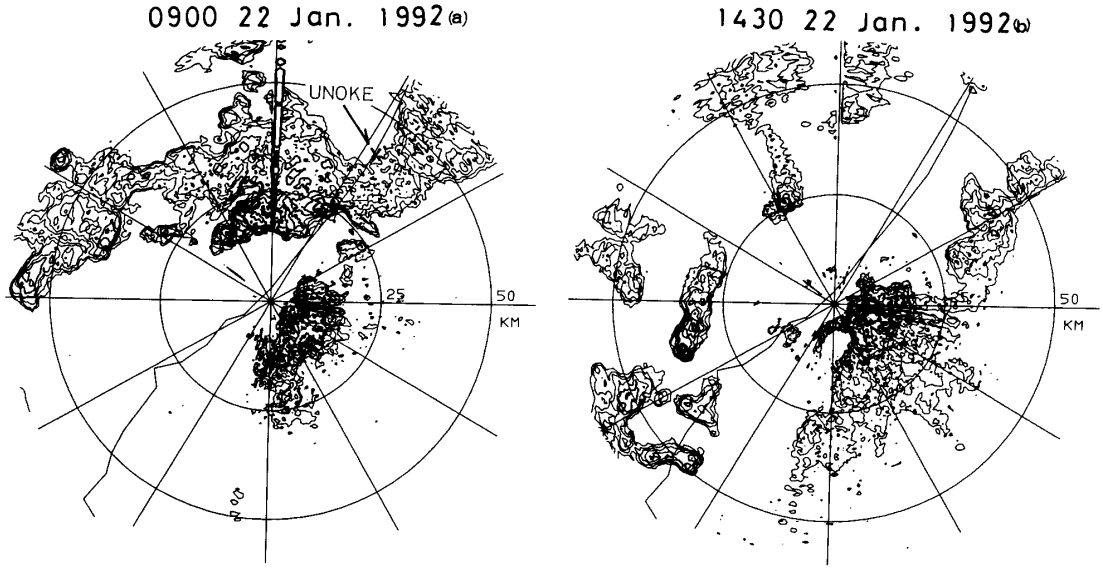
Meteorological Society of Japan



第6図　1992年1月22日9時(a)，11時(b)，13時(c)，17時(d)，21時(e)，23時(f)，23日3時(g)におけるアメダスによる地上風の分布を示す．矢羽根一本1m/s，三角旗は5m/sを示す．図中，直線は経線と緯線を示し，影により収束領域を示す．

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第7図　1992年1月22日9時(a)と14時30分(b)の500 m高度におけるCAPPIを示す．等値線の間隔は20 dBZである．図中，中心は小松であり，25 km円と50 km円と海岸線を記入してある．

時間帯の雷活動が始まった時に能登半島西岸部における地上風では東風成分の卓越が見られた(第8図)．この東風成分の到達高度を調べるために，東風成分を正，西風成分を負符号で表わし，上層風の東西成分の鉛直分布の時間変化を第11図に示す．この図によれば，観測期間中は全体的に西風成分が卓越していたが，2番目の雷活動の時間帯にだけ高度，ほぼ900 hPaに及ぶ正領域すなわち東風成分が見られる．この東風成分は能登半島東岸には現れず，また，厚さも1 km程度と薄いので，局地的な風であると考えられる。2番目の雷活動開始とほぼ同時刻にこの局地風が卓越したことから，両者間に大きな関係があることが想像される．

対流の様子を調べるために，湿球温位の鉛直分布の時間変化を第12図に示す．この図によれば，600 hPa高度付近に安定な層が存在していることが分かる．また，その下では湿球湿位の鉛直傾度は23日5時から16時の間を除いて小さく，この湿球温位の鉛直傾度が小さい時間帯では対流による混合が卓越していることを示している．22日10時40分から14時にかけては600 hPa以下において湿球温位の鉛直分布は乱れており，局所的に不安定な領域も見られる．22日15時から23日5時までは，ゆっくりと湿球温位は低くなり，寒冷前線後部の通過を示している．23日14時から20時までは地上付近では湿球温位の時間変化は見られないが，800 hPa高度から600 hPa高度にかけて湿球温位は時間とともに低下し，上空のみにおいて気温の不連続線が通過している．

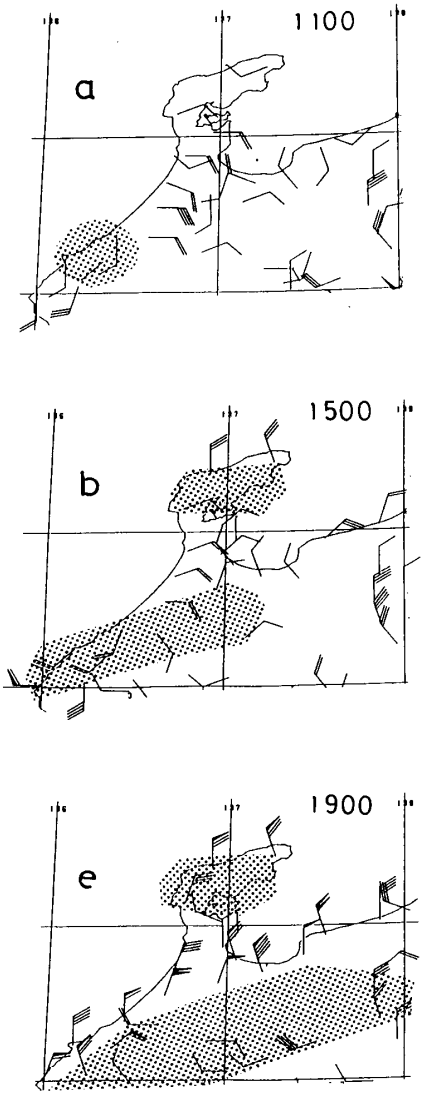
7．ショワルターインデックスによる解析

雷雲が発達するためには大気の状態が不安定でなければならない．その不安定の程度を表すために，通常ショワルターインデックスを用いる．ここでショワルターインデックス(SSI)とは，ある気圧面P_1にある気塊を凝結高度までは乾燥断熱線に沿って上昇させ，次に偽湿潤断熱線に沿って所定の気圧面P_2まで上昇させた時，この気塊の温度を気圧面P_2における気温から差し引いた温度差のことである．通常は850 hPaと500 hPa間のインデックス(SSI_{500})を用いるが，本論文では850 hPaと700 hPa(SSI_{700})のインデックスも計算し，第13図に示す．ここで，SSI_{500}が3以下は不安定とされている．まずSSI_{500}を調べると，常に3以上の大きい値を示し，比較的に安定な場が継続していたように見える．ただし，地上電界値が大きな値を示した1番目と3番目の時間帯の直後に急速に減少している．2番目の時間帯の中にあたる23日0時にもSSI_{500}は減少しているが，その値は6.5であり，安定な状態を保っている．

SSI_{700}の値は全体的に小さいが，その変化傾向はほぼ同じであり，1番目と3番目の時間帯の直後に減少している．また，23日0時にも減少し，負の値になり，この時は不安定な場であることを示している．両インデックスとも地上電界値が大きくなった1番目と3番

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

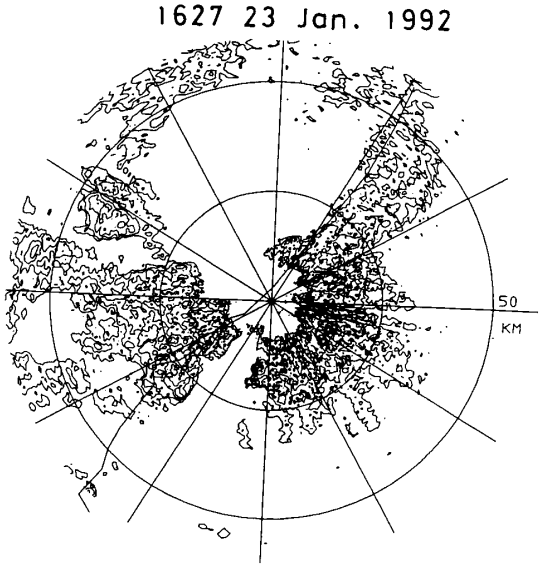


第8図　第6図と同様．但し，1992年1月23日11時(a)，15時(b)，19時(c)におけるもの．

目の時間帯の直後に減少していることは，これらの雷雲により対流混合が引き起こされ，通過後の大気は中立な状態に近付いていることを示している．このことは，第12図の湿球温位分布によっても，1番目と3番目の時間帯の直後に等湿球温位線が立ち上がり，600 hPa 高度付近では下から押し上げたような形状をしていることからも理解される．2番目の時間帯中，23日0時に一時的に SSI_{700} が負となり不安定な場であることを示すのは，第12図中この時刻，700 hPa 付近に寒気が存在しているためである。

8．まとめ

今回の観測期間中に発現した3つの雷活動が活発な



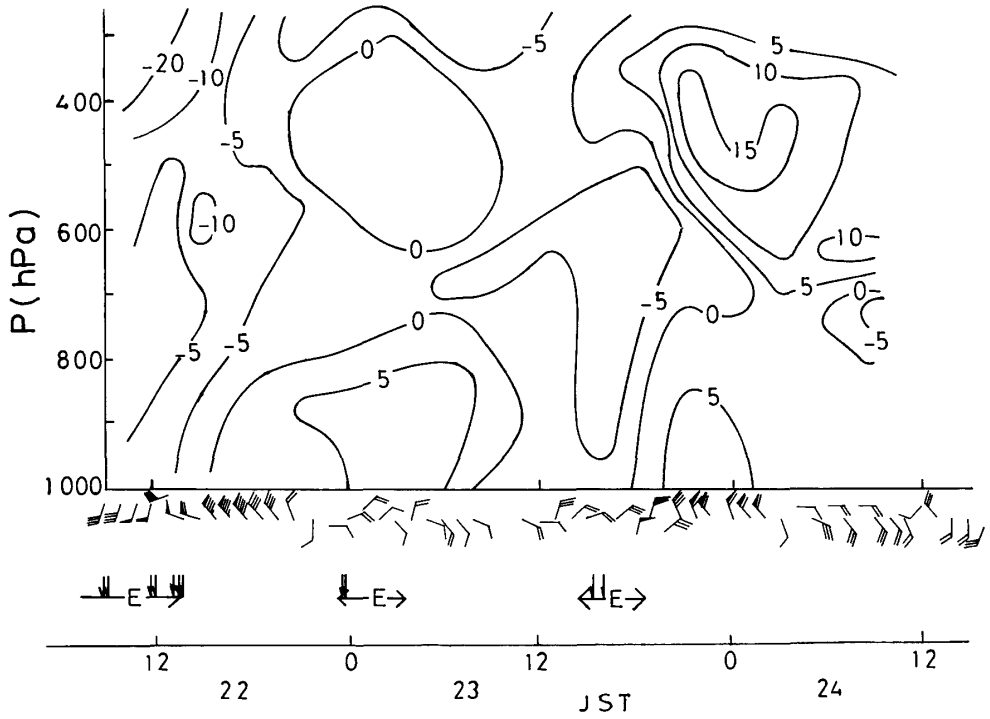
第9図　第7図と同様．ただし，1992年1月23日16時27分のもの．

時間帯は，それぞれいくつかの特徴を示している．まず第1番目の時間帯は，天気図上で解析されているシノプティックスケールの寒冷前線通過の初期に相当する．この時間帯は，観測期間中最も雷活動が盛んであり，22日8時から14時まで継続していた．この時間帯の前半においては未だ気温も気圧も低下しておらず，10時頃から気圧の低下が見られ，その後15時から気温も低下した．この時，当初能登半島の付け根にあった収束域は次第に南下している（第6a，b，c図）．湿球温位の分布（第12図）によれば，対流による混合は高度600 hPa まで到達しており，この時間帯には局所的に不安定な領域も存在していた．レーダーエコーによれば(第7図)，この時間帯の初期には大きな帯状のエコーが現われ，最も対流活動が盛んであったことを示している．この時間帯の末期には小さなエコーが多数現われ，ヒョウ紋状になっている．

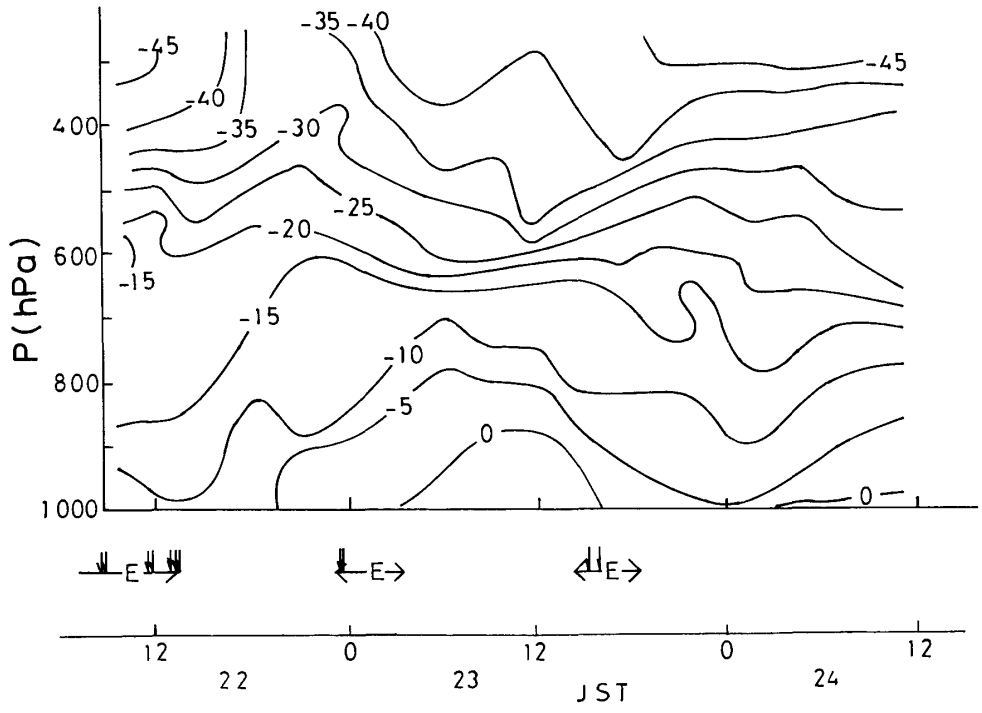
2番目の時間帯は寒冷前線通過の末期に相当し，気圧の低下は見られず振動しているだけである．アメダスによれば，地上の収束域は停滞したままであった．上層の北風成分が次第に大きくなるということから収束域は確認されるが，その到達高度は700 hPa 程度であり，前者と比較するとかなり低い(第10図)．湿球温位の分布（第12図）によれば一部不安定域も存在しているが，下から押し上げられているような様子は見られず，対流活動があまり活発ではないことを示している．この2番目の時間帯が始まる直前に能登半島西岸でのみ東風成分が卓越している（第6f図）．また，こ

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



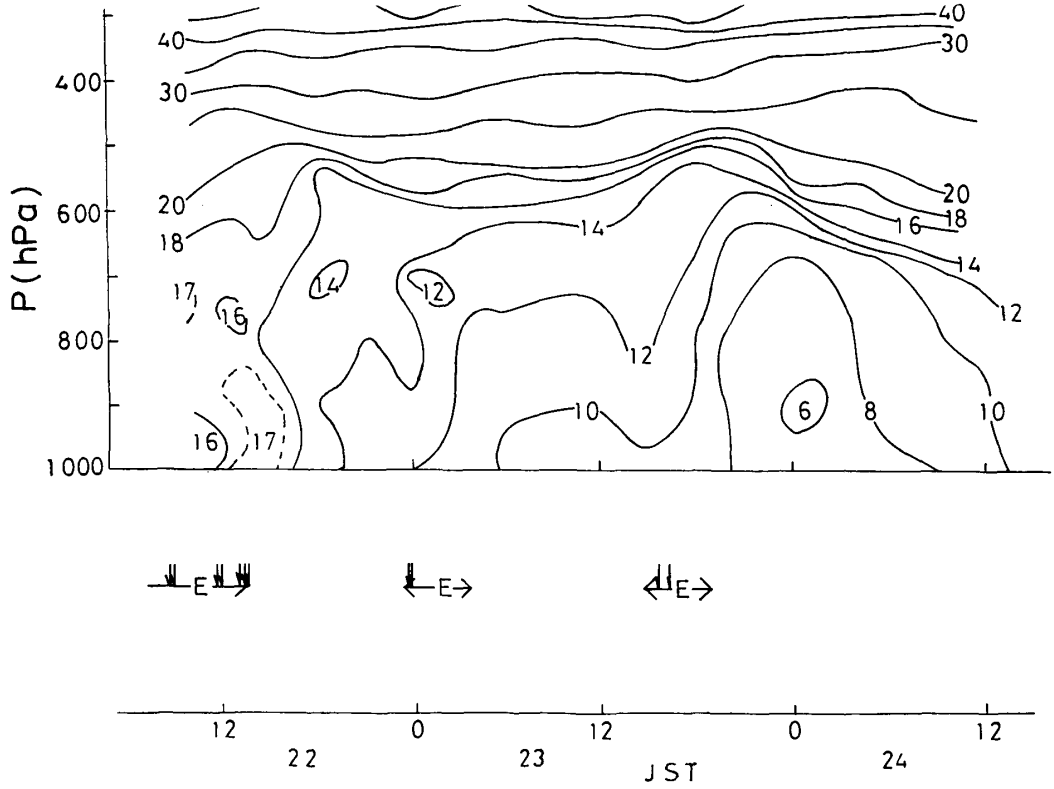
第10図　上層風の南北成分の鉛直分布の時間変化．図中の数字は北風成分（m/s）を表す．負符号は南風成分を表す．図の下に字ノ気におけるアメダスの地上風，地上電界値が大きく変化した時間帯（←—E—→）と発雷時刻（縦矢印）を示す．矢羽根一本は 1 m/s，三角旗は 5 m/s を表わす．



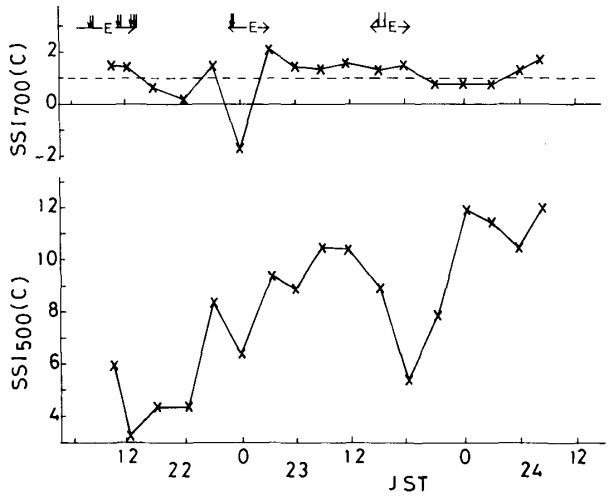
第11図　上層風の東西成分の鉛直分布の時間変化．東風成分を正，西風成分を負符号で表わし，単位は m/s である．その他は第10図と同様．

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan



第12図　湿球温位の鉛直分布の時間変化．図中の数字は湿球温位(C)を表す．その他は第10図と同様．



第13図　ショワルターインデックスの時間変化．SSI_{700} と SSI_{500} はそれぞれ，850 hPa と 700 hPa 間の，850 hPa と 500 hPa 間のショワルターインディクスを表す．地上電界値が大きくなった時間帯と発雷の時刻を第5図と同様に表す．

の東風成分の到達高度は 900 hPa 程度と低いことから(第11図)，この風は局地風だと考えられる．寒冷前線通過末期の，あまり収束が活発でない時間帯の中で，この局地風により大気下層でのみ収束域が形成され，これに刺激されて2番目の雷は発生したものであると推察している．

3番目の時間帯には地上気温はほとんど変化せず，寒気団の中で発達した雷のように見える．しかし，局所低圧部をともない．地上の収束域も存在，南下しており(第8図)，上層風も南風成分から北風成分に短期間に変化している．湿球温位を見ると，地表面付近ではほとんど変化していないが，900 hPa から 650 hPa 間の気層においては時間とともに急速に低下している．これらのことから，この時間帯には地上気温変化は小さいが，上空でははっきりと確認される気温の不連続線が通過しているものと考える．しかし，この時のレーダーエコーは層雲系のものであるので（第9図)，第1番目の時間帯に比べると対流活動はあまり活発ではなかったようである．

以上のことから，地上電界値が大きな値を示すこれら3つの時間帯には，天気図上での前線が解析されていない場合でも，風の収束域，もしくは気温の不連続線が対応していることが分かった．これらの風の収束域や気温の不連続線を予測することにより，雷の発生

NII-Electronic Library Service

Meteorological Society of Japan

を予測することができるようになると考えられる.

9. 謝 辞

本研究のために，これまで数々の協力と支援をして下さった北陸電力（株）技術研究所の方々に厚くお礼申し上げます．また，観測場所を提供して下さり，数々の便宜を図って下さった石川県砂丘地農業試験場の方々に感謝します.

参 考 文 献

Hozumi, K. and C. Magono, 1984 : The cloud structure of convergent cloud bands over the Japan Sea in winter monsoon period. Jour. Met. Soc. Japan, **62**, 522-533.

鈴川三男，遠峰菊郎，阿部成雄，道本光一郎，1987：小松周辺の冬季雷雲下の電界分布について，天気，**34**，443-452.

Nagata, M., M. Ikawa, S. Yoshizumi, and T. Yoshida, 1986 : On the formation of a convergent cloud band over the Japan Sea in winter. Numerical experiments. Jour. Met. Soc. Japan, **64**, 841-855.

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.

遠峰菊郎，鈴川三男，道本光一郎，1987：地表電界値による航空機の被雷防止法，天気，**34**，769-773.

八木正充，1985：冬期の季節風の吹き出し方向に対しておおよそ直交する方向にロール軸をもつ大規模な雷雲，天気，**32**，175-187.

八木正允，村松照男，内山徳栄，黒川信彦，1986：大陸沿岸の地形の影響を受けた日本海上の帯状収束雲とCu-Cb ライン，天気，**33**，453-465.

第13回風工学シンポジウム開催と発表論文募集

＜**共催**＞電気学会，土木学会，日本気象学会，日本建築学会，日本鋼構造協会，日本風工学会（幹事学会）

期 日 平成6年11月30日（水），12月1日（木），2日（金）（予定）

会 場 日本学術会議講堂

発表論文の募集

(1)課題

(a)風の性質，(b)環境と風，(c)風災害，(d)気流・風圧・風力およびその制御，(e)構造物の応答およびその制御，(f)耐風設計，(g)計測方法・風洞実験法，(h)数値解析法，(i)その他，風工学に関するもの

(2)応募論文原稿

1）フルペーパーによる査読が行われる．採否の判定の基準は査読つきの専門学会誌・技術誌（例えば，共催学協会の論文集）と同程度とする.

2）ページ数は6ページ以内（和文論文では英文概要などを含む）の偶数ページとする.

3）英文論文も可とする.

4）ワープロなどによってオフセット印刷用完成原稿（フルペーパー）を作成する．和文，英文の場合とも投稿要領に記載の執筆要領，体裁規則にしたがって作成する.

5）登載が認められた場合10,000円の登載料を負担する.

6）別刷50部を無料進呈する．別途注文は受け付けない.

(3)投稿要領

原稿用紙の請求先および原稿提出先

〒106 東京都港区六本木7-22-1
東京大学生産技術研究所 村上研究室内
第13回風工学シンポジウム運営委員会事務局
TEL 03-3401-7439 FAX 03-3746-1449

(4)原稿提出締切日

平成6年5月31日（火）（必着）．締切り後，ただちに査読作業に入るので延期は一切認められない．原稿はオフセット印刷用原稿（B4版フルペーパー）のコピー（A4縮小版）を提出する.

NII-Electronic Library Service