

落雷頻度でみた夏季, 冬季の雷活動*

河 崎 善一郎・松 浦 虔 士**

久 保 隆・山 田 勝・園 井 康 夫***

要 旨

落雷位置評定システム (LLP) により得られる雷撃点は, 通常数キロメートルの評定誤差を含んでいる。そこで本論文では, 雷撃点そのものよりも, 落雷密度という観点から, 夏季雷 (1990年7月24日) 及び冬季雷 (同年12月11日) を論じた。即ち落雷密度は, 新たに開発したソフトウェアにより, 落雷数の等高線化を行うことにより求めた。その結果, 雷活動の時間単位の移動状況が把握でき, レーダ観測の結果との対比も容易となった。特に7月24日の雷活動は, 中規模対流性雷活動の様相を呈しており, 興味もたれる。

1. はじめに

落雷位置をリモートセンシングにより標定するためのシステムとして, 現在次の2つがよく知られている。即ち1つは, 落雷に伴う電磁界変化を直交ループアンテナで受信し, その誘起する電圧値のベクトル方向により落雷方向を求め, さらにこれを複数点に配置されたアンテナで受信し, 交会法から落雷位置を標定する LLP (Lightning Location and Protection) システムと, もう1つは, 落雷の電磁界変化が複数の地点に到達する時間差より落雷位置を標定する LPATS (Lightning Positioning And Tracking System) システムである (上之園, 1988)。これらシステムに共通していることは, 比較的長スパン (～100 km) で受信系を構成するため, その標定した落雷点には多少の誤差を含んでおり, そのため標定した落雷点はおおよそその位置となっている (例えば Casper, 1990)。即ちシステムが標定した場所より実際には数 km 離れた送電鉄塔に落雷があり, 送電停止に至っているという事例がある。しかしこれらのシステムが対象としている観測範囲が広範囲であることから, 標定した位置を巨視的観点から見れば, 十分な精度である

と考えられる。このような観点から本論文では落雷の位置そのものより, ある範囲内の落雷頻度に着目することとして, データの処理を行う。

雷活動は, ある短時間内あるいは, ある小地域に集中して起こる気象現象であり, 1時間程度の短時間における落雷頻度の変化, ならびにその移動度を知ることにより, 夏季雷, 冬季雷における落雷点の分布や動向という観点から検討を加えれば, 地域的, 短時間での雷特性を把握できるものと考えられる。

尚本論文で作成した落雷頻度マップと気象状況とを照合するために用いる気象データ (降水強度, 雲頂高度) は, 大阪管区気象台技術部観測課レーダ班より提供していただいたものであることを附記しておく。

2. LLP データの等高線表示方法

本論文では, 落雷頻度を表すのに, 等高線表示を用いている。落雷点データは, 関西電力㈱総合技術研究所が所有している LLP システムにより得られたデータを用いる。関西電力㈱では, 現在2組の LLP システム (日本海システムと紀南システム) が稼働しており, その磁界アンテナの配置を第1図に示す。LLP システムが標定した落雷点データを, 緯度, 経度とも10分の正方領域内における落雷数として総計を求め, その集計した数に応じて6段階に重み付を行う。等高線図の作成範囲は, 緯度 $33^{\circ}30' \sim 37^{\circ}00'$, 経度 $134^{\circ}00' \sim 137^{\circ}40'$ の範囲とする。なお等高線図の作成には, パーソナルコンピュータ PC-9801 を用いている。

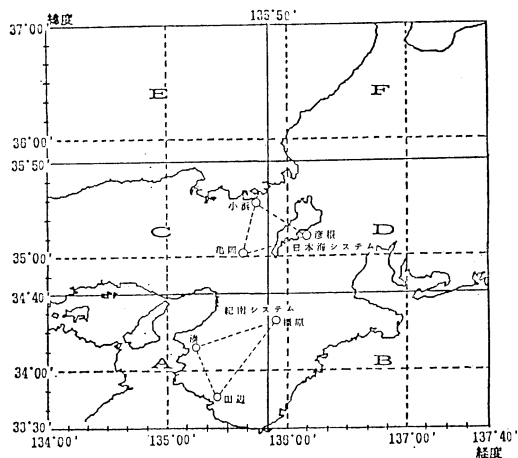
* Lightning flash density during the summer and winter thunderstorms.

** Zen-Ichiro Kawasaki, Kenji Matsuura, 大阪大学・工学部。

*** Takashi Kubo, Masaru Yamada, Yasuo Sono, 関西電力・総合技術研究所。

——1991年4月15日受領——

——1991年12月6日受理——



第1図 磁界アンテナの配置及び等高線図の作成範囲

第1表 等高線図(第2図)において色が示す落雷頻度の高さ

青色	≤ 0.63 [個・日/ km^2]
紫色	≤ 1.67 [個・日/ km^2]
緑色	≤ 2.50 [個・日/ km^2]
赤色	≤ 3.33 [個・日/ km^2]
水色	≤ 4.17 [個・日/ km^2]
黄色	> 4.17 [個・日/ km^2]

3. 観測結果

3.1 落雷頻度でみた1990年7月24日の雷活動

7月24日, 00:00:00~07:59:59までの落雷頻度を第2図(a)~(f)に示す。落雷頻度を色別で表示しているが、その対応を第1表に示す。

この日の気象状況は地上天気図(気象庁, 1990)によると、太平洋高気圧の勢力が弱まり、日本の南海上には弱い熱帯性低気圧がある。等圧線は九州と北海道を結ぶ直線に平行した右上がりの状態となっており、風は等圧線に沿って北東に吹いている。そのため南海上にある弱い熱帯性低気圧からの湿った空気が日本上空に広く入り込んでいる。さらに500 mbの高層天気図(気象庁, 1990)によると日本上空に -9°C の寒気があることから、この日は大気が不安定であったと考えることができる。1日の雷活動を作成した落雷頻度の等高線図で見ると、00:00に愛知県東部に現れた雷活動領域は、時速約32 km/hで西に移動し、琵琶湖付近で約1時間停滞

第2表 等高線図(第3a図)において色が示す落雷頻度の高さ

青色	≤ 0.77 [個・日/ km^2]
紫色	≤ 1.54 [個・日/ km^2]
緑色	≤ 3.08 [個・日/ km^2]
赤色	≤ 6.15 [個・日/ km^2]
水色	≤ 9.23 [個・日/ km^2]
黄色	> 9.23 [個・日/ km^2]

第3表 等高線図(第3b図及び8a図)において色が示す降水強度

青色	1未満
水色	1以上 4未満
緑色	4以上 16未満
黄色	16以上 32未満
紫色	32以上 64未満
赤色	64以上
単位 [mm/h]	

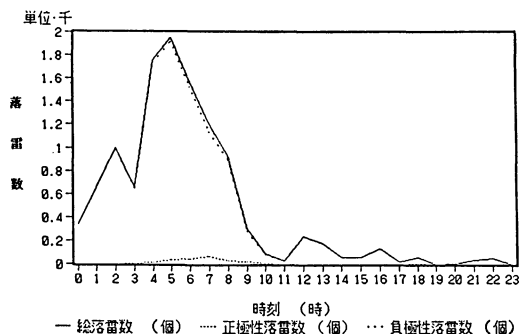
第4表 等高線図(第3c図及び8b図)において色が示す雲頂高度

1	2 km 未満
2	2 km 以上 4 km 未満
3	4 km 以上 6 km 未満
4	6 km 以上 8 km 未満
5	8 km 以上 10 km 未満
6	10 km 以上 12 km 未満
7	12 km 以上 14 km 未満
8	14 km 以上

すると共にその活動が活発となり、06:00頃には東に移動を始め、その活動が衰退している。なおこの日の雷の振舞いは、降雨領域の移動と一致している。7月24日の落雷頻度の変化ならびに移動を示したが、以下に落雷頻度と気象データの照合、比較を行い検証する。一例として06:31:00~06:43:59の間にLLPシステムが標定した落雷点データにより作成した落雷頻度の等高線図を第3a図に、06:30に大阪気象レーダが捉えた降雨領域、ならびに降水強度、雲頂高度を第3b図に、同じく06:40の気象状況を第3c図に示す。落雷頻度の高さ、ならびに気象データが示す降水強度の強さ及び数字が示す雲頂高度の高さをそれぞれ第2表、第3表、第4表に示す。落雷頻度と気象データを照合すると、陸上におい

第5表 等高線図（第4図）において色が示す落雷頻度の高さ

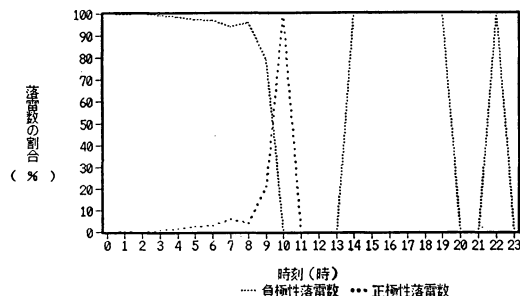
青色	≤ 0.17 [個・日/ km^2]
紫色	≤ 0.35 [個・日/ km^2]
緑色	≤ 0.52 [個・日/ km^2]
赤色	≤ 0.69 [個・日/ km^2]
水色	≤ 0.87 [個・日/ km^2]
黄色	> 0.87 [個・日/ km^2]



第5図 1990年7月24日 毎時間ごとの落雷数の推移。

では落雷点が観測されている場所と降雨領域とが一致しており、さらに落雷頻度の高い所と降水強度の強い場所についても一致している。降水が弱い所では、落雷頻度も低くなっている。これらより落雷頻度と降水強度の間には、従来よりよく知られているように相関関係があることがわかる。雷雲の活動を発達、成熟、消滅の3段階に分けることができるが、発達期の末期にはじまる放電現象に加えて成熟期には激しい降水を伴い、消滅期に入るとセルが消失するまでの一連の現象を考えると、降水強度の強い箇所と落雷頻度の高い地域の一致することは興味深い。なお紙面の都合上、気象データと落雷頻度の時間毎の比較（両者の移動）については全てを示さないが、概ねよく一致している。7/24日に限ってみれば、降水強度が4 [mm/h] をこえると落雷頻度が高くなっている。即ち、夏季にあっては降水の強度と雷雲の発達程度に強い、相関があるためであると考えられる (Atlas, 1990)。

7月24日について、1日の落雷頻度と、1日の正極性、負極性雷について個別に作成した落雷頻度の等高線図を第4図に示す。落雷頻度の高さを第5表に、また時間毎の落雷数を第5図に示す。第5図より、夏季落雷は従来



第6図 7月24日 緯度 $34^{\circ}40' \sim 35^{\circ}50'$ 、経度 $135^{\circ}50' \sim 137^{\circ}40'$ の範囲における毎時間ごとの落雷数の推移。

第6表 等高線図（第7図）において色が示す落雷頻度の高さ

青色	≤ 0.08 [個・日/ km^2]
紫色	≤ 0.17 [個・日/ km^2]
緑色	≤ 0.25 [個・日/ km^2]
赤色	≤ 0.33 [個・日/ km^2]
水色	≤ 0.42 [個・日/ km^2]
黄色	> 0.42 [個・日/ km^2]

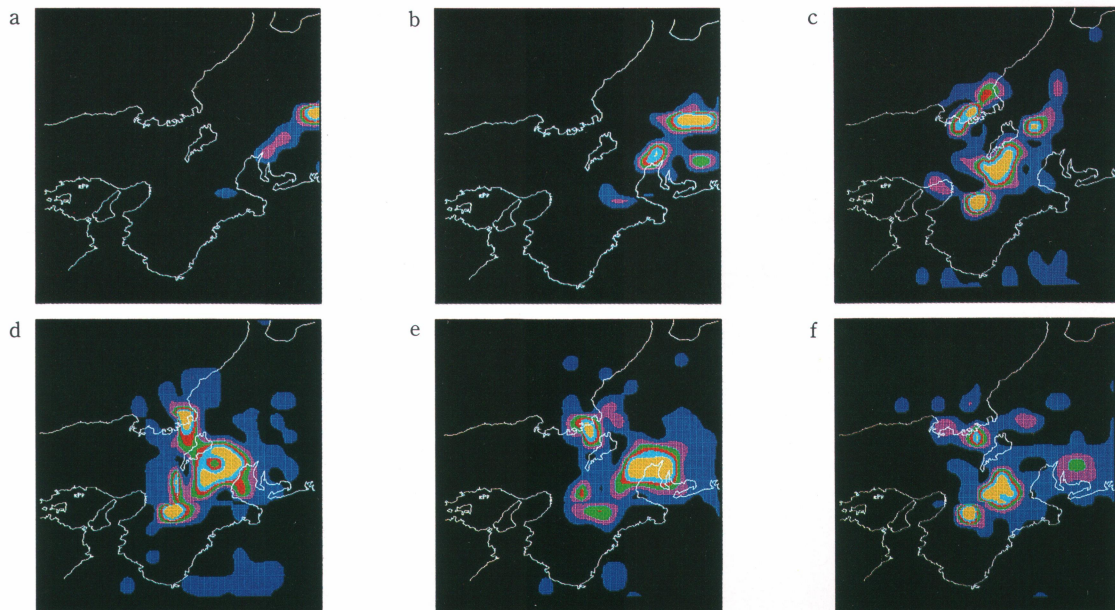
よりよく知られているように、大部分が負極性落雷であることが判る。尚、正極性落雷は1日の総落雷数の2.1%であった。第11図より、落雷点が集中している緯度 $34^{\circ}40' \sim 35^{\circ}50'$ 、経度 $135^{\circ}50' \sim 137^{\circ}40'$ の範囲において、正極性、負極性落雷がその範囲内の総落雷数に対して占める割合を第6図に示す。第6図は、はじめは負極性雷の占める割合が多いが、時間の経過に伴い正極性雷の割合が増え、ピークの位置がずれている事を示している。これは、夏季には雷活動の末期、消滅期に正極性雷が多いと言われている説 (Fuquay, 1982) と一致する。

1990年7月24日の雷活動に関しては、比較的長時間・広領域に及ぶ落雷頻度の連続した移動を見られた。即ち最初に発生したセルの全面に次のセルが発生するいわゆる「セルの若返り」が相次いで連続して起こったためであろうと考えられるが、今後レーダー観測等を通じてこのような現象が国内にも起こり得るのか否かを確かめていく必要がある。

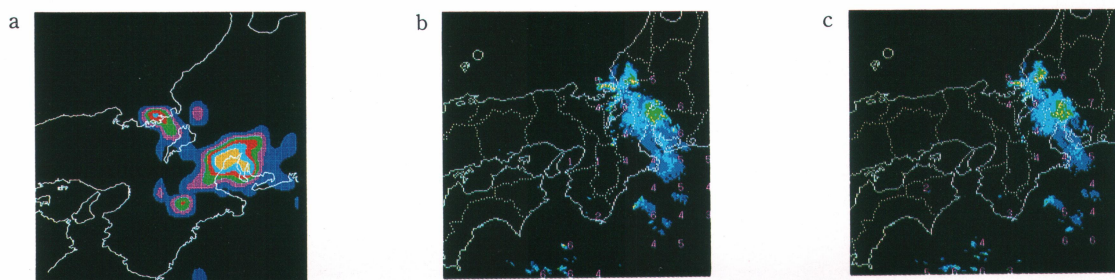
3.2 落雷頻度でみた1990年12月11日の雷活動

12月11日、12:00:00~16:59:59までの落雷頻度を第7図に、落雷頻度の高さと色別の関係を第6表に示す。

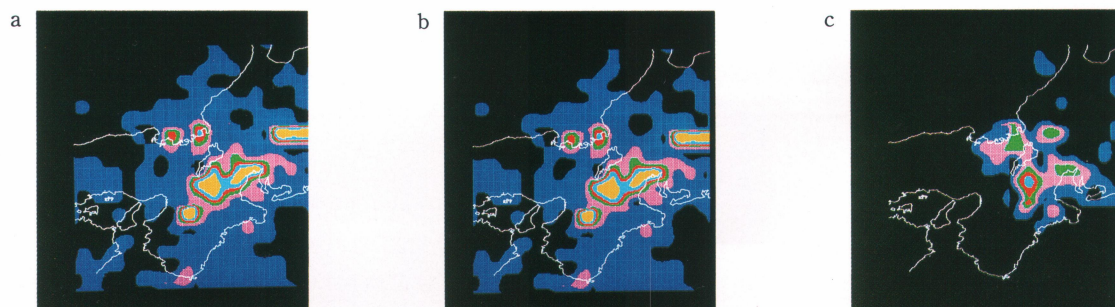
気象状況は、10日には冬型の気圧配置が緩んでおり、



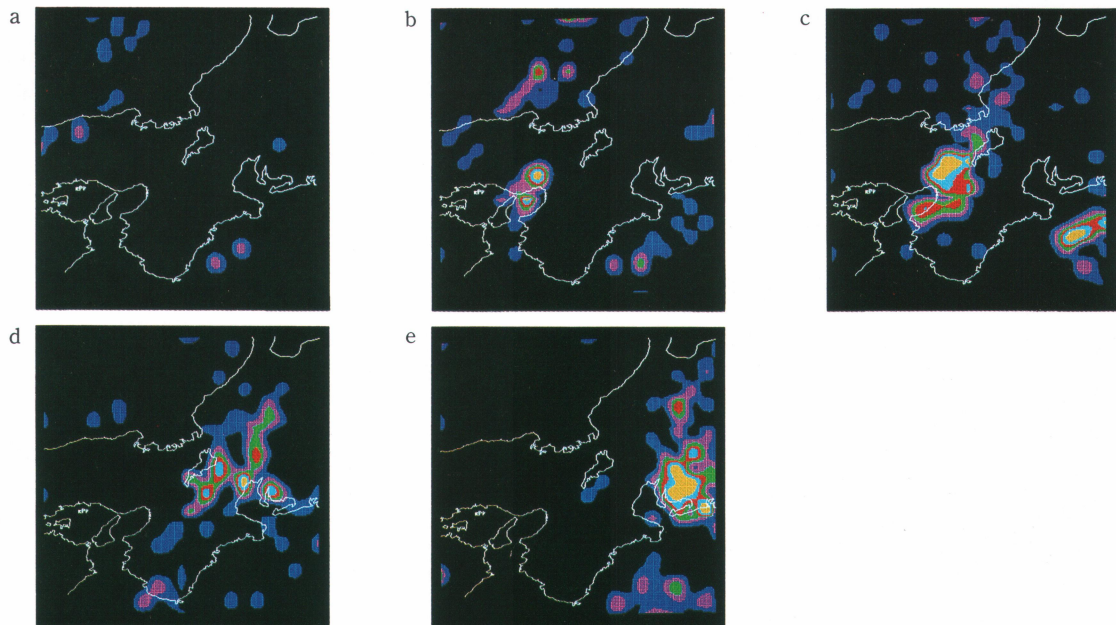
第2図 1990年7月24日の落雷頻度. 色の意味は第1表参照. 時間(日本標準時)はそれぞれ,
 (a) 00:00:00~00:59:59, (b) 02:00:00~02:59:59, (c) 04:00:00~04:59:59,
 (d) 05:00:00~05:59:59, (e) 06:00:00~06:59:59, (f) 07:00:00~07:59:59.



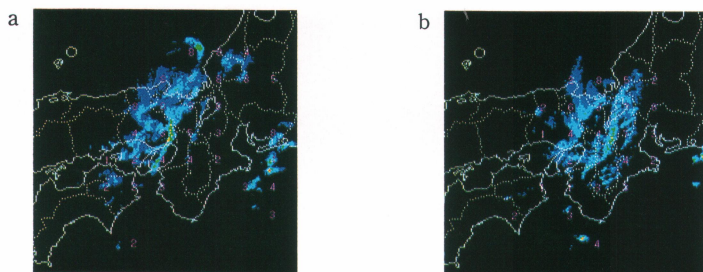
第3図 1990年7月24日の
 (a) 06:31:00~06:43:59での落雷頻度(色の意味は第2表参照) (b) 06:30:00の降水強度(色の意味は第3表参照) (c) 同日06:40:00の雲頂高度(色の意味は第4表参照)



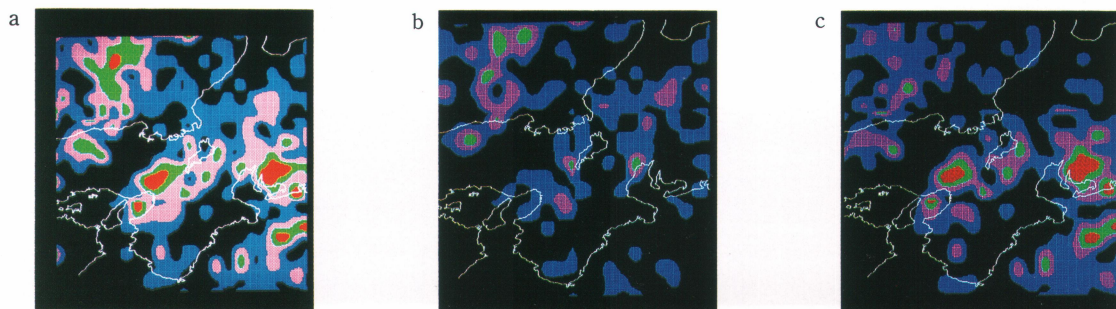
第4図 1990年7月24日, 1日間の落雷頻度. 色の意味は第5表参照.
 (a) 正負両極性の頻度 (b) 正極性の頻度 (c) 負極性の頻度



第7図 1990年12月11日の落雷頻度。色の意味は第6表参照。時間はそれぞれ，
 (a) 12:00:00~12:59:59, (b) 13:00:00~13:59:59, (c) 14:00:00~14:59:59,
 (d) 15:00:00~15:59:59, (e) 16:00:00~16:59:59.



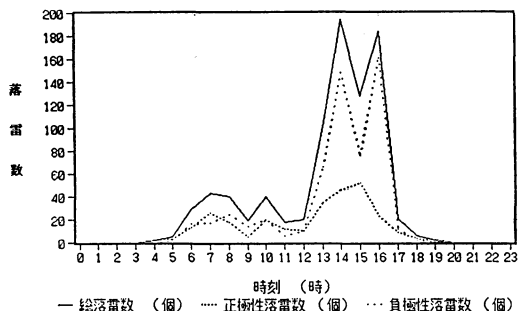
第8図 1990年12月11日の
 (a) 14:00:00の降水強度 (色の意味は第3表参照) (b) 15:00:00の雲頂高度 (色の意味は第4表参照)



第9図 1990年12月11日，1日間の落雷頻度。色の意味は第5表参照。
 (a) 正負両極性の頻度 (b) 正極性の頻度 (c) 負極性の頻度

第7表 等高線図(第9図)において色が示す
落雷頻度の高さ

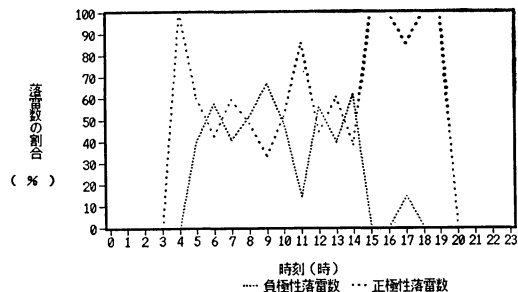
青色	≤ 0.007 [個・日/ km^2]
紫色	≤ 0.014 [個・日/ km^2]
緑色	≤ 0.028 [個・日/ km^2]
赤色	≤ 0.056 [個・日/ km^2]
水色	≤ 0.083 [個・日/ km^2]
黄色	> 0.083 [個・日/ km^2]



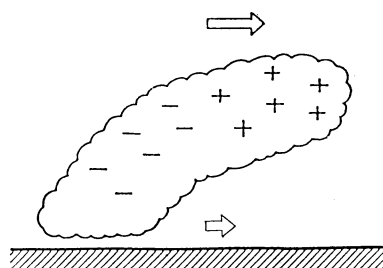
第10図 12月24日 毎時間ごとの落雷数の推移.

朝鮮半島にあった弱い低気圧が発達し、中心から温暖前線、寒冷前線のがび、その活動を活発化し11日に近畿を通過した。この日の500 mbの高層天気図(気象庁, 1990)において、上空に -20°C の寒気がある。この日の雷活動を落雷頻度の等高線図で見ると、はじめは落雷点が海洋上及び海と陸の境界線付近に点在した形で観測されているが、寒冷前線の近畿接近に伴い内陸部に現れた雷活動領域は、前線の移動に伴いその活動を活発化し東方に移動している。17:00:00以降は落雷頻度は低く、降雨はこの1日、広範囲に観測されているが、20:00:00以降、落雷点は観測されていない。

夏季と同様に、14:00:00~14:59:59の間にLLPが標定した落雷点データにより作成した落雷頻度の等高線図(第7c図を参照)と14:00と15:00の気象データ第8図とを比較する。気象データが示す降水強度、雲頂高度は、第3表、第4表と同じである。両者を比較すると、夏季雷と異なり落雷点が観測されている場所は、降雨領域の一部分であり、落雷点が観測されている場所に限って見ても落雷頻度と降水強度には、夏季雷のようにはっきりとした相関関係はみられない。これは夏季の熱雷とちがひ冬季の雷雲の発生は、低気圧、気団の影響するところが大きく、その降雨領域の中で全てのセルが雷活動を伴うには至らないのであろう。



第11図 12月11日 緯度 $35^{\circ}50' \sim 37^{\circ}00'$ 、経度 $134^{\circ}00' \sim 135^{\circ}50'$ の範囲における毎時間ごとの落雷数の推移.



第12図 冬季の雷雲の模範図
(竹内他, 1983).

12月11日について、1日の落雷頻度と、1日の正極性、負極性雷について個別に作成した落雷頻度の等高線図を第9図に示す。落雷頻度の高さを第7表に示す。また1日の落雷数を毎時間ごとに見たものを第10図に示す。第10図より冬季雷は、夏季雷に比べ正極性落雷の割合が多いことが判る。正極性落雷は、1日の総落雷数の32.7%となっている。第9図より、落雷点が集中している緯度 $35^{\circ}50' \sim 37^{\circ}00'$ 、経度 $134^{\circ}00' \sim 135^{\circ}50'$ の範囲において、正極性、負極性雷がその範囲内の総落雷数に対してしめる割合を第11図に示す。

図より、負極性雷より正極性雷の方が先行して観測されていることがわかる。7月24日の地上の風速は0~10 m/s、500 mbの高層においても2~13 m/sと大差は見られない。しかし、12月11日においては、地上では2~10 m/s、500 mbの高層では25~40 m/sとその差は大きい。その結果、雷雲を正のダイポール構造とすると第12図の様に冬季の雷雲は、上層の風速が下層の風速より速い(ウインドシャ)ため、雷雲の上層部(正電荷領域)が突き出た形となり、そのため正電荷領域が負電荷領域よりも先行する(竹内, 他, 1983)事によるもので

あると考えられる。

4. 落雷頻度でみた夏季、冬季雷の比較

夏季雷（7月24日）の場合、雷活動域はそのほとんどが陸上であり、夏季の場合は強い太陽放射により熱せられた地上の大気は浮力を生じやすく、加えて大気が不安定となるとたちまちにして積雲対流を生ずる。このように夏季は雷雲が得るエネルギーが、周囲に豊富に存在することから、1時間おきに落雷頻度を順次見ても、等高線図の連続した移動、ならびにその変化を見ることがができる。

冬季雷（12月11日）の場合、上昇気流は前線ならびに気団によるものであり雷雲の活動は、海上ならびに海と陸の境界線付近に落雷頻度の低い場所が小地域に観測されており、しかも広範囲にわたって点在している。その結果それぞれの場所について、連続した等高線図の移動ならびに変化が見られないことから、これは北陸地方で見られる「一発雷」と言われているものと同じ現象であろう。このように冬季雷の場合、夏季雷と違い連続した落雷頻度の移動、変化は、ほとんど見られない。しかし陸上において前線による雷活動は、夏季雷と同様に落雷頻度の移動ならびに変化を連続して見ることができる。

雷活動領域の移動は、冬季の場合は西から東に移動する一般的な気象の変化に伴っているのに対し夏季雷は、その振舞いが不規則で一概には言えない。（7/24は00:00:00~04:00:00頃まで東から西に移動している）しかし夏季雷の場合、降雨領域と雷活動領域がほぼ一致している。これは前節でも述べたように、強い降水の形成は活発な雷雲を意味しているためであると考えられる（道本、1988）。

5. おわりに

今回、1990年7月24日と12月11日について1日の雷活動を落雷頻度の等高線化を用いて検討した。ただ紙面の都合上すべての落雷頻度マップを掲載しておらず、掲載

していない時間帯も含めて文中において両日の流れを説明した。また7月24日について、1時間毎の雷活動に注目すれば、日本においてもアメリカ大陸で観測されている「中規模対流性雷活動現象」に類似した現象がある可能性を確認することができた。

今後は落雷頻度の等高線図を近畿全域ではなく雷の多い地域に絞り、等高線図の移動および変化を気象データとの細かい時間変化と対応させた解析が必要である。

謝 辞

本論文を作成するにあたり、気象データを提供して頂いた大阪管区気象台技術部観測課レーダ班、高層気象データを提供して頂いた財団法人日本気象協会関西本部に感謝する。また本論文の改稿に関しては、査読者に多大なるご助言を頂いた。この場を借りて謝意を表したい。

参考文献

- Atlas D., 1990: Radar in meteorology. American Meteorological Society, 86-97.
- Casper P.W., 1990: The LPATS time of arrival lightning positioning system: critical performance aspects. 20th Int. Conf. Lightning Protection, 6-12 p.
- Fuquay D.M., 1982: Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorms. J. Geophys. Res., 87, 7131-7140.
- 気象庁発行, 1990: 天気図（平成2年7月1日~7月31日）, 0000 GMT 地上.
- : 天気図（平成2年7月1日~7月31日）, 0000 GMT 500 MB.
- : 天気図（平成2年12月1日~12月31日）, 0000 GMT 500 MB.
- 道本光一郎, 1988: 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, 天気, 35, 31-37.
- 竹内利雄, 仲野 一, 1983: 北陸における冬の雷の研究, 天気, 30, 13-18.
- 上之國親佐監修, 1988: 雷その被害と対策, 教育社, 53-78.