

北陸における冬の雷の研究*

—学会賞受賞記念講演—

竹内 利雄・仲野 蕒**

1. はじめに

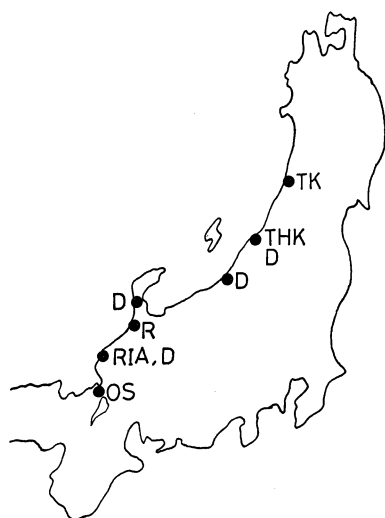
冬の雷は北陸地方に住んでいる人にとっては極めて日常的な出来事であるが、太平洋側に住んでいる我々にとっては大変珍しい現象である。我々は以前から行っていた夏の雷の研究の補助的な意味で昭和47年の冬に北陸地方の冬の雷観測を始めた。それ以来観測場所を石川県宇ノ気町、福井県敦賀市、福井県三国町と移動しながら観測を続けてきて、いつのまにか冬の方が主になってしまった。近頃では我々のグループの他にも、ロケット誘雷実験グループ、電力中央研究所、二、三の大学で冬の雷の研究を続けている。さらに少し前には日米共同研究が行われ、現在、第2次共同研究の話がすすめられている。この様に北陸地方は今や世界の雷研究者の注目のまとなっている。夏の雷の研究は、近年のエレクトロニクスの急速な進歩により観測技術が進み、米国を中心に目ざましい発展をとげている。しかし、冬の雷の研究はやっと落雷の極性が解決したところで、電力関係の人々の大きな期待もあって、今後ますます研究を進めなければならない分野である。ここでは冬の雷について今まで明らかになってきた点を報告し、さらに今後の問題について少しふれてみたい。

2. 北陸における冬の雷の研究の歴史

気象学的立場、あるいは天気予報を出すという立場からの冬の雷の観測・研究は古くから行われている。総合調査の一つに、昭和44年2月の航空自衛隊機の被雷墜落事故のあと行われた金沢地方気象台と全日空による冬雷協同観測がある。その後我々が北陸地方で観測を始め、夏の落雷のほとんどが負極性落雷（雷雲内の負電荷を中和する）であるのに対し、冬の落雷の大半は正極性である

ことを発見し、このことを昭和49年西ドイツで行われた第5回国際大気電気会議で発表した（Takeuchi 他、1977）。この発表がきっかけになり、名大・北大・米国ニューメキシコ工大の三者による日米共同観測が、北大孫野教授・ニューメキシコ工大 Brook 教授のリーダー・シップのもとに昭和51～52年および52～53年の冬に石川県宇ノ気町周辺で行われた。さらにその後2年間、北大・名大・宇都宮大・埼玉大が協力して総合研究を行った。一方昭和52年12月から名大工学部を中心とするロケット誘雷実験グループが石川県河北潟干拓地で誘雷実験を始め、すぐれた研究成果をおさめている。

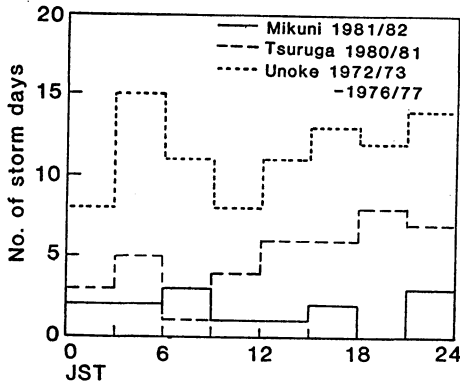
近年電力需要の増大に伴い、北陸地方に多くの発電所が建設されている。これらの発電所からの送電効率を高



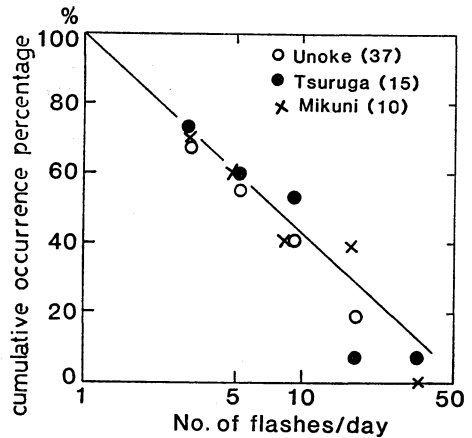
第1図 国内における冬の雷の研究機関とその観測地点。TK：東大生産技研，THK：東北大（工），D：電力中央研究所，R：ロケット誘雷実験グループ（名大工，名工大，中部工大，金沢工大他），RIA：名大空電研，OS：大阪大（工）。

* Winter thunderstorms of the Hokuriku coast.

** Toshio Takeuchi and Minoru Nakano, 名古屋大学空電研究所。



第2図 発雷の日変化.



第3図 1日の放電数の累積度数分布.

めるために50万V送電が開始され、さらに100万V級送電が計画されている。このことは必然的に送電塔を高くすることになり、雷害事故が重大な問題になってきている。このため、北陸地方に発電所・送電線をもつ電力会社・電力中央研究所・大学（東北大・東大・阪大他）等の電力関係の研究者が冬の雷の研究を始めている。国内で各研究機関が行っている観測点を第1図に示す。

一方冬の雷の研究は外国特にスカンジナビア地方の雷の研究にも影響を与える結果となった。スウェーデンでは、夏の雷でも気象条件によっては正極性落雷が発生することが明らかになり、正極性落雷による雷災害と正極性落雷の探知法の研究が盛んに行われるようになった。また気象条件が北陸地方と似ているノルウェーの大西洋岸では冬に雷が多く発生し、トロンヘイムにあるノルウェー電力研究所が冬の雷の研究を精力的に行うようになった。

3. 冬の雷活動

我々は毎年冬期1～2ヶ月北陸へ出かけて雷観測を行い、その間観測点から20～30 km以内の雷による電界変化を残らず記録している。これは雷鳴の聞こえる範囲かそれより少し広い範囲の雷を記録していることになる。この記録に基づく雷活動の日変化と1日の放電数を第2図および第3図に示す。よく知られているように、夏は対流活動が盛んになる午後に雷活動もピークになるが、冬は第2図にみられるように顕著な日変化はない。第3図は1日の放電数の累積度数分布を示している。横軸は1日の放電数を対数目盛で表わし、縦軸は横軸に示す値かそれ以上の放電が記録された日数の全体に対する割合を表わしている。この図から1日の放電数は10個以下の場合が多いことがわかる。

4. 冬の雷雲内の正負の電荷の位置

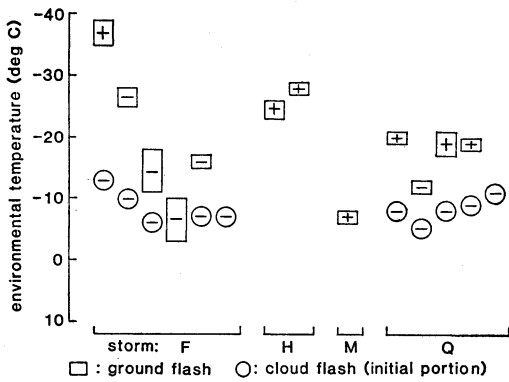
冬の雷雲内の正負の電荷の位置は二つの方法で調べられた。その一つは北大グループにより行われた気球による直接測定で、もう一つは我々とニューメキシコ大グループと共同で行った雷放電による地上電界変化の多点観測結果からの推定である。気球観測の結果によると、雷雲の極性は夏と同じで雲の上層に正電荷、下層に負電荷がある。しかし降水粒子についている電荷の位置は夏より暖かい所にある。例えば負電荷は 0°C 高度かそれより低い所にある (Magono 他, 1980)。

次に地上電界変化からの推定であるが、落雷により大地へ運ばれる雷雲内の電荷を点電荷と仮定し(球内で一様分布と等価)、その電気量・位置を Q, X, Y, Z とする。地上4点以上で Q が消えることによる電界変化を測定すれば Q, X, Y, Z をきめることができる。雲放電については、最初に X, Y, Z にあった電荷 Q が等速度で移動すると仮定すると、この仮定が妥当と考えられる時間の範囲内で放電による電界変化を一定の時間間隔で測定することにより、やはり数ヶ所のデータから、 Q, X, Y, Z と移動速度をきめることができる。われわれはニューメキシコ工大のグループと共同で、北陸で地上7点の電界変化の同時観測を行った。解析結果のうち、電荷の雷ごとの高さを示したのが第4図である。この図で矩形で示されているのは落雷についてで、高さ方向の広がりや連続電流を含む電荷中心の位置の広がりやを示している (Brook 他, 1982)。また白丸は雲放電についてで、放電のはじまった高さを示している (Nakano, 1979)。電界変化から求めた場合も雷雲毎にみれば雷雲は正極性であるが、電荷の高さは孫野他 (1980) の結果と少し異なる。

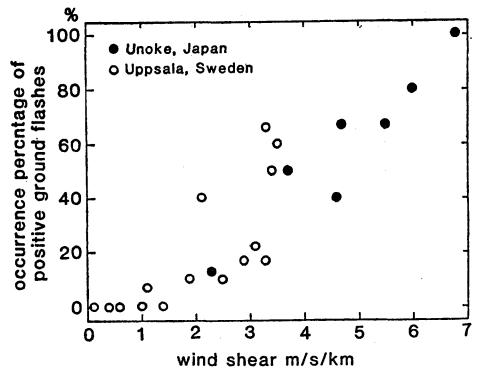
第1表 全落雷中の正極性落雷の発生率.

| | | % of positive ground flash | No. of data |
|------------------------|--------------------|----------------------------|-------------|
| natural ground flash | summer Maebashi | 3.4 | 176* |
| | winter Unoke | 57.9 | 107 |
| | Tsuruga | 90.0 | 20 |
| | Mikuni | 90.4 | 21 |
| | Fukui | 57.1 | 7 |
| triggered ground flash | winter Kashiwazaki | 35.0 | 20** |

* Ishikawa (1960), ** Kishijima *et al.* (1981)



第4図 雷放電から求められた雷雨毎の電荷中心の高さ。縦軸の高さは輪島測候所の高層データに基づく温度高度で表わしてある。



第5図 風のシャーと正極性落雷の発生率の関係。縦軸は雷雨毎の全落雷中正極性落雷の発生率を百分比で表わしている。黒丸は宇ノ気の冬の雷、白丸はスウェーデンの夏の雷である。

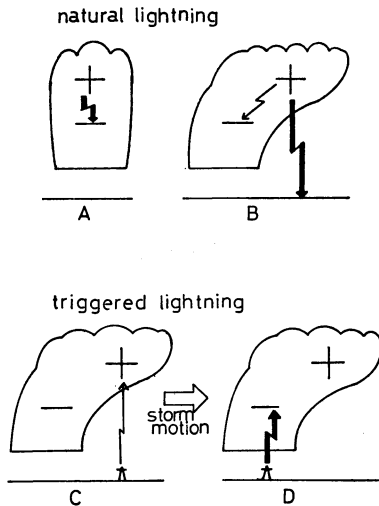
ている。これは気球では降水粒子の電荷を測定し、電界変化では放電により中和される電荷を点電荷と仮定して推定しているというように方法・対象が異なるためであると考えられる。

5. 落雷の極性

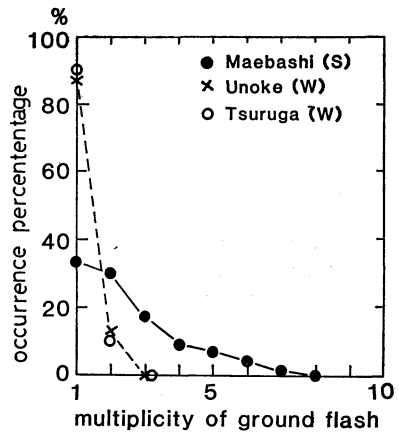
冬の雷の最も特筆すべき特徴は、正極性落雷の発生頻度が非常に高いことである。落雷は Triggered 落雷と Natural 落雷に分けることができる。Triggered 落雷は高い建造物等の先端で電界が強くなり、そこで絶縁破壊が起こり上向きリーダーが発生するものである。一方、Natural 落雷は雷雲内の電荷の蓄積による雷雲内の局所的な電界が臨界値をこえると、雲粒・雨滴等の表面で絶縁破壊が起こり、雲からリーダーが下に向かって進みだすものである。第1表に日本で観測された落雷のうちの正極性落雷の割合を示す。夏の Natural 落雷がほとんど負極性であるのに対し、冬は大半が正極性である。Trig-

gered 落雷は Natural 落雷に比べ冬の正極性落雷の発生率が少ない。

第5図は雷雨毎の風の垂直シャーと正極性落雷の発生率の関係を示したものである。黒丸は宇ノ気で観測した冬の雷で、風のシャーは雲底高度とレーダーで測定した雲頂高度での輪島のデータから算出した雲層の平均値を用いている (Brook 他, 1982)。白丸はスウェーデンのウプサラで観測した夏の雷で、風のシャーは正電荷の下限と考えられる5 km と雲頂高度9 km の間の平均値を用いている (Takeuchi 他, 1980)。この図は風のシャーが約1.5 m/s/km をこえると正極性落雷が発生しはじめ、風のシャーが大きくなるほど正極性 Natural 落雷の発生率が増大することを示している。このことと第1表に示されている正極性 Triggered 落雷の発生率が Natural に比べて小さいことは次のように説明できる。



第6図 正極性 Natural 落雷と Triggered 落雷を示す模式図。矢印は放電の進む方向を示し、太い矢印は発生頻度が高いことを表わす。



第7図 落雷多重度の頻度分布。

極性落雷の方が多いのではないかと質問をされたことがある。我々気象の研究者はとかく Natural 落雷に関心を持つ。このため同じ冬の落雷を観測しても結果が異なってくるのである。

まず正極性 Natural 落雷の場合、第6図A, Bについて考える。Aは風のシャワーが弱い場合で、このときは正ストリーマーが上からおりてきて下の負電荷と中和する雲放電となり正極性落雷となる可能性は少ない。次にBの場合を考えてみる。一般に、(1) 気圧の低い方が放電が起き易い、(2) 針と平板の間での火花放電は針から開始するが、火花電圧は針が正極の場合の方が負極の場合より低い、(3) 正ストリーマーは負ストリーマーより弱い電界で進むことができる。これらの理由により雷雲内の上層の正電荷領域から正ストリーマーがのびだすことが多いと考えられる。Bの場合、Aと違って風のシャワーのため下方に負電荷がないから落雷となる。次に Triggered 落雷、第6図C, Dについて考えてみよう。雷雲内で正負の電荷量が等しいとすると、一般に負電荷の方が低い所にあるから、地上電界は上空に負電荷がきたときの方が正電荷がきたときより強い。建造物等の先端を考えると、前の条件(2)および(3)は上空に負電荷がきたときにあてはまる。条件(1)はいま正負で同じである。従って建物等の先端からは上空の負電荷に向かって正のストリーマーが進みだす確率が高い。しかし風のシャワーが大きいときは第6図Cのように正極性 Triggered 落雷も発生すると考えられる。以上が Triggered 落雷で正極性落雷の発生率が Natural に比べて小さい理由である。かつて送電線鉄塔など主として Triggered 落雷に関心を持っている電力関係の研究者から、冬でも負

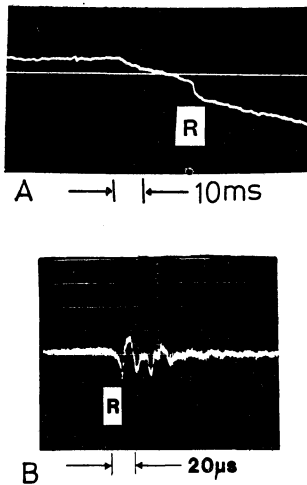
6. 冬の落雷の特性

6.1. 多重度

冬の落雷の最も顕著な特徴は前述の極性にあるが、その他にもいろいろな点で夏の雷と異なっている。第7図に帰還雷撃数の頻度分布を示す。夏の雷も比較のため示してある。この図から、冬の落雷の多重度は夏の落雷に比べて非常に小さいことがわかる。多重雷撃は雷雲内の電荷を次々に中和することにより発生する。冬の雷雲は夏に比べて規模が小さく、雷雲内の電荷のかたまりの数が多くないために、多重雷撃が少ないと考えられる。

6.2. 中和される電荷の量

日米共同観測中に帰還雷撃で中和される電荷量が約+100クーロンという通常の夏の10倍程の大きさをもつ正極性落雷が観測された。また負極性落雷も-24クーロン、-35クーロンと夏に比べて大きい落雷が観測されている。帰還雷撃に続く連続電流が発生する割合が冬の場合多く、夏の雷が20~25%であるのに対し冬は50%以上である。そうして連続電流のピーク値が 10^5 Aという異常に大きいものも観測されている(Brook 他, 1982)。雲放電についても、初期ストリーマーで運ばれる電荷量が約60クーロンと夏に比べてやはり大きい値を得ている(Nakano, 1979)。この様に冬の雷は夏に比べて電気的に激しいものが多い。このことは米国の人工衛星で、冬の日本付近に光エネルギーの異常に大きい Superbolt が



第8図 両極性落雷の波形例. Aはスローアンテナによる記録でRは帰還雷撃による変化を示す. Bはファーストアンテナによる記録で, 帰還雷撃部分を時間軸を拡大して示してある.

数多く観測されていることも一致する (Turman, 1977).

7. 今後の研究課題

前章までで今まで明らかになった事柄を説明してきたが, ここで今後に残されている問題, これからの研究について少しふれてみたい.

(a) 電荷量

冬の雷についての最大のトピックスは正極性落雷の発生であったが, この問題は一応の決着がついたと考えている. しかし規模が小さく背の低い雷雲で何故前章で述べたような100クーロンという大きな放電が起こるのだろうか. 雷雲内の電荷の発生・蓄積に起因するのか, あるいは放電機構が原因なのか. この問題の解決のためにはもう一度基礎的な室内実験を見直す必要があると思われる.

(b) 両極性落雷

我々はここ数年来時間分解能1マイクロ秒以上の性能をもつ電界変化測定器を用いて雷放電による電界変化を測定しているが, 冬の落雷で落雷地点から10~20 kmという近い所で電界変化がベースラインを横切って振動する場合がかなりあることを発見した. ここでこのタイプの落雷を両極性落雷と呼ぶことにする. 第8図に両極性落雷の典型的な波形を示す. Aは帯域DC~1 kHzの測定器によるもので, Rは帰還雷撃を示している. 同図B

は帯域100 Hz~1 MHzの測定器によるもので, 帰還雷撃変化部分を時間軸を拡大して示してある. 今までこういう電界変化は, 放射成分が卓越してくる約50 km以遠において観測されるというのが常識であった. この新しく発見された現象は, 冬の雷雲内の電荷による対地静電容量が夏に比べて小さいため, 雲に到達した帰還雷撃電流が放電路の電気抵抗が大きくなる前に反射して往復運動を繰り返すことにより生じると考えられる (Takagi他, 1982). 今まで両極性落雷は電界変化で観測しているが, 今後磁界変化の測定, 放電路の光学的な測定を同時に行い, 電流の振動現象を確かめたいと考えている.

(c) 冬の電力設備に対する雷災害防止

冬の雷による被害のうち航空機や通信設備に関しては次第に解決の方向に向かっていくようである. 電力設備に対する雷害防止の問題も機器の耐雷性能の向上により一時解決に向かいつつあった. しかし, 近年になって超高圧送電の問題やこれまで述べてきた冬の雷の特異性のために, 再び重要な問題となり, 電力関係の研究者による雷害防止のための研究が盛んになってきている. この研究には冬の雷の気象学的・放電物理的な研究が極めて重要であり, 電力関係の研究者と協力して研究をすすめていくことが必要である.

8. おわりに

私達は冬の雷の研究を国内では, 北大理学部・埼玉大工学部・宇都宮大工学部等の人々と, 国外では, 米国, ニューメキシコ工大・スウェーデン, ウプサラ大学の人々と共同で研究をすすめてきました. 現在ノルウェー, 電力研究所と共同でノルウェーの冬の雷の研究をすすめています. さらに第2次日米共同研究を計画中です. 冬の雷の研究はこれから第2段階に入ろうとしているところです. 国内・国外の各研究機関でそれぞれ研究体制に長所・短所があり, 視点も異なります. これからの研究を進展させていくためには, これらを相補うよう協力して研究をすすめていくことが非常に大切だと思われま

す. 今回気象学会100年という記念の年に, 思いがけなく学会賞を頂くことになりました. 受賞に際しまして御尽力下さった学会の関係の方々へ厚く御礼申し上げます. 私達の研究の成果は先に述べた国内・国外の多くの研究機関の方々との共同研究の賜物です. 北海道大学 孫野長治 名誉教授, 埼玉大学 北川信一郎教授をはじめ各研究機関の方々へ深く感謝いたします. また冬の雷観

測というきびしい観測を推進し、日頃討論下さっている名古屋大学空電研究所の方々に心から感謝いたします。

文 献

- Brook, M., M. Nakano, P. Krehbiel and T. Takeuchi, 1982: The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, **87**, C 2, 1207-1215.
- Ishikawa, H., 1961: Nature of lightning discharges as origins of atmospherics, *Proc. Res. Inst. of Atmos. Nagoya Univ.*, **8A**, 1-274.
- 岸嶋 勇, 三谷 弘, 井上敦之, 一原嘉昭, 五十嵐正弘, 1981: 柏崎・刈羽地点の冬期雷撃電流の測定結果(その1) —昭和53~55年度の結果—, 電力中央研究所報告, 180070.
- Magono, C., T. Endoh and T. Taniguchi, 1980: Charge distribution in active winter clouds, 6th International Conference on Atmospheric Electricity.

- Nakano, M., 1979: Initial streamer of the cloud discharge in winter thunderstorms of the Hokuriku coast, *J. Met Soc. Japan*, **57**, 452-457.
- Takagi, N. and T. Takeuchi, 1982: Oscillating bipolar electric field changes due to close lightning return strokes, *Radio Science*, to be published.
- Takeuchi, T. and M. Nakano, 1977: On lightning in winter thunderstorms, *Electrical Processes in Atmospheres*, edited by H. Dolezalek, and R. Reiter, Steinkopff, Darmstadt, West Germany 614-617 pp.
- Takeuchi, T., S. Israelsson, M. Nakano, H. Ishikawa, S. Lundquist and E. Astrom, 1980: On thunderstorms producing positive ground flashes, *Proc. Res. Inst. of Atmos. Nagoya Univ.*, **27-A**, 1-18.
- Turman B.N., 1977: Detection of lightning superbolts, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2566-2568.

図書分類番号の付け方の変更について

「天気」編集委員会

これまで、「天気」に掲載される解説、論文等については、国際十進図書分類表による番号を付してきたが、学会創立100周年を記念して内容分類を行った*の機に、1983年1月号(Vol. 30, No. 1)からこの「天気」

独自の分類表による番号を付すことにした。なお番号のあとにある括弧内の文字は表題からひろったキーワードである。

* 「天気」1982年4月号(Vol. 29, No. 4)参照