

電磁界観測による北陸の冬季雷性状の研究

板本直樹*¹ 川村裕直*¹ 新庄一雄*¹

1. はじめに

北陸地域の日本海沿岸では冬季雷による超高圧送電線の2回線事故が多く発生し、大規模停電や瞬時電圧低下など電力系統に深刻な被害を与える。この冬季雷による送電線事故は、夏季雷に基づいた耐雷設計では対応できないため、冬季雷を対象とする研究が行われてきた^{(1)~(3)}。これまでの研究により、北陸地域に発生する冬季雷は継続時間が長い、エネルギーが大きい、多地点落雷が多い、高構造物への落雷が集中するなど、夏季雷の性状と大きく異なることが確認されているが、耐雷設計に十分反映されていない。

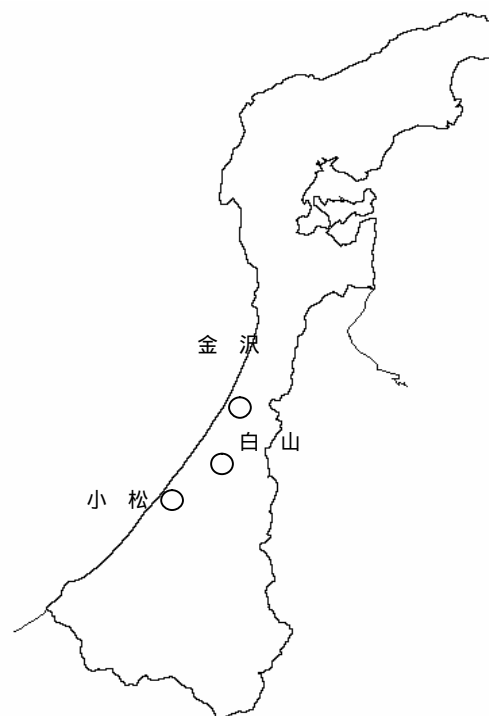
電力設備の耐雷設計に用いる重要なパラメータとして雷電流波高値、波頭峻度、電荷量などがある。雷電流波高値と波頭峻度は送電線の逆フラッシュオーバー事故に、電荷量は避雷器の損傷事故や架空地線の素線切れに影響する。このため、観測により冬季雷パラメータを明らかにし、冬季雷に対応した電力設備の耐雷設計を行うことが重要である。

雷電流の測定には、シャント抵抗やログスキークoilを用いた直接的な観測⁽²⁾⁽³⁾があるが、特定の対象構造物への雷電流しか取得できず、更に、データの収集効率が悪く、多くの時間と労力が必要となる。一方、落雷時の放射電磁界を利用する方法は、広範囲な観測が可能であり、データの収集効率が高いという利点があり、雷性状の地域差や構造物による違いについても把握できるものと期待される。

本論文では、1999年度から2005年度まで、北陸地域において落雷に伴う電磁界観測を行い、送電線事故との照合・分析により、北陸の冬季雷性状について検討した結果について報告する。

2. 観測方法

電磁界観測局の配置図を第1図に示す。石川県の金沢市、白山市、小松市に電磁界観測局を設置し、主に、石川県と福井県の日本海側で発生する



第1図 電磁界観測局の配置図

冬季雷を対象とした観測を行っている。

電磁界観測局を第2図に示す。観測局では磁界を測定する直交ループアンテナと電界を測定する電界センサが設置されている。落雷からの放射磁界を得ることにより、落雷方向の特定と雷電流の推定を行い、電界波形は極性の判別と波形形状の確認に利用する。サンプリング時間および波形記録時間は可変であり、サンプリング時間は100nsに設定し、波形記録時間は20ms~100msの範囲に設定している。電磁界観測装置の時刻はGPS時計を基準としており、一方、送電線事故の記録装置もGPS時計による時刻管理を行っているため、送電線事故と落雷データとの高精度の照合が可能となっている。

電磁界波形からの雷電流の推定には、負極性帰還雷撃について広く受け入れられている手法があり、観測した電磁界データの解析に適用し、雷電流値として示した。

*¹ 技術開発・環境保全センター 電力品質チーム



第 2 図 電磁界観測局

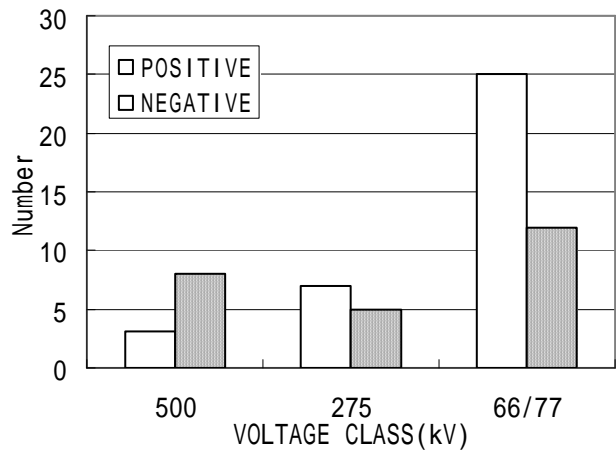
3. 観測結果

(1) 雷電流の極性

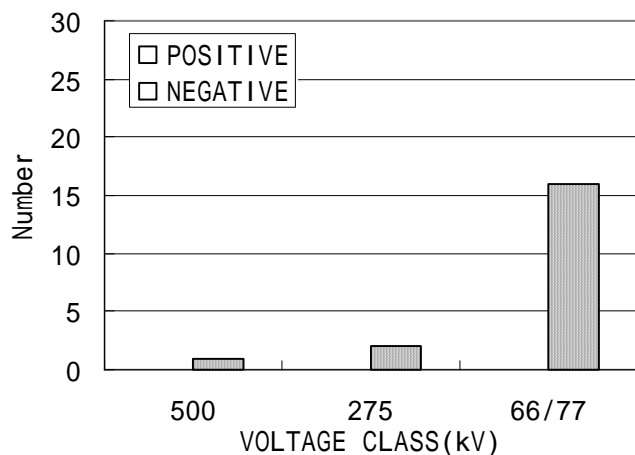
1999 年度から 2004 年度の冬季の送電線事故と照合できた電圧階級別の落雷数を第 3 図、夏季の送電線事故と照合できた電圧階級別の落雷数を第 4 図に示す。なお、夏季は 2005 年度から電磁界観測を開始しており、2005 年度のみデータとなっている。

冬季の送電線事故と照合できた 60 件の電磁界データの極性は正極性 58% (35/60 件)、負極性 42% (25/60 件) である。電圧階級別でみると 66/77kV 階級は正極性が 68%(25/37)、275kV 階級は 58%(7/12 件)、500kV 階級は 27%(3/11 件) であり、電圧階級があがるほど負極性の比率が高くなる傾向がみられた。

一方、夏季の送電線事故と照合できた雷電流は 19 件であり、すべて負極性であった。



第 3 図 冬季の電圧階級別の落雷数 (n=60)



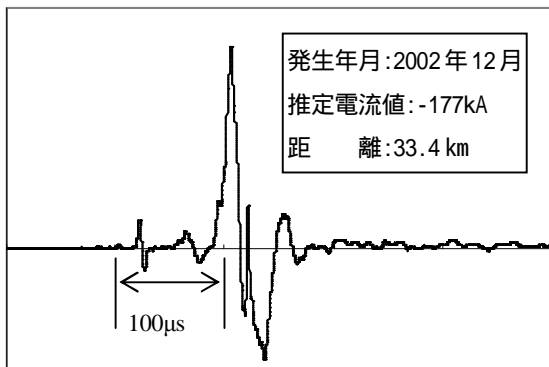
第 4 図 夏季の電圧階級別の落雷数(n=19)

(2) 負極性雷放電に伴う電界波形の特徴

a. 冬季の負極性雷放電

冬季の負極性雷放電に伴う電界波形の例を第 5 図に示す。2002 年 12 月に観測された電界波形で、電流波高値は-177kA と推定される。

すべての下向き帰還雷撃の電界波形の立ち上がり部分に共通にみられるスローフロント、ファーストトランジションが明らかでなく⁽⁴⁾、小さなパルスが重畳している。また、下向き帰還雷撃にみられる短くとも数 ms 以上の上空からのステップトリーダによる規則的な単極性パルスが観測されていない。さらなる特徴は、最大電界パルスのピーク後の逆極性への振れが大きく、ゼロクロス時間が比較的短いことである。冬季に観測した負極性雷放電 25 件のうち 22 件がこのタイプの雷放電であった。この雷放電は、送電線の逆フラッシュオーバーを発生させるのに十分な波高値と立ち上がり峻度をもつ。



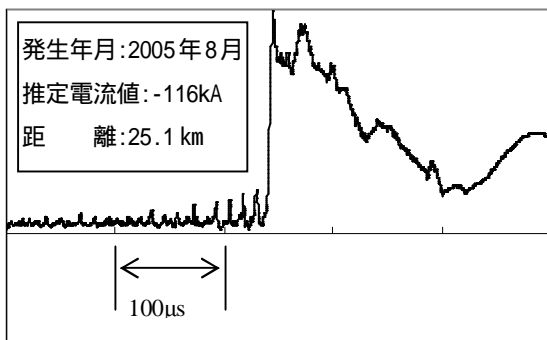
第5図 上向き負極性雷放電に伴う電界波形の例

この負極性雷放電の特徴は、上向き正極性リーダによる雷放電モデル⁽⁵⁾で説明できる。鉄塔先端から上向きに進展した正極性リーダと、雷雲内の別の負極性リーダとの結合点で大電流パルスが発生する。負極性リーダの末端は開放されているので電流波は完全不反射し、それが重畳するため電流波形は短波尾になる。この電流波が大地へ向けて下降し短絡状態に近い地上端で反射して上昇し、雷雲内の負極性リーダの末端でさらに反射する。開放端に近いリーダ末端での負反射により、電界波形では逆極性の大きなピークとして観測される。

b. 夏季の負極性雷放電

夏季の負極性雷放電に伴う電界波形の例を第6図に示す。2005年8月に観測された電界波形で、電流波高値は-116kAと推定される。

最大の電界パルスの立ち上がり部分に下向き帰還雷撃の特徴であるスローフロント、ファーストトランジションが明らかである。さらに、その直前に負極性ステップリーダによるものと思われる規則的な単極性パルスがみられることから、下向き帰還雷撃と推定される。夏季に観測した雷放電に伴う電界波形のすべてがこのタイプであった。

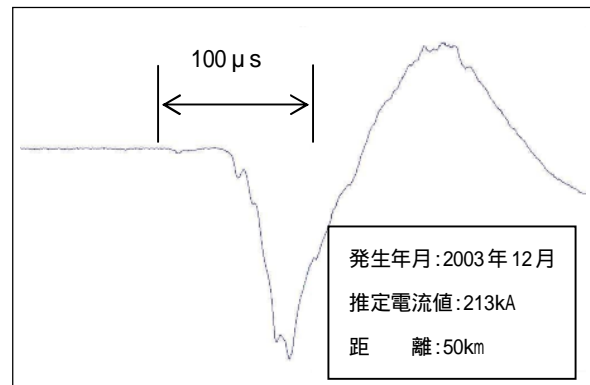


第6図 下向き負極性雷放電に伴う電界波形の例

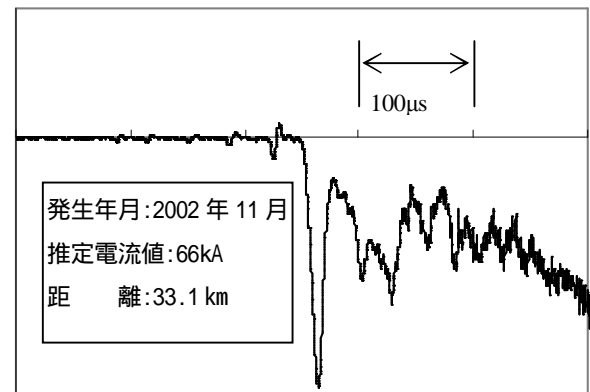
(3) 正極性雷放電に伴う電界波形の特徴

冬季の正極性雷放電に伴う電界波形の例を第7図と第8図に示す。第7図の波形はスローフロントとファーストトランジションが明確でなく、立ち上がり部分に小さなパルスが重畳している。また、最大パルス後の逆極性への振れが大きい。第4図の負極性雷放電と同様、上向きリーダ進展による雷放電と推定される。冬季に観測した正極性雷放電35件のうち26件がこのタイプであった。

第8図の波形はスローフロントとファーストトランジションが明確で、最大パルス後の逆極性の振れが小さく、下向きリーダで開始する雷放電と推定される。冬季に観測した雷放電のうち、9件がこのタイプの雷放電であった。



第7図 上向き正極性雷放電に伴う電界波形の例



第8図 下向き正極性雷放電に伴う電界波形の例

(4) 雷放電の分類

電界波形より推定した冬季の雷放電の分類を第1表に示す。冬季に観測した雷放電の82%(48/60件)は、上向き雷と推定され、負極性雷の92%(22/25件)は上向き雷と推定される。この負極性雷

に伴う電界波形は、第4図に示す逆極性へ大きく振れ、ゼロクロス時間が短いなど共通した特徴をもつタイプの雷放電であった。

特に、事故を引き起こした超高压送電線は比較的標高の高い山岳地域を通過しており、高度の低い雷雲の電荷の影響を受けやすいことから、鉄塔先端から上向きにリーダが進展していく上向き雷放電が多くなったものと思われる。

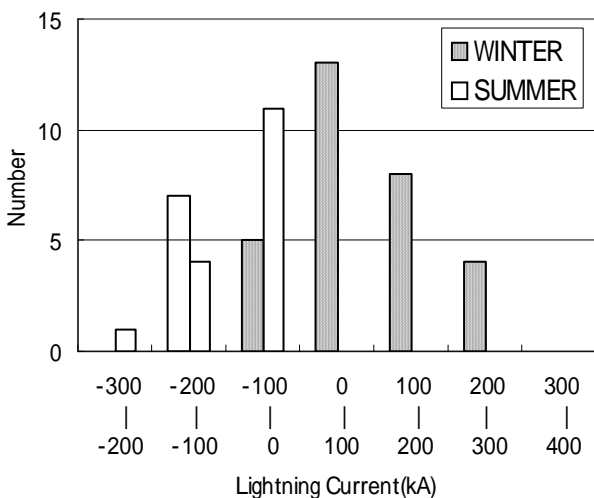
第1表 冬季の雷放電の分類

電圧階級	負極性		正極性	
	上向き	下向き	上向き	下向き
500kV	8	0	2	1
275kV	5	0	5	2
66・77kV	9	3	19	6
合計	22	3	26	9

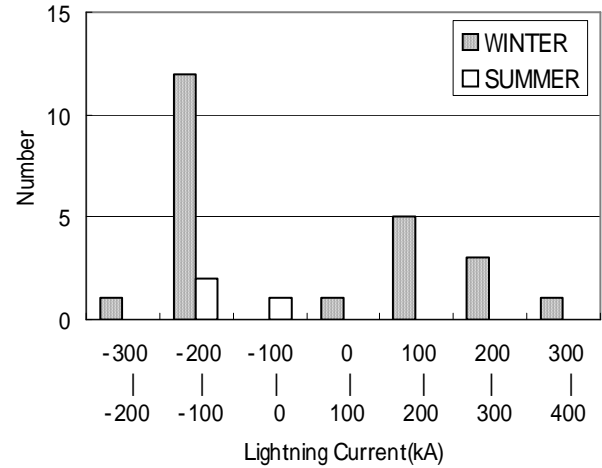
(5) 雷電流の波高値

66・77kV 送電線事故の雷電流波高値を第9図、超高压送電線事故の雷電流波高値を第10図に示す。66・77kV 送電線事故では、夏季の雷電流波高値(絶対値)は100kA以上が約30%程度であるが、冬季の雷電流波高値は正極性、負極性ともに100kA以上の大電流雷が半数以上を占めており、大電流の比率が高くなっている。

超高压送電線事故は夏季のデータが少なく比較が難しいが、冬季の雷電流波高値は正極性、負極性とも大電流の比率が高くなっており、特に負極性の場合、-100kAから-200kAの範囲に集中している。これらの負極性大電流雷は、すべて第4図に示す上向き雷放電と推定される雷である。



第9図 66・77kV 送電線の雷電流波高値



第10図 超高压送電線の雷電流波高値

4. 超高压送電線事故の事故原因の推定

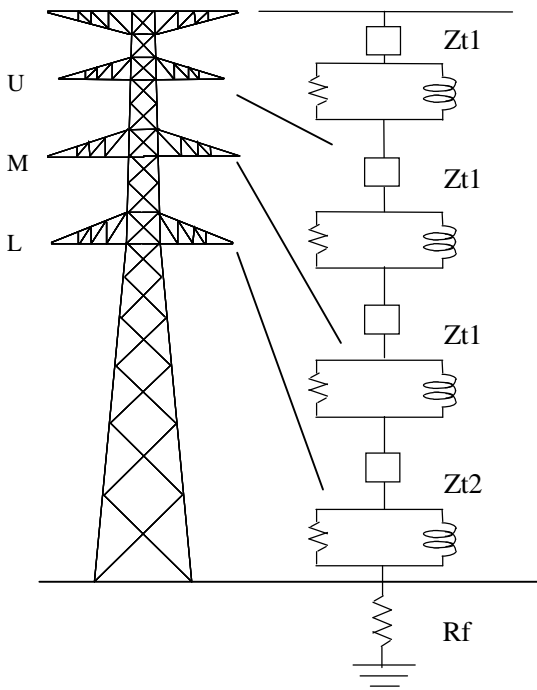
北陸の日本海沿岸地域において、冬季の超高压送電線事故が多く発生し、特に2回線にまたがる多相事故の発生率が高い⁽⁶⁾。

電磁界波形と送電線事故を照合・分析した結果から、冬季の超高压送電線事故に上向き雷が大きく関与していることが確認できた。これは、高度の低い雷雲に誘発され、鉄塔先端から上向きにリーダが進展する雷放電により、鉄塔雷撃率が夏季に比べて高くなったものと推定される。さらに、電磁界波形より算出した雷撃電流波高値は、100kAを超える大電流の比率が高くなることを示している。冬季に超高压送電線事故が多く発生する理由として、上向き雷放電による鉄塔雷撃率が高いことと大電流の比率が高いことが原因として考えられる。

5. E M T P 解析

(1) 解析手法

500kV 送電線事故について、E M T Pを用いたシミュレーション解析を行った。第11図に鉄塔モデル、第2表に計算緒元を示す。雷撃電流波形は電磁界波形に基づいて推定した電流波形を適用した。また、送電線モデルは周波数依存型 J.Marti 多相モデル、送電鉄塔は実際の鉄塔形状に基づく四段鉄塔モデルを用いた。



第 11 図 E M T P 解析における鉄塔モデル

第 2 表 E M T P 計算諸元

項 目	値	
鉄塔サージインピーダンス	Zt1	120
	Zt2	120
塔脚接地抵抗	Rf	10
送電線モデル	J.Marti 多相モデル	
鉄塔モデル	実際の形状に基づく四段階モデル	
雷撃電流波形	電磁界波形より推定	

(2) 計算結果

EMTPによる解析結果を第3表に示す。推定した雷撃電流値を用いたシミュレーションでは、すべてのケースで碍子間電圧がフラッシュオーバー電圧までに至らなかった。しかし、雷撃電流値を1.3倍することにより、No3のケースを除いてほぼ送電線事故様相を再現できた。No3のケースはフラッシュオーバー電圧に達しなかった。

雷撃電流値の補正後のシミュレーションで再現できたことは、電磁界波形に基づく電流値の推定モデルに課題があり、第9図、第10図に示した電流値よりも大きいことを示している。

第 3 表 E M T P 解析結果

No	年月日	雷撃電流 (kA)	1L			2L		
			U	M	L	U	M	L
1	2003/12/12	+300						
2	2002/12/17	+210						
3	2002/11/27	-121						
4	2002/01/29	-140						
5	2002/01/09	-139						
6	2001/12/22	-196						
7	2001/12/15	-168						
8	2001/01/15	-240						
9	1999/12/06	-179						

(注) 上段：実際の逆フラッシュオーバー相

下段：シミュレーション結果

○：フラッシュオーバー

今回の解析では、通常の負極性帰還雷撃電流と電磁界波形の関係をそのまま適用して、雷撃電流値を推定した。ただし、上向き雷については異なるモデルを適用する必要がある。下向き雷に基づくモデルによる推定値と、EMTP解析から推測される電流値が異なってくるのはむしろ当然である。上向き雷放電モデルの構築により雷撃電流の推定精度を上げることが今後の課題としたい。さらに事故様相との関係を分析して、冬季雷に対応した合理的な電力設備の耐雷設計につなげる研究を今後の目標としたい。

6. まとめ

北陸地域の送電線事故と電磁界波形との照合・分析を行い、以下の結論を得た。

(1)冬季の送電線事故と照合できた電磁界データから推定した雷撃電流の極性は正極性 58% ,負極性 42%である。超高圧送電線事故に限れば、負極性が 73%であり、負極性の雷撃電流が多くなっている。

(2)電界波形の特徴より、冬季の送電線事故と照合できた雷の多くは、鉄塔先端からリーダが上向きに進展する雷放電と推定される。雲底の低い冬季の雷雲の影響によるものと思われる。一方、夏季の雷放電はすべて下向きリーダで開始する雷放電である。

(3)夏季の送電線事故と照合した雷放電はすべて負極性で、その電流波高値(絶対値)は 100kA 以上が 30%程度である。一方、冬季の雷放電は正極性、負極性ともに 100kA 以上が半数を超え、夏季に比べ大電流の比率が高くなっている。

(4)北陸地域において冬季の超高圧送電線事故が多い原因として、夏季に比べて大電流の比率が高いこと、高度の低い雷雲に誘発された鉄塔先端からの上向きリーダが進展する雷放電による鉄塔雷撃率の高さによるものと推定される。

(5)負極性帰還雷撃モデルにより推定した雷撃電流波形を用いて実際の送電線事故現象についてシミュレーション解析した結果、推定した雷撃電流値を 1.3 倍することで再現することができた。このことは、冬季の上向き雷に対しては推定値よりさらに大電流である可能性が高く、上向き雷放電に対応したモデルの構築が必要である。

参考文献

- 1) 耐雷設計委員会送電分科会：「冬季における日本海沿岸地域での雷観測」, 電中研報告, T11, 1989
- 2) Y.Matsumoto,O.Sakuma, K.Shinjo, "Characteristics of Winter Lightning Current on Test Transmission Line Equipped with Arresters Struck by Natural and Triggered Lightning," IEEE Trans.Power Delivery, Vol.11, No2, pp.996-1002, April 1996.
- 3) N.Itamoto,K.Shinjo,T.Wakai,T.Sakai,"Observation of Winter Lightning at the 275kV Okushishiku Test Transmission Line,"in Proc. 10th ISH Montreal, Vol.5, pp.59-62, 1997.
- 4) M.Ishii,J.Hojo, "Statistics of Fine Structure of Cloud-to Ground Lightning Field Waveforms," Journal of Geophysical Research, Vol.94, No.D11, pp.13267-13274, 1989.
- 5) 宮寄, 斎藤, 石井：「上向き雷放電に伴う電磁界波形の特徴の再現」, 平成 18 年電気学会全国大会, No7-130
- 6) Sugimoto, "Lightning protection against winter lightning," Proc.28thICLP, Kanazawa, Special Session, 2006.