

北陸, 若狭地方における1996年度冬季雷の活動

李 鍾 浩*¹・和田 将 一*²・河崎 善 一 郎*¹・松 浦 虔 士*¹
竹 内 真*³・園 井 康 夫*³

要 旨

1996年11月30日～1997年2月末日の間, SAFIR (フランスで製造されている雷放電位置標定システムの商品名) による雷観測を, 北陸, 若狭地方を対象とし実施した. 本論文では, 雷放電密度分布図を作成するとともに, 雲放電, 負極性落雷, 正極性落雷の放電種別の統計を求め, 気象条件との関係を考察している. その結果, 気象の冬型が強まるほど雲放電の割合が高くなるという結果が得られ, -10°C 温度層の高度が高いほど落雷, 特に正極性落雷の割合が高くなる傾向があるという結果が得られた. 更に SSI (Showalter Stability Index) の値が高いほど雲放電の割合が高くなるという結果が得られた.

1. はじめに

近年のエレクトロニクス技術の進歩に伴い, 広域で雷活動をモニタすることのできるシステムが種々製品化され, 実用に供されている. これらは落雷位置標定システムと呼ばれ, 我が国では1970年代後半から LLP (Lightning Location and Protection) が, これに少し遅れて LPATS (Lightning Positioning And Tracking System) が, それぞれ電力会社により導入されている (耐雷設計委員会, 1996). これらは雷放電に伴って放射される中波帯の電磁波を利用して落雷位置の標定を行うシステムであり, 電力設備の雷害防止に役立てることを目的として, 現在まで運用されてきている.

一方, 大阪大学・関西電力(株)の共同研究の一環として使用されている SAFIR (System de Surveillance et d'Alerte Foudroyante par Interferometrie Radioelectrique) (園井ほか, 1993; Kawasaki *et al.*, 1994; 松井ほか, 1996) も, 上記2システムと同様雷

放電位置標定の機能を有しており, 1991年から3局構成で近畿北部, 若狭及び北陸地方を探知範囲として運用され, その後1996年11月からは4局運用により南近畿も探知範囲に含めて観測が行われている. また1995年4月からは, 財団法人日本気象協会により関東地方においても SAFIR による観測が開始されている (奥山ほか, 1996).

SAFIR は, 雷放電に伴う VHF 波帯のパルス波の放射源方位を, 干渉法に基づいて探知するシステムであり, 精度の高い標定が可能である. 更に SAFIR は, 高い時間分解能で, 落雷のみならず, 雲放電から放射される VHF パルス波を探知することが可能で, いわゆる「探知効率」が先行2システムに比して高いということが出来る. また統計的には雷放電の80%以上が雲放電であるといわれており (竹内, 1987), 多くの場合雲放電が落雷に数分先行することから, 雲放電の VHF パルス波を探知する事は, 落雷とその直撃範囲の予知を行う事になると考えられる. 言い換えれば SAFIR は, 「広域落雷予知警報システム」としての機能を具えていると考えることが出来る.

落雷・雲放電いずれも雲内に蓄えられた電荷の中和現象であり, 雲放電も含めた雷放電の広域標定を行うことは総合的に雷雨を探知するという点で重要な意味をもつと考えられる.

そこで本論文では, より高精度の標定が可能である

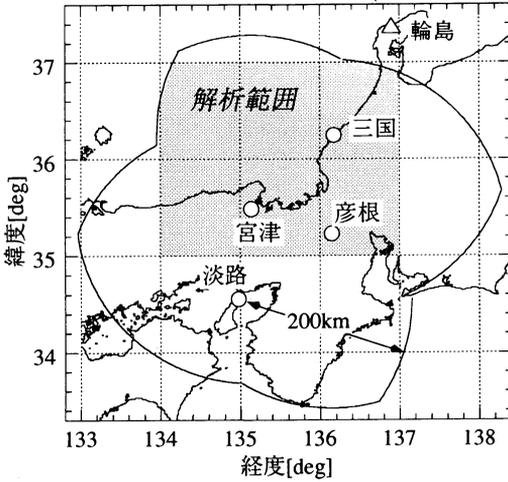
*¹ 大阪大学工学部.

*² 大阪大学工学部 (現: 株式会社東芝).

*³ 関西電力・総合技術研究所.

—1997年6月26日受領—

—1998年6月1日受理—



第1図 SAFIRの探知局位置と標定範囲(網掛域は本論文の解析域).

4局構成により観測された1996年度の北陸地方の冬季雷について、雷放電の発生頻度と特徴をまとめた結果を報告する。

2. システムの概要と解析条件

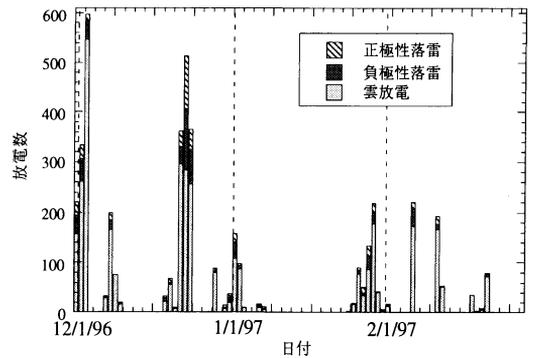
第1図に SAFIR の探知局位置と標定範囲を示す。本論文ではこの標定範囲内の網掛域の雷放電を解析した。ただし、図中の地図情報は国土地理院1 km メッシュ平均標高データを用いた。大阪大学・関西電力(株)が運用している SAFIR は、4 素子からなる干渉計アンテナを4地点(京都府宮津市、滋賀県彦根市、福井県三国町、兵庫県淡路島・北淡町)に設置することにより構成されている。雷放電に伴って放射される VHF パルス波を各アンテナで受信し、位相差法により電磁波の到来方位を求め、交会法により放電位置を標定している。なおこれらの探知局における各々の受信周波数は、宮津市116.5 MHz、彦根市115.5 MHz、三国町114.0 MHz、北淡路115.0 MHz(帯域幅は各々1 MHz)である。また、放電種別の識別は、SAFIR システムに付属しているファーストアンテナにより測定された電界変化波形をもとに行われた(Kawasaki *et al.*, 1994)。この電界変化測定は探知機の受信パルス波と同期しており、雷放電を雲放電、負極性落雷、正極性落雷の3つに識別することが出来る。第1表に落雷として識別する条件を示す。本論文における解析の範囲は北陸地方の冬季雷を対象とするために、北緯35~37°、東経134~137°(第1図の網掛域)としており、

第1表 ファーストアンテナで測定される電界変化波形で落雷と識別する条件.

立ち上がり時間	0.125~15 μ s
半減期	15~255 μ s

第2表 観測された雷放電の分類.

	雲放電	負極性落雷	正極性落雷	全放電
放電数	3451	563	412	4426
割合 [%]	78.0	12.7	9.3	100.0
極性割合 [%]		57.7	42.3	100.0



第2図 日別に累計した雷放電数.

後述する高層気温データは図中の輪島測候所において得られたものを使用した。解析の対象とする期間は SAFIR が4局構成の観測を開始した1996年11月30日から1997年2月28日までとした。

3. 雷放電頻度分布と放電種別による分類

3.1 雷放電の計数

解析範囲内の観測期間中の雷放電を雲放電、正極性落雷、負極性落雷にわけて第2表に示す。同表より、全放電中雲放電の占める割合は4426例中3451例で78.0%であった。また、落雷の極性に注目すると、正極性落雷の占める割合は42.3%となっている。Suzuki (1992)は日本海沿岸の冬季雷の長期の観測結果から正極性落雷の割合が約33%と報告している。これは送電線系統への落雷の統計であるから単純には比較できないが、今回の観測ではこれよりも正極性の割合が高い結果となっている。また、海外の年間を通じた観測結果と比較しても(Orville and Silver, 1997)はるかに高い割合となっており、北陸地方の冬季雷の特徴をよく表している。

3.2 雷放電の頻度分布

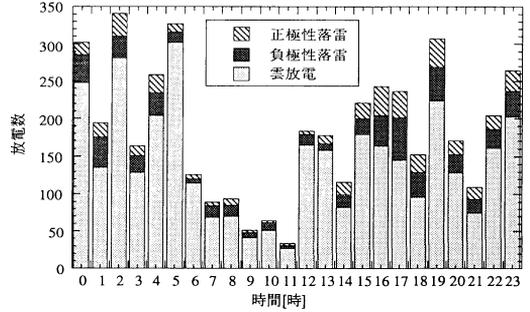
解析期間中の日別の雷放電数を第2図に示す。第2図によると例えば12月中の雷放電活動は、1日、2日、21日、22日、23日に特に活発であり、それ以外の日は比較的弱いか無活動であった。また、12月22日は雷放電中、落雷の占める割合は513例中228例、44.4%となっており、他の日に比べて落雷の割合が大きかった。さらに冬の深まりとともに、言い換えれば1月、2月と月が進むにつれ、1日の放電総数が減少する傾向を示し、「雪起こし」という古くからの呼称に符合する結果となっている。なお放電種別割合については4.1節において考察する。

ここで夏季と冬季の雷発生時刻を考察する。夏季には地表大気が高湿・多湿で、風が弱い日の午後から夕方にかけて発生頻度が高い。これに対し、冬季雷の発生は、シベリア寒気団の海上移流が主因であるため、発生時刻に夏季の様な傾向があるとは考えられない。しかしながら冬季雷を観測するとき経験的に、明け方に多く発生するとの印象を受ける。そこで今回雷活動の時刻別変化を調べるため、雷放電数を時間別に累計した結果を第3図に示す。同図より雷放電活動は、0時から5時までが最も活発で、6時から11時までの間は最低となり、1冬期に限られた観測結果であるが、時刻依存性を認めることができる。この原因の1つとして、季節風に対抗する局所的風系、すなわち日没以後の陸風の性格をもった下層風が発生し、収束で上昇気流を助長し、その結果が雷雲の発生にいたる (Ishihara *et al.*, 1989; Kobayashi *et al.*, 1994) ことが考えられる。なお12時から23時の間は雷放電頻度は、明瞭ではないが時刻とともに増加する傾向が見られるが、この点に関する考察は今後の課題とする。

3.3 解析範囲における雷放電の密度分布

解析範囲を5 km四方のメッシュに区切り、その中の雷放電及び落雷の発生数を求めた結果を第4図に示す。第4図aは雲放電と落雷を合わせた雷放電密度の分布であり、第4図bは落雷密度の分布である。ここで、雲放電においては1放電に対し複数の標定点が得られるが、統計量としては、放電開始点のみを取り上げている。

第4図aより雷放電の密度が高い地域が三国付近すなわち、北緯36°東経136°あたりであることがわかる。この雷放電多発の原因としては、(1) 海上を移流してきた気団が上陸し地形 (若狭を境に、本州のそのものがほぼ北向きに成ること) の影響をうけて上昇流成分



第3図 時間別に累計した雷放電数。

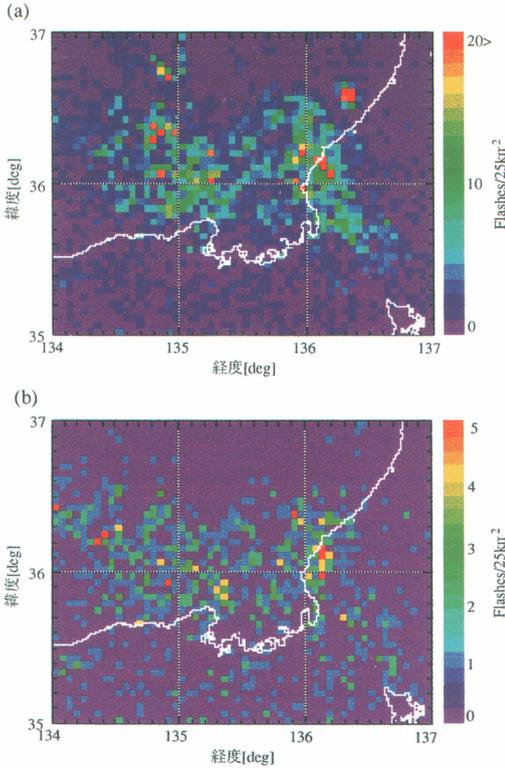
が強化されること、(2) この地域は、沿海州からの最寒の気団と朝鮮半島を經由する比較的高温の寒気団が収束する不連続線の延長にあること (植村, 1980)、の2つをあげることができ、同図bからも解かるようにこの領域においては落雷の密度も高くなっている。また丹後半島付近に雷活動が、集中することはシベリアより移流する寒気と陸風の収束によるものと考えられる。一方、日本海上の雷放電密度は、若狭湾域で相対的に低くなっている。これは湾内という特殊な地理条件によると考えられるが、現在のところ明確な地学的・気象学的根拠は不明である。

4. 気象条件と雷放電種別の関係

4.1 地上天気図から見た気象と放電種別の関係

前述の第2図を見ると放電種別の割合が発雷日に依存して変化していることがわかる。この原因の1つとして気圧配置、すなわちその日の気象の違いが考えられる。そこで、本論文では1つの試みとして地上天気図および高層気象データにより、北陸地方の冬季の気象を(1)強い冬型(2)冬型(3)冬型解消型(4)前線通過型(5)小低気圧発生型の5つに分類し、気象型と放電種別との関係を調べた。ここで、(1)と(2)の区分は地上天気図から冬型と判断されるケースの中で、500 hPaの気温が -35°C 以下の場合を冬型の中でも特に強い冬型と分類した。このような方法により、気象型と放電種別との関係を調べた結果を第3表に示す。

同表より、気象型の違いにより放電種別の割合が、異なる傾向があることが解かる。例えば、強い冬型に分類される条件下において発生する雷放電は、雲放電の割合が84.2%と他の気象型に比べて高くなっている。これに対し前線通過時に発生する雷放電は雲放電の割合が62.1%となっており、相対的に落雷の占める



第4図 雷放電の密度分布 (5×5 km メッシュ)
(a) 全放電の密度分布 (b) 落雷の密度分布

第3表 気象型に対する放電種別発生回数と割合.

気象の型	強い冬型	冬型	冬型解消型	前線通過型	小低気圧発生型	
放電数 [回]	雲放電	1176	657	554	465	599
	負極性落雷	130	107	67	159	100
	正極性落雷	90	71	72	125	54
	全放電	1396	835	693	749	753
割合 [%]	雲放電	84.2	78.7	79.9	62.1	79.5
	負極性落雷	9.3	12.8	9.7	21.2	13.3
	正極性落雷	6.4	8.5	10.4	16.7	7.2
極性 [%]	負極性落雷	59.1	60.1	48.2	56.0	64.9
	正極性落雷	40.9	39.9	51.8	44.0	35.1

割合が高くなっている。また、冬型が解消したときに発生する雷放電の中で、落雷極性の割合に注目すると、正極性落雷が51.8%となって、ここに示した5つの型の中で最高となり、かつ正極性落雷の割合が50%を超えるのはこの型に限られることが解かる。

第4表 -10°C 温度層高度に対する放電種別発生回数と割合.

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
-10°C 温度の高度		1.4 km 以下	1.4~1.8 km	1.8~2.2 km	2.2~2.6 km	2.6 km 以上
放電数 [回]	雲放電	85	932	1343	671	420
	負極性落雷	7	72	240	80	164
	正極性落雷	2	43	151	81	135
	全放電	94	1047	1734	832	719
割合 [%]	雲放電	90.4	89.0	77.5	80.6	58.4
	負極性落雷	7.4	6.9	13.8	9.6	22.8
	正極性落雷	2.1	4.1	8.7	9.7	18.8
極性 [%]	負極性落雷	77.8	62.6	61.4	49.7	54.8
	正極性落雷	22.2	37.4	38.6	50.3	45.2

4.2 -10°C 温度層高度と放電種別の関係

Takahashi (1984) は、冬季雷の数値実験を行い、-10°C 温度層付近に特に濃密に負電荷が蓄積されると説明している。又 Michimoto (1993) は雷活動の有無・強弱は、この-10°C 温度層の高度に強く依存することを明らかにした。今回解析の対象とした観測期間中の雷放電活動をこの-10°C 温度層の高度を指標として、(1) 1.4 km 以下 (2) 1.4~1.8 km (3) 1.8~2.2 km (4) 2.2~2.6 km (5) 2.6 km 以上の5つに分類し、放電種別との関係を調べた結果を第4表に示す。同表によると (1) では雷放電の中で雲放電の割合は90.4%であるのに対し、(5) においては58.4%となっている。また、落雷の極性については、(1) では正極性の割合が22.2%であるのに対し、(5) においては45.2%となっており、-10°C 温度層高度が高いほど落雷の割合が高くなる傾向が見られる。また落雷の極性では、正極性の割合が高くなる傾向が見られる。これらの傾向は単調増加ではなくいずれも (4) で極大になっていることは注目に値する。

正極性落雷発生機構には次の3つが考えられる：

(a) 下部の負電荷層が急速に地表に落下して消失し、上部正電荷領域が直接地表に対向する。

(b) 上部正極性領域がウインドシアーにより下部負電荷の存在しない領域にシフトする。

(c) ポケットチャージと呼ばれる下部正電荷が高濃度に集積し地表に放電する。

正極性落雷の割合が、-10°C 温度層の高度増加に対し単調ではなく曲折のある増加傾向を示すことは、正極性落雷発生機構が単一でないことと関連があると

第5表 5段階に分けたSSI値に対する放電種別発生回数と割合。

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
SSIの値		4℃以上	0～4℃	0～-3℃	-3～-6℃	-6℃以下
放電数 [回]	雲放電	0	100	341	486	2525
	負極性落雷	0	4	21	59	479
	正極性落雷	0	1	17	60	334
	全放電	0	104	379	605	3338
割合 [%]	雲放電	0	95.2	90.0	80.3	75.6
	負極性落雷	0	3.8	5.5	9.8	14.3
	正極性落雷	0	1.0	4.5	9.9	10.0
極性 [%]	負極性落雷	0	80.0	55.3	49.6	58.9
	正極性落雷	0	20.0	44.7	50.4	41.1

第6表 雷注意報発表回数及び発雷日とSSI5領域との関係。

	SSIの値	雷注意報発表回数/ 事例	発雷日数/ 事例
(5)	-6℃以下	27/31	24/31
(4)	-6℃～-3℃	21/45	18/45
(3)	-3～0℃	17/48	11/48
(2)	0～4℃	10/40	7/40
(1)	4℃以上	1/6	0/6

第7表 SSI値範囲に対する気象型事例数及び雲放電割合。

SSIの値	気象形態別事例数	雲放電数/全放電数
(2)	強い冬型：0	
	冬型：2	78/78
	冬型解消型：4	21/26
	前線通過型：0	
(3)	小低気圧発生型：0	
	強い冬型：0	
	冬型：8	186/209
	冬型解消型：4	83/91
(4)	前線通過型：1	72/79
	小低気圧発生型：0	
	強い冬型：0	
	冬型：8	63/85
(5)	冬型解消型：5	414/508
	前線通過型：0	
	小低気圧発生型：0	
	強い冬型：9	1170/1390
(5)	冬型：4	339/463
	冬型解消型：5	36/68
	前線通過型：2	392/666
	小低気圧発生型：5	597/751

SSI値範囲 (2)：0～4℃ (3)：0～-3℃ (4)：-3～-6℃ (5)：-6℃以下。

考えられる。

また、雷放電の約74%が、-10℃温度層の高度が1.8 kmより高いときに発生していた点は、Michimoto (1993)の指摘を支持する結果となっている。

4.3 安定指数 (SSI) と雷放電種別の関係

SSIを(1)4℃以上、(2)0～4℃、(3)0～-3℃、(4)-3～-6℃、(5)-6℃以下、の5つに分類し、雷放電型との関係を調べた結果を第5表に示す。同表より、(5)に分類された雷放電数は3338であり、雷放電の中で75.4%がSSIの値-6℃以下で発生していた。また、(5)の条件で発生する雷放電の中で雲放電が占める割合は75.6%となっているのに対し、サンプル数は少ないが(2)では95.2%が雲放電となっており、SSI値が高いほど雲放電の割合が高くなっている。更にSSI値と発雷及び雷注意報との関係を調べるために解析期間を12時間ごとに分けて調べた結果を第6表に示す。同表より、発雷の占める割合は(5)の条件においては、31例中24例、77.4%であり、(4)の条件においては、45例中18例、40%、(3)の条件においては、48例中11例、22.9%、(2)の条件においては、40例中7例、17.5%

であった。また、観測範囲内の雷注意報発表とSSI値との関係を調べた。その結果、雷注意報発表は、(5)の条件においては、31例中27回、(4)の条件においては、45例中21回、(3)の条件においては、48例中17回、(2)の条件においては、40例中10回、そして(1)の条件においては、6例中1回であった。また、今回の雷注意報的的中率は12月には22例中19例で86.4%、1月においては、37例中20例で54.1%、2月においては、17例中11例で64.7%であった。

更にSSI値に対する気象型事例数及び雲放電の割合を調べた結果を第7表に示す。同表より、強い冬型及び小低気圧発生型の場合は、雷放電発生は、SSI値が(5)即ち-6℃以下のときに限られ、大気成層が非常に不安定にならないと雷雲は形成されない。これに対し、冬型および冬型解消型の場合は、SSI値が(2)即ち0～4℃で雷放電が発生し、大気成層が比較的安定な条件下でも雷雲が形成されている。

夏季雷雲の発生の目安は、SSI値が-3℃以下のときであることが知られている。冬季では、冬型および冬型解消型の場合に、この目安が当てはまる。第5表は、

SSI値が低下するに従って、雷放電発生回数が明確に増加することを示し、冬季雷発生についてもSSIは、有効な目安であることが解る。ただ第7表は、本論文で定義した気象型によって、雷雲発生の目安とすべきSSI値が、区々であることを示している。

冬季雷雲とその発生時の気象型については、今後気象学的研究を一層深める必要が認められる。

5. まとめ

本論文では雲放電、負極性落雷、正極性落雷の広域位置標定を行うことが可能なシステムであるSAFIRを用いて観測した1996年度の北陸・若狭地方の冬季雷の解析結果をまとめた。

その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 今回の観測では、雲放電の比率は78%であった。落雷の極性に注目すると、正極性落雷の占める割合は42.3%であり、従来の冬季雷観測結果と比較してかなり高い割合となった。

(2) 解析期間中の12月には特に雷活動が活発な時期が2回見られ、それ以外は不活発か無活動であった。さらに厳冬期になるにつれ、雷活動が減少するという、季節変化が認められた。一方、雷放電数を時間別に累計した結果を見ると0時から5時までが最も頻度が高く、6時から11時まででは最も低い。これは経験的に得られている知見と一致する統計結果であった。

(3) 解析範囲内の雷放電密度分布では、北緯36°、東経136°あたり、すなわち三国付近の雷放電密度が最も高い。このことは、沿海州と朝鮮半島が夫々北岸と西岸となっているという日本海特有の地理的条件に起因すると推論される。日本海上の寒気の移流では、上記の地域付近で特に対流活動が激しくなるからである。

(4) 地上天気図と高層気象データから分類される気象型と比較すると、冬型が強まるほど落雷の割合が低くなり、その中で、前線通過型の雷放電は相対的に落雷の割合が高いという結果が得られた。

(5) 今回の観測では、 -10°C 温度層高度が高いほど落雷の割合が高くなる傾向があった。また、強い冬型で雷放電が発生するのは、SSI値が -6°C 以下の場合に限られた。

夏季雷では氷結高度(0°C 温度層の高度)が高いほど、落雷の割合が低くなるという傾向が確立しているので、上記の傾向は注目、検討に値する。

最後に、本論文の結果は1996年度冬季に限った結果

であるため、さらにデータの蓄積を行って解析をすることが今後の課題である。

参考文献

- Ishihara, M., H. Sakakibara and Z. Yanagisawa, 1989: Doppler radar analysis of the structure of meso-scale snow bands developed between the winter monsoon and the land breeze, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 503-520.
- Kawasaki, Z-i., K. Yamamoto, K. Matsuura, P. Richard, T. Matsui, Y. Sonoi and N. Shimokura, 1994: SAFIR operation and evaluation of its performance, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1133-1136.
- Kobayashi, F., G. Naito, T. Wakai and T. Shindo, 1994: The role of the lower atmospheric conditions to development of winter thunderclouds in the Japan Sea Coast, *J. Atmos. Electr.*, **14**, 31-40.
- 松井敏明, 足立幹雄, 大貫 淳, 河崎善一郎, 和田将一, 松浦慶士, 1996: SAFIRによる落雷予知, *電気学会論文誌 B*, **116B**, 438-443.
- Michimoto, K., 1993: A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku district Part II: Observation and analysis of "single-flash" thunderclouds in midwinter, *J. Meteor. Soc. Japan*, **71**, 195-204.
- 奥山和彦, 田口晶彦, 小倉義光, 1996: 1995年から1996年夏にかけての関東地方の雷活動について, *日本気象学会秋季大会講演予稿集*, 142p.
- Orville, R.E. and A.C. Silver, 1997: Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95, *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 631-637.
- 園井康夫, 河崎善一郎, 松浦慶士, 松井敏明, 下倉尚義, 1993: SAFIRによる雷観測結果と気象用レーダエコーとの照合, *電気学会論文誌 B*, **113B**, 987-993.
- Suzuki, T., 1992: Long term observation of winter lightning on Japan Sea Coast, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 53-56.
- 耐雷設計委員会雷性状分科会, 1996: 落雷位置標定装置の現状とそのデータを用いた落雷頻度マップの作成, *電気学会論文誌 B*, **116B**, 395-402.
- Takahashi, T., 1984: Thunderstorm electrification-a numerical study, *J. Atmos. Sci.*, **41**, 2541-2558.
- 竹内利雄, 1978: 北陸における冬季雷の研究, *電気学会雑誌*, **98**, 1156-1159.
- 竹内利雄, 1987: 雷放電現象, 名古屋大学出版会, 87-89.
- 植村八郎, 1980: 冬季季節風下の日本海沿岸に大雪をもたらすじょう乱の構造と形成について, *天気*, **27**, 33-44.

A Study on Lightning Activity of the Thunderstorms during 1996 Winter Season
around Wakasa, Hokuriku District, Japan

Jongho Lee*¹, Masakazu Wada*², Zen-Ichiro Kawasaki*¹,
Kenji Matsuura*¹, Makoto Takeuti*³, Yasuo Sonoji*³

*¹ (*Corresponding author*) Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka 565-0871, Japan.

*² Faculty of Engineering, Osaka University (Present affiliation : Toshiba Co.).

*³ Kansai Electric Power Co., Inc.

(Received 26 June 1997 ; Accepted 1 June 1998)

Abstract

The authors observed winter lightning discharges over the Hokuriku coastal area by means of SAFIR, from 30 November 1996 to 28 February 1997.

The paper presents the map of the flash density and the statistics of the lightning discharges, in terms of cloud flash, ground flash of negative and positive polarity. The paper also discusses the lightning activity with the meteorological conditions.

It is noticed that the occurrence rate of the cloud discharges becomes highest when the winter type synoptical situation prevails and the occurrence rate of the ground flashes, especial, that of positive polarity tends to be higher, when the altitude of the -10°C temperature level is higher. It is also noticed that the occurrence rate of the cloud discharges tends to be higher, when the SSI (Showalter Stability Index) is relatively higher.
