

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 広帯域電界・電磁波による雷放電の観測的研究   |
| Author(s)    | 牛尾, 知雄  |
| Citation     | 大阪大学, 1998, 博士論文  |
| Version Type | VoR   |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.11501/3143927">https://doi.org/10.11501/3143927</a> |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

広帯域電界・電磁波による  
雷放電の観測的研究

1998年

牛尾知雄

広帯域電界・電磁波による  
雷放電の観測的研究

1998年

牛尾知雄

# 目次

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 序論.....                  | 1  |
| 1. 1 本研究の対象, 背景.....         | 1  |
| 1. 2 本研究の目的, 意義.....         | 3  |
| 1. 3 本論文の構成と概要.....          | 5  |
| 参考文献.....                    | 6  |
| 第二章 正極性落雷の観測と放電開始過程.....     | 9  |
| 2. 1 緒言.....                 | 9  |
| 2. 2 観測機器.....               | 10 |
| 2. 3 解析結果.....               | 12 |
| 3. 3 検討とまとめ.....             | 19 |
| 参考文献.....                    | 20 |
| 第三章 冬季雷に伴う電界変化の多地点観測.....    | 25 |
| 3. 1 緒言.....                 | 25 |
| 3. 2 電界変化多地点観測システム.....      | 26 |
| 3. 2. 1 システムの構成と原理.....      | 26 |
| 3. 2. 2 精度の検証.....           | 28 |
| 3. 3 観測結果, 解析.....           | 29 |
| 3. 3. 1 観測概要.....            | 29 |
| 3. 3. 2 解析手法.....            | 30 |
| 3. 3. 3 雷放電観測結果 (1).....     | 31 |
| 3. 3. 4 雷放電観測結果 (2).....     | 35 |
| 3. 4 結言.....                 | 37 |
| 参考文献.....                    | 38 |
| 第四章 広帯域干渉計の試作とロケット誘雷の観測..... | 41 |
| 4. 1 緒言.....                 | 41 |
| 4. 2 観測状況.....               | 42 |
| 4. 3 実験結果と検討.....            | 49 |
| 4. 4 結論.....                 | 63 |
| 参考文献.....                    | 64 |

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第五章 中国高原雷の広帯域干渉計による観測..... | 67 |
| 5. 1 緒言.....               | 67 |
| 5. 2 観測概要.....             | 68 |
| 5. 3 観測結果.....             | 70 |
| 5. 3. 1 雲放電解析例 1 .....     | 70 |
| 5. 3. 2 雲放電解析例 2 .....     | 77 |
| 5. 3. 3 雲放電解析例 3 .....     | 82 |
| 5. 4 検討とまとめ.....           | 88 |
| 参考文献.....                  | 91 |
| 第六章 結論.....                | 95 |
| 謝辞 .....                   | 98 |
| 研究業績.....                  | 99 |

# 第一章

## 序論

### 1. 1 本研究の対象、背景

地球は窒素や酸素などの大気に取り囲まれた惑星である。この大気は通常、鉛直方向に温度により分類され、地表面から順に対流圏、成層圏、中間圏、熱圏と呼称されている。我々が日々接する天気の変化をもたらすのは平均して約10 kmの厚さをもつ対流圏内の現象である。この対流圏の大気が地表からの加熱により不安定な成層を成すとき、その不安定を解消するため積乱雲あるいは雷雨が発達する。その構造や発達は気象状況によって異なり、特に風向、風速の高度に対する変化の割合（これをシアという）が雷雨の形態に大きく作用する。雷雨の形態はシアが弱い時に発生する気団性雷雨、シアが強い場合に発生するマルチセル型雷雨やスーパーセル型雷雨と3種類に大別される。しかし、一般的に雷雨はスーパーセル型雷雨を除いていずれも対流セルあるいは降水セルと呼ばれる秒速数メートル程度の激しい上昇気流、下降気流を含む対流の単位の集合体で構成されている。各々の対流セルは発達期、成熟期、消滅期という特有のライフサイクルを持ち、発達期のあられを主成分とする降水の形成に伴い雲内で電荷分離が進行し電荷が蓄積される。そして、大気の絶縁破壊強度を越えたとき放電という形態をとって、雲内の電荷が中和される。これを雷放電と呼び、以上を総称して雷放電現象と呼んでいる。

雷放電は対地放電（落雷）と雲放電の2種類に大別される。雷害の主要な原因になっている対地放電は、雲中の電荷が大地に放電する過程であり、例えば雲内の負電荷が中和される場合これを慣習的に負極性落雷と呼んでいる。落雷に先行する前駆放電は雲内で開始し、雲外に伸びた前駆放電路は枝分かれしながら数十マイクロ秒間隔で発光しながら伸びていく。これをステップトリーダと呼ぶ。リーダの下端が大地に達すると、帰還雷撃あるいはリターンストロークと呼ばれる現象が発生し、リーダ上を光速に近い速度で強い発光

部分が上昇していくとともに、リーダから大地に継続時間が100マイクロ秒程度のパルス状の電流が流れる。その後、数十から数百ミリ秒経過してから再びリーダが以前に形成された放電路をたどって大地へ進展する。これをダートリーダと呼び、その速度はステップリーダの10倍程度速く、ステップを踏むことなく連続的に持続進展する場合が多い。ダートリーダが大地へ到達すると第2の帰還雷撃が起こり、放電は同様な過程を経て継続していく。これを後続雷撃と呼び、後続雷撃のある落雷を多重雷と呼んでいる。夏季の落雷は負極性落雷が90%以上を占めているが、日本海沿岸に発生する冬季雷では正極性落雷が半数以上を占めている<sup>(1)</sup>。

雷放電現象は電力工学と密接に関連している。送配電線の供給支障を伴う総事故件数のうち、雷事故は電圧・年度により異なるものの、送電線では25から64%<sup>(2)</sup>、配電線で11から45%<sup>(3)</sup>を占めており、最大の事故原因となっている。特に、原子力発電所、大容量火力発電所につながる基幹送電線の事故はひとたび発生すると広範囲に影響を及ぼすことからその対策は重要である。さらに、500kV送電線の雷によるトリップ事故の統計によれば、日本海側の平衡高絶縁線路において、2回線事故が46%と極めて高い比率を示していることが報告されている<sup>(4)</sup>。これらの日本海側の事故の多くは冬季雷によって発生し、特に2回線事故のうち高速再閉路方式適用の困難な4線以上にまたがる事故が十数%近くの高率で発生している。これらの事故は供給支障に及ぶ可能性を秘めているためその対策は極めて重要であると考えられている。このような理由により、昭和50年代の初頭より電力会社、大学を中心として冬季雷の観測が精力的に行われ、冬季雷の性状が明らかにされてきている。例えば、夏季雷に比べ冬季雷の特徴としてよくあげられる性状として以下がある<sup>(5)</sup>。

- (1) 正極性落雷の割合が高い。
- (2) 一つの雷雲セル当たりの放電数が少ない。
- (3) 上向き雷放電が発生する。
- (4) 多地点同時雷撃。
- (5) スーパーボルトが発生する。
- (6) 雷雲下の長い水平放電路、など。

スーパーボルト<sup>(6)</sup>とは、米国の人工衛星からの光学観測により発見された通常の雷放電の光エネルギーより1から2桁高い電光のこといい、冬季日本上空で比較的多く観測されている。地上での観測結果からスーパーボルトは大きな中和電荷量<sup>(7)</sup>や雷撃電流値<sup>(8)</sup>を有する正極性落雷と考えられているが、統計的な扱いは未だ十分ではない。このような特異性とくに正極性落雷の性状は送配電線路の冬季雷による事故の大きな要因の一つと考えられる。

以上の様な雷害を防止するための手法は多岐にわたる。例えば、鉄塔への雷撃を防止するための遮蔽、送電線へ雷撃したときのフラッシュオーバの防止、酸化亜鉛避雷器の適用、再開路による短時間の事故除去、復旧さらには、広域雷位置標定システムや気象レーダを用いた雷予知などがある。このような雷害防止手法に関する研究は、雷撃後の耐雷と雷の制御そしてそれらの基礎知識となる雷性状の把握の3つに大きく分類することができる。耐雷に関する研究では、特に電力会社を中心として送、変、配電設備の合理化、精緻化を目的として雷撃様相の把握や酸化亜鉛避雷器の適用、解析に基づく変電機器の絶縁合理化、サージ解析などが現在も精力的に行われている。また、雷制御に関する研究では、日本においては、ロケット誘雷グループ（現在名古屋工業大学グループを中心とする）を中心に現在も北陸地方の冬季雷を対象としてロケットを用いての誘雷が行われており、多くの知見が得られている。最近では別のグループがレーザー誘雷や水誘雷などの研究を行っており、実際に野外実験も実施されている。それらに対して、雷予知や雷性状の把握に関する研究には一般的にあまり関心が寄せられていないのが現状である。そもそも雷現象は気象現象であるため、気象学者らにより研究が行われるのが通常であるが、わが国においてはそのような例は非常に少ない。しかしながら、雷害防止を考える上で、雷現象そのものについての研究は必要不可欠であると考えられ、その結果得られた知見に基づき、雷抑制さらには雷予知の糸口を見いだす可能性もあると考えられる。

## 1. 2 本研究の目的, 意義

雷放電を観測する場合、その生起は場所、時間を特定し難いことから遠隔計測、リモートセンシングが主たる手段となる。物理量として観測されるのは電界、磁界、光を含む電磁波などである。元来、雷放電は電荷移動を伴う現象なので電磁界計測により雷放電に関する多くの情報が得られる。その雷放電に伴って放射あるいは変化する電界は、周波数領域で見ると非常に広く、直流からマイクロ波帯に至るため、どのような放電過程を観測の対象にするかによって、測定方法も異なる。

放電前の雷雲の接近に伴う電界や、雷放電前後の電界変化等の数百ヘルツまでの電界の測定にはフィールドミルと称されている回転セクタ型の電界計が用いられる。一方、これより周波数の高い数十メガヘルツまでの電界変化の測定にはスローアンテナやファーストアンテナと称される容量性アンテナが用いられるのが一般的である。これらはアンプの入力の抵抗とコンデンサが時定数を決めていて、時定数が数秒以上のものをスローアンテナ、数ミリ秒程度のものをファーストアンテナと便宜的に呼んでいる。しかしながら、最近では大容量のメモリーや高速で分解能の高いA/D変換システムが比較的安価に手に



入るようになってきており、実際上ファーストアンテナとスローアンテナの両方の性質を兼ね備えたダイナミックレンジの広い広帯域スローアンテナ<sup>(9)</sup>ともいえるべき測定システムが用いられるようになってきている。この領域の測定は測定が容易なことや雷放電に伴って変化あるいは放射される電磁波のスペクトルの大部分がこの領域であることから1950年代より行われており、雷放電に関する知見の多くはこの領域の測定により得られている。しかし、これらの知見の多くは夏季雷とくに負極性落雷や雲放電に関するものがほとんどであり、近年問題となっている冬季雷や正極性落雷に関する報告は少ない。そこで、本論文の前半においてはスローアンテナやファーストアンテナを用いた静電場から数MHz付近までの電界観測を冬季正極性落雷、特にその放電開始過程に適用したその結果について述べることにする。

一方、数十メガヘルツ以上の高周波帯の領域では、近年の高周波技術の進歩とともにその測定技術は発展してきている。この周波数帯の電磁波は雷放電の微小な放電過程から放射されていると考えられており、落雷の発生予兆となる雲内での放電現象を高い時間、空間分解能で可視化するのに応用されている。その結果、今まで直接見ることが出来なかった雲内の放電進展様相が明らかになってきおり、今後この領域での観測により放電過程や雷雲の電氣的構造など雷放電現象の基礎的な事項の解明、さらに雷予知の糸口を見いだす可能性が高いと思われる。

VHF/UHF放射を用いての電磁放射源標定手法は到達時間差法と干渉法の二つに大別される。到達時間差法は複数地点において同時観測された波形の到達時間差を測定し、これから電波源を求める方法のことをいい、時間差の代わりに対象とする電磁波の中心周波数の波長程度離れたアンテナ対で位相差を計測し到来方位を求めるものを干渉法と呼んでいる。これらの手法を用いての雷放電の研究は主にアメリカやフランスを中心として活発になされており、LDARシステム<sup>(10),(11)</sup>やSAFIRシステム等実用化されているものもある。しかしながら、雷放電はその一連の過程においてステップリーダによる枝分かれなど高速に同時に進行する現象を伴うこともあり、こうした現象に対して到達時間差法や干渉法では十分な時間分解能をもち得ない。一方、こうした手法に対して、近年のデジタル、高周波技術の進歩の結果、超高速サンプリング技術が開発され、VHF/UHF帯の電磁波を高速サンプリングすることが出来るようになってきている。この技術は電気機器の診断などに応用されている<sup>(12)</sup>が、サンプリング周波数が極めて速いため時間分解能がよい。さらに、この手法では電磁波の信号を直接記録するので、様々なソフトウェア処理の適用が考えられる。しかしながら、この手法を実際の雷放電の観測に適用し、電磁波放射源の標定を行った例はなく、一次元でその可能性を論じている<sup>(13)</sup>に過ぎないのが現状で

ある。そこで、本研究の後半では雷放電路再現を目的として2次元標定のための広帯域干渉計を製作し、雷観測を行った結果について述べることとする。

### 1. 3 本論文の構成と概要

図1. 1に概要を示すように、本研究では、広帯域電磁波観測により雷放電に関する新たな知見を得ることおよび電界変化多地点観測システムの製作、広帯域干渉計の製作、放電路の再現を目的とし、冬季雷特に正極性落雷に対しての低周波数帯の観測および広帯域VHF帯干渉計によるロケット誘雷、自然雷の観測を行っている。

第一章においては、本研究で対象とする雷放電についての一般的な説明を行い、次に電気工学および大気電気学の観点から冬季雷や正極性落雷、雷予知について述べている。さらに、電磁波観測の有用性に言及し、本研究の立脚点を明らかにしている。

第二章では従来より広く行われている数MHzまでの低周波帯の電界変化観測を冬季正極性落雷に適用した結果について述べている。特に、落雷の初期予兆現象となるプレリミナリーブレイクダウンパルスについて解析を行い、その物理過程について考察を行っている。本章は業績リスト中の発表論文4の内容に基づいている。

第三章では電界変化を3地点で観測し、各地点をGPSを用いて同期させることにより雷放電から放射される電磁波の位置標定を行った結果について述べる。正極性落雷の初期に記録されるプレリミナリーブレイクダウンパルスについて標定を行い、正極性落雷の概念図の提唱を行っている。本章は業績リスト中の発表論文1の内容に基づいている。

第四章ではVHF帯の電磁波を広帯域で観測することにより電磁波放射源の位置標定を行う観測機器の試作を行っている。さらに、同機器を用いてロケット誘雷の観測を行い、その結果について考察を行うとともに本手法の有効性を示す。本章は業績リスト中の発表論文3の内容に基づいている。

第五章では広帯域干渉計の改良を行い、中国高原地帯において実施した雲放電観測の結果について述べる。

第六章では、以上で得られた知見を総括し、本論文の結論とする。

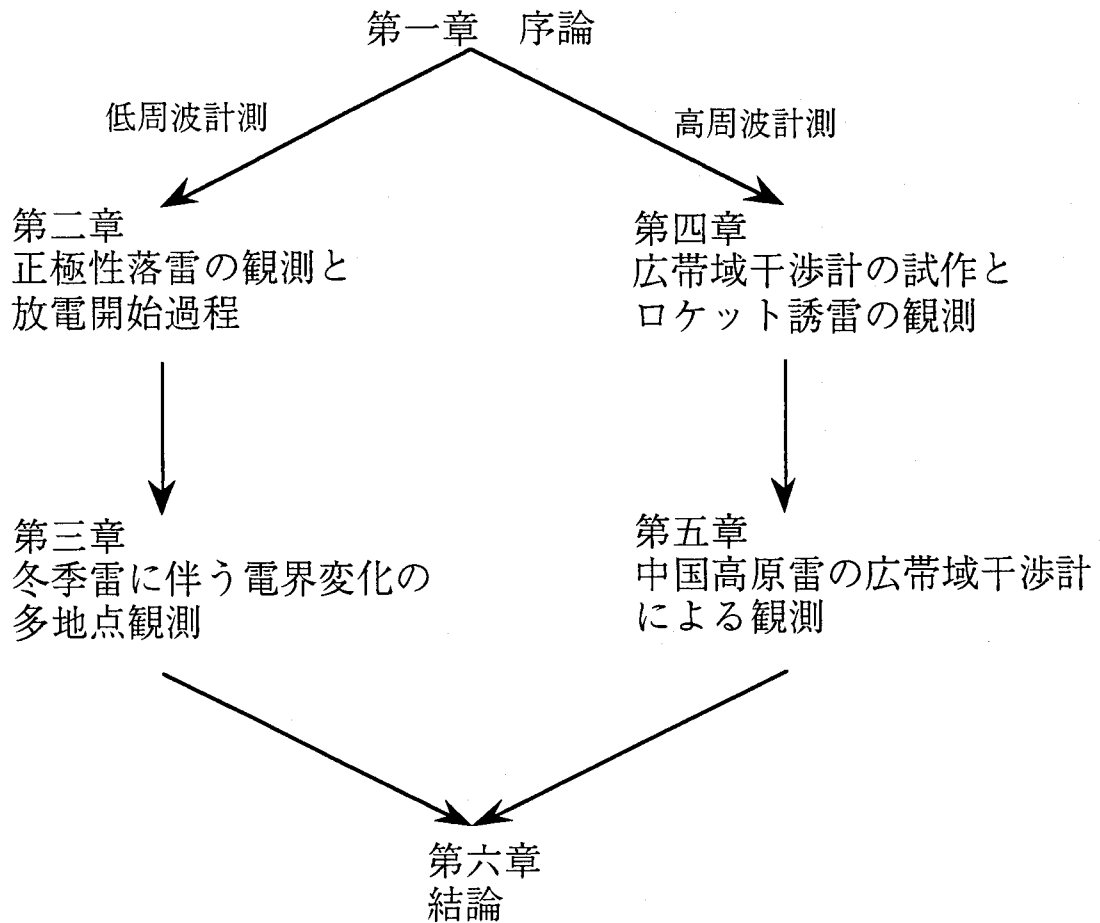


図 1. 1 本論文の構成

参考文献

- (1) 竹内, 仲野, 北陸における冬の雷の研究, 天気, 30, 13-18, 1983
- (2) 耐雷設計委員会送電分科会, 送電線事故統計-1980年~1993年14年統計-, 電中研報告T95805, 1995
- (3) 電気事業連合会, 電気事故統計, 昭和58年~平成7年
- (4) 井上, 秋山, 送電線における雷害対策, 電気学会雑誌, 110, 10, 1990
- (5) Kawasaki, Z.-I., Lightning during winter thunderstorm in Japan, *Proc. International workshop on physics of lightning 1997*, 3-3, Saint Jean de Luz, France, September, 1997
- (6) Turman, B. N., Detection of lightning superbolts, *J. Geophys. Res.*, 82, 2566-2568, 1977

- (7) Brook, M., M. Nakano, P. Krehbiel, and T. Takeuti, The electrical structure of Hokuriku winter thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, 87, 1202-1215, 1982
- (8) 後藤幸弘, 冬季雷スーパーボルト発生 of 気象条件, 電気学会研究会資料, ED-89-105, 1989
- (9) Kawasaki, Z-I., K. Matuura, K. Yamamoto, M. Nagatani, H. Nakata, M. Nakano, and T. Takeuti, Design of the transient memory of extremely large size for electric field changes due to the lightning discharge and observation results during summer and winter thunderstorms, *Trans. IEE of Japan*, 111-B, 1991.
- (10) Taylor, W., A VHF technique for space-time mapping of lightning discharge processes, *J. Geophys. Res.*, 83, 3575-3583, 1978
- (11) Rustan, P. L., M. A. Uman, D. G. Childers, and W. H. Beasley, Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center, *J. Geophys. Res.*, 85, 4893-4903, 1980
- (12) Kawasaki, Z.-I., J.-M. Li, K. Matsuura, M. Kawasaki, and O. Sugimoto, Localization of partial discharges using time difference of arrival of radiation fields, *Proc. 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Tokyo, Japan, 1991
- (13) Shao, X. M., D. N. Holden, and C. T. Rhodes, Broad band radio interferometry for lightning observations, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1917-1920, 1996



## 第二章

# 正極性落雷の観測と放電開始過程

### 2. 1 緒言

雷放電における初期絶縁破壊過程は落雷や雲放電の初期予兆現象となる。この過程は雷放電の研究初期から現在に至るまで、主に負極性落雷について研究されてきた。これは、地球上で生起する雷放電の多くが負極性落雷と雲放電であることに起因している。Beasleyらの研究<sup>(1)</sup>によると、負極性落雷の第一帰還雷撃に先行する電界変化は二つの領域に分けることができる。即ちそれは、"Preliminary variation"と"Stepped leader"である。Preliminary variationの終わり、またはステップリーダの開始部分には広い周波数帯域において、比較的大きな振幅の連続する両極性パルスが記録される<sup>(1),(2),(3),(4),(5),(6)</sup>。これらの波形の詳細な解析はWeidmanら<sup>(5)</sup>や、Le Vine<sup>(7)</sup>によりなされており、一方、雲放電に関しては、その放電開始過程に記録される電磁界パルスは多くの研究者によって研究されている<sup>(5),(7),(8),(9),(10),(11)</sup>。

しかしながら、正極性落雷に関しては、その正極性リーダに先行する Preliminary Breakdownについての研究はほとんどなされておらず、少数の文献が存在するのみである。例えば、Rustら<sup>(12)</sup>は正極性の第一帰還雷撃に先行する非常に長い持続時間を有する電界変化についての報告を行っているが、正極性リーダの開始部分の両極性パルスあるいはプレリミナリーブレイクダウンパルスについての報告はない。Fuquay<sup>(13)</sup>は正極性の第一帰還雷撃に先行する電界変化の開始部で、約20 kHzの振幅の非常に小さいパルスについて報告を行っている。Beasleyら<sup>(14)</sup>もまた、正極性落雷の開始部における雲内放電によるものと考えられる帰還雷撃に比べて遅い立ち上がり時間をもつFuquayの報告<sup>(13)</sup>に似たパルスについて記述しているが、詳細な検討は行っていない。このように、正極性落雷に先行する雲内放電のプレリミナリーブレイクダウンパルスについての記述はほとんどない。これらの報告に対して、正極性リーダに先行するパルスについて明らかにその存在を示したのは河

崎とM a z u rの論文<sup>(15)</sup>である。そして、その物理プロセスをBi-directional leader process<sup>(16),(17),(18)</sup>と解釈している。

ところで、最近雷雲上層部から電離層へ向けて伸びる放電（これらはRed Sprite, Blue Jet, Elvesなどと呼称されている。）が発見され<sup>(19),(20),(21)</sup>、その発生がMCSs(Mesoscale Convective Storm system)において生起する極めて大きなピーク電流値と長距離にわたり水平に雲内を進展する雲内放電を持つ正極性落雷の発生と関係していることがわかっている<sup>(22)</sup>。Milikhら<sup>(23)</sup>はこの物理モデルを提唱し、Red Spriteが雲内放電により放射される電磁界パルスによって引き起こされるとしている。一方これに対して、Boccippioら<sup>(22)</sup>とPaskoら<sup>(24)</sup>は正極性帰還雷撃による準静電界の変化がその原因であると主張している。正極性帰還雷撃に先行する放電開始部分に記録されるプレリミナリーブレイクダウンパルスはその雲内放電において放射される唯一の電磁界パルスであるが、現時点においてはそのパルスの特徴が明らかにされていないためこれらの一連パルス列がRed Spriteの発生とどのように関わっているの論ずることは困難である。

以上のように、Red Spriteとの関連やそして雷放電の放電開始過程の解明を行う上で、正極性落雷の開始部分に記録される両極性パルスの特徴を明らかにすることは重要であると考えた。そこで、本章においては正極性落雷の開始部分に記録される両極性パルスについて論ずることとする。

### 2. 2 観測機器

本章での研究は雷放電の開始過程に関するものである。その過程を論ずるため、雷放電に伴って変化する電界を測定し、その波形の解析を行った。電界変化の測定は北陸若狭湾に面する美浜地区において、3地点で行った。その観測地点付近の地図およびアンテナ配置を図2. 1に示す。アンテナ間隔は約3~4 kmである。電界変化の記録に用いた機器の構成図を図2. 2に示す。本実験において使用した計測機器はBrookら<sup>(25)</sup>、河崎ら<sup>(26)</sup>の使用したものに類似している。アンテナセンサーとして直径約30 cmの円形平板アンテナを用い、そのセンサー部は地上約40 cmに設置している。検知された信号はアンテナ直下でコンデンサによって積分され、その信号はバッファアンプにより、50 Ωで終端された3 D 2 Vの同軸ケーブルを通じて伝送される。アンテナ系のゼロピークの立ち上がり時間応答は約0. 7マイクロ秒で、観測帯域の上限は0. 5 MHzとなる。放電時定数は約5秒である。雷放電に伴って変化する電磁界は距離とともに減衰するので、測定範囲を広く補償するため本実験で用いた観測機器では積分コンデンサの値を300 p Fから3000 p Fの範囲で3種類の中から選べるように構成している。50 Ωの抵抗により検

知された信号をアナログデジタル変換器の入力レンジに合わせるため2倍即ち $\pm 10\text{ V}$ まで増幅している。アナログデジタル変換器に入力された信号は1マイクロ秒毎に標本化され、約1秒間記録される。1ワードは12ビットで構成し、システム全体のトリガは雷放電からの発光強度の差を用いて行っている。また、雷放電の生起した時刻を正確に知るため、GPSを導入している。

測定器の校正は実験室内において $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ の平行平板電極と衝撃電圧発生装置により行った。観測地点における校正は行っていない。

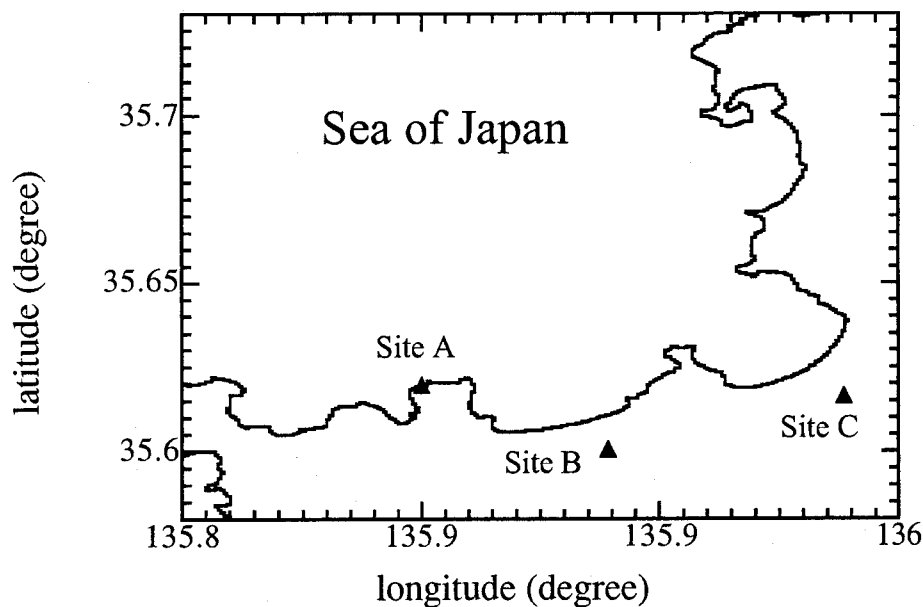


図 2. 1 観測地点付近の地形図とアンテナ配置。同地域はレーザ誘雷実験場付近であり、Site Aと記した地点はレーザ誘雷実験が行われた嶽山である。



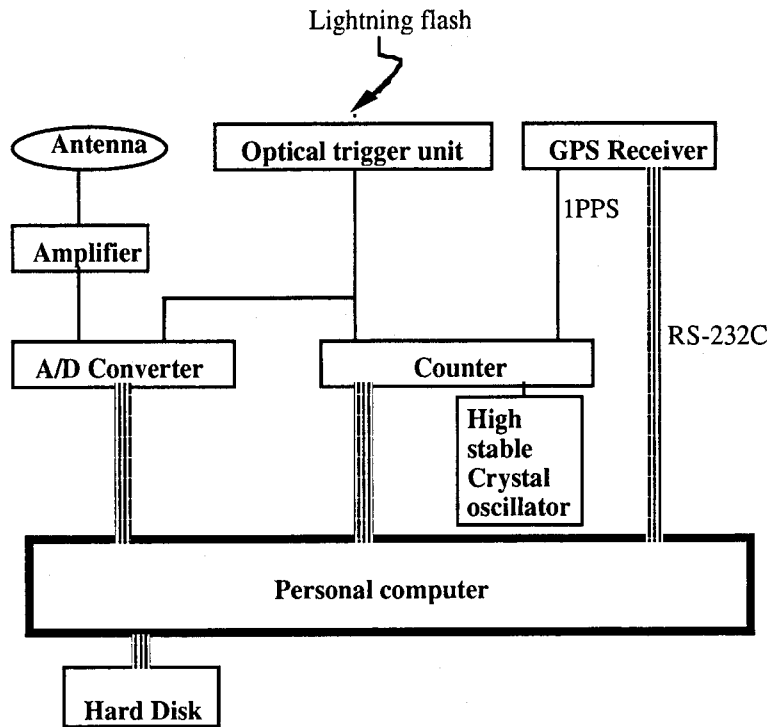


図 2. 2 電界変化の記録に用いた観測機器の構成図

### 2. 3 解析結果

日本の北陸地方の冬季雷は負極性落雷に対する正極性落雷の比率の高いことでよく知られている。1994年度以降、筆者を含む研究グループは同地域において継続的に雷観測をおこなっており、本論文で解析対象としたデータは1994年度と1995年度に取得している。

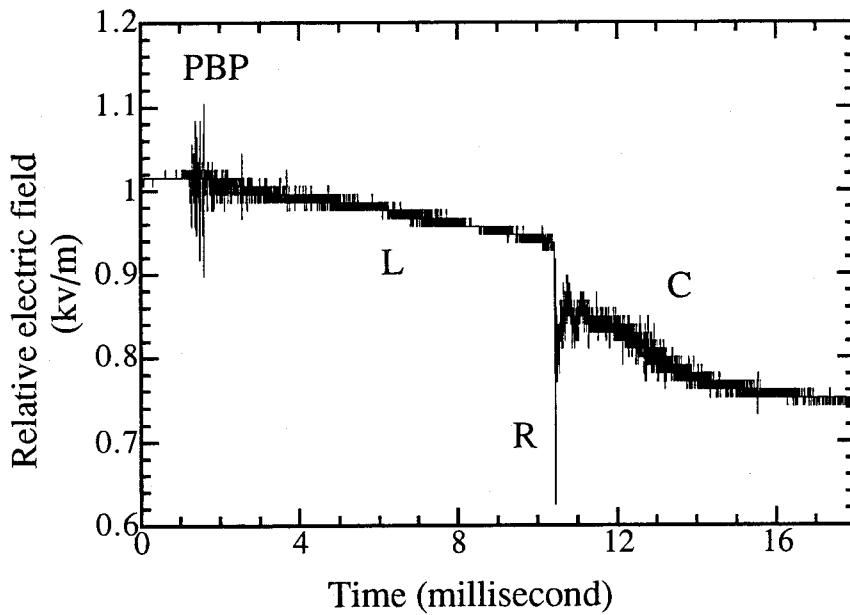
上記の正極性落雷の高比率に加え北陸地方の冬季雷では、多地点落雷や上向きリーダで開始するトリガード雷、Bi-polar lightning<sup>(27)</sup>等が生起することが報告されている。高木ら<sup>(28)</sup>は全放電数の内例えば多地点落雷はその55%をしめ、その多くは上向き放電で開始するトリガード雷であることを報告している。そのため、北陸地方の冬季雷の電界変化波形は通常の夏季雷等と比べて異なった様相を示し、殊にビデオによる光学観測を併せて行っていない本観測では正極性落雷のみを全て抽出することは困難である。そこで、本章ではプレリミナリブレイクダウン、リーダ、帰還雷撃、連続電流という落雷の典型的な波形の特徴を有しているものだけを抽出し、解析対象とした。抽出した正極性落雷の帰還雷撃部のスローフロントとファーストトランジションを含めた立ち上がり時間の平均は18マイクロ秒であり、この値はCoorayらの報告<sup>(29)</sup>の13マイクロ秒、北条ら<sup>(30)</sup>の22マイクロ秒に

類似している。なお、本章では19例の正極性落雷の解析を行っている。

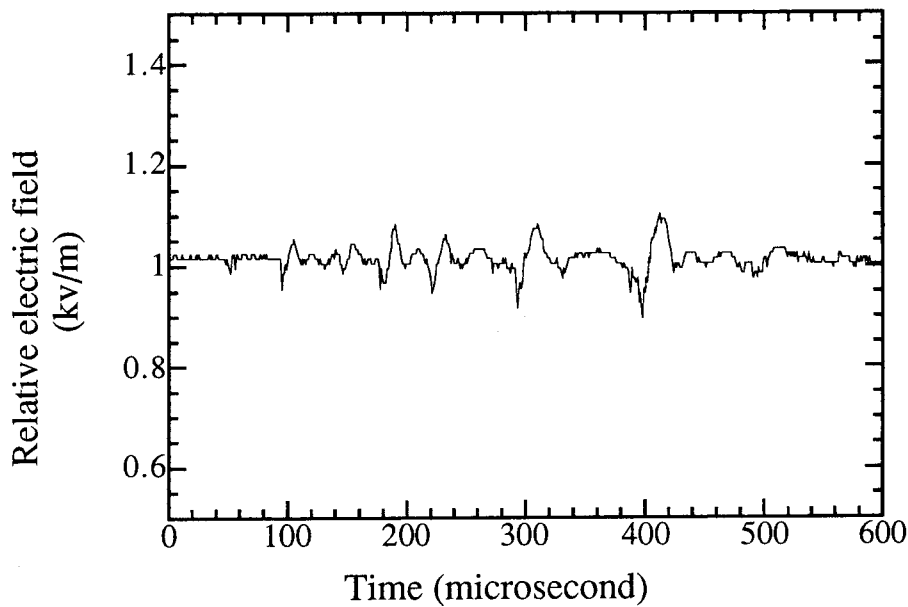
図2.3(a)に正極性落雷の電界変化の全体図の一例を示す。(本研究では、上空の正電荷の消滅に伴う地上での電界変化を負とする大気電気学の慣習に従うものとする。)

図2.3(a)からわかるように、この正極性落雷の持続時間は約20ミリ秒であり、放電開始前の電界変化はゼロレベルを示している。プリトリガの時間は放電開始過程を記録出来るよう通常約250ミリ秒に設定されている。PBPと記した部分において正極性落雷のリーダに先行して放射されるプレリミナリーブレイクダウンパルスが記録されていることがわかる。図2.3(b)にその拡大図を示す。この図からこのパルス列が両極性のパルスにより構成されていることがわかる。そして、その最初の半サイクルの極性はすべて負の方向を示しており、この極性はその後に続くリーダおよび、帰還雷撃に伴う変化の方向と一致している。図2.4(a)に正極性落雷に伴う電界変化の全体図をさらに一例示す。この図からも正極性落雷のリーダに先行するプレリミナリーブレイクダウンパルス列が認めれる。その拡大図を図2.4(b)に示す。この例においてもプレリミナリーブレイクダウンパルスの最初の半サイクルの極性とその後続くリーダ及び帰還雷撃の極性が一致している。本章で解析対象とした19例の正極性落雷の内、17例においては両極性パルスの最初の半サイクルの極性と帰還雷撃およびリーダによる変化の極性は一致しているが、残る2例において両極性パルスの最初の半サイクルの極性と帰還雷撃の極性は異なり、リーダによる変化の極性と一致する結果が得られている。図2.5(a), (b)にそのような場合を示す。以上から、プレリミナリーブレイクダウンにおける両極性パルス列の最初の半周期の極性はその後続くリーダによる変化の方向と一致することがわかる。この結果は河崎とMazurの結果<sup>(15)</sup>を支持するものである。

プレリミナリーブレイクダウンパルス列の持続時間は約1ミリ秒である。また、プレリミナリーブレイクダウンと帰還雷撃の時間間隔即ちリーダの持続時間は1ミリ秒から38ミリ秒にわたっており、平均12ミリ秒である。

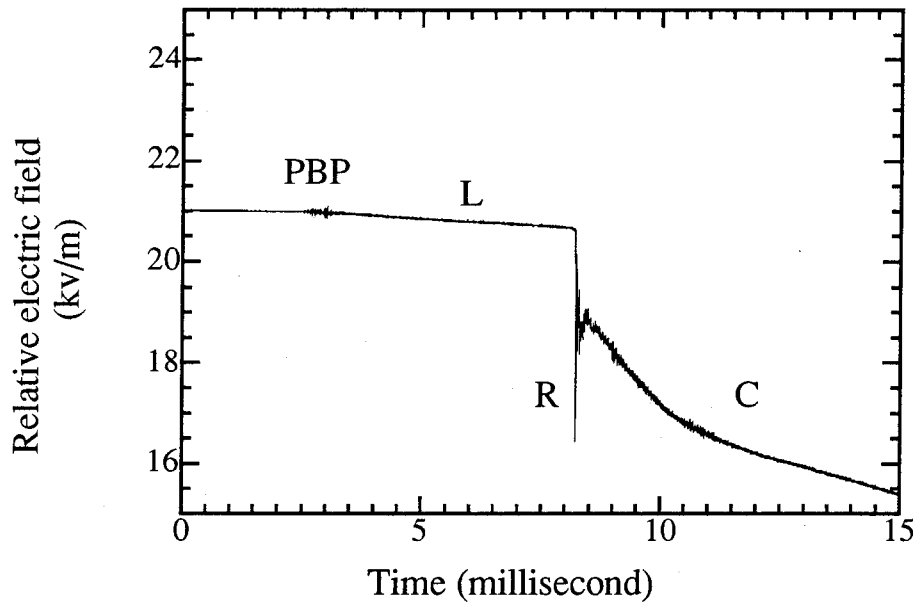


(a) 電界変化の全体図。PBPはプレリミナリーグレイクダウンパルス、Lはリーダ、Rは帰還雷撃、Cは連続電流をそれぞれ示している。

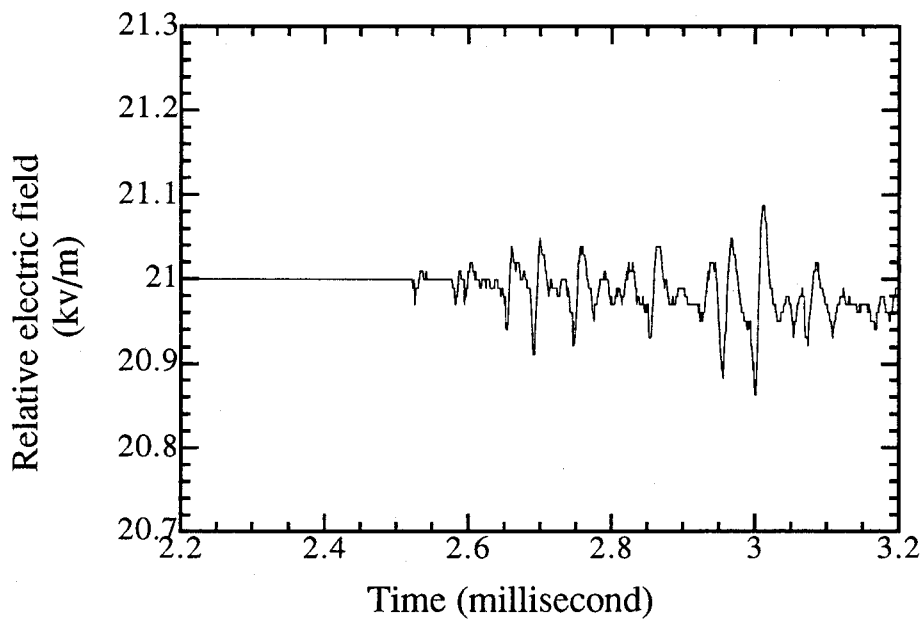


(b) 放電開始部分の拡大図

図 2. 3 正極性落雷に伴う電界変化の一例。

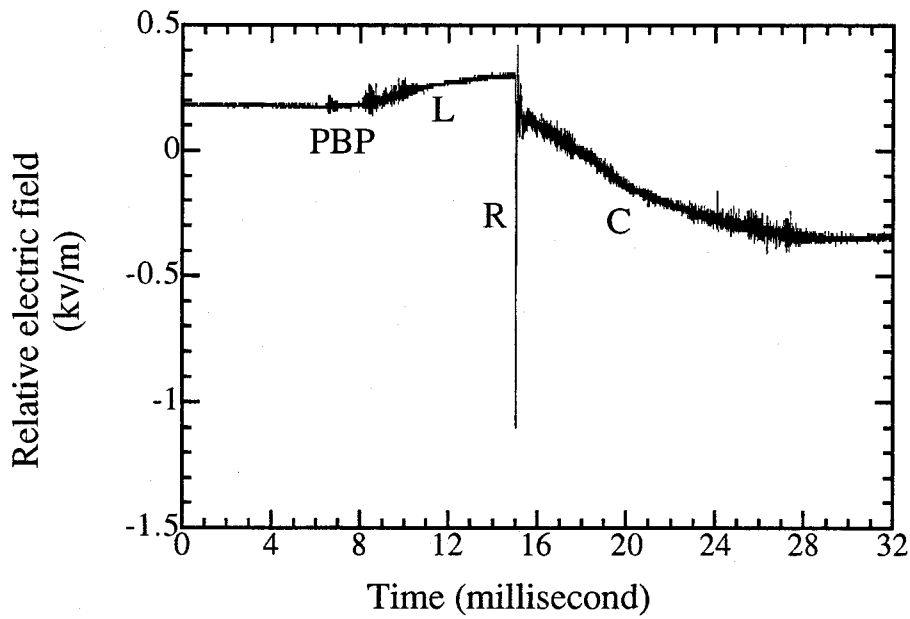


(a) 記録の全体図。PBPはプレリミナリーグレイクダイウンパルス、Lはリーダ、Rは帰還雷撃、Cは連続電流をそれぞれ示している。

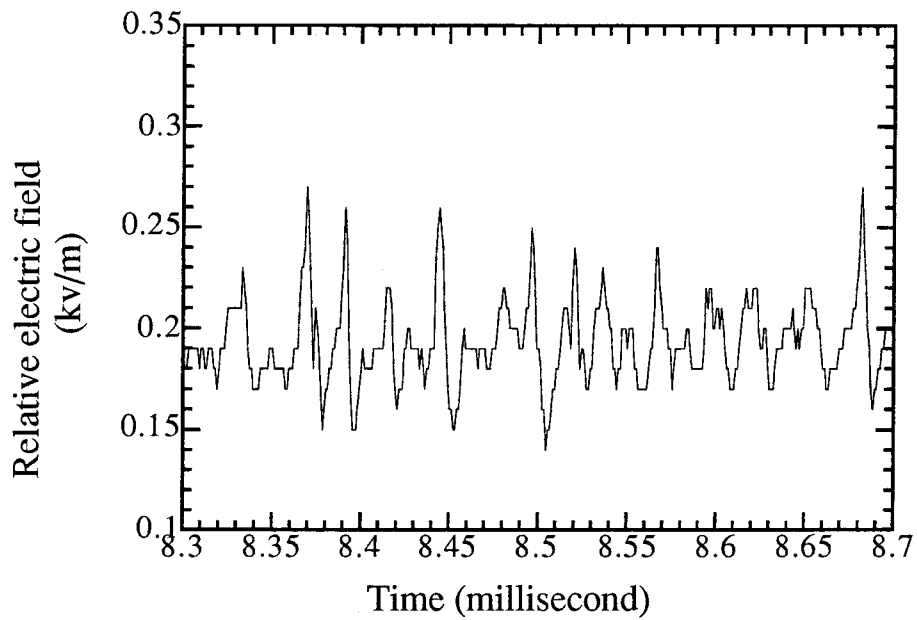


(b) 放電開始部分の拡大図

図2. 4 冬季正極性落雷に伴う電界変化記録。



(a) 全体図。PBPはプレリミナリーグレイクダイウンパルス、Lはリーダ、Rは帰還雷撃、Cは連続電流をそれぞれ示している。



(b) 放電開始部分の拡大図

図2.5 冬季正極性落雷に伴う電界変化の記録。この例の場合、リーダによる変化の極性と帰還雷撃による変化の極性は反対である。

図2. 6に各々の両極性パルスのパルス幅のヒストグラムを示す。両極性パルスの持続時間はこのグラフからわかるように5マイクロ秒から52マイクロ秒にわたっており、平均は18.8マイクロ秒である。これらのパルスの立ち上がり時間については、サンプリング時間である1マイクロ秒と同等もしくは早いので本章においては解析を行っていない。これらのパルスの時間間隔のヒストグラムを図2. 7に示す。この値は10マイクロ秒から180マイクロ秒にわたっており、平均52マイクロ秒である。各々の両極性パルスのオーバシュートの振幅に対する前半部の振幅比は0.4から4.7の間で、平均1.3となっている。帰還雷撃に伴う放射の振幅に対する一連のプレリミナリーブレイクダウンパルス列の最大振幅比は0.02から1.9の間の値をとり、平均0.27である。正極性落雷に見られるプレリミナリーブレイクダウンパルスの最大振幅は帰還雷撃に伴う変化の振幅に比して同等もしくは時として、大きくなることがわかる。図2. 8にそのような例を示す。プレリミナリーブレイクダウンに伴う両極性パルスと帰還雷撃変化が同じスケールで示されている。なお、この落雷の例ではピーク電流は評価されていない。

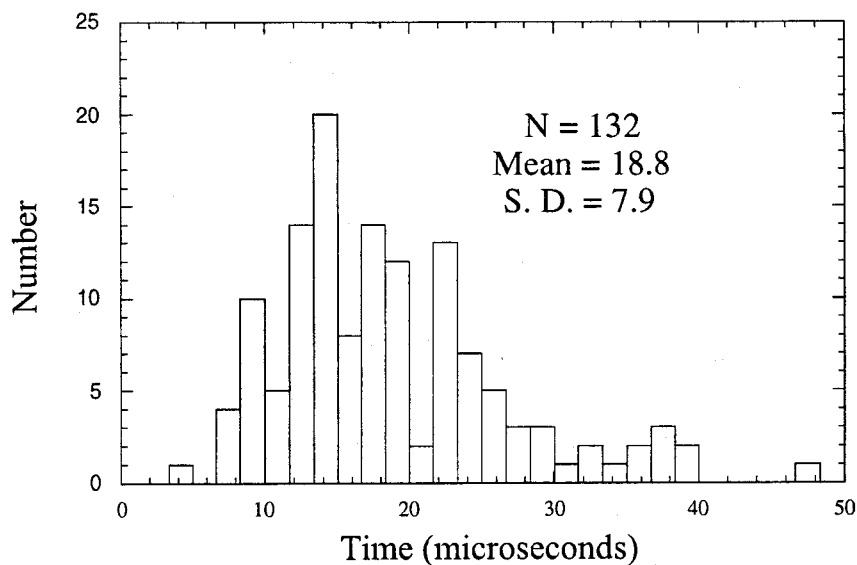


図2. 6 プレリミナリーブレイクダウンに含まれる両極性パルスのパルス幅のヒストグラム。パルス数の数、平均時間、標準偏差が示されている。

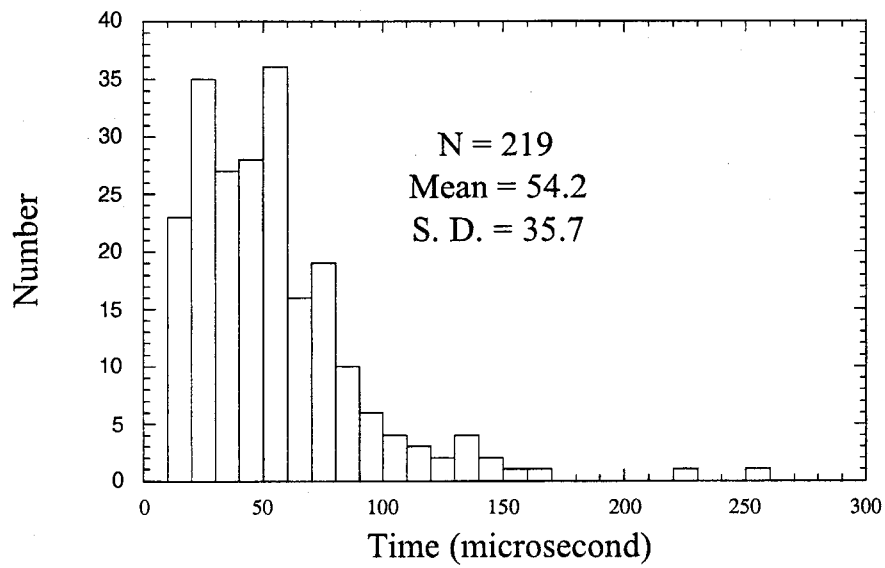


図 2. 7 プレリミナリーブレイクダウンパルスのパルス間隔のヒストグラム。  
度数、平均パルス間隔時間、標準偏差が示されている。

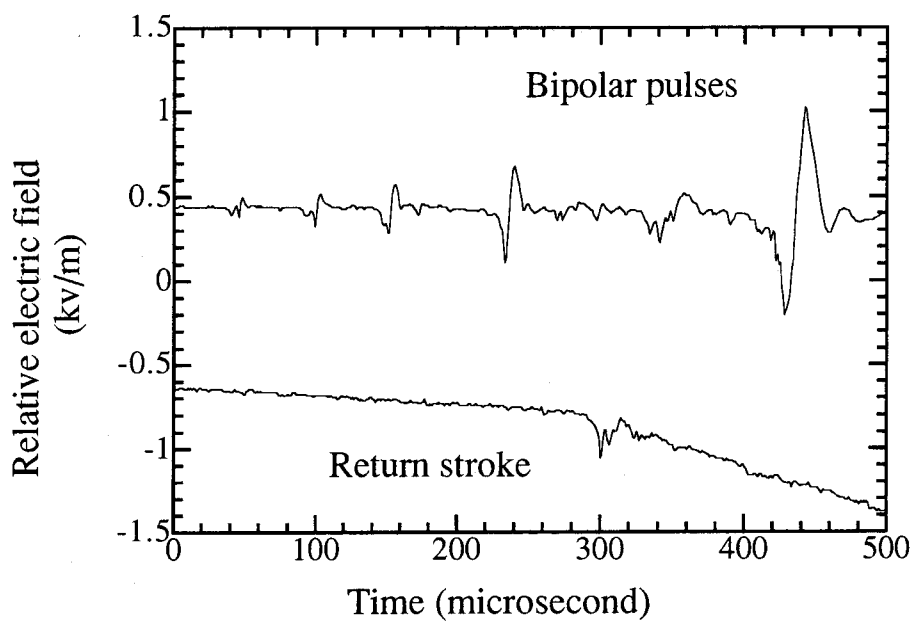


図 2. 8 正極性落雷に先行するプレリミナリーブレイクダウンと帰還雷撃に伴う  
電界変化。同じスケールで示している。

## 3. 3 検討とまとめ

正極性落雷のリーダに先行するプレリミナリーブレイクダウンパルスに関する詳細な解析は、筆者の知る限りにおいて、未だかつてない。負極性落雷および雲放電のプレリミナリーブレイクダウンパルスについては、北川ら<sup>(4)</sup>とWeidmanら<sup>(5)</sup>が報告を行っている。特に、Weidmanら<sup>(5)</sup>は最初の半周期が正極性の150（その内、77%が負極性落雷）のパルスについて解析を行い、パルス間の平均時間間隔が130マイクロ秒で平均パルス幅が41マイクロ秒であることを報告している。また、パルスの形が最初の半周期に2, 3のパルスが重畳した両極性パルスであることも報告している。これらの報告に加え、Le Vine<sup>(7)</sup>は10から20マイクロ秒程度の持続時間を持つ、比較的滑らかな立ち上がり時間の遅い両極性パルスについて報告している。本章で示した各々の両極性パルスの持続時間はWeidmanらの報告<sup>(5)</sup>の約半分の値となっているが、Le Vineの報告<sup>(7)</sup>と同程度の値となっている。しかしながら、各々の両極性パルスのオーバシュートの振幅に対する前半部の振幅比は、Weidmanらの3.6に比べて小さい。

このようなパルス列がなぜ放射されるのかその物理的な過程は未だよく理解されていない。これまでの文献によると、これらのパルス列の物理的な解釈は雷雲の負電荷領域とその下部の正電荷領域との間の放電過程であるとする説が有力である。Weidmanら<sup>(5)</sup>は両極性パルスの立ち上がりの早いインパルスは負極性電荷領域から地面へむけてステップ状に進展する過程に相当し、その後続く緩やかな変化は負電荷領域からさらに電荷が地面に向けて移動しているかまたは下部正電荷領域からのリコイルストリーマに相当するとの解釈を行っている。Le Vine<sup>(7)</sup>は伝送線路モデルを用いて数値計算を行い、持続時間の短いパルスは小規模のK変化に類似したリコイルストリーマがその物理過程であると解釈している。一方、Rustanら<sup>(31)</sup>はVHF帯の電磁波を用いて到達時間差法によりプレリミナリーブレイクダウン過程から放射される電磁波の放射源の3次元標定を行っている。その結果によると、プレリミナリーブレイクダウンの初期では放電路は非体系的に形成され、その後の過程において約 $1.0 \times 10^6$  m/sで下方に放電が進展している。また、Proctorら<sup>(32)</sup>は南アフリカでの観測で同様にVHF帯で到達時間差法により電磁波放射源の3次元標定を行い、プレリミナリーブレイクダウン特にBILの概念<sup>(6)</sup>および、ステップリーダの開始部での強い放射の開始高度について詳細な解析を行っている。しかしながら、Rustanら<sup>(31)</sup>が観測したような特徴的な両極性パルス列をProctorら<sup>(32)</sup>は観測していない。近年、Rhodesら<sup>(33)</sup>は干渉法により放電路の2次元標定を行い、負極性リーダの開始付近で生ずるいくつかのストリーマについて報告している。それらのストリーマは、それに先行する雲内放電の放電路に沿って、リーダの開始点に向かって放射源が $10^6$  m/sのオーダで進展している。この観測結



果に基づき、Rhodesら<sup>(33)</sup>はプレリミナリーブレイクダウンパルスはこれらのストリーマが負極性の電荷を供給する過程によって放射されるとの解釈を行っている。

筆者の知る限り、河崎とMazur<sup>(15)</sup>のみが正極性落雷に先行するプレリミナリーブレイクダウンパルスの物理的な解釈を行っている。彼らはその物理過程が正極性リーダが大地へ向けて進展すると同時に負極性のリーダが雲内を正極性リーダとは逆方向へ進展するという双方向リーダ<sup>(16),(17),(18)</sup>に因ると解釈している。本章での両極性パルスの最初の半周期の極性とその後続くリーダの変化の方向との一致はこの双方向リーダの仮説を支持するものと言える。

一般的に雷雲はその上部に広く分布した正電荷領域とその下部の温度領域にして $-10$ 度付近の負電荷領域、そしてそのさらに下部の正電荷領域の3極構造である。日本の北陸地方の冬季の雷雲構造に関しては、Brookら<sup>(34)</sup>が多地点観測の結果から同様な3極構造を提唱している。北川ら<sup>(35)</sup>はレーダ及びフィールドミルの観測により、冬の雷雲は、成熟初期にプラス・マイナス・プラスの三極構造、ついでプラス・マイナスの二極構造の電荷分布をとるが、各々の継続時間は数分程度の短時間で、雷雲ライフサイクル中の大部分を占める消滅期では電荷分布はプラスの単極性となるとの観測結果を発表している。本章で解析対象としたデータはすべて日本の北陸地方の冬季正極性落雷であるため、プレリミナリーブレイクダウンパルスの放射源は数分間の三極構造をとる期間を除いて雷雲の上部正電荷領域か消滅期の正電荷領域にあると推測される。もしプレリミナリーブレイクダウンパルスが負極性落雷のように中和される電荷領域と近接するその反対の符号の電荷領域との間での放電により放射されるとすると、正極性落雷の場合、正電荷領域の周りのScreening layer<sup>(36)</sup>あるいは空間電荷領域以外に近接する電荷領域はない。正電荷領域とその周りのScreening layerとの距離は、夏季雷雲の負極性電荷領域とその下部の正極性電荷領域との間の距離に比べて近いので、本章での夏季負極性落雷の場合に比べて短い両極性パルスの持続時間と時間間隔とは矛盾しない。一方、これらのパルス列が双方向リーダまたは電荷を補給するストリーマに因るものであれば、本章で示した統計量の差異は夏季と冬季の違いや極性の違いを反映していると考えられる。

### 参考文献

- (1) Beasley, W. H., M. A. Uman, and P. L. Rustan, Electric fields preceding cloud-to-ground lightning flashes, *J. Geophys. Res.*, 87, 4883-4902, 1982
- (2) Appleton, E. V., and F. W. Chapman, On the nature of atmospherics, 4, *Proc. R. Soc. London*,

- Ser. A, 1-22, 1937
- (3) Clarence, N. D., and D. J. Malan, Preliminary discharge process in lightning flashes to ground, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 83, 161-172, 1957
  - (4) Kitagawa, N., and M. Brook, A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 65, 1189-1201, 1960
  - (5) Weidman, C. D. and E. P. Krider, The radiation field waveforms produced by intracloud lightning discharge processes, *J. Geophys. Res.*, 84, 3157, 1979
  - (6) Uman, M. A., The lightning discharge, *Academic Press*, Orland, 1987
  - (7) Le Vine, D. M., Sources of the strongest RF radiation from lightning, *J. Geophys. Res.*, 85, 4091-4095, 1980
  - (8) Cooray, V., Further characteristics of positive radiation fields from lightning in Sweden, *J. Geophys. Res.*, 89, 11807-11815, 1984
  - (9) Cooray, V., and S. Lundquist, Characteristics of radiation fields from lightning in Sri Lanka in the tropics, *J. Geophys. Res.*, 90, 6099-6109, 1985
  - (10) Bils, J. R., E. M. Thomson, and M. A. Uman, Electric field pulses in close lightning cloud flashes, *J. Geophys. Res.*, 93, 15933-15940, 1988
  - (11) Villanueva, Y., V. A. Rakov, and M. A. Uman, Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 14353-14360, 1994
  - (12) Rust, W. D., D. R. MacGorman, and R. T. Arnold, Positive cloud-to-ground lightning flashes in severe storms, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 791-794, 1981
  - (13) Fuquay, D. M., Positive cloud-to-ground lightning in summer thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 87, 7131-7140, 1982
  - (14) Beasley, W. H., M. A. Uman, D. M. Jordan, and C. Ganesh, Positive cloud to ground lightning return strokes, *J. Geophys. Res.*, 88, 8475-8482, 1983
  - (15) Kawasaki, Z-I., and V. Mazur, Common physical processes in natural and triggered lightning in winter storms in Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 12935-12945, 1992
  - (16) Kasemir, H. W., Qualitative Ueberricht ueber Potential-, Feld-, und Ladungsverhaltnisse bei einer Plitzentladung in der Gewitterwolke, in *Das Gewitter* edited by H. Israel, *Akademie Verlags. Ges. Geest and Porting K.-G.*, Leipzig, German Democratic Republic, 1950
  - (17) Kasemir, H. W., A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge, *J. Geophys. Res.*, 65, 1873-1878, 1960
  - (18) Mazur, V., Triggered lightning strikes to aircraft and natural intracloud discharges, *J. Geophys.*

- Res.*, 94, 3311-3325, 1989
- (19) Winckler, J. R., R. C. Franz, and R. J. Nemzek, Fast low-level light pulses from the night sky observed with the SKYFLASH program, *J. Geophys. Res.*, 98, 8775-8773, 1993
- (20) Sentman, D. D., and E. M. Wescott, Observations of upper atmospheric optical flashes recorded from aircraft, *Geophys. Res. Letts.*, 20, 2857-2860, 1993
- (21) Lyons, W. A., Characteristics of luminous structures in the stratosphere above thunderstorm as imaged by low-light video, *Geophys. Res. Letts.*, 21, 875-878, 1994
- (22) Boccippio, D. J., E. R. Williams, S. J. Heckman, W. A. Lyons, I. T. Baker, and R. Boldi, Sprites, ELF transients and positive ground strokes, *Science*, 269, 1088-1091, 1995
- (23) Milikh, G. M., K. Papadopoulos, C. L. Chang, On the physics of high altitude lightning, *Geophys. Res. Letts.*, 22, 85-88, 1995
- (24) Pasko, V. P., U. S. Inan, T. F. Bell, Sprites as luminous columns of ionization produced by quasi-electrostatic thundercloud fields, *Geophys. Res. Letts.*, 23, 649-652, 1996
- (25) Brook, M., R. W. Henderson, and R. B. Pyle, Positive lightning strokes to ground, *J. Geophys. Res.*, 94, 13295-13303, 1989
- (26) Kawasaki, Z-I., K. Matuura, K. Yamamoto, M. Nagatani, H. Nakata, M. Nakano, and T. Takeuti, Design of the transient memory of extremely large size for electric field changes due to the lightning discharge and observation results during summer and winter thunderstorms, *Trans. IEE of Japan*, 111-B, 1991.
- (27) Narita, K., Y. Goto, H. Komuro, and S. Sawada, Bipolar lightning in winter at Maki, Japan, *J. Geophys. Res.*, 94, 13191-13195, 1989
- (28) Takagi, N., T. Watanabe, I. Arima, H. Ito, Z-I. Kawasaki, M. Nakano, T. Takeuti, H. Kinoshita, M. Suzuki, Y. Saikawa, Lightning flash with multiple strikes to ground, *T. IEE Japan*, 111-B, 93-98, 1991
- (29) Cooray, V., and S. Lundquist, On the characteristics of some radiation fields from lightning and their possible origin in positive ground flashes, *J. Geophys. Res.*, 87, 11203-11214, 1982
- (30) Hojo, J., M. Ishii, T. Kawamura, F. Suzuki, and R. Funayama, The fine structure in the field change produced by positive ground strokes, *J. Geophys. Res.*, 90, 6139-6143, 1985
- (31) Rustan, P. L., M. A. Uman, D. G. Childers, and W. H. Beasley, Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center, *J. Geophys. Res.*, 85, 4893-4903, 1980
- (32) Proctor, D. E., R. Uytendogaart, and B. M. Meredith, VHF radio pictures of lightning flashes

- 
- to ground, *J. Geophys. Res.*, 93, 12683-12727, 1988
- (33) Rhodes, C. T., X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and C. O. Hayenga, Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, 99, 13059-13082, 1994
- (34) Brook, M., M. Nakano, P. Krehbiel, and T. Takeuti, The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorm, *J. Geophys. Res.*, 87, 2107-1215, 1982
- (35) Kitagawa, N., and K. Michimoto, Meteorological and electrical aspects of winter thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, 99, 10713-10721, 1994
- (36) Vonnegut, B., Some facts and speculations concerning the origin and role of thunderstorm electricity, *Meteorol. Monogr.*, 5, 224-241, 1963



## 第三章

# 冬季雷に伴う電界変化の多地点観測

### 3. 1 緒言

電力供給において供給支障を伴う事故件数中、雷害のしめる割合は送電線全体で50%近くにまで及び<sup>(1)</sup>、その対策が望まれている。しかしながら、雷放電現象そのものを直接測定することは容易ではないため、雷放電の研究は電磁界観測、光学観測など間接測定が主な手段となっている。中でも電界観測は、雷放電が電荷移動に起因していることから、最も有力な観測手段の一つであると考えられ、これまでに多くの報告がなされている<sup>(2)</sup>。

電界観測では静電場から数MHzまでの周波数帯域（RF帯）での研究が広く行われており、この領域で見た雷性状の把握がすすんでいる。しかしながら、電界観測のみから得られる情報量は多いとはいえ限られており、雷放電に関する一側面を観測しているにすぎない。一方で、例えば電流観測や光学観測などは電界観測とはまた異なる側面の観測であり、電界観測からは得にくい知見を得ることが出来る。そこで、電流観測や光学観測、さらにレーダ観測等を併用するなど多角的な総合観測は雷放電に関する極めて多くの知見を得ることができると考えられ、アメリカのフロリダにおける観測等<sup>(3)</sup>に見られるように利点は多い。こうした総合観測を実施する上で時刻管理は重要である。特に、雷放電を対象とした場合、一つの放電に含まれる過程は様々であり、帰還雷撃等1マイクロ秒以下の現象も含まれているため、同程度の時間精度が要求されることとなる。一方、空間スケールで考えると、電流観測などは雷撃点での観測であり、電界観測やレーダ観測は雷撃点から数キロメートル離れて観測することが望ましい。さらに、雷放電の観測では一般的に天候など気象条件は極めて悪く、場合によっては降雪や突風を伴う。このような条件のもとでの時刻管理は難しく、ラジオの時報やテレビの走査線を用いた管理が成されてきた。しかしながらこれらの時刻管理では精度が十分ではなく、ミリ秒までが限界である。そこで、本

章ではマイクロ秒までの時刻精度を有するGPS (Global Positioning Systemの略)<sup>(4)</sup>を雷放電の観測に応用している。

ところで、雲内放電から放射される電磁波の波形には幾つかの種類がある。それらは大きく分類して次の3つである。(1) 数十マイクロ秒の持続時間を有する最初の半サイクルに幾つかのパルスが重畳した両極性パルス<sup>(5)</sup>。(2) 数百マイクロ秒間連続的に放射されるパルス幅が1マイクロ秒以下の単極性パルス<sup>(6)</sup>。(3) 10マイクロ秒程度のパルス幅を持つ立ち上がりの滑らかな両極性パルス<sup>(7)</sup>。これらに加えて、前章では冬季正極性落雷に先行する雲内放電から放射されるパルスの特徴について報告を行ってきた。このような雲内に起源を持つパルスに対して、計算機を用いて数値計算することによりモデルが提案されている<sup>(8),(9)</sup>。しかし、こうしたモデルの検証をするためには放射源の場所に関する情報が不可欠であり、上述のようなパルスが記録される低周波数帯での放電点標定が未だなされていないため検証は出来ていない。

これらのパルスに関して、Weidmanら<sup>(5)</sup>は近距離と遠距離で同じパルスを受信し、波形の違いが認められなかったことから、これらのパルスに関して誘導界や静電界の効果は無視できると報告している。さらに、Kridlerら<sup>(6)</sup>は海上伝搬してくるパルスと陸上で観測したパルスとの間には波形歪が認められないことから、上述のような雲内放電活動に伴って放射されるパルスでは伝搬効果は無視できることを明らかにしている。従って、これらのパルスの位置標定には、VHF帯の電磁波を数キロメートル離れた幾つかのアンテナで受信し雷放電路の3次元放電路再現を行う到達時間差法<sup>(10),(11),(12)</sup>が適用できると考えられる。

以上のことから、本章においてはスローアンテナ、ファーストアンテナでの周波数帯域、即ち静電場付近から数MHzまでの周波数帯域での電界変化に重畳してマイクロ秒間隔で受信されるパルス<sup>(13)</sup>に注目し、雷放電源標定の手法を提案する。さらに同手法の有効性を検証するため、GPSを用いてマイクロ秒の精度で時間同期した多地点電界変化観測システムを製作し、北陸地方の冬季雷の観測を行っているため、この観測で得られたデータを示しつつ検討する。

## 3. 2 電界変化多地点観測システム

### 3. 2. 1 システムの構成と原理

GPSとは、アメリカが開発した人工衛星を利用した船舶、航空機の航法支援用の位置測定システムである。各衛星は約1.5GHzの電波を軌道情報や衛星内にある高安定なセシウム原子時計で作りだされた時刻情報とともに地上に送信し、一方地上ではこの軌道情報から衛星の位置を算出し、時刻情報と受信機内部の時計との時間差から位置測定を

行う。原理的には3つの衛星からの距離がわかれば測位可能であるが、受信機内部の時計は安定度が原子時計ほど良くないため第4の衛星を利用して衛星の原子時計と時刻補正を行う。従って、GPS受信機から出力される時刻情報である1PPS (Pulse Per Sccondの略) 出力は安価なシステムながら世界協定時 (以後UTCと略) に±1マイクロ秒で同期した精度を有している。そこで、本電界変化多地点観測システムではこの1PPS出力を利用し、各地点での時刻を同期させることとした。図3. 1に回路のブロック図および測定系のシステム構成図を示す。GPS受信機からの時間に関する出力は2種類あり、第一が立ち上がり時間がUTCに±1マイクロ秒で同期した1PPS出力であり、第2がこの1PPSに同期してRS-232C通信回線を通して出力される年、月、日、秒のシリアルデータである。そこで、1MHzの発振器出力を加算機で計測し、このカウンターを1PPS出力毎にリセットすることにより、その内容がUTCの秒以下の時刻をマイクロ秒の単位、即ち6桁の数字で表されることになる。そして、アンテナ系の波形信号のAD変換を開始させるためのトリガ信号でカウンターの内容を保持し、制御用コンピューターに転送することによりトリガしたときの秒以下6桁のUTCが記録され、従って波形信号のサンプリングされた各点のUTCが決定される。一方、秒までの時刻は、シリアルデータにより1秒ごとに時刻データを書き換え、AD変換開始とともに通信回線をからの割り込みを中止させることにより知ることができる。以上のことから各観測地点での時間同期が±1マイクロ秒以内で実現されている。

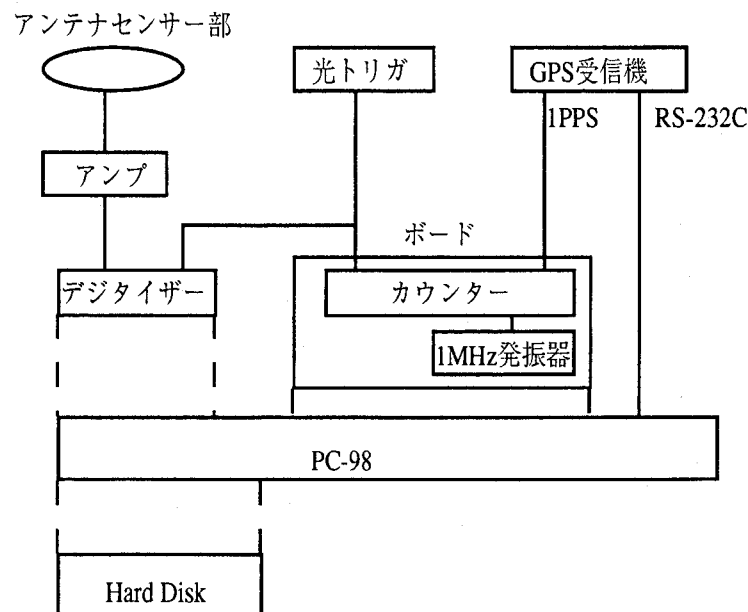


図3. 1 システム構成図



表3. 1に測定系の性能仕様を示す。アンテナの帯域は0. 2 Hz～2 MHz（放電時定数5秒）でいわゆる従来のスローアンテナとファーストアンテナの両方の性質を有しており、サンプリング速度は1 MHzである。さらに、北陸地方の冬季雷などによく見られる多地点同時雷撃や連続電流を含む落雷にも適するよう1秒間の記録長となっている<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。

表3. 1 性能仕様

|          |                   |
|----------|-------------------|
| センサ      | 円形平板アンテナ          |
| 帯域       | 0.1Hz～2MHz        |
| 時定数      | 5秒                |
| サンプリング速度 | 1MHz              |
| 記録時間長    | 1秒                |
| A/D変換    | ADH-12LM(サンシステム社) |
| GPS      | GN-72(古野電気)       |

### 3. 2. 2 精度の検証

製作したシステムの時間精度検証を平成5年度のロケット誘雷実験（於：石川県奥獅子吼高原，期間：1993年11月）において、3システムを同地点に配置して行った。図3. 2は11月27日17時32分52秒に記録された正極性自然落雷の帰還雷撃部の再生結果である。3システム同地点に配置しているため3システムそれぞれで同じ波形が記録されており、図3. 2の矢印で示したピークでのUTCを3システムそれぞれで算出した。その結果を表3. 2に示す。表3. 2に示されるように3システムでのトリガ時刻が異なっているにも関わらず図3. 2のピークでのUTCは3システム±1マイクロ秒以内で合致している。このことは、本観測システムが設計仕様どおり正常に動作していることを示している。

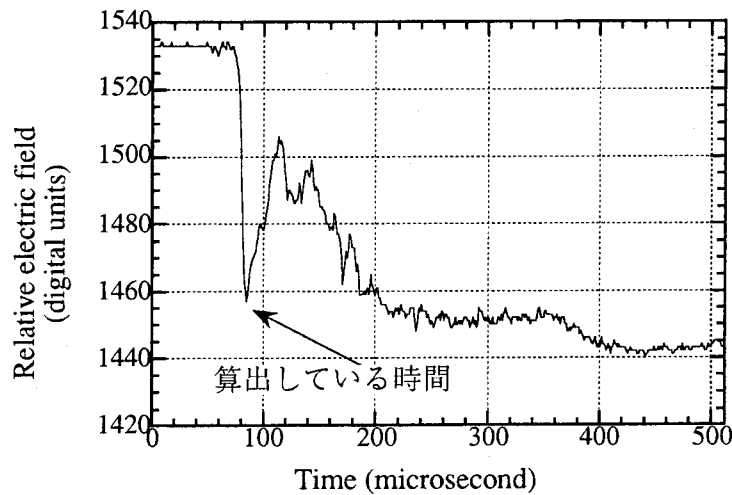


図 3. 2 帰還雷撃部拡大図 (512 マイクロ秒)

表 3. 2 システムの検証

|       | トリガ時刻  | 帰還雷撃部の時刻 |
|-------|--------|----------|
| システム1 | 272795 | 299785   |
| システム2 | 272803 | 299784   |
| システム3 | 272822 | 299786   |

単位：(マイクロ秒)

### 3. 3 観測結果、解析

#### 3. 3. 1 観測概要

本システムを用いた観測を1993年12月～1994年1月(於：福井県三方郡美浜町)に実施した。図3. 3に各アンテナの配置図を示す。3地点による観測で、3 km×8 kmの範囲を覆っている。各アンテナ間距離は約4 kmで岳山-郷市と郷市-太田は直角に近くなるように配置されている。

全観測期間中で多数のデータが記録されたが、本報告では対地雷撃、雲放電の2ケースそれぞれ1例ずつについて議論を進めることとする。また、本実験はレーザ誘雷野外実験と平行して行われたことを付記しておく。

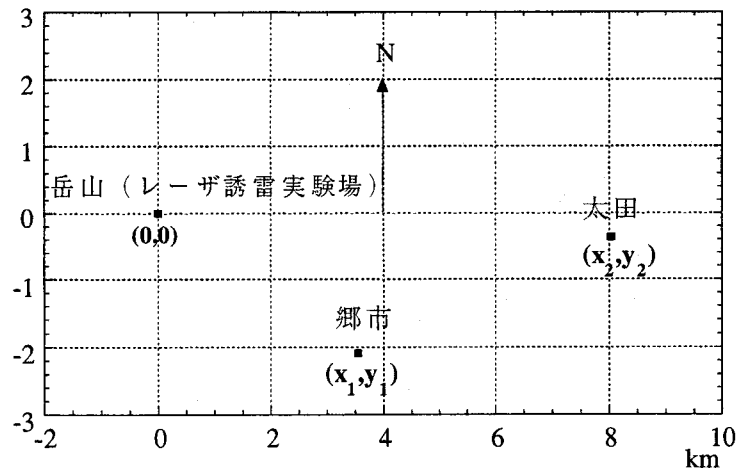


図 3. 3 広帯域スローアンテナ配置図

### 3. 3. 2 解析手法

前述のように、各観測点での時刻が±1マイクロ秒で同期しているため観測点間距離が4 km以上にわたる本実験の場合、雷放電に伴って放射される電磁波の各観測点への到達時間は放射地点により異なり、電界変化記録波形に重畳するパルス列についてその到達時間差から放射地点の推定が可能となる。即ち、同一パルスに対する2地点間での時間差を $\Delta t$ とするとパルス放射源は観測地点を焦点とする距離差 $C \times \Delta t$  ( $C$ :光速)の双曲面上(式1)に位置する。同様に他の2地点についても双曲面(式2)、(式3)が描け、この3つの双曲面の交点がパルスの放射点となる。

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+z^2}=c\Delta t_1 \quad (\text{式1})$$

$$\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+z^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+z^2}=c\Delta t_2 \quad (\text{式2})$$

$$\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+z^2}-\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+z^2}=c\Delta t_3 \quad (\text{式3})$$

ここで、本観測に供した測定器の総数は3で式1～式3の解を一意的に求めることはできない。しかし、高度の関数としての標定位置  $(x, y)$  の変化は系統的であり、各点の相対的位置はあまり変化しない(図3. 8参照)。そこで、本論文では高度を表す  $z$  を仮定した2次元近似で議論を進めることとする。

## 3. 3. 3 雷放電観測結果 (1)

図3. 4が1月22日12時18分26秒(UTC)に記録された, 落雷による郷市地区での電界変化の再生結果である。図中のPB, L, RおよびCはそれぞれプレリミナリーブレイクダウン, リーダ, 帰還雷撃および連続電流成分を示しており, この全体図から落雷の極性が正であることがわかる。さらに図3. 5(a), 6, 7に図3. 4でPB, R, Cと記した部分の拡大図をそれぞれ示す。

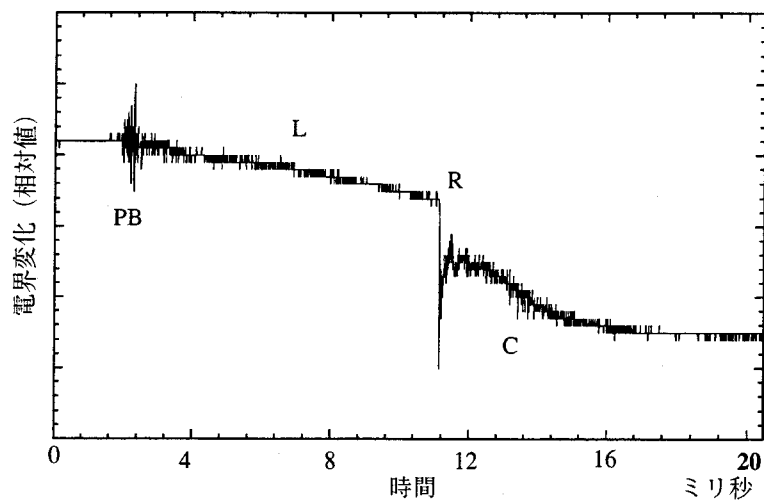


図3. 4 正極性対地雷撃全体図

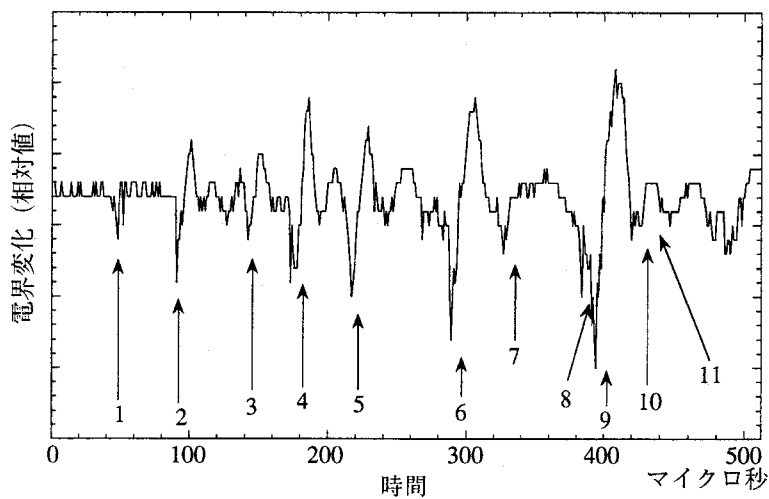


図3. 5 (a) 放電開始部 (郷市)

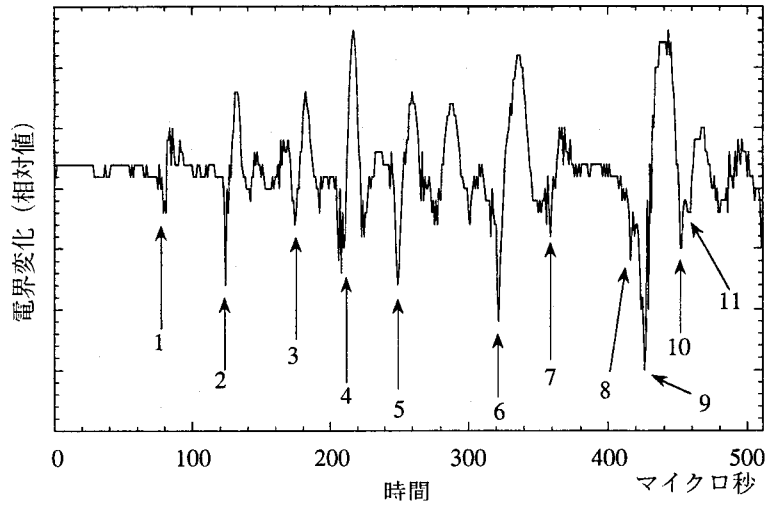


図 3. 5 (a) 放電開始部 (太田)

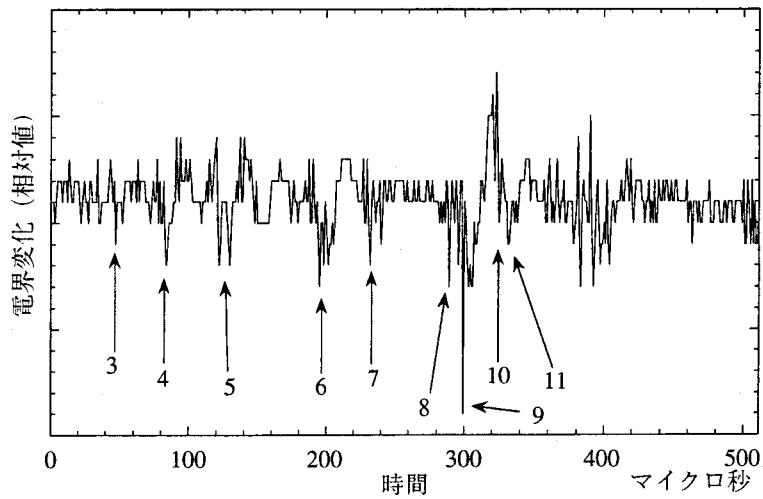


図 3. 5 (c) 放電開始部 (岳山)

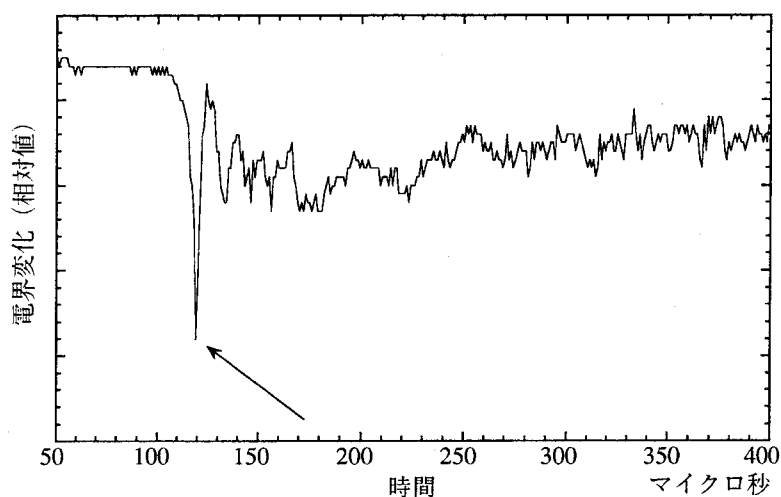


図 3. 6 帰還雷撃部

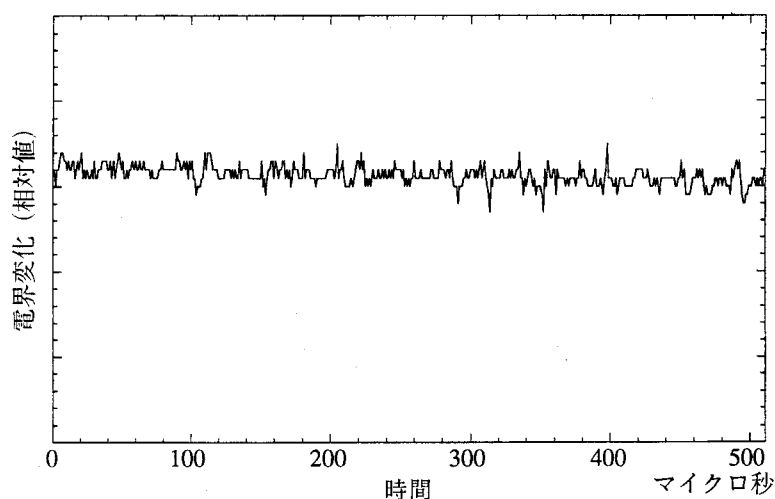


図 3. 7 連続電流部

岳山および太田地区においても同様な波形が記録されており（一例として，放電開始部分の太田，岳山地区での波形例を示す。図 3. 5 (b)，(c)），矢印で示したパルス列，帰還雷撃部について到達時間差により放射源をもとめ，2次元標定した図を図 3. 8 に示す。ここで，エラーバーは時間精度による標定誤差を示す。

この図の時系列によりパルス放射点は最初，北方向にのび，その後逆方向にリーダが進展し 1～2 km の南方向への移動ののち帰還雷撃に至ったものと思われる。さらに連続電流成分に重畳するパルス列が帰還雷撃点から見て放電開始点，リーダ進展点よりもさらに北方向に位置していることから帰還雷撃電流が雲内の電荷を中和すべく雲底に達した後も平行方向にみて 1～2 km 移動していると考えることができる。

放電開始部分に重畳するパルス列標定に関し他の一例でも放電開始点から見て帰還雷撃点とは逆方向に移動するといった同様な傾向がみられる。

放電点投影図から、連続電流成分に重畳する放射源について、図3.9のような対地雷撃の概念図を考えることができる。即ち、帰還雷撃電流は雲底到達後も局所的電荷領域を中和すべく進展し続ける。この結果は文献16において提唱された落雷のモデルを支持する結果と言える。

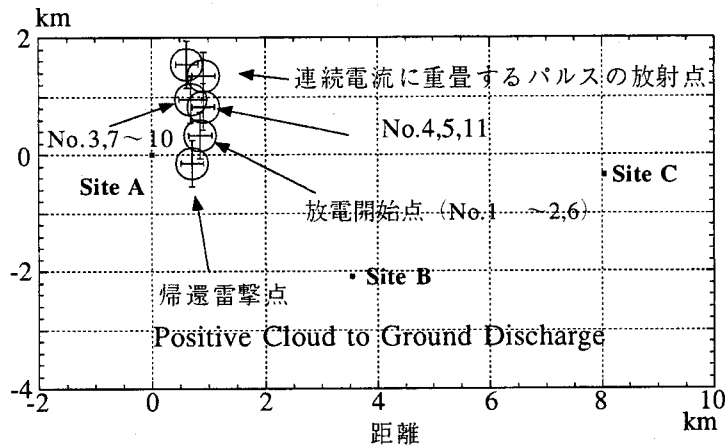


図3.8 放電点投影図

(エラーバーは標定誤差を示す。また、高度を2 kmと仮定すると放射源は1 km西へ移動する。)

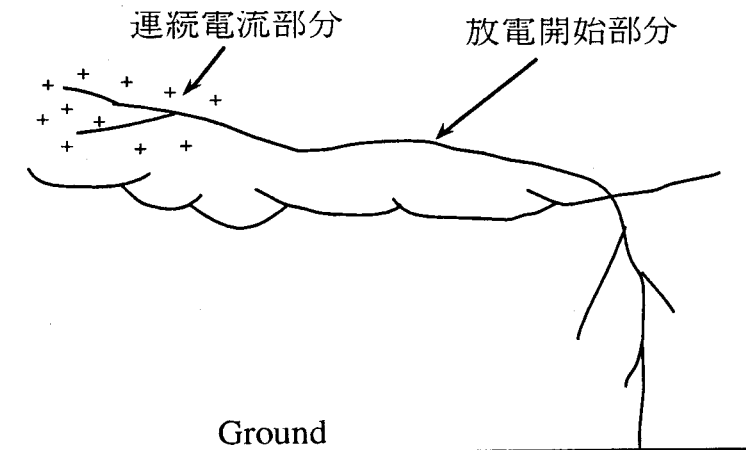


図3.9 対地雷撃概念図

## 3. 3. 4 雷放電観測結果 (2)

図3. 10が1月23日10時9分54秒 (UTC) に記録された雷放電による郷市地区における電界変化の再生結果である。図中のPBはプレリミナリーブレイクダウンを示す。さらに図3. 11に放電開始部の、図3. 12, 13に図3. 9でA, Bと示した部分で記録されたパルスの拡大図を示す。図3. 11に、示されるようにこの雷放電が比較的大きな両極性パルスで開始していることがわかる。太田, 岳山地区においても同様な波形が記録されており、図3. 11, 12, 13の矢印に示されたピークについて到達時間差により放射点の位置標定をした結果を図3. 14に示す。

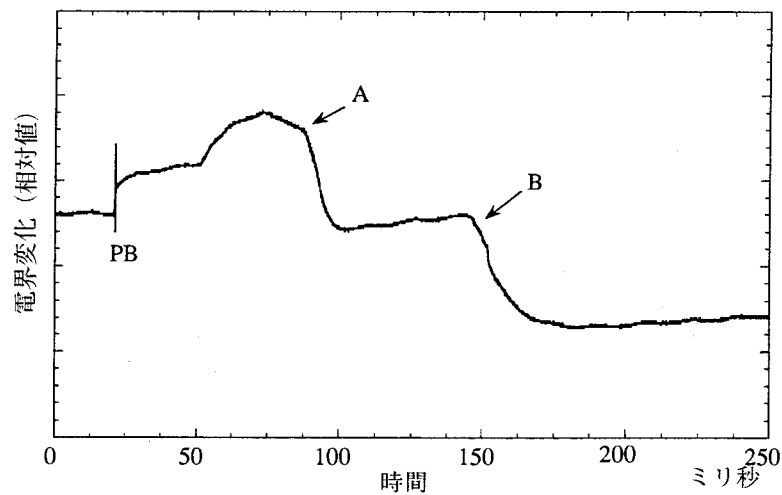


図3. 10 雲放電全体図

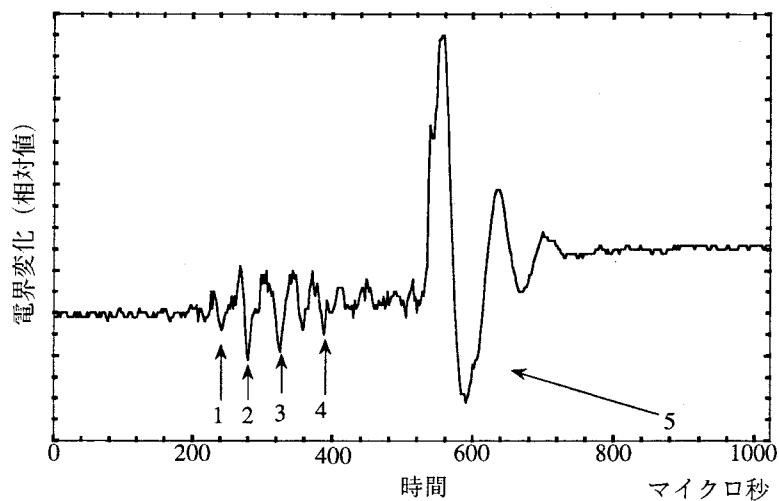


図3. 11 放電開始部



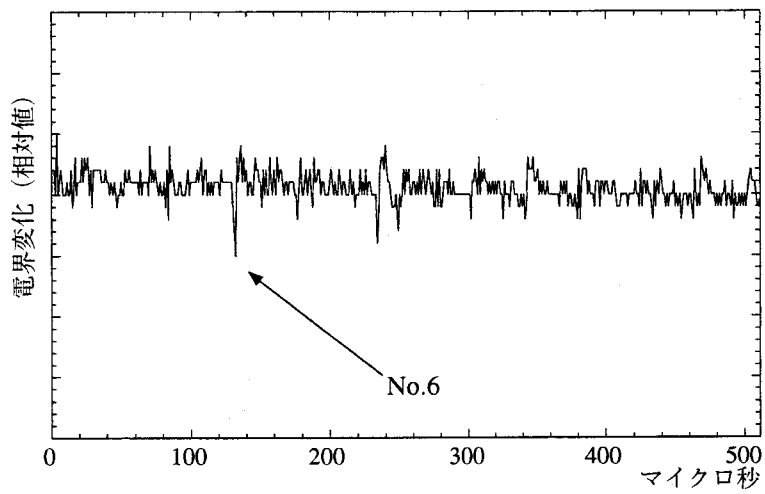


図3.12 パルス拡大図 (A)

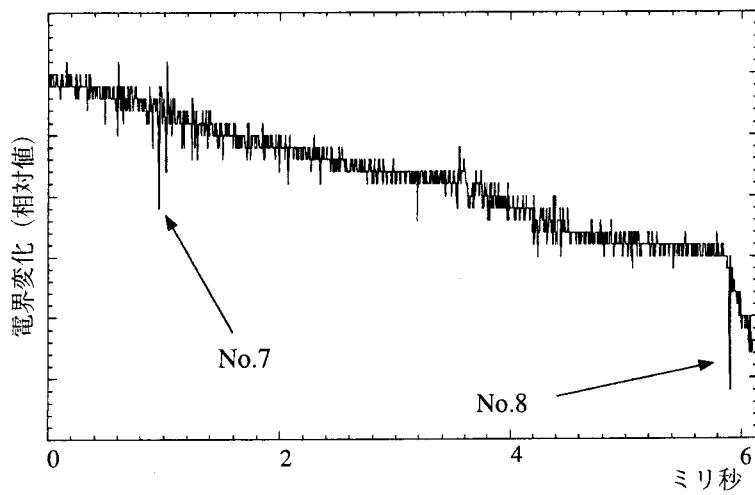


図3.13 パルス拡大図 (B)

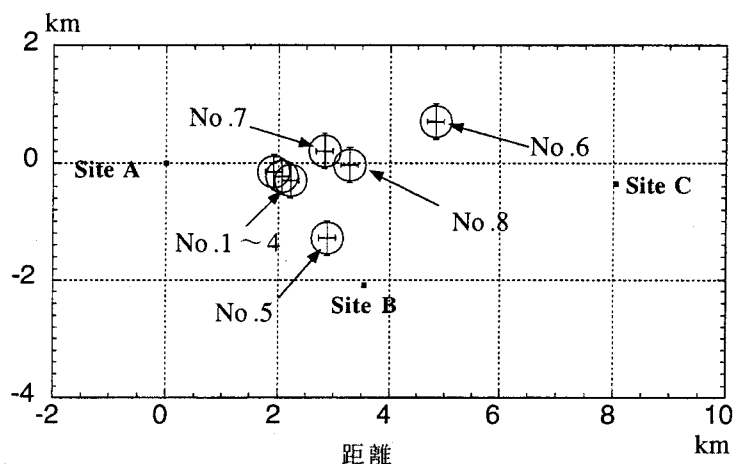


図 3. 14 放電点投影図  
(エラーバーは標定誤差を示す。)

No. 1～No. 4の放射点とNo. 5の放射点とは約1 km離れていることがわかる。ここで、この移動をリーダの進展によるものと考えたとリーダの進展速度を最も速い $1 \times 10^6 \text{ m/s}$ と仮定しても約400マイクロ秒の間には400 mほどの移動距離にしかならず矛盾する。実際の雲放電が3次元であることを考えあわせると、この距離差はリコイルストリーマ<sup>(17)</sup>によるものと考えることができる。また、No. 6の放射点は放電開始点から約3 km程度離れており、さらにNo. 8において小振幅であるが帰還雷撃に対応する電界変化が記録されている。以上のことから、この雷放電はかなり広範囲にわたる雲放電をトリガとして対地雷撃に至ったものと思われる。しかし、本システムは電界変化に重畳するパルスに着目しているため放電点標定は間欠的であり、放電開始機構を論ずることに適している反面、放電全体を連続的に捉えることは困難である。従って、今後のデータの蓄積または干渉計<sup>(18)</sup>等による観測が必要と思われる。

### 3. 4 結論

GPSをもちいた広帯域スローアンテナによる電界変化多地点観測システムを製作、北陸地方の冬季雷を観測した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 設計仕様どおり、 $\pm 1$ マイクロ秒の精度で動作していること。
- (2) 到達時間差法により、従来のスローアンテナ、ファーストアンテナの周波数領域でのパルス列の位置標定ができること。
- (3) 正極性落雷のプレリミナリーブレイクダウンパルスを標定した結果、その移動方

向はリーダや帰還雷撃とは逆であること。

(4) 正極性落雷に関して、その連続電流成分に重畳するパルス列の電波放射源2次元近似標定結果は文献16に示された放電モデルを裏付ける結果となったこと。

(5) 放電開始部の放電源位置標定に関しては適しているが、放電の連続的な全体像を捉えるにはあまり有効でないこと。

従来多地点観測は、雷放電による全電界変化値を測り中和電荷量およびその高度算出のために用いられてきた<sup>(19)</sup>。この観測ではアンテナを最低4カ所に設置して雷放電に伴う電界変化を計測するが、データ記録系のダイナミックレンジや記録された雷放電が各地点で同一のものかどうか時間同期の問題などから、その実施は困難で多大な労力を要する観測であった。これに対して、本章において提案されたGPSは安価な上、天候や場所に左右されないことから各観測点間の時間同期の極めて有効な手段と言える。本章においては、電界変化多地点観測への適用を試みたが、雷放電に関するあらゆる測定の時刻管理手段として用いることが出来ると思われる。

一方、正極性落雷の初期過程において記録されるプレリミナリーブレイクダウンパルスは最近報告された<sup>(13)</sup>が、その物理過程は未だ未解決である。本観測において示された結果は、双方向性リーダ仮説を支持するものであるが、時間分可能の良い干渉計等による観測が必要である。また、今後地点数を増やすことにより3次元標定が可能と思われる。さらに、電界変化を考慮するところにより、雲内放電の雷撃電流値の把握やその詳細な把握が可能と思われる。

#### 参考文献

- (1) 井上, 秋山, 送電線における雷害対策, 電気学会雑誌, 110, 10, 1990
- (2) Uman, M. A., The lightning discharge, Academic, San Diego, Calif., 71, 1987.
- (3) Uman, M. A., et al, An unusual lightning flash at Kennedy Space Center, *Science*, 201, 9, 1978
- (4) Hofmann-wellenhof, B., H.Lichtenegger, and J.Collins, GPS theory and practice, Springer-Verlag, 1992
- (5) Weidman, D. E. and E.P.Krider, The radiation field waveforms produced by intracloud lightning discharge processes, *J.Geophy.Res.*, 84, 3157, 1979
- (6) Krider, E. P., G. J. Radda, and R. C. Noggle, Regular radiation field pulses produced by intracloud discharges, *J. Geophys. Res.*, 80, 3801-3804, 1975

- 
- (7) Le Vine, D. M., Sources of the strongest RF radiation from lightning, *J. Geophys. Res.*, 85, 4091-4095, 1980
  - (8) Thomson, E. M., Radiation field from an in-cloud lightning process with arbitrary orientation, *Proc. Int. Conf. Atmospheric Electricity*, 533-538, 1988
  - (9) Le Vine, D. M., and J. C. Willet, Comment on the transmission line model for computing radiation from lightning, *J. Geophys. Res.*, 97, 2601-2610, 1992
  - (10) Lewis, E. A., R. B. Harvey, and J. E. Rasmussen, Hyperbolic direction finding with sferics of transtic origin, *J. Geophys. Res.*, 65, 1879-1905, 1960
  - (11) Oetzel, G. N., and E. T. Pierce, VHF technique for locating lightning, *Radio Sci.*, 4, 199-201, 1969
  - (12) Proctor, D. E., A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, *J. Geophys. Res.*, 76, 1478, 1971
  - (13) Kawasaki, Z.-I., and V. Mazur, Common physical processes in natural and triggered lightning in winter storms in Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 12935, 1992
  - (14) Brook, M., R. W. Henderson, and R. B. Pyle, Positive lightning strokes to ground, *J. Geophys. Res.*, 94, 13295-13303, 1989
  - (15) Kawasaki, Z.-I., K. Matuura, K. Yamamoto, M. Nagatani, H. Nakata, M. Nakano, and T. Takeuti, Design of the transient memory of extremely large size for electric field changes due to the lightning discharge and observation results during summer and winter thunderstorms, *Trans. IEE of Japan*, 111-B, 1991.
  - (16) Proctor, D. E., R. E. Uytendogaardt, and B. M. Meridith, VHF radio pictures of lightning flashes to ground, *J. Geophys. Res.*, 93, 12683-12727, 1988
  - (17) Ogawa, T., and M. Brook, The mechanism of the intracloud lightning discharge, *J. Geophys. Res.*, 69, 5141-5150, 1964
  - (18) Richard, P., A. Delannoy, G. Labaune, and P. Laroche, Results of spatial and temporal characterization of the VHF-UHF radiation of lightning, *J. Geophys. Res.*, 91, 1248-1260, 1986
  - (19) Krehbiel, P., M. Brook, and R. McCrory, An analysis of the charge structure of lightning discharges to ground, *J. Geophys. Res.*, 84, 2432-2456, 1979



## 第四章

# 広帯域干渉計の試作と ロケット誘雷の観測

### 4.1 緒言

雷放電により放射される電磁波は、周波数領域で直流付近から光の領域に至るまで極めて広い。近年特に、VHFやUHF帯の電磁波を用いて、雷放電の諸過程から放射されているパルスの3次元標定がなされており、これまで曖昧であった雲内の放電過程の様相が明らかになってきている。この手法は、到達時間差法<sup>(1),(2),(3)</sup>と干渉法<sup>(4),(5),(6),(7),(8)</sup>に大別される。到達時間差法とは数km離れた4から5地点においてパルスを同時受信し、各アンテナへの到達時間差を計測することにより電磁波放射源を特定する手法のことをいう。一方、干渉法は受信周波数の波長程度に離れた二つのアンテナに到達する電磁波の位相差を測定することにより電磁波放射源を特定するものである。到達時間差法では孤立したパルスに対してはその時間対応が比較的容易にできるが、Qノイズ<sup>(9)</sup>のようなバースト状の放射に対してはその電磁波放射源の標定は不可能である。一方、干渉法においては逆にバースト状の放射は比較的容易にその動きを可視化できる反面、孤立した単発パルスに対しては標定は難しいとされている<sup>(10),(11)</sup>。

近年のデジタル技術の進歩の結果、ギガヘルツといった高速サンプリング技術が開発され、VHFやUHF帯の電磁波を直接サンプリング出来るようになってきている。この技術は、GIS内部の部分放電から放射される電磁波の検出や位置標定などに適用されてきている。特に位置標定技術は広帯域干渉法と呼ばれ、最近、Shaoら<sup>(12)</sup>は雷放電を対象とした広帯域干渉法<sup>(13)</sup>の基本的な原理について記述し、同手法によりダートリーダの特性について次元での報告を行っている。広帯域干渉法では信号を数百メガヘルツ以上のサンプリング速度で記録するため、Qノイズタイプの放射現象も各々孤立したパルスの集合とし

て記録できる。そのため、孤立した単発パルスとQノイズタイプの電磁波放射現象の両方に対してその放射源の特定が可能であると考えられる。加えて、同手法では受信した信号に対して周波数毎の標定が可能であるため電磁波放射源の周波数依存性についても議論でき、雷放電に関する新たな知見を得ることができると予想される。

以上のことから、広帯域干渉計を試作し、1996年度のロケット誘雷実験において試験を兼ねて測定を行った。本章では、その結果について詳述することとする。

#### 4.2 観測状況

1996年度のロケット誘雷実験は金沢市郊外にある奥獅子吼山頂（海拔928m）において11月に行われた。同地域は北陸電力の試験送電線が設置されており冬季雷を対象としたロケット誘雷が毎年行われている。観測項目は多岐にわたり雷撃電流測定、放電路の光学観測、放電路の分光スペクトル測定、雷鳴による放電路再現、空間電荷測定、接地電位測定、避雷器の試験、土中電流分布測定などである。大阪大学が担当したVHF広帯域干渉計はそのロケット発射台より3.6km離れた標高628mのスキー場のゲレンデ付近に設置された。本実験で使用した観測機器のシステム構成図を図4.1に示す。アンテナセンサーとして円形平板アンテナを使用しその出力を5D2V同軸ケーブルの特性インピーダンスである50オームで終端して、そこに流入する電界の時間微分波形を直接デジタル記録している。観測周波数帯域は約10MHzから250MHzまでで、サンプリング周波数は500MHzである。1チャンネルあたりのメモリ長は50キロバイトで1ワードは8ビットで構成されている。アンテナは全部で3個使用している。その配置を図4.2に示す。この図に示されように、アンテナ間隔は5mで、一対アンテナがそれぞれ直角をなすよう配置されている。

前述のように本観測機器はサンプリング周波数が500MHzであるため、持続時間が1秒程度に及ぶ雷放電を対象とした場合、信号を連続的に記録するのは困難である。そこで、本実験においては全メモリを50個に分割し、ある一定の信号レベルを越えた時、2マイクロ秒間3チャンネルを同時に記録するようになっている。

広帯域信号の記録と同時に本観測では電界変化の記録も行っている。放電時定数は5秒である。サンプリング周波数は1MHzで、記録時間長は1秒である。

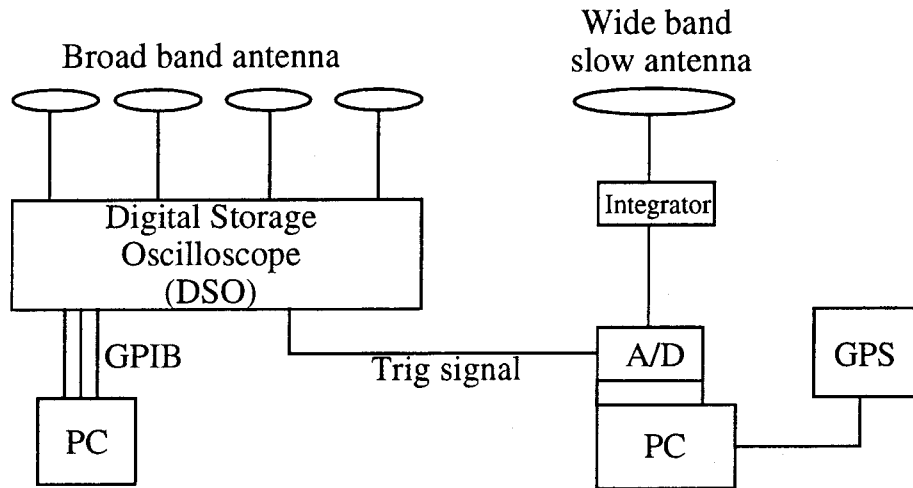


図 4. 1 観測機器構成図

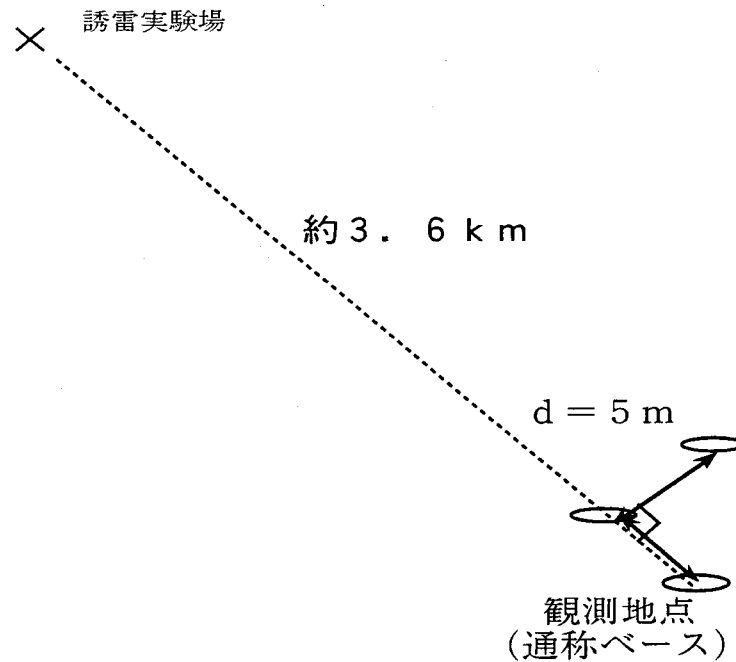


図 4. 2 観測機器配置図

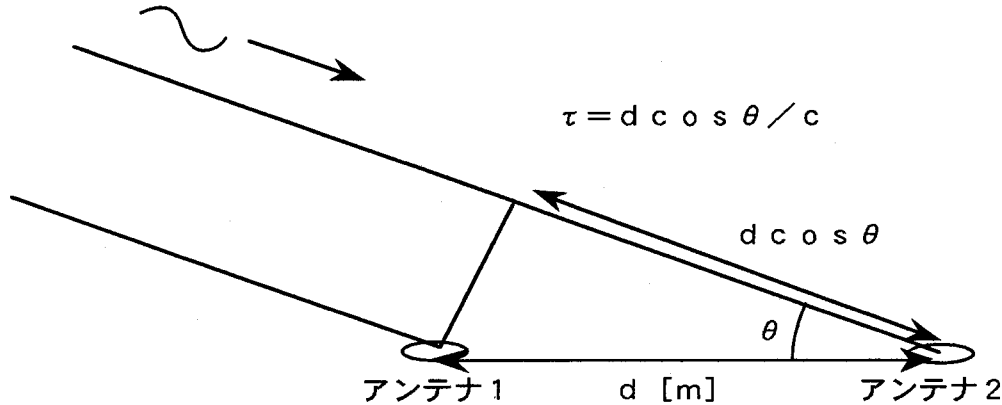
取得されたデータの解析手法は以下の3ステップに大別される。

- (1) 一組のアンテナ対に入射する電磁波の位相差検出のためのフーリエ変換
- (2) 入射角の算出
- (3) 観測点から望んだ方位角, 仰角の算出



以下、順に各解析過程を説明する。

本研究においては、全部で3個のアンテナを使用しているが、まず一つのアンテナで記録される波形を考える。例えばアンテナ1において検出される信号を時間をパラメータとして $f_1(t)$ と表すこととする。



$f_1(t)$ は実際は離散信号であるため離散フーリエ変換を適用すると以下のように表せる。

$$F_1(v) = \sum_{n=0}^{N-1} f_1(n\Delta t) e^{-i2\pi v n \Delta t} \quad (1)$$

距離  $d$  メートル離れたアンテナ2に同じ信号が同じ入射角で到達するとすると、アンテナ2での検出信号 $f_2(t)$ は $f_1(t+\tau)$ に等しくなる。これを離散信号系で表すと

$$f_2(n\Delta t) = f_1((n+k)\Delta t) \quad (2)$$

となる。

式(2)の関係を考慮して、アンテナ2での信号に同様に離散フーリエ変換を適用すると、以下のようなになる。

$$F_2(v) = \sum_{n=0}^{N-1} f_1(n\Delta t) e^{-i2\pi v n \Delta t} = e^{-i2\pi v k \Delta t} \sum_{n=k}^{N-k-1} f_1(n\Delta t) e^{-i2\pi v n \Delta t} \quad (3)$$

ここで、データポイント数  $N$  をパルスの全体波形が含まれるくらいに  $k$  に対して十分大きくとると

$$\sum_{n=0}^{N-1} f_1(n\Delta t) e^{-i2\pi v n \Delta t} = \sum_{n=k}^{N-k-1} f_1(n\Delta t) e^{-i2\pi v n \Delta t} \quad (4)$$

となる。(4)式の左辺は(1)式の右辺、(4)式の右辺は(3)式の右辺に含まれる項であるので、アンテナ1の波形に対して離散フーリエ変換を適用した値でアンテナ2の波形に対して離散フーリエ変換を適用した値を割ると、各周波数での $2\pi k\Delta t$ の値が算出できる。 $k\Delta t$ はアンテナへの到達時間差 $d\cos\theta/c$ に等しいので、既知の値であるベースライン長 $d$ と光速 $c$ を代入することにより、到達電磁波のアンテナ対に対する各周波数での入射角を求めることができる。以上がステップ2までの解析手順となる。

一組のアンテナ対に対する入射角が求められているとき、その電磁波放射源はその2本のアンテナを結ぶ直線を軸とし、頂角を入射角とする円錐の底面円周上に存在することになる。今、二組のアンテナ対は直角にそれぞれ東西、南北を指すように配置されているので、電波源はそれぞれのベースラインを回転軸とし、回転角がそれぞれのアンテナ対での算出された入射角とする二つの円錐の交点として求めることができる。これが、ステップ3に相当する解析手順である。以上のような手順により電磁波放射源が2次元で標定されこととなる。なお、このステップ3の手順は狭帯域干渉計での電磁波放射源標定の手順<sup>(5)</sup>と同一であることを付記しておく。

図4.3に記録された波形の一例を示す。各アンテナの波形は振幅に差が認められるものの同様な波形を示しており、その波形間には時間差が存在することが示されている。この波形に対して、FFT (Fast Fourier Transformation) でフーリエ変換を数値的に行い、スペクトルを求めた結果を図4.4に示す。各アンテナ入力に対して、求められるスペクトルは、それぞれ同様な傾向を示していることがわかる。いずれの波形においても高周波ほどスペクトル強度が減少する傾向を示している。30MHz付近にいずれの波形においてもスペクトル強度の低い箇所が認められるが、これはアンテナの周波数特性によるものと考えられる。

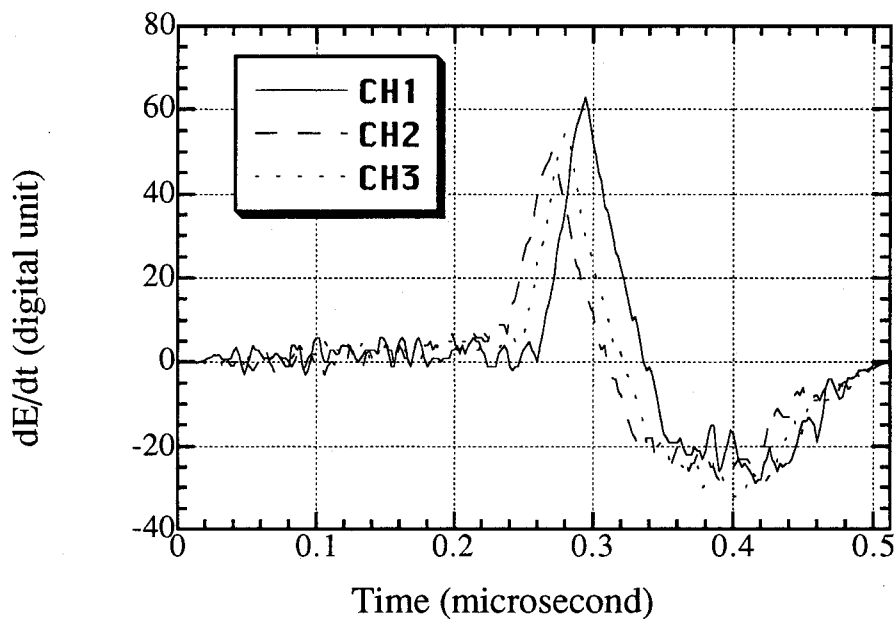


図 4. 3 記録された広帯域信号の一例。

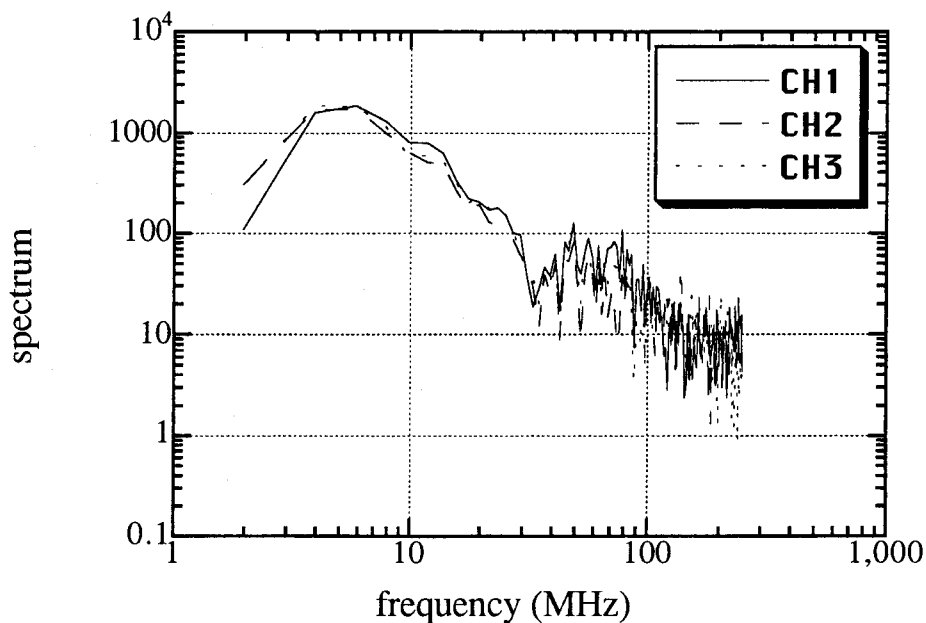


図 4. 4 広帯域信号のスペクトル

図 4. 5 に各アンテナ対（東西，南北方向）について位相差を抽出した結果を示す。位相差が  $\pm 2\pi$  の範囲内において約 120 MHz 付近までの間，周期的な特徴を示していることがわかる。120 MHz 以降，位相差はランダムになり，これはスペクトルの強度が

小さい領域に対応している。

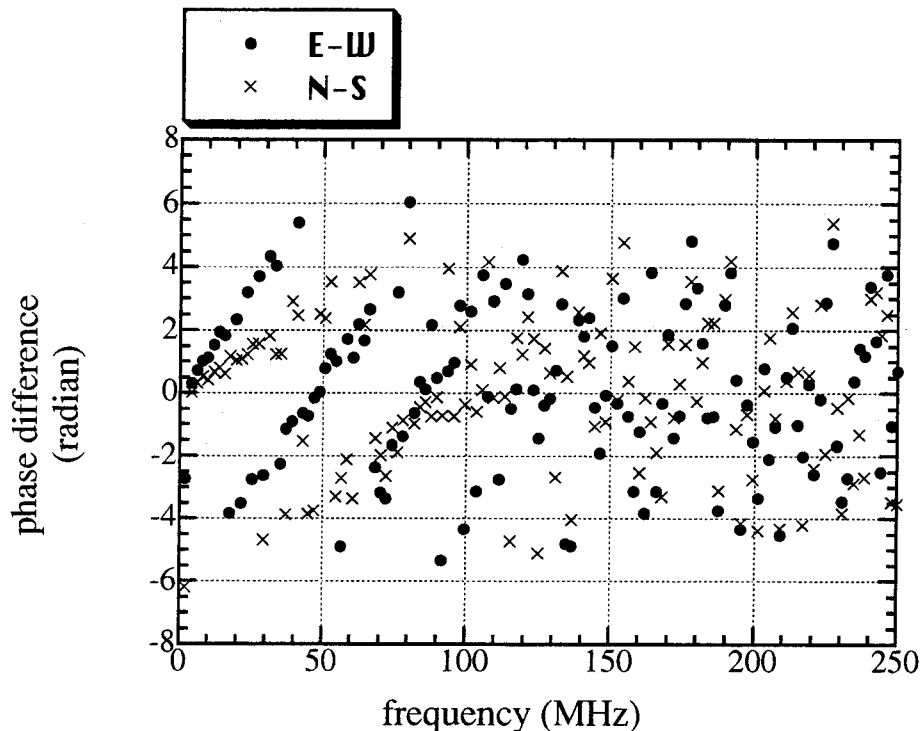


図4. 5 各アンテナ対における信号の位相差

本解析においてはFFTを使用しているため、抽出されている位相差は $\pm 2\pi$ に限定される。しかし、高周波成分ほどその位相差は大きくなるため、実際の位相差は $\pm 2\pi$ 以上の値をとっても計算上では $\pm 2\pi$ 以内の値をとることになる。これをフリッジという<sup>(7)</sup>が、正しいフリッジを選択するためには求められた位相差に対して $\pm 2\pi$ ,  $\pm 4\pi$ ,  $\pm 8\pi$ 等の加算を行う必要がある。この加算を行った結果を図4. 6に示す。 $2\pi$ 倍の加算、減算を行うことにより位相差が周波数に応じて連続的に変化することがわかる。

電磁波の到来方向は一つに限定されるので、このパターンの中から正しいフリッジを選択する必要がある。本実験の場合、ベースライン長は5メートルであるので最も位相差の大きい入射角をとるように電磁波が到来したとすると、これらの不定性つまりフリッジが存在しない周波数は30 MHzまでに限られる。そこで、この領域の位相差を基準にしてフリッジの選択を行うことにより正しい位相差検出が行えることになる。実際図4. 7に示す様に、位相差の選択が正しく行われていること確認できる。

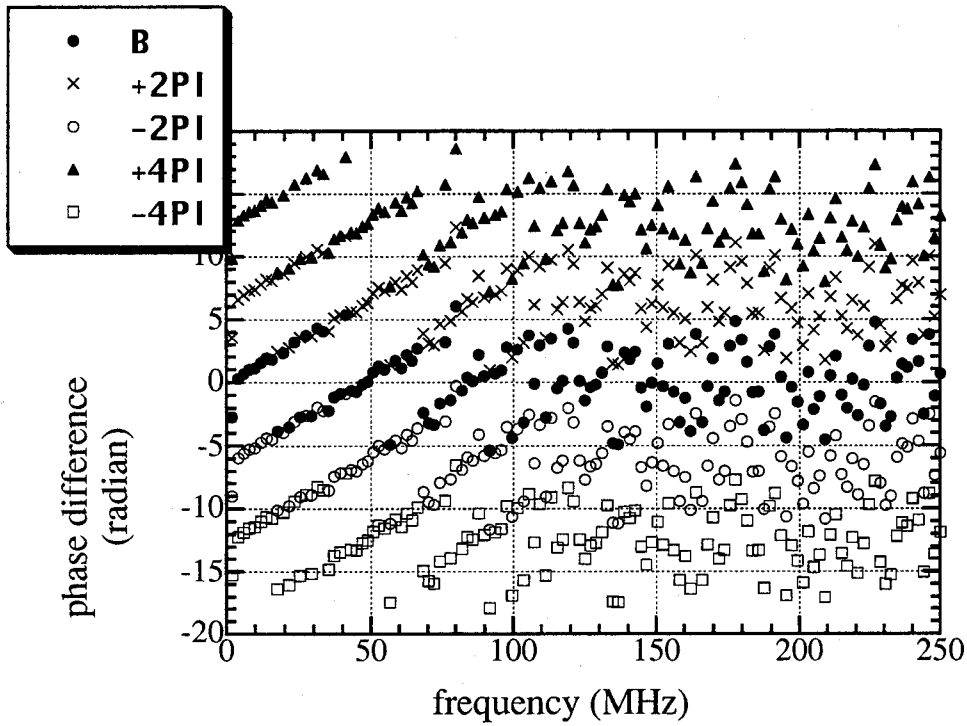


図4. 6 アンテナ間での信号位相差 ( $\pm 2\pi$ の整数倍の加算をした結果)

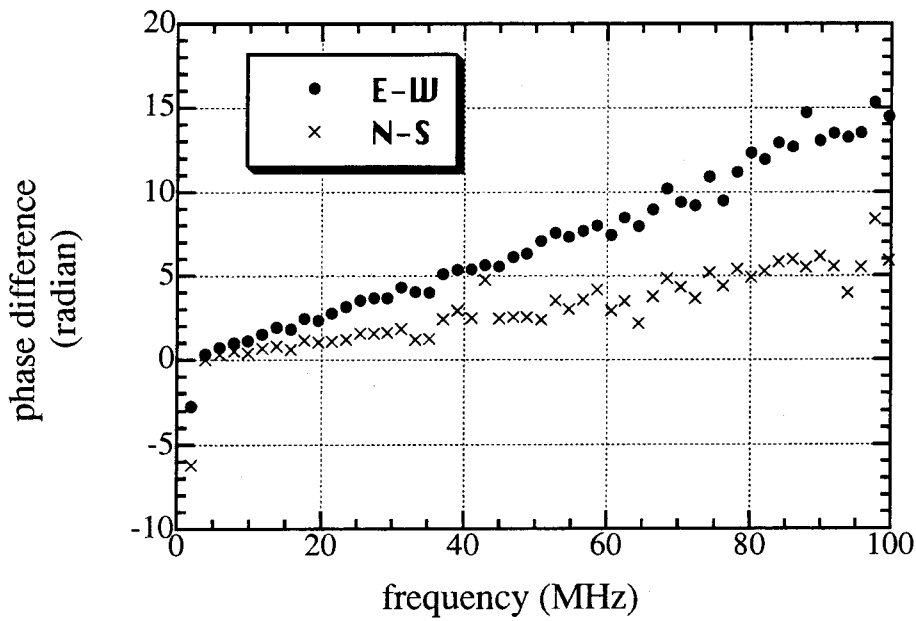


図4. 7 東西、南北方向の各アンテナ対での広帯域信号の位相差 (フリッジの選択結果)

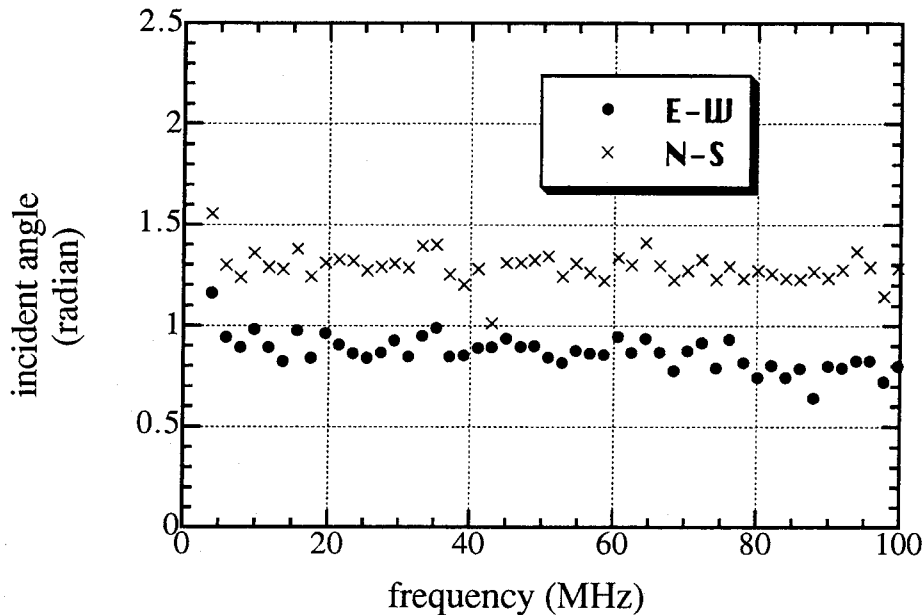


図4. 8 東西、南北方向に配置されている各アンテナ対に入射する  
広帯域信号の算出された入射角

FRINGE選択の後、入射角を算出した結果を図4. 8に示す。このように、周波数に対する依存性は顕著ではなく、方位角、仰角とも周波数に対してほぼ一定の傾向を示している。

#### 4. 3 実験結果と検討

図4. 10に11月15日20時59分34秒に誘発された地上誘雷の電界変化の全体図を示す。同波形は緩やかな負方向の変化に多数のパルスが重畳した特徴を示し、そのパルス列は放電初期に多くみられ、記録の終焉に向かって緩やかに減少していることがわかる。この波形全体の電界変化の極性からこの誘雷により上空の正電荷の中和が行われたことが示唆される。また、自然雷に見られるような正極性の帰還雷撃によると思われる立ち上がりの速い変化は記録されていない。この特徴は文献(14), (15), (16), (17)で指摘されているものと一致しており、正極性ロケット誘雷では夏季、冬季を問わず帰還雷撃が存在しないことが確認できる。図4. 11にこの誘雷の放電開始部分の時間軸を拡大した図を示す。図中で縦棒で示したものは広帯域パルスが記録された時間を示

している。放電開始前に変化は見られず信号はほぼ平坦なノイズレベルを示しており、その後電界変化は緩やかに負方向に変化し始めその変化に重畳しているパルスの振幅も同様に徐々に大きくなっていることがわかる。この顕著な電界変化に先行して広帯域パルスが放射されている。一方、同時にシャント抵抗により測定された電流波形はその持続時間が約13ミリ秒であり、これは電界変化の持続時間とほぼ一致し、その極性は正、即ちこの誘雷が負極性の上向き放電で開始し上空の正電荷が中和されていることを示している。従って、電界変化に見られるパルス列及びその時間に対応して放射されている広帯域パルスは地上から上空に向けて持続進展している負極性のステップトリーダによるものと思われる。また、電流波形において同様に記録されているパルス列は数キロアンペアから十数キロアンペアを示しており、電界変化に記録されているパルス列は冬季正極性トリガード雷に特有な大電流パルスであると考えられる。

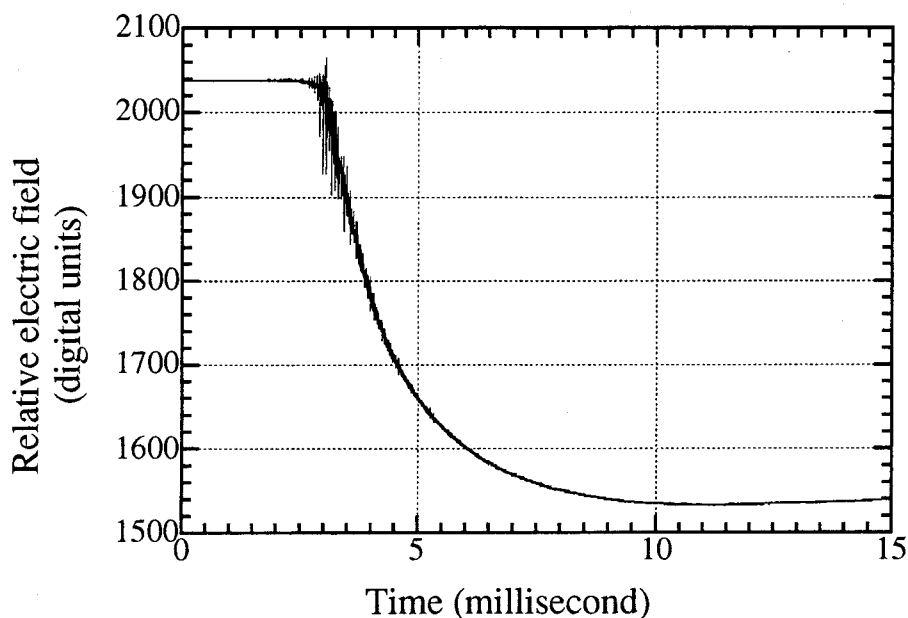


図4. 10 11月15日20時59分34秒に誘発された地上誘雷の電界変化の全体図

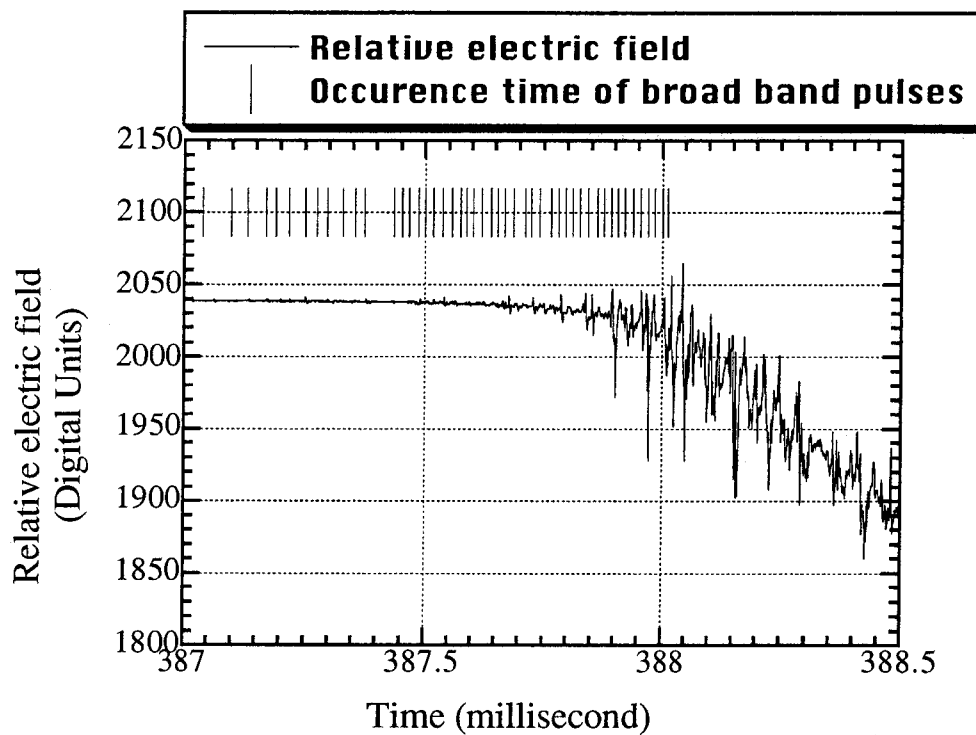


図4. 11 図4. 10の誘雷の放電開始部分の拡大図

図4. 12に広帯域パルスの時間間隔のヒストグラムを示す。平均時間間隔は約22マイクロ秒で、これはアリゾナで観測された負極性落雷の下向きに進展するステップトリーダの25マイクロ秒<sup>(18)</sup>と類似した値となっている。図4. 13に算出した方位角と仰角対周波数のグラフを示す。同図からわかるように、周波数が上がると同時に方位角と仰角に数度程度の傾向が存在する。この傾向は放射源の微視的な放射過程と関係があると思われるが詳細な検討は今後の課題としたい。数十メガヘルツ以上においては電磁波放射源の方位角、仰角はほぼ一定の傾向を示しており、この領域において平均値を算出し一放電点とすることにより以後は解析をおこなっている。上記の負極性ステップトリーダから放射されていると思われる広帯域信号の仰角の時間推移を図4. 14に示す。同図から電磁波放射源が上向きに進展する様子がわかる。観測点からロケット発射台までの距離が既知であるので、その速度を評価することができ、 $6 \times 10^5 \text{ m/s}$ と算出されている。この値は負極性落雷の光学観測により決定された2次元の速度 $6 \times 10^5 \text{ m/s}$ <sup>(19)</sup>、電界観測による $5.7 \times 10^5 \text{ m/s}$ <sup>(20)</sup>に類似している。これらの値から電磁波の放射源はリーダ先端である<sup>(7)</sup>ことも示唆される。

ところで、リーダ開始部での標定された放射点はロケット発射台の位置と数度程度以内



で合致しており、方位角方向での放射源標定のばらつきの標準偏差は1.6度で標定誤差が数度以内であることがわかる。また、本観測地点付近に周波数にして58MHz付近の通信用電波塔が存在し、雷放電が生起していない時にこの周波数を抽出して位置標定を行った。その結果、概ねその方向は一致しており、標定点のばらつきは2から3度で標準偏差は1度以下と算出されている。電波塔の正確な位置を測量することが出来なかったため正確な評価は難しいが、鉄塔誘雷での電波放射源がロケット発射台の位置と数度以内で一致していること、またその標準偏差が数度以内であること、通信波の標定のばらつきが数度程度であることを併せて考慮すると、本観測システムが数度程度の標定精度を有することがわかる。

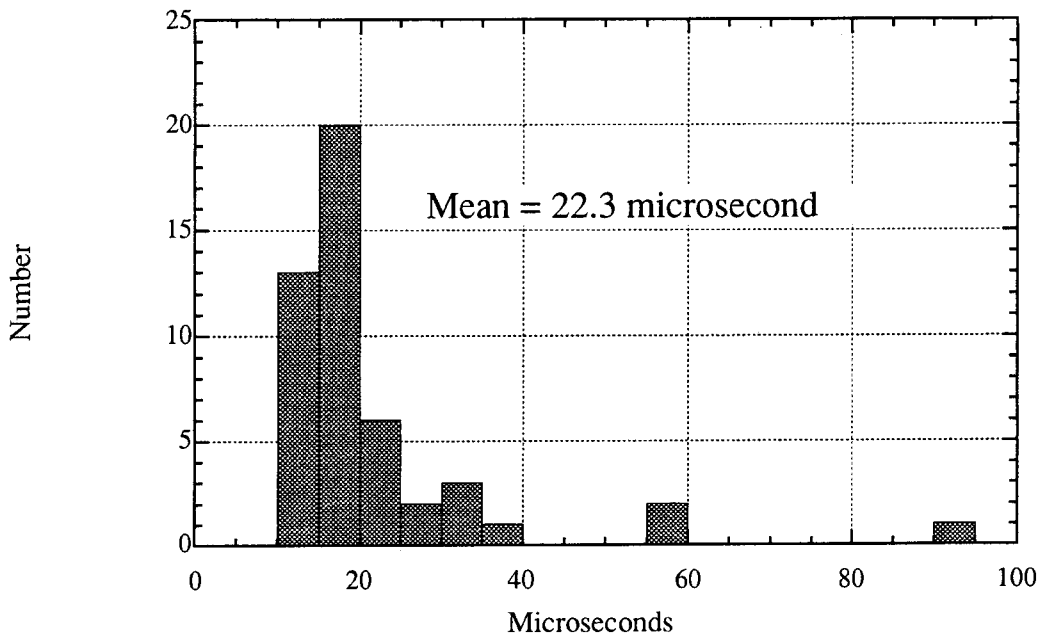


図4.12 負極性上向きリーダから放射される広帯域パルスの時間間隔のヒストグラム

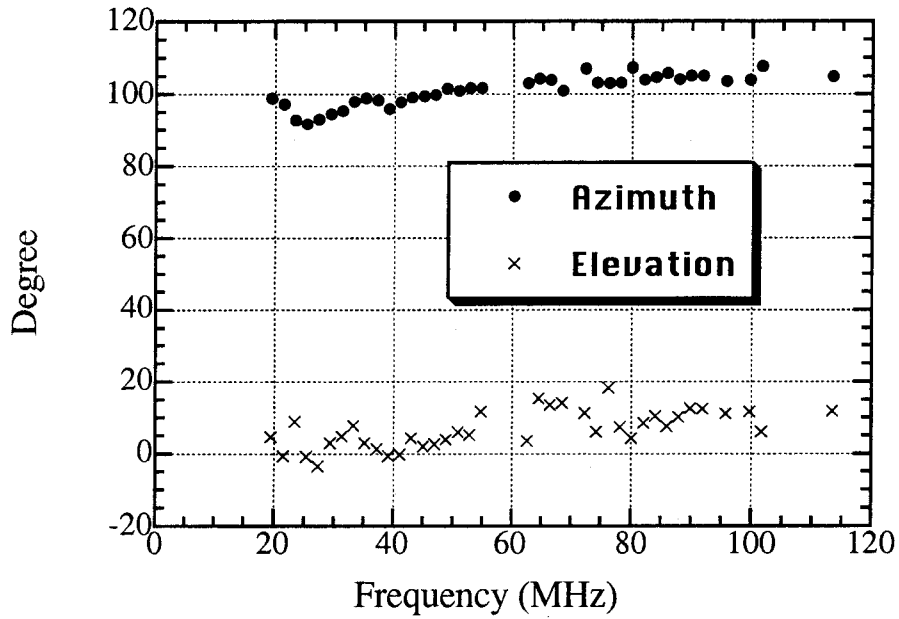


図4. 13 広帯域パルスの算出された方位角、仰角の周波数依存性

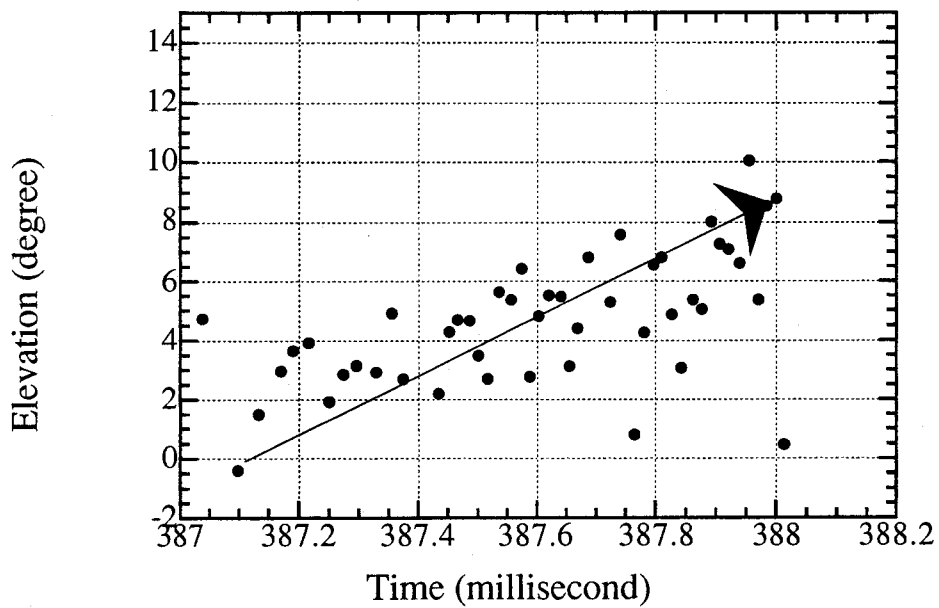


図4. 14 負極性上向きリーダーにより放射される広帯域パルス列の仰角の時間変化

図4. 15に11月15日20時54分22秒に誘発された鉄塔誘雷の電界変化の全体図を示す。本実験の場合、これは50mの試験鉄塔への誘雷であり、上空に打ち上げられたロケットおよびワイヤーは地面とは絶縁されている。なお、この方式の誘雷はフランスでのAltitude lightning<sup>(21),(22)</sup>と同種のものであることを付記しておく。同図からわかるように、最初緩やかな電界変化で始まり、正方向への変化の後60ミリ秒付近から幾つかの階段状の変化が続いている。この特徴は欧米での負極性のロケット誘雷での電界変化の特徴<sup>(23),(24)</sup>と類似しており、この階段状の変化は負極性の後続雷撃によるものと思われる。一方、電界変化の全体の極性はこの誘雷により上空の負電荷の中和が行われたことを示しており矛盾はない。なお、鉄塔誘雷の雷撃電流の直接測定は不可能であるため、電流波形との照合は行っていない。

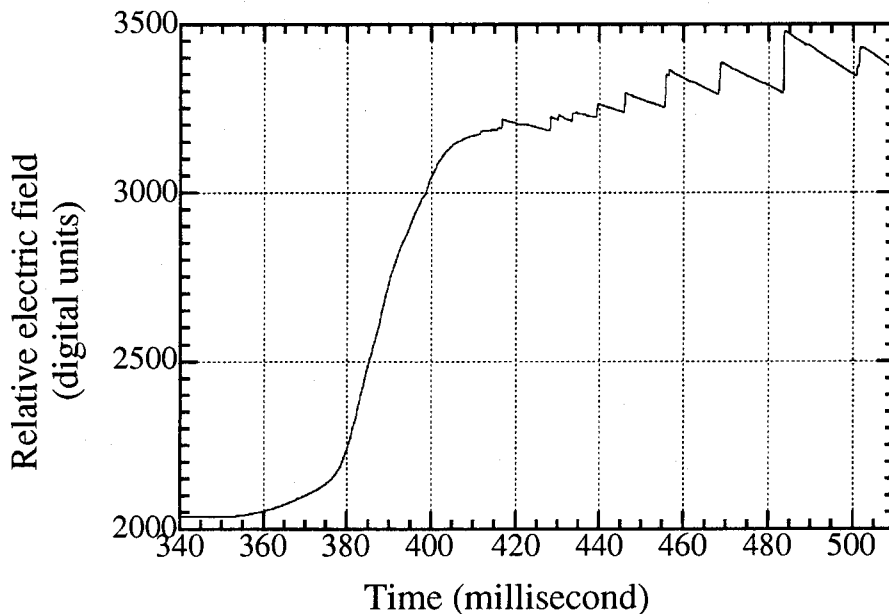


図4. 15 11月15日20時54分22秒に誘発された鉄塔誘雷の電界変化の全体図

上空の負電荷が中和されるとした鉄塔誘雷の誘雷過程を欧米での場合と日本の場合と対比させた模式図を図4. 16に示す。同図上の模式図が欧米とくにフロリダでのロケット誘雷を指しており、下図が日本の冬季北陸地方でのロケット誘雷実験のものである。顕著な違いはその誘雷高度である。欧米での鉄塔誘雷のワイヤー下端の高度は400メートル

近くあるのに対して、日本の北陸地方での鉄塔誘雷では高々100メートルまでである。さらに、日本の場合、鉄塔の高さは約50メートルあり、実際鉄塔へ向けて進展するリーダの長さは50メートル程度である。

次に、具体的な鉄塔誘雷の誘雷過程を説明する。鉄塔誘雷では、地上から約100メートルまではナイロン釣り糸で絶縁され、その先にスチールワイヤ（ピアノ線）がロケットに付けたボビンから引き出される。即ち、ロケットとその後に続くワイヤは鉄塔や地面から絶縁されていることになる。そのため、例えば上空の負電荷が中和される負極性誘雷の場合、正極性リーダがロケット先端からまず上空に向けて進展し、ワイヤ下端からはその数ミリ秒後に地面に向けて負極性のリーダが進展する<sup>(25),(26)</sup>。日本でのロケット誘雷の場合、ワイヤ下端の高度は欧米でのロケット誘雷の高度に比べ10倍程度低く<sup>(27),(28),(29)</sup>、また冬季の山岳地帯であり実験場付近の視界も悪いことからこの部分の過程についてはよくわかっていないが、反対極性のリーダが同時に進展する過程は同一である。そして、ワイヤ下端から開始したリーダは通常、鉄塔または避雷針からのコネクティングリーダと結びつき、Partial return stroke またはSmall return stroke と呼称される下向きリーダの放電路に蓄えられた負電荷の中和過程を経て上向きの正極性リーダとなって、雲へ向けさらに上昇進展する。そして、数十ミリ秒の後ダートリーダが雲から降下し、後続雷撃が起こりこの過程が何回か繰り返される。これが、負極性の鉄塔誘雷の過程である。

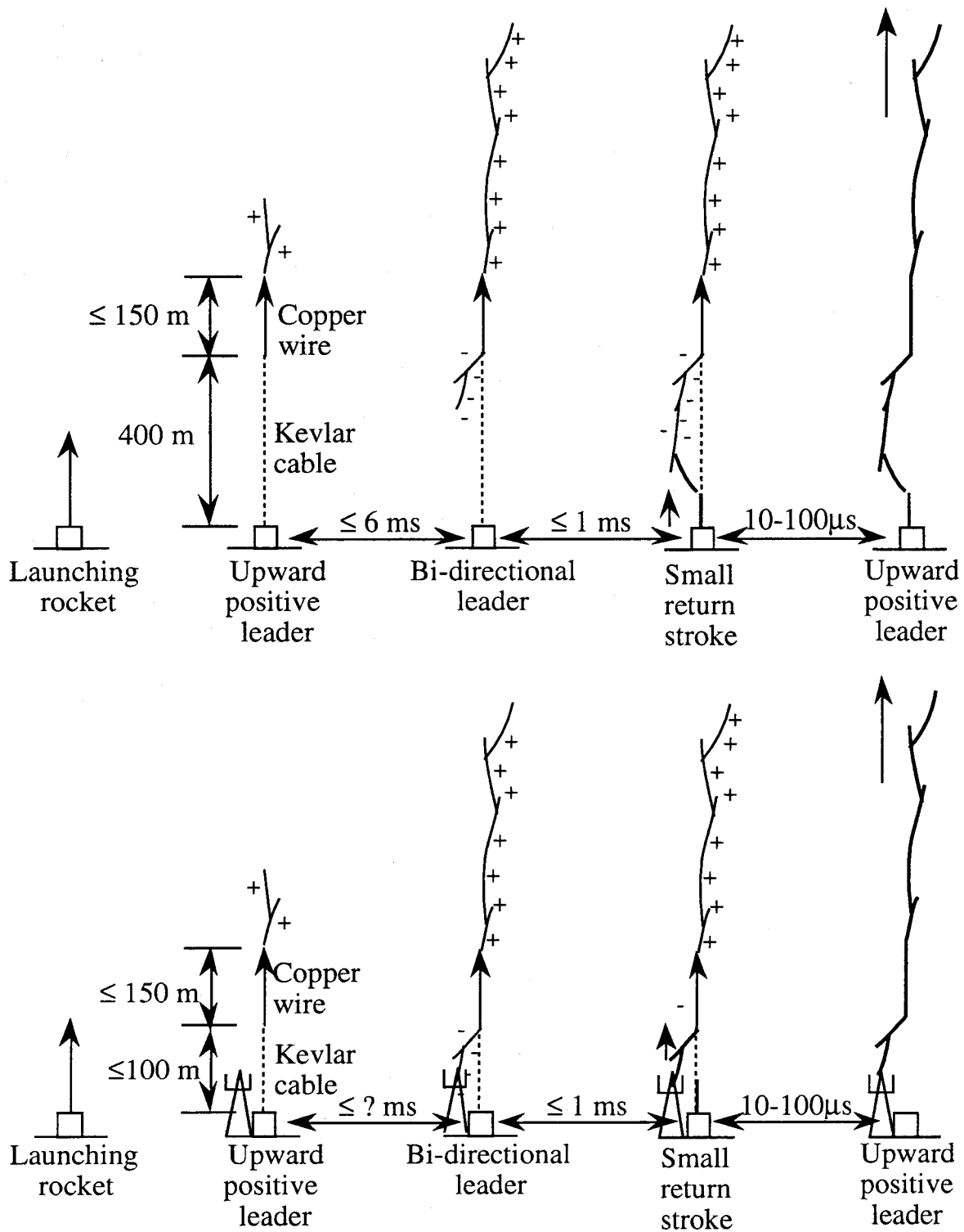


図4. 16 鉄塔誘雷の誘雷過程の模式図（上段が欧米の場合、下段は日本での場合）

図4. 17にこの誘雷の開始部分の電界変化の拡大図を示す。図中数字が付記された縦棒は広帯域パルスの生起時刻である。同図よりこの誘雷が両極性パルスで開始し、そのパルスに先行して広帯域パルスが放射されていることがわかる。これらのパルスに対して2次元での標定を行った結果を図4. 18に示す。同図からわかるように、これら1から6までの番号のパルスは鉄塔付近から放射されている。正極性リーダは負極性リーダに比べて、VHF放射強度は弱いのでこれらのパルスはワイヤー下端から鉄塔に向けて持続進展している負極性リーダから放射されていると考えられる。また、日本のロケット誘雷の場合、誘雷高度は約100メートルで欧米での400メートルに比べ極めて低い。即ち、鉄塔付近に標定されている本解析結果は実験事実とよく合致している。また、このことから電界変化に記録されている両極性パルスは負極性リーダが鉄塔へ雷撃したときのsmall return strokeにより放射されていると考えられる。

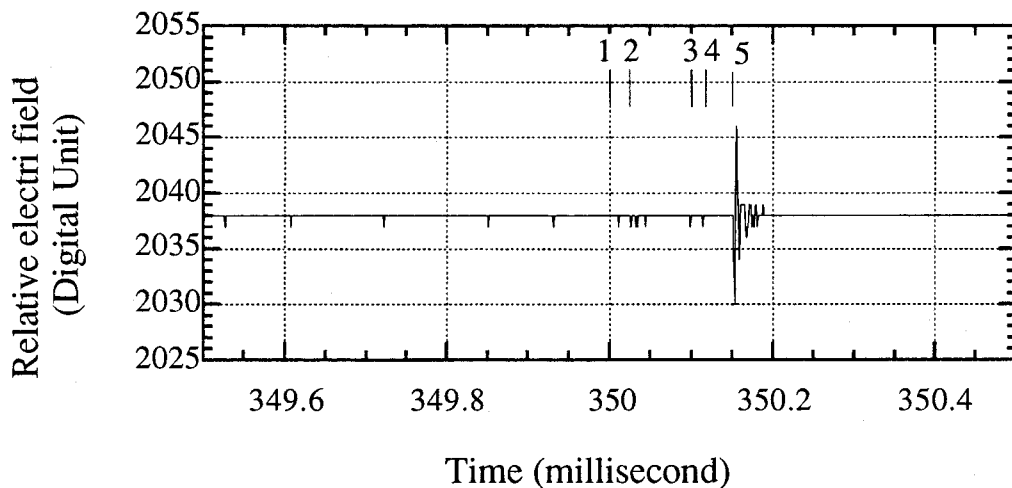


図4. 17 鉄塔誘雷の放電開始部分の拡大図

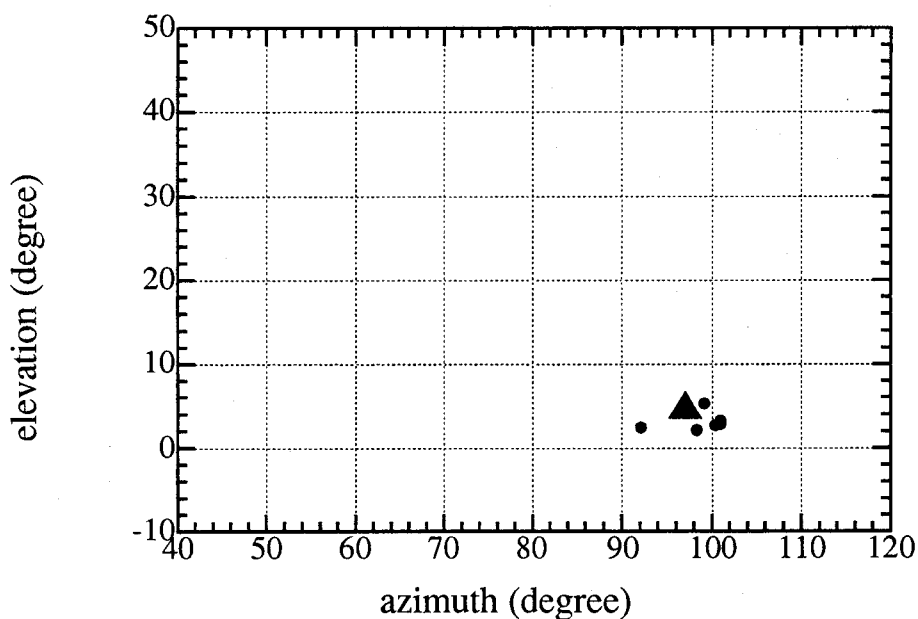


図4. 18 広帯域パルスの2次元標定結果 (パルス番号1から6まで)

最初の両極性パルスの後、約4.6ミリ秒はVHF放射は記録されていない。この間は正極性リーダが雲へ向けて進展している過程に相当すると考えられ、電界変化の正方向への振れは正極性のリーダが上昇進展しているときの振れの方向と一致している。(図4. 19参照)その後3.98ミリ秒付近で、図4. 19からわかるようにVHFパルスが短い時間間隔で記録されている。図4. 20にこれらのVHFパルスの電波放射源の標定結果を示す。この図に示されようにこれらのパルスの放射源は誘雷鉄塔から約30度、距離に換算して約2キロメートル離れた地点で数度以内の領域に標定されている。このことから、正極性リーダの進展速度が $4.4 \times 10^4 \text{ m/s}$ と算出される。この値はアメリカのロケット誘雷で光により観測された $3.6 \times 10^5 \text{ m/s}$ <sup>(30)</sup>に比べて一桁ほど遅いが、本標定は2次元であるため、実際の速度は評価値より若干速くなると思われる。これらのパルスの起源については、この集中的な放射の後130マイクロ秒後に帰還雷撃に相当すると思われる早い変化が記録されているため、これらのパルスはダートリーダの形成に伴う負極性の絶縁破壊過程または雲内の負電荷領域を進展する正極性リーダからの放射であると考えられる。また、パルスの時間間隔の平均値は77マイクロ秒となっている。そのヒストグラムを図4. 21に示す。

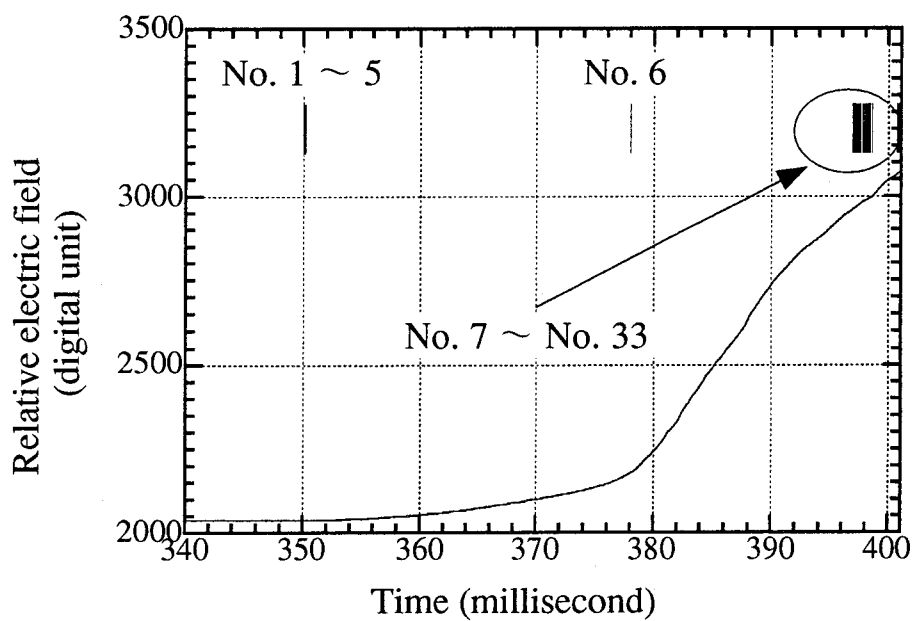


図4. 19 鉄塔誘雷の電界変化の前半部

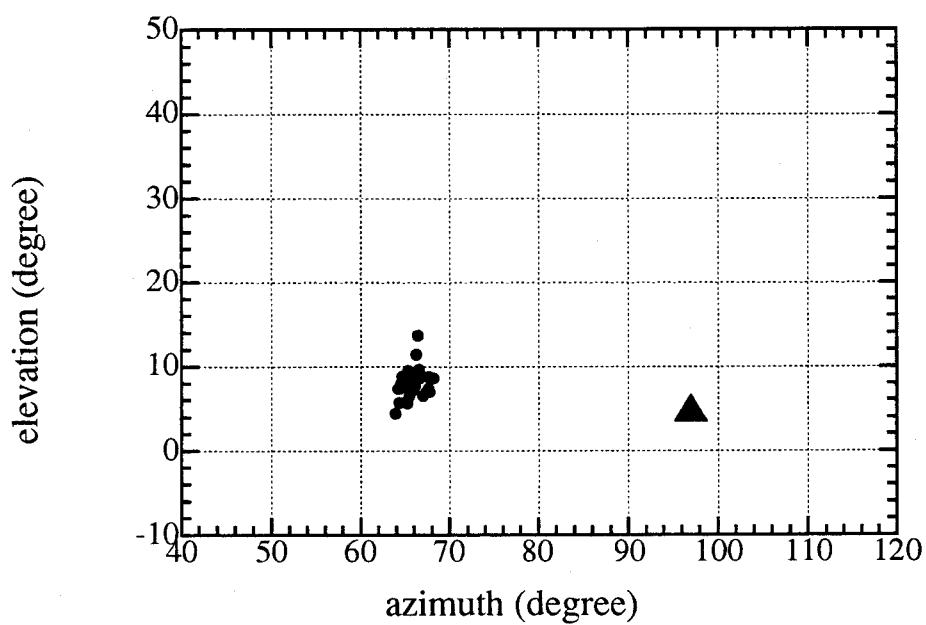


図4. 20 広帯域パルスの2次元標定結果 (パルス番号7から33まで)



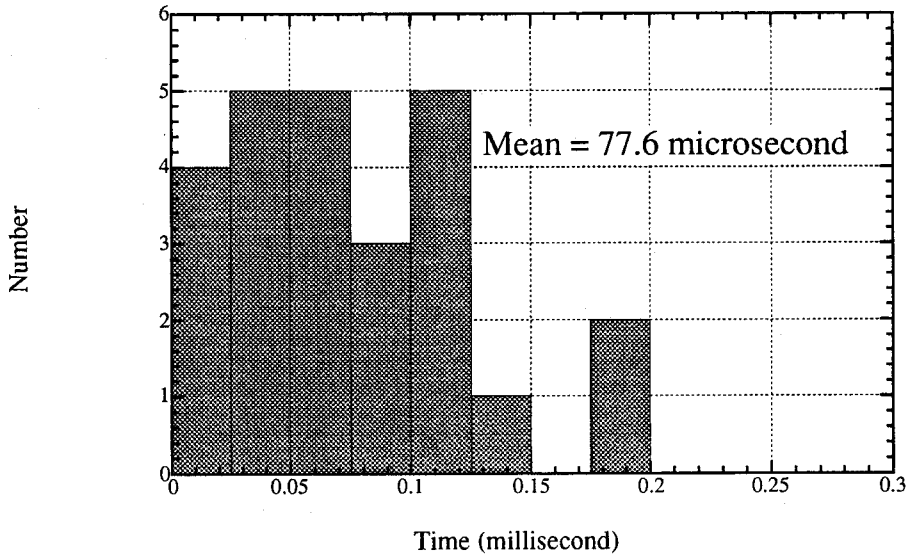


図4. 21 ダートリーダ形成に伴って放射される広帯域パルスの時間間隔のヒストグラム

第一後続雷撃に先行して放射されているパルスバーストの後の電界変化を図4. 22に示す。同図からわかるように電界変化の速い変化に対応して幾つかの広帯域信号が記録されている。これらの拡大図を図4. 23 (a), (b), (c)に示す。さらにこれらのパルスの二次元標定結果を図4. 24に示す。電界変化の速い変化に同期してパルス34および38が放射されている。そして、これらのパルス放射源は鉄塔付近に標定されている。このことはこのR1, R3と記した変化が帰還雷撃によるものであることを示している。この変化の波形が典型的な夏季の負極性落雷にみられる波形と異なる様相を示すのは放電路の折れ曲がり等のためと考えられる。R1に先行して約130マイクロ秒前にダートリーダによると思われるパルス放射列の33番目のパルスが放射されている。この間にダートリーダが鉄塔へ向けて進展しているとすると、その速度は $1.5 \times 10^7 \text{ m/s}$ となり、この値はニューメキシコでのロケット誘雷実験の際評価された平均 $2.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ <sup>(31)</sup>に極めて類似している。ダートリーダ過程はVHF帯電磁放射が強いとの報告がある<sup>(2),(32),(33),(34),(35)</sup>が、本観測では記録されていない。これはシステムのトリガしきい値が高く設定されていたためと考えられる。今後、VHF, UHF帯の狭帯域観測を併用していく必要がある。R1の変化の後、広帯域パルス35および36が放射され、その位置はダート

リーダの開始点付近である。これは、帰還雷撃が上空の負電荷層へ到達しその後正極性のストリーマが負電荷層内を持続進展していく正極性の絶縁破壊過程<sup>(10),(36),(37)</sup>と考えられる。この傾向はR3の変化におけるパルス39の標定についても見られる。R2およびパルス37についてはその標定点は鉄塔付近ではないため、このパルスは雲内の放電活動に起因しているものと考えられる。以上パルス39までの標定結果とその解釈について述べてきた。残りのパルスについても同様な標定結果が示されており、その結果には新規性が認められないので割愛することとする。

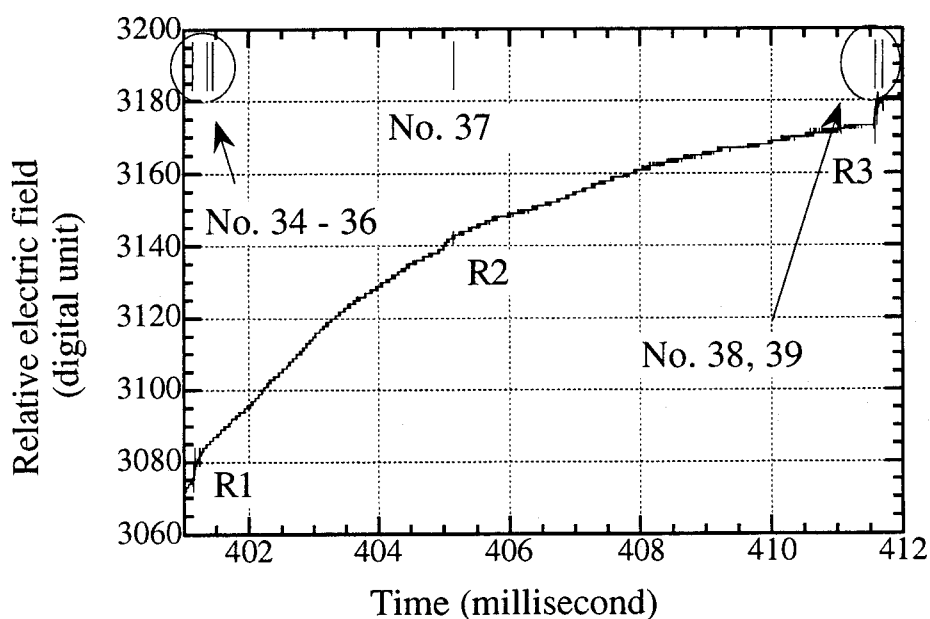
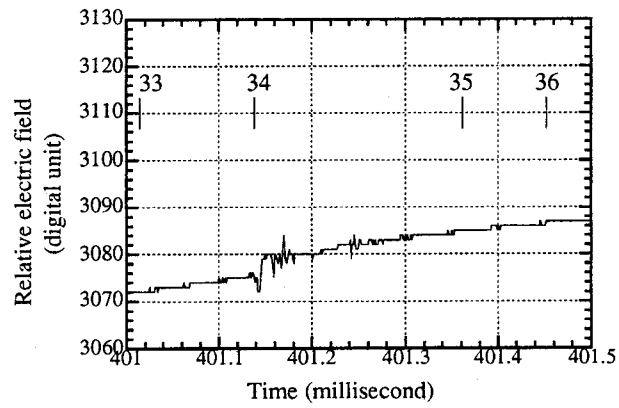
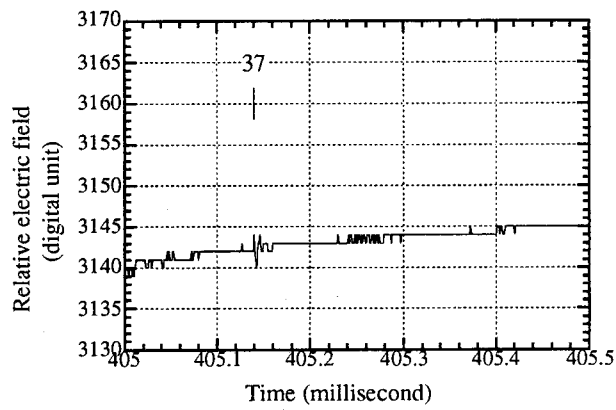


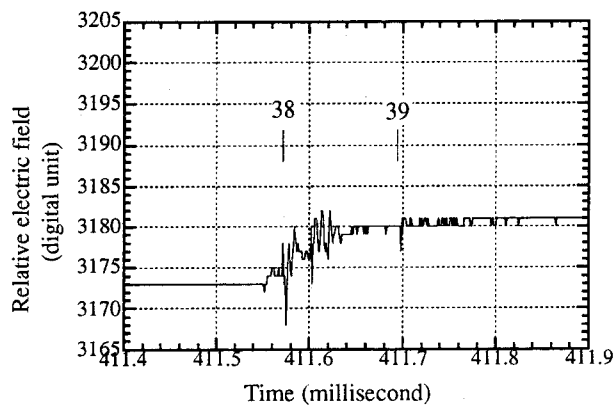
図4. 22 鉄塔誘雷に伴う電界変化（後続雷撃部分の拡大図）



(a) 図4.22でのR1付近の拡大図



(b) R2付近の拡大図



(c) R3付近の拡大図

図4.23 鉄塔誘雷の電界変化の拡大図

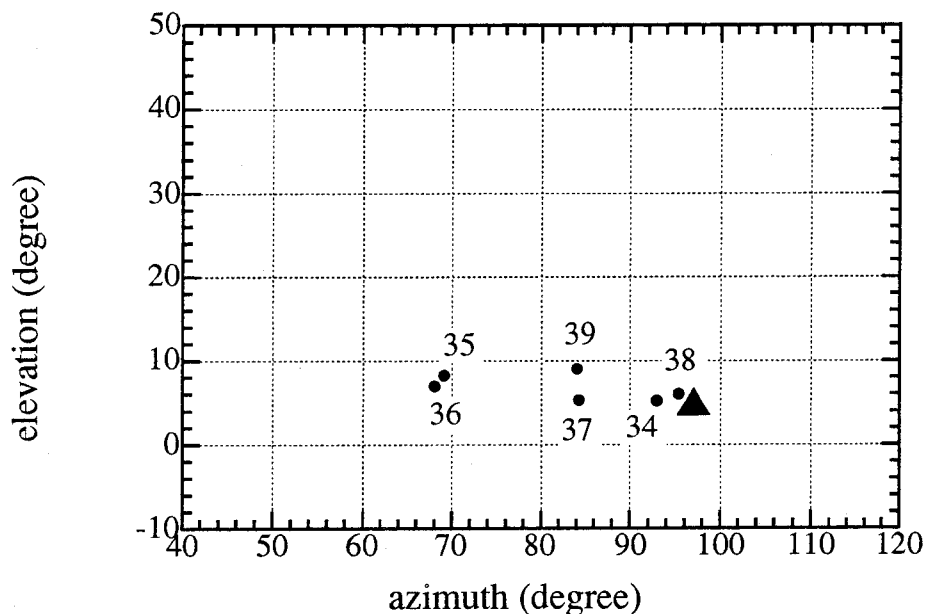


図4. 24 図4. 22での広帯域パルスの2次元標定結果

#### 4. 4 結論

本章では、広帯域干渉計を製作、1996年度のロケット誘雷実験において観測を行った。その結果以下の事項の結論が得られた。

- (1) 製作した広帯域干渉計が数度以内の精度で動作していることを確認した。
- (2) 観測した範囲内において、負極性上向きリーダから放射される広帯域パルスの時間間隔は平均22マイクロ秒で、その進展速度は $6 \times 10^5 \text{ m/s}$ であることを示した。
- (3) 正極性ロケット誘雷には帰還雷撃に相当する速い変化は存在しないことを確認した。
- (4) 負極性ロケット誘雷の放電開始部の両極性パルスに先行する広帯域パルスはワイヤー下端から鉄塔へ向けて進展する負極性リーダにより放射され、両極性パルスは負極性リーダの鉄塔へのコネクティング過程により放射されることが明らかとなった。
- (5) 製作した広帯域干渉計はパルスバーストと単発パルスの両方のタイプのパルスに対して標定が可能であることを示した。
- (6) 負極性ロケット誘雷の観測から、解析事例の範囲内において正極性上向きリーダの速度が $4 \times 10^4 \text{ m/s}$ であることを示した。
- (7) 観測した範囲内において、負極性ロケット誘雷の観測から下向きダートリーダに先行する広帯域パルス放射の時間間隔が平均78マイクロ秒で、ダートリーダの速度が $1.5 \times 10^4 \text{ m/s}$ であることを示した。

参考文献

- (1) Proctor, D. E., A hyperbolic system for obtaining VHF radio pictures of lightning, *J. Geophys. Res.*, 76, 1478-1489, 1971
- (2) Rustan, P. L., M. A. Uman, D. G. Childers, W. H. Beasley, and C. L. Lennon, Lightning source locations from VHF radiation data for a flash at Kennedy Space Center, *J. Geophys. Res.*, 85, 4893-4903, 1980
- (3) Taylor, W. L., A VHF technique for space-time mapping of lightning discharge process, *J. Geophys. Res.*, 83, 3575-3583, 1978
- (4) Warwick, J. W., C. O. Hayenga, and J. W. Brosnahan, Interferometric directions of lightning sources at 34 MHz, *J. Geophys. Res.*, 84, 2457-2468, 1979
- (5) Hayenga, C. O., and J. W. Warwick, Two-dimensional interferometric positions of VHF lightning sources, *J. Geophys. Res.*, 86, 7451-7462, 1981
- (6) Richard, P., and G. Auffray, VHF-UHF interferometric measurement applications of lightning discharge mapping, *Radio Sci.*, 20, 171-192, 1985
- (7) Rhodes, C. T., and P. R. Krehbiel, Interferometric observations of a single stroke cloud-to-ground flash, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 1169-1172, 1989
- (8) Wada, M., Z-I. Kawasaki, K. Matsu-ura, T. Matsui, T. Musashiya, K. Yamamoto, UHF interferometer system and observation of lightning discharge : Part 1 -Performance of interferometer system- (in Japanese), *T. IEE Japan*, 116-B, 322-331, 1996
- (9) Proctor, D. E., VHF radio pictures of cloud flashes, *J. Geophys. Res.*, 86, 4041-4071, 1981
- (10) Rhodes, C. T., X. M. Shao, P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and C. O. Hayenga, Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, 99, 13059-13082, 1994
- (11) Mazur, V., E. R. Williams, R. Boldi, L. Maier, and D. E. Proctor, Comparison of lightning mapping with operational time-of-arrival and interferometric systems, *Proc. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Williamsburg, U. S. A., 1995
- (12) Shao, X. M., D. N. Holden and C. T. Rhodes, Broad band radio interferometry for lightning observations, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1917-1920, 1996
- (13) Kawasaki, Z.-I., J.-M. Li, K. Matsuura, M. Kawasaki, and O. Sugimoto, Localization of partial discharges using time difference of arrival of radiation fields, *Proc. 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Tokyo, Japan, 1991
- (14) Kawasaki, Z.-I., T. Kanao, K. Matsuura, M. Nakano, K. Horii, and K. Nakamura, The electric

- field changes and UHF radiation caused by the triggered lightning in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1711-1714, 1991
- (15) Willet, J. C., Rocket-Triggered-Lightning experiments in Florida, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, 12, 37-45, 1992
- (16) Kawasaki, Z-I., and V. Mazur, Common physical processes in natural and triggered lightning in winter storms in Japan, *J. Geophys. Res.*, 97, 12935-12945, 1992
- (17) Liu, X., C. Wang, Y. Zhang, Q. Xiao, D. Wang, Z. Zhou, and C. Guo, Experiments of artificially triggering lightning in China, *J. Geophys. Res.*, 99, 10727-10731, 1994
- (18) Krider, E. P., C. D. Weidman, and R. C. Noggle, The electric fields produced by lightning stepped leaders, *J. Geophys. Res.*, 82, 951-959, 1977
- (19) Orville, R. E., and V. P. Idone, Lightning leader characteristics in the thunderstorm research international program (TRIP), *J. Geophys. Res.*, 87, 11177-11192, 1982
- (20) Thomson, E. M., M. A. Uman, and W. H. Beasley, Speed and current for lightning stepped leaders near ground as determined from electric field records, *J. Geophys. Res.*, 90, 8136-8142, 1985
- (21) Laroche, P., A. Eybert-Berard, L. Barret, and J.P. Berlandis, Observations of preliminary discharges initiating flashes triggered by the rocket and wire technique, *Proc. 8th International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, 1988
- (22) Laroche, P., A. Bondiou, A. Eybert-Berard, L. Barret, J. P. Berlandis, G. Terrier, and W. Jafferis, Lightning flashes triggered in altitude by the rocket and wire technique, *Proc. 1989 International Conference on Lightning and Static Electricity*, Bath, UK, 1989
- (23) Le Vine, D. M., J. C. Willet, and J. C. Bailey, Comparison of fast electric field changes from subsequent return strokes of natural and triggered lightning, *J. Geophys. Res.*, 94, 13259-13265, 1989
- (24) Willet, J. C., J. C. Bailey, V. P. Idone, A. Eybert-Berard, and L. Barret, Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission line model, *J. Geophys. Res.*, 94, 13275-13286, 1989
- (25) Mazur, V., A physical model of lightning initiation on aircraft in thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 94, 3326-3340, 1989
- (26) Laroche, P., V. Idone, A. Eybert-Berard, and L. Barret, Observations of bi-directional leader development in triggered lightning flash, *Proc. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Cocoa Beach, FL, 1991

- (27) Lalande, L., A. Bondiou-Clergerie, P. Laroche, A. Eybert-Berard, J.-P. Berlandis, B. Bador, A. Bonamy, M. A. Uman, and V. A. Rakov, Connection to ground of an artificially triggered negative downward stepped leader, *Proc. 10th International Conference on Atmospheric Electricity*, Osaka, Japan, 1996
- (28) Rakov, V. A., M. A. Uman, R. Thottappillil, A. Eybert-Berard, J. P. Berlandis, P. Lalande, A. Bonamy, P. Laroche, A. Bondiou-Clergerie, R. J. Fisher, and G. H. Schnetzer, New insights into lightning process gained from triggered-lightning experiments in Florida and Alabama, *Proc. 10th International Conference on Atmospheric Electricity*, Osaka, Japan, 1996
- (29) Uman, M. A., V. A. Rakov, K. J. Rambo, T. W. Vaught, M. I. Fernandez, J. A. Bach, Y. Su, A. Eybert-Berard, J. P. Berlandis, B. Bador, P. Lalande, A. Bonamy, F. Audran, F. Morillon, P. Laroche, A. Bondiou-Clergerie, S. Chauzy, S. Soula, C. D. Weidman, F. Rachidi, M. Rubinstein, C. A. Nucci, S. Guerrieri, H. K. Hoidalen, V. Cooray, 1995 Triggered lightning experiment in Florida, *Proc. 10th International Conference on Atmospheric Electricity*, Osaka, Japan, 1996
- (30) Idone, V. P., The luminous development of Florida triggered lightning, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, 12, 23-28, 1992
- (31) Idone, V. P., R. E. Orville, P. Hubert, L. Barret, and A. Eybert-Berard, Correlated observations of three triggered lightning flashes, *J. Geophys. Res.*, 89, 1385-1394, 1984
- (32) Takagi, M., VHF radiation from ground discharges. In "Planetary Electrodynamics", 543-570, *Gordon and Breach*, New York, 1969
- (33) Takagi, M., VHF radiation from ground discharges, *Proc. Res. Inst. Atmos.*, Nagoya Univ., Japan, 16, 163-168, 1969
- (34) Le Vine, D. M., and E. P. Krider, The temporal structure of HF and VHF radiations during Florida lightning return strokes, *Geophys. Res. Lett.*, 4, 13-16, 1977
- (35) Rust, W. D., P. R. Krehbiel, and A. Shlanta, Measurements of radiation from lightning at 2200 MHz, *Geophys. Res. Lett.*, 6, 85-88, 1979
- (36) Proctor, D. E., R. Uytendogaardt, and B. M. Meredith, VHF radio pictures of lightning flashes to ground, *J. Geophys. Res.*, 93, 12683-12727, 1988
- (37) Shao, X. M., P. R. Krehbiel, R. J. Thomas, and W. Rison, Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, *J. Geophys. Res.*, 100, 2749-2783, 1995

## 第五章

# 中国高原雷の広帯域干渉計による観測

### 5. 1 緒言

前章で広帯域干渉計を試作し，場所，時間の特定が可能なロケット誘雷の観測を行った。そして，その有効性が示されたが，取得パルス数が50に過ぎなかったため放電の全過程を捉えることは出来なかった。そこで，取得パルス数を最大2000個に増したシステムを構築し，中国高原地帯で自然雷の観測を行った。本章ではその結果について述べる。

地球上で生起する落雷の内，負極性落雷は90%以上を占める<sup>(1)</sup>。この割合は季節や地域によって変動し，例えば日本の北陸地方の冬季雷のように正極性落雷の比率が高いケースがある<sup>(2)</sup>。一般的に正極性落雷の占める割合は夏季に少なく，冬季に増加する傾向がある<sup>(3)</sup>が，中国内陸部の蘭州付近の高原地帯では，夏季雷であるにも関わらず正極性落雷の発生率が高い<sup>(4)</sup>。それに加えて，同地区でのロケット誘雷実験において「雷撃電流値が数十アンペア」，「中和電荷量が数クーロン」，「正極性誘雷のみ成功」など，一見して特異と考えられる結果が多い<sup>(5)</sup>。これらの特徴は同地区の雷雲の構造の特異性によると考えられている<sup>(6)</sup>が，同地区での雷観測例は少なく，正極性落雷の生成要因，雷雲の電氣的構造など未解明な部分が多い。さらに，同地域は北陸地方とは対照的に，数百kmにわたり平坦で，建造物も少ないために，地形による影響は少なく，夏であるため降雪による影響もない。中国内陸部で人工密度も低いことから放送波が少なく，広帯域電磁波観測に都合が良い。以上のような観測条件のもとで雷観測を実施し，これまで未解明な部分の多い正極性落雷の性状解明を進めることが出来れば日本の冬季雷における雷害防止に役立てることができると思われる。そこで，筆者はグループの共同研究者らと1996年度，1997年度の2年にわたり中国内陸部において雷観測を行った。1996年度は，電界変化の多地点観測



を実施し<sup>(7)</sup>、100例あまりのデータが取得されたが観測地点付近の雷放電例が少なく成果は得られなかった。1997年度においては広帯域干渉計による観測を実施し、数例のデータを取得したが、正極性落雷に伴うデータは得られなかった<sup>(8)</sup>。上述のような実験目的に合致するようなデータは得られなかったが、雲放電に伴うデータが得られ、その進展様相が3例ではあるが明らかとなった。雲放電の放電路再現に関する報告は数例存在する<sup>(9),(10),(11)</sup>が、広帯域干渉計による観測例はなく、雷雲の構造が異なる高原雷を対象としたVHF/UHF帯の観測例もない。そこで、本章においては1997年度の観測で得られた雲放電の事例解析を行うこととする。

### 5.2 観測概要

観測は1997年7月3日から8月10日までの約一ヶ月間、中国甘粛省（Gansu）の省都である蘭州（Lanzhou）付近の平涼（Pingliang）において行われた（図5.1参照）。同地区の海拔は約1700メートルで高原地帯である。また、中国科学院高原大気物理研究所のレーダサイトがあり、気象レーダおよび2重偏波レーダそしてLLPによる観測が同時に行われた。取得されたデータのまとめを表5.1に示す。全部で5日間のデータが取得され、7月8日、9日は観測地点から遠距離（約10km）で雷放電が観測された。26日、27日の両日は比較的近距离で雷放電が観測された。取得できたデータの総数は全部で79で、この表からわかるように負極性の落雷が取得データの33%を占め、雲放電が55%を占めている。本実験では正極性落雷によると思われるデータは記録されていないが、全観測期間中での雷雨日数が少ないためこの一年間でのデータのみから以前の報告の是非は議論できない。本章において対象とした雲放電は7月27日15時37分30秒、15時41分40秒、17時5分5秒の3例である。なお、時刻は全て北京時間を用いており、一時間を加えれば日本時間となる。図5.2に7月27日に記録された放電数の時間変化を示す。放電は14時30分頃から始まり、17時5分頃終わっており、その継続時間は約2時間30分である。そして、その数は時間が進むに従って増加し、15時15分頃ピークに達した後単調に減少していつている。これは雷雲が発生してから成熟期を迎え、そして消滅していく過程によく対応しており、また、継続時間が2時間以上のため、マルチセル型の大きな雷嵐であった可能性がある。このグラフから判断すると解析対象とした雲放電は成熟期のものが二つと消滅期のものが一つということになる。

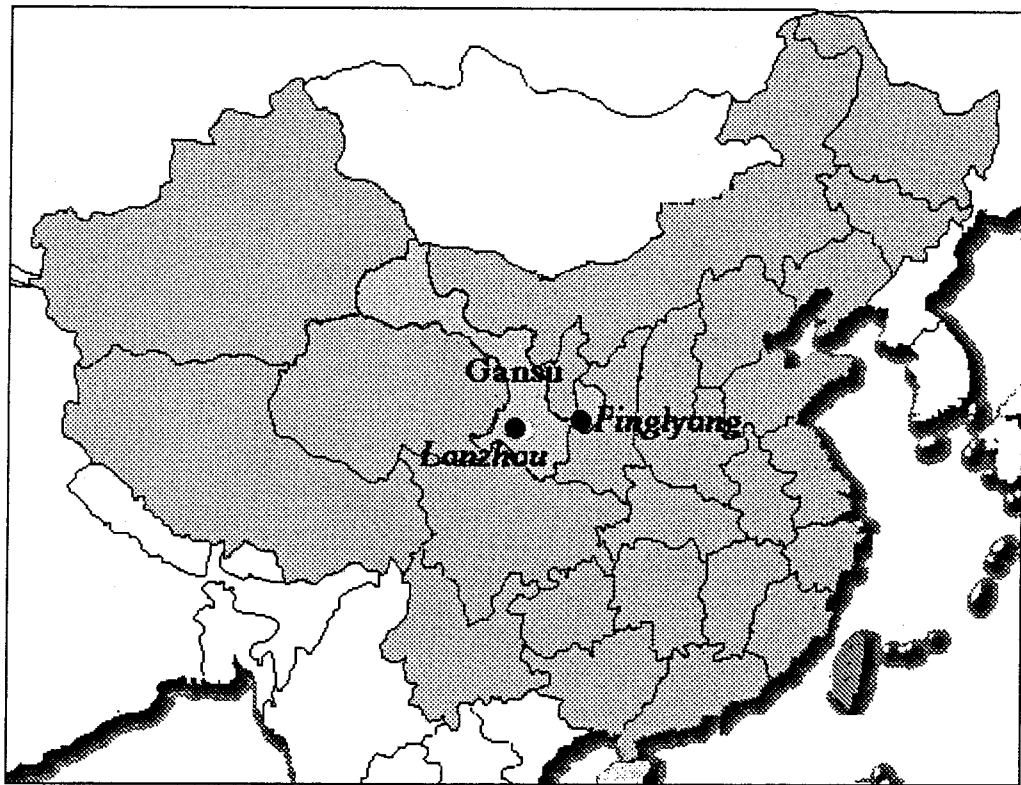


図 5. 1 観測地点図

表 1 取得データまとめ

|       | 負極性落雷 | 正極性落雷 | 雲放電 | 不明 | ロケット誘雷 | 計  |
|-------|-------|-------|-----|----|--------|----|
| 7月8日  | 0     | 0     | 8   | 2  | 0      | 10 |
| 7月9日  | 0     | 0     | 2   | 2  | 0      | 4  |
| 7月26日 | 0     | 0     | 7   | 0  | 1      | 8  |
| 7月27日 | 26    | 0     | 26  | 4  | 0      | 56 |
| 7月29日 | 0     | 0     | 1   | 0  | 0      | 1  |
| 計     | 26    | 0     | 44  | 8  | 1      | 79 |

観測機器の仕様は第四章と基本的に同一である。取得セグメント数は本実験では最大 2000 個に変更された。また、電界観測装置は時定数 10 秒のスローアンテナと時定数 6 ミリ秒のファーストアンテナの両方に切り換えられるようになっており、これは電荷をもった激しい降水がアンテナセンサーに接触し波形が飽和するのを防ぐためである。15 時 37 分 30 秒、15 時 41 分 40 秒のものはファーストアンテナ、17 時 5 分 5 秒のものはスローアンテナにより記録された。広帯域干渉計のアンテナベースライン長は 10 メートルである。よって、フリッジ選択の必要のない周波数の上限は約 15 メガヘルツとなる

(4章参照)<sup>(12)</sup>。解析手法は4章と同一である。

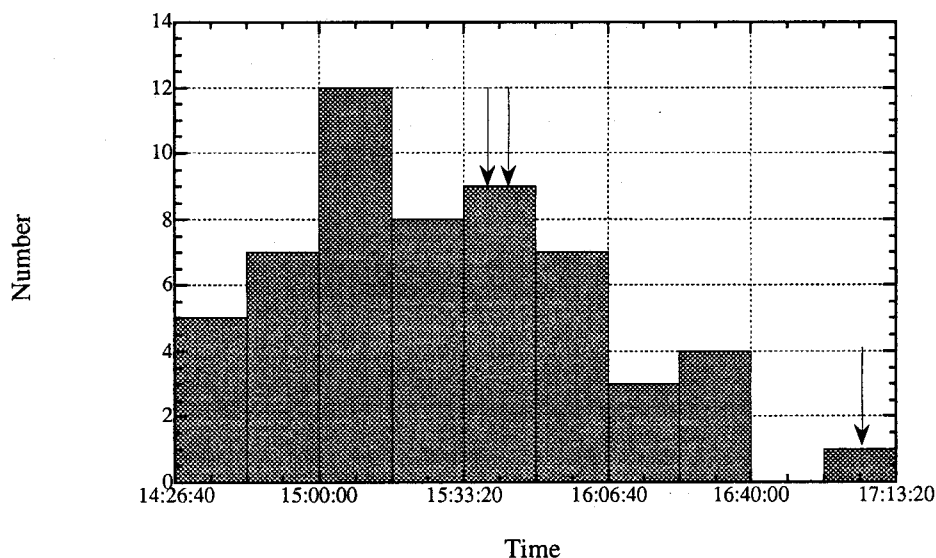


図5.2 7月27日に記録された放電数の時間変化

### 5.3 観測結果

#### 5.3.1 雲放電解析例1

図5.3に7月27日15時37分30秒に記録されたファーストアンテナによる記録の全体図を示す。広帯域パルスの生起時刻も図中縦棒により示されている。この放電は約450ミリ秒間継続し、その間電界変化に対応して広帯域パルスの放射が行われていることがわかる。全体の電界変化の方向はファーストアンテナによる記録のためわかりにくいですが、負方向への変化が支配的と思われる。この変化の方向は上空の正電荷の消滅に伴う変化の方向と一致しており、観測地点から雷雲までの距離が雲放電に伴う電界変化の反転距離<sup>(1)</sup>以上であることを示唆している。放電の開始から約150ミリ秒間、この放電に伴う電界変化は負方向への比較的振幅の小さい緩やかな形状を示しており、その間広帯域パルスの放射が断続的に行われていることがわかる。この間は、北川らの分類<sup>(13)</sup>を適用するならば、Initial stageに対応していると思われる。その後、500ミリ秒から700ミリ秒付近において電界変化で負方向への大きな変化が記録されている。この期間中は広帯域パルスの放射頻度は前半に比べて、非常に高い。700ミリ秒以降、正方向への速い変化が幾つか記録されているが、これはK変化によるものであると考えられる。この段階はFinal stageと命名されている。

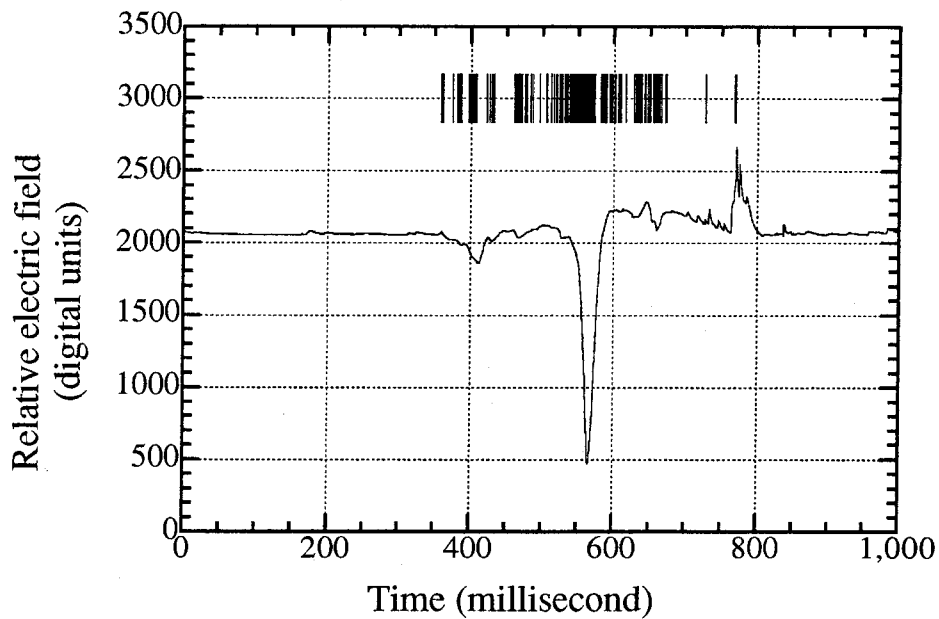


図5. 3 7月27日15時37分30秒に生起した雲放電のファーストアンテナによる記録の全体図

図5. 4に電磁波放射源の2次元標定結果を示す。この放電は最初の150ミリ秒において図中Sと記した付近から開始し、a1への進展の後、a2への進展と同時に垂直方向へ伸び、bへの水平進展へと繋がっている。上記のInitial stageはa1の進展に対応しており、a2、bおよびcでの進展は電界変化での大きな負方向への変化に対応している。a1、a2、cとbは一本の垂直方向への放電路で繋がっているが、これらはそれぞれ雷雲内の負電荷領域付近と上部正電荷領域に対応していると思われる。また、この二つの水平進展が一本の垂直放電路で繋がっているという雲放電の二層構造は狭帯域干渉計によるフロリダでの雲放電の観測結果<sup>(11)</sup>と良く一致している。

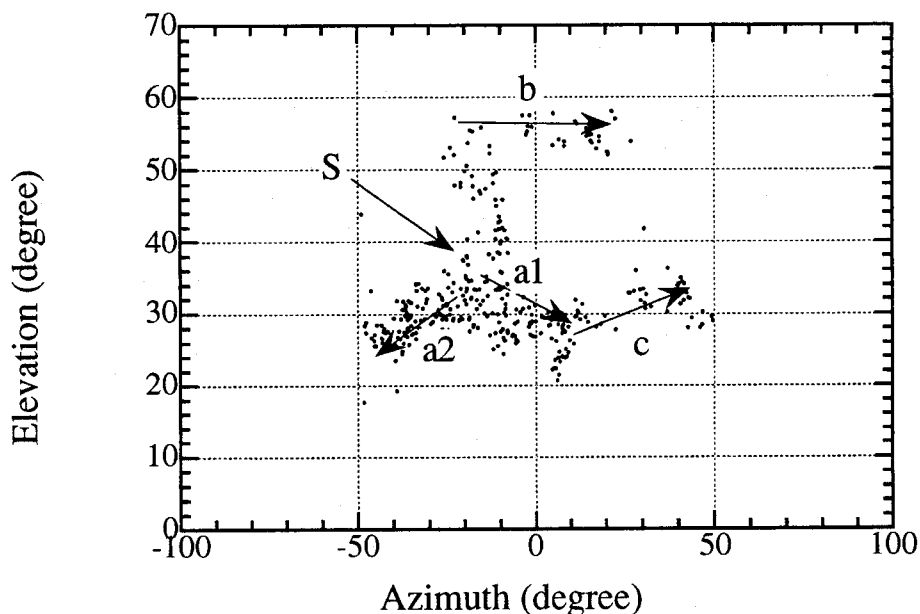


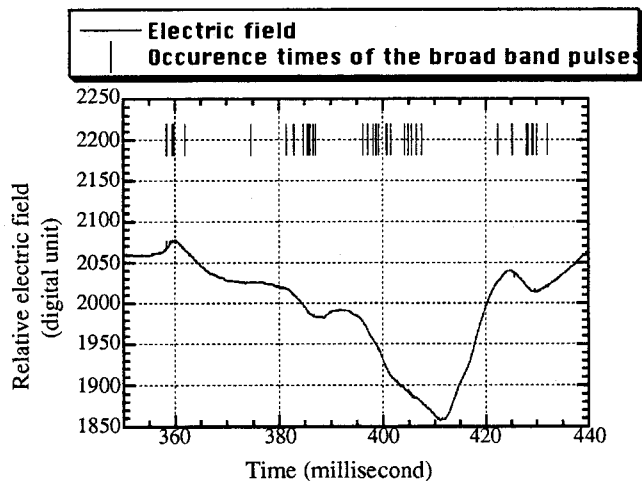
図5.4 電磁波放射源の2次元標定結果

放電の開始と思われる350ミリ秒付近から440ミリ秒までの電界変化図、および算出された方位、仰角の時間変化とその間の2次元の標定結果を図5.5(a), (b), (c)に示す。この放電は(c)でSと記した点から開始し、電界変化での正方向への振れとともに放電点は下方向へ移動している。これは雲内の負電荷が下方向へ運ばれるとしたときの变化と一致しており、この過程では負極性のリーダが下方向へ進展していると思われる。その後、380ミリ秒から410ミリ秒にかけて電磁波放射源は水平方向へ移動しており縦方向への顕著な動きは認められない。そして、これに伴う電界変化は負方向への変化へと転じている。410ミリ秒以後は正方向へと電界変化の極性は変わっているが、広帯域パルス放射に対応している部分では再び電界変化は負方向へと変化していることがわかる。

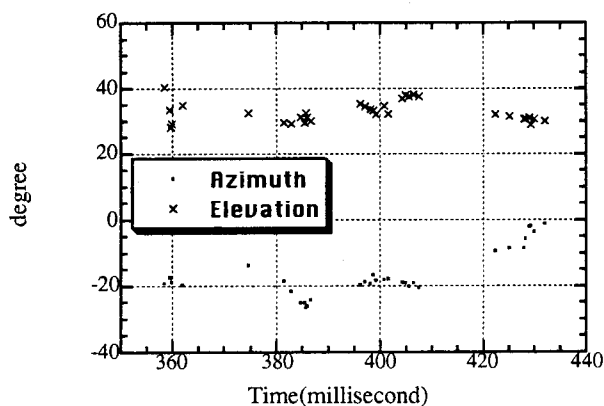
図5.6(a), (b), (c)に460ミリ秒から580ミリ秒までの電界変化図、および算出された方位、仰角の時間変化とその間の2次元の標定結果を示す。460ミリ秒付近から500ミリ秒付近までの間、比較的低い頻度で広帯域パルスが放射されていることがわかる。電界変化の記録ではゼロレベルである縦軸の2048付近で480ミリ秒までの間、振幅の小さい変化が記録されており、その後520ミリ秒付近まではこのスケ-

ルでは顕著な変化は認められない。500ミリ秒までの広帯域パルスの標定結果によればこの間は水平方向に放電が進行していると考えられ、放電開始点からは遠ざかる方向へ移動している。520ミリ秒以後、電界変化は大きく負方向へ振れ、それとともに広帯域電磁波パルスの放射頻度も高くなっている。この過程はActive stageに対応していると考えられる。この間の方位角、仰角の時間変化を見ると、電磁波放射源は二つの方向即ち垂直方向と水平方向へ同時に移動していることがわかる。これは雲内で放電路が枝分かれていると考えられるが、狭帯域干渉計ではこのような枝分かれは明瞭に再現するのは困難である。それに対して、この結果は広帯域干渉計においてはこのような同時進行している二つの放電の枝分かれをも再現できる可能性を示すものである。電界変化での負方向への大きな変化は負電荷が上方向に運ばれることを示しており、雷雲上部の正電荷領域での負極性リーダの進展様相を再現しているものと考えられる。

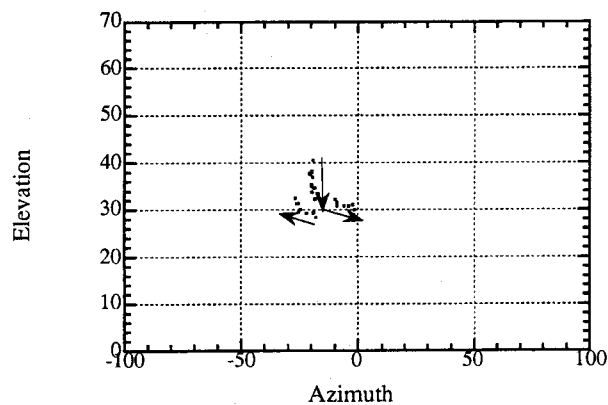
580ミリ秒以後の電界変化図、および算出された方位、仰角の時間変化とその間の2次元の標定結果を図5.7(a), (b), (c)に示す。この過程では再び水平方向の動きが顕著となる。620ミリ秒までは電磁波放射源は-30度から-50度まで水平に移動している。一方、その間の電界変化はその直前までの負方向への大きな変化から復元する正方向への変化をしめしている。これが時定数による変化か放電活動に伴って変化する電界を表しているのかは明らかではないが、その波形が指数関数に類似しており設定された時定数に近い時間で復元していることからこの間の放電活動は弱く、この変化の多くは時定数によるものと推測される。620ミリ秒以後はそれ以前とは反対方向即ち0度付近から50度付近へ水平に移動しており、それに伴う電界変化は正方向へのふれから650ミリ秒付近で負方向へと転じている。



(a) 電界変化

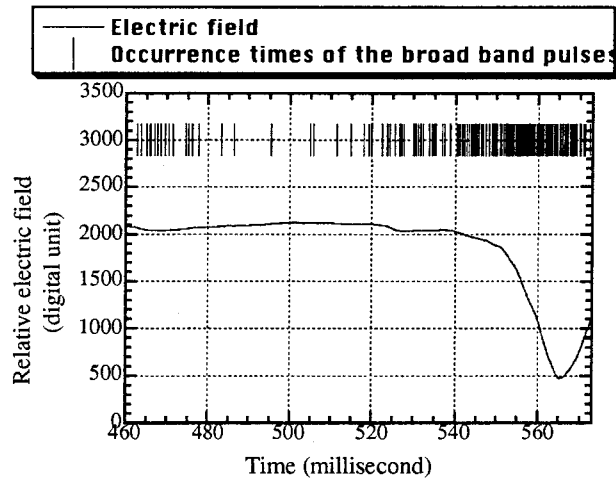


(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化

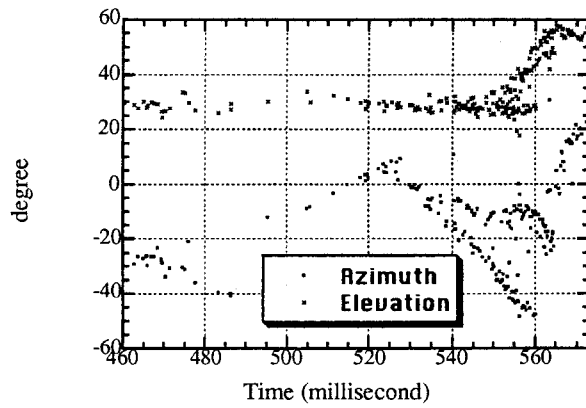


(c) 2次元の標定結果

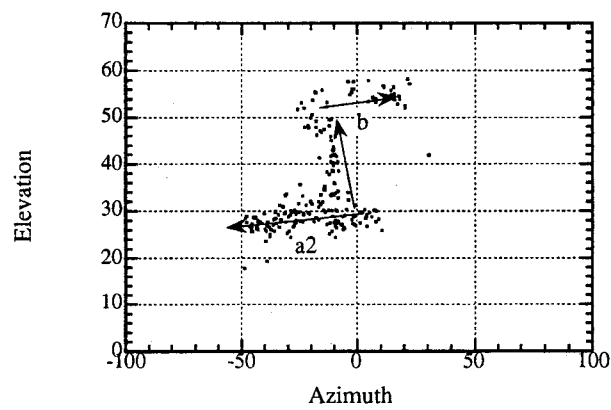
図5.5 350ミリ秒付近から440ミリ秒までの放電過程.



(a) 電界変化



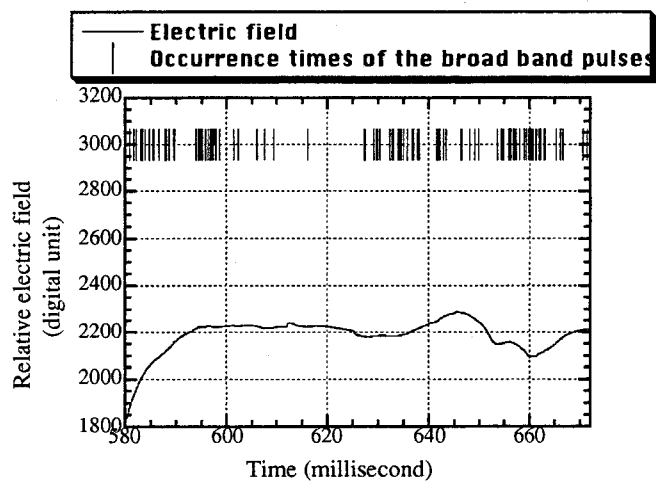
(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化



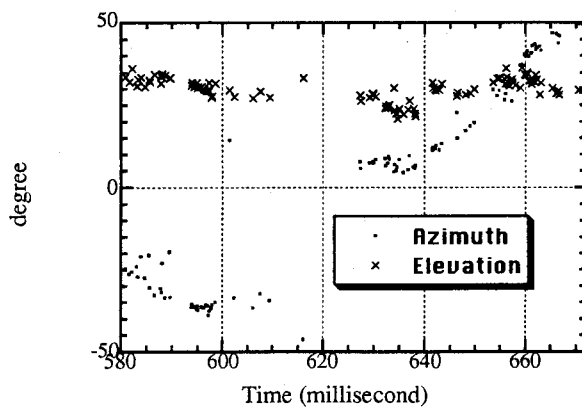
(c) 2次元の標定結果

図5. 6 460ミリ秒付近から573ミリ秒までの放電過程.

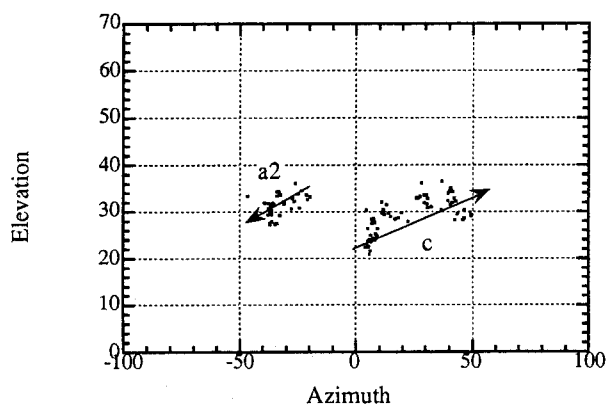




(a) 電界変化



(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化



(c) 2次元の標定結果

図5.7 580ミリ秒付近から672ミリ秒までの放電過程

## 5. 3. 2 雲放電解析例 2

図5. 8に7月27日15時41分40秒に記録された雲放電に伴う電界変化の全体図を示す。上述の雲放電から約4分後に記録されているが、放電に伴う電界変化は大きく650ミリ秒付近で波形が飽和している。これは放電に寄与した電荷量が先に議論した雲放電に比べて大きいことを示唆している。放電に先行する変化は概ねゼロレベルを示しており、放電の初期から終焉まで1秒間にわたり全容が記録されている。この放電は約600ミリ秒間継続し、全体として15時37分30秒の雲放電と同様に負方向への変化が支配的と思われる。従って、全体の電界変化の方向は負方向即ち、上空の正電荷が中和されたときに変化する方向と一致している。電界変化を詳細に見ると、緩やかな電界変化に重畳するパルス列の放射はこの例では見られない。これは負方向への大きな変化の間においても同様で、その後続くK変化と思われる部分において速いパルス状の変化が幾つか記録されている。

図5. 9にこの放電に伴って放射された広帯域パルスの放射源の標定結果を示す。前述の雲放電の標定結果と同様に、この雲放電は雷雲下部と思われる領域での水平方向への放電路とそこから雷雲上部へ伸びている放電路から構成されている。この雲放電は図中Sと記した地点より開始している。この地点は前述の雲放電の開始点に比べて約10度ほど低い位置になる。それに続いて、図中a1およびa2と記した方向に放電路は伸びる。ここまでは、電界変化での600ミリ秒付近までの過程に対応している。a2の方向へは同じ放電路上を3回繰り返して同じ方向に電磁波放射源は移動する。その後、雷雲上部の方向へ標定点は移動し、そして水平方向へ進展した後c2と記した方向へ伸びる。c2の過程は見かけ上は下方向への進展となるが、観測点から遠ざかる方向への放電の進展に伴うものと思われる。この過程において電界変化では負方向へ大きく変化しており、観測点からこの雲放電が生起している地点までの距離が反転距離以上と推測されるため、電磁波放射源が上空へ向けて上昇進展していく過程を合わせて考慮すると、この過程では負電荷が上方へ向けて運ばれているものと考えられる。

その後のK変化に伴う過程では、広帯域パルスの放射頻度は非常に少ない。一つのK変化に一つの広帯域パルスが放射されている。これは、システム上の問題が考えられる。本観測システムにおいては、パルス記録のためのデッドタイムは約70マイクロ秒で、K変化のような急速な電荷移動を伴う現象ではこのデッドタイムより現象が早く終了してしまうためと考えられる。この改良は今後の課題としたい。

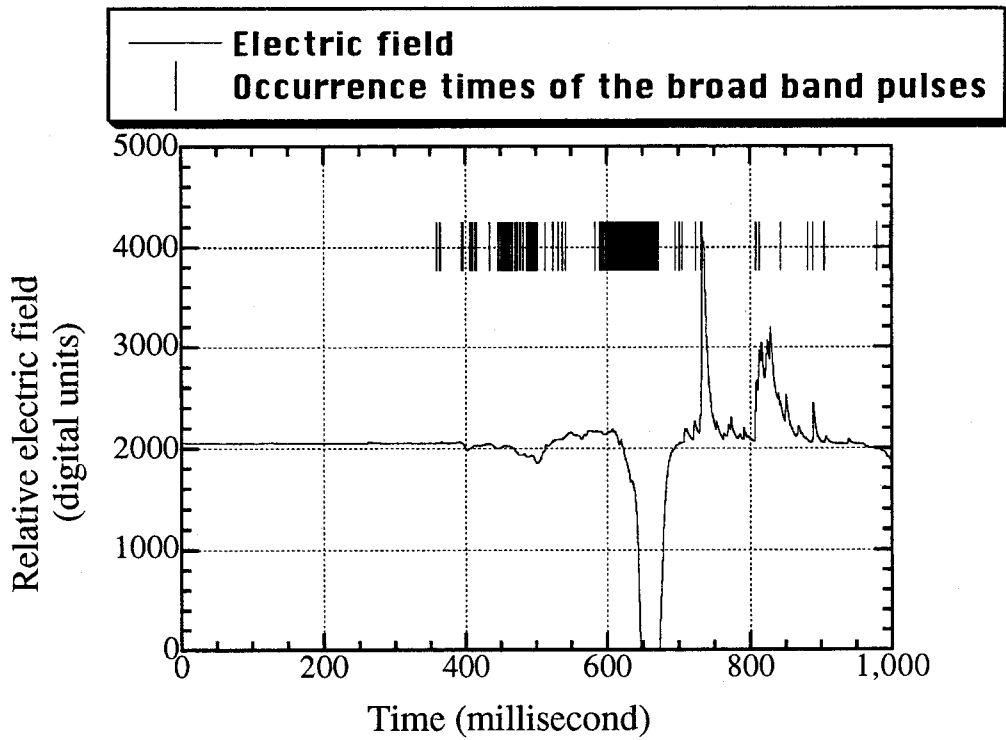


図5.8 7月27日15時41分40秒に記録された雲放電に伴う電界変化の全体図

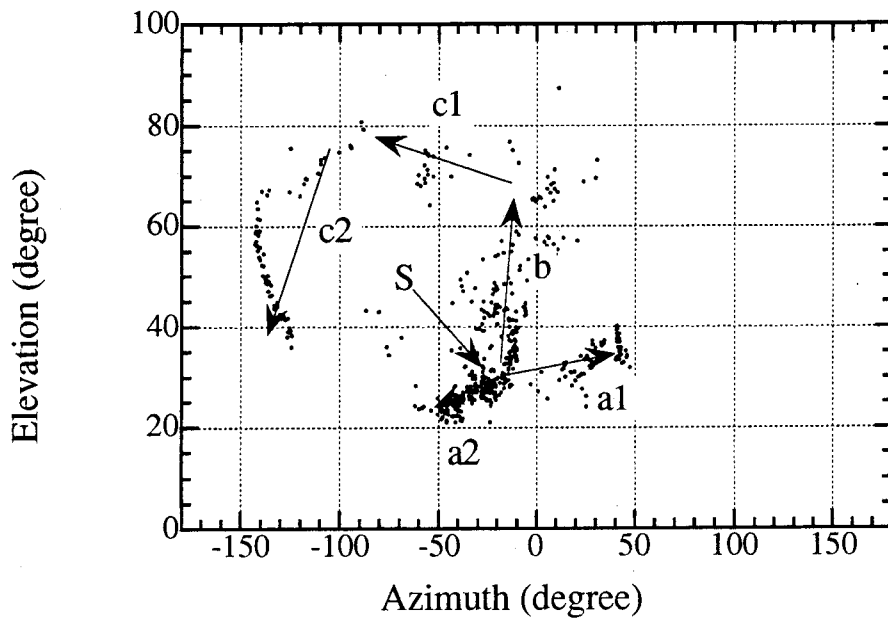
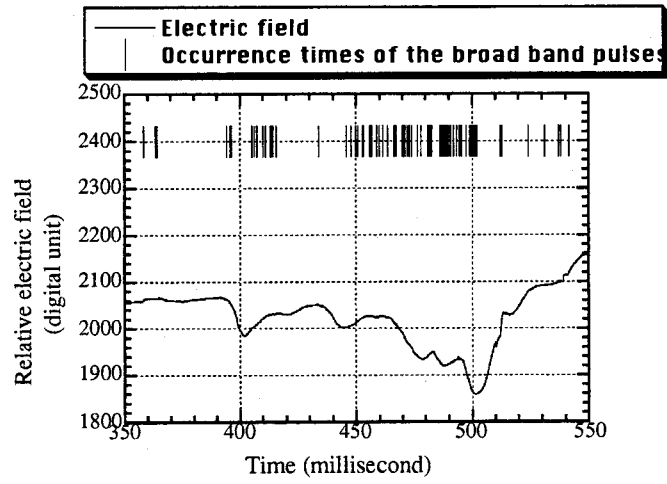


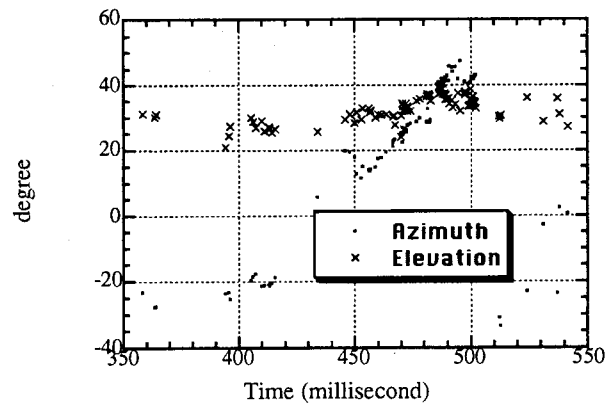
図5.9 広帯域パルスの放射源の標定結果

図5. 10 (a), (b), (c)に460ミリ秒から580ミリ秒までの電界変化図, および算出された方位, 仰角の時間変化とその間の2次元の標定結果を示す。この雲放電の開始点は方位角 $-25$ 度, 仰角 $30$ 度である。4分前の放電である前述の雲放電では, まず最初に下方向に放電が進んでいたのに対し, この雲放電では放電開始部分での縦方向の動きはない。その後, 放射源は全体的に水平方向に移動しているが, 詳細に見ると500ミリ秒前後に縦方向の動きが幾つかあり, その動きに対応して電界変化は負方向へ振れていることがわかる。

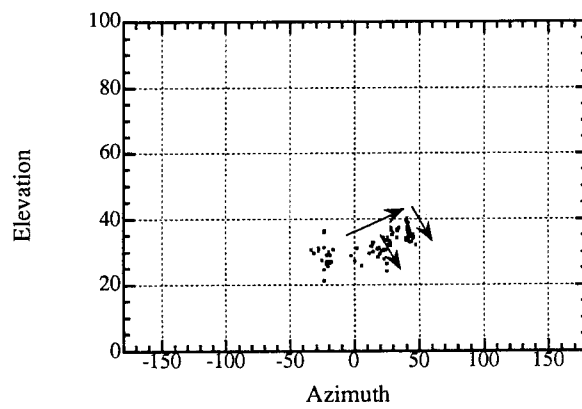
583ミリ秒から673ミリ秒までの電界変化, 広帯域パルスの放射源の方位角, 仰角の時間変化, 2次元標定結果を図5. 11 (a), (b), (c)に示す。電界変化の大きな負方向への変化とともに広帯域パルスが集中的に放射されていることがわかる。一方, その間の方位角, 仰角の対時間変化を見ると, この間幾つかの放電進展過程が同時に進行していることがわかる。620ミリ秒までの間は電界変化はその後続く変化に比べ大きくは変化していない。この間a2と記した方向に放射源は移動し, その間はこの放電過程のみが進行していることが(b)の図からわかる。その後, 620ミリ秒から640ミリ秒付近まで同様な経路を電磁波放射源が移動しているが, 630ミリ秒付近から同時に二つの放電過程が進行していることが示されている。このような二つの放電が同時進行している過程ではパルスの放射頻度は高く, 到達時間差法ではアンテナ間隔が数十キロ離れているためその時間対応をつけるのが困難であり, 干渉法ではその帯域の狭さから十分標定し得ない。このもう一つの放電経路は上方向へ伸びておりその進展に伴い, 電界変化も大きく負方向へ変化している。この上方向への進展と同時に生ずる雷雲下部での水平進展はこれまで解析対象とした2例の雲放電に共通した事項である。上方向への進展は670ミリ秒付近までその後続き, 670ミリ秒直前では標定された電磁波放射源は一本の細い経路を示している。この間の放電経路方向の分散は数度以内である。



(a) 電界変化

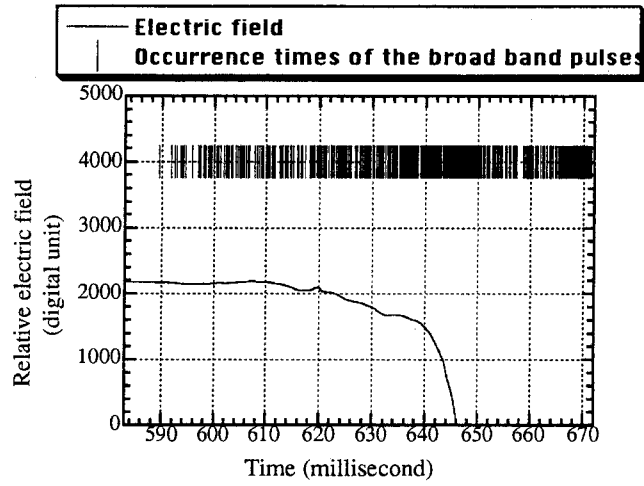


(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化

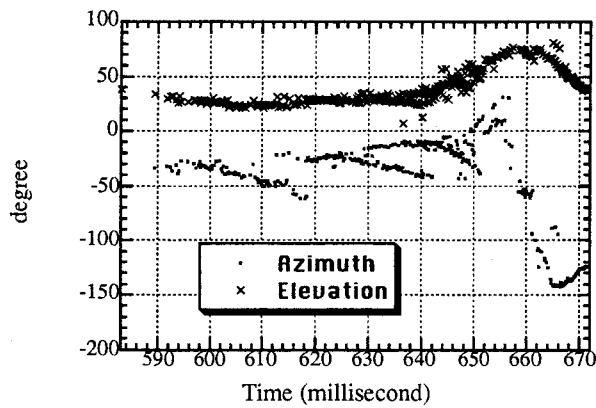


(c) 2次元の標定結果

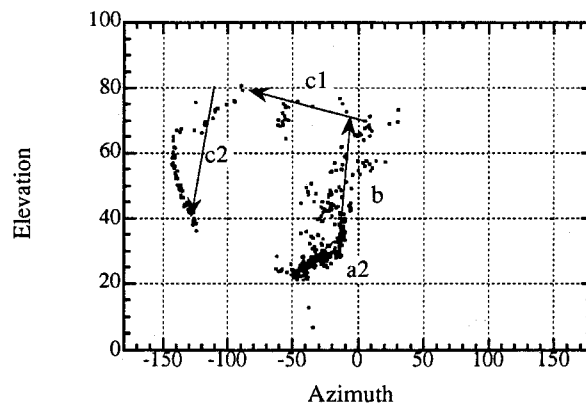
図5.10 350ミリ秒から550ミリ秒までの放電過程



(a) 電界変化



(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化



(c) 2次元の標定結果

図 5. 11 583ミリ秒から672ミリ秒までの放電過程

### 5. 3. 3 雲放電解析例 3

図5. 1 2に7月27日17時5分5秒に記録された雲放電によるものと思われる電界変化の全体図を示す。この波形は時定数10秒のスローアンテナにより得られている。前項で指摘したようにこの放電は7月27日の記録中の最後の放電であり、雷雲の消滅期に生じた雷放電である。電界変化の上部に記されている縦棒はこれまでと同様に広帯域信号の記録された時刻を示している。この雲放電はこれまでの雲放電と同様に緩やかな電界変化で開始しており、それに伴って広帯域パルスが放射されていることがわかる。前半は振幅の小さい変化であるが、後半はこれまでと同様に負方向へ大きく振れるという特徴を示している。この負方向への大きな変化の後の変化は記録時間を越えているため記録されていない。従って、全体の継続時間は600ミリ秒以上である。500から600ミリ秒付近を詳細に見ると負方向への早い変化が幾つか記録されているが、立ち上がり時間を検討するとこれは帰還雷撃によるものではなくむしろK変化と思われる。このことを踏まえてこの波形を見ると、350ミリ秒から700ミリ秒までの変化で雲放電も一般的な特徴を示しており、その後の変化と独立な放電である可能性もあるがこの波形のみから断定は難しい。

図5. 1 3に電磁波放射源の2次元標定結果を示す。前2例ほど明確ではないが、この雲放電の解析例においても雷雲下部と上部と思われる領域に対応した2層構造が示されている。放電の開始点は図中Sと記した箇所であり、この例の場合下方向への動きにより放電が開始していることがわかる。放電が進むに従い水平方向へ進展するが、前2例に比べて垂直方向の動きが顕著である。その後、電界変化の負方向への大きな振れ（900ミリ秒付近）と共に電磁波放射源はe1, e2と記した方向に大きく動いている。これは前2例にも共通して示されている特徴であり、負極性の上向きリーダーが雷雲上部の正電荷領域中を進展していく過程に対応していると思われる。

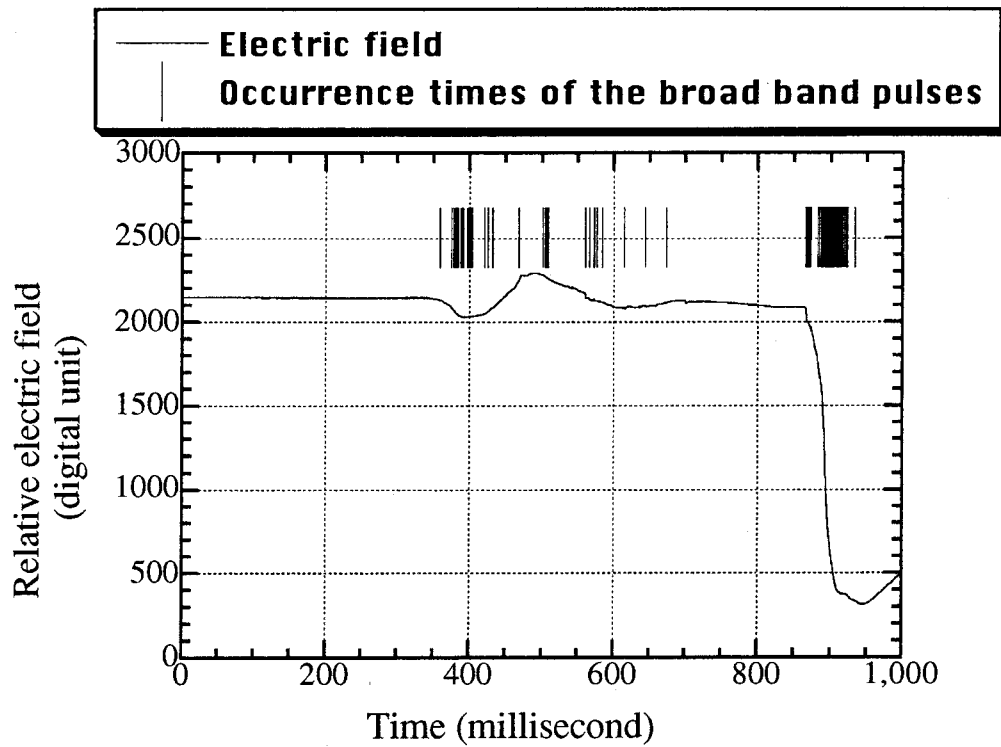


図5. 12 7月27日17時5分5秒に記録された雲放電によるものと思われる電界変化の全体図

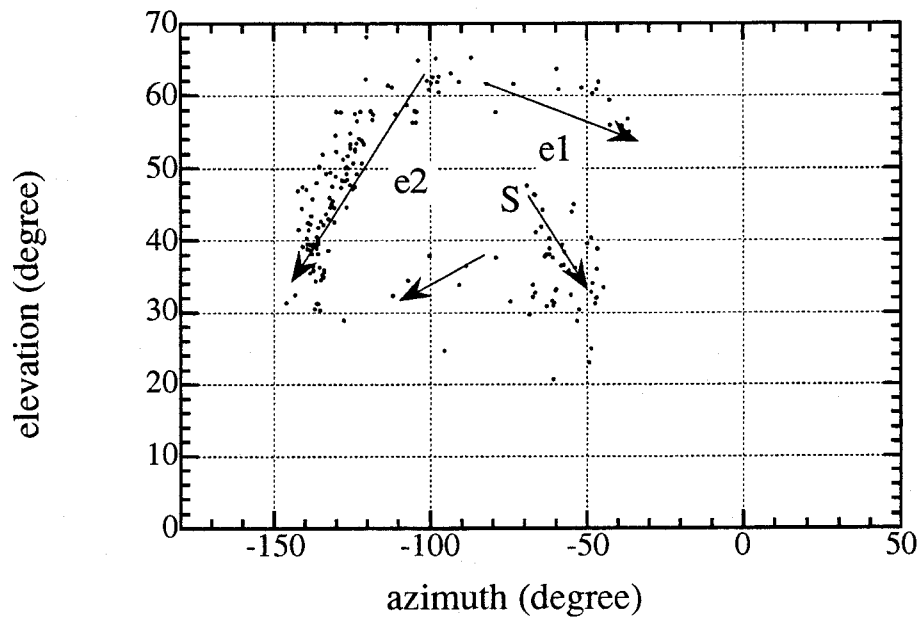


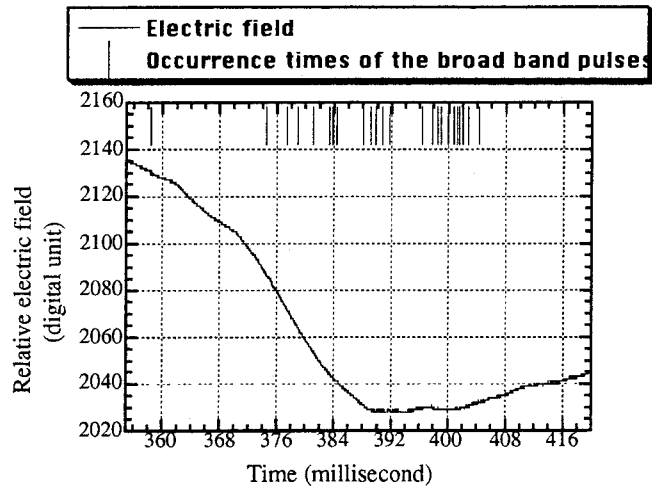
図5. 13 電磁波放射源の2次元標定結果



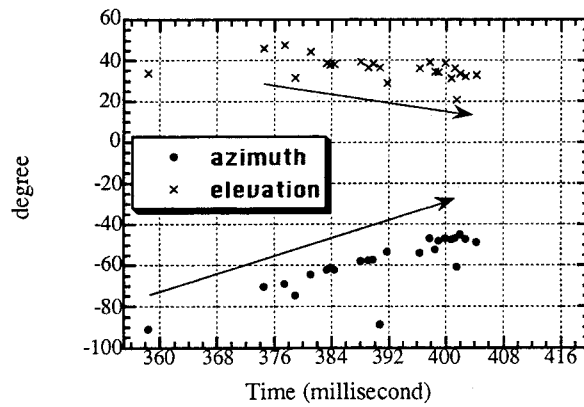
この放電は最初緩やかな電界変化で開始している。放電開始部分の拡大図を図5. 14 (a)に、仰角、方位角の時間変化を同図(b)に、2次元プロットを同図(c)に示す。電界変化の図より、広帯域パルスが放電の進展によるものと思われる電界変化の緩やかな変化に対応して放射されていることがわかる。しかし、雲放電の初期によく記録されている特徴的な両極性パルスの放射はみられない。広帯域パルスの標定結果からは放射点の時間推移には明らかな傾向が認められる。即ち、この放電は仰角50度付近より開始し、観測点から望んで下方向に進展しているのがわかる。そして、この移動に伴い電界変化は負方向にふれていることがわかる。これは雷雲下部の正電荷領域を進展する負極性リーダと考えられる。速度については放射点までの距離が不明であるので評価は難しい。

次に、400ミリ秒から700ミリ秒までの電界変化図を図5. 15 (a)に、方位角、仰角の時間変化を同図(b)に、平面プロットを同図(c)に示す。同図(a)に示しているaの変化では電磁波放射点は観測点から望んで右方向に移動している。その後bと記した変化では(b)の図からわかるように電磁波放射点の顕著な移動は見られず、図5. 14での段階での放射点付近に分布しているのがわかる。電界変化で530ミリ秒付近以降断続的に早い変化が記録されているが、立ち上がり時間を考慮するとこれらは帰還雷撃ではなくむしろK変化であろう。この部分の電磁波放射源の動きはこれまでの右方向への動きとは逆に左方向への動きが顕著である。

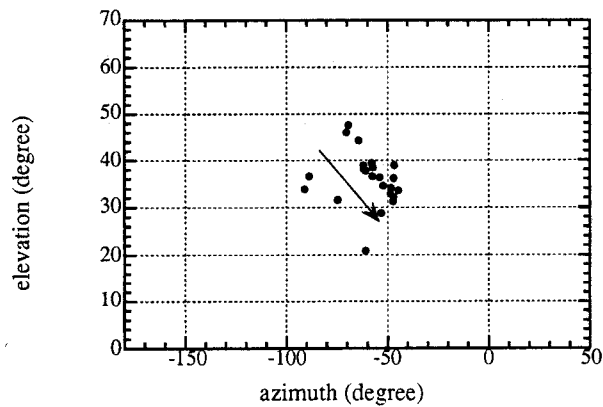
850ミリ秒以降の電界変化の拡大図を図5. 16 (a)に、同図(b)に広帯域パルスの電磁波放射源の方位角、仰角の時間変化を、同図(c)に方位角、仰角の平面プロットを示す。(a)より広帯域パルスの放射は865ミリ秒付近の比較的早い変化とその後870ミリ秒以後の二つの領域(図中でd, eと記した)で放射されていることがわかる。dの放射は(c)の放電点標定結果から、これまでの雲放電の放電路を辿っていることがわかる。860ミリ秒以後は(c)に示されているように雷雲上部と思われる領域において左右同時に放電路が形成されている。



(a) 電界変化

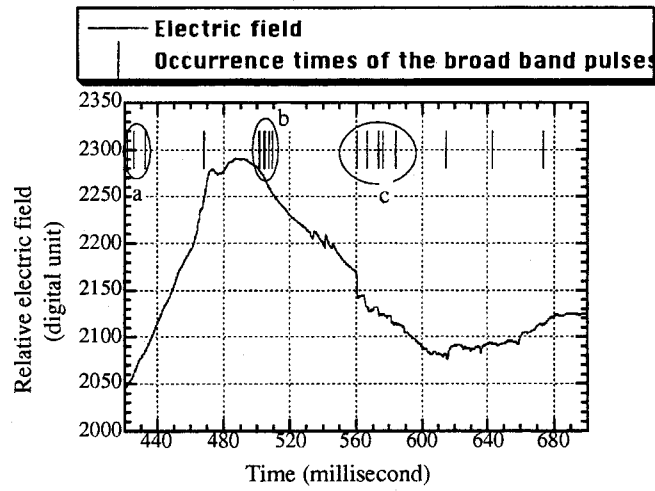


(b) 広帯域パルスの算出された方位, 仰角の時間変化

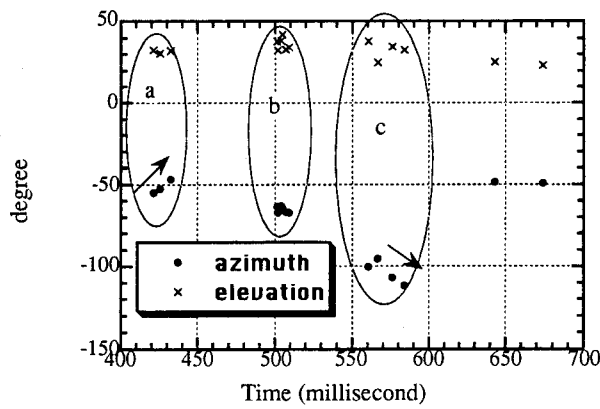


(c) 2次元の標定結果

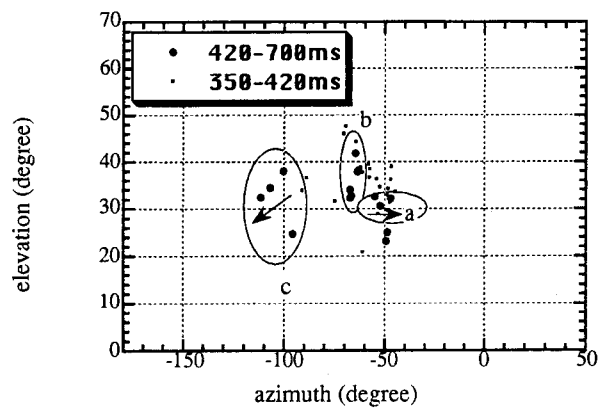
図5. 14 355ミリ秒付近から420ミリ秒までの放電過程



(a) 電界変化

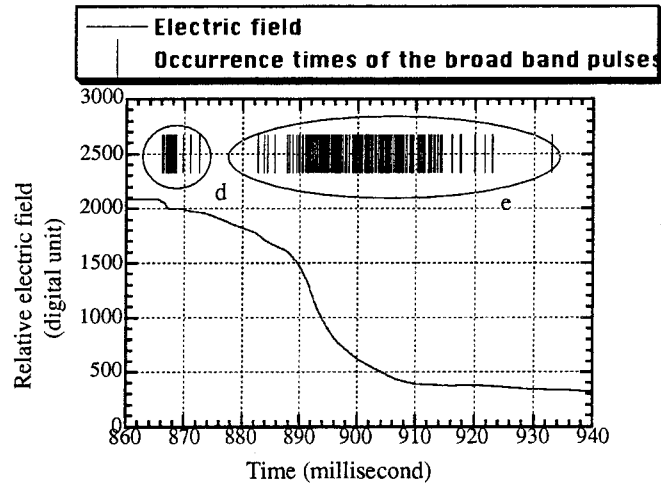


(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化

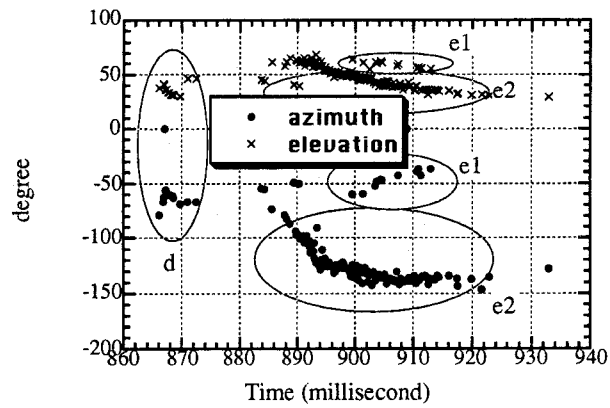


(c) 2次元の標定結果

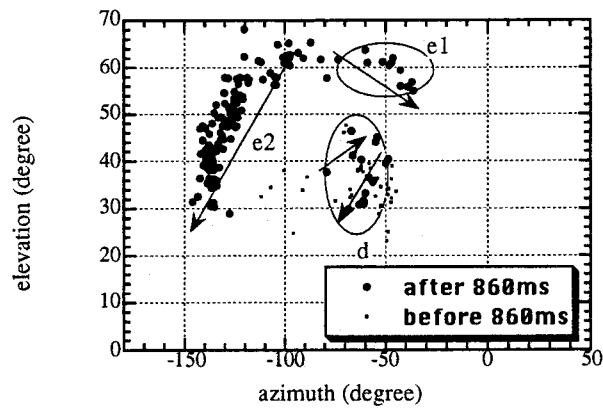
図5.15 400ミリ秒付近から700ミリ秒までの放電過程



(a) 電界変化



(b) 広帯域パルスの算出された方位、仰角の時間変化



(c) 2次元の標定結果

図5. 16 860ミリ秒から940ミリ秒までの放電過程

## 5. 4 検討とまとめ

## 電界変化の特徴について

雷雲は通常、その上層部から下方に向けて順に正、負、正の3極構造をとる<sup>(14),(15),(16)</sup>。負極性落雷は温度約 $-10$ 度付近に分布する負極性電荷層から通常放電し、雲放電は負電荷層と雷雲上部の正電荷層との間で生起する。負極性落雷に関する研究はこれまでに数多くの研究者によりなされてきたが、雲放電に関しては負極性落雷の場合ほど多くはない。

雲放電に伴う電界変化計測は、古くからなされており様々な情報を得ることができる。北川ら<sup>(13)</sup>はニューメキシコにおいて1400の雲放電を計測し、雲放電を(1) Initial portion (2) Very active portion (3) Final portionの3つの過程に分類している。Initial portionでは比較的小さな振幅の数百マイクロ秒の時間間隔で生起するパルス列が記録され、Very active portionは大きな緩やかな変化とそれに重畳するパルス列によって特徴づけられる。Final portionは、緩やかな変化ではなく、K変化が生起する過程に対応している。この報告に対して、近年Bilsら<sup>(17)</sup>やVillanuevaら<sup>(18)</sup>は、電界変化に重畳するパルス列の生起時間を解析することにより、雲放電は前半のパルス列が記録される過程と、後半のK変化が生起する過程との2つの部分で分類すべきであると主張している。

本章において解析対象とした雲放電は、その放電開始過程においては雲放電に特有なパルス列<sup>(13),(17),(18),(19),(20)</sup>の放射は認められない。さらに、電界変化におけるパルスの放射は、その後の負方向への大きな変化の間も記録されておらず、Final stageと思われる放電後半においてK変化が幾つか記録されている。即ち、電界変化から雲放電を幾つかの過程に分類するとするならば、本章での雲放電は前半の比較的小振幅の緩やかな変化で開始する過程とその後続く大きな緩やかな変化とK変化過程の3つの領域に分類することができる。放電半ばの負方向への緩やかな大きな変化はVery active portionの特徴の一つであるが、それに伴う活発な低周波パルスの放射が記録されていないため、本章での雲放電が北川らの分類<sup>(15)</sup>にあてはまるかどうかは疑問が残る。また、Bilsら<sup>(17)</sup>やVillanuevaら<sup>(18)</sup>の分類においても、雲放電に伴う特徴的な両極性パルスが放電全体の前半部に記録されており、この分類とも相いれない。一方、Proctorら<sup>(9),(21)</sup>は、VHF放射の測定から、雲放電をInitial stageの有無により2つの種類に分類している。Initial stageが存在せず、VHF放射の放射頻度が1秒間に $10^5$ 以上のものは雷雲中心部の負電荷領域と考えられる部分から放電が開始し、Initial stageが存在し、 $10^4$ 以下の放射頻度のものは雷雲上部の正電荷領域と思われる部分から放電が開始することを報告している。本章での雲放電は雷雲の負電荷領域と思われる領域から放電が開始しているため、Proctorら<sup>(9),(21)</sup>の結果との比較が有効と考えられるが、Villanuevaら<sup>(18)</sup>の指摘にもあるように、電界変化の詳細な波形が示されていないため、電界

変化波形の比較は困難である。しかし、同時計測している広帯域パルスの発生頻度を電界変化と併せてみると（前項参照），前半の比較的小振幅の変化の期間はパルスの放射頻度は低く，負方向への大きな振れとともにパルスは密に放射されている。そして，その後のK変化による変化は電界変化により明瞭に示されている。これは，北川ら<sup>(15)</sup>の分類と非常に類似している。

以上のように，本章での雲放電が示している電界変化の特徴はこれまでの報告の一般的な特徴とは若干異なっている。これらの特徴は，中国内陸部の高原雷あるいは成熟期から消滅期での雷雲の構造と関係しているものと思われる。

#### 標定結果の特徴について

本章において示している中国高原地帯の夏季雲放電の放電路再現結果は，全体的にみて2層構造を示している。即ち，その電磁波放射源標定結果は雷雲下部と思われる領域における水平部と垂直方向への一本の放電路で繋がった雷雲上部領域での水平進展部から成っている。雲放電の初期過程では，雷雲下部と思われる領域において数百ミリ秒までの放電活動の後，垂直方向への進展へと繋がっている。そして，その間は水平方向への動きが顕著で，同じ放電路を数回辿ると同時に垂直方向へ進展している。その間のパルス放射頻度は高く，到達時間差法では標定することは極めて困難である<sup>(9)</sup>。その後，電界変化の負方向への振れと共に，垂直方向へそして雷雲上部と思われる領域において水平移動し，負電荷が雷雲上方へ移動していることが示されている。放電後半でのK変化に伴い放射されるパルスについては，観測システムのデッドタイムの70マイクロ秒のため，その放射源の詳細な移動を標定することは出来ていない。

雲放電は正負どちらの電荷領域から開始するのかは，現在においても一致した見解が得られていない。小川ら<sup>(22)</sup>は，雲放電に伴う電界変化と雷雲の接近に伴う電界を同時計測し，一連の雷雲のライフサイクルの中で雲放電を4つのタイプに分類している。そして，数値計算およびたまたま雷雲の外に出た雲放電のストリーク写真の解析から，雲放電により雷雲上部の正電荷領域から中心の負電荷領域に正電荷が運ばれることを明らかにしている。これに対して，Smith<sup>(23)</sup>や仲野<sup>(24),(25)</sup>は電界変化の多地点観測および数値計算から，逆に，雲放電では負極性電荷領域から上方に向けて負極性リーダが進展することを示している。竹内<sup>(26)</sup>は電界変化計測から，Weberら<sup>(27)</sup>は音響観測から雲放電は雷雲上部の正電荷領域からも雷雲下部の負電荷領域からも開始することを示している。これらに対して，劉ら<sup>(28)</sup>はこれまで用いられてきたモデルの誤りを指摘し，折れ曲がり考慮したモデルを用いて，時間分解の良い電界計を用いた多地点観測から，雲放電の初期過程のリーダの速度および電荷

密度を計算し雲放電は負電荷領域から上向きに進展することにより開始することを明らかにしている。一方、Proctorら<sup>(9),(21)</sup>は雷放電に伴って放射されるVHF帯の電磁波を用いて到達時間差法により雲放電の放電路再現を行っている。その結果、雲放電はその初期過程では負極性リーダが水平進展することを報告している。Shaoら<sup>(11)</sup>は、干渉計を用いて、雷雲の放電開始から数分後の雲放電を数例解析し、雲放電は最初、垂直に伸びる負極性のリーダにより開始することを示している。

本章で示した雲放電はその3例においていずれも負極性のリーダにより開始し、水平進展の後、雷雲上部に向けて上昇進展することが示されている。この結果は、その極性において小川ら<sup>(22)</sup>の結果に反し、進展方向において劉ら<sup>(28)</sup>、Shaoら<sup>(11)</sup>による結果と異なるが、Proctorら<sup>(9),(21)</sup>の結果とは合致している。これは、本章で解析対象とした雲放電の記録された時刻あるいは中国内陸高原地帯の雷雲の構造と関連があると思われる。

雲放電はそのライフサイクルの各過程で様々な形態をとると考えられている<sup>(11)</sup>。一連のライフサイクルの中での雲放電の時系列変化の調査は今後の課題であると思われるが、例えば、消滅期の雷雲においてSpider lightningと呼称される雷雲下部を長距離にわたりゆっくり水平進展する負極性リーダが観測されており<sup>(29),(30)</sup>、これは消滅期の雷雲の電荷構造と関係があると考えられている<sup>(31)</sup>。即ち、Proctorら<sup>(9),(21)</sup>の結果と合致している本章での結果は、劉ら<sup>(28)</sup>の指摘にもあるように、本章およびProctorら<sup>(9),(21)</sup>が解析対象とした雲放電が成熟期から消滅期に記録されていることが一因と考えられる。一方、劉ら<sup>(6)</sup>は蘭州地区において、中国内陸部の高原雷の観測を行い、同地区の雷雲の構造について、それは基本的に三極構造をとるが、雷雲下部の正電荷領域は他地域の夏季雷雲に比べて広く分布しているとの推測を行っている。そのため、雷雲の負電荷領域から開始した放電は、落雷や雲放電を問わず、その直下の正電荷領域を広く進展し、落雷に至るかあるいはその領域のみで雲放電として完結することもあるとしている。本観測結果はいずれの例においても水平方向への負極性リーダの進展が顕著であり、また、3例目の雲放電ではその前半部において雷雲下部と思われる領域とその上の領域との間で放電活動が行われ、電界変化の特徴からもこの前半部のみで雲放電の特徴がしめされている。即ち、本観測での結果はこの推測やロケット誘雷での実験結果<sup>(5)</sup>とよく合致しており、劉ら<sup>(6)</sup>の説を裏付ける結果となっている。

電磁波放射源の全般的な特徴については、本章での雲放電からの電磁波放射源標定結果は、いずれの例においても二層構造を示している。しかし、本章ではK変化に伴う放射の標定結果は示されておらず、K変化の標定において二層構造が明確となっているShaoら<sup>(11)</sup>との比較は難しい。しかし、二層構造についてはMac Gormanら<sup>(32)</sup>は音響観測から雲放電の放電路再現を行い、同様な二層構造を報告している。また、LDARシステム<sup>(33)</sup>を

用いて雲放電を標定した結果は、同様な二層構造を示しており<sup>(34)</sup>、本観測結果の妥当性が確認される。

## 参考文献

- (1) Uman, M. A., The lightning discharge, *Academic Press*, 1987
- (2) Takeuti, T., M. Nakano, and Y. Yamamoto, Remarkable characteristics of cloud-to ground discharge observed in winter thunderstorms in Hokuriku area, Japan., *J. Meteorol. Soc. Japan*, 54, 436-439, 1976
- (3) Orville, R. E., R. A. Weisman, R. B. Pyle, R. W. Henderson, and R. E. Orville, Jr., Cloud-to-ground lightning flash characteristics from June 1984 through May 1985, *J. Geophys. Res.*, 92, 5640-5644, 1987
- (4) Liu, X., detected by LLP system, Personal communication, 1996
- (5) Liu, X., C. Wang, Y. Zhang, Q. Xiao, D. Wang, Z. Zhou, and C. Guo, Experiment of artificially triggering lightning in China, *J. Geophys. Res.*, 99, 10727-10731, 1994
- (6) Liu, X., Z. Ye, X. Shao, C. Wang, M. Yan, and C. Guo, Intracloud lightning discharges in the lower part of thundercloud, *Acta Meteorol. Sinica*, 3, 212-219, 1989
- (7) 岐阜大学・中国科学院蘭州高原大気物理研究所・上海気象研究所・大阪大学, 中国蘭州における電界変化多地点観測, 電気学会研究会, ED-96-186・HV-96-86, 1996
- (8) 牛尾知雄, 河崎善一郎, 太田恭久, 松浦虔士, 渡辺貞司, 劉欣生, 広帯域干渉計の製作と中国での雷観測, 電気学会研究会, ED-97-144・HV-97-128, 1997
- (9) Proctor, D. E., VHF radio pictures of cloud flashes, *J. Geophys. Res.*, 86, 4041-4071, 1981
- (10) Proctor, D. E., Lightning and precipitation in a small multicellular thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 88, 5421-5440, 1983
- (11) Shao, X. M., and P. R. Krehbiel, The spatial and temporal development of intracloud lightning, *J. Geophys. Res.*, 101, 26641-26668, 1996
- (12) Shao, X. M., D. N. Holden, and C. T. Rhodes, Broad band radio interferometry for lightning observations, *Geophys. Res. Lett.*, 23, 1917-1920, 1996
- (13) Kitagawa, N., and M. Brook, A comparison of intracloud and cloud-to-ground lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 65, 1189-1201, 1960



- (14) Wilson, C. T. R., Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, *Phil. Trans. R. Soc. Ser. A*, 221, 73-115, 1920
- (15) Williams, E. R., The tripole structure of thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 94, 13151-13167, 1989
- (16) Marshall, T. C., and W. D. Rust, Electric field soundings through thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 96, 22297-22306, 1991
- (17) Bils, J. R., E. M. Thomson, M. A. Uman, and D. Mackerras, Electric field pulses in close lightning cloud flashes, *J. Geophys. Res.*, 93, 15933-15940, 1988
- (18) Villanueva, Y., V. A. Rakov, M. A. Uman, and M. Brook, Microsecond-scale electric field pulses in cloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 99, 14353-14360, 1994
- (19) Weidman, C. D., and E. P. Krider, The radiation field waveforms produced by intracloud lightning discharge process, *J. Geophys. Res.*, 84, 3159-3164, 1979
- (20) Cooray, V., and S. Lundquist, Characteristics of the radiation field from lightning in Sri Lanka in the tropics, *J. Geophys. Res.*, 90, 6099-6109, 1985
- (21) Proctor, D. E., R. Uytendogaardt, and B. M. Meredith, VHF radio pictures of lightning flashes to ground, *J. Geophys. Res.*, 93, 12683-12727, 1988
- (22) Ogawa, T., and M. Brook, The mechanism of the intracloud lightning discharge, *J. Geophys. Res.*, 69, 5141-5150, 1964
- (23) Smith, L. G., Intracloud lightning discharges, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 83, 103-111, 1957
- (24) Nakano, M., The cloud discharge in winter thunderstorms of the Hokuriku coast, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 57, 444-445, 1979
- (25) Nakano, M., Initial streamer of the cloud discharges in winter thunderstorms of the Hokuriku coast, *J. Meteorol. Soc. Japan*, 57, 452-458, 1979
- (26) Takeuti, T., Studies on thunderstorm electricity, 1, cloud discharges, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 17, 59-68, 1965
- (27) Weber, M. E., H. J. Christian, A. A. Few, and M. F. Stewart, A thundercloud electric field sounding: Charge distribution and lightning, *J. Geophys. Res.*, 87, 7158-7169, 1982
- (28) Liu, X. M., and P. R. Krehbiel, The initial streamer of intracloud lightning flashes, *J. Geophys. Res.*, 90, 6211-6218, 1985
- (29) Mazur, V., X. M. Shao, and P. Krehbiel, "Spider" intracloud and cloud-to-ground lightning in the late stage of Florida storms, *Proc. 16th International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, Germany, 33-41, 1994

- 
- (30) Mazur, V., P. Krehbiel, and X. M. Shao, Correlated high speed video and radio interferometer observations of a cloud-to-ground lightning flash, *J. Geophys. Res.*, 100, 25731-25753, 1996
- (31) Williams, E. R., and D. Boccippio, Dependence of cloud microphysics and electrification on mesoscale vertical air motions in stratiform precipitation, *17th Conf. on Severe Local Storms and Conf. on Atmos. Electricity*, AMS, St. Louis, MO, 825-831, 1993
- (32) Mac Gorman, D. R., A. A. Few, and T. L. Teer, Layered lightning activity, *J. Geophys. Res.*, 86, 9900-9910, 1981
- (33) Lennon, C., and L. Maier, Lightning mapping system, *Proc. International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity*, 89-1, FL, 1991
- (34) Rison, W., P. Krehbiel, L. Maier, and C. Lennon, Comparison of lightning and radar observations in a small storm at Kennedy Space Center, Florida, *Proc. 10th Int. Conf. Atmos. Electr.*, 196-199, Osaka, 1996



## 第六章

### 結論

本研究では電界変化多地点観測システムの製作，広帯域干渉計の製作を行うこと，そしてさらに，同機器を用いて雷放電に関する新たな知見を得ることを目的として，冬季雷特に正極性落雷に対しての低周波数帯の観測および広帯域VHF帯干渉計によるロケット誘雷，自然雷の観測を行った結果についてまとめている。以下に2章から5章にかけて得られた成果を述べ，本論文の結論とする。

#### [第二章]

第二章では従来より広く行われている数MHzまでの低周波帯の電界変化観測を冬季正極性落雷に適用した結果について述べた。特に，落雷の初期予兆現象となるプレリミナリーブレイクダウンパルスについて解析を行った。

- (1) 冬季正極性落雷に先行する雲内放電において，プレリミナリーブレイクダウンパルスが存在することを多数の落雷記録から明らかにした。
- (2) プレリミナリーブレイクダウンパルスの最初の半周期の極性は，それに続くリーダによる変化の極性と一致することを明らかにした。
- (2) 冬季正極性落雷の正極性リーダの持続時間が観測した範囲内において平均1.2ミリ秒であることを明らかにした。
- (3) 観測した範囲内においてプレリミナリーブレイクダウンパルスのパルス幅は平均1.8マイクロ秒で，パルス間隔は平均5.2マイクロ秒，オーバシュートの振幅に対する最初の振れの振幅比は平均1.3であることを明らかにした。また，プレリミナリーブレイクダウンパルスの最大振幅の帰還雷撃の振幅に対する比が平均0.27であることを明らかにした。

### [第三章]

第三章では電界変化を3地点で観測し、各地点をGPSを用いて同期させることにより雷放電から放射される電磁波の位置標定を行った。

- (1) GPSを用いることにより、時間同期が1マイクロ秒の精度で実現されることを示した。
- (2) 雲内放電から放射されるパルス列を、低周波帯（数メガヘルツまで）において到達時間差法により位置標定できることを示した。
- (3) 冬季正極性落雷における放電進展過程の概念図を提唱した。
- (4) 冬季正極性落雷に先行するプレリミナリーブレイクダウンパルスが双方向性リーダにより放射されることを示唆した。

### [第四章]

第四章ではVHF帯の電磁波を広帯域で観測することにより電磁波放射源の位置標定を行う観測機器を試作し、日本の冬季ロケット誘雷の観測を行った。

- (1) 製作した広帯域干渉計が数度以内の精度で動作していることを確認した。
- (2) 観測した範囲内において負極性上向きリーダから放射される広帯域パルスの時間間隔は平均22マイクロ秒で、その進展速度は $6 \times 10^5 \text{ m/s}$ であることを示した。
- (3) 正極性ロケット誘雷には帰還雷撃に相当する速い電界変化は存在しないことを確認した。
- (4) 負極性ロケット誘雷の放電開始部の両極性パルスに先行する広帯域パルスはワイヤー下端から鉄塔へ向けて進展する負極性リーダにより放射され、両極性パルスは負極性リーダの鉄塔へのコネクティング過程により放射されることが明らかとなった。
- (5) 製作した広帯域干渉計はパルスバーストと単発パルスの両方のタイプのパルスに対して標定が可能であることを示した。

### [第五章]

第五章では広帯域干渉計の改良を行い、中国高原地帯において観測された雲放電の解析結果について述べた。

- (1) 観測された雲放電の電界変化の特徴を示した。
- (2) 標定結果がこれまでに推測されていた中国高原地帯での雷雲の電氣的構造を支持

- すること示した。
- (3) 観測した雲放電ではいずれに於いても負電荷が雷雲上部に向けて運ばれることを示した。

# 謝辞

本研究は大阪大学工学研究科電気工学専攻システム・電力工学講座電力工学領域において行われたものである。研究に際し、ご指導およびご鞭撻を賜りました松浦虔士教授に感謝の意を表します。終始直接のご指導、ご鞭撻、およびご教示を賜りました河崎善一郎助教授に感謝の意を表します。本研究を進めるに辺り、様々の面でご協力頂いた松原一郎学内講師、舟木剛助手に感謝いたします。研究に際し、ご教示ご鞭撻賜りました鈴鹿工業高等専門学校山本賢司教授、大阪工業大学木村紀之助教授、神戸市立工業高等専門学校津吉彰助教授に感謝いたします。

本論文の作成にあたり直接の御指導を賜りました辻毅一郎教授、熊谷貞俊教授に感謝の意を表します。

本研究に際し、御指導賜りました佐々木孝友教授、中塚正大教授、山中龍彦教授、黒田英三教授、谷野哲三教授に感謝の意を表します。

本研究に際し、様々な議論、ご教示を賜った岐阜大学王道洪助手、中国での実験の際ご協力頂いた高木伸之助教授、渡辺貞司教授に感謝いたします。レーザ誘雷実験の際、ご協力およびご教示賜りましたレーザ技術総合研究所内田成明研究員、島田義則研究員、安田祐彦研究員（現関西電力）、山中千代衛大阪大学名誉教授、関西電力株式会社総合技術研究所園井康夫研究員、松井敏明研究員、足立幹雄研究員に感謝いたします。ロケット誘雷実験の際、ご協力頂いた大同工業大学堀井憲爾学長、名古屋工業大学中村光一教授、豊田工業高等専門学校仲野貢教授、愛知工業大学依田正之教授、中部大学角伸一助教授、石川工業専門学校櫻野仁志助教授、沼津工業高等専門学校若松勝寿教授、信州大学田原徳夫教授、中央大学稲葉次紀教授、富山大学酒井英男助教授および関係者の方々に感謝いたします。中国蘭州での実験の際、お世話いただいた中国科学院蘭州高原大気物理研究所劉欣生所長、上海気象研究所郭昌明所長、蘭州高原大気物理研究所の皆様感謝いたします。

本研究を進めるに辺りご協力頂いた、松浦研究室の諸兄、諸姉、岐阜大学小嶋利朗氏（現中部電力株式会社）に感謝いたします。

本研究を結ぶにあたり最後に両親に心より御礼申し上げます。

# 研究業績

## 発表論文 (査読有り)

1. 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 山本賢司, 雷放電に伴う電界変化の時間同期多点観測, 電学論B, 114-B, 1160-1167, 1994
2. 牛尾知雄, 李鍾浩, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 松井敏明, 冬季雷放電開始部の電磁界パルスの性質, 電学論B, 116-B, 453-460, 1996
3. Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, Y. Ota, and K. Matsuura, Broad band interferometric measurement of rocket triggered lightning in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2769-2772, 1997
4. Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, and D. Wang, Electric fields of initial breakdown in positive ground flash, *J. Geophys. Res.* (in press)
5. Wang, D., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Y. Shimada, S. Uchida, C. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Sonoi, and N. Simokura, The study of possibility of lightning triggering by means of a laser, *J. Atmos. Electr.*, 14, 49-55, 1994
6. Wang, D., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Y. Shimada, S. Uchida, C. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Sonoi, and N. Simokura, A possible way to trigger lightning using a laser, *J. Atmos. Terres. Phys.*, 57, 459-466, 1995
7. Wang, D., N. Takagi, T. Watanabe, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Y. Shimada, S. Uchida, and C. Yamanaka, Propagation of leader system in long gap laser triggered discharges, *J. Atmos. Electr.*, 15, 67-74, 1995
8. 和田将一, 牛尾知雄, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦虔士, 松井敏明, 冬季雷放電に伴う電界変化のウェーブレット解析, 電学論B, 116-B, 469-474, 1996
9. 河崎善一郎, 和田将一, 牛尾知雄, 大貫淳, 雷の予知について, レーザー研究, 24, 541-546, 1996

## 学会発表 (査読有り)

1. 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 園井康夫, 雷放電に伴う電界変化の時間同期多点観測, 平成6年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集 (論文1), 203-208, 1994
2. Ushio, T., D. Wang, Z.-I. Kawasaki, and K. Matsuura, Synchronized multipoint measurements of lightning electric field changes, *Proc. 1995 International aerospace and ground conference on lightning and static electricity*, 52, Williamsburg, Virginia, USA, September, 1995
3. Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, and K. Matsuura, Electric fields of initial breakdown in lightning, *Proc. 10th International conference on atmospheric electricity*, 588-591, Osaka, Japan, June, 1996
4. Wang, D., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Y. Shimada, S. Uchida, C. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Sonoi, and N. Shimokura, Study on triggering lightning with a CO<sub>2</sub> laser, *Proc. 5th Annual conference of power and energy society IEE Japan*, 124, Tokyo, Japan, 1994



5. Wang, D., T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, S. Uchida, Y. Shimada, H. Yasuda, T. Yamanaka, C. Yamanaka, K. Matsuura, Y. Ishikubo, and M. Adachi, Field experiments on laser triggered lightning, *Proc. 1995 International aerospace and ground conference on lightning and static electricity*, 78, Williamsburg, Virginia, USA, September, 1995
6. Uchida, S., Y. Shimada, H. Yasuda, H. Tsubakimoto, S. Motokoshi, C. Yamanaka, Z.-I. Kawasaki, T. Yamanaka, K. Matsuura, T. Ushio, M. Adachi, and Y. Ishikubo, Laser triggered lightning experiments in the field, *Proc. 10th International conference on atmospheric electricity*, 660-663, Osaka, Japan, June, 1996

## 学会発表

- 王道洪, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 山本賢司, 松浦虔士, 雷放電に伴う電界変化に重畳するパルス列について, 大気電気研究, 43, 19-20, 1993
- 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 雷放電に伴って放射されるUHF波, 平成5年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 555-556, 1993
- 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 園井康夫, 広帯域スローアンテナによる高時間精度電界変化多地点観測, 大気電気研究, 44, 20-21, 1994
- 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 園井康夫, 広帯域スローアンテナによる高時間精度電界変化多地点観測, 平成6年電気学会全国大会論文集, 10-24, 1994
- 北陸ロケット誘雷実験グループ, ロケット誘雷と電界変化, 平成6年電気学会全国大会論文集, 10-42, 1994
- 横井清孝, 牛尾知雄, 和田将一, 河崎善一郎, 松浦虔士, GPS時間同期を用いた雷観測結果のデータベース化, 大気電気研究, 45, 43-44, 1994
- 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 時間同期電界変化多地点観測による雷放電電荷量の算出, 大気電気研究, 45, 57, 1994
- 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, GPSを用いた高時間同期雷観測法, 環境電磁工学研究会, EMCJ94-28, 1994
- 牛尾知雄, 河崎善一郎, 松浦虔士, 園井康夫, 広帯域スローアンテナによる多地点雷観測, 大気電気研究, 46, 95, 1995
- 北陸ロケット誘雷実験グループ, ロケット誘雷の電界変化多地点観測, 平成7年電気学会全国大会論文集, 7-63, 1995
- 丹山英明, 牛尾知雄, 王道洪, 河崎善一郎, 松浦虔士, 雷放電開始部に観測される両極性パルスの性質, 平成7年電気学会全国大会論文集, 7-110, 1995
- Ushio, T., D. Wang, Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Synchronized multipoint measurement of lightning electric field change, International Union of Geodesy and Geophysics XXI General Assembly, in Boulder Colorado, USA, 1995
- 河崎善一郎, 牛尾知雄, 松浦虔士, 雷放電と電波放射源に関する一考察, 大気電気研究, 47, 41, 1995
- 内田成明, 島田義則, 安田祐彦, 山中千代衛, 横井清孝, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 松浦虔士, 石窪雄二, 足立幹雄, 平成6年度レーザー誘雷実験と冬季雷観測, 大気電気研究, 47, 58, 1995
- 岐阜大学・大阪大学雷観測グループ, 岐阜大学における夏季雷観測の総括, 大気電気研究, 48, 35, 1996
- 大阪大学・岐阜大学雷観測グループ, 1995年度冬季雷観測結果速報, 大気電気研究, 48, 36, 1996
- 小嶋利朗, 王道洪, 高木伸之, 渡辺貞司, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 松浦虔士, 冬季多地点落雷の総合観測(その1), 平成8年電気学会全国大会論文集, 7-41, 1996
- 槇島士郎, 王道洪, 高木伸之, 渡辺貞司, 牛尾知雄, 河崎善一郎, ALPSと電界SLOWアンテナによる上向き雷放電の2地点観測, 平成8年電気学会全国大会論文集, 7-44, 1996

- 牛尾知雄, 河崎善一郎, 松浦虔士, 松井敏明, 冬季雷の電界変化多地点観測, 平成8年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 491-492, 1996
- 岐阜大学, 中国科学院蘭州高原大気物理研究所, 上海気象研究所, 大阪大学, 中国蘭州における電界多地点観測, 放電高電圧合同研究会, ED-96-186・HV-96-86, 1996
- 渡辺貞司, 高木伸之, 王道洪, 小嶋利朗, 槇嶋士郎, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 仲野, 寺本正英, 中村光一, 劉欣生, Qie Xinshu, 郭昌明, 中国内陸高原部における雷の総合観測, 放電高電圧合同研究会, ED-96-210・HV-96-110, 1996
- 大西賢, 李鍾浩, 河崎善一郎, 和田将一, 牛尾知雄, 大貫淳, 松浦虔士, 冬季雷雲下での電界多地点観測, 大気電気研究, 50, 6, 1997
- 牛尾知雄, 河崎善一郎, 中村光一, 櫻野仁志, 堀井憲爾, 松浦虔士, 1996年ロケット誘雷実験とVHF放射, 大気電気研究, 50, 36, 1997
- 小嶋利朗, 王道洪, 高木伸之, 渡辺貞司, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 劉欣生, Qie Xinshu 郭昌明, 中国内陸部の高原雷観測速報, 大気電気研究, 50, 71-72, 1997
- 太田恭久, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 松浦虔士, VHF帯広帯域アンテナを用いた雷観測, 平成9年電気学会全国大会論文集, 7-61, 1997
- 中村正史, 中村光一, 牛尾知雄, 河崎善一郎, ロケット誘雷実験における放電路の再現と検討, 平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, 581-582, 1997
- Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Wideband interferometry and rocket triggered lightning, *Proc. International workshop on physics of lightning 1997*, 3-3, Saint Jean de Luz, France, September, 1997
- Shimada, Y., S. Uchida, H. Yasuda, K. Tsubakimoto, S. Motokoshi, C. Yamanaka, T. Yamanaka, Z.-I. Kawasaki, T. Ushio, J. Onuki, M. Adachi, Y. Ishikubo, Leader initiation in laser triggered lightning field experiment, *Proc. International workshop on physics of lightning 1997*, 3-4, Saint Jean de Luz, France, September, 1997
- 武田実, 王道洪, 高木伸之, 渡辺貞司, 陳明理, 牛尾知雄, 河崎善一郎, 仲野, 中村光一, 劉欣生, Qie Xinshu, 郭昌明, スローフロントに関する一考察, 放電高電圧合同研究会, ED-97-141・HV-97-125, 1997
- 牛尾知雄, 河崎善一郎, 太田恭久, 松浦虔士, 渡辺貞司, 劉欣生, 広帯域干渉計の製作と中国での雷観測, 放電高電圧合同研究会, ED-97-144・HV-97-128, 1997
- Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, K. Matsuura, Broad band interferometric measurement of rocket triggered lightning in Japan, 1997 Fall meeting American Geophysical Union, San Francisco, USA, 1997