



Title	LF帯広帯域干渉計の開発と雷放電観測に関する研究
Author(s)	高柳, 裕次
Citation	大阪大学, 2013, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/27546">https://hdl.handle.net/11094/27546</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

工17 16438

## 博士学位論文

# LF 帯広帯域干渉計の開発と 雷放電観測に関する研究

高 柳 裕 次

2013 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

電気電子情報工学専攻

博士学位論文

LF 帯広帯域干渉計の開発と  
雷放電観測に関する研究

高 柳 裕 次

2013 年 1 月

大阪大学大学院工学研究科

電気電子情報工学専攻

# 内容梗概

本論文は筆者らが大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻在学中に行つた、LF 帯広帯域干渉計の開発と雷放電観測に関する研究の成果をまとめたものである。

近年、情報化社会の発展に伴い、雷放電によって生じる電子機器の損傷や誤動作の被害件数が急増しており、雷放電測定を用いた対策が望まれている。電磁波を用いた雷放電観測装置は、主に ELF 帯から UHF 帯まで存在している。このうち ELF/VLF 帯では数千キロメートルの広範囲の観測が可能であるが、雲内放電の観測が不可能である。VHF/UHF 帯では雷放電進展過程を詳細に可視化可能であるが、50km 程度の範囲に限られる。一方、LF 帯では帰還雷撃等、大電流に伴う電磁波の観測範囲は 200km 程度であり、広域の雷放電観測が可能である。また、対地放電、雲内放電を問わず雷放電進展過程に伴う電磁波も観測可能である。特に雲内放電は雷放電の 9 割を占め、対地放電の前に先行することから、雲内放電の観測は重要である。そこで、我々は広範囲かつ雷放電進展過程の観測が可能である LF 帯に着目した LF 帯広帯域干渉計を開発しその観測を随時行っている。LF 帯を用いた他の観測システムは、100km 程度のネットワークで観測を行っているため、雷放電進展過程に伴う電磁波が受信されにくく、1 フラッシュ中 10 点程度の標定結果となっている。一方、我々は 50km 程度のネットワークで観測を行なうことにより 1 フラッシュ中 50~100 点程度の標定結果となり、詳細な雷放電進展過程の観測が可能となっている。

本論文は全 4 章より構成される。

第 1 章は本論文の導入であり、雷放電と積乱雲の発達過程、基本的な雷放電諸過程とその特性、雷放電観測システム、および研究の目的について述べる。他の雷放電位置標定システムと比較することにより、我々が提案した LF 帯広帯域干渉計の目的および意義を明確にする。

第 2 章では、開発した LF 帯広帯域干渉計について、その構成、LF 帯電磁波源の標定手法について詳細に示す。また、LF 帯広帯域干渉計を観測ごとに改良した点について述べる。

第 3 章では、LF 帯広帯域干渉計を用いた野外観測について述べる。3.2 節では電波環境の良いオーストラリア・ダーウィンにおける雷放電初期観測結果について述べる。開発した LF 帯広帯域干渉計による標定結果と、これまで我々が開発してきた VHF 帯広帯域干渉計による標定結果を比較することで、対地放電および雲内放電の三次元位置標定が可能であることを実証する。対地放電の事例では LF 帯で強く放射

される帰還雷撃、K-event、Compact Intracloud Dischargeについて、雲内放電の事例では K-event の位置標定結果について述べる。3.3 節では、北陸地方における冬季特有の雷放電現象を対象とした観測結果について述べる。冬季雷における、上向き放電で開始する雷放電の割合は、夏季に比べて非常に多い。また、上向き放電で開始する雷放電は比較的低い構造物からも発生し、夏季に比べて非常に大電流であるため構造物に重大な被害をもたらす。さらに、上向き放電で開始する雷放電は帰還雷撃を含まない場合もあるため、雷放電位置標定が困難であり、上向き放電で開始する雷放電を標定することが重要となっている。上向き放電で開始する雷放電は、極性によって上向き負極性雷と上向き正極性雷が存在する。帰還雷撃を含まない上向き放電で開始する雷放電の事例について、VHF 帯広帯域干渉計、LF 帯広帯域干渉計を避雷鉄塔の周囲に設置し、避雷鉄塔の脚部に設置されたロゴスキーコイルによる電流観測と同期観測を行った結果について述べる。3.4 節では、電波環境の悪い関西地方における雷放電観測結果について述べる。都市部においても、人的被害や機械的損傷に対する防災の面から雷放電監視が重要となっている。一般的に都市部では様々なノイズが混在しており、電波環境が悪い。関西地方における観測では電波環境を改善するために、設置環境の向上や観測サイトの冗長化を図り、雷放電進展過程に伴う微弱な電磁波が受信可能となった。関西地方で発生した対地放電および雲内放電の事例について LF 帯広帯域干渉計を用いた雷放電進展過程の標定を行い、同期観測された VHF 帯広帯域干渉計による雷放電進展過程の標定結果との比較と検討を行う。3.5 節では、現在稼働中である LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステムの構築について述べる。各サイトの観測装置によるデータの記録から web ページに表示されるまでの処理過程について説明する。また、リアルタイムモニタリングの結果を示し、システムの有用性を述べる。

第 4 章では、本論文で得られた成果を総括する。

# 謝辞

本博士論文は、大阪大学大学院工学研究科博士後期課程における 3 年間、大阪大学大学院工学研究科博士前期課程における 2 年間、計 5 年間で得られた研究成果をまとめたものである。

本論文を執筆するにあたって、終始、懇切かつ的確な御指導および御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科 河崎善一郎教授に謹んで深謝の意を表します。

また、本論文を執筆するに際して、有益な御討論、御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科 井上恭教授に謹んで深謝の意を表します。

さらに、本論文に対して有益なる御助言をいただきました大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 滝根哲哉教授、北山研一教授、馬場口登教授、三瓶政一教授、並びに大阪大学産業科学研究所 鷺尾隆教授に深く感謝いたします。

大阪大学大学院工学研究科 山本賢司招聘教授には観測システム・解析手法に関する技術的な助言をいただきましたことを感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり多大な御指導と御助言を賜りました大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 牛尾知雄准教授、近畿大学理工学部電気電子工学科 森本健志准教授、大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点吉田智助教に深く御礼申し上げます。

また、本研究をまとめるにあたってお世話になりました大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 金寛助教、神戸市立工業高等専門学校電気工学科 中村佳敬講師、電気通信大学情報理工学研究科知能機械工学専攻 秋田学助教に深く感謝いたします。

第 3 章の北陸金沢での観測において、鉄塔・風車に設置された電流計測器による有益なデータをご提供いただいた岐阜大学の高木伸之教授、王道洪准教授、および岐阜大学工学部 電気電子工学科 高木研究室・王研究室の皆様、元石川工業高等専門学校櫻野仁志教授、株式会社北計工業窪内祥之氏に多大なる協力をいただきました。深く感謝いたします。

北陸雷観測期間中にご協力を頂いた、金沢大学理工学部 機能機械工学科 榎本啓士教授に深く感謝いたします

関西地方雷観測期間中にご協力を頂いた、大阪府立大学大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 小木曾望准教授および神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 大石哲教授に深く感謝いたします。

観測機器の構築から運用、解析にご協力いただきました菊池博史氏、Wu Ting

氏、村田和隆氏、管原康太氏、北出直也氏、酒谷章宏氏、河内駿迪氏にも大変お世話になりました。深く感謝いたします。また、本研究をまとめるにあたってお世話になりました大阪大学大学院工学研究科 電気電子情報工学専攻 情報通信工学部門 光電波工学講座 環境電磁工学領域の皆様にも深く感謝いたします。

オーストラリア・ダーウィン、北陸の内灘町、関西地方での観測期間中、現地の方々にご親切にご協力いただいたことを深く感謝いたします。

最後に、これまでの長きにわたる学生生活を許して下さった両親に心から感謝を申し上げます。

多くの方々に支えられ、本博士論文を執筆するに至りました。これからも、これらを肝に銘じながら研究活動に邁進し、広く社会に貢献する研究者となるよう努めて参ります。今後ともご指導ご鞭撻のほど、よろしくお願ひ申しあげます。

# 目次

第 1 章 序論 .....	1
1.1 雷放電と積乱雲の発達過程 .....	1
1.2 雷放電諸過程とその特性 .....	1
1.3 雷放電観測システム .....	4
1.3.1 雷放電観測手法 .....	4
1.3.2 電磁界観測システム .....	5
1.4 研究目的 .....	6
第 2 章 LF 帯広帯域干渉計の開発 .....	9
2.1 緒言 .....	9
2.2 LF 帯広帯域干渉計の開発 .....	9
2.2.1 LF 帯広帯域干渉計の構成 .....	9
2.2.2 LF 帯電磁波源の標定手法 .....	12
2.3 VHF 帯広帯域干渉計の構成 .....	16
2.4 結言 .....	17
第 3 章 LF 帯広帯域干渉計を用いた野外観測結果 .....	19
3.1 緒言 .....	19
3.2 LF 帯広帯域干渉計を用いた初期観測結果 .....	19
3.2.1 観測概要 .....	19
3.2.2 初期観測結果と考察 .....	21
3.3 LF 帯広帯域干渉計を用いた上向き放電で開始する落雷の観測 .....	36

3.3.1 冬季雷の性質と背景 .....	36
3.3.2 観測概要 .....	38
3.3.3 上向き放電で開始する落雷の観測結果 .....	38
3.3.3.1 両極性雷 .....	38
3.3.3.2 負極性雷 .....	46
3.3.4 考察 .....	49
3.4 LF 帯広帯域干渉計を用いた雷放電進展過程の観測 .....	50
3.4.1 観測概要 .....	50
3.4.2 観測結果 .....	51
3.4.2.1 雲内放電 .....	51
3.4.2.2 対地放電 .....	54
3.4.3 考察 .....	59
3.5 LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステム .....	62
3.5.1 リアルタイムモニタリングシステムの構成 .....	62
3.5.2 LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングの結果 .....	63
3.6 結言 .....	65
<b>第 4 章 結論 .....</b>	<b>67</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>71</b>
<b>関連発表論文 .....</b>	<b>77</b>

# 第1章 序論

## 1.1 雷放電と積乱雲の発達過程

近年日本では、気象レーダによる観測が困難な突発的、局所的に発達する積乱雲が問題になっている。こういった積乱雲は発生から成熟に至るまでが 20 分以内、水平スケールが数キロから数十キロメートル程度と報告されており(Chisholm et al., 1972; Orlanski et al., 1975)、急激な豪雨をもたらしその被害は大きい。降雨の開始が急であることや、短時間に多量の降雨を伴うためその被害が大きくなりやすい。多くの気象レーダは空間分解能 500m 程度、時間分解能 5-10 分程度であるため、このような積乱雲を観測することは困難である。

突発的、局所的に発達する積乱雲は激しい雷活動を伴うことが多いため、雷放電モニタリングによる集中豪雨、竜巻などの気象災害予測の可能性が示唆されており(Williams et al., 1999)、雷放電を伴う積乱雲の監視が可能であると考えられる。道本は夏季に雷放電数と波長 5.7 cm のレーダによる降雨強度の時間変化を比較し、20-30 dBZ のエコー高度が急激に上昇する 5-10 分後、および 45dBZ が-20°C 高度に達した 5 分後に雷活動のピークが発生していることを報告している(Michimoto, 1991)。また米国フロリダでの観測により豪雨や突風の 10 数分前に雷放電数が急激に増加する”lightning jump” も観測されている(Williams et al., 1999)。よって、雷放電監視は単に積乱雲の位置を推定するだけではなく、積乱雲内の電気的活動度をモニタリングすることによる雷放電を伴った急発達する積乱雲の成熟度も推定可能である。

## 1.2 雷放電諸過程とその特性

本節では一般的な雷放電諸過程とその特性について述べる。雷雲は通常、発達・成熟・衰弱という 3 つのステージを経る。図 1.1 に単一セルにおける雷雲のステージを示す(Rogers and Yau, 1988)。3 つのステージの持続時間はそれぞれ 15 分程度であり、約 1 時間以内でセルのライフサイクルが完結する。実際には衰弱期のセルに隣接して新しいセルが発達してサイクルが繰り返されることが多い。雷雲の発達に伴って、一般的な雷雲内では上部に正電荷、下部に負電荷が分布し、下層の強い降水域に対応して局所的な正電荷が分布する。雷雲の電荷生成は雲内のあられや氷晶等の衝突による電荷分離によって発生するものと考えられている(Takahashi, 1978; Williams, 1989; Saunders and Peck, 1998)。電荷生成が進むと雷雲内の電界が強くなり雷放電が開始する(Kesemir, 1960)。雷放電は放電路が地上に達する場合と達しない場合があり、前者

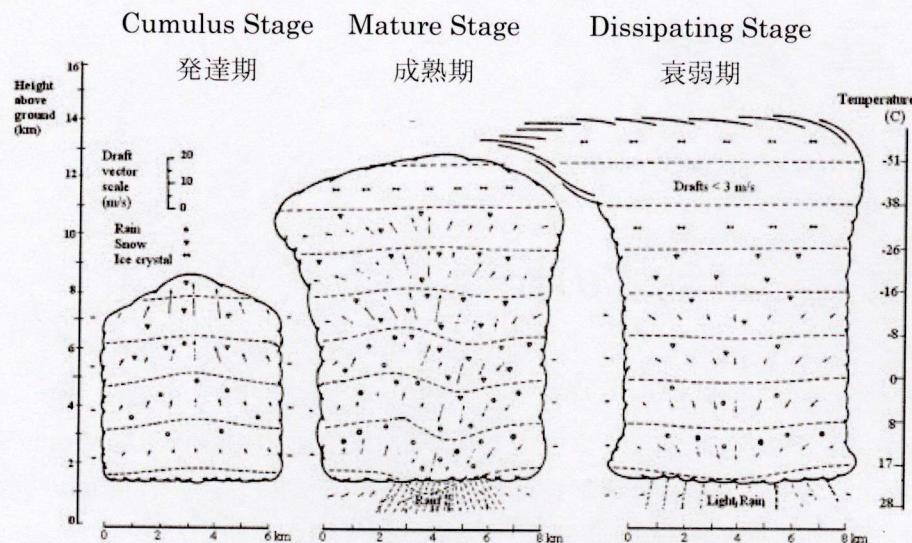
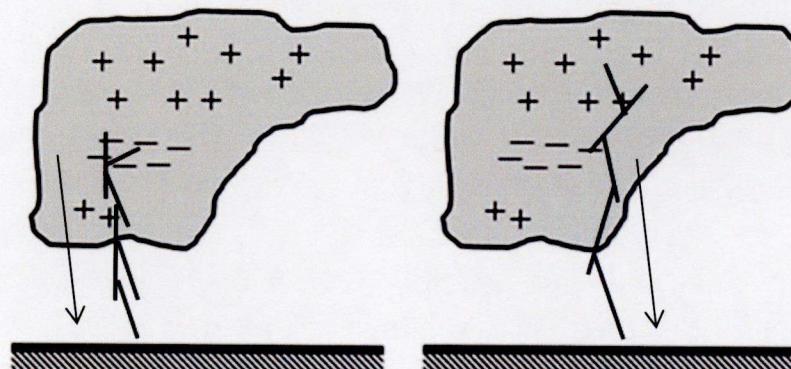
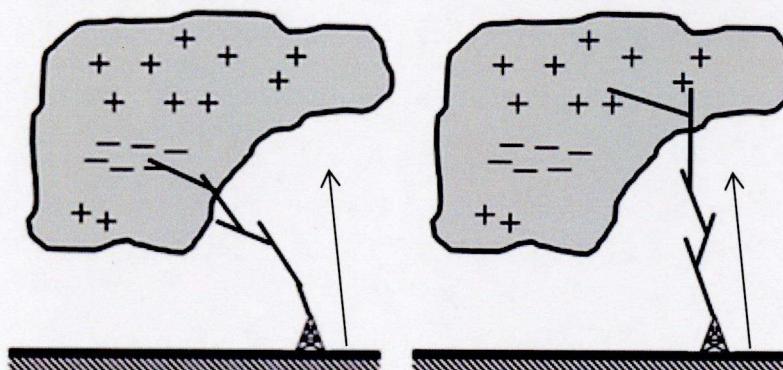


図 1.1: 単一セルにおける雷雲のステージ(Rogers and Yau, 1988)



(a)下向き負極性落雷

(b)下向き正極性落雷



(c)上向き負極性落雷

(d)上向き正極性落雷

図 1.2: 落雷の種類

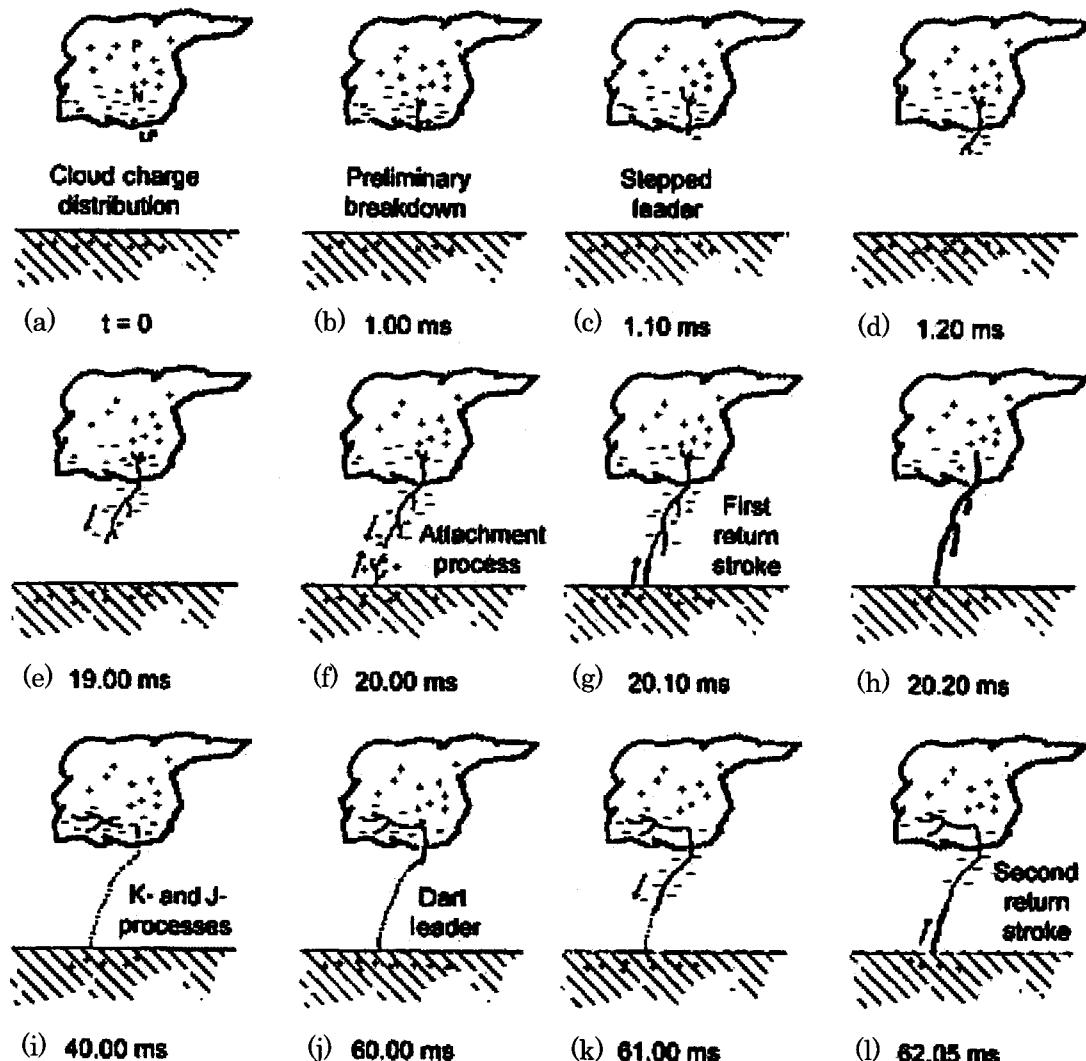


図 1.3: 下向き負極性落雷の放電進展過程(Uman, 2001)

を落雷もしくは対地放電と呼び、後者を雲内放電と呼ぶ。一般的に発達期には雲内放電のみが発生し、成熟期、衰弱期には雲内放電および対地放電が発生する。

図 1.2 に示すように対地放電は以下に示す 4 種類の落雷に分類される。対地放電の際に中和される雷雲内の電荷の極性には負と正があり、それぞれ負極性落雷、正極性落雷と呼ばれる。雷雲内から地上に向かって雷放電が進展する場合と地上から雷雲内に向かって雷放電が進展する場合があり、それぞれ下向き落雷と上向き落雷と呼ぶ。下向き落雷、上向き落雷それぞれに負極性落雷と正極性落雷があり、落雷の種類は下向き負極性落雷、下向き正極性落雷、上向き負極性落雷、上向き正極性落雷の 4 種類になる。

対地放電の中で最も発生頻度の高い下向き負極性落雷の放電進展過程について説明する(図 1.3)(Uman, 2001)。(a)雷雲内に電荷が蓄積されるとその周辺で電界強度が高

くなる。電界強度が絶縁破壊臨界値を超えると部分的に空気の絶縁破壊が起こる。このような(b)初期放電(preliminary breakdown(Brook, 1992))が数 ms～数十 ms 継続すると、(c)ステップトリーダと呼ばれる導電性の高い負電荷を帯びたプラズマチャネルが電荷領域から大地に向かって進展を開始する。ステップトリーダは進展と休止を繰り返しながら平均速度  $10^5\text{m/s}$  のオーダで進展し、約 20ms で大地近傍に達する。通常ステップトリーダは大地付近で枝分かれが多くなることが知られている(Yoshida et al., 2012)。ステップトリーダが大地に接近すると、ステップトリーダ内の負電荷により木の先端やビルの避雷針等の電界が上昇し、その値がある閾値に達すると正に帯電した結合リーダが突起物先端から進展を開始する。(f)これら二つのリーダが結合すると、雷雲内の電荷領域と地上とが電気的に結ばれる。

二つのリーダが結合されると、その結合点より(g)帰還雷撃が雷雲内に向かって進展を開始する。帰還雷撃は負に帯電したステップトリーダを下から順次中和していく。それに伴い大電流が流れ、激しい閃光が生じる。帰還雷撃は地上近傍で  $2 \times 10^8\text{m/s}$  の速度で進み(Schonland, 1956)、その速度は高度とともに減少する。最初の帰還雷撃を第一雷撃と呼ぶ。通常、一つの対地放電で複数の帰還雷撃が発生する。

第一雷撃から数十 ms 経過すると(j)ダートリーダによって再び負電荷が大地に引き降ろされる。ダートリーダは通常第一雷撃と同じ放電路を進展し大地に至る。この放電路は直前の帰還雷撃により一度プラズマ状態になっているため、周囲の空気よりもはるかに高い導電率を保持する。このためダートリーダは枝分かれが少なく、またステップトリーダのように休止することなく、ステップリーダよりも一桁以上大きい平均速度  $10^7\text{m/s}$  を有する。ダートリーダが地上に接続すると、(l)第一雷撃と同様に帰還雷撃へと至る。2番目以降の帰還雷撃は後続雷撃と呼ばれる。一つの帰還雷撃で対地放電が完了する場合を单一落雷、複数の帰還雷撃が含まれる場合を多重雷と呼ぶ。帰還雷撃終了から引き続き数百 A 程度の電流が 20ms から 100ms の間流れ続ける場合があり、これを連続電流と呼ぶ。この間放電路は連続的に発光を続けているが、1ms 程度発光強度が強まる場合があり、この変化を M-コンポーネント(Malan and Schonland, 1947; Thottappillil et al., 1995)と呼ぶ。また、連続電流が流れていない対地放電中あるいは雲内放電中に雲内で 1ms 程度微弱な発光が 10ms 程度の間隔で見られ、これは(i)K 変化(Kitagawa et al., 1962)と呼ばれる。

## 1.3 雷放電観測システム

### 1.3.1 雷放電観測手法

1.2 節で述べたように、雷放電は非常に複雑な過程を有している。雷放電諸過程は大量の電荷の移動を伴っているため、様々な ELF 帯(Rodger et al., 2006)から光波(Wang et al., 1999)、放射線(Yoshida et al., 2009; Torii et al., 2011)に至るまでの様々な電磁放射

を伴うことが知られている。電磁波(ELF 帯～UHF 帯)は光波や放射線と比較して降水粒子による減衰はなく、比較的遠くまで伝播するために、雷放電に伴う電磁波を観測しその位置を標定する手段として古くから技術開発が行われてきた。雷放電発生位置を標定する手法は到達時間差法(Lewis et al., 1960)と干渉法(Rhodes et al., 1994)に大別され、これらの技術は、これまで雷放電物理の解明に貢献し、また雷雲のモニタリングに用いられてきた。到達時間差法は各センサへ到達するパルスの時間差を求める手法であり、干渉法は着目する周波数におけるセンサ間の位相差を求める手法である。干渉法は、位相を求める際に着目する周波数における到来波同士の干渉を計測するため干渉法と呼ばれる。本節では雷放電の電磁波観測の現状を紹介する。

### 1.3.2 電磁界観測システム

ELF/VLF 帯、LF/MF 帯、および VHF/UHF 帯など幅広い周波数帯において雷放電の電磁波観測が実施されている。雷放電に伴う VLF 帯電磁波の特徴は、観測範囲が数千キロと非常に広範囲であることがあげられる。帰還雷撃に伴う放射電力の強度は VLF 帯で最も強く、電離層と大地間で反射を繰り返して伝搬するため、非常に広範囲な観測が可能である。しかし、VLF 帯では雷撃による電磁波は強いが、雲内放電や雷放電進展過程に伴う電磁波が弱いため、夏季雷放電の 9 割に相当する雲内放電の標定は困難である。雲内放電は、対地放電の前に先行すること(Williams, 1989)を考慮すると、雷放電を伴った急発達する積乱雲を早期に監視する上で、特に雲内放電の監視は不可欠である。WWLLN(World Wide Lightning Location Network) では、全世界に現在 40 箇所のセンサを配置したネットワークで VLF 帯を用いた全球的な雷放電観測を行なっている。雷放電位置標定方法は群遅延を考慮した到達時間差法であり、標定には最低 5 つのセンサが必要である。到達時間差法とは 4 つ以上の受信機で電磁波を受信し、それぞれの受信機へ到達したパルスの時間差を用いて、電磁波源を標定する手法である。WWLLNにおいて、帰還雷撃電流が 30kA の検出効率は 30% であり、標定精度は平均 10km 以内である(Rodger et al., 2009)。

一方、雷放電に伴う VHF/UHF 帯電磁波の特徴は、雷放電進展の際に電磁波パルスが放射されるため、1 フラッシュ中に数千もの電磁波パルスが受信可能であり、それぞれの電磁波パルスの標定を行うことで、対地放電だけでなく雲内放電の雷放電路を詳細に可視化することが可能である。我々は VHF 帯広帯域干渉計を開発してきており、雷放電路を可視化することで様々な成果を上げている(Sumida et al., 2011 ; Akita et al., 2011; Yoshida et. al., 2012)。しかし、VHF 帯広帯域干渉計は観測範囲が 50km 程度に限られているため、雷雲の発達から衰弱に至るまでを全体的に観測することが困難である。

この VLF 帯と VHF/UHF 帯の中間に位置する、雷放電に伴う LF/MF 帯電磁波の特徴は、帰還雷撃や雲内放電の際に発生する K-event(Kitagawa et al., 1962)等に伴う電磁波も受信可能であり、LF/MF 帯におけるそれらの放電過程の観測範囲が 200km 程度

もしくはそれ以上であることが知られているため、雷雲の発達から衰弱に至るまでを観測することが可能である。また、LF/MF 帯では雲内放電に伴う比較的放射電力の弱い電磁波パルスや、雷放電進展に伴う微弱な電磁波パルスが受信可能であるため、対地放電だけでなく雲内放電の雷放電進展過程が観測可能である。したがって、広範囲な対地放電および雲内放電の三次元発生位置が観測可能な LF/MF 帯は、突発的、局所的に発達した雷放電を伴う積乱雲のモニタリングに最適である。

LF 帯を用いた観測ネットワークは、国内ではフランクリンジャパンが展開している Japan Lightning Detection Network (JLDN)で用いられている。JLDN は全国規模の雷観測ネットワークであり、2012 年の時点で全国 30 箇所にセンサを設置している。雷放電位置標定手法は到達時間差法である。検出効率は 90%以上、標定精度は平均 500m 以下となっており、雷放電位置標定とともに電流値の推定を行う。ただし、JLDN は観測対象を対地放電としているため、雷放電を伴った急発達する雷雲を監視するには不十分である。

雷放電進展過程を含む雷放電を観測対象としている観測ネットワークは、アメリカの Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN)(Heckman et al., 2011)やドイツの Lightning Location Network(LINET)(Betz et al., 2010)が挙げられる。これらのシステムは広範囲な雷放電観測を目的としているため、100km～200km の広範囲にセンサを配置するネットワークとなっている。そのため、一部の信号強度が強い雷放電進展過程に伴う電磁波パルスが受信可能なものの、多くの信号強度が弱い雷放電進展過程に伴う電磁波パルスの標定が困難であるため、1 フラッシュあたりの標定数が 10 点程度となり詳細な雷放電の像をえることは難しい(Stolzenburg et al., 2012)。これらのシステムは到達時間差法を用いて雷放電位置標定を行っている。

## 1.4 研究目的

雷放電に伴う電磁波のうち LF 帯では、信号強度の強い帰還雷撃や雲内放電の際に発生する K-event(Kitagawa et al., 1962)も位置標定が可能であるため、広範囲な落雷地点および雲内放電の三次元位置標定も観測可能であり、突発的、局所的に発達し雷放電を伴う積乱雲のモニタリングに最適である。また、LF 帯では観測装置から数十キロ以内で発生した雷放電進展過程に伴う電磁放射も受信可能である。雷放電進展過程の標定は LINET(VLF/LF Lightning NETwork) によっても報告されており(Stolzenburg et al., 2012)、LF 帯の受信装置により標定可能である。

我々大阪大学の研究グループでは、積乱雲を詳細に監視するために LF 帯広帯域干渉計を開発している。LF 帯広帯域干渉計は 4 つ以上の観測サイトに設置した LF 帯受信機より構成される。今回我々が開発した LF 帯広帯域干渉計は、詳細な放電路を可視化することを目的としているため 50km 程度のネットワークとしている。LF 帯を用いた従来システムより狭い範囲で観測することにより、1 フラッシュあたり数十～

百点程度の標定数が期待される。また、従来システムが到達時間差法を用いて雷放電位置標定を行っているのに対して、LF 帯広帯域干渉計は広帯域ディジタル干渉法 (Morimoto et al., 2004)を用いて雷放電位置標定を行う。到達時間差法は孤立したパルスに対して有効である一方、regular pulse burst(Rakov et al., 1996)に代表されるバースト状の信号波形に対してパルスの同定が困難であるため(Proctor, 1981)電磁波源位置標定が一般には不適当とされる。一方、広帯域ディジタル干渉法は波形の位相情報のみを用いるため、パルスを同定する必要がなく、K-event のようなバースト状の波形に対しても位置標定可能である(Hayenga, 1984)。また、パルスの振幅ではなく位相情報を用いた標定手法であるため、狭帯域のノイズに隠れている波形に対しても位置標定可能である。以上で述べた理由により LF 帯広帯域干渉計を開発した。

LF 帯広帯域干渉計では広範囲な雷放電観測が可能であり、突発的、局所的に発達し雷放電を伴う積乱雲のモニタリングに適している。また、対地放電および雲内放電における雷放電進展過程に伴う電磁波を多数標定することが期待される。そこで本研究では LF 帯広帯域干渉計の開発及びその有効性の実証を行った。



# 第2章 LF 帯広帯域干渉計の開発

## 2.1 緒言

我々の研究グループでは雷放電路可視化装置である VHF 帯広帯域干渉計を開発してきた。VHF 帯広帯域干渉計は VHF 帯電磁波に広帯域干渉法を適用した装置であり、詳細な雷放電路の可視化が可能という特性を活かした様々な成果を上げている。ただし、落雷地点が判別できず、観測範囲が 50km 程度という欠点がある。そのため、雷雲の発達から衰弱に至るまでの積乱雲の盛衰全体を観測することが困難である。これに対し、雷放電に伴う LF 帯電磁波は 200km 程度伝搬するため、広範囲な観測が可能である。また、雷放電進展に伴う電磁波も受信可能なため、雷放電路の可視化が期待される。本論文では、広域かつ詳細な雷放電観測を行うために、広帯域干渉法を LF 帯に適用した LF 帯広帯域干渉計を開発し、その有効性を検証する。

本章では、論文の基本装置である LF 帯広帯域干渉計の開発および雷放電位置標定手法について説明する。また、本研究で LF 帯広帯域干渉計による標定結果の比較・検討に用いた VHF 帯広帯域干渉計の構成を説明する。

## 2.2 LF 帯広帯域干渉計の開発

### 2.2.1 LF 帯広帯域干渉計の構成

LF 帯広帯域干渉計は、数キロから数十キロメートル離れた 4 つ以上の観測サイトに設置した LF 帯受信機より構成され、各受信機によって記録された受信波形から、3 つ以上の独立した LF 帯受信機対で位相差を求め、LF 帯電磁波源を三次元で標定する装置である。

LF 帯受信機は、容量性円形平板アンテナ、A/D 変換ボード、GPS(global positioning system)、パーソナルコンピュータ、で構成される(図 2.1 参照)。受信電圧波形はローパスフィルタを通過後、A/D 変換されパーソナルコンピュータに記録される。A/D 変換ボードにはアンテナによる受信信号と GPS から正秒毎に発せられる精度 50ns の矩形波信号(1PPS(pulse per second)信号)が入力される。1PPS 信号の立ち上がり部分が正秒に対応する。各 LF 帯受信機は 1PPS 信号により 1μs 以内の精度で装置間の時刻同期を実現している。LF 帯受信機の諸元を表 2.1 に示す。2009 年 11 月～12 月に実施し

表: 2.1 LF 帯受信機の諸元

Observation period	Nov. ~ Dec. 2009	Nov. 2010~Jan. 2011		Apr. ~ Oct. 2012	Oct. 2012~
Site	Site1, Site2, Site3	Site4	Site1, Site3, Site4, Site5	Site2	All Site
Antenna	Flat plate antenna		Flat plate antenna		Flat plate antenna
Frequency band	400Hz~500kHz		800Hz~1MHz		800Hz~500kHz
Time constant	200μs		200μs		200μs
Sampling frequency	1MHz		4MHz		4MHz
Recording time	1.25s	1s	1.1s	1s	200ms
Resolution	12bit	10bit	12bit	12bit	14bit

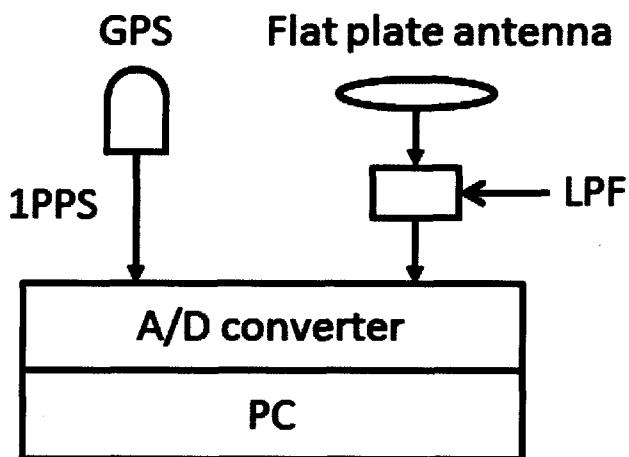


図: 2.1 LF 帯受信機の構成図。

た初期観測で用いた A/D 変換ボードのサンプリングレートは 1MHz、分解能は 12bit、帯域は 400Hz~500kHz、記録時間は 1.25s であった。これに対し、2010 年 11 月~2011 年 1 月の観測ではサンプリングレートを 4MHz、帯域を 800Hz~1MHz、記録時間を 1.1s に変更した。サンプリングレートを 1MHz から 4MHz に変更することで、時刻精度を向上させ受信電圧波形を詳細に記録することができる。1MHz サンプリングで 1 ポイントのずれは経路差 300m のずれに対応するため、標定誤差に大きく影響をおよぼすためサンプリングレートを向上させることができが望ましい。2012 年 4 月からは AM 波の信号を遮断するため、A/D 変換ボードの入力部に 500kHz のローパスフィルタ(LPF)を装荷し、2012 年 10 月から現在までは分解能を 14bit、記録時間を 200ms に変更した。

また、細かい点では、アースの改善や、電源から混入するノイズを低減させるために AC ラインフィルタの採用等を行なっている。LPF の装荷、アースの改善、および AC ラインフィルタの採用によって、電波環境の悪い都市部において、SN 比が改善し雷放電進展過程に伴う微小な電磁波パルスが受信可能となった。

さらに、現在 LF 帯受信機を多地点に配置しており、標定に対して冗長性をもたせ

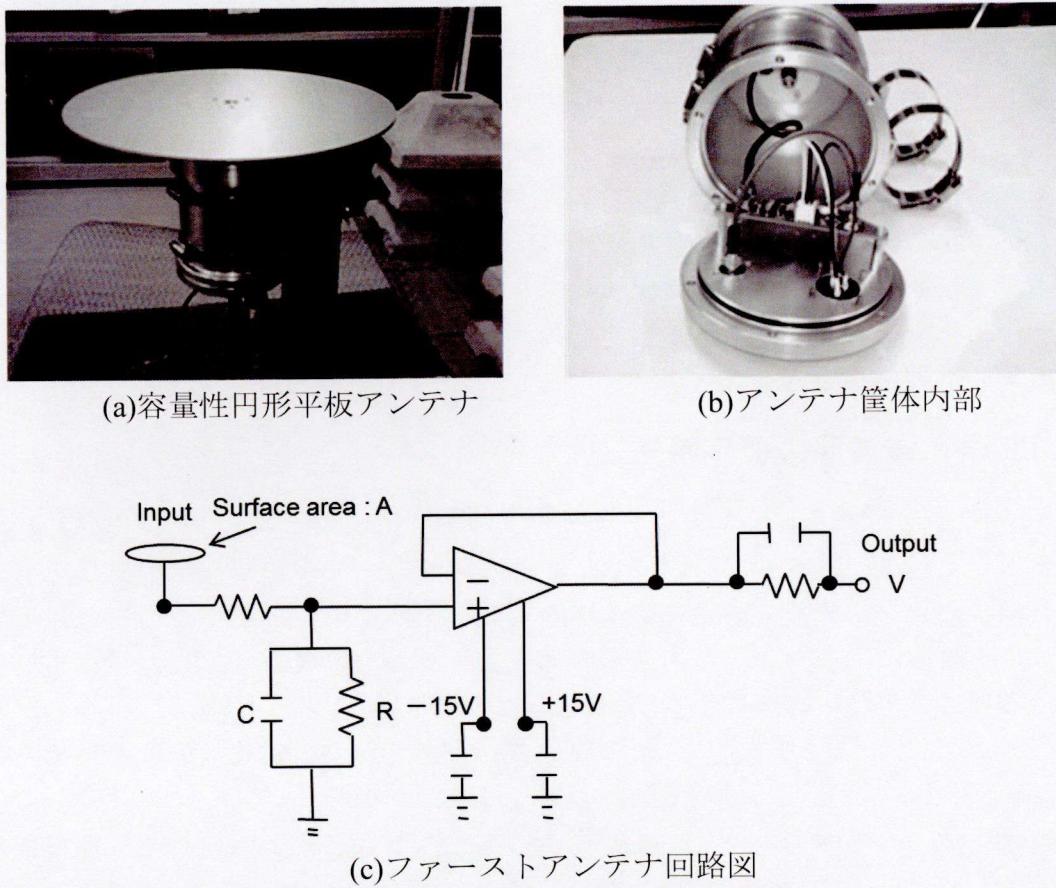


図: 2.2 容量性円形平板アンテナと内部回路図。

ている。そうすることで、観測範囲が広がり、かつ標定精度が向上することが期待される。一般的に、雷放電進展過程に伴う電磁波パルスは信号強度が弱いため、すべての LF 帯受信機で受信される確率が低い。したがって、LF 帯受信機を多地点に配置することで、標定可能な電磁波パルス数を向上させることができる。

2012 年以前の A/D 変換ボードは波形の記録終了から次の波形の記録開始までの時間であるデッドタイムが 100ms 程度であったが、現在使用している A/D 変換ボードはデッドタイムが無く、波形を記録する時間のずれによって標定不可能となる雷放電過程が無くなるため、雷放電観測に非常に有効である。4MHz サンプリング以上にサンプリングレートを向上させると、データ量が大きくなりリアルタイム性に問題が生じるため、現状は 4MHz サンプリングでデータを記録している。

本研究では、雷放電に伴う電界変化を観測するために直径 30cm の容量性円形平板アンテナを大地と水平に設置し、さらにコンデンサ C を接続し、コンデンサ両端の電圧  $V$  を記録する。コンデンサ容量  $C$  を変えることで受信感度を調節することができる。容量性円形平板アンテナと内部回路を図 2.2 に示す。容量性円形平板アンテナは、モノポールアンテナのように突端がないため局所的に電界が増大しない、そのため雷雲が接近した際にアンテナ先端でコロナ放電が発生せず、雷雲観測に適している。その

ため、我々は容量性円形平板アンテナを採用している。容量性アンテナの外部電界は  $E = CV / (\epsilon_0 A)$  より求まる。 $A$  は金属平板の面積、 $\epsilon_0$  は真空の誘電率である。また、コンデンサに抵抗  $R$  を挿入し、回路の周波数帯域の下限  $f = 1 / (2\pi RC)$  を決定する。ここで、 $RC$  は時定数と呼ばれ、 $V$  にステップ電圧が加わったとき  $1/e$  に減少するまでの時間である。スローアンテナの時定数は数秒程度であり、ファーストアンテナの時定数は 1ms 程度である。本論文では LF 帯電磁波形(電界変化波形)を容量性円形平板アンテナで受信し、時定数 200μs のファーストアンテナ回路を通過後の電圧波形を記録する。なお、本研究では、上空の負電荷の消滅に伴う地上での電界変化を正とする大気電気学の慣習に従う。

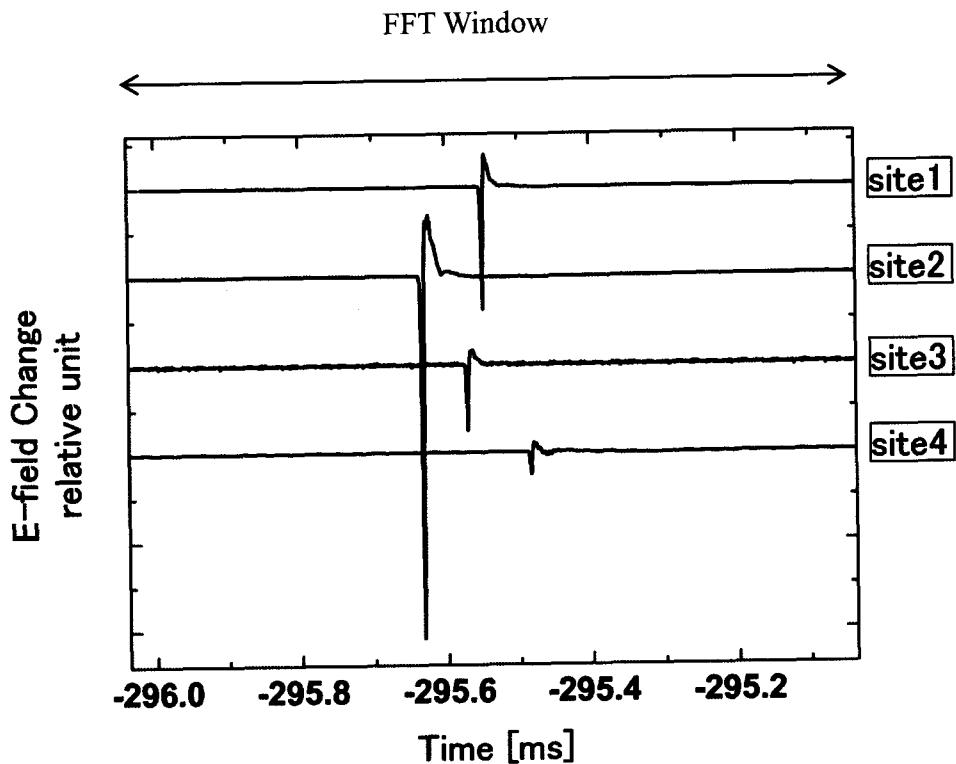
## 2.2.2 LF 帯電磁波源の標定手法

LF 帯広帯域干渉法では、まず 2 サイトのアンテナで受信された LF 帯電磁波形の位相差を求める。次に、着目する周波数における位相差から、電磁波放射源から各アンテナへの経路差を求める。最後に、未知の変数である電磁波放射源位置を三次元で求める。このためには、少なくとも 3 つの連立方程式が必要である。これは、電磁波放射源から各アンテナへの経路差を 3 つ以上の独立したアンテナ対(4 つ以上のアンテナ)から求めることにより、3 つ以上の連立方程式が立てられ、電磁波放射源を求めることができる。

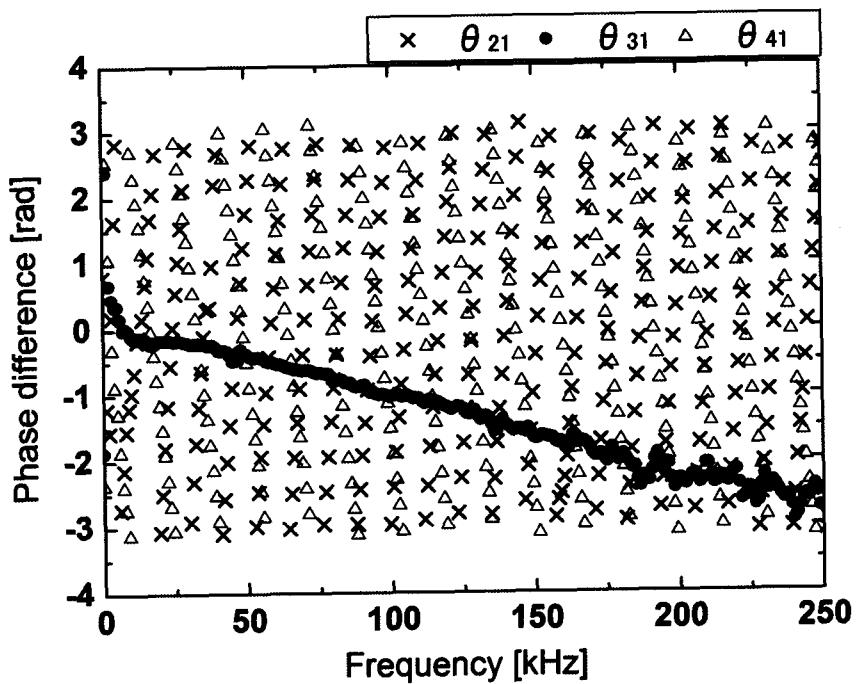
観測された一つの波形を例に、広帯域干渉法によって経路差を求める計算過程を図 2.3 を用いて説明する。2 つのサイト  $(i, k; 1 \leq i, k \leq N_s, i \neq k)$  ( $N_s$ : サイト数) で同時に記録された約 1s の LF 帯電磁波形に対してパルス部分を抜き出す。基準とするサイトの波形に電圧の閾値を設定し、閾値以上の波形をパルスのピーク時刻を中心とした  $N$  ポイントの信号  $S_i[n], S_k[n]$  ( $n$  は整数  $(0 \leq n \leq N - 1)$ ) に各々分割する。信号  $S_i[n], S_k[n]$  の各添字は各サイトに対応している。

初期観測の解析では 4 サイトで 1MHz サンプリング、 $N=2048$  ポイント(1023μs)の時間窓を用い、初期観測以降は 5~8 サイトで 4MHz サンプリング、 $N=2048$  ポイント(512μs)の時間窓を用いる。ここで、 $N$  の値は以下に示す点を考慮して決定している。初期観測では振幅の大きい孤立した波形の帰還雷撃等が観測対象であったため時間窓を大きめに設定した。また、初期観測以降では観測サイト間の最大距離に応じて時間窓を設定した。例えば最大距離が 30km である場合、到達時間差が最大 100μs 程度であるため 256μs 程度の時間窓で十分である。時間窓が小さいほど、複数の雷放電過程による波形が時間窓内に入る可能性が少なくなる。

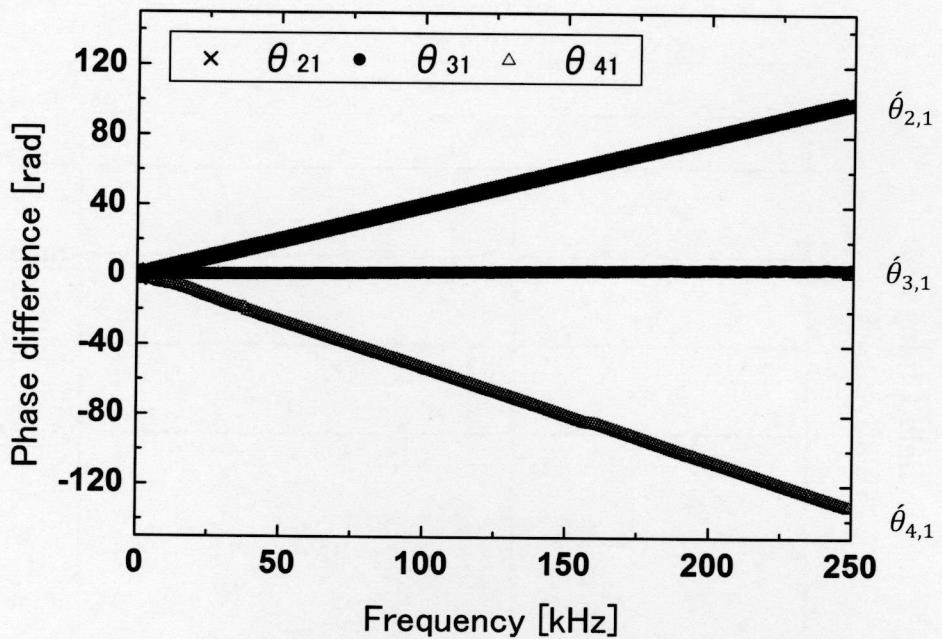
サイト 1~4 で実際に取得された雷放電に伴う 1MHz サンプリングによる LF 帯電磁波形  $S_i[n], S_k[n]$  のパルス部分を図 2.3 (a) に示す。図 2.3(a) ではサイト 1 のパルスピークを中心とした時間窓を採用している。LF 帯電磁波形  $S_i[n], S_k[n]$  に対してハニング窓をかけ FFT(Fast Fourier Transform) を行い(式(2.1)、(2.2))、周波数ごとにフーリエ成分  $\tilde{S}_i[m], \tilde{S}_k[m]$  を求める。



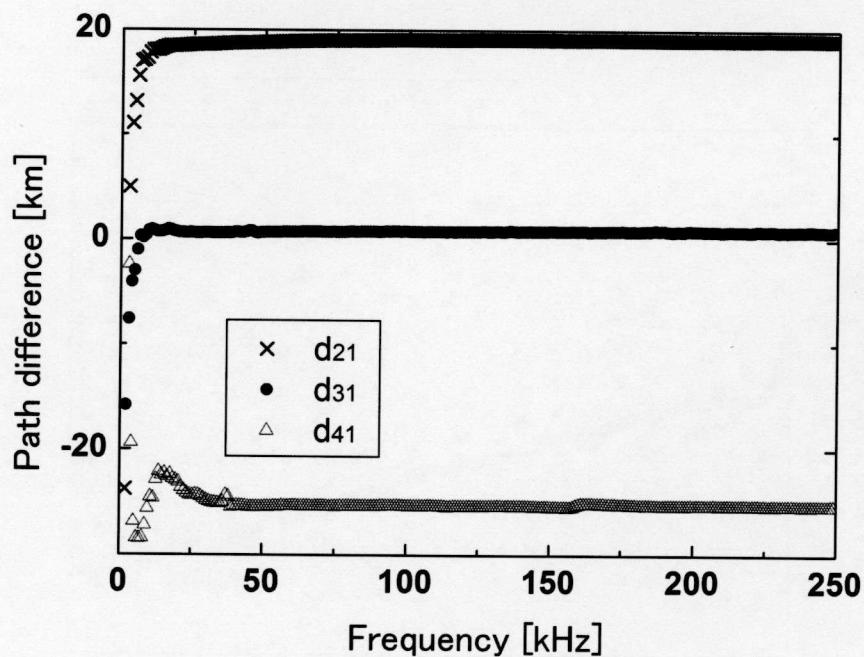
(a) LF 帯受信機で記録された LF 帯電磁波形の一例



(b) フーリエ変換後の周波数ー位相差の関係



(c) フリンジ不確定性除去後の位相差



(d) 周波数-経路差の関係

図 2.3: 広帯域デジタル干渉法の計算過程の説明図。

$$\tilde{S}_i[m] = \sum_{n=0}^{N-1} S_i[n] \exp\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \left(0.5 - 0.5 \cos 2\pi \frac{n}{N}\right) \quad \dots \quad (2.1)$$

$$\tilde{S}_k[m] = \sum_{n=0}^{N-1} S_k[n] \exp\left(\frac{-j2\pi mn}{N}\right) \left(0.5 - 0.5 \cos 2\pi \frac{n}{N}\right) \quad \dots \quad (2.2)$$

フーリエ成分  $\tilde{S}_i[m], \tilde{S}_k[m]$  ( $m$  は整数 ( $0 \leq m \leq N - 1$ ) からサイト  $i, k$  間で受信された LF 帯電磁波形の各周波数成分における信号間の位相差  $\theta_{k,i}[m]$  を求める (式(2.3))。

$$\theta_{k,i}[m] = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}\tilde{S}_k[m]}{\text{Im}\tilde{S}_i[m]}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}\tilde{S}_i[m]}{\text{Im}\tilde{S}_k[m]}\right) \quad \dots \quad (2.3)$$

1024 ポイント FFT を行った場合、513 個の位相差が求まる。図 2.3 (a) で示した LF 帯電磁波形から求めた周波数と位相差の関係を図 2.3(b) に示す。図 2.3(b) には 0~250kHz の周波数成分における位相差  $\theta_{2,1}[m], \theta_{3,1}[m]$ 、および  $\theta_{4,1}[m]$  が示されている。サイト 2-1 間ではサイト 2 にパルスが到達した後サイト 1 にパルスが到達するため、 $\theta_{2,1}[m]$  の傾きが正になっている。一方、サイト 4-1 間ではサイト 1 にパルスが到達した後サイト 1 にパルスが到達するため、 $\theta_{4,1}[m]$  の傾きが負になっている。サイト 3-1 間では他のサイト間に比べて時間差が短いため、 $\theta_{3,1}[m]$  は緩やかな負の傾きとなっている。なお、LF 帯電磁波形において 300kHz 以上のパワースペクトルでは環境雑音に対する SN 比が低いため、それらの成分は計算に用いていない。これらの位相差  $\theta_{2,1}[m], \theta_{3,1}[m]$ 、および  $\theta_{4,1}[m]$  は  $-\pi \sim \pi$  の範囲に制限されており、位相の回り込みが考慮されていない。位相の回り込みを考慮して、周波数に対して位相差が連続的に並ぶように補正する操作をフリンジ不確定性除去 (Morimoto et al., 2004) と呼んでいる。

アンテナで受信された信号間の位相差  $\theta_{k,i}[m]$  からフリンジ不確定性除去した位相差  $\hat{\theta}_{k,i}[m]$  を求める。フリンジ不確定性除去後の位相差  $\hat{\theta}_{2,1}[m], \hat{\theta}_{3,1}[m]$ 、および  $\hat{\theta}_{4,1}[m]$  と周波数の関係を図 2.3(c) に示す。図 2.3(c) では図 2.3(b) で見られる位相の折り返しが無くなりかつ周波数に対して線形に並んでいることがわかる。

その後、式(2.4)を用いて  $\hat{\theta}_{k,i}[m]$  から経路差  $d_{k,i}[m]$  を求める。

$$d_{k,i}[m] = \frac{c\hat{\theta}_{k,i}[m]}{2\pi f[m]} \quad \dots \quad (2.4)$$

ここで、電磁波放射源から観測サイト  $i$  への経路長を  $d_i[m]$ 、観測サイト  $k$  の位置への経路長を  $d_k[m]$  とすると経路差  $d_{k,i}[m] = d_k[m] - d_i[m]$  で表される。経路差  $d_{2,1}[m], d_{3,1}[m]$ 、および  $d_{4,1}[m]$  と周波数の関係を図 2.3(d) に示す。周波数  $f[m]$  はサンプリング周波数  $f_s$  を用いて、 $f[m] = mf_s/N$  と表される。c は光速である。

各周波数に対してそれぞれの経路差  $d_{k,i}[m]$  を求め、この算術平均値  $d_{k,i}$  を電磁波放

射源から各観測サイト  $i, k$  までの経路差として採用する。図 2.3(d)で見られるように、50kHz 以下の低周波成分は誤差を多く含むため、 $d_{k,i}$  の計算に用いていない。経路差  $d_{i,k}$  および LF 帯電磁波放射源標定点  $(x, y, z)$ 、観測サイト  $i$   $(x_i, y_i, z_i)$ 、観測サイト  $k$   $(x_k, y_k, z_k)$  は次式(2.5)を満たす。

$$d_{k,i} = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2} \\ - \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad \dots (2.5)$$

最後に経路差  $d_{k,i}$  から式(2.6)に示す評価関数を用いて LF 帯電磁波放射源標定点を導出する。サイト  $i$  を基準とした各観測サイトに対する式(2.5)の二乗値を式(2.6)のように表し、評価関数  $\chi^2$  値を最小にするような  $x, y, z$  を LF 帯電磁波放射源標定点とする。

$$\chi^2 = \sum_{i \neq k}^{N_s} \left\{ \left( \frac{d_{k,i} - \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2}}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}} \right)^2 / \sigma_{k,i}^2 \right\} \quad \dots (2.6)$$

ここで、式(2.6)ではサイト  $i$  を基準とした式を用いて LF 帯電磁波放射源標定点を導出しており、 $\sigma_{k,i}^2$  は式(2.4)の経路差  $d_{k,i} [m]$  の分散である。

今節ではサイト 1 を基準とした計算方法を説明したが、実際標定する際の計算にはすべてのサイトを基準とした位相差、経路差を導出しており、それらによる経路差(式(2.5))の二乗値が式(2.6)の評価関数  $\chi^2$  に含まれる。

## 2.3 VHF 帯広帯域干渉計の構成

本論文では LF 帯広帯域干渉計による標定結果を VHF 帯広帯域干渉計の標定結果と比較・検討を行なっている。VHF 帯広帯域干渉計は 1 つの観測サイトに設置された 3 機の VHF 帯受信機から構成され、記録された波形を元に各 VHF 帯受信機間の位相を求め、観測サイトを基準とした VHF 帯電磁波の到来方向を仰角、方位角で推定する装置である(Morimoto et al., 2004)。VHF 帯広帯域干渉計は、円形平板アンテナ、A/D 変換ボード、GPS、パーソナルコンピュータで構成される。A/D 変換ボードのサンプリングレートは 200MHz、分解能は 10bit である。3 機のアンテナで受信された電圧波形は、通過帯域 20~80MHz のバンドパスフィルタを通過後、A/D 変換しパーソナルコンピュータに記録される。VHF 帯広帯域干渉計は雷放電の進展に伴い放射される VHF 帯電磁波を標定することで、詳細な雷放電路の可視化を実現している(Akita et al., 2011; Sumida et al., 2011; Yoshida et al., 2012b)。VHF 帯広帯域干渉計は開発当初に既存の VHF 帯狭帯域干渉計との比較による精度検証が行われており、それら干渉計による標定結果の差は方位角で平均 0.46°、標準偏差 4.5°、仰角で平均 -1.35°、標準偏差 5.0° であった(Murakami et al., 1999)。VHF 帯狭帯域干渉計は中心周波数 327MHz に対して

350kHz の帯域幅をもっており、広帯域干渉計よりも広範囲な観測が可能となっている。広帯域干渉計は広帯域な周波数を用いるため、冗長性があり標定精度が高い。

## 2.4 結言

本章では、LF 帯広帯域干渉計の構成を示した。また、LF 帯に広帯域干渉法を用いた雷放電位置標定手法について、実際に取得された雷放電に伴う LF 帯電磁波形を用いて説明を行った。さらに、本論文で LF 帯広帯域干渉計による結果との比較に用いる VHF 帯広帯域干渉計の構成について述べた。



# 第3章 LF 帯広帯域干渉計を用いた野外観測結果

## 3.1 緒言

本章では我々が開発した LF 帯広帯域干渉計を用いて雷放電観測を実施し、得られた結果について述べる。まず、2009 年に実施したオーストラリア・ダーウィンでの初期観測結果から LF 帯電磁波が強く放射される雷放電過程である帰還雷撃、K-event、Compact intraclooud discharge(CID)等が標定可能であることを示す。CID とは通常の雲内放電よりも高高度で発生する放電であり、放射電力が強く、LF 帯では  $50\mu\text{s}$  以下の非常にパルス幅の狭い両極性パルスである。次に、2010-2011 年に実施した北陸での冬季雷観測について、冬季に頻発し被害が大きいとされる上向き放電で開始する雷放電の観測結果について述べる。さらに、2011 年から関西地方で実施している LF 帯広帯域干渉計および VHF 帯広帯域干渉計による雷放電観測について述べる。観測毎に得られた知見に基づいて LF 帯広帯域干渉計の改良を行うことで、雷放電進展に伴う細かい電磁波パルスが標定可能であることを雲内放電および負極性対地放電の事例を用いて検証する。最後に、LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステムの構築について述べる。また、構築したリアルタイムモニタリングシステムによる観測結果を述べる。

## 3.2 LF 帯広帯域干渉計を用いた初期観測結果

### 3.2.1 観測概要

本節で述べる初期観測では、4 機の LF 帯受信機で構成された LF 帯広帯域干渉計を用いた。初期観測では 3 サイト(サイト 1, 2, 3) とサイト 4 では異なる A/D 変換ボードを使用しており、それぞれ垂直分解能は 12bit(±5V)、10bit(±1V)、記録時間は 1.25s、1s、サンプリングレートはともに 1MHz である。

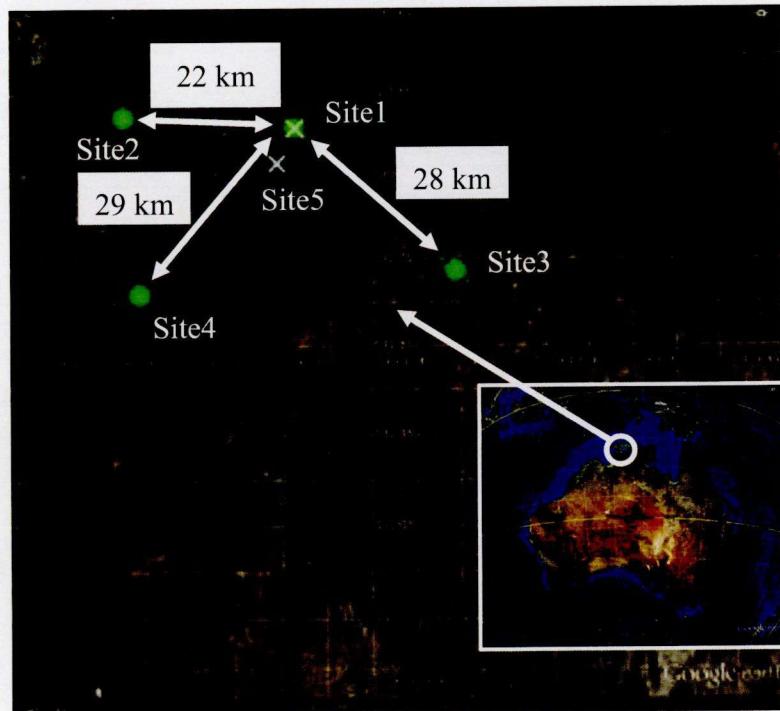
筆者らは 2009 年 11 月 20 日から 2009 年 12 月 12 日の期間にオーストラリア・ダーウィン地域において、LF 帯広帯域干渉計および VHF 帯広帯域干渉計を用いて雷観測を行った。図 3.1 に VHF 帯広帯域干渉計の設置写真、図 3.2 に LF 帯受信機の設置写



図 3.1: VHF 帯広帯域干渉計の設置写真。



図 3.2: LF 帯受信機の設置写真。



○:Site location of LF receiver, ×:Site location of VHF DITF

図 3.3: 2009 年に実施した初期観測サイトマップ。(引用 : Google earth)

真を示す。また、図 3.3 にサイトマップを示す。同図に示す通り、LF 帯広帯域干渉計は 20~30km の間隔で設置した LF 帯受信機で構成する。また、サイト 1、サイト 5 には VHF 帯広帯域干渉計を設置した。

### 3.2.2 初期観測結果と考察

図 3.4 に、2009 年 12 月 8 日 07:32:45 (GMT)に発生した雷放電に伴う 600ms 間の電界変化波形を示す。図 3.4 から 600ms の間に振幅の大きいパルスがサイト 1~4 で少なくとも 9 個記録されていることがわかる。図 3.4(b)および(c)から、304ms においてサイト 2 およびサイト 3 の波形が飽和していることがわかる。また、サイト 1 およびサイト 2 では全体的に振幅が大きく、サイト 3 およびサイト 4 ではサイト 1 およびサイト 2 よりも振幅が小さいことがわかる。サイト 2 の振幅が他のサイトに比べて最も大きいことから、雷放電発生地点から最も近い観測サイトはサイト 2 であることが予想される。図 3.4 で示す各観測サイトで受信された約 1s 間の波形からパルス部分を約 1ms 抜き出し、第 2 章で述べた手法を用いて、LF 帯電磁波放射源の位置標定を行った。図 3.5 に図 3.4 の波形をもとに求めた LF 帯広帯域干渉計による LF 帯電磁波放射源位置標定結果および VHF 帯広帯域干渉計による VHF 帯電磁波放射源二次元標定結果を時系列で示す。図 3.5(a)-(c)に LF 帯広帯域干渉計のサイト 1 を原点とした LF 帯

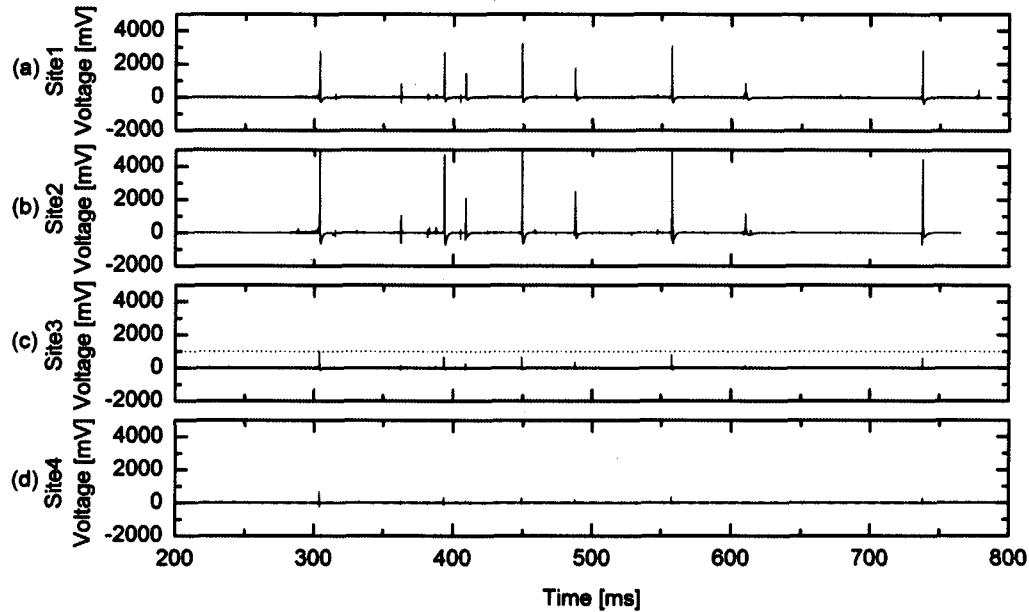


図 3.4: 2009 年 12 月 8 日 07:32:45 (GMT)に発生した雷放電に伴う電界変化波形。

電磁波放射源の東西方向、南北方向、および高度の各位置を示す（赤色三角印）。図 3.5(d)、(e)にサイト 1 の VHF 帯広帯域干渉計によって得られた二次元標定結果（黒色四角印）、LF 帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換したサイト 1 基準の二次元標定結果（赤色三角印）を示す。図 3.5(f)にサイト 1 で取得された電界変化波形を示す。図 3.5(a)、(b)はそれぞれ東方向、北方向を正としている。図 3.5(e)の方位角は反時計回りを正とし、北方向を  $0^\circ$  としている。

本事例で帰還雷撃が発生した時刻はそれぞれ、304、393、409、449、488、558、610、および 738ms であり(図 3.5 参照)、8 回の帰還雷撃を伴う負極性落雷である。帰還雷撃であるかどうかは、サイト 1 の電界変化波形および VHF 帯広帯域干渉計の標定結果から判断している。また、対地放電の極性は電界変化波形の正負により判断しており、パルスの変化が正の場合、負極性雷である(Krider et al., 1977)。なお、304ms に発生した第一雷撃は 4 サイトの LF 帯受信機のうち、サイト 2 およびサイト 3 で波形が飽和していたため、LF 帯電磁波放射源の導出は不可能であった。帰還雷撃と判断した例として、図 3.5 に見られる 738ms に発生した第八雷撃を中心とした拡大図を図 3.6 に示す。図 3.6 では、図 3.6(d)で示す VHF 帯広帯域干渉計で標定されている大地に向かうリーダ（ステップトリーダ）が地面に到達後に、図 3.6(f)で示す電界変化波形のパルスが受信されており、このパルスの立ち上がり時間とパルス幅が一般的な帰還雷撃に相当する。我々は、VHF 帯広帯域干渉計による仰角の変化と電界変化波形のパルス立ち上がり時間とパルス幅により帰還雷撃の当否を判断している。図 3.6 から、帰還雷撃そのものは VHF 帯広帯域干渉計によって標定されておらず、LF 帯広帯域干渉

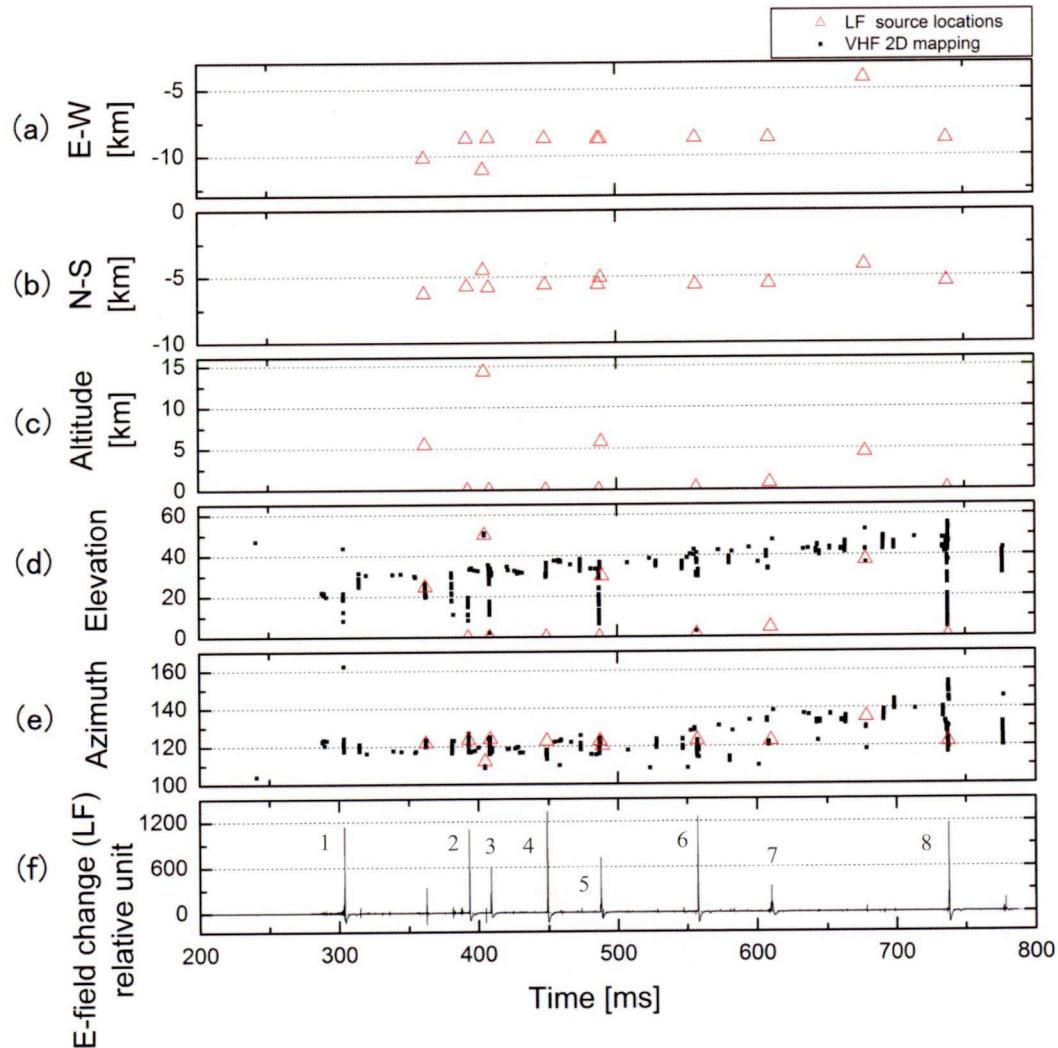


図 3.5: 2009 年 12 月 8 日 07:32:45(GMT)に発生した負極性多重雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電界変化波形の時系列変化。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形

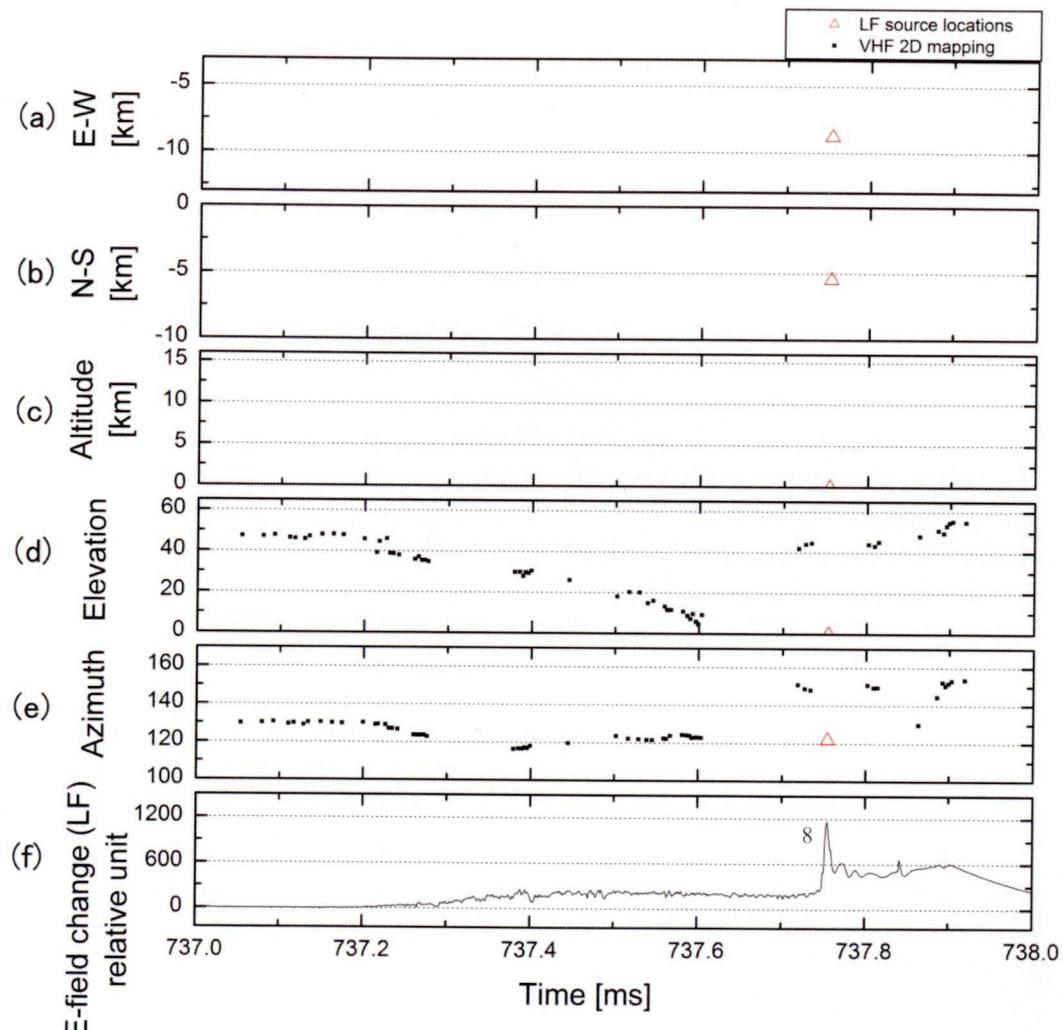


図 3.6: 図 3.5 の第八雷撃付近(738ms)の拡大図。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形

計のみによって標定されていることがわかる。

図 3.5 の 1 フラッシュ全体を VHF 帯広帯域干渉計によって三次元標定した結果および LF 帯広帯域干渉計によって三次元標定した結果を図 3.7 に示す。図 3.7 は三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図である。ここで、VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果はサイト 1 とサイト 5 の二次元標定結果である方位角を用いて水平位置( $x, y$ )を確定した後、それぞれのサイトで得られる仰角を用いて高度  $z$ 、 $z'$ を求める、 $z$  と  $z'$  の差が 2.5km 以内の場合これらの平均値を標定点として算出している。図 3.5(a)-(c)および図 3.7 に示すように、帰還雷撃は LF 帯広帯域干渉計によってほぼ同じ位置( $(x, y, z)=(-8.5, -5.5, 0)$ )に標定されていることがわかる。これは、一般的な多重雷の帰還雷撃が同じ位置から発生する事実と一致している。また、図 3.5(c)より帰還雷撃に伴い放射される LF 帯電磁波放射源が高度 1km 以下の地表面付近に標定されていることが確認できる。さらに、図 3.5(e)の方位角から VHF 帯広帯域干渉計で

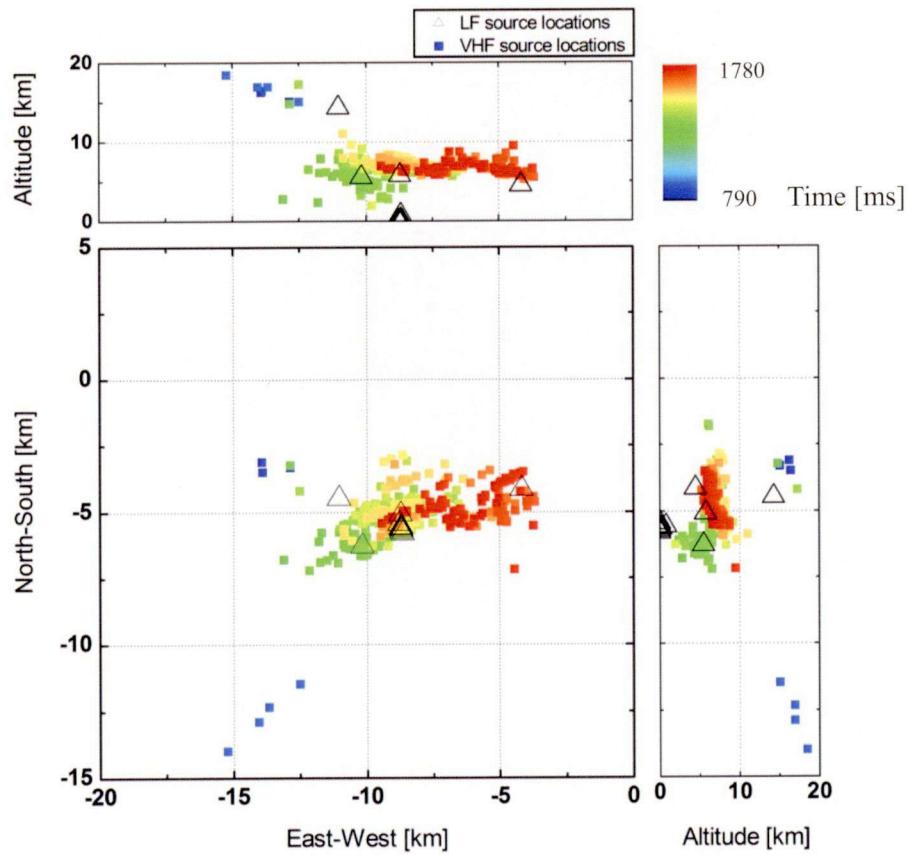


図 3.7: 2009 年 12 月 8 日 07:32:45(GMT)に発生した負極性多重雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源の三次元標定結果の展開図。VHF 帯広帯域干渉計による標定結果は四角のカラーで示し、LF 帯広帯域干渉計による標定結果は三角の黒色で示す。図 3.5 の LF 帯および VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。

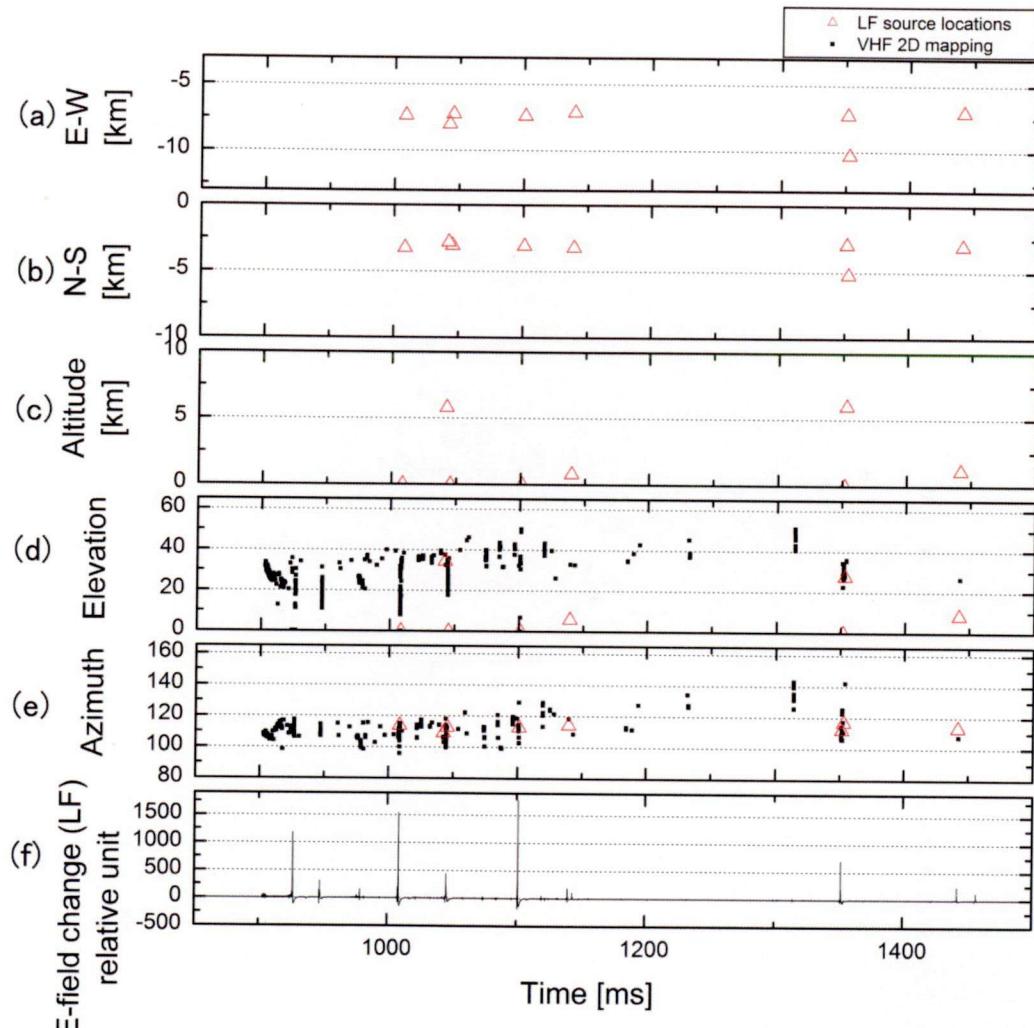


図 3.8: 2009 年 12 月 8 日 07:35:17(GMT)に発生した負極性多重雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電界変化波形を時系列で示した図。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

標定されたステップトライダの到来方向と LF 帯広帯域干渉計で標定された帰還雷撃の到来方向が一致していることがわかる。帰還雷撃そのものは VHF 帯広帯域干渉計によって標定されていない。

異なる時刻に発生した多重雷の標定結果を時系列で図 3.8 に示す。図 3.5 と同様に図 3.8(a)-(c)は LF 帯広帯域干渉計のサイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の東西、南北、高度、図 3.8(d)、(e)にサイト 1 の VHF 帯広帯域干渉計によって得られた二次元標定結果（黒色四角印）、LF 帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換したサイト 1 基準の二次元標定結果（赤色三角印）、および図 3.8(f)にサイト 1 で取得された電界変化波形をそれぞれ時系列で示す。サイト 1 の電界変化波形および VHF 帯広帯域干渉計の標定結果から、これらの LF 帯電磁波はすべて帰還雷撃から放射されたものであることを確認している。

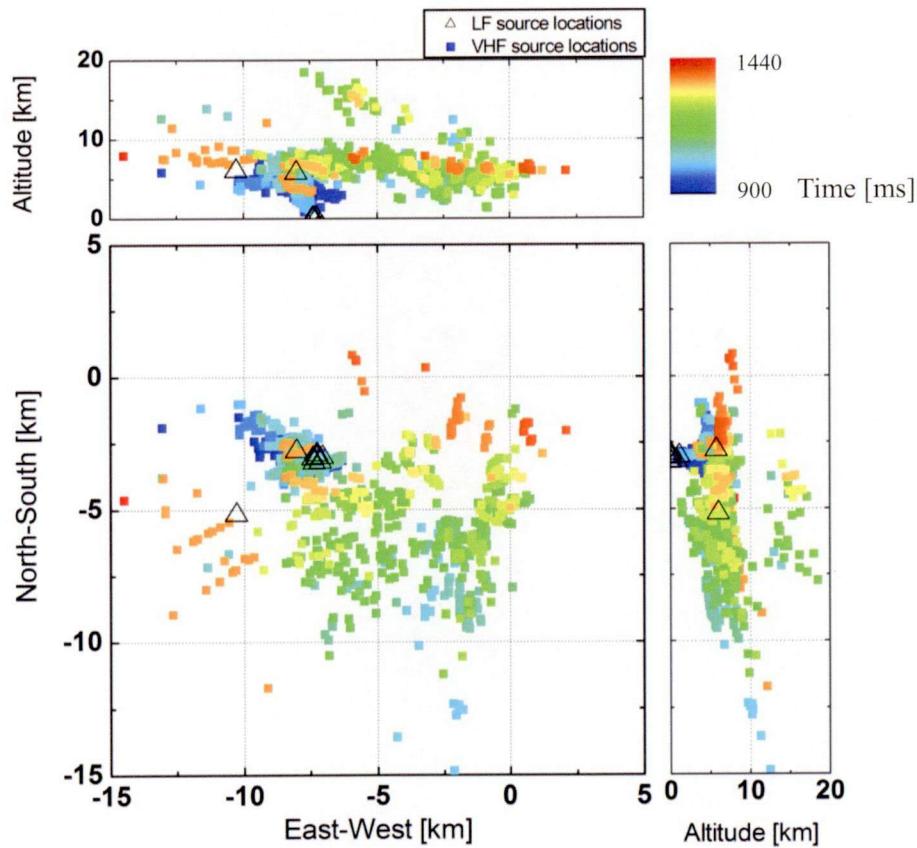


図 3.9: 2009 年 12 月 8 日 07:35:17(GMT)に発生した負極性多重雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源の三次元標定結果の展開図。VHF 帯広帯域干渉計による標定結果は四角のカラーで示し、LF 帯広帯域干渉計による標定結果は三角の黒色で示す。図 3.8 の LF 帯および VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。

また、図3.8の三次元展開図を図3.7と同様の形式で図3.9に示す。図3.8および図3.9の結果からも同様に帰還雷撃に伴い発生するLF帯電磁波放射源が地表付近に標定され、それぞれが三次元でほぼ同じ位置に標定されていることが確認される。また、図3.8(e)の方位角からVHF帯広帯域干渉計で標定されたステップトリーダの到来方向とLF帯広帯域干渉計で標定された帰還雷撃の到来方向が一致していることもわかる。帰還雷撃そのものはVHF帯広帯域干渉計によって標定されていない。

帰還雷撃に伴うLF帯電磁波が地表付近で最も強く放射されるという結果は、これまでの光学観測等の研究(Betz et al., 2004; Lu et al., 2009)と一致し、LF帯広帯域干渉計の標定結果が妥当であることが言える。これまで対地放電と雲内放電の判別は電界変化波形のパルス幅によってのみ行われているが(Watson et al., 1995)、LF帯広帯域干渉計を用いることでLF帯電磁波放射源高度をパラメータとして導入することにより対地放電か雲内放電かどうかの判別に応用できると考えられる。

帰還雷撃以外にも、K-event(Kitagawa et al., 1962; Thottappillil et al., 1990)とCID(Smith et al., 1998; Nag et al., 2010; Wu et al., 2012)のLF帯電磁波放射源位置標定に成功した。図3.5(f)に示す、363、489、678msに発生した電界変化波形のパルス幅は順に0.3、0.1、0.5msであり、電界変化波形の振幅は本事例におけるすべての帰還雷撃に伴う電界変化波形より狭かった。K-eventに伴う電界変化波形は帰還雷撃に比べて振幅が数分の1程度と小さく、持続時間が数百マイクロ秒~数ミリ秒であり波形が複雑であると報告されている(Rakov et al., 1992)。よって、これらの電界変化波形はK-eventに伴うK-changeであると考えられる。363、489、678msに発生したK-eventに伴うLF帯電磁波の放射源高度はそれぞれ5.5、5.8、4.5kmに標定された。これらの一例として、363msに発生したK-eventの拡大図を図3.10に示す。図3.10(f)で示すK-eventに伴う電界変化波形は複雑であり、到達時間差法による位置標定は困難である。図3.10(d),(e)からVHF帯広帯域干渉計で推定された到来方向とLF帯広帯域干渉計で推定された到来方向が一致していることがわかる。

また、図3.5の405msにはパルス幅15μsの両極性パルスが記録されていた。両極性パルス部分の拡大図を図3.11に示す。CIDに伴う電界変化波形は、パルス前後に電界変化が発生しない、および50μs以下の非常にパルス幅の狭い両極性パルスとなる、という特徴を持つと言われている。図3.11(f)に示す405msに発生したパルスはこれらの条件を満たしており、CIDに伴うパルス波形が記録されていると判断した。405msに発生したCIDに伴うLF帯電磁波の放射源高度は14.3kmであった。先行研究におけるCIDの標定高度は7~20kmに分布しており(Nag et al., 2010; Smith et al., 2004; Wu et al., 2012)、本事例と一致していた。また、図3.11(d),(e)からVHF帯広帯域干渉計で標定された到来方向とLF帯広帯域干渉計で標定された到来方向が一致していることがわかる。

図3.12に2009年12月8日07:26:21(GMT)に発生した雲内放電の事例を示す。図3.5と同様にして図3.12(a)-(c)にLF帯広帯域干渉計で得られたサイト1を原点とした

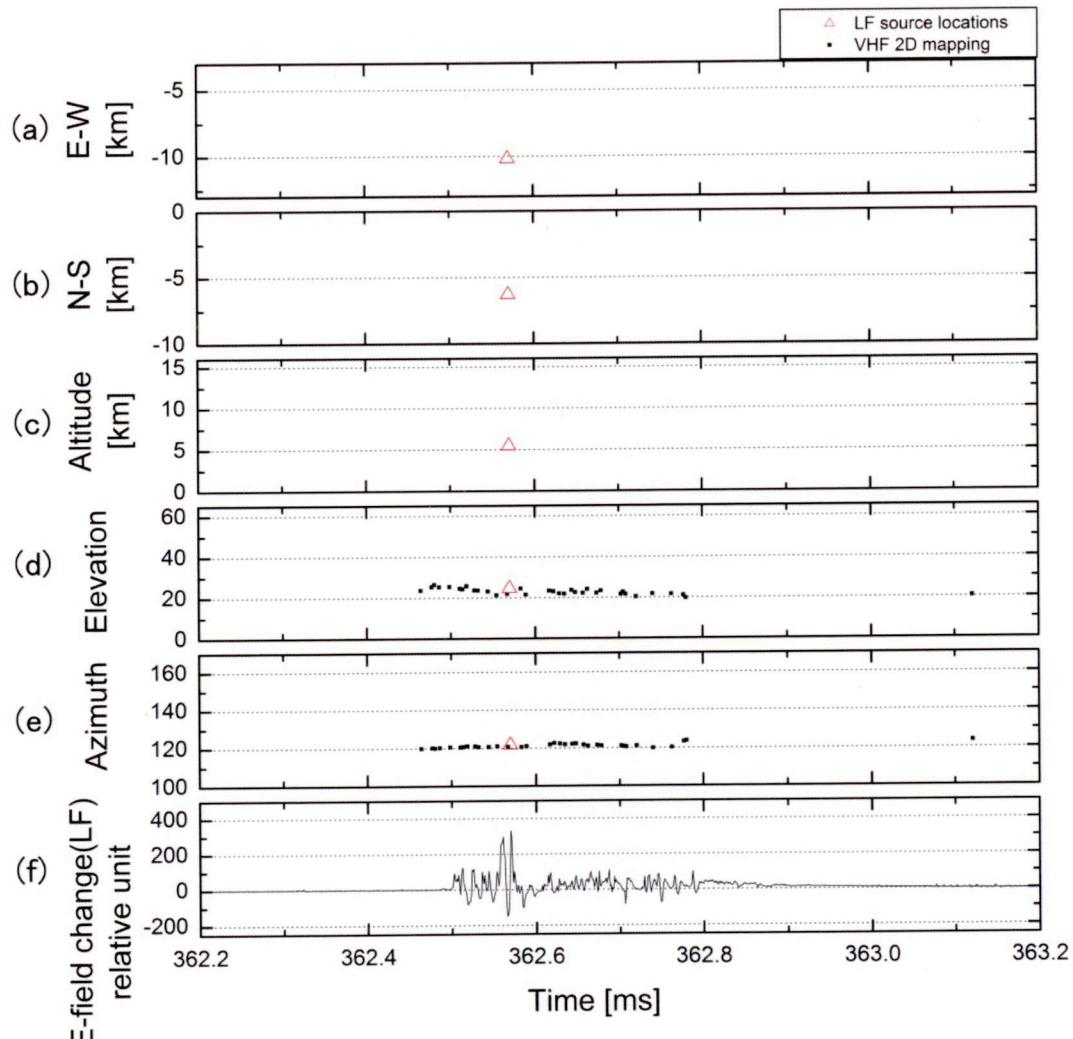


図 3.10: 図 3.5 の K-event 付近の拡大図(363ms)。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

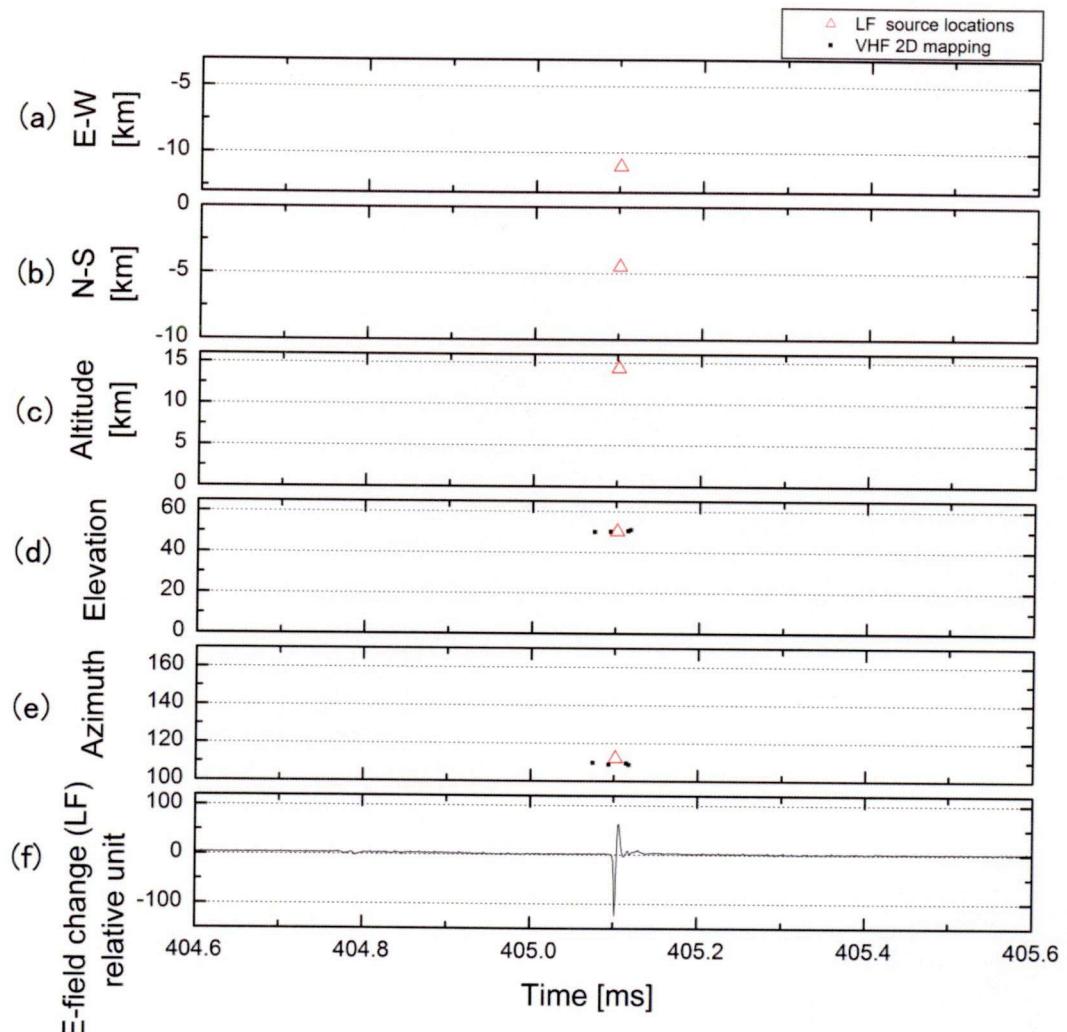


図 3.11: 図 3.5 の CID 付近の拡大図(405ms)。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

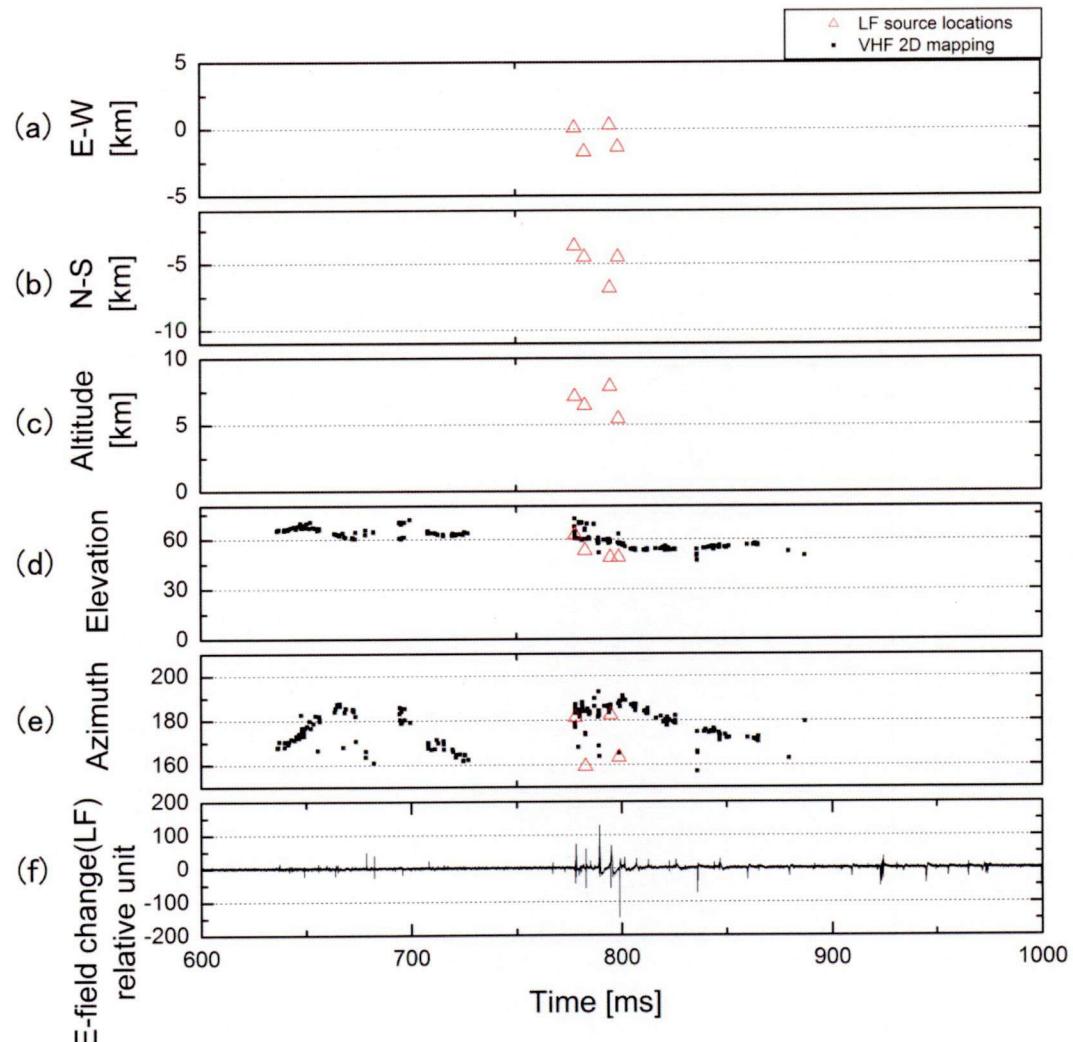


図 3.12: 2009 年 12 月 8 日 07:26:21(GMT)に発生した雲内放電の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電界変化波形を時系列で示した図。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

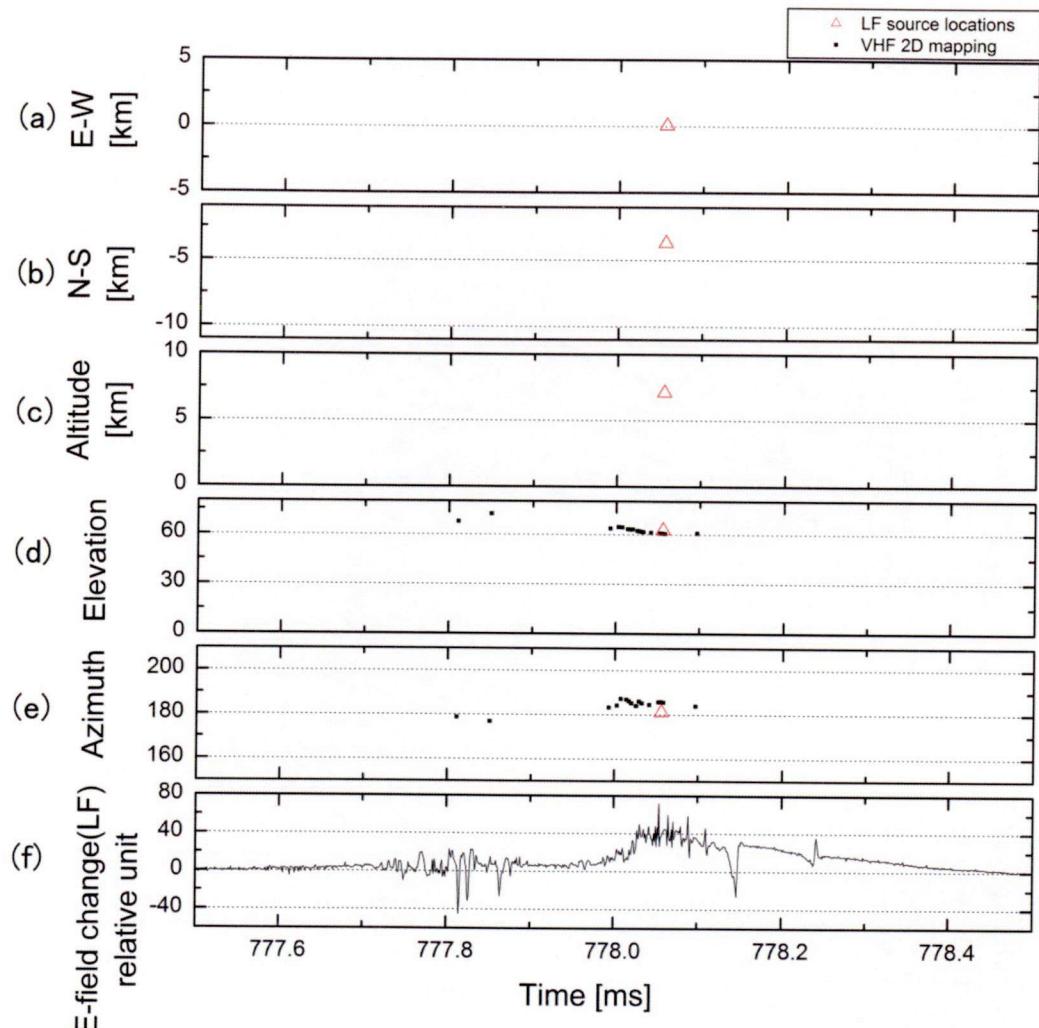


図 3.13: 図 3.10 の K 変化の拡大図。サイト 1 を原点とした LF 帯電磁波放射源の (a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 1 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 1 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

電磁波放射源の東西、南北、高度、図 3.12(d),(e)にサイト 1 の VHF 帯広帯域干渉計によって得られた二次元標定結果（黒色の四角）、LF 帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換したサイト 1 基準の二次元標定結果（赤色の三角）、および図 3.12(f)にサイト 1 で取得された電界変化波形をそれぞれ時系列で示す。LF 帯広帯域干渉計により標定された K-event の発生時刻は 778、783、795、799ms であり、LF 帯電磁波の放射源高度がそれぞれ 7.1、6.4、7.9、5.4km に標定された。サイト 1 の電界変化波形および VHF 帯広帯域干渉計の標定結果から、これらの LF 帯電磁波はすべて K-event から放射されたものであることを確認している。また、他の時刻に発生した雷放電における K-event が標定された高度も本事例と同様に 5~8km に標定されていることを確認している。

一例として、778ms に発生した雲内放電の K-event の発生時刻周辺の拡大図を図 3.13

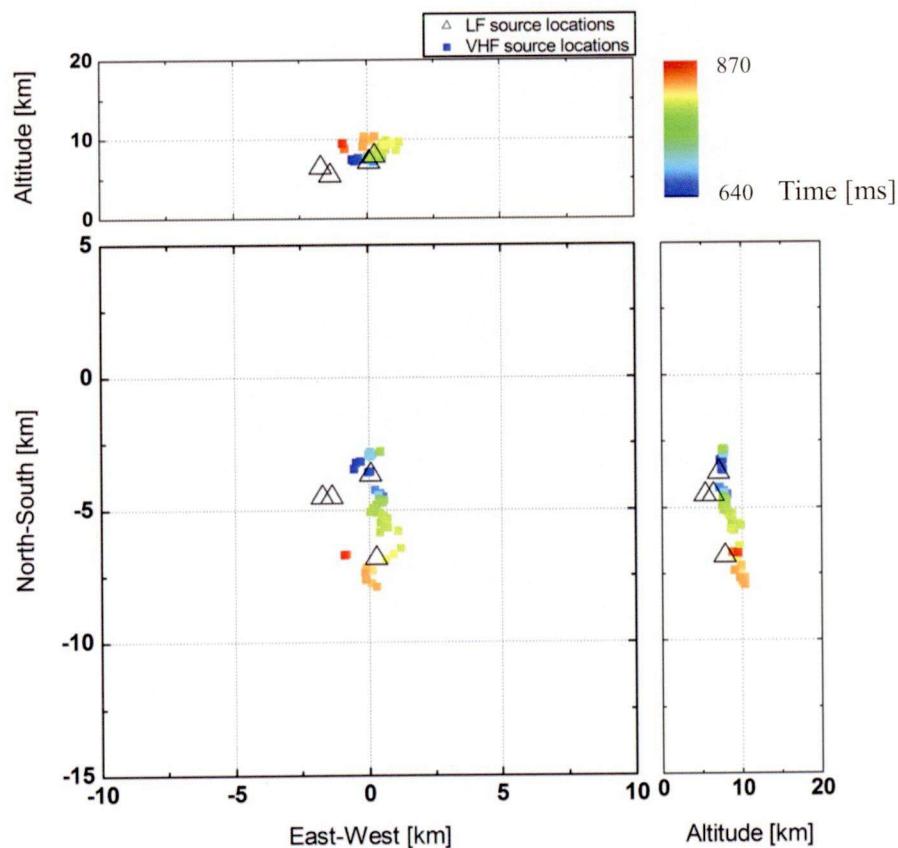


図 3.14: 2009 年 12 月 8 日 07:26:21(GMT)に発生した雲内放電の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源の三次元標定結果の展開図。VHF 帯広帯域干渉計による標定結果は四角のカラーで示し、LF 帯広帯域干渉計による標定結果は三角の黒色で示す。図 3.12 の LF 帯および VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。

に示す。図 3.13(d),(e)から、VHF 帯広帯域干渉計で標定された到来方向と LF 帯広帯域干渉計で標定された到来方向が一致していることがわかる。従来の LF 帯電磁波の放射源位置標定システムでは到達時間差法を用いており波形のピーク時間に時間差が左右されるため、図 3.13(f)にみられるようなバースト状の電界変化波形に対して標定が困難である。これまでの VHF 帯広帯域干渉計の結果(Akita et al., 2010a)によると、K-event はおよそ 5~10km に標定されていることから、今回の標定結果は十分妥当なものであると考えられる。

図 3.12 の三次元展開図を図 3.7 と同様の形式で図 3.14 に示す。図 3.14 は三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図である。両干渉計による標定点を三次元で比較すると、北と南に一致している点が二点見られる一方、その他の二点は一致していない。これらの点について、図 3.12 の時系列変化を見てみると、800ms 付近にはリーダに伴う多数の電磁波放射源が VHF 帯広帯域干渉計によって方位角 180°周辺に標定されており、方位角 160°周辺には数点の電磁波放射源が標定されていることがわかる。また、720ms 付近には 160°周辺に VHF 帯広帯域干渉計によってリーダが多数標定され、LF 帯広帯域干渉計が電磁波放射源位置標定をしている 80ms 程度前にリーダ進展があったことが確認される。このことから、160°周辺では 720ms におけるリーダ進展が多数標定されているものの、800ms におけるリーダ進展は VHF 帯放射電力が弱いため標定数が少ないことが考えられる。また、サイト 5 における VHF 帯広帯域干渉計による 720ms 付近のリーダの標定数が少ないことを確認している。そのため、三次元位置標定が不可能であり、図 3.14 の原点から 2km 西付近では三次元標定されていない。一方、800ms 付近の LF 帯受信機による電界変化波形は比較的大きいため標定可能であり、160°付近に LF 帯電磁波放射源が標定されており、これらの点が図 3.14 の原点から 2km 西付近に標定されている。すなわち、図 3.14 では VHF 帯広帯域干渉計によって三次元標定できない点を LF 帯広帯域干渉計によって標定している。このことは、両干渉計による相補的な観測の重要性を示唆している。

表 3.1 に、2009 年 12 月 8 日 07:32:45 (GMT) と 2009 年 12 月 8 日 07:26:21 (GMT) の事例で同時に得られた VHF 帯電磁波放射源と LF 帯電磁波放射源の水平距離をまとめた。ここでは 2ms 以内に両装置で標定された電磁波放射源のうち、両者の距離が最も近い位置を水平距離の算出対象としている。VHF 帯広帯域干渉計では帰還雷撃そのものが標定されていないため、帰還雷撃直前のステップトリーダの VHF 帯電磁波放射源と帰還雷撃による電磁波放射源を比較している。雲内放電の事例で、水平距離が 2.0km および 3.2km となったものは、別の放電路の位置に対して比較を行なっているためである。同表から対地放電、雲内放電を問わず VHF 帯電磁波放射源近傍で LF 帯電磁波放射源が標定されており、装置の妥当性が確認できる。なお、水平距離の平均値は 1.1km であり VHF 帯広帯域干渉計の誤差範囲内である。水平距離の平均値を算出する際に、別の放電路を標定していると思われる雲内放電の 2 例に關し

では、平均を求める際の計算に含んでいない。

VHF 帯広帯域干渉計で三次元標定するためには VHF 帯広帯域干渉計 2 サイト同時にデータが取得されている必要がある。観測期間中に VHF 帯広帯域干渉計で三次元標定可能かつ、LF 帯広帯域干渉計で三次元標定可能である時間帯は少なかつため、比較対象を増やすために二次元標定結果で比較を行った。VHF 帯広帯域干渉計による二次元標定結果の方位角と、LF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果から変換したサイト 1 を基準とした二次元標定結果の方位角を比較した。観測期間中には 8 フラッシュ 37 事例が比較可能であった。37 事例中 12 事例が帰還雷撃、25 事例がその他の放電であり、それぞれの放電に対して二次元標定結果の方位角を比較した。帰還雷撃の事例では平均  $0.6^\circ$ 、標準偏差  $2.4^\circ$ 、その他の放電では平均  $-5.2^\circ$ 、標準偏差  $8.7^\circ$  であった。VHF 帯広帯域干渉計は VHF 帯狭帯域干渉計との比較によって精度が方位角で平均  $0.46^\circ$ 、標準偏差  $4.5^\circ$ 、仰角で平均  $-1.35^\circ$  標準偏差  $5.0^\circ$  であり (Murakami et al., 1999)、LF 帯広帯域干渉計によって雷放電諸過程が VHF 帯広帯域干渉計の誤差程度で標定可能であることを示した。

表 3.1: LF 帯および VHF 帯電磁波放射源の水平距離の比較

Cloud to ground discharge		Intracloud discharge	
07:32:45 GMT		07:26:21 GMT	
LF altitude [km]	Distance [km]	LF altitude [km]	Distance [km]
5.5 <sup>a</sup>	0.5	7.1 <sup>a</sup>	1.0
0.0 <sup>b</sup>	N/A*	6.4 <sup>a</sup>	2.0
14.3 <sup>c</sup>	1.2	7.9 <sup>a</sup>	1.0
0.0 <sup>b</sup>	2.1	5.4 <sup>a</sup>	3.2
0.0 <sup>b</sup>	1.2		
0.0 <sup>b</sup>	1.1		
5.8 <sup>a</sup>	0.0		
0.2 <sup>b</sup>	1.0		
0.0 <sup>b</sup>	0.7		
4.5 <sup>a</sup>	N/A*		
0.0 <sup>b</sup>	2.5		

a: K-event

b: Return stroke

c: CID

\*:VHF pulses were not recorded.

## 3.3 LF帯広帯域干渉計を用いた上向き放電で開始する落雷の観測

### 3.3.1 冬季雷の性質と背景

日本海沿岸において冬季に発生する雷放電の性質は、夏季に発生する一般的な雷放電の性質とは全く異なることで知られている(Takeuti et al., 1973)。冬季雷の特徴のひとつは上向き放電で開始する雷放電が頻発することである(Suzuki, 1992)。上向き放電で開始する負極性雷は大地の建造物等から *upward positive leader* (UPL)によって放電が開始し雷雲内の負電荷領域に向けて進展する雷放電である。上向き放電で開始する正極性雷は大地の建造物等から *upward negative leader* (UNL)によって放電が開始し雷雲内の正電荷領域に向けて進展する雷放電である。正極性リーダには、進展と停止を繰り返して放電が進展するものや、停止をせずに連続的に進展するものがある(Berger et al., 1969)。一方、すべての負極性リーダは進展と停止を繰り返して放電が進展する性質をもつ(Berger et al., 1969)。

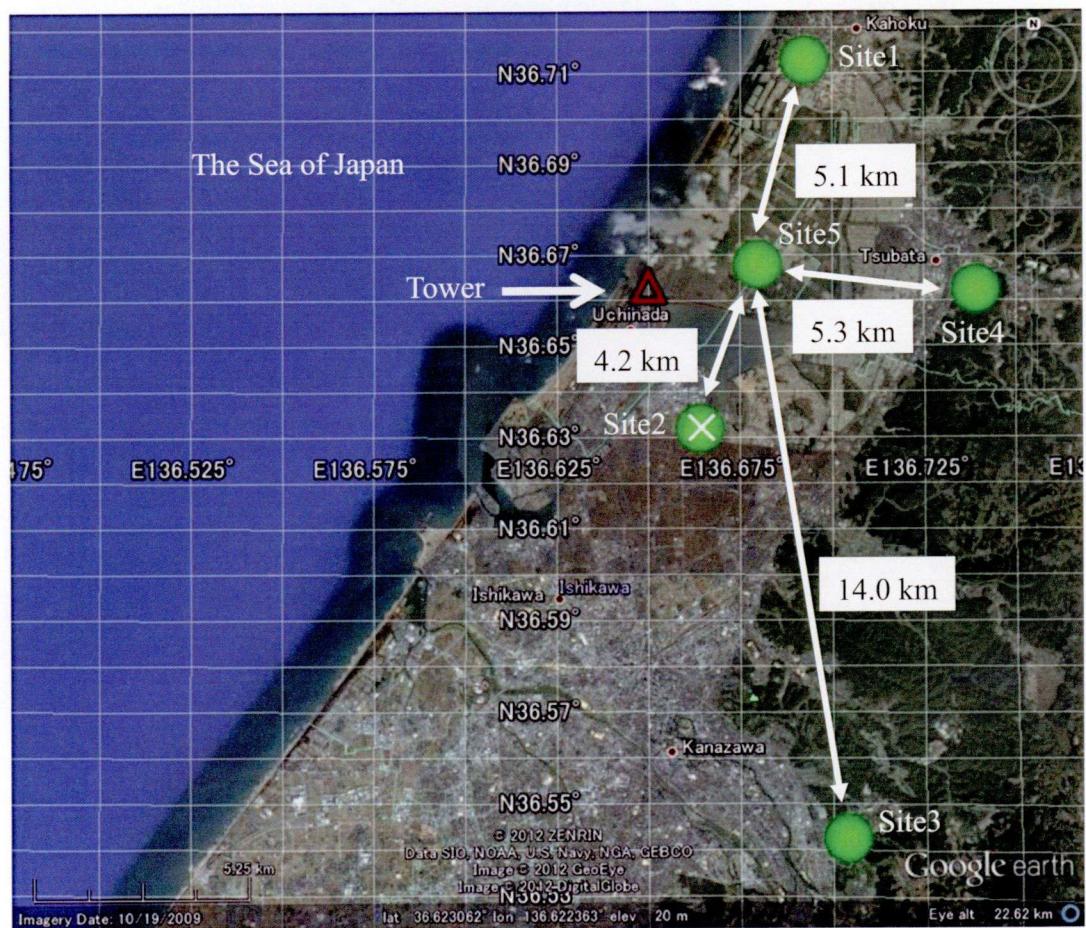
一般的な気象条件では上向き放電で開始する雷放電は雷雲と建造物の高度間距離が短い場合に発生しやすいため、高構造物で発生頻度が高く比較的低い建造物では発生頻度が低い(Eriksson, 1978)。ただし、日本の冬季雷では雷雲高度が低いため、上向き放電で開始する雷放電の大多数は雷撃対象が標高の低い場所に設置された比較的低い建造物の場合でも発生する(Miyake et al., 1990)。冬季に発生する上向き放電で開始する負極性雷は、しばしば非常に大きな電流を含むため、風車のような高建造物に重大な被害をもたらす。また、上向き放電で開始する負極性雷は帰還雷撃を含まない場合もあるため(Berger and Vogelsanger, 1966)、UPLを標定することは上向き放電で開始する雷放電および防雷の研究を行う上で非常に重要である。UPLに関する研究報告としては、VHF帯広帯域干渉計を用いたものや(Yoshida et al., 2010)、光学観測を用いたものがある(Biagi et al., 2011)。

上向きリーダに伴う LF 帯電磁波形の多くは複雑であり、明確なピークを有していない場合が多く、到達時間差法によって上向きリーダに伴う電磁波放射源を標定することは困難である。例えば、IMPACT センサーを用いた上向き放電で開始する負極性雷の検出効率が 23%、上向き放電で開始する正極性雷が 67%と報告されている(Honma, 2010)。IMPACT とは直交したループアンテナによる到来方向推定および到達時間差法の両標定手法を採用した装置であり、アメリカやカナダ、日本等で用いられている。一方、干渉法(Rhodes et al., 1994)はパルスピークを検出する必要がないため、このような複雑な波形に適している。

雷放電発生地点近傍では、LF 帯を用いた受信機で雷放電進展等に伴う比較的放射



図 3.15: LF 帯受信機の設置写真。



○:Site location of LF receiver, ×:Site location of VHF DITF, △:Tower location  
 図 3.16: 2010 年に実施した冬季雷観測サイトマップ。(引用 : Google earth)

電力の弱い電磁波を受信することが可能である。そのため、LF 帯広帯域干渉計は大電流に伴う電磁波放射源だけでなく雷放電進展過程のような微小な電流に伴う電磁波放射源も標定可能である。

### 3.3.2 観測概要

本節では、石川県の内灘町にある高さ 105m の避雷鉄塔から発生した上向き放電で開始する雷放電の観測結果を示す。本節で示す 2 事例は LF 帯広帯域干渉計、VHF 帯広帯域干渉計、ロゴスキーコイルによって観測されたものである。観測期間中における LF 帯受信機の設置写真を図 3.15 に示す。LF 帯広帯域干渉計のサンプリングレートは初期観測の 1MHz から 4MHz に変更している。また、観測サイトの配置を図 3.16 に示す。Site1~5 に LF 帯広帯域干渉計、Site2 に VHF 帯広帯域干渉計を設置した。

ロゴスキーコイルではコイルの断面に磁束が貫くとコイル両端に電圧が誘起され、この電圧を積分することで電流波形が得られる。雷放電に伴って避雷鉄塔に流れる電流は、4 つの塔脚にそれぞれ設置されたロゴスキーコイルで計測される。記録計ではトリガレベルが 600A のアナログトリガによって記録が開始し、波形が A/D 変換される。帯域は 500kHz 以下であり、トリガの前 8ms から後 16ms の間の波形が 4MHz サンプリングで記録され、トリガの後 480ms までが 200kHz サンプリングで記録される。本論文で示す電流波形は 4 つの塔脚で計測された電流の足しあわせであり、-25.6kA ～25.6kA の振幅を 200A 間隔で離散化して記録している。

### 3.3.3 上向き放電で開始する落雷の観測結果

#### 3.3.3.1 両極性雷

図 3.17 に、2011 年 1 月 15 日 17:03:11(JST)に発生した UPL(upward positive leader)から開始する両極性雷(Narita et al., 1989; Yoshida et al., 2012b)の標定結果を示す。図 3.17 (a)-(c)に LF 帯広帯域干渉計で得られた電磁波放射源の(a)東西、(b)南北、(c)高度を示す。図 3.17(c)には高度に対応した大気の温度を示している。大気の温度は雷放電発生時刻から最も近い 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)におけるラジオゾンデによる高層気象観測結果(URL: <http://www.jma.go.jp/jma/>)から得られた。高層気象観測の場所は避雷鉄塔から 85km 離れた輪島である。図 3.17(d)、(e)にサイト 2 の VHF 帯広帯域干渉計で得られた二次元標定結果と LF 帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換した二次元標定結果を(d)仰角、(e)方位角で示す。図 3.17(f)に避雷鉄塔の塔脚に取り付けられたロゴスキーコイルによって測定された電流波形を示す。図 3.17(g)にはサイト 2 の LF 帯受信機で受信された電界変化波形を示す。

図 3.17(a)-(c)の原点は避雷鉄塔の位置に対応する。図 3.17(c)において、-10°C 高度および-20°C 高度は、-10°C、-20°C を挟む高度の観測値の気温減率を一定と仮定し線形補間して求めた。高層気象観測の観測時刻は 9:00(JST)と 21:00(JST)であり、1 日

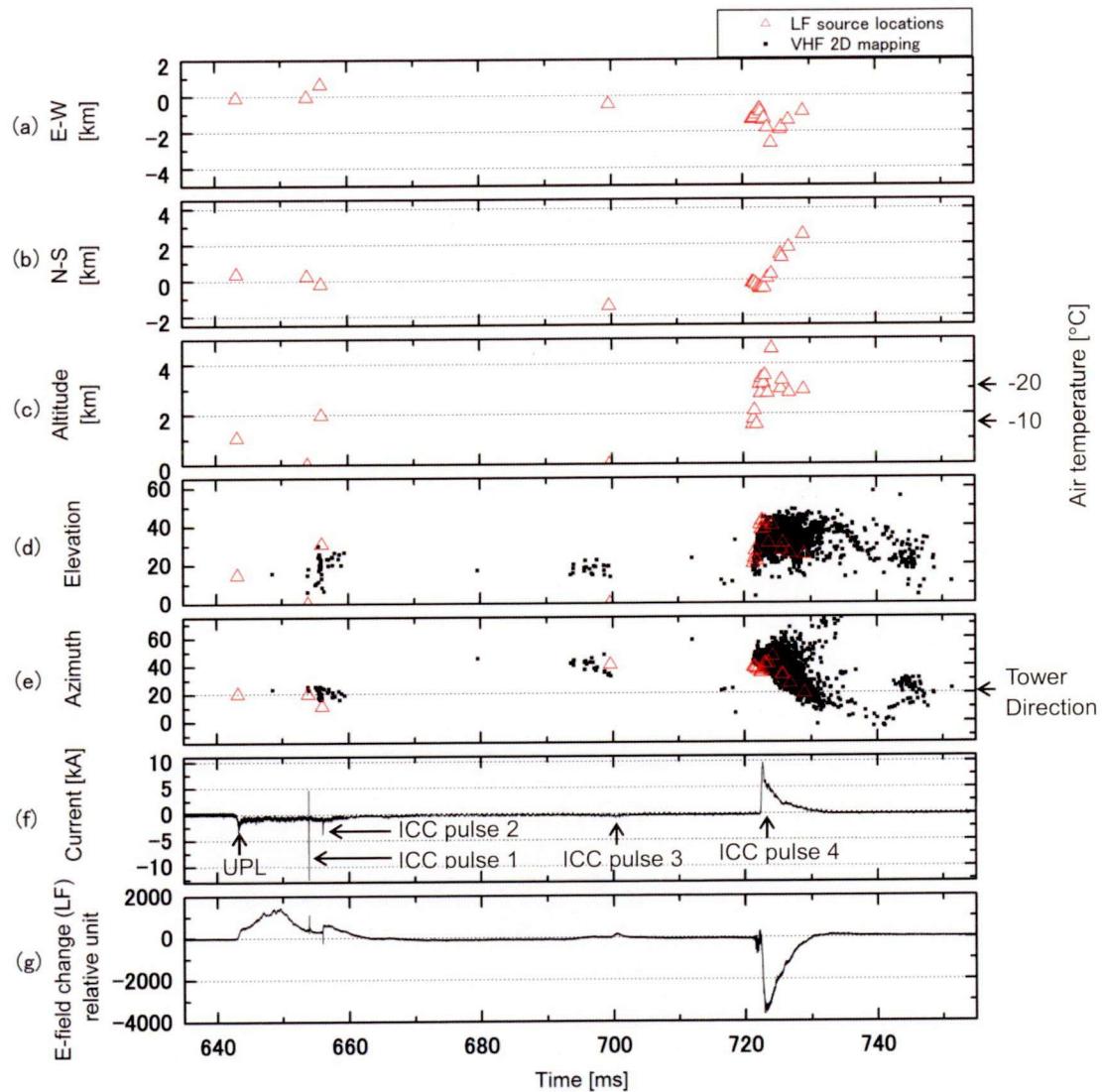


図 3.17: 2011 年 1 月 15 日 17:03:11(JST)に発生した両極性雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電流波形、電界変化波形を時系列で示した図。避雷鉄塔を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度および避雷鉄塔から 85km 離れた輪島のラジオゾンデにより計測された 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)における大気温度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)避雷鉄塔の塔脚で記録された電流波形、(g)サイト 2 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。図 3.17(e)における破線は鉄塔方向を示している。

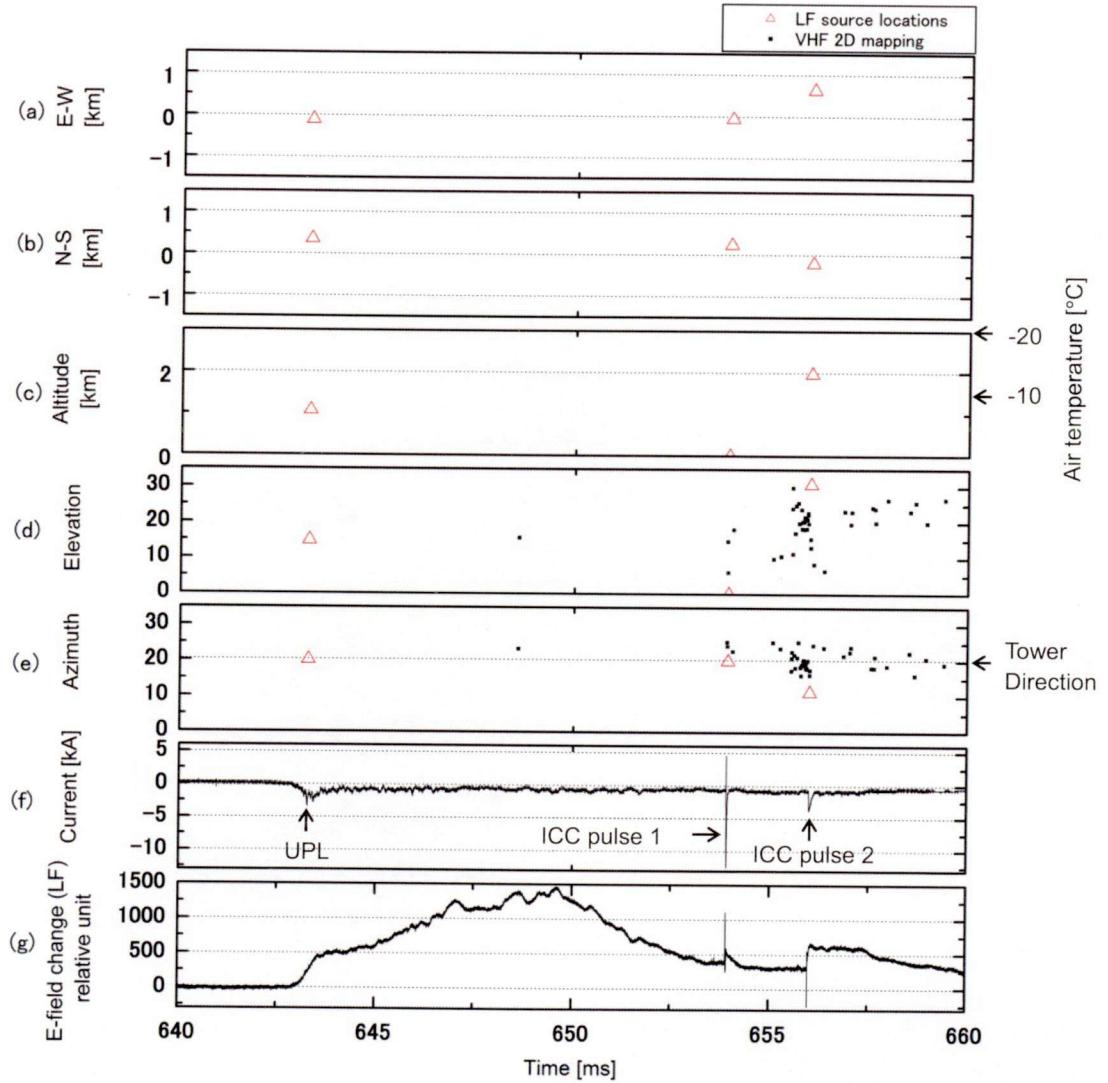


図 3.18: 図 3.17 の UPL 開始付近の拡大図。避雷鉄塔を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度および避雷鉄塔から 85km 離れた輪島のラジオゾンデにより計測された 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)における大気温度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)避雷鉄塔の塔脚で記録された電流波形、(g)サイト 2 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。図 3.18(e)における破線は鉄塔方向を示している。

あたり 2 回の観測を行なっている。本事例が観測された日付の  $-10^{\circ}\text{C}$  高度は 9:00、21:00 でそれぞれ、1700m、1300m であった。また、 $-20^{\circ}\text{C}$  高度はそれぞれ 3100m、2800m であり、 $-10^{\circ}\text{C}$  高度、 $-20^{\circ}\text{C}$  高度ともに、ほとんど変化していない。さらに 9:00~21:00 における、10 分毎の地表温度は最低が  $-1.1^{\circ}\text{C}$ (20:50)、最高が  $1.5^{\circ}\text{C}$ (9:20) であり、ほとんど変化していない。そのため雷放電発生時刻の温度と 21:00 における温度にそれほど差がないと考え、 $-10^{\circ}\text{C}$  高度および  $-20^{\circ}\text{C}$  高度をそれぞれ 1500m、3000m として使用した。図 3.17(e)において、方位角は北を原点として反時計回りを正としており、避雷鉄塔の位置は  $20.4^{\circ}$  に位置する。図 3.17(f)において、正の電流は避雷鉄塔内を負電荷が上向きに進展する、もしくは正電荷が下向きに進展することに対応する。

図 3.17(f)の電流波形に見られるように、本事例は負電荷が中和された後に、正電荷が中和される両極性雷であった。643ms に電流波形が負極性である UPL が開始し、正の電荷が大地から雷雲に向かって流れ始めている。UPL の開始後、initial continuous current (ICC) が流れ始め、図 3.17(f)では見ることが困難であるが 734ms まで流れ続けている。ICC とは鉄塔等から開始する上向き放電の際に連続的に流れる電流のことである。図 3.17(f)において、ICC に重畠された電流パルスが ICC pulse である(Fuchs et al., 1998; Wang et al., 1999; Yoshida et al., 2012b)。ICC pulse の特性は、帰還雷撃後の連続電流中に発生する M-コンポーネントに類似している(Thottappillil et al., 1995)。図 3.17(f)の電流波形では 4 つの ICC pulse が記録されている(図 3.17(f)中に ICC pulse 1~4 と示す)。この雷放電は上向きリーダと ICC の初期過程(Wang et al., 1999)のみであり、リーダ・帰還雷撃過程を含んでいない。図 3.17 に示す LF 帯広帯域干渉計による標定結果から ICC pulse 4 では LF 帯電磁波放射源が多数標定されていることがわかる。また、図 3.17(c)から全ての LF 帯電磁波放射源が 5km 以下の低高度に標定されている。

図 3.17 における UPL の開始付近である 640ms~660ms を拡大して図 3.18 に示す。図 3.18 から、UPL の開始 450 $\mu\text{s}$  後に最初の LF 帯電磁波放射源が標定されていることがわかる。最初に標定された LF 帯電磁波放射源の避雷鉄塔からの水平距離は 0.4km、高度 1.1km であり、避雷鉄塔から近い位置に標定されていることから、LF 帯広帯域干渉計は UPL から放射された電磁波を標定したことを示している。LF 帯広帯域干渉計は ICC pulse 1、2 に伴う LF 帯電磁波放射源をそれぞれ一つずつ標定している。これら 2 つの LF 帯電磁波放射源の鉄塔からの水平距離はそれぞれ 0.2km および 0.7km であった。ICC pulse 1 付近には VHF 帯広帯域干渉計による標定点が無く LF 帯広帯域干渉計による標定点のみであった。ICC pulse 2 に伴って標定された LF 帯電磁波放射源発生時刻から最も近い VHF 帯電磁波放射源は  $5^{\circ}$  以内であった。

図 3.17 の ICC pulse 3 付近である 692ms~702ms を拡大して図 3.19 に示す。Miki ら(2005)は福井県において雷観測を行い、煙突から上向き放電で開始する雷放電中における ICC pulse のピーク電流は、81A~22.9kA であり、それらの幾何平均は 781A であったと報告した。Yosida ら(2009)は鉄塔から上向き放電で開始する雷放電を観測し、6 つの ICC pulse 中 2 つの ICC pulse ピークが 200A を下回ったことを報告した。図 3.19(f)

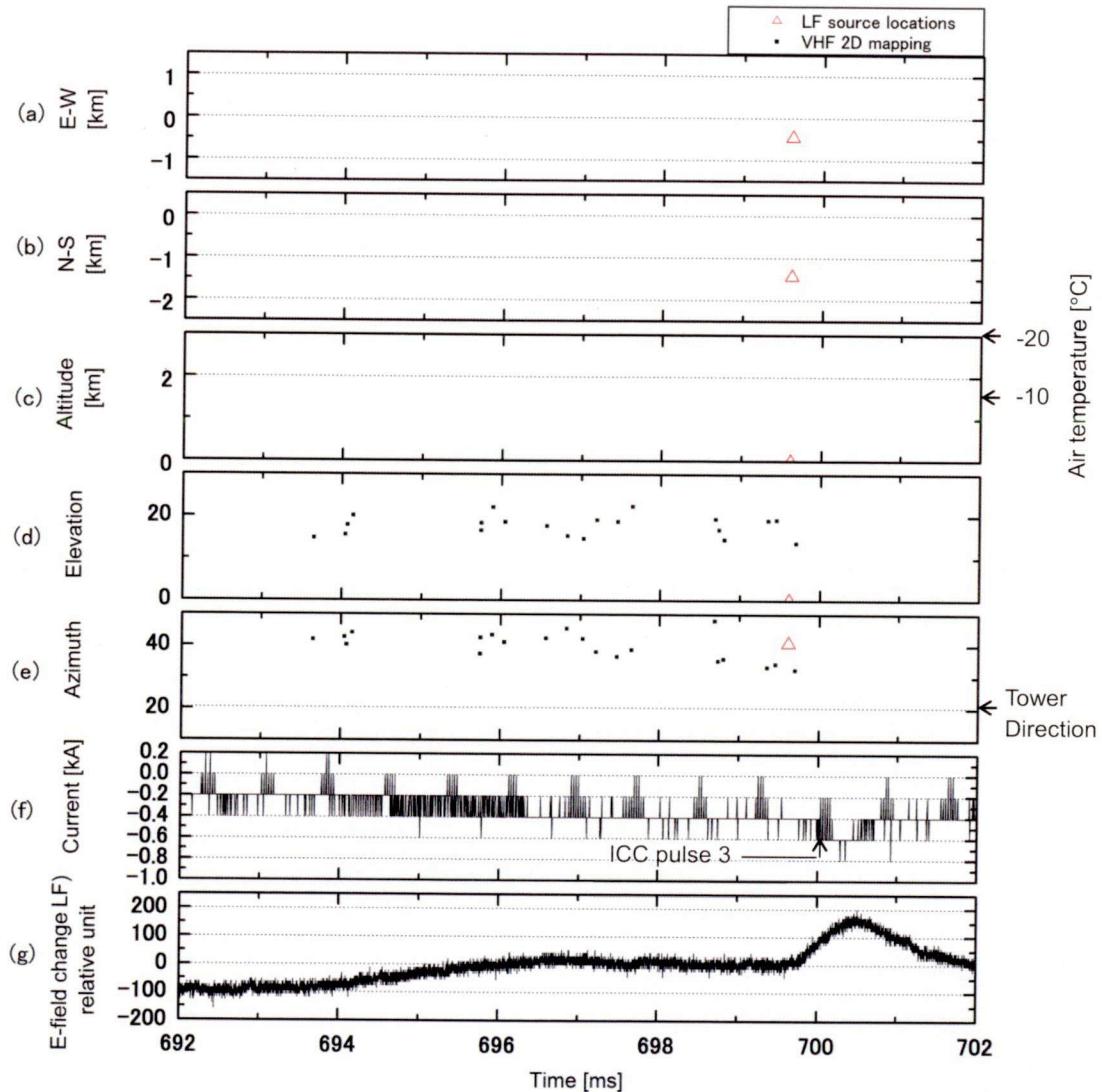


図 3.19: 図 3.17 の ICC pulse 3 付近の拡大図。避雷鉄塔を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度および避雷鉄塔から 85km 離れた輪島のラジオゾンデにより計測された 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)における大気温度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)避雷鉄塔の塔脚で記録された電流波形、(g)サイト 2 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。図 3.19(e)における破線は鉄塔方向を示している。

中に ICC pulse 3 と示した 700ms におけるわずかな電流のピークは ICC pulse に類似しており、図 3.19(g)に緩やかな電界変化も含んでいる。そのため、700ms における LF 帯電磁波放射源は ICC pulse 3 に伴って標定されたことが考えられる。図 3.19(d),(e)では VHF 帯広帯域干渉計によるリーダ進展の標定後、ICC pulse 3 に伴った LF 帯電磁波放射源が LF 帯広帯域干渉計により 1 つ標定されている。ICC pulse 3 に伴う LF 帯電磁波放射源は高度 0km であり避雷鉄塔からの水平距離は 1.5km であった。図 3.19(f)から、ICC pulse 3 のピーク電流は-600A であった。Rakov ら(1995)は ICC pulse と類似した現象である M-コンポーネントは入射波と反射波から構成され、放電路中において電流が最大値を持つ場所は大地であるというモデルを報告している。LF 帯広帯域干渉計によって ICC pulse が地表付近に標定されるという結果は、Rakov らのモデルを支持するものである。

図 3.17 の ICC pulse 4 周辺である 721ms~730m を拡大して図 3.20 に示す。図 3.20(f)の電流波形から UNL が観測されていることが確認できる。図 3.20(f)でもわかるように 722ms 周辺で電流の増加が開始している。電流の増加が開始する約 500  $\mu$ s 前に VHF 帯および LF 帯電磁波が両干渉計により標定され始めている。このうち最初に標定された LF 帯電磁波は避雷鉄塔のほぼ真上であった。LF 帯電磁波は標定が開始してから 2.8ms の間、高度 1.6km~4.6km へ移動し、水平距離 1.4km 移動しており、三次元進展速度の平均は  $8.0 \times 10^5$  m/s であった。Berger と Vogelsanger(1969)は Monte San Salvatoreにおいて UNL の光学観測を行い、UNL の二次元進展速度は  $8 \times 10^4$  m/s~ $4.5 \times 10^5$  m/s であると報告した。Kawasaki ら(2002)は UHF 帯干渉計を用いて、煙突から発生する UNL の三次元観測を福井県にて実施し、UNL の三次元進展速度は平均  $1.2 \times 10^6$  m/s と報告した。したがって、本論文で推定された三次元進展速度の平均は UNL に対して妥当であると考えられ、LF 帯広帯域干渉計を用いてもリーダの進展速度が十分に推定できることを示している。ICC pulse 4 に伴って発生した LF 帯電磁波放射源は高度 1.6km から進展を開始したことや、両干渉計によって標定された方位角が鉄塔方向から 20°程度ずれていることを考慮すると、UNL は UPL によって形成された放電路による枝分かれの一部から、新たに上空の正電荷領域に向かって進展を開始したと考えられる。

図 3.21 に両極性雷を LF 帯広帯域干渉計によって標定した三次元展開図を示す。図 3.21 は LF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図である。図 3.18 および図 3.19 で示した UPL、ICC pulse 1~3 を丸印、図 3.20 で示した UNL の 722ms 以前を三角印、722ms 以降を罰印で示す。原点は避雷鉄塔の位置に対応する。図 3.20 から UPL による多数の枝分かれが発生し、その一部から新たに UNL が発生したものを標定していると考えられる。722ms 以前の UNL は高度 2km 付近に水平距離が 0.5km 以内の範囲にまとまって標定されている。722ms 以降の UNL は高度 2km より上空に標定されており、水平距離が 4km 程度広がって標定されている。UPL によって形成された雷放電路は ICC が流れている間導電性を保ち、雷放電

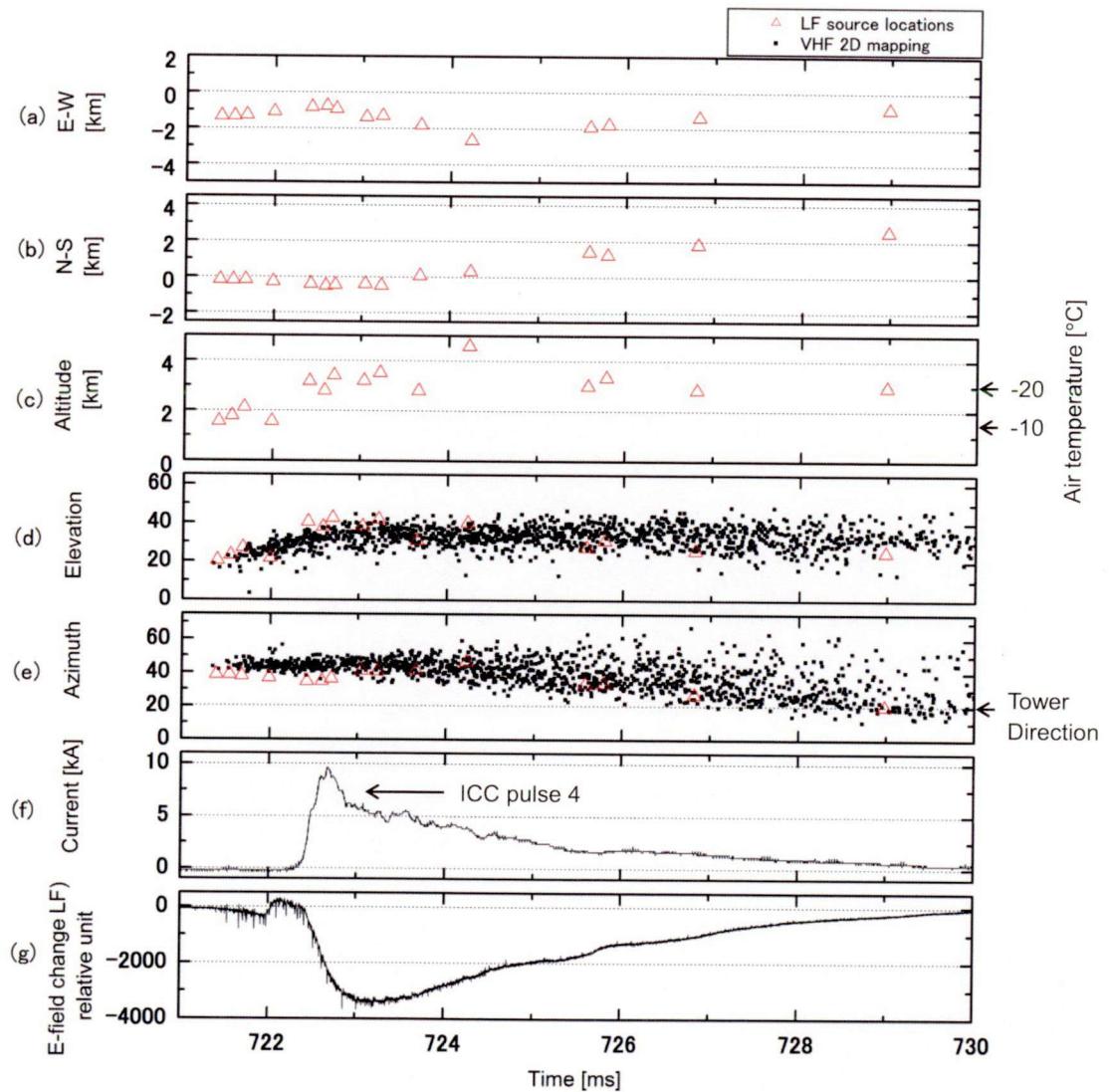


図 3.20: 図 3.17 の UNL 開始付近の拡大図。避雷鉄塔を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度および避雷鉄塔から 85km 離れた輪島のラジオゾンデにより計測された 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)における大気温度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)避雷鉄塔の塔脚で記録された電流波形、(g)サイト 2 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。図 4.6(e)における破線は鉄塔方向を示している。

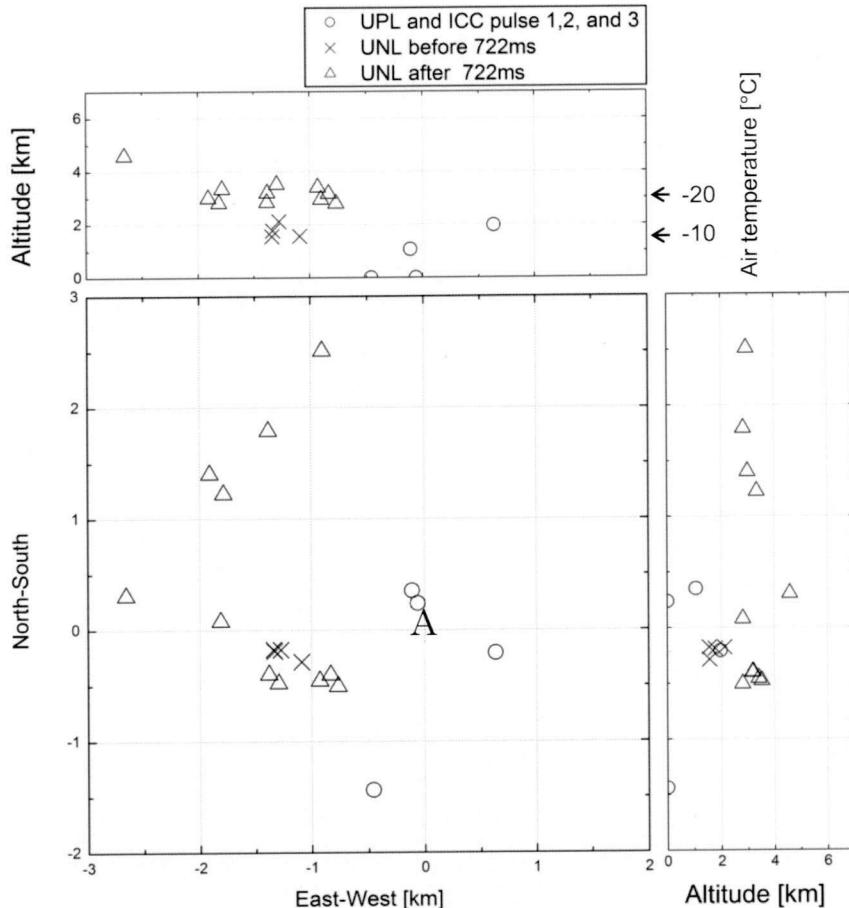


図 3.21: LF 帯広帯域干渉計によって標定された両極性雷の三次元展開図。図 3.17 の三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。原点は鉄塔(A)の位置を示す。

路の電位は大地の電位とほぼ等しいことが考えられる。そのため、雷放電路は鉄塔などの高構造物と同じ役割を果たし、雷放電路から新たな放電が開始しやすくなっている。

本事例において、UNL に伴う LF 帯電磁波放射源高度は UPL に伴う高度より高く標定されており、雷雲中部の負電荷が中和された後、さらに上空の正電荷が中和されたことを示している。Akita ら(2010b)は VHF 帯広帯域干渉計を用いて両極性雷の観測を行い、本論文で示した事例と類似した電荷構造の結果を報告している。また、722.4ms 以降電流は急速に増加しており、LF 帯電磁波放射源は図 3.20(c)および図 3.21 で示す、-20°C 高度より高い、2.8km から 4.6km の範囲に標定されている。これは、UNL が負電荷領域の上空に存在する正電荷領域に到達した際に、電流が急速に流れたものと考えられる。また、図 3.20 の 722ms 以降および図 3.21 中三角印の UNL の標

定点は広がっており、それは UNL が雷雲中に分布した正電荷領域に向けて進展したためと考えられる。Takahashi (1978)は負電荷領域が-10°C から -20°C 高度に存在し、正電荷領域は-20°C 高度より高高度に存在することを提案しており、本結果は Takahashi らの提案を支持するものである。

LF 帯広帯域干渉計は UPL、UNL に対してそれぞれ 1 個および 15 個の LF 帯電磁波放射源を推定している。この結果は VHF 帯電磁波において正極性リーダに伴う放射電力は負極性リーダに伴う放射電力より非常に弱く標定が困難であるという Kawasaki ら(2002)の結果と一致している。図 3.20(d), (e) から大部分の LF 帯電磁波放射源は VHF 帯電磁波放射源付近に標定されていることがわかる。図 3.20(g)の 721ms ～723ms では、負極性の微小なパルスが大きく緩やかな変化をした負極性の波形に重畠していることを示している。大部分のパルスは波頭部の極性が負極性で、片極性もしくは両極性のパルスであり、負電荷が上空へ進展していることを示している。

### 3.3.3.2 負極性雷

次に、2011 年 1 月 15 日 18:40:58(JST)に発生した UPL から開始する負極性雷の事例を示す。図 3.22 (a)-(c)に LF 帯広帯域干渉計で得られた電磁波放射源の(a)東西、(b)南北、(c)高度を示す。図 3.22(c)には高度に対応した大気の温度を示している。大気の温度は 2011 年 1 月 15 日 21:00:00(JST)におけるラジオゾンデによる高層気象観測結果である。図 3.22(d)、(e)にサイト 2 の VHF 帯広帯域干渉計で得られた二次元標定結果と LF 帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換した二次元標定結果を(d)仰角、(e)方位角で示す。図 3.22(f)に避雷鉄塔の塔脚に取り付けられたロゴスキーコイルによって測定された電流波形を示す。図 3.22(g)にはサイト 2 の LF 帯受信機で受信された電界変化波形を示す。図 3.22(f)から、本事例は雷雲内の負電荷中和する上向き放電で開始する負極性雷であることがわかる。706ms から負極性の電流値を示しているため、正極性の電荷が大地から雷雲へ向けて流れ始めており、UPL が開始していることを示している。UPL の開始後 ICC が流れ始め、フラッシュ中絶えず流れ続けている。LF 帯広帯域干渉計は図 3.22 に示す ICC pulse に伴う LF 帯電磁波放射源を標定している。その他の ICC pulse は標定不可能であった。本事例は上向きリーダと ICC の初期過程のみであり、リーダ・帰還雷撃過程を含んでいない。図 3.22 から、本事例では図 3.18 で示す両極性雷の事例と同様に正極性リーダの標定点が少ないことがわかる。

本事例において、LF 帯広帯域干渉計は UPL および ICC pulse に伴う LF 帯電磁波放射源をそれぞれ 1 つずつ標定した。UPL および ICC pulse が標定された高度はそれぞれ 0km、4.2km であり、鉄塔からの水平距離はそれぞれ 0.2km、0.8km であった。UPL が発生した 707ms 前後の VHF 帯電磁波の標定数は 2 点のみであり、ICC pulse が発生した 712ms 前後には VHF 帯電磁波が標定されていない。UPL に伴う LF 帯電磁波放射源は最も近い VHF 帯電磁波放射源から 8°離れている。UPL は LF 帯広帯域干渉計によって避雷鉄塔付近に標定されているため、両干渉計はそれぞれ別の雷放電路を標定していることが考えられる。

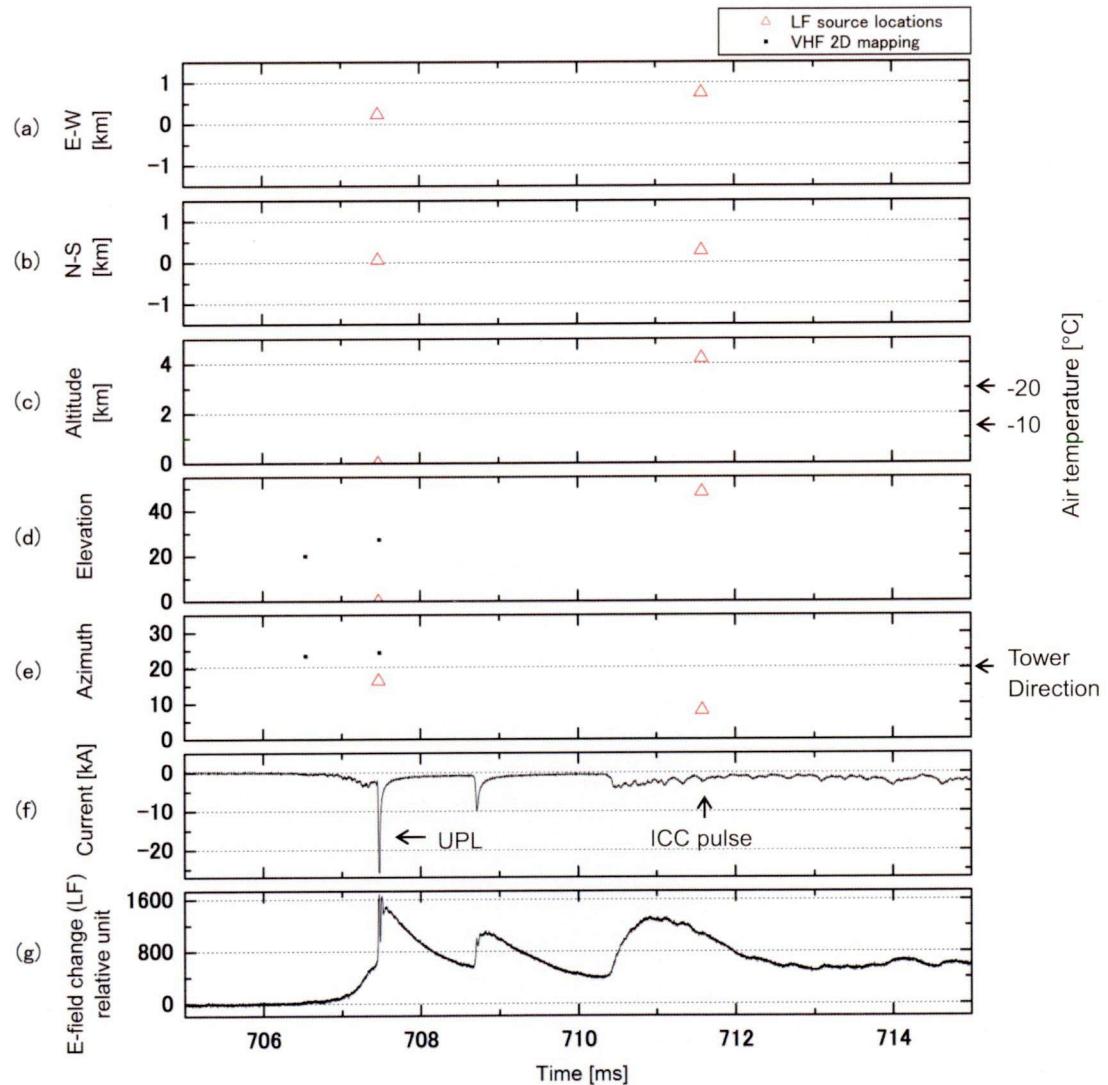


図 3.22: 2011 年 1 月 15 日 18:40:58(JST)に発生した両極性雷の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電流波形、電界変化波形を時系列で示した図。避雷鉄塔を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度および避雷鉄塔から 85km 離れた輪島のラジオゾンデにより計測された 2011 年 1 月 15 日 21:00(JST)における大気温度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)避雷鉄塔の塔脚で記録された電流波形、(g)サイト 2 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。図 3.22(e)における破線は鉄塔方向を示している。

これら両極性雷および上向き放電で開始する負極性雷の2事例から、LF帯広帯域干渉計はICC pulseやUPL、UNLといった様々な放電過程を標定可能であることを示している。図3.20(d)および図3.20(e)は、VHF帯広帯域干渉計によって標定された負極性リーダーの一部がLF帯広帯域干渉計によっても標定されていることを示している。図3.18および図3.22は、VHF帯広帯域干渉計によって標定できていない電磁波放射源をLF帯広帯域干渉計によって部分的に標定可能であることを示している。LF帯広帯域干渉計のみによって標定されている電磁波放射源から発生する放射電力は、LF帯で強くVHF帯で弱いことが考えられる。

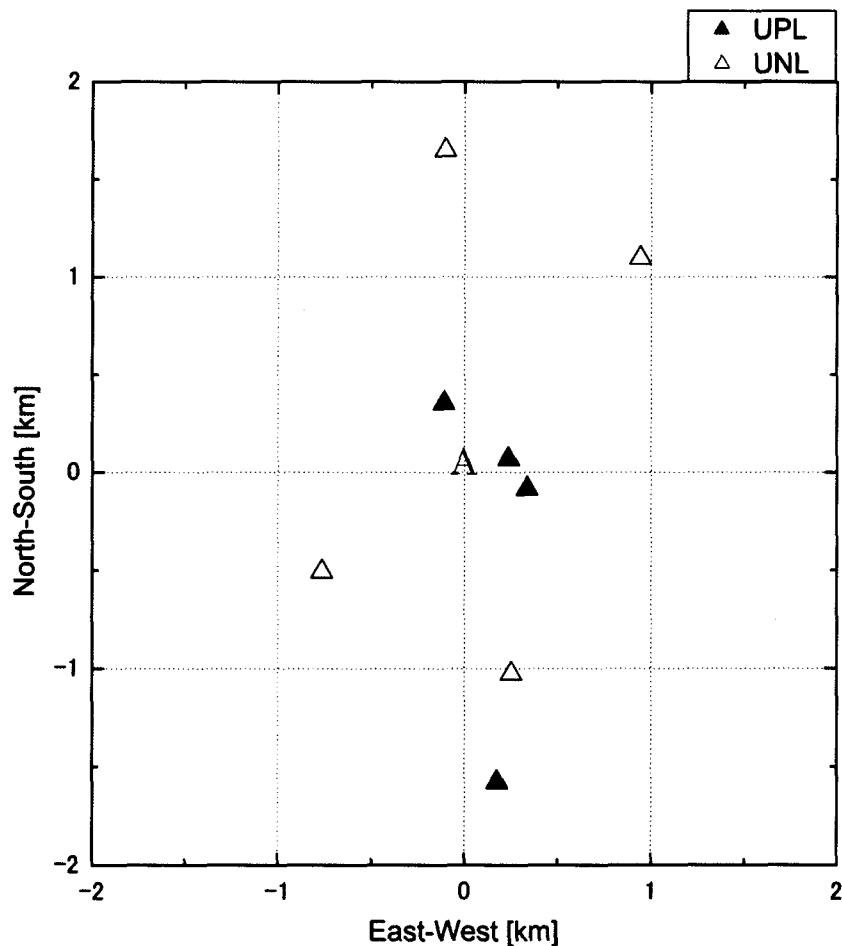


図3.23: 2011年12月6日～2012年1月26日の観測期間中避雷鉄塔から開始したUPLおよびUNLのLF帯広帯域干渉計による標定点と避雷鉄塔の位置関係。原点は鉄塔(A)の位置を示す。

### 3.3.4 考察

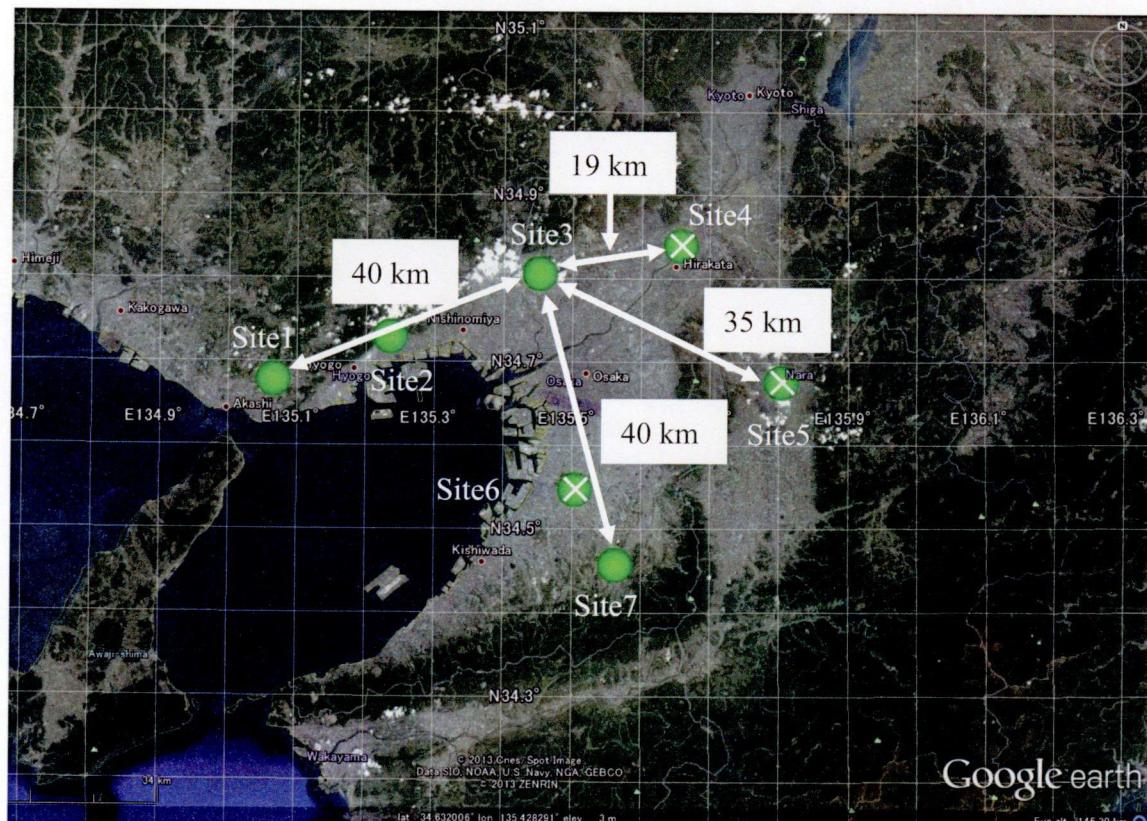
2011年12月6日から2012年1月26日の観測期間中、14事例の上向き放電で開始する落雷が避雷鉄塔に設置されたロゴスキーコイルによって測定された。14事例中、7つのUPLと7つのUNLが測定され、そのうち4つのUPLと4つのUNLがLF帯広帯域干渉計によって標定された。電流が流れ始めてから10ms以内に標定されたLF帯電磁波放射源のうち、避雷鉄塔から最も近い標定点を平面図で図3.23に示す。図3.23の原点は避雷鉄塔の位置に対応する。避雷鉄塔からこれら標定点までの水平距離の平均値は1.0kmであった。上向きリーダが放電開始点から数百メートルかそれ以上進展した際にLF帯電磁波放射源が標定されることを考慮すると、本結果は避雷鉄塔からある程度進展した上向きリーダをLF帯広帯域干渉計が標定したものと考えられる。

## 3.4 LF 帯広帯域干渉計を用いた雷放電進展過程の観測

### 3.4.1 観測概要

オーストラリアと北陸では電波環境の良い場所で雷放電観測を行なってきたが、電波環境の悪い都市部における LF 帯広帯域干渉計の有効性を検証するために、2011 年 7 月より関西地方で LF 帯広帯域干渉計および VHF 帯広帯域干渉計を用いた雷観測を行なっている。図 3.24 に雷観測機のサイトマップを示す。Site1～Site8 に LF 帯受信機を設置し、Site 2～6 には VHF 帯広帯域干渉計を設置した。同図に示す通り、LF 帯広帯域干渉計は 20～50km の間隔で設置した LF 帯受信機で構成されている。

本章では LF 帯広帯域干渉計の改良を行なっている。即ち、設置環境の改善やローパスフィルタの装荷、AC ラインフィルタの採用等により LF 帯受信機のノイズレベルを低減し、さらに LF 帯受信機を多地点に配置し冗長性を持たせた。冗長性を持たせることにより、標定精度の向上や観測範囲の拡大が期待される。



○:Site location of LF receiver, ×:Site location of VHF DITF

図 3.24: 2011 年から実施している関西における雷放電観測サイトマップ。

(引用 : Google earth)

### 3.4.2 観測結果

#### 3.4.2.1 雲内放電

図 3.25 に 2011 年 9 月 17 日 03:44:24 (JST) に発生した雲内放電の観測結果を示す。図 3.25 (a)-(c) に LF 帯広域干渉計で得られた電磁波放射源の(a)東西、(b)南北、(c)高度を、図 3.25 (d)、(e)にサイト 2 の VHF 帯広域干渉計で得られた二次元標定結果と LF 帯広域干渉計で得られた三次元標定結果から変換した二次元標定結果を(d)仰角、(e)方位角で、図 3.25 (f)にサイト 3 の LF 帯受信機で記録された電界変化波形をそれぞれ示す。図 3.25 (a)-(c) に示す LF 帯電磁波放射源および図 3.25 (d)、(e)の二次元標定結果はサイト 2 が基準となっている。

図 3.25(f) に示す 996ms 付近の電界変化波形では放電開始に伴い比較的振幅の大きいパルス列が記録され、1001ms 以降それらのパルスに比べて振幅が 3 分の 1 以下の小さいパルスが複数記録されている一方、帰還雷撃に相当する立ち上がり時間が短く振幅の大きいパルスは記録されていない。よって、本事例はプレリミナリーブレイクダウンパルス(Brook, 1992)から開始する雲内放電である。プレリミナリーブレイクダウンパルスとは、電界変化波形において、放電開始に伴って発生する、継続時間が数 ms の両極性パルスである。プレリミナリーブレイクダウンパルスの振幅は、雷放電進展過程に伴うパルスより大きく、帰還雷撃に相当するものもある。図 3.25 (a)-(c) の LF 帯電磁波放射源は、プレリミナリーブレイクダウンによる放電開始後、東西および南北方向に広がっている様子を示している。本事例では、プレリミナリーブレイクダウンおよび枝分かれを含むリーダ進展に伴い、約 100 パルスもの LF 帯電磁波放射源が標定されている。

LF 帯電磁波の放射時刻後 150 $\mu$ s 以内に標定されている VHF 帯電磁波を比較対象として精度検証を行った。本事例のフラッシュ中に比較対象となったパルス数は 60 個であった。これらのパルスに対して、VHF 帯広域干渉計で標定された方位角から LF 帯広域干渉計で標定された方位角の差を求めた結果、平均-0.2°、標準偏差 2.9° であった。仰角でも同様に求めた結果、平均 0.8°、標準偏差 4.3° であった。これらの結果は VHF 帯広域干渉計の精度と同程度であり誤差範囲内であることを示した。図 3.25(d)、(e)からも VHF 帯広域干渉計による標定結果とよく一致していることが確認できる。

図 3.26 に、図 3.25 のプレリミナリーブレイクダウン発生時刻の拡大図を示す。本事例で観測されたプレリミナリーブレイクダウンは高度 5km で開始し、その後 5ms で高度 10km まで移動している。Nag ら(2009)は雷雲中部の負電荷領域から発生する下向きの負極性リーダと雷雲下部のポケット正電荷領域の相互作用によりプレリミナリーブレイクダウンパルス列が発生するというモデルを提案している。つまり、プレリミナリーブレイクダウンの放電開始点は負電荷領域とポケット正電荷領域の中間付近となる。サイト 2 から 4.4km 離れた地点の 2011 年 9 月 17 日 03:40 における地

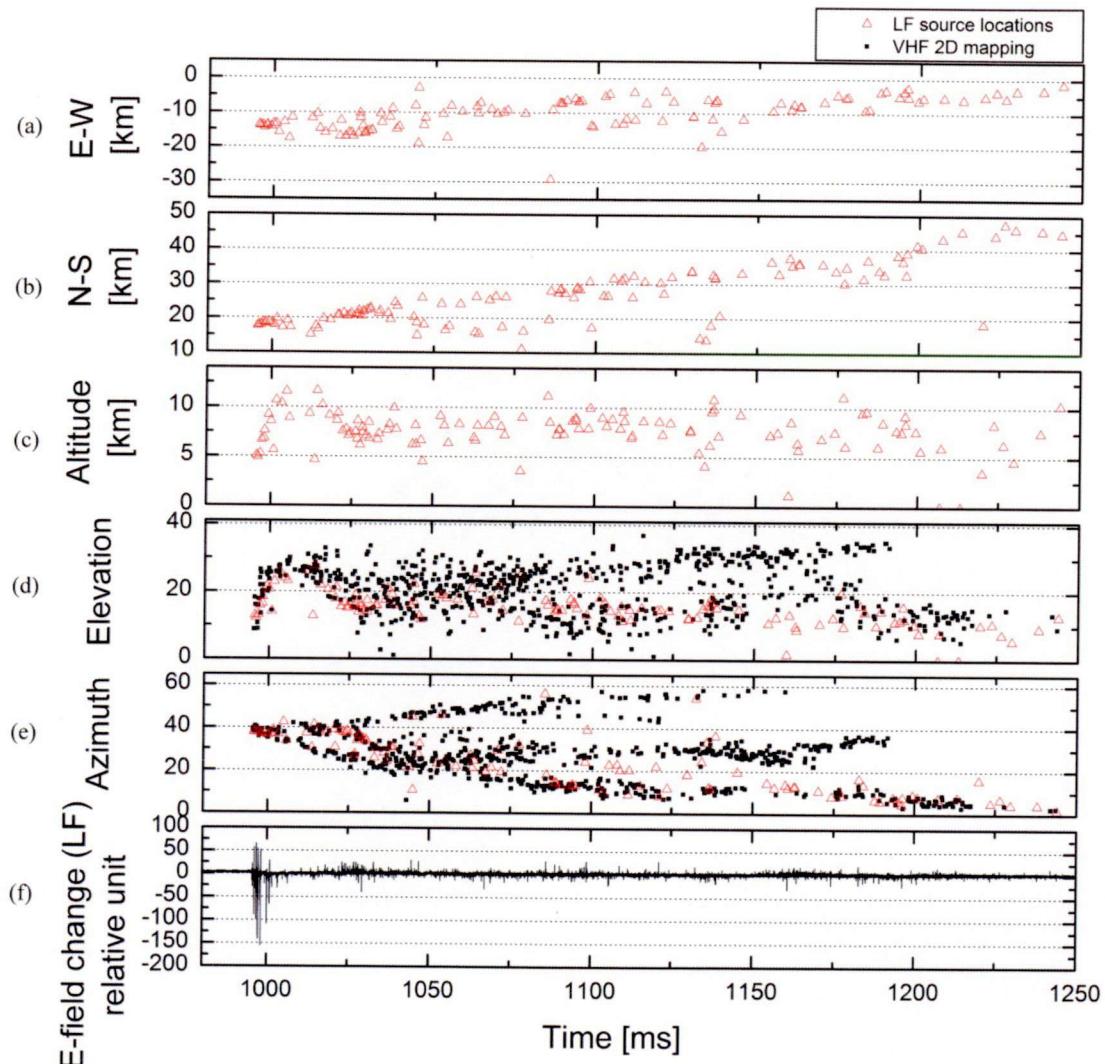


図 3.25: 2011 年 9 月 17 日 03:44:24(JST)に発生した雲内放電の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電界変化波形を時系列で示した図。サイト 2 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 3 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

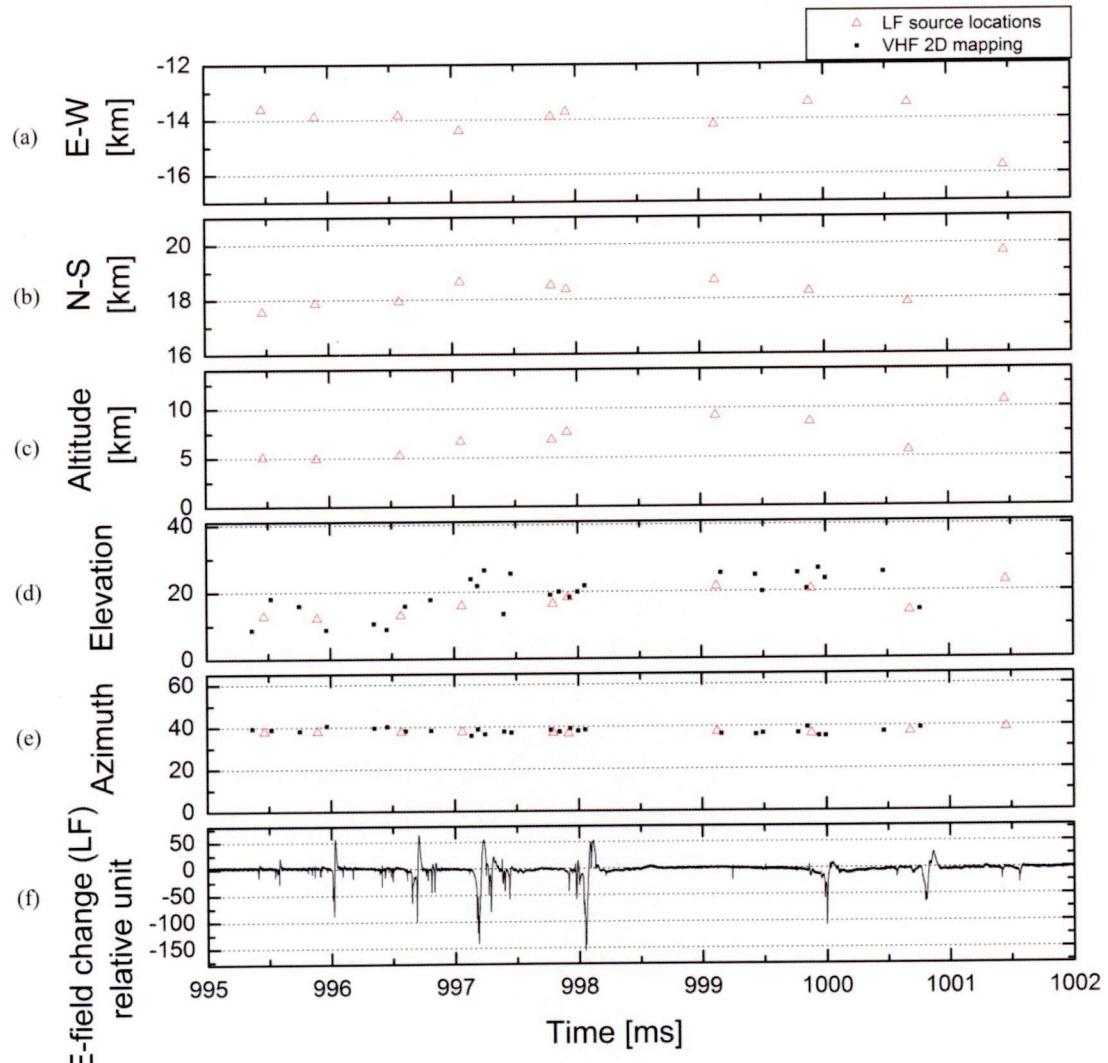


図 3.26: 図 3.25 のプレリミナリーブレイクダウン開始付近の拡大図。サイト 2 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 3 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

表温度は26°Cであり(URL: <http://www.jma.go.jp/jma/>)、標準大気の気温減率6.5°C/kmを仮定すると-10°C高度および-20°C高度はそれぞれ、5.5km、7kmであった。Takahashi(1978)は-10°C高度～-20°C高度に負電荷が分布していると提案しており、下部正電荷領域は高度5.5km以下に存在すると予想される。したがって、負電荷領域と下部正電荷領域の中間高度は5km程度であるため、LF帯広帯域干渉計によって標定されたプレリミナリーブレイクダウンの開始点高度と同程度である。

図3.26(a)-(c)において本事例のプレリミナリーブレイクダウンの標定位置は水平距離が0.7km移動しており、高度5.1kmから8.5kmへ移動していることから、三次元進展速度は $8.1 \times 10^5$ m/sであった。プレリミナリーブレイクダウンは、物理機構や発生条件、開始点、速度等十分に明らかにされておらず、雷雲内電荷構造や放電開始に深く関わっていることから、今後多数の事例について詳細な解析が必要である。

図3.27に図3.25の1150ms周辺の拡大図を示す。VHF帯広帯域干渉計による二次元標定結果の方位角からリーダは60°、30°、10°付近に分かれており、30°付近には多数標定されているが、60°、10°付近は標定数が少ない。図3.27(e)の1137msおよび1177msの方位角10°付近に注目すると、両干渉計により同じリーダが標定されていることがわかる。一方、1154ms～1170msの方位角10°付近には、LF帯広帯域干渉計のみによってリーダが標定されている。したがって、VHF帯およびLF帯広帯域干渉計とともに標定されるリーダや、LF帯広帯域干渉計のみによって標定されるリーダが存在することを示している。VHF帯広帯域干渉計は主にリーダ進展に伴う電磁波を受信して標定するため、詳細な雷放電路が可視化可能である。しかし、本事例で示したように、VHF帯広帯域干渉計による雷放電路で標定されていない位置に、LF帯広帯域干渉計によって標定された電磁波放射源が存在することを示した。過去の研究結果から、放電電力が弱い正極性リーダは、VHF帯広帯域干渉計によって標定が困難である事が知られているため(Kawasaki et al., 2002)、VHF帯広帯域干渉計によって標定されなかつた正極性リーダをLF帯広帯域干渉計が標定したと考えられる。または、VHF帯広帯域干渉計は観測サイトから30km以上で発生した電磁波放射源の標定数が少なくなることから、LF帯広帯域干渉計のみによって電磁波放射源が標定されたと考えられる。この結果は、VHF帯広帯域干渉計は詳細な雷放電路を観測し、LF帯広帯域干渉計は広範かつVHF帯広帯域干渉計で標定されなかつた正極性リーダ等の雷放電路の一部を標定して補う、両干渉計による相補的な観測の重要性を示唆している。

### 3.4.2.2 対地放電

図3.28に、2011年9月17日15:09:18(JST)に発生した負極性落雷の観測結果を示す。図3.28(a)-(c)にLF帯広帯域干渉計で得られた電磁波放射源の(a)東西、(b)南北、(c)高度を、図3.28(d)、(e)にVHF帯広帯域干渉計で得られた二次元標定結果とLF帯広帯域干渉計で得られた三次元標定結果から変換した二次元標定結果を(d)仰角、(e)方位角で、図3.28(f)にサイト3のLF帯受信機で記録された電界変化波形をそれぞれ示す。図3.28(a)-(c)に示すLF帯電磁波放射源および図3.28(d)、(e)の二次元標定結

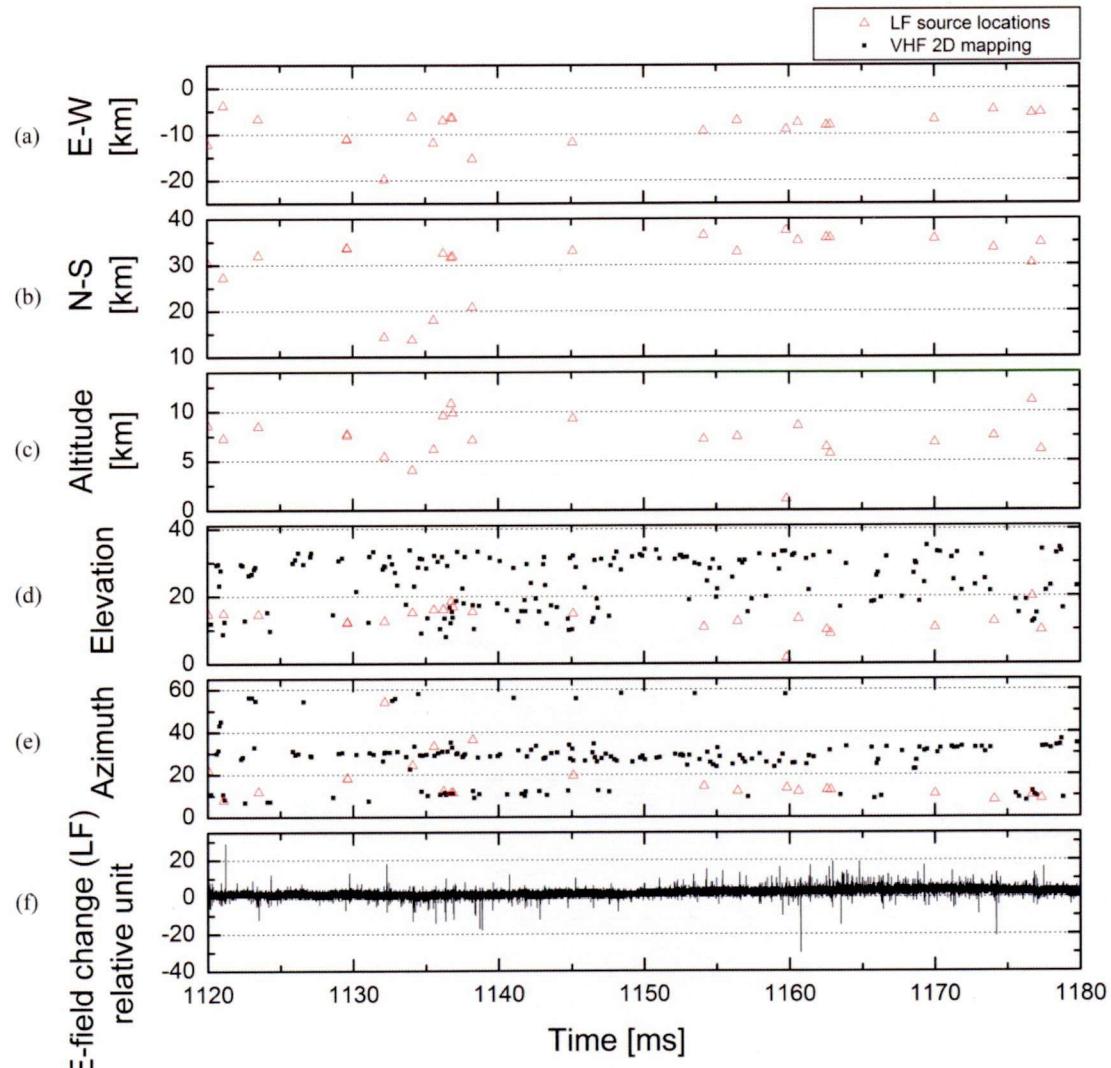


図 3.27: 図 3.25 の 1150ms 周辺の拡大図。サイト 2 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 2 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 3 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

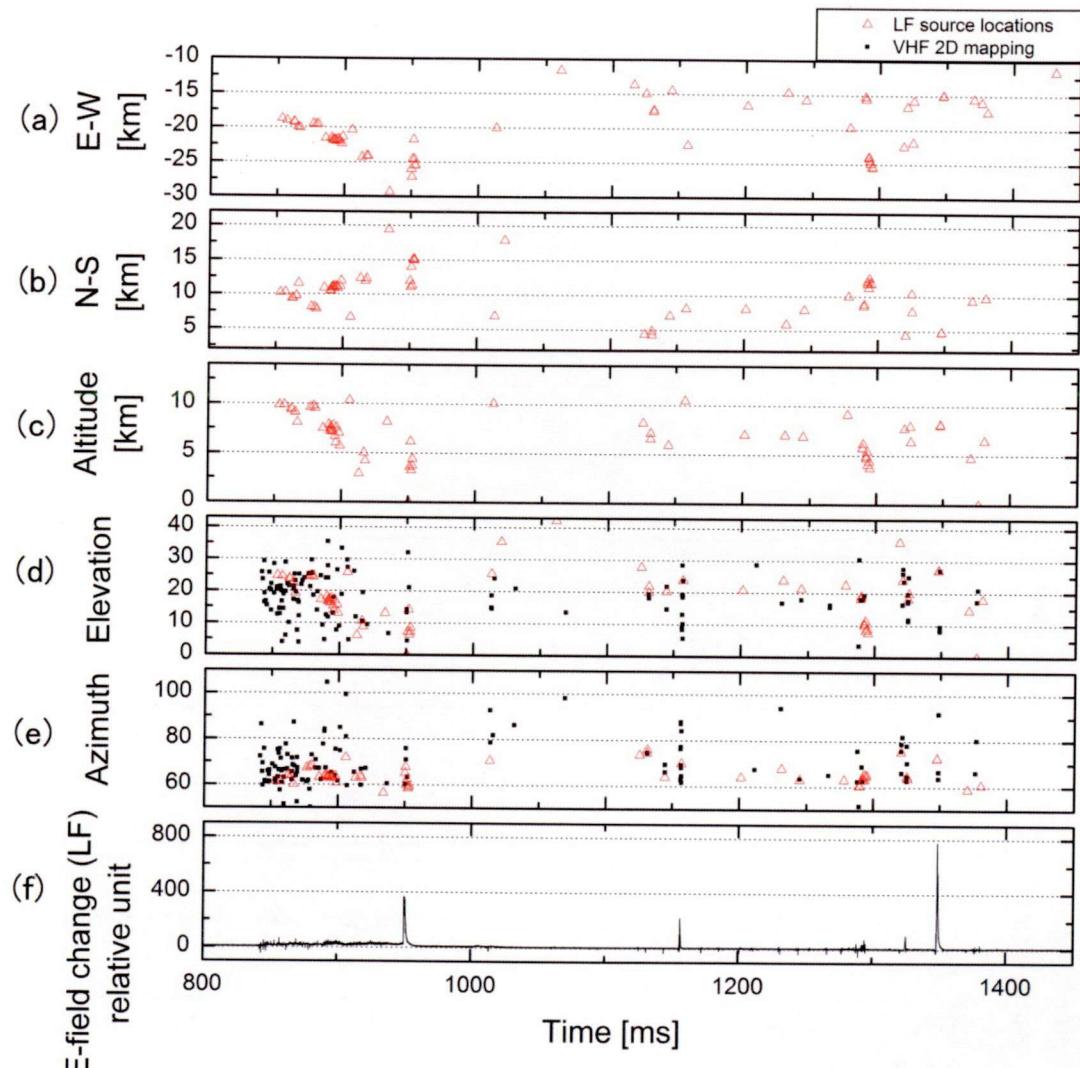


図 3.28: 2011 年 9 月 17 日 15:09:18(JST)に発生した対地放電の LF 帯および VHF 帯電磁波放射源、電界変化波形を時系列で示した図。サイト 4 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 4 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 3 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

果はサイト 4 が基準となっている。本事例では、ステップトリーダ、帰還雷撃、K-event が標定されており、図 3.28(f) に見られるように 840ms から電界変化波形に微小なパルスであるステップトリーダが記録され始めると同時に、図 3.28(d)、(e)から VHF 帯広帯域干渉計によるステップトリーダの標定が開始している。850ms からは LF 帯広帯域干渉計による電磁波放射源の標定が開始する。図 3.28(f)より、本事例では放電開始時刻付近にプレリミナリーブレイクダウンが記録されていないことがわかる。

雲内放電の事例と同様に本事例で 1 フラッシュ中に VHF の標定結果と一致した 16 パルスについて精度検証を行った結果、方位角では平均  $0.0^\circ$ 、標準偏差  $5.8^\circ$ 、仰角では平均  $2.7^\circ$ 、標準偏差  $6.6^\circ$  であった。これらの結果は VHF 帯広帯域干渉計の精度と同程度であり誤差範囲内であることを示した。LF 帯電磁波はステップトリーダから第一雷撃までの放電過程において、枝分かれを含めて約 30 パルスもの標定がされており、図 3.28 (d)、(e)からも VHF 帯広帯域干渉計による標定結果とよく一致していることが確認される。本事例において LF 帯広帯域干渉計によって標定された 1 フラッシュ中の総パルス数は約 70 個であった。

図 3.29 にステップトリーダから帰還雷撃までの部分を拡大して示す。840ms からステップトリーダによる微小パルスが継続した後、950ms では微小パルスに比べて振幅が五倍以上で、10-90%立ち上がり時間が  $3.8\mu\text{s}$  のパルスが記録されている。このパルスは典型的な帰還雷撃に伴うパルスであるため(Master et al., 1984)、840～950ms の現象はステップトリーダから第一雷撃に至る放電過程であることが考えられる。また、微小パルスの VHF 帯広帯域干渉計による二次元標定結果の仰角の変化と帰還雷撃が存在することから、微小パルスはステップトリーダによるものと考えられる。

906ms 付近の LF 帯電磁波放射源は、上空から地面に向かうステップトリーダの下端だけではなく、上部にも標定されている。さらに、VHF 帯電磁波放射源も同様に上空に位置標定されているため、この LF 帯電磁波放射源は標定エラーではなく、上空から新たに枝分かれしたリーダからの電磁波放射源を標定したものであると考えられる。Yoshida ら(2012a)は VHF 帯広帯域干渉計および高速カメラによる光学観測を実施し、ステップトリーダは多数の枝分かれを含み、リーダが地面へ向けて進展中に、新たに上空からのリーダの枝分かれが多数発生することを確認し、そのためステップトリーダの期間中は仰角方向に拡がった標定結果になることを示した。本事例では、LF 帯広帯域干渉計によって 851～918ms にステップトリーダが標定されており、水平方向で  $5.8\text{km}$  の距離を進展し、高度  $9.9\text{km}$  から  $4.2\text{km}$  へ進展していることから、三次元進展速度は  $1.2 \times 10^5 \text{ m/s}$  であった。Shao ら(1995)による VHF 帯狭帯域干渉計を用いたフロリダでの観測や Schonland ら(1956)による光学観測によると、ステップトリーダの典型的な速度は  $2 \times 10^5 \text{ m/s}$  であると報告されている。よって、LF 帯広帯域干渉計を用いてもステップトリーダの速度を十分に推定できると考えられる。

また、さまざまなパルスのなかで、第一雷撃およびその直後に発生したパルスのみが高度  $0\text{km}$  に標定された。帰還雷撃が地表付近に標定されるという結果は Takayanagi

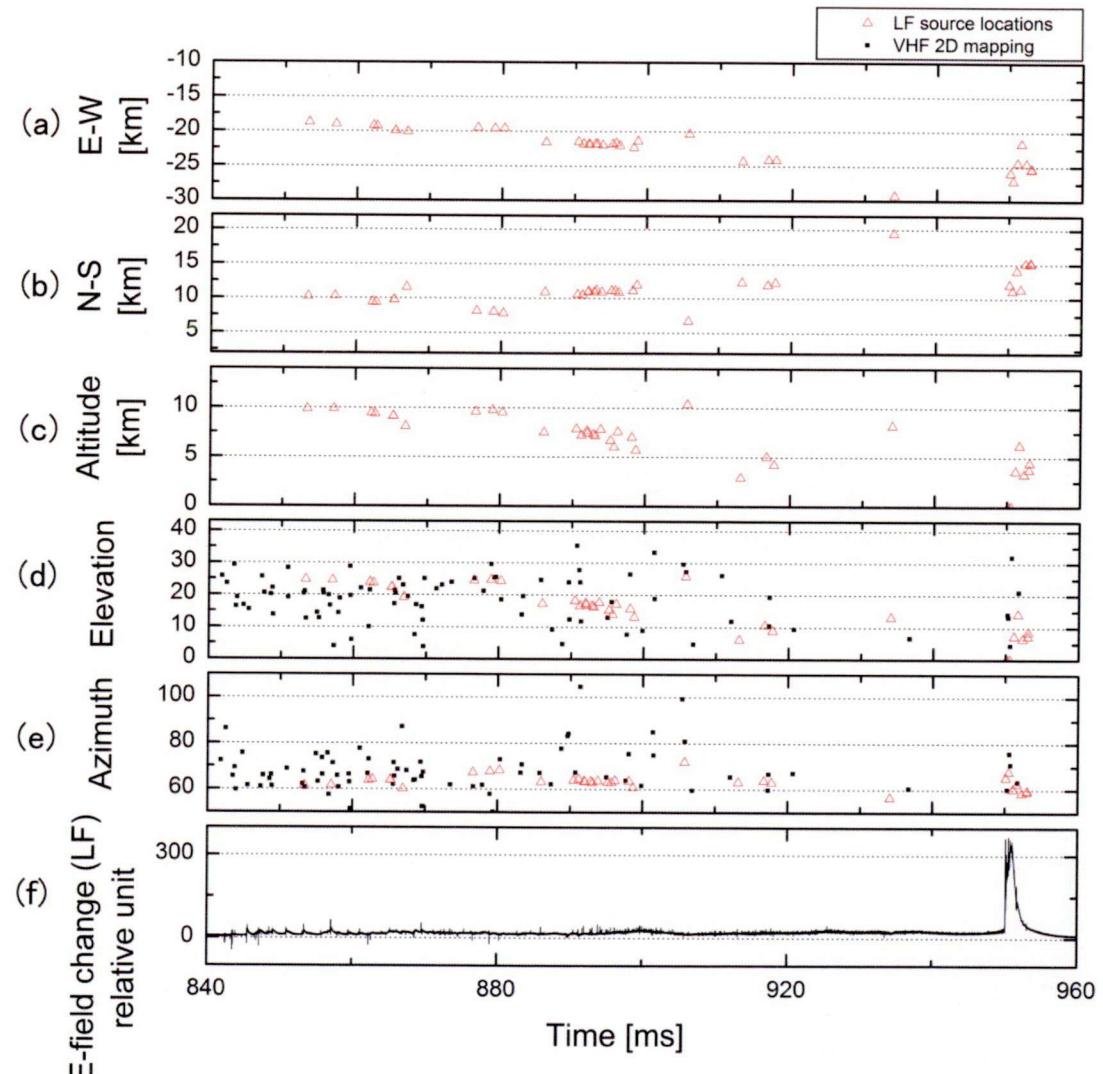


図 3.29: 図 3.28 のステップトリーダから第一雷撃までの部分を拡大した図。サイト 4 を原点とした LF 帯電磁波放射源の(a)東西方向、(b)南北方向、(c)高度、サイト 4 を基準とした VHF 帯電磁波放射源および LF 帯電磁波放射源の(d)仰角、(e)方位角、(f)サイト 3 の LF 帯受信機で得られた電界変化波形。

ら(2011)がオーストラリア・ダーウィンで観測した事例と同様である。

### 3.4.3 考察

ここで、これら 2 事例の結果を三次元展開図でそれぞれ図 3.30、図 3.31 に示す。図 3.30 の雲内放電の事例からは、放電開始点付近であるプレリミナリーブレイクダウン発生地点から北東に放電路が進展していることが確認される。また、放電の大部分が放電開始点から北東方向に進展しているのに対して、図 3.30 の黒丸で囲む点は放電開始時刻から 250ms 程度経過した後、標定されていることが確認される。図 3.30 の黒丸で囲む点を以下の 3 点の理由から正極性リーダが標定されたものと判断した。

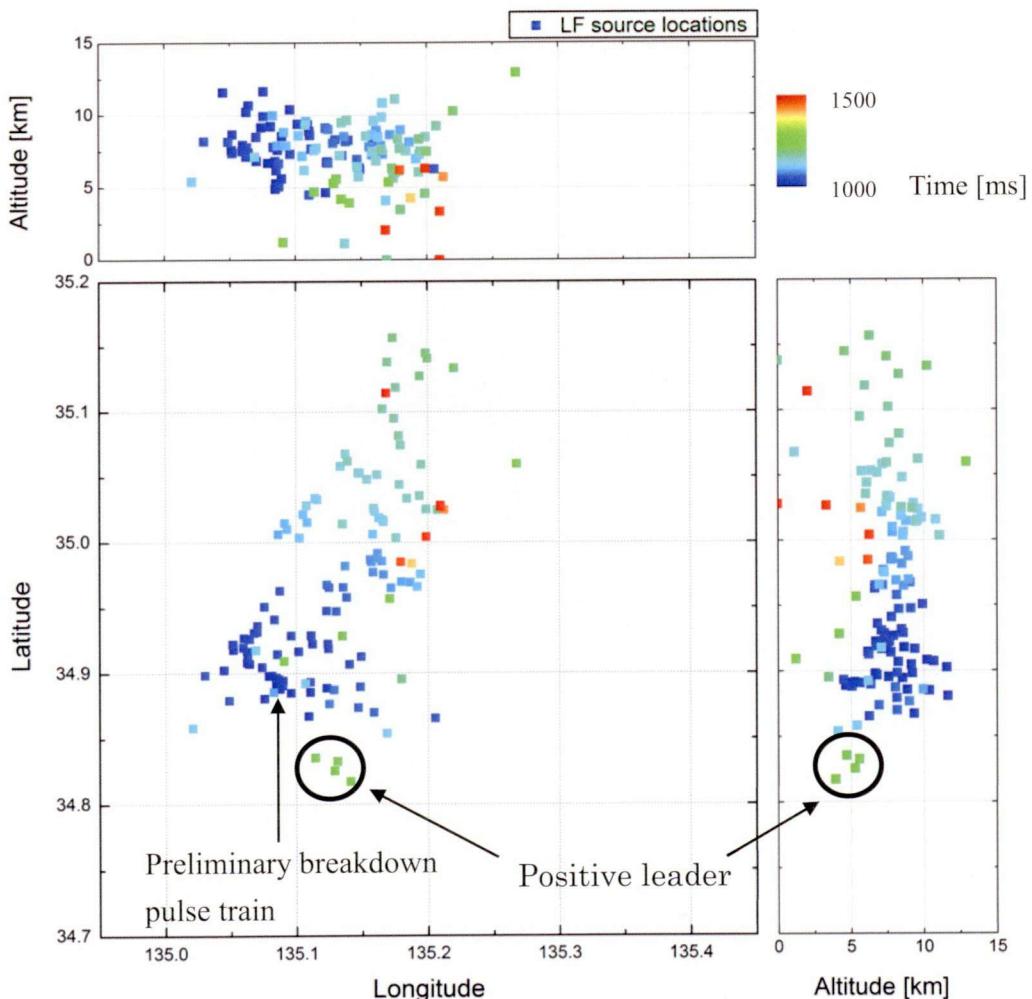


図 3.30: LF 帯広域干渉計によって標定された雲内放電の三次元展開図。図 3.25 の三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。

- 放電開始点付近から大部分のリーダが北東方向に進展しているのに対しで黒丸で囲む標定点は南東方向に標定されている。一般に負極性リーダは正極性リーダよりも放射電力が大きいことが知られており(Kawasaki et al., 2002)、標定点の多いリーダは負極性、少ないリーダは正極性と考えられる。黒丸で囲まれたリーダの標定点数は他方に比べ1/20程度と少なく、北東に進むリーダ、黒丸で囲まれたリーダはそれぞれ、負極性リーダ、正極性リーダであると考えられる。
- 黒丸で囲む標定点の高度は約5kmであり、負極性リーダの全体的な標定点の高度である約7kmより低高度に標定され、また黒丸で囲む高度が雷雲内の負電荷領域と推定される高度に近い。Takahashi(1978)は氷晶との衝突によって電荷分離されたあらの極性と気温の関係を実験的に調査し、その結果を

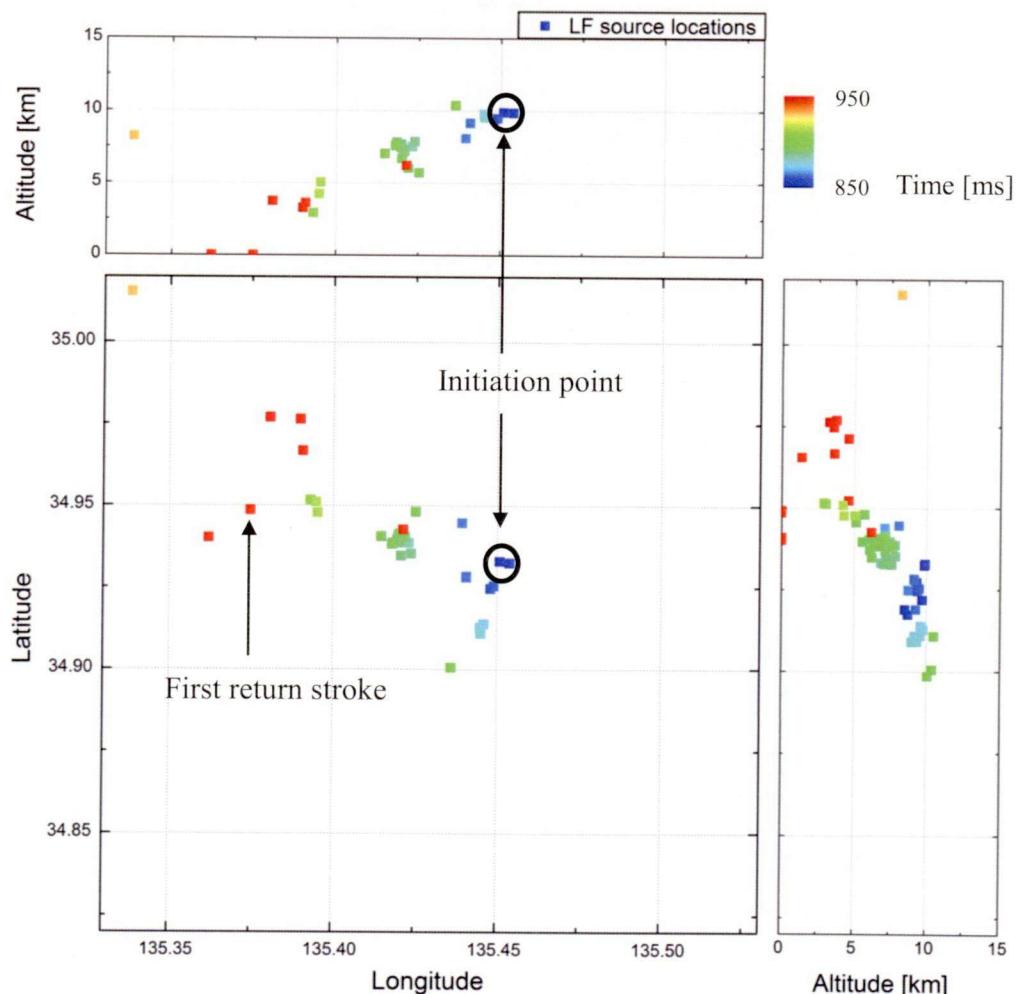


図 3.31: LF 帯広帯域干渉計によって標定されたステップトリーダから対地放電までの三次元展開図。図 3.29 の三次元標定結果を水平平面および垂直平面に投影した図。

もとに着氷電荷分離機構を提案した。着氷電荷分離機構によると、-10°Cから-20°Cの領域に電荷密度の高い負電荷が存在する。標準大気の気温減率  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  を仮定すると、高度 5.5km~7km の狭い範囲が-10°Cから-20°Cの領域に対応し、この範囲が負電荷領域であると考えられる。LF 帯広帯域干渉計による正極性リーダだと思われる標定点の高度は 5km 程度であり、気温減率による負電荷領域の高度と 0.5km~2km 異なっている。しかしながら、気温減率は気温、気圧、湿度に大きく影響を受け、乾燥している場合（乾燥断熱減率）は  $9.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$  となる。一般に下層大気が乾燥断熱減率を持つ場合、雷雨が発生しやすいといわれている（大野, 2001）ため、今回雷放電が観測された時刻は、気温減率  $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$  より高く、負電荷領域が高度 5.5km~7km より低くなると考えられる。つまり、黒丸で囲む標定点は雷雲の負電荷領域を進展していたと考えられるため、正極性リーダであると考えられる。

3. 黒丸で囲む点は放電開始時刻から数百ミリ秒経過した後に標定されている。これら、3 点は Akita ら(2012)の VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果と同一である。

また、負極性リーダと正極性リーダが双方向に進展していることから、LF 帯広帯域干渉計により負極性リーダの進展に伴い逆方向に進展した正極性リーダが標定されたと考えられる。これは、双方向性リーダ仮説（Kawasaki et al., 2002）を支持するものである。

図 3.31 の対地放電の事例からは、黒丸で囲む放電開始点から北西方向へ大地に向かうステップトリーダの進展が連続的に標定されていることが確認される。また、標定の開始時刻から一定時間が経過した後、最初の標定点の高度付近に標定点が存在しており、上空から新たに進展したリーダが標定されていることを示している。

3.2 節で述べた初期観測の際には、電波環境が良いオーストラリア・ダーウィンにおいて、帰還雷撃や K-event のような電界変化の大きいパルスのみ標定可能で、雲内放電、対地放電では 1 フラッシュ全体で、それぞれ 4 パルスおよび 11 パルスの標定数であった。これに対し、今回観測を行った雲内放電および対地放電の事例では、電波環境の悪い関西地方において、1 フラッシュ全体でそれぞれ約 100 パルスおよび約 70 パルスの標定数であった。標定数が向上した主な理由は、設置環境の改善（見晴らしの良い場所に LF 帯受信機を設置することや接地方法の改善）、サンプリング周波数の向上による時刻精度の向上、および観測サイトの冗長化によるものである。細かいパルスの標定が可能となったことで、雷放電路の様相が大まかに可視化され、LF 帯広帯域干渉計による詳細な雷雲の監視が可能となった。

## 3.5 LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステム

### 3.5.1 リアルタイムモニタリングシステムの構成

2012年からLF帯広帯域干渉計を用いた雷放電位置のリアルタイムモニタリングシステムを構築し、webページで観測結果のリアルタイム配信を行なっている。リアルタイムモニタリングシステムの概念図を図3.32に示す。図3.32中には、雷放電発生からリアルタイムでモニタリングされるまでを時系列順に示している。各観測サイトのPCでは雷放電発生時(①)にアナログトリガにより1.1s間のLF帯電磁波形が記録される(②)。1.1s間に振幅の大きいパルスや微小なパルスが含まれているが、受信波形に変化が見られない部分が多い。LF帯広帯域干渉計ではパルス波形部を用いて雷放電位置標定を行うため、1.1s間のデータに位置標定に不要な部分が大半を占めている。そこで、1.1s間のデータ記録後、ソフトウェア上でA/D変換ボードのアナログトリガ電圧より低い閾値を設定し、それを超えた波形のパルス部分のみを抜き出す。雷放電に伴うパルス幅は、回路の時定数を200μsとしているため、数十μs～200μs程度が大多数を占めている。パルス部分は波形のピーク付近2msを抽出したデータ(セグメントデータ)とし、セグメントデータの先頭およびファイル名を正秒から0ms、2ms、

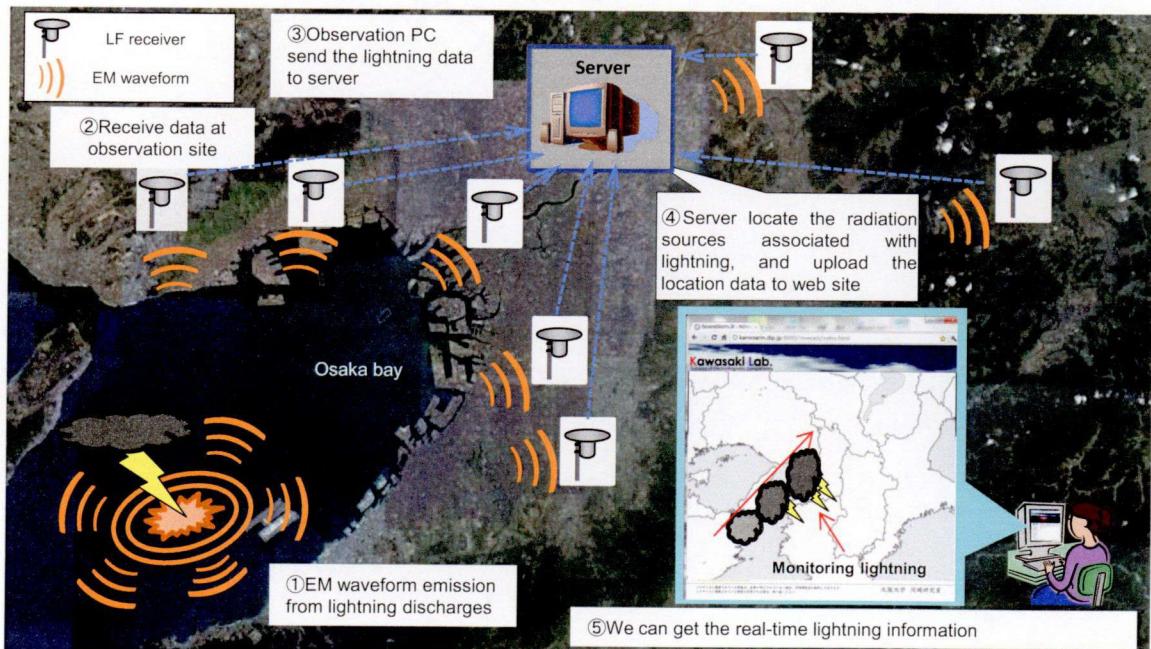


図3.32: LF帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステムの概念図。図中の番号(①～⑤)は時系列順を示している。

4ms・・・とすることで、各観測サイトで作成されたセグメントデータの先頭の絶対時刻を同一にしている。セグメントデータは作成された直後に大阪大学のサーバへ送信される(③)。各サイトと大阪大学のサーバ間の通信は主に WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)を用いて行っている。サーバでは 10 分毎に各観測サイトによるセグメントデータを時系列で並べたリストを作成し、リストから絶対時刻が同一のデータを読み込み、それらに対して雷放電発生位置の計算を行う(④)。

具体的には、サーバが位相差を計算する際に基準とするサイトのセグメントデータ(2ms)からピーク時刻を計算し、ピーク時刻を中心とした 2048 ポイント(512μs)の FFT により位相差を計算し、雷放電発生位置を標定する。現在実施中の関西における LF 帯広帯域干渉計を構成する観測サイト間の最大距離は 68km であり、波形の到達時間差は最大 230μs 程度であるため、FFT のタイムウインドウを 512μs とした。雷放電発生位置は 10 分毎に web ページに表示される(⑤)。

### 3.5.2 LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングの結果

図 3.33 に 2012 年 9 月 6 日 15:40～19:20 に発生した雷放電をリアルタイム配信した一例を示す。兵庫県の丹波地方で雷雲が発達し、奈良方面へ向けて約 3 時間にわたり雷放電が発生している。図 3.33 から、LF 帯広帯域干渉計は広範囲な雷放電発生位置の標定を行うことで、雷雲の発達から成熟、衰弱に至るまでの雷雲の全過程を監視可能であることを示している。ユーザは、閲覧時刻から 1 時間前までの雷放電発生位置を確認することができる。またこの事例では、雷雲はほぼ直線上に進展していることが明らかであり、このような場合には移動ベクトルを用いた雷雲の移動予測も可能である。本システムでは対地放電だけでなく雲内放電も標定し表示しているため、対地放電が発生する前に雷雲の発生と移動の様子がわかるシステムとなっている。

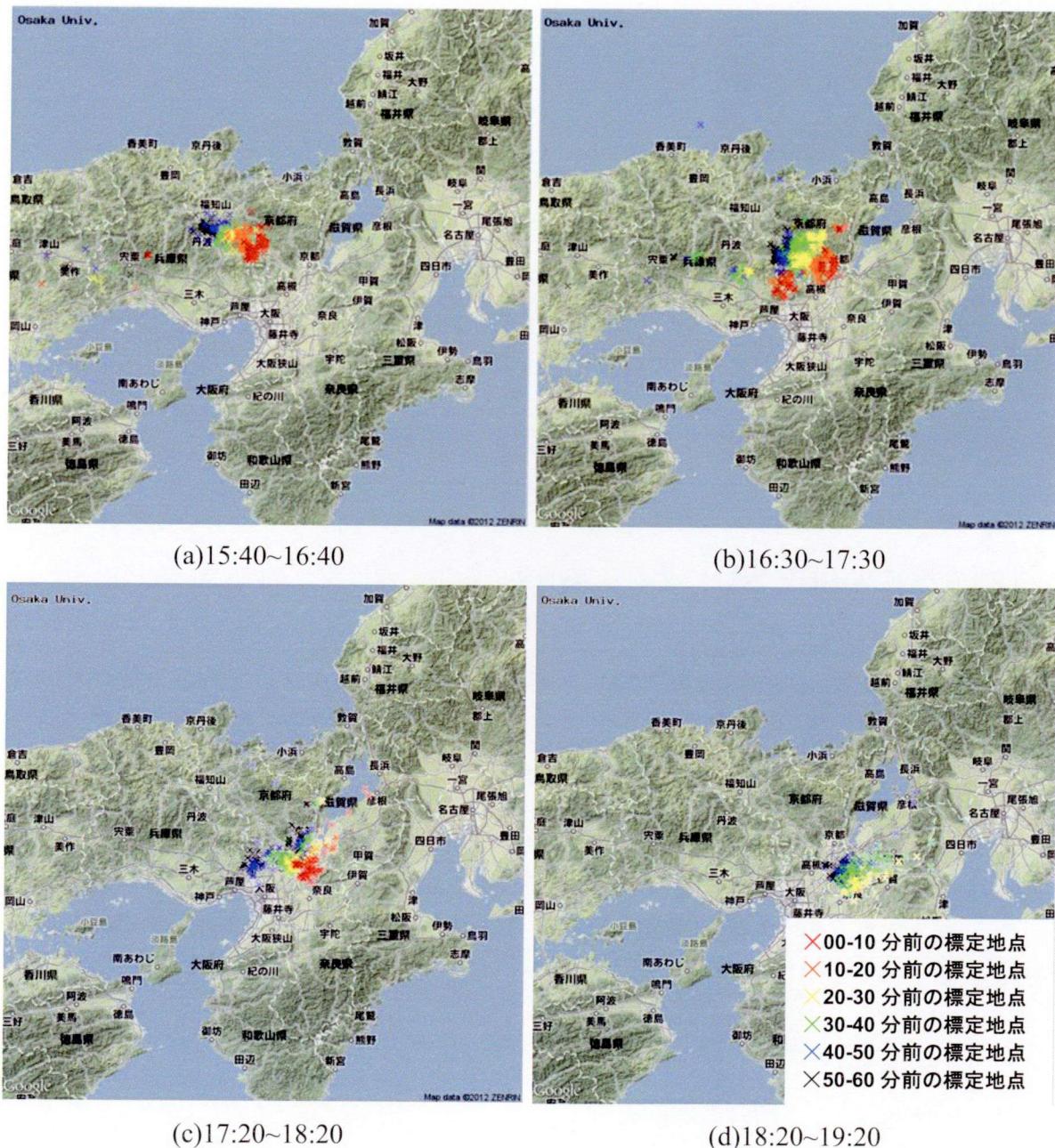


図 3.33: 2012 年 9 月 6 日 15:40~19:20 に発生した雷放電のリアルタイム配信システムの一例。

## 3.6 結言

本章では、我々の研究グループで開発した LF 帯広帯域干渉計を用いた雷放電観測を行った。試験観測では多重雷および雲内放電に伴う LF 帯電磁波放射源を三次元標定し、VHF 帯広帯域干渉計の観測結果と比較することで雷放電過程のうち LF 帯電磁波の放射電力が強い帰還雷撃、K-event、CID が標定可能であることを確認した。また、LF 帯広帯域干渉計によって帰還雷撃は高度 1km 以下の地表付近に標定されることがわかった。さらに、他の雷放電位置標定システムでは標定困難なバースト状の電界変化波形に対しても電磁波放射源位置標定が可能であることを示した。これら、雷放電諸過程の VHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果と LF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を比較したところ、水平距離の平均値は 1.1km であった。

次に、冬季に避雷鉄塔から発生する上向き放電で開始する雷放電を LF 帯広帯域干渉計、VHF 帯広帯域干渉計、ロゴスキーコイルによって観測した。本観測では、LF 帯広帯域干渉計によって、リーダ・帰還雷撃を含まない落雷について 2 事例、標定に成功した。それらの事例は、両極性雷および上向き放電で開始する負極性落雷であった。両極性雷の事例における LF 帯電磁波放射源の標定結果から、UNL は UPL の放電路の一部から放電が開始し、負電荷領域の上空に存在する正電荷領域を進展するという新たな知見が得られた。また、到達時間差法によって標定が困難である UPL および ICC pulse の標定に成功した。2011 年 12 月 6 日から 2012 年 1 月 26 日の観測期間中 4 つの UPL および 4 つの UNL の標定に成功し、それらの鉄塔からの水平距離は平均 1.0km であった。

さらに、電波環境の悪い関西地方において LF 帯広帯域干渉計および VHF 帯広帯域干渉計による雷放電観測を行った。関西地方における観測ではプレリミナリーブレイクダウンから開始する雲内放電と対地放電をそれぞれ 1 事例ずつ示した。雲内放電の事例について LF 帯広帯域干渉計と VHF 帯広帯域干渉計を比較して精度検証を行った結果、方位角では平均  $-0.2^\circ$ 、標準偏差  $2.9^\circ$ 、仰角では平均  $0.8^\circ$ 、標準偏差  $4.3^\circ$  であった。対地放電の事例についても同様に精度検証を行った結果、方位角は平均  $0.0^\circ$ 、標準偏差  $5.8^\circ$ 、仰角では平均  $2.7^\circ$ 、標準偏差  $6.6^\circ$  であった。LF 帯広帯域干渉計では対地放電、雲内放電を問わず、帰還雷撃等も含めて、リーダ進展に伴う微小パルスが標定可能であり、詳細な雷雲の監視が可能であることを示した。

最後に、現在稼働中である LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステムの構築とその結果について述べた。LF 帯広帯域干渉計では広範囲な雷放電発生位置の標定を行うことで、雷雲の発達から成熟、衰弱に至るまでの雷雲活動全体をリアルタイムで監視可能であることを示した。また、LF 帯広帯域干渉計では対地放電だけでなく雲内放電も標定可能であるため、対地放電が発生する前に雷雲の監視が可能なシステムとなっている。今後は波形判別から雲内放電と対地放電をリアルタイムで分別するアルゴリズムを開発し、さらに積乱雲の成熟度もリアルタイムで配信で

きるシステムへと改良する。

## 第4章 結論

本論文は、LF 帯広帯域干渉計の開発と雷放電観測に関する研究について述べたものである。雷雲内で発生する雷放電を広範囲かつ詳細に観測するために、雷放電位置標定装置である LF 帯広帯域干渉計を開発した。そして、開発した装置を用いてオーストラリア・ダーウィン、日本海沿岸に位置する北陸の金沢市、関西地方において雷放電観測を実施し様々な雷放電過程が LF 帯広帯域干渉計によって標定可能であることを実証した。さらに、LF 帯広帯域干渉計を用いたリアルタイムモニタリングシステムの構築を行った。本章では、本研究で得られた結果をまとめ、今後の展望と課題について述べる。

第2章では、LF 帯広帯域干渉計の開発について述べた。我々は、LF 帯広帯域干渉計を数キロ～数十キロメートル離して設置した4つ以上のLF 帯受信機によって構成した。LF 帯広帯域干渉計は、LF 帯受信機によって記録された受信波形から3つ以上の独立したLF 帯受信機対で位相差を求め、雷放電の三次元位置標定を行う装置である。LF 帯受信機では、装置の近傍で発生する雷放電を観測するために容量性円形平板アンテナを採用し、また雷放電諸過程を個々に分別するために時定数  $200\mu\text{s}$  のファーストアンテナ回路として、設計・製作を行った。また、LF 帯広帯域干渉法について、LF 帯電磁波形から位相差の算出、雷放電位置標定に至るまでの計算方法を記述した。

第3章では、我々の研究グループで開発したLF 帯広帯域干渉計を用いた雷放電観測結果について述べた。まず、試験観測において、多重雷および雲内放電に伴うLF 帯電磁波放射源を三次元標定し、VHF 帯広帯域干渉計の観測結果との比較から対地放電および雲内放電が三次元標定可能であることを確認した。標定に成功した雷放電諸過程は、LF 帯電磁波の放射電力が強い帰還雷撃、K-event、CID であった。帰還雷撃はLF 帯広帯域干渉計によって高度 1km 以下の地表付近に標定されることがわかった。また、他の雷放電位置標定システムでは標定困難な K-event に伴うバースト状の電界変化波形に対しても電磁波放射源位置標定が可能であることを示した。雷放電諸過程のVHF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果と LF 帯広帯域干渉計による三次元標定結果を比較した結果、両干渉計による標定位置間の水平距離は平均 1.1km であった。

次に、冬季に避雷鉄塔から発生する上向き放電で開始する雷放電の観測を実施し、LF 帯広帯域干渉計、VHF 帯広帯域干渉計、ロゴスキーコイルを用いた同期観測を行った。そこでは、LF 帯広帯域干渉計によって、リーダ・帰還雷撃を含まない落雷について2事例、標定に成功した。両極性雷および上向き放電で開始する負極性雷の標

定に成功した。両極性雷の事例では、LF 帯広帯域干渉計による観測結果から、UNL は UPL の放電路の一部から放電が開始し、負電荷領域の上空に存在する正電荷領域に向けて進展することが新たにわかった。また、LF 帯広帯域干渉計による UNL の標定点数は UPL の標定点数よりも多いことから、正極性リーダは負極性リーダよりも標定点数が少ないという結果が得られ、VHF 帯広帯域干渉計を用いた結果と同様であることを示した。また、到達時間差法によって標定が困難である UPL および ICC pulse の標定に成功した。2011 年 12 月 6 日から 2012 年 1 月 26 日の観測期間中、4 つの UPL および 4 つの UNL の標定に成功し、鉄塔からの水平距離の平均値は 1.0km であった。

さらに、電波環境の悪い都市部(関西地方)において、LF 帯広帯域干渉計および VHF 帯広帯域干渉計による雷放電観測を行った。ここでは、プレリミナリーブレイクダウンから開始する雲内放電と負極性落雷をそれぞれ 1 事例ずつ示した。雲内放電の事例について、LF 帯広帯域干渉計と VHF 帯広帯域干渉計による標定点を比較して精度検証を行った結果、方位角では平均-0.2°、標準偏差 2.9°、仰角では平均 0.8°、標準偏差 4.3° であった。対地放電の事例についても同様に精度検証を行った結果、方位角は平均 0.0°、標準偏差 5.8°、仰角では平均 2.7°、標準偏差 6.6° であった。これらは雷雲をモニタリングするのに十分な精度であることを示している。LF 帯広帯域干渉計では対地放電、雲内放電を問わず、帰還雷撃等の振幅の大きなパルスおよび、雷放電進展過程に伴う微小パルスが標定可能であり、詳細な雷雲の監視が可能であることを示した。

最後に、現在稼働中である LF 帯広帯域干渉計によるリアルタイムモニタリングシステムの構築とその結果について述べた。まず、LF 帯広帯域干渉計を構成する各観測サイトにおける観測装置でのデータの記録から、web ページに表示されるまでの処理過程について説明した。さらに、LF 帯広帯域干渉計により広範囲な雷放電発生位置の標定を行うことで、雷雲の発達から成熟、衰弱に至るまでの雷雲活動全体をリアルタイムで監視可能であることを示した。LF 帯広帯域干渉計では、対地放電だけでなく雲内放電も標定可能であるため、対地放電が発生する前に雷雲の監視が可能なシステムとなっている。

LF 帯広帯域干渉計は雷放電に伴う電磁波放射源の三次元位置標定が可能であり、雲内放電を雲内に標定し、対地放電を地表付近に標定する特徴がある。雷放電諸過程は様々な波形を示すが、それぞれ特徴を持っていることが知られる。そのため、標定高度や波形判別から雷放電諸過程を判別するアルゴリズムの開発が可能である。また、波形の振幅等から中和電荷量を推定することが可能である。今後、雷放電諸過程の種類や中和電荷量等から積乱雲の成熟度をリアルタイムで配信することが課題である。また、関西の雷放電観測で雲内放電の放電開始に発生するプレリミナリーブレイクダウンを 1 事例示したが、プレリミナリーブレイクダウンの物理機構等が未だ解明されていない。そのため、対地放電の開始に発生するプレリミナリーブレイクダウンの事例等を含めて、多数の事例について三次元標定を行うことで、現象解明に貢献するこ

とが期待される。さらに、2012年から大阪大学吹田キャンパスで1ボリュームスキャン10秒という高時間分解能を有したフェーズドアレイレーダによる降雨観測を行っている。フェーズドアレイレーダによる降雨観測結果とLF帯広帯域干渉計による雷放電位置標定結果の比較を行うことで雷放電物理に関する新たな知見が得られることが期待される。



# 参考文献

- Akita, M., Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, 2010a: What occurs in K-process of cloud flashes?, *J. Geophys. Res.*, **115**, D07106.
- Akita, M., S. Yoshida, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, 2010b: Lightning channels of cloud-to-ground flashes neutralizing multiple charge regions inside winter thunderclouds, *IEEE Trans. FM.*, **130**, 467-472.
- Akita, M., S. Yoshida, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, and D. Wang, 2011: Effects of charge distribution in thunderstorm on lightning propagation paths in Darwin, Australia, *J. Atmos. Sci.*, **68**, 719–726.
- Akita, M., Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, 2012: Estimation for charge distributions related with individual lightning discharges using VHF broadband digital interferometer, *J. Atmos. Electr.*, **32**, 55-63.
- Betz, H.-D., K. Schmidt, P. Oettinger, and M. Wirz, 2004: Lightning detection with 3-D discrimination of intracloud and cloud-to-ground discharges, *J. Geophys. Res.*, **31**, L11108.
- Berger, K., and E. Vogelsanger, 1969: New results of lightning observations, In Planetary Electrodynamics, eds. S.C. Coroniti and J. Hughes, 489-510, New York: Gordon and Breach.
- Biagi, C.J., M. A. Uman, J. D. Hill, and D. M. Jordan, 2011: Observations of the initial, upward-propagating, positive leader steps in a rocket-and-wire triggered lightning discharge, *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L24809.
- Brook, M., 1992: Breakdown electric fields in winter storms, *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 47–52.
- Chisholm, A. J., and J. H. Renick, 1972: The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms, 6th Annual Congress, Canadian Meteorological Society, Research Council of Alberta, 24-31.
- Fuchs, F., E. U. Landers, R. Schmid, and J. Wiesinger, 1998: Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, **40**, 444-451.
- Hayenga, C. O., 1984: Characteristics of lightning VHF radiation near the time of return strokes, *J. Geophys. Res.*, **89**, 1403-1410.
- Heckman, S., and C. Liu: Waveform climatology: return strokes are rare, the 13th

- International Conference on Atmospheric Electricity, Rio de Janeiro, Brazil, August 2011. (Oral, Reviewed).
- Honma, N., 2010: Detection efficiency of the Tohoku Impact Sensor Network in winter, 21st International Lightning Detection Conference/ 3rd International Lightning Meteorology Conference., Orlando, Florida, USA.
- Kasemir, H. W., 1960: A contribution to the electrostatic theory of a lightning discharge. *J. Geophys. Res.*, **65**, 1873-1878.
- Kawasaki, Z.-I., S. Yoshihashi, and J. H. Lee, 2002: Verification of bi-directional leader concept by interferometer observations, *J. Atmos. Electr.*, **22**, 55-79.
- Kitagawa, N., M. Brook, and E. J. Workman, 1962: Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, **67**, 637-647.
- Krider, E.P., C.D. Weidman, and R.C. Noggle, 1977: The electric field produced by lightning stepped leaders, *J. Geophys Res.* **82**, 951-960.
- Lewis, E. A., R. B. Harvey, and J. E. Rasmussen, 1960: Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic Origin, *J. Geophys. Res.*, **65**, 1879-1905.
- Lu, W., Y. Zhang, X. Zhou, X. Qie, D. Zheng, Q. Meng, M. Ma, S. Chen, F. Wang, and X. Kong, 2009: Simultaneous optical and electrical observations on the initial processes of altitude triggered negative lightning, *Atmos. Res.*, **91**, 353-359.
- Malan, D.J., and B.F.J., Schonland, 1947: Progressive lightning, Part 7, Directly correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms. *Proc. Roy. Soc. A* **191**: 485-503.
- Master, M.J., M.A. Uman, W.H. Beasley, and M. Darveniza, 1984: Lightning induced voltages on power lines: experiment, *IEEE Trans. PAS* **103**, 2519-2529.
- Michimoto, K., 1991: A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku district Part I: observation and analysis of Thunderclouds in summer and winter, *J. Met. Soc. Japan*, **69**, 327-336.
- Miki, M., V. A. Rakov, T. Shindo, G. Diendorfer, M. Mair, F. Heidler, W. Zischank, M. A. Uman, R. Thottappillil, and D. Wang, 2005: Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning, *J. Geophys. Res.*, **110**, D02109.
- Miyake, K., T. Suzuki, M. Takashima, M. Takuma, and T. Tada, 1990: Winter lightning on Japan Sea coast – lightning striking frequency to tall structures”, *IEEE Trans. Pow. Del.*, **5**, 1370-1376.
- Morimoto, T., Z. Kawasaki, and T. Ushio, 2004: An operational VHF broadband digital interferometer and thunderstorm observations, *IEEJ Trans. FM.*, **124**, 1232-1238.
- Murakami, M., Z. Kawasaki, Y. Ohrta, R. Mardiana, H. Isoda, and T. Ushio, 1999: Comparison between broadband and narrowband interferometer for lightning observation, *IEEJ Trans. FM.*, **119**, 807-812.

- Nag, A., and V. A. Rakov, 2009: Some inferences on the role of lower positive charge region in facilitating different types of lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L05815.
- Nag, A., V. A. Rakov, D. Tsalikis, and J. A. Cramer, 2010: On phenomenology of compact intracloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, **115**, D14115.
- Narita, K., Y. Goto, H. Komuro, and S. Sawada, 1989: Bipolar lightning in winter at Maki, *J. Geophys. Res.*, **94**, 13 191-13 195.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **56**, 527-530.
- Proctor, D.E, 1981: VHF radio pictures of cloud flashes", *J. Geophys. Res.*, **86**, 4041-4071.
- Rakov, V.A., R. Thottappillil, and M.A. Uman, 1992: Electric field pulses in K and M changes of lightning ground flashes, *J. Geophys. Res.*, **97**, 9935-9950.
- Rakov, V.A., R. Thottappillil, M.A. Uman, and P. P. Barker, 1995: Mechanism of the lightning M component, *J. Geophys. Res.*, **100**, 701-725.
- Rakov, V.A., M. A. Uman, G. R. Hoffman, M. W. Masters, and M. Brook, 1996: Bursts of pulses in lightning electromagnetic radiation: observations and implications for lightning test standards, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* **38**, 156-164.
- Rodger, C. J., S. Werner, J.B. Brundell, E.H. Lay, N.R. Thomson, R. H. Holzworth, and R.L. Dowden, 2006: Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN): initial case study, *Ann. Geophys.*, **24**, 3197-3214.
- Rodger, C.J., J.B. Brundell, R.H. Holzworth, and E.H. Lay, 2009: Growing detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network, Am. Inst. Phys. Conf. Proc., Coupling of thunderstorms and lightning discharges to near-Earth space: Proceedings of the Workshop, 23-27 June 2008, Corte, France, 1118, 15-20.
- Rogers, R.R., M.K. Yau, 1988: A Short course in cloud physics, Butterworth-Heinemann, 290.
- Rhodes, C.T., X-M. Shao, P.R. Krehbiel, R.J. Thomas, and C.O. Hayenga, 1994: Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, **99**, 13 059-13 082.
- Saunders, C.P.R., and S. L. Peck, 1998: Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. *J. Geophys. Res.*, **103**, 13 949-13 956.
- Schonland, B.F.J., 1956: The lightning discharge. In *Handbuch der Physik*, 22, 576-628, Berlin: Springer-Verlag.
- Shao, X.M., P.R. Krehbiel, R.J. Thomas, and W. Rison, 1995: Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, *J. Geophys. Res.*, **100**, 2749-2783.
- Smith, D.A., 1998: Compact intracloud discharges, Ph.D. thesis, Univ. of Colorado, Boulder.

- Smith, D.A., M. J. Heavner, A. R. Jacobson, X. M. Shao, R. S. Massey, R. J. Sheldon, and K. C. Wiens, 2004: A method for determining intracloud lightning and ionospheric heights from VLF/LF electric field records, *Radio. sci.*, **39**, RS1010.
- Suzuki, T., 1992: Long term observation of winter lightning on Japan Sea coast", *Res. Lett. Atmos. Electr.*, **12**, 53-56.
- Stolzenburg, M., T. C. Marshall, S. Karunarathne, N. Karunarathna, T. A. Warner, R. E. Orville, and H.-D. Betz, 2012: Strokes of upward illumination occurring within a few milliseconds after typical lightning return strokes, *J. Geophys. Res.*, **117**, D15203.
- Sumida, Y., S. Yoshida, Y. Nakamura, M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, and Z.-I. Kawasaki, 2011: Statistical analysis of VHF electromagnetic radiation from lightning discharges, *IEEJ. Trans. FM.*, **131**, 659-664.
- Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1536-1548.
- Takayanagi, Y., M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and K. Yamamoto, 2011: Development of VLF/LF bands interferometer and its initial observations, *IEEJ. Trans. FM.*, **131**, 716-722.
- Takeuti, T., M. Nakano, M. Nagatani, and H. Nakada, 1973: On lightning discharges in winter thunderstorms, *J. Meteor. Soc. Japan.*, **51**, 494-496.
- Thottappillil, R., V. A. Rakov, and M. A. Uman, 1990: K and M changes in close lightning ground flashes in Florida, *J. Geophys. Res.*, **95**, 18 631-18 640.
- Thottappillil, R., J.D. Goldberg, V. A. Rakov, and M. A. Uman, 1995: Properties of M components from currents measured at triggered lightning channel base, *J. Geophys. Res.*, **100**, 25, 711-720.
- Torii, T., T. Sugita, M. Kamogawa, Y. Watanabe, and K. Kusunoki, 2011: Migrating source of energetic radiation generated by thunderstorm activity, *Geophys., Res., Lett.*, **38**, L24801.
- Uman, M.A., 2001: The Lightning Discharge, 377 , Mineola, New York: Dover.
- Yoshida, Y., M. Akita, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, D. Wang, and N. Takagi, 2009: Evidence of negative leaders prior to fast rise ICC pulses of upward lightning, *J. Atmos. Electr.*, **29**, 13-21.
- Yoshida, S., C. J. Biagi, V. A. Rakov, J. D. Hill, M. V. Stapleton, D. M. Jordan, M. A. Uman, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, 2010: Three-dimensional imaging of upward leaders in triggered lightning using VHF broadband digital interferometers, *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L05805.
- Yoshida, S., M. Akita, T. Morimoto, T. Ushio, and Z.-I. Kawasaki, 2012a: Propagation characteristics of lightning stepped leaders developing in charge regions and descending out of charge regions, *Atmos. Res.*, **106**, 86-92.

- Yoshida, S., C. J. Biagi, V. A. Rakov, J. D. Hill, M. A. Stapleton, D. M. Jordan, M. A. Uman, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, and M. Akita, 2012b: The initial stage processes of rocket-and-wire triggered lightning as observed by VHF interferometry, *J. Geophys. Res.*, **117**, D09119.
- Wang, D., V. A. Rakov, M. A. Uman, M. I. Fernandez, K. J. Rambo, G. H. Schnetzer, and R. J. Fisher, 1999: Characterization of the initial stage of negative rocket-triggered lightning, *J. Geophys. Res.*, **104**, 4213-4222.
- Watson, A.I., R. L. Holle, and R. E. Lopez, 1995: Lightning from two national detection networks related to vertically integrated liquid and echo-top information from WSR-88D Radar, *Wea. Forecasting*, **10**, 592-605.
- Williams, E. R., 1989: The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, **94**, 13 213-13 220.
- Williams, E., B. Boldi, A. Matlin, M. Weber, S. Hodanish, D. Sharp, S. Goodman, R. Raghavan, and D. Buechler, 1999: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms, *Atmos. Res.*, **51**, 245-265.
- Wu, T., W. Dong, Y. Zhang, T. Funaki, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, 2012: Discharge height of lightning narrow bipolar events, *J. Geophys. Res.*, **117**, D05119.
- Japan Meteorological Agency :“<http://www.jma.go.jp/jma/>”, *Japan Meteorological Agency*, (15 Nov. 2012).
- 大野久雄, 2001: 雷雲とメソ気象, 99-104, 東京堂出版.



# 関連発表論文

## 学会誌発表論文

- A.1. Y. Takayanagi, M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z-I. Kawasaki, D. Wang, N. Takagi, H. Sakurano, and Y. Kubouchi, "Upward lightning observed by LF broadband interferometer", IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials (in press)
- A.2. 高柳, 秋田, 中村, 吉田, 森本, 牛尾, 河崎, 山本, VLF/LF 帯広帯域干渉計の開発と初期観測結果, IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 131, 9, pp. 716-722, 2011.

## 国際会議

- B.1. Y. Takayanagi, M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, "Leader process in 3D observed by VLF/LF broadband interferometer", Proceedings of 31<sup>th</sup> International Conference on Lightning Protection (ICLP), 206, Vienna, Austria, Sep. 2012. 8 ページ
- B.2. M. Akita, Y. Takayanagi, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, "Time Evolution of Charge Distributions and Characteristics of Lightning Leader Progressions using VHF Broadband Digital Interferometer", Proceedings of 14th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 143, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2011. 4 ページ
- B.3. Y. Takayanagi, M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, and Z. Kawasaki, "Development and initial observations of VLF/LF broadband digital interferometer", Proceedings of 14th International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE), 309, Rio de Janeiro, Brazil, Aug. 2011. 4 ページ
- B.4. Y. Takayanagi, M. Akita, Y. Nakamura, S. Yoshida, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, D. Wang, and N. Takagi, "Winter Lightning Observations using VLF/LF Broadband Interferometer", Proceedings of 3rd International Symposium on Winter Lightning (ISWL), , Sapporo, Japan, June 2011. 4 ページ

