

## 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報・通信工学専攻 博士前期課程		
氏 名	中村 遼平	学籍番号	1131091
論 文 題 目	<b>ELF/LF 帯空電観測による落雷電荷モーメントの時空間分布に関する研究</b>		
<p><b>要 旨</b></p> <p>雷放電の中でも低い周波数に大きいエネルギーを持つ落雷の場合、ELF 帯の観測においては ELF 帯トランジェントと呼ばれる過渡的な波形が観測される。この ELF 帯トランジェントを解析することで、理論上は一点観測にて全地球上で生じた対地雷放電の時空間分布、電荷モーメントなどの電気的特性を導出することが可能となる。これまでに ELF 帯トランジェントを用いて世界巨大雷電荷モーメント時空間分布の導出が行われており、標定精度は推定距離誤差が約 500 km と、一点観測から世界中の落雷位置評定を行うには十分高精度なものとなった。しかし、日本周辺の落雷標定を行う場合、推定距離誤差が 500 km では誤差の影響が非常に大きくなってしまいうため、より良い標定精度が必要である。</p> <p>近年、日本国内にて太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー政策が推進されている。しかし、太陽光発電や風力発電施設などは落雷によって大規模な被害を受けてしまう。落雷による被害規模は電荷モーメントに比例していると考えられている。そのため、新たな発電施設導入のためには早急な日本周辺における落雷活動の評価が必要と考えられる。また、日本国内においては以前から北陸地方の冬季雷による落雷被害が甚大であることが知られており、この地方における電荷量の大きな落雷特性の調査が望まれている。そのため本研究では日本周辺における落雷特性マップ、特に北陸地方に注目して落雷特性マップの導出を行う。その方法として、日本落雷評定ネットワーク(JLDN)によって観測された落雷データから落雷位置及びピーク電流値、落雷データから ELF 帯トランジェントを伴う落雷イベントを同定し電荷モーメントを導出する。これら 2 つを合わせることで落雷特性マップを作成し、電気的特性の評価を行った。</p> <p>今回の解析の結果、冬季において日本海側では大きな電荷モーメントを持つ正極性落雷が発生しているのを再確認したのと同時に、北陸地方を含めた日本周辺における落雷特性マップの導出に成功した。このことから、この ELF 帯トランジェントを用いる方法によって、北陸地方における大規模な正極性落雷に関する落雷特性マップの導出を行うことができたといえる。今後は統計的信頼性を向上させるために解析期間を拡張しピーク電流値及び電荷モーメントの領域、季節依存性の統計解析を行う必要があると考えている。</p>			

平成 24 年度 修士論文

ELF/LF 帯空電観測による  
落雷電荷モーメントの時空間分布  
に関する研究

学籍番号 1131091

氏名 中村 遼平

情報・通信工学専攻

電子情報システムコース

指導教員 芳原 容英 教授

副指導教員 橋本 猛 教授

# 概要

雷放電の中でも低い周波数に大きいエネルギーを持つ落雷の場合、ELF 帯の観測においては ELF 帯トランジェントと呼ばれる過渡的な波形が観測される。この ELF 帯トランジェントを解析することで、理論上は一点観測にて全地球上で生じた対地雷放電の時空間分布、電荷モーメントなどの電気的特性を導出することが可能となる。これまでに ELF 帯トランジェントを用いて世界巨大雷電荷モーメント時空間分布の導出が行われており、標定精度は推定距離誤差が約 500 km と、一点観測から世界中の落雷位置評定を行うには十分高精度なものとなった。しかし、日本周辺の落雷標定を行う場合、推定距離誤差が 500 km では誤差の影響が非常に大きくなってしまいうため、より良い標定精度が必要である。

近年、日本国内にて太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー政策が推進されている。しかし、太陽光発電や風力発電施設などは落雷によって大規模な被害を受けてしまう。落雷による被害規模は電荷モーメントに比例していると考えられている。そのため、新たな発電施設導入のためには早急な日本周辺における落雷活動の評価が必要と考えられる。また、日本国内においては以前から北陸地方の冬季雷による落雷被害が甚大であることが知られており、この地方における電荷量の大きな落雷特性の調査が望まれている。そのため本研究では日本周辺における落雷特性マップ、特に北陸地方に注目して落雷特性マップの導出を行う。その方法として、日本落雷評定ネットワーク(JLDN)によって観測された落雷データから落雷位置及びピーク電流値、落雷データから ELF 帯トランジェントを伴う落雷イベントを同定し電荷モーメントを導出する。これら 2 つを合わせることで落雷特性マップを作成し、電気的特性の評価を行った。

今回の解析の結果、冬季において日本海側では大きな電荷モーメントを持つ正極性落雷が発生しているのを再確認したのと同時に、北陸地方を含めた日本周辺における落雷特性マップの導出に成功した。このことから、この ELF 帯トランジェントを用いる方法によって、北陸地方における大規模な正極性落雷に関する落雷特性マップの導出を行うことができたといえる。今後は統計的信頼性を向上させるために解析期間を拡張しピーク電流値及び電荷モーメントの領域、季節依存性の統計解析を行う必要があると考えている。

# 目次

第1章 序論 .....	3
1.1 先行研究と問題点 .....	3
1.2 本研究の重要性及び目的 .....	3
第2章 基礎理論 .....	6
2.1 雷放電 .....	6
2.2 ELF 帯トランジェント .....	7
2.2.1 大地-電離層導波管モード理論 .....	7
2.2.2 ELF 帯空電 .....	8
2.3 球面三角法 .....	9
第3章 観測システム及び解析データ .....	11
3.1 ELF 帯トランジェント .....	11
3.1.1 電界観測システム .....	11
3.1.2 磁界観測システム .....	12
3.2 LF 帯落雷評定システム(JLDN) .....	13
3.3 鉄塔への落雷データ .....	13
3.4 雷雲に関する気象レーダーデータ .....	14
3.5 データ諸元 .....	16
第4章 解析方法 .....	17
4.1 落雷電流モーメントの推定 .....	17
4.2 落雷電荷モーメントの推定 .....	17
4.2.1 インパルス推定法 .....	17
4.2.2 指数関数的電流近似法 .....	18
4.3 到来方向導出 .....	19
4.4 落雷イベントの同定 .....	21
4.5 落雷極性の推定 .....	21
第5章 解析結果及び考察 .....	22
5.1 事例解析 .....	22
5.2 落雷電気的特性の月別中央値 .....	23
5.3 落雷頻度分布 .....	24
5.4 季節依存性 .....	26
5.4.1 夏季 .....	26

5.4.2 冬季 .....	29
5.5 累積確率密度分布 .....	31
第 6 章 結論 .....	35
謝辭 .....	35
参考文献 .....	36
発表実績 .....	37
付録 .....	38

# 第1章 序論

## 1.1 先行研究と問題点

雷放電によって生じる電磁波は空電と呼ばれており、広帯域な周波数成分を含んでいる。その中でも周波数の低い ELF 帯においては伝搬中の減衰が少ないことが確認されている[Hobara et al., 2000]。放電の中でも低い周波数に大きいエネルギーを持つ落雷の場合、ELF 帯の観測においては振幅の大きい ELF 帯トランジェントと呼ばれる過渡的な波形が観測される。ELF 帯トランジェントは、ある特定の場所で発生した大規模落雷により励起されたものである。そのため、この ELF 帯トランジェントを解析することで、理論上は一点観測にて全地球上で生じた対地雷放電の時空間分布、電流モーメント、電荷モーメント、落雷極性などの電気的特性を導出することが可能となり、大きな電荷モーメントを持つ雷放電の時空間分布の把握に非常に有効である[Huang et al., 1999]。電荷モーメントとは雷雲中の電荷量と雷雲の雲頂高度を掛けあわせた値であり、落雷の規模を表す重要なパラメータだと考えられている。

これまでに ELF 帯トランジェントを用いた世界巨大雷電荷モーメント時空間分布の導出が行われてきた[Huang et al., 1999; Hobara et al., 2006; Yamashita et al., 2010]。その結果、世界落雷分布の標定精度は推定距離誤差が約 500 km と、一点観測から世界中の落雷位置評定を行うには十分高精度なものとなった。しかし、この方法を用いて日本周辺の落雷標定を行う場合、推定距離誤差が 500 km では空電源-受信点間の距離が近いために誤差の影響が非常に大きくなってしまうため、より良い標定精度が必要である。そのため、近年では我々の研究グループによって ELF 帯電磁波多点観測による日本周辺落雷の時空間分布の導出が始められている[Hobara et al., 2012]。

一方、ELF 帯トランジェントを用いた世界巨大雷電荷モーメント導出の推定精度に関しては前例が少ないため、まだ明確にはなっていない。現在、日本周辺における電荷モーメントの推定には、一般的にフィールドミルが用いられている。しかし、フィールドミルは推定精度が良いものの、観測範囲は設置場所から数十 km 以内と、極めて局所的な観測しか出来ない。また、一つの観測点の観測範囲が狭いために、国内全土を網羅するには多点観測が必要となり、維持費なども考慮すると経済性が非常に悪いという問題点がある。

## 1.2 本研究の重要性及び目的

本研究の意義としては2つ挙げられる。

1つ目は雷災アセスメントへの応用である。2011年3月11日に発生した大震災以降、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギー政策が推進されている。しかし、太陽光発電や風力発電施設などは落雷によって大規模な被害を受けてしまう。落雷による被害規模は電荷モーメント  $Qds$  に比例していると考えられている。風力発電施設を例に挙げると図 1.1 に示すように、落雷被害のおよそ 4 割がブレードの落雷被害である。ブレードが故障してしまうと長い運転停止時間が生じてしまうため、新たな発電施設導入のためには早急な日本周辺における落雷活動の評価が

必要と考えられる。また、日本国内においては以前から北陸地方の冬季雷は正極性落雷が多く、大きな電荷量が中和されて電荷モーメントが大きい落雷となり、落雷被害も甚大であることが知られており、この地方における電荷量の大きな落雷特性の調査が非常に望まれている。そのため、北陸地方における局所的な落雷活動評価のために電荷モーメント  $Qds$  の導出が至急必要である。

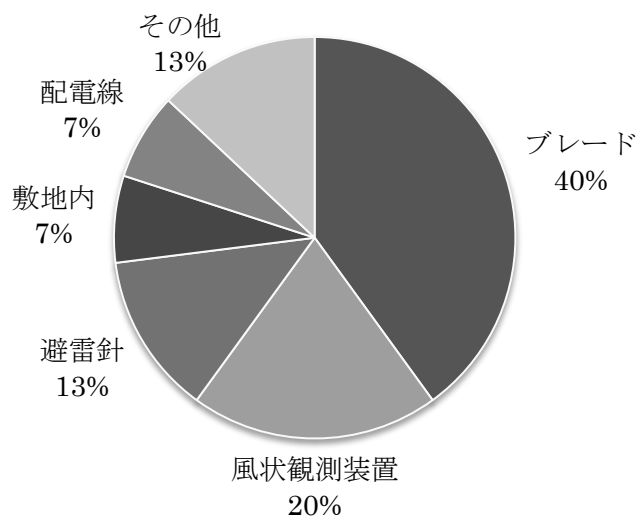


図 1.1 落雷被害の内訳 [Takebayashi, 2004]

2 つ目は図 1.2 に示すスプライトをはじめとする中間圏発光現象の解明である。中間圏発光現象は ELF 帯トランジェントを励起するような大規模落雷に伴って発生するため、ELF 帯電磁波を観測及び解析することでスプライトを伴う雷放電の電荷モーメント  $Qds$  や時定数の導出を行い、中間圏発光現象の発生機構や大規模落雷の電離層への影響などの解明をすることができると考えている。また、 $Qds$  は落雷規模を表す指標となるため、季節依存性や領域依存性を導出し気象条件と比較することで、大規模落雷の発生メカニズムと気象条件の関係性を解明することが可能となる。



図 1.2 スプライトの光学観測例

以上 2 つの観点から、本研究では日本周辺における落雷特性マップ、特に北陸地方に注目して落雷特性マップの導出を行う。その方法としては、日本落雷評定ネットワーク (JLDN) によって観測された落雷データから落雷位置及びピーク電流値を導出する。次に、落雷データから ELF 帯トランジェントを伴う落雷イベントを同定し電荷モーメント  $Qds$  を導出する。これら 2 つを合わせることで落雷エネルギー分布図を作成し、ピーク電流値と電荷モーメント  $Qds$  の比較、検討を行う。



## 第2章 基礎理論

### 2.1 雷放電

一般的な雷雲は、正電荷が生成されると上部に、負電荷が生成されると下部に分布するというダイポール構造を形成している。この雲内で発生する正負間の放電を雲内放電、雲内の電荷が大地に放電するものを対地雷放電もしくは落雷と呼ぶ。対地雷放電は雲内中に蓄積された電荷による電界や、それらと地上に誘導される電荷との間の電界が強まり、大気中の絶縁が破壊され、対地雷放電が生じる。対地雷放電の際に雲内の正電荷を地上に運ぶ落雷を正極性落雷、負電荷を運ぶ落雷を負極性落雷と呼ぶ。日本の夏によく見られる落雷の90%以上が負極性落雷である。また、正極性落雷は日本海側における冬季雷において発生割合が高いとされている。しかしながら、雷雲ごとにその割合は異なり、雷雲の発達段階においてもその割合は大きく変化し、一般的には雷雲の消滅機に正極性落雷の割合が高い。その一方、近年では数時間にわたって正極性落雷を大量に発生する雷雲も夏季に観測されている。また、対地雷放電のほとんどは負極性落雷であると言われている。図2.1に雷雲の模式図を示す。

正極性落雷には雷雲上部に分布する正電荷から発生することがあり、このケースは日本海側における冬季雷によく見られる。この要因としては、雷雲上層部には季節風が強く流れこみ雷雲が傾くため、もしくは雷雲下部に分布する負電荷が早く地面に落下するために雷雲上部に正電荷が取り残されるなどと考えられている。

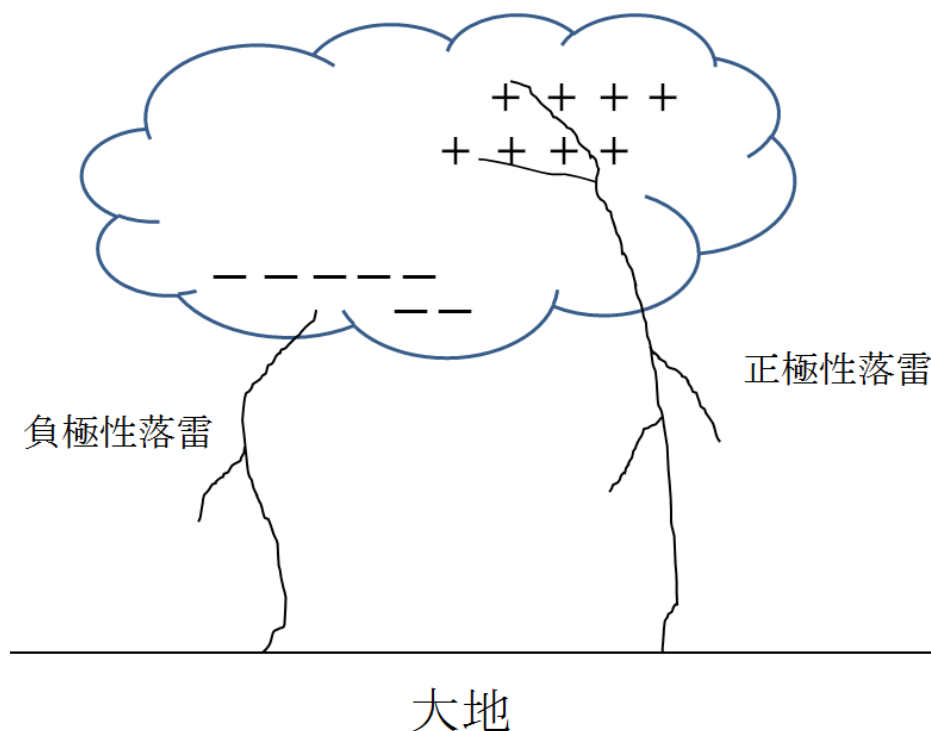


図 2.1 正極性雷及び負極性雷

## 2.2 ELF 帯トランジェント

### 2.2.1 大地-電離層導波管モード理論

空電の中でも ELF 帯などの周波数が非常に低い領域においては、その電磁波の波長が電離層高度と比較できるほどの大きさとなるため、大地-電離層間を導波管や空洞共振器の伝搬と類推することができる。この時、大地の導電率はほぼ無限大、地表付近における大気の導電率はほぼ 0 となるため、大地を完全導体、大気を絶縁体とみなすことができる。大気の導電率は高度の上昇に伴い指数関数的に増加する。また、導電率 $\sigma$ が $\sigma \gg \epsilon_0 \omega$ となる時、電離層を完全導体とみなすことができる。この時、大地-電離層間を完全導体とみなせるので、図 2.2 に示す球殻空洞共振器として扱うことができる。

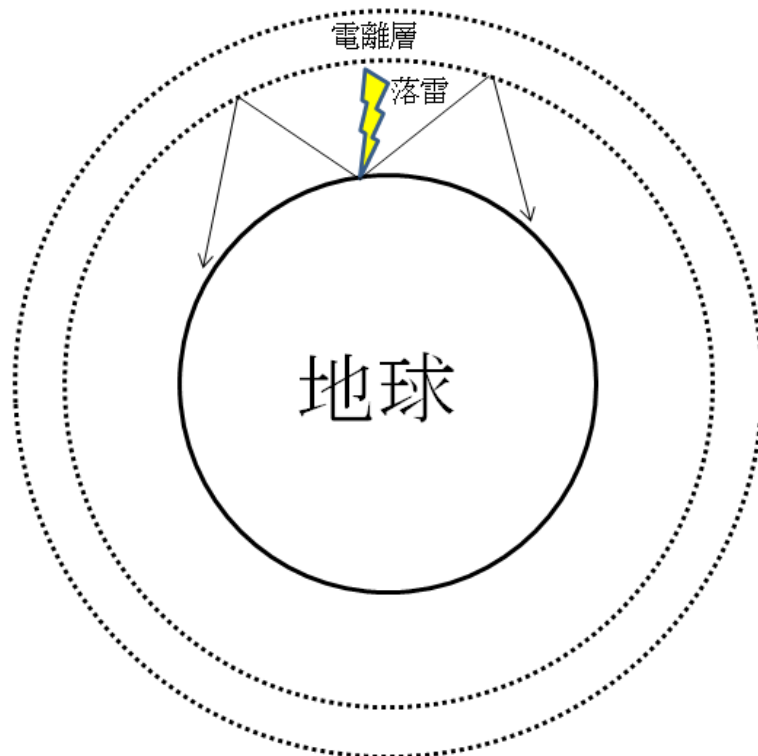


図 2.2 大地-電離層導波管

雷放電に伴う ELF 帯電磁波を解析する際、空電源を垂直電気双極子とし、電磁波は大地-電離層導波管モード理論に基づき伝搬しているとして取り扱う。ELF 帯電磁波は電離層高度をカットオフ周波数 (80 km とすると、周波数が 1.6 kHz) 以下であるために、0 次モード伝搬する。導波管の上下の境界を完全導体とした場合、横幅が無限大である平行平板中を反射しながら交差して進む 2 つの平面波を合成し電磁界を導出した際、0 次モードで電界、磁界が共存するのは TM モードのみとなる。そのため、鉛直磁界成分はほぼ 0、水平電界成分は無視することができる。この大地-電離層間の ELF 帯共振モードの周波数領域における強度分布はモデル化されており、電離層高度が昼夜対称であると仮定した TM<sub>0</sub> 次モードでの電磁界は以下の式で表される [Wait, 1996]。

$$\begin{aligned}
E_z &= j \frac{I(f) ds \nu(f) (\nu(f) + 1) P_{\nu(f)}^0 (-\cos \theta)}{4a^2 \varepsilon_0 2\pi f h \sin(\pi \nu(f))} \quad \left[ \frac{\text{V}}{\text{m} \cdot \text{Hz}} \right] \\
H_\phi &= - \frac{I(f) ds P_{\nu(f)}^1 (-\cos \theta)}{4ah \sin(\pi \nu(f))} \quad \left[ \frac{\text{A}}{\text{m} \cdot \text{Hz}} \right]
\end{aligned} \tag{2.1}$$

ここで $P_{\nu}^{0,1}$ は複素ルジャンドル関数、 $I(f)ds$ は落雷の電流モーメント、 $\theta$ は落雷発生地点-受信点間距離、 $a$ は地球半径(6371 km)、 $h$ は電離層高度(80 km)、 $\varepsilon_0$ は真空中の導電率( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m)、 $\nu$ は波動関数を表している。この波動関数 $\nu$ は以下の式で求められる。

$$\nu(f) = \frac{f-2}{6} - j \frac{f}{100} \tag{2.2}$$

## 2.2.2 ELF 帯空電

一般的に、雷放電に伴って生じる電磁波瞬間的なパルス波形であるため、幅広い周波数成分を含んでいる。特に ELF 帯電磁波は、大地・電離層で構成された導波管内をゆっくりとした速度で進む。導波管内の伝搬損失は、周波数が数 Hz では電離層下端のフレネル反射係数は 1 に近づき、電離層も完全導体に近づくことから非常に小さくなる。それに対し、周波数が 2 kHz 付近では非常に大きくなるため、ELF 帯空電は大地・電離層によって構成された導波管内を殆ど減衰することなく地球を何周もすることができる。また、この電磁波は球面波であるため空電源から放射状に伝搬する。したがって、地球上における落雷により生じた ELF 帯空電は地球上で同時観測することが可能となる。

ELF 帯空電のうち、波長の整数倍が地球の円周長と等しくなる時に空洞共振現象を引き起こす。この共振現象は周波数が 8,14,20 Hz 付近において顕著に現れる。この共振現象はシューマン共振と呼ばれている。[Schumann, 1952]

雷放電の中でも非常に規模が大きい落雷の場合、ELF 帯の観測においてシューマン共振周波数領域に振幅の大きい過渡的な波形として世界中で観測することができる。これは一般に ELF 帯トランジェントと呼ばれており、シューマン共振強度の数倍以上にも及ぶことがわかっている。ELF 帯トランジェントは、地球上のある特定の位置で生じた雷放電によって発生したものであり、これを解析することで落雷極性、電流モーメントや電荷モーメントなどの電気的特性の導出が可能となる。図 2.3 に本研究室が名古屋大学太陽地球環境研究所附属北海道母子里観測所内に設置したシステムによりで観測された ELF 帯トランジェント波形の一例を示す。図 2.3 において縦軸は磁界、横軸は世界時(UT)を示している。

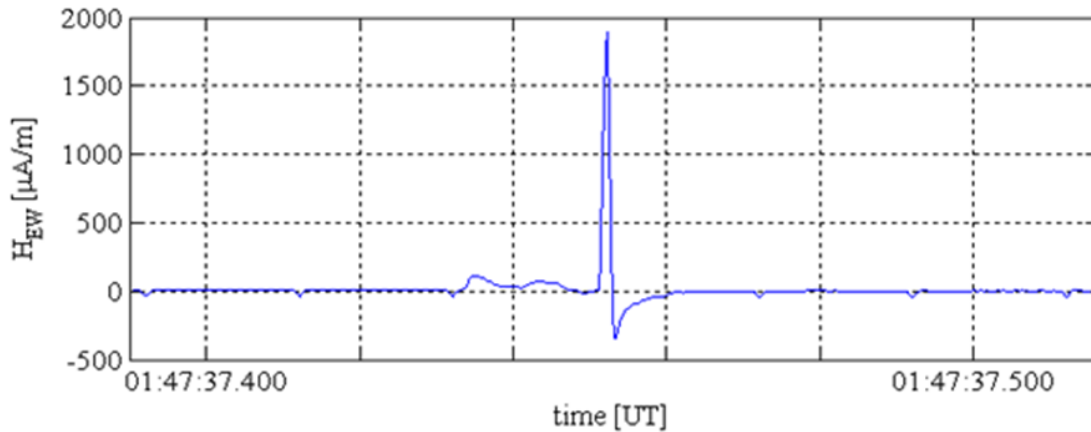


図 2.3 ELF 帯トランジェント波形の一例

## 2.3 球面三角法

大地・電離層導波管モード理論に基づき空電源-受信点間の角距離を導出する際に、球面三角法を用いる。

球面上での円の中心が球体の中心と一致する円を大円と呼び、この球面上の 2 点間の距離を測定する際、経路を大円上とすると最短距離となる。このようにして球面上の任意の 3 点をそれぞれ最短距離となるように結ぶと、図 2.4 に示す頂点を  $X, Y, Z$  とした球面三角形が形成される。ここで、図 2.4 中の  $a, b, c$  はそれぞれの辺の長さを球の中心から見た角度で示しており、角距離と呼ばれる。

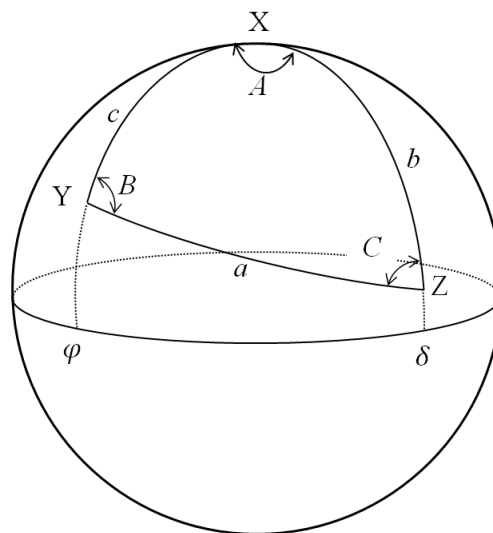


図 2.4 球面三角形

この球面三角法においては、平面と同様に正弦定理、余弦定理を適用することができるため、以下の関係式が成り立つ。

・ 正弦定理

$$\frac{\sin A}{\sin a} = \frac{\sin B}{\sin b} = \frac{\sin C}{\sin c} \quad (2.3)$$

・ 余弦定理

$$\begin{aligned} \cos a &= \cos b \cdot \cos c + \sin b \cdot \sin c \cdot \cos A \\ \cos b &= \cos a \cdot \cos c + \sin a \cdot \sin c \cdot \cos B \\ \cos c &= \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b \cdot \cos C \end{aligned} \quad (2.4)$$

また、余弦定理は以下のようにも示される。

$$\begin{aligned} \cos A &= -\cos B \cdot \cos C + \sin B \cdot \sin C \cdot \cos a \\ \cos B &= -\cos A \cdot \cos C + \sin A \cdot \sin C \cdot \cos b \\ \cos C &= -\cos A \cdot \cos B + \sin A \cdot \sin B \cdot \cos c \end{aligned} \quad (2.5)$$

以上の式を用いて空電源-受信点間の距離を導出することが可能となる。

## 第3章 観測システム及び解析データ

### 3.1 ELF 帯トランジェント

本研究で用いた ELF 帯トランジェントデータは、北海道雨竜郡幌加内字母子里に位置する母子里観測所において観測された ELF 帯電磁波データである[Hobara et al., 2000, 2001]。電界、磁界アンテナによって観測された電磁界データを A/D 変換し、GPS アンテナによる GPS 信号を用いることで時刻同期を行なっている。また、母子里観測所では鉛直電界 1 成分、水平磁界 2 成分の合計 3 成分を 4 kHz サンプルングで連続観測している。観測システムの概略図を図 3.1 に示す。

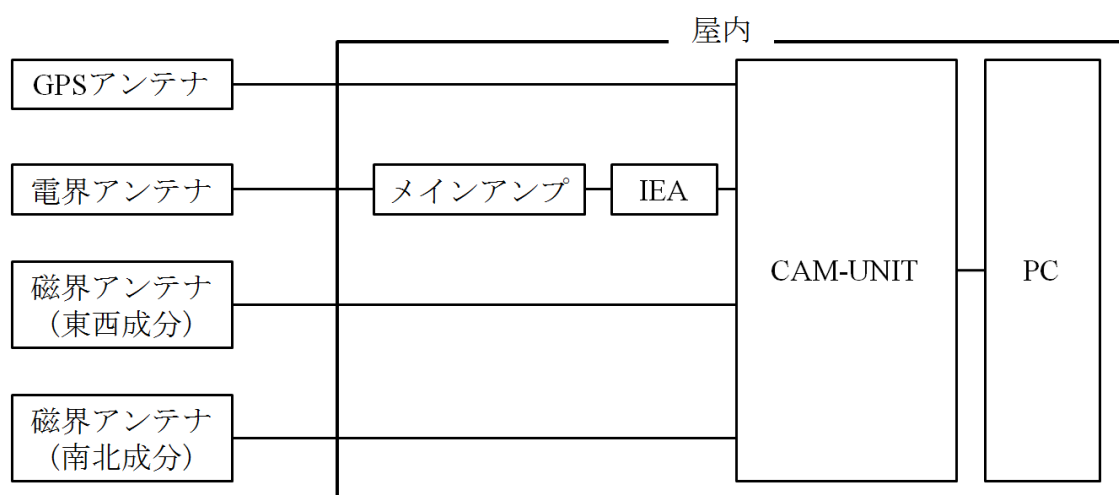


図 3.1 ELF 帯観測システム概略図

電界アンテナはメインアンプ、電力線高調波遮断フィルタ (IEA :Interference Eliminating Amplifier) を介し、磁界アンテナは直接 CAM-UNIT に接続されておりここで A/D 変換を行う。CAM-UNIT には GPS アンテナも接続されており、電磁界データ及び GPS 信号が PC 内に接続されている PCI(DAQ ボード)に入力され、PC 内にデータが保存される。

#### 3.1.1 電界観測システム

垂直電界成分の観測は、図 3.2 に示すようなボールアンテナを地上から約 6.6 m の高さに設置し観測を行なっている。このボールアンテナに励起された電圧はプリアンプ、メインアンプ、電力線高調波遮断フィルタ (IEA) を通り、CAM-UNIT に入力され PC 内に保存される。また、メインアンプ内には 50 Hz、100 Hz、150 Hz にノッチフィルタ、800 Hz にローパスフィルタが組み込まれている。

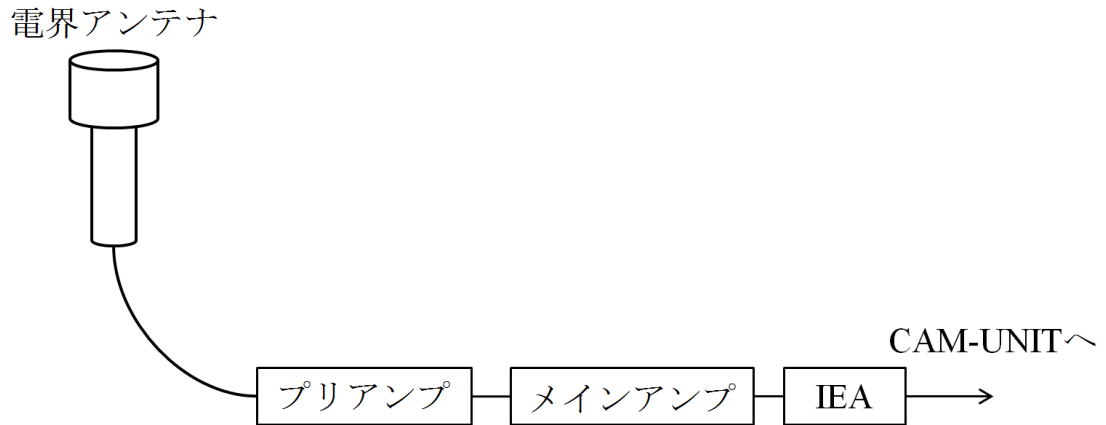


図 3.2 電界観測システム概略図

### 3.1.2 磁界観測システム

水平磁界 2 成分の観測にはウクライナルビブ宇宙科学研究所によって製造された磁場センサー (LEMI116) を用いる。付属のプリアンプ内には 1000 Hz のローパスフィルタが内蔵されており、0.01~1000 Hz まで観測可能となっている。

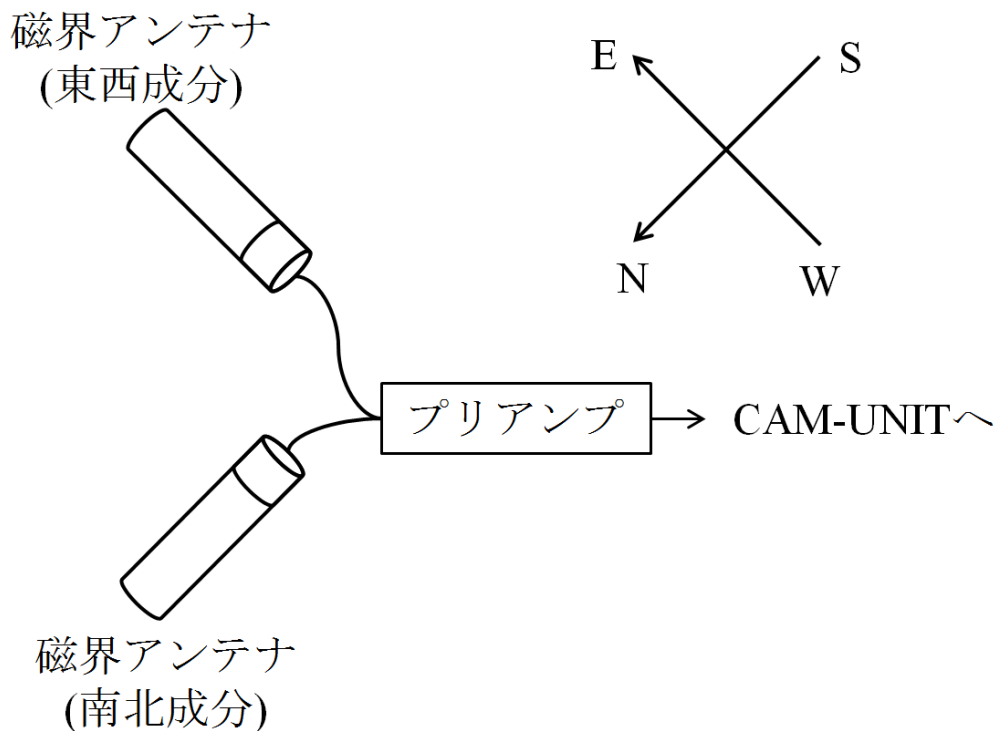


図 3.3 磁界観測システム概略図

### 3.2 LF 帯落雷評定システム(JLDN)

本研究では落雷位置評定のために、LF 帯を用いた日本落雷評定ネットワーク(JLDN :Japan Lightning Detection Network)によって観測された落雷データを用いる。この観測システムは、全国 30 ヶ所に 3 種類のセンサーを設置し観測を行なっている。雷放電に伴う電磁波を各センサーで受信し、GPS から送られてくる正確な時刻情報から到来時間差を導出することで、雷放電の発生位置及び雷電流の大きさを推定する。また、1 つの雷に対して 6~7 基のセンサーを用いるため、高密度のネットワークが構築されており、24 時間リアルタイムで捕捉率 90%以上、平均評定位置誤差 500 m 以下と高精度な観測が可能となっている。

### 3.3 鉄塔への落雷データ

本研究では 3.2 に示した LF 帯落雷評定システムによる落雷データだけではなく、鉄塔への落雷データも使用した。その詳細を以下に示す。

鉄塔への落雷データは岐阜大学工学部のグループにより、石川県河北郡内灘町に位置する風力発電施設の風車・鉄塔にて観測されたものである。これらの風車・鉄塔にはロゴスキーコイルが取り付けられている。ロゴスキーコイルとは、ドイツの電気工学者である Walter Rogowski によって考案されたコイルであり、コアを使用することなく磁界を検出することができる。風車・鉄塔への落雷が生じるとロゴスキーコイルに電流が流れ、アンペールの法則により磁界が発生し、式(3.1)に示す誘導起電力 $e$ が生じる。図 3.4 にロゴスキーコイルの概要図を示す。

$$\begin{aligned} H &= \frac{I}{2\pi r} \quad [\text{A/m}] \\ e &= -\frac{d}{dt} [\mu_0 HS] \\ &= -\frac{d}{dt} \left[ \frac{\mu_0 I(t) S}{2\pi r} \right] \end{aligned} \quad (3.1)$$

ここで、 $r$ はロゴスキーコイルの半径、 $S$ はロゴスキーコイルの断面積を表す。この式(3.1)を時間領域にて積分すると式(3.2)になり、落雷電荷量  $Q$  を導出することができる。

$$\begin{aligned} V' &= \frac{\mu_0 S}{2\pi r} I(t) \\ \int V' dt &= \frac{\mu_0 S}{2\pi r} \int I(t) dt = \frac{\mu_0 S}{2\pi r} Q \\ Q &= \int I(t) dt \quad [\text{C}] \end{aligned} \quad (3.2)$$



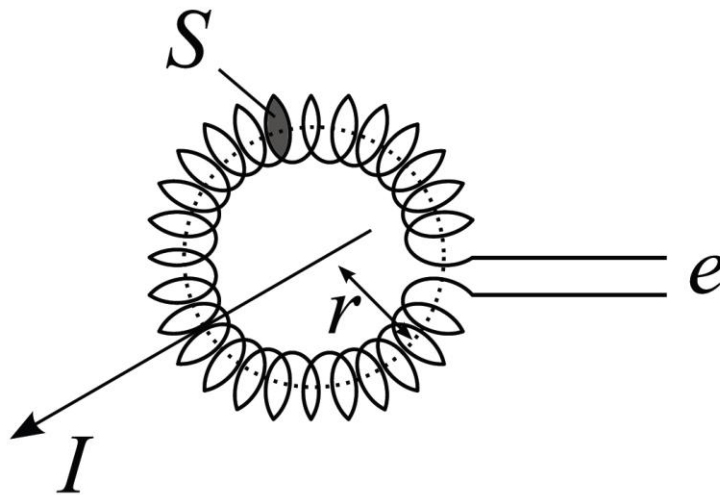


図 3.4 ロゴスキーコイル

### 3.4 雷雲に関する気象レーダーデータ

電荷モーメント  $Qds$  の評価のために、3.3 で導出した落雷電荷量  $Q$  以外にも雷雲の高度が必要となる。そのため、今回は気象庁によって観測された雷雲に関する気象レーダーデータを用いて電荷モーメント  $Qds$  の評価を行った。以下にその詳細を記す。

気象レーダーは、アンテナを回転させながら電波を発射し、半径数百 km の広範囲内に存在する雷雲や雪雲を観測するものである。発射した電波が戻ってくるまでの時間から雷雲や雪雲までの距離を測定し、レーダーエコーの強さから雷雲や雪雲の強さや高度などを観測する。また、気象ドップラーレーダーを用いることで、強さや高度に加え、ドップラー効果を利用して雷雲や雪雲の動きを観測することができる。現在、国内には 20 台の気象レーダーが設置され、観測を行なっている。図 3.5 にレーダーの配置図を示す。本研究では、この 20 台のレーダーによる開口合成レーダーデータのうち、エコー頂高度のデータを用いる。観測されたエコー頂高度は 10 分間隔に保存され、水平分解能は 2.5 km メッシュ相当の緯度 1.5 分、経度 1.875 分となっており、格子系は等緯度等経度格子である。

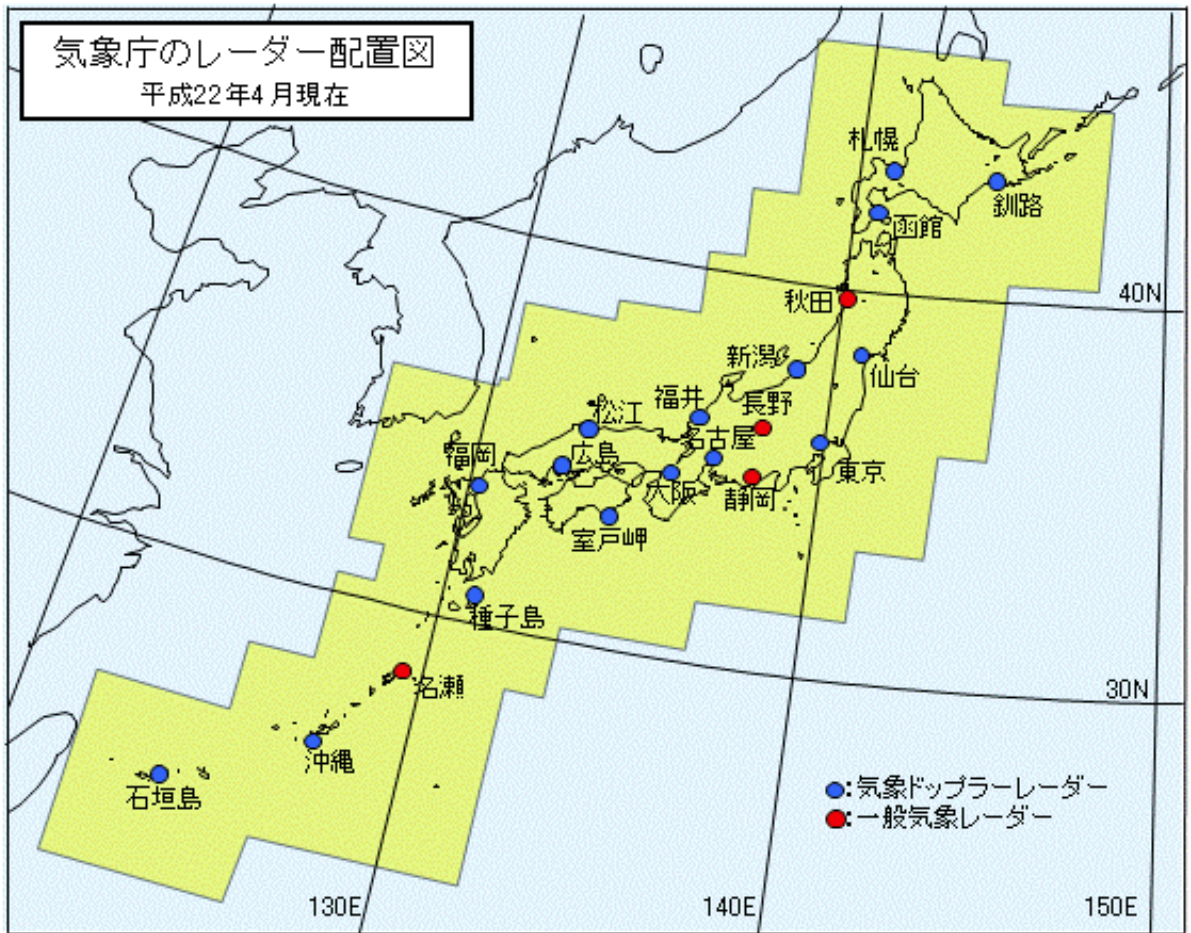


図 3.5 気象庁レーダー配置図

### 3.5 データ諸元

本解析に用いた ELF 帯トランジェント、落雷データ、エコー頂データのデータ諸元を表 3.1、3.2 に示す。LF 帯を用いた日本落雷評定ネットワークである JLDN によって観測された落雷データには、落雷発生時刻、落雷位置、ピーク電流値、極性、の情報が含まれている。岐阜大学で観測された落雷データも同様である。また、気象庁で観測された雷雲エコー頂高度とは、レーダーを用いて測定された雷雲の高さを表している。

表 3.1 データ諸元(落雷特性マップ)

	落雷データ(JLDN)	ELF 帯トランジェント
観測場所	日本全国 (30 点)	北海道母子里 44.29°N 142.21°E
観測対象	LF 帯電磁波	水平磁界 2 成分 鉛直電界 1 成分
観測期間	2007 年 1 月 1 日~12 月 31 日	

表 3.2 データ諸元(電荷モーメント推定精度の検証)

	落雷データ(鉄塔)	ELF 帯トランジェント	気象データ
観測場所	石川県河北郡 36.66°N 136.65°E	北海道母子里 44.29°N 142.21°E	日本全国 (20 点)
観測対象	落雷電流波形	水平磁界 2 成分 鉛直電界 1 成分	雷雲エコー頂高度
観測期間	2006~2009 年 (34 イベント)		

## 第4章 解析方法

### 4.1 落雷電流モーメントの推定

空電源-受信点間の距離が決定することにより、式(2.1)を用いて電流モーメント $I(f)ds$ を導出することが可能となる。水平磁界を用いて導出した場合を以下の式に示す。

$$\begin{aligned} I(f)ds &= T_H \cdot H_\phi(f) \\ T_H &= -\frac{4\pi h \sin(\pi\nu(f))}{P_{\nu(f)}^1(-\cos\theta)} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで、定数 $T_H$ の関数は全て既知の値となり、観測によって得られた水平磁界成分のスペクトルを $T_H$ で割ることによって、電流モーメント $I(f)ds$ を導出することができる。この時、得られたトランジェントデータの中には背景のシューマン共振も含まれるため、その影響により電流モーメントに推定誤差が生じる。しかし、ELF帯トランジェントにおける強度はシューマン共振強度に比べ非常に大きくなることからここでは無視出来るものとする。

### 4.2 落雷電荷モーメントの推定

電荷モーメント導出方法はインパルス推定、指数関数的電流近似法の2通りがある。本研究ではELF帯トランジェントの継続時間 $\tau$ を $Qds$ とともに導出できる指数関数的電流近似法を用いている。

#### 4.2.1 インパルス推定法

落雷の電流モーメントが時間領域において指数関数的な振る舞いをするを仮定すると、以下の様に表せる。[Sentman, 1996]

$$I(t) = I_0 dse^{-t/\tau} \quad [\text{A} \cdot \text{m}] \quad (4.2)$$

ここで、 $\tau$ は継続時間、 $I_0$ は初期電流を表す。継続時間 $\tau$ が $\tau \rightarrow 0$ と仮定し、式(4.2)を複素フーリエ変換すると式(4.3)のようになる。

$$\begin{aligned}
I(f)ds &= \frac{I_0 ds}{j2\pi f + 1/\tau} \\
&= \frac{I_0 ds \tau}{j2\pi f \tau + 1} \\
&= I_0 ds \tau \quad (\tau \rightarrow 0) \\
&= Q ds \quad [\text{C} \cdot \text{km}]
\end{aligned}
\tag{4.3}$$

このようにして $\tau \rightarrow 0$ とすると $I(f)ds$ はデルタ関数となり電荷モーメント  $Qds$  が求まる。雷放電に伴う電磁波の継続時間はシューマン共振と比較して非常に短いため、式(4.3)を用いることが可能となる。

## 4.2.2 指数関数的電流近似法

2.5.1 で記したインパルス推定の場合、落雷の継続時間 $\tau$ を 0 と近似して計算を行う。しかし、実際に発生する落雷の継続時間 $\tau$ は 0 ではないため正確な電荷モーメント  $Qds$  を導出できない可能性がある。そのため、より正確な電荷モーメント  $Qds$  を導出し、更には落雷の継続時間 $\tau$ を導出することができる手法が指数関数的電流近似法である[Huan et al., 1996]。

式(4.3)中の以下の $I_0 ds$ を $I_0 ds = A$ と置換して式変形を行うと以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}
|I(f)ds|^2 &= \frac{A^2}{(2\pi f)^2 + \left(\frac{1}{\tau}\right)^2} \\
\frac{1}{|I(f)ds|^2} &= \left(\frac{2\pi}{A}\right)^2 f^2 + \left(\frac{1}{A\tau}\right)^2
\end{aligned}
\tag{4.4}$$

式(4.4)から、周波数領域における電流モーメント $I(f)ds$ の二乗の逆数は、周波数の二乗に比例していることがわかる。この式(4.4)を一次関数とみなすことができる。言い換えれば式(4.4)を以下のように書き直せる。

$$\begin{aligned}
 y &= mx + b \\
 x &= f^2 \\
 y &= \frac{1}{|I(f)ds|^2} \\
 m &= \left(\frac{2\pi}{S}\right)^2 \\
 b &= \left(\frac{1}{A\tau}\right)^2
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

式(4.5)を用いて描いた近似直線の一例を図 4.1 に示す。

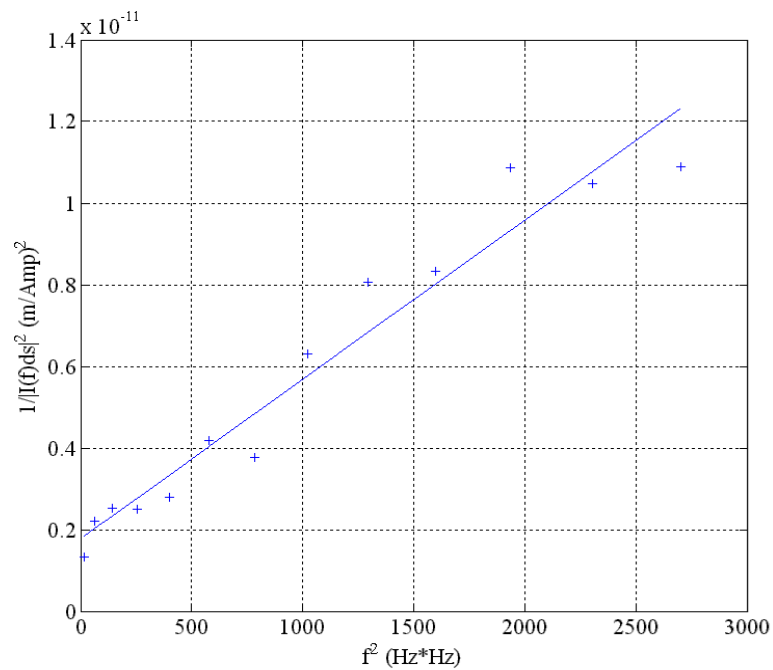


図 4.1 指数関数的電流近似法の一例

この図 2.5 中の近似直線の  $y$  切片を求めることで、式(4.5)に示すように電荷モーメント  $Qds$  及び継続時間  $\tau$  を導出することができる。

$$\begin{aligned}
 Qds &= \frac{1}{\sqrt{b}} \\
 \tau &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m}{b}}
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

### 4.3 到来方向導出

落雷イベントの同定のために、ELF 帯トランジェントの到来角を求める必要がある。ここで

は、時間領域における水平磁界 2 成分を用いる。

図 4.2 に水平磁界 2 成分の観測波形を示す。波形の中心部において ELF 帯トランジェントが発生していることが確認できる。図 4.2 中の ELF 帯トランジェントのピークから±20 ポイントの水平磁界成分を用いてリサーチ図形を描いたものが図 4.3 である。

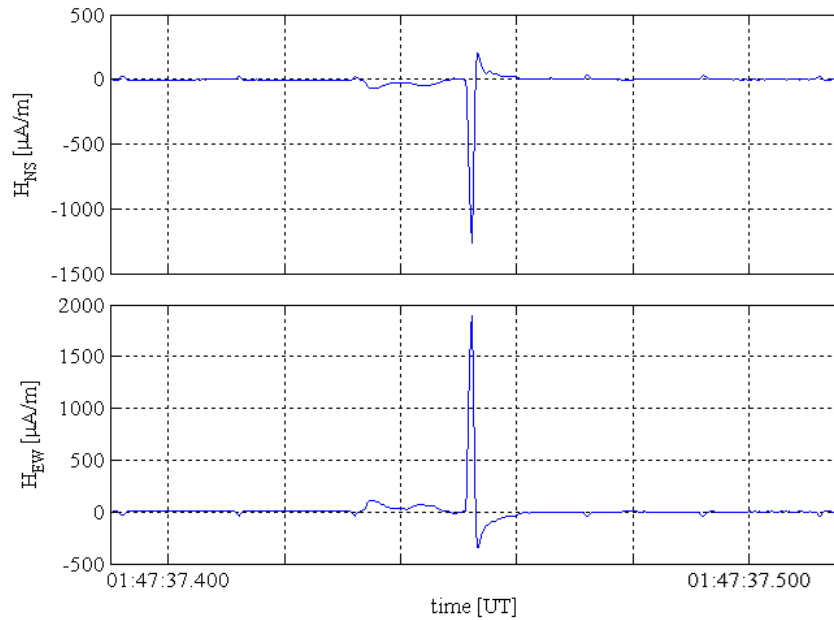


図 4.2 水平磁界 2 成分の時系列波形

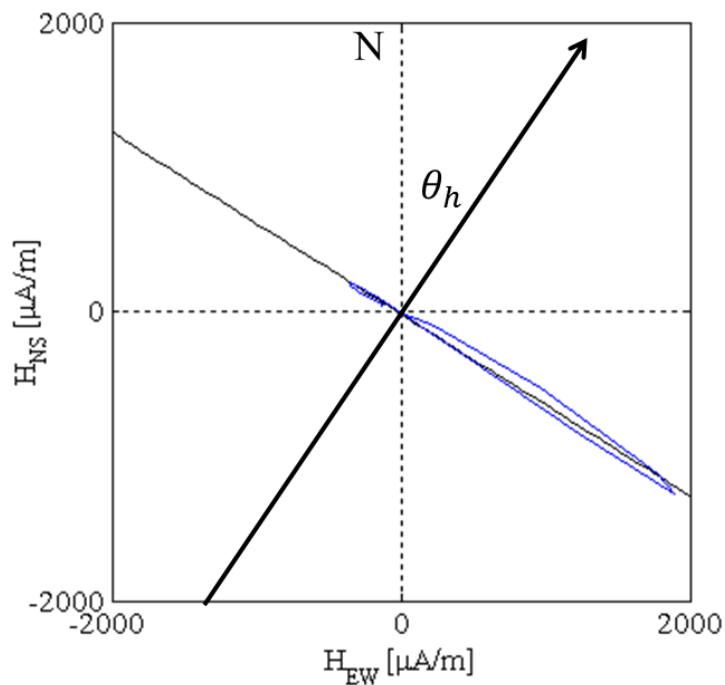


図 4.3 リサーチ図形

図 4.3 は縦軸が磁界の南北成分、横軸が磁界の東西成分を表している。また、図 4.3 中の青線は水平磁界 2 成分を用いて描いたリサーチ図形であり、最小二乗法を用いて直線をしたもの

が細い黒線である。また、矢印の付いた直線が到来方向を示しており、 $\theta_h$ が到来角となる。この到来角は北を $0^\circ$ とし、時計回りを正としている。

#### 4.4 落雷イベントの同定

岐阜大学及び日本落雷評定ネットワーク(JLDN)による落雷観測時刻から $\pm 10$  ms以内にELF帯トランジェントが確認され、磁界成分の振幅が $\mu + 5\sigma$ ( $\mu$ :平均値、 $\sigma$ :標準偏差)を超えたものを選別し、落雷の到来角を導出する。この導出された到来角が、落雷データによる落雷の発生位置から北海道母子里観測所をみこんだ角度からの誤差が $10^\circ$ 以内のイベントを落雷に伴うELF帯トランジェントであると同定する。

#### 4.5 落雷極性の推定

本解析ではLF帯落雷評定システム(JLDN)及び鉄塔への落雷データを用いていたため、落雷位置が既知であることから、ELF帯トランジェントの到来方向を一意に決定できる。そのため、ELF帯電磁波の伝搬方向であるポインティングベクトル $S$ を考えることで落雷の極性を導出する。ポインティングベクトル $S$ は式(4.7)で表すことができる。

$$S = E_z \times H_\phi \quad (4.7)$$

ポインティングベクトル $S$ の向きと磁界 $H_\phi$ の向きは既知なので、電界 $E_z$ の向きを導出し落雷の極性の決定を行った。



## 第5章 解析結果及び考察

本研究の解析期間である 2007 年一年間に渡り ELF 帯トランジェントを伴う落雷において、2.4 にて示した指数関数的電流近似法を用いて導出された電荷モーメントの解析結果を示す。この解析期間内に日本落雷評定ネットワーク(JLDN)により観測された落雷数は 4247371 イベントであり、そのうち ELF 帯トランジェントを伴うものは 467659 イベントであった(約 11%)。

### 5.1 事例解析

第4章で記した解析手法を用いて解析を行ったイベントの一例として、2007年1月6日15:00:39 [UT]に発生した落雷イベントの解析結果を図5.1に示す。図5.1中の波形は上から順に鉛直電界成分、水平磁界南北成分、水平磁界東西成分、横軸は時刻を表している。

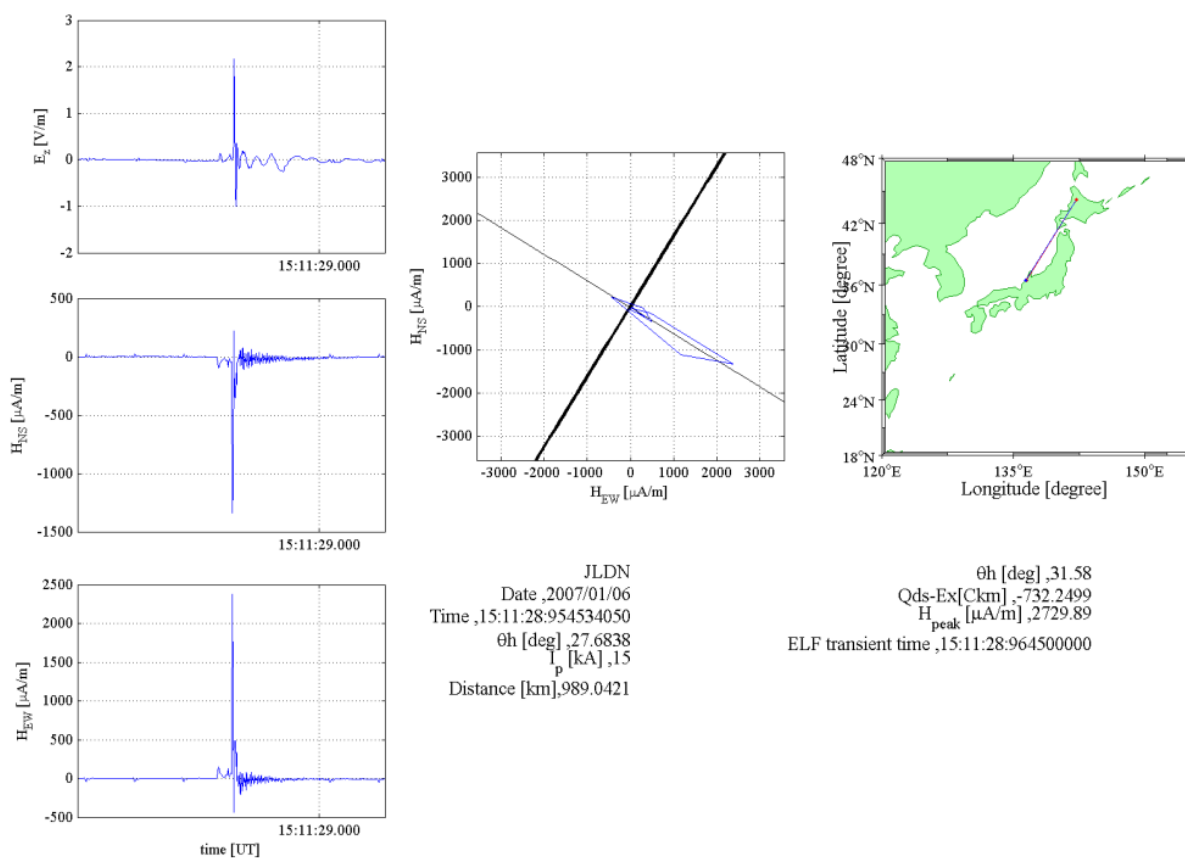


図 5.1 解析例(2007年1月6日15:00:39 [UT])

図5.1における鉛直電界成分、水平磁界東西成分、水平磁界南北成分の時系列波形の中心部にELF帯トランジェントが確認できる。この落雷イベントの解析の結果、到来角は地理座標の北から右回りに計算し31.58°、電荷モーメントは-732 Ckm、と導出することができた。

## 5.2 落雷電気的特性の月別中央値

月ごとの解析結果を図5.2に示す。上図2つは縦軸がELF帯トランジェントと伴う落雷のイベント数、ピーク電流値、下図2つは縦軸が電荷モーメント、どちらの図も横軸は月を表している。また、青は負極性、赤が正極性を示しており、折れ線グラフの値は各月のピーク電流値、電荷モーメントの中央値をとったものである。

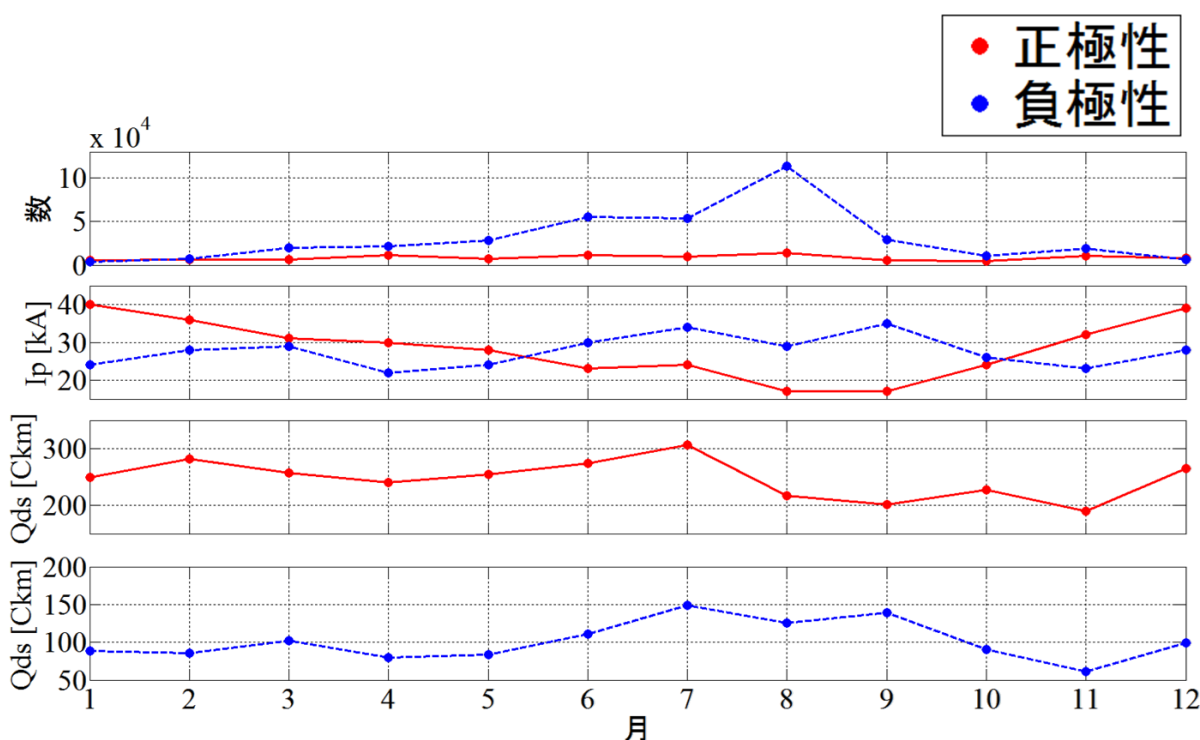


図 5.2 月変化(2007年)

まず、落雷イベント数に着目すると、正極性落雷のイベント数は年間を通して大きな変化はないが、負極性落雷に関しては夏季において多くの落雷が発生していることがわかる。

次に、ピーク電流値に着目すると、正極性落雷が冬季にピークを持っているのに対し、負極性は夏季にピークを持っている。また、冬季では正極性が負極性の値よりも大きく、夏季では負極性の方が正極性より大きくなっている。一方、ELF帯トランジェントを用いて導出した電荷モーメントは、正極性落雷では夏季雷である7月と冬季雷の2月にピークが確認できる。しかしながら、負極性落雷に関しては、夏季のみにピークを持っている。また、年間を通して正極性落雷の電荷モーメントが負極性を2倍以上上回っていることが分かった。

負極性落雷に関しては、電荷モーメントとピーク電流値の間に比例関係が見られた。つまり、負極性落雷ではピーク電流の大きなものは電荷モーメントもそれなりに大きいということを意味している。しかしながら、正極性のピーク電流値と電荷モーメントに関しては明確な相関は見ら

れなかった。つまり、正極性落雷の場合、ピーク電流が多きいからといって、必ずしも電荷モーメントが大きいわけではなく、2つの物理量の間にある程度の独立性が存在する可能性がある。中間圏発光現象発生観点からすると、エルブ生成にはピーク電流値が 40 kA、スプライト生成には電荷モーメントが 350 Ckm という閾値が存在することから、エルブは夏には負極性、冬季は正極性雷から、スプライトはいずれも正極性から主に発生すると考えられる。

### 5.3 落雷頻度分布

本研究によって電荷モーメントが導出された 2007 年一年間の日本周辺落雷分布図を図 5.3 に示す。前述のとおり、ELF 帯トランジェントを伴う落雷は 467659 イベントであり、正極性落雷は 21.3%(99682 イベント)、負極性落雷は 78.7%(367997 イベント)であった。

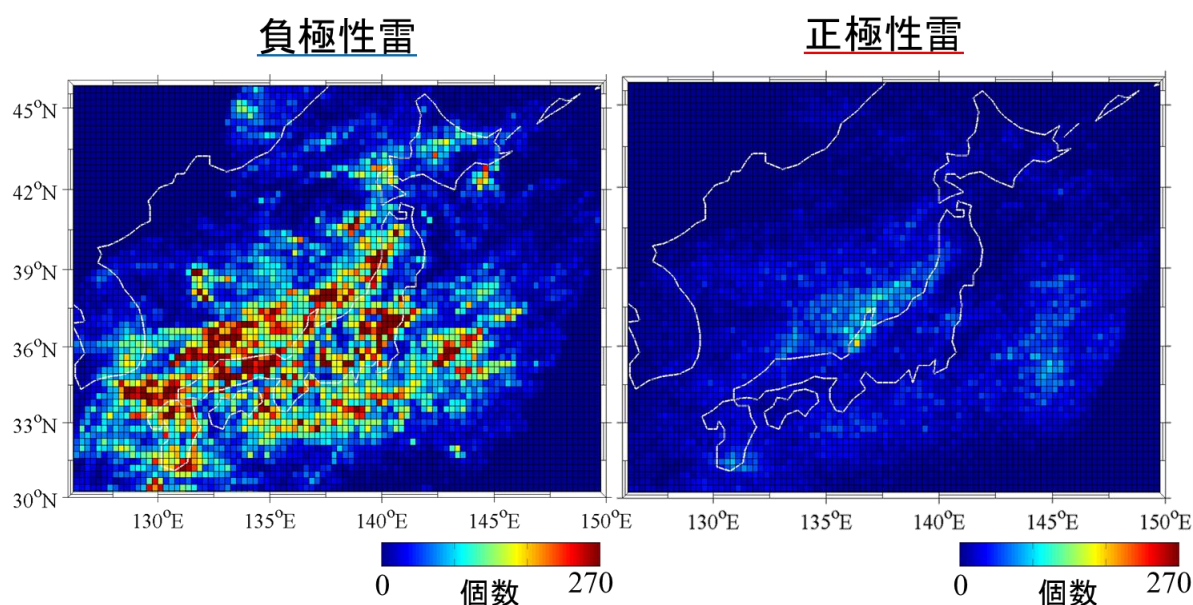


図 5.3 落雷頻度分布

左図は負極性落雷、右図は正極性落雷の分布図を表しており、どちらもカラーバーで個数を表している。一年間でみると負極性雷の割合が非常に多くなった。その中でも、北関東や日本海側において落雷頻度が多いということがわかった。正極性落雷に関しては負極性落雷に比べて割合は低いものの、北陸の日本海側にて非常に多くの落雷が発生していることがわかる。また、太平洋側においてもかなりの落雷が発生していることがわかった。

負極性落雷のイベントの割合が非常に大きくなった要因としては、日本の夏季における落雷の 9 割以上が負極性落雷と言われているため、夏季雷を多く含んでいるためと考えられる。また、正極性落雷に関しては日本海側における冬季雷において発生割合が高いとされているため、その影響が顕著に現れている。季節ごとの詳細な分布図はのちの 5.4 にて示す。

次に、スプライト生成の閾値 350 Ckm を十分に上回る 500 Ckm 以上の電荷モーメントを持

つ落雷に着目し、分布図を描いたものを図 5.4 に示す。

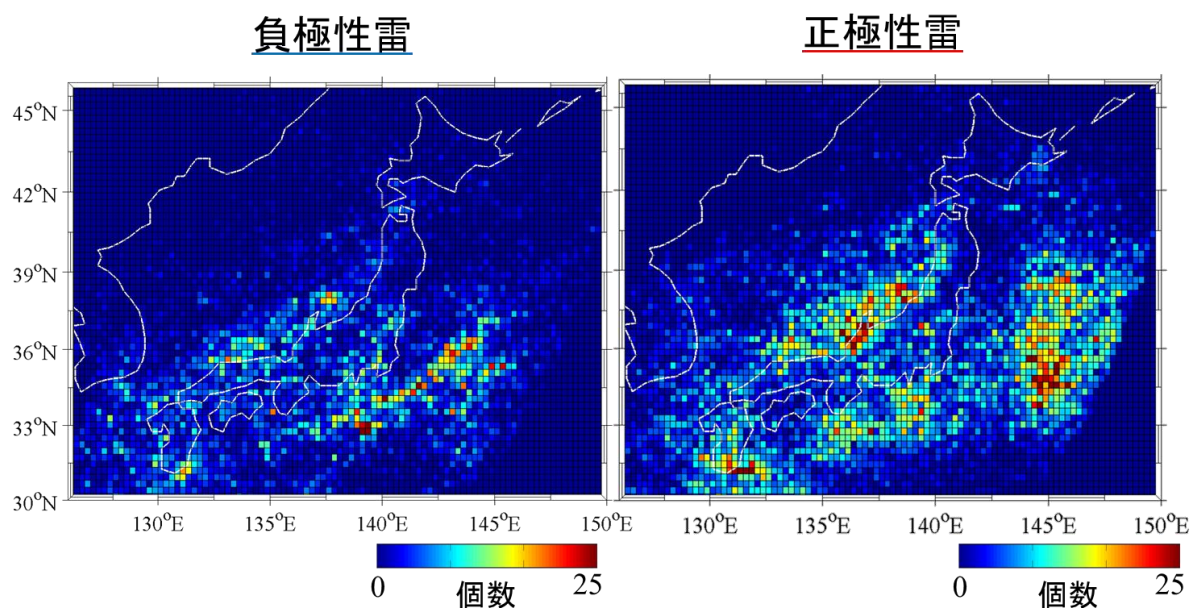


図 5.4 落雷頻度分布(>500 Ckm)

図 5.3 と同様に左図は負極性落雷、右図は正極性落雷の分布図を表しており、どちらもカラーバーで個数を表している。また、正極性落雷は 63.4%(20985 イベント)、負極性落雷は 36.6%(12131 イベント)となり、先ほどとは異なり正極性落雷の割合が負極性落雷を上回った。図 5.4 より、負極性落雷は日本海側、太平洋側に筋状に大きな電荷モーメントを持つ落雷が分布していることがわかる。それに対し、正極性落雷は北陸地方の日本海沿岸及び太平洋上に大きな電荷モーメントを持つ落雷が集中していることがわかる。

5.2 において、負極性落雷に関しては、電荷モーメントとピーク電流値の間に比例関係が存在する可能性を示した。そのため、図 5.4 のような電荷モーメント  $Qds$  が大きい落雷の分布図だけでなく、ピーク電流値  $I_p$  も大きい落雷についても分布図を描き、比較する必要がある。そのため、エルブス生成の閾値 40 kA を上回る 50 kA 以上のピーク電流値を持つ落雷に着目し、分布図を描いたものが図 5.5 である。

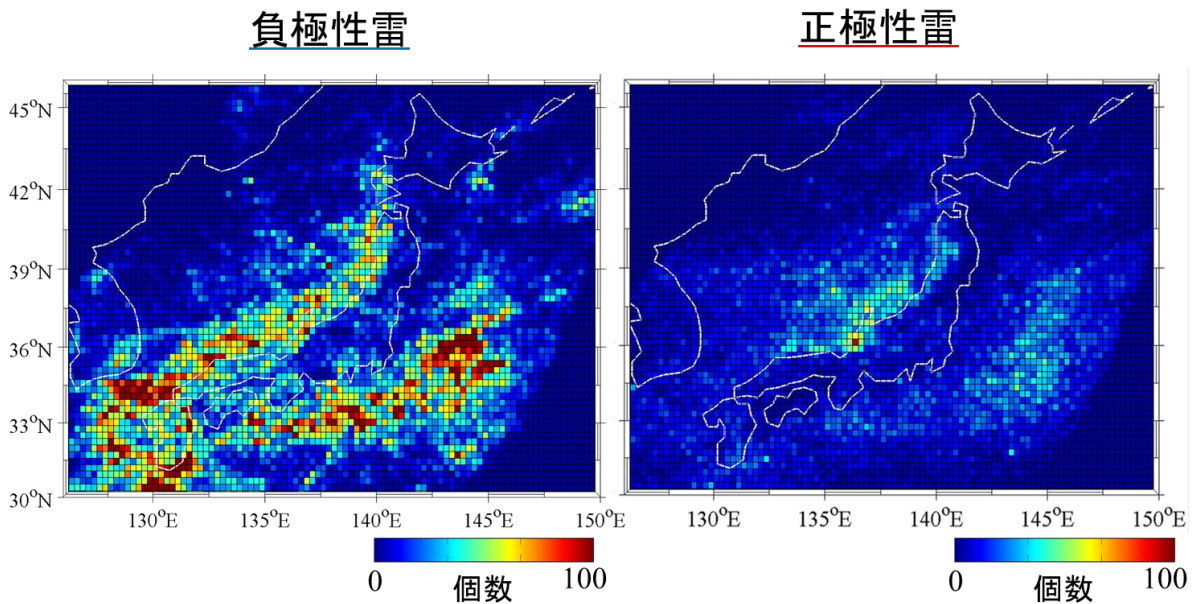


図 5.5 落雷頻度分布(>50 kA)

正極性落雷は 26.8%(55109 イベント)、負極性落雷は 73.2%(150762 イベント)となった。負極性落雷の分布図を見ると、大きなピーク電流値を持つ落雷は図 5.4 と同様に日本海側、九州地方、太平洋上において筋状に分布していることがわかる。正極性落雷に関しては図 5.4 の場合ほどではないものの、日本海側に大きなピーク電流値を持つ落雷が多く発生していることがわかる。しかし、太平洋上においては電荷モーメント分布の場合に比べ、大きな電流値を持つ落雷が少ないということが確認できる。

## 5.4 季節依存性

日本では夏季における負極性落雷の割合が 90%以上と言われている[14]。また、正極性落雷は日本海側における冬季雷において発生割合が高いとされている。そのため、それぞれの時空間分布及び電気的特性の違いを効果的に見るために、夏季、冬季と季節を分けて解析する必要がある。そのため本研究では、夏季、冬季それぞれに項目を設け、それぞれの時空間分布及び電気的特性の導出を行う。本解析では 6、7、8 月の三ヶ月間を夏季、1、2、12 月の三ヶ月間を冬季として解析を行った。

### 5.4.1 夏季

夏季における ELF 帯トランジェントを伴う落雷は 257576 イベントであり、正極性落雷は 13.6%(34916 イベント)、負極性落雷は 86.4%(222660 イベント)であり、負極性落雷の割合が非常に高いことからこの三ヶ月間の落雷は、一般的に夏季雷と呼ばれるものと言える。図 5.6 に夏季における落雷頻度分布図を示す。負極性落雷、正極性落雷どちらの分布図においても、北関

東において落雷頻度が多いということがわかった。また、正極性落雷に関しては日本列島の南半分  
に多く分布しており、その中でも北陸の日本海側及び九州付近に多くの落雷が発生していること  
がわかる。

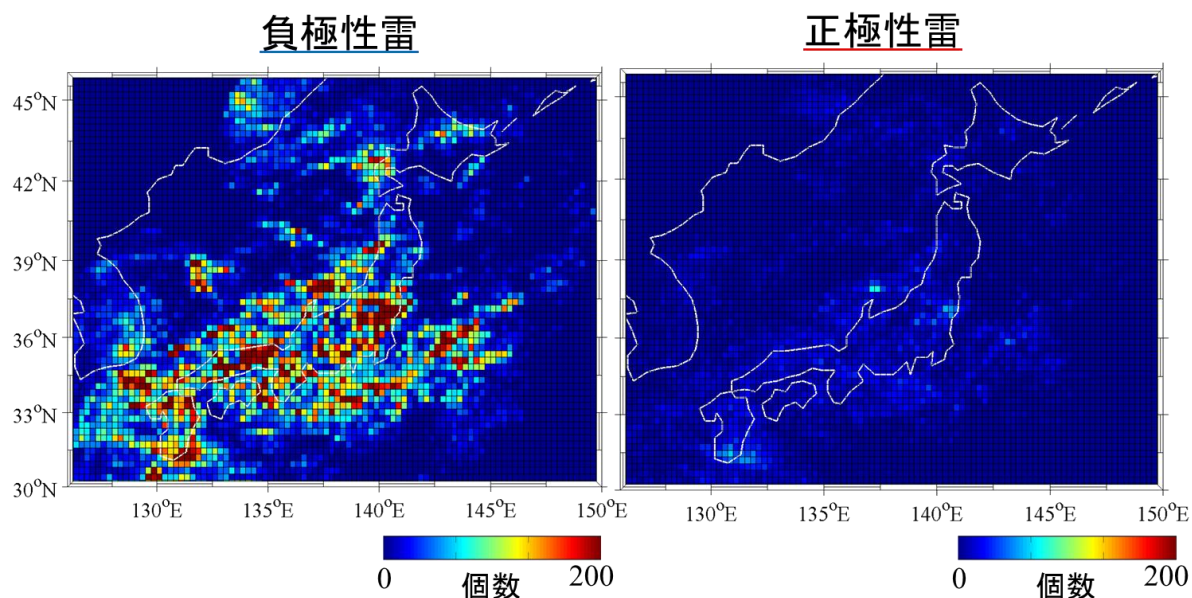


図 5.6 落雷頻度分布(夏季)

次に、500 Ckm 以上の電荷モーメントを持つ落雷、50 kA 以上のピーク電流値を持つ落雷の  
分布図を描いたものを図 5.7、図 5.8 に示す。落雷イベント数は電荷モーメントに関しては  
16371 イベントであり、正極性落雷は 50.5%(8261 イベント)、負極性落雷は 49.5%(8110 イベン  
ト)、ピーク電流値に関しては 106337 イベント中、正極性落雷が 12.9%(13713 イベント)、負極  
性落雷は 87.1%(92624 イベント)であった。

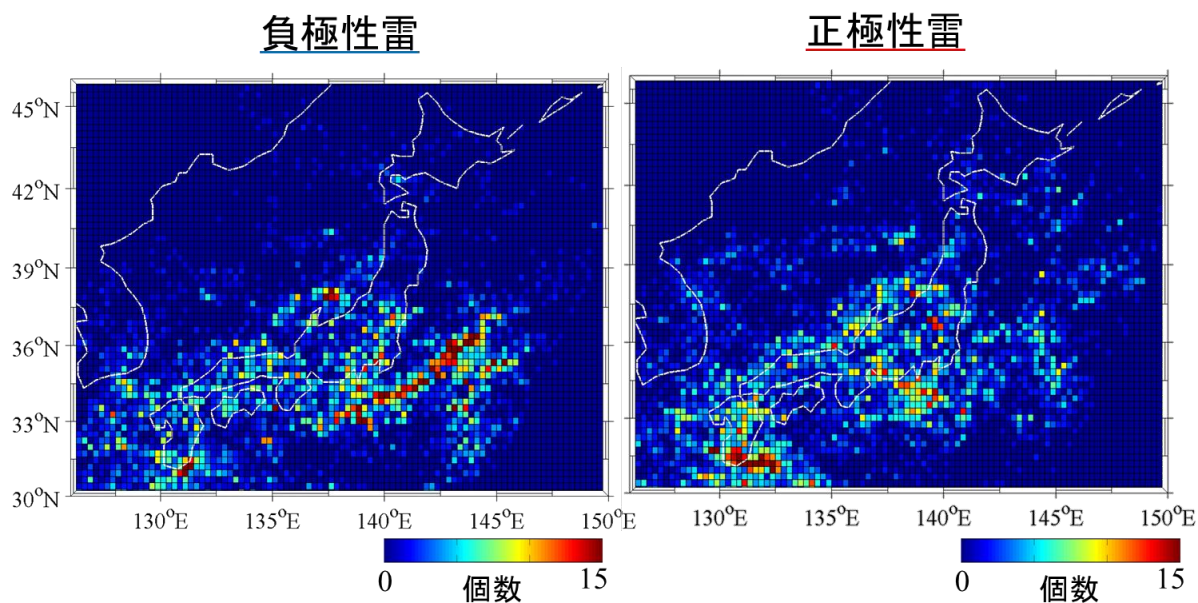


図 5.7 落雷頻度分布(夏季 >500 Ckm)

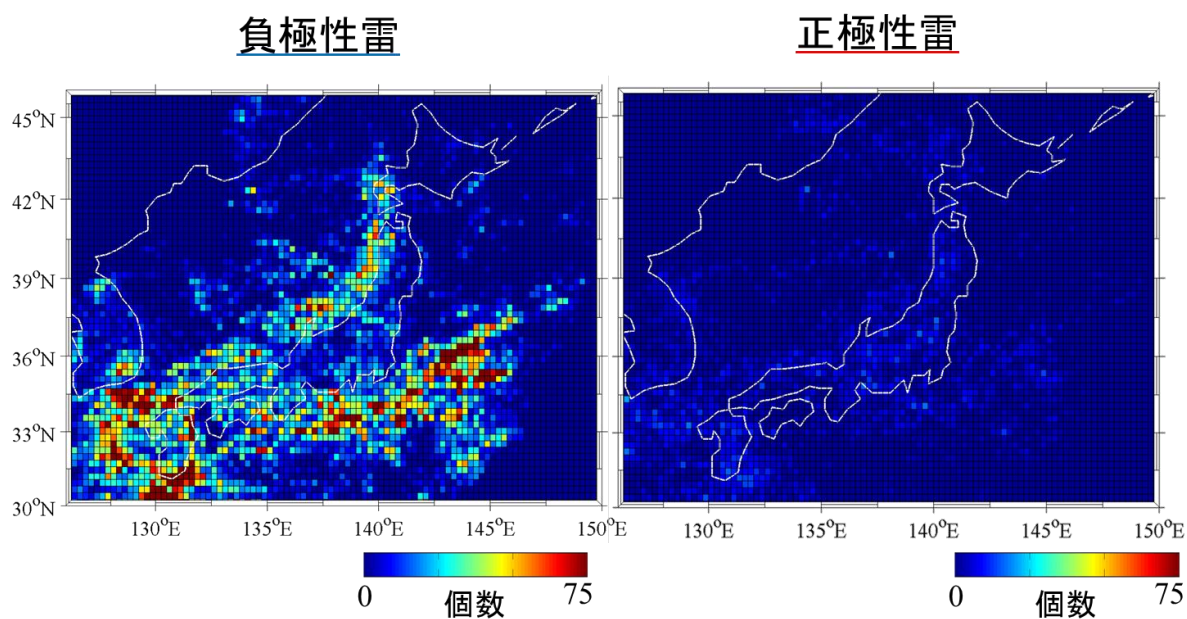


図 5.8 落雷頻度分布(夏季 >50 kA)

図 5.7 の電荷モーメントの大きな落雷においては、負極性落雷及び正極性落雷ともに、内陸、海上ともにイベントが見られた。負極性落雷では太平洋側に大きな電荷モーメントを持つ落雷が筋状に分布しているが、正極性落雷に関しては太平洋側よりも、九州付近において大きな電荷モーメントを落雷が集中していることが確認できる。また、負極性落雷及び正極性落雷に共通して関東北部に大きな電荷モーメントを持つ落雷が発生していることがわかった。関東北部は、北側に山があるため南風が吹くと強い上昇気流が起これ、雷雲が発生しやすくなるためだと考えられる。

図 5.8 のピーク電流値の大きな落雷に関しては、負極性落雷の割合が非常に多いが、電荷モーメント分布の負極性落雷と比較すると、太平洋側だけではなく九州付近においても分布していることがわかる。正極性落雷の分布図に関しては、イベント数が少なすぎるため比較、検討には利用できないと判断した。

## 5.4.2 冬季

冬季における ELF 帯トランジェントを伴う落雷は 36891 イベントであり、正極性落雷は 53.5%(19742 イベント)、負極性落雷は 46.5%(17149 イベント)であった。冬季における落雷の分布図は夏季の場合とは大きく異なり、日本列島の内陸部には分布しておらず日本列島沿岸部に集中している。また、負極性落雷、正極性落雷ともに北陸地方の日本海側において非常に多くの落雷が発生していることが確認できる。この北陸地方の日本海側には数多くの風力発電施設が集中しており、落雷による大規模な被害を受けてしまうため、深刻な問題となっている。図 5.9 に冬季における落雷頻度分布図を示す。

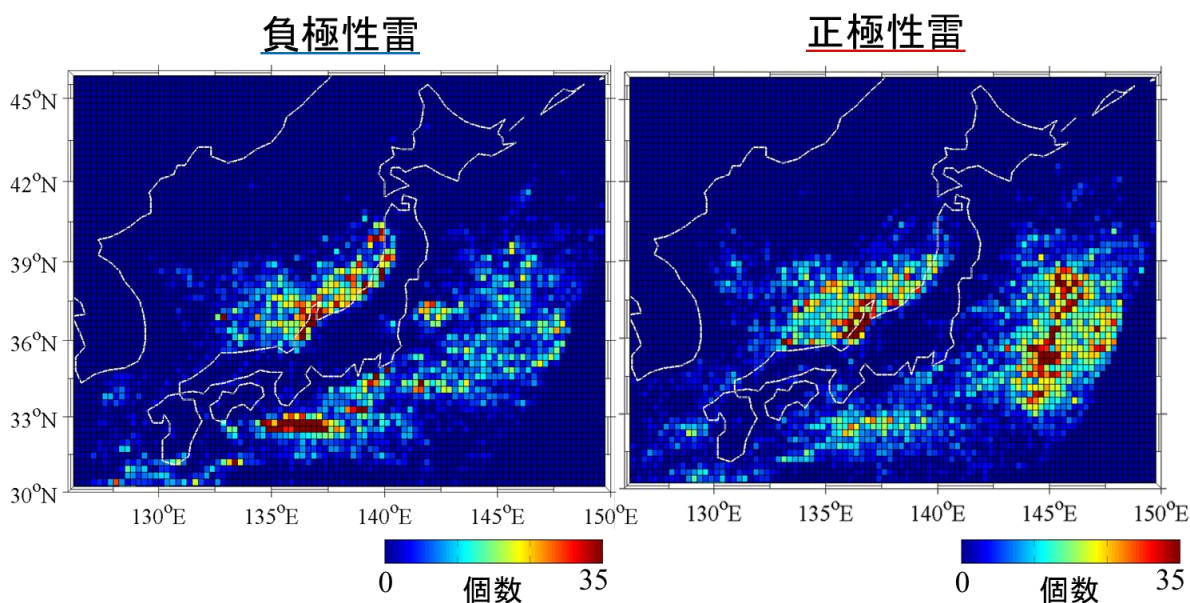


図 5.9 落雷頻度分布(冬季)

次に、500 Ckm 以上の電荷モーメントを持つ落雷、50 kA 以上のピーク電流値を持つ落雷の分布図を描いたものを図 5.10、図 5.11 に示す。落雷イベント数は電荷モーメントに関しては 5089 イベントであり、正極性落雷は 88.6%(4509 イベント)、負極性落雷は 11.4%(580 イベント)、ピーク電流値に関しては 21334 イベント中、正極性落雷が 65.6%(13995 イベント)、負極性落雷は 34.4%(7339 イベント)であった。



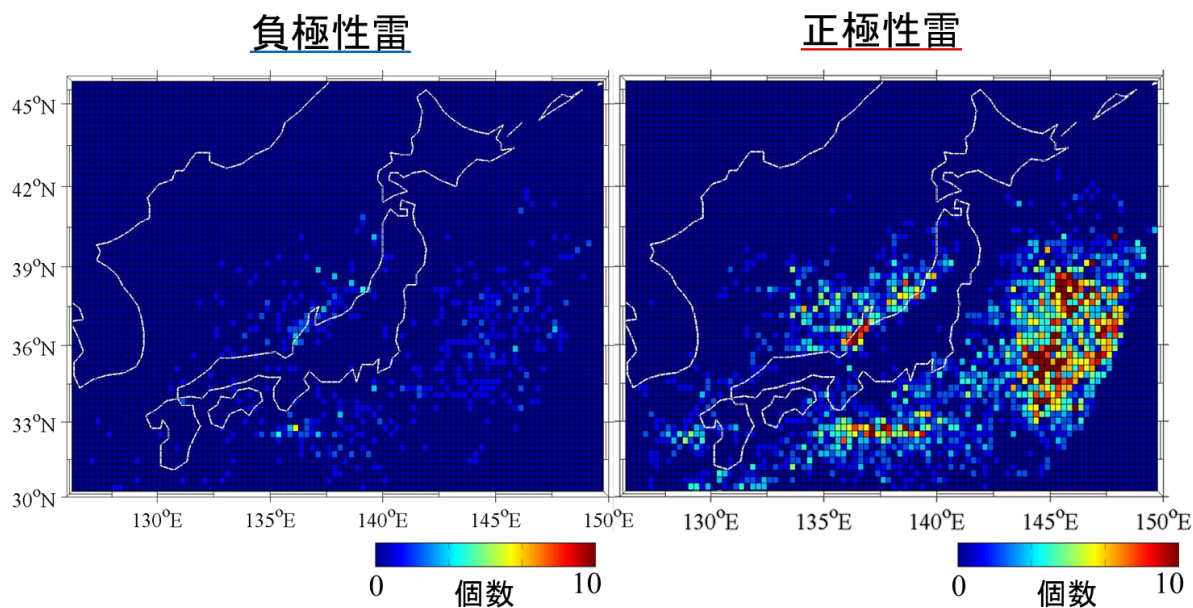


図 5.10 落雷頻度分布(冬季 >500 Ckm)

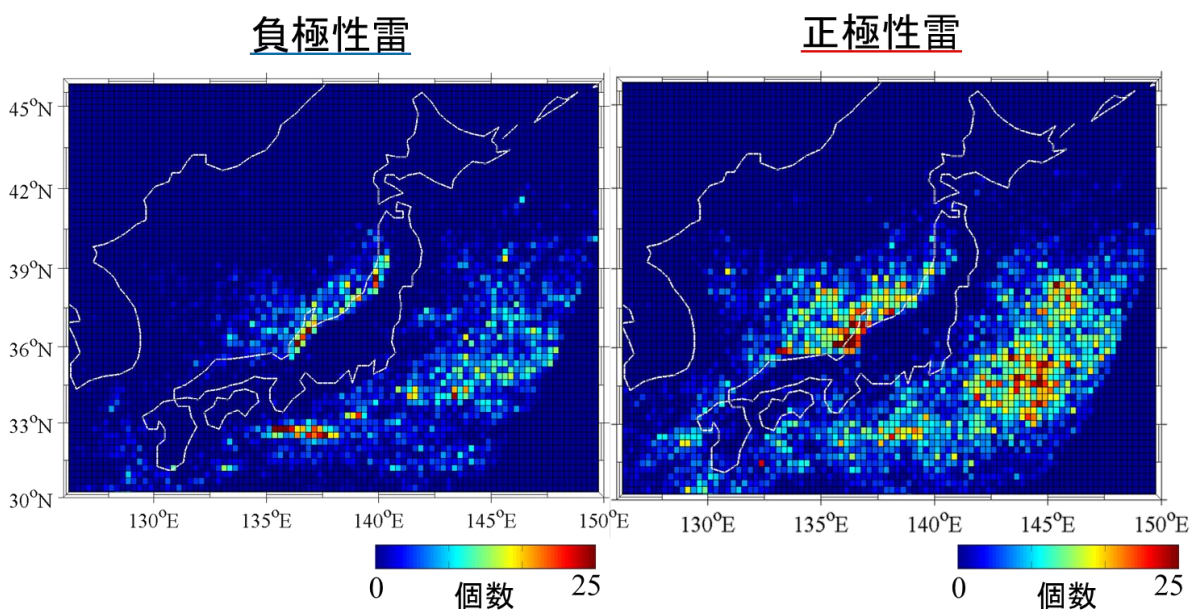


図 5.11 落雷頻度分布(冬季 >50 kA)

図 5.10 から負極性落雷は全体のイベント数は少ないものの、北陸地方に大きな電荷モーメントを持つ落雷が集中している。正極性落雷についても、イベント数は少ないが日本海側の北陸地方にて大きな電荷モーメントを持つ落雷が発生していることがわかり、太平洋側においても数多くの電荷モーメントの大きい落雷が分布していることがわかる。ピーク電流についても同様に日本海側の北陸地方に大きなピーク電流値を持つ落雷が集中していることが確認できる。これが一般的に北陸の冬季雷と呼ばれるものである。これらのことから、この ELF 帯電磁波を用いる方

法によって、北陸地方における大規模な正極性落雷に関する落雷特性マップの導出を行うことができたといえる。

次に、冬季において太平洋上にも大きな電荷モーメントを持つ落雷が数多く分布している点について考察を行う。気象庁より提供された気象データを用いて日本海側及び太平洋側のエコー頂データを比較したところ、ほぼ同様の高度であることがわかった。そのため、この太平洋側に多くの雷をもたらす雷雲は、日本海側で発生した雷雲と同様の性質を持つものだと考えられる。また、日本海側から太平洋側に吹き抜けたことによって勢力が衰退した冷たい空気が、太平洋を北上している暖気と衝突することで上昇気流を発生させ、再び雷雲を形成し、多くの落雷を発生させていると考えられる。

## 5.5 累積確率密度分布

累積確率密度分布とは、有限期間における数値を大きい順に並べ直し、各値における全体に対する確率を導出するものである。図 5.12、5.13 にそれぞれ夏季、冬季における電荷モーメント  $Qds$  に関する累積確率密度分布を描いたものを示す。図 5.12、5.13 どちらにおいても縦軸が割合、横軸が電荷モーメント  $Qds$ 、赤線が正極性落雷、青線が負極性落雷を表している。また、図中の破線①は電荷モーメント  $Qds$  が 500 Ckm、破線②は割合が 50%を示している。

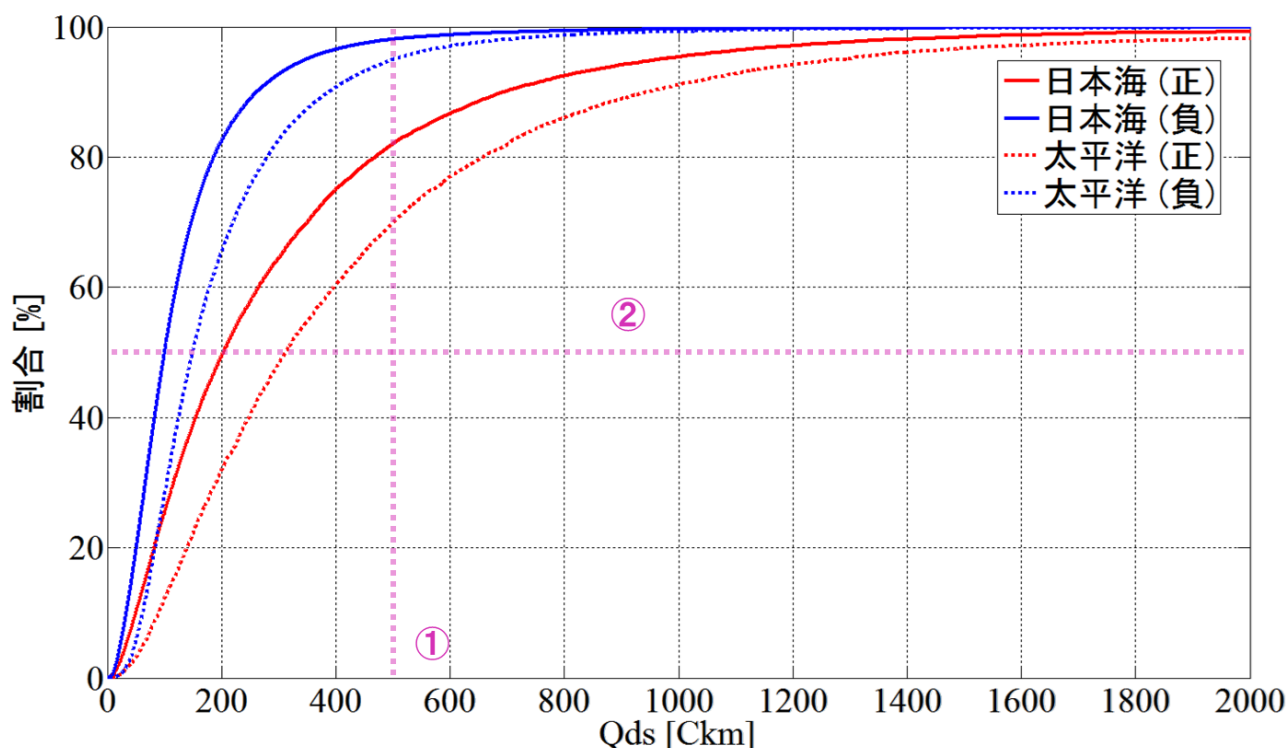


図 5.12 累積確率密度分布(夏季  $Qds$ )

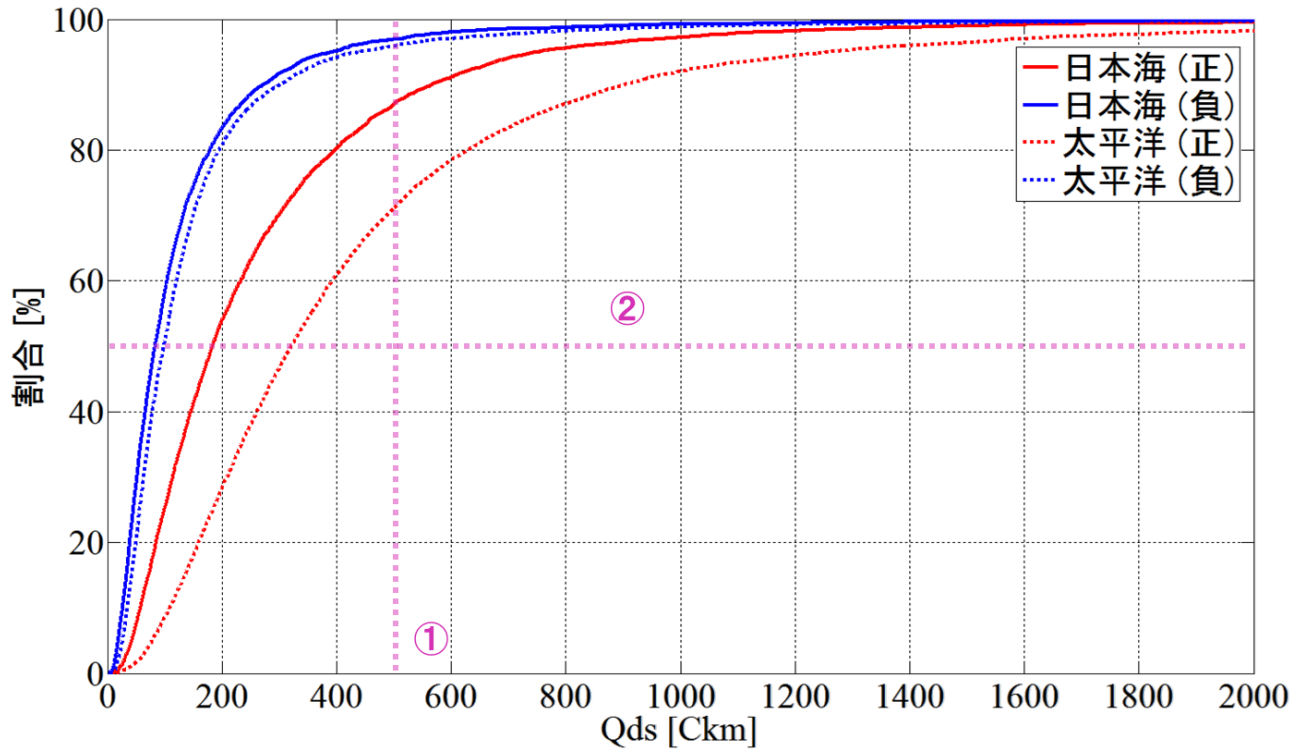


図 5.13 累積確率密度分布(冬季  $Q_{ds}$ )

まず、図 5.12 の破線①に着目すると、電荷モーメントが 500 Ckm に達した際の正極性落雷の割合が 70~80 %となるのに対し、負極性落雷では既に 90 %以上に達している。次に破線②に着目すると、割合が 50 %に達した時、正極性落雷の電荷モーメントは 200~300 Ckm 付近であるのに対し、負極性落雷では 100 Ckm 付近にて 50 %に達する。同様に図 5.13 の破線①に着目すると、先程の場合と同様に正極性落雷では 70~80 %付近になるのに対し、負極性落雷では 90 %以上となることがわかる。また、正極性落雷において割合が 50 %に達した時の電荷モーメントは 200~300 Ckm、負極性落雷の場合は 100 Ckm 付近であった。これらのことから、夏季、冬季のどちらにおいても正極性落雷の電荷モーメントは負極性落雷よりも大きくなることがわかった。

夏季、冬季どちらにおいても、負極性落雷に関しては太平洋側、日本海側どちらの領域においても電荷モーメントが 350~400 Ckm にて累積確率密度が 90%に達する。正極性落雷に関しては、日本海側で 600 Ckm 付近、太平洋側で 850~900 Ckm 付近にて累積確率密度が 90%に達していた。また、正極性落雷、負極性落雷どちらにおいても日本海側よりも太平洋側の方が電荷モーメントは大きいことが分かった。次に、ELF 帯トランジェントが検出された落雷のピーク電流値に関する累積確率密度分布を図 5.14、5.15 に示す。

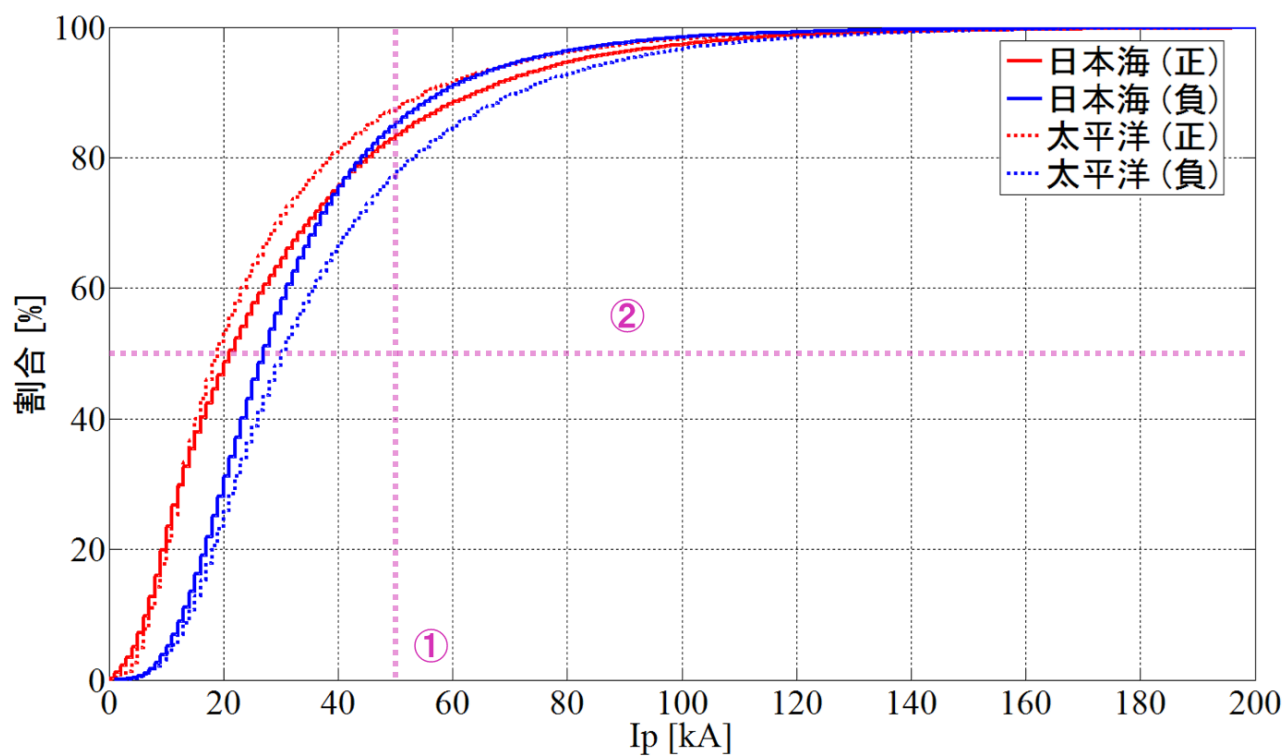


図 5.14 累積確率密度分布(夏季  $I_p$ )

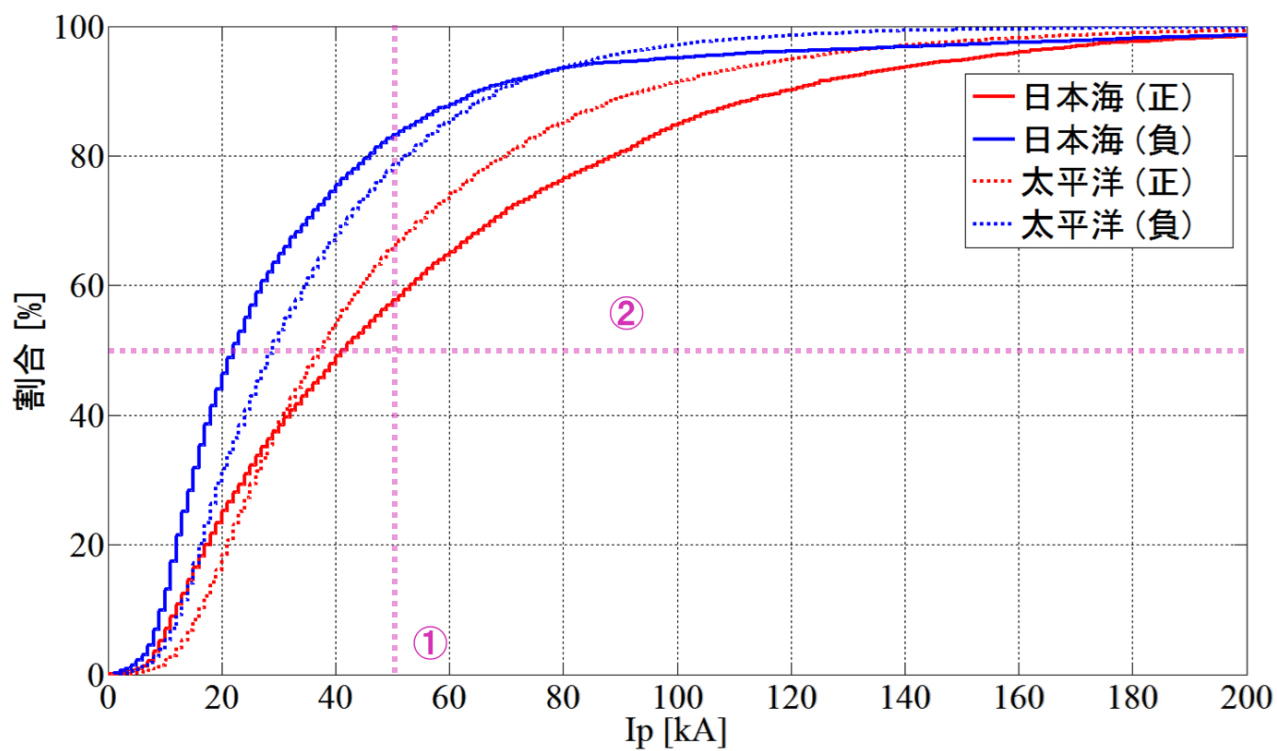


図 5.15 累積確率密度分布(冬季  $I_p$ )

図 5.14、5.15 にそれぞれ夏季、冬季におけるピーク電流値  $I_p$  に関する累積確率密度分布を描いたものを示す。図 5.14、5.15 どちらにおいても縦軸が割合、横軸がピーク電流値  $I_p$ 、実線が正極性落雷、点線が負極性落雷を表している。また、図中の破線①はピーク電流値  $I_p$  が 50 kA、破線②は割合が 50 %を示している。

まず、図 5.14 の破線①に着目すると、ピーク電流値が 50 kA に達した際の正極性落雷、負極性落雷の割合は 80~90 %付近に集中している。

次に破線②に着目すると、割合が 50 %に達した時、正極性落雷のピーク電流値は 20 kA 付近であるのに対し、負極性落雷では 25~30 kA 付近にて 50 %に達する。これらのことから、夏季においては正極性落雷及び負極性落雷に関しては大きな差がないことがわかった。

同様に図 5.15 の破線①に着目すると、正極性落雷では 60~70 %付近になるのに対し、負極性落雷では 80 %以上となることがわかる。また、正極性落雷において割合が 50 %に達した時のピーク電流値は 40 kA、負極性落雷の場合は 20~30 kA 付近であった。これらのことから、冬季においては正極性落雷のピーク電流値は負極性落雷よりも大きくなることがわかった。

また、夏季においては正極性落雷のピーク電流値が 50~60 kA、負極性落雷は 70 kA 付近にて累積確率密度が 90%に達していることがわかる。それに対し、冬季においては正極性落雷のピーク電流値が 90~100 kA、負極性落雷は 60~70 kA 付近にて累積確率密度が 90%に達している。夏季、冬季を比較すると冬季における正極性落雷のピーク電流値が著しく大きいことがわかる。冬季における電荷モーメントの場合とは異なり、日本海側において大きなピーク電流値を持つ落雷が多数発生していることがわかる。また、夏季、冬季どちらにおいても電荷モーメントに関する場合とは異なり、太平洋側よりも日本海側のほうがピーク電流値の大きい落雷が多く発生している。これは、日本国内において北陸地方の冬季雷のピーク電流値が大きいと言われており、その影響を強く受けたためだと考えられる。

## 第6章 結論

本研究では、ELF 帯トランジェントが観測された落雷を用いて、日本周辺における落雷頻度分布図を導出し、季節依存性や領域依存性について検討を行った。

今回の解析の結果、冬季において日本海側では大きな電荷モーメントを持つ正極性落雷が発生しているのを再確認出来たと同時に、ELF 帯電磁波を用いて北陸地方を含めた日本周辺における落雷特性マップの導出に成功した。夏季においては九州付近、本州内陸部において大規模な落雷が発生していることがわかった。また、冬季においては太平洋上にも大きな電荷モーメントを持つ落雷が数多く分布していることが確認されたため、今後このメカニズムについてもより詳細な解析が必要である。そのため、今後は統計的信頼性を向上させるために解析期間を拡張、 $I_p$ 、 $Qds$  の領域、季節依存性の統計解析を行う必要があると考えている。それに加え、気象データとの比較との比較を行うことで落雷の領域依存性、季節依存性の発生原因とされる台風や集中豪雨等と落雷の時空間特性を導出する必要がある。また、今回の解析では JLDN のデータから落雷位置を導出したが、今後は我々によって新たに設置された、鹿児島県垂水観測所での観測データを用い、本研究グループ単独での落雷位置同定及び日本周辺における電荷モーメント  $Qds$  を用いた落雷特性マップを作成する予定である。

## 謝辞

本研究の機会をあたえてくださり、日頃より懇切丁寧な指導をいただいた電気通信大学芳原容英教授に感謝いたします。また、大学入学以来 6 年間に渡り援助をしてくれた両親に心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] E. W. Huang , Electromagnetic Transients, Elves, and Sprites in the Earth-Ionosphere Waveguide, 1997.
- [2] S. F. Abarca, K. L. Corbosiero, D. Vollaro, The World Wide Lightning Location Network and Convective Activity in Tropical Cyclones, *American Meteorological Society*, 139, 1, 175-191, 2011
- [3] J. N. Thomas, N. N. Solorzano, S. A. Cummer, R. H. Holzworth, Polarity and energetics of inner core lightning in three intense North Atlantic hurricanes, *Journal of Geophysical Research*, 115, A00E15, 2010
- [4] B. Gungle, E. P. Krider, Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms, *Journal of Geophysical Research*, 111, D19203, 2006
- [5] N. N. Solorzano, J. N. Thomas, R. H. Holzworth, Global Studies of Tropical Cyclones using The World Wide Lightning Location Network , *American Meteorological Society*, 2008
- [6] C. P. Burke, D. L. Jones, On the polarity and continuing currents in usually large lightning flashes deduced from ELF events, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 58, 531-540, 1996
- [7] S. Yoshida, M. Akita, Y. Nakamura, T. Morimoto, T. Ushio, Z. Kawasaki, D. Wang, N. Takagi, Evidence of negative leaders prior to fast rise ICC pulses of upward lightning, *Journal of Atmospheric Electricity*, 29, 13-21, 2009
- [8] M. Ross, S. A. Cummer, T. K. Nielsen, Y. Zhang, Simultaneous remote electric and magnetic field measurements of lightning continuing currents, *Journal of Geophysical Research*, 113, D20125, 2008
- [9] J. Schoene, M. A. Uman, V. A. Rakov, Return stroke peak current versus charge transfer in rocket-triggered lightning, *Journal of Geophysical Research*, 115, D12107, 2010
- [10] Y. Hobara, M. Hayakawa, E. Williams, R. Boldi, E. Dowens, Location and electrical properties of sprite-producing lightning from a single ELF site, Sprites, *Elves and Intense Lightning Discharges*, 211-235, 2006
- [11] 河崎善一郎, 雷放電とは -雷放電の物理-, *J. Plasma Fusion Res*, 7, 589-596, 2004
- [12] 田口昌彦, 奥山和彦, 小倉義光, SAFIR で観測した夏季の関東地方における雷雨と大気環境 II: 安定度指数による雷雨の予測, *日本気象学会機関誌*, 49, 8, 649-659, 2002
- [13] 道本光一郎: 冬季雷の科学, コロナ社, 1998
- [14] 日本大気電気学会, 大気電気学概論, コロナ社, 2003
- [15] A. Brekke, 超高層大気物理学, 愛智出版, 1997
- [16] 久保木久孝, 確率・統計解析の基礎, 朝倉書店, 2007
- [17] 佐尾和夫, 空電, 成山堂書店, 1981

## 発表実績

- [1] R. Nakamura, Y. Hobara, M. Hayakawa, M. Parrot, “Statistical study of the ionospheric perturbation observed by low-altitude satellite”, *Japanese Geosciences Union 2011*, Chiba
  
- [2] 全著者名: 中村遼平、芳原容英、早川正士、藤木佑太(電通大)、王道洪(岐阜大)、楠研一、齋藤貞夫(気象研)  
論文題目: ELF 帯トランジェントを用いた落雷電荷量推定精度の検証  
日本大気電気学会第 86 回研究発表会, Jan, 2012
  
- [3] 全著者名: 中村遼平、芳原容英、早川正士、藤木佑太(電通大)、塩川和夫(名大 STE 研)  
論文題目: ELF 帯トランジェント及び LF 帯落雷評定ネットワークを用いた日本周辺落雷の電気的特性  
日本大気電気学会第 87 回研究発表会, Sep, 2012
  
- [4] 全著者名: 中村遼平、芳原容英 (電通大)、塩川和夫(名大 STE 研)  
論文題目: ELF 帯トランジェント観測及び LF 帯落雷評定ネットワークを用いた日本周辺落雷の時空間分布及び電気的特性  
日本大気電気学会第 88 回研究発表会, Jan, 2013



## 付録

### プログラムリスト

以下に、電荷モーメント  $Qds$  の導出、到来方向の導出、落雷極性の決定を行うプログラムを掲載する。

```

% tgf_Qds.m
% このプログラムは母子里のELFデータから落雷のQdsを導出する。(2010/08/12) mod4paperJan2011

close all;
fclose all;
clear all;
clc;

data_dir = 'C:\JLDN\original_data\2007';
AA = dir([data_dir ' 20070106_JLDN.dat']);
dir_folder = 'F:test';

for i=1:length(AA)
% for i=1:2
    datname = AA(i).name;
    fname=[data_dir datname]

    fftsizeE=1024;
    fftsize=1000;
    sf=4000;
    f=sf*(1:(fftsize))/fftsize;
    Q_ds = [];
    ALL = [];
    ALL {1, 1} = '番号';
    ALL {1, 2} = '年';
    ALL {1, 3} = '月';
    ALL {1, 4} = '日';
    ALL {1, 5} = '時';
    ALL {1, 6} = '分';
    ALL {1, 7} = '秒';
    ALL {1, 8} = 'ミリ秒';
    ALL {1, 9} = 'Qds_exponential_method';
    ALL {1, 10} = 'Qds_impulse_method';
    ALL {1, 11} = 'Ip';
    ALL {1, 12} = 'H_peak_amplitude';
    ALL {1, 13} = ' $\theta$  (JLDNから)';
    ALL {1, 14} = ' $\theta$  (リサージュ曲線から)';

```

```

ALL {1, 15} = '落雷の緯度';
ALL {1, 16} = '落雷の経度';
ALL {1, 17} = '距離';
ALL {1, 18} = 'eventtime';
ALL {1, 19} = 'Elf_transient_time';
ALL {1, 20} = '群速度';
ALL {1, 21} = '光速との比率';
ALL {1, 22} = '雷インデックス';

%%%JLDNの落雷データ%%%
% fid = fopen([data_dir '20071221_JLDN.dat']);
fid = fopen([data_dir datname]);
%年月日時分秒, ナノ秒, 緯度(世界), 経度(世界), 電流強度, 雲放電インデックス
% [year month day time_h time_m time_s time_ns latitude longitude current index] =
fscanf(fid, '%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s');
JLDN = fscanf(fid, '%d/%d/%d %02d:%02d:%02d %d %f %f %i %d', [11 inf]);
JLDN = JLDN';
fclose(fid);

mkdir([dir_folder
num2str(JLDN(end, 1)), '_ ', num2str(JLDN(end, 2), '%02d'), '_ ', num2str(JLDN(end, 3), '%02d')]);
% dir_res =
['F:¥Qds¥2007¥', num2str(JLDN(end, 1)), '_ ', num2str(JLDN(end, 2), '%02d'), '_ ', num2str(JLDN(end,
3), '%02d'), '¥'];
dir_res = 'F:¥test¥';

JLDN1 = JLDN;
JLDN_n = JLDN1(:, 4)-9;
JLDN1(:, 4) = JLDN_n;

steps = length(JLDN1(:, 1));

for ss = 1:steps
    if (JLDN1(ss, 2)==1) && (JLDN1(ss, 3)==1)
        if JLDN1(ss, 4)<0
            JLDN_nn = JLDN1(ss, 4)+24;
            JLDN1(ss, 4) = JLDN_nn;
        end
    end
end

```

```

JLDN1(ss, 3) = 31;
JLDN1(ss, 2) = 12;
JLDN_year = JLDN1(ss, 1) - 1;
JLDN1(ss, 1) = JLDN_year;

end

else

if JLDN1(ss, 4) < 0
    JLDN_nn = JLDN1(ss, 4) + 24;
    JLDN1(ss, 4) = JLDN_nn;
    JLDN_nnn = JLDN1(ss, 3) - 1;
    JLDN1(ss, 3) = JLDN_nnn;

end

end

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
nnnn = find(abs(JLDN1(:, 10)) >= 0);          %電流強度の場合分け
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Qds=zeros(length(JLDN1(:, 1)), 10);
% index=zeros(length(JLDN1(:, 1)), 10);
% pa2=zeros(length(JLDN1(:, 1)), 1);

% steps=length(JLDN1(:, 1));
steps=length(JLDN1(nnnn, 1));
Qds_Ex=zeros(length(JLDN1(nnnn, 1)), 10);
Qds_Im=zeros(length(JLDN1(nnnn, 1)), 10);
index=zeros(length(JLDN1(nnnn, 1)), 10);
pa2=zeros(length(JLDN1(nnnn, 1)), 1);

for k=3987
% for k=2348:steps

    yy=JLDN1(nnnn(k), 1); %年
    mm=JLDN1(nnnn(k), 2); %月
    dd=JLDN1(nnnn(k), 3); %日

    th=JLDN1(nnnn(k), 4); %時

```

```

tm=JLDN1(nnnn(k),5); %分
ts=JLDN1(nnnn(k),6); %秒
tns=JLDN1(nnnn(k),7); %ナノ秒
tms=tms*10^-6; %ミリ秒

eventtime=ut2ms([th tm ts tms]);

slat=JLDN1(nnnn(k),8); %sorse latitude
slon=JLDN1(nnnn(k),9); %sorse longitude
Ip=JLDN1(nnnn(k),10); %電流強度
L_index=JLDN1(nnnn(k),11); %雷インデックス
%%%%%%%%%%

% try
name=[num2str(yy),num2str(mm,'%02d'),num2str(dd,'%02d'),'-'
',num2str(th,'%02d'),num2str(tm,'%02d'),num2str(ts,'%02d'),'-',num2str(tns,'%d')]

load(['¥NAS_HOBARA_LAB2¥data¥M2_nakamura¥MSR_2007¥',num2str(JLDN(end,1)),'_',num2str(JLDN
(end,2),'%02d'),'_',num2str(JLDN(end,3),'%02d'),'¥' [name] '.mat'])
ez=func_notch_eastjp_00(ez,sf,1000);
hns=func_notch_eastjp_00(hns,sf,1000);
hew=func_notch_eastjp_00(hew,sf,1000);
% t=ut2ms([th tm ts tms]);
t=ut2ms([th tm ts]);
elftime=(t-5000:0.25:t+5999.75)';

ind=find(elftime==floor(eventtime));

figure(1)
subplot(3,1,1)
plot(elftime(ind-4000:ind+4000),ez(ind-4000:ind+4000))
xtime(elftime(ind-4000:ind+4000));
hold on
ylabel('Ez')
grid on
vline(eventtime)

```

```

title(name)
subplot(3,1,2)
plot(elftime(ind-4000:ind+4000),hns(ind-4000:ind+4000))
xtime(elftime(ind-4000:ind+4000));
ylabel('Hns')
vline(eventtime)
grid on

subplot(3,1,3)
plot(elftime(ind-4000:ind+4000),hew(ind-4000:ind+4000))
xtime(elftime(ind-4000:ind+4000));
ylabel('Hew')
vline(eventtime)
grid on

%
%   Mean_ez = mean(ez);
%   Std_ez = std(ez);

HH = sqrt(hns.^2 + hew.^2);
Mean_HH = mean(HH);
Std_HH = std(HH);
%   Mean_hns = mean(hns);
%   Std_hns = std(hns);
%   Mean_hew = mean(hew);
%   Std_hew = std(hew);
%

Elftime = elftime(ind-4000:ind+4000);

%   close
%   if max(hns(ind-4000:ind+4000))>=(Mean_hns + Std_hns)
if max(hns(ind-4000:ind+4000))>=(Mean_HH + (Std_HH*5))
%       fff = find(hns(ind-4000:ind+4000)==max(hns(ind-4000:ind+4000)));
fff = find(HH(ind-4000:ind+4000)==max(HH(ind-4000:ind+4000)));
%       if (Elftime(fff)>=eventtime-10) && (Elftime(fff)<=eventtime+10);
%           if (Elftime(fff)>=(eventtime-500)) && (Elftime(fff)<=(eventtime+500));
%               ggg = find(elftime(fff)>=eventtime-5) & (elftime(fff)<=eventtime+5);

%           pause; %有効にするとランジェント選択の時に一時停止するので、波形を拡大しよ

```

り細かく選択できる

```
%      [ind2, y]=ginput(1);
ind2 = Elftime(fff)
%      close

aaa = find(elftime(ind-4000:ind+4000)==floor(ind2))

%      ind = ind-4000+floor(ind2);
ind = ind-4000+aaa
index(k, 1) = ind;
target = elftime(ind);

ezt = ez(ind-fftsizeE/2:ind+fftsizeE/2-1);
hnst = hns(ind-fftsize/2:ind+fftsize/2-1);
hewt = hew(ind-fftsize/2:ind+fftsize/2-1);
time = elftime(ind-fftsize/2:ind+fftsize/2-1);

%%%hamming window%%%
% Han=[];
mi = 1:fftsizeE;
Han = 0.54 - 0.46*cos(2*pi*mi/fftsizeE);
mi = 1:fftsize;
Han2 = 0.54 - 0.46*cos(2*pi*mi/fftsize);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%Ez Calib%%%
CalibDir = 'C:\Users\Nakamura\Desktop\ELF_Qds\MATLAB\Calib';
CalibData = load([CalibDir, 'CalibEz_Fs', int2str(2000), ...
    'FFTSIZE', int2str(fftsizeE), '.mat']);
CEZ_Freq = CalibData.EzCabFreqData;
CEZ_Data = CalibData.EzCabData;

ezf = fft(ezt.*Han')/fftsizeE;
ezfc = ezf(1:fftsizeE/4).*CEZ_Data(1:numel(CEZ_Data)/2)';

eztc = ifft(ezfc);
%      [maxE, ind]=max(abs(eztc));
```

```

[maxE, inde] = max(abs(eztc));
pol = (real(eztc(inde))>=0)-(real(eztc(inde))<0);
pol = -pol;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% 到来角 (m_idist) %%%
[rad, B, a21]=m_idist(142.2, 44.2, slon, slat, 'wgs84'); %母子里の座標
rad/1000000;
aaa=(3.141592653589793238462643)/20000000*rad;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%I(f)ds%%%

%%%球面三角法%%%
%経度0~360(東回り), 緯度-90~90
b=90-slat;
c=90-44.2;
A=slon-142.2;
a=acos(cosd(b)*cosd(c)+sind(b)*sind(c)*cosd(A));
kakudo=atand(hns(ind)/hew(ind));
B=atand(sind(A)/(cosd(44.2)*tand(slat)-sind(44.2)*cosd(A)));
kakudo2=B+90;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

ht=hewt(1:end);
ht2=hew;

h=fft(ht.*Han2')*(1/sf);
fftsize2=fftsize;
sf2=sf;

ifds=h2ifds(h, a, fftsize2, sf2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% 極性決定 %%%%%%%%%
hf=length(ht)/2;
nsp=ht(hf)-(ht(hf-5)+ht(hf+5))/2;
if B>0 && B<180
    if nsp>0

```



```

        pol=1;
    else
        pol=-1;
    end
else
    if nsp>0
        pol=-1;
    else
        pol=1;
    end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%% peak amp %%%
hphi=sqrt(hewt.^2+hnst.^2);
hpa=decround(max(hphi*10^6),3);

```

%%Exponential fitting method%%

```

%%% tau %%%
itds = real(iffit(ifds)*fftsize);
pa(k) = pol*max(abs(itds));
x = f(f<55).^2;
y = 1./(abs(ifds(f<55)).^2);

%%% 変な部分を取り除く %%%
n = mean(y);
nn = std(y);
out = find(y>(n + nn));
yyy = [y(1:out-1) y(out+1:end)];
xx = [x(1:out-1) x(out+1:end)];
P = polyfit(xx,yyy,1);
ppp = polyval(P,xx);
b = P(2);
m = P(1);
tau = (1/(2*pi))*sqrt(m/b);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Qds_Ex = (1/sqrt(b))*pol/1000;

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Impulsive estimation method%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%高調波の部分を0に%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
f1=(50:50:sf/2)-8;
```

```
f2=(50:50:sf/2)+8;
```

```
l=length(f1);
```

```
for l=1:l;
```

```
    h(f>f1(l) & f<f2(l))=0;
```

```
end
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Qds %%%%%%%%%%
```

```
fftsizeIFDS = fftsize/2; % data size to derive Qds
```

```
dfreqIFDS = 4000/fftsizeIFDS;
```

```
CntIfdsFreqMin = 1;
```

```
CntIfdsFreqMax = floor(30/dfreqIFDS);
```

```
Qds_SR = pol*mean(abs(ifds(2:CntIfdsFreqMax)))/1e3;
```

```
Qds_Ip = pol*abs(ifds(2))/1e3;
```

```
Qds_Ip2=pol*abs(mean(ifds(1:9)))/1e3;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% peak amp %%%%%%%%%%
```

```
hphi=sqrt(hewt.^2+hnst.^2);
```

```
Qds_Im=Qds_Ip;
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
% figure('visible','off');
```

```
% plot(x, y, 'b+')
```

```
% plot(xx, yyy, 'b+')
```

```
% hold on
```

```
% XXX = polyfit(x, y, 1);
```

```
% YYY = polyval(XXX, x);
```

```
% plot(x, YYY)
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%CREATE FIGURE%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%         graph=figure('visible','off');
%         figure(nnnn(k))

set(gcf,'PaperType','A5','PaperOrientation','landscape','PaperPositionMode','auto','defaultAxesFontName','Times New Roman','Position',[1 1 1200 900]);

        [hour, minute, second, msec] = ms2ut(Elftime(fff));

subplot(3,3,1);
plot(elftime(ind-250:ind+250), ez(ind-250:ind+250));
xtime(elftime(ind-250:ind+250));
%   ylabel('E_z [V/m]','FontName','Times New Roman','fontsize',20);
ylabel('E_z [V/m]','FontName','Times New Roman');
grid on

subplot(3,3,4);
plot(elftime(ind-250:ind+250), hns(ind-250:ind+250).*10^6);
xtime(elftime(ind-250:ind+250));
%   ylabel('H_N_S [¥muA/m]','FontName','Times New Roman','fontsize',20);
ylabel('H_N_S [¥muA/m]','FontName','Times New Roman');
grid on

subplot(3,3,7);
plot(elftime(ind-250:ind+250), hew(ind-250:ind+250).*10^6);
xtime(elftime(ind-250:ind+250));
%   ylabel('H_E_W [¥muA/m]','FontName','Times New Roman','fontsize',20);
%   xlabel('time [UT]','FontName','Times New Roman','fontsize',20);
ylabel('H_E_W [¥muA/m]','FontName','Times New Roman');
xlabel('time [UT]','FontName','Times New Roman');

grid on

X1=hew(ind-10:ind+10).*10^6;
Y1=hns(ind-10:ind+10).*10^6;

subplot(2,3,2);
maxscale=max(max(abs(X1))*1.5,max(abs(Y1))*1.5);
% Find x values for plotting the fit based on xlim

```

```

xplot1 = linspace(-maxscale, maxscale);
% 多項式 (次数 = 1) に対する係数を検出
fitResults1 = polyfit(X1, Y1, 1);
yplot1 = polyval(fitResults1, xplot1);
yplot2=-(xplot1/fitResults1(1));
thetah=decround((-atand(fitResults1(1))), 3);
plot(xplot1, yplot1, 'k');
hold on;
plot(xplot1, yplot2, 'k', 'LineWidth', 2);
plot(X1, Y1, 'b');
axis([-maxscale maxscale -maxscale maxscale]);
axis square;
% 作成 xlabel
xlabel('H_E_W [ $\mu$ A/m]', 'FontName', 'Times New Roman');
ylabel('H_N_S [ $\mu$ A/m]', 'FontName', 'Times New Roman');
grid on
annotation('textbox', [0.3 0.11 0.25
0.2], 'String', {'JLDN', ['Date ', num2str(yy), '/', num2str(mm, '%02d'), '/', num2str(dd, '%02d')]
, ...
['Time ', num2str(th, '%02d'), ':', num2str(tm, '%02d'), ':', num2str(ts, '%02d'), ':', num2str(tns, '%d')]}, ...
[' $\theta$  [deg]', num2str(a21)], ['I_p [kA]', num2str(Ip)], ['Distance
[km]', num2str(rad/1000)]}, 'FitBoxToText', 'off', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', '
Times New Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 12);
% %
annotation('textbox', [0.73 0.11 0.25
0.2], 'String', {num2str(thetah), num2str(abs(Qds_Ex)), num2str(hpa)},
'FitBoxToText', 'on', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New
Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 14);
annotation('textbox', [0.62 0.11 0.25 0.2], 'String', {' $\theta$ 
[deg]', num2str(thetah)}, ['Qds-Ex [Ckm]', num2str(pol*abs(Qds_Ex))], ['H_p_e_a_k
 $\mu$ A/m]', num2str(hpa)], ...
['ELF transient
time ', num2str(hour, '%02d'), ':', num2str(minute, '%02d'), ':', num2str(second, '%02d'), ':', num
2str(msec*10^6, '%d')]}, ...
'FitBoxToText', 'off', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New
Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 12);
% %
annotation('textbox', [0.73 0.11 0.25
0.2], 'String', {num2str(thetah), num2str(abs(Qds_Ex)), num2str(hpa)},

```

```

FitBoxToText', 'on', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New
Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 14);

%     saveas(gcf, [dir_res, num2str(yy), num2str(mm, '%02d'), num2str(dd, '%02d'), ' -
', num2str(th, '%02d'), num2str(tm, '%02d'), num2str(floor(ts), '%02d')] , 'png')
%     %     close(gcf)
%         close(1)
%         close(2)

        group_velocity = rad/(Elftime(fff)/1000 - eventtime/1000);
        ratio = group_velocity/(3*10^8);

%     close all
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
        %番号, 年, 月, 日, 時, 分, 秒, ミリ秒, Qds_Ex, Qds_Im, H peak
        %amplitude, 方位角(JLDn), 方位角(リサーチ), 落雷の緯度, 落雷の経度, 母子里からの
距離, 落雷発生時刻, トランジェントの時間, 群速度, 比率

Q_dsds=[nnnn(k), yy, mm, dd, th, tm, ts, tms, pol*abs(Qds_Ex), pol*abs(Qds_Im), Ip, hpa, a21, thetah, sl
at, slon, rad, eventtime, Elftime(fff), group_velocity, ratio, L_index];
%     name=[num2str(yy), num2str(mm, '%02d'), num2str(dd, '%02d'), ' -
', num2str(th, '%02d'), num2str(tm, '%02d'), num2str(ts, '%02d'), ' - ', num2str(tns, '%d')]
        Q_ds = [Q_ds;Q_dsds];
        tau1(k) = tau';

        lon=-180:180;
        lat=atan(tan(60*pi/180)*cos((lon-30)*pi/180))*180/pi;

        figure(2147483646)
        [rad, B, a21]=m_idist(142.2, 44.2, slon, slat, 'wgs84'); %母子里の座標
        Mlat = [slat;44.2];
        Mlon = [slon;142.2];
        [Mlon, Mlat, a211] = m_fdist(142.2, 44.2, thetah+180, rad, 'wgs84');
        MMMlat = [Mlat;44.2];
        MMMlon = [Mlon;142.2];
        hold on
%         subplot(2, 3, 3);
        m_proj('miller', 'lon', [126 150], 'lat', [30 46]);

```

```

m_coast('patch', [ .7 1 .7], 'edgecolor', [0 .6 0]);
m_coast('Linewidth', 2, 'Color', 'g');

m_grid('linestyle', 'none', 'box', 'fancy', 'tickdir', 'out', 'Fontname', 'Times new
roman', 'fontsize', 30);
    m_line(Mlon, Mlat, 'color', 'r');
    m_line(MMMlon, MMMlat, 'color', 'b');
    hold on
    m_plot(slon, slat, '.', 'color', 'r', 'markersize', 10);
    m_plot(MMlon, MMlat, '.', 'color', 'b');
    m_plot(142.2, 44.2, '.', 'color', 'r');
    hold on
%       xlabel('Longitude [°]', 'FontName', 'Times New Roman', 'fontsize', 12);
%       ylabel('Latitude [°]', 'FontName', 'Times New Roman', 'fontsize', 12);
    annotation('textbox', [0.3 0.11 0.25
0.2], 'String', {'JLDN', ['Date ', num2str(yy), '/', num2str(mm, '%02d'), '/', num2str(dd, '%02d')]
, ...
['Time ', num2str(th, '%02d'), ':', num2str(tm, '%02d'), ':', num2str(ts, '%02d'), ':', num2str(tns
, '%d')], ...
        ['θ [°]', num2str(a21)], ['Ip [kA]', num2str(Ip)], ['Distance
[km]', num2str(rad/1000)]}, 'FitBoxToText', 'off', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', '
Times New Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 12);
% %       annotation('textbox', [0.73 0.11 0.25
0.2], 'String', {num2str(thetah), num2str(abs(Qds_Ex)), num2str(hpa)},
'FitBoxToText', 'on', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New
Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 14);
    annotation('textbox', [0.62 0.11 0.25 0.2], 'String', {'θ
[°]', num2str(thetah)}, ['Qds-Ex [Ckm]', num2str(pol*abs(Qds_Ex))], ['Hpeak
[μA/m]', num2str(hpa)], ...
        ['ELF transient
time ', num2str(hour, '%02d'), ':', num2str(minute, '%02d'), ':', num2str(second, '%02d'), ':', num
2str(msec*106, '%d')], ...
        'FitBoxToText', 'off', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New
Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 12);
% %       annotation('textbox', [0.73 0.11 0.25
0.2], 'String', {num2str(thetah), num2str(abs(Qds_Ex)), num2str(hpa)},
'FitBoxToText', 'on', 'HorizontalAlignment', 'right', 'FontName', 'Times New

```

```

Roman', 'LineStyle', 'none', 'FontSize', 14);
%
%         dir_res =
[' F:¥Qds¥2007¥', num2str(JLDN(end, 1)), '_ ', num2str(JLDN(end, 2), '%02d'), '_ ', num2str(JLDN(end,
3), '%02d'), ' ¥'];
%         saveas(gcf, [dir_res, name], 'png');
%         print([dir_res, graph, '-dpng', name]) % ハンドルhのfigureをtiff形式でファイル保存
%         clf
%         close all
%
%         else
%         end
%         close all
%
%         else
%         end
%         close all
%         catch
%         end
%         close all
%         end
%
%
save([dir_res , num2str(JLDN(end, 1)), num2str(JLDN(end, 2), '%02d'), num2str(JLDN(end, 3), '%02d'
), '.mat'], 'ALL', 'Q_ds')
        clearvars -except data_dir AA dir_folder
end

```

# 目次

図 1.1 落雷被害の内訳 [Takebayashi, 2004] .....	4
図 1.2 スプライトの光学観測例 .....	4
図 2.1 正極性雷及び負極性雷 .....	6
図 2.2 大地-電離層導波管 .....	7
図 2.3 ELF 帯トランジェント波形の一例 .....	9
図 2.4 球面三角形 .....	9
図 3.1 ELF 帯観測システム概略図 .....	11
図 3.2 電界観測システム概略図 .....	12
図 3.3 磁界観測システム概略図 .....	12
図 3.4 ログスキーコイル .....	14
図 3.5 気象庁レーダー配置図 .....	15
図 4.1 指数関数的電流近似法の一例 .....	19
図 4.2 水平磁界 2 成分の時系列波形 .....	20
図 4.3 リサージュ図形 .....	20
図 5.1 解析例(2007 年 1 月 6 日 15:00:39 [UT]) .....	22
図 5.2 月変化(2007 年) .....	23
図 5.3 落雷頻度分布 .....	24
図 5.4 落雷頻度分布(>500 Ckm) .....	25
図 5.5 落雷頻度分布(>50 kA) .....	26
図 5.6 落雷頻度分布(夏季) .....	27
図 5.7 落雷頻度分布(夏季 >500 Ckm) .....	28
図 5.8 落雷頻度分布(夏季 >50 kA) .....	28
図 5.9 落雷頻度分布(冬季) .....	29
図 5.10 落雷頻度分布(冬季 >500 Ckm) .....	30
図 5.11 落雷頻度分布(冬季 >50 kA) .....	30
図 5.12 累積確率密度分布(夏季 $Qds$ ) .....	31
図 5.13 累積確率密度分布(冬季 $Qds$ ) .....	32
図 5.14 累積確率密度分布(夏季 $I_p$ ) .....	33
図 5.15 累積確率密度分布(冬季 $I_p$ ) .....	33



## 表目次

表 3.1 データ諸元(落雷特性マップ).....	16
表 3.2 データ諸元(電荷モーメント推定精度の検証).....	16