

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	阿部 利之	学籍番号	1331003
論 文 題 目	人工衛星による ELF/VLF 帯電波観測を用いた全球雷の空間分布および電気的特性に関する研究		
<p>要 旨</p> <p>我々の研究グループでは低高度人工衛星 DEMETER で観測された雷起源のホイスラ波動の長期解析により、電離層透過係数を考慮した、雷放電源位置の世界分布を導出している。</p> <p>先行研究では、より統計的な解析を行うため、衛星の観測エリアをグリッドで区切り、6年分の落雷数および落雷電磁波強度の分布図の導出を行った。その結果、三大落雷領域を中心に活発な雷活動領域を確認できたが、領域ごとのより詳細な電気的特性を導出するために、発生頻度の導出や電磁波強度の領域での比較、地上観測データとの対応を見る必要があると考えた。</p> <p>そこで本研究は人工衛星による電磁波動観測を用いた雷活動の発生頻度および電気的特性の導出を目的としている。一般に、ELF 帯、VLF 帯による観測ではそれぞれ電荷モーメント、ピーク電流の高い雷が観測できる。したがって緯度 3° \times 経度 3° の領域における世界の落雷発生頻度、電磁波強度の 2 つの周波数帯における季節変化を観測した。さらに、北米、カリブ海、アフリカ、ヨーロッパ、アジア、オーストラリア、東南アジアの領域における落雷電磁波強度を導出、その中で電磁波強度の大きい領域を比較し、どの領域において落雷の電磁エネルギーが卓越しているか調べた。また、地上で観測されたスプライトと呼ばれる中間圏発光現象と衛星観測で得られたこれらのスプライトを発生させた雷起源のホイスラを照合し、スプライトを伴う雷の電磁波強度を調べた。</p> <p>解析の結果、電荷モーメントの大きい雷は主に内陸部、ピーク電流の大きい雷は沿岸部を中心に卓越して発生していることが分かり、スプライトは ELF 帯において非常に大きな電磁波強度を持つ、つまり電荷モーメントの大きな雷に伴って発生するという事が分かった。</p>			

平成 26 年度 修士論文

人工衛星による ELF/VLF 帯電波観測
を用いた全球雷の空間分布および
電気的特性に関する研究

学籍番号 1331003

氏名 阿部 利之

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

我々の研究グループでは低高度人工衛星 DEMETER で観測された雷起源のホイスラ波動の長期解析により、電離層透過係数を考慮した、雷放電源位置の世界分布を導出している。

先行研究では、より統計的な解析を行うため、衛星の観測エリアをグリッドで区切り、6年分の落雷数および落雷電磁波強度の分布図の導出を行った。その結果、三大落雷領域を中心に活発な雷活動領域を確認できたが、領域ごとのより詳細な電気的特性を導出するために、発生頻度の導出や電磁波強度の領域での比較、地上観測データとの対応を見る必要があると考えた。

そこで本研究は人工衛星による電磁波動観測を用いた雷活動の発生頻度および電気的特性の導出を目的としている。一般に、ELF 帯、VLF 帯による観測ではそれぞれ電荷モーメント、ピーク電流の高い雷が観測できる。したがって緯度 3° \times 経度 3° の領域における世界の落雷発生頻度、電磁波強度の 2 つの周波数帯における季節変化を観測した。さらに、北米、カリブ海、アフリカ、ヨーロッパ、アジア、オーストラリア、東南アジアの領域における落雷電磁波強度を導出、その中で電磁波強度の大きい領域を比較し、どの領域で落雷が活発であるか調べた。また、地上で観測されたスプライトと呼ばれる中間圏発光現象と衛星観測で得られたこれらのスプライトを発生させた雷起源のホイスラを照合し、スプライトを伴う雷の電磁波強度を調べた。

解析の結果、電荷モーメントの大きい雷は内陸部、ピーク電流の大きい雷は沿岸部を中心に卓越して発生していることが分かり、スプライトは ELF 帯において非常に大きな電磁波強度を持つ、つまり電荷モーメントの大きな雷に伴って発生するという事が分かった。

なお、本研究は気象情報との関連性から異常気象との対応、太陽活動などの宇宙天気との対応、将来的には宇宙からの高精度な雷観測により、雷、火山活動などの自然災害の警報および減災への貢献も目指している。

目次

第1章 序論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.1.1 地上における雷観測.....	3
1.1.2 衛星における雷観測.....	4
1.1.3 世界落雷強度分布の導出.....	5
1.1.4 TLE を伴う雷について.....	6
1.2 目的・意義.....	8
第2章 基本理論.....	9
2.1 電離層.....	9
2.2 ホイ斯拉波.....	10
第3章 地上および衛星観測.....	11
3.1 地上観測.....	11
3.1.1 ELF トランジェント観測.....	11
3.2 衛星観測.....	12
3.2.1 DEMETER 衛星.....	12
第4章 解析方法.....	15
4.1 先行研究データ.....	15
4.2 世界分布図の導出.....	15
4.2.1 落雷の発生頻度.....	15
4.2.2 落雷電磁波強度.....	15
4.3 落雷の活発な領域の調査.....	16
4.4 落雷電磁波強度比（VLF 帯/ELF 帯）の季節変化.....	16
4.5 スプライトを伴う雷の電气的特性.....	16
第5章 解析結果.....	17
5.1 世界分布図.....	17
5.1.1 落雷の発生頻度.....	17
5.1.2 落雷電磁波強度.....	19
5.2 落雷の活発な領域の調査.....	23
5.2.1 ELF 帯.....	23
5.2.2 VLF 帯.....	26

5.3 落雷電磁波強度比 (VLF 帯/ELF 帯) の季節変化.....	29
5.4 スプライトを伴う雷の電気的特性.....	30
5.4.1 スプライトと衛星データとの照合結果.....	30
5.4.2 スプライトを伴う雷の電磁波強度.....	34
 第 6 章 考察.....	 36
 第 7 章 まとめ.....	 38
 第 8 章 今後の展望.....	 39
 謝辞	
 参考文献	
 発表実績	
 付録	

第 1 章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 地上における雷観測

地球上で落雷が発生すると電磁波動が生じ、大地－電離層間を導波管伝搬する。この電磁波を地上観測所で観測することにより電荷モーメントやピーク電流、落雷の極性といった電氣的パラメータの導出が行われている。全世界にわたる観測ネットワークにより全球にわたる雷の同時観測が可能であるものの、地震などの災害による影響を受けやすい、落雷地点から最短の観測所までの距離による減衰が発生するため雷の検出感度が一定でない、広域での観測がほぼ不可能である。

図 1.1 は地上の 1 点の観測所における ELF 帯トランジェント観測から落雷位置の標定を行ったものである。位置のみでなく落雷の電荷モーメント及び落雷極性が導出される。

図 1.2 は WWLLN (World Wide Lightning Location Network: 世界落雷位置標定ネットワーク) と呼ばれる複数の観測所ネットワークによる VLF 帯の雷起源電磁放射の観測により落雷位置及び発生時間の標定を行ったものである。

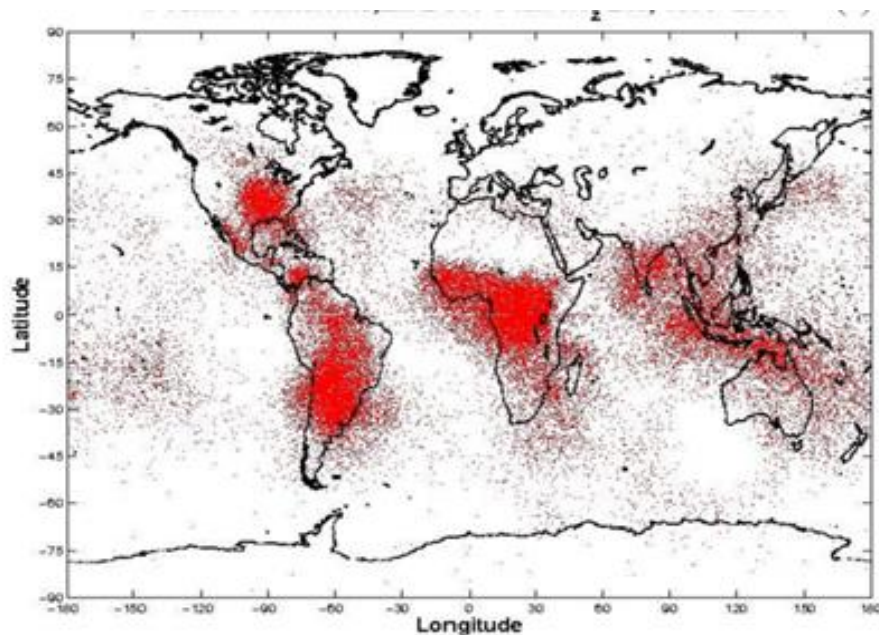


図 1.1 : ELF 帯電磁波観測による落雷位置標定 (Hobara et al., 2006)

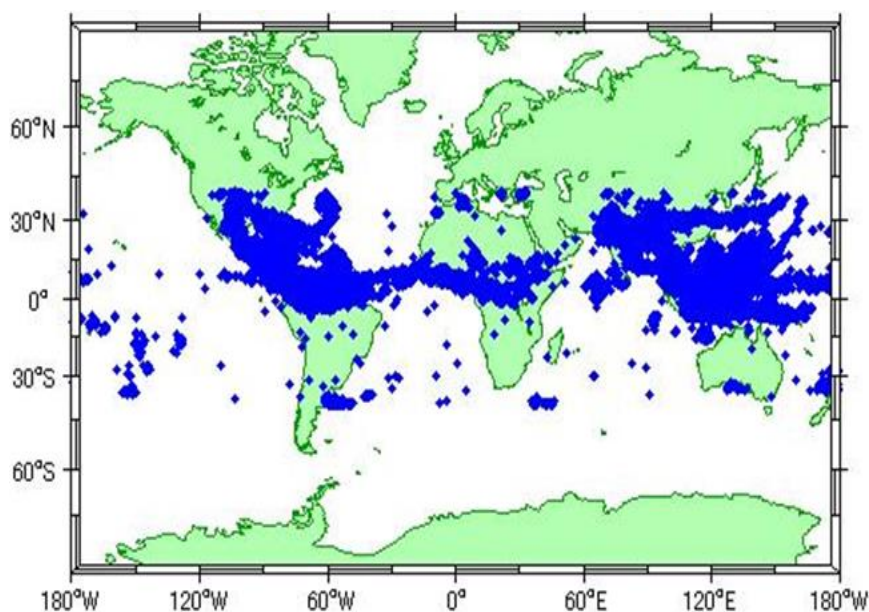


図 1.2 : VLF 帯電磁波観測による落雷位置標定 (WWLLN)

1.1.2 衛星における雷観測

現在雷活動の衛星による観測が行われており、光学観測による雷放電数の分布図の導出がなされている。地上観測とは異なり、GPS 衛星のように編隊飛行する衛星でない限り全球にわたる雷の同時観測は不可能であるものの、地震などの災害による影響を受けにくい、磁気緯度依存性を考慮することにより一定の検出感度が得られる、広帯域の観測が可能であるなど長所が多く、雷放電の観測には有効な手段であると考えられる。図 1.3 は OTD (Optical Transient Detector) 衛星によって 1999 年に観測された雷放電数分布である。三大落雷領域とされるアメリカ・アフリカ・アジアなどで落雷数が多いことが分かる。

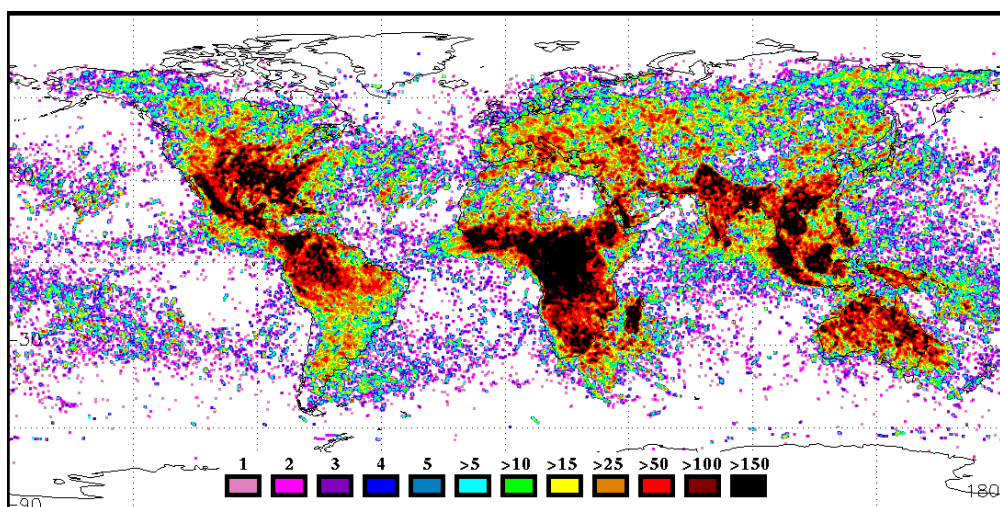


図 1.3 : OTD 衛星による 1999 年の雷放電数 (平均) 分布

1.1.3 世界落雷強度分布の導出

前節にも述べた通り、衛星による雷観測が有効であると考え、我々の研究グループでは低高度人工衛星 DEMETER を用いた雷放電観測を行っている。衛星によって雷を観測するには、落雷によって発生するホイスラ波と呼ばれる電離層を透過する電磁波を観測するが、電離層を透過する際に減衰が起きてしまうため、そのままの観測結果では正確な落雷の電磁波強度を得ることができない。そこで電離層透過係数、すなわち電離層による減衰率を実験的および理論的に導出し、これを衛星の観測結果に適用することにより正確な強度を算出した。この結果と、地上観測ネットワークによって推定された落雷位置と照合することにより世界における落雷電磁波強度分布図を導出し、6年間の観測データをまとめる事により統計的な分布図を導出した。例として夜間の分布図を以下に示す。

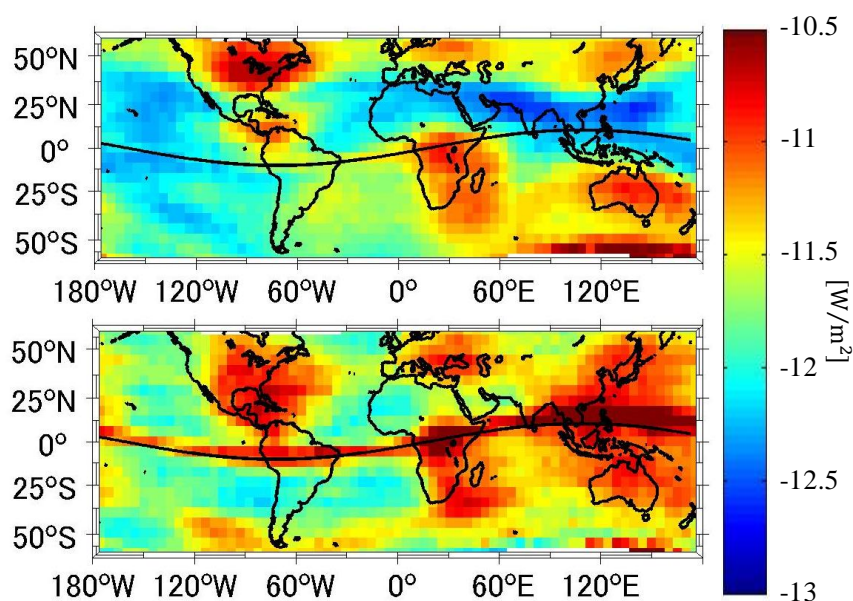


図 1.4 : 6 年間の落雷電磁波強度分布 (上: ELF 帯、下: VLF 帯)

図 は横軸が経度、縦軸が緯度、波線は磁気赤道であり、色が赤いほど落雷電磁波強度が強いことを表している。このように解析を行った結果、世界三大落雷領域と呼ばれるアメリカ、アフリカ、アジアにおいて活発な雷活動を確認し、6年間にわたる観測データにより雷活動領域の空間的な移動を観測することができたが、VLF 帯において磁気赤道に沿うように強度が大きいなどの問題があり、結果の信頼性に問題があった他、より詳細な領域ごとの電気的特性の導出が必要であった。そこで本研究では領域ごとの電気的特性を調べるために、世界雷の発生頻度の導出や電磁波強度の比較、地上観測によって得られたデータとの対応を見る必要があると考えた。

1.1.4 TLE を伴う雷について

落雷発生時に雷雲上空にて様々な発光現象が確認されており、このような現象を **TLE** (中間圏発光現象) という。**TLE** は落雷に付随して発生すると考えられており、その中でもスプライトは電荷モーメントの大きな雷に伴って発生すると考えられている。図 1.5 は先行研究においてアメリカのニューメキシコ州で 2005 年 7 月 28 日に観測されたスプライトの写真である。また、図 1.6 はこのスプライトの発生時刻付近において **DEMETER** 衛星によって観測された電磁界スペクトルであり、どちらの図からも同時刻に雷起源のホイッスラ波が観測されているのが分かる。このような雷イベントとスプライト発生との関係が注目されており、現在解析が行われている。

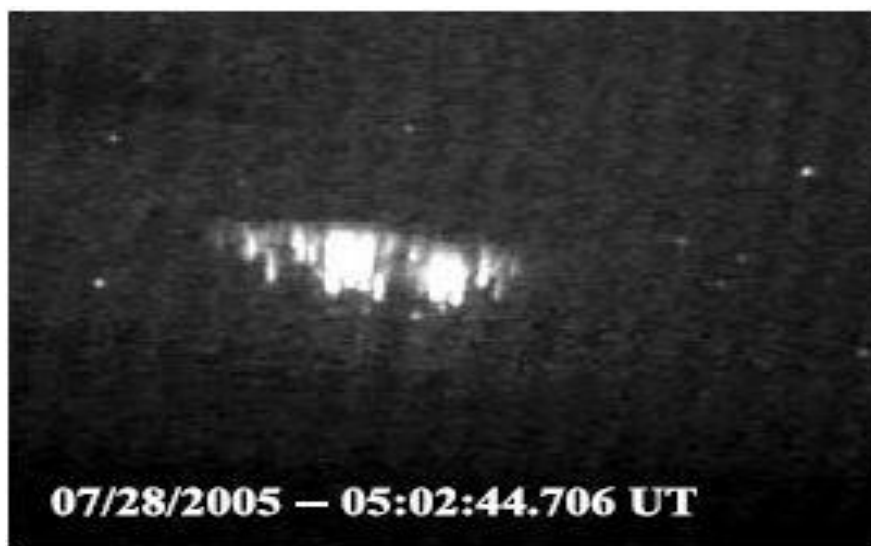


図 1.5 アメリカで観測されたスプライト
(2005 年 7 月 28 日 5 時 2 分 44 秒 706 UT) [Lefeuve et al., 2009]

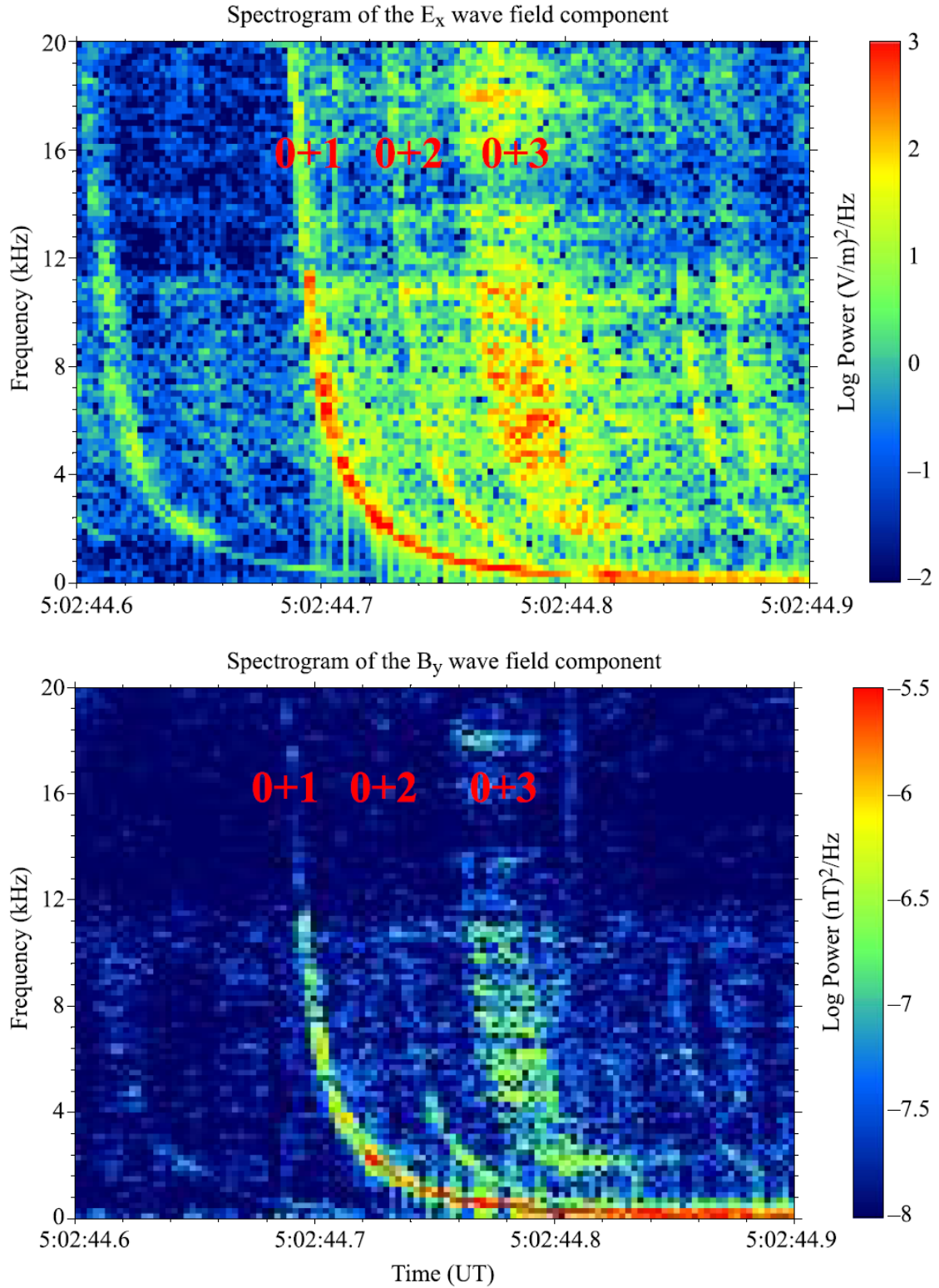


図 1.6: スプライトが観測された時刻における電磁界スペクトル[Lefeuvre et al., 2009]

1.2 目的・意義

本研究は低高度人工衛星 **DEMETER** による電磁波動観測を用いた世界雷放電特性を導出することを目的としている。一般に **ELF** 帯、**VLF** 帯における観測ではそれぞれ雷の電荷モーメント、ピーク電流を観測することができる。そこで緯度 3° \times 経度 3° の領域の領域における世界雷の発生頻度および電磁波強度分布図の 2 つの周波数帯における季節変化を導出した。また、アメリカ、アフリカ、ヨーロッパ、アジア、オーストラリア、東南アジアで比較を行い、それぞれの周波数帯や季節において最も活発な領域を調べた。さらに **DEMETER** の観測データと、アメリカのニューメキシコ州での地上観測で得られた 2 つのスプライトのデータとの照合を行い、スプライトを伴って発生した落雷の電磁波強度を調べ、世界雷との比較を行った。

なお本研究は、気象情報との関連性から異常気象との対応、太陽活動などの宇宙天気との対応、将来的には宇宙からの高精度な雷観測により、雷、火山活動などの自然災害の警報および減災に役立てることができると考えている。

第 2 章 基本理論

2.1 電離層

電離層とは地球大気圏が太陽の光エネルギーによって電子とイオンで電離した層のことであり、上空 70～1000 km にわたって分布している。図は電離層中の電子密度の変化を表している。

地球大気中に降り注ぐ地球外からのエネルギーのうち、ごく狭い波長域の可視光線のみが大気に吸収されずに地表に到達する。しかし波長 300 nm 以下の紫外線や X 線は大気中にて吸収され地表には到達せず、大気によるエネルギーの吸収の過程において、大気分子の解離や原子・分子の電離を引き起こす。この結果として成層圏付近にはオゾン層が、高度約 90 km 以上の領域には電離層が形成される。電離層は地表から放射された電波を屈折させ、条件によっては全反射させる。屈折の度合いは電波の波長と電離層の電子密度で決まり、ELF 帯、VLF 帯のような周波数の低い波は地表－電離層間を導波管伝搬し、地球の反対側まで伝搬する。

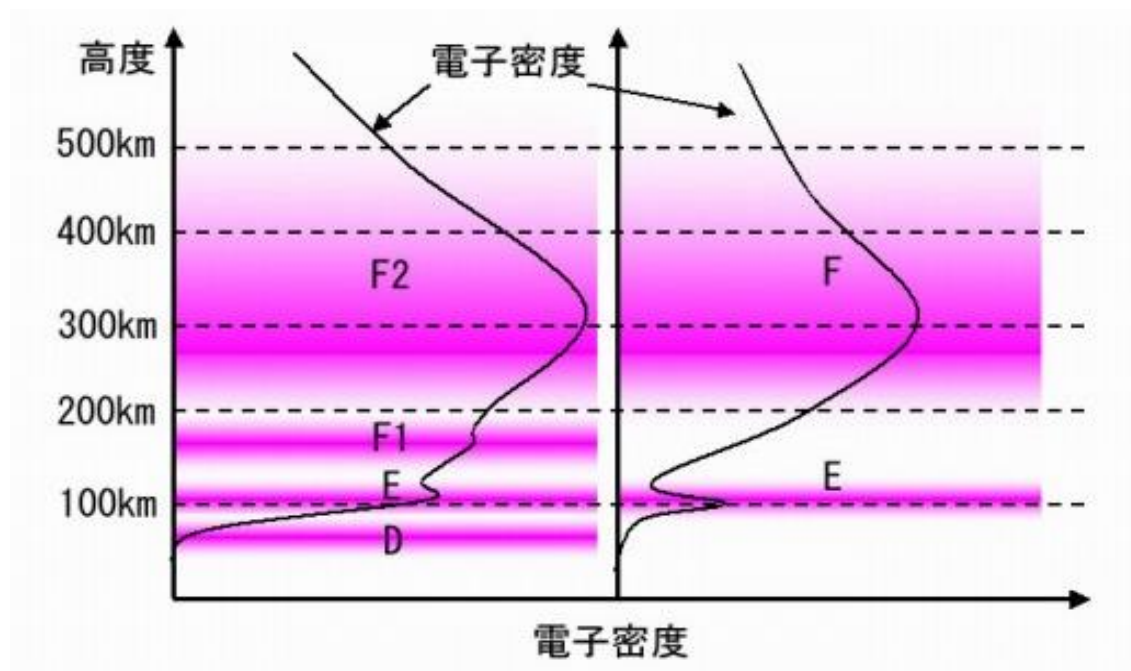


図 2.1：電離層における電子密度分布（左：昼間、右：夜間）

2.2 ホイスラ波

ホイスラ波は雷放電により生じた ELF 帯 (3 kHz 以下) と VLF 帯 (3~30 kHz) の周波数帯における電磁波が、空電源地点の磁力線に沿って磁気共役点 (空電源地点の反対半球側) まで伝搬する右回りの円偏波である。時間とともに周波数が減少する性質を持ち、これを音に変換すると口笛に似た音が発生する。

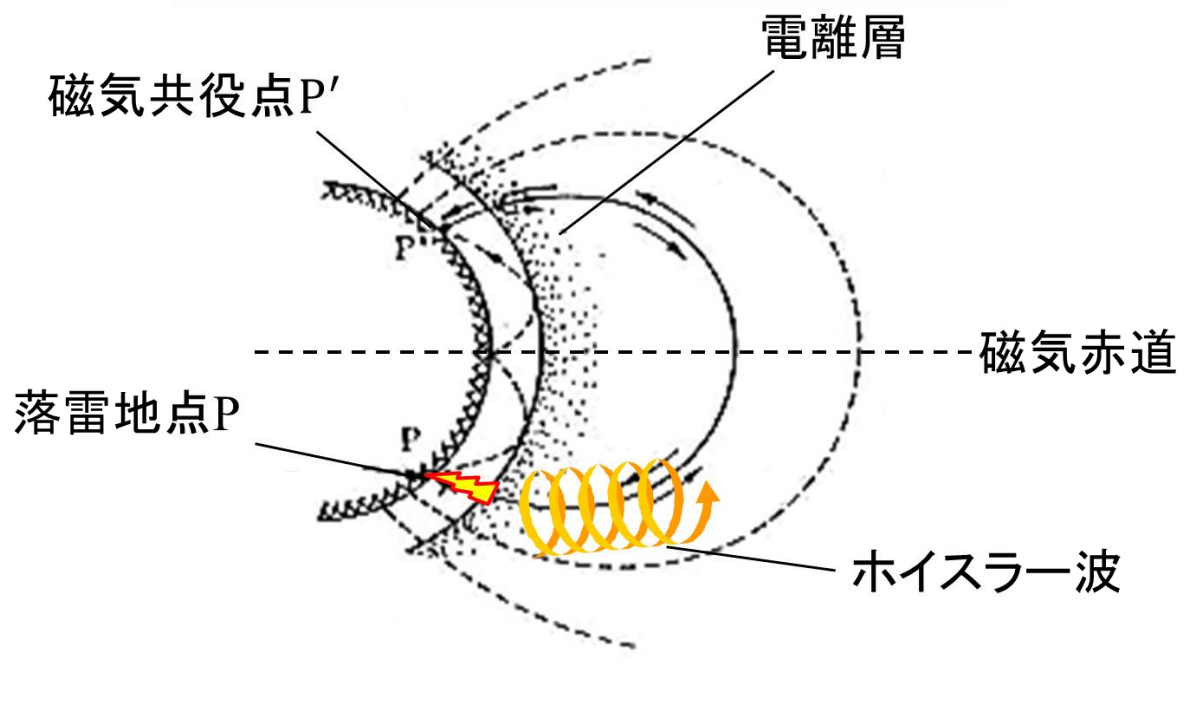


図 2.2: ホイスラ波の磁気圏内伝搬の様子

第 3 章 地上および衛星観測

3.1 地上観測

3.1.1 ELF トランジェント観測

電離層透過係数を実験的に導出するために本研究では北海道母子里観測所で観測された電磁放射の電磁界データを使用した。雷放電によって発生する **ELF** 帯の電磁波は大地－電離層間を導波管伝搬する。よって電磁波を観測するためには垂直成分の電界の水平成分の磁界を受信すれば良い。本研究では北海道母子里にて観測を行っている **ELF** 帯の電磁波データを解析に用いた。母子里観測所のデータ諸元を以下に示す。

表 3.1 母子里観測所データ諸元

観測地点	緯度	44.29°
	経度	142.21°
観測成分		垂直電界成分
		水平磁界東西成分
		水平磁界南北成分
サンプリング周波数		4000 Hz
観測周波数		0.1～1000 Hz

3.2 衛星観測

3.2.1 DEMETER 衛星

本研究において世界雷分布の導出に用いた低高度人工衛星 DEMETER 衛星は、フランス CNRS によって 2004 年 6 月 29 日に打ち上げられ、2010 年 12 月 9 日まで観測を行っていた。この衛星は約 665 km の高度で太陽同期軌道を周回し、地震電磁気および地球電磁環境観測を目的としている。



図 3.1 : DEMETER 衛星
(出典: Unofficial “DEMETER” website)

DEMETER 衛星の太陽同期軌道は、衛星の軌道面と太陽光線とのなす角が常に一定となるような軌道を通る。このような軌道を通る衛星から地球を見ると、地表に当たる太陽光線が常に一定の角度となっているため、同一条件下における地球の観測に適している。この衛星は1日に地球を15周し、経度24度ずつずれながら移動し、また昼と夜に地球上の同じ位置を1度ずつ通過する。

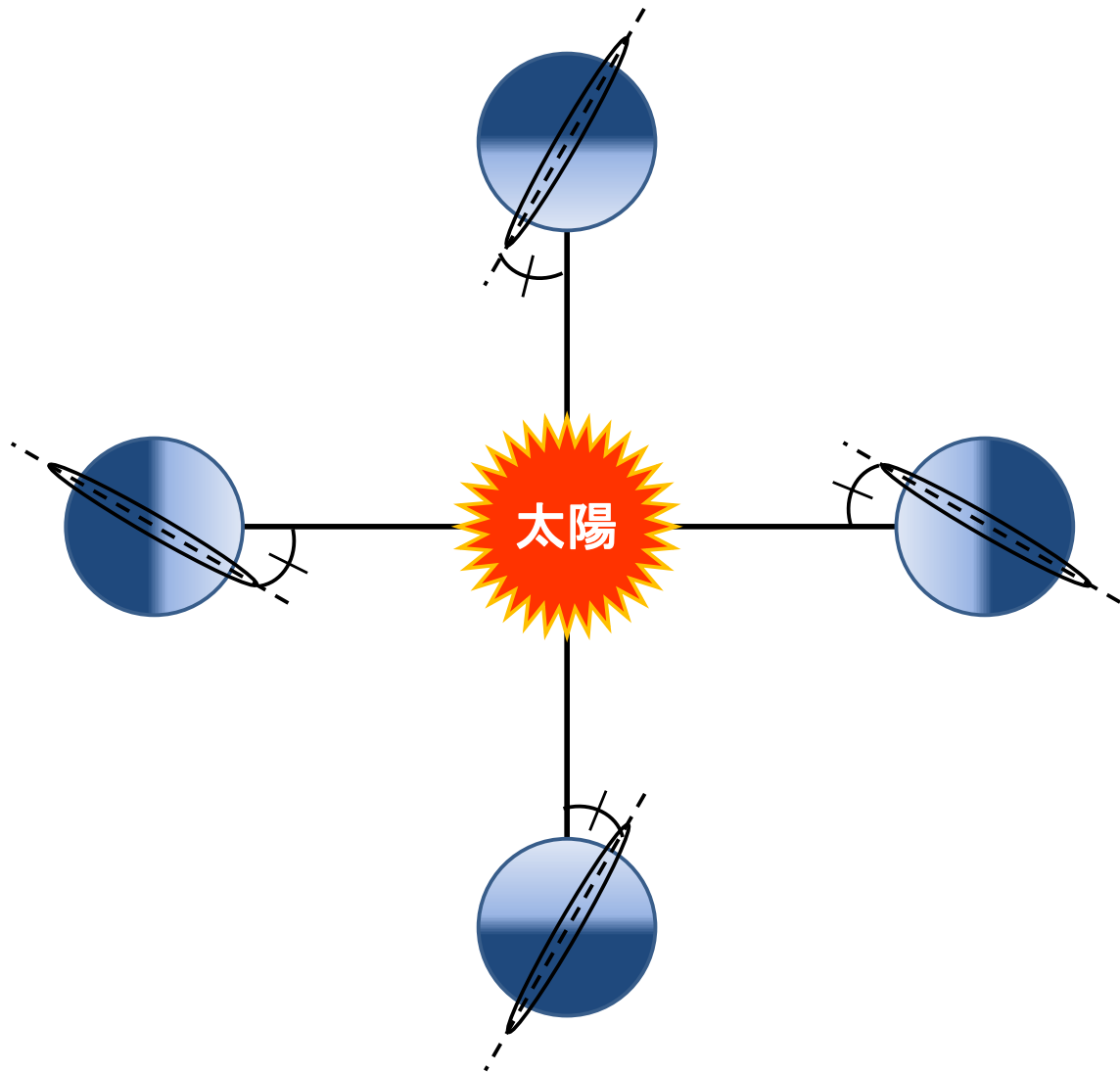


図 3.2：太陽同期軌道
(出典: Satellite types and their Orbit)

本研究に用いたデータを以下に示す。電磁界の観測には極域以外の全域における電磁界のパワースペクトルを観測するサーベイモードを用いており、この結果を用いて落雷数および落雷強度分布図を導出した。なお先行研究における電離層透過係数の導出には、大陸部の一部（地震活動が活発な地域）における電磁界の時系列データを観測するバーストモードを用いている。

表 3.2 : DEMETER 衛星データ諸元

観測モード	サーベイモード
観測成分	電界パワースペクトル 1 成分
	磁界パワースペクトル 1 成分
周波数分解能	20 Hz
観測エリア	北緯 60° ～南緯 60° 全域
本研究における用途	落雷数・落雷強度分布図の導出

第 4 章 解析方法

4.1 先行研究データ

本研究では、先行研究で導出されたデータを元に世界落雷数・強度平均分布図、月変化を導出した。解析に用いたデータを以下に示す。

表 4.1：解析に用いたデータ

種類	パラメータ
落雷地点	地理緯度・経度
	磁気緯度・経度
落雷日時 昼間:現地時間 10 時 夜間:現地時間 22 時	日付
	秒
電離層透過係数を考慮した 落雷強度	電界スペクトル
	磁界スペクトル
	電界×磁界によるポインティングベクトル

これらのデータが 2005 年 1 月～2010 年 12 月までひと月ごとにまとめられており、昼間および夜間、周波数が 100 Hz～19 kHz それぞれの場合についてのデータとなっている。本研究では、ELF 帯では 500 Hz、VLF 帯では 9 kHz のデータについて解析を行った。

4.2 世界分布図の導出

4.2.1 落雷の発生頻度

DEMETER 衛星の観測エリアである西経 180° ～東経 180°、北緯 60° ～南緯 60° の領域を 3° ×3° のグリッドで区切り、落雷発生地点の地理緯度・経度データから各グリッドに落雷データを分類することにより、各グリッド内のデータ数を落雷数とし、これをグリッド面積で割り、6 年分のデータの平均をとることにより落雷の発生頻度として導出した。

4.2.2 落雷電磁波強度

各グリッドに分類された落雷のポインティングベクトルを平均し、さらにこれを 6 年間のデータで合計して平均をとることにより落雷電磁波強度として導出した。

4.3 落雷の活発な領域の調査

それぞれの季節および周波数帯における分布図から、落雷電磁波強度が特に大きかった領域についてのヒストグラムを導出し、電磁波強度の大きなイベントの数を比較する事により、どの領域において雷放電からの電磁エネルギーが卓越しているか調べた。

4.4 落雷電磁波強度比（VLF 帯/ELF 帯）の季節変化

周波数帯による季節変化を比較するため、各グリッドの VLF 帯における電磁波強度を ELF 帯における電磁波強度で割り、電磁波強度比の分布図として季節変化を導出した。

4.5 スプライトを伴う雷の電気的特性

スプライトの発生時刻の±1 秒以内、かつスプライトの発生地点と衛星位置の緯度経度差が±20°以内で観測された雷データを、そのスプライトを伴う雷として考え、その雷の電磁波強度を調べた。以下の時刻および場所において観測されたスプライトを、衛星データとの照合に用いた。

表 4.2 照合に用いたスプライト

		アメリカ ニューメキシコ州	
発生年月日		2005 年 7 月 28 日	2005 年 8 月 3 日
発生時刻 (UT)		5 時 2 分 44 秒 706	4 時 20 分 22 秒 885
発生地点	緯度	27°86 N	32°10 N
	経度	250°06 E	247°45 E
衛星位置	緯度	34°98 N	12°59 N
	経度	253°40 E	266°97 E

第 5 章 解析結果

5.1 世界分布図

5.1.1 落雷の発生頻度

経度 $3^\circ \times$ 緯度 3° における領域で発生した落雷の発生頻度分布図の季節変化を以下に示す。この図を見ると分かるように、昼間では磁気赤道付近において発生頻度の異常な減少が見られたため、以後は夜間における結果のみ扱う。

図 5.2 を見ると、ELF 帯においては内陸部、VLF 帯においては沿岸部を中心に発生頻度が大きい事が分かる。

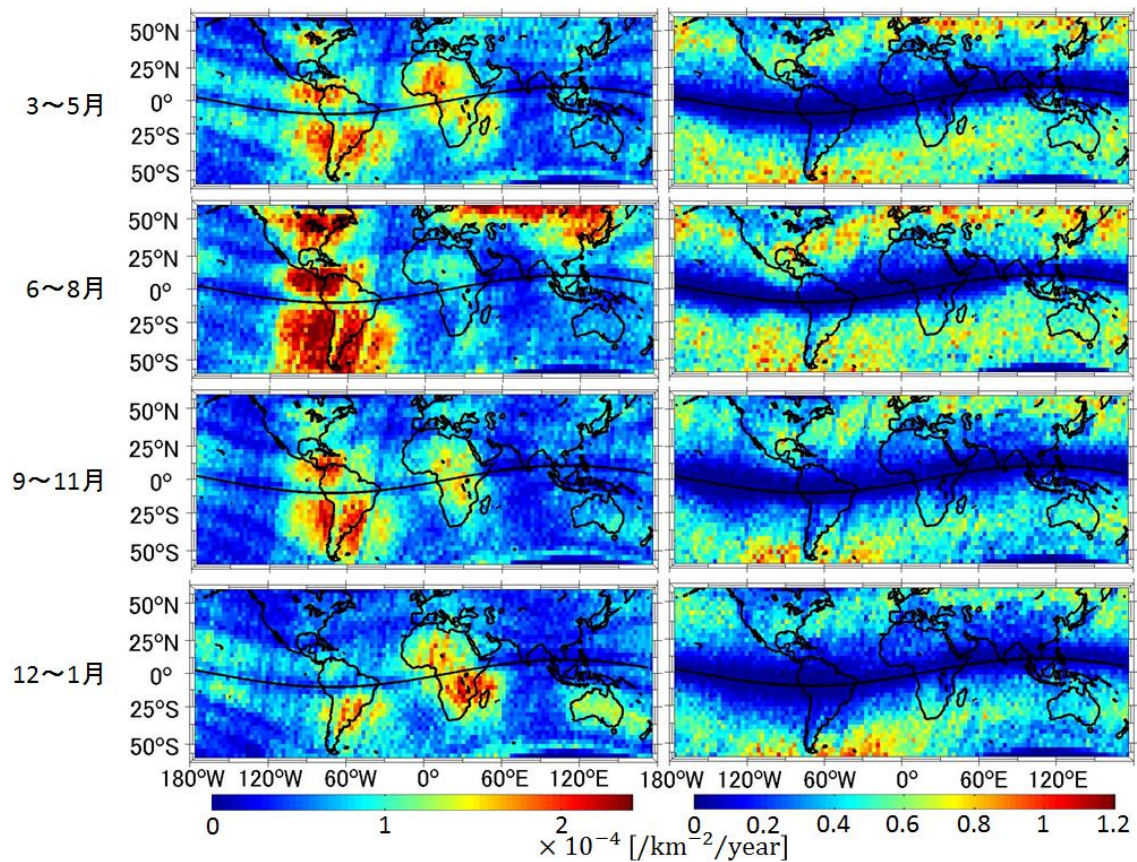


図 5.1：観測期間すべての昼間における落雷の発生頻度の季節変化（左:ELF 帯、右:VLF 帯）

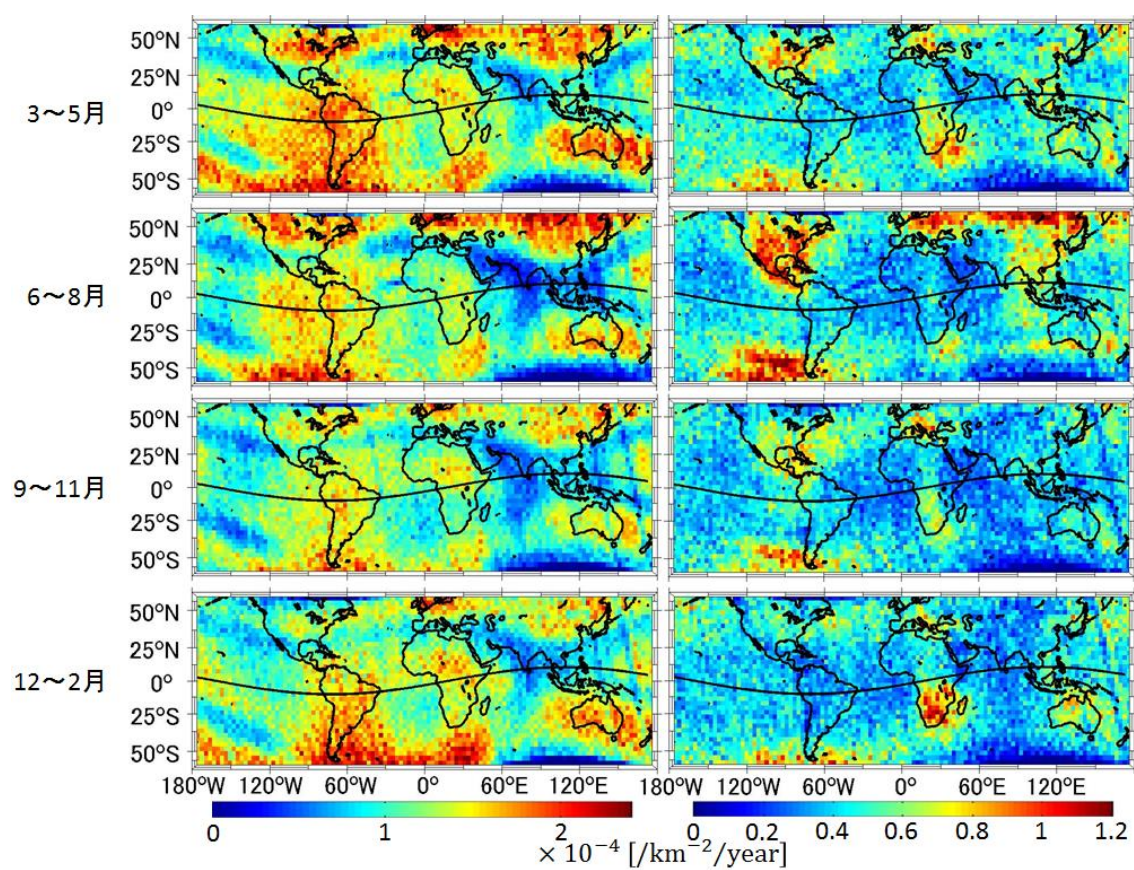


図 5.2：観測期間すべての夜間における落雷の発生頻度の季節変化（左:ELF 帯、右:VLF 帯）

5.1.2 落雷電磁波強度

落雷の発生頻度と同様に導出した落雷電磁波強度分布図の季節変化を以下に示す。電磁波強度の分布図でも昼間において磁気赤道付近において電磁波強度の異常な増加が見られたため、以後は夜間における結果のみ扱う。

図 5.4 を見ると、発生頻度の場合と同様に ELF 帯においては内陸部、VLF 帯においては沿岸部を中心に電磁波強度が大きい事が分かる。

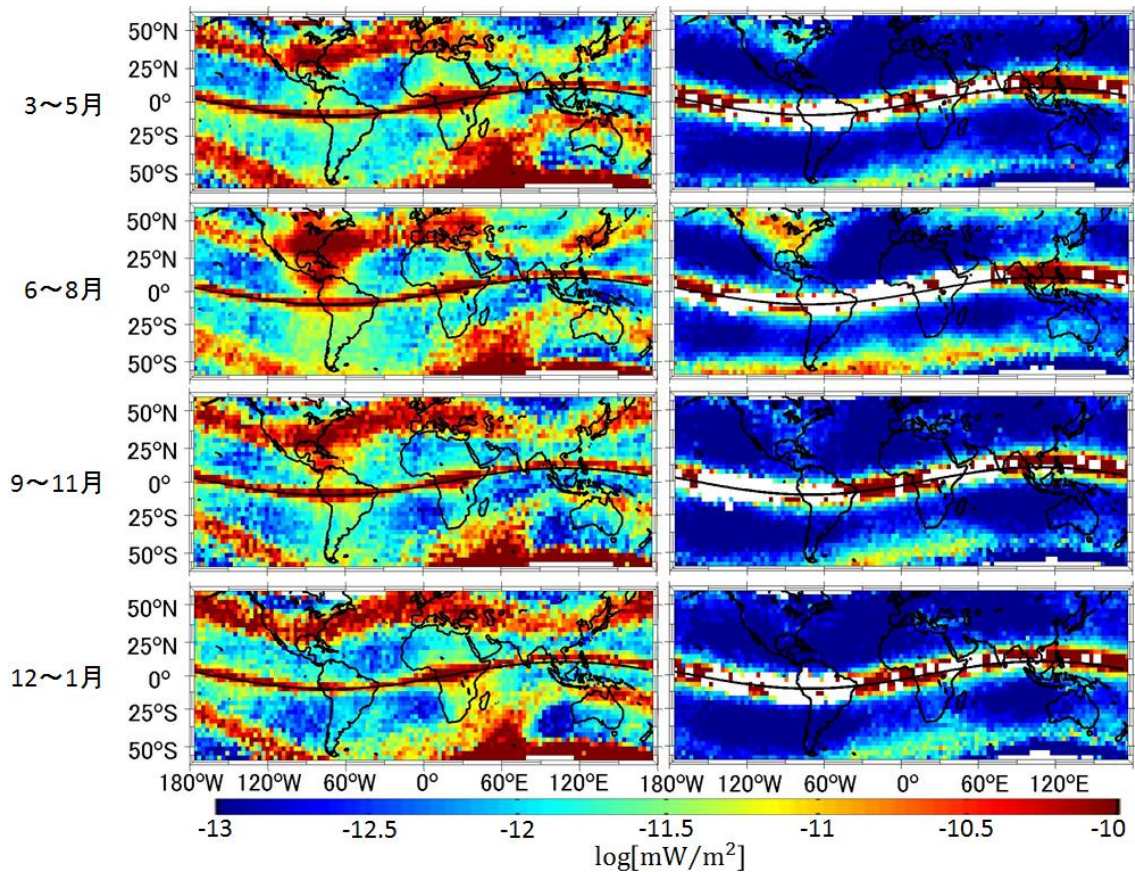


図 5.3：観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の季節変化 (ELF 帯)

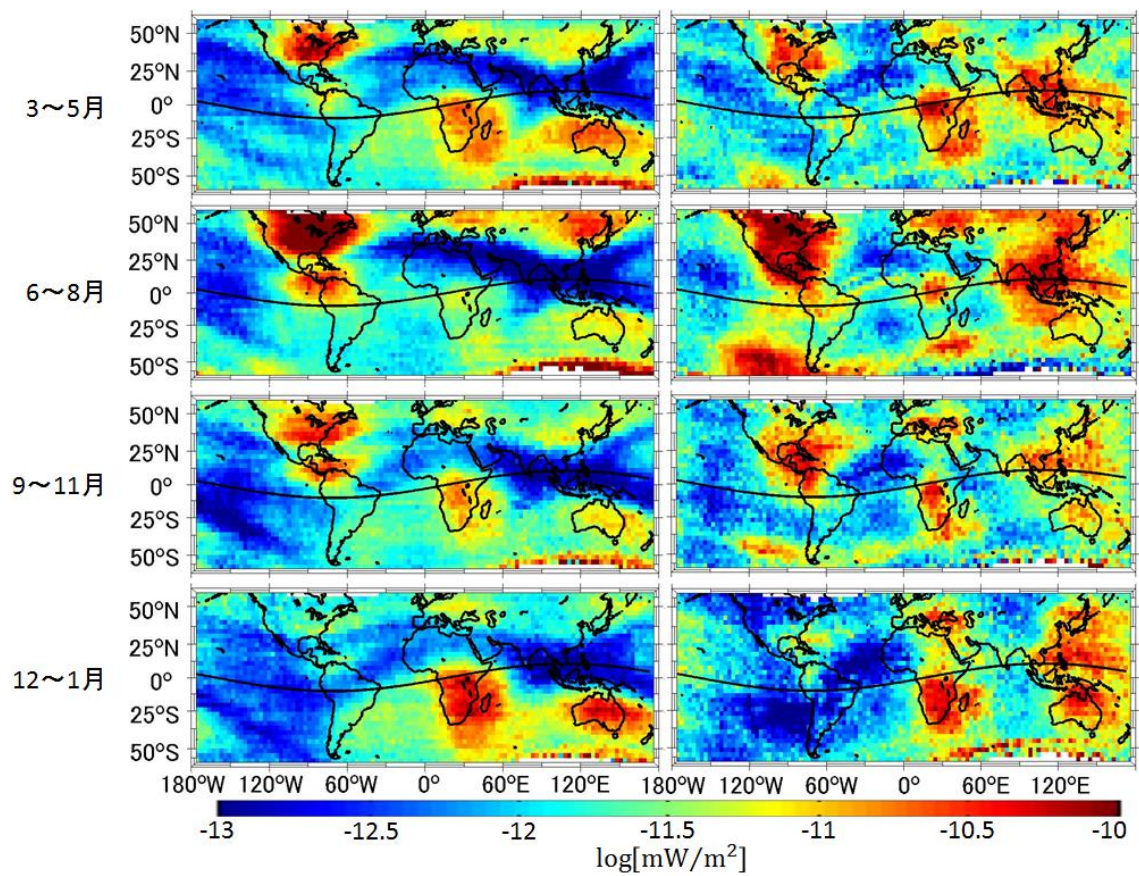


図 5.4：観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化（左:ELF 帯、右:VLF 帯）

次に、この分布図において特に電磁波強度が大きかった領域を比較するため、全球雷の中央値を超える強度のみを示した分布図を以下に示す。

以下の 2 つの図を見ると、前述の分布図よりも電磁波強度の大きな領域において比較がしやすくなっている。

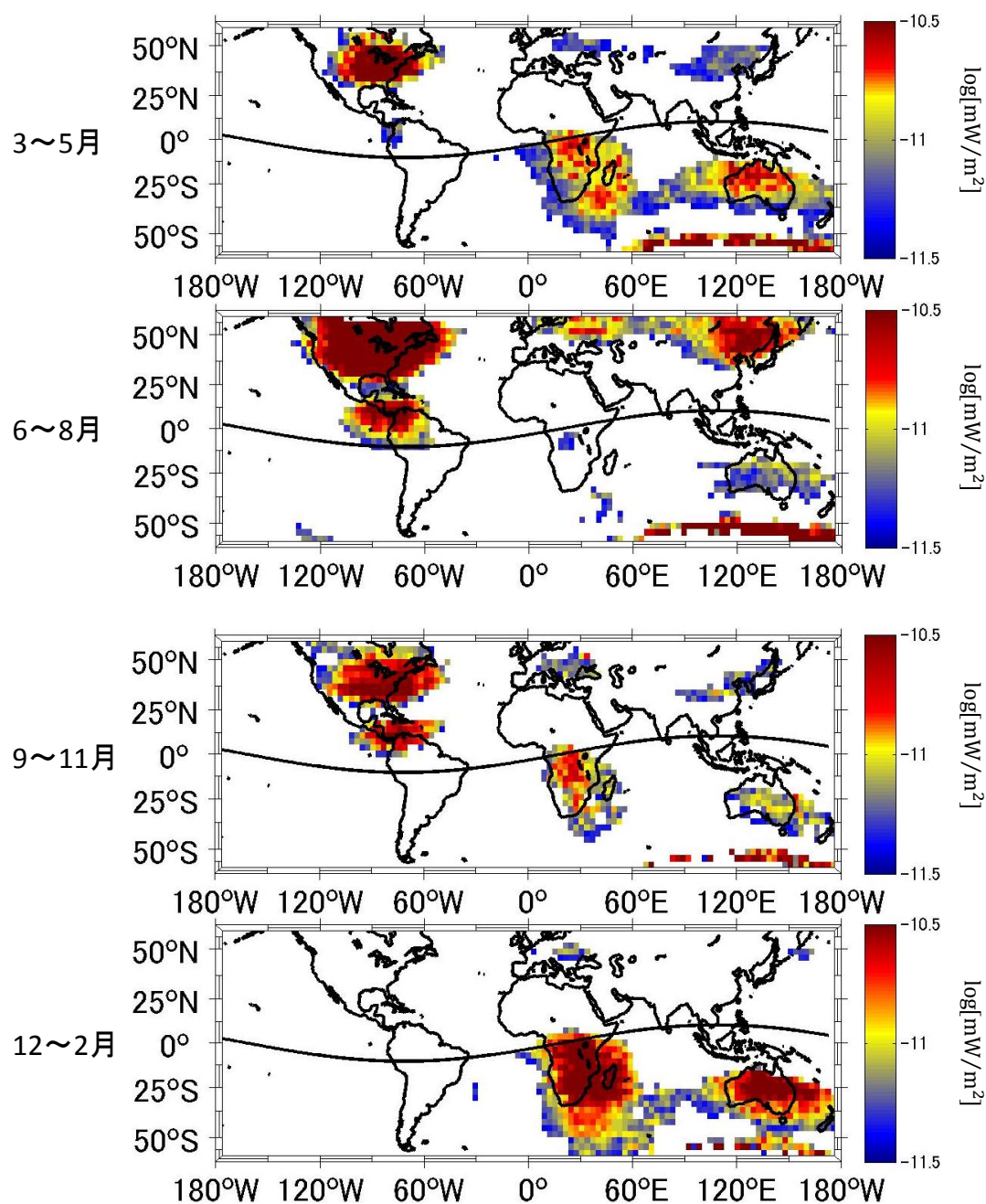


図 5.5：観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化(ELF 帯)

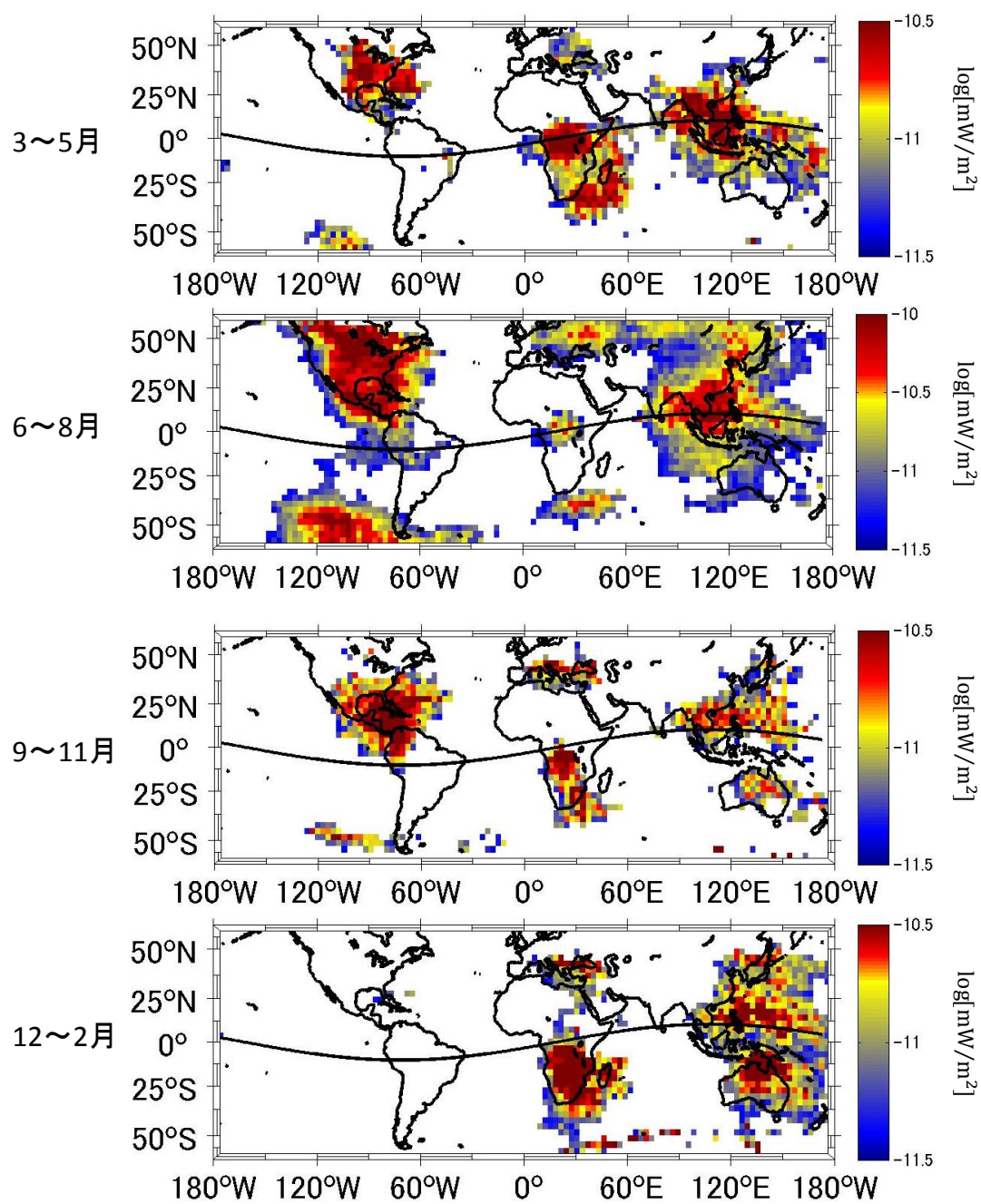


図 5.6: 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化 (VLF 帯)

5.2 落雷の活発な領域の調査

5.2.1 ELF 帯

前節の分布図から電磁波強度の大きかった領域を比較するためのヒストグラムを以下に示す。以下の図から、3～5月では北米、マダガスカル、オーストラリア、6～8月ではアジア、カリブ海、オーストラリア、9～11月では北米、カリブ海、オーストラリア、12～2月ではマダガスカル、南アフリカ、オーストラリアにおいて電磁波強度の大きな雷が多い事が分かる。

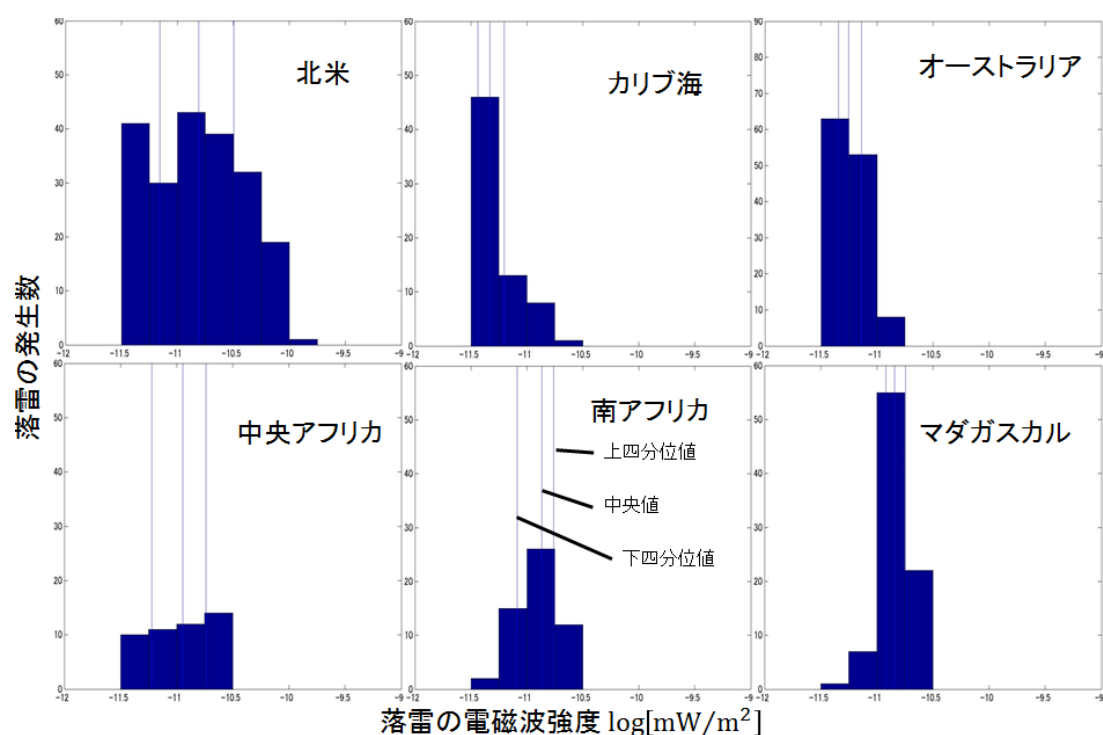


図 5.7：領域での電磁波強度の比較（3～5 月）

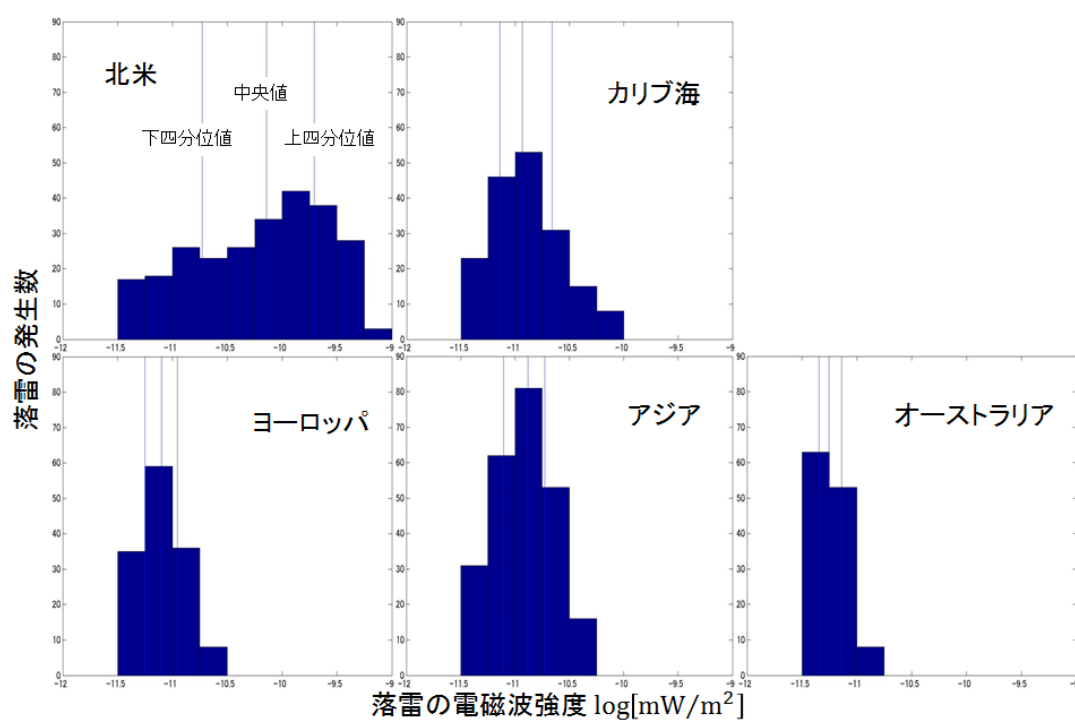


図 5.8：領域での電磁波強度の比較（6～8 月）

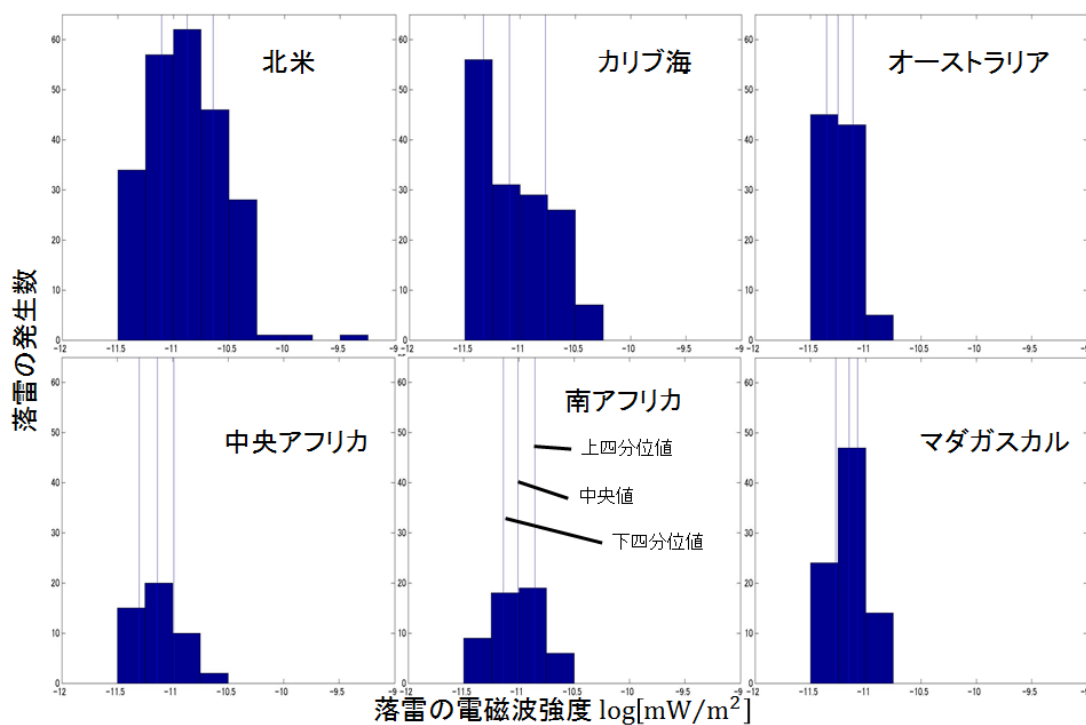


図 5.9：領域での電磁波強度の比較（9～11 月）

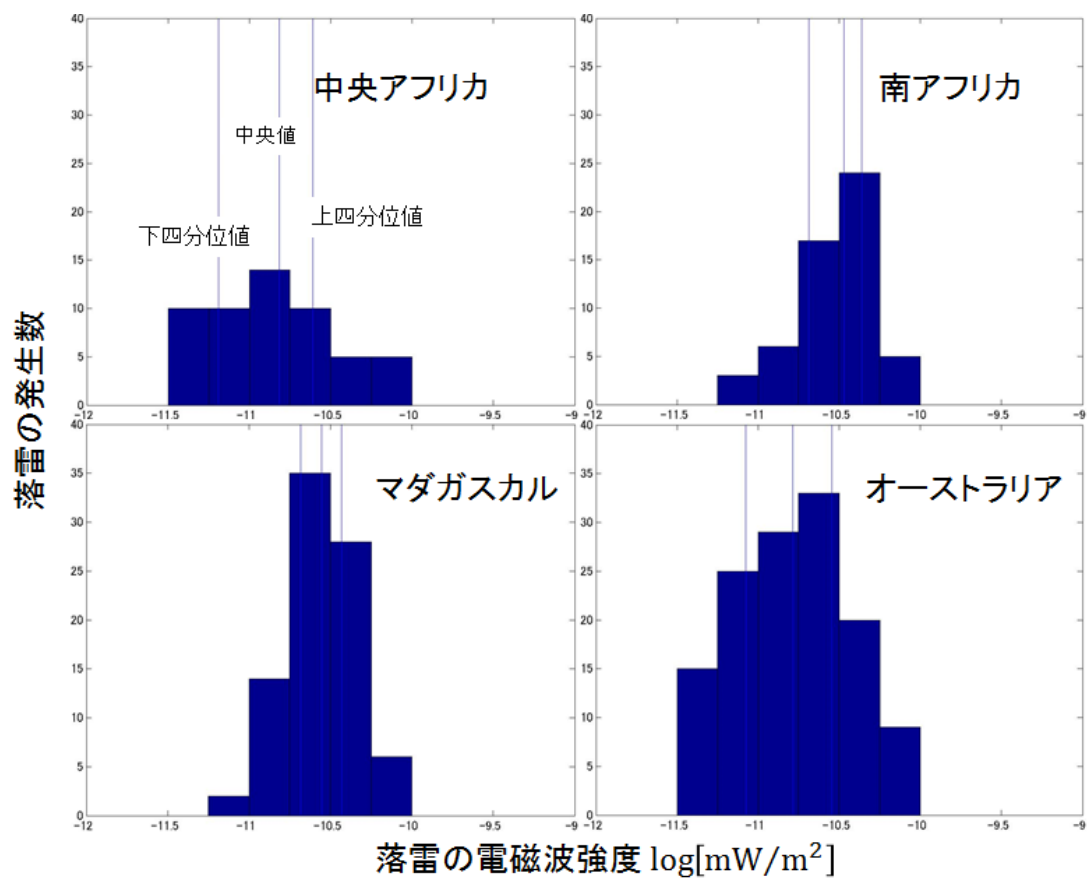


図 5.10：領域での電磁波強度の比較（12~2 月）

5.2.2 VLF 帯

前項と同様のヒストグラムを以下に示す。以下の図から、3～5 月では北米、マダガスカル、東南アジア、6～8 月では北米、アジア、東南アジア、9～11 月では北米、カリブ海、東南アジア、12～2 月ではヨーロッパ、マダガスカル、東南アジアにおいて電磁波強度の大きな雷が多い事が分かる。

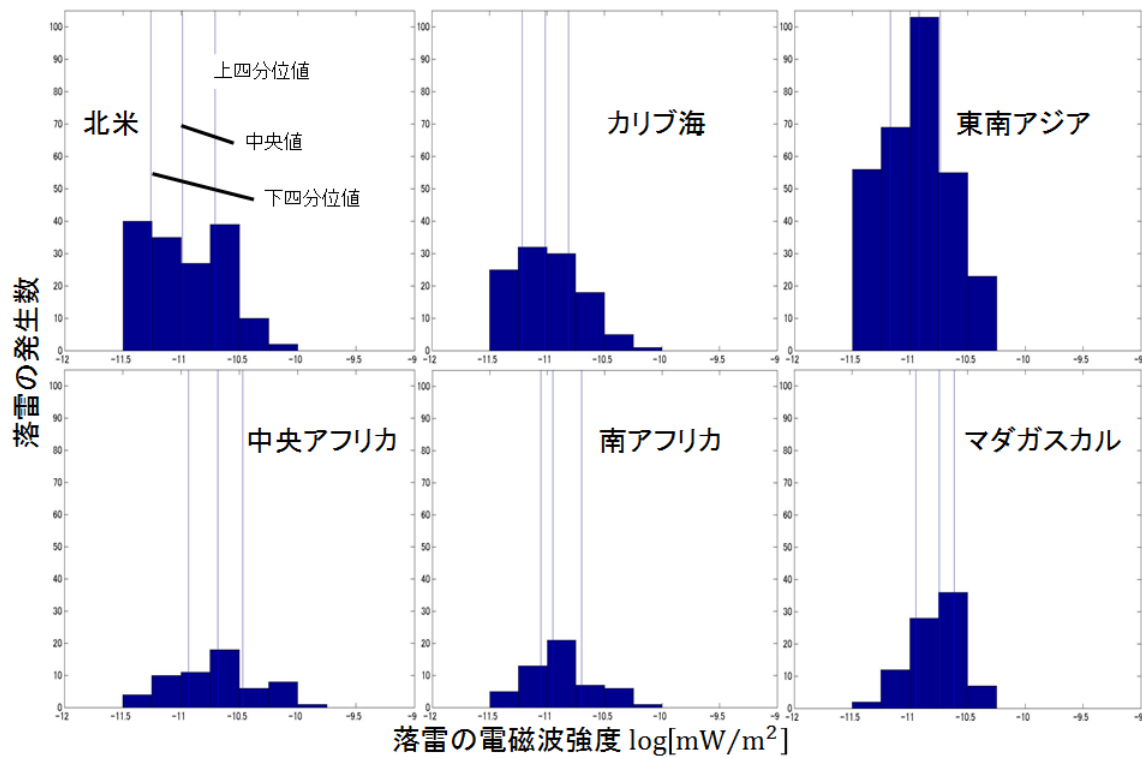


図 5.11：領域での電磁波強度の比較（3～5 月）

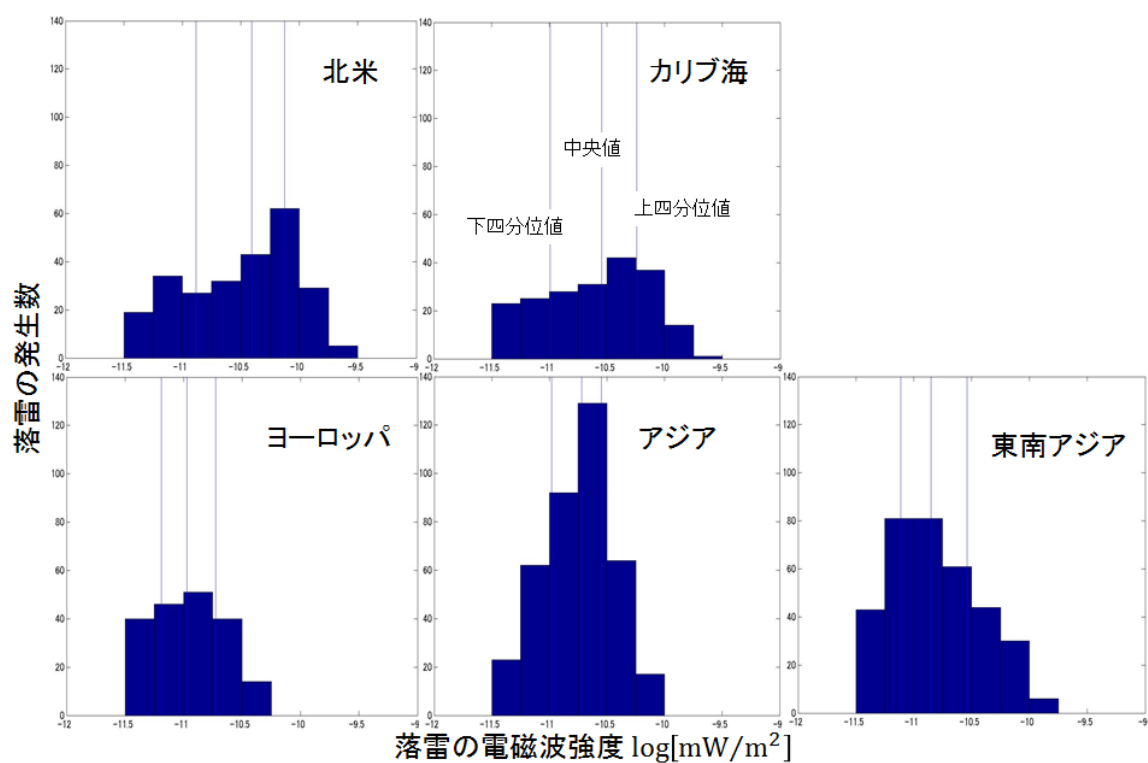


図 5.12：領域での電磁波強度の比較（6～8 月）

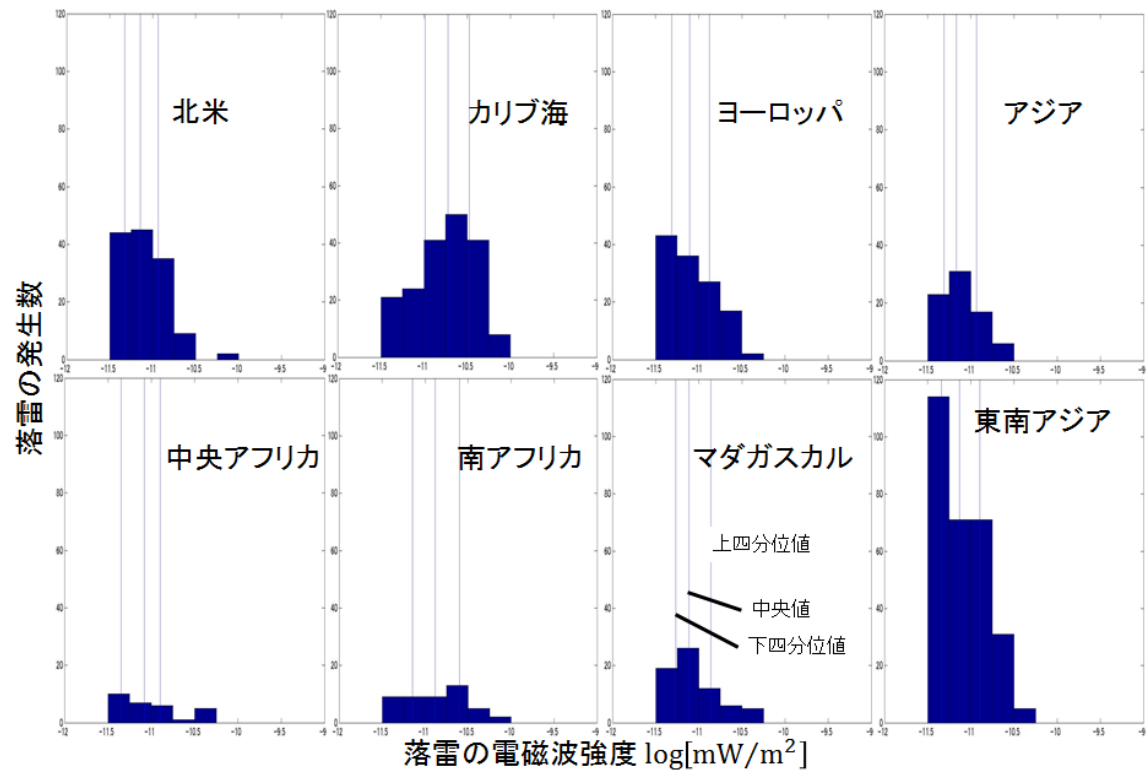


図 5.13：領域での電磁波強度の比較（9～11 月）

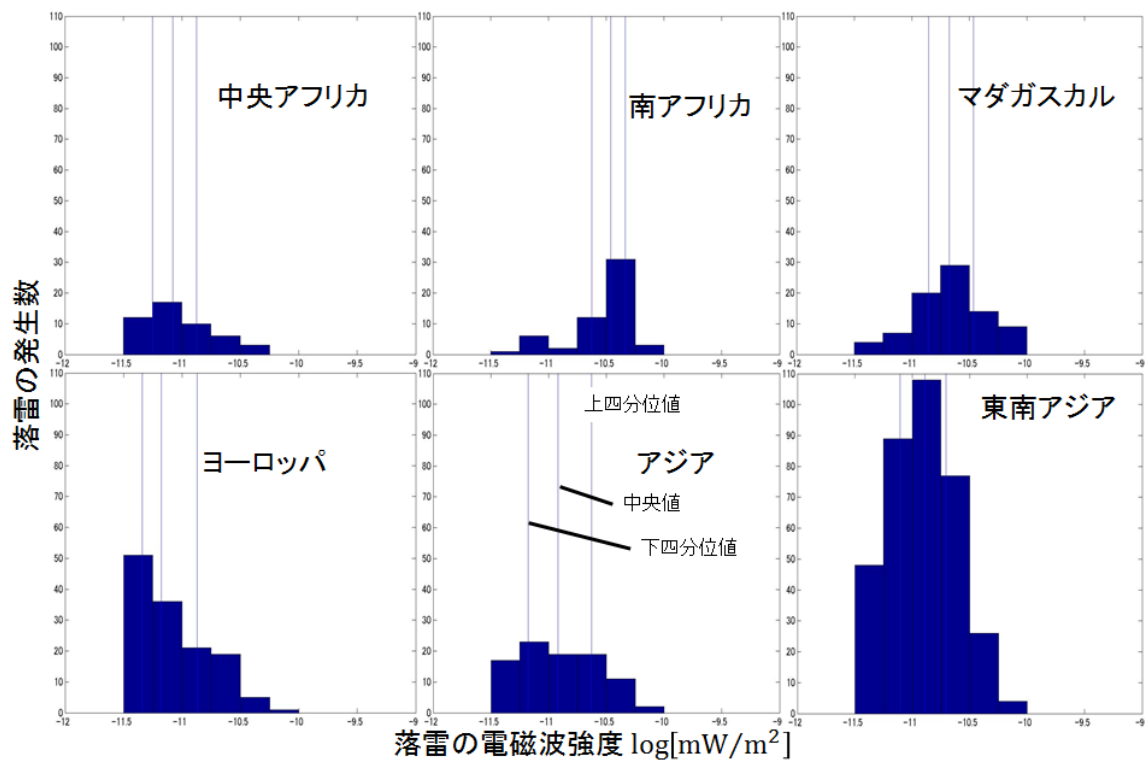


図 5.14：領域での電磁波強度の比較（12～2 月）

5.3 落雷電磁波強度比 (VLF 帯/ELF 帯) の季節変化

各領域の電磁波強度がどちらの周波数帯においてより大きいのかを比較するために導出した落雷電磁波強度比の季節変化を以下に示す。この図は色が赤いほど VLF 帯における電磁波強度が ELF 帯のものより大きく、色が青いほど ELF 帯における電磁波強度が VLF 帯のものより大きい事を表している。この図を見ると、北米やオーストラリアを中心とした内陸部の領域では ELF 帯における電磁波強度が VLF 帯の電磁波強度の 2 倍以上となっており、カリブ海や東南アジアを中心とした沿岸部の領域では VLF 帯における電磁波強度が ELF 帯の電磁波強度の 2 倍以上となっている事が分かる。

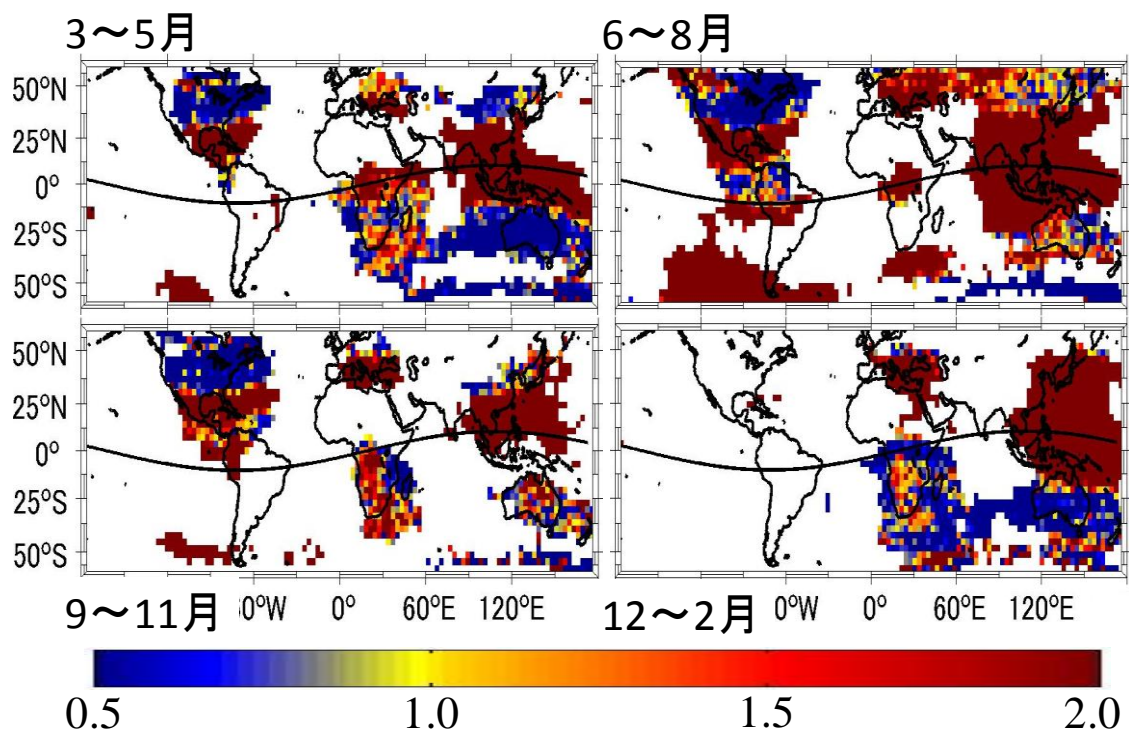


図 5.15： 落雷電磁波強度比の季節変化

5.4 スプライトを伴う雷の電气的特性

5.4.1 スプライトと衛星データとの照合結果

Lefeuvre et al.において観測されたスプライト発生時刻付近において、衛星により観測された電磁界スペクトルおよび時間波形を以下に示す。なお、青塗りの部分はスプライトの発生時刻を表している。以下の図のように、スプライトの発生時刻付近において電界・磁界ともに変化が大きい ELF 帯の観測結果において、スプライトを伴う雷イベントがあると考え、照合を行った。

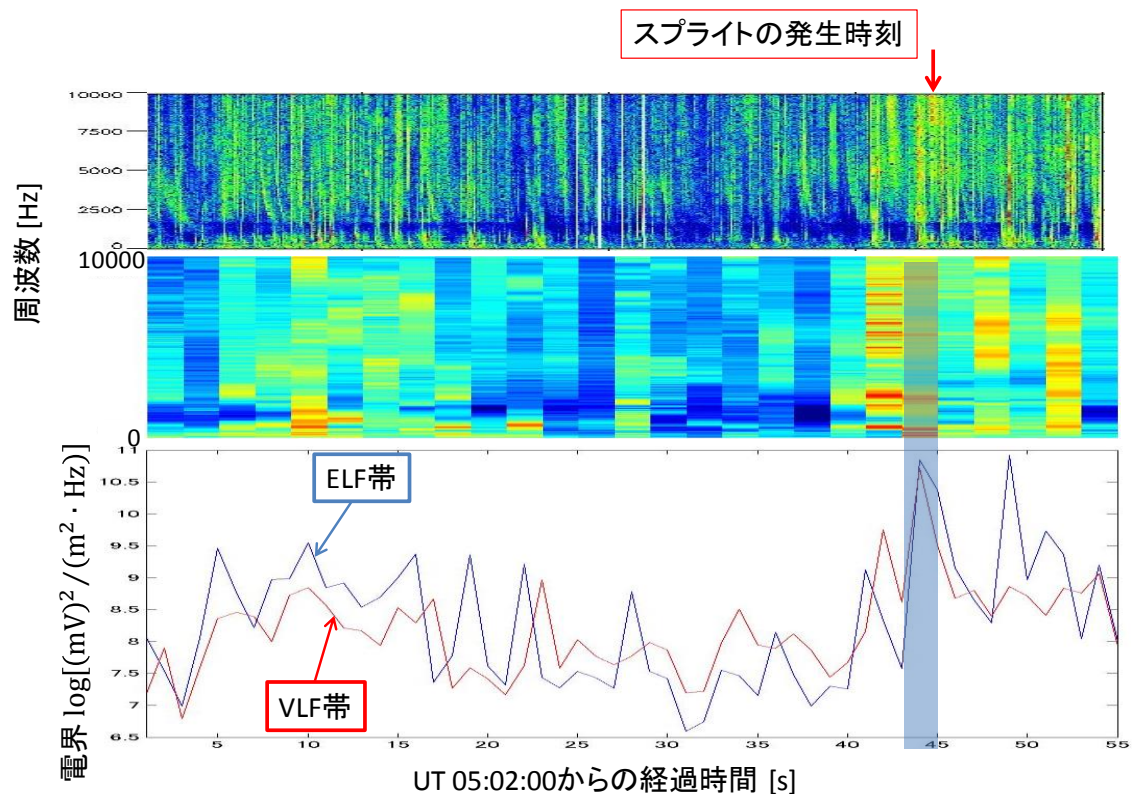


図 5.16：衛星観測による電界スペクトルおよび時間波形
(2005 年 7 月 28 日 青: ELF 帯、赤: VLF 帯)

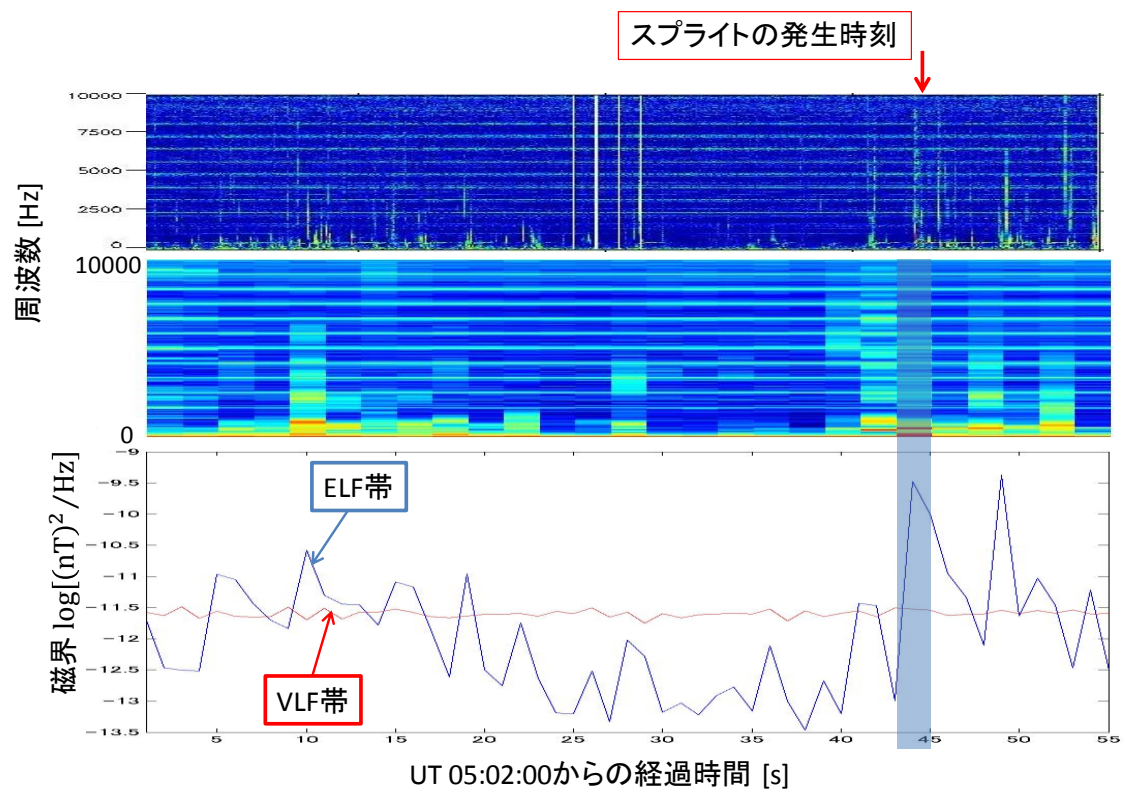


図 5.17: 衛星観測による磁界スペクトルおよび時間波形
(2005 年 7 月 28 日 青: ELF 帯、赤: VLF 帯)

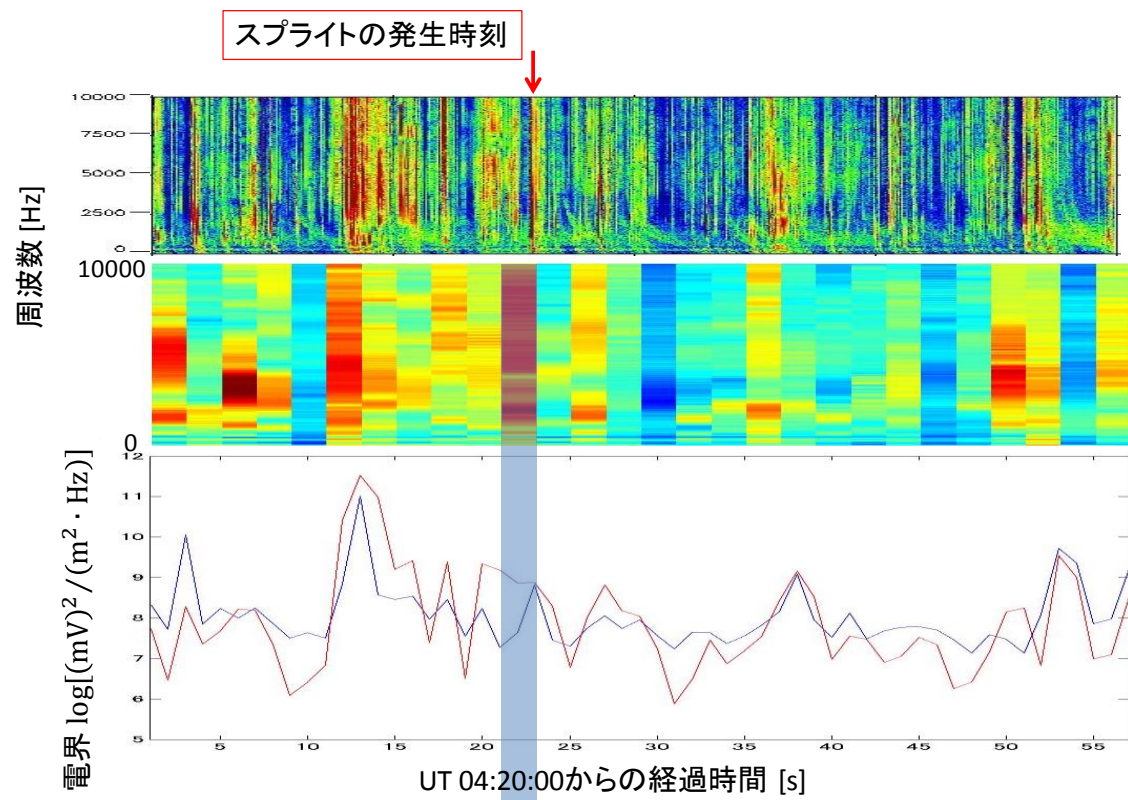


図 5.18：衛星観測による電界スペクトルおよび時間波形
(2005 年 8 月 3 日 青: ELF 帯、赤: VLF 帯)

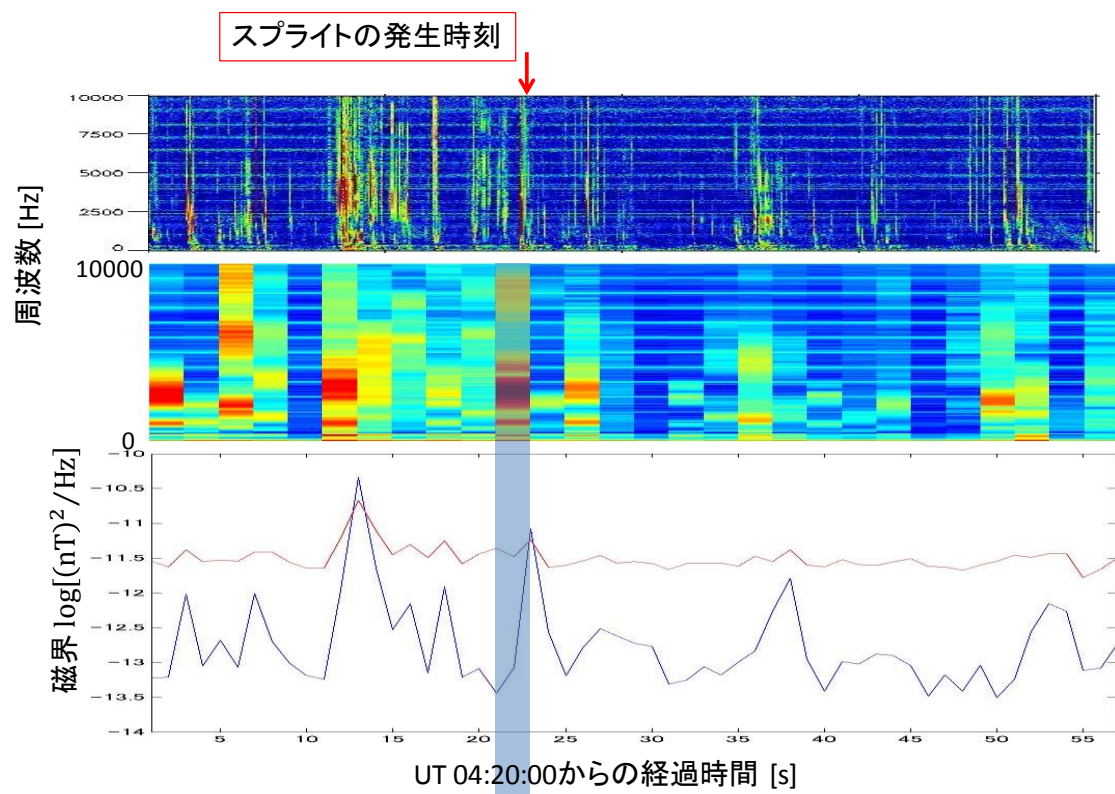


図 5.19：衛星観測による磁界スペクトルおよび時間波形
(2005 年 8 月 3 日 青: ELF 帯、赤: VLF 帯)

5.4.2 スプライトを伴う雷の電磁波強度

前項の結果から照合した ELF 帯における雷イベントの電磁波強度の全球雷における位置づけをしたものを以下に示す。以下の図より、2つのスプライトはともに全球において非常に大きな電磁波強度を持った雷放電に付随して発生している事が分かる。

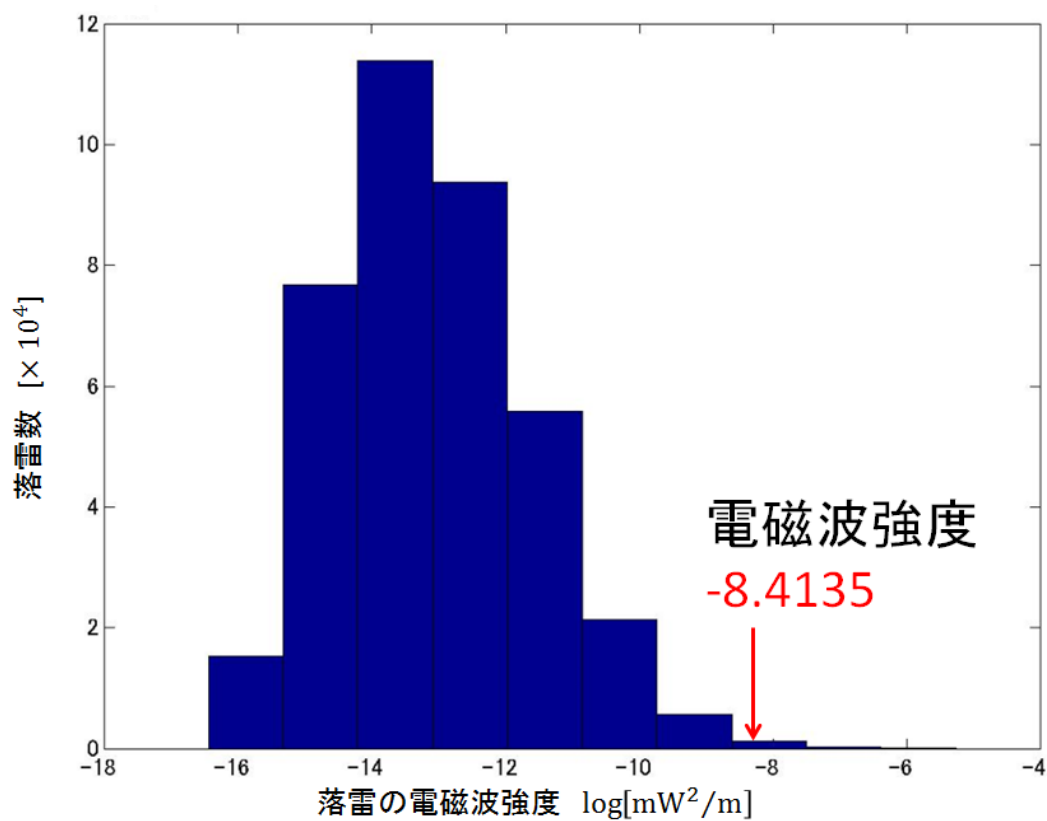


図 5.20： スプライトを伴う雷の電磁波強度 (2005 年 7 月 28 日)

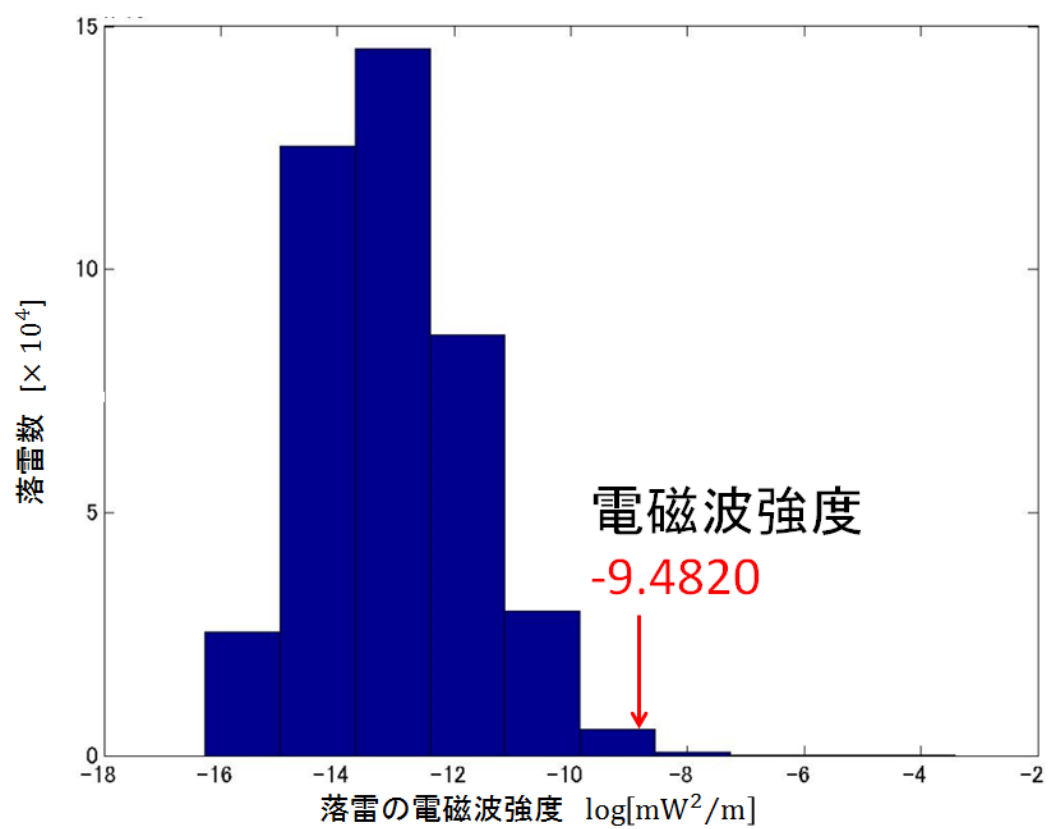


図 5.21： スプライトを伴う雷の電磁波強度（2005 年 8 月 3 日）

第 6 章 考察

まず昼間における分布図では、磁気赤道付近において落雷数が極端に少ない、落雷強度が極端に高い、季節による変化があまり見られないなどの問題が見られた。これは、通常昼間では夜間に比べて電離層における電子密度が高いため、電離層の透過係数も高くなり、衛星の観測結果の補正が夜間に比べ荒いことや、雷のものではない電磁波を衛星が観測している事が原因であると考えられる。

図 5.4～5.6 の分布図を見ると、ELF 帯においては内陸部、VLF 帯においては沿岸部を中心に雷活動が活発であることが分かる。さらに、図 5.15 の比を見ると、北米やオーストラリアを中心とした内陸部の領域では ELF 帯における電磁波強度が VLF 帯の 2 倍以上となっており、東南アジアやカリブ海を中心とした沿岸部の領域ではその真逆の結果になっている事が分かる。したがって、内陸部では電荷モーメントの高い雷、沿岸部ではピーク電流の高い雷が活発であると考えられる。また図 5.2 の分布図の結果において、極域付近の頻度が異常に大きいという問題が見られた。これはグリッド内のイベント数をグリッド面積で割ったものを発生頻度としているためであると考えられる。

図 5.7～5.14 のヒストグラムから比較し、最も活発な領域についてまとめたものを以下に示す。

表 6.1：2 種類の雷が最も活発な領域

月	電荷モーメントの大きな雷 (ELF 帯)	ピーク電流の大きな雷 (VLF 帯)
3～5	北米、カリブ海	中央アフリカ、東南アジア
6～8	北米、アジア	北米、カリブ海
9～11	北米、南アフリカ	カリブ海、南アフリカ
12～1	南アフリカ、オーストラリア	南アフリカ、東南アジア

この表から、北米やオーストラリアにおいては電荷モーメントの大きな雷、カリブ海や東南アジアではピーク電流の大きな雷が卓越して発生していることが分かる。これは、前述の内陸部、沿岸部それぞれにおける雷の特徴とも一致している。また、月変化により落雷の活発な領域が北半球から南半球へと空間的に移動していることが分かる。

図 5.16～5.19 の電磁界スペクトルおよび時間波形を見ると、スプライトの発生時刻±1 秒以内の範囲で電磁界がともに大きくなっている事が分かる。スプライトの発生地点と衛星位置の緯度経度差が±20°以内である事も考慮すると、これらの電磁界の変化がスプライトを伴う雷によってもたらされたものであると考えられる。また、VLF 帯よりも ELF 帯において電磁界の変化量が大きくなっている事から、スプライトの発生が落雷の電荷モーメントに深く関係しているといえる。次に図 5.20, 5.21 のヒストグラムを見ると、このスプライトが全球雷の中でも非常に大きな電磁波強度を持つ雷に伴って発生していると考えられる。またこの図から、スプライトを伴う雷の電磁波強度が 6 年間にわたって観測された雷

のうちのわずか数%の雷しか持たない事が分かる。

第7章 まとめ

- 内陸部で発生する雷は電荷モーメント、沿岸部で発生する雷はピーク電流の大きな雷が活発
- 北米およびマダガスカルでは電荷モーメント・ピーク電流ともに大きな雷が活発
- オーストラリアでは電荷モーメント、東南アジアではピーク電流の大きな雷が一年を通して活発
- DEMETER 衛星によってスプライトを伴う雷の観測が可能
- スプライトは電荷モーメントの大きな雷の中でも非常に大きな電磁波強度を持つ雷に伴って発生する

以上のことが確認できた一方で、

- 昼間における観測で正確な結果が得られなかった
- 落雷の発生頻度の図において極域付近の頻度が異常に大きい
- 本来、通年雷活動が活発であるはずのアフリカや南米で、雷活動が観測されない季節があった

などの問題が見られた。

第 8 章 今後の展望

前章で述べた通り、図 5.1 および図 5.3 のような昼間における観測結果で、磁気赤道付近における落雷数が極端に少ない、落雷強度が極端に大きいという問題が見られた。これは昼間における電離層透過係数の再計算をする必要がある。次に発生頻度の図において極域付近の頻度が異常に大きいという問題が見られた。原因は頻度の導出の際にグリッド内のイベント数をグリッド面積で割っている事が考えられるので、今後は正規化の方法を変える必要がある。

また、世界で最も高い強度の雷が活発であるはずのアフリカや南米において発生頻度や電磁波強度が大きくなかった。これはアフリカや南米は上でも述べた磁気赤道上にある地域であること、またアフリカで発生する一部の雷によって発生する水平方向の電磁波を DEMETER 衛星が観測できていないことが原因であると考えられるため、電離層透過係数の見直しの他に、DEMETER 衛星で観測できない雷を特定し、他の手段による観測でデータを得る必要がある。

その他の課題として、地上観測によって得られた雷の電荷モーメントやピーク電流の実際の値と今回得た衛星観測のデータとの対応、スプライトに加えてエルブスを伴う雷イベントとの照合、太陽活動との関連性、電離層透過係数の季節変化などが必要であると考えている。

謝辞

本研究を行う機会を与えてくださりいつも丁寧なご指導を賜った電気通信大学情報・通信工学専攻芳原容英教授に心より感謝を申し上げます。また、有益なご助言をいただいた本研究室 OB の綿引俊氏に感謝申し上げます。そして、衛星のデータを使用するにあたりフランスの M.Parrot 氏に深く感謝いたします。最後にお互い有益な情報の交換やプログラミングについての相談、ソースの提供など助力をいただいた諸先輩方、研究室メンバーに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Huang, E., Electromagnetic Transients, Elves, and Sprites in the Earth-Ionosphere Waveguide, Master Res., 1997
- [2] F. Nemec, O. Santolik, M. Parrot, and C. J. Rodger, Relationship between median intensities of electromagnetic emissions in the VLF range
Hayakawa M. , Handbook of ATMOSPHERIC ELECTRODYNAMICS Volume II ,
Hans Volland , 1995
- [3] Hugh J. Christian, Richard J. Blakeslee, Dennis J. Boccippio, et al, Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 108, NO. D1, 4005, doi:10.1029/2002JD002347, 2003
- [4] M. L. V. Pitteway and J. L. Jespersen , A numerical study of the excitation, internal reflection and limiting polarization of whistler waves in the lower ionosphere, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics , VOL. 28, pp.17-43, 1966
- [5] Y. Hobara, M. Hayakawa, E. Williams, R. Boldi and E. Downes, Location and Electrical properties of sprite-producing lightning from a single ELF site, Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges., 211-235, 2006
and lightning activity., JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 115, , A08315, 10 PP., 2010
- [6] Y. Hobara, N. Iwasaki, T. Hayashida, N. Tsuchiya, E. R. Williams et al., New ELF observation site in Moshiri, Hokkaido Japan, and the results of preliminary data analysis, J. Atmos. Electr., VOL. 20, pp.99-109, 2000
- [7] Y. Hobara, N. Iwasaki, T. Hayashida et al., Interrelation between ELF transients and ionospheric disturbances in association with sprites and elves, Geophys. Res. Lett., VOL. 28 pp.935-938, 2001
- [8] A. ブレッケ , 奥澤隆志 , 田口聡 , 超高層大気物理学 , 愛智出版 , 2003
- [9] 恩藤忠典 , 丸橋克英 , 宇宙環境科学 , オーム社 , 2000
- [10] 高橋 劭 , 雷の科学 , 東京大学出版会 , 2009
- [11] 佐尾和夫 , 空電 雷の電波ふく射をめぐって , 成山堂書店 , 1981
- [12] 山下幸三 ELFトランジェントを用いた世界雷放電分布の導出とその考察. , 69-69
2004-2007

- [13] 小嶋稔 , 地球物理概論 , 東京大学出版会 , 1990

- [14] 早川正士 , 波動光学 , コロナ社 , 1992

- [15] 日本大気電気学会 , 大気電気学概論 , コロナ社 , 2003
- [16] AM 放送波 (中波) の電波伝搬について
(<http://asaseno.cool.ne.jp/germanium/propagation.html>)
- [17] JEM-GLIMS
(<http://www.ep.sci.hokudai.ac.jp/~msato/GLIMS/index.html>)
- [18] Lightning and Atmospheric Electricity Research at GHCC
(thunder.msfc.nasa.gov/lis/)
- [19] Prof. Emeritus TAKEO Home Page
(http://homepage1.nifty.com/ym_xpg/yoshino_lab/yoshino_lab.htm)

発表実績

- [1] 阿部利之、芳原容英、M. Parrot、“人工衛星による電波観測を用いた世界雷領域別発生頻度および電気的特性に関する研究”、第 90 回日本大気電気学会（2014 東京都 東京学芸大学）
- [2] 阿部利之、芳原容英、M. Parrot、“人工衛星観測による全球にわたる雷起源の電磁波特性に関する研究”、第 92 回日本大気電気学会（2015 千葉県 千葉大学）

付録

A. 地上観測

観測システムの概略図を以下に示す。電界アンテナはメインアンプと IEA を介して、磁界アンテナはアンテナから CAM-UNIT に接続されている。CAM-UNIT には GPS アンテナからケーブルも接続されている。したがって CAM-UNIT に入力された電磁界データと GPS データが、PC 内部に接続されている PCI ボード (DAQ) に入力され、PC にデータ保存されている。

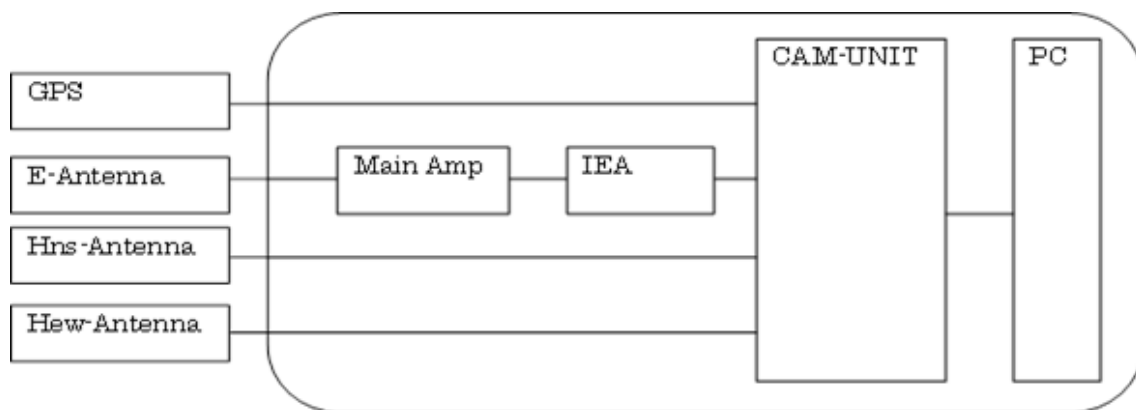


図 A.1：観測システム

電界観測システム

電界観測システムを以下に示す。地上から 6.6 m に設置されているボールアンテナに冷気された電圧はプリアンプ、可変抵抗、メインアンプ、電力線高調波遮断フィルタ (IEA) を通り、CAM-UNITに入力される。メインアンプ内には 800 Hz のローパスフィルタと 50 Hz、100 Hz、150 Hz のノッチフィルタが内蔵されている。

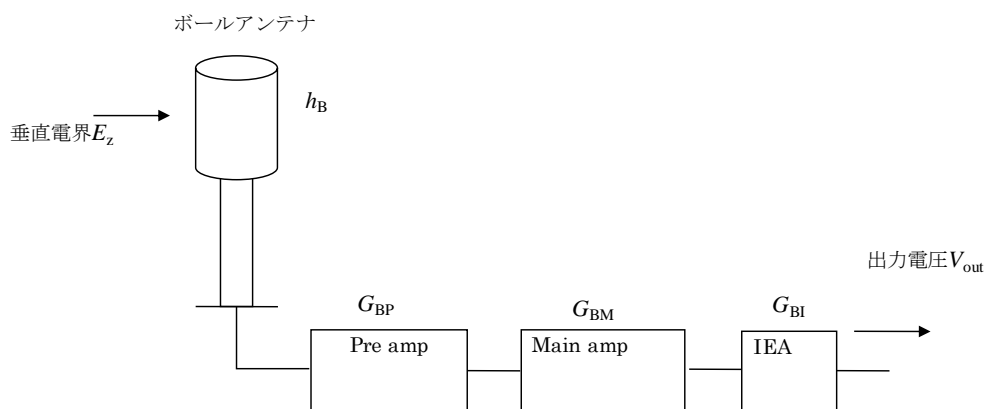


図 A.2：電界観測システム

磁界観測システム

磁界観測システムを以下に示す。水平磁界 2 成分を観測する 2 つの磁界アンテナ、GPS、DAQ により構成されている。観測磁界アンテナは付属のプリアンプ内に 1300 Hz のローパスフィルタが内蔵されており、全体としては 0.01~1000 Hz まで観測可能な設定となっている。

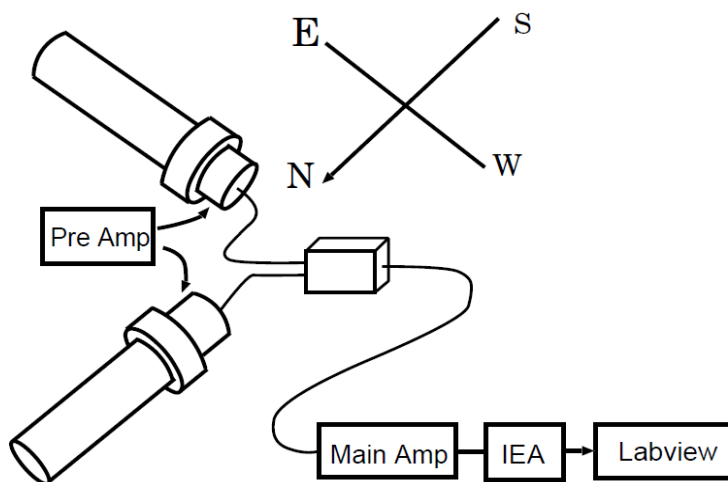


図 A.3：磁界観測システム

B. 衛星観測

衛星座標系

DEMETER 衛星は衛星座標系、地磁気座標系の 2 種類を用いた。それぞれの座標系を以下に示す。衛星座標系は x 方向が衛星から見た地球への向き、 z 方向が衛星の進行方向と逆の向き、 y 方向は $z \times x$ の向きとなっている。

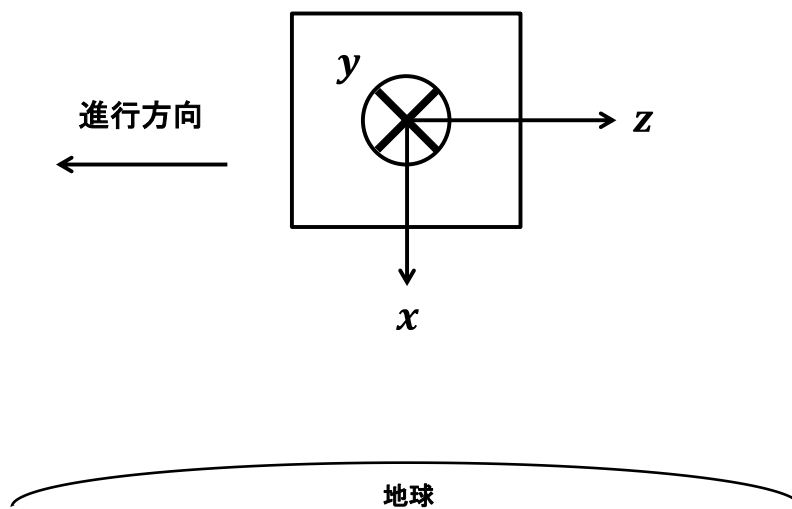


図 B.1：衛星座標系

地磁気座標系は z 方向が衛星地点における地磁気 B_0 の向き、地球の中心点を O 、衛星の位置を S として OS ベクトルを考えたとき、 y 方向が $z \times OS$ の向き、 x 方向が $z \times y$ の向きとなっている。

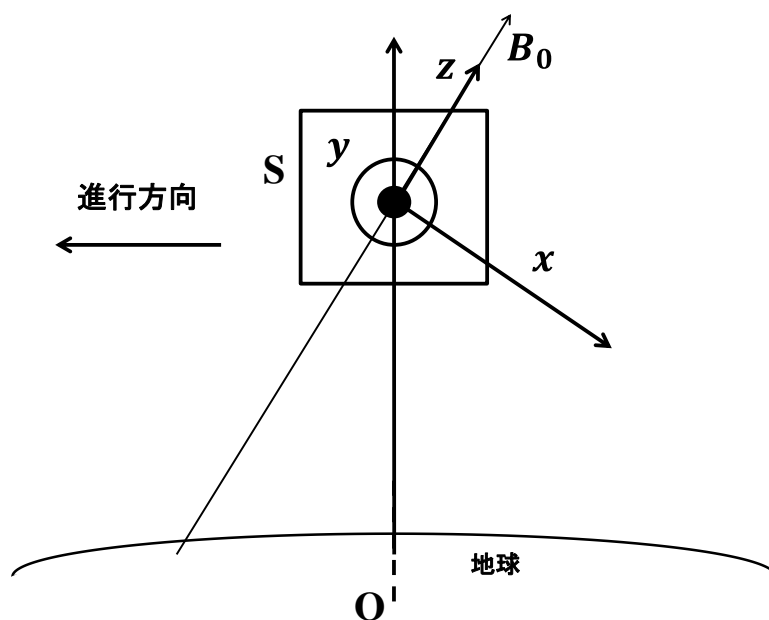


図 B.2：地磁気座標系

電界観測システム

電界は衛星に取り付けられたお互いの距離が分かっている4つのプローブにて測定する。プローブの電圧からプローブ間の電位差 E_{12} 、 E_{13} 、 E_{14} 、 E_{23} 、 E_{24} 、 E_{34} を導出し、以下に示す行列式よりホイイスラ波の電界(E_x 、 E_y 、 E_z)を導出する。本研究で扱うサーベイモードでは E_{12} 方向の電界パワースペクトルを導出する。

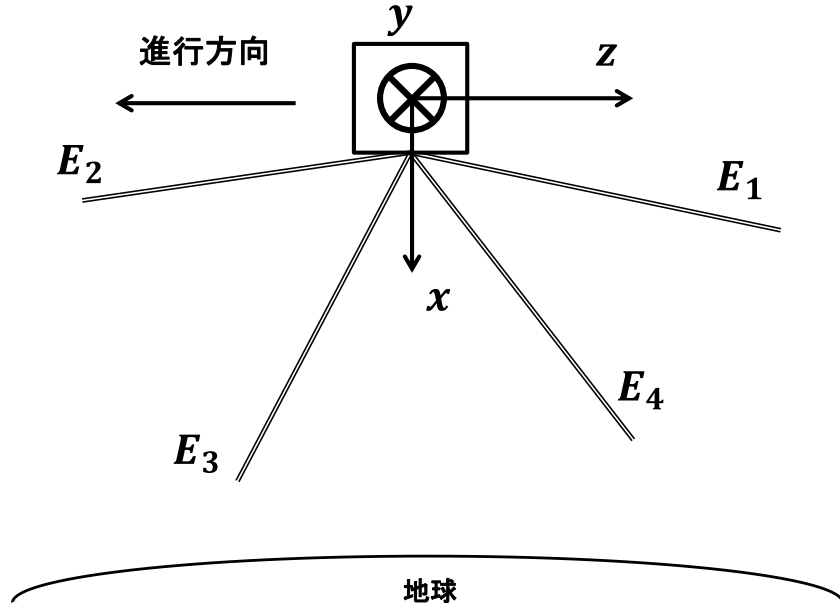


図 B.3：電界観測システム

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -1.5810 & 2.1414 & 1.0169 \\ -1.0809 & 0.1119 & 0.0020 \\ -0.0938 & 0.0097 & 1.0039 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{13} \\ E_{34} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -1.5810 & 2.2299 & -1.0888 \\ -1.0809 & 0.1165 & -0.1081 \\ -0.0938 & 0.0101 & 0.9944 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{14} \\ E_{34} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4676 & 2.0347 & 1.0169 \\ -0.9215 & 0.1063 & 0.0020 \\ -0.0938 & 0.0092 & 1.0039 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{23} \\ E_{34} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.4676 & 2.0180 & -1.0888 \\ -0.9215 & 0.1055 & -0.1081 \\ -0.0938 & 0.0091 & 0.9944 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E_{12} \\ E_{24} \\ E_{34} \end{pmatrix}$$

磁界観測システム

磁界はサーチコイルに流れる電流の値より磁束密度 B_1 、 B_2 、 B_3 を導出し、以下に示す行列式よりホイスラ波の磁界(B_x 、 B_y 、 B_z)方向の磁界のパワースペクトルを導出する。本研究で扱うサーベイモードでは B_2 方向の磁界パワースペクトルを導出する。

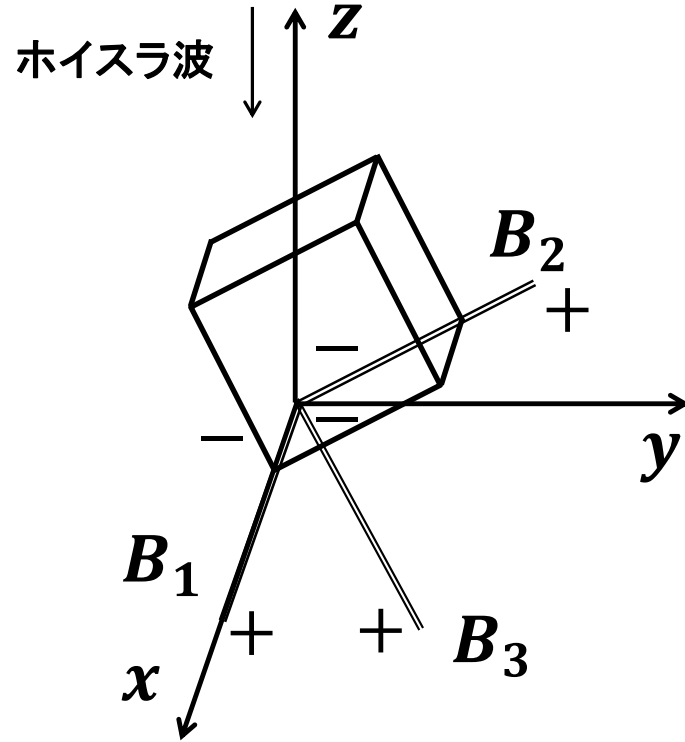


図 B.4：磁界観測システム

$$\begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.7071 & 0.7071 \\ 0.0000 & 0.7071 & -0.7071 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix}$$

C. 月ごとの分布図

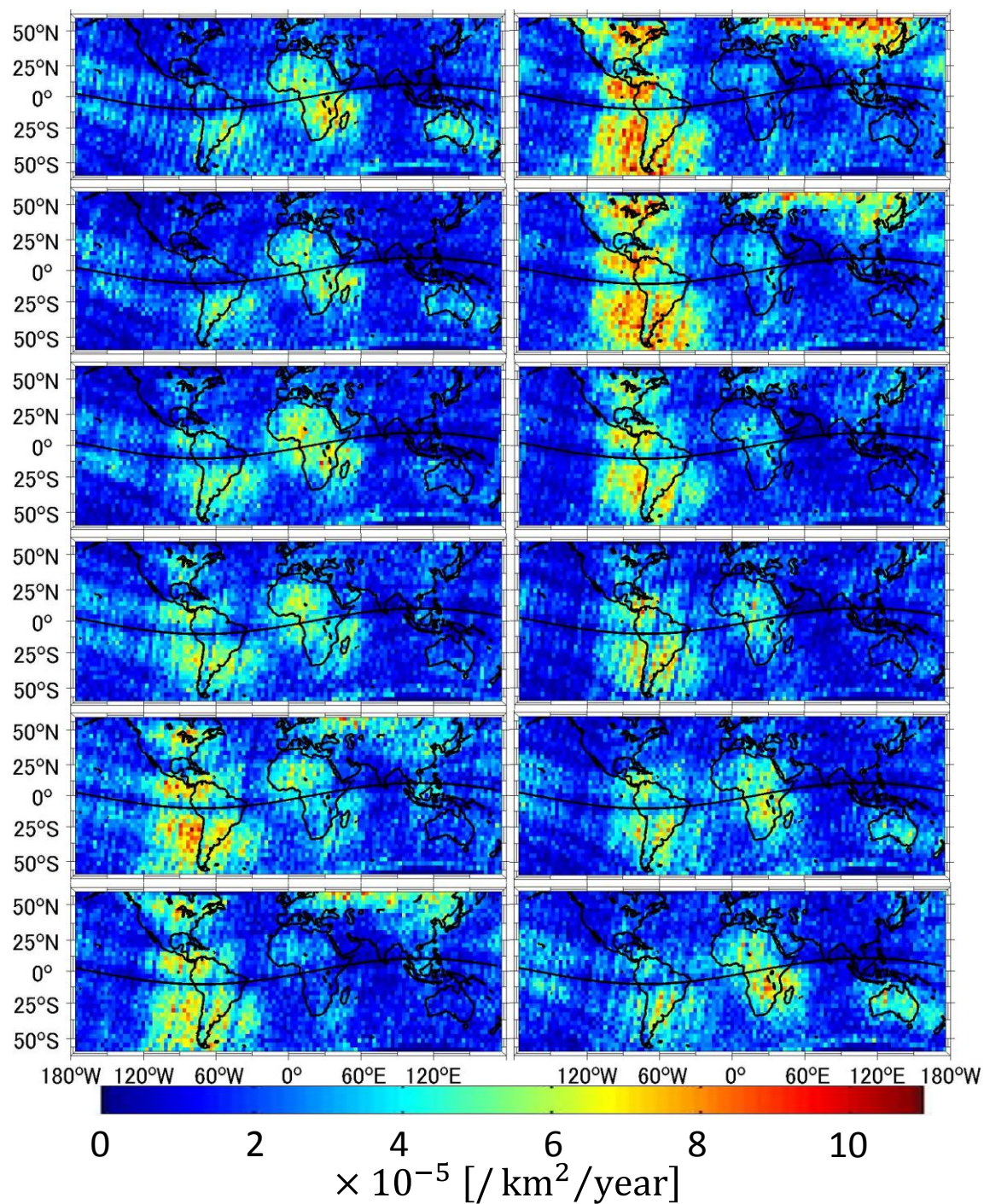


図 C.1；観測期間すべての昼間における落雷発生頻度の月変化
(ELF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

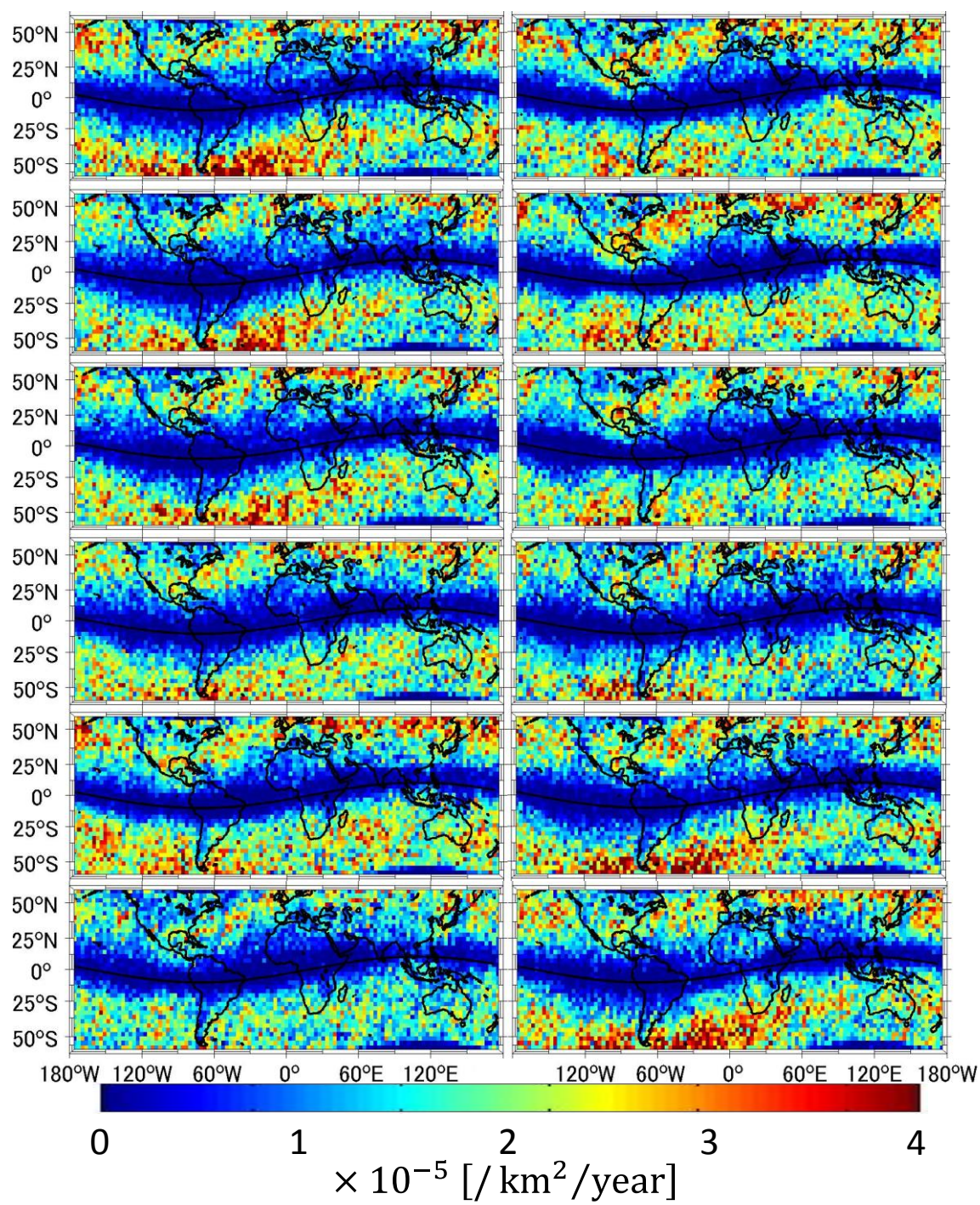


図 C.2：観測期間すべての昼間における落雷発生頻度の月変化
(VLF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

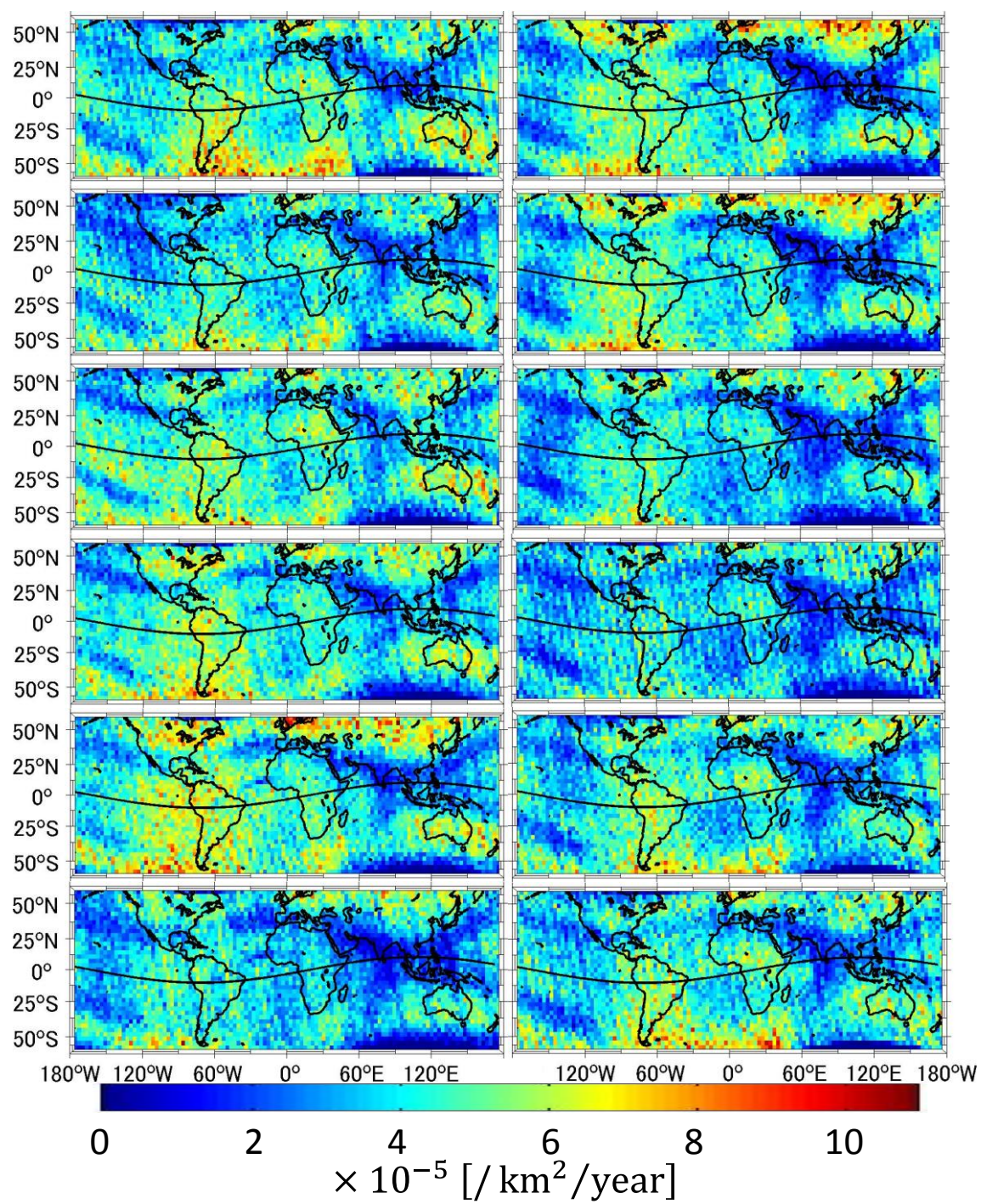


図 C.3：観測期間すべての夜間における落雷発生頻度の月変化
 (ELF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

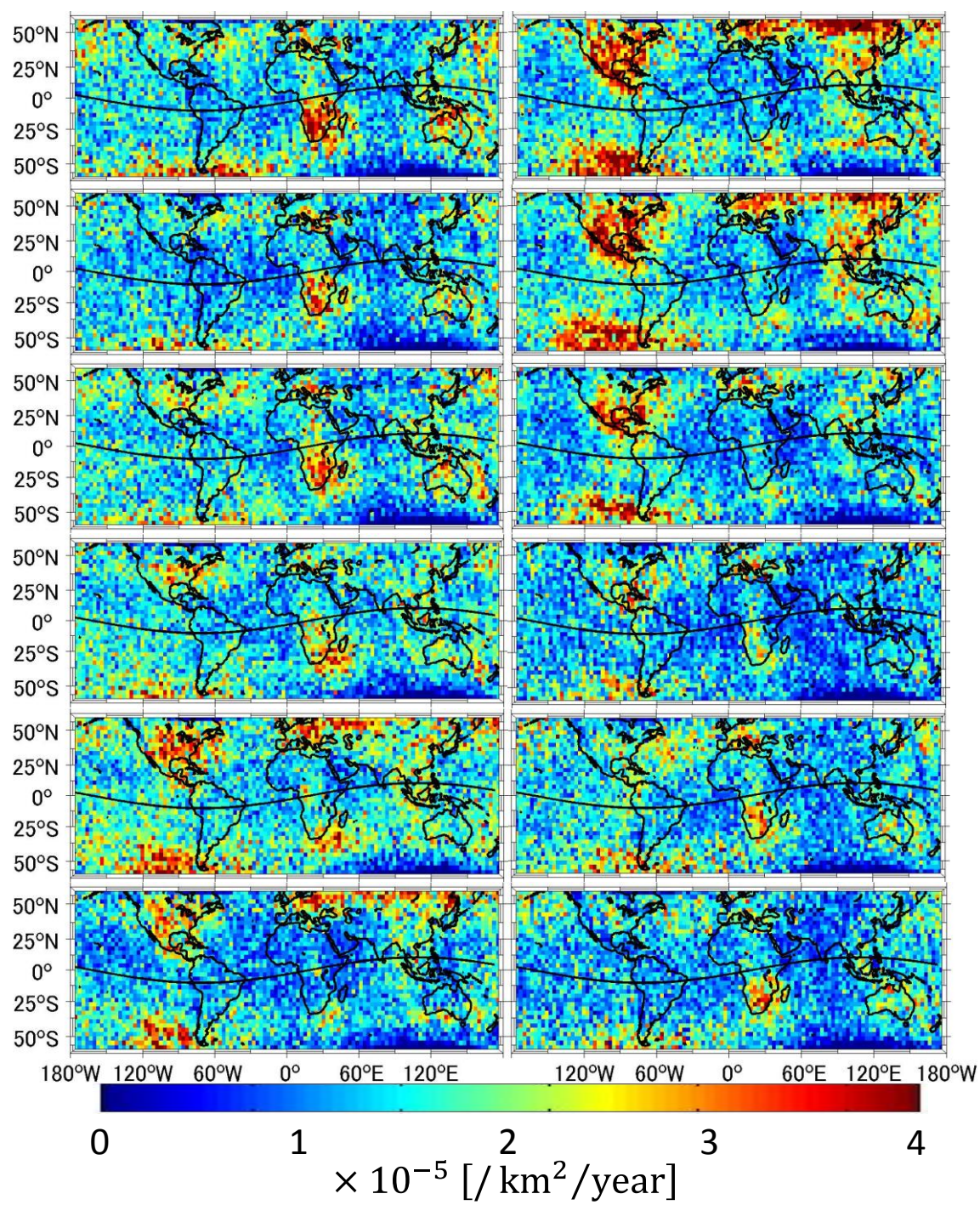


図 C.4：観測期間すべての夜間における落雷発生頻度の月変化
(VLF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

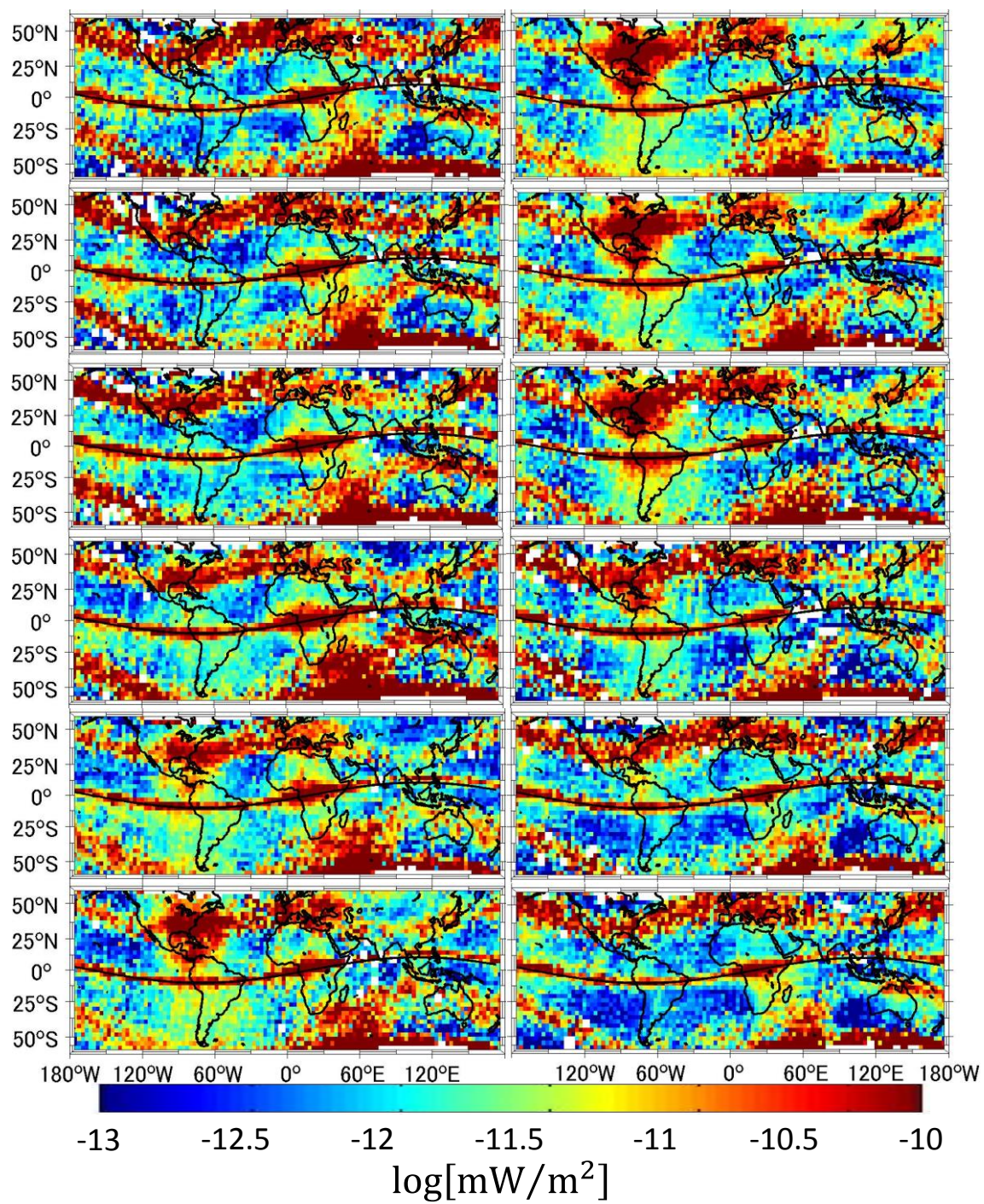


図 C.5：観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の月変化
(ELF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

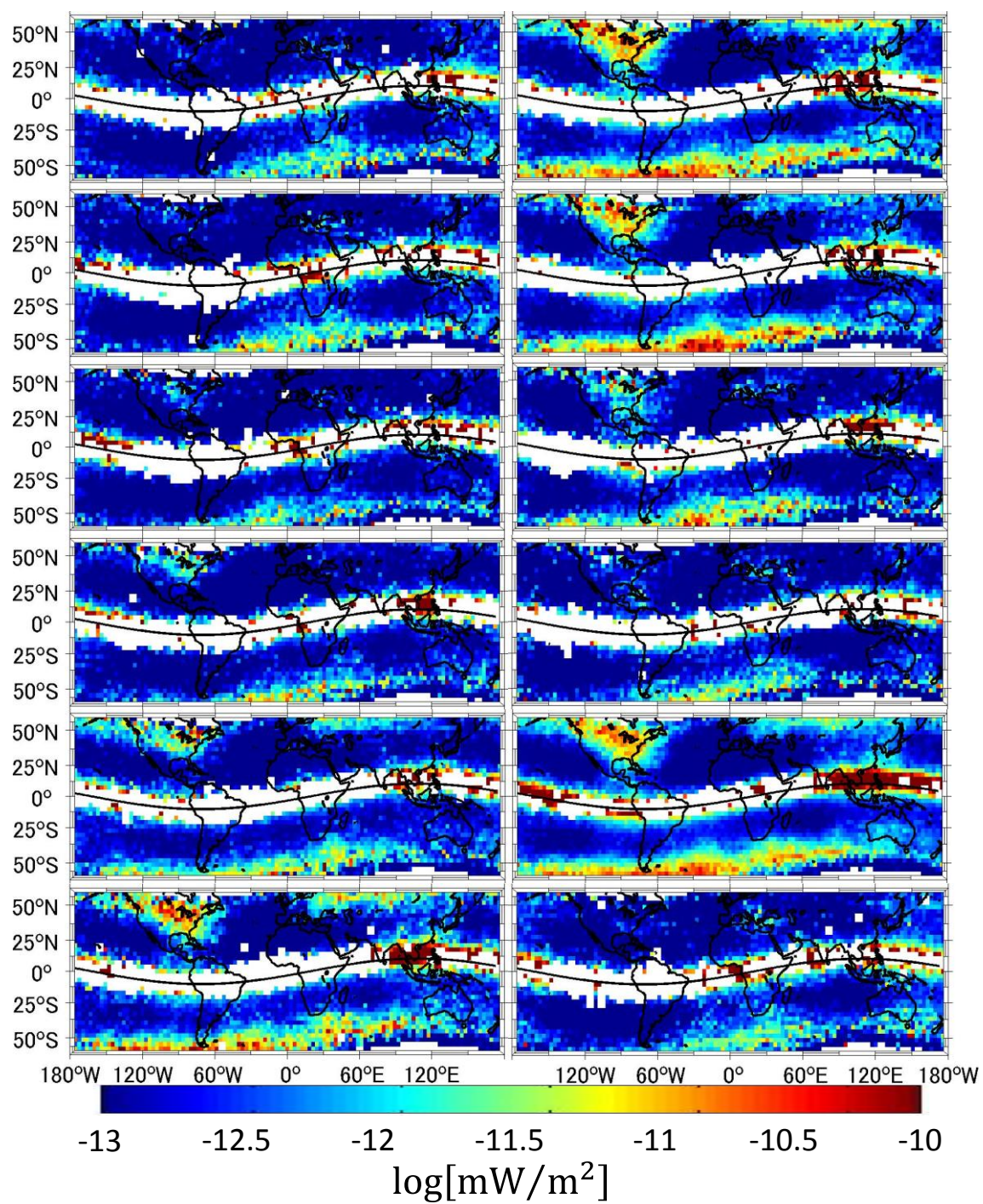


図 C.6：観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の月変化
(VLF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

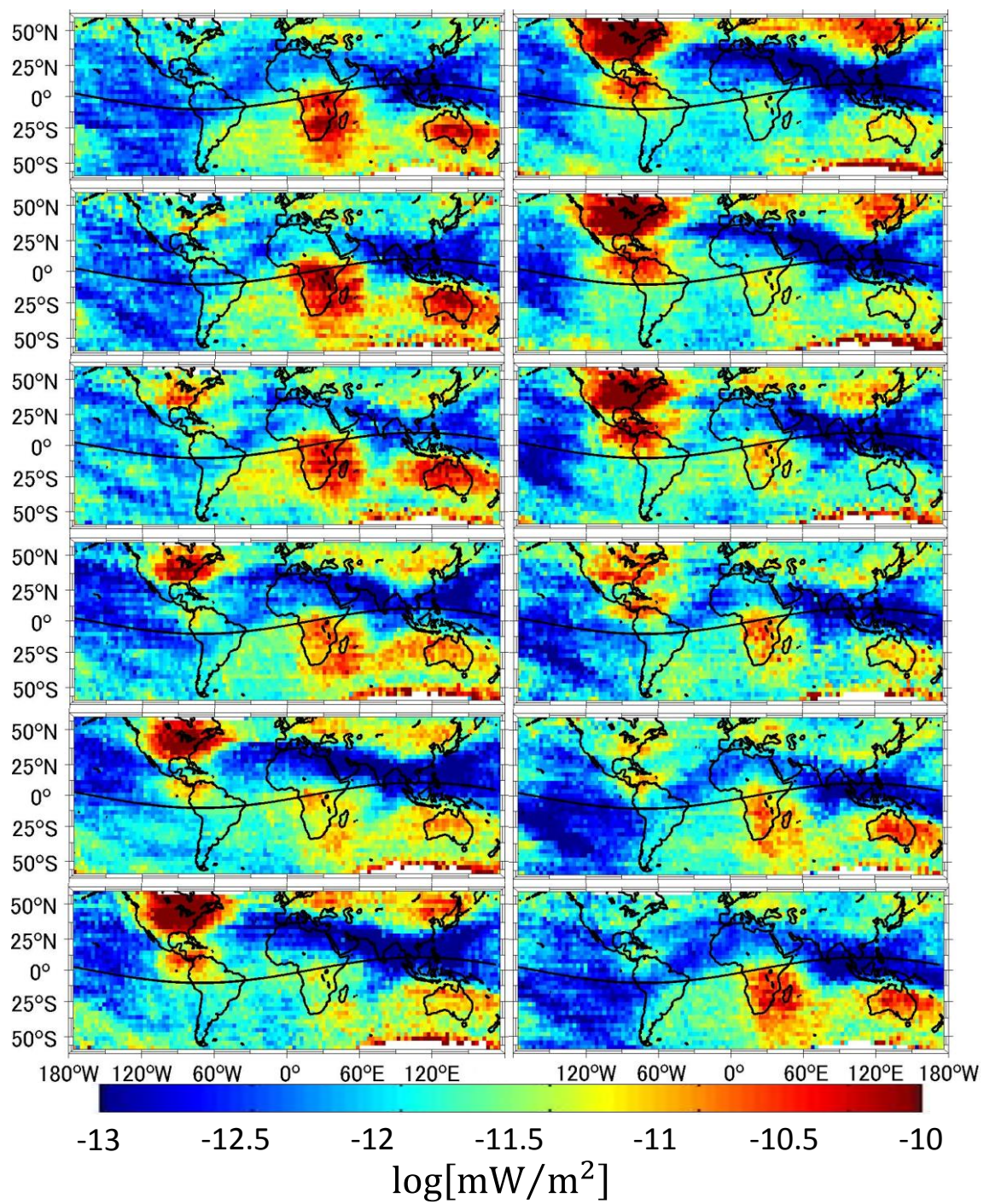


図 C.7：観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の月変化
(ELF 帯、左上から 1～6 月、右上から 7～12 月)

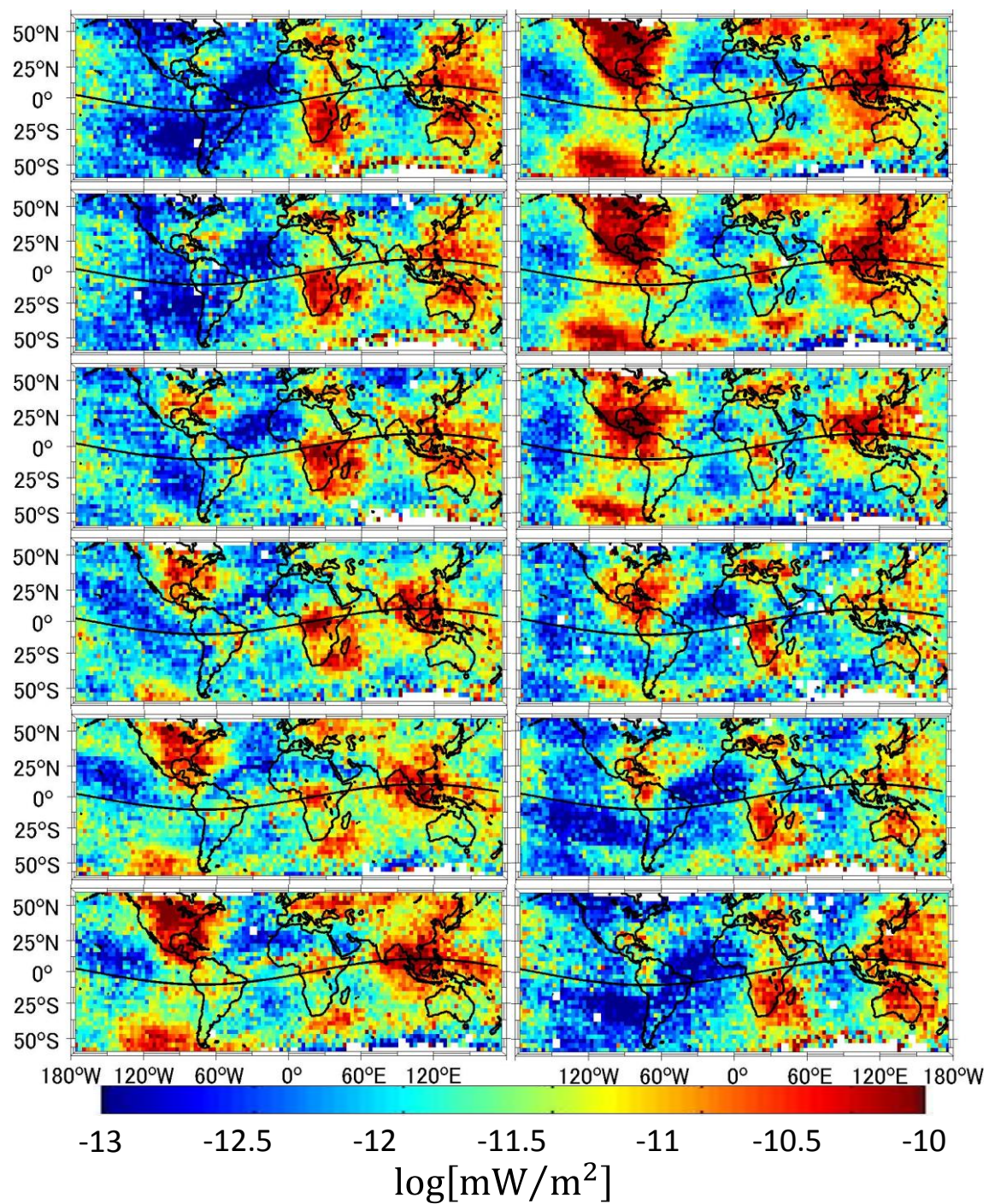


図 C.8：観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の月変化
(VLF 帯、右上から 1～6 月、左上から 7～12 月)

図目次

1.1 ELF 帯電磁波観測による落雷位置標定.....	3
1.2 VLF 帯電磁波観測による落雷位置標定.....	4
1.3 OTD 衛星による 1999 年の雷放電数(平均) 分布.....	4
1.4 6 年間の落雷電磁波強度分布.....	5
1.5 アメリカで観測されたスプライト (2005 年 7 月 28 日).....	6
1.6 スプライトが観測された時刻における電磁界スペクトル.....	7
2.1 電離層における電子密度分布.....	9
2.2 ホイスラ波の磁気圏内伝搬の様子.....	10
3.1 DEMETER 衛星 (出典: Unofficial “DEMETER” website).....	12
3.2 太陽同期軌道(出典: Satellite types and their Orbit).....	13
5.1 観測期間すべての昼間における落雷の発生頻度の季節変化.....	17
5.2 観測期間すべての夜間における落雷の発生頻度の季節変化.....	18
5.3 観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の季節変化.....	19
5.4 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化.....	20
5.5 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化 (ELF 帯)	21
5.6 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の季節変化 (VLF 帯)	22
5.7 領域での電磁波強度の比較 (3~5 月).....	23
5.8 領域での電磁波強度の比較 (6~8 月).....	24
5.9 領域での電磁波強度の比較 (9~11 月).....	24
5.10 領域での電磁波強度の比較 (12~2 月).....	25
5.11 領域での電磁波強度の比較 (3~5 月).....	26
5.12 領域での電磁波強度の比較 (6~8 月).....	27
5.13 領域での電磁波強度の比較 (9~11 月).....	27
5.14 領域での電磁波強度の比較 (12~2 月).....	28
5.15 落雷電磁波強度比の季節変化.....	29
5.16 衛星観測による電界スペクトルおよび時間波形 (2005 年 7 月 28 日).....	30
5.17 衛星観測による磁界スペクトルおよび時間波形 (2005 年 7 月 28 日).....	31
5.18 衛星観測による電界スペクトルおよび時間波形 (2005 年 8 月 3 日).....	32
5.19 衛星観測による磁界スペクトルおよび時間波形 (2005 年 8 月 3 日).....	33

5.20 スプライトを伴う雷の電磁波強度 (2005 年 7 月 28 日)	35
5.21 スプライトを伴う雷の電磁波強度 (2005 年 8 月 3 日)	35
A.1 観測システム.....	43
A.2 電界観測システム.....	44
A.3 磁界観測システム.....	44
B.1 衛星座標系.....	45
B.2 地磁気座標系.....	46
B.3 電界観測システム.....	47
B.4 磁界観測システム.....	48
C.1 観測期間すべての昼間における落雷発生頻度の月変化 (ELF 帯).....	50
C.2 観測期間すべての昼間における落雷発生頻度の月変化 (VLF 帯).....	51
C.3 観測期間すべての夜間における落雷発生頻度の月変化 (ELF 帯).....	52
C.4 観測期間すべての夜間における落雷発生頻度の月変化 (VLF 帯).....	53
C.5 観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の月変化 (ELF 帯).....	54
C.6 観測期間すべての昼間における落雷電磁波強度の月変化 (VLF 帯).....	55
C.7 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の月変化 (ELF 帯).....	56
C.8 観測期間すべての夜間における落雷電磁波強度の月変化 (VLF 帯).....	57

表目次

3.1 母子里観測所データ諸元.....	11
3.2 DEMETER 衛星データ諸元.....	14
4.1 解析に用いたデータ	15
4.2 照合に用いたスプライト.....	16
6.1 2 種類の雷が最も活発な領域.....	36