


## 成果報告書

VLF 帯空電観測を用いた世界的落雷位置  
標定ネットワークの構築による災害防止

平成 29 年 6 月 1 日

湘南工科大学 電気電子工学科 成田知巳 

# 目次

第1章	序論.....	1
1.1	研究目的.....	1
1.2	雷放電.....	2
1.3	電磁波の伝搬.....	3
1.3.1	大地-電離層導波管伝搬.....	3
1.3.2	VLF 帯空電.....	4
1.4	雷放電位置標定システム.....	4
1.4.1	雷放電観測手法.....	4
1.4.2	雷放電位置標定システム (LLS).....	5
1.5	Blitzortung.org の概要.....	6
第2章	VLF 帯空電観測を用いた Blitzortung の全国展開.....	8
2.1	Blitzortung システムの構成.....	8
2.1.1	Blitzortung 受信局の構成.....	8
2.1.2	電界アンテナ.....	11
2.1.3	磁界アンテナ.....	13
2.1.4	Blitzortung システムの雷放電位置標定手法.....	16
2.1.5	受信局の設置.....	17
2.2	Blitzortung 受信局の全国展開.....	18
2.3	Blitzortung システムによる雷放電位置標定事例.....	21
2.4	緒言.....	22
第3章	Blitzortung システムによる落雷分布.....	23
3.1	落雷分布.....	23
3.1.1	日本の落雷分布.....	23
3.1.2	米国の落雷分布.....	26
3.1.3	欧州の落雷分布.....	27
3.1.4	オセアニア地域の落雷分布.....	28
3.1.5	世界の落雷分布.....	30
3.2	WWLLN との比較.....	33
3.3	日本の冬季雷分布.....	34
3.4	緒言.....	45

第4章	Blitzortung システムの波形観測 .....	46
4.1	磁界波形.....	46
4.1.1	雷放電位置標定事例.....	46
4.2	磁界波形の地表波と空間波 .....	55
4.3	緒言.....	57
第5章	Blitzortung の統計データ .....	58
5.1	オセアニアにおける標定率 .....	58
5.2	アジアにおける貢献度 .....	59
5.3	Vaisala システムとの比較 .....	60
5.4	緒言.....	61
第6章	結論.....	62
	参考文献.....	63
付録①	Blitzortung の受信局一覧 .....	65
付録②	関連発表 PowerPoint.....	79
付録③	関連発表論文.....	95

# 第1章 序論

## 1.1 研究目的

高度情報化社会の発達とともに、様々な分野において電子機器が導入され、ネットワーク化された機器によってインフラなど、社会の基盤が支えられている。しかし、これらの電子機器は落雷に伴い外部から侵入してくるサージ電圧・電流に対して非常に脆弱である。落雷による機器の破損や、工場の生産ラインの停止、機器の不具合によって被る被害額は計り知れない。また、平成 22 年警察白書の統計資料[1]より 2005 年~2009 年において、落雷による死者は平均 2.8 人、負傷者は平均 10.0 人と落雷による人的災害も発生している。このように落雷によってもたらされる経済損失は膨大であり、電子機器や人命への雷事故対策がこれまで以上に重要となる。これらの対策として、落雷分布の傾向から設備の設置地域の選定やリアルタイムでの落雷の状況監視、警告などが有効である。そこで、落雷の状況を知るため、落雷の位置標定を行う雷放電位置標定ネットワークが必要となる。

雷放電位置標定には、安価で精度の高い雷放電位置標定ネットワークが望ましい。商用ネットワークは、これまでに気象会社や電力会社などが運用するシステム[2][3]があるが、公開されている雷に関するデータは広域の情報であり、詳細は公開されておらず、落雷波形や極性データなどの詳細なデータを入手するには、高額な料金を払う必要がある。さらに、既存の雷放電位置標定ネットワークは限られた地域のみで落雷を標定するシステムが多く、標定に LF 帯周波数などの波長の短い周波数を用いているため、雷放電により発生する電磁波を観測する受信局を約 200km 間隔に設置する必要がある。なお、受信局は高額であり、広く電磁気学の知識が必要となってくるため、個人が受信局の製作や設置を行うことは困難である。

一方、IoT 技術の向上によりセンサの小型化やネットワークを介して、装置やセンサをコントロールすることが容易になった。そこで、IoT 技術を活用した安価な受信局を用いて、世界規模で高精度の落雷標定ネットワークを構築し、広く雷に関するデータを利用できるよう、ドイツのハインリッヒ大学の Egon Wanke 氏らは、2012 年に落雷位置標定ネットワーク構築プロジェクト「Blitzortung.org」[4]を開始した。本プロジェクトは、自ら受信局の電子部品を購入し、組み立ておよび運用するなど受信局を管理する必要がある。なお、商用目的では利用できない。

本プロジェクトで使用する受信局は IoT 技術を活用したものであり、小型で価格は 200 ユーロ程度、日本円で約 3 万円と安価であるため、個人で購入することが可能である。さらに、観測周波数帯に VLF 帯を用いることにより、少ない受信局数での全球的な雷放電位置標定の実施や、世界の落雷に関するデータを無料で取得可能という特徴がある。

Blitzortung システムでは、標定位置の座標を始め、観測された落雷波形や一定期間ごとの落雷数、受信局からの落雷までの距離、落雷分布などの落雷に関する詳細なデータを容

易に取得することができる。

本研究では、Blitzortung システムの日本初導入から日本における Blitzortung の雷放電位置標定ネットワークの構築、雷放電位置標定の妥当性の検証および落雷の電磁波の波形観測を行った結果を述べる。

## 1.2 雷放電

一般的な雷雲は、雲中であられや氷晶等が衝突することによって電荷分離が生じ、上部に正電荷、下部に負電荷が分布している[5]。雷雲内に電荷が蓄積されると、周辺電界強度が高くなり、それが絶縁破壊臨界値を超えると、部分的に空気の絶縁が破壊され、放電が発生すると考えられている。放電は、この雲内の正負極間で発生する放電である雲内放電と、雲内の電荷が地上に放電する対地雷放電（落雷）の二種類に大きく分けられる。さらに落雷では、雲内の正電荷が地上に落ちる正極性落雷と、雲内の負電荷が地上に落ちる負極性落雷がある。日本においては、夏の落雷の90%以上が負極性落雷であるのに対し、冬の落雷では正極性落雷の割合が増え、日本沿岸部の長期観測結果より、発生率の平均値が33%であることが分かっている[6]。また、リーダーの進行方向により落雷は更に分けられ、進行する方向が上向きの落雷を上向き雷、下向きの落雷を下向き雷と呼ぶ。上向き雷は日本海側の冬の落雷に頻繁に見られ、下向き雷は夏の落雷で発生しやすい。特に負極性の下向き雷は落雷の代表的な例である[5]。落雷の4つの種類を図1.1に示す。

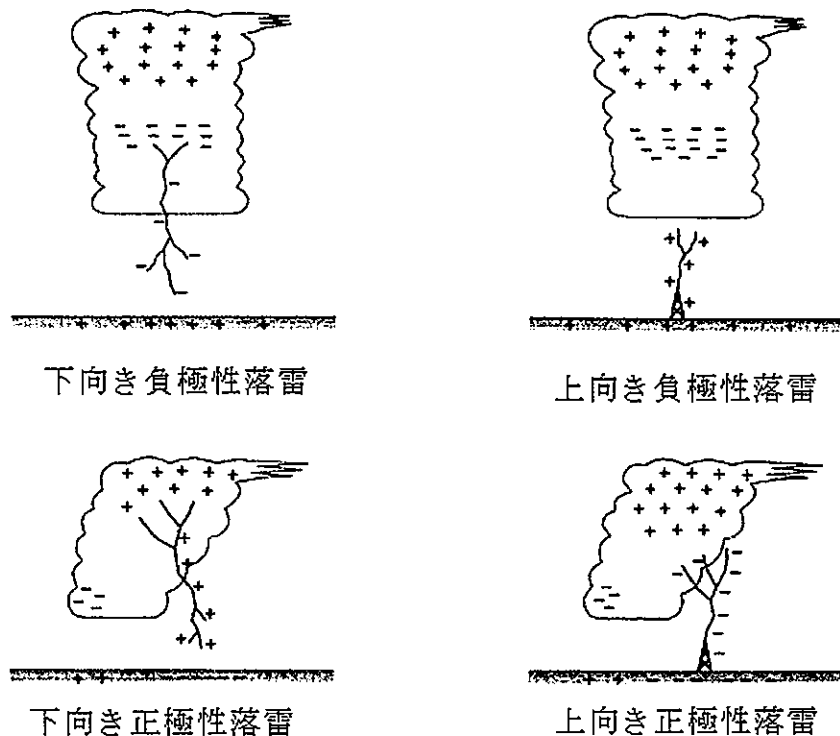


図 1.1 落雷の種類

落雷の放電過程において、最初に空気の絶縁を破壊して進行する放電をリーダー（先駆放電路）と呼ぶ。リーダーは、枝分かれしながら大地に至るまでに、進行と停止を段階的に繰り返す。この状態をステップトリーダという。ステップトリーダは  $10^5\sim 10^6$ (m/s) で進行する。リーダーが地上に達したとき、地上との間に放電路ができ、リーダーの向きと反対方向に主放電が生じる。この雷撃を帰還雷撃（リターンストローク）と呼ぶ。最初の帰還雷撃は第一雷撃と呼ばれ、平均的には約  $100\sim 200\mu\text{s}$  で終了する。つまり、落雷には雲内で電荷分離が生じ、リーダーが発生、ステップトリーダが生じ、リーダーが大地に至ると、主放電である帰還雷撃が発生するという過程がある[7]。

第一雷撃から数 10ms（代表値 40ms）経過すると、ダートリーダが大地に向かって第一雷撃と同じ放電路を進展する。なお、ダートリーダはステップトリーダより早く進展する。ダートリーダが大地に至ると第二の帰還雷撃（後続帰還雷撃）が発生し、後続帰還雷撃の発生過程は、雷雲内の電荷が全て中和されるまで繰り返し続く。第一雷撃のみで落雷が終了してしまう場合を単一落雷といい、複数の帰還雷撃を伴う落雷を多重雷と呼ぶ。

## 1.3 電磁波の伝搬

### 1.3.1 大地-電離層導波管伝搬

雷放電から放射された電磁波は球面波として空間を伝播し、その電磁波は、大地と電離層との間を多重反射して伝搬する空間波（Sky wave）と、地表に沿って直接伝搬する地表波（Ground wave）があることが知られている[8]。VLF 帯などの周波数が非常に低い領域の空間波は大地と電離層の間を数千 km に渡って導波管伝搬する。これは大地-電離層導波管伝搬と称される。図 1.2 に空間波と地表波の模式図を示す。大地と電離層で構成された導波管の上部境界から下部境界までの高さは、VLF 帯の電波に対してほぼ同じオーダーとなり、大気を絶縁体、大地と電離層の導電率はほぼ無限大で完全導体と見なせるので、通常のマイクロ波と導波管の関係と同様となる。そして、いくつかの明確に異なった遮断周波数を持つ伝搬モードがある。完全導体の境界からなる導波管の例で言えば、電磁波は完全導体内には進入できず完全反射され、TM 波の場合、伝搬モードは  $f=3\text{kHz}$  で 2 つ、 $f=30\text{kHz}$  で 10 個である。

ELF、VLF、LF 帯では導波管の伝搬様式が問題になる。この 3 つの周波数帯では波長の大きさにより、理論的な取り扱いが異なっている。ELF 帯の高い周波数帯では遮断周波数が現れ、低い領域では地球と電離層で構成される同心球殻の共振器による共振理論、VLF 帯ではモード伝搬理論、LF 帯ではモード伝搬理論と高い周波数領域では幾何学理論で取り扱われている。

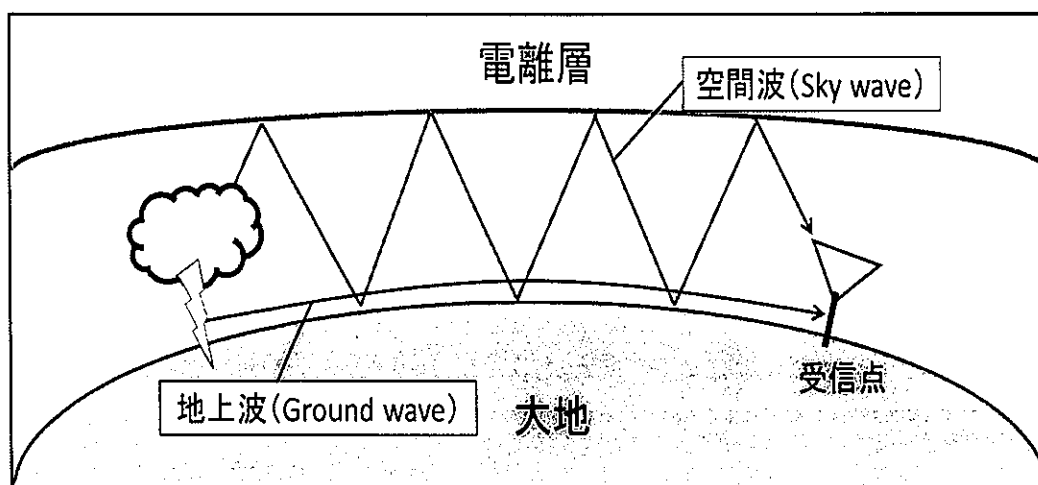


図 1.2 大地-電離層導波管伝搬の模式

### 1.3.2 VLF 帯空電

一般的に、雷放電によって電磁波が生じるが、それは瞬間的なパルス波形であり、超々低周波から超高周波までの幅広い周波数成分を含んでいる。電波の伝搬速度は周波数依存性を持ち、周波数が低いほど速度が遅くなる特徴がある。そのため、超低周波である VLF 帯 (3-30kHz) の電磁波は、大地と電離層で構築された導波管内をゆっくりとした速度で進み、数千 km 以上の遠方でも観測される。

VLF 帯の電磁波は、電離層を完全に突き抜けることなく反射を起こし、低い減衰率で長距離に渡って伝播していくことで、地球を何周もすることができる。また、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[8]。

## 1.4 雷放電位置標定システム

### 1.4.1 雷放電観測手法

落雷の位置標定には、ELF 帯から UHF 帯までの広い範囲の電磁波が利用されている。雷放電の位置は人工衛星に搭載された観測システムの場合、光や電磁波の到来方向から直接知ることができるが、地上の観測システムの場合には、複数地点での電磁波の到来方向や到達時間差を利用して標定されている。

雷放電によって生じる電磁波は、磁界、電界共に電磁波の伝搬方向に直交しており、大地からの帰還雷撃電流は、概ね鉛直方向に流れるので、磁界が大地表面に平行、電界は鉛直方向に発生する。したがって、地上での雷放電位置標定では磁界観測が適応される。

雷放電観測の標定手法としては、交会法 (MDF : Magnetic Direction Finding) と到来時間差法 (TOA : Time of Arrival) がある。図 1.3 に交会法と到達時間差法の概略図を示す。交会法は 2 局以上の既知点において、観測された落雷方向に直線を引き、直線が交わる点を

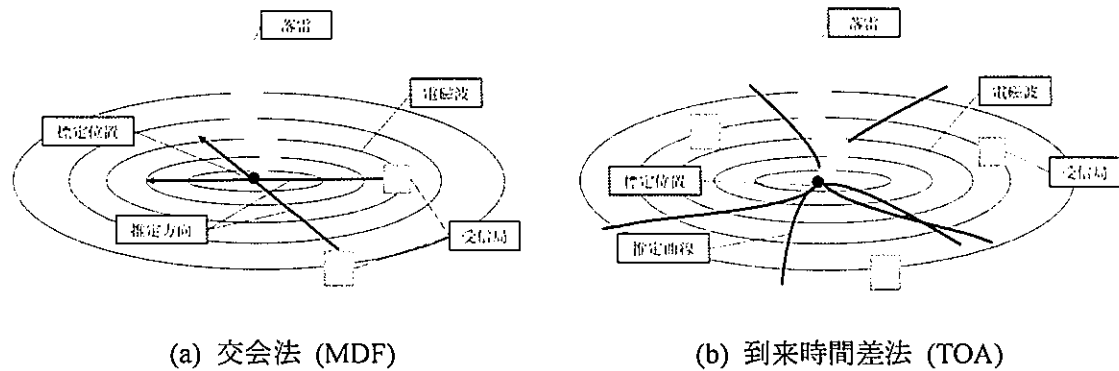


図 1.3 雷放電位置評定手法

標定点とする方法である。到来時間差法は、電磁波がほぼ光速で伝播することを利用して、3局以上で観測した電磁波の到来時間を GPS で付け、各局の到来時間差から落雷地点までの距離を算出し、その3つの双曲線の交点を落雷位置として標定できる。なお、GPS 衛星は、原子時計を搭載しており、それから高精度の時刻パルスを受信することで時刻を決定している。現在では安価な GPS でも時間誤差は  $0.1\mu\text{s}\sim 1\mu\text{s}$  未満のため、高精度の位置標定が容易に可能となる。そのため、現在では到来時間差法が主流となっている。

### 1.4.2 雷放電位置標定システム (LLS)

雷放電位置標定システムは、各国に普及しており、米国の LLP(Lightning Location and Protection)システムや、LPATS(Lightning Position And Tracking System)、フランスの SAFIR(Surveillance et Alerte foudre par Interférométrie Radioélectrique)システムが、各国に普及し、国内や地域でそれぞれのネットワークシステムを形成している[9]。

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、電磁波観測が実施されている。中でも VLF 帯などの超低周波数帯の特徴として、観測範囲が数千 km と広範囲であるという特徴がある。これは、帰還雷撃に伴う放射電力の強度が最も強く、大地と電離層で反射を繰り返して長距離に渡って伝搬していくためである。しかし、VLF 帯では、帰還雷撃に伴う電磁波は強いが、雲内放電や、ステップリーダに伴う電磁波は弱いため、雷放電の 9 割に相当する雲内放電の標定は困難である。この VLF 帯を用いた雷放電位置標定システムに、WWLLN(World Wide Lightning Location Network)があり、これは、全世界に設置された 40 箇所のセンサで構築されているネットワークで、全球的な雷放電位置標定を行っている。標定方法は群遅延を考慮した到来時間差法であり、最低 5 つのセンサが必要である。帰還雷撃電流 30kA の検出効率は 30% であり、標定精度は平均 10km 以内である。なお日本国内には、電気通信大学(東京都)、大阪大学(大阪府)の 2 箇所に受信局が設置されている[10]。



国内では、LF帯を用いたネットワークであるJLDN(Japanese Lightning Detection Network)が形成されている。これは、フランクリン・ジャパンが展開している全国規模の雷観測ネットワークであり、2015年の時点で全国に30箇所のセンサが設置されている。標定方法は到来時間差法であり、1つの落雷に対し、常時平均6~7基のセンサが参加している。捕捉率は90%以上、標定精度は平均500m以下となっており、雷放電位置標定と同時に電流値の観測も行っている。

近年では、既存のシステムに対して、高精度のものや普及を目指して低コスト化を図ったシステムの開発が行われている。

## 1.5 Blitzortung.org の概要

Blitzortung.orgとは、2012年にドイツのハインリッヒ大学のEgon Wanke氏、デンマークのRicho Andersen氏、ドイツのTobias Volgnandt氏ら3人によって開始されたプロジェクトであり、安価な受信局を用いて、世界規模で高精度の雷放電位置標定ネットワークを構築し、広く雷に関するデータを一般の人でも利用できることを目的としたプロジェクトである[6]。

Blitzortung.orgでは、サーバーの管理とホームページの運用、受信局キットの販売をしている。個人がボランティアとして受信局キットを購入し、受信局をはんだ付けなどで組み立て、設置する事により、Blitzortungの雷放電位置標定システムを構築している。

2017年1月時点で、Blitzortung受信局は、世界に1476局設置されている。内訳は、欧州に1224局、米国に174局、オセアニア地域に43局、アジアに29局、アフリカに6局となっている。アクティブ率は約60%である。日本では、2016年2月に湘南工科大学が初めて設置し、以降国内での受信局の設置を進めている。2017年1月までに、札幌、仙台、栃木、浦和、晴海、東村山、藤沢、金沢、兵庫、福岡、那覇に合計11局の受信局を設置した[11]。これまでに、アジアに設置されている受信局が少ないため、アジアでの標定が少なかったが、日本に受信局を設置した事によりオセアニア、アジア地域での標定数、標定精度共に向上が期待できる。

受信局で観測された落雷の波形や観測時間、受信局の座標のデータは、ドイツのサーバーに送られ、サーバーで同一雷における観測データを統計的に処理し、位置標定を行っている。位置標定の結果はインターネットに公開されており、リアルタイムで地図上に表示される標定位置を見ることが出来る。その他にも、時間ごとの落雷数の統計データや、Blitzortungの運用が開始された、2012年からこれまでの落雷位置のアーカイブス、他のLLSとの精度の比較など様々な情報が公開されている。なお、商業利用はできない。

図1.4に世界におけるBlitzortung受信局の配置図を示す。これは2017年1月現在の受信局の配置図である。

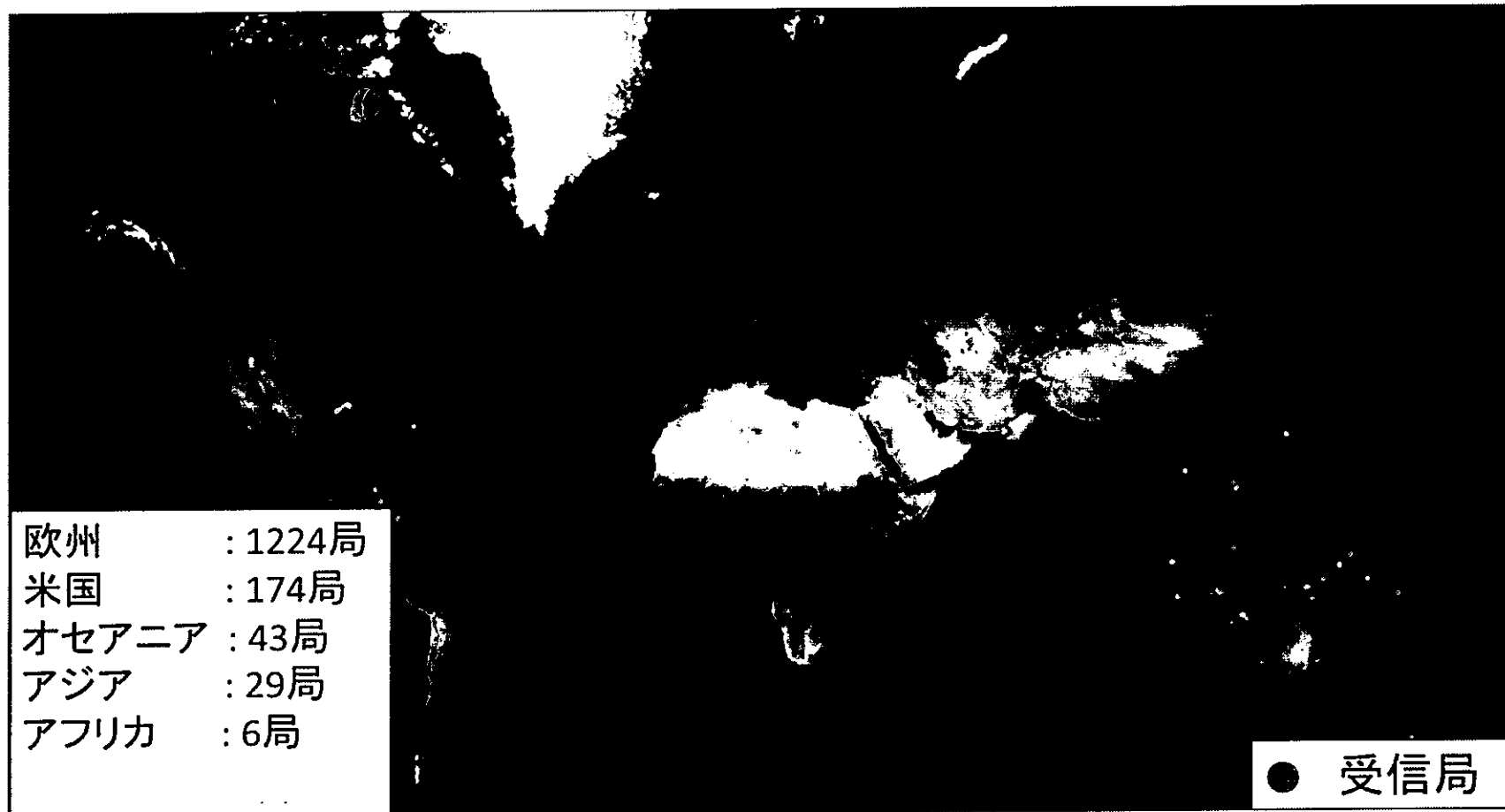


図 1.4 Blitzortung 受信局の配置図 (2017.1)

## 第2章 VLF 帯空電観測を用いた Blitzortung の全国展開

### 2.1 Blitzortung システムの構成

#### 2.1.1 Blitzortung 受信局の構成

Blitzortung の受信局は、次の図 2.1 に示すように電界アンテナと磁界アンテナ、コントローラボード、GPS で構成されている。

電界と磁界のアンテナは、受信部とアンプで構成されている。それぞれのアンテナのアンプによって、電界では 5-50kHz、磁界では 1-50kHz の VLF 帯電磁波をフィルタ回路によって抽出している。電界アンテナは近距離における落雷の極性判定に、磁界アンテナは雷放電位置標定に使われている。電界の受信部には銅線のホイップアンテナが、磁界の受信部にはフェライト棒アンテナが使われている。コントローラボードには ARM 社のマイコンである STM ボード(STM32F4DISCOVERY)[12]を使用した。本マイコンの最大サンプリング周波数は 525kHz、分解能は 12bit である。それぞれのアンテナで観測された電磁波の波形はコントローラボードに送られ、A/D 変換される。波形がトリガを超えると、観測した時刻を、GPS(MediaTek 製 MT3339)[13]を用いて 50ns の精度で時間を記録している。記録された波形と時刻、受信局の座標のデータがネットワークを通じてサーバーに送られる。データの送信が終わると自動的にトリガ待ち状態となる。なお、ディスプレイには温度や CPU の稼働率などのシステムの状態や、トリガを超えた波形の観測時刻などの情報がリアルタイムで表示されている。Blitzortung の藤沢に設置した受信局（以降 Kanagawa 局）における諸元を表 2.1 に、コントローラボードの写真を図 2.2 に、回路図を図 2.3 示す。

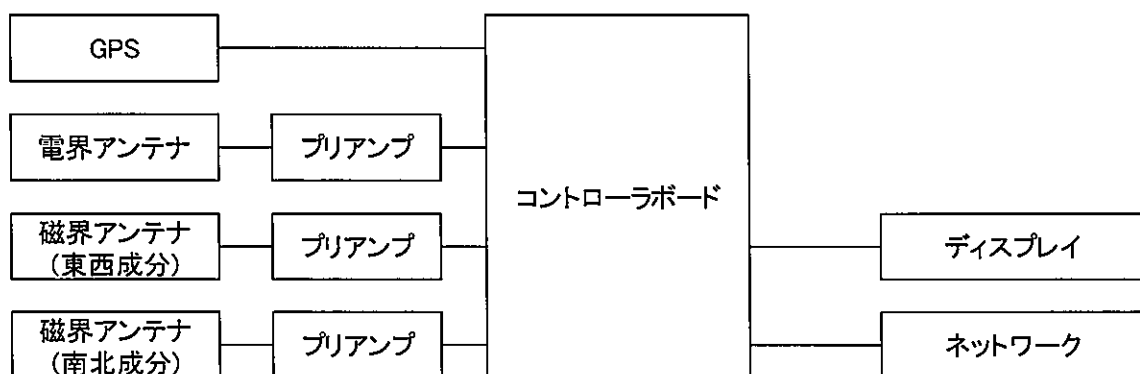


図 2.1 Blitzortung 受信局の概略図

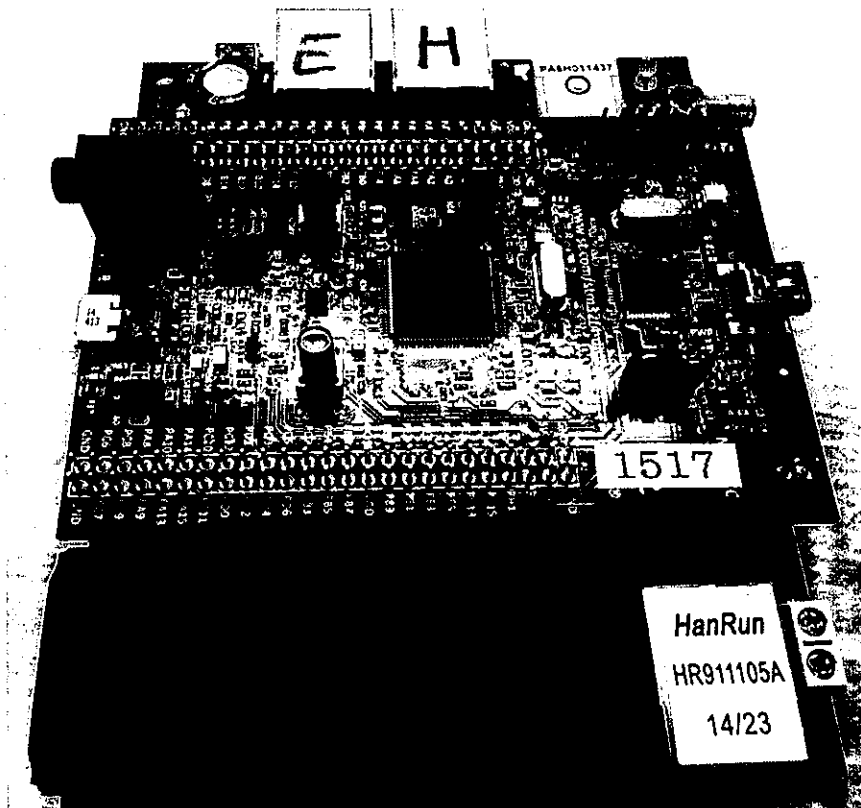


図 2.2 コントローラボード写真

表 2.1 Blitzortung 受信局の諸元 (Kanagawa 局)

Geographic coordinates	Latitude	35.323792°
	Longitude	139.4525591°
Waveform observation	Vertical electric field component	
	Horizontally magnetic field component (West-East)	
	Horizontally magnetic field component (North-South)	
Sampling rate	525kHz	
Observation frequency	5-50kHz (Electric field)	
	1-50kHz (Magnetic field)	

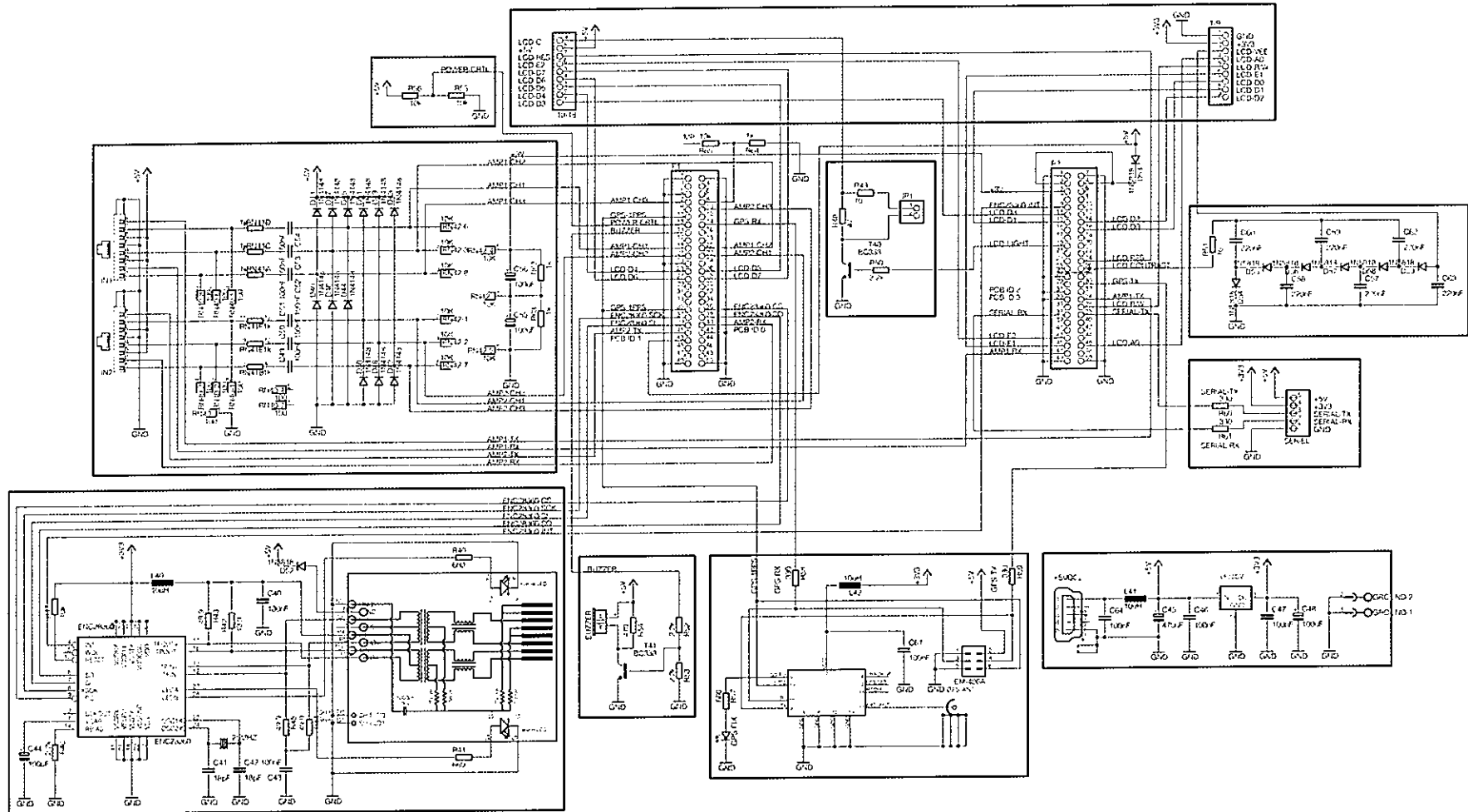
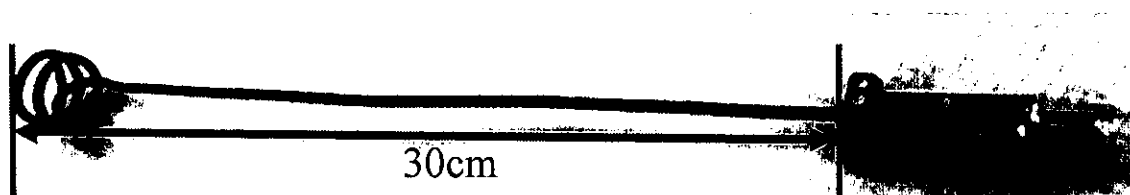


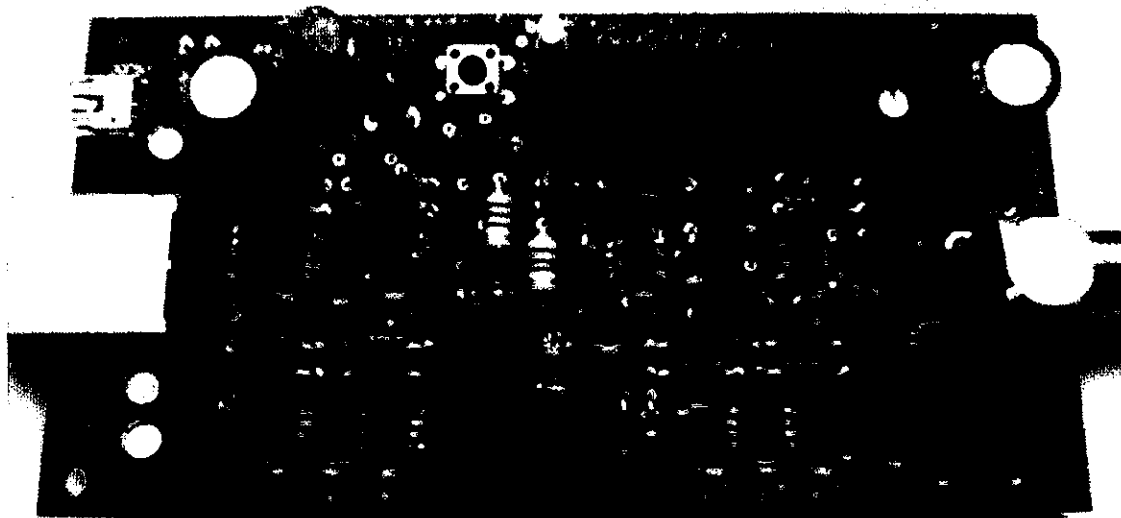
図 2.3 コントローラボード回路図

### 2.1.2 電界アンテナ

電界アンテナは、受信部であるアンテナと信号増幅用のアンプで構成されている。図 2.4 にアンテナと電界アンプ、図 2.5 に回路図を示す。電界アンテナでは、落雷によって発生した、電磁波の電界成分をアンテナで観測し、観測された電界の変化をアンプで増幅、コントローラボードへ信号を出力している。出力された電界波形がトリガを超えると落雷の極性の判定に利用される。なお観測周波数帯域は 5-50kHz である。Kanagawa 局で使用した電界アンテナは銅線のホイップアンテナを使用し、鉛直方向に設置している。なお、電磁波の磁界成分の信号の伝送には、アンテナとアンプ間では同軸ケーブルを、アンプとコントローラボード間では LAN ケーブルを使用している。また信号のゲインは、周辺のノイズレベルによって 1-1024 の値で変化する。



(a) ホイップアンテナ



(b) 電界アンプ

図 2.4 Blitzortung 電界観測アンテナ

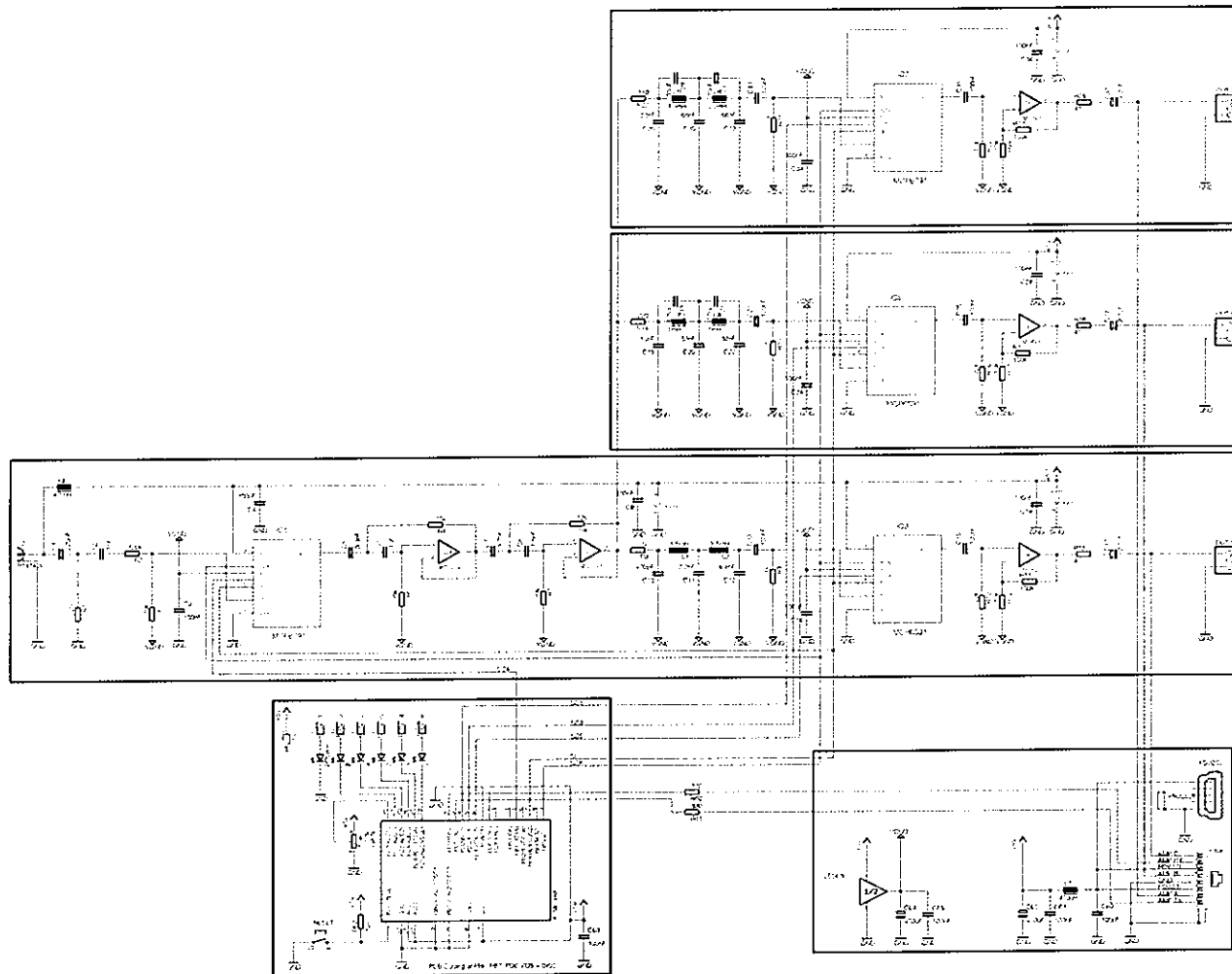
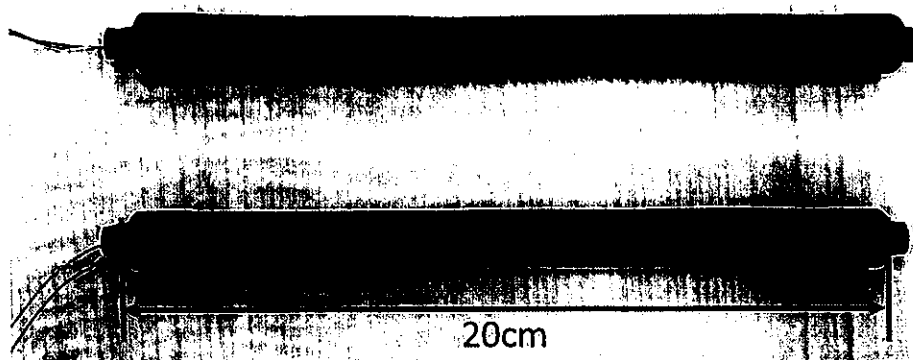


図 2.5 電界アンテナの回路図

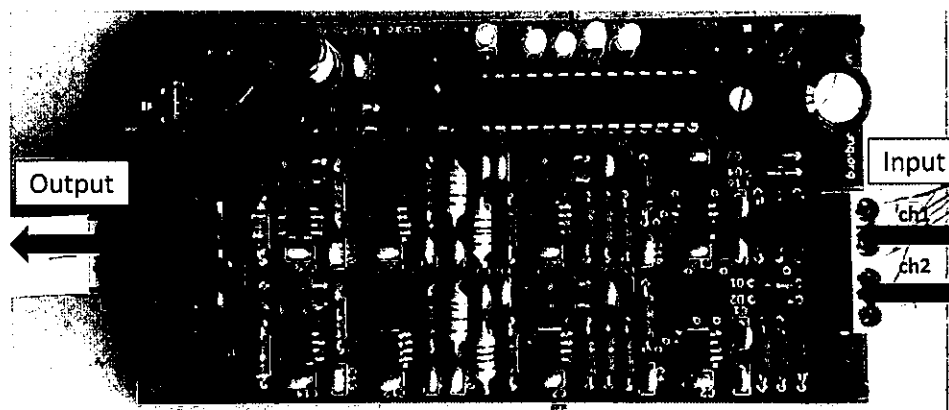
### 2.1.3 磁界アンテナ

磁界観測システムは、アンテナとアンプで構成されたシステムである。図 2.6 に磁界アンテナと磁界アンプ、図 2.7 に回路図を示す。磁界アンテナでは、落雷による磁界の変化を、電磁誘導によって起電力がフェライト棒アンテナ部分で発生、その起電力をアンプで増幅し、コントローラボードへ信号として出力している。Kanagawa 磁界アンテナは2つの20cmのフェライト棒アンテナを使用し、地面と並行に、東西と南北方向にそれぞれ一本ずつ設置している。なお、電磁波の磁界成分の信号の伝送には、アンテナとアンプ間は直結し、アンプとコントローラボード間ではLANケーブルを使用している。

磁界アンプの周波数特性を、図 2.8 に示す。入力電圧を一定とし、1kHzのときの出力を基準として減衰分を利得で表した周波数特性測定結果である。図 2.5 より、低減量-3dBにおいて、低域遮断周波数は1kHz、高域遮断周波数は50kHzであることから、VLF帯域を観測するのに十分な性能を有している事がわかる。



(a) フェライト棒アンテナ



(b) 磁界アンプ

図 2.6 Blitzortung 磁界観測アンテナ



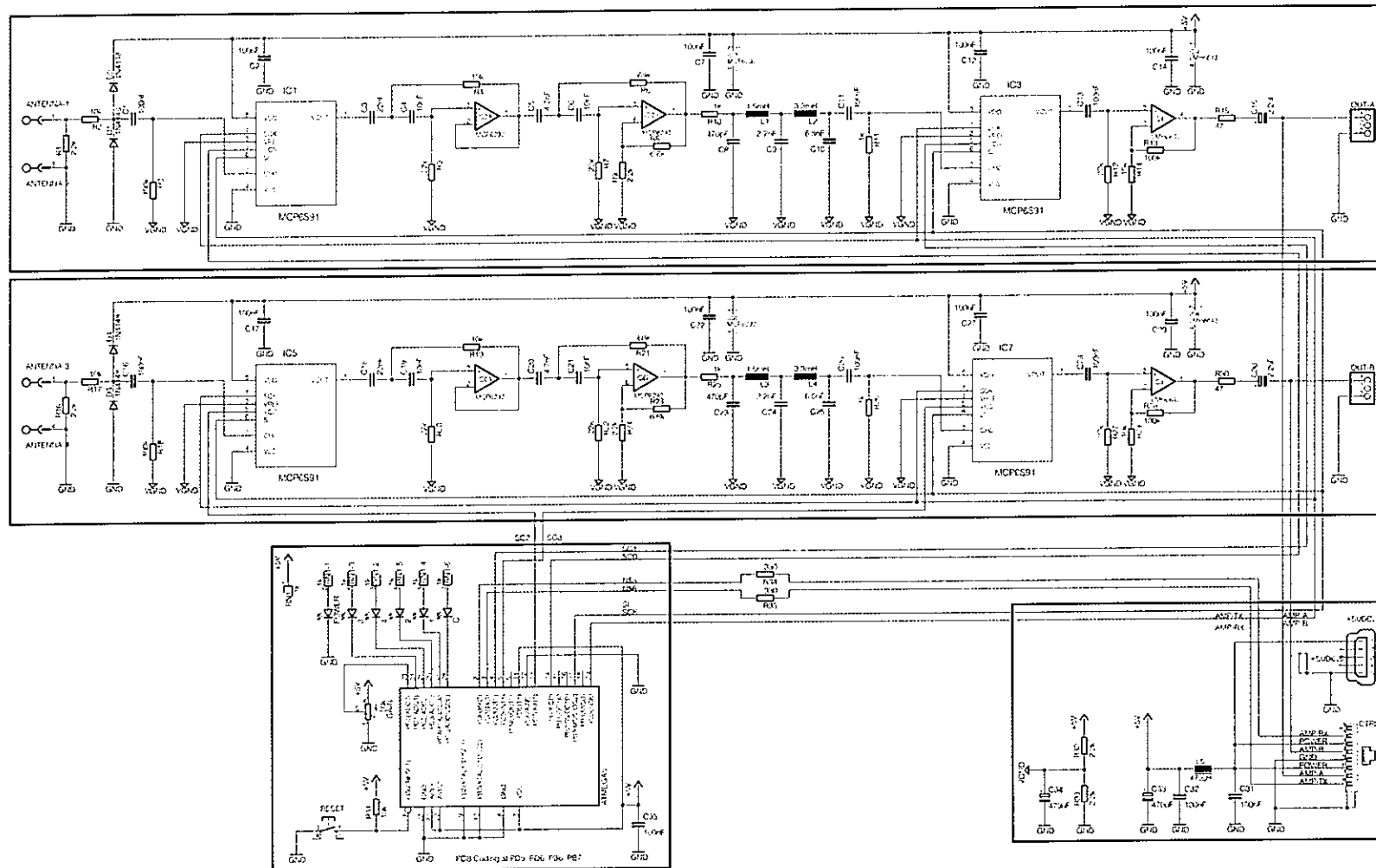


図 2.7 磁界アンプの回路

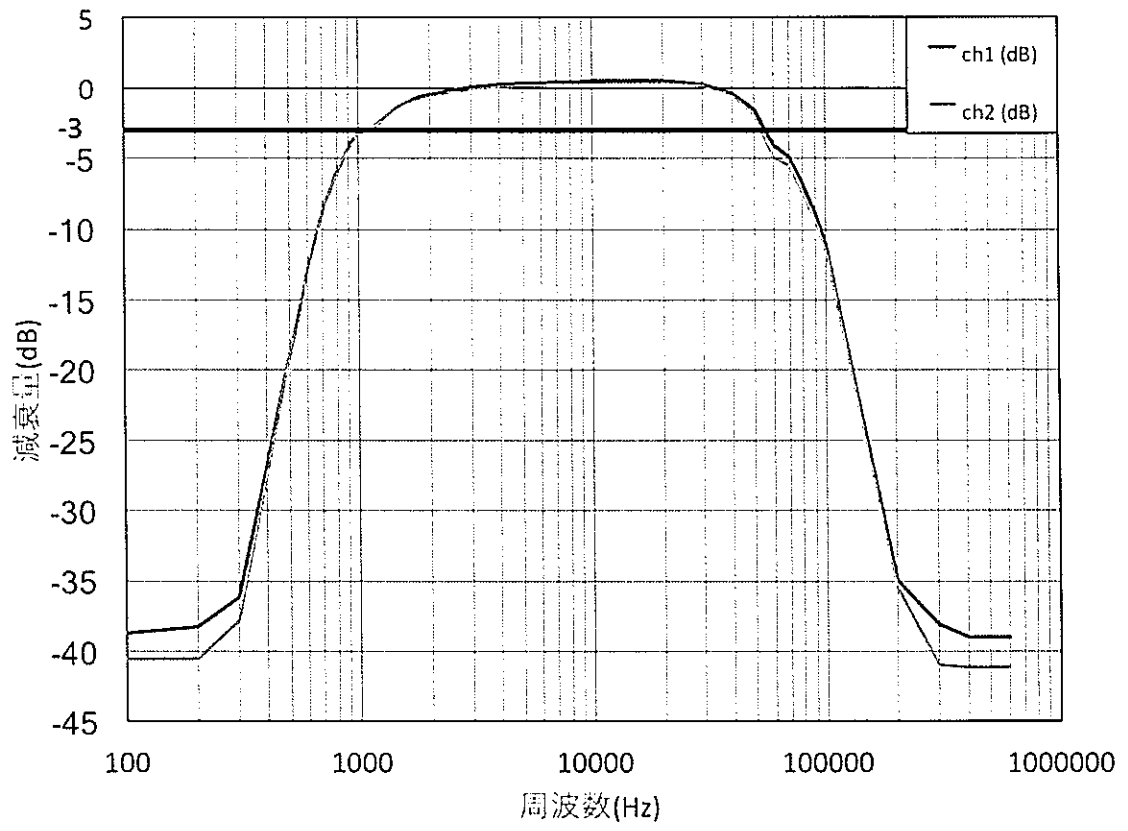


図 2.8 磁界アンプの周波数特性測定結果

## 2.1.4 Blitzortung システムの雷放電位置標定手法

Blitzortung では、雷放電位置標定手法に到来時間差方式を適用している。雷放電に伴う VLF 帯の電磁波を各受信局で受信し、GPS から得られる 50ns 精度の到来時間差を算出することで、落雷の発生位置を標定する。位置標定の標定誤差を最小にするため、1 つの落雷に対して複数の受信局が必要となる。標定の精度向上のため、受信局数に応じて受信局の最低数を設定している。2017 年 1 月現在、標定に必要な受信局は欧州では 10 局、アジア・オセアニア地域では 6 局に設定している。

標定位置を確定する際に、mds (maximum deviation span) と mcg (maximum cycle gap) という 2 つのパラメーターを用いて標定精度を向上させている。mds とは計算された複数の標定位置の最大の時間差を ns 単位で表した値である。一般的に電磁波は光速に伝搬することが知られており、1ns で 0.3m 伝搬するので、例えば mds が 6048 なら  $6048(\text{ns}) \times 0.3(\text{m}) = 1874(\text{m})$  で最大距離差は 1874m となる。Blitzortung では、15000m 以上のものは標定しない設定にしている。次に、mcg とは標定点を円の中心として、標定に用いた受信局の方向から受信局間の角度を算出し、受信局の偏りを角度で表した値である。例えば mcg が 269 の場合には、ほとんどの受信局が一方向に偏っているため標定精度が悪いことを示している。Blitzortung では、270 以上のものは標定しない設定にしている。

図 2.9 に到来時間差から算出した双曲線の図を示す。緑の点が受信局、白い曲線の重なる点が標定位置となる。

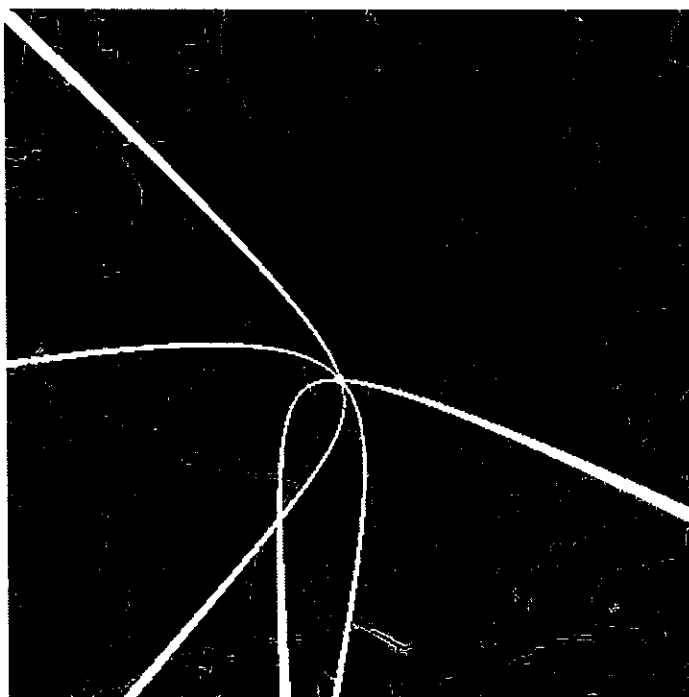
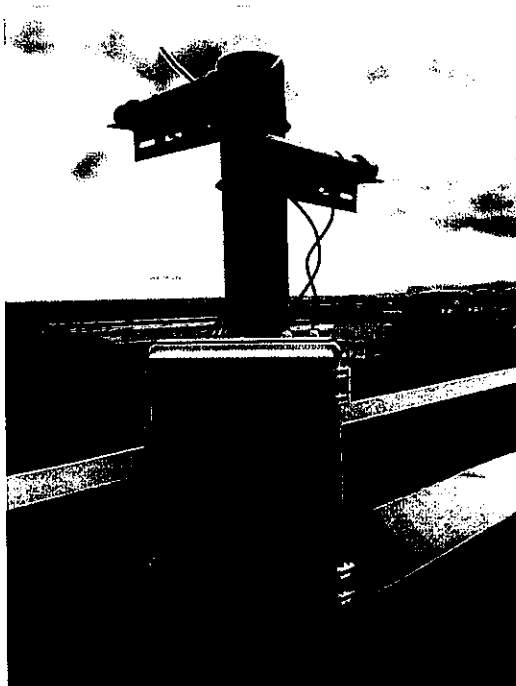


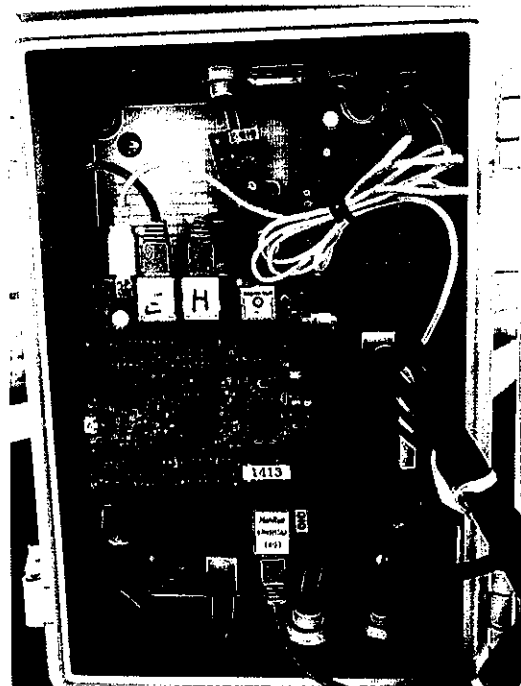
図 2.9 雷放電位置標定の双曲線

### 2.1.5 受信局の設置

2016年2月に藤沢に受信局（以降 Kanagawa 局）を設置した。本局は、日本で初めて設置された Blitzortung システムである。図 2.10 に Kanagawa 局の設置状況を示す。本体は、防水ケースに入れた状態で、30cm×20cm×10cm 程度であり、重量は約 2kg。観測場所には、ノイズの少ない周囲が開けた地点が好ましいため、周りに電波を遮る建物やノイズ源が少なく、太平洋を見渡せる大学の屋上とした。電源は、学内の AC-100V から直流安定化電源で屋上に DC-5V で電源供給をし、波形観測のためのアンテナとして、磁界アンテナと電界アンテナを設置した。磁界アンテナは、地面と垂直にフェライト棒アンテナをそれぞれ東西、南北方向に、電界アンテナは、銅線のホイップアンテナを鉛直方向に、それぞれ防水加工を施し設置した。さらに、ネットワークは学内ネットワークを使用した。落雷観測は磁界アンテナで行い、近距離落雷の極性判定は電界アンテナを使用している。



(a) 受信局の外観



(b) 受信局本体

図 2.10 Kanagawa 局の設置状況

## 2.2 Blitzortung 受信局の全国展開

雷放電位置標定ネットワークを形成するには複数の受信局が必要となり、Blitzortung システムではアジア・オセアニア地域の雷放電位置標定に 6 局以上の受信局が必要となる。雷放電位置標定を実施するには、位置標定を実施したい地域を囲うように、受信局を設置するのが効率的である。本システムの観測周波数帯は VLF 帯なので、1 波長の長さは式(2.1)、式(2.2)に示すように 10~100 km である。したがって、日本国内の落雷の位置標定を実施するためのネットワークを形成するためには、受信局の設置数が最小かつ VLF 帯の電磁波を効率的に観測できるよう、受信局の設置間隔を 100 km に設定し、標定範囲である日本列島を囲うように受信局を設置すればいい。そこで、全国に受信局を設置するために、2016 年 2 月から湘南工科大学の屋上で、本システムの動作確認、エラーなどの調査および効率的な設置方法などを模索した後、各大学や企業などに受信局の設置場所の提供などを依頼した。

2017 年 1 月までに、札幌、仙台、栃木、浦和、晴海、東村山、藤沢、金沢、兵庫、福岡、那覇に合計 11 局の受信局を設置した。図 2.11 に受信局のリストを、図 2.12 に受信局の増加推移を、図 2.13 に受信局の配置図を示す。

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m]$$

f=3[kHz]の場合

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{3 \times 10^3} \\ &= 100 \quad [km] \end{aligned} \quad (2.1)$$

f=30[kHz]の場合

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{3 \times 10^8}{30 \times 10^3} \\ &= 10 \quad [km] \end{aligned} \quad (2.2)$$

Station City	Comment	Country Regions	Latitude	Longitude	Altitude	PCB Firmware	Status
1413 Kanagawa, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.323803	139.452515	16	10.4	8.2 Running
1460 West Tokyo, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.757423	139.46611	70	10.4	7.4 Running
1462 Kanazawa, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	36.760643	136.753281	36	10.4	7.4 Running
1525 Sendai, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	38.259869	140.838669	172	19.1	8.1b1 Running
1530 Tokyo, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.652454	139.774612	15	19.1	8.2 Running
1531 Tochigi, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	36.487743	139.846664	85	19.1	8.2 Running
1586 Urawa, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.880253	139.662308	18	19.3	8.1b1 Running
1587 Okinawa, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	26.252897	127.766602	143	19.3	8.2 Running
1646 Hyogo, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	34.733394	135.424606	10	19.3	8.1 Running
1666 Sapporo, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	43.072647	141.339432	19	19.3	8.2 Running
1704 Fukuoka, JAPAN	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	33.254993	130.549561	40	19.3	8.2 Running
1449 Under construction	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.323914	139.451187	5	19.1	8.0-b5 Offline
1517 2017.3-start(Ogasawara)	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.32365	139.451355	68	10.4	8.2 Offline
1528 2017.3-start(Gunma)	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.32357	139.45137	-1	19.1	8.2 Offline
1585 2017.3-start(Toyama)	Shonan Institute of Technology Japan	Oceania/Asia	35.323708	139.451401	35	19.3	8.1b1 Offline

図 2.11 Blitzortung 受信局のリスト

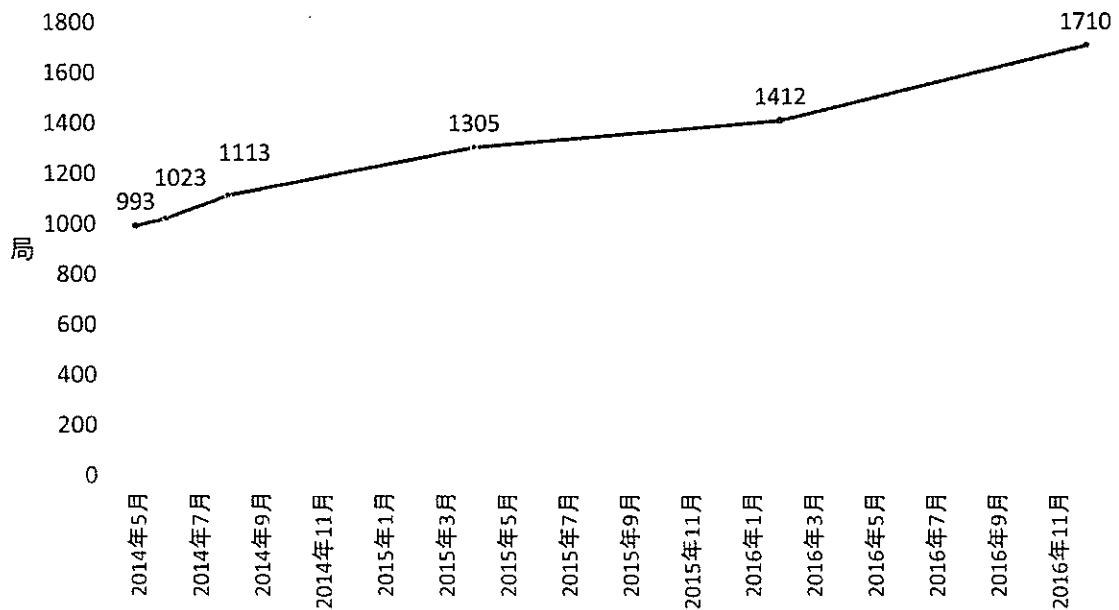
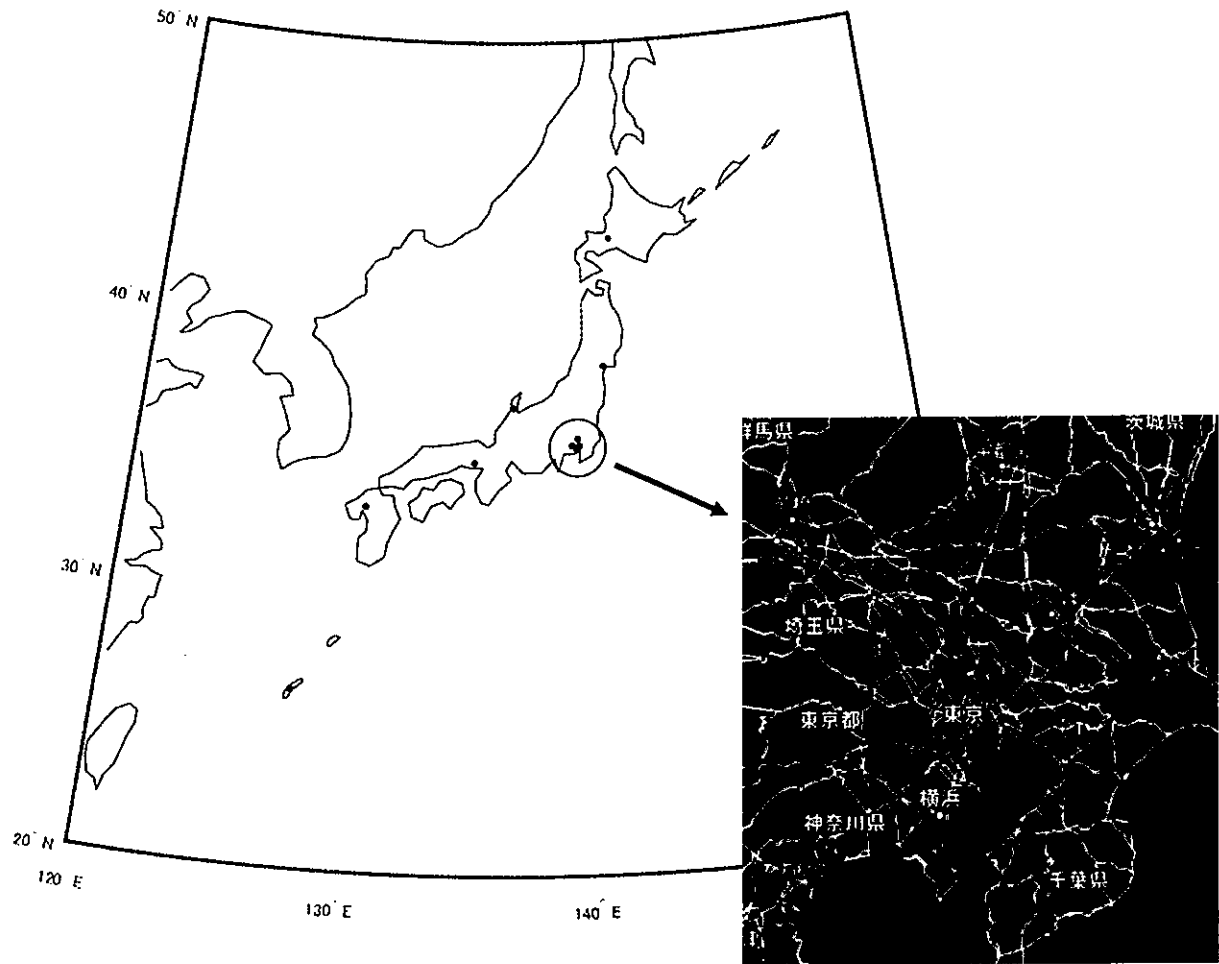


図 2.12 Blitzortung 受信局の増加推移



●: 受信局	
札幌	H.28 12月
仙台	H.28 9月
栃木	H.28 12月
浦和	H.28 9月
晴海	H.28 8月
東村山	H.28 8月
藤沢	H.28 2月
金沢	H.28 10月
兵庫	H.28 10月
福岡	H.28 12月
那覇	H.29 1月
千葉	(第三者)

図 2.13 Blitzortung 受信局の配置図

### 2.3 Blitzortung システムによる雷放電位置標定事例

2016年5月26日の4時14分37秒(UTC)にオーストラリアの南東部で落雷が発生した。15局で観測された事例を示す。Kanagawa局で観測された磁界波形を図2.14に、標定された落雷位置を図2.15に示す。図2.13には、観測された時刻と位置標定までの距離、波形観測に用いたアンプの品番などが記載されており、受信時間は37秒285135、位置標定までの距離は7121km、アンプの品番はPCB12.3(磁界アンプ)であった。

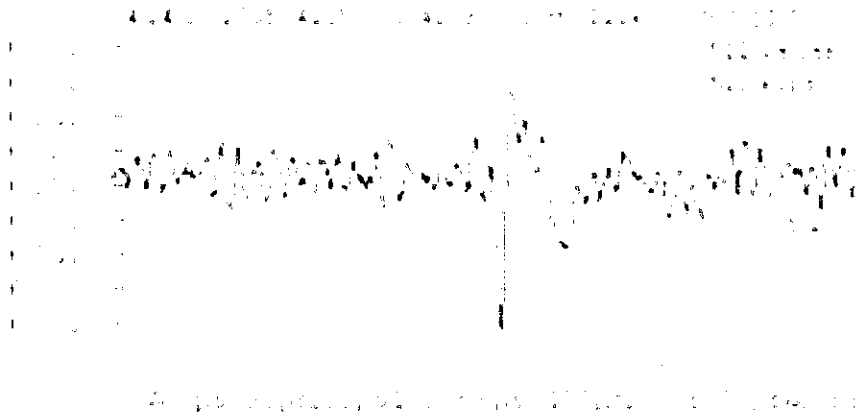


図 2.14 観測された磁界波形

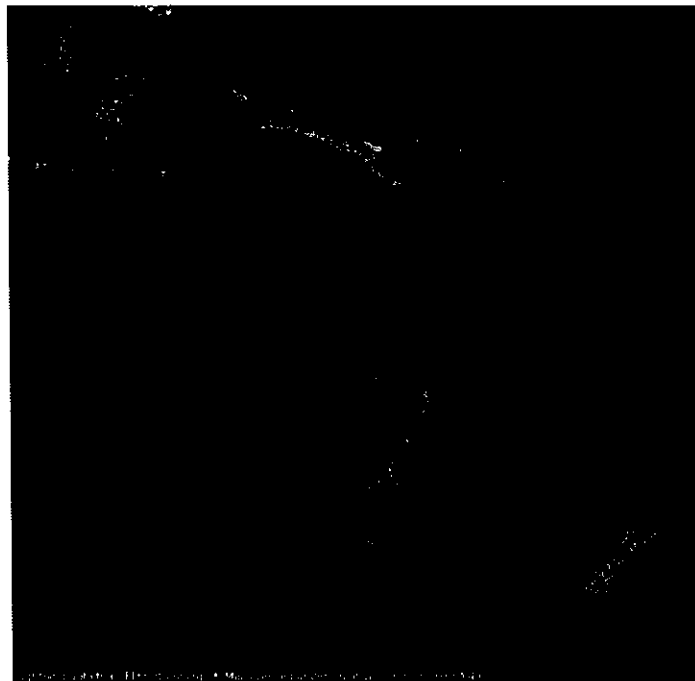


図 2.15 雷放電位置標定位置地点



## 2.4 緒言

本章では、Blitzortung システムの構成および Blitzortung システムで用いている雷放電位置標定手法について述べた。さらに、受信局の設置の実例および全国ネットワークを構築している受信局の配置についての検討および配置状況を説明した。受信局は札幌、仙台、栃木、浦和、晴海、東村山、藤沢、金沢、兵庫、福岡、那覇に設置した。最後に、日本に設置した受信局が捉えた落雷の実例を紹介した。

## 第3章 Blitzortung システムによる落雷分布

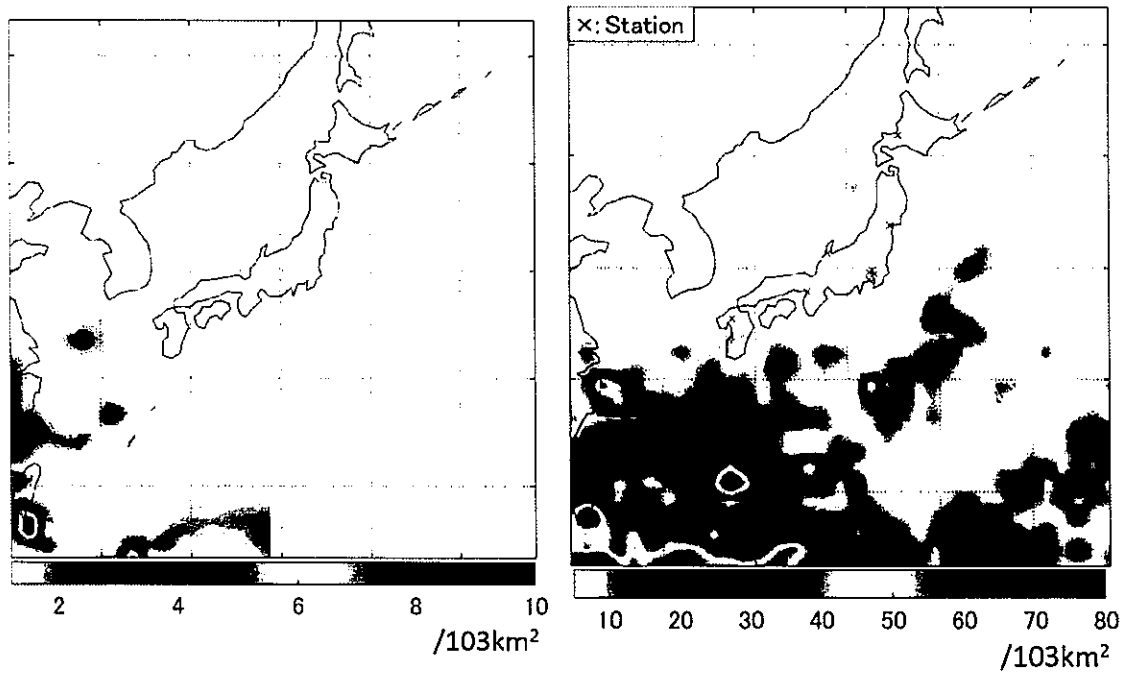
### 3.1 落雷分布

#### 3.1.1 日本の落雷分布

日本における 2015 年と 2016 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.1 に示す。2015 年と 2016 年の落雷分布を比較すると 2015 年に比べ、2016 年では落雷の標定数、分布範囲共に増加している。これは、日本では 2016 年 2 月から受信局の設置を始め、2015 年では 0 台だったが、2016 年 12 月までに 11 台設置したことで受信局が増加し、さらに位置標定範囲が広がったため、標定数が増加したと推定される。

次に、Blitzortung の落雷分布の傾向が実際の落雷分布と一致しているか検証するため、NASA の落雷密度分布と比較する。Blitzortung の落雷分布図との比較のため、2014 年の NASA の落雷密度分布図を図 3.2 に示す[14]。これは、衛星に搭載されたカメラと雷センサによって観測された放電の分布図である。図 3.1 と図 3.2 を比較すると、落雷分布の傾向が一致しない。これは、日本では 2016 年 12 月に受信局の全国展開が完了したため、十分な標定データが得られず、Blitzortung と NASA の落雷分布の傾向が一致しなかったと考えられる。

次に、Blitzortung の受信局が全国展開を完了した 2017 年 1 月 22 日の Blitzortung の落雷分布と、フランクリン・ジャパンの JLDN の雷放電位置標定の分布[15]の比較を図 3.3 に示す。Blitzortung システムは、2016 年 12 月に全国展開が完了し、2017 年 1 月より、日本周辺の落雷を多く標定するようになった。そこで、位置標定分布の傾向を比べるため、2017 年 1 月 22 日の日本周辺の雷放電位置標定を比較した。新潟県と石川県の日本海側と北海道の太平洋側、本州の太平洋側に 2 つの帯状の位置標定が一致していることから、概ね落雷分布の傾向が一致していることが分かる。したがって、Blitzortung は正しい落雷位置を標定していると推定される。なお、地図の縮尺および縦横比が図 3.3(a),(b)では若干異なる。そのため、(a)と比べ(b)では位置標定の点が右上に傾いているが、落雷分布傾向は一致している。



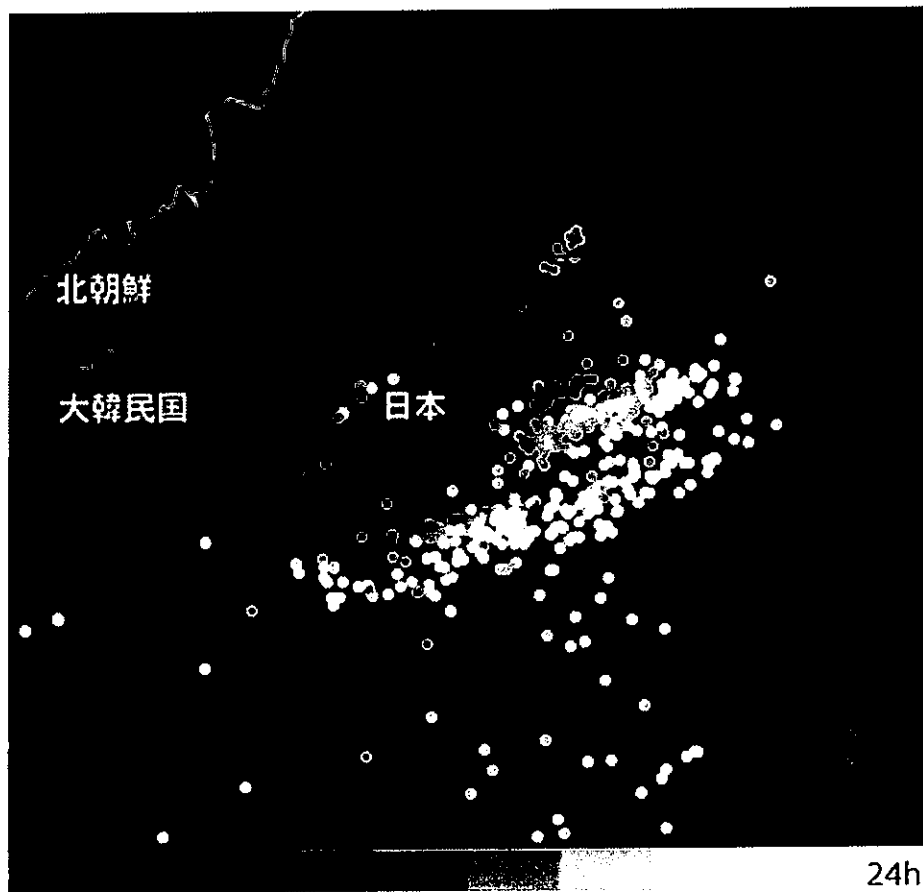
(a) 2015 年の落雷分布

(b) 2016 年の落雷分布

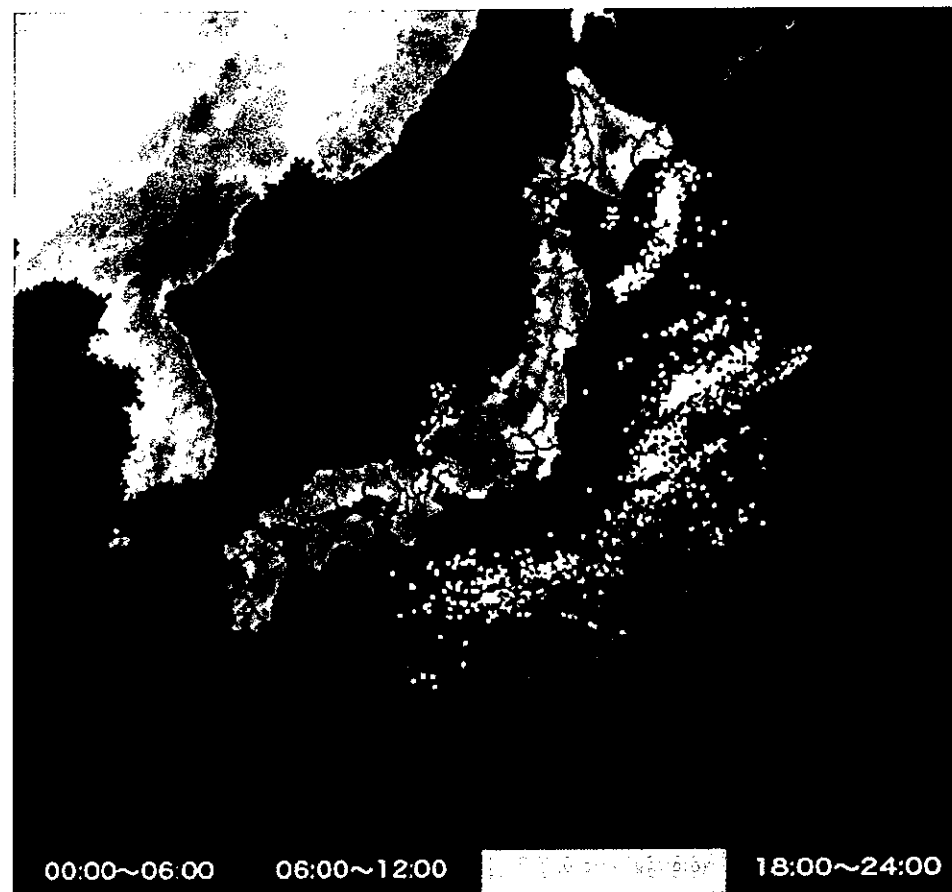
図 3.1 日本における落雷分布



図 3.2 NASA の落雷分布マップ



(a) Blitzortung システム



(b) JLDN (フランクリン・ジャパン)

図 3.3 2017 年 1 月 22 日の落雷標定分布比較

### 3.1.2 米国の落雷分布

米国における 2015 年、2016 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.4 に示す。2015 年と 2016 年の落雷分布を比較すると 2015 年に比べ、2016 年では落雷の標定数が増加している。これは、受信局が増加した事により、標定数が増加したためと考えられる。

次に、Blitzortung の落雷分布の傾向が実際の落雷分布と一致しているか検証するため、NASA の落雷密度分布と比較する。Blitzortung の落雷分布図との比較のため、2014 年の NASA の落雷密度分布図を図 3.5 に示す[14]。これは、衛星に搭載されたカメラと雷センサによって観測された放電の分布図である。図 3.4 と図 3.5 を比較すると、米国では西海岸に落雷が少なく、南部に多い傾向が一致した。したがって、米国での Blitzortung と NASA の落雷分布の傾向は、概ね一致しており、正しい位置を標定している。

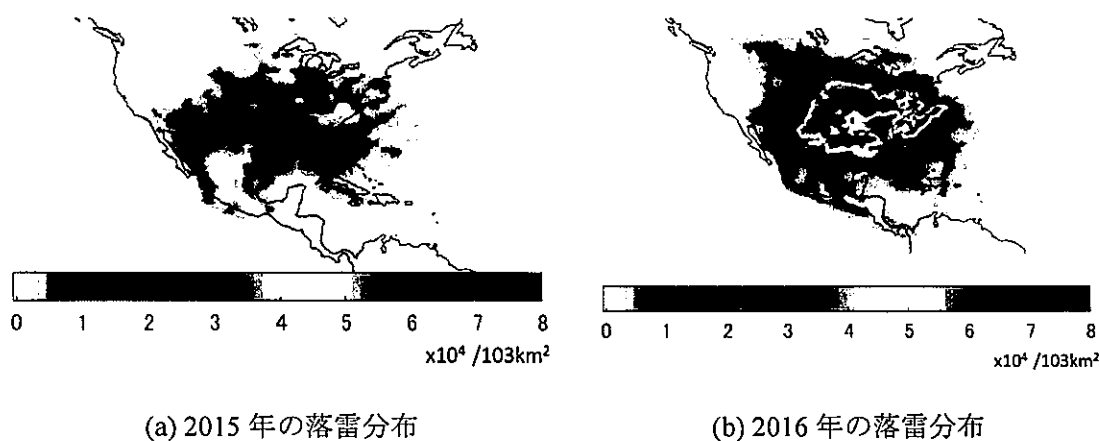


図 3.4 米国における落雷分布

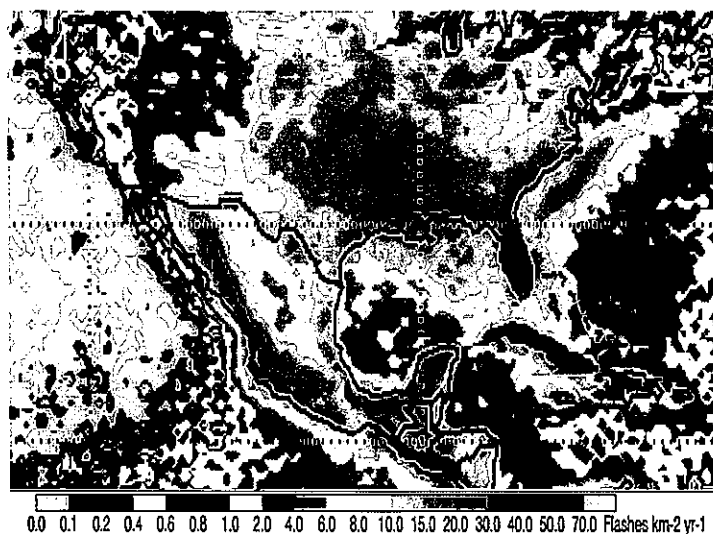


図 3.5 NASA の落雷分布マップ

### 3.1.3 欧州の落雷分布

欧州における 2015 年、2016 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.6 に示す。2015 年と 2016 年の落雷分布を比較すると 2015 年に比べ、2016 年では落雷の標定数が増加している。これは、受信局が増加した事により、標定数が増加したためと考えられる。

次に、Blitzortung の落雷分布の傾向が実際の落雷分布と一致しているか検証するため、NASA の落雷密度分布と比較する。Blitzortung の落雷分布図との比較のため、2014 年の NASA の落雷密度分布図を図 3.7 に示す[14]。これは、衛星に搭載されたカメラと雷センサによって観測された放電の分布図である。図 3.6 と図 3.7 を比較すると、欧州ではイタリアの周辺地域に落雷が多い傾向が一致した。したがって、Blitzortug と NASA の落雷分布の傾向は、概ね一致しており、正しい位置を標定している。

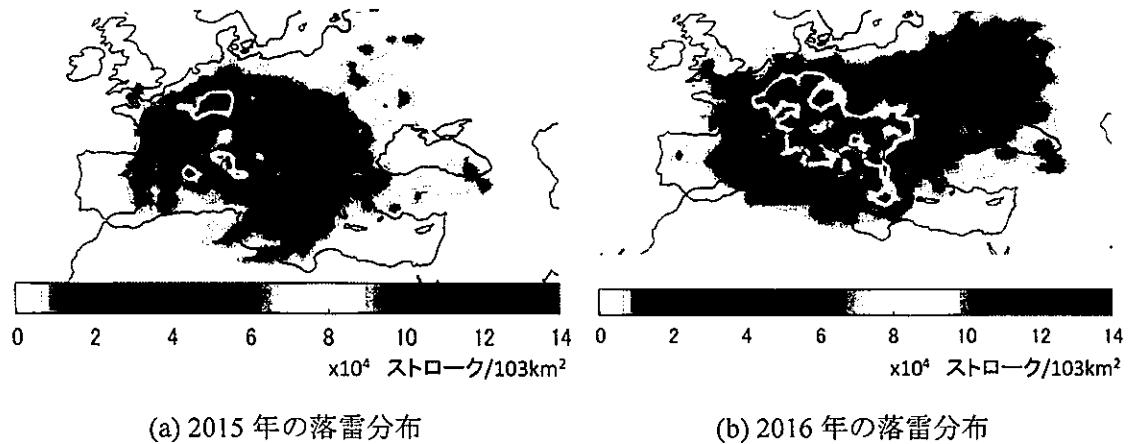


図 3.6 欧州における落雷分布

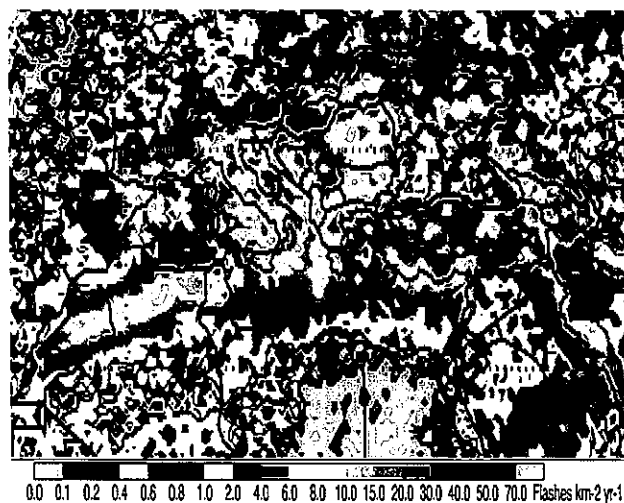
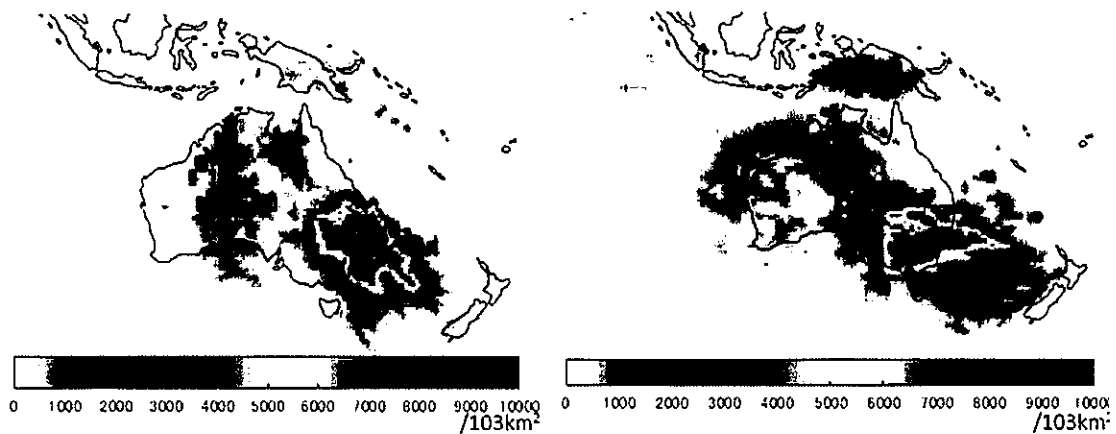


図 3.7 NASA の落雷分布マップ

### 3.1.4 オセアニア地域の落雷分布

オセアニア地域における 2015 年、2016 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.8 に示す。2015 年と 2016 年の落雷分布を比較すると 2015 年に比べ、2016 年では北部の落雷分布傾向が強くなっている。これは、日本などアジア受信局が増加し、さらに 2016 年にハワイに受信局が設置されたことにより、太平洋を囲うように受信局が配置されたため、標定範囲が広がり、北部での標定数が増加したためと考えられる。

次に、Blitzortung の落雷分布の傾向が実際の落雷分布と一致しているか検証するため、NASA の落雷密度分布と比較する。Blitzortung の落雷分布図との比較のため、2014 年の NASA の落雷密度分布図を図 3.9 に示す。これは、衛星に搭載されたカメラと雷センサによって観測された放電の分布図である。図 3.8 と図 3.9 を比較すると、Blitzortung ではオーストラリアとニュージーランドの間の海域に落雷が多く、NASA ではオーストラリア北部に多いという傾向の違いが確認された。これは、Blitzortung では、オーストラリア東部とニュージーランドに受信局が多く設置されているが、東南アジアにはシンガポールとタイで 3 局のみと、受信局が少なく、オーストラリア北部を囲うように受信局が設置されていないため、標定数が少ないものと考えられる。



(a) 2015 年の落雷分布

(b) 2016 年の落雷分布

図 3.8 オセアニア地域における落雷分布

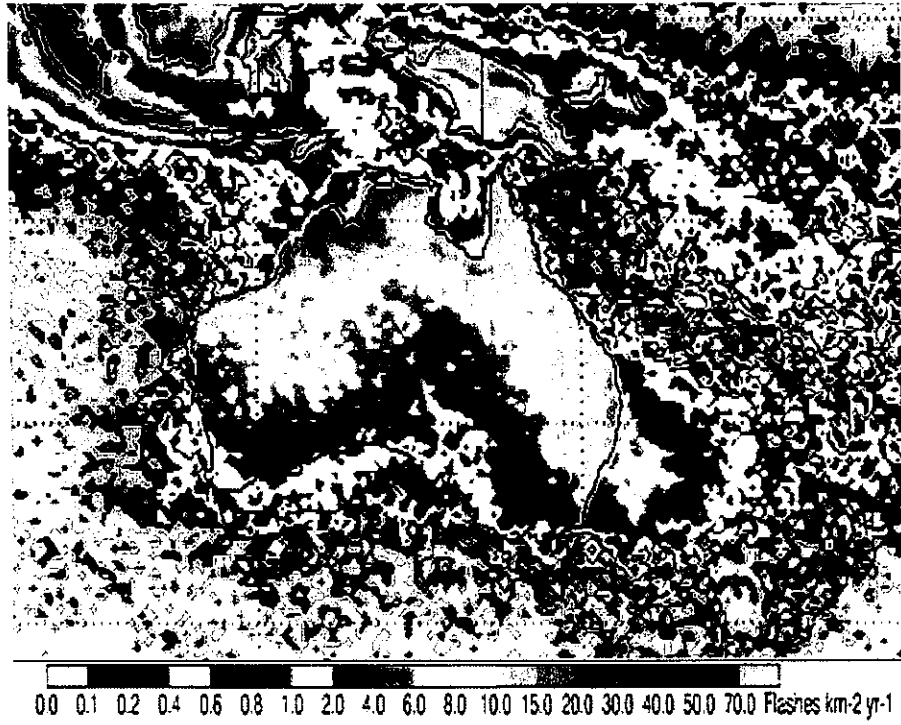


図 3.9 NASA の落雷分布マップ

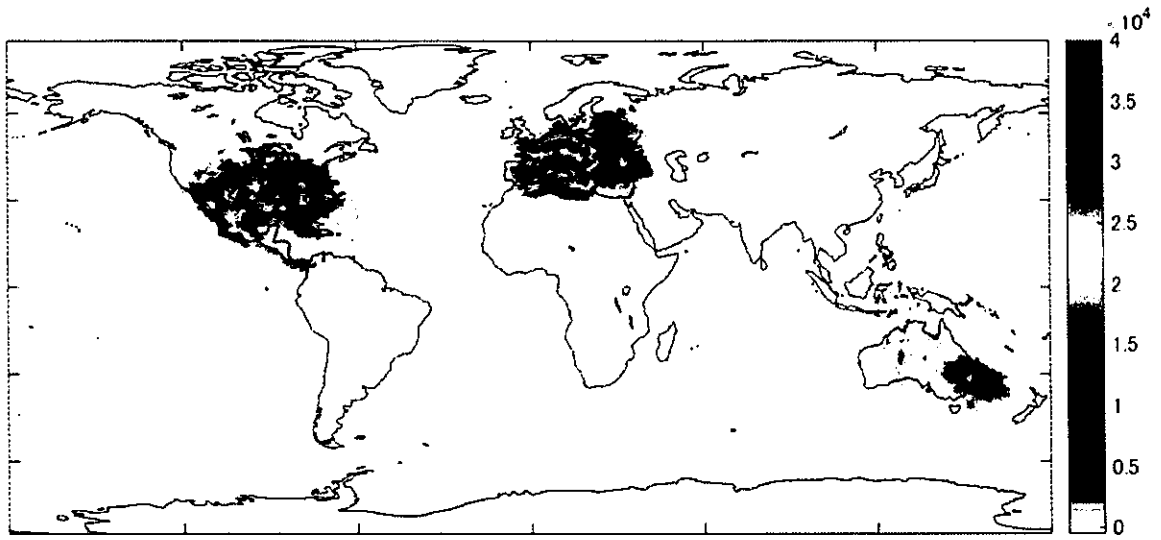


### 3.1.5 世界の落雷分布

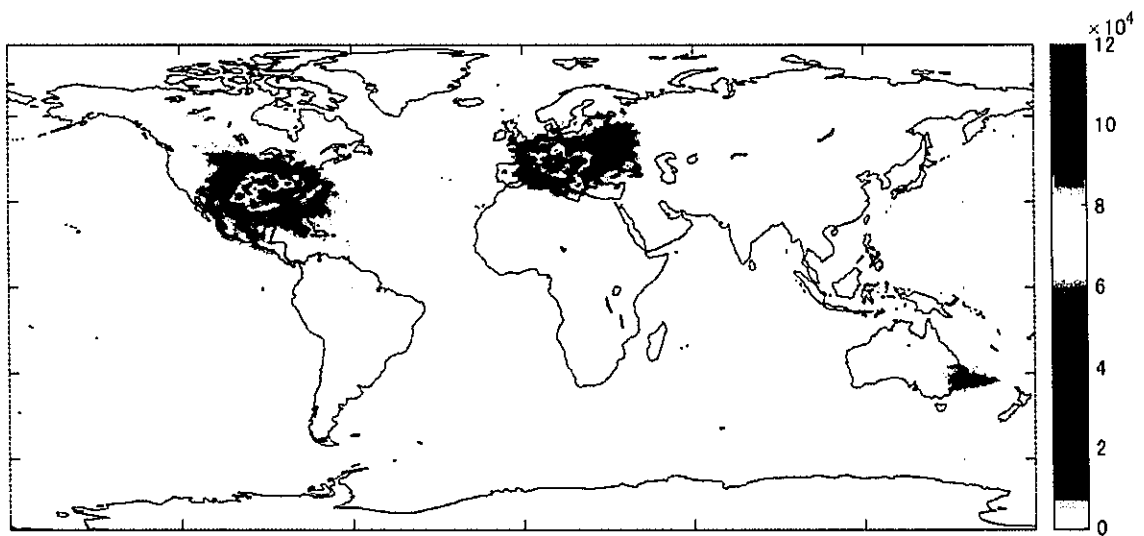
世界における 2015 年、2016 年の Blitzortung の落雷分布図を図 3.10 に示す。2015 年と 2016 年の落雷分布を比較すると、落雷分布の傾向は概ね一致しているが、標定範囲が米国、欧州、オセアニア地域と限定されている。

次に、Blitzortung の落雷分布の傾向が実際の落雷分布と一致しているか検証するため、NASA の落雷密度分布と比較する。Blitzortung の落雷分布図との比較のため、2014 年の NASA の落雷密度分布図を図 3.11 に示す。これは、衛星に搭載されたカメラと雷センサによって観測された放電の分布図である。図 3.10 と図 3.11 を比較すると、Blitzortung では米国、欧州、オセアニア地域に落雷が多く、NASA ではアフリカ大陸、東南アジア、米国、南アメリカ大陸落雷が多いという異なる分布傾向を示した。これは、Blitzortung では米国、欧州、オセアニア地域に受信局が集中しており、さらに mcg の値が 270 以上になると位置標定を行わないという標定手法の関係上、標定範囲が限定されているためであると考えられる。また、図 1.4 より落雷標定数が多い米国、欧州、オセアニア地域には、受信局が多く設置されているが、落雷標定が少ないアフリカ、南アメリカ、東南アジアでは受信局が少ない、または設置されていないという、標定数と受信局数の相関関係が見て取れる。そのため、受信局が集中している地域では多くの落雷を標定しているが、受信局のない地域では標定が少ない、または標定がされていないことが分かる。したがって、受信局の配置と局数が異なる分布傾向を示す要因と推定される。

世界の落雷標定数を、Blitzortung で最も標定数が多い欧州地域と比較すると、Blitzortug では最大  $120000$  個/ $103\text{km}^2 \cong 1200$  個/ $\text{km}^2$  に対し、NASA では  $30$  個/ $\text{km}^2$  と、約 40 倍の差がある。この標定数差の原因は、観測方法と観測対象の違いにあると考えられる。まず観測方法では、Blitzortug.org は VLF 帯の電磁波を用いて観測しているが、NASA では放電によって生じる光を用いて観測しているという違いがある。つぎに観測対象では、Blitzortug.org は Stroke、NASA では Flash を観測の対象にしているという違いがある。なお、Stroke と Flash の違いは多重雷の場合、1 つ 1 つの雷を Stroke と言い、全体を Flash と言う。例えば、5Stroke で 1Flash となる。これら 2 つの違いにより、標定数に差が生じたものとする。



(a) 2015年の落雷分布



(b) 2016年の落雷分布

図 3.10 世界の落雷分布

HRFC\_COM\_FR

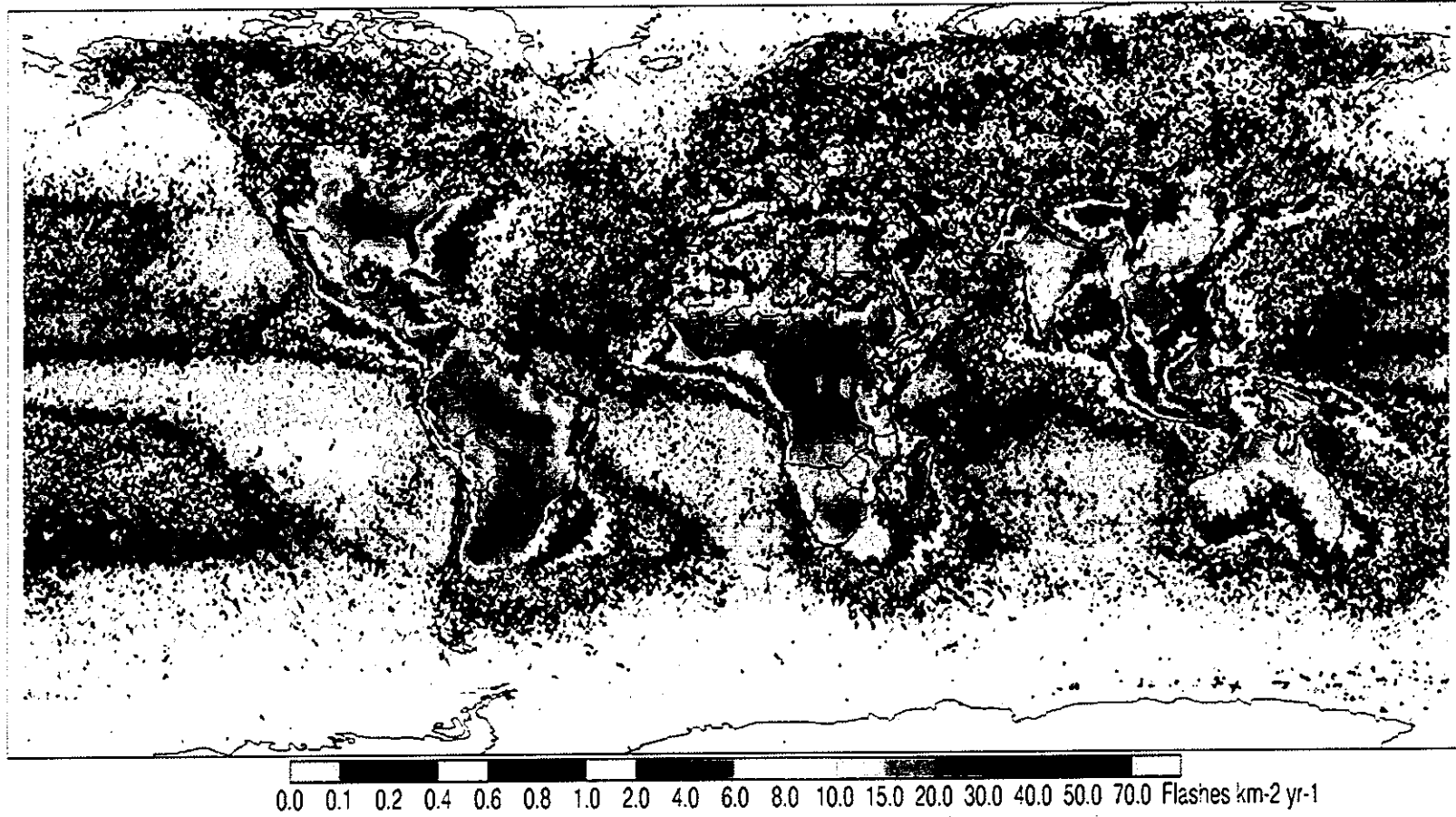


図 3.11 NASA の落雷分布マップ

### 3.2 WWLLN との比較

Blitzortung と観測周波数帯域が同様の VLF 帯を用いている WWLLN と落雷分布を比較した。期間は、2017年1月27日の17:40~18:40(UTC)の1時間である。Blitzortung と WWLLN の雷放電位置標定の比較を図 3.12 に示す。緑の十字が Blitzortung の、青い点が WWLLN の位置標定を表している。この期間における位置標定数は、Blitzortung では 275、WWLLN では 1513 で Blitzortung の捕捉率は 18%だった。

Blitzortung では日本、東南アジア、オセアニアの落雷を標定しているが、インド洋の落雷や、アフリカの落雷はあまり標定されていない。東アジアやオセアニア地域には受信局が多く設置されており、日本近海、東南アジア、オーストラリアでは WWLLN と落雷分布は一致しているが、西アジアやアフリカに受信局が少なく、インド洋においては、マダガスカル東部にあるレユニオンに1局のみ、さらに標定手法である mcg の値 270 を超えてしまうため、標定数が少ないと推定される。

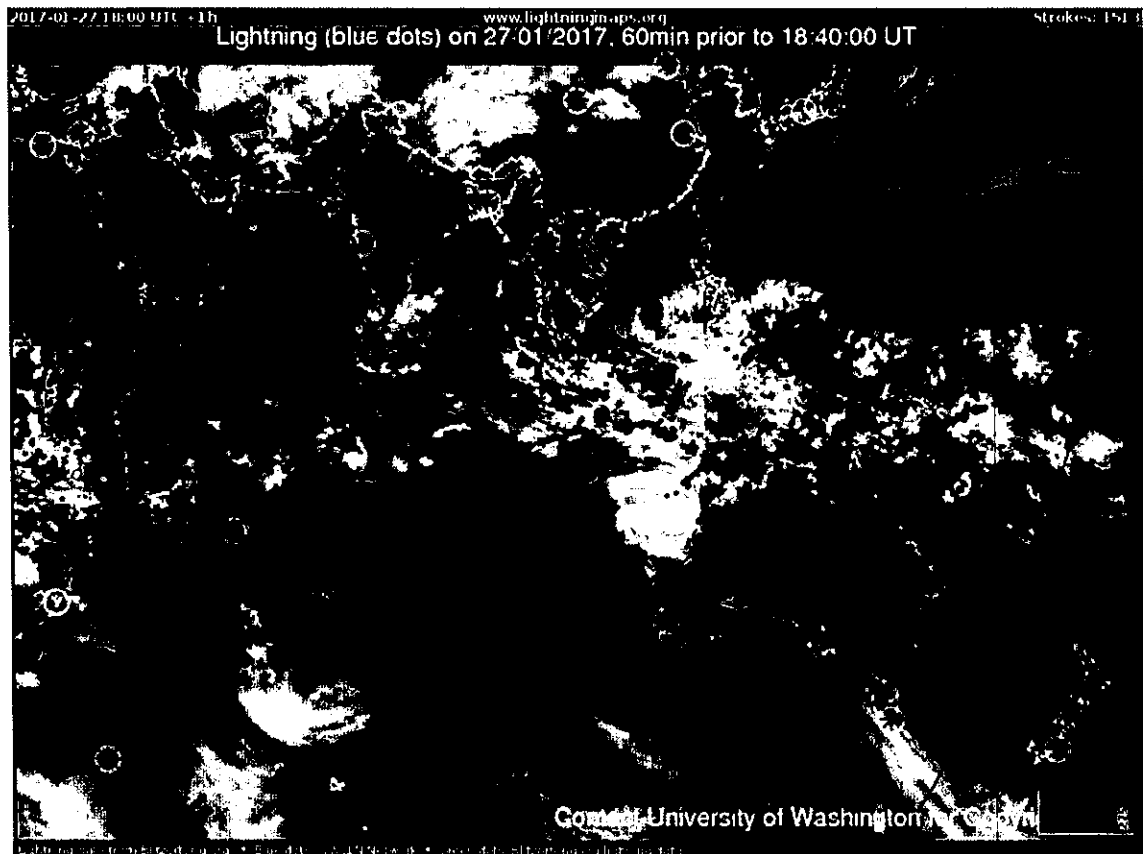


図 3.12 Blitzortung と WWLLN の比較

### 3.3 日本の冬季雷分布

一般的に落雷は、夏に多いということが知られているが、冬の日本海側でも落雷が生じる。これは世界的に見ても非常に珍しく、代表的なのは北欧のノルウェーの西海岸、北米の五大湖からの東海岸、そして日本海側の北陸地方の沿岸の3箇所である。

2017年1月にBlitzortungシステムの全国展開が完了し、日本での雷放電位置標定が可能になった。そのため、日本の特徴的な落雷として、冬季雷の観測を実施した。

Blitzortungによる落雷位置に対し、気象データである地上天気図(気圧配置)[16]、高層天気図(500hPa)[17]を用いて、気象的観念から分析した。検討期間は2017年1月24日~2017年2月6日(UTC)とした。気圧配置と500hPa天気図、Blitzortungで標定された日本の落雷分布を図3.13に示す。雷雲内の正電荷の中心は $-20^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ に存在し、地上と500hPaの高度での温度差が $33^{\circ}\text{C}$ 以上のとき冬季雷が発生する[18]ことから、(b)の $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線を赤線で示した。 $-30^{\circ}$ 等温線と冬季雷の関係を表にまとめたものを表3.1に示す。

[2017.1.24] [2017.1.25] [2017.2.9] [2017.2.10]

(a)より、西高東低の冬型の気圧配置になっており、(b),(c)より $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が関東地域まで南下している。この時、冬季雷の特徴である日本海沿岸および太平洋の落雷が標定されている。

[2017.2.6] [2017.2.9]

(b),(c)より $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が関東地域まで南下している。この時、冬季雷の特徴である日本海沿岸および太平洋の落雷が標定されている。

[2017.2.1] [2017.2.2]

(b),(c)より、 $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が岩手県あたりの東北地域まで南下しているときは、太平洋でのみ落雷が標定されている。

[2017.1.28] [2017.1.29] [2017.1.30] [2017.1.31] [2017.2.3] [2017.2.7] [2017.2.8]

(b),(c)より、 $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が北海道までしか南下していないときは、日本海沿岸および太平洋には落雷は標定されなかった。

[2017.1.26] [2017.1.27] [2017.2.4] [2017.2.5]

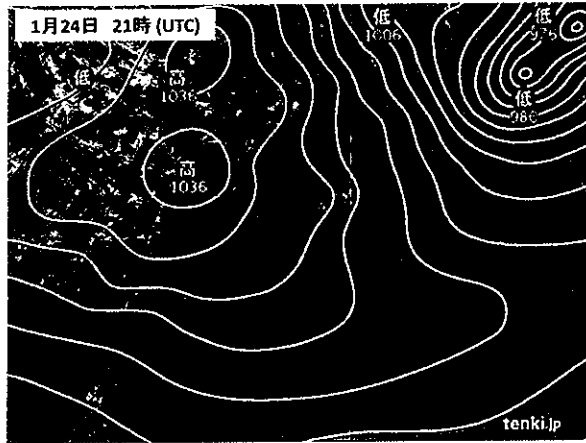
(c)において帯状に落雷が標定されているが、これは、同日の(a)より寒冷前線によって発生した前線雷である。

したがって、 $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が関東地域にあるときは、日本海沿岸および太平洋で落雷が発生するが、 $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が東北地域にあるときは、太平洋のみに落雷が発生し、 $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が北海道にあるときは、日本海沿岸および太平洋に、落雷は発生しないという、気象の特徴が冬季雷にあることが確認された。

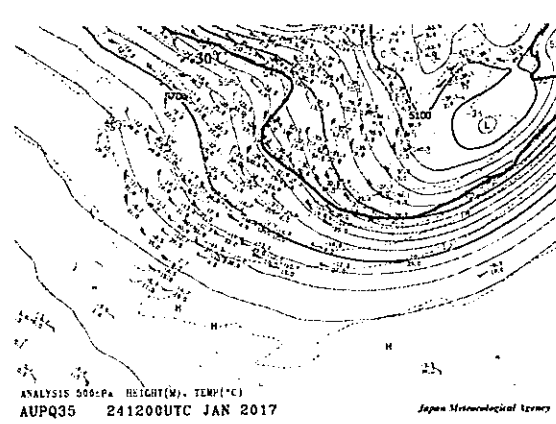
表 3.1 -30° 等温線と冬季雷の相関関係

日付	-30° 等温線	冬季雷	日付	-30° 等温線	冬季雷
2017/1/24	関東地方	○	2017/2/2	東北地方	△
2017/1/25	関東地方	○	2017/2/3	北海道	×
2017/1/26	北海道	前線雷	2017/2/4	北海道	前線雷
2017/1/27	東北地方	前線雷	2017/2/5	北海道	前線雷
2017/1/28	北海道	×	2017/2/6	関東地方	○
2017/1/29	北海道	×	2017/2/7	東北地方	△
2017/1/30	北海道	×	2017/2/8	北海道	×
2017/1/31	北海道	×	2017/2/9	関東地方	○
2017/2/1	東北地方	△	2017/2/10	関東地方	○

(注) 冬季雷…○:日本海沿岸・太平洋、△:太平洋、×:なし



(a) 気圧配置図

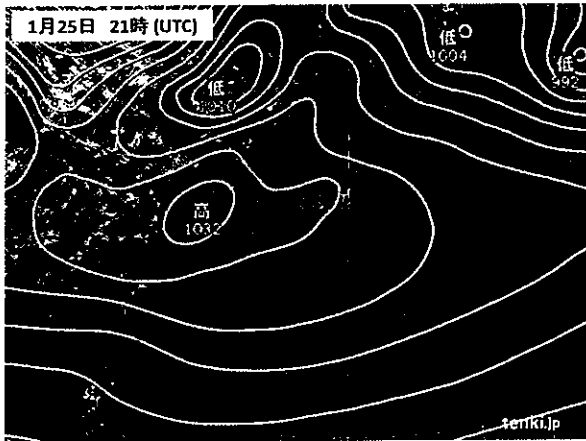


(b) 500hPa 天気図

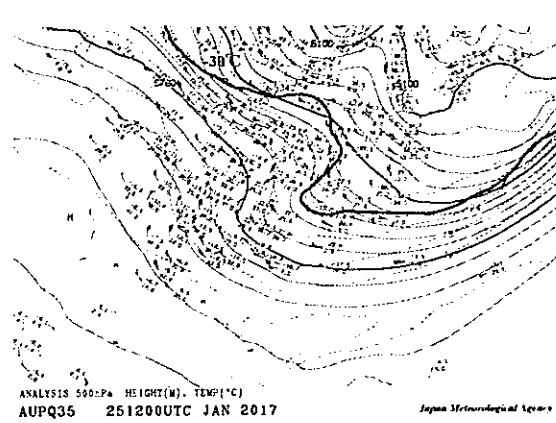
2017年1月24日



(c) Blitzortung の落雷分布



(a) 気圧配置

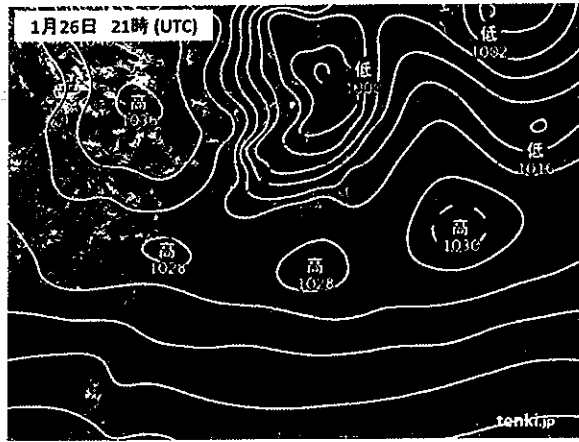


(b) 500hPa 天気図

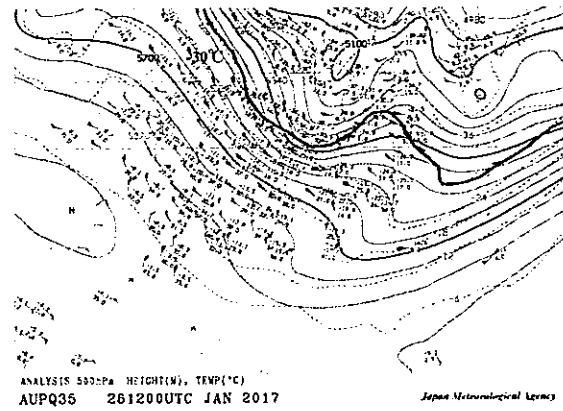
2017年1月25日



(c) Blitzortung の落雷分布

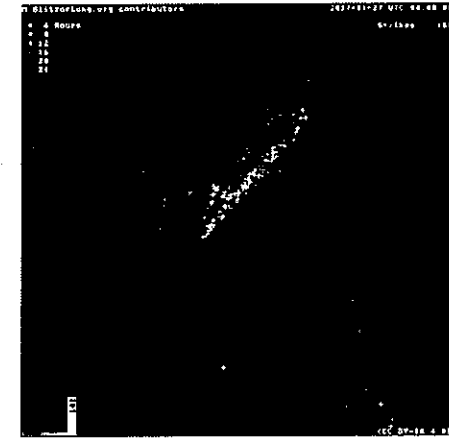


(a) 気圧配置

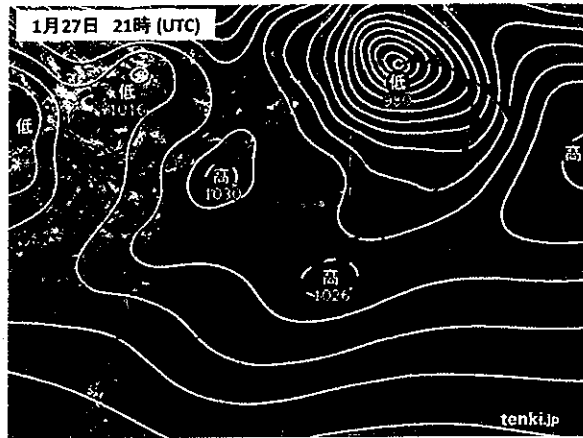


(b) 500hPa 天気図

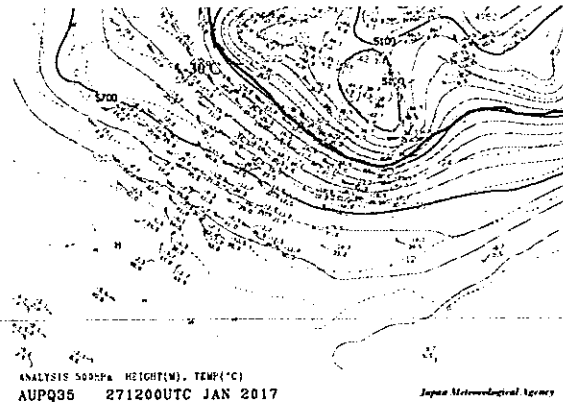
2017年1月26日



(c) Blitzortung の落雷分布

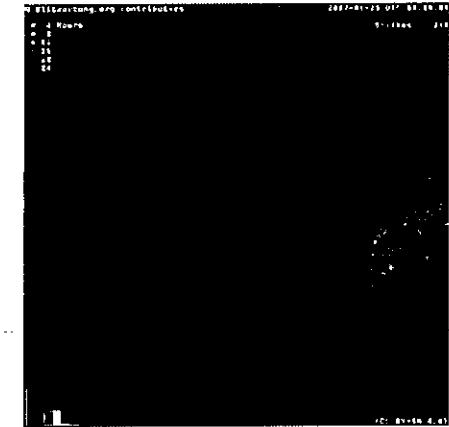


(a) 気圧配置



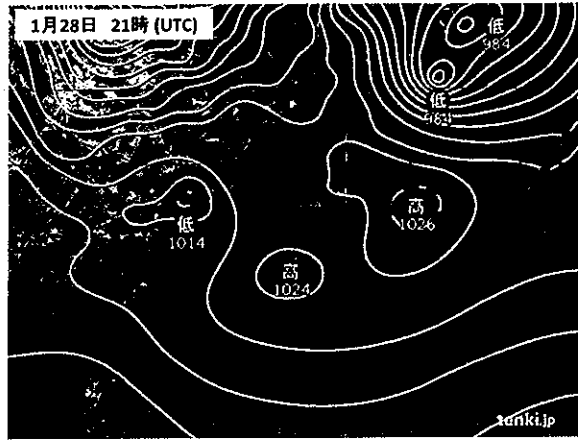
(c) 500hPa 天気図

2017年1月27日

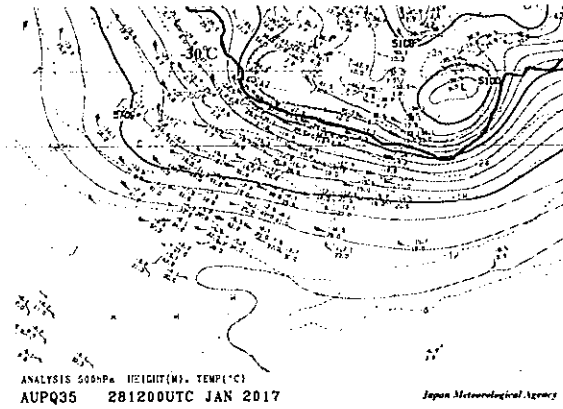


(c) Blitzortung の落雷分布





(a) 気圧配置

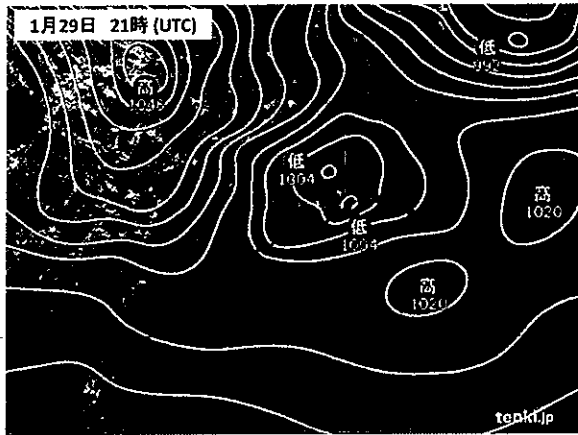


(c) 500hPa 天気図

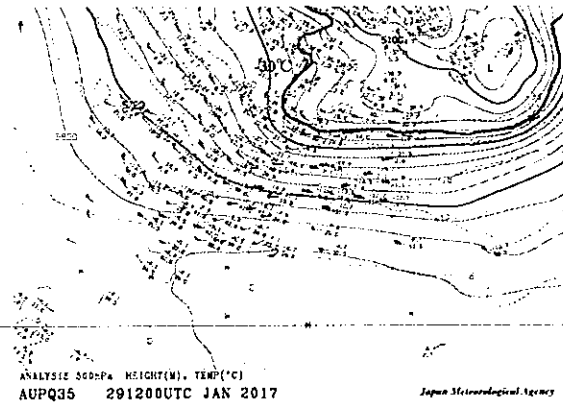


(c) Blitzortung の落雷分布

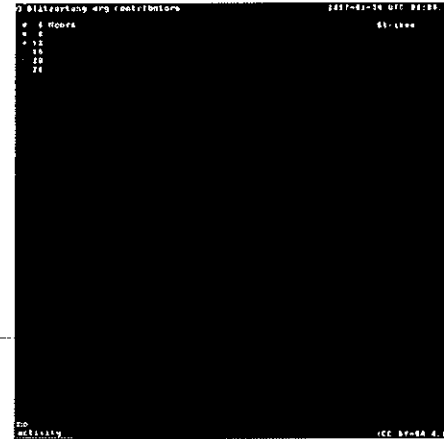
2017年1月28日



(a) 気圧配置

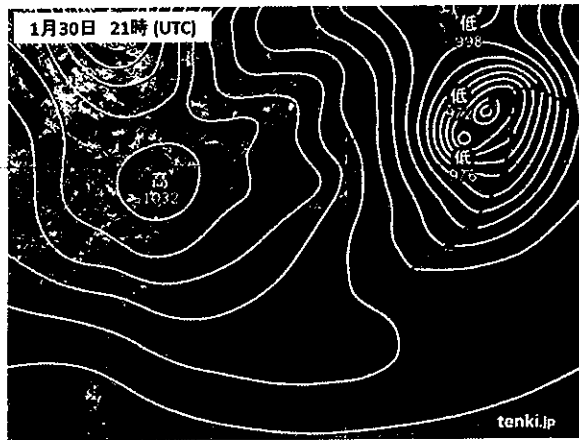


(c) 500hPa 天気図

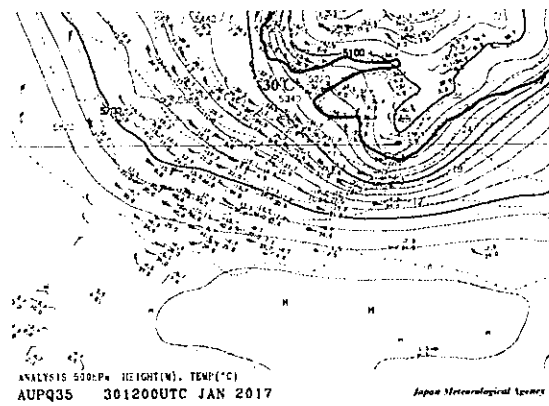


(c) Blitzortung の落雷分布

2017年1月29日



(a) 気圧配置

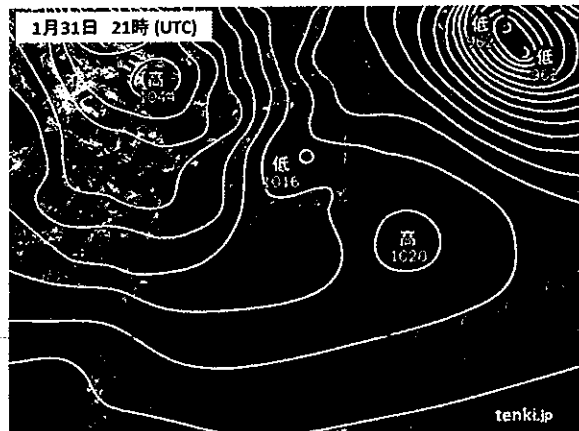


(c) 500hPa 天気図

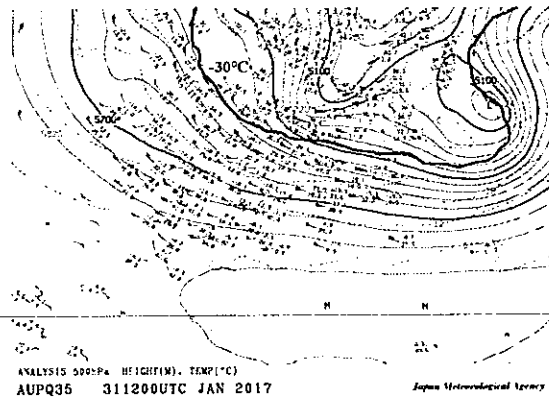
2017年1月30日



(c) Blitzortung の落雷分布

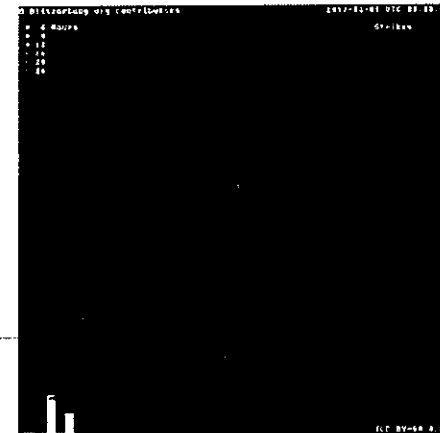


(a) 気圧配置

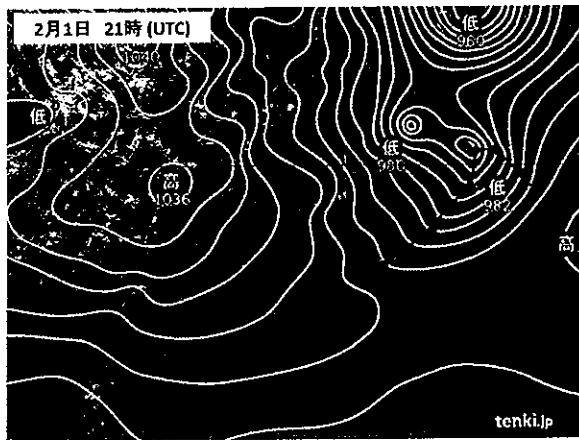


(c) 500hPa 天気図

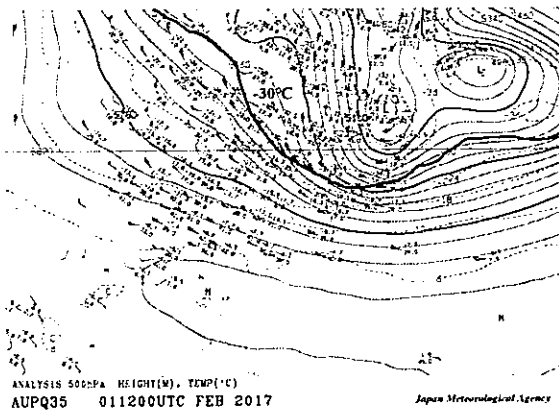
2017年1月31日



(c) Blitzortung の落雷分布

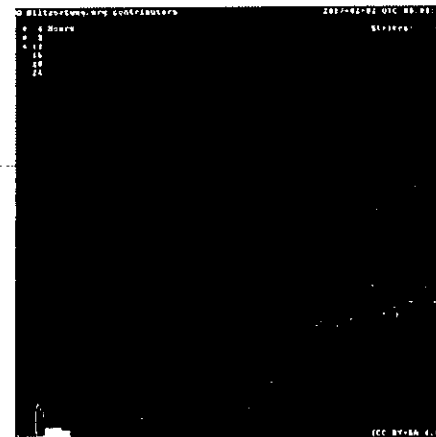


(a) 気圧配置

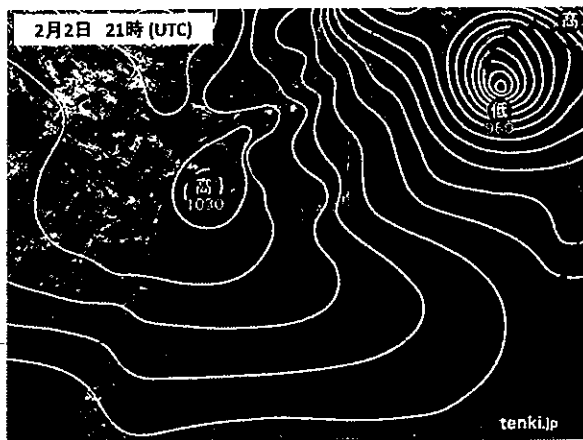


(c) 500hPa 天気図

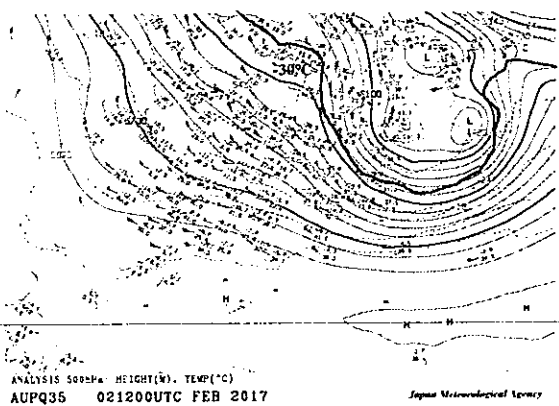
2017年2月1日



(c) Blitzortung の落雷分布

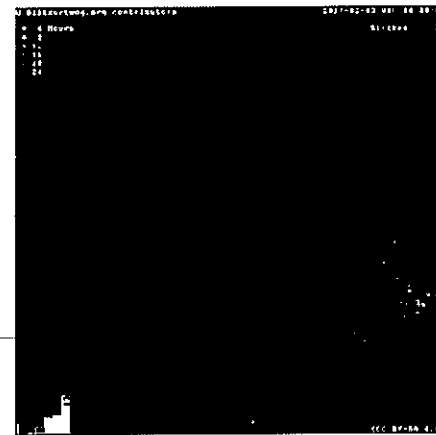


(a) 気圧配置

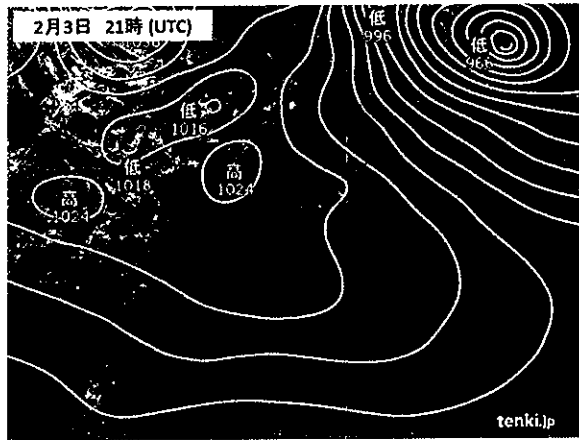


(c) 500hPa 天気図

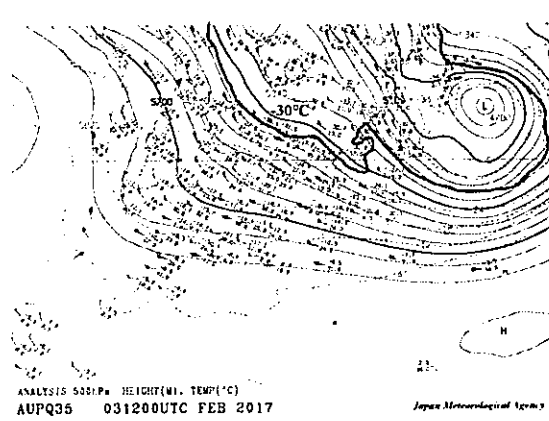
2017年2月2日



(c) Blitzortung の落雷分布

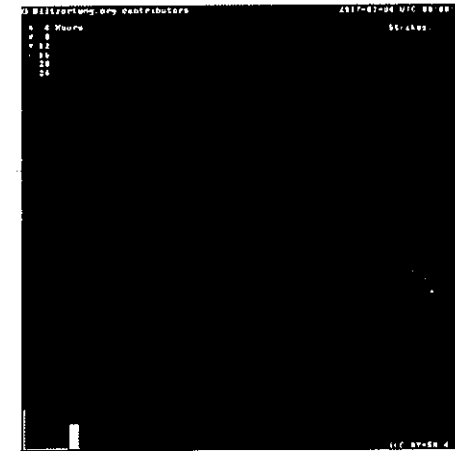


(a) 気圧配置

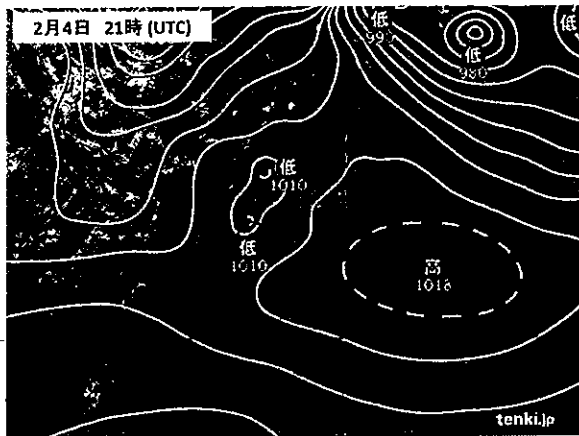


(c) 500hPa 天気図

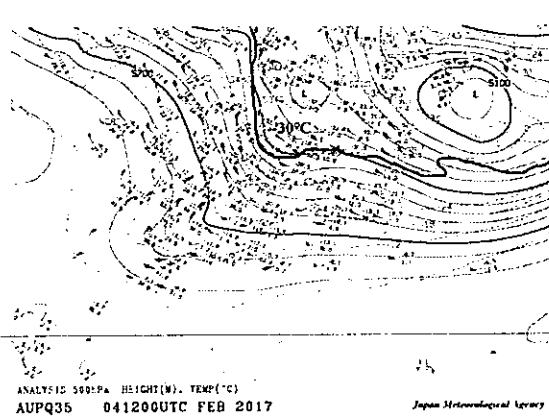
2017年2月3日



(c) Blitzortung の落雷分布

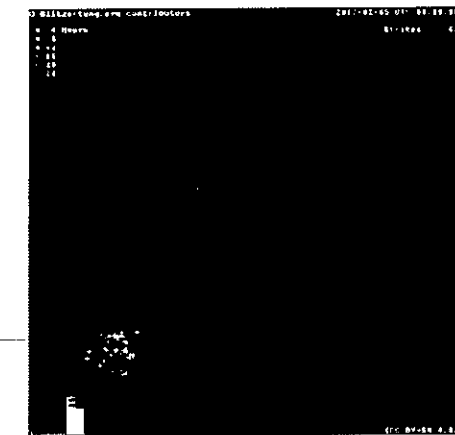


(a) 気圧配置

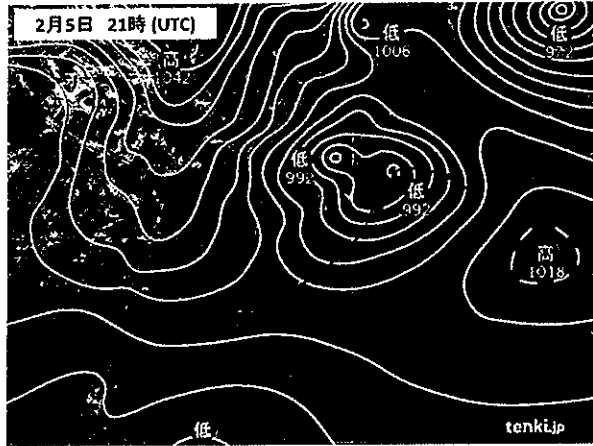


(c) 500hPa 天気図

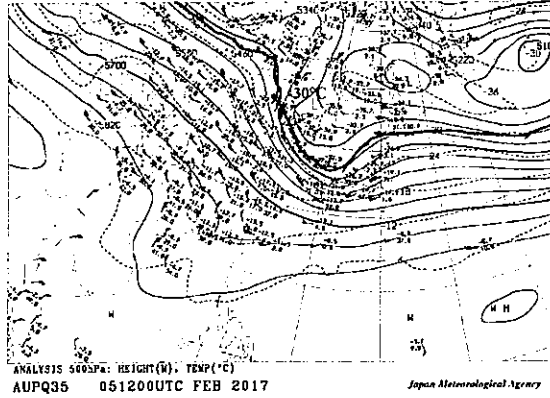
2017年2月4日



(c) Blitzortung の落雷分布



(a) 気圧配置

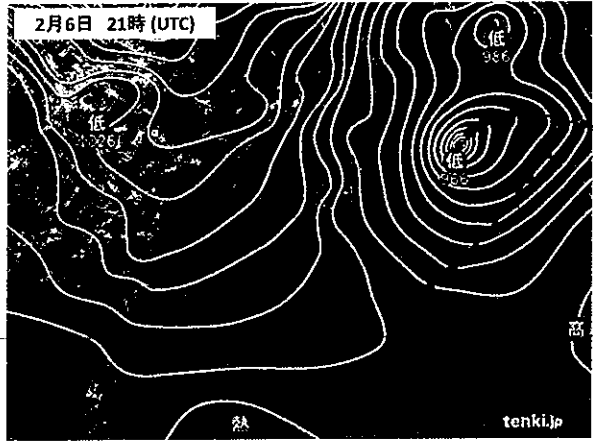


(c) 500hPa 天気図

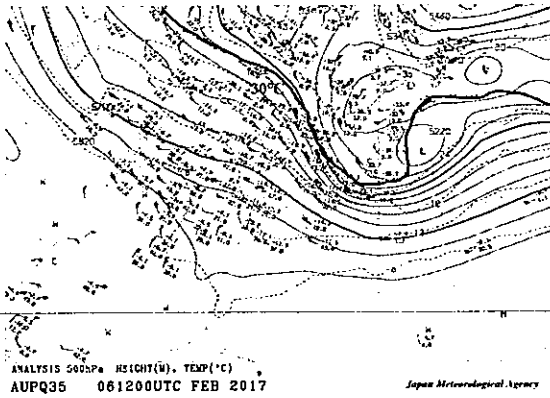
2017年2月5日



(c) Blitzortung の落雷分布

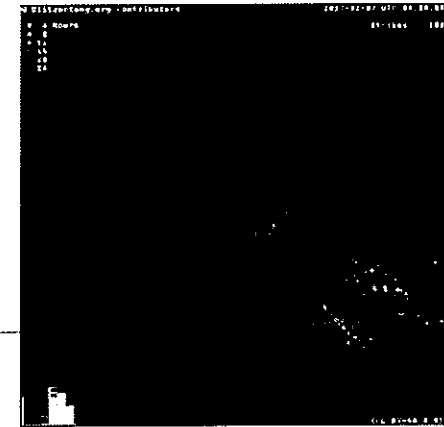


(a) 気圧配置

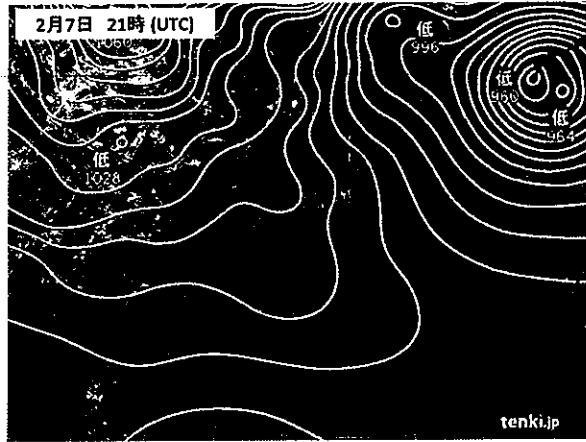


(c) 500hPa 天気図

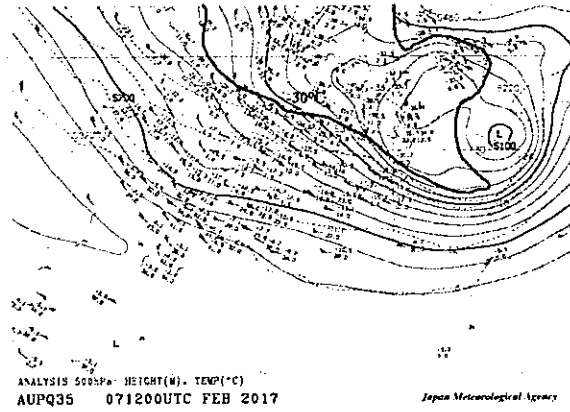
2017年2月6日



(c) Blitzortung の落雷分布

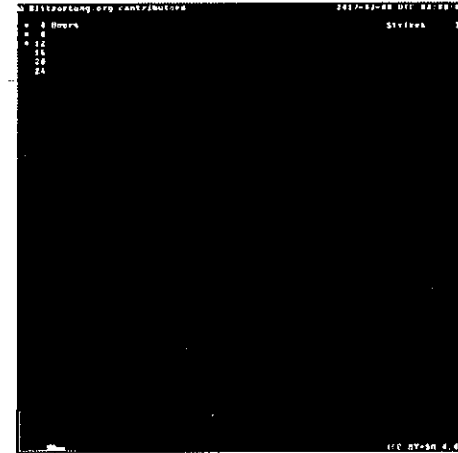


(a) 気圧配置

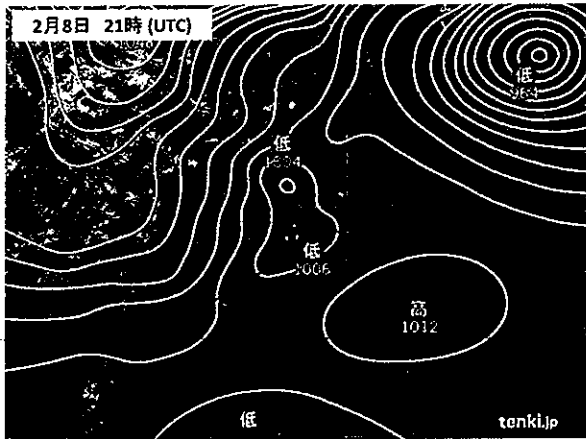


(c) 500hPa 天気図

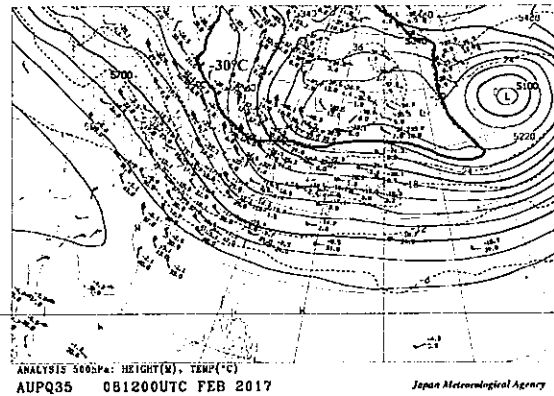
2017年2月7日



(c) Blitzortung の落雷分布

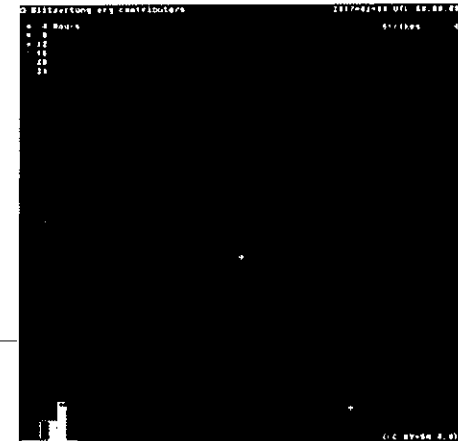


(a) 気圧配置

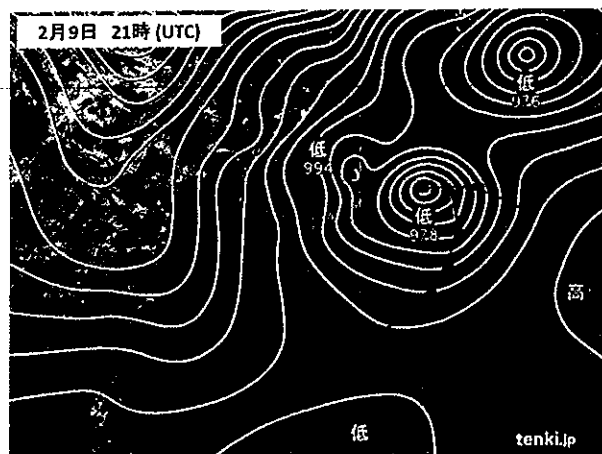


(c) 500hPa 天気図

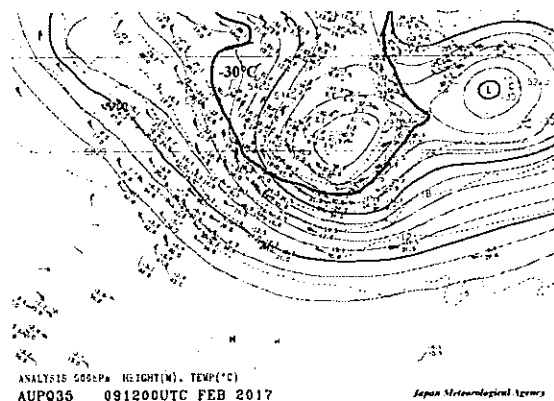
2017年2月8日



(c) Blitzortung の落雷分布

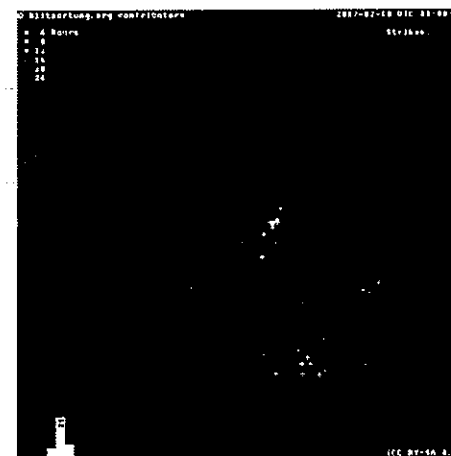


(a) 気圧配置

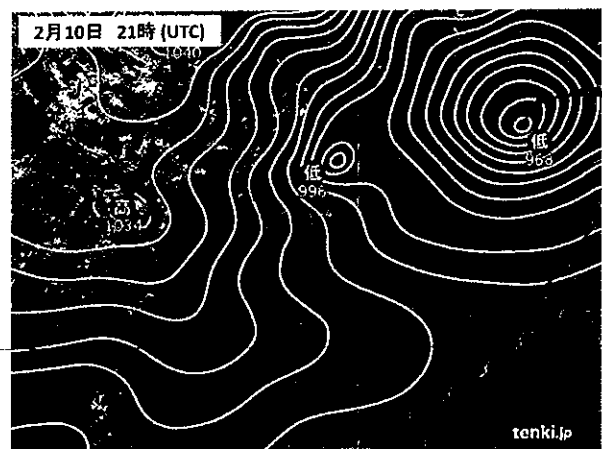


(c) 500hPa 天気図

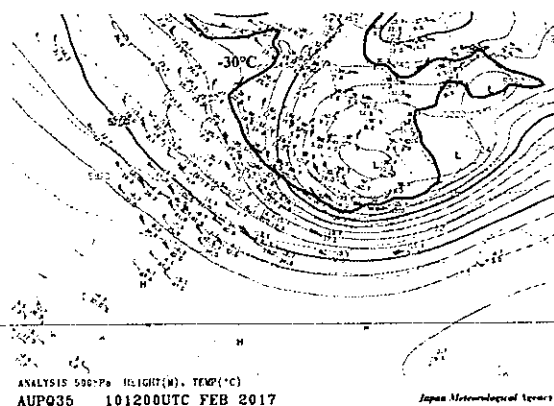
2017年2月9日



(c) Blitzortung の落雷分布



(a) 気圧配置



(c) 500hPa 天気図

2017年2月10日



(c) Blitzortung の落雷分布

図 3.13 気象と雷放電位置標定

### 3.4 緒言

本章では、Blitzortung システムと NASA による落雷分布の比較を行った。位置標定を実施している地域の分布傾向は、米国、欧州で一致、日本、オセアニア地域で一致しないことを示した。また、分布傾向と受信局の配置状況から、位置標定がなされている地域は、その標定範囲を囲うように受信局を設置していることがわかった。さらに、日本ではこれまでに Blitzortung 受信局が無く、日本近辺の落雷の標定は行われていなかったが、2017 年 1 月に全国ネットワークが完成したことにより、日本近辺の落雷も標定可能になったことを示した。

同じ VLF 帯を観測周波数とする WWLLN と Blitzortung システムを比較することにより、アジア・オセアニア地域の落雷において、Blitzortung システムでは東アジア、東南アジア、オセアニア地域の落雷は標定されているが、西アジアおよびインド洋の落雷は標定していない事がわかった。さらに、WWLLN と比較して Blitzortung システムの落雷捕捉率は 18%であった。

最後に、日本における冬季雷を Blitzortung システムで標定した。500hPa において $-30^{\circ}\text{C}$ の等温線が東北地域まで南下すると太平洋に、 $-30^{\circ}$ の等温線が関東地域まで南下すると日本海沿岸と太平洋に冬季雷が発生するという気象的特徴があることを示した。



## 第4章 Blitzortung システムの波形観測

### 4.1 磁界波形

Blitzortung は、放電で発生した電磁波の磁界成分を用いて、雷放電位置標定を行っている。そのため、観測された磁界波形を評価し、位置標定の妥当性を検証する。

#### 4.1.1 雷放電位置標定事例

(事例1)

2017年2月6日の5時54分21秒(UTC)に落雷が発生した。雷放電は島根県近海で発生し、この落雷の電磁波を7局で観測した。受信局はいずれも日本に設置したものである。雷放電位置標定場所を図4.1に示す。さらに、観測された代表的な3つの磁界波形を図4.2に示す。それぞれの磁界波形では、 $0\mu\text{s}$ の位置でトリガがかかっており、振動波形である。各磁界波形の第1ピークと第2ピークとの時間差は、(a)では $48.4\mu\text{s}$ 、(b)では $50.7\mu\text{s}$ 、(c)では $70.9\mu\text{s}$ であった。これは、電磁波が空気を媒体として伝搬する際、空気の透磁率によって電磁波の磁界成分の伝搬速度が変化するため第1ピークと第2ピークの間隔が異なると考えられる。雷放電までの距離と受信時間差から、一般的に電磁波が光速に近い速度で伝搬していることを利用し、推定雷放電時間を算出した。この関係を表4.1に示す。雷放電推定時間に最大 $18.7\mu\text{s}$ のずれがあった。これを距離に換算すると $5.6\text{km}$ になる。同じVLF帯の電磁波を用いて、位置標定を行っているWWLLNの標定誤差が $10\text{km}$ 以内であることから、今回の標定結果は妥当である。また、受信局間と雷放電までの距離を表4.2に示した。着色された数字は、信号は受信したが計算には使用されなかったものである。

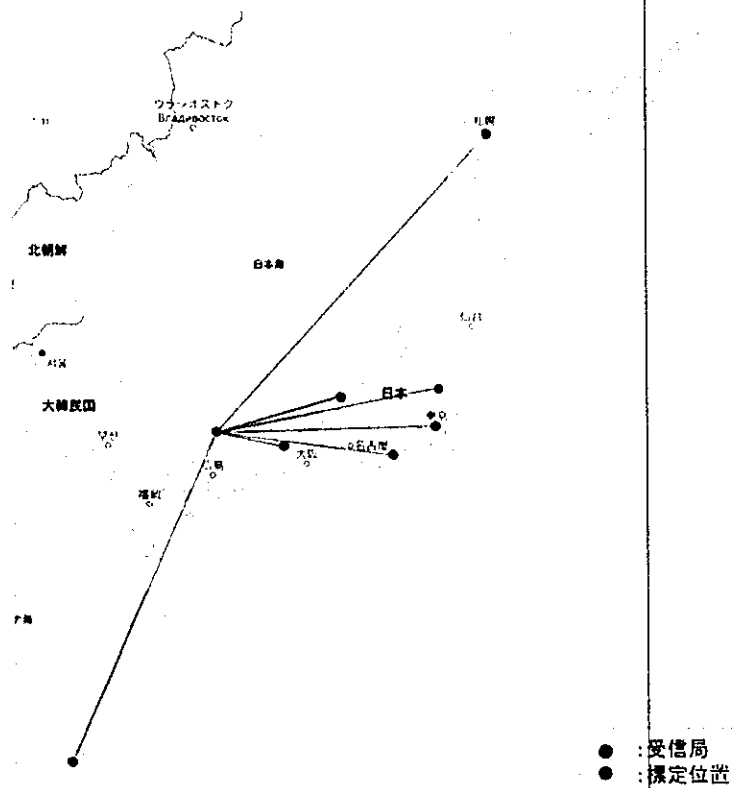


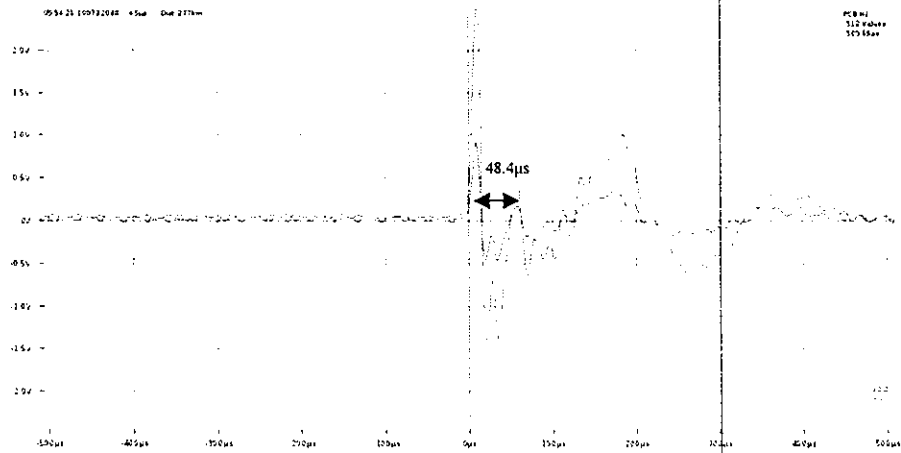
図 4.1 雷放電位置標定結果 (事例 1)

表 4.1 受信時間と雷放電推定時間 (事例 1)

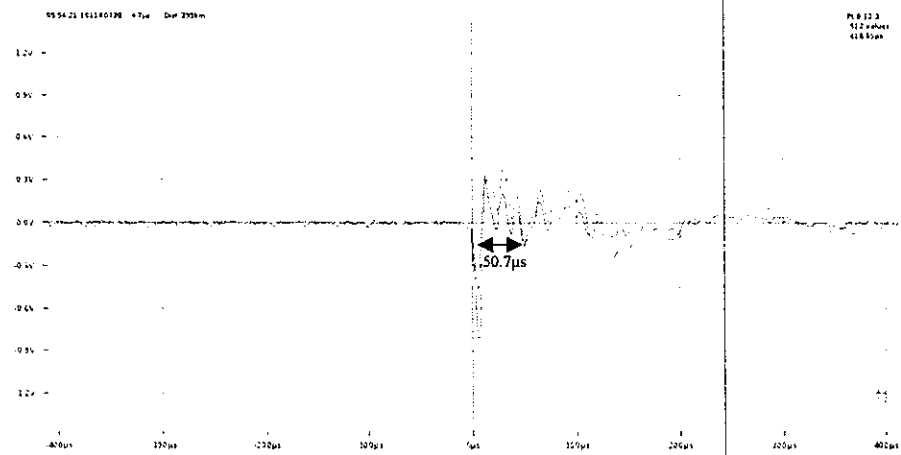
Location	Distance from lightning point [km]	Received time [s]	The estimated lighting occurrence hour [s]	The time difference of the lighting in Hyogo [ $\mu$ s]
Hyogo	277	21.100732	21.099809	-
Kanagawa	625	21.101902	21.099819	10.0
Sapporo	1124	21.103574	21.099827	18.7

表 4.2 受信局間と雷放電までの距離 (事例 1)

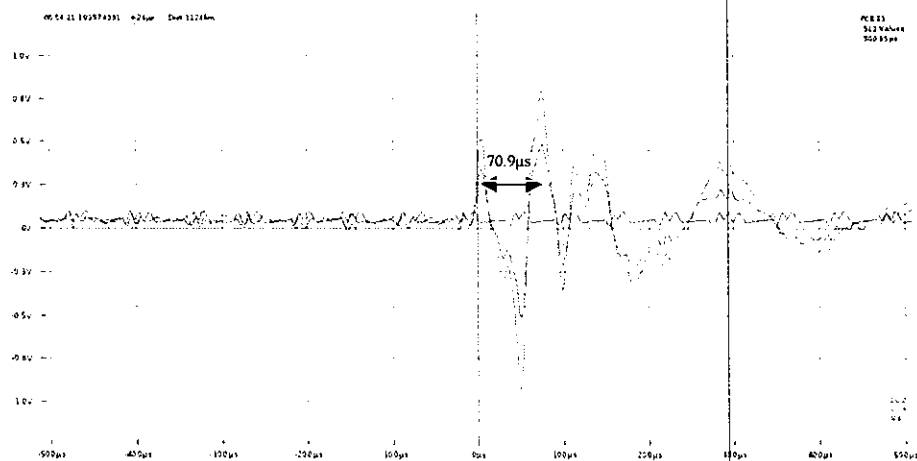
	Id	100	72	70	80	81	103	92	Stroke
Hyogo, JAPAN	100								277km
Kanazawa, JAPAN	72	255							399km
Kanagawa, JAPAN	70	373	291						625km
Tokyo, JAPAN	80	408	298						653km
Tochigi, JAPAN	81	445	278	134	93				663km
Sapporo, JAPAN	103	1058	803	877	836	743			1,124km
Okinawa, JAPAN	92	1194	1444	1502	1548	1613	2238		1,133km



(a) 受信局:Hyogo (Japan)(赤線)



(b) Kanagawa (Japan) (赤線)



(c) Sapporo (Japan) (赤線)

図 4.2 落雷の磁界波形 (事例 1)

〈事例2〉

2016年7月29日の4時32分19秒(UTC)に落雷が発生した。落雷は沖縄近海に発生し、この落雷の電磁波を9局で観測した。雷放電位置標定場所を図4.3に示す。さらに、観測された代表的な3つの磁界波形を図4.4に示す。それぞれの磁界波形は、0 $\mu$ sの位置でトリガがかかっており、振動波形である。各磁界波形の第1ピークと第2ピークとの時間差は、(a)では35.2 $\mu$ s、(b)では56.6 $\mu$ s、(c)では58.5 $\mu$ sであった。これは、電磁波が空気を媒体として伝搬する際、空気の透磁率によって電磁波の磁界成分の伝搬速度が変化するため第1ピークと第2ピークの時間差が異なると考えられる。さらに、雷放電までの距離と受信時間差から、一般的に電磁波は光速に近い速度で伝搬していることが知られているため、これを利用して推定落雷時間を算出した。この関係を表4.3に示す。推定落雷時間に、最大127 $\mu$ sのずれがあったが、これは距離に換算すると誤差は38.3kmになる。同じVLF帯の電磁波を用いて、位置標定を行っているWWLLNの標定誤差が10km以内であることから、今回の標定結果は十分妥当でないと考えられる。これは、東南アジア周辺では雷放電が頻発しているという結果から、他の雷放電の電磁波の磁界成分を観測した際、本雷放電と誤って標定したと考えられる。さらに波形も相似であることから、これらは同じ落雷を観測していると推定される。また、受信局間と落雷までの距離の関係を表4.4に示した。

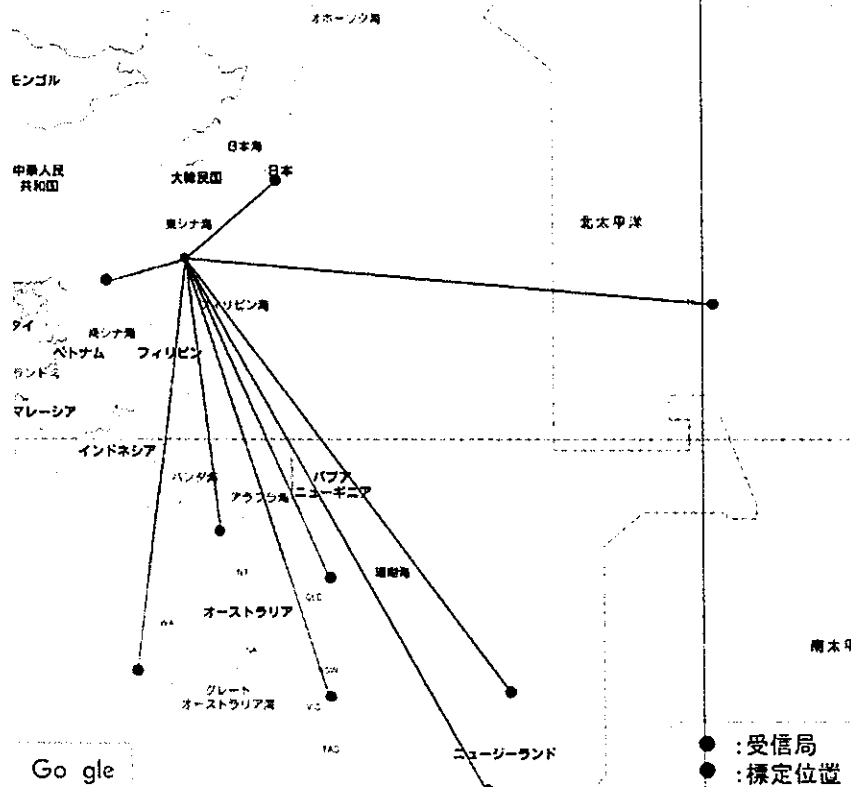


図 4.3 雷放電位置標定結果 (事例 2)

表 4.3 受信時間と雷放電推定時間 (事例 2)

Location	Distance from lightning point [km]	Received time [s]	The estimated lighting occurrence hour [s]	The time difference of the lighting in Hong Kong [ $\mu$ s]
Hong Kong	1298	19.336208	19.331881	-
Kanagawa	1741	19.337557	19.331753	127.8
Darwin-Humpty Doo	4120	19.345679	19.331945	64.3

表 4.4 受信局間と雷放電までの距離 (事例 2)

	Id	65	70	23	82	76	16	29	39	57	Stroke
Hong Kong	65										1,298km
Kanagawa, JAPAN	70	2842									1,741km
Darwin - Humpty Doo	23	4301	5402								4,120km
Cranbrook	82	5826	6123	1828							5,300km
Parkerville	76	6026	7856	2631	3358						6,331km
Wagga Wagga, NSW	16	7286	7882	2991	1765	2905					6,948km
Maui, Hawaii	29	9095	6394	8754	7637	10994	8607				7,809km
Kerikeri	39	8972	8618	4970	3199	5297	2411	6977			8,264km
Dunedin	57	9472	9553	5230	3672	4861	2283	8139	1223		8,958km

### 5.3 Vaisala システムとの比較

米国において、2016年5月30日~2016年6月30日に標定された落雷数を Blitzrtung と Vaisala USA で比較したものを図 5.3 に示す。Vaisala とは、米国の Vaisala 社が販売している LLS であり、ここでは、Vaisala USA は米国の雷放電位置標定ネットワークである NLDN (National Lightning Detection Network) を指す。これは、雷放電によって発生する LF 帯を観測することによって、位置標定を行っており、標定方式は到来時間差法を適用している。雷放電検知効率は 95% 以上であり、位置精度中央値は 250~500m である。図 5.3 より、Vaisala USA の標定数は日によって大きく変動しているが、Blitzrtung の標定数の変動は小さく、Vaisala USA に対する Blitzrtung の標定数の比率の平均は 11% である。これは、Blitzrtung では観測周波数帯が VLF 帯であるため、雲内放電の標定が困難であるが、Vaisala USA では観測周波数帯が LF 帯であるため、雲内放電の標定も可能であるため、標定数に差が生じていると推定される。

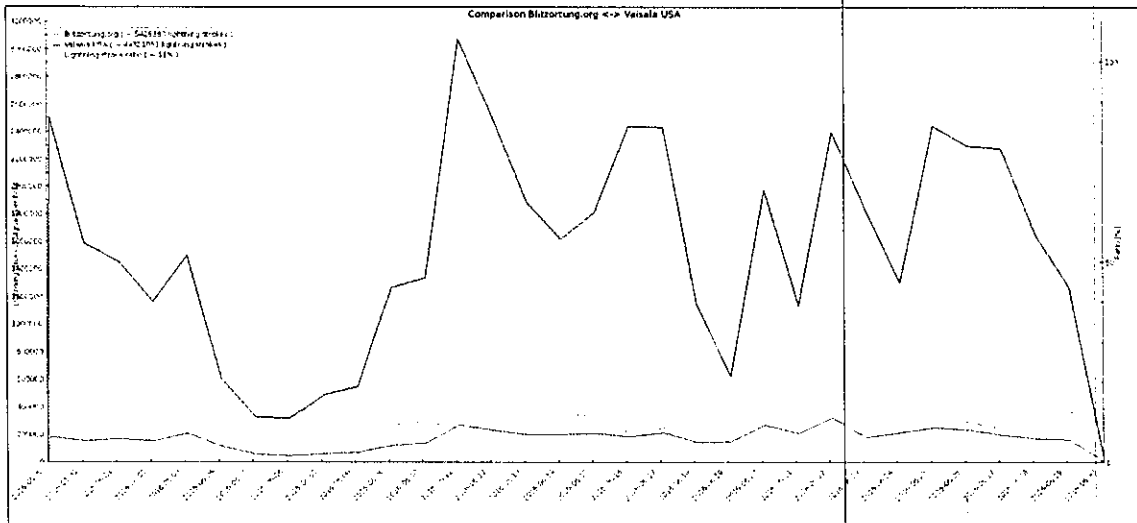
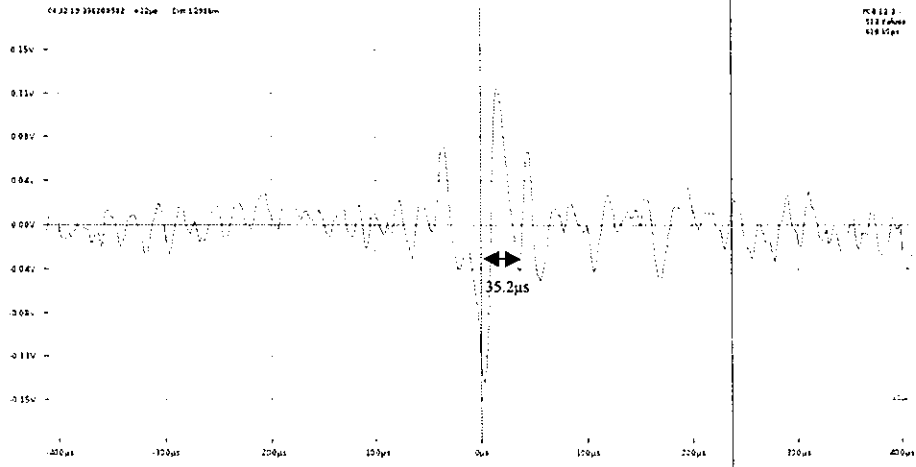
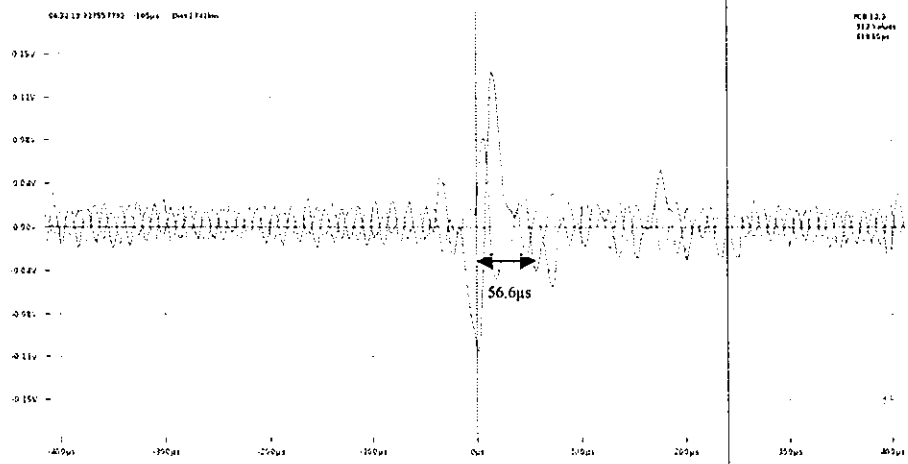


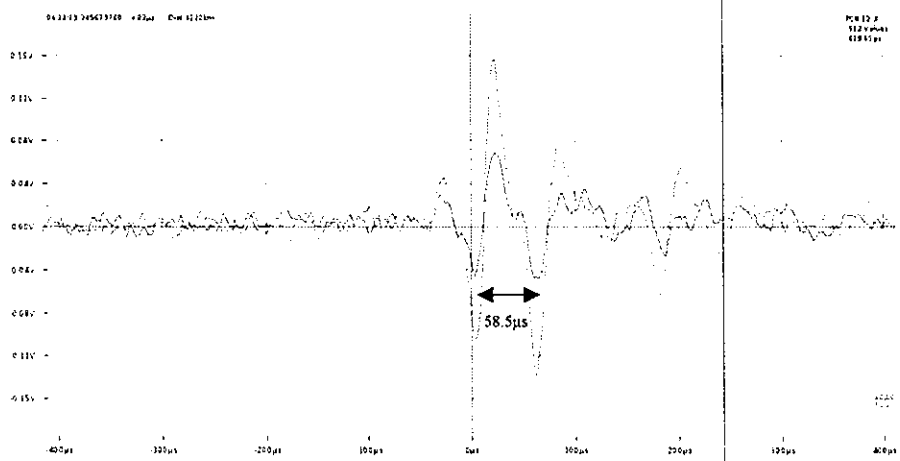
図 5.3 Blitzrtung と Vaisala の比較



(a) 受信局:Hong Kong (Hong Kong)(青線)



(b) Kanagawa (Japan)(青線)



(c) Darwin - Humpty Doo (Australia)(赤線)

図 4.4 落雷の磁界波形 (事例 2)

〈事例3〉

2017年2月17日の7時2分3秒(UTC)に落雷が発生した。雷放電は東南アジア海上に発生し、この落雷の電磁波を14局で観測した。雷放電位置標定場所を図4.5に示す。さらに、観測された代表的な3つの磁界波形を図4.6に示す。それぞれの磁界波形では、 $0\mu\text{s}$ の位置でトリガがかかっており振動波形である。各磁界波形の第1ピークと第2ピークとの時間差は、(a)では $63.3\mu\text{s}$ 、(b)では $57.5\mu\text{s}$ 、(c)では $66.0\mu\text{s}$ であった。これは、電磁波が空気を媒体として伝搬する際、空気の透磁率によって電磁波の磁界成分の伝搬速度が変化するため第1ピークと第2ピークの時間差が異なると考えられる。雷放電までの距離と受信時間差から、一般的に電磁波が光速に近い速度で伝搬していることを利用し、推定雷放電時間を算出した。この関係を表4.5に示す。雷放電推定時間に最大 $40.3\mu\text{s}$ のずれがあった。これを距離に換算すると $12.1\text{km}$ になる。同じVLF帯の電磁波を用いて、位置標定を行っているWWLLNの標定誤差が $10\text{km}$ 以内であることから、今回の標定結果は妥当でないと考えられる。これは、東南アジア周辺では雷放電が頻発しているという結果から、他の雷放電の電磁波の磁界成分を観測した際、本雷放電と誤って標定したと考えられる。また、受信局間と雷放電までの距離を表4.6に示した。着色された数字は、信号は受信したが計算には使用されなかったものである。

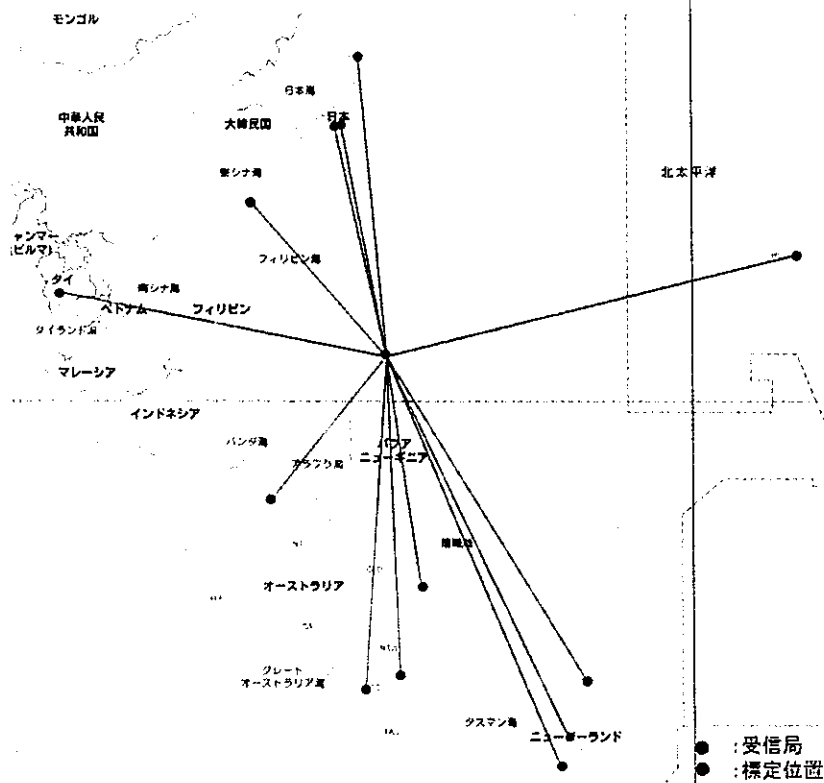


図 4.5 雷放電位置標定結果 (事例 3)

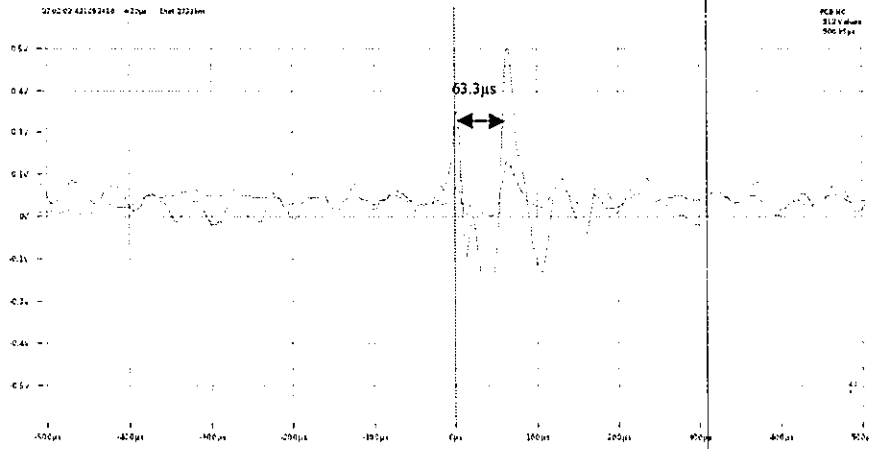


表 4.5 受信時間と雷放電推定時間 (事例 3)

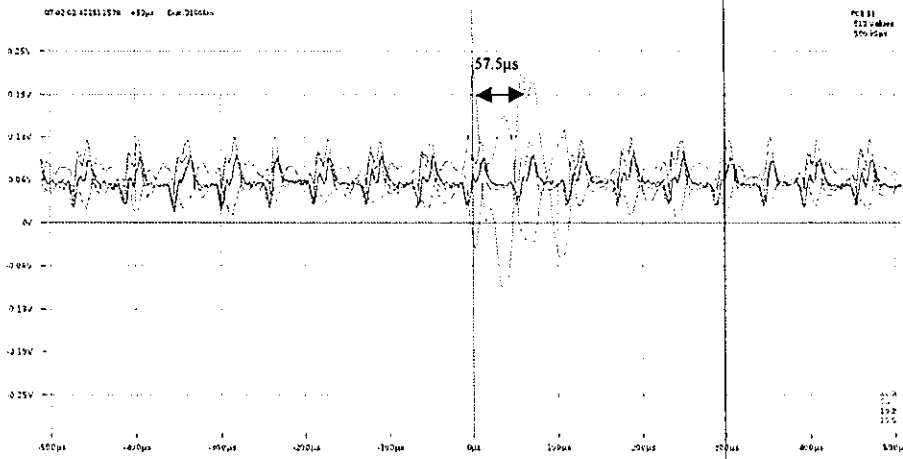
Location	Distance from lightning point [km]	Received time [s]	The estimated lighting occurrence hour [s]	The time difference of the lighting in Darwin-Alawa [ $\mu$ s]
Cranbrook	2733	2.42105341	2.4119434	-
Okinawa	3160	2.42251157	2.4119782	135.0
Wagga Wagga	4495	2.42695069	2.4119673	131.3

表 4.6 受信局間と雷放電までの距離 (事例 3)

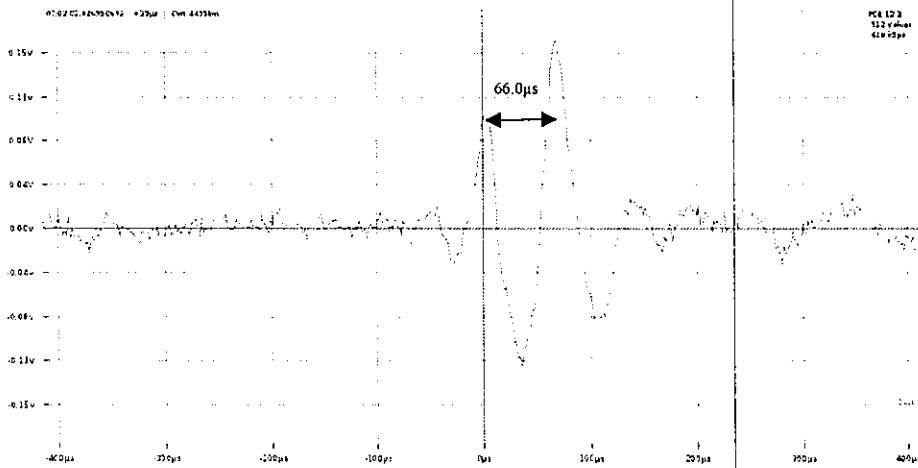
	Id	25	82	92	86	80	99	103	16	98	33	6	107	57	29	Stroke
Darwin - Alawa	25															2,710km
Cranbrook	82	1863														2,733km
Okinawa, JAPAN	92	4309	5465													3,160km
Chiba, Japan	86	5443	6158	1594												3,475km
Tokyo, JAPAN	80	5422	6155	1548	53											3,479km
Carina	99	2857	1116	6561	7156	7158										3,684km
Sapporo, JAPAN	103	6257	6958	2238	820	836	7937									4,254km
Wagga Wagga, NSW	16	3027	1766	7134	7919	7915	1015	8722								4,495km
Portarlinton	98	3171	2101	7371	8224	8218	1419	9034	404							4,833km
Bangkok	33	4427	6251	3155	4656	4604	7284	5072	7337	7371						5,258km
Tauranga	6	5285	3499	8717	8957	8973	2430	9641	2583	2750	9713					5,601km
Cust	107	5247	3580	8973	9365	9376	2466	10086	2327	2394	9638	700				5,934km
Dunedin	57	5267	3672	9108	9568	9577	2558	10304	2283	2294	9619	1024	325			6,115km
Maui, Hawaii	29	8767	7637	7652	6310	6362	7648	6221	8607	8992	10784	7117	7815	8139		6,262km



(a) 受信局:Singapore (Singapore)(青線)



(b) Hyogo (Japan)(ピンク線)



(c) Wagga Wagga (Australia)(ピンク線)

図 4.6 落雷の磁界波形 (事例 2)

## 4.2 磁界波形の地表波と空間波

2016年5月26日の4時14分(UTC)に落雷が発生した。落雷はオーストラリアの南東部にあり、この落雷の電磁波を15局で観測した。雷放電位置標定場所を図4.7に示す。さらに、観測された代表的な3つの磁界波形を図4.8に示す。それぞれの磁界波形は $0\mu\text{s}$ の位置でトリガがかかった。(a),(b)の磁界波形は相似だが、(c)の磁界波形は相似でない。この原因は、(a),(b)のトリガは地表波でかかっており、(c)のトリガは空間波でかかっているためである。これは、(c)の $0\mu\text{s}$ での波形が(a),(b)の $200\mu\text{s}$ 以降の空間波と相似していることから分かる。(a),(b)から地表波と空間波の到達時間差は $250\mu\text{s}$ 、電磁波が光速で伝搬すると仮定し、距離に換算すると、 $\lambda = c \times s$  (m)より、 $75\text{km}$ となる。これは位置標定をする際の誤差になるため、標定精度の低下につながると考えられる。

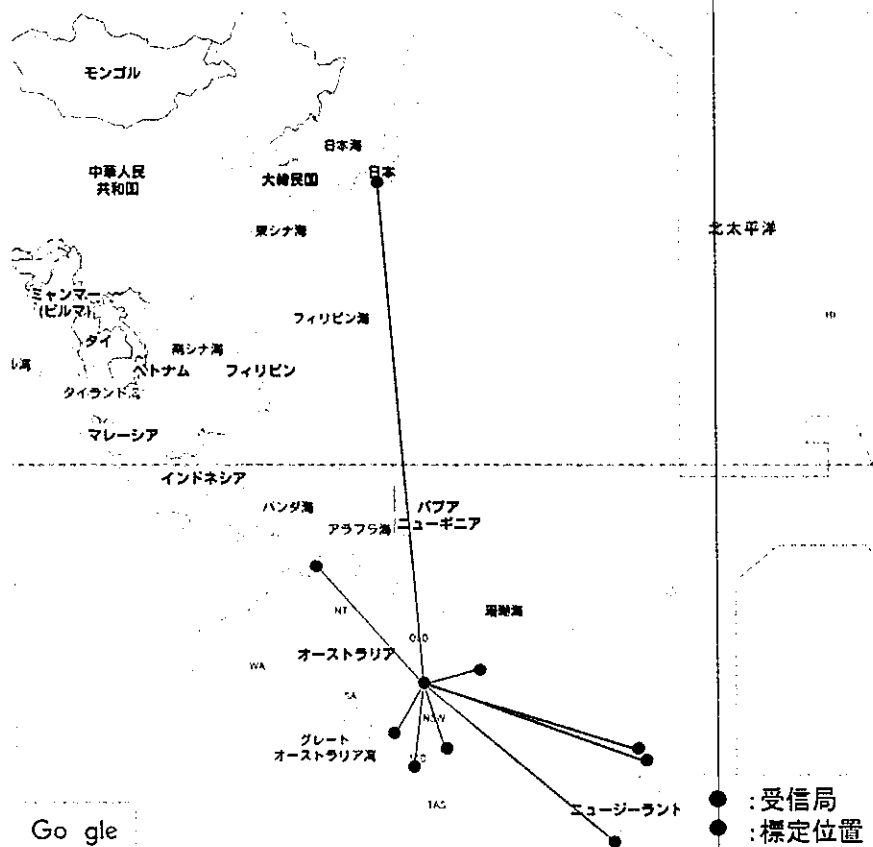
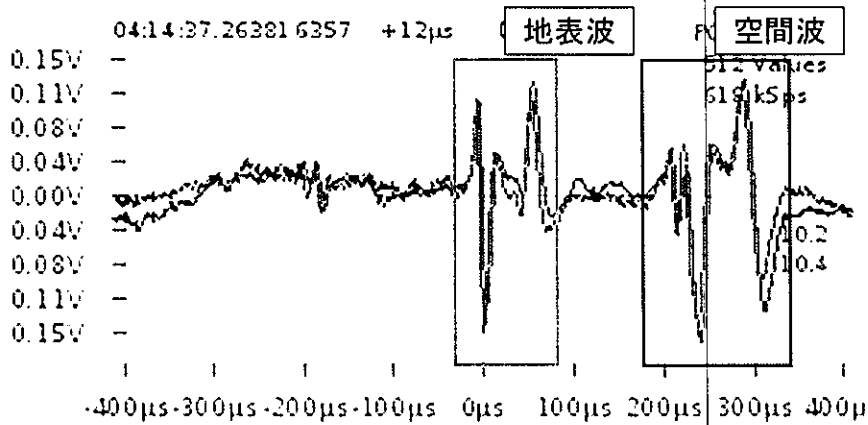
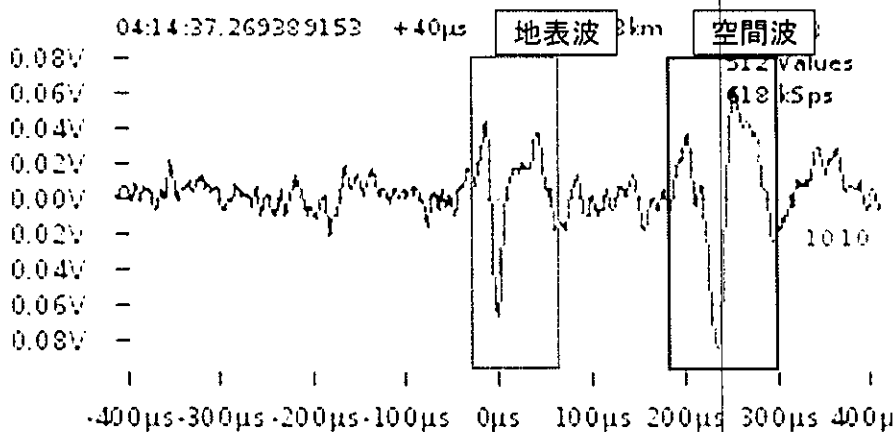


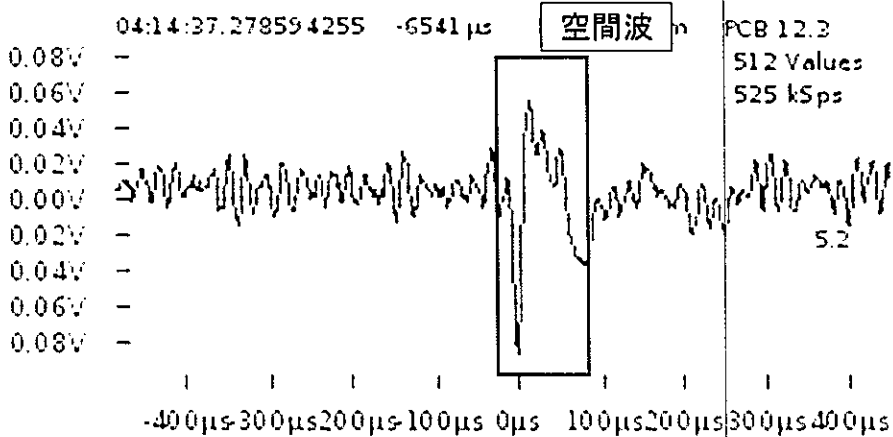
図 4.7 雷放電位置標定結果



(a) North Rocks (Australia)



(b) Darwin (Australia)



(c) Kanagawa (Japan)

図 4.8 磁界波形の地表波と空間波

### 4.3 緒言

本章では、Blitzortung システムのそれぞれの受信局で観測された落雷の電磁波の磁界成分の波形の検討を行った。標定位置である日本、東アジア、東南アジアで発生した落雷の磁界波形を、それぞれの受信局で観測した時間から落雷の発生時刻を算出し、発生時刻の時間差から同一雷を捉えているか評価した。日本で発生した落雷については、相対的な標定誤差は 5.6km で同一雷を捉えているが、東アジアおよび東南アジアでは、相対的な標定誤差は 38.3km、12.1km と同一雷を捉えていないと判断した。日本では、受信局が落雷点の 1200km 以内と比較的近辺に標定に用いた受信局が複数設置されているため正しく標定がされていると判断した。東アジアおよび東南アジアでは、落雷点から標定に用いている受信局の約 2/3 が 4000km 以上遠方にあるため、他の落雷の磁界波形を同一雷と誤って標定したと判断した。

さらに、落雷からの距離によって各受信局で観測される磁界波形は、地表波と空間波、または空間波のみに分けられ、トリガがかかる波形が地表波、空間波と混在している標定は標定精度が低下することを示した。

## 第5章 Blitzortung の統計データ

Blitzortung では、雷放電位置標定のデータを用いた様々な統計データが、インターネット上に公開されている。このような雷放電に関する統計データは、これまでに公開されてはおらず、入手するのは困難であった。

統計データは、オーナーとなっている受信局に関する統計データと、自身が所属している地域 (2017年1月現在ではヨーロッパ、アメリカ、オセアニアに分かれている。) に所属している全受信局の統計データ、の2種類に分けられる。本研究のために日本に設置した受信局は、いずれもオセアニア地域に所属しているため、本章では、本研究で日本に設置した受信局と、オセアニア地域に所属している受信局から成る統計データの評価をしていく。なお、オセアニア地域に所属している受信局の一覧は付録を参照。

### 5.1 オセアニアにおける標定率

2017年1月30日~2017年2月2日(UTC)におけるオセアニア地域の受信局で観測された、毎時間あたりの Signal 平均数を図 5.1 に示す。オセアニア地域では昼は少なく、夜は落雷が多い傾向がある。これは、夜では電波が遠くまで届くことに起因すると推定される。さらに、日によって毎時間あたりの Signal 数は上下するが、概ね平均 350000(Signal/h)となっている。この期間において、Blitzortung による雷放電標定数は 75234(Stroke/3day)なので、1時間あたりの Stroke 数は約 1017(Stroke/h)となる。したがって、観測された Signal 数の内 Stroke の占める割合は 0.3%であった。したがって、ノイズが 99.3%、落雷が 0.3%とノイズが多い。

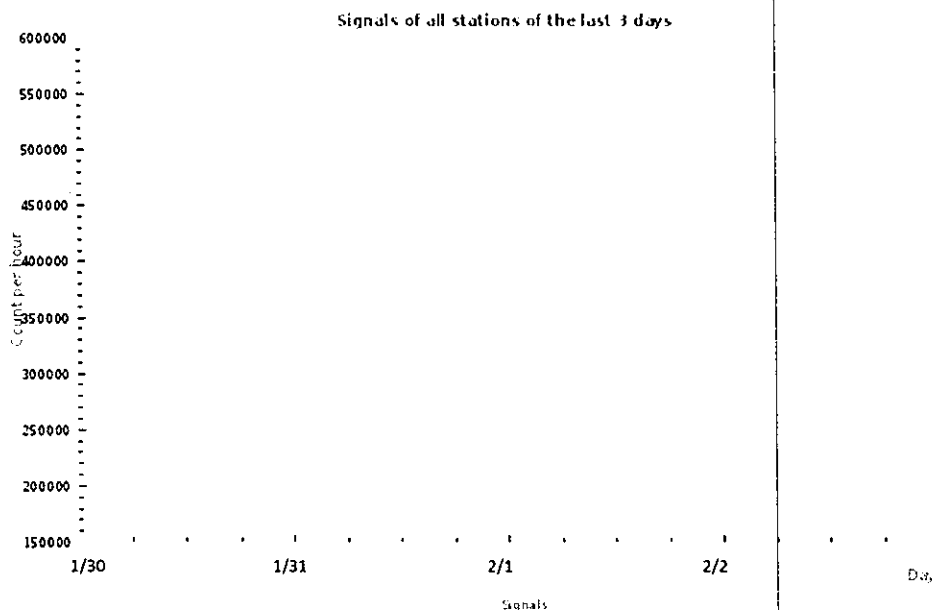


図 5.1 オセアニア地域における Signal 数

## 5.2 アジアにおける貢献度

2017年1月30日~2017年2月2日(UTC)における、雷放電までの距離を藤沢に設置した受信局(以降 Kanagawa)とアジア・オセアニア地域に所属している受信局で比較した統計データを図 5.2 に示す。なお、Kanagawa を原点としたときの雷放電までの距離を表している。全 Stroke のカウントを見ると、4200km 以降で急激に Stroke 数が増えている。しかし、Kanagawa では 4200km 以降のストロークの標定率は低く、400~800km と 3000~4200km でストロークの標定率が高い。これは、Kanagawa から 4500km 離れたオーストラリア北部より南下した地域で、雷放電の標定が多いが、Kanagawa ではこの地域の雷放電の標定には使われていないことが分かる。しかし、Kanagawa から 500km 離れた日本近海と、3500km 離れた東南アジア地域の雷放電の図 5.2 において赤く囲った標定参加率が 80%以上と高いことから、Kanagawa は東南アジアを中心とした、アジアにおける雷放電の標定に高い貢献度を示していることが分かる。

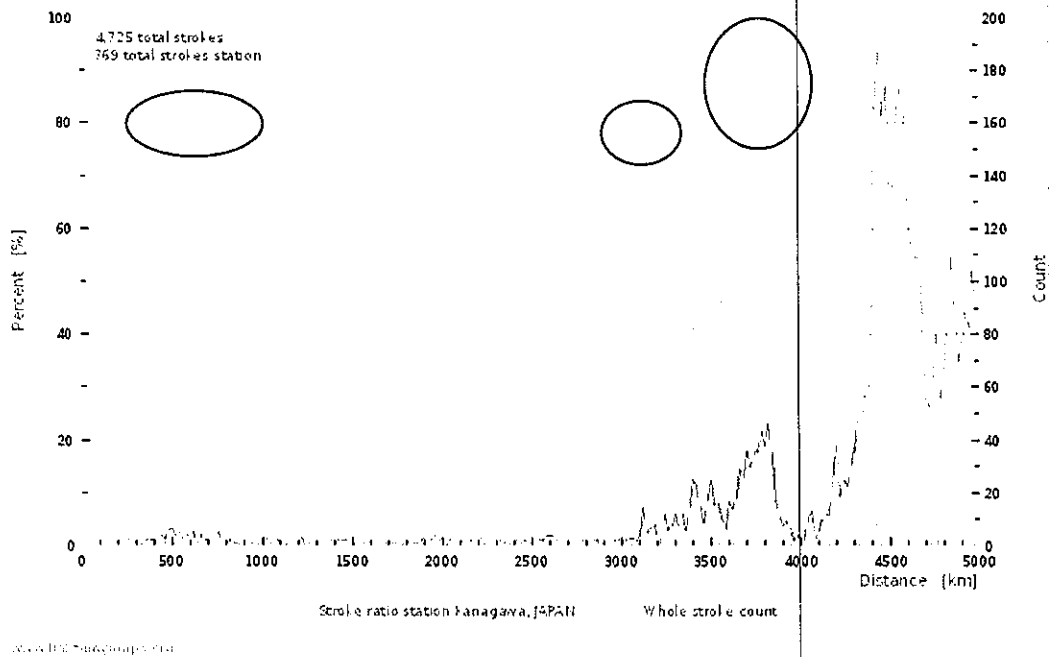


図 5.2 受信局 Kanagawa からの雷放電発生距離

## 5.4 緒言

本章では、Blitzrtung で公開されている統計データから Blitzrtung システムの標定に関する解析を行った。その結果、アジア・オセアニア地域において Blitzrtung システムで観測された Signal の内、Stroke と判定されたのは 0.29% であることがわかった。さらに、藤沢に設置した受信局 (Kanagawa 局) に関して、アジア・オセアニア地域に所属している受信局がこれまでに標定していなかった日本近辺および東南アジアの落雷の標定参加率 80% と非常に高く、アジア・オセアニア地域の落雷標定の精度向上に大きく貢献していることを示した。

Blitzrtung システムと NLDN の米国における標定数の比較を行い、NLDN に対する Blitzrtung の標定数の比率の平均は 11% であり、Blitzrtung と NLDN の標定数の違いは、それぞれの観測周波数帯の特性から、雲内放電を標定しているかの有無によるものである事が推定された。



## 第6章 結論

高度情報化社会は雷に対して脆弱である。そのため、落雷による停電や機器の破損を防ぎ、社会インフラのネットワークを支えている電子機器の安定運用および落雷からの人命保護のため、落雷に関する情報が必要となる。しかし、落雷に関するデータは入手することは困難であるという課題がある。これらを解決するために Blitzortung システムを日本で初めて導入し、雷放電位置標定および波形観測結果から Blitzortung システムの妥当性および標定精度について検証を行った。

Blitzortung システムは小型で安易なセンサを用いて高精度の雷放電位置標定を行う装置であり、湘南工科大学ではこのシステムを日本で初めて導入し、全国に受信局を 11 局設置することで全国展開を実施した。これにより、落雷に関する様々なデータを無料で取得することが可能となった。また、VLF 帯の電磁波は日本、東南アジア、オーストラリアなど遠方まで電磁波が伝搬するという特徴があるため、広範囲にわたっての位置標定が可能となった。

まず、Blitzortung システムの評価として他のシステムである NASA および WWLLN と比較した。Blitzortung の落雷分布傾向と NASA の落雷密度分布を比較したところ、米国では西海岸に落雷が少なく、南部に多いという傾向が一致し、欧州ではイタリアの周辺に落雷が多いという傾向が一致した。次に、WWLLN の落雷分布と比較したところ、日本近海、東南アジア、オーストラリアで一致した。

さらに、日本における冬季雷の位置標定を Blitzortung システムと JLDN で比較したところ、新潟県と石川県の日本海側と、北海道の太平洋側、本州の太平洋側の 2 つの帯状で位置標定が一致した。したがって、Blitzortung システムは冬季雷においても他システムと同等の性能を有している事がわかった。

また、アジア・オセアニア地域において日本に設置した受信局の標定参加率を算出したところ、日本近海や東南アジアで発生した落雷の標定参加率が 80% を超えており、日本に Blitzortung の受信局を設置したことにより、これまで標定が困難だったアジア・東南アジアの落雷標定が可能になった。

以上から本研究では、Blitzortung を日本に導入し全国展開を行ったところ、安価で精度の高い雷放電位置標定システムを構築できた。位置標定や落雷に関する様々なデータは無料でリアルタイムにインターネット上で公開されており、これを利用することにより効率的な社会インフラや人命への雷害対策に役立つことを期待する。

今後は、スカイツリーに落ちた落雷を標定することにより、絶対位置からの位置標定精度の評価を行うとともに、スカイツリーで測定された電流波形と、磁界波形から比較検討することにより、電荷量の推定が可能になることが期待される。

## 参考文献

- [1]. 平成 22 年警察白書 統計資料 : <https://www.npa.go.jp/hakusyo/h22/data.html>
- [2]. E. Zaima, A. Mochizuki, N. Fukiyama, H. Hojo and M. Ishii : “Observation of Lightning by Time-of-arrival type Lightning Location System (LPATS) ”, IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.116, No.9, pp.1033-1038 (1996)
- [3]. T. Narita, T. Shioda, E. Zaima, and M. Ishii : “Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO ”, IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.134, No.5, pp.450-455 (2014)
- [4]. Blitzortung\_RED 技術書:[http://www.blitzortung.org/Documents/TOA\\_Blitzortung\\_RED.pdf](http://www.blitzortung.org/Documents/TOA_Blitzortung_RED.pdf)
- [5]. T. Takahashi : “Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms”, J. Atmos. Sci., 35, pp.1536-1548 (1978)
- [6]. K. Takamatu : ”Several discharge phenomena observed in winter upward lightning”,(2015)
- [7]. 竹内利雄 1987 年「雷放電現象」,名古屋大学出版会
- [8]. 馬場清英,「超長波電波の電離層・地表導波管伝搬の研究」,名古屋工業大学学術機関リポジトリ,1993.
- [9]. 岸本保夫,「異方性磁気抵抗センサによる雷観測システムの試作と落雷位置標定への適応性評価」,NTT Facilities Research Institute,2007.
- [10]. C. J. Rodger, S. Werner, J. B. Brundell, E. H. Lay, N. R. Thomson, R. H. Holzworth, and R. L. Dowden : “Detection efficiency of the VLF World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) : initial case study”, Ann. Geophys., 24, pp.3197–3214,2006.
- [11]. 大野高寛, 山田素輝,成田知巳,「超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定装置に関する研究」電気学会電力・エネルギー部門大会, 450, pp.59-60, 2016.
- [12]. STM32F4DISCOVERY 技術書 :  
[http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data\\_brief/09/71/8c/4e/e4/da/4b/fa/DM00037955.pdf/files/DM00037955.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037955.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/data_brief/09/71/8c/4e/e4/da/4b/fa/DM00037955.pdf/files/DM00037955.pdf/jcr:content/translations/en.DM00037955.pdf)
- [13]. MT3339 技術書 : [http://www.si-tech.co.jp/eng/images/locosys/mc-1513\\_jp.pdf](http://www.si-tech.co.jp/eng/images/locosys/mc-1513_jp.pdf)
- [14]. NASA の雷放電位置標定分布 : [https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data\\_lis-otd-climatology.html](https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data_lis-otd-climatology.html)
- [15]. フランクリン・ジャパン落雷分布図 : <http://www.franklinjapan.jp/contents/lightning-info/previous/>
- [16]. 地上天気図 : <http://www.tenki.jp/guide/chart/>
- [17]. 高層天気図 : <http://www.hbc.co.jp/weather/pro-weather.html>
- [18]. N. Kitagawa : “Meteorological aspects of winter thunderclouds along the Japan Sea coast”,社団法人日本気象学会, Vol43, No2, pp.98-99 (1996)



付録①

**Blitzortung** の受信局一覧

C

C

## Blitz 設置例(湘南工科大学)



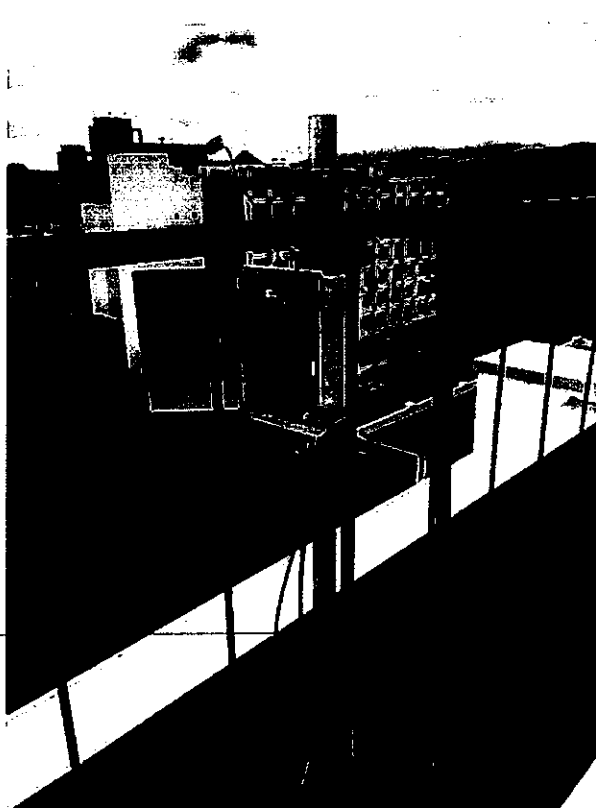
<b>場所</b>	<b>湘南工科大学4階建て屋上 (35.323782°N, 139.452520°E)</b>
電源	2階でAC100VからDC12Vに変換し、屋上までケーブル(30m)本体内でDC12VからDC5Vに降圧。
LAN	耐候性のLANケーブルを3階の端子から屋上まで(30m)
アドレス	ローカルアドレス(ポート開放した)
支柱	単管パイプを流用
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を単管パイプに固縛。ケーブルは本体へ。
防水防塵ボックス	外部には、LAN,電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	電源、ネット、場所は全て無料
system	Red
設置時期	H28.2

## Blitz 設置例(北海道大学)



<b>場所</b>	<b>北海道大学理学部3階建屋上 (43.072611°N, 141.339417°E)</b>
電源	AC100V防水ケーブルを階下のコンセントまで(50m)
LAN	耐候性のLANケーブルを階下のジャックまで(50m)
アドレス	グローバルアドレスを借用
支柱	エレベータールーム外側に単管パイプを準備してもらう
GPS	外部アンテナとする
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を単管パイプに固縛。ケーブルは本体へ。
防水防塵ボックス	外部には、LAN、電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	共同研究とし、電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.12.9

## Blitz 設置例(東北大学)



<b>場所</b>	<b>東北大学理学部8階建て屋上 (38.259797°N, 140.838810°E)</b>
電源	AC100V防水ケーブルを階下のコンセントまで(30m)
LAN	耐候性のLANケーブルを階下のジャックまで(30m)
アドレス	グローバルアドレスを借用
支柱	手すりに単管パイプを準備してもらった
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を単管パイプに固縛。ケーブルは本体へ。
防水防塵ボックス	外部には、LAN、電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	共同研究とし、電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.9



## Blitz 設置例(宇都宮)



<b>場所</b>	<b>栃木県宇都宮市 2階建一軒家の2階ベランダ (36.487699°N, 139.846631°E)</b>
<b>電源</b>	1階外のAC100Vコンセントから軒下の本体内に引き込み。 DC5VのUSBアダプタを本体内に設置。
<b>LAN</b>	室内から無線LANにて本体内にある無線LAN子局に伝送。
<b>アドレス</b>	一軒家のネット契約、ローカルアドレス
<b>支柱</b>	ベランダを利用
<b>GPS</b>	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
<b>アンテナ</b>	磁界アンテナ(20cm)をベランダの手すりに固定
<b>防水防塵 ボックス</b>	外部には、電源、磁界アンテナケーブルの2つを防水コネクタで 出している。
<b>費用</b>	知人宅のため、電源、ネット、場所は全て無料
<b>system</b>	Blue
<b>設置時期</b>	H28.12
<b>ノイズ</b>	特に問題なし

## Blitz 設置例(浦和)



場所	埼玉県さいたま市浦和区2階建一軒家の2階ベランダ (35.880290°N, 139.662236°E)
電源	1階外のAC100Vコンセントから防水ケーブルにて2階ベランダの本体内に引き込み。DC5VのUSBアダプタを本体内に設置。
LAN	室内から無線LANにて本体内にある無線LAN子局に伝送。
アドレス	一軒家のネット契約、ローカルアドレス
支柱	物干しざおの支柱を利用
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を支柱に固縛。
防水防塵ボックス	外部には、電源、磁界アンテナケーブルの2つを防水コネクタで出している。
費用	知人宅のため、電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.9
ノイズ	電力線が近いこと、住宅街であることから、ノイズ多し



## Blitz 設置例(晴海)

場所	東京都中央区晴海20階建マンション7階ベランダ (35.652485°N, 139.774591°E)
電源	部屋のAC100VコンセントにDC5VのUSBアダプタを接続し、USBケーブルをエアコンの穴からベランダに出した。(2m)
LAN	室内のLAN端子からケーブルをエアコンの穴を利用してベランダに出した(2m)
アドレス	マンションタイプ光のネット契約、ローカルアドレス
支柱	なし
GPS	外部GPSアンテナをマンションの壁面にシールで固定
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を手すりに固縛。磁界アンプは、アンテナ直結で、LANケーブルで本体へ。
防水防塵ボックス	なし
費用	電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.8



## Blitz 設置例(金沢)

場所	金沢市2階建屋根 (36.760655°N, 136.753271°E)
電源	AC100V防水ケーブル
LAN	耐候性のLANケーブル
アドレス	ローカルアドレス
支柱	単管パイプ
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を単管パイプに固縛。ケーブルは本体へ。
防水防塵ボックス	外部には、LAN、電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	電源、ネット、場所は全て無料
system	Red
設置時期	H28.10



## Blitz 設置例(兵庫)

場所	兵庫県尼崎市4階建 屋上 (34.733921°N, 135.424611°E)
電源	AC100V防水ケーブル
LAN	無線LAN
アドレス	ローカルアドレス
支柱	木柱
GPS	外部にアンテナ
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を木材に固縛。ケーブルは本体へ。
防水防塵ボックス	外部には、電源、磁界アンテナケーブル、GPSケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.10

## Blitz 設置例(福岡)



場所	福岡県 駐車場 (33.254979°N, 130.549588°E)
電源	AC100V防水ケーブル
LAN	無線LAN
アドレス	ローカルアドレス
支柱	金属製ポール
GPS	内部にアンテナ
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)をポールに固縛。
防水防塵ボックス	外部には、電源、磁界アンテナケーブルの2つを防水コネクタで出している。
費用	電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H28.12.7



## Blitz 設置例(琉球大学)

場所	琉球大学工学部2号館北棟 5階建屋上 (26.252858°N, 127.766637°E)
電源	AC100V防水ケーブルを階下のコンセントまで(30m)
LAN	耐候性のLANケーブルを階下のジャックまで(30m)
アドレス	グローバルアドレスを借用
支柱	屋上のコンクリートブロックにアンカーボルトで固定
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)をコンクリートブロック上部の鉄骨に固縛。 ケーブルは本体へ。
防水防塵 ボックス	外部には、LAN、電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネク タで出している。
費用	共同研究とし、電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H29.1.18

## Blitz 設置例(富山大学)



具体的な設置方法は検討中

<b>場所</b>	<b>富山大学理学部4階建屋上</b> (36.699028°N, 137.187583°E)
電源	AC100V防水ケーブルを階下のコンセントまで(50m)
LAN	耐候性のLANケーブルを階下のジャックまで(50m)
アドレス	グローバルアドレスを借用
支柱	検討中
GPS	防水防塵ボックス内の内側上部に貼り付け
アンテナ	磁界アンテナ(20cm)を単管パイプに固縛。
防水防塵ボックス	外部には、LAN,電源、磁界アンテナケーブルの3つを防水コネクタで出している。
費用	共同研究とし、電源、ネット、場所は全て無料
system	Blue
設置時期	H29.3を予定





付録②

関連発表 PowerPoint



# VLF帯空電観測を用いた雷放電位 置標定装置の全国展開

2017年 1月 20日

湘南工科大学 成田研究室

大野 高寛, 成田 知巳

1

## VLF 帯空電観測を用いた落雷位置標定装置の全国展開

### 背景

電力会社や気象会社などが、落雷による被害の早期発見、予防のために雷放電位置標定装置(LLS)を運用しているが、データは非公開、または高額となっている。

IoT技術の発達により、低コストの雷センサーを用いた情報ネットワークの構築が容易になった。

## VLF 帯空電観測を用いた落雷位置標定装置の全国展開

### 目的

一般の人でも利用できるよう、IoT技術を活用した安価で精度の高い雷放電位置標定ネットワークを構築し、落雷位置標定、波形観測、電荷量推定を行う。



「Blitzortung.org」に参加

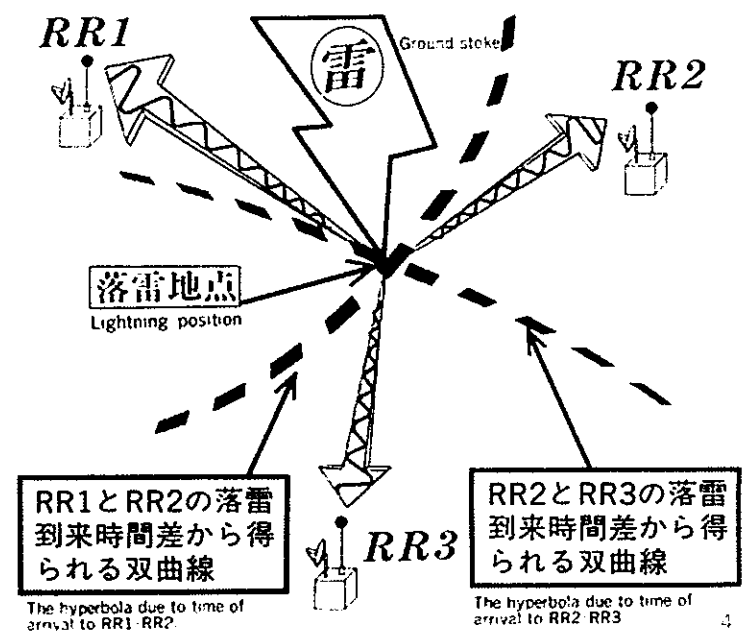
世界中で、高精度かつ安価な受信局を用いて、リアルタイムの雷放電位置標定ネットワークの構築を目的としたプロジェクト。

# 雷放電位置標定装置(LLS)とは

- 落雷から生じる電磁波を複数の受信局で受信することで落雷の位置を標定するシステム。

## 雷放電位置標定方法 (到来時間差方式)

1. 落雷により発生した電磁波を3局以上の受信局で受信。
2. GPSを用いて50nsの精度で電磁波の到来時間をつける。
3. 各受信局の座標と到来時間差を利用して落雷位置を標定。



## 落雷位置標定システム(LLS)の比較

システム名	観測周波数帯	標定方式	運用者	料金	標定範囲
JLDN	LF帯 (30-300kHz)	到来時間 差方式	会社	有料	日本周辺
NLDN			会社	有料	米国
電力会社のLLS			会社	-	電力会社の 地域
WWLLN	VLF帯 (3-30kHz)		大学	-	全世界
Blitzortung			個人	無料	全世界

5



## Blitzortung.orgとは



- ドイツのハインリッヒ大学のワンケ先生ら三人が2012年に立ち上げたプロジェクト
- Blitzortungでは、個人が約30000円で、基板と電子部品を購入し、半田付けなどで受信局を組み立て、その受信局をインターネットに接続することで、世界規模のLLSを構築しようとしている。

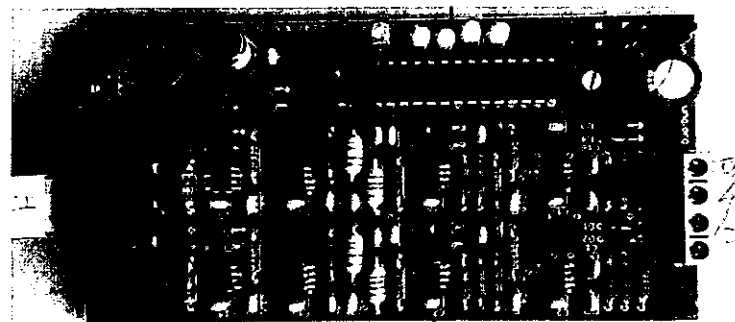
# 受信局の製作



プリント基板・電子部品

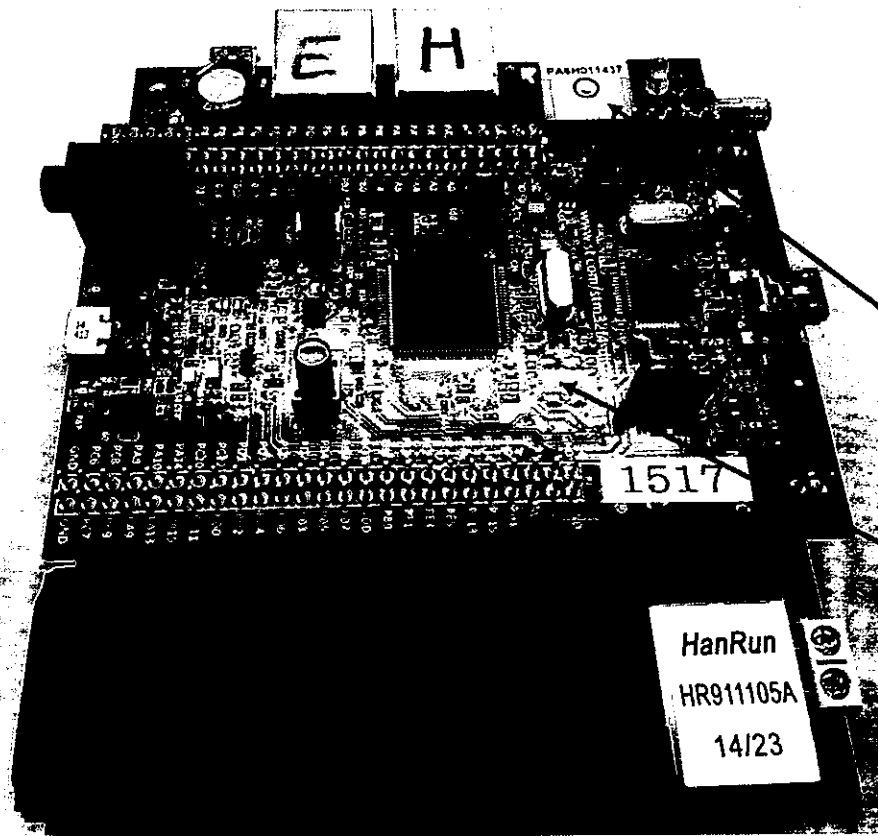


電界アンプ



磁界アンプ

## 受信局の製作



### コントローラボード

STMボード(マイコン)により、  
アンプの信号を12bitでA/D変換、  
ネットワーク、GPSの制御をしている。

GPSチップ  
ns精度のもの

STMボード  
秋葉原で購入

## 受信局のスペック

標定方式	到来時間差方式
GPS (時間)	50ns精度
アンテナ	磁界アンテナ (東-西)
	磁界アンテナ (北-南)
	電界アンテナ
サンプリング 周波数	525kHz
観測周波数	1-50kHz (磁界成分)
	5-50kHz (電界成分)

磁界アンテナ



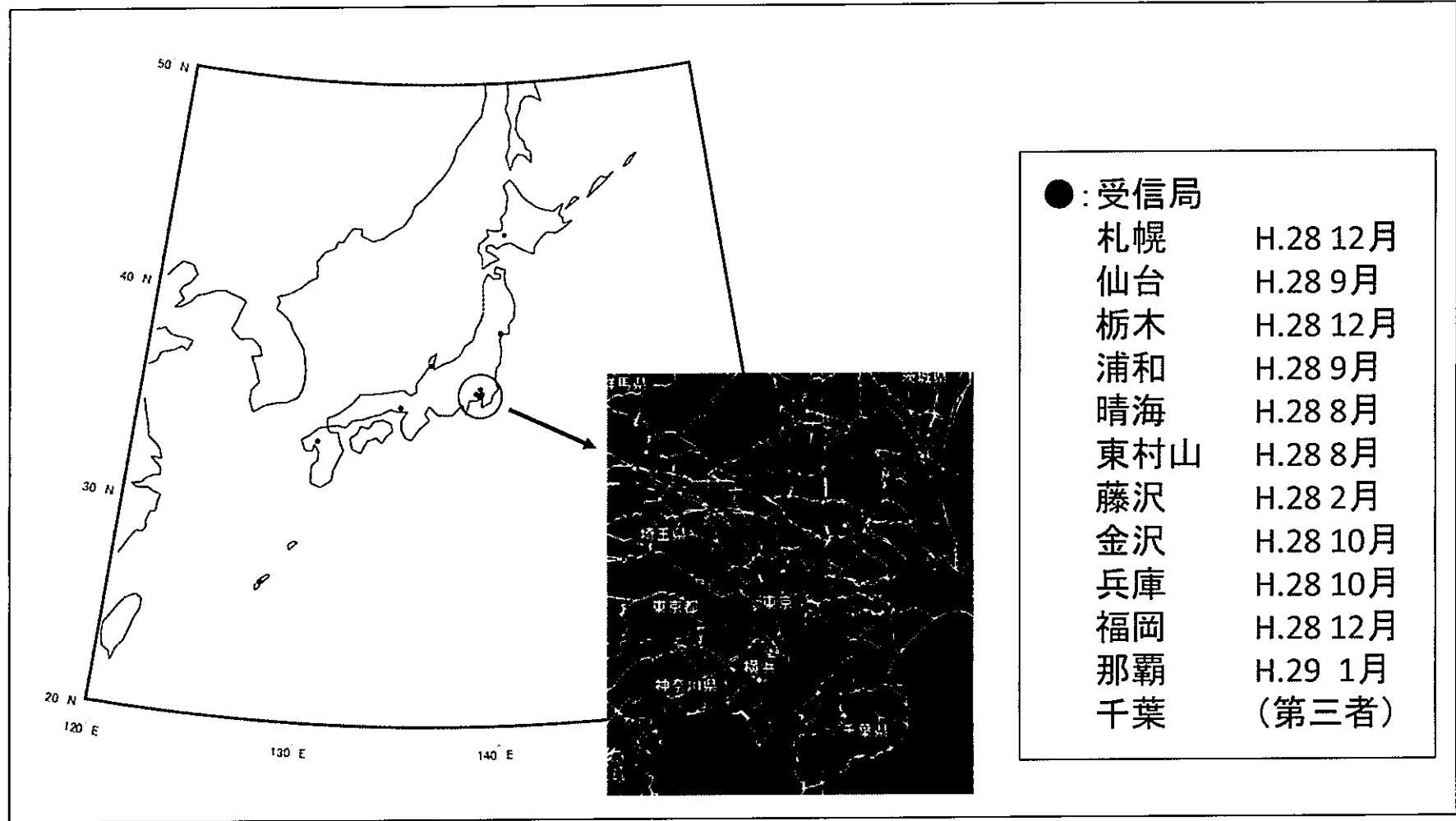
本体

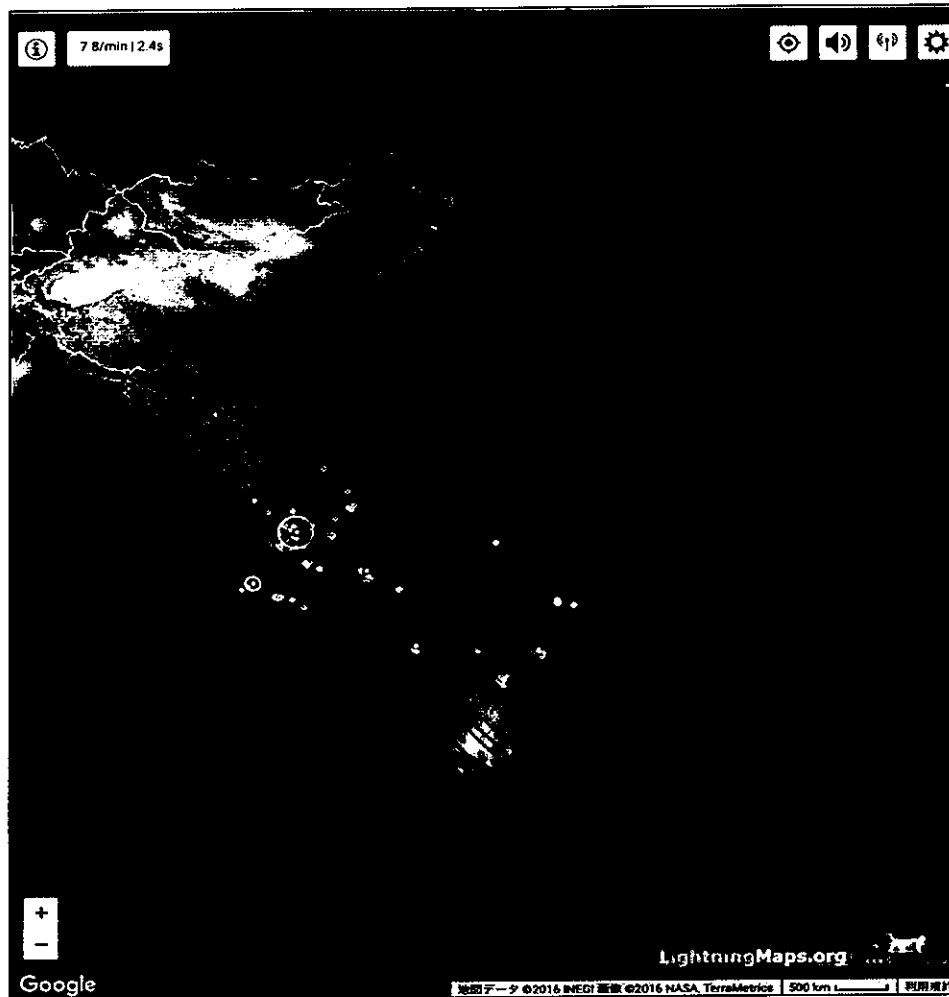
設置写真

9

## 世界の受信局の設置状況

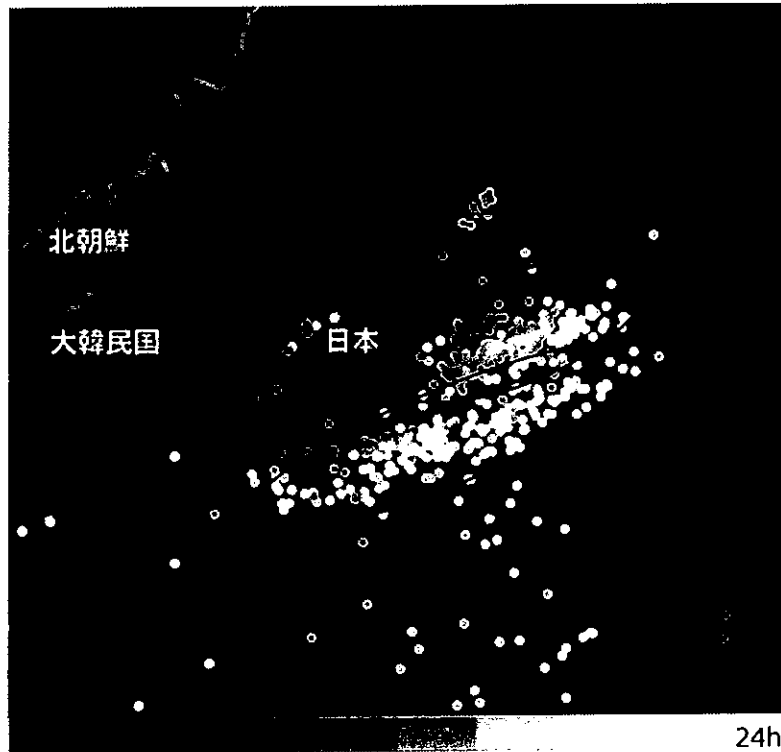




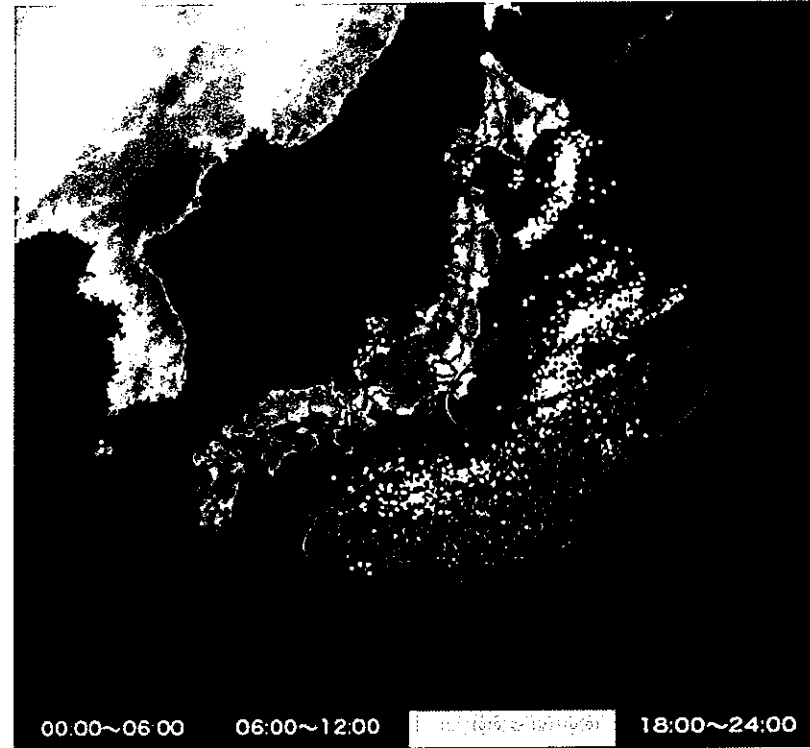


2017年1月1日  
2時46分の標定の様子

12



2017年1月22日 Blitzortungシステム



2017年1月22日 JLDN (フランクリンジャパン)



## まとめ

- Blitzortungシステムを日本に初めて導入した。
- 受信局を全国展開し、日本を含む東南アジアの落雷を標定できるようになった。  
札幌、仙台、栃木、浦和、晴海、東村山、藤沢、金沢、兵庫、福岡、那覇
- BlitzortungシステムとJLDNの落雷頻度マップの比較で、日本近海の落雷分布の傾向が一致した。

謝辞：北海道大学、東北大学、富山大学、琉球大学、  
音羽電機工業(株)、(株)ホトニクス、東京電力パワーグリッド(株)

付録③

関連発表論文

## 学会発表論文

- (1). 大野高寛, 山田素輝, 成田知巳, 「超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定装置に関する研究」電気学会電力・エネルギー部門大会, 450, pp.59-60, 2016.
- (2). 大野高寛, 山田素輝, 成田知巳 (湘南工科大), 佐藤光輝 (北海道大), 坂野井健, 土屋史紀 (東北大), 金子英治, 原田繁実 (琉球大), 工藤剛史 (音羽電機工業), 荏原正昭 (ホトニクス), 三塚洋明 (東京電力パワーグリッド) 「VLF 帯空電観測を用いた落雷位置標定システムによるオーストラリアの落雷分布」, 2017
- (3). 大野高寛, 山田素輝, 成田知巳 (湘南工科大), 佐藤光輝 (北海道大), 坂野井健, 土屋史紀 (東北大), 金子英治, 原田繁実 (琉球大), 工藤剛史 (音羽電機工業), 荏原正昭 (ホトニクス), 三塚洋明 (東京電力パワーグリッド), 「超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定システムによる落雷分布」, 2017

# 超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定装置に関する研究

非会員 大野 高寛<sup>a)</sup> 非会員 山田 素輝\* 上級会員 成田 知巳\*

## A study of lightning position based on the observation of VLF sferics

Non-Member, Takahiro Ohno<sup>a)</sup>, Non-Member, Motoki Yamada\*, Senior-member, Tomomi Narita\*

キーワード：落雷位置標定装置，到達時間差方式，超長波

Keywords : LLS, time of arrival technique, VLF

### 1. はじめに

落雷による災害によって生じる経済損失は膨大である。突発的な降雨や落雷によって生じる水害や停電などによる公共災害防止のために落雷位置標定装置が必要となる。

落雷位置標定には，安価で精度の高い落雷位置測定ネットワークを構築できるのが望ましい。しかし，雷に関するデータは，これまでに気象会社や電力会社<sup>(1)(2)</sup>などが運用する商用ネットワークがあるが，公開されているデータは広域の情報であることなど，詳細は公開されていない。また詳細なデータを入手するには，高額な料金を払う必要があった。そこで安価で広く雷に関するデータを利用できるように，ドイツの Egon Wanke 氏らは，2012 年に落雷位置標定ネットワーク構築プロジェクト「Blitzortung.org」を開始した。このプロジェクトは，安価な受信局を用いた落雷位置標定を世界規模で行うことを目的としたものであり，基本的にボランティアで運用され，自ら電子部品を組み立てる必要がある。なお，商用目的では利用できない。

現在，落雷位置標定のための受信局は，主に米国，欧州，オセアニア地域で展開しており，約 800 台の受信局が接続されている。アジアでは香港およびタイにそれぞれ 1 局ずつあり，日本国内では湘南工科大学が初めて受信局を設置した。これにより，オセアニア，アジア地域での標定精度の向上が期待できる。

本報告では，落雷位置標定ネットワーク Blitzortung.org の受信局導入および落雷位置標定の例を示す。

### 2. 日本への導入

#### 〈2・1〉 落雷位置標定原理 Blitzortung.org の落雷位置

a) Correspondence to: Takahiro Ohno  
E-mail: 13A2011@sit.shonan-it.ac.jp

\* 湘南工科大学  
〒251-8511 神奈川県藤沢市辻堂西海岸 1-1-25  
Shonan Institute of Technology  
1-1-25 Tsujido-nishikaigan, Fujisawa-city, Kanagawa, 251-8511

標定システム (LLS: Lightning Location System) は，落雷標定に到達時間差方式を用いており，雷放電時に発生する電磁波の各受信局に到達する時間差を用いて落雷位置の標定している。2 局間の到達時間差が分かると，電磁波放射点の解の軌跡は 1 つの双曲線となる。したがって 3 つの受信局があれば双曲線の交点として，落雷位置が標定できる。

〈2・2〉 システムの構成 装置は磁界アンブ，電界アンブ，GPS およびコントローラーで構成される。磁界アンテナと電界アンテナを用いて，雷撃により発生した VLF 帯の電磁波の磁界成分と電界成分を受信する。その大きさが，しきい値を超えるとトリガがかかり，時刻と受信局の座標，波形が記録される。それらのデータがサーバーに送信し，4 局以上で落雷波形が観測されると，誤差が最小になるように統計的に処理され，落雷の位置が計算される。なお，距離の計算は球面座標を使用する。また，受信局の時刻の同期は GPS を用いている。装置のスペックを Table 1. に示す。

〈2・3〉 アンテナのフィルタ 磁界アンブには 1kHz のハイパスフィルタと 50kHz のローパスフィルタがあり，電界アンブには 5kHz のハイパスフィルタと 50kHz, 18kHz および 44kHz のローパスフィルタがある。

Table 1. Overview of observation  
(at Fujisawa city, Kanagawa prefecture)

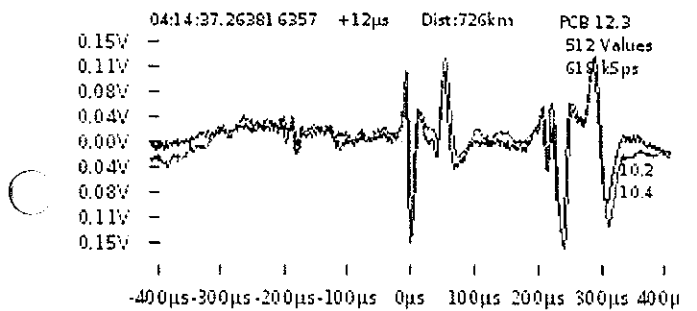
Geographic coordinates	Latitude	35.323792°
	Longitude	139.4525591°
Waveform observation	Vertical electric field component	
	Horizontally magnetic field component (West-East)	
	Horizontally magnetic field component (North-South)	
Sampling rate	525kHz	
Observation frequency	1-50kHz (Magnetic field)	
	5-50kHz (Electric field)	

〈2.4〉 落雷位置標定結果 2016年5月26日の4時14分(UTC)に落雷が発生した。この落雷は15局で観測され、代表的な3つの波形をFig.1に示す。磁界波形は相似しており、0 $\mu$ sの位置でトリガがかかった。受信局間の時間差および距離差の関係をTable2に示す。伝搬速度は、ほぼ光速であること、波形も相似であることから、これらは同じ落雷を観測していると推定される。

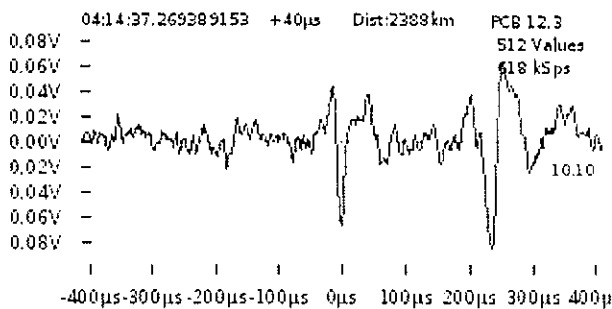
本システムで標定された落雷位置をFig.2に示す。オーストラリアの南東部に落雷があり、これを15局で受信している。

Table 2. Relationship between distance and received times

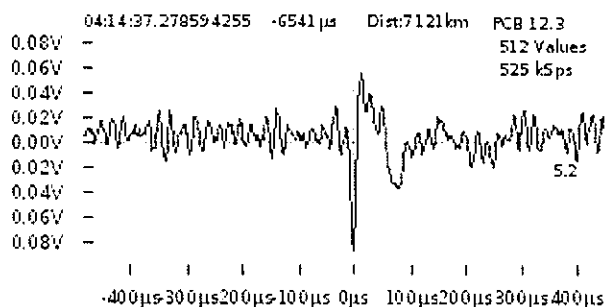
Location	Distance from lightning point [m]	Received time [s]	Distance from North Rocks [km]	Time difference from North Rocks [ms]	Propagation of velocity [km/ms]
North Rocks	726	37.263804	-	-	-
Darwin	2388	37.269349	1662	5.54	300
Kanagawa	7121	37.285135	6395	21.3	300



(A) North Rocks(Australia)



(B) Darwin(Australia)



(C) Kanagawa(Japan)

Fig. 1. An example of observed magnetic field waveforms

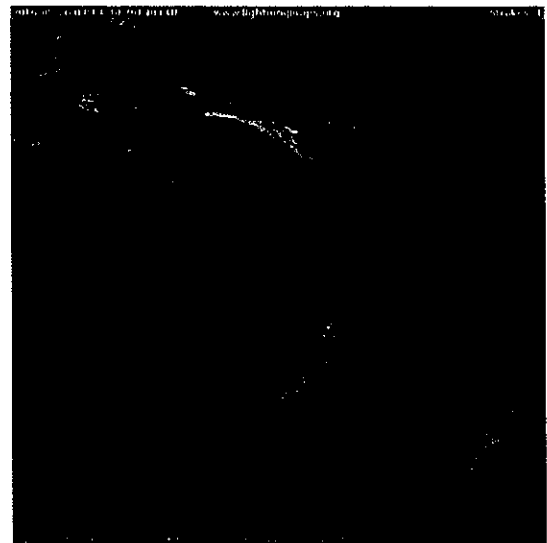


Fig. 2. Lightning Location

### 3. まとめ

ドイツのBlitzortung.orgプロジェクトに日本で初めて参加し、神奈川県藤沢市の湘南工科大学に受信局を設置して、落雷位置標定を開始した。オーストラリアに落ちた落雷について日本を含む15局で受信し、代表的な受信局の波形がほぼ一致していることを確認した。また、受信時刻と距離差の関係より同一の雷であることが確認できた。

今後は標定の精度検証など装置の評価を実施する予定である。

### 文 献

- (1) E. Zaima, A. Mochizuki, N. Fukiyama, H. Hojo and M. Ishii: "Observation of Lightning by Time-of-arrival type Lightning Location System (LPATS)", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.116, No.9, pp.1033-1038 (1996) (in Japanese)  
財満英一、望月東、吹山直樹、北条準一、石井勝:「到達時間差方式の雷放電位置標定システム(LPATS)による雷放電の観測」, 電気学会論文誌B, 116巻9号(1996)
- (2) T. Narita, T. Shioda, E. Zaima, and M. Ishii: "Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.134, No.5, pp.450-455 (2014) (in Japanese)  
成田知己、塩田徹、財満英一、石井勝:「落雷位置標定装置(LPATS-T)のパフォーマンス評価」, 電気学会論文誌B, Vol.134, No.5, pp.450-455, 2014.

# VLF 帯空電観測を用いた落雷位置標定システム によるオーストラリアの落雷分布

大野高寛\*, 山田素輝, 成田知己 (湘南工科大), 佐藤光輝 (北海道大),

坂野井健, 土屋史紀 (東北大), 金子英治, 原田繁実 (琉球大),

工藤剛史 (音羽電機工業), 荏原正昭 (ホトニクス), 三塚洋明 (東京電力パワーグリッド)

## Geographic distribution of lightning position based on the observation of VLF sferics

Takahiro Ohno\*, Motoki Yamada, Tomomi Narita (Shonan Institute of Technology),  
Mitsuteru Sato (Hokkaido University), Takeshi Sakanoi, Fuminori Tsuchiya (Tohoku University),  
Eiji Kaneko, Shigemi Harada (University of the Ryukyus), Takeshi Kudo (Otowadenki),  
Masaaki Chihara (Photonics), Hiroaki Mitsuzuka (TEPCO Power Grid)

キーワード：落雷位置標定装置, 到達時間差方式, 超長波

3. Keywords : LLS, time of arrival technique, VLF

### 1. はじめに

これまでに商用の落雷位置標定システムは, 気象会社や電力会社<sup>(1)(2)</sup>のものがあるが, 公開されているデータは広域の情報であり, 詳細なデータは非公開または高額である.

一方 IoT 技術の向上により, ネットワークを介して, 装置やセンサをコントロールすることが容易になった.

そこで, IoT 技術を活用した安価な受信局を用いて, 世界規模で高精度の落雷位置標定ネットワークの実現を目指した「Blitzortung.org」プロジェクトに参加した. このプロジェクトは, ドイツの Egon Wanke 氏らが 2012 年に開始したもので, 受信局を自らがはんだ付けすることで製作し, 設置するボランティアで運用されている. 落雷標定の座標などの雷に関するデータは, インターネット上に公開されている. なお, 商用目的では利用できない.

現在, 落雷標定のための受信局は主に米国, 欧州, オセアニア地域で展開しており, 2016 年 12 月現在, 約 1400 台の受信局が接続されている. 日本国内には湘南工科大学が初めて設置し<sup>(3)</sup>, 2017 年 1 月までに国内の札幌, 仙台, 宇都宮, 浦和, 晴海, 東村山, 藤沢, 金沢, 兵庫, 福岡, 那覇の 11 局の設置が完了した. これによりオセアニア, アジア地域での標定精度の向上が期待される. 本報告では, 2015 年, 2016 年の日本およびオーストラリアにおける落雷分布を示す.

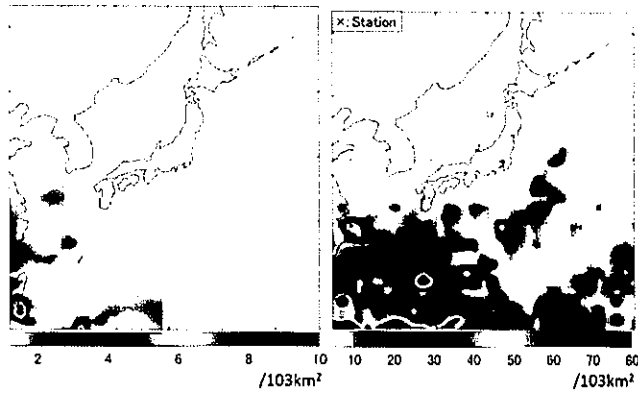
### 2. 受信局の概要

〈2・1〉 落雷位置標定原理 Blitzortung.org の落雷位置標定システム (LLS: Lightning Location System) は, 落雷標定に到達時間差方式を用いており, 雷放電時に発生する電磁波の各受信局に到達する時間差を用いて, 落雷位置の標定している. 2 局間の到達時間差が分かると, 電磁波放射点の解の軌跡は 1 つの双曲線となる. したがって 3 つの受信局があれば双曲線の交点として, 落雷位置が標定できる.

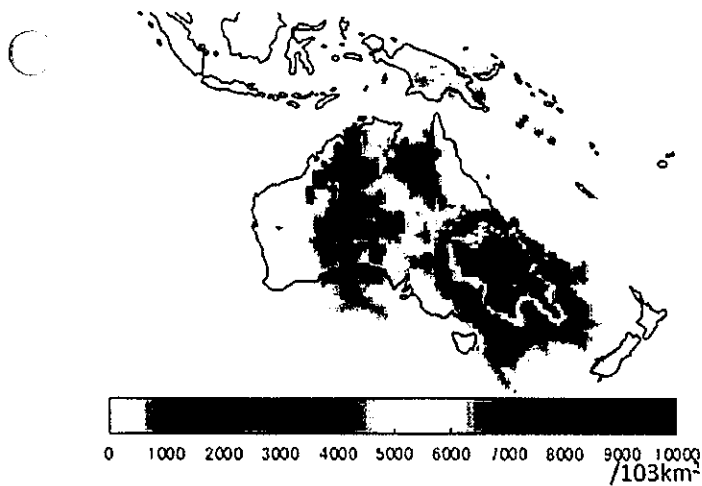
〈2・2〉 システムの構成 装置は磁界アンテナ, 電界アンテナ, GPS およびコントローラーで構成される. 磁界アンテナと電界アンテナを用いて, 雷撃により発生した VLF 帯の電磁波を受信する. 磁界成分では 1-50kHz, 電界成分では 5-50kHz の電磁波を受信する. その大きさがしきい値を超えるとトリガがかかり, 時刻と受信局の座標, 波形が記録される. それらのデータがサーバーに送信され, 4 局以上で落雷波形が観測されると, 誤差が最小になるように統計的に処理され, 落雷の位置が計算される. なお, 距離の計算は球面座標を使用する. また, 受信局の時刻の同期は GPS を用いている.

〈2・4〉 落雷分布の比較 Blitzortung.org の落雷標定システムにて, 標定した落雷を 1 年の期間でまとめ, 落雷分布マップを作成した. 日本での落雷分布マップを Fig. 1. に示す. 日本に受信局の無い 2015 年と比べ, 受信局を設置した 2016 年では標定数と標定範囲共に増加している. ただし,

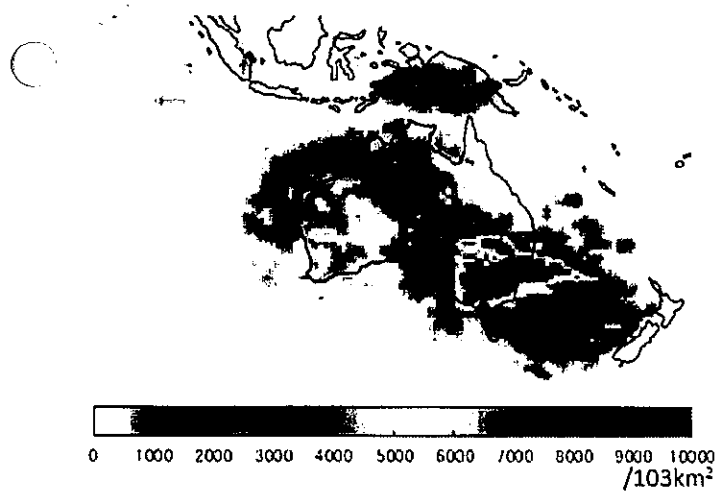
日本国内は 12 月までに設置したため、標定数は少ない。



(A) Japan in 2015 (B) Japan in 2016  
Fig. 1. Lightning distribution map



(A) Oceania in 2015



(B) Oceania in 2016

Fig. 2. Lightning distribution map

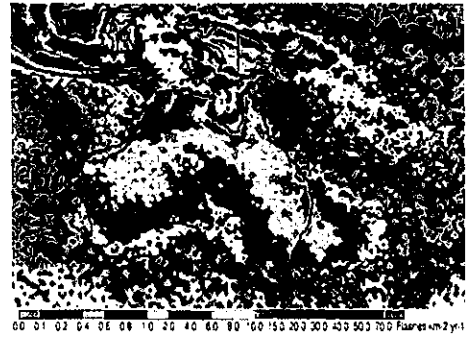


Fig. 3. NASA Lightning distribution map (4)

次に, Blitzortug.org の落雷分布の傾向を, 衛星から観測した NASA の落雷分布マップと比較した。ただし, 日本での標定データが少ないため, 先行して受信局を設置していたオセアニア地域の落雷分布マップを用いた。オーストラリアでの落雷分布マップを Fig. 2. に, NASA の 2014 年における落雷分布マップを Fig. 3. に示す。オーストラリアでは, 北部に落雷が多い傾向が一致した。しかし, Blitzortug.org では東部に落雷多い傾向がある。これは受信局がオーストラリアの東部に 23 局, 北部に 2 局, 西部に 2 局, ニュージーランドに 11 局とオーストラリア東部とニュージーランドに受信局が多く, 東南アジアには受信局が少ないためと推定される。このことから, Blitzortug.org と NASA の落雷分布マップの傾向が概ね一致していることが分かる。

### 3. まとめ

ドイツの Blitzortug.org プロジェクトに日本で初めて参加し, 神奈川県藤沢市の湘南工科大学をはじめ, 日本各地に受信局を設置することで, 全国ネットワークを構築した。日本に受信局のなかった 2015 年と, 受信局を設置した 2016 年では, 日本周辺の標定数, 標定範囲共に増加したことを確認できた。さらに, Blitzortug.org と NASA との落雷分布マップの比較から落雷分布の傾向が概ね一致した。

今後は日本における落雷標定を評価する予定である。

### 文 献

- (1) E. Zaima, A. Mochizuki, N. Fukiyama, H. Hojo and M. Ishii: "Observation of Lightning by Time-of-arrival type Lightning Location System (LPATS)", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.116, No.9, pp.1033-1038 (1996) (in Japanese)  
財満英一, 望月東, 吹山直樹, 北条準一, 石井勝: 「到達時間差方式の雷放電位置標定システム (LPATS) による雷放電の観測」, 電気学会論文誌 B, 116 巻 9 号 (1996)
- (2) T. Narita, T. Shioda, E. Zaima, and M. Ishii: "Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.134, No.5, pp.450-455 (2014) (in Japanese)  
成田知己, 塩田徹, 財満英一, 石井勝, 「落雷位置標定装置(LPATS-T)のパフォーマンス評価」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.5, pp.450-455, 2014.
- (3) 大野高寛, 山田素輝, 成田知己, 「超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定装置に関する研究」 電気学会電力・エネルギー部門大会, 450, pp.59-60, 2016.
- (4) [https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data\\_lis-otd-climatology.html](https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data_lis-otd-climatology.html)

# 超長波（VLF 帯）空電観測を用いた 落雷位置標定システムによる落雷分布

大野高寛\*, 山田素輝, 成田知己 (湘南工科大), 佐藤光輝 (北海道大),  
坂野井健, 土屋史紀 (東北大), 金子英治, 原田繁実 (琉球大),  
工藤剛史 (音羽電機工業), 荏原正昭 (ホトニクス), 三塚洋明 (東京電力パワーグリッド)

## Geographic distribution of lightning position based on the observation of VLF sferics

Takahiro Ohno\*, Motoki Yamada, Tomomi Narita (Shonan Institute of Technology),  
Mitsuteru Sato (Hokkaido University), Takeshi Sakanoi, Fuminori Tsuchiya (Tohoku University),  
Eiji Kaneko, Shigemi Harada (University of the Ryukyus), Takeshi Kudo (Otowadenki),  
Masaaki Chihara (Photonics), Hiroaki Mitsuzuka (TEPCO Power Grid)

キーワード：落雷位置標定装置，到達時間差方式，超長波

4. Keywords : LLS, time of arrival technique, VLF

### 1. はじめに

これまでに商用の落雷位置標定システムは，気象会社や電力会社<sup>(1)(2)</sup>のものがあるが，公開されているデータは広域の情報であり，詳細なデータは非公開または高額である。

一方 IoT 技術の向上により，ネットワークを介して，装置やセンサをコントロールすることが容易になった。

そこで，IoT 技術を活用した安価な受信局を用いて，世界規模で高精度の落雷位置標定ネットワークの実現を目指した「Blitzortug.org」プロジェクトに参加した。このプロジェクトは，ドイツの Egon Wanke 氏らが 2012 年に開始したもので，受信局を自らがはんだ付けすることで製作し，設置するボランティアで運用されている。落雷標定の座標などの雷に関するデータは，インターネット上に公開されている。なお，商用目的では利用できない。

現在，落雷標定のための受信局は主に米国，欧州，オセアニア地域で展開しており，2016 年 12 月現在，約 1400 台の受信局が接続されている。日本国内には湘南工科大学が初めて設置し<sup>(3)</sup>，2016 年 12 月までに国内の札幌，仙台，浦和，晴海，東村山，藤沢，金沢，兵庫，福岡，那覇の 10 局の設置が完了した。これによりオセアニア，アジア地域での標定精度の向上が期待される。本報告では，2015 年，2016 年の日本および米国における落雷分布を示す。

### 2. 受信局の概要

〈2・1〉 落雷位置標定原理 Blitzortug.org の落雷位置標定システム (LLS: Lightning Location System) は，落雷標定に到達時間差方式を用いており，雷放電時に発生する電磁波の各受信局に到達する時間差を用いて，落雷位置の標定している。2 局間の到達時間差が分かると，電磁波放射点の解の軌跡は 1 つの双曲線となる。したがって 3 つの受信局があれば双曲線の交点として，落雷位置が標定できる。

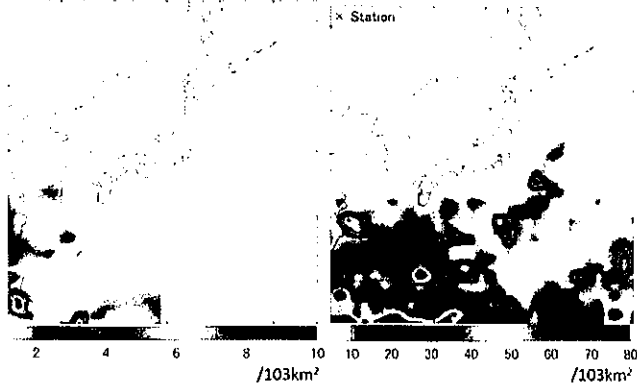
〈2・2〉 システムの構成 装置は磁界アンプ，電界アンプ，GPS およびコントローラーで構成される。磁界アンテナと電界アンテナを用いて，雷撃により発生した VLF 帯の電磁波の磁界成分と電界成分を受信する。その大きさがしきい値を超えるとトリガがかかり，時刻と受信局の座標，波形が記録される。それらのデータがサーバーに送信され，4 局以上で落雷波形が観測されると，誤差が最小になるように統計的に処理され，落雷の位置が計算される。なお，距離の計算は球面座標を使用する。また，受信局の時刻の同期は GPS を用いている。

〈2・3〉 アンテナのフィルタ 磁界アンプには 1kHz のハイパスフィルタと 50kHz のローパスフィルタがあり，電界アンプには 5kHz のハイパスフィルタと 50kHz，18kHz および 44kHz のローパスフィルタがある。

〈2・4〉 落雷分布の比較 Blitzortug.org の落雷標定シ



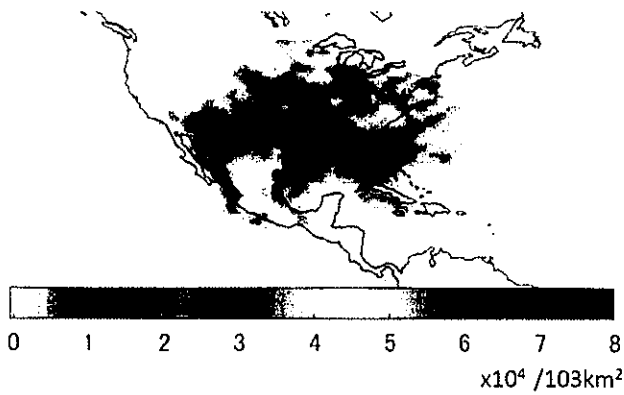
システムにて、標定した落雷を1年の期間でまとめ、落雷分布マップを作成した。日本での落雷分布マップを Fig. 1.に示す。日本に受信局の無い2015年と比べ、受信局を設置した2016年では標定数と標定範囲共に増加している。ただし、日本国内は12月までに設置したことから、標定数は少ない。



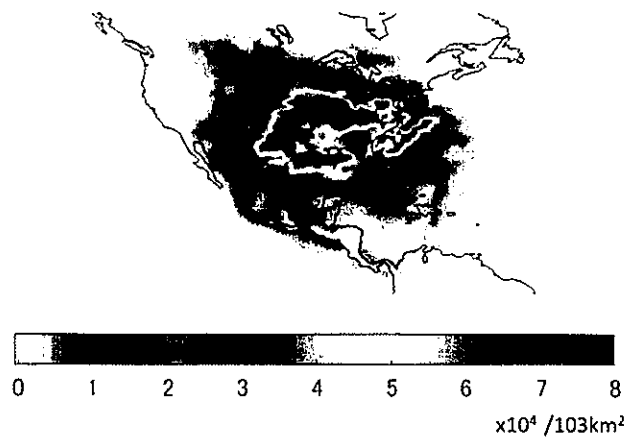
(A) Japan in 2015

(B) Japan in 2016

Fig. 1. Lightning distribution map



(A) The United States in 2015



(B) The United States in 2016

Fig. 2. Lightning distribution map



Fig. 3. NASA Lightning distribution map <sup>(4)</sup>

次に、Blitzortung.orgの落雷分布の傾向を、衛星から観測したNASAの落雷分布マップと比較した。ただし、日本での標定データが少ないため、先行して受信局を設置していた米国の落雷分布マップを用いた。米国での落雷分布マップをFig. 2.に、NASAの2014年における落雷分布マップをFig. 3.に示す。米国では西海岸に雷が少なく、南部に多い傾向が一致した。このことから、Blitzortung.orgとNASAの落雷分布マップの傾向が概ね一致していることが分かる。

### 3. まとめ

ドイツのBlitzortung.orgプロジェクトに日本で初めて参加し、神奈川県藤沢市の湘南工科大学をはじめ、日本各地に受信局を設置することで、全国ネットワークを構築した。日本に受信局のなかった2015年と、受信局を設置した2016年においては、日本周辺の標定数、標定範囲共に増加したことを確認できた。さらに、Blitzortung.orgとNASAとの落雷分布マップの比較から落雷分布の傾向が概ね一致した。今後は日本における落雷標定を評価する予定である。

### 文 献

- (1) E. Zaima, A. Mochizuki, N. Fukiyama, H. Hojo and M. Ishii : "Observation of Lightning by Time-of-arrival type Lightning Location System (LPATS)", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.116, No.9, pp.1033-1038 (1996) (in Japanese)  
財満英一, 望月東, 吹山直樹, 北条準一, 石井勝 : 「到達時間差方式の雷放電位置標定システム (LPATS) による雷放電の観測」, 電気学会論文誌 B, 116 巻 9 号 (1996)
- (2) T. Narita, T. Shioda, E. Zaima, and M. Ishii : "Performance Evaluation of LPATS-T at TEPCO", IEE of Japan Trans. Power & Energy, Vol.134, No.5, pp.450-455 (2014) (in Japanese)  
成田知巳, 塩田徹, 財満英一, 石井勝, 「落雷位置標定装置(LPATS-T)のパフォーマンス評価」, 電気学会論文誌 B, Vol.134, No.5, pp.450-455, 2014.
- (3) 大野高寛, 山田素輝, 成田知巳, 「超長波 (VLF 帯) 空電観測を用いた落雷位置標定装置に関する研究」 電気学会電力・エネルギー部門大会, 450, pp.59-60, 2016.
- (4) [https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data\\_lis-otd-climatology.html](https://lightning.nsstc.nasa.gov/data/data_lis-otd-climatology.html)