

世界的落雷位置標定ネットワークの構築によるアジア全域の気象災害防止に関する研究

研 究 報 告 書

平成 30 年 7 月

湘南工科大学 成田知巳



1. 目的

落雷位置標定装置を自作し、世界的なネットワークに参加することにより、アジア、オセアニアの落雷位置情報を提供する。

2. 実施期間

(自) 平成 29 年 6 月 1 日

(至) 平成 30 年 5 月 31 日

3. 実施内容

- (1) 落雷位置標定装置のアジアへの展開
- (2) コンパクト・低コスト型雷センサを用いた落雷標定システムによる落雷観測
- (3) 落雷観測データを用いた同システムの捕捉率・位置精度等の詳細性能評価

目次

1. 落雷標定システムによる落雷観測	5
第1章 序論	5
1.1 研究背景	5
1.2 研究目的	6
1.3 雷放電	7
1.4 電磁波の伝搬	8
1.4.1 大地-電離層導波管伝搬	8
1.4.2 VLF 帯空電	9
1.5 雷放電位置標定システム	9
1.5.1 雷放電観測手法	9
1.5.2 雷放電位置標定システム (LLS)	10
第2章 Blitzortung.org の概要	10
第3章 Blitzortung.org システムによる落雷分布	14
3.1 落雷分布	14
3.1.1 日本の落雷分布	14
3.1.2 アジア・オセアニアの落雷分布	18
3.1.3 世界の落雷分布	22
3.2 フランクリン・ジャパン(JLDN)との比較	24
第4章 Blitzortung と LLS の位置精度評価	27
4.1 検証方法	27
4.2 一日毎の比較	28
4.2.1 データ数	28
4.2.2 精度	30
4.3 Blitzortung と LLS の多重雷比較	34
4.4 緒言	35
第5章 結論	36
参考文献	39

2. 落雷標定システムの詳細性能評価	40
第1章 序論	40
1.1 研究の目的	40
第2章 Blitzortung.org の概要	41
2.1 Blitzortung.org とは	41
2.2 観測周波数帯	41
2.3 落雷位置標定方法	42
2.4 受信機	43
2.4.1 磁界アンテナ	43
2.4.2 電界アンテナ	45
2.4.3 コントローラボード	46
2.5 Blitzortung.org Controller	47
第3章 性能評価	50
3.1 磁界アンプの性能評価	50
3.1.1 入力電圧と出力電圧	50
3.1.2 LPフィルタ	56
3.2 Blitz システムの性能評価	46
3.2.1 磁界アンプの立ち上がり時間	46
3.2.2 Dead Time	58
第4章 ノイズ源	61
第5章 結論	69
参考文献	71
使用機器	71

発表文献

- [1] 大野高寛, 山田素輝, 成田知己, 佐藤光輝, 土屋史紀, 金子英治, 原田繁実, 工藤剛史, 荏原正昭, 三塚洋明, 「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」, 電気学会全国大会, Vol.7, pp.221-222, 2017. (論文発表賞)
- [2] 三上元気, 山田嘉将, 成田知己 「VLF帯の空電観測を用いた落雷位置標定装置の精度評価」 電気学会電力・エネルギー部門大会, 310, pp.931-932, 2017.
- [3] 成田知己, 「VLF帯の観測による落雷位置標定システム (Blitz)」, 電気学会高電圧研究会, HV-18-32, pp.171-176, 2018.

マスコミ報道

- (1) 成田知己, 「Lightning sensor inaugurated」, The HINDU 紙, 2017年11月24日
- (2) 成田知己, 「After Meghalaya, Vizang gets lightning sensor」, TIME NATION 紙, 2017年11月24日
- (3) 成田知己, 「Lightning sensor inaugurated in AU dept」, THE NEW INDIAN EXPRESS 紙, 2017年11月24日
- (4) 成田知己, 「Lightning sensor inaugurated」, Eenadu 紙, 2017年11月24日
- (5) 成田知己, 「アジアの落雷被害防げ」, 東京新聞 (神奈川版), 2017年11月12日
- (6) 成田知己, 人物風土記「世に役立つ落雷研究を」, タウンニュース, 2017年10月13日
- (7) 成田知己, 「市民参加型の観測網本格稼働」, 神奈川新聞, 2017年8月27日。
- (8) フジテレビ「直撃 LIVE グッディ！」に出演。8月19日に発生した花火大会での落雷被害の解説および日本に初導入した「落雷位置標定システム」について紹介。2017年8月22日。
- (9) NHK 総合放送、解説委員による「くらし☆解説」に出演。「雷対策の最前線」について解説。2017年8月2日。
- (10) テレビ朝日「スーパーJチャンネル」に出演。日本に初導入した「落雷位置標定システム」について紹介された。2017年6月28日。
- (11) 成田知己, 「アキバの部品で落雷を観測する湘南工科大教授 成田知己さん」, 朝日新聞 (全国版) 朝刊 2面「ひと」欄, 2017年5月12日
- (12) 成田知己, 「世界の落雷情報、ネット共有 札幌にも受信機」, 北海道新聞, 2017年4月24日
- (13) 成田知己, 「落雷地点 ウェブで瞬時に」, 朝日新聞, 2017年4月13日
- (14) 成田知己, 「アジア・オセアニア地域の落雷位置情報、ウェブ上で確認可能に」, 電気新聞, 2017年4月13日
- (15) 成田知己, 「落雷検知で世界と協力」, 東京新聞, 2017年4月8日

1. 落雷標定システムによる落雷観測

第1章 序論

1.1 研究背景

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、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。また、送電線に直接雷が落ちると大電荷量を伴う雷撃により、送電線の架空地線が損傷する場合がある。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、電子機器や電力設備への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リアルタイムでの落雷の状況確認、またその警告などが有効である。そこで、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である。

雷放電位置標定ネットワークはこれまで電力会社や気象庁などが落雷による被害の早期発見、予防のために運用するシステム[1][2]があるが、公開されているデータは広域の情報であり、詳細なデータは公開されていないか、入手することは困難または有料である。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帯周波数を用いているため落雷から生じる電磁波を観測する受信局を200km前後の間隔で設置する必要がある。しかし、受信局は高価であり、電磁気学の知識も必要になるため個人では受信局の設置は困難である。

一方、あらゆる物がインターネットに接続されるIoT(Internet of Things)が期待されている。温度、湿度、カメラ、雨量などの各種センサの小型化やネットワークを介して、コントロールすることが容易になった。そこで、IoT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」[3]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。

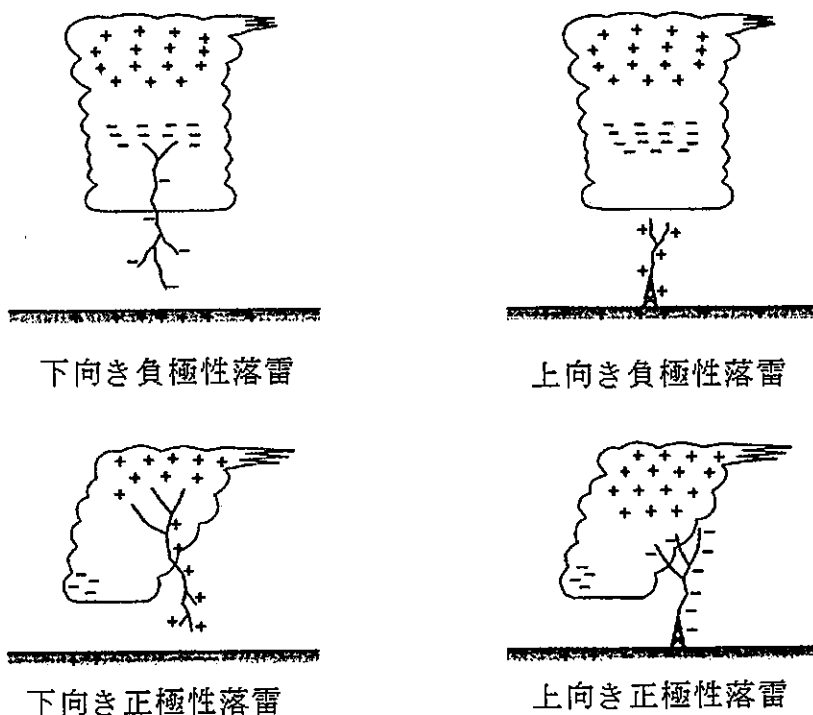
Blitzortungシステムでは、標定位置の座標を始め、観測された落雷波形や一定期間ごとの落雷数、受信局からの落雷までの距離、落雷分布などの落雷に関する詳細なデータを容易に取得することができる。ただし、Blitzortungシステムは位置精度などの評価データや、落雷分布図はほとんどないという課題がある。

1.2 研究目的

本研究では、Blitzortung システムのデータを用いて今まで評価されてなかった位置精度の検証を行い、落雷分布図作成による落雷分布の傾向を調べ、他システムとの比較により Blitzortung の性能検討を行う。

1.3 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[4]。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[5]。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[4]。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[6]。

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。

1.4 電磁波の伝搬

1.4.1 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[7]。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。

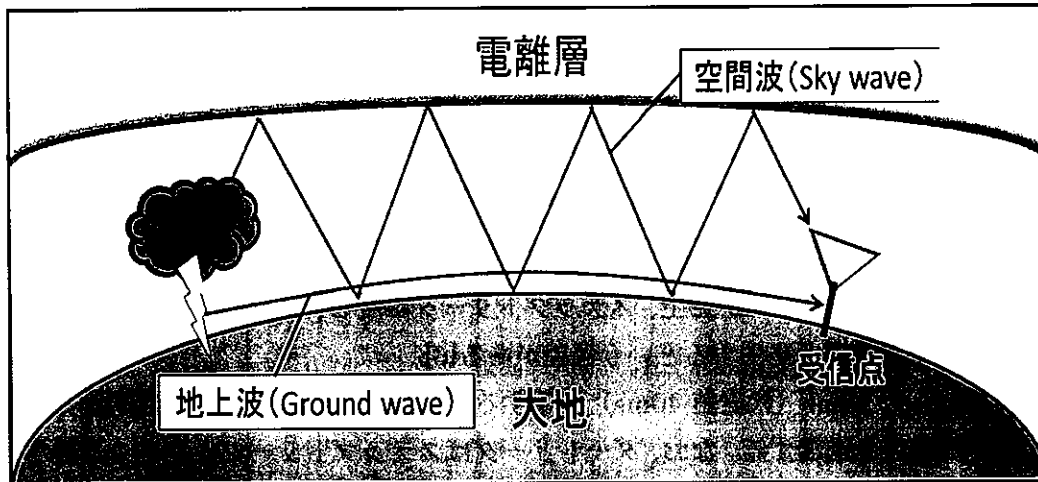


図 1.2 大地・電離層導波管伝搬の模式

1.4.2 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[7]。

1.5 雷放電位置標定システム

1.5.1 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

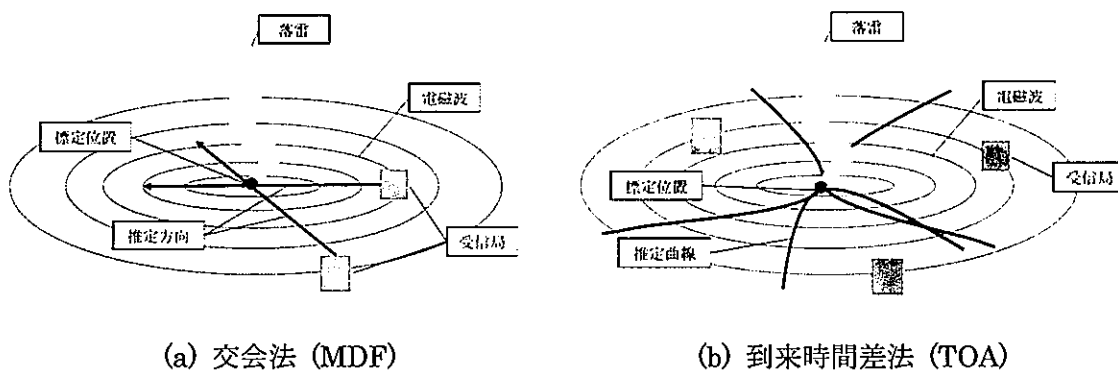


図 1.3 雷放電位置標定手法

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。

1.5.2 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[8]。

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、ステップト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[9]。

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、2017 年の時点で全国に 31 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。

また、気象庁が運用する LIDEN(LIghtning DEtection Network)システムもある。これは、全国 30 か所の空港に設置した「検知局」にて雷から放射された LF 帯の電磁波をアンテナで受信して、この信号から得られる雷の到達時間や波形情報などに、高精度の受信時刻を付加して瞬時に「中央処理局」にその情報を伝送する。中央処理局では、それらの情報を元に雷の種類及び発生位置を自動的に算出（標定）する。

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。

第2章 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[5]。

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。

2018年2月時点で、Blitzortung 受信局は、世界に1859局設置されている。内訳は、欧州に1462局、米国に263局、オセアニア地域に66局、アジアに59局、アフリカに9局である。そのうち稼働している局数は、欧州が771局、米国が168局、オセアニア地域が38局、アジアが38局、アフリカが0局である。また、止まっている局数は欧州が691局、米国が95局、オセアニア地域が28局、アジアが21局、アフリカが9局となっている。アクティブ率は55%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。2018年2月20日までに、名寄、北見、札幌、苫小牧、仙台、新潟、いわき、那須塩原、宇都宮、白岡、さいたま、柏、富里、文京区、中央区、東村山、父島、保土ヶ谷区、大和、藤沢、湯河原、小諸、かほく、京都、尼崎、三木、三原、北九州、八女、鹿児島、中頭群に合計31局の受信局を設置した。また国外では、モンゴル、インド、バングラデシュ、カンボジア、グアムに合計5局の受信局を設置した。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アジア・オセアニア地域での標定数、標定精度共に向上した。

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2.1に世界におけるBlitzortung 受信局の配置図を示す。これは2018年2月現在の受信局の配置図である。



図 2.1 Blitzortung 受信局の配置図 (2018.2)

第3章 Blitzortung.org 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 2017 年を月ごとに区切った Blitzortung での落雷分布図を図 3.1 に示す。月ごとの落雷分布を比較すると 6 月から 8 月にかけて日本の内陸に落雷が生じている。これは夏、日中の強い日射によって暖められた地面付近の空気が上昇し、積乱雲となって雷を発生させる夏季雷である。また 1、2 月と 11、12 月にかけて日本海側に落雷が生じている。これは冬季雷と呼ばれ、これは冷たいシベリア気団が相対的に暖かい日本海上を移流することにより、日本海上の暖かい空気は高い位置へ、またシベリア気団の冷たい空気は低い位置へ移動し合い混ざる。その際、空気中の水分が飽和し水蒸気が発生することによって熱が生じ、空気が暖められる。暖められた空気は更に上空へ上がり、上空の冷たい空気と混じり水蒸気を発生させる。このようにして発生した水蒸気は積乱雲となり、雷を生じるものである。

次に図 3.1 の落雷個数最大値を合わせた落雷分布図を図 3.2 に示す。月ごとの落雷分布を比較すると、冬に生じた落雷個数よりも夏に生じた落雷個数の方が多く、一年間で一番落雷が生じた月は 8 月で、最大 3000 個である。これは、夏季雷は広範囲に発生し長時間継続する特徴がある[10]のに対し、冬季雷は放電の数が少ないものの、一回あたりの雷の電気量が多いという特徴がある[10]ため、夏季雷が多いと推定される。

次に 2015 年、2016 年、2017 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.3 に示す。2015 年、2016 年と 2017 年の落雷分布を比較すると、2016 年に比べ 2017 年では日本で生じた落雷を捉えている。これは、日本に受信局を設置し始めたのが 2016 年の 12 月からのため 2017 年 12 月までに 25 台設置したことで日本全体が位置標定範囲内に入ったからであると考えられる。また、一年で一番多くの落雷を観測した場所は新潟県沖から秋田県沖にかけてであり、最大 6000 個である。図 3.2 より冬季雷が生じていることもあるが 8 月、9 月でも 1500 個以上の落雷が生じている。これは、2017 年の天候の特徴として 8 月上旬から中旬を中心

にオホーツク海高気圧が出現したため、日本海で前線の活動が活発であったためであると
考えられる。

2017 日本 Blitz 落雷頻度マップ

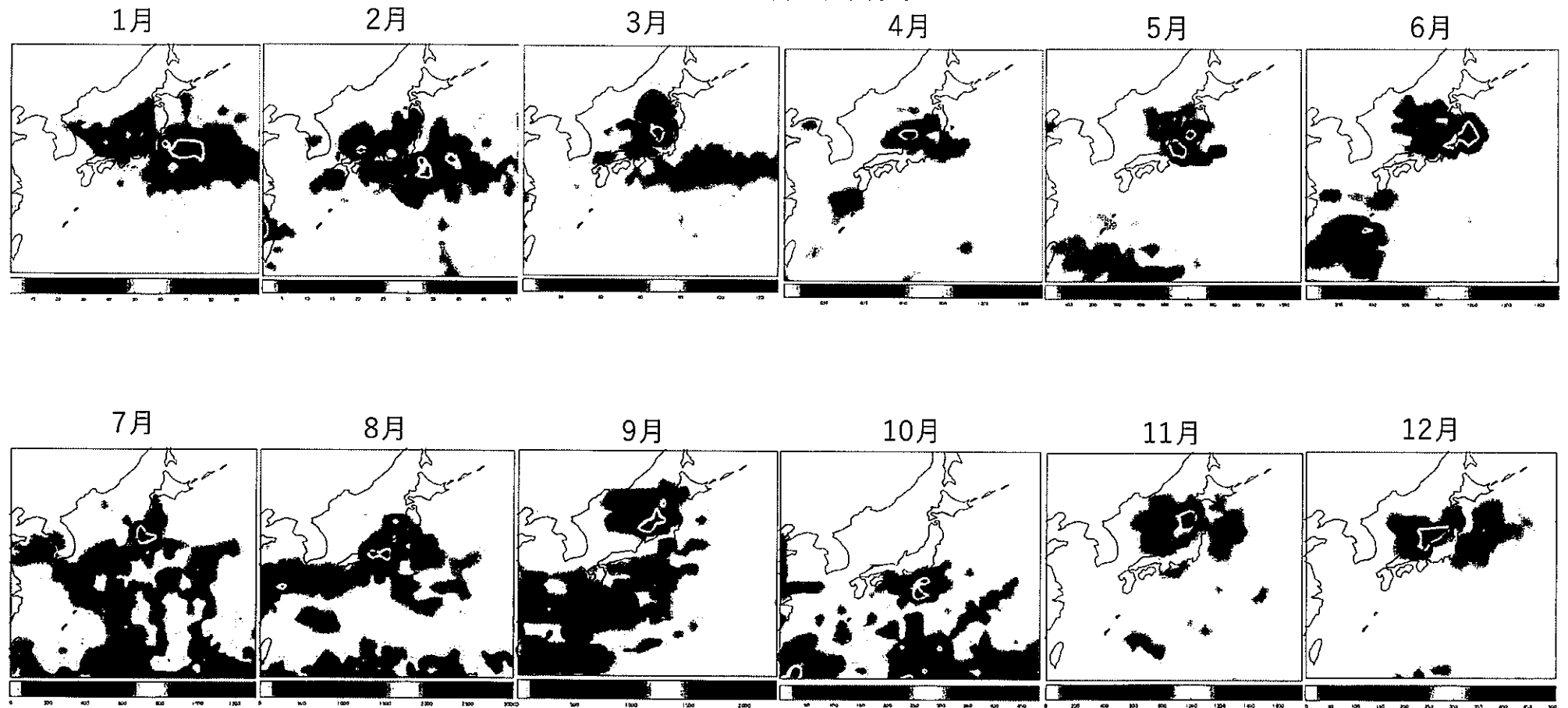


図 3.1 2017 年月毎の落雷分布

2017 日本 Blitz 落雷頻度マップ

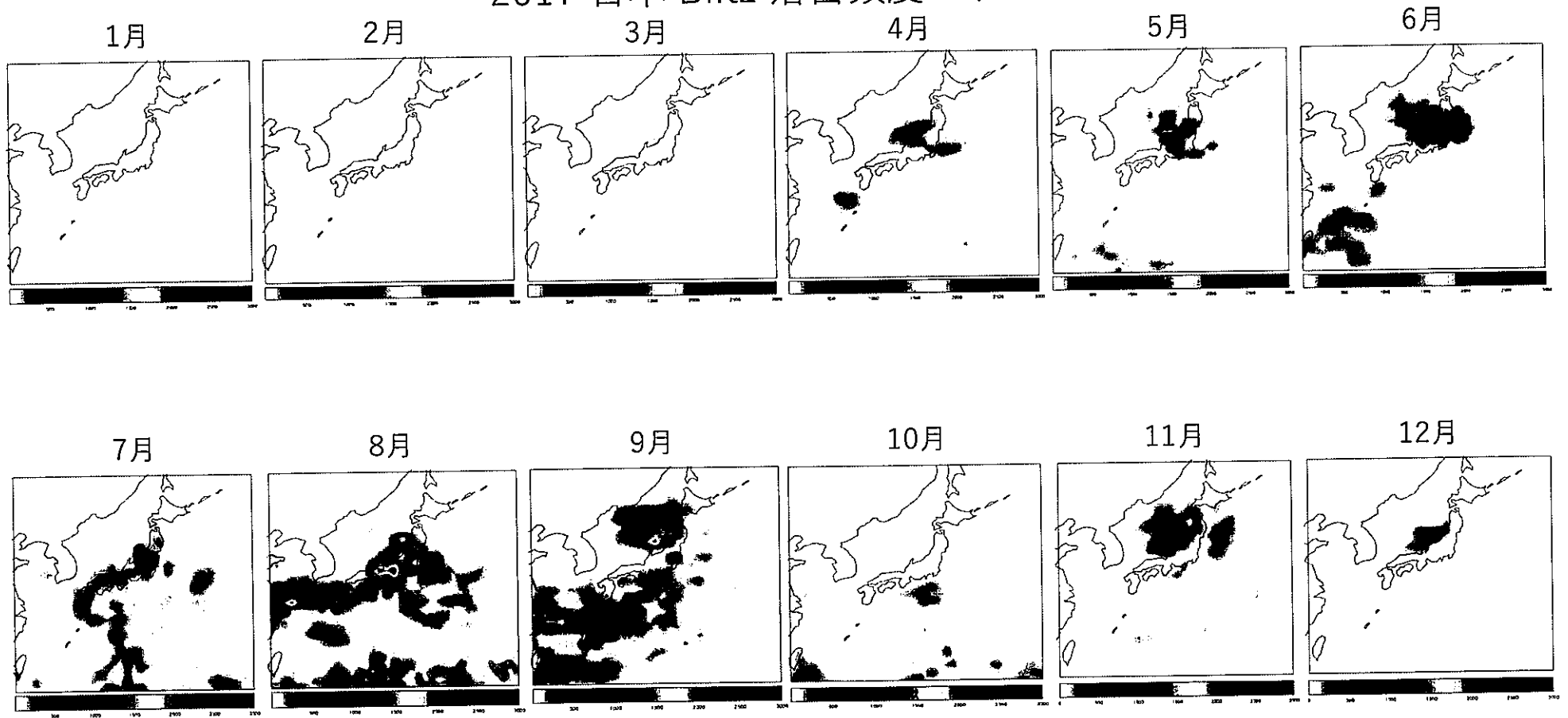


図 3.2 2017 年月毎の落雷分布(最大値合わせ)

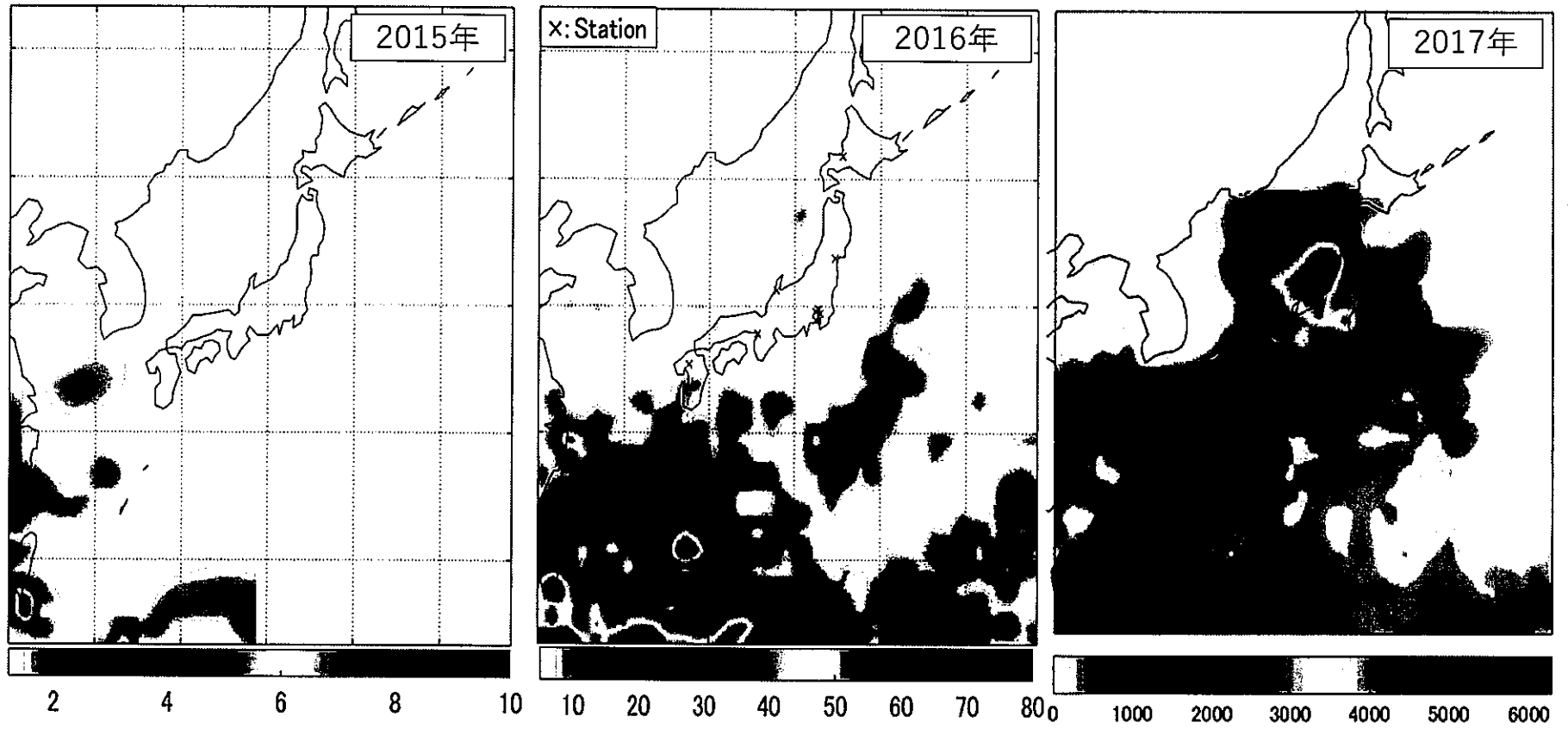


図 3.3 日本における落雷分布

3.1.2 アジア・オセアニアの落雷分布

アジア・オセアニアにおける 2017 年を 3 か月ごとに区切った Blitzortung での落雷分布図を図 3.4 に示す。1 から 3 月、10 から 12 月ではオーストラリアに落雷が多く生じていることがわかる。これは、オーストラリアの季節と日本の季節が逆になっているためである。つまり、4 から 9 月はオーストラリアの季節が冬となり落雷はあまり生じず、季節が夏の日本で落雷が多く観測されると考えられる。また、東南アジアの落雷分布を比較すると 4 月から 6 月では東南アジア全域で落雷が生じているが、7 月から 9 月の間になると落雷分布は赤道付近から北側に多くなり、特に海上の広がりが顕著である。そして、10 月から 12 月の間になるとフィリピン付近から南側の陸地にかけて落雷が生じていることが分かる。これは、7 月から 9 月の間では北太平洋高気圧が発達し海上の空気を温めることにより発生する積乱雲の影響で生じる落雷だと考えられる。また、10 月から 12 月の間では、北から南へ冷たい空気が流れるためだと考えられる。

次に図 3.4 の落雷個数最大値を合わせた落雷分布図を図 3.5 に示す。1 から 3 月、10 から 12 月ではオーストラリアの内陸北部で落雷が生じている。この時オーストラリアの季節は夏であり、4～9 月は冬であるため落雷は少ししか生じていない。しかし、オーストラリアとニュージーランドの間では大陸の寒気と暖流により冬季雷が発生していることが分かる。また、4～9 月ではオーストラリアは冬の季節であるため、落雷はほぼ生じていないが日本の季節は夏となり落雷が生じている。一方で東南アジアは赤道付近にあるため年間を通して落雷を観測することができると考えられる。

次に 2015 年、2016 年、2017 年の Blitzortung での落雷分布図を図 3.6 に示す。2015 年、2016 年と 2017 年を比較すると 2017 年では東南アジアの落雷分布傾向が強くなっている。これは、2017 年に日本の受信局を増やしたため日本とオーストラリアに挟まれている東南アジアも位置標定範囲内に含まれたためであると考えられる。

2017 アジア、オセアニア Blitz 落雷頻度マップ

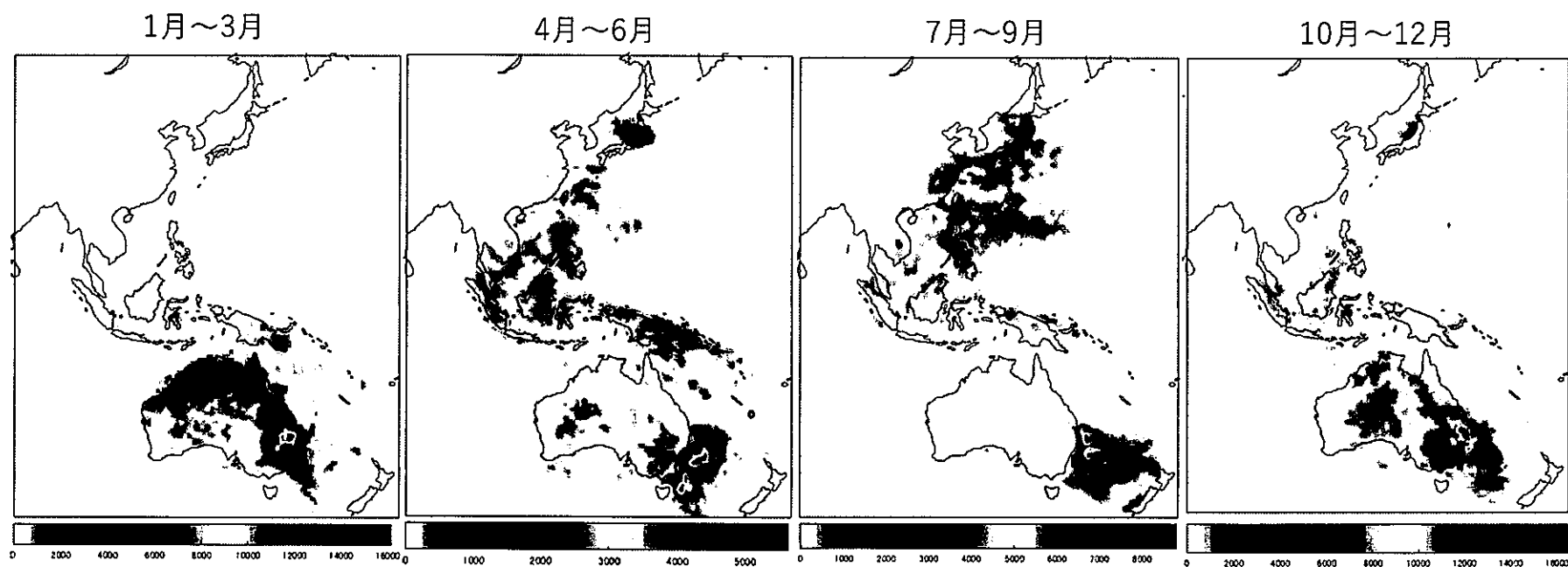


図 3.4 2017 年 3 か月毎の落雷分布

2017 アジア、オセアニア Blitz 落雷頻度マップ

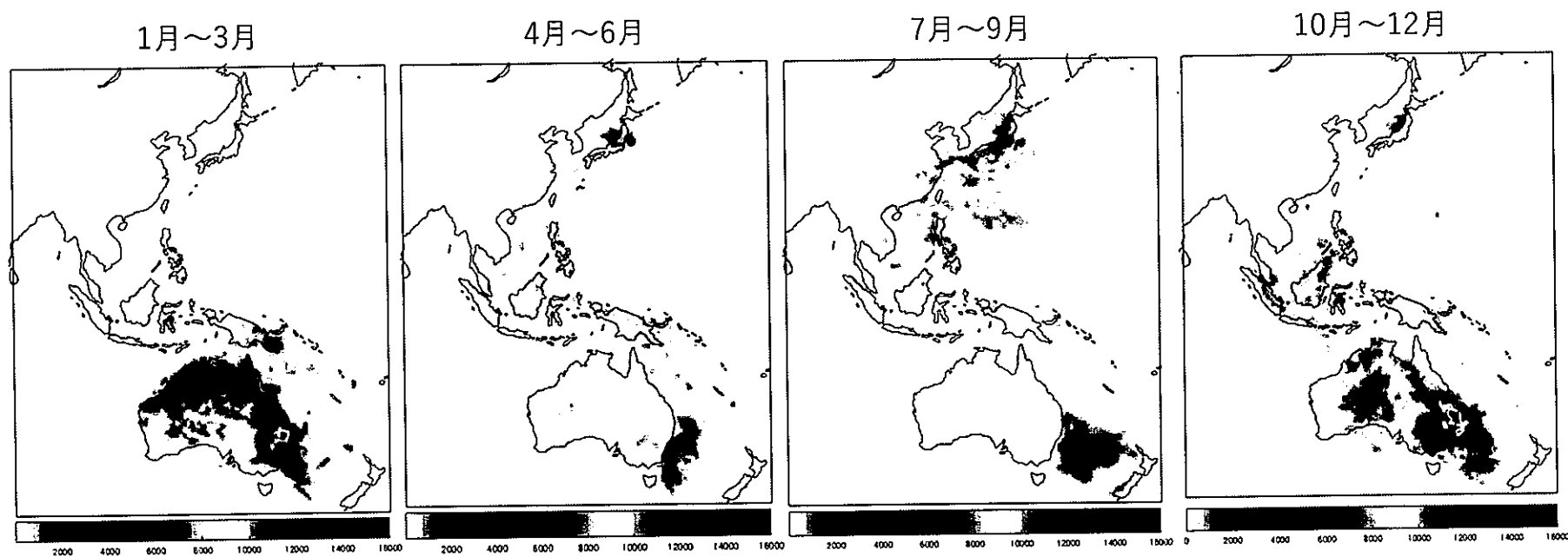


図 3.5 2017 年 3 か月毎の落雷分布(最大値合わせ)

Blitzortung.orgの落雷頻度マップ アジア・オセアニア

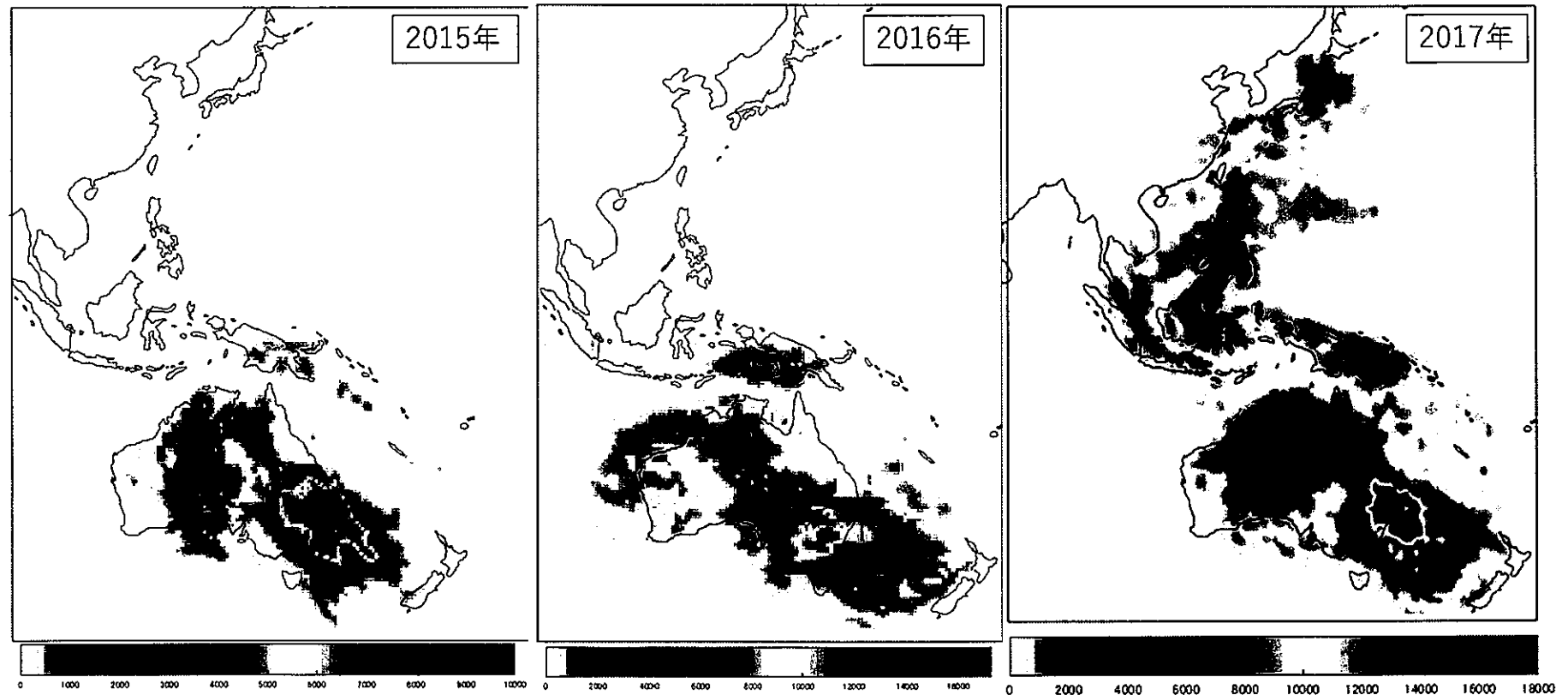


図 3.6 アジア・オセアニアにおける落雷分布

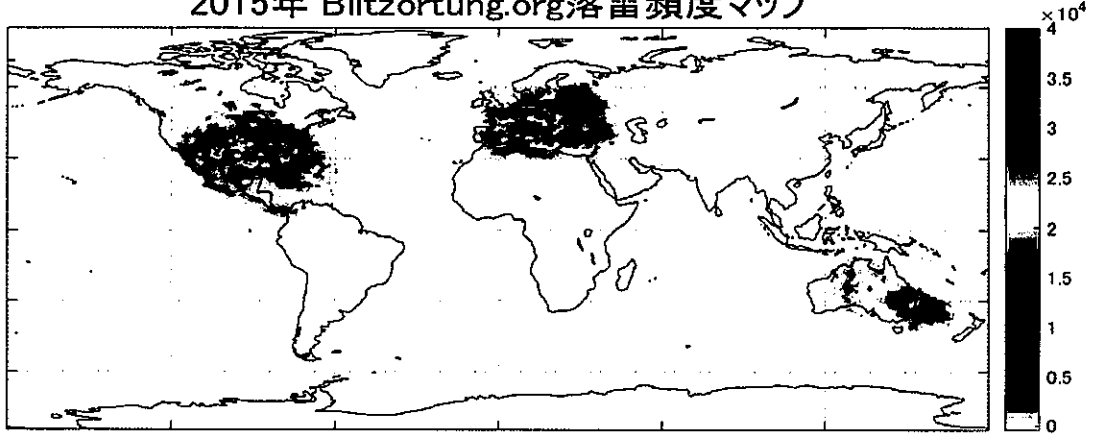
3.1.3 世界の落雷分布

世界における 2015 年、2016 年、2017 年の Blitzortung の落雷分布図を図 3.7 に示す。2015 年、2016 年と 2017 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。2016 年までは標定範囲が欧州、米国、オセアニア地域となっていたが 2017 年では、日本、東南アジアでも標定できるようになった。

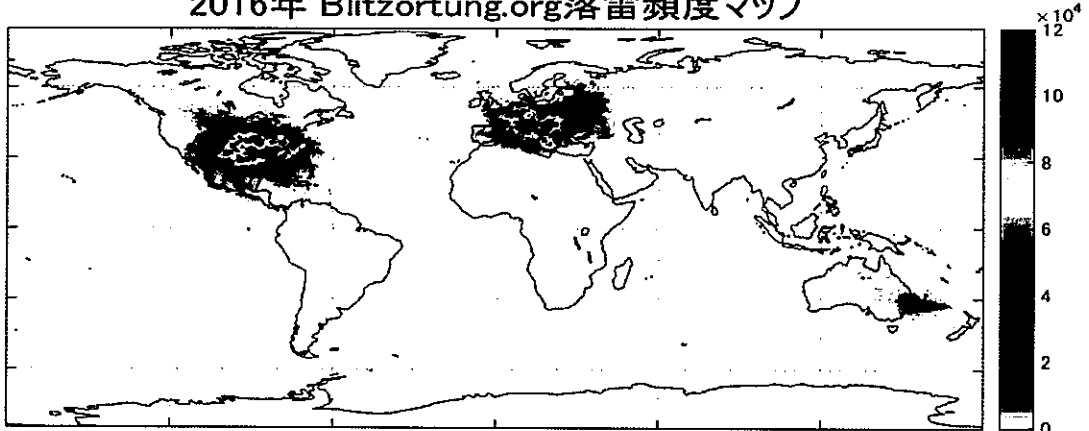
次に、2015 年、2016 年と 2017 年の欧州の落雷標定数を比較すると 2017 年では落雷の標定数が増加している。これは、受信局が増加したことにより、標定数が増加したためと考えられる。

次に、2015 年、2016 年と 2017 年の米国の落雷標定数を比較すると 2017 年では落雷の標定数が増加している。これは、受信局が増加したことにより、標定数が増加したためと考えられる。

2015年 Blitzortung.org落雷頻度マップ



2016年 Blitzortung.org落雷頻度マップ



2017年 Blitzortung.org落雷頻度マップ

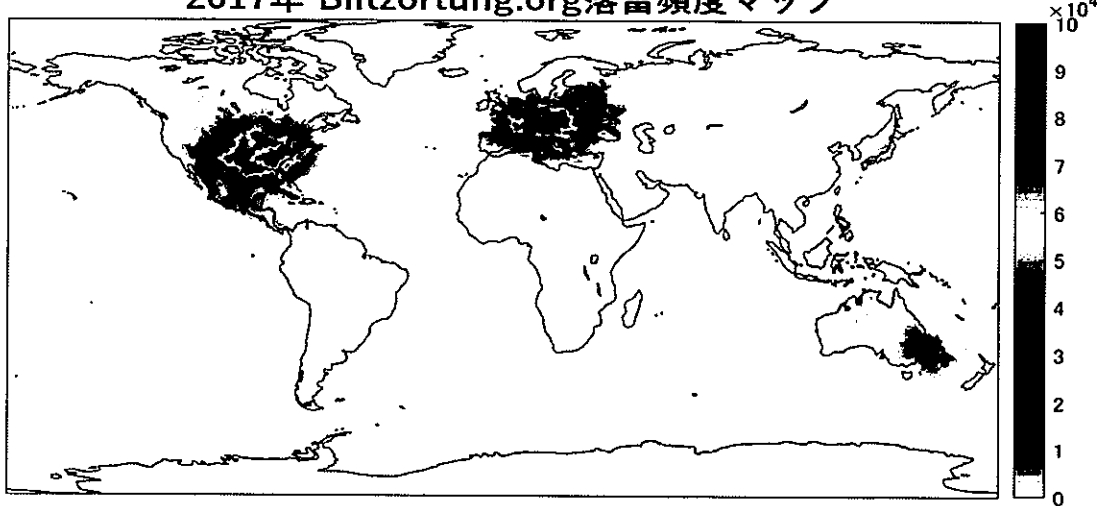


図 3.7 世界における落雷分布

3.2 フランクリン・ジャパン(JLDN)との比較

Blitzortung と観測周波数帯域が異なる LF 帯を用いているフランクリン・ジャパンと落雷分布を比較した。期間は、2017 年 8 月 19 日の一日(JST)と、2017 年 11 月 8 日の一日(JST)である。Blitzortung とフランクリン・ジャパンの JLDN の雷放電位置標定の分布[11]の比較を図 3.8、図 3.9 に示す。位置標定分布の傾向を比較するため 2017 年 8 月 19 日と 11 月 8 日の日本周辺の雷放電位置標定を比較した。図 3.8 より、新潟県と石川県の日本海側と関東地方から太平洋にかけて 2 つの帯状の位置標定が一致している。また、図 3.9 より日本海沖、中部地方から東北地方の日本海側、関東地方と東北地方の太平洋沖に 3 つの帯状の位置標定が一致している。以上の事例より、概ね落雷分布の傾向が一致していることがわかる。

従って、Blitzortung は従来のシステムと比較しても遜色なく落雷位置を標定していると推定される。なお、Blitzortung とフランクリン・ジャパンでは時間による色分けが異なる。Blitzortung では 4 時間おきに色を変えており、図の赤いところは落雷が発生した時間が古く、赤の次は橙色、橙色の次は黄色、そして白色で示している落雷地点が一日の最後の 4 時間である。また、フランクリン・ジャパンでは 6 時間ごとに色を変えており、図の青いところは落雷が発生した時間が古く、赤色で示している落雷地点が一日の最後の 6 時間である。

このことにより、従来システムのコストの 1/1000 で作成できる安価な受信局であり、また観測周波数帯も違うシステムがほぼ同等の位置精度を有していることが分かった。

2017年8月19日の落雷標定分布比較

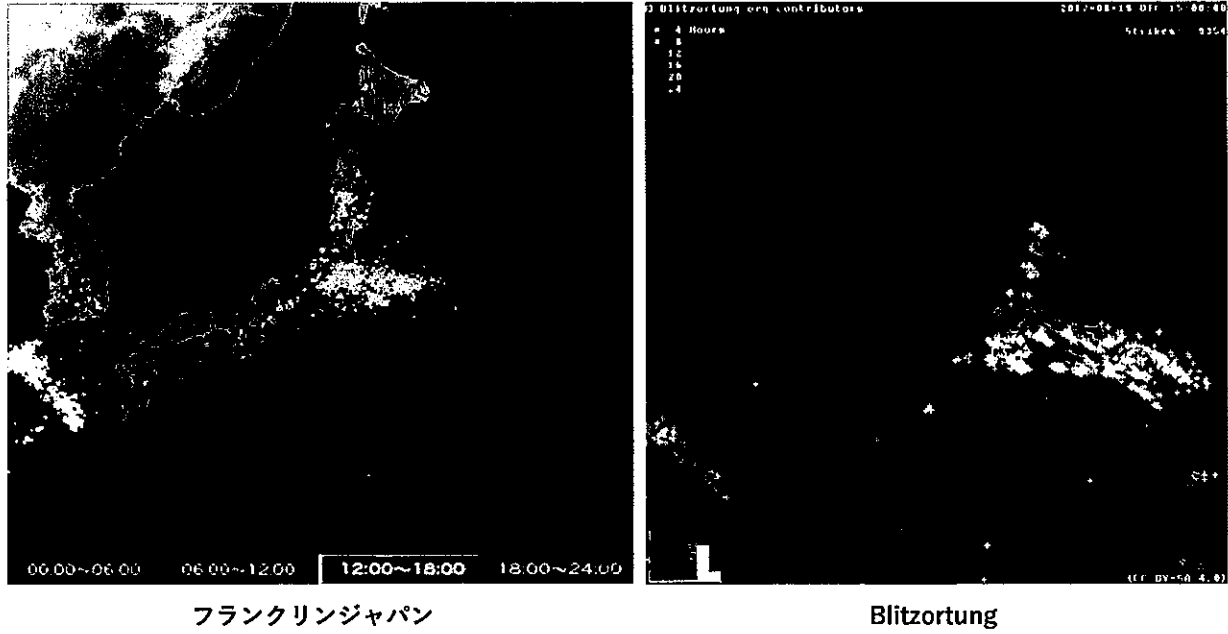


図 3.8 Blitzortung とフランクリン・ジャパンの比較(1)

2017年11月8日の落雷標定分布比較

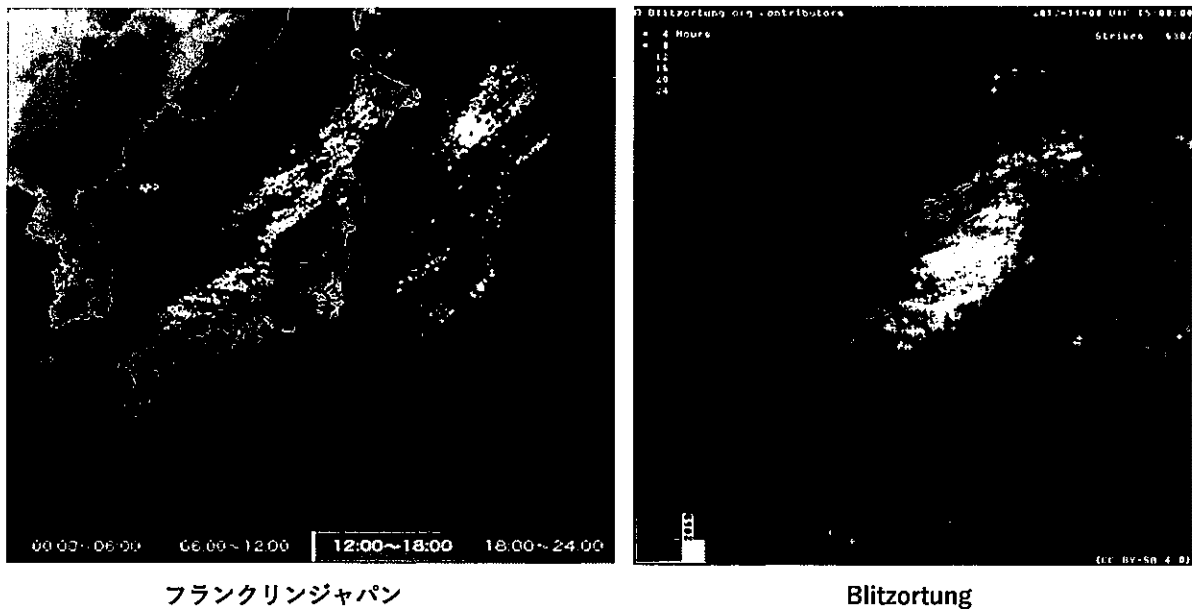


図 3.9 Blitzortung とフランクリン・ジャパンの比較(2)

3.3 緒言

本章では、まず Blitzortung システムの日本における月間ごとの比較を行った。2016 年までは日本の落雷標定ができなかったが、2017 年に全国ネットワークが完成したことにより、日本周辺の落雷も標定が可能になったことを示した。また、冬季雷と夏季雷の落雷分布を示すことができた。同時に、2017 年で最も落雷個数が多い月が 8 月であることを確認した。そして 2017 年で一番落雷個数が多い場所は新潟県沖から秋田県沖にかけてであり、最大 6000 個であった。これは、2017 年の天候の特徴として 8 月上旬から中旬を中心にオホーツク海高気圧が出現したため、日本海で前線の活動が活発であったためであることを示した。

次に、Blitzortung システムの日本を含むアジア・オセアニアの 4 ヶ月ごとの比較と 1 年間ごとの比較をおこなった。まず、4 ヶ月の比較ではオーストラリアの落雷分布においてオーストラリアとニュージーランドの間では大陸の寒気と暖流により冬季雷が発生していることを示した。また、年間を通して落雷が生じている東南アジアでも季節により落雷分布の傾向が異なることを示した。そして、2015 年、2016 年と 2017 年の比較により日本の受信局が増えたことにより、東南アジアの落雷も標定可能になったことを示した。

次に、Blitzortung システムの 2015 年、2016 年と 2017 年の比較を行った。その結果、世界から見てもアジアの落雷位置標定が可能になったことを示した。また、欧州、米国共に落雷標定数の増加を確認することができた。

また、従来の雷位置標定装置であるフランクリン・ジャパンとの比較により、複数の落雷分布の傾向から従来システムのコストの 1/1000 で作成できる安価な受信局であり、また観測周波数帯も違うシステムがほぼ同等の位置精度を有していることを示した。

第4章 Blitzortung と LLS の位置精度評価

4.1 検証方法

LLS のデータを基準とし、落雷の多かった日を4例取り上げ、以下の条件で図 4.1 の範囲を比較し検証を行った。なお、LLS は TEPCO の落雷データを使用する。

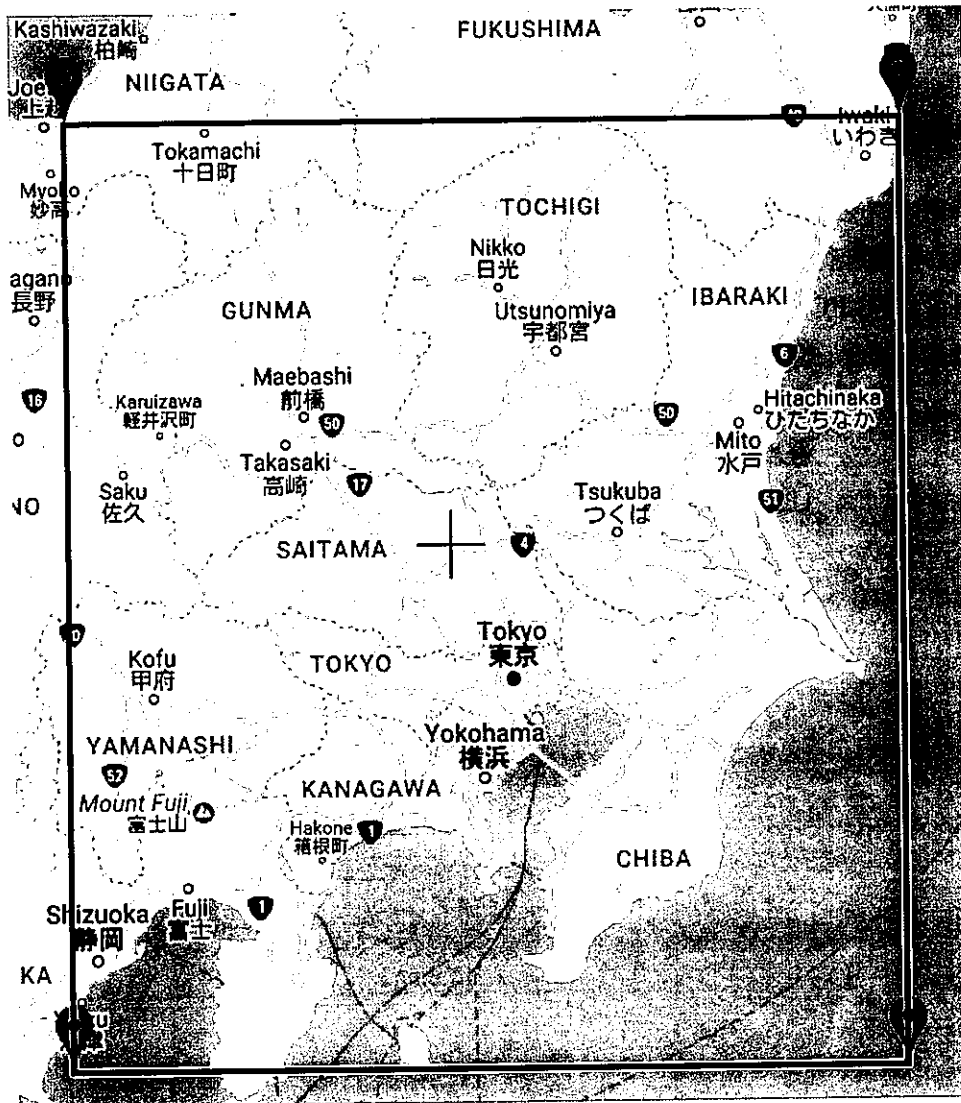
LLS : FG,FC を除く

LLS ・ Blitz : 時間は JST

緯度:34.68° - 37.15°

経度:138.3° - 141.0°

LLS と Blitz の時間差:10 μ s 以内



LLS と Blitz の距離差:10km 以内

図 4.1 検証範囲

4.2 一日毎の比較

4.2.1 データ数

2017年4月3日、6月16日、8月19日、9月25日の4日分の位置精度の比較を表4.1に示す。表4.1より、Blitzortung のデータ数が4日間で一番多い8月19日のデータ数を比較するとLLSの対地雷データ数は18283個に対してBlitzortung のデータ数は2782個であった。この対地雷のデータ比率は14.7%であり、Blitzortung とLLSには大きな差が見られた。このように4日間ともデータ数を比較するとBlitzortung とLLSの標定数に差があることが分かった。これは以下のように考えられる。まず、落雷と標定してから次の

落雷を標定できるまでのデットタイムが LLS では $1\mu\text{s}$ に対して Blitzortung は $8\mu\text{s}$ (Blue System) から $14\mu\text{s}$ (Red System) であること。次に、落雷を標定する際のアルゴリズムが異なること。また使用している周波数帯が LLS は LF 帯 (30-300kHz) に対して Blitzortung は VLF 帯 (3-30kHz) であるため、遠くからのノイズが入り誤標定となることがあること。一つの落雷を標定する時に使用する受信局の数が LLS は 4 局以上に対して Blitzortung は 6 局以上であること。また、Blitzortung では mds は 15000m 以上のものは標定しない設定となっており、mcg は 270 度以上のものは標定しない設定とし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距離差を ns 単位で表した値である。つまり、落雷の電磁波を受信した受信局がそれぞれで時間差を算出するが、その時に距離誤差が生じる。その差が 1500m 以上のものは標定しない設定にしている。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。その角度が 270 度以上のものは標定しない設定にしている。

次に、2018 年 2 月 17 日~2018 年 2 月 20 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 Fujisawa) を図 4.2 に示す。なお、図の横軸が Fujisawa を原点としたときの雷放電までの距離であり、縦軸が Fujisawa の標定参加率と Stroke 数である。また、青色の折れ線グラフは全体の Stroke 数を表しており、緑色の棒グラフは Fujisawa の標定参加率を表している。Fujisawa の Stroke のカウントを見ると 100km 以内では Stroke 数が無く標定できていないことが分かる。これにより、Blitzortung の近くに落雷が生じた場合磁界波形が飽和してしまい位置標定ができなくなることが推定される。

さらに、図 4.3 より 200km 付近では太平洋に生じた落雷を標定しており、500km から 1200km では日本近海で標定参加率は高く 80% に達する。また、2800km から 4200km では東南アジアであり標定参加率が 80% 以上と高いことが分かる。4200km 以降ではオーストラリア北部より南下した地域であり、徐々に標定参加率が減少していることが分かる。

表 4.1 Blitzortung と LLS の精度評価

	元のデータ数(LLS個)			元のデータ数 (Blitz個)	使用していないデータ数(LLS個)			使用していないデータ数 (Blitz個)	一致したデータ数(個)			Blitz/LLS(L-G)	LLSを基準としたBlitzとの距離差平均(km)		全国のBlitzの局数
	全体	L-G	L-C		全体	L-G	L-C		全体	L-G	L-C		L-G	L-C	
4月3日	1365	802	563	95	1301	759	542	31	64	43	21	5.4%	2.23	1.66	13
6月16日	3264	2599	665	1008	2525	1920	605	267	739	679	60	26.1%	1.47	2.43	15
8月19日	18283	14208	4075	2782	15909	12125	3784	354	2374	2083	291	14.7%	1.43	2.00	20
9月25日	6916	5336	1580	1256	5831	4302	1529	171	1085	1034	51	19.4%	1.48	2.75	24

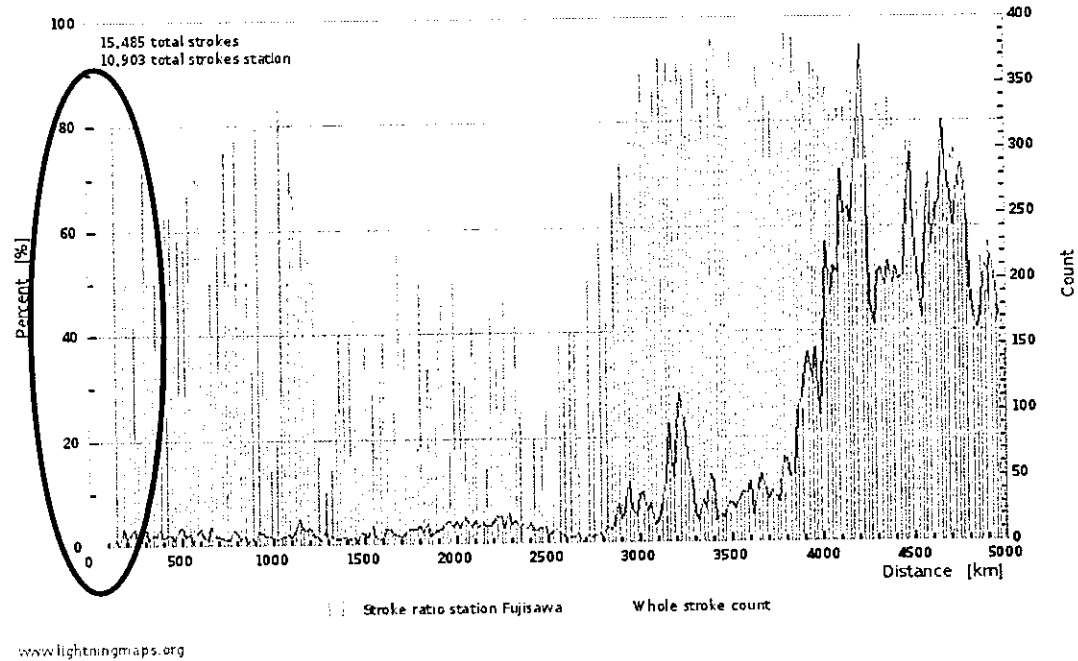


図 4.2 受信局 Kanagawa からの雷放電発生距離

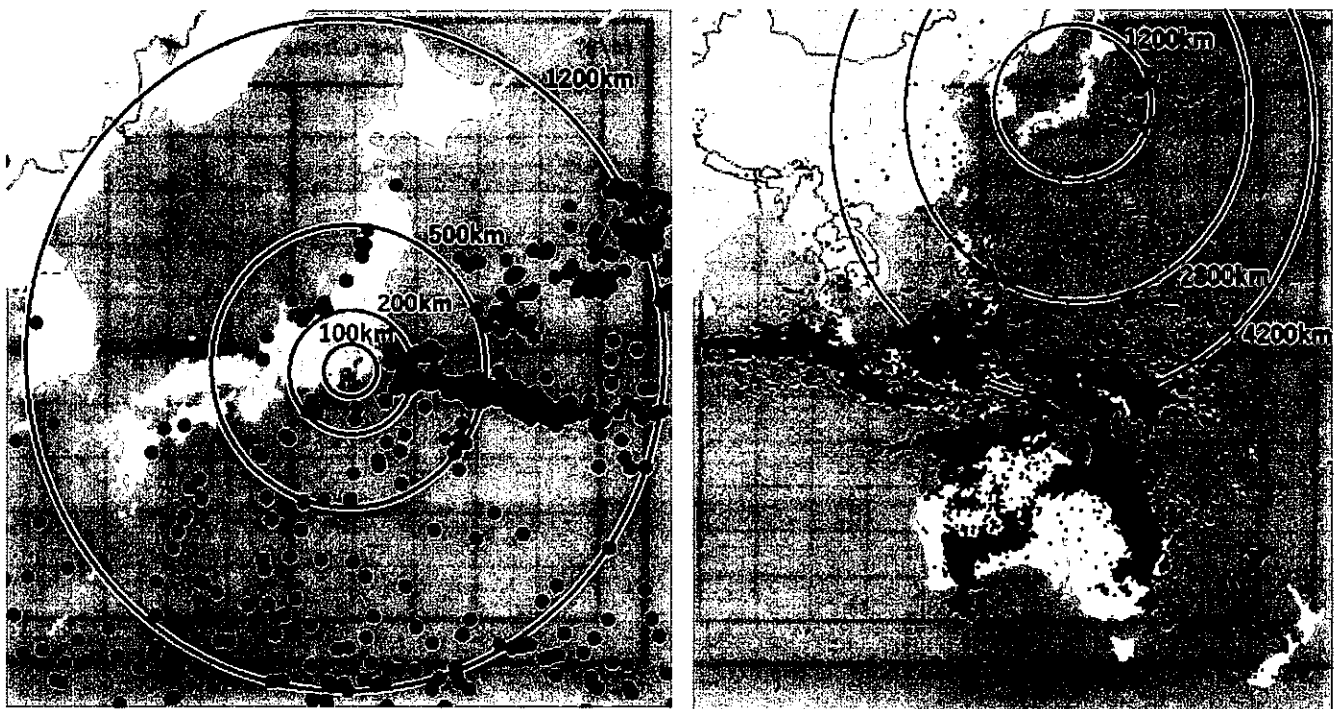


図 4.3 受信局 Kanagawa からの雷放電発生距離(地図)

4.2.2 精度

表 4.1 より LLS を基準とした Blitzortung との距離差平均を比較すると、4月3日を除けば 1.47km となりデータ数の差がありながら落雷の位置精度は近いことを示している。これにより観測周波数帯が違っていても Blitzortung の位置精度は LLS とほぼ同等の性能を有していることが示された。また、4月3日については対地雷の距離差平均が 2.23km である。これは、4月3日時点では Blitzortung の受信局がまだ少なく関東地方に生じた落雷を捉えきれなかったことが主な原因として考えられる。そして、Blitzortung と LLS の比較によりどのくらい位置に誤差があるのかを見やすくするため4日分の位置精度図を図 4.4、4.5、4.6、4.7 に示す。どの日も東寄りのズレとなっている。これは、日本に設置している Blitzortung の受信局が東寄りになっていること、また関東地方に生じた落雷を標定する時にハワイ島やオーストラリアの受信局まで電磁波が届くが、その際電磁波は海面を通る。大地の導電率は海の導電率より低いいため、到来時間差方式を用いている Blitzortung では東寄りになることなど原因は数多く考えられるが、どれかは特定できていない。次に、8月19日のデータを位置補正したものを図 4.8 に示す。更に拡大図を図 4.9 に示す。位置補正した結果 LLS を基準とした Blitzortung との距離差平均は対地雷で 1.43km だったのが、1.25km となった。これは、北西と東南にプロット図が伸びているためであると考えられる。

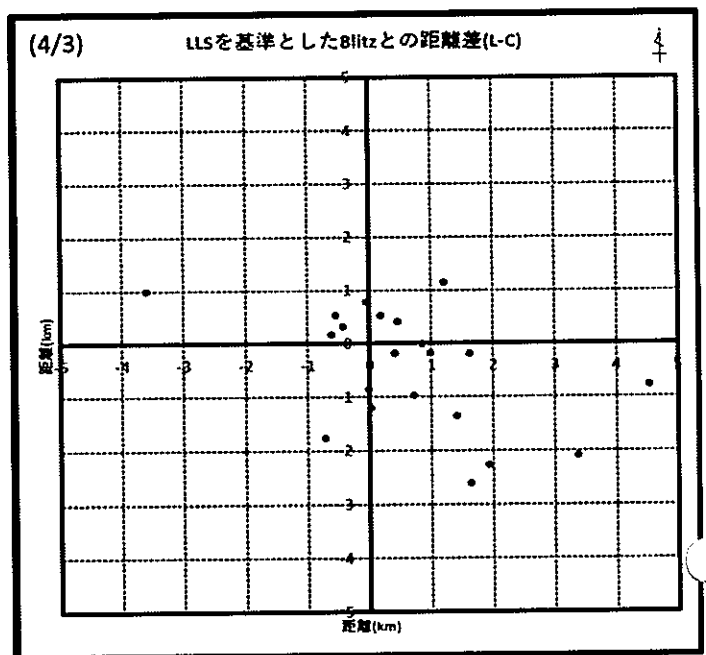
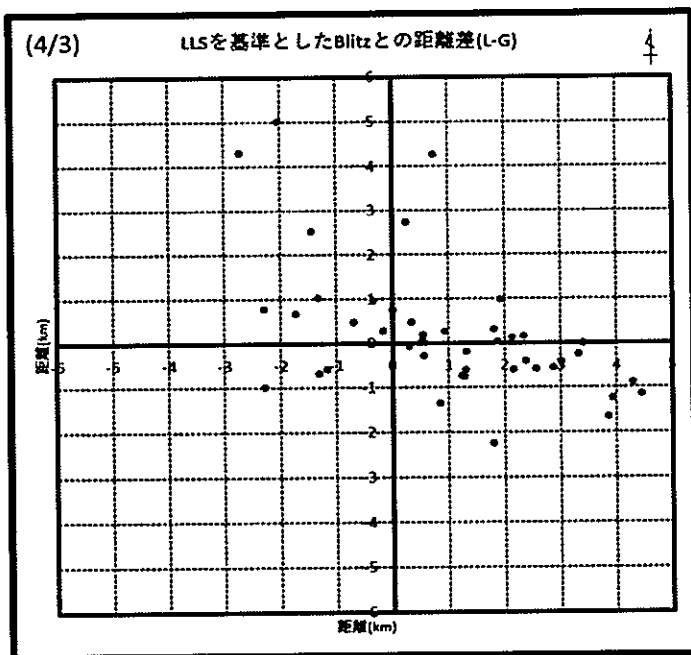


図 4.4 4月3日の精度評価

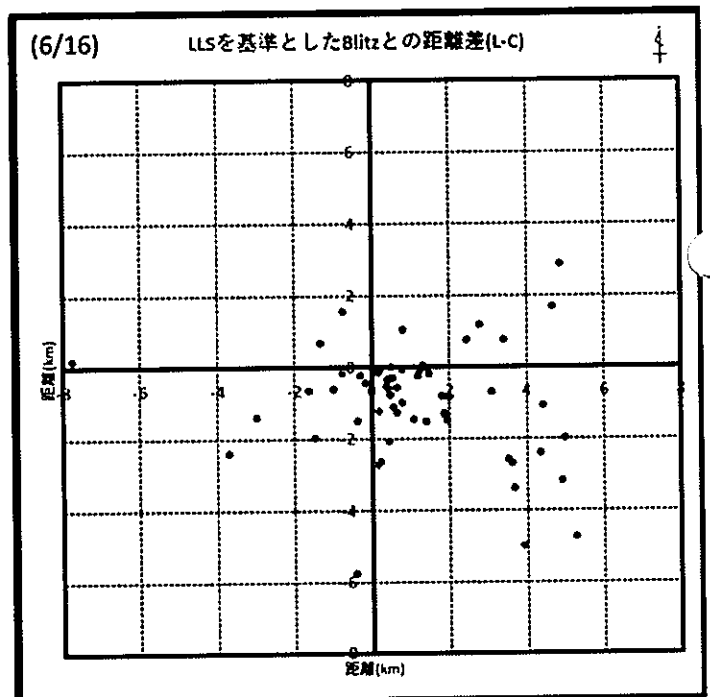
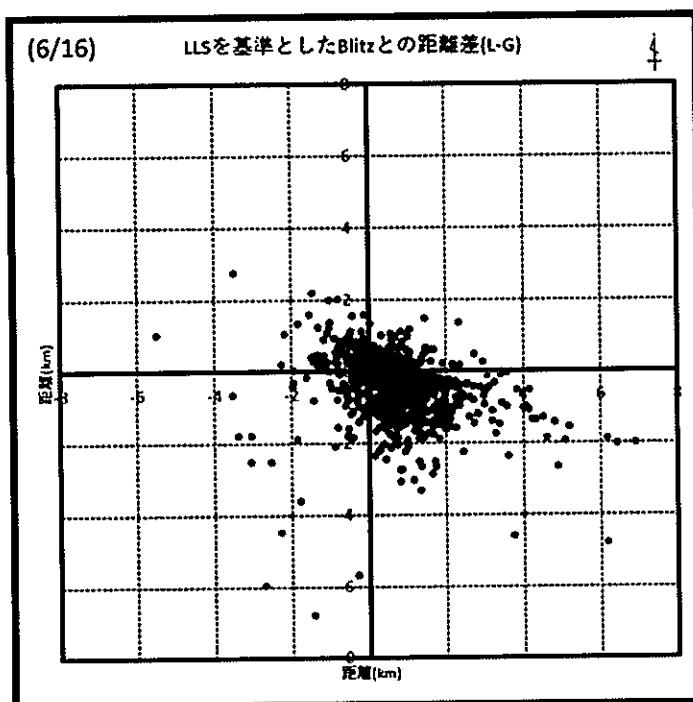


図 4.5 6月16日の精度評価

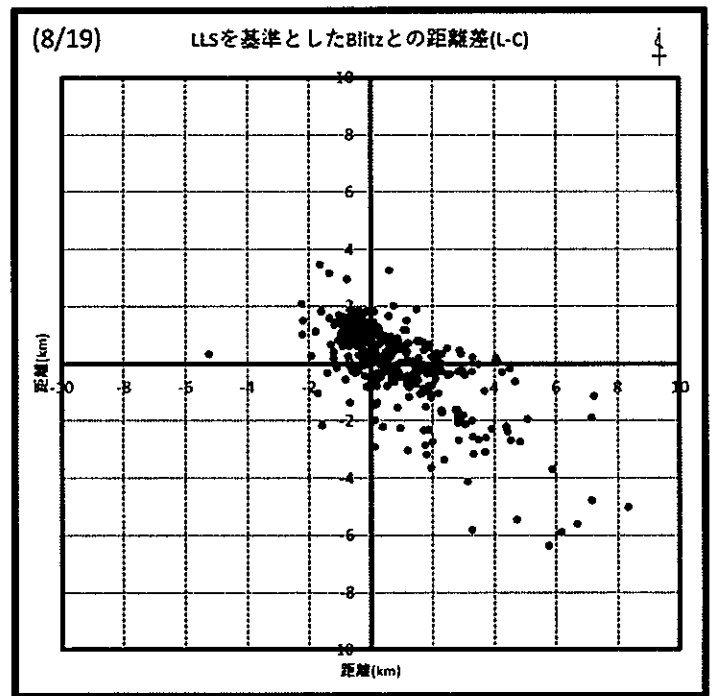
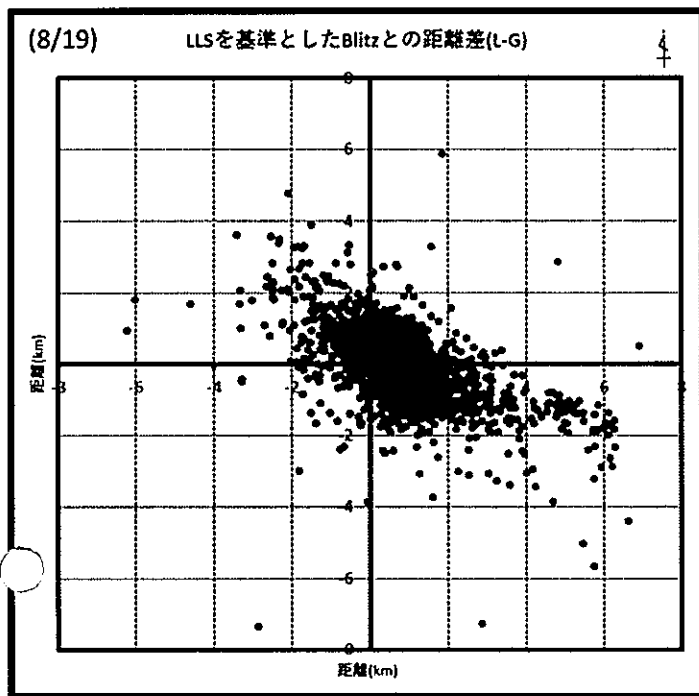


図 4.6 8月19日の精度評価

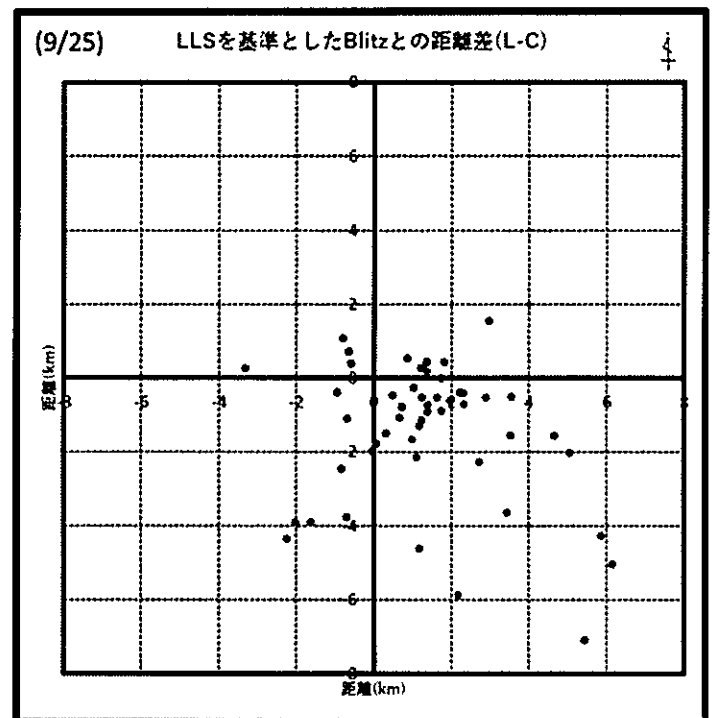
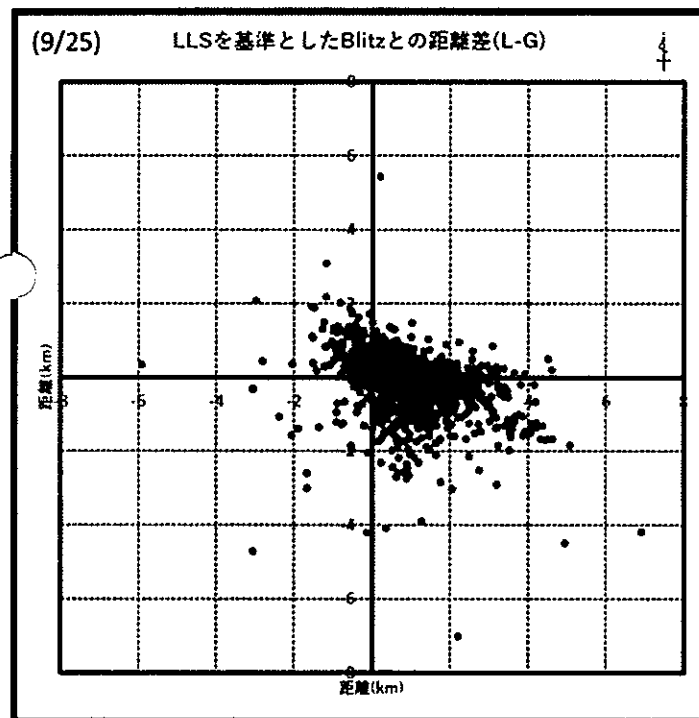


図 4.7 9月25日の精度評価

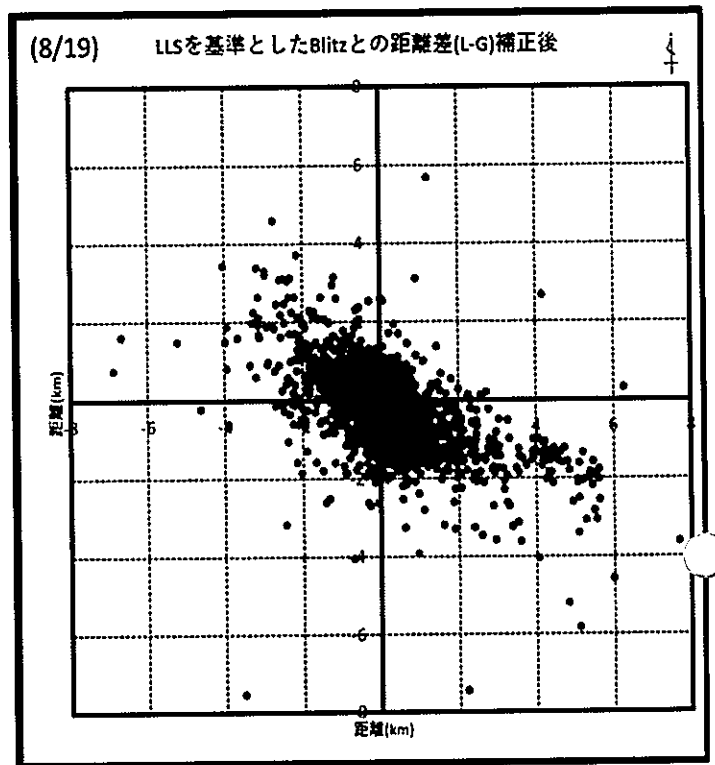
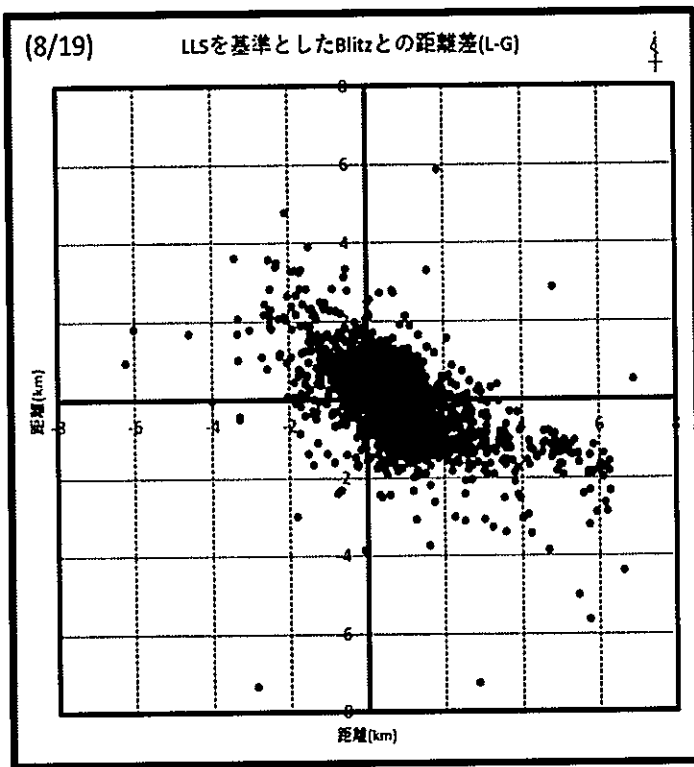


図 4.8 8月19日の精度評価(位置補正)

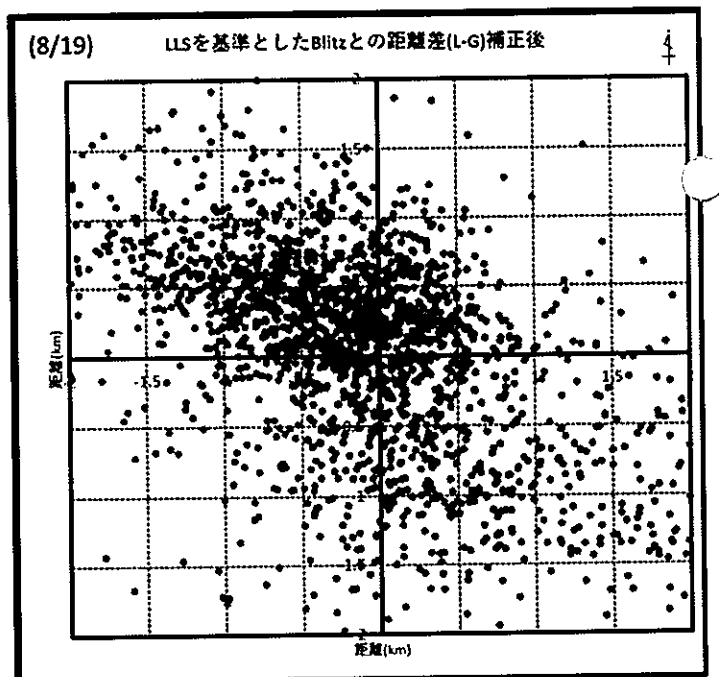
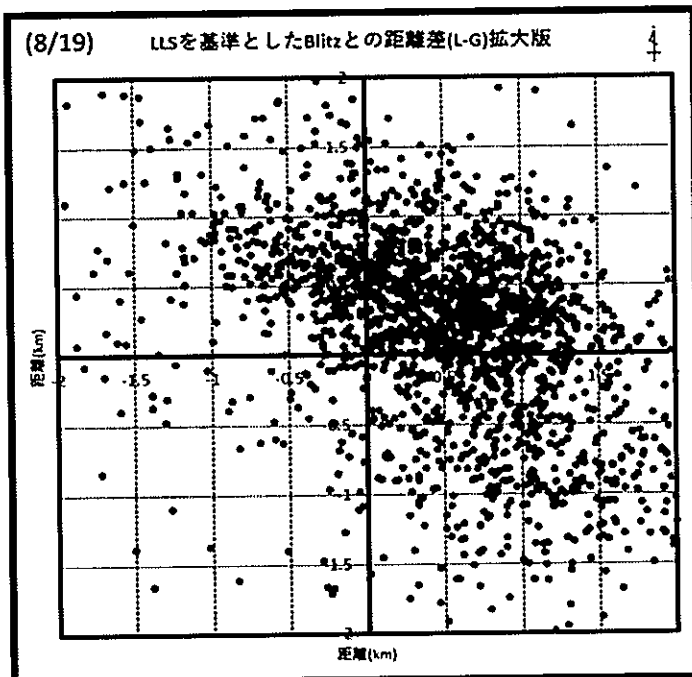


図 4.9 8月19日の精度評価(位置補正拡大版)

4.3 Blitzortung と LLS の多重雷比較

Blitzortung と LLS では、標定数に大きな差がある。これは、多重雷による違いがあると推定されるため以下の条件で多重雷と仮定し、図 4.1 に示す範囲で比較を行った。その結果を表 4.2 に示す。

LLS : FC,FG を除く

LLS・Blitz : 時間は JST

緯度:34.68° -37.15°

経度:138.3° -141.0°

100ms・1km 以内 : 多重雷と仮定

受信局の数が少ない時は多重雷を除いても落雷の標定数にバラつきが確認できる。受信局の数が 20 局を超えると、安定した値となることが確認できた。また、多重雷を除いても LLS が Blitzortung の 5 倍も標定できている理由としては、Blitzortung の近くに落雷が生じた場合、磁界波形が飽和してしまい位置標定ができなくなることがあると推定できる。

表 4.2 Blitzortung と LLS の多重雷比較

	Blitz	LLS	LLS/Blitz	多重雷を除く Blitz	多重雷を除く LLS	多重雷を除く LLS/Blitz	全国のBlitzの局数
4月3日	95	1365	14.37	92	1090	11.85	13
6月16日	1008	3264	3.24	957	2574	2.69	15
7月18日	858	10434	12.16	824	8184	9.93	18
8月18日	208	653	3.14	177	460	2.60	20
8月19日	2782	18283	6.57	2586	13633	5.27	20
8月21日	272	1431	5.26	246	1016	4.13	20
8月22日	1089	6106	5.61	1006	4230	4.20	20
9月25日	1256	6916	5.51	1164	4963	4.26	24

4.4 緒言

本章では、Blitzortung で標定された落雷データと TEPCO の LLS のデータを比較し、位置精度評価を行った。

まず、落雷数を比較した。LLS の対地雷データ数は 18283 個に対して Blitzortung のデータ数は 2782 個であった。この対地雷のデータ比率は 14.7% であり、Blitzortung と LLS には大きな差を確認した。これは、デットタイムやアルゴリズムが異なること、使用している周波数帯が LLS は LF 帯に対して Blitzortung は VLF 帯であること、落雷を標定する時に使用する受信局の数が LLS は 4 局以上に対して Blitzortung は 6 局以上であること、Blitzortung では mds は 15000m 以上のものは標定しない設定であること、mcg は 270 度以上のものは標定しない設定であること、また Blitzortung の近くに落雷が生じた場合磁界波形が飽和してしまい位置標定ができなくなることがあることなどが考えられる。

次に、位置精度を検証した。LLS を基準とした Blitzortung との距離差平均を対地雷で比較すると 1.4km であることが分かった。これにより観測周波数帯が違っていても Blitzortung の位置精度は LLS とほぼ同等の性能を有していることが示された。また、データ数の差が大きい結果からでも距離差平均は近い値を出すことを示した。このことにより、Blitzortung のアンプ特性が LLS より長く遅れが生じるとしても、Blitzortung では到来時間差式で計算を行っていることより、すべての受信局が同様に遅れるため落雷の位置精度への影響は少ないと推定された。

さらに、Blitzortung と LLS の多重雷比較を行った。受信局の数が少ない時は多重雷を除いても落雷の標定数にバラつきが確認できた。また、受信局の数が 20 局を超えると、安定した値となることが確認できた。

第5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、2018年2月20日現在で全国、アジアに受信局を計36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。

本研究では、今まで評価されていなかった Blitzortung システムの落雷位置精度の性能検討をする目的で、Blitzortung の落雷分布図を作成し落雷分布の傾向を調べ従来システムと落雷分布の比較を行った。また、LLS の落雷データとの比較を行い Blitzortung システムの位置精度の評価を実施した。

まず、Blitzortung の日本の落雷分布図を作成した。これにより、日本の冬季雷、夏季雷の落雷分布傾向や、年間を通じて一番多く落雷が落ちた場所が新潟県沖から秋田県沖にかけてであることが示された。また、アジア・オセアニアの落雷分布図を作成したことにより、オーストラリアでも冬季雷が生じることを示した。さらに、日本の受信局が増えたことでこれまで標定が困難だった東南アジアの落雷標定が可能になったことを示した。

次に、Blitzortung システムの評価として他のシステムである JLDN と比較した。Blitzortung の落雷分布傾向と JLDN の落雷分布傾向を比較したところ、新潟県と石川県の日本海側と関東地方から太平洋にかけて2つの帯状の位置標定が一致した。また、日本海沖、中部地方から東北地方の日本海側、関東地方と東北地方の太平洋沖に3つの帯状の位置標定が一致した。このことより、Blitzortung システムは他システムと同様な落雷分布傾向であることを示した。

さらに、TEPCO の LLS システムと位置精度検証をしたところ LLS との距離差平均は1.4kmであった。したがって、Blitzortung システムは従来他システムとほぼ同等の性能を有している事がわかった。

以上から本研究では、今まで Blitzortung の精度評価データはなかったが、他システムとの比較で1.4kmの良い精度システムであることが示された。また、落雷分布図も他システムと同等であることを示した。

Blitzortung の落雷情報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などの防災対策や雷害対策に役立つことを期待する。

今後は、Blitzortungで受信する磁界波形から落雷の電荷量を推定する手法の検討や日本独自のアルゴリズムによる落雷標定の位置精度の向上が期待される。

参考文献

- [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)
- [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)
- [3]. Blitzortung_RED 技術書:http://www.blitzortung.org/Documents/TOA_Blitzortung_RED.pdf
- [4]. T. Takahashi : “Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms”, J. Atmos. Sci., 35, pp.1536-1548 (1978)
- [5]. K. Takamatu : ”Several discharge phenomena observed in winter upward lightning”,(2015)
- [6]. 竹内利雄 1987年「雷放電現象」,名古屋大学出版会
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 気象庁 <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/thunder1-3.html>
- [11]. フランクリン・ジャパン落雷分布図 :
<http://www.franklinjapan.jp/contents/lightning-info/previous/>

2. 落雷標定システムの詳細性能評価

第1章 序論

1.1 研究の目的

近年、電子機器は様々な分野で用いられている。しかし、電子機器は落雷による異常電圧・電流に弱い。雷はいつどこに落ちるか予測が難しく、毎年死亡事故などの重大な災害が発生している。また、雷雨を伴うゲリラ豪雨により、河川の氾濫など重大災害が頻発している。さらに、電力設備への落雷により停電が発生することに伴い、病院、鉄道など社会的に大きな影響を及ぼす。そこで、落雷位置標定を行い、分布・頻度などから雷害対策を取ることが必要である。

落雷から発生する電磁波を受信し、受信局への到達時間差から落雷の位置を標定する装置は、主に落雷により大きな被害を受ける電力会社や一部の気象会社を中心に、商用のネットワークがある。しかし、一般にはわずかしか公開されておらず、詳細なデータは有料であることから、公衆災害防止には十分役に立っているとは言えない状況である。スポーツ観戦時や農作業時に落雷によって死亡災害が毎年発生していることから、より一層の正確かつ安価な情報提供が必要である。現在、商用の落雷位置標定システムは高い建設コストや閲覧が有料であるなど、一般の人は利用しにくいものが多い。

一方、本研究の Blitzortung.org は 2012 年頃からドイツの大学を中心にボランティアベースに広がり、ドイツを中心にヨーロッパ各国に展開されている。このネットワークは、安価な受信局を一般の人がネットワークに接続することにより、ネット上の地図にプロットするというもので、全世界で数百のボランティアによる受信局が存在している。受信機一台約 3 万円の低コストと無料での閲覧が可能で一般の人でも利用できるようになってきていることが特徴である。

そこで、2016 年 2 月、日本でいち早くこのネットワークに注目し、受信器を組み立てて、ネットワークに参加した。これにより日本付近での落雷の位置がリアルタイムでネット上の地図に表示出来るようになり、落雷の災害防止、被害低減に貢献している。

しかし、システムには不透明な部分が多くあり、精度評価や標定率の評価が困難である。

本研究では、Blitzortung.org のシステムの性能を受信機を用いて解明する。

第2章 Blitzortung.org の概要

2.1 Blitzortung.org とは

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、電子工作が得意なボランティアが落雷の電波を受信するキットを自分で組み立て、インターネットに接続することで、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。落雷位置標定結果は無料でパソコンやスマートフォンから確認することができ、Blitzortung.org や LightningMaps.org などのサイトがある。非営利目的での使用が許可されており、参加者はボランティアである。

なお、既存の商用システムの公開されている情報は広域のものであり、詳細な情報は有料である場合が多い。また、受信局は高価であり、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。

2.2 観測周波数帯

落雷によって発生する電磁波は様々な周波数を含んでいる。位置標定に利用される周波数は低周波の ELF 帯(3Hz~30kHz)から高周波の UHF 帯(300MHz~3GHz)までの範囲がある。図1に落雷から発生する電磁波の分布を示す。

Blitzortung.org では雷放電によって放出された VLF 帯(3~30kHz)を用いている。使用理由として VLF 帯の特徴が、観測範囲が数千 km と広範囲であることがあげられる。VLF 帯は、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観測範囲が広い。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。また、同じ VLF 帯を用いた雷放電位置標定システムに、WWLLN(World Wide Lightning Location Network)がある。

一方、LF 帯を用いているシステムとして JLDN(Japan Lightning Detection Network)がある。LF 帯が用いられている理由として、帰還雷撃や雲内放電の際に発生に伴う電磁波も受信可能であり、LF 帯におけるそれらの放電過程の観測範囲が 200km 程度もしくはそれ以上であることから、雷雲の発達から衰弱に至るまでを観測することが可能であるという特徴がある。

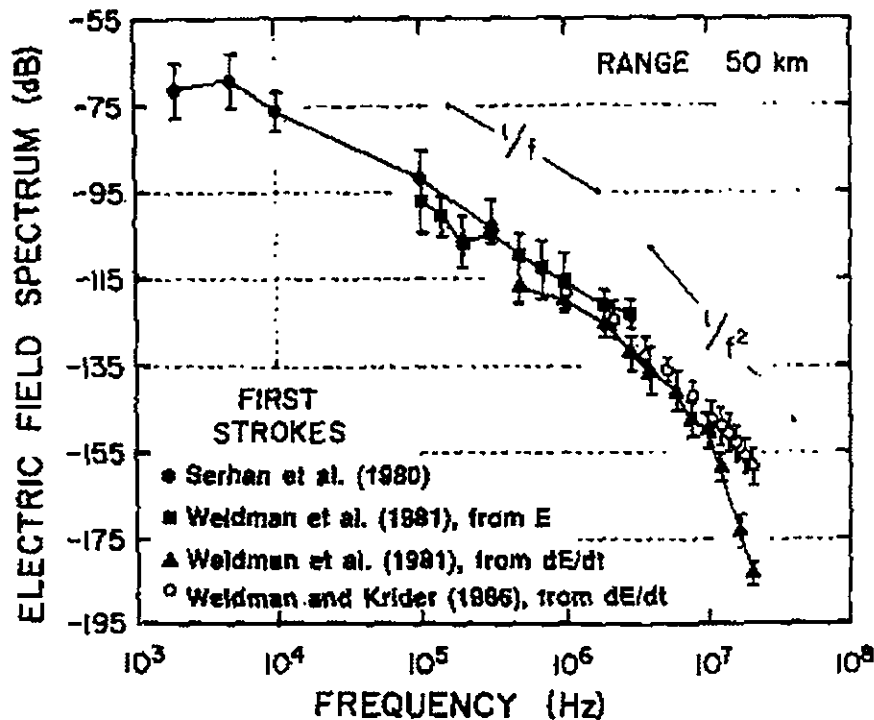


図1 落雷による電磁波の分布

出典: Uman, M.A., 1987: The Lightning Discharge, Academic Press, New York

2.3 落雷位置標定方法

Blitzortung では ToA (Time of Arrival) 方式を用いている。ToA 方式とは落雷による電磁波がほぼ光速で伝搬することを利用して、3 局以上で受信した電磁波の到来時間を GPS で付ける。次に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 2 つの双曲線の交点を落雷位置として標定するものである。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。

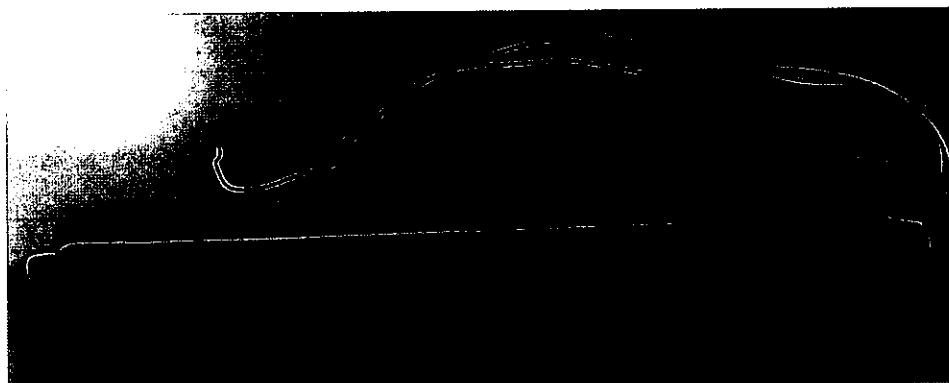
また、Blitzortung は 6 局以上の受信局で受信した場合に標定を行っており、同じ ToA 方式を用いている WWLLN では最低 5 局での受信が必要である。他に JLDN (Japanese Lightning Detection Network) では 4 基以上の受信機で標定している。

2.4 受信機

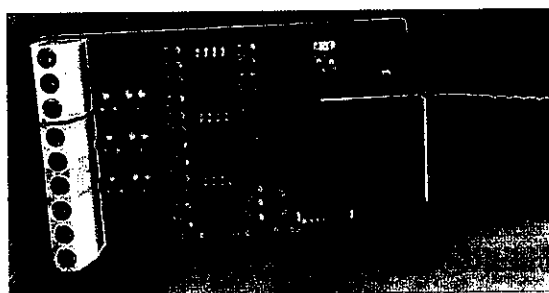
2.4.1 磁界アンテナ

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に磁界アンテナと磁界アンプを示す。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。またアンプのゲインは周囲のノイズによって1-1024で変化する。Fujisawa局では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。

図3に磁界アンプの周波数特性を示す。低減量-3dBにおいて、低域遮断周波数は1.8kHz、高域遮断周波数は38kHz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)フェライトアンテナ



(b)磁界アンプ

図2 Blitz 磁界観測アンテナ

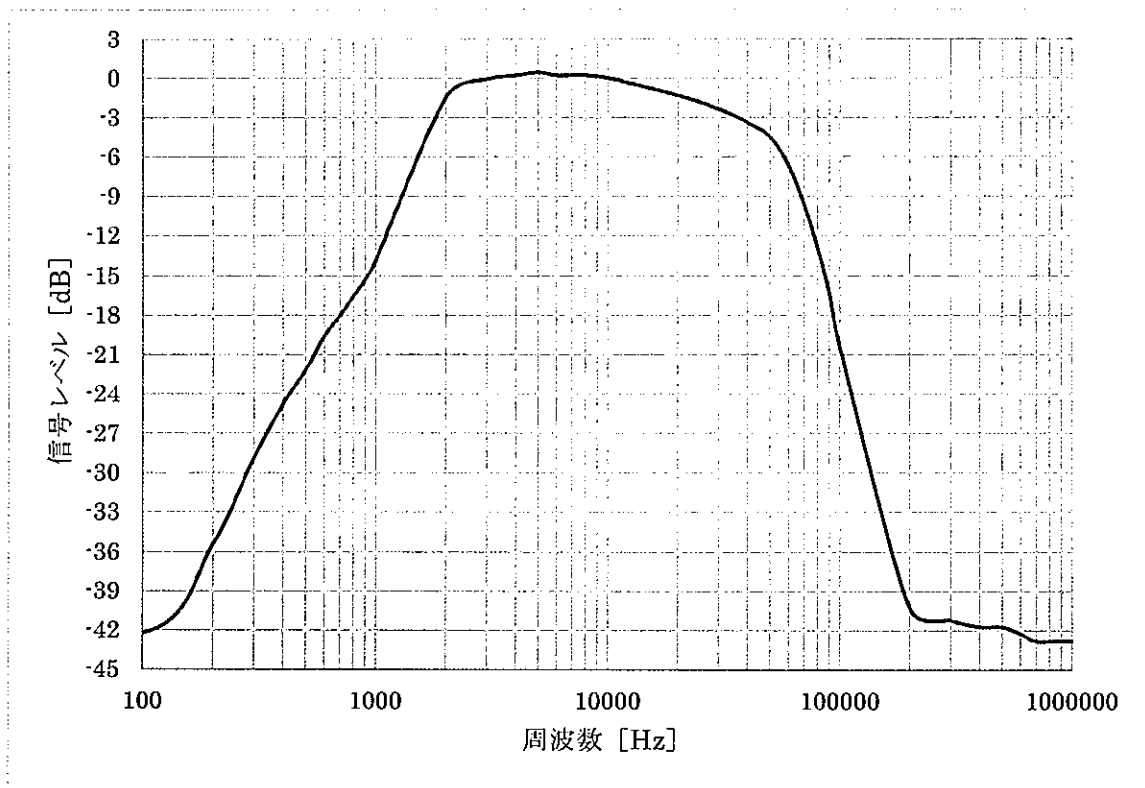


図3 磁界アンプの周波数特性

2.4.2 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 4 にアンテナと電界アンプを示す。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。Fujisawa 局の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は直結し、アンプとコントローラボード間では同軸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。

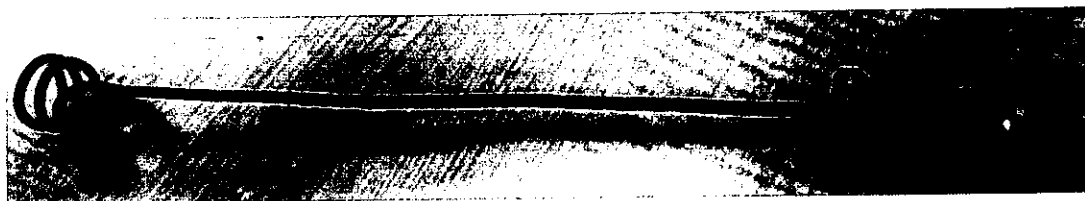


図 4 Blitz 電界観測アンテナ

2.4.3 コントローラボード

図 5 にコントローラボードを示す。磁界アンテナで観測された磁界の波形は LAN ケーブルを通じて、電界アンテナで観測された電界の波形は同軸ケーブルを通じて、コントローラボードに送られ、525kHz のサンプリング周波数で 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)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、受信局の緯度経度のデータがネットワークを通じてサーバーに送られる。

図 6 にコントローラボードの LP フィルタ(LTC1569-7)を示す。磁界・電界アンプの各チャンネルに1つ取り付けることができ、J0 をはんだで導通させることによって使用できるようになる。ノイズが多い環境に設置する場合に使用する。

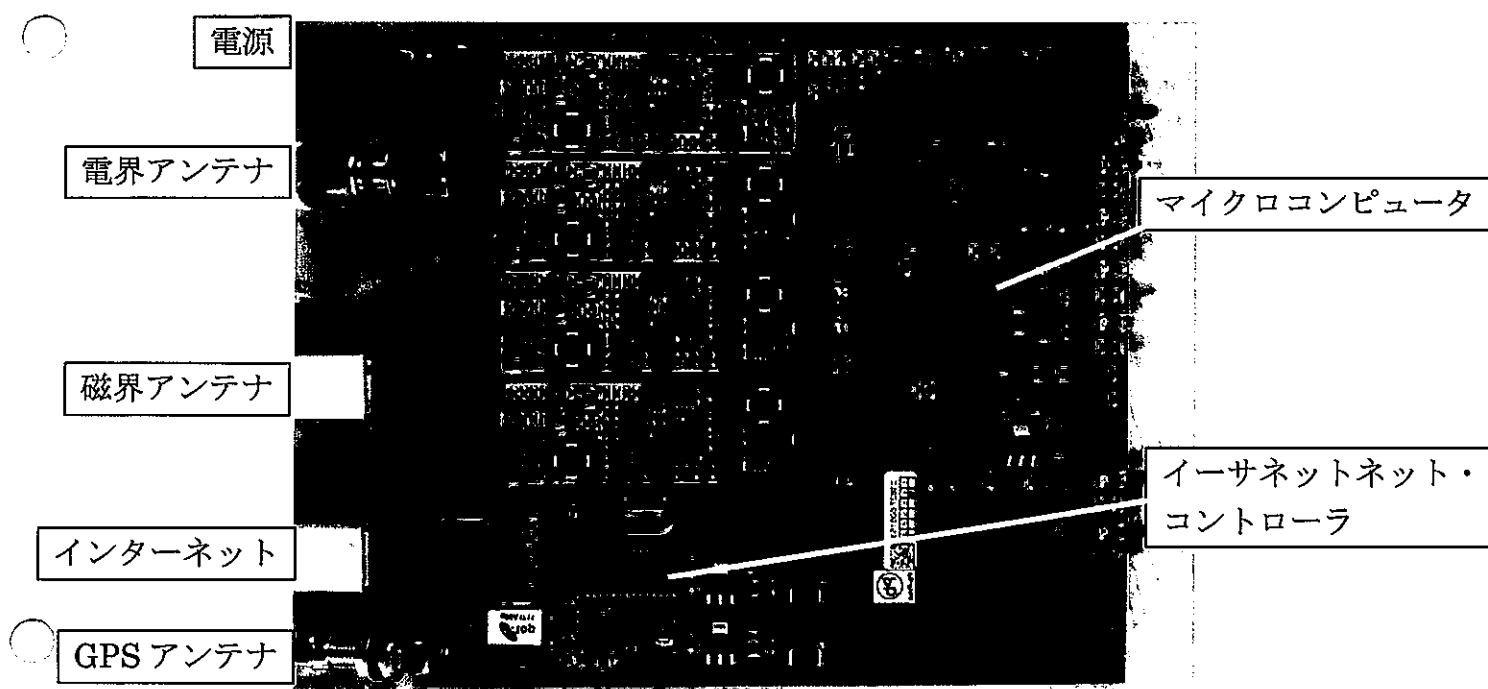


図 5 コントローラボード

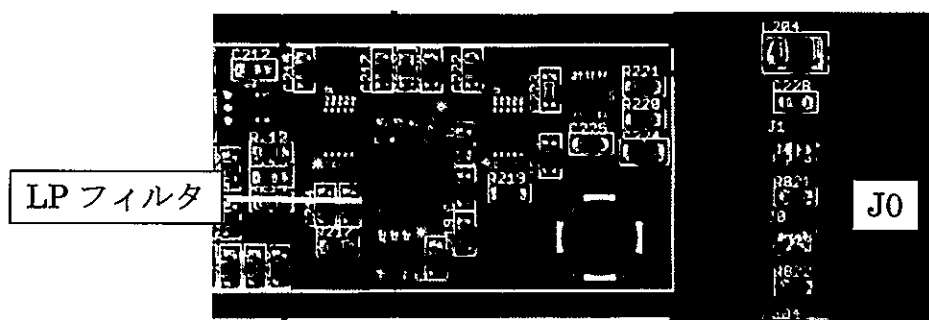


図 6 LP フィルタ

2.5 Blitzortung.org Controller

各 Blitz 受信局にインターネットから直接アクセスすることで Blitzortung.org Controller を見ることができる。Blitzortung.org Controller では主にその受信局の LP フィルタの設定、リアルタイムの波形や磁界アンテナの受信数・送信数の確認などができる。

LP フィルタの設定方法を示す。まず Blitzortung.org Controller の settings/main のページより、Mode を Manual Mode にする。図 7(a)に settings/main のページの画像を示す。次に settings/Amp1 の Filters の任意のチャンネルに適切な周波数を入力し、チェックボックスにチェックを入れる。図 7(b)に settings/Amp1 の画像を示す。以上が LP フィルタの設定である。

次に磁界アンテナの受信数の確認方法を示す。Blitzortung.org Controller の status/main のページを開く。図 8 の値が受信数である。

最後にリアルタイムの波形を確認する方法を示す。Blitzortung.org Controller の signals のページを開く。図 9 がリアルタイムの波形であり、横軸が時間、縦軸が電圧である。

Blitzortung.org Controller

SYS GPS NET AMP SIG 0/s 11 51 06

Status Settings Tools Signals About

Station 2012
FW 0.2 PCB 19.3/10/E0



All Main Network GPS Amp 1 Amp 2 Sampling Buzzer System Actions Alerts

Main

Remote Control

Mode:

Manual Mode

Manual Mode: You can change all settings manually. The controller still receives some parameters from the servers. On very rare occasions, the server might send updates for a single parameter, for example to limit traffic. Your own settings from flash will never be overwritten. Depending on your settings, the servers might not accept the data, because we need some parameters equal on all stations to compute the strokes. Especially the numbers in the "Tracker" and "Sampling" sections shouldn't be changed.

Apply

(a)Mode

Blitzortung.org Controller

SYS GPS NET AMP SIG 0/s 11 51 57

Status Settings Tools Signals About

Station 2012
FW 0.2 PCB 19.3/10/E0



All Main Network GPS Amp 1 Amp 2 Sampling Buzzer System Actions Alerts

Amp 1

Parameters

Channel A: Gain: 5 x 1 - HP on - Status: Normal

Channel B: Gain: 1 x 1 - HP on - Status: Normal

Channel C: Gain: 1 x 1 - HP on - Status: Normal

Channel A Threshold: ± 1000 mV

Channel B Threshold: ± 120 mV

Channel C Threshold: ± 120 mV

Apply

Filters

Channel A Filter: 50 kHz

Channel B Filter: 50 kHz

Channel C Filter: 50 kHz

Apply

(b)Filters

図 7 LP フィルタ設定方法

Blitzortung.org Controller

SYS GPS NET AMP SIG 0/5 03:17:30

Status Settings Tools Signals About

Station 2012
FW 0.2 * PCB 19 3/10/10



Auto Refresh

Tracker

Mode: **Manual**
 Signals: Received: 27, Good: 27, Sent: 0
 Signal Rate: Last second: 0, Last 60s: 0.5
 Errors: No GPS: 0, Overflow: 1
 Status: Normal
 Server 1: 133.130.105.77:8309, Region 8
 0.0MByte, 0 Packets, 0Bytes each
 Server 2: 81.7.10.204:8308, Region 2
 0.0MByte, 0 Packets, 0Bytes each
 Server 3: 213.32.62.243:8308
 0.0MByte, 0 Packets, 0Bytes each
 New Firmware: Version 8.4, [Download](#) ([Changelog](#))

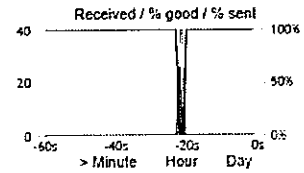


図 8 受信数

Blitzortung.org Controller

SYS GPS NET AMP SIG 0/5 03:21:03

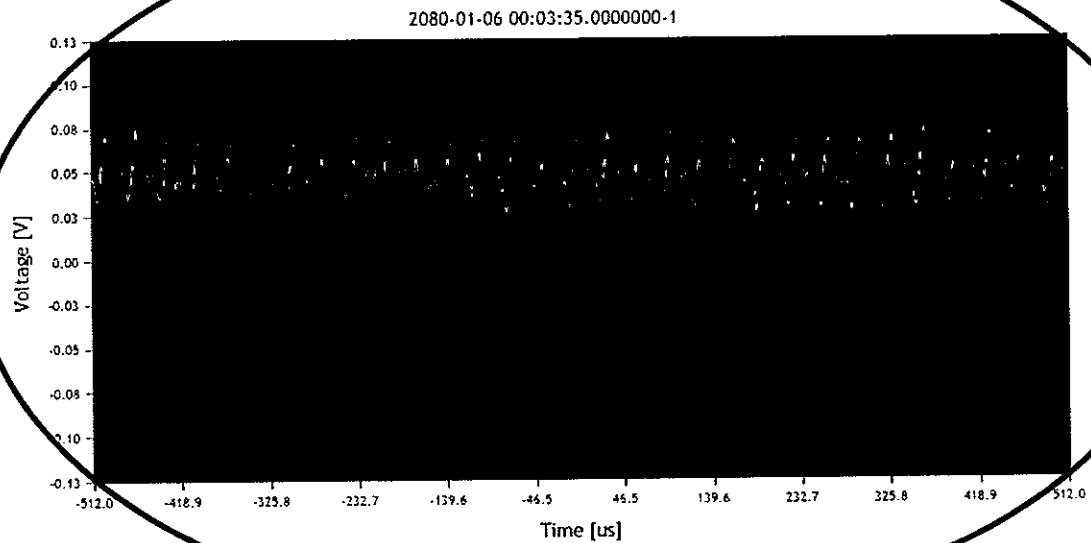
Status Settings Tools Signals About

Station 2012
FW 0.2 * PCB 19 3/10/10



Maximize Auto Refresh

Live Signals



Channel	Gain	Threshold	Noise Floor	Display
1A LP	4 * 2 * 40 = 320	1057 * 55 mV	64 mVpp	<input checked="" type="checkbox"/>
1B L	5 * 1 * 40 = 200	91 / -42 mV	0 mVpp	<input checked="" type="checkbox"/>
1C	8 * 4 * 40 = 1280	113 / -62 mV	0 mVpp	<input checked="" type="checkbox"/>
2A	-	-	-	<input checked="" type="checkbox"/>

Limit time (X):
0 - 100 %
 Limit voltage (Y):
100 % Auto
 Averaging:

図 9 リアルタイム波形

第3章 性能評価

3.1 磁界アンプの性能評価

3.1.1 入力電圧と出力電圧

LP フィルタ、ノイズ源の評価をする際に磁界アンプのゲインを固定するが、入力電圧が高いと出力電圧が比例しない場合があるため、磁界アンプの入力電圧と出力電圧の関係を、以下の条件、方法で検証した。

条件

入力波形を 10kHz の正弦波

磁界アンプのゲインを 1 に固定

検証方法

- 1.ファンクションジェネレータの出力を磁界アンプに入力した。
- 2.ファンクションジェネレータの出力電圧を 10mV～1V まで変化させ、入出力電圧をオシロスコープを用いて測定した。

入力電圧に対する出力電圧の関係を表 1 に示す。表 1 より縦軸を出力電圧、横軸を入力電圧とした図 10 を作成した。

図 10 より、入力電圧が 300mV までは出力電圧と直線性の関係があり、300mV 以上では入力に出力が比例しないことから、LP フィルタの測定には入力電圧が 300mV 以下の電圧が適当であるといえる。

表 1 入力電圧と出力電圧

入力電圧[mV]	出力電圧[mV]
10	14.0
20	27.5
30	40.0
40	55.0
50	68.0
60	84.0
70	96.0
80	110.0
90	124.0
100	136.0
200	290.0
300	350.0
400	350.0
500	350.0
600	350.0
700	350.0
800	350.0
900	350.0
1000	350.0

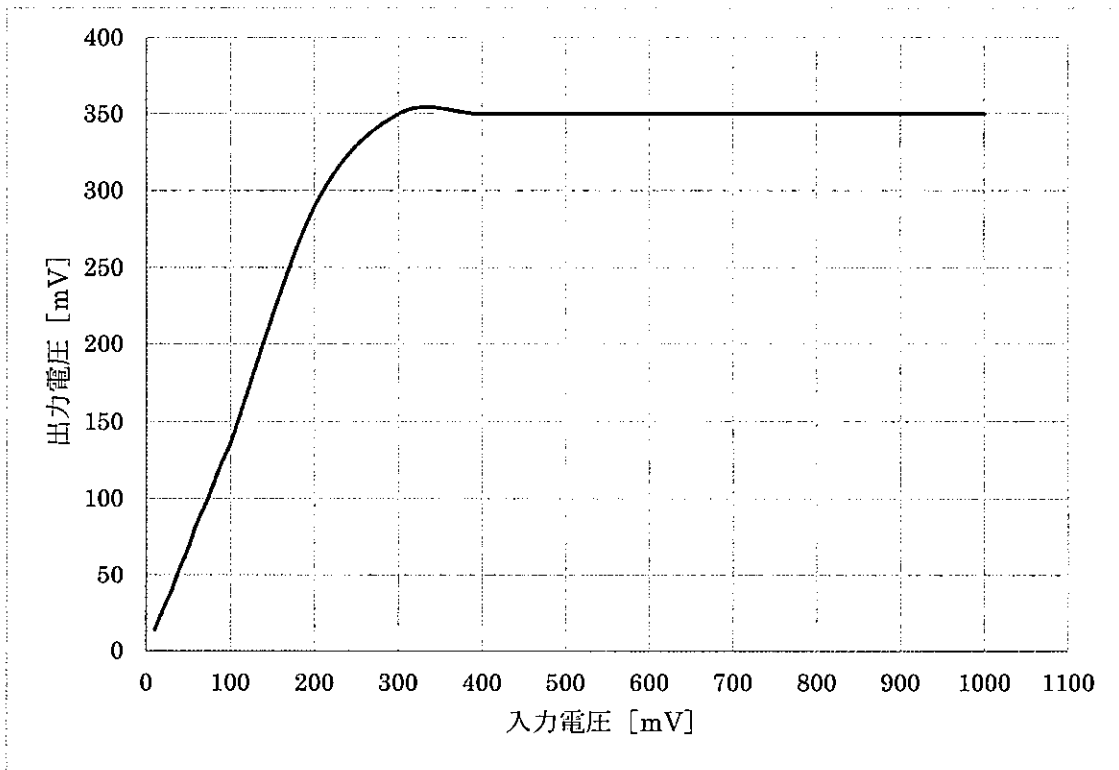


図 10 入力電圧と出力電圧

3.1.2 LP フィルター

ノイズが多い環境に受信局を設置する場合にコントローラボードに付属する LP フィルタを使用するが、LP フィルタのノイズ軽減がどの程度有効か詳細が不明のため、以下の条件、方法で実験を行った。

条件

磁界アンプのゲインを固定した

入力電圧を 100mV 一定とした

LP フィルタの設定周波数を 50kHz とした

実験方法

- 1.ファンクションジェネレータの出力を磁界アンプに入力した。
- 2.ファンクションジェネレータの出力周波数を変え、磁界アンプの入出力をオシロスコープで測定した
- 3.LP フィルタのあり・なしを切り替え、1、2 を同様に繰り返した

実験結果を表 2 に示す。表 2 より横軸を周波数、縦軸に 10kHz を基準とした出力電圧の減衰分の利得を信号レベルとして図 11 を作成した。

図 11 より、LP フィルタありのほうが LP フィルタなしに比べ、低周波の特性は同じで高周波の減衰が大きいことから、LP フィルタが 40kHz~200kHz のノイズ軽減に有効であると分かった。

周波数[Hz]	LPあり電圧[mV]	LPフィルタあり[dB]	LPなし電圧[mV]	LPフィルタなし[dB]
10	1.6	-40.1	1.44	-41.2
100	1.6	-40.1	1.28	-42.3
200	3.2	-34.1	2.8	-35.5
300	5.6	-29.2	6	-28.8
400	10.4	-23.8	9.6	-24.8
500	13.6	-21.5	13	-22.1
600	16.8	-19.7	17.4	-19.6
700	20	-18.2	20.8	-18.0
800	24.8	-16.3	24.6	-16.6
900	28.8	-15.0	28.6	-15.3
1,000	33.6	-13.7	34	-13.8
2,000	140.7	-1.2	140	-1.5
3,000	164	0.1	163.9	-0.1
4,000	169.9	0.4	169.8	0.2
5,000	169.9	0.4	174	0.4
6,000	171.9	0.5	169.8	0.2
7,000	169.9	0.4	169.8	0.2
8,000	167.8	0.3	169.8	0.2
9,000	164	0.1	167.9	0.1
10,000	161.9	0.0	165.9	0.0
20,000	136	-1.5	142	-1.4
30,000	120	-2.6	125.9	-2.4
40,000	104	-3.8	112	-3.4
50,000	64	-8.1	98.4	-4.5
60,000	6.8	-27.5	76.8	-6.7
70,000	1.6	-40.1	54.4	-9.7
80,000	1.5	-40.7	37.2	-13.0
90,000	1.44	-41.0	24.8	-16.5
100,000	1.44	-41.0	15.52	-20.6
200,000	1.4	-41.3	1.6	-40.3
300,000	1.37	-41.5	1.44	-41.2
400,000	1.4	-41.3	1.36	-41.7
500,000	1.4	-41.3	1.36	-41.7
600,000	1.4	-41.3	1.28	-42.3
700,000	1.2	-42.6	1.2	-42.8
800,000	1.2	-42.6	1.2	-42.8
900,000	1.2	-42.6	1.2	-42.8
1,000,000	1	-44.2	1.2	-42.8

表 2 LP フィルタ

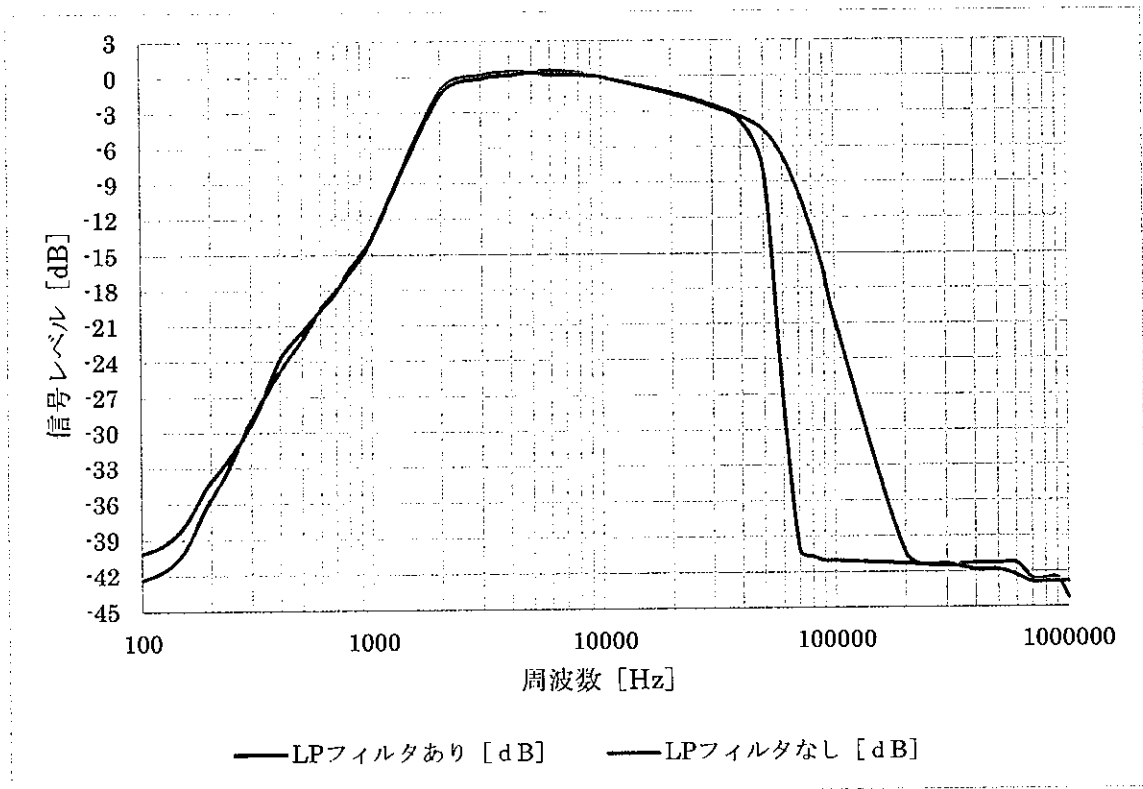


図 11 周波数特性 LPフィルタ

3.2 Blitz システムの性能評価

3.2.1 磁界アンプの立ち上がり時間

他の落雷位置標定システムと比較し標定率や精度の評価する際、同一の落雷の条件として時間の一致が重要である。そこで本来の落雷発生時刻から受信機がつける落雷発生時刻の遅れを以下の条件、方法で実験した。

条件

入力電圧を 100mV の単発パルス

立ち上がり時間は図 12 に示すように 10%～90%の時間とした

実験方法

1. ファンクションジェネレータの出力を磁界アンプに入力した
2. 磁界アンプの入出力をオシロスコープで測定した
3. ファンクションジェネレータの出力の立ち上がり時間を $0.68\mu\text{s}$ ～ $15.20\mu\text{s}$ まで変化させ、オシロスコープで磁界アンプの入出力を測定した

実験結果を表 3 に示す。表 3 より縦軸を出力立ち上がり時間、横軸を入力立ち上がり時間とした図 13 を示す。図 13 より、入力立ち上がり時間と出力立ち上がり時間は直線性の関係があることがわかる。また $9\mu\text{s}$ で入力と出力が等しくなるため、 $9\mu\text{s}$ 以上であれば正しい落雷到達時間が記録できることが分かる。しかし、到来時間差方式では、各受信局の受信時間の差から双曲線を描き、交点を標定点としているため、 $9\mu\text{s}$ 以下であっても全ての受信局が同様に遅れた時間を記録するため、時間差は変わらない。よって到来時間差法を利用している Blitz では LF 帯の空電を受信している商用の LLS に近い位置精度を有している可能性がある。

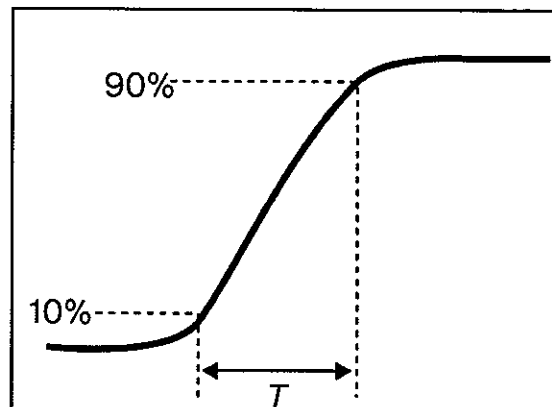


図 12 立ち上がり時間

表 3 立ち上がり時間

入力立ち上がり時間 [μ s]	出力立ち上がり時間 [μ s]
0.68	2.89
1.37	3.33
3.22	4.87
4.76	5.92
6.00	6.92
7.48	7.88
8.84	8.88
9.88	9.92
10.75	10.79
12.11	12.13
13.56	13.59
15.20	15.22

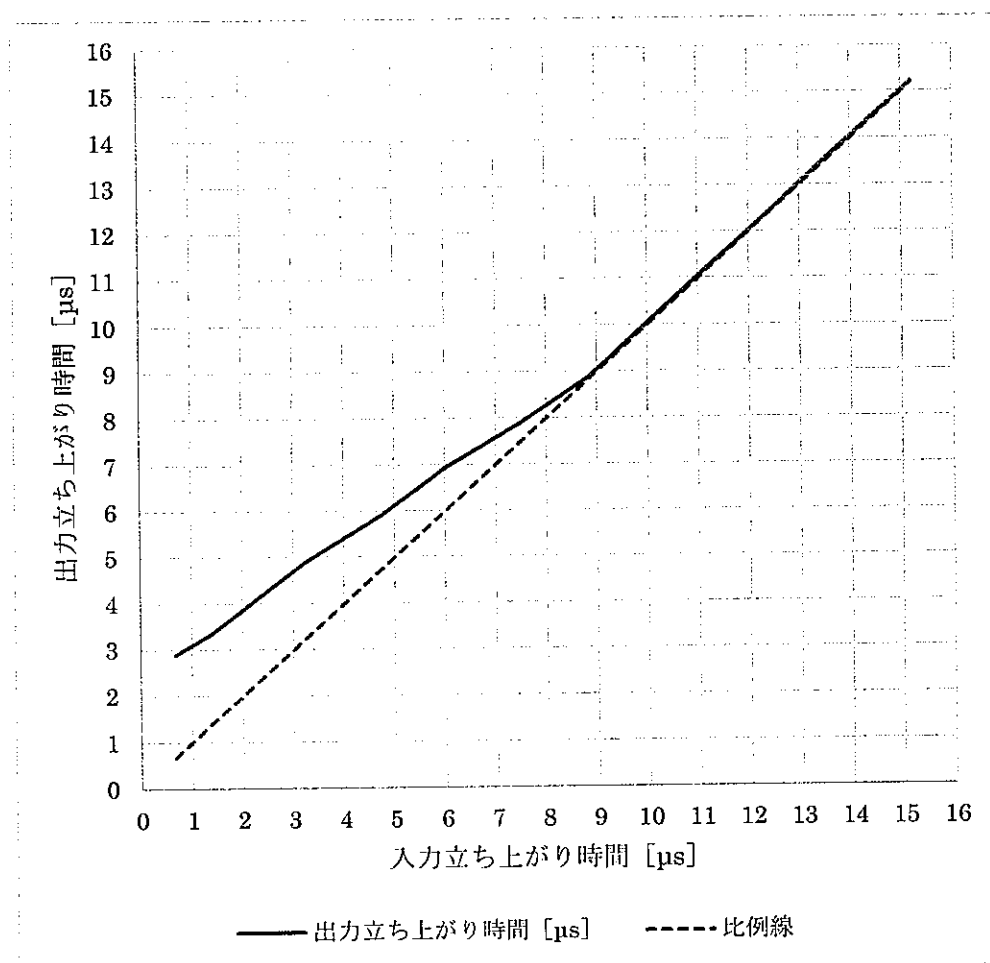


図 13 磁界アンプ 立ち上がり時間

3.2.2 Dead Time

落雷位置標定システムでは多重雷を Flash として捉えるか Stroke として捉えるかによって標定数が変わる。Flash とは多重雷全体を一つの落雷として考えることであり、Stroke とは多重雷を一つ一つの落雷として数えることである。また、LLS に対して Blitz の標定数が少ない傾向があるため、磁界アンプへの入力数と出力数の関係から Dead Time を以下の条件、方法で実験した。

条件

入力電圧を 100mV 一定のパルス波

入力数を 10 回

システムは旧タイプの RED system と新タイプの BLUE system の2種類を用いた

実験方法

1. ファンクションジェネレータの出力を磁界アンプに入力した
2. Blitzortung.org Controller の出力数を記録した
3. ファンクションジェネレータの出力パルスの周期を変化させ、同様に記録した

実験結果を表 4 に示す。表 4 より、縦軸を入力数と出力数の比、縦軸をパルス周期とした図 14 を示す。

図 14 より入力と出力の比が 1 になったときが Dead Time であり、BLUE では 8ms、RED は 14ms である。

図 15 に多重雷の時間分布を示す。図 15 より多重雷は 30~80ms 間隔で起こることが多い。Blitz 各受信機の Dead Time は最大で 14ms であるため、受信機単体の試験からは Blitzortung.org の受信局は 14ms 以上の間隔の多重雷を捉えることができる。また、14ms 未満の間隔の多重雷は、受信機単体の試験からは Dead Time となり、stroke として捉えることはできない。なお、システム全体の Dead Time は不明である。

表 4 Dead Time

周期[ms]	入力数	出力数(BLUE)	出力/入力 (BLUE)	出力数(RED)	出力/入力 (RED)
0.5	10	1	0.1	1	0.1
0.6	10	1	0.1	1	0.1
0.7	10	1	0.1	1	0.1
0.8	10	1	0.1	1	0.1
0.9	10	2	0.2	1	0.1
1	10	2	0.2	1	0.1
2	10	3	0.3	2	0.2
3	10	4	0.4	3	0.3
4	10	5	0.5	3	0.3
5	10	5	0.5	4	0.4
6	10	5	0.5	4	0.4
7	10	7	0.7	5	0.5
8	10	10	1	5	0.5
9	10	10	1	5	0.5
10	10	10	1	5	0.5
11	10	10	1	5	0.5
12	10	10	1	5	0.5
13	10	10	1	8	0.8
14	10	10	1	10	1
15	10	10	1	10	1
16	10	10	1	10	1
17	10	10	1	10	1
18	10	10	1	10	1
19	10	10	1	10	1
20	10	10	1	10	1
50	10	10	1	10	1

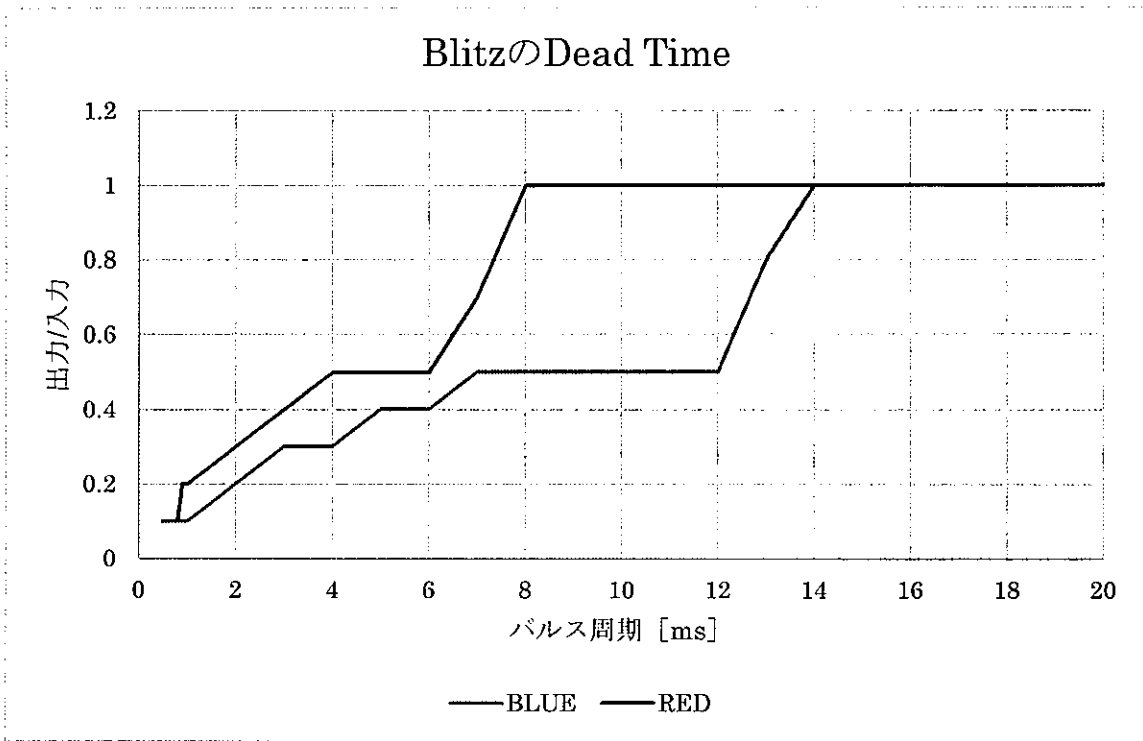


図 14 Blitz Dead Time

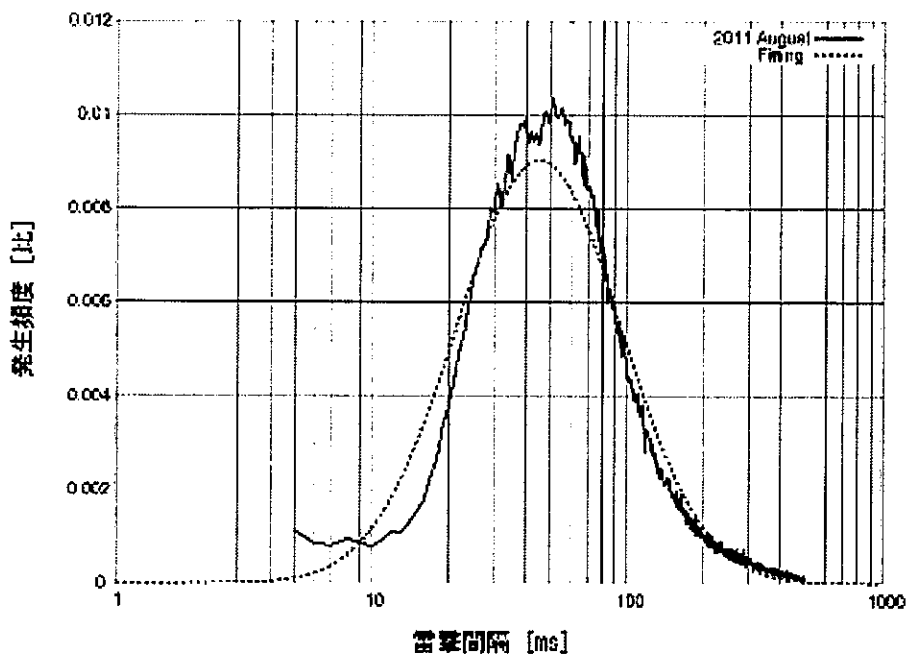


図 15 多重雷の時間分布
 出展 藤居文行 落雷観測データの統計解析

第4章 ノイズ源

受信機を設置する場合、ノイズ源がアンテナ、磁界・電界アンプの近くにあると標定に影響を与える可能性がある。そこで 近くに置く可能性がある、コントローラボード、AC アダプタ、無線 LAN からどの程度離せば影響が少なくなるのかを以下の条件・方法で実験した。

条件

磁界アンプのゲインを1に固定した

Blitzortung のコントローラボードに GPS、無線 LAN、磁界アンプ、電界アンプを直結した

コントローラボード測定部品は図 16 の①～⑬場所とした

- ①インダクター
- ②マイクロコンピュータ
- ③電界アンプ LP フィルタ
- ④磁界アンプ LP フィルタ 3ch
- ⑤磁界アンプ LP フィルタ 2ch
- ⑥磁界アンプ LP フィルタ 1ch
- ⑦イーサネット・コントローラ
- ⑧電源端子
- ⑨電解コンデンサ
- ⑩トランス
- ⑪磁界アンプ端子
- ⑫LAN 端子
- ⑬GPS チップ

実験方法

1. Blitzortung のコントローラボードの各部品、AC アダプタ、無線 LAN にフェライトアンテナを当て、最も電圧が高くなった箇所の出力をオシロスコープで測定した
2. 各部品の磁界アンテナを 0cm、3cm、5cm、10cm 離し、同様にオシロスコープで測定した

表 5 にコントローラボード上の①～⑬にフェライトアンテナを近づけた場合の測定結果を示す。表 5 より横軸を距離、縦軸を電圧とした図 17 を作成した。図 17 より 0cm では⑫LAN アダプタが 7mV と最も電圧が高く、次いで⑬GPS チップが高い結果となった。また、5cm、10cm では全ての部品が 2mV となっている。これは周囲のホワイトノイズである。

表 6 に AC アダプタにフェライトアンテナを近づけた場合の測定結果を示す。図 18 に AC アダプタにフェライトアンテナを近づけたとき最も電圧が高くなった箇所を示す。表 6 より横軸を距離、縦軸を電圧とした図 19 を作成した。図 19 より⑭PA-U32 が最も電圧が高く、次いで⑮YMK-6w05100 が高い結果となった。また、10cm 離すことで、0cm に比べ全ての AC アダプタが 1/10 以下の電圧

になった。また、実際に湘南工科大学の受信局に用いている⑩PW081-05002400 は 10cm 離すことで、1/22 の電圧になった。これは、10cm において測定した AC アダプタの中では2番目に低い電圧である。また、表 5 では 10cm 離せばホワイトノイズである 2mV であったが、表 6 では 10cm であっても 2mV 以上の電圧が発生している。これは、表 6 では 0cm における電圧が高いことに起因していると考えられる。

表 7 に無線 LAN にフェライトアンテナを近づけた場合の測定結果を示す。図 20 に無線 LAN にフェライトアンテナを最も電圧が高くなった箇所を示す。表 7 より横軸を距離、縦軸を電圧とした図 21 を作成した。図 21 より 0cm では tp-link に比べ、23 の wli-utx-ag300 は約 1/2 の値となった。また 10cm 離すことで全ての無線 LAN が 2/15 の電圧になった。また、表 5 では 10cm 離せばホワイトノイズである 2mV であったが、表 7 では 10cm であっても 2mV 以上の電圧が発生している。これは、表 7 では 0cm における電圧がと高いことに起因していると考えられる。

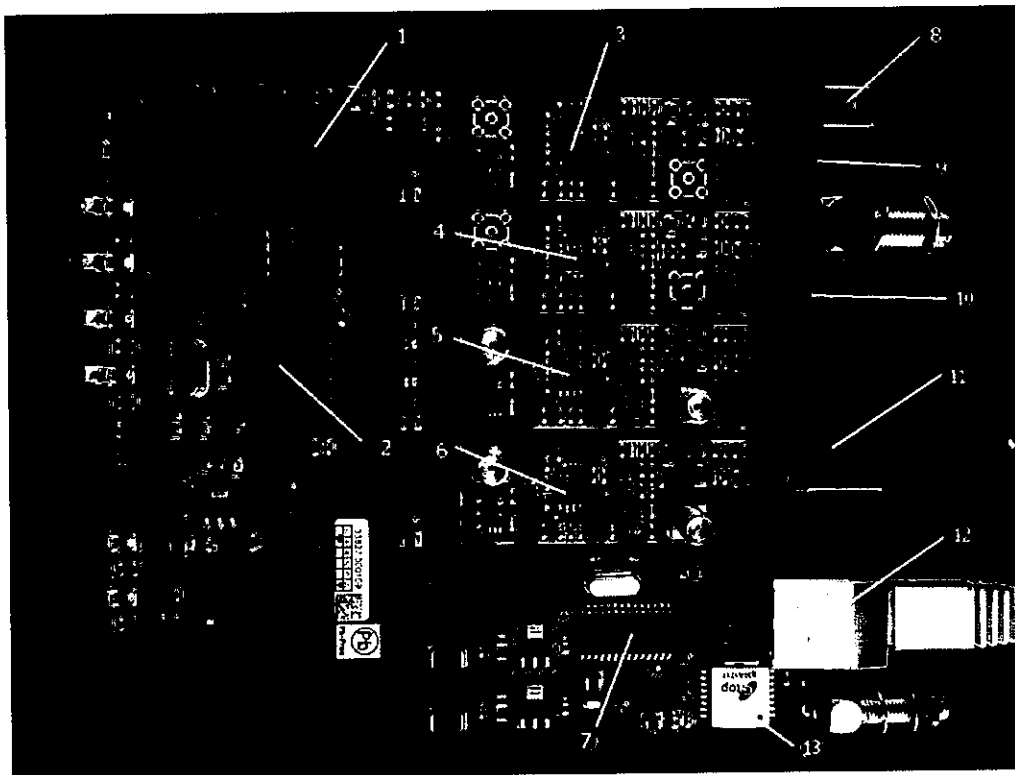


図 16 コントローラボード

表 5 コントローラボードのノイズ源

パーツ番号	0cm 電圧[mV]	3cm 電圧[mV]	5cm 電圧[mV]	10cm 電圧[mV]
⑫	7.0	4.0	2.0	2.0
⑬	6.5	3.0	2.0	2.0
②	5.0	2.0	2.0	2.0
①	4.0	3.0	2.0	2.0
⑦	4.0	2.0	2.0	2.0
⑨	3.5	2.0	2.0	2.0
⑩	3.5	2.0	2.0	2.0
⑪	3.5	2.0	2.0	2.0
③	3.0	2.0	2.0	2.0
④	3.0	2.0	2.0	2.0
⑥	2.6	2.0	2.0	2.0
⑤	2.1	2.0	2.0	2.0
⑧	2.0	2.0	2.0	2.0

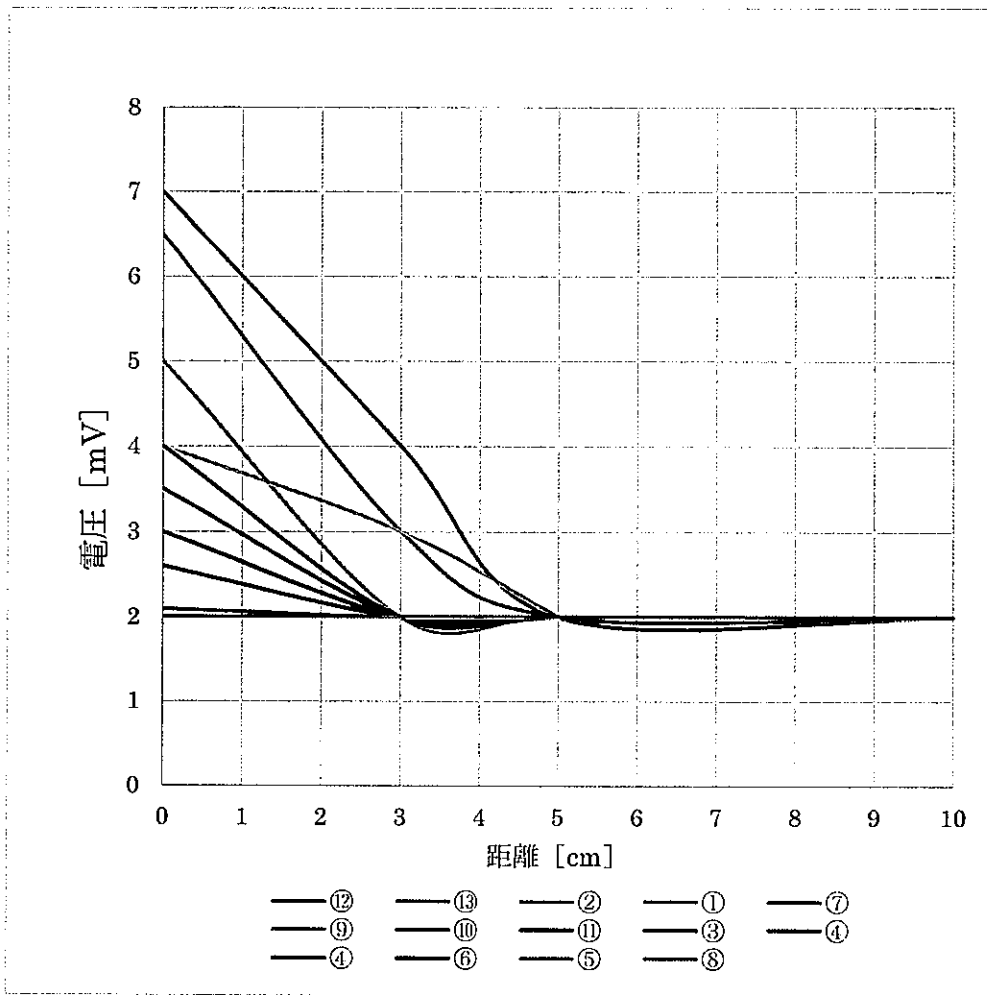


図 17 コントローラボード

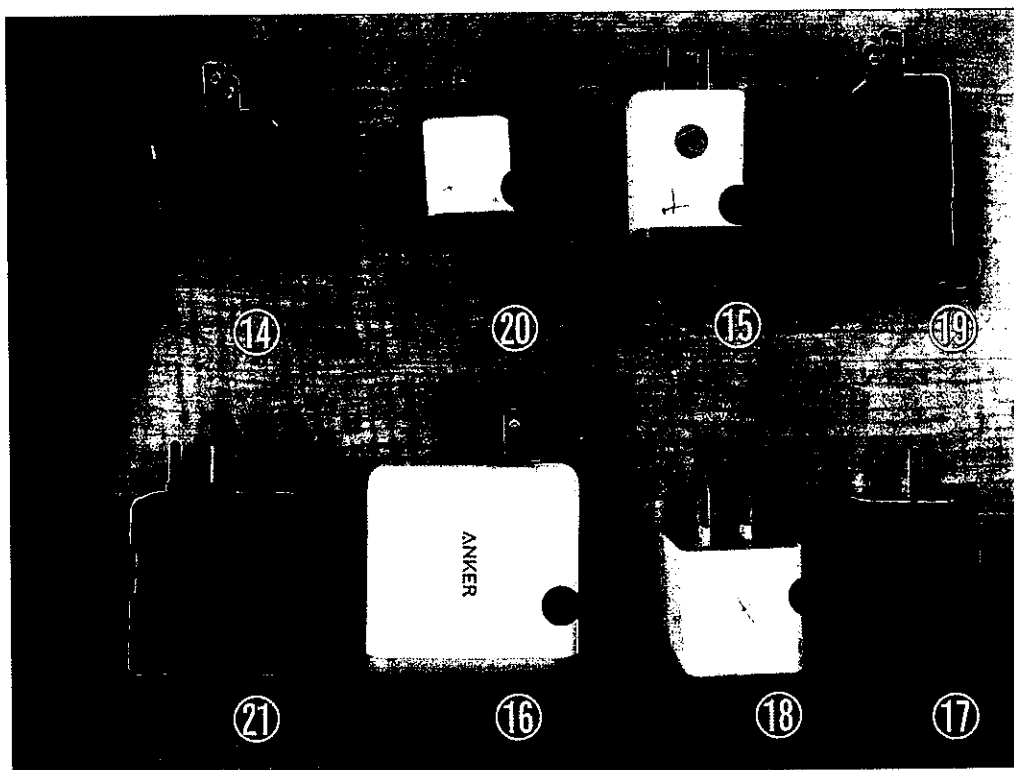


図 18 ACアダプタ

表 6 ACアダプタ

型番	電 流 [mA]	0cm 電圧 [mV]	3cm 電圧 [mV]	5cm 電圧 [mV]	10cm 電圧 [mV]
⑭PA-U32	0.35	360	150	80	30
⑮YMK-6w05100	0.36	360	180	60	20
⑯A2142	0.35	360	130	20	20
⑰FANA7R	0.36	350	110	40	10
⑱PW081-05002400	0.36	340	150	20	15
⑲AD-B50P200	0.36	300	150	40	20
⑳A1265	0.36	280	120	28	10
㉑AL1004001-101	0.36	200	50	20	15

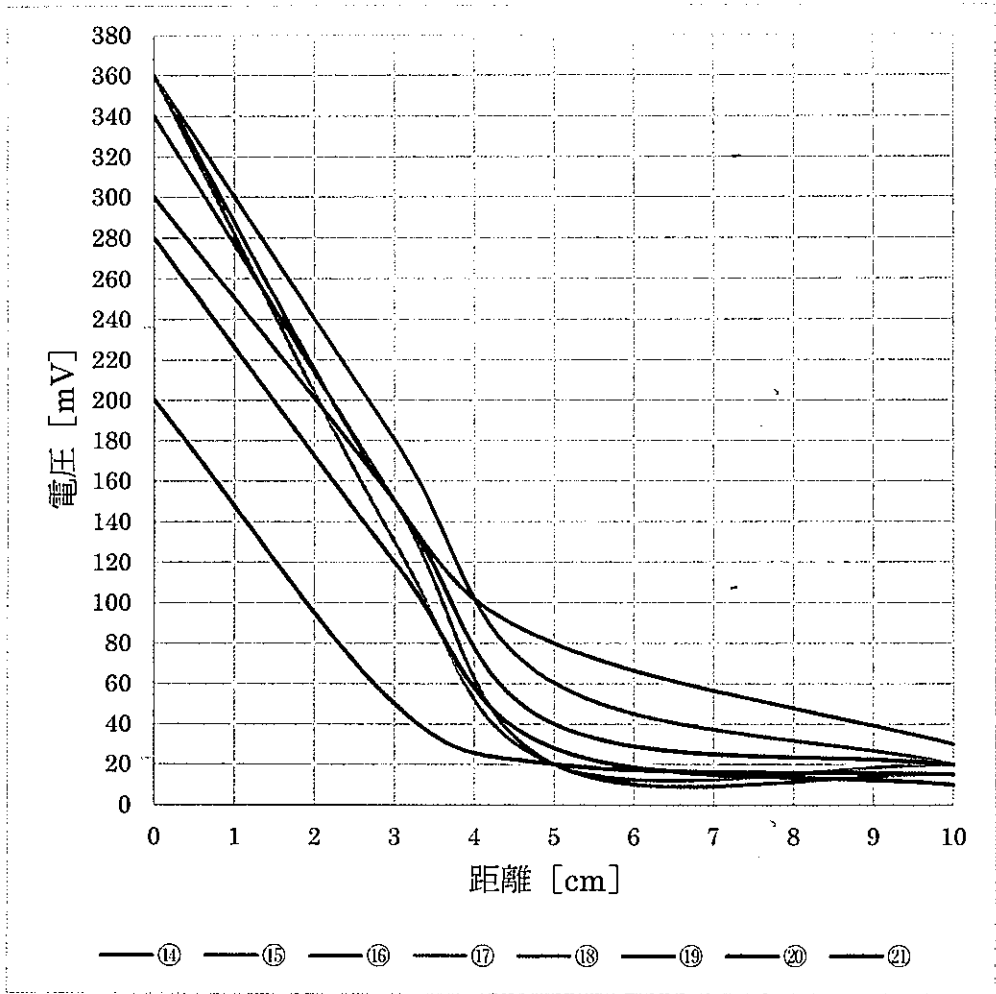


図 19 ACアダプタ

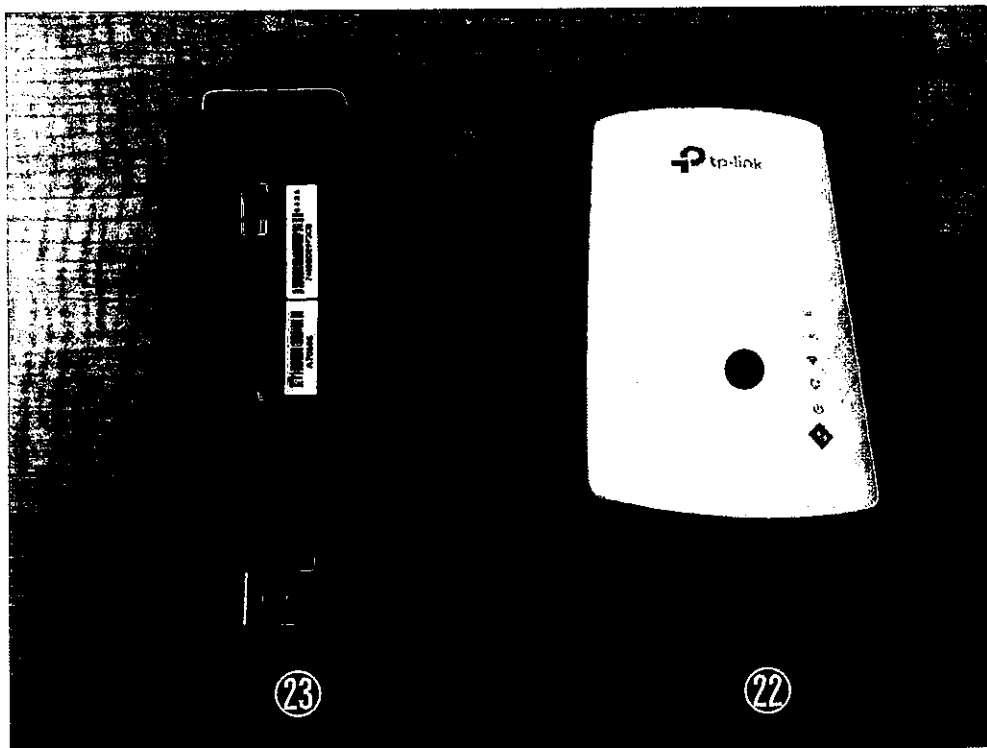


図 20 無線 LAN

表 7 無線 LAN

型番	0cm 電圧 [mV]	3cm 電圧 [mV]	5cm 電圧 [mV]	10cm 電圧 [mV]
②tp-link	300	180	100	40
③wli-utx-ag300	150	40	30	20

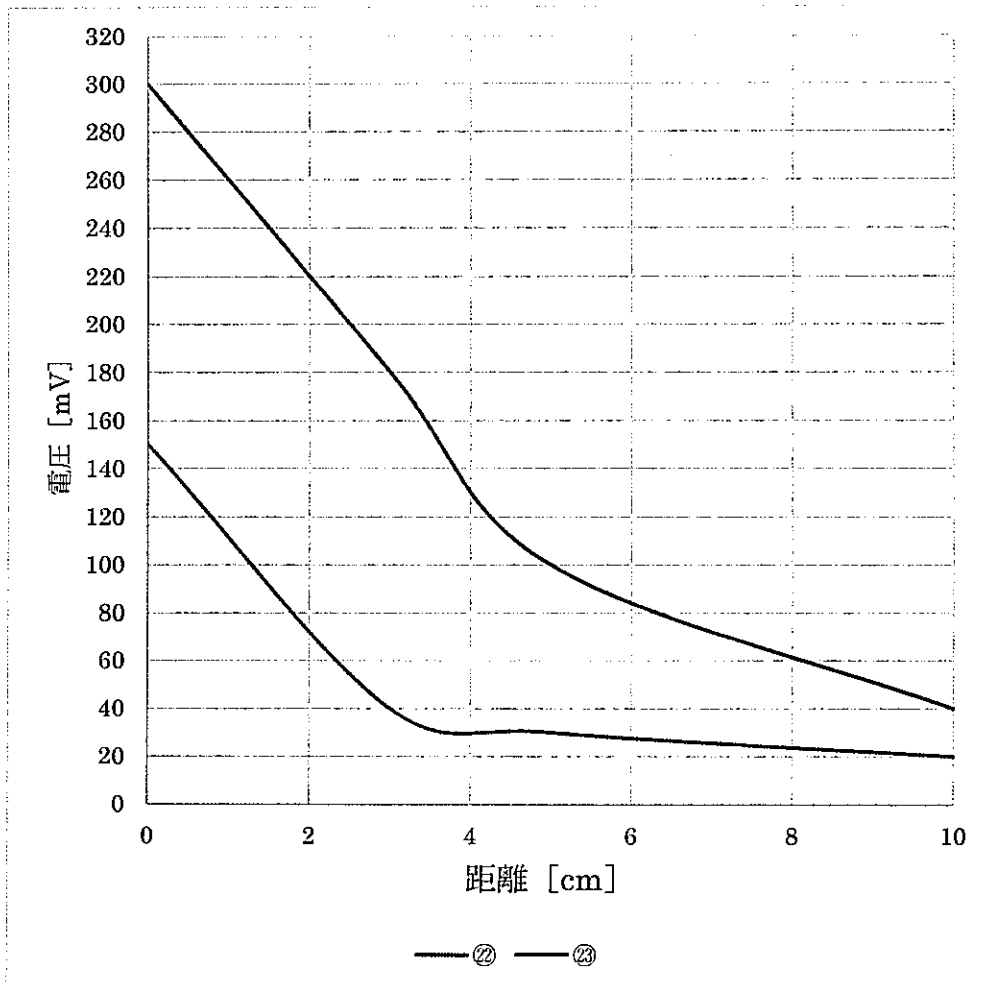


図 21 無線 LAN

第5章 結論

落雷による異常電圧・電流は電子機器への被害が出る。また、落雷の死亡事故や落雷に伴うゲリラ豪雨による河の氾濫などの自然災害の被害は甚大である。そこで、落雷位置標定が必要であり、分布・頻度などから雷害対策を取ることが必要である。しかし、一般の人が落雷の詳細なデータを入手することは困難である。そこで湘南工科大学では一般の人でも利用できる落雷位置標定ネットワークである Blitzortung.org を 2016 年 2 月から国内初導入し、その性能評価を行った。まず、磁界アンプの入力電圧と出力電圧の関係であるが、300mV までは直線性的関係があり、300mV 以上では入力に出力が比例しないことから、300mV までがゲインが有効な入力電圧であり、LP フィルタの測定では 300mV 以下が適当である。

次に LP フィルタによるノイズ除去を検証した。LP フィルタなしとありの場合の周波数特性を比較すると、低周波の特性は変わらず、高周波数の減衰がかなりの大きくなり、40~200kHz のノイズが取り除かれていることが分かった。これにより、ノイズが多い環境に受信機に設置した場合でも問題なく動作できるといえる。

次に磁界アンプの立ち上がり時間を検証した。入力立ち上がり時間と出力立ち上がり時間は直線性的関係があることがわかった。また 9 μ s で入力と出力が等しくなるため、9 μ s 以上であれば正しい落雷到達時間が記録できることが分かる。しかし、到来時間差法では、各受信局の受信時間の差から双曲線を描き、交点を標定点としており、全ての受信局が 9 μ s 遅れるため受信時間差は変わらない。よって、9 μ s 以下であっても、到来時間差法を利用している Blitz では LF 帯の空電を受信している商用の LLS に近い位置精度を有している可能性がある。

次に LLS に対して Blitz の標定数が少ない傾向にあるため、DeadTime の検証を行った。DeadTime は BLUE system では 8ms、RED system は 14ms である。多重雷は 40~80ms 間隔で起こることが多い。Blitz 各受信機の DeadTime は最大で 14ms であるため、受信機単体の試験からは Blitz の受信局は多重雷を捉えることができると推定される。

最後にノイズ源の測定を行った。磁界アンテナはノイズ源から離すことで、影響が少なくなるか実験を行った。まず、磁界アンテナからノイズ源であるコントローラボードの LAN アダプタ、GPS チップから 5cm 離して設置することで、0cm の場合より約 1/3 のノイズ量にできるといえる。また、5cm、10cm では 2mV であった。これは周囲のホワイトノイズである。また、AC アダプタは磁界アンテナから 10cm 離すことで、0cm に比べ全ての AC アダプタが 1/10 のノイズ量にできる。そして無線 LAN は磁界アンテナから 10cm 離すことで 0cm に比べ、全ての無線 LAN が 2/15 のノイズ量にできる。しかし、10cm 離れた場合でもコントローラボードに比べ、AC アダプタと無線 LAN はホワイトノイズにはならなかった。これは、0cm における電圧が高いことに起因していると推定される。実際の受信局ではノイズ源である AC アダプタ、無線 LAN、コントローラボードは磁界アンプ、フェライトアンテナから 10cm 以下の位置においてある箇所はないが、コントローラボードとノイズ源が 10cm 以下の距離にある受信局があり、標定に影響が出ている可能性がある。

以上から本研究では、Blitzortung の性能を受信機単体からの評価することができた。

今後の課題としてシステム全体の Dead Time の解明や全受信局でノイズ源から適切な距離を取ることを実現が考えられる。

参考文献

[1]天野 典『しくみを知れば真の波形が見えてくる デジタル・オシロスコープ実践活用法』

[2]Blitzortung_BLUE 技術書:

https://docs.google.com/document/d/1KzPZJW0ErInFtFTcmhNhSZTOpg6N2bgZDyIxxh_DRVs/pub?1518757778

[3]Blitzortung_RED 技術書:

http://www.blitzortung.org/Documents/TOA_Blitzortung_RED.pdf

[4]藤居文行 落雷データ統計解析

https://www.jstage.jst.go.jp/article/seisankenkyu/69/3/69_155/_pdf

使用機器

IWATSU DIGITAL OSCILLOSCOPE DS-5102B

NF MULTI FUNCTION GENERATOR WF1973

Blitzortung.org PCB19.3C

3. まとめと課題

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 2016 年 2 月に日本で初めて導入し、2018 年 2 月 20 日現在で全国やアジアに受信局を計 36 局設置することで全国展開を実施した。これにより、落雷に関する様々データを取得することが可能となった。

本研究では、今まで評価されていなかった Blitzortung システムの落雷位置精度の性能検討をする目的で、TEPCO の LLS の落雷データとの比較を行い Blitzortung システムの位置精度の評価を実施した。

その結果、LLS と Blitz の距離差平均は 1.4km であった。したがって、Blitzortung システムは従来の他システムとほぼ同等の性能を有している事がわかった。

また、観測装置の単体の性能評価を行った。性能評価のうち、落雷位置標定精度や個数に関係の深い、ノイズ、Dead Time、及び磁界アンプについて検証した。

まず、誤動作の原因となるノイズの検証を行った。AC アダプタは 10cm アンテナから離すことで、それぞれ約 1/10 のノイズになった。次に周囲のノイズをどの程度カットできるか確認するため、LP フィルタの検証を行った。LP フィルタにより、40~200kHz のノイズが取り除かれていることが分かった。よって、ノイズの多い環境において LP フィルタが有効であると言える。また、LP フィルタの検証にあたり、磁界アンプへの入力電圧は出力電圧と比例関係になっている 100mV を用いた。

次にシステムの不動作時間は標定数に大きく影響を与えるため、Dead Time の検証を行った。Dead Time は受信機単体の試験からは Blue System では 8ms、Red System は 14ms であった。多重雷は 40~80ms 間隔で起こることが多いため、受信機単体の試験からは Blitzortung.org の受信局は多重雷を捉えることができると推定される。

最後に、正しいトリガー時間が記録できているか確認するため、磁界アンプの立ち上がり時間を検証した。その結果、9 μ s 以上であれば正しい落雷到達時間が記録できることが分かった。なお、到来時間差方式では、9 μ s 以下であっても全ての受信局が同様に遅れた時間を記録するため、時間差は変わらない。よって到来時間差法を利用している Blitzortung.org では LF 帯の空電を受信している商用の LLS に近い位置精度を有していると推定される。

以上のことから Blitzortung.org は、商用の落雷位置標定システムと同様に電子機器への影響対策、気象防災防止のツールとして役立つシステムだと言える。Blitzortung の落雷情報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などの防災対策や雷害対策に役立つことを期待する。

今後は、Blitzortung で受信する磁界波形から落雷の電荷量を推定する手法の検討や日本独自のアルゴリズムによる落雷標定の位置精度の向上が期待される。

本研究のまとめと課題を下記に示す。

まとめ

(1) 全国展開

2016年2月に日本で始めて Blitz を導入してから、約2年間で全国32箇所に受信局を展開した。JLDNの全国展開が約11年かかったことに対して、約5倍のスピード展開であった。

(2) 単体特性

受信局単体のデッドタイムおよびアンプ特性を測定した結果、LLSが1msに対して、8msであった。これは、各ストロークを標定出来る性能であった。

(3) 位置精度

TEPCOのLLSとの位置標定精度を比較した結果、1.4kmの精度が得られた。

課題

(1) 精度向上

デフォルトでは、1.4kmであったが、下記の検討を実施することにより、さらなる精度向上が期待できる。

- ・位置精度の向上には、受信局を増やす。
- ・近距離の標定のためには、アンプのゲインを減らした受信局を設置する。
- ・独自標定のためには固定IPサーバーおよび独自プログラムを構築する。
- ・波形の評価が必要であるが、現在は保存機能がないため、サーバーおよびプログラム作成を構築する。

(2) デッドタイム

デッドタイムを減少するためには、アンプのゲインを高/低にした2つのシステムを運用することにより、可能と考えられる。

(3) 検索機能

- ・現在は、リアルタイムの地図表示は出来るものの、過去のデータを検索する機能は非常に貧弱であり、送電線事故との照合は困難である。

解決方法は、サーバーを立ち上げて、データをダウンロードするプログラムおよび検索プログラムを構築することである。

(4) 装置のメンテナンス

初期の装置は、防水加工、ノイズ対策、ノイズフィルタ非設置、など課題が多い。少しずつ改良した経緯があり、初期型の装置を改良する必要がある。

また、モバイルルーターを使用している箇所もあり、維持費用がかかっている。

さらに、設置から2年足らずであり、今後どのような箇所に不具合が出るか不明であり、様子を見る必要がある。

以上