

令和元年8月19日

研究報告書

課題名：ICT技術を活用した高精度・低コスト型落雷位置標定システムによる気象災害防止に関する研究

研究代表者：成田知巳

所属機関名：湘南工科大学

研究期間：平成30年6月3日 ～ 令和1年6月2日

第1章 落雷標定システムによる落雷観測

1.1 研究背景

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、磁界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の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、IT 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、IT 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」を開始した。(以下、Blitz と称する) 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。

本プロジェクトで使用する受信局は IT 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。

Blitz では、落雷位置を始め、観測された磁界波形や一定期間ごとの落雷数などの落雷に関する詳細なデータを取得することができる。また、それらの情報は WEB 上に公開されている。

1.2 研究目的

湘南工科大学では、日本でいち早くこのネットワークに注目し、2019 年 6 月までに受信局を全国 40 か所に設置し、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、落雷の災害防止や被害低減に貢献している。落雷は集中豪雨や竜巻と同じ積乱雲で発生するため、落雷および気象レーダー情報を組み合わせることにより、アジア圏の気象災害の直前予測が可能となると期待されることから、アジアのエリアに拡大することにより、減災に役立てることを目的とする。

1.3 雷の概要

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。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。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。落雷の4つの種類を図1.1に示す。

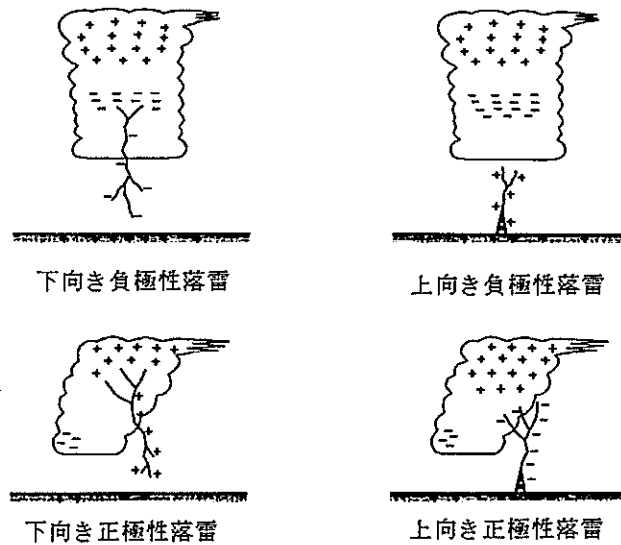


図 1.1 落雷の種類

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リーダーという。ステップリーダーは $10^5 \sim 10^6$ (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、ステップリーダーが生じ、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。

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。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 に亘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。

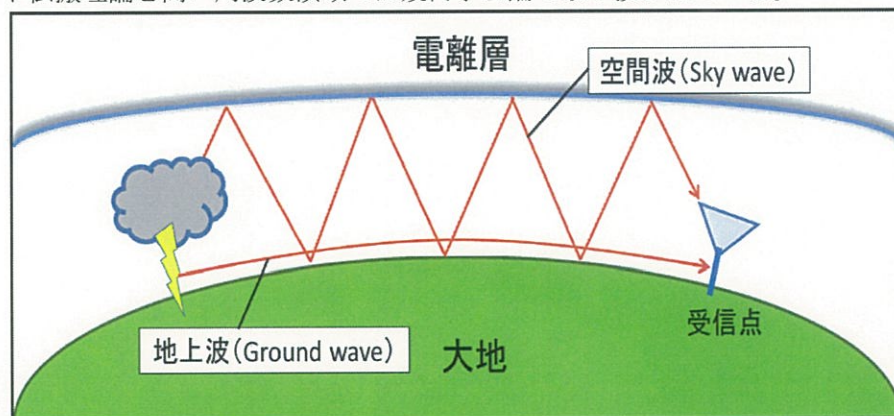


図 1.2 大地-電離層導波管伝搬の模式

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。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。

1.5 雷放電位置標定の概要

1.5.1 MDF 方式・TOA 方式

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、交合法 (MDF: Magnetic Direction Finding) と到来時間差法 (TOA: Time of Arrival) がある。図 1.3 に交合法と到達時間差法の概略図を示す。交合法は 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。

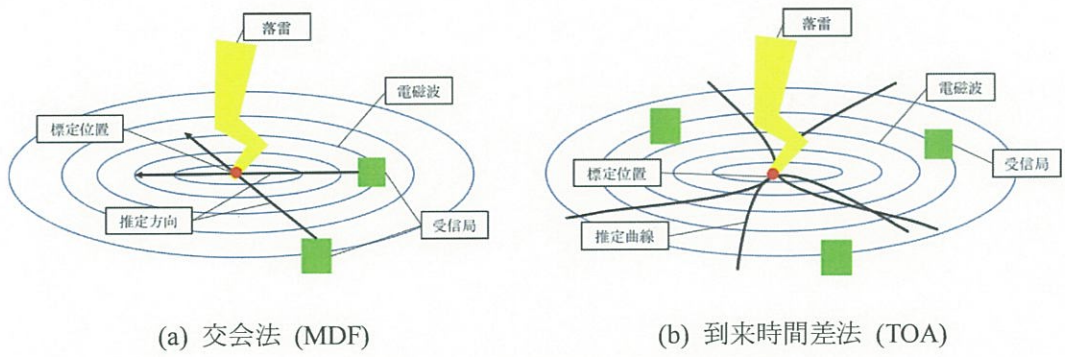


图 1.3 雷放电位置标定手法

1.5.2 LLS 方式

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。

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。

LF 帯を用いた雷放電位置標定システムに国内では、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。なお、このサービスの利用料金は過去の落雷調査や落雷マップで 10,000~20,000 円。リアルタイムの落雷情報は有料で入手可。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 31 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。なお、航空会社などへリアルタイムの落雷情報を有料で提供している。

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。

1.6 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。

「Blitzortung.org」では、サーバ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、設置し、ネットワークに接続する事により、雷放電位置標定システムを構築している。

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。2019年6月までに、名寄市、北見市、札幌市、苫小牧市、仙台市、石巻市、酒田市、いわき市、那須塩原市、宇都宮市、藤岡市、白岡市、さいたま市、東村山市、清瀬市、文京区、中央区、千代田区、父島、横浜市、大和市、藤沢市、千葉富里、千葉柏、湯河原町、富士山、新潟市、珠洲市、かほく市、小諸市、京都市、尼崎市、三木市、三原市、出雲市、高知市、北九州市、八女市、鹿児島市、沖縄の合計40局の受信局を設置した。これらの受信局の展開場所のマップを図1.4に示す。これまでは、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。また、東南アジア周辺にも設置を進めている。タイ、グアム、カンボジア、インド、モンゴル、バングラデシュ、ベトナム（ホーチミン大学）、ベトナム（ダナン工業大学）、ベトナム（ハノイ工業大学）、フィリピン、ハワイの合計12局の設置を行った。これらの受信局の展開場所のマップを図1.5に示す。この地域は落雷数が多いが、これまで受信局がなかったため標定がされていなかった。東南アジア地域に受信局が展開されることでアジア地域での標定数、標定精度共にさらなる向上が期待できる。

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、ドイツのサーバに送られ、サーバ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、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。



図 1.4 日本国内の受信局展開状況



図 1.5 アジア地域の受信局の展開状況

1.6.1 Blitz の雷放電位置標定手法

Blitz 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 10ns 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。2018年2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、m_{ds} (maximum deviation span) と m_{cg} (maximum cycle gap) という2つのパラメータを用いて標定精度を向上させている。m_{ds} 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 m_{ds} 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。Blitz では、15000m 以上のものは標定しない設定にしている。次に、m_{cg} 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 m_{cg} 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。Blitz では、270 以上のものは標定しない設定にしている。図 1.6 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。

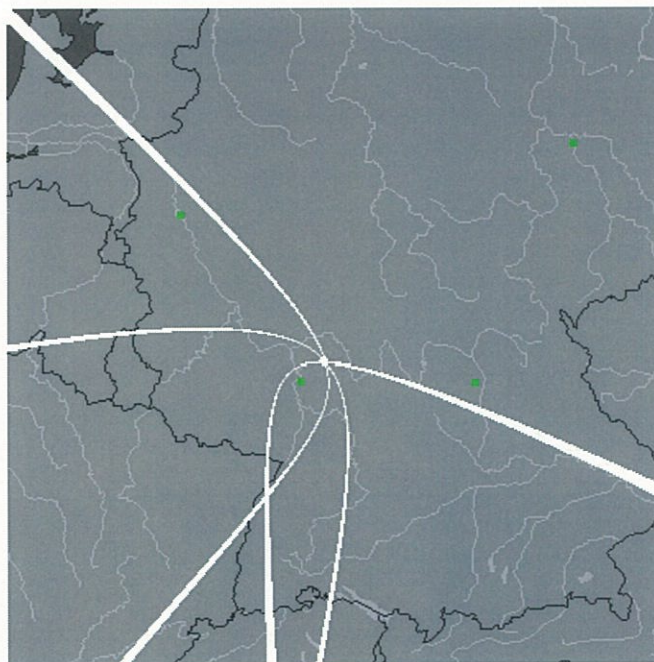


図 1.6 雷放電位置標定の双曲線

第2章 観測装置の概要

図 2.1 は受信局の前面の写真である。全面にはインジケータ LED があり、受信局の状態を点灯・消灯・点滅で把握することができる。図 2.2 の受信局背面の写真では、左からネットワーク端子・GPS 端子・磁界アンテナ用端子・アース端子・電界アンテナ用端子・電源端子となっている。



図 2.1 Blitz(blue)の筐体（前面）



図 2.2 Blitz(blue)の筐体（背面）

この受信機に接続する GPS と磁界、電界アンテナを図 2.3 に示す。左から

GPS アンテナ、磁界アンテナ、電界アンテナとなっている。接続には GPS アンテナが SMA コネクタ、磁界アンテナはシールド LAN ケーブル、電界アンテナは同軸ケーブルで受信機と接続される。



図 2.3 受信機に接続するアンテナ

第3章 Blitzortung 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 年と 2018 年に Blitzortung が観測した落雷分布図を図 3.1 に示す。2017 年は新潟県沖、栃木県、岐阜県で多くの雷を観測し、 1 km^2 あたり 1 個であった。2018 年は能登半島から新潟県沖、栃木県、山梨県東部から群馬県高崎市にかけて、岐阜県で多くの雷を観測し 1 km^2 あたり 1 個であった。

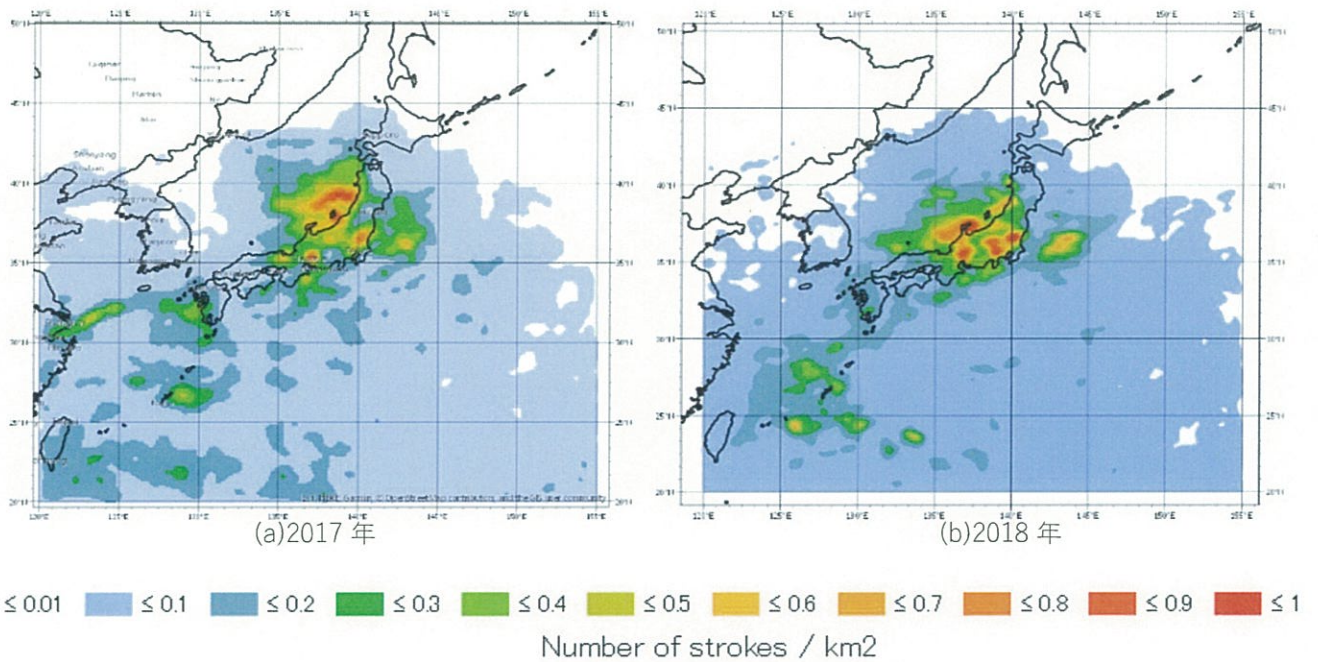


図 3.1 日本の落雷分布図

3.1.2 バングラデシュの落雷分布

バングラデシュにおける2017年と2018年1月1日～6月30日にBlitzortungが観測した落雷分布図を図3.2に示す。この時点においては、バングラデシュ周辺に雷観測装置はないため、欧州から7200km、日本から5000km、オセアニアから7000kmの遠方にある受信局から算出した落雷位置データであるので観測数が少ないと考える。2017年ではバングラデシュの南東部のチッタゴン丘陵に雷が多く観測された。次に2018年1月1日～6月30日までの半年間の落雷密度マップを示す。インド・アッサム州のブラマプトラ谷およびバングラデシュ沿岸で雷活動が活発であった。このような落雷分布のデータはこれまでに無かったことから、新規性の高い知見を得ることが出来た。

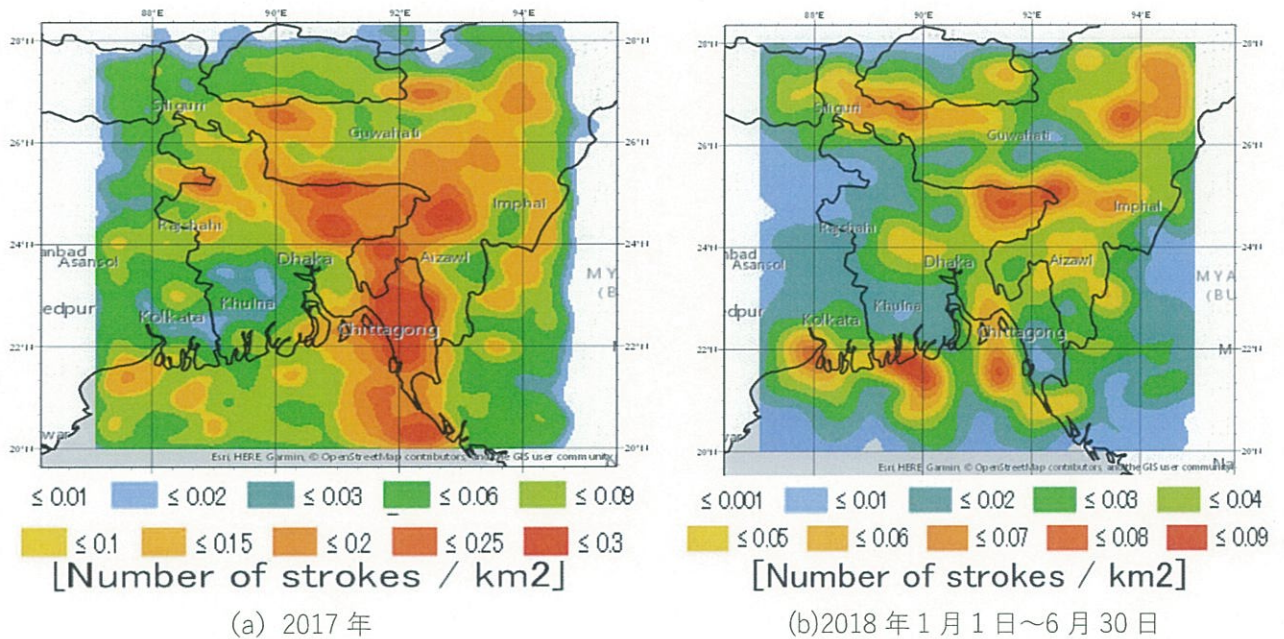


図3.2 Blitzortungが観測したバングラデシュの落雷分布図

3.1.3 インドの落雷分布

インドにおける 2017 年に Blitzortung が観測した落雷分布図を図 3.3 に示す。この時点においては、インド周辺に雷観測装置はないため、欧州から 6500km、日本から 6000km、オセアニアから 8000km の遠方にある受信局から算出した落雷位置データであるので観測数が少ないと考える。インド南東の沖に雷が多く観測された。

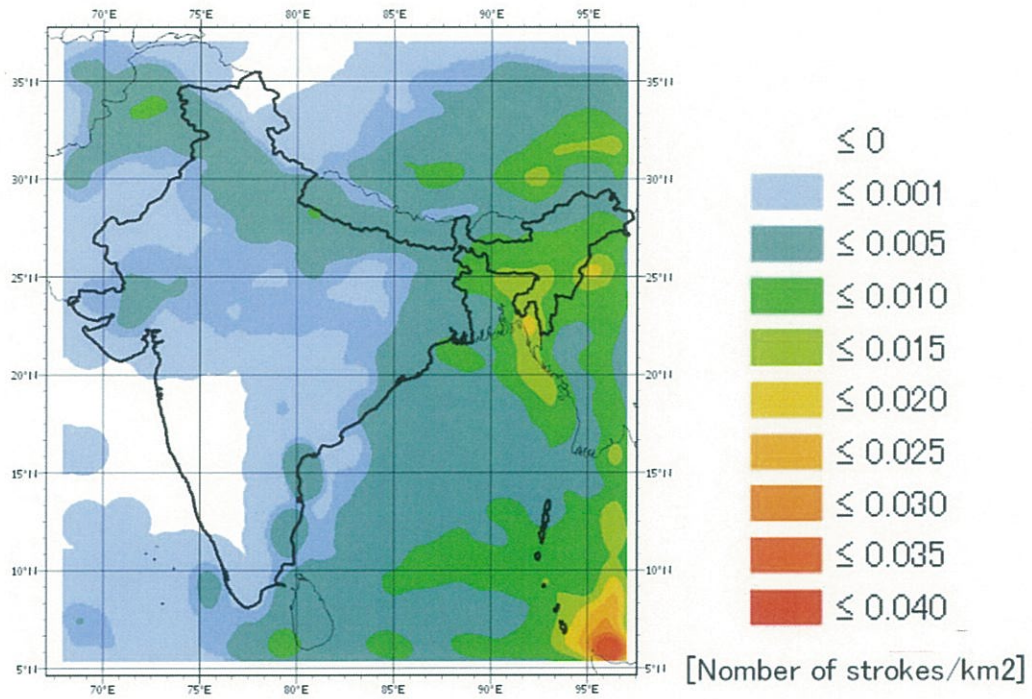


図 3.3 Blitzortung が観測したインドの落雷分布図 (2017)

3.1.4 カンボジアの落雷分布

カンボジアにおける 2017 年に Blitzortung が観測した落雷分布図を図 3.4 に示す。この時点においては、カンボジア周辺に雷観測装置はないため、欧州から 9000km、日本から 4500km、オセアニアから 5000km の遠方にある受信局から算出した落雷位置データであるので観測数が少ないと考える。カンボジア南の沖に雷が多く観測された。

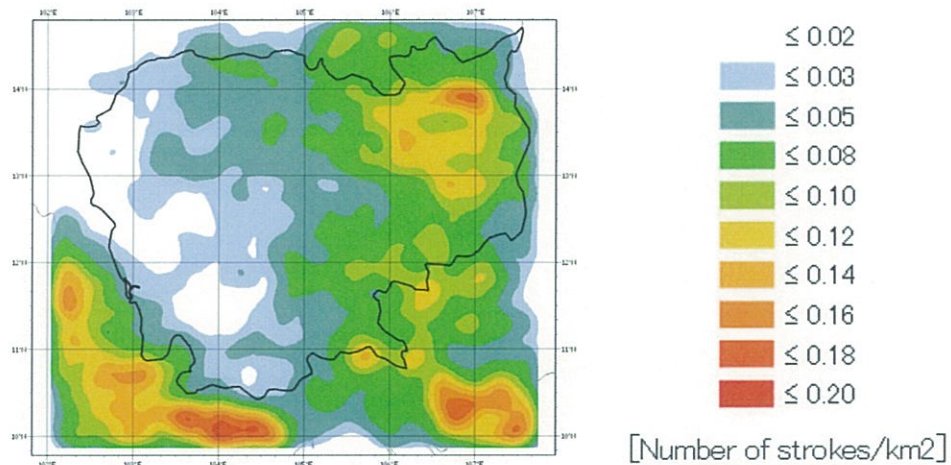


図 3.4 Blitzortung が観測したカンボジアの落雷分布図 (2017)

3.1.5 オーストラリアの落雷分布

オーストラリアにおける 2017 年に Blitzortung が観測した落雷分布図を図 3.5 に示す。オーストラリアの北部、東海岸とその沖の海域に雷が多く観測された。

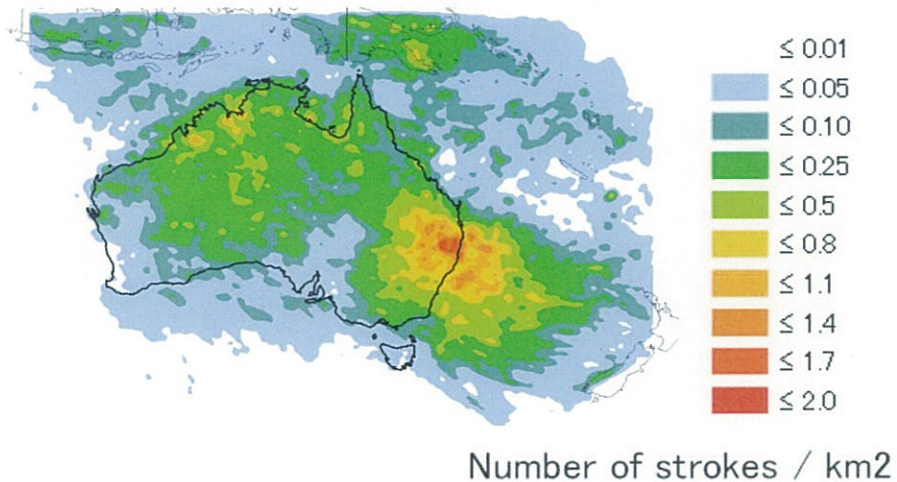


図 3.5 Blitzortung が観測したオーストラリアの落雷分布図 (2017)

3.1.6 アメリカの落雷分布

アメリカにおける 2017 年に Blitzortung が観測した落雷分布図を図 3.6 に示す。アメリカのテキサス州では雷観測が多く、1km²あたり 6 個観測している。

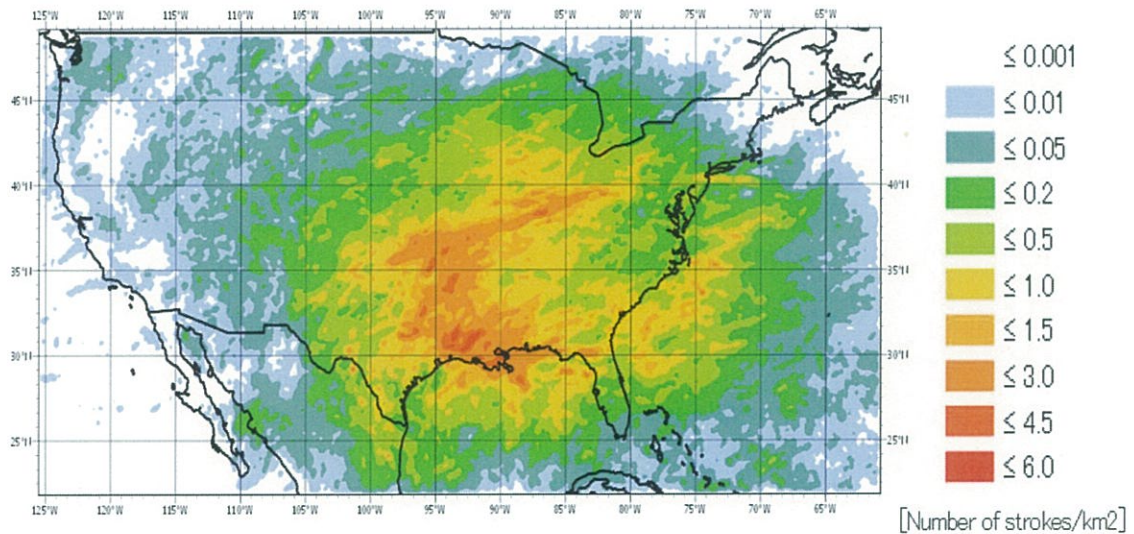


図 3.6 Blitzortung が観測したアメリカの落雷分布図 (2017)

3.2 緒言

本章では、Blitzortung の落雷位置標定結果から地域ごとの落雷分布図を作成し、傾向を評価した。日本の落雷分布図からは新潟県沖、栃木県、岐阜県に雷が多い傾向があることが分かった。

次にアジアに Blitzortung を設置したことにより、欧州、日本、オセアニア地域の Blitzortung だけでは観測できなかつた雷観測ができるようになり、落雷分布図を作成することによって傾向が分かった。

今後は、より多くの Blitzortung 受信局を設置することによって、雷の多いアジアの落雷分布をより詳細に観測する必要がある。

第4章 まとめと課題

安価で高精度な落雷位置標定システム（Blitzortung）をインドやバングラデシュなどアジア各地に導入した結果、落雷位置データをリアルタイムかつ無料で提供できるようになったことから、気象災害の減災が期待される。また、年間落雷マップの作成によって、危険度が分かることから、効率的な災害防止対策の一助となることが期待される。

今後は、Blitzortung の受信局をインドやバングラデシュ周辺に増やすことにより、より精度の高い落雷位置データを提供する予定である。また、落雷データと気象データおよび災害データと比較検討することにより、より効率的な災害防止が期待される。

以上