

修士論文

地上静電場観測網による積乱雲内部の電荷構造推定

北海道大学大学院理学院

宇宙理学専攻

野口 陸人

(指導教員 高橋 幸弘 教授)

平成 31 年 2 月 1 日提出

要旨

背景と目的

発達する積乱雲における激しい気象擾乱は水平方向の対流セルのスケールが 5-10 km、時間スケール 30-60 min と小さいために、その活動を把握するには、現行のアメダスや気象レーダー観測網の時間・空間分解能は必ずしも十分とはいえない。対流活動は雲内の電荷の空間分布およびその移動に反映されると考えられるが、その詳細な関係については明らかになっていない。本研究では、雷放電による地上における鉛直準静電場の変化の多点観測を行い、その水平分布の情報を使って、積乱雲内で移動した電荷の立体的な空間分布およびその電荷量を推定することを試みる。

先行研究として、フィールドミルによる多地点観測 (Workman et al., 1942; Jacobson and Krider, 1976) が挙げられるが、この手法では観測器の価格およびメンテナンスの点で大規模な観測網の展開は困難であると考えられる。また、容量性アンテナを用いた観測 (Krehbiel et al., 1979; Baranski et al., 2012) においては、観測機器は安価であるものの観測地点間の感度のキャリブレーションが困難であり、電荷推定の精度に問題がある。これらの問題を解決するためには、安価で簡便かつ、観測地点間の感度校正が可能な高精度の電荷構造推定法を確立する必要がある。

本研究は、ULAT (Understanding Lightning and Thunderstorm) プロジェクトの一環として行っている。本プロジェクトは、東南アジア等を中心に大規模な災害を引き起こす雷雨や台風による降雨の、高精度な活動把握および予測を目指すものである。本研究では、フィリピン・マニラ首都圏 50 ヶ所に約 5km 間隔で設置予定のプレート型電場センサー観測網による静電場観測の有効性を検証することを目標とする。

多地点観測のシミュレーション

P-POTEKA の設置が完了している 6 か所 (2019 年 1 月 25 日現在) での観測を想定し、仮想の落雷データを用いて、観測値から真の値を導出することが可能であるかのシミュレーションを行った。落雷に関する全てのパラメータ (観測地点の相対感度、落雷の電荷量、高度、水平位置) が未知であると仮定した状態から計算を行うのが理想的であるが、未知数が多くなるにつれてコンピュータでの計算にかかる時間が膨大になってしまったため、本研究では観測地点の相対感度、あるいは落雷の水平位置のどちらかが既知であると仮定したうえで、最小二乗法を用いたフィッティングを行い、未知のパラメータを算出した。

結果

全ての静電場変化量の観測値 ΔE には $\pm 20\%$ 以内のランダムノイズが乗っているものと仮定して計算を行った。

相対感度が既知と仮定した場合、電荷量 Q は 3% 程度の誤差、高度 h は 7% 程度の誤差が生じ、また水平位置の誤差は ~ 300 m 程度であった。ランダムノイズの大きさを考慮すると、この推定方法は十分有効であると考えられる。

落雷発生位置が既知の場合、電荷量 Q は 12% 程度の誤差、高度 h は 10% 程度の誤差が生じた。また、相対感度の誤差は最大で 22% となった。ランダムノイズの大きさに対して、相対感度の誤差はやや大きい。本研究ではコンピュータの計算速度の都合もあり、多くの落雷を観測した場合の推定値を求めることはできなかったが、観測する落雷のデータの数を増やすことができれば推定値の確度を高めることができると考える。

相対感度・落雷発生位置がともに未知である場合に、今回求めたような推定値にどの程度の影響が生じるかについては、追って検証する必要がある。

また、実際の観測において ΔE にどの程度のノイズが生じるかは現時点では不明である。落雷の各パラメータおよび観測地点の相対感度推定の確度に大きく関わる点であるため、実際の観測データを用いた計算結果を得ることが今後の課題である。

まとめ

上記のシミュレーションにおいて真の値から大きくずれた結果は出ず、用いた推定方法は有効なものであると考えられる。確度の検証に関しては更なる実験・検討が必要であるが、今後の大規模静電場観測網による雷放電観測に向けて、容量性アンテナを用いた静電場観測から各パラメータの推定が可能であることを示すことができた結論づける。

謝辞

指導教員の高橋幸弘教授には、研究に対する姿勢や取り組み方、不調との向き合い方など様々な面でご指導を頂きました。しばしばご迷惑をお掛けしたであろうことを申し訳なく思っておりますが、要領が悪く、作業の遅い自分に粘り強く指導して下さいたことに感謝いたします。

また惑星宇宙グループの皆様には、セミナーや学会発表など多くの場面において助言を頂いたり、分からないことを教えて頂きました。皆様に感謝の意を述べ、謝辞とさせていただきます。

2019年2月1日

野口陸人

目次

要旨	i
謝辞	iii
目次	iv
第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 雷雲の電荷分離機構と電荷構造	2
1.3 対流活動と雷放電頻度・雲内の電荷構造	3
1.4 雷放電による静電場変化	7
1.4.1 雷雲がつくる静電場	7
1.4.2 静電場観測器	9
1.4.3 中和電荷の位置および電荷量の推定原理	11
1.5 ULAT プロジェクト	13
1.6 目的	14
第2章 解析手法の開発	15
2.1 観測システム概要 (ULAT)	15
2.2 想定される観測波形	17
2.3 落雷時の移動電荷量・位置の推定	18
2.4 感度校正	19
第3章 観測のシミュレーション	20
3.1 事例解析	20
3.2 考察	27
第4章 結論	28
4.1 結論	28
4.2 展望	29
参考文献	30

第1章

序論

1.1 背景

落雷やスコールなど、急速に発達する積乱雲に伴う激しい気象擾乱は深刻な社会問題であり、それらの検知および予測を行うことは重要な課題である。急速に発達する積乱雲においては、水平方向の対流セルのスケールが 5-10 km、時間スケール 30-60 min と小さいために、その活動を把握するには、アメダス観測網の密度（約 17 km メッシュ）では不十分である。

対流セル内の気流を捉えるために現在用いられているものとして、気象レーダーが挙げられる。気象庁が用いている C バンド (4-8 GHz) レーダーは、雨粒に当たり反射された水平電波の強度から降水強度を算出するものであり、半径 120 km という広範囲内の降水強度を捉えることが可能である。一方で空間分解能は 1 km メッシュ、時間分解能は 5 分と粗く、また、反射した電波の強度から降水強度を求めるためのパラメータは雷雨や台風などの降雨タイプによって異なるため、地上雨量計での補正が必要であり、観測から情報発信までに 5~10 分のタイムラグが発生するという短所がある。

これに対し、X バンド(8-12 GHz)レーダーは雨滴の形状の計測から雨量を推定するものであり、空間分解能 250 km メッシュ、時間分解能 1 分と、C バンドレーダーよりも高い時間・空間分解能による観測が可能である。また、地上雨量計での補正が不要であるため、観測から情報発信までのタイムラグが 1~2 分程度と短いのも利点である。一方で、降雨減衰の影響を受けやすく、観測範囲が半径 60 km 程度と狭いのが難点である。

対流セルの発生および発達を観測し、気象擾乱の検知と予測を行うためには、高い時間・空間分解能を持つ観測対象および観測網の確立が必要である。

1.2 雷雲の電荷分離機構と電荷構造

雷雲内での電荷分離機構の中で現在最も有力視されているのが、着氷電荷分離機構である。これは、温度と雲水量によって霰と氷晶の帯電量と符号が変化するという仮説である。雷雲の発達期では、雲頂（ -30°C 付近）で負の霰・正の氷晶に電荷分離し、成熟期になると、下層（ -10°C 以下の領域）で正の霰、負の氷晶に電荷分離する。上層から落下してくる負の霰と下層から吹き上げてくる負の氷晶により、 -10°C 付近の領域に負電荷が集積し、積乱雲の上部から順に正、負、正の三重極構造が形成される。このようにして蓄積された電荷が大気中の絶縁破壊強度を超えたとき、放電が発生する。また、成長した氷晶は自らの重さで落下し、強い降雨が生じる。

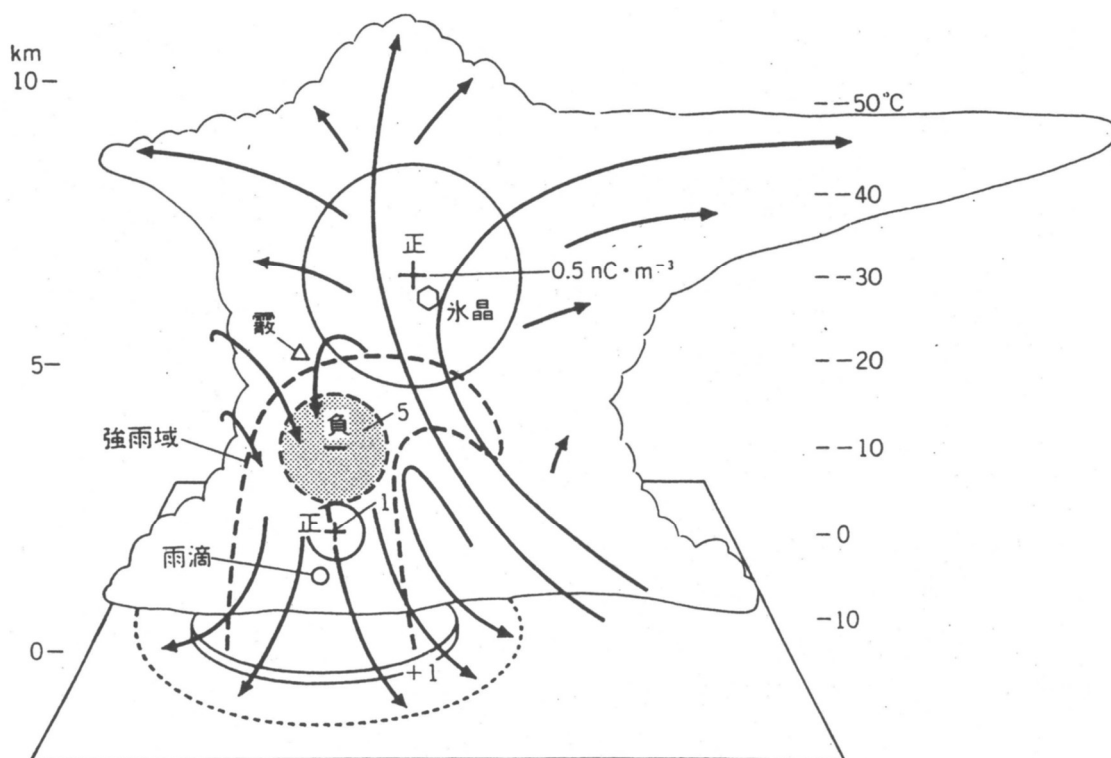


図 1.1 雷雲内の空間電荷分布。 -10°C 付近に強い負電荷の集積が起こる。

(https://www.metsoc.jp/tenki/pdf/2004/2004_01_0007.pdf)

1.3 対流活動と雷放電頻度・雲内の電荷構造

雲内の様々な対流活動パラメータと雷放電頻度の関係性は、これまで多くの研究により指摘されている。例として、降水量と雷放電頻度の比較(Piepgrass et al., 1982)、降水強度および霰の質量と雷放電頻度の比較(Carey and Rutledge, 2000)の2つを紹介する。このほかにも、レーダーエコーの発達と雷放電頻度(Brown et al., 2002)や、風速と雷放電頻度(Williams et al., 1989)の比較を行っている先行研究があり、いずれも対流活動パラメータと雷放電頻度の間に強い相関があることを示しており、雷放電頻度は対流活動の指標となることが明らかになっている。

一方で、雷放電頻度の観測においては、放電の電荷量は考慮されていない。雷放電により中和される電荷量は数 C から数百 C と幅広く、それを加味した対流活動の指標を確立することが重要である。

●降水量と雷放電頻度の比較(Piepgrass et al., 1982)

図 1.2 はフロリダの孤立雲を対象に、ケネディスペースセンターに設置してある電場観測網で捉えられた 5 分ごとの雷放電頻度と降水量の観測結果である。雷放電は降水に数分先行して生じていることが明らかになった。

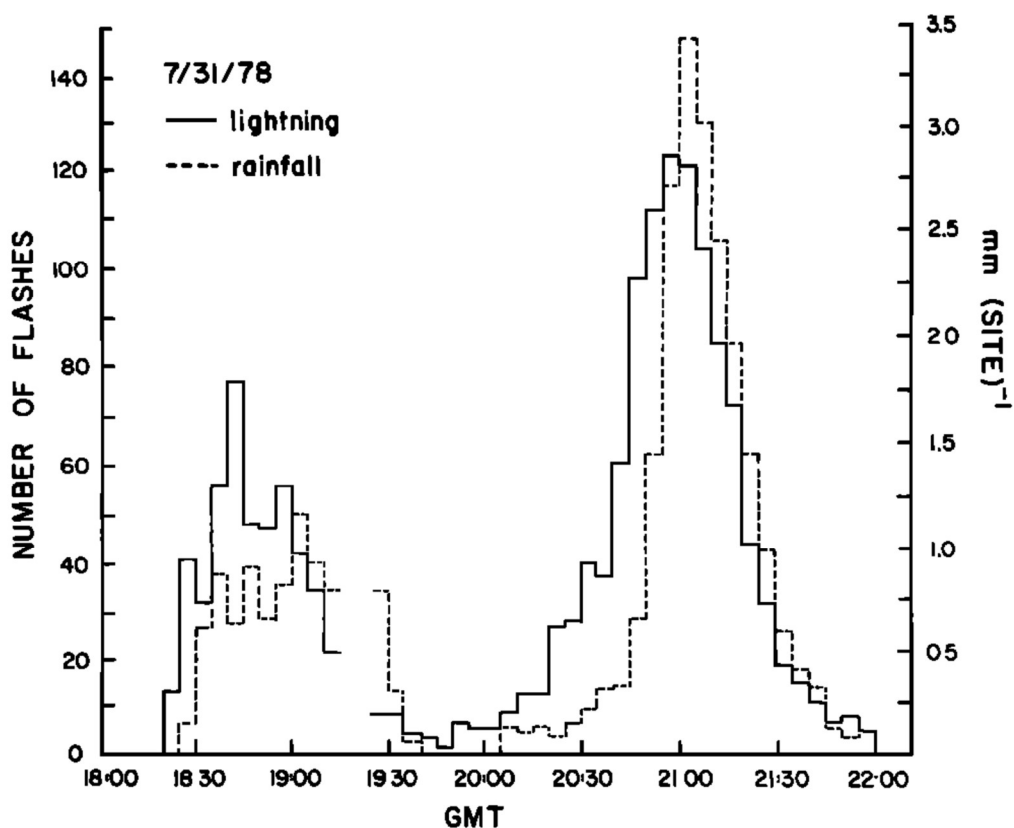


図 1.2 5 分ごとの雷放電頻度と降水量の比較(Piepgrass et al., 1982)。実線が雷放電頻度、点線が降水量である。

●降水強度および霰の質量と雷放電頻度の比較(Carey and Rutledge, 2000)

図 1.3 はスーパーセルを対象に、偏波レーダーから求めた雲内の霰の質量、降水強度、対地雷の放電頻度の比較である。霰の質量と対地雷放電頻度が良い一致を示すことが明らかになった。

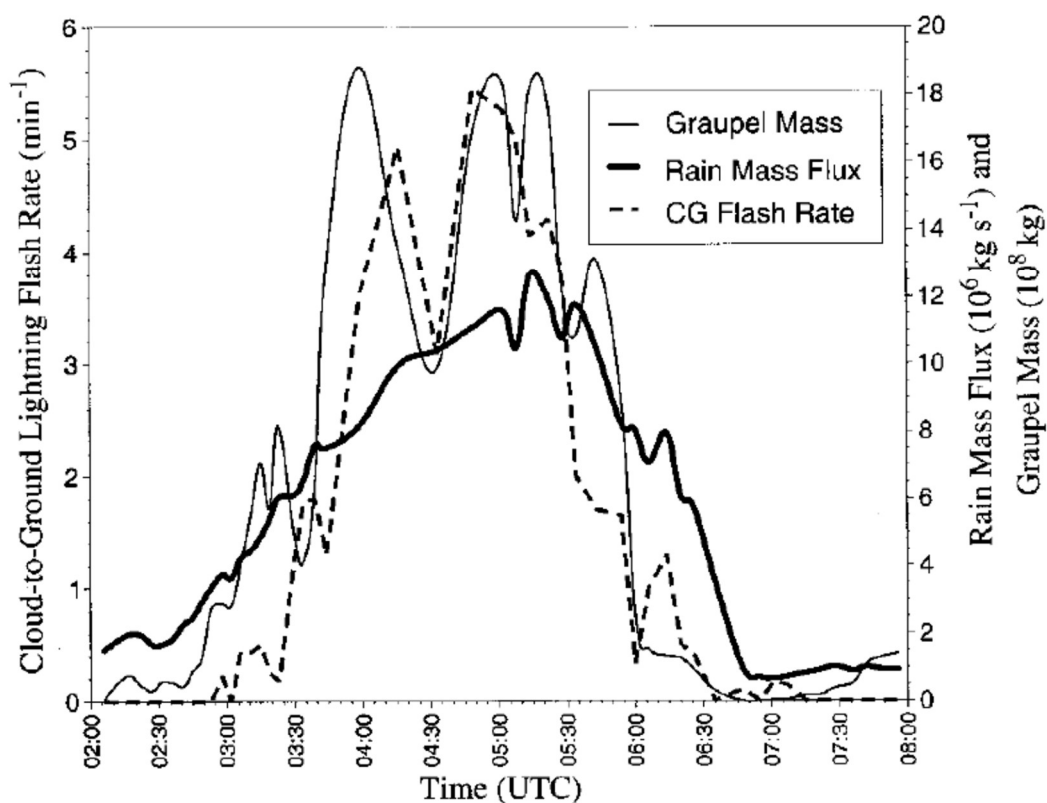


図 1.3 雲内の霰の質量（細実線）と降水強度（太実線）、対地雷放電頻度（点線）の比較(Carey and Rutledge, 2000)。

前述したとおり、対流活動パラメータと雷放電頻度を比較した研究は多く見られるが、一方で対流活動と雲内の電荷構造の関係について検証した研究は少ない。発達する積乱雲における激しい気象擾乱は水平方向の対流セルのスケールが 5-10 km、時間スケール 30-60 min と小さいために、その発達を追うことのできる高密度の観測網がないことが理由の1つと考えられる。

この問題を解決するための新たな観測網として、本研究では静電場観測網を想定する。蓄積された雲内の電荷は、雷放電や降水によって解消される。雷放電時に発生する静電場変化を観測することにより、解消される電荷の位置と大きさをそれぞれ見積もることが可能となる。それにより積乱雲内の電荷の空間分布および電荷量を明らかにし、対流活動との関係を明らかにするための基礎をつくるのが本研究の狙いである。

1.4 雷放電による静電場変化

1.4.1 雷雲がつくる静電場

雷雲によってつくられる電場は、単純化した場合、双極子がつくるそれと同じものになる。実際の雷雲内には点電荷が複数存在すると考えることができるので、ひとつひとつの点電荷がつくる電場を重ね合わせたものが雷雲のつくる電場となる。

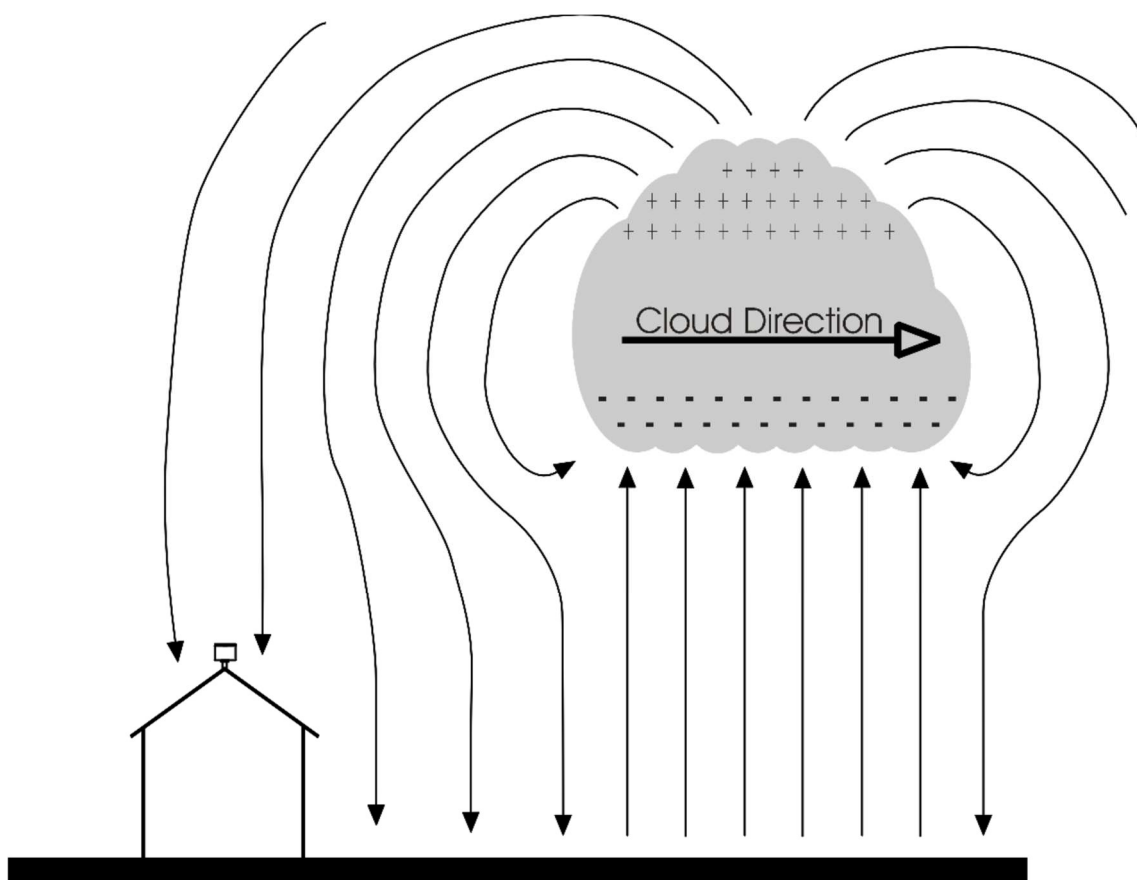


図 1.4 雷雲がつくる電気力線(https://www.boltek.com/EFM_Manual_050205.pdf)

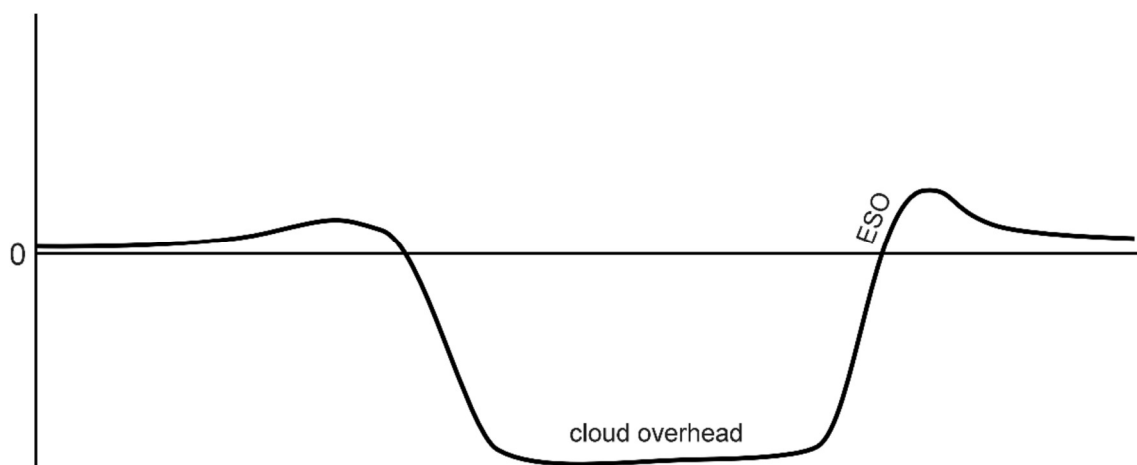


図 1.5 雷雲が接近した際に観測される静電場。縦軸が鉛直静電場、横軸が時間経過。
(https://www.boltek.com/EFM_Manual_050205.pdf)

1.4.2 静電場観測器

静電場観測に用いられる機器として、容量性アンテナおよびフィールドミルが挙げられる。それぞれの観測周波数は、容量性アンテナのうちスローアンテナと呼ばれるものは0.1 Hz-10 kHz、ファストアンテナと呼ばれるものが0.1 kHz-10 MHzであり、フィールドミルはDC-1 kHz程度である。

●容量性アンテナ

容量性アンテナには、先述した通り観測周波数帯によって2種類に大別される。時定数が $RC > 1\text{ s}$ のものをスローアンテナ、 $RC < 1\text{ ms}$ のものをファストアンテナと呼ぶ。主にスローアンテナは1フラッシュ全体の電場変化を観測するために用いられ、ファストアンテナは放電現象の短い時間スケールを観測するために用いられる。測定原理としては、金属平板を地表面と水平に設置し、平板と大地の間に大きな静電容量を持ったコンデンサを高抵抗と並列に接続し、コンデンサ両端の電圧より外部電場を求める。

容量性アンテナは安価かつ製作・メンテナンスが簡便であるという利点を持つ。一方、接地の状態が観測値に影響を与えるため、同じ装置でも観測点ごとに感度が異なってしまうという欠点があり、これが容量性アンテナを用いた観測網による静電場観測を難しくしている。

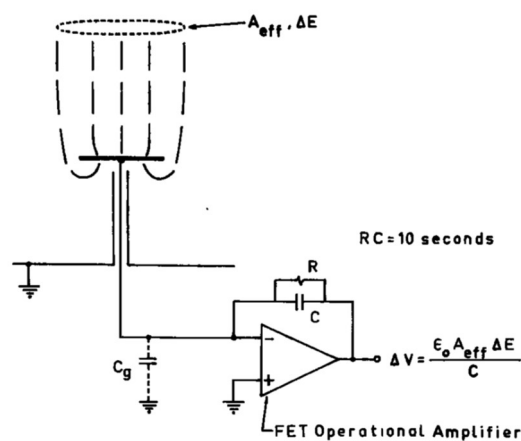


図 1.6 スローアンテナ (Krehbiel et al., 1979) (左) とその回路 (右)

●フィールドミル

固定された金属板（誘導板）の上を羽根型の金属板（遮蔽板）がモーターによって回転し、誘導板を繰り返し遮蔽および露出させることによって、誘導板に電荷の誘導とその電荷の地表への移動が繰り返され、その際に回路中の抵抗（数 $M\Omega$ の高抵抗）に交流電圧が発生する装置である。ここで誘導される面電荷密度は静電場に比例するため、交流電圧の振幅を測定することによりそれに比例する静電場を知ることができる。

フィールドミルには容量性アンテナのように感度に変化する特性はない。一方で、1台あたり約30万円と高価である、動作部の故障が多い、モーターの動作不良によって時定数に変化する恐れがあるといった欠点を持ち、大規模な観測網の展開を難しくしている。

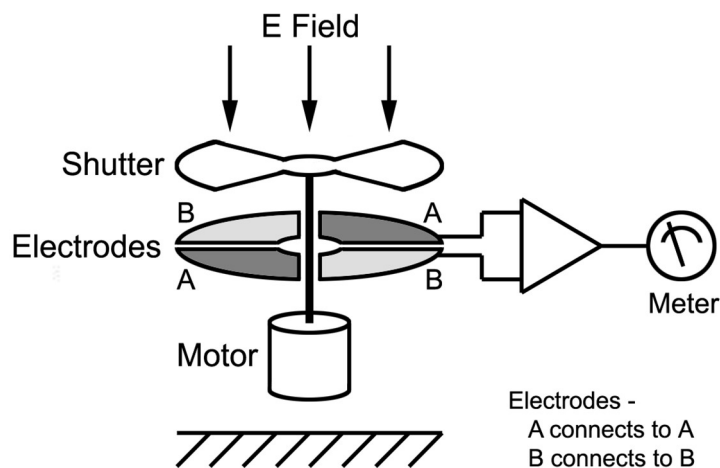


図 1.7 フィールドミルの概略

(<http://a-tech.net/ElectricFieldMill/>)

1.4.3 中和電荷の位置および電荷量の推定原理

雷放電によって電荷が中和される際、その電荷が作っていた静電場が消失することにより、周囲の静電場が変化する。その変化を観測することにより、中和された電荷量および電荷の位置を求めることができる。以下にその原理を示す。

雷雲内の電荷を点電荷、地面を完全な導体であると仮定したとき、地表で観測される落雷発生前の静電場 E_{before} は、雷雲内の点電荷が鏡像電荷とともに作る E_+ , E_- の足し合わせで $E_{\text{before}} = E_+ + E_-$ と表せる。この状態で落雷により負電荷の中和が起こった場合、 E_- が消失し、落雷後に地上で観測される静電場 $E_{\text{after}} = E_+$ となる。よって落雷前後の静電場変化 ΔE は

$$\Delta E = E_{\text{after}} - E_{\text{before}} = -E_-$$

で導くことができる。

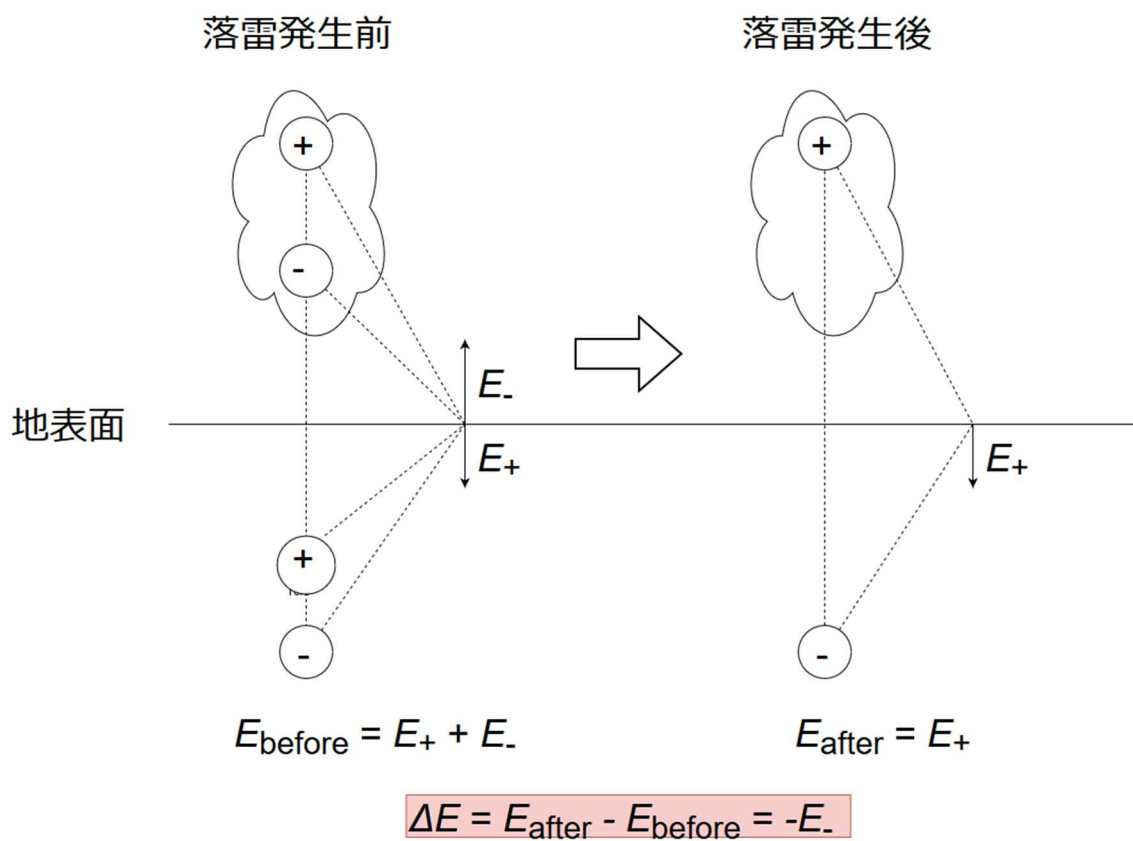


図 1.8 落雷前後の静電場変化の模式図

また、図 1.9 で表したような静電場変化の大きさ ΔE は、以下の式で表すことができる。

$$|\Delta E| = \frac{2|Q|h}{4\pi\epsilon_0(h^2 + d^2)^{\frac{3}{2}}}$$

(ϵ_0 は電気定数)

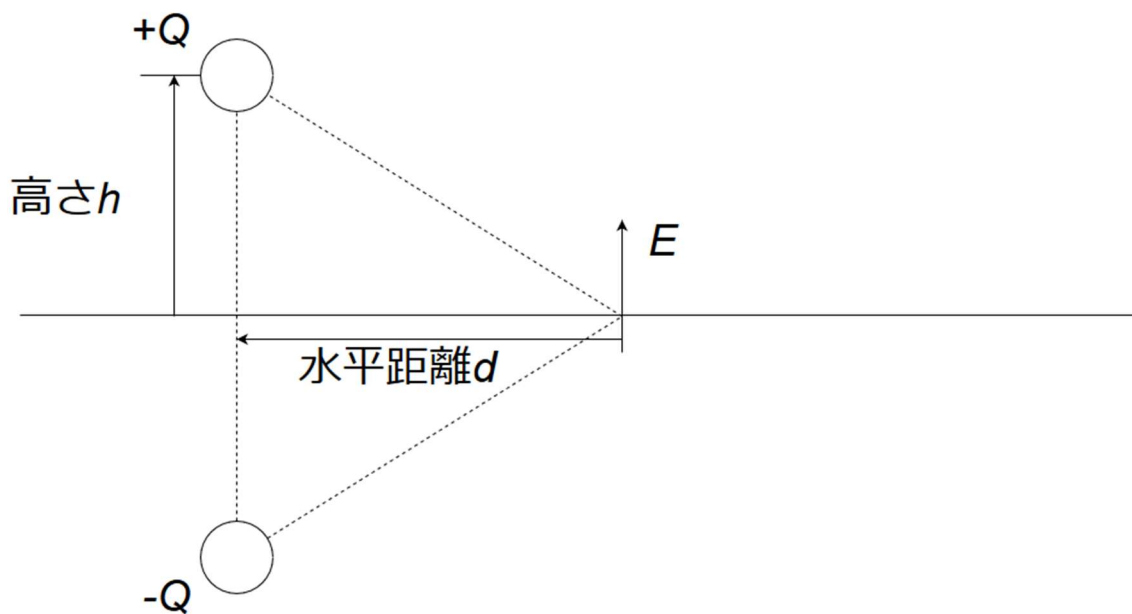


図 1.9 鏡像電荷法の概略

以上の計算を行うことで、雷放電前後の静電場変化から放電の電荷量と高度、水平位置を算出することができる。

1.5 ULAT プロジェクト

本研究は、地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム（SATREPS）の一部である、ULAT（Understanding Lightning and Thunderstorm）プロジェクトの一環として行っている。本プロジェクトでは、東南アジア等を中心に大規模な災害を引き起こす雷雨や台風による降雨の、高精度な活動把握および予測を目指すものである。

本研究で扱うのは、フィリピン・マニラ首都圏に展開予定である P-POTEKA と呼ばれる観測システムである。P-POTEKA は明星電気の自動気象観測システム

「AWS」をベースにプレート型スローアンテナおよびマイクロフォン型インフラサウンドセンサーを付加したものである。本研究ではそのうちスローアンテナおよびフィールドミルによる静電場観測をシミュレーションする。また、本研究では扱わないが、インフラサウンドセンサーによる雷放電の発生位置の高精度な観測（-100 m 程度）が期待されている。

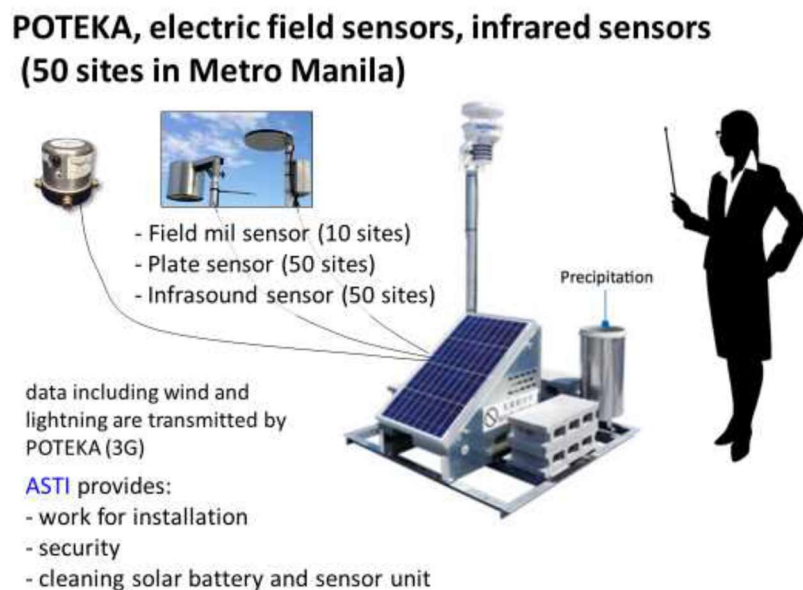


図 1.10 P-POTEKA の概要

1.6 目的

発達する積乱雲に伴う激しい気象擾乱は、水平スケール 5-10 km、時間スケール 30-60 min 程度の小規模な対流セル内部で生じるため、現行のアメダスやレーダー観測網では時間・空間分解能ともに不十分である。そのため、対流セルの発生・発達を高い時間・空間分解能で追うことのできる新たな観測対象および観測網が求められている。雷放電観測によって得られる雲内電荷の空間分布を対流活動の指標とすることで、対流セルの発生・発達過程を追うことができると考えられる。

本研究は、展開予定である P-POTEKA による観測網によって得られるであろう雷放電時の静電場変化をシミュレーションし、その発生位置・電荷収支の予測およびスローアンテナの感度校正方法が有効であるかどうかを検証するものである。

第2章

解析手法の開発

2.1 観測システム概要

本研究では、1.5 項で述べた P-POTEKA による観測網を想定したシミュレーションを行う。P-POTEKA の設置箇所は約 5 km 程度の間隔で全 50 か所が予定されており、そのうち 10 か所はフィールドミルセンサーを伴う。そのうち、すでに設置が完了している 6 か所（2019 年 1 月 25 日現在）での観測を想定し、仮想の落雷データを用いて、P-POTEKA 観測網を用いた静電場観測の有効性を検証する。

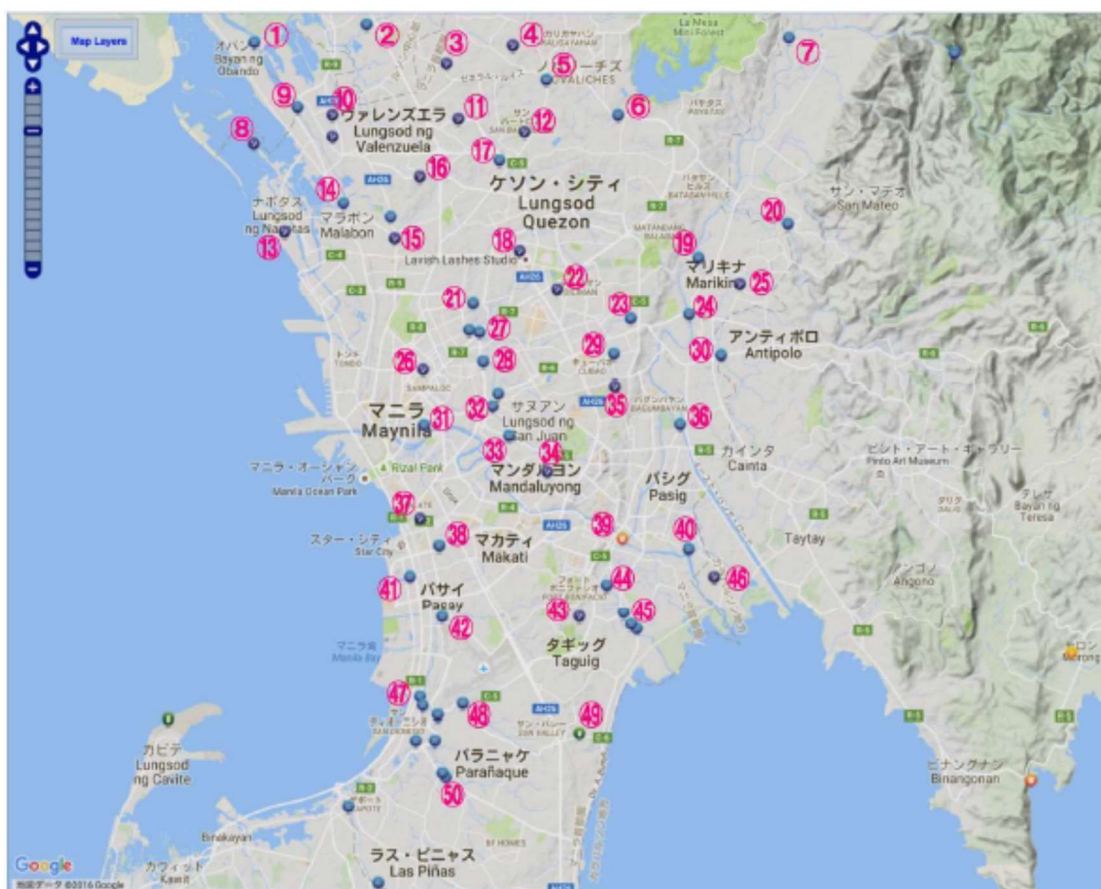


図 2.1 北海道大学側が提示した P-POTEKA の観測候補地（2016 年当初）。実際の観測地点の選定は、ASTI（フィリピン先端科学技術研究所）が順次行う。

2.2 想定される観測波形

図は落雷時の静電場の時間変化を追ったものである。電圧の変化量 $\Delta E = E_{\text{after}} - E_{\text{before}}$ が正であれば雲中の負電荷が中和されたことによる変化（負極性落雷）、負であれば正電荷が中和されたことによる変化（正極性落雷）であると判断できる。

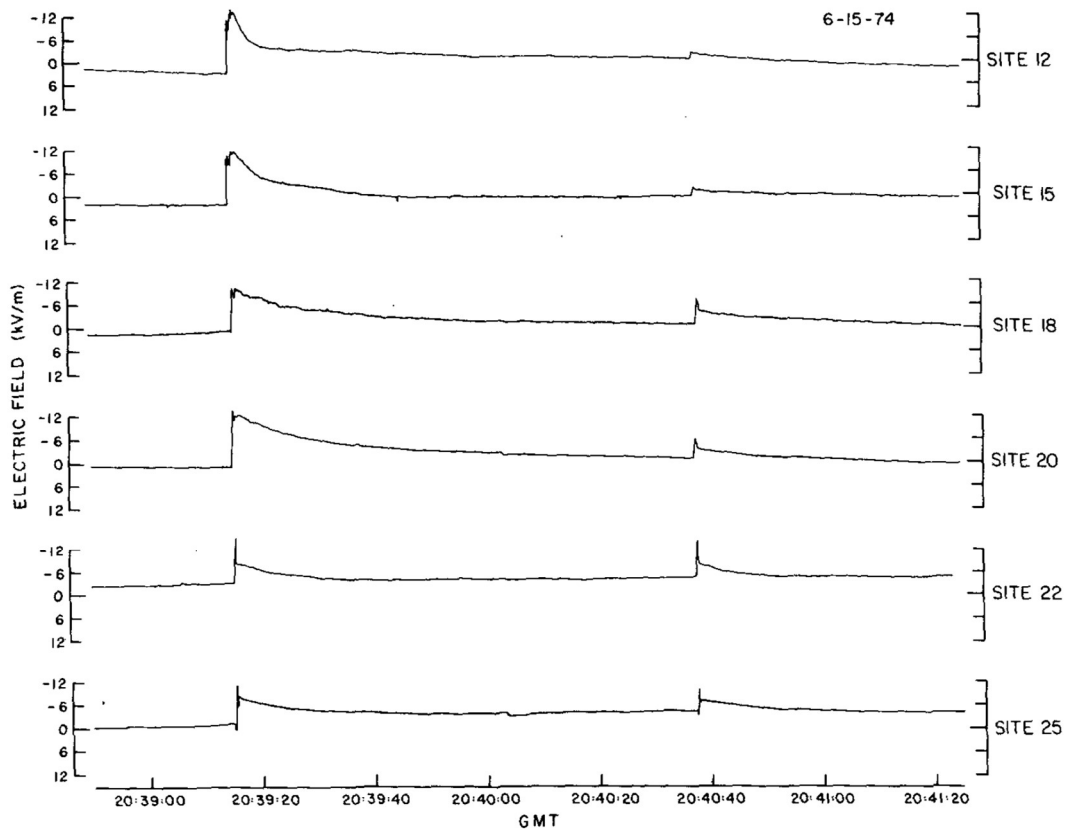


図 2.2 落雷発生時の静電場の時間変化の一例(Jacobson and Krider, 1976)

2.3 落雷時の移動電荷量・位置の推定

落雷（対地放電）の場合、観測される静電場変化 ΔE は、1.4.3 で述べた通り点電荷が中和された際の静電場変化に近似することができる。

各パラメータ（電荷量、高度、水平位置）に対して、想定される範囲内でまずは大まかな間隔でパラメータを仮定（例：電荷量 $Q = -300, -270, \dots, +270, +300$ など）し、それぞれの組み合わせについて最小二乗法を行い、残差の二乗和が最も小さくなるパラメータを求める。次にそのパラメータ付近で、より細かい間隔で各パラメータを仮定し、最小二乗法で残差の二乗和が最も小さくなるパラメータを求める。これを繰り返すことにより、より精度の高い推定値を算出する。

●最小二乗法

各観測地点における静電場変化の観測値 $\Delta E_{obs,i}$ 、求めたい関数 $\Delta E_i(Q, x, y, h)$ とした場合、

$$\sum_{i=1}^n \{\Delta E_{obs,i} - \Delta E_i(Q, x, y, h)\}^2$$

が最小となる $\Delta E_i(Q, x, y, h)$ が、最も確からしい近似となる。

2.4 感度校正

1.4.2 で述べたとおり、容量性アンテナは接地の状態によって相対感度が変化してしまう。ある観測地点の相対感度を 1 とし、別の観測地点の相対感度を α とし、また相対感度以外によって観測値の誤差が出ないとした場合、真の値 ΔE_{true} に対して静電場観測値 ΔE_{obs} は

$$\Delta E_{obs} = \alpha \times \Delta E_{true}$$

と表すことができる。

後述する落雷観測のシミュレーションでは、各観測地点の相対感度が短時間で変動することはないものとし、複数の落雷を同じ相対感度で観測した場合の静電場観測データから、最小二乗法を用いて最も確からしい相対感度を算出する。基本的な考え方は 2.3 で述べた電荷量・位置の推定と同じであり、2.3 の手法に相対感度 α も加味して計算することで、落雷のパラメータに加えて相対感度の推定も行うことができる。

第3章

観測のシミュレーション

3.1 事例解析

観測地点の座標、相対感度、および落雷の電荷量、高度、水平位置を仮定し、各観測地点で得られる静電場変化量を算出する。その後、静電場変化量にランダムノイズ（最大で±20%）を乗せ、各観測地点で得られたデータとする。それらのデータをもとに、落雷の電荷量・位置をどの程度の精度で逆算できるかを実験する。

全てのパラメータ（観測地点の相対感度、落雷の電荷量、高度、水平位置）が未知と仮定した状態から逆算することが理想的であるが、未知数が増えるにつれコンピュータを用いた計算にかかる時間が膨大になってしまったため、本研究では観測地点の相対感度、あるいは落雷の水平位置のどちらかが既知であると仮定したうえで計算を行った。

(i) 相対感度が既知の場合

各観測地点の相対感度は既に求められており、静電場観測のデータは精確に校正可能であると仮定し、ある落雷の電荷量 Q 、高度 h 、水平位置 (x, y) を逆算した。

表 3-1 落雷の各パラメータの観測値および真の値、それらの差

	Q [C]	h [m]	x [m]	y [m]
観測値	+30.6	8840	11190	5647
真の値	+29.7	9465	10927	5634
観測値-真の値	+0.9	-625	+263	+13

表 3-2 各観測地点の座標、相対感度、静電場変化量

	x [m]	y [m]	相対感度 α	ΔE (校正済) [V/m]	ΔE のランダム
					ノイズ[%]
地点 1	12221	9500	1.00	5364	+16.2
地点 2	18024	8051	1.77	3167	+10.3
地点 3	5316	11946	0.71	2627	+6.1
地点 4	11302	0	1.30	4218	+11.8
地点 5	21521	1	0.89	1659	+17.2
地点 6	0	3897	2.17	1548	-5.4

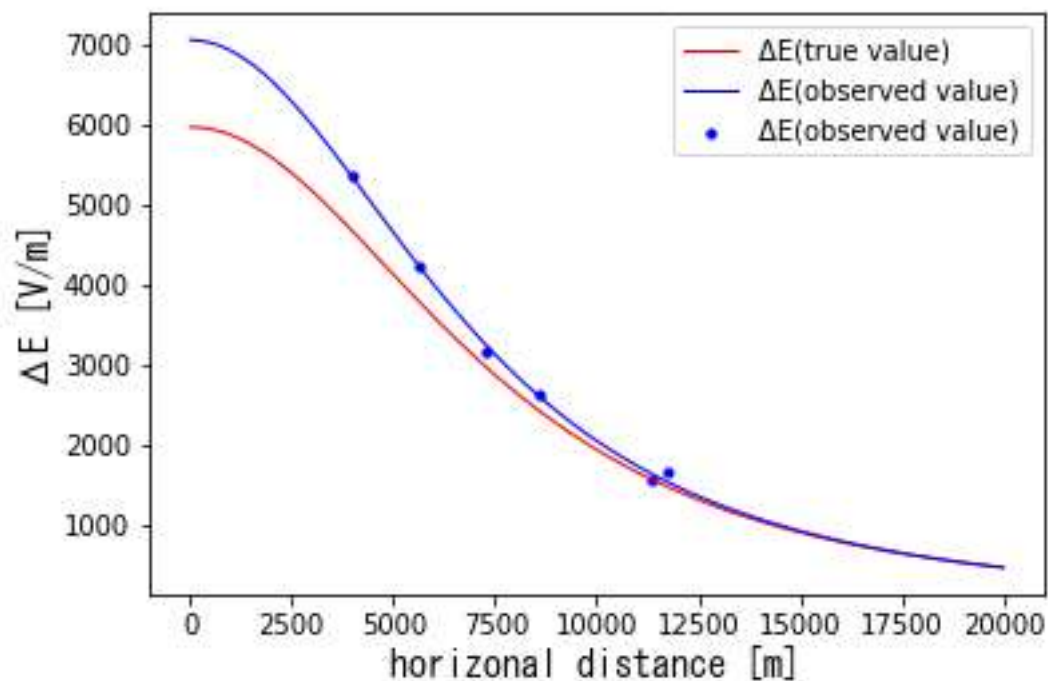


図 3.1 落雷からの水平距離に対する地表静電場変化量。青線は落雷の観測値、赤線は真の値

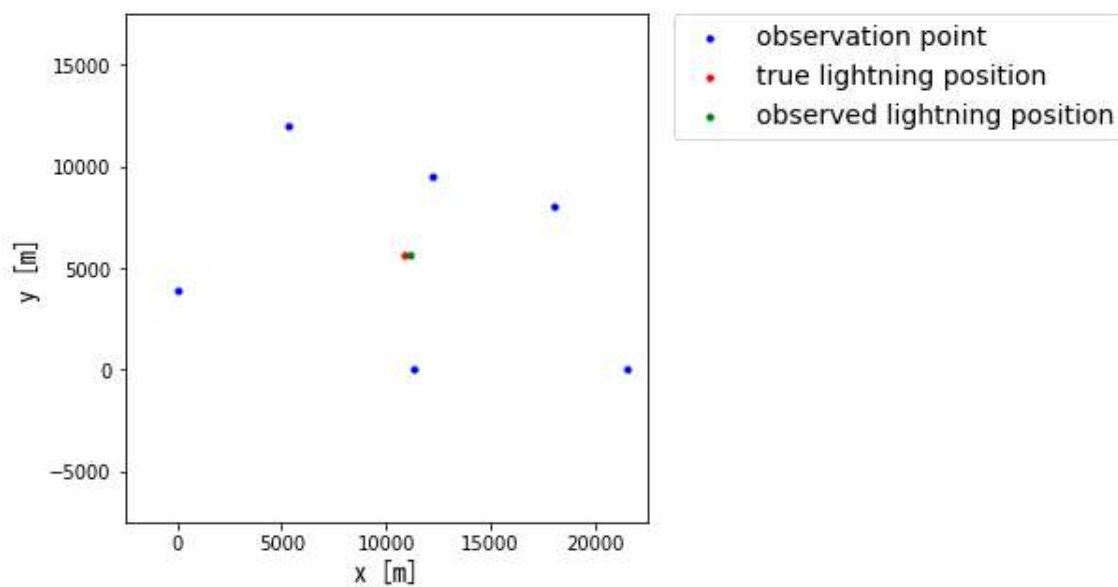


図 3.2 各観測地点（青点）と落雷の真の水平位置（赤点）、推定された水平位置（緑点）

(ii) 落雷発生位置が既知の場合

落雷が発生した水平位置(x, y)は既に別のデータから精確に求められていると仮定し、またある1つの地点(地点1)の相対感度を1とした場合の、ある2つの落雷の電荷量(Q_1, Q_2)、高度(h_1, h_2)、および各観測地点の相対感度 a を逆算した。

表 3-3 落雷の各パラメータの観測値および真の値、それらの差

	Q_1 [C]	h_1 [m]	x_1 [m]	y_1 [m]
観測値	26.00	8560		
真の値	29.70	9465	11190	5647
観測値 - 真の値	-3.70	-905		

	Q_2 [C]	h_2 [m]	x_2 [m]	y_2 [m]
観測値	92.00	4840		
真の値	103.00	5072	5634	802
観測値 - 真の値	-11.00	-232		

表 3-4 各観測地点の座標、相対感度、静電場変化量

	x [m]	y [m]	相対感度 α	相対感度 α	ΔE_1 [V/m]	ΔE_1 のランダム
			(観測値)	(真の値)		ノイズ[%]
地点 1	12221	9500	1.00	1.00	4808	+4.1
地点 2	18024	8051	2.16	1.77	4837	-4.8
地点 3	5316	11946	0.82	0.71	1971	+12.2
地点 4	11302	0	1.41	1.30	5437	+10.8
地点 5	21521	1	0.87	0.89	1255	-0.4
地点 6	0	3897	2.42	2.17	3561	+0.2

	x [m]	y [m]	相対感度 α	相対感度 α	ΔE_2 [V/m]	ΔE_2 のランダム
			(観測値)	(真の値)		ノイズ[%]
地点 1	12221	9500	1.00	1.00	4544	-13.8
地点 2	18024	8051	2.16	1.77	25877	+9.0
地点 3	5316	11946	0.82	0.71	938	-13.3
地点 4	11302	0	1.41	1.30	14635	-5.1
地点 5	21521	1	0.87	0.89	41752	-7.7
地点 6	0	3897	2.42	2.17	2442	-5.8

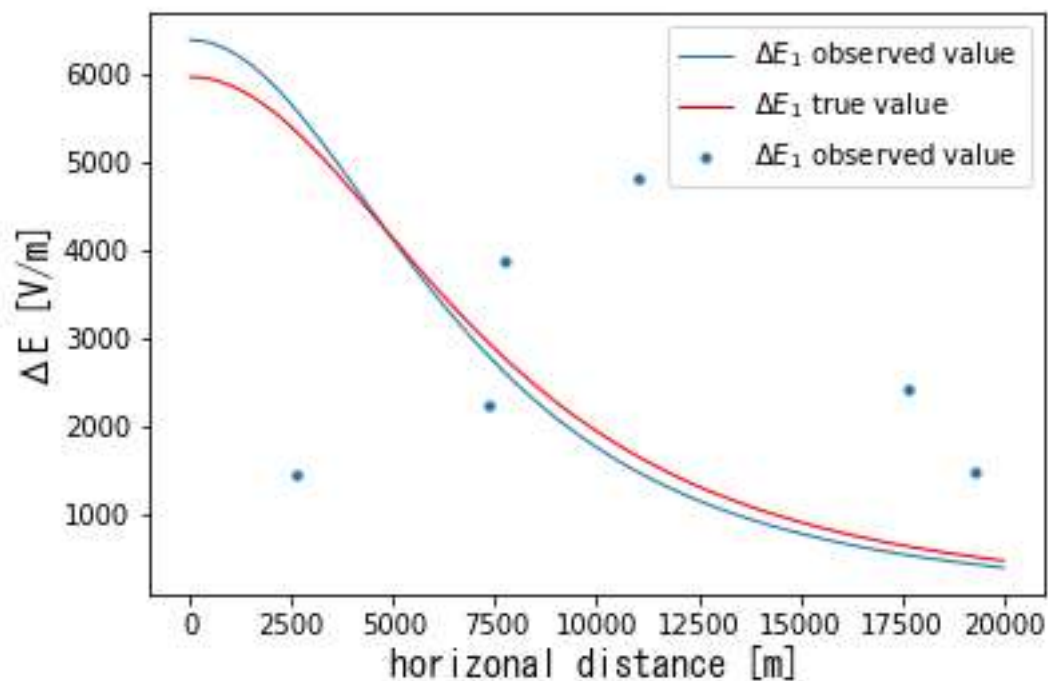


図 3.3 1つ目の落雷からの水平距離に対する地表静電場変化量。青線は落雷の観測値、赤線は真の値

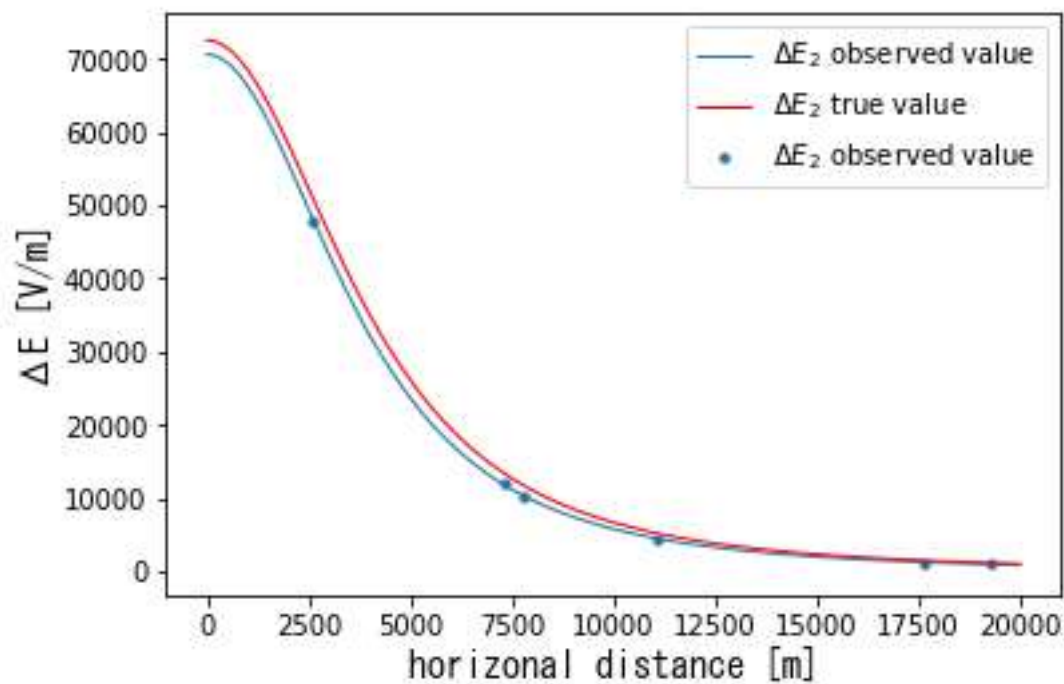


図 3.4 2つ目の落雷からの水平距離に対する地表静電場変化量。青線は落雷の観測値、赤線は真の値

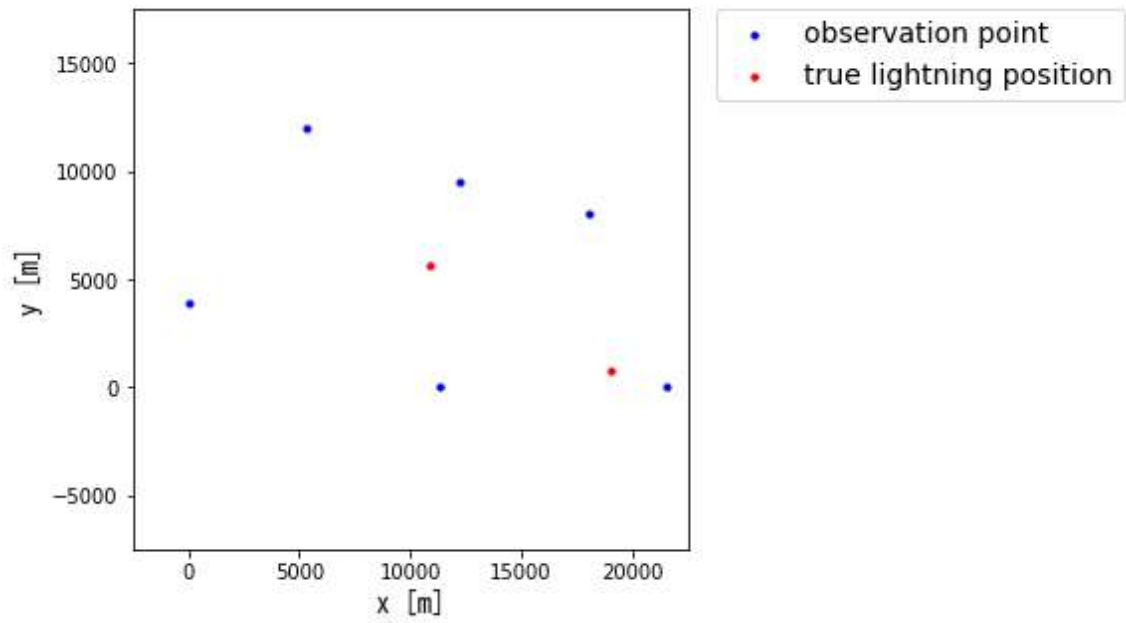


図 3.5 各観測地点（青点）と2つの落雷の水平位置（赤点）

3.2 考察

前項の結果から、算出した各パラメータの誤差について考える。

(i) 相対感度が既知の場合

電荷量 Q は真の値 : +29.7 C に対して +0.9 C ($\approx +3\%$) の誤差、高度 h は真の値 : 9465 m に対して -625 m ($\approx -7\%$) の誤差が生じ、また水平位置の誤差は ~ 300 m 程度であった。ランダムノイズの大きさ ($-5.4 \sim +16.3\%$) を考慮すると、この推定方法は十分有効であると考えられる。

(ii) 落雷発生位置が既知の場合

電荷量 Q_1, Q_2 は真の値 : +29.7 C, +103.0 C に対してそれぞれ -3.7 C ($\approx +12\%$) , -11.0 C ($\approx -11\%$) の誤差、高度 h_1, h_2 は真の値 : 9465 m, 5072 m に対してそれぞれ -905 m ($\approx -10\%$) , -232 m ($\approx -5\%$) の誤差であった。また、相対感度の誤差は地点 2 の計算結果 (+22%) が最大であった。ランダムノイズの大きさ ($-13.8 \sim +12.2\%$) に対して、相対感度の誤差はやや大きい。本研究ではコンピュータの計算速度の都合もあり、多くの落雷を観測した場合の推定値を求めることはできなかったが、観測する落雷のデータの数を増やすことができれば推定値の確度を高めることができると思う。

相対感度・落雷発生位置がともに未知である場合に、今回求めたような推定値にどの程度の影響が生じるかについては、追って検証する必要がある。

また、本研究では静電場変化量 ΔE のノイズを $\pm 20\%$ 以内と仮定して観測値のモデルを作ったが、実際の観測において ΔE にどの程度のノイズが生じるかは現時点では不明である。落雷の各パラメータおよび観測地点の相対感度推定の確度に大きく関わる点であるため、実際の観測データを用いた計算結果を得ることが今後の課題である。

第4章

結論

4.1 結論

発達する積乱雲における激しい気象擾乱は水平方向の対流セルのスケールが 5-10 km、時間スケール 30-60 min と小さいために、その活動を把握するには、現行のアメダスや気象レーダー観測網の時間・空間分解能は必ずしも十分とはいえない。対流活動は雲内の電荷の空間分布およびその移動に反映されると考えられるが、その詳細な関係については明らかになっていない。本研究では、雷放電による地上における鉛直準静電場の変化の多点観測を行い、その水平分布の情報を使って、積乱雲内で移動した電荷の立体的な空間分布およびその電荷量を推定することを試みる。

先行研究として、フィールドミルによる多地点観測(Workman et al., 1942; Jacobson and Krider, 1976)が挙げられるが、この手法では観測器の価格およびメンテナンスの面で大規模な観測網の展開は困難であると考えられる。また、容量性アンテナを用いた観測(Krehbiel et al., 1979; Baranski et al., 2012)においては、観測機器は安価であるものの観測地点間の感度のキャリブレーションが困難であり、電荷推定の精度に問題がある。これらの問題を解決するためには、安価で簡便かつ、観測地点間の感度校正が可能な高精度の電荷構造推定法を確立する必要がある。

本研究では、仮想の静電場観測の結果から落雷の電荷量、高度、水平位置、および容量性アンテナの相対感度を求めるシミュレーションを行った。真の値から大きくずれた結果は出ず、用いた推定方法は有効なものであると考えられる。確度の検証に関しては更なる実験・検討が必要であるが、今後の大規模静電場観測網による雷放電観測に向けて、容量性アンテナを用いた静電場観測から各パラメータの推定が可能であることを示すことができた結論づける。

4.2 展望

本研究で用いたパラメータ推定の手法は、確度の検証という点に関しては未だ実験・検討の余地があるものの、容量性アンテナの感度校正を落雷の観測データのみから求めることを可能とするという点で、大規模な静電場観測網を用いた雷放電観測を行う上での将来性を示すことができた。

今後の展望としては、実際の観測値を用いた計算、および高性能な計算機を使ったパラメータ推定を行うことで、大規模静電場観測網による積乱雲内部の電荷構造推定の信頼性の評価をより一層推し進めることが可能であると考ええる。

参考文献

Brown, R. A., C. A. Kaufman and D. R. MacGorman, 2002, Cloud-to-ground lightning associated with the evolution of a multicell storm, *J. Geophys. Res.*, 107, No. D19, 4397, doi:10.1029/2001JD000968.

Carey, L. D. and S. A. Rutledge, 2000, The Relationship between Precipitation and Lightning in Tropical Island Convection: A C-Band Polarimetric Radar Study, *Mon. Wea. Rev.*, 128, 2687-2710.

Jacobson, E. A., and E. P. Krider, 1976, Electrostatic field changes produced by Florida lightning, *J. Atmos. Sci.*, 33, 103-117.

Krehbiel, P. R., M. Brook, and R. A. McCrog, 1979, An Analysis of the charge structure of lightning discharge to the ground, *J. Geophys. Res.*, 84, 2432-2456.

Piepgrass, M. V., E. P. Krider and C. B. Moore, 1982, Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 87, 11193-11201.

Takahashi, T., 1987, Determination of lightning origins in a thunderstorm model, *J. Meteor. Soc. Japan*, 65, 777-794.

Williams, E. R., M. E. Weber and R. E. Orville, 1989, The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds, *J. Geophys. Res.*, 94, 13213-13220.

Workman, E. J., R. E. Holzer, and G. T. Pelsor, 1942, The electrical structure of thunderstorms, Aero. Tech. Note 864, pp. 1-47, Nat. Advan. Comm., Washington, D. C.