

氏 名 源 泰拓

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大乙第275号

学位授与の日付 2022年9月28日

学位授与の要件 学位規則第6条第2項該当

学位論文題目 南極・昭和基地における大気電場変動と全地球電気回路に関する研究

論文審査委員 主 査 門倉 昭

極域科学専攻 教授

田中 良昌

極域科学専攻 准教授

平沢 尚彦

極域科学専攻 助教

鴨川 仁

静岡県立大学 グローバル地域センター

特任准教授

佐藤 光輝

北海道大学 大学院理学研究院 教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏 名 源 泰拓

論文題目 南極・昭和基地における大気電場変動と全地球電気回路に関する研究

本研究では、局所的な擾乱の影響を受けていない大気電場観測値を同定して、極域のオーロラ活動に伴う大気電場の変動を示した。

地球の大気中の電氣的な現象としては雷放電がよく知られるが、晴天時にも大気中には電場が存在していて、この電場を大気電場という。観測点の近傍に電場の擾乱をもたらすものがない場合、地上では、上空から地表への向きを正とする約 100 V/m の大気電場が存在し、上空から地表に向けて微弱な電流が流れる。この電流が流れる回路は全地球電気回路と呼ばれ、上空の中間圏・電離圏と地球の表層をそれぞれ正、負の極板とする、巨大な球殻コンデンサーに擬することができる。大気電場観測値は、地表から高さ $60\text{-}80\text{ km}$ におよぶ全地球電気回路の状況を反映しており、起電力としての降水や雷活動、回路の導体としての大気の電気伝導度、さらに全地球電気回路の外部に発生する極域のオーロラ活動などをモニタリングする手段として活用できる可能性がある。

大気電場は、最小値が 03 UT 頃、最大値が 20 UT 頃となる日変動を示すことが知られている。この、観測値の地方時ではなく世界時 (UT) に固定された日変動はカーネギーカーブと呼ばれる。また、季節変動、永年変化といった長期の変動に関しては、その変動の様相や原因について、長年にわたり議論が続いている。一方、オーロラサブストームのような短期の現象についても、事例解析は行われているものの、サブストームの発生していない静穏な時期との比較を、十分な量のデータをもって統計的に実施した例はない。

この、最も大きな阻害要因は、気象、エアロゾル、煤煙等の地表付近の局所的な擾乱を排除した「晴天静穏時」と呼ばれる時間帯のデータを抽出することの困難さにある。先行研究では各々の観測点について、独自の方法で降水、雲、飛雪のある時間帯を除いている。しかしながら、晴天静穏時でないデータを排除する閾値が示されていない論文が複数ある。また、この基準を記載した先行研究においても、気象要素の目視観測を必要とするものが多く、データ抽出の時間分解能を上げることが難しい。気象を要因としない擾乱の評価は更に困難である。極域での観測にかかわる先行研究では、発電機等の影響を避けるために特定の風向の時間帯のデータは捨象する、との基準を記したものがあるが、影響を受ける条件についての詳細な検討は窺えない。

本研究では、昭和基地における数々の大気電場の擾乱源を、ひとつひとつその性質と影響量を調査した。極域では、気象条件に起因する擾乱として、吹雪に伴って観測される kV/m オーダーの正の電場変動が存在する。このことは 1960 年代から報告されていたが、その原因は不明なままであった。本研究では、雪面への衝突・跳躍を経て負に帯電した雪粒が強い電場を形成する可能性について検討した。結果、雪粒の帯電量と数密度を与えた計算では強い電場は再現されなかったことから、観測される強い電場は、帯電した雪粒がセンサーに衝突したことによる見かけ上の電場変動である可能性が高いことを示した。浮遊す

る雪粒の数密度は高さによって異なるので、雪粒が浮遊している状況下では高さを変えた 2 点における電場観測値は異なる。このことを利用して、高さの異なる 2 点で観測された大気電場値の差によって浮遊する雪粒の有無を判別できる。

気象条件に起因する大気電場の擾乱源として、雲の影響が先行研究で議論されている。極域では、強い帯電が生じる対流雲の発生は稀であることから、雲の影響は限定的と考え、大気電場値と目視観測による雲量の統計解析と、大気電場値、雲量、風速、ライダー後方散乱強度、全天カメラ画像を用いた事例解析を行った。その結果、極域では雲の出現・消失が大気電場値に与える影響は軽微であることを示した。

さらに、夏季に上昇するエアロゾル濃度と、人間活動に起因する煤煙等の大気電場への影響を検討した。エアロゾルについては、昭和基地で観測されている粒子径 7 nm 以上の凝結核濃度と大気電場値の相関は認められなかった。煤煙については、観測時の風向と大気電場値のばらつきから、発電機等の固定した排出源からの煤煙が大気電場に与える影響を示した。これを受けて、「高さを変えた 2 点における電場観測値の差」と「一定時間に観測された大気電場値の標準偏差」に閾値を設定して、晴天静穏時間帯のデータを同定する方法を提示した。この手法は、気象観測、とりわけ目視観測を必要とせず、高い時間分解能で晴天静穏時間帯のデータを同定することができる。

この新手法で抽出された晴天静穏時間帯のデータを用いて、極域のオーロラ活動に伴う大気電場の変動を検討した。オーロラ活動が静穏な条件下の晴天静穏時の大気電場値から参照値を導出し、大気電場観測値と参照値の差を、銀河雑音吸収 (CNA)、地磁気、オーロラ電流の消長の指標である AE-index と比較したところ、午後側で AE-index が増大する時に大気電場が低下する事例が複数認められた。吹雪や煤煙等による局所的な影響の多くは大気電場の正の変動をもたらすので、負の変化が観測されている事象は、オーロラサブストームに伴う地上の大気電場の変動を強く示唆する。さらに、AE-index、と晴天静穏時の大気電場を比較したところ、AE-index の上昇時には磁気地方時 (MLT) 午前側では大気電場が上昇、夕方から真夜中側では低下することが示された。オーロラ活動と大気電場の関係を論じた先行研究の多くは、特定の磁気嵐、オーロラサブストームの事例解析にとどまっているのに対して、本研究では、極域のオーロラ活動の影響を受けていないデータをも踏まえて、極域のオーロラ活動の影響が地表に及ぶこと、観測点の MLT によって、電場の上昇・低下のどちらになるかが決まることを、統計的にも示すことができた。

本研究では、オーロラサブストーム発生時に電離圏電位の変動が地表の大気電場を変動させる可能性について述べた。このメカニズムが検証されれば、逆に地表の電場観測網から電離圏電位をモニタリングする手法を提示することができる。さらに、本研究で示した晴天静穏時の同定手法によって蓄積される晴天静穏時データは、カーネギーカーブの季節変動・長期変動からグローバルな雷活動や降雨活動の推移を解析する、あるいは太陽活動周期と関連するような長期変動などを調べるためにも貢献できるものと考えられる。

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 源 泰拓

Title
論文題目 南極・昭和基地における大気電場変動と全地球電気回路に関する研究

本論文は、昭和基地における大気電場観測データを用いて、地上の大気電場変動に対するローカルな気象現象（風、降雪、雲、エアロゾル）や人工擾乱（発電機の煤煙など）の影響の詳細な解析を行い、全球の雷活動や降雨活動が駆動する全地球電気回路に起因する成分（晴天静穏時データ）のみを抽出するための抽出条件を見出すと共に、極域のオーロラ活動が全地球電気回路に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした研究である。

論文の構成は、第 1 章で研究の背景の説明と先行研究の紹介を、第 2 章で研究に用いた観測機器や観測データの紹介をそれぞれ行い、第 3 章では、風雪（吹雪）、雲、エアロゾル、発電機からの煤煙が大気電場観測に及ぼす影響についての解析結果をそれぞれ示し、それぞれの影響を除いたデータから導出した晴天静穏時の日変化やその季節変動の特徴を議論している。

吹雪の影響については、帯電した雪粒の影響を評価するためのモデル計算を行い、吹雪の際に観測される kV/m オーダーの正の電場変動は、帯電した雪粒の分布による電位変動では説明出来ないことを示し、雪粒のセンサー面への衝突など別の要因による可能性が高いことを示した。また、そのような地上気象現象による擾乱を判別する手段として、通常の高さ 1.4m での観測に加え、地上高 10m のタワーを用いた上下 2 点での観測データの比較を行う、という新しい観測方法を提案し、上下 2 点の電場観測値の差が、 -20V/m から $+20\text{V/m}$ の範囲にあることが晴天静穏時データ抽出の条件であることを見出した。

雲の影響については、吹雪の影響のない時間帯について、雲の有無による大気電場観測値を比較し、その差は $1\sim 2\text{V/m}$ 程度と軽微であることを示した。エアロゾルの影響については、粒子径 7nm 以上のエアロゾル濃度観測値と大気電場観測値との間には有意な相関は見られないことを示した。

煤煙の影響については、風向が昭和基地の発電設備の方向の時、大気電場観測値及びそのばらつき（標準偏差）が顕著に増加することを見出し、発電機の煤煙の影響が大きいことを示し、10 分間の大気電場観測値の標準偏差が 15V/m 以下であることが、その影響を受けた時間帯を除く条件であることを見出した。

上述した条件の下で抽出した晴天静穏時データの日変化とその季節変動を調べたところ、全季節から求めた日変化は、全地球電気回路に特徴的な変動（カーネギーカーブ）を示すが、季節ごとに調べると、特に夏期の変動が他の季節とは異なることを示した。

第 4 章では、抽出した晴天静穏時データにさらに地磁気活動静穏という条件も加えた新たな静穏参照データを算出し、地磁気活動（オーロラ活動）活発時の観測値と静穏参照値との間のずれを調べることにより、オーロラ活動の影響の解析を行っている。その結果、オーロラ活動が活発化すると、大気電場観測値は、午前の時間帯で増加し、夕方から真夜

中の時間帯で減少することが統計的に示され、オーロラ活動の影響が大気電場観測値に確かに現れていることが示された。その変動は最大で静穏時の約 20%に及び、そのことは、オーロラ活動により電離層電位が約 20%変動していることを示唆していて、過去の研究により示されているサブストームに伴う電離層電位変動の値と矛盾しないことが示された。

また、地磁気活動静穏の条件を加えた晴天静穏時データによる日変化はよりカーネギーカーブに近くなること、オーロラ活動が活発になるとカーネギーカーブの特性が見られなくなることが示され、昭和基地では、オーロラ活動が全地球電気回路による変動に及ぼす影響が顕著であることが示された。

昭和基地での大気電場観測について、考え得るほとんど全てのローカルな擾乱源の影響についての詳細な解析を行い、全地球電気回路についての議論に耐えうる信頼性の高い晴天静穏時データを抽出するための抽出条件を見出し、新たな観測方法を提案し、抽出した晴天静穏時データを元に、日変化の季節変動の特徴や、オーロラ活動の影響など、新たな観測結果が得られている。第 3 章の吹雪の影響の解析については査読付国際学術誌の論文として出版されており、上下 2 点による解析や雲の影響についても査読付国際学術誌の論文として投稿し現在査読中である。出願者は、本学の研究科を経ない者で、論文博士としての審査となるが、博士論文の内容や国際学術誌への発表履歴などから、本学の研究科を修了した者と同等以上の学力を有するものと判断出来る。また、上述したように、博士論文研究の内容は、極域科学専攻の研究として相応しいもので、出願者自身が主体的に行った独創的なものであり、かつ十分な学術的水準に達していると評価出来る。

以上のことから、本審査委員会としては、全審査委員一致で、本審査論文が博士の学位論文の内容として十分であると認め、博士（理学）の学位を授与するのに相応しいという結論に至った。