

氏名・(本籍)	やま した こう ぞう 山 下 幸 三
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第2623号
学位授与年月日	平成23年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Study on the global and Asian lightning activity based on the observation of ELF/VLF sferics (ELF/VLF 帯空電観測に基づいた全球・アジア域の落雷活動に関する研究)
論文審査委員	(主査) 准教授 村田 功 (環境科学研究科) 教授 高橋 幸弘 (北海道大学) 教授 笠羽 康正 教授 岡野 章一 准教授 藤原 均

論文目次

Abstract	1
Acknowledgement	4
1 General Introduction	9
1.1 Observation for lightning activity	9
1.1.1 Optical observation by satellite	9
1.1.2 Radio wave measurements with ground-based system	11
1.2 Global electric circuit	13
1.2.1 Classical model of global electric circuit	13
1.2.1 Recent insights on global electric circuit	16
1.3 Purpose of this study	19
2 Global lightning activity	21
2.1 Introduction	21
2.1.1 Propagation in the Earth-ionosphere waveguide	21
2.1.2 Schumann resonance	25
2.1.3 ELF transients	29
2.2 Purpose of this section	33
2.3 Observation and data	35
2.3.1 Observation system	35
2.3.2 Global ELF observation network(GEON)	36

2.3.3	Threshold for the detection of ELF transients	37
2.4	Methodology to analyze ELF transients	39
2.4.1	Geolocation of CGs based on ELF observation	39
2.4.2	Estimation of charge moments	42
2.5	Results	46
2.5.1	Accuracy evaluation for new algorithm	46
2.5.2	Spatial distribution	49
2.5.3	Charge moment distribution	57
2.5.4	Temporal variation	59
2.5.5	Comparison with SR intensity	61
2.6	Discussion	63
2.6.1	Terminator effects on the geolocation	63
2.6.2	Regional characteristics of CG lightning discharges	64
2.6.3	Relationship between the huge CGs and small CGs	65
2.6.4	Temporal variation of global CGs activity	65
2.7	Summary and conclusion of this section	67
3	Lightning activity in the Maritime Continents	69
3.1	Introduction	69
3.1.1	General view for propagation of VLF sferics in waveguide	69
3.1.2	Application of the measurements for VLF sferics	72
3.2	Purpose of this section	75
3.3	Measurements of electromagnetic fields in VLF/LF band	76
3.3.1	Hardware/software of observation network	76
3.3.2	Asian VLF observation network(AVON)	78
3.4	Methodology to analyze the VLF sferics	80
3.4.1	Filtering for the detection of transient peaks	80
3.4.2	Geolocation of VLF sferics	82
3.5	Results	87
3.5.1	Accuracy of geolocation	87
3.5.2	Spatial distribution	92
3.5.3	Temporal distribution	93
3.6	Discussion	95
3.6.1	Error of geolocation	95
3.6.2	Evaluation of detection efficiency	96
3.7	Summary and conclusion	97
4	Effect of global lightning activity on global electric circuit	99
4.1	Introduction	99
4.2	Purpose of this section	103
4.3	Estimation of charge moments of VLF sferics	104
4.4	Results	106

4.4.1 Qdl distribution in the Maritime Continents	106
4.4.2 Estimation of current due to CGs in the Maritime Continents	108
4.4.3 Estimation of current due to CGs activity on the globe	109
4.5 Discussion	110
4.6 Summary and conclusion	111
5 Conclusion and the suggestion for the future works	113
5.1 Conclusion	113
5.2 Suggestion for the future works	115
5.2.1 Plans to modify the methodology for global ELF observation network	115
5.2.2 Improvements of a methodology for Asian VLF observation network	115
5.2.3 Investigation of thunderstorm activity with the observation of sferics.....	116
5.2.4 Now-cast and oversight for extreme weather and natural hazard with CG observation	116
5.2.5 Evaluation of the global electric circuit	117
5.2.6 Chemical effects on the middle atmosphere and the ionosphere	117
Figure list	131
Table list	132

論 文 内 容 要 旨

最近10年において、主に下記の2つの理由により雷研究に対する注目がなされている。

ひとつは雷放電の観測の進歩である。例えば、Microlab-1 衛星搭載の観測器 Optical Transient Detector (OTD) により取得された統計データは、全球における雲間放電 (IC) と対地雷放電 (CG) の発生頻度が秒間 44 ± 5 、年間 197 億に達する事を明らかにした。一方で、落雷から放射される電磁波の地上計測システムも発展している。World Wide Lightning Location Network (WWLLN) では、全世界に約40個の計測器を展開し、2007年には年間 4.6 億の CG の位置を推定した。1年以上にわたる長期データを用いた全球落雷分布に対する統計的解析は、OTD や WWLLN の観測実施まで行われてこなかった。

研究者を魅了するもうひとつの理由として、中・上層大気におけるスプライトやエルブス、ブルージェット等の過渡発光現象の発見が挙げられる。これらの放電現象の存在は、下層大気と電離圏の電氣的結合を明示するものである。この洞察はまた、地球大地から大気圏、電離圏、そして磁気圏までを包括する電流系であるグローバルサーキット (GEC) モデルの再考を導くものである。このモデルにおいて、その中で氷晶と霰の衝突による電荷分離が発生している雷雲は、同回路の主電源とみなされている。雷雲は、降雨や落雷等といった活動を介して、大地と電氣的に結合していると考えられる。しかし、落雷活動による GEC への寄与に対する評価を、全球落雷活動の観測結果から定量的に行われていない。

落雷から放射される電磁波は過渡波形として観測され、空電と呼ばれている。VLF 帯 (3-30 kHz) もしくは ELF 帯 (3kHz 以下) における空電は、非常に低い減衰での伝搬するため、落雷地点から数 Mm 遠方の観測点においても検出される。この長距離伝搬は、単点もしくは少数観測点での全球落雷活動の監視

を可能とする。ELF・VLF帯で観測された波形は、雷の位置だけでなく、極性やピーク電流、そして落雷の規模を表す中和電荷モーメント (Qdl) といった個々の雷放電の電気的特性に関する情報を含んでいる。これらの電気的特性の導出は、衛星による光学観測データからは導出できない。

先行研究においては、比較的規模の大きな落雷 (Qdl > 2000C-km) の全球分布が導出されている。これらの結果は、アフリカ、アメリカ、そして海洋大陸の赤道域において落雷の強い活動を示している。一方で、比較的エネルギーの小さい落雷を含んだ全球分布の導出は未だに困難である。伝搬による電磁波の減衰は、観測点に近い落雷は検出しやすく、遠いイベントは検出しにくくする。減衰率は低くとも、伝搬による電磁波の減衰は全球における検出感度の不均一性を生み、全球における落雷活動の評価の妨げになる。

現在、比較的エネルギーの小さい落雷を考慮した全球落雷分布を、検出感度が一律な状態で導出した例はない。本研究の目的は、ELF帯空電、VLF帯空電の観測・解析をもとに、小規模雷を含んだ全球落雷分布を検出感度が一律な状態で評価することである。そのために、第一に1-100Hz帯磁場データに適用するための解析アルゴリズムを開発し、全球の検出感度が一律な状態でQdlが950C-km以上の落雷の全球分布を導出した。第二に、世界三大雷地域の一つである東南アジアにVLF帯電磁場観測ネットワークを新規構築した。同観測ネットワークから、200C-km以上の落雷の取得を行った。第三に、アジアの落雷規模の分布が全球における落雷規模を代表するものであると仮定し、全球における落雷規模の分布を導出した。導出した落雷規模分布から、グローバルサーキットにおける落雷活動の寄与に対し、定量的評価を行った。

第一に、落雷位置推定と中和電荷モーメント推定をQdlが1000C-km以下の比較的小規模な落雷に行うための解析アルゴリズムの開発を行った。新しい解析アルゴリズムは、南極・昭和基地、日本・女川観測所、スウェーデン・エスレンジ観測所、米国サンタクルスからなる世界ELF帯空電観測ネットワーク (Global ELF observation network: GEON) で計測された1-100Hz帯磁場観測データに適用した。落雷位置推定法として到来時間差法を採用した結果、中和電荷モーメントが470C-km以上の規模の落雷に対して680kmの位置推定精度を達成し、従来研究における位置推定精度を信号強度が3分の1の状況で実現した。また、中和電荷モーメントと時間領域における空電波形の振幅強度の間に高い正の相関があることを示し、時間波形からの中和電荷モーメントの導出を可能にした。これにより、従来手法の適用が困難であった信号強度の低い空電に対して中和電荷モーメントの導出を可能とした。上記の解析アルゴリズムを一ヵ月間データ (2004年1月) に適用し、中和電荷モーメントが470C-km以上の落雷を約10万イベント取得し、従来研究の10-30倍の検出効率を実現した。また、年間データ (2003年8月-2004年7月) の解析により、中和電荷モーメントが950C-km以上の落雷を約100万イベント取得し、全球落雷活動の月変化や季節変化を導出した。

第二に、東南アジア域にVLF帯電磁場計測ネットワーク (Asian VLF observation network: AVON) を構築し、アジアにおける落雷活動の監視体制の確立を行った。観測システムは台湾・台南、タイ・サラブリー、インドネシア・ポイティアナクに設置し、100kHzサンプリングにてデータ蓄積が行われている。本研究では、2010年10月13-15日に台南とポイティアナクにて取得されたデータを使用し、初期解析を行った。その結果、毎秒1-3イベントの落雷位置推定を可能にし、従来の地上VLF帯観測において達成されて

いた検出感度の2倍程度の取得率を達成した。WWLLNとの比較を行ったところ、位置推定誤差の中央値は93kmであった。

第三に、全球における落雷の中和電荷モーメント分布を求めることにより、グローバルサーキットにおける全球落雷活動の寄与に対し定量的評価を行った。まず、AVONで取得されたデータセット(>200C-km)から落雷が担う電流量が60A以上であることを見出した。さらに、東南アジア域における中和電荷モーメント分布が全球の雷活動を代表するものと仮定し、GEONで取得されたデータセット(>1000C-km)と米国カリフォルニアにおいて取得されたデータセット(<200C-km)の3つから全球における中和電荷モーメント分布の導出を行った。その結果、全球の落雷活動が担う電流量はグローバルサーキットにおける全上向き電流の20%に相当する600Aと推定された。

論文審査の結果の要旨

本論文は、ELF 帯空電、VLF 帯空電の観測・解析をもとに、小規模雷を含んだ全球落雷分布を検出感度が一樣な状態で評価し、全球における落雷活動に起因する電流がグローバルサーキット与える寄与を定量的に評価することを目的としたものである。具体的には以下の成果を上げた。

1. 落雷位置推定と中和電荷モーメント (Qdl) 推定を比較的小規模な落雷 (Qdl>950C-km) に行うための解析アルゴリズムを開発し、これを南極、日本、スウェーデン、米国に設置された世界ELF帯空電観測ネットワーク (Global ELF observation network: GEON) で計測された 1-100Hz 帯磁場観測データに適用した。落雷位置推定法として到来時間差法を採用した結果、中和電荷モーメントが 470C-km 以上の規模の落雷に対して 680km の位置推定精度を達成し、従来研究における位置推定精度を信号強度が 3 分の 1 の状況で実現した。また、中和電荷モーメントと時間領域における空電波形の振幅強度の高い正の相関があることを示し、時間波形からの中和電荷モーメントの導出を可能にした。これにより、従来手法の適用が困難であった信号強度の低い空電に対して中和電荷モーメントの導出を可能とした。上記の解析アルゴリズムを一ヵ月間データ (2004年 1 月) に適用し、中和電荷モーメントが 470C-km 以上の落雷を約 10 万イベント取得し、従来研究の 10-30 倍の検出効率を実現した。また、年間データ (2003年 8 月-2004年 7 月) の解析により、中和電荷モーメントが 950C-km 以上の落雷を約 100 万イベント取得し、全球落雷活動の月変化や季節変化を導出した。
2. 世界三大雷地域の一つである東南アジア域に VLF 帯電磁場計測ネットワーク (Asian VLF observation network: AVON) を新たに構築し、アジアにおける落雷活動の監視体制の確立を行った。観測システムは台湾、タイ、インドネシアに設置し、100kHz サンプルングにてデータ蓄積が行われている。本研究では、2010年10月13-15日に台湾とインドネシアで取得されたデータを使用し、初期解析を行った。その結果、毎秒 1-3 イベントの落雷位置推定を可能にし、従来の地上 VLF 帯観測において達成されていた検出感度の 2 倍程度の取得率を達成した。World Wide Lightning Location Network との比較を行ったところ、位置推定誤差の中央値は 93km であった。
3. 全球における落雷の中和電荷モーメント分布を求めることにより、グローバルサーキットにおける全球落雷活動の寄与に対し定量的評価を行った。まず、AVON で取得されたデータセット (>200C-km) から落雷が担う電流量が 60A 以上であることを見出した。さらに、東南アジア域における中和電荷モーメント分布が全球の雷活動を代表するものと仮定し、GEON で取得されたデータセット (>1000C-km) と米国カリフォルニアにおいて取得されたデータセット (<200C-km) の 3 つから全球における中和電荷モーメント分布の導出を行った。その結果、全球の落雷活動が担う電流量はグローバルサーキットにおける全上向き電流の 20% に相当する 600A と推定された。

本論文は従来導出できなかった小規模雷の分布を新たな解析手法および新たな観測網によって精度よく導出し、これを用いてグローバルサーキットにおける全球落雷活動の寄与が従来予測よりもかなり大きいことを示した。論文・プレゼンテーションの内容は、背景となる物理の理解、結論および将来展開への提案等、水準に達するもので、著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。

以上の理由により、山下幸三提出の博士論文は、博士 (理学) の学位論文として合格であると認める。なお、本論文の主要部はすでに出版済である。