

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 18 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560266

研究課題名（和文） 低周波電磁波動と雷活動総合観測を用いた冬季雷及び夏季雷の電気的特性に関する研究

研究課題名（英文） Research on electrical properties of summer and winter lightning by using low frequency electromagnetic waves and comprehensive observations of thunderstorm activities

研究代表者

芳原 容英 (HOBARA YASUhide)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：10303009

研究成果の概要（和文）：北陸大規模冬季雷や関東夏季雷に伴う落雷の電気的特性導出のために国内スケールでの ELF 帯電波観測ネットワークを構築した。現在までに、2つの ELF 観測点のみによる日本周辺の落雷極性、電荷モーメント別の落雷時空間分布の導出に成功した。電荷モーメント導出では数千 km の空間スケールでは世界初。また、LF 帯との併用により 1年に渡る統計結果も得た。特に日本海北陸冬季雷及び冬季の太平洋沖にて、落雷電荷モーメントの大きな落雷の多発が確認された。

研究成果の概要（英文）：Electrical properties of winter lightning in Hokuriku region around the sea of Japan and of summer lightning over Kanto region are studied by using newly developed ELF observation network to detect radiations from lightning flashes. To date spatio-temporal distributions of lightning flashes with a polarity and charge moment information have been successfully derived This is the first attempt to use multipoint measurement of the ELF frequency range for such short separation distance. Moreover, one-year statistical analysis has been carried out by using the data from LF conventional lightning network together with our ELF network. As a result, we found that lightning flashes delivering a large amount of charge are frequently occurred around the sea of Japan and over the Pacific Ocean during the wintertime.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：電気電子工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：①電気・電磁環境 ②落雷電荷量マップ ③自然現象観測・予測 ④自然災害

1. 研究開始当初の背景

雷により発生するサージ電流は、送電線に対する影響はもとより、最近では高度情報化社会を支えている情報ネットワークやコンピュータシステムに使用されている電子回

路、各種産業への影響（例えば半導体工場等の瞬間電圧低下、鉄鋼産業における制御系のトラブル）、さらには風力発電設備への落雷等、人間社会への影響は甚大である。特に、中国地方山陰から東北地方日本海側に発生

する冬季雷は、その電気エネルギーの大きさは落雷電荷量にして数百クーロンにも及ぶ。この落雷電荷量は一般的な夏の雷の数十倍に達するにもかかわらず、詳細な雷特性には不明な点も多い。特に落雷電荷量は雷害の程度に比例するが、その測定には一般的には複数のフィールドミル等の静電界測定装置を用い、観測点近傍における落雷のみに制限されることから広域の統計的なデータを得るには極めて困難な状況にある。したがって、日本全土にわたる落雷電荷量を含む落雷データの蓄積とそれらを引き起こす雷雲の諸特性の導出を可能にすることは、将来の発雷予測の精度向上や、雷害リスクマネジメントを講じる上で極めて重要である。さらに、最近発見された大きな落雷電荷量をもつ正極性落雷に伴って起こる中間圏における発光現象（レッドスプライト）が大規模な日本海側冬季落雷に伴って観測されているが、日本の夏季雷に伴うレッドスプライトの観測に申請者グループが成功したことから、最近の異常気象によるゲリラ豪雨（集中豪雨）を引き起こすような夏季雷は一般的に小さな落雷電荷量と負極性雷が多いとされる夏季雷の特性と明確に異なる、冬季雷と同程度の大きなエネルギーを持つ雷活動も存在する可能性があり、その詳細な特性を明らかにする意義は極めて大きい

2. 研究の目的

本研究の目的は、第一に、雷共同観測キャンペーンを通じて日本特有の北陸地方日本海沿岸に発生する大規模冬季雷や関東地方に発生するゲリラ豪雨を引き起こす活発な夏季雷にともなう落雷の落雷電荷モーメント、落雷極性などの電気的特性をELF帯電磁波データよりリモートセンシングの手法を用いて導出することである。第二の目的は、第一の目的により得られた、夏季雷と冬季雷の電気的特性の比較を気象学的見地からも考察することにより日本における雷活動の物理的特性の包括的理解を得ることである。第三の目的として、2-3観測点のみのELF帯電磁波連続観測データを用いて日本国内全土の大規模落雷に伴う中和電荷量を導出し落雷電荷量マップの作成を行い、夏季及び冬季雷害リスクマネジメントへの重要な評価基準を提供することである。さらに将来的には、ゲリラ雷雨等の激しい雷を伴う集中豪雨の短時間予想を行ってゆきたいと考える

3. 研究の方法

(1) ELF帯電磁波動観測環境の整備

電通大により現在稼働中の北海道母子里観測点のELF帯広帯域電磁波動観測シ

テム[Hobara et al., 2000, 2001]に加えて、鹿児島県垂水市、名古屋大学太陽地球環境観測所垂水観測点に新たにULF/ELF観測システムを設置した。さらに、3点目の観測点として、伊豆大島内に同様な観測点を設置中である（H25年1月よりテスト観測開始）。

(2) 夏季、冬季雷総合観測

夏季雷及び冬季雷の観測キャンペーンをそれぞれ毎年7月から9月上旬、11月下旬から2月下旬に渡って実施した。具体的には、母子里、鹿児島でのELF帯電磁波観測、中間圏発光現象の光学観測を調布（津山（津山高専））を実施するとともに、電通大VLF帯送信電波受信ネットワークにより、中間圏発光現象にともなう、下部電離層擾乱観測を行った。

(3) 日本周辺落雷電荷量マップの作成

申請者のグループは北海道母子里における雷起源ELF帯トランジェント観測データから落雷電荷モーメント及び世界雷時空間マップの作成を行っている[Hobara et al., 2006; Hayakawa et al., 2005; 2006]。ここでは1観測点を利用して落雷地点の位置標定を行うものであるが、全世界の大規模落雷を捉えることができる一方で、落雷の標定精度は数100kmであり、日本国内スケールの標定には十分ではない。そこで本研究では、2観測点からの公合法による、落雷位置標定を行い、観測点までの距離を導出し、大地電離層導波管伝搬理論を用いて落雷電荷モーメント及び、落雷極性を導出した。また、LF帯落雷標定ネットワークによる落雷標定位置データと、北海道観測点のELF帯データとの併用により、1年間の長期にわたる日本周辺落雷電荷モーメントの時間空間分布を導出した。

まず、各ELF帯観測所の水平磁界データより、5分ごとの磁界の振幅の時系列データの $\mu + 10\sigma$ (μ : 平均, σ : 標準偏差) を超えた過渡波形をELFトランジェントと同定し、母子里の各イベントから最大±10ミリ秒以内に発生している垂水の単一イベントを同じ落雷によるものとした。

次に、各観測点での水平磁界2成分より空電の到来方向をそれぞれ決定し、2観測点からの公合法により落雷位置を標定した。さらに、同時に大地-電離層導波管モード理論を用いて Q_{ds} の導出を行った。本研究では、到来方位の決定には時間領域におけるゴニオメータ法、 Q_{ds} 導出にはインパルス法を各々の手法として採用した、この方法では、水平磁界2成分を用いて時間領域でリサージュ図形を描き、線形近似により求めた磁界ベクトルの方向から電磁波の伝搬方向を決定する。また、インパルス法では時間領域における電

流モーメントの指数関数的変化を仮定し、周波数領域で継続時間 $\tau \rightarrow 0$ (インパルス) とおくことにより Qds を得る。なお、落雷極性は到来方向と、イベント開始時の磁界波形の反変化により導出した。

さらに、LF 帯落雷標定ネットワークデータと母子里における ELF 観測との併用による 1 年間にわたる統計解析では、落雷位置を LF 帯ネットワークから得られた落雷標定位置とし、母子里から落雷地点までの距離を用いて、上記と同様に Qds を導出する。

4. 研究成果

- (1) ELFELF 帯電磁波ネットワーク観測を用いた日本周辺落雷位置および電気的特性の導出

① 事例解析

2011 年 3 月 9 日 13:45:35 (UT) の落雷イベントを使用した。各観測所において時間的一致がみられるトランジェントの時系列波形から描いたリサージュを以下の図 1 に示す。

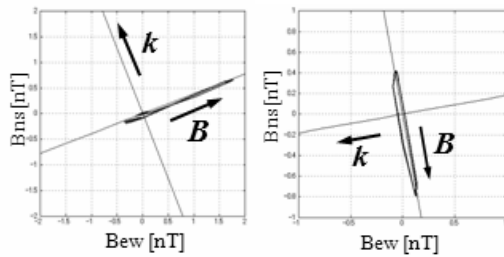


図 1：母子里（左）および垂水（右）の水平磁界 2 成分を用いて描かれたリサージュ

これより各観測点で観測された空電の到来方向を求め、交会法により標定された落雷位置および導出された物理量の詳細を図 2 及び表 1 に示す。

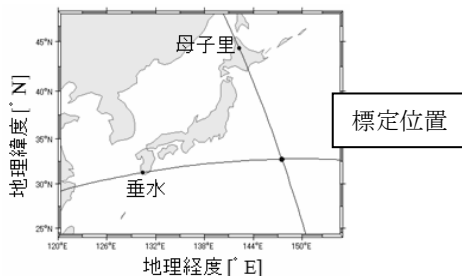


図 2：交会法より標定した落雷位置

表 1：導出された落雷データの諸元

標定位置	地理緯度	32.5 ° N
	地理経度	147.7 ° E
各観測所からの距離	母子里	1400 km
	垂水	1639 km
Qds		-396 Ckm (負極性)

② 統計解析

解析期間中に ELF 帯空電により検出された全 19153 の落雷イベントを用いて、 Qds 分布の導出および評価を行った。例として 2011 年 3 月 25 日の落雷分布を図 3 に示す。

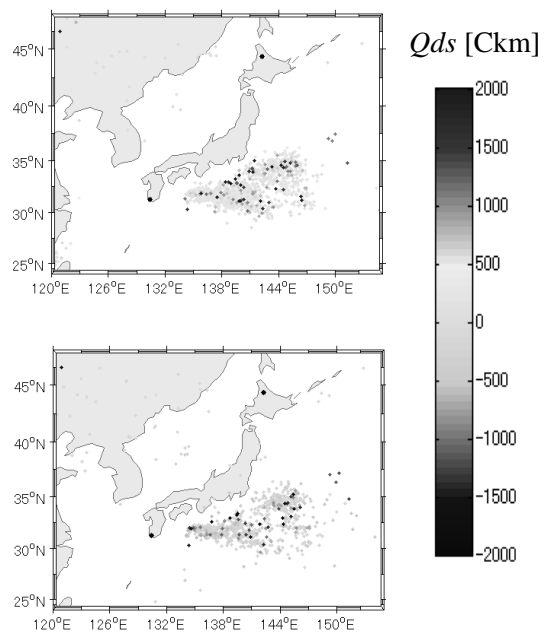


図 3：2011 年 3 月 25 日の Qds 分布 (上：正極性落雷，下：負極性落雷)

解析期間中には、2000 Ckm を超える大規模なイベントも存在し、雷活動が活発であったことがうかがえる。また、時間の経過とともに太平洋上雷雲の東方への移動が見られた。

表 2 および表 3 に期間、領域別の Qds の中央値の変化をそれぞれ示す。

表 2：期間別 Qds の中央値

期間	負極性 [Ckm]	正極性 [Ckm]	正極性雷の割合 [%]
03/01 ~ 03/10	-134	153	62.1
03/11 ~ 03/20	-126	147	57.0
03/21 ~ 03/30	-118	135	54.6

以上の結果から、全ての期間において正極性雷の発生数は負極性雷よりも多く、また正極性雷の Qds も負極性雷のそれより 20 Ckm 程度大きいという結果となった。また、時間とともに正極性雷数の割合は減少していった。

表 3：領域別 Qds の中央値

領域	負極性 [Ckm]	正極性 [Ckm]	正極性雷 の割合 [%]
全体	-123	140	56.2
日本海側	-82	102	69.0
太平洋側	-131	156	53.4

領域別分布においても、正極性雷が優勢だったが、特に日本海側において正極性雷数が 2 倍と卓越しており、このことは日本海側における冬季落雷の傾向を示しているといえる。また、領域ごとの比較をしてみると、日本海側に比べ太平洋側の落雷電荷モーメントの中央値は正・負極性ともに約 50 Ckm も大きいという結果となった。一般的に、日本海側の冬季落雷は Qds の大きな正極性落雷が多いとされているが、本研究により太平洋側でも正極性・負極性共に Qds の大きい落雷が発生することが分かった。

(2) ELF 帯トランジェント観測及び LF 帯落雷標定ネットワークを用いた一年間にわたる日本周辺落雷の時空間分布と電気的特性

LF 帯雷標定ネットワークにより観測された落雷位置及び、ELF 法により導出された電荷モーメントを用いて 2007 年 1 年間の落雷電気的特性の月別中央値を表したものを図 4 に示す。

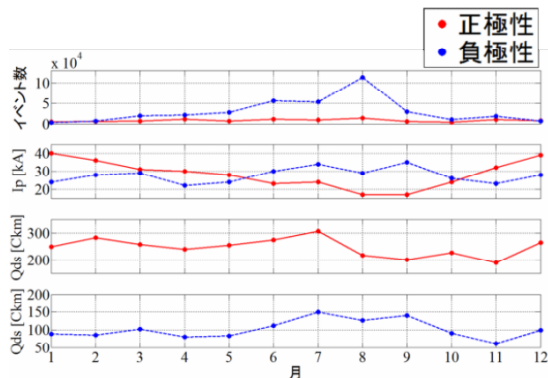


図 4. 2007 年における日本周辺の LF、ELF 観測を用いた落雷イベント数、ピーク電流及び電荷モーメントの中央値の月変化

まずピーク電流値に着目すると、正極性落雷が冬季にピークを持っているのに対し、負極性は夏季にピークを持っている。また、冬季では正極性が負極性の値よりも大きく、夏季では負極性の方が正極性より大きくなっている。一方、ELF 帯トランジェントを用いて導出した電荷モーメントは、正極性落雷では夏季雷である 7 月と冬季雷の 2 月にピークが確認できる。しかしながら、負極性落雷に関しては、夏季のみにピークを持っている。また、年間を通して正極性落雷の電荷モーメントが負極性を 2 倍以上上回っていることが分かった。

負極性落雷に関しては、電荷モーメントとピーク電流値の間に比例関係が見られた。つまり、負極性落雷ではピーク電流の大きなものは電荷モーメントもそれなりに大きいということの意味している。しかしながら、正極性のピーク電流値と電荷モーメントに関しては明確な相関は見られなかった。つまり、正極性落雷の場合、ピーク電流が多きいからといって、必ずしも電荷モーメントが大きいわけではなく、2つの物理量の間に独立性が存在すると考えられる。

次に北陸地方の冬季雷を効果的に見るために、冬季雷の中でも電荷モーメントが 500 Ckm 以上、ピーク電流値が 100 kA 以上の落雷に着目し、導出した日本周辺落雷頻度分布を図 5 及び図 6 に示す。

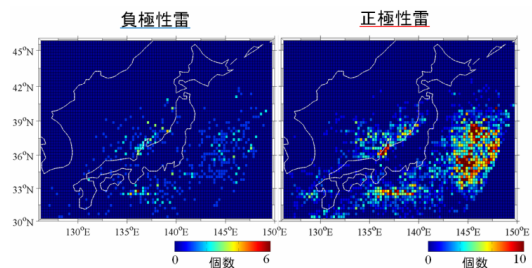


図 5. 落雷頻度分布 (冬季 >500 Ckm)

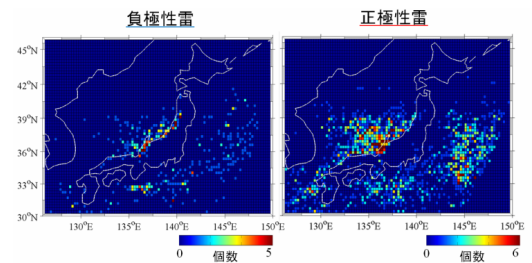


図 6. 落雷頻度分布 (冬季 >100 kA)

図 5 及び図 6 に示す落雷頻度分布では

軸が緯度、横軸が経度を表しており、左図は負極性落雷、右図は正極性落雷の分布図を表しており、カラーはイベント数を示している。図6から負極性落雷は全体のイベント数は少ないものの、北陸地方に大きな電荷モーメントを持つ落雷が集中している。正極性落雷に関しては、日本海側の北陸地方に大きな電荷モーメントを持つ落雷が多数発生していることが明確に示されている。また、今回初めて明らかになった事項として、太平洋沖の海上においても数多くの電荷モーメントの非常に大きい落雷が分布していることがわかった。ピーク電流についても同様に日本海側の北陸地方に大きなピーク電流値を持つ落雷が集中していることが確認できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 24 件)

1. Y. Hobara, T. Inoue, M. Hayakawa, and K. Shiokawa, Deducing Locations and Charge Moment Changes of Lightning Discharges by ELF Network Observations in Japan, IEEJ Trans Power Energy, 133, 12, accepted, 2013. 査読有
2. Y. Hobara, R. Nakamura, M. Suzuki, M. Hayakawa, and M. Parrot, Ionospheric perturbations observed by the low altitude satellite DEMETER and possible relation with seismicity, Journal of Atmospheric Electricity, 33 巻、2013、21-29 査読有
3. Hobara, Y., T. Harada, K. Ohta, M. Sekiguchi, and M. Hayakawa, A study on global temperature and thunderstorm activity by using the data of Schumann resonance observed at Nakatsugawa, Japan, J. Atmos. Electr., 31 巻、2011、111-119 査読有
4. Y. Hobara, M. Balikhin, V. Krasnoselskikh, M. Gedalin, and H. Yamagishi, Statistical study of the quasi - perpendicular shock ramp widths, Journal of Geophysical Research Atmospheres, 115 巻、2010 査読有

[学会発表] (計 29 件)

1. 芳原 容英、雷放電に伴う電磁気現象 (基調講演)、日本天文学会春季年会、2012 年 3 月 21 日、龍谷大学

2. 芳原容英、GROUND-BASED MEASUREMENT OF THE SEISMO-ELECTROMAGNETIC SIGNALS (invited)、URSI General Assembly and Scientific Symposium of International Union of Radio Science、2011 年 8 月 19 日、トルコ (イスタンブール)
3. 芳原容英、Ionospheric transmission property deduced from lowaltitude satellite and ground-based observations of lightning ELF waves. (invited)、International Conference on Atmospheric Electricity (ICAE)、2011 年 8 月 8 日、ブラジル (リオデジャネイロ)
4. 芳原容英、Statistical analysis of the ULF magnetic field data linked to Izu Island earthquake swarm. (invited)、International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)、2011 年 7 月 3 日、オーストラリア (メルボルン)
5. 芳原容英、VLF subionospheric disturbances and ELF transients associated with TLEs: Observations and modeling (invited)、International Workshop on Seismo-Electromagnetics and Atmospheric Science、2010 年 11 月 17 日、R. B. S. College, Bichpuri, Agra. (インド)

[図書] (計 3 件)

1. 芳原容英、他、近代科学社、エネ&エネサイティングサイエンス、2013、72-109
2. Yasuhide Hobara 他、Institution of Engineering and Technology、Lightning Electromagnetics、2013、611-646、647-685
3. 芳原容英、AIP Conference Proceedings、VLF subionospheric disturbances and ELF transients associated with TLEs: observations and modeling in PROPAGATION EFFECTS OF VERY LOW FREQUENCY RADIO WAVES、2010、16

6. 研究組織.

(1) 研究代表者

芳原 容英 (HOBARA YASUHIDE)
電気通信大学・大学院情報理工学研究所・教授
研究者番号：10303009

(2) 研究分担者

早川 正士 (HAYAKAWA MASASHI)
電気通信大学・先端ワイヤレスコミュニケー

ション研究センター・客員教授
研究者番号：80023688

太田 健次 (OTA KENJI)
中部大学・工学部・教授
研究者番号：10131161

鳥家 秀昭 (TOYA HIDEAKI)
津山高等専門学校・電子制御工学科・教授
研究者番号：40311071