

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400463

研究課題名(和文) 高エネルギー落雷に注目した日本周辺の雷活動の気候学

研究課題名(英文) Climatology on the lightning with high energy around Japan

研究代表者

岩崎 博之 (IWASAKI, Hiroyuki)

群馬大学・教育学部・教授

研究者番号：70261823

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：上位10%の落雷エネルギーを持つ落雷を「強い落雷」、全落雷数に占める強い落雷の割合をS比と定義し、全球・領域規模の落雷気候学の研究を行った。全球的に見ると、落雷頻度が低(高)い領域ではS比の値が高(低)くなる特徴があった。S比が40%以上の領域は50-60°N/Sの海洋上に分布し、冬期の夜間～早朝に落雷が増加した。また、シベリアでもS比は30-40%と高く、夏期の日中に落雷が増加した。日本周辺でも落雷頻度が低い領域ではS比の値が高い。S比の高い関東地方の春期は、強い落雷の多くは正極雷であった。一般に、正極雷は高い落雷エネルギーを持つため、正極雷の割合がS比の大きさに関係していると考えられた。

研究成果の概要(英文)：Climatological features of lightning, based on stroke energy, were studied. The ratio of strong lightning (>90th percentile of stroke energy) to overall lightning is defined as S-ratio. It is found that a large S-ratio was observed in the grid where lightning activity was very weak. Four regions were found in which the S-ratio exceeded 30% over the ocean in the sub-polar climatic zones of the Northern and Southern Hemispheres. In cold seasons of the two Hemispheres, both the lightning activity and the S-ratio increased. In addition, Siberia also exhibited a large S-ratio (>30%), and both the lightning activity and the S-ratio increased in summer season. S-ratio exceed 30% over the Kanto district in spring. Most of strong lightning were corresponding to positive lightning. Since it is well known that positive lightning have a larger stroke energy, it is considered that the cumulonimbi that brought strong spring lightning was equivalent to cumulonimbi that brought positive lightning.

研究分野：気象学

キーワード：雷 落雷エネルギー WLLN 正極雷 気候学

1. 研究開始当初の背景

これまでの雷の研究は、観測データの制限から、限られた領域の落雷についての研究が主流であった。近年、Washington 大学が開発した全球落雷観測網 (WWLLN: World Wide Lightning Location Network) データを利用することで、広域の落雷を一樣な基準と精度で研究することが可能になり、真の意味での領域比較が容易になりつつある。また、これまでの個別領域の研究から、落雷エネルギーは  $\sim 10^4$  という大きな dynamic rang を持つことが知られているが、何故、大きなエネルギー幅が存在するのか明確な説明はなされていない。それどころか、データの制約から高いエネルギーを伴う落雷が卓越する領域や季節などの基礎的な知見さえないのが現状である。この基礎的な知見を蓄積することで、大きな dynamic rang を理解する糸口が得られる可能性もある。

ここでは、WWLLN から得られる落雷エネルギーに注目し、高エネルギー落雷について気候学的な側面から研究を行う。

2. 研究の目的

大きな dynamic rang を持つ理由を、直接、解明するのは難しいため、本研究では、高いエネルギーを持つ落雷に注目し、その気候学的な特徴を明らかにし、その理由に迫る糸口を探ることを目的としている。

但し、申請書では日本周辺のみを研究対象としていたが、全球規模の視点による研究が重要であり、かつ、発展性があることが分かったので、申請時の研究計画を変更している。

3. 研究の方法

1) データ

解析には、次の2種類の落雷データを用いた。

WWLLN 落雷データ (2009 - 2014)

Washington 大学から提供された全球落雷観測網データである。全球に展開された約 80 の観測点で記録された空電データから全球における落雷位置・時刻・落雷エネルギーを計算している。

日本周辺と全球の落雷についての気候学的な研究には、WWLLN データを利用した。

docomo 落雷データ (2013-2014)

株)ドコモが販売している日本域の落雷データである。落雷位置・時刻・エネルギーに加え、落雷の極性の情報が含まれている。

強い落雷が卓越する春期の関東地方の解析には、WWLLN 落雷データに加えて、この docomo 落雷の極性情報も利用している。

2) 落雷エネルギーを用いた分類

図1に、WWLLN で検出された日本周辺(赤)と全球(青)の落雷についてのエネルギー頻度分布を示す。2つの領域とも、200-400J に極大を持つ対数正規分布で近似できる。

ここでは、全球落雷の上位 10%以上のエネ

ルギー(>7666J)を持つ落雷を「強い落雷」と定義する。全落雷数に対して、強い落雷が占める割合を S-ratio とする。

また、下位 10%以下のエネルギー(<175J)を持つ落雷を「弱い落雷」と定義し、その割合を W-ratio とする。

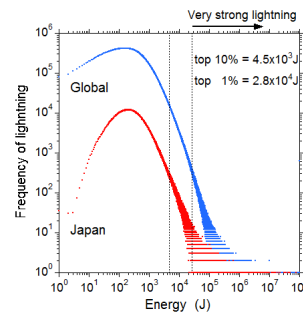


図 1: 日本周辺(赤)と全球(青)の落雷についてのエネルギー頻度分布。

4. 研究成果

1) 全球の落雷分布と W/S-ratio 分布の特徴

全球を  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  の格子に分け、格子毎の落雷密度と弱い/強い落雷の特徴について調べる。図2は、WWLLN データから得られた全落雷の密度分布である。

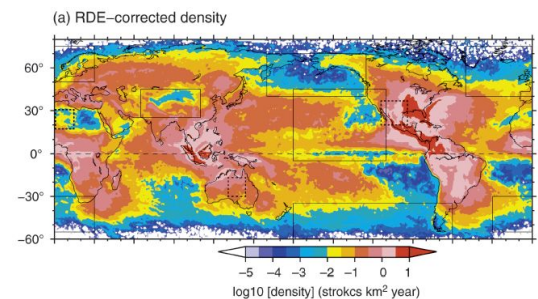


図 2: WWLLN データから求めた落雷密度分布。

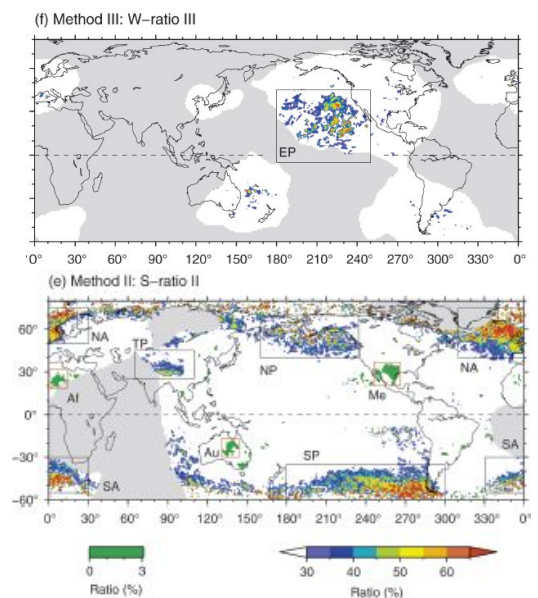


図 3: (上) 全落雷に対し弱い落雷の割合 (W-ratio)。(下) 全落雷に対する強い落雷の割合 (S-ratio)。灰色域は、弱い落雷と強い落雷の解析において、データの信頼度が低い領域を示し、それらは解析対象から外した。

アフリカ大陸、インドネシア周辺と南北アメリカ大陸の熱帯から亜熱帯域で落雷密度が高く、高緯度に向かうにつれて、落雷密度は低下する。海洋上では、黒潮や南太平洋収束帯に沿って落雷密度の高い領域が広がり、大まかに、積乱雲に伴うような降水量が多い領域と一致する。

格子毎に計算した全落雷に対する弱い落雷の割合(W-ratio: 図3上)と強い落雷の割合(S-ratio: 図3下)を図3に示す。W-ratioは東太平洋の限られた領域で30-60%と大きな値を示し、その領域での落雷密度は比較的低い。この領域の弱い落雷の発生は、冬期(12-2月)の06-19LSTに集中している。

一方、S-ratioはチベット高原(次節参照)と高緯度(北緯・南緯50-60度帯)で30-60%の高い値を示す。この強い落雷の占める割合が高い領域は、陸域を避けるように海洋上に帯状に広がっている(図3下)。この高S-ratio域では、南北半球ともに、寒候期の夜間から早朝にかけて落雷が発生しやすく、強い落雷が卓越するという共通性がある。

図3下では、シベリアは信頼性が低い領域(灰色)になっている。しかし、落雷検出精度が改善された2015-2016年のWLLNデータを用いると、シベリアにもS-ratioが30-40%に達する領域が帯状に認められ(図略)、夏期の日中に落雷が発生している。

図2と図3下の比較から、全ての高S-ratio域では落雷密度が小さいという共通点が認められる。逆に、インドネシア等の落雷密度が大きな領域にはS-ratioが30%を越える領域はない。この特徴を全球規模で概観するために、全格子における落雷密度とS-ratioの散布図を図4に示す。図の は、落雷密度を5つの階級に分けたときの、S-ratioの平均値を示す。図から明らかな様に、落雷密度が小さく(大きく)なるにつれて、S-ratioの値が大きく(小さく)なる特徴がある。つまり、落雷が発生し難い領域(図2の  $10^{-1.5}$  stroke/km<sup>2</sup>/yr以下)では、7666J以上の大きなエネルギーを持つ落雷の割合が高くなると言える。但し、90-180°Wの熱帯海洋上では落雷密度が低くても、S-ratioが30%を越える領域がないことは特筆すべきであろう。

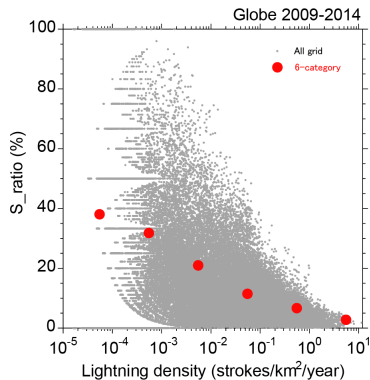


図4: 落雷密度とS-ratioの関係。灰色は全格子について、 は落雷密度を5階級に分けたときの落雷密度とS-ratioの関係を示す。

## 2) 領域規模の落雷気候学

### チベット高原

WLLNは全球の落雷を検出できるため、これまで研究対象にならなかった遠隔地の落雷の特徴を調べられる。その例として、チベット高原周辺の落雷密度とS-ratioの分布を示す(図5)。

落雷密度とS-ratioの比較から分かるように、チベット高原の狭い領域であっても、図4に示した全球規模の特徴、つまり、落雷密度が低い領域ではS-ratioが高くなる傾向が認められる。

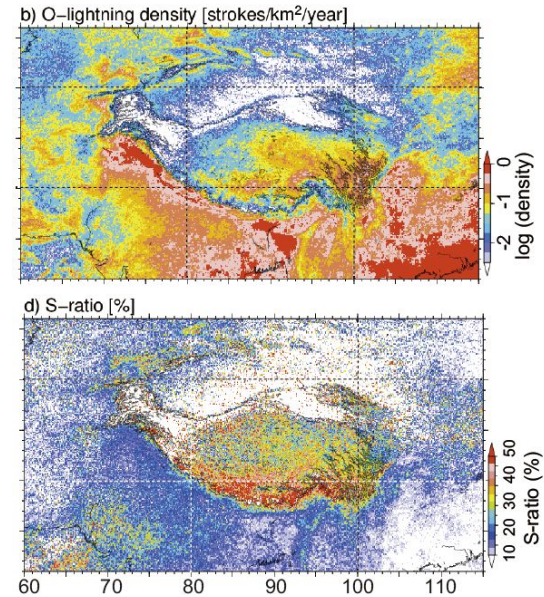


図5: チベット高原の落雷密度とS-ratioの分布。

### 西ヒマラヤ山脈における落雷の春期極大

チベット高原ではモンスーン期の6-9月に、積乱雲活動の活発化に伴い落雷数が増加する。しかし、その近傍の西ヒマラヤでは、図6に示すように、モンスーン期と4月に、2度の落雷数の極大が訪れる。春期に落雷が起きるときには、深いトラフを伴う温帯低気圧が西ヒマラヤを通過する。それに伴う一般風の地形収束に伴い西ヒマラヤ山脈で積乱雲が発達していると推測される。

この期間の落雷密度は少ない。しかし、高いエネルギーを伴った落雷は少なく、図4で示された特徴は認められない。

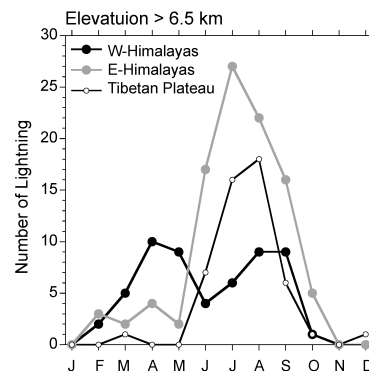


図6: 西ヒマラヤ山脈・東ヒマラヤ山脈とチベット高原上の落雷数の季節変化。

### 日本周辺の落雷気候学

日本における落雷気候学は、落雷データの入手が困難なことから、充分に行われてきたとは言いがたい。そこで、2009年4月-2012年12月を解析期間とし、基礎的な情報である落雷密度分布を図7に示す。一般に、北関東や九州などが雷多発地帯として知られているが、図7から明らかな様に、北関東や九州の数倍の落雷密度が、黒潮流路に沿って観測されている(K1+K2領域)。多くの場合、温帯低気圧の東進に伴って、黒潮流域で積乱雲が発達し、それに伴い落雷が発生している。

そして、図4で示した全球規模の落雷密度とS-ratioの関係は、日本周辺でも成立する。図8はS-ratio分布であり、落雷密度の低い黒潮続流域(K3領域)や北西太平洋で30%以上の高いS-ratioが認められる。

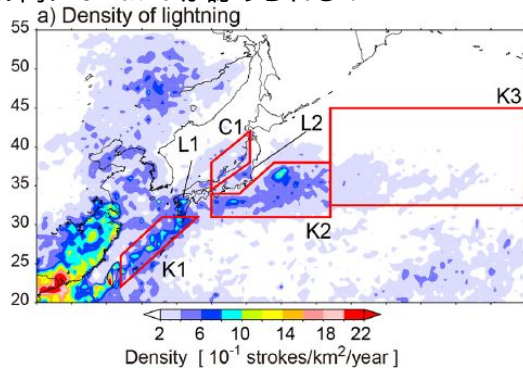


図7:日本周辺の落雷密度分布。

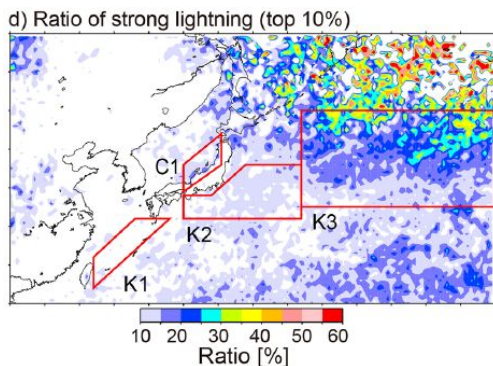


図8:日本周辺のS-ratio分布。

次に、落雷密度が高い関東域を例に、陸域の落雷活動の季節変化の特徴を調べる。ここでは、落雷エネルギー上位1%(>28000J)を基準として、非常に強い落雷(Very Strong lightning)を定義し、その全体の落雷に対する割合をVS-ratioとしている。S-ratioとVS-ratioは同位相の季節変化になるので、その比の違いは議論しない。

関東地方の落雷数は夏期に増加し、VS落雷もそれに同期して夏期に極大となる(図9)。しかし、落雷頻度が夏期の5%未満と少ない春期や秋期にも、VS落雷は発生しており、特に、春期の極大が明瞭である。それに対応して、VS-ratioは春に明瞭な極大を迎える。全落雷数(青)とVS-ratio(黒)を比較すると、図4と同じ傾向が、季節変化に対しても認めること

ができる。つまり、関東地方では、春雷に伴う落雷数は少ないが、非常に強い落雷の占める割合が高いという特徴がある

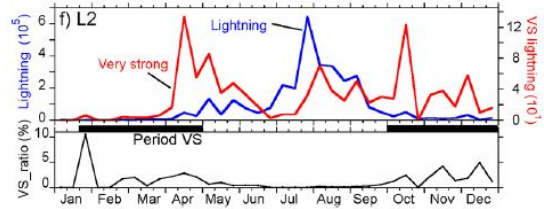


図9: 関東地方の全落雷数(青)とVS落雷(赤)とVS-ratio(黒)の季節変化。解析期間は、2009年から2012年までの4年間である。

### 関東地方の春期雷の特徴

前節で説明したように、北関東における春雷には落雷エネルギーの高い落雷が卓越する。ここでは、2013-2014年の4-5月を解析期間とし、WLLN落雷データに加えて、docomo環境観測網で捉えられた落雷データの極性情報を利用して、落雷の極性と落雷エネルギーの関係を調べる。なお、比較のために、落雷数が極大になる8月についても同様の解析を行う。

解析期間の春期に7362個、夏期に53648個のWLLN落雷が検出された。その内、春期では44.8%、夏期では54.4%の落雷がdocomo環境観測網でも検出されている。これら同定された落雷を全落雷(overall)、強い落雷(Strong: > 7666 J)と非常に強い落雷(Very strong: > 28000 J)の3階級に分けて、月毎に正極性落雷の占める割合を求めた(図10a)。夏期の雷に比べて春期の雷では正極雷の占める割合が約2倍高い。そして、特筆すべきは、季節に依らず、エネルギーの高い落雷ほど正極雷の占める割合が高くなることである。春期には、強い/非常に強い落雷に占める正極雷の割合は50-90%にも達する。

正極雷と負極雷に占める強い/非常に強い落雷の割合を図10bと図10cに示す。負極雷に比べて、正極雷では「強い落雷」の占める割合が高く、その傾向は春期の落雷で顕著である。

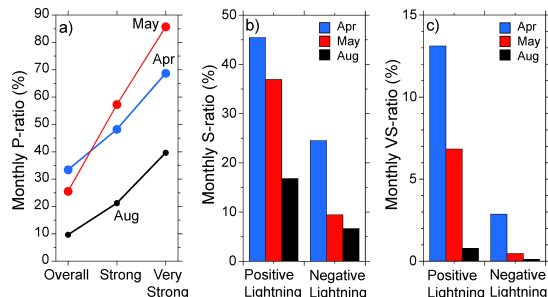


図10a: WLLN落雷データで定義された「落雷の強さ」と docomo落雷データで定義された正極雷の占める割合の関係。

図10b: 正極雷と負極雷とS-ratioの関係

図10c: 正極雷と負極雷とVS-ratioの関係

国内外の観測に基づく統計研究から、負極

雷に比べて、正極雷に伴う最大電流値(落雷エネルギーに相当)は数倍~10倍大きいことが知られている。本研究の結果は、この先行研究の知見と整合的である。つまり、北関東の春雷は正極雷の占める割合が高いため、その結果として、高エネルギーの落雷が占める割合も高くなると解釈することができる。

しかし、この解釈が、大きな S-ratio を持つ高緯度地域やチベット高原についても応用できるのかは、全球規模にわたる落雷の極性データが存在しないため、考察することもできない。また、仮に、この解釈が正しいとしても、春期に正極雷が発生しやすい原因については全く解決されない。

### 3) 今後の研究方針

落雷が発生するためには、積乱雲の内部で正電荷と負電荷が分離する必要がある。現在、確からしいと考えられている Takahashi (1978)の「霰と氷晶の接触分離説」によると、積乱雲内部の-10 ~ -20 高度に多量の霰が存在することになる。この霰分布の時空間変動が、雷活動の特徴に影響すると考えられる。そこで、国土交通省 X-rain の偏波レーダーから、この霰分布の時空間変動を調べ、落雷エネルギーや落雷の極性との関係を調べる予定である。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Iwasaki, H., 2016: Relating lightning features and topography over the Tibetan Plateau using WLLN data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **94**, 431-44. 査読有, DOI:10.2151/jmsj.2016-025.

南條 利昂・芳賀 望・本島 邦行・岩崎 博之, 2016: 落雷と見通し内 VHF 帯伝播異常の統計的関連性. *J. Atmospheric Electricity*, **36**, 23-38. 査読有, DOI.org/10.1541/jae.36.23.

Iwasaki, H., 2016: Recent variations in surface specific humidity in the warm season over Japan. *Theor. Appl. Climatol.*, **123**, 845-858. 査読有, DOI: 10.1007/s00704-015-1402-5.

Norose, K., F. Kobayashi, H. Kure, T. Yada, H. Iwasaki. 2015. Observation of downburst event in Gunma prefecture on August 11, 2013 using a surface dense observation network. *J. Atmospheric Electricity*. **35**, 31-41. 査読有, doi.org/10.1541/jae.35.31

Iwasaki, H., 2015: Climatology of global lightning classified by stroke energy using WLLN data. *Int. J. Climatol.*, **35**, 4337-4347. 査読有, DOI: 10.1002/joc.4291.

Iwasaki, H., 2015: Increasing trends in heavy rain during the warm season in eastern Japan and its relation to

moisture variation and topographic convergence. *Int. J. Climatol.* **35**, 2154-2163. 査読有,

DOI: 10.1002/joc.4115

Iwasaki, H., 2014: Preliminary study on features of lightning discharge around Japan using World Wide Lightning Location Network data. *SOLA*, **10**, 98-102. 査読有, DOI: 10.2151/sola.2014-020.

〔学会発表〕(計 11 件)

小川 哲也, 甲野 慎太郎, 岩崎 博之, 清水 慎吾, 芳原 容英, 2017: 激しい降水事象に伴うトータル雷の時空間変動に関する研究. 日本大気電気学会第 95 回研究発表会, 2017 年 1 月 7 日, UNITY(兵庫県, 神戸市).

岩崎 博之, 2017: 台風の inner core における落雷密度の時間変化について. 日本大気電気学会第 95 回研究発表会, 2017 年 1 月 7 日, UNITY(兵庫県, 神戸市).

岩崎 博之, 2016: 台風の inner core における落雷密度の時間変化について. 台風研究会 - 複合要因により巨大化する台風災害の実態解明と減災に向けて -, 2016 年 11 月 27 日, 京都大学防災研究所(京都府, 宇治市).

岩崎 博之, 2016: 暖候期の日本周辺における発雷効率の特徴. 日本気象学会 2016 年秋季大会, 2016 年 10 月 26 日, 名古屋大学(愛知県, 名古屋市).

岩崎 博之, 2016: 落雷エネルギーと極性に注目した東日本における春期雷の特徴. 日本気象学会 2016 年春季大会, 2016 年 5 月 21 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター(東京都, 渋谷区).

岩崎 博之, 2016: 春期の西部ヒマラヤ山脈周辺に見られる雷活動の極大. 日本大気電気学会第 94 回研究発表会, 2016 年 1 月 8 日, 電気通信大学(東京都, 調布市).

岩崎 博之, 2015: 春期の西部ヒマラヤ山脈周辺に見られる雷活動の極大. 日本気象学会 2015 年秋季大会, 2015 年 10 月 30 日, 京都テルサ(京都府, 京都市).

岩崎 博之, 2015: 落雷エネルギーに着目したチベット高原における雷活動の特徴. 日本気象学会 2015 年春季大会, 2015 年 5 月 22 日, エポカルつくば(茨城県, つくば市).

岩崎 博之, 2015: 落雷エネルギーに注目した全球落雷気候学. 日本大気電気学会, 2015 年 1 月 10 日, 千葉大学(千葉県, 千葉市).

岩崎 博之, 2014: 落雷エネルギーに注目した全球落雷気候学. 日本気象学会 2014 年秋季大会, 2014 年 10 月 22 日, 福岡国際会議場(福岡県, 福岡市).

岩崎 博之, 2014: 落雷エネルギーに注目した日本周辺の雷活動の気候学. 日本気象学会 2014 年春季大会, 2014 年 5 月 23 日, 横浜開港記念会館(神奈川県, 横浜市).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩崎 博之 (IWASAKI Hiroyuki)

群馬大学・教育学部・教授

研究者番号：70261823