

第11回気象文化大賞 研究報告書

課題名： 気象衛星ひまわり赤外多波長データを用いた落雷予測のための基礎研究

研究代表者： 岩崎 博之（群馬大学共同教育学部）

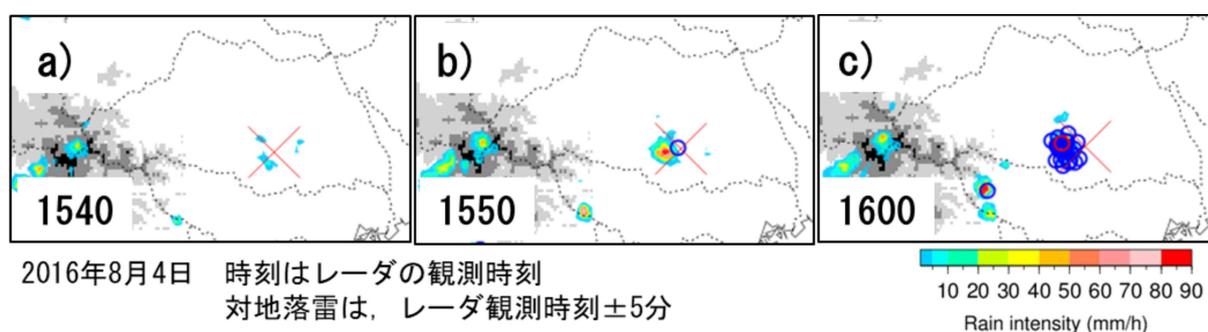
1. 研究背景と目的

2016年8月4日15時55分頃に、埼玉県川越市の川越南高校の野球場において野球部員が落雷の被害に遭い、心肺停止で病院に搬送された。新聞報道によると、当時は日も差しており、その落雷に先行する雷鳴は聞こえなかったという（例えば、埼玉新聞, 2016）。これらの状況から考えると、この落雷は、急発達する孤立した積乱雲に伴う最初の落雷（第1雷撃）であった可能性がある。そうであれば、落雷からの回避行動が難しい事例だったと言える。

本研究の目的は、1) この落雷が第1雷撃であることを落雷データから確認し、2) 静止気象衛星の赤外データから第1雷撃の直前予測が可能か検討し、更に、3) 第1雷撃の大気電気学的な特徴を明らかにすることである。今回の報告書では、直前予報の研究については中間的な報告に留め、第1雷撃の特徴の記述に重点を置くことにする。

2. 川越落雷事故の原因となった落雷の特徴

第1図に、川越落雷事故の前後の気象庁レーダエコーと落雷地点（対地放電）の分布を示す。第1b図ではレーダエコーの観測時刻は15時50分の分布であるが、落雷地点は15時46分00秒から56分00秒の10分間に検出された全ての地点を重ね書きしている。なお、第1図に示した全ての期間において、雲間放電は検出されていない。



第1図：川越落雷事故の前後におけるレーダエコーと落雷地点（対地放電）の分布。○は負極性雷撃，○は正極性雷撃の落雷地点を示し、赤い十字の交点が川越南高校の野球場の位置を示す。降水強度分布の推定には気象庁合成レーダを使い、落雷地点の推定にはフランクリン ジャパンが管理するJLDN落雷データを利用した。

15:40には10 mm/h以上の強いエコーは観測されず、まだ、埼玉県に落雷は起きていない（第1a図）。その10分後の15:50に80 mm/hの強いエコーが観測され、15時55分56秒に川越南高校の野球場の西1.1 kmの地点に1つの負極性の雷撃（stroke）が検出されている。この雷撃が事故をもたらしたと考えられる。落雷の評定位置と落雷地点には1.1kmのズレがあるが、これは評定誤差であろう。その10分後には、エコーの周辺に30個以上の雷撃が検出され、その殆どが事故現場から西に5-8 km離れている（第1c図）。

以上の状況から、事故の原因になった落雷は、急発達した積乱雲に伴う最初の雷撃、つまり、第1雷撃であったと見なすことができる。この雷撃の特徴を第1表にまとめる。

音波の屈折の効果により、雷鳴は落雷地点から15km以上離れた地上には届かないため、一般に、雷鳴が聞こえたら、雷雲が15kmよりも近くまで接近していると考え、避雷行動をとることが推奨されている。しかし、この第1雷撃では、先行する雲間放電も雷撃（対地放電）も観測され

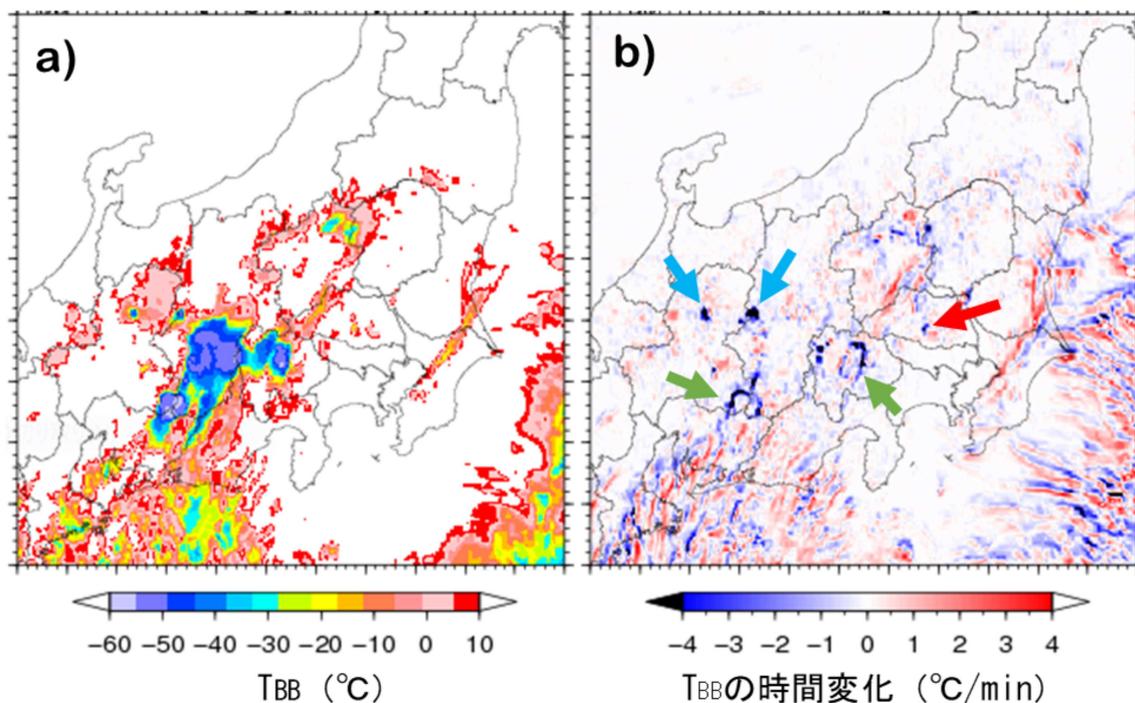
ていないので、雷鳴を使って落雷の予兆や雷雲の接近を知ることは不可能であった。防ぎようのない事故だったのかも知れない。

第1表 川越落雷事故の原因になった第1雷撃の特徴

発生時刻	2016年8月4日15時55分56.01秒 JST
落雷位値	北緯35.902度 東経139.442度 (評定誤差 1.1 km)
電流値	-10 kA (負極性雷撃)
多重度	1回 (多重雷ではない)
雲間放電	検出されず

3. 気象衛星ひまわりデータを用いた第1雷撃の直前予報の可能性について

静止気象衛星ひまわりは2.5分毎に日本全域を輝度温度を観測しているため、積乱雲の発達に伴う雲頂温度の変化から、第1雷撃の直前予測ができる可能性がある。そこで、川越落雷事故をもたらした第1雷撃を例に、その可能性について検討する。



第2図: a) 2016年8月4日15時55.0分の輝度温度分布. b) 15時52.5分と15時55.0分のデータから求めた輝度温度の変化率の分布. 負の値が輝度温度が低下したことを意味する. 矢印の意味は本文を参照.

第2a図は、川越落雷事故の原因となった第1雷撃が発生する直前の15時55分における気象衛星ひまわり赤外band13 (10.4 μ m) データから求めた輝度温度分布である。落雷地点の近傍には、輝度温度が -20°C から -30°C の直径10km程度の雲域が認められる。第2b図において、この雲域は $-3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ から $-4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の割合で輝度温度が低下していることが分かる (赤の矢印)。この温度低下率を雲頂の上昇速度に変換すると約10 m/sとなり、一般的な積乱雲の上昇気流と同じ程度の速度となる。そして、この雲域において、第1b図と第1c図に示した第1雷撃と後続雷撃が発生したことになる。つまり、この第1雷撃に関しては、気象衛星ひまわりの赤外データから前兆現象を検出できる可能性があると言える。

しかし、第2b図の水色の矢印で示された雲域は、 -40°C 以下の輝度温度と $-4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の輝度温度の変化率が認められるが、この近傍では落雷と雲間放電は検出されていない。つまり、雲域の輝度温度とその変化率だけでは、落雷が起きるか否かを判別することは難しいことが分かる。

更に、輝度温度の変化率には解釈が難しい点がある。急発達する孤立した積乱雲であれば、その雲頂温度の低下は、積乱雲の発達に伴う雲頂の上昇と見なせるだろう。しかし、緑の矢印で示された雲域では、積乱雲のアンビルが水平方向に拡大することに対応して、 $-4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ を超える輝度温度の低下域が円弧状に現れる。この場合でも、雲域の輝度温度の低下域と落雷との対応は非常に悪い。直前予報の可能性について検討するには、このようなノイズとなる雲域を排除して、孤立した積乱雲の雲頂のみを抽出するアルゴリズムを作成する必要がある。

4. 第1雷撃の特徴

1) 第1雷撃に注目する理由

孤立した積乱雲内部の理想的な電荷分布は3極構造と考えられ、この構造はTakahashi (1978と1984)の着氷電荷発生機構から説明できる。一方、Rust and MacGorman (2002)で報告されているように発達した積乱雲の電荷分布は複雑で、この3極構造が観測されるとは限らない。

第1雷撃をもたらす積乱雲の電荷分布は、積乱雲が発生してから間もないため、理想的な3極構造に近いと考えられる。一方、通常の雷撃では、近傍に新しい積乱雲が発生するなどして、理想的な3極構造が維持されているとは限らないであろう。つまり、第1雷撃と通常の雷撃では、積乱雲内部の電荷構造に違いが生じている可能性があり、それに対応して第1雷撃と通常の雷撃の特徴が異なることも考えられる。ここでは、この作業仮説に基づき、第1雷撃と通常の雷撃の大気電気学的の特徴について比較を行う。

2) 調査方法

フランクリンジャパンが運営するJLDN (Japan lightning Detection Network) で検出された落雷を解析に用いた。解析期間は2016, 2017と2022年の夏期 (7月下旬~9月上旬の計145日)、解析範囲は北緯34-38.5度、東経136.0-141.5度の範囲である。

次の基準を満たす雷撃を「第1雷撃」と定義し、それ以外を「通常の雷撃」と呼ぶことにする。

基準: 前60分間の時間内に半径30km以内の範囲で、雷撃が検出されていない。

合計で6323個の第1雷撃が抽出された。全雷撃数は65万9529個なので、その0.94%が第1雷撃だったことになる。

3) 第1雷撃の大気電気学的特徴

a: 極性とピーク電流

第2表は、第1雷撃と通常の雷撃の極性を示している。通常の雷撃では負極性雷撃が80%以上 (正極性雷撃は20%以下) を占め、これまでの研究で報告されている夏期の落雷の特徴と一致する。一方、第1雷撃では正極性雷撃が44%を占めており、通常の雷撃よりも正極性雷撃の割合が約2.5倍ほど高い。

第3図は、第1雷撃を中心に半径30 km以内で、第1雷撃の発生後30分以内に検出された後続雷について、正極性雷撃であった割合を示している。第2雷撃から正極性の割合は減少し続け、15番目以降の雷撃では通常の雷撃と同じ割合になる。つまり、第1雷撃は正極性雷撃である確率は高いが、雷撃の順番が進むと、通常の雷撃の特徴と変わらなくなる。

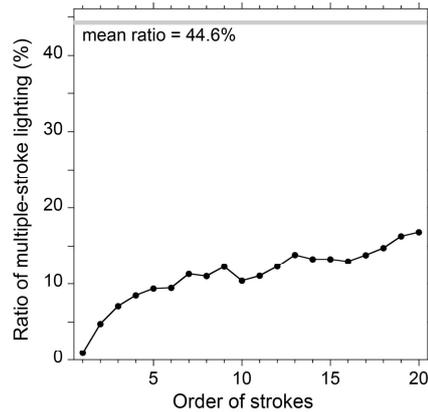
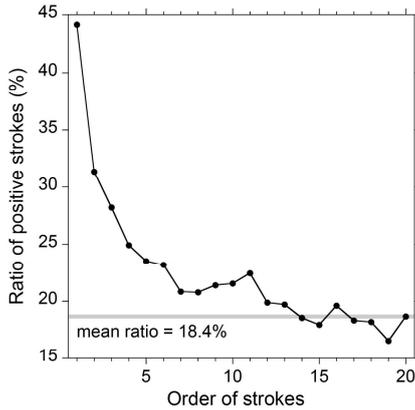
また、第3表は、第1雷撃と通常の雷撃のピーク電流の平均値を示す。正極性雷撃では第1雷撃は通常の雷撃の1.5倍のピーク電流が観測されているが、負極性雷撃では差が見られない。

第2表 極性の割合

	負極性	正極性
第1雷撃	55.9%	44.1%
通常落撃	81.6%	18.4%

第3表 ピーク電流の平均値

	負極性	正極性
第1雷撃	-18.4kA	+15.1kA
通常落撃	-17.3kA	+9.9kA



第3図(左)：雷撃の順番と正極性雷撃である割合の関係。解析期間全体での正極性雷撃の割合は18.4%であった。
 第4図(右)：雷撃の順番と多重雷である割合の関係。解析期間全体での多重雷の割合は44.6%であった。

b: 多重雷

1回の落雷が複数の雷撃(stroke)から構成されている場合があり、「多重雷」と呼ばれている。前橋における夏期の落雷では、65%の落雷が多重雷であったとの報告もある(竹内と仲野, 1983)。それに対して、1つの雷撃からなる落雷は「単一落雷」と呼ばれている。

ここでは、Iwasaki (2020)の手法を参考にして、JLDN落雷データから多重雷を定義した。具体的には、ある雷撃とその次の雷撃の距離が0.5 km以下、かつ、時間差が10-400 m秒の場合は、この2つの電撃は同じ多重雷の構成要素であると解釈した。その結果、第1落雷の中に、5個の正極性多重雷と55個の負極性多重雷の計60個(0.92%)が認められた。通常の落雷では44.6%の雷撃が多重雷の構成要素であったことから、第1雷撃は多重雷の割合が極めて低いと言える。また、第4図に示すように、雷撃の順番が進むと、徐々に多重雷の割合は大きくなり、通常の電撃の特徴に近づく。

c: 雲間放電

通常の落雷では、雷撃(対地放電)の直前に雲間放電が観測されることが多く、雲間放電に注目して、落雷の直前予測を目指している研究者もいる。今回の解析期間において、659529個の対地放電と609701個の雲間放電が観測されており、その比率は1.00:0.93となる。対地放電と雲間放電は、ほぼ同数であったと言える。

第1落雷が発生する前0.5秒の時間内に半径5 km以内の範囲で、検出された雲間放電に注目する。第4表は、第1雷撃の直前に検出された雲間放電の回数の平均値を示している。対地放電と雲間放電の個数がほぼ同数であることを考慮すると、第1雷撃は雲間放電を伴い難い傾向があると言える。

第4表 第1雷撃直前の雲間放電の回数		
	負極性	正極性
雲間放電数	0.15回	0.08回

d: 川越落雷事故の原因となった第1雷撃の特徴について

第1表に示した川越落雷事故の原因となった落雷は、負極性雷撃であったが、単一落雷であり、雲間放電も検出されなかった。極性を除けば、第1雷撃の特徴と矛盾がないと言える。

5. まとめ

発達した積乱雲から、最初に発生する雷撃（第1雷撃）の直前予測の可能性を検討し、更に、第1雷撃の特徴の調査を行い、次の結果を得た。

1) 川越落雷事故は第1雷撃が原因であった。負極性雷撃であったことを除けば、第1雷撃の一般的な特徴（雲間放電が少ない単一落雷）を有していた。

2) 2.5分毎の気象衛星ひまわり赤外データから、川越落雷事故の第1雷撃が発生する前に、輝度温度が急激に低下する雲域が検出された。これは直線予測の可能性を示唆しているが、落雷と関係のない輝度温度の低下も多数見られ、今後、これらのノイズを取り除くアルゴリズムが必要になる。

3) 3年間の夏期の落雷データから第1雷撃を抽出し、通常の雷撃と比較を行った。その結果、第1雷撃には次のような特徴が認められた。

a. 第1雷撃は正極性雷撃の割合が44%と高い。雷撃の順番が進むにつれて、正極性雷撃の割合は低下し、通常の雷撃の特徴に近づいた。

b. 第1雷撃は正極性雷撃のピーク電流の平均値は、通常の正極性雷撃に比べ、約1.5倍大きかった。負極性雷撃については差がなかった。

c. 第1雷撃の99.1%が単一落雷であった。雷撃の順番が進むにつれて、多重雷の割合が増加した。

d. 第1雷撃は、極性に関係なく、直前に発生する雲間放電の数が少なかった。

以上のことから、第1落雷は、通常の雷撃とは異なる大気電気学的特徴を有すると言える。

参考文献

埼玉新聞, 2016: 落雷で高1男子が心肺停止 川越南高、野球の試合中 ... 予兆なく突然,
https://www.saitama-np.co.jp/news/2016/08/05/02_.html (2022年8月29日閲覧)

竹内利雄と仲野貢,1983: 北陸における冬の雷の研究 -学会賞受賞記念講演-. 天気, 30, 13-18.

Iwasaki H., 2020. Climatology of multiple-stroke lightning in Japan. Int J Climatol. 40, 1-10.

Takahashi, T., 1978: Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. J. Atmos. Sci., 35, 1536-1548.

Takahashi, T., 1984: Thunderstorm electrification—A numerical study. J. Atmos. Sci., 41, 2541-2558.

Rust, W.D., and D.R. MacGorman, 2002: Possibly inverted - polarity electrical structures in thunderstorms during STEPS. Geophys. Res. Lett., 29, 12-1.