

第12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）

【第1部 2022年の研究背景と目的】

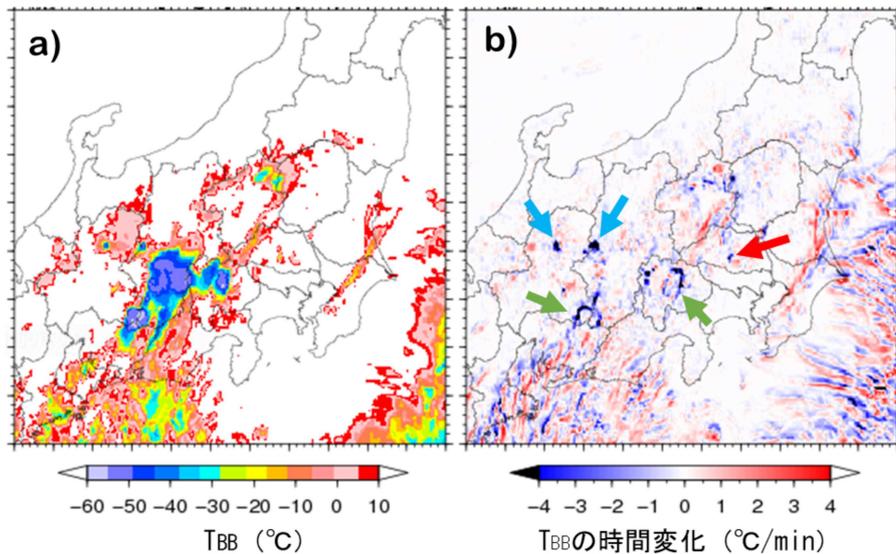
2年目を迎える今年度の目標は、1) 気象衛星ひまわり赤外多波長データを用いた落雷予測の再検討と 2) 積乱雲の発達に伴い最初に発生する落雷（第1落雷）の特徴を記述することである。

目的1) 落雷予測が可能性の再検討

昨年度の研究において、積乱雲の発達に伴い雲頂温度が急激に低下した画素の近傍で、落雷が記録された多数の事例を確認している。2019年8月4日に川崎市で起きた落雷事故では、第1b図の赤い矢印で示したように落雷地点に対応して、その画素は $-3^{\circ}\text{C}/\text{分}$ から $-4^{\circ}\text{C}/\text{分}$ の割合で輝度温度が低下し、雲頂が 10m/s で上昇していたと解釈される。これは落雷の直前予測の可能性を示す事例であった。

しかし、同じ時刻であっても広域に亘り詳細に検討すると、輝度温度が低下した画素の近傍であっても落雷が観測されない事例が数多くある（例えば、水色と緑矢印）。緑矢印の輝度温度が低下した画素では、雲頂の上昇ではなく、既存の積乱雲群のアンビル域が水平方向に広がることで、アンビル域の縁に対応する画素で輝度温度が急激に低下した。また、低温な雲域が移動することでも、その近傍の画素では、輝度温度が急激に低下する。これらの画素を確実に排除することは難しい。

複数の事例で輝度温度の低下と落雷の検討を行ったが、2つの対応は非常に悪く、直前予報のアルゴリズム開発は断念した。そのため、これ以上の目的1の結果報告は行わない。



第1図: a) 2019年8月4日15時5

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.

目的2) 第1落雷の特徴の明確化

昨年度の報告書においては、夏期の積乱雲の発達に伴い最初に発生する第1落雷には正極性落雷の割合が高いことを報告した。そして、今回の申請においては、この夏期雷の第一落雷の特徴を明確にすること、及び、正極性落雷の割合が高い北陸地方の冬期雷の第1落雷の特徴を調べ、季節による差異を確認することを目標としている。夏期雷と冬期雷に差異がなければ、普遍的な特徴と考えることができ、第1落雷の特徴を決める要因を考察しやすくなる。

この目的2の成果が科学的に重要なので、第2

部として独立させて報告を行う。

【第2部 第1落雷の特徴に関する研究】

1. 第1落雷に注目する理由

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)やの着氷電荷発生機構から説明でき、lightning mapping arrays (LMA)や雲粒子ゾンデの観測やからも整合的と考えられている (Schults, et al,2018; Caricedo et al., 2018; Takahashi et al., 2019)。一方、Marshall and Rust (1993)や 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、この理想的な3極構造が観測されるとは限らない。しかし、着氷電荷発生機構が正しいのであれば、第1落雷をもたらず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るのが自然である。一方、積乱雲が発生してから時間が経った後に発生する通常の落雷では、近傍に新しい対流セル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落雷と通常の落雷では、積乱雲内部の電荷構造に違いが生じ、それに対応して落雷の特徴が異なることも考えられる。このような作業仮説に基づき、第1落雷の大気電気学的の特徴を明らかにする。

一方、Holle et al. (1994)は、米国大陸のMCC (Mesoscale Convective Complex)では、積乱雲活動が成熟期に向かうにつれて正極性落雷の割合が増加し、衰退期になると負極性落雷が急激に減少することで正極性落雷が卓越することを示している。しかし、積乱雲活動の初期段階の落雷の極性の特徴については明確にしておらず、落雷の新しい側面が解明される可能性がある。

2. 落雷データ

フランクリンジャパンが運営するJLDN (Japan lightning Detection Network) で検出された落雷データを解析に用いた。正確には、1回毎の放電に対応する「雷撃 (stroke)」が記録されているが、ここでは、多重雷の第1雷撃 (=先行雷撃) や後続雷撃との混同を避けるために、一般的に使われる「落雷 (lightning)」と表現する。

但し、多重雷に注目した解析では、多重雷を構成する要素は「雷撃 (stroke)」と正しく表現する。また、雷撃の順番の影響を調べる際にも、「雷撃」と正しく表現する。

夏期雷についての解析期間は2016年、2017年、2021年と2022年の夏期 (7月下旬~9月上旬の計145日)、解析範囲は北緯34.0-38.5度、東経136.0-141.5度の範囲である。

冬期雷については、2021/2022年と2022/2023年の冬期 (12月-1月の計63日)。解析範囲は北緯35.3-39.0度、東経134.5-139.5度の範囲である。

JLDN落雷データには、落雷地点の緯度と経度 (精度300m)、時刻 (精度1m秒以下)、ピーク電流、雲間放電(IC)と対地放電(CG)の別が記録されている。ピーク電流の大きなICをCGと誤判別する危険性を少なくするために、ピーク電流値の絶対値が5kAよりも大きなCGのみを解析対象とした。1年目の報告書では、この閾値を用いなかったため、第1落雷のピーク電流値の特徴が正しく評価されていなか

った。

3. 第1落雷の定義

孤立した積乱雲の水平スケールは10-20km、寿命は30-60分程度と言われている。この積乱雲から最初に発生した落雷 (正確には、雷撃) を、ここでは「第1落雷」と呼び、次の手順で抽出した。

まず、各落雷地点を中心に半径30km以内の範囲を求め、これを「単位領域」と呼ぶ。次に、この単位領域において、前60分の期間に落雷が検出されていなければ、積乱雲に伴う最初の落雷と考えて、「第1落雷」と定義する。それ以外の落雷は「通常の落雷」と呼ぶことにする。

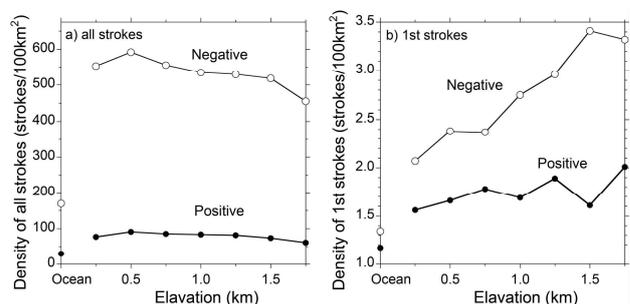
夏期雷と冬期雷では、それぞれ、8246個と2612個の第1落雷が抽出され、全落雷に占める割合は0.79%と9.8%になる (第1表)。夏期雷において第1落雷の占める割合が低いのは、1つの雷雲から数多くの落雷がもたらされるためである。換言すると、冬期雷においては「一発雷」と言われるような1回の落雷で雷活動が終息する積乱雲が多いため、第1落雷の占める割合が高くなる。

第1表: 夏期雷と冬期雷で検出された全落雷数と第1落雷数

	夏期雷	冬期雷
全落雷数	1047418	26749
第1落雷数	8246 (0.79%)	2612 (9.8%)

4. 第1落雷の発生密度の標高依存性

第1落雷の発生頻度と標高の関係について調べる。冬期雷の78%は海洋上で発生し、標高0.25kmよりも高い落雷地点は7%に満たないため、冬期雷は標高依存性の解析には向かない。そのため、77%が陸域で発生している夏期雷のみを解析対象とする。



第2図: 夏期雷の標高別の落雷密度。a: 全ての落雷, b: 第1落雷。

第2図は全落雷と第1落雷についての標高別の発生密度を示す。全落雷では、極性に関わりなく、標高が高くなるにつれて落雷密度が徐々に低下する (第2a図)。それに対して、第1落雷では、極性に関わりなく、標高が高くなるにつれて落雷密度が明ら

かに増加しており、特に、この傾向は負極性落雷で顕著である(第2b図)。つまり、標高が高くなると、第1落雷が発生し易くなると言える。これは、標高が高くなると、負/正電荷域と地表との距離が短くなるため、放電が起きやすくなることが要因と考えられる。

Iwasaki (2020) は、山岳域の多重雷では第1雷撃と第2雷撃の時間間隔が短くなることを示している。積乱雲内の電荷域と地面までの距離が短くなると、第2雷撃に対応する放電が起き易くなる可能性がある。メカニズムが共通している保証はないが、山岳域のように積乱雲内の電荷域と地面までの距離が短いと、積乱雲の電荷分離過程の早い時期に落雷が発生するのかもしれない。

5. 負極性第1落雷における多重雷の割合

5.1 多重雷の定義

1回の雷撃(先行雷撃)により積乱雲内の負電荷が十分に中和されなかった場合に、先行雷撃の放電路に沿って、後続雷撃が発生することがあり、多重雷と呼ばれている(e.g. Schonland, 1956)。ここでは積乱雲の発達段階が多重雷の発生に影響しているのか否かを確認するために、第1落雷に占める多重雷の割合を調べる。

まず、多重雷を定義するために、Iwasaki (2020) を参考に、多重雷を検出する2つの基準を作り、2つの基準を満たす雷撃を多重雷を構成する雷撃と見なした。

- 基準1: 先行雷撃と後続雷撃との距離が0.5km以下
- 基準2: 先行雷撃と後続雷撃との時間間隔が10m秒以上かつ400m秒以下

検出された多重雷は、夏期雷で17万4707個と冬期雷で1546個で、それぞれの全落雷に占める割合は15.2%と5.5%であった。冬期雷では多重雷の個数が少ないため、解析結果の信頼性は低いが、夏期雷との比較のために記載を行った。また、負極性雷撃から始まる多重雷の割合は、夏期雷と冬期雷において、それぞれ、97.8%と89.3%であった。正極性の多重雷が極めて少ないため、この解析には負極性の多重雷についてのみ注目する。

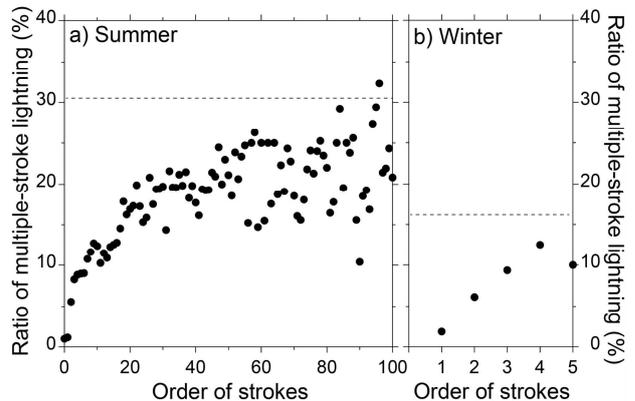
5.2 多重雷の割合

第3図は、雷撃の順番ごとに、多重雷を構成する雷撃が占める割合を示している。

夏期雷では、第1落雷が多重雷であった割合は1%と極めて低いが、その後、同じ単位領域で発生した雷撃が多重雷である割合は、雷撃の順番と共に増加し、解析期間を通した平均値に近づいて行く(第3a図)。このように、雷活動の初期段階では、第1落雷を含めて多重雷は起き難いことが分かる。

第3b図は、冬期雷の解析結果であるが、多重雷の数が少ないため、6以上の雷撃順番は省いてある。第1

雷撃が多重雷であった割合は2%と低く、その割合は雷撃の順番と共に増加する。つまり、夏期雷と同じように、雷活動の初期段階では、第1落雷を含めて多重雷は起き難いことが分かる。



第3図: 雷撃順番ごとの多重雷が占める割合。a:夏期雷 b:冬期雷。点線は夏期雷と冬期雷の各期間で計算された多重雷の割合を示す。

5.3 第1落雷に多重雷の占める割合が少ない原因についての考察

先行雷撃が終了した後に、まだ、雲内に十分な負電荷が残存していると、先行雷撃の放電路に沿って、後続雷撃が発生することがある。これが多重雷である(e.g. Schonland, 1956)。次の後続雷撃が起きるまでの期間には、先行雷撃により負電荷が中和された領域に向けて、その周囲から負電荷が移動し、次の後続雷撃のための負電荷が蓄積される(e.g. Malan and Schonland, 1951)。これはJ-過程と呼ばれている。もし、雲内に蓄積されている負電荷の量が少なければ、J-過程で十分な負電荷が供給できないため、次の後続雷撃に対応する放電(絶縁破壊)が起きず、多重雷は発生しないことになる。

第1落雷(雷撃)は、積乱雲活動に伴う最初の落雷なので、通常の落雷に比べて、積乱雲全体に蓄積された電荷は少ないと考えるのが自然であろう。そのため、第1落雷に伴い中和された領域へのJ-過程による負電荷の供給も少ないため、後続雷撃が起き難く考えられる。その結果、第1落雷は多重雷の割合が小さくなるであろう。

6. 極性と電流値

6.1 結果

1年目の報告書で、夏期雷の第1落雷は正極性落雷の占める割合が高いことを述べた。その特徴について詳しく見てみる。一般に、夏期雷では負極性落雷の割合が高く、正極性落雷は約10%と言われている。第2表に示したように、今回の解析でも全雷撃に対する正極性落雷の割合は13.2%であった。しかし、第1落雷が正極性落雷である割合は44.1%と3倍以上の値となっている。

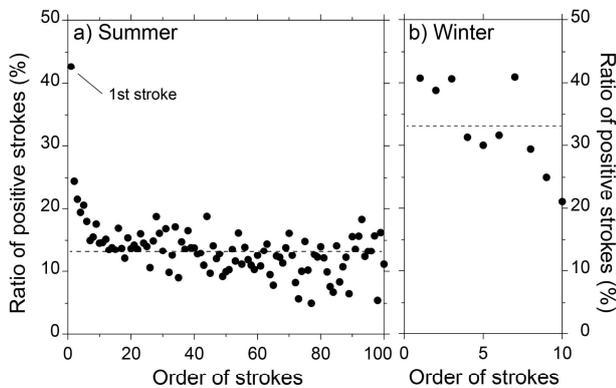
注目すべきは、第4a図に示すように、第1落雷の

後に、単位領域内で発生した後続落雷は、雷撃の順番が進むにつれて、正極落雷の割合は急激に小さくなる。第1落雷から数えて20番目の雷撃では、正極の割合は約15%となり、通常の雷撃と同程度の値となる。つまり、夏期の雷活動の初期段階では、正極性落雷の割合が高いということを意味している。

第2表: 夏期雷と冬期雷の正極性雷撃の割合

	夏期雷	冬期雷
通常の雷撃	13.2% (1)	34.2% (1)
第1雷撃	44.1% (3.3)	42.3% (1.2)

北陸の冬期雷では正極性落雷の割合が多く (Takeuti, et al, 1978; 竹内と仲野, 1983; Suzuki, 1992), 夏期雷とは大気電気学的な性質が異なると言われている。今回の解析でも正極性落雷の割合は34.2%を示し (第2表), これは Suzuki (1992)の統計値とほぼ同じである。そして, 第1落雷に占める正極性落雷の割合は42.3%と平均値の1.2倍の値になっている。つまり, 季節によらず, 第1落雷では正極性落雷の割合が高いことになる。更に, 冬期雷でも落雷の順番が進むにつれて, 正極性落雷の割合は徐々に小さくなる傾向が認められる (第4b図)。つまり, 夏期雷と同じように, 冬期雷も雷活動の初期段階では, 正極性落雷の割合が高いと言える。



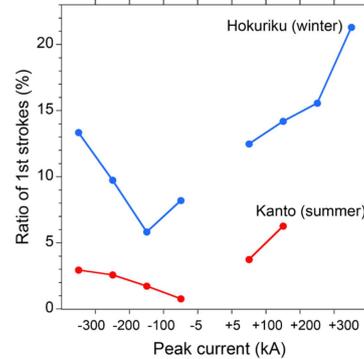
第4図: 落雷の順番ごとの正極性落雷が占める割合。 a: 夏期雷 b: 冬期雷。点線は夏期雷と冬期雷の各期間で計算された正極性落雷が占める割合を示す。

第3表: 夏期雷と冬期雷のピーク電流値の平均値 (kA)

	夏期雷		冬期雷	
	負極性	正極性	負極性	正極性
第1落雷	-19.2	+16.6	-26.5	+57.7
全落雷	-18.6	+13.2	-28.2	+54.6

次に、ピーク電流の特徴について述べる。夏期雷の正極性第1落雷では通常の落雷に比べて1.3倍ほど大きな値を示すが、他のカテゴリーでは第1落雷と

通常の落雷で有意な差は認められない (第3表)。しかし, 第5図に示すように, ピーク電流の大ききで階級を区分すると, 季節や極性の違いにかかわらず, ピーク電流の絶対値が大きくなるにつれて第1落雷の割合が大きくなる特徴が認められる。これは特に大きなピーク電流値の絶対値は, 第1落雷で観測され易いことを意味している。



第5図: ピーク電流の階級ごとに見た第1落雷が占める割合。

6.2 正極性第1落雷の起源に関する考察

第1落雷においては, 夏期雷と冬期雷のどちらでも, 正極性雷撃の割合が増加することが明らかになった。この正電荷の起源について考えて見る。

Takahashi (1978と1984)の着氷電荷発生機構を基に考えると, 孤立した積乱雲内部の理想的な電荷分布は, -30°C 高度の正電荷, -10°C 高度の負電荷と 0°C 高度の正電荷の3極構造を持つことになる。2つの正電荷域のどちらかが, 正極性第1落雷の起源である。

暖候期の米国では発達期を過ぎたメソスケールの積乱雲群のアンビル域から正極性落雷が発生することが知られ (e.g. Orville et al, 1988; Engholm et al. 1990), 大きなピーク電流を伴いspriteの原因になっている (e.g. Rodger, 1999)。活発な積乱雲活動で作られた正に帯電した氷晶が, 一般風により輸送されることでアンビル域の正電荷域が作られ, その正電荷が正極性落雷の源になっている (Rutledge and MacGorman, 1988)。この考え方は, 10kmスケールの北陸冬期雷における+CGの発生メカニズム (Brook et al, 1982) をメソスケールに拡張したものである。言い換えると, -30°C 高度の正電荷域を起源とする落雷は, 積乱雲が十分に発達した後に発生すると言える。従って, 本研究で示した第1雷撃の正極性落雷の起源が, -30°C 高度の正電荷域とは考え難い。

そのため, 消去法で, 第1雷撃の正極性落雷の起源は 0°C 高度に形成される, いわゆる, ポケット正電荷と考えることが出来る。また, 夏期雷では, 0°C 高度は約5kmとなり, -30°C 高度の約10kmに比べて低い位置にある。 0°C 高度の正電荷域では, 30°C 高度の正電荷域に比べて気圧が高くなるため絶縁破壊電圧も高くなる。これは放電が起き難くなることを意

味するが、地面との距離が短くなる効果が勝り、対地放電が起きやすくなると考えられる。

5. まとめ

最初に発生する第1落雷の特徴を、夏期雷と冬期雷について調べ、次の結果を得た。第1落雷の特徴の多くは、夏期雷と冬期雷に共通することが明らかになった。

- 1) 夏期雷については、標高が高くなるにつれて、第1落雷の発生密度が高かった。
- 2) 夏期雷と冬期雷ともに、雷活動の初期段階では、多重雷は発生し難かった。雷活動の初期段階では、十分な電荷の蓄積がなく、後続雷撃が起き難いことが原因と考えられた。
- 3) 夏期雷と冬期雷ともに、雷活動の初期段階では、正極性落雷の割合が高かった。正極性第1落雷の起源は、0℃高度に存在する正電荷域と考えられる。
- 4) 夏期雷と冬期雷ともに、大きなピーク電流値の絶対値は、第1落雷で観測され易かった。

参考文献

- 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.
- Brook, M., Nakano, M., Krehbiel, P., and Takeuti, T., 1982: The electrical structure of the Hokuriku winter thunderstorms. *J. Geophysical Research*, 87, 1207-1215.
- Caicedo, J. A., Uman, M. A., and Pilkey, J. T., 2018: Lightning evolution in two North Central Florida summer multicell storms and three winter/spring frontal storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1155-1178.
- Engholm, C. D., E. R. Williams and R. M. Dole, 1990: Meteorological and electrical conditions associated with positive cloud-to-ground lightning. *Mon. Wea. Review*, 118, 470-487.
- Holle, R. L., Watson, A. I., López, R. E., Macgorman, D. R., Ortiz, R., and Otto, W. D., 1994: The life cycle of lightning and severe weather in a 3-4 June 1985 PRE-STORM mesoscale convective system. *Monthly Weather Review*, 122, 1798-1808.
- Iwasaki H., 2020. Climatology of multiple-stroke lightning in Japan. *Int J Climatol*. 40, 1-10.
- Rodger, C. J., 1999: Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations. *Reviews of Geophysics*, 37, 317-336.
- Rust, W.D., and D.R. MacGorman, 2002: Possibly inverted - polarity electrical structures in thunderstorms during STEPS. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 12-1
- Rutledge, S. A., and MacGorman, D. R., 1988. Cloud-to-ground lightning activity in the 10-11 June 1985 mesoscale convective system observed during the Oklahoma-Kansas PRE-STORM project. *Monthly Weather Review*, 116, 1393-1408.
- Schultz, C. J., Lang, T. J., Bruning, E. C., Calhoun, K. M., Harkema, S., and Curtis, N., 2018: Characteristics of lightning within electrified snowfall events using lightning mapping arrays. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 2347-2367.
- Schuur, T. J., and Rutledge, S. A., 2000: Electrification of stratiform regions in mesoscale convective systems. Part I: An observational comparison of symmetric and asymmetric MCSs. *J. Atmos. Sci.*, 57, 1961-1982.
- Suzuki, T., 1992: Long term observation of winter lightning on Japan Sea coast. *Research Letters on Atmospheric Electricity*, 12, 53-56.
- 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.
- Takahashi, T., Sugimoto, S., Kawano, T., and Suzuki, K., 2019: Microphysical structure and lightning initiation in Hokuriku winter clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 13,156-13,181.
- Takeuti, T., Nakano, M., Brook, M., Raymond, D. J., and Krehbiel, P., 1978: The anomalous winter thunderstorms of the Hokuriku coast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83, 2385-2394.
- Malan, D. J., and B.F.J. Schonland, 1951: The electrical processes in the intervals between the strokes of a lightning discharge. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 206.1085: 145-163.
- Marshall, T. C., and W. D. Rust, 1993: Two types of vertical electrical structures in stratiform precipitation regions of mesoscale convective systems. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74, 2159-2170.
- Orville, R. E., Henderson, R. W., and Bosart, L. F., 1988: Bipole patterns revealed by lightning locations in mesoscale storm systems. *Geophysical Research Letters*, 15, 129-132.