UHF波帯干渉計によるロケット誘雷観測

学生員 和田 将一 (大阪大)
 正員 河崎 善一郎 (大阪大)
 正員 松浦 虔士 (大阪大)
 正員 中村 光一 (名古屋工大)
 正員 堀井 憲爾 (大同工大)

UHF Radio Interferometry Observation of Rocket-Trigged Lightning

Masakazu Wada, Student Member, Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Kenji Matsuura, Member (Osaka University),
 Kouichi Nakamura, Member (Nagoya Institute of Technology),
 Kenji Horii, Member (Daido Institute of Technology)

The UHF Interferometric observation were conducted during the Rocket Triggered Lightning Experiment in Japan. The experiment site is located in the Hokuriku Area where we have frequent winter thunderstorms. The experiment was held during a winter thunderstorm season. During the project four data sets of the UHF radiation emitted by upward negative leaders which initiated positive ground strokes were recorded. The images of upward leader progressions were derived and the velocity of upward negative leaders as functions of time were estimated. The estimated results seem to be consistent with the former results obtained through optical observations.

キーワード：ロケット誘雷，干渉計，雷放電可視化，UHF放射波，上向きリーダ，リーダ進展速度

1. まえがき

筆者らは雷放電における放電進展機構の解明のために、UHF波帯干渉計により雷放電の可視化を行ってきた^{(1),(2)}。観測対象としている雷放電は性状に特異性があり、電力施設に多大な被害を与えることから注目されている冬季雷が主であり、中でもロケット誘雷実験における観測では冬季雷特有の上向き放電が観測されている。ロケット誘雷実験は雷撃電流を直接測定できるという利点があり、近年では冬季雷研究の一つの支柱となっている。

ロケット誘雷実験において雷放電の視覚的な観測としては、光学観測⁽³⁾、音響観測^{(4),(5)}があるが、干渉計による雷放電の可視化は天候に左右されず、高空間分解、高時間分解で放電点の移動を可視化できる可能性があることから多くの期待が寄せられている。しかしながら、その技術は発展途上であり、特に冬季雷の可視化においての実績は十分であるとは言い難い。ロケット誘雷実験は放電の開始位置が一定であることから、これらの課題を

解決する上でも有効であるといえる。さらに、雷撃点までの距離が既知であることから、二次元的な観測結果からでも、十分に定量的な解析が行えるということもロケット誘雷実験の利点の一つである。

そこで本論文では、石川県奥獅子吼高原で実施された平成6年度ロケット誘雷実験におけるUHF波帯干渉計の観測結果をもとに、ロケット誘雷のリーダ進展過程の可視化を行った結果について報告する。また、放電の開始位置に注目し、干渉計による位置標定の信頼性を議論するとともに、放電点の高度や放電進展速度などの雷パラメータ値を干渉計の標定結果から算出する。

2. ロケット誘雷における干渉計観測

ロケット誘雷実験は前述したように石川県奥獅子吼高原に設置しているロケット誘雷制御所(以下、制御所)において行われているが、干渉計による観測はそこから水平距離で3.6km離れた獅子吼高原ロープウェイの獅子吼

高原駅付近の観測小屋(通称、ベース基地)で行っている。ベース基地の標高は 609m、制御所の標高は 928m であるから、観測地点とロケット発射地点の標高差は 319m である。また、ベース基地から見た制御所の方角は南方から東に 30° の方角(南南東方向)である。一方、干渉計観測において放電点方向は方位角と仰角で標定しており、方位角は北方向を 0° とし、反時計周りに 360° まで表している。ただし、観測装置の設営においてアンテナ配置は磁極に合わせているが、本論文の標定結果はこの偏角⁽⁶⁾の影響を補正したものである。これらのことから、干渉計から見たロケット発射位置すなわち放電開始位置は、方位角 210° 、仰角 5.06° ということになる。

本論文での解析は、平成6年度において誘雷に成功した9例の中で、トリガタイミングが適切であった4例を選択して行う。表1にこれら解析事例の放電種別、ロケット発射時刻、雷撃電流強度を示す。ここで、放電種別には地上誘雷と鉄塔誘雷の2つがあり、大地に接地したピアノ線をロケットで引き上げる方法が地上誘雷であり、ピアノ線の下端に長さ数十mの絶縁線を挿入し、ワイヤに拘束されない自由放電を鉄塔に導く方法が鉄塔誘雷である⁽⁷⁾。同表より分かるように、誘雷番号 94-08 は地上誘雷であり、それ以外はすべて鉄塔誘雷で、同じ日に誘雷している。また解析対象すべてにおいて、雷撃電流値は正であることから、観測された上向きリーダの極性は負である。

表1. 解析データ(平成6年度)

Table 1. Analyzed data sets of rocket-triggered lightning in 1994.

誘雷番号	種別	発射日	発射時間	雷撃電流[kA]
94-08	地上	11/25	16:58:31	+28
94-16	鉄塔	11/27	00:04:24	+55
94-21	鉄塔	11/27	03:47:06	+39
94-22	鉄塔	11/27	03:52:21	+54

3. 干渉計による上向き放電進展の可視化

干渉計による雷解析はこれまでも行われているが⁽⁸⁾、⁽⁹⁾、負極性上向きリーダの進展を可視化した例はまだない。ロケット誘雷実験はこのような負極性リーダを人為的に、時間と場所をある程度特定して発生させることが可能であることが大きな特徴であり、これを干渉計により可視化することは負極性リーダ進展機構の理解において重要な意味をもつ。

ロケット誘雷時におけるUHF放射波強度の1秒間の全体波形を図1(a)に示し、リーダ進展付近の10ミリ秒間の

拡大波形を図1(b)に示す。同図(a)において200ミリ秒以前に単発のUHFパルスが確認され、260ミリ秒付近においてUHF波強度は急激に振幅を増している。このUHF波の放射強度や放射密度から、これまでの観測結果と比較すると⁽¹⁰⁾、この時間帯からリーダの進展が観測されることが分かる。また、この時間を拡大した同図(b)を見ると、UHF波の急激な上昇は2ミリ秒程度の間続いていることが分かる。

図1 UHF強度波形(誘雷番号 94-08)

Fig. 1. Observed UHF radiation (No. 94-08). (a) Whole wave forms. (b) The part of the leader initiation.

この付近の時間帯を干渉計により標定すると、UHF波が振幅を増している途中から上向きに進展する放電が観測される。図2(a)に短スパン系の位相差から算出される標定結果を示し、同図(b)に長スパン系を併用した場合の位相差から算出される結果を示す⁽¹⁾。ただし、同図は放電点の2次元マッピング(左図)と、方位角、仰角の時間変化(右図)の2つの結果を同時に示している。同図を見ると短スパン系でも上向きの放電進展が見られ、長スパン系の結果を見るとその傾向はさらに顕著である。前述したように放電の開始位置は方位角 210° 、仰角 5.06° が真値であるが、同図(b)の標定ではこの真値とほぼ等しい地点から放電が始まっていることが確認される。また、仰角の時間変化を見ると仰角は261ミリ秒を過ぎた付近で急激に上昇しており、これはリーダのステップを標定している可能性が高い。さらに、この時間以降の標定結果を図3に示し、この後の放電点分布を見る。ただし、この時間帯の位相差の変化は激しく、長スパン系の選択を行うことは困難であるため⁽¹⁾、同図には短スパン系の結果のみを示す。この標定結果では方位角も仰角も大きく変動しており、図2に見られるような連続した放電点の移動は見られない。

図3に示したような1.5ミリ秒程度の短時間において、 360° にもおよぶ範囲へ放電点が広がるとすると、 $10^5[\text{m/s}]$ オーダでの放電の進展では説明することは不可能である。上向きに進むリーダが雲内の正電荷層に到達した場合、通常のリーダ進展速度を超えるような速度での放電点の移動も予想される。また、枝分かれなどによる複数の放電進展は、システムの性質上、放射電磁波の強い放電路を可視化することになるが、雲内の広い範囲に及ぶ範囲で放電点すなわち電波放射源が広がっている場合、すべての放電を正しく標定するのは困難と思われる。いずれにしても、図3に示される放電は上向きに進展するリーダが雲内の正電荷に到達したことによる結果であると推察される。ただし、これらの標定にあるような広い範囲で実際に放電が行われているのか、電波放射源の広がりが大きすぎるために標定ができないのかはこの結果のみからでは断定することはできない。このことは、光学、音響、レーダ観測等の結果との比較により明らかにする必要があると思われ、今後の課題としたい。しかしながら、図2に示したように干渉計により負極性上向きリーダの標定を行うことは可能であり、以下他の3例についても同様に上向きリーダの標定を試みる。

図2 リーダ部の標定結果(実験番号 94-08)

Fig. 2. Radiation sources of the leader (No. 94-08). (a) Short baseline. (b) Combination of short and long baselines.

図3 リーダ部以降の標定結果
(実験番号 94-08, 短スパン系)

Fig. 3. Radiation sources of the the following leader using short baseline phases only (No. 94-08).

図4に実験番号 94-16, 94-21, 94-22 の3例におけるリーダ部の標定結果に示す。同図と図2(b)の結果を比較すると、すべての事例について放電の開始位置はほぼ同じであり、方位角 210° 付近である。標定の結果も似かよったものとなっている。このことから、本システムによる標定には再現性があることが確認される。

さらに詳細に放電開始位置を検討するために、ここに示した4例の放電開始点の方位角、仰角を表2に示す。ただし、これらは標定開始時間から100マイクロ秒の平均を求めた結果であり、同時にその100マイクロ秒間の標準偏差も示している。前述したように、放電開始方向の真値は方位角 210° 、仰角 5.06° であるから、同表は正しく放電開始点が標定できていることを立証する結果であるといえる。位置標定システムで位置を標定する場合、機器の設置位置や装置の特性、地形の影響などにより誤差が生じる。一般に、これらの誤差を総称してサイトエラーと呼ぶが、ここで標定した方向のサイトエラーは方位角、仰角ともに数度以内であるといえる。また、標準偏差を見ると、標定点のパラッキは方位角では小さく $1\sim4^\circ$ 程度であり、仰角ではそれより大きく $2\sim6^\circ$ 程度となっている。次に放電の到達点に着目し、同様にその標定方向を求めた結果を表3に示す。同表より、放電の到達点は事例ごとに少しずつ異なり、その高さは仰角にして $20\sim24^\circ$ 程度である。また、放電の開始点と比べると全体的に標準偏差が大きくなっており、放電が広がりながら進展していることを示唆する結果となっている。特に、94-08 と 94-16 においては、断定はできないものの枝分かれのような放電点の分布も見られ、標定のパラッキを大きくする原因となっている。

図4 リーダ部の標定結果(長スパン系併用)

Fig. 4. Radiation sources of the leader. (a) No. 94-16. (b) No. 94-21. (c) No. 94-22

表2 放電開始位置の標定結果

Table 2. Coordinates of the radiation sources of the initiation part of discharge.

誘雷番号	方位角[deg]		仰角[deg]	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
94-08	213.5	3.90	8.2	6.22
94-16	215.4	0.92	8.7	4.99
94-21	216.6	1.58	6.9	2.89
94-22	217.7	1.79	6.8	2.42

表3 リーダ到達点の標定結果

Table 3. Coordinates of the radiation sources of the upper part of discharge.

誘雷番号	方位角[deg]		仰角[deg]	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
94-08	207.2	5.21	19.8	8.22
94-16	205.7	6.05	21.1	7.20
94-21	203.4	6.00	21.2	8.70
94-22	204.4	4.00	23.5	6.11

ここまでの結果から、放電の到達高度とリーダの進展速度を求め表4に示す。ただし、これは放電が垂直に進展したと仮定することにより求められた結果であり、到達高度は地上高で表し、リーダ進展速度は表2、表3からリーダ進展全体での平均的な速度を求めている。また、同表には前述したサイトエラーの値も示しておく。同表より到達高度は地上高1km程度となっており、実験場の標高を考えると海拔2km付近まで放電が進展していることが分かる。また、リーダの進展速度は 10^5 [m/s]のオーダーとなっている。この事例においては光学観測から速度は算出されていないが、他の誘雷の結果と比較すると⁽³⁾、本論文の結果よりは若干遅いながらも 10^5 [m/s]オーダーとなっている。また、SchonlandのType- α のステップドリーダの速度も同じオーダーとなっており⁽¹¹⁾、本論文の結果はこれらと同様の結果であることが分かる。

ここで、表4に示したリーダの進展速度は、放電の進展における休止期間も含めたリーダ全体の速度であるが、図2(b)及び図4の仰角の時間変化において、急激に仰角が上昇している時間帯と、ほとんど変化していない時間帯が存在している。したがって、このような仰角の上昇速度の違いから、時系列でのリーダ進展速度を求めることも可能であると思われる。そこで、図5に図3、図4に示した時間帯におけるリーダの進展速度の時間変化を示す。ただし、ここに示す進展速度は標定のバラツキの影響を低減するために100マイクロ秒の時間平均により算出している。実際、時間平均後に放電開始位置の標定点の広がりや表2と同様の方法により評価したところ、方位角、仰角ともに標準偏差で 0.5° 程度となっており、標定点のバラツキの影響は無視できる範囲であることを確認している。

表4 方位角のサイトエラー及び雷パラメータ値

Table 4. Site error of azimuth, the arrival height from ground level and the upward speed of leader.

誘雷番号	サイトエラー [deg]	到達高度 [m]	リーダ進展速度 $\times 10^5$ [m/s]
94-08	3.5	977	4.57
94-16	5.4	1070	6.98
94-21	6.6	1077	6.00
94-22	7.7	1246	6.68

図5 放電進展速度の時間変化

Fig. 5. The velocities of upward leaders as functions of time.

同図(a)を見ると、261.1ミリ秒付近に 10^6 [m/s] オーダの進展速度の極大値が見られ、図2(b)からも予想されたようにこのような変化はステップド・リーダのステップを表していると考えられる。また、同様の極大値がこれ以降にも見られ、同図(b)~(d)においても同様の変化を見ることができる。これらの変化はいずれも数十から数百マイクロ秒の間隔で生じており、極大値付近の速度は 10^6 [m/s] オーダであることから、極大値付近においてリーダは進展し、極大値と極大値の間はリーダ進展の休止期間を表していると思われる。これらのことは、光学観測及び電流の観測結果と比較することにより、さらに詳細な検討が行えると思われる。

4. まとめ

本論文では、石川県奥獅子吼高原で実施された平成6年度ロケット誘雷実験におけるUHF波帯干渉計の観測結果をもとに、ロケット誘雷のリーダ進展過程の可視化を行い、干渉計による位置標定の信頼性、放電点の高度、放電進展速度などについて考察した。以下、その結果をまとめる。

- (1) ロケット誘雷により引き起こされる負極性上向きリーダの進展様相を可視化することができた。その結果から放電開始位置を評価したところ、この方向のサイトエラーは方位角、仰角ともに数度以内であることが明らかとなり、干渉計による標定の信頼性を裏付ける結果となった。
- (2) 上向きリーダの到達高度は地上高1km程度であり、これ以降は標定点が定まらないことから、この高度で雲内の電荷層に到達し、広い範囲で電荷の中和が行われていることが推察された。また、干渉計から求めたリーダ全体での平均的な放電進展速度は 10^5 [m/s] オーダと算出され、これまでの光学観測とほぼ同様の結果となった。
- (3) リーダの進展速度を時系列で求めた結果、放電の進展様相を進展と休止とに分けて捉えることが可能となり、進展時の速度は 10^6 [m/s] オーダであることが明らかとなった。

最後に、観測にあたり多大な御協力をいただいたロケット誘雷実験グループの方々、北陸電力の関係各位に深く感謝の意を表する。なお、本研究は文部省科学研究費(基礎研究(A)(1): 08555069)の助成を受けていることを附記する。

(平成8年7月29日受付、同8年12月2再受付)

文献

- (1) 和田・河崎他：「UHF波帯干渉計の製作と雷観測(そ

- の1)-システムの性能評価-」, 電学論B116, 322-331(平8-3)
- (2) 大貫・河崎他:「干渉計による雷放電路の三次元可視化」, 電学論B116, 475(平8-4)
- (3) 角・池田他:「流しカメラによる冬季北陸のロケット誘雷放電の観測」, 電学論B105, 39(昭60-1)
- (4) 若松・世森・堀井:「雷鳴解析による雷放電路の再現」, 電学論B108, 277(昭63-8)
- (5) 若松・堀井:「ロケット誘雷による近距離雷鳴と雷放電路の再現」, 電学論B109, 281(平元-8)
- (6) 例えば, 国立天文台編:「理科年表」, 丸善株式会社, 784(平4)
- (7) 北川編:「大気電気学」, 東海大学出版会, 171(平8)
- (8) V.Mazur, P.R.Krehbiel X.M.Shao: "Correlated high-speed video and radio interferometric observations of a cloud-to-ground lightning flash", J.Geophys.Res., 100, 25731-25753, 1995.
- (9) P.Richard, A.Delannoy, et al: "Results of spatial and temporal characterization of the vhf-uhf radiation of lightning", J.Geophys.Res., 91, 1248-1260, 1986
- (10) 金尾・河崎他:「電磁界変化とUHF放射から見たロケット誘雷」, 電学論B111, 1079(平3-10)
- (11) M.Uman: "The Lightning Discharge", Academic Press, 82, 1987.

和田 将一 (学生員) 1969年10月31日生。1994年

3月武蔵工業大学大学院修士課程修了。平成9年3月大阪大学大学院博士課程修了, 現在に至る。工学博士。放電現象及び信号処理に関する研究に従事。

河崎 善一郎 (正員) 1949年1月17日生。1978年3月

大阪大学大学院博士課程修了。1979年4月～1989年7月名古屋大学空電研究所勤務。1989年7月大阪大学工学部講師。1991年同助教授, 現在に至る。工学博士。電磁界理論, 環境電磁工学,

雷観測に関する研究に従事。1993年日本大気電気学会賞受賞。気象学会, 日本大気電気学会, AGU, IEEE各会員, 日本学術会議・電波研連委員。

松浦 虔士 (正員) 1938年1月1日生。1962年3月大阪大学大学院修士課程修了。同年4月住友電気工業(株)入社。1977年1月大阪大学工学部助教授, 1988年3月同教授。工学博士。電気エネルギーの発生・伝送・変換・制御に関する研究に従事。1995年ITAアカデミアン。

中村 光一 (正員) 1942年3月7日生。1966年名古屋工業大学工学部電気工学科卒業。1967年4月同大学工学部電気工学科助手, 1980年同講師, 1988年同助教授, 現在に至る。1983～1984年クラークソン大学客員研究員。工学博士。電力系統解析, 誘雷, 高温超伝導の電力応用の研究に従事。1982年電気学会論文賞, 1990年電気学会進歩賞受賞。日本大気電気学会, 電気設備学会, IEEE会員。

堀井 憲爾 (正員) 1930年1月7日生。1952年3月名古屋大学工学部電気工学科卒業。同年4月通産省工業技術院電気試験所(現, 電子技術総合研究所)入所, 高電圧現象, 高エネルギー研究室長。1971年4月名古屋大学工学部教授。1990年10月豊田工業高等専門学校校長。1996年4月大同工業大学学長。工学博士。電力工学, 電力応用工学, 高電圧工学, ロケット誘雷, 極低温超伝導工学に関する研究に従事。1986年電気学会電力賞受賞。CIGRE会員。