雷放電路三次元可視化とリーダ進展速度

学生員 吉 橋 幸 子 (大阪大学)

正 員 河 崎 善一郎 (大阪大学)

正 員 松 浦 虔 士 (大阪大学)

非会員 磯 田 仁 志 (大阪大学)

正 員 園 井 康 夫 (関西電力)

3D imaging of lightning channel and leader progression velocity

Sachiko Yoshihashi, Student Member, Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Kenji Matsu-ura, Member, Hitoshi Isoda, Non-member (Osaka University), Yasuo Sonoi, Member (Kansai Electric Power Co.,INC)

Three-dimensional imaging of lightning channels by means of UHF interferometers is performed. To realize this, a field campaign was conducted with two observation sites in Darwin Australia. The distance between two sites is about 14 km, and the triangulation scheme is applied to estimate locations of UHF radiation sources. Since the UHF radiation during the leader progression is more expected than the return stroke phase, imaging of lightning channels is obtained mainly for the downward leaders. Velocities of downward leaders are estimated and statistics are shown for first and subsequent strokes. The result is consistent with those of former investigators obtained by optical observations. The statistics for the velocity of leader propagation inside thunderclouds is shown in this paper. By using optical measurement, velocity estimation of leader progressions inside thundercloud is impossible, and presented results is concluded to be the first results.

キーワード：干渉計、三次元可視化、リーダ進展速度

1. ま え が き

雷放電進展機構解明のために現在用いられている雷放電路観測技術として光学観測⁽¹⁾、雷鳴観測⁽²⁾、電磁波観測が挙げられる。光学観測は空間・時間分解能が高く、雷雲下におけるリーダ進展の微細構造の理解に多大な成果を上げているが、雷雲内の活動をとらえることは困難である。雷鳴観測は音波源が近距離に限られ、また高い時間・空間分解能で放電路を再現することが困難であるため、放電進展機構の理解に十分とはいえない。電磁波観測は、雷雲内における放電現象を観測することができ、放電現象全体の電波放射源の位置測定が可能なることから近年注目されている。特に、雷放電に伴って放射される電磁波のうちVHF/UHF帯による電波放射源の位置標定がなされており、その標定手法は、大きく分けて到達時間差法⁽³⁾と干渉法⁽⁴⁾⁽⁵⁾がある。筆者ら大阪大学雷研究グループは、後者の手法を用いたUHF波帯電波干渉計による雷放電路の可視化を行い、これによる雷観測の有用性を検証している⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾。その一環として平成7年度からオーストラリア・ダーウィンにおいて夏季雷観測を行い、平成8年度からは観測地点を2地点

とし、雷放電路を三次元的に再現し、雷放電現象を解明することに努めている⁽⁹⁾。

負極性落雷のリーダ進展速度に関する研究は、多くの研究者により様々な手法で検証されている。Schonland⁽¹⁰⁾らは、ストリークカメラを用いた光学観測により、リーダの進展速度が $10^5\text{m/s} \sim 10^6\text{m/s}$ であることを報告している。到達時間差法を用いた電磁波観測では、Proctorら⁽³⁾により雷放電路の三次元標定からリーダ進展速度は 10^5m/s オーダーであることが報告されている。干渉法を用いたリーダ進展速度の評価は、Rhodesら⁽¹¹⁾により雷放電路の二次元マッピングにより行われているが、この結果はレーダ観測から放電開始高度を仮定し速度を推定しているにすぎない。これに対し筆者らは、文献(9)において夏季多重落雷の干渉計観測による三次元標定解析から平均的なリーダの進展速度について述べており、このような報告は筆者らの知る限りほとんど行われていない。干渉計観測の特徴は、リーダ進展に伴って放射されるバースト状の電磁パルスと比較的高い時間精度で標定できることである。そこで本稿では、リーダ速度の変化を時間関数として求め、平成8年度、9年度に行われた観測により得られたデータを加え、リーダ

図1 アンテナ配置

Fig. 1. Configuration of the interferometer antennas

図2 三次元標定方法

Fig. 2. An algorithm of locating discharge point

進展速度について統計的観点から議論し、より一層の理解を得ることとする。

2. UHF 波帯電波干渉計観測と三次元放電路像

本観測で用いている UHF 波帯電波干渉計は、電波天文の保護バンドである 327MHz を中心周波数とした電磁波を 1 対のモノポールアンテナ系で受信することにより、アンテナ間に生じる入射電磁波の位相差が得られる装置である。図 1 に示すように 2 組のアンテナ対を直交するように配置することにより、それぞれのアンテナ間に生じる位相差から、雷放電に伴って放射される電磁波の電波源を仰角・方位角の二次元で特定できる。また、アンテナ配列は、短長両スパンにより構成されており、両スパン系を組み合わせることで、明瞭な放電路像を得ることができる。さらに、干渉計観測を 2 地点で行うことにより、それぞれの観測地点から得られる仰角・方位角から放電点を三次元的に特定することが可能となる。

図 2 に三次元標定方法を示す。同図では、まず両観測地点における方位角から地表上の交点を求め、次に仰角により高度を求めている。両観測地点での仰角より、同図中の A、B に示すように高度が 2 通り求められるが、本稿では AB 間の中点を放電点としている。また、この UHF 波帯

図3 電界変化・UHF 波強度の全体波形

Fig. 3. E-field change and UHF radiation

電波干渉計システムは容量性アンテナによる電界変化も同時に記録している。この電界変化波形により雲放電・対地放電（負極性・正極性）の種別を識別し、さらに UHF 波放射強度とともに 2 地点で得られたデータが同一の現象をとらえているかどうかを判断している。なお、同システムにおいてデータは、サンプリング周波数 1MHz で 1 秒間記録している。干渉計システム、三次元標定アルゴリズムの詳細は文献 (6)(7)(9) に記載されている。

平成 8 年度、9 年度におけるダーウィンでの観測実施期間は共に 11 月中旬から 12 月中旬のおよそ 1 ヶ月間であり、雨季の開始する雷活動が盛んな時期である。干渉計観測は Robertson 地区と Kowandi 地区で行われ、2 地点間のベースライン距離は約 14km である。観測地点周辺は、高層建造物も少なく電波障害が皆無に近いことから、雷観測を行うには格好の場所である。

1997 年 12 月 2 日 6 時 54 分 55 秒 (UTC) に 2 地点同時に雷放電を記録した。図 3 は、それぞれの観測地点で記録した電界変化および UHF 波強度の 1 秒間の全体波形を示す。同図より両観測地点で同一の現象を記録していることが確認される。同図中 R で示した部分において電界変化波形の立ち上がりに数マイクロ秒の急峻な正方向への変化が見られ、全体的に正方向の変化が支配的であることから同事例は負極性対地雷撃であり、多重度は 6 である。また、UHF 波強度波形において、帰還雷撃に伴う強い電波放射とそれに先立つリーダ進展に対応する電波放射が現れており、負極性対地雷撃の特徴⁽³⁾⁽¹²⁾が顕著に現れている。同図中 L1 で示した第一雷撃のリーダ進展部分に対応する時間領域 (200ms～

図4 第一雷撃リーダの三次元像

Fig. 4. 3D Image of the first leader channel

図5 第一雷撃リーダの電界変化・UHF波強度
高度・速度

Fig. 5. E-field change, UHF radiation, altitude and progression velocity of the first leader

250ms)の雷放電路三次元像を図4に示し、電界変化・UHF波強度の拡大図及び高度の時間変化を図5に示す。図4は、東西方向をX軸、南北方向をY軸、高さ方向をZ軸とし、東方向、北方向を正としている。また、Robertson地区がSite1、Kowandi地区がSite2であり、Site1を原点とし、Site2の座標は $(X,Y,Z) = (9.4, 10.6, 0)$ である。同図から放電点が、図中 $A(X,Y,Z) = (11.3, -1.1, 6.6)$ から開始し、地面に向かって進展する様相が示されている。このことから、UHF波帯電波干渉計により、雲内から放電が開始し下向きに進展する負リーダをとらえることが確認できる。

次に図3中L2で示す後続雷撃のリーダ進展部分に対応する時間領域(312ms~314ms)の雷放電路三次元像を図6に示し、電界変化・UHF波強度の拡大図および高度の時間変化を図7に示す。図6に示す標定結果から、放電は図

図6 第二雷撃リーダの三次元像

Fig. 6. 3D Image of the second leader channel

図7 第二雷撃リーダの電界変化・UHF波強度
高度・速度

Fig. 7. E-field change, UHF radiation, altitude and progression velocity of the second leader

中 $A(X,Y,Z) = (11.7, -1.1, 6.8)$ から開始し、第一雷撃リーダと同様に地面に向かって進展している。図7より放電点は、第二雷撃リーダの放電開始から312.5ミリ秒までの約100マイクロ秒間、高度6kmから4kmまで急激に下がり、312.5ミリ秒から約100マイクロ秒間は高度4kmで変化せず、312.7ミリ秒までの100マイクロ秒間で高度2km付近まで下がっている。その後放電点は、放電開始点付近まで高度が戻り、313.2ミリ秒までの約500マイクロ秒かけて地面に到達していることが確認できる。

各観測地点から求められる仰角・方位角には分散があり、そのため図4、6に示すリーダの三次元像においてばらつきが生じる。そこで、第一雷撃リーダ、後続雷撃リーダについて、このばらつきを定量的に評価する。リーダが地面に向かって進展していることから、放電点は100マイクロ

表 1 100 マイクロ秒刻みの放電点の標準偏差の平均

Table 1. An average of standard deviation every 100 microsecond

	X 軸	Y 軸
第一雷撃リーダ	550	600
第二雷撃リーダ	430	450
第三雷撃リーダ	170	240
第四雷撃リーダ	110	210
第五雷撃リーダ	130	170
第六雷撃リーダ	140	140

単位: (m)

秒では第一雷撃リーダ、後続雷撃リーダともに X 軸方向、Y 軸方向にほとんど移動しないと仮定し、第一雷撃リーダ、後続雷撃リーダともに X 軸、Y 軸についてそれぞれ 100 マイクロ秒毎に標準偏差を算出し、その平均値を求めた結果を表 1 に示す。ただし、100 マイクロ秒間に放電点が 10 点以上ある場合についてのみ平均値を求めている。表 1 より、第一雷撃リーダに比べ、第二雷撃リーダでは標準偏差にあまり変化は見られないが、第三雷撃以降の後続雷撃リーダは明らかに標準偏差の値が小さくなっていることが確認される。

表 2 に第一雷撃リーダ、後続雷撃リーダについて高度 3km~6km まで 1km ごとの X 座標、Y 座標の平均値を示す。表 2 より、第二雷撃から第六雷撃の後続雷撃リーダのそれぞれの座標値は、各高度においてほぼ一致しており、同一の放電路を進展していることが確認できる。しかし、第一雷撃リーダと後続雷撃リーダの各座標値は、高度によっては 1km 以上離れており、同一の放電路を進展しているとは言いがたい。

これらの結果から第一雷撃において、リーダは大気の絶縁破壊を起こしながら進展していくため、放電路に複数の枝分かれが生じ、分散が大きくなっているものと考えられる。これに対し、第三雷撃以降の後続雷撃リーダは、表 2 により第二雷撃リーダと座標値が一致しており、第二雷撃により電離され、導電性の保たれている放電路を進展するため、枝分かれがなく、放電点の分散が少なくなるためであると考えられる。第二雷撃リーダは、表 1 に示すように標準偏差の値が大きく、表 2 に示すように第一雷撃リーダと比較して座標値が約 1km 離れていることから、第一雷撃とは別の放電路であると判断できる。従って、図 7 の高度の変化に見られる現象は、第二雷撃はリーダの開始時から 312.7 ミリ秒までは、第一雷撃と同一の放電路を進展するが、その進展は途中で休止し、再びもとの放電開始点付近からステップしながら進展して最終的には異なる経路をとっていると考えられる。

3. リーダ進展速度

〈3・1〉 第一雷撃リーダ 干渉計により、連続的な放電路を三次元的に得られることから、リーダ進展速度の変

表 2 高度別の放電点の位置

Table 2. The discharge point in each altitude

高度	3~4km		4~5km		5~6km	
	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸	X 軸	Y 軸
第一雷撃リーダ	12.2	-1.1	12.6	-0.8	12.8	-0.9
第二雷撃リーダ	11.5	-1.0	11.7	-0.8	11.5	-1.3
第三雷撃リーダ	11.6	-1.0	11.7	-0.9	11.7	-1.3
第四雷撃リーダ	11.7	-1.0	11.6	-1.0	11.6	-1.3
第五雷撃リーダ	11.6	-0.9	11.6	-1.0	11.6	-1.2

単位: (km)

化を時間関数として求めることができる。図 5 に第一雷撃部の 200~250 ミリ秒の電界変化・UHF 波強度、高度の変化に加えてリーダ進展速度を示す。ただし、リーダ進展速度を求めるにあたり、前述したように標定点にばらつきがあり、個々の放電点から速度を求めると誤差を含んでしまうため、時間窓 1 ミリ秒で移動平均を計算し、その後 1 ミリ秒間でのリーダ進展速度の時間変化を算出する。

ステップリーダの進展速度を $1 \times 10^6 \text{ m/s}$ と仮定した場合、リーダは 1 ミリ秒の間に 1km 進展する。表 1 から放電点の標準偏差の平均は数百メートルのオーダーであり、1 ミリ秒の時間窓では放電点のばらつきを無視することができる。従って移動平均処理により、リーダの進展・休止を含んだ 1 ミリ秒間の速度が求められる。また、移動平均処理を行うにあたり、1 ミリ秒間の放電点が少ない場合は移動平均処理を行っても分散が軽減されないため、1 ミリ秒間に放電点が 10 個以下の場合は速度を算出しないこととしている。

図 5 に示すリーダ進展速度の時間変化からリーダの進展速度は、数十~数百マイクロ秒の間隔で増減 ($10^4 \sim 10^6 \text{ m/s}$ のオーダー) を繰り返している。Schonland⁽¹⁰⁾ は、ステップリーダの休止時間は 37 マイクロ秒~124 マイクロ秒であると報告していることから、図 5 が示す変化は、リーダ進展速度が増加する点ではリーダが進展する期間を、速度が減少する点ではリーダの休止期間を表していると考えられ、ステップリーダの進展の様子を顕著にとらえていることになる。また、リーダ進展の平均速度は $2.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ となり、これは Schonland⁽¹⁰⁾、Proctor⁽³⁾、Rhodes⁽¹¹⁾ らの報告とオーダーは一致する。

〈3・2〉 後続雷撃リーダ 第一雷撃と同様に後続雷撃についてもリーダ進展速度を求める。第二雷撃部の 312~314 ミリ秒の電界変化・UHF 波強度に加えて高度及びリーダ進展速度を図 7 に示す。同図のリーダ進展速度は、ダートリーダの進展速度がステップリーダよりも 1 桁ほど速いため、 $1 \times 10^7 \text{ m/s}$ と仮定し、時間窓を 100 マイクロ秒として前述した算出方法で求めた結果である。同図で 313.2 ミリ秒以降は速度が示されていないが、これは 100 マイクロ秒間に放電点が 10 個以下の場合は速度を算出しないことに依存する。このときのリーダ進展速度の平均値を求めると $8.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ となる。しかしながらリーダ進展速度は放電開始付近では 10^7 m/s のオーダーであるが、313 ミリ秒付近では 10^5 m/s のオーダーとなる。このことから、この事例

図8 第一雷撃リーダの速度分布

Fig. 8. Progression velocity distribution of the first leader

図9 後続雷撃リーダの速度分布

Fig. 9. Progression velocity distribution of the subsequent leader

の第二雷撃はリーダの開始時はダートリーダであるが、その後ステップしながら進展するダートステップリーダとなると判断できる。313 ミリ秒後にリーダ進展速度は速くなっているが、これは放電点が少ないため移動平均処理を行ってもばらつきが軽減できなかったためと思われる。

〈3・3〉 統計的検討 リーダ進展速度の統計的な検討を行う。図8に第一雷撃16例について、図9に後続雷撃25例について、前述した算出方法で求めたリーダの平均速度の分布を示す。図8より、第一雷撃では平均速度が 10^5 m/sのオーダーとなるものが多く、 10^6 m/sにいたるものもあり、その平均は 5.3×10^5 m/sとなっている。図9より、後続雷撃では平均速度が 10^6 m/s後半から 10^7 m/s前半であることが多く、平均は 2.4×10^7 m/sとなっている。これらの値は、主として光学のかつ二次元速度として求められているリーダ進展速度⁽¹⁴⁾と同様の結果となっている。

4. 雲内を水平に進むリーダの進展速度

12月13日2時25分55秒に記録された負極性落雷の第一雷撃の三次元像を図10に、電界変化・UHF波強度・高度・速度の時間変化を図11に示す。図10、11より、この事例は高度約6キロメートルから放電は開始しており、230ミリ秒付近まで高度はほとんど変化せず東方向に進展した後、地面に向かって進展していることが確認される。そこ

図10 三次元像

Fig. 10. 3D image of the lightning channel

図11 電界変化・UHF波強度・高度・速度

Fig. 11. E-field change, UHF radiation, Altitude of UHF radiation sources and progression velocity

で、リーダが雲内を水平に進展するときの速度と地面に向かって進展するとき速度を比較する。図11に示すように、放電開始から230ミリ秒までの時間領域を1、230ミリ秒から245ミリ秒までの時間領域を2とし、領域1および領域2におけるリーダ進展速度の平均値を求めるとそれぞれ 2.1×10^5 m/s、 2.3×10^5 m/sとなる。このことより、負リーダが雲内を水平に移動するときの速度と地面に向かって移動するときの速度では変化が見られないことが確認される。雲内のリーダ進展速度は、Shaoら⁽¹⁵⁾の二次元干渉計を用いて行われた観測とレーダ観測において放電開始高度を仮定することにより推定されている。そして本論文の結果は、彼らの推定結果を証明する結果となっている。

5. む す び

- (1) 夏季負極性落雷において、リーダ進展に伴う電波放射源の三次元標定を行なった結果、放電点が雲内から地上に向かって進展する様相が示され、下向き負リーダを三次元的に再現することができた。さらに、後続雷撃においては、リーダが数百メートル以内の誤差で同一放電路を進展しており、干渉計観測による三次元標定の有用性が示された。
 - (2) UHF 波帯干渉計により得られた放電路から、第一雷撃、後続雷撃の負リーダ進展速度を求めたところ、その平均速度はそれぞれ 10^5 m/s 、 10^7 m/s のオーダーとなり、これまでの光学観測から知られている進展速度と同様の結果となった。光学観測はリーダ先端の最も明るい部分の移動速度を求めたものであり、今回得た両者の一致は「リーダ進展に伴う VHF/UHF 波の放射は、進展するリーダ先端から」という経験的知見を、観測的に証明するものであると考えられる。加えて本論文では、時間の関数としてリーダの進展様相を明らかにしているが、これは光学観測等では求めることが出来ず、従って UHF 波帯干渉計の特長と考えることが出来、本論文の成果の一つとして特記したい。
 - (3) 負極性落雷の第一雷撃において、負リーダが雲内を水平に移動するときの速度と地面に向かって移動するときの速度を比較した結果、顕著な違いは見られなかった。これは、光学観測では困難であった雲内の放電進展模様の把握を電磁波観測により可能とした結果である。
- (平成 11 年 4 月 5 日受付, 同 12 年 2 月 1 日再受付)

文 献

- (1) 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(昭和 60-1)
- (2) 若松・世森他, 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(平成-8)
- (3) D.E.Proctor, et al., VHF radio pictures of lightning flashes to ground, *J. Geophys. Res.*, 93, 12683-12727, 1988
- (4) P.Richard, et al., VHF-UHF interferometric measurement applications of lightning discharge mapping, *Radio Sci.*, 20, 171-192, 1985
- (5) 松浦・河崎他, UHF 波帯干渉計方式による雷放電路三次元可視化装置の試作, 平成 6 年度科学研究費補助金研究成果報告書 (平成 6-3)
- (6) 和田・河崎他, UHF 波帯干渉計の制作と雷観測 (その 1) ～システムの性能評価～, 電学論 B116,322-331(平 8-3)
- (7) 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)
- (8) 和田・河崎他, UHF 波帯干渉計によるロケット誘雷観測, 電学論 B117,494-499(平 9-4)
- (9) 吉橋他, 電波干渉計による夏季多重雷の三次元標定, 電学論 B119,605-613 (平成 11-5)
- (10) Schonland, B.F.J., *The Lightning Discharge, Handb. Phys.*, 22, 576-628, 1956
- (11) Rhodes, T.C., et al., Observations of lightning phenomena using radio interferometry, *J. Geophys. Res.*, 99, 13059-13082, 1994
- (12) Shao, X.M., P.R.Krehbiel, et al., Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida,

J. Geophys. Res., 100, 2749-2783, 1995

- (13) Ushio, T., et al., Broad band interferometric measurement of rocket triggered lightning in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 2769-2772, 1997
- (14) Uman, A.M., *The Lightning Discharge*, Academic press 1987
- (15) Shao, M.X. and P.R.Krehbiel, The spatial and temporal development of intracloud lightning, *J. Geophys. Res.*, 101, 26641-26668, 1996

吉 橋 幸 子 (学生員) 1973 年 8 月 30 日生。1998 年 3 月
岐阜大学大学院博士前期課程修了。同年 4 月大阪
大学大学院博士後期課程進学, 現在に至る。雷観
測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, 絶
縁診断技術に関する研究に従事。1993 年日本大気
電気学会賞受賞。1998 年電気学会進歩賞受賞。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。

磯 田 仁 志 (非会員) 1975 年 1 月 7 日生。1997 年 3 月大阪
大学工学部電気工学科卒業。1999 年 4 月同大学
大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。
現在、三菱電機勤務。

園 井 康 夫 (正員) 1952 年 12 月 5 日生。1977 年 3 月京都
大学大学院研究科修士課程修了。同年 4 月関西電
力(株) 入社。同社総合技術研究所勤務。工学博
士。雷および送電に関する研究に従事。日本大気
電気学会会員。