UHF 波帯干渉計を用いた多重落雷および多地点落雷観測結果

正員 河崎 善一郎 (大阪大学)

非会員 野村 幸司 (大阪大学)

学生員 吉橋 幸子 (大阪大学)

正員 松浦 虔士 (大阪大学)

Observation of Multiple Stroke and Multi-point discharge by means of UHF Interferometers

Zen Kawasaki, Member, Koji Nomura, Non-member, Sachiko Yoshihashi, Student Member, Kenji Matsu-ura, Member (Osaka University)

Interferometric observations of cloud-to-ground flash in Darwin have been analyzed to investigate some features of the lightning. Our study focuses a comparison between multipoint and multiple negative cloud-to-ground flashes. We estimate the speed of leaders with submillisecond resolution for both multipoint and multiple strokes. The leader that precedes first stroke for multiple flash progresses in a stepped fashion, and its behavior seems to be similar to that for multipoint flash. The speed of the leader is estimated at the mean value to 10^5 m/s order, and the mean step length is found to be 96 meter with a mean pause time of 73 microsecond. The running time of the leader analyzed here takes the mean value of 89 microsecond. The duration of UHF radiation of leader which traces the former channel ranges from 0.2 to 55.3 millisecond with a mean of 7.5 millisecond. To the contrary, those preceding multipoint strokes ranges 21.1 to 90.6 millisecond with a mean value of 47.5 millisecond. The time interval between strokes which strike the same point as the former stroke ranges from 22.5 to 330.6 millisecond with a mean of 75.1 millisecond, and those for multipoint strokes ranges from 55.6 to 633.7 millisecond with a mean of 149.1 millisecond. All of the leaders preceding multipoint strokes starts at the same region inside the cloud.

キーワード : 熱帯収束帯, 干渉計, 多重落雷, 多地点落雷

1. はじめに

大阪大学雷研究グループは、これまで雷放電進展機構の解明を目的として UHF 波帯干渉計による雷放電の可視化を行い、それによる雷観測の有効性を検証している^{(1)~(4)}。その一環として、熱帯収束帯における雷活動の把握を目的とした雷観測を 1996 年 11 月 4 日~11 月 25 日及び 1997 年 11 月 22 日~12 月 13 日の合計約 2ヶ月間、オーストラリア北部のダーウィンにおいて行っている。Darwin は IKL (雷雨日数) が 80 以上であり、かつ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。のみならず、同地域では、気象レーダ、到達時間差法を用いた落雷点標定 (ALDF)、ロケット誘雷および雷雲雲頂と電離層間での放電現象である Red Sprite の観測も行われ、熱帯収束帯における雷活動の把握を目的とした総合観測が行われている。

同地区は、熱帯収束帯であることから、負極性落雷の

割合が高いことがわかっている⁽⁵⁾。一般的に負極性落雷は多重落雷の形態をとり、電界変化記録等を用いてこれまで数多くの報告がなされてきている⁽⁶⁾。さらに近年では、干渉計などにより雲内の進展様相も含めその詳細な事例解析が行われており、負極性多重落雷の機構が次第に解明されつつある⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし、最近の報告⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾によれば、これまで多重落雷と考えられてきた負極性落雷には約半数の多地点落雷が含まれていることが明らかとなっており、これは帰還雷撃間隔など多重落雷の統計量を見直す必要性を示唆している。また、多地点落雷に関する雷撃頻度や雷撃時間間隔などは耐雷設計などに有用であると考えられ、いくつかの報告がある。例えば清水ら⁽¹⁰⁾は、多地点落雷の電磁界の多地点観測を行い、その頻度について報告し、送電線の事故解析への適用について言及している。しかし、多地点落雷に関して現段階では、雲内の放電活動も含めた詳細な放電路再現に基づく解析は行われておらず、その生成要因や放電形態な

図1 干渉計のアンテナ構成

Fig. 1. The antenna configuration of our interferometer

ど未解明な部分が多い。そこで、本論文ではまず、ビデオ映像と干渉計による再現像を比較し、それらが一致することを示す。その上で、多地点落雷および多重落雷のリーダの特性に着目し、その進展速度および進展様相が、多重落雷の第1帰還雷撃に先行するリーダと多地点落雷のリーダで類似していること、言い換えれば、多地点落雷のリーダと多重落雷の後続雷撃に先行するリーダでは特性が異なることを、UHF干渉計による観測から示す。続いて、リーダによるUHF電波放射継続時間、帰還雷撃間隔が、多地点落雷のリーダと多重落雷の後続雷撃に先行するリーダでは異なることを統計的に示し、そのヒストグラムを報告する。

2. 観測システム

本論文で用いる干渉計は、UHF波帯中の電波天文の保護バンドである327MHzを中心周波数とし、アンテナ配列は図1に示す様に、直交する短長両スパンにより構成されている。さらに干渉計受信機の出力である位相差は、各雷放電毎にサンプリング周波数1MHzで1秒間記録し、雷放電により放射される電波源位置の、観測サイトに対する仰角・方位角を、時間分解能1マイクロ秒で求めることが出来るよう設計されている。アンテナ配列として、短長両スパン系を用いる理由は、これらを組み合わせることにより、電波放射源位置としての明瞭な放電路像を得るためであり、本論文で示す全ての放電路像は短長両スパン系を用いて求めていることを強調しておく。

本観測では同時に360度全方位を撮影可能なビデオカメラによる観測を実施している。ビデオデッキは市販されているVictor HR-X7を用い、一秒間に30コマの撮影が可能である。時刻管理はビデオタイマーを用い、10ミリ秒の分解能を有している。時刻の校正は手動により行っており、精度は約1秒前後と思われる。

3. 解析結果

図2に1997年12月12日2時32分55秒(UTC)に記録された雷放電の電界変化及びUHF電波強度を示す。全体として電界変化は負方向に振れており、図中Rと記したいくつかの階段状の速い変化が記録されている。そし

図2 電界変化とUHF波振幅全体波形

Fig. 2. Whole waveforms of electric field change and UHF radiation

てその変化前に対応してUHF電磁波強度は大きくなっていることがわかる。この雷放電の最初の3雷撃の全方位ビデオ映像を図3に、干渉計による電波放射源像を図4に示す。同図において、方位角は0°を北とし、反時計回りを正としており、以下方位角の表記はこれに準ずる。図3のビデオ映像右下に時刻を記しているが、これはダーウィン付近の地域時間であり、日本との時差は30分である。同図の映像から放電路は地面に達しており、解析対象としている雷放電が対地放電であることがわかる。上述の電界変化およびUHF電磁波強度の特徴はこれまでに報告されている対地放電の特徴と一致しており、電界変化全体の正方向への振れからこの放電が負極性の落雷であることがわかる。図4は放電路像の天球への射影であるが、前述の3雷撃の落雷地点は方位角340度から345度となっており、ビデオ映像と一致している。

ビデオ映像による放電路の発光と雷鳴との時間遅れから、雷撃点までの距離の推定が可能であり、従ってリーダの平均進展速度を求めることが出来る。図2に示した多重落雷の場合、時間遅れが11秒18であり、観測地点から落雷点までの距離は約3700[m]と推定できる。放電路を大地に垂直な直線と仮定すると、仰角変化から放電路像のリーダの平均進展速度を求めることが可能となる。その結果を表1に示す。同表より、第1雷撃及び第2雷撃は 10^5 [m/s]オーダーであり、第3雷撃以降の後続雷撃はすべて 10^6 [m/s]オーダーとなっていることがわかる。この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の全体平均速度であるため、このままではステップ状の進展であることの確認が容易でない。そこで、放電路像の100マイクロ秒間の移動平均値より、時間間数としてのリーダ進展速度を求めることとする。移動平均値を用いるのは、干渉計の放電路像が、分散を含んでいることを考慮しての上である。第1雷撃、第2雷撃、第4雷撃に先行する2ミリ秒間の拡大図を図5に示す。同図より、第1雷撃に先行するリーダは、 10^6 [m/s]オーダーの進展速度の極大値を持ち、リーダの進展と約50～100マイクロ秒の休止期間を繰り返しながら、間欠的な進展

(a) 第1 雷撃映像

(a) Video image of the first stroke

(b) 第2 雷撃映像

(b) Video image of the second stroke

(c) 第3 雷撃映像

(c) Video image of the third stroke

図3 多重落雷ビデオ映像

Fig. 3. Video images of the multiple stroke

をすることがわかる。リーダ先端の進展速度は 10^6 [m/s] オーダであるものの、休止時間が含まれるため、平均進展速度は前のように一桁低い 10^5 [m/s] オーダとなる。第2 雷撃に先行するリーダは、極大値が 10^7 [m/s] 程度と高速度を示し、リーダの進展期間と休止時間の間隔がそれぞれ長くなり、リーダの進展距離が第1 雷撃のステップ・リーダより長くなっていることを示している。第四雷撃に先行するリーダは、極大値は 10^7 [m/s] オーダであり、これは先行雷撃が2 回起こり、放電路が高い電離度に保たれているためと思われる。

UHF 波干渉計を用いたこの種の考察は筆者等のグループでロケット誘雷では行われているが⁽⁴⁾、自然雷では全く行われておらず、今回の結果は初めて電磁波観測を通

図4 多重落雷干渉計放電路像

Fig. 4. Radiation sources of the multiple stroke

図5 時間関数としてのリーダ進展速度 (多重落雷)

Fig. 5. The speed of the stepped leader versus time for multiple flash

図6 時間関数としてのリーダ進展速度 (多地点落雷)

Fig. 6. The speed of the stepped leader versus time for multipoint flash

じて高時間分解能でステップ・リーダおよび後続雷撃に先行するリーダの進展速度及びその様相を解明したことを意味する。また、多地点落雷に関しても帰還雷撃に先行するリーダの進展速度を求めることができる。図6 に100 マイクロ秒の時間窓でリーダの進展速度を算出した結果を示す。また、表2にその平均速度を参考までに示す。この表より、多地点落雷のリーダ速度は第1 雷撃に先行するリーダ速度に類似していることがわかる。これは、多地点落雷のリーダが、新たな放電路を形成するため、その進展様相が、多重落雷の第1 帰還雷撃に先行するステップ・リーダに類似しているためである。

表 1 多重落雷のリーダ平均進展速度

Table 1. The average speed of each stroke in case of multiple flash

第 1 雷撃	1.5×10^8 [m/s]
第 2 雷撃	8.9×10^8 [m/s]
第 3 雷撃	7.4×10^8 [m/s]
第 4 雷撃	4.1×10^8 [m/s]
第 5 雷撃	2.8×10^8 [m/s]
第 6 雷撃	2.2×10^8 [m/s]

表 2 多地点落雷リーダ平均進展速度 (参考値)

Table 2. The average speed of each stroke in case of multi-point flash

第 1 雷撃	2.9×10^8 [m/s]
第 2 雷撃	1.4×10^8 [m/s]
第 3 雷撃	1.6×10^8 [m/s]

統計的な考察を行うため、ビデオ映像と雷鳴の時間遅れから瞬時速度を求められるステップリーダ 4 例の進展継続時間長、進展休止時間長及び進展距離のヒストグラムを図 7、図 8 に示す。図 7 より、継続時間及び休止時間ともピークが 20 ~ 40 マイクロ秒と 100 ~ 120 マイクロ秒に存在しており、バイモダルとなっていることが確認でき、平均値はそれぞれ 89.0 マイクロ秒、73.4 マイクロ秒となっている。図 8 よりステップの進展距離は 0 ~ 125[m] にしめる割合が約 75% と高く、平均値は 95.9[m] となっている。

4. 統計からみた多重落雷と多地点落雷の相違点

本論文で解析する事例はオーストラリア・ダーウィンで観測されたものであり、電界変化波形からすべて負極性落雷と判断できる。多重落雷と多地点落雷との相違点に関して考察を加えるため、それぞれ 10 例ずつ選択し、いくつかの変数に関して統計をとる。高木らの分類⁽¹²⁾に従えば、多地点落雷は、放電路の途中で枝分かれした放電路が大地に達する落雷 (タイプ B)、先行する雷撃と後続雷撃の雷撃地点が異なる落雷 (タイプ C)、雲と大地間に二本以上の放電路が見える落雷 (タイプ D) とに分類される。これにより多地点落雷と多重落雷との区別は干渉計により得られている放電路像に基づいて行い、タイプ C および D の多地点落雷を解析対象としている。

〈4・1〉 UHF 波帯電波放射継続時間からの相違点

図 9 に後続雷撃のリーダ開始に相当する UHF 放射の開始から帰還雷撃に至るまでのその電波放射継続時間のヒストグラムを示す。同図において、灰色のものが先行雷撃と同地点に落雷するリーダを示し、斜線のものが先行雷撃とは異なった地点に落雷するリーダを表している。データの総数はそれぞれ、48, 12 である。同地点に落雷するリーダでは、UHF 電波放射継続時間が 0 ~ 5 ミリ秒の総数が全体の約 71% を占め、平均値は 7.5 ミリ秒 (標準偏差は 14.1 ミリ秒) である。最小値は 0.2 ミリ秒であり、最大値は 55.3 ミリ秒となっている。一方、異なった

図 7 ステップリーダの進展時間に関するヒストグラム

Fig. 7. The histogram of the pause time and the running time of the stepped leader

図 8 ステップリーダの進展距離のヒストグラム

Fig. 8. The histogram of the step length

地点に落雷するリーダでは、放射継続時間が最短のもので 21 ミリ秒であり、最長のものでは 90 ミリ秒になる。平均値は 47.6 ミリ秒で、標準偏差が 22.6 ミリ秒となっている。異なった地点に落雷するリーダの場合、同地点に落雷するリーダと違い後続雷撃が先行雷撃とは異なる放電路上を放電が進展するため、リーダは第 1 雷撃と同様にステップド・リーダの形態をとることが多いためと推測される。以上のことから、UHF 電波放射継続時間は、リーダが先行雷撃と同一放電路を進展するか否かの判断パラメータとなり得るものと思われる。

〈4・2〉 帰還雷撃間隔からの相違点

帰還雷撃間隔に関するヒストグラムを図 10 に示し、その表記法は図 9 に準じている。先行雷撃と同地点に落雷するリーダについては、48 例、先行雷撃と異なった地点に落雷するリーダでは 12 例について統計量を求めている。先行雷撃と同地点に落雷するリーダでは、帰還雷撃間隔は最小値 22.5 ミリ秒から最大値 330.6 ミリ秒までの値をとり、平均 75 ミリ秒 (標準偏差 57 ミリ秒) である。一方、先行雷撃と異なった地点に落雷するリーダでは、最小値 55.5 ミリ秒から最大 633.7 ミリ秒までの値をとり、平均 149.0 ミリ秒 (標準偏差 158.7 ミリ秒) である。連続電流の有無などにより後続雷撃までの帰還雷撃間隔は左右されるものの、同図より、異なった地点に落雷するリーダの方が全体的に長くなっていることがわかる。殊に最短時間で比較すると、同地点に落雷するリーダの場合は 22.5 ミリ秒、

図9 UHF 電波放射継続時間のヒストグラム

Fig. 9. The histogram of the duration of the UHF radiation bursts for leader

図10 帰還雷撃間隔のヒストグラム

Fig. 10. The histogram of the time intervals between strokes

異なった地点に落雷するリーダの場合は55.6ミリ秒であり、約2倍長くなっていることがわかる。また平均値についても約2倍の長さになっている。

〈4・3〉雷撃毎の放電開始点からの相違点 次に、放電開始点に関して考察を加える。ビデオとの照合が行っている多地点落雷の放電開始点を図11に示す。同図より、多地点落雷の放電開始点はすべて先行雷撃とほぼ同位置にあることがわかる。多重落雷では、同一放電路をダート・リーダが進展するため、同位置から放電が開始するが、一方、多地点落雷においても、多重落雷と同様に同位置から放電が進展することが確認でき、このことから、多重落雷と多地点落雷では放電開始点に関しては相違点がないことが明らかとなった。また、他の事例9例においても同様な結果が得られている。従って、今回の観測結果に限って議論する場合、干渉計により、多地点落雷でこれまでタイプDと判断されていた落雷は、雲内で共通の放電路を持つタイプCであることが判断でき、多地点落雷は多重落雷と同様、一つの雷雲ないしはセルに蓄えられている電荷によるものと結論できることになる。

5. まとめ

本論文では、オーストラリア・ダーウィンで行った雷観測で得られた負極性多重落雷及び多地点落雷に関する統計から、それぞれの雷の相違点について考察を行った。その結果以下の事が明らかとなった。

図11 多地点落雷の各雷撃放電開始点

Fig. 11. The start point of the leader preceding return strokes for multipoint flash

- (1) 干渉計を用いて負極性多重落雷を解析した結果、電波源として求められる放電路像が、光学観測による放電路と一致し、干渉計の機能が確認された。
- (2) 負極性多重落雷のリーダの平均進展速度を、電波源の進展速度という観点から算出した。
- (3) 従来の電磁界観測の解釈では、多重落雷に属すると考えられる事象の中で、多地点への落雷が含まれていることが確認された。
- (4) UHF 電波放射継続時間が、後続雷撃のリーダが先行雷撃と同一放電路を進展するか否かを判断するパラメータとなり得ることを示した
- (5) 帰還雷撃間隔の最小値及び平均値は、異なった地点に落雷するリーダの場合、同一点に落雷するリーダの約2倍長いことが明らかになった。
- (6) 今回の観測結果に限って議論する場合、先行雷撃とは異なった地点に落雷するリーダと同地点に落雷するリーダとの間に放電開始点に関しては大きな違いはなかった。このことは、多地点落雷も同一電荷群から放電が開始していることを示唆している。
- (7) ステップド・リーダの進展持続時間長、進展休止時間長及び進展距離に関する統計を表した。進展持続時間長及び進展休止時間長には二つのピークが存在することなどが明らかとなった。

最後に本研究は、文部省科学研究費 (国際学術研究:10041142) の援助を受けており、本稿を終えるにあたりここに謝意を表する。また、本研究に際し、大貫淳氏 (現ソニー)、和田将一氏 (現東芝) に多大なるご協力を賜りました。御礼申し上げます。

(平成10年8月28日受付, 同10年12月17日再受付)

文 献

- (1) 和田他: UHF 波帯干渉計の製作と雷観測 (その1) ~干渉計システムの性能評価~, 電学論, B-116(平 8-3)
- (2) 大貫他: 干渉計による雷放電路の三次元可視化, 電学論, B-116(平 8-4)

- (3) 大貫他: 電波干渉計観測による上向き放電の特性, 電学論, B-117(平 9-4)
- (4) 和田他: UHF 波帯干渉計によるロケット誘雷観測, 電学論, B-117(平 9-4)
- (5) 野村他: UHF 波帯干渉計を用いた熱帯収束帯における雷観測, Journal of Atmospheric Electricity, 17, 1997
- (6) Uman, M. A., The lightning discharge, Academic Press, 1987
- (7) Shao, X. M., et al., Radio interferometric observations of cloud-to-ground lightning phenomena in Florida, J. Geophys. Res., 100, 1995
- (8) Rhodes, C. T., et. al., Observation of lightning phenomena using radio interferometry, J. Geophys. Res., 1994
- (9) Rakov, V. A., et. al., Review of lightning properties from electric field and TV observation, J. Geophys. Res., 99, 1994
- (10) 清水他, 多重落雷の電磁界による多地点同時観測, 電学論, B-118, 1998
- (11) Le Vine, D. M., and E. P. Krider, The temporal structure of HF and VHF radiation during Florida lightning return strokes, Geophys. Res. Lett., 4, 1977
- (12) 高木他, 多地点落雷について, 電学論, B-111, 1991

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。

野村 幸司 (非会員) 1973 年 7 月 15 日生。1996 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。1998 年 4 月大阪大学大学院前期博士課程修了。同年 4 月トヨタ自動車(株)入社, 現在に至る。

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。

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。