雷観測のための広帯域及び狭帯域干渉計の比較

学生員	村 上 昌 孝	(大阪大学)
正 員	河 崎 善一郎	(大阪大学)
非会員	太 田 恭 久	(大阪大学)
非会員	磯 田 仁 志	(大阪大学)
非会員	Redy Mardiana	(大阪大学)
正 員	牛 尾 知 雄	(大阪大学)
正 員	松 浦 虔 士	(大阪大学)

Comparison between Broad band and Narrow band Interferometer for Lightning Observation

Masataka Murakami, Student Member, Zen-Ichiro Kawasaki, Member, Yasuhisa Ota, Non-member, Hitoshi Isoda, Non-member, Redy Mardiana, Non-member, Tomo-o Ushio, Member, Kenji Matsu-ura, Member (Osaka University)

The location of lightning radiation sources observed by our narrow band interferometer and the lightning channel image by an all sky camera are compared with that of our broad band interferometer. The broad band interferometer system is described by Ushio and Kawasaki et al. [1997] and measures the two dimensional direction of the radiation sources from 25 to 250 MHz with sub-microsecond time resolution, using 500 MHz digitizer which has 8 Megabyte memory. These three observations show the excellent correspondence, and we can conclude the potential capability of the newly designed wide band interferometer. By analyzing simultaneously observed data by narrow band and wide band interferometers for of one flash, the advantages and disadvantages of the both type of interferometers are discussed. The analysis shows that the broad band system can also locate two radiation sources, which propagate simultaneously like branching, in time and space. And we conclude this is a new technology.

キーワード：広帯域干渉計、狭帯域干渉計、負極性落雷、リーダ、帰還雷撃

1. ま え が き

雷放電により放射される電磁波は、周波数領域で直流付近から光波に至るまで極めて広い。近年特に、VHF や UHF を用いて、雷放電の諸過程から放射されているパルスの標定がなされており、これまで曖昧であった雲内の放電過程の様相が明らかになってきている。この手法は、到達時間差法⁽¹⁾と干渉法^{(2) (3)}に大別される。我々大阪大学雷研究グループでは 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きている^{(4) (5) (6)}。近年のデジタル技術の進歩の結果、GHz といった高速サンプリング技術が開発され、VHF や UHF 帯の電磁波を直接記録できるようになってきている。これを位置標定技術に用いたのが広帯域干渉計であり、雷放電を対象に用いる原理が報告されている⁽⁷⁾。そして筆者等は広帯域干渉計の開

発・製作を行い、1996 年度より国内外にて観測を行っている⁽⁸⁾。1997 年度はオーストラリア・ダーウィンで実施された日本、アメリカ、オーストラリア三国の合同雷雨総合観測において、広帯域干渉計の観測システムを設置し観測を行っている。また同時に UHF 波帯干渉計（本論文では区別するためこれを狭帯域干渉計とする）による観測を行っている。本論文はこの二つの観測機器による雷放電の位置標定結果を比較検証したものである。

2. 観 測 概 要

観測場所であるオーストラリア・ダーウィンは、オーストラリア北端に位置し、雷雨日数 (IKL) が 80 日を越える雷活動多発地帯である⁽⁹⁾。観測期間は平成 9 年 11 月 22 日から 12 月 14 日までの約 1 ヶ月であり、これは雨季が開始する雷活動が盛んな時期となっている。本実験では狭帯域干

図1 システム構成図

Fig. 1. A schematic diagram of the system

表1 干渉計の仕様比較

Table 1. Specification of the Interferometers

	狭帯域干渉計	広帯域干渉計
センサ	モノポールアンテナ	容量性円形アンテナ
受信周波数	中間周波数 327MHz	25~250MHz
	帯域幅 350kHz	
分解能	12bit	8bit

渉計と広帯域干渉計の2システムによる同時観測を行っているが、これらに加え、放電時定数約1秒の広帯域スローアンテナによる電界変化の観測、全方位型ビデオカメラによる連続撮影も同時に行っている。なお、ビデオ画面には時刻を10ミリ秒単位でスーパーインポーズしている。

ここで、広帯域干渉計の観測システム構成図を図1に示す。アンテナセンサーとして円形平板アンテナを使用しその出力を同軸ケーブルの特性インピーダンスである50Ωで終端して、そこに流入する電界の時間微分波形を直接デジタル記録している。サンプリング周波数は500MHzであるが、低域遮断周波数25MHz、高域遮断周波数250MHzのバンドパスフィルターの装着により、VHF波帯の信号が受信されるようにアンテナ出力が配慮されている。これは低周波成分とりわけ中波帯に雑音源が多く存在し、帯域制限なしでは高いS/N比が得られないことに因っている。1チャンネルあたりのメモリ長は1Mbyteで1ワードは8bitで構成されている。アンテナは4機使用し観測を行っているが、本論文ではこの4機用いた観測結果のうち、大地と平行に配置された3機のアンテナ出力に限って解析を行っている。アンテナ2を基準として東へ10メートルの地点にアンテナ1、北へ10メートルの地点にアンテナ3をそれぞれ配置している。

また、観測機器のサンプリング周期とメモリ長の関係から、トリガしてから記録時間長は数百マイクロ秒～数ミリ秒程度であり、放電の全課程を連続して記録できない。そこで、ある一定の信号レベルを超えたとき、2マイクロ

表2 広帯域干渉計取得データのまとめ

Table 2. Wide band Interferometry's data

日付	負極性落雷	正極性落雷	雲放電	不明	計
11/28	15	0	8	1	24
12/2	15	0	2	0	17
12/3	9	0	3	0	12
12/4	0	0	3	0	3
12/5	1	0	21	1	23
12/6	0	0	6	0	6
12/10	1	0	0	0	1
12/11	0	0	9	1	10
12/12	15	0	8	8	31
12/13	5	0	15	0	20
12/14	0	0	11	0	11
計	61	0	86	11	158

図2 12月13日13時20分00秒に記録された雷放電の電界変化とUHF波強度の1秒間全体波形

Fig. 2. Observed UHF radiation and electric field change(at 13:20:00 on 13th December,LT)

秒間4チャンネルを同時に記録するようにしている。

なお、狭帯域干渉計⁽⁴⁾と広帯域干渉計の仕様の比較を表1に示す。

3. 解析結果

観測期間中広帯域干渉計で雷放電が観測されたのは計11日で、158例のデータが記録されている。電界変化波形よりその放電種別を行ったものが表2である。ここに示すように、負極性落雷61例(39%)、正極性落雷0例(0%)、雲放電44例(58%)及び不明11例(3%)となっている。なお、本報告に記された時間は全てオーストラリア北部標準時である。狭帯域干渉計の観測結果との照合したところ、このうちの7例が両干渉計システムで同一の雷放電を観測している。本稿ではその解析結果について報告する。

〈3・1〉 狭帯域干渉計及び光学観測との比較検証 図2に13時20分00秒に記録された雷放電の電界変化及びUHF波振幅の全体図を示す。広帯域パルスの生起時刻も図

図 3 第 1 雷撃部の電界変化、VHF/UHF 波放射及び方位角・仰角の時間変化
Fig. 3. Electric field change, VHF/UHF radiation, and azimuth, elevation of radiation sources as functions of time for the first stroke.

表 3 両干渉計間の放射源マッピングの統計比較

Table 3. Comparison of radiation source locations by the broad band interferometer with those by the narrow band interferometer and their statistics.

	差の平均 [deg]	差の標準偏差 [deg]	標本数 [個]
方位角	0.463	4.51	327
仰角	-1.35	5.04	327

中縦棒で示している。図 2 において R と示した部分には、電界変化の立ち上がりに数 μ sec という急峻な変化が表れていることから帰還雷撃部に相当することがわかる⁽¹⁰⁾。また同図より、電界の全体的な変化が正方向に進展していること、帰還雷撃の直後に UHF 波強度が急激に小さくなっていることなどからこの時刻の雷放電は負極性の対地放電に伴うものだということが分かり、その多重度は 5 である。また、この時刻に記録された全方位カメラによるビデオ映像で放電経路が大地にまで達していることから対地雷撃であるということが言える。なお、ビデオ映像と比較した議論は後述する。ここで、図 2 において”1”で示される時間帯の拡大図及び狭帯域、広帯域の両干渉計による放電点標定結果の時系列表示を図 3 に示す。”1”の時間帯はこの時刻の雷放電の第 1 雷撃部に相当する箇所である。狭帯域干渉計での標定結果によると放電は 358 ミリ秒で方位角-30

図 4 第 1 雷撃部の標定結果天球表示及び全方位カメラによる映像
Fig. 4. Radiation source projection from the celestial hemisphere onto the plane of the antenna array and all sky video image for the first stroke.

度、仰角 30 度付近から始まり、方位角の変化はほとんどないが、仰角の変化から 362.5 ミリ秒付近まで下向きに、先行する負極性リーダが進展している。これがステップトリードに伴う放電点の変化である。その後帰還雷撃に至るが、このことは電界変化図において急峻な変化がこの時間帯に見られることから確認できる。ここで、狭帯域干渉計と広帯域干渉計の標定結果の一致性を示す為に、12 月 13 日に記録された全雷放電について、標定結果について差をとり統計した結果が表 3 である。

図 3 及び表 3 から両手法で推定される放射源が、同様の傾向を示すことが理解できる。加えて、広帯域干渉計の結果は分散も少なく、従って放電路像としてはより微細構造の情報を提供し得ることを示唆している。また、”1”の時刻の雷放電は全方位カメラによる光学観測にも成功しているので第 1 雷撃部のビデオ映像とその時の狭帯域干渉計及び広帯域干渉計の 2 次元マッピング図を図 4 に示す。ただし、この 2 次元マッピング図は円周方向が、磁北から時計

図5 12月13日12時4分55秒に記録された雷放電の電界変化とUHF波強度の1秒間全体波形

Fig. 5. Observed UHF radiation and electric field change (at 12:04:55 on 13th December, LT)

回りに計った電波源（放電点）の方位であり、半径方向が仰角となっている。言い換えれば、中心が天頂、円周が地平線を表している。図4によれば干渉計の雷撃地点は方位角-57度の地点であるのに対し、全方位カメラの雷撃地点は方位角が-62度の地点となっている。雷撃点の方位角が約5度違っているが、これは測定器の設置時に生じる誤差の範囲であり、広帯域・狭帯域の両干渉計で観測されているものと同じ雷放電を撮影していると判断できる。

〈3・2〉同時進展する現象に対する位置標定 図5に12月13日12時4分55秒に記録された雷放電の電界変化及びUHF波振幅の1秒間全体波形を示す。図7において350ミリ秒以降波形は飽和しており、電界変化波形からこれ以降の放電に関する情報を得ることは難しいが、UHF波振幅全体図からその後も雷放電が続いていることが分かる。また、図2と同様の特徴を有することから負極性の対地放電と考えられ、UHF波振幅等から多重度5であることが分かっている。図5において“1”で示される時間帯の拡大図及び狭帯域、広帯域の両干渉計による放電点標定結果の時系列表示を図6に示す。なお、この時間帯は第1雷撃部に相当する。図6でも図3と同様に狭帯域、広帯域の両干渉計で同じ標定結果を示していることが分かる。またここでは省略するが、図5で“2”、“3”及び“5”で表されている各時間帯の雷撃部についても同様に同じ標定結果を示している。

次に、図5において“4”で示されている時間帯について、拡大図及び狭帯域・広帯域両干渉計による標定結果の時系列表示を図7に示す。この時間帯は他の時間帯と同様にUHF波振幅の変化から第4雷撃部と考えられる。いま方位角・仰角の時系列表示より、狭帯域干渉計による標定結果では方位角15度、仰角60度付近から放電が始まり方位角は732

図6 第1雷撃部の電界変化、VHF/UHF波放射及び方位角・仰角の時間変化

Fig. 6. Electric field change, VHF/UHF radiation, and azimuth, elevation of radiation sources as functions of time for the first stroke.

ミリ秒までは方位角10度と30度の間を繰り返す、その後25度付近を735.5ミリ秒まで下向きに進展している。そして帰還雷撃部に至り、方位角0度、仰角60度付近まで上昇している。ここで広帯域干渉計の標定結果は今示した放電経路とは別に731ミリ秒から732ミリ秒の間で異なる標定結果を示している箇所が見られる。そこで、放電経路を分かり易くするために第4雷撃部の2次元マッピングを図8に示す。図8において、放電は図中Sで示される地点から始まり狭帯域干渉計の標定結果と広帯域干渉計の標定結果の一部は矢印1の放電経路を示しているが、それとは別に矢印2で示される方向への進展も広帯域干渉計では標定している。この矢印2方向への進展は雲内での枝分かれによるものと考えられ、広帯域干渉計が同時に持続進展する複数の現象に対しても放電経路の特定が可能であることを示している。

このことは次の理由で説明することができる。広帯域干渉計では、各パルスごとに1 μ sといった短時間で標定点を算出しているため、連続する信号であっても個々のパルスの集合と見なし、全く独立に標定を行うことができる。一方、狭帯域干渉計では数msに及ぶ連続したUHF波形から位相差を一意に決定しているため、求められる標定点は空間を一方向に移動する点となる。そのため、枝分かれを伴う雷放電のように同時に進展するような現象に対しては、狭帯域干渉計では複数の放電路として標定することは

図7 第4雷撃部の電界変化、VHF/UHF波放射及び方位角・仰角の時間変化

Fig. 7. Electric field change, VHF/UHF radiation, and azimuth, elevation of radiation sources as functions of time for the fourth stroke.

図8 第4雷撃部の2次元マッピング

Fig. 8. Radiation sources in Azimuth-elevation format of forth stroke

できない。

4. む す び

本論文では製作した広帯域干渉計の有効性を検証するためにオーストラリア・ダーウィンにおいて合同雷雨総合観測の一環として観測が行われた。その結果以下のことが得られた。

- (1) 広帯域干渉計による位置標定画像は、同時観測に

より得られた狭帯域干渉計の画像とはほぼ一致し、しかも分散の少ないより明瞭な画像が得られた。また、全方位型ビデオカメラによる画像とも放電経路がほぼ一致することも、広帯域干渉計による位置標定画像が正しいことの裏付けである。

- (2) 狭帯域干渉計では不可能であった同時に持続進展する複数の現象に対しても、広帯域干渉計では位置標定が可能であることを示した。
- (3) 放射される VHF 波強度が小さいため、放電全過程を通じてデータを収集することが難しい。これを改善するためにログアンプ等を装着したシステムを作成することが今後の課題である。

なお、本論文で取り扱っている広帯域干渉計は、この種の雷放電に伴う電波放射源測定システムの全てが、これまで諸外国で考案されてきたことを考慮するとき、国内独自の技術として、種々の方面への応用・展開が期待できる。即ち本来の雷放電物理研究への適用はもとより、本論文の内容からも理解できるように受信系が比較的簡単かつ測定精度の高いことを考慮して、可搬型もしくは衛星搭載電波源位置測定装置への適用等がその具体例であるが、それらの具現化をあわせて今後の課題としたい。

本研究は文部省科学研究費補助金（国際学術研究 課題番号：08041123）の助成を受けていることを付記する。

（平成 10 年 8 月 12 日受付，同 11 年 1 月 25 日再受付）

文 献

- (1) D.E.Proctor, et al.: "VHF radio pictures of lightning flashes to ground", J.Geophys.Res., 89,1403-1410,1984
- (2) C.O.Hayenga: "Characteristics of lightning VHF radiation near the time of return strokes", J.Geophys.Res.,89,1403-1410,1984
- (3) P.Richard, et al.: "VHF-UHF interferometric measurement applications of lightning discharge mapping, Radio Sci., 20,171-192,1985.
- (4) 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)
- (5) 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)
- (6) 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)
- (7) Ushio,T,et al., Broad band interferometric measurement of rocket triggered lightning in Japan, Geophys.Res.Lett., 24,2769-2772,1997
- (8) 牛尾知雄:「広帯域電界・電磁波による雷放電の観測的研究」, 大阪大学学位論文 (工学部), 1998
- (9) 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
- (10) M.Uman: "The Lightning Discharge", Academic Press, 71, 1987

村 上 昌 孝（学生員） 1975 年 1 月 2 日生。1998 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程進学、現在に至る。雷観測に関する研究に従事。

牛 尾 知 雄（正員） 1969 年 8 月 21 日生。1998 年 3 月大阪大学大学院博士課程修了。同年米航空宇宙局 Global Hydrology and Climate Center 研究員、現在に至る。工学博士。雷放電物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。

太 田 恭 久（非会員） 1974 年 6 月 16 日生。1997 年 3 月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程進学、現在に至る。雷観測に関する研究に従事。

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。同年同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程進学、現在に至る。雷観測に関する研究に従事。

Redy Mardiana（非会員） 1968 年 3 月 4 日生。1997 年 10 月バンドン工科大学（インドネシア）大学院修士課程修了。1997 年 11 月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻研究生、現在に至る。雷観測に関する研究に従事。