

雷嵐監視のための 広帯域観測装置ネットワークの構築



研究ノート

牛尾 知雄^{*}, 吉田 智^{**}, 森本 健志^{***}, 河崎善一郎^{****}

Development of the broadband network for thunderstorm observation

Key Words : Radar, Lightning, Thunderstorm

^{*} Tomoo USHIO

1969年8月21日生。
1998年3月大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程修了。大阪府立大学工学部助手を経て、大阪大学工学研究科准教授、現在に至る。博士(工学)。現在電波リモートセンシング、地球観測などの研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本リモートセンシング学会、日本気象学会、日本大気電気学会、AGU 会員。

^{**} Satoshi YOSHIDA

2001年3月神戸大学理学部卒業。2003年3月大阪大学大学院工学研究科博士前期課程修了後、三菱重工(株)に3年間勤務。2008年9月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。2008年4月より日本学術振興会特別研究員。2009年10月より大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点所属の助教、現在に至る。リモートセンシングの開発とその気象分野の応用、人工衛星開発、大気電気学などの研究に従事。

^{***} Takeshi MORIMOTO

1977年3月10日生。
2005年3月大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士後期課程修了。同年4月より大阪大学工学研究科助手を経て2008年7月同講師、現在に至る。博士(工学)。雷放電物理、リモートセンシング機器開発などの研究に従事。日本気象学会、日本大気電気学会、AGU 会員。

^{****} Zenichiro KAWASAKI

1949年1月17日生。
1978年3月大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士後期課程修了。1979年4月名古屋大学空電研究所助手、1989年7月大阪大学講師、1991年6月同助教授、2000年12月同教授、現在に至る。工学博士。雷放電物理、地球環境観測などの研究に従事。IEEE、電子情報通信学会、日本気象学会、日本大気電気学会、AGU 会員。国際大気電気学委員会(ICAE)委員長。日本大気電気学会学術賞、電気学会進歩賞、レーザー学会進歩賞各賞受賞。

1. はじめに

地球の大気が地表からの加熱により不安定な成層を成すとき、その不安定を解消するため積乱雲あるいは雷雨が発達する。一般的に雷雨は対流セルあるいは降水セルと呼ばれる秒速十数メートル程度の激しい上昇気流、下降気流を含む対流の単位の集合体で構成されており、各々の対流セルは発達期、成熟期、消滅期という特有のライフサイクルを持つ。このライフサイクル中で、発達期のあられを主成分とする粒子が雲内における過冷却条件下で氷晶と接触し、電荷分離が進行して、電荷が蓄積される。そして、大気の絶縁破壊強度を越えたとき放電という形態をとって、雲内の電荷が中和される。これを雷放電と呼び、以上を総称して雷放電現象あるいは雷嵐と呼んでいる。

このような雷嵐は、時として我々の生活に大きな脅威となることがある。例えば、近年話題となっている「ゲリラ豪雨」(気象学的な明確な定義がないため、括弧付けとさせていただきます)は、予測が困難な突発的な局地的豪雨であり、多数の死傷者を伴う多くの悲劇的な災害を日本社会にもたらした。これは雷嵐現象の一種である。さらに、近年の人間活動に伴う地球温暖化によってこのような局地的な豪雨が増加するなどの報告もあり、今後の対策が急がれている。また、雷放電自体からは、DC付近からガンマ線に至るまでの広い帯域の電磁波が放射されており、数十kA以上の電流強度を有することがあるため、比較的強いインパルス性の電磁波が生ずる。これらは、電力線、通信線、電気電子機器にしばしば被害をもたらす、EMC課題の一つとして取り上げられている。

このような雷嵐現象を監視する手段は、電磁波を用いたリモートセンシング技術が主たる方法となる。

雷放電から放射されるインパルス性電磁波の強度とその時間変化を詳細に解析することによって、雷放電の物理過程を知ることが出来る。中でも特に、発生した場所の情報は、被害の原因の考察、特定等には重要であり、位置標定システムとして多くの国々で導入が進んでいる。また、雷放電発生の源である積乱雲の構造はレーダ技術によって捉えることが出来る。主にマイクロ波帯の電磁波を用いて、積乱雲中の降水粒子による散乱波を受信し、その強度及びドップラー速度から構造を捉える。積乱雲の種類、場所、時期によって結果として生じる雷放電の性質は異なり、特に、冬季積乱雲に特有な正極性落雷は大きな中和電荷量から被害が甚大である。しかしながら、何故、雷放電が生じ、どのような電荷構造をどのような積乱雲が有し、結果、どのような性質を有する雷放電が何時生成されるのか、このような基本的な性質についてでさえ、未解明な部分が多い。

本稿では、このような雷嵐監視のための観測技術とその科学に関して、我々の取り組みを紹介したいと思う。近年の情報通信技術の進歩によって、雷嵐を観測する技術も大きく進んできている。特に、雷嵐をこれまで以上の分解能で観測することにより、その新たな機構と過程を発掘する試みについて紹介したい。

2. 観測機器

2.1 レーダ技術

積乱雲の解析に用いられるレーダは多くの場合、降雨による減衰が比較的少ないCバンド若しくはXバンド帯の中大型レーダである。しかしながら、これらのレーダは広い観測範囲が得られる一方、以下のような制限を受ける。

(1) 地球曲率による低層未観測域

観測範囲が100 km以上に及ぶ大型レーダの場合、一般的に、地球の曲率に伴って、遠方になるに従い地表面から上方に観測域が設定される。例えば、地上10 mの高さにレーダが設置され、仰角1度での観測が行われた場合、距離120 km地点における最低観測高度は、約3 kmとなる。雷放電を伴うようなシビアな気象現象は、低層に竜巻等の特徴的な現象を伴うことがあるため、このような現象をターゲットにする場合は、大型レーダでは捉えることが難

しくなる。

(2) ビーム広がりに伴う空間分解能劣化

良く知られているようにアンテナからの電磁波放射はビーム幅を有し、遠方ではこの広がりによって空間分解能が劣化する。例えば、1度のビーム幅を有するアンテナを用いた場合、120 km先におけるビーム広がり約2 kmとなる。即ち、上記(1)の効果を含めると、120 km先の降雨を対象とした場合、高度3 km以上の降雨を2 kmの分解能で観測することになる。これは、数km以下の構造を有する竜巻や局所的な豪雨の構造を十分に捉えることが難しいことを示している。

(3) 大型アンテナによる時間分解能劣化

一般的に、大型気象レーダでは直径数m以上のアンテナが必要となる。このような大型のアンテナを、高速に回転するのは機構上、容易ではなく、時間分解能は5分以上となっている。集中豪雨や竜巻などの現象はその持続時間が短いもので数分程度と短い上、構造が数分で変化する。このような現象を、捉えるには1分程度の分解能が必要であり、しかも3次元的にも高い空間分解能で観測するのが望ましい。

以上のような本質的な問題が介在しているため従来の大型レーダを高度化するだけでは、短時間の間に竜巻等の現象を生起する積乱雲の構造を時空間的に密に観測することは難しい。このようなことから、我々は図1に示すような小型レーダネットワークによるアプローチを提唱している。その基本的な考え方と特徴は以下のようにまとめることが出来る。

(a) 広帯域の使用

レーダにおけるレンジ方向の空間分解能は帯域幅に比例する。本レーダでは80 MHzという従来に比べて数十倍の帯域を確保し、積乱雲の構造を極めて高い空間分解能で観測することが出来る。

(b) Ku帯の使用

本レーダシステムでは通常のレーダより高い周波数であるKu帯を中心周波数としている。しかし、降雨減衰が大きいため、本レーダでは観測可能距離を15 kmから20 kmの近距離レーダとしている。また、高い周波数帯に移行することによって、アンテナシステムを小型化出来ること、高精度な偏波観測が可能になると思われること等の利点がある。

(c) 多地点観測

前述のように本レーダは、20 km以内の近距離を

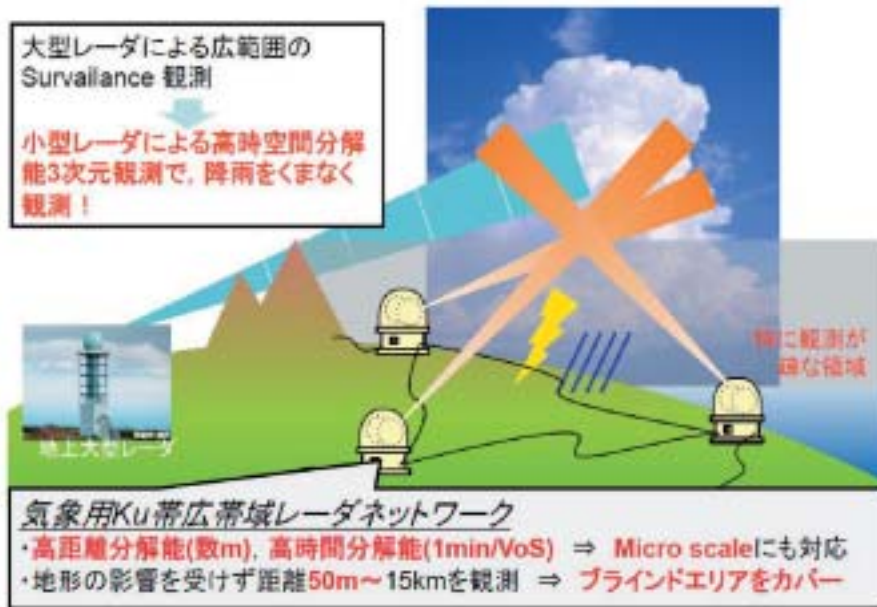


図1 広帯域レーダネットワークの概念図

対象としている。そのため一台のレーダがカバー出来る範囲は極めて限定的である。これに対して、観測対象とする積乱雲は数十 km 以上の水平方向の広がりを持ち、垂直方向にも時には対流圏界面付近まで成長することがある。こうした現象を広くカバーするには一台ではなく、複数台を用いて、観測範囲を補償する必要がある。さらに、一台において鉛直方向まで含めて高速に3次元スキャンを行うことにより地表面付近からエコートップまでをカバーすることが出来る。

以上のような考え方によって、製作したレーダ(1)(2)(3)の概観を図2に示す。



図2 広帯域レーダ外観図

ここに示されているように、直径約1.5m、500kg以下であり、気象レーダとしては比較的小型軽量で

ある。送信電力も10w程度であり、アンテナ回転速度が約40rpmと極めて高速であることが大きな特徴となっている。

2.2 雷放電観測技術

前述のように雷放電からは広い帯域の電磁波が放射される。その中でVHF帯の電磁波を用いて、雷放電路を再現する試みがなされている。図3に示されるように、角度方向から到来した電磁波は、片方のアンテナに対して、位相差だけ遅延するため、この位相差を、フーリエ変換によって各周波数毎に算出し、平均化することによって到来電磁波の仰角と方位角を算出することが可能である。

この装置(広帯域干渉計)の概観と観測の様子を図4に示す。これはオーストラリア・ダーウィンにおける熱帯地方の雷雲の観測プロジェクトでの様子である。

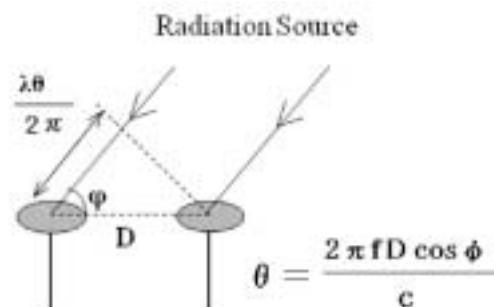


図3 2つのアンテナへの電磁波到来概念図



図4 オーストラリア・ダーウィンでの
広帯域干渉計による観測の様子

3. 雷放電と積乱雲の高分解能観測の科学

以上のような小型レーダと広帯域干渉計の同期観測によって得られた観測結果の一例を図5に示す。上図は、レーダによる仰角0度での水平スキャンの結果であり、下図は上図における黒線上の鉛直断面図である。レーダの中心から北西方向にレーダ反射因子の大きな領域が存在し、その近辺において雷放電が生起していることがわかる。そして、広帯域干渉計によって標定されている点が地面に向けて進展していることから、この放電が対地放電であることが示されている。放電開始高度は約6kmで、9月における観測であることを考慮すると、この高度が0度近辺の領域対応していることが推測できる。一般に、-10度付近には負電荷層が存在することが、これまでの研究から明らかとなっており、本観測結果も同様の傾向を示している。一方、積乱雲の構造に着目すると、この放電はエコーの強い領域の上方から開始しており、積乱雲のコア近辺であることがわかる。詳細に見ると、コアにはさらに細かな構造が示されており、今後、このような細かな構造に加えて速度場の情報を合わせて解析することによって、積乱雲の詳細構造と雷放電の対応関係がより明確になるものと思われる。

このように、広帯域干渉計によって、雷放電過程の微細な構造を捉えることが可能であり、さらにこのような進展過程は積乱雲の電荷構造と密接に関連している。積乱雲の電荷構造は、雲粒子の電荷分離機構と積乱雲生成の熱的および力学的過程によって決定されるため、降雨構造を詳細に捉えることの出来る小型レーダネットワークによる観測データと同期観測することによって、積乱雲の構造とその変化

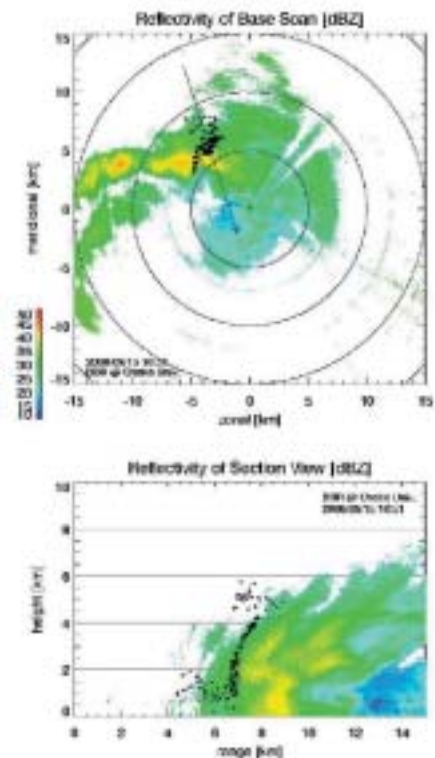


図5 広帯域レーダと広帯域干渉計による積乱雲と
雷放電の同時観測結果の一例

を電荷構造および降水構造の両側面から詳細に観測することが出来ると考えられる。このような観測によって、積乱雲の電荷分布とその変化のみならず、電荷分離メカニズムの解明、雷予知、豪雨対策がより一層進むと思われる、さらには、新たな現象の発見にもつながると思われる。

文 献

- (1) Mega, T., K. Monden, T. Ushio, K. Okamoto, Z-I. Kawasaki, and T. Morimoto, A low power high resolution broad-band radar using pulse compression technique for meteorological application, *IEEE Geosci. Remote. Sens. Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 392-396, JULY 2007
- (2) Yoshikawa, E., T. Mega, T. Morimoto, T. Ushio, and Z-I. Kawasaki, Real-Time spectral moments estimation and ground clutter suppression for precipitation radar with high resolution, *IEICE Trans. Commun.*, Vol. E92-B, No. 2, pp. 578-584, 2009
- (3) Yoshikawa, E., Tomoaki Mega, Takeshi

- Morimoto, Tomoo Ushio, Zen Kawasaki, *Member, IEEE*, Katsuyuki Imai, and Shin Ichiro Nagayama, Development and Initial Observation of High Resolution Volume Scanning Radar for Meteorological Application, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 48, No. 8, pp. 3225-3235, 2010
- (4) Ushio, T., Z-I. Kawasaki, Y. Ota, K. Matsuura, Broadband Interferometric Measurement of Rocket Triggered Lightning in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 24, pp. 2769-2773, 1997
- (5) Kawasaki, Z-I., R. Mardiana, T. Ushio, Broadband and narrow band RF interferometers for lightning observation, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 3189-3193, 2000
- (6) Morimoto, T., Z. Kawasaki, and T. Ushio, Lightning observations and consideration of positive charge distribution inside thunderclouds using VHF broadband interferometry, *Atmospheric Research*, Vol. 76/1-4, pp. 445-454, 2005

