

## 雲内放電及び対地放電に先行する Preliminary breakdown の比較 Comparison of preliminary breakdown pulses of cloud-to-ground and intracloud lightning flashes

秋山 泰洋<sup>1\*</sup>; Wu Ting<sup>1</sup>; 金 寛<sup>1</sup>; 菊池 博史<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>; 吉田 智<sup>2</sup>  
AKIYAMA, Yasuhiro<sup>1\*</sup>; WU, Ting<sup>1</sup>; KIM, Gwan<sup>1</sup>; KIKUCHI, Hiroshi<sup>1</sup>; USHIO, Tomoo<sup>1</sup>; YOSHIDA, Satoru<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 気象研

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute

Preliminary breakdown (以下, PB) は電界変化波形において, 数十  $\mu$  秒の両極性パルスが複数, 連続的に発生する現象で, 雷放電における最初の放電過程であると考えられている. PB を解析することによって, 雲内の物理的な状況や後に現れる放電プロセスを推測することができる. しかし, PB について不明な点は多く, 特に PB の放射源の3次元標定事例は非常に少ない. また, 放電過程に大きな違いがある雲内放電及び対地放電に対して, 先行する PB を解析することは, 雷放電の初期段階で, 雲内で放電を終える場合と大地へ放電し直接被害をもたらす場合を判断する指標となる可能性があり, 防災の観点からも非常に重要であると考えられる. そこで, 本研究では, 我々の研究グループが開発した広域雷放電観測ネットワークである Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm(BOLT) を用いて, 2013年夏季における雲内放電及び対地放電に先行する PB を三次元的に観測し, 解析した. BOLT は, 数 km から数十 km 離れた複数の観測地点に設置した LF 帯広帯域センサにより構成される. LF 帯広帯域センサは, 時定数 200  $\mu$  s の容量性円形平板アンテナ, A/D 変換ボード (ADC), GPS, パーソナルコンピュータ (PC) で構成される. A/D 変換ボードのサンプリングレートは 4MHz である. 各センサは, GPS により 250ns 以下の精度で装置間の時刻同期し, A/D 変換ボードの垂直分解能は 16bit で, 記録時間は 200ms である. LF 帯広帯域センサにより観測した電界変化波形から電磁波パルスのピークを検出し, 到達時間差法を用いて電磁波放射源の三次元位置標定を行う. PB については, LF 帯広帯域センサで得られた電界変化波形において PB pulse の initial peak の極性が正のものを -PB, initial peak の極性が負のものを +PB として分類し, +PB を 334 事例, -PB を 400 事例解析した. また, PB の特徴を表すパラメータとして, パルス幅, パルス間時間, パルス数, PB 継続時間, PB 発生高度及び進展速度を定義した. 定義したパラメータの内, パルス幅, パルス間時間, PB 継続時間及び PB 開始高度の平均値は -PB よりも +PB の方が大きくなった. 一方で, PB のパルス数及び PB の進展速度は, +PB, -PB とともに大きな違いは無かった. また, +PB は放電開始から上方に進展する上方進展, -PB は放電開始から下方に進展する下方進展及び水平に進展する水平進展と, 極性に応じて進展路が異なっており, 下方進展における PB の収束高度は水平進展の発生高度と近い値をとった. また, フェーズドアレイレーダを用いて積乱雲の成熟度と PB のパラメータとの関連性を考察する.

キーワード: Preliminary breakdown, 雷放電, 電磁波観測

Keywords: Preliminary breakdown, lightning discharges, EM source location

## 夏季正極性落雷の放電進展様相 VHF observations of positive cloud-to-ground lightning flashes in summer thunderstorm season

大谷 拓<sup>1\*</sup>; 森本 健志<sup>1</sup>; 中村 佳敬<sup>2</sup>; 林 清孝<sup>3</sup>; 林 雅明<sup>3</sup>

OTANI, Taku<sup>1\*</sup>; MORIMOTO, Takeshi<sup>1</sup>; NAKAMURA, Yoshitaka<sup>2</sup>; HAYASHI, Kiyotaka<sup>3</sup>; HAYASHI, Masaaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 近畿大学, <sup>2</sup> 神戸高専, <sup>3</sup> 中部電力

<sup>1</sup> Kindai University, <sup>2</sup> Kobe City College of Technology, <sup>3</sup> Chubu Electric Power Co., Inc.

雷放電とは、雷雲内で分離された正電荷と負電荷とが放電に伴い中和される現象である。雲内の電荷が大地に放電するものを対地放電（落雷）と呼ぶ。夏季に見られる対地放電の90%以上は雲内の負電荷を中和する下向き負極性落雷であるとされている。電磁界観測において、正リーダの進展に伴い放射されるVHF帯電磁波が弱いため、正極性落雷の放電進展様相はほとんど明らかになっていない。しかし双方向性リーダの概念によると正リーダと同時に進展を開始する負リーダが存在する。正極性落雷ではこの負リーダを中心に議論が行われることになる。本研究では、落雷時に発生する電磁波の到来方向と時刻を検出し、落雷位置を標定する落雷位置標定システムLLS、および雲内を含めた雷放電の進展様相を可視化するVHF帯広帯域干渉計で観測された正極性落雷について詳細に解析し考察を行う。本稿では、2014年岐阜県東濃地方において行った雷観測データのうち、瑞浪と恵那観測所に設置してある2組の干渉計がデータを記録した正極性落雷4例を対象とする。

2014年7月20日19:56:50に記録した雷放電では、雲内から大地に向かい下向きに進展する正リーダは可視化されていないが、同時に進展を開始したと思われる負リーダが標定されている。帰還雷撃は普通、先行するリーダ内の電荷を中和するように進展する。しかしこの事例では、帰還雷撃直後に発生したリーダは、先行するリーダとは異なる放電路を進展している。雲内に存在する別の電荷領域を中和する放電が継続したようである。更に帰還雷撃後の放電進展に注目すると、一度リーダが進展した放電路を、時間をおいて再び進展する様子が見られ、正極性落雷では稀である多重落雷を記録したものであると考えられる。

解析対象とした他の3事例のうち、1例では帰還雷撃前に雲内を進展する負リーダと、大地に向かい下向きに進展する正リーダが共に標定された。他の2例は共に、帰還雷撃前にリーダ進展が標定されなかった。前者は、後者に比べ観測点からの距離が近い。電磁波の減衰が少なかったため正リーダの進展様相が標定できたと考えられる。

以上のように、本研究では、干渉計とLLSで観測された夏季の正極性落雷の放電進展様相を詳細に解析した。正極性落雷では稀である多重落雷の進展や、双方向性リーダの負リーダだけではなく正リーダの進展様相も知ることができた。

キーワード: 正極性落雷, 広帯域干渉計, LLS, 夏季雷

Keywords: Positive cloud-to-ground lightning flash, Broadband digital interferometer, Lightning Location System, lightning in summer season

## 広帯域雷放電センサネットワークを用いた関東平野での雷観測 Lightning observation using Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm in the Kanto Plain

吉田 智<sup>1\*</sup>; 楠 研一<sup>1</sup>; 足立 透<sup>1</sup>; 猪上 華子<sup>1</sup>; 呉 亭<sup>2</sup>; 牛尾 知雄<sup>2</sup>

YOSHIDA, Satoru<sup>1\*</sup>; KENICHI, Kusunoki<sup>1</sup>; ADACHI, Toru<sup>1</sup>; INOUE, Hanako<sup>1</sup>; WU, Ting<sup>2</sup>; USHIO, Tomoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 気象研究所, <sup>2</sup> 大阪大学

<sup>1</sup>Meteorological Research Institute, <sup>2</sup>Osaka University

We have been designing and developing Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm (BOLT). The BOLT consists of four or more LF sensors which detect LF radiation from lightning discharges and locate LF emission sources in 3D using either time of arrival or digital interferometry. We have lightning observation with BOLT in the Kanto Plain from 2015. In this presentation, we overview the lightning observation, including location error estimation of BOLT for LF emission associated with lightning, and update the BOLT lightning location technique.

キーワード: 雷放電, 積乱雲, リモートセンシング

Keywords: lightning discharges, thunderstorms, remote sensing

## 国内初トータルライトニングネットワークによる突風現象による雷活動の初期観測結果

### The first observational results of Japanese total lightning network associated with severe weather phenomena in 2014

熊谷 悠里<sup>1\*</sup>; 石井 颯杜<sup>1</sup>; 芳原 容英<sup>1</sup>; S. Heckman<sup>2</sup>; C. Liu<sup>2</sup>  
KUMAGAI, Yuri<sup>1\*</sup>; ISHII, Hayato<sup>1</sup>; HOBARA, Yasuhide<sup>1</sup>; S., Heckman<sup>2</sup>; C., Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 電気通信大学大学院情報理工学研究科, <sup>2</sup>EarthNetworks,USA

<sup>1</sup>Graduate School of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications, <sup>2</sup>EarthNetworks,USA

近年、国内外にて頻発する局所的気象擾乱と雷放電との関係性について注目が集まっている。特に、対地雷と雲内雷をあわせたトータルライトニングは激しい降雨や突風の先行現象として有望とされ、世界中で詳細な研究が始まっている。しかしながら、日本においてトータルライトニングと気象擾乱に関する研究は未だ無い。本発表では、電通大が展開した国内初のトータルライトニングネットワークの初期観測結果を報告する。今回は特に、2014年度に日本国内で発生した局所的気象擾乱のうち突風に着目し、トータルライトニングの気象擾乱に対する先行性と突風事例別の対地雷、雲内雷との比較を行った結果、トータルライトニングの優位性を見いだした。

キーワード: 雷, 短期予測, 突風, シビア気象, トータルライトニング

Keywords: lightning, nowcasting, wind gust, severe weather, total lightning

2013年9月16日群馬県みどり市で発生した竜巻の地上稠密観測データを用いた解析結果  
Observation of tornado using a high dense ground observation network in Midori city, Gunma, Japan on 16 September 2013

木村 孝承<sup>1\*</sup>; 小林 文明<sup>1</sup>; 野呂瀬 敬子<sup>1</sup>; 呉 宏堯<sup>2</sup>; 矢田 拓也<sup>2</sup>; 佐藤 香枝<sup>2</sup>  
KIMURA, Hyosun<sup>1\*</sup>; KOBAYASHI, Fumiaki<sup>1</sup>; NOROSE, Keiko<sup>1</sup>; KURE, Hiroataka<sup>2</sup>; YADA, Takuya<sup>2</sup>; SATO, Kae<sup>2</sup>

<sup>1</sup>防大地球, <sup>2</sup>明星電気(株)

<sup>1</sup>National Defense Academy, <sup>2</sup>Meisei Electric

2013年9月16日02:20 JST(Japan Standard Time)頃に群馬県みどり市で発達した積乱雲の通過に伴い突風被害が発生した。この突風は、気象庁の現地調査によると竜巻(F1)であった。竜巻は、群馬県を中心に設置された地上稠密観測網内(前田ほか2014)を移動した(小林2014)。本研究では、小型気象計POTEKAが捉えた突風被害域周辺で観測された気圧データを解析し、渦の構造を議論する。気圧の時系列変化をみると、竜巻の被害発生地点から1.6 km離れた地点では、全体的に台風の影響で下降する中、01:52~02:11 JSTで2段階の気圧降下がみられ、最終的に3 hPa降下した。また、2~5 km離れた他の2地点においても同様な気圧降下のピークがみられた。それぞれ02:03~02:11 JSTで1.4 hPa, 02:03~02:11 JSTで1.3 hPa降下した。この気圧分布は修正ランキン渦モデルを用いることが適しており、マイソサイクロンの $R=1\text{km}$ ,  $V_{\text{max}}=20\text{m/s}$ を仮定すると、 $\alpha$ は0.35~0.75の範囲であった。以上のことから実際の竜巻モデルを考える際は、地上の竜巻渦とマイソサイクロンの両方を議論する必要があると結論づけられた。

## 地上稠密観測 POTEKA で観測された 2014 年度夏季の突風現象 Surface Temperature and Pressure Distributions of Wind Gust captured by High Dense Ground Observation Network 'POTEKA'

矢田 拓也<sup>1\*</sup>; 佐藤 香枝<sup>1</sup>; 呉 宏堯<sup>1</sup>; 小林 文明<sup>2</sup>  
YADA, Takuya<sup>1\*</sup>; SATO, Kae<sup>1</sup>; KURE, Hirotaka<sup>1</sup>; KOBAYASHI, Fumiaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 明星電気株式会社, <sup>2</sup> 防衛大学校

<sup>1</sup> Meisei Electric Co. Ltd., <sup>2</sup> National Defense Academy.

明星電気株式会社は、小型気象計 POTEKA Sta.(ポテカ: Point Tenki Kansoku、以下 POTEKA)を開発し、2013 年度から群馬県を中心に地上稠密気象観測を実施している。2014 年度は、POTEKA を改良し新たに風向風速と雨量を観測可能とした。また、既存の観測網を拡大し小学校を中心に約 2km 間隔で 93 カ所に追加設置を行い、計 145 ケ所で 1 分毎の地上観測網を構築した。本稿では、2014 年度夏季に発生した顕著な突風事例について紹介する。

2014 年 7 月 27 日の突風は寒冷前線通過に伴い発生した。気象庁の発表によると、被害地域は伊勢崎市内で、F0 のガストフロントであった。気温の低下は 11 時 50 分から開始し、気象台・POTEKA 共に  $-0.25$  °C/分の低下率であり、広範囲に渡って気温の低下が観測された。最大瞬間風速は気温低下から約 20 分後にピークがあり、約 19m/s の突風を観測した。

2014 年 8 月 22 日の事例では活発な積乱雲が通過したことによるものであった。気象庁の発表によると突風は F0 のダウンバーストで、18 時 10 分ごろに高崎市から前橋市にかけて発生した。7 月 27 日と同様、ダウンバースト発生前後で POTEKA と気象台の変化傾向が一致していることを確認した。POTEKA の気温 1 分値を見ると、17 時 45 分頃から気温の急低下が見られ、平均で  $-0.47$  °C/分の気温減率を観測した。気象庁の現地調査結果との比較では、気温低下地域の拡大方向・時刻は一致した。また、最初の気温低下は被害発生時刻の約 25 分前に確認した。

今回発生した 2 回の突風事例では、気温・風の変化傾向は前橋地方気象台の観測値とよく一致しており、突風を捉えるためには十分な性能であるといえる。

キーワード: 小型気象計, 地上稠密気象観測, ガストフロント, ダウンバースト, 風向風速, 2014 年度夏季

Keywords: compact weather sensor, high ground observation network, gust front, downburst, wind direction and wind speed, summer 2014

## ELF 波形から推定された雷放電の放電電荷量と極端気象現象との関係 Relation between charge amounts of lightning discharges derived from ELF waveform data and severe weather

清水 千春<sup>1\*</sup>; 佐藤 光輝<sup>1</sup>; 高橋 幸弘<sup>1</sup>; 土屋 史紀<sup>2</sup>; 本間 規泰<sup>3</sup>; 本郷 保二<sup>3</sup>; 阿部 修司<sup>4</sup>;  
吉川 顕正<sup>4</sup>  
SHIMIZU, Chiharu<sup>1\*</sup>; SATO, Mitsuteru<sup>1</sup>; TAKAHASHI, Yukihiko<sup>1</sup>; TSUCHIYA, Fuminori<sup>2</sup>;  
HONMA, Noriyasu<sup>3</sup>; HONGO, Yasuji<sup>3</sup>; ABE, Shuji<sup>4</sup>; YOSHIKAWA, Akimasa<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学, <sup>2</sup> 東北大学, <sup>3</sup> 東北電力, <sup>4</sup> 九州大学

<sup>1</sup>Hokkaido University, <sup>2</sup>Tohoku University, <sup>3</sup>Tohoku Electric Power, <sup>4</sup>Kyushu University

雷放電と気象現象との密接な関係性が先行研究によって示されているが、ほとんどの研究では雷放電発生頻度との比較がなされており、雷放電の電気的特性に着目した研究は皆無である。雷放電は放電現象であるため、極性・ピーク電流値・中和電荷量などの雷放電の電気的特性と気象現象とのパラメータ比較はより重要であると考えられる。雷雲内に蓄えられた電荷量は鉛直対流強度と直接的な関係にあると考えられるため、積乱雲の発達過程などを示す重要な指標となり得る。雷放電の中和電荷量は電流波形を積分することによって得られるが、これまでの雷放電電流波形の計測では、ログスキーコイルが設置されているタワー等を直撃した雷放電からのみの電流波形の計測が可能であり、任意の雷放電の電流計測は困難である。近年、誘導磁場が観測される範囲において ELF 帯の電磁波観測で検出される磁場波形が雷放電の電流波形と高い相似性を示すことが報告されている [Sato et al., 2013]。従って、電流波形と ELF 波形を定量的に評価することにより、ELF 波形から中和電荷量を経験式に基づいて推定することが可能になると期待される。本研究では、新潟県尾上岳に設置されているログスキーコイルで得られた電流波形データと、宮城県女川に設置されている ELF 帯電磁波観測器で得られた ELF 磁場波形データを用いて解析を行い、両波形を比較することでピーク電流値と中和電荷量に関する経験式を得た。一方、関東地方でダウンバーストが発生した前後の時間帯に生じた雷放電に関し、JLDN の雷データと久住観測所で得られた ELF 磁場波形データを用い、経験式を適用することでピーク電流値と中和電荷量を推定した。その結果、推定した中和電荷量の時間変化とダウンバースト発生には、明瞭な特徴があることを発見した。本発表では、解析により得られた結果の詳細を報告する。

## 偏波フェーズドアレイレーダにおけるMMSE法のビームフォーミング手法への適用 MMSE beamforming method for polarimetric phased array weather radar

菊池 博史<sup>1\*</sup>; 田島 拓朗<sup>1</sup>; Wu Ting<sup>1</sup>; Gwan Kim<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>; 後藤 秀人<sup>2</sup>; 水谷 文彦<sup>2</sup>  
KIKUCHI, Hiroshi<sup>1\*</sup>; TASHIMA, Takuro<sup>1</sup>; WU, Ting<sup>1</sup>; GWAN, Kim<sup>1</sup>; USHIO, Tomoo<sup>1</sup>; GOTO, Hideto<sup>2</sup>;  
MIZUTANI, Fumihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 東芝

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>TOSHIBA Co.,Ltd.

A polarimetric 2-D phased array radar, which consists of dual-polarized antenna with two-dimensional circular planar phase-array elements, capable of measuring the 3-D rainfall distribution in less than 20 seconds, is under development. We proposed minimum mean square error (MMSE) method for the under developing radar as digital beam forming (DBF) method, which is one of the important components to develop the phased array radar. In this presentation, precipitation radar signal simulations based on the developing radar concept are carried out. We discuss the estimation accuracy of polarimetric precipitation profiles (differential reflectivity, specific differential phase, and copolar correlation coefficient). From comparison of the performance of the conventional DBF methods, MMSE is superior because of the effect of adaptively suppressed side lobes.

キーワード: 降雨観測, 偏波レーダ, フェーズドアレイ, ビームフォーミング手法

Keywords: precipitation measurement, polarimetric radar, phased array radar, beamforming method

## フェーズドアレイレーダの較正に向けたアンテナ性能の検討 The examination of antenna performance for the calibration of Phased Array Radar

芝池 尚哉<sup>1\*</sup>; 妻鹿 友昭<sup>1</sup>; 嶋村 重治<sup>1</sup>; 菊池 博史<sup>1</sup>; 金 寛<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>; 花土 弘<sup>3</sup>; 水谷 文彦<sup>2</sup>  
SHIBAIKE, Naoya<sup>1\*</sup>; MEGA, Tomoaki<sup>1</sup>; SHIMAMURA, Shigeharu<sup>1</sup>; KIKUCHI, Hiroshi<sup>1</sup>; KIM, Gwan<sup>1</sup>;  
USHIO, Tomoo<sup>1</sup>; HANADO, Hiroshi<sup>3</sup>; MIZUTANI, Fumihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 情報通信研究機構, <sup>3</sup> 株式会社 東芝

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>National Institute of Information and Communications Technology, <sup>3</sup>TOSHIBA CORPORATION

数分規模で変化していく雨雲の内部構造の進展, 発達を補足し予測・対応していくためには, より高い時空間分解能(数十秒程度)を持つ気象レーダによる観測が求められる。そこで我々は大阪大学吹田キャンパスに設置された気象用フェーズドアレイレーダ(Phased Array Radar: PAR)を用いた気象観測及び解析を行っている。PARは半径60[km]圏内を10~30[秒]の時間分解能及び100[m]の距離分解能で観測を行うことができるため, 雨雲の内部構造の進展及び発達をリアルタイムに補足し, 解析を行う上で非常に有用である。

気象レーダを用いて気象観測を行うにあたって, 気象レーダの較正を行うことは非常に重要である。気象レーダの較正を行うためには, レーダ定数に必要な送受信利得や電力半値幅を測定しなければならない。また, PARは従来型気象レーダとは異なり, 128個のスロットアンテナが縦に線形配列されたアレイアンテナであり, 受信波のアンテナパターンの形成の際にはデジタルビームフォーミング処理を行っている。従って, その較正を行うためには, 送受信利得や電力半値幅の測定に加えて, 各受信素子の持つバイアス誤差が受信波のアンテナパターン形成に与える影響も考慮する必要がある。そのため本研究ではホーンアンテナを用いてPARの送信波及び受信波のアンテナパターンを測定することで, 必要なパラメータの測定を行った。加えて, 受信波アンテナパターンの測定の際に各素子のI/Qデータから, 受信信号の位相の測定も行った。

本稿では, 送受信波のアンテナパターン測定結果から得られた送受信利得及び電力半値幅を示し, その妥当性について考察を行う。加えて, 受信波アンテナパターン測定と同時にを行った各素子のI/Qデータによる各素子の受信信号の位相の測定結果を示し, 受信波のアンテナパターン形成に対し各素子の持つ位相検波におけるバイアス誤差が与える影響について考察を行う。

キーワード: フェーズドアレイレーダ, 気象レーダ, アレイアンテナ, 較正

Keywords: phased array radar, weather radar, array antenna, calibration

## フェーズドアレイレーダにおけるアンテナパターン決定手法の検討 Digital Beam Forming methods on Observation Result of Phased Array Radar

田島 拓朗<sup>1\*</sup>; 菊池 博史<sup>1</sup>; Wu Ting<sup>1</sup>; 嶋村 重治<sup>1</sup>; 金 寛<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>; 後藤 秀人<sup>2</sup>; 水谷 文彦<sup>2</sup>  
TASHIMA, Takuro<sup>1\*</sup>; KIKUCHI, Hiroshi<sup>1</sup>; WU, Ting<sup>1</sup>; SHIMAMURA, Shigeharu<sup>1</sup>; KIM, Gwan<sup>1</sup>;  
USHIO, Tomoo<sup>1</sup>; GOTO, Hideto<sup>2</sup>; MIZUTANI, Fumihiko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 東芝

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>Toshiba

本研究グループでは2012年にフェーズドアレイレーダ (PAR) を開発し、現在実験的観測を行っている。PARは仰角方向に対して電子走査を行うことで10~30秒の時間分解能、100mの空間分解能での降雨観測を実現した。PARは128個のアンテナ素子を持ち、各受信信号の情報からデジタルビームフォーミング (DBF) によってアンテナパターンを決定し、仰角方向に1.0[degree]程度の分解能で観測を行っている。

現在DBF手法にはビームフォーマ (BF) 法が採用されているが、BF法は所望方向から到来信号を求める際に、全てのアンテナ素子に対して一様な重みを与えている。そのため、サイドローブレベルが高く、異なる方向からの地形クラッタや強い降雨などによる影響で擬似エコーが生じてしまう。またBF法に代わり最小二乗平均誤差法 (Minimum Mean Square Error method: MMSE法) を用いることが提案され、BF法に比べて擬似エコーを減少させることができた。しかしMMSE法は計算コストがBF法の数千倍と非常に大きく、高い時間分解能を持つPARには不向きである。

本研究では、MMSE法のアダプティブビームフォーミングやアダプティブマルチステアリングなどの特性を維持したまま計算コストを抑える手法を提案する。提案手法は、MMSE法のアンテナ素子数に依存した逆行列演算の次元を下げ、そして繰り返し演算回数を減らすようにアルゴリズムを改変し、計算コストを小さくする。

本稿では、BF法、MMSE法及び提案手法の概要を示す。さらにPARの観測結果に適用し、その計算時間及び反射因子の結果の比較を行う。この比較から、PARに適したアンテナパターン決定手法を考察する。

キーワード: フェーズドアレイレーダ, デジタルビームフォーミング, 最小二乗平均誤差法, シビア現象

Keywords: Phased Array Radar, Digital Beam Forming, Minimum Mean Square Error method, severe phenomena

## フェーズドアレイレーダネットワークにおける降雨減衰を考慮した合成手法の検討 Precipitation attenuation retrieval method with Phased Array Radar network

藤田 秀平<sup>1\*</sup>; 嶋村 重治<sup>1</sup>; 妻鹿 友昭<sup>1</sup>; 菊池 博史<sup>1</sup>; 呉 亭<sup>1</sup>; 金 寛<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>; 吉川 栄一<sup>2</sup>  
FUJITA, Shuhei<sup>1\*</sup>; SHIMAMURA, Shigeharu<sup>1</sup>; MEGA, Tomoaki<sup>1</sup>; KIKUCHI, Hiroshi<sup>1</sup>; WU, Ting<sup>1</sup>;  
KIM, Gwan<sup>1</sup>; USHIO, Tomoo<sup>1</sup>; YOSHIKAWA, Eiichi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 大阪大学, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>Japan Aerospace eXploration Agency

ゲリラ豪雨や竜巻等のシビア現象を含む一般的な降水観測において、リモートセンシング技術は有効である。従来型の気象レーダの多くは、パラボラタイプのアンテナを用いてビーム幅 1 [deg] 程度の電波を放射し、仰角・方位角方向ともに機械走査を行っている。この走査方法は、低仰角の観測に 1~5 分程度、未観測域を含む立体的な観測に 5~10 分程度を要する。また従来型のレーダは距離分解能が 500 [m] 程度である。しかし、シビア現象の多くは数分のうちに局地的に発生するため、従来型レーダはシビア現象の捕捉には不十分である。さらに従来型レーダは半径数百 [km] という広範囲の観測を行うため、レーダ遠方で地球の曲率に伴い低高度の未観測域が発生するという問題も存在する。一方、大阪大学吹田キャンパスと神戸市西区に設置されている X 帯フェーズドアレイレーダ (以下, PAR) は、距離分解能 100 [m], 時間分解能 30 [sec] という従来型レーダに比し非常に高分解能であり、仰角方向に電子走査、方位角方向に機械走査を行っている。また観測範囲は 60 [km] であるため、従来型レーダと比し地球の曲率の影響はあまりない。しかし、PAR は X 帯を使用しているため C 帯等のレーダよりも大きな降雨減衰が発生する。この問題に対処するには、レーダを複数配置したネットワーク観測が有効である。なぜならば、複数レーダの観測により単体レーダでは降雨減衰の影響により捕捉が不十分であった雨雲でも、他方のレーダから相補的に観測し、減衰補正の精度向上が期待されるからである。また、降雨減衰の補正手法の一つとして、Hitschfeld-Bordan 法 (以下, HB 法) が用いられている。しかし、減衰量の大きい X 帯のレーダに HB 法を適用すると、補正值が発散してしまい降水量を過大推定してしまうという問題もある。本研究では、これらの問題に対処するため、2 台の PAR を用いたネットワーク観測領域における降雨減衰を考慮した合成手法を提案する。

キーワード: フェーズドアレイレーダ, 降雨減衰, 降雨減衰補正, レーダネットワーク

Keywords: phased array radar, precipitation attenuation, precipitation attenuation retrieval, radar network

## ドップラーレーダにおける低高度速度場推定手法 Low-altitude Velocity Field Estimation in Doppler Radar

藤原 達朗<sup>1\*</sup>; 嶋村 重治<sup>1</sup>; 吉川 栄一<sup>2</sup>; 菊池 博史<sup>1</sup>; 妻鹿 友昭<sup>1</sup>; Wu Ting<sup>1</sup>; Gwan Kim<sup>1</sup>; 牛尾 知雄<sup>1</sup>  
FUJIWARA, Tatsuro<sup>1\*</sup>; SHIMAMURA, Shigeharu<sup>1</sup>; YOSHIKAWA, Eiichi<sup>2</sup>; KIKUCHI, Hiroshi<sup>1</sup>;  
MEGA, Tomoaki<sup>1</sup>; WU, Ting<sup>1</sup>; GWAN, Kim<sup>1</sup>; USHIO, Tomoo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>大阪大学, <sup>2</sup>宇宙航空研究開発機構

<sup>1</sup>Osaka University, <sup>2</sup>JAXA

本研究グループが開発したフェーズドアレイレーダでは、ドップラースペクトル算出手法として最も一般的な手法である高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform : FFT) 法を採用している。しかし FFT 法では山岳、ビル等の障害物の影響が強くなる低高度観測において、スペクトル上でクラッタサイドロープレベルが高いため気象信号が埋没してしまい、従来のフィルタリングアプローチでは気象信号の抽出が不可能となる問題点がある。ビル等の障害物の多い観測地域というのは、人々の生活範囲と一致し、その地域の気象情報を正確に得ることが、気象災害の被害の予防につながると考えている。そこで本研究ではスペクトル推定そのものを改善し、クラッタの影響下においてもサイドロープレベルを抑え、従来のフィルタリングアプローチで気象信号が抽出可能となる新たなスペクトル算出手法として最小二乗平均誤差 (Minimum Mean Square Error : MMSE) 法を検討し、提案手法の有効性をシミュレーションとフェーズドアレイレーダにより得られた観測データで検証した。

シミュレーションでは降水とクラッタの性質を加味した位相差信号を作成し両手法を適用した。クラッタの影響が小さいケースでは FFT 法、MMSE 法両手法とも降水エコーを抽出できたが、クラッタの影響が大きいケースでは FFT 法では抽出できなかった降雨エコーに対して、MMSE 法で算出したドップラースペクトルはより正確に降雨エコーを抽出した。

実際の観測データではクラッタの存在する観測地点 (レーダからの距離約 26[km], 方位角 130°~150[deg]) に着目し、MMSE 法を用いてドップラースペクトルを算出しスペクトル上でクラッタエコーを除去した後、ドップラー速度を算出した。その結果、クラッタエコーの影響が少ない仰角の観測地点で吹いている風速度場と一致した。これは FFT 法では抽出できなかった降雨エコーを MMSE 法の適用によって抽出できることを示しており、以上の結果より、クラッタの影響が強くなる低高度観測におけるドップラースペクトル算出手法として MMSE 法は有効であることが示された。

キーワード: ドップラーレーダ, 最小二乗平均誤差法, ドップラースペクトル

Keywords: Doppler Radar, Minimum Mean Square Error, Doppler Spectrum

## AVONを用いたVLF帯電磁波観測に基づく空電波形の変化 Variations of sferic waveforms in VLF range observed by AVON

大西 翔太<sup>1\*</sup>; 高橋 幸弘<sup>1</sup>; 山下 幸三<sup>2</sup>  
ONISHI, Shota<sup>1\*</sup>; TAKAHASHI, Yukihiro<sup>1</sup>; YAMASHITA, Kozo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻, <sup>2</sup> サレジオ工業高等専門学校

<sup>1</sup>Department of Cosmospice, Graduate school of science, Hokkaido University, <sup>2</sup>Salesian Polytechnic

Previous studies suggested that there exists a good relationship between lightning activity and atmospheric convection [e.g. Deierling and Petersen, 2008]. The lightning data can be used as a proxy for the presence of deep atmospheric convection. Previous researches estimated statistically the total optical lightning flashes for understanding the relationship between lightning activities and atmospheric convection [e.g. Boccippio et al., 2000]. However it is difficult for optical observation to estimate electrical properties of lightning discharge. When we can measure electrical properties of each lightning and the flashes of lightning, it is possible to understand more detailed relationship between the lightning activity and atmospheric convection.

In this study, we use Asia VLF observation Network (AVON) and estimate the location of lightning and electrical characteristics of each lightning stroke in South-East Asia. AVON monitors electromagnetic waves in the frequency range of 0.1 kHz – 40 kHz. We estimate the lightning locations using 3 stations of AVON, that is, at Tainan, Taiwan, Saraburi, Thailand and Potianak, Indonesia, by time-of-arrival method and the charge moment change (CMC) using the waveform of sferics in VLF range. However, there is a difficulty in estimating CMC with VLF wave forms occurred at long range (>200 km) since the ground wave is overlapped by sky waves. We investigated the relationship between the ground wave and sky waves for different ranges. The observed data is from 06:00(UT), December 1st 2010 to 00:00(UT), December 2nd 2010 and the total number of analyzed events is 72. We divided to consider change of the ground wave and sky waves by depending on ranges at intervals of 100km.

It is found that the sky waves are dominant as compared with the ground wave at long range and it is possible that we estimate CMC of CG lightning, considering low frequency of the lightning discharge. We found that there was the time variation of arrival time for sky waves because of the changes of the ionospheric height. It could be possible to identify a lightning pulse as one of them using sky waves, considering the ionospheric height. We discuss about the geolocation of CG lightning using arrival times of sky wave and estimation of CMC using observed data from AVON.

キーワード: 雷放電, 対地雷, 空電波形, 落雷位置推定

Keywords: lightning, cloud-to-ground lightning, lightning geolocation, sferic waveform, very low frequency

## 夏季スプライトと親雷雷雲のライフサイクル～2013年富士山キャンペーン観測 The relation between summer sprites and lifecycle of parent storm system: 2013 Mt. Fuji observation campaign

鈴木 裕子<sup>1\*</sup>; 鴨川 仁<sup>1</sup>; 鈴木 智幸<sup>1</sup>  
SUZUKI, Yuko<sup>1\*</sup>; KAMOGAWA, Masashi<sup>1</sup>; SUZUKI, Tomoyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学教育学部物理学科

<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ

房総半島や千葉など、東日本上空に発生する高高度放電発光現象の映像を得るため、孤立峰で高度 3776 m である富士山山頂において観測を行った。多くの高高度放電発光現象が 2013 年の夏の間、特にこのエリアで発生した正極性落雷に起因していた。夏の雷雲は地上や海上を覆い、しばしば富士山山頂より下に位置する。富士山山頂は大気圧が低く、大気汚染が少なく、孤立峰であり 360° の眺めがあることから、高高度放電発光現象の観測事例を増やすことや鮮明な画像を取得することが期待できる。我々はモノクロ CCD カメラを用いて数 km 離れた高高度放電発光現象を捉えた。さらに、スプライトと親雷と親積乱雲の関係を調べる。6つのスプライト事例は正極性落雷に関連しており、落雷の電流は  $156 \pm 76$  kA (89 - 312 kA) であった。また、スプライトは正極性落雷の発生後の  $41 \pm 30$  ms 後に発生しており、正極性落雷位置とスプライト発生位置は層状雲の発生していた領域にあった。

キーワード: スプライト, 高高度放電発光現象, 雷雲

Keywords: Sprite, Parent lightning, Thunderstorm

## 冬の日本海沿岸に到来する雷雲由来のガンマ線バースト観測 Observation of gamma-ray bursts from winter thunderclouds and lightning over the Japan sea coast

榎本 大悟<sup>1\*</sup>; 土屋 晴文<sup>2</sup>; 湯浅 孝行<sup>3</sup>; 中澤 知洋<sup>1</sup>; 榎戸 輝揚<sup>4</sup>; 古田 禄大<sup>1</sup>; 山田 真也<sup>5</sup>; 牧島 一夫<sup>1</sup>

UMEMOTO, Daigo<sup>1\*</sup>; TSUCHIYA, Harufumi<sup>2</sup>; YUASA, Takayuki<sup>3</sup>; NAKAZAWA, Kazuhiro<sup>1</sup>; ENOTO, Teruaki<sup>4</sup>; FURUTA, Yoshihiro<sup>1</sup>; YAMADA, Shin'ya<sup>5</sup>; MAKISHIMA, Kazuo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京大学, <sup>2</sup> 原子力研究開発機構, <sup>3</sup> 理化学研究所, <sup>4</sup> 京都大学, <sup>5</sup> 首都大学東京

<sup>1</sup>University of Tokyo, <sup>2</sup>JAEA, <sup>3</sup>RIKEN, <sup>4</sup>Kyoto University, <sup>5</sup>Tokyo Metropolitan University

近年、数十 MeV に達するガンマ線が雷雲や雷から生じる現象が報告されるようになってきた。この現象はガンマ線観測衛星によって TGF(terrestrial gamma-ray flashes) として宇宙で発見され、地上観測も行われている。我々がやっている GROWTH 実験 (Gamma-Ray Observation of Winter Thunderclouds) では、2006 年より新潟県柏崎刈羽原子力発電所内に複数の検出器を設置し、北陸冬季雷雲を由来とするガンマ線放射現象を観測してきた。この実験を続ける中で、雲中雷を含む雷放電と同時に生じる 1 秒以内の継続時間をもつショートバーストの他に、放電とは関連せず数分にわたって放射を継続し、雷雲と相関する「ロングバースト」があることが明らかになった (H. Tsuchiya+2007, 2011)。ロングバーストのガンマ線エネルギースペクトルは、多くの場合においてなだらかで構造がない形状をしており、雷雲電場によって相対論的速度まで加速された電子の制動放射によって概ね説明できる。ロングバーストの典型的な持続時間は 1 分程度である。これは、検出器上空を 15 m/s 程度で差し渡し 1 km 程度の大きさをもつ雷雲セルが通り過ぎる典型的なタイムスケールと一致するが、放射の開始・成長・消滅が原因であるのか、あるいは単に雷雲の移動が見えているのか不明である。従って、ガンマ線放射が何をきっかけとして始まり、どの程度持続し、何を原因として終了するか、という点は未知である。

2012 年 1 月 13 日 09:27、GROWTH の検出器に興味深い放射現象が記録された。雲中雷と 200 ms 以内で同期したショートバーストが観測され、その後 1 分以上にわたってロングバーストが継続した。後者の強度は時定数 30 秒で指数関数的に減衰した。

このロングバーストの際立った特徴として、まず、極めて顕著な 511 keV 電子-陽電子対消滅線成分の存在が挙げられる。通常のロングバーストと共通する連続的な成分 (連続成分) に対する輝線の強度を表す等価幅 (equivalent width) というパラメータは、この対消滅線バーストでは 280 keV に達していた。過去のロングバーストでは最大でも約 140 keV で通常は 50 keV 程度であり、平常時の約 5 倍に及ぶ明瞭さであった。このバーストでのみ対消滅線が明るく観測された理由として、以下が考えられる。電子は制動放射する際に、電子の進行方向に集中して高いエネルギーのガンマ線を生じ、それ以外の方向へ放射されるガンマ線はエネルギーも個数も少なくなることが知られている。仮に多数の電子が同じ方向へ平行に加速されていれば、この効果は強められ、容易に観測可能となるはずである。ビームの軸から外れた位置に検出器があれば、対消滅線の源となる陽電子の発生元となった  $>1$  MeV のガンマ線が特に弱まって観測され、相対的に対消滅線が顕著に観測されるはずである。このようなビームを原因とする現象は、過去にも雷雲の移動に伴って到来ガンマ線の平均エネルギー (連続分布の傾き) が変化する例として報告されている (H.Tsuchiya+2009, 2013)。

このイベントのもう一つの特徴として、放電と時を同じくしてロングバーストが開始した点がある。これまで放電と相関してロングバーストが開始した例はなかったが、放電と同時にバーストが停止する例は過去にも報告されている (H.Tsuchiya+2013)。これは放電によって雲中電場が消失し、電子の加速が止まったためであると自然に解釈できる。この対消滅線バーストにおいては逆転しており、例えば、放電によって雷雲内の電場構造が変化し、ロングバーストが開始したとも考えられるが、より深い考察が必要である。

以上の解釈が実際に正しいか検証するため、および、ロングバースト放射源の真の時間変動を観測する試みとして、我々は 2014 年 11 月、新たに方向感度のあるガンマ線検出器を柏崎刈羽原子力発電所に設置した。その結果、ロングバーストが今冬だけで 6 例観測された。2006 年から 2013 年までの 8 年間の観測数 12 例と比べると、例年の約 4 倍である。検出器の有効面積を従来のものに対して倍増させたことと、今冬の日本海温度が例年よりも高く、反対に気温が低かったため、雷雲の成長が促されたことが理由として考えられる。これらの新しいバーストの中には、過去の GROWTH バースト中で最大のガンマ線統計のバーストが含まれており、そのバーストにはビーミングを示唆する徴候も見られた。その他にも、過去に GROWTH で報告されたような、放電と同時に終了するロングバーストが再び一件観測された。

キーワード: 雷雲ガンマ線, TGF, 陽電子生成

Keywords: gamma-ray observation from thunderclouds, TGF, positron generation

## 2013年7~8月に富士山頂で検知された雷雲起源放射線 Thunderstorm-induced energetic radiation observed at the summit of Mt. Fuji during July - August of 2013

高橋 周作<sup>1\*</sup>; 鴨川 仁<sup>1</sup>; 鳥居 建男<sup>2</sup>; 齋藤 将監<sup>1</sup>; 庄司 智美<sup>1</sup>; 鈴木 裕子<sup>1</sup>; 鈴木 智幸<sup>1</sup>  
TAKAHASHI, Shusaku<sup>1\*</sup>; KAMOGAWA, Masashi<sup>1</sup>; TORII, Tatsuo<sup>2</sup>; SAITO, Shogen<sup>1</sup>; SHOJI, Tomomi<sup>1</sup>;  
SUZUKI, Yuko<sup>1</sup>; SUZUKI, Tomoyuki<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東京学芸大学教育学部物理学科, <sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構  
<sup>1</sup>Dpt. of Phys., Tokyo Gakugei Univ., <sup>2</sup>Japan Atomic Energy Agency

2013年の夏に富士山頂で高エネルギー放射線の観測を行った。その結果、7月23日、7月26日、8月5日において、雷雲の接近に伴って、およそ10%ガンマ線量の増加がみられた。7月26日の観測結果から、電荷球の表面電場約-150 kV/mを推定し、モンテカルロシミュレーションを行った結果、5 km高度の気圧で約-150 kV/m程度でガンマ線量が増加するとわかった。他の2つのイベントについても同程度の電場を示しているため、高エネルギーガンマ線が検知されたと推測できる。

キーワード: 高エネルギー放射線, 雷雲, 富士山  
Keywords: Energetic radiation, Thunderstorm, Mt. Fuji

## 雷活動に起因した高エネルギー放射線のゾンデ、航空機、及び地上での観測 Measurement of radiation caused by thunderstorm activities by a sounding balloon, an airplane, and the ground

鳥居 建男<sup>1\*</sup>; 眞田 幸尚<sup>1</sup>; 西澤 幸康<sup>1</sup>; 山田 勉<sup>1</sup>; 織田 忠<sup>1</sup>; 村岡 浩治<sup>2</sup>; 佐藤 昌之<sup>2</sup>; 渡邊 明<sup>3</sup>;  
久米 恭<sup>4</sup>; 長谷川 崇<sup>4</sup>; 杉田 武志<sup>5</sup>  
TORII, Tatsuo<sup>1\*</sup>; SANADA, Yukihisa<sup>1</sup>; NISHIZAWA, Yukiyasu<sup>1</sup>; YAMADA, Tsutomu<sup>1</sup>; ORITA, Tadashi<sup>1</sup>;  
MURAOKA, Koji<sup>2</sup>; SATO, Masayuki<sup>2</sup>; WATANABE, Akira<sup>3</sup>; KUME, Kyo<sup>4</sup>; HASEGAWA, Takashi<sup>4</sup>;  
SUGITA, Takeshi<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 日本原子力研究開発機構, <sup>2</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>3</sup> 福島大学, <sup>4</sup> 若狭湾エネルギー研究センター, <sup>5</sup> 科学システム研究所  
<sup>1</sup>Japan Atomic Energy Agency, <sup>2</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>3</sup>Fukushima University, <sup>4</sup>The Wakasa Wan Energy Research Center, <sup>5</sup>Science & System Lab. Inc.

雷活動により高エネルギー放射線が様々なフィールドで観測されている。その放射源を調査するために、放射能ゾンデ、航空機、及び地上観測により放射線の測定を行った。

ゾンデ観測では2つのGM管を用いて雷活動中に放球した。その結果、雷雲中の高度5~7.5km付近で2桁程度の放射線計数率の上昇が観測された。また、航空機に大型NaI検出器を搭載して夏季と冬季に雷雲上空を飛行した。さらに、冬季には日本海沿岸で地上観測を行い、高エネルギー放射線を観測した。これらの測定結果について報告する。

キーワード: 高エネルギー放射線, モンテカルロ計算, 雷, 気球, 航空機, 福島

Keywords: Transient energetic radiation, Monte Carlo simulation, Thunderstorm, Balloon, Airplane, Fukushima

固体地球の有限電気伝導度を考慮したシューマン共振の定式化  
A derivation of basic formalism of the Schumann resonance considering finite electrical conductivity of the solid earth

小河 勉<sup>1\*</sup>  
OGAWA, Tsutomu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

地球電磁場のシューマン共振の周波数特性は従来、固体地球を完全導体近似して定式化されてきた。しかしこの近似は、ELF帯地磁気地電流法比抵抗構造探査の際に観測される、水平電場が観測される事実と定性的には調和しない。そこで、地球内部電磁気研究に基づいて、簡単な空間すなわち有限電気伝導度を持つ一様導体の固体地球、球殻状の一様絶縁体とする大気及び無限の厚さと一様な有限電気伝導度を持つ電離圏の3層球体を仮定して、シューマン共振の定式化を試みた。動径方向の電流素片によって励起されるTM波3成分の周波数特性について報告する。

キーワード: シューマン共振, 固体地球  
Keywords: Schumann resonance, Solid earth

## 避雷飛行支援システムの研究開発 Aviation Tactical Lightning Avoidance System for Weather-Smart Airport Operation

吉川 栄一<sup>1\*</sup>; 神田 淳<sup>1</sup>; 岡田 孝雄<sup>1</sup>; 楠 研一<sup>2</sup>; 吉田 智<sup>2</sup>; 足立 透<sup>2</sup>; 猪上 華子<sup>2</sup>; 牛尾 知雄<sup>3</sup>  
YOSHIKAWA, Eiichi<sup>1\*</sup>; KANDA, Atsushi<sup>1</sup>; OKADA, Takao<sup>1</sup>; KENICHI, Kusunoki<sup>2</sup>; YOSHIDA, Satoru<sup>2</sup>;  
ADACHI, Toru<sup>2</sup>; INOUE, Hanako<sup>2</sup>; USHIO, Tomoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 宇宙航空研究開発機構, <sup>2</sup> 気象研究所, <sup>3</sup> 大阪大学

<sup>1</sup>Japan Aerospace Exploration Agency, <sup>2</sup>Meteorological Research Institute, <sup>3</sup>Osaka University

Aircraft initiated or intercepted lightning is one of the heaviest issues for civilian flights in Japan. Although several accidents have been reported many years ago, it is currently much less possible that lightning strikes cause fatal aircraft accidents due to both of certifications of aircraft design for lightning strikes and many of weather supports for aircraft operation. However, hundreds of lightning strikes to aircrafts were still reported in each recent year in Japan, and airlines have been forced to delay or cancel most of those flights and to cost millions of yen for repair. Especially in the coastal area of the Sea of Japan, winter lightning often gives heavy damages to aircrafts. Though flight safety is secured even with such heavy damages by winter lightning, it is necessary to take much more cost and time to repair after landing compared with normal summer lightning.

As is well known in aviation weather field, it is significant for actual aircraft operation that observed meteorological parameters are converted to decision-making information. Otherwise, pilots, controllers, or operators need to learn meteorology as much as weather experts, and to owe hard work load to interpret observed meteorological data to their risk. Ideally, it is desired to automatically provide them with predicted operation risk, for example, delay time, possibility of flight cancellation, repair cost, etc., caused by lightning as decision-making information. In order to realize products of those operation risks, high quality of weather observation is required. A high resolution radar, such as the phased array weather radar, has potential to detect thunderstorms in their early stage due to the high volume scan rate from 10 to 30 sec. A lightning mapping system, such as Broadband Observation network for Lightning and Thunderstorm (BOLT), indicates electrical structure inside clouds in concert with a co-located radar data. Aircraft sounding and real-time data downlink, especially high-frequency data provided by Secondary Surveillance Radar (SSR) mode S, gives in-situ measurements of three-dimensional profiles of wind and temperature. The in-situ wind data supports a radar to accurately estimate spatial profiles of wind speed and direction. And the in-situ temperature data can indicate altitudes of electrical charge separation.

Our research group started a research and development (R&D) of aviation tactical lightning avoidance system in this fiscal year. The final goal of this R&D is to provide airport officers with products of operation risks caused by lightning which are derived from the novel weather observation devices stated above. In the presentation, overview and progress of our R&D will be described.

キーワード: 航空気象, 空港気象システム, 雷

Keywords: Aviation weather, Terminal weather system, Lightning

## ニューラルネットワークを用いたGPS対流圏水蒸気トモグラフィーの開発 Development of the GPS tomography of water vapor distribution in troposphere using neural network

廣木 暁充<sup>1\*</sup>; 服部 克巳<sup>1</sup>; 廣岡 伸治<sup>2</sup>  
HIROKI, Akimitsu<sup>1\*</sup>; HATTORI, Katsumi<sup>1</sup>; HIROOKA, Shinji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 千葉大学大学院理学研究科, <sup>2</sup> 台湾国立中央大学  
<sup>1</sup>Graduate School of Science, Chiba University, <sup>2</sup>National Central University, Taiwan

大雨や落雷の被害をもたらすような雨雲の発達が起こるときには顕著な水蒸気の流入がある。このような水蒸気の分布や水蒸気の流れはGPSによる測定が可能である。従来のGPS気象学はPWV(可降水量)が用いられている。トモグラフィーもモデル依存性のものが一般的に使われていた。本研究ではモデル依存性の無い残差最小化学習ニューラルネットワーク(RMTNN)のアルゴリズムを用いて、GPSデータとAMeDASデータから3次元水蒸気分布の再構成を試みた。構築したアルゴリズムの水平分解能と高度分解能を調査するため、数値シミュレーションを行った。

対象地域は東経135° - 137°, 北緯34° - 36°, 高度0 km - 10 kmである。経度、緯度方向に20分割、高度方向に50分割し、0.1° × 0.1° × 0.2 kmのボクセルとした。GPS観測点は地表面に0.1°毎に一様に計400点配置した。GPS衛星の位置は2012年8月13日09:00JSTのものを使用した。ノイズは実際のGPSデータで想定されるデータに対して5%のノイズ強度で付加した。水平分解能の調査のため、高度に対して指数的に水蒸気量が減少していく静穏状態の大気分布を背景水蒸気量として、水平方向にのみ変化するガウス分布状の擾乱を与えたモデルを用いて水蒸気分布の再構成を行った。擾乱は中心点が東経136°, 北緯35°でピーク値が背景水蒸気量の30%, 20%, 10%、半値幅が0.5°, 0.3°, 0.1°のそれぞれの場合についてシミュレーションを行った。また、高度分解能の調査のため、静穏状態の大気分布を背景水蒸気量とし、水平・高度方向に変化するガウス分布状の擾乱を与えたモデルを用いて水蒸気分布の再構成を行った。擾乱は中心点が東経136°, 北緯35°, 高度2 kmでピーク値が15(g/m<sup>3</sup>)、半値幅が水平方向に0.3°, 高度方向に0.6 kmである。

シミュレーション結果は、水平分解能については背景水蒸気量の30%のピーク値を持つ擾乱はGPS観測点6点、20%のピーク値を持つ擾乱はGPS観測点10点で再現できることがわかった。高度方向の分解能について、適当な位置に拘束点を配置することで水蒸気量の逆転層も再現することができることがわかった。以上のように開発した対流圏水蒸気トモグラフィーアルゴリズムは擾乱をモデル依存性なく再現できる能力があることを示すことができた。

キーワード: GPS トモグラフィー, 水蒸気  
Keywords: GPS tomography, water vapor