地球大気を電波リモートセンシングで探る

山本　衛 [1]*

Explore the Earth's atmosphere with radio remote sensing

Mamoru Yamamoto[1]*

概要

電波とは何だろうか？テレビや携帯電話などの通信機器は、電波を使って情報を伝えるが、別の利用方法として遠隔観測（リモートセンシング）がある。アンテナから放射された電波は、大気の密度や温度の変化、雨滴や雲粒などの影響をうけて、反射・散乱・屈折を受けながら飛び回る。当研究所は MU レーダー（滋賀県・信楽）や赤道大気レーダー（インドネシア）を使って、大気の動きや構造を研究している。一方、GPS に代表される衛星測位は、大気中での電波の屈折を計測することができ、研究に応用されている。電波を使った大気環境のセンシング技術と研究成果の例を紹介する。

1. はじめに

通信ではない電波利用としてリモートセンシングがあるが、それは観測対象が発する電波（あるいは光）を受信して相手の性質を測る受動的なリモートセンシングと、観測装置が電波や光を観測対象にあてて観測をする能動的なリモートセンシングに分かれる。レーダーは電波パルスを観測対象にあてて跳ね返ってくるエコーを調べる装置であり、能動的なリモートセンシング装置である。図 1 にレーダーの原理図を示す。送信機と受信機がひとつのアンテナを共用している。送受切替えスイッチを送信側に設定してパルス変調波を標的に向かって短時間送信する。その後、スイッチを受信側に切り替えて反射波の到来を待つ。送信からエコー受信までの時間差から、レーダーから標的までの距離が分かる。標的が動いていれば、エコー波の周波数がドップラーシフトを示すため、速度が分かる。飛行機や船だけではなく、大気中のさまざまな現象を標的とするレーダーが実用されている [1)]。

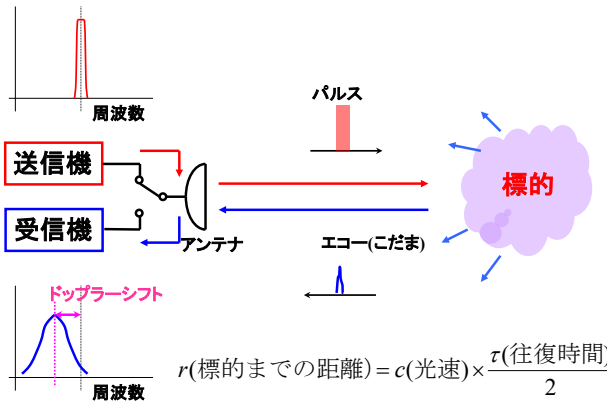


図 1　レーダー原理図

2. レーダーによる大気観測

大気は重力によって地球表面に捉えられた気体であり、密度と圧力は地表面が最大で高度と共に指

2022 年 10 月 10 日受理.
[1]〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所レーダー大気圏科学分野
* E-mail: yamamoto@rish.kyoto-u.ac.jp

数関数的に減少する。図 2 に標準的な大気温度の高度分布を示す。気温は地表面から高度 10 km を過ぎるあたりまでは 1 km 当り約 6.5 度の割合で高度と共に低下する。ここを対流圏と呼ぶ。雨・雲などの気象現象は対流圏内の現象である。高度約 11 km に対流圏界面と呼ばれる気温の極小層があり、その上部の高度約 50 km までは高度と共に温度が上昇していく成層圏である。その上部は再び温度が下がる中間圏、高度 90km 以上は温度が飛躍的に高くなっていく熱圏が広がっている。熱圏は、例えば高度 100 km では大気圧は 2 × 10^{-7} 気圧程度しかない（地表は 1 気圧）。高度 300 km 以上は希薄で人工衛星が飛翔しうる領域である。更に上部は太陽系空間に徐々につながって行く。宇宙空間から地球に飛び込んでくる微小な塵は高度 70～110 km において燃えて流星となる。また熱圏では大気を構成する原子や分子が太陽光線に含まれる紫外線や X 線によって電離して、電離圏を形作っている。電離圏は高度 100～120 km に広がる E 層、高度 200～400 km を中心とする F 層と呼ばれる層構造を成している。

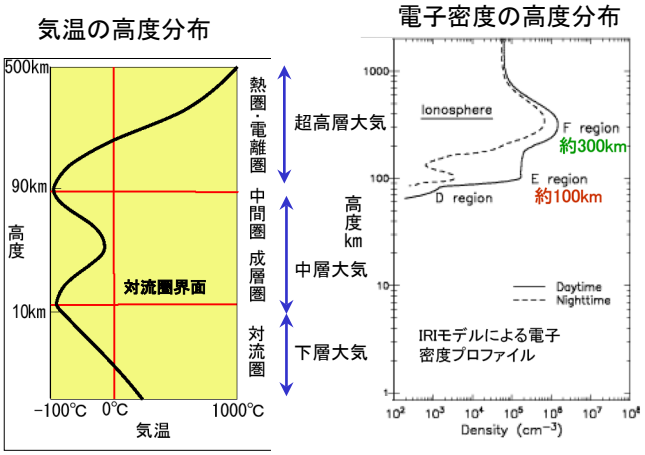


図２　大気の温度分布と電子密度分布

周波数 50 MHz 付近から数 GHz の電波を利用するレーダーとしてウィンドプロファイラーや ST (成層圏・対流圏)レーダー、MST (中間圏・成層圏・対流圏)レーダーなどと呼ばれるグループがある。これらは大気中の密度変動や水蒸気分布などからのエコーを利用して風速を観測する点に特徴がある。観測高度範囲は、小型のものでは高度数 km、ST レーダーと呼ばれるタイプで高度 10～20 km まで、大型の MST レーダーではこれらに加えて高度 60～80 km の中間圏も観測可能である。これらのレーダーはまとめて「大気レーダー」と名づけられる。京都大学生存圏研究所では、大気レーダーを中心として多様な装置を開発し、大気研究に利用してきた。

大気レーダーの標的は、大気乱流や密度成層などから生じる屈折率変動であり、雲粒・雨粒などが大気中になくてもエコーが得られる。大気中にはいたるところに乱流が発生しており、それにともなって密度変動が存在し電波や光の屈折率が変動する（図 3）。例えば星の光が大気を通過する際に屈折することで、またたきが生じる。これは、大気密度の変化によって光や電波が影響を受けるひとつの例である。レーダービームを覆いつくす多くの散乱体からの寄与の合成を考えるとき、電波が同位相で足しあわされる条件（ブラッグ条件）が満たされるとき散乱波は最大となる [1]。これから、大気レーダーは乱流などによる屈折率変動のうち、レーダー波の半波長スケールの成分を主として観測することになる。

図３　大気エコーの仕組み（左図）と大気の揺らぎの例（右図）

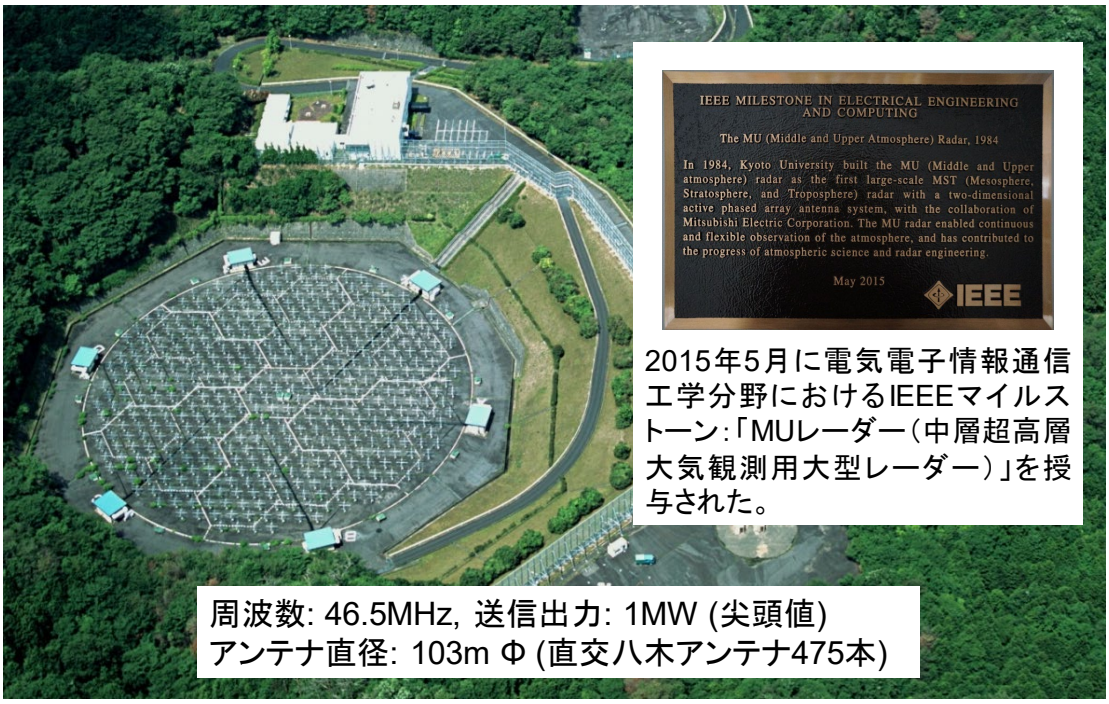


図４　滋賀県甲賀市信楽町にあるＭＵレーダー全景写真。IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)は、米国に本部を持つ電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である。

3. 大気レーダーの実際

生存圏研究所は、1984 年に大型の大気観測用レーダーである MU レーダーを滋賀県甲賀市信楽町の信楽 MU 観測所に完成し、現在まで様々な研究を行ってきた [2]。図 4 に MU レーダーの全景写真を示す。丸く見えるのはアンテナシステムであり、直径 100 m の円形の敷地内に 475 本の八木アンテナ（詳しくは、３素子のクロス八木アンテナ）が整然と並んでいる。アンテナ面の回りには６棟の小屋が並んでいるが、この中には各々のアンテナについて１台ずつ対応する半導体の送受信機が収容されている。MU レーダーは多くの送受信機とアンテナから構成されるが、電子制御によってそれらを一体のものとして運用する。即ち、全体を中心周波数 46.5 MHz、送信時の最大電力が全体で 1 MW に及ぶ巨大なレーダーとして使用する。MU レーダーのアンテナの働きは、同じ大きさの開口をもつパラボラアンテナと同等であり、更に送受信の電波の位相を制御することによって、電波の発射方向を電子的に振ることができる。このような構成のアンテナは、アクティブ・フェーズド・アレイと呼ばれる。MU レーダーは、電気・電子・情報・通信分野の世界最大の学会である IEEE によって 2015 年に、「世界初のアクティブ・フェーズド・アレイ方式の大気レーダー」としてマイルストーンに認定された。

MU レーダーの観測領域は、地表面近くから高度約 1000 km までの地球大気全域に及ぶが、超高層大気に関しては、(1) 電離圏の電子 1 個 1 個からの超微弱な散乱電波を捉える「非干渉性散乱エコー」と、(2) 電離圏プラズマの不安定現象に関連して生じる電子密度の不規則構造に伴う「電離圏イレギュラリティエコー」の観測が主となる。また、(3) 役目を終えた人工衛星やその破片などからなるいわゆるスペースデブリの観測も実施されている。

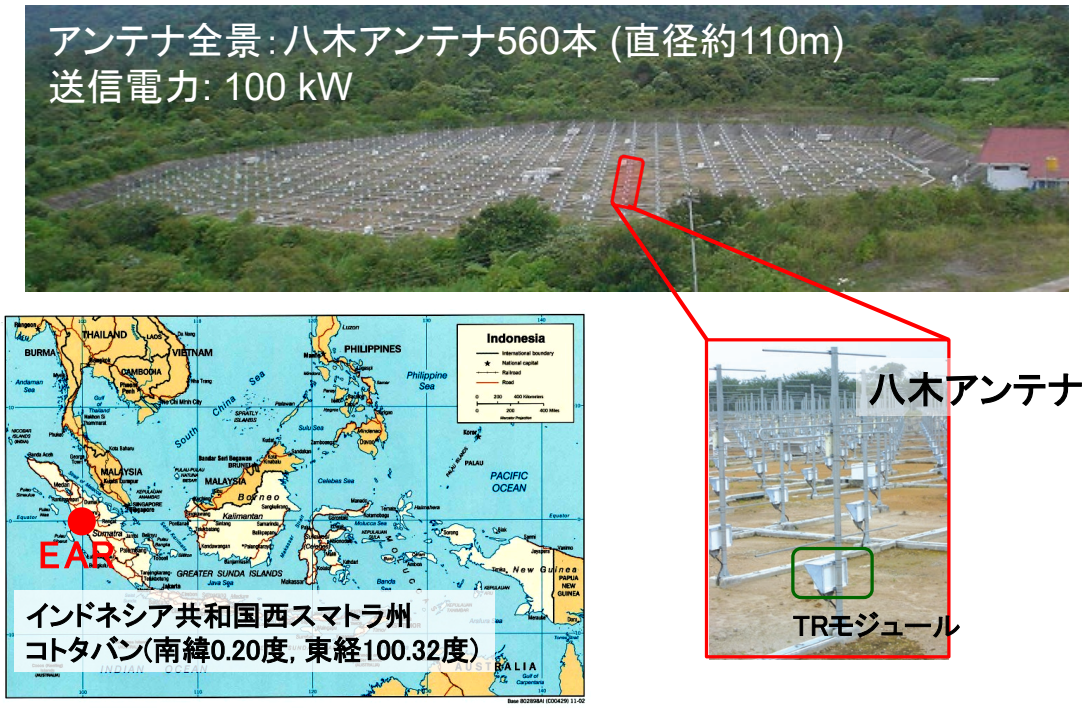


図５　赤道大気レーダーの全景（上図）、アンテナ・TR（Transmitter-Receiver; 送受信）モジュール（下右図）、レーダーの位置（下左図）。

生存圏研究所には、MU レーダーに良く似た大型のレーダーがインドネシア共和国西スマトラ州コトタバンにある [3]。赤道大気レーダー（Equatorial Atmosphere Radar; EAR）と呼ばれるこのレーダーの全景とアンテナ部を図 5 に示す。周波数 47 MHz で直径約 110 m のアンテナを備えており、アンテナと直下の送受信モジュールの総数は 560 に達する。MU レーダーと同様にアクティブ・フェーズド・アレイ構成であり、全体の送信出力が 100 kW と MU レーダーの 10 分の 1 である以外は、ほぼ同様の機能を備えている。超高層大気に関しては上記の(2)の観測ができるが、(1)と(3)には感度が不足している。EAR の運営は、インドネシア航空宇宙庁（LAPAN）との密接な協力の下で進められている。設置場所の特徴を活かして、赤道大気に特有の波動現象や、低緯度・赤道域の電離圏に特徴的なプラズマバブルという現象の研究を精力的に実施している。

4. レーダー観測の例

大気レーダーによる観測例を示す。1994 年の台風 9426 号は、紀伊半島を縦断しながら北進し、9 月 29 日に MU レーダーの上空を通過した。このため、台風を完全に輪切りにする観測に成功した。台風は中心の周りに大気が反時計回りにまわる巨大な渦巻き構造を持つ。図 6 に示すように、MU レーダーで観測された風速から台風の移動速度を引き去ることで台風と共に動く系からみた風速を求め、さらにこれを回転成分（接線風）と半径方向の成分（動径風）に

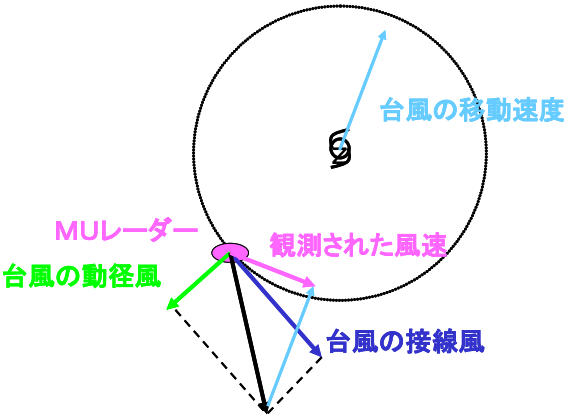


図６　台風観測の原理図

分解して研究を進めた。図 7 には台風 9426 号の観測から得た接線風の水平距離・高度分布を示す。ここで水平距離は、元は時間変化として捉えた風速を、そのときの MU レーダーと台風中心との水平距離に置きなおしたものである。台風の中心が MU レーダーを通過したため、水平距離ゼロまで観測を行うことができた。台風の接線風はほぼ全域にわたって反時計回りであり、高度 10 km より下側で強い風が吹いている。台風中心付近に時計回りの成分（負の値）が見られるが、上陸後の台風の構造が完全な軸対称からずれたことによるものと考えられる。図 8 には同時に観測された鉛直風の分布を示すが、1 m/s を超える上昇流（正の値）と下降流が複雑に分布する様子が捉えられた。このように高分解能で台風内部の 3 次元風速の分布を明らかにできたのは、MU レーダーならではの成果である。

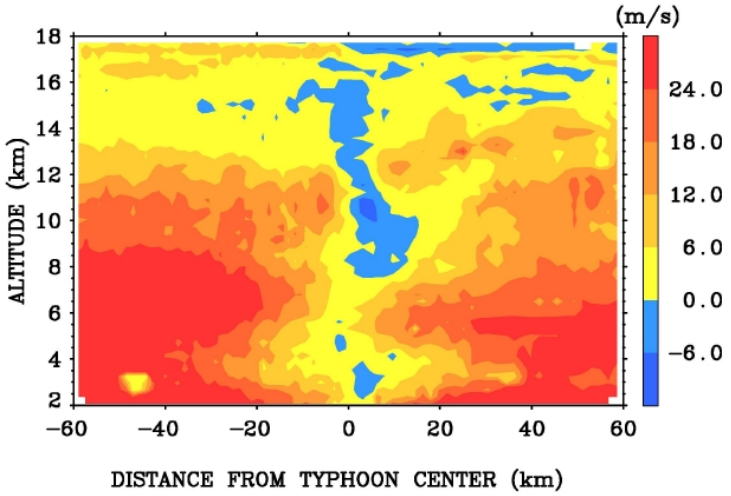


図 7　台風 9426 号の接線風速の分布図
（反時計回りを正とする）

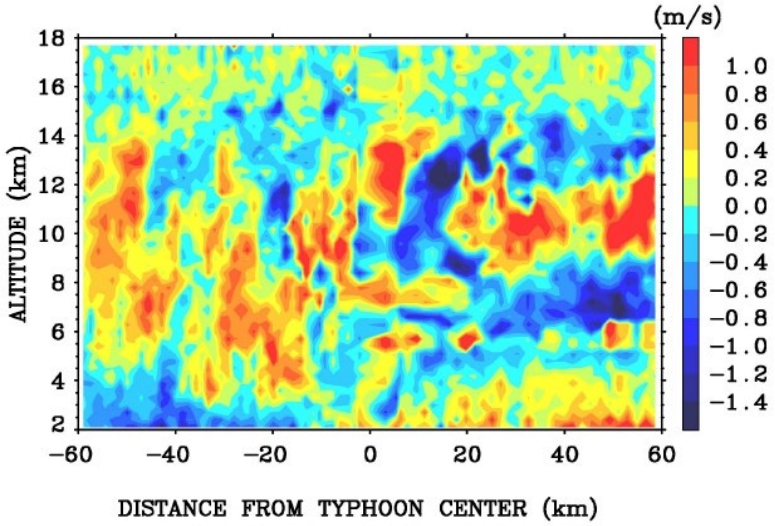


図 8　台風 9426 号の鉛直風の分布図
（上昇流を正とする）

5. GPS を使った大気観測

GPS （ Global Positioning System）は衛星を使った測位システムの代表例であり、カーナビゲーションやスマートホンの地図アプリなどに広く利用されている。衛星測位の原理は衛星からの電波到来時刻の精密測定であって、4 個以上の衛星からの電波を用いて受信点の 3 次元位置を測定する。測位には誤差があるが、その主な原因は、１）衛星から受信機までの電波が直達しない（受信機周辺の建物などによる反射波の影響、マルチパスと呼ばれる）問題、２）地球大気や電離圏のプラズマによる伝搬遅延の問題、３）衛星や受信機自体の特性に起因する問題、である。これらの誤差を低減する努力と共に、逆に利用する試みも多く行われている。つまり、受信機の位置が分かっているとすれば、誤差の量や振る舞いを調べることによって、その原因（例えば上の２）から地球大気や電離圏などの環境）の情報を引き出すことが可能である。

衛星測位は 2 つの周波数の電波を利用するが、その位相差を測定する事によって、電波の伝搬経路に沿った電離圏内の全電子数（Total Electron Content; TEC）が測定できる（図 9 の左図）。そのデータが電離圏研究にも活用されている。こうやって求める電離圏 TEC 値を、ここでは GPS-TEC と呼ぶ。日本では GEONET と呼ばれる千点以上の衛星測位受信機の観測網が国土地理院によって運営されて

おり、測量の基準や地震・火山活動・地殻変動のモニタリングに利用されている。さらに、GEONET からの GPS-TEC データを用いた電離圏電子密度の水平分布の研究が広く行われている。

GPS-TEC データの高度な利用としてトモグラフィー解析がある。図 9 の右図に示すように、複数の GPS 衛星と地上の多数の GPS 受信機を結ぶ多方向の GPS-TEC データを用いて、電子密度分布の 3 次元分布を再現しようとする解析技術である。トモグラフィー解析の最も顕著な成功例としては、医療分野の CT スキャンや MRI（核磁気共鳴撮像）がある。「CT」は Computed Tomography の略語であり、正にトモグラフィー解析を意味している。一方、電離圏電子密度のトモグラフィー解析は困難である。問題は、図 9（右図）に示す通り、電離圏に対して得られる電波伝搬の方向が限定的である点にあり、安定した解が得られにくい。我々は、GEONET からの日本全国をカバーする豊富な GPS-TEC データに対して拘束条件付き最小二乗法を用いることによって、電離圏電子密度の 3 次元トモグラフィー解析を安定的に行うことに成功し、さらにリアルタイム解析に成功してきた。これは世界初のことと自負している [4]。

我々が開発してきた拘束付き最小二乗法は、観測モデルに従って数学的に合理的な解を求めるだけではなくて、電子密度の空間分布が「なめらかに」なるような考慮を加えると言う解析手法である。

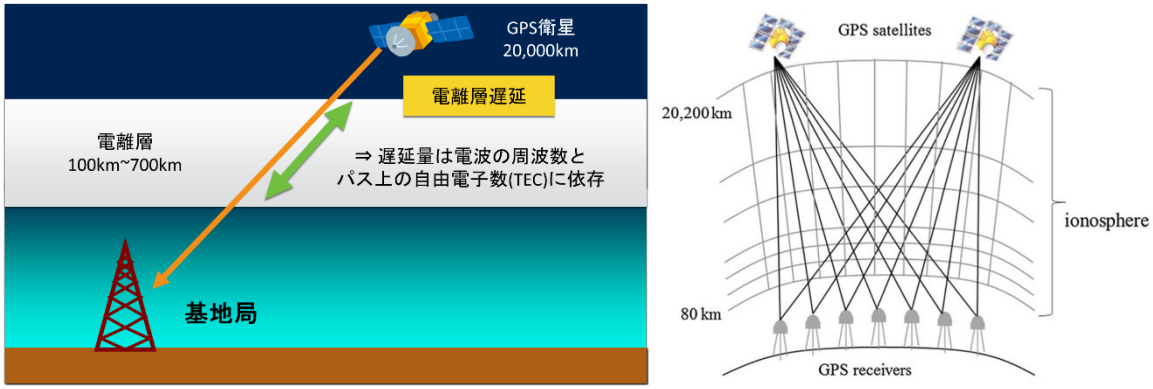


図 9　（左図）GPS 衛星から地上への 2 周波電波伝搬による全電子数推定
（右図）GPS-TEC 観測に基づく電離圏電子密度トモグラフィーの概念図

数学的な合理性のみに従うことで電子密度の空間分布が不安定になることを防ぎながら、より確からしい結果を得ることに成功した。更にデータ解析システムの整備を行って、2016 年から 15 分毎のリアルタイム・トモグラフィー解析と結果の公表を開始している。解析結果を他の観測結果と比較したところ、比較的良好な成果を得られることが分かったが、次のような問題点が存在していた。

- 電子密度が最大となる高度が 270km よりも低くなるようなケースにおいて、トモグラフィー解析による電子密度ピークが実際よりも高い。
- 電子密度が負の値になってしまうという、物理的にあり得ない解が現れる場合がある。

上記のような問題点を解決するため、ここ数年の間、GPS-TEC にイオノゾンデ観測による電離圏電子密度とその高度のデータを加えた、解析手法の改良を進めてきた。イオノゾンデとは、数 MHz から数十 MHz 帯の電波を上空に発射し、電離圏からの反射波を用いて電子密度を求める観測手法である。電離圏電子密度の標準的な観測方法であって、観測サイトは全世界に分布している。日本においても情報通信研究機構（NICT）が全国 4 か所において常時観測を行っている。イオノゾンデからのパラメータ NmF2（最大電子密度）と hmF2（電子密度が最大となる高度）を用いて GPS-TEC トモグラフィー解析の改良を試みた。

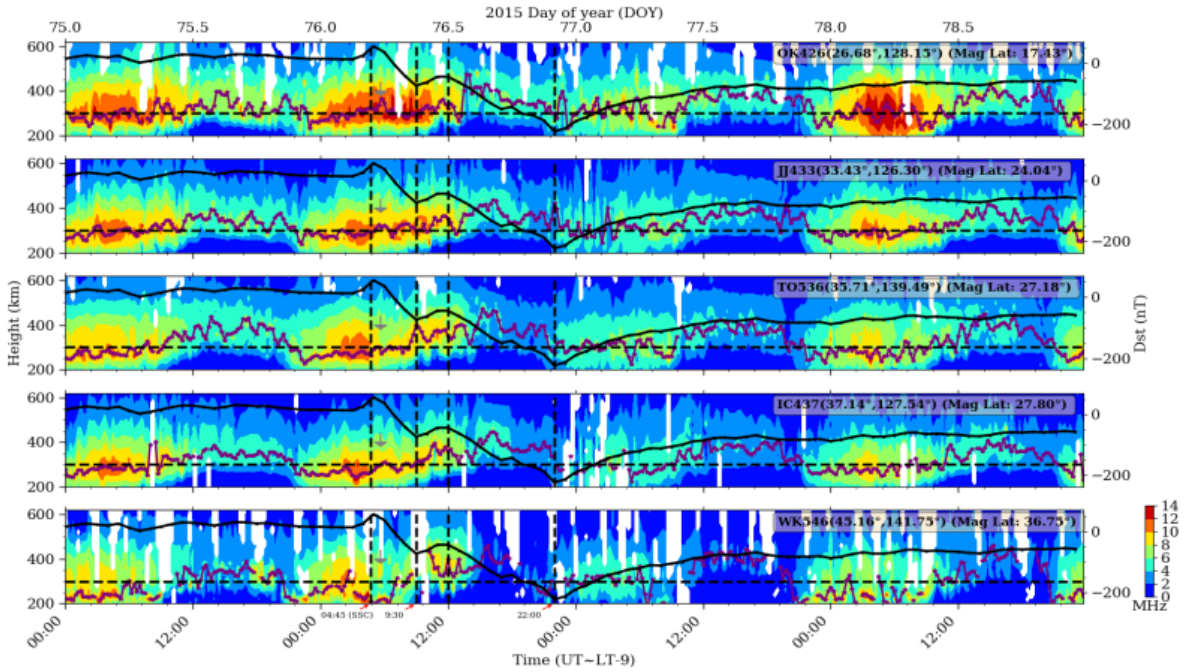


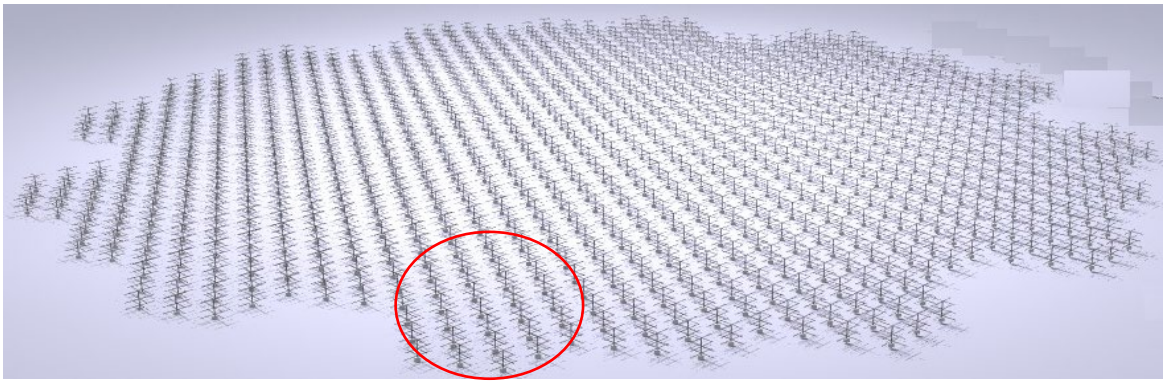
図１０　2015 年 3 月 17 日に発生した巨大な磁気嵐前後の電離圏トモグラフィー解析結果 [5)]

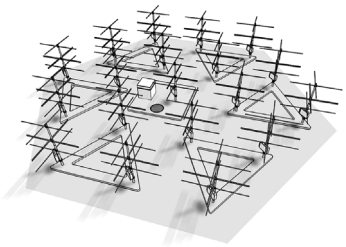
改良されたトモグラフィー解析の結果は目覚ましいものであった。図 10 に結果の例を示す [5)]。2015 年 3 月 17 日に発生した巨大な磁気嵐（太陽面の爆発に起因する磁気圏・電離圏の全地球的な変動現象）は St Patrick's Day イベントと呼ばれており、多くの研究の対象となってきた。図 10 の複数のパネルは、沖縄（最上部）から稚内（最下部）まで、異なる緯度における電子密度の変動を示している。図中には太実線で Dst インデックスと呼ばれる磁気嵐の指標が示され、中央付近の時間帯で値が下方に振れていく。これが磁気嵐の発生を示している。電離圏の電子密度の時間・高度変化は、磁気嵐が始まる前まで 2 日間にわたって通常の日変化を示すが、Dst インデックスの低下と共に電子密度が減少し、電離圏の高度が上下に激しく変動する。その後の Dst インデックスの回復と共に、徐々に回復していく。この解析結果は他の観測と非常に良い一致性を示しており、改良型のトモグラフィー解析の威力を示す結果となっている。

6. まとめと大気レーダーの今後

以上に述べたように、電波は環境計測に広く用いられている。本稿では、大気乱流を標的とし風速測定を主とする大気レーダーと、衛星から地上までの電波伝搬を利用した GPS-TEC 観測とそのトモグラフィー解析を紹介した。

インドネシアにある EAR は、MU レーダーに比べて感度が 1/10 と不足している。また受信チャンネルが 1 個であってイメージング観測ができないなど、機能面でも劣っている。そこで現在、MU レーダーと同等以上の高感度かつ高機能なものにしようと、「赤道ＭＵレーダー(Equatorial MU radar; EMU レーダー)」の新設を計画している [6)]。図 11 に EMU レーダーの概要を示す。大気レーダーの感度は送信出力とアンテナ面積の積に比例する。MU レーダーと比較すると、EMU レーダーは送信出力は 1/2 だが、アンテナ面積を 2 倍以上にすることで同等の感度を達成する。我々は、EMU レーダーを主要設備の一つとする大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤形成」を日本学術会議のマスタープラン 2014/2017/2020 に提案し、全てにおいて重点大型研究計画の一つとして採択された [7)]。EMU レーダー実現に向けて、さらに努力を続けていきたいと考えている。





1群（アンテナ本数19本）
アンテナは55群構成
（19本×55群＝1045本）

◆システム構成
周波数47MHz
アレイアンテナ（直径約163m、八木アンテナ1045本）
送受信モジュール（出力500W PEP）
（八木アンテナ基部に取付）
多チャンネル変復調・データ処理装置
（変復調装置、データ処理装置、屋外分配装置・コネクタパネル・屋内分配装置・電源装置等からなる）

図１１　計画中の「赤道 MU レーダー（EMU レーダー）」の概要

参考文献

1) 深尾昌一郎, 浜津享助, “気象と大気のレーダーリモートセンシング”, 京都大学学術出版会, 2005, pp. 491.
2) MUレーダー：http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu
3) 赤道大気レーダー（EAR）：http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear
4) リアルタイム電離圏トモグラフィー解析：http://www.enri.go.jp/cnspub/tomo3/
5) Ssessanga et al., Assessing the performance of a Northeast Asia Japan-centered 3-D ionosphere specification technique during the 2015 St. Patrick’s day geomagnetic storm, *EPS*, **73** (124), 2021, doi: 10.1186/s40623-021-01447-8
6) 赤道MUレーダー（EMU）：http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/emu
7) 大型研究計画「太陽地球系結合過程の研究基盤構築」：http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/masterplan2020/

著者プロフィール

山本 衛（Mamoru Yamamoto）

＜略歴＞ 1983 年　京都大学工学部電子工学科卒業／1988 年　京都大学大学院工学研究科博士後期課程電子工学専攻修了（京都大学工学博士）／1988 年京都大学超高層電波研究センター助手／1996 年　京都大学超高層電波研究センター助教授／2007 年　京都大学生存圏研究所教授、現在に至る。＜研究テーマ＞大気レーダー開発、電波伝搬による大気観測手法の研究、電離圏イレギュラリティの研究（レーダー、観測ロケット、衛星＝地上ビーコン観測など）