

FEATURE

## リモートセンシング技術の新展開

— 気象・防災から環境・宇宙まで —



## CONTENTS

### FEATURE

#### INTERVIEW

進化を続けるリモートセンシングの最先端を支える

中川 勝広

次世代ウィンドプロファイラの研究開発

2

風の流れと乱れをとらえる

山本 真之 川村 誠治

衛星搭載雲観測レーダ処理アルゴリズムの研究

4

地上検証用電子走査雲観測レーダの開発

堀江 宏昭

合成開口レーダによる標高計測

6

相対値計測から絶対値計測へ

上本 純平

テラヘルツ地球観測のための研究開発 8

中層・超高層大気の温度と風を衛星から測る技術の確立

落合 啓 入交 芳久

見えない微粒子を観る光リモートセンシング技術 10

石井 昌憲

### TOPICS

原子時計をスマートフォンに搭載できる 12

くらいの超小型システムへ

～原子時計のチップ化・オンボード化に向けて～

原 基揚

NICT 2018年度イベント開催・出展のご案内 13

### INFORMATION

オープンハウス2018 14

こども公開デー2018

INTERVIEW

進化を続けるリモートセンシングの最先端を支える



中川 勝広 (なかがわ かつひろ)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
室長

大学院博士課程修了後、1998年、郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。マイクロ波リモートセンシングに関する研究などに従事。博士（工学）。

離れた場所から光や電波を使い、地表や大気の様子を広範囲に調べるのがリモートセンシングである。突然発生し、刻々と状況を変化させるゲリラ豪雨や竜巻などの気象災害。近づいて調べることが難しい火山の活動。広い範囲にわたっての植生や土地利用の様子。これらの観測に使われる機器やシステムの進化を担う電磁波研究所リモートセンシング研究室の活動について、室長の中川勝広に話を聞いた。

■3分野、8プロジェクトで進む研究開発

—まずは、リモートセンシング研究室の現在の主なミッションについて教えてください。

中川 研究活動の内容は、大きく3つの分野に分かれています。1つめは、ゲリラ豪雨などの気象現象をターゲットにしたもの。2つめは火山、地震などの防災に関するもの。そして3つめが、宇宙から地球環境を観測するもの。

この3つの柱の下に、計8つの研究開発

プロジェクトがあります。1つめの気象現象の観測に関しては、①雨量を水平方向で観測するフェーズドアレイ気象レーダ（PAWR）と、水平・垂直方向の二重偏波で観測するマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダ（MP-PAWR）が挙げられ、②地上デジタル放送波を使った水蒸気量の推定手法、③次世代ウィンドプロファイラ（WPR）の開発もこの分野に入ります。

2つめの防災分野では、地表面をレーダで観測するもので、具体的なプロジェクトとしては、④航空機搭載合成開口レーダ（Pi-SAR）がこれにあたります。

3つめの宇宙からの地球環境観測は雨・雲・風（大気の様子）などを対象としたもので、⑤雨は全球降水観測計画（GPM）、⑥雲はEarthCARE、そして大気の様子を観測するものとして⑦レーザー光を利用したレーダであるライダー、⑧テラヘルツ波を使うテラヘルツセンサーの研究開発があります。

こうして並べるとずいぶん研究内容が幅広いように感じますが、「安心・安全な社会を実現する」という根本のテーマは共通しています。

■MP-PAWRは東京2020オリンピック・パラリンピックでの実利用を目指す

—MP-PAWRについては、世界初の実用型開発であることをはじめ、最近、メディアでも何度か取り上げられましたね。

中川 2008年、神戸の都賀川で鉄砲水が発生し、子どもを含む16人の方々が流され、5人の方々が亡くなる痛ましい事故がありました。同じ年、東京都豊島区でもゲリラ豪雨による急激な増水が原因となって、下水道で作業中の5人の方々が亡くなる事故が起きています。PAWRやMP-PAWRの研究・開発は、これらの事故が直



\*1: DPR=二周波降水レーダ、\*2: CPR=雲観測レーダ

図 リモートセンシング研究室の3つの研究分野と8つのプロジェクト

接のきっかけになっています。

特にMP-PAWRはゲリラ豪雨や竜巻など、突然発生し変化も激しく、予報や予想が難しい気象現象の予兆や推移を的確にとらえ、情報を提供するシステムを目指しており、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）における「レジリエントな防災・減災機能の強化（リアルタイムな災害情報の共有と利活用）」の施策のひとつとして外部資金を得て、開発が進められています。

現在、NICTではPAWRを大阪大学吹田キャンパス、NICT未来ICT研究所（神戸市）、NICT沖縄電磁波技術センター（恩納村）の3カ所で稼働しており、一般の方々に向けアプリ（「3D雨雲ウォッチ〜フェーズドアレイレーダ〜」<http://pawr.liferranger.jp/>）を通じてのデータ提供も開始しています。

機械的に仰角・方位角の操作が必要なパラボラ型レーダに対し、電子的に走査を行うフェーズドアレイレーダは高速で立体的な観測が可能です。我々が開発したPAWRでは従来、最短でも5分かかっていた立体観測に要する時間が、約30秒に短縮できました。MP-PAWRは上空にある、いわば“ゲリラ豪雨の卵”も捕捉できます。例えば20〜30分前にゲリラ豪雨の発生がわかれば、より適切な対応が可能になります。

このMP-PAWRは内閣府のSIPに基づき2017年11月に埼玉大学に設置しました。これは、2020年の東京オリンピック・パラリンピックでの本格的な実利用を目指したものです。屋外競技の実施の可否などの競技運営だけでなく、屋内競技の場合でも、突然の雨の際に建物入り口が混雑しないようにするなど、お客様の誘導などにも役立てられないかと、組織委員会や東京都、内閣府などとも協議しているところです。



### ■単なるデータ提供でなく付加価値のある情報抽出へ

—航空機搭載の合成開口レーダ（Pi-SAR）も、災害情報把握のデータを公開するなど、社会還元を進んでいるテーマですね。

**中川** Pi-SARは、移動体に搭載することで疑似的に大きな開口面（レーダの直径）を得るものです。また、これに使われるマイクロ波は雲や噴煙などを透過するため、天候の影響を受けにくく、活動中の火山の火口の様子の把握などにも役立ちます。

NICTでは、分解能1.5mのPi-SARを開発し1998年から運用を開始、さらに2008年からは分解能を30cmにまで高めたPi-SAR2を運用しています。

先述のように天候の影響を受けずに広範囲の地表面を観測できるため、ある時点を境にした変化をとらえるのにも適しており、2011年の東日本大震災の被災地の観測、2014年の御嶽山噴火の観測、2016年の熊本地震における大分・熊本の被災地の観測なども行い、観測データの検索・配信システムも稼働しています。

2018年度には、更に分解能を15cmまで向上させたPi-SAR X3が完成の予定です。並行して、観測データから地表面の状態や標高などの高さ情報などを抽出する手法の研究開発を進めていますが、例えば土砂崩れの発生においては、単に発生地点の確認ではなく、土砂量の算定も行えないかなど付加価値のある情報の抽出も検討しています。

—一般社会に身近かつ重要な「安心・安全」に直結した研究という印象を受けますね。

**中川** それを実現するのが、我々の最終的な目標と言えます。今までは「新たに機器を研究・開発しました」で済んでいた部分もあるかと思いますが、今後は、研究・開発に伴って取得したデータ提供、更にもう一步踏み込んだ、データ利活用が重要になってくると思います。

もちろん現在進行中の8つのプロジェクトは、それぞれ研究開発のフェーズが違いますから、どれもが直ちに一般社会の利益に直結とはいかないと思います。しかし、既にある程度システムが出来上がり、動いているものに関しては、専門家も交え利活用の道筋もきちんと組み立てていくようにしたいと思っています。

実は、私はNICTの中ではちょっと特異なのですが、出身分野が土木なのです。つまり、元々防災などに関してデータを利活用する側にいました。今後は特にそうした視点から、外部との連携も積極的に進めていきたいと考えています。

## 次世代ウィンドプロファイラの研究開発

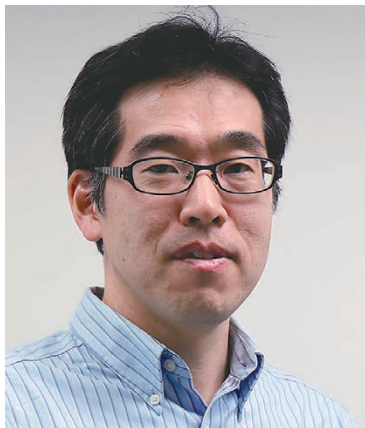
風の流れと乱れをとらえる



**山本 真之** (やまもと まさゆき)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

大学院修士課程修了後、企業・大学での勤務を経て、2015年、NICTに入所。大気リモートセンシングの研究に従事。博士(情報学)。



**川村 誠治** (かわむら せいじ)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て2006年、NICTに入所。レーダーリモートセンシングの研究に従事。博士(情報学)。

**気** 象状態の詳細な把握と予測は、防災・減災のみならず、電力・交通などの社会インフラの運用にも不可欠です。本プロジェクトでは、風の流れと乱れ(乱流)を優れた分解能で解像する新たなレーダである、1.3GHz帯の周波数の電波を用いた次世代ウィンドプロファイラ(WPR)の開発に取り組んでいます。高度分解能を向上させる技術であるレンジイメージングと、観測データの品質向上に貢献する技術であるアダプティブクラッタ抑圧を用いることで、次世代WPRに求められる観測性能を実現します。また、既設のWPRのハードウェアを活用して次世代WPRの設置費用を下げることにより、次世代WPRが社会に広く利用されることを目指しています。

### 背景

WPRは、乱流等が引き起こす電波散乱によるエコー(大気エコー)を受信することで、そのドップラーシフトから晴天域における風速3成分(鉛直流・東西風・南北風)の高度分布を計測します。気象状態の詳細な把握と高精度の予測を実現するためには、優れた分解能と精度で観測することが必要です。しかし、これまでのWPRが持つ高度分解能では、気象状態を知る手が

かりとなる風の細かな変動や、航空機の安全を脅かす乱流(乱気流)を、十分な分解能で観測できません。また、WPRでは、樹木・車両・航空機・鳥などによる不要なエコー(クラッタ)が受信信号に混入することにより、観測データの品質が低下する問題もあります。

### 次世代WPRにおける新技術

多くの干渉に対して強い次世代WPRを実現するため、高度分解能を向上するレンジイメージングと、クラッタの混入による悪影響(干渉)を低減するアダプティブクラッタ抑圧の開発と検証に取り組んでいます。図1に、これらの技術の概要を示します。レンジイメージングでは、送信周波数を送信ごとに切り替えます。レンジイメージングにおけるデータ処理では、従来のWPRよりも小さい高度間隔で、高度方向における受信信号のサンプル点(サブゲート)を設定します。さらに、それぞれのサブゲートにおいて、複数の送信周波数から得た受信信号を、振幅と位相の重み付けを行いながら加算します(重み付け合成)。所望のサブゲートにおける信号強度を一定に保つ拘束条件の下、所望の高度以外からの受信信号の寄与が最小となるような重み

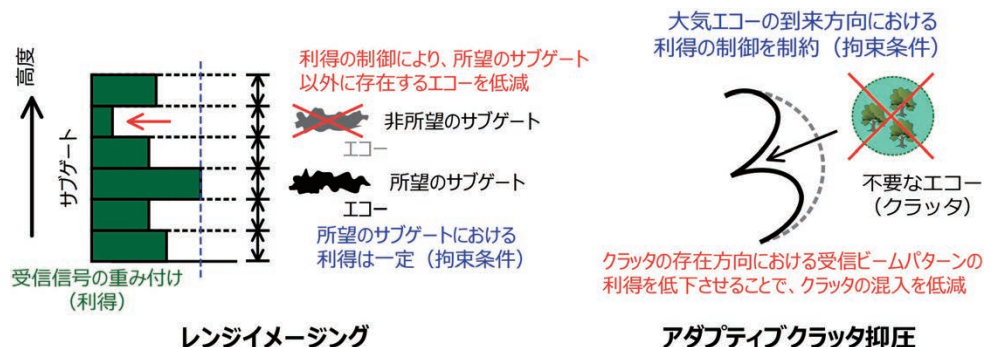


図1 レンジイメージング及びアダプティブクラッタ抑圧の概要

付け合成を行うことで、高度分解能を向上させます。

アダプティブクラッタ抑圧では、複数のアンテナ（サブアレイ）から得た受信信号を重み付け合成します。大気エコーの情報を極力変えない拘束条件の下、クラッタの混入が最小となるような重み付け合成を行うことで、クラッタの混入を低減させます。

これらの技術では、入力（受信信号）の状態に応じて、最良の解が得られるように重み付けを変化させます。このような信号処理を、適応信号処理と呼びます。

### ■ソフトウェア無線技術を活用した多チャンネル受信システムの構築

次世代WPRの設置費用を下げることは、次世代WPRが社会に広く使用されることにつながります。そのため、既設のWPRを改修することで、次世代WPRの機能であるレンジイメージングやアダプティブクラッタ抑圧を付加することを目指しています。現在は既設のWPRを用いた技術開発を行うため、NICTが有するWPR（通称LQ-13）を開発プラットフォームとして活用しています。

LQ-13には、レンジイメージングの性能向上に有効であるオーバーサンプリングや、アダプティブクラッタ抑圧に不可欠となる多チャンネル受信の機能がありませんでした。これらの機能をLQ-13に実装するために構築した多チャンネル受信システムの概要を、図2に示します。多チャンネル受信システムのデジタルデータ処理部は、ソフトウェア無線用データサンプリング装置と汎用のワークステーションで構成されています。ソフトウェア無線技術を活用することで、デジタルデータ処理の機能変更や追加が容易な多チャンネル受信システムを実現しています。

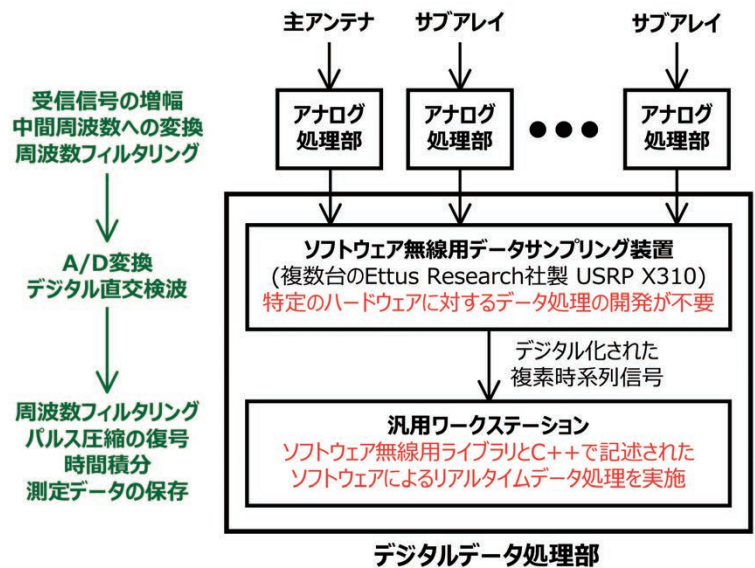


図2 多チャンネル受信システムの概要



図3 LQ-13に設置されたアダプティブクラッタ抑圧システムの外観

### ■今後の展望

これまでの技術開発により、レンジイメージングとオーバーサンプリングの機能がLQ-13に実装されています。さらに、既設のWPRに付加できるアダプティブクラッタ抑圧システムが開発されています。このシステムは、既設のWPRの主アンテナの周りにクラッタ受信用サブアレイを新たに設置することで、アダプティブクラッタ抑圧の機能を実現します（図3）。

今後は、これまでに開発した技術の性能向上に加え、次世代WPRの実用化に向けた取組を実施します。レンジイメージング

とオーバーサンプリングを活用した風と乱流の高分解能観測により、乱気流発生 の早期検出による航空機の安全な運行の実現や、積乱雲発達 の早期探知によるゲリラ豪雨予測への貢献などのアプリケーション創出に取り組んでいきます。

クラッタの発生源は多様であるため、WPRの設置場所・社会活動・気象状況によりクラッタの特性も大きく変化します。様々なクラッタを効果的に低減できるアダプティブクラッタ抑圧の実現を目指し、我々は今後の技術開発に取り組んでいきます。

## 衛星搭載雲観測レーダ処理アルゴリズムの研究

### 地上検証用電子走査雲観測レーダの開発



堀江 宏昭 (ほりえ ひろあき)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

大学院修士課程修了後、1990年、郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。環境計測分野のレーダリモートセンシング研究に従事。

**地** 球温暖化による極端な気象現象が観測される昨今ですが、温暖化予測における大きな不確定要素は雲と大気中のちり（エアロゾル）の影響評価であり、正確な予測には人工衛星による地球規模の雲・エアロゾルの観測情報が必要とされています。そのため、NICTは宇宙航空研究開発機構（JAXA）と共同でEarthCARE（Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer Mission）衛星に搭載する雲観測レーダ（CPR：Cloud Profiling Radar）、EarthCARE/CPRの開発を行っています。日欧共同プロジェクトであるEarthCARE衛星は他に3つの観測センサを搭載し、欧州宇宙機関により2019年度に打ち上げられる予定です。

#### ■背景

EarthCARE/CPRは、2006年に打ち上げられた米国航空宇宙局（NASA）のCloudSat衛星搭載CPRの約4倍の観測感度であり、地球の放射収支（太陽光からの放

射と地表からの放射の輻射熱の差）に影響する氷雲の98%のほか、層積雲（水雲）も観測することができます。また、雲粒の鉛直速度を測定するため、衛星搭載気象レーダとしては世界初となるドップラ速度計測機能を有することが特徴です（図1）。これによって鉛直速度を用いて雲と弱い雨（drizzle）を識別できることから、雲水量算出等の処理アルゴリズムの改善が期待されています。

衛星搭載レーダの観測精度を高めるために重要なのが、地上設置レーダによる検証です。衛星打上げ後に同じ観測対象を衛星搭載と地上設置の両レーダで直接比較するだけでなく、衛星打上げ前から処理アルゴリズムの妥当性を確認するために、観測データを取得する必要があります。本稿では、この地上検証用に開発しているEarthCARE/CPRのビーム内の雲の水平不均一を観測する電子走査雲観測レーダ（ES-SPIDER: Electronic Scanning SPIDER〈Super Polarimetric Ice-crystal Detection and Explication Radar〉）を紹介します。

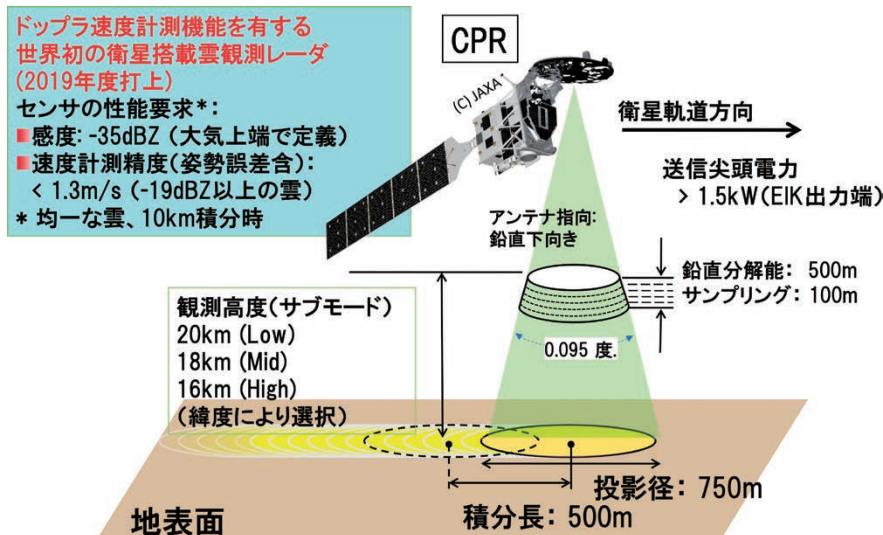


図1 EarthCARE/CPRの観測概念図と性能



図2 高感度雲観測レーダ (HG-SPIDER) アンテナと送受信器  
 感度: -40dBZ (1秒積分時、高度15km)

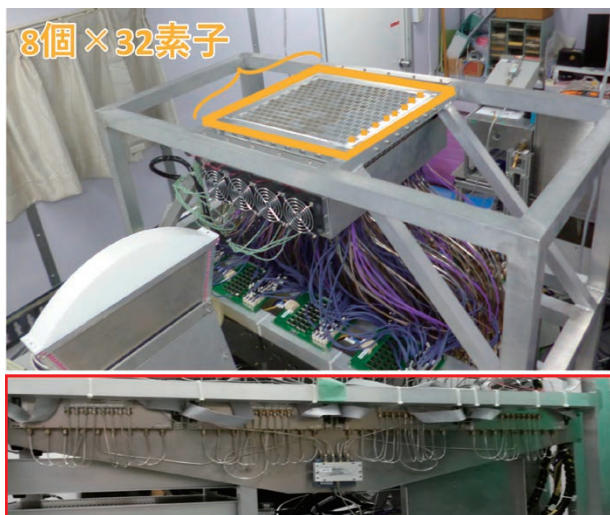


図3 電子走査雲観測レーダ (ES-SPIDER)  
 上図奥：ホーンアンテナアレイ及び受信システム  
 上図手前：送信ファンビームアンテナ  
 下図：信号合成器  
 走査角度：±4.5度  
 感度：-27dBZ (1秒積分時、走査角度0度時)

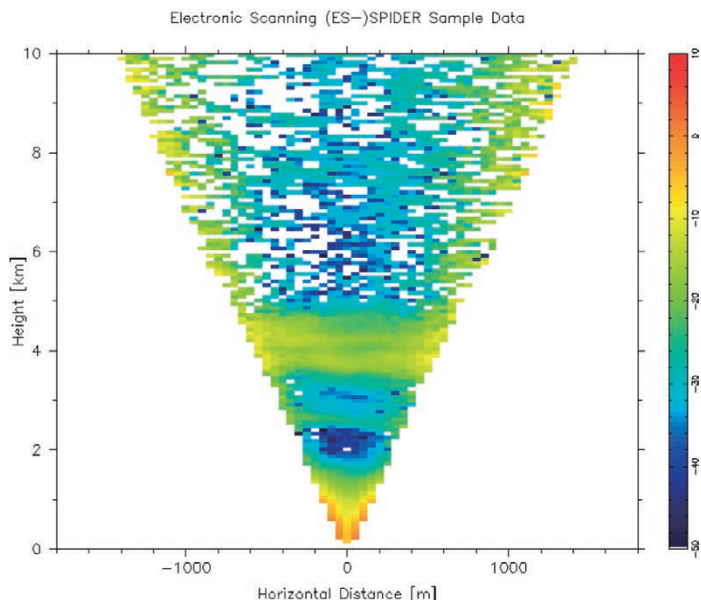


図4 ES-SPIDERによる観測例  
 位相器による逐次走査方式、データ取得時間約7秒 (0.1秒×63走査角度)  
 横軸：水平距離±1500m 縦軸：高度0-10km 色：青→赤 (散乱強度が強くなる)  
 計算処理により複数方向のアンテナビームを合成するDBF化のため、デジタル受信器を開発しており、完成すれば上図は0.1秒で取得可能となる。

### ■雲観測レーダとは

一般に気象レーダと呼ばれる降雨レーダが降水量を導出するのが目的であるのに対し、CPRは、雲水量・雲水量といった物理量を導出するものですが、直接には単位体積 (1m<sup>3</sup>) あたりの雲粒による散乱断面積を測定します。そこからZ因子と呼ぶ、雨滴・雲粒の直径の6乗に比例する量に変換します。ダイナミックレンジ (最小値と最大値の比率) が大きいので通常はデシベル表記 (dBZ) を用います。例えば、単位体積中に直径1mmの雨滴が1個ある場合のZ因子は1 (0dBZ) となります。同じ体積の直径0.1mmの雲粒1000個の場合のZ因子は0.001 (-30dBZ) となることから、雲観測ではミリ波と呼ばれる短い波長の電波を用いて感度を改善する必要があります。また、Z因子から雲水量などの粒子の直径の3乗に比例する量に変換する処理アルゴリズムを必要とします。

NICTは1998年からCPR (SPIDER) の観測を開始していますが、通常気象レーダで用いられている周波数の10~20倍高い94GHz帯の電波を、国内では初めて採用しています。このように、EarthCARE/CPRの検証用にはこれまでの経験を活かして十分な感度を有する高感度CPR (HG-SPIDER: High-sensitivity Ground-based SPIDER) を開発しました (図2)。

### ■電子走査雲レーダ (ES-SPIDER)

先に述べたように、EarthCARE/CPRは、世界初となるドップラ速度計測機能を有しています。今までこの機能搭載が難しかった理由のひとつに、衛星移動速度の混入分が鋭いビーム幅のアンテナであっても、対象とする雲の鉛直速度に比べて無視できないくらいの大きさになることがあります。さらに、衛星の進行方向の雲の水平不均一は、強い散乱によって値が引きずられて、計測誤差を生むことが指摘されています。この誤差を低減する処理アルゴリズム開発のために、雲の水平不均一を計測する地上設置CPRが必要とされています。また、積分時間を考慮すると、機械的にアンテナを走査する方法よりも、フェーズドアレイアンテナにより、瞬時にビームを切り替える電子走査方式が有効です。

通常、アンテナ素子間は波長以下にしますが、この周波数帯での波長は約3mmであり、波長以下の間隔でフェーズドアレイアンテナのアンテナ開口約30cmに素子を並べることは、物理的にもコスト的にも、またアンテナ利得の点からも困難です。そこで、アンテナ走査角度を、EarthCARE/CPRのアンテナビーム直径約750mを高度5kmで走査できる±4.5度に限定し、1次元走査とすることで、膨大な素子数から実現可能な8個×32素子へ減少させたホーンアンテナアレイにしました。また、技術的な問題から、各アンテナ直下に受信モ

ジュールを配置し、ミリ波帯から中間周波数帯へ周波数変換した後に信号合成する方式を取り、実現させました。電子走査は受信のみとし、送信アンテナパターンは走査方向に広いファンビームとしました。

プロトタイプは、移送器を用いてアンテナビームを切り替える逐次走査方式ですが、94GHz帯では世界初の電子走査雲観測レーダとなります (図3、4)。

現在は計算処理により複数方向のアンテナビームを一度に合成するデジタルビームフォーミング (DBF) をするため、デジタル受信器を開発しています。DBF化により、EarthCARE/CPRのドップラ速度計測対象に対し十分満足する感度となります。

### ■今後の展望

今回紹介した地上検証用CPRは検証用にとどまらず、処理アルゴリズムの研究開発用に、衛星の打上げ前から有用な観測データ取得ができると考えています。

また、衛星観測では、降雨レーダとCPRを搭載して雨と雲の両方を測るNASAの計画などが提案されています。地上レーダでは、ゲリラ豪雨の予測は降雨となる前の雲の状態から把握することが望まれています。このような用途を見据えて、次世代CPRの開発にも取り組んでいきたいと思えます。

## 合成開口レーダによる標高計測

### 相対値計測から絶対値計測へ



#### 上本 純平 (うえもと じゅんぺい)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

大学院博士課程修了後、2008年、NICTに入所。超高層大気物理、リモートセンシングデータ解析に関する研究に従事。博士(理学)。

N ICTでは、航空機搭載型の合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) である Pi-SAR (Polarimetric and interferometric SAR) シリーズの開発、データ取得及びデータ解析技術の研究を行っています。航空機搭載 SAR の測定量には、測定対象の偏波特性、テクスチャ情報、標高及び移動体の検出等様々ありますが、本稿では測定量のひとつである標高を計測する手法について実際の解析データを交えながら紹介します。

#### ■ SARによる高さ計測方法 —干渉 SAR—

航空機搭載 SAR は地表へ向けて電波を照射し、地上からの反射波を受信・信号処理することで地表面を観測するレーダです。航空写真の撮影とは異なり自ら電波を照射するため、原理的には SAR 観測は昼夜を問いません。また大気透過性の高い周波数の電波を利用することで、雲や噴煙等を突き抜けて地上を観測することができます。この特徴を活かし、Pi-SAR シリーズはこれまでに噴火・地震・津波・土砂崩れ等の自然災害に伴う被災状況の迅速な把握に貢

献してきました。

SAR では照射電波の往復時間の計測を基に反射体の位置を同定しているため、1つのアンテナでは基本的には地表の偏波特性とテクスチャ情報しか得られません。しかし、受信アンテナをもう1つ用意すると、反射体からの距離差を計測することを通じてその高さを計測することができます (図1)。距離差がどのように受信電波に現れるかを模式的に表したのが図2です。波 (山と谷) の位置を表すのが位相ですが、距離差に伴って2つのアンテナでの観測位相に差が出ます。この図の例では山と谷3.5個分の位相差です。2つのアンテナの受信データを干渉させることにより位相差を抽出し、対象物の高さを得ます。このような手法は干渉 SAR (Interferometric SAR) と呼ばれています。

#### ■ 標高の相対値と絶対値

図3に実際の観測例として桜島 (鹿児島県) の干渉 SAR 計測の結果を示します。虹色で表された位相差はまるで等高線のように見え、標高と関連があることが見て取れますが、標高を得るためにはもうひとつ手間が必要です。図2に示した受信電波の位相

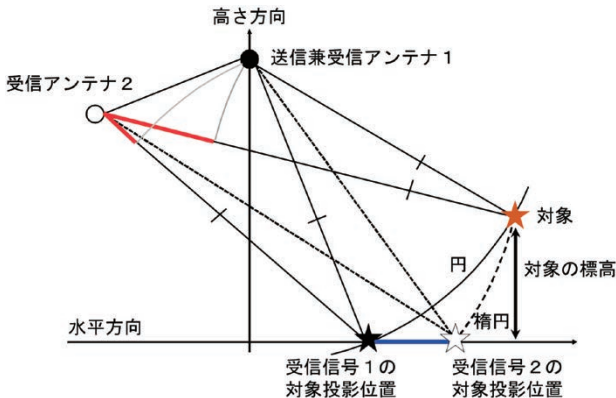


図1 2つのアンテナによる SAR 観測の模式図。アンテナ1のみの場合、★の位置と★の位置は同じ往復時間のため区別が付けられません。一方、アンテナ2を用いると、距離差 (赤線) の長さがそれぞれ異なるため区別することができ、その結果対象の標高を求めることができます。青線はステレオレーダグラメトリで利用する位置ずれ量です。

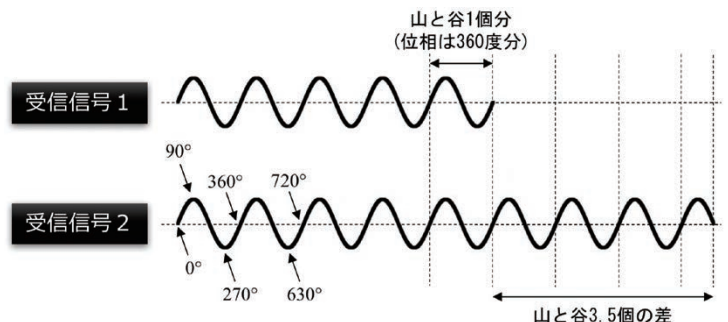


図2 受信電波に現れる距離差の影響の模式図。図中の角度は位相を表しています。



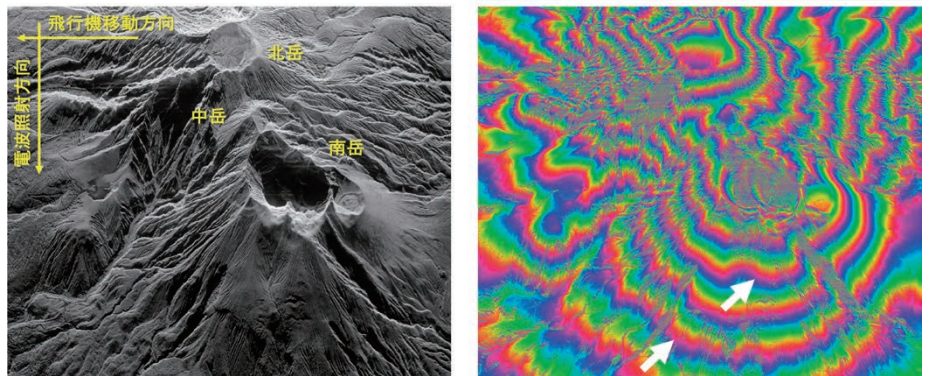


図3 桜島のテクスチャ画像（左）と干渉SAR画像（右）。干渉SAR画像では上のカラーバーで示したように位相差を色で表しています。

差は山と谷3.5個分でしたが、実は干渉によって抽出できる位相差はこの端数の0.5個分のみで山と谷何個分かは抽出できません。このため、異なる高さでも同じ位相差（色）になってしまいます。例えば、図3の矢印で指し示された部分は上の方が山頂に近く高さは異なるはずですが、同じ位相差（色）です。したがって標高を得るためには、同じ色の位相差同士でもお互いに山と谷何個分の差があるのかを決める必要があります。ですが、このままではまだ何度の位相差（どの色）が高さ何mに相当するかわかりません。つまり山の形状は求めることができますが、標高が何mなのかはわからないという状態です。この意味で、干渉位相差から計測される高さは相対的な値であると言えます。通常は参照点として、少なくとも1地点以上で既知の標高を別データから与えて位相差と標高の紐づけを行います。

## ■もうひとつの高さ計測手法 —ステレオレーダグラメトリ—

上述のように既知の標高を与えれば絶対値の標高を得ることができるのですが、いつも参照できる標高データが存在するとは限りません。SARデータのみから高さの絶対値を計測することは不可能なのでしょうか？実は干渉SARとは異なるステレオレーダグラメトリという手法を用いると絶対値の計測が可能になります。再び図1に戻りますが、干渉SARでは2つのアンテナで生じる図中の赤線の距離差を位相差として計測していました。実は、図中の青線で示した部分にも2つのアンテナ間で差が生じます。SARでは観測結果を2次元画像データとして取り扱います。その際、縦軸・横軸はそれぞれ電波照射方向及び飛行機移動方向を選びます。電波照射方向の座標は電波の往復時間で決めるのですが、2つのアン

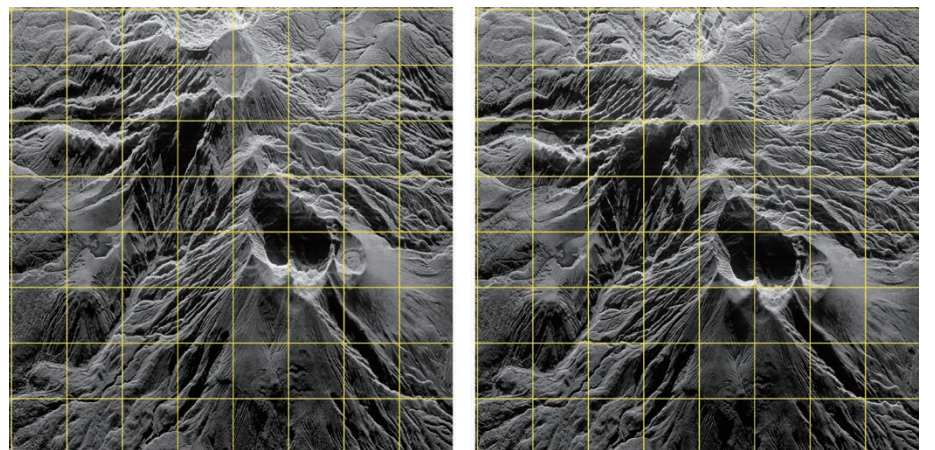


図4 飛行方向と垂直な方向に互いに約1.5 km程度離して計測した桜島のテクスチャ画像。高さに応じて縦方向の位置ずれ量が異なっていることがわかります。

テナ位置が異なることにより、同じ反射位置でも電波の往復時間に違いが生じます。この結果として高さに応じて2つのアンテナでの受信画像データ間に位置ずれが生じることになります。ステレオレーダグラメトリでは、この画像上の位置ずれを基に高さを計測します。位置ずれには、干渉SARと異なり位相の回転といった概念は存在せず絶対値で計測が可能なので、結果として標高を絶対値で計測することができます。図4は飛行位置を飛行方向と垂直な方向に互いに約1.5 km程度離して計測した桜島のテクスチャ画像です。標高の高い位置に存在する火口の縁と標高の低い麓において位置ずれ量が異なる、つまり位置ずれ量が高さに関連していることがわかります。

## ■今後の展望

ステレオレーダグラメトリにより正確な標高を得るためには、2つのアンテナの受信画像データ間の位置ずれ量を正確に求める必要があります。私達は数年前から東北

大学大学院情報科学研究科青木研究室との共同研究によりこの課題に取り組んでおり、現在までに開発したアルゴリズムによりPi-SAR2データを用いて位置ずれから高さを計測できることを実証しました。開発アルゴリズムの一部については特許出願（特開2016-57092）を行っています。絶対値計測ができるようになると、例えば大規模開発・災害により地形が広範囲にわたって変化し、参照先の外部データの整備・更新が追いついていないような状態でも安定して標高データを取得し、開発・被災状況について3次元的に把握することができるようになると考えられます。

前述のとおり、ステレオレーダグラメトリにより標高を絶対値で計測することはできません。しかし位置ずれ量を正確に求めるためには画像の相関領域を比較的大きく設定する必要があり、その結果どうしても干渉SARに比べて空間分解能が劣化します。今後は両手法それぞれの良さを活かせるような高さ計測アルゴリズムの検討・実装を進めていきたいと考えています。

## テラヘルツ地球観測のための研究開発

### 中層・超高層大気温度と風を衛星から測る技術の確立



**落合 啓** (おちあい さとし)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
総括研究員

大学院修士課程修了後、1988年、郵政省電波研究所（現NICT）に入所。ミリ波サブミリ波のリモートセンシングに関する研究などに従事。博士（工学）。



**入交 芳久** (いりまじり よしひさ)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

大学院修了後、文部省国立天文台 野辺山太陽電波観測所研究員を経て、1993年、郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。テラヘルツ波受信機システム開発等に従事。博士（理学）。

**テ**ラヘルツ波で宇宙から見た地球は、可視光と違って、昼と夜のコントラストはほとんどありません。遠赤外のうち周波数の低い帯域あたりがテラヘルツ波ですが、大気温度に応じた強度の放射が見え、地球は太陽の向きにほとんど関係なくぼやとした球状に見えると考えられます。テラヘルツ波は大気で大きな吸収を受けます。特に水蒸気による吸収が大きいため、対流圏（地球の大気層のひとつ。地表と成層圏の間に位置する）はテラヘルツ波が透過しません。ゆえに、一部の周波数帯を除けば、宇宙から地表を見ることはできず、地上の観測に向いていませんが、対流圏の上部に存在する巻雲などは観測することができます。テラヘルツ波のスペクトルから、これまでほかの方法では測ることのできなかつた上空の様子を知ることができるのです。

#### ■テラヘルツで見える大気

地球の周縁を、少し分解能の良いテラヘルツ望遠鏡で見ると、対流圏の外側にいろいろなものが見えてきます。酸素やオゾンはテラヘルツ帯に多くの輝線（電磁波を放射する周波数のことで、分子構造により固有のもの）を持ちますが、この輝線の周波

数では、冷たい宇宙の背景放射の上に大気温度の分子の放射が観測されます。対流圏のすぐ外側の成層圏ではオゾンの輝線での放射が強く、酸素の放射は更にその外側まで続きます。地表から100 km程度離れたあたりから酸素分子の濃度は減っていき、解離した原子状酸素の割合が増えるので、原子状酸素の輝線の2.06 THzの放射が強くなってきます。テラヘルツ波の放射を測ると、これらの物質の濃度ばかりでなく、その温度を知ることができます。さらに、観測される輝線のドップラー効果による周波数の偏移からその物質の速度、すなわち風速も知ることができます。

テラヘルツ波による観測の良いところは、対流圏界面（約15 km）から上で150 kmを超える高さまでのどの高度にも、周波数を選べば放射のある大気物質を見つけることができることと、それが昼も夜もほぼ同程度の精度で観測できることにあります。対流圏界面より上の中層・超高層の全ての大気を地球規模で測ることができれば、電離圏まで含めた大気上下結合に新たな知見をもたらすとともに、中長期の気象予測や気候変動予測の精度向上にも貢献できると期待しています。

NICTでは大学や他の研究機関の研究者と協力して、オゾンの吸収線の集まる

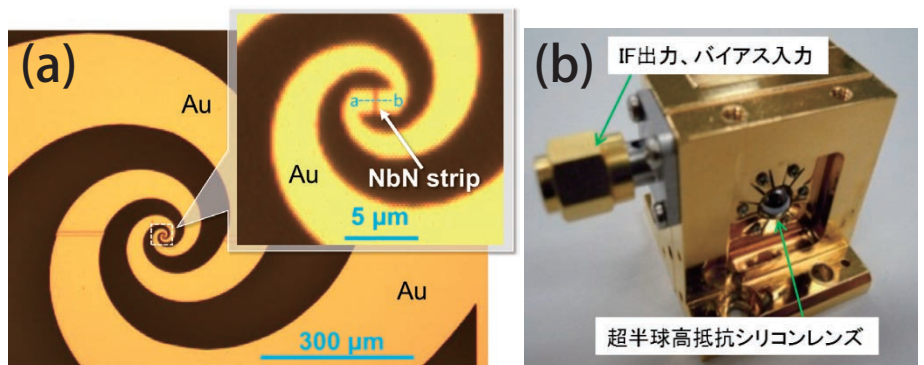


図1 HEB ミキサ用 (a) 超伝導デバイス (b) 準光学型ミキサマウント

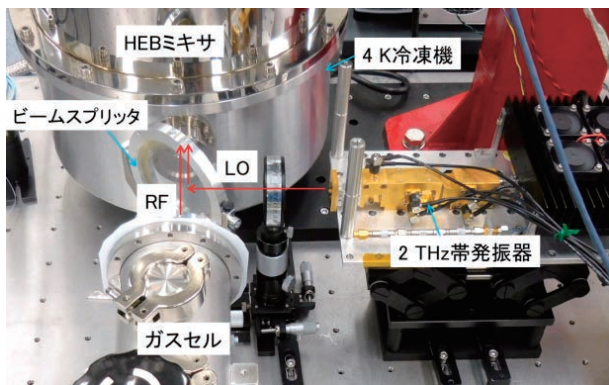


図2 2 THz帯ヘテロダイナ受信機によるガスセルを用いた分子スペクトル検出システム

640 GHz帯や、原子状酸素の吸収線の2.06 THzによる衛星からの地球観測の構想を検討しています。2009年にはJAXAと協力して、640 GHz帯によるオゾン層などの観測を、国際宇宙ステーションから実施しました。さらにオゾン層を含む全大気の観測を実現するために2 THz帯等の技術開発に取り組んでいます。

### ■地球大気分子から放射される微弱なテラヘルツ波のスペクトルの検出技術

地球大気分子から放射される微弱なテラヘルツ波の電波を検出するために、私たちはヘテロダイナ方式を用いた受信機を開発しました。ヘテロダイナ方式とは、大気分子からの信号(RF)とほぼ同じ周波数のテラヘルツ波の信号(局部発振器信号(LO))を作って、ミキサ(周波数混合器)によって、ギガヘルツ波の中間周波数信号(IF)に周波数変換を行い、その信号を増幅し、スペクトルを検出する方式です。この方式は一般にも広く用いられていますが、2 THz帯で動作するものは特殊で、その鍵となる技術は、低雑音ミキサと高出力局部発振器です。

### ■超伝導を利用した高感度受信機をデバイスから作る

受信機の感度が高いほど、より短時間で良質な信号を検出することができます。私たちは超伝導を利用した高感度受信機を、その心臓部となるデバイスから開発しています。ホットエレクトロンボロメータ(HEB: Hot Electron Bolometer)ミキサと呼ばれるミキサは、テラヘルツ波(特に1.5 THz

以上)では、最も高感度なスペクトル検出器です。図1に、未来ICT研究所(神戸)のクリーンルームで作製したデバイス(a)と、それをリモートセンシング研究室で組み込んで作製した準光学型ミキサマウント(b)の写真を示します。デバイスの中心部にはNbN(窒化ニオブ)の超伝導薄膜(サイズは約 $2\mu\text{m}\times 0.2\mu\text{m}$ で、厚さは約3 nm)があり、それがギガヘルツ程度の応答速度を持つため、IF信号の位相と振幅を検出することができます。デバイスは広帯域特性を示すログスパイラルアンテナを持ち、これを無反射コーティングした超半球高抵抗シリコンレンズに取付けて、準光学型ミキサを作製しました。

### ■2 THz帯での分子からの放射電波スペクトル検出に成功

このミキサを使ってヘテロダイナ受信機

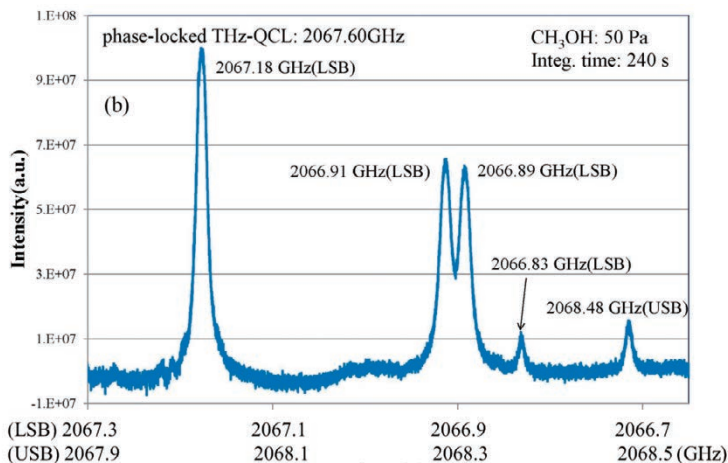
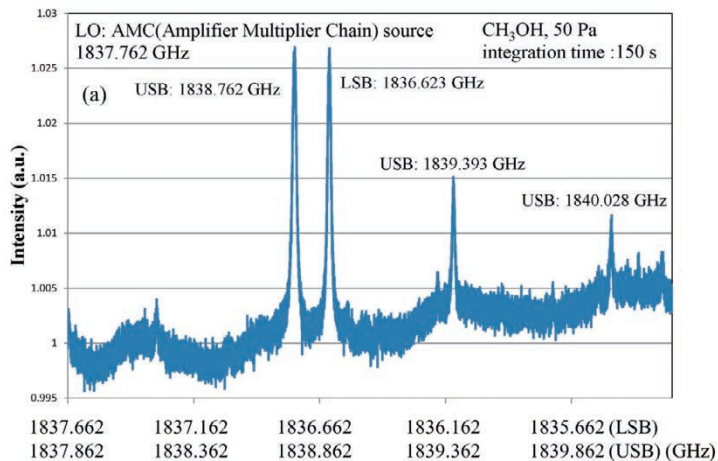


図3 検出された (a) 1.83 THz帯 (b) 2.06 THz帯におけるメタノール分子からの放射電波スペクトル

を構成し、2 THz帯で分子からの放射電波スペクトルの検出を行いました(図2)。ミキサは4 Kに冷却して超伝導状態で動作させるため、冷凍機のクライオスタット内に装着されます。局部発振器としては、マイクロ波信号の144通倍により2 THzを発振する発振器などを用いました。この信号をビームスプリッタでミキサに導入し、ガスセルを用いた実証実験として、メタノール分子からのテラヘルツ波を検出しました(図3)。

### ■今後の展望

今後、受信機の更なる性能向上を行っていきたいと考えています。また、2 THzを超える周波数帯(3~4 THz)での受信機動作実証にも成功しているので、これらの技術を将来の新たな地球観測へと役立てていくことを目指します。

## 見えない微粒子を観る光リモートセンシング技術



### 石井 昌憲 (いしい しょうけん)

電磁波研究所  
リモートセンシング研究室  
主任研究員

1994年 日本電気入社、2000年、専攻研究員として郵政省通信総合研究所（現 NICT）に入所、2014年 NASA 客員研究員。光リモートセンシング技術や光基盤技術などの研究開発に従事。博士（理学）。

**私** たちの身の回りには目では見えないとても小さな粒子が、存在していることをご存じでしょうか？この小さな粒子は、“エアロゾル”や“エロゾル”と呼ばれており、海、土壌、人間活動から生まれています。そして、エアロゾルは風によっていろいろな場所へ運ばれていきます。ここでは、空気中に浮遊する小さな目に見えない粒子を観るリモートセンシング技術を紹介します。

### ■背景

エアロゾルは地球の放射収支に作用し、気候システムに影響を与えることが知られています。エアロゾルが太陽からの光を散乱したり吸収したりすることで温暖化を引き起こしたり、あるいは、寒冷化の原因となります。この効果を直接効果と呼びます。エアロゾルは雲の種ともなります。雲の形成からその寿命まで深く関わっており、雲の蒸発や凝結（微物理過程）を通して、雲の放射特性を変化させることで、地球の放射収支に作用します。この効果を間接効果と呼びます。また、エアロゾル同士もしくは、エアロゾルと気体が遭遇すると

化学変化を起こすことから化学組成も重要です。気候変動への影響を定性的、かつ定量的に評価するためには、全球規模でエアロゾルの光学特性（複素屈折率、吸湿性）や化学特性（組成、混合状態）、微物理情報（形、粒径分布、数密度）のデータが必要とされています。

近年話題となったエアロゾルが、大きさ 2.5 $\mu\text{m}$  以下の粒子状物質、いわゆる“PM2.5”（人間活動にともなう粉じんやスス、自然起源の黄砂などの土壌）です。その大きさゆえに、体内に吸い込まれると人体の気管支や肺にまで達するため、健康への影響が指摘されています。春先や秋に砂漠地域からの土壌粒子の飛来が確認されると、1 週間以内は小児喘息による入院リスクの上昇、あるいは、土壌粒子の環境基準値以下であっても入院リスクが上昇するとの報告もあります。連続的な時空間データとしてエアロゾルを観測することは、個人の身の回りレベルから地球規模のスケールまで大変重要になります。また、エアロゾルが「いつ、どこから、運ばれてきたか?」、「この先どこへ運ばれていくか?」を予測するために風の観測が鍵のひとつとなります（図1）。

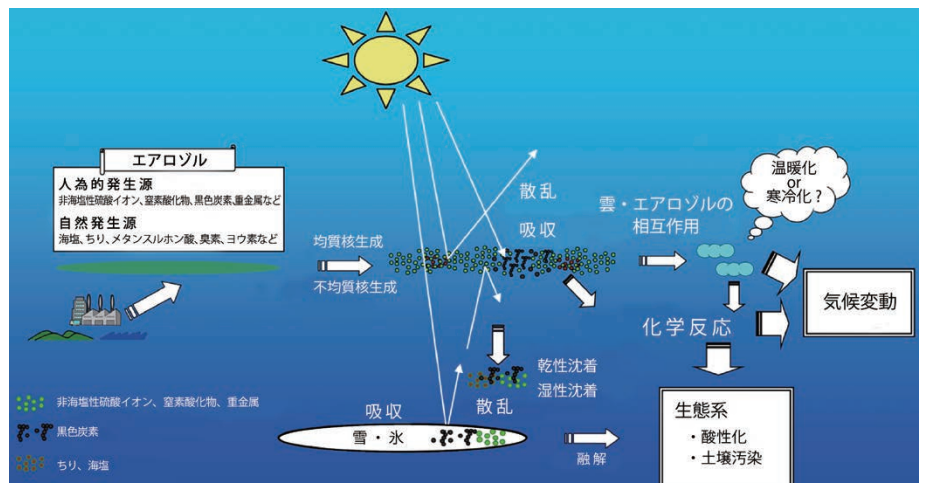


図1 エアロゾルの役割のイメージ

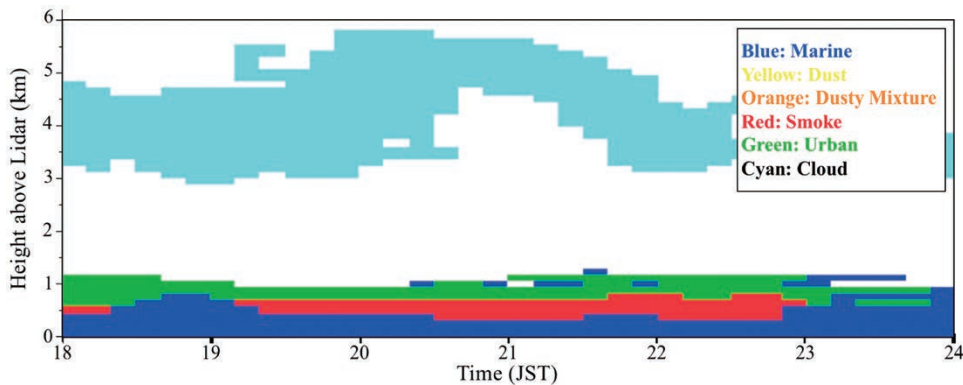


図2 2017年12月2日に福岡大学に設置されたライダーで観測されたエアロゾルの分類：海洋性（青）、土壌性（黄色）、ダスト混合（橙色）、燃焼性（赤色）、人為性（緑色）、雲（水色）



図3 新しく開発された2μmレーザを用いた地上設置型風ライダー。航空機搭載用風ライダーとしても運用可能

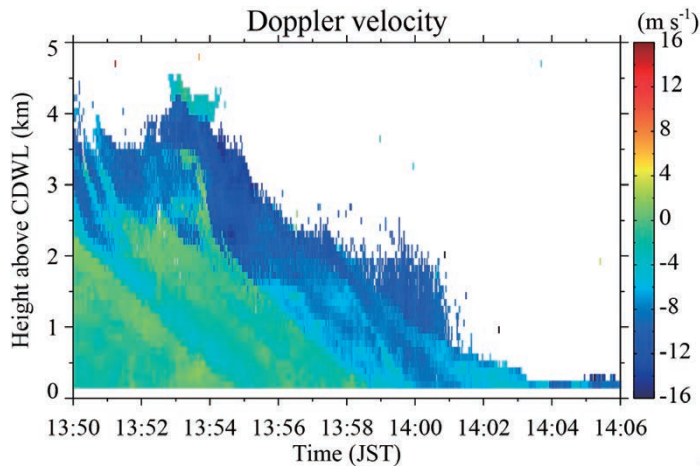


図4 2017年7月18日にNICT小金井本部で観測された電の落下速度

## ■ NICTの観測技術—ライダー (Lidar: Light Detection And Ranging) —

リモートセンシング技術とは、測定対象に直接（ローカル）触れることなく遠隔（リモート）から測定して対象の情報を得る技術をいいます。リモートセンシング技術は、自ら電磁波源を持つ能動型（Active）とそれを持たない受動型（Passive）に大別されます。NICTは、レーザ光を電磁波のソースとするActive センサであるライダーを開発しています。

### ・エアロゾルライダー (Aerosol Lidar)

ライダーに用いられるレーザ光は、可干渉性に優れる（時間的・空間的コヒーレンスがよい）、単色性がよい、指向性が鋭い等の特徴を有します。連続波のレーザが用いられることもありますが、ライダーでは主にパルスレーザがよく用いられます。パルスレーザを用いることにより、非常に高い精度で測距が可能となり、ライダーは高い距離分解能でエアロゾルの分布を観ることが出来ます。レーザ光を空気中の大気分子やエアロゾルに照射すると相互作用（例えば、ミー散乱、非等方性散乱）を起こして反射されます。反射された光からエアロ

ゾルの光学特性や微物理情報等の物理量として情報が得られます。NICTでも得られた光学特性を基に化学組成を推定し、大気質の研究に役立てています（図2）。

### ・風ライダー (Doppler Wind Lidar)

前述の相互作用のひとつとしてドップラー効果があります。ライダーから射出されたレーザ光の周波数は、大気分子やエアロゾルによって反射される際にドップラー効果によって変化します。変化した周波数を測定することによって風速情報が得られます。世界気象機関は、数値予報等において全球の風の高度分布が得られるセンサの必要性を述べています。NICTは数値予報研究のみならず、局地的な気象現象の予測精度向上やメソ（2～2,000 kmサイズ）気象研究に役立てるために、風ライダーを独自に開発しています（図3）。

NICTは、風ライダー用レーザとして目に対する安全性の観点から、2μm波長帯を用いて、次の2種類のレーザを開発しています。

#### 低いパルスエネルギー：

やや早い繰返し周波数のタイプ

#### 高いパルスエネルギー：

低繰返し周波数のタイプ

前者は主に地上での観測、後者は地上、航空機、そして、人工衛星からの観測を想定しています。

地上測定用風ライダーは2軸走査システムを有しており、方位と仰角を変えることによって3次的に風を観測できます。図4は小金井本部で風ライダーが観測した電ひょうの落下の様子で（寒色が落下を示す）、背景風（中性色）の上部高度2～4kmから地上付近まで秒速10～15mで落ちてきている様子をとらえています。

## ■ 今後の展望

NICTで開発された風ライダーは地上用としてだけではなく、航空機用としても開発されています。航空機に搭載して降雨に伴う前線活動や台風周辺の風を観測することにより、集中豪雨、局所的大雨、台風予報の精度向上やメソ気象分野の研究に役立てたいと考えています。さらに、ライダーを人工衛星に搭載して地球の風やエアロゾルの分布を観測し、数値予報精度や温暖化に伴う気候変動予測の向上に寄与したいと考えています。

能動型センサであるライダーは高い距離分解能・高い時間分解能で測定できる強みがありますが、受動型センサのように広範囲でデータを取得できません。面的測定が行えるように、多数素子光検出器による方式やフェーズドアレイによる方式等の新しいライダー技術の開発に取り組んでいきます。

昨今、リモートセンシング分野でも人工知能（AI）やIoTが利用されています。ライダーによる高度情報（縦方向）と地上に設置された多数のセンサや衛星データ（面方向）、そして、IoTデータ・技術を組み合わせたデータ同化技術や大気質予測の精度向上に取り組めます。

# 原子時計をスマートフォンに搭載できるくらいの超小型システムへ ～原子時計のチップ化・オンボード化に向けて～

電磁波研究所 時空標準研究室 原基揚

**未**踏領域の探索に精密な時計は欠かすことができません。見知らぬ街を旅するとき、私たちは地図を片手に歩きますが、地図さえない世界では、時間と速度を測りながら、経路を慎重に計算・記録しながら進むでしょう。私たちの研究チームは、このような時計の用途を見据え、極めて高精度な原子時計を、微細加工技術を用いてチップ化することを目指しています。これにより、深海や宇宙など、“地図さえない世界”での探索に大きな可能性が広がります。

原子時計はIoT時代のキーデバイスでもあります。スマートフォンやドローンには大量のセンサが内蔵されています。これらのセンサ群にとって地図はGPS衛星からの電波です。しかし、電波は環境に依存し、常時受信可能とは言えません。人間がGPSを利用するときは手元の地図と視覚とで複合的な判断をするため、不便を感じませんが、小さなセンサ部品からするとGPS信号の途絶は暗闇に放り込まれるようなものです。原子時計のチップ化はこのGPSの不安定さを補い、センサ部品への時刻・位置情報を常時提供可能にします。これは、おびただしい数のセンサが常に時刻と座標を共有していることを意味し、今までばらばらだった測定データを、時空間的に括りを持ったビッグデータとして統合することを容易にします。この技術をドローンの撮像に展開すれば、人が踏み込めない場所の3D・4D映像の取得も容易になります。

原子時計はアルカリ金属原子とレーザーとの相互干渉で得られる極めて細い共鳴線を用いて、マイクロ波発振器の周波数を変化しないように制御する（安定化する）技術です（図1）。原子時計の小型化は欧米を中心に開発が

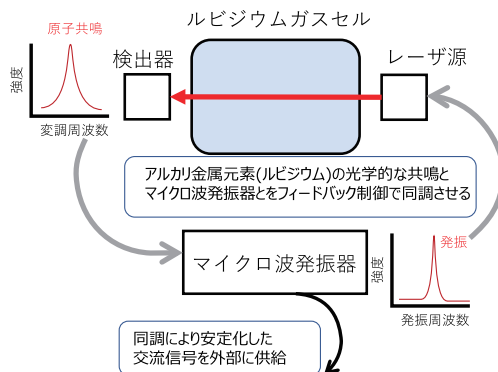


図1 原子時計の原理図

進められ、共鳴線を得る装置の小型化が大きく進展しました。しかしながら、マイクロ波発振器とこれを安定化するための制御回路の小型化は発展途上です。我々のチームはここに着目し、圧電体の薄膜に誘起される振動をマイクロ波発振器に利用する新しい原子時計システムを提案しました（図2、3）。この圧電体の薄膜は、原子の共鳴線で得られる周波数と同じ周波数帯で強い振動（共振）を示すため、同調制御が容易で、発振器と制御回路とを大幅に簡便化・小型化することができます。これにより、市販の原子時計に対して、消費電力とチップ面積を大きく削減することに成功しました。

スマートフォンには、人工衛星に採用されている先進技術が多数搭載されていますが、さらに原子時計が内蔵されれば、私たちは人工衛星とほぼ同じ機能をポケットに持ち歩くことが可能になります。これは、新しい産業とサービスの創出を明るく予見させてくれます。

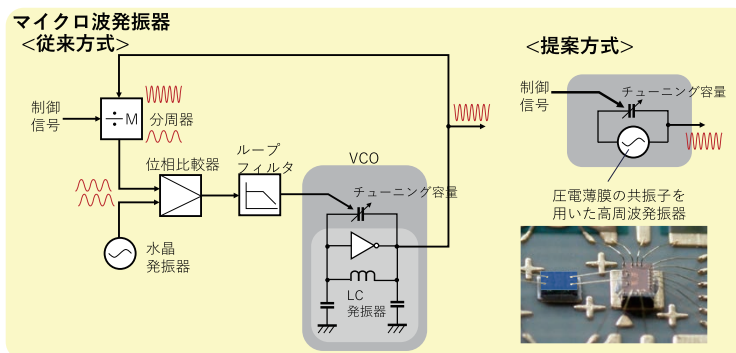


図2 マイクロ波発振器：従来法と提案手法の比較

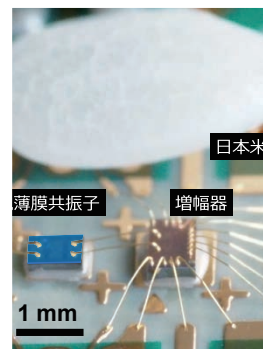


図3 開発した発振器の写真

■ 報道発表関連記事（2018/1/23付）

<http://www.nict.go.jp/press/2018/01/23-1.html>



原基揚（はらもとあき）

電磁波研究所 時空標準研究室 主任研究員  
大学院博士課程修了後、株式会社富士通研究所に入社、東北大学大学院工学研究科准教授を経て2016年にNICTに入所。半導体微細加工技術を応用したマイクロデバイスの開発に従事。博士（工学）。

# NICT 2018年度イベント開催・出展のご案内

## ワイヤレス・テクノロジー・パーク (WTP) 2018

<https://www.wt-park.com/2018>

開催日：2018/5/23～25

会場：東京ビッグサイト

無線通信技術に焦点を当てた国内最大級の専門イベントです。2018年は、展示、セミナー、アカデミアプログラムを通じて、第5世代移動通信システム(5G)を中心に最先端技術を紹介します。NICTは、ワイヤレス技術等の最新成果のデモ展示・講演を行います(主な出展部署:ワイヤレスネットワーク総合研究センター、未来ICT研究所、戦略的プログラムオフィス、総合テストベッド研究開発推進センター)。

※ NICT、YRP 研究開発推進協会及びYRPアカデミア交流ネットワークによる共催



2017年度の様子



## Interop Tokyo 2018

<https://www.interop.jp/>

開催日：2018/6/13～15

会場：幕張メッセ

サイバーセキュリティ研究室の動態展示(例年)に加え、ナショナルサイバートレーニングセンターより成果を展示する予定です(サイバーセキュリティ研究所)。



2017年度の様子



| 出展イベント名  | 開催日・会場  | 出展内容(出展者)   | 2017年度の様子 |
|--|---|---|-----------|
| <b>14th International Conference on IP + Optical Network (iPOP2018)</b><br><a href="https://www.pilab.jp/ipop2018/">https://www.pilab.jp/ipop2018/</a> | 開催日：2018/5/31・6/1<br>会場：NICT本部                | ネットワークインフラ技術に関する展示(ネットワークシステム研究所)。  |           |
| <b>第8回 CiNet シンポジウム</b><br><a href="https://www.cinet.jp/nict180627/">https://www.cinet.jp/nict180627/</a><br>※4月末アップ予定                                | 開催日：2018/6/27<br>会場：ナレッジキャピタル コングレコンベンションセンター | CiNetの研究成果を紹介するシンポジウム。アンドロイドで有名な石黒浩特別研究員ほかが登壇予定(脳情報通信融合研究センター)。                                     |           |
| <b>周波数資源開発シンポジウム2018</b><br><a href="http://www2.nict.go.jp/wireless/event.html">http://www2.nict.go.jp/wireless/event.html</a>                        | 開催日：2018/7/6<br>会場：明治記念館                      | 将来の周波数有効利用・電波利用の促進を目的に、最新の無線技術について専門家から技術、政策、市場動向等を紹介(ワイヤレスネットワーク総合研究センター) ※NICT及び一般社団法人電波産業会による共催。 |           |
| <b>国際フロンティア産業メッセ2018</b><br><a href="https://www.kobemesse.com/">https://www.kobemesse.com/</a>  | 開催日：2018/9/6・7<br>会場：神戸国際展示場                  | 未来ICT研究所(神戸)の紹介と研究成果を出展予定(未来ICT研究所)。  |           |
| <b>国際福祉機器展 (H.C.R.2018)</b><br><a href="https://www.hcr.or.jp/">https://www.hcr.or.jp/</a>   | 開催日：2018/10/10～12<br>会場：東京ビッグサイト              | 情報バリアフリー事業「チャレンジド向け通信・放送役務提供・開発推進助成金」の事業成果と「Wi-SUN」や「こえとら」等を出展予定(デプロイメント推進部門)。                      |           |
| <b>nano tech 2019</b><br><a href="http://www.nanotechexpo.jp/">http://www.nanotechexpo.jp/</a>   | 開催日：2019/1/30～2/1<br>会場：東京ビッグサイト              | 未来ICT研究所を主として、研究成果応用展開や技術移転の出展を予定(未来ICT研究所)。  |           |



# NICT オープンハウス2018 in 小金井

6月29日(金) 9:30~17:00  
 6月30日(土) 9:30~16:30

入場無料、事前申込不要（一部除く）

## ■6月29日(金)【午前】

### 特別講演 ほかむらひとし 外村 仁氏

Scrum Ventures Partner/ First Compass Group,  
 General Partner/ 前 Evernote Japan 会長

研究者講演【午後】 NICTの研究  
 者が最新の研究成果について講演

## ■6月29日(金)・30日(土)

技術展示 最新の研究成果につ  
 いてのデモ・パネル展示

ラボツアー 研究施設見学による  
 最新の研究活動のご紹介※事前申込制

■研究者講演、技術展示、ラボツアー、サイエ  
 ンストーク、ポスターセッションを通して NICT  
 の研究開発成果や事業内容を紹介する「NICT  
 オープンハウス 2018 in 小金井」を開催いたし  
 ます。昨年までの「秋開催」から「6月末の金・  
 土開催」に変更し、ご来場いただきやすくなり  
 ました。皆様のご来場をお待ちしております。

会場：情報通信研究機構本部 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1 詳細は <http://www.nict.go.jp/open-house2018/>

## 2018年度の施設一般公開予定

(夏休み特別公開)

### こども公開デー2018

NICT 本部(小金井)で開催する毎年恒例の夏休みイベ  
 ント！新企画も多数ご用意して、お待ちしております。

日時：2018年 **7/23(月)・24(火)**

9:30~17:00 (入場は16:30まで)

会場：NICT (国立研究開発法人情報通信研究機構)  
 東京都小金井市貫井北町4-2-1



2017年度の様子



詳細は <http://www.nict.go.jp/summer-event2018/>

## 各施設のオープンハウス2018

2018年度の施設公開は以下の  
 日程を予定しております。この  
 機会に最新の研究成果をぜひ、  
 ご体験ください。



| 施設名 (所在地)  | 開催日 (予定)             |
|--|----------------------|
| 未来ICT研究所<br>(兵庫県神戸市西区)                                     | 7/28 (土)             |
| 鹿島宇宙技術センター<br>(茨城県鹿嶋市)                                     | 7/28 (土)             |
| 耐災害ICT研究センター<br>(宮城県仙台市)                                   | 10/6 (土)・<br>7 (日)   |
| ユニバーサルコミュニケーション研究所<br>(京都府相楽郡精華町)<br>※けいはんな情報通信フェアの一部として実施 | 10/25 (木)<br>~27 (土) |
| 沖縄電磁波技術センター<br>(沖縄県国頭郡恩納村)                                 | 11/23 (金・祝)          |