

電波・光・音波を利用した大気のリモートセンシング

生存圏研究所 大気圏精測診断分野
橋口 浩之、矢吹 正教

1. はじめに

電波（電磁波）は、テレビ、ラジオ、スマホ（携帯電話）、WiFi、カーナビ（GPS）、あるいは電子レンジなど広範囲に利用されており、私たちの生活になくてはならないものになっています。電波の種類は周波数で識別され、例えば、携帯電話では約 800MHz、1.5GHz などの周波数の電波が使われています。光も電磁波の一種ですが、慣習的に波長で識別されます。波長と周波数は逆数の関係になっていて、光速（秒速約 30 万 km）を周波数で割れば波長が求まります。可視光の波長はおおよそ $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 、それより短い光は紫外線、長い光は赤外線と呼ばれます。電波と光の明確な境界はありませんが、電波法では周波数 3THz（波長 $100 \mu\text{m}$ ）までを電波としています。¹

電磁波は情報通信の分野で広く使われていますが、その際、伝搬路となるのが大気です。電磁波と大気との間で起こる様々な物理現象を用いて、多くの大気のリモートセンシング手法が開発されています。大気自体が放射している電磁波を検出すれば、気温や組成など様々な大気情報を得ることができます。例えば、地上に設置したマイクロ波放射計を上空に向けて大気からの特定の周波数の電磁波を受けると水蒸気を測定できます。また、衛星搭載の赤外・マイクロ波放射計では気温や水蒸気の全球分布を測定できます。このように自然界の電磁波を用いた手法は受動型リモートセンシングと呼ばれます。一方、人工的に電磁波を発射して大気を計測する手法は、能動型リモートセンシングと呼ばれ、電波が大気中で散乱・反射される現象を利用したレーダーがその典型です。また、GNSS（全球測位衛星システム）衛星から発射される電波が大気中で伝搬遅延あるいは屈折することを活用した大気計測法も開発されています。

電波を利用したリモートセンシングの代表がレーダー（RADAR: Radio Detection And Ranging）です。レーダーと聞くと、飛行機の探索や自動車の衝突防止などのための装置という印象が強いかと思いますが、大気中の様々な現象を観測するためのレーダーも実用されています。ここでは、電波のほか、光や音波を利用して大気（気象）を観測するリモートセンシング装置の概要と観測例について紹介します。気象庁のアメダスのように、地上気象観測はそのほとんどが直接観測により行われています。一方、上空の高層気象を直接観測するには、センサーを飛行機やヘリウムを詰めた気球に付けて飛ばすなど手間やコストがかかるので、地上からのリモートセンシングが有力な観測手段になります。

2. 電波による大気リモートセンシング

気象観測で一般に用いられるレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットから散乱されるエコーを受信し、ターゲットの位置や特性（大きさ、移動速度など）を測定します。雨滴が電波の散乱体となるのはよく知られていますが、降雨がない時にも大気の乱れ（乱流）による屈折率の微細変動により電波はわずかに散乱されます。雨滴をターゲットとするレーダーは気象レーダー、乱流をターゲットとするレーダーは大気レーダー（あるいはウィンドプロファイラー）と呼ばれます。ここでは、主に大気レーダーについて紹介します。

大気温度と風速構造が一定の条件を満たせば大気不安定状態が起こり、乱流が生成されることが知られており、乱流は大気密度の変動としても現れます。電波の屈折率は大気密度と水蒸気密度で決まり、乱流により大気密度変動が起こると、屈折率も変動します。これが電波散乱に寄与しますが、テレビ放送や携帯電話通信には影響を与えないほど、散乱はごく僅かです。散乱の度合いは雨滴などに比べても大変微弱なので、この種のレーダーでは増幅作用が必要です。

ブラッグの回折格子は良く知られていますが、これは光の波長の半分の間隔で格子を刻んだものです。光の半波長に対応する格子構造が散乱した波を同じ位相に揃えて足し合わせることで強い散乱が起こります。電波が大気乱流によって散乱する時にも同様のことが起こります。一見乱雑に見える乱流も、波長成分に分解すれば規則的な構造の重ね合わせと捉えることができます。乱流のうち、ブラッグの共鳴条件を満たすようなレーダー電波を使うと、効率的な電波散乱を起こします。対流圏および成層圏では数 cm から数 10m の大きさ（スケール）の乱流渦が連続的に存在するとされています。すなわち、大気レーダーに使用できる電波波長にも広い選択肢があり、数 MHz から数 GHz までのどんな周波数を使っても、対応する乱流渦が存在するので、レーダーエコーが期待できます。しかし、国際的な電波利用の取り決めにより、大気レーダーの周波数には 50MHz、400MHz、900MHz、あるいは 1.3GHz 帯が用いられています。成層圏より上の中間圏では小スケールの乱流渦が存在しなくなりますので、中間圏まで観測するレーダーでは 50MHz 帯のみが使われます。

大気乱流は背景の大気の流れと一緒に動くので、乱流エコーのドップラー周波数を計測すれば、レーダービーム方向の視線風速成分を知ることができます。音波のドップラー効果は、近づいて来る救急車のサイレンは高く聞こえ、遠ざかる場合は低く聞こえるなど、日常生活でも体感できます。電波でも同様に、移動している物体に電波を当てると反射された電波の周波数は、その速度に応じて発射した周波数からずれます。この周波数のずれ（ドップラーシフト）は物体の速度に比例するため、ずれを測定することで速度を知ることができるのです。図 1 に示すように、大気レーダーでは、一般にアンテナビームを鉛直方向と東西および南北面内で天頂角が 10 度程度の斜め 4 方向に走査して、各視線風速を測定します。アンテナビームを走査する空間内（例えば、高度 5km ではおよそ直径 2km の円内）で風速が一様であると仮定すれば、5 つのビームから得られた視線風速成分から風速の 3 成分（東西風、南北風、鉛直流）が求められます。一般に鉛直流は水平風速に比べて 1 桁以上小さく測定が困難な量です。例えば、気球観測では気球自体が浮力により上昇するので、鉛直流を測定することは原理的に困難ですが、大気レーダーでは鉛直上方にアンテナを向けることで、鉛直流を 0.1m/s 程度の高精度で測定できる特長があります。

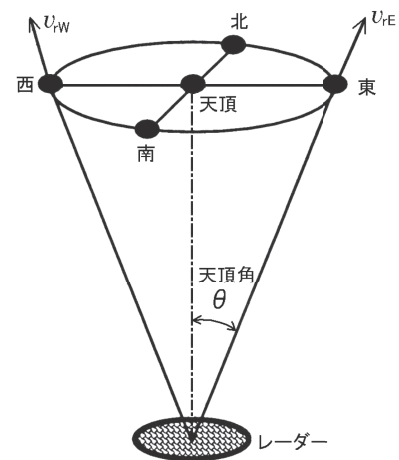


図 1: ウィンドプロファイラーのビーム走査例（深尾と濱津, 2005）

MU レーダー

レーダーには多種多様なシステム構成がありますが、もっとも一般的なレーダーは、短いパルス状の電波を送信し、ターゲットで散乱され戻ってくるエコーを受信して、散乱体までの距離や散乱体の特性（大きさ、移動速度等）を測定する方式を取っています。この場合、アンテナを送信と受信に共用するので、モノスタティック・パルス・レーダーと呼ばれます。「モノ (mono)」は単一を意味します。

気象レーダーや大気レーダーに使われるアンテナは、一枚の大きなパラボラアンテナを用いたものか、線状のアンテナ素子を多数並べたフェーズドアレイアンテナが主です。パラボラアンテナはその名前の通り反射面が放物面になっており、その焦点に置かれた一次放射器からの電波を反射して、指向性のあ

る電波を放射します。パラボラアンテナではモーターを使い機械的にアンテナ全体を駆動することでビーム方向を変えます。一方、アレイアンテナは多くの八木アンテナなどを用いて大型のアンテナを構成しますが、アンテナ自体は固定されています。それぞれの素子から放射される電波を少しずつ遅らせて、各アンテナから発射された電波を空間で合成して、特定の方向に電波を集中させます。大気レーダーとしては、多数の八木アンテナを2次元に配置したアクティブ・フェーズドアレイアンテナが、我々のグループが1984年に滋賀県甲賀市信楽町に建設したMUレーダー（Middle and Upper atmosphere radar）で初めて採用されました。フェーズドアレイアンテナは電子的にビーム方向を走査できますので、パラボラアンテナに比べて、非常に高速に観測方向を変更できる特長があります。特に大型のアンテナではその差が顕著になります。

MUレーダー（図2）では、直径約100mの円形凹地に八木アンテナ475本を設置しており、送受信周波数は46.5MHz、すなわち波長約6.5mです。MUレーダーの最大の特長は、475本の八木アンテナそれぞれを小型半導体送受信モジュールで励振する分散型送受信方式を採用していることです。1台の小型送受信機の送信電力は2.4kWで、475台の小型送受信機を同時に働かせることにより合計1MWの大電力を送信することができます。またレーダーシステム全体がマイクロコンピュータを用いてソフトウェアにより制御される柔軟な構成となっており、その結果各アンテナについて送受信信号の自由な位相制御が可能となり、アンテナビーム方向をパルス送信毎すなわち最高1秒間に2500回という高速で走査できます。また、MUレーダーのアンテナは25個の小アンテナ群に分割して、それぞれ独立な小型レーダーとして動作させることができるなど、様々な新しい観測手法の実験に使うことができます。

図3に台風通過時にMUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例を示します。通常ラジオゾンデ観測では6～12時間毎にデータが得られるのに比べて、大気レーダーの時間分解能が格段に優れていることが分かります。大気レーダーは地上に固定設置されるため、上空を移動していく大気現象を時間的に連続に観測することになります。つまり大気レーダーで得られるのは、上空の高さ・時間の2次元データになります。近似的に大気現象の空間構造が観測時間内で大きく変わらないとすれば、現象が西から東に移動することを利用して、時間変化を水平変化に置き換え、その高度・水平距離断面の構造を推定できます。すなわち、図3の例であれば、図の左側を東、右側を西と考えて、擬似的に台風の高度・東西断面を表していると考えられます。

気象庁は、北海道から沖縄県までの全国33ヶ所に1.3GHz帯大気レーダーを配置した「局地的気象監視システム Wind Profiler Network and Data Acquisition System (WINDAS)」を運用しています。手前味噌ですが、これには我々のMUレーダーで培ってきた技術が大いに活かされています。

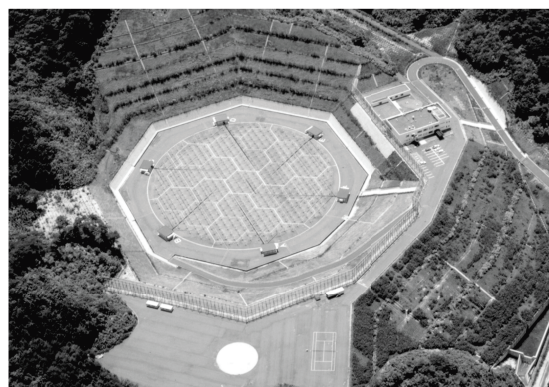


図2: MUレーダー。中央の円形の部分が475本の八木アンテナから構成されるフェーズドアレイアンテナ（直径103m）

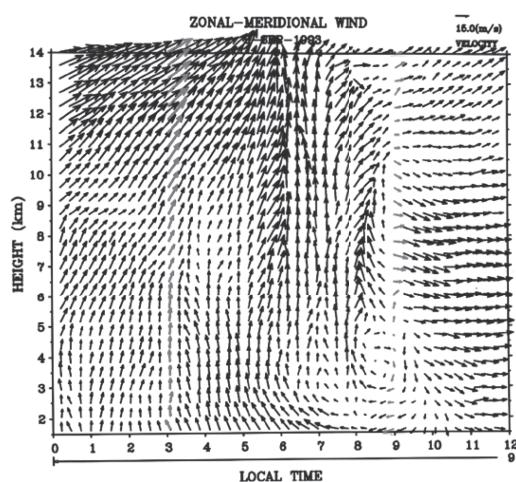


図3: MUレーダーで観測された水平風の時間高度変化の例

3. 光による大気リモートセンシング

レーザーを光源とするレーダーは、レーザーレーダーあるいはライダー（LIDAR: Light Detection And Ranging）と呼ばれ、近年それを大気計測に応用する研究開発が急速に進んでいます。レーダーは一般に同一のアンテナで送・受信を行いますが、ライダーは光源としてのレーザーと散乱された光を集める望遠鏡でそれぞれ送・受信を行い、これらに集光された光の強度または光子数を計測する受光・分光装置で構成されます。パルスレーザー光を射出して、その後方散乱光が戻ってくるまでの時間から距離を、散乱光強度や周波数変化から測定対象の分布や移動速度を計測します。測定対象は、エアロゾルや雲、オゾンや二酸化窒素などの微量気体成分、気温・水蒸気・風などの気象要素など多岐に渡ります。時空間的な変動が大きい大気環境をモニタリングする上で、ライダーは有効な計測手法の一つです。

エアロゾル (aerosol) は、「aero (空気の)」と「sol (媒質中に固体または液体が分散しているコロイド系)」を組み合わせた言葉です。すなわち、エアロゾルの定義は気体中に浮遊する固体もしくは液体の粒子で、私たちの身の回りにたくさん存在しています。例えば、タバコの煙、海の波飛沫、土埃、火山の噴煙、車から排出される煤塵、花粉など、すべてエアロゾルです。大気中に浮遊するエアロゾル濃度は、場所によって大きく異なり、都市域では 1 cm^3 あたり数万個以上にもなりますが、南極のように非常に清浄な地域では 100 個以下です。エアロゾルは、工場や自動車などの人間活動がもとになって排出された「人為起源」のもの、森林や土壌、海水など自然界から放出された「自然起源」のものとに大別されます。一般的に、人為起源のエアロゾルはサイズが小さく、自然起源のそれは大きい傾向があります。微小粒子ほど体の奥まで取り込まれやすいため、健康影響の面からも重要視されており、2009 年にはサイズが $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子の重量濃度で定義される PM2.5 について、環境基準が新たに設けられました。

数 nm から約 $10 \mu\text{m}$ にわたる広い粒径範囲を取るエアロゾルの光学特性は、ミー散乱理論が適用できます。粒径 $10 \sim 100 \text{ nm}$ を最大とする一般的なエアロゾル粒子数濃度の分布（粒径分布）を考慮すると、光の波長領域におけるミー散乱の強度は波長におおよそ反比例します。一方、窒素、酸素など空気分子 1 個の大きさは、光の波長に比べても非常に小さく 1 nm 以下であり、このような粒子の光散乱はレイリー散乱と呼ばれ、その強さが波長の 4 乗に反比例します。それに対して、エアロゾル粒子の波長に対する強度差は、かなり小さいと言えます。そのため、太陽光に対するエアロゾルの散乱では、色ごとの明瞭な違いが表れず、白っぽく見えることとなります。この特徴は、2000m を超えるような標高の高い山で見る青空と、都会で見る青空の色の違いにも反映されています。高山では、透き通った深い青色、空気分子のレイリー散乱による「理想的な青空」となります。一方、大気汚染物質が多く浮遊する都市域で見る空は、空気分子によるレイリー散乱に、エアロゾルによるミー散乱の効果が加わった色となり、白みがあった青色の空となります。

信楽 MU 観測所には、レイリー・ミー散乱を計測する多波長偏光ライダーが設置されています。このライダーシステムにより、エアロゾル後方散乱信号を数 m おきに、高度約 1 km 以下では数秒、 10 km 以下では 1 分程度の時間分解能で取得できます。何故、多波長なのかというと、粒子特性によって散乱される光の波長（色）ごとの強度が変わる特徴を計測に利用するためです。人工的に光の波長を制御したレーザー光を何種類か使用して、その波長ごとの散乱特性の違いを検出すると、粒子サイズなどの情報を抽出できるようになります。また、レーザーから出た光は電場（および磁場）の振動方向が一定の直線偏光をしています。球形粒子からの後方散乱光の偏光成分は変わらないですが、非球形粒子では入射光と後方散乱光の偏光特性に違いが表れます。そのため、多波長と偏光を組み合わせたライダーは、エアロゾル成分や雲相（水雲・氷晶雲・混合相雲）の計測に広く利用されています。また、レーザーの入射波長と散乱波長が異なる水蒸気分子や窒素分子のラマン散乱を検出すると、水蒸気濃度や気温の空間分布の計測が可能となります。これら物質の空間的な広がりを把握するために、ライダーの観測視野

方向を自動制御できる走査型ライダーも開発しています(図4)。

一方、オゾンのような微量気体は、窒素や酸素に比べて非常に少ないため、その散乱の計測のみから濃度を求めることはできません。そこで、特定の光の波長のみを吸収する微量気体の特性を利用します。例えば、オゾンは波長 250 nm を中心とする紫外域で強い吸収を示します。効率良く光を吸収する波長

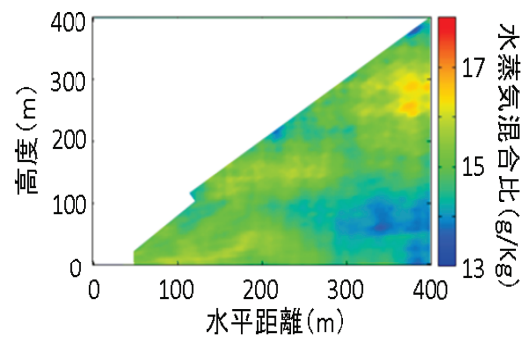


図4: (左) 走査型水蒸気ラマンライダーシステムの外観、(右) ライダーで取得された水蒸気混合比の鉛直断面図(信楽MU観測所 2012年8月28日22時17分)

と、吸収しない波長の2波長の光源を用いて同時に信号を取得し、その差分を取ると、オゾンによる光吸収の情報が抽出できます。分子1個あたりの光吸収(吸収断面積)は理論的に求まるため、それらの情報からオゾン濃度の分布を推定できます。

ライダーの応用範囲は非常に広いですが、原理上の弱点もあります。まず、光を用いているため、大きく散乱するものがあるとその先が見えません。つまり、厚い雲があると、その先が計測できなくなります。さらに太陽光がノイズ源となるため、日中の観測精度が落ちるという課題もあります。そのため、最近では、太陽光の影響が少ない紫外領域や近赤外域を光源とするライダーも多く開発されています。また、得られた信号からエアロゾルの情報のみを抽出しようとする、空気分子の散乱に埋もれない程度の粒子による散乱強度が必要となります。一般的に、ライダーで検出できる粒子サイズは、サブミクロン以上(0.1 μm 以上)と言われており、それ以下のナノ粒子サイズの定量的な計測は難しいです。そこで、ライダーだけでなく、雲中まで計測できるレーダーやタワー・気球を利用した直接計測など、様々な計測手法を組み合わせた複合観測から、大気微量物質の動態や気象要素の空間変動を総合的に把握する取り組みが進められています。

4. 音波による大気リモートセンシング

気温の高度プロファイルを測るには一般にラジオゾンデ気球が用いられます。しかし、放球から観測終了まで1~2時間かかるので、いわゆるゲリラ豪雨など変動の激しい気象現象を捉えるには時間分解能が不十分です。大気レーダーと音波発射システムを併用したラス(RASS: Radio Acoustic Sounding System)では、高時間分解能で気温を連続観測できます。ラスでは、音波を上空に発射して屈折率変動を人工的に作り、そこからの散乱電波を大気レーダーで検出します(図5)。そのエコーのドップラー周波数から音速を求めます。さらに、音速が気温の二乗に比例する関係を用いて気温を測定します。

乱流エコーと同様、ラスでもブラッグ条件が重要で、レーダーの送信電波の波長と、音波による屈折率変動の周期構造の間でブラッグ条件が満たされる必要があります。自然界の乱流は様々な大きさの乱流渦の重ね合わせなので必ずレーダー半波長に合うものが存在し、さらに乱流は3次元等方的なのでどの方向にビームを向けても電波散乱が期待できま

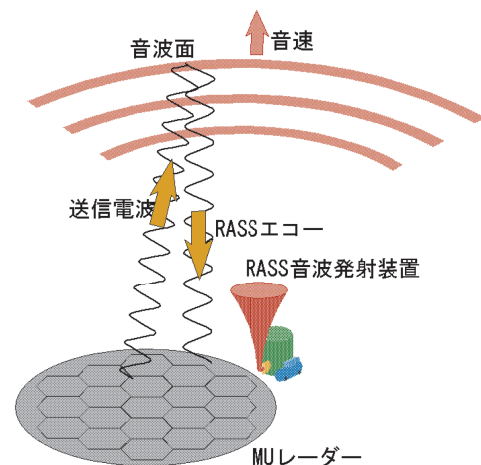


図5: ラスの原理

す。一方、ラスでは音波の周波数の選択と音波面の形状が鍵となります。ラスに関するブラック条件は、レーダービームが音波面に垂直に入射すること（直交条件）と、屈折率変動を作る音波波長がレーダー波長の半分になること（共鳴条件）の両方を満たす必要があります。音波は風の影響を受けるので、直交条件を満たすためには音源を風上側に設置し、アンテナビームを風上方向に適切に向ける必要があります。MU レーダーはアンテナビーム方向を自在に走査できますので、風による音波面の変化に追従して、直交条件を満たすようにアンテナビームを向け、広い高度範囲で RASS エコーを検出できます。共鳴条件について、対流圏では高度とともに気温が低下し、音速も遅くなるため、単一周波数の音波では、波長が高度とともに短くなり、共鳴条件は特定の高度でしか満たしません。そこで、適切な音域で周波数を変化させてこれを解決します。ここで、レーダーで測定される音速は対地速度であることに注意が必要で、測定された音速から背景風の成分を補正しなければいけません。背景風を補正して求めた気温精度は 0.5 度程度で、ラジオゾンデと同等かそれ以上とされています。このような高精度な気温プロファイルが 150m 程度の高度分解能で時間間隔 1～2 分で連続的に得られます。

一方、音波のみで大気を観測する装置として、ソーダー (SODAR: Sonic Detection And Ranging) が実用されています。使用する媒体に音波と電波の違いはありますが、測定原理は大気レーダーと基本的に同じで、上空の風の鉛直分布を測定します。1kHz 程度の音波パルスが大気中に発信し、大気の屈折率の乱れによって散乱されて戻ってくる音波を受信します。受信した音波は風によるドップラー効果により周波数が偏移するので、それを元に風を算出します。大気による音波の減衰が比較的大きいことから高高度の観測には向きませんが、逆に大型のレーダーが不得意な地表面近くからの観測が可能であるという特長があります。

5. おわりに

電波、光、音波を利用して大気を観測するリモートセンシング技術について紹介しました。MU レーダーの成果を背景に、我々はインドネシア共和国西スマトラの赤道直下に赤道大気レーダー (Equatorial Atmosphere Radar: EAR) を建設しました。EAR も MU レーダーと同様、直径 110m の円形敷地内に 560 本の八木アンテナを配置し、各アンテナに半導体送受信モジュールを備えたアクティブ・フェーズドアレイ方式を採用しています。送信出力は 100kW で、MU レーダーに比べて感度は 1/10 ですが、高度約 20km までの赤道大気の連続観測が可能です。EAR を MU レーダー並に高感度化する赤道 MU レーダー計画もあります。これまでに培ってきた知見や新しい計測技術を活用して、地球大気環境の変化を精密かつ多角的・長期的に把握し診断していくことは、持続発展可能な社会の実現において重要であると考えます。

注

- 1 n (ナノ): 10 の -9 乗、 μ (マイクロ): 10 の -6 乗、m (ミリ): 10 の -3 乗、k (キロ): 10 の 3 乗、M (メガ): 10 の 6 乗、G (ギガ): 10 の 9 乗、T (テラ): 10 の 12 乗

参考文献

- 深尾昌一郎・濱津享助, 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, 491 頁, 2005.
石原正仁・津田敏隆, 最先端の気象観測 (新しい気象技術と気象学), 東京堂出版, 176 頁, 2012.
MU レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/mu/>
赤道大気レーダーのホームページ <http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/ear/>
気象庁 WINDAS のホームページ <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/windpro/kaisetsu.html>