

# 気象大気研究部



## 研究テーマ・キーワード

- 先進的な偏波レーダや雲粒子ゾンデ観測を用いた雲降水観測
- 最先端の気象レーダ等の観測装置の基礎技術の開発研究
- 様々な地球観測衛星を横断的に活用した対流圏および雲降水観測データ解析
- ミリ波・赤外光の精密な分光観測による温室効果気体・オゾン等の微量気体の計測
- 先端計測装置を用いる大気観測や室内実験に基づくエアロゾルの性状・動態の解析

私たちの住む地球は、豊かな自然を湛え多様な生命で満ちあふれる太陽系唯一の惑星である。この稀有の環境をもたらした条件の一つとして、地球を包み込む大気役割は計り知れない。大気中の酸素が無数の生物の繁栄を可能としたことはもちろん、水蒸気や二酸化炭素など温室効果気体の存在が今日の温暖な気候を維持し、水蒸気はさらに雲や降水へ変化することで暮らしに不可欠な水の恵みを与えてくれる。また、成層圏のオゾンは太陽から届く有害な紫外線から地表の生物を守っている。

しかし、このような大気の成り立ちは、微妙な均衡の上に支えられている。温室効果気体の増加に伴い進行する地球温暖化は、ゆるやかな気候の変化にとどまらず気象の極端化や生態系の激変を招く。様々な観測手段を用いて大気の状態を注意深く監視し、さらに理論的考察や数値モデルの活用を通じて大気や気象の成り立ちをより深く理解することは、地球環境問題に対峙する私たちに課せられた喫緊の課題の一つである。

気象大気研究部は、広範な切り口から大気科学研究を推進している。ミリ波帯電波や赤外光の精密な分光観測による温室効果気体やオゾン層破壊関連物質などの微量気体の計測、先進的な偏波レーダや雲粒子ゾンデ観測を用いた雲降水観測、エアロゾル質量分析法などの先端的手法を用いた大気エアロゾルの特性や動態の解析など、様々な測器を活用した多角的な大気観測を精力的に行うとともに、観測装置の基礎技術の開発研究も手掛けている。また、様々な地球観測衛星を用いて熱帯大気力学の未解決問題に挑む観測データ解析に取り組んでおり、数値シミュレーションによる気象学研究の実績を踏まえ観測データと数値モデルの連携にも力を入れている。

## 2018年度の主な活動

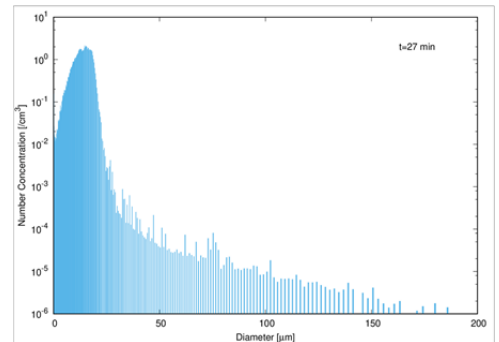
### Ka 帯レーダで検出されなかった層積雲内部の雲粒粒径分布の特徴

Ka 帯レーダは短い波長の電波を用いることで小さな雲粒を観測することが可能であるが、しばしば目視で確認可能な積雲や層積雲を検出できない場合がある。雲粒子ゾンデと CPS による雲粒の直接観測との比較を行うことで、Ka 帯レーダで検出されない層積雲内部の雲粒粒径分布の特徴を示すことが可能となる。2017 年梅雨期に、Ka 帯レーダを琉球大学瀬底研究施設に設置して連続観測を行った。6 月 10 日 19 時 16 分に、レーダの観測範囲内に位置する八重岳（標高 453 m）の山頂付近から雲粒子ゾンデと CPS を連結したものを雲底高度 400 m、雲頂高度 700 m の層積雲に放球した。雲粒子ゾンデの観測から、層積雲の下層から中層での雲粒の体積平均直径と最大直径はそれぞれ  $17.5 \mu\text{m}$  と  $30.6 \mu\text{m}$  で、雲粒数濃度はおよそ  $100 \text{ cm}^{-3}$  であった。このとき、Ka 帯レーダではこの層積雲に対応するエコーを検出できなかった。雲粒子ゾンデの観測から得られた粒径分布に基づいて反射強度を見積もったところ  $-23.8 \text{ dBZ}$  となった。レーダからの距離や大気減衰などによる減衰を考慮すると、推定された反射強度の

値は観測下限値 (-16.6 dBZ) を下回っていたため、このような層積雲を Ka 帯レーダで検出できないことを確認した。さらに粒径分布の形状が変わらないと仮定した場合、体積平均粒径が  $23.8 \mu\text{m}$  以上となった場合に、同じ条件でファーストエコーとして検出できることを確認した。

### 超水滴法を用いて推定されるファーストエコーの粒径分布

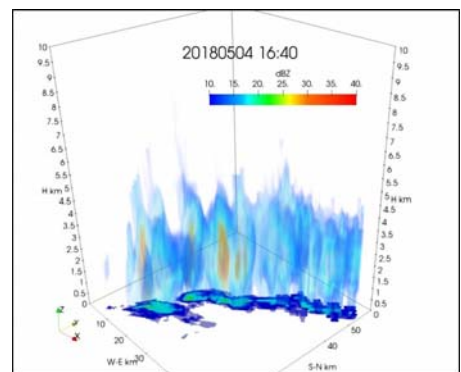
Ka 帯レーダでファーストエコーを検出することで、積乱雲の発生・発達をより早期に検出することが可能である。しかしながら、積乱雲のファーストエコー内部の粒径分布を直接観測することは困難である。そこで、エアロゾルから雲粒、雨粒への発達過程（凝結核化過程・雲粒の凝結過程・併合過程）をラグランジュ的に追跡することで、精緻な雲物理過程の再現を行うことのできる超水滴法（Super Droplet Method, CReSS-SDM）を用いて、積雲発達過程における粒径分布の変化を追跡した。再現実験では、発生初期の層積雲での平均粒径分布が小さ過ぎるという問題点があったものの、積雲の発達とともに併合過程により雨粒（粒径  $100 \mu\text{m}$  以上）が形成され、 $200 \mu\text{m}$  以上の雨滴が形成されることで、Ka 帯レーダのファーストエコーが検出されることが示された。この時の体積平均粒径は、沖縄で観測された値 ( $17.5 \mu\text{m}$ ) よりも小さな値 ( $13.3 \mu\text{m}$ ) であり、雨滴の併合過程がファーストエコーの形成に大きく寄与することを示した。



超水滴法により計算された Ka 帯レーダによるファーストエコー検出時の粒径分布。横軸は粒径 ( $\mu\text{m}$ )、縦軸は数濃度。

### MP-PAWR による新たな降水観測

内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「レジリエントな防災減災機能の強化」において、二重偏波マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ (MP-PAWR) を情報通信研究機構や首都大学東京、東芝と協力して開発した。MP-PAWR は従来の気象レーダに比べて約 10 倍高速に、約 10 倍の鉛直分解能でデータを提供できるため、ゲリラ豪雨や竜巻といった変化の激しい現象に対して有効であり、今後の活用が期待される。MP-PAWR による観測を 2018 年 3 月から開始し、様々な降水現象の新たな一面を明らかにすることに成功している。積乱雲内での降水の形成から落下し、地上に降水をもたらす様子を明らかにし、それに伴う降水粒子の大きさの変化も捉えている。また上空 5 km 以上にのみ存在する降水雲の立体構造を明らかにし、その内部の力学的特徴や降水粒子のサイズの変化を捉えた。ドップラーレーダから風速場を推定する手法 (VAD 法) も MP-PAWR のデータを用いることにより風速のみならず、発散や変形の鉛直プロファイルについても定量的に推定することが可能になった。



MP-PAWR が観測した降水の 3 次元構造と地上付近の降水パターン。

### 熱帯亜熱帯境界における大気の熱力学的動態の解明

低緯度大気における鉛直積算水蒸気量の頻度分布は、熱帯湿潤域と亜熱帯乾燥域のはざまに当たる約  $48 \text{ mm}$  の極小値を挟んで二極構造を持つことが知られる。熱帯と亜熱帯を分かつこの「 $48 \text{ mm}$  境界」付近で水蒸気量がしばしば特異な変動を示すことが、最近の観測研究から分かってきた。本研究では熱帯亜熱帯境界における水蒸気の動態解明が熱帯気候場の形成機構の理解に新たな進展をもたらすと考え、水収支・エネルギー収支解析を大気力学場診断に活用する独自手法を衛星観測データに適用した。まず Aqua 衛星搭載マイクロ波放射計 AMSR-E から  $48 \text{ mm}$  境界を同定し、その熱帯側・亜熱帯側に広がる雲構造と放射加熱の実態を CloudSat・CALIPSO 両衛星の雲レーダ・ライダー観測データを用いて明らかにした。また Aqua 衛星赤外サウンダ AIRS から得られる気温・湿度データを組

み合わせて水・エネルギー収支解析を実施し、48 mm 境界を挟んで大気の大熱力学的状態が定性的に変化することを突き止めた。一方、熱帯・亜熱帯大気の大熱力学場を簡略化し表現する概念数理モデルを構築し、観測から示唆される 48 mm 境界付近の水蒸気動態を理論的に説明する道筋を示した。この成果は、既存の静的な気候区分に代わり、日々ゆらぐ気象場と密接に連動する動的な熱帯・亜熱帯という新たな描像を提示するものである。

### 南米パタゴニア地域における中層大気オゾン観測

2013 年よりアルゼンチン、チリおよび国内の国立環境研究所との共同研究プロジェクト「南米における大気環境リスク管理システムの開発 (SAVER-Net プロジェクト)」を 5 年間にわたり進めてきた。プロジェクトは 2018 年 3 月末で終了したが、プロジェクト期間中に整備した南米南端部のオゾン層観測施設とアルゼンチン・チリに広域展開した 9 台の多波長エアロゾルライダー網を使った共同研究は継続的に進めている。今年度は 2015 年から 2017 年にかけて南米南端部のリオガジェゴスで取得したミリ波分光データのリトリーバル解析を進めた。オゾンホールが到来する 9 月および 10 月について MERRA-2 気象場再解析データから導出した温位、渦位、気温等と高度毎のオゾン混合比を比較し、温位 1000 K (高度~35 km) 以下では、渦位の絶対値とオゾン混合比の相関が高く、またオゾンホールの到来に伴い、高度~25 km では極渦空気塊の移流に伴い気温の減少、高度~35 km 以上では極渦の下降流に伴う気温上昇がみられること等を明らかにし、極渦の絶対値と気温で簡便にオゾンホール内に入ったかどうかの識別が可能であることを示した。

### 極域における中間圏大気組成変動観測

極域では太陽や放射線帯から高エネルギー荷電粒子が磁力線に沿って侵入し、大気分子を電離・解離し組成変動を引き起こす。この影響を定量し、メカニズムを理解するために、国立極地研究所と共同で南極昭和基地にミリ波分光観測装置を設置し、2012 年 1 月より中間圏および下部熱圏の一酸化窒素 (NO) のモニタリング観測を行っている。高エネルギー粒子の降りこみに伴い NO が数日間増加する短期イベントに加え、極夜期に数ヶ月のタイムスケールで NO が増加する季節変動が観測されているが、2014 年の季節変動振幅が他の年に比べ顕著に低く、同時期に Van Allen Probes で観測された MeV 電子のフラックスが極端に低く、両者の時間変化に良い相関があることを明らかにした。これは MeV 以上の高エネルギー電子が短期イベントだけでなく数ヶ月以上の長期的な組成変化にも影響を及ぼしていることを示している。北極域のノルウェー・トロムソに設置したミリ波分光計では、昨年度発生した FFT 分光計の不具合を解決し、2019 年 1 月から NO のモニタリング観測を開始した。また、2004 年以降の太陽陽子イベント (SPE) 時の AURA/MLS のオゾン混合比データと GOES、POES で観測された陽子フラックスとの関係の統計解析から、気圧 0.1 hPa (高度約 60 km) で SPE での最大陽子フラックスとオゾン減少率の最大値に相関があること、最大陽子フラックスが 1000 pfu を境界に最大陽子フラックスとオゾン減少率の最大値の関係に違いがみられること、等を明らかにした。

### 赤外分光器による温室効果ガス等の対流圏・成層圏大気微量成分の変動観測

陸別観測所において国立環境研究所の高分解能フーリエ赤外分光器 (FTIR) を用いた太陽光吸収スペクトル観測を継続した。観測スペクトルから  $O_3$ 、HCl、HF、 $HNO_3$ 、 $ClONO_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $N_2O$ 、CO、HCN、 $CCl_4$  のカラム全量および高度分布を得ている。今年度はさらに、森林火災や生物起源揮発性有機物 (BVOC) と関連する HCHO の高度分布解析を行った。観測された HCHO カラム量は夏期に極大となり、季節を通じて北半球中緯度の遠隔地での値に近いことが分かった。また、光スペクトラムアナライザ (OSA) を使った小型地上分光観測装置の開発と評価を進め、精度が検証された大型 FTIR と小型 OSA との同時観測から両装置の観測値に高い相関があり、小型装置で  $CO_2$ 、 $CH_4$  のカラム平均混合比 ( $XCO_2$ 、 $XCH_4$ ) の季節変動が観測できることを実証した。東京都心での 2 年間の小型 OSA による  $XCO_2$  観測から、東京都心の  $XCO_2$  は風向と相関し、南および南東風時に高く、北風で風速が大きい時には低いこと、風速が遅い時にも  $XCO_2$  が高くなる傾向を見出し、これらが火力発電所や交通量等の地勢、気塊の滞留に起因することを明らかにした。

## 広帯域・広ダイナミックレンジ次世代ミリ波帯大気分子観測装置の開発

現在ミリ波-テラヘルツ帯の技術開発は、情報通信分野や電波天文用観測装置などで急速に発展しており、我々はそのような新たな技術を宇宙地球環境研究所が運用する地球大気分子のミリ波観測装置に応用することで、検出器のさらなる高感度化・高精度化、観測周波数の広帯域化に取り組んでいる。今年度は、昭和基地で2019年末より開始予定の「オゾンを中心とした大気微量分子多輝線同時観測」のための新たな観測システムの開発を進めた。まず、従来の装置に比べて周波数に依存せず広帯域な特性を有する光学系を設計し、コルゲートホーンや伝送ミラーの製作および伝送特性の評価を実施し、概ね設計通りの良好な特性を確認した。また国立天文台先端技術センターとの共同開発研究を行っている超伝導検出器は、天文台のクリーンルームで製作された新たな200 GHz帯素子を実験室で評価した結果、周波数160-180 GHzにおいて雑音温度が約40 K（量子雑音限界のおよそ2倍）の非常に高い受信機感度が得られたことを確認できた。ただ、共振点が観測周波数から60-80 GHz程低周波にシフトしており、現在その改良を行っている。

## 気体置換法を応用するエアロゾル反応実験の手法の開発

大気中に存在するエアロゾルは、気相の酸化剤と反応して変質する（エイジングが進む）と考えられているが、この過程がエアロゾルの化学構造や雲凝結核活性などの性状にどのように作用しているのかは明らかになっていない。そこで、この解明に向けた大気エアロゾルの反応実験を行うべく、二重管構造を持つ流通式反応管とICP-MS用に実用化されている気体置換器を組み合わせた反応実験装置の開発を進めた。これまでの取り組みにおいて、流体解析により流通式反応管の気体の流れを計算し、反応実験で得られるデータの解析に必要な反応性気体（オゾン）の拡散やエアロゾル粒子の滞在時間に関する知見を得た。また、大気エアロゾルを気体置換器に通し、気体をアルゴンに置換した上でエアロゾル質量分析計に導入する実験を行い、気体とエアロゾル粒子のそれぞれに由来するイオンの信号の分離において、アルゴン置換の方法に優位性があることを示す結果を得た。今後、開発している実験装置の性能評価をさらに進めた上、大気エアロゾルを対象とする反応実験を行うことを計画している。

## 大気エアロゾルの粒径別吸湿性分布とその呼吸器沈着の関係の解析

大気汚染物質であるエアロゾルは、呼吸を通して人の体内に沈着することで健康に悪影響を及ぼすことが知られている。大気中には大きさや組成の異なる様々なエアロゾル粒子が存在し、それらがどの程度体内に沈着するのかは、大気エアロゾルの健康影響を定量的に明らかにする上で重要な要素と考えられる。そこで、過去に名古屋の都市大気を対象に行ったエアロゾルの粒径別吸湿性分布の測定で得たデータを用い、エアロゾルの乾燥粒径・吸湿性の分布とその呼吸器への沈着の関係について、呼吸器沈着モデルにより得られる沈着率をもとに解析を進めた。2010年7、8月のデータに続き、今年度は粒径別の吸湿性分布の測定回数がより多い2009年9月の大気観測で取得したデータを用いて解析を行い、当該観測期間に人が呼吸により大気エアロゾルを取り込んだ場合の呼吸器への沈着量の特徴を得た。観測期間中の沈着量の変化は、エアロゾルやその前駆物質の都市内の排出量の変動に加えて、気象条件に依存する輸送や変質過程の変動が影響していると考えられ、これらの沈着量に影響する要因との結びつきにまで踏み込んだ研究を今後進める予定である。

## ブラックカーボンエアロゾルの北極観測データの解析

温暖化が急速に進行している北極域において、温室効果気体に加え、ブラックカーボン（BC）のような光吸収性エアロゾルが及ぼす影響を明らかにする必要がある。本研究では、2018年3-4月のグリーンランド北端を拠点とした国際的な航空機観測において、東京大学が開発したレーザー誘起白熱法により取得された粒子信号データを用いて、北極域のBC濃度の高度分布や粒径・混合状態などの微物理量の解析を進めた。高度3.5 kmや高度5 km付近にBC高濃度の汚染大気層が広がっていることや、高度5 km以下の全高度においてBCが他の化学成分で厚く被覆されていることを明らかにした。また、北極域の複数地点で長期的に観測されている地表BC濃度のデータを用いて、北極域内のBCの時空間分布の解析を行った。現在、航空機や地上で観測されたこれらのBCの発生源・輸送過程の解析を進めている。