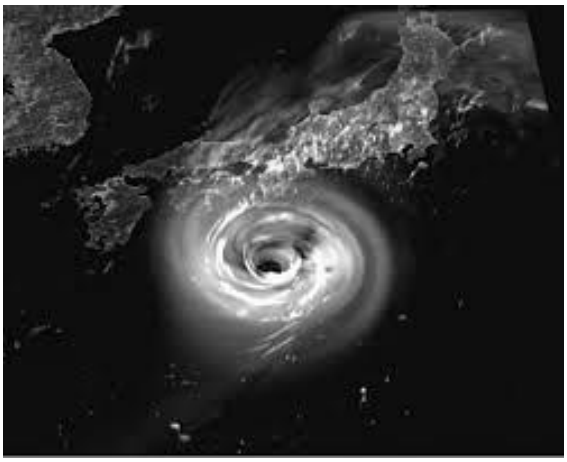
9-1. 基盤研究部門｜気象大気研究部



気象大気研究部の研究テーマ・キーワード

- 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
- レーザー・光学技術や室内実験に基づく大気微量成やエアロゾルの特性や反応過程の解析
- 観測装置の基礎技術の開発研究
- 数値気象モデル CReSS の開発および数値シミュレーションによる気象学研究
- 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

気象大気研究部の紹介

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す。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の役割は計り知れません。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ます。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ます。

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ます。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きます。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す。

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ます。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、レーザー・光学技術や室内実験に基づく大気微量成分やエアロゾルの特性や反応過程の解析のほか、観測装置の基礎技術の開発研究も手掛けています。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ます。

2016 年度 気象大気研究部の主要な成果

1. 中国・四川盆地におけるメタンおよび二酸化炭素のカラム平均濃度の観測

メタンは、二酸化炭素に次ぐ放射強制力を持つ温室効果気体である。メタンの放出過程は、水田からの放出、化石燃料の燃焼、反芻動物やシロアリ、湿地からの放出など多岐にわたることから、各放出源の寄与や分布には未解明な点が多い。衛星観測などにより、中国の四川盆地において、秋季から冬季に非常に高濃度のメタンが存在していることが指摘されているが、これまで地上からの連続観測を行った例はなかった。そこで、四川盆地において 9 月から 11 月に、光スペクトルアナライザと太陽追尾装置を組み合わせた独自の測定システムを用いて、太陽光が地上に到達する際に通過する大気の近赤外領域の吸収スペクトルを測定し、メタンおよび二酸化炭素のカラム平均濃度を得た。その結果、二酸化炭素濃度は、大気が安定し盆地内部に空気が滞留する 11 月に高いことが分かった。一方、二酸化炭素に対するメタンの濃度の比は、稲の刈入れ期である 9 月から 10 月上旬に高く、水田からのメタン放出が寄与していることが示唆された。

2. 都市近郊における新粒子生成過程の観測研究

大気中の微小粒子の生成過程として、直接排出以外に、人間活動や自然活動により排出される気体の二酸化硫黄や有機化合物などが、大気中での化学反応を経て、新たに粒子となる「新粒子生成」がある。森林や都市部においては、多くの観測研究が報告されているものの、人間活動と森林の両方の影響を受ける都市近郊大気での新粒子生成過程の研究例はこれまで少なかった。そこで、京都市および東京都八王子市で夏季に微小粒子の粒子径分布と各種気体成分の同時観測を行なった。その結果、新粒子生成が、京都では観測期間の半数程度の日で観測されたのに対し、八王子では一度も観測されなかった。その原因について考察し、八王子では広葉樹から放出される有機化合物のイソプレンが新粒子生成を阻害している可能性を指摘した。本研究の成果は、都市近郊大気での大気微小粒子の生成過程のより詳細な理解につながると期待される。

3.小型 PM2.5 センサの開発と性能評価

開発した小型 PM2.5 センサ。

PM2.5（直径 2.5 μm 以下の浮遊粒子状物質）の重量濃度を測定する方法としてはベータ線吸収法やフィルタ重量法などがあり、全国の環境測定局での常時監視や研究観測に用いられている。しかしながら、これらの測定法の装置は、非常に高価で、また長時間の積算時間が必要である。そこで、パナソニック（株）との共同研究により、手のひらに載るサイズの小型でリアルタイム計測が可能な PM2.5 センサを開発した。開発した小型 PM2.5 センサは、LED を光源として大気中の PM2.5 による散乱光を受光器で計測するものである。測定精度を上げるため、光散乱強度から粒子径を推定して、PM2.5 の重量濃度を算出している。室内実験による性能評価を行った結果、最小検出直径は 0.3 μm であり、600 μg/m^3 の高濃度条件下でも測定が可能であることが確認された。さらに、公定法のベータ線吸収法の装置との実大気中の PM2.5 重量濃度の同時計測を行ったところ、両者に相関係数 0.8 以上の高い相関関係が得られた。

4. TRMM の EOM 特別実験データによる地表面エコーの評価

熱帯降雨観測衛星（TRMM）の end of mission（EOM）特別実験では将来の人工衛星搭載降水レーダ開発のための基礎データの取得を目的とした走査幅を拡大した実験を行った。この実験では、走査幅を拡大したときに懸念される地表面エコーの降水エコーへの混入（または地表面エコーが降水エコーをマスクすること）の評価を目的としたものである。また、衛星搭載降水レーダから降水強度を推定するアルゴリズムでは地表面エコーを降雨減衰補正のための参照データとして用いているため、広い走査幅（大きな入射角）の時の強度・変動の大きさの情報も必要となる。実験データ解析として無降雨時の地表面エコー（クラッター）高度および地表面エコー強度の入射角依存性を調べた結果、地表面エコー強度（規格化散乱断面積：σ^0）は海と陸で異なる入射角依存性を示し、大きな入射角の時には海上の σ^0 のほうが陸の σ^0 より小さくなることが明らかになった。この結果から海上の観測においては走査幅を拡大した場合でもある程度強い降水であれば、従来の観測幅と同様なクラッター 高度に抑えることが可能となり、降水観測として十分利用できることが示唆された。一方で、海上の大きな入射角における σ^0 は、大きな減衰が発生したときには十分な S/N が取れないため減衰補正に限界があることも分かった。

5. 台風上部吹き出し層における巻雲のレーダ観測

台風上部には台風中心から外向きに吹き出す気流場が存在し、この層には巻雲が広がっている。この巻雲に伴う放射加熱量は台風の強度、構造や進路に影響を与えることが近年明らかになってきた。放射加熱量の計算のためには、台風内部の雲粒・氷晶の量とその分布を知る必要があるが、雲の微物理過程、特に氷粒子の形成過程がよく分かっておらず数値シミュレーションによる表現には不確かさが大きい。そこで、台風上部の巻雲を観測から量的に把握するために、名古屋大学では琉球大学と協力し、雲粒子に感度のある Ka 帯偏波レーダを沖縄県瀬底島に設置し 2016 年 4 月より 12 月まで観測を実施した。この間の 10 月 3 日に、最発達した台風 1618 号（Chaba）がレーダから 135 km の距離まで接近し、台風上部の巻雲をレーダで観測することができた。この観測によって、レーダ反射強度や偏波パラメータ、鉛直観測による鉛直ドップラー速度が長時間得られたことに加えて、雲の微細な構造も明らかになった。本結果は、数値モデルの雲微物理過程検証のための量的根拠を与え、台風予測の向上に寄与することが期待できる。

6. 複数の X 帯マルチパラメータレーダを利用した対流性降水域内部の霰領域と強い上昇気流域の分布

一般的に、霰が多量に存在する領域は強い上昇気流域と共存すると考えられている。この作業仮説を確認するために、東海地方に設置されている 3 台の国土交通省 X 帯マルチパラメータレーダで取得されたデータを用いて、デュアルドップラ解析から推定した 3 次元気流場と粒子判別法を用いて推定した霰領域の 3 次元分布を調べ、霰領域が 0℃高度から高度 10 km まで厚く広がっている事例（2013 年 9 月 4 日：霰の多い事例）と霰領域が 0℃高度周辺にのみ存在している事例（2014 年 9 月 25 日：霰の少ない事例）を対象として、霰領域の分布と上昇気流の速度の鉛直分布の関係を調べた。その結果、0℃高度より下層の全層で鉛直速度の上位パーセンタイル値（降水セルの中心付近の上昇気流の速度を反映していると考えられる）は、霰の少ない事例に比べて霰の多い事例で、大きな値を示していることを確認した。しかしながら、鉛直格子列（降水セル）単位ではこの作業仮説は成立せず、大きな速度を持つ上昇気流域と反射強度の大きな領域（霰領域）は異なる格子に位置することが示された。これは、霰領域の形成に先立って、強い上昇気流が観測されることを示唆する。今後、事例数を増やすことで、雲解像数値モデルの鉛直流の精度評価に利用できると考えられる。また、霰の形成の必要条件となる上昇気流の速度の閾値を見出すことができれば、複数のフェーズドアレイレーダによるデュアルドップラ解析領域において、雹害や落雷の早期警戒情報の提供に繋げる可能性があると考えられる。

7. Ka 帯偏波レーダを用いた雪雲観測

本研究所は 2014 年 9 月より可搬式の走査型 Ka 帯偏波レーダを導入し、観測を行っている。Ka 帯偏波レーダで観測される偏波パラメータと固体降水粒子（氷晶・雪片など）の特徴との間の関連を明らかにするために、2016–2017 年冬季に石川県立大学に同レーダを設置して連続観測を実施した。同レーダの観測範囲内に位置する金沢大学に複数の光学式雨量計や降雪粒子の画像を取得できる観測機器を設置し、固体降雪粒子の形状・粒径・落下速度を観測するとともに、同レーダで取得される偏波パラメータとの比較を行った。観測期間中の顕著な降雪事例に対して、取得された粒子画像より球形の霰や雪片の両者が混在していた事例と、雪片が卓越した事例に対して、同レーダで取得される偏波パラメータの値との比較を行い、各偏波パラメータがどのような粒子に感度があるのかを確認した。今後、さらなる比較事例を増やすことで、Ka 帯偏波レーダに対応した粒子判別手法に繋げていく予定である。

8. 南米パタゴニア地域における紫外線・中層大気オゾン、エアロゾルのモニタリング観測

地球規模課題対応国際科学技術協力事業（SATREPS）「南米における大気環境リスク管理システムの開発」プロジェクトによるアルゼンチンおよびチリとの共同研究を継続した。2016 年はチリおよびアルゼンチン気象局の協力を得てデータフォーマットの共通化を図り、両国にまたがる 30 点あまりの観測点から成る紫外線観測網を構成し、実時間データおよび予報を公開するための IT プラットフォームを整備した。南米南端部では、オゾンホール崩壊期にオゾンゾンデやブリューワ分光計と連携した 4 回目のキャンペーン観測を実施した（成果の詳細については次々節参照）。また、国立環境研究所とともに進めているエアロゾルライダー網開発については、9 台計画しているライダーのうちの 7 台が稼働を開始し、残り 2 台のライダーの製作と試験観測がほぼ完了した。

9. 極域における中間圏大気組成変動観測

地球磁場の構造から、極域では地球外から高エネルギー荷電粒子が侵入して大気中の分子を電離・解離することで大気組成変動を引き起こす。この影響を定量しそのメカニズムを理解するために、本研究所は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）とオゾンのモニタリング観測を継続して行っている。さらに今年度、北欧ノルウェー・トロムソにもトロムソ大学と共同してミリ波分光観測装置を設置し、NO とオゾンの試験観測を開始した。昭和基地で取得した NO の時系列データの解析から、極域冬期の NO カラム量の月平均値と昭和基地と同磁気緯度帯に降りこむ 30 keV 以上のエネルギーを持つ電子の月積算量には正の相関があることを見出した。このことは極域冬期の中間圏・下部熱圏においては高エネルギー電子による NO 生成が大きな役割を果たしていることを強く示唆している。来年度から始まる南

北両極域での NO のミリ波同時観測により、気象場や紫外線環境の異なる大気への高エネルギー粒子の降りこみによる大気組成変動を捉えることで、高エネルギー粒子と大気環境変動とのを関連とその影響の解明を進める。

10. 中緯度地域における成層圏オゾン力学変動解析

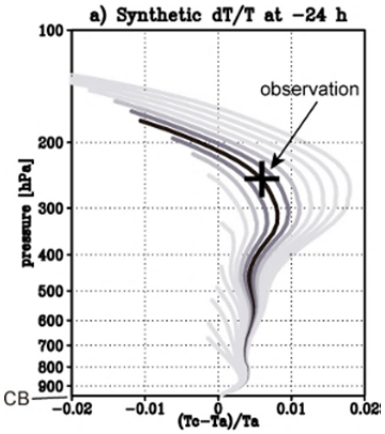
南米で行っているキャンペーン観測において、本年度は極渦（南極オゾンホール）の境界付近のオゾン混合比のプロファイルをオゾンゾンデ観測により 6 日間連続で取得することができた。得られた全てのオゾンプロファイルにおいて数 km 以下の薄層構造が単独または複数重なった状態で観測された。このような薄層構造は、重力波による鉛直方向および水平方向の空気塊の置換やロスビー波の砕破に伴う水平方向の輸送によって生成されることが知られている。これらの各要因によるオゾン混合比の変動成分を定量化した結果、ロスビー波起源の水平方向の輸送による変動が支配的であることが分かった。一方、陸別のミリ波分光放射計による観測では、2015 年と 2016 年の 12 月に上部成層圏（1 hPa 付近）において数日で最大 2 ppmv 程度（約 50%）のオゾン混合比の変動が観測された。トレンド解析における影響を評価するために、まずはこの変動要因について調査した。Aura 衛星搭載のマイクロ波リムサウンダ（Microwave Limb Sounder : MLS）と客観解析データ MERRA-2 を用いて気温およびプラネタリー波とオゾン混合比の関係について解析した結果、冬季の上部成層圏ではプラネタリー波の伝播によって温位面が東西方向に大きく波打ち、オゾン混合比の等値線は温位面にほぼ平行になっていることを明らかにした。これによりある気圧面で見たとき、数日スケールでのオゾン混合比の急激な変動を説明できることが分かった。

11. 広帯域で広ダイナミックレンジの次世代ミリ波帯大気分子観測装置の開発

ミリ波–テラヘルツ帯の超高周波電波領域は、近年情報・通信分野や電波天文観測装置の高周波化などで技術開発が急速に進んでいる。我々は、そのような新たな技術を地球大気分子観測装置に応用することで、観測周波数の広帯域化や受信信号の高精度化を目指し、2014 年度から国立天文台先端技術センターと共同で新たな超伝導検出器や受信機コンポーネントの開発に取り組んでいる。従来からモニタリング観測を行っている 200 GHz 帯の NO とオゾンに加え、オゾンの破壊に化学的に寄与すると考えられる NO_x、HO_x、ClO_x 系の分子を含む 8 分子を同時に観測できる受信機の開発をめざし、今年度は 179–254 GHz の信号を導波管回路によって 4 つの帯域に分けられるマルチプレクサの設計を行った。電磁界シミュレーターによる設計で、必要な周波数帯域の通過損が 0.2 dB 以下、反射損が 15 dB 程度となる回路の設計に成功した。また信号検出の鍵となる超伝導素子については、複数の超伝導接合を直列に接続することで広いダイナミックレンジを実現する素子を設計し国立天文台のクリーンルームで試作した。また、入力電波強度に対する受信機出力の飽和度の関係を評価する新たなシステムを実験室に立ち上げ、100 GHz 帯の試作素子で超伝導素子の線形性を明らかにした。

12. 衛星観測を用いた積雲/大規模場平均質量フラックスの推定手法の開発

大気の質量鉛直フラックスは気象学において重要な変数であるが、実際に計測することは難しい。本研究では、衛星観測データから積雲質量フラックスと大規模場平均質量フラックスをそれぞれ推定する新たな解析手法を考案した。積雲質量フラックスは、まず簡便な鉛直一次元雲モデルをもとに様々な雲内鉛直速度を構築し、その中から衛星観測から導かれる雲頂浮力に整合する解を選びだす方法をとった（右図）。一方、大規模場平均質量フラックスは、既に開発済みの手法に基づき衛星観測大気熱力学場から別に求めることができる。これらの観測値を、激しい降水システムの出現前後の時間軸上に投影することにより、降水発達に伴う大気質量フラックスの動態が明らかになった。この解析結果は、熱帯対流力学のさらなる理解および全球気候モデルの積雲パラメタリゼーション評価にあたりユニークな観測資料を与えると期待される。



一次元雲モデルの浮力プロファイル。濃い色ほど観測値に近い。