

気象大気研究部



研究テーマ・キーワード

- 偏波レーダや雲粒子ゾンデ観測を用いた雲降水現象の観測
- 最先端の気象レーダ等の観測装置の基礎技術開発と検証の実施
- 様々な地球観測衛星を横断的に活用した熱帯大気力学過程と雲降水現象の解析
- ミリ波帯の電波や赤外光の精密な分光観測による温室効果気体・オゾン等微量気体の計測
- 先端計測装置や室内実験に基づく大気エアロゾルの特徴・動態解析

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、水蒸気はエアロゾルを核として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。

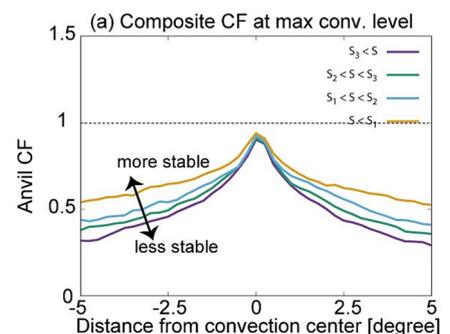
しかし、このような大気の成り立ちは、微妙な均衡の上に支えられている。温室効果気体の増加に伴い進行する地球温暖化は、ゆるやかな気候の変化にとどまらず気象現象の極端化や生態系の激変を招くことが危惧されている。様々な観測手段を用いて大気の状態を注意深く監視し、理論的考察や数値モデルの活用を通じて大気や気象の成り立ちをより深く理解することは、地球環境問題に対峙する私たちに課せられた喫緊の課題の一つである。

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、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、先進的な偏波レーダや雲粒子ゾンデを用いた雲降水現象の観測など、様々な観測機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データ解析に取り組んでおり、数値シミュレーションを用いた極端気象現象などを対象として観測データと数値モデルの連携にも力を入れている。

2021 年度の主な活動

熱帯海洋上におけるアイリス効果のプロセスレベル検証

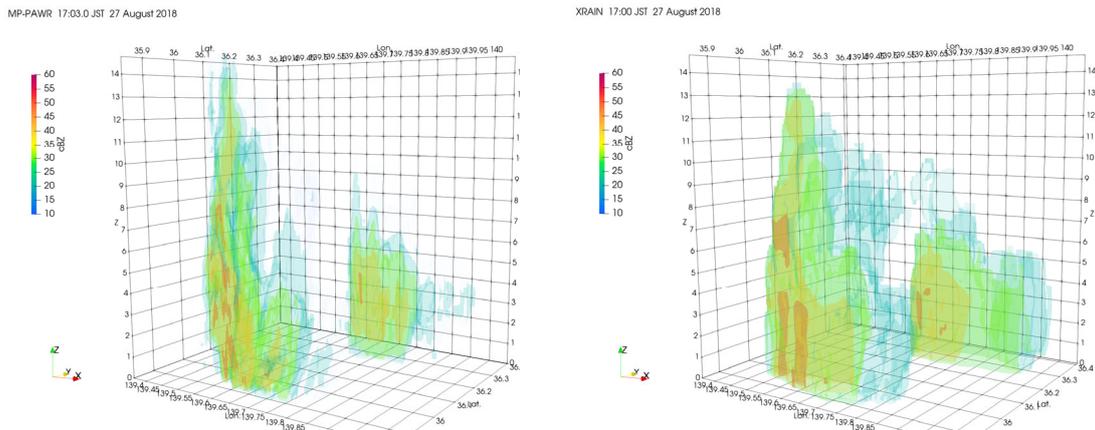
アイリス効果とは、熱帯アンビル雲量が温暖化気候において減少する結果外向き赤外放射が増加することにより、温暖化を緩和するとされる雲放射フィードバック仮説である。アイリス効果を説明する物理機構として、降水効率に関わる仮説と対流圏上層の安定度を鍵とする説の二説が提唱されている。本研究では、A-Train 衛星観測データをもとに二仮説を検証した。主な結論は以下のとおりである。(1) 安定度アイリス仮説の予想する通り、アンビル雲量は対流圏上層の安定度と明確な相関を示した(図参照)。(2) 降水効率はアンビル雲量に影響を及ぼす証拠は認められなかったが、中層と下層の雲量と関連が見られた。(3) 昼間と夜間の雲放射効果は日周期にわたり積分すると大部分が相殺されると推定され、すなわち正味の雲放射効果は中立であると考えられる。



200-hPaにおける安定度の四分位数ごとに分類したアンビル雲量の分布。

マルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダの校正

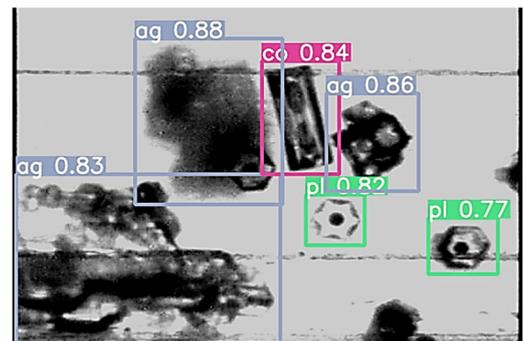
最新レーダ技術であるマルチパラメータフェーズドアレイ気象レーダ（MP-PAWR）は、ファンビームで送信し、ペンシルビームで受信しているため、その校正は全ての仰角で行う必要がある。これは従来型レーダにおける一仰角で行う校正とは大きく異なる。ここでは、偏波間位相差変化率（KDP）とレーダ反射強度因子（Z）の比と反射因子差（ZDR）の関係が雨滴粒径分布への依存度が小さいことを利用してMP-PAWRの全仰角での校正を行う手法を開発した。ZDRはMarshall-Palmerタイプの雨滴粒径分布を仮定してZのバイアスを考慮した上で校正し、同時にKDP/ZとZDRの関係を満たすZを求めることにより校正を行った。その結果、ZDRの校正ではファンビームの切り替えに伴うジャンプが見られる場合があることが分かり、校正後は良く校正されたレーダとの比較で良好な結果を得た。



2018年8月27日17:00のMP-PAWR(左)とXRAINによるZの3次元構造。XRAINは5分間の観測データのため広がっている。

深層学習を用いた固体雲粒子の客観的判別

雲を構成する粒子を観測する方法として、気球により顕微鏡を雲内に投入して雲粒子の画像を撮影する「雲粒子ゾンデ」が用いられてきた。この方法では粒子の膨大な画像データが得られるが、その解析には膨大な時間がかかり、しかも主観的判別を排除できないという大きな問題があった。このため定量的で統計的な解析を行うことができなかった。そこで深層学習を用いて、固体雲粒子の客観的判別法を開発した。図はこの方法により判別された粒子の例である。実際の雲の固体雲粒子は六回対称性の高い樹枝状や角柱状をした結晶ではなく、多様で、複雑で、非対称な粒子が多くを占める。これを客観的にかつ高速に判別することによって、雲粒子の統計的解析が可能となった。この結果は工学的手法を気象学に持ち込んだ新規性の高い研究であり、雲の特性を理解できるだけでなく、雲解像モデルの改良などに寄与することが期待される。

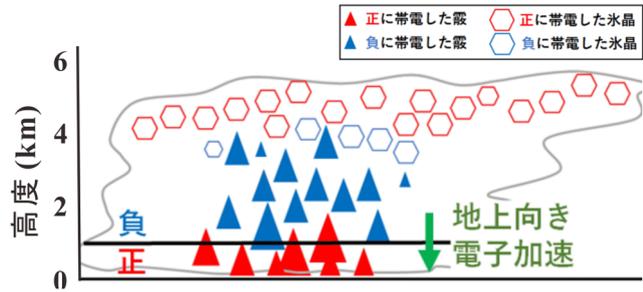


雲粒子ゾンデで観測された固体雲粒子を深層学習により客観的判別を行った例。四角で囲まれている粒子が判別された粒子で、aqは凝集粒子、coは角柱状粒子、plは板状粒子である。

地上にガンマ線グローをもたらず冬季降水雲の特徴

近年、冬季北陸地方において、対流性降水雲からガンマ線グローと呼ばれるガンマ線放射現象が地上で観測されている。ガンマ線グローは、数十秒から数分の継続時間を持ち、電荷を帯びた降水粒子により形成された雲内の強い電場中での「逃走電子のなだれ増幅」に起因した現象であると考えられる。本研究では、最近5年間で観測された11事例のガンマ線グローを、X帯偏波レーダを用いて解析し、その時間変化と降水粒子の3次元分布から電荷分布と電場構造を推定した。いずれの事例でも、ガンマ線グローが検出される際には、冬季としては背が高く、反

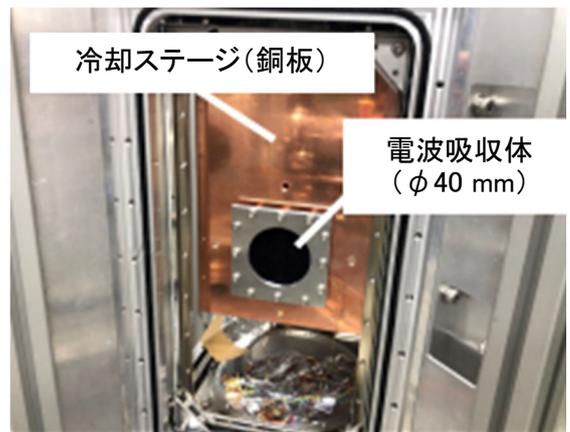
射因子が 35 dBZ 以上の強い対流性エコーが、その衰退期に地上に設置されたガンマ線検出点上空を通過していたことを確認した。このことから、 -10°C 層より下層の霰による正電荷領域と -10°C 層より上層の霰による負電荷領域の境界が、衰退域となって下方へ移動している状況で、電子が地上向きに加速される上向きの電場が形成される状況が生じたと考えられることができる。十分な強度をもつ電場が地上に接近した際に「逃走電子のなだれ増幅」により、地上でグローが観測されると考えられる。



偏波レーダの観測結果から推定される降水粒子とその電荷分布の概念図。黒い(白い)三角形は正(負)に帯電した霰粒子、黒い(白い)六角形は正(負)に帯電した氷晶粒子の存在を示す。高度 1 km 付近に正電荷領域と負電荷領域の境界面(黒実線)があると考えられる。

ミリ波大気ラジオメータ用の新たな較正源の開発

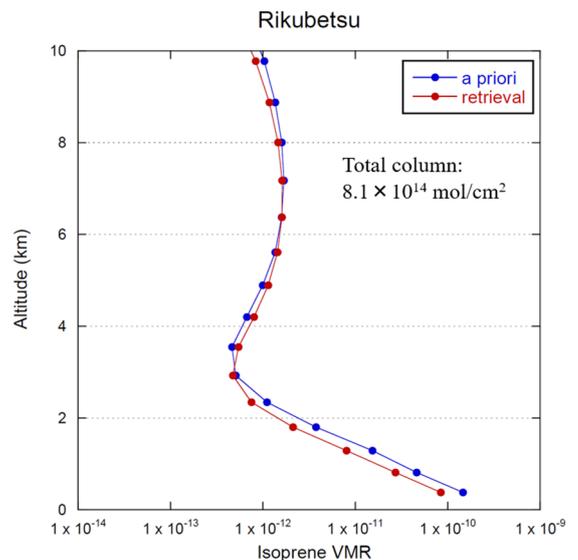
ミリ波帯の大気分子輝線を観測するラジオメータでは、入力信号の絶対強度較正のために、温度が既知の黒体放射を受信機に入力する較正系を用いる。現在の較正源では液体窒素温度を用いているが、これを安定的に維持するためには連続的に液体窒素を製造し供給する装置群が必要であり、遠隔地での長期無人観測には適していない。そこで我々は、現在の観測システムで超伝導受信機を冷却するために用いている冷凍機を利用することで、較正源を機械的に冷却することを考えた。較正源の電波吸収体の設計・製作の経験を有する京都大学との共同研究により、我々のラジオメータの周波数や構造に適した電波吸収体を設計し、実際に実験室の冷凍機内に設置して冷却を行ったところ、安定して 76 K に冷却できることが分かった。これは、既存の較正系で用いている液体窒素温度とほぼ同じであり、機械式冷却を用いた新たな較正源が実現可能なものであることが確認できた。



受信機デュー内部の冷却ステージ上に設置した電波吸収体の様子。

高分解能赤外分光器による大気微量成分モニタリング

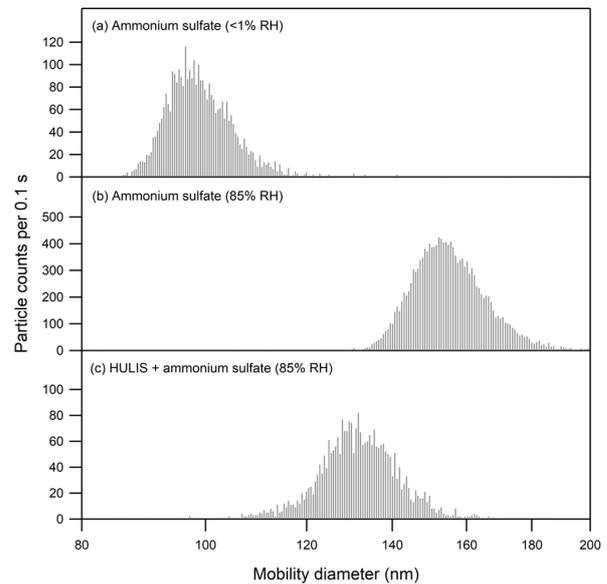
陸別観測所に設置されている国立環境研究所の高分解能フーリエ変換型赤外分光器 (FTIR) を用いて、太陽光の吸収スペクトルモニタリング観測を継続した。観測されたスペクトルから O_3 等の主に成層圏に分布する分子および CH_4 、 CO 等の対流圏に主に分布する分子の計 17 種についてカラム全量と高度分布を得た。本年度新たに、植物起源揮発性有機物であるイソプレンのカラム量の導出を試みた。波数領域 $900\text{--}910\text{ cm}^{-1}$ のスペクトルから CO_2 と水蒸気の高度分布を事前に解析したのちに、 CFC-12 、 HCFC-142b 、 NH_3 、 HNO_3 と同時にイソプレンの高度分布を求め、それを積分してカラム量を得た。2020 年に観測されたスペクトルから求めたイソペンカラム量は $(2\text{--}8) \times 10^{14}\text{ mol/cm}^2$ で、冬期に少ないことが分かった。



観測スペクトルから求めたイソペン高度分布(赤)と初期推定値(青)。

大気エアロゾルの吸湿性および光吸収特性の解析

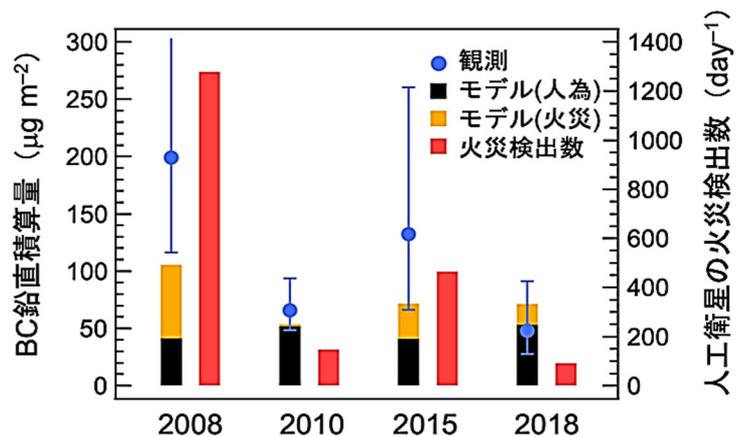
大気エアロゾルは地球の放射収支に影響を及ぼす物質であり、その影響を規定する特性として、吸湿性と光学特性が挙げられる。エアロゾルの吸湿性は化学成分の吸湿性パラメータ κ の加成性を仮定して表されることが一般的だが、その妥当性は十分に検証されていない。そこで、大気エアロゾル試料から抽出したフミン様物質 (HULIS) と硫酸アンモニウムの混合物からなる微小な粒子を発生させ、吸湿タンデム DMA (HTDMA) を用いて 2 成分の割合と吸湿成長の関係を調べ、 κ 値の化学成分 (有機・無機物の存在割合) に対する関係を得た。また、大気エアロゾルの光学特性に関しては、光吸収性の有機物の寄与がよく理解されておらず、都市および森林で採取された大気エアロゾル試料の有機画分に対し、その光吸収特性の解析を進めた。今後のエアロゾル吸湿性の解析に向け、ヘルシンキ大学の協力により、フィンランドのヒューティアラ森林フィールドステーションにおける大気エアロゾルの採取も実施した。



HTDMA を用いた微粒子の吸湿成長測定で得られたデータの例。(a,b) 硫酸アンモニウム粒子の(a)乾燥状態および(b)加湿時の粒径別粒子カウント数。(c) HULISと硫酸アンモニウムの混合粒子の加湿時の粒径別粒子カウント数。加湿時の相対湿度(RH)は85%。横軸は対数軸。

非水溶性エアロゾルの測定法の評価と観測

ブラックカーボン (BC) や鉛物ダストなどの非水溶性エアロゾルは、太陽放射の吸収や氷晶核としての働きを通じて気候に影響を及ぼしていると考えられている。しかし、観測が限られていることや確立された測定法がないことから、これらの動態の理解は不十分である。本研究ではまず、2018年の3-4月に北極域で実施された航空機観測により得られたデータを解析し、北極域のBCの鉛直積算量の年々変動が中緯度の森林火災の規模によって強く支配されていることや、数値モデルが森林火災由来のBCを大幅に過小評価している可能性があることを示した。また、フィルタに採取したエアロゾルを水に分散させ、個々の非水溶性粒子を光学的に検出し、種別ごとに数濃度を測定する新しい手法の評価を進めた。この手法による分析のため、名古屋や北極ニーオルスンにおいてエアロゾル試料の集中的な採取を実施した。



北極域でこれまでに航空機観測が実施された年(春季)のBC鉛直積算量の観測値(中央値)と数値モデルによるシミュレーションの値。人工衛星(MODIS)による北緯50度以北の火災検出数の日平均値も示されている。