

特集：最近の極域研究

北極域のオーロラ研究の現状

藤 井 良 一

1. はじめに

太陽のコロナ領域からはプラズマ（正の電荷を持つイオンと負の電荷を持つ電子に電離した気体）状態の高温の大気が宇宙空間に常時流れ出している。一方、地球の固有磁場は、このプラズマ流（太陽風）が地球周辺に入りこむのを妨げ、磁気圏と呼ばれる領域を作り出している（図1）。この磁気圏には高温のプラズマを貯えるプラズマシートをはじめ色々な領域があり、太陽風から強い影響を受けながら、プラズマの大規模の運動や爆発的な加熱・加速現象等の興味深い様々な現象が生起している。極夜を彩るオーロラはその一つで、プラズマシートのプラズマが磁力線に沿って加速されて電離圏に降下し、大気を発光させる現象である。極域地上観測と人工衛星観測を用いた観測・研究やシミュレーション・モデリングを用いた研究により、太陽風-磁気圏-電離圏という系のダイナミックな描像が次第に明らかになってきている。本稿では最近大きな発展を見せている北極域における地上観測の現状を概観する。

2. なぜ極域での観測が必要か

図1から、太陽風プラズマが直接磁気圏に入り込むことのできるカスプ領域、プラズマ

シートにつながるオーロラ帯、ポーラーローブにつながる極冠帯はいずれも磁力線を通して比較的狭い高緯度の電離圏につながっているのが分かる。そのため、地上からこの高緯度（極域）電離圏全域を観測することにより、電離圏内の様々な現象の観測に加えて、磁力線で結ばれた広大な磁気圏全領域のプラズマの運動や加速現象等の物理過程を時間変動と空間変動を分離して観測することができる。これは衛星観測に対する極域地上観測の大きな利点で、お互いに影響しあう太陽風-磁気圏-電離圏系全体の理解にとり大変有効である。ただし、実際に現象が起きている場所での直接観測ができる人工衛星観測が、物理過程の解明に必要な不可欠であることは言うまでもなく、衛星観測、地上観測双方がお互いの足りない部分を補い合って、研究を進めるこ

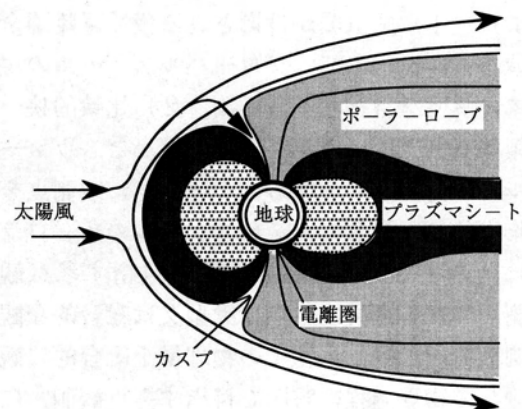


図1 地球磁気圏の形状と構造

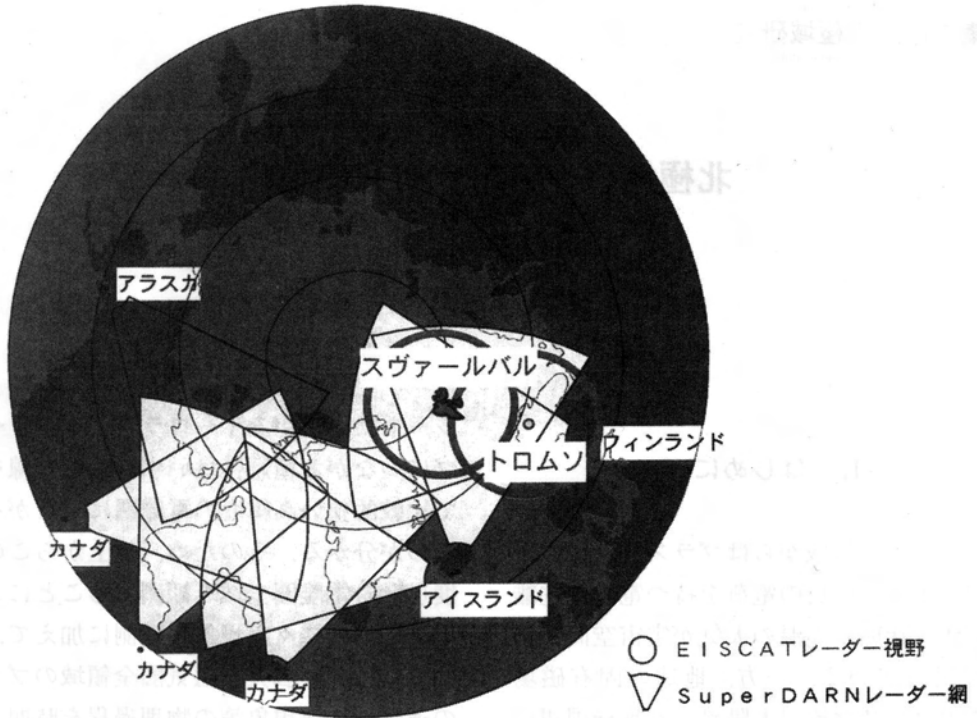


図2 北極域における SuperDARN レーダーと EISCAT レーダーの観測領域

とが大切である。

近年の先端的な観測技術の極域への展開は、上部の磁気圏や下部の大気圏から大きな影響を受ける電離圏・熱圏・中間圏の構造やその中のプラズマや中性大気の極めてダイナミックな描像を明らかにしつつある。

現在の極域観測は観測装置の能力と配置により、1) 磁気圏が投影される極域電離圏全域をモニターして、グローバルスケールの現象の解明を目指す多点観測、2) 比較的狭い領域（例えばスカンジナビア半島とスヴァールバル島をカバーする位の領域）に観測点を集中的に配置して、メソスケールのオーロラに関連する物理過程の解明を目指す多点観測、3) 1点又は数点に大型又は総合的な観測機器を配置し、種々の物理量を総合的に観測して物理過程の解明を目指す拠点観測、に大別できる。これらの三つは各々長短所があ

り相補的であるので、組み合わせて実施されるのが一般的である。

1) の代表的な例は両極域に展開されている短波レーダー網 SuperDARN（詳細については次稿の南極の記述参照）で、極域全域のプラズマの運動を数分間で観測することができる（図2）。測定できる物理量はプラズマの運動に限られるが、運動の空間と時間発展の分離ができるので、太陽風の変動に地球の磁気圏や電離圏がどのように反応するのか、夜側のプラズマシートに貯えられたエネルギーがどのように解放されるかという太陽地球系科学の中心的な課題の解明に画期的な役割を果たしてきている。ただし、物理過程を理解するためにはプラズマの運動以外の物理量も必要なので、人工衛星や他の地上観測との同時観測が重要となる。

2) の例としては、過去にカナダにおいて実施されたオーロラと磁場の超多点観測（東

京大学)や、現在も実施されているカナダの磁場多点観測網 CANOPUS (カナダアルバータ大学)等があり、オーロラの発達、電離圏電流の時間空間発展の研究に貢献してきている。レーダー観測も含めたより総合的な北欧の観測網については次章で紹介する。

3)の例としては大型の非干渉散乱レーダー(後述)や、多種類の最新の観測機器(ライダーや分光計、干渉計やレーダー等)を併せて用いて、極域の対流圏、成層圏から、中間圏や熱圏、電離圏にいたる総合観測をし、地球環境に与える影響を研究する「地球環境のための高度電磁波利用技術に関する日米国際共同研究」(通信総合研究所)等があげられる。

これらの他に、南北両半球での共役点観測(次稿の南極の記述参照)や極域と中低緯度をカバーした磁場多点観測網観測(九州大学)も実施されている。

3. スカンジナビア

—スヴァールバルにおける観測

本領域は、SuperDARN レーダーにより観

測される領域であることに加えて、EISCAT レーダーや多点観測網が整備されており(<http://eiscat.dph.aber.ac.uk/ESR/groundbased.html>), 世界でも最も密度の濃い観測地域である。前章でのべた2)と3)の代表的な例といえる。

非干渉散乱(IS)レーダーは電離圏や下部磁気圏を観測・研究するのに最も適した手段の一つである。SuperDARNのようにグローバルな領域を短時間で観測することはできないが、対象とする物理過程を理解する上で必須の物理量をほぼすべて測定できるのが特徴である(観測領域は図2の中)。地上から電離圏に向けて発射された電波は、周波数が電離圏のプラズマ周波数より高いと、電離圏を透過してエネルギーのほとんどが宇宙空間に失われる。しかし、電波のほんの一部は電離圏の電子によって散乱され地上に戻ってくる。この散乱波からは、直接間接的に電子密度やイオンと電子の温度、イオン組成、イオン運動速度、電場、電気伝導度、電流、中性風の速度、電離源、加熱源、大気密度等の重要なパラメータを導きだすことができる。しかしISレーダーの散乱波の強度は大変弱い

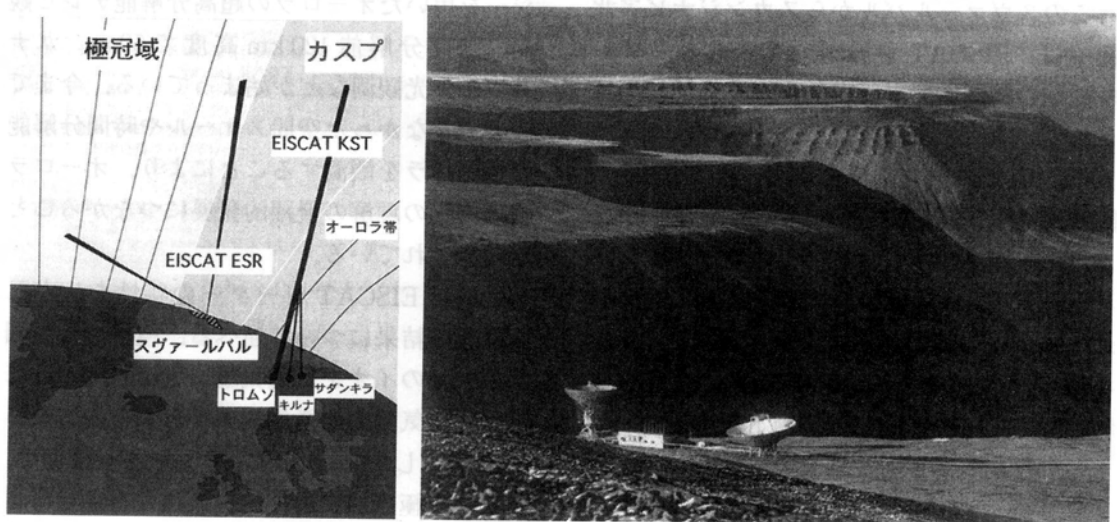


図3 EISCAT レーダーの構成(左)とスヴァールバルレーダーアンテナ(I. Wolf 提供)

ため、大出力（数100万ワット）で大口径（数10から数100 m）のアンテナを備えたレーダーが必要である。このため、現在極域で稼働中のISレーダーはグリーンランドに1機と、北欧にある欧州非干渉散乱（EISCAT）レーダーだけである。EISCATレーダーシステムは北欧のトロムソ、キルナ、サダンキラに3機のアンテナを備えた世界で唯一の3局方式のUHF帯レーダーとトロムソのVHF帯レーダーに加えて、新たにスヴァールバル島に建設された2機のUHF帯アンテナから構成されており、極冠帯、カस्प領域からオーロラ帯にいたる広い領域の観測が可能である。日本はEISCATレーダー科学協会に1996年正式参加し、原加盟国（英、仏、独、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド）と共に、レーダーを自由に使えるようになり、全国の共同研究者の利用に供されている。

このスヴァールバルからスカンジナビア北部では、EISCATレーダーを中心として、多種類の観測機器が総合的かつ有機的に配備されている。まず、極冠帯、カस्प、オーロラ帯、サブオーロラ帯をカバーする25点の観測点からなる磁場観測網（IMAGE）がノルウェー、スウェーデン、フィンランド、ドイツ、ポーランド、ロシアにより共同運営されている。これに加えて、6点の観測点からなるオーロライメージの観測網（ALIS）が稼働している。また、電離圏下部の観測ができる分反射レーダーやVHFレーダー、イオンゾンデ、イメージングリオメータなどもこれらの領域に設置されて連続稼働している。

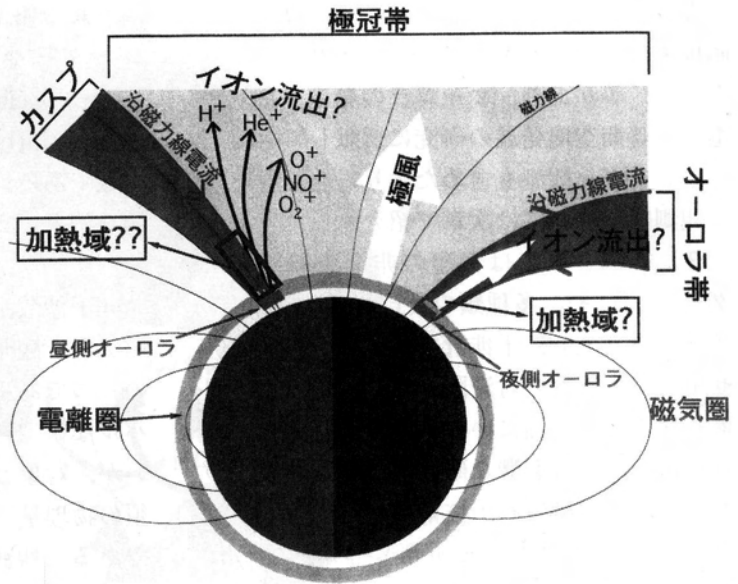


図4 電離圏からのイオンの流出の概念図。イオンの流出は昼間側カस्पとオーロラ帯に多く見られる。

EISCATレーダーやSuperDARNとこれらの観測網の同時観測は、太陽風のエネルギーやプラズマが磁気圏に流入する物理過程やオーロラサブストームに伴うエネルギー解放過程など、太陽風-磁気圏-電離圏相互作用の解明に画期的な役割を果たすと期待されている。

さらに、これらに加えて、最新のテクノロジーを用いたオーロラの超高分解能テレビ観測（空間分解能120 km高度で50 m、カナダ）や分光観測などが始まっている。今まで観測できなかった空間スケールや時間分解能でオーロラを観測することにより、オーロラ物理過程の理解の飛躍的発展につながるものが期待されている。

最後にEISCATレーダーの特性を生かした最近の結果について述べる。極域の電離圏から大量のイオンが磁気圏に流出していることは、磁気圏での衛星観測から明らかになっている。しかし、EISCATレーダー観測は、従来から極冠域で連続的な流出が可能と考えられてきた軽い水素イオンの流れ（極風）だ

けでなく、カスプ領域やオーロラ帯では電離圏の酸素イオンや酸化窒素イオン、酸素分子イオンなどの重たいイオンが間歇的に流れ出していることを明らかにした(図4)。これらのイオンがどのような物理機構で加熱・加速されて、重力に打ち勝って電離圏から脱出するのかはまだ明らかではないが、イオンの流出機構の解明は、惑星大気の進化・散逸を考える上でも重要であると考えられる。加熱機構を考える上で重要な物理量であるイオン速度や電子/イオン温度などの高度分布を直接観測できる EISCAT レーダーはこの謎の解明に重要な役割を果たすことが期待される。

4. おわりに

北極域はオーロラに関連する現象を総合的

に研究するために、様々な観測機器が有機的に配備されており、オーロラ科学の発展に重要な貢献をしてきている。北極域の観測は極めて国際協力の色彩が強く、これらの観測の多くはインターネットを通して制御されるとともに、得られたデータはリアルタイムで世界中の共同研究者の利用に供されている。このデータの即時性と公開性は今後の宇宙天気研究においても重要な点である。

今後、国際協力の下に組織的な地上観測と人工衛星観測を有機的に組み合わせた観測・研究は益々盛んになると予想され、太陽風から磁気圏に注入されたエネルギーやプラズマが、大気圏を含めた私たちの環境にどのような影響を与えているかについての理解が飛躍的に進展することが期待される。

藤井 良一 (ふじい・りょういち)
名古屋大学太陽地球環境研究所 教授.