



名古屋大学 太陽地球環境研究所

August 2000

Newsletter

No. 20

北極域上空の高層風

野澤悟徳（電磁気圏環境部門）

極域電離圏

北極上空の特徴と言えば、なんととっても美しく幻想的なオーロラの舞いをあげることができるでしょう。オーロラは、主に高度100kmから300kmの大気が、磁気圏から降り込んでくる荷電粒子との衝突を通して発光する現象です。また高度100kmから130km付近では、オーロラ発生時に膨大な量の電流が流れ地上では地磁気擾乱がおこります。この電流は地球の電離圏で閉じておらず、磁気圏と繋がって3次元的な電流系を形成しています。

また、地上から放射された電波（波長約10m以上；短波、中波、長波など）は、電離圏によって反射されます。例えば、短波通信で海を越えて通信ができるのはこの電離圏のおかげ。しかし、現在大幅に普及した全地球測位システム（Global Positioning System: GPS）を用いた位置決定にとって、この電離圏は“厄介”

な存在なのです。GPS衛星は高度約20,000kmの軌道を周回しており、衛星から放射された電波は電離圏を経由して地上に届くため、電離圏の影響を受けるからです。オーロラの活動が活発な時には、このGPS電波も擾乱を受けて位置決定の精度は劣化してしまいます。このように高度



ロングイアピンに設置されている口径42mのスヴァールバルISCATレーダー第2アンテナ。

100km上空の大気密度は、地上付近と比べて大変希薄（0.01%以下）ですが、磁気圏との結合や、電離圏による電波の反射など、重要な役割を果たしていることがだんだんわかってきました。

電離圏といっても、電子密度は、中性大気密度の0.1%以下です。高度130km以下においては、イオン（主に一酸化窒素や酸素分子イオン）は頻りに中性大気と衝突し、運動量・エネルギーの交換をします。したがって、イオンは中性大気に「束縛されている」とも言えるかもしれませんが。電離圏においても、中性大気は重要な役割を果たしているのです。

この領域の中性大気の動き（風）に関しては、観測が難しいためにこれまであまり研究が進んでいませんでした。しかし最近、衛星や地上からの光学機器（ファブリペロー干渉計）による観測、各種のレーダーを用いた観測、そして計算機シミュレーションなどにより、精力的に研究が進められています。

EISCATレーダー

高度90kmから120kmの風を、時間・空間分解能を高く求める観測装置として現在もっとも有効なのが、非干渉性散乱（IS）レーダーを用いる方式です。ISレーダーは、電離圏のプラズマにより散乱される非常に微弱な電波を地上で受信することにより、プラズマの各種パラメーター（電子密度、電子温度、イオン温度、イオン速度など）を求めることができます。しかし、散乱される電波は非常に微弱であるため大出力の送信機と大口径のアンテナが必要となり、その建設費用は数十億円の単位になり、運営費も非常に高価です。

欧州非干渉散乱レーダー（EISCATレーダー）は、日本（代表機関 国立極地研究所）と欧州6カ国（イギリス、フランス、ドイツ、ノルウェー、スウェーデン、フィンランド）の国際協同により運営され、ノルウェーのトロムソ（北緯69.5°）、スウェーデンのキルナ（67.9°）、フィン

ランドのソダンキラ（67.4°）およびスヴァールバル諸島ロングイアピン（78.2°）に設置されています。そのパラボラアンテナは口径32m、最高出力1.5メガワットという強力なものであり、ロングイアピンの第2アンテナはそれを上回る口径42mという巨大なものです（巻頭写真）。

超高層の風系

大気を動かす力（駆動力）として、圧力勾配（温度勾配）、コリオリ力、粘性力、重力などがあげられます。これらに加え下部熱圏では、大気波動による力も重要となります。そこでは周期の短い変動成分（大気重力波）も存在しますが、平均風（安定して存在する成分）、24時間変動風（24時間の周期で変動する成分）、そして12時間変動風が支配的です。これら24時間、12時間変動風（大気潮汐波）は、全地球的な波動であり、対流圏や成層圏で励起され、上方に伝播していきます。高度が高くなるに伴い波の振幅（強度）が増大し、12時間変動風はこの下部熱圏で最大の振幅（強度）を持ちます。24時間変動風は、高度90km付近までで碎波してしましますが、高度100km以上では太陽紫外線による加熱の影響で、1日平均成分が励起されます。一方で、下層大気に起因する“大気重力波”と呼ばれている周期の短い、また空間波長も短い波は、地球大気中に常時存在していると考えられ、その活動度は地形や前線などの影響を受けます。この重力波も上方伝播して高度約80km以上で碎波し、エネルギーと運動量を大気に供給します。最近の研究では、この大気重力波の下部熱圏大気への影響をどう正しく見積もるかが重要なテーマの1つとなってきました。

ISレーダーで風を導出できる高度は、通常90kmから120km（下部熱圏）です。我々は、トロムソのEISCATレーダーで取得された10年以上のデータを用いて、この領域の風の季節変化、太陽活動度依存性などを研究しています。この領域の風の特徴は、高度変動が激しく、また時間

的にも大きな変動をしていることです。例えば高度100kmにおいては、約 - 100m/sから100m/sの変動が24時間起きていることがあげられます。図1に夏のトロムソ上空における風速の時間変化を、5つの高度について示しました。100m/sといえば、地表の竜巻きでもかなり上級のレベルで、とんでもない“強風”ですが、このような風が超高層大気では通常吹いているのです。

太陽活動は11年の周期を持ち、電離圏の形成に貢献する紫外線強度は太陽活動度によって数倍程度変化します。それに伴い、電離圏の電子密度や熱圏の大気密度、大気温度などが変動すると考えられています。図2に、1日平均風の太陽活動度変化を示します。太陽活動度が高くなると、北向きおよび東向き成分が強くなるのが分かります。ちなみに、この東向きの風はこの領域の特徴でもあり、1年中吹いています。対流圏の“ジェットストリーム”に似ているとも言えるでしょう。(ただし、下部熱圏ではこの平均風に、24時間、12時間などの周期変動が加

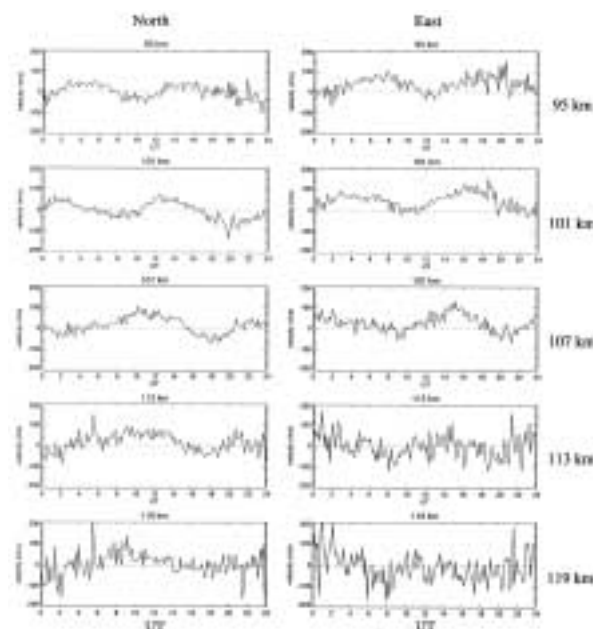


図1 EISCATレーダーにより取得された高度95, 101, 107, 113, 119kmの風の日変化(夏)。横軸は世界標準時(UT: トロムソにおける局所時間はUTに1時間足す)。左が南北成分(北向きが正)で、右が東西成分(東向きが正)。風速は、約±100m/sの範囲で変動している。

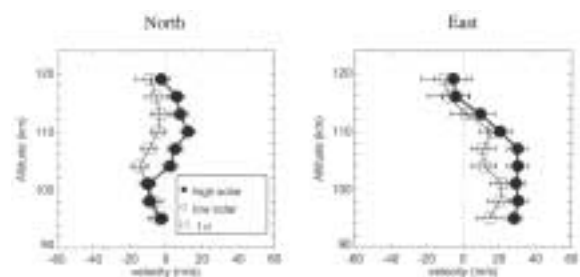


図2 EISCATレーダーによって観測された1日平均風の太陽活動度変化。黒丸、白丸がそれぞれ高、低太陽活動度のデータを示し、左が南北成分(北向きが正) 右が東西成分(東向きが正)。太陽活動度が高くなると、北向きおよび東向きにシフトしている。

わる)

平均風は冬から夏にかけて、北西風から南西風へと変わり、24時間変動風の強度は夏に強く、冬に弱い傾向が見られます。そして12時間変動風に関しては、春(秋)に強い傾向が見られますが、まだ不明な点が残っており、今後の研究が待たれています。

中間圏との同時観測

研究を進めていくと、下部熱圏と中間圏(高度50kmから90km)との同時観測の重要性が改めて強く認識されました。その理由は、対流圏や成層圏に励起源を持つ大気波動が、中間圏高度まで上方伝播するのに伴い、その波の振幅が徐々に成長し、上部中間圏や下部熱圏で碎波しているからです。すなわち、中間圏におけるこれら波動の観測なしでは、下部熱圏ダイナミクスの十分な理解は得られないと言えます。1998年からトロムソにおいて分反射(MF)レーダーを国際協同(日本、カナダ、ノルウェー)で運営して、中間圏・下部熱圏同時観測が行われています。MFレーダーは、高度約60kmから100kmの風を観測することができ、同じ観測所内で中間圏・下部熱圏の風を同時観測できる場所は、世界的にみてもあまり例がありません。極域では、トロムソだけです。

MFレーダーの最大の利点は、常時観測が可能であり、大気重力波の季節変化やプラネタリー

波（周期は1日より長い）の観測が可能なことでしょう。トロムソMFレーダーの時間分解能は2分で、これは大気重力波の観測に十分です。大気波動は、周期の短いものから順に、大気重力波、大気潮汐波、プラネタリー波と呼ばれており、このMFレーダーはほぼすべてが観測可能です（ほぼというのは、その高度分解能が3km、アンテナ間隔が164mのため、空間的に検出できない波も存在するから）。大気潮汐波、プラネタリー波は全地球的な波動ですから、問題なく検出できます。プラネタリー波は、下部熱圏の平均風に無視できない変動を与えていると考えられていますが、その影響に関しては未だ不明な点が多々残されています。

図3に、トロムソ上空、高度70kmから120kmの東西風（1日平均風）の季節（月）変化を示します。高度70kmから91kmはMFレーダーの1月平均のデータを用い、高度95kmから119kmは、EISCATレーダーの季節平均（夏、冬、春秋）を用いています。EISCATレーダーデータはそのデータ数が限られるため、季節平均になっています。高度および季節と共に、風系が変わっていくようすがみてとれるでしょう。また夏における高度構造の変化が顕著なこともわかります。高度80km付近では西向きに約30m/sの風が吹いていますが、高度100km付近では東向き約40m/sに変わっています。ただし、実際の風系は、中間圏では平均風が支配的ですが、下部熱圏では前述したように平均風に加え、24時間および12時間変動成分が重畳して風系を構成しています。

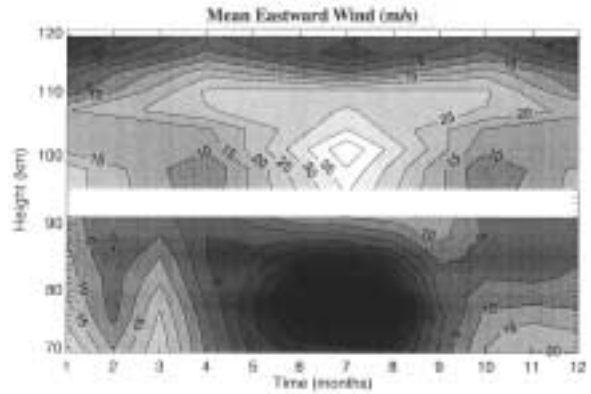


図3 トロムソにおける1日平均風（東西成分：東向きが正）の季節（月）変化。EISCATレーダー（高度95 kmから119 km）とMFレーダー（高度70 kmから91 km）のデータを併せ描いている。中間圏から下部熱圏にかけての、夏における風速の高度変化が顕著である。

ロファイルを取得することが可能となりました。しかし同時観測はまだ始まったばかりです。これから数年のデータの蓄積を経て、中間圏における大気重力波やプラネタリー波の活動度と、下部熱圏風との関係を定量的に探っていきたいと思います。また下部熱圏風には、季節変化や太陽活動度変化以外にも、日変化という大きな特徴があります。これは、大気潮汐波の強度が日によって大きく変動する現象です。中間圏における波動間の相互作用が原因と考えられていますが、未だ観測的に十分な解明はなされていません。これらの理解を深めたうえで、近い将来には、地磁気擾乱時における下部熱圏風の応答の解明を行いたいと考えています。

今後の課題

ノルウェーのトロムソにおいて、2つのレーダーを用いて中間圏から下部熱圏の風の高度プ