ISSN 1345-7063

名古屋大学 太陽地球環境研究所
http://www.stelab.nagoya-u.ac.jp

STEL Newsletter

March 2011

No. 58

# 北極域超高層大気の温度変動に迫る～新ナトリウムライダー～

野澤 悟徳 ( 電磁気圏環境部門 )

## はじめに

オーロラが輝く極域の超高層大気。高度 90 km より上にあるこの領域には、地球表面と比較して低密度 ( 百万分の 1 以下 ) ながら、大気分子・原子 ( 窒素分子、酸素分子、酸素原子 ) は数多く存在しています。下部熱圏と呼ばれる高度 90 km から 130 km の領域は、宇宙と地球大気をつなぐ遷移領域とも言え、そこでは様々な興味深い物理現象が起こっており、大気温度や風速・風向は、ダイナミックに変動しています。その変動の主な原因は、太陽光 ( 紫外線、極端紫外線 ) と、大気波動や太陽風エネルギーです。下層大気から伝搬してくる大気波動 ( 大気重力波、大気潮汐波 ) の多くは、この高度領域で散逸し、この領域の大気ダイナミクス ( 風速変動 ) に大きな影響を与えています。一方で、太陽風エネルギーは、磁気圏を経由して極域の地球大気に進入し、膨大なエネルギーをもたらします。オーロラがその代表例です。太陽・磁気圏起源の高エネルギー電子が極域大気に侵入し、その大気と衝突した結果、酸素原子 ( 緑、赤 ) や窒素分子 ( 紫 ) が輝くのがオーロラです。輝く高度の下限はおよそ 90 km ぐらいで、上限は 500 km 程度です。時には高エネルギー電子・陽子は、高度 80 km 以下の大気まで侵入してきます。

図 1　ナトリウムライダーのレーザービーム ( オレンジ色 ) とオーロラ ( 緑色 )。

## 研究目的

天空にオーロラが舞うオーロラ嵐のときに、地球大気はどのような影響を受け、どのように変動をしているのでしょうか? これまでのレーダー観測から、高度 107 km 付近より上の大気では、風速・風向が大きく変動することが分かってきています。時には風速が 500 m/s を超えるような「暴風」が吹くこともあります。では、大気温度はどのぐらい変わるのでしょうか? 大気温度は時々刻々と変わっています。例えば日本では、地表面の 1 日の気温差は、だいたい 10℃ぐらいです。下部熱圏では、オーロラ粒子による粒子加熱、電離圏電流によるジュール加熱など、オーロラ嵐のときに大きな熱の発生が知られていますが、下部熱圏で大気温度はどのぐらい変動するのかはまだよく理解されていません。また、どのぐらい低い高度まで、大気温度が太陽風エネルギーにより変動するのかもまだ分かっていません。この謎に迫りたく、特別教育研究経費により、

新たにナトリウムライダーを製作・開発し、ノルウェーのトロムソ ( 北緯 69.6 度、東経 19.2 度 ) に 2010 年 3 月に設置をしました。図 1 に、ナトリウムライダーのレーザー光 ( オレンジ色 ) とオーロラ ( 緑色 ) の写真を示します。

## ナトリウムライダー

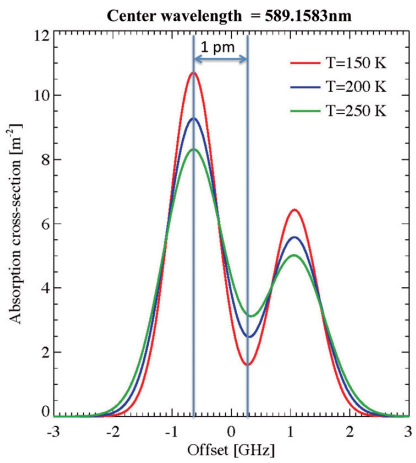
ライダーは光のレーダーです。高度 80 km から 110 km の領域では、流れ星が輝いています。宇宙から降り注いでくる塵や隕石が大気に突入し、燃えるときに明るく輝くのが流れ星です。その発光高度が、だいたい 80 km から 110 km です。この高度領域には、これら流星の燃えかすが起源と考えられている、ナトリウム、カルシム、カリウムなどの金属原子が多量に存在しています。これら金属原子は、ある特定の波長の光を非常に強く散乱する ( 共鳴散乱と呼ばれる ) 性質を持っています。この共鳴散乱に着目し、その共鳴散乱波長のレーザー光を地上から上空に打ち上げ、その散乱光を受光するのが、共鳴散乱ライダーです。ナトリウムライダーでは、ナトリウムの共鳴散乱波長 589.158 nm (= 0.000000589158 メートル ) を用いています。Nd:YAG 結晶から発振する 2 光波 ( 波長が 1064 nm と 1319 nm) のレーザー光を、非線形光学結晶と呼ばれる特殊な結晶に同時に入射すると、2 光波の周波数の和に相当する波長、589 nm のコヒーレント光が発生します。広く使われている Nd:YAG レーザーを用いて、ナトリウム原子の D 線共鳴光波を発生させることができるのは、自然界の奇跡と言えるかもしれません。そして、約 1 pm ( ピコメートル ) (= 0.000000000001 メートル ) 異なる 2 つの波長のレーザー光を交互に放射し、受信することにより、その散乱受信強度比からナトリウム原子の温度が分かります。これは散乱光の強度比が、ナトリウム原子の温度により、変わるためです。そして金属原子は、大気と比べて密度が低いので、大気と熱平衡 ( ナトリウム原子温度＝大気温度 ) と考えることができ、大気温度を導出することができます。我々のライダーでは、1 分毎に波長を切り替えて観測を行っています。図 2 に、ナトリウム原子のスペクトルを 3 つの温度に関して示します。受信には、大口径の望遠鏡、狭帯域光学フィルター、および弱い光を受信・増幅する光電子増倍管を用いています。

我々の開発したライダーの特徴は、(1) 従来にない繰り返し速度が 1 kHz の 2 W 級全固体パルスレーザーを使用、(2) ナトリウムセルを用いた絶対周波数モニターによる高精度観測、(3) レーザーダイオード (LD) 励起による完全空冷のレーザーの実現と長期安定動作、(4) 大気温度および風速が同時測定可能、(5) マルチビーム観測による 5 方向 ( 東西南北と鉛直方向 ) 同時観測が可能、などで、これまでの同種のナトリウムライダーにない多くの特徴を有しています。図 3 に、ライダーの受信望遠鏡を示します。5 つの望遠鏡 ( 口径 36 cm) は、それぞれ独立に観測が可能になっています。

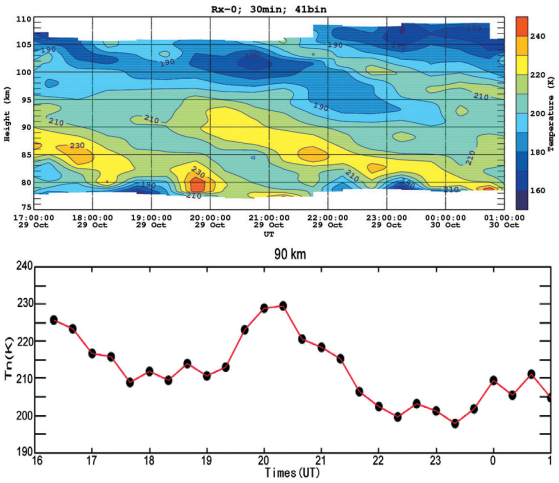
## 観測開始

2011 年 9 月後半にいよいよ最終整備を行い、9 月 29 日にトロムソにて初めてレーザー光を上空に打ち上げました。10 月 3 日には、5 ビーム打ち上げ実験も行い、無事成功を納めました ( 図 4)。

2010 年 10 月から 2011 年 3 月の観測シーズンは、観測初年度であるため、ライダーの性能評価



左：図 2　ナトリウム D 線のスペクトルとその温度変化の様子。
右：図 3　受信望遠鏡。口径 36 ㎝の望遠鏡に、光電子増倍管が装備されており、5 系統独立に受信が可能となっている。




左：図 4　5 ビームレーザーの打ち上げ。後方には、EISCAT UHF レーダーおよび VHF レーダー。
右上：図 5　2010 年 10 月 29 日の大気温度観測例。
右下：図 6　2010 年 10 月 29 日の高度 90 km の大気温度変動。

をかねて、1 ビームの鉛直方向観測に専念しています。同時に、いろいろなシステム改善を進めています。図 5 に、10 月 29 日の 17 時 UT ( 世界時＝日本時間－ 9 時間 ) から翌日の 01 時 UT までに取得された大気温度観測データを示します。観測高度領域は、約 80 km から 110 km です。この図から、この高度領域の大気温度は、数時間のスケールで大きく変動していることが分かります。また、大気重力波によると思われる変動を示している様子が分かります。図 6 に、高度 90 km の大気温度を横軸時間、縦軸温度で示しています。200 K ( 絶対温度＝摂氏温度＋ 273.15℃ ) というのは、約－ 73℃ で、非常に低温です。この図から、3 時間程度で、約 30℃変動してことが分かります。2011 年 1 月には、15 時間近くの連続データを 4 晩取得することができました。この観測データを解析することにより、大気潮汐波や大気重力波による大気温度変動の様子を調べることができると期待しています。また、この 1 月の観測期間中には、オーロラ活動が活発であり、他の観測データと組み合わせて、大気波動による変動のみでなく、オーロラ活動に伴う大気温度変動に関する知見が得られるのではと思っています。

## 研究の重要性

地球環境の理解の意味でも、高度 80 km から 110 km の大気温度観測は重要です。例えば、地球温暖化の影響は、対流圏では温度上昇になりますが、中間圏 (50 － 90 km) では寒冷化となることが指摘されています。特に大気密度が低い ( 地球表面の数十万分の 1 以下 ) ため、大気温度変動は、地表面の変動に比べて大きな変動を示すと考えられ、地球温暖化の進行 ( または寒冷化の進行 ) をモニターするのに適しています。一方で、オーロラ加熱により高度 105 km 付近で生成された一酸化窒素が、成層圏上部 ( ～ 50 km) まで下方輸送され、オゾンを破壊することが指摘されていますが、定量的な理解は十分ではありません。我々は、フィンランドのグループと連携して、この問題にも取り組むことを考えています。このように、この高度領域の大気温度変動を観測し、その変動メカニズムを解明することは、地球大気全体の理解を深める上でも重要であると言えます。

## まとめ

これまで我々は、レーダーを用いて、大気風速変動に着目してこの高度領域の現象を研究してきました。この研究の発展のために、大気温度の測定が必要であり、ナトリウムライダーを新たに開発・製作し、導入しました。このナトリウムライダーと既存の観測装置との連携により、重要な物理量を精度良く測定でき、オーロラに代表される、磁気圏－電離圏－熱圏結合の研究の解明が大きく進むと考えています。

今回紹介しましたナトリウムライダープロジェクトは、名古屋大学太陽地球環境研究所、信州大学工学部、理化学研究所、トロムソ大学の共同にて進めています。このナトリウムライダーの開発・製作、トロムソでの設置・観測開始までには、3 年以上の時間を要しました。この間、多くの方々からご協力・ご援助を頂きました。この場を借りまして、お礼申し上げます。