

改良されたスペクトル取得型光学オゾンゾンデによる 成層圏オゾン、二酸化窒素の観測

村田 功¹、野口 克行²

¹東北大学大学院環境科学研究科、²奈良女子大学大学院自然科学系

1. はじめに

東北大学では、上部成層圏のオゾンを直接観測する光学オゾンゾンデを開発し、宇宙科学研究所によって開発された薄型高高度気球と組み合わせて三陸におけるオゾン高度分布観測を1994年から2007年まで14年連続して8月下旬～9月上旬の期間に行ってきた[1, 2, 4, 5]。また、2010年には大樹町で9月に観測を行っている。この装置は上部成層圏オゾンと二酸化窒素を直接観測できる数少ない観測器であり、2010年には、オゾン以外に二酸化窒素なども同時観測できるよう小型分光計を用いたスペクトル取得型の観測器を開発したが、機器トラブルなどもあり2013年5月によりやく初観測を行った。しかし、解析をしてみると改良すべき点が多くあることが分かり、二酸化窒素を精度よく観測するための改良を行い、2016年9月にこの装置を用いて観測を行った。今回は、改良点とその効果について報告する。

2. 観測装置

光学オゾンゾンデは、オゾンハートレー帯吸収によって太陽光の300 nm付近の紫外線の強度が高度に対して変化することを利用してオゾン濃度の鉛直分布を得る[3]。ECCオゾンゾンデのように外気を取り込む必要がないため、大気の薄くなる30 km以上での観測精度がよいことが特徴である。受光面にはテフロン製の拡散板を用いており、これにより太陽追尾をしなくても光を観測器内部に取り込むことができる。従来の装置では内部に取り込まれた光を石英製のビームスプリッターによって分け、オゾンによる吸収を受ける波長(300 nm)とオゾンの吸収を受けない波長(420 nm)の2波長の強度をフィルターによる分光で測定し、その比を取ることで観測器の揺れによる入射光量の変化を補正した上でオゾン量を求めていたが、新しく開発したスペクトル取得型では小型分光器を用いて約280-500 nmの範囲を2400チャンネルに分けて測定している。これによりオゾン以外に二酸化窒素やOC10, BrOなどの吸収帯のスペクトルも取得できる。また、風速を求めるためにGPSを搭載し緯度、経度、高度データを取得している。スペクトル取得型光学オゾンゾンデのサイズは340 x 170 x 250mm、重量は2.2kgである。

3. 2013年の観測における問題点とそれに対応した改良

2013年5月のスペクトル取得型光学オゾンゾンデによる初観測の解析を行ったところ、オゾンに関しては同時搭載のフィルター型や札幌のオゾンゾンデと比較してまずまずの結果が得られたが、NO₂に関しては1-40kmのスラントコラムでさえかなり大きな誤差(377%)でしか求まらなかった。なお、この解析では460-490nmのスペクトルから差分吸光法(DOAS)用の解析プログラムNLIN_D[6]を応用してコラムを求めている。

解析過程でのデータのチェックや予備機を用いた実験室でのテストなどから、この原因として以下のことが考えられた。

1. 分光器アレイセンサーのピクセル毎のゼロレベルの差および感度ムラによるランダムでないノイズ成分がかなり大きい。
2. 分光器の温度変化による波長シフトや分解能変化があり、補正が難しい。
3. そもそもNO₂の吸収量が不足している。

そこで、これに対し以下のような改良を行った。

1. ピクセル毎のゼロレベルの差および感度ムラについては、観測前に較正用データを取得しておく。
2. 分光器の温度変化を抑えるため、保冷剤を用いた温度安定機構を構成する。
3. NO₂の吸収量を増やすため、光路長の長くなる日出直後の観測を行う。

1については、事前に光の入っていないゼロレベルおよび白熱球を用いた波長方向に細かい構造のない感度ムラ補正用スペクトルをそれぞれ30分(1000スペクトル程度)測定した。図1に最高到達高度付近(44-45kmの1km平均)での観測スペクトルにゼロレベルおよび感度ムラの補正を行った例を示す。黒線が観測した生スペクトル、青線が、ゼロレベル補正後、緑線がゼロレベルと感度ムラ補正後、赤線は感度ムラ補正用の白熱球スペクトルである。図を見ると白熱球スペクトルにも細かい構造が見え、同様の構造が生スペクトルにも見られる。これが感度ムラの影響で、白熱球のスペクトルを用いて補正することで緑線のようなスペクトルが得られる。これにより、かなりS/Nを向上させることができた。(なお、図1ではまだ波長感度特性の補正はしていないため、あくまで感度ムラの補正効果を見るための初期データである)

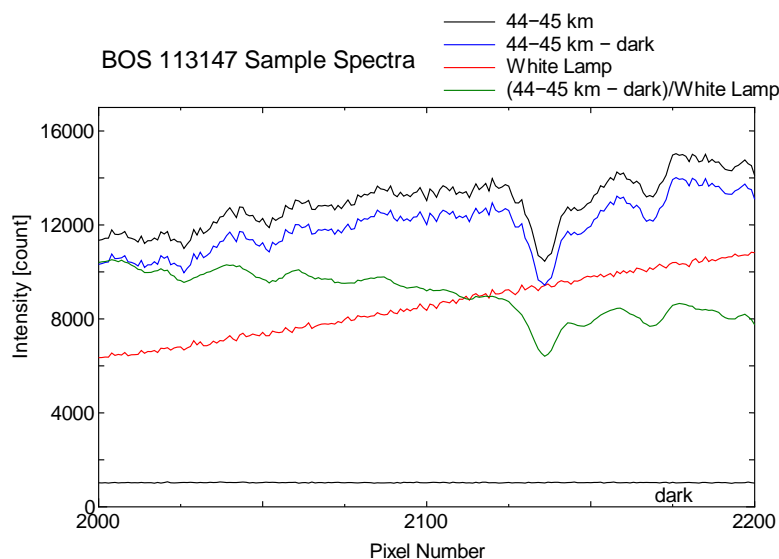


図1. 感度ムラ補正前後のスペクトル例

2については、一般的にはヒーターと温度コントローラを搭載して能動的に温度安定化を図るが、この方法では消費電力が増えてバッテリー容量を大きくする必要があり重くなってしまう。そこで今回は保冷剤を用いることにした。保冷剤は、凝固点付近では相変化に伴う熱放出(または吸収)により一定温を長時間維持可能である。過去の観測では、装置内の温度は放球前の室温付近から放球後に0℃付近へと下がっていくことが多かったため、凝固点が5℃、10℃の保冷剤を2種類用意し、事前のテストの結果5℃のものを使用した。分光器自体の発熱量は1.25W程度であるので、100gの保冷剤2個で分光器を両側から挟み込み、全体を発泡スチロールの保温ケースに収納する形とした。なお、分光器自体も以前使用したUSB4000よりも温度安定性の上があったFlame-T(熱安定性: 0.06pixels/℃)に交換している。

図2に分光器温度(赤)と外気温(黒)の放球後の時間変化を示す。放球時の気温は18℃程度であったため、観測器は前日から保冷剤をセットした状態で5℃の恒温槽に保管しておき、当日放球準備直前に取り出した。その後放球までの1時間半程度で分光器温度は10℃弱まで上昇していたが、放球後に外気温の下降とともに下がり、観測を開始する

高度16kmに到達する頃には4.25°Cとなり、その後は最高高度の45kmに到達するまで0.8°C程度の変動に収まっている。つまり、今回は観測時間帯にちょうど保冷剤の凝固点付近の温度を維持することができ、分光器の温度を1°C以内で安定化することに成功した。

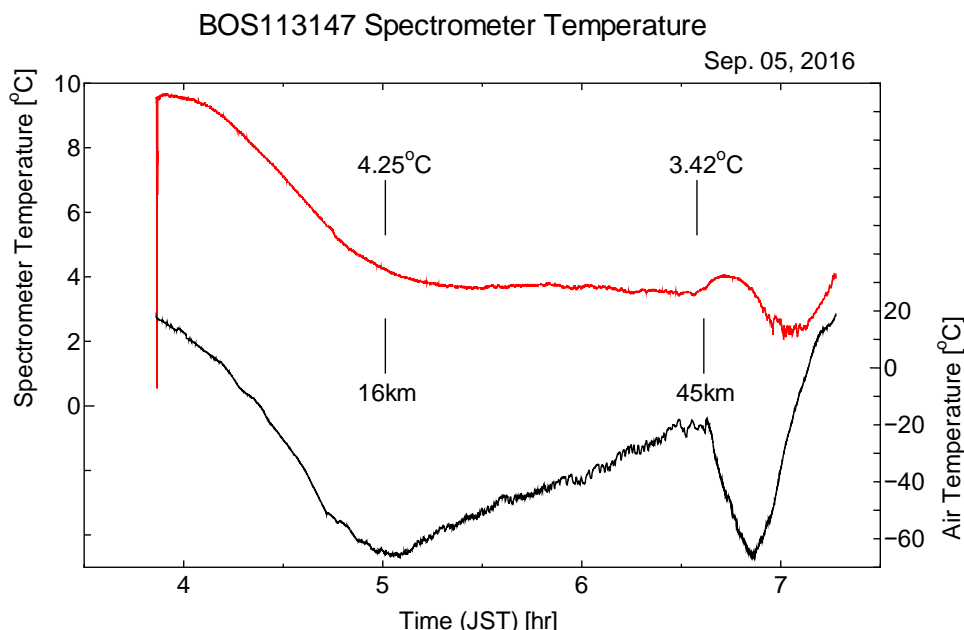


図2. 分光器温度(赤)と外気温(黒)の放球後の時間変化

この結果、分光器の波長シフトや分解能変化もほぼなかったようである。図3に日出直後の高度15-16kmと最高高度付近の44-45kmのスペクトルを示すが、15-16kmのスペクトルはまだ温度下降中のもののためか若干シフトしているものの、ピクセル番号2136付近の太陽大気吸収線がほぼ一致していることがわかる。

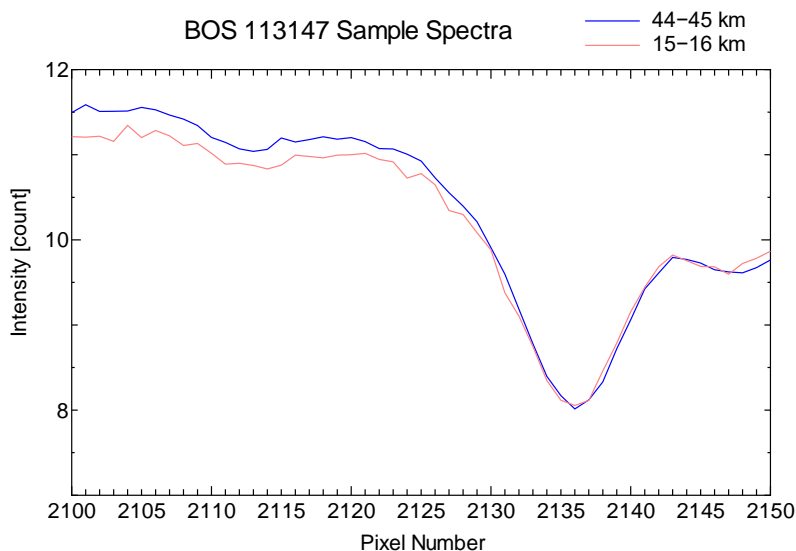


図3. 高度15-16kmと44-45kmのスペクトルの比較

3については、観測を開始する下部成層圏で日出を迎えるように放球すると、光路長を長くとれるため2013年の観測時の10倍程度の吸収を期待できることから、日出1時間程度前の放球を行うこととした。また、これに伴って日出直後にほぼ水平方向から入射する太陽光を観測器内に導くため、図4のようにアルミ製の球面鏡を入射口の直上に設

置した。球面鏡には結露防止用のヒータも設置した。なお、可視から紫外領域の高反射率を確保できるコーティングを施した凸面ミラーで半球状のものは市販されていないため、今回はアルミ球を利用し、放球直前に研磨剤で表面の酸化皮膜を取り除くことで紫外域の反射率を確保している。実際の観測では、高度15km付近で日出を迎え、その前後からスペクトルデータが無事に測定できていることを確認している(図3参照)。

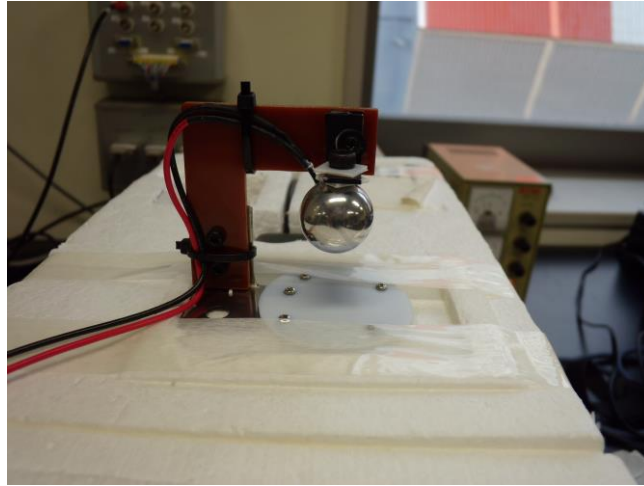


図4. アルミ球面鏡

観測スペクトルのデータ処理はまだこれからであるが、今回は観測自体はほぼ予定通りに行うことができ、分光器温度も非常に安定した状態であったので、NO₂も成層圏カラムなどはある程度の精度で観測できていると期待している。なお、日出直後の観測では300nm付近の紫外線は届かないため、オゾンの高度分布観測にはもう少し長波長側のスペクトルを使う必要はあるが、これも含めて慎重に解析を進めていく予定である。

参考文献

- [1] 岡林昌宏、田口真、岡野章一、福西浩、高高度気球搭載光学センサーによる成層圏オゾンの観測、*宇宙科学研究所報告特集*、第32号、105-111、1995.
- [2] 岡林昌宏、村田功、福西浩、高高度気球搭載光学オゾンゾンデを用いた成層圏オゾン高度分布の観測、*宇宙科学研究所報告特集*、第40号、45-54、2000.
- [3] Okano, S., M. Okabayashi, and H. Gernandt, Observations of ozone profiles in the upper stratosphere using a UV sensor on board a light-weight high-altitude balloon, *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **51**, 225-231, 1996.
- [4] Murata, I., K. Sato, S. Okano, and Y. Tomikawa, Measurements of stratospheric ozone with a balloon-borne optical ozone sensor, *International Journal of Remote Sensing*, **30**, 3961-3966, 2009.
- [5] 村田功、佐藤薫、山上隆正、岡野章一、富川喜弘、GPS搭載型光学オゾンゾンデの開発、*宇宙航空研究開発機構研究開発報告*、JAXA-RR-08-001, 57-62, 2009.
- [6] A. Richter, Absorptionsspektroskopische Messungen stratospha"rischer Spurengase u"ber Bremen, 53° N, PhD-Thesis, University of Bremen, June 1997 (in German)