

二酸化窒素観測に向けたスペクトル取得型光学オゾンゾンデの改良

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奈良女子大学研究院自然科学系

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]。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を直接観測できる数少ない観測器であり、またオゾンや気温・風速の高度分布にみられる波状構造をもちいて大気重力波のパラメータも導出可能なように、2002年には観測器を改良しGPSを搭載し、ECCオゾンゾンデとの同時観測を始めた[5]。2004年からは超薄型気球を用いて高度 50km 前後までの観測も何度か行っている。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った。ここでは、二酸化窒素を精度よく観測するための改良点について報告する。

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現状で300 x 170 x 250mm、重量は2.5kgであるが、今後の改良により若干変化する見込みである。

3. 2013年の観測における問題点

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分光法(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ずれ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。

1については、観測前に較正用データを取得しておけば補正可能である。2についても較正用データを取得しておくことは重要であるが、まずは温度安定化を図る方がより効果的である。3については観測をこれまでの日中から日出直後にすることで吸収量を増やすしかないと考えられる。

4. 装置及びデータ処理の改良

ゼロレベルについては波長方向にはほぼ一定で、温度と共に変化することは分かっていた。2013年の観測時にも事前に10分程度光を入れない状態で測定してはいたが、波長方向のばらつきはほぼランダムと考えていたので、観測時のゼロレベルは太陽光の届かない290nm以下のピクセルの値の平均値を取り、これを全ての波長に共通なゼロレベルとしていた。ところが、実際に測定したゼロレベルを積分してみてもあまりばらつきが下がらず、逆に複数のゼロレベルデータをピクセル毎に差を取ったところばらつきが少なくなった。このことからゼロレベルはピクセル毎に異なる固有の値を持つことが分かった。今後は、事前のノイズレベル測定データから時間方向に平均化してランダムノイズを除いたデータを作り、これを温度変化に合わせてシフトしたものを観測データから差し引く方法でピクセル依存のノイズ成分を除去できると考えられる。

感度ムラに関しては図1にその例を示す。ゼロレベル同様に感度もピクセル毎に異なる固有の値がありランダムではないため、赤線の白熱球や青線のXeランプの測定スペクトルは1000回程度の積算をしてランダムノイズ成分を落としても滑らかにならない。しかし、緑線のように白熱球の測定スペクトルでXeランプの測定スペクトルを割ってやるとピクセル間のばらつきが消えて滑らかなXeスペクトルが得られる。実際の解析時には白熱球のような波長方向に細かい構造のない光源を測定してそれに直線あるいは二次曲線などのフィッティングをし、これを基にピクセル毎の相対感度比のデータを作っておけば、感度ムラの補正が可能となる。2013年の観測時にはXeランプのデータは取ったものの白熱球のデータは取っておらず、Xeランプの細かいスペクトル構造のため感度ムラ補正データは作れなかったが、次回は事前に白熱球の測定をしておく予定である。

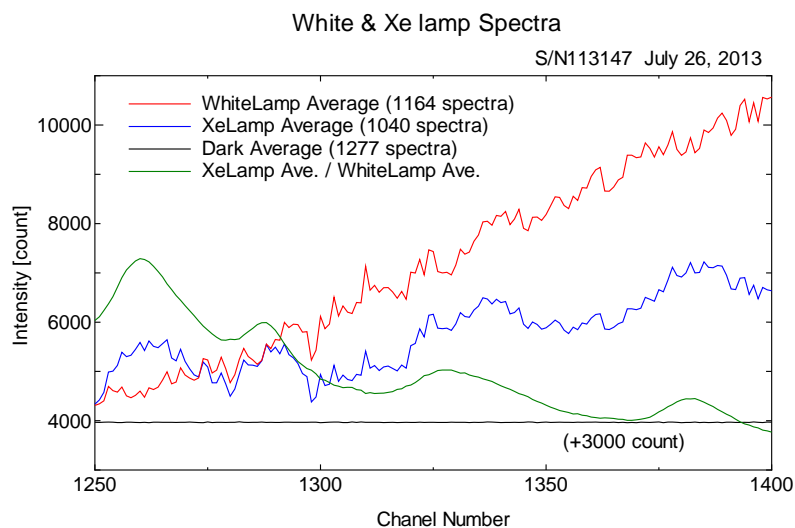


図1. 感度ムラの測定例

分光器の温度安定化としては、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方法が一般的であるが、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います。しかし、この観測器は成層圏上部まで観測するために軽量にしたい。そこで、現在考えているのは分光器を保冷剤とともに保温容器に入れることである。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°C付近へと下がっていくことが多いので、これにより放球前から分光器を0°C近辺に保つことができれば、波長ずれ等はかなり押さえられると考えられる。分光器の発熱量と放球後の観測時間との関係からどの程度の保冷剤を使えばよいかは検討中であるが、近いうちに実験しておく予定である。

NO₂吸収量については、図2に高度20kmでSZA=89°、40kmでSZA=79°を仮定したときの見積を示す。20kmと40kmの吸収量の差はNO₂で2%程度となっており、2013年の観測時はNO₂吸収量の差が0.2%以下であったことからすると10倍以上の吸収が得られることになる。これと、先に述べたノイズの低減策によりかなりS/Nは向上すると考えられる。

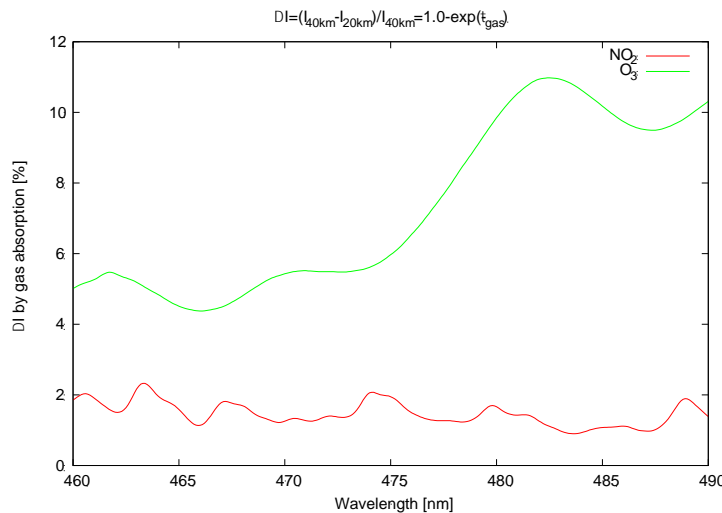


図2. 日出直後に20kmを通過する場合の吸収量

このように日出直後の観測をする場合、これまでの拡散板では太陽光を取り込みにくいので、図3に示すように半球状の鏡を使って反射光を光ファイバに取り込むように変更する必要がある。そこで図4のようなアルミ球を使った反射鏡を試作してテストした。

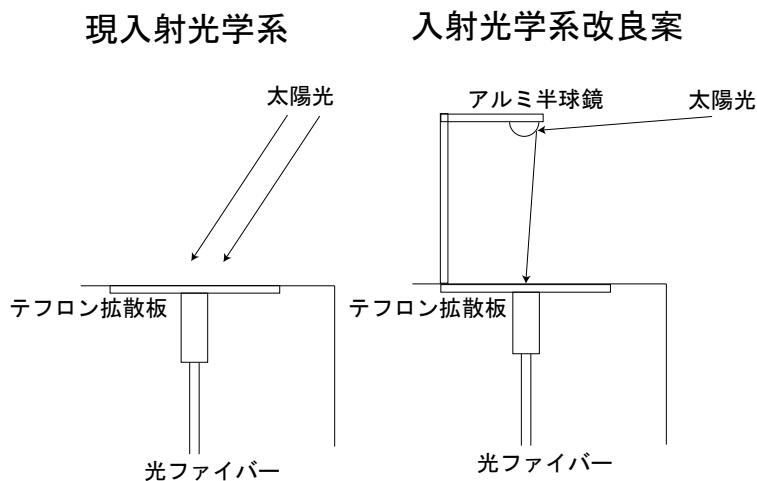


図3. 入射光学系の改良案

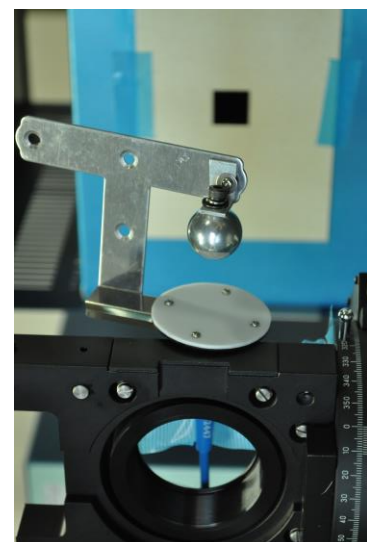


図4. 試作した反射鏡

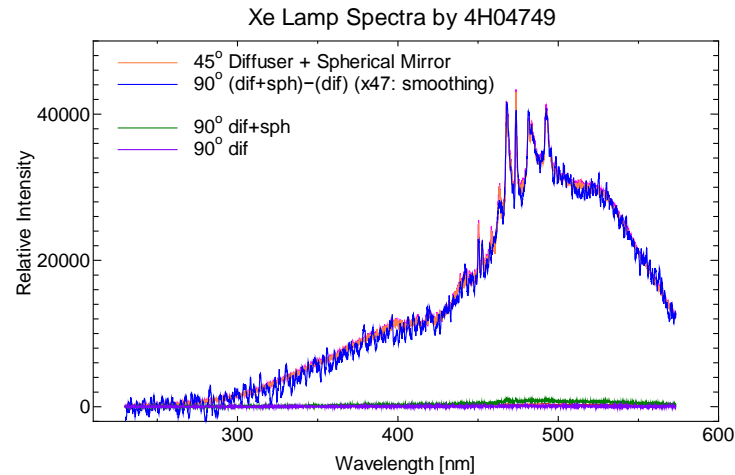


図5. アルミ球反射鏡で反射したXeスペクトルと直達スペクトルの波長特性比較

図5にXeランプを使ってアルミ球反射鏡で反射したスペクトルと直達スペクトルを比較した結果を示す。オレンジが直達スペクトルで、緑が90°方向からの光をアルミ球で反射したスペクトルである。青はこの反射光成分を47倍にしたもので、ほぼ直達光と同じスペクトルとなっていることが分かる。強度は数十分の一になってしまうが、これを積分時間や積算回数でカバーすれば観測可能であることが分かった。今回は単なるアルミ球を試験的に使ったが、今後はコーティング付きの凸面ミラーを購入して光学系の支持部などの設計を行う予定である。

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逆に太陽高度が高い方が適しているが、オゾンの吸収帯はもう少し長波長側にも伸びているので、解析波長を変更することで対処可能である。2013年のデータでも長波長側を使ったオゾンの解析も試しておき、精度の検討をしておく予定である。

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 stratosphärischer Spurengase über Bremen, 53° N, PhD-Thesis, University of Bremen, June 1997 (in German)