

# JEM/SMILES が観測する成層圏 BrO について

\*林 寛生(ISAS/JAXA)、今井 弘二(とめ研究所)、高橋 千賀子(ISAS/JAXA)、  
鈴木 睦(ISAS/JAXA)、佐野 琢己(ISAS/JAXA)、秋吉 英治(環境研)、  
塩谷 雅人(京大生存圏)、谷口 弘智(富士通 FIP)

## 1. はじめに

2009 年 9 月に打ち上げ予定の SMILES は、国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験モジュール (JEM) の曝露部に取り付けられ、大気周縁からの微弱なサブミリ波帯放射を 4K まですで冷却した超伝導センサ (SIS ミクサ) によって測定し、成層圏オゾン化学に関連する大気微量成分 ( $O_3$ ,  $ClO$ ,  $HCl$ ,  $HNO_3$ ,  $HOCl$ ,  $CH_3CN$ ,  $HO_2$ ,  $BrO$ ,  $O_3$  同位体) をこれまでにないほどの高精度で観測する。現在、宇宙航空研究開発機構の SMILES サイエンスチームでは、各大気微量成分の鉛直プロファイルを導出するための Level2 (L2) データ処理システムの開発と同時に、L2 処理における forward-model に必要なアプリオリ (先験値) プロファイルを提供するべく、大気微量成分の気候値データベース作成を進めている。SMILES の観測では、ISS の軌道が太陽非同期であり、また観測対象の一部 ( $ClO$ ,  $HOCl$ ,  $HO_2$ ,  $BrO$ ) については日射の影響が非常に大きいので、日変化を考慮に入れる必要があることから、CCSR/NIES 化学気候モデルによる実験結果を参考にしている。ここでは、特に一酸化臭素ラジカル ( $BrO$ ) に注目し、成層圏における分布とそれにもとづくデータリトリバル方法、および気候値作成方法について検討する。

## 2. 成層圏 BrO について

1980 年代以降、世界的な関心を集めている成層圏のオゾン破壊に関して、臭素化合物 ( $Br_y$ ) は塩素化合物に次いで重要な役割を果たしているとされる。 $BrO$  は日中の成層圏  $Br_y$  の半分以上を占め [Lary, 1996 等]、比較的検出しやすい分子であることから、これまでも気球や衛星に搭載した測器から観測が行われてきた。成層圏における  $Br_y$  の量は、観測される  $BrO$  と光化学モデル等から予想される  $BrO/Br_y$  比から見積られるが、その値はおよそ 18-25pptv と見積りによって差がある。一方で、成層圏  $Br_y$  のソースと考えられている対流圏の  $CH_3Br$  やハロンガス量は 16-17pptv 程度と見積られており、成層圏  $BrO$  の観測にもとづく  $Br_y$  量 (18-25pptv) を説明できない。この成層圏  $Br_y$  量の不確定性について、最近の報告 [WMO, 2007] では  $CH_3Br$  やハロンガスよりもずっと寿命の短い自然起源の対流圏ソースガスからの寄与が約 5pptv あると見積られているが、その他にもこれ

までの BrO 観測の精度や臭素化合物の光化学反応に関する我々の知識に問題があるのかもしれない、まだ議論の余地が残されている。

BrO は反応性の高いラジカルであり、その分布が日射に大きく影響されることが知られている。図 1 に CCSR/NIES 化学気候モデルを用いた実験による成層圏 BrO 分布の一例を示す。これは 12UT(世界時)におけるスナップショット(瞬間値)なので、経度  $0^{\circ}$  は 12LT(ローカルタイム)、 $180^{\circ}$  E は 00LT に相当する。図では、日中に多く夜間はほとんど存在しないという単純なステップ関数型の日変化に加えて、正午過ぎ(13-14LT)の弱い極小や夕方よりも朝方の極大のほうがやや大きいというローカルタイム(もしくは太陽天頂角)に関する非対称性が見られる。しかしながら、これまでの BrO 観測は、気球を使った地上からの散発的な観測や太陽同期の衛星観測しかなく、現実大気における BrO のグローバルな日変化は未知のままである。

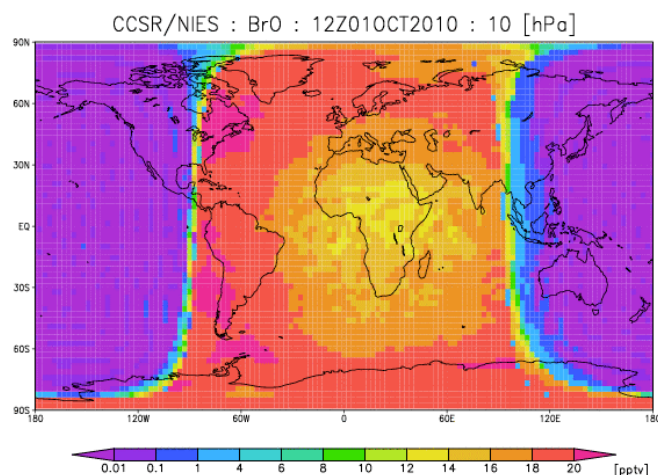


図 1: CCSR/NIES 化学気候モデルの実験から得られた 2010 年 10 月 1 日 12UT における BrO の緯度-経度分布。高度は 10hPa(～日中の BrO 分布のピーク高度)。

すでに述べたように、SMILES は、極低温に冷却した超伝導センサによって前代未聞の高精度で BrO を測定し、また ISS の軌道が太陽非同期であることから、様々なローカルタイムで観測が行うため、BrO の日変化の様子も捉えることができる。このように、成層圏の臭素化合物に関する研究に対して、これまでになかったようなユニークな観測データを提供できると期待される。

### 3. BrO プロファイルのリトリバル方法

#### 3.1. 積算処理について

サブミリ波帯における BrO 信号の強度は非常に弱いため、個々のスキャンだけでは意味のあるプロファイルを導出することは難しい。そこで、なんらかの積算処理により S/N 比を稼ぐ必要がある。SMILES と同じような周波数帯で観測を行っている Microwave Limb Sounder (MLS; EOS-Aura に搭載の測器)では、 $10^{\circ}$  幅の緯度帯で一ヶ月間に得られる全プロファイル(約 3000)を平均することで約 4pptv のリトリバル精度(成層圏の BrO ピーク値の 20-25%程度)を達成している(Kovalenko et al., 2007)。もし、SMILES

で同じ積算処理を施すとすれば、観測精度が良い分だけもっと少ないプロファイル数で同様のリトリバル精度を得られるが、これでは日変化の詳細が隠されてしまう。そのため、MLS とは違った積算処理方法を考えなければならない。

### 3.2. 必要な積算数の見積もり

化学モデルから予想される BrO の日変化(図 1)では、午後の早い時間(13-14LT)に朝夕の極大と比較して約 20%少ない極小を取る。そこで、SMILES の観測でこのような極大・極小を検出することを目標として、最低でも 20%のリトリバル精度を達成するのに必要な積算数を見積もった。図 2 は、積算するスキャン数別に達成されるリトリバル精度の高度分布を示したも

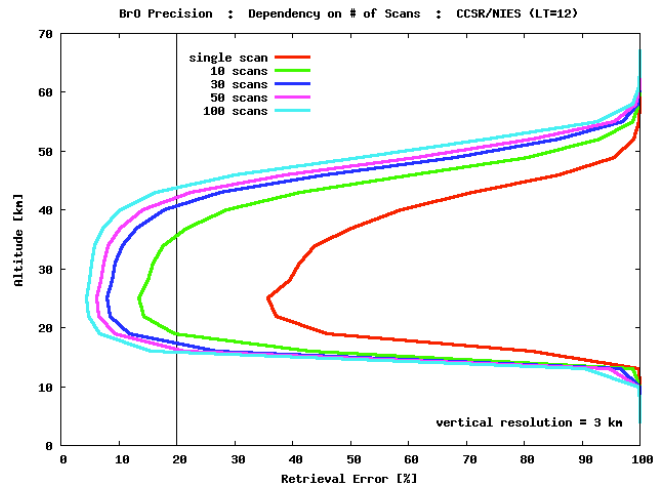


図 2: リトリバル精度の積算数依存性。SMILES の L2 データ処理システムにおいて、10 月 30N の 12LT における気候値(後述)をリファレンスとして計算。

のである(それぞれ 1、10、30、50、100 回の積算)。この結果によると、高度 15-40km の範囲において、30-50 スキャン程度の積算数で十分であることがわかる。また、もし 100 以上の積算数があれば、10%近い精度まで達成できると予想される。

### 3.3. 積算グリッドの設定

次に積算する時空間領域について考察した。図 3 は SMILES の観測位置をシミュレーションした結果について、緯度とローカルタイムの断面、および緯度と太陽天頂角の断面で示したものである(リファレンスとして緯度と経度の断面図も示す)。MLS のような積算方法(緯度  $10^{\circ}$  幅の帯状平均)をとれば、一日でも十分な観測数が稼げるのに対し、ローカルタイムや太陽天頂角を考慮すると、一日の観測でカバーできる範囲はほんの一部分しか無く、一週間経っても全体の 1/3 もカバーされてない様子が見られる。結局、一ヶ月待つことで、(緯度によっては一部のローカルタイムや太陽天頂角における観測が欠けるものの)グローバルな日変化を調べるのに十分な程度に観測が行き渡ることがわかった。そこで、SMILES では、緯度  $10^{\circ}$  ×ローカルタイム 1 時間のグリッドもしくは緯度  $10^{\circ}$  ×太陽天頂角  $15^{\circ}$  のグリッドを設定し、それぞれにおいて一ヶ月分の観測を積算する方法を採用する。図 4 は、このようにして設定した各グリッドにおける観測

数(一ヶ月間)を表したものであるが、ほとんどのグリッドで十分な数の観測(30-50 スキャン以上)が存在することがわかる。

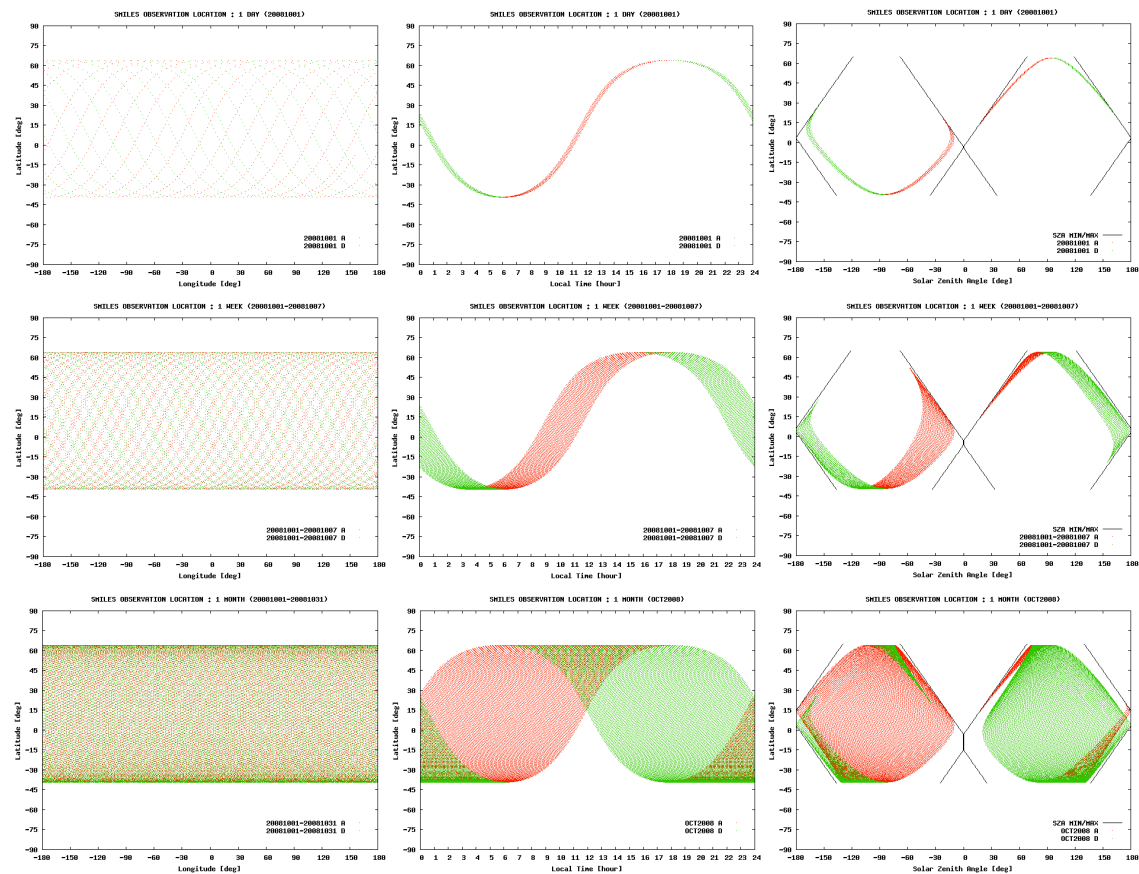


図 3: 2008 年 9 月 30 日 09UT における ISS の軌道要素を用いた、一日(10/1 のみ: 上行)、一週間(10/1-10/7: 中行)、一ヶ月(10/1-10/31: 下行)における全観測位置のシミュレーション。それぞれ、緯度-経度断面(左列)、緯度-ローカルタイム断面(中列)、緯度-太陽天頂角断面(右列)で表す。赤点は ascending 時の、緑点は descending 時の観測を示す。太陽天頂角の座標のうち、負の値は 00LT から 12LT までを意味する。

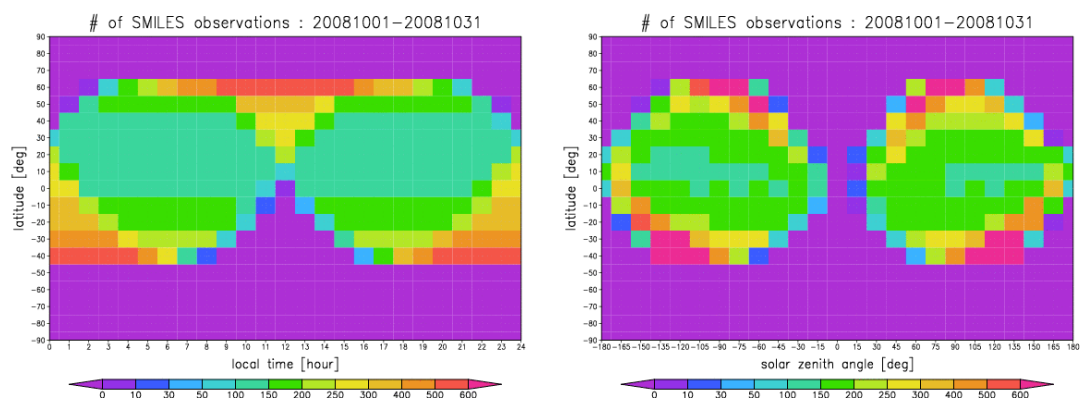


図 4: 図 3 で示した観測位置シミュレーションのうち、一ヶ月(2008 年 10 月)の全観測点を設定した各グリッド(本文参照)で数えたもの。それぞれ、ローカルタイムに関するグリッド(左図)と太陽天頂角に関するグリッド(右図)。

#### 4. BrO 気候値の作成

SMILES の L2 リトリバルにおける積算処理では、積算される全てのスキャンにもとも合致する平均的なプロファイルがただ一つ導出される。つまり、リトリバルのアプリオリ (初期値) についても、積算処理を行うグリッドに対して準備する必要がある。そのため、CCSR/NIES 化学気候モデルを使った実験のうち、2001 年から 2010 年までの各月 1 日と 15 日の 12UT におけるスナップショットを用い、上述したグリッドにおける月毎の平均 (と分散) から気候値データを作成した。その結果の一例を図 5 に示す。図 1 で見られたようなローカルタイムや太陽天頂角に関する非対称性は、この気候値データの中にも現れている。

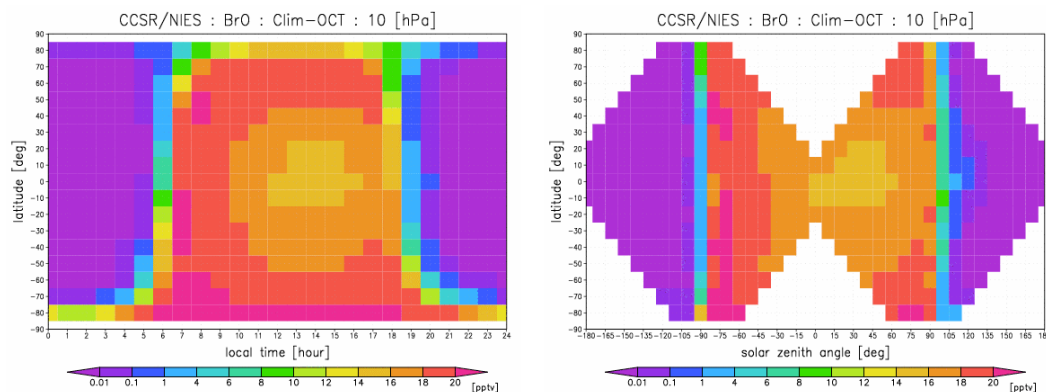


図 5: CCSR/NIES 化学気候モデルの実験結果 (2001–2010 年) から作成した 10 月の気候値のうち、10hPa における分布を示したもの。それぞれ、ローカルタイムに関するグリッド (左図) と、太陽天頂角に関するグリッド (右図)。

#### 5. まとめ

2009 年 9 月より ISS において観測を開始する予定の SMILES に関して、観測対象分子のうち特に BrO の L2 リトリバル方法 (積算方法) について考察した。SMILES は太陽非同期の軌道で観測を行うことから、BrO のグローバルな日変化を検出するために、緯度  $10^\circ \times$  ローカルタイム 1 時間もしくは緯度  $10^\circ \times$  太陽天頂角  $15^\circ$  のグリッドで一ヶ月間の観測を積算処理する予定である。SMILES は非常に高感度なセンサであるため必要な積算数は比較的少なく済み、これらのグリッド・期間における積算処理でも十分な精度 (約 20% かそれよりも良いリトリバル精度) が出せることがわかった。また、リトリバルのアプリオリ用として、CCSR/NIES 化学気候モデルの実験結果から、上記のグリッドにおける月毎の気候値データを準備した。

## 参考文献

- Lary, D. J. (1996), Gas phasae atmospheric bromine photochemistry, *J. Geophys. Res.*, *101*, 1505–1516.
- Kovalenko, L. J., et al. (2007), Validation of Aura Microwave Limb Sounder BrO observations in the stratosphere, *J. Geophys. Res.*, *112*, D24S41, doi:10.1029/2007JD008817.
- World Meteorological Organization (2007), Scientific assessment of ozone depletion: 2006, *Global Ozone Res. And Monit. Proj.*, Rep. 50, Geneva, Switzerland.