

# 流跡線解析ツールSPIRALの開発と対流圏オゾン解析への応用

川岸 諒子, 川添 添子, 林田 佐智子, 野口 克行 (奈良女子大学・理)

## はじめに

流跡線解析は、大気微量成分の分布や起源、輸送を明らかにする有効な手法である。我々は独自に流跡線解析ツールSPIRALを開発し、対流圏オゾン解析へ応用した。

近年、対流圏オゾンは人為起源物質によって増加しつつあることが懸念されている。対流圏オゾンは広域的な大気汚染物質であるだけでなく、地球規模での温室効果をもたらすことが問題視されている。本研究では、長距離輸送の影響を考慮したオゾンの季節変化や長期変動の支配要因を明らかにすることを目的とする。そこでまず、SPIRALの正当性を評価したのち、対流圏における流跡線計算時間を決定するために流跡線発散効果の検証を行った。次に、流跡線解析による空気塊分類に基づきオゾン濃度から得られた対流圏オゾンの解析を行った。

## SPIRALの評価

開発したツールを検証するため他の流跡線解析ツールと同じ条件で計算を実施し、比較を行った。

### 使用データとツール

#### 流跡線解析ツール：SPIRAL

- ・時間積分方向：前方/後方
- ・時間積分方法：オイラー法、2次のルンゲクッタ法、4次のルンゲクッタ法
- ・高度決定方法：等圧面、鉛直風、等温位面

#### 比較に使用したツール：EORC-TAM

- ・EORC/NASDAで開発された流跡線解析ツール [Matsuzono et al., 1998]
- ・時間積分方法：2次のルンゲクッタ法
- ・高度決定方法：等圧面、鉛直風、等温位面、相当温位面、等温位面

#### 比較に使用したデータ：ECMWF Basic Level III-A

- ・空間分解能：2.5°格子
- ・時間分解能：12時間
- ・気圧面：21層(1000-1hPa)

### 比較方法・結果

EORC-TAMと今回開発したSPIRALで同じ条件の計算を実施し、比較を行った。

時間積分は2次のルンゲクッタ法、時間刻みは60分、計算の初期条件は以下の5280ケースである。

- ・初期位置
  - 経度：30°間隔12ケース
  - 緯度：-75°から75°間に15°間隔11ケース
  - 高度：500-900hPa間に100hPa間隔5ケース
- ・計算期間(8ケース)
  - 2001年01月10日, 2001年04月10日
  - 2001年07月10日, 2001年10月10日
  - UTC00時から前方と後方に7日間

流跡線結果の比較には2点間 $(\lambda_1, \phi_1)$ と $(\lambda_2, \phi_2)$ の距離である絶対球面距離(ASD)と流跡線の道りに対するASDの割合である相対球面距離(RSD)を求めた[Knudsen and Carver, 1994]。式は以下の通りである。

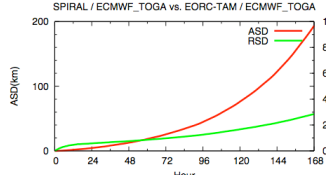


図1：3次元法によるSPIRALとEORC-TAM間のASD(赤、縦軸左)とRSD(緑、縦軸右)

$$\cos(ASD) = \cos\phi_1 \cos\phi_2 \cos(\lambda_1 - \lambda_2) + \sin\phi_1 \sin\phi_2$$

### 結果

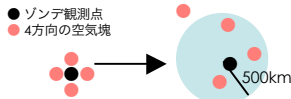
図1は3次元法による計算結果であり計算期間7日目までのRSDの平均値は3%程度であった。しかし、EORC-TAMの3次元法の計算には不具合と思われる箇所があるため、修正したところRSDは0%となり結果は完全に一致した。また、等圧面法と等温位面法ではRSDが1%未満であった。

## 流跡線発散効果の検証

対流圏における流跡線解析の計算期間を決定するために、流跡線発散効果の評価を行った。

### 使用したデータ：NCEP/NCAR再解析

- ・空間分解能：2.5°格子
- ・時間分解能：6時間
- ・気圧面：17層(1000-10hPa)



### 検証方法

空気塊の水平位置の確かさは空気塊の初期状態の集まりによって説明ができ、その集まりから離れて歪んだ割合が不確かさの割合となる。オゾンゾンデ観測地点である札幌、つくば、鹿児島、那覇の4地点をそれぞれ中心として、東西南北4方向に0.25°の位置に空気塊を配置し、空気塊間の距離を検討した。ゾンデ測定日時を初期位置として3次元法で3808通りの後方計算を行った。高度は境界層と下部対流圏の代表として1500m、3000mとしている。空気塊全てが500km以内存在する割合"Compact megaparcels fraction"を考えた[Morris et al., 1995]。

### 結果

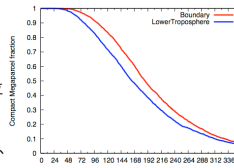


図2：オゾンゾンデ観測日時から後方計算を行い求めたCompact megaparcels fraction。赤が境界層、青が下部対流圏を示す。

168時間では境界層で60%、下部対流圏で50%が500km以内に存在していることがわかった(図2)。

この結果をふまえオゾンの解析では計算期間を7日間とすることにした。

## 空気塊分類に基づく対流圏オゾンの解析

空気塊分類による1970-2002年のオゾンゾンデデータ解析はNaja and Akimoto(2004)によって行われており、1990年まではオゾン濃度が増加、1990年以降は増加していないことが示されている。そこで本研究では2007年7月までのデータを追加することで、その後オゾン濃度が変化したのかどうか解析を行った。

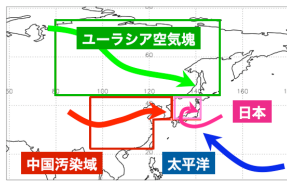
### 解析したデータ：オゾンゾンデデータ

WOUDCがwebで公開しているデータ、及び、気象庁の観測データ。

- 観測地点：解析期間
  - 札幌：1968/12-2007/07 つくば：1968/11-2007/07
  - 鹿児島：1968/12-2005/03 那覇：1989/09-2007/07

### 空気塊分類方法

- 札幌、つくば、鹿児島、那覇の4地点を初期位置とし、オゾンゾンデ観測日時から7日間の後方流跡線解析を行った。Naja and Akimoto(2004)と同様に、下部対流圏(950-750hPa)、境界層(750-550hPa)に分け、空気塊の経路と滞留時間に基づき空気塊の起源を4つに分類した。
- 中国汚染域：中国汚染域に48時間以上
- ユーラシア：ユーラシアに48時間以上
- 中国汚染域に3時間未満
- 太平洋：太平洋上に120時間以上
- 中国汚染域と日本上空に各24時間未満
- 日本：日本上空に36時間以上、中国上空に3時間未満



### 解析結果

例としてつくば境界層における結果を示す。図3はつくばにおける月平均オゾン濃度の時系列である。1990年頃までは増加、その後安定もしくは減少傾向、2005年頃から再び増加しているように見える。

図4は流跡線解析に基づいて分類された空気塊の起源を示している。境界層の夏には太平洋と日本、冬にはユーラシアの空気塊の割合が大きいもの、それ以外の季節では中国汚染域からの影響が大きいことが分かる。

影響が大きい中国汚染域からの空気塊における季節ごとのオゾン濃度の長期傾向を図5に示す。(a)はオゾンが低い値を取るDJF(12月、1月、2月)、(b)はオゾンが高い値をとるAMJJ(4月、5月、6月、7月)である。Naja and Akimoto(2004)ではDJFで1985年頃から減少傾向にあるのに対し、本研究では2005年頃から増加傾向に転じているように見える。AMJJは安定している。

同様にAMJJにおける日本空気塊の長期傾向を図6に示す。2000年から増加が見られ、近年になってつくばで日本付近のオゾン濃度が上昇している可能性が示唆される。

また、日本空気塊ではイベント的に高い値をとることがあり、高濃度の日の一例として光化学スモッグ注意報が発令した2007年5月23日のオゾンゾンデデータのプロファイルと流跡線解析の結果を示す。(図7、図8)

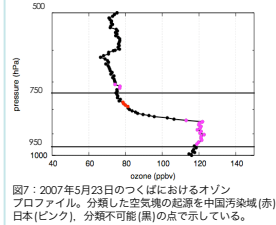


図7：2007年5月23日のつくばにおけるオゾンプロファイル。分類した空気塊の起源を中国汚染域(赤)、日本(ピンク)、分類不可能(黒)の点で示している。

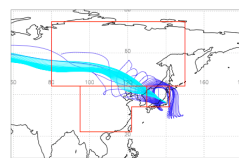


図8：2007年5月23日のつくばの流跡線。光化学スモッグ注意報が発令された、境界層(青)、下部対流圏(赤)

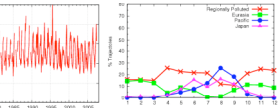


図3：つくばにおけるオゾン濃度

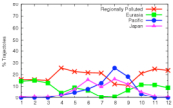


図4：つくばにおける中国汚染域(赤)、ユーラシア(緑)、太平洋(青)、日本(ピンク)を起源とする空気塊の割合

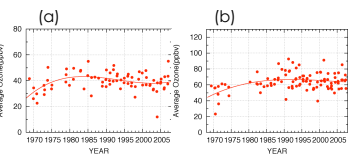


図5：中国汚染域起源の空気塊の季節ごとの長期傾向 (a)AMJJ, (b)DJF

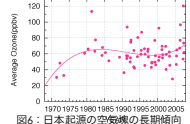


図6：日本起源の空気塊の長期傾向

境界層の下部で約120ppbvの高濃度のオゾンが観測されている(図7)。この時の空気塊を分類した所、高濃度オゾンは日本空気塊に分類された。

## まとめと今後の課題

独自の流跡線解析ツールSPIRALを開発し、比較を行ったところ相対誤差に相当するRSDの平均値は3%以内となった。Naja and Akimoto(2004)の手法を改良し、流跡線解析に基づく空気塊分類を適用し解析を行った。つくば境界層におけるオゾン濃度は2005年以降増加しているように見えるため、中国汚染域と日本を起源とする空気塊のオゾン濃度の長期傾向を見た。日本空気塊では2000年以降増加傾向が見られ、日本付近のオゾン濃度が上昇している可能性が示唆される。今後は、衛星観測と合わせた解析を行う予定である。

## 参考文献

- Naja, M., and H. Akimoto, J. Geophys. Res., 109, 10.1029/2004JD004687, 2004
- Matsuzono, T. et al., EORC technical report, 1998
- Knudsen, B.M. and Carver, G.D., Geophys. Res. Lett., 21, 1199-1202, 1994
- Morris, G.A. et al., J. Geophys. Res., 100(D8), 16,491-16,505, 1995