

Python を用いた統計的流跡線解析 (その2)

田崎盛也・城間朝彰・前田美奈子・南雲春馬・上地薫・友寄喜貴

Statistical Analysis of Trajectories with Python (Part 2)

Moriya TASAKI, Tomoaki SHIROMA, Minako MAEDA, Haruma NAGUMO

Kaoru UECHI and Nobutaka TOMOYOSE

要旨: 大気汚染物質の発生源の推定には流跡線を利用する方法が有用であり、その中でも多数の流跡線を用いて発生源を推定する方法として統計的流跡線解析といった手法がある。本報告では PySPLIT で作成した流跡線データを利用し、流跡線解析の不確実性を考慮した SQTBA とアンサンブルの手法を利用した ens-SQTBA を用いた解析を行い、これまでに利用している CWT との比較を行った。SQTBA は正規分布を用いた平滑化の効果により滑らかな分布が得られた。一方、ens-SQTBA では平滑化の効果は小さく、CWT の特徴を残したような結果が得られた。これらの解析は不確実性を考慮した解析であり、汚染源の推定の考察を深めるための有用な手法であると思われる。

Key words: 統計的流跡線解析, SQTBA 解析, アンサンブル解析, Python, オキシダント (Ox)

I はじめに

流跡線解析は大気環境の分野において、ある大気汚染物質の高濃度事象が観測された際にその汚染源の由来がどの地域由来であるのかといった推定でよく用いられている。流跡線の利用方法は個々の事象に対して用いるほか、ある期間内で観測点に平均的な大気汚染濃度に影響を与える地域を推定するといった目的でも用いられ、統計的流跡線¹⁾と呼ばれる。筆者は CWT (Concentration Weighted Trajectory, 濃度重みづけ流跡線) 解析や、PSCF (Potential Source Contribution Function, 潜在的発生源寄与関数) 解析といった手法を過去の報告²⁾により Python 上で利用可能としている。今回は統計的流跡線の手法で流跡線の不確実性を考慮した SQTBA (Simplified Quantitative Transport Bias Analysis, 簡略化定量輸送バイアス分析)³⁻⁶⁾という手法による解析を報告する。

II 方法

1. 統計的流跡線の手法 SQTBA について

流跡線は解析時間が長くなるほど大気拡散など様々な要素により不確実性は増すと考えられるものの、通常解析結果は一点のみでしか与えられない。SQTBA 解析では大気拡散による不確実性について、正規分布を仮定した拡散モデルを組み込むことによってこれを取り入れている。同解析の拡散モデルでは、大気拡散による正規分布が流跡線の中心線を近似し、標準偏差が風上方向に時間とともに直線的に増加すると仮定している。SQTBA の定義については以下のように説明される³⁻⁶⁾。時刻 t'

に地点 (x', y') に位置する空気塊が時刻 t に地点 (x, y) に到達する遷移確率密度関数 Q_{ijl} は以下の式のように表される。

$$Q_{ijl}(x, y, t | x', y', t') = \frac{1}{2\pi s_x(t')s_y(t')} \left[-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{X - x'(t')}{s_x(t')} \right)^2 + \left(\frac{Y - y'(t')}{s_y(t')} \right)^2 \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 i, j はグリッドセルのインデックス、 l は流跡線のインデックス、 X, Y は流跡線の中心座標である。また、 s_x, s_y は流跡線の標準偏差 (共分散行列の成分) であり時刻 t が進むにつれ増加すると仮定され、次の式で表される。

$$s_x(t') = s_y(t') = at' \quad (2)$$

なお、この時の係数 a は 5.4 km/h と定数として設定されることが多い³⁻⁶⁾。グリッドセル i, j における流跡線 l の積分ポテンシャル物質移動場は、次のように計算される。

$$\bar{T}_{ijl}(x, y | x', y') = \frac{\int_0^\tau Q_{ijl}(x, y, t | x', y', t') dt'}{\int_0^\tau dt'} \quad (3)$$

τ は流跡線の総遡行時間である。各流跡線 l について、計算したポテンシャル物質移動場を、そのサンプリング期間中に測定された対応する濃度 c_l で重み付けすると、次式で定義される濃度重み付け物質移動ポテンシャル場が得られる。

$$\tilde{T}_{ij}(x, y | x', y') = \sum_{l=1}^L \bar{T}_{ijl}(x, y | x', y') c_l \quad (4)$$

濃度重み付け物質移動ポテンシャルを重み付けなしの物質移動ポテンシャルで割ると、濃度単位となり、各グリ

ッドセルでの SQTBA が得られる。

$$SQTBA_{ij} = \frac{\tilde{T}_{ij}(x, y | x', y')}{\sum_{l=1}^L \tilde{T}_{ijl}(x, y | x', y')} \quad (5)$$

今回の報告では先に示した通常の SQTBA に加えて、標準偏差（共分散行列）の算出に際し、係数 a を 5.4 km/h とした単調増加による方法ではなく、流跡線のアンサンブルのステップ実行を利用し、エンドポイント毎に共分散行列を算出した値を用いる方法（以下、ens-SQTBA）に加え、既報²⁾でも取り扱った CWT と結果を比較する。

2. 解析に用いたデータと対象地点

解析に用いるデータについて、地点は沖縄局（中部保健所、沖縄県沖縄市）のオキシダント（Ox）とし、期間は 2017 年度および 2022 年度のそれぞれ 1 時間値を対象とした。

3. 流跡線解析の設定と解析環境について

流跡線解析の開始時間は測定期間内の毎時、流跡線遡行時間は 5 日間（120 時間）とし、気象データは GDAS を用い、出発高度は 500 m とした。また、アンサンブルのステップ実行解析は既報⁷⁾の通り行っている。流跡線ファイルの作成やその後の統計的流跡線解析実行は公式版 Python (<https://www.python.org>) により解析環境を構築し、プログラミング言語 Python (3.10.9) と PySPLIT (0.3.6) を使用した。その他のライブラリについては表 1 に示す。また PySPLIT の使用にはデスクトップ版の HYSPLIT が必要となるためこれも導入しておく必要がある。なお、今回の解析では、逆解析流跡線による相対誤差の確認は行わず、既報⁸⁾では解析対象外とした流跡線もあえてそのまま使用している。

表 1. 使用した Python と主なライブラリのバージョン。

Name	Version
Python	3.10.9
Numpy	1.24.4
Xarray	2023.6.0
pandas	2.0.3
GeoPandas	0.13.2
Shapely	1.8.2
Matplotlib	3.7.2
japanize-matplotlib	1.1.3
Basemap	1.3.7
PySPLIT	0.3.6

4. 解析用データセットの作成について

流跡線データを用いて統計的流跡線解析を行う場合、緯度・経度や観測点の時間、流跡線の遡行時間やアンサ

ンブル数など多次元のデータになり、通常の表形式のデータでは扱いが難しい。そのため、既報²⁾と同様に Python の Xarray というライブラリを使用し、解析に必要な情報を含んだ解析用データセットを作成した。

5. 統計的流跡線解析の設定について

解析範囲の設定について、グリッドセルの範囲は 0–50N°，90–160E° とし、グリッドは正規分布による平滑化の効果を見るために既報²⁾よりも細かく設定し、0.25° × 0.25° のサイズで分割した。

III 結果および考察

1. 各手法の二次元正規分布の広がり方について

SQTBA の各手法の計算ために算出した共分散行列を用いて作成した信頼楕円の例を図 1 に示す。図 1(a)および(b)のどちらにおいても、SQTBA で計算された信頼楕円と ens-SQTBA では信頼楕円の大きさが全く異なっていることがわかる。また楕円の形状について、SQTBA はその定義上共分散を含まないことから、どの段階でも形状はほぼ同じだが、ens-SQTBA は緯度経度方向の広がり方の違いがみられる。

2. エンドポイントの頻度および物質移動ポテンシャルについて

図 2 に 2017 年度の、図 3 に 2022 年度のグリッドセル上のエンドポイントの頻度および物質移動ポテンシャルを 10 の N 乗毎に階級表示した分布を示す。エンドポイントの頻度の分布（図 2(a)および図 3(a)）は 2017 年と 2022 年どちらも同じような分布であり、エンドポイント頻度分布は観測点のある沖縄島付近に集中し、観測点から離れるにしたがって分布が減少しているのが分かる。既報²⁾の 10 年分の結果と比べても分布の傾向は同様であった。流跡線に確率的なばらつきを適用した SQTBA の物質移動ポテンシャル（図 2(b)および図 3(b)）では正規分布を適用した結果、平滑化され分布が滑らかになっている。また観測点からの分布も平滑化により同心円状の広がり方に近づいている。さらに、エンドポイント頻度の少なかった領域にも分布がみられるようになっている。ens-SQTBA の物質移動ポテンシャル（図 2(c)および図 3(c)）は SQTBA と比べると平滑化の効果は小さく、エンドポイントの頻度の特徴を残した分布となっている。これは共分散行列の大きさに差があることに由来する。

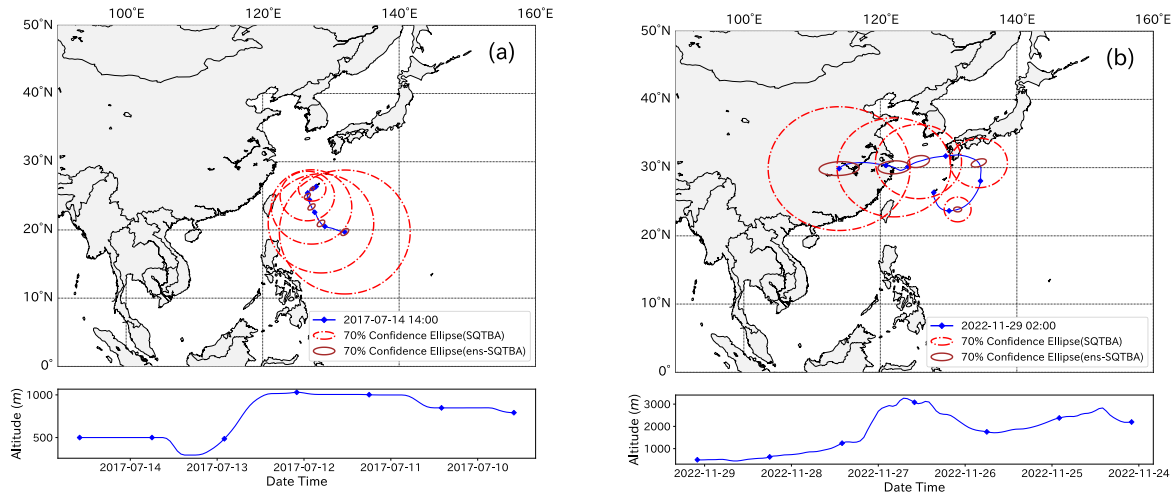


図 1. 流跡線の信頼楕円作成例. 青色実線が流跡線, 楕円は 70%信頼楕円の範囲であり, 赤色破線が SQTBA, 茶色実線が ens-SQTBA. (a)2017 年 7 月 14 日 14 時 (日本標準時). (b)2022 年 11 月 29 日 2 時 (日本標準時).

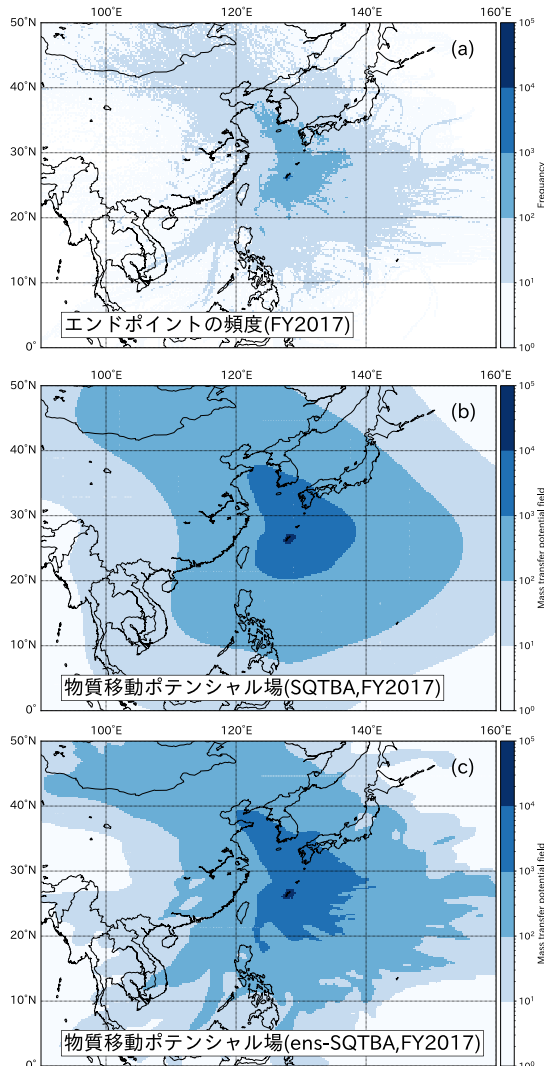


図 2. 2017 年度の流跡線の(a)エンドポイント頻度 および物質移動ポテンシャル場 ((b)SQTBA, (c)ens-SQTBA) の分布.

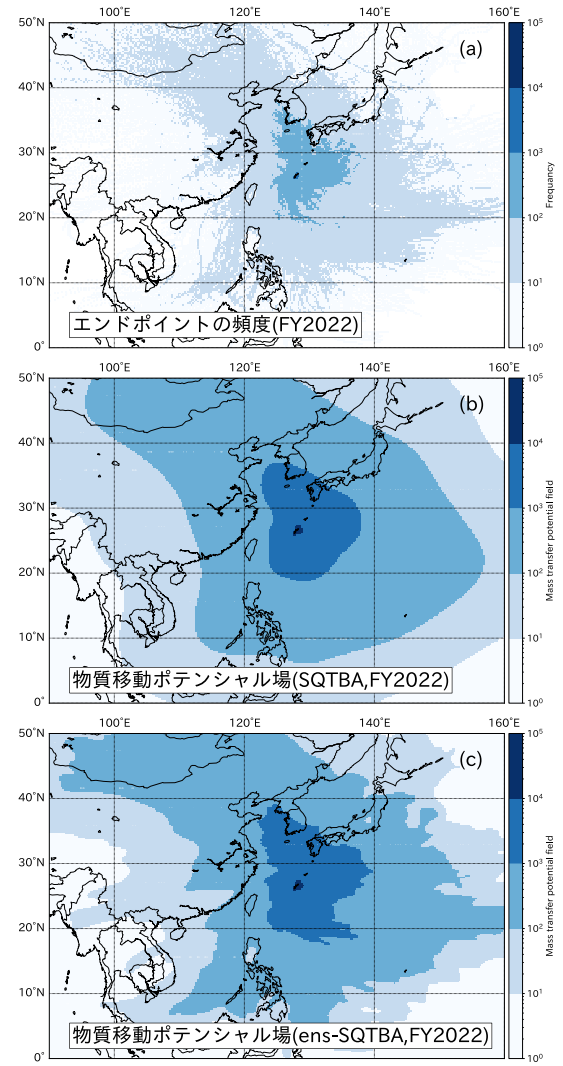


図 3. 2022 年度の流跡線の(a)エンドポイント頻度 および物質移動ポテンシャル場 ((b)SQTBA, (c)ens-SQTBA) の分布.