

14. 大気汚染物質の広域輸送を対象とした流跡線解析手法の検討

The Accuracy of Trajectory Calculations for Long-Range Transport of
Air Pollutants

村尾直人*、太田幸雄*、山形 定*、近藤浩毅*、佐藤久靖*

Naoto MURAO, Sachio OHTA, Sadamu YAMAGATA, Hiroki Kondo, Hisayasu Satoh

ABSTRACT; The increasing attention to large-scale air pollution has resulted in numerous air monitoring networks and field studies. Trajectory calculations are often used to understand the behavior of air pollutants and the results of measurements. However the accuracy of trajectory calculations is not well known, especially for the long-range transport in East Asia. In this study, some recent measurement data are used to determine the accuracy of isentropic trajectory model. The separation between isentropic trajectories and three-dimensional trajectories derived from meteorological data which have sufficient temporal resolution is used to assess the validity of the isentropic technique. The results indicate that the isentropic trajectories arrived closest the boundary layer sometimes differ greatly from three dimensional trajectories arrived at the surface measurement points. The causes of discrepancy is considered. Although the details of each trajectory do not necessarily reflect the actual path of motion of pollutants, the calculations suggest that the ensemble mode of trajectory analysis provides a useful tool of the relative patterns of large scale air motion,

KEYWORDS; Trajectory analysis, Isentropic trajectory, East Asia, Long-range transport

1. 緒言

近年、地球環境問題に関連する微量汚染物質の長期モニタリングや汚染物質の長距離に関する航空機観測等が活発に行われるようになってきた。しかし、これらのデータを解析する手段は意外なほど確立されていない。それらの解析に利用されることが多い流跡線解析手法は、大気汚染の発生源と測定点のデータに関連づける手法として、これまで多くの現象に対して用いられてきた手法である。しかし、広域の輸送過程の評価を行う場合には、これまでの研究成果を利用できるものが非常に少なく、精度などの検討が不十分なまま利用されているのが現状である。以上のことから、本研究では、地表付近の観測をもとに行われる地球大気環境監視および広域大気汚染検出に適用可能な流跡線解析手法の検討を行うとともに、広域観測データへの手法の適用を行い、流跡線解析の適用可能性について検討した。すなわち、

- (1) 流跡線解析手法の検討として、特別に出力された時間分解能の高い気象データからを計算した流跡線を基準として、通常使用されている等温位面流跡線の信頼性を検討した。
- (2) 環境庁が沖縄県波照間島で行っているオゾンとエアロゾルの通年観測に等温位面流跡線手法を適用し、流跡線解析からどのような評価が可能であるかを検討した。

* 北海道大学工学部衛生工学科 Department of Sanitary and Environmental Engineering., Hokkaido Univ.

2. 1 気象データ

流跡線を作成するためには、対象地域を含む広い範囲にわたる気象データが必要となる。利用可能なデータは各気象機関で観測やモデル計算から作成されており、通常入手可能なものとして気象庁やヨーロッパ中期予報センタ（ECMWF）などによるデータがあげられる。これらのデータには6～12時間間隔で風速や風向、温度、湿度などのデータが収録されている。本研究で用いたECMWFデータでは、アジア地域に対して緯度と経度については0.5度（日本付近で緯度方向約55 km、経度方向約48 km）の距離分解能を持ち鉛直方向については地上から100 hPaまでの11レベル（1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100）についてデータが収録されている。時間間隔は6時間である。

一方、本研究では、気象庁の日本域スペクトルモデル（JSM）により出力された気象データも同時に利用した。このデータは、後述する研究対象期間に対して特別に出力されたものであり、極東域のデータが20分間隔で、また鉛直方向には地表付近のデータが充実している特徴がある。

2. 2 流跡線の計算

- (A) 三次元基準流跡線：2. 1に示したJSMデータを用いて三次元流跡線作成し、等温位面流跡線に対する基準流跡線とした。三次元流跡線はその名の通り、水平・鉛直方向の風向、風速を利用して作成される流跡線である。JSMデータは20分間隔でしかも地表付近のデータが充実しているために、観測点高度からの三次元流跡線作成が可能であり、その信頼性も高いと考えられる。三次元流跡線が一般に用いられない理由は、ECMWFのような通常提供されるデータでは、時間分解能が低く、変動の大きい鉛直方向の風が利用できないことが主たる理由である。
- (B) 等温位面流跡線：観測やモニタリングデータに対して通常利用されている流跡線として、ここでは等温位面流跡線をECMWFデータを用いて作成した。大気中において、等圧面や等高度面を考えるように等温位面を考えることができる。温位とは、気圧 p 、温度 T の気塊を基準気圧 p_0 （通常1000hPa）のもとに移動させたときに気塊が示す温度をいう。温位は断熱条件のもとでは保存量となるので、そのような条件が満足されるときには気塊の運動は等温位面上に限られる。等温位面を考える利点は、気塊の三次元の運動を水平方向の風向・風速のみのデータで表現できることにある。一方、その欠点は、流跡線を作成できる高度が境界層上端（およそ850 hPa）以上に限られること、および、大気の運動が断熱条件を満足しないような条件下では作成された流跡線に信頼がおけない点にある。具体的な流跡線作成手法については中山ら¹⁾を参照されたい。

2. 3 解析対象とする観測と解析方法

- (A) 流跡線手法の検討：等温位面流跡線手法の検討では、兼保ら²⁾が1993年1月に日本海上で船舶を用いて行った観測を対象とした。この観測では高濃度の過酸化水素や SO_2 が観測されており、いずれも大陸からの輸送が示唆されている。解析の方法は以下のとおりである。すなわち、対象とする観測結果に対して、
 - (1) まず観測点高度を到達点としてJSMデータを用いた三次元基準流跡線を作成する。
 - (2) ECMWFデータを用いて、境界層の上端に相当する850hPa付近の温位面上で観測点の緯度・経度に到達する等温位面流跡線を作成し、(1)で作成した基準流跡線との比較を行う。
 - (3) 二つの流跡線が異なる場合には、その原因を明らかにするために、JSMデータを用いて850hPa付近で観測点の緯度・経度に到達する三次元流跡線を作成する。作成した流跡線と、(1)で作成した基準流跡線との比較を行うことで、到達高度の違いによる流跡線の違いを明らかにする。同様に(2)で作成した等温位面流跡線と比較を行うことで、利用した気象データの違いによる流跡線の違いを明らかにする。

(B) 流跡線解析の適用:流跡線解析の適用については、環境庁が沖縄県波照間島で行っている環境モニタリングデータ³⁾のうち、1993年4月～12月までのオゾンおよびエアロソル個数濃度(粒径 0.3～0.5 μm)を解析の対象とした。解析の方法は以下のとおりである。すなわち、

- (1) 各月のオゾン、エアロゾル濃度を用いて散布図を作成し、濃度の大小でグループ分けを行う。
- (2) 各グループ毎に 850hPa 付近の温位面上で観測点の緯度・経度に到達する等温位面流跡線を ECMWF データを用いて作成し、共通する流跡線の特徴があればその解釈を行う。

3. 結果および考察

3. 1 等温位面流跡線妥当性の検討

(A) 基準流跡線と等温位面流跡線との相違: 前述のように、等温位面流跡線解析手法の検討の対象とした兼保²⁾の観測では高濃度の過酸化水素や SO_2 が観測されている。図1に、高気圧下で観測された過酸化水素エピソードおよび冬型の気圧配置下で観測された 10ppb にもおよび SO_2 高濃度現象 (SO_2 エピソード) に関する流跡線の比較結果を示す。基準流跡線によれば、過酸化水素エピソードは韓国ソウル付近を通過した気塊が観測点に達していることが示されている。この結果は、過酸化水素が都市大気的光化学による生成であることと矛盾しない。また SO_2 エピソードでは、中国山東半島付近で下降し地表付近を通過した気塊が韓国南端を通過後観測点に達していることがわかる。図1より基準流跡線と等温位面流跡線との差は大きく、特に過酸化水素エピソードでは流跡線そのものが全く異なるものになっていることがわかる。 SO_2 エピソードについても、流跡線の方法は一致するが同じ時間を逆上った場所は大きく異なる。

(B) 基準流跡線と等温位面流跡線との相違の原因 —到達高度による違い—: 二つの流跡線が異なる原因として考えられるのは、到達高度による違いと使用する気象データによる違いである。このうち、到達高度による違いを明らかにするために、JSM データを用いて、850 hPa 付近で観測点の緯度・経度に到達する三次元流跡線を作成し、(地上)基準流跡線との比較を行った。対象とする事例は図1

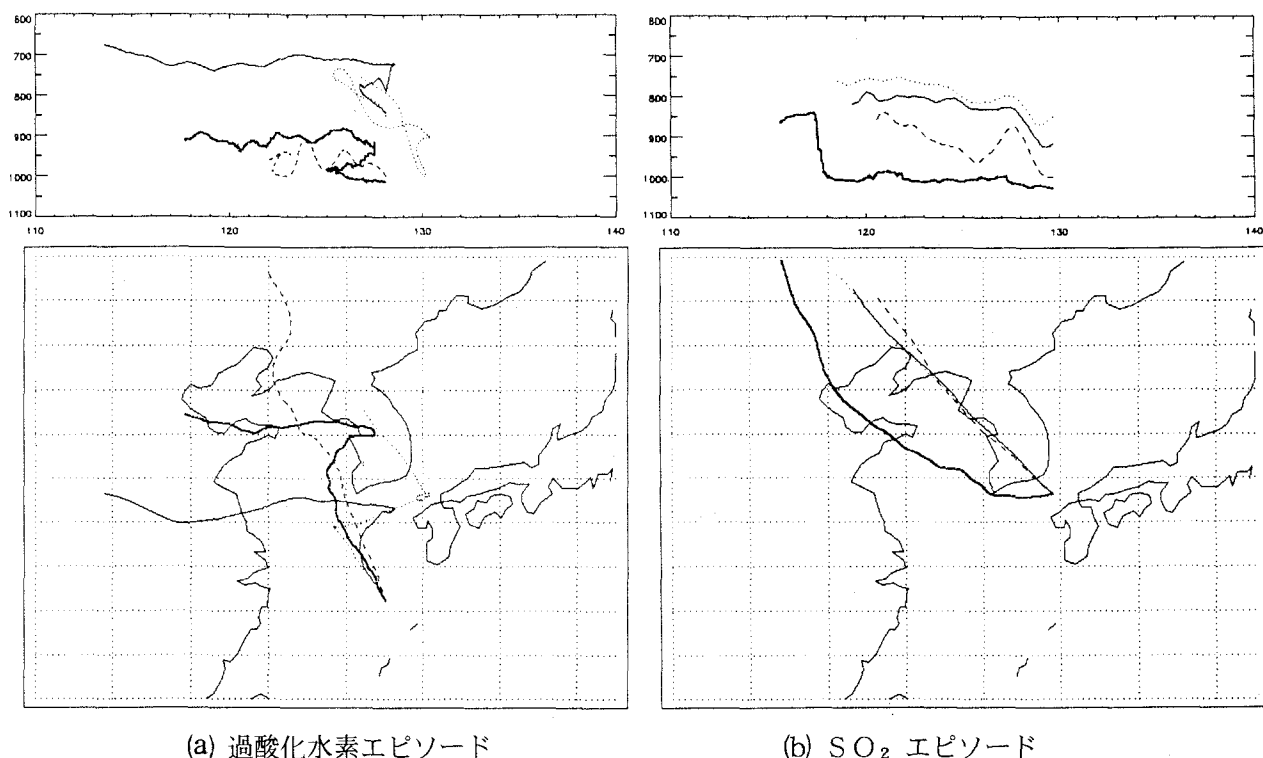


図1 基準流跡線と等温位面流跡線との比較: 太線は基準流跡線、実線は等温位面流跡線、破線・点線は参考のため計算した ECMWF データを用いた三次元流跡線 (到達高度はそれぞれ 1000, 850 hPa)

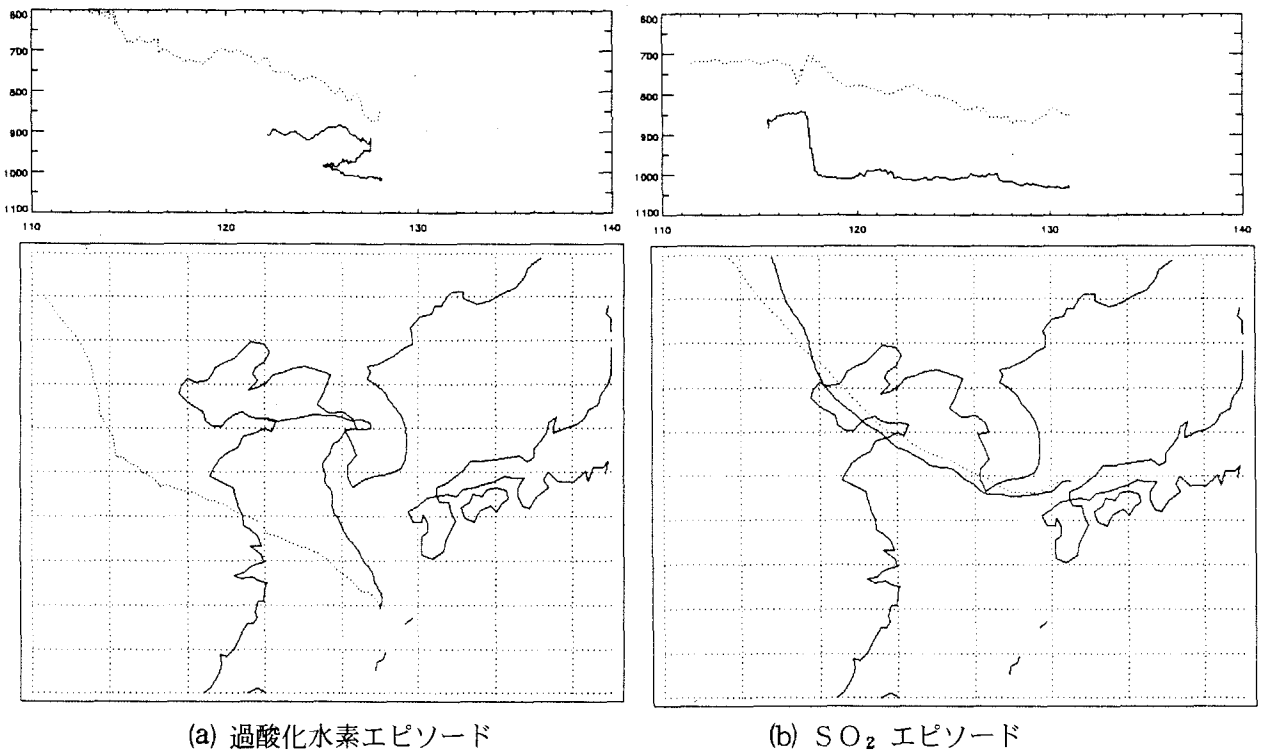


図2 JSMデータを用いた高度別流跡線：実線は観測点（地表）、点線は 850hPa 付近に到達する流跡線

と同じである。図2に示した結果より、流跡線は地上と境界層上部で大きく異なることがわかる。その差はいずれも 24 時間で 200km 程度であった。

(C) 基準流跡線と等温位面流跡線との相違の原因 — 気象データによる違い —：二つの流跡線が異なる原因のひとつとして考えられるもう一つの原因は使用する気象データによる違いである。この点を明らかにするために、850 hPa 付近で観測点の緯度・経度に到達する JSM データを用いた三次元流跡線と ECMWF データを用いた等温位面流跡線を比較した。結果を図3に示す。両方の流跡線のずれは、過酸化水素エピソードで 200km 程度、 SO_2 エピソードでは 500km にもおよび、その違いは (B) に示した到達高度による違いと同程度かそれ以上のものである。これらのずれは、使用する気象データの違いと同時に流跡線解析手法との違いによっても生じると考えられる。流跡線解析手法との違いについては、等温位面上の輸送を仮定した断熱条件が現実の大気で満足されていないことによる違いである。しかし、図3をみると、到達点付近、すなわち流跡線計算開始当初から両方の流跡線のずれはすでに始まっており、このことは、流跡線の違いが流跡線解析手法のだけでなく、気象データそのものにあることを示している。今回、解析の対象とした観測は気象データの海上のものであり、しかも冬季の海上で境界層の発達も考えにくいことから等温位面流跡線の適用には最も厳しい条件ではあるが、流跡線作成にあたっては以上のような違いがあることを十分理解してその利用を考えなければならないと思われる。

3. 2 地上モニタリングデータに対する流跡線解析の適用

前述のように、流跡線解析の適用については、環境庁が沖縄県波照間島で行っている環境モニタリングデータ³⁾のうち、1993年4月～12月までのオゾンおよびエアロソル個数濃度（粒径 0.3～0.5 μm ）を解析の対象とした。ここでは1993年12月に観測されたオゾン濃度に関する解析結果を例として示す。オゾン濃度は、この期間 20～50ppbの値を示したが、観測結果を 30ppb 以下および 40ppb 以上にグループ分けし

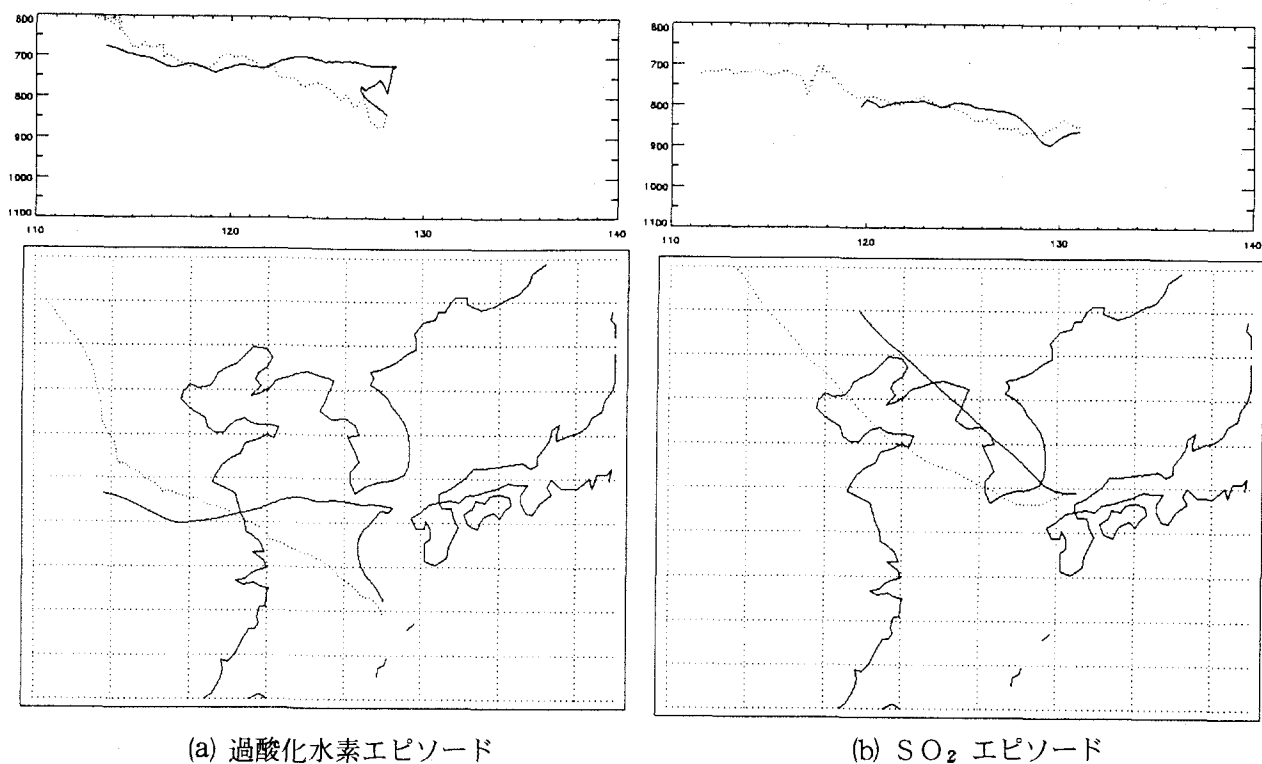


図3 同一高度に到達する三次元流跡線と等温位面流跡線の比較 実線はECMWFデータを用いた等温位面流跡線、点線はJSMデータを用いた三次元流跡線

それぞれのグループについて等温位面流跡線をまとめて作成した(図4)。なお、解析対象を明確にするため、粒子数は10,000個/ℓ以下のデータのみを使用した。この期間は冬季であるため、地表付近の光化学反応によるオゾンの生成は起こりにくく、また粒子数に制限を設けたことから、オゾンの高濃度については上層からの輸送が、また低濃度については海洋からの輸送が予想される。流跡線解析結果がこれらの予

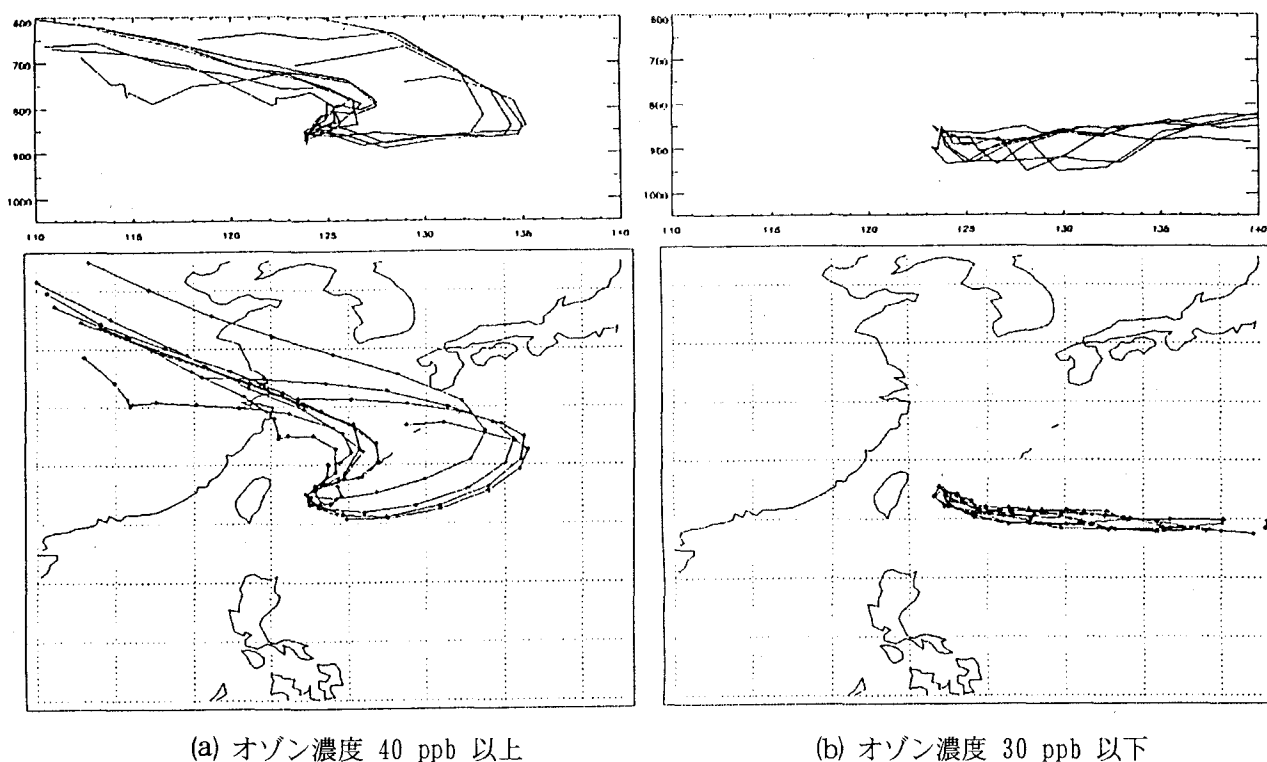


図4 沖縄県波照島で観測されたオゾン濃度で分類した等温位面流跡線の比較

想と一致することが図4からわかる。

同様の解析を他の月にも適用した結果をまとめると以下の通りである。

- (1) オゾン濃度が低くエアロゾル数も少ない観測に対する流跡線は、全て海洋からの輸送が示され、海洋大気の輸送として観測結果を理解することに矛盾は生じない。このケースに関する流跡線の信頼性は高いと考えられる。
- (2) オゾン濃度が高くエアロゾル数が少ない観測に対する流跡線は、日本、台湾、中国上層からの下降流を示すものが多い。この結果は、オゾン濃度が地表に比較して高く、粒子数の少ない上層空気の輸送として観測結果を理解することと矛盾は生じない。このケースに関する流跡線の信頼性も高いと考えられる。
- (3) オゾン濃度が低くエアロゾル数が多い観測に対する流跡線は、中国大陸南部の産業地域を通過してきたものがみられ、人間活動の影響を受けた気塊の到達が考えられるが、作成できた流跡線数が少なくはっきりしない。
- (4) オゾン濃度が高くエアロゾル数も多い観測に対する流跡線は、日本、台湾、中国大陸上空を通過してきたものがみられ、人間活動の影響を受けた気塊の到達が考えられるが、前述のとおり各々の流跡線の信頼性に問題があると考えられる。

4. まとめ

本研究では、地球大気環境監視および広域大気汚染検出に適用可能な流跡線解析手法の検討を行うとともに、広域観測データへの手法の適用を行い、流跡線解析の適用可能性について検討し、以下に示す結果を得た。

- (1) 地表近くでの観測を対象として流跡線解析手法の検討を行った。すなわち、特別に出力された時間分解能の高い気象データを用いて計算した流跡線を基準として、通常使用されている等温面流跡線の信頼性を検討した。その結果、両方の流跡線解析結果に大きな差が生じる事例があることが示された。違いの原因としては、等温位面流跡線が境界層上部を到達点としなければいけないことから生じる観測点と到達点の高度の違いによる誤差の他、気象データの違いによる誤差が考えられることがわかった。したがって、広域汚染を対象とした観測結果やモニタリングデータに流跡線解析を利用する際には以上のような問題点を十分考慮することがきわめて重要である。
- (2) 環境庁が沖縄県波照間島で行っているオゾンとエアロゾルの通年観測に流跡線解析を適用し、観測結果をグループ分けし、より多くの流跡線作成することによって、大気中の広域輸送の解釈や判断が可能になる例が多いことを示した。

謝辞

本研究の遂行にあたりデータの提供をいただいた資源環境総合研究所の兼保直樹さん、国立環境研究所の内山政弘さんに厚く感謝致します。

引用文献

- ¹⁾ 中山里美ら (1994)、環境科学会誌、7(4)、325.
- ²⁾ 兼保直樹(1994)、第 35 回大気汚染学会講演要旨集、166
- ³⁾ 内山政弘ら(1994)、第 35 回大気汚染学会講演要旨集、565