

東アジア域の汚染源からの輸送に着目した対流圏 NO₂ 分布の解析

太田 絵美、瓜田 直美、野口 克行、林田 佐智子（奈良女子大・理）

Andreas Richter, John P. Burrows (University of Bremen)

1 はじめに

窒素酸化物 (NO_x≡NO+NO₂) は大気汚染物質であり、対流圏における NO_x の生成源はほとんど化石燃料の燃焼およびバイオマスバーニングによるものである。NO_x の寿命は OH 濃度によって決定されるため、上部対流圏では 4-7 日、境界層内では 1 日程度といわれている。NO_x は短寿命化学種であるので通常は発生源から遠距離に輸送されることは考えられない。しかし大規模な低気圧の発達にともなう長距離輸送がおこることがある。Stohl et al. [2003]は、アメリカ東海岸で発生した NO₂ が北大西洋を超えてヨーロッパ、ロシアまで達したと報告している。近年東アジア域においては、急速な経済発展にともなう大気汚染が深刻化しており、大陸からの越境汚染が拡大することが予測されている。

本研究では、人工衛星 ERS-2 搭載センサ Global Ozone Monitoring Experiment (GOME) から得られた対流圏 NO₂ 気柱量データを使用し、東アジア域の発生源からの NO₂ の輸送に着目して解析を行った。

2 解析に用いたデータ

GOMEは1995年4月に打ち上げられたERS-2衛星に搭載された直下視型のセンサである。水平分解能は40km×320kmで、3日ではほぼ全球を観測することができる。使用したデータはBremen大学によって導出された対流圏NO₂気柱量データである。3次元化学輸送モデルを援用して成層圏NO₂気柱量を求め、それを全気柱量から差し引くことによって対流圏NO₂気柱量を導いている [Richter et al., 2005]。

3 対流圏 NO₂ の分布

大都市上空には1平方センチメートルあたり10¹⁵から10¹⁶のオーダーの高い値が分布しているが、その他の領域ではほとんど10¹⁴のオーダーである。また、GOME全気柱量からの成層圏量の引き方によっては、特に海洋上などでマイナスになる部分もみられる。負の値というのは明らかにエラーであるが、リモートな海洋上ではほとんどの値が±1×10¹⁵ molecule cm⁻²の範囲内に収まっており、この範囲におけるばらつきはランダムな誤差と考えることができる。

4 発生源近辺への流出

汚染源付近では定常的に、海岸線より海側に張り出して NO₂ が観測されている。NO₂ は海上に発生源があるとは考えられないため、それらは汚染源からの流出であると考えられる。そこで東京、上海沖において定常的な流出距離を調べた。図 1 は東京と上海の海岸線からの距離に対する NO₂ 気柱量を示している。NO₂ は海岸線からの距離にともなう指数関数的に減衰している。そして減衰は 5×10¹⁴ molecule cm⁻² 以下で頭打ちになっており、これは GOME の検出限界であると考えられる。また、上海沖では海岸線から離れて再び値が盛り上がっている様子が見える。これは上海の西に新たなソースがあることを示しており、ここでは九州が相当する。

減衰曲線の傾きは同じ緯度帯では季節によってあまりかわらないことを示しており、これらの場合の 1/e になる特性距離は約 200km であった。しかし、NO₂ は冬の方が高濃度であるため、高濃度域は冬の方が広く、値が 1×10¹⁵ molecule cm⁻² まで減衰する距離は東京の場合で冬は約 550km、夏は 250km であった。GOME の水平分解能は 40km×320km と大きく、ピクセル内の NO₂ の空間分布は平均して観測される。そのため、実際には海上に流出が起きていなくても、海上で高濃度が観測される可能性がある。しかし、GOME ピクセルサイズより広い範囲で高濃度が観測されており、これらは汚染源からの流出であると考えられる。

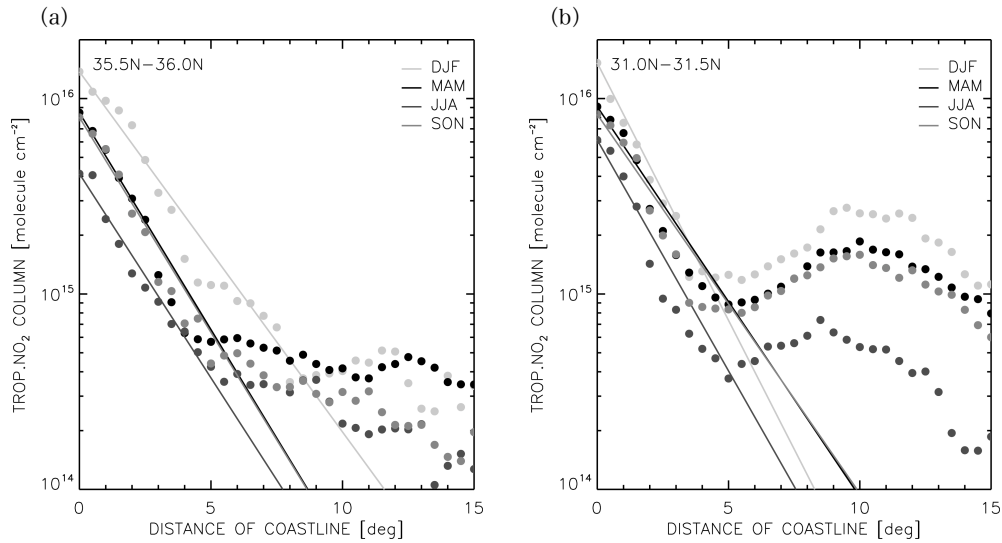


図1：東京沖 (a) と上海沖 (b) の海岸線からの距離に対する対流圏 NO_2 気柱量の減衰。1996 年 1 月から 2002 年 12 月までのデータを季節ごとに平均して示している。ドットは対流圏 NO_2 気柱量、フィッティングラインは海岸線からの距離 15 度までの全範囲におけるデータに対して非線形のフィッティングを行ったものである。

5 発生源から遠く離れた西太平洋上への輸送

汚染源からの流出の影響は定常的には発生源から数百 km の範囲内であるが、イベント的に清浄な太平洋上でも観測されることがある。図 2 は GOME の 7 年間のデータを用いて、 2×10^{15} molecule cm^{-2} 以上の値であったピクセルを hot point として抽出したものである。hot point は発生源付近で最も多く観測されているが、冬や春には都市から離れた海上でもよく観測されており、さらに冬は低緯度側、春は高緯度側にかたよって分布するという季節的な特徴が見られる。

また、図 3 は hot point の発生頻度を示している。hot point は夏に少なく冬に多いという明瞭な季節変化が見られた。これらは季節的な風系の違いと大きく関係しているものと思われる。

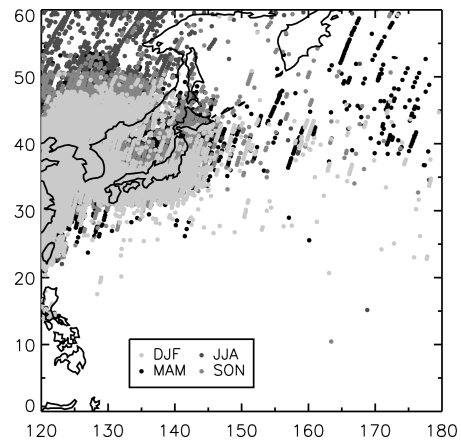


図2：hot point の分布。

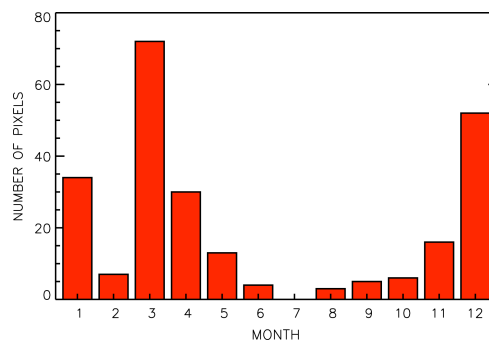


図3：hot point の発生頻度。

6 事例解析

2001 年 3 月 31 日に太平洋上で大規模な hot point が観測された。hot point が清浄な太平洋上で広い空間範囲にまとまって観測されたのは、GOME による観測が行われた 7 年の間に 4 例しかないほど珍しい観測事例である。これらの高濃度の NO_2 の発生源としては中国や日本の汚染源以外には考えられない。また、境界層内での NO_2 の寿命を考慮すると、寿命がより長く風による輸送が急速に行われる自由対流圏まで上方輸送されたものと推定することができる。

高濃度の NO_2 が観測された直前には強い低気圧が太平洋上に存在していた。そこで発生源と輸送経路を明らかにするために、発生地域を始点とした流跡線解析を行った。流跡線解析ツールは EORC-TAM [Matsuzono et al., 1998]、客観解析データは ECMWF Basic Level IIIA を使用し、鉛直風を用いた三次元法で計算を行った。初期位置は GOME データを用いて東アジア域において常に NO_2 の高い領域を抽出した。高度については 1000-800hPa まで 20hPa ごとに 11 高度設定し、開始時刻は 2001 年 3 月 29 日 0 UTC から 3 月 31 日 0 UTC まで 6 時間間隔に前方計算を行った。そして流跡線の中から hot point が観測された同時刻に、hot point 14 点の中心から 500km 以内に到達した流跡線のみを選択した。このようにして抽出した流跡線を、輸送経路ごとに 6 パターンに分類したところ、そのうちの 3 つのパターンについて、長距離輸送の可能性が高くなる自由対流圏まで輸送されるものがあった。そこで、その 3 つのパターンの結果について次に示す。

図4は3つの輸送パターンに対する気圧経度断面図、初期位置、輸送経路を示している。パターンAとBは初期位置が異なるが、同じ輸送経路をとっていて本質的に違いがないため、ここではまとめて1つの輸送パターンとして考える。この A、B、2つの輸送パターンでは、空気塊が中国の上空800hPaから日本の上空まで1日から2日かけて移動し、そして約1日で600hPa程度まで持ち上げられたことを示しており、汚染源から hot point までの輸送パターンとして可能性が高いと考えられる。そしてパターンCでは関東沖から日本付近の上空を2日かけて600から500hPaまで上昇した様子を示している。しかし、AやBと比較するとソースとしては小さいと思われる。

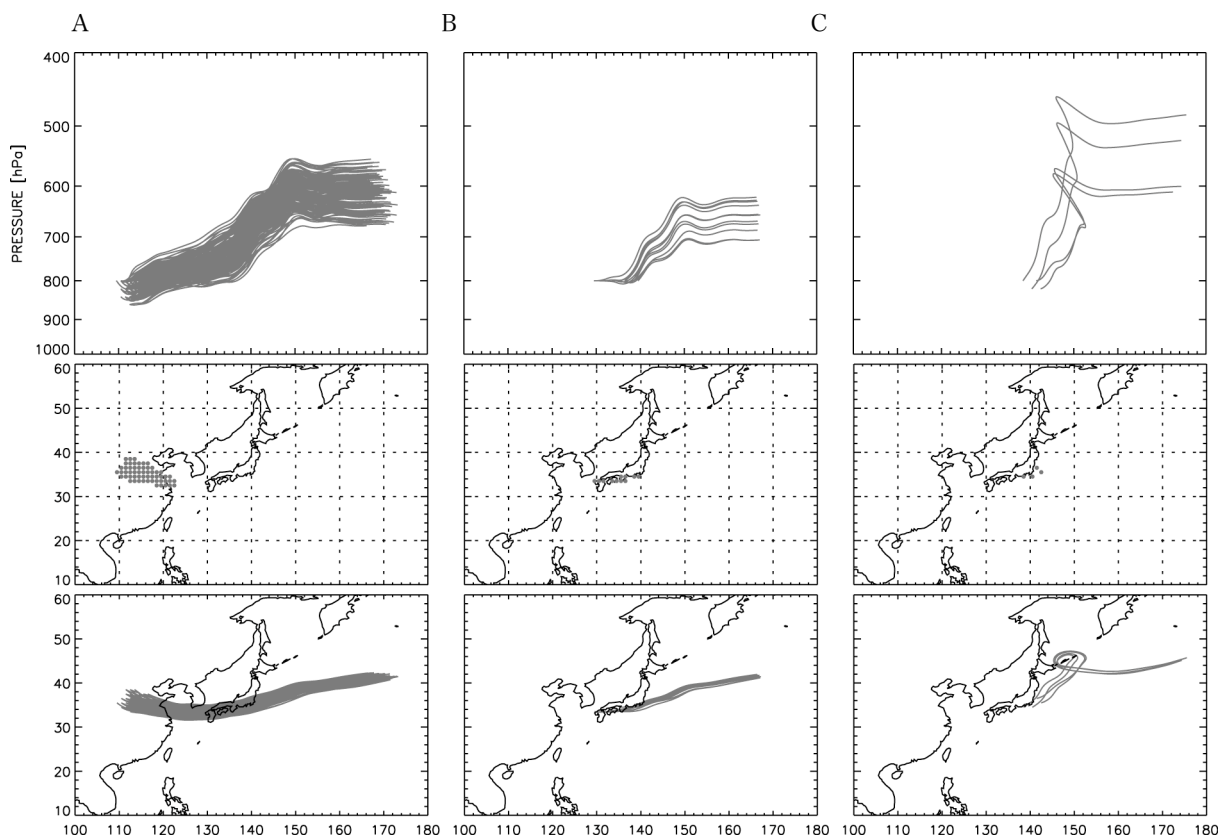


図4：A、B、C、3つの輸送パターンの方流跡線の気圧経度断面図（上）、初期位置（中）、輸送経路（下）。

Aの輸送パターンについて前方流跡線の風速、気圧の時間変化を調べた。流跡線が700hPaに達したとき、その場での風速はおよそ 25 ± 5 m/sであった。それに対して、解析範囲である北緯30-50度、東経110-180度での2001年3月の月平均値は 15 ± 3 m/sであり、流跡線の風速が絶対値として平均より高いことがわかった。また、時間につれて高度が上がっている様子も示された。このように空気塊は平均以上に速い風に乗って、また次第に風速の速い高高度に上昇しながら遠距離輸送されていった様子が示された。しかし、速い風に乗って輸送されたとしても3日間かかって輸送されていることがわかった。

NO₂の寿命は境界層内であれば1日以内と言われているが、このように時間をかけて輸送されたのであれば寿命はもっと長かったはずである。流跡線解析の結果、最もソースとして可能性の高かった中国の上海付近では 10^{16} のオーダーの値が観測されている。そこでソースの強さをこの値と仮定し、また希釈効果を無視して、NO₂の寿命を見積もると約30時間であった。実際には希釈効果があるので、寿命は最低でも30時間以上であったということが推定できる。

7 まとめ

GOMEの対流圏NO₂気柱量データを用いて発生源からの輸送について解析を行った。定常的に発生源から海洋上に流出が起きている。その特性距離は季節に依存せず、発生源から約200kmであった。ただし冬の方が高濃度であるため高濃度域は冬の方が広い。

都市から離れた西太平洋上でhot pointを抽出した。これらはイベント的に東アジアの発生源から輸送されたものだと考えられる。hot pointの観測位置とその頻度には明瞭な季節変化が見られた。これらは風系の季節変化によるものであると考えられる。

西太平洋上で観測された大規模なhot pointのイベントについて流跡線を用いた事例解析を行った。中国や日本を起源とする前方流跡線は平均以上に速い風に乗って高高度に上昇しながら輸送されたことがわかった。また、NO₂の寿命は30時間以上であったと推定された。

これまでGOME観測による北大西洋やインド洋でのNO₂の長距離輸送が報告されているが、本研究では東アジア域を起源とする太平洋上での新たな事例を示した。

参考文献

- Matsuzono, T., et al, (1998), Development of the Trajectory Analysis Model (EORC-TAM), *EORC Tech. Rep.*
- Richter, A., et al. (2005), Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space, *Nature*, 437, 129-132.
- Stohl, A., et al. (2003), Rapid intercontinental air pollution transport associated with a meteorological bomb, *Atmos. Chem., Phys.*, 3, 969-985.