

ILAS データによる1997年冬～春期北極域の 成層圏オゾン減少の評価

寺尾有希夫・田中博・安成哲三 (筑波大学・地球科学)

笹野泰弘・中島英彰 (国立環境研究所)

林田佐智子・齋藤尚子 (奈良女子大学・理)

1 はじめに

極域成層圏のオゾン破壊量の評価に不可欠な化学過程と輸送過程の分離を行うため、von der Gathen et al. [1995], Rex et al. [1997, 1998, 1999] は Match Technique を考案し、日射時間とオゾン破壊の関係や化学的オゾン減少率の時間的変化を見ることに成功した。ここで Match Technique とは、あるオゾンゾンデ観測された空気塊が流跡線によって計算された軌跡で移動したと仮定し、数日後の別の観測地点に十分近付いたとき、これらの2つの観測は同一気塊を捕らえた (Match した) と解釈し、このオゾン濃度の差が力学的影響を除去した化学的な変化を与えると考えるものである。

この Match Technique と同様の手法を用いて、Terao [1999] や Sasano et al. [2000] は、オゾンをはじめとする各大気微量成分と、PSC などのエアロゾルを同時観測した改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) データから、大規模な北極域でのオゾン減少が報告されている 1996/97 年冬期を事例にして、化学的オゾン減少率を算出した。今回の発表では、ILAS の最新バージョン (4.20) を用いて、1. 空気塊の非断熱下降を考慮したオゾン減少率の計算結果、2. 手法に残されるエラーを評価するために行った重回帰分析の結果、3. 他研究で得られたオゾン減少率と本研究の結果の比較、について報告する。

2 解析データと手法

2.1 解析データ

オゾンの混合比と可視エアロゾル消散係数 (780 nm) データは ILAS バージョン 4.20 を用いた。流

表 1: 流跡線解析を行った温位面と対応する高度。

(高度は 2~4 月の 3 カ月平均値)

温位 (K)	高度 (km)*
350	12.2
375	13.6
400	15.0
425	16.4
450	17.7
475	18.9
500	19.9
525	20.9
550	22.2
600	23.6
700	26.6

跡線解析等に使う気象要素データは UKMO 全球同化データ ($2.5^\circ \times 3.75^\circ$, 12 UT) を用いた。

2.2 流跡線解析

北半球における 1997 年 1 月 1 日から 5 月 31 日の全 ILAS 観測地点から、10 日先までの流跡線を UKMO 流跡線解析プログラムを用いて 11 等温位面上で計算した (表 1)。

2.3 同一気塊の選定基準

図 1 に、複数の ILAS 観測イベントが同一気塊を捕らえた (Match した) 例を示す。Match の条件は、1. ILAS 観測地点 (図 1 の星印) と流跡線で計算された位置 (白丸) との距離の差が 400 km 以内、2. 流跡線に沿った渦位 (24 時間の移動平均) の

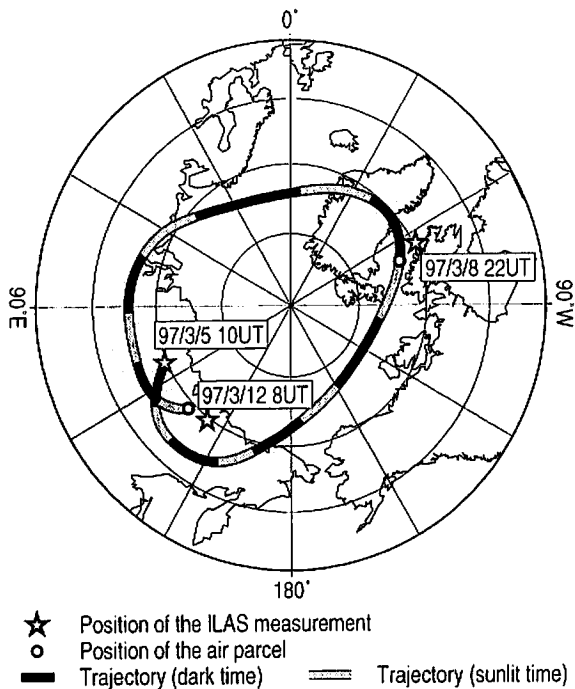


図 1: 475 K 面における Match の例. 太線は 3 月 5 日 10 UT の ILAS 観測地点からの先方流跡線を示し, 灰色部分は太陽光が当たっていた (太陽が地平線より上にある) 期間を示す. 星印は ILAS 観測地点を, 白丸は ILAS 観測が行われた時刻における空気塊の位置を示す. この空気塊は, 3 月 8 日 22 UT と 12 日 8 UT に再び ILAS によって観測されたとみなされる.

最大値と最小値の差の平均に対する割合が 15% 以内, であることとした.

2.4 オゾン減少率の計算

まず, 上述の条件を満たす極渦内の個々の Match に対して, 非断熱冷却/加熱 ($\Delta\theta$) による空気塊の下降/上昇を考慮してオゾン混合比の変化 (ΔO_3) を計算する

$$\Delta O_3 = O_3^{\text{end}}(\theta + \Delta\theta) - O_3^{\text{start}}(\theta).$$

O_3^{start} と O_3^{end} はそれぞれ Match した観測ペアの始点と終点のオゾン濃度を示す (異なる温位面上であることに注意). 非断熱加熱率は Knudsen et al. [1998] を利用した. 次に, ある日に対して前 7 日以内に出発して後 7 日以内に到着する様な Match を選び出し, データのセットを作る. そして, オゾン変化は時間に対して線形であると仮定し, 最小二乗法でオゾン変化と時間の回帰係数を求め, それをオゾン変化率と定義した (図 2).

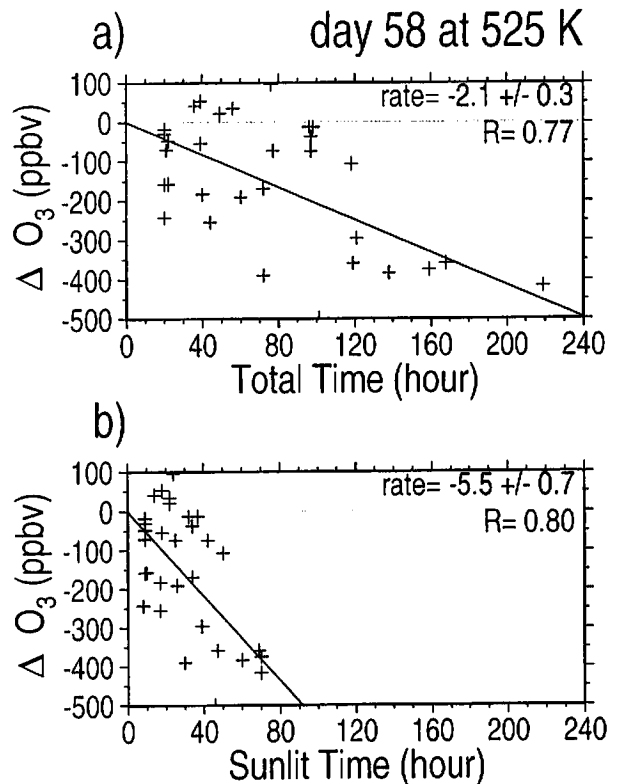


図 2: Match した各観測ペアにおける a) 空気塊の総経過時間, b) 空気塊の移動中に太陽光が当たった時間, に対するオゾン濃度変化 ΔO_3 . データは, 2 月 28 日 \pm 7 日 (2 月 20 日 ~ 3 月 7 日) の 525 K 面. a), b) それぞれの直線は, オゾン変化と時間の回帰直線を示す. b) で得られた回帰係数を 2 月 28 日のオゾン変化率 (1 時間太陽光があつた時のオゾン変化量, ppbv/sunlit hour) と定義する.

3 結果と考察

3.1 化学過程によるオゾン変化率

図 3 に, 一日あたりのオゾン減少量 [ppbv/day] の高度時間断面図を示す. これは, 1 時間太陽光があつた時のオゾン変化量 [ppbv/sunlit hour] に, 流跡線上に太陽光があつた時間の日平均値を掛けることにより算出された. ほとんどの領域でオゾンは有意に減少していて, わずかに見られるオゾンの増加域は統計的有意性が無い. オゾン減少率は 2 月下旬の 525 K 面で最大となり -61 ± 9 ppbv/day に達した. 非断熱下降する空気塊に沿って積算したオゾン減少量は, 1 月 30 日 (492 K) から 4 月 11 日 (450 K) で最大 -1.7 ± 0.1 ppmv を記録した. また, オゾン変化率を混合比から数密度に変換して単位気柱におけるオゾン減少量を計算した結果 (図省略), 1 月 30 日から 4 月 11 日の 400 K から 600 K におけるオゾンカラム減少量は 86 DU であった.

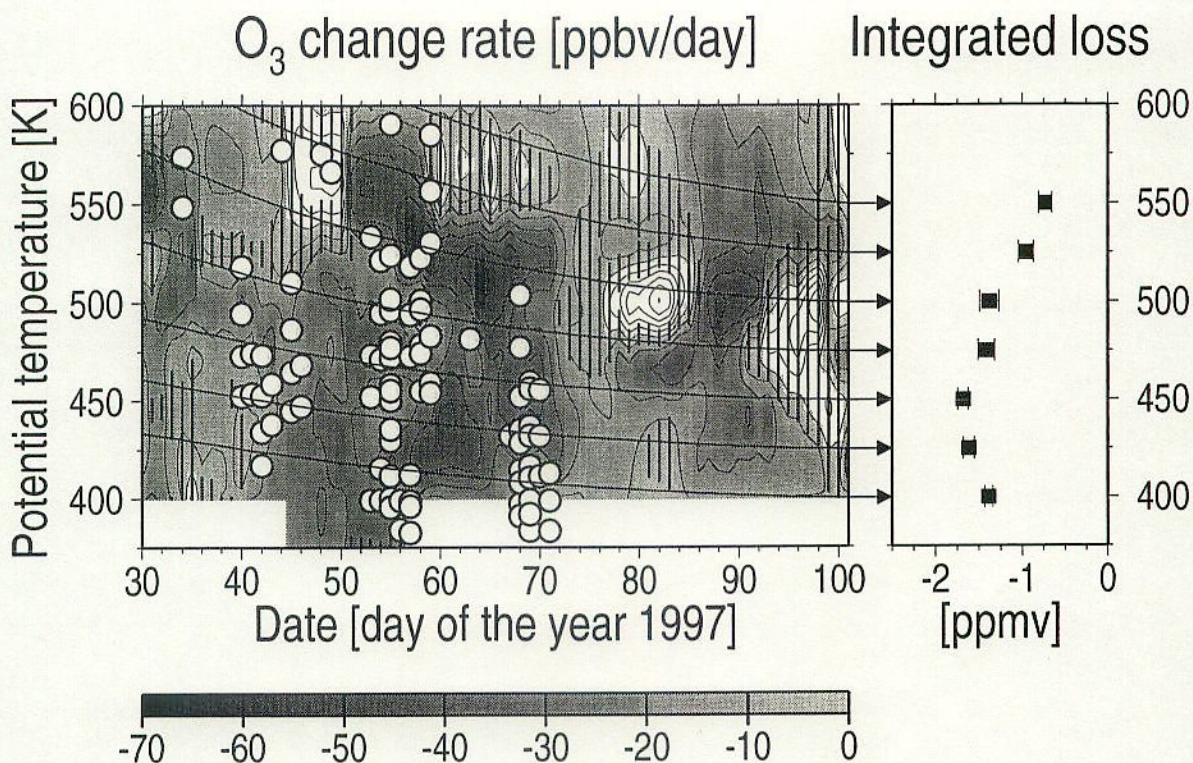


図 3: (左) オゾン変化率 [ppbv/day] の高度時間断面図. 等値線間隔は 10 ppbv/day で, 負の値にはハッチを施してある. 縦線は統計的に有意でない領域 (有意水準 99 %) を, ゆるやかな曲線は day 101 に図で示した温位面に到達するような空気塊の温位変化 (下降運動) [Knudsen et al., 1998] を示す. また, 可視エアロゾル消散係数の 10 日毎の平均値を各高度で求め, 消散係数が平均値 + 5 シグマ以上離れているイベント (PSC が存在する可能性があるところ) を白丸で示した. データは鉛直方向に 1 K 間隔でスプライン補間した. (右) 空気塊の下降に沿った積算オゾン減少量 [ppmv]. 400~500 K は day 30~101, 525 K は day 39~101, 550 K は day 57~101 で積算した. エラーバーは 1 シグマ.

また図 3 には, ILAS の可視エアロゾル消散係数が平均値 + 5 シグマ以上離れている様な高消散係数イベントをプロットした. これらは PSC が存在する可能性を示している. 2 月下旬から 3 月上旬において, 大規模なオゾン減少と高い消散係数が同時に観測されていることから, この期間のオゾン減少は PSC の出現によって引き起こされたと考えられる.

3.2 重回帰分析

同一気塊を追跡する本研究の手法は, 大スケールの力学的効果 (移流など) を除去できるが, 小スケールの力学的効果 (空気塊の拡散など) は除去できない. 化学過程以外の変動成分を調べる為に, 空気塊が経験した昼間の時間 (t_{sunlit}) と夜間の時間 (t_{dark}) を二変数として重回帰分析を行った.

$$\Delta O_3 = R_{\text{sunlit}} \cdot t_{\text{sunlit}} + R_{\text{dark}} \cdot t_{\text{dark}}$$

その結果, 大きなオゾン減少が見られた 2 月 9 日 ~ 3 月 10 日の 450 K 面では, それぞれの回帰係数は $R_{\text{sunlit}} = -4.6 \pm 1.8$ ppbv/sunlit hour と $R_{\text{dark}} = 1.1 \pm 1.1$ ppbv/dark hour となり, 得られたオゾン減少は明らかに太陽光の元で起こっている化学過程によるものであることが確認された. 夜間ではオゾン変化が小さいことから, 上述した様な小スケールの力学的効果の影響は小さいと考えられる.

3.3 他研究との比較

Knudsen et al. [1998] は, 多数のオゾンゾンデ観測から, 1 月 6 日 ~ 4 月 6 日の間に 425, 450, 475 K 面でそれぞれ 1.45, 1.59, 1.24 ppmv のオゾン減少を検出した. 本研究のオゾン減少はこれらより少し大きい, よく一致している.

Kreher et al. [1999] は, キルナのオゾンゾンデ観測から, 2 月 1 日 ~ 3 月 25 日の 450 K 面で

1.04 ppmv のオゾン減少を検出した。これは本研究より 50 %ほど小さい。

[8] von der Gathen, P. *et al.*, Observational evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in the winter 1991-92. *Nature*, 375, 131-134, 1995.

4 最後に

著者らは Rex らにより考案された Match Technique を改良型大気周縁赤外分光計 (ILAS) による衛星観測データへ応用することに成功している。本研究では、ILAS バージョン 4.20 データを用いて、1997 年冬～春期北極域の極渦内における化学過程によるオゾン破壊量を、空気塊の非断熱下降を考慮して、定量的に評価した。

現在、ILAS の観測空気塊の大きさを考慮し、複数の流跡線解析を行うことで、より確かな同一空気塊の選定を行っている途中である。また、Match Technique を ILAS に応用する最大の利点は、オゾンだけでなく硝酸や一酸化二窒素、水蒸気等の変動も解析できる、という点にあり、これらオゾン以外の物質についても鋭意解析中である。

参考文献

- [1] Knudsen, B. M., et al., Ozone depletion in and below the Arctic vortex for 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 627-630, 1998.
- [2] Kreher, K., et al., Ozone and temperature profiles measured above Kiruna inside, at the edge of, and outside the Arctic polar vortex in February and March 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 715-718, 1999.
- [3] Rex, M., et al., Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995-96 Arctic winter, *Nature*, 389, 835-838, 1997.
- [4] Rex, M., et al., In-situ measurements of stratospheric ozone depletion rates in the Arctic winter 1991/92: A Lagrangian approach, *J. Geophys. Res.*, 103, 5843-5853, 1998.
- [5] Rex, M., et al., Chemical ozone loss in the arctic winter 1994/95 as determined by the Match technique, *J. Atmos. Chem.*, 32, 35-59, 1999.
- [6] Sasano, Y., et al., ILAS observations of chemical ozone loss in the Arctic vortex during early spring 1997, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 213-216, 2000.
- [7] Terao, Y., ILAS-derived stratospheric ozone loss evaluated by match technique during the Arctic winter of 1996/1997, A dissertation for a Degree of Master of Science, 58 pp., University of Tsukuba, 1999.