

A-1 オゾン層破壊の長期変動要因の解析と将来予測に関する研究

(4) オゾン層将来予測モデルを用いた北半球トレンドの解析に関する研究

独立行政法人国立環境研究所

大気圏環境研究領域 大気物理研究室

秋吉英治

大気圏環境研究領域 大気物理研究室

Libo Zhou

平成17～18年度合計予算額 1, 951千円
 (うち、平成18年度予算額 951千円)

[要旨] 下部成層圏における亜酸化窒素濃度の年々変動を、化学輸送モデルを用いて計算し、その結果をProbability Distribution Function (PDF)解析した。初年度に行ったNCEP/NCAR再解析データを化学輸送モデルにu-v-Tナッジングによって同化した計算に加えて、データの上限高度がより高いECMWF-ERA40を、温度同化を行わないu-vナッジングによって同化した計算を行った。1978年から2002年までの高度600K、45°N以北のN₂O濃度の計算結果を解析したところ、極渦崩壊の早い年は、極渦崩壊時期にN₂O濃度の急激な低下が起っていることがわかった。そして、夏までにはその最大面積を占める濃度がまた冬の時期の値まで増加・回復するという結果が得られた。極渦崩壊の遅い年には、極渦崩壊に伴うこのような急激な下部成層圏N₂O濃度の低下は起こらず、最大面積を占める濃度は冬から夏までほぼ一定値を示す。そして、この極渦崩壊時期の早い年の45°N以北の領域のN₂O濃度の低下の原因は、これらの年のより強い下降流の影響であることがわかった。ただし、極渦内だけを見た場合、極渦崩壊時期の早い年のN₂O濃度は増加し、それには水平方向の輸送の影響が大きいことがわかった。

また、化学気候モデルによって行われたオゾン層の将来予測実験（1980～2050年）の結果を使ってオゾンとN₂O濃度の相関を調べた。高度600Kのオゾン濃度とN₂O濃度の相関は極渦境界付近で大きく、その相関は年代によって変化していた。このことは、年代によってフロンによるオゾン化学の影響が異なることを示唆している。

[キーワード] 亜酸化窒素、化学輸送モデル、PDF解析、極渦崩壊、成層圏

1. はじめに

本課題のサブテーマ(1)「温室効果気体の増加がオゾン層に与える影響の定量化に関する研究」では、フロン、ハロン、温室効果気体の将来シナリオに基づいたオゾン層の将来予測実験を行い、オゾンホールが回復するプロセスや回復する時期についての研究を行っている。一方、北極におけるオゾン層の将来変動については、オゾンホール並みのオゾン層破壊に至る結果は得られていない。また、年々変動が大きく、大気中のフロン・ハロンの増減に伴うオゾンの減少と増加の明確なシグナルが得られてない。オゾン層破壊が最も顕著となる冬季・春季の北半球では、北極渦が複雑に変形・分裂を起こすなどその年々変動が大きい(WMO, 2003¹⁾; Nakane, 2000²⁾)、オゾン層破壊の予測が難しくなっている。このように複雑な北半球のオゾン層の将来予測の精度を向上させるためには、北半球オゾン層変動について力学的および化学的要因に分離し、その特

徴を基に過去のトレンドを解析すると共に、将来予測実験に関して同様の解析を行い、その比較を行うことが必要である。

成層圏のオゾン破壊を促進する窒素酸化物 (NO_x) の主な供給源として、N₂Oは、成層圏オゾン収支において重要な役割を果たしている (WMO, 2003¹¹)。また、その地球温暖化効果に対する寄与も無視できない (Mahlman et al., 1986³)。N₂Oは光化学的に殆ど不活性であることから、輸送特性や地球の大循環を調査するためのトレーサーとして用いられている (Yang, 1995⁴; Nakamura and Ma, 1997⁵; Fleming et al., 1999⁶, 2001⁷)。N₂Oの光化学的寿命は、高度が増すにつれて減少し、高度22kmでは約100年、28kmでは10年、33年では1年、約40km以上では1カ月である (Brasseur and Solomon, 1986⁸)。下部成層圏でのその長い寿命ゆえに (数年以上)、N₂Oは下部成層圏極渦の崩壊期間中の混合過程を調べるには、ポテンシャル渦度 (PV) よりも優れた保存性トレーサーであると考えられている (Waugh et al., 1999⁹; Akiyoshi et al., 2002¹⁰)。観測とモデリングの結果は、極渦崩壊後の極渦大気とその周囲の空気の混合が遅いことを示唆している (Hess, 1991¹¹); Strunk et al., 2000¹²)。Hermann et al. (1998)¹³は、「N₂O濃度の長期間の異常が、1997年の極渦の崩壊後も1カ月半観測された」ことを見いだした。Orsolini (2001)¹⁴は、1998年の夏のN₂O輸送を研究し、「長寿命の西方伝播トレーサー・パターンの中には、中緯度大気への極渦大気の違い移流 (4月～9月) と関連しているものがある」ということを示した。

最近になって、多くの研究が、「北極渦崩壊の時期には、大きな年々変動があり、また中々消滅しない極渦が増える傾向にある」ことを確認した (Waugh et al., 1999¹⁵; Zhou et al., 2000¹⁶); Waugh and Rong, 2002¹⁷)。極渦の持続性は、春季の極域気温と崩壊前2カ月の上部対流圏/成層圏下部の熱の渦輸送の平均と強い関連性がある (Waugh et al., 1999¹⁵)。極渦持続の変化は、極域オゾンと混合、および極域と中緯度地方の間の輸送の年々変動に重大な影響を与えている。問題は、「N₂O分布は、極渦崩壊の影響を受けているのか？」ということだ。微量ガスを用いたそれぞれの年の極渦崩壊を調べた研究は多少あるが、微量ガスを通して極渦崩壊の年々変動に注目した研究は、比較的少ない。本研究では、北極渦崩壊の早い年と遅い年のN₂O分布を調査して、N₂O分布、水平拡散、垂直方向の移流の間の関係の究明を試みる。昨年の研究で用いたのと同じCTMを用いてN₂O分布を調べるが、異なったナッジング・プロセスと気象データを用いる。

2. 研究目的

北極域では冬季に南極域と同様、極渦とよばれる成層圏で発達する低気圧の渦が形成され、その中でオゾン破壊が進むが、南極渦と違ってその生成時期・持続期間・消滅時期は年々激しく変化し、それに伴ってオゾン量の変化も年々激しく変化するので、このことが北極域におけるオゾン量のトレンドを見いだすことを困難にしている。下部成層圏において極渦内外で濃度差が大きかつ化学反応の影響をほとんど受けないN₂Oの過去と将来予想される分布を調べることで、極渦の年々変動の大気微量成分分布への影響を明らかにすることがこの研究の目的である。

3. 研究方法

(1) 化学過程を簡易化した化学輸送モデル

観測風速場と温度場を大循環モデル (GCM) に同化させるために設計されたナッジング化学輸送モデル (CTM) は、CCSR/NIES AGCM (東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所

大気大循環モデル)の協力で開発された。成層圏化学と連動したGCMの力学モジュール、放射モジュール、化学モジュールの詳細な説明は、Takigawa et al. (1999)¹⁸⁾によって提供された。CTMでは、臭素化学などの高度な化学的機構、および気象データをAGCMに同化することができるモジュールを用いた(Akiyoshi et al., 2000¹⁹⁾)。モデルは、水平解像度T42 (2.8×2.8)で、表面から70kmまで拡張された30層の垂直領域を持つ。ナッジングCTMを用いることで、Akiyoshi et al.

(2002)¹⁰⁾は、北極渦崩壊後の1997年に改良型大気周縁赤外分光計(ILAS)によって観測された低N₂O気塊の変化をシミュレートすることに成功した。ここで用いたデータは、上記のCCSR/NIES ナッジングCTMの簡略版によって得た。この簡略版では、N₂O濃度は次の式で計算した。

$$\partial C_{N_2O} / \partial t = -J_{N_2O}[C_{N_2O}] + k[O(^1D)][C_{N_2O}] + R_{transport}, \quad (1)$$

ここで、 C_{N_2O} はN₂O濃度、 J_{N_2O} はN₂Oの光分解速度、 k はO(¹D)とN₂Oの間の反応の化学反応係数である。また、O(¹D)はパラメータ化されたChapmanサイクルによって計算した(Hartmann, 1978²⁰⁾; Akiyoshi and Uryu, 1992²¹⁾)。 $R_{transport}$ は、輸送プロセスに起因するN₂O変動である。下部成層圏におけるN₂O濃度およびN₂O分布に対する極渦崩壊時の影響を明確に知るために、全ての年のモデルの地表面でN₂O濃度を315 ppbv に固定した。東西風・南北風(u-vナッジング)モデルは、地表から1 hPaまでは、ヨーロッパ中期気象予報センター(ECMWF) ERA40データを使い、ECMWF ERA40データが存在しない1 hPa以上は、COSPAR International Reference Atmosphere 86 (CIRA1986) データに同化した。ナッジング処理には、1日の緩和タイムスケールを用いた。

「preliminary run」のためのN₂Oの初期分布は、30年間実施されたCTM計算から得た。予備計算は、N₂Oの初期分布および1957 NCEPデータを用いて、3年間実施してモデルラン用の初期状態を得た。オゾン全量の季節変化は、「preliminary run」の3年目に定常サイクルに近づいた。ランは、1957年～2002年の46年間実施され、1979年からの全てのデータが分析された。1997年のこの簡略化されたCTMにおけるN₂O濃度は、full化学によるオリジナル版の濃度よりも若干高い値を示したが、ほぼ同様の分布であった。ここで用いたデータは、気温、風速、N₂O濃度、非断熱加熱率を含む、簡略版の出力から得たものを用いた。

NCEP/NCAR再解析データとu-v-Tナッジングモデルを用いたN₂O分布計算の解析結果は、昨年度の報告書に発表した。しかしながら、NCEP/NCAR再解析データはその上限高度が30km付近で低く、成層圏全体の大気大循環の年々変動を表すには不十分でそれが下部成層圏のN₂O濃度の年々変動に影響を及ぼしているかもしれないこと、また、化学輸送モデルの母体となる大気大循環モデルCCSR/NIES AGCMバージョン5.4.02は熱帯対流圏上部と冬期の極域の気温が観測値に比べて低い(いわゆる大循環モデルの低温バイアス)、u-v-Tナッジングで気温の同化を行うとこのような場所での気温を矯正する度合いが大きくなってそれが無視できない人工的な加熱冷却となって大気大循環が歪められる恐れがある(Miyazaki et al., 2005²²⁾)。u-v-Tナッジングは、化学輸送モデルの母体となる大気大循環モデルに温度バイアスがある領域で、不均一反応が関与する極域のオゾン破壊といったような非常に気温に敏感な過程を調べる場合には必須であるが、下部成層圏のN₂Oの場合ほとんど化学反応を起こさない準トレーサーと考えられるので、その輸送過程のみが重要になり気温はそれほど重要ではない。それゆえ、N₂Oの輸送に重点を置いたより確かな結果を得る

ために、NCEP/NCAR再解析データの代わりにその上限高度が45～50km付近にあるECMWF-ERA40データ、u-v-Tナッジングの代わりにu-vナッジング（気温の同化をせず水平風速のみの同化を行うモデル）を使った計算、あるいはそのどちらかを代えた計算を、同じ期間について行った。

（2）N₂O濃度のProbability Distribution Function (PDF)解析

N₂O濃度場の分布と変化の特性を決定するために、PDFという手法を用いた。PDFは、今考えている範囲内で、あるN₂O濃度値の等値線で占有された領域の面積の、範囲全体の面積に対する比で表される（*Sparling, 2000*²³⁾）。この解析によって、考えている範囲全体のN₂O濃度値の時間変化を知ることができる。この研究では45°N以北の北半球中・高緯度域を考える。理由は、仮に解析範囲をもう少し低緯度からとると（例えば30°N以北）、低緯度からの高濃度N₂Oの影響がしばしば現れ、極渦と中緯度での影響解析をわかりづらくする恐れがあるからである。また、PDF解析は、考えている範囲全体の傾向を示すので、例えば、いちばん大きい確率を示すN₂O濃度がその範囲内のどこにあるかの情報は提供しないということに注意する必要がある。

4. 結果・考察

（1）NCEP/NCAR再解析データとu-v-Tナッジングモデル

1978年～2002年の期間で45°N以北の高度600K（22-24 km）の亜酸化窒素の濃度分布の年々変動をPDF解析によって調べた。その結果、北極渦崩壊は晩冬から春季にかけて起こるが、その極渦崩壊の早い年と遅い年との間に、亜酸化窒素濃度の分布とその季節変動に関して明確な違いが認められた。極渦崩壊の早い年は、その崩壊時期に急激にN₂O濃度が下がりその下がった状態が、夏が終わるまで続くという傾向が見られた。一方、極渦崩壊の遅い年には、極渦崩壊に伴う45°N以北全体のN₂O濃度の急激な低下は見られず、最大の面積を占める濃度は冬から夏にかけてあまり変化しない。そして、このような違いを起こすのは子午面循環の強度の違いであることを見いだした。

（2）その他の結果

3（1）の最後に述べたように、上述のNCEP/NCAR再解析データとu-v-Tナッジングモデルの結果の信頼性に多少の疑問があるので、さらに、同化データとナッジング手法を変えた3つの数値実験を行い、結果をN₂O濃度に関してPDF解析した。以下にその実験について記す。

- 1) NCEP/NCAR再解析データとu-v-Tナッジング(上述)
- 2) NCEP/NCAR再解析データとu-vナッジング
- 3) ECMWF-ERA40データとu-v-Tナッジング
- 4) ECMWF-ERA40データとu-vナッジング

これらについて、結果を比較したところ以下のようなことがわかった。

まず、u-v-Tナッジングとu-vナッジングの結果の違いについて述べる。上の1)と2)との間および3)と4)の間には共通の違いがあり、4（1）で述べたとおり、u-v-Tナッジングでは、極渦崩壊の早い年には、極渦崩壊時期に急激なN₂O濃度の低下が起こり、夏季にその最大面積を占めるN₂O濃度が低くなった。一方、u-vナッジングでの極渦の崩壊の早い年は、同様に極渦崩壊時期に急激なN₂O濃度の低下が起こるのだが、夏にはその最大面積を占める濃度がまた冬の時期の値まで戻る

という結果が得られた。さらに、ナッジング過程を含まない化学気候モデルの結果(Eyring et al., 2006²⁴⁾)も解析したところ、 N_2O 濃度の季節変動はu-vナッジング化学輸送モデルのものに近かった。

次に、NCEP/NCAR再解析データとECMWF-ERA40データを使った結果の違いについて述べる。u-v-Tナッジングを使った結果に関しては(1)と3)、600Kの高度における最大面積を占める N_2O 濃度の値に若干違いが見られたが、季節変動の違いは無かった(極渦崩壊の早い年の夏の N_2O 濃度は低い)。一方、u-vナッジングを使った結果では(2)と4)、その値、季節変動ともほとんど差が無かった。

以上の結果を考えて、現化学輸送モデルで、4) ECMWF-ERA40データとu-vナッジングを使った結果が最も信頼性が高いと考え、以下ではこの結果について詳述する。

(3) ERA40データとu-vナッジングモデル結果の詳細

1) 高度600Kにおける極渦崩壊時期と N_2O 分布



図1 Nash et al. (1996)と同じ判定基準を用いて、ECMWF ERA40データから得た北極渦崩壊日の年々変化。図中の●と□は、それぞれ崩壊の早い年と遅い年を表している。

図1は、1979年～2002年の北極渦崩壊の時期の年々変動を示している、これはNash et al. (1996)²⁵⁾と同様な方法でPV勾配および東西風判定基準によって決定されたものだが、CMWF ERA40データから計算された。ここで得た極渦崩壊日は、NCEP/NCARデータから計算された、1986年以降のWaugh and Rong (2002)¹⁷⁾の図1のものとほぼ同じ値を示したが、1979年～1985年の期間には多少相違があることに注意。今回の結果から、極渦崩壊の早い年として1981年、1987年、1999年、2001年を、極渦崩壊の遅い年として1990年、1993年、1994年、1995年、1997年をそれぞれ選択した。図2は、極渦崩壊の早い年と遅い年における、45°N以北600K等温面の N_2O 濃度のPDFの時間変化を示している。極渦崩壊の早い年では、最大 N_2O の確率は、晩冬から初春に、高い N_2O 値(約180ppbv)から低い N_2O 値(およそ120ppbv)までシフトした後、晩春から初夏に、高い値(約180ppbv)に戻る。極渦崩壊の遅い年には、早い年に起こる大きな N_2O -PDFシフトは見られず、最大 N_2O の確率は、

冬から春まで約180ppbvのままである。

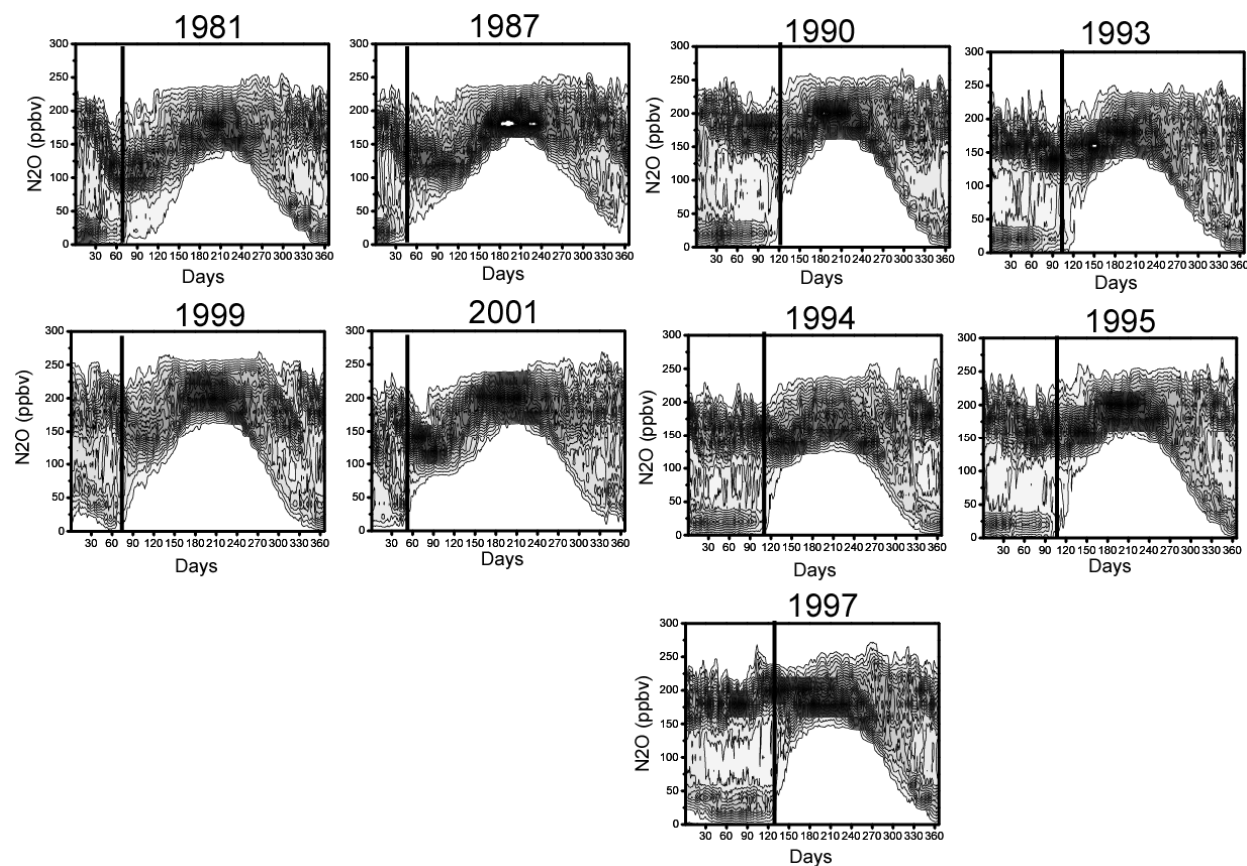


図2 45N以北の600K等温位面における、極渦崩壊の早い年（1981年、1987年、1999年、2001年）（左側の2つの縦の列）と遅い年（1990年、1993年、1995年、1997年）（右側の2つの縦の列）の N_2O 濃度のPDF。縦軸（ N_2O 濃度）の単位はppbv、横軸の単位は日である。縦の黒線は、図1の極渦崩壊日を表している。

PDF解析は、 N_2O 濃度の地理的な情報を提供できないという欠点がある。我々は等価緯度（Equivalent Latitude）によって、帯状平均 N_2O 濃度を計算した（図3）。図から、崩壊の早い年の N_2O 濃度は、崩壊の遅い年よりも、中等価緯度領域では低い値、高等価緯度領域では高い値を示している。図2のPDFで、晩冬から早春の崩壊の早い年に起きた大きな N_2O 濃度シフトは、主として極渦崩壊の早い年の中緯度領域での N_2O 濃度の減少に起因していることがわかる。

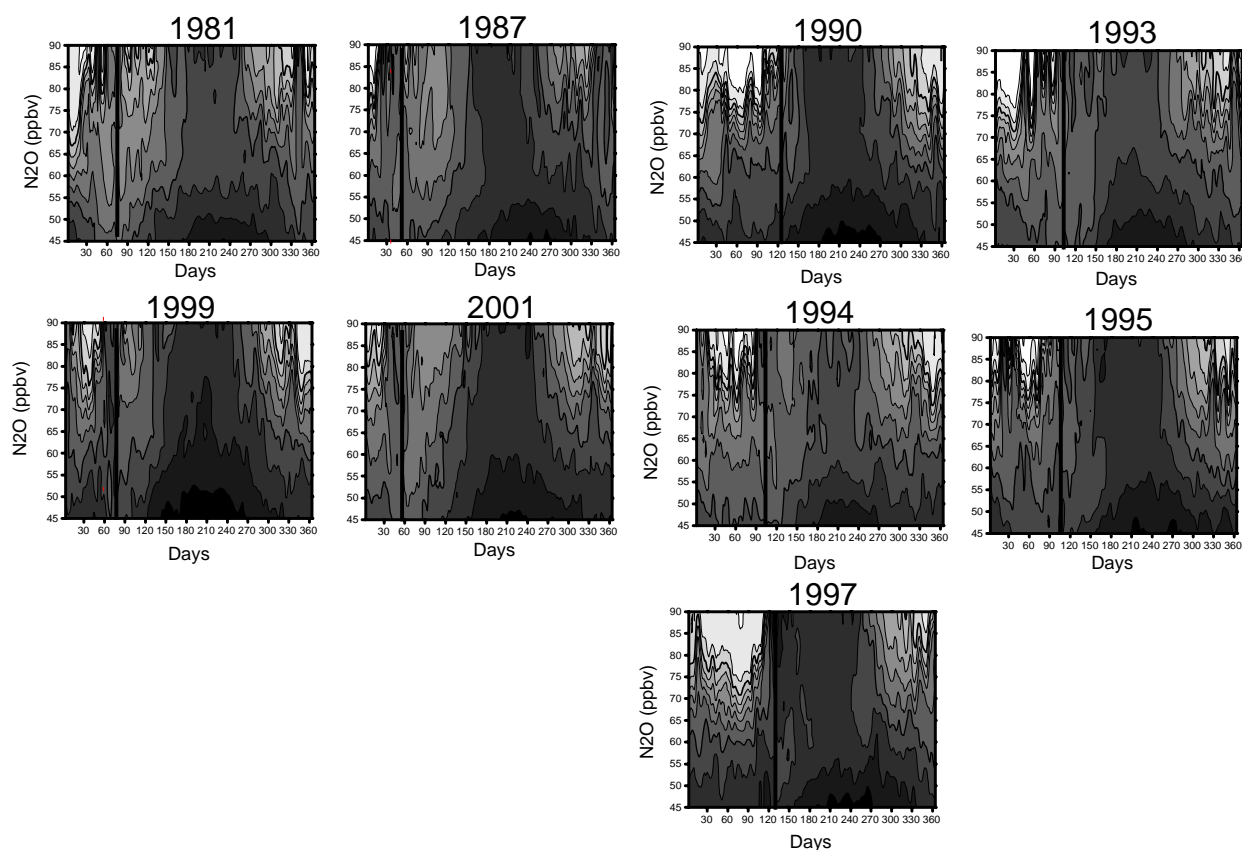


図3 北極渦崩壊の早い年（左側の2列）と遅い年（右側の2列）における600K等温位面での等価緯度に対するN₂O濃度の変化。縦の黒線は、図1からの崩壊日を表している。太線および中太線は、それぞれ60 ppbv、160ppbv等値線である。

2) N₂O分布に影響を与えるプロセス

以前の研究では、u-v-TナッジングおよびNCEPデータによるCTMからの結果を用いて、N₂O分布に影響を与えたプロセスを分析した。結果は、「N₂O分布は、垂直方向の移流と密接に関連している」ことを示した。u-vナッジング・プロセスおよびERA40データによるCTMから、N₂O分布に影響を与えたプロセスを調べるために、所与のN₂O等値線 χ^* で囲まれた領域傾向を計算し、極渦発達 の指標として用いた (Nash *et al.*, 1996²⁵)。Butchart and Remsberg (1986)²⁶の以下の式 (6)~(13)、等温位面でのN₂O濃度の領域傾向は、次の式で表される。

$$\frac{d}{dt} A(t) \chi \leq \chi^* \approx \oint_{\hat{z}=\chi^*} H \frac{\partial \hat{\chi}}{\partial \theta} \frac{ds}{|\nabla_{\theta} \hat{\chi}|} + \int_{A(t) \hat{z} \leq \chi^*} \nabla_{\theta} \cdot \hat{v} dA + \int_{\hat{z}=\chi^*} v \cdot \nabla_{\theta} \chi' \frac{ds}{|\nabla_{\theta} \hat{\chi}|} + \oint_{\hat{z}=\chi^*} F \frac{ds}{|\nabla_{\theta} \hat{\chi}|} - \oint_{\hat{z}=\chi^*} G \frac{ds}{|\nabla_{\theta} \hat{\chi}|}, \quad (2)$$

ここで、 $A(t)$ は、等温位面での所与のN₂O等値線に囲まれた領域である。 H は純非断熱加熱率、 v は南北流速、 F は摩擦力である。 G は、N₂Oの化学ソースまたはシンクである

($G = -J_{N_2O}[N_2O] - k[O(^1D)][N_2O]$)。式 (2) の右辺の初項は、N₂O濃度の垂直方向の移流に伴う変化

を表している。第2項、第3項、および第4項は、それぞれ水平風場、sub-grid scaleプロセス、摩擦力を表している (Nash *et al.*, 1996²⁵)。末項は、N₂Oの化学ソース/シンクによる面積変化を表している。

図3から、160ppbv (中太曲線)は、45°N等価緯度の北側のほぼ全領域をカバーしており、60ppbv (太曲線)は、北極渦の少し内側ではあるが、ポテンシャル渦度によって決まる極渦周辺を示している。45°N以北と極渦内側のこの領域傾向 ((2)式の左辺) および (2) 式右辺の各項の寄与を調べるために、図4に45°N以北、図5の極渦の内側についてそれぞれ、領域傾向、垂直方向の移流、水平風の発散を示した。図4および図5の網掛け領域は、図2において-30 ppbv month⁻¹以上の勾配を持つ高いN₂O値から低いN₂O値に、最大領域を占めるN₂O濃度が急速にシフトする期間を表している。

概して網掛け領域において、鉛直移流項には、領域傾向 ($dA(t)/dt$) と同じ徴候があり、水平風の発散項には、小規模の反対の徴候がある。鉛直移流項は、N₂O濃度の急速な減少期間の領域傾向 ($dA(t)/dt$) に対する主な原因である。鉛直移流項における $\partial\chi/\partial\theta$ は、常に負であるので (N₂Oは高度と共に減少する)、下降は鉛直移流項を正にする。冬と春に強い下降が持続する場合には (大きな正の鉛直移流値)、160ppbv以下のN₂O値領域は、それに応じて増加する (正の領域傾向)。

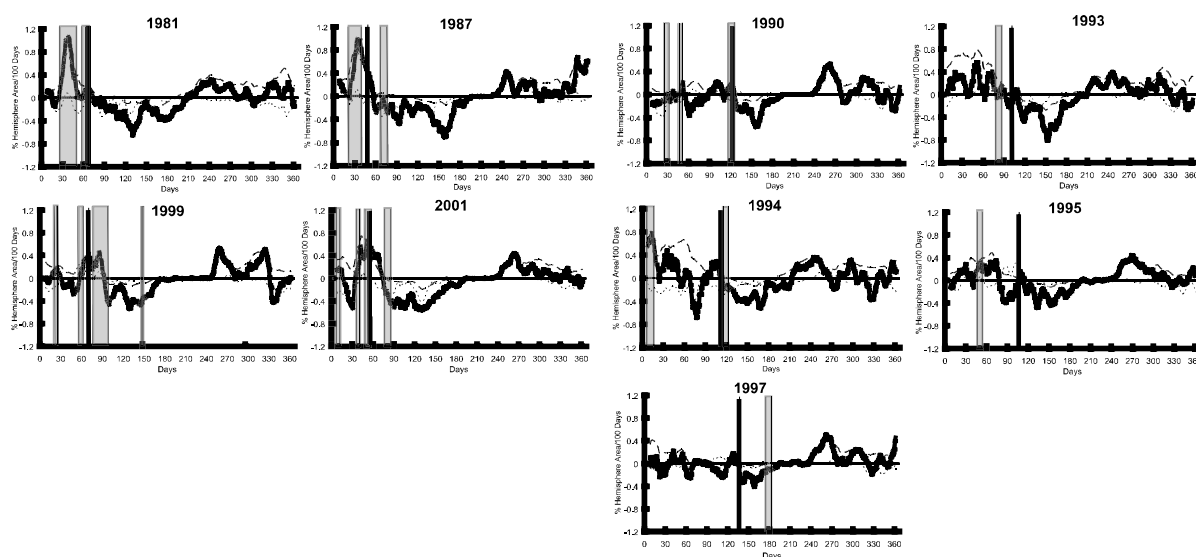


図4 崩壊の早い年 (左側の2列) と遅い年 (右側の2列) の600K等温位面における160ppbv等値線 $dA(t)/dt$ によって囲まれた領域傾向 (実線)、鉛直移流項 (破線)、水平風の発散項 (点線) の変化。これらのデータは、11日移動平均で平滑化された。網掛け領域は、図2における-30 ppbv month⁻¹以上の勾配を持つ高いN₂O値から低いN₂O値への大きなN₂O PDFシフトの期間である。縦線は、極渦崩壊日を示している。

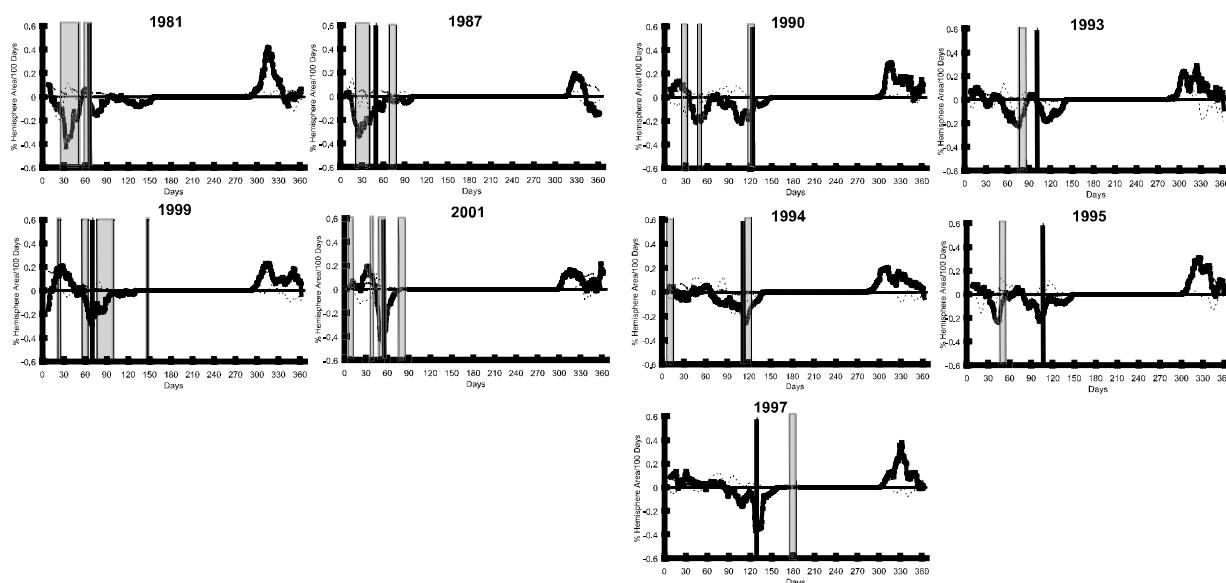


図5 図4と同じ。ただし、60ppbvで囲まれる等値線についての結果。

極渦内の式 (2) の各項の寄与率を調べるために、60ppbv等値線で囲まれた領域傾向、移流項、水平風の発散項も計算した (図5)。図4と比較すると、図5に示した崩壊の早い年の鉛直移流項は、領域傾向の主な原因ではない。60ppbv等値線で囲まれた領域は、網掛けされた期間には、負の領域傾向 (実線) を示した。これは、図4に示した160ppbv等値線で囲まれた領域傾向に反した傾向であり、「低濃度領域が、その期間に減少する」ことを示唆している。鉛直移流項は、正の傾向を示しているので、負の領域傾向は、ある程度は水平風の発散項および他の小規模運動項によるものでもある。このことは、「図3に示された、崩壊の早い年の極渦内側の低い N_2O 濃度領域の減少は、水平風の発散および他の小規模な運動によるものである」ことを示唆している。

崩壊の遅い年には、鉛直移流項は、明らかに水平風の発散項より小さい。この結果は、「水平風および他の小規模なプロセスは、崩壊の遅い年の安定した極渦内の N_2O 濃度領域傾向に対して、同程度に寄与している」ことを示唆している。

(4) 将来予測実験の結果を用いた N_2O とオゾンとの相関関係

CCSR/NIES CCM [東京大学気候システム研究センターと国立環境研究所が共同開発で開発した成層圏化学モデル (CCM)] による2つの実験、即ちREF1およびREF2は、2005年からの「成層圏と気候への役割」(SAPRC)によるCCM確認プロジェクトの下で実施された (Eyring et al., 2006²⁴)。CCM REF2からのデータを用いて、600K等温位面での N_2O 濃度とオゾン混合比を計算して、3月の $60^{\circ}\sim 70^{\circ}N$ 等価緯度帯で平均し、その偏差を図6に示した。 N_2O 濃度とオゾン混合比の両方とも、1980年~2050年の正の傾向と共に、強い年々変化を示した。 N_2O 濃度とオゾン混合比の間には、密接な関連性があり、相関係数は0.75である。また、 $45^{\circ}\sim 60^{\circ}N$ および $70^{\circ}\sim 90^{\circ}N$ 等価緯度帯の N_2O 濃度とオゾン混合比の関係も調べて、それぞれの相関係数0.45と0.62を得た。 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}N$ 等価緯度帯の最大係数は、そこでの極渦と中・高緯度との混合プロセスが最も大きいことと関連している可能性がある。また、年代によってその相関の程度が違っている。このことは、年代によってフロン

によるオゾン化学の影響が異なることを示唆している。しかしながら、 N_2O とオゾンの間の関係に影響を与えるプロセスを定量化するためには、さらに詳しい解析が必要である。

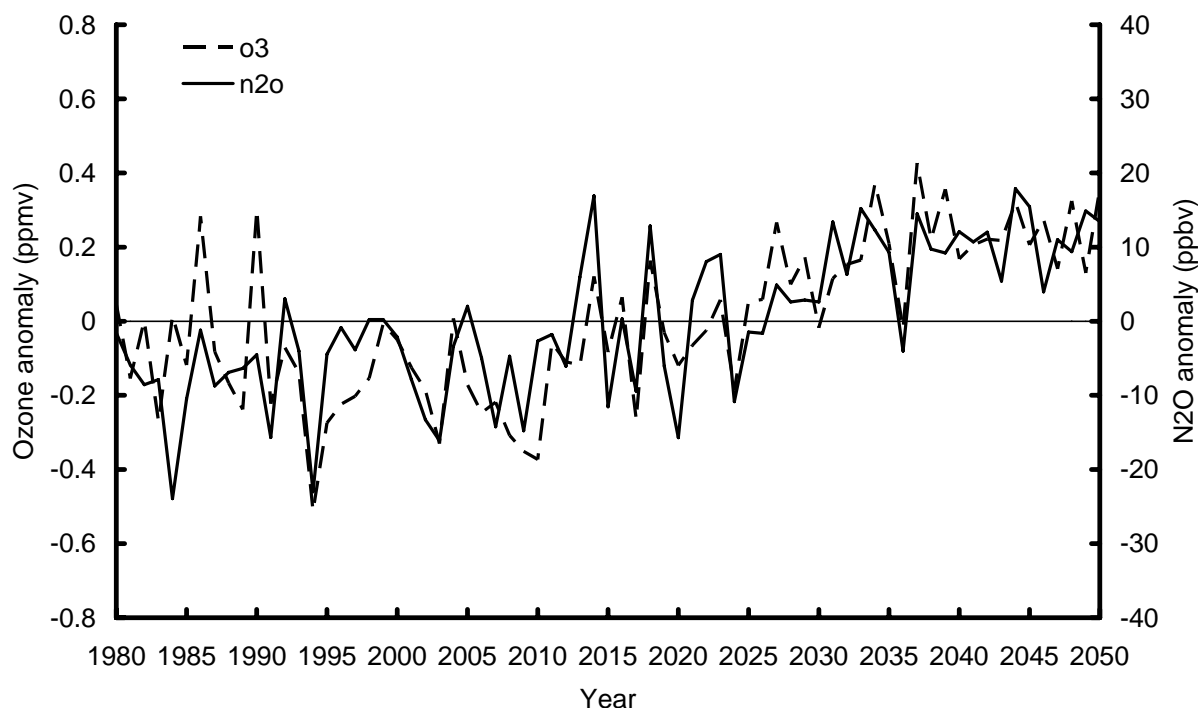


図6. 1980年～2050年3月の600K等温位面における、 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}N$ 等価緯度帯で平均した N_2O 濃度（実曲線）とオゾン混合比偏差（破曲線）の年々変化

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

下部成層圏における亜酸化窒素濃度の年々変動を、化学輸送モデルを用いて計算し、その結果をPDF解析した。昨年度行ったNCEP/NCAR再解析データを化学輸送モデルにu-v-Tナッジングによって同化した計算に加えて、データの上限高度がより高いECMWF-ERA40を、温度同化を行わないu-vナッジングによって同化した計算を行った。1978年から2002年までの高度600K、 $45^{\circ}N$ 以北の N_2O 濃度の計算結果を解析したところ、極渦崩壊の早い年は、極渦崩壊時期に N_2O 濃度の急激な低下が起っていることがわかった。そして、夏までにはその最大面積を占める濃度がまた冬の時期の値まで増加・回復するという結果が得られた。極渦崩壊の遅い年には、極渦崩壊に伴うこのような急激な下部成層圏 N_2O 濃度の低下は起こらず、最大面積を占める濃度は冬から夏までほぼ一定値を示す。そして、この極渦崩壊時期の早い年の $45^{\circ}N$ 以北の領域の N_2O 濃度の低下の原因は、これらの年のより強い下降流の影響であることがわかった。ただし、極渦内だけを見た場合、極渦崩壊時期の早い年の N_2O 濃度は増加し、それには水平方向の輸送の影響が大きいことがわかった。

以上の結果は、オゾン全量への影響が大きい下部成層圏の北極域で、化学的な影響をほとんど受けない準トレーサー物質の分布の年々変動の要因を明らかにしたものであり、この結果をもとに化学的な影響をより受けるオゾン濃度の年々変動を理解することが可能になった。

国際プロジェクト「化学気候モデル検証」の下で行われたオゾン層の将来予測実験（1980～2050

年)の結果を使ってオゾンとN₂O濃度の相関を調べた。高度600Kのオゾン濃度とN₂O濃度の相関は極渦境界付近で大きく、その相関は年代によって変化していた。このことは、年代によってフロンによるオゾン化学の影響が異なることを示唆している。

(2) 地球環境政策への貢献

- ・ 本課題の成果に関するアウトリーチ活動の一環として、2006年10月に一般向けの講演会を開催、高緯度オゾンの変動に関しての講演を行った。
- ・ 環境省環境研修所での地球環境保全研修で中高緯度のオゾンの長期変化とその年々変動に関する研究成果の一部を紹介した。

6. 引用文献

- 1) WMO (World Meteorological Organization), 2003: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Rep. 47. Global Ozone Res. and Monit. Proj., Geneva, Switzerland.
- 2) Nakane, H. (2000), Long and short term variability in the dynamical attributes of the Arctic polar vortex and its effect on ozone, SPARC Newsletter, 15, 15-17.
- 3) Mahlman, J. D., H. Levy II, and W. J. Moxim, 1986: Three-dimensional simulations of stratospheric N₂O: Predictions for other tracer constituents. J. Geophys. Res., 91, 2687-2707.
- 4) Yang, H., 1995: Three-dimensional transport of Ertel potential vorticity and N₂O in the GFDL SKYHI model. J. Atmos. Sci., 52, 1513-1528.
- 5) Nakamura, N., and J. Ma, 1997: Modified Lagrangian-mean diagnosis of the stratospheric polar vortices. 2. N₂O and seasonal barrier migration in the CLAES and SKYHI general circulation model. J. Geophys. Res., 102, 25,721-25,735.
- 6) Fleming, E. L., C. H. Jackman, R. S. Stolarski, and D. B. Considine, 1999: Simulation of stratospheric tracers using an improved empirically based two-dimensional model transport formulation. J. Geophys. Res., 104, 23,911-23,934.
- 7) Fleming, E. L., C. H. Jackman, D. B. Considine, and R. S. Stolarski, 2001: Sensitivity of tracers and a stratospheric aircraft perturbation to two-dimensional model transport variations. J. Geophys. Res., 106, 14,245-14,263.
- 8) Brasseur, G., and S. Solomon, 1986: Aeronomy of the Middle Atmosphere. 452 pp., D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland.
- 9) Waugh, D. W., K. K. Kelly, P. A. Newman, and L. R. Lait, 1997: Mixing of polar vortex air into middle latitudes as revealed by tracer-tracer scatter plots. J. Geophys. Res., 102, 13,119-13,134.
- 10) Akiyoshi, H., S. Sugata, T. Sugita, H. Nagajima, H. Hayashi, J. Kurokawa, and M. Takahashi, 2002: Low-N₂O air masses after the breakup of the Arctic polar vortex in 1997 simulated by the CCSR/NIES nudging CTM. J. Meteor. Soc. Jpn., 80, 451-463.
- 11) Hess, P. G., 1991: Mixing processes following the final stratospheric warming. J. Atmos. Sci., 48, 1625-1641.
- 12) Strunk, M., A. Engel, U. Schmidt, C. M. Volk, T. Wetter, I. Levin, H. Glatzel-Matteier, 2000: CO₂ and SF₆ as stratospheric age tracers: consistency and the effect of mesospheric SF₆ loss. Geophys.

- Res. Lett., 25, 341–344.
- 13) Herman, R. L., and coauthors, 1998: Tropical entrainment time scales from stratospheric N₂O and CH₄ observations. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2781–2784.
 - 14) Orsolini, Y. J., 2001: Long-lived tracer patterns in the summer polar stratosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3855–3858.
 - 15) Waugh, D. W., W. J. Randel, S. Pawson, P. A. Newman, and E. R. Nash, 1999: Persistence of the lower stratospheric polar vortices. *J. Geophys. Res.*, 104, 27,191–27,201.
 - 16) Zhou, S. T., M. E. Gelman, A. J. Miller, and J. P. McCormack, 2000: An inter-hemisphere comparison of the persistent stratospheric polar vortex. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1123–1126.
 - 17) Waugh, D. W., and P. P. Rong, 2002: Interannual variability in the decay of lower stratospheric Arctic vortices. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 80, 997–1012.
 - 18) Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi (1999), Simulation of ozone and other chemical species using a Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled stratospheric chemistry, *J. Geophys. Res.*, 104, 14003-14018.
 - 19) Akiyoshi, H., 2000: Modeling of chemistry-radiation coupling processes for the middle atmosphere and a numerical experiment on CO₂ doubling with a 1-D coupled model. *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 78, 563–584.
 - 20) Hartmann, D. L., 1978: A note concerning the effects of varying extinction on radiative-photochemical relaxation. *J. Atmos. Sci.*, 35, 1125–1130.
 - 21) Akiyoshi, H., and M. Uryu, 1992: Diagnostic model study of the seasonal variation of global ozone and the Antarctic ozone hole. *J. Geophys. Res.*, 97, 20,837–20,853.
 - 22) Miyazaki, K., T. Iwasaki, K. Shibata, M. Deushi, and T. T. Sekiyama, 2005, The impact of changing meteorological variables to be assimilated into GCM on ozone simulation with MRI CTM, *J. Meteor. Soc. Jpn.*, 83(5), 909–918.
 - 23) Sparling, L. C., 2000: Statistical perspectives on stratospheric transport. *Rev. Geophys.*, 38, 417–436.
 - 24) Eyring, V., N. Butchart, D. W. Waugh et al. (2006), Assessment of temperature, trace species, and ozone in chemistry-climate model simulations of the recent past, *J. Geophys. Res.*, 111, D22308, doi10.1029/2006JD007327.
 - 25) Nash, E. R., P. A. Newman, J. E. Rosenfield, and M. R. Schoeberl, 1996: An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity. *J. Geophys. Res.*, 101, 9471–9478.
 - 26) Butchart, N., and E. E. Remsberg (1986), The area of the stratospheric polar vortex as a diagnostic for tracer transport on an isentropic surface, *J. Atmos. Sci.*, 43, 1319-1339.

7. 国際共同研究等の状況

- WCRP（国際気候研究プログラム）傘下の国際共同プログラムであるSPARC（成層圏プロセスとその気候に対する役割）のプロジェクトの一つであるCCMVal（化学気候モデルの検証プロジェクト）に参画、化学気候モデルの国際比較に貢献している。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文 (査読あり) >

- 1) Kurokawa, J., H. Akiyoshi, T. Nagashima, H. Nakane, H. Masunaga, T. Nakajima, M. Takahashi, Effects of atmospheric sphericity on the stratospheric chemistry and dynamics over Antarctica, J. Geophys. Res., 110(D21), D21305, doi:10.1029/2005JD005798 (2005)
- 2) Akiyoshi, H., S. Sugata, M. Yoshiki, and T. Sugita, Ozone decrease outside Arctic polar vortex due to polar vortex processing in 1997, J. Geophys. Res., 111, D22311, doi:10.1029/2005JD006540 (2006).

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) Akiyoshi, H., L. B. Zhou, and M. Takahashi, Northern hemisphere lower stratospheric N2O distributions in the early and late polar vortex breakup years, CGER's Supercomputer Activity Report, 13, 3-13 (2006).
- 2) L. B. Zhou, 秋吉英治, Mid- and high- latitude N2O distributions in Northern Hemisphere in early and late vortex breakup years, 第16回大気化学シンポジウム研究集会講演集, 236-238 (236-238).

(2) 口頭発表 (学会)

- 1) L. B. Zhou and H. Akiyoshi, Mid- and high- latitude lower stratospheric N2O distributions related to the Arctic vortex breakup, CCMVal wrokshop 2005, Boulder, USA, 2005年10月17-19日; CCMVal 2005 - agenda and abstracts p.16.
- 2) L. B. Zhou and H. Akiyoshi, Lower stratospheric N2O distributions in the early an late vortex years, 日本気象学会、東京、2006年5月21-24日; 2006年度春季大会講演予稿集(89)、331.
- 3) 坂本圭、秋吉英治、永島達也、L. B. Zhou、高橋正明、太陽活動に対する熱帯下部成層圏のオゾンの変動、日本気象学会、名古屋、2006年10月25-27日; 2006年度秋季大会講演予稿集(90)、206
- 4) L. B. Zhou、秋吉英治、北半球中緯度におけるオゾンQBOの経度依存性、日本気象学会、名古屋、2006年10月25-27日; 2006年度秋季大会講演予稿集(90)、207

(3) 出願特許

なし。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

一般講演会「オゾン層破壊問題—今後の予測と紫外線影響—」、(2006年10月28日、ウィル
あいち、観客90名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

なし

(6) その他

なし