

オゾンホール¹⁾の現状と今後

Present and Future Status of the Ozone Hole

川平浩二*・牧野行雄**

Kohji Kawahira Yukio Makino

1. はじめに

南極オゾンホールの発見は、100年に1度の大発見といわれる。地球環境問題への世界的関心の高揚をもたらすきっかけとなった¹⁾。オゾンホールは形状が円形で中心部が最低オゾン量であることから、オゾンの“穴”という名をマスコミがつけた。オゾン量が年々低下していることも意味する。ここではオゾンホールの現状とその成因を概観し、今後の推移を考えるためのいくつかの課題をまとめる。

2. オゾンホールの現状

地表上空にあるオゾン全量の単位として、標準状態(0℃, 1気圧)での厚さを定めている。1000分の1cmを単位として、DU (Dobson Unit ドブソン単位) またはm atm-cm (ミリアトムセンチメートル) と呼ぶ。300DU (m atm-cm) とは、0.3cmの厚さのオゾン全量を意味する。ちなみに大気全体の標準状態の厚さは約8,000mである。

オゾンホールの定義は統一されていないが、1970年代までには出現しなかった220DU以下の領域とする²⁾。月平均オゾン量が220DU以下の領域が南極大陸並みの大規模であること、また年々低下傾向にあることが共通して理解されている。北極域のオゾン量も減少しているが、冬の数日間220DU以下の小規模領域もみられるが、移動が速く持続しない。現在までのところ、北極オゾンホールといえるオゾン分布は出現していないといえる^{1), 2)}。

2.1 南極オゾンホールの実態

南極オゾンホールの最近の状況に関して、最も発達する南極の春、10月平均の分布を示したのが図1であ

る。オゾンホール出現前の1979年と、昨年98年の比較である²⁾。中心域は310から160m atm-cmへ半減し、周辺の最大値も460から400m atm-cmへ減少している。オゾンホール最盛期におけるオゾン鉛直分布は(図2)、15~20km高度のオゾンがすべて破壊つくされる状況が続く²⁾。最も密度の高いこの領域のオゾンが約一ヶ月間(8月終わりから10月初め)ですべて消失している。

月毎のオゾン量の推移は図3でみられるように、1980年代から減少傾向が続いている²⁾。10月については70年代に比べて90年代後半は50%減少、9月は30%

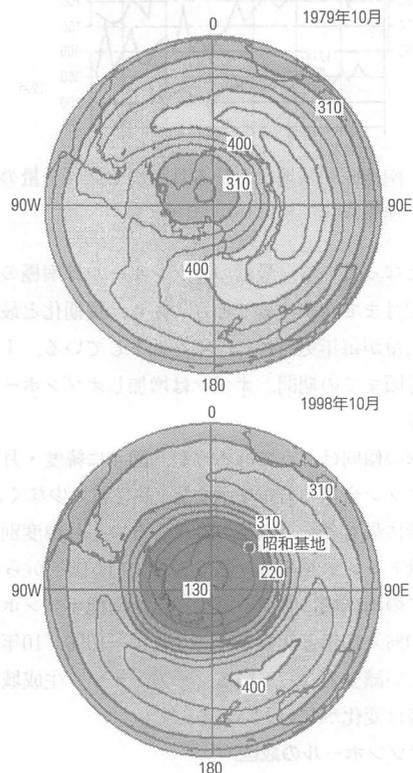


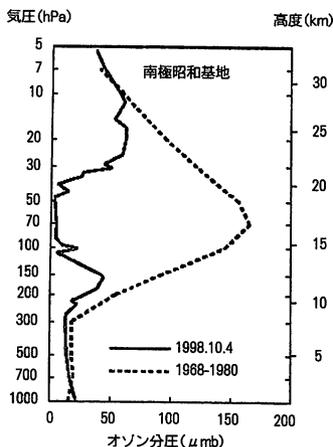
図1 1979, 1998年10月の南半球月平均オゾン全量分布図²⁾ 単位はm atm-cm

* 福井県立大学生物資源学部教授

〒910-1195 福井県吉田郡松岡町兼定島4-1-1

** 気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部第1研究室長

〒305-0052 茨城県つくば市長峰1-1



点線はオゾンホール出現前の10月の平均分布を示す。オゾン分圧は数密度に比例する

図2 昭和基地におけるオゾンゾンデ観測結果²⁾

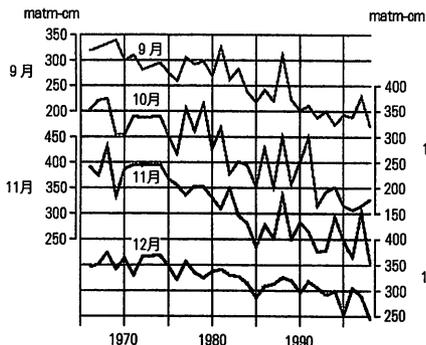


図3 南極昭和基地における月平均オゾン全量の経年変化²⁾ 単位はm atm-cm

減少となっている。最近のオゾンホールは南極の夏の初め12月まで持続することさえあり、長期化と最低オゾン全量が毎年更新され、年々低下している。1月から8月頃までの期間、オゾンは増加しオゾンホールは消える。

全球の傾向はどうであろうか。図4に緯度・月別でみたオゾン全量の分布を示す²⁾。熱帯域で少なく、北極の春に最も多く、南極の春に少ない。月緯度別のオゾン量トレンドをみる(図5)²⁾。やはり冬から春にかけての両極域における減少率は、南極オゾンホールで-20%/10年と北極の春、3月に-10%/10年という著しい減少となっている。一方、オゾン生成域である熱帯は変化がないといえる。

2.2 オゾンホールの成因

オゾンホールの成因としてはいくつもの仮説が出されたが、一ヶ月間にオゾン量を半減する急速な減少と

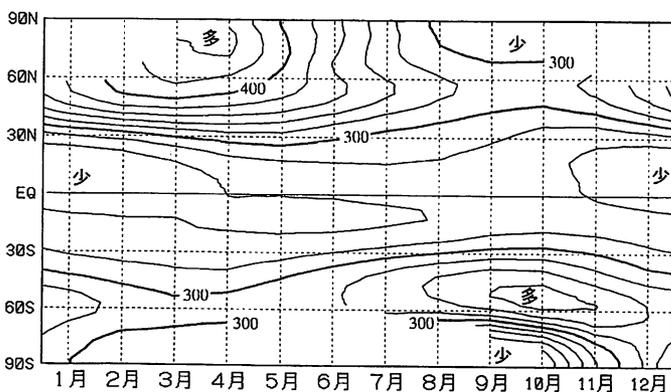


図4 オゾン全量 (matm-cm) の緯度・月分布 1979年1月から1992年12月までの平均²⁾

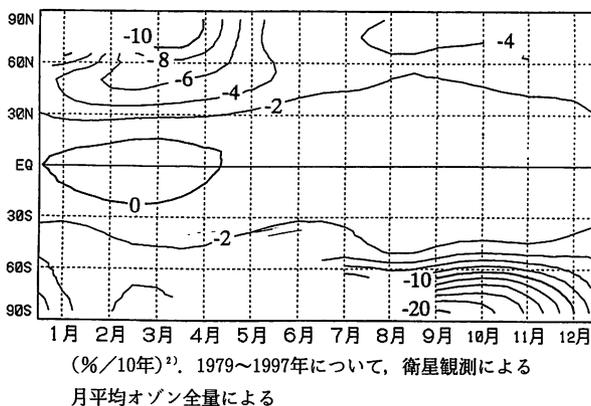
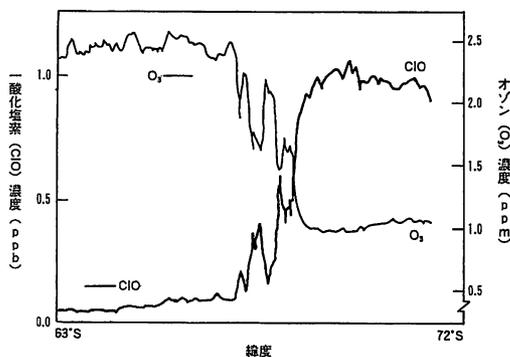


図5 オゾン全量トレンドの全球分布 (1979~1997年について、衛星観測による月平均オゾン全量による)



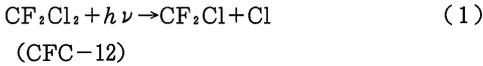
1987年9月16日、高度18kmで飛行した観測結果
図6 オゾンホール内外の一酸化塩素とオゾンの量的対比¹⁾

南極の冬から春先の20km高度以下で著しいオゾン減少が何故生じているかを説明出来ねばならない。

観測結果が示したのは、オゾンホール内の高度18

kmでは大量の一酸化塩素 (ClO) と少量のオゾン分布である (図6)¹⁾。成層圏まで塩素原子 (Cl) を運ぶのはフロンガスのみであることから、ローランドとモリナ (1995年ノーベル化学賞受賞) が提唱した次の例のような過程が成因として登場した^{1), 3)}。

地上から放出されたフロン-12の場合は、拡散してオゾン層を突き抜けると強い紫外線により分解されてClが解離する。



この塩素原子が触媒として作用し、次のようなオゾン破壊を行う。



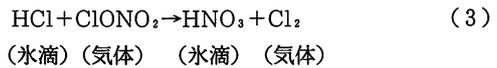
1個の塩素原子が1万個のオゾンを破壊するといわれる、この過程が生じていることは確実となった。しかしこの破壊は太陽高度の高い地域、熱帯や中緯度の40km高度で最も有効である。またこの反応によるオゾン破壊量は、50年間で約10%程度と予測された。

南極の冬は日射のない極夜であるから、この反応がオゾン破壊に有効と考えることは難しい。しかしClOは確かに多い、極夜の間に塩素を急増させるメカニズムは何か? モリナは室内実験から、極夜の低温下に生じる極成層圏雲の水滴が関係していると提唱した。観測結果を説明できる理論となった。

まず塩素原子の行方をみる (図7)⁴⁾。フロンから紫外線によって解離された塩素原子は、熱帯成層圏で上昇し両極域で下降する物質循環によって両極域へ運ばれる。地球規模の‘熱対流’の如き循環である。極へ輸送途中において、塩素原子はメタン (CH₄) 起源のHと結合し塩化水素 (HCl) へ、一酸化窒素 (N₂O) 起源のNO₂と結合し硝酸塩素 (ClONO₂) と変わる。この両気体はオゾン破壊を行わないリザーバーとなる。メタンと一酸化窒素は地表面の細菌が発生する温室効果の大きい気体である。しかし成層圏ではオゾン層を守る重要な役割を果たしている。このように南極成層圏に集まった二つの気体から、雲を構成する水滴が塩素を大気中に放出する。

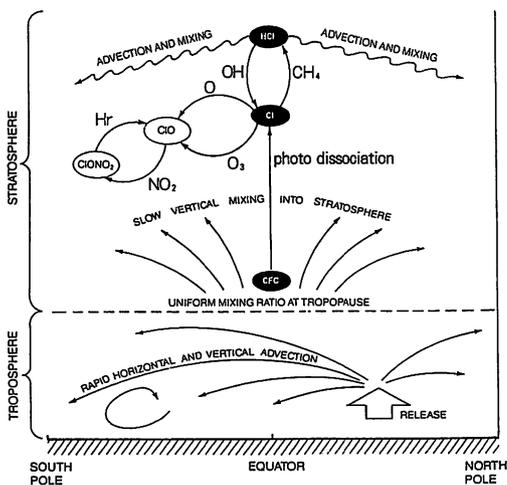
この雲を極成層圏雲 (Polar Stratospheric Clouds, PSCと略) と呼ぶが、極域成層圏20kmあたりを中心に出現する雲のことである。-70℃以上の気温では発生しない³⁾。元々海洋プランクトンが放出するカルボニルサルファイド (COS) や二硫化炭素 (CS₂) などの硫黄化合物が、成層圏まで達する間にH₂SO₄ (硫酸) になる。硫酸は水蒸気と混じり液滴として全球の成層圏15~20km高度あたりに存在する。成層圏エアロゾルである。

-80℃前後の気温では、硫酸エアロゾルは凍結し凝結核となる。この核の周りに硝酸 (HNO₃) と水蒸気が集合したタイプIの極成層圏雲が生成される。この雲の表面に極へ運ばれたHClが溶け込む。赤い色の雲としてみる。更に-85℃まで気温低下が起こると、水蒸気の凝結がタイプIの雲粒を覆い成長する。タイプIIと呼ばれる雲であり、白い雲としてみる。どのタイプの雲の水滴表面に溶けたHClに、気体のClONO₂が衝突する。その時、次の反応が生じる。



塩素分子の効率的生成が太陽光の入射しない極夜の成層圏で行われる。氷と気体が介在する反応のため、不均一反応と呼ばれる。気体間の反応に比べて100倍速いといわれる。

窒素酸化物を取り込み、また重力落下により一ヶ月間で約5km程低下する極成層圏雲は、塩素をリザーバー化する窒素化合物の成層圏からの除去作用を行うことになる。オゾンホール発達の二重に寄与する。なおタイプIの雲は南極域を50%程占めるが、北極域は10%を占める程度である。気温は北極域が平均にして約10℃ほど高いことによる。このために、タイプII



対流圏 (troposphere) から成層圏 (stratosphere) へは主として赤道域を通して流入する

図7 特定フロンから解離した塩素原子の分布と両極域への輸送概念図⁴⁾

の雲は北極域では観測されていない。

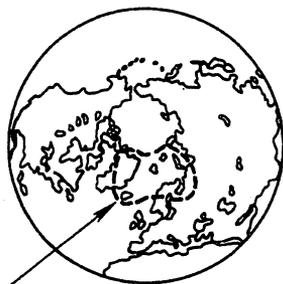
春の日射により塩素分子は塩素原子へ変わり、大量に溜まった塩素は(2)の反応により、急速なオゾン破壊を南極の空で行う。この時南極の成層圏は極渦という、風速60m/s以上のジェット気流で囲まれ、中・低緯度の暖かい空気の極域への流入を妨げる。

これがオゾンホール生成機構の概要といえる。不均一反応の驚くべき役割は、その後の大気化学に大きな影響を与えている。

3. オゾンホールの今後

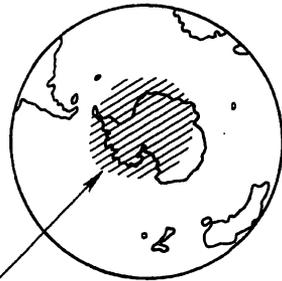
南北両極域のオゾン分布を、1996年の春季について比較したのが図8である⁵⁾。人口の多い北極域が今後どうなるのか懸念される。タイプIの極成層圏雲が北極でも発生し、南極域と同様な不均一反応が生じていることが直接観測から実証されている⁶⁾。

北極 (1996年3月)



300~320m atm-cm
(1980年以前は約450m atm-cm)

南極 (1996年9月)



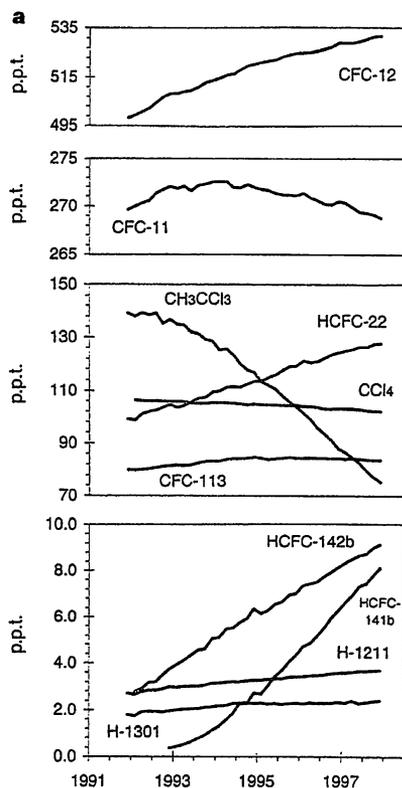
210m atm-cm以下
(1980年以前は約320m atm-cm)

図8 1996年の南北両極域上空のオゾン全量分布の模式図⁵⁾

今後の推移を考えるために、オゾンホール形成に関わるいくつかの要素の現状をまとめる。これらの要素の変化がオゾン層回復の鍵を握っている。

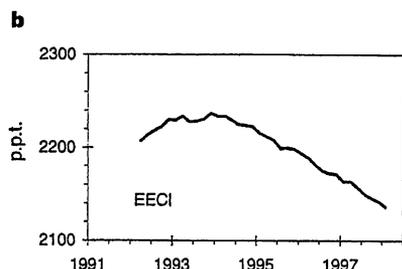
3.1 オゾン破壊物質の推移

成層圏内の塩素量は、自然起源が2割に対して、人



地上測定値の変化(北極から南極まで7地点観測結果)⁷⁾

図9 a: ハロカーボン混合比 (p.p.t. = 10¹²の1)



オゾン破壊係数や成層圏への流入割合を考慮し、塩素化合物に換算した量⁷⁾ (EECl=effective equivalent chlorine)

図9 b: 成層圏オゾン破壊塩素換算量

間活動起源は8割に達しているとの評価がある。モントリオール議定書により、特定フロンなどが先進国では1996年以降全廃になったが、発展途上国では2010年以降である。オゾン破壊物質の現状はどのようなものか。

図9aは、全球平均したハロカーボンの地上測定値の変化である⁷⁾。北極から南極域までの7観測地点の結果である。図9bはオゾン破壊に寄与する成層圏塩素相当量の推定値を示す。この中には塩素の5倍破壊

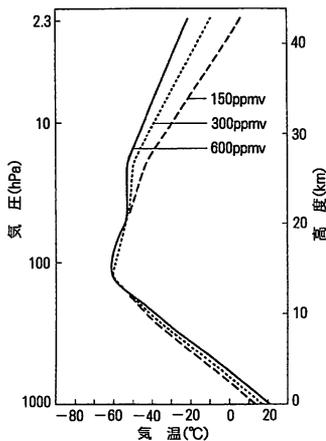
能力を持つ臭素 (Br) も含まれている。

成層圏オゾン破壊塩素換算量は、92~93年をピークに最近では低下しているが、最大値の3%減にすぎない。最大の寄与は、クリーニングに使われたメチルクロロホルム (CH₃CCl₃) の減少であるが、最近では事実上限界に達してゼロになっていると著者らは述べている。憂慮すべき点として、最大量のオゾン破壊物質フロン-12 (CFC-12) がまだわずかに増加中であること、さらにこの生産量が発展途上国では現在増加しているとの懸念を指摘している。また消化剤に用いられる halon-1211 (CBrClF₂) はゆっくりと増加中であり、将来のオゾン破壊への影響を警告している。一方でフロン-11は減少しているし、フロン代替物質のHCF Cの放出量も議定書予測量の50%程度になっている。

議定書のシナリオが示す、2050年頃にオゾン層破壊物質の25%減少による回復は楽観的ではなさそうである。

3.2 成層圏気温の推移

地球温暖化をもたらす二酸化炭素の増加は、対流圏では温暖化をもたらす成層圏では冷却化をもたらす。図10は、このことを示す数値計算結果である⁵⁾。水蒸気やオゾンの加熱効果も考慮にいたれた現実的結果である。二酸化炭素が300ppm (現在) から2倍の600ppmに増加したとき、地表面は2.3°Cの気温上昇があり、13km以上の成層圏では気温の低下となっている。成層圏では太陽光を直接吸収するのはオゾンであるが、赤外線を吸収・放出するのは二酸化炭素となっているためである。また成層圏オゾンの減少は成層圏加熱減



大気中のCO₂濃度が600ppm, 300ppm (現在) 150ppmである場合について示す⁵⁾

図10 放射対流平衡にある大気鉛直気温分布

となり、気温の低下を加速する。観測結果も全球成層圏気温低下を示している¹⁾。

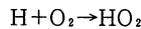
この成層圏の気温低下は、極成層圏雲の拡大・長期化をもたらす可能性がある。オゾン層の回復にとっては負の役割となる。2020年頃には北極にも220DU以下のオゾンホールが出現するとの計算結果もある⁹⁾。

3.3 熱帯成層圏オゾン

オゾンの生成域は、熱帯成層圏にある。しかし図5にみられるごとく、オゾンホール出現以降も熱帯のオゾン量の変化はない。熱帯成層圏を入り口として、両極の成層圏へ向かって物質は運ばれる重要な地帯である。特にこの鉛直輸送は活発な積雲活動による。この重要な領域でオゾンの減少が無いことは、オゾン生成活動が変わっていないことを示す。

積雲対流がオゾン生成に寄与するという研究が出てきた¹⁰⁾。結論的には、熱帯の活発な積雲対流は、10%ほどが対流圏最上部 (対流圏界面) を突き抜けて成層圏下部 (15km) まで達する。地上から15km高度まで達するのに30分程度という活発な積雲対流もある。この対流が地上の汚染物質を同時に運ぶ。その結果、上部対流圏から最下部の成層圏オゾンが増加する¹⁰⁾。

焼畑などのバイオマス燃焼から出る一酸化炭素 (CO) と窒素酸化物の大気汚染物質が対流圏最上部まで運ばれると、次の反応がおこる。



次に地上付近から運ばれた一酸化窒素と反応し、

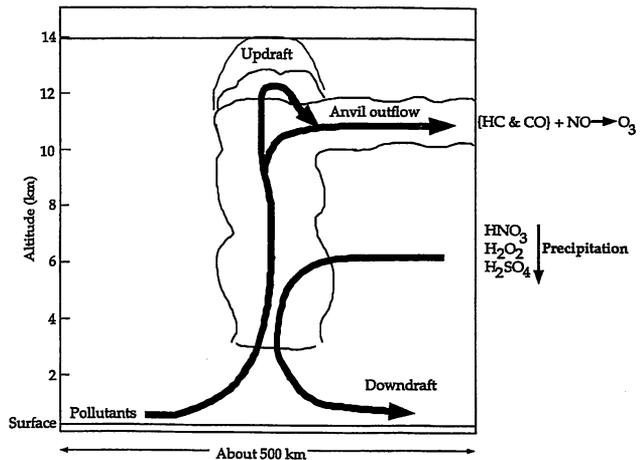
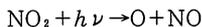


図11 積雲対流によるオゾン前駆物質 (CO, NO, HC = ハイドロカーボン) の輸送¹⁰⁾

このNO₂から太陽光線により酸素原子が解離され



というオゾン生成をもたらす。この結果、対流のないときに比べて3～4倍のオゾン増加が上部対流圏から成層圏下部にみられるとの飛行機観測結果がある。

激しい対流による雷活動が窒素酸化物を増加させるために、熱帯以外の対流活動によっても同様なオゾン増加がある、との研究結果も出ている。展開中のこの研究は、オゾン層回復にとっては期待と興味もてる。

4. まとめ

オゾンホールは大気物質の‘帝王’であるオゾンに関する、誰も予想し得なかった異常現象である。そして人間活動起源のフロンガスが地球規模のオゾン破壊をもたらした明白な事実でもある¹⁾。しかしオゾンホールの研究は、発見後急速に進展した。1984年、85年、86年の日、英、米の研究論文による南極オゾンホールの発見後の1987年、米国を中心とした集中観測により要因はフロンであること、不均一反応が重要な役割を果たしていることを見出した。フロン全廃を1996年より先進国では実施した。科学的知見が社会を動かしたといえる。

紫外線の影響がこれらの動きの背景には当然ある。オゾンホール下の紫外線の影響については、詳細な観測結果が数多く報告されている⁵⁾。一例として、オゾンホールに覆われる南米南端の都市では、子供の顔に湿疹が生じ、町行く人すべてがサングラス着用、牛や羊に目の障害が発生したのがある。オゾンホールの回復する夏や秋には、子供の湿疹は消える。このような状況が今なお続いている。カナダ等でも詳細な紫外線予報を毎日発表している。両極を取り巻く国での紫外線の強度は強くなっていることは確かである。日本上空は比較的大量のオゾンで覆われる地域であるが、やはりオゾンは減少傾向である。紫外線予報を強化する

方策が気象庁によって進められている。

世界気象機構(WMO)の予測は、全球オゾン量は今後10ないし20年は減少し続けると述べている⁶⁾。

2050年頃に1970年代のオゾン層を回復するためには、やはり人間活動起源の温室効果気体やオゾン破壊物質の急激な減少努力が要求されている。

地球規模のオゾン層の変化は、厚い未知のヴェールで覆われてはいるが、研究も急速に進展しつつあると思える。この進展が2000年7月札幌にて、アジアで初めて開催される「国際オゾンシンポジウム」に集約されるだろうと、筆者等は期待している。

引用文献

- 1) 川平浩二, 牧野行雄: オゾン消失, (1989), 225, 読売新聞社。
- 2) 気象庁: オゾン層観測報告: 1998, (1999), 51。
- 3) 岩坂泰信: オゾン層の破壊, 地球環境論3 (岩波講座地球惑星科学), (1996), 139-176, 岩波書店。
- 4) J. G. Anderson, D. W. Toohey, W. H. Brune: Free radicals within the Antarctic vortex: The role of CFCs in Antarctic ozone loss, Science, 251, (1991), 39-46。
- 5) 気象庁: オゾン層破壊の科学アセスメント: 1998, (1999), p. 32。
- 6) Y. Makino, H. Fast: HCl and HF measurements by FTIR on board aircraft and on the ground, Atmospheric Ozone, Proc. XIII Quadrennial Ozone Symposium, L'Aquila, Italy 12-21 Sep. 1996, ed. By R. D. Bojkov and G. Visconti, (1998), 551-554。
- 7) S. A. Montzka, J. H. Butler, J. W. Elkins, T. M. Thompson, A. D. Clarke, L. T. Lock: Present and future trends in the atmospheric burden of ozone-depleting halogens, Nature, 398, (1999), 690-694。
- 8) 真鍋淑郎: 二酸化炭素と気候変化, 科学, 55, (1985), 84-92, 岩波書店。
- 9) D. T. Shindell, D. Rind, P. Lonergan: Climate change and the middle atmosphere. Part IV: Ozone response to doubled CO₂, J. Climate, 11, (1998), 895-918。
- 10) A. M. Thompson, W-K. Tao, K. E. Pickering, J. R. Scala, J. Simpson: Tropical deep convection and ozone formation, Bulletin of the American Meteorological Society, 78, (1997), 1043-1054。

協賛行事ごあんない

「PRTR法成立-2001年施行へ向けて、取り組み最前線」

〔主催〕化学工学会関西支部

〔場所〕大阪府商工会館 7階講堂

〔協賛〕近畿化学協会、廃棄物学会 他

〔申込先〕化学工学会関西支部

〔日時〕平成11年度11月26日(金) 9:30~16:40

Tel: 06-6441-5531, Fax: 06-6443-6685