

Panel.

島崎達夫, 1979: 成層圏オゾン, 東京大学出版会, 184 pp.

鈴木剛彦, 1983: ドブソン分光光度計によるオゾン

観測, 天気, 30, 237-253.

WMO, 1985: Atmospheric Ozone 1985, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project, Report No. 16.

108 : 1081 : 103 : 101 : 106 (オゾン ; 輸送 ; うず拡散 ; 南極オゾンホール ; 力学)

2. オゾン層の力学*

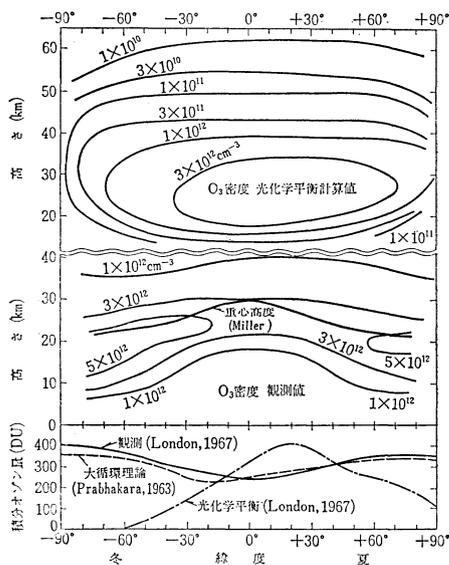
神澤 博**

シンポジウム時には、まず最初に Nimbus 7/TOMS によるオゾン全量の 16 mm 映画 (NASA/GSFC 作成) をみていただいた。北半球の 1~4 月 (1982 年) の日々激しく、ダイナミックに変化するオゾン全量の映画から、大気の流れによるオゾン輸送、オゾンのかき混ぜ効果がいかに大きいかについての感触をつかんでいただけたかと考える。

1. 力学輸送の大切さ—観測事実と光化学モデルとの比較—

観測されるオゾンの鉛直分布は、光化学平衡モデルでほぼ再現できる。ただし、観測されるように対流圏でもオゾンが存在するためには、対流によるオゾンの鉛直下向きの力学輸送が大切である (例えば、島崎, 1989 a)。温度の鉛直分布が放射平衡モデルでほぼ再現でき、対流圏では対流による熱の鉛直上向きの力学輸送を考慮しなければいけないということと事情がよく似ている。すなわち、鉛直分布を考える時、成層圏では、オゾンは光化学で、温度は放射でほぼ説明ができ、対流圏では、両者とも対流の効果が効いてくる。

本稿では、緯度分布および季節変化の特徴に焦点をあてよう。第 1 図の下図は、冬夏のオゾン全量の緯度分布である。観測値と光化学平衡モデルによる理論計算値とを比べてある。日射が少ないか、あるいは、ない冬の極域でオゾンが少ないのは、光化学だけの観点からみれば自然であることを、光化学モデル計算値は示す。一方、観測値をみると、オゾンの生成域である赤道域よりも、極域の方が多いたことがみてとれよう。この違いをもたらしているのは大気の流れによる極向きの力学輸送であ



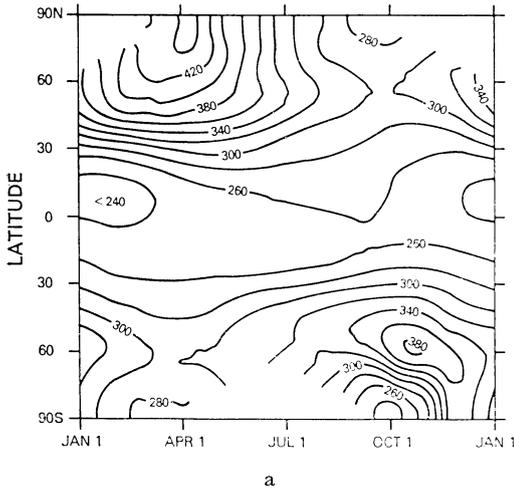
第 1 図 大気オゾンの子午面内分布, 上図は光化学平衡理論計算値, 真中の図は実測値. 下図はオゾン全量 (ドブソン単位) の緯度分布. London (1967), Prabhakara (1963) を元に作成した永田・等松 (1973) の図より.

る。冬の極域の温度の場合、観測される温度が放射モデル理論計算から期待される温度に比べて、ずいぶん暖かいという事実が、大気の流れによる極向きの熱輸送効果で説明できることと事情が似ている。

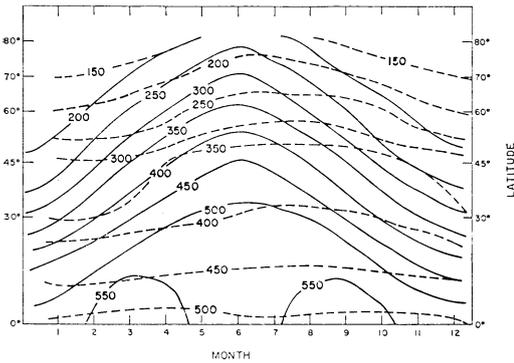
次に、オゾン全量の季節変化を第 2 図に示す。観測値と光化学モデルによる理論計算値とを比べてある。光化学から期待されるのは、日射の多い夏に多く、冬には少ないということである。ところが、観測事実はその期待を裏切っている。両半球とも、冬から夏にかけて、主に

* Dynamics of the Ozone Layer.

** Hiroshi Kanzawa, 国立極地研究所.



a



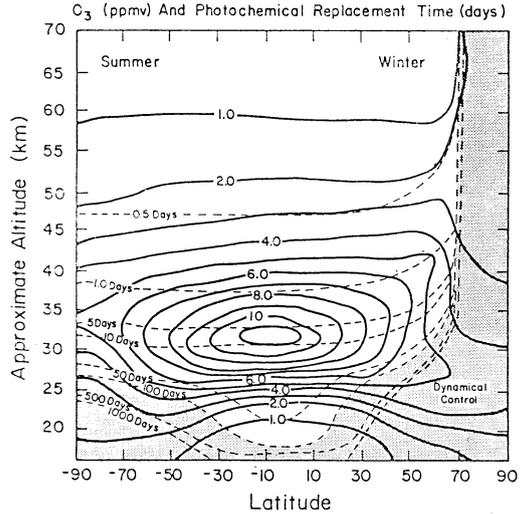
b

第2図 帯状平均のオゾン全量(ドブソン単位)の季節-緯度断面図。(a) Nimbus 7/TOMSの4年間(1978年10月~1982年9月)のデータセットの10日平均値から作成。Bowman and Krueger(1985)より。(b) 純酸素大気モデルによる光化学理論計算値。実線は光化学平衡値。破線は非平衡値(時間発展を考慮)。第3図に示すように、オゾンの多い下部成層圏ではオゾンの光化学寿命が長いので、平衡と非平衡の差が定量的に大きい。Dütsch(1971)より。

春に多いのである。極大値が北半球では高緯度に、南半球では中緯度に観測される、という点でいささか異なっているが、

このようなオゾンの緯度分布・季節変化の特徴は、1960年代頃から指摘されており、大気の運動による力学輸送の重要さは早くから認識されてきていた。

それでは何故それほど輸送効果が効くのだろうか？



第3図 オゾンの光化学寿命。破線が光化学寿命、実線はオゾンの混合比(ppmv)。右半分が冬半球、左半分が夏半球。影をつけた部分はオゾンの分布が力学輸送過程で決まる領域。Solomon et al.(1985)より。

第3図がその答である。第3図はオゾンの光化学寿命を示している。オゾン密度(第3図の実線は混合比であることに注意)が最も高い高度約20km付近では、赤道域で100日程度、極域では1,000日以上であり、光化学寿命が、力学的輸送のタイムスケールである数週間から1カ月程度に比べて、非常に長いことがわかる。従って、オゾン全量の分布は力学輸送の影響を大きく受ける。次節で述べるように、力学輸送は極向きにオゾンを輸送する性質を持っており、その結果オゾン分布は観測されるようなものとなる。

2. 子午面内での物質の輸送

以上述べてきたようなことは1960年代頃から多くの研究者にとって自明なことであったが、その輸送の仕組みについては、大気のラグランジュ的にみた運動の研究の積み重ねを待たねばならなかった。大気粒子の動きの様子を目のあたりにみせてくれたのはKida(1977, 1983)の研究である。数値モデルで再現された大気の運動に伴っておこる大気粒子の動きを追跡し、以下のことを示した。対流圏起源の空気は赤道から成層圏に入り、成層圏で極に向かう。中緯度の対流圏界面の折れ込み(tropopause folding)域等を通して対流圏へ入る。このような子午面内での大気粒子の動きは、水蒸気の分布、オゾ

ンの分布等から Brewer (1949), Dobson (1956) の時代にすでに推測されていたが, Kida の研究によって粒子の動きの様子が目のあたりに示された。

子午面内での物質の輸送は, 平均子午面循環による「移流」によるものと, プラネタリー波等による「うず拡散」に分けることができる。「移流」の定式化として, Generalized Lagrangian-mean Circulation, Residual Circulation, Diabatic Circulation, Transport Circulation 等が提案されてきたが, それぞれ欠点がある(ごく最近 Iwasaki (1989) によりまた新しい定式化が提案された)。最近提案された Plumb and Mahlman (1987) による Transport Circulation が概念的にも実用的にも便利であると考えられるので以下に簡単に紹介しよう。

「移流」として Transport Circulation (V_T, W_T) を採用した場合のトレーサー q の混合比の経度平均を記述する定式化は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \overline{\partial q} / \partial t + V_T \cos \phi \overline{\partial q} / \partial y + W_T \overline{\partial q} / \partial z \\ = S + (1/\bar{p}) \bar{p} \cdot (\bar{p} D \cdot \bar{p} \bar{q}) \end{aligned}$$

ここで, 右辺第1項 S はソース/シンクで, 化学または光化学による生成または消滅過程, または, 分子拡散を表わす。右辺第2項が大気運動による「うず拡散」を表わす。Transport Circulation (V_T, W_T) は,

$$\begin{aligned} V_T &= -(1/p \cos \phi) \partial(\bar{p} x_T) / \partial z, \\ W_T &= \partial x_T / \partial y, \end{aligned}$$

x_T は Transport Circulation の (y, z) 面での流れの関数で,

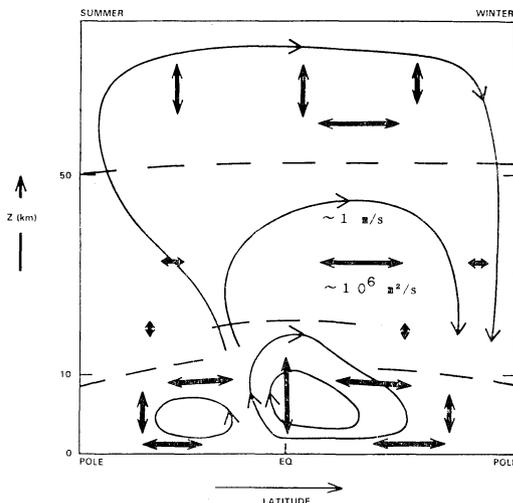
$$x_T = x - (\overline{v'\zeta} - \overline{w'\eta}) / 2.$$

D は「うず拡散」テンソルであり, うずが微小振幅の場合,

$$\begin{aligned} D &= \begin{bmatrix} D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zy} & D_{zz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \partial(\overline{\eta^2}/2) / \partial t & \partial(\overline{\eta\zeta}/2) / \partial t \\ \partial(\overline{\eta\zeta}/2) / \partial t & \partial(\overline{\zeta^2}/2) / \partial t \end{bmatrix} \\ &\quad + \text{source/sink} \end{aligned}$$

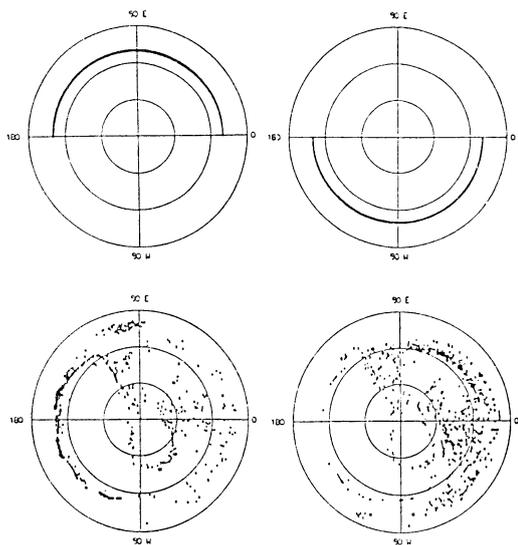
となる。他の記号はこの分野で通常よく使われるもので, t は時間, p は圧力, ϕ は緯度, $y = a \sin \phi$ (a は地球の半径), $z = H \ln[(1,000 \text{ mb})/p]$ (H はスケールハイト), (η, ζ) は (y, z) 方向の粒子の変位であり, (v, w) は (y, z) 方向の速度である。「 $\bar{\quad}$ 」は経度平均, 「 $'$ 」は経度平均からのずれを表わす。この定式化を使って「移流」および「うず拡散」が, 物質輸送に果たす役割の評価が可能である。

上記の定式化に基づいて, 大気大循環モデルのデータ



第4図 子午面断面でみた輸送過程の模式図。矢印つき細実線は「移流」, 太実線矢印は準水平「うず拡散」および鉛直「うず拡散」を表わす。破線は対流圏界面および成層圏界面を表わす。Kida (1983) および Plumb and Mahlman (1985) を元に WMO (1986) が作成したものに, 冬の成層圏の V_T, D_{yy} の代表的な値 ($\sim 1 \text{ m/s}, \sim 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$) を付け加えて示した。木田 (1986) にも同様の図がある。

を解析した結果, 第4図に示す物質輸送の概念図が描かれた, 緯度方向に 1,000 km 輸送するためには, 図に示した冬の成層圏の代表的な値 ($D_{yy} \sim 10^6 \text{ m}^2/\text{s}, V_T \sim 1 \text{ m/s}$) を使うと準水平「うず拡散」では約10日, 「移流」でも約10日となる。このように, 成層圏の物質輸送には, 準水平「うず拡散」と「移流」とが, ほぼ同程度の割合で貢献していることがわかる。これまでの文献に描かれてきた物質輸送の図は「移流」のみのことが多かった。この「移流」は Brewer-Dobson 循環と呼ばれてきたものに相当する。「移流」のみでなく「うず拡散」も大事だということは, Reed and German (1965), Matsuno (1980) 等によりこれまででも言われてきたことであった。しかしながら, 定量的な評価を行った上でこのような図が描かれたのは, Kida, Plumb and Mahlman のものが初めてである。しかしながら, 両者とも大気大循環モデルのデータを解析したものである。観測データに基づいた系統的な解析によってこのような図を描くことが, 鉛直速度の評価等, 様々な問題があるとしても, 次になされるべき仕事であろう。断片的な結果はすでに出つつ



第5図 GFDL SKYHI 大気大循環モデル（高分解能 1° モデル）で再現された成層圏突然昇温時の空気粒子の拡散の様子。初期に（上図）850 K という温位面（高度約 10 mb（ ~ 30 km））上で 20°N にあった粒子が 24 日後には下図のように拡散してしまう。木田（1988）より。

ある（例えば、Yamazaki, 1989）。

3. 準水平面での物質の輸送—「うず拡散」の中味—

前節では子午面内での輸送を論じた。その際、「うず拡散」という概念が有用であったが、この「うず拡散」の実態をみるには準水平面での輸送をみる必要がある。木田（1988）による第5図は、大循環モデルで再現された成層圏突然昇温というイベント時に、プラネタリー波によって空気粒子がいかにか拡散していくかを示したものである。この第5図の下図をみると、質量中心はどこかということがそもそも意味をなさないから、子午面内での質量中心の運動という「移流」で物質輸送を表現する Generalized Lagrangian-mean Circulation という概念が実用的でないことが一目瞭然である。前節で述べた子午面内での準水平「うず拡散」の実態とは、この図に示したような様相を呈する。このようなイベントに伴う粒子の分散を統計的に、ある意味では無理に、子午面に押し込めて表現したものが「うず拡散」である。

現実大気の準水平面での物質輸送を表現するには、温位およびうず位が1週間程度のタイムスケールで保存す

ることから、等温位面という準水平面上のうず位図（Q-Map といわれることがある）を描き、その時間変化を追いかけることが有用である。また、保存性の強いオゾン、 N_2O 等の等温位面上の図を描くことも有用である。このように、空気粒子の追跡解析、Q-Map 解析、オゾンおよび N_2O の等温位面解析等を行い、これらの図を総合的に見ることが、準水平面での物質輸送を理解する上で不可欠である。これを実際に行うことは、たくさんの等温位面での2次元分布の時間変化を追うことになるわけで、まずこの作業から出発しなければならぬ。しかし、この作業そのものは毎日の天気図をながめていることに同等なわけで、われわれは単純にスッキリと理解できる方向で整理したい。一つの試みが、物事の複雑さを承知の上で、子午面内で「移流」と「うず拡散」に分離して物事を整理することだったわけであった。

前節での「うず拡散」の定式化は、物質の輸送が、その物質の混合比の平均場の勾配に比例し、平均場の大きい方から小さい方へと行われる、という前提に基づいたものである。この前提は、うずがでたらめな構造を持った乱流である場合に成り立つ。ところが、現実大気の「うず拡散」には、プラネタリー波という秩序ある構造を持ったうずが大きな寄与をしていると考えられる（例えば、Matsuno, 1980）。そのため、平均場の勾配の大きいところで「うず拡散係数」（前節の式の D ）が小さくなり、「うず拡散」が小さくなるということが起こりうる（例えば、次節の第6図に示すようなオゾンの急勾配が維持され続ける）。このような無理があるため、現実大気の物質輸送を表現する際に、「うず拡散」という概念は、物理的に曖昧である（McIntyre, 1989 a, b）。かといって、他によい方法が未だ開発されておらず、現在のところ、この方法は有用である。物質輸送を理解するためのよりよい方法をみつけるための研究が、現在進行中である。

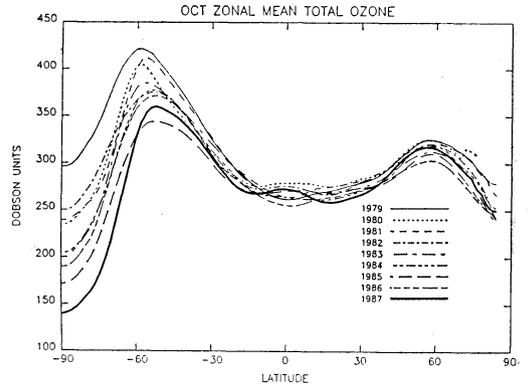
4. 南極オゾンホール

ここではオゾンホールの力学的側面を述べよう。第6図にみられるように、オゾンホールと一口にいわれる問題には二つの側面がある。一つは、春の南極大陸上空のオゾン全量が中・低緯度に比べて著しく低いということである。まさに、南極にオゾンの穴（ホール）があるというわけである。オゾンが減るのは、本来オゾンが多いはずの下部成層圏であり、鉛直分布をみても穴があいたような様相を呈する。すなわち、3次元的にみても、穴

ができていくことになる。もう一つは、1970年代後半から現在にかけて、この春の南極大陸上空のオゾン全量が年々減りつつある、すなわち、オゾンの穴が深くなっているということである。季節変化をみると、南極のオゾン全量は8月下旬から9月下旬にかけて減少し、11月頃再び増加する。北極域では、オゾンの穴の面積は小さく、また年々の減少傾向も南極域ほど顕著でない。

前に述べたように光化学の観点からいえば、日射の少ない時期に極域でオゾンが少ないのは自然である。現実には、オゾンの輸送効果があることと、極域でのオゾンの滞在時間が長いこと、冬の南極でのオゾンは多い。オゾンホール問題で重要なのはその季節変化で、9月から10月にかけて日が当たり出すとともにオゾンが減少するという点である。力学説ではこの点が説明しにくい。かといって、オゾンが減るのは下部成層圏であるから、光化学反応のタイムスケールから考えて(第3図参照)、化学反応が働くとは考えにくい。そこで登場してきたのが不均一系反応(heterogeneous reaction)説であった。気相のみの反応では、第3図に示されているように、タイムスケールが非常に長くなるが、液相・固相が存在する下での塩素その他によるオゾン破壊触媒反応は非常に速くなるというのである。南半球下部成層圏では大気の運動による極向き熱輸送効果が少ない。従って、下部成層圏温度が南極は北極域に比べて低温であり、南極域では極域成層圏雲(Polar Stratospheric Clouds; PSCs)がしやすい。このPSCsという気相以外のものの存在が、塩素その他によるオゾン破壊触媒反応を促進するというのである。また、PSCsにはもう一つの役割がある。窒素酸化物は、塩素酸化物と反応してしまっており、塩素酸化物によるオゾン破壊触媒作用を弱める働きがある。PSCsは、その窒素酸化物をとり込んでしまうことにより、オゾン破壊を促進する。いずれにしても、オゾンホールにとってPSCsの存在は本質的であると考えられている。

力学として重要なポイントは、南半球でのプラネタリー波による熱および物質の輸送効果が少ないため、南極域下部成層圏でPSCsができるような低温条件を作り出していること、および、オゾンそのもののかき混ぜ効果も少ないことである。オゾンホールの力学の本質的な事柄が、Mahlman and Fels (1986)に記されている。ただし、その論文で大きく取り扱われている“Flywheel Effect”は、9月の南極オゾン減少に必要な程度の大きさの上昇流をもたらさないことが、同じグループによ



第6図 10月のオゾン全量の緯度分布の年々変動(1979~1987)。全体のトレンドとして、南極オゾンホールが深く、かつ、広がってきていることがみてとれよう。Krueger *et al.* (1988)より。なお、1988年はだいぶ浅くかつ狭くなり、1980年代初頭程度に回復した(Schoeberl *et al.*, 1989参照)。

て示された(Snieder and Fels, 1988)。オゾンホールの化学の話は近藤豊氏による次の章に詳しい。また、島崎(1989 a, b)、Solomon (1988)に包括的な記述がある。

5. おわりに

オゾンホールの発見以来、成層圏オゾン層が社会的にも注目を集めている。一方、オゾン層の研究は、純粋に学問として興味深い点が多く、力学的研究としては「大気中の物質はどこから来たりどこへ行くか」という問題に対する興味を推進力として進展してきた。この一般的问题において、大気中の物質の一つとしてのオゾンを考えるという応用問題として、オゾン輸送はとらえることができる。そこへオゾンホール問題が登場したわけであり、これまでの基礎的な研究の積み上げがあったおかげで研究も素早く進展した。

しかしながら、物質輸送の概念的な枠組はすでにできていたか、あるいは、できつつあったが、観測データから物質輸送を評価するという研究がまだまだ手薄のようにみうけられる。オゾンの極向き輸送そのものの効率が年々悪くなっているという仮説も、状況証拠はあるが、直接オゾン輸送が少なくなっているという解析はまだなされていない。観測データに基づいたオゾン輸送の研究が待たれる。すでにそのような研究がなされつつあるけれども(例えば Atkinson *et al.*, 1988)。また、オゾン

ホール問題を考える中で、第3節で述べたように、物質輸送の概念的枠組が不十分であることも、あらためて認識された。

なお、ここで述べてきたような問題を包括的に扱った文献に松野・島崎(1981)、木田(1983)、WMO(1986)、Andrews *et al.*(1987)、島崎(1989a)がある。木田(1986)は短いエッセイであるが、この研究分野の開拓者(パイオニア)が書いたものだけに独創的であり、問題のありかと現在での理解の概略が記されている。本稿では、成層圏から対流圏へのオゾン輸送、オゾンの準2年振動(QBO)、中間圏オゾンの半年振動といった力学輸送の点で重要な問題について、触れることができなかった。これらの問題についても、上に掲げた文献に触れている。

参考文献

- Andrews, D.G., Holton, J.R. and Leovy, C.B., 1987: Middle atmosphere dynamics, Academic Press, 489 pp.
- Atkinson, R.J., Matthews, W.A., Newmn, P.A. and Plumb, R.A., 1989: Evidence of the mid-latitude impact of Antarctic ozone depletion. *Nature*, 340, 290-294.
- Bowman K.P. and Krueger, A.J., 1985: A global climatology of total ozone from the Nimbus 7 total ozone mapping spectrometer. *J. Geophys. Res.*, 90, 7967-7976.
- Brewer, A.W., 1949: Evidence for a world circulation provided by the measurements of helium and water vapor distribution in the stratosphere. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 75, 351-363.
- Dobson, G.M.B., 1956: Origin and distribution of the polyatomic molecules in the atmosphere. *Proc. R. Soc. London. Ser.*, A236, 187-193.
- Dütsch, H.U., 1971: Photochemistry of atmospheric ozone. *Adv. Geophys.*, 19: 219-322.
- 図2bは, Dütsch, H.U., 1969: Atmospheric ozone and ultraviolet radiation (Chapter 8, *Climate of the Free Atmosphere, World Survey of Climatology*, 4, 383-432)にも載っている。
- Iwasaki, T., 1989: A diagnostic formulation for wave-mean flow interactions and Lagrangian-mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentropes. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 67, 293-311.
- Kida, H., 1977: A numerical investigation of the atmospheric general circulation and stratospheric-tropospheric mass exchange: I. and II., *J. Meteorol. Soc. Japan*, 55: 52-70, 71-88.
- , 1983: General circulation of air parcels and transport characteristics derived from a hemispheric GCM: Part 1 and Part 2. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 61, 171-188, 510-524.
- 木田秀次, 1983: 高層の大気—運動と組成の立体構造をみる—(気象学のプロムナード16), 東京堂出版, 211 pp.
- , 1986: 大気循環モデルによる物質輸送の研究—昭和60年度日本気象学会賞受賞記念講演一, *天気*, 33, 83-88.
- , 1988: 大気大循環モデルで再現された成層圏突然昇温, 日本気象学会, 1988年秋季大会講演予稿集, p. 207.
- Krueger, A.J., Schoeberl, M.R. and Stolarski, R.S., 1988: The 1987 Antarctic ozone hole: A new record low. *Geophys. Res. Lett.*, 15, 1365-1368.
- London, J., 1967: The average distribution and time variation of ozone in the stratosphere and mesosphere. *Space Res.*, 7, 172-185.
- Mahlman, J.C. and Fels, S.B., 1986: Antarctic ozone decreases: A dynamical cause? *Geophys. Res. Lett.*, 13, 1316-1319
- Matsuno, T., 1980: Lagrangian motion of air parcels in the stratosphere in the presence of planetary waves. *Pure Appl. Geophys.*, 118, 189-216.
- 松野太郎・島崎達夫, 1981: 成層圏と中間圏の大気(大気科学講座3). 東京大学出版会, 279 pp.
- McIntyre, M.E., 1989a: On the Antarctic ozone hole. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 51, 29-43.
- , 1989b: The middle atmosphere: Current challenges to our understanding. Dynamics, Transport and Photochemistry in the Middle Atmosphere of the Southern Hemisphere (Proceedings of NATO Advanced Research Workshop, Lone Mountain Conference Center, San Francisco, 15-17 April 1989). Kluwer Academic Press (to appear).
- 永田 武・等松隆夫, 1973: 超高層大気の物理学(物理科学選書6), 裳華房, 453 pp.
- Plumb, R.A. and Mahlman, J.D., 1987: The zonally averaged transport characteristics of the GFDL general circulation/transport model. *J. Atmos. Sci.*, 44, 298-327.
- Prabhakara, C., 1963: Effects of non-photochemical processes on the meridional distribution and total amount of ozone in the atmosphere. *Mon. Weather Rev.*, 91, No. 9, 411-431.
- Reed, R.J. and German, K.E., 1965: A contribution to the problem of stratospheric diffusion by large-scale mixing. *Mon. Weather Rev.*, 93, 313-321.
- Schoeberl, M.R., Stolarski, R.S. and Krueger, A.J., 1989: The 1988 Antarctic ozone depletion

tion: Comparison with previous year depletions. *Geophys. Res. Lett.*, **16**, 377-380.

島崎達夫, 1989 a: 成層圏オゾン (第2版), 東京大学出版会, 224 pp.

———, 1989 b: 〈特別公演〉 成層圏オゾンの諸問題 特に南極オゾン・ホールについて, 第3回大気圏シンポジウムプロシーディングス, 宇宙科学研究所, 1-18.

Snieder, R.K. and Fels, S.B., 1988: The flywheel effect in the middle atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3996-4004.

Solomon, S., 1988: The Mystery of the Antarctic ozone "hole". *Rev. Geophys.*, **26**, 131-148.

———, Garcia, R.R. and Stordal, F., 1985: Transport processes and ozone perturbations. *J. Geophys. Res.*, **90**, 12981-12989.

WMO, 1986: Atmospheric ozone 1985, Vol. 1-3, World Meteorol. Organ., Geneva, 1095 pp. の特に Chapter 6 "Dynamical Processes"

Yamazaki, K., 1989: Diffusion coefficients derived from the Lagrangian statistics. *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, **2**, 16-24.

1081 (中層大気の微量成分)

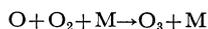
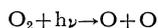
3. オゾン層の化学*

近藤 豊**

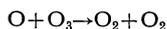
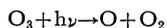
1. 気相光化学反応

成層圏オゾンの唯一の生成過程は太陽紫外線による酸素分子の解離である。

すなわち

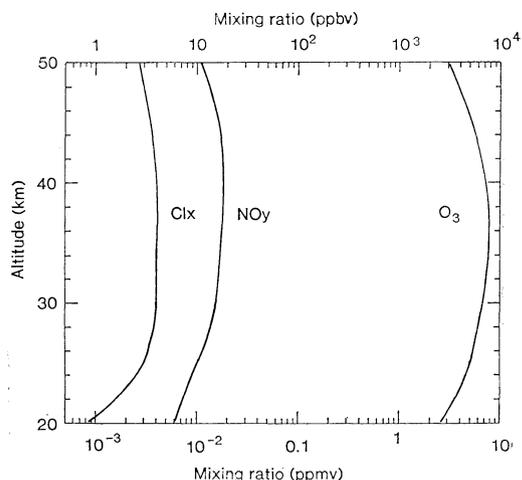


一方, オゾンを消滅させる過程はオゾン分子と酸素原子との再結合反応である。



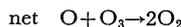
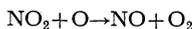
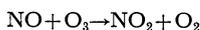
酸素原子とオゾンの再結合反応以外に, 窒素化合物 (NO_x), 水素化合物 (HO_x), 塩素化合物 (Cl_x) がオゾンの消滅に実質的な寄与をしている。

NO_x の主な source は地中のバクテリアにより作られる N_2O の成層圏中での光化学分解である。また, HO_x の source は H_2O の分解であり Cl_x の主たる source はフロンなど安定な塩素化合物である。さて, 現在までの多くの測定によって分かっているオゾン, 窒素酸化物グループ (NO_y) および無機塩素化合物 (Cl_x) の総量を比較してみたのが第1図である。成層圏では NO_y オゾンの数百分の1, Cl_x は千分の1程度の量しかない。このように相対的に少ない量の気体がオゾンの収支に影響を与えるためには, これらの気体とオゾンの反応が触媒的 (catalytic) であることを意味している。

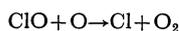
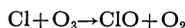


第1図 オゾン, NO_y , Cl_x の平均的高度分布

NO_x サイクルとして



が Crutzen (1970) や Johnston (1971) により提唱された。また, Stolarski and Cicerone (1971) や Molina and Rowland (1974) により次の ClO_x サイクルが提唱された。



* Chemistry of the Ozone Layer.

** Kondo Yutaka, 名古屋大学空電研究所.