



オゾンの南極域春季減少——オゾン・ホール*

小川利紘** 柴崎和夫***

1. まえがき

オゾン層に対する人的改変という問題があり、地上のドブソン観測網と人工衛星により汎世界的に長期的な観測が続けられていて、その変動状況は多くの研究者の興味を中心となっている。本解説の主題となるオゾンの南極域春季減少という現象(いわゆるオゾン・ホール(穴))は、極域という観測の穴場で発見されたものである。もともと極域は観測地点も少なく観測データが乏しい領域で、人工衛星観測でもオゾン測定には大部分が太陽紫外吸光法を採用しているの、通年のデータはほとんど存在しない。Dütsch (1971), London (1985) らがまとめたオゾン全量の全球分布図、さらにニンバス4号による衛星観測 (London, 1985) などでは、オゾン全量は極へ向かうにつれて増大し、季節的には春季が極大秋に極小(少なくとも北半球では)となるように見える(第1図a, b)参照)。ただし本当の極大領域は極の周囲(70度近辺?)であり、それより極側ではやや少ない傾向を示す。また北極の方が南極よりもオゾン全量が多い傾向にある。いずれにしても冬(極夜)のデータは皆無に近く高緯度での季節変動の実態はまだまだ研究不十分である。そこに登場したのが南極でのオゾン全量の春季異常(?)減少であった。

2. 発端

年間を通して眺めたとき南極域の春にオゾン全量が極

小になることをはっきり示したのは Chubachi (1984) による昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) での1982年2月から1983年1月までの通年観測であった。彼は極夜(冬)期間に月光観測を実施しており9月から10月にかけてオゾンが減少する様子を明確に捕えている(第2図)。またこの時の10月のオゾン全量極小値は昭和基地での1982年以前の観測中最低でもあった。同様の異常に小さいオゾン全量値がアメリカのアムンゼン・スコット基地(南極点)でもこの年の春観測されている。

この春季極小の現われる10月のデータに長期的変動傾向があることを示したのは Farman *et al.* (1985) であった。彼らは Halley Bay 基地 (75.5°S, 26.7°W) での1957年から1984年までの10月のオゾン全量平均値を調べ、1970年代後半から急速に10月のオゾン全量が減少していることを見出したのである(第3図)。第3図からわかるように1970年代後半までは、小さな変動や長期的傾向もあるように見えるが、大体 300 D.U. (1 D.U. = 10⁻³ atm-cm) が代表値といえる。ところが1980年代に入ると急速に平均値は下がりはじめ、1984年の値は 200 D.U. を割っている。なんと30%以上の減少である。

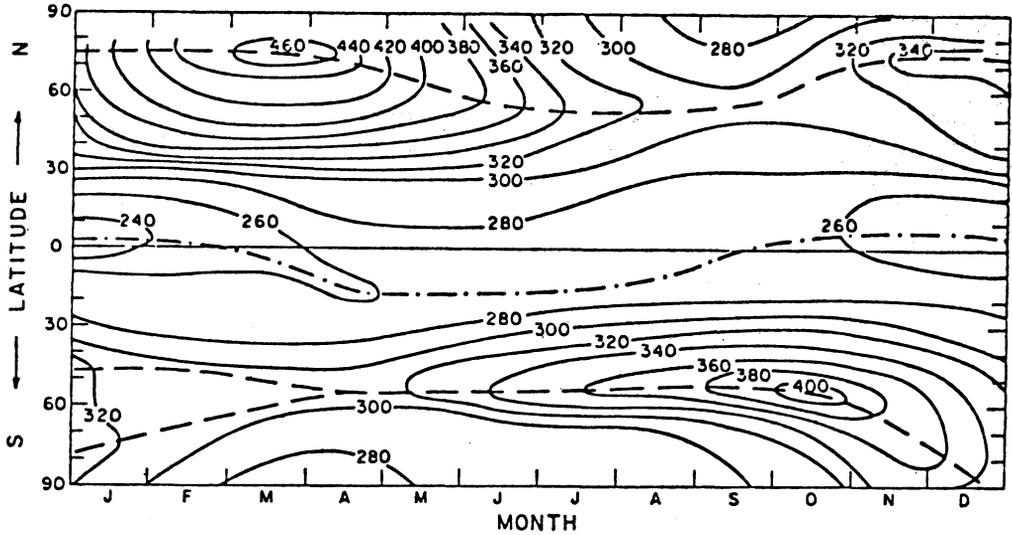
3. 人工衛星観測

Farman *et al.* (1985) が示した1970年代後半以降の南極域オゾン春季減少傾向と対比するのにちょうど良いデータがニンバス7号の観測データである。ニンバス7号は1978年10月からオゾン観測を開始し、TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) を用いて1日に1枚の全世界オゾン全量分布図を得ている。また SBUV (Solar Backscattered Ultraviolet Spectrometer) によるオゾン

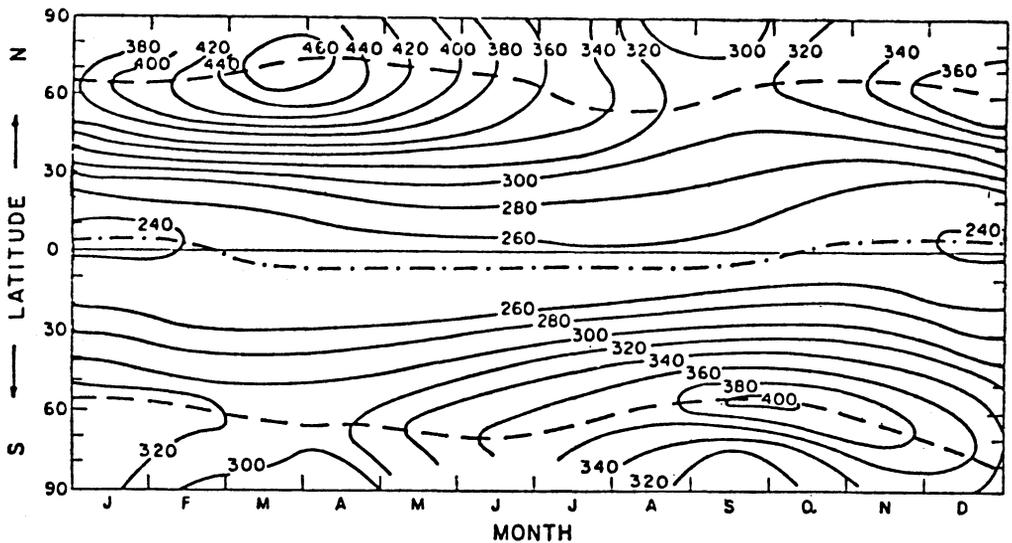
* Antarctic springtime decrease of ozone—Ozone hole

** Toshihiro Ogawa, 東京大学理学部.

*** Kazuo Shibasaki, 国学院大学.



a



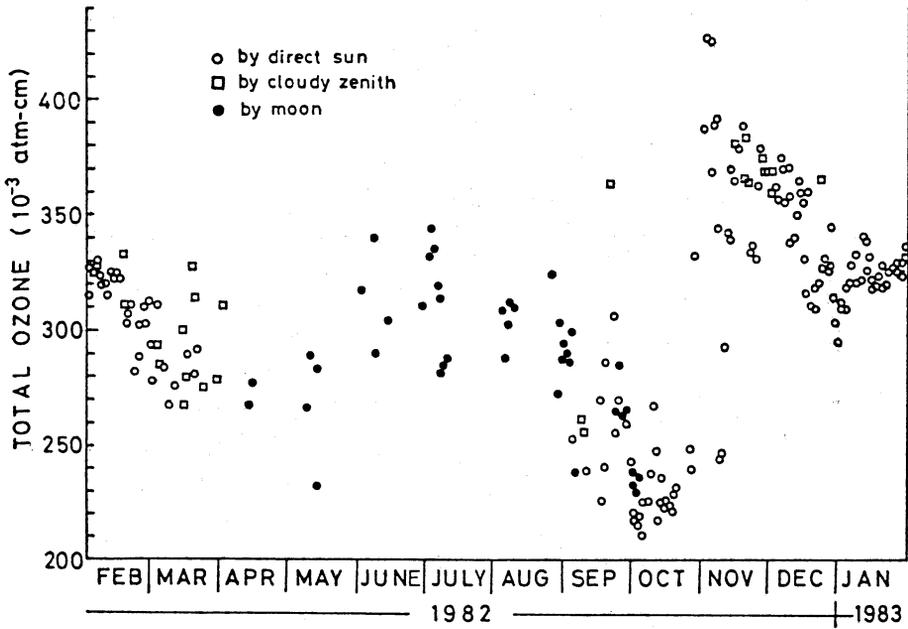
b

第1図 a) 1958年～1980年のドブソン観測網データから求めたオゾン全量緯度-季節分布図。図中の数字の単位は 10^{-3} atm-cm (London, 1985より)。

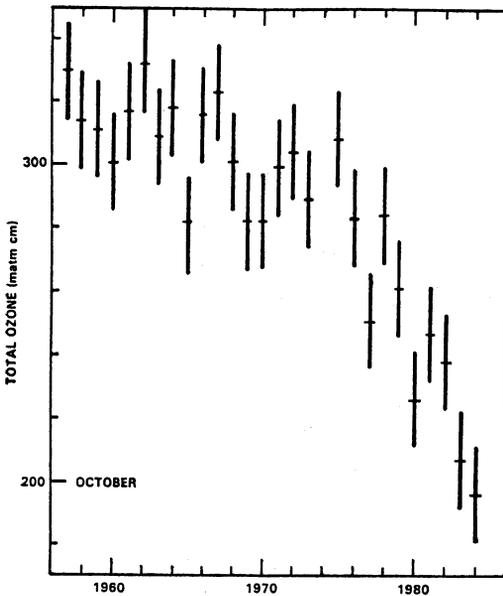
b) 第1図a)と同様。ただしデータはニンバス4号 BUV の1970年4月から1977年3月の結果を使用 (London, 1985より)。

高度分布の観測データもある。いずれの装置も太陽紫外放射の散乱光中のオゾン吸収を測定する手法を用いており、極夜中の観測はできない。しかし問題となる9月、10月頃には、ほぼ極域全体のオゾン分布を知ることができる。

ニンバス7号の関係者はかねてから昭和基地のドブソン観測のデータとの相互比較をしたいともらしていた。もともと人工衛星からの遠隔測定データの解析にはかなり難しい問題があり、種々の大気状態での測定精度を確認するには Ground Truth という地上観測との相互比



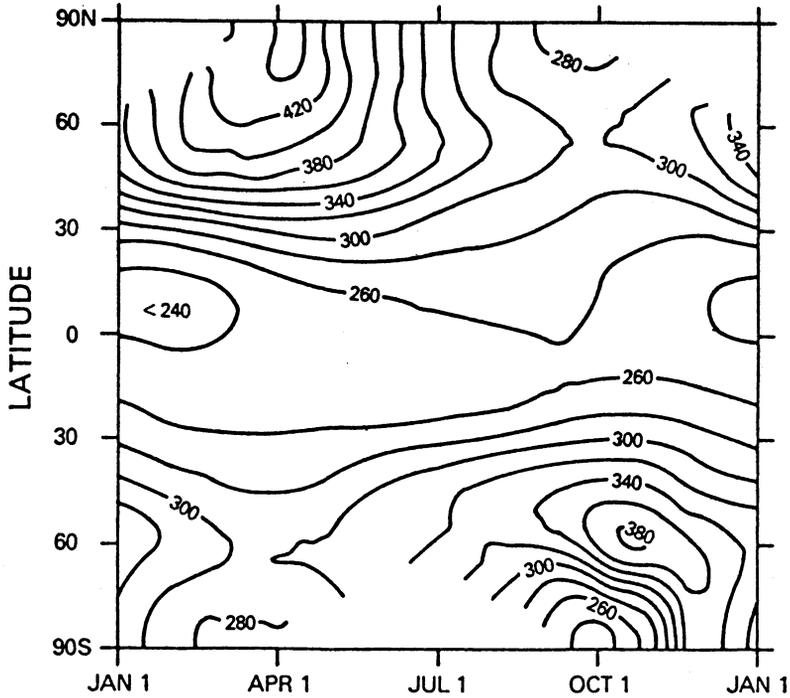
第2図 1982年2月～1983年1月の昭和基地 (69.0°S, 39.6°E) でのオゾン全量観測結果 (Chubachi, 1984 より). 黒丸は月光観測による結果.



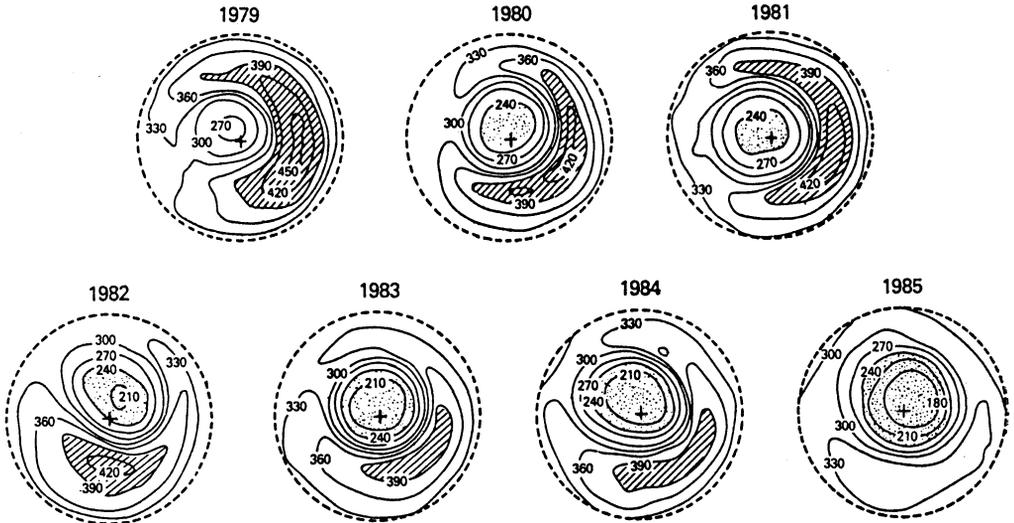
第3図 Halley Bay 基地における1957年～1984年のオゾン全量10月月平均値の変化 (Farman et al., 1985 より).

較が大切なのである。けれど今になって考えてみると、彼らの希望は単なる Ground Truth というのではなく、衛星データが南極上空のオゾン分布の異常を示していたのでその事を地上観測データを見て確認したかったのではないかと思われる。それはともかく極域というのは太陽高度も低く、しかも低温（特に南極の成層圏）という特殊状況である南極域春季のデータに関してはデータ解析の方法が不適當なかもしれない、ということで異常の原因を追求することなくこの部分だけは除いて考えるようにしていたらしい。それでも Bowman and Krueger (1985) が1978年10月から1982年9月までの4年間の観測結果をまとめた論文で、経度方向に平均した値の緯度-時間変化を眺めてみると、南極域では10月初めに極小があり、南半球の極大領域も 60°S 付近で北半球との違いがはっきりしている (第4図)。しかし彼らは論文中で 70°S 以南の値については信頼性が低いこと、本当の極小が南極点 (90°S) ではなく南極大陸内の最高高度領域に存在するらしいことをさりげなく述べているに過ぎない。

Farman et al. の論文が発表されてから情勢は大きく変わり、TOMS のデータは一躍脚光を浴びることになる。TOMS の1日毎の全球データにより南極域の春季



第4図 ニンバス7号 TOMS の1978年10月~1982年9月の4年間のデータから求めたオゾン全量緯度平均値の緯度-季節分布図 (Bowman and Krueger, 1985 より)。図中の数字の単位は 10^{-3} atm-cm。



第5図 ニンバス7号 TOMS のデータから求めた南半球10月のオゾン全量月平均値の7年間の変化傾向。各円の中心が南極点で、一番外側が 30° S の緯度線。経度0度は真上側。数字の単位は 10^{-3} atm-cm (Stolarski et al., 1986 より)。

オゾン減少が Halley Bay だけでなく、ほぼ南極大陸全域に渡っていることが明らかになり、また9月から10月、そして年々オゾン減少が進行していく様子もわかるようになった (Stolarski *et al.*, 1986). TOMS のデータ例を第5図に示す。この図のような TOMS による全球分布図がおそらく今回の現象を 'オゾン・ホール(穴)' と呼ぶことになるきっかけをつくったのである。さらに衛星の観測からオゾン減少域が年々拡大し、また極小値が更新されていることもはっきりしてきた。さらに Stolarski *et al.* はオゾン減少域周辺のオゾン極大域でのオゾン全量も減少しつつあることを報告している。ただし1986年のオゾン全量極小値は1985年と比較すると若干増加、1984年の値よりは減少したそうで (A. Krueger, 私信, 1986), 今後の成行きが注目される。

4. オゾン・ホールと極渦, 低温域

第5図からも想像できるようにオゾン・ホールの形状、配置は極渦 (polar vortex) と密接な関係がある。実際に調べてみるとオゾン濃度の低い領域は成層圏内の低温域と重なっており、等圧面気圧図で見ると極渦の内側に位置していることが確認できる。極渦内の気塊は周囲の大気から孤立して存在するといえる。つまり、極渦がしっかりしている状態では周囲からの南北輸送は抑えられ極渦内の大気はかなり閉鎖系に近くなり、日照が少ない春の時期に光化学的生成が十分でない物質は極渦内で一方的に壊れる方向に進むことになる。成層圏に存在する微量成分ではオゾン、二酸化窒素などがこのような例に当たる。既に Noxon (1978, 1979) は北半球でも南半球でも極渦内での二酸化窒素濃度が低いことを見出していた。北半球の場合はプラネタリー波動が活発で南半球の春のように成層圏最終昇温後も極渦が維持されることはまれである。したがって北半球では平均場してみると目立たなくなる。けれども Noxon の地上観測結果は人工衛星観測 (SAGE) でも確かめられていて (Chu and McCormick, 1986), 極渦が分裂した場合でも低気圧 (極渦) 内では二酸化窒素密度が小さい。また SAGE II の観測でも南半球の極渦内では確かにオゾンも二酸化窒素も、そしてエアロソル量も春季に少ないことが報告されている (McCormick and Larsen, 1986)。

以上のように極渦の内側でオゾン濃度が小さいこと自体は珍しいことではない (といっても解明しつくされていない訳ではない)。問題となるのはその経年変化-長期減少傾向一である。最近の南極域成層圏の冬季の気温は

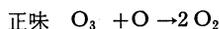
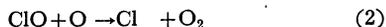
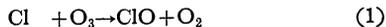
北半球より低く 180K 近い温度領域も存在する。またオゾン減少傾向に伴う (?) ように下部成層圏の低温化と広域化が見出されてもいる (Angel, 1986; Newman and Schoeberl, 1986)。この低温化とオゾン減少との関係はどのようなであろうか。原因は同じなのか、違うのか。極渦が弱まって崩れる時期は11月末~12月初頭で、1979年から現在まではほぼ同じであるし、成層圏最終昇温時期 (10月~11月) も、年毎の違いがあるものの、一定傾向があるわけではない (Newman, 1986)。

5. 南極春季オゾンの減少および極小値 (10月平均値) の経年減少の原因

南極域の春季オゾン全量減少のメカニズム、および10月の極小値の経年減少のメカニズムに関しては、主に化学反応によるものとする仮定がいくつか提案されている。

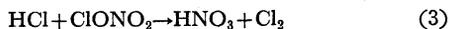
5.1 塩素説-エアロソルの役割

Farman *et al.* (1985) は10月のオゾン全量平均値の経年減少傾向 (第3図) を成層圏中のフロン増加と結びつけて説明しようとした。つまり、塩素化合物によるオゾンの消失が働いているとする考え方に立っている。しかし通常成層圏内で起こる塩素化合物によるオゾンの消失反応というのは、ClO_x の触媒反応サイクル



であって、通常の成層圏内においてこの反応サイクルを考えるだけでは現状のフロン経年増加量によってオゾンの経年減少をとうてい説明できるわけではない。

日射のない極夜の期間には塩素化合物は HCl, ClONO₂, HOCl 等の準安定な分子の形で存在している。春になって日照が始まればこれらの分子から ClO_x への変換が始まるが、これは高度領域にして ~25 km 以上で起こる。しかしもっと低い高度でこれらの分子が ClO_x に大量に変わってくれないと塩素説としては工合が悪い。そこで Farman *et al.* は、

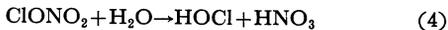


の反応を考える。(3) の反応が十分速ければ極夜のうちに上記塩素化合物は Cl₂ の形にまで変換される。春になり日照が戻ると Cl₂ は光解離で Cl に素早く変化し (1), (2) のサイクルに入り込むという訳である。しかしながら (3) の反応は気相では極めて遅い。

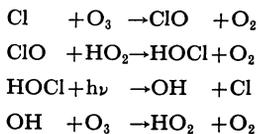
そこで登場するのがエアロソルである。南極域の冬季

(極夜中) 下部成層圏は -90°C にもなる低温で、極成層圏雲 (Polar Stratospheric Cloud) と呼ばれるエアロソル層が発達することが地上からのレーザー・レーダ観測や人工衛星観測で知られている (ちなみに PSC は大気中の水蒸気 H_2O と硝酸 HNO_3 が凝結してできるらしい)。このエアロソル表面上で (3) の反応を起こそうというのである。エアロソルの成長過程で (3) の反応生成物である Cl_2 を内部に取り込み、春になり日照が始まると一気に Cl_2 が蒸発してくれば、この Cl_2 の光解離により Cl がオゾン消失反応サイクルに取り込まれるという筋書である。エアロソル表面上で (3) の反応が気相よりはるかに速いと考ええる正当な理由はあるが、実験室内における実測で確かめられている訳ではない。しかしながら、この現象にエアロソルが何らかの形で関与していると考えたくなる理由があるのである。昭和基地のオゾン・ゾンデ観測 (Chubachi, 1984) から春季のオゾン減少はオゾン層のピーク付近とその下部、高度 20 km より下部で生じているらしい (人工衛星観測だと成層圏上部まで減少が生じているという後述)。エアロソル層も 20 km 付近に存在しており Cl_2 がエアロソルに取り込まれていると考えるのが大変都合が良い。

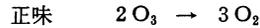
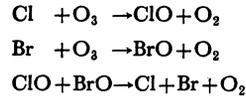
塩素説では (3) の反応だけでなく、次の (4) の反応も候補に挙がっている。



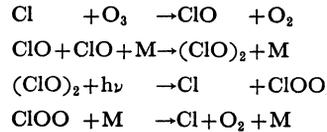
HCl に次いで塩素の大きな貯蔵物質である ClONO_2 と H_2O を、これもエアロソル表面上で反応させるとするのが (4) の反応である。HOCl も光解離して Cl を生成するので春になり日照が始まれば ClO_x のオゾン消失反応サイクルに組み込まれる。しかしながら ClO_x のオゾン消失反応サイクルは高度 30 km 以上で有効に働くので、高度 20 km 付近では有効でない。そこで Solomon *et al.* (1986) は HOCl を介らせて OH によるオゾン消失反応を取り入れ高度 20 km 付近でもオゾン消失を促進させている。すなわち



という反応サイクルを考える。これに対し、McElroy *et al.* (1986) は塩素と臭素の共同作用によるオゾン消失反応サイクルを考慮して高度 20 km 付近でオゾン消失反応サイクルが有効に働くようにしている。すなわち

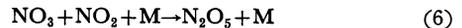
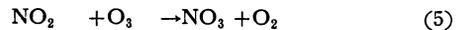


という触媒反応を考える。さらに Molina and Molina (1986) は



の反応サイクルならば高度 20 km 付近で有効に働くという。これに加えて Crutzen and Arnold (1986) は、宇宙線によって生成されたイオンの反応で生成する OH 分子に加えて、春に日照が再開した直後オゾンの光解離で生じる $\text{O}(^1\text{D})$ と H_2O の反応による OH 生成が促進されて OH 密度が増加し、下部成層圏の HCl や HBr を Cl や Br に変換する過程も通常状態よりは強化されると言っている。

これら塩素-エアロソル説で特徴的なのは二酸化窒素 (NO_2) 密度が非常に小さくならないという制約がつくことである。 NO_2 は、 ClO_x と反応して ClO-NO_2 分子になり、(1) (2) のオゾン消失反応サイクルから塩素を除去する役目を果たすからである。この NO_2 を除去するためにもエアロソル表面上の反応を考える。 NO_2 はオゾンとの反応で NO_3 に変換され、その後 NO_3 が NO_2 と反応して N_2O_5 分子に変わる。 N_2O_5 のままだとまた NO_2 に戻る可能性があるので H_2O と反応させて、窒素化合物の溜り物質でやや寿命の長い HNO_3 に変換してやる。すなわち、



(5) (6) は気相反応で十分速く起こるが (7) は気相反応としては遅いので、エアロソル表面上で速く起こってくれると都合が良いということになる。Crutzen and Arnold はイオンが介してこの反応を促進している。そして硝酸 (HNO_3) は極夜の低温状態で水と凝結して PSC になるという。

5.2 酸化窒素説-太陽活動度11年周期変動

前節で述べた ClO_x 以外に成層圏でオゾンを壊す微量気体分子には NO_x (NO , NO_2), HO_x (HO , HO_2)

がある。エアロソル表面で直接オゾンを壊す反応は無視できる位能率が悪いと考えられている。すると NO_x , HO_x 等に経年増加の傾向でもあれば好都合となるが、 NO_x の親物質である N_2O の増加率は極めて小さく、増加率の大きいメタン (CH_4) などはむしろオゾンの増加に働く。

しかしながら Callis and Natarajan (1986 a), b)) は極域熱圏でオーロラ粒子の作用により作られた NO が成層圏へ降下し、 NO_x 反応サイクルによってオゾンを壊すという説を唱えた。極域の熱圏では中低緯度に比べ NO 密度が大きいことは既に知られていた事実である。さらに、極渦の内側では極夜期間中に中間圏から上部成層圏にかけて下降流が存在する。従って以前から熱圏の NO が極域成層圏の NO_x の源として重要であるということも知られていた。

彼らは NO_x が増加している証拠として人工衛星による NO_2 観測データを挙げている。1979年の SAGE による観測と1984年の SAGE II による観測から得た NO_2 高度分布の比較、ニンパス7号 LIMS (Limb Infrared Monitor of Stratosphere) と SME 衛星の1979年1月、3月および1982年1月、3月の高度分布の比較により、南極上空の NO_2 量が2倍近く増加していると主張している。しかし、人工衛星の観測データはあまり信頼性が高くないので異なった測器による測定データの差を信用することは危険である。ちなみに、Shibasaki *et al.* (1986)の昭和基地での1982年と1983年の成層圏 NO_2 高度分布大気球観測結果では、1982年から1983年にかけて増加は認められていない。

それはともかく、オーロラ活動は太陽活動とともに変化するから、極域熱圏における NO 生成も太陽活動周期の11年サイクルで変動する。Callis and Natarajan は太陽活動がオゾンの減少に関係すると主張する。しかしながらオゾンの減少が始まったのは太陽活動極大期であり、それ以降オゾン減少が進行する期間は太陽活動が低下していく時期である。これに対しては彼らは、成層圏や中間圏での NO の寿命が長いので、NO 生成から成層圏 NO の増加とそれに続くオゾンの減少までに数年の遅れがあっても良いという。それにしても、1985年、もし、オゾン減少の最も進行した年とすると11年サイクルの約半分の遅れがあるわけで、これは少々信じ難い。

酸化窒素説に立てば、NO は上空から成層圏に降りてくることと、 NO_x によるオゾン消失反応サイクルが主

に中部・上部成層圏で働くことから、オゾンの減少は成層圏中部・上部で起こることになる。Callis and Natarajan はニンパス7号の SBUV オゾン高度分布測定データが 50 km の高度まで経年減少を示していることを重視する。しかし SBUV のデータは、オゾンの減少が下部成層圏で起こっているとするオゾン・ゾンデの結果と矛盾することになるし、またオゾン・ホールの場合のようにオゾン全量が 250 D.U. 以下の場合にはデータ解析誤差が大変大きくなって、結果をあまり信頼できないという主張がある。いずれにせよ、今後数年のオゾン全量値の変化傾向、 NO_2 量の変化傾向をみれば、この理論の正否に結着がつきそうである。

5.3 輸送効果説

化学反応でなく輸送の効果によってオゾン減少を説明しようとする説もある。オゾンを減らすためにはオゾン濃度の低い気塊を運んでくればよい。オゾン濃度の低い気塊というと極渦内の下層ないしは上層を考えざるを得ない。オゾン・ホールの周辺は逆にオゾン高濃度域なので、極へ向かっての水平輸送は抑止する必要がある。

Tung *et al.* (1986) は下層のオゾン低濃度気塊を上昇流によって成層圏へ運び込むというアイデアを提唱した。春になって日照が始まるとオゾンの太陽紫外線吸収により加熱が起こり、この diabatic な加熱に釣り合うような上昇気流が生じると考えるのである。この加熱にはオゾンだけでなくエアロソルによる太陽光吸収も寄与すると説く。そして1980年代にはエル・チチオン火山噴火の噴出物の影響等で成層圏エアロソルが増加し加熱効率を増大させていると考えるのである。この説はより精密な大気循環の数値シミュレーションによって確かめる必要があるが、diabatic な加熱により上昇流が生じて循環に変化が起こるといふモデル計算は Rosenfield and Schoeberl (1986) も行っているし、また PSC が diabatic な加熱に大きな役目を果しているという指摘もある (Mahlman and Fels, 1986)。

この説に関連して Makino *et al.* (1985, 1986) による1983年の昭和基地での N_2O 赤外分光観測結果が興味深い。Makino *et al.* によると N_2O 全量が春先に多く、10月末になって昭和基地が極渦の外側に出ることが多くなると全量が小さくなるという。 N_2O は対流圏起源であり、上昇流がある場所では N_2O 濃度の高い対流圏から濃度の低い成層圏へと運ばれ、したがって極渦の内側で上昇流があれば周辺に比較して N_2O 全量が大きくなることを期待される。つまりこの結果は上昇流説に味方す

ることになる。

6. 諸説の正否

これまで述べてきたオゾン・ホール生成に関する説のどれが正しいかを判定するのは、現状では証拠不十分で難しい。しかしながら現実のオゾン減少の様相をよく知っておくことは諸説の判定に役立つ。特に化学反応(塩素説, 酸化窒素説)が主因とする説においては、どの高度のオゾンが減っているかが判定の基準となりうる。

Chubachi (1984) による昭和基地でのオゾン・ゾンデ観測によると問題の減少はオゾン層のピークより下方の 20 km 以下の高度で生じていて、それより上層では大きな変動はないように見える。けれども、オゾン・ゾンデの観測はオゾン層のピークより上の高度になるとデータの信頼性が落ちてくるので、その点注意しなければいけないだろう。一方ニンバス 7号の SBUV で得られたオゾンの高度分布データでは、10月の5日間平均値を比べると極渦内では 30 mb から 0.7 mb 高度まで全てに経年減少傾向が存在する (Aikin and McPeters, 1986)。SAGE II の結果でも極渦内では対流圏界面から 60 km までのオゾン密度は極渦周辺域に比べて小さい (McCormick and Larsen, 1986)。NO_x がオゾン減少に寄与しているとするとその効果は 30~40 km 領域で最も顕著であるから、上述の衛星観測結果は酸化窒素説に有利といえる。ただし、これらの衛星観測データの信頼性には、やはり、疑問がないわけではない。

塩素説と酸化窒素説では NO₂ 密度に対する要請が全く逆となるので、NO₂ 実測データも判定の基準となる。成層圏 NO₂ が年々増加しているかどうかについては、前述したように、判定できるような確たる証拠(データ)はなく、今のところ、酸化窒素説に対しての判定は保留となる。一方塩素説の方は NO₂ 全量地上観測結果から見ると歩が悪そうである。極渦内では確かに周辺と比べ NO₂ 全量が少ないのは事実なのだが、McKenzie and Johnston (1984) の 1982 年, Shibasaki *et al.* (1986), Keys and Johnston (1986) の 1983 年の地上観測によると、南極成層圏内の日照時間の増大とともに中高緯度地域と同様に NO₂ 密度は増加するのである。その量は ClO_x の反応サイクルを抑制するのに十分である。もちろん地上観測では高度方向に積分した NO₂ 全量を測定しているので、20 km 領域の NO₂ は春になっても増加していないと考えることもできないことではない。しかしそれは大変苦しい解釈である。

1986年の南極春季にアメリカの研究者達はマクマード基地で集中観測を実施した。彼らの速報によると NO₂ 量は極めて小さかったという。ただし塩素説に絶対的に有利になる程 ClO が多かったわけでもないらしい。それに N₂O 濃度についても上昇流説に対し、否定的だったという。けれどもこれらは最終的な結果ではない。え、一部既存のデータと矛盾するものもある。

輸送効果を考える説にも高い高度でのオゾン減少はあまり好ましくない。adiabatic な循環により 40 km や 50 km に達するまでオゾン減少効果を作り出すことができるかどうか疑問がある。これまで述べてきたことを全般的に判断すると結局、酸化窒素説が一番有利と思えるかもしれないが、この説にも前述したような問題がある。どの説も一長一短で最終的にどの説が正しいか、なかなか決着がつかないというのが現状である。

7. オゾンは減っていない?

これまではオゾンが減少しているということを大前提にしていたが、そうではないという主張もある。オゾン・ホール内でのオゾン減少が続いていることは認めるが、実は中緯度でオゾンが増加していて半球平均で見るとオゾンは変化していないという考え方である (Stolarski and Schoeberl, 1986)。ニンバス 7号 TOMS のデータを用い 44°S から 90°S までの面積加重平均をとると、9月~11月まではほぼ一定値に収まるというのである。彼らは1979~1982年の4年間のデータから結論づけているが、その後の傾向はどうか興味がある。いずれにしても、オゾン・ホールとは半球内での力学的輸送による再配分に過ぎないという主張である。これは純粋に力学効果を考える研究者に歓迎されそうな結果で、今後より精密な吟味が必要である。ただし、オゾン・ホール現象は力学的再配分だが、全球的にもオゾン量が1979年以後減っているという指摘 (Schoeberl *et al.*, 1986) もあって、何やら複雑なことになっている。

8. おわりに

これまで述べてきたこととお解りのように、オゾン・ホール問題の解決はまだカオスの状態にあって決定的なことは何一つ言えないような状況である。ここで簡単に概観した以外にも種々の考え方が今後提唱されると思われる。個々の観測結果の信頼性の評価、より厳密な光化学-力学モデルによる数値シミュレーションなどが今後なされなければならないだろう。特に力学的効果を考慮

した数理的分析が要求されている。

1986年のオゾン・ホール内のオゾン極小値は1985年よりは大きかったという。果たしてオゾンの減少傾向は終わったのであろうか。成層圏の研究者達には目が離せない状況が続くそうである。なお、より専門的にもう少し知りたいと思う方には、本解説で挙げた参考文献の他に *Geophysical Research Letters* vol. 13, no. 12 (1986) のオゾン・ホール特集号をご覧になることをお勧めする。

文 献

- Aikin, A.C. and R.D. McPeters, 1986: Meteoric material and the behavior of upper stratospheric polar ozone, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1300-1303.
- Angell, J.K., 1986: The close relation between Antarctic total ozone depletion and cooling of the Antarctic low stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1240-1243.
- Bowman, K.P. and A.J. Krueger, 1985: A global climatology of total ozone from the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer, *J. Geophys. Res.*, **90**, 7967-7976.
- Callis, L.B. and M. Natarajan, 1986 a): The Antarctic ozone minimum: Relationship to odd nitrogen, odd chlorine, the final warming and the 11-year solar cycle, *J. Geophys. Res.*, **91**, 10771-10796.
- and —, 1986 b): Ozone and nitrogen dioxide changes in the stratosphere during 1979-1984, *Nature*, **323**, 772-777.
- Chu, W.P. and M.P. McCormick, 1986: SAGE observations of stratospheric nitrogen dioxide, *J. Geophys. Res.*, **91**, 5465-5476.
- Chubachi, S., 1984: Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983, *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, No. **34**, 13-19.
- Crutzen, P. J. and F. Arnold, 1986: Nitric acid-cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime 'ozone hole', *Nature*, **324**, 651-655.
- Dütsch, H.U., 1971: Photochemistry of Atmospheric Ozone, *Adv. Geophys.*, **15**, Academic Press, 219-322.
- Farman, J.C., B.G. Gardiner and J.D. Shanklin, 1985: Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, **315**, 207-210.
- Keys, J.G. and P.V. Johnston, 1986: Stratospheric NO_2 and O_3 in Antarctica: Dynamic and chemically controlled motions, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1260-1263.
- London, J., 1985: The observed distribution of atmospheric ozone and its variations, *Ozone in the Free Atmosphere*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 11-80.
- Mahlman, J.D. and S.B. Fels, 1986: Antractic ozone decrease: A dynamical cause?, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1316-1319.
- Makino, Y., H. Muramatsu, S. Kawaguchi, T. Yamanouchi, M. Tanaka and T. Ogawa, 1985: Spectroscopic measurements of atmospheric N_2O at Syowa Station, Antarctica: Preliminary result, *Mem. Natl. Inst. Polar Res.*, No. **39**, 40-50.
- , —, —, —, — and —, 1986: Observation of atmospheric minor constituents by FTIR, 第9回極域気水圏シンポジウム予稿集, 17-18.
- McCormick, M.P. and J.C. Larsen, 1986: Antarctic springtime measurements of ozone, nitrogen dioxide, and aerosol extinction by SAM II SAGE, and SAGE II, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1280-1283.
- McElroy, M.B., R.J. Salawitch, S.C. Wofsy and J.A. Logan, 1986: Reductions of Antarctic ozone due to synergistic interactions of chlorine and bromine, *Nature*, **321**, 759-762.
- McKenzie, R.L. and P.V. Johnston, 1984: Springtime stratospheric NO_2 in Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, **11**, 73-75.
- Molina, L.T. and M. J. Molina, 1986: Production of Cl_2O_2 from the self-reaction of the ClO radical, *J. Phys. Chem.*, in press.
- Newman, P.A., 1986: The final warming and polar vortex disappearance during the southern hemisphere spring, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1228-1231.
- and M.R. Schoeberl, 1986: October Antarctic temperature and total ozone trend from 1979-1985, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1206-1209.
- Noxon, J.F., 1978: Stratospheric NO_2 in the Antarctic winter, *Geophys. Res. Lett.*, **5**, 1021-1022.
- , 1979: Stratospheric NO_2 2. Global behavior, *J. Geophys. Res.*, **84**, 5067-5076.
- Rosenfield, J.E. and M.R. Schoeberl, 1986: A computation of stratospheric heating rates and the diabatic circulation for the Antarctic spring, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1339-1342.
- Schoeberl, M.R., A. J. Krueger and P.A. Newman, 1986: The morphology of Antarctic total ozone as seen by TOMS, *Geophys. Res. Lett.*, **13**, 1217-1220.
- Shibasaki, K., N. Iwagami and T. Ogawa, 1986:

Stratospheric nitrogen dioxide observed by ground-based and balloon-borne techniques at Syowa Station (69.0°S, 39.6°E), Geophys. Res. Lett., 13, 1268-1271.

Solomon S., R. Garcia, F.S. Rowland and D.J. Wuebbles, 1986: On the depletion of Antarctic ozone, Nature, 321, 755-758.

Stolarski, R.S., A. J. Krueger, M.R. Schoeberl, R.D. McPeters, P.A. Newman and J.C. Alpert, 1986: Nimbus 7 satellite measurements of the

springtime Antarctic ozone decrease, Nature, 322, 808-811.

— and M.R. Schoeberl, 1986: Further interpretation of satellite measurements of Antarctic total ozone, Geophys. Res. Lett., 13, 1210-1212.

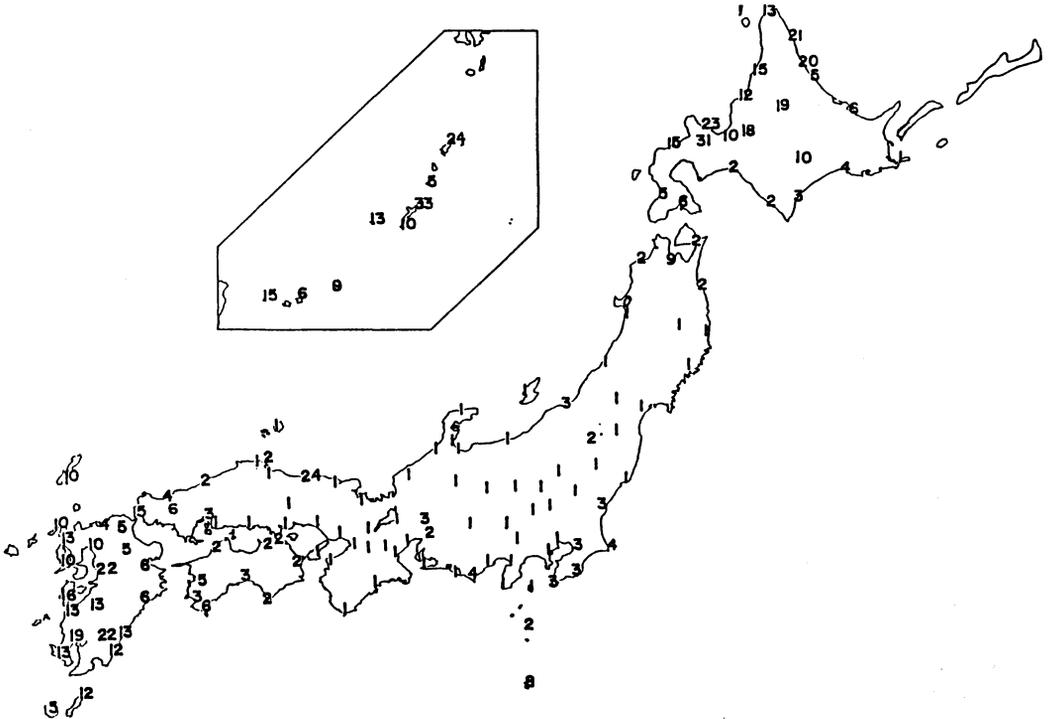
Tung, K.K., M.K.W. Ko, J.M. Rodriguez and N.D. Sze, 1986: Are Antarctic ozone variations a manifestation of dynamics or chemistry?, Nature, 322, 811-814.

File

少雨の状況 (速報)

昭和62年4月の降水量は東北地方から中国・四国地方の東部にかけて極端に少なく、降水量の最少値を多くの地点で更新した。全国約150官署の少雨の順位も、北海道と九州を除いた地域では、大部分が第1位の少雨であった。(気象庁ニュースより)

産業気象課では、農業災害に影響するような気象状況を監視し、必要に応じて速報情報を農林水産省へ提供している。この業務は、大型計算機とパソコンを利用して行っており、“農業気象実況監視システム”と称されている。



昭和62年4月の月降水量の少ない順位 (統計期間 1951年—1987年)
(気象庁産業気象課 災害係 茶円敏彦)