

—夏期大学講座内容③—

オゾンホール

札幌管区气象台 金戸 進

はじめに

オゾンは大気中にごくわずかししか含まれていないが、その役割は地球上の生命にとってきわめて大きいことがわかってきた。特に、生物にとって有害な紫外線を吸収するオゾン層が、フロンガスによって破壊されているとの観測結果は世界的な反響を呼び起こしている。ここでは、このオゾンについて、南極や札幌での観測結果も交えて紹介する。

オゾンとは

オゾンは、分子式 O_3 、常温では気体で特異臭をもちやや青みをおびている。人体に有害であり、大気汚染源のオキシダントの主成分である。人工的には乾燥大気中の無声放電により生成されるが、

天然には太陽紫外線の光化学作用により生成されその濃度の最大は地上約20kmあたりの成層圏にある(図3-1)。地上付近のオゾンは成層圏から輸送された天然のものと地上の大気汚染物質の光化学反応によるものとが混在している。

大気中でオゾンが比較的多量に含まれる10-50kmをとくにオゾン層と呼ぶ。この成層圏のオゾンは太陽光線のうち動植物に有害な波長200~300nmの紫外線を強く吸収する。この熱が空気を暖めるため上部成層圏は比較的高温となり約50km上空の成層圏界面では気温は約0℃にまで達する(図3-2)。

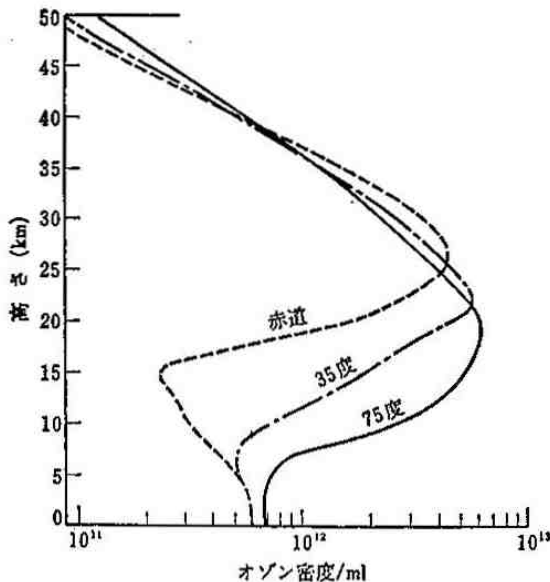


図3-1 3月の北半球各緯度におけるオゾン密度分布の比較

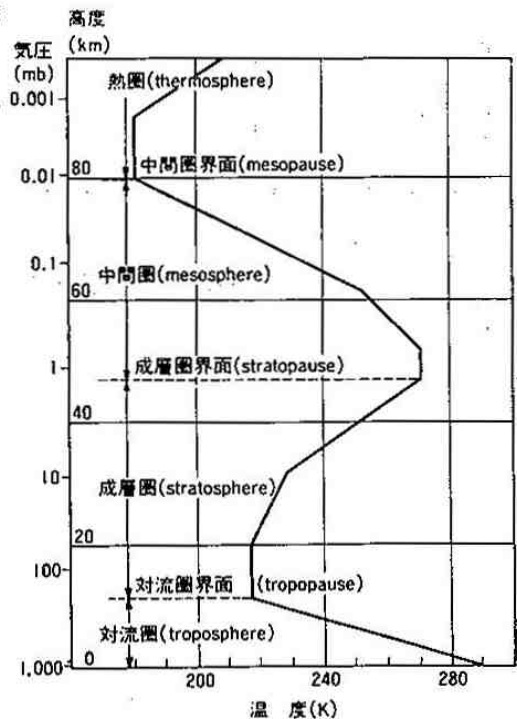


図3-2 大気の区分、温度分布は1962年の米国標準大気

オゾンはまだ、温室効果ガスの一つとしても最近注目されてきた。温室効果とは、ちょうど温室のガラスのように、太陽の光は通すが地面からの熱は逃がさず大気を暖める作用で、炭酸ガスによるものが大きい。オゾンをはじめとする微量ガスによる効果も無視できない程度になるとみられている。

オゾンのもとになる大気中の酸素を地球の歴史のスケールで見れば、酸素が出現するのは水中で植物が光合成を始めてからと考えられている。その後、酸素が次第に増加すると共に成層圏にオゾン層ができ紫外線が吸収されるようになって地表面では植物が陸上へと進出していきそれを食物とする動物も進化していったと考えられている(図3-3)。

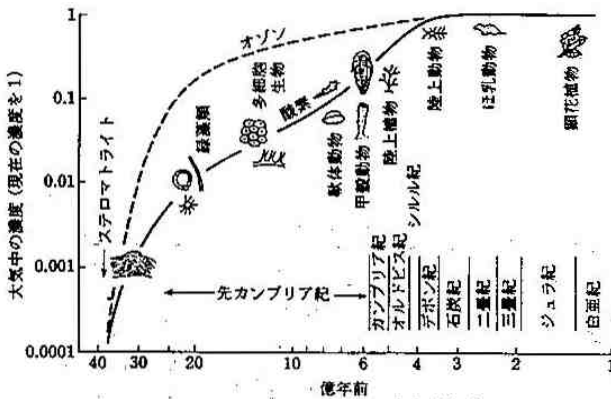


図3-3 地球における酸素とオゾンの生成と生物の進化
(R. P Wayne, Chemistry of Atmospheres, 1985 p 338 より構成)

オゾンの観測

オゾン量の測定方法には、オゾンの化学反応を利用した化学法、紫外線吸収を利用した光学法などがある。

化学法は、一定量の大气をポンプにより電極を封入した反応管に送り込み反応電流を計ることによってオゾン量を知る(図3-4)。反応液としては一般にヨウ化カリウム溶液が用いられる。このようなオゾン測定器を気球に吊して大気中のオ

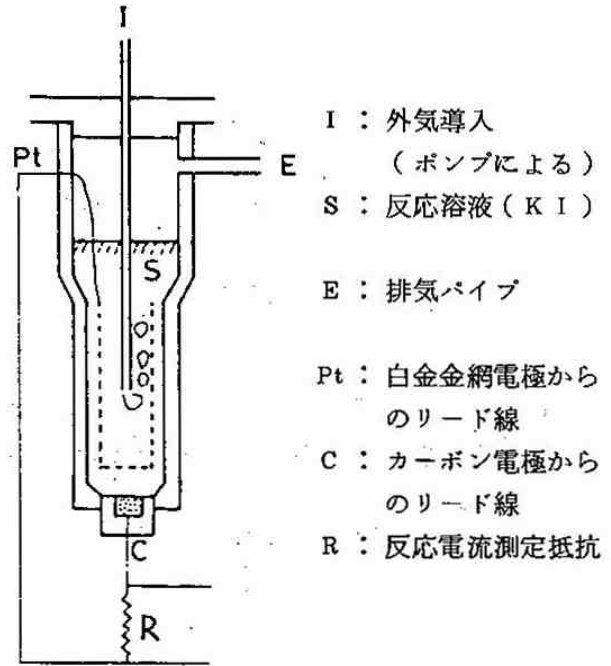


図3-4 オゾンゾンデ反応管

ゾンの垂直分布(30km上空まで)を直接測定するオゾンゾンデ観測が広く行われている。

光学法は、オゾンの紫外線領域での光の吸収率の違いを利用して、吸収率の大きい波長と小さい波長での光の強さを比較することによりオゾン量を知る。地上では太陽直射日光を利用して、また人工衛星では地球からの散乱光を利用して、光の通路でのオゾン量の合計すなわちオゾン全量を測定している。このような観測を行う測定器は分光光度計とよばれている(図3-5)。また、この測定器を用いてオゾンの垂直分布(50km上空まで)を推定する反転観測法も開発されている。

現在、国連の専門機関である世界気象機関(WMO)では、全世界のネットワークによりオゾン観測やデータの収集を行っており、日本では気象庁が1957(昭和32)年の国際地球観測年(IGY)を契機に観測を続けてきた。観測地点は現在、札幌、つくば(高層气象台)、鹿児島、那覇のほか南極昭和基地で、分光光度計による全量、反転観測とオゾンゾンデ観測が行われている(図3-6)。

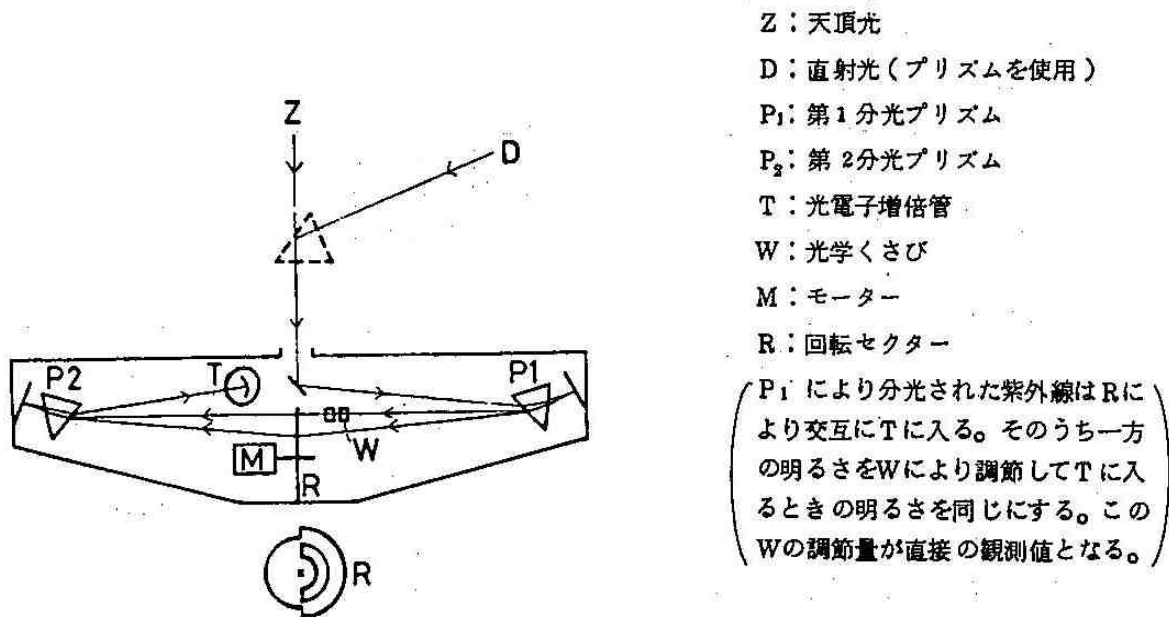


図3-5 分光光度計

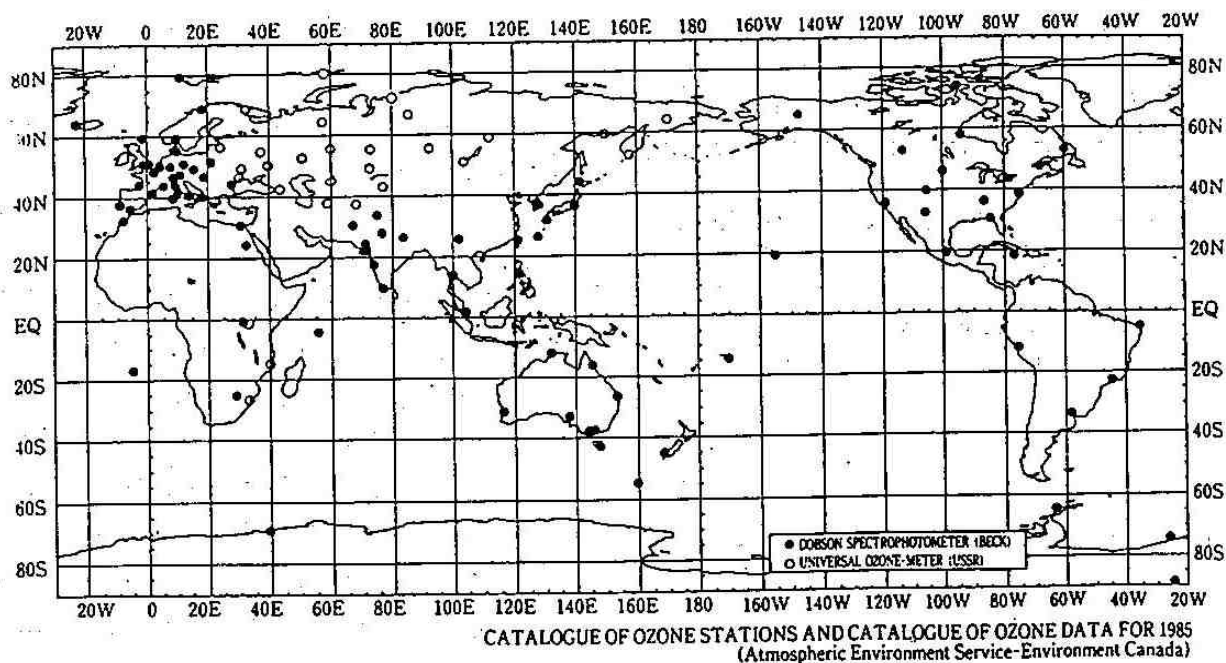


図3-6 世界のオゾン全量観測点(1985年)

オゾンの単位

オゾン通常は気体であるので、その単位として体積混合比 (ppm) や分子数密度 (個/cm³) が使われるが、これらのほかに一般的ではない単位も用いられている。

(1) 分圧 ($\mu\text{mb} = 10^{-6}\text{mb}$)

混合ガスでは成分ガスの量を全圧力に対する分圧で示すことがある。大気中のオゾン分圧は、地上 (気圧 1000 mb) では $10\mu\text{mb}$ 位、オゾン層 (気圧 50 mb) では $200\mu\text{mb}$ を越えることもある。なお、大気中の水蒸気も分圧で計られるが、これは、地上では 10mb 位である。

(2) 全量 (m atm-cm : ミリアトムセンチメートル

$$= 10^{-3}\text{cm} = 10^{-2}\text{mm}$$

$$= \text{DU} : \text{ドブソン単位})$$

全大気を標準状態 (0℃、1気圧) にするとその厚さは約 8000 m となるが、このときのオゾンのみを集めた厚さがオゾン全量を計るとき単位として用いられている。ドブソンとはオゾン研究で有名な英国の科学者の名前である。この単位で計った札幌のオゾン全量は 300 ~ 500 m atm-cm、すなわち、3 ~ 5 mm である。オゾン全量の大部分は成層圏にあるオゾンで占められている。

地面付近のオゾン

地面付近のオゾンは大気汚染物質のうちオキソダントとして各地で測定されている。札幌では札幌市環境局公害部によって 1972 (昭和 47) 年より測定が始められ現在では市内 9 地点で 4 ~ 9 月に測定されている。このほか、気象台で行っているオゾンゾンデ観測でも地面付近からオゾン量が測定されている。これをまとめた結果によると、地上オゾン量の季節変化は春に多く夏から冬に少ない (図 3-7)。一方、札幌の成層圏でのオゾン量は冬から春に多く夏から秋に少ない。すなわち札幌では冬には成層圏でオゾンが多く地面付近では少なくなっている。これは冬の大气汚染によりオゾンの破壊が起きているからだと考えられる。

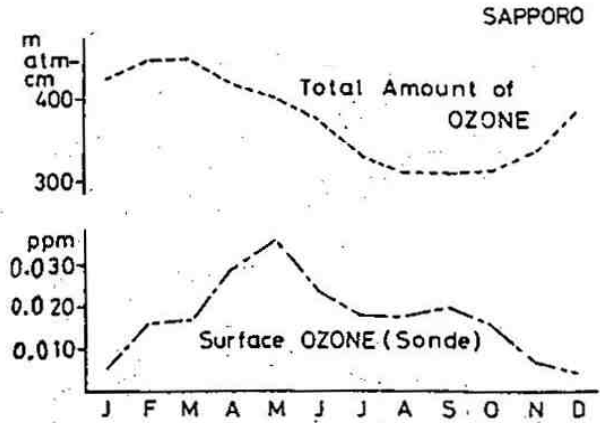


図 3-7 札幌での地上オゾン量(下)とオゾン全量(上)

もちろん、夏には大気汚染によりオキソダント濃度が高くなることがあるが、札幌では基準を越えることはあまり多くはないようである。

オキソダントによる生物への影響は、人間の場合は目や呼吸器への影響が、植物には葉の組織への直接的障害の他に生育や収量に影響があると言われている。

成層圏のオゾンについて

成層圏のオゾンは、生物に有害な紫外線を吸収するフィルターの役割と、その吸収した熱による成層圏の加熱および温室効果により大気大循環ひいては地球気候系を形成する要因としての役割がある。

これまでの観測結果では (図 3-8)、オゾン全量は、一般に赤道付近で少なく極に近いほど多い。また、季節変化は、赤道付近では春から夏に多く、極に近い地方では冬から春に多い (南極を除く)。これは、赤道上空の成層圏で作られたオゾンが成層圏の大循環により極地方に運ばれるためだと考えられている (図 3-9)。

(1) 太陽紫外線

太陽光は、太陽の表面温度約 6000 K により、放射強度のピークが波長約 480 nm (青色) にあ

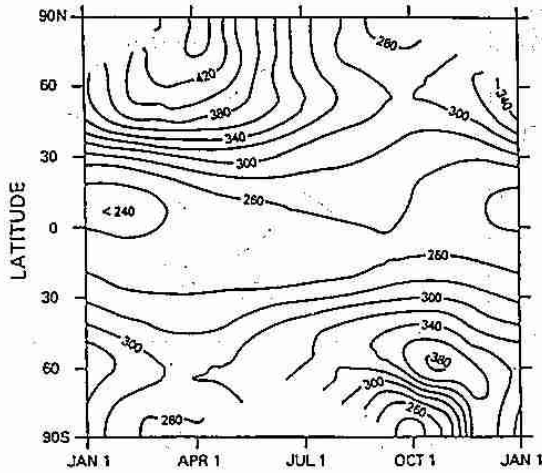


図3-8 ニンバス7号TOMSにより観測されたオゾン全量の経度平均値の緯度と季節による変化、数値はドブソン単位による。(Krueger、1985より)

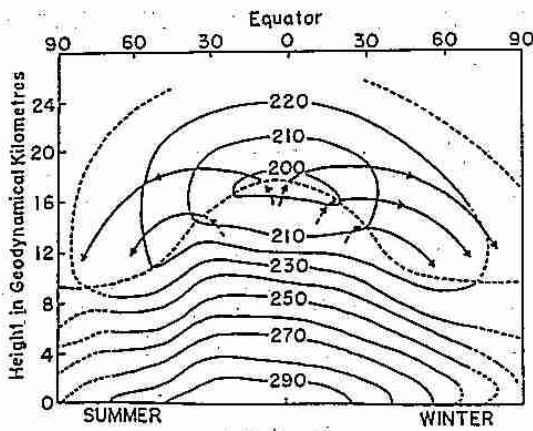


図3-9 ブルーワーが描いた対流圏・下部成層圏の気温の鉛直断面内分布と、それに対応する飽和水蒸気量と実際観測値の比較から推定した成層圏内の大気の動き。成層圏内の空気はどこでも200 Kでの飽和水蒸気量しか含んでいない(非常な低温度である)。この循環をブルーワー・ドブソン循環と呼ぶ。

る。紫外線は波長が400nmより短い光で、オゾンによる吸収は320nm以下で起こり280nm以下の紫外線はほとんど完全に吸収される(図3-10)。生物の遺伝子を構成しているDNA(デオキシリボ核酸)は、紫外線のうち波長260nm付近に強い吸収帯を持っており、このような紫外線にさらされた場合には破壊されてしまうと言われている。

現在考えられている成層圏オゾンの変化は、今のところこのような波長の短い紫外線領域にまで及ぶとは考えられていないが、300nm付近では影響があることが予想されている。この波長の紫外線による人間への影響は皮膚の炎症(日焼け)とそれに基づく皮膚がんで、その発生機構はあまりよくわかっていない。一般に、低緯度では太陽高度が高いので放射強度が強い上にオゾン全量が少ないので紫外線が高緯度より強く皮膚がんの発生率が大きいことが予想され、この傾向を裏付ける調査結果も発表されている。

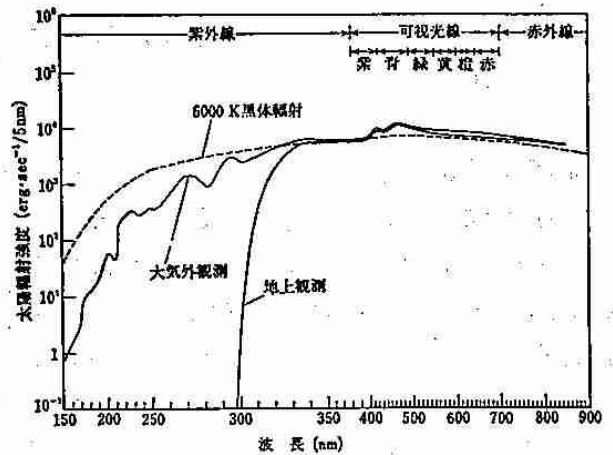


図3-10 いろいろな波長における太陽輻射強度。地上と大気外の観測結果の違いに注意せよ。

(2) 大気の大循環について

地球大気中の温度分布や運動状態などを総合的に大気大循環と呼んでいる。大気大循環を基本的に決めている要因としては、大気組成、大気量、地球重力、太陽からの距離、自転軸の傾き、自転速度などがある。これらによって考えられる大気大循環はほぼ現在のものと合ってくるがさらにオゾン層を加えることにより一段と現実の大気に近づくことが知られている(図3-11)。当然、オゾン層の状態が変化すれば、大気大循環さらには地球気候系にも影響がでてくることは十分考えられる。

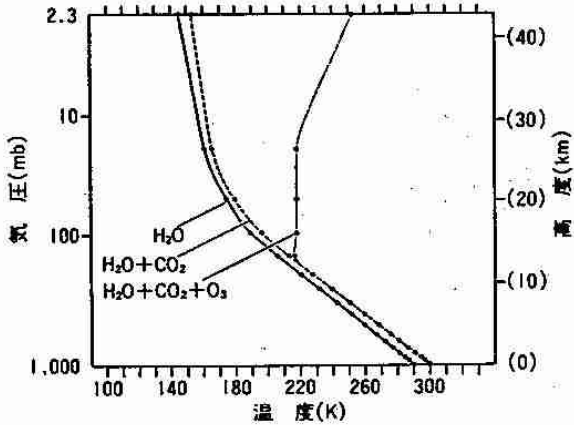


図3-11 放射-対流平衡における気温の鉛直分布 (Mamabe and Strickler, 1964)。オゾンを加えると成層圏での気温が大きく変化し現実大気に近づく。

(3) 温室効果ガス

大気中の微量な成分であるオゾンやフロン、メタンなどは炭酸ガスと共に温室効果を持っていることが明らかになってきた。これらのガスの増加による地表気温の変化は50年間で1.5℃程度との研究結果がある(図3-12)。

オゾンホール

南極昭和基地では1961(昭和36)年からオゾン

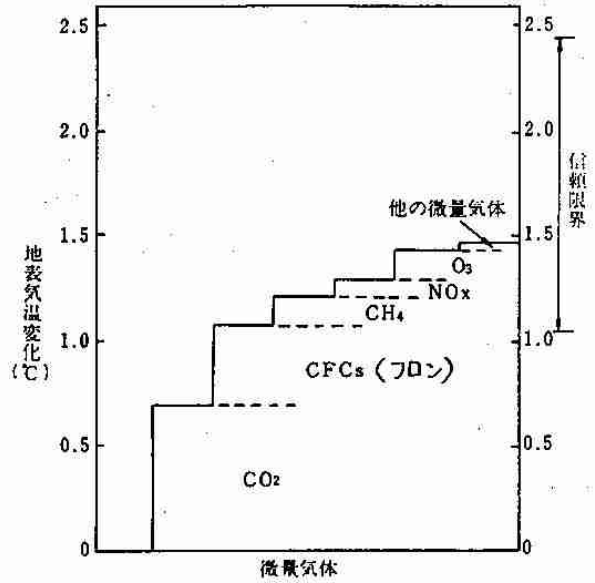


図3-12 一次元放射対流平衡モデルを用いて計算された1980年から2030年までの温室効果気体の増加に伴う地表気温の変化。

Ramanathan et al. (1985)の結果を Bolin et al. (1986)より引用

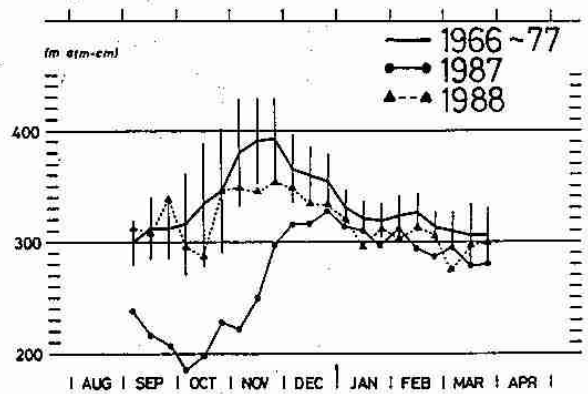


図3-13 昭和基地でのオゾン全量 (10日平均値による)

観測が行われてきたが、1980(昭和55)年頃から9~11月に限ってこれまでになく小さいオゾン全

量が観測されるようになり、1987(昭和62)年10月には1980年以前の半分という程度にまで達した(図3-13)。オゾンゾンデ観測では、これまでオゾン層の中で最もオゾン濃度の高かった高度15~20km付近で逆にオゾン濃度がほとんど0に近いといった状態が見られるようになった(図3-14)。このような状態は、12月には平常の状態に回復したが、成層圏では冬の循環が平年より1か月も長く続くなど大気大循環にも影響が現れている可能性がある。

このような現象は、人工衛星で観測したオゾン全量の平面分布で見ると南極大陸上でオゾン全量が少なく周囲が多いため、オゾンホールと呼ばれるようになった(図3-15)。

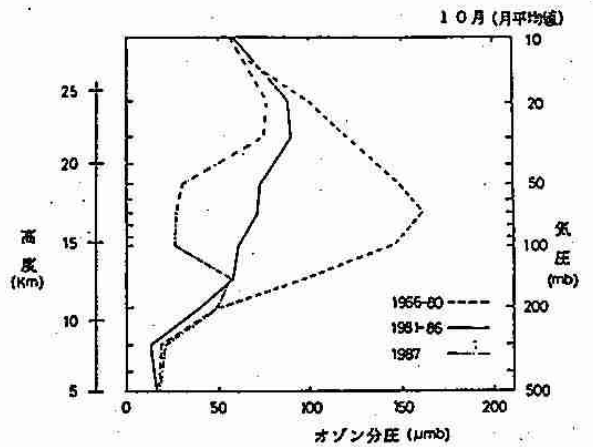


図3-14 昭和基地でのオゾンゾンデ観測結果 (1987年は5回の平均)

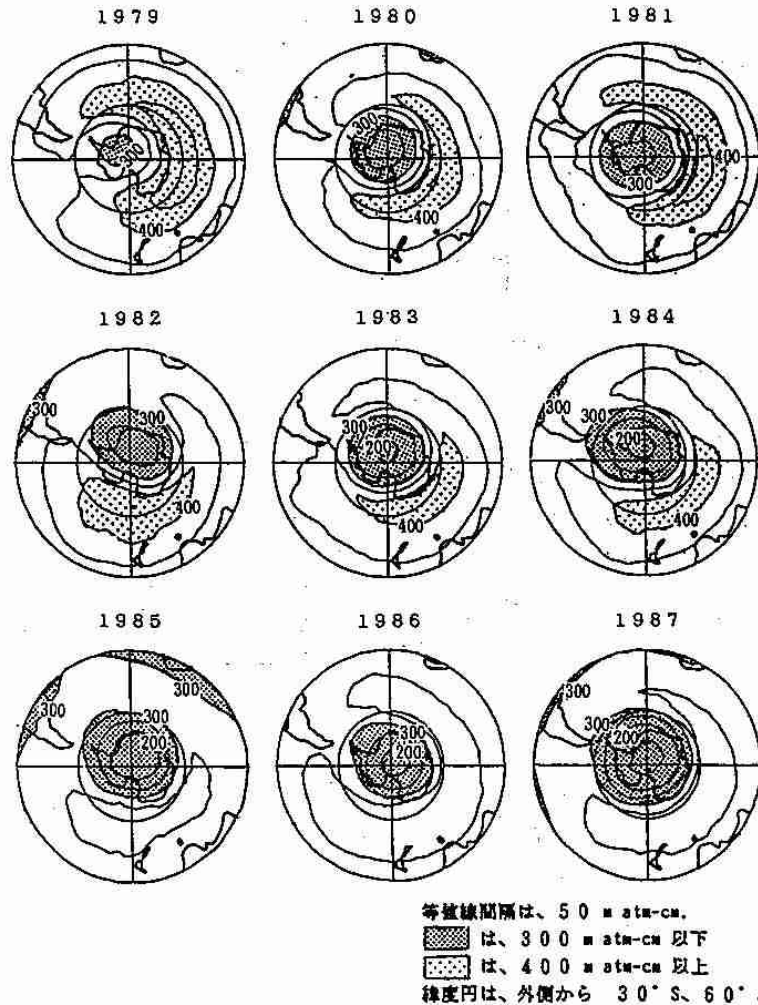


図3-15 人工衛星による南半球の10月のオゾン全量分布

最近の各国の集中観測により、このオゾンホールの原因は、工業ガスの一種であるフロンによることがはっきりしてきた。フロンは、化学的にきわめて安定で、地上で放出されると破壊されずに成層圏まで達し、そこで紫外線により分解されて塩素を放出する。極地方では冬のあいだ太陽の光が当たらない極夜期間があるが、南極の成層圏ではこの時期に特に気温が下がり（ -90°C 程度）、極域成層圏雲と呼ばれる雲ができ、これが塩素を蓄積する効果を持つと考えられている。そして極夜が終わり再び太陽光が当り始める8月頃から塩素によるオゾン層の破壊が始まり、10月頃まで進行する。その後は上層や周囲からの輸送により平常状態に戻るといったサイクルが考えられており、オゾンホール現象そのものは今のところ南極地域に特有の現象と考えられている。

フロンによるオゾンの破壊は、このような低高度（15Km付近）ではなく、より高いところで起きている可能性があることが古くから指摘されていた。フロンが紫外線によって分解する割合は紫外線の強い成層圏上部でより大きいので、そこでのオゾンの直接的破壊があると考えられている。日本での分光光度計による反転観測結果では（図3-16）、成層圏上部（約40Km）でのオゾンが観測開始以来徐々に減っていることが示されており、これがフロンの影響ではないかと言われている。しかし、この付近のオゾン全量への寄与はあまり大きくはないので、オゾン全量としての変化傾向は日本付近でははっきりしない（図3-17）。世界的にはオゾン全量の減少傾向が現れている地域もあり今後も観測の継続が重要となっている。

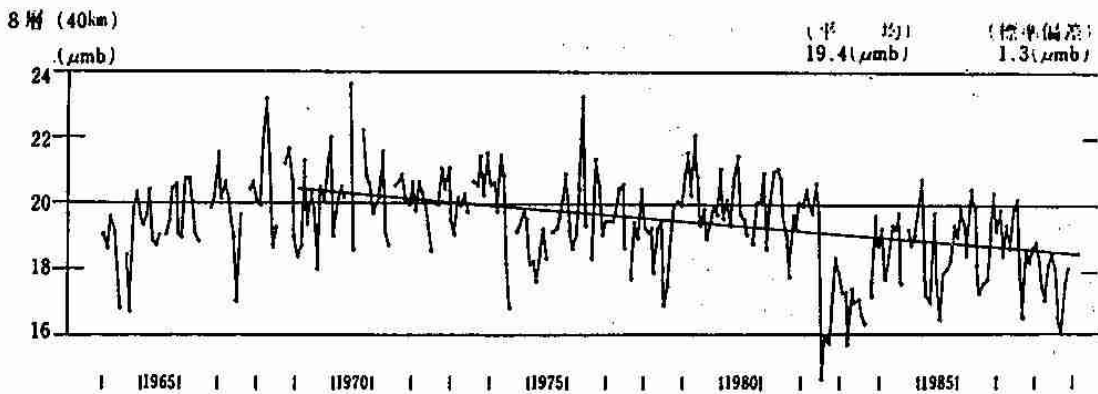


図3-16 つくばにおける反転観測によるオゾン層の経年変化
斜線は1969～1988年の資料に基づく回帰直線

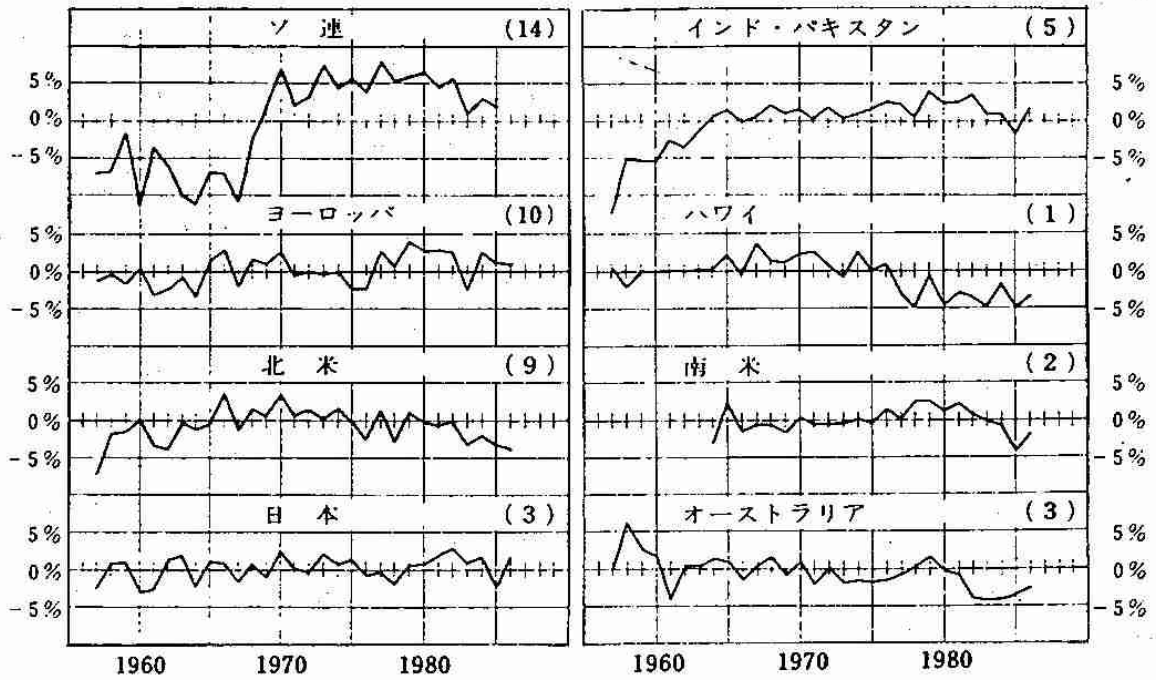


図3-17 世界の各地域におけるオゾン全量の経年変化
平年値からの偏差(%)を示す。カッコ内は観測地点数。

【参考文献】

- 成層圏オゾン, 島崎達夫, 東京大学出版会
- 大気科学講座 3. 成層圏と中間圏の大気, 松野太郎 島崎達夫
4. 大気の大循環, 岸保勘三郎
田中正之 時岡達志, 東京大学出版会
- 大気環境の科学 5. 大気環境の変化と植物,
門司正三 内嶋善兵衛, 東京大学出版会
- 札幌市の大気汚染物質測定結果報告, 札幌市環境
局公害部
- 南極オゾンホール之谜, 卷出義紘, 化学43卷11号
- 異常気象レポート'89, 気象庁, 大蔵省印刷局
- 成層圏大循環とオゾンホール, 松野太郎, 気象庁
気候問題懇談会
第38回資料
- オゾン層を守る, NHKブックス574, 環境庁
<オゾン保護検討会>

