

1. 大気オゾンの科学

北海道大学地球環境科学研究科 塩谷 雅人

1 はじめに

オゾンは酸素原子3個からなる反応性の高い気体で、そのほとんどが高さ10数kmから50kmあたりの高層大気中に存在しています。この主要な生成域においても、オゾンはたかだか10万個の大気分子のうち1個程度しか存在しません。こんなに微量しか存在しないオゾンですが、オゾンは太陽光のうち波長の短い紫外線光を強く吸収することによって大気層を加熱するとともに、人類を含む地球上のすべての生物にとって有害な紫外線から私たちを守ってくれています。

いっぽう、私たちの生活する地表付近から高さ10数kmくらいまでの大気下層においても、オゾンは生成域のさらに100分の1以下の濃度ではありますが存在しています。この下層大気中で、オゾンは間接的にさまざまな汚染物質を酸化し大気を浄化する重要な役割を果たしています。このように、オゾンは大気にごく微量しか存在しないにもかかわらず、私たちが地球上で生活していく上でなくてはならない気体成分であるということが出来ます。

ここでは、最近の衛星観測データやゾンデ観測データにもとづく大気オゾンの分布を見ながら、まず、高層大気領域で問題となっているオゾンホールの問題を中心にお話します。さらに時間が許せば、下層大気中におけるオゾンの分布について、昨年インドネシア領域で問題となった大規模な焼き畑ともなうオゾン増加の話、あるいは私自身が最近興味を持っておこなっている赤道東太平洋（ガラパゴス諸島）におけるオゾンゾンデ観測の話をしたしたいと思います。

2 オゾンの分布

オゾンについて話す前に、大気の鉛直構造について簡単に説明しておきましょう。私たちはふつう、大気をその鉛直温度構造に注目して次のように分けています。地表から高度約10kmまでの領域は対流

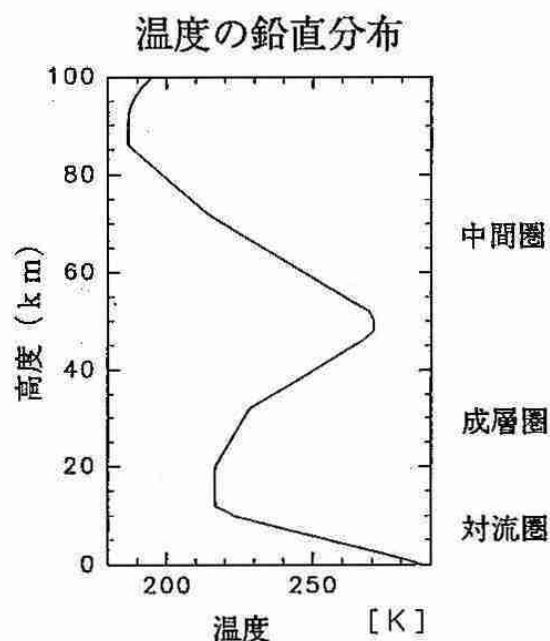


図1：米国標準大気にもとづく温度の鉛直構造。

圏とよばれ、気温は高度とともに減少していきます。そこでは私たちにもなじみ深い雲や雨と関連した現象が見られます。その対流圏の上には雲のない大気層が広がっていて、高度50km付近までは気温が高度とともに上昇しておりそこを成層圏といいます。さらにその上には高度とともに気温が減少していく中間圏（約50-80km）、そして再び気温の上昇する熱圏（約80km以上）が広がっています。

先ほども簡単に述べたように、オゾンはほとんどが成層圏に存在しています。オゾンが生成されるためには太陽の紫外線が必要でそれは大気上層ほど多い、いっぽうオゾンの供給源である酸素分子は大気の下層ほど多いため、成層圏領域のある適当な高さでオゾン量は最大になります。以下では、しばしば

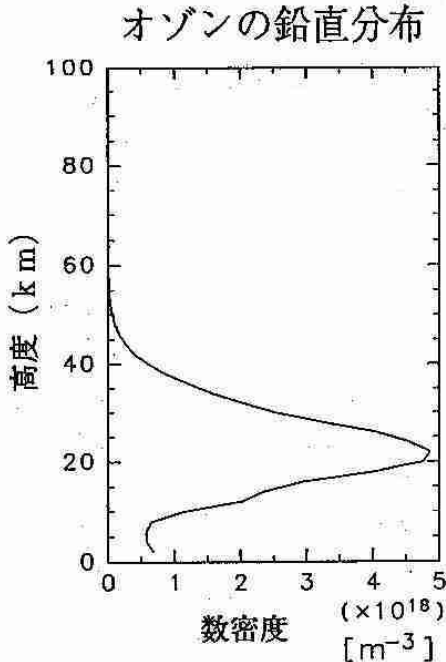


図2：米国標準大気にもとづくオゾンの鉛直構造。

オゾン全量という単位 (DU：ドブソン単位ともいう) がでてきますが、これは図2のオゾン分布を高さ方向に足し合わせたような量です。図2から分かるように、オゾン全量の変動は主として下部成層圏のオゾン変動を代表しているといえることができます。

3 オゾンホールが発見

南半球の極域で特に春の時期にオゾンが減少してきていることを最初に報告したのは、気象庁気象研究所の忠鉢氏でした (1984年)。彼は自分自身が南極昭和基地で観測した1982年のオゾン全量データが、それまでの観測値に比べて非常に低いことに気がつきました。その直後、同じ南極域におけるイギリスの観測基地 (ハレー・ベイ) のオゾンデータからも同様な結果が報告され、人々の興味が南極域におけるオゾン減少に集まりました。図3には南極域にある4つの観測点における10月の月平均オゾン全量の

年々変動を最近の観測も含め示しています。この図から1980年頃を境にオゾン全量が急激に減少してきているのがわかります。さらに、人工衛星からの観測によってもこのオゾン全量の減少が南極大陸規模のものであることが確かめられるにいたって、研究者の関心は急速に高まりました。

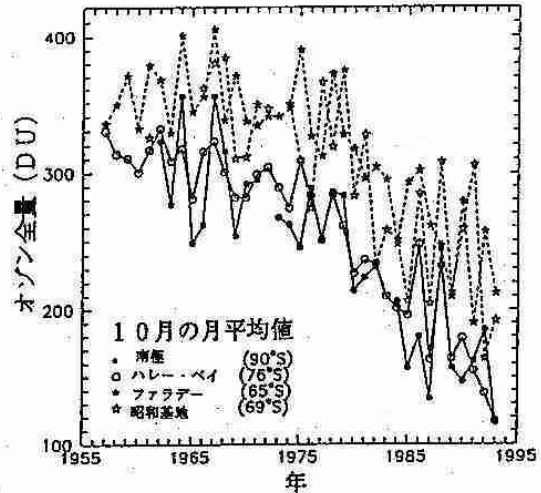


図3：南極域にある4つの観測点で測定された10月の月平均オゾン全量の年々変動。単位はドブソン単位 (DU)。

図4には衛星観測データにもとづく南半球の10月におけるオゾン全量分布を示します (衛星データにもとづきオゾンホールについて言及した最初の論文から引用した)。もともとこの時期、南半球におけるオゾンは、南極上空で少なく、それを取り囲むようにして中緯度に三日月型の高濃度域が存在するような分布をしています。この形態的な特徴からオゾンホールと呼ばれているわけですが、問題はこのオゾンの穴「オゾンホール」が年毎にどんどん深く (つまりオゾン量が少なくな) っていることにあります。こういった観測事実刺激されオゾンホールの特徴を明らかにするさまざまな観測がおこなわれましたが、それらをまとめると：オゾンの急激な減少は(1)南半球極域で顕著なこと、(2)南半球の春の時期 (10月) を中心に見られること、(3)高度15-20 km付近 (下部成層圏) でおこっていること、などが明らかになってきました。

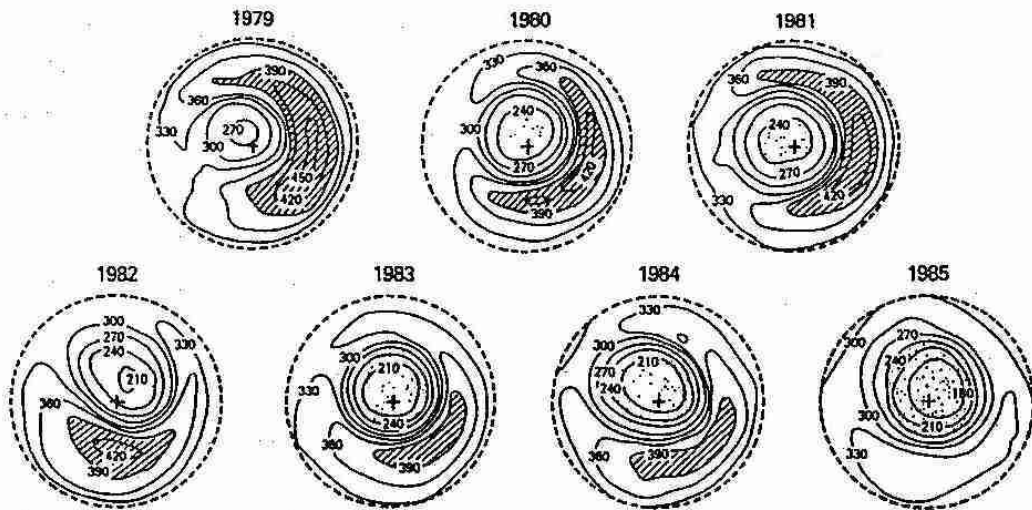


図4：TOMS と呼ばれる衛星搭載測器によって得られた1979年から1985年までの南半球10月の月平均オゾン全量の図。南極上から眺めたような投影法を用いていて作画されている。図の外側の円は南緯30度を示す。390 DU より値の大きなところには斜線が、240 DU より低いところには点々が描かれている。

4 オゾン破壊のメカニズム

それではなぜ、春季南半球の極域下部成層圏でこのようなオゾンの破壊が起こるのでしょうか。それまでも窒素や塩素を含んだ酸化物が太陽の光でその結合が解かれること（光解離）をきっかけとして、オゾンを破壊しうることが知られていました。たとえば冷蔵庫の冷媒や噴霧器の発射剤として使われてきたフロンガスは、大気の流れによって放出源である対流圏からやがては成層圏に輸送され、オゾン破壊をもたらす化学物質の一つとなります。しかし、そういった反応はもっぱら上部成層圏で起こることであり、下部成層圏では大規模なオゾン破壊につながらないと考えられていました。さらにフロンガスが光解離してできる塩素は、ふつう窒素酸化物と結びついて安定な分子の形で成層圏に存在し、オゾンにとっては何の影響も与えないと信じられていました。ところが、南半球の下部成層圏では冬から春にかけて非常に低温な状態となる（北半球の冬は大規模な大気波動によって南半球に比べ高温となっている）ため、水や硝酸の水粒からなる極域成層圏雲（PSCs: Polar Stratospheric Clouds）が発達し、その水粒の表面でこれまで考えられてこなかった反応の起こりうるということがわかってきたのです。つまり、塩素と窒素酸化物とが結びついてできた安定な分子も PSCs の表面で反応し、それまで閉じ込められ

ていた塩素の放出が促されることによって、結果的に下部成層圏で急激なオゾン破壊を招くことが明らかになってきたのです。

すぐさま（1987年）この仮説を検証すべくアメリカの研究者たちは下部成層圏を飛べる飛行機を使って、各種微量成分の測定をおこないました。図5にその観測例を示します。図の左側がオゾンホールの

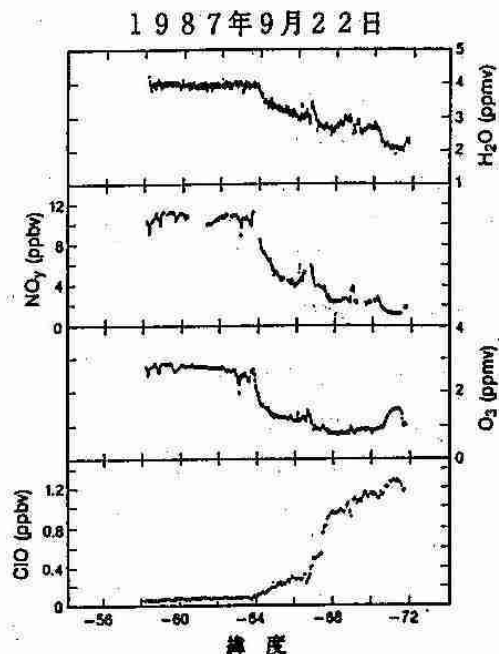


図5：飛行機観測から得られた（上から順に）水蒸気、窒素酸化物（NO_y）、オゾン、塩素酸化物（ClO）の航路に沿う緯度分布。

外、右側がオゾンホールの内に対応していることは、3番目のオゾンに関するグラフからわかります。同時にオゾンホールの中では水蒸気(1番目のグラフ)も少なくPSCsが形成されていることを示唆しています。そして最も重要なことは、オゾンの破壊を促進する鍵となる塩素酸化物(4番目のグラフ)がオゾンホール内で急激に増加し、オゾンと非常にきれいな逆相関関係を示している点です。さらに、塩素酸化物を不活性化する窒素酸化物もオゾンホール内で少なくなっている(2番目のグラフ)こともわかります。ここにいたって、私たちが何の規制もない中で放出し続けていたフロンガスは、ある条件のもとではありますが、すでにオゾン層破壊をもたらしていることが明らかになったのでした。こういったシナリオに沿ったオゾン破壊が南極大陸ほどの広がりを持って起こっていることは、1991年に米国で打ち上げられたUARSと呼ばれる大気観測衛星からも確かめられています。

5 北半球にもオゾンホール?

いっぽう、極域の温度が南半球よりも暖かくオゾン破壊は起こらないと考えられていた北半球についても、1990年代にはいって小規模なオゾンホールが観測されるようになり、結果的にオゾンが減っているという報告がなされています。これは近年、北半

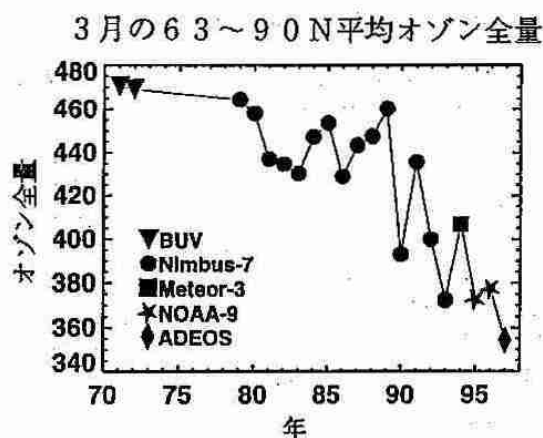


図6: 北半球高緯度域3月の平均オゾン全量。(印の違いは、観測した衛星測器の違いを示す。)

球下部成層圏でも低温化傾向が見られ、PSCsの出現頻度が高くなっているらしいことと関連していると考えられていますが、いまだに明解な説明は得られていません。一昨年わが国で最初の大規模な地球

観測衛星 ADEOS (みどり) が打ち上げられ、そこに搭載された測器の一つ ILAS が、この北半球におけるオゾン破壊を観測することに成功しています。今後さらにデータ解析が進めば、北半球におけるオゾン減少の原因も明らかになることが期待されます。このように、オゾン層破壊を食い止めるためフロンガスに関するさまざまな規制が提案され実行されてきましたが、オゾン層破壊は今もなお進行中の問題であるわけです。

6 対流圏オゾン

対流圏に存在するオゾンは、成層圏よりもさらに微量です。しかしながら、対流圏のオゾンも以下のような理由から注目されています。一つには、あまりに高濃度のオゾンは植物や人間にとって有害であるということです。いわゆる光化学スモッグがそうであるように、都市大気中で放出された窒素酸化物がもとになって生成されるオゾンは、私たちに害を及ぼします。では、対流圏においてオゾンはないほうがいいのかということではありません。大気中には数々の有害な大気微量成分が存在しますが、オゾンを生産源とするOHラジカルとよばれる微量気体がそれらを酸化してしまう力を持っています。つまり、オゾンは大気の浄化作用を維持するために重要な働きをしているのです。さらに最近では、オゾンが二酸化炭素に次ぐ温室効果気体として、地球大気の温暖化に寄与する可能性が示唆されています。このように対流圏において、オゾンは多くても少なくとも困る微量気体であるわけです。

7 焼き畑によるオゾン生成

都市域において放出される窒素酸化物がオゾンを生産するのと同じように、焼き畑等の人為的な活動によってもオゾンは生成されることが知られています。昨年(1997)の9月を中心に、インドネシア地域でおきた大規模な焼き畑が引金となって深刻な煙害が発生したことはみなさんの記憶にも新しいかと思います。実はこのとき、オゾンもこの地域で増大していたことが知られています。図7には衛星から推定された対流圏部分のオゾン量の分布が示されています。インドネシアを中心として非常に高濃度のオゾンが観測されていたことがわかります。こういった焼き畑

1997年9月18日

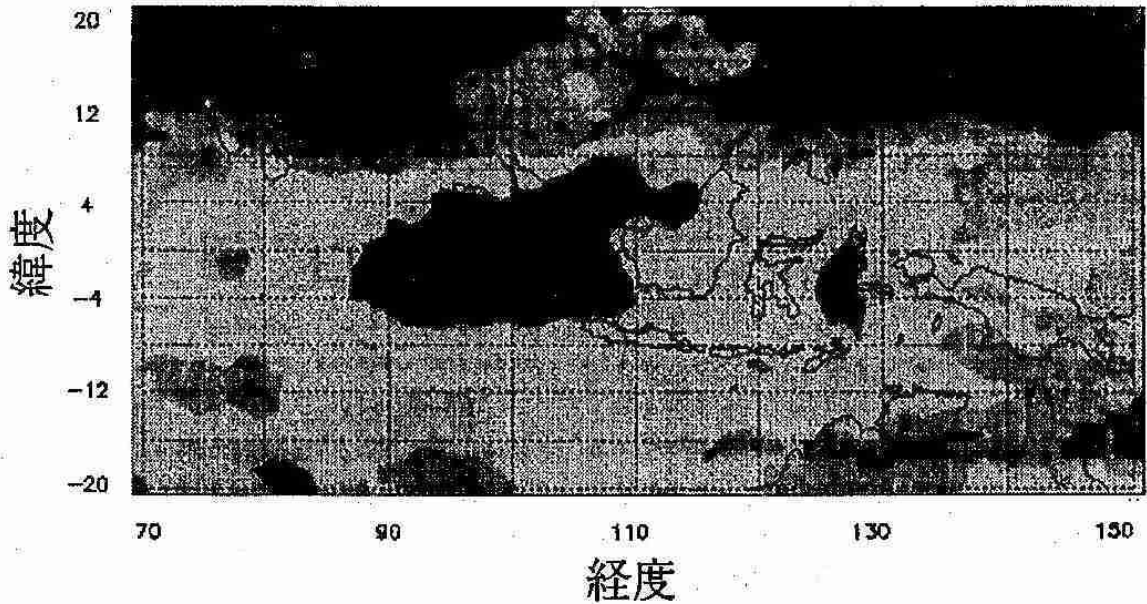


図7：1997年9月18日、インドネシア周辺における対流圏オゾン量の推定値。濃淡の濃い部分でオゾン量が多くなっていることを示している。

にともなう対流圏オゾンの増加は、南アメリカのアマゾン地域でも毎年のように観測されており、大気システムへの影響が懸念されています。

8 ガラパゴスにおけるオゾン観測 —「終わりに」にかえて

これまで、主として衛星観測にもとづく結果を示してきました。衛星からの観測というのは、グローバルな視点を得られるという点で非常に強力な手段ですが、その精度という点ではまだまだ地上での観測あるいはゾンデ等を用いた定点観測に及びません。特に、定常的な観測点が全くといっていいほど存在しない熱帯域に関していうと、私たちは科学的な論議をするための材料（データ）をほとんど持っていないことに驚きます。そんな問題意識から、私自身、何人かの研究協力者と共同で赤道域におけるオゾンゾンデ観測を組織的に起こりたいと考えるようになりました。まだまだ、定常観測をおこなうまでの資金がえられず、キャンペーン的な観測しか実施できていませんが、この3、4月には東太平洋に浮かぶガラパゴス諸島でのオゾンゾンデ観測をおこないました。これまで、西太平洋域でのオゾンゾンデ観測は断片的におこなわれていましたが、東太平洋にお

ける観測はこれが世界で初めてとなります。そんなことさえこれまでおこなわれてこなかったのかと驚かれる人も多いかと思いますが、しかし現実にはまさにその通りで、まだまだ私たちの知らない領域というのは広く存在します。地球大気を行く末を見守っていくためにも、私たちは地道な観測を継続しておこなっていかねばならないのです。

ガラパゴス諸島におけるオゾン観測

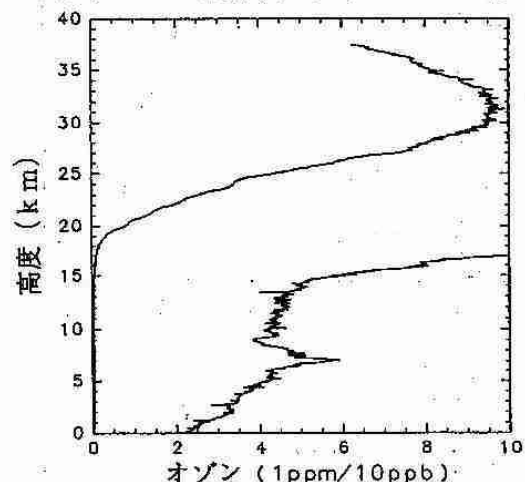


図8：ガラパゴス諸島におけるオゾンゾンデ観測の例。対流圏部分は目盛を100倍に拡大して描いている。