

大 気 オ ゾ ン (II)*

関 口 理 郎**

オゾン層の3次元構造

1. 垂直分布

大気中のオゾンは太陽紫外線の光化学作用により生成されることは疑いのないところであるが、問題は光化学理論だけでは高度の低い層の実際の分布を十分に説明できないことである。光化学理論による垂直分布の計算には波長別紫外線強度や気温、気圧などの諸量を必要とし、これら諸量の精度を考えると35km以上の高さにおけるオゾン分布はロケット観測などの実測値とよく一致している(第1図)。高度が低くなるにつれて、理論上オゾンが光化学平衡に達する時間が指数函数的に増加することは、実測と理論的分布のずれが低い所ほど大きいことが光化学理論の否定的根拠となるものではなく、逆に上層で理論と実測が一致することと共に理論の正しさを正当化するものであるといえよう。

光化学平衡の分布が空気の運動などによって乱され、不平衡状態になった時にもとの平衡状態に戻るに要する時間の目安として平衡値からのズレ ΔO_3 が $1/e$ に減少するまでの時間 τ を計算すると (Dütsch¹⁾)

$$\tau = \frac{1}{4} (f_2 f_3 / k [M])^{-\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 $f_2 = Q_2 / [O_2]$, $f_3 = Q_3 / [O_3]$,
 となる。 τ のオーダーは高度40kmで0.1日、35kmでは数時間から1日、30kmでは数日から10日、25kmでは100ないし1,000日、20kmでは1,000日である。これらの値から35km以上では常にはほぼ平衡状態にあると考えられるが、高度が低くなるにしたがって不平衡状態になる可能性は増大する。特に25km以下では光化学平衡は分布を決める要素とならず、オゾンは大気の運動に伴って移動する保存量と考えられる。即ちオゾンの混合比 μ は

運動中保存され、

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{\partial \mu}{\partial t} + u \frac{\partial \mu}{\partial x} + v \frac{\partial \mu}{\partial y} + w \frac{\partial \mu}{\partial z} = 0 \dots \dots (2)$$

が成立する。したがってオゾンの局地的な変動はその3次元分布と風の分布によって支配される。しかしながら保存量として扱えるのは25km以下の下部成層圏と上部対流圏であり、気温が高くしかも空気の濁っている下部対流圏ではオゾンは急速に破壊される。したがってオゾン層は垂直方向に3つに大別される。すなわち、光化学平衡を保っている30km以上の生成領域、生成も破壊も無視できる25~10kmの保護領域、破壊作用の卓越している地面付近の破壊領域である。これら3領域の境界の高さは季節により、又場所によって変動すると考えられる。又その境界によってはっきりと区分できるわけではなく、それぞれの領域の間には中間的な性質をもった層が存在していると考えられよう。

大気環流と関連して最も興味のある領域は下部成層圏に相当する保護領域であり、前に述べたようにこの領域内のオゾン量の垂直分布やその地理的分布と季節変化は空気の運動によって支配されている。即ち下部成層圏における平均的な風系の地理的、季節的な分布と大規模な水平混合、垂直混合の強さによってこの層内のオゾン分布が支配されている。さて、 u, v, w を平均流と乱流の和、 $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$ と考え、(2)式の平均をとると、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial t} = & - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial y} \right) - \bar{w} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} \right) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

となる。但し、 K_x, K_y, K_z はそれぞれ x, y, z 方向の渦動拡散係数である。水平方向の移流も混合もオゾンの変動に寄与するが、地球全体としてオゾンの source →

* Ozone in the Atmosphere (II)
 ** Yoshiro Sekiguchi 気象庁高層課

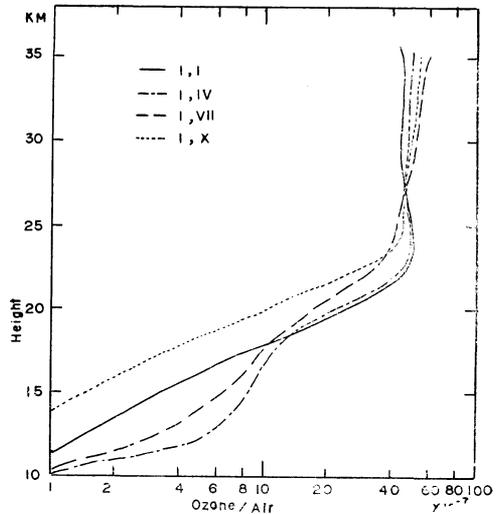
reservoir→sink の流れは本質的には鉛直方向の流れであり、まず水平方向の輸送は無視して考えよう。即ち、(3)式の水平移流と水平混合をゼロと仮定して、

$$\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial t} = -\bar{w} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(4)$$

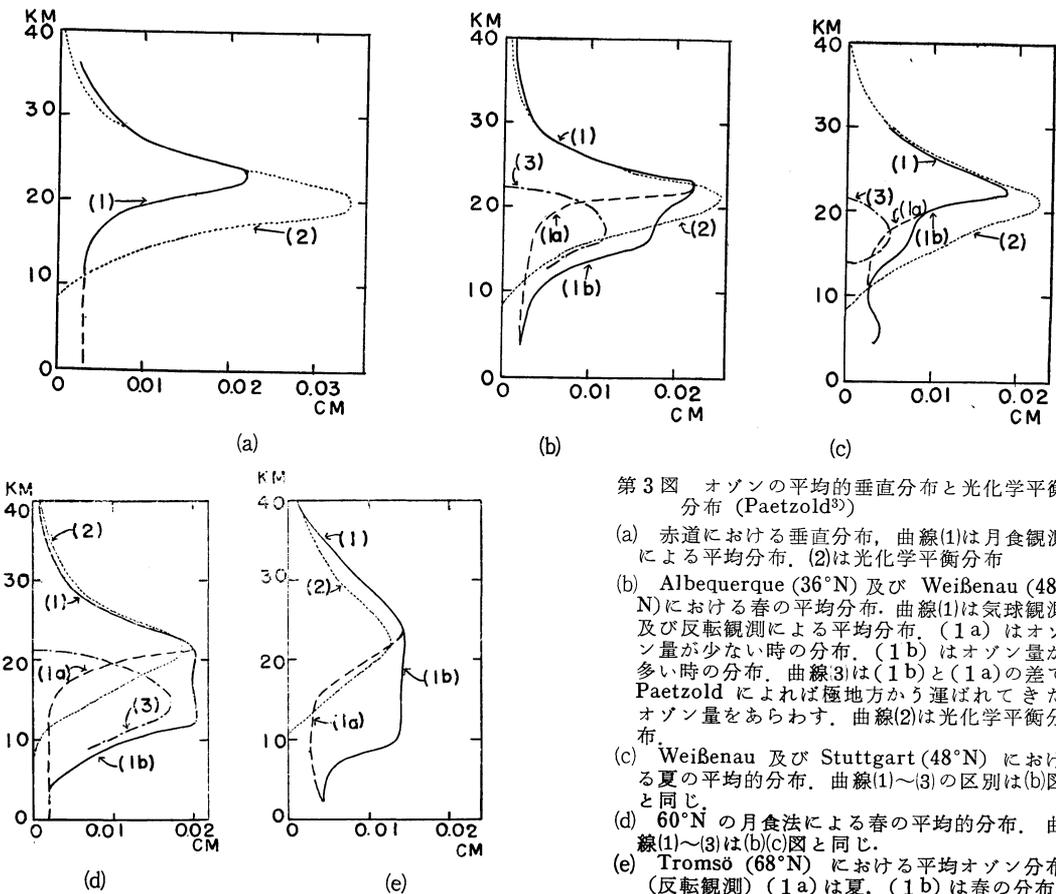
垂直方向の拡散係数の変化も無視すると

$$\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial t} = -\bar{w} \frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} + K_z \frac{\partial^2 \bar{\mu}}{\partial z^2} \dots\dots\dots(5)$$

オゾン混合比は観測結果からみると下部成層圏では高度と共に単調に増大し、30~35kmに極大があり、その上では単調に減少する(第2図)。従って(4)或は(5)の右辺第1項は下部成層圏では $\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial z} > 0$ であるから上昇気流では $\frac{\partial \bar{\mu}}{\partial t}$ に対し負の効果、下降気流では正の効果がある。一方、第2図からわかるように約23km以下では $\log \mu \sim z$ であるから、 $\frac{\partial^2 \bar{\mu}}{\partial z^2} > 0$ であり、常に上方から下方への渦動拡散により混合比が増大することを示している。25km以上では $\frac{\partial^2 \bar{\mu}}{\partial z^2}$ は小さくなる。



第2図 オゾン混合比の高度分布 (Paetzold²⁾)
20km以下の混合比は春に最も多く、秋に最も少ない。



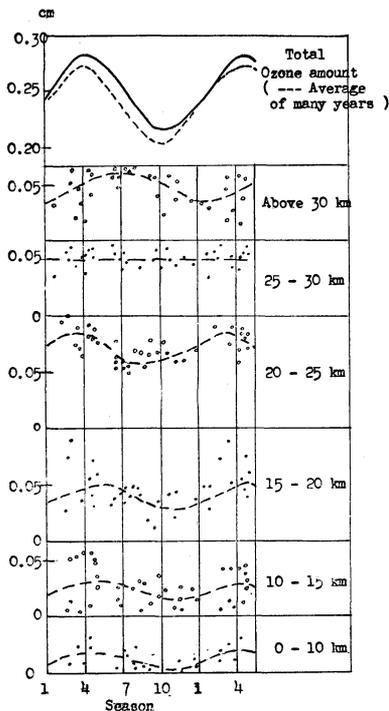
第3図 オゾンの平均的垂直分布と光化学平衡分布 (Paetzold²⁾)
(a) 赤道における垂直分布、曲線(1)は月食観測による平均分布、(2)は光化学平衡分布
(b) Albuquerque (36°N) 及び Weißenau (48°N) における春の平均分布、曲線(1)は気球観測及び反転観測による平均分布、(1a)はオゾン量が少ない時の分布、(1b)はオゾン量が多い時の分布、曲線(3)は(1b)と(1a)の差で Paetzold によれば極地方から運ばれてきたオゾン量をあらわす、曲線(2)は光化学平衡分布
(c) Weißenau 及び Stuttgart (48°N) における夏の平均的分布、曲線(1)~(3)の区別は(b)図と同じ
(d) 60°N の月食法による春の平均的分布、曲線(1)~(3)は(b)(c)図と同じ
(e) Tromsø (68°N) における平均オゾン分布 (反転観測) (1a)は夏、(1b)は春の分布。

第3図に Paetzold³⁾が各緯度における季節別のオゾン濃度 (cm/km) の平均的な垂直分布を測定結果から求めたものを示してある。(オゾン混合比は(2)~(5)式により分布の変化を計算する時には便利であるが、その他の場合には濃度であらわすのが普通である。) 同図(a)~(e)にはそれぞれの緯度の各季節における光化学平衡分布 (Paetzold³⁾の計算による)を比較のために示してある。実測による平均分布と光化学平衡分布は各緯度とも極大層の約23kmより上でよく一致している。特に低緯度ほどよく一致している。一方23kmより下層では両者は非常に違い違っており、下部成層圏では光化学平衡が成り立っていないことを示している。

光化学平衡が分布を支配しているのはいわゆる「半減期」 τ が比較的短い30km以上と考えられるが、Paetzoldの比較によれば、23kmから30kmにおいても非常によく一致している。光化学平衡分布の計算は必ずしも妥当な値を示しているとは限らないが、一応正しいものとして考えると、次のように解釈できる。

第3図の20~30kmの各緯度の各季節における分布を比較すると殆んど同じである。したがって、この層内では光化学分布の南北差や季節差が小さく大気環流による再分布の効果が少ないと考えられる。このことは Paetzold⁴⁾が Weißenau において行なった連続観測から求めた高度別オゾン濃度の年変化を示した第4図をみると一層よくわかる。すなわち同図の25~30kmにおけるオゾン量は系統的な年変化を示しておらず、生成領域の中間的性質を示している。

23km以下の保護領域の各緯度の平均分布は各季節とも光化学平衡値よりも少なく、その差は低緯度程、又夏ほど大きい(第3図)。Paetzoldの計算によると地球上に平均0.35cmの厚さのオゾン層が光化学作用によってできるはずだが、実測では0.2cmの厚さしかない。(1957年以降オゾン吸収係数が新しく定められ、その吸収係数を使った観測値は従来の観測値の約1.36倍になる。従って Paetzoldの推定はその分だけ補正しなければならず、又光化学分布の計算も変わるはずである。) 若し実際にこれだけの違いがあるとすれば、破壊領域におけるオゾンの破壊は生成領域における生成より多く、その差が保護領域において生成されていることを意味する。この問題を定量的に取り扱うためには世界的規模の精密な測定と正確な光化学分布の計算が必要である。しかしながら、保護領域のオゾン分布やその変動を取り扱



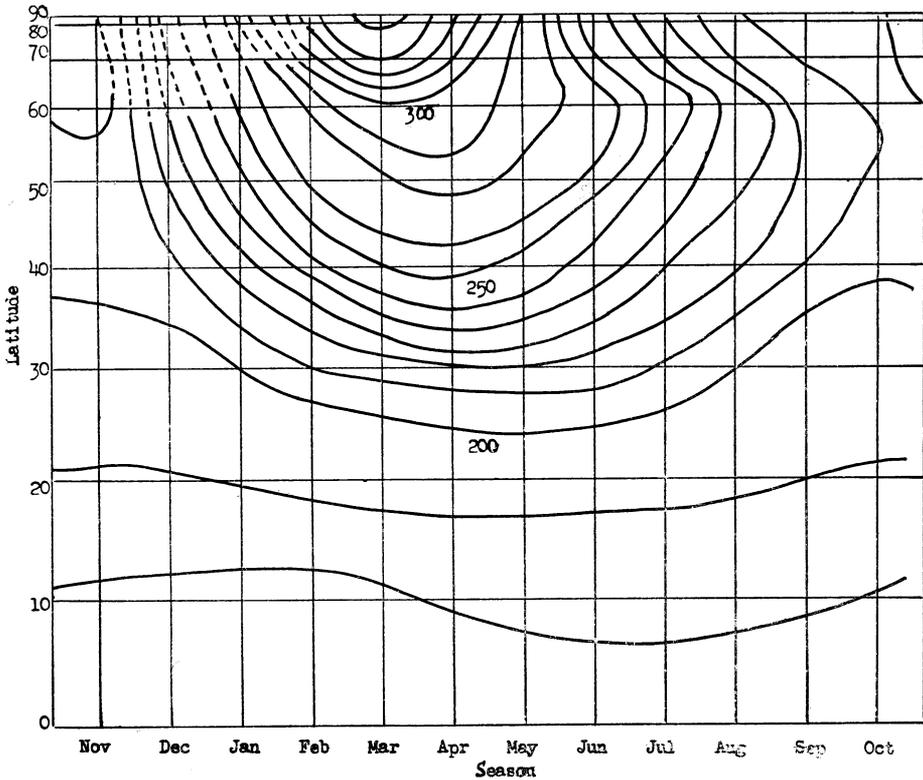
第4図 Weißenauにおける高度別オゾン量の年変化 (Paetzold⁴⁾)

うには $\frac{d\bar{\mu}}{dt} = 0$ の仮定に従っても充分定量的な議論は可能のはずである。

2. 緯度分布と季節変化

光化学分布との比較はさておいて、第3図の23km以下のオゾン量の平均的分布をみると、赤道では四季を通じて保護領域内で非常に少なく、緯度が高くなるにつれて増大する。又季節的にみると低緯度を除いて冬から春には保護領域のオゾン量は多く、夏から秋には少ない。一方オゾン全量季節変化や緯度分布は Normand⁵⁾によれば第5図のようになっている。即ち、一般的に高緯度程オゾン量は多く、又高緯度では早春に極大、秋に極小となる。この季節変化の位相は低緯度では四季の変化に近くなり、赤道では太陽高度の高い夏至の頃に極大。逆に冬至の頃は極小を示す。従って、中高緯度のオゾン全量の変動と保護領域内のオゾン量の変動は一致しており、オゾン全量の分布、変動を支配しているのは保護領域内に貯えられているオゾン量の増減である。

Paetzold³⁾は保護領域内では極地方を除いて光化学平衡に較べてオゾンが少ないのは乱流拡散によって対流圏下部(破壊領域)に運び去られるためであり、特に低緯



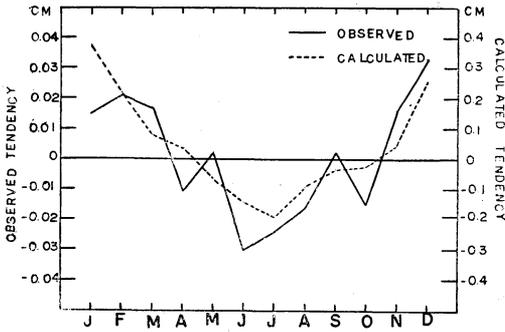
第5図 北半球におけるオゾン全量 (Normand⁵⁾) 縦軸は緯度のsine, 横軸は季節。

度程圏界面が高く拡散が20km以上まで盛んに行なわれるため高緯度よりこの傾向が大きいと主張している。従って第3図の各図の平均的分布は(1)―(1a)の鋭い極大層を持つ分布曲線が極地方を除いては標準的分布であり、(1)―(1b)の中の広い極大層をもつ分布は極地方のオゾン濃度の高い空気が流れ込んだ時におこる現象であると説明している(3)で示す曲線が(1b)と(1a)の差で流入量を示す。極地方では春は常に(1b)なる分布であり、これは下降気流によって生成領域から運ばれたものであり、夏(或は秋)には(1a)で示す分布となっている。従って、極地方以外では春以外には(1b)のような分布のおこる可能性は少ない。以上がPaetzoldの説であるが、Brewer⁶⁾は低緯度では成層圏下部には上昇気流があり、保護領域内のオゾンを生成領域内へ逆輸送し、生成領域における平衡値を越えたオゾンが破壊され、拡散作用で下方に輸送されるのを妨げるために保護領域のオゾンが少なく、高緯度では逆に下降気流が卓越しているために生成領域から保護領域に運ばれて貯えられるためにオゾンが多いと説明する。それ故Brewerの

説に従えば中高緯度では第3図の(1)―(1b)の分布が標準とみなされよう。

PaetzoldとBrewerの主張は前者が拡散はオゾンを減少させる役割りを果し、その大小によってオゾン緯度分布が決定されていると説き、上昇下降運動は平均的にみて極地方を除いてはあり得ないと考えているが、後者は拡散は保護領域のオゾン量を増大させるがその作用は本質的でなく、特に赤道地帯では対流圏への拡散は考えられず、上昇下降運動がオゾンの平均的緯度分布を支配するとして全く両者は正反対の推論を行なっているが一体何れが真実に近いのであろうか。

筆者⁷⁾が日本のオゾン観測と風の観測を使って100~200mbの上昇下降連運動によるオゾンの季節変化を調べた結果によれば、冬から春には下降運動が卓越して、オゾンは増大し、夏から秋にかけては上昇運動が卓越して減少する。実際の季節変化との比較は第6図に示しているように計算と実測は定性的にはかなりよく一致している。(計算値の方が実測よりかなり大きい値になるのはモデルが不完全なためと思われる。)又、下降運動は冬



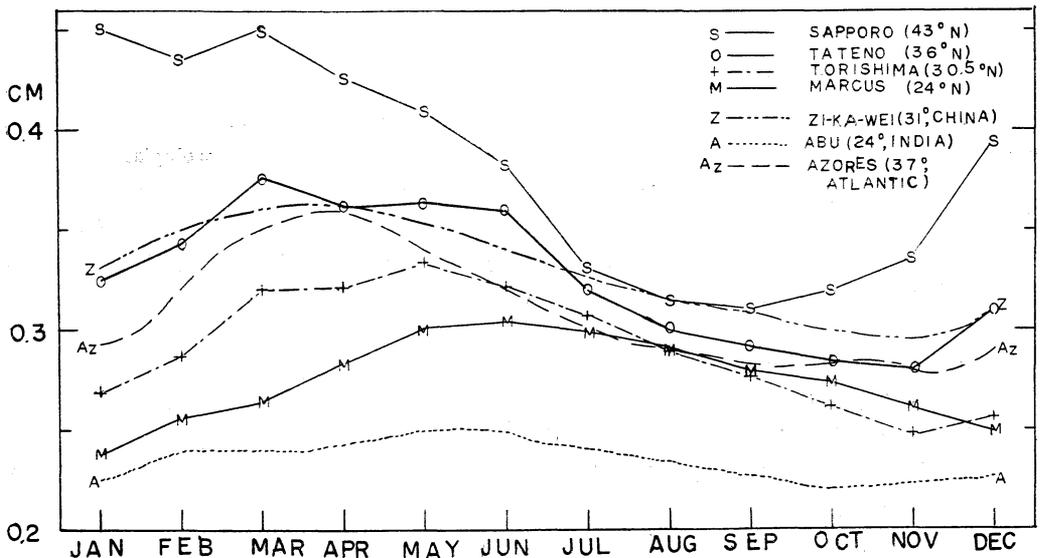
第6図 館野における季節変化の実測と計算の比較(関7⁷⁾). 計算は月平均垂直流による1月間の変化量, 実測は月平均の変化量. 計算値が実測の約10倍となっている.

から春にかけて高緯度程大きく, 上昇運動は夏にはそれ程緯度による差がみられない. この結果からみて, 筆者は Brewer の説を支持したい.

一方移流がオゾンの分布やその変動に与える影響も無視してはならないが, 移流だけを単独に取りだしてその効果を考えることはあまり意味がなく, これに伴う垂直運動の性質を調べることが必要であろう. 例えば上層の trough 内部にはオゾンが多く, ridge ではオゾンが少な

いことは多くの統計調査の結果が示しているが, 一方ではオゾンは高緯度に多いという事実がある. 今までの研究の多くは北からの移流によってオゾンは増大することを示しているが, これは ridge から trough への流れでオゾンが増加することを意味し, この間に下降気流によるオゾンの増加がなければならないことを意味している. Martin⁸⁾⁹⁾ や筆者¹⁰⁾ の調査によれば逆に南からの移流の時にオゾンが増加している. このように相反する統計結果を得ることは移流に伴う垂直運動と上層気圧場や jet stream の位置とその強弱の関係等を充分に解明していないためではなかろうか. この観点から Ramanathan¹¹⁾ のように meridional circulation とそれに伴う垂直運動だけでオゾン分布やその変動を説明するのは古典的なにおいが強く, zonal circulation による移流と垂直輸送を考えていく必要があろう.

第7図には日本の IGY 期間中のオゾンの季節変化をヨーロッパ, インドの資料と比較して示したものであるが, 冬や春に日本や中国ではインドやヨーロッパに較べてかなりオゾンが多いことを示している. これは日本付近は冬から春に定常的に上層の強い trough の前面にあり, 世界で最も jet stream が強まる所に位置していることによると思われるが, zonal circulation の重要性を示す一例と考えられよう.



第7図 日本のオゾン全量の季節変化(1958, 59年の平均)と他の地域の季節変化の比較(外国の観測値は1.36倍して, 新吸収係数による日本の観測値と比較). Tateno と同緯度の Azores, Marcus と同緯度の Abu はかなりオゾン量が少ない. 更に中国の Zi-ka-wei は同緯度の Torishima よりかなり多い.

結 語

オゾンの緯度分布や季節変化と大気環流の関係については決定的な結論を得るには至っていない。ここに紹介した議論は何れもその一面をとらえているにすぎず、I GY 以後の豊富な観測資料による研究の発展が大いに期待される。この小文においては筆者の私見がかなり含まれており、或は少なからぬ誤りを犯かしているかもしれないが、今後のオゾン研究の一つの立場を示したものと了解していただければ幸である。

尚、季節変化や緯度分布に重要な要素と考えられる polar night と極地方の循環の問題には触れなかったが、これも今後の問題の一つであろう。更にオゾン層の熱経済は長期予報とも関連して大切な問題であるが紙面の関係で割愛する。

文 献

- 1) Dütsch, H.U. 1946: Photochemische Theorie des atmosphärischen Ozons unter Berücksichtigung von Nichtgleichgewichtszuständen und Luftbewegungen. Doctoral Dissertation, University of Zürich.
- 2) Paetzold, H.K. 1957: Zur Analyse von Atmosphärischen Transportvorgängen durch Variationen des Ozons, Ann. Met., 8.
- 3) Paetzold, H.K. 1953: The mean vertical ozone distribution resulting from the photochemical equilibrium, turbulence and currents of air, J. Atmosph. Terr. Phys. 3, 125-131.
- 4) Paetzold, H.K., 1955: New experimental and theoretical investigations on the atmospheric ozone layer, J. Atmosph. Terr. Phys. 7, 128.
- 5) Normand, C.W.B. 1954: Sci. Proc. Inter. Assoc. Met, Rome.
- 6) Brewer, A.W. 1960: The transfer of atmospheric ozone into the troposphere, Planetary Circulation Project, M.I.T.
- 7) Sckiguchi, Y. 1960: オゾン量の季節変化の計算, (未印刷) 気象学会総会.
- 8) Martin, D.W. 1958: Contributions to the study of atmospheric ozone Studies of the Atmospheric General Circulation II, M.I.T.
- 9) Martin, D.W. & A.W. Brewer: A synoptic study of day-to-day changes of ozone over the British Isles, Q.J.R.M.S. 85, 393.
- 10) Sekiguchi, Y. 1960: オゾン量の変動を利用した高層解析 (未印刷) 気象学会総会.
- 11) Ramanathan, K.R. 1954: Atmospheric ozone and the general circulation of the atmosphere, Sci. Proc. Inter. Assoc. Met, Rome.

気象の英語 (28)

有住 直介

30. often と frequently, sometimes と occasionally など

回数 の程度を示す副詞は沢山あるが、その主なものをひんばんに順から並べると

(1) always, generally, usually, (2) often, frequently, (3) sometimes, occasionally, now and then, at times, (4) rarely, seldom, hardly ever, scarcely ever, never

(1) **always** は「何時も」= at all times, throughout all time, **generally** は「大概」= for the most part, in the majority of cases, **usually** は「通常」= practically always の意。

(2) **often** も **frequently** も「しばしば」と訳されるが、often の方は、規則的にあるいは意識的に行なって繰返す時に使い、frequently の方は、不規則にあるいは偶然にくり返される場合に使うことが多い。たとえば、

I **often** go to the observatory, and **frequently** met the young meteorologist there.

(3) sometimes, occasionally, at times, now and then 等は大体同じ意味で「時々、時折」。しかし、**sometimes** と **occasionally** との間にも違いがある。

sometimes は文字通り at some times の意味で、C. O.D. の例では It is sometimes hot and sometimes cold. = 時にはあつく、時には寒い

I have sometimes thought it. = (いつもではないが)、時には考えたことがある。

これに対して occasionally は not regularly or frequently (規則的でない、ひんばんではない) の意味である。したがって、たとえば

晴れ時々くもり = fair, occasionally cloudy

くもり時々晴れ = cloudy, occasionally fair

のような例では、sometimes は使えない。

(235頁につづく)

「天気」 7. 8.