

## 成層圏気象に関するシンポジウム\*

昭和40年度春季大会において成層圏気象のシンポジウムを開いたが、時間の関係で十分な討論ができなかつた。一方、成層圏気象は世界各国とも強い関心を示し、対流圏気象との関連、オゾン分布との関連、長期予報への応用など急速に開発されつつある。そこで、秋季大会において、より深い討論を進め将来の進むべき途を明白化する目的をもつて再びとり上げた。今回は成層圏の突然温暖化を中心としたシノプティックな解析を杉本豊氏に、また、成層圏循環に関連させたオゾンの話を関口理郎氏にお願いして話題を提供していただいた。

司会は北岡博士にお願いして、いろいろお骨折りいただいたが、急用のため当日になつて和田博士にかわつていただいた。誌上を借りて厚く感謝いたします。

また、討論のとりまとめについては、気象庁高層課の中村繁氏、八木正充氏、長期予報管理官室の渡辺正雄氏久保田効氏にお願いした、今迄になく要領よくまとめていただけたのは、4氏の並々なぬ御努力によるもので、厚く感謝いたします。(講演企画委員会)

### 冬季末における成層圏昇温の 綜観解析

杉本 豊\*\*

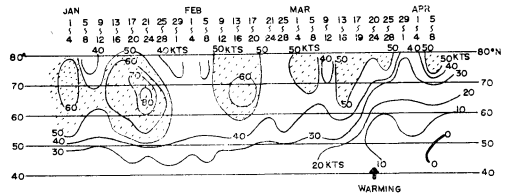
1952年 Scherhag により発見されたベルリン昇温はその規模の壮さが対流圏の場合に比して一桁大きかったため多くの人の注意がこの面に向けられ、その後Teweles および Finger (1958), Godson と Lee (1958), Craig と Hering (1959), Boville (1960) 等によって相次いでその他の年の成層圏昇温の解析が行われた。成層圏における現象は途中に介在する圏界面によりそれよりも下層の波長の短い波をすべて消し超長波の波だけが残存する。超長波の波はひとつは北極寒気に伴う非常に脊の高い寒冷渦であり、今ひとつはアリューシャンおよび大西洋の亜熱帯高気圧である。このように成層圏の波は非常に単純な型を示すので、たとえば寒冷渦の形成される時期およびその発現の場所からその年の寒候期の気温の予想が長期的に予想出来る可能性が存在する。寒冷渦の崩壊期にともなう成層圏の異常昇温が例年より早く起きたかあるいはおくらせて起きたかによりその年の暖候期の予想も相当程度可能となつて来た。

以上の可能性を証明するには成層圏と対流圏の間にある相互関係がさらに深く解明されなければならないが、現在迄のわれわれの経験的知識のみを以つてしても成層圏の現象は対流圏とは全く無関係ではないようでかなり多くの人によつても証明されている。

\* Symposium on Meteorology of Stratospherere.

\*\* Yutaka Sugimoto, 東京航空気象台.

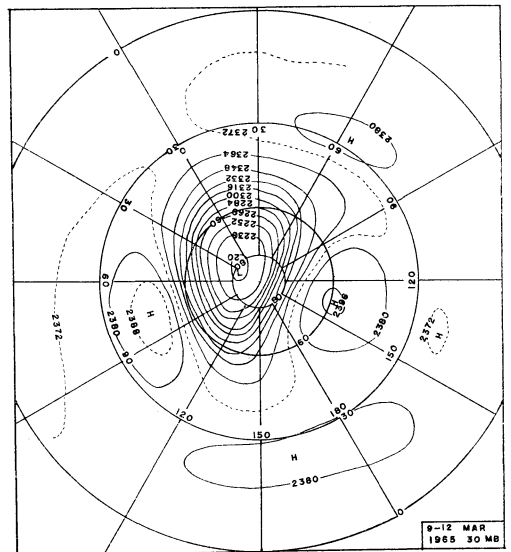
—1965年1月20日受理—



ISOPLETHS OF ZONAL WIND (KNOTS) AT THE 30MB, JANUARY TO APRIL, 1964

第1図 1964年1月より4月に至る30mb面上の半球を一周する带状風速(単位ノット)

以上のようなわけでここでは1964年と1965年の二年間われわれの解析的調査から得られた冬季末に起きる成層



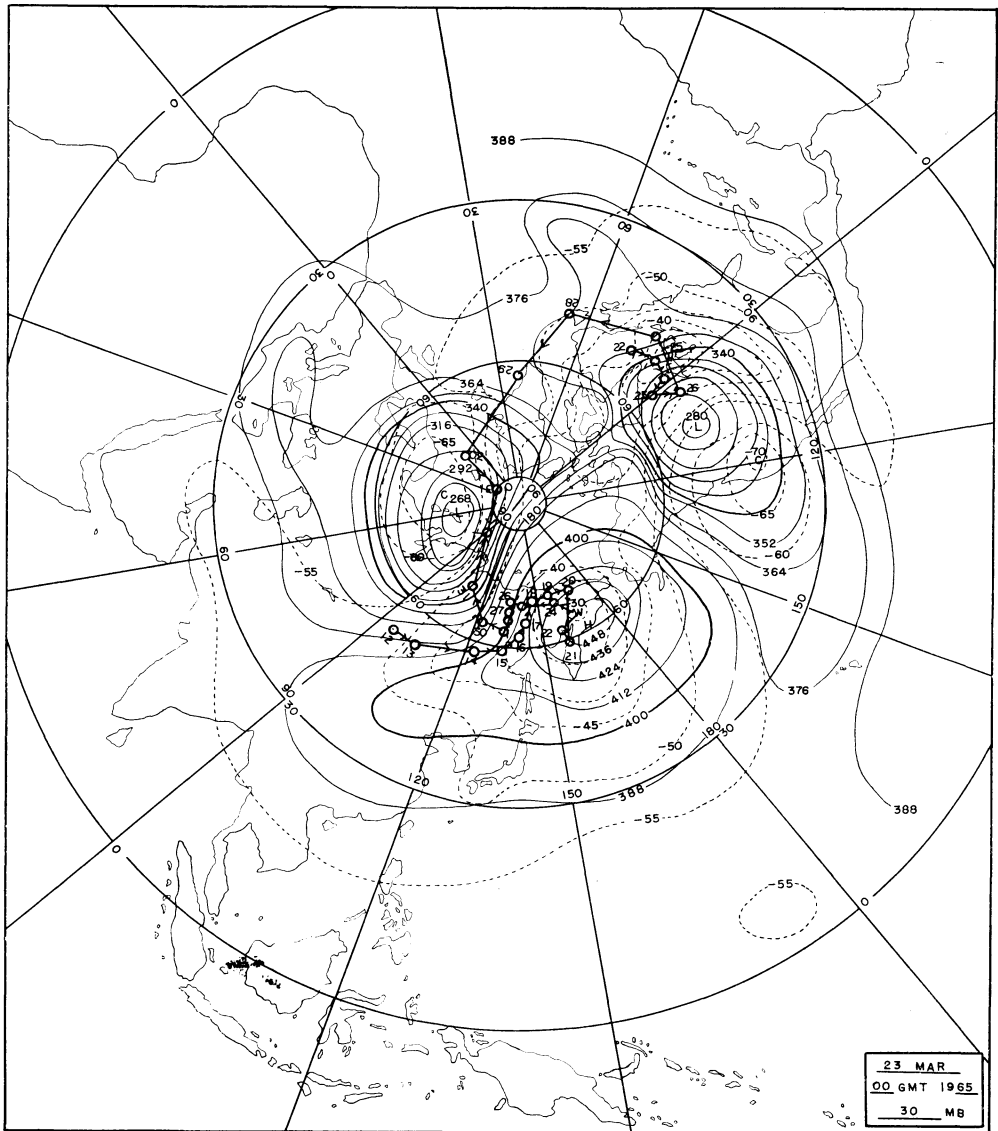
第2図 1965年3月9日より12日に至る4日平均の30mb等圧面天気図

圏の昇温が如何なる機構により生じたかをのべたい。

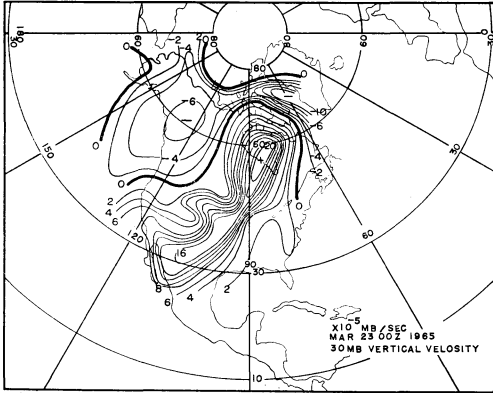
1) Zonal Index の変化

第1図は1965年1月より同4月に至る30mb面の帯状風速の変化を示している。同図より帯状風速は約20日～25日の周期をもって強化され、その間に数回指数がかなり弱くなる時期が存在している。3月20日頃より北緯40度から70度にかけて指数は急速に小さくなっているがこの時が丁度成層圏における最終昇温期に対応している。

第2図は最終昇温が起きる寸前の3月9日より同12日に至る4日平均の30mb等圧面天気図であり、第3図は昇温期に当る3月23日の30mb天気図を示している。第2図と第3図を比較すると20日以降アリューシャン高気圧の発達にともない極低気圧は完全に二つの低圧部に切離され、アメリカ大陸中部に南下して来た極寒気に伴う低気圧の東側象限においてはげしい下降流に伴う昇温を引き起している。この時の米大陸上の30mb面の下降流を断熱の式



第3図 1965年3月23日 00GMT 30mb 等圧面天気図 (等圧面高度は2万位省略)



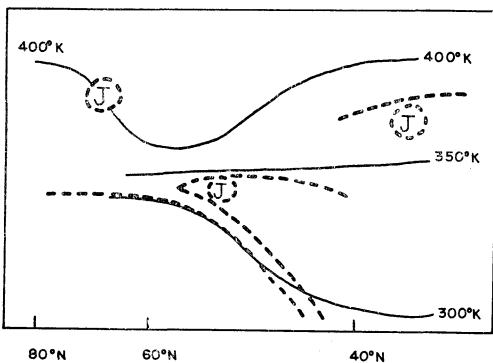
第4図 断熱法で計算した 30mb 面の  $\omega$  (単位は  $10^{-5}$ mb/sec 図)

$$\omega_{ad} = \frac{\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V}\nabla T}{\frac{RT}{C_p P} - \frac{\partial T}{\partial P}}$$

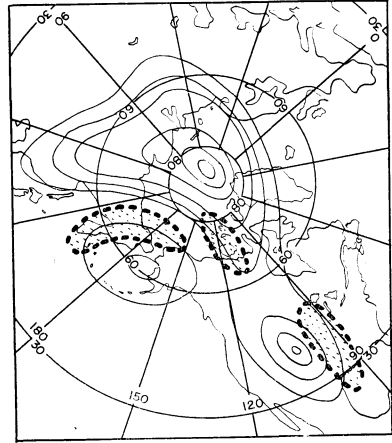
を用いて計算すると第4図のようになり第3図と対照してみると低気圧の東側象限で最大  $20 \times 10^{-5}$ mb/sec (約 4 cm/sec) の下降流が、また低気圧の後面で  $-6 \times 10^{-5}$  mb/sec 位の上昇流が卓越しており、低気圧の位置と鉛直流の分布の関係を考えると間接循環を形成していることがわかる。

一般に冬季における南北断面は第5図のように考えられ成層圏では北緯60度付近の Warm Belt を境にして北側では北風は下降流、南風は上昇流、Belt の南側では南風が下降流、北風が上昇流に対応すると考えてよいので 30mb 面における昇温域は、

- 1) Warm belt の南側に位置する高気圧の西側象限



第5図 冬季における南北断面模図、実線は400°K, 350°K, 300°K 等温位面を、破線は前線面圏界を示す。



第6図 30mb 等圧面高度分布(実線)上で主として観測される昇温域を示す(破線)

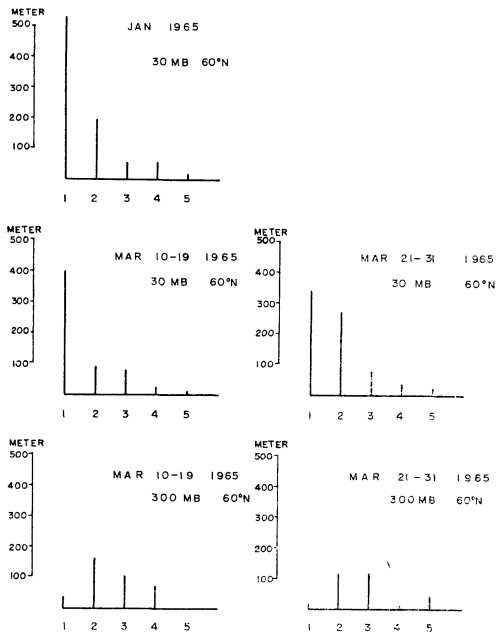
- 2) Warm belt のはるか北に位置する polar Night vortex 後面の北風の部分
- 3) Polar vortex に伴う寒気の out-break による中緯度に位置する分離低気圧の東側の南風が卓越する象限

の三つの地域に主として観測されることになる。以上を模図で示すと第6図のようになる。

成層圏では一般に風の鉛直シアが負 ( $\frac{\partial V}{\partial P} > 0$ ) であるから谷の東側では上昇速度  $\omega > 0$ 、谷の西側で  $\omega < 0$  となり、対流圏の場合の東側で  $\omega < 0$ 、西側で  $\omega > 0$  とは全く逆の分布をすることになる。ところが成層圏においても第6図に示す極圏に近い場所では polar night の影響で上昇流の分布は対流圏の場合く同一の循環型を示す部分が存在する。

## 2) 波数の変化

1)でのべた総観気圧配置でわかるように真冬の状態は極のどちらかに片寄って低気圧が位置し、極夜低気圧に伴う低温域も年によりアジア側に片寄ったり、アメリカ側に片寄ったりする傾向を有している。(図省略)とにかく真冬の間は高緯度域では波数1が卓越するであろうことが想像される。第7図は1965年1月について緯度60度に沿う 30mb 面の等圧高度の調和解析を行ったもので、計算の都合で波数5までのものについて各々振巾を求めた。その結果は想像される通り波数1が最も卓越し、振巾は520メートルを示し、波数3以上の波はほとんど考えなくてもよいことを示している。つぎに最終昇温が始まった3月について同様な調和解析を行ったがこ



第7図 上段 1965年1月の30mb面波数分析. 単位は振巾をメートルで示す.  
 中段 1965年3月の昇温が開始される前と後の30mb面波数分析  
 下段 中段と同じ300mb面の波数分析

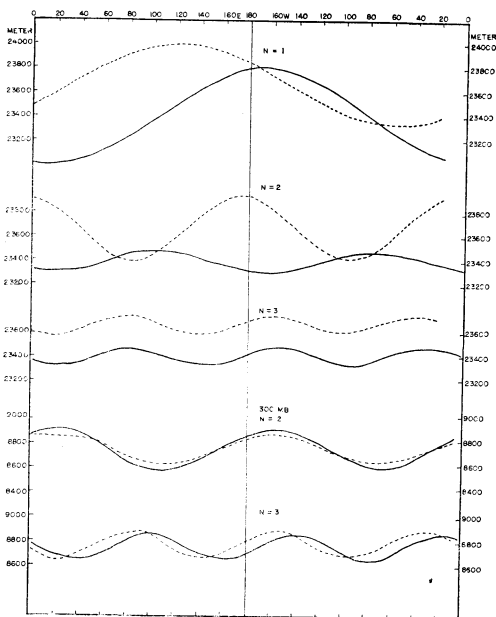
ここでは昇温開始以前と昇温が始まった後の期間に分けて計算を行った結果は第7図の中段に示してあるように昇温開始以前の状態ではまだ波数1が卓越し、波数2以下の振巾は非常に小さいが昇温開始とともに波数1の振巾は減少し波数2の振巾が顕著に増加している。同時に波数3の波は昇温の前後を通じてほとんど変化なく昇温に関係するものは波数1と2の変化のみであることがわかる。

以上を対流圏の状態と対比するため同じ期間の300mb等圧面高度の調和解析を行うと(第7図下段)昇温以後波数2の振巾が減じて波数3の波の振巾が増加することがわかる。以上の結果を用いて各成分波の位相角の関係を見るためにプロットされたのが第8図である。

第8図より波数2の波の変動が最も大きく昇温開始以前にアリューシャン付近(180度E)の30mbの谷の部分が峯になり、300mb面の波数2の峯との間に経度にして約20度の位相差が鉛直方向に見出される。

以上の現象から昇温を引き起す原因のひとつとして峯の鉛直方向の傾きが考えられる。

顕熱の南北方向の輸送量の緯度平均値を〔 〕で、\*



第8図 昇温開始期の前と後における30mb面上の波数1, 2および3の振巾と位相の比較

で緯度平均値よりの編差を示すものとする、

$$[Tv] = [T][v] + [T^*v^*] \text{ であるが地衡風を考えると, } [v] = 0 \text{ で}$$

$[Tv] = [T^*v^*]$  となり、さらに等圧面高度が緯度圏に沿って simple harmonic な分布をしていると仮定すると、気温  $T$  および風速の南北成分  $v$  および等圧面高度は

$$Z = A_1 + A_2 \cos \frac{2\pi}{L}(x-x')$$

$$T = -g \frac{P}{R} \frac{\partial z}{\partial p} = -g \frac{P}{R} \left[ \frac{\partial A_1}{\partial p} + \frac{\partial A_2}{\partial p} \cos \frac{2\pi}{L}(x-x') + A_2 \frac{2\pi}{L} \frac{\partial x'}{\partial p} \sin \frac{2\pi}{L}(x-x') \right]$$

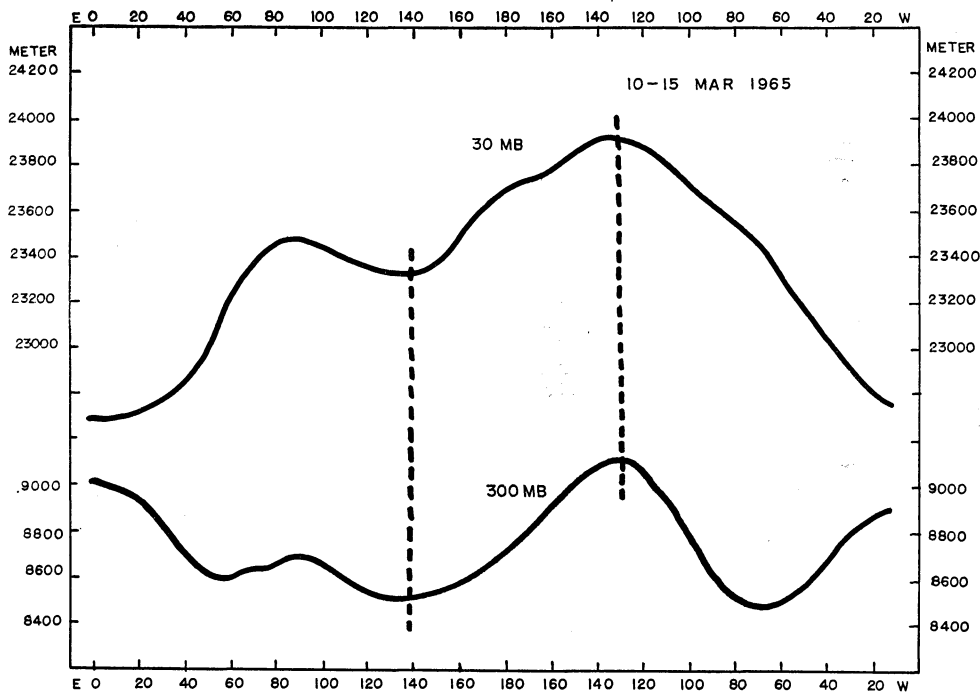
$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial z}{\partial x} = -\frac{g}{f} A_2 \frac{2\pi}{L} \sin \frac{2\pi}{L}(x-x')$$

であるから、

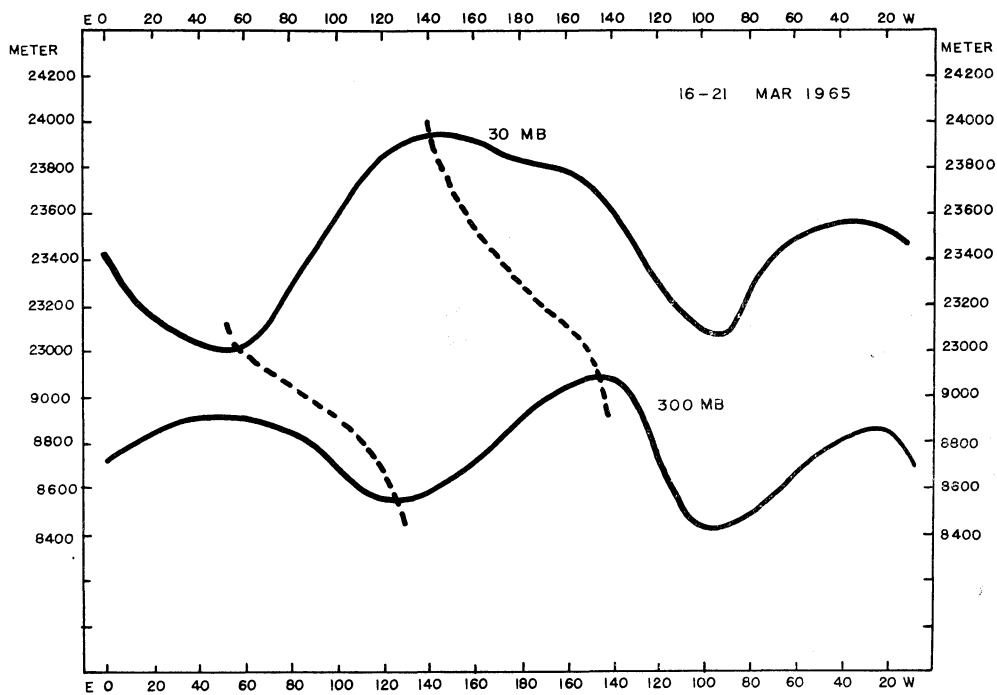
$$[T^*v^*] = [Tv] = \frac{1}{2} \frac{P}{Rf} \left( g A_2 \frac{2\pi}{L} \right)^2 \frac{\partial x'}{\partial p} = \frac{P}{2R} f [v_2] \frac{\partial x'}{\partial p} \text{ (} x' \text{ は等圧面高度による位相角)}$$

となり、谷または峯の発達には位相のずれと風速の南分の二乗に比例することがわかる。

第9a図は成層圏の昇温が起きる以前の北緯60度線に沿う300mbおよび30mb面の等圧面高度の分布を示しているが大西洋地域を除いて対流圏と成層圏の等圧面高



第9 a 図 昇温開始以前に当る1965年3月10日から15日までの300mbと30mb面の60°Nに沿う高度分布図



第9 b 図 昇温開始直後に当る1965年3月16日から21日までの300mbと30mb面の60°Nに沿う高度分布図

度の位相はほとんど一致している。しかるに昇温が始まるとともに位相のづれがおき、とくにアリューションの高気圧は 300mb 面ではその位置がほとんど変化していないのに反し、30mb 面においては西方にその位置がづれ両者の等気面の間の位相がかなり大きくなっている状態がよくわかる。(第9b図)それとともに風速の南分の緯度平均値  $[V^2]$  の値は16日頃より急速に増加している。(省略)

以上で示したごとく成層圏の気温の急変は baroclinity の増加で一応の説明は出来たが、しからば傾圧性の増加はなにによって生起するかを次に調べたが紙面の関係で図示出来ないが調査の結果得られた結論のみを示しておく。前にも示したように波数の小さい周極流が崩壊する過程においては常にアリューションおよび大西洋の高気圧の発達を伴っている。(たとえば、杉本豊: 1964年冬期末における成層圏の昇温について: 天気第11巻第11号参照) この場合上記亜熱帯高気圧の対流圏の部分に着目すると成層圏における高気圧の発達が開始される数日前に、すでに対流圏上部では高気圧の強まりと北上が開始されていることが解析的にたしかめられる。このような状態のもとでは対流圏上部より成層圏の下部において中緯度圏界面 (Middle latitude tropopause) の北上が同時に開始されるが中緯度圏界面は低温域 ( $-65^{\circ}\text{C}\sim -70^{\circ}\text{C}$ ) を伴っている。そのために成層圏の天気図上では対流圏の高気圧の発達により傾圧性が増加し、不安定化を引き起こすであろうことは推論することが出来る。

以上成層圏における諸問題のうち冬季末に起きる成層圏の異常昇温のみをとりあげて綜観解析のいくつかの結果を示した。

## 討 論

### (I) 成層圏の Synoptic process について

松野(東大) 成層圏の気温変化において、Sudden warming というような突然昇温がおこらないで徐々に変るといふことはないのか。

杉本 読んだ文献および経験した範囲内では sudden warming は冬の終り頃に現われ、強い時には  $10^{\circ}\text{C}/\text{day}$ 、弱い時で  $5^{\circ}/\text{day}$  ぐらいである。

松野(東大) Polar night vortex が崩れる現象と温度上昇の現象とが必ず伴うものであって、例えば渦の方は“比較的安定”であるけれども、温度の方だけが何処かで急にポット上昇するというたことか絶対に有り得な

いものか?

杉本 これに該当するものは、最終昇温が起る前の冬期の中間の状態であって全般的には Circular の循環が卓越している時である。このような循環場の時に大西洋、大平洋一部、たとえばアリューションの地域に亜熱帯高気圧が北上して突然昇温が起ることがある。しかしこのような場合は大きく場を崩すほどの“不安定化”は起らない。

松野(東大) Final warming 以外の突然昇温では循環の流れの場は余り変わらないで、温度だけが変わるということがあり得ると考えてよろしいですか。

杉本 そのような考え方でよろしいと思います。

和田 松野さんの最初の質問に関連すると思いますが現在手元にある成層圏の資料では、1953年だけが顕著な sudden warming が起らないで冬から夏に入っている。

主田(農技研) 杉本さんの話しは、final warming に“weight おいて”話されたものと解釈して良いか? 谷の鉛直方向のずれの現象は Final warming だけでなくその途中の Warming でも起るものなのか?

杉本 主として final warming に重きをおいて私は話しをした。しかし谷のずれの現象は final warming 以外の warming でも起り得る。

主田 その場合、次の warming になる前に、また warming が起る前の状態にもどるのか?

杉本 そうです。zonal index の変化図に示したように、12月に2回、1月以降3回このような zonal index の小さな状態が起っている。

主田 冬の間は何回か warming が起るときこれが final warming だということが判るか?

杉本 季節が終ったときに、結果論的にわかる。

和田 1955年の場合は1月に final warming が起っている。そのほかの年は2~3月である。1955年のような場合に、1月に起ったものが final warming だと判定するのはむづかしい問題である。

村上(気研) 今の軸の傾きに関係してだが、天気図上で実際に軸の傾きを見たことはないが、顕熱の輸送量を計算してみる。この量は軸の傾きに比例している。軸の傾きと波の振幅に関係する。それを見てみると、冬の間にも常に変動していて、その周期は2~3週間ていどだがその量は絶対にマイナスにはならない。この量は warming が起るとき (final warming も含むが) 非常に大きくなる。つまり軸の傾きも大きく傾く。なんで大きくなるかが問題である。

和田 30mb 面のデータは、かなりそろいつつあるが、まだ中共域は欠けている。

## (II) エネルギー論について

栗原(気研) 成層圏はオープンシステムであるから対流圏との相互作用が重要である。成層圏の冬のエネルギーバランスを調べる場合に、第1段階としては定常的なエネルギー収支、成層圏における運動エネルギーや位置のエネルギーがいかに補給され、いかに破壊されてバランスを保っているかということ調べるのが必要であるが、次の段階として、対流圏において秋から sudden warming が終るまでの間に A. P. E. が絶えず増加しつづけていくことに注目してよいと思う。対流圏ではバロクリニックな波がたえず熱を北に運んでいるか、太陽から供給される熱エネルギー分布が大気を不安定化しており、その不安定化作用の方がバロクリニック波による安定化作用にうちかって冬期の間 A. P. E. はずつと増加しつづける。統計を見ても実際の A. P. E. は sudden warming があるときまで増加しつづける。結果的に見ると 1度 warming があると、大気の A. P. E. は多少減る。それでまた、増加しはじめて、一応あるレベルに達すると warming が起る。final に warming があるとそれから以後は全体として A. P. E. が減っていく。これは instability という言葉が適当かどうか分らないが、A. P. E. にある限界というものがあそうなので注目してもいいのではないか。

成層圏については村上さんから話がありましたが、温度の勾配に反して低温のところから高温のところ熱が運ばれる。これは熱的にはバロクリニック波が不安定化を起している。この点是对流圏と逆、一方輻射の場合は安定化作用がある。成層圏自体で秋から sudden warming にかけて、エネルギー全体としての変動を見ることが必要ではないかと思う。

村上 解析によって最初に見出したのは Winston だと思ふ。彼は対流圏で zonal available energy が変動しながら冬中増加している。ある時期に達するとがたっと落ちる。南北の温度傾度が増加するので、それを解消しようとして、大きな顕熱が流れる。その時期に対流圏で blocking が起る。では成層圏では何か。成層圏では A. P. E. の定義がやっかいになる。

今極夜ジェット流に付ずいして A. P. E. をごういんに定義したとする。これは対流圏と同じように、一方的に増加するということは、polar night jet stream も

段々強くなることである。この温度傾度を解消するのが sudden warming である。そのような意味で対流圏の blocking と成層圏の sudden warming は同じ性質をもつ。温度傾度を解消する波も対流圏でも成層圏でも wave No. は 1~2 で同じである。それで熱を fix した議論はこのような process を説明するのに不十分ではないかという気がしている。

関口(高層) 南北の温度傾度がある値、critical value に達すると、sudden warming が起きてこの温度傾度を解消するというメカニズムは Hardley type の循環だと思ふ。成層圏ではこのような Hardley type の循環の不安定は存在し得たいと思ふが、

栗原(気研) 対流圏において available potential energy A が一方的に増大して、丁度成層圏で sudden warming が起きる時と同じ時期には A が減少しているということであって、available potential energy を成層圏自体で定義すると、一方的に増大するか又は減少するかは分らない。又、この循環が Hardley type であるかどうかは良く分らないが先程の blocking の話によってみてどうも Hadley type の循環ではないように思ふ。

駒林(名大) 1. 突然昇温とは逆の突然冷却という現象は存在し得ないのか。

2. 太陽や、外の星では1週間に100万度ぐらい変化するのは普通であるが、地球の温度変化の範囲を決める要因はなにか、

和田 突然昇温に対応するような突然冷却という現象は天気図を見た限りにおいては存在しない。

堀内(気象大) 2の質問に関して、地球大気の温度変化のスケールは対流圏においての慣行に基づいて調べると、電離層では温度変化は数 100°K/day である。

村上(気研) 温度変化の問題は良く分らないが、運動を支配する方程式によって大体決まるものだと思う。成層圏においては地衡風近似の方程式が成立する。このように地衡風近似が成立つ運動においては、温度変化は 1°C/day で、大きくて 5°C/day のオーダーである。ですから sudden warming はこのオーダーを超えるような温度変化が起きていることになる。

また秋口に突然冷却が起らないかという問題については、前にも言及したように突然昇温は  $A_2$  が極大値に達した時におこる、秋口には  $A_2$  が極値に達するようなことは起らない。

駒林(名大) 50°C/week という温度変化は如何なる

点において注目すべきものなのか？

村上(気研) zonal mean した気温の変化  $\partial \bar{T} / \partial t$  は一般には小さいものであるが, sudden warming の時には  $3^{\circ} \sim 4^{\circ} \text{C/day}$  の変化であって, 対流圏では絶対に見られない変化量であるという点において注目すべき点である。

次に, このように突然昇温の現象には波数 1 や波数 2 の波が関連して発生しているものだが, このような超長波の不安定化現象はこれまでの不安定性理論では説明されたいものでこの意味でも注目すべき性質のものである。

### (Ⅲ) Sudden Warming の原因論について

広田(東大) 松野さんと共同で計算した結果と, 杉本さんの話しに関連させて述べる。

対流圏のアリュウーシャン高気圧と成層圏の循環の pattern と関係があるというのは, 成層圏が, 地形の影響を受けていることを示すものであろう。秋から冬のはじめにかけての成層圏循環はこのような large scale の外力とバランスした quasi-steady な状態にあると考える。ところが冬の終りにかけて徐々に発達して来た long wave が, ある強い horizontal wind shear をもった結果, 初めてそこで instability が生ずるという立場で考える。つまり barotropic instability を単に Cicular なものというのではなく, long wave が発達した結果その非対称性によってそこに新たに生じたものとする。したがって, 地形の影響ということも関係して来るけれども, そのことを implicit に仮定して成層圏天気図 (50 mb) にあらわれた long wave pattern をベースにして, その上でじょう乱が barotropic 的に発達するかどうかをテストした。

1958年の例について計算した。これに基づいた結果では warming は 1月23日ごろ起きているが, この Sudden warming の 5日位前から instability がおきて barotropic なじょう乱が急激に発達している。アリュウーシャン高気圧に対応するところから高気圧がでて来て, polar vortex が分裂をする。解釈としては, 成層圏では, 安定度が非常に良いので, まず, barotropic instability によって polar vortex の分裂が起り, これに follow して温度場ができると考えれば杉本さんの話しの cut-off low と warming との関係も説明されよう。勿論非常に温度が上がった結果, 何にか再び baroclinic 的な mechanism が存在して来るかも知れませんが, これはさておいて——, 我々の計算の結果では, 所

謂 warming の前にすでに instability が生じているということを書いておきたい。

松野(東大) Barotropic 不安定によって起るものと考えられる。dynamic な warming の効果, adiabatic な compression による温度上昇を考えると  $\Delta p$  が同じならば容積が大きい程, 暖まり方が大きいわけである。一方村上さんのお話のような準地衡風の運動では  $\Delta p$  は水平発散と結びついているので高い所へ行っても気圧程極端なへり方はしない。「比較的一定に保たれる傾向があるので」その結果上層では暖まり方が大きいことになると推測される (elementary の考え方であるけれども)。

関口(高層) 1958年の場合も含めて, 多くの解析が sudden warming の直前に baroclinic な擾乱が発達し北向きの熱輸送が卓越していることを示している。しかしこれらの場合, zonal mean からの deviation をすべて擾乱として扱っている点が広田さんの取り扱いと異なる点であると思います。

和田 sudden warming が発見された当時においては原因は太陽活動にあるとされてかなり調らべられたが現在はこの sudden warming の原因論として太陽活動をもつて来るという考え方は下火になっている。このへんから意見を求めたいと思います。

栗原(気研) sudden warming の原因としての太陽活動と関連したものではないけれども, 温度の急激な上昇を何によって説明できるかと言うことを考えてみたい。horizontal advection では説明できない。どうしても垂直流を考慮しなければならない。杉本さんの解析の図から分るように実測の温度変化を断熱的に説明するにはかなり強い下降気流が必要であることが分る。 $\omega$  が負の値の時はあまり大きくないのに,  $\omega$  が正の値のとき非常に大きな値をとっている。下降気流の強さについては私は多少疑問を持つ。例えば下降気流がそんなに大きくなくとも, オゾンを増し, 水蒸気が減る。そのような吸収体の輸送による positive feed back を伴うことによって, さらに昇温を強めるようなメカニズムが考えられるのではないか。だから, 実際の下降速度は断熱法による見積りほど大きくはないのではないかということ, 関口さんのお話を楽しみにしています。

関原(気研) 質問ですが, sudden warming が上の方から先に起っていることをどうお考えですか。

堀内(気象大) 結論的にはよくわからないが, 現象は 40km 以下ではないかと思う。48km の天気図は sudd-



en warming のときに, normal からそう変っていないから。

松野(東大) 数学的にラフに考えて, Internal wave というものは, 上下方向の伝ばんについては, group velocity と phase velocity が逆向きの性質を持っていることがある。だからエネルギー的には下層が原因であっても, phase としては上から伝わって来るように見えることがあり得るという点が1つと, 上ほど密度が小さいから, 温度になおしたときの振巾が非常に大きくなる, つまり目立って見えるということを考えなければならぬと思う。

和田 いろいろ議論もあるでしょうが, オゾンのことも考えなければいけない。次の講演に昇温の原因も含まれているので, 次の講演に移りたいと思う。

## 成層圏循環とオゾン\*

関 口 理 郎\*\*

### 1. 成層圏気象におけるオゾンの役割

オゾンの生成・消滅は太陽放射の光化学作用が主な原因である。すなわち, オゾンは酸素分子による太陽外線吸収により生成される。一方, オゾンは太陽紫外線及び可視光線を吸収すると同時に, その光化学作用で破壊される。主としてこの2つの光化学作用 ( $O$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  間の再結合の反応も含む) が釣合った状態におけるオゾンの分布が光化学平衡分布である。

一方, オゾンに吸収された太陽放射のエネルギーは大気を加熱し, 成層圏の気温分布に大きな影響を与えている。しかし大気はオゾン(や水蒸気及び炭酸ガス)の赤外放射によって冷却, 加熱される。

ところが, オゾンと酸素原子の再結合の反応速度は気温に左右されるので, 成層圏の気温分布はオゾンの光化学平衡分布に影響を与えている。

また, 気温分布は気圧傾度を通じて大気の運動に関係している。逆に, 大気の運動は顕熱の輸送によって気温分布に影響を与える。

このように, 光化学作用・放射作用・大気の運動は直接・間接に関連している (Fig. 1)。しかし, これらの要素を包含して取り扱うのは非常に複雑であり, またそれぞれの問題の本質を見失う恐れがある。そのため, 従来

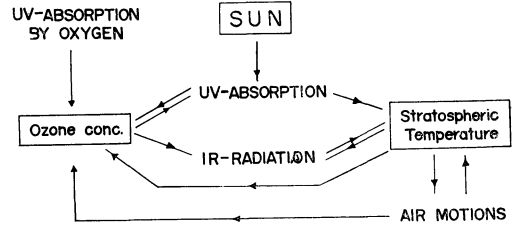


Fig. 1 成層圏におけるオゾン・気温・循環の相互関係を示す図 (Dütsch)

は光化学理論では気温分布を与え, 大気の運動はないものとして平衡分布を求めるし, 放射理論ではオゾン・水蒸気・炭酸ガスなどの分布 (実測値, または尤もらしい分布) を与えて, 放射平衡の温度分布を求めている。一方大気大循環を考える場合, 断熱過程の仮定を用いることが多く, また, オゾンを tracer として (光化学変化を無視して, 混合比が保存されると考える), その分布や変動から大気運動を追跡する方法も大気環流研究の有力な手段である。すなわち, (下部成層圏においては光化学反応の進行速度がきわめてゆっくりしているため) 大気の運動によって平衡分布から deviate したオゾンの分布は, 光化学の作用に影響されず, ほぼ大気循環によって支配されている。

このような方法で, それぞれの過程についての知識は増加したが, 実際の現象を定量的に扱うには, すべての過程を取り入れたモデルが必要である。最近の成層圏気象学では観測の質及び量の増加, 高速計算機の利用等によって, 光化学・放射・力学, あるいはそのうちの2つを同時に取り扱う方向に進んでいる。

### 2. オゾンの分布と成層圏循環

オゾンの光化学平衡分布 (3次元) と実際の分布を比べると, 全体的にその特徴が全く逆になっている。すなわち, 光化学理論による分布では,

- 1) 同じ緯度では夏の方が冬よりオゾン量が多く, その最大濃度の出現高度は低い。
- 2) 同じ季節では, 低緯度ほどオゾン量は多く, その最大濃度の高度も低い。

一方, 実際の分布をみると, オゾン量は高緯度ほど多く, 最大濃度の出現高度も光化学理論のそれよりかなり低く, しかも高緯度におけるほど低く, 絶対値も大きい。光化学分布と実測の比較はたとえば清水の総合報告<sup>2)</sup>の Fig. 4 に明瞭に示されている。Fig. 2 には実測の光化

\* Circulation in the Stratosphere and Ozone

\*\* Y. Sekiguchi, 気象庁観測部

1) 40km より上層では, ほぼ両者は一致している。

2) 大気オゾン; 天気, Vol. 12, 7, 8号

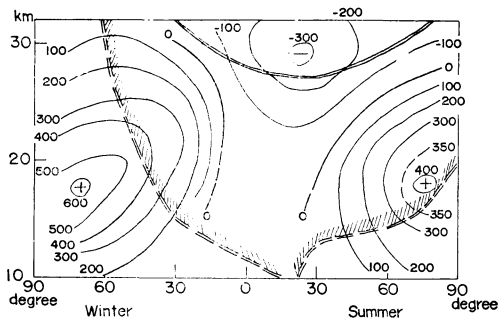


Fig. 2 オゾンゾンデの実測（アメリカ）と充化学理論分布の差，斜線の内測の領域で光化学作用によりオゾンは生成されている．単位は  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

学分布からの偏差の南北断面図を示してあるが，これだけの偏差は成層圏の大気の流れによって生じたものと考えられる．プラスの偏差の最大値は夏冬とも 20km 以下に現われ，特に冬季には光化学反応ではオゾンが生成されない領域に極値が現われている（偏差でなく，オゾン量そのものになるわけである）．逆にマイナスの偏差は赤道上空の 30 km を中心に，光化学理論で最もオゾン量の多い領域に現われている．図から分るように，オゾン生成領域（低緯度の中層成層圏）から，オゾンの保存領域（中高緯度の下部成層圏）へオゾンが輸送されていることを意味している．この事実は成層圏循環の研究に一つの有力な手掛りを提供している．Dobson & Brewer の平均子午面循環 model などはその例であるが，オゾ

ンを tracer としたこのような今までの model は近代的大気循環理論において重視されている eddy transport の役割を充分考慮に入れていない．また，気温分布をもとにして計算した Murgatroyd の子午面循環についても同様なことが言える．

London は擾乱効果として渦動拡散を考え，これに平子午面循環（Murgatroyd の値の 20%）を加え，光化学作用と力学過程を結合し，四季のオゾンの平衡分布を求めている．その結果はほぼ実際の分布と一致している．しかし成層圏における（擾乱による）顕熱の南北輸送  $\overline{V'T}$  は baroclinic wave の特性として北向きであることが多くの解析結果に示されている．下部成層圏ではオゾンの混合比の保存性は，温位の保存性より優れており，両者の鉛直傾度も同じセンスにあることから，オゾン量の eddy transport も北向きであると想像される．実際に Newell が計算した結果は第 1 表に示す通り，1 年中を通じて，オゾンの輸送は北向き (transient eddy も standing eddy も) である．そして，顕熱の場合と同様に，輸送方向は counter gradient であり，diffusion による輸送方向とは正反対である．この事実は成層圏の循環についての London のモデルが妥当でないことを示唆している．たゞ，Newell の結果によると日本付近では，南向きの輸送が卓越している<sup>1)</sup>．その原因は日本付近はオゾンの南北傾向が大きいことと考えられるが，実際の輸送機構として，渦動拡散が卓越し，baroclinic wave による北向き輸送を上廻るためと説明することも

第 1 表 オゾンの南北輸送 (Newell による)，北向き輸送を正とする．(単位は， $\text{cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ ) (カッコ内の数字は sample の数)

(a) transient eddy term

緯度	冬 (1957年10月~1958年3月) (1958年10月~1959年3月)	夏 (1958年4月~10月) (1959年4月~10月)	全年
0~30°N (50mb)	+0.74 (324)	+0.21 (555)	+0.40 (879)
30~60°N (100mb)	+2.37 (6302)	+0.77 (7780)	+1.49 (14082)
60~90°N (100mb)	+11.16 (769)	+2.50 (1804)	+5.09 (2573)
30°N~60°N 130°E~160°E	-4.2 (2790)	-2.1 (2065)	-3.2 (4855)

(b) standing eddy term

50°N	6.37	2.6	4.44
------	------	-----	------

1) 顕熱の輸送は南向きである．

できよう。しかし、渦動拡散の概念を成層圏の循環研究の導入することは力学機構の本質を究明する上には不向きであり、London らの行き方には賛成できない。いずれにしても、日本付近のこの特異性は注目すべき現象の1つとして、今後、解析すべき問題であるように思われる。

Mean Meridional Circulation Jan.1958(after K. Miyakoda)

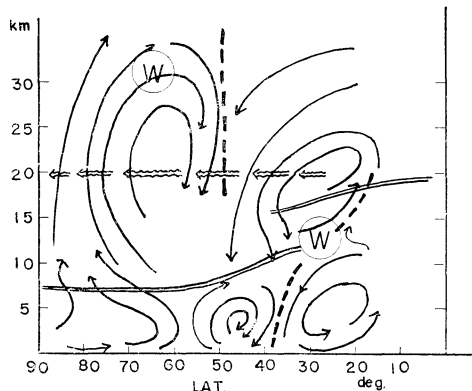


Fig. 3 1958年1月の平均子午面循環 (都田)

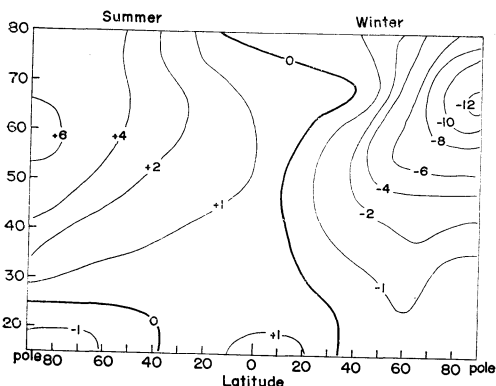


Fig. 4 成層圏における熱源の分布 (Goody と Murgatroyd) 1日の昇温率 °C/day で表わしてある

実際の冬季の成層圏の循環は都田の計算によると、Fig. 3 のように 2 cell の間接循環が卓越している。この profile を擾乱効果を見放した Dobson のモデルや Murgatroyd の計算結果と比べると、かなり本質的な差がみられる。オゾン tracer をして成層圏循環の研究を行なうことは有力な手段であるが、さらに力学的機構と密着した方向に進むことが望ましい。

3. 成層圏の気温とその変動

成層圏の heat source の分布は Fig. 4 (Goody &

Murgatroyd) のようになっている。すなわち、25km 以下の下部成層圏では赤道を中心に緯度 30~40° に熱源、極地方に冷源がある。25km 以上の中層及び上部成層圏では夏の極地方を中心とする熱源と冬の極地方を中心とする冷源がある。これを気温の南北傾度と較べてみると冬半球の下部成層圏では、warm belt 以南、南極まで気温傾度が熱冷源の分布と逆になっている。これは力学的機構、すなわち、Fig. 3 の午面循環にみられるように、北緯 50° あたりの下降気流や北向き熱輸送 (図のゾグザグ矢印) が気温分布に重要な役割を果していることを示唆している。(cooling rate の極値は下部成層圏の warm belt の位置、約 60°N にあり、輻射過程では warm belt の形成は説明できない。) warm belt 以北では、気温傾度は熱冷源の分布と定性的には一致するが、北向き熱輸送が気温傾度を弱めていると考えられる。

輻射平衡気温分布は Manabe ら (1964) の詳しい計算があり、これを実測と比較すると、冬季、上部成層圏における気温傾度 (低緯度で高温) は実測値よりずっと大きい。これは冬季の上部成層圏の極地方では、輻射平衡の状態になく、低緯度地方からの熱輸送が卓越していることを示している。また、下部成層圏の冬季の warm belt によって代表される中緯度の高温域も輻射からは説明できない。このような相違の原因として、Manabe らは

- (1) 子午面循環
- (2) 大規模な擾乱による熱の垂直輸送
- (3) 大規模な擾乱による熱の水平輸送 (counter gradient)

の効果が無視されているためと推論し、成層圏の気温分布に対する力学的機構の重要性を強調している。

Manabe らの論文では、予め吸収物質の分布を与えて輻射平衡温度分布を計算し、かなり実際の分布に近いものを得ているが、一方かなり重要な点で実際の分布とくい違っている。その原因は上述の通り、大気運動の無視によるものと思われる。一方、Lindsen や Leovy は独立にそれぞれ光化学-輻射平衡気温分布を計算しているが、その結果を実測や Manabe らの結果と共に Fig. 5 に示してある。Lindsen は CO<sub>2</sub> の効果を 1 次式で近似しているが、その cooling rate は 30km では両者はほぼ一致するが、30km 以下では大きすぎ、30km 以上では逆に小さすぎる。この結果、Manabe らの計算結果 (図の M & S のカーブ) と比べると、Lindsen の計算

第2表 光化学、輻射過程の time scale の高度分布 (Lindren の論文の資料から計算)

km	$B \text{ sec}^{-1}$	$a \text{ sec}^{-1}$	$\eta \text{ deg sec}^{-1}$	$C \text{ sec}^{-1} \text{ deg}^{-1}$	$\sqrt{aB+\eta C} \text{ sec}^{-1}$	$2\pi \cdot (aB+\eta C)^{-\frac{1}{2}}$
20	$10^{-10}$	$5 \times 10^{-7}$	4.5	$10^{-17}$	$9.8 \times 10^{-8}$	745 days
25	$10^{-7}$	$5 \times 10^{-7}$	4.5	$2.5 \times 10^{-14}$	$4.0 \times 10^{-7}$	180
30	$2 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	6	$10^{-12}$	$2.6 \times 10^{-6}$	27
40	$10^{-4}$	$7 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^2$	$10^{-11}$	$5.5 \times 10^{-5}$	1.3
50	$3 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^2$	$2 \times 10^{11}$	$10^{-4}$	0.7
60	$10^{-10}$	$7 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^2$	$2 \times 10^{-11}$	$10^{-4}$	0.7

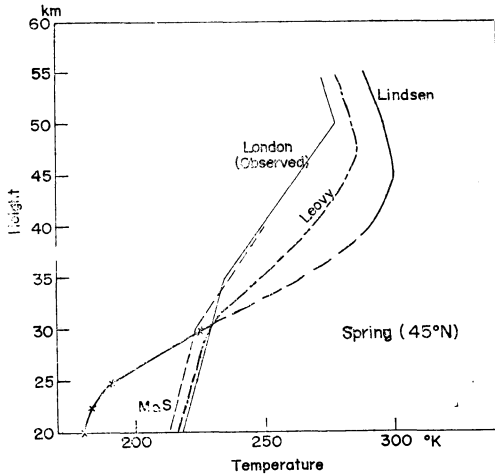


Fig. 5 気温の実測垂直分布と計算結果の比較

は 30km 以上の気温は高温になり、30km 以下で非常に低温になっている。また、水蒸気の cooling effect (上層ほど大きい) を無視したことも上部成層圏での気温を高くしている原因と思われる。Leovy は  $\text{CO}_2$  の効果について近似を良くしているため、30km 以下では比較の実測とよく一致しているが、それより上では、やはりかなり高温になっている。その原因は  $\text{H}_2\text{O}$  の効果を無視したためと思われる。

このように、光化学—輻射理論はまだ不完全であり、成層圏の気温分布を定量的に説明するまでに至っていない<sup>2)</sup>。また、Manabe らのように、一部大気運動 (対流圏の convection) と光化学理論 (吸収物質の 3 次元分

- 1) 討論の際、片山から指摘されたように、光化学的オゾン分布を用いているので、実際の heating より少ないものを入れていることになり、これも 30km 以下の低温の原因の 1 つと考えられる。
- 2) 水平方向の気温分布をみると (たとえば Leovy),  $\text{CO}_2$  や  $\text{H}_2\text{O}$  の取り扱いの不充分さ以外に、大気運動を無視したための本質的な欠陥があらわれている。

布として) の結果を取り入れたものも完全には温度場を説明できない。しかし、これらの結果から、今後の方向として、成層圏の循環を取り扱うには、光化学・輻射・温度場・大気運動を同時に取り入れたモデルの必要性が指摘されよう。

Lindsen らはこのような model による成層圏の研究を目指して精力的な研究を行っている。第 1 段階として光化学—輻射非平衡温度場の計算を行ない、non-dynamic な効果がどのように温度場に影響を与えるか、またその結果として、突然昇温や 26ヶ月周期の trigger action になり得る要因が存在するかどうかを追求している。

光化学と輻射を結合すると、平衡状態からのオゾンの偏差 ( $\phi'$ ) と気温の偏差 ( $T'$ ) についての方程式は、

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} = -CT' - B\phi' \quad (1)$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} = \eta\phi' - aT' \quad (2)$$

となる。 $\text{O}_3 + \text{O} \rightarrow 2\text{O}_2$  の反応は気温が高くなると促進され ( $CT'$ )、また  $\text{O}_3$  が増加すれば反応回数が増加する ( $B\phi'$ ) ため、 $\text{O}_3$  の破壊率 ( $-\frac{d\phi'}{dt}$ ) が大きくなることを表わしたのが (1) 式である。一方、気温が上ると、放射冷却により cooling が大きくなり ( $-aT'$ )、オゾンが増すと紫外線の吸収により気温が上る ( $\eta\phi'$ ) ことを表わしたのが (2) 式である。(1), (2) から  $\phi'$  を消去すると、

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial t^2} + (a+B) \frac{\partial}{\partial t} + (aB+\eta C) \right] T' = 0 \quad (3)$$

となり、温度場の変動の time scale は  $(aB+\eta C)^{-\frac{1}{2}}$  である。 $a, B, \eta, C$  の値は光化学理論や輻射理論によって与えられる常数 (高度の関数) であり、第 2 表のようになる。表には time scale や共振周期  $\tau = 2\pi(aB+\eta C)^{-\frac{1}{2}}$  も同時に示してある。 $B, \eta$  は太陽輻射 (反射成分も含む) を含んでいるので、もし輻射量に周期  $\tau$  のような変動があると、これが (3) 式の右辺に外力の形

## 討 論

## (1) 光化学放射過程と力学過程を結びつける方法としての Lindzen Leovy's model の妥当性および possibility について

高橋(気研) オゾンと温度との関係で起る coupling の27日週期は太陽活動のほうからも言えそうだが、26か月週期のほうは太陽活動に結びつきそうにない。そういう意味で27日週期のほうが大きくてもよさそうに思うが、

関口(気象庁) はっきりしたことは判っていないが、26か月週期は30km付近で振幅が最大であるが、30km付近ではそのような強制振動を起させるような「刺激」がなく、むしろそれより低い20km付近にあるということが一つの議論の点になると思う。

広田(東大) オゾンの photochemical な理論式より出した値と実測とのずれを general circulation 的なもので説明されたが量的にあっているか、また成層圏の夏の meridional circulation はまだ確立されていないと思うが、オゾンのほうからいえば anomaly は量的にはともかく夏も冬も同じく極で一番大きい。このようなことから逆にオゾンの分布から夏の成層圏子午面循環についてどのようなものが期待されるか。

関口 London 等の行った計算結果はそのモデルの妥当性はともかくとして実測分布とよく一致している。実際に計算したのは London だけだと思う。また energy flow 等が夏冬同じであることから、経験的には夏冬とも定性的に同じような circulation が期待される。

堀内(気象大) オゾンの緯度分布の実測値は冬も夏も高緯度に max があり特に冬は夏より大きいがこの差をどう考えるか。

関口 何らかの形で輸送が盛んなのであろう。それが平均的な meridional circulation によるのか eddy transport かははっきりしないが、eddy による counter gradient の輸送が卓越しているのだと思う。すなわち baroclinic な wave が卓越しているのだろう。また春は冬よりさらに deviation が大きい。

関原(気研) オゾンと温度の関係で起る coupling の週期の問題であるが、雲の albedo と関連させての着想は非常におもしろい。問題となるのは可視域の Chappuis band や Hartley band の光であるが、この領域では27日週期のほうも考えられないと思う。もしそういう

ではいるため、 $T'$  (同時に  $\phi'$ ) の変動の振巾が増大することになる。表の値から、20km あたりに2年周期を起させる共振周期、30km あたりに約1ヶ月の共振周期(突然昇温の time scale と同程度)が存在する。Lindzen によると、このような外力作用として紫外部の輻射( $O_2$  や  $O_3$  の吸収帯)は約12%変動して温度場に $2^\circ C$ の変動を起させる程度であり<sup>2)</sup>、trigger となる可能性が少ない、しかし、可視部の輻射に約5%の変動があると、約 $2^\circ C$ の振巾の温度変動が生ずる可能性があり、trigger となりうる」と主張している。若し、低緯度における cloud cover が26ヶ月周期で変動すれば、albedo の変化から、この程度の visible light の fluctuation を起す可能性があり、成層圏の気温場、それに伴う風の場の26ヶ月周期変動の原因となり得るというわけである。一方、冬季高緯度における cloud cover はかなり特徴的な分布をしており、海洋上に雲量が多く、zonal wave number 2 の pattern が卓越している。このような cloud cover の anomaly は成層圏や中間圏の気温の anomaly と対応がつくので、その pattern が変ると可視光線強度が成層圏で30%程度の変化を起す可能性があり、突然昇温の trigger として充分の大きさであるという。

このような光化学—輻射理論による26ヶ月変動や突然昇温の trigger 作用は一つの可能性ではあるが、問題がないわけではない。26ヶ月周期についていえば、はたして、cloud cover に26ヶ月前後の周期の変動があるかということ、Lindzen の model では26ヶ月周期が卓越する高度は約20kmであるが<sup>3)</sup>、実際の振巾は30kmより上で極大となり、位相的には上から下へと伝播している。突然昇温については、太陽輻射を trigger とする Wexler の説が否定的となり、力学的原因が有力であったが、決定的な説明がなされていない現在、Lindzen の説も興味深い。今後この方面の研究が理論と解析の両面から行なわれることが望まれるわけである。

- 1) 高緯度では、 $B$  や  $\eta$  が小さくなり、time scale は伸びるので、 $\tau=30$  日程度の共振周期はもっと高々度に現われるはずである。
- 2) (3) 式からは  $O_2$  の吸収帯に相当する紫外線の変動効果ははいつてこない。しかし、形としては(3)式に外力の形ではいる。
- 3) Lindzen は asymptotic な振巾として ( $a > \tau^{-1} > B$ )、30km あたりで気温変動が極大となるため、26ヶ月周期の trigger として有力としているが、このような asymptotic な周期は30km あたりには適用できないので、疑問である。

週期があるとするともっと短波長の紫外線や X-ray の領域だと思う。だから Lindzen の考えるような process だけでなく酸素原子が増すとか D-layer の問題との関連になってくる。

片山(気研) Lindzen や Leovy のモデルは非常に興味がある。第一近似として妥当なものであり将来進むべき方向を指示しているものと思う。ところで気象関係者は下部成層圏に関心をもっているが、その場合むつかしい問題が入ってくる。というのは対流圏からの反射による可視部の radiation は雲の状態によって相当変動し、しかもそれが下部成層圏の放射収支にかなりの影響を与えることが二、三の研究で認められている。このような対流圏との interaction を無視して下部成層圏の放射に関連したことを解決することは無理と思われ、海と空気の interaction と同じく、かなり大変な仕事となるだろう。

駒林(名古屋大) オゾンの生成には必ず紫外線を考えなくてはならないか、また polar night には紫外線はないか。ロケット観測では X-ray は低緯度より北極の方に多いが。

関口 オゾンの生成には必ず紫外線による photochemical な process が考えられている。そのほかに地上付近の生成源などもあるがオーダーはずっと小さい。

関原(気研) オゾンができるには酸素原子ができてオゾンによる。そういう意味では X-ray オゾンをつくる能力があるが問題は量であり 50km 以上では X-ray も考慮しなくてはならない。また問題となる Hartley band の紫外線は polar night にはほとんどないと思う。

高橋(名古屋大) オゾンが X-ray や紫外線を吸収して activate されることはないか。そしてそういうことがあるとすると突然昇温の原因として、冬、高緯度ある下層のオゾンが春先に太陽 energy を吸収して一度に activate され energy をたくわえるということも考えられると思うが、

関原 問題はオゾンが光を吸収してどうなるかということであるが、 $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ なる反応が考えられる。activate されていくらか寿命をもっているものもあるだろうが、すぐに分解してしまう方が main な process と思われる。

高橋(名大) 一度短い波長を吸収してそのあとで energy にかえる mechanism も考えられるし、photochemical な process のみを考えるのはどうかと思うが、

堀内 X-ray でオゾンを分解する作用はあるだろうか

紫外線の作用のほうはるかに大きい。X-ray の場合でも一度 ionize してそして recombination する時にオゾンができる。夜間の紫外線もいくらかあるがそれはライマン  $\alpha$  という line に集中していて大体夜間は昼間の 1/100 ぐらいである。ライマン  $\alpha$  はほとんど D 層で吸収されるので 30~40km 付近では X-ray に限定される。

もちろん X-ray は夜も存在する。また X-ray は 27 日週期をもつかも知れない、というのは X-ray は太陽爆発つまり flare に伴って強いものが来るからでその場所は太陽活動の 27 日週期に拘束される。しかし強い X-ray あるいは  $\gamma$ -ray を出すような非常に大きな disturbance は 27 日はあまり続かず短期間のものが多いので直接 27 日週期に関係があるかどうかわからない。

関口 関連することだが、太陽紫外線が吸収されるという process において、もちろん光化学反応にも紫外線の energy は使われるが平衡状態においてはこのような energy は recombination によって生じてくる energy とキャンセルして全 energy が熱にかかわると考えられる。非平衡状態の場合についても、Lindzen が estimate したところでは光化反応に使われる energy は全体として negligible であって太陽紫外線の大部分の energy は熱にかかわることである。

## (2) perturbation eq. と突然昇温の引き金作用の可能性

堀内 はじめはオゾンが引き金作用をなすと考えていたが、オゾンの変動は殆んど 20km 付近で、ここで dynamic に変動しても吸収は僅かなのでオゾン効果は小さいと考えている。

磁気嵐がおこりオーロラが出現した時に突昇温がおこり、その時にたまたま人工衛星による観測が得られた。それによると particle flux が地球に突入した場所つまりオーロラの強かったところの近くで昇温がおきているようなので、上の方と関連があるかも知れないが力学的な寄与も大いにあるだろう。

関原 Lindzen の論文に関連して、オゾンが雲からの反射光(主として可視光線)を受けて分解し、加熱をおこし影響を及ぼすのですが、突然昇温がある一定の場所に起りやすいということと関係がありそうだ。つまり対流圏の雲が生じやすい場所にオゾンの加熱の光が多いだろうということがいえよう。

関口 最近の Lindzen の論文によると、50°N 以北の雲の分布が平均的に大陸上で少なく、アリューシャン

や北大西洋で多いところがあり、そのため雲量が突然昇温とあるマッチした週期で変化すると（可視部の約35%位の部分か変化する可能性がある）引き金作用として突然昇温を起させる可能性がある。

駒林 オゾンの eddy transport と水蒸気のそれとの関連はどうか。

栗原 これまでに行なわれた解析やモデル実験では、成層圏では熱とオゾンの eddy transport は counter gradient である。米気象局で行なわれている水蒸気を入れた大循環の数値実験によると下部成層圏では 60° 付近で mixing ratio が極大で低緯度は少なく、eddy  $q'v'$  を計算すると北から南へ向う。すなわち gradient の向きになるという結果がでている。

関口 水蒸気の source が下にあって、上昇流との関連がオゾンと逆になっているということになるか。

栗原 水蒸気のもとはもちろん地面にしかない。成層圏で予想されることは下降流に伴って温度は上り、水蒸気は少くなることで、 $T'v'$  と  $q'v'$  に逆のことがでもよいように思われる。

### (3) 成層圏における Large-scale motion と mixing phenomena の取扱いについて

和田 日本付近の北向きのオゾンの説明に大規模な eddy diffusion の考え方をを使って説明したが若干問題があるようですが。

関口 日本付近だけでオゾンの transient eddy flux が負になり、sensitive heat については正になることの解釈として、日本付近ではオゾンの南北傾度が大きいため eddy diffusion の効果が baroclinic wave による counter gradient transport より卓越している可能性があると考えられる。 $\frac{dp_3}{dt}=0$  ( $p_3$ : オゾン分圧) に風速の南北成分を掛け、covariance を取って簡単化すると trough-ridge system に付随する垂直流の効果(counter-gradient transport) と  $\bar{p}_3$  の南北傾度に比例する拡散項に分けられる。1,000km程度運動して混合すると仮定すると ( $y$  方向),  $\sqrt{v'^2}=10\text{m/sec}$  として、 $V_y=$

$L\sqrt{v'^2} \approx 10^{10} \text{ cm/sec}$  となる。日本付近の  $\frac{\partial \bar{p}_3}{\partial y}$  の実際の値を入れると、counter gradient transport と同じかそれより大きな値となる。

小倉(東大) 混合理論はそもそも mixing length が一般の場の特徴的な長さに較べて非常に小さいという仮定の上に立っている。結局それは  $y$  で展開して  $y$  の一次までで止めるということがあって、その場合 1,000 軒もった場合にはそれでよいかどうかよくわからない。

関口 これは advection からゆけば一番単純なわけで、時間的平均をとると、この混合距離 ( $L$ ) をどの程度にとるかが問題になる。観測では24時間間隔にとっているから  $L$  として非常に大きなスチールのものを選んでよいと考えたわけです。

和田 突然昇温が一定の場所におこるといふことについて雲の分布が考えられるとの話がありましたが、これに関連して他に。

広田 成層圏の Long-wave のパターンが対流圏の地形の影響で生成され、その break down が突然昇温に関係があると考えると場所が一定しているのは地形によるものともいえる。もちろん単に山の影響ということだけではなく海陸分布による熱のパターンをも含めてのことである。南半球では一例ではあるが南米の方にパターンが移動したものがあつた。これは地形によるものかはわからないが、南極のようにホモジニアスの場合、つまり北半球にくらべて、地形が circular な分布をしている場合はランダムに発生するものかどうかは非常に興味あることなので、観測結果を期待している。

和田 北半球でも北米大陸や欧亜大陸に寒気を中心に移動するということから地形の影響の可能性も大きい。

成層圏の問題は気象学的には根本的な問題であり、その応用面でも長期予報などにとり入れられるようになって来た。しかし少しずつは分ってはきたが、まだ未解決の問題ばかりです。

今回の討論では特にオゾンの問題が加わって大へん参考になり、有益なシンポジウムであった。