

# 太陽活動と中層大気の力学過程とその関係に関する研究

—1996年度日本気象学会賞受賞記念講演—

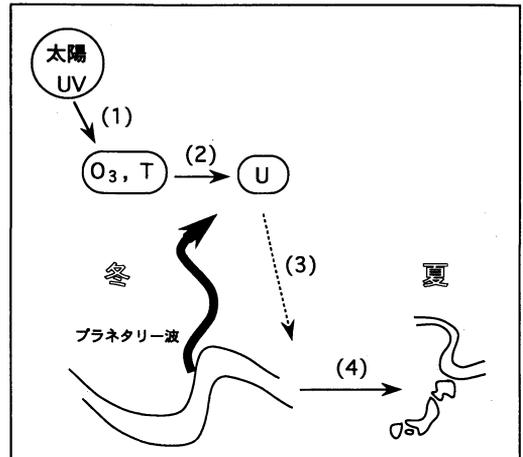
小 寺 邦 彦\*

## 1. はじめに

思いがけず日本気象学会賞をいただき、どうもありがとうございました。思いがけないという理由の1つは、後でより詳しく示しますが、第1図に見られるように、私の研究対象は、「太陽活動の気象・気候への影響」というつかみどころのないものだったからです。このような研究は未完のまま終わる可能性が大きいのですが、その途中の一部のプロセスの研究について賞をいただいたからです。

私が「太陽活動の気象・気候への影響」の研究を始めたのは、「気象庁の研究所」である気象研究所の「宇宙線の研究室」にいたからと言えるでしょう。とにかく何かしら、「宇宙とか太陽」と「気象・気候」の関係を研究しなければならないような立場でした。この分野は、古くから人々の興味をそそっているものなのですが、実体があるものやらどうやら、「超科学」と呼ぶ人もいるくらいです。でも、「とにかく、何かしないと」と「太陽活動」と「気象・気候」の関係の、一特に我々とも関連の深い「東北冷害」との関係に留意しつつ—研究を始めたわけです。東北冷害と太陽活動の関係についての議論は、明治以来行われているようであり、日本の長期予報の原点でもあるという事です。

太陽活動の変化というと約11年の太陽黒点周期があります。これと、地上の気温、降水等との関係は古くから調べられてきましたが結局、これといったものはないようです。ところで、太陽活動の変化とはいったい何の変化なのか？太陽から放射される全エネルギーの変化、つまり太陽定数の変化ととらえる人が多いとおもいます。しかし、エネルギーは小さいけれど紫外線が変化すると、化学反応を通しオゾンの濃度を変化



第1図 太陽紫外線の変動が対流圏の気象・気候に影響を及ぼす機構の概念図。

させ、ひいては成層圏の気温を変える事も予想されます。また太陽風の変化や惑星空間磁場の変化を通しての宇宙線の変化等他にも色々あります。また、これらが気候に及ぼす影響も、雲物理や、雷の電場や様々な過程を通じての可能性が議論されています。どの説にも一長一短が有り、(というより短ばかりとも見える)、始めからどれか1つの説を選ぶというのは難しいものです。

従って、私の場合、どれも片っ端からやって見たという事です。けっこう時間がかかるもので、あれもやり、これもやっているうちに7、8年が過ぎ、その頃からここで話をする「太陽紫外線(UV)」の変化に基づくシナリオを調べ始めました。そして今日までこの「シナリオ」を捨て去る理由もなく、それに従って調べていくと逆に、おもしろいと思う事が見つかるので続けているわけです。今日はこのお話をしたいと思えます。

\* 気象研究所気候研究部。

—1996年10月21日受領—

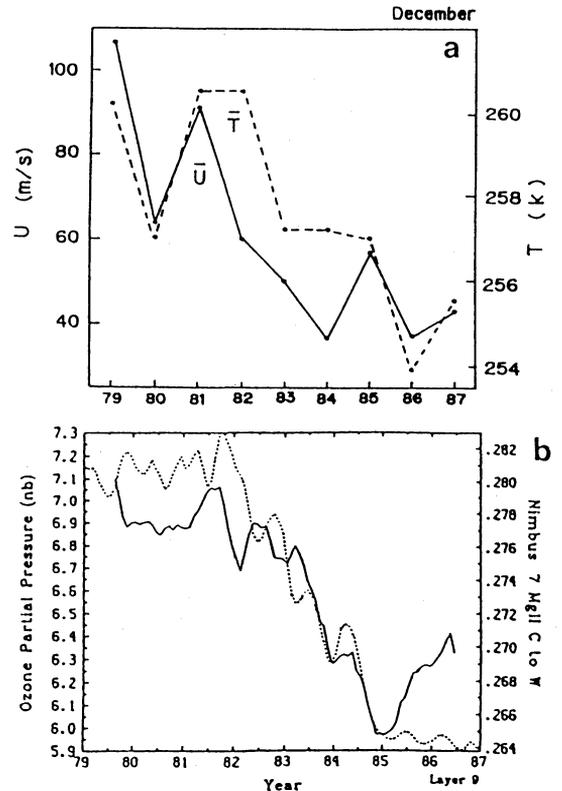
—1997年1月23日受理—

## 2. 研究したこと

さて、太陽紫外線の変動を通しての、太陽活動と気象・気候の関係の「シナリオ」は大ざっぱに述べると、第1図のようになります。

まず、(1) 11年太陽周期でUVが変化し、その結果中層大気でのオゾン濃度の変化、並びにそれによる気温の変化が起こる。(2) 低緯度の温度場の変化に伴う中緯度の東西風が変化し、それが赤道方向へと伝播してくるプラネタリー波と相互作用し、さらに大きな風場、極域での温度場の変化が起こる。(3) 中層大気での風場とプラネタリー波の相互作用の下方伝播。(4) その結果、冬の対流圏プラネタリー波の構造が変化し、循環パターンの変化による降雨、降雪、また、海水、海水温が変化する。その変化は長い時間記憶され、その結果の影響は夏の循環場にも及ぶ。と言うような、「風が吹けば桶屋が儲かる」式の話になってしまいます。しかし、例えば、太陽活動と東北冷害の関係も調べようとするなら、ここに述べたような過程を全て明らかにしなければなりません。これがけっこう大変なことは第1図を見てもらえばわかると思います。(4)は、季節予報そのものだし、(3)に至っては、矢印の方向が世間の常識とはまるで、逆になっています。(1)については、まともな観測はないし、(2)なんかは誰も議論していないようなものでした。

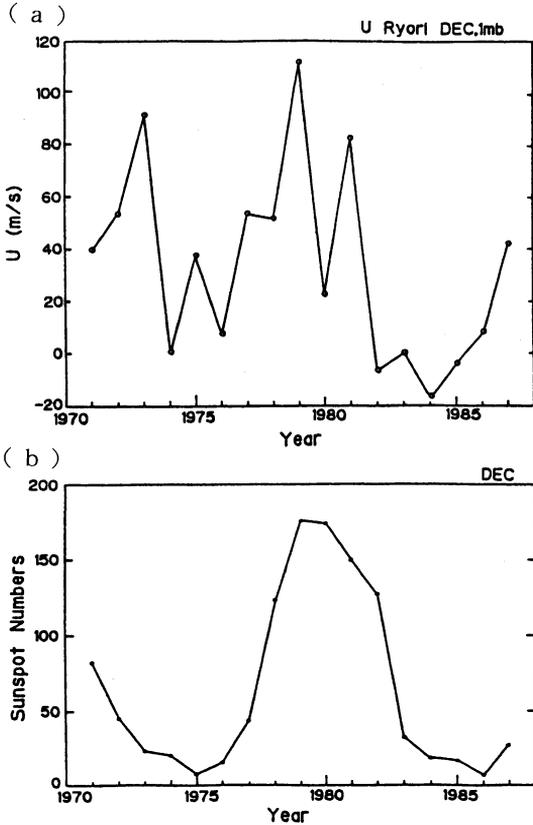
先ほどの説明では、中層大気という言葉を使いましたが、過去における研究結果を見ていると、ゾンデの観測にかかるような成層圏の低い方にはあまりおもしろい結果は無いようでした。この頃、山崎孝治さんが、NMC(米国気象局；現、環境予報センター)の衛星観測データから算出した0.4 hPa、(約55 km)までの温度と気圧高度場のデータを整備されていたので、一緒に太陽活動の信号を求めて解析を行いました(Kodera and Yamazaki, 1990)。とはいっても、第2図からわかるように、たった9年間、1太陽周期にも満ちません。第2図bの破線は太陽UVのインデックスを表していますが、太陽活動の極大期1979~1983年頃高く、極小期1984~1987年頃低くなっています。それと同期して、実線で示されている上部成層圏のオゾン(DeLuisi *et al.*, 1989)も極大から極小へかけて減少しています。この期間、12月の赤道域上部成層圏2 hPaの温度(点線)と1 hPa、40°Nの带状平均東西風(実線)を見ると(第2図a)、それらは太陽UV、オゾン濃度と並行して、極大から極小へと減少しています。勿論、こんな短いデータだけではお話になりませんが、



第2図 (a) 12月平均1hPa, 40°Nの带状平均東西風(実線)と、2mb赤道域(20°S-20°N)の気温(破線)の時系列(Kodera and Yamazaki, 1990)。(b) 北半球中緯度帯上部成層圏のオゾン濃度(実線)と太陽UVインデックスの時系列(点線)(DeLuisi *et al.*, 1989)。

ほぼ同じ緯度にある、綾里のロケットデータによる12月東西風を見ると、1周期半にわたって太陽黒点周期と同期して変化しているのが確認できました(第3図)。带状平均の風(第2図)と綾里の風を比べると、1980年頃の極大期には双方とも80 m/sとあまり違いませんが、1985年頃の極小期には带状平均風は40 m/s前後あるのに綾里の地点では0、時には、マイナス、つまり逆向きの風になっているのがわかります。この事から、極大期には定在プラネタリー波の振幅が小さく、極小期には大きいこともわかります。以上の結果から、第1図の(1)、(2)のプロセスを、確認したとまでは言えないが、作業仮説として話をさらに進めて良いだろうという事になりました。

次のプロセス(3)は、成層圏から対流圏へ変動が伝わり降ってくると言うものです。ここから先は、本



第3図 (a) 綾里におけるロケット・ゾンデ観測による12月平均1hPaの東西風と(b)12月平均太陽黒点数(Kodera and Yamzaki, 1990).

来太陽活動とは何の関係も無いのです。しかし、太陽活動の影響が対流圏に及ぶという話をする以上、そして、誰も気象の人がやってくれない以上、これも調べていかなければなりません。

さて12月の中緯度の成層圏界面(1hPa)付近で太陽周期と同期して帯状平均東西風が変化することは上で述べました。第4図aは、このあたりの風、(12月の50°N, 1hPaの帯状平均東西風)の強さと、各月(上から12月, 1月, 2月)の各緯度、高度の帯状平均東西風との相互相関係数を示しています(Kodera et al., 1990)。12月に上部成層圏中緯度に見られる正の相関域が、時が経つにつれ、極方向に移動し、下部成層圏、対流圏へと降りて来るのがわかります。正の相関域が高緯度に移るのに従い、低緯度には負の相関域が成長してきます。図を見ると、一応、上から下への伝播が認められます。しかし、相関係数を求めるのに使っ

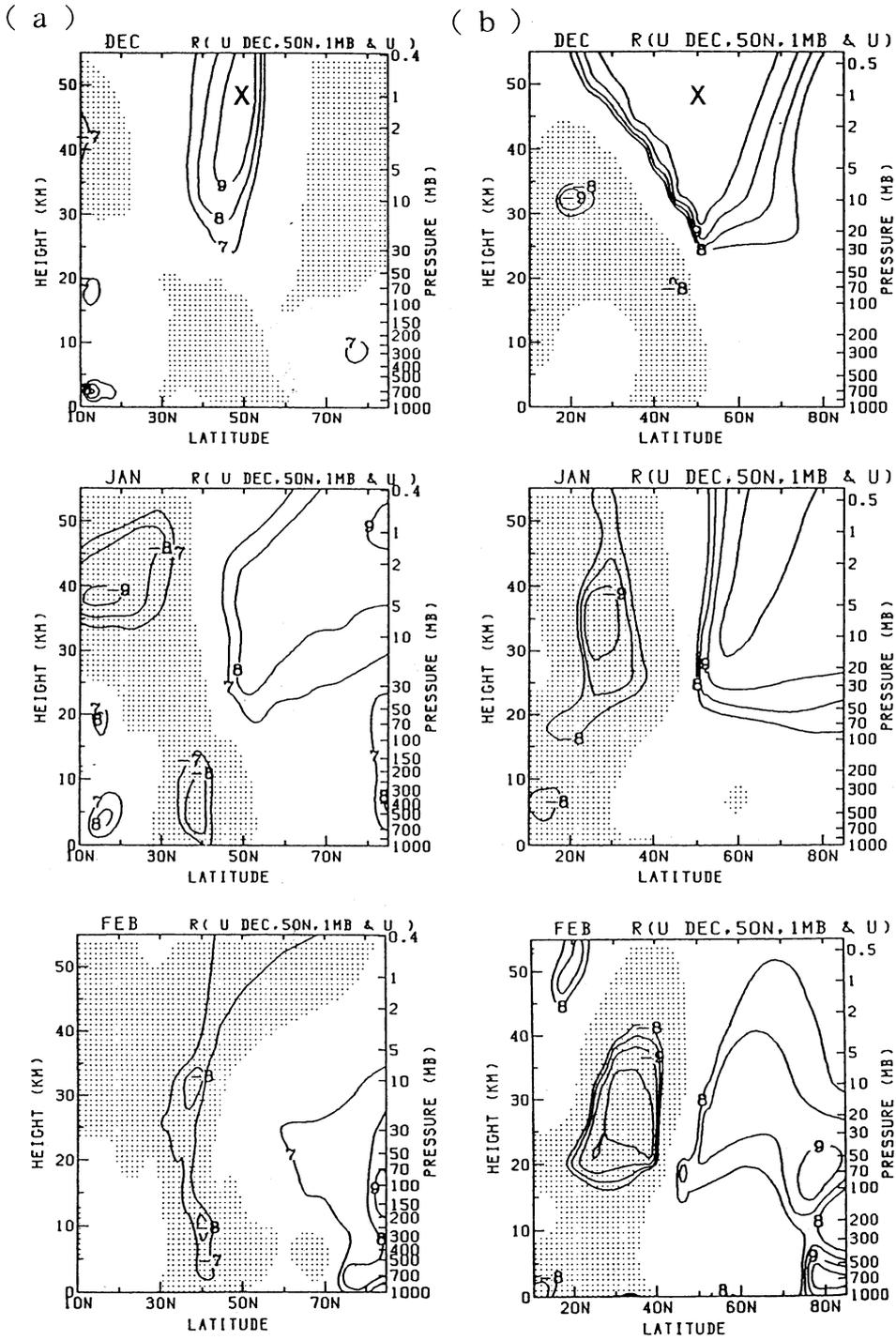
ているのは、たった8年のデータです。各年のデータが独立だとすると、5%危険率で有意ではあるのですが、これだけで話に乗ってくる研究者はいないでしょう。

一方この頃、千葉長さんが柴田清孝さんといっしょになって、モデルのトップが中間圏、約70km、まで達する大気大循環モデル(GCM)を完成させていました(Shibata and Chiba, 1990)。それで、観測結果の解析をやる一方、このGCMを使って、(1)、(2)のプロセスを理解する為の実験をやってみました。何をやったかと言うと、メカニスティック・モデルの結果から冬の成層圏には、極夜ジェットの強い状態と、弱いものの2つの安定な状態がある(例えば、Yoden, 1987; Wakata and Uryu, 1987)のが知られています。これに関して放射強制力が変化したときのような事が起こるかと言う問題をFels(1987)は概念モデルを用いて論じています。それをGCMを用いてやってみたわけです。メカニスティック・モデルで判る事をわざわざ「大循環モデル」を使うという、ちょっと贅沢で少しバカげている実験です。それでもこの紫外線加熱率を色々変化させてGCMを走らせた結果があったので、これを観測と比較して、上部成層圏で生み出された風の変化が対流圏へと伝わって行くことができる可能性を示しました(第4図b)。ただし、後で述べるように、現実の太陽活動の変化に伴うUV加熱の変化はUVのフラックスの直接の変化によるものより、UVを吸収するオゾン生成の変化による役割が大きい。

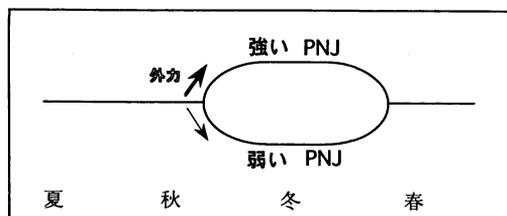
さて第4番目の過程(第1図)、冬の循環の変化がどう夏に影響するか、これは太陽活動と直接関係は無いのですが、「太陽活動と東北冷害」の関係を論じようとするれば、やはり、これについても少しはやっておかなければという事で、ユーラシア積雪と夏の日本付近の循環場との関係をちょっと調べてみました(Kodera and Chiba, 1989)。

第4番目は、まあ少し置いておくとして、(1)から(3)まで、作業仮説としてはできたわけです。従って以後は、これをどう証明していくかという事になります。

仕事をした順序からすると、この次に、太陽活動と下部成層圏赤道準2年振動(QBO)の影響との相互作用(Labitzke, 1987)の話になるのですが、少しややこしいので後にまわして、火山噴火の影響の話の先にします。第1図は太陽活動の影響の「シナリオ」を描いたものですが、本当に太陽活動の影響といえるのは(1)



第4図 12月平均1hPa, 50°Nの帯状平均東西風と、各月(上から12月, 1月, 2月)の各緯度、高度の帯状平均東西風との相互相関係数(×10)。(a)は観測データ,(b)はモデル実験。負値域には影。(Kodera et al., 1990)



第5図 冬の成層圏循環に及ぼす外力の効果の概念図。

から成層圏へ降りて来る分、少し進行が遅れているように見える)。この事から、太陽活動の成層圏への影響は第5図のような概念で捕えられると言えます。

さて、そうだとすると、第5図から明らかなように、もし、2つの違った外力が加わった場合、その影響は、単独な場合の和にはならないと言う事です。つまり、2つの外力の影響の相互作用があり得ると言うこと、またその影響の結果生み出されるのは新しいパターンではなく、やはり似たようなものになるという事が考えられます。

先にも述べましたが、1987年に、Labitzke さんが、太陽活動の影響は、下部成層圏の QBO の位相に合わせて東風と西風の2つの場合にデータを分けて見るとはっきり見える事を示しました。また、太陽活動の影響は、成層圏のみならず対流圏にまではっきり及んでいる (Labitzke and van Loon, 1988) 事を主張した為、非常に大きな反響と議論を引き起こしたのは御存知の方も多いかと思えます。ただ、どういう機構で太陽活動と赤道 QBO の相互作用が起こるのかについては不明だったので、議論は主に、統計的な有為性と信号解析の手法の問題に限定されていました (Kodera, 1993)。

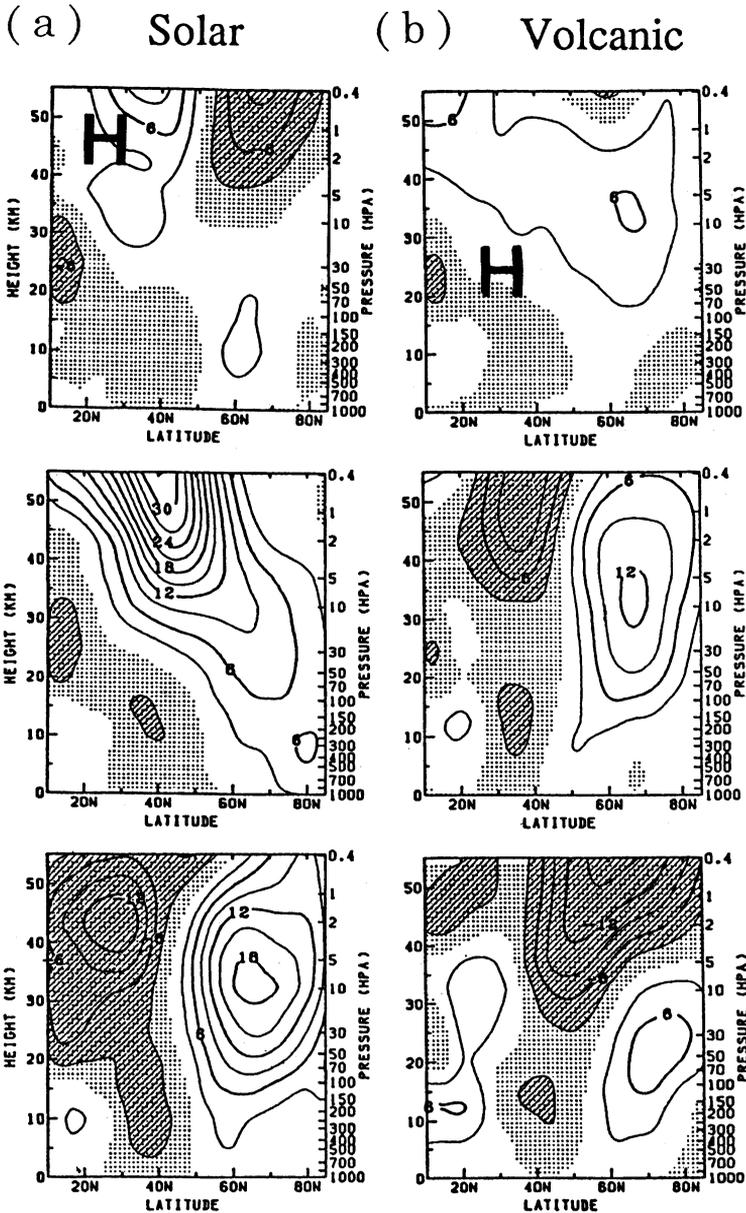
さて、赤道 QBO と太陽活動の相互作用を考える前に、赤道 QBO だけが変化した時、中・高緯度の循環にどのような影響があるか、まず考えなくてはなりません。今、メカニズムはさて置いて、赤道上での風が東風か西風かで、やはり第5図に示したように、極夜ジェットの強いか弱いかのモードがトリガーされる (O'Sullivan and Dunkerton, 1994) ようです。このように、QBO の影響も、太陽活動のそれも、第5図のような考えで得られるのなら、その間で相互作用が起こるのも理解できない事ではありません。ただ2つの外力の相互作用について調べる前に、より単純な場合に1つの外力の場合について調べる必要があると思っ

ているので、この太陽活動・赤道 QBO の変調問題については、簡単な解析とそんな事が起こり得ると言う実験結果をちょっと示しただけです (Kodera, 1991; Kodera *et al.*, 1991)。

数値実験は、第4図に示した実験と同じですが、太陽 UV の他に、赤道域に、赤道 QBO に対応した風が吹くように運動量源を与えています。第7、8図の a に、赤道域成層圏に東風位相の QBO に対応する風 (下部成層圏で東風 (E)、上部に西風 (W)) が吹くような力を与えた場合を示しています。第7図は太陽 UV を

だけで、(2)、(3)は成層圏内部力学の問題として捕えられるものです。従ってここでの問題は、外部強制力に対する冬の成層圏の応答というより一般的な形で、つまり、強い極夜ジェット (PNJ) と弱い PNJ という2つの循環場のレジームがあるような場合に、外部強制力が変化するとどのような応答が得られるかについて調べると言う事になります。第5図に概念図を示してありますが、分岐の起こる秋から冬にかけて外力が働くと、冬にはそれに応じた強い PNJ か弱い PNJ かどちらかの循環場が出現し易くなるというものです。この場合、外力がどんなものであっても、その結果として冬の循環場に現れる影響は同じような形だと言う事になります。つまり、極端に単純化して言えば太陽活動も、火山噴火も、QBO も、オゾンの減少も、全部同じで、外力に固有の影響が明らかなのは秋から冬にかけてだけという事になります (Kodera, 1995)。ここでは、一例として、太陽活動と火山噴火の影響を見ましょう。第6図は、帯状平均東西風の合成平均図で、a は太陽活動極大期と極小期、b は、火山噴火後の冬と平年との差を示しています。

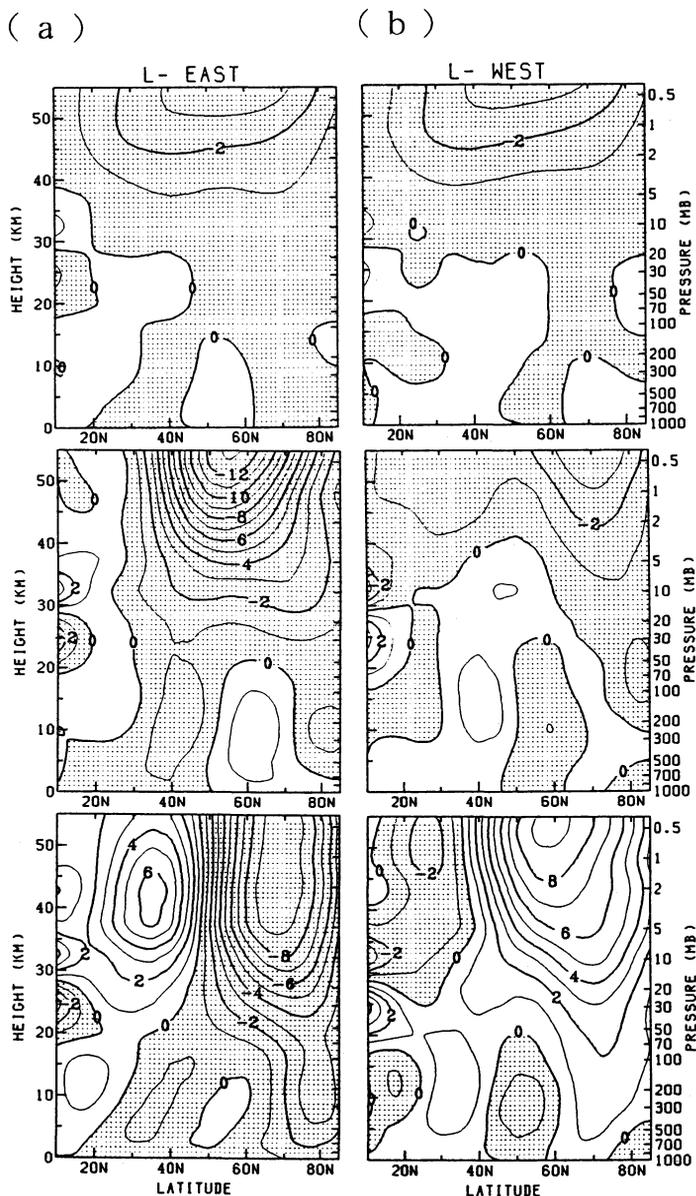
火山噴火は、エルチチョンとピナツポの2例です。両方とも低緯度にある火山で、噴火によるエアロゾルは低緯度の下部成層圏に注入されました。その結果、エアロゾルによる赤外、あるいは可視域での吸収が起こり、下部成層圏の気温が数度上昇しました。11月について見ると、太陽の場合は下部中間圏40°N 付近で、火山の場合成層圏60°N 付近で西風がより強くなっているのが見られます。この領域は、それぞれ、オゾン、エアロゾルによる加熱域と考えられる場所の極より上方にうまく対応しています。12月、1月と季節が進むにつれ、どちらの場合も極域で西風が強くなり、対流圏へと降りてくる一方、低緯度で東風アノマリーが強まり双極的な構造を示しています。最初は全く違うパターンだったのが、冬になるにつれ似てくるのがわかります (ただ、太陽の場合、火山と比べると、中間圏



第6図 月平均帯状平均東西風の合成平均図。(a)太陽周期極大期一極小期。(b)火山の噴火後の冬一年。(上から順に)11, 12, 1月平均。等値線は3 m/s おき, 負値域に影 (Kodera, 1995)。

小さくした場合(70%~90%), 第8図は大きくした場合(100%~110%)です。東風位相の場合は, 第4図の場合と同様に, 下部中間圏, 上部成層圏にできたアノマリーが極側に移りながら対流圏へと降りて来のが認められます。しかし, QBO 西風位相の風を吹かせた場合(第7, 8図b)には, 最初に, 上部成層圏に

太陽UVの変動により作り出された風のアノマリーは, 東風位相の場合と異なり, その後そのまま発達せず, ちょうど東風位相の時と逆のパターンになってしまいます。この結果は Labitzke and van Loon (1988) で示されている, QBO 西風位相の時は, 太陽活動極小期に 30 hPa の極域の気温が低く, 極大期に高い, そし



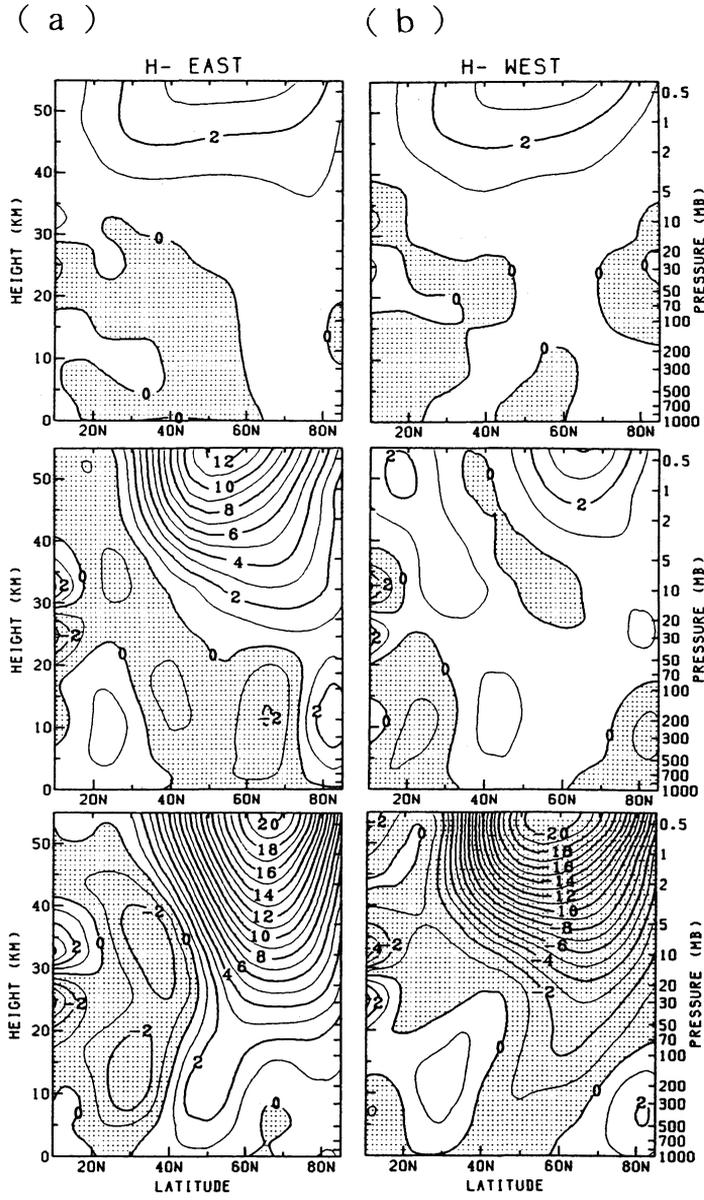
第7図 大気大循環モデルによる、太陽紫外線加熱と赤道QBOの相互作用の実験結果の10日平均帯状平均東西風の偏差。UV加熱が小さく、かつ赤道QBOの位相が(a)東風、あるいは(b)西風、に対応する場合(上から順に、積分開始後、1~10、11~20、21~30日の平均)。等値線は1 m/sおき、負値域には影 (Kodera *et al.*, 1991)。

て、QBOが東風位相の場合は、その逆の傾向になる事と対応しています。

### 3. まとめ

これまでの仕事をまとめると、第1図のような、“ス

トリー”を選び出したこと、そして、その各プロセスを調べたことと言えます。図からわかるように太陽活動の直接の影響は第1番目の過程だけです。実は、この所で大きな問題があるので。観測されるUVの変化から期待されるオゾンの濃度、気温の変化は、



第8図 第7図と同じ、ただしUV加熱が大きい場合 (Kodera et al., 1991).

観測されるそれらの半分以下しか無いのです (Brasseur, 1993). 私も Brasseurさんと一緒に彼の光化学放射輸送モデルを使って調べたのですがよくわかりません。モデルが悪いのか、観測が悪いのか? 10年を越える長期間にわたり精度の良い観測データを得るというのはなかなか難しいという事です。また、ここでは太陽UVによる加熱率の変化の話のみでしたが、太陽UVが変化したときの光化学的効果は波長帯によ

り異なり、オゾンがより多く作られる場合も、壊されて少なくなる場合もあるので。その為には、スペクトルの分布の形の変化まで精密に測定しなければならないという事になります。

1番目はさておき、2番目について少し考えてみましょう。これは太陽活動とはほぼ切り離して考えられる問題です。観測されるオゾン濃度の変化を与えて、観測されるような気温、風の場合が得られるか? という

問題です。第2図を見て下さい。赤道気温が3~4°Cしか変化していないのに、風は40 m/s以上も変化しています。第4図で示した実験ではこのような大きさの風の変化を作り出す為に、太陽UVを何10%も変化させ赤道域の気温も10~20°Cほど変化しています。この理由としては、現在の世界中のGCMでそのようなのですが、GCMで表現される上部成層圏、中間圏のジェットが現実とは異なり極に寄ってしまうのです。困ったことに、ジェットの位置が赤道から遠くなると、プラネタリー波と帯状平均流の相互作用の起き方が変化してしまい、低緯度の熱源の変化に鈍感になってしまうようです。今後はモデルの改良で、もう少し現実的な条件での実験が可能になると期待しています。

3番目の過程は、現在一番力を入れている所で、これはまた「外部強制力の変化に対するレジームを有する大気場の応答」というような、別の枠組み(第5図)から捕らえています。この場合も、太陽活動は、他の様々な一ここで示した火山噴火や赤道QBOの他に人為的な原因によるオゾンや二酸化炭素の変化による一影響と共に吟味すべき対象として入っています。

また第4の過程は、私の研究の出発が、太陽活動と東北冷害の関係だった為に入ったものです。これは、全くの長期予報の問題で私などが首をつっこまなくとも良い問題なのですが、冬に起こった影響がどこまで何によって記憶されるか興味がある問題です。

#### 4. おわりに

「太陽活動の気象・気候への影響」を研究していると「そんな危ない研究はやめた方がいいですよ」とずいぶん多くの人達から忠告を受けたものです。一つには、最初に述べたような理由で他に選択の余地がなかったのと、もう一つは、第1図で示したように、一つ一つの過程に分けて取り組めば別に恐い研究テーマでもないように思えたからです。例えば、「結局、太陽活動の影響なんていうものは幻想にすぎなかった」という事になっても、第1図の一番上だけ変えればあとはそのまま使えるのです。つまり、太陽ではなくとも、何らかの原因で“成層圏オゾンが変化した時、その影響は対流圏にどう及ぶか?”という問題に、同じ枠組のまま対応できます。例えば、火山性エアロゾルによるオゾン破壊の力学的効果のモデル実験の結果 (Zhao *et al.*, 1996) も、ここで示した枠組で理解できるのがわかると思います。逆に「太陽活動」という観点から出発したものが、火山噴火、QBO等、その他のものに

も適応できうるといふ事は、“もしかしたら……………”, という期待もいだかせてくれます。

#### 謝 辞

先に「太陽活動の気象・気候への影響」の研究が恐いものでなくなったと書きましたが、そうなったのは、観測データの解析結果から得られた作業仮説に対し、モデルによる数値実験を行い確認をし、さらに解析を進めるといふ普通の研究の手法がこの種の研究で初めて可能になったからです。この点において、解析における山崎さん、GCM実験における千葉さん、柴田さんの協力は、この研究を進める上で本質的なものでありました。どうもありがとうございました。また、研究を行っていくには、色々お金がいたり、物がいたり、他の知識や技術も必要なのですが、そういう支援をいただいた様々な方、特に旧高層物理研究部、気候研究部の皆様に重ねて感謝いたしております。ところで、Brasseurさんとは、彼のモデルを自由に使って、太陽UVの変化の生み出す光化学的效果について一緒に色々調べましたが、壁は厚く、これといった結果は未だ得られていません。しかし、太陽活動の大気に及ぼす影響の一番核心の部分について色々学ぶ事ができました。どうもありがとうございました、Merci, Guy.

#### 参 考 文 献

- Brasseur, G. P., 1993: The response of the middle atmosphere to long-term and short-term solar variability: A two dimensional model, *J. Geophys. Res.*, **98**, 23079-23090.
- DeLuisi, J. J., D. U. Longenecker, C. L. Mateer and D. J. Wuebbles, 1989: An analysis of Northern middle-latitude Umkehr measurements corrected stratospheric aerosols for 1979-1986, *J. Geophys. Res.*, **94**, 9837-9846.
- Fels, S. B., 1987: Response of the middle atmosphere to changing O<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub>, A speculative tutorial, in transport processes in the middle atmosphere, G. Visconti and R. Garcia eds., Reidel, Dordrecht, Holland, 371-386.
- Kodera, K., 1991: The solar and equatorial QBO influences on the stratospheric circulation during the early Northern-Hemisphere winter, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 1023-1026.
- Kodera, K., 1993: Quasi-decadal modulation of the influence of the equatorial quasi-biennial oscillation on the north polar stratospheric temperatures,

- J. Geophys. Res., **98**, 7245-7250.
- Kodera, K., 1995 : On the origin and nature of the interannual variability of the winter stratospheric circulation in the northern hemisphere, J. Geophys. Res., **100**, 14077-14087.
- Kodera, K. and M. Chiba, 1989 : Western Siberian spring snow cover and east Asian June 500 mb height, Pap. Meteor. Geophys., **40**, 51-54.
- Kodera, K. and K. Yamazaki, 1990 : Long-term variation of upper stratospheric circulation in the Northern Hemisphere in December, J. Meteor. Soc. Japan, **68**, 101-105.
- Kodera, K., K. Yamazaki, M. Chiba and K. Shibata, 1990 : Downward propagation of upper stratospheric mean zonal wind perturbation to the troposphere, Geophys. Res. Lett., **17**, 1263-1266.
- Kodera, K., M. Chiba and K. Shibata, 1991 : A general circulation model study of the solar and QBO modulation of the stratospheric circulation during the Northern Hemisphere winter, Geophys. Res. Lett., **18**, 1209-1212.
- Labitzke, K., 1987 : Sunspots, the QBO, and the stratospheric temperature in the north polar region, Geophys. Res. Lett., **14**, 535-537.
- Labitzke, K. and H. van Loon, 1988 : Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I : the troposphere and stratosphere in the Northern Hemisphere in winter, J. Atmos. Terr. Phys., **50**, 197-206.
- O'Sullivan, D. and T. J. Dunkerton, 1994 : Seasonal development of the extratropical QBO in a numerical model of the middle atmosphere, J. Atmos. Sci., **51**, 3706-3721.
- Shibata, K. and M. Chiba, 1990 : A simulation of seasonal variation of the stratospheric circulation with a general circulation model, J. Meteor. Soc. Japan, **68**, 687-703.
- Wakata, Y. and M. Uryu, 1987 : Stratospheric multiple equilibria and seasonal variations, J. Meteor. Soc. Japan, **65**, 27-42.
- Yoden, S., 1987 : Bifurcation properties of a stratospheric vacillation model, J. Atmos. Sci., **44**, 1723-1733.
- Zhao, X., R. P. Turco, C.-Y. J. Kao and S. Elliott, 1996 : Numerical simulation of the dynamical response of the Arctic vortex to aerosol-associated chemical perturbation in the lower stratosphere, Geophys. Res. Lett., **23**, 1525-1528.

---

## Research on the Solar Activity, Middle Atmospheric Dynamical Process, and Their Relationship

Kunihiko Kodera\*

\* *Climate Research Department, Meteorological Research Institute, Tsukuba 305, Japan.*

(Received 21 October 1996 ; Accepted 23 January 1997)

---