

# 簡略化した全球循環モデルを用いた対流圏一成層圏結合系の 内部変動に関する数値実験

—2004年度山本・正野論文賞受賞記念講演—

田 口 正 和\*

## 1. はじめに

この度は、名誉ある山本・正野論文賞を頂き、大変ありがとうございます。対象となった論文 (Taguchi and Yoden, 2002a, b) は、京都大学大学院理学研究科において余田成男教授のご指導のもと学位論文の一環として行われたもので、全球大気循環モデルを用いた数値実験により、対流圏一成層圏力学的結合系の内部変動を詳しく調べています。本稿では、研究の背景・結果を中心に、残された問題なども加えて、簡単に紹介したいと思います。

本研究に特に関係の深いものを2つ挙げておきます。ひとつは Taguchi *et al.* (2001) で、そこでは、Taguchi and Yoden (2002a, b) の前段階として、季節を冬に固定したときの季節内変動・上下結合を調べています。もうひとつ、Yoden *et al.* (2002) は、これらの研究を含む、対流圏一成層圏力学的結合系の変動に関する数値的研究のレビューです。

## 2. 背景

現実には観測される成層圏の年々変動は、南北半球間で少し様子が違います。最近29年間に観測された30 hPa の月平均温度の分布関数を見てみると、南極上空では春に年々変動が大きい一方、北極では冬に変動が大変大きいことが分かります(第1図 a, b)。これらの時期に年により温度が非常に高くなるのは、成層圏突然昇温の発現と密接に関連しています。より長期間(約45年)のデータを見ると、北極では12、1月に分布が歪んでいるのではないかということも示唆されます(第1図 c)。このような分布の歪みは、比較的低温の状

態がしばしば実現するのに対して、高温の状態がまれに現れることを意味します。

近年の研究によると、例えば突然昇温や北極振動に端的に見られるように、このような成層圏の変動が対流圏の変動と双方向に結合しているということが明らかにされてきました (Baldwin *et al.*, 2003; Hartmann *et al.*, 2000)。従来から認識されてきた惑星波活動の上方伝播に加えて、最近の研究では成層圏の様子が対流圏や地表の天候・気候に有意に影響することが際立った特徴として指摘され、対流圏一成層圏結合系の認識が高まってきました。

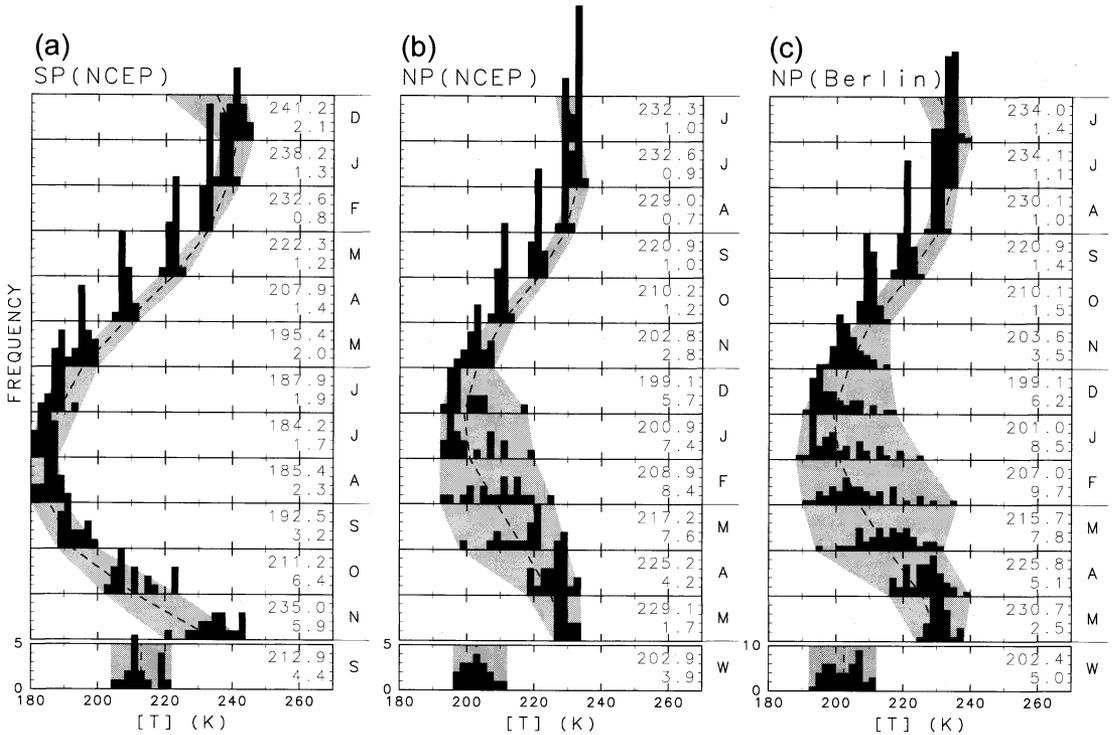
そこで中高緯度の対流圏一成層圏力学的結合系をいま関心のある系だとしますと、第1図に見られるような系の変動は、大別して2つの原因により生じます(第2図)。ひとつは、この系に対する“外力”が年々変化するというものです。ここで、外力としては、例えば、太陽活動の変動、火山噴火、エルニーニョ・南方振動、準2年周期振動、人為的影響が考えられます。一方、外力の変化が全くなかったとしても、系の内部過程により変動が生じる可能性があります。

対流圏一成層圏結合系(あるいは成層圏)の変動については、これまで様々な階層のモデルを用いた研究が精力的に行われてきました(詳細は、Yoden *et al.*, 2002を参照)。対流圏一成層圏結合系に関する研究結果を整理するには、地表の東西非一様性(大規模な山岳・海陸の熱的コントラスト)により励起される強制惑星波が重要なパラメータとなります。地表で励起され、対流圏から成層圏に入射する惑星波は、成層圏に対して波強制として働き、そこでの変動の様子を大きく左右するからです。強い強制惑星波の存在する北半球の冬季を主眼とした大気大循環モデルの解析は、対流圏一成層圏間の双方向結合を示していました。これに対して、強制惑星波が存在しない状況を念頭に置いた、

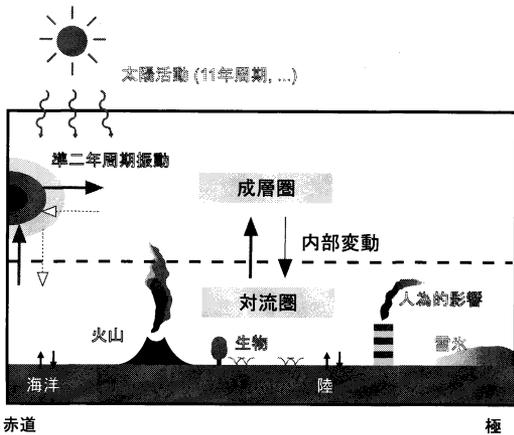
\* 京大生圏研究所 (現所属: 愛知教育大学)。

—2005年1月6日受領—

—2005年7月13日受理—



第1図 観測された30 hPaでの月平均温度の頻度分布。(a)は南極,(b),(c)は北極について。(a),(b)はNCEP/NCAR再解析データで,期間は1979年から1997年まで。(c)は,ベルリン自由大学のデータで,期間は1955年7月から2000年10月まで(ラビツク教授のご厚意による)。最下段は,春平均(a)と冬平均(b,c)を示す。各パネルにおいて,平均値(上の数字)と標準偏差(下の数字)が示されている。Yoden *et al.* (2002)の第2図より。



第2図 中高緯度対流圏-成層圏気候システムに働く外力の模式図。Yoden *et al.* (2002)の第3図を改変。

力学過程のみを陽に表現するメカニスティックなモデルでは,対流圏の傾圧擾乱の変調により成層圏惑星波が励起されるが,成層圏の変動は比較的穏やかである

という結果がありました。一方,対流圏を含まない成層圏だけのモデル実験では,対流圏界面付近で惑星波強制を与えますが,この種の実験結果はこのパラメータなどに依存した成層圏の内部変動をより系統的に示していました。これらの先行研究を踏まえると,対流圏-成層圏結合系に関するモデル研究は,成層圏だけのモデルを用いた研究と比較して,矛盾はないものの断片的でしたので,対流圏-成層圏系の変動や上下結合の様子を対流圏と成層圏を含む理想的な枠組みを用いて系統的な考察をすることにしました。

この疑問に答えようとするとき注意することが2つありました。ひとつは,成層圏の変動の様子は,高温の状態,つまり突然昇温の発現を強く反映しますので,変動の様子を正確に捉えるには多数のサンプルが必要になります。もうひとつは,現実の成層圏変動が両半球で違うことと,成層圏モデルが惑星波強制に強い鋭敏性を持つことから,このパラメータに注目したパラメータ走査が不可欠ということです。これらの要請に対しては,大規模な運動を比較的良好に表現し,計算コ

ストが比較的安いメカニスティックモデルが最適な選択と言えます。要約すると、本研究の枠組みと目的は、対流圏—成層圏を含むメカニスティックモデルを用いたパラメータ走査実験・長時間ランからなる一連の実験により、理想的な対流圏—成層圏系の性質を明らかにすることでした。

### 3. モデル

本研究には、地球流体電脳クラブの AGCM5 をもとにした全球プリミティブモデル (Swamp Project, 1998) を使用させて頂きました。モデルの水平分解能は T21, 鉛直レベルは地表から中間圏付近まで 42 層あり、大規模な運動を表現するにはおよそ十分と言えます。放射過程はニュートン冷却で表現し、季節サイクルは放射平衡温度場を 1 年周期変化させることで実現されます。モデル最下層と中間圏には、レーリー摩擦を導入しました。湿潤過程は含まれません。モデルの北半球には、東西に正弦波型で波数 1 の仮想的な地形を導入しました。

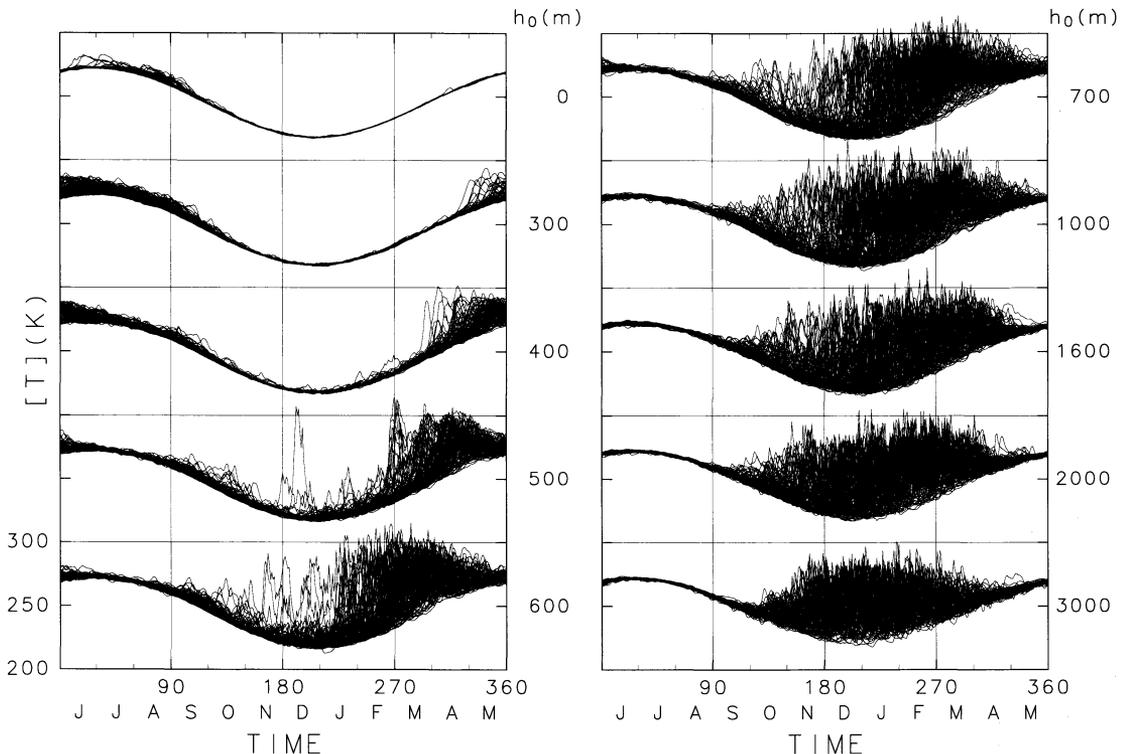
行った実験は大きく 2 つに分かれます。実験 1 では、

地形の振幅  $h_0$  を変化させるパラメータ走査実験を行い、強制惑星波に対する系の依存性を調べました。ここでは、0 m から 3000 m までの 10 個の  $h_0$  の値それぞれについて、100 年ランを行ないました。特に  $h_0$  が 500 m と 1000 m の 2 つの場合には現実の南北半球に似た成層圏の年々変動が得られたので、実験 2 としてさらに 1000 年のランを行ないました。

### 4. 結果

#### 4.1 成層圏変動のパラメータ依存性

第 3 図は、極域上部成層圏での帯状平均温度の年変化を 10 ラン各々 100 年分示しています。この領域を選んだのは、ここで温度の変動が大きく、この量が成層圏の力学的状態の良い指標となるからです。第 3 図を見ると、成層圏の年々変動の様子がパラメータに依存することが明瞭に分かります。すなわち、 $h_0$  がごく小さいときは変動がほとんどありませんが、 $h_0$  が少し大きくなる (500 m 程度) と春に変動が現れます。より大きな  $h_0$  (1000 m 程度かそれ以上) では、冬に変動が非常に大きくなります。春に変動の大きい“レジーム”は現



第 3 図 100 年ランパラメータ走査実験における極域上部成層圏 (88°N, 2.6 hPa) での帯状平均温度の時系列。走査したパラメータ  $h_0$  (m) の値が示されている。Taguchi and Yoden (2002a) の第 5 図より。

実の南半球に対応し、冬に大きい“レジーム”は現実の北半球の状況と言えます。パラメータ依存性を詳細に調べると、平均値や変動の様子が  $h_0$  に非線型な依存性を示すことが分かります (例えば, Taguchi *et al.*, 2001の第6, 8図)。

#### 4.2 成層圏変動の分布関数

現実の南北半球に対応する代表例として,  $h_0=500$ , 1000 m の2例を選んで分布関数を見てみると, 1000年ランでも必ずしも滑らかとは言えませんでした (Taguchi and Yoden, 2002a の第6図) ので, これら2例についてさらに長期間 (1000年) の積分を行いました。第4図は, その1000年ランでの極域上部成層圏の月平均温度の分布関数を示しています。すでに第3図で見たことですが,  $h_0=500$  m のランでは春に変動が大きく,  $h_0=1000$  m のランでは冬に変動が大きいことが確認できます。さらに, そのサンプル数を生かすと, 分布の詳細についても見て取ることもできます。例えば,  $h_0=500$  m のランでは冬から春に分布が歪ん

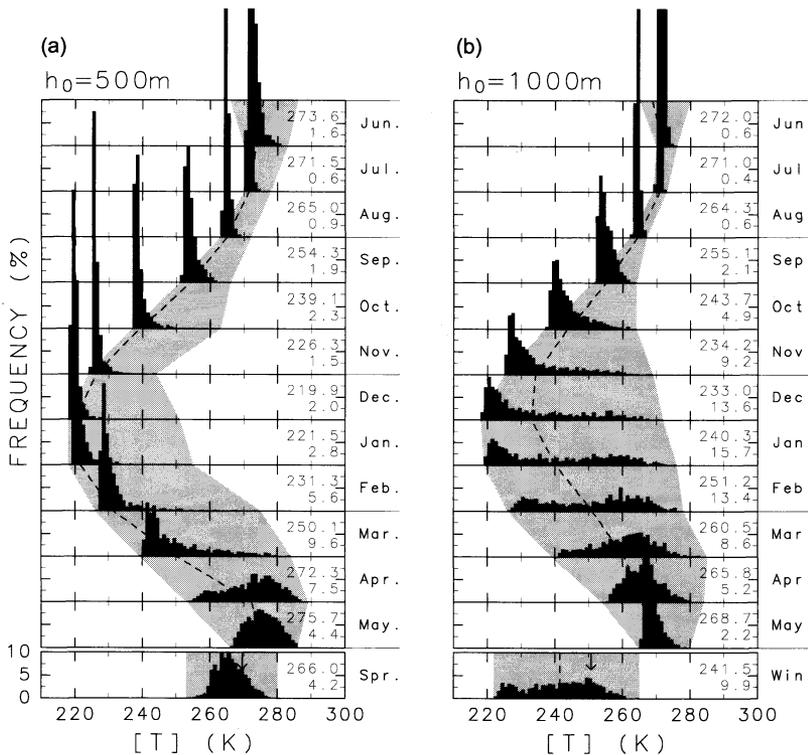
でいることや,  $h_0=1000$  m のランでは1, 2月に分布がふた山 (bimodal) になっていることも分かります。第4図では上部成層圏を見ていますが, 成層圏のより下層を見ると第1図に似た分布が得られますので, これら2ランは現実の成層圏の変動と矛盾はありません。

先に100年ではサンプル数が必ずしも十分ではないと述べましたが, 1000年ランとより短いデータでの結果を比較することにより, このことを定量的に検証しました。  $h_0=1000$  m の1月を例として, いくつかの統計量について, 1000年データでの値に対して, そのうち限られたデータだけを用いたときの値の相対的誤差を見てみると, 平均値は比較的短いデータ (例えば, 100年) でもかなり正確に得られます (誤差は数%以内) が, 高次モーメント (例えば歪み度) は短いデータではうまく得られないことが分かります (ここでは図示しない, Taguchi and Yoden, 2002bの第12図)。つまり, 分布の形を正確に知るには, より多数のサンプルを必要とします。内部変動の分布関数の詳細は, 大きな内部変動を持つ系のトレンドを有限長のデータから見積もるときに重要になります

(Nishizawa and Yoden, 2005)。

(Nishizawa and Yoden, 2005)。

第4図のような分布関数を見ることで, 成層圏の変動と対流圏の変動の性質が異なることも明らかとなりました。例えば,  $h_0=1000$  m の1000年ランの1月について, 極域の温度の頻度分布を高さ方向に比較する (ここでは図示しない, Taguchi and Yoden, 2002bの第8図) と, 成層圏では, ふた山, あるいは大きく歪んだ分布で, これは, 成層圏の変動が突然昇温という極域の崩壊現象によることの反映です。一方, 対流圏での分布関数はほぼ正規分布に近く, これは, 対流圏の変動は平均のまわりの“ゆらぎ”のようなものであることを含意しています。



第4図 1000年ラン実験における極域上部成層圏での月平均温度の頻度分布。(a)  $h_0=500$  m, (b)  $h_0=1000$  m。最下段は, 春平均 (a) と冬平均について (b)。下向きの矢印は, 1000個のサンプル中上から200個を取り出す閾値を示す。Taguchi and Yoden (2002b) の第1図より。

4.3 成層圏の年々変動の非周期性

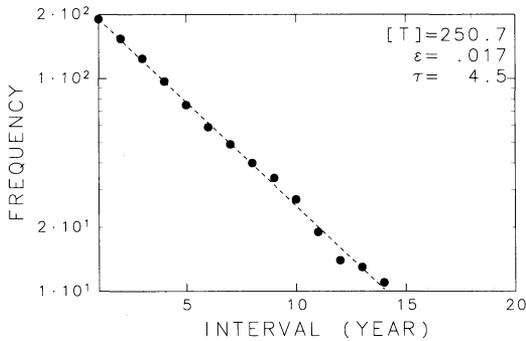
1000年データのもうひとつの使いみちとして、成層圏の年々変動の周期性（あるいは、非周期性）を調べました。その動機は、半球で惑星波—平均風相互作用を再現する成層圏モデルは、下端での波強制が中程度のときに、2年周期の振動を示すからです (Scott and Haynes, 1998)。そのメカニズムの鍵は、低緯度の東西風偏差は放射過程で散逸されにくく、前年の冬の状態を次の冬の入り口まで記憶できる、というもので、“low-latitude flywheel”と呼ばれます。年々変動の周期性を調べる一方法として、例えば  $h_0=1000$  m の冬平均の温度について上から200個を特に暖かい冬と定義し、それらの間隔を数える方法があります。その累

積頻度分布（第5図）を見てみると、分布は片対数で直線に非常によくのっていることが分かります。つまり、定義した暖かい冬の間隔は、指数分布です。それと表裏一体の関係として、暖かい冬自身はポアソン分布に従います。どちらの分布も、定義した暖かい冬が年々ランダムに起きることを意味します。この結果は、 $h_0=500, 1000$  m のどちらのランでも、変動の大きな月・季節について広く成り立ちます。また、この非周期性は、スペクトル解析でも直接示すことができます。

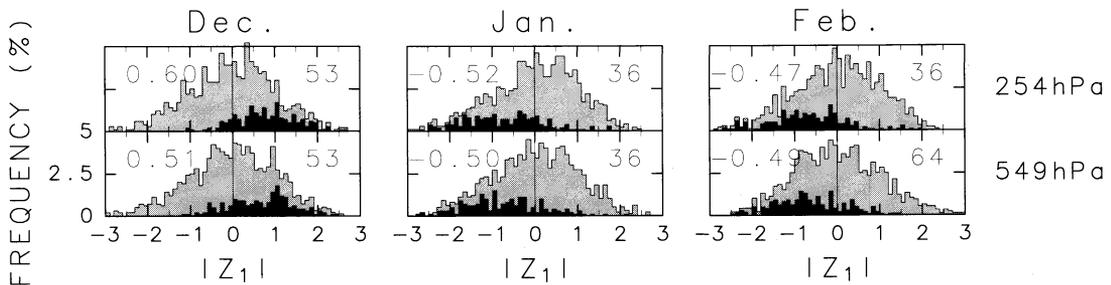
この結果は、半球成層圏モデルにおける2年周期振動とは対照的です。より現実的状况との比較として、アメリカ国立大気研究センターのグループが開発した全層大気大循環モデル (Whole Atmosphere Community Climate Model) に気候学的な季節変化条件 (海面温度、オゾンなど) のみを与えたコントロールランを見てみると、周期性は顕著には認められません (図示しない)。つまり、これらの結果を総合すると、対流圏—成層圏結合系では、低緯度大気を持つ記憶に比べて、不規則な対流圏からの強制が勝ることを示しています。

4.4 対流圏—成層圏結合

以上から、このメカニスティックモデルでは、成層圏の変動は、それが大きい季節には、対流圏の変動と強く結合していることが示唆されましたので、上下結合の様子をいくつかの方法で調べました。例えば、永続的な冬の条件下で行なったパラメータ走査実験において、ラグ相関解析を行なうと、突然昇温が間欠的に起きる  $h_0=1000$  m 付近のレジームでは、そのようなイベントに関連して上下結合は双方となります (Taguchi *et al.*, 2001)。つまり、対流圏で増幅した惑星波が成層圏へ伝播して突然昇温を引き起こすこと、



第5図  $h_0=1000$  m の1000年ランにおける特に暖かい冬(1000サンプルのうち上から200個、250.7 K 以上、第4図の矢印)の間隔の累積頻度分布。破線は、最小二乗法で決めた、最もよく適合する指数関数。誤差の平均  $\epsilon$  は0.017 (縦軸の一枚を1としている)、平均の間隔  $\tau$  は4.5年。Taguchi and Yoden (2002b) の第5図より。



第6図 第4図(b)と同じで、ただし規格化した東西波数1成分の惑星波振幅について。左から、12, 1, 2月。黒塗は、1月の極域上部成層圏の温度が1000サンプル中上から200個であったものを示す。対流圏の2レベル(254, 549 hPa)について、惑星波振幅と1月の温度の相関係数の絶対値が最大(パネル内左の数字)となる緯度(パネル内右の数字)を取り出している。Taguchi and Yoden (2002b) の第10図の一部。

成層圏偏差がゆっくりと対流圏へ下降するという特徴が見てとれます。一方、山がないケースでは、惑星波が上方伝播するだけで、成層圏からのリターンシグナルがないのが特徴的です。さらに、直接的な方法として、永続的な冬での  $h_0=1000$  m の10,000日ランで多数 (132例) の突然昇温のコンポジット解析を行うと、突然昇温前後の一連の変動を確認できます (Taguchi, 2003)。これらの特徴は、現実に見られる特徴をよく再現しています (Baldwin and Dunkerton, 2001; Polyani and Waugh, 2004)。

1000年ランを用いると、このような上下結合の様子を分布関数の視点から見ることができます。第6図は、 $h_0=1000$  m での対流圏における規格化した惑星波振幅の分布関数ですが、成層圏変動との関係を見るため、1月に極域上部成層圏での温度が1000年中上から200個以内であったものを黒塗で示しています。成層圏が普通より顕著に暖くなる1か月前に対流圏で惑星波が増幅することは、ラグ相関解析からも分かりますが、分布関数で見ると、そのような関係は分布の偏りに見ることができます。つまり、1月に極域上部成層圏がすごく暖くなる場合には、その直前の12月に惑星波振幅が正の(振幅の大きい)方に偏っています。例えば、12月、254 hPaにおいて、惑星波振幅が+1標準偏差以上であるのは、全1000サンプル中156回あります。そのうちの80回は1月に成層圏の温度が1000サンプル中で上から200に入っています。この比率 (80/156=51%) は、定義したイベントの比率 (200/1000=20%) よりもずっと大きいので、2つの量の間に強い関係があることが分かります。一方、2月の分布関数を見てみると、12月の場合と同程度に、振幅の小さい方に偏りがあるのが認められます。このように成層圏が顕著に暖くなる(端的には、突然昇温が起きる) と、その後数十日の時間スケールで対流圏で惑星波の振幅が小さくなるのがこのモデルの特徴です。モデルで再現された突然昇温に対して、その直後から成層圏偏差を散逸させる付加的な実験を行うことにより、そのような対流圏の偏差が(このモデルでの)突然昇温の結果であることが結論できます (Taguchi, 2003)。

## 5. まとめと展望

本研究の枠組・結果を簡単にまとめると、メカニスティックな全球循環モデルを用いた一連の数値実験により、理想的な対流圏—成層圏系の性質(成層圏の変動や上下結合の様子)を詳しく調べたということにな

ります。具体的には、パラメータ走査実験において、成層圏変動・上下結合が地形による強制惑星波に顕著に依存することや、1000年積分から対流圏—成層圏結合系の変動の詳細(分布関数や、年々変動のランダムな発現)を明らかにしました。本研究の“メッセージ”としては、この系における変動の捉え方とこの系の持つ力学の複雑さということがあり、これらについて残された問題に少し触れてみたいと思います。

非線型システムの変動の見方として、Palmer (1999) は、Lorenz の3元大気モデルを例として、外力の影響は、分布関数全体のシフトではなく、レジーム(系が頻繁に訪れる状態)付近の確率の変化に現れることを示しています。このような見方は、“非線型力学的遠近法”と呼ばれます。本研究で見たように、対流圏—成層圏系は、パラメータ・季節に依存して、bimodality を含む大きな内部変動を持ちますので、この系はその見方にあてはまる可能性があります。しかし対流圏—成層圏系における外力の影響に関する研究は、これまで平均状態に注目したものが多く、そのようなアプローチはまだ断片的です (Naito *et al.*, 2003; Taguchi and Hartmann, 2005)。特に、現実的な状況での内部変動の詳細や異なる階層のモデルを比較した研究はあまりありません。もう一点、上下結合のダイナミクスについては、特に、対流圏・地表に対する成層圏の気候インパクトのメカニズムは、まだ十分には解明されていない問題で、本研究で用いたようなメカニスティックモデルによるさらなる実験が有益だと考えられます。

## 謝辞

京都大学大学院在籍当時より現在に至るまで、絶えず暖かいご指導を頂きました余田成男教授に深く感謝します。また、廣田 勇名誉教授をはじめとする京都大学気象学研究室のみなさまには、セミナー・議論などをおして、たびたび有益なご助言を頂きました。

## 参考文献

- Baldwin, M. P., D. W. J. Thompson, E. F. Shuckburgh, W. A. Norton and N. P. Gillett, 2003: Weather from the stratosphere?, *Science*, **301**, 317-318.  
 Baldwin, M. P. and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes, *Science*, **294**, 581-584.  
 Hartmann, D. L., J. M. Wallace, V. Limpasuvan, D.

- W. J. Thompson and J. R. Holton, 2000 : Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change?, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **97**, 1412-1417.
- Naito, Y., M. Taguchi and S. Yoden, 2003 : Effects of the quasi-biennial oscillation on stratospheric sudden warming events in a simple global circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **60**, 1380-1394.
- Nishizawa, S. and S. Yoden, 2005 : Distribution functions of a spurious trend in a finite length data set with natural variability : Statistical considerations and a numerical experiment with a global circulation model, *J. Geophys. Res.*, **110**, No. D12, D1210510.1029/2004JD005714.
- Palmer, T. N., 1999 : A nonlinear dynamical perspective on climate prediction, *J. Climate*, **12**, 575-591.
- Polvani, L. M. and D. W. Waugh, 2004 : Upward wave activity flux as precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous weather regimes, *J. Climate*, **17**, 3548-3554.
- Scott, R. K. and P. H. Haynes, 1998 : Internal interannual variability of the extratropical stratospheric circulation : The low-latitude flywheel, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 275-297.
- Swamp Project, 1998 : AGCM5 (in Japanese) GFD-DENNOU CLUB, (オンライン), 入手先 <<http://www.gfd-dennou.org/arch/agcm5/>>, (参照 n. d.).
- Taguchi, M., 2003 : Tropospheric response to stratospheric sudden warmings in a simple global circulation model, *J. Climate*, **16**, 3039-3049.
- Taguchi, M., T. Yamaga and S. Yoden, 2001 : Internal variability of the troposphere-stratosphere coupled system simulated in a simple global circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **58**, 3184-3203.
- Taguchi, M. and S. Yoden, 2002a : Internal interannual variability of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model. Part I : Parameter sweep experiment, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3021-3036.
- Taguchi, M. and S. Yoden, 2002b : Internal interannual variability of the troposphere-stratosphere coupled system in a simple global circulation model. Part II : Millennium integrations, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 3037-3050.
- Taguchi, M. and D. L. Hartmann, 2005 : Increased occurrence of stratospheric sudden warmings during El Niño as simulated by WACCM, *J. Climate*, Submitted.
- Yoden, S., M. Taguchi and Y. Naito, 2002 : Numerical studies on time variations of the troposphere-stratosphere coupled system, *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 811-830.

---

## Numerical Experiments on Internal Variability of the Troposphere-Stratosphere Coupled System with a Simple Global Circulation Model

Masakazu TAGUCHI

*Research Institute for Sustainable Humanosphere, Kyoto University,  
(Present affiliation : Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542 Japan)*

(Received 6 January 2005 ; Accepted 13 July 2005)

---