

環状変動における地形の役割

京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻

西澤誠也・余田成男

1. はじめに

Thompson and Wallace(1998,2000 以下 TW2000)は海面更正気圧の EOF 解析を行ない,大規模な大気の長期変動のなかでもっとも卓越するモードは,南北半球ともに極域と中緯度間の振動である「環状モード」であることを見出した。このモードの経年変動が近年の気候変動と同じ傾向であることから,多くの関心が集まっている。

両半球の環状モードはパターンがよく似ているものの,それらが同一の現象であるかどうかは必ずしも明らかではない。南半球の環状モードは,以前から知られていた"zonal flow vacillation"(Yoden et al. 1987,Hartmann 1995 など)と同じ現象をとらえていると考えられている。一方,北半球では,EOF の第一モード(EOF1)が中緯度の太平洋域と大西洋域とで同符号をもつが,両地域の変動の相関は低い(Deser 2000)。また EOF1 に対応する主成分(PC1)の時系列は,北大西洋域の変動である NAO の時系列と相関が高い(Wallace 2000)。これらのことから,北半球では環状モードよりも NAO や PNA の方が大気変動をより適切に表しているのではないかという指摘がある(Ambaum et al. 2001)。

このような両半球間の大気変動の違いは,大規模地形や加熱源の東西非一様性によって強制された惑星規模波動の違いに因るところが大きいと考えられる。そこで本研究では,地形の違いによって大気変動の主要モードである環状変動がどのように変化するかを数値実験により調べた。地形を理想化して惑星規模波動だけを直接強制し,基本場や傾圧擾乱との相互作用を単純化して実験を行った。地形の振幅を実験パラメータとして長時間積分を繰り返し,環状変動における地形強制の役割を明らかにした。

2. 実験およびデータ

本研究で用いたモデルは,3次元大気大循環モデル AGCM5.3(地球流体電脳倶楽部 1998)をもとに,放射や接地境界層過程等のいくつかの物理過程を簡略化し,また乾燥大気の仮定をしたものである(Akahori and Yoden 1997)。水平分解能は三角切断 T42,鉛直分解能は 30 層である。放射過程はニュートン加熱/冷却で置き換えた。その際に用いた放射平衡温度場は東西一様で,北半球の冬の状況を模している(図 1(a))。またその緩和時間には図 1(b)に示す鉛直依存性をもたせた。

	地形	実験パラメータ(ho)
WN2 実験	東西波数 2	0,200,400,450,500,550,600,800,1000m (9 通り)
WN1 実験	東西波数 1	0,200,400,600,800,1000m (6 通り)

表 1: 本研究で行った実験の内容。

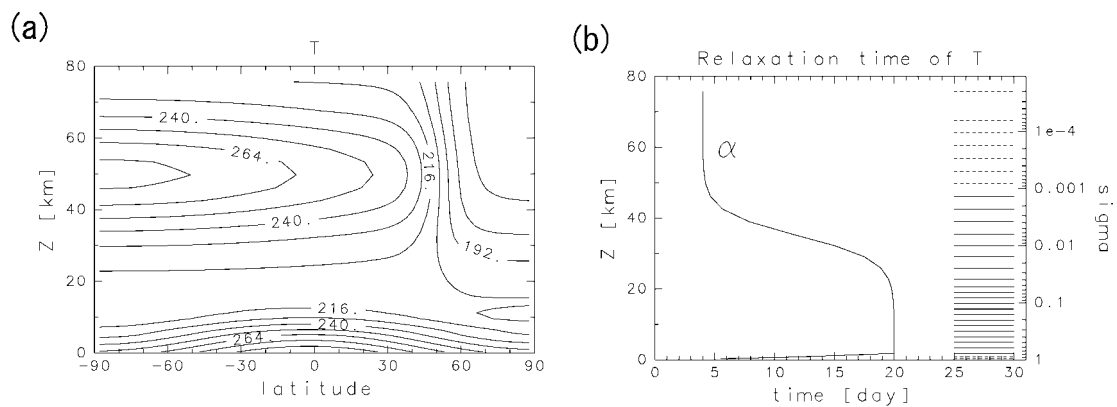


図1: ニュートン加熱/冷却における(a)放射平衡温度と(b)緩和時間。(b)図中の右側の横線はモデルの鉛直格子点レベルを表している。

表面地形の東西波数を変えて2種類の実験を行った。1つめは東西波数2型(WN2)実験で、南北方向には北緯45度で最大の振幅をもち東西方向には波数2型の地形(図2(a))を北半球のみに置き、南半球は平坦とした。2つめは東西波数1型(WN1)実験で、図2(b)の地形を同じく北半球のみに置いた。それぞれの実験の実験パラメータは地形の振幅(h_0)で表1に示す通りである。

実験は250Kの静止等温大気から30日間時間積分した後に4000日間積分し、その4000日分を解析に使用した。モデルの出力は座標系のデータであるが、スプライン補間をして気圧座標系のデータに変換した。また解析には30日のlow-passフィルターを通した1日毎の北半球のデータを使用した。

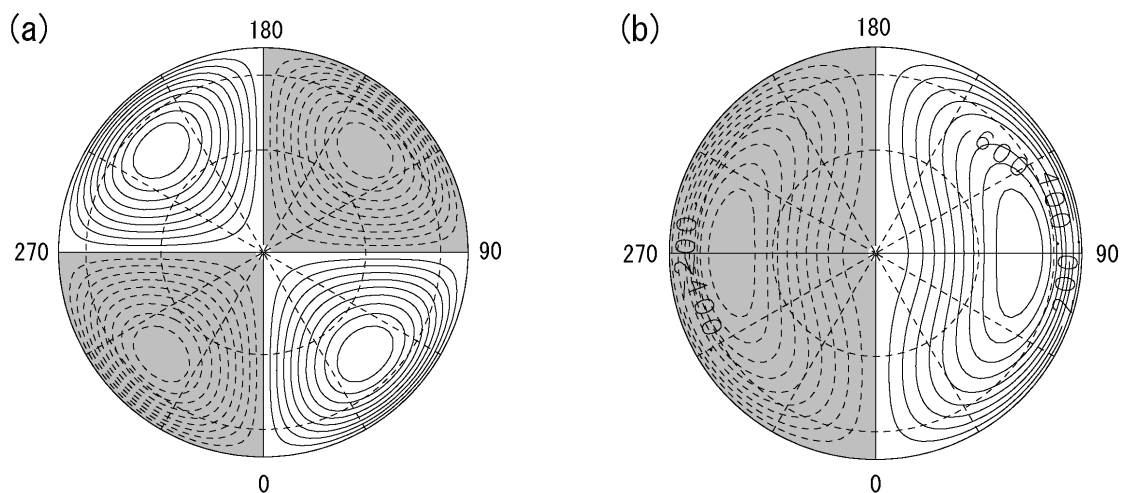


図2: 表面地形;(a)WN2 実験,(b)WN1 実験。負の領域にハッチをかけている。外側の数字は経度を表している。緯線,経線を共に30度ごとに破線で示している。

3. 結果

3.1 WN2 実験

まず帯状平均した場の EOF 解析を行った。北半球での地上から 50hPa までの領域における帯状平均帯状風(U)の EOF1 は、 h_0 の値にかかわらず従来得られてきた結果(TW2000 など)と類似したパターンとなる。すなわち、極域と中緯度で反対符号をもち、地上から下部成層圏まで突っ立った等価順圧的な構造となる。図 3 はその EOF1 の南北構造の h_0 依存性を示すもので、300hPa 断面図を順に並べたものである。 h_0 が小さな場合には、符号が反転する節の位置が北緯 60 度付近にあり、第 2、第 3 の節がそれぞれ 40 度、20 度付近にある。 $h_0=450\text{m}$ 前後で節の位置が急に変化し、それより大きな h_0 では徐々に低緯度側にシフトする。

EOF1 の寄与率も地形の振幅 h_0 に依存して変化する(図 4)。 $h_0=0\text{m}$ の場合は 60%近いが、 $h_0=400\text{m}$ では約 30%まで下がる。 $h_0=450\text{m}$ 付近で寄与率も急に変化し、 $h_0 \geq 500\text{m}$ の場合には 50%前後である。

東西非一様な地形の影響をみるために地表面気圧(P_s)場の解析を行った。図 5 は P_s の EOF1 である。 $h_0=400, 450\text{m}$ の場合には EOF1 は東西波数 1 が卓越する構造をしているが、それ以外の場合には、極域と中緯度で反対符号をもち東西非一様性が小さな環状構造をしている。EOF1 が環状である場合に節となる緯度は、 h_0 が小さな場合は北緯約 60 度、大きな場合は北緯約 50 度である。また、第 1 モードの寄与率の変化は、帯状平均帯状風 EOF1 の寄与率の変化と同じ傾向にあり、 $h_0=450 \sim 500\text{m}$ で急に変化している。

図 6 は P_s の EOF1 に対応する PC1 の時系列とその分布関数である。PC1 の時間変化には明瞭な周期性はみられないものの、 $h_0=0\text{m}$ の場合は数 100 日程度の時間スケールの変動が認められる。 $h_0=200\text{m}$ では、 $h_0=0\text{m}$ の場合に比べて数 100 日の時間スケールの変動がみえにくくなっている。 $h_0=500 \sim 600\text{m}$ の場合では、PC1 が間欠的に大きな負の値をとることがあり、それに対応して分布関数の歪度が大きくなっている。またこのようなイベントは不規則に

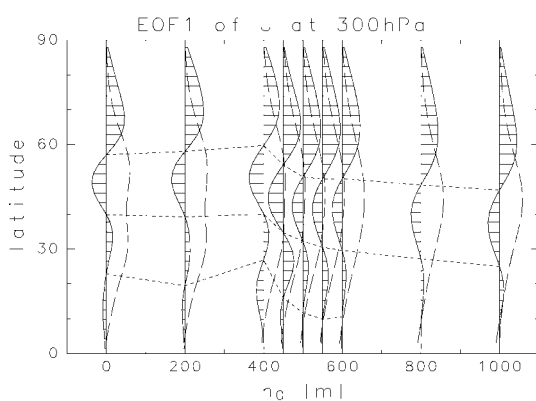


図 3: WN2 実験における帯状平均帯状風の EOF1 の 300hPa 断面 (実線)とそのレベルでの時間平均した帯状平均帯状風速(破線)。EOF1 の節の位置を点線でつないでいる。

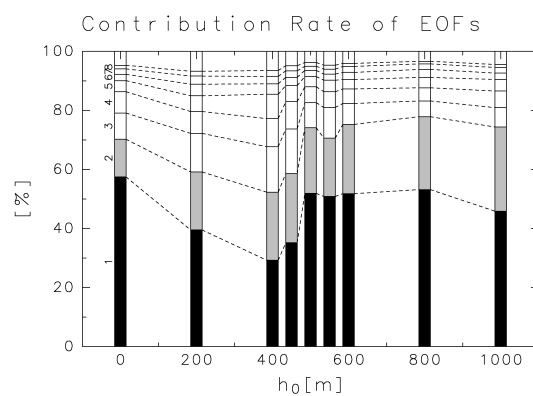


図 4: 帯状平均帯状風 EOF1 の寄与率の h_0 依存性(WN2 実験)。下から順に第 1 モード、第 2 モード...の寄与率。

起こり、長期間ほとんど起こらないときと、連続して起こるときとがある。ho ≥ 800m の場合はそのようなイベント的な変動の特徴がみえにくくなっている。また Ps の PC1 と U の PC1 との相関は ho = 400, 450m の場合を除いて高く (表 2), 両者は基本的に同じ変動成分をとらえていると考えられる。

ho (m)	0	200	400	450	500	550	600	800	1000
相関係数	0.88	0.70	-0.04	-0.07	0.89	0.88	0.87	0.90	0.91

表 2: 帯状平均帯状風の PC1 と地表面気圧の PC1 との相関係数。

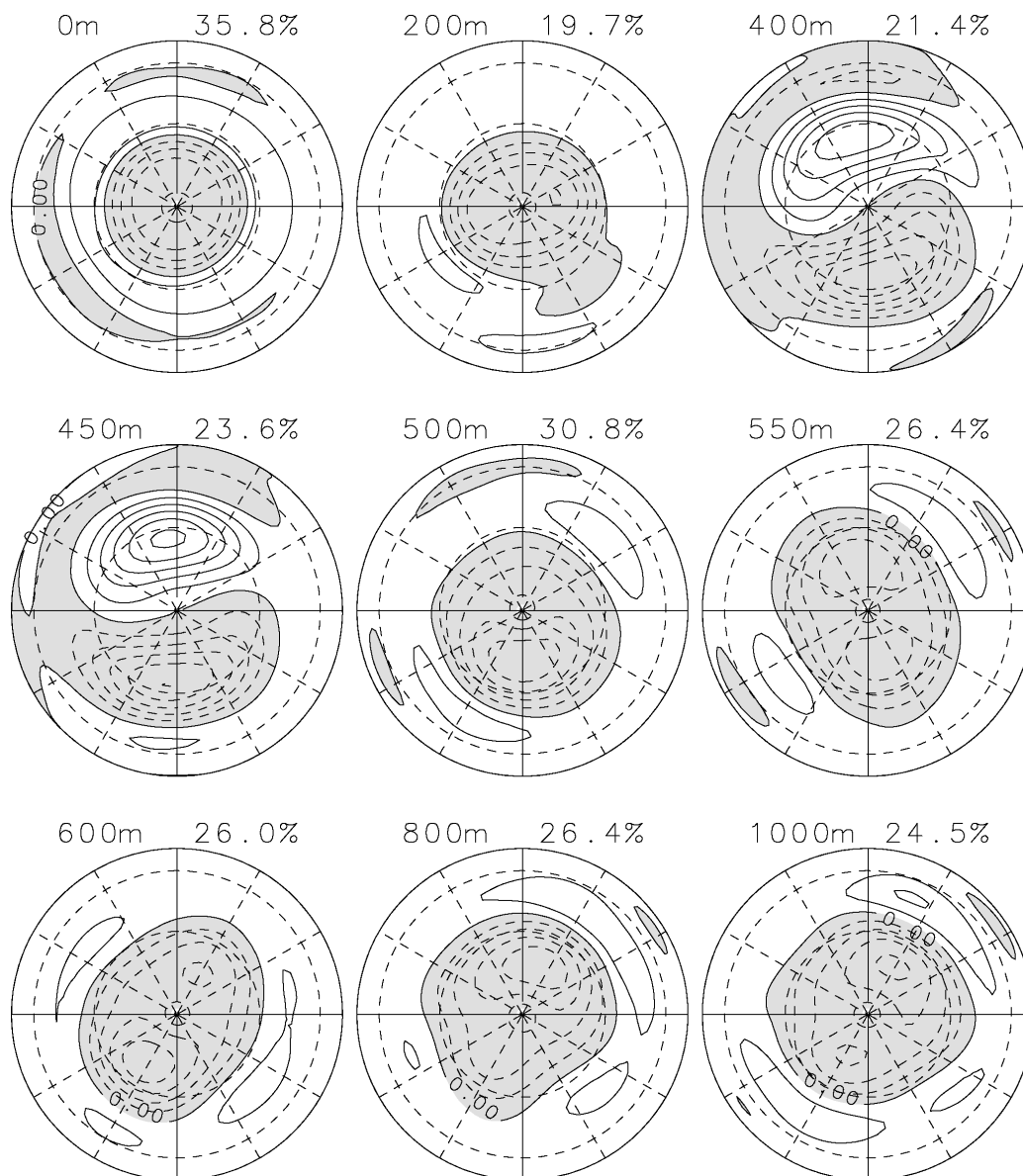


図 5: 地表面気圧の EOF1 (WN2 実験)。左肩および右肩の数字は、それぞれ ho の大きさおよび EOF1 の寄与率である。また負の領域には影をつけている。

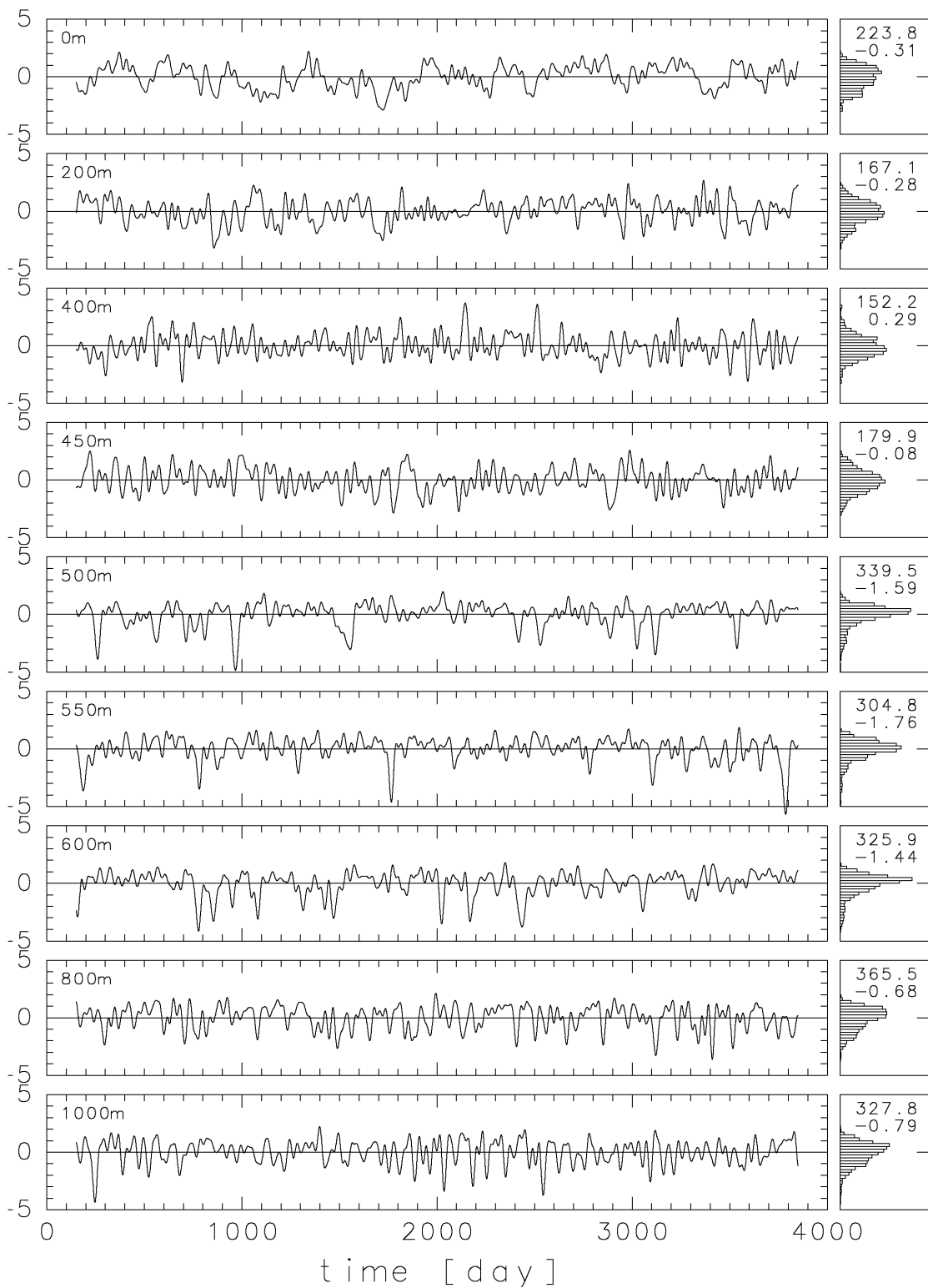


図 6: WN2 実験における地表面気圧の PC1 の時系列(左)とその分布関数(右)。PC1 の値はそれぞれの標準偏差で規格化している。左図中の左上の数字は h_0 の値であり, 右図中の数字は上から標準偏差と歪度である。

EOF1 において或る 2 点が同符号であっても,その 2 点間の相関が高いとは限らない (Ambaum et al. 2001)。そこでテレコネクションパターンを抽出する際に使われた 1 点相関解析(Wallace and Gutzler 1981)を行った。まず時間平均場と分散の様子をみておく。図 7(a),図 8(a)はそれぞれ $h_0=0\text{m}$ および $h_0=1000\text{m}$ の場合における P_s の時間平均場と分散である。 $h_0=0\text{m}$ の場合の時間平均場は同心円状であるのに対し, $h_0=1000\text{m}$ の場合は表面地形を反映して東西非一様であり,地形の山に相当する経度 45 度および 225 度では値が低く,谷に相当する経度 135 度および 315 度では値が高い。また $h_0=1000\text{m}$ の場合,分散は谷の北側の 2 ヶ所で局所的に大きな値をもつ。上部対流圏では偏西風ジェットが地形の谷の西側に局在しており, P_s の分散が大きくなるのはそのジェットの出口域にあたる。1 点相関解析の結果, $h_0=0\text{m}$ の場合は図 7(b)のように高緯度と中緯度で逆相関の関係がみられ,その逆相関をもつ領域がほぼ東西一様に存在している。それに対し $h_0=1000\text{m}$ の場合は高い逆相関の

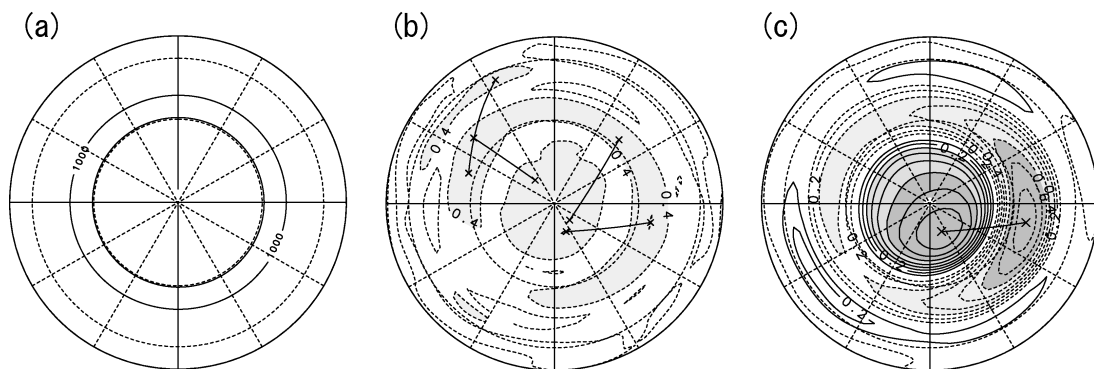


図 7: $h_0=0\text{m}$ の場合の(a)地表面気圧の時間平均,(b)1 点相関図および(c)図中の指標に対する相関図。(b) 図において高い逆相関の関係にある 2 点の対を \times 印とそれを結ぶ線で表している。また(c)図においては本文中において定義した指標を計算するために使用した 2 点を \times 印で表している。

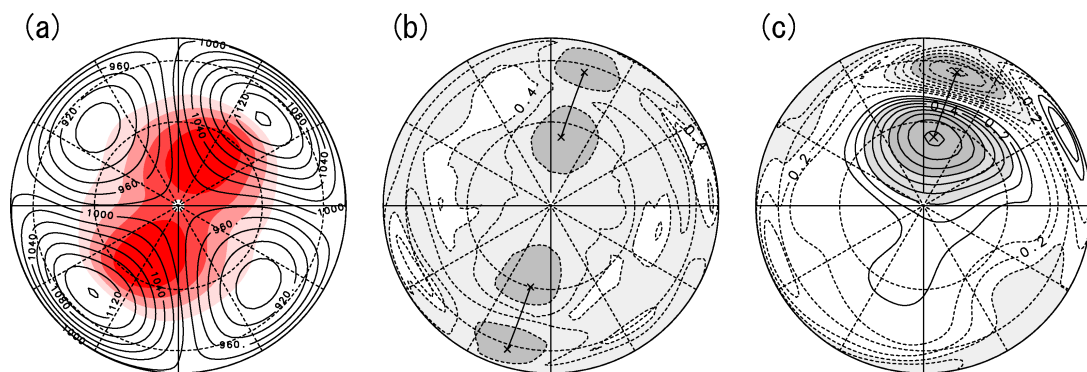


図 8: WN2 実験の $h_0=1000\text{m}$ の場合の(a)地表面気圧の時間平均と分散,(b)1 点相関図および(c)図中の指標に対する相関図。(a)図において平均を等値線,分散を濃淡で表している。それ以外は図 7 と同じ。

関係をもつ領域の対が経度 170 度および 350 度付近の 2 ヶ所に局所的に存在している(図 8(b))。そこは,Ps の分散が大きく上部対流圏ジェットの出口域のある経度とほぼ同じである。

次に,最も高い逆相関の関係をもつ 2 点を取り出し,それぞれ点の Ps の値を規格化し,高緯度側の点の値から低緯度側の値を引いたものを指標とした。そしてこの指標と各格子点での Ps との相関を計算した(図 7(c),8(c))。ho=0m の場合の相関パターンは,極域とそれを取り巻く中緯度とが反対符号をもつというものであり,E0F1 と似たものとなっている。一方,ho=1000m の場合は東西方向の範囲が限られた局所的な南北双極子構造をしている。また経度約 170 度および約 350 度の 2 つの高い逆相関領域でそれぞれ定義した 2 つの指標の相関は 0.17 であり,2 つのジェットの出口域における変動は同期していないことを示している。

3.2 WN1 実験

WN1 実験における Ps の E0F1(図 9)は,WN2 実験とは異なりすべての ho において環状に近い構造をもっている。ただし ho=0m 以外の場合は波数 1 成分もみられ,中緯度では地形の谷にあたる経度 270 度付近で値が大きく,極を取り巻く極小域は山にあたる経度 90 度の方にずれている。特に ho=400m の場合には波数 1 の成分が大きい。符号が反転する節となる位

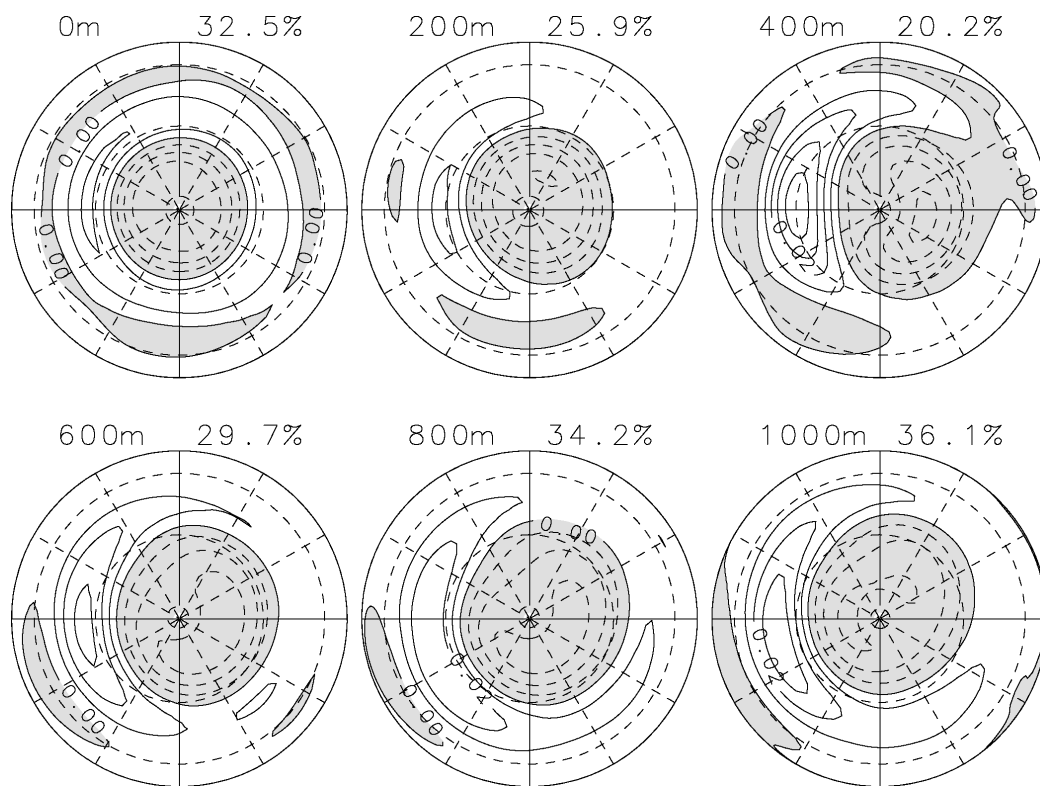


図 9: WN1 実験における地表面気圧の E0F1。ただし図の描き方は図 5 と同じ。

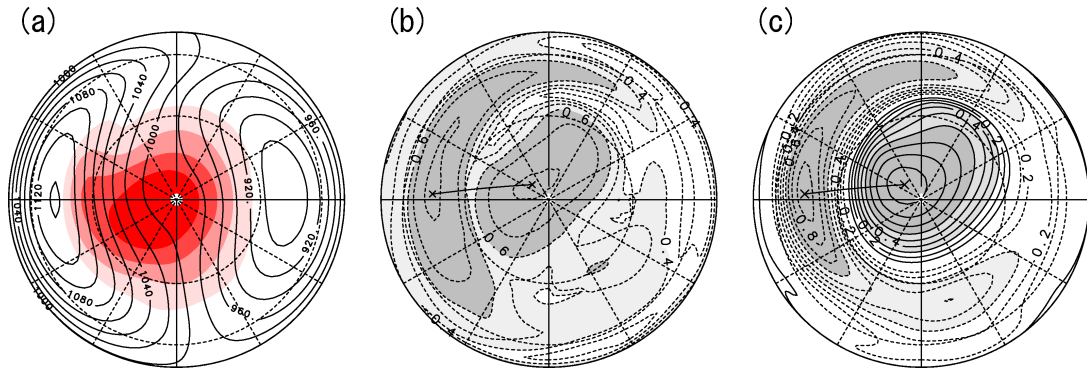


図 10: WN1 実験における $h_0=1000\text{m}$ の場合の(a)地表面気圧の時間平均とその分散,(b)1 点相関図および(c)図中の指標に対する相関図。図の描き方は図 8 と同じ。

置は $h_0=0\text{m}$ よりも $h_0=1000\text{m}$ の場合の方が低緯度にある。また寄与率は $h_0=0\text{m}$ の場合の約 30% から $h_0=400\text{m}$ の場合の 20% 近くまで減少し, $h_0 \geq 600\text{m}$ では 30% 前後である。これら節の位置や寄与率の変化は WN2 実験の結果と似た特徴をもっている。

P_s の分散をみると, $h_0=1000\text{m}$ の場合は図 10(a) のように極から地形の谷にかけて大きな値を持っている。1 点相関の結果(図 10(b)) をみると, 高緯度と中緯度間の逆相関が高い領域が 270 度を中心に東西にのびて存在しているのがわかる。ただし WN2 実験とは異なり, 逆相関である領域の対は 1 つだけである。またこの対の高緯度側は極を取り巻いており, 中心は極に近い。WN2 実験の解析と同様に逆相関が最も高かった 2 点から指標を定義し, その指標に対する各格子点の P_s との相関を計算した(図 10(c))。この場合の相関パターンは環状に近く, EOF1 のパターン(図 9 右下)と似ている。

4. まとめと議論

地形の振幅によって環状変動の実体は異なっている。U や P_s の EOF の寄与率や緯度構造などの特徴は h_0 に依存しており, $h_0=400 \sim 500\text{m}$ 付近で急に変化している。地形が小さな場合の気象変動は, WN2 実験, WN1 実験ともに経度方向の非一様性が小さく, 高緯度と中緯度間で逆相関の関係をもった変動が卓越している。EOF 解析と相関解析の結果はともに似た環状パターンであり, 環状変動が主要な変動成分であるといえる。

地形の振幅が大きな場合, WN2 実験, WN1 実験ともに P_s の EOF1 は環状であるが, その実体は地形が小さな場合の環状変動とは異なっている。WN2 実験では, P_s の分散の大きなところが 2 ヶ所あり, その経度帯が限られている。これはストームトラックが 2 つのジェットの出発域にそれぞれ形成されていることに因る。相関解析を行うと, それら 2 つの経度帯で局在化した南北方向の双極子パターンが得られる。これらの領域間の相関は低く, 変動は同期していない。一方, WN1 実験では P_s の分散が大きなところは 1 ヶ所だけであり極域を含んでいる。1 点相関解析の結果は南北双極子パターンを示すものの, 相関の高い領域は広い経度帯に及び, その振動を表す指標を基準とした相関図は EOF1 のパターンと似て環状である。

この対応はWN2実験の結果と異なるが、それはWN1実験では変動の大きな領域が1ヶ所であることに因ると考えられる。

これら一連の実験により、表面地形の違いによって環状変動の性質に大きな違いが見られることが分かった。地形の振幅だけでなくその東西波数によっても環状変動の実体は大きく異なっている。地形の違いにより偏西風ジェットやストームトラックの経度構造が変化し、同時に大規模な長期変動の空間構造も変化している。

現実大気において、北半球では大規模山脈が存在し、変動の大きな対流圏ジェットの出口域が大西洋と太平洋の2ヶ所に存在する。一方、南半球は海洋がほとんどで、北半球に比べ地形が平坦であるので、対流圏ジェットの東西非一様性が比較的小さい。地形による惑星規模波動の影響を考えると、 h_0 が小さな場合が南半球の状況に近く、WN2実験の h_0 が大きな場合が北半球の状況に近いと考えられる。

参考文献

- Akahori, K., S. Yoden, 1997: Zonal Flow Vacillation and Bimodality of Baroclinic Eddy Life Cycles in a Simple Global Circulation Model. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 2349-2361.
- Ambaum, A. H. P., B. J. Hoskins, D. B. Stephenson, 2001: Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation? *J. Climate*, **14**, 3495-3507.
- 地球流体電脳倶楽部, 1998: AGCM5.3. <http://www.gfd-dennou.org/arch/agcm5/>
- Deser, C., 2000: On the Teleconnectivity of the "Arctic Oscillation". *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1141-1144.
- Hartmann, D. L., 1995: A PV view of zonal flow vacillation. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2561-2576.
- Thompson, D. W. J., J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297-1300.
- Thompson, D. W. J., J. M. Wallace, 2000: Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, **13**, 1000-1016.
- Wallace, J. M., D. S. Gutzler, 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Mon. Weather Rev.*, **109**, 784-812.
- Wallace, J. M., 2000: North Atlantic Oscillation/annular mode: Two paradigms-one phenomenon. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **126**, 791-805.
- Yoden, S., M. Shiotani, I. Hirota, 1987: Multiple planetary flow regimes in the Southern Hemisphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 571-586.