

# 対流圏における天候レジームとその力学\*

北海道大学 大学院地球環境科学研究科 向川 均 (MUKOUGAWA Hitoshi)

## 概要

現実大気における天候レジームの力学に関する理解を深めるため、北大西洋域における夏季の天候レジームについて解析を行い、その力学的性質を冬季の天候レジームと比較した結果を報告する。また、天候レジームの発生頻度の年々変動として、気候変動を理解する力学的描像についても議論を行う。

## 1. 序

対流圏中高緯度における季節内長周期変動の理解には、「天候レジーム」という力学的概念が有効であることが最近の研究により明らかにされつつある (Kimoto and Ghil, 1993a,b; 以下では KG93a, KG93b)。天候レジームとは、(1) 地理的に固定した循環パターンを持ち、(2) 総観規模擾乱の持つ時間スケールよりも長い、一週間以上の持続性を持ち、(3) さらに再現性を有するという、大気循環パターンを客観的に定義したものである。例えば、冬季のアラスカ付近でしばしば発生するブロッキング現象なども、天候レジームとして定義される。また、対流圏中高緯度における季節内長周期変動は、いくつかの天候レジーム間の遷移現象として理解することができる。さらにこの視点は、力学的予報限界よりも長い予報期間を対象とする中長期天気予報を成功させる、最も有力な力学的指針を与えると考えられている (e.g., Kimoto et al. 1992; Palmer 1993)。

天候レジームが持つ特性の中で、どれに着目するかに依存して、観測データから天候レジームを定義する、いくつかの手法が提唱されている。Molteni et al. (1990) や KG93a, KG93b では、天候レジームが持つ再現性と持続性に着目し、観測データより構築される低次元位相空間で表現した大気状態の存在確率密度関数 (PDF) が局所的に極大となる領域として、天候レジームを定義する。また、いくつかのクラスター分析を用いた手法も、同様に、実現されやすい大気状態として天候レジームを定義するときに用いられている。例えば、Legras et al. (1987; 以下では LDP87) による iterative relocation method、Mo and Ghil (1988) による fuzzy clustering、Cheng and Wallace (1993; 以下では CW93) による hierarchical clustering、Michelangeli et al. (1995; 以下では MLV95) による least-squares clustering、さらには、Smyth et al. (1997) による cross-validated clustering がある。クラスター分析は、PDF 極大域を直接検索できないような、高次元位相空間においても適用可能であるが、得られたクラスターの統計的有意性を吟味することは難しい。しかしながら、異なるアルゴリズムを用いても、検出された天候レジームが類似した循環パターンを持つ場合には、その天候レジームの存在は、統計的有意性を持つと考えられる。

一方、準定常性という天候レジームが持つ、もう一つの特性に着目して、天候レジームを定義することも可能である。Vautard (1990; 以下では V90) と MLV95 は、観測データをもとに、総観規模擾乱に伴う渦度フラックスをパラメタライズして得られる、長周期変動成分に対する非線形の統計的方程式の解として天候レジームを定義している。この手法により検出される天候レジームは、必ずしも再現性や持続性に基づき検出された天候レジームと一致する必要性はない (MLV95)。この不一致は、単純化された大気モデルで得られる天候レジームにおいても確認されている (例えば、Vautard and Legras 1988; Mukougawa 1988)。

ところで、天候レジームに関するこれら全ての解析的研究は、冬季の半球あるいは領域的な大気循環場について行われており、他の季節における天候レジームに関する解析的研究は存在しない。これは、冬季に、季節内変動の活動性が最も大きく、検出される天候レジームの統計的有意性を議論しやすいことが原因と考えられる。他方、単純化した大気力学モデルにおいては、季節変化に対応する南北方向の差分加熱の強さなどの外部パラメータを変化させることにより、天候レジームを生じさせるいくつかの「吸引点」の存在が確認されている。これらの吸引点としては、不安定定常解 (Legras and Ghil 1985) や、非定常極小点 (あるいは、“ghost equilibrium”; Mukougawa 1988)、不安定周期解や擬周期解 (Mukougawa 1994)、さらには、多重カオスアトラクターやその廃虚 (Itoh and Kimoto 1996) といったものが提唱され、天候レジームはそれらの吸引点に、大気状態場が接近する時に生ずると考えられている。そこで、大気モデルにおける天候レジームのパラメータ依存性との比較という観点から、また、現実大気における天候レジームの力学についての理解を深めるためにも、冬季以外の季節における天候レジームを解析することが必要と考える。

\*本原稿は、Mukougawa and Sato (1999) に基づく

ここでは、毎日の 44 年分の北半球 700 hPa 等圧面高度場データに基づいて解析した夏季の天候レジームについて報告する。このデータセットは利用しうるデータの中では、最も長期間で完全なものである (KG93a)。この試みは、外部パラメータの変化に対する、現実大気における天候レジームの分岐特性を調べる研究に相当すると考えられる。

全ての季節における、北半球 700 hPa の高度場の年々変動については、Barnston and Livezey (1987; 以下では BL87) が、回転主成分分析の手法を用いた解析により、夏季に卓越する変動成分が、冬季と同様に北大西洋振動 (NAO) であることを示した。また、夏季の NAO の変動パターンが、北大西洋域にのみ偏在し、全球的な拡がりを持つ冬季の NAO とは対照的であることも明らかにした。これは、夏季の偏西風が冬季に比べ弱いためと考えられる。さらに、NAO は季節内変動の周期帯においても、最も卓越するモードであるため (KG93a)、夏季において、統計的有意性を持つ天候レジームを検出できる可能性が最も高いのは、北大西洋域と考えられる。

従って、以下では、北大西洋域における天候レジームについて解析を行う。これまでの研究 (LDP87, V90, KG93b, CW93, MLV95) において、同じ北大西洋域で冬季に検出された天候レジームと比較することにより、夏季の天候レジームが持つ特性について詳細に検討する。

## 2. データと主成分 (EOF) 分析

本研究で用いたデータセットは、NOAA の Climate Analysis Center (現在 NCEP の Climate Prediction Center) で編纂された、北緯 20 度以北の北半球 700 hPa 等圧面高度場で、一日 2 回、水平方向に 10 度×10 度のダイヤモンド格子上で与えられる。これは、KG93a, KG93b で用いられたのと同じデータセットである。ここでは、6 月 1 日から 8 月 31 日までの期間で定義した北半球夏季において、北緯 20 度から 80 度、西経 80 度から東経 40 度で囲まれる北大西洋域について、1951 年から 1994 年までの 44 年分のデータを解析した。この領域には、176 個の格子点が含まれる。

まず、一日 2 回のデータを平均し、一日毎のデータを作成し、さらに、季節変化を除くため、毎日の各格子点データから、44 年平均値に 5 日の移動平均を施した「気候値」を取り除き、アノマリデータを作成した。このアノマリデータは、合計、4048 日分のデータとなる。

次に、北大西洋域での主要な季節内長周期変動成分を取り出すため、アノマリデータに 10 日の low-pass フィルター (Blackmon 1976) を施したのについて、EOF 解析を行った。この low-pass フィルターは、主要な EOF 成分の寄与率を高める効果を持つが、その空間パターンにはほとんど影響しない。

図 1 に、各主成分の寄与率を、その誤差範囲 (North et al. 1982) とともに示す。この図より、第 3 主成分と第 4 主成分との間に、寄与率の明確なギャップが存在することがわかる。従って、以下では、主要な 3 つの EOF 成分を用いて、PDF を求める位相空間を構築する。なお、この 3 成分で全変動の 43.8 % を説明する。

図 2 には、主要な 3 つの EOF 成分の空間パターンを示す。この図におけるコンターは、スコア (Principal Component; PC) が標準偏差に等しくなったときの値を示す。第 1 モード (図 2a) は、グリーンランドと北緯 20 度付近の北大西洋に変動の中心を持つ、南北の双極子 (dipole) 構造として特徴づけられる。このモードは、BL87 により報告された NAO に対応する。第 2 モード (図 2b) は、スカンジナビア半島の南西に変動の中心を持ち、西ヨーロッパで発生するブロッキングに対応する。第三モード (図 2c) は、イギリスの西と、スカンジナビア/西ヨーロッパ付近に変動の中心を持つモードとして特徴づけられる。

## 3. 3 次元 PDF と天候レジーム

ここでは、主要な 3 つの EOF 成分で張られる 3 次元位相空間で PDF を求め、その非一様性の統計的有意性を吟味し、天候レジームを抽出する。

### a. 3 次元 PDF

まず、毎日の主要な 3 つの EOF 成分に伴うスコアに基づき、3 次元位相空間における PDF を、KG93a と同様の kernel method (Silverman 1986) により推定する。推定された PDF は 3 次元の位置ベクトル  $\mathbf{x}$  の関数  $\hat{f}(\mathbf{x})$  として次のように与えられる:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \frac{1}{C} \sum_{i=1}^N \eta_i^{-3} K\left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{X}_i}{h\eta_i}\right) \quad (1)$$

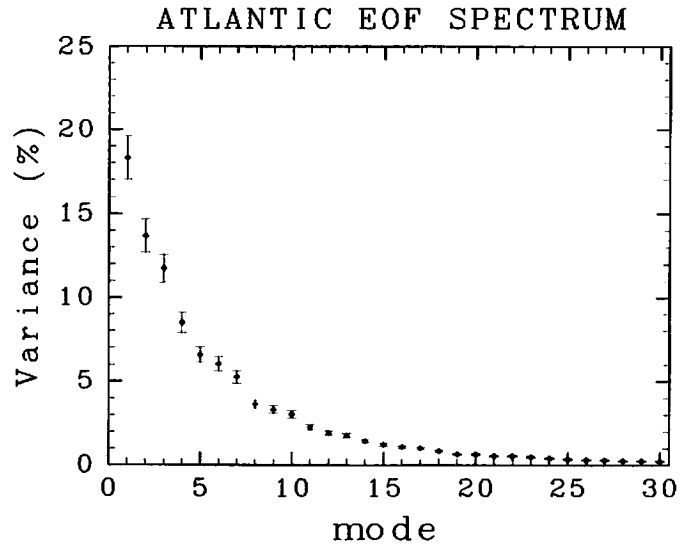


図 1. 北大西洋域での主要な 30 個の EOF 成分の寄与率。経験的に推定される寄与率の誤差範囲を縦線で示す。

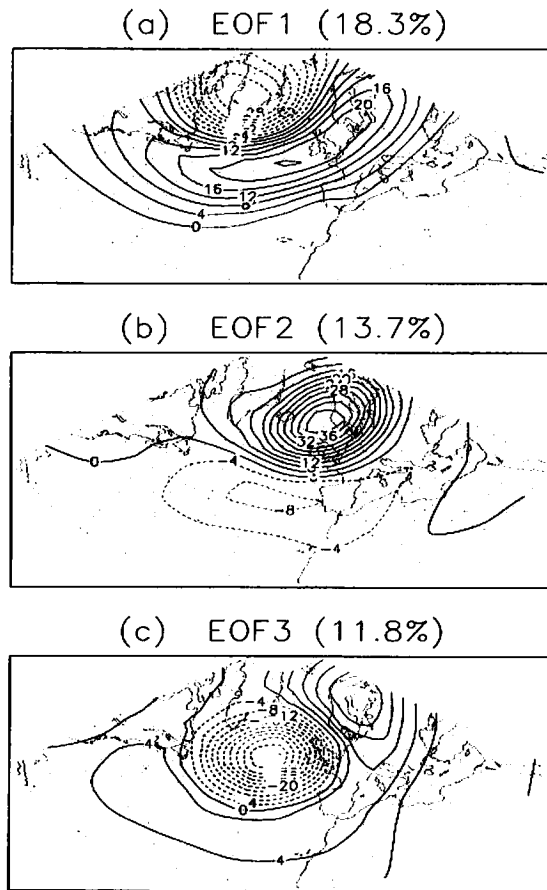


図 2. (a) EOF1, (b) EOF2, (c) EOF3 の空間パターン。負の値を持つコンターを破線で示す。コンターは、スコアが標準偏差に等しくなったときの値を示す (m)。

ここで、 $X_i$  は、 $i$ -番目のデータ点を示し、 $h$  は平滑化パラメータ (smoothing parameter)、 $\eta_i$  は各データ点の局所的影響幅 (KG93a の式 (4) で定義される) であり、 $C$  は  $\int \hat{f}(x) dx = 1$  を保証するための定数である。ここで、Epanechnikov kernel  $K$  は、

$$K(x) = \begin{cases} 1 - \|x\|^2, & \text{if } \|x\|^2 < 1 \\ 0, & \text{if } \|x\|^2 \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

で定義される。また、平滑化パラメータ  $h$  は、least-squares cross validation (LSCV) によって、 $h = 1.1$  と推定した (KG93a)。なお、以下で得られる結果は、LSCV で見積もられた適切な範囲での、 $h$  の値には依存しないことも確認した。

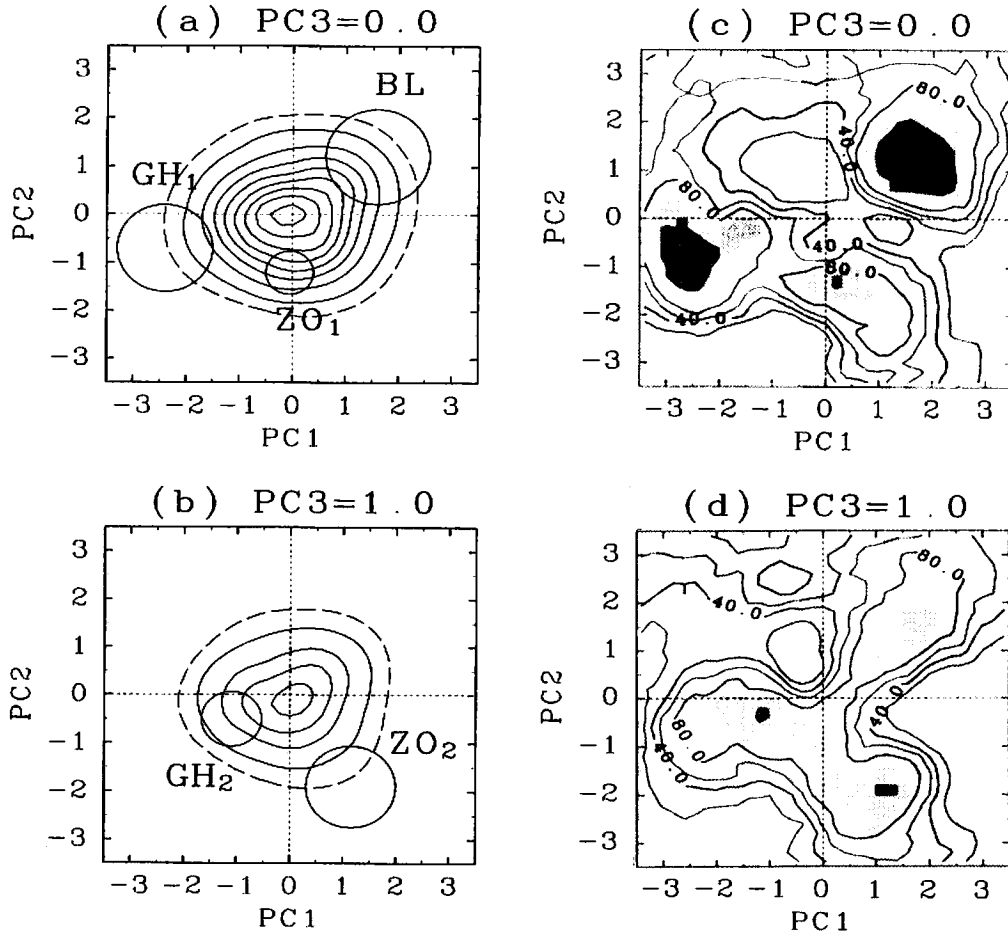


図3. 大西洋域における主要な3つのEOF成分で張られた位相空間におけるPDF ( $h = 1.1$ ) を、(a)  $PC3$  (第3主成分のスコア) = 0.0、(b)  $PC3 = 1.0$  の切断面上で示す。各座標軸は、 $PC1$  の標準偏差で規格化した。コンター間隔は 0.01 で、破線は 0.005 の値のコンター。各天候レジームの領域を、その略称と伴に示す。ガウス分布からのPDF偏差の統計的有意性を、(c) と (d) に示す。PDFの値が、98% (90%) 以上の有意水準でガウス分布よりも大きい領域を、濃い (薄い) 陰影で示した。

図3a, bに、このようにして得られた3次元PDFを、 $PC3$  (第3主成分のスコア) をある値に固定した切断面上で表現したものを示す。この図で、ガウス分布からの偏差として、PDFの非一様性を捉えることができる。例えば、図3aの第1、第3、第4象限にPDFの伸びた「峰」を見て取ることができる。そして、KG93aと同様に、モンテカルロ法を用いた手法により、PDFの値がガウス分布より有意に大きい領域の存在を検証した。

その結果 (図3c, d)、PDFがガウス分布よりも有意 (98% 以上) に大きい領域をいくつか特定することに成功し、その領域を天候レジームとして定義した。各々の天候レジームについて、定量的な議論を行うため、さらに、次のように天候レジームの領域を決定した。すなわち、3次元空間においてPDFの値が、98% 以上の有意水準でガウス分布よりも大きい領域をそれぞれ囲み、しかも、互いに重ならない、最小の

「球」として、各天候レジームの領域を定義する。このように検出された天候レジームは、5つあり、その循環パターンの特徴から、それぞれ、GH<sub>1</sub>、GH<sub>2</sub>、ZO<sub>1</sub>、ZO<sub>2</sub>、BL と名付けた。

表 1. 夏季の北大西洋域における天候レジームの特徴。表の各列の意味は以下の通りである。(1) 3次元位相空間における各レジームの中心位置 (PC1, PC2, PC3)。但し、各主成分の値は PC1 の標準偏差で正規化されている。(2) レジームの半径。(3) レジームの中心位置での PDF と、その有意性 (カッコ内: %)。(4) レジームが生じた回数。(5) レジームと定義された日数。(6) レジームの平均持続日数  $T_d$ 。(7) 各レジーム間の平均遷移間隔日数  $T_w$ 。

Regime	PC1	PC2	PC3	Radius	PDF×10 <sup>2</sup>	Number of events	Number of days	$T_d$	$T_w$
GH <sub>1</sub>	-2.4	-0.7	0.0	0.9	0.45 (99)	38	81	2.1	6.8
GH <sub>2</sub>	-1.1	-0.5	0.8	0.6	2.9 (98)	55	112	2.0	12.8
ZO <sub>1</sub>	-0.05	-1.2	0.4	0.6	3.7 (100)	88	142	1.6	10.7
ZO <sub>2</sub>	1.15	-1.9	0.9	0.85	0.41 (98)	33	60	1.8	11.7
BL	1.6	1.2	-0.2	1.0	1.3 (100)	94	250	2.7	14.1
Total/mean						308	645(15.9%)	2.1	11.7

#### b. 天候レジームの特徴

表 1 に各天候レジームの統計を示す。全データ日数 4048 のうち、いずれかの天候レジームに分類された日数は 645 日で、全体の 15.9% を占める。これは、冬季の北大西洋域における天候レジームのそれ (45.0%; KG93b) に比べ大変少ない。また、平均持続日数  $T_d$  は、2.1 日で、冬季 (5.5 日) に比べ短い。一方、ある天候レジームから次の天候レジームに遷移するまでの期間  $T_w$  の平均は 11.7 日で、冬季 (8.1 日) に比べて長い。従って、夏季の天候レジームは、再現性を持つが、その持続性は冬季に比べて弱いと結論できる。

図 4 に、夏季の各々の天候レジームの総観的特徴を、アノマリ高度場の合成図で示す。一方、図 5 は、気候場も含めた合成図である。また、図 4 での陰影領域は、 $t$ -検定の結果、アノマリが 99% の統計的有意性を持つと判断された領域を示す。

GH<sub>1</sub> (グリーンランド高気圧) レジーム (図 4a) は、グリーンランドでの正のアノマリと、北海付近での負のアノマリで特徴づけられる。このパターンは、EOF 第 1 モード (図 2a) に良く似ている。気候場との合成図 (図 5a) では、グリーンランドでの気圧の峰と、それに伴う、北西大西洋での弱いジェットが見て取れる。

GH<sub>2</sub> レジーム (図 4b と図 5b) は、GH<sub>1</sub> レジームと良く似た循環パターンを持つが、グリーンランドの正のアノマリの振幅は小さい。

ZO<sub>1</sub> (ゾナル) レジーム (図 4c) はイギリス北方の負のアノマリで特徴づけられる。北大西洋域でのジェットは平年並の強さである (図 5c)。

ZO<sub>2</sub> レジームは、ZO<sub>1</sub> と良く似ているが、アノマリの振幅は大きく (図 4d)、北大西洋域に平年よりも強い偏西風ジェットが存在する (図 5d)。

BL (ブロッキング) レジームは、北海に中心を持つブロッキング高気圧を伴う (図 4e, 図 5e)。グリーンランド上空には、弱い負のアノマリが存在する。このことから、BL レジームは、GH<sub>1</sub> や GH<sub>2</sub> レジームとはほぼ逆の極性を持ち、両者のレジーム間の遷移により、NAO が形成されていることがわかる。なお、BL レジームは最も発生頻度の高いレジームである (表 1)。

図 6 に、 $n$  日以上持続したレジームの数を片対数でプロットすることにより、各レジームの持続特性を示す。プロットされた曲線は、ほぼ直線となり、レジームの持続確率は、持続日数  $n$  とともに指数関数的に減少することがわかる。この持続特性は、冬季の天候レジーム (例えば、Dole and Gordon 1983; KG93b) や、力学モデル (例えば、Legras and Ghil 1985; Mukougawa 1988) 及び、大循環モデル (例えば、D'Andrea et al. 1998) で出現する天候レジームにも共通するものである。なお、Mukougawa (1988) は、この持続特性が、天候レジームを形成する不安定定常解の周りでの局所的線型場の性質から説明できることを示している。また、BL レジームは他のレジームに比べて、持続しやすいこともわかる。

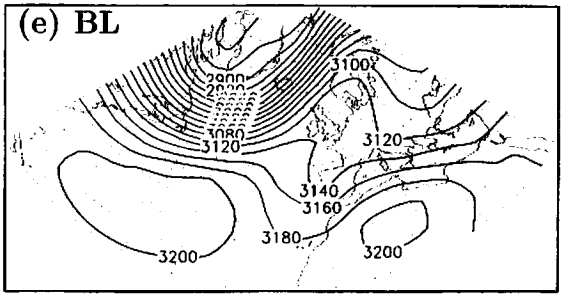
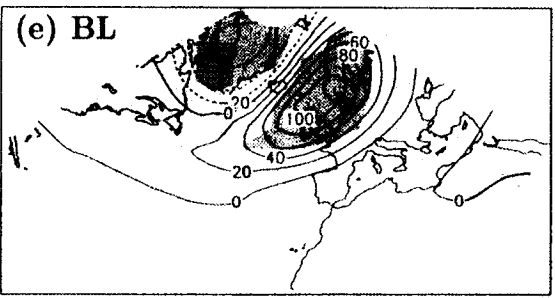
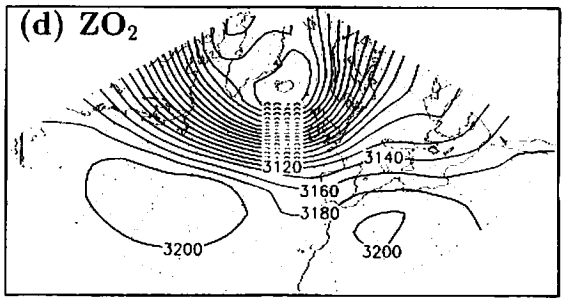
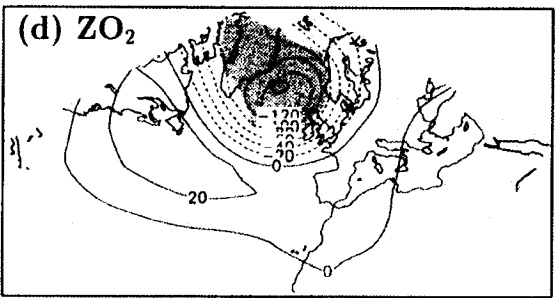
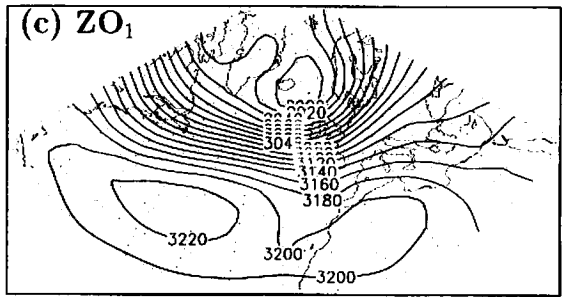
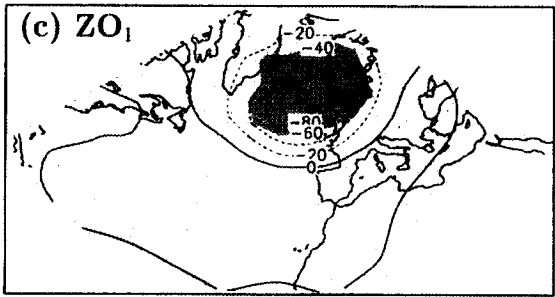
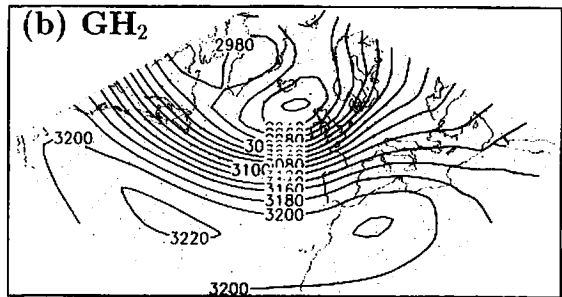
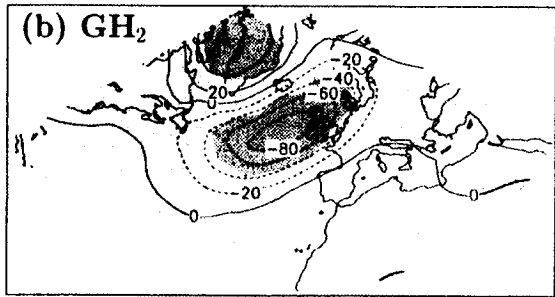
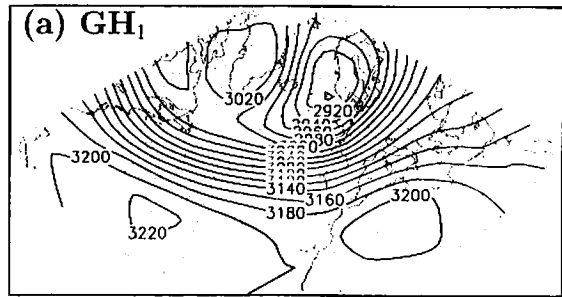
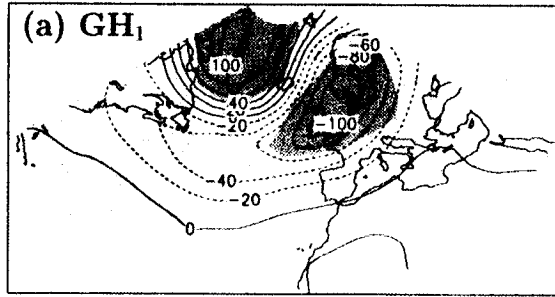


図4. 5つの天候レジームの合成アノマリー図。陰影部分は、 $t$ -検定でアノマリが99%以上有意と判断された領域。コンター間隔は20 m。負の値のコンターを破線で示す。

図5. 図4に同じ。但し、気候値を含む700hPa高度場で示す。コンター間隔は20 m。

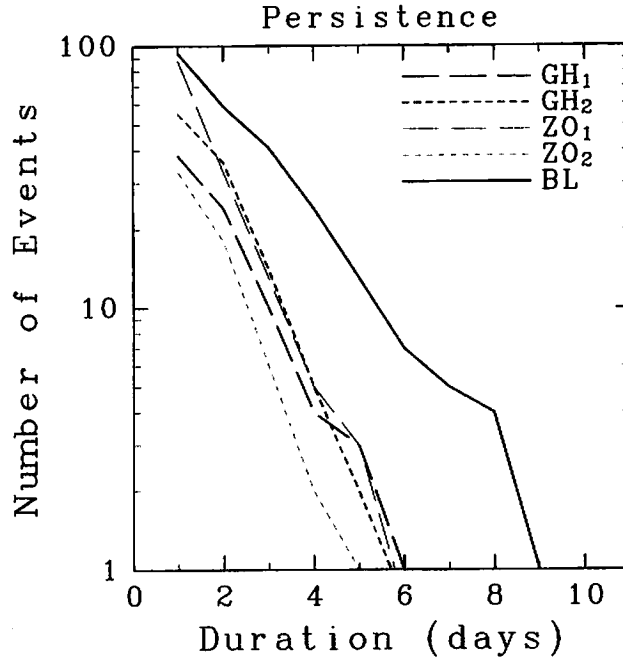


図 6. 天候レジームの持続特性。n 日以上持続したレジームの数を片対数で示す。

c. 天候レジーム間の遷移

中高緯度大気の季節内長周期変動の時間発展の特性は、天候レジーム間の遷移行列で表現されるマルコフ過程でうまく記述することができる (Mo and Ghil 1988; KG93b; Vautard et al. 1990)。表 2 に、夏季の天候レジーム間の遷移回数表現する遷移行列を示す。また、遷移行列の各要素の統計的有意性を、Vautard et al. (1990) による、モンテカルロ法に基づく手法で求めた。この表より、冬季の天候レジーム (KG93b) と同様に、夏季の天候レジーム間の遷移確率は一様ではなく、生じやすい (生じにくい) 遷移経路が存在することがわかる。GH<sub>1</sub> ⇒ GH<sub>2</sub> と ZO<sub>2</sub> ⇒ ZO<sub>1</sub> への遷移は、95%以上の有意水準で生じやすい遷移として判断される。このことと、循環パターン (図 4, 5) での類似性を考慮すると、GH<sub>2</sub> (ZO<sub>1</sub>) レジームを、GH<sub>1</sub> (ZO<sub>2</sub>) レジームと区別することに意味はなく、同じ天候レジームと判断するのが妥当と考えられる。

もう一つの生じやすい遷移経路は BL ⇒ BL である。これは、BL レジームが他のレジームとは孤立しており、BL レジームは繰り返し生じやすいことを意味している。また、NAO を形成する 2 つのレジーム (BL と、GH<sub>1</sub> や GH<sub>2</sub>) の間では直接の遷移が生じにくいことから、NAO が単純な振動現象ではないこともわかる。さらに、KG93b で示されたように、冬季の天候レジーム間に見られる、生じやすい閉じた遷移経路 (chain of likely transitions) は、夏季には見られないことも、この表から見て取れる。

表 2. 夏季の北大西洋域での天候レジーム間の遷移行列。有意水準 90%以上で生じやすい (生じにくい) 遷移は太文字 (斜体文字)、95%以上の有意水準を持つ遷移には下線を付けた。

From/To	GH <sub>1</sub>	GH <sub>2</sub>	ZO <sub>1</sub>	ZO <sub>2</sub>	BL	Sum
GH <sub>1</sub>	6	<u>17</u>	6	<u>0</u>	6	35
GH <sub>2</sub>	8	10	17	5	<u>6</u>	46
ZO <sub>1</sub>	8	14	26	11	19	78
ZO <sub>2</sub>	<u>0</u>	2	<u>14</u>	4	9	29
BL	6	10	<u>14</u>	5	<u>43</u>	78
Sum	28	53	77	25	83	

4. 考察

北大西洋域における夏季の天候レジームの循環パターンと、冬季のそれとの類似性を、表 3 に示した。この表から、夏季の天候レジームと類似する循環パターンを持つ天候レジームが、冬季にも存在することがわかる。しかし、冬季に出現する天候レジームのうちいくつかは、夏季には検出されない。これらの天候

レジームの中には、KG93b で検出された A3、A5 のような北大西洋域でのブロッキング現象に対応する循環パターンを持つものが含まれる。

この夏季と冬季の天候レジーム間の類似性は、NAO が季節を通じて卓越するモードである (BL87) ことと矛盾しない。その理由としては、北大西洋域における季節平均場の季節変化が小さいことが考えられる。季節変化が大きい、北太平洋域では、夏季と冬季に卓越する主成分のパターンも異なることから、検出される天候レジームも大きく異なると推論できる。

表 3. 北大西洋域において、本研究 (MS99) で得られた夏季の天候レジームと、過去の研究 (LDP87, V90, KG93b, CW93, MLV95) で得られた冬季の天候レジームとの類似性。循環パターンの類似性から、同じ天候レジームと判断したものを、同じ行にその略称で記した。横線は、対応する天候レジームが検出されていないことを示す。

MS99	LDP87	V90	KG93b	CW93	MLV95
GH <sub>1</sub> , GH <sub>2</sub>	SP4	GA	A4	G+	C1
ZO <sub>1</sub> , ZO <sub>2</sub>	SP1	---	A6	---	C3
BL	SP2	BL	A2	G-	C2
---	SP3	ZO	A1	---	---
---	---	AR	A3	---	C4
---	---	---	A5	---	---

一方、夏季の天候レジームの持続性が、冬季に比べ弱いという事実は、単純化した力学モデルにおける天候レジームの外部パラメータ依存性とは一見矛盾している。力学モデルでは、季節変化に対応する外部パラメータである、南北非断熱加熱差を大きくした場合、モデルで現れる運動は、次第に、乱雑になり、持続性は弱くなっていく (M88)。従って、力学モデルの結果からは、夏季に対応するパラメータ領域での運動は、冬季に比べ、より規則的で持続性を持つことが示唆される。しかし、この矛盾は、力学モデルでは表現されていない、ランダムな外部強制力を考慮することで、解決できる可能性がある。このような強制力としては、例えば、熱帯における積雲対流活動を考えることができる。また、この見方は、夏季において、天候レジーム間で遷移しやすい経路が存在しない事実とも調和的である。ランダムな強制力の影響が大きい場合には、中高緯度大気自身に固有に存在する、遷移が生じやすい天候レジーム間の経路が乱され、遷移がランダムになると推論できる。また、その場合における、天候レジームの持続性は、ランダムな強制力の強さと、天候レジームを形成する不安定定常解などの「吸引領域」の「ポテンシャル壁の高さ」との兼ね合いによって決定される (Benzi et al. 1984)。

次に、図 7 を用いて、天候レジームの年々変動について議論する。この図から、いくつかの天候レジームの発生頻度が、比較的大きく年々変動することが明らかである。特に、BL レジームの年々変動は顕著であり、例えば、1976 年の BL レジームの卓越は、西ヨーロッパに大干ばつをもたらしている (Green 1977)。従って、天候レジームの発生頻度の年々変動は、西ヨーロッパの気候変動と強く関連していると考えられる。また、GH<sub>1</sub> や GH<sub>2</sub> と BL との発生頻度の間に、逆相関が見て取れる。この逆相関は、例えば、1954 年、1955 年、1974 年や 1976 年で、顕著である。このことから、北大西洋域における夏季の季節平均場の年々変動において、NAO パターンが卓越するという事実 (BL87) は、各天候レジームの発生頻度の年々変動として理解できる可能性がある。

Palmer (1993) は、3 元ロレンツシステムにおいて、海面温度分布 (SST) などの外部強制力の年々変動の天候レジームに対する影響を考察した結果、天候レジームの循環パターンは、外部強制力の変動にほとんど影響されないが、その PDF のみが大きく影響を受けることが示唆されている。また実際、Robertson et al. (1999) は、北大西洋域の 10 年周期振動に対応するパターンを持つ、正の SST 偏差 (振幅の大きさは観測の 5 倍) を中緯度域で与え、大気 GCM を長期間数値積分することにより、GCM 中で出現する天候レジームの年々変動を調べた。その結果、この SST 偏差により、本研究で示された BL と類似する天候レジームの発生頻度が高くなり、逆に、GH<sub>1</sub> (GH<sub>2</sub>) レジームに類似する天候レジームの発生頻度が低くなることを示された。これらの結果は、本研究で得られた夏季の天候レジームの年々変動における、BL と GH<sub>1</sub> (GH<sub>2</sub>) との発生頻度の逆相関と類似しており、大変興味深い。一方で、我々は、北大西洋域の SST 偏差分布を調べたが、BL レジームが卓越する年に共通する SST 偏差パターンは検出できなかった。従って、現実大気における外部強制力と天候レジームとの関連性は、大変微妙であることが推論される。



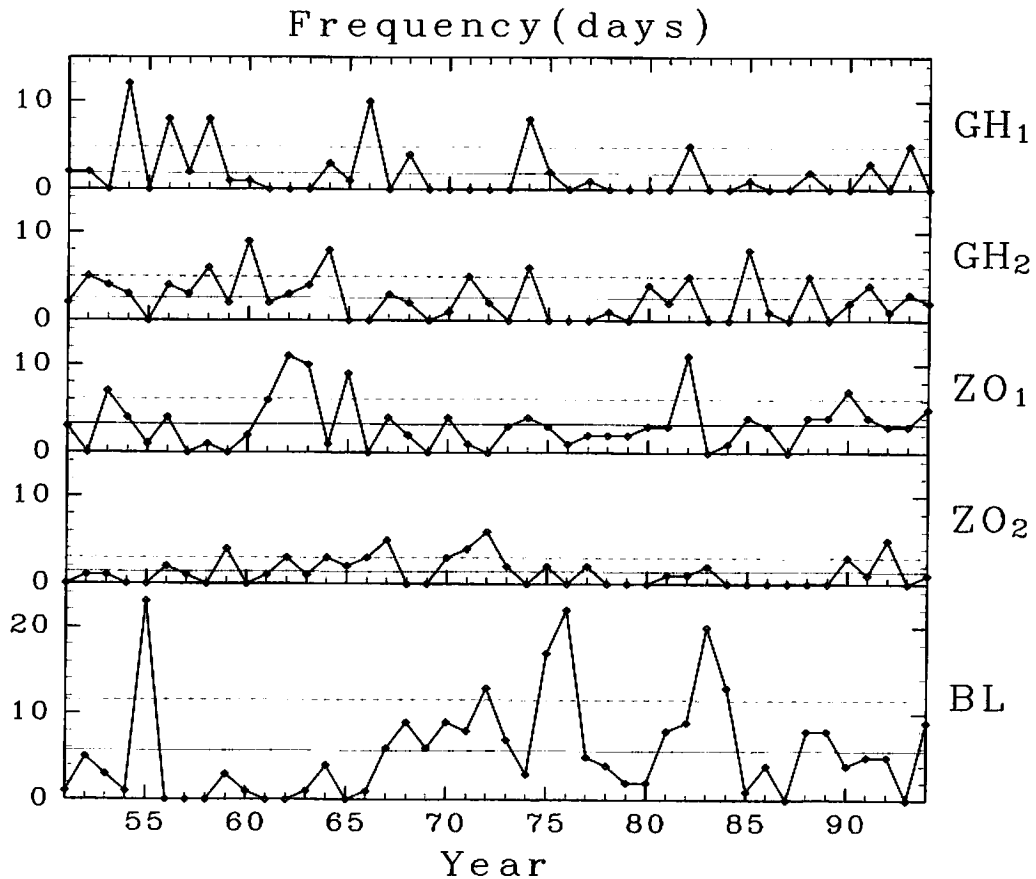


図7. 夏季の天候レジームの発生頻度の年々変動。毎年、各レジームに分類された日数をプロットする。水平な実線と破線はそれぞれ、発生頻度の平均と平均+標準偏差の値。

## 5. 結論

本研究では、北大西洋域における44年分の日々の700hPa高度場データに基づき、夏季の天候レジームについて解析を行った。ここでは、天候レジームを、主要なEOF 3成分により張られる位相空間において、存在確率密度(PDF)が、ガウス分布から有意に大きい領域として定義した。得られた結果は以下の通りである。

- 5つの天候レジーム(GH<sub>1</sub>, GH<sub>2</sub>, ZO<sub>1</sub>, ZO<sub>2</sub>, BL)を検出した。これらは、循環パターンの類似性から、おおまかに、3つのグループに分類できる: GH<sub>1</sub>とGH<sub>2</sub>は、グリーンランドでの高気圧; ZO<sub>1</sub>とZO<sub>2</sub>は、北大西洋域での強い偏西風ジェット; BLは、ヨーロッパでのブロッキング高気圧で特徴づけられる。
- BLとGH<sub>1</sub>(GH<sub>2</sub>)レジームは、北大西洋振動(NAO)の二つの位相に対応する。
- 夏季の天候レジームの持続性(2.1日)は、冬季のそれ(5.5日)に比べ小さいが、BLレジームは比較的持続性が高い。
- 天候レジーム間の遷移をマルコフ過程により記述した。遷移しやすい(しにくい)経路が、冬季と同様に存在した。しかし、BLレジームは、他のレジームとは孤立して存在する。また、冬季に見られた、閉じた遷移経路は夏季には存在しない。
- 夏季の天候レジームと類似する循環パターンを持つ天候レジームが冬季にも存在する。しかし、冬季に出現する天候レジームのいくつかは、夏季には出現しない。
- 天候レジームの発生頻度には大きな年々変動がある(特に、BLレジーム)。これは、北大西洋域での季節平均場の年々変動が、各天候レジームのPDFの年々変動として記述できることを意味している。

## 謝辞

本研究で使用したデータは、東京大学気候システム研究センターの木本昌秀氏より提供して頂いた。図の作成には、地球流体電脳ライブラリと GrADS を用いた。記して感謝いたします。

## 引用文献

- Barnston, A. G., and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1083–1126.
- Benzi, R., A. R. Hansen, and A. Sutera, 1984: On stochastic perturbation of simple blocking models. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **110**, 393–409.
- Blackmon, M. L., 1976: A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **33**, 1607–1623.
- Cheng, X., and J. M. Wallace, 1993: Cluster analysis of the Northern Hemisphere wintertime 500-hPa height field: Spatial patterns. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2674–2696.
- D’Andrea, F., S. Tibaldi, M. Blackburn, G. Boer, M. Déqué, M. R. Dix, B. Dugas, L. Ferranti, T. Iwasaki, A. Kitoh, V. Pope, D. Randall, E. Roeckner, D. Straus, W. Stern, H. Van den Dool, D. Williamson, 1998: Northern Hemisphere atmospheric blocking as simulated by 15 atmospheric general circulation models in the period 1979–1988. *Climate Dynamics*, **14**, 385–407.
- Dole, R. M., and N. D. Gordon, 1983: Persistent anomalies of the extratropical Northern Hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1567–1586.
- Green, J. S. A., 1977: The weather during July 1976: Some dynamical considerations of the drought. *Weather*, **32**, 120–126.
- Itoh, H., and M. Kimoto, 1996: Multiple attractors and chaotic itinerancy in a quasigeostrophic model with realistic topography: Implications for weather regimes and low-frequency variability. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 2217–2231.
- Kimoto, M., H. Mukougawa, and S. Yoden, 1992: Medium-range forecast skill variation and blocking transition: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1616–1627.
- Kimoto, M., and M. Ghil, 1993a: Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter. Part I: Methodology and hemispheric regimes. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2625–2643.
- Kimoto, M., and M. Ghil, 1993b: Multiple flow regimes in the Northern Hemisphere winter. Part II: Sectorial regimes and preferred transitions. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 2645–2673.
- Legras, B., and M. Ghil, 1985: Persistent anomalies, blocking and variations in atmospheric predictability. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 433–471.
- Legras, B., T. Desponts, and B. Pignat, 1987: Cluster analysis and weather regimes. *Proc. Workshop on the Nature and Prediction of Extratropical Weather Systems* Vol. 2. ECMWF, Reading, Shinfield Park, UK, 123–149.
- Michelangeli, P.-A., R. Vautard, and B. Legras, 1995: Weather regimes: Recurrence and quasi stationarity. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 1237–1256.
- Mo, K. C., and M. Ghil, 1988: Cluster analysis of multiple planetary flow regimes. *J. Geophys. Res.*, **93**, 10927–10952.
- Molteni, F., S. Tibaldi, and T. N. Palmer, 1990: Regimes in the wintertime circulation over northern extratropics. I: Observational evidence. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **116**, 31–67.
- Mukougawa, H., 1988: A dynamical model of “quasi-stationary” states in large-scale atmospheric motions. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2868–2888.
- Mukougawa, H., 1994: “Periodic sequences” embedded in aperiodic motions in the Lorenz system. *J. Meteor. Soc. Japan*, **72**, 747–763.
- Mukougawa, H., and H. Sato, 1999: Multiple weather regimes in the summertime North Atlantic circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 483–494.
- North, G. R., T. L. Bell, R. F. Cahalan, and F. J. Moeng, 1982: Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 699–706.
- Palmer, T. N., 1993: Extended-range atmospheric prediction and the Lorenz model. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **74**, 49–65.
- Robertson, A. W., M. Ghil, and M. Latif, 1998: Interdecadal changes in atmospheric low-frequency variability with and without boundary forcing. *J. Atmos. Sci.*, submitted.
- Silverman, B. W., 1986: *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. Chapman and Hall, 175 pp.
- Smyth, P., M. Ghil, K. Ide, J. Roden, and A. Fraser, 1997: Detecting atmospheric regimes using cross-validated clustering. *Proc. of the Third International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Menlo Park, CA, US, 61–66.
- Vautard, R., 1990: Multiple weather regimes over the North Atlantic: Analysis of precursors and successors. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2056–2081.
- Vautard, R., and B. Legras, 1988: On the source of midlatitude low-frequency variability. Part II: Nonlinear equilibration of weather regimes. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 2845–2867.
- Vautard, R., K. C. Mo, and M. Ghil, 1990: Statistical significance test for transition matrices of atmospheric Markov chains. *J. Atmos. Sci.*, **47**, 1926–1931.