

# 修士論文

## 初秋の東アジア域における 大気大循環場の年々変動に関する解析的研究

京都大学大学院 理学研究科 地球惑星科学専攻

吉田 裕一

(Yuichi Yoshida)

平成 20 年 1 月 28 日提出

## 要旨

近年の人間活動に伴う地球温暖化は、集中豪雨などの顕著現象の出現頻度を変化させるだけでなく、中高緯度における季節進行にも影響を与える可能性が指摘されている。この影響は、2007年9月など、近年厳しい残暑が西日本を中心に頻発する傾向にも現れている可能性がある。従って、初秋(9月)の東アジア域における大気循環場の年々変動の実態と、そのメカニズムを明らかにすることは、大変重要である。このため本研究では、JRA-25長期再解析データや、外向き長波放射(OLR)データを利用して、東アジア域における初秋の大気循環場変動について詳しい解析を行った。解析には、1979年から2006年までの28年間の月平均データを用いた。

まず、9月の全球での500hPa高度場の線形トレンド成分として、中国東北部からアリューシャン列島の南方に至る帯状の正の有意なトレンドの存在を確認した。このトレンドは、季節進行に伴う北太平洋高気圧の衰弱が近年遅れ、日本付近の残暑が長引く傾向にあることを示唆している。この正のトレンドの領域で850hPa温度場においても、正のトレンドが存在する。

次に、主成分分析によって、東アジア域における大気循環場の主要な年々成分を取り出した。その結果、9月の東アジア域における500hPaの流線関数月平均偏差場変動の第1主成分(EOF1)として、日本付近に変動の中心を持つ変動パターンが抽出された。このモードの寄与率は36.5%で、ほぼ日本全域で同位相で変動するパターンである。また、このモードは、日本付近の850hPa温度変動と有意に関連している。しかし、このモードに伴うスコアには有意なトレンドはない。また、このモードは、西アジア域からアジアジェット上を東に伝播するロスビー波列であると考えられるシルクロードパターンを含むことが示された。さらに、この循環偏差場は、南アジア域の対流活動とも有意に関連し、南アジア域で対流活動が活発な年には、日本付近は厳しい残暑となる。一方、第2主成分(EOF2)として、トレンド成分と良く似た変動成分が抽出された。この寄与率は21.0%で、このモードにともない、北日本を中心とする帯状の高気圧性偏差が形成されるときには、フィリピン北東海上での対流活動が活発になる傾向があることがわかった。

以上より、近年における9月における東アジア域での大気循環変動は、西アジア域から東方に伝播するシルクロードパターンに良く似た循環偏差場を表現する年々変動成分と、季節進行に伴う北太平洋高気圧の衰弱を妨げるようなトレンド成分によって特徴づけられることが明らかになった。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>2</b>
1.1	日本付近における9月の気候の特徴	2
1.2	北太平洋高気圧	3
1.3	北太平洋高気圧の起源や変動要因	3
<b>2</b>	<b>データと解析手法</b>	<b>7</b>
2.1	使用データ	7
2.2	トレンド解析	7
2.3	EOF解析	7
2.4	解析領域	8
<b>3</b>	<b>解析結果</b>	<b>9</b>
3.1	気候値	9
3.2	トレンド解析	13
3.3	EOF解析	16
3.3.1	9月の主成分	16
3.3.2	8月の主成分	23
3.3.3	8月と9月のEOFの比較	31
<b>4</b>	<b>まとめ</b>	<b>32</b>

# 1 はじめに

産業革命以降の人間活動に伴う大気中における二酸化炭素濃度の増大が温室効果を促進し、1980年代以降の地球温暖化の主要因になっていることは、ほぼ間違いのない事実と考えられるようになってきた(IPCC,2007)。この地球温暖化は、集中豪雨、渇水、異常高温などの顕著現象の出現頻度を増加させることが懸念されている。日本においても、1994年や2004年、2007年など盛夏期に極端な猛暑や2007年などの記録的な暖冬が近年、相次いだ。一方、地球温暖化は、これらの顕著現象の出現頻度の増大だけではなく、季節進行にも大きな影響を与える可能性が指摘されている。例えば、Kobayashi and Maeda(2006)は、近年、9月と10月におけるハドレー循環が強化する傾向にあり、北半球の夏の気候循環の特徴が秋にずれ込む傾向を示唆している。日本付近においても残暑が厳しくなる傾向にあり、特に、2007年9月は全国の地上気象官署153地点中、64地点で月平均気温が観測史上1位、西日本全体でも観測史上1位(東日本は2位)と猛烈な残暑を記録した。また、1999年9月も残暑が極端に厳しく、全国の99地点で月平均気温の高い記録を更新している。一方、冷夏だった2003年も9月になってから真夏並の暑さに見舞われ、大阪など9月になってから年間の最高気温を記録したところが多くなった。また、厳しい残暑や夏から秋への季節進行の遅れは、秋物商材の不振など経済活動にとって大きなマイナスの要因となり、その原因について解析することは社会的な要請も大きい。

したがって、初秋の東アジア域における、気候循環場の年々変動の実態を明らかにすることは急務である。しかし、これまでの気候循環場の変動に関する研究は、主として、冬季や夏季などの解析期間中における季節進行が小さい期間について実施されてきたため、9月の初秋のような季節遷移期の東アジア域における年々変動の実態は明らかではなかった。そこで本研究では、長期間の再解析月平均データを利用して、初秋の東アジア域で出現する厳しい残暑を引き起こす気候循環変動を明らかにすることを目的とする。

本論文の構成は以下の通りである。まず、本章で9月の気候の特徴について述べ、北太平洋高気圧の形成や変動に関連するこれまでの研究についてレビューを行なう。第2章では、本研究で用いたデータと解析手法について説明する。第3章では8月から10月の北半球気候場の季節進行について概観し、トレンド解析の結果を記述した後、EOF解析を用いて実施した8月と9月の東アジア域における気候循環変動に関する解析結果について記述する。最後に第4章で結論と考察を述べる。

## 1.1 日本付近における9月の気候の特徴

ここではまず、日本付近における9月の気候場の特徴について述べ、その形成要因について説明する。

9月は真夏から秋への季節遷移期にあたる。9月上旬では日本付近は北太平洋高気圧に覆われ、西日本から東日本では真夏と同様に30度以上の真夏日が多く、35度以上の猛暑日を記録する日もある。一方、北日本は大陸からの高気圧に覆われ始め、冷たく乾燥した空気が流れ込むため、朝晩を中心に気温が低下し、内陸部では10度を下回る日も出始める。9月中旬から下旬にかけては、北太平洋高気圧に代わり大陸の高気圧が広く日本付近に張り出すようになる。大陸の高気圧と北太平洋高気圧の境界には秋雨前線が形成されるため、日本付近は長雨になることもあるが、北太平洋高気圧が再び勢力を強めると、日本付近は厳しい残暑に見舞われる。また、北太平洋高気圧の縁辺には台風が北上しやすく、日本に大きな被害をもたらすことも多い。

以上のように、北太平洋高気圧の盛衰が、残暑や秋雨、台風など9月の日本付近の天候や気候に大きな影響をもたらしている。次に、北太平洋高気圧について述べる。

## 1.2 北太平洋高気圧

北太平洋高気圧は、夏季を中心に日本付近を覆う海盆スケールの高気圧である。北大西洋のアゾレス高気圧などと同様に亜熱帯高気圧の1つであり、太平洋東部に中心を持ち準定常的に存在する。季節変動は大きく、日本付近では梅雨明けのころから急速に発達し最盛期を迎えるが、8月下旬にはゆっくりと南下を始め、10月には南海上へ離れる。冬は500hPaでは北緯20度付近でほぼ東西一様な構造を持つものの、地上付近では北米西岸付近から北太平洋東部だけに小さく見られる(気象科学事典、1998)また、北太平洋高気圧は10から15日の周期でその勢力は強弱を繰り返している(Enomoto 2000)。

予報現場では、500hPa等圧面における高度5880mの等値線を北太平洋高気圧の勢力の目安として利用されている。これは、500hPa等圧面高度が5880mを超えるときは、海面気圧でも1010hPa以上の高気圧が形成される傾向にあるためである。また、この場合には、850hPaの気温は19度を超えてくるため、日本付近は晴れて暑い夏らしい天気になることが多い。ただし、この5880mという高度は、あくまでも目安であり、かならずしも、夏らしい天気と対応するものではなく、5880mに覆われていても、天気が不安定であるというケースも現れている。(気象庁、2006)

## 1.3 北太平洋高気圧の起源や変動要因

ここでは夏季の東アジア域の天候を支配する北太平洋高気圧の起源や変動に関する過去の研究をレビューする。北太平洋高気圧の存在する北緯20~30度の緯度帯は、赤道域での活発な対流活動に伴う上昇気流によって形成されるハドレー循環の下降域に

あたるため、北太平洋高気圧など亜熱帯高気圧の存在はハドレー循環に起因するものと考えられてきた。例えば、Held and Hou(1980)は、角運動量保存則、温度風の関係と放射と対流のバランスに基づく考察から、年平均した東西一様なハドレー循環の構造を説明した。東西に広がる冬季の亜熱帯高気圧帯の存在理由は彼らの理論で説明できるが、夏半球に存在する亜熱帯高気圧が東西非一様であることや、しかも、冬季よりハドレー循環の下降流の弱い夏の方が、亜熱帯高気圧の勢力が強くなるため、彼ら議論では説明できない。そこで、Hoskins(1996)は数値実験によって、アメリカモンスーンに伴う非断熱加熱が北太平洋高気圧の形成に重要であることを示した。また、Chen(2002)はアジアモンスーンに伴う非断熱加熱も、北太平洋高気圧の発達に寄与していることを数値実験により示している。一方、Nitta(1987)は北太平洋高気圧の年々変動や季節内変動に注目し、熱帯西部太平洋の海面水温(SST)が夏季の北半球大気循環場に大きな影響を与えていると指摘した。さらに、Enomoto(2000)は日本付近で北太平洋高気圧は等価順圧構造となっていることに注目し、アジアジェット上を西から伝播する定常ロスビー波束が日本付近で砕波することがその形成要因であることを数値実験などで示した。以下では、本研究と関連するこれらの研究について紹介する。

・ 亜熱帯高気圧の東側でのモンスーン潜熱解放の重要性：Hoskins(1996,2001)

Hoskins(1996)は観測と理想化した数値実験から、亜熱帯高気圧の発達について、その東に位置する大陸上のモンスーン潜熱の解放が重要であることを示した。具体的には、

1. モンスーン加熱は、春から夏にかけてそれぞれの大陸で極側に移動する。そのようなとき、特に中緯度の偏西風との相互作用によって北側や西側での下降流が強制される。
2. 強制された下降流は放射過程と結びついて、下降域の非断熱冷却と対流の抑制を引き起こし、さらに下降流を強化する。この正のフィードバックにより下降流は大陸西岸でさらに強化される。
3. 亜熱帯域で支配的な渦度バランスであるスベルドラップバランス ( $\beta v = f \partial w / \partial z$ ) を考慮すると、この下降流域では、大気下層では  $\partial w / \partial z < 0$  なので、北風が存在しなければならない。したがって、下降流域のさらに西側の大気下層には強い高気圧循環が存在する。
4. この大陸西岸での北風は、西向きエクマン吹送流を駆動し、冷たい海水の湧昇を引き起こす。これは、その領域で対流をさらに抑制する効果をもち、大気下層の下降流が強化される傾向となる。

以上のように、Hoskins(1996)は海盆における夏に強い亜熱帯高気圧が存在する要因として、その東側の大陸上のモンスーンに伴う加熱の重要性を指摘した。

また、Hoskins(2001)では松野・ギルパターン(Gill,1980)で示された熱帯域における定常熱源に対する大気の影響から赤道域に存在する東風は、モンスーン加熱に対する大気のケルビン波応答の結果と解釈し、夏の北太平洋高気圧の赤道側の東風は、アジアモンスーン加熱が主要な要因であると考えた。このように、北太平洋高気圧はアメリカモンスーンとアジアモンスーンの2つのモンスーンの弱い相互作用によって引き起こされたものと結論した。

・アジアモンスーンに伴う潜熱解放の重要性：Chen(2002)

Chen(2002)は北太平洋域と北大西洋域の下層の亜熱帯高気圧の成因について、線形準地衡風モデルを用いて調べた。その結果、アジア大陸上と北アメリカ大陸上で観測される上層の高気圧は、それぞれのモンスーン潜熱解放による局所的な応答と考えられるが、北大西洋と北太平洋に存在する下層の亜熱帯高気圧は、アジアモンスーンに伴う大規模な熱源により強制されたロスビー波による応答として解釈されると提案した。すなわち、亜熱帯域における東西に非対称な循環形成には、Hoskins(2001)で示されたアメリカの熱源よりもアジアの熱源が北太平洋高気圧の形成と維持には重要であることを示した。

・Pacific-Japan(PJ):Nitta(1987)

Nitta(1987)は、夏季の西部太平洋熱帯域の対流活動が北半球大気循環場に与える影響について年々変動と季節内変動成分に分けて、衛星による雲量データや海面水温、高度場データを用いて調べた。その結果、北半球の夏季において西部太平洋熱帯域の海面水温が高い年には、低い年と比べて、フィリピン沖での対流活動が活発であることが示された。さらに、フィリピン付近の積雲対流活動と東アジアの対流圏中層の高度場偏差に正の相関があり、フィリピン付近の積雲対流活動が活発なときには東アジア域は正の高度場偏差に覆われることを示した。また、フィリピン海沖から北東に射出されるロスビー波束が、北太平洋から北アメリカへと5日ほどでエネルギーを伝播していることを指摘した。熱帯西太平洋で対流活動が強いときには日本付近は高気圧偏差に覆われ、猛暑になりやすいことが示された。

・シルクロードパターン Enomoto(2000)

Enomoto(2000)は、北太平洋高気圧は太平洋東部では傾圧構造を有し、下層のみで高気圧性循環が形成されているのに対し、日本付近では下層から上層におよぶ等価順圧な高気圧になっていることに注目し、日本付近の等価順圧な高気圧である小笠原高気圧を北太平洋高気圧と区別する必要性を指摘した。さらに、この小笠原高気圧は、西アジアの乾燥地域の非断熱冷却により形成される下降流が対流圏界面付近で生成する

負の渦位を励起し、アジアジェット中を東に伝播する定常ロスビー波列（シルクロードパターン）により形成されることを示した。

また、Enomoto(2004) はシルクロードパターンの年々変動に注目し、シルクロードパターンの明瞭な年（蛇行年）と不明瞭な年（非蛇行年）を運動エネルギーを用いて分類し、合成図解析を行った。その結果、蛇行年は日本付近に高気圧性循環があり、非蛇行年は高気圧性循環が見られないことを示した。



## 2 データと解析手法

### 2.1 使用データ

本研究では、1979年から2006年までの28年間にわたる月平均JRA再解析データをトレンド解析とEOF解析に用いた。また、対流活動について解析するため使用した同期間の米国国立大気海洋庁（NOAA）によって作成された月平均の外向き長波放射（OLR）は緯度・経度は2.5度格子点上で与えられる。

表 1: JRA 再解析データ

期間	1979年1月から2006年12月 月平均
水平解像度	1.25° × 1.25°グリッド
鉛直解像度	23層
使用変数	200hPa 東西風, 南北風, 500hPa 高度場, 東西風, 南北風 850hPa 気温, 東西風, 南北風

### 2.2 トレンド解析

気候変化のトレンドを検出するため、各  $x_n$  年における月平均値 ( $y_n$ ) について、以下のように最小二乗法をもとに線形トレンド  $a$  を求めた。

$$a = \frac{N \sum x_n y_n - \sum x_n \sum y_n}{N \sum x_n^2 - (\sum x_n)^2} \quad (1)$$

ここで、 $N$  はデータ数 (28) である。また、トレンドの有意性を  $t$ -検定で調べた。

### 2.3 EOF 解析

本研究では主要な年々変動成分を取り出すため、各月の月平均流線関数についてEOF解析（主成分分析）を行った。まず、各月の気候値を、各月の1979年から2006年までの平均値で定義した。次に、水平方向に存在する  $N$  個の格子点上で与えられた気候値からの各月の偏差場を  $Z'(x, y, t)$  とする。 $x, y, t$  は経度、緯度、時間を表す。EOF解析では  $Z'$  を  $N$  個の線形独立で直交する主成分  $e_i(x, y)$  を用いて、以下のように変数分離する。

$$Z'(x, y, t) = \sum_{i=1}^N f_i(t) e_i(x, y) \quad (2)$$

ここで、 $f_i(t)$  は主成分（スコア）、 $e_i(x, y)$  は空間EOF（経験的直交関数）と呼ばれる。

空間 EOF、すなわち  $e_i(x, y)$  は、 $Z'(x, y, t)$  の共分散行列の固有ベクトル ( $V$ ) として求めることができる。

$$V e_i(x, y) = \lambda_i e_i(x, y) \quad (3)$$

で与えられる。ここでは  $\lambda_i$  は  $e_i(x, y)$  に対応する固有値である。本研究では  $e_i(x, y)$  は、解析領域全体での 2 乗和が 1 になるように規格化した。また、第  $i$  モードの固有値  $\lambda_i$  を全固有値の和で除したものを寄与率といい、全分散量に対する第  $i$  モードの分散の割合を表す。

## 2.4 解析領域

ここでは、東アジア付近の高度場変動に寄与すると考えられる PJ パターンやシルクロードパターンを表現できるように、空間領域（北緯 15 度～45 度、東経 90～150 度）における 500hPa の月平均流線関数偏差について EOF 解析を行った。

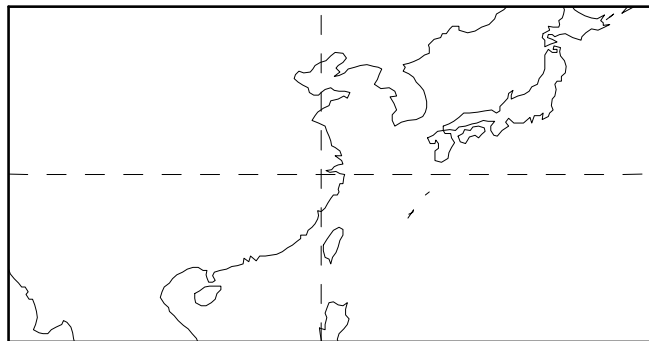


図 1: EOF 解析領域

## 3 解析結果

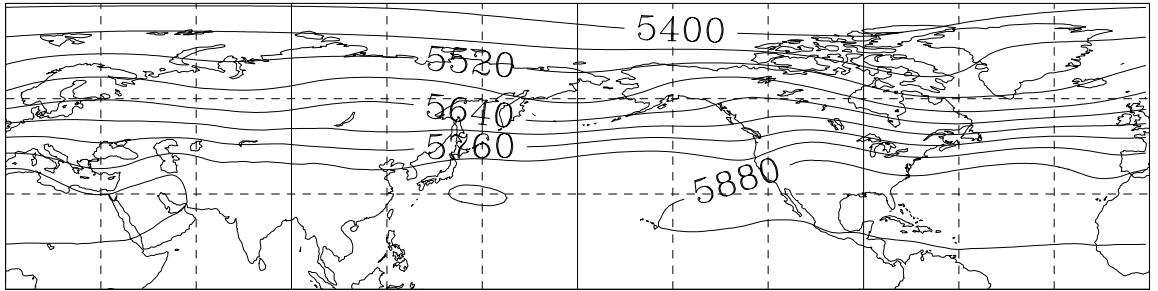
### 3.1 気候値

まず、ここでは8月から10月の500hPa高度場、850hPa高度場、200hPa東西風速場の気候値を用いて、夏季から秋季における東アジア域の気候場の季節進行について記述する。

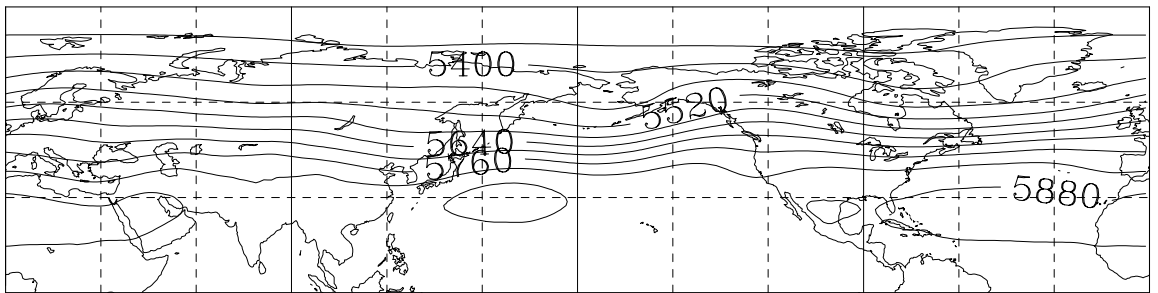
#### (1) 500hPa高度場(図2)

北太平洋高気圧の目安として高度5880mの等値線に注目すると、8月よりも9月の方が拡大していることがわかる。これは、秋季に日本東南海上で太平洋高気圧が発達することを示唆している。しかし、5820mの等値線を見ると、8月には北緯40度付近の北日本に存在するのに対し、9月になると西日本から東日本にかけて北緯35度まで南下し、さらに10月では日本南岸の北緯30度付近まで南下し、日本付近での高度場の下降が明瞭である。また、これと対応して、10月には、日本東南海上の高気圧性循環の中心は北緯25度付近まで南下する。また、各月とも北太平洋高気圧の目安となる5880mの等高度線は日本をおおっていない。したがって、5880m等高度線で覆われ、日本が猛暑となるのは、約10日程度の周期をもつ北太平洋高気圧の季節内変動に伴って、北太平洋高気圧が一時的に強化するときのみである。

Z500 08



Z500 09



Z500 10

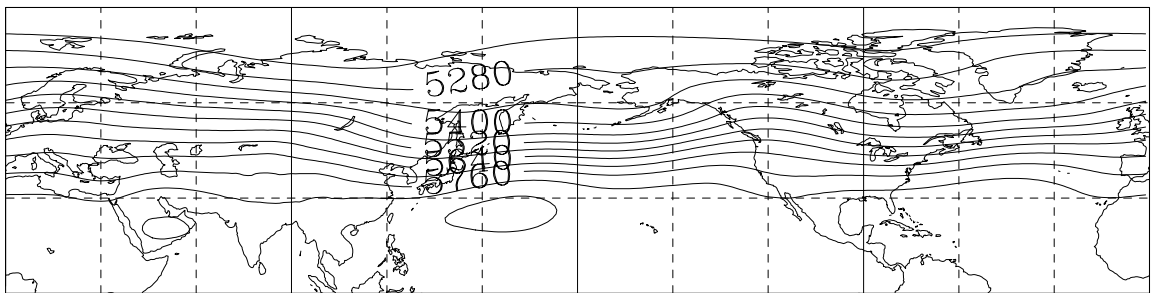
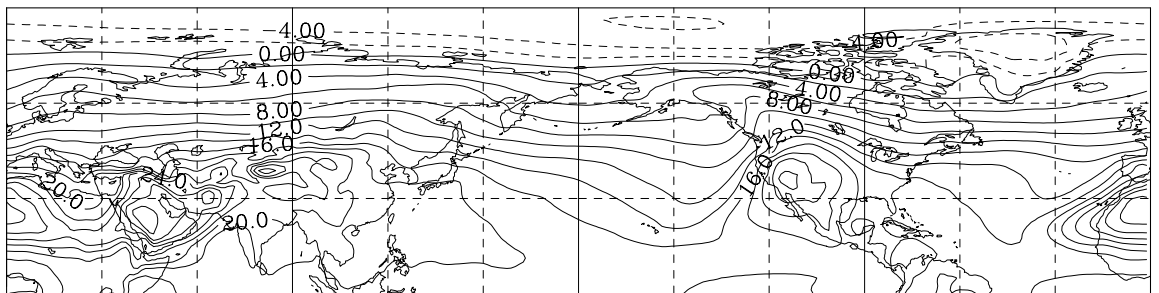


図 2: 8 月から 10 月の 500hPa 高度場。コンター間隔は 60m

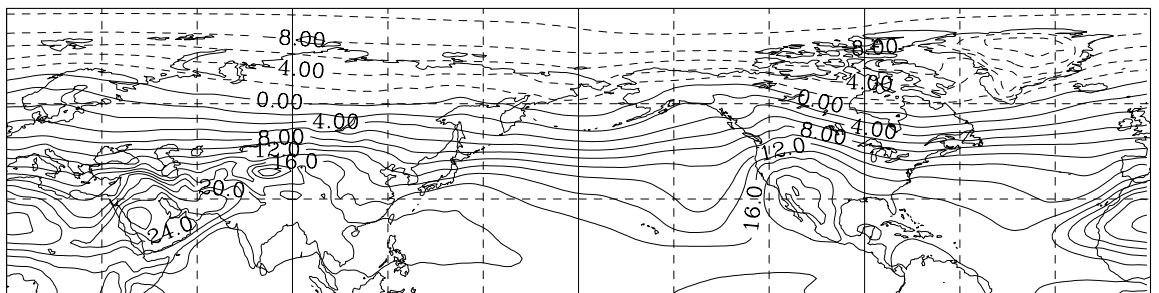
## (2) 850hPa の温度場 (図3)

8月は西日本から東日本にかけて18度前後であるが、9月には14度程度になり、気候値では夏から初秋にかけて日本付近で気温が低下していることがわかる。さらに、10月には10度以下にまで急激に低下する。一方、南北温度傾度は季節進行とともに、東アジア域で大きくなることわかる。日本付近の北緯30度から40度の緯度帯の南北温度差は8月では6度程度、9月では10度程度、10月には14度に達する。日本南岸の温度はこの期間に6度程度しか低下していないため、この南北温度勾配の強化は、季節進行に伴う北日本付近の急激な温度低下により強く関係している。

T850 08



T850 09



T850 10

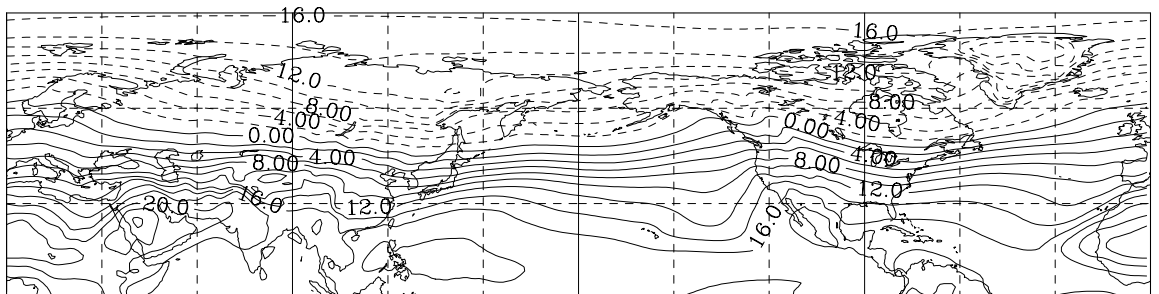
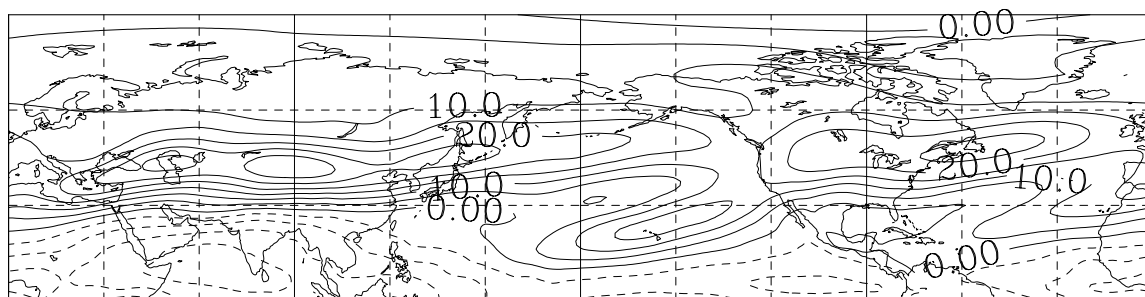


図3: 8月から10月の850hPa気温の気候値。コンター間隔は2度

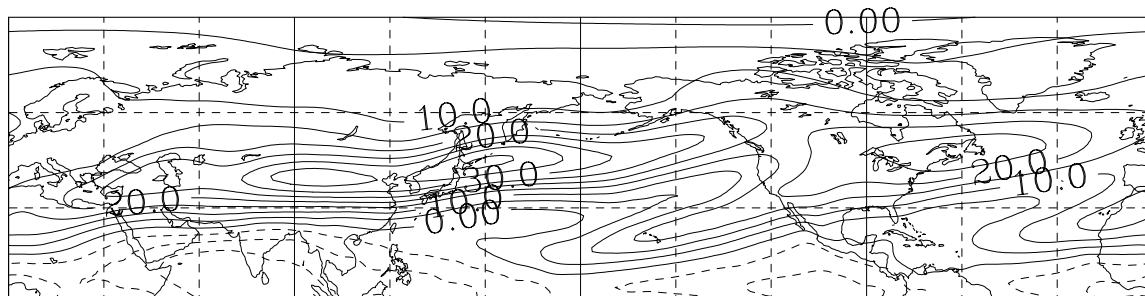
### (3) 200hPa 東西風 (図4)

アジア域の強風帯であるアジアジェットは、風速 25m/s の等値線に着目すると、8月には北緯 40 度付近の東経 30 度 (西アジア付近) から、東経 150 度の北海道東方海上に存在する。9月には日本付近のアジアジェットの南北位置は8月より少し南下し、風速は 40m/s まで強化している。さらに、10月にはアジアジェットに伴う強風域は日本付近で北緯 35 度付近の本州上まで南下し、風速 45m/s まで強化するとともに、強風コア領域が日本付近で、東西に伸びる傾向がわかる。特に、太平洋上のジェットの延伸が9月から10月にかけて明瞭である。これは、図2で示された南北温度勾配の強化と対応している。

u200 08



u200 09



u200 10

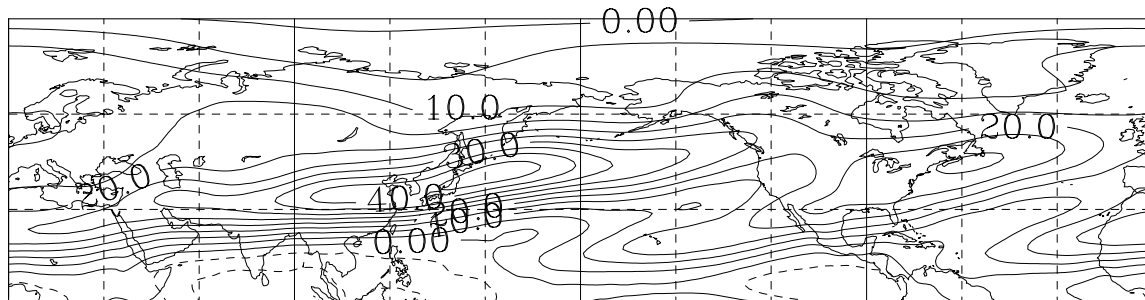


図4: 8月から10月の200hPa東西風の気候値。コンター間隔は5m/s

## 3.2 トレンド解析

ここでは、近年の温暖化傾向に伴い、夏季から秋季の東アジア域の大気循環に有意なトレンド傾向が存在するのかが確かめるため、式(1)を用いて、1979年から2006年までの線形トレンドを500hPa高度場、850hPa温度場について解析した。

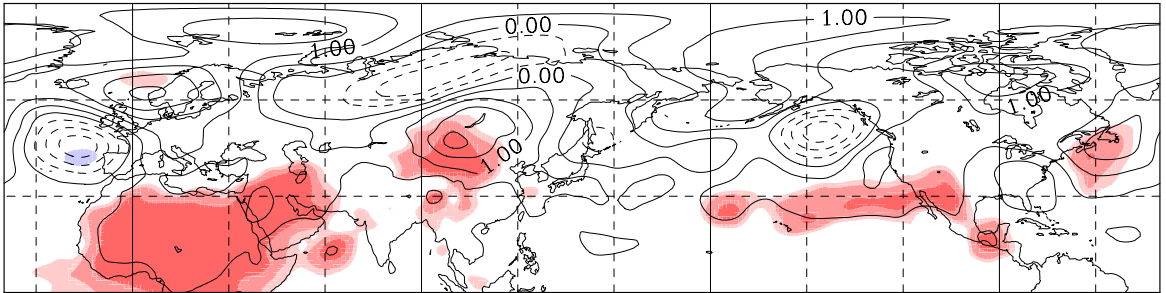
### (1) 500hPa高度場(図5)

まず、東アジア域の北太平洋高気圧の強度にトレンドが存在するかどうかを調べるため、500 hPa等圧面高度のトレンドを8月から10月の各月で計算した。図5から、図2で示された気候場の北太平洋高気圧付近で、正のトレンドが存在するとき、北太平洋高気圧が強化していることがわかる。8月(図5上)では北海道付近でわずかに負のトレンドが存在する一方、西日本では正のトレンドがみられる。このことから、西日本を中心とした領域で北太平洋高気圧は弱い正のトレンドをもっていることがわかる。しかし、トレンドの大きさはいずれも有意ではない。9月(図5中)では中国東北部から北海道、アリューシャン南部にかけて、帯状に最大2.5m/年の強い正のトレンドが存在する。このトレンドの大きさは、中国大陸では有意である。9月では、中国東北部には、弱い気圧の谷が存在するため、このトレンドはこの気圧の谷が年々弱化する傾向、すなわち、北太平洋高気圧の北側縁辺部で、北太平洋高気圧は強化する傾向にあることを示している。一方、日本南海上の高度場トレンドはわずかに負であり(有意性90%)、北太平洋高気圧はわずかに中心部では弱化的トレンドがあることがわかる。10月ではオホーツク海を中心とした正のトレンドがあり、このトレンドは95%有意であるが、10月では北太平洋高気圧は衰弱してさらに南下しているため、オホーツク海の正のトレンドは北太平洋高気圧と直接関連しないと考えられる。

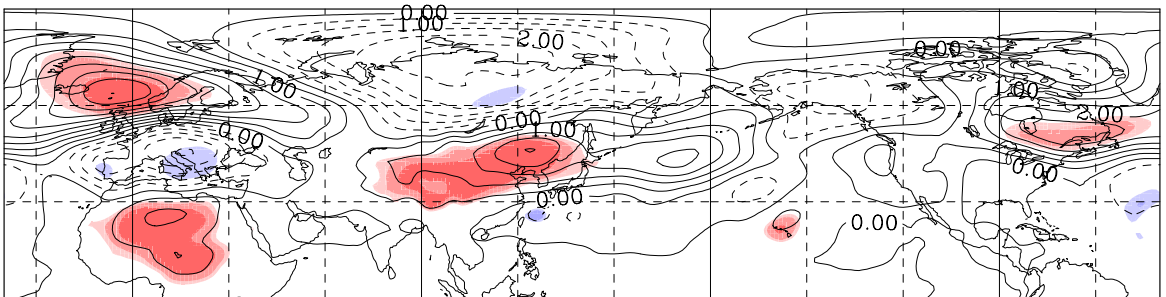
### (2) 850hPa温度場(図6)

850hPa気温のトレンドを8月から10月の各月で計算した。いずれの月でも、アフリカサヘル地域や北大西洋域における正のトレンドが顕著である。日本付近では8月の北日本を除いた他の地域では、全ての月で正のトレンド見られる。特に、9月は中国東北部から北日本にかけて帯状の正の有意なトレンドが存在する。これは8月や10月に比べて顕著に出ている。これらの地域は500hPa高度場において正のトレンドのトレンドが存在する地域(図5中)とほぼ同地域であり、この高温トレンドは北太平洋高気圧の北側の縁辺部で高気圧性循環が強化するトレンドと対応していると考えられる。

trend Z500 08



trend Z500 09



trend Z500 10

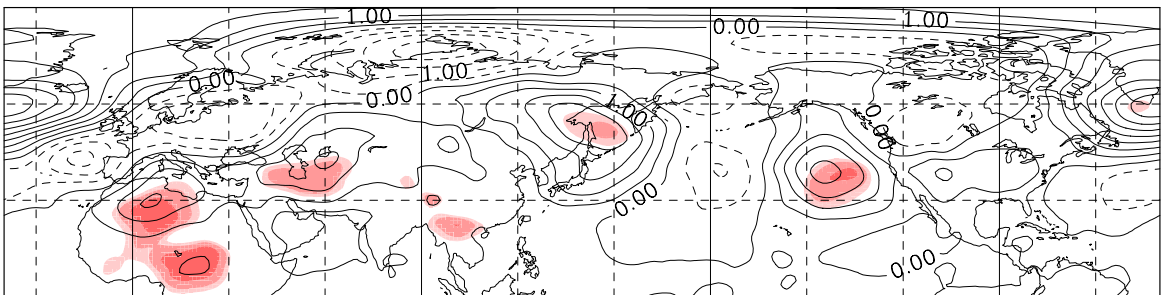
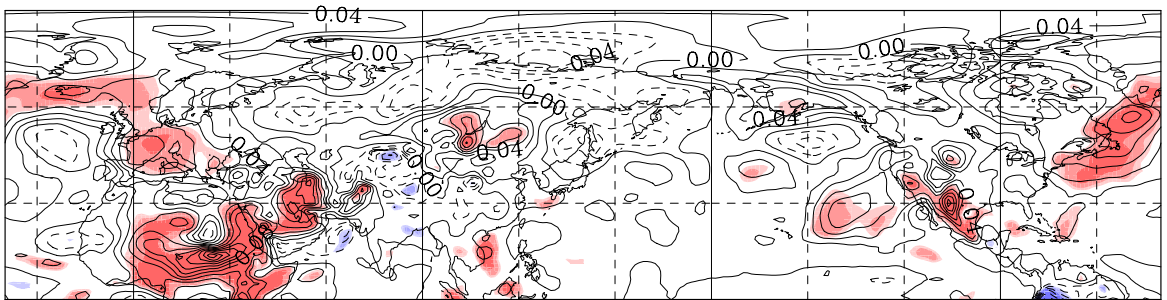


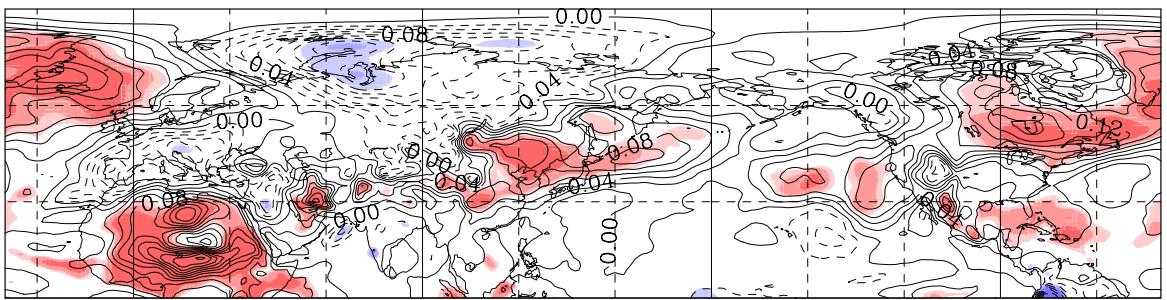
図 5: 8月から10月の500hPa高度場のトレンド(コンター間隔0.5m/年、90,95,99%以上の有意水準を持つ領域に色塗りした。暖色系は有意な正のトレンド、寒色系は有意な負のトレンドを示す。)



trend T850 08



trend T850 09



trend T850 10

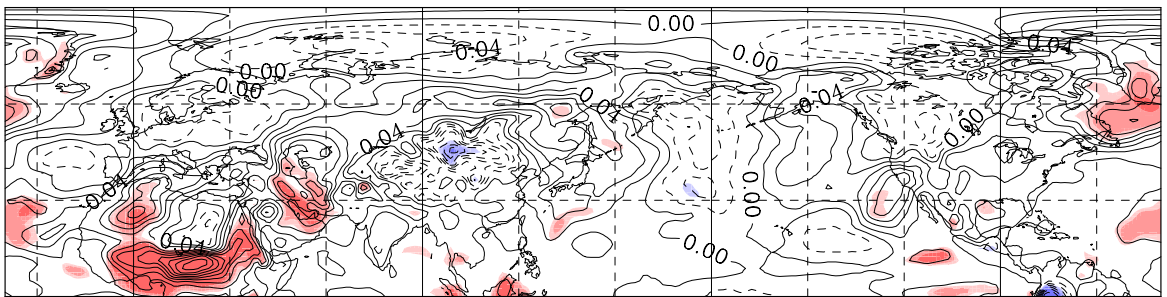


図 6: 8月から10月の気温のトレンド(コンター間隔0.05度/年、90,95,99%以上の有意水準を持つ領域に色塗りした。暖色系は有意な正のトレンド、寒色系は有意な負のトレンドを示す。)

### 3.3 EOF 解析

初秋と盛夏期の大気循環の年々変動を調べるため、9月と8月の東アジア域における月平均500hPa流線関数についてEOF解析を行った。ここでは、高度場に比べ、亜熱帯域での循環変動を表現しやすい流線関数を用いた。なお、EOF解析には、トレンドを含む月平均偏差場を用いた。8月と9月の主成分を別々に解析することにより、初秋の9月に卓越する年々変動が盛夏期の年々変動と同じか否かを調べることができる。また、200hPa流線関数場と850hPa流線関数場との500hPa流線関数で得られたスコアとの回帰分析を実施し、流線関数場の水平・鉛直構造の解析をした。さらに、OLRとの回帰分析により、各主成分がどの地域の対流活動と関連して励起されているかを調べた。

#### 3.3.1 9月の主成分

##### (1) EOF 第1モード

図7上に、9月における500hPa流線関数偏差場を用いて主成分分析を行った結果得られた第1EOF(以下 EOF1)の空間パターンを示す。西日本を中心とした単極子構造を持つ変動を主に表現するが、中国大陸には弱い負の領域も広がっており、日本付近と中国大陸付近との弱い逆相関パターンも表現している。このモードの寄与率は36.5%(図7上)で、また、このモードのスコアと850hPa気温とは、近畿領域で有意な相関になっている(図7中、相関係数0.34)。一方、東日本や北日本では両者の相関は有意ではなく、北日本では弱い負の相関となっている(図7下)。したがって、このEOF1モードに伴うスコアが正の場合は、西日本が高温で、北日本が低温となる北冷西暑パターン、逆に、スコアが負の場合は、西日本が低温で、北日本が高温となる変動パターンを示している。このモードに伴うトレンドは0.004/年でほとんど存在しない。このため、このモードは東アジア域における年々変動成分を表現すると考えられる。

##### 200hPa流線関数,850hPa流線関数,OLRとの回帰分析

この高度場偏差のEOF1と他の物理量との関係を調べるために、200hPa流線関数、850hPa流線関数、OLR月平均データのそれぞれを、EOF1にともなうスコアとの回帰分析を行った。図8は、スコアが1標準偏差になった場合の各変数の回帰図を示す。

まず、図8上に示された200hPaの回帰図について記述する。200hPa等圧面はアジアジェットの高風軸が存在する高度であり、9月のアジアジェットは北緯40~45度付近に存在する(図4中)。図8上より、アジアジェットコア付近で東西の波列構造が見られる。この波列は、北緯40~50度付近で東西につながり、Enomoto(2000)が8月のデータを用いて抽出したシルクロードパターンとよく似た構造を示す。この波列の東西波長は約7000km程度であり、アジアジェット上を伝播するロスビー波列に相当する可能

性が高い。ただし、8月のシルクロードパターンと比べ、日本東方海上での偏差はより大きくなっている。一方、図8中の850hPa流線関数偏差場を見てみると、日本の南海上から北東方向に伝播するような波列が認められる。この波列はNitta(1987)が指摘したPJパターンと比べると、その波長はやや長く、また偏差中心もやや南に変位している。一方、200hPa回帰図と850hPa回帰図をみると、850hPa回帰図(図8中)で日本の南海上にある高気圧性偏差は、鉛直方向にやや北へ傾いた構造をしていることがわかる。このため、このモードの偏差中心は500hPaでは日本上空、200hPaでは朝鮮半島北部付近(図8上)に存在する。アリューシャン列島の南側に存在する低気圧性偏差は、850hPaと200hPa回帰図ではほぼ同じ位置にあり、等価順圧構造となっている。さらに、ユーラシア大陸上の200hPa回帰図に見られる波状の偏差場は850hPa回帰図では明瞭でない。このため、この変動パターンはシルクロードパターン以外に、日本付近で励起されて下流に伝播する波列パターンが重畳したパターンであると考えられる。一方、このEOF1パターンの励起源を考えるため、大気の非断熱加熱と対応するOLR偏差の回帰図を作成した(図8下)。EOF1のスコアが正、すなわち西日本を中心に高気圧偏差で覆われているとき、インド付近、インド洋の赤道付近からインドネシア海洋大陸上、台湾付近の主に3箇所に対流活動が有意に活発(OLR偏差が負)になり、北緯15度東経160度を中心とするフィリピン東方海上で対流活動は不活発(OLR偏差は正)となることがわかる。また、Nitta(1987)が示したPJパターンとフィリピン東方海上での対流活動の関係を考慮すると、台湾付近の対流活発域は、図7中で見られる日本東方海上を北東方向に伝播する波列パターンの励起源となっている可能性が高い。また、西アジア域の北緯30度、東経40度付近でもOLR偏差は正となり、対流活動が抑制されている。一方、東アジア域では、このモードが正のスコアるとき、北太平洋高気圧は北偏し、秋雨前線の南下が遅れるため、朝鮮半島北部から日本海にかけて有意なOLR負偏差が広がり、対流活動が活発となる。

## (2) EOF第2モード

図9上に500hPa流線関数のEOF2を示す。このモードの寄与率は21.0%で、日本の南(北緯30度、東経135度)と北緯45度付近とのシーソーパターン(双極子構造)を表現している。このモードに伴うスコアが正の場合は、北太平洋高気圧が北偏し、逆にスコアが負の場合は、北太平洋高気圧が日本の南海上に南偏した状態と対応している。さらに、このモードに伴うスコアには有意な正のトレンド(0.091/年)が見られるため、このモードは大気循環場の近年のトレンド傾向に対応すると考えられる。実際図10上で示された200hPa流線関数回帰図と図4中の9月の500hPa高度場トレンド空間パターンは東アジア域でよく一致している。また、日本全域で850hPa温度と正の相関があるため、スコアが正、すなわち太平洋高気圧が北偏すると、北日本を中心に全国的な高温偏差が出現する。

## 200hPa 流線関数,850hPa 流線関数,OLR との回帰分析

200hPa 流線関数との回帰図(図 10 上)を見ると、EOF 第 1 モードとは異なり、東アジア付近で回帰偏差は東西に延びた帯状構造をとることがわかる。また、このモードは EOF1 のように西からの波列の伝播は認められない。中国東部の北緯 40 度付近を中心とした東西に広がる有意な高気圧性偏差の東側の北緯 40 度、東経 150 度付近の高気圧性偏差は、日本の南方海上(北緯 30 度、東経 135 度)からアラスカ南岸(北緯 60 度、西経 150 度)へと北東に伝播するような波列から構成されているように見える。

一方、アジアジェット上を東西方向に伝播する中国東部を中心とする正偏差、シベリア付近の負偏差は、ほぼ南北に偏差が並んでいるため、ロスビー波列によって説明することは難しい。一方、850hPa 流線関数の回帰図と比較すると、ユーラシア北部の偏差場は等価順圧構造をしており、北緯 60 度付近の亜寒帯ジェットの形成と対応していると考えられる。このため、この領域の偏差場は、亜寒帯ジェット上で生成消滅する総観規模擾乱に伴う西風運動量の南北輸送によってもたらされた可能性が大きい。

一方、北緯 30 度、東経 135 度からベーリング海へ北東に伝播する波列は、8 月の PJ パターン(図 14 中)と比べると、やや全体に北偏しているが、PJ パターンによく似た構造を持っている。しかし、850hPa と 200hPa の回帰図(図 10 上と中)を比べると、日本の南海上の低気圧偏差は、ほとんど順圧的な構造をしていることがわかる。また、OLR 偏差はそこで負であり、対流活動は活発化している。したがって、励起減の領域でだけ傾圧構造を持つ PJ パターンとは、異なる励起機構でこの波列が励起されていることが示唆される。このモードのスコアが正の場合、北日本は高気圧性偏差でおおわれているため、日本付近の OLR 偏差は正となる。しかし、その偏差の大きさは有意ではない。(図 10 下)

### (3) EOF3 モード(図略)

500hPa の流線関数から得られる EOF 第 3 モードは、東日本の東と中国大陸から東シナ海にかけての領域間での双極子構造を持っている。ただし、第一モードとは位相が東西に 90 度ずれた構造ともっているため、モード間の直交性という EOF 解析の制限から出現したモードである可能性が高い。寄与率は 12.7 % と第一モードにくらべかなり小さく、日本への温度変動への影響は少ない。

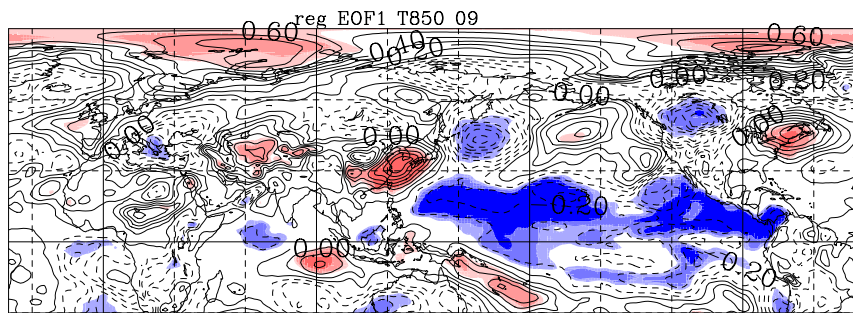
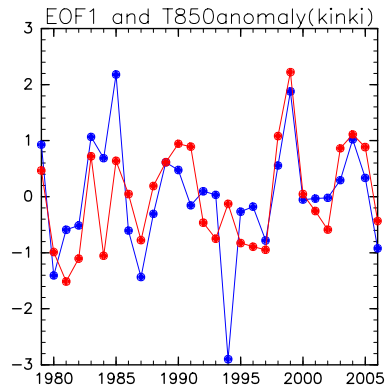
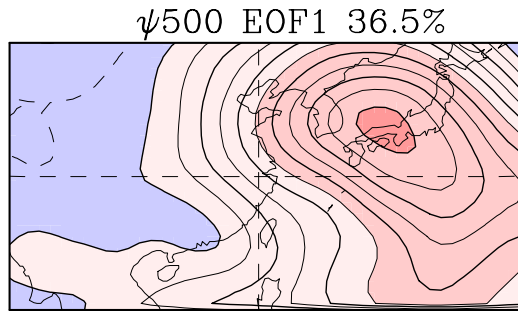


図 7: 上から、9月のEOF1のパターン(単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、スコアと近畿(北緯 35 度、東経 135 度)の気温(850hPa)のグラフ(赤線:近畿の気温、青線:スコア)、850hPaの気温との相関図(単位:0.1 度)

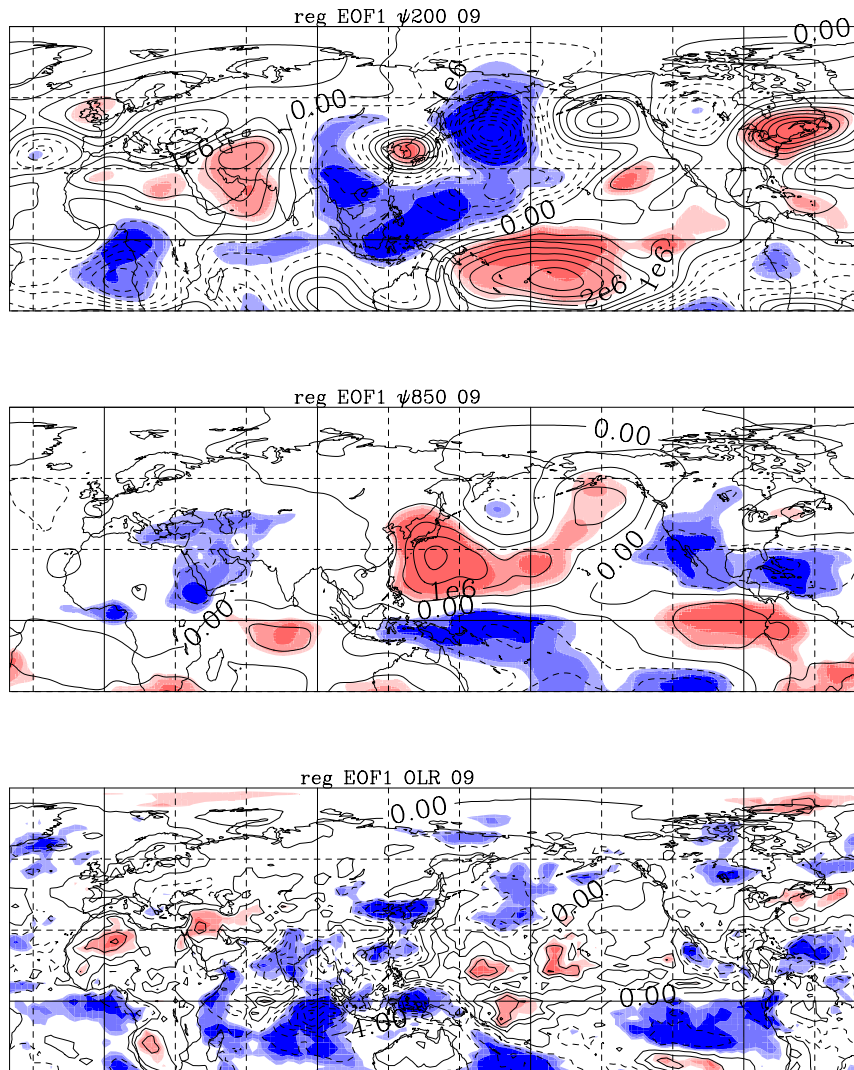


図 8: 9月のEOF1の各回帰結果。上から、200hPa 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、850 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、OLR (単位:  $2W/m^2$ ) との回帰の結果を表す。

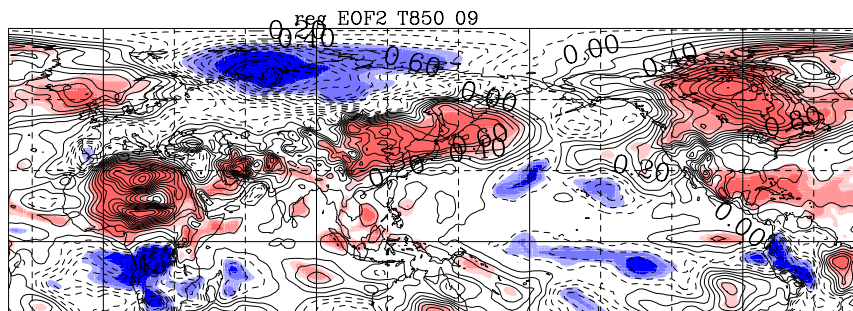
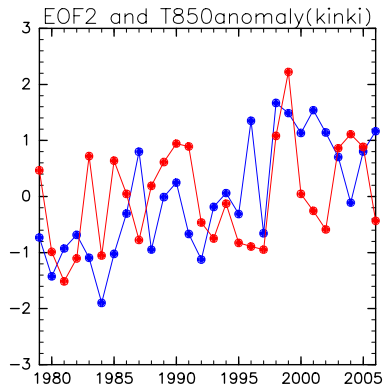
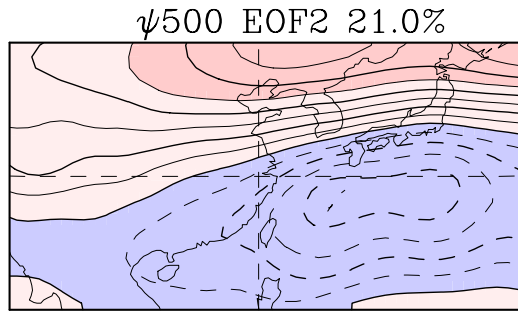


図 9: 上から、9月の EOF2 のパターン (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、スコアと近畿の気温 (850hPa) のグラフ (赤線 : 近畿の気温、青線 : スコア)、850hPa の気温との相関図 (単位 : 0.1 度)

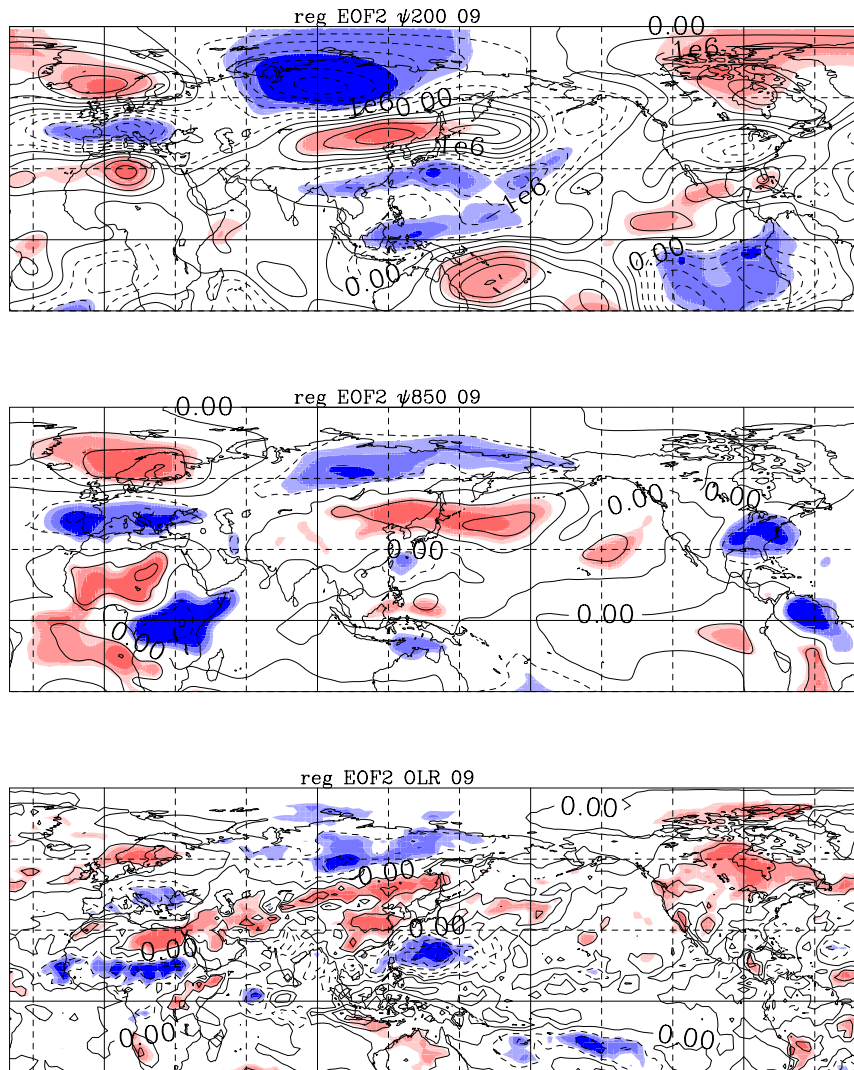


図 10: 9月のEOF2の各回帰結果。上から、200hPa 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、850 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、OLR (単位:  $2W/m^2$ ) との回帰の結果を表す。



### 3.3.2 8月の主成分

9月において、気候値からの500hPa流線関数偏差場について行った主成分分析の結果、EOF第1モードとして年々変動に対応する年々変動モードが、第2モードとして主に近年のトレンドに対応するトレンドモードが得られた。ここでは、8月の偏差場について同様に解析を行い、初秋時において東アジアの大気循環場に出現する主要な変動成分との類似性や相異点を明らかにする。なお、用いた偏差場は、9月と同様にトレンド成分はあらかじめ除去していない。

#### (1) EOF第1モード

図11上に、8月における500hPa流線関数偏差場を用いて主成分分析を行った結果得られた第1EOF(以下EOF1)の空間パターンを示す。このモードは主として、日本の南海上(フィリピンの北東海上)に変動の中心を持ち、解析領域のほぼ全域で同じ位相を持つ変動成分として特徴づけられる。このモードの寄与率は44.3%と極めて高い値を示している。図9上と比較すると、このモードは9月のEOF2とよく似た空間変動パターンを持つことがわかる。ただし、近年の東アジア域におけるトレンドを表現する9月のEOF2とは異なり、8月のEOF1に伴うスコア(図10中に青線)のトレンドの大きさは0.006/年であり、有意ではない。また、図10中の赤線で示された近畿地方における850hPa温度偏差との関連性も弱い。一方、近畿地方における850hPa温度偏差には弱いながらも正のトレンド(0.025度/年)があるが、このトレンドともEOF1に伴うスコアは関連しない。

一方、この北緯30度付近における正の相関領域の南北に負の相関領域が広がっていることがわかる。北日本は、この負の相関領域に含まれるが、やはり相関係数の大きさは-0.1程度で有意ではない。すなわち、8月の東アジア域で得られた第1主成分は日本付近の気温偏差場と有意な相関を持たないことがわかる。従って、この主成分の空間パターンは、9月の第2主成分と空間変動パターンは良く似ているが、それとは異なり日本付近の気温偏差とは有意に関係しない。この気温偏差場との関連性は、8月と9月における日本付近の気候場の違いや、9月のEOF2に比べ8月のEOF1における日本南海上での偏差中心がやや低緯度側にシフトしていることが原因と考えられる。

#### 200hPa流線関数、850hPa流線関数、OLRへの回帰

図12に、EOF1に伴うスコアに、200hPa流線関数(図12上)、850hPa流線関数(図12中)、OLR(外向き長波放射)(図12下)のそれぞれを回帰させた結果を示す。これらの回帰図は、EOF1のスコアが+1の標準偏差のときの、各変数の偏差を示している。

まず、日本南方海上の偏差中心における符号をみると、200hPaでは負偏差(図12上)、500hPaで正偏差(図11上)、850hPaでは正偏差(図12中)となっており、対流圏中下層と上層で逆位相となる傾圧構造となっていることがわかる。一方、図12下の

OLR 偏差では、フィリピンの東方海上で統計的に有意な正偏差が広がっている。このため、日本南方海上で対流圏下層が高気圧性偏差が存在するとき、その偏差付近や赤道側で、対流活動が抑制されていることがわかる。さらに、この OLR 偏差のさらに南側にあたる赤道付近から南半球の中緯度にかけて、対流圏下層に負の流線関数偏差（図 12 中）すなわち、高気圧性偏差が広がっている。この大気の応答は、フィリピン東方海上の対流活動変動に対する Matsuno-Gill 応答と対応している可能性がある。ただ、OLR 偏差の東側の北太平洋の低緯度には対応する Kelvin 波応答を確認することができない。むしろ、東西に波数 1 の応答が卓越している。この EOF1 に伴うフィリピン東方海上での OLR 偏差は、その地理的位置を考慮すると、台風や熱帯低気圧活動の変動に伴う対流活動の変動を表現している可能性がある。

一方、北海道付近に注目すると、200hPa でも流線関数は負偏差となっており、対流圏中層から上層は順圧的な構造を有していることがわかる。但し、この領域へ伝播するユーラシア大陸からの波列は存在しないため（図 12 上）、北海道付近の偏差場は、いわゆるシルクロードパターンと対応してない。むしろ、台湾付近に見られる偏差中心（図 12 上）から北東につながる波列により説明できる可能性がある。また、北海道付近に低気圧性偏差が存在するときには、悪天傾向となるため、OLR の偏差は北日本で負となる（図 12 下）。

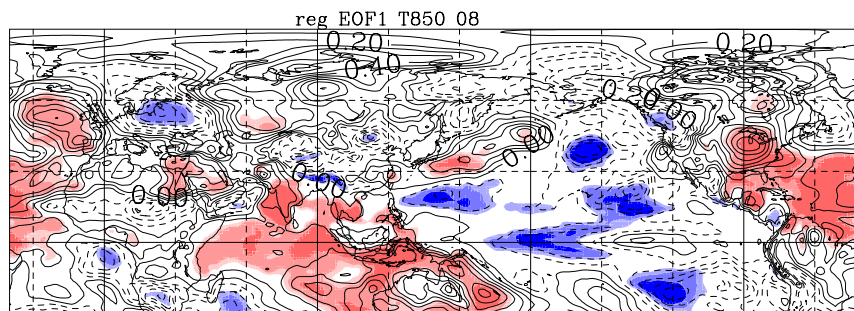
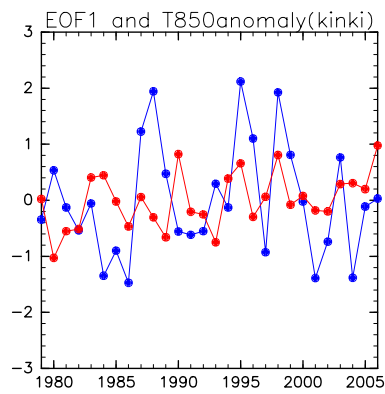
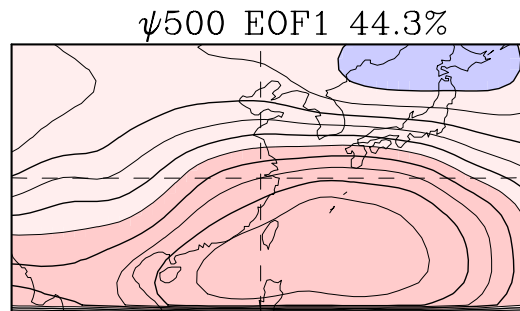


図 11: 上から、8月の EOF1 のパターン (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、スコアと近畿の気温 (850hPa) のグラフ (赤線: 近畿の気温、青線: スコア)、850hPa の気温との回帰結果 (単位: 0.1 度)

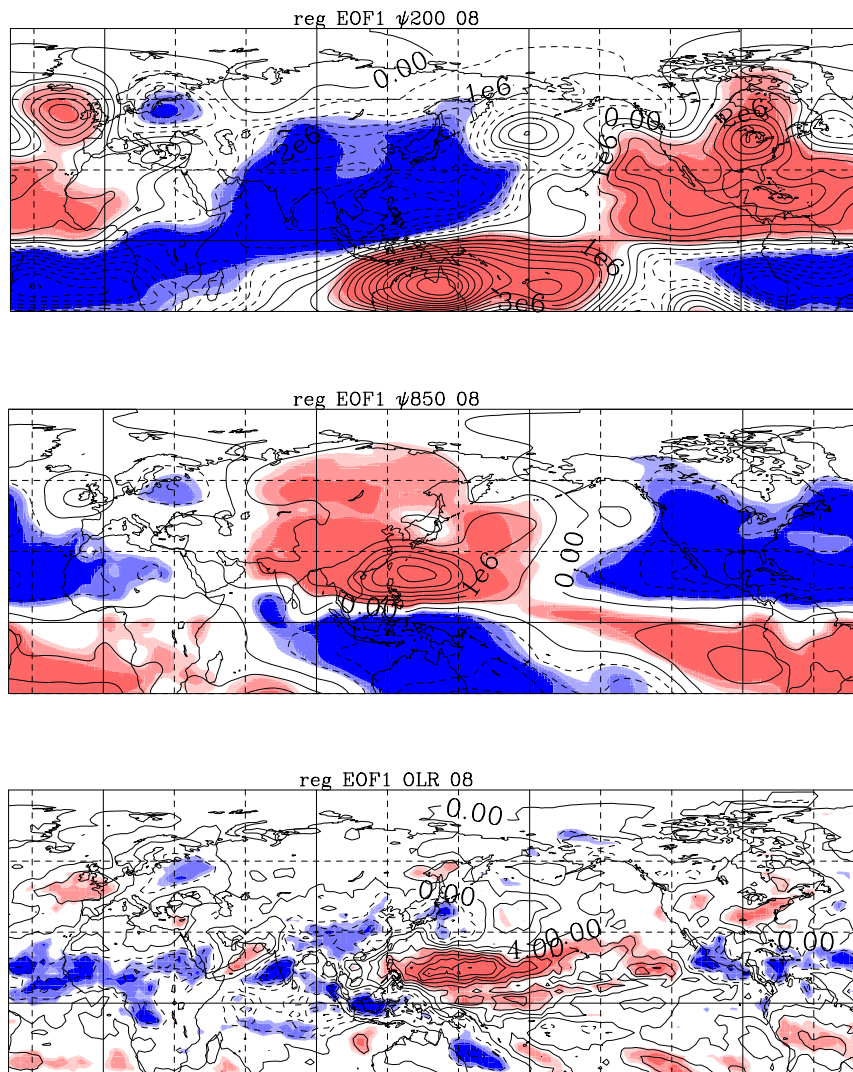


図 12: 8月の EOF1 の各回帰結果。上から、200hPa 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、850 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、OLR (単位:  $2W/m^2$ ) との回帰の結果を表す。

## (2) EOF2 モード

図 13 上に、8 月における 500hPa 流線関数偏差場を用いて主成分分析を行った結果得られた第 2 EOF(以下 EOF2) の空間パターンを示す。この変動パターンは、日本海北部と中国華南に変動の中心を持つ双極子構造として特徴づけられる。このモードの寄与率は 19.6%で、EOF1 に比べ寄与率はかなり小さい。また、EOF1(図 11 上) の空間パターンと比較すると、日本海北部での変動が顕著で、双極子的な特徴がより明瞭である。一方、9 月の EOF1 や EOF2 の変動パターンとは類似性が低い。

図 13 中にこの EOF2 に伴うスコアの時間変動を示した(青線)。トレンドの大きさは、0.004/年で統計的に有意ではない。一方、近畿地方における 850hPa 温度偏差の時間変動との間には有意な正の相関があることがわかる。特に、1990 年代前半までの両者の関連性は極めて高い。また、850hPa 気温偏差と EOF2 のスコアとの相関係数を求めた結果(図 13 下)、日本海域を中心として有意な正の相関が存在することがわかった。このため、この EOF2 は、8 月の日本付近の気温変動と関連性が大きい主要な変動パターンであると考えられる。

### 200hPa 流線関数、850hPa 流線関数、OLR への回帰

図 14 に、8 月の EOF2 に伴うスコアに、200hPa 流線関数(図 14 上)、850hPa 流線関数(図 14 中)、OLR(外向き赤外放射)(図 14 下)のそれぞれを回帰させた結果を示す。これらの回帰図は、EOF2 のスコアが +1 標準偏差のときの、各変数の偏差を示している。

まず、日本海北部の 500hPa の高気圧性偏差(図 14 上)が存在するほぼ同じ領域に、200hPa における流線関数の有意な正偏差領域が存在することがわかる。しかし、850hPa 面での正偏差の中心は、日本の南岸付近の北緯 30 度付近に存在する。このため、この高気圧性偏差は、対流圏下層では高さとともにやや北に傾いた構造を持つが、対流圏中層より上層ではほぼ等価順圧構造を持つことがわかる。また、200hPa における流線関数偏差に注目すると(図 14 上)、北緯 40 度付近に沿って、ヨーロッパ域の負偏差、カスピ海付近の正偏差、バイカル湖の南部のやや弱い負偏差と、日本海北部の正偏差が東西につながる波列構造を持つことがわかる(図 14 上)。従って、この EOF2 はいわゆる盛夏におけるシルクロードパターンを含む変動パターンに相当すると考えられる。さらに、この波列は、カムチャッカ半島の南の負偏差、アラスカ湾付近の正偏差など下流側の波列とも関連することがわかる。ただ、バイカル湖付近で波列の振幅は小さくなっており、日本海北部の偏差の形成には、単なるロスビー波のエネルギー伝播以外の力学プロセスも重要であることが示唆される。

一方、OLR 偏差(図 14 下)の分布から、EOF2 が表現する大気循環変動に伴って、大気下層において日本付近が高気圧性偏差に覆われるとき、南シナ海からフィリピン北東海上の領域で OLR 偏差は負となり、そこで対流活動が活発化していることがわかる。大気下層の流線関数偏差場では、この領域を波源と考えられる波列が北東につながり、

日本南岸での高気圧性偏差、東経 170 度北緯 50 度付近の負偏差、アラスカ南岸の高気圧性偏差を形成していると考えられる。すなわち、この EOF2 に伴う大気下層の変動は、Nitta (1987) が指摘した典型的な PJ(Pacific-Japan) パターンに対応していると考えられる。また、この EOF2 モードが卓越すると日本付近の OLR 偏差は正となることがわかる (図 13 下)。つまり、フィリピン北東海上で対流活動が活発化し、大気下層では日本南岸を中心に日本全域が高気圧性偏差に覆われて、晴天域が拡がり高温となる。

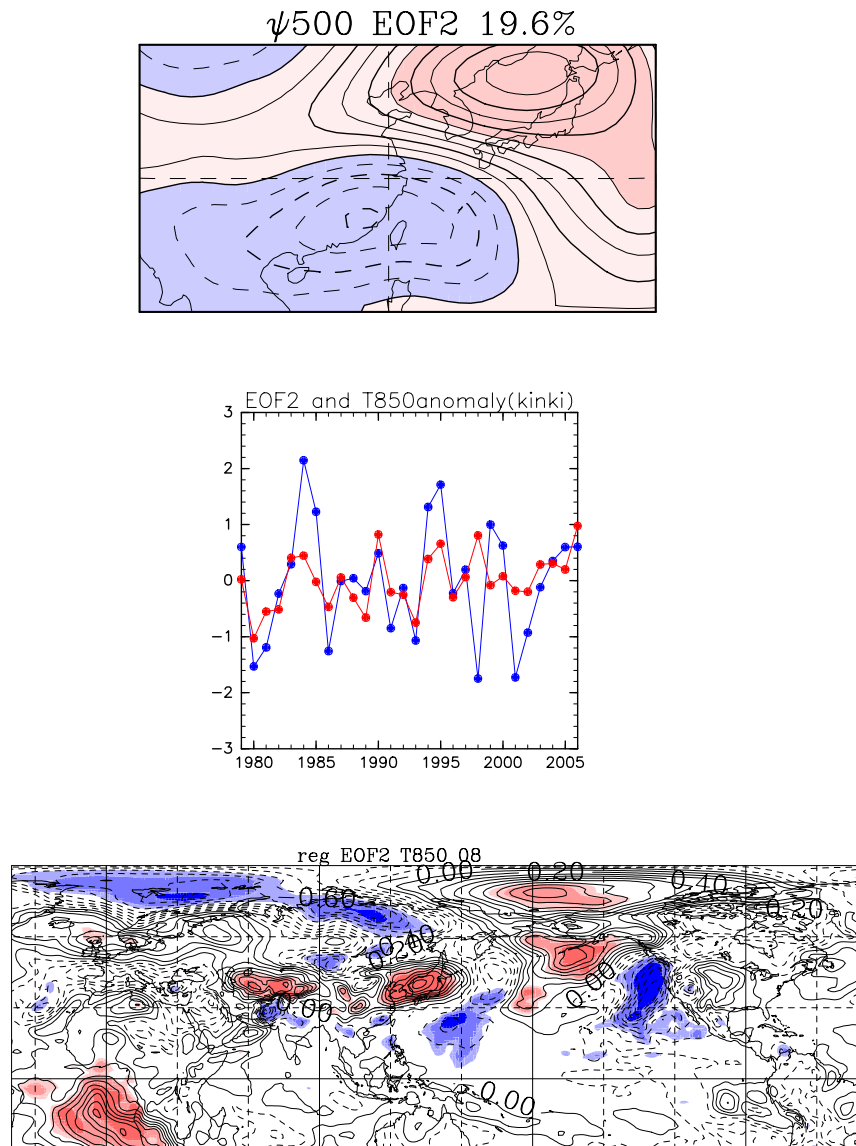


図 13: 上から、8月の EOF2 のパターン (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、スコアと近畿の気温 (850hPa) のグラフ (赤線: 近畿の気温、青線: スコア)、850hPa の気温との回帰結果 (単位: 0.1 度)

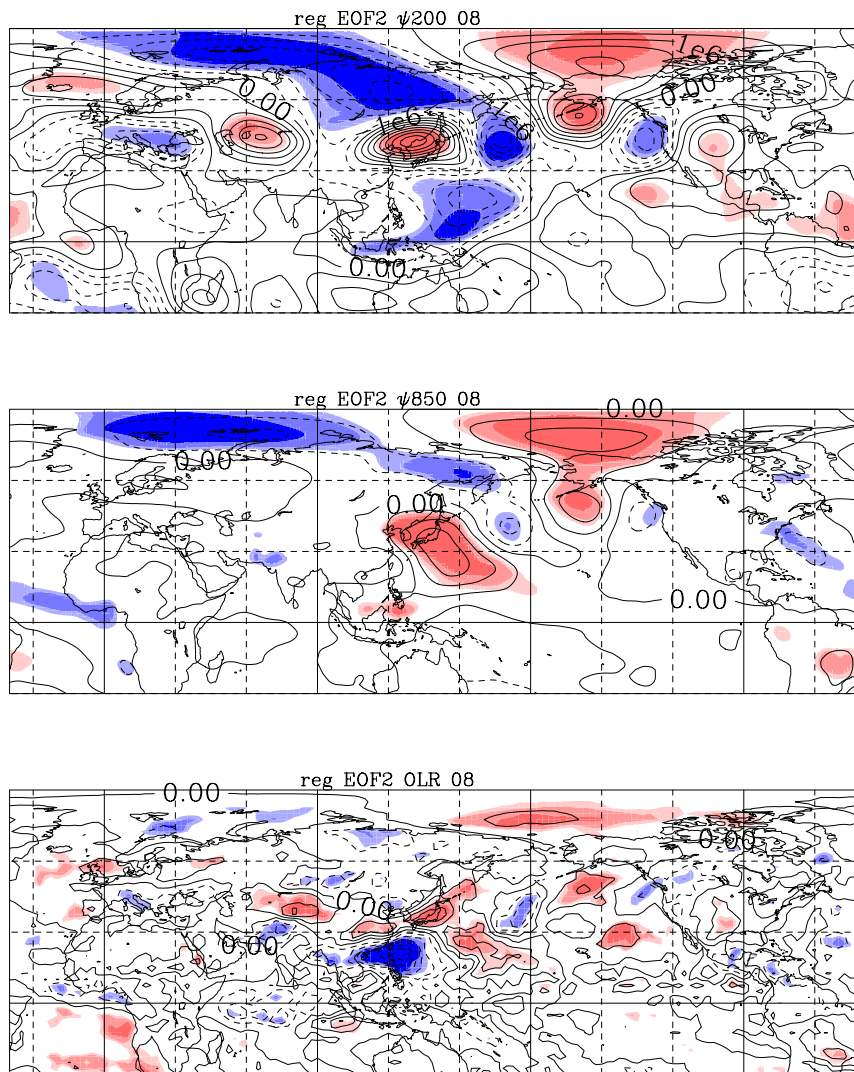


図 14: 8月のEOF2の各回帰結果。上から、200hPa 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、850 流線関数 (単位  $5 \times 10^5 m/s^2$ )、OLR (単位:  $2W/m^2$ ) との回帰の結果を表す。



### 3.3.3 8月と9月のEOFの比較

北緯40度付近の、8月と9月の主要変動成分と比較すると、8月のEOF1は9月のEOF2と東アジアの変動パターンが比較的良く類似しているが、8月のEOF1はより空間スケールが大きい(図10上と図12上)。これは、それぞれのEOFパターンと関連する低緯度域における対流活動偏差の分布の違いと関連している可能性がある。すなわち、8月のEOF1ではOLR偏差は北緯10度付近を東西方向に拡がって分布するのに対し(図12下)、9月のEOF2に伴うOLR偏差は、フィリピン北東海上に局在化している。この熱源の大きさの違いが、大気応答パターンの空間スケールの違いを生み出したと考えられる。

## 4 まとめ

本研究では、気象庁と電力中央研究所の共同研究成果として公開された JRA-25 長期再解析データを利用して、東アジア域における初秋の大気循環場変動について詳しい解析を行った。また、米国国立大気海洋庁 (NOAA) によって作成された外向き長波放射 (OLR) データを併せて使用することにより、大気循環変動の原因の一つである対流活動についても解析を行った。この解析では、1979 年から 2006 年までの月平均データを用いた。

まず、9 月の全球での 500hPa 高度場の線形トレンドを最小二乗法を用いて求めた。その結果、東アジア域に注目すると、中国東北部から北海道さらにはアリューシャン列島の南方に至る帯状の正のトレンドの存在を確認した。トレンドの大きさは、中国大陸上で 2.5m/年で統計的に有意である。このトレンドは 9 月の気候場を考慮すると、北太平洋高気圧の北側縁辺部での高気圧性循環の強化、すなわち、北太平洋高気圧の季節進行にともなう衰弱が近年遅れる傾向にあることを示している。また、850hPa 温度場においても、上記の正の高度場トレンドが存在する領域に、有意な正のトレンドが存在する。すなわち、近年のトレンドとして、東アジア域の初秋で季節進行が遅れる傾向にあることが確認された。

次に、1979 年から 2006 年までの月平均値を気候値と定義し、それからの月平均偏差について東アジア域を対象に主成分分析を行い、東アジア域における大気循環場の年々変動について詳しい解析を行った。その結果、9 月の東アジア域における 500hPa の流線関数月平均偏差場変動の第 1 主成分 (EOF1) として、西日本付近に中心を持つ変動パターンが抽出された。このモードの寄与率は 36.5% で、変動の中心は西日本上空に存在し、ほぼ日本全域の 500hPa 流線関数偏差場が同位相で変動する変動パターンを表現する。また、このモードと、日本付近の 850hPa 温度変動の関係を回帰分析により調べた。その結果、有意な正偏差領域が西日本を中心に広がっている。一方、北日本では弱い負偏差領域が存在する。しかし、このモードに伴うスコアには有意なトレンドはなく、主として東アジア域における年々変動成分を表現するモードと考えられる。このモードに伴う、大気上層 (200hPa) 流線関数偏差場には、西アジア域からアジアジェット上を東に伝播するロスビー波列である、いわゆるシルクロードパターンを見取することができる。一方、OLR 偏差との回帰分析の結果から、この循環偏差場は、南アジアの対流活動と有意に関連することがわかった。すなわち、9 月に南アジアで対流活動が活発な年には、日本上空には等価順圧構造を持つ強い高気圧性循環が形成され厳しい残暑となるが、北太平洋高気圧の縁辺部に相当する朝鮮半島北部では秋雨前線が活発し悪天となる傾向があることが示された。

一方、9月の東アジア域における500hPaの流線関数月平均偏差場変動の第2主成分(EOF2)として、変動の中心を北緯45度付近と北緯30度付近とする東西に帯状に広がる南北双極子構造が抽出された。このモードの寄与率は21.0%である。また、500hPa流線関数場の変動パターンの比較から、このモードは、前述のトレンド解析で得られたトレンド成分と良く一致していることが示された。このモードに伴うスコアには正のトレンドが存在し、これは、近年の日本付近における9月の高温トレンドとも一致している。このため、このモードは近年、北太平洋高気圧が北偏するトレンドを表現していると考えられる。さらに、大気上層流線関数偏差やOLR偏差との回帰分析の結果、このモードは、ロスビー波列によって説明することは難しく、PJパターンとも異なる励起機構を持つことが示唆された。

以上より、近年における9月における東アジア域での大気循環偏差には、季節進行に伴う北太平洋高気圧の衰弱を妨げるようなトレンド成分が存在するため、徐々に残暑が長引く傾向にあることがわかる。一方、西日本を中心に厳しい残暑が出現する年には、このトレンド成分に加えて、西アジア域から東方に伝播するシルクロードパターンに良く似た循環偏差場に伴って、日本付近で等価順圧構造を持つ強い高気圧性循環が卓越することがわかった。

さらに、9月の東アジア域における大気循環場の主要変動成分と、盛夏時に対応する8月における主要変動成分を比較すると、8月のEOF1と9月のEOF2が、東アジア域において比較的良く似た循環変動パターンを持つことがわかった。しかしながら、それぞれのパターンと関連する低緯度域における対流活動領域の大きさには、大きな違いが存在する。このことは、東アジア域の大気循環場において出現する主要変動成分の生成メカニズムは、8月と9月で異なることを示唆している。

本研究では、月平均データを使用したため、各モードの出現プロセスを特定することは困難であった。この出現プロセスを解明するためには、より時間分解能の高い日平均データを使用する必要がある。特に、北太平洋高気圧には、内在する約10日程度の周期をもつ変動現象が存在することが知られており、日平均データを用いた解析が必要である。また、日平均データを用いることにより、熱帯域で卓越する循環変動であるMadden-Julian振動と日本付近の残暑との関連の有無を明らかにすることができる。さらに、本研究では、海面水温データを用いた解析が実施することができなかった。各モードに付随する対流活動の成因を探るためにも、海面水温偏差分布との回帰分析を行うことは緊急の課題である。この海面水温の解析により、熱帯域で卓越する年々変動成分であるENSO(El Niño – Southern Oscillation)変動成分と、日本付近の大気循環の年々変動との関連性を明らかにできると期待できる。

一方、地球温暖化実験データを用いて、本研究と同様の解析を行う必要があると考える。地球温暖化に伴って、将来の日本付近の季節進行、特に夏季から秋季への季節

進行が、どのようなメカニズムによって、どのように変調していくのか、大変興味深い問題である。

## 参考文献

- Chen, P. M. P., Hoerling R. M., Dole, 2001: The Origin of the Subtropical Anticyclones. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1827-1835.
- Enomoto, T., 2000: The formation mechanism for the equivalent-barotropic structure of the Bonin high., *東京大学博士論文*
- Enomoto, T., 2004: Interannual Variability of the Bonin High Associated with the Propagation of Rossby Waves along the Asian Jet. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 1019-1034
- IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
- Kobayashi, C., and S., Maeda, 2006: Phase shift of the seasonal cycle in the Hadley Circulation in recent decades, *Geophys Res. Lett.*, **33**, L22703, doi:10.1029/2006GL027682
- Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447-462.
- Grant Branstator, 2002: Circumglobal Teleconnections, the Jet Stream Waveguide, and the North Atlantic Oscillation. *J. Climate. Sci.*, **15**, 1893-1910.
- Held, A. Y. How, 1980: Nonlinear axially symmetric circulations in a nearly inviscid atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 515-533
- Hoskins, B. J., 1996: On the Existence and Strength of the Summer Subtropical Anticyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**, 1287-1292.
- Hoskins, B. J., and M. J. Rodwell, 2001: Subtropical Anticyclones and Summer Monsoons. *J. Climate. Sci.*, **14**, 3192-3211.
- Hoskins, B. J., and T. Ambrizzi, 1993: Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. *J. Atmos. Sci.*, **50**, 1661-1671.
- 気象庁、2007:平成19年度季節予報研修テキスト 日本为天候に影響を与える循環場の特徴
- 日本気象学会、1998:気象科学辞典

## 謝辞

本研究を進めるに当たり、指導教官である向川均准教授には、気象力学のおもしろさや難しさ、研究に対する心構えなど丁寧にご指導いただきました。心より感謝申し上げます。また、京都大学防災研究所災害気候研究室岩嶋樹也教授、井口敬雄助教には多大なる助言や激励をいただきました。東京大学気候システム研究センター近本善光研究員、防災研究所谷口博研究員にはデータ解析やプログラミングについて多くの助言やヒントをいただきました。そのほか、辛苦をともにした災害気候研究室風本さん、林さん、正木さん、伊藤さん、中村さん、OBの久保田さん、堀川さん、祖慶さん、高橋さん、木村さんや物理気候研究室の皆さん、仕事上迷惑をおかけしたABC ウェザーセンターのメンバー、(株)ウェザーニューズの皆さんに感謝します。なお、研究に使用したJRA再解析データは気象庁・電力中央研究所との共同研究により作成されたものである。