

2011年夏の熱帯季節内変動と日本の天候への影響

大野浩史・萱場互起・田中昌太郎（気象庁気候情報課）

1. はじめに

2011年夏の西部太平洋熱帯域では、2～3週間周期で変動する季節内変動が卓越した。本稿では、この夏の熱帯季節内変動の特徴と日本付近の大気循環や天候との関連についてまとめる。

以下、次章で使用データについて示す。第3章で2011年夏の季節内変動の特徴、第4章でそれに伴う日本の天候への影響について述べる。第5章では2～3週間周期の季節内変動に伴う大気循環場の一般的な変動を抽出するために行った複素 EOF 解析の結果を紹介する。

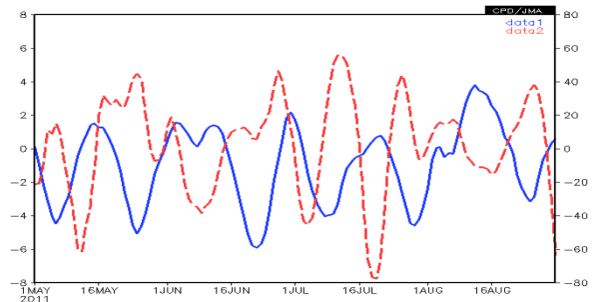
なお、2011年に2～3週間周期の季節内変動が卓越したのは5～8月であったため、2章と3章では5～8月を解析対象とし、特に断りがない場合は夏を5～8月の期間を指すものとする。

2. データ

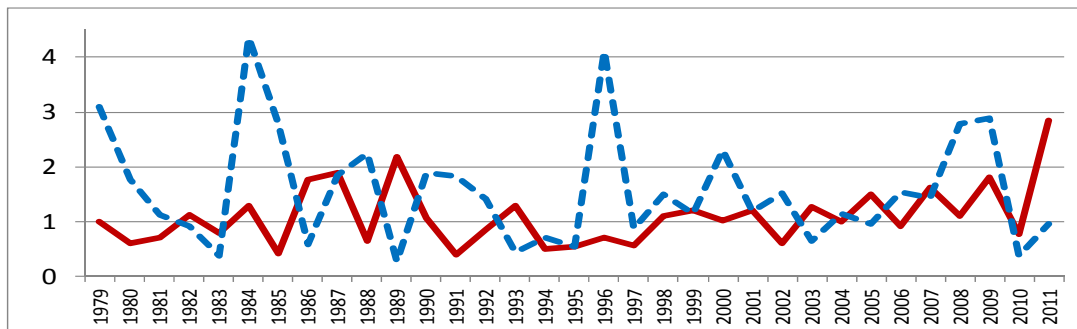
大気循環場は JRA-25/JCDAS (Onogi et al. 2007) データを利用した。対流活動の指標として、米国海洋大気庁 (NOAA) から提供されている外向き長波放射量 (OLR) を用いた。平年値は 1981～2010 年平均値である。

3. 2011年夏の熱帯季節内変動の特徴

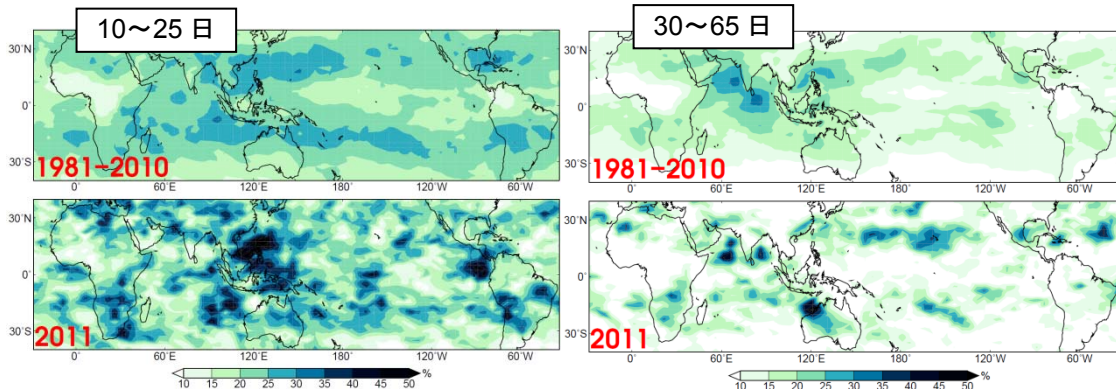
熱帯域ではマッデン-ジュリアン振動 (MJO) と呼ばれる 30～90 日程度の周期で赤道域を東に進む季節内変動が卓越することが知られているが (Madden and Julian 1971, 1972)、このほかにも夏季のアジアモンスーン領域では MJO より短い 2～3 週間周期の季節内変動が存在することが報告されている (例えば Murakami 1976, Yasunari 1979, Chen and Chen 1995)。



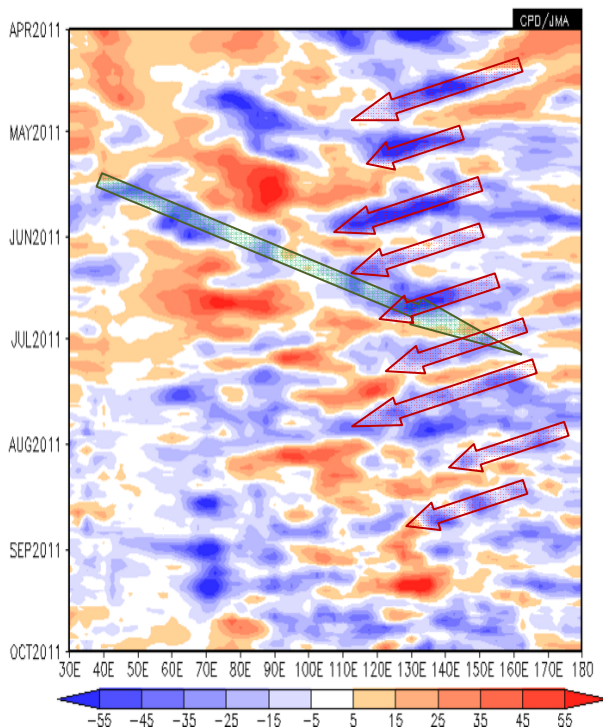
第1図 フィリピン付近 (10～20°N、115～140°E) の OLR 平年差 (青実線、右軸、単位: W/m^2) および日本付近 (30～40°N、130～140°E) の海面気圧平年差 (赤破線、左軸、単位: hPa) の推移 (2011年5月1日～8月31日) いずれも5日移動平均をかけた上で表示している。



第2図 フィリピン付近 (10-20°N、115-140°E) OLR の 5～8 月における季節内周期成分のパワースペクトルの経年変化 (単位: $10^6 (W/m^2)^2$) 赤実線は 10～25 日周期成分、青破線は 30～65 日周期成分を示す。



第3図 5～8月におけるOLRの季節内周期成分(左列:10～25日、右列:30～65日)のパワースペクトルの全周期成分に対する割合(単位:%)
上段は1981～2010年の30年平均、下段は2011年を示す。



第4図 5～15°N平均OLR 平年差の東西-時間断面図(単位 W/m²)
5日移動平均をかけた上で表示している。緑矢印はMJO、赤矢印は2～3週間周期変動を示す。

第1図(青実線)にフィリピン付近で領域平均した2011年夏季の外向き長波放射量(OLR)の平年偏差の時系列を示す。これを見ると、対流活動の2～3週間周期の変動が明瞭であることが分かる。また、この領域平均OLRの毎年の5～8月の時系列に対してスペクトル解析を行った結果(第2図)、2011年の10～25日周期成分のパワー

スペクトル(赤実線)は1979年以降で最も大きな値となった。また、MJOが卓越する30～65日周期成分のパワースペクトル(青破線)は小さかった。第3図は5～8月のOLR時系列の全周期成分のパワースペクトルに対する季節内周期成分のパワースペクトルの割合を表し、2011年の分布、および同年との比較のため1981～2010年の30年間の平均の分布を示す。30年平均(第3図左上)を見ると、南シナ海から日付変更線付近の15°N帯では10～25日周期成分が20～30%程度を占め、例年でも西部太平洋熱帯域は2～3週間周期の変動が比較的大きな領域であるが、2011年(同図左下)は南シナ海やフィリピン付近で50%程度を占め、例年に比べて卓越したことが分かる。一方、この領域における2011年(同図右下)の30～65日周期成分は例年(同図右上)に比べて割合が小さかった。

次に、熱帯域における2～3週間周期変動の対流活動の伝播の特徴を見るため、第4図に5～15°Nで平均した2011年夏季のOLR平年偏差の時間-経度断面図を示す。5月半ばから6月にかけては、活発な対流活動の位相がインド洋から太平洋西部を東に伝播したが(緑矢印)、それ以外の期間では、東進する位相は不明瞭だった。一方、日付変更線付近から南シナ海にかけての領

域では、2～3週間程度の周期で西向きに進む活発な対流活動の位相が明瞭だった（赤矢印）。ただし、南シナ海からインド洋への伝播は明瞭ではなかった。

第5図には、太平洋西部で平均した OLR の推移を陰影で示す。この図を見ると、A～Eで示した時期に対流活発域が赤道付近から 20°N 帯付近に北進している様子が分かる（Fは台風第9号を含む）。A～Eで示した時期は、第4図で示した西進する対流活発域が太平洋西部に位置している時期にあたる。これらの図から、2～3週間周期の活発な対流活動の位相は西または北西に進んだことが分かる。

このような対流域の北西進の特徴は過去の報告、例えば Fukutomi and Yasunari (1999) や Mao and Chan (2005) と一致する。ただし、彼らの報告と異なり、2011年夏季はインド洋への西進は不明瞭だった。西向きの位相速度はおよそ 5 m/s で、Wang and Rui (1990) 等の報告と整合的である。また、この西進する変動は周期を 10～25 日とすると $n=1$ の赤道ロスビー波に相当する (Wheeler and Kiladis 1999)。

この対流活発域の西進は、日付変更線付近から始まっているよう見える（第4図）が、この時期の対流圏上部のミッド・パンフィック・トラフ (MPT) は顕著に深く、350K の等温位面上の渦位は 2～3 σ 程度の正偏

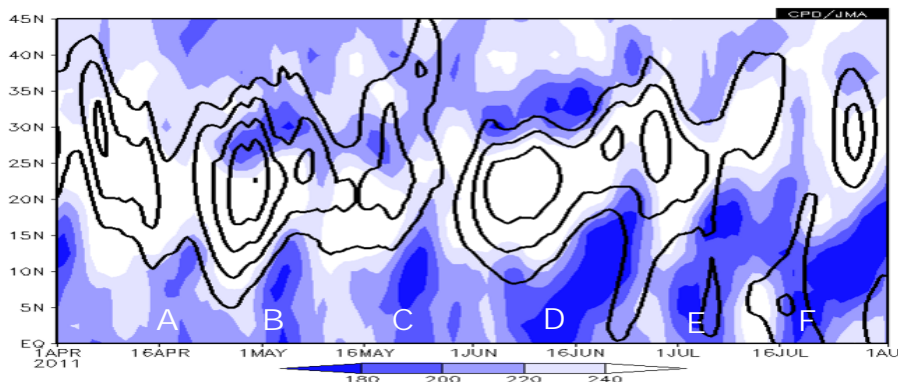
差だった（図略）。このような上層の大気循環の特徴が、2011年夏季に西向きに進む2～3週間周期の季節内変動と関連した可能性が示唆されるが、この点についてはさらなる調査が必要である。

4. 日本の天候への影響

(1) 6月下旬～7月中旬の高温

2011年夏季は全国的に気温が高く、太平洋高気圧の勢力の変動に対応して気温が大きく変動した。太平洋高気圧の日本付近への張り出しが強まった6月下旬から7月中旬にかけては北～西日本で記録的な高温となった。1961年以降の気温の統計では、6月下旬に東・西日本で1位、7月上旬は北日本で1位、東日本で2位、7月中旬は東日本で再び1位だった。

第1図は、フィリピン付近の OLR に加えて、日本付近で領域平均した海面気圧の時系列（赤破線）を示す。これを見ると、日本付近の海面気圧も2～3週間周期の変動が卓越しており、フィリピン付近で対流活動が活発化するときに、日本付近の太平洋高気圧が強まるという相関関係がある。これは、PJ パターンと呼ばれる夏季に現れやすい太平洋西部の変動のパターン (Nitta 1987, Kosaka and Nakamura 2006 等) と一致する。また、Fukutomi and Yasunari (1999) は、2～3週間周期で西進する対流活発域

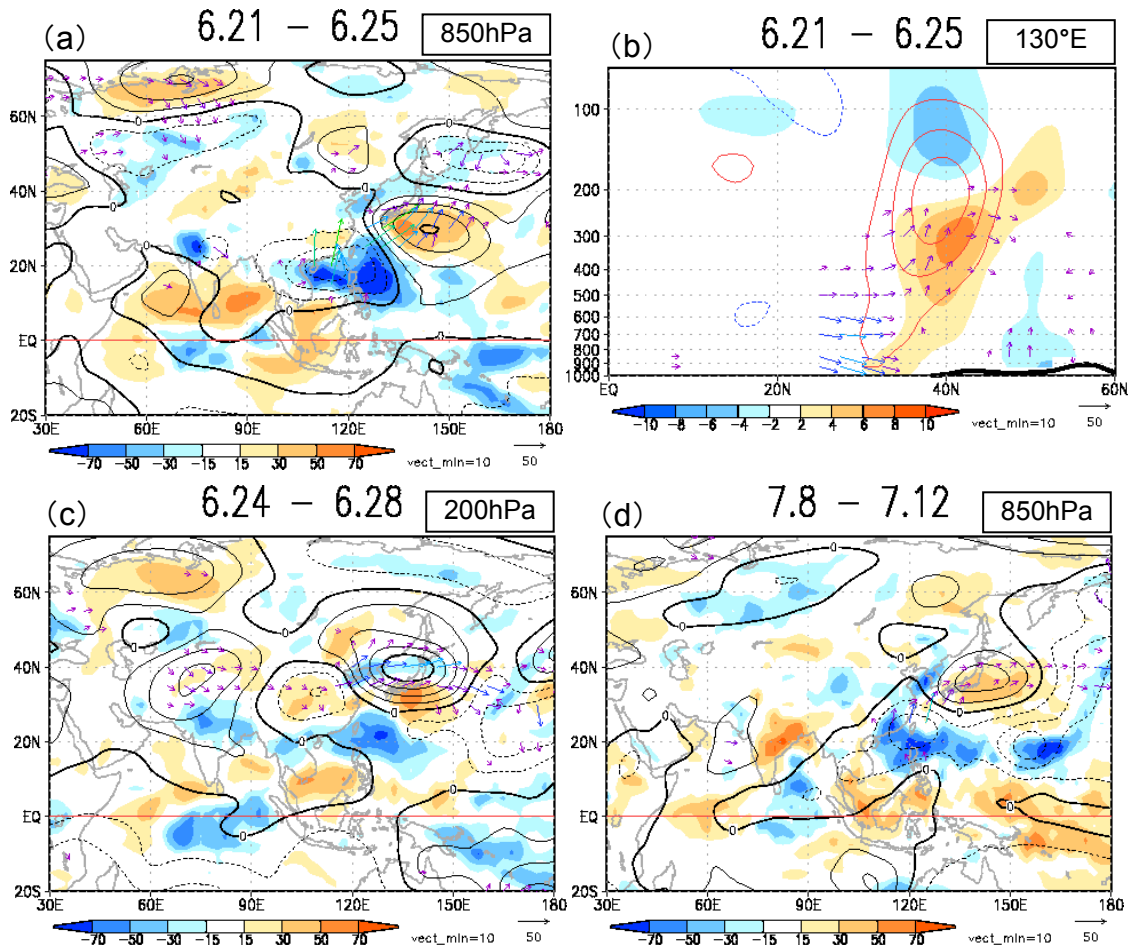


第5図 125～140°E 平均 OLR (陰影、単位: W/m^2) および 850hPa 流線関数 (等値線) の南北-時間断面図 (2011年4月1日～8月1日) 等値線間隔は $3 \times 10^6 m^2/s$ ($3 \times 10^6 m^2/s$ 以上を描画)。いずれも 5 日移動平均をかけた上で表示している。図中 A～F は対流域の北進の時期を示す (詳細は本文参照)。

がフィリピン付近に達したときに、本州付近からその南東海上にかけて高気圧性循環偏差が強化される傾向があることを示した。

第6図(a)は6月21~25日平均の850hPa流線関数偏差とOLR偏差の分布である。フィリピン付近には南東から進んできた対流活発域が位置し、フィリピン付近で低気圧性循環偏差、日本付近で高気圧性循環偏差、日本の北東海上で低気圧性循環偏差という波列が見られる。130°E沿いの鉛直断面図(第6図(b))を見ると、本州付近では、軸が上層に向かってやや北に傾いた等価順圧構造の高気圧性循環偏差(上層ほど偏差

が大きい)が位置しており、過去に報告されているPJパターンの構造とも一致する(Kosaka and Nakamura 2006)。本州付近は、この背の高い高気圧に覆われたことで高温がもたらされたと考えられる。さらに、数日後にはシルクロードパターンと呼ばれる亜熱帯ジェット気流に沿った波列パターン(Enomoto 2003)が現れ(第6図(c))、本州付近の高気圧がさらに強まった。このような構造は7月初めに解消されたが(本州付近の高気圧は弱まったが)、日本の南海上で太平洋高気圧の西への張り出しが強まったことなどから、南西からの暖気移流によ



第6図 (a) 6/21~25 平均 850hPa 流線関数年差(等値線)、OLR 年差(陰影、単位: W/m^2)、850hPa 波の活動度フラックス(矢印、単位: m^2/s^2)の分布、(b) 同期間の流線関数年差(等値線)、気温年差(陰影)、波の活動度フラックスの130°E沿い南北一鉛直断面図、(c) 図(a)と同じ、ただし期間は6/24~28 平均、流線関数と波の活動度フラックスは200hPa、(d) 図(a)と同じ、ただし期間は7/8~12 平均 等値線の間隔は(a) および(d) が $2.5 \times 10^6 m^2/s$ 、(b) および(c) が $5 \times 10^6 m^2/s$ で、点線は負の値を示す。

って高温は持続した。その後、再び対流活発域がフィリピン付近に西進してきた7月10日前後には対流圏下層にPJパターン(第6図(d))が現れた。その後、シルクロードパターンが重なって日本上空は6月下旬と同様の等価順圧構造の高気圧性循環偏差に覆われ、顕著な高温が持続した。

以上のことから、太平洋西部における2~3週間周期の季節内変動が、偏西風帯の波列パターンと重なることによって6月下旬から7月中旬にかけての顕著な高温をもたらしたと考えられる。

(2) 梅雨入り・明け

2011年の梅雨入りは、沖縄地方から関東甲信地方にかけては平年よりかなり早く、北陸地方と東北地方では遅かった。梅雨明けは、全国的に早く、沖縄地方と中国地方から東北地方にかけてはかなり早かった(第1表)。

第5図は、OLRに加えて、日本付近の太平洋高気圧の位置の目安として850hPa流線関数を示す。対流活発域の北進と同期して、太平洋高気圧の中心が北偏する傾向が見られる。また、太平洋高気圧の北縁には梅雨前線に対応するOLR極小域があり、これも同様に北にシフトする様子が見られる(同図B~Eの時期)。第5図のCは九州~

第1表 2011年の梅雨入り・明けの時期

記号の意味は、(+)*: かなり遅い、(+): 遅い、(0): 平年並、(-): 早い、(-)*: かなり早い、の階級区分を表す。

地方名	梅雨入り		梅雨明け	
	2011年	平年	2011年	平年
沖縄	4月30日ごろ (-)*	5月9日ごろ	6月9日ごろ (-)*	6月23日ごろ
奄美	4月30日ごろ (-)*	5月11日ごろ	6月22日ごろ (-)	6月29日ごろ
九州南部	5月23日ごろ (-)*	5月31日ごろ	7月8日ごろ (-)	7月14日ごろ
九州北部	5月21日ごろ (-)*	6月5日ごろ	7月8日ごろ (-)	7月19日ごろ
四国	5月21日ごろ (-)*	6月5日ごろ	7月8日ごろ (-)	7月18日ごろ
中国	5月21日ごろ (-)*	6月7日ごろ	7月8日ごろ (-)*	7月21日ごろ
近畿	5月22日ごろ (-)*	6月7日ごろ	7月8日ごろ (-)*	7月21日ごろ
東海	5月22日ごろ (-)*	6月8日ごろ	7月8日ごろ (-)*	7月21日ごろ
関東甲信	5月27日ごろ (-)*	6月8日ごろ	7月9日ごろ (-)*	7月21日ごろ
北陸	6月18日ごろ (+)	6月12日ごろ	7月9日ごろ (-)*	7月24日ごろ
東北南部	6月21日ごろ (+)	6月12日ごろ	7月9日ごろ (-)*	7月25日ごろ
東北北部	6月21日ごろ (+)	6月14日ごろ	7月9日ごろ (-)*	7月28日ごろ

関東地方の梅雨入り、Dは奄美地方の梅雨明けと北陸・東北地方の梅雨入り、Eは九州~東北地方の梅雨明けの時期にあたり、2011年の日本の梅雨入り・明けと太平洋西部の2~3週間周期の季節内変動は良い対応を示した。

5. 複素 EOF (CEOF) 解析

前章では、2011年夏季に卓越した2~3週間周期の季節内変動による日本の天候への影響について述べた。天候への影響の過程で現れる大気循環場の特徴が、2~3週間周期の季節内変動に伴って一般的に見られる現象であるかを調べるため、複素 EOF

(CEOF) 解析を行った。本調査で CEOF 解析を行ったデータは、インド洋から太平洋中部(30°E~180°)の5~15°Nで平均した過去32年分のOLR平年偏差(1979~2010年)に10~25日の周期帯でバンドパスフィルターをかけたもので、夏季を対象にしているため6~8月のデータのみを使用した。解析の結果、第1モードに2011年夏季に見られたような西向きに進む変動が抽出された(寄与率29.7%)。本章ではこのモードについて議論を行う。

第7図は、CEOF第1モードの空間構造を示す(スコアの分散が1となるように規格化)。まず位相(赤破線)を見ると、太平洋西部からインド洋にかけて単調に増加しており、これは太平洋からインド洋にかけて西向きに進む変動を表している。1波長の東西方向の空間スケールは100°(波数3~4)程度で、位相速度は周期を15日とすると8m/s、25日では5m/s程度である。次に振幅(青実線)を見ると、インド洋より太平洋西部で相対的に大きく、南シナ海の120°E付近で最も大きい。なお、2011年5~8月のスコアを計算したところ、1979年以降では5番目に大きかった。

第8図は、このモードに回帰させた6～8月のOLR、200hPa速度ポテンシャル (χ_{200}) および200hPaと850hPaの流線関数 (Ψ_{200} 、 Ψ_{850}) で、振幅が1の場合の分布を、スコアの位相を45度ごとに示している。つまり、周期を15日程度とすれば約2日ごとの循環場の変化を表し、位相180°の2日後は位相-135°になる。

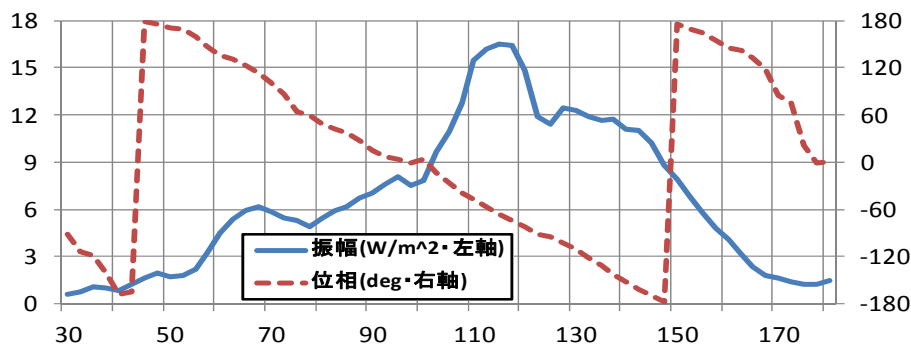
まず、OLRの分布(左列の等値線)を見ると、太平洋西部で対流活動の活発な領域が現れ(位相-45°)、活発化しながら北西に進み、フィリピンから南シナ海付近で最も活発となる(同90°)。その後、対流活発域は弱まりながら西進し、インドシナ半島(同180°)、ベンガル湾(同-135°)を經由してアラビア海(同-45°)まで進んでいる。 χ_{200} (右列の等値線)を見ても西向きに進む変動が明瞭で、位相-135°には日付変更線付近に発散偏差が現れる。

次に、 Ψ_{850} (左列の陰影) および Ψ_{200} (右列の陰影) について述べる。対流圏下層(Ψ_{850})では、概ね各位相でフィリピン付近から日本付近を通してアラスカの南海上へ至る波列が見られ、特にフィリピンの東で対流活発(あるいは不活発)となる位相0~45°(180~-135°)で明瞭である。上層(Ψ_{200})でも波列パターンが見られ、日本付近からアラスカ付近にかけては下層と同符号(等価順圧構造)の波列が明瞭である。このような波列は、熱帯域の対流活動の変動に対する応答として形成されたと考

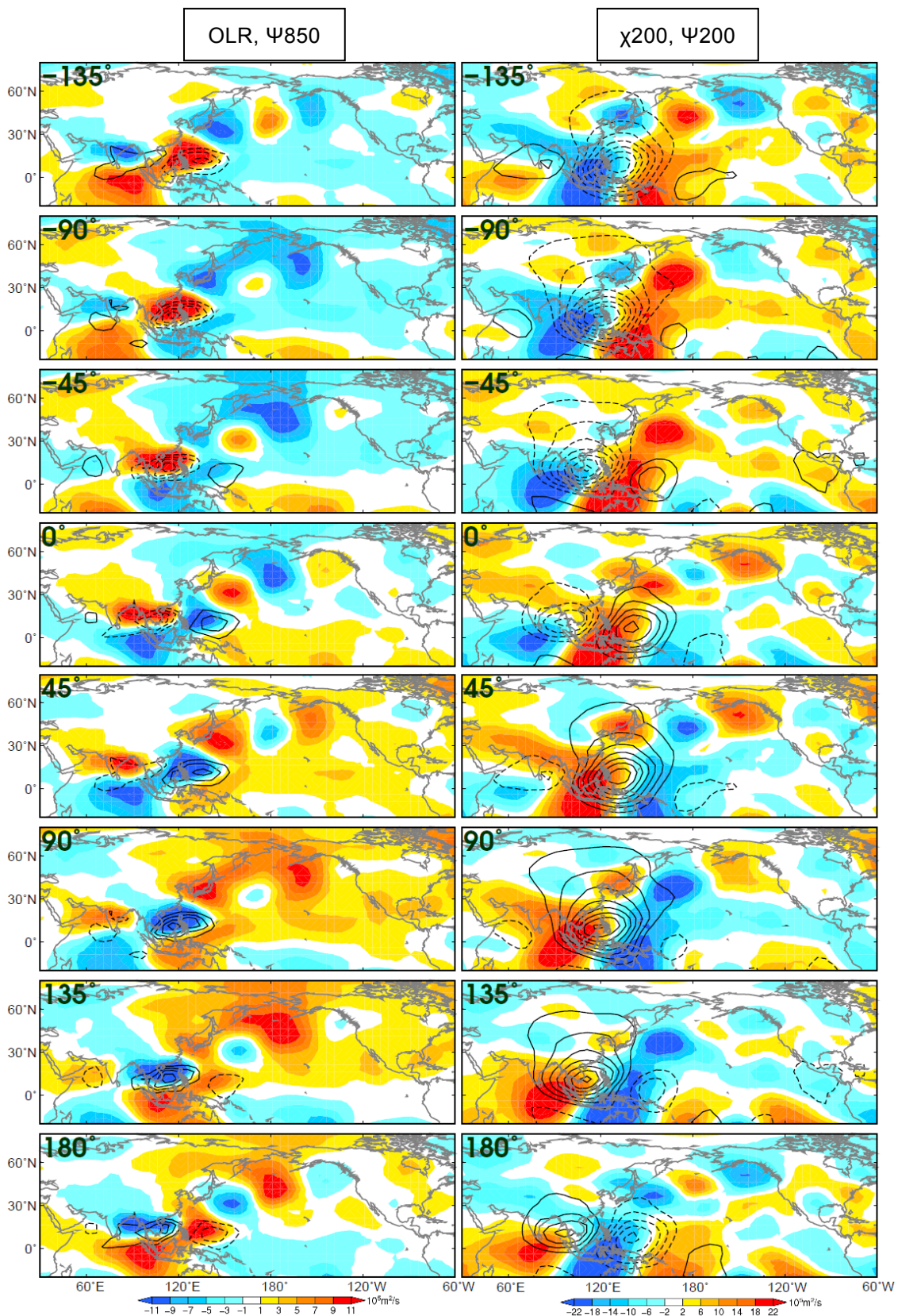
えられる。

対流活動が南シナ海～フィリピン付近に位置する位相(90°前後)を見ると、本州上空は対流圏下層・上層とも高気圧性循環偏差に覆われている。また、135°Eに沿った相対渦度の鉛直構造を第1モードに回帰させると(第9図)、日本付近はやや北に傾いた背の高い高気圧に覆われており、PJパターンのときに見られる構造と整合的である(Kosaka and Nakamura 2006)。これらは前章で述べた6月下旬から7月中旬の高温時に見られた特徴とよく一致している。実際、6～8月の850hPa気温を第1モードに回帰させると(第10図)、本州付近は位相90°前後のときに高温偏差となる。また、気象官署における気温の観測値を同様に回帰させた場合も(第2表)、北日本～西日本では90°前後の位相のときに気温の極大値が現れる。

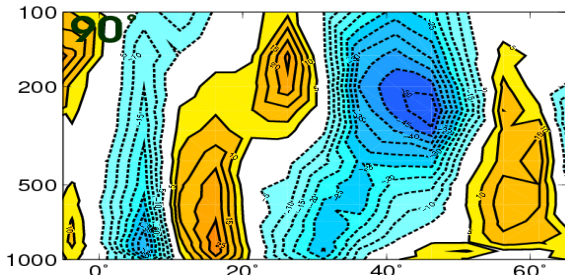
位相が180~-135°まで進むと、対流活発域の中心はインド洋側に移り、太平洋西部側では対流不活発となる。このとき、フィリピンの東海上では高気圧性循環偏差が強まっており、太平洋高気圧の西への張り出しが強まっていることを表している。これはフィリピン付近の不活発な対流活動に対する応答である可能性がある。第2表をみると、この位相のとき、沖縄・奄美地方では気温の極大値が現れる。第10図を見ても、南西諸島周辺では180°前後で高温偏差が分布している。したがって、2～3週間周



第7図 CEOF 第1モードの空間構造
青実線は振幅(左軸、単位: W/m²)、赤点線は位相(右軸、単位: 度)を示す。振幅はスコアの分散が1となるように規格化している。



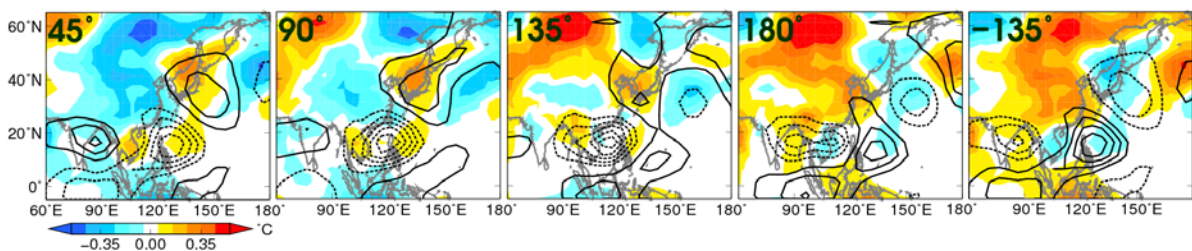
第8図 GEOF 第1モードに回帰させた(左)OLR(等値線)、850hPa 流線関数(陰影)、(右)200hPa 速度ポテンシャル(等値線)、200hPa 流線関数(陰影) スコアの振幅が1標準偏差の場合の分布をスコアの位相を45°ごとに表示(各図の左上の数字が位相を表す)。OLR(200hPa 速度ポテンシャル)の等値線は実線が負偏差(発散偏差)、点線が正偏差(収束偏差)を示し、 $6 \text{W}/\text{m}^2$ ($4 \times 10^5 \text{m}^2/\text{s}$)ごとに描画(ただし値が0の等値線は省略)。



第9図 CEOF 第1モードに回帰させたスコアの位相が45°のときの相対湿度の南北-鉛直断面
スコアの振幅が1標準偏差の場合の分布。等値線は実(点)線が正(負)偏差を示し、 $5 \times 10^{-7} \text{m}^{-1}$ ごとに描画(ただし値が0の等値線は省略)。

第2表 CEOF 第1モードに回帰させた地域別気温偏差が最大値を示すときの位相と、そのときの振幅(スコアの標準偏差が1の場合、単位: °C)

	位相	偏差(°C)
北日本	59°	0.136
東日本	81°	0.162
西日本	119°	0.235
沖縄・奄美	-158° (202°)	0.077



第10図 CEOF 第1モードに回帰させた850hPaの気温(陰影)、流線関数(等値線)
スコアの振幅が1標準偏差の場合の分布。各図の左上の数字が位相を表す。等値線は実(点)線が高(低)気圧性循環偏差を示し、 $4 \times 10^5 \text{m}^2/\text{s}$ ごとに描画(ただし値が0の等値線は省略)。

期の季節内変動に伴う沖縄・奄美地方の気温の変動には、本州の南での太平洋高気圧の張り出しの程度が影響している可能性が考えられる。

2011年について見ると、沖縄・奄美地方では6月上旬から中旬にかけて気温が高く、特に6月中旬は1961年以降で2番目に高い記録となった。また、沖縄地方では6月9日に平年よりかなり早く梅雨明けした。このとき、フィリピン付近では対流活動が相対的に不活発の時期にあたり(第1図)、本州の南では太平洋高気圧の西への張り出しが明瞭だった(図略)。したがって、この時期の沖縄・奄美地方の天候には2~3週間周期の季節内変動が一部影響を及ぼした可能性がある。実際、5~8月のフィリピン付近ではOLRとSLPが概ねよく対応して2~3週間周期で変動していた(図略)。

本章で示した結果は、合成解析によって2~3週間周期の変動に伴う循環場の特徴

を調査した Fukutomi and Yasunari (1999) や Mao and Chan (2005) の結果ともよく整合している。前者は4年分のデータのみの結果であり、後者は対流圏上層の循環についてはあまり触れていない。よって、今回の結果は2~3週間周期の変動に伴う循環場の変動をより包括的に示したといえる。

6. まとめ

2011年夏季の太平洋西部では、2~3週間周期で北西進する季節内変動が季節を通して卓越した。この季節内変動に伴って、フィリピン付近の対流活動が変動し、PJパターンを通じて日本付近の顕著な高温や梅雨の入り・明けに影響を及ぼした。

過去およそ30年分のOLRデータを用いてCEO解析を行い、第1モードとして西向きに進む季節内変動を抽出した。このモードに回帰させた循環場の変動は、2011年夏季に見られた特徴とよく一致した。

この2～3週間周期の季節内変動が2011年夏季に卓越した要因については、さらなる調査研究が必要である。

参考文献

- Chen, T.-C. and J.-M. Chen, 1995: An observational study of the South China Sea monsoon during the 1979 summer: Onset and life cycle. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2295-2318.
- Enomoto, T., B. J. Hoskins, and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Bonin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 157-178.
- Fukutomi, Y. and T. Yasunari, 1999: 10-25 day intraseasonal variations of convection and circulation over East Asia and western North Pacific during early summer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 753-769.
- Kosaka, Y. and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **132**, 2009-2030.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1971: Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1972: Description of global scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Mao, J. and J. C. L. Chan, 2005: Intraseasonal variability of the South China Sea summer monsoon. *J. Climate*, **18**, 2388-2402.
- Murakami, M., 1976: Analysis of summer monsoon fluctuations over India. *J. Meteor. Soc. Japan*, **54**, 15-32.
- Nitta, T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Wang, B. and H. Rui, 1990: Synoptic climatology of transient tropical intraseasonal convection anomalies: 1975-1985. *Meteor. Atmos. Phys.*, **44**, 43-61.
- Wheeler, M. and G. N. Kiladis, 1999: Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 374-399.
- Yasunari, T., 1979: Cloudiness fluctuations associated with the Northern Hemisphere summer monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan*, **57**, 227-242.