

気象庁長期再解析データを用いた 夏季前線性豪雨時の広域的大気構造の研究

A STUDY ON SYNOPTIC SCALE ATMOSPHERIC STRUCTURE OF
SUMMER HEAVY RAINFALL BY JAPANESE 25-YEAR RE-ANALYSIS DATA

冨田 惇¹・谷口 健司²・小池 俊雄³

Atsushi TOMITA, Kenji TANIGUCHI and Toshio KOIKE

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

²正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

³正会員 工博 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

A summer heavy rainfall event in Japan is a part of large-scale circulation field. But, heavy rainfall research has not been done from large-scale viewpoint because it is difficult to get high-integrity long-term data. In 2006, Japanese 25-year Re-analysis (JRA-25) data was begun to be published.

In this study, by using JRA-25 data, trajectory analysis was carried out and anomalous field of atmospheric conditions about the 35 events in which heavy rainfall occurred in Japan in Baiu season was investigated. Some features of synoptic scale atmospheric structure of summer heavy rainfall was found out.; intention of Pacific high, westward spread of Pacific high, intensification of cyclone near Japan, intensification of MA-3, increase of water vapor of moist tongue, pressure variation of Okhotsk Sea. When dry year events were analyzed, they show opposite tendency to the features.

Key Words : Asian summer monsoon, Baiu, heavy rainfall, JRA-25, trajectory

1. はじめに

梅雨前線は、太平洋の高温多湿な海洋性熱帯気団（小笠原気団）の北縁に形成される準定常的な前線帯である。図-1のように、前線帯の北側には、寒冷なオホーツク海気団と、乾燥した大陸性気団が存在する。オホーツク海上空にブロッキング高気圧が発生すると、オホーツク海高気圧によって、オホーツク海気団の寒冷な大気が南下し、前線帯の活動が強化される。前線帯の南側には、海洋性熱帯気団によって、太平洋高気圧が形成される。その西側、すなわち、南シナ海あるいはフィリピン海近海の上空では、インド洋から吹き込む西風（本研究では、MA-1と定義した）と、太平洋高気圧による東風（MA-2）とが合流し、南風（MA-3）に転じる。さらに、太平洋高気圧の西縁を回り、西寄りの風となり、前線帯に吹き込み、水蒸気を供給する。この南シナ海から日本列島に向かって流入する湿潤ゾーンは湿舌と呼ばれ、梅雨前線の雲ゾーンは湿舌のすぐ北側に位置している¹⁾。

前線性豪雨は局地的な現象であるが、前線帯の形成、水蒸気の供給などは、上述のような大規模な循環場で起

こっている。アジアモンスーンを含めた広域的な豪雨研究をおこなう必要がある。1991年7月の豪雨では、太平洋高気圧の西縁に沿った南西風によって、暖かく湿った空気が前線帯に運ばれ、対流性の雲が発生しやすい状態となる²⁾、といった広域場の特徴が検出されており、その特徴を、他事例と比べた研究³⁾も行われている。しかし、十分な信頼性を有する長期データの取得が困難であったこともあり、上述のような広域場の一般性・共通項に対する議論が、ほとんどおこなわれてこなかった。

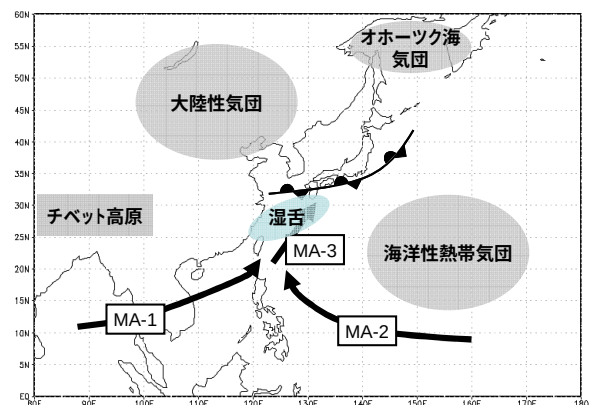


図-1 梅雨期の日本周辺の様子

2006年に気象庁より、精度の高い長期再解析データの提供が開始されたことを受け、本研究では、これまで個別に議論されることが多かった梅雨日本の豪雨事例を、35事例一括して扱い、複数の豪雨事例に共通する、広域的な大気場の特徴の解明を目的として、トラジェクトリー解析と偏差解析という2つの解析をおこなった。

2. データと方法

(1) 気象庁長期再解析データ

2001年度から5年間、気象庁と電力中央研究所が共同で、アジア初の長期再解析データとなる、JRA-25 (Japanese 25-year Re-analysis) プロジェクトを実施し、2006年に完了した。

他の再解析プロジェクトでは使用されていない、GMS再計算衛星風データ、熱帯低気圧周辺風データ、SSM/I積雪域データ、中国積雪データといった、独自の観測データを使用している。欧米の長期再解析プロジェクトと比べ、とりわけ、台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の解析、全球の降水量の表現において、優れている。

全球規模での本格的な衛星観測が開始された1979年から2004年までの26年間分の、100種類以上の気象要素についての6時間毎の全球格子点データがそろっている。空間解像度は気象要素によって異なるが、最も細かなものでは、水平方向に1.125度（赤道付近で約120km）、鉛直方向に高度約50000mまでの40層の解像度をもつ。

2005年以降は、JRA-25と同じシステムで計算するデータ同化サイクルを延長した、気象庁気候データ同化システム (JCDAS: JMA Climate Data Assimilation System) がリアルタイムで運用されている。JCDASデータとJRA-25データを併せて利用することで、1979年以降の均質なデータによる気候解析が可能である。

本研究では、JRA-25により提供されたデータセットのうち、ジオポテンシャル高度、水平風2成分、温度、比湿のデータを使用した。これらのデータの水平解像度は1.25°×1.25°格子で、鉛直方向には23層（0.4～1000hPa面）の解像度をもつ。

(2) トラジェクトリー解析

温位とは、空気塊を断熱的に標準気圧のところまで下降（あるいは上昇）させたとき、空気塊がもつ温度であり、次式で表される。

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/c_p}$$

θ : 温位 [K] , T : 気温 [K]

p_0 : 標準気圧 (=1000hPa) , p : 気圧 [hPa]

R/c_p : 空気の気体定数/定圧比熱 (=0.286)

ある温位を考え、この等温位面上に、その高度における風・気温・湿度などを記入した天気図を描くことがおこなわれており、等温位面解析という。大気の運動が断熱的に起こっている場合、各々の空気塊の温位は変化しない。したがって、空気塊は断熱変化をしている限り、等温位面上を風とともに動き、この面を離れることはない。この点で等温位面解析は空気塊の動きを追跡するのに適している⁴⁾。そこで、本研究では、断熱変化を仮定し、等温位面上でトラジェクトリー解析をおこなった。

トラジェクトリー解析とは、大気中の物質の分布・移動を調べるための解析手法で、今回使用した後方トラジェクトリー解析は、ある物質がどのような経路をたどってここにきたのか、を特定することを可能とする。既存のトラジェクトリーツールとしては、EORC-TAM⁹⁾などがあげられるが、本研究では、データの取り扱いの自由度を意識し、EORC-TAMのアルゴリズムを参考にし、オリジナルツールを開発した。

水蒸気塊は、大きさを持たない格子状の点であり、時空間内挿によって得られた水平風を単位時間受け続け、その水平風と同じ速度で等温位面上を動く、という前提を立て、後述のプログラムを作成した。

6時間毎のデータであるJRA-25データから単位時間ごとの風速を得るため、前後の時間から線形内挿をおこなった。等圧面データを等温位面データに変換するため、各時間・各気圧面での気温から、各地点の鉛直温位プロファイルを求め、解析対象の温位の位置を特定する。2つの気圧面の間に位置していれば、鉛直方向に線形内挿をおこない、その温位における東西風、南北風を求めた。

水蒸気塊を、大きさ・重さをもたず、水平風によって等温位面上を漂う点と考えると、水蒸気塊(ϕ, ψ)の1時

間後の位置($\phi + \Delta\phi, \psi + \Delta\psi$)は、次式で表される。

$$\Delta\phi = \frac{u_{\theta(\phi, \psi)} \times 60 \times 60 \times 360}{2\pi(z + R_E) \cos \psi} \quad (1)$$

$$\Delta\psi = \frac{v_{\theta(\phi, \psi)} \times 60 \times 60 \times 360}{2\pi(z + R_E)} \quad (2)$$

u : 東西風 [m/s] , v : 南北風 [m/s]

z : 温位 θ における地表面からの高度 [m]

R_E : 地球の半径 [m] (= 6.3773×10⁶)

対象領域にいくつかの水蒸気塊があるとし、それぞれに座標を与える。上記の計算方法に従って、各々の水蒸気塊の1時間前の座標を地図上に落とす。求めたい日数分、この操作を繰り返し、線でつないだものが、その水蒸気塊のたどってきた道筋（トラジェクトリー）である。

表-1 解析対象豪雨

事例	年	期間	場所
01	1982	7/11-20	九州 中国 四国 紀伊半島
02		7/23-25	九州 中国 四国 紀伊半島
03	1983	7/20-27	中国 北陸 東北
04	1989	6/9	九州北部 三重
05		6/16-17	四国 紀伊半島 東海 東北
06		6/28-29	近畿 東海 北海道
07		7/9-10	九州
08		7/12	中国 北陸
09		7/16-17	本州内陸部
10	1990	6/8-9	九州南部 四国 紀伊半島 静岡 神奈川
11		6/15	九州北部 中国西部
12		6/27	東北
13		6/29-7/2	九州 四国
14		7/15-19	全国
15	1991	6/9-6/15	九州 四国
16		6/28-30	九州 北陸
17		7/15-17	九州北部 中国 中部
18		8/1-6	全国
19	1993	6/2-4	西日本・東北太平洋側 北海道
20		6/13-15	九州
21		6/18-23	北日本を除く全国
22		6/29-7/7	西日本 東海 関東
23		7/17-18	九州 中国西部
24	1995	7/1-4	西日本
25		7/8-12	北陸 東北日本海側
26		8/9-11	鹿児島 新潟 山形 北海道
27	1996	7/3-4	九州
28	1997	7/6-13	九州 中国 中部
29		7/17	長崎
30	1998	8/3-7	北陸 東北日本海側
31	1999	6/23-7/3	全国
32	2001	7/11-13	九州北部 四国 北陸
33	2003	7/18-21	九州 中国 四国
34	2004	7/12-14	新潟 福島
35		7/17-18	北陸 東北 岐阜

各事例において、豪雨が発生した地域のいくつかの水蒸気塊に対して、豪雨が発生した時間から10日前までの等温位面上（305K面、315K面、325K面）のトラジェクトリーを求めた。日本付近（北緯35度）では、各等温位面は、それぞれ600、400、250hpa程度の気圧面に該当する。

(3) 偏差解析

豪雨発生時の、水平風・気温・ジオポテンシャル高度・比湿の5日間平均を求め、各年の3ヶ月平均（6～8月）からの偏差を図示し、各豪雨事例の相違点を考察した。解析の対象は850・500hpa面の2等圧面とした。

モンスーンは、季節内変動、季節変動（年内変動）、年々変動、より長い周期の変動など、様々な変動をともなう。年々変動の影響を除くため、各年について、梅雨という季節の特徴を最も顕著に表すと考えられる、6～8

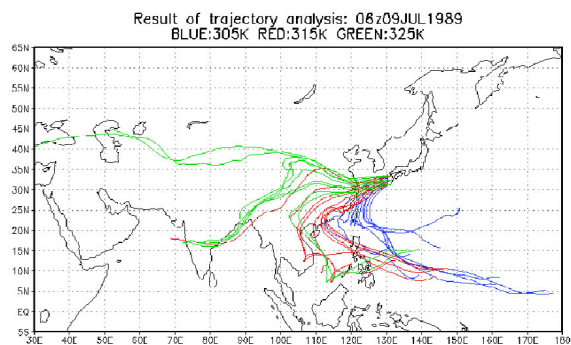


図-2 トラジェクトリー解析の結果（事例07・08）

図上部の日時から10日前までのトラジェクトリーで、青線は305K面、赤線は315K面、緑線は325K面上のトラジェクトリーを表している。

月の3ヶ月平均をとった。

集中豪雨などのメソスケール現象の時間・空間スケールは、それぞれ、数時間から1日程度、数10kmから数100km程度である⁴⁾。豪雨自体ではなく、豪雨発生時の広域場（空間的・時間的）の特徴を調べるには、1日という短期場ではなく、日々の変動を無視できる程度の期間の平均場について考えるべきであり、5日平均をとった。

後述の35事例において、広域場の状態が持続し連続して起こったと考えられる、事例07と08、及び12と13については、それぞれ一つの期間として扱った。

3. 解析対象豪雨

気象庁ホームページで公開されている「災害をもたらした気象事例（昭和20年～63年、平成元年～17年）」の、1979～2004年の6～8月に起きた豪雨事例の中から、日本列島での降水が台風・熱帯低気圧の影響を受けていないと考えられる事例を解析対象とした。長期にわたる場合は、各事例の「概要」、「日々の概況」、「期間内での観測値」の「アメダスでの観測値 値の大きい方から10地点（日最大降水量・最大1時間降水量）を参考にし、表-1のように、いくつかの期間にわけ、解析を実施した。

4. 解析結果

35事例の解析結果のうちの特徴的な2つの事例を取り上げ、解析結果を以下に記述する。

(1) 事例解析1：事例07・08

a) トラジェクトリー解析（図-2）

夏季の中緯度帯では偏西風ジェットが卓越しており、上層のトラジェクトリー（緑線）が、その偏西風ジェットに重なり、赤線、青線と下層に向かうにつれ、低緯度

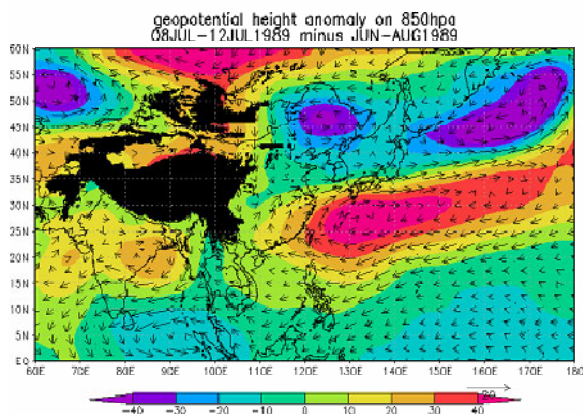


図-3 850hpa面の偏差解析の結果1 (事例07・08)
陰影がジオポテンシャル高度、矢印が水平風ベクトルの偏差を表している。

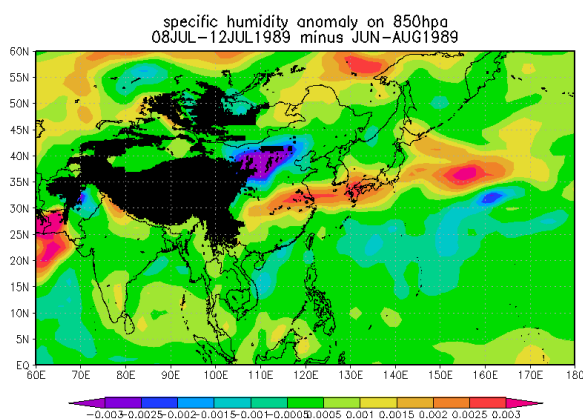


図-4 850hpa面の偏差解析の結果2 (事例07・08)
陰影が比湿の偏差を表している。

からの風、特にMA-2により、水蒸気が輸送されている。

b) 偏差解析 (図-3・図-4)

高圧偏差が太平洋から大陸にかけて東西に長く広がり、その北西と北東に低圧偏差が存在する。MA-3が強化されており、2つの低圧偏差の反時計回りの風と合流し、日本列島に収束域を形成している。豪雨が起きたのは、北西の低圧場との収束域である。インド洋からのMA-1西風成分の偏差は見られないが、太平洋からのMA-2の強化は確認でき、これは、図-2のトラジェクトリー解析の結果と一致する。また、MA-3の強化に伴い、湿舌の水蒸気量（比湿）が正偏差になっており、MA-3による水蒸気輸送が大きいことが分かる。

(2) 事例解析2：事例34

a) トラジェクトリー解析 (図-5)

(1)の事例07・08とは異なり、上層の偏西風ジェットによる水蒸気輸送は見られず、低緯度からの風、特にMA-1によって水蒸気が運ばれている。

b) 偏差解析 (図-6・図-7)

太平洋高気圧の強化が見られ、太平洋の西側に位置し

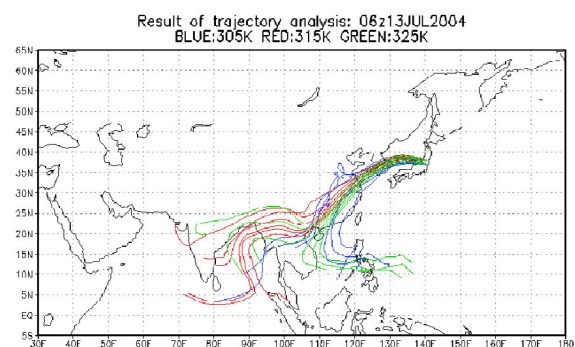


図-5 トラジェクトリー解析の結果 (事例34)

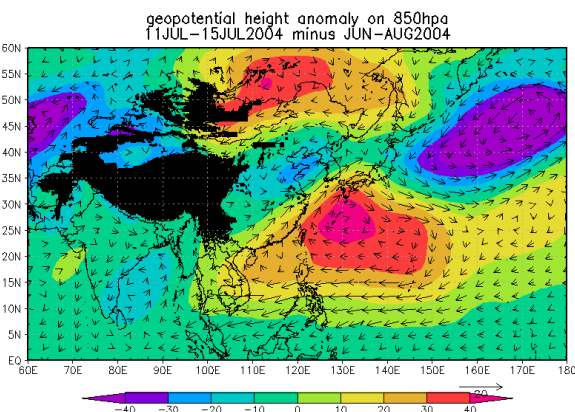


図-6 850hpa面の偏差解析の結果3 (事例34)

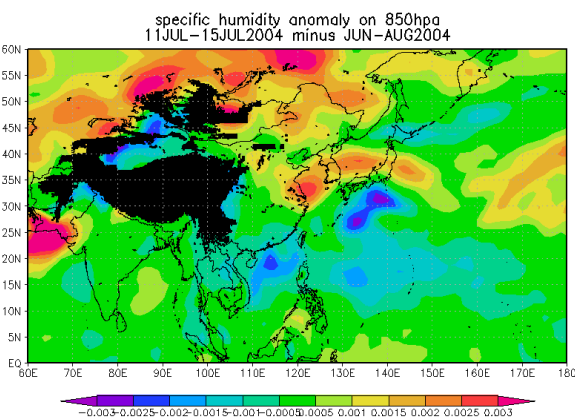


図-7 850hpa面の偏差解析の結果4 (事例34)

ている。この高圧偏差の北西と北東に低圧偏差が存在し、日本列島に収束域を形成している。MA-3が強く、北西の低圧偏差の風と合流し、豪雨が起きた新潟・福島県に吹き込み、北東の低圧偏差の風も吹き込んでいることが分かる。また、(1)と同様に、湿舌の水蒸気量が正偏差で、MA-3による水蒸気輸送が大きいことが分かる。

5. 広域大気場の共通構造

35事例の広域場の状態を観察すると、いくつかの特徴的な地域・状態の存在が見えてくる。その中から、豪雨

表-2 広域場の特徴 (850hpa面)

①太平洋高圧偏差の最大値 (m)

* : 130度以西に存在

** : 東方に存在するが高圧場が西方まで広がる

②高圧偏差に隣接する低圧偏差の極値 (m)

③MA-3存在領域の南西風ベクトルの偏差

④湿舌の比湿偏差の最大値 (kg/kg)

⑤オホーツク海のジオポテンシャル高度の偏差 (m)

* : 豪雨をもたらした収束域を形成

事例	①	②	③	④	⑤
01	+40*	-10	正	0.0025	+60
02	+20*	-40	正	0.0025	+60
03	+40	-20	正	0.003	-40
04	+30*	-60	正	0.001	+60
05	+20*	-60	正	0.001	+50
06	+20*	-50	正	0.0005	+60*
07・08	+50**	-40	正	0.0025	-10
09	+40*	0	正	0.003	+10
10	+40**	-60	正	0.001	-20
11	+20**	-20	正	0.001	+20
12・13	+20*	-10	正	0.001	+60*
14	+20*	-60	正	0.003	-60*
15	+50**	-60	正	0.0015	-60*
16	+40**	-60	正	0.001	-60
17	+20**	0	正	0.003	+60
18	+20*	-60	正	0.002	+60*
19	無	-60	負	無	+50
20	+20*	-60	正	0.001	-60
21	+20**	-20	正	0.001	+10
22	+30**	-30	正	0.0015	-20
23	+10	-50	正	0.0025	+40
24	+40**	-20	正	0.0025	+20
25	+30**	-60	正	0.003	-60*
26	+30*	-10	正	0.0025	+20*
27	+30*	-40	正	0.001	-30
28	+30*	-10	正	0.002	-20
29	+30*	-60	正	0.003	-60*
30	+40	-60	正	0.003	+40*
31	+30**	-20	正	0.0015	+50
32	+40	-60	正	0.003	-40
33	+30	-20	正	無	+60*
34	+40*	-60	正	0.002	+10*
35	+50*	-60	正	0.003	-40*

の要因と考えられる特徴を選択し、以下に述べる。

(1) 太平洋高気圧の強化

事例19を除いた全ての事例で、太平洋におけるジオポテンシャル高度の正偏差、すなわち太平洋高気圧の強化が観察される。強化された太平洋高気圧と周辺の低圧場とが日本列島に収束域を形成し、豪雨をもたらす。

太平洋高気圧はMA-3の挙動に大きな影響を与えており、その位置は日本列島への水蒸気供給にとって非常に重要となる。平均場 (図-8) では、太平洋高気圧の中心

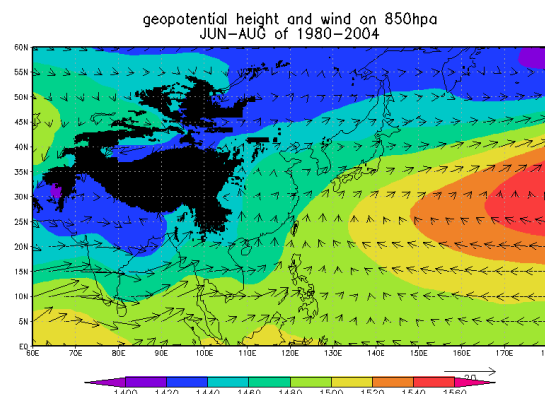


図-8 850hpa面におけるジオポテンシャル高度と水平風の3ヶ月平均場 (1980～2004年の6～8月の平均)

が、日本列島の経度域よりかなり東側にある。しかし、表-2のように、太平洋高気圧の偏差の極大を示す位置が130度以西の事例が多く、中心は東方だが高圧場が西方まで広がる事例も含めば、大半の事例で、太平洋高気圧の高圧場が一般場より西方にある。太平洋高気圧が西方にある場合に豪雨が発生するのは、MA-2が高温な南シナ海を通り水蒸気を蓄え、湿潤なMA-1とぶつかり、多量の水蒸気を含んだMA-3が湿舌を形成するため、と考えられる。事例23, 32, 33では、太平洋高気圧が明らかに東方に位置しているが、事例23では、ジオポテンシャル高度の偏差には顕著に表れない、太平洋西方の高圧性循環場が水平風の偏差に確認でき、事例32では、顕著な湿舌が存在するため、豪雨が発生した。事例33では、顕著な湿舌は見られないが、豪雨域周辺の比湿が高い。

事例19では、日本海を東進した強い低気圧によって豪雨が発生した。他事例が図-1で示した総観規模の構造の影響を受け豪雨が発生しているのに対し、事例19は小スケールの現象であり、他事例とは異なる特徴が見られた。表-2の③と④においても、事例19は他事例と異なる傾向を示している。

(2) オホーツク海の気圧変動

収束域を作る高気圧は、太平洋起源の高気圧の場合が大半だが、オホーツク海高気圧の場合も、いくつかの事例で見られる。事例06, 12・13, 18, 26と、オホーツク海高気圧によって収束域が形成され、北日本に豪雨が発生し、同時に太平洋高気圧による収束域により、他地域にも豪雨が発生している。事例17, 18, 30, 33では、太平洋高気圧とオホーツク海高気圧が隣接し、一つの大きな高圧場を形成している。事例14, 15, 25, 29, 32では、オホーツク海は強い低圧偏差を示し、南側の太平洋高気圧と収束域を形成し、豪雨をもたらしている。高圧・低圧偏差ともに豪雨をもたらすことから、オホーツク海の気圧変動が、日本列島の豪雨に影響を与えている可能性が示唆される。

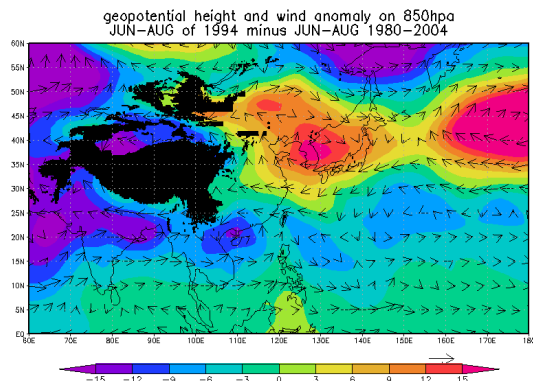


図-9 少雨事例の850hpa面の解析結果

(3) 低圧偏差の存在

前線帯の形成には、高気圧だけでなく、低気圧も必要である。規模や位置の違いはあるが、全事例で低圧偏差が確認できる。表-2の事例09と17では、値が0となっているが、500hpa面で低圧偏差が確認できる。一般場では、太平洋で高圧、大陸で低圧という傾向が見られるが、豪雨時には、この気圧配置の特徴がより明瞭に見られる。

(4) MA-3の強化

事例19以外の全ての事例で、MA-3の南西風ベクトルの正偏差が確認でき、MA-3が強まっているといえる。

(5) 湿舌の水蒸気量の増加

事例19と33を除いた全ての事例で、湿舌の比湿が正偏差を示す。事例19では、日本列島の周囲が広域にわたって負偏差となっている。事例33では、日本列島北西部が正偏差となっており、これは、朝鮮半島から回り込むように吹き込むMA-3の位置と一致する。

(6) 少雨年との比較

(1)~(5)の特徴の整合性を確かめるため、豪雨でないときの広域場の様子と比較した。気象庁ホームページの「災害をもたらした気象事例・長期緩慢災害」で、少雨事例として5つの事例があげられており、そのうち、JRA-25データが存在する1984年と1994年について解析をおこなった。解析内容としては、各気象要素について、1984年と1994年の6~8月平均の、1980~2004年の6~8月平均場からの偏差を求めた。そのうち、1994年のジオポテンシャル高度と水平風の偏差(図-9)を示す。日本列島付近のジオポテンシャル高度が平年より高く、太平洋ではやや低くなっており、太平洋高気圧が弱く、収束域を形成する低気圧の存在が顕著でないと考えられ、そのため、収束域も形成されず、少雨傾向となったと推察できる。水平風は、MA-3の東風の成分が強く、南風の成分が見られず、日本列島への吹きこみが顕著でないと考えられる。1984年も、同様の傾向を示した。このように、少雨年の事例では、豪雨事例と逆の傾向を示している。

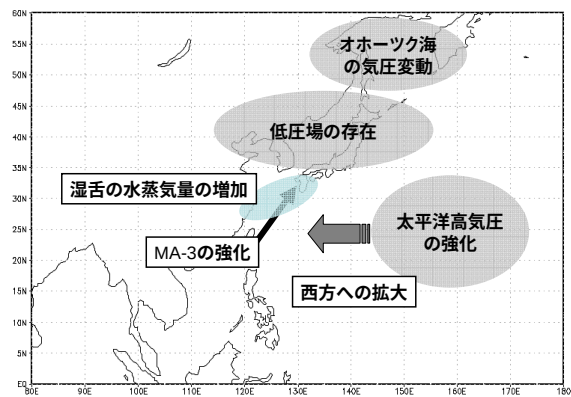


図-10 前線性豪雨発生時の広域的大気場の特徴

6. まとめ

本研究では、他の長期再解析データに比べ精度の高い、JRA-25データ(2006年公開)を用いて、個別に議論されることが多かった梅雨日本の豪雨事例を、35事例一括して扱い、トラジェクトリー解析と偏差解析をおこなうことによって、夏季前線性豪雨時の広域的大気構造について、以下の知見(図-10参照)を得ることができた。

太平洋高気圧が強化され、太平洋の西方までその高圧場が広がっている場合が多い。強化された太平洋高気圧、またはオホーツク海高気圧に隣接するように、日本列島付近に低圧場が存在する。太平洋高気圧の強化に伴い、MA-3も強化され、湿舌の水蒸気量が多くなる。また、オホーツク海の気圧変動が豪雨に影響を与えている。

これらの豪雨場の気候学的な理解を踏まえて、今後、数値気象モデルや衛星観測などを用いた定量的な手法により、数値予報に結びつくメカニズムの理解を進める予定である。

謝辞: 本研究では、気象庁から長期再解析(JRA-25)データの提供を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 二宮洸三: 豪雨と降水システム, 東京堂出版, 2001.
- 2) Ninomiya, K.: Large- and meso- α -scale characteristics of Meiyu-Baiu front associated with intense rainfalls in 1-10 July 1991, *J. Meteor. Soc. Japan*, 78, 141-157, 2001.
- 3) Ninomiya, K. and Y. Shibagaki.: Cloud System Families in the Meiyu-Baiu Front Observed during 1-10 July 1991, *J. Meteor. Soc. Japan*, 81, 193-209, 2003.
- 4) 小倉義光: 一般気象学, 東京大学出版会, 1999.
- 5) 松園正, 佐野琢己, 小川利紘: トラジェクトリー解析モデル(EORC-TAM)の開発, *EORC Bulletin, Technical Report*, No 1, 55-68, 1998.

(2007.9.30受付)