

2012 年 8 月 14 日に宇治市周辺に大雨災害をもたらした メソスケール対流システムの組織化について

Organization of Mesoscale Convective Systems Causing Heavy Rainfall and Flash Flood around Uji, Kyoto on 14 August 2012

石原正仁⁽¹⁾・寶 馨

Masahito ISHIHARA⁽¹⁾ and Kaoru TAKARA

(1) 京都大学 学際融合教育研究推進センター 極端気象適応社会教育ユニット

(1) Global COE Program: Sustainability/Survivability Science for a Resilient Society Adaptable to
Extreme Weather Conditions, Kyoto University

Synopsis

A heavy rainstorm occurred in the area from Uji City to Hirakata City on 13 and 14 August 2012. This paper studies organization manner of the mesoscale convective systems causing the rainstorm using radar and numerical model data of the Japan Meteorological Agency. At the first stage of the rainstorm event, warm moist airflow at the lowest level coming from Osaka Bay was decelerated in the border between Hyogo and Osaka prefectures and convergence of moisture flux occurred, generating back building-type convective systems. After the second stage of the event when convection was less active, wind speed over Osaka Bay increased and the moisture convergence was intensified in the area from the eastern Hyogo Prefecture to the southern Kyoto Prefecture, and convective systems of back and side building-type were developed. At the final stage, a squall line-type convective system was created under the change of mid-troposphere winds from westerly to northerly direction. The convective systems were almost stationary, because convective cells were successively generated at the western edge of the existing convective systems, although elderly convective cells were conveyed to the east by the low-level westerly jet.

キーワード： 淀川チャンネル型大雨, Back Building 型対流システム, 水害

Keywords: Yodogawa-channel-type rainstorm, Back-building-type convective system, Flash flood

1. はじめに

2012年8月13日の深夜から14日明け方において、
京都府宇治市から大阪府枚方市にかけての東西40km

南北15kmの領域(Fig. 1a)に大雨(以下では総称して“宇治大雨”)が発生した(大阪管区気象台, 2012). 気象庁の解析雨量(雨量計で校正されたレーダー雨量)の総降水量が400mmに達した宇治市

志津川地区では、川岸沿いの家屋が流出し 2 名が死亡・行方不明となった。アメダスで 91mm の最大 1 時間降水量を記録した大阪府枚方市では 1 名が用水路に流されて死亡した。これらの大雨域では小河川の破堤等により 1,663 戸の床上浸水, 7,200 戸の床下浸水の被害が発生した (総理府 2012)。宇治市の三室戸寺周辺, 五ヶ庄, 京滋バイパスにおいては水・土砂の氾濫や斜面崩壊が発生した (防災研究所流域災害研究センター, 2012)。五ヶ庄に立地する防災研究所においても 1 階及び地階の部分に雨水が浸入した。

気象庁の資料によれば (気象庁, 2013), この地域の 30 年再現期間の 24 時間確率降水量は京田辺市で 180mm, 枚方市で 179mm と算出されており, 実際には 13 日 12 時 (以後すべて日本時間) ~14 日 12 時の 24 時間に京田辺市のアメダスでは 200.5mm, 枚方市では 151.5mm を記録した。前述した宇治市での解析雨量の 14 時間で 400mm という値も考慮すると, 今回

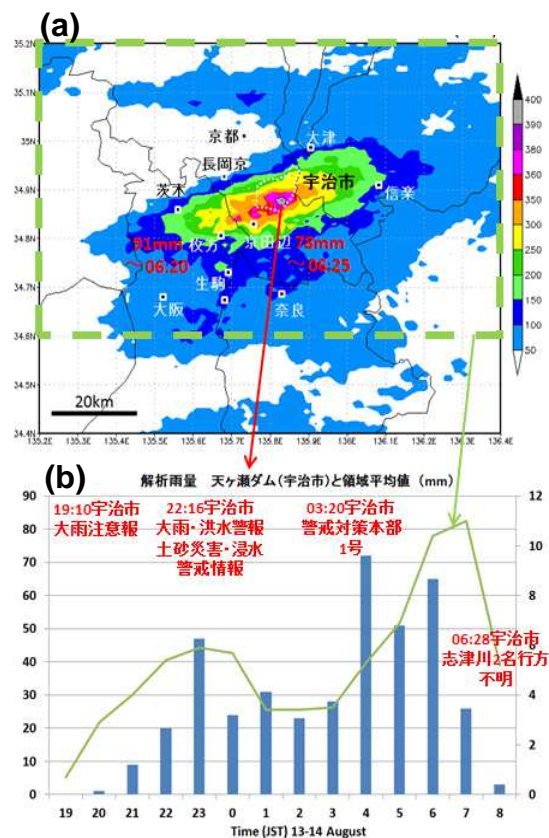


Fig. 1 Rainfall estimated from the Radar/Raingauge-Analyzed Precipitation data (Kaiseiki-Uryo in Japanese) of the Japan Meteorological Agency (JMA). (a) accumulated rainfall amount from 19 JST 13 August to 08 JST 14 August 2012, (b) areal mean of 1-hour rainfall amount (green) in the area surrounded by the dashed line in (a) and 1-hour rainfall amount (blue) at the Amagase Dam, Uji, Kyoto.

の降雨が記録的な大雨であったことがわかる。

この地域の梅雨～夏季には線状降水システムがしばしば発生し水害を発生させている。これらは淀川本川に沿って発生することが多いため「淀川チャンネル型大雨」と総称され, 構造的には Back Building(BB)型対流システムであるとされてきた (横田, 1992; 池田, 1994; 吉本・小西, 2003; 東・藤井, 2008)。大阪管内の各気象台と気象研究所による共同研究では, 淀川チャンネル型大雨を含む近畿各地に発生する各種の線状降水帯が詳しく調べられた (大阪管区気象台ほか, 2010)。淀川チャンネル型大雨の特徴は降雨強度が大きいことと, 雨域が数 10km の狭い領域に長時間停滞することである。もちろん, 個々の事例には環境場・発生場所・組織化の形態などに差異がある。発生地域, 発生時刻, 大雨の程度や広がりなどを的確に予測し, 防災情報を充実させ被害を軽減させるためには, より多くの事例を対象とし, 共通点と相違点を明確にしながら, その組織化の過程, 対流システムの構造や特性を総合的に理解する必要がある。

小山ほか (2012) は宇治大雨について, 予報現場の立場から環境場・強雨の要因・メソ低気圧の存在等について議論した。一方, 本研究の目的は, より小さい水平スケール, すなわち大雨をもたらした対流システムを構成する積乱雲群に着目して, ①主にレーダーデータによって大雨をもたらした降水システ

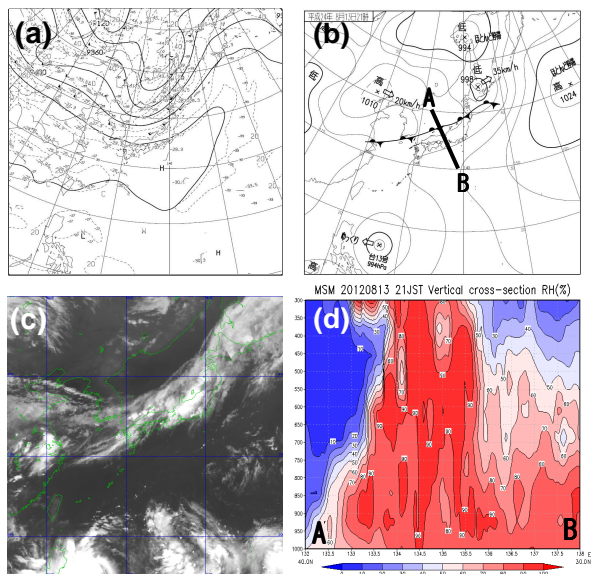


Fig. 2 Synoptic situations at 21 JST 13 August 2012, the beginning of the Uji rainstorm. (a) 500 hPa, (b) surface, (c) IR image of the MTSAT satellite, and (d) the vertical cross section of relative humidity (%) of the JMA MSM analysis along the line from A to B in (b).

ムの形態と組織化の状況を調査し、②数値予報と地上観測のデータによってなぜ宇治市付近に大雨が集中したのかを明らかにすることである。

2. 総観場の状況

ここでは宇治大雨の発生の背景となった日本周辺の総観規模の気象場について述べる。宇治大雨が始まった13日21時の500hPaでは、北緯54° 東経140°に寒冷低気圧とそれともなう深いトラフが日本海上空に達していた (Fig. 2a)。地上では太平洋高気圧が東北地方南部以南の日本の張り出し、日本海北西部の移動性高気圧の間に停滞前線があった (Fig. 2b)。衛星画像 (Fig. 2c) と関西を通る南北断面図 (Fig. 2d) によると、太平洋高気圧の縁辺に沿った“下層水蒸気ベルト” (二宮, 2011) が停滞前線の南に存在し、この中では湿潤な空気が対流圏上層まで達していた。停滞前線の北西側 (大陸側) には乾燥域が存在し、この乾燥域とその南東側の湿潤域の境界は“上空水蒸気前線” (小倉ほか, 2011) に相当すると思われる。ただし、宇治大雨時にはこの乾燥域は宇治市上空には達していない。

13日21時の潮岬におけるエマグラム (Fig. 3a) 内の黄色領域で示される対流有効ポテンシャルエネルギー (CAPE) の値は、この地方の年間の最大値に相当する 2340 Jkg^{-1} と大きく、これによってこの地点は強い潜在不安定状態にあったことがわかる。最下層は飽和に近い状態であることも特徴的であった。持上げ凝結高度と自由対流高度はともに 958hPa (450m) と低く、そこまで持ち上げられた気塊は自ら上昇し浮力消滅高度 15km まで達する状況であった。気象庁の現業メソ数値モデル (MSM) によると、京都・大阪・奈良の3府県におけるショワルタ安定指数 (Fig. 4) は $0.0 \sim -2.0$ の値を示し、これらの府県のいずれ

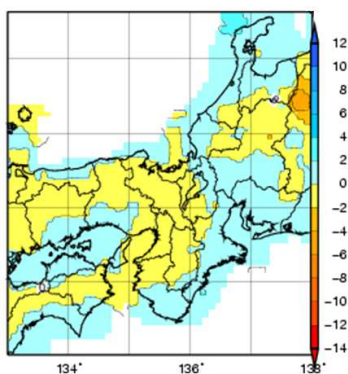


Fig. 4 Showalter's stability index from the JMA MSM analysis at 21 JST 13 August 2012.

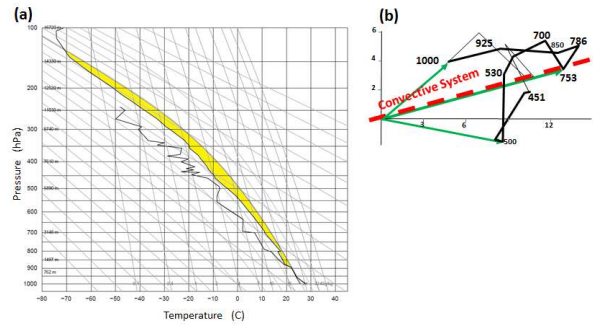


Fig. 3 Emagram (a) and hodograph (b) from the sounding at Shionomisaki at 21 JST 13 August 2012.

の地点でも対流が容易に発生する可能性があった。13日21時の潮岬のラジオゾンデ観測は (Fig. 3b)、750 hPa 付近に西南西 14m/s の極大を持つ“下層 jet”型の風の鉛直分布を示しており、当日発生した線状降水システムはほぼこの jet 軸に平行な走向を持っていた。

大阪管区気象台ほか (2010) によると、淀川チャネル型大雨は対流圏中下層が南西気流場であり、日本海を低気圧が東進しそれに伴う前線が近畿地方を通過するとき、或いは梅雨前線や秋雨前線が近畿地方を南下するとき発生するとした。今回の宇治大雨

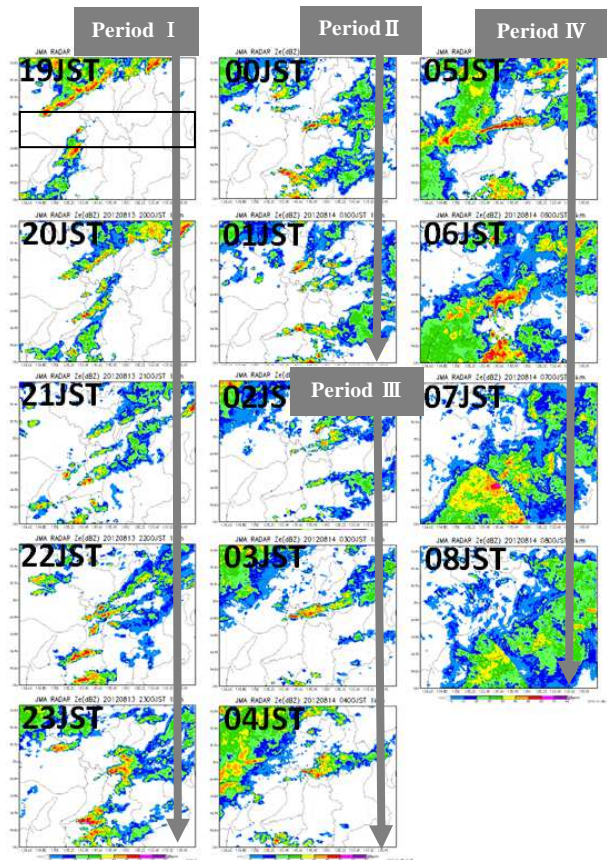


Fig. 5 Maps of radar reflectivity (dBZ) at the 1 km level from the JMA radar network from 19 JST 13 August to 08 JST 14 August 2012, and four periods during the Uji rainstorm event.

は総観場の状況から見ると後者に該当する。

3. 対流システムの形態と組織化

宇治大雨をもたらした対流システムの形態，すなわちどのような積乱雲がどのように組織化されていたかを知ることは，大雨の成因や停滞の理由を知るうえで重要である．Fig. 1aに示した領域には，全期間を通して11の線状降水システムが発生した．Fig. 1bによると当日の降雨には特徴的な時間変化があった．このときの対流システムの活動度や小山ほか(2012)による分類を参考に，全降雨期間を4つに分けた(Fig. 5)．さらに宇治市を中心とする東西110km・南北33kmの短冊領域におけるレーダーエコーの10分ごとの時系列をFig. 5に示す．各期間の特徴は次のとおりである．

- ・I期(13日19時～14日00時)：7つの線状対流システムが発生した．各システムでは新しい積乱雲(対流セル)が兵庫県・大阪府境付近で作られ，その後対流セルは13m/sの速度で東北東に進行した．対流セルの移動ベクトルは750hPaの風とほぼ一致し

た．Fig. 6の破線で示すように，新しい対流セルが生まれる位置がほぼ同一地点か東向きにごくゆっくり移動したため，京都府南部から大阪湾にかけて準停滞性の線状対流システムが形成された．破線は対流システムのいわば群速度を示し，実線矢印は位相速度を示している．23時頃に宇治市では最初の雨のピークが到来した．

- ・II期(14日00～02時)：対流セルの発生地点はI期より東の大阪府・京都府境に移動し，降雨域は京都府南部に限定された．3つの小型の対流システムが発生した．小山ほか(2012)はこの期間を「小康期」と表現した．

- ・III期(14日02時～05時)：対流セルの発生地点が兵庫県・大阪府境付近に戻るとともに，対流セルの東への移動速度は10m/s程度に減少した．この時期の対流がI期より鉛直方向に発達し，対流の鉛直方向の“重心”が比較的風速の小さい対流圏中層に達したことが理由かもしれない．この期間には2つの大型の線状対流システムが前後して組織化され，14日4時には宇治市では2回目の降雨のピークが起きた．

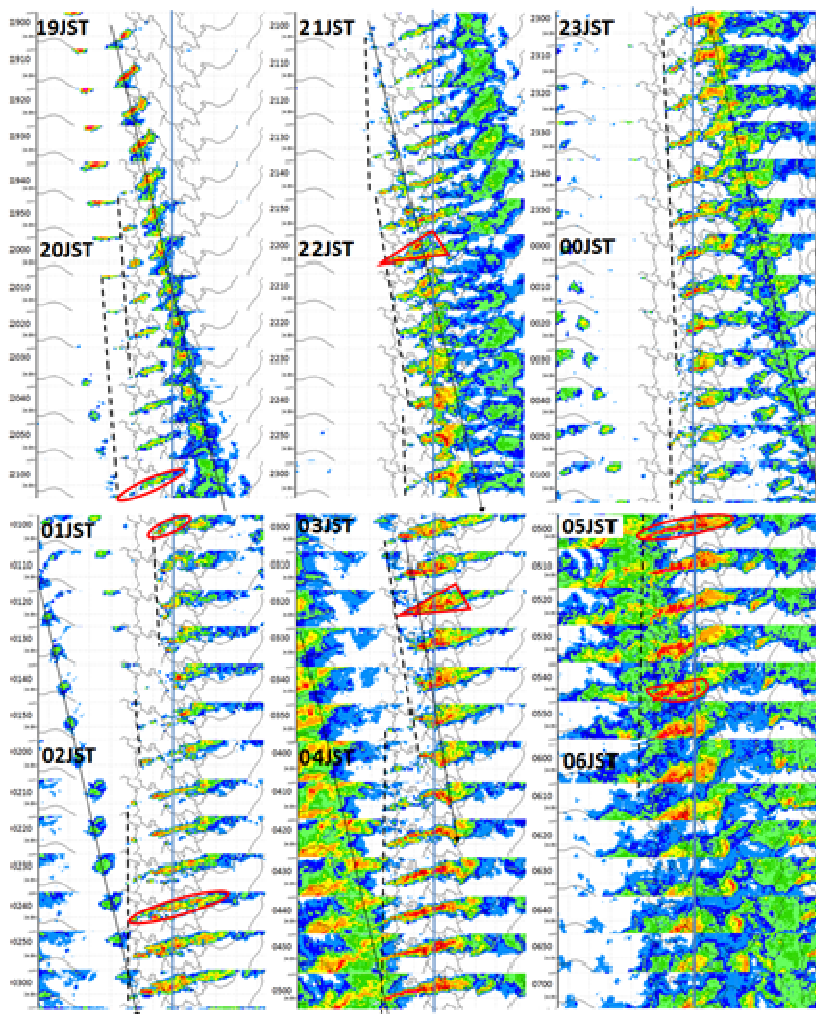


Fig. 6 Time series of radar reflectivity (dBZ) at the 1 km level at 10 minute interval for the area indicated by the rectangle at 19 JST of Fig. 5. Blue lines show the location of Uji, Kyoto, solid arrows movements of convective cells, and dotted lines locations of newly generated convective cells. Red ellipses indicate BB-type convective systems and triangles merging of two BB-type convective systems or BSB-type convective system.

・IV期 (14日 05~08時)：線状対流システムは西からきた層状性メソ降水システムと合流し、走行を北東-南西に変えながら南東進した。これにより 06時に宇治市では3回目の降雨ピークが到来した。

各期において、新しい対流セルが線状対流システムの西端で発生する時間間隔は一定ではなく、短いときには数10分、長いときには1時間以上であった。この間隔が短いと東西に長い線状対流システムが作られ、時間間隔が長いと短い対流システムとなった。

4. 対流システムの気流構造とタイプ

一般に降水をともなう対流システムは周辺領域の対流圏下層に存在する水蒸気が、水平流の収束とそれにともなう上昇流によって上空に運ばれ雨滴として凝結することで形成・維持される。したがって対流システムの維持機構を知るには、第一義的に対流圏下層の気流場を調べることが必要である。ドップラーレーダーは降水の分布とともに風に移流される雨滴の移動速度の視線成分をドップラー速度として測定する。2台のレーダーで得られるドップラー速度を組み合わせるデュアル解析(石原, 2000)を使うと風の水平・鉛直成分を算出することができる。本事例ではFig. 7に示す関西空港と大阪空港において運用されている空港気象ドップラーレーダー(DRAW)のデータを用いてデュアル解析を行い、対流システム内の高度0.5kmにおける気流場を調べた(Fig. 8)。

I期の対流システムの形状はほぼ線状であり(Fig. 8a)、内部の流れはシステムにほぼ平行であった。西端(神戸市付近)で新しい対流セルが発生し中層の風で東北東に移動した。これは典型的な Back Building(BB)型システム(Kato, 1998)であった。22時02分(Fig. 8b)には南北に並んだ2つのBB型対流システムが合流した。南側のシステムには南からの流入が見られ、全体として Back and Side Building(BSB)型(瀬古, 2010)のようにも見える。宇治市ではこの時間帯に第1の降雨ピークが現れた(Fig. 8b)。

II期(Fig. 8c)では、対流システム内の流れは南西から北東で、組織化の程度は弱く、全域で降水量は少なかった。

III期(Fig. 8d)には、これまでより幅の広い線状対流システムが現れ、西南西からの流れと南からの流れが対流システムの南端に沿って顕著に収束し、BSB型の対流が発達した。この時間帯に宇治市では第2の降雨ピークが現れた。

IV期の5時過ぎ(Fig. 8e)には、山陰方面からやって来た広い層状性メソ降水システムと合流する形

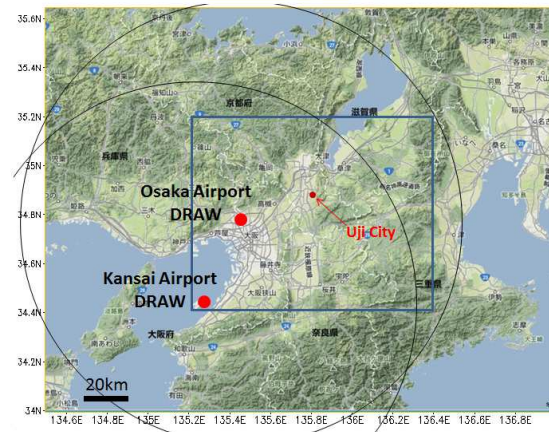


Fig. 7 Locations of the Doppler radars (DRAW) at the Kansai Airport and at the Osaka airport, and their observation areas (circles).

で線状対流システムが発達し、その西端での収束と南端に沿った強い線状の収束帯が顕著である。この後このシステムはゆっくり南下を始めた。05時43分(Fig. 8f)にはシステムの北端から中央部にかけて強い北西流が現れ、システム南端において南からの流れと強く収束していた。05時10分頃にFig. 8eの線状対流システムの南端が到達した京田辺市と枚方市のアメダスでは1.5~2.0℃の気温低下が起こり、この状態はシステムが通過し終わるまで続いた。このことはそれまでの対流システムでは見られなかった冷気プールが対流システムの直下に形成されたことを示している。さらに対流システムに直交する南方向への対流セルの交代と、それにともなうシステムの伝播が生じたことを考慮すると、5時過ぎにこの対流システムはBB型(またはBSB型)から小型ではあるが“スコールライン型”(Houze et al., 1989)に移行したものと思われる。この時刻前後の枚方市から宇治市上空では、エコー頂高度が15kmに達するとともに、気象庁の雷監視システムLIDENによって観測された雷放電回数が急増した。これらにより、それ以前より深い対流が形成されたことがわかる。宇治市ではこのとき第3の降雨のピークが発生した。

5. 議論

対流システムの形態が時間の経過とともに変化していった理由及び大雨域が枚方市~宇治市に集中した要因を考える。宇治大雨に関する現業メソ数値モデル(MSM)による降水強度の値は実際より弱めではあったが、対流システムの位置については最大20km程度の違いであった。現業MSMと地上観測の資料を使ってメソスケールの環境場を調べる。

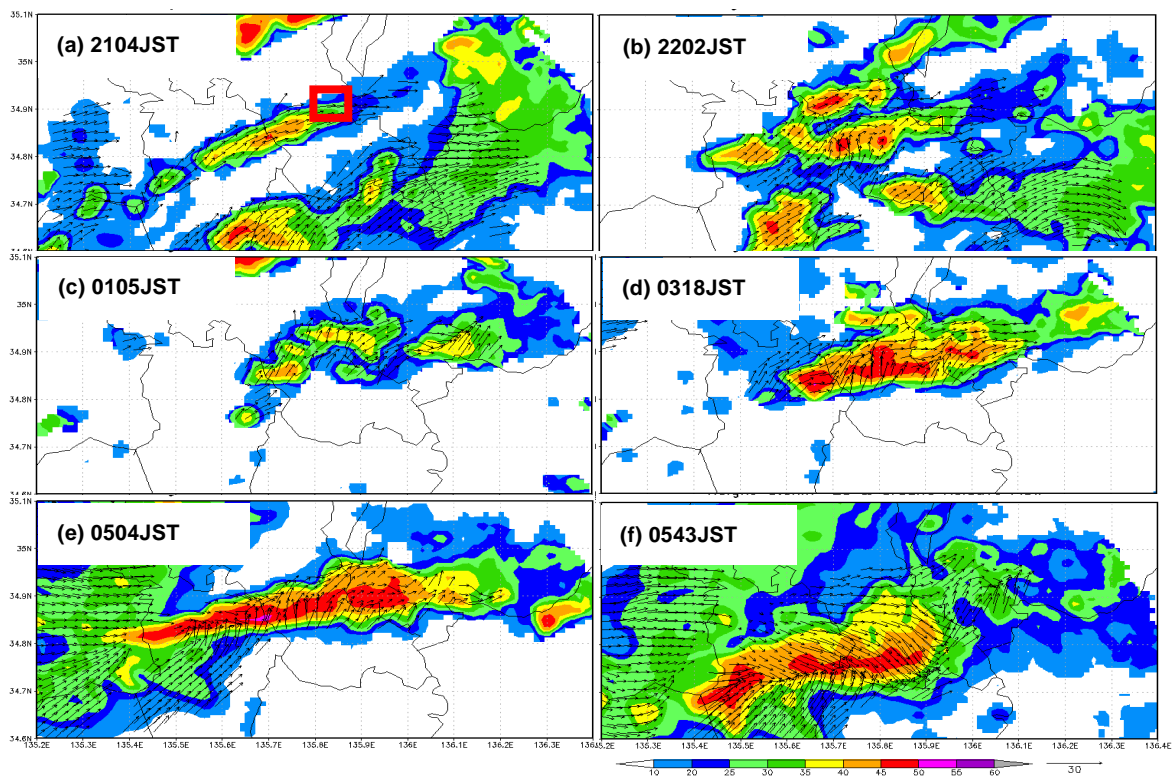


Fig. 8 Ground-relative horizontal winds at the 0.5 km level deduced from dual analyses of the Kansai and Osaka Airport Doppler radars overlaid on reflectivity patterns (dBZ). The red rectangle in (a) shows the location of Uji City.

持上げ凝結高度近くの950hPaの流れを見ると、I期(13日19~00時)には紀伊水道から大阪湾に流入する暖湿な南西流が兵庫県・大阪府境付近で減速することによって水蒸気フラックスの収束域が発生し、ここにBB型対流が発生した(Fig. 9a-c)。この減速の理由はわからない。II期(14日00~02時)には(Fig. 9d-f)、瀬戸内海東部から兵庫県・大阪府境に西風が現れ、水蒸気フラックス収束域は弱まって大阪・京

都府境に移り、対流活動は不活発となった。III期(02~05時)には(Fig. 9g-i)、大阪湾上の南西風が強まり、兵庫県東部から京都府に収束域が広がり、規模の大きなBSB型降水システムが発達した。小山ほか(2012)はこの期間に大阪湾上に弱いメソ低気圧を解析したが、今回の解析では不明瞭であった。IV期(05時~)には(Fig. 9j-l)、中層のトラフが山陰から到達した近畿地方では500hPaの風向が西寄りか

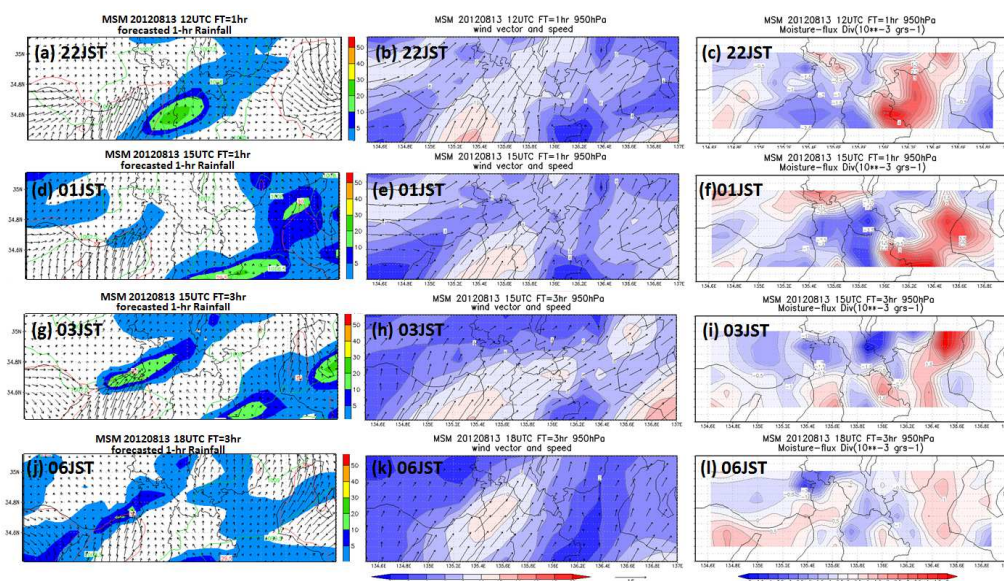


Fig. 9 One-hour rainfall amount (a), wind vectors and wind speed at 950 hPa (b) and moisture flux divergence at 950 hPa in Period-I from the MSM forecast of JMA. (c)-(f) in Period-II, (g)-(i) in Period-III, and (j) in Period-IV.

ら北寄りに変化し(図略), それまで小さかった中層と下層との風向シアーが増大した. これによりスコールライン型対流システムが出現したことがわかった.

6. まとめと課題

2012年08月13, 14日に京都府宇治市から大阪府枚方市にかけて発生した大雨をもたらしたメソスケール対流システム群の形態と組織化を, 気象庁の気象レーダーと数値予報モデルのデータから得られる降水場, 気流場, 水蒸場によって調べた. 11の線状対流システムが発生し, それらはほぼ Back Building (BB)型と Back and Side Building 型 (BSB型) に分類され, 大雨のピークは2つのBB型システムの合流またはBSB型システムのときに発生したことを明らかにした.

降雨期間の前半 (I期) では, 紀伊水道から大阪湾に進入する地表付近の暖湿気流が兵庫県・大阪府境付近において減速することによる水蒸気フラックス収束域にBB型システムが発生した. この収束域が内陸に進入し降雨の小康期を経過した後, 大阪湾上の南西風が強まることによって兵庫県東部から京都府に収束域が広がり, 規模の大きなBSB型システムが発達した. 期間末期 (IV期) には中層トラフの通過にともない中～下層の風の鉛直シアーの向きが変化したこと, スコールライン型の対流システムが発生し大雨をもたらした.

I期とIII期に発生したBB型及びBSB型対流システムでは, それらの西端のほぼ同一地点で新しい対流セルが次々に発生した. 発生地点は下層暖湿気流のメソスケール収束域にあったことは確かだが, これだけでは新しい対流セルが同一地点に発生したことを説明できない. 原因として既存の対流が作る重力波 (Schumacher, 2009), 対流内の凝結加熱による地表付近の気圧低下, 対流縁辺の停滞性冷氣プールなどが考えられる. 今後, 新しい対流セルが発生した際の地上の気象要素の変化などに注目して調査する.

謝 辞

空港気象ドップラーレーダーのデータを提供していただいた関西航空地方気象台, 大阪航空測候所, 及び気象研究所気象衛星・観測システム研究部の佐藤栄一氏に感謝いたします.

参考文献

- 池田 浩 (1994): 京都府南部の短時間強雨. 日本気象学会関西支部例会講演要旨集, pp. 14-17.
- 石原正仁 (2001): ドップラー気象レーダーの応用. 気象研究ノート, 200号, pp. 38-73.
- 大阪管区気象台 (2012): 平成24年8月14日の近畿地方の大雨について (近畿地方の気象速報). 気象速報.
- 大阪管区気象台・同管内各地方気象台・気象研究所予報研究部 (2010): 強雨をもたらす線状降雨帯の形成機構等の解明及び降水強度・移動速度の予測に関する研究. 気象研究所技術報告, 第61号.
- 小倉義光・隈部良司・西村修司 (2011): 「平成20年8月末期豪雨」の天気系, 特にメソ対流系の組織化について. 天気, 58巻, 201-217.
- 気象庁 (2013): 異常気象リスクマップ. 気象庁ホームページ, http://www.data.kishou.go.jp/climate/riskmap/amd_ov100.html (2013年6月6日参照).
- 小山芳太・飯田早苗・野村武司・佐伯亮汰 (2012): 平成24年8月14日に発生した近畿地方中部の大雨について. 2012年度日本気象学会関西支第3回例会講演要旨集.
- 瀬古 弘 (2010): 中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. 気象庁研究時報, 62巻, pp. 1-74.
- 二宮洗三 (2011): 1968年8月17日に発生した飛騨川豪雨のメソスケール降水系. 天気, 58, pp. 306-316.
- 東 邦昭・藤井 健 (2008): 1999年に京阪神地域を通過した関連前線に伴って線状降水帯が発生したときの環境場. 京都産業大学論, 自然科学系列, 37号, pp. 81-93.
- 防災研究所流域災害研究センター (2012): 2012年8月宇治水害調査速報. 突発災害調査報告. 防災研究所ホームページ, http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/web_j/saigai/disaster_report.html (2013年6月6日参照).
- 横田寛伸 (1992): 淀川チャンネル型大雨の比較解析. 日本気象学会関西支部年会講演予稿集, pp. 14-18.
- 吉本直弘・小西啓之 (2003): 梅雨期の京阪神地域における強雨の発生と降雨の強化. 日本気象学会関西支部年会講演予稿集, pp. 26-29.
- Bluestein, H. B. and M. H. Jane (1985): Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe

- squall lines in Oklahoma during the spring. J. Atmos. Sci., Vol. 42, pp. 1711-1732.
- Kato, T. (1998): Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed over southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. J. Meteor. Soc. Japan, Vol. 76, pp. 97-128.
- Houze, R. A. Jr., M. I. Biggerstaff, S. A. Rutledge and B. F. Smull (1989): Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale Convective Systems. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 70, pp. 608-619.
- Schumacher, R. S. (2009): Mechanisms for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective systems. J. Atmos. Sci., Vol. 66, pp. 1543-1568.

(論文受理日:2013年6月10日)