

論 文

2008年7月28日近畿地方を南西進した線状降水帯について - スコールラインの解析 -

北村光良*, 坂本徹重**, 清水栄一*, 松村哲***, 金森恒雄†,
小西誠二††, 小山芳太†††, 泉敏治††††, 草開浩§

Case Study on Line-Shaped Precipitation Band moving southwestward
the Kinki Area on July 28, 2008

Mitsuyoshi KITAMURA, Tetsushige SAKAMOTO, Eiichi SHIMIZU,
Akira MATSUMURA, Tsuneo KANAMORI, Seiji KONISHI,
Yoshita KOYAMA, Toshiharu IZUMI and Hiroshi KUSABIRAKI

要 旨

2008年7月28日、近畿地方では各地で1時間50mm以上の非常に激しい雨が降り、神戸市灘区の都賀川では大雨による増水で5名の方が亡くなった。これらの大雨は、朝鮮半島南部から北陸・関東地方にかけて停滞する前線付近で形成された線状降水帯の一部が、スコールラインの構造をもって近畿地方を南西進したことによって発生した。また、兵庫県の六甲山南麓では、この降水帯からの冷氣外出流が大阪湾からの暖湿気流と収束し、これが都賀川に増水をもたらした大雨発生の引き金となった。

1. はじめに

2008年7月28日、昼前から夜のはじめ頃にかけて近畿地方を線状降水帯が南西進し、各地に大雨を降らせた。この雨により、神戸市灘区の都賀川は急激に増水し、河川敷で水遊びをしていた学童保育の小学生ら大勢の人が流され、その内小学

生2人と保育園児、成人2人の計5人が濁流に巻き込まれて死亡した。

この事例について詳細な実況解析を行い、大雨の発生要因を考察した。実況解析には、高層天気図・局地天気図、アメダス、一般気象レーダー、ウィン Doppler プロファイラ (以下、WPR)、航空気象ドップラ

* 大阪管区気象台 (現高知地方気象台), ** 大阪管区気象台 (現京都地方気象台),

*** 大阪管区気象台 (2010年3月退職), † 神戸海洋気象台 (現松江地方気象台), †† 神戸海洋気象台,

††† 神戸海洋気象台 (現大阪管区気象台), †††† 神戸海洋気象台 (現気象衛星センター),

§ 関西航空地方気象台神戸空港出張所 (現気象庁予報部)

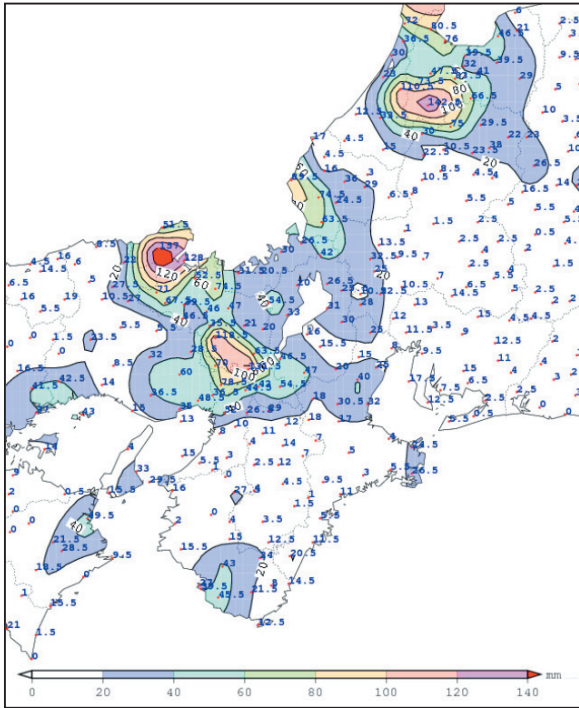
(2009年4月16日受領, 2011年11月15日受理)

レーダー (以下, DRAW), 気象衛星画像, 日本航空・全日本空輸による航空機自動観測データ (以下, ACARS) を用いた。

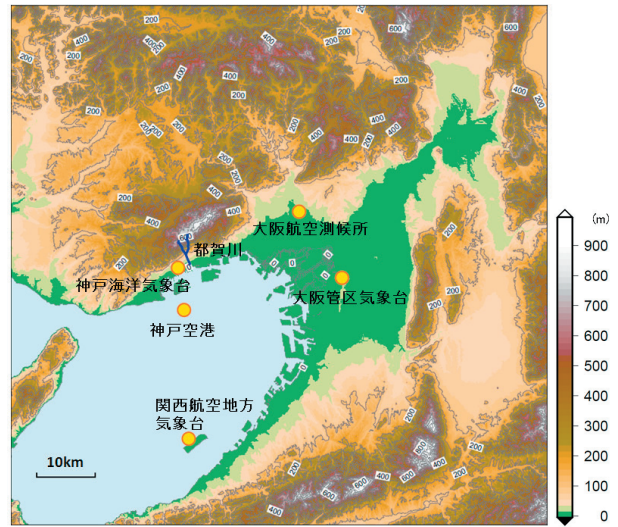
2. 現象の概要

第1図に7月28日のアメダスの24時間降水量

分布を示す。28日明け方から午前中にかけて北陸地方に大雨を降らせた降水帯が南下し、昼前から夜のはじめ頃にかけて近畿地方の各地で1時間に50mm以上の非常に激しい雨を降らせた。近畿地方を南下してきた発達した雨雲は長さが数100kmに及ぶ組織的な降水帯を形成した。兵庫県の六甲山の

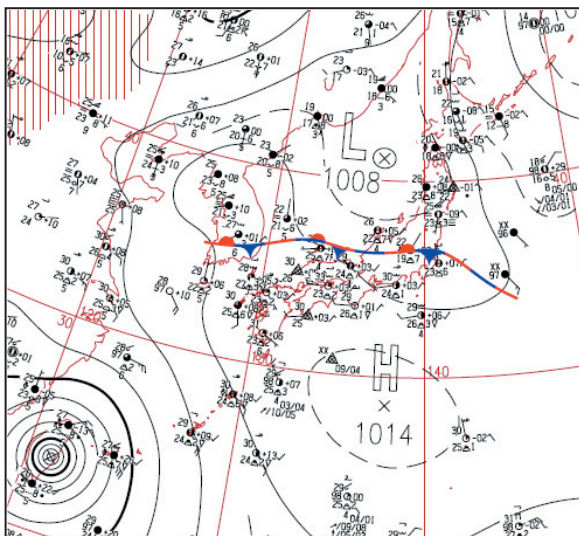


第1図 2008年7月28日00時～24時アメダス降水量積算図 (単位は mm)

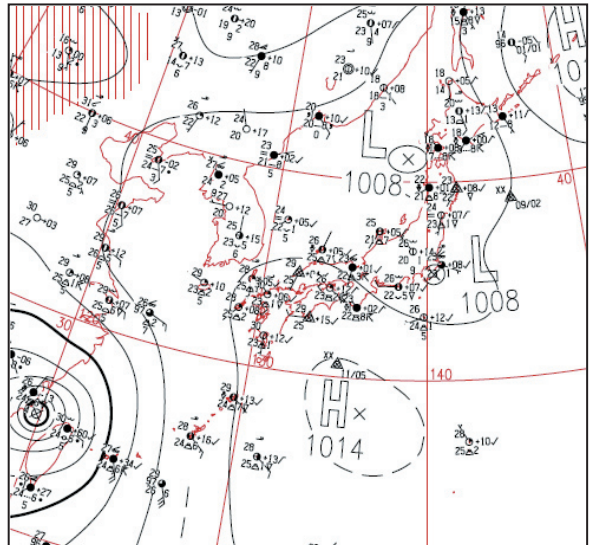


第2図 神戸市灘区の都賀川周辺の地形図

この地形図は、国土地理院数値地図50mメッシュを使用し作成した。



第3-1図 地上天気図 (2008年7月28日09時)



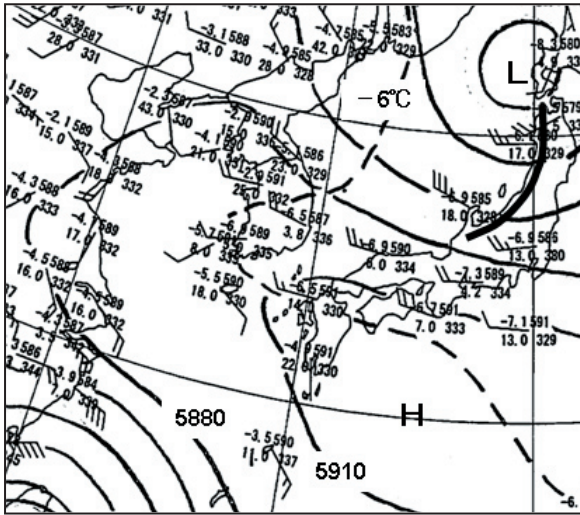
第3-2図 地上天気図 (2008年7月28日21時)

南麓付近では、14時（以下、全て日本時間）頃から降り出した雨が14時20分頃から急激に強まり、1時間に40mm以上の激しい雨が降った。参考として第2図に近畿地方の地形図を示す。

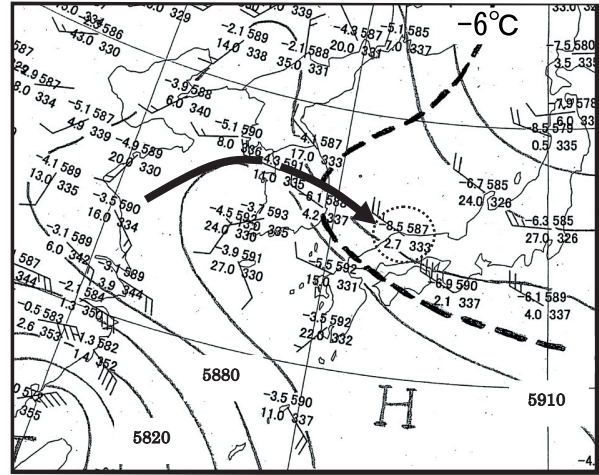
3. 事例解析

3.1 総観解析

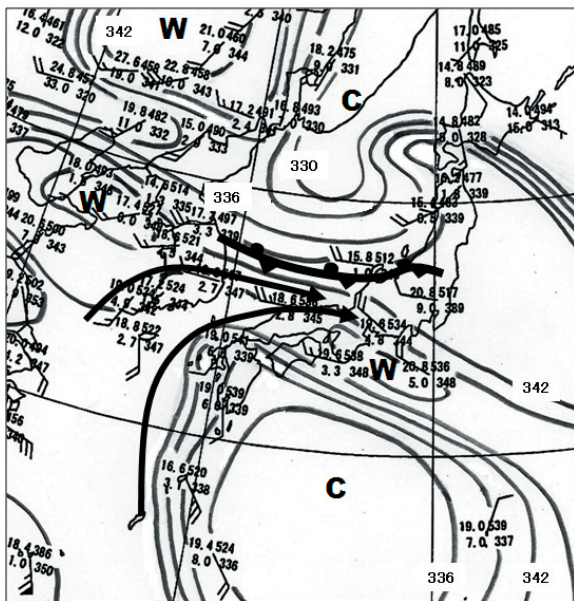
第3-1図、第3-2図に、28日09時、21時の地上天気図をそれぞれ示す。28日09時には、日本海中部には低気圧があり、また、西日本は北緯30度付近に中心をもつ太平洋高気圧に南から広く覆わ



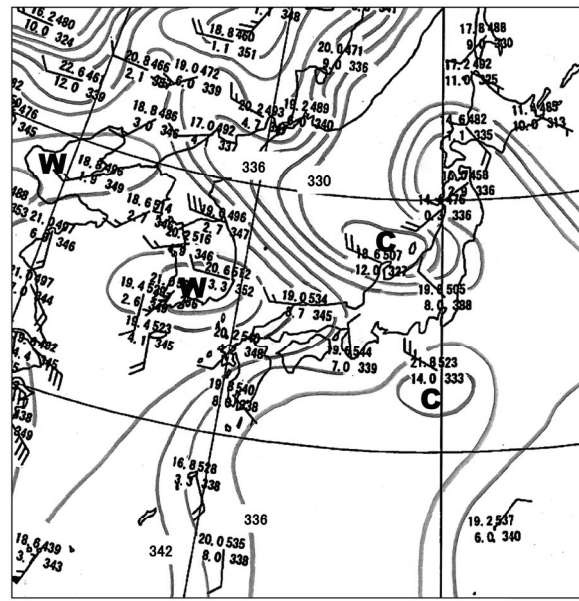
第4-1図 500hPa面天気図(2008年7月28日09時)
太実線はトラフ、細実線は等高度線(30mごと)、破線は等温度線 -6°C 線を示す。



第4-2図 500hPa面天気図(2008年7月28日21時)
矢印は米子に流入した寒気の移動経路(24時間分)を示す。



第5-1図 850hPa面天気図(2008年7月28日09時)
太実線は前線、細実線は相当温位(3Kごと)、矢印は暖湿空気の流れを示す。

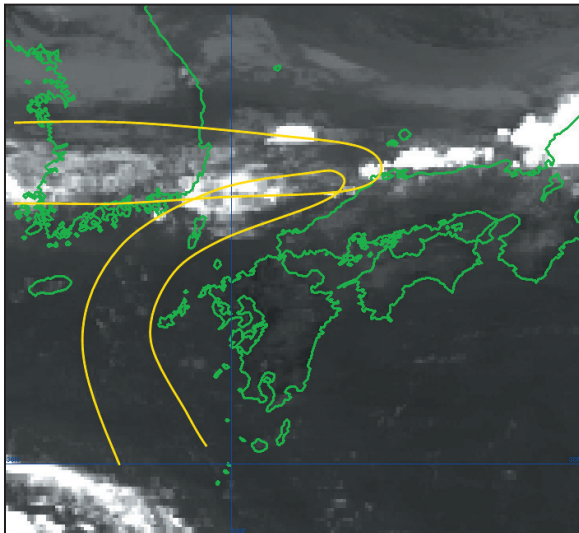


第5-2図 第5-1図に同じ(ただし、2008年7月28日21時)

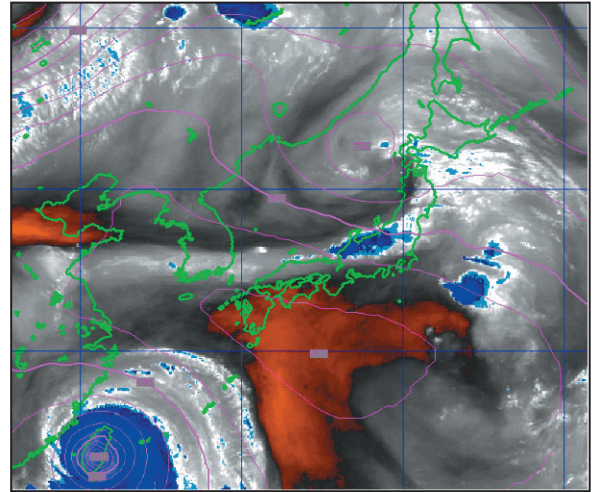
れ、その北辺にあたる朝鮮半島南部から北陸・関東にかけて停滞前線が解析されていた。この前線は21時には本州の南岸付近まで南下して不明瞭となった。一方この期間に、台風第8号が台湾を通過して台湾海峡へ進んだ。

28日09時の500hPa面天気図(第4-1図)では、東北地方から北陸地方にトラフがあって、東に移動していた。西日本は -6°C 以下の寒気に覆われていた。28日21時の500hPa面天気図(第4-2図)では、このトラフ通過により、近畿地方は北西流場となりまた、米子に -8.5°C の寒気が入るなど、不安定が一層強まった。

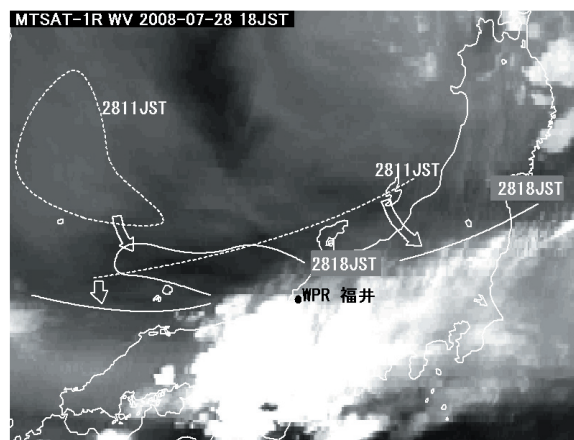
第5-1図に28日09時の850hPa面天気図を示す。若狭沖から朝鮮半島東岸にかけて相当温位線の集中帯があり、この集中帯が同時刻の地上天気図の停滞前線に対応していた。前線の南側には、台湾付近の台風から大陸東岸、朝鮮半島を経て入る気流と、四国の南海上にある太平洋高気圧周辺の九州から山陰付近を回って近畿地方に入る相当温位 345K 以上の暖湿気が解析できた。28日21時(第5-2図)には、相当温位線の集中帯は山陰沖ではやや南下したが、西日本で太平洋高気圧の北西方への強まりにより、山陰沿岸には引き続き暖湿気が入っていた。



第6図 赤外画像(2008年7月28日09時)

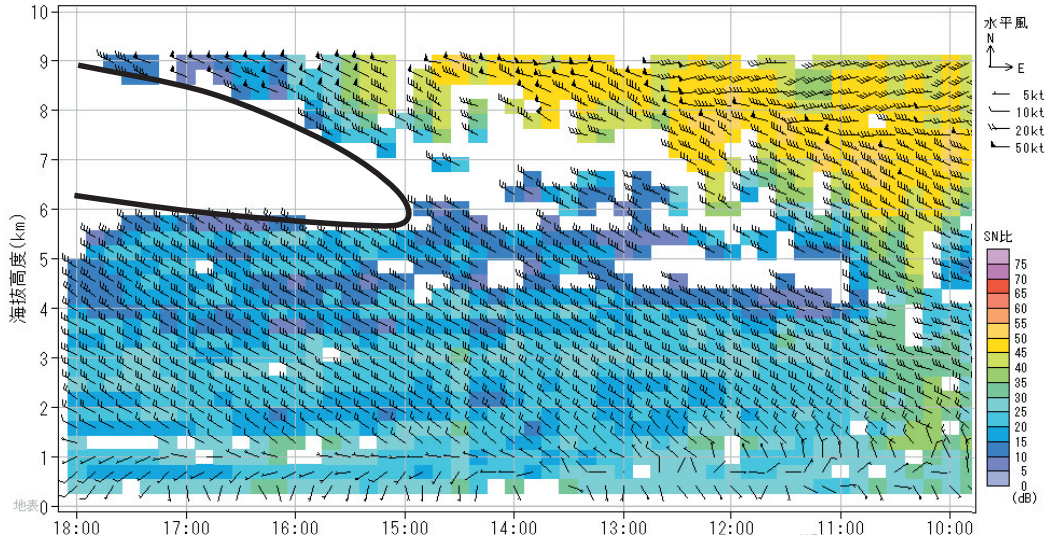


第7図 水蒸気画像(2008年7月28日09時)



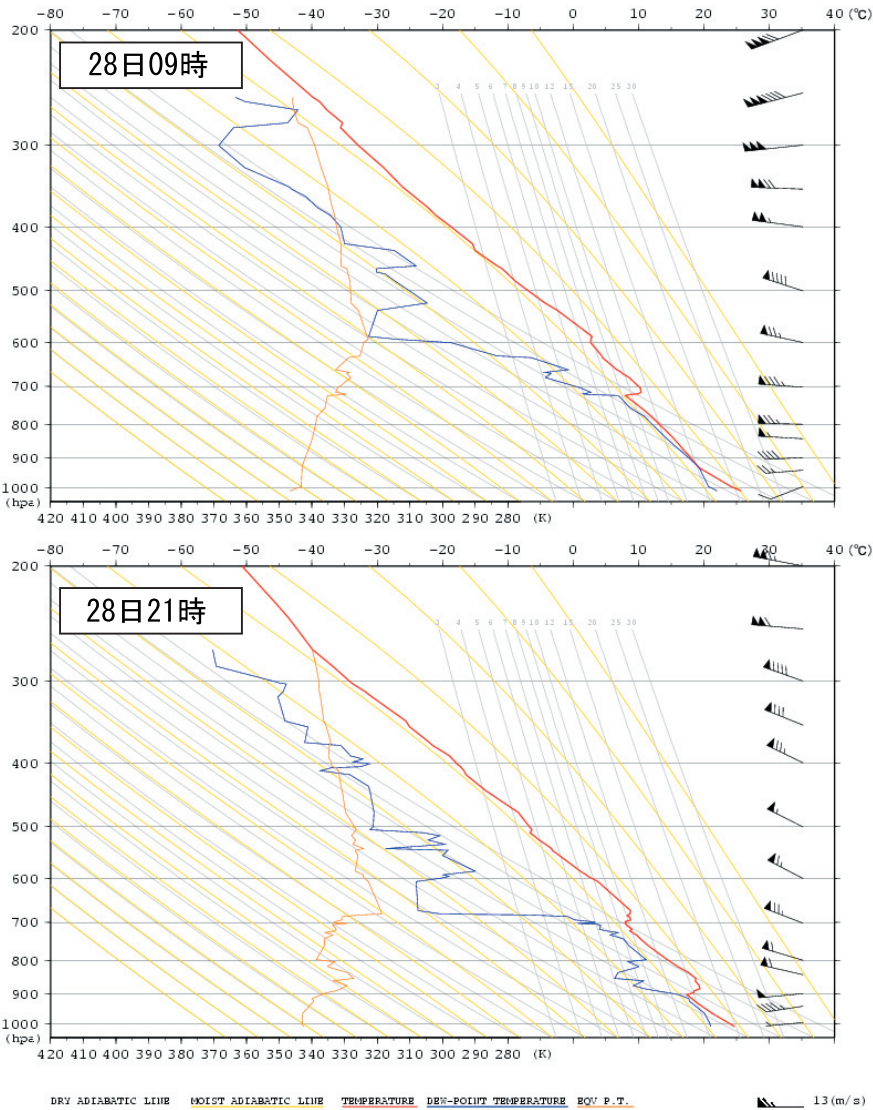
第8図 水蒸気画像(2008年7月28日18時)

バウンダリ、日本海西部の暗化域の南下を示す。(破線は11時、実線は18時)



第9図 福井 WPR 鉛直時間断面図 (2008年7月28日10時~18時)

実線は乾燥域の境界を示す。



第10図 輪島における高層気象観測データ (赤線: 気温、青線: 露点温度、オレンジ線: 相当温位)

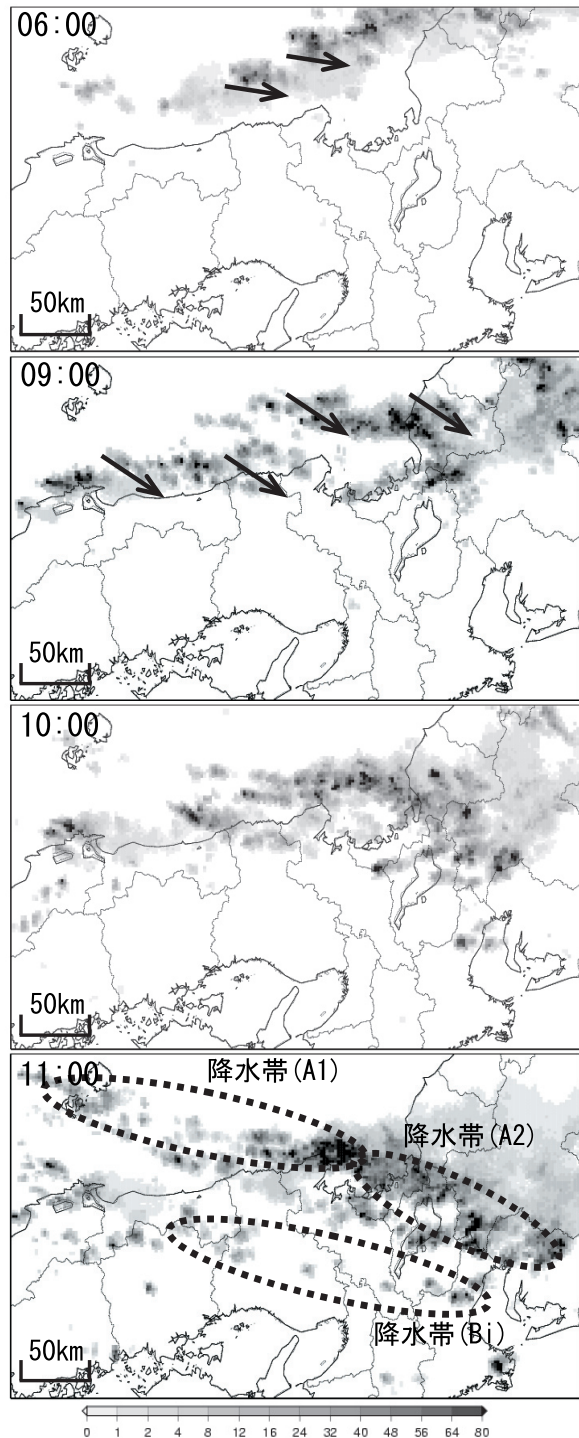
第6図に28日09時の赤外画像を、第7図に同時刻の水蒸気画像を、第8図に18時の水蒸気画像を示す。第6図では九州の西海上から対馬海峡を通過して山陰地方を指向する点状の下層雲と朝鮮半島中部から山陰地方を指向する発達した雲域が確認でき(第6図:黄色の実線), 前述した二つの暖湿気の流入経路を示唆していると考えられる。第8図には同日11時と18時におけるバウンダリ(明域と暗域の境目)と日本海西部の暗化域の位置を図示している。11時において, バウンダリは佐渡島から隠岐島のあたりに位置していたが, 18時には, 福井県上空まで南下していた。また, 日本海西部の暗化域についても, 18時には近畿・北陸地方まで南下しており, これらの南下のタイミングで近畿地方の積乱雲が発達していた。この期間について福井WPRデータ(第9図)を見ると, 高度6kmから8kmでは15時以降でデータの空白域が観測されている。また, 09時及び21時の輪島の高層観測データ(第10図)によると, 高度6kmから8kmに相当する450hPa付近前後を含む, 700hPaより上層で露点温度の低下が見られたことから, 15時以降の福井WPRデータの空白域は水蒸気画像の上層雲の下に広がる比較的乾燥した気塊に対応すると考えられ, 暗化域の南下を示している。

3.2 メソスケール解析

3.2.1 降水セルの動向

第11-1図, 第11-2図に2008年7月28日06時から15時のレーダーエコー図を示す。28日早朝, 隠岐島から北陸にかけて線状の降水エコーが停滞し, 石川県や富山県では1時間に100mmを超える大雨となった。28日06時の降水エコーの走向はほぼ東西であったが, 09時には西北西-東南東走向へと変化した。線状エコーを構成する個々の降水セルは, 生成・消滅を繰り返しながら南東進していた。この線状の降水エコーは次第に南下し, 11時頃には丹後半島にかかり始め, その後, 15時頃にかけて丹後半島付近に停滞した(第11-1図11時の降水帯A1)。一方で, 11時頃には, 滋賀県北部から愛知県北部にかけて降水エコーが線状に発生し(第

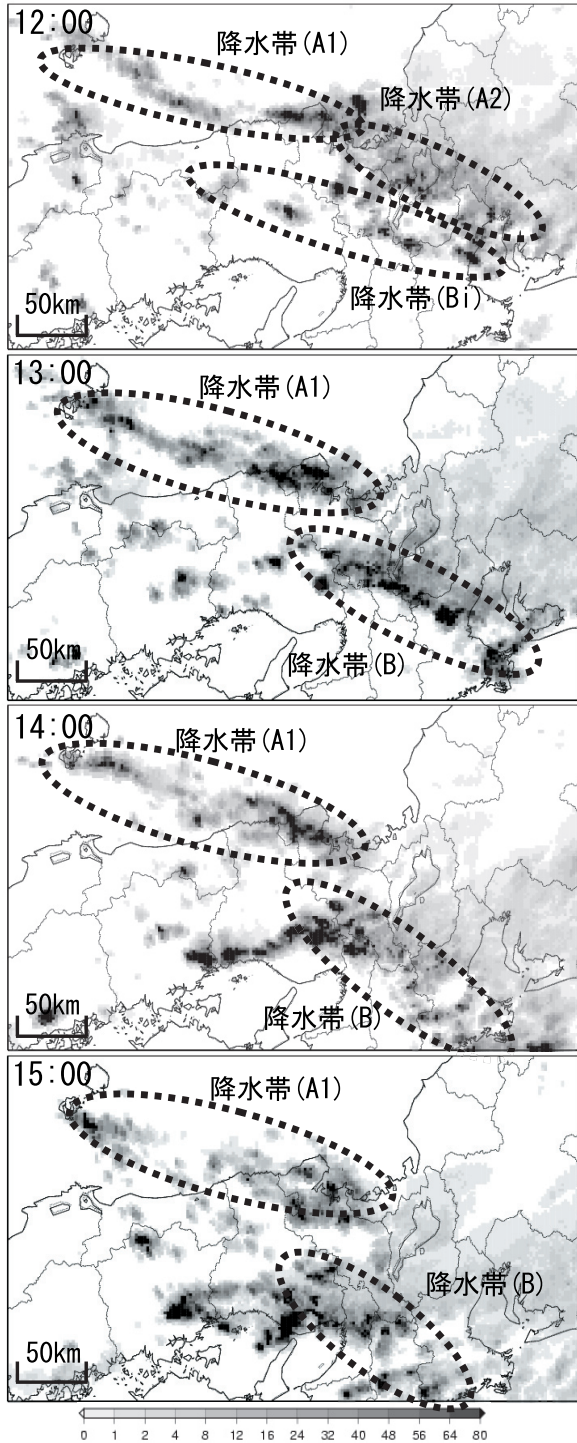
11-1図11時の降水帯A2), 降水帯A2とは別に兵庫県西部から滋賀県南部にかけて点々とした降水エコーが発生した(第11-1図11時の降水帯Bi: 降水帯Bの最初)。12時には降水帯A2は北西-南



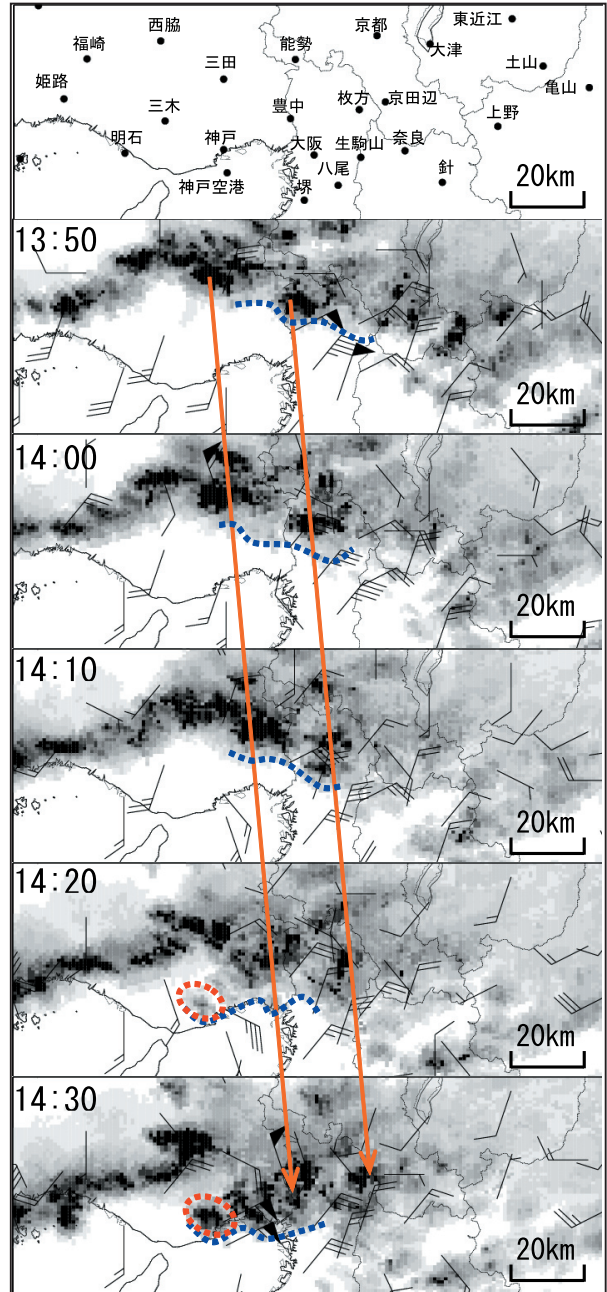
第11-1図 レーダーエコー図(2008年7月28日06時, 09時~11時) 矢印はエコーの走向を示す。

東走向の線状降水帯を形成して発達し、降水帯 Bi も線状に発達した。13時には、降水帯 A2 は京都府・滋賀県南部から伊勢湾付近に発生した強雨域（降水帯 Bi が発達したもの）と一体化し、個々の降水

セルは南東進しながら、降水帯としては約 20km/h で南西進した（第 11-2 図 13 時の降水帯 B）。このように、当日の降水系は日本海沿岸に停滞した降水帯（第 11-2 図 13 時の降水帯 A1）と、近畿北東



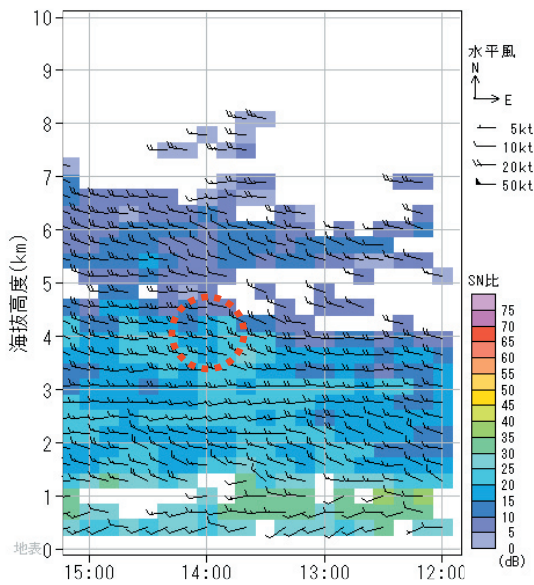
第 11-2 図 レーダーエコー図（2008 年 7 月 28 日 12 時～15 時）



第 12 図 レーダーエコーとアメダス風（2008 年 7 月 28 日 13 時 50 分～14 時 30 分、最上図は地点名）
代表的なエコーの動きをオレンジ矢印、降水帯の南端を青破線、都賀川での大雨セルを赤破線円で示す。

部を南西進した降水帯（第 11-2 図 13 時の降水帯 B）の二通りに分かれた。両者は移動の特徴が異なるだけでなく、降水帯 A は対流性の降水であるのに対し、降水帯 B が南西進した後方には 1 時間に 10mm 以下の弱い降水域が広がっているという違いも見られた。

第 12 図に、兵庫県南部から京都府南部におけるエコーの動きとアメダス風データを詳細に示した。13 時 50 分に、兵庫県三田市と大阪府箕面市にある降水エコーを追跡すると、それぞれ図にオレンジ矢印で示したような動向を示す。図から概算すると、個々の降水エコーは東南東へ約 37km/h で移動していることがわかった。高松 WPR(第 13 図)によると、同日 14 時において高度 4km 付近で西北西 20kt (約 37km/h) となっており、個々の対流セルは中層風で移動していたと考えられる。一方で降水帯の南端(青破線)を見ると、時間とともに南西方向へ降水エコー発生域を拡大させており、降水帯全体としては南進していた。14 時 20 分には降水帯の南西端に位置する神戸市付近で降水エコーが発生しており(赤破線円)、14 時 30 分の画像と比較して、これが都賀川中流で大雨を降らせた降水エコーであるこ

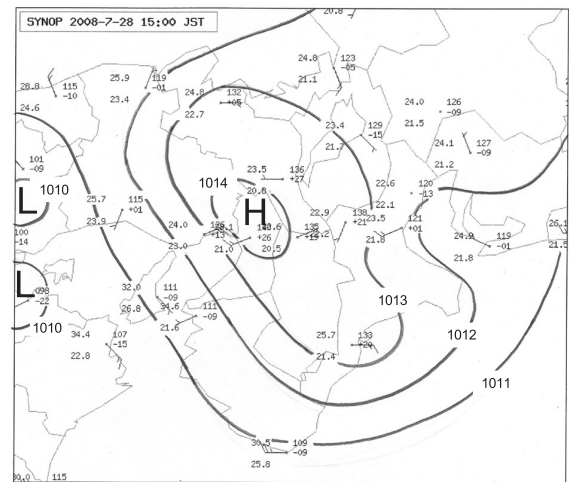
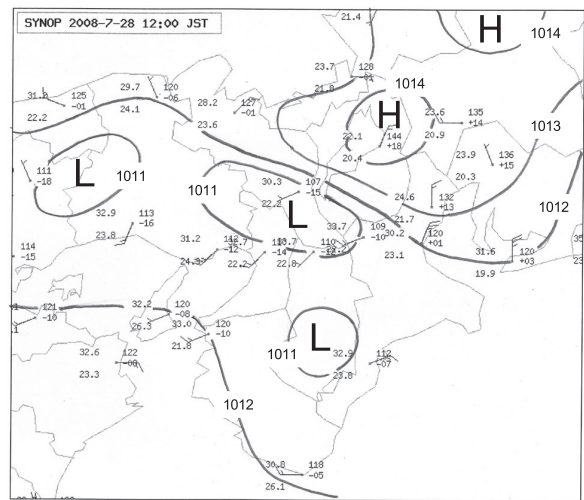


第 13 図 高松 WPR 鉛直時間断面図 (2008 年 7 月 28 日 12 時~15 時)
14 時における高度 4km 付近の風を赤破線円で囲む。

とがわかる。

3.2.2 局地天気図解析

第 14 図に 28 日 12 時と 15 時の局地天気図を示す。28 日 10 時 (図省略) には京都府南部や中国山地では晴れて地上気温が 32℃ を超え、前 3 時間気圧下降量の大きい領域となっており、12 時の局地天気図では内陸部で更に気温が上昇し、中国地方から京都府南部、奈良県に熱的低気圧が解析できる。一方、11 時 (図省略) には、福井県、岐阜県、滋賀県北部の前線付近の発達した雨雲の下で地上気温が 1 時間に 5℃ 前後下降、25℃ 以下の低温域となって気圧が上昇し、12 時には、低温域となった滋賀



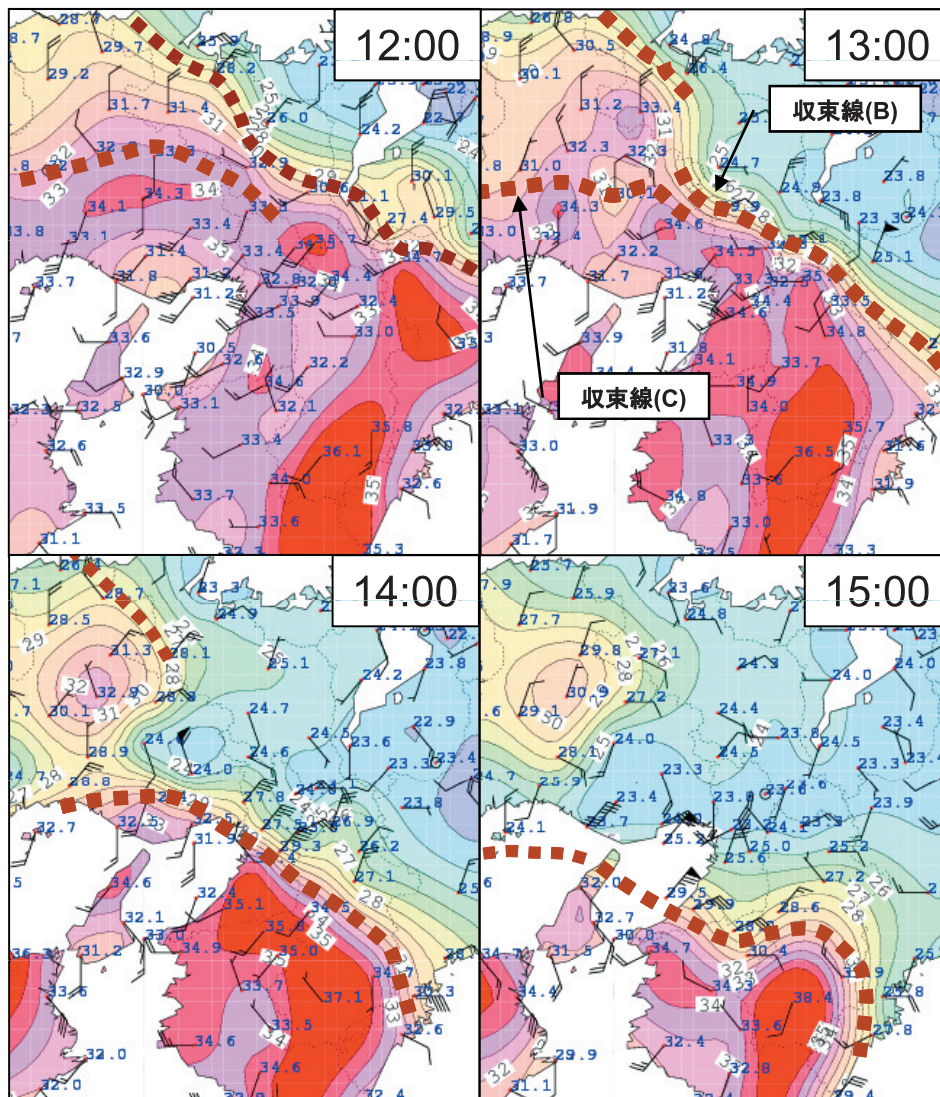
第 14 図 局地天気図(2008 年 7 月 28 日 12 時, 15 時)
実線は等圧線 (1hPa ごと) を示す。

県北部にメソスケールの高気圧が解析できた。この高気圧の南西側では気圧傾度が大きくなっており、アメダスでは平均風速 5m/s 以上の北よりの風が吹いていた (図省略)。滋賀県北部のメソスケールの高気圧は、南に広がり、15 時には大阪府から奈良県付近に達している。近畿地方にあった熱的低気圧は降水に伴う気温の下降により不明瞭となった。

3.2.3 アメダス解析

第 15 図に 28 日 12 時から 15 時までのアメダスの風と気温分布を示す。隠岐島から北陸にかけての

降水域は南下し、09 時頃から降水域に対応した 24℃以下の低温域が北よりの風を伴って福井県から南に広がり始めていた (図省略)。12 時には、降水域は丹後半島から伊勢湾に広がり、降水域付近では気温が 1 時間に 5℃前後下降し平均風速 5m/s 以上の北より風が観測された。北よりの風はこの降水域からの冷氣外出流と見られる。24℃以下の低温域は福井県から三重県北部に広がり、低温域の南側は晴れて気温が上昇、低温域との気温差は 10℃前後に達し、温度傾度が強まった。また、京都府北部から三重県北部にかけて、低温域からの北



第 15 図 アメダス気温・風 (2008 年 7 月 28 日 12 時～15 時)

気温は高度補正(0.65℃/100m)をした値。細実線は等温度線(1℃ごと)、太破線は収束線を示す。

よりの風と海風との間に明瞭な収束線が形成され、時速約 30km の速さで南下した。この収束線の通過に伴い、気温の急降下や風向の急変等が観測され、収束線はガストフロントの特徴を示していた。また、兵庫県の内陸部から京都府南部にかけての晴天域では、日中の昇温に伴う収束線（高温の領域）が形成されて降水エコーが発生しており、温度傾度の大きい領域が達した 12 時 20 分頃からは発達した降水エコーの領域が拡大した。13 時には、滋賀県北部から愛知県北部の降水帯が南進して、京都府南部・滋賀県南部から伊勢湾付近に発生した強雨域と一体化しており、京都府南部、滋賀県南部、三重県中部では、気温が 1 時間に 9°C 前後下降し平均風速 7m/s 以上の北より風が観測され、降水帯からの冷氣外流出が顕著となった。京都府北部の収束線はほぼ停滞するが、京都府南部から三重県北部にかけての収束線（第 15 図 13 時の収束線 B）は南下して大阪府に入り、枚方では 13 時 00 分過ぎに気温の急下降、風の急変を観測した。大阪では 13 時 35 分頃に風の急変や気温の急下降、気圧の上昇を観測し、ガストフロントの特徴を示していた（第 17 図の大阪管区気象台における気象観測データを参照）。第 15 図の 14 時の風向を見ると、大阪での風の急変後の風向は北東となっていたため、大阪の北東方向に位置するアメダス枚方のデータと大阪のデータを用いてガストフロントの移動速度を見積もった。枚方と大阪の間の距離は約 20km、通過に要した時間は約 35 分であることから、ここでのガストフロントの移動速度は約 35km/h と見積もることができる。このガストフロントは、移動方向や地上気象の変化特性から、京都方面から南西に進んできた降水帯 B が形成した冷氣外流出であると考えられる。

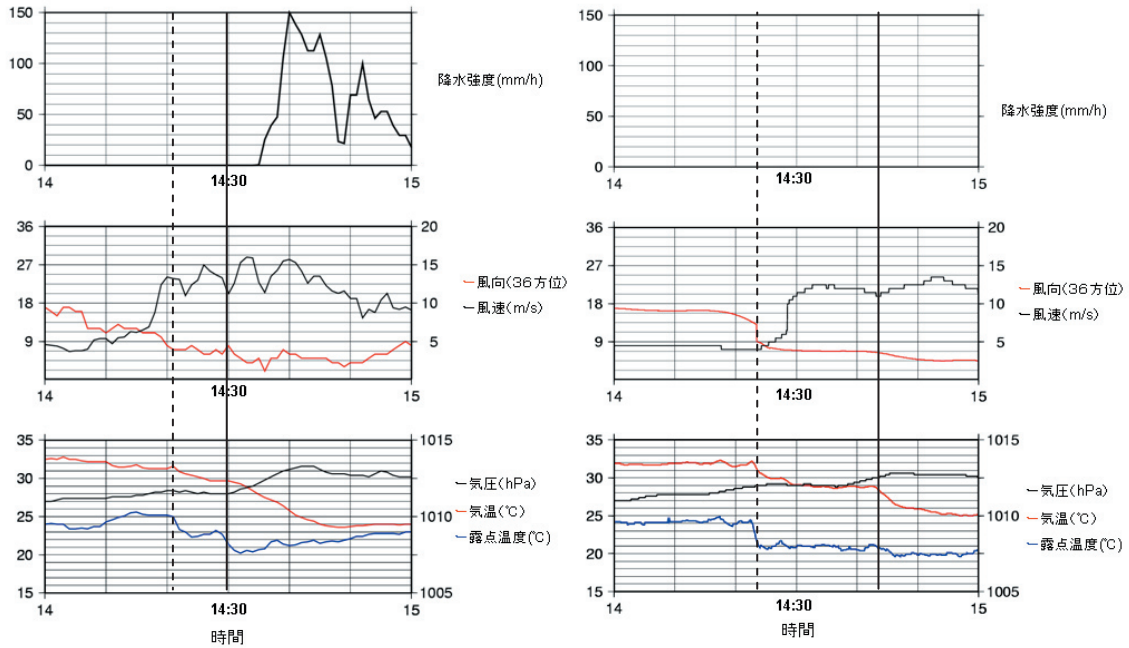
兵庫県の内陸部から京都府と兵庫県の県境付近に形成された収束線（第 15 図 13 時の収束線 C）は 20 から 30km/h で南下した。13 時 30 分には、六甲山北側の三田付近から京都府南部の収束線近傍の温度傾度の大きい領域に発達した降水エコーが見られるが、大阪では収束線（ガストフロント）が降水エコーより約 20km 先行していた。14 時には、

京都方面から進んできた収束線はさらに南西進して大阪湾に入り、14 時 20 分には神戸に達した。三田付近では収束線上の積乱雲からの冷氣外流出や降水により低温域が形成され、神戸との間の温度傾度は更に大きくなり、六甲山北側の温度傾度の大きい領域では降水エコーが更に発達し始めた。14 時 20 分から 30 分にかけて六甲山の南側でも急速に降水エコーが発達していた（レーダーエコー図は第 12 図を参照）。

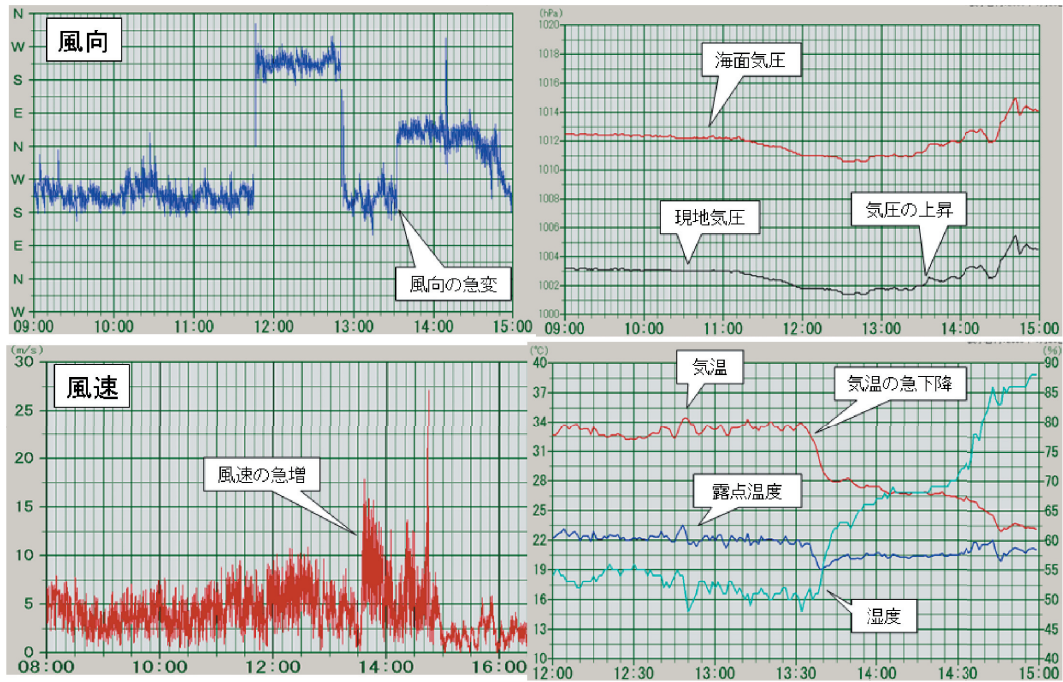
3.2.4 地上観測時系列解析

第 16 図に当日 14 時から 15 時における神戸海洋気象台と神戸空港の気象観測データを時系列で示した。これによると、それぞれの観測点で 2 回の気温の下降が見られた。1 回目の気温降下は神戸海洋気象台で 14 時 23 分頃から、神戸空港で 14 時 24 分頃から観測された。神戸海洋気象台では、およそ 6 分間で約 2°C 気温が下降し、風向が南よりの風から東に変わり 13.2m/s の風が吹いた。神戸空港でもおよそ 6 分間で約 3°C 気温が降下し、風向が南よりの風から東北東に変わり約 10m/s の風が吹いた。これらの変化は、大阪管区気象台で 13 時 35 分頃に観測された地上気象変化と同様であった。第 2 図を見ると、冷氣外流出が移動してきたと考えられる神戸海洋気象台の北東方向には、風をさえぎる障害が無いことから同じ冷氣外流出が通過したと考えられる（第 17 図に大阪管区気象台における気象観測データを示す）。更に、このことは、大阪航空測候所と神戸海洋気象台の気温降下の時間差から冷氣外流出の移動速度を見積もると約 35km/h となり、枚方—大阪間の移動速度と一致することからも説明できる。また、大阪管区気象台では冷氣外流出通過後の気温、露点温度はそれぞれ約 28°C、20°C で、第 16 図における気温降下後の観測値と近い値を示している。このことから、神戸に冷氣外流出が達するまでに、冷氣外流出自身の変質はほとんど無かったことがわかる。

14 時 20 分、14 時 30 分のレーダーエコー（第 12 図）と見比べると、この気温降下の直後から六甲山南麓で雨雲が急発達したと考えられる。



第16図 神戸海洋気象台(左)と神戸空港(右)観測データ時系列(2008年7月28日14時~15時)
 上から、降水強度、風向、風速、気温、露点温度、気圧。
 縦破線、縦実線はそれぞれ1回目、2回目の気温下降時刻を示す。



第17図 大阪管区気象台観測データ時系列(2008年7月28日9時~15時)
 左上:風向. 左下:風速. 右上:気圧. 右下:気温, 露点温度, 湿度

2 回目の気温降下は、神戸海洋気象台で 14 時 30 分頃、神戸空港で 14 時 42 分頃に発生している。神戸海洋気象台では約 10 分間で 7°C の気温降下が観測された。同時に風向は東北東から北東に変わり、気圧も急上昇した。また、気温が降下して約 10 分後に最大降水強度 150mm/h を観測した。神戸空港では 14 時 42 分頃に冷氣外出流の通過を観測し、その後約 5 分間で 4°C の気温降下が観測された。風向は神戸海洋気象台と同様に、東北東から北東に変わった。気温降下が始まった時間や、風向変化から都賀川周辺で急発達した雨雲から発生した冷氣外出流が観測されたと考えられる。

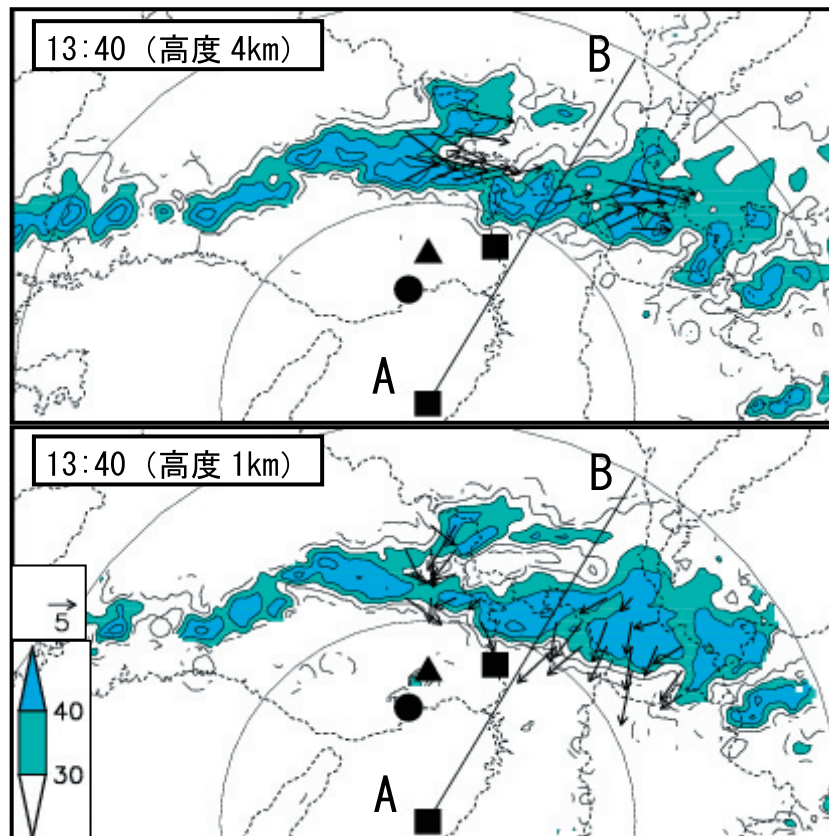
これらのことから、京都府南部、大阪府北部を進んできた降水帯によって形成された冷氣外出流が、都賀川に増水をもたらした雨雲の急発達に関与したと考えられる。

3.3 2 台の DRAW による解析

3.3.1 降水帯内部の気流

今回発生した線状降水帯の気流構造を調べるために、関西航空地方気象台、大阪航空測候所それぞれの DRAW のデータを用いた。これら二つのレーダーサイトから得られた反射強度とドップラー速度のデータを用いて、三次元的な風の解析、いわゆるデュアル解析を行った。

第 18 図に 13 時 40 分のデュアル解析から求めた風分布を示す。大阪府北部から滋賀県南部あたりで急激に発達した降水帯について解析を行った結果、高度 1km では降水帯内部は北よりの風が卓越していた。第 15 図と比較すると、上記の風は冷氣外出流に対応していた。同時刻の ACARS データを用いて降水帯の周囲における風分布を調べると、大阪湾の地上付近から高度約 1km 付近までは南西風が



第 18 図 デュアル解析による上空の風分布図 (2008 年 7 月 28 日 13 時 40 分頃)

色は反射強度 (dBZ) を示す。黒円は関西航空地方気象台を中心とする同心円で、半径 50km ごとに描いた。

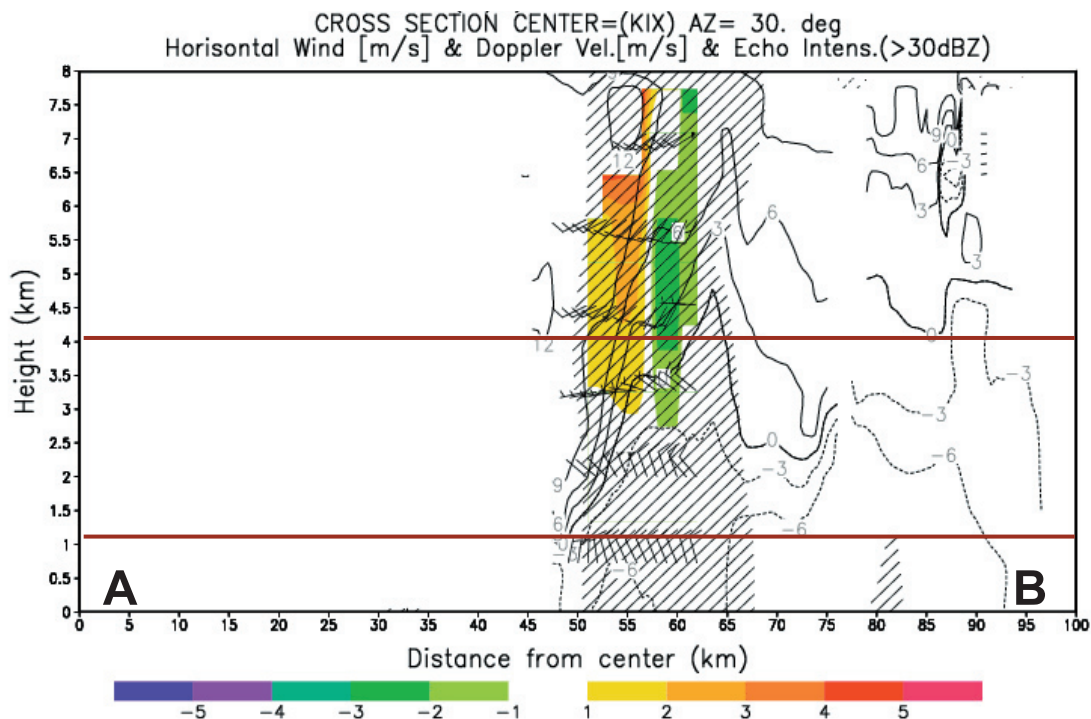
■: レーダーサイト (北側: 大阪航空測候所, 南側: 関西航空地方気象台), ●: 神戸海洋気象台, ▲: 六甲山

卓越し、北よりの風である冷気外出流との間に強い収束があることがわかった。高度 4km の解析では、降水帯の南側で南西風、北側で西北西から北西の風が解析された。北西よりの風については総観解析における中層の北西気流と対応していたが、南西風については総観解析の気流と異なっていた。第 19 図に、降水帯における気流構造の鉛直断面を示した。線分 AB の断面において、降水帯の進行方向前面では、高度 1km より上空で南西風と遠ざかる速度成分のドップラー速度が解析されており、高度 3km 付近より上空で強い上昇流が解析された。この上昇流の後面には強い下降流が解析されており、高度 4km 以下では北西風領域と対応していた。また、降水帯内部前方の高度 1km 以下では北から北東の風が解析され、冷気外出流と対応している。このように、高度 4km 付近から下層にかけて、上昇流後面で北から北東の風が卓越していたことか

ら、中層で解析された下降流と北西風が冷気外出流を形成していたと考えられる。

3.3.2 降水帯周辺の気流

第 20 図は、関西航空地方気象台の DRAW で観測した 0.7 度等仰角反射強度データであるが、線状降水帯の南西側に大阪湾を南西進する線状のエコーが観測された。このエコーが神戸空港や関西国際空港を通過し、それと同時に地上気象の急変化が起こったが、降水は観測されなかった。このことは、降水現象を除けば、先に述べた冷気外出流通過時の特徴と類似していたことから、このエコーは、冷気外出流先端部の大気屈折率の乱れが大きい領域で電波散乱が起こった非降水性のものであると考えられる。関西国際空港に到達する直前の非降水エコーの高さは 600 ~ 700m、移動速度はデュアル解析から求めた風分布から概算して約 40km/h



第 19 図 デュアル解析による上空の風分布図 (2008 年 7 月 28 日 13 時 40 分頃)

第 18 図中にある線分 AB における鉛直断面を示す。(赤線は 1km, 4km 高度を示す)

矢羽は水平風 (m/s)、色は鉛直風 (m/s)、等値線は関西国際空港 DRAW のドップラー速度 (m/s) を表す。鉛直風は上昇を正 (暖色)、下降を負 (寒色) で表現している。ドップラー速度は遠ざかる速度を正 (実線)、近づく速度を負 (点線) で表現している。斜線部は反射強度が 30dBZ 以上の領域を示す。

であった（図省略）。実際に、関西国際空港周辺の ACARS 温位データによると、非降水エコーが現れた高度で水平方向の温位傾度が大きくなっていた。地上の気圧と気温の観測データから理論式を用いて冷気外出流の移動速度と冷気層の厚さを求めたところ、関西国際空港のデータでは 36km/h、840m であった。非降水エコーから求めたエコーの高さや移動速度は、冷気外出流の移動速度や冷気層の厚さの理論値と大体一致していたため、この非降水エコーの高さがおおむね冷気層の厚さを示していることがわかった。このことから、この非降水エコーは近畿中部の降水帯が形成した冷気外出流であると判断した。14時30分のレーダーエコーによると（第12図）、非降水エコーの後面に位置する西宮市から豊中市付近にかけて強雨域がしま状に整列していた。また、非降水エコーが、神戸海洋気象台や神戸空港を通過したのと同時期に神戸市周辺で対流雲が急激に発達した。

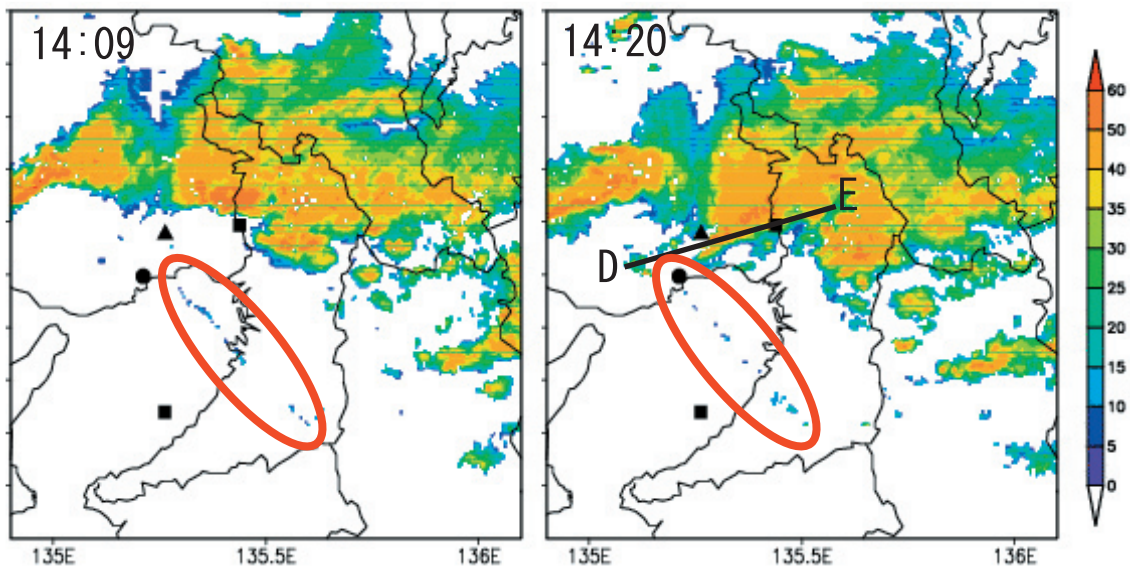
3.4 六甲山ろくで発生した対流雲

第21図に、六甲山南麓における14時から15時の1時間降水量分布を示す。14時から15時の間で、

都賀川周辺では30mm以上、都賀川中流にあたる永峰では38mmの短時間強雨を観測した。

第22図は都賀川周辺における観測点での雨量時系列である。降水を観測した時刻は14時30分からで、10分間降水量のピークは14時50分であった。都賀川下流での増水は14時30分から15時の間に発生しており、強い降水の発生と一致している。

都賀川に大雨をもたらした対流雲の発生については、中北ほか（2009）の調査において、都賀川出水の約20分前に摩耶山付近の上空5kmの高度に「積乱雲の卵」と見られるエコーが観測されたと報告している。この発生段階のエコーについては関西航空地方気象台 DRAW においても捉えられていた。第23図は6.8度等仰角反射強度データであるが、矢印と破線円で示したように、14時06分ごろに三木市の南東上空で弱いエコーが観測され、南東進しながら急激に発達した。6.8度仰角では、このエコーの観測高度は高度約4.5kmであり、上記報告の事実と一致した。これ以外の仰角スキャンでは、5.4度仰角（エコー発生位置での観測高度は約3.6km）でも観測されていた。14時10分以降の観測ではそれ以下の仰角スキャンでもエコーが捉え



第20図 反射強度データ（2008年7月28日14時9分、20分）

関西航空地方気象台 DRAW0.7度等仰角の反射強度データを使用した。ランドマークは第18図に同じ。大阪湾を南西進する線状のエコーを赤実線で囲む。（図中の線分DEは第24図と対応している）

られていた。

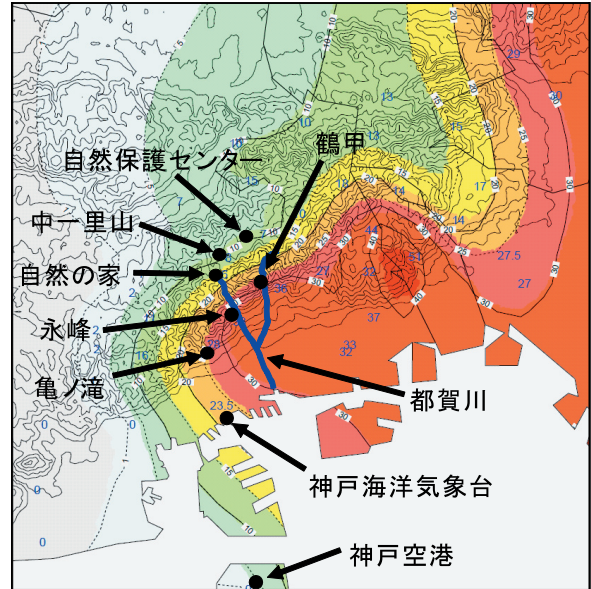
また、第24図は、関西航空地方気象台 DRAW が観測したエコーを、第20図の線分 DE で鉛直断面にとったものである。これによると、14時14分に都賀川の西約7kmでエコーが確認でき、14時20分、26分と急激に発達しながら東進した。14時31分の画像では、このエコーが都賀川に達しており、大雨の降り始め時刻とほぼ一致する。

4. 考察

7月28日昼前から近畿地方を線状降水帯が南西進し、14時30分頃には、六甲山南麓で急発生・急発達した対流雲によって短時間強雨が発生した。これらの対流活動の形成・発達要因を考察する。

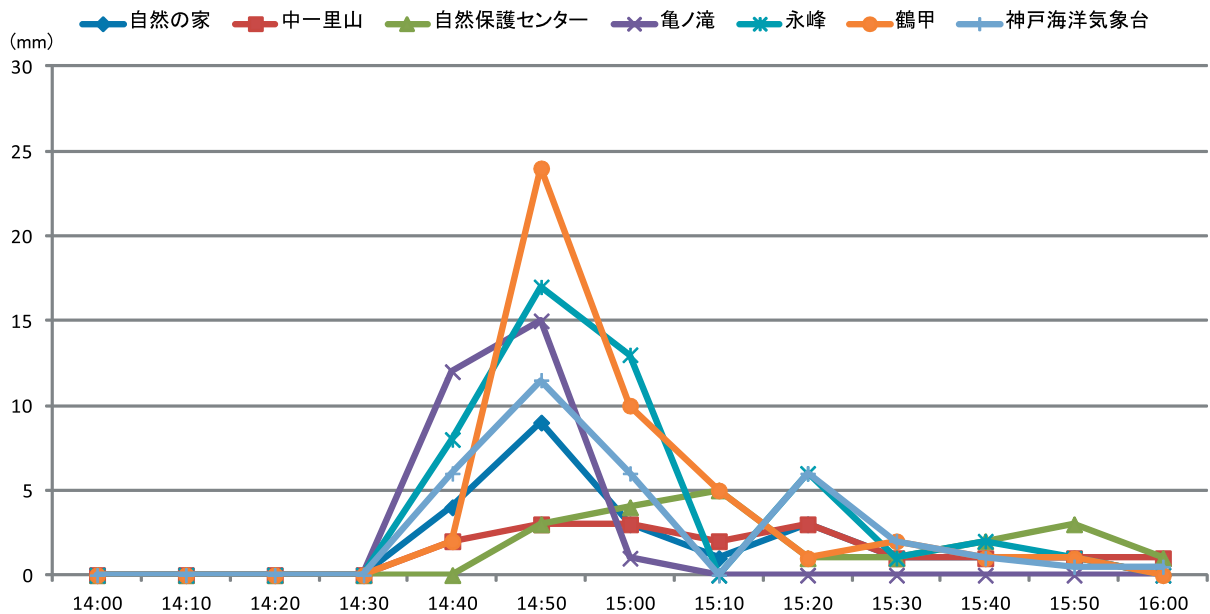
4.1 日本海側で停滞した降水帯（降水帯 A1）

早朝、北陸付近に流入した線状の降水帯 A1（第11図）は、衛星で見れば、隠岐島付近を先端として発生したテーパリング状の雲域に対応するものとする。その後、日本海中部上空の寒冷渦が東に移動するとともに、下層風系が西から北西に変わ

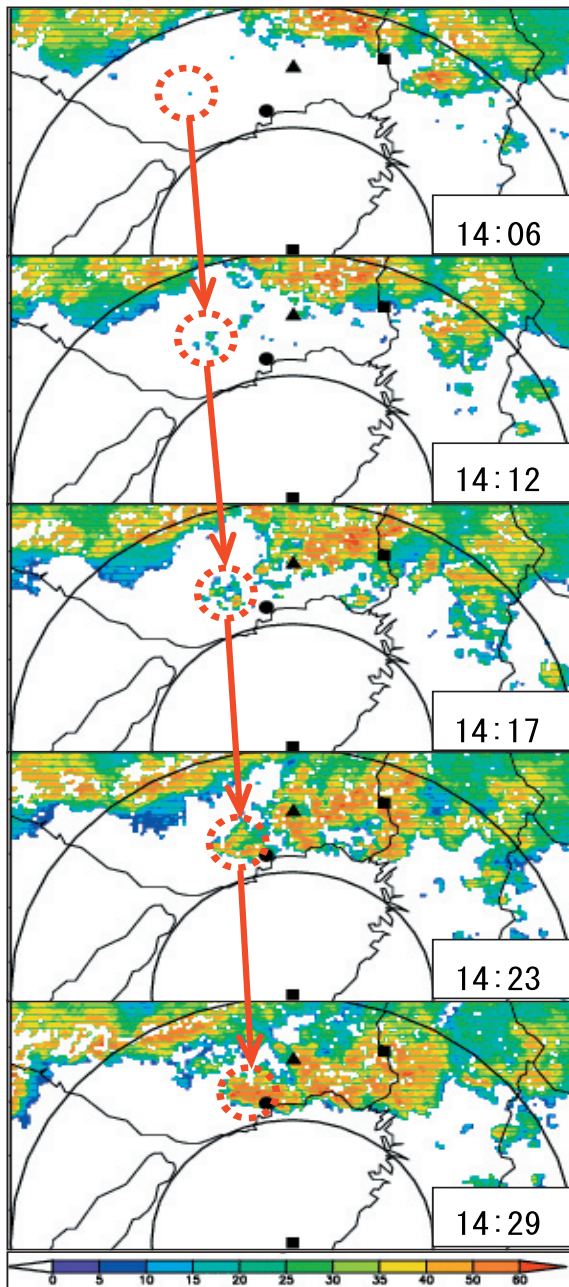


第21図 六甲山南麓における1時間降水量（2008年7月28日15時）

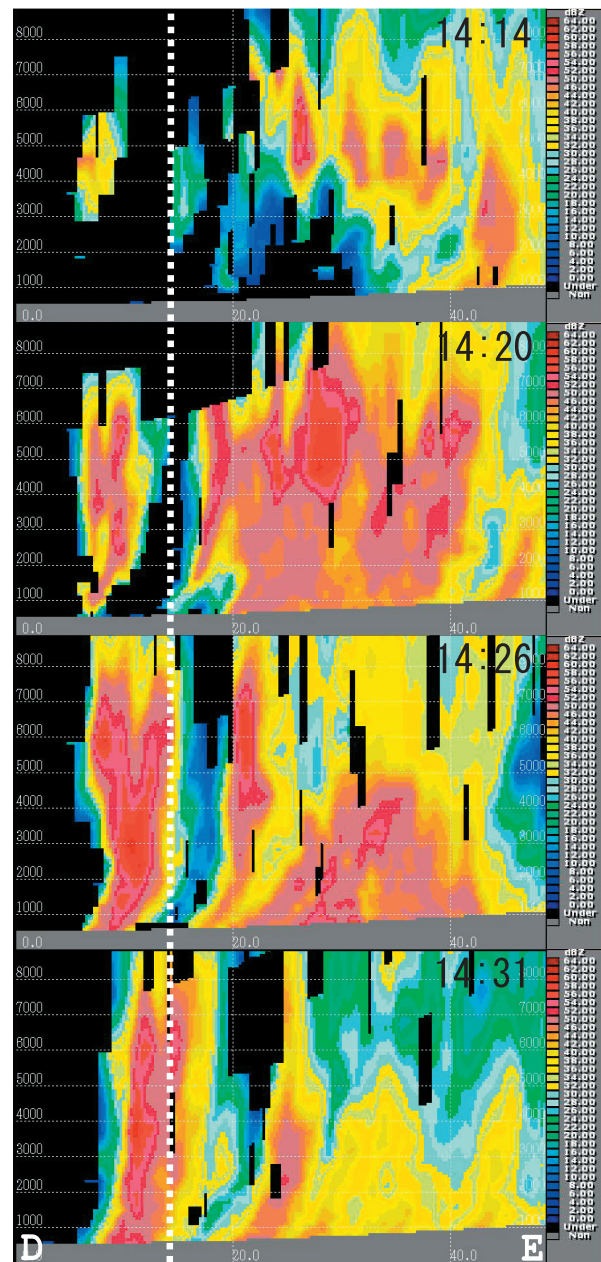
色塗、太実線は1時間降水量、細実線は等高線を表す。降水量データにはアメダスに加えて国土交通省「川の防災情報」(<http://www.river.go.jp/>)サイトのデータを、等高線・海岸線には国土地理院数値地図50mメッシュを使用した。



第22図 都賀川周辺の雨量観測点の時系列データ（2008年7月28日14時～16時）
降水量データにはアメダスに加えて国土交通省「川の防災情報」(<http://www.river.go.jp/>)サイトのデータを使用した。（雨量観測点は、第21図と対応している）



第23図 反射強度データ (2008年7月28日)
 関西航空地方気象台 DRAW6.8度等仰角の反射強度データを使用した。ランドマークと黒円は第18図に同じ。ただし、黒円は半径25kmごと。都賀川で大雨をもたらしたエコーを矢印と赤破線円で追跡した。



第24図 第20図線分DEにおける反射強度の鉛直断面図 (2008年7月28日14時14分, 14時20分, 14時26分, 14時31分)
 関西航空地方気象台 DRAWの反射強度データを使用した。横軸は点Dからの距離 (km), 縦軸は高度 (m) を表し, 縦の白色太点線は都賀川的位置を示す。

って前線が南下してきた。昼前からは近畿北部沿岸に線状降水帯が停滞するようになった。これについて、対流活動を取り巻く気流に注目しながら考察すると、下層では隠岐島の風向から判断して西風、中層は周囲の高層観測から北西風であり、下層と中層で風向が異なることからバックビルディング構造では無いと推測する。同時にエコーの動きを追跡すると、隠岐島周辺で発生したエコーが南東へ発達しながら移動していく様子が捉えられた。これらのことから、日本海で下層収束によって対流雲が発生し、中層風により次々と風下へ流されるというバックアンドサイドビルディング構造の可能性が考えられる。

4.2 近畿地方を南西進した降水帯（降水帯 A2）

11 時頃に滋賀県北部から愛知県北部にかけて線状に発生した降水帯 A2 は、12 時頃には丹波山地から三重北部にかけて線状降水帯を形成し、個々の降水セルは南東進しながら、降水帯としては南西進した。地上観測結果やレーダーエコーの動きを追跡した結果、この降水帯は冷氣外出流を形成し、それが周囲の風と収束したところで新しい降水セルを形成するといったマルチセル構造をもっていたことがわかった。新しい降水セルは主に降水帯の南西側で形成されており、これが全体的に南西進する要因となった。

4.3 近畿地方を南西進した降水帯（降水帯 B）

第 4.1 節で述べた対流活動の南東側では、対流活動が生成・消滅を繰り返しながら南下し、13 時頃には近畿地方中部で最盛期を迎えた。この降水帯の形成・発達要因を、ステージに分けてそれぞれ考察する。

4.3.1 発生期

第 11-1 図 11 時を見ると、兵庫県西部から滋賀県南部にかけて、点々とした対流雲が形成されていた（図中の降水帯 Bi）。この降水帯は時間とともに南東方向へ移動しながらエコー面積を拡大させ、12 時以降には、エコー同士がつながり合っ

て降水帯を形成していた。局地天気図（第 14 図）やアメダス風データ（第 15 図）を見ると、降水帯 Bi の位置は大阪湾からの海風の先端に対応し、局地低圧部となっていることから、夏季特有の熱雷であると考えられる。

4.3.2 発達期

近畿地方北部から南西進してきた降水帯（第 11 図の降水帯 A2）からの冷氣外出流により、近畿地方中部に形成された降水帯 Bi は強化された。降水帯 A2 は降水帯 Bi と合流し、13 時過ぎには非常に発達した対流雲域が形成された（第 11-2 図の降水帯 B）。降水帯 Bi の発達から降水帯 B の形成には、降水帯 A2 の合流が大きく関係していると考えられる。

降水帯 B は、地上観測結果やレーダーエコーの動きを追跡した結果、この降水帯は顕著な冷氣外出流を形成し、それが大阪湾からの海風と収束したところで新しい降水セルを形成するといったマルチセル構造をもっていたことがわかった。降水帯が南西進する要因は降水帯 A2 と同じであった。この降水帯後方には、弱いエコー域が広がっており、地上では層状性降水を観測していた。この特徴はさまざまな文献で示されているスコールラインの特徴と類似していた。例えば瀬古ほか（1998）で調査されたスコールラインでは、対流性の強い降水域後方の層状性の弱い降水域の存在、地上での冷氣発散風と暖気が進行方向前面で収束といった特徴がでていた。

4.3.3 最盛期

前節で述べたように、降水帯 Bi と A2 が合流して最盛期（降水帯 B）となった。この降水帯についても、スコールライン構造に見られる特徴が確認された。最盛期においては二台の DRAW を利用した気流解析を行うことができた。その結果、第 3.3.1 節でも述べたように、降水帯の進行方向前面では南西気流が上昇、後面では北西気流が下降するといった気流構造が解析された。このことは瀬古ほか（1998）のドップラーレーダー解析結果と一致する

ものであった。また、加藤・瀬古 (2005) でまとめられた降水帯の形態と内部構造におけるスコールラインの特徴と合致するものであった。

この降水帯が形成した冷気外出流は、DRAWで観測された非降水エコーを追跡したところ、降水帯の南西進よりも速い速度で進行し、15時ごろには関西航空地方気象台にまで到達していた。第11-2図13時と15時のエコーを比較してみると、13時にはほぼ一直線であった降水帯が、15時にはばらばらになっていた。特に、奈良県から三重県にかけての降水域は図の南端付近まで達しているのに対し、兵庫県南部から大阪府北部の降水域は大阪湾沿岸部までの進行にとどまっている。これは、冷気外出流が降水帯から離れてしまったために、降水帯前面での新しい降水セルの形成と取り込みができなかったことが原因と考えられる。

4.4 都賀川周辺で急発達した対流雲

最後に、神戸市灘区の都賀川に増水をもたらした対流雲について考察する。第3.4節で述べたように、この対流雲は三木市の南東上空で発生したものが、南東進して急発達したことがわかった。急発達のタイミングは、先に述べた冷気外出流の先端がこの対流雲を通過した直後であった。このことから、この対流雲の急発達は降水帯Bが最盛期に形成した冷気外出流と神戸周辺で吹いていた海風の収束が一因であると考えられる。また、神戸市灘区よりも東側には降水帯Bの前面で形成された降水セルが存在し、これとの合流も急発達の一因と考えられる。

今事例では、総観スケールや地上観測結果の詳細な解析、また、観測時間間隔が短いDRAWによる降水セルの追跡や降水帯内部の気流解析によってメカニズムを考察することができたが、三木市南東上空で発生した対流雲など、非常に短時間で局地的な現象についてはその成因を突き止めることはできなかった。今事例が数値実験で再現されれば、更に詳細な対流セルの動向や気流構造を解析することができると思われる。

5. まとめ

2008年7月28日は、日本海中部には寒冷渦に対応する低気圧があり、また、日本の南には太平洋高気圧があり、この境界付近にあたる朝鮮半島南部から北陸にかけて前線が停滞していた。この前線付近では、中・上層で寒気が入り、下層で太平洋高気圧の周辺に沿って南からの湿った気塊が流入し、不安定な成層状態となっていた。この不安定な成層状態で、28日早朝には、この前線付近で発生した対流雲が発達しながら次々と北陸地方を中心に流入するような場が継続し、大雨による大きな災害が発生した。

日本海中部にあった低気圧は次第に東に移動するとともに、前線は南下を始めた。中層風の風向は西から北西に変わり、この前線付近で発生する対流雲(降水帯A1)が昼前には近畿地方に流入した。前線付近の対流雲とは別に前線の南側で新たな対流雲が発生・発達し、線状の降水帯(降水帯A2と降水帯Biの合流による降水帯B)を形成した。この降水帯は前線の移動方向とは異なり南西方向の大阪湾に向かって早い速度で移動しつつ、進行方向前面に顕著な冷気外出流を、後面には層状性降水域を形成していた。これらの特徴とドップラーレーダーで解析した降水帯内部の気流構造から、この降水帯はスコールライン構造をもっていた。

また、この降水帯の最盛期(降水帯BiとA2が合流して降水帯Bを形成した直後)に形成された冷気外出流は、約20km/hで移動する降水帯に先行して大阪湾を35-40km/hで南西進した。この冷気外出流と大阪湾からの海風が六甲山南麓で収束した結果、雨雲が急発達して短時間強雨をもたらしたと推測した。都賀川ではこの大雨によって濁流が発生し大勢の方が流されて5名が死亡するという痛ましい災害が発生した。

謝辞

本調査では、気象研究所の津口裕茂氏をはじめ、大阪管区気象台、関西航空地方気象台の皆様、そしてドップラーレーダーデータ及び航空気象観測データを提供していただいた大阪航空測候所の方々

に深く感謝いたします。

なお、デュアル解析には気象研究所提供のソフト「draft」を使用させていただきました。

参考文献

- 上杉忠孝・田中恵信 (2008) : 2000 年 7 月 4 日に起きた東京都心における短時間強雨の発生機構. 天気, 55, 23-36.
- 大野久雄 (2001) : 雷雨とメソ気象. 東京堂出版, 東京, 291pp.
- 加藤輝之・瀬古弘 (2005) : 突然発生するメソスケール降水系の研究. 気象研究ノート, 第 208 号, 151-200.
- 瀬古弘・吉崎正憲・楠研一・つくば域降雨観測研究グループ (1998) : 1995 年 8 月 16 日に関東地方を通過したスコールライン. 天気, 45, 93-103.
- 中北英一・山口弘誠・山邊洋之 (2009) : レーダー情報を用いたゲリラ豪雨の卵の解析. 京都大学防災研究所年報, 52B, 547-562.
- 吉崎正憲・加藤輝之 (2007) : 豪雨・豪雪の気象学. 朝倉書店, 東京, 175pp.