

第2章

大阪管区の研究成果

2.1 大阪府における線状降水帯による大雨発生の必要条件の抽出・妥当性の確認と十分条件の抽出

大阪管区气象台予報課

要 旨

下層南西風場での大阪府の大雨発生の必要条件は、統計的調査から「500m 高度水蒸気フラックス: $150\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上」, 「700hPa 湿数: 3°C 以下」, 「500m 高度から自由対流高度までの距離: 1000m 以下」, 「K 指数: 34 以上」, 「500m 高度の風向: $180\sim 240$ 度 かつ 700hPa の風向: $210\sim 270$ 度」, 「700hPa-500m 高度の鉛直シア: 向き $265\sim 360$ 度かつ $4\sim 16\text{m/s}$ 」とした。十分条件は、大雨事例解析から、「上層発散場」, 「500hPa \sim 700hPa トラフの通過」, 「下層に加え中層の水蒸気の持続的輸送」, 「六甲山地から北摂山地の地形」, 「大阪平野の下層収束場と冷気層の形成」による強制上昇を抽出した。

1. はじめに

大阪府では、日本海に前線があり大阪府が暖域側に位置している場合に、下層で南西風が卓越し、しばしば線状降水帯が形成され大雨が発生する。このため、過去に事例解析が行われ、その積み重ねにより、大雨が発生する様々な環境場の特徴や大雨をもたらす降水系の発生・発達メカニズムについての知見が得られている。平成 25・26 年度の地方共同研究では過去の知見を整理するとともに、線状降水帯が形成され、大阪府で 3 時間降水量が 70mm 以上となった 2012 年 8 月 13 日朝(以下、事例 1)、2012 年 8 月 13 日夜から 14 日朝(以下、事例 2)、2014 年 8 月 16 日(以下、事例 3)の事例解析を行い、大雨が発生する環境場の特徴を抽出した。本稿では、事例解析として、気象庁非静力学モデル(以下、JMA-NHM)を用いた事例 2 の結果を主に報告する。また、大雨が発生する環境場の定量的な閾値を抽出することを目的に統計解析を行った。これらの事例解析及び統計解析の結果から、大阪府における線状降水帯による大雨発生の必要条件と十分条件の抽出、及び、その妥当性について確認した。

2. JMA-NHM による事例解析

2.1 事例の概要

8 月 13 日から 14 日にかけて、朝鮮半島から日本海中部へのびる停滞前線がゆっくりと南下し、本州付近に達した。前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込み、大気の状態が非常に不安定となったため、近畿中部を中心に大雨となり、局地的に猛烈な雨が降った。京都府宇治市付近では、13 日 12 時から 14 日 12 時(以下、すべて日本時間)までの総雨量が、解析雨量で約 400mm に達した(第 1 図)。

2.2 総観場

500hPa では、西南西流場の中、13 日夜から 14 日朝にかけて、高度 5820m 付近のトラフが西日本を通過した。地上では、日本海の停滞前線に向かって、太平洋高気圧の縁辺を回る暖かく湿った空気が流れ込み、大気の状態が非常に不安定となっていた(第 2 図)。この停滞前線は、14 日昼には近畿中部まで南下した。

2.3 JMA-NHM による解析

2.3.1 モデルの設定

初期時刻 2012 年 8 月 13 日 15 時、水平格子間隔 5km で 180×180 格子、鉛直 50 層、対流パラメタリゼーション無しで FT=18(時間)まで計算した。その計算結果を親モデルとして、初期時刻 2012 年 8 月 13 日 18 時、水平格子間隔 2km で 250×250 格子、鉛直 50 層、対流パラメタリゼーション無しで FT=15 まで計算した(以下、2km モ

デル).

2.3.2 計算結果

2km モデルは、13日19時頃から23時にかけて大阪府を東進する雨域を概ね表現している(第3図). 14日3時の線状降水帯は、実況と概ね合致している.

2.3.3 暖湿気の流入経路と持ち上げ機構

レーダーによると、14日3時頃には線状降水帯が六甲山地近傍から東北東に向かって滋賀県南東部にかけて形成されていた. 2km モデルの結果でも、14日3時頃に宇治市付近に強雨域が表現されている. この雨域の中心付近の7地点の高度500m~5kmに高度500m間隔でトレーサーを置き、14日3時から6時まで前方流跡線解析を実施した. この前方流跡線解析において高度10km以上まで速やかに上昇したトレーサーを、強い上昇流を構成していた気塊(以下、コア気塊)とする. 次に、この前方流跡線解析と同一時刻(14日3時)、同一位置においたトレーサーから、14日0時まで遡る後方流跡線解析を行い、コア気塊の流入経路を調べた結果、コア気塊の流入経路は①紀伊水道、②瀬戸内海、③近傍の地表付近に大別できた(第4図).

① 紀伊水道から流入した空気塊

これらは、全て高度1km以下で線状降水帯の南側から進入し、線状降水帯の近傍で急上昇している. 紀伊水道上空における相当温位は、約353~359Kであった. さらに、紀伊水道-直接経路と紀伊水道-六甲経路に細分できる(第4図a・b).

①a 紀伊水道-直接経路

紀伊水道から来た空気塊の大部分は高度1km以下を保って大阪平野上空を通過し、14日2時40分頃から順次北摂の線状降水帯の近傍に到達した所で上昇し、3時に宇治市付近上空1~4.5kmに達していた(第4図a).

2時40分の950hPa面の収束・発散(第5図b)をみると、線状降水帯の南側に沿って強い収束が計算されている. 空気塊はこれにより上昇したものと考えられる. 950hPa面では、相当温位の高い空気がこの収束域へ向かって直接流れ込んでいる(第5図a). これは、バックアンドサイドビルディング型(以下、BSB型)(瀬古2010)のインフローの特徴を示している. 1000hPa面では大阪平野に低相当温位気塊がみられるが(第6図)、その上の950hPa面では南西風の暖湿気が通過して、線状降水帯へ直接流入している.

①b 紀伊水道-六甲経路

紀伊水道から来た空気塊の一部は14日2時頃から六甲山地の南側で上昇を始め、3時に宇治市付近上空4.5kmに達していた(第4図b). 2時の1000hPa面の収束・発散(第7図a)をみると、六甲山地南側に強い収束域がある. 紀伊水道から来た空気塊は、六甲山地と大阪平野の低相当温位気塊で形成される障壁に阻まれ、そこに生じた地表付近の収束域(第7図aのA・B)によって持ち上げられたと考えられる.

②瀬戸内海から流入した空気塊

全て高度1km以上で、ほぼ高度一定で進入している. 相当温位は約343~346Kであった. 高度約1500~2000mで流入した2つのトレーサーは紀伊水道-六甲経路の上昇に巻き込まれる形で2時40分から上昇し、それ以外は全て線状降水帯に到達する直前の2時50分から上昇している(第4図c). いずれも発達中の対流雲に取り込まれて上昇したものと考えられる.

③近傍の地表付近から来た空気塊

高度500m以下で地上付近にあった空気はゆっくりと移動しており、2時40分以降に線状降水帯の近傍にあった空気塊が急上昇している(第4図d). これは、地表付近の収束域(第7図aのA・B・C)の近傍にあった空気が持ち上げられたものと考えられる.

2.3.4 大阪平野の低相当温位気塊の由来

紀伊水道-六甲経路の持ち上げ機構の一因となっていると考えられる大阪平野の低相当温位気塊の起源を探るため、2時の大阪平野の空気塊から後方流動線解析をした。その結果、前日20時台の先行降雨からの下降流により低相当温位気塊は形成されていた(図略)。

2.3.5 感度実験(蒸発の効果)

先行降雨による冷却効果が大阪平野の低相当温位気塊の形成に与えた影響を確認するため、降水物質の蒸発の効果を除いた感度実験を行った。

蒸発効果を除くと、大阪平野の低相当温位気塊が形成されなかった(図略)。また、線状降水帯も形成されなかった(図略)。大阪湾からの暖湿気は、低相当温位気塊に妨げられずに南西風で内陸まで流入する(第7図b)。六甲山地の南側には減速場による収束が形成されるものの、蒸発あり実験(第7図a)と比較すると弱かった。

2.3.6 感度実験(地形の効果)

これまで議論してきた標準実験と同じ初期値・境界値を用いて、六甲山地から若狭湾にかけての標高を0.1mに変更する感度実験を行い、標準実験(CNTL)と地形変更実験(TOPO)の1時間降水量を比較した。TOPO実験では、CNTL実験にみられる線状降水帯が発生しなかった(第8図)。

14日3時の1000hPa面の相当温位(第9図)をみると、CNTL実験では暖湿気流が六甲山地の南側で止められており、ここで強制的に持ち上げられたことが示唆される。一方、TOPO実験では、1000hPa面の暖湿気流が日本海側まで進み、近畿中部に線状降水帯はあらわれなかった。

先行研究によれば、松本ほか(2012)は六甲山地の標高を150mに変更、小山ほか(2012)は六甲山を半分にする実験を行ったが、いずれも線状降水帯が計算された。これらの先行研究では六甲山地を完全に無くしてはいないので、六甲山地の南側で暖湿気流が強制的に持ち上げられる機構が働き、線状降水帯が予測されたと解釈できる。つまり、現実より低い六甲山地であっても、地形障壁としては十分であるということを示唆している。

今回の実験結果をあわせて考えると、六甲～北摂の地形障壁は近畿中部の線状降水帯の発生に寄与していると考えられる。また、この地形が現実より低い高さでも、線状降水帯を発生させるには十分であると解釈できる。

2.4 考察

紀伊水道-六甲経路の持ち上げ機構は、六甲山地と大阪平野の低相当温位気塊があれば働くと考えられる。しかし、大阪平野の低相当温位気塊が存在しなくても、六甲山地の南側で紀伊水道-六甲経路の持ち上げ機構が働く可能性はある。その理由は次の2点である。①第2.3.5項の大阪平野の低相当温位気塊が形成されない蒸発なし実験でも、六甲山地の南側1000hPa面にはある程度の収束が計算されたこと、②第2.3.6項の地形を除いた実験では、線状降水帯は形成されず、六甲～北摂山系から若狭湾までの地形の存在が線状降水帯の形成に大きく寄与していると考えられること。

一方、紀伊水道-直接経路の持ち上げ機構はすでに存在する線状降水帯の南側に形成される950hPa面の収束が原因とみられる。この持ち上げ機構が働くためには、既に線状降水帯がそこにある必要がある。したがって、線状降水帯の最初の対流雲は六甲経路で形成され、その後は、形成された対流雲に対して紀伊水道-直接経路の暖湿気供給も加わり、BSB型の機構で線状降水帯が発達・維持されるのではないかと考えられる。

一方、瀬戸内海上空から来た空気塊の相当温位は約343～346K程度で紀伊水道からの気流と比べれば低いものの、これも暖かく湿った空気といえる。六甲付近で発達中の対流雲が巻き込んだ気流が、対流を抑制しない程度に高相当温位だったという点が、線状降水帯の維持に一定の役割を果たしていたと考えられる。

2.5 JMA-NHMの解析のまとめ

第10図に8月13日から14日の大雨の概念図を示す。

- ①暖湿気の流入は、淀川チャネル型大雨同様、紀伊水道と瀬戸内海が主たる経路であった。ただし、今回の調査では、線状降水帯近傍に滞留していた高度500m以下の空気も持ち上げられていた。
- ②持ち上げ機構は、六甲山地の地形効果と先行降雨による大阪平野の低相当温位気塊であった。
- ③維持機構は、六甲経路で形成された線状降水帯に紀伊水道から直接暖湿気が流入するBSB型の機構であった。
- ④瀬戸内海から流入する暖湿気は、紀伊水道経路からの気流と収束し、高度1km以上で対流を抑制しない程度で混合されることにより線状降水帯を維持する役割を果たしていたと推察した。

3. 環境場の特徴

過去知見および事例1, 2, 3の解析結果から、下層南西風場で大雨が発生する環境場のステージ毎の特徴を以下に示す。

3.1 総観場

- ①上層発散場に位置し、下層上昇流を助長する場。
- ②500~700hPaのトラフに伴う上昇流場が通過。
- ③日本海に前線があり、大阪府は暖域側に位置し、下層南西風が卓越して暖湿気が流入しやすい場。
- ④下層の暖湿気流入に加え、500~700hPaの水蒸気が持続的に流入し、水蒸気量が平均値より多い。
- ⑤500m高度面から自由対流高度までの距離(DLFC)が小さく、かつ対流有効位置エネルギー(CAPE)等が大きい潜在不安定な場が持続。

3.2 持ち上げシステム

- ①500~700hPaトラフ前面の上昇流場と下層上昇流場のカップリングにより深い対流を形成(第11図)。
- ②下層暖湿流の強まり。友ヶ島、神戸空港、神戸のアメダスの風の強まりや500m高度面以下の層の水蒸気フラックスの強まり(第12図)。
- ③六甲山地から北摂山系の地形効果。六甲山地、北摂山系の斜面を暖湿気が滑昇。北摂山系が降水により生じた冷氣層を塞ぎ止め、冷氣層の上を大阪平野から流入した暖湿気が滑昇。
- ④前線南側の暖域内での下層収束場の形成。
- ⑤500~700hPaの乾燥空気の流入。乾燥空気の先端部で対流不安定を強め、対流雲が発達した事例もみられた。ただし、乾燥空気の流入が持続することにより、対流活動は抑制方向に働く。

3.3 線状降水帯の維持

- ①降水エコーは700hPaの風に流され、大阪府の地形と降水エコーの走向が同じ(第13図右)。
- ②地上~700hPaの適度な鉛直シアベクトル。
- ③500m高度面で大阪平野から流入した暖湿気が、線状降水帯にサイドから直接吹き込むBSB型(瀬古2010)のインフロー(第13図左)。

3.4 線状降水帯の衰弱

- ①乾燥空気流入による対流活動抑制(第11図)。
- ②500~700hPaのトラフの通過。
- ③950hPa以下の相当温位と水蒸気フラックスが小さくなり、持続的な暖湿気の流入が弱まる。

4. 統計解析

4.1 調査方法と期間

本調査での大阪府の大雨とは、大阪府の3時間降水量(以下、R3)警報基準の一番低い値である70mmとした。調査期間は2009～2014年の6～8月、大阪府におけるR3最大値と様々な気象要素との対応関係を調べた。

R3の調査には解析雨量を用いた。大雨は暖湿気を自由対流高度まで持ち上げ、その状態が持続することで発生することから、気象要素は「水蒸気量」、「持ち上げシステム」、「安定度」、「降水が持続するシステム」の4グループに分類し、気象庁メソ解析から各気象要素を抽出した(第1表)。抽出した地点は、水蒸気の輸送経路、対流雲が発生しやすい「大阪湾」、「淡路島」、「六甲山」、「北摂山系」の4地点(第14図)で、 $R3 \geq 70\text{mm}$ が解析された3時間前の値を用いた。

4.2 データ取得ポイントによる違い

第14図の4地点のデータを抽出し、比較を行ったが、データ値に大きな差はなく特徴は見出せなかった。以下では、水蒸気の流入経路である「大阪湾」のデータを用いた解析結果を示す。

4.3 大阪府の下層風向別の大雨頻度分布

第15図に大阪府で $R3 \geq 70\text{mm}$ (以下、大雨)が発生する回数の頻度分布図を示す。これをみると、北大阪に集中していることがわかる。次に、大阪湾で500m高度(以下、500m)と700hPaの風向別に調査した結果、500mで南から西南西、700hPaでは南南西から西の場合に最も大雨の発生頻度が高かった(第16図)。このことから、北大阪の大雨は500mで南から西南西風(180～240度)、700hPaで南南西から西風(210～270度)で、かつ500mから鉛直方向に700hPaにかけて時計回りに風向が変化する暖気移流場で発生していることが示唆される。また、六甲山から京都南部にかけての西南西から東北東の山地に沿った走向で大雨の発生頻度が高くなっており、大雨の発生頻度の高い700hPaの風向とほぼ同じであることから、周辺の地形も北大阪の大雨の要因の一つと考えられる。

本調査では、500mの風向が南から西南西風かつ、700hPaの風向が南南西から西風を満たす事例を「南西風場」と定義する。

4.4 大雨と単独気象要素との対応

第1表でグループ分けした気象要素と雨量との関係について調査した(第17図)。雨量は $R3 \geq 70\text{mm}$ 、 $R3 < 70\text{mm}$ (以下、非発生)に分類、さらに $R3 \geq 70\text{mm}$ については、南西風場のみの場合と風向で層別化しない場合のそれぞれを調べた。

水蒸気量グループでは、500mEPT・FLWV、TPWのすべての要素で南西風場大雨事例の第一四分位数は非発生事例の第三四分位数より大きく、明瞭な違いが見られる。さらに、大雨事例では500～700hPaのT-TDが 5°C 以下となっており、中層も湿潤化している。ただし、500hPaでは事例によっては乾燥空気の流入がみられるものもあったことから、乾燥空気の流入により大雨となる可能性も否定できない。

持ち上げシステムでは、DLFCは2000mと高い状態でも発生しているが、南西風場大雨事例の第三四分位数は非発生事例の第一四分位数と同じで平均値は1000m以下となっている。ELは高いほど大雨と対応が良いが、6km程度でも大雨となっており、ELが低くても降水エコーが停滞することで大雨となる場合があることが考えられる。CONVは大雨事例と非発生事例に明瞭な違いが見られない。

安定度では、大雨事例の500Tは $-4 \sim -5^{\circ}\text{C}$ に集中しているが、非発生事例との差は小さい。着目するのはKIで、大雨との対応が非常に良い。SEPT500hPa-EPT500mが負である場合も大雨との対応が良い。前述の500～700hPaの湿数と大雨との関係、及びKIは700hPaの湿りを考慮した指数であることから、成層不安定かつ湿潤層が厚いことが大雨発生の重要な要因と言える。

持続システムとしては、南西風場の大雨事例は700FFが10～18m/s、500mFFが8～14m/sに集中しており、700FF、

500mFF とともに、南西風場の大雨、大雨、非発生の順に強い。VSH の大きさは両事例で違いが見られなかった。そこで、非発生事例を「 $R3 < 30\text{mm}$ 」と「 $30 \leq R3 < 70\text{mm}$ 」、大雨事例を「南西風場」と「それ以外」、さらに「南西風場」を「線状降水帯が形成された事例」と「線状降水帯が形成されなかった事例」に分類し、VSH の分布を調査した。地点は今まで「海上」を利用していたが、線状降水帯の始点である「六甲山」と線状降水帯が形成・維持される「北摂山系」の地点で行った。その結果、線状化し大雨となった事例は、「六甲山」ではVSH の向きが西～北向き(第 18 図)に、「北摂山系」では西北西～西南西向き(図略)に分布していた。大きさはどちらも 4～16m/s に分布しており、大きすぎても線状化せず、適度な鉛直シアーが必要であることがわかった。また、「六甲山」のVSH の向きが北西ということは、上空に向かって時計回りに回転しており、下層の南成分が大きく西成分が小さい、つまり暖気移流でかつ下層の南成分が強い場であることを意味する。

4.5 大雨と複数要素の組み合わせとの対応

第 4.4 項で大雨との対応が良かった要素を組み合わせで調査した(第 19 図)。ここでは、南西風場で線状降水帯が形成され大雨となる事例(以下、南西風場線状化大雨)について考察する。

- ①EPT-FLWV では、相当温位が 352K 以上であれば、水蒸気フラックス量が小さくても線状化するが、相当温位が 352K 未満と低ければ、水蒸気フラックス量は $159\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上なければ線状化しない。
- ②FLWV-SEPT500hPa-EPT500m では、水蒸気フラックス量が $159\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上であれば、安定度に関係なく線状化するが、水蒸気フラックス量が小さい場合は、SEPT500hPa-EPT500m が -7K 以下と安定度が悪くなければ線状化しない。
- ③DLFC-KI では、KI が 35 未満でも DLFC が 969m 以下であれば線状化する。
- ④TPW-KI では、TPW が 60mm 以上と水蒸気量が多く、KI が 34 以上と安定度が悪ければ線状化する。この組み合わせが最も南西風場線状化大雨との対応が良い。
- ⑤DLFC-700T-TD では、700T-TD が 1.4°C 以下と湿っていれば、DLFC が 1000m 以上でも線状化する。しかし、DLFC が 2000m 以上では大雨となっても線状化はしない。
- ⑥VSH-KI では、KI が 35 あれば、VSH の大きさが小さくても線状化する。

4.6 統計解析の考察とまとめ

第 17 図から南西風場大雨と対応の良い気象要素を抽出し、第 19 図から南西風場線状化大雨となった事例の各気象要素の最も低い値を閾値とした(第 2 表)。ただし、除外した方が好ましい事例については第 3 表にまとめた。

閾値について、南西風場線状化大雨事例の全事例についての確認を行った(例として、事例 1, 2, 3 の結果を第 4 表に示す)。その結果、ほとんどの事例で第 2 表の条件を満たしており、この閾値は大阪府で線状化した大雨の環境場を示す条件として良好と言える。なお、事例 2 の後半の線状化では FLWV が小さく閾値を下回るが、事例 1 の前半の線状化の大雨により環境場はすでに水蒸気量が多く(TPW, 700T-TD 参照)、水蒸気の移流が小さくても持ち上げ機構が働けば、線状化が可能であったと推測できる。

第 2 表では要素が多すぎ、また各グループで複数の要素が重なっているため、各グループから判定に必要な要素を絞り込むことを考える。まず、第 3 項の事例解析で得られた結果と合致することを条件とした。「水蒸気量」では、EPT と TPW は 6 月と 8 月では平均値が 10～15 違うので年差をとる必要があり困難なため、線状降水帯の衰弱にも寄与している FLWV, 700T-TD を採用した。「持ち上げシステム」は DLFC, 「安定度」は大雨との対応が良い KI を採用した。「維持機構」は「南西風場」の条件である 700hPa と 500m の風向、かつ VSH とした。

5. まとめ

過去知見および事例解析と統計解析により抽出した「下層南西風場で大阪府の大雨発生の必要条件と十分条件」を第5表に示す。また、必要条件を多画面ツールの独自要素(第20図)に設定し、大雨監視ツールを作成した(第21図)。

参考文献

- 今野暁, 松下浩則, 本田英司, 土井ひかる, 小山内大輔, 2013: 大阪府における大雨発生条件の検討(2012年8月13日~14日に発生した近畿地方中部の大雨について)。平成25年度大阪管区気象研究会誌(近畿地区)。
- 小山芳太, 飯田早苗, 野村武司, 佐伯亮介, 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。平成24年度大阪管区気象研究会誌(大阪府)。
- 松本覚, 向井直人, 土井ひかる, 榎原資嗣, 2012: 2012年8月14日の線状降水帯について。平成24年度大阪管区気象研究会誌(近畿地区)。
- 三宅里香, 松下浩則, 山本陽子, 今野暁, 2014: 2014年8月16日に発生した北大阪の大雨事例解析。平成26年度大阪管区気象研究会誌(近畿地区)。
- 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**, 1-74。
- 山本陽子, 松下浩則, 三宅里香, 今野暁, 2014: 大阪府における大雨が発生する環境場の統計解析。平成26年度大阪管区気象研究会誌(大阪府)。

第1表: 気象要素

水蒸気量	①相当温位 (EPT)、②水蒸気フラックス (FLWV)、③可降水量 (TPW)
	④500hPa湿数 (500T-TD)、⑤600hPa湿数 (600T-TD)、 ⑥700hPa湿数 (700T-TD) ※①~②は500m高度
	⑦自由対流高度までの距離 (DLFC)、⑧平衡高度 (EL)、 ⑨収束 (CONV) ※⑦~⑨は500m高度
安定度	⑩500hPa気温 (500T)、⑪K指数 (KI)、 ⑫500hPa飽和相当温位-500m相当温位 (SEPT500h-EPT500m)
	⑬700hPa風向風速 (700DD、700FF)、⑭500m高度風向風速 (500mDD、500mFF) ⑮700hPa-500m高度鉛直シアー (VSH)

第2表: 南西風場線状化大雨時の各気象要素の閾値

黄色のハッチは各グループから絞り込まれた判定に必要な要素。

グループ	気象要素	南西風場線状化大雨発生時の閾値
水蒸気量	500m高度相当温位	343K以上
水蒸気量	500m高度 水蒸気フラックス	150g/m ² /s以上
水蒸気量	可降水量	62ミリ以上
水蒸気量	700hPa湿数 (湿度)	3°C以下 (80%以上)
持ち上げシステム	500m高度 自由対流高度	1000m以下
安定度	K指数	34以上
安定度	500hPa飽和相当温位と 500m高度相当温位の差	0K以下
維持機構	500m高度の風向	180~240°
維持機構	700hPaの風向	210~270°
維持機構	700hPa-500m高度の 鉛直シアー (六甲山付近)	向き 270~360° 大きさ 4~16m/s

第3表: 閾値作成のため除外した事例

要素	範囲外事例	値	除外理由
EPT	2010/7/14 15時	336	線状化が一旦終了し、まだ次の線状化が始まっていない。
FLWV	2012/8/13 21時	90	2事例とも「4.考察とまとめ」で説明する。
	2012/8/14 00時	107	
TPW	2012/7/15 06時	57	線状化が終了しつつある。
700T-TD	2010/7/14 18時	5.1	一度線状化した後で、再度FLWVが強まっているため、中層は湿ってはいなかったが線状化した。
	2012/7/15 03時	3.4	「海上」では3以上だが、六甲周辺から北大阪にかけては3以下なので、環境場としては満たすこととする。
	2012/7/15 06時	6.7	TPWと同様。
DLFC	2009/6/30 00時	1119	4事例とも「海上」では1000m以上だが、六甲周辺から大阪にかけて1000m以下の領域が広がっているため、環境場としては満たすこととする。
	2010/7/13 18時	1881	
	2010/7/13 21時	1574	
	2014/8/16 09時	1213	
KI	2012/7/15 06時	31.2	TPWと同様。
500hPaSETP-500mEPT	2010/7/14 15時	6.3	EPTと同様。

第4表：南西風場での線状化大雨発生事例の検証結果(上表：2012/8/13~14 事例，下表：2014/8/16 事例)

薄黄色・オレンジ色のハッチは各要素の閾値を超えたもの、青色ハッチは各グループから絞り込まれた大雨発生の判定に必要な要素、

線状化の項目の「○」は、実際に線状化が確認されたもの。

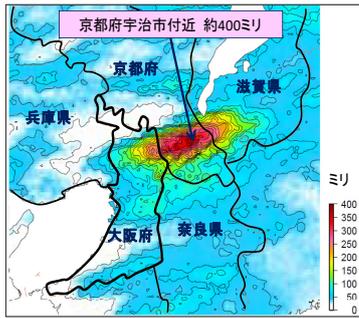
2012		大阪府 最大解 析雨量 R3(mm)	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	六甲	六甲
Date(JST)	線状 化	TPW (mm)	EPT (K)	DLFC (m)	FLWV ($gm^{-2}s^{-1}$)	500hSEPT- 500mEPT (K)	700RH (%)	700T-TD (K)	600T-TD (K)	500T-TD (K)	KI	VSH-FF (m/s)	VSH-DD ($^{\circ}$)	
8/12 21:00		19.4	64.1	353	1510	186	-6.4	90	1.6	1.6	3.8	38.4	5.6	316
8/13 0:00		0.4	63.6	357	734	201	-11.2	84	2.7	2.4	2.8	35.9	4.2	281
8/13 3:00	○	8.4	64.2	357	812	232	-12.7	83	2.7	1.3	3.3	37.6	8.2	287
8/13 6:00	○	87	66.9	356	731	204	-11.5	95	0.7	1.2	0.8	39.2	9.0	296
8/13 9:00	○	93	66.1	358	579	189	-14.9	82	2.9	4.0	2.4	38.8	4.4	298
8/13 12:00		56	62.0	358	667	192	-13.7	64	6.7	3.4	6.8	34.0	4.9	281
8/13 15:00		13.4	60.7	355	1036	169	-10.4	69	5.5	5.8	4.9	35.1	8.1	304
8/13 18:00		8.4	67.8	355	935	189	-9.1	88	1.9	1.4	1.3	38.7	7.4	310
8/13 21:00	○	45	68.5	355	888	90	-11.0	88	2.0	0.1	0.0	39.0	7.8	259
8/14 0:00	○	117	63.8	353	880	107	-7.3	99	0.1	0.1	1.8	36.4	6.9	279
8/14 3:00	○	120	65.5	352	817	57	-6.9	92	1.1	0.0	0.0	36.4	7.3	265
8/14 6:00	○	170	66.8	353	416	125	-8.1	82	2.8	1.4	0.5	36.4	8.7	174
8/14 9:00		163	64.2	351	776	92	-7.6	90	1.5	0.4	0.5	37.5	6.8	269
8/14 12:00		38.4	66.4	355	316	96	-10.6	83	2.7	1.1	0.5	36.7	6.8	260
8/14 15:00		35.4	65.8	355	269	199	-10.5	82	2.9	1.1	1.4	36.4	5.6	297

2014			海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	六甲	六甲
Date(JST)	線状 化	最大解 析雨量 R3(mm)	TPW (mm)	EPT (K)	DLFC (m)	FLWV ($gm^{-2}s^{-1}$)	500hSEPT- 500mEPT (K)	700RH (%)	700T-TD (K)	600T-TD (K)	500T-TD (K)	KI	VSH-FF (m/s)	VSH-DD ($^{\circ}$)
8/16 3:00		30	65.5	354	1367	320	-4.3	98	0.3	1.2	6.2	37.8	4.9	336
8/16 6:00		14	67.4	352	1684	217	-3.4	96	0.5	1.4	0.4	37.6	3.2	299
8/16 9:00		5.4	68.4	353	1213	188	-7.1	97	0.4	0.9	1.7	39.2	5.8	277
8/16 12:00	○	96	71.2	358	704	336	-10.5	91	1.5	0.1	3.0	38.7	6.1	326
8/16 15:00		137	71.5	358	801	288	-8.2	95	0.6	2.6	4.2	38.5	7.9	17
8/16 18:00		86	67.3	358	654	247	-9.7	71	5.1	5.3	3.9	34.7	4.3	281
8/16 21:00		66	65.0	359	528	246	-11.3	91	1.4	2.2	17.0	37.7	4.9	265
8/17 0:00		22.4	67.1	359	178	241	-12.3	95	0.8	3.3	5.3	38.6	6.8	270

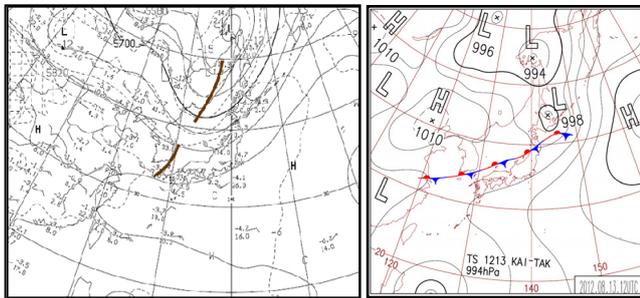
第5表：下層南西風場での大阪府の大雨発生の必要条件と十分条件

必要条件は統計解析から、十分条件は過去知見および事例1, 2, 3の解析結果から抽出されたもの。

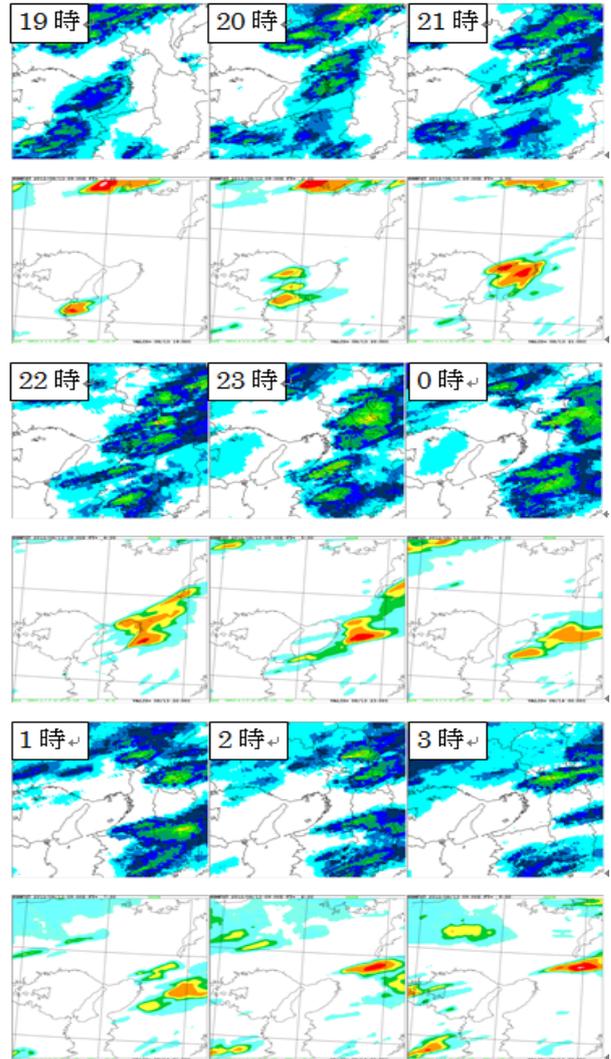
必要条件		十分条件
500m高度 水蒸気フラックス	150g/m ² /s以上	①上層発散場 ②500hPa~700hPaトラフの通過 ③下層に加え中層の水蒸気の持 続的輸送 ④大阪平野の下層収束場と冷気 層の形成 ⑤六甲山地から北摂山地の地形 による強制上昇
700hPa湿度 (湿度)	3°C以下 (80%以上)	
500m高度 自由対流高度	1000m以下	
K指数	34以上	
500m高度の風向	180~240°	
700hPaの風向	210~270°	
700hPa-500m高 度の鉛直シア- (六甲山付近)	向き 265~360° 大きさ 4~16m/s	



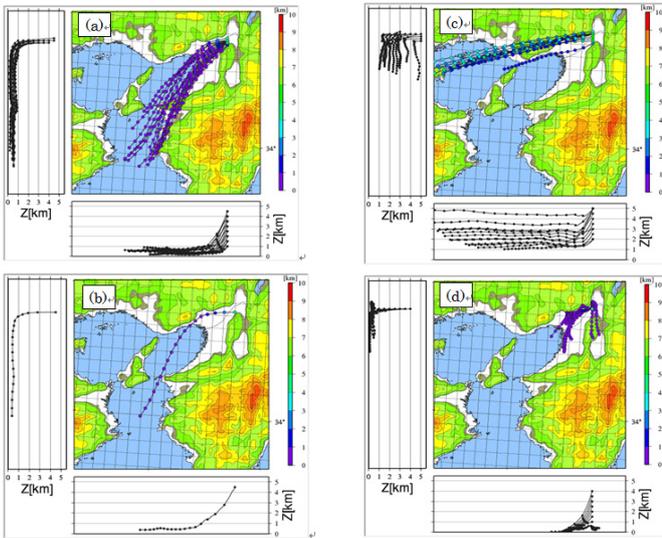
第1図: 解析雨量による8月13日12時~14日12時の積算降水量.



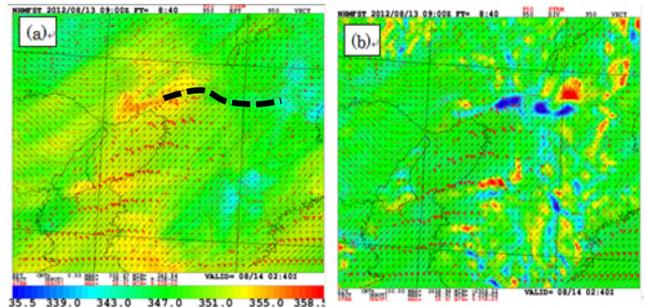
第2図: 8月13日21時の総観場。(左)500hPa天気図, 実線は高度, 点線は気温, 茶実線はトラフを示す。(右)地上天気図.



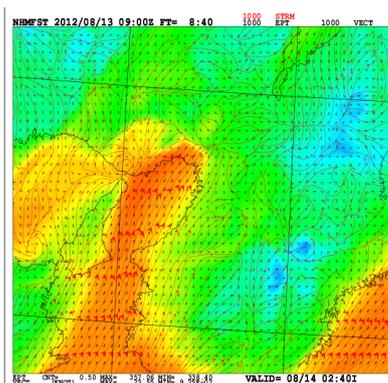
第3図: 2012年8月13日19時~14日3時の前1時間雨量. 上段: 解析雨量, 下段: 2kmモデル.



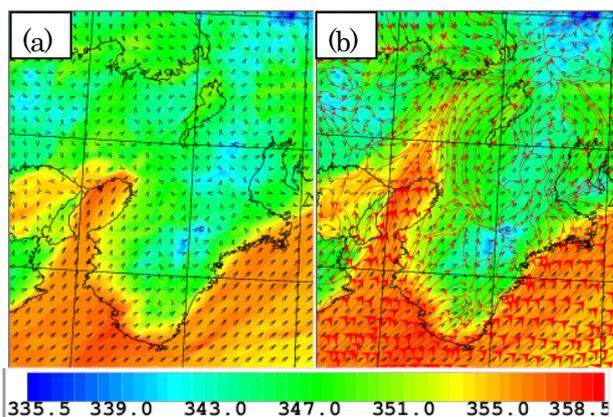
第4図: コア気塊の後方流跡線解析(14日3時→14日0時, マークは10分毎). (a)紀伊水道-直接経路, (b)紀伊水道-六甲経路, (c)瀬戸内経路, (d)近傍地表付近由来.



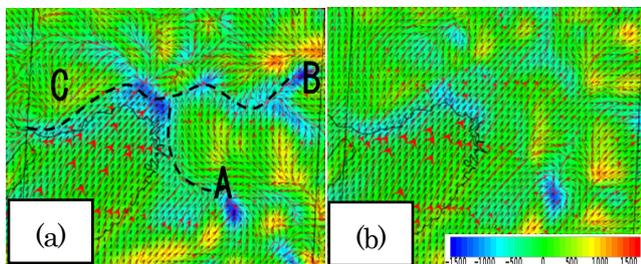
第5図: 14日2時40分の(a)950hPa面の相当温位, 風向風速, 実線は流線, 黒点線は収束線を示す, (b)950hPa面の収束・発散(青色が収束域).



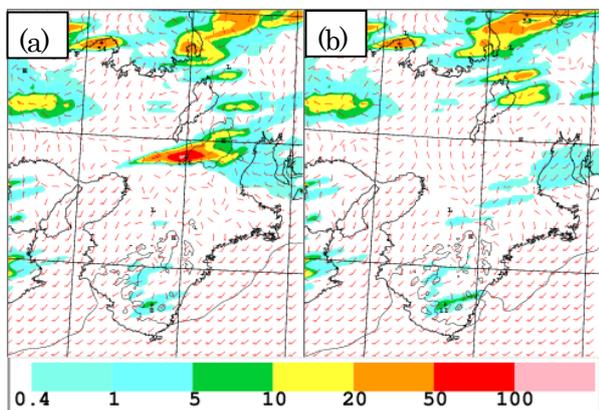
第6図: 14日2時40分の1000hPa面の相当温位, 風向風速, 実線は流線.



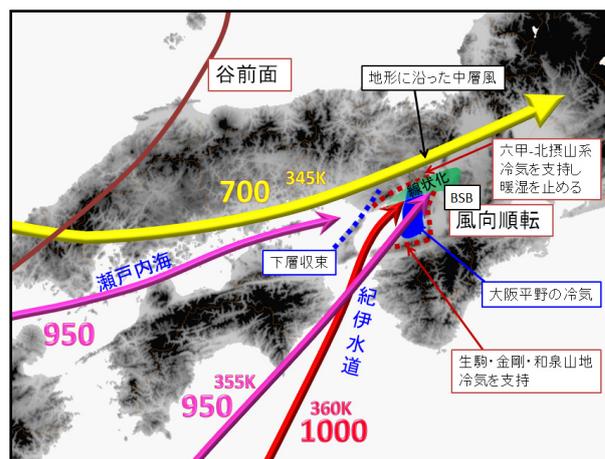
第9図: 14日3時の1000hPa面の相当温位, 風向風速. (a)標準実験(CNTL), (b)地形改変実験(TOPO).



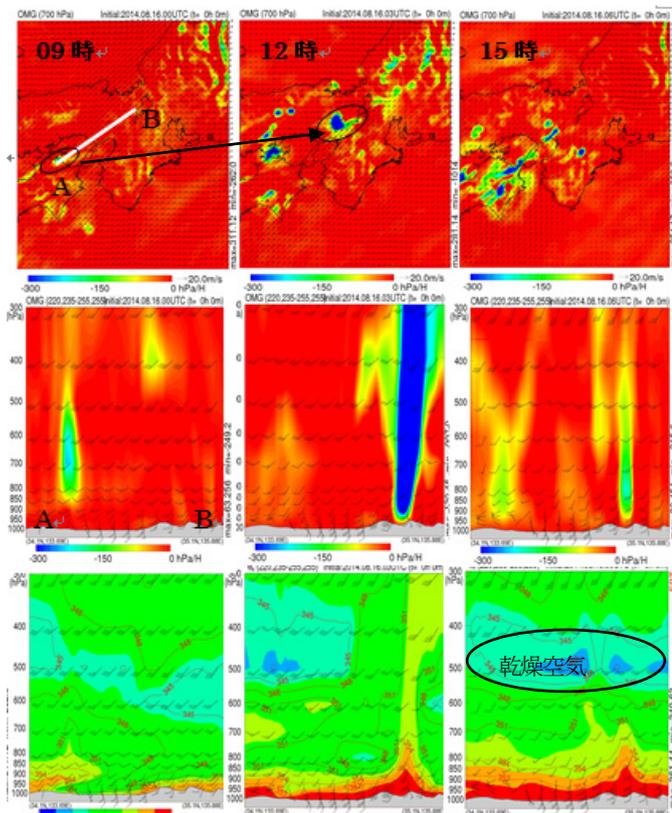
第7図: 蒸発の有無による1000hPa面の収束・発散の違い(14日2時). (a)蒸発あり, (b)蒸発なし.



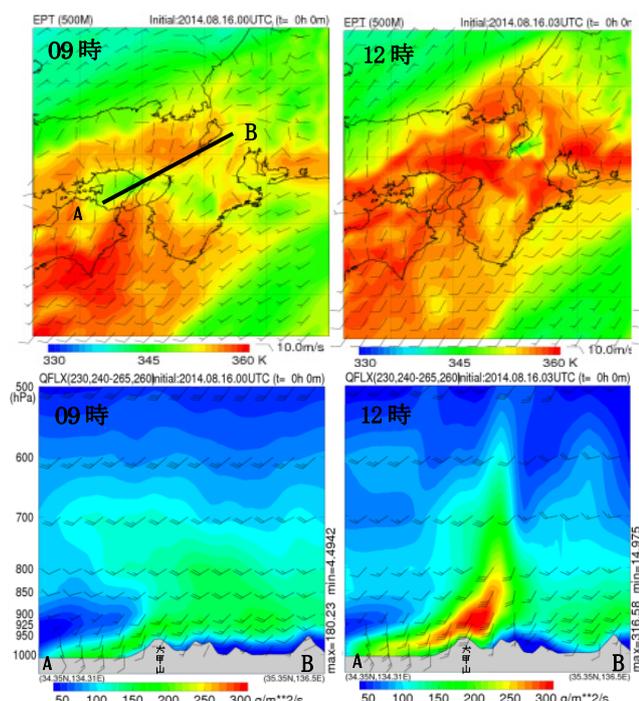
第8図: 14日3時の前1時間降水量. (a)標準実験(CNTL), (b)地形改変実験(TOPO).



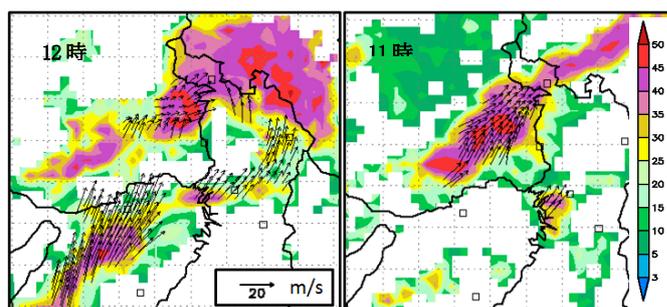
第10図: 8月13日から14日の大雨事例の概念図.



第11図: 700hPa 鉛直流(上段)とそのAB断面図(中段), 相当温位断面図(下段). 左から順に2014年8月16日09時, 12時, 15時. 上段の黒囲み実線は上昇流域, 黒矢印実線は移動, 白実線は断面図の領域を示す. 下段の黒囲み線は乾燥空気を示す.



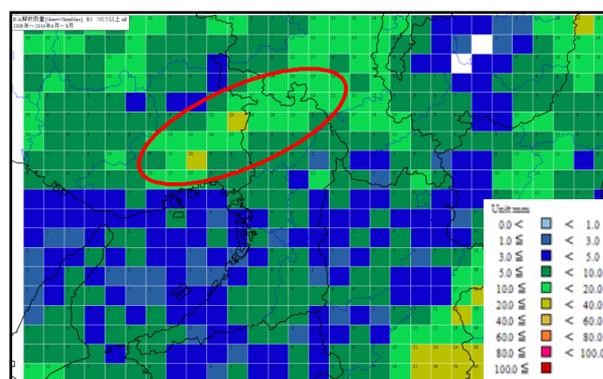
第12図: (上)500m高度面相当温位と(下)同時刻の水蒸気フラックス量断面図(上段左図中の黒実線A-Bの断面). 2014年8月16日09時(左), 12時(右).



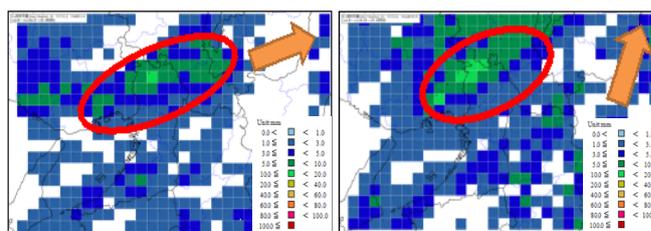
第13図: 500m高度(左)と3km高度(右)のレーダーエコー反射強度と風向風速(2014年8月16日). 塗りつぶしはレーダーエコー反射強度(dBZ), 実線矢印(→)は風向風速を示す.



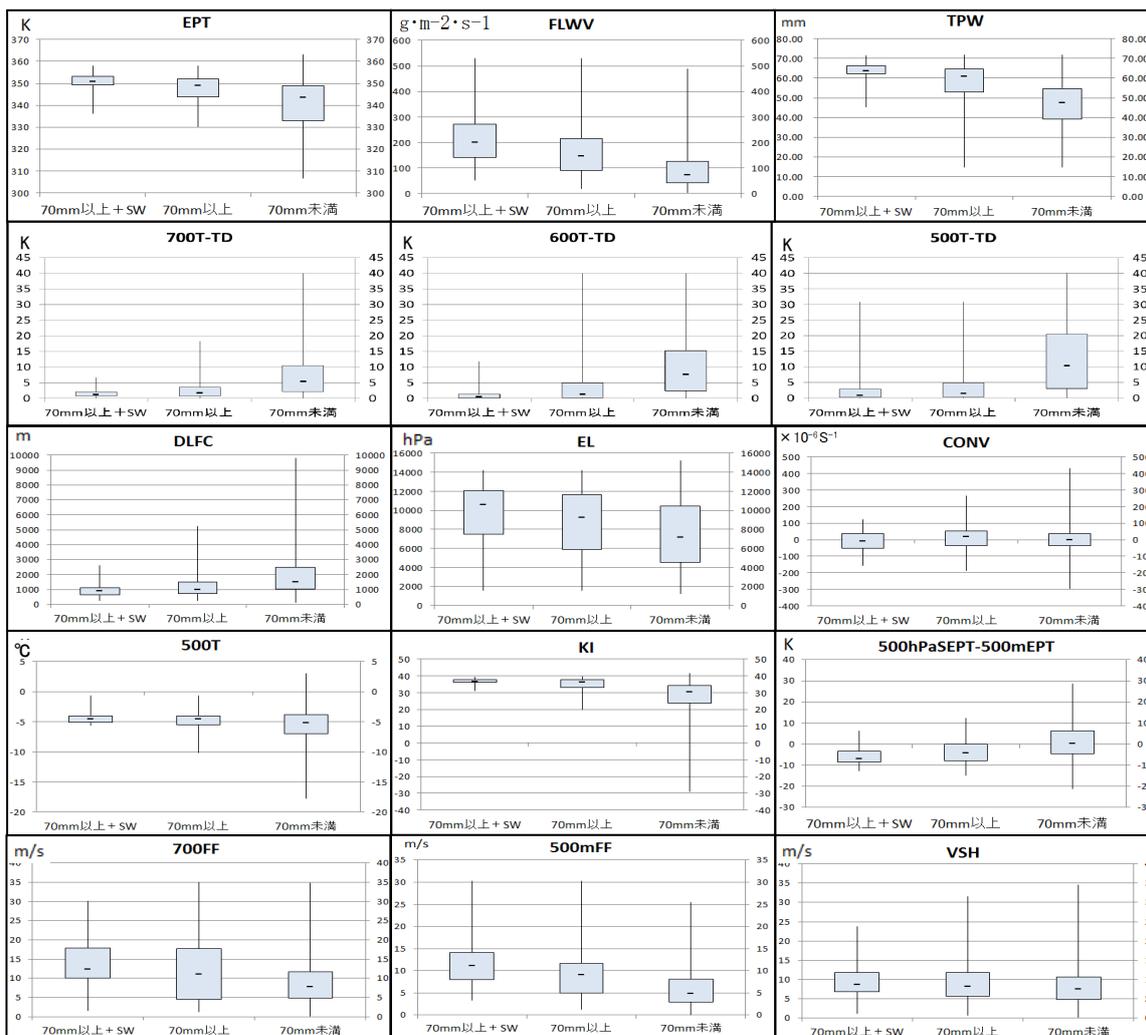
第14図: 気象庁メソ解析のデータ取得地点.



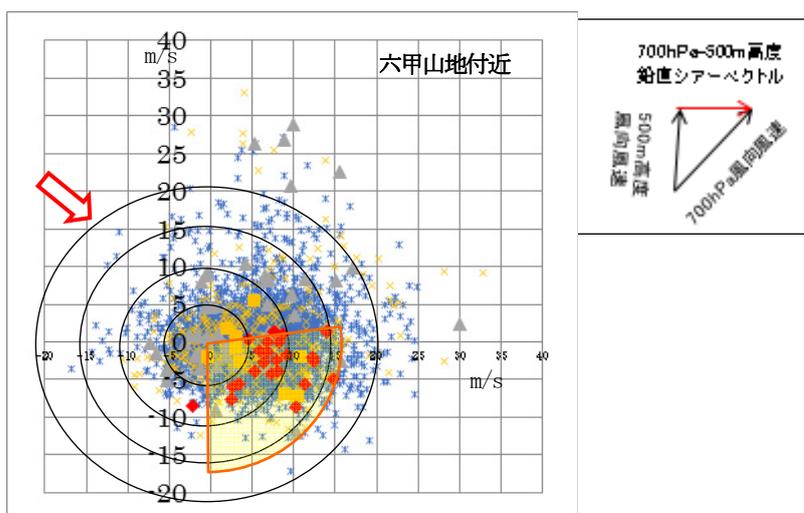
第15図: 大阪府のR3 ≥ 70mmの出現回数の頻度分布図. 赤○は頻度の多い領域を示す.



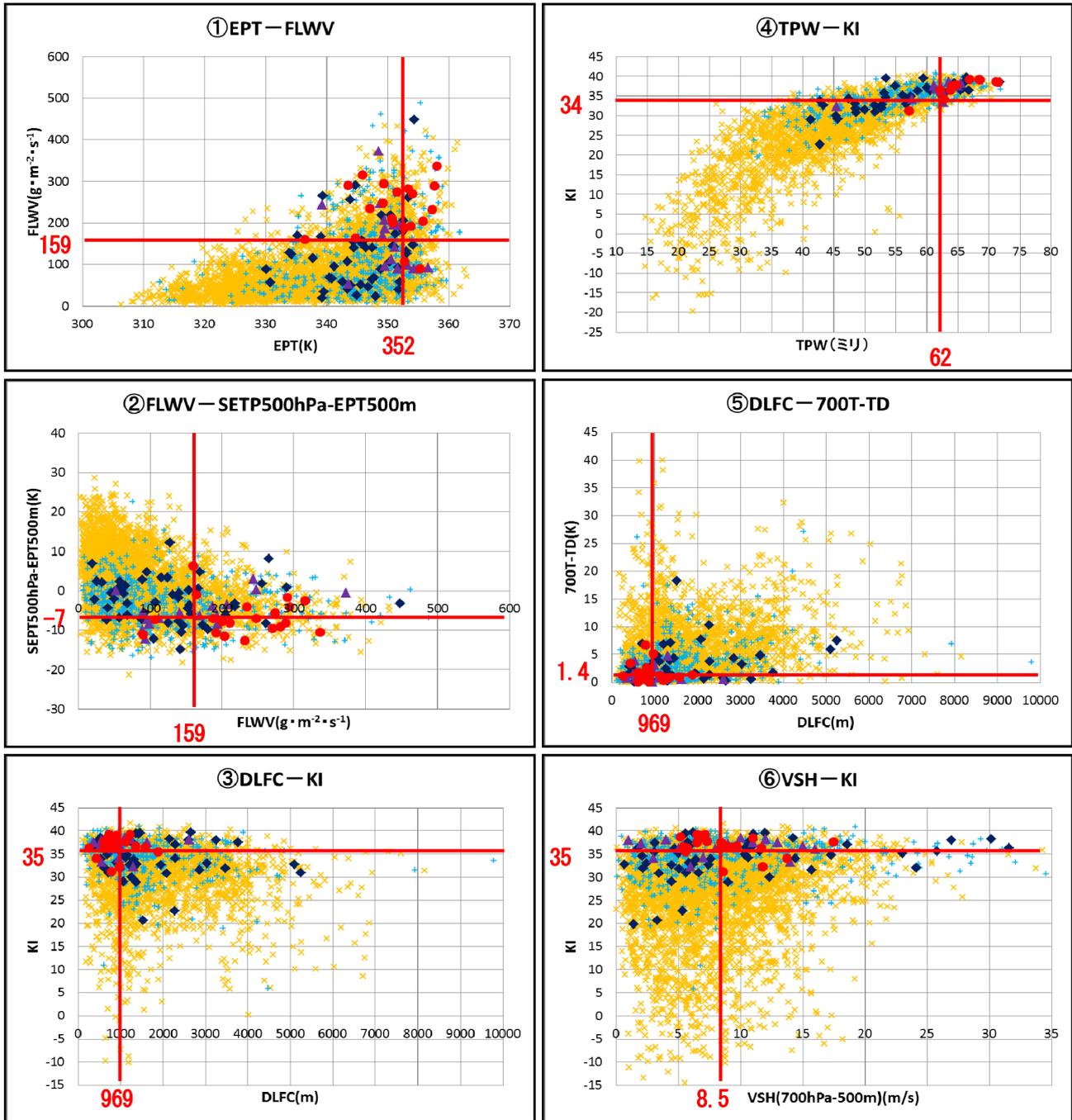
第16図: 大阪府のR3 ≥ 70mmの出現回数の頻度分布図. (左)700hPaの風向が南南西から西の場合, (右)500mの風向が南から西南西の場合. 赤○は頻度の多い領域, 矢印は風向を示す.



第17図: グループ毎の気象要素の箱ひげ図。(上段)水蒸気量, (中上段)持ち上げシステム, (中下段)安定度, (下段)持続システムの各グループの気象要素。図中, “70mm 以上+SW” (左)は南西風場で $R3 \geq 70\text{mm}$, “70mm 以上” (中)は風向による層別化なしで $R3 \geq 70\text{mm}$, “70mm 未満” (右)は風向による層別化なしで $R3 < 70\text{mm}$ 。



第18図: 700hPa-500m 高度の鉛直シアベクトル。縦軸は南北成分風速, 横軸は東西成分風速。図中, 赤実線で囲んだ黄色塗りつぶしは南西風場で線状化大雨となる事例の鉛直シアベクトルの向きの範囲。右上図は鉛直シアベクトルの求め方の例。

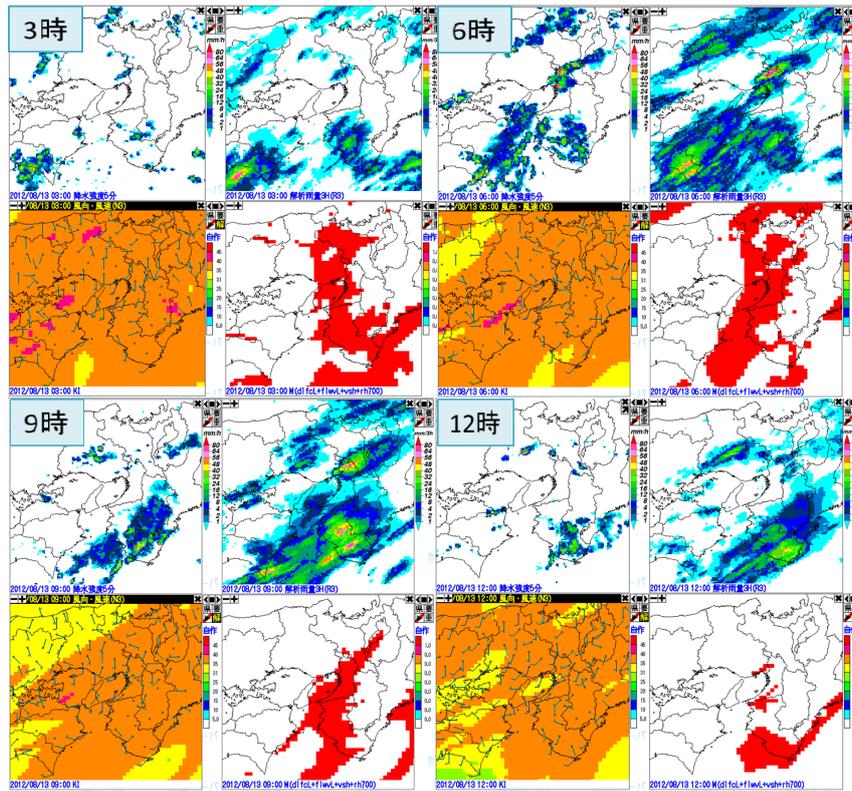


× 30ミリ未満 + 30ミリ以上70ミリ未満 ◆ 70ミリ以上 ▲ 70ミリ以上+SW ● 70ミリ以上+SW+線状化

第19図: 組み合わせグラフ. 図中の赤実線と数字は, 南西風場での線状化大雨発生の各気象要素の閾値を示す.

m500m.dlfc<1000&&m500m.dlfc>1&&m500m.flwv>150&&m500m.rh(700hPa)>80&&m500m.u(700hPa)-m500m.u>0&&m500m.v(700hPa)-m500m.v<0&&

第 20 図: 多画面ツール独自要素の設定.



第 21 図: 多画面ツールを利用した南西風場での線状化大雨の監視画面(2012年8月13日事例). 3時(上段左: 発生期), 6時(上段右: 発達期), 9時(下段左: 衰弱期), 12時(下段右: 解消). 4画面図中, (左上)降水強度, (右上)3時間解析雨量, (左下)KI, (右下)判定結果を示す. 大雨判定は, 判定結果(右下)と $KI \geq 34$ 領域(左下)の総合判定とする.