

第2章 実例に基づいた予報作業の例

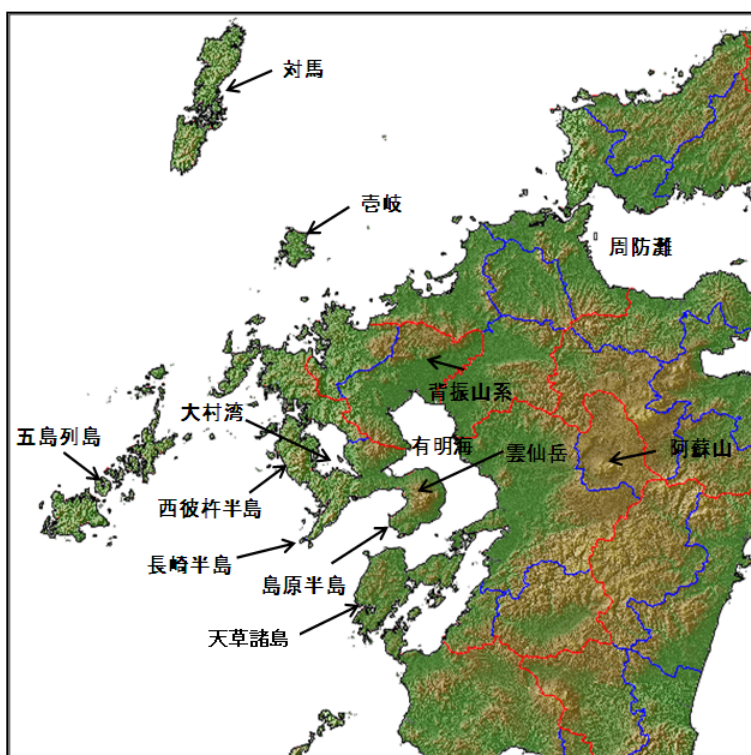
2.1 大雨の事例（平成24年7月九州北部豪雨）

2.1.1 はじめに*

2012年7月11～14日、九州北部（第2.1.1図）では梅雨末期の大雨による土砂崩れ、河川のはん濫などにより死者・行方不明者が32名となる甚大な災害が発生した（2012年7月27日消防庁調べ）。気象庁はこの記録的な大雨を「平成24年7月九州北部豪雨」と命名した。本事例において、現地気象官署は前日から府県気象情報、防災メールなどを出し、土砂災害、浸水害、河川の増水やはん濫への警戒を呼びかけた。また、大雨期間中、各気象官署は災害発生の危機感を地元自治体に電話で直接伝えるなどし、防災対応の支援を行った。

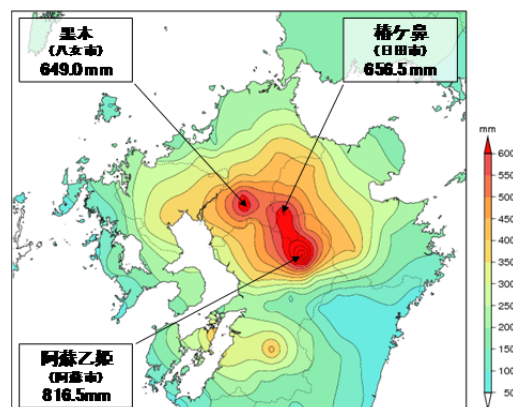
11～14日の4日間の総降水量（第2.1.2図）については、福岡県、熊本県、大分県で600mmを超えたアメダス観測所が4地点あり、うち、7月の月平年値の150%以上となった観測所が2地点あった（福岡管区気象台（2012））。また、大雨期間中の主な降水のピークは「12日未明～朝」と「14日未明～昼前」の2回であった。本節では、前半の大雨が始まる前の段階までの熊本地方気象台における標準的な予報作業の過程を、主に経験の浅い予報作業者を対象とし、説明する。

近年、数値予報資料やガイダンス資料の精度は向上しているが、顕著現象発生時に大雨警報を常に適切に運用出来るほど十分な予測精度には達していない。先ず実況観測資料から現象の推移を把握・解釈し、その後の予報に活かすことで、量的予報作業におけるガイダンス資料等の補正が可能となり、適切な大雨警報の運用に繋がる。次項では、これらの作業の具体的な進め方や思考過程、様々な判断の例を示す。今後の予報作業に応用していただきたい。



第2.1.1図 九州北部付近の地形図

（地形図は METI and NASA の提供による。）



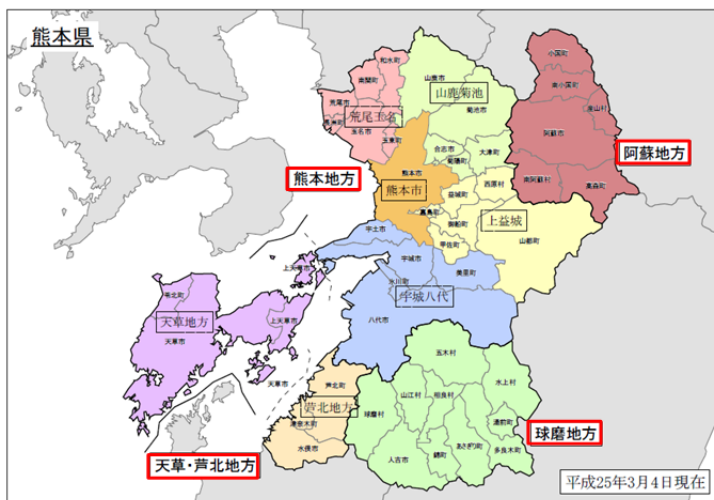
第2.1.2図 2012年7月11～14日の九州北部付近における総降水量分布図

*黒良 龍太、木下 仁（気象庁予報部予報課）

2. 1. 2 2012年7月12日の熊本県阿蘇地方を中心とした大雨*

2. 1. 2. 1 熊本県の細分と地形

熊本県の細分区域を第2.1.3図に示す。県内市町村の大雨警報（浸水害）の1時間雨量基準は60～70mmである（平坦地以外では80～90mmの所がある）。地形的に見て「コ」の字型に西方に開け、南西海上から暖湿気が流入しやすい。また、県の北側から東側にかけて九州山地が連なっており、暖湿気が山地の斜面に当たって上昇することにより、大雨がもたらされることが多い。なお、阿蘇地方は阿蘇外輪山に囲まれており、標高が400mを越す山地となっている。



第2.1.3図 熊本県の市町村

□：一次細分区域名、□：市町村等をまとめた地域名。

2. 1. 2. 2 7月11日日勤時のシナリオについて

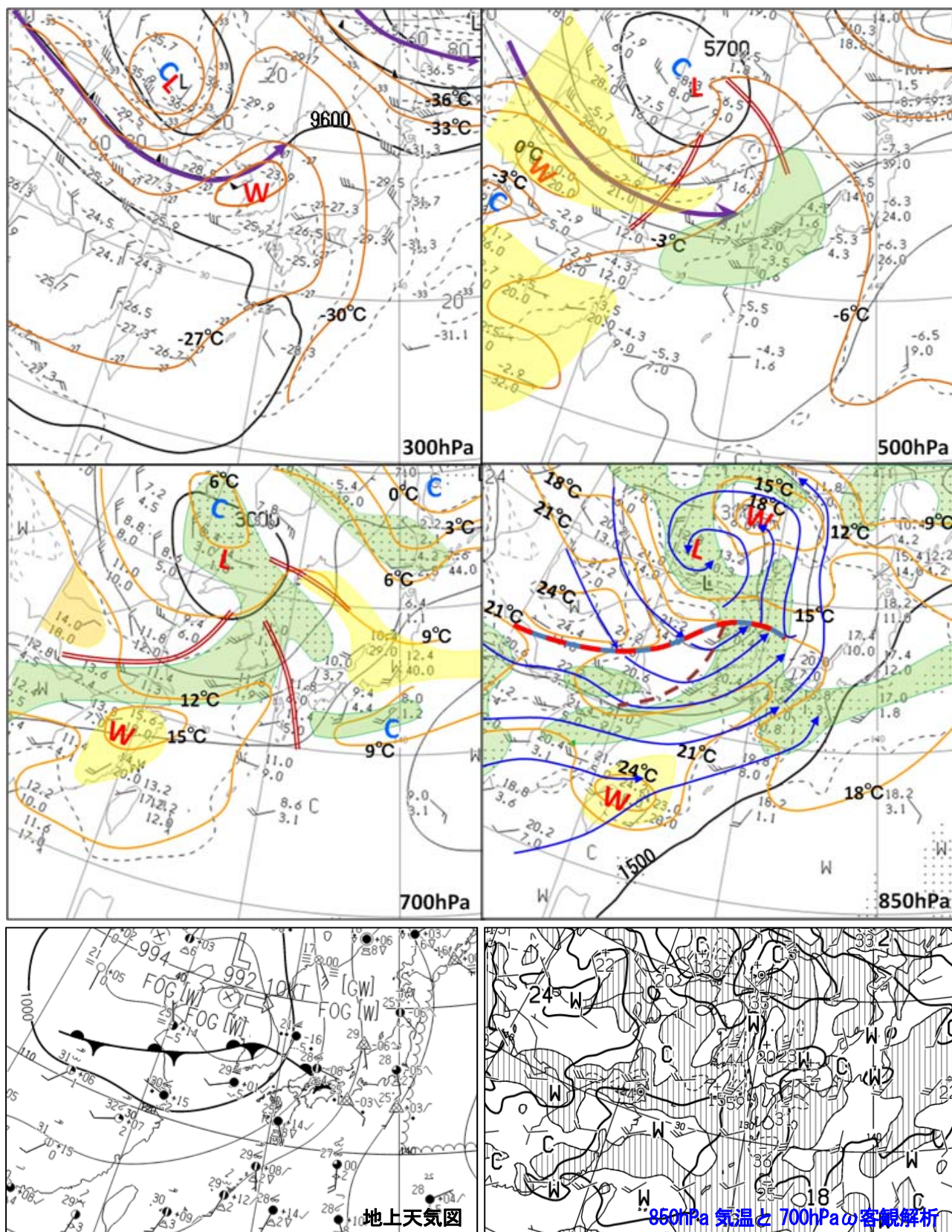
熊本県における11日18時～12日18時までの降水予測を対象としたシナリオ作成と1時間雨量の量的予報の作業について以下に示す。

(1) シナリオ作成における資料の検討作業

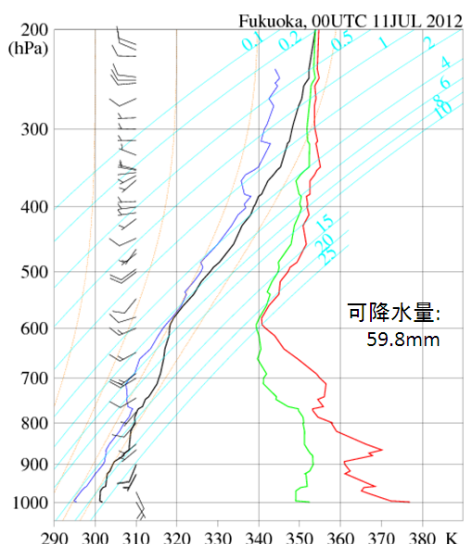
① 実況資料の確認

10日21時と11日9時の高層・地上天気図などから、総観場のじょう乱の状況や推移を確認する(第2.1.4図参照)。300hPa面ではチベット高気圧が大陸から東シナ海付近へ張り出している。チベット高気圧の東西走向のリッジ軸は次第に南にシフトし、11日09時の九州付近はチベット高気圧の北東象限に位置し、発散が卓越しやすい場となっている。この上層発散により中層では上昇流が顕在化しやすい状況と言える。中国東北区には寒冷渦があって南東へ進んでおり、その南側では高度約9600mに沿った強風軸が明瞭である。500hPa面における寒冷渦は中国東北区付近にほぼ停滞し、その周囲を回るトラフが日本海と黄海付近に進んでおり、図に表現していないがスケールの小さいトラフが九州付近を通過中である。高度5760～5820m付近の強風軸が黄海付近で明瞭化しており、この上流部に乾燥域があって朝鮮半島の一部に流れこみ始めている。トラフ前面の東シナ海から九州付近にかけては概ね暖気移流の場である。700hPa面では寒冷渦の周囲を回る3つのトラフを解析でき、ボツ海から華中へのびるトラフの前面に湿潤域があって、梅雨前線の雲域に対応している。850hPa面の前線の位置は、等相当温位線の集中帯や風を参考にする、相当温位約342K付近に解析できる。また、朝鮮半島西岸からチェジュ島の西へのびる下層シアアが存在し、その前面では30kt前後の南西風により東シナ海付近では下層暖湿気の流れ込みが明瞭となっている。地上では梅雨前線が中国・四国地方へのび、九州は暖域内に入っており、次第に気圧の傾きが急になってきている。以上をまとめると、基本的に寒冷渦をまわる複数のトラフが梅雨前線の活動や動向に影響を与える場となっており、地上の梅雨前線の位置は850hPaの等相当温位集中帯と対応は概ねよい。九州は暖域内にあたり、下層の相当温位はかなり高い。接近中の下層シアア前面では南西風による水蒸気フラックスが大きく、対流雲が発達しやすい場にある。さらに、500hPa面の乾燥域が下層シアアの西側から接近中で、この乾燥域の前面では対流雲の側面から乾いた空気が入り、蒸発により気温が低下するため、この高度より低い気層では不安定化が進むため、対流雲がさらに発達することが予想される。

*黒良 龍太、木下 仁（気象庁予報部予報課）横田 稔、田代倫裕、大櫛熊典（熊本地方气象台）

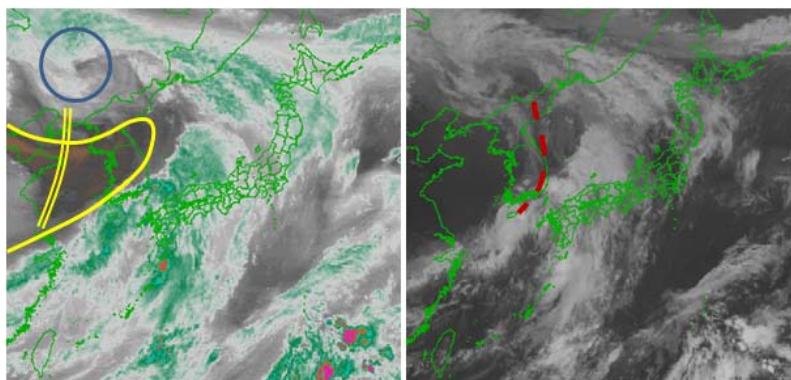


第 2.1.4 図 2012 年 7 月 11 日 9 時の 300、500、700、850hPa 面高層天気図と地上天気図、850hPa 気温・700hPa w の客観解析
 青実線：流線 (850hPa)、紫実線：強風軸 (300, 500hPa)、茶色二重線：トラフ (500, 700hPa)、茶色破線：下層シア (850hPa)、
 橙色実線：等温度線、緑色着色域：湿潤域 (湿数が 3 度以下)、黄色着色域：乾燥域 (露点温度差が 18 度以上)、
 青と赤の実線：前線の位置 (850hPa 面) を示す (九州付近とその西側以外では解析していない部分あり)。



第 2.1.5 図 福岡の温位エマグラム
(2012 年 7 月 11 日 9 時)

黒線：温位、青線：露点温度から求めた温位、緑線：相当温位、赤線：飽和相当温位、水色線：等飽和混合比線、
オレンジ線：飽和相当温位が一定となる線。



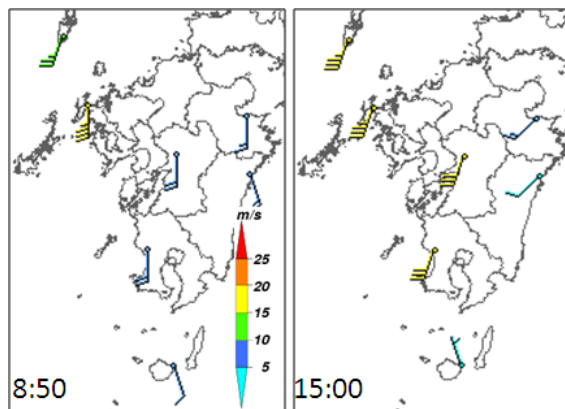
第 2.1.6 図 2012 年 7 月 11 日 15 時の水蒸気画像(左)と赤外画像(右)
黄色実線内：暗域、黄色二重線：トラフ、青丸：寒冷渦、茶色破線：下層シアー。

次に、11 日 9 時の福岡の高層実況を確認する。第 2.1.5 図に示す温位エマグラムでは、可降水量は約 60mm と大きく、下層の相当温位も 350K 程度と高いが、地上付近は南寄りの風で海上の湿った空気が流れ込みにくい風系となっている。下層や中層は乾燥しており、自由対流高度も高く、対流が発生しにくい状況である。この時点では、まだ短時間強雨が継続する状況とはなっていない

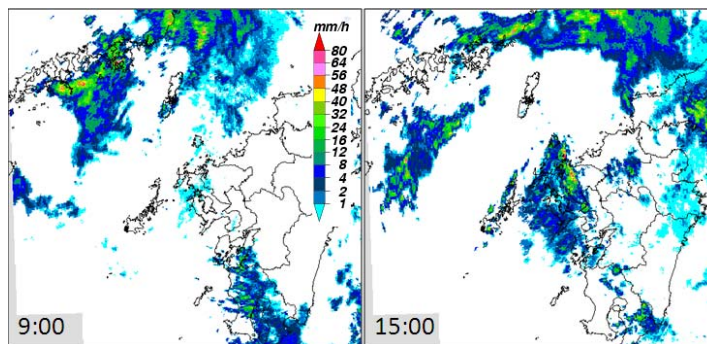
と判断する。

11 日 15 時までの衛星画像から、梅雨前線付近の雲域の状況を確認する(第 2.1.6 図参照)。水蒸気画像では中国東北区の寒冷渦が明瞭でゆっくり北上しており、その南側には暗域が存在し、15 時には大陸から朝鮮半島、一部は日本海に進入している。また、黄海付近に東進中のトラフを解析できる。赤外画像では、暗域の南から南東側に梅雨前線暖域内の雲域があって、華中から対馬海峡、日本海へのびている。下層シアー(同図中茶色破線)の前面では、対馬海峡から山陰沖に発達した対流雲域があるが、暗域(上・中層の乾燥域と対応)に覆われている領域では対流活動がみられない。一方、チェジュ島付近は暗域前面にあたり、組織化した対流雲域がみられる。

ウィンドプロファイラの観測による九州付近の下層風を第 2.1.7 図に示す。11 日朝、九州付近は南よりの風であったが、朝鮮半島付近を東進する下層シアーの接近により、次第に南南西風に変化しながら強まり、九州西岸では海上の湿った空気が流れ込みやすい場が変わってきている。雷を伴う降水域は、この風系の変化の影響を受けて、朝は九州南部中心であったが、昼頃から五島列島や九州西岸が中心となっている(第

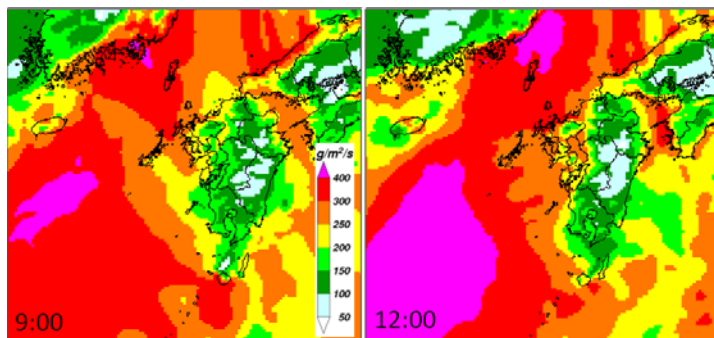


第 2.1.7 図 高度 690m の風(2012 年 7 月 11 日)
8 時 50 分と 15 時のウィンドプロファイラの観測。



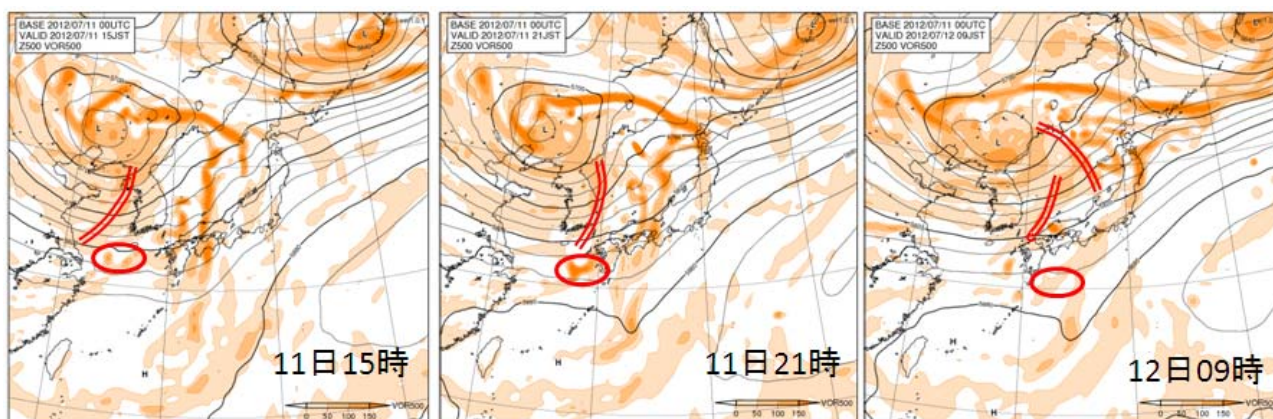
第 2.1.8 図 九州付近におけるエコー強度
2012 年 7 月 11 日 9 時(左)、15 時(右)。

2.1.8図参照)。15時に長崎県に進んだ南北走向の降水システムは東進速度が早く、1時間雨量は20mm程度であったが、10分間雨量では15mm以上を観測し、警報級の短時間強雨のポテンシャルが高まってきていると考えられる。また、15時の対馬の南西海上では、下層シアアの南端付近で発達していると考えられる別の降水システムが組織化しつつある。



第2.1.9図 MSM初期値の500m高度の水蒸気フラックス
2012年7月11日9時(左)、12時(右)。

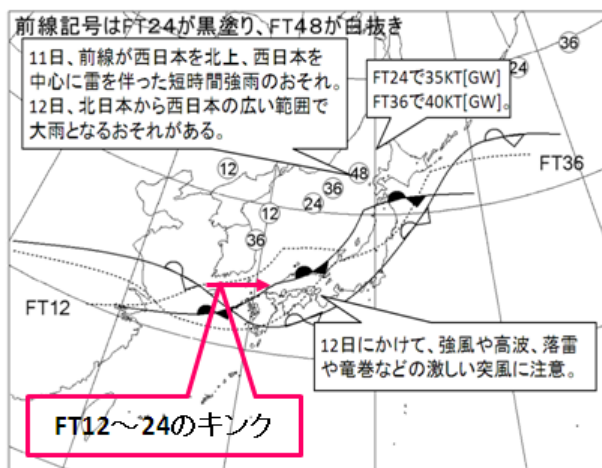
この下層シアアの接近前後の降水を予想する上で、九州の西海上における下層の暖湿気の流入状況を確認しておく必要がある。そこで、毎時大気解析などを活用して状況を把握する。11日9時～12時、九州の西海上では、MSM初期値の500m高度の相当温位は約360Kであり、九州西岸でも次第に相当温位が高まってきている。また、図は示さないが毎時大気解析950hPaの南西風の20m/s以上の領域が拡大しており、これに合わせて、MSM初期値の500m高度の水蒸気フラックス(以下500mFLWV)が400g/m²/sを超える領域も広がっており(第2.1.9図参照)、熊本県沿岸部の一部でも500mFLWVが集中豪雨の目安となる250g/m²/s(第5章第5.6b図参照)程度にまで高まっている。500mFLWVの値が非常に大きいため、降水システムが発生すれば、供給される多量の水蒸気により、集中豪雨をもたらすような短時間強雨が持続する状況にあることがわかる。



第2.1.10図 GSM(2012年7月11日9時初期値)の500hPaの高度と過度の予想図
赤色二重線はトラフ、赤色楕円は正過度域を示す。

② 予想資料の確認

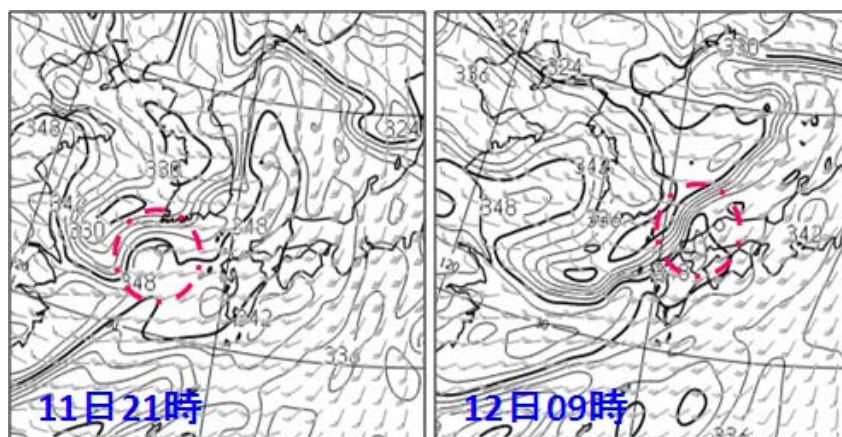
GSMの500hPa面予想天気図(第2.1.10図)から、中国東北区の寒冷渦は12日朝まで停滞することが予想される。この寒冷渦の周囲をまわるトラフは11日21時～12日03時に九州北部付近に接近し、その南の正過度極大域も11日21時頃から九州南部へ進入する予想となっている。また別のトラフが12日9時頃に再び九州北部付近に接近する予想である。九州北部では、これら2つのトラフ前面や正過度極大域付近での降水システムの発生・発達が想定される。なお、15時の水蒸気画像から解析できるトラフ(第2.1.6図(左)参照)



第2.1.11図 中央指示報の主要じょう乱解説図
(2012年7月11日15時発表)

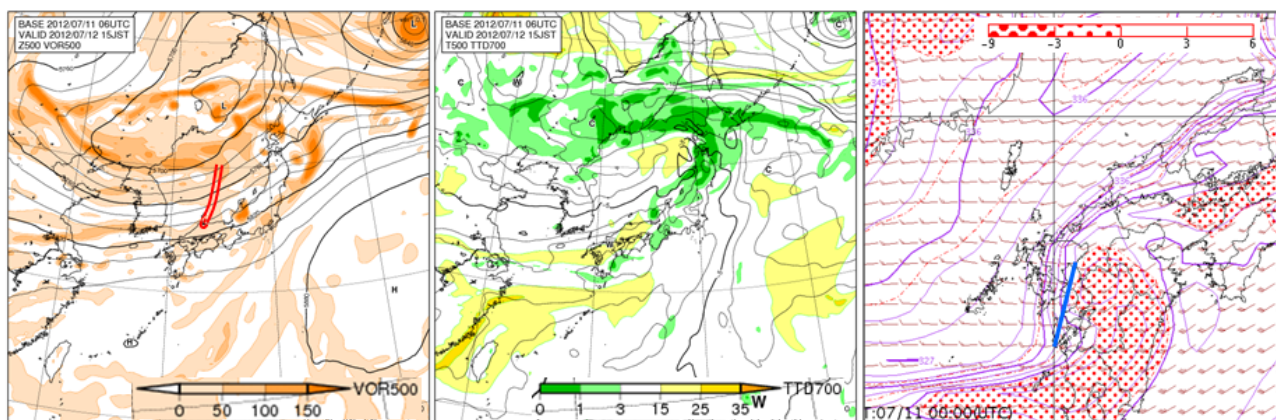
はGSMによる500hPa面トラフの予想より西側に位置しており、着目する必要がある。

中央指示報の主要じょう乱解説図を第 2.1.11 図に示す。これによると、梅雨前線上のキンクが黄海で顕在化し、対馬海峡付近を12日未明～朝にかけて通過する。前線はその後南下する予想で、12日夕方頃に熊本県内を通過する予想となっている。中央指示報の中には、「前線上のキンク位相などで降水システムが組織化」との記述がある。GSMの850hPa面相当温位、風予想図(第 2.1.12 図)から、前線の位置は等相当温位線集中帯の南縁(約 342K)と対応しており、キンク付近では相当温位 348K の暖湿気が予想されている。また、12日9時の予想では、九州付近の等相当温位線集中帯の前面で西南西風 30～35kt 程度、後面で西風 10～15kt 程度と弱く、下層シアアが存在している。ただし、これに対応する収束はあっても、大きくないと見込まれる。700hPa面の上昇流は、この下層シアア付近の南側に予想されている。



第 2.1.12 図 GSM の 850hPa 面の等相当温位線と風の予想図
2012 年 7 月 11 日 09 時初期値。鎖線の円は地上キンク付近の位置を示す。

「前線上のキンク位相などで降水システムが組織化」との記述がある。GSMの850hPa面相当温位、風予想図(第 2.1.12 図)から、前線の位置は等相当温位線集中帯の南縁(約 342K)と対応しており、キンク付近では相当温位 348K の暖湿気が予想されている。また、12日9時の予想では、九州付近の等相当温位線集中帯の前面で西南西風 30～35kt 程度、後面で西風 10～15kt 程度と弱く、下層シアアが存在している。ただし、これに対応する収束はあっても、大きくないと見込まれる。700hPa面の上昇流は、この下層シアア付近の南側に予想されている。



第 2.1.13 図 GSM(2012 年 7 月 11 日 9 時初期値)の 12 日 15 時の予想図
左は 500hPa 渦度と等高度線、中央は 850hPa 気温と 700hPa の湿数、右は 850hPa の相当温位と SSI。
赤二重線は 500hPa 面のトラフ、青実線は 850hPa の下層シアアの位置を示す。

12 日日中の予想について考察するため、第 2.1.13 図に 12 日 15 時の GSM 予想図を示す。これらの図によると、500hPa の寒冷渦は中国東北区で弱まり、沿海州に主体を移す。12 日 9 時頃に九州北部へ接近するトラフの後面に 700hPa の乾燥域があり、梅雨前線の南下が予想される 12 日 15 時頃には、この乾燥域が熊本県をほぼ覆う。850hPa 面では 12 日 15～18 時に下層シアアが県内を通過する予想となっている。このシアアは前面で南西風、後面が西風となっており、シアアの前面には約 350K の高相当温位域を伴っている。以上のことから、12 日日中はトラフ接近時に中層の乾燥域前面で、対流雲が発達・組織化するおそれがある。

これら GSM の予想資料の検討から、熊本県内の現象の大まかな流れは、次の通りとなる。

【梅雨前線の暖域内の期間 (11 日 18 時～12 日 15 時頃)】

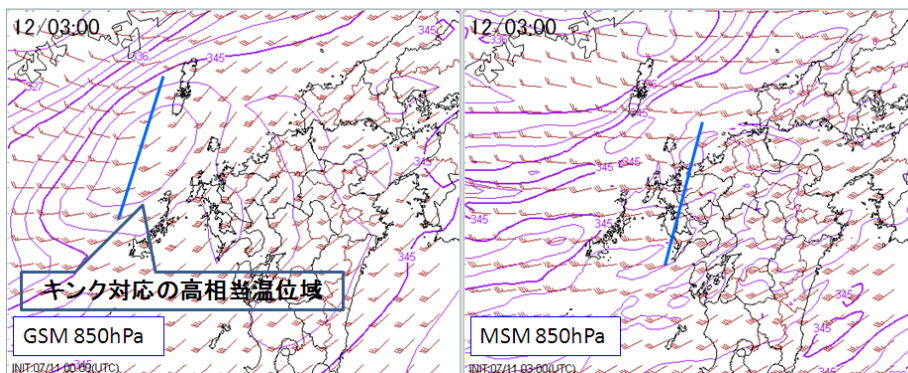
県内は梅雨前線の南側となり、キンク接近時を中心に、下層では南西風が強まり、暖湿気流入のピークがある。また、2つのトラフ接近時にも、暖域内の降水システムが組織化する可能性がある。これらのタイミ

ングでは、短時間強雨を伴う大雨に要警戒。地形性降水や地形による降水強化にも併せて要注意。

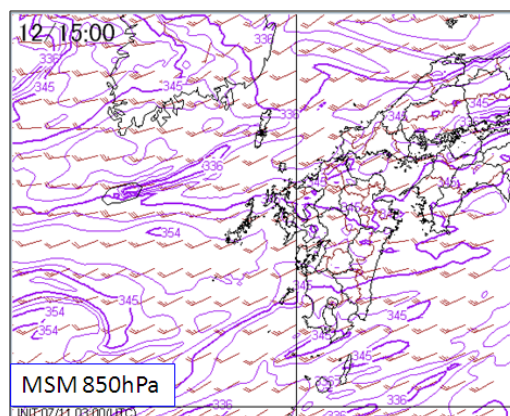
【県内を梅雨前線が南下する期間(12日15時~18時)】

梅雨前線が県内を南下する。前線近傍では下層収束は小さく、また中層は乾燥域に覆われてくるため、対流雲は発達しにくく、降水域は順調に南ないし東へ進む見込み。暖域内の短時間強雨には引き続き要注意。降り始めからの総降水量が多くなる地域は、土砂災害や洪水に要警戒。

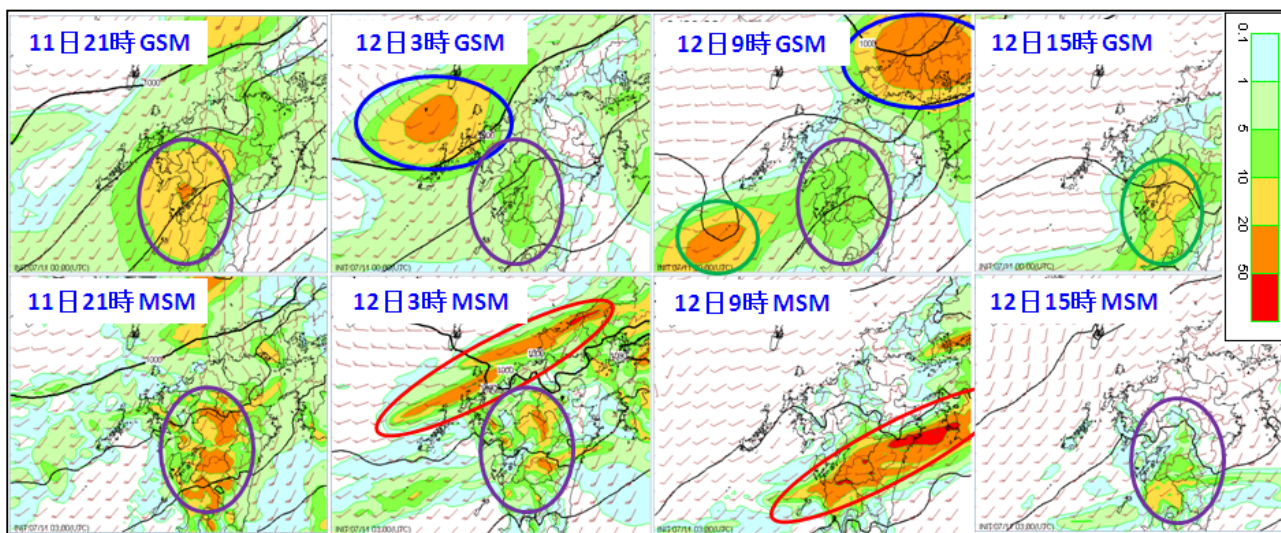
次に、MSMの予想資料の検討作業に入る。GSMによるシナリオのポイント部分を中心にGSMと比較し、シナリオの修正作業を行う。まずは、梅雨前線上のキンク接近時、850hPa面の相当温位と風(第2.1.14図)の比較を行う。GSMが予想するキンク対応の高相当温位域とシアアはMSMでは不明瞭となっており、シアアの位置はやや先行している。また、熊本県付近では、MSMはGSMより850hPa面の風速が強く、約50ktを予想している。以上のことから、この時間帯では、暖域内の下層シアア通過と下層暖湿気の流れ込みの強まりによる大雨が懸念される。



第2.1.14図 2012年7月12日3時の850hPa面予想図の比較
左図:GSM(11日9時初期値)の予想、右図:MSM(11日12時初期値)の予想、等値線は相当温位、青線は下層シアアの位置を示す。



第2.1.15図 2012年7月12日15時のMSMの850hPa面の相当温位、風予想図
(MSMは11日12時初期値)



第2.1.16図 GSMとMSMの3時間FRRの比較(2012年7月11日21時から12日15時の6時間毎)

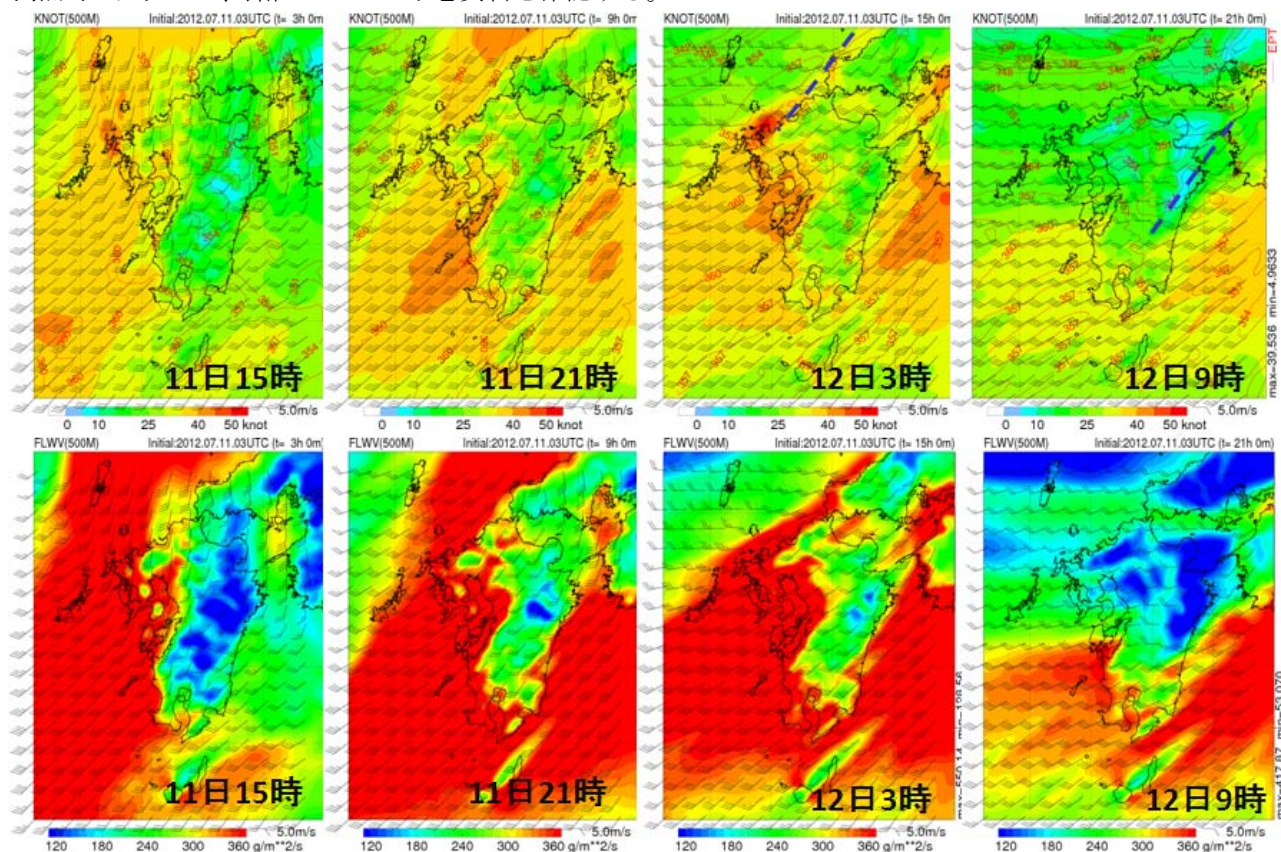
GSMは11日9時初期値、MSMは11日12時初期値。着色:3時間FRR、等値線:地上気圧、矢羽根:地上風。
青線内:キンク付近の強雨域、緑線内:下層シアアに伴う強雨域、紫線内:地形性降水、赤線内:前線南側の線状の強雨域。

同様にGSMで12日15時~18時頃に県内通過を予想している下層シアア(第2.1.13図(右図))について、MSMの予想資料を確認する。12日15時の850hPa面の相当温位と風の予想図(第2.1.15図)から、MSMでは下

層シアーがみられない。その後の予想図も比較すると、GSM では 12 日 18 時には等相当温位線の集中帯が鹿児島県にまで南下する予想だが、MSM では 12 日昼頃から熊本県付近には西海上から相当温位 345K 以上の暖湿気が流れ込む予想となっており、梅雨前線の南下がみられない。このことから、12 日昼以降の梅雨前線の動向については、モデル間に大きな違いがみられ、不確定性が大きいと判断する。そこで、サブシナリオとして、中央指示報の内容とは異なるが、MSM の予想資料から、12 日昼頃まで梅雨前線が南下した後は停滞または北上に転じ、熊本県内は 12 日日中は暖域内となる可能性もあると考える。

次に GSM と MSM の予想降水域を比較する。第 2.1.16 図に 11 日 21 時～12 日 15 時の両モデルの 6 時間毎の 3 時間 FRR を示す。地形性降水については、紫色楕円で示した通り GSM と MSM 共に表現し、ピークは 11 日夜で、その後 12 日 15 時頃にかけて予想されている。この降水の分布表現は地形が細密な MSM の方がよいと考えられる。12 日 3 時～9 時は、GSM ではキンク近傍の降水域が対馬海峡から中国地方に進むが、MSM では明瞭なキンクの予想はなく、西南西から東北東走向の線状の降水域を表現している。MSM で予想されている線状の降水域は熊本県付近では 12 日 3 時～9 時頃に予想されている。

地形性降水や梅雨前線の暖域内での降水の強まりを検討する上で、この事例では上層に明瞭な寒気がないことから、下層の暖湿気や風の状況を確認することが重要である。そこで、MSM の 500m 高度の風、相当温位、水蒸気フラックス、鉛直シアーの予想資料を確認する。



第 2.1.17 図 MSM の 500m 高度の風と相当温位(上段)、水蒸気フラックス(下段)の予想図

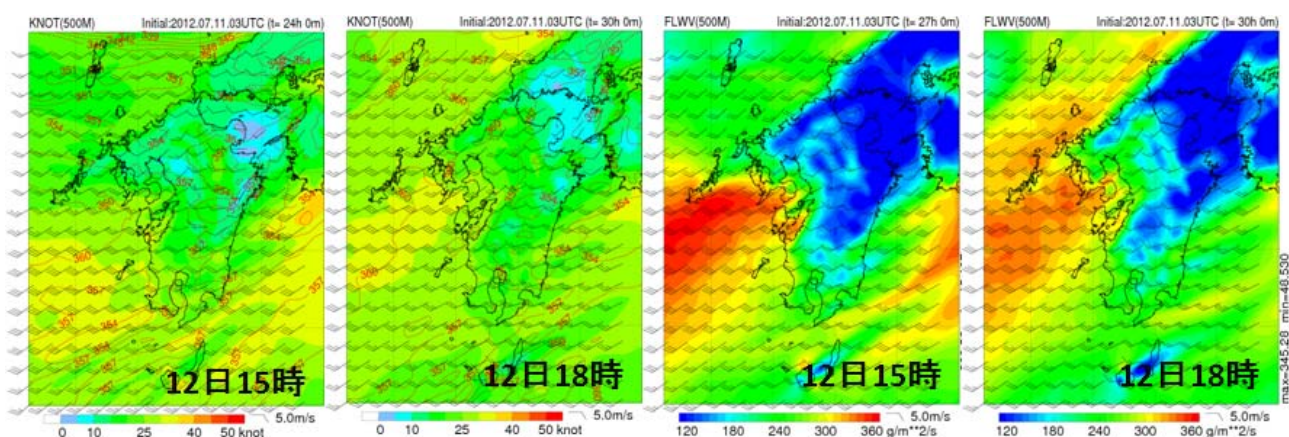
2012 年 7 月 11 日 15 時から 12 日 9 時の 6 時間毎の予想図を示す。MSM の初期時刻は 11 日 12 時。

上段の色の分布は風速、等値線は等相当温位線、青破線は下層シアー、下段の色の分布は水蒸気フラックスを示す。

第 2.1.17 図の上段の図から、熊本県周辺では相当温位のピークは 11 日 18 時～12 日 3 時で約 360K となり、このピーク前後の時間帯でも 350K 以上の非常に高い状況が続く予想となっている。風向は 11 日 18 時頃から南南西から南西に変わり、風速のピークは 11 日 21 時～12 日 3 時過ぎとなっている。これは、12 日 3

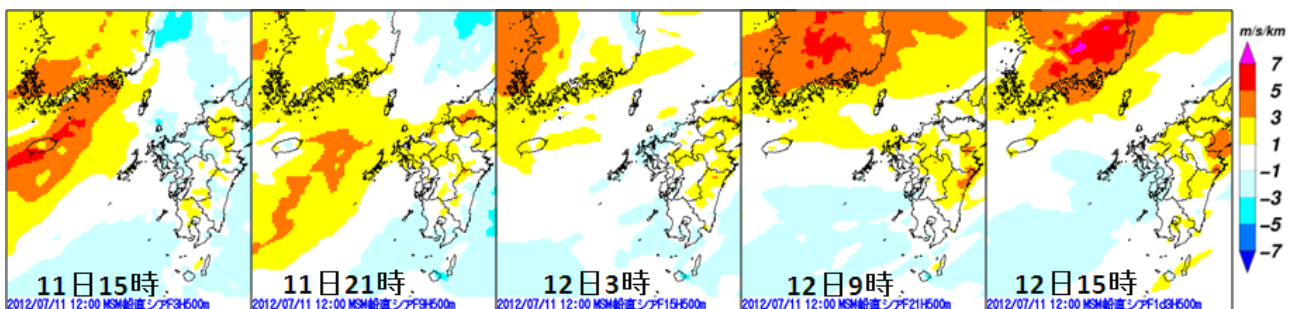
時に山陰沖から九州北部へのびる下層シア（第2.1.17図上段の青破線）の接近により、風速が強まっているためと考えることができる。12日6～9時には、また別の下層シアが熊本県付近を通過し、風向は南西から西南西に変化する予想となっている。第2.1.17図の下段の図から、11日15時～12日6時頃は500mFLWVの値が大きい状況が続き、その後北から次第に小さくなる。以上から、12日昼までの予想では、梅雨前線の暖域内や地形による降水強化を主体に考えて、500mFLWVを重視すると、11日21時～12日6時の時間帯が警報級の短時間強雨を伴う大雨に最も警戒を要すると考えられる。

第2.1.18図に、第2.1.17図と同じ要素の12日15時と18時の分布図を示す。熊本県の西海上で一旦弱まっていた西南西風が12時以降一時的に30～35ktと強まり、500mFLWVは15時頃に県南部沿岸部を中心に一時的に大きくなる。このように、梅雨前線が県内を南下しない場合、12日15時頃に下層の暖湿気の流れ込みが一時的に強まる影響で、南部を中心に暖域内の対流雲や地形性降水が発達しやすい場となることが予想される。



第2.1.18図 MSMの500m高度の風と相当温位(左側2枚)、水蒸気フラックス(右側2枚)の予想図
2012年7月12日15時と18時の予想図を示す。MSMの初期時刻は11日12時。
上段の図は、分布は風速、等値線は等相当温位線を、下段の分布は水蒸気フラックスを示している。

アデスの統合ビューワで表示できる500m高度データの中に「鉛直シア」（地上から約3kmと約500m間の風速差）がある。加藤(2011)は、この値が大きいほど降水システムが組織化されやすいことを説明している。この鉛直シアの推移から、降水システムが線状に組織化されやすい状況に変化しているかを予測することができる。第2.1.19図に鉛直シアの分布予想図を示す。11日21時頃から九州北部付近では鉛直シアが大きくなり、その後12日日中にかけて山間部を中心にやや高い状況が続く。また11日21時には五島列島の西から南西の海上で大きく、海上で組織化した降水システムが九州北部へ進入するおそれもある。この資料から、熊本県内では11日21時頃～12日日中に、線状の降水システムが発生・持続する可能性あると考える。



第2.1.19図 MSM(初期時刻2012年7月11日12時)の500m高度面データ・鉛直シア分布の予想図(11日15時～12日15時)

最終的な現象のシナリオを組み立てる前に、数値予報資料と現時点の実況のずれを確認する。GSMが予想

しているキンク付近の雲域では、11日15時の赤外画像(第2.1.6図の右)とその3時間前の画像との比較から、雲頂高度が下がってきている。また、数値予報の下層風とウィンドプロファイラの観測を比べると、11日15時頃に平戸で約50ktの観測があるが、GSMの下層風速は実況より弱く、MSMの方が実況に近い。以上のことから、キンク近傍や下層風系の予想について、MSMの方が精度のよい状況と判断する。

③ 現象のシナリオと想定される強雨イメージ

これまでの検討をまとめると、「12日18時までに予想される現象のシナリオ」は次のようになる。

- 熊本県は12日昼過ぎにかけて梅雨前線の暖域内に位置し、下層は大雨の目安を超える暖湿気(500m高度の相当温位357K前後)が入る状況が続く。その後、梅雨前線は県内を南下するが、前線付近の下層収束が小さいことから、暖域内中心の大雨と判断する。
 - ⇒ 暖域内では、警報級の短時間強雨のポテンシャルありと判断。
 - (留意点) MSMの予想では12日午後の前線は停滞または北上傾向で熊本県内は通過しない予想。西南西から東北東走向の線状降水域も予想されており、前線が停滞すると強雨が持続するおそれがある。
- 九州の西海上でも暖湿気が流れ込み続け、暖域内の対流雲は発達しやすい。
 - ⇒ 島しょ部などによる強制上昇で対流雲が発生または、さらに発達し、熊本県に進入するおそれ。
- 500hPaのトラフが11日夜遅く～12日未明と12日9時前後に接近する。
 - ⇒ トラフ(暗域)前面で対流雲の活動がさらに活発化し、組織化するおそれ。
 - (留意点) 水蒸気画像によるトラフの位置とズレがあることに留意。
- 下層南西風は11日夜遅く～12日明け方がピークとなり、暖湿気の流入がさらに強まる。12日午後には、モデル間に差があり、下層シアー通過時や一時的な南西風の強まりにも留意。
 - ⇒ 地形性降水が発生しやすい地域で、大雨が持続するおそれがある。
 - ⇒ 鉛直シアーもあり、線状の降水システムが形成される可能性もある。
 - ⇒ 12日午後、下層シアー前面での強雨が更に強まる可能性。
- キンク付近の降水域は熊本県にはかからない予想。
 - ⇒ 暖域内の対流雲がキンクの接近で発達・組織化するおそれがある。
 - (留意点) MSMは予想しておらず、実況でキンク対応の雲域が衰弱傾向のため、この可能性は低くなりつつある。

以上から想定できる強雨のイメージについては、次の通りと解釈する。

- 南西風による地形性降水(トラフ接近で組織化するおそれ)
- 西海上の暖域内で発達した対流雲の進入(地形による強化も考慮)
- 長崎県島しょ部による強制上昇で対流雲が発生・組織化し進入
- 前線南下に伴う、暖域内の線状降水域の通過(MSM)
- キンクに伴う強雨(GSMの予想より南下すれば)
- 下層シアーに伴う強雨(12日午後、GSMの予想)

また、シナリオ検討項目をバーチャートにまとめると第2.1.1表のようになり、警報級の大雨の確度の高い時間帯を、11日夜遅くから12日明け方と予想する。これにより、警報・注意報・情報の発表や発表判断のタイミングは、11日夕方に大雨警報発表の可能性に言及する注意報とこれを補う熊本県気象情報を発表し、夜間の短時間強雨を伴う大雨に対する警戒を呼び掛け、大雨警報の発表判断は、実況解析・監視を行いつつ、11日夜に行うことを想定することができる。

第2.1.1表 2012年7月11日日勤時のシナリオ検討項目

日付 時間	11日					12日				
	-18	-21	-24	-3	-6	-9	-12	-15	-18	
500hPa	寒冷渦を囲むトラフ					接近				
850hPa	対馬海峡付近の下層シア					接近 通過				
850hPa	下層シア(GSM)									
500m	下層シア(MSM)					通過				
500m	南西(西南西)風					強まる 風速ピーク 弱まる 一時強まる 弱まる				
500m	南西風の水蒸気補給					特に多い 前線の暖域側 多い 一時強まる 多い				
地上	前線との位置関係					前線の暖域側 接近 南下				
地上	キク									
予想	対流雲域の動向					かなり発達 雲システム組織化のおそれ かなり発達				
予想	短時間強雨					警報級の可能性有 警報級 警報級の可能性有				
予想	大雨(土砂・洪水)					注意 可能性あり 先行降雨の状況により可能性有				

(2) 現象のシナリオに基づいた量的予報作業

現象のシナリオに基づいて、ガイダンスや実況資料を参考に、最大1時間雨量の量的予報の検討に入る。

まずは、11日15時～16時の実況から目先の雨量予測を行う。九州北部では発達した降水エコーが海上から進入しており、10分間降水量で15mm以上を観測しているが、エコーの動き早く、1時間雨量は40mm以下であった。トラフ前面の発達した雲域が接近するまでは、この程度の状況が続くと判断して、量的予報の作業に入る。

GSMとMSMの1時間雨量の最大降水量ガイダンスを第2.1.2表に示す。警報級短時間強雨の期間の検討では、GSMよりMSMの予想の方が現状で精度が高いことを考慮し、シナリオによる期間を、MSMガイダンスを使い補正する。シナリオの期間は11日21時～12日6時だが、MSMの最大降水量ガイダンスでは500m高度の下層シア通過のタイミングにあたる12日6～9時にピークを予想しているため、警報級の期間を11日21時～12日9時とする。

第2.1.2表 熊本県のGSMとMSMの最大1時間降水量ガイダンス(2012年7月)

GSM(左表)は11日9時初期値、MSM(右表)は11日12時初期値。平滑化していない値。

GSM	時刻	11				12					
		-15	-18	-21	-24	-03	-06	-09	-12	-15	-18
熊本県	熊本地方	40	42	46	41	34	48	51	48	49	28
	阿蘇地方	18	25	46	41	34	48	51	48	38	28
	天草・芦北地方	22	37	37	27	24	37	47	81	43	4
	球磨地方	20	21	35	28	28	34	45	47	49	11

MSM	時刻	11				12					
		-15	-18	-21	-24	-03	-06	-09	-12	-15	-18
熊本県	熊本地方	31	37	54	41	52	79	107	13	14	19
	阿蘇地方	20	27	52	49	47	53	21	6	7	10
	天草・芦北地方	21	40	34	11	29	85	71	17	25	24
	球磨地方	20	38	44	49	46	82	107	25	24	25

最大雨量については、1時間最大降水量ガイダンスがGSMで約80mm、MSMで約110mmが予想されており、実況のGPS可降水量が約70mm、MSMの予想でも約70mmが持続することから勘案し、最大を80mmとする。警報級以外の期間では地形性降水による短時間強雨を主に考え、ガイダンスを参考に12日12時まで50mmとし、12日12時以降は、シナリオで不確定な部分が多いため、MSMのガイダンスを参考に30mmとする。

第2.1.3表 熊本県の最大1時間雨量の量的予報

時刻	11				12					
	-15	-18	-21	-24	-03	-06	-09	-12	-15	-18
熊本県	熊本地方									
	阿蘇地方									
	天草・芦北地方									
	球磨地方									

降水の分布について、警報級の短時間強雨は、地形性降水が強まる地域の方が可能性は高いが、暖域内で発生し海上から進入してくる強雨域も想定できることから県内全域とする。地形性降水による強雨の予想領域については、MSMの最大降水量ガイダンスの分布にもよく表現されており、天草・芦北地方を除いた3つの一次細分区域とする。また、12日昼前については県南部を中心に下層の暖湿気の流れ込みが強くなること

から、北部より南部を多く予想することとする。12日12時以降は、モデル間の表現に大きな差があることから、地形性降水の雨量分布を採用する。

以上の検討から、一次細分区域別の最大1時間雨量予想を第2.1.3表のように考える。なお、一次細分区内のより詳細な予想雨量分布については、南西斜面を中心にここで示した最大雨量予想を配置するなどの作業を行うことも考えられる。

2. 1. 2. 3 大雨時の実況監視と大雨警報の発表判断

11日18時以降から最初の大雨警報発表までの実況監視の作業と大雨警報（浸水害）の発表判断について以下に解説する。

(1) 実況監視の作業について

① 実況監視の着目点

前項に述べたシナリオに基づいて実況監視の着目点を整理しておく。大雨が始まると、警報、注意報、府県気象情報等への対応などで、実況解析にかけられる時間が少なくなる。着目点を容易に確認できるように、具体的な実況資料を事前に把握しておくことも重要である。

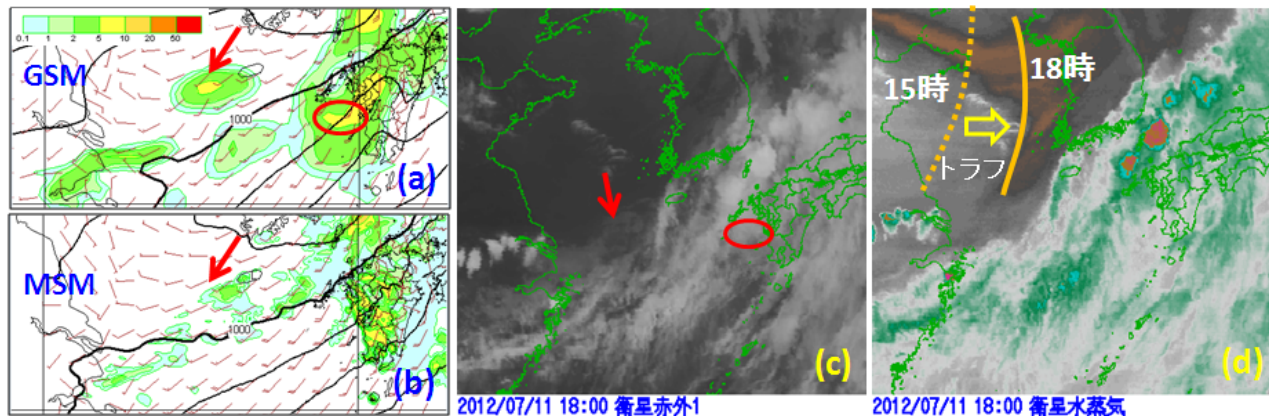
- 梅雨前線の動向
衛星、地上解析から把握。
⇒ 特に、チェジュ島や畿原の地上観測（露点温度や風）に着目。
- 黄海を東進するトラフの動向
高層天気図解析、数値予報の初期値、衛星から把握。
⇒ 水蒸気画像からトラフを追跡、暗域の動向の確認。
- 下層暖湿気の動向（南西風の強まりと暖湿気の変化）
毎時大気解析、数値予報の初期値、ウィンドプロファイラによる観測、地上局地解析の利用。
⇒ 雲仙岳（気温：標高678m、風：標高870m）などの観測時系列なども利用できる。
- 九州の西海上での対流雲の発達・組織化
衛星、レーダー、LIDENによる雷の発生状況による監視。
⇒ エコー頂高度の変化、エコーの走向と進行方向の把握。
- 地形性降水の状況の監視
衛星、レーダー、解析雨量、雨量計、地上局地解析による監視。
- GSMの予想にある前線上のキンク付近の動向
衛星による対流雲域の動向の把握。

② 11日18時までの実況監視

11日15時の速報天気図によると梅雨前線は朝鮮半島に停滞しており、着目している梅雨前線上のキンクは解析されていない。このキンク付近の状況について、衛星画像と数値予報資料を比較する。

第2.1.20.図に、11日18時のGSMとMSMの予想図、赤外画像及び水蒸気画像を示す。図中の赤矢印でGSMのキンク予想位置を示しており、MSMではキンク表現は弱い。赤外画像では下層雲はあるものの衰弱した傾向が続き、18時にも発達した雲域は含まれず、GSMのFRRは過大であり、MSMの方がこの付近の予想表現がよいと判断できる。また、水蒸気画像から黄海付近を東進するトラフを解析できる（図中の黄色点線が15時の位置、黄色実線が18時の位置）。予想されたキンク対応の下層雲域よりトラフが先行しつつあり、トラフ近傍には暗域があって、この下層雲域を覆っている。暗域では上・中層が乾燥しており、対流雲の発達が抑

制されていると考えられる。GSM では九州の西海上で FRR の極大域(図中赤線内)を予想しているが、赤外面像では発達した雲域はない。さらに、解析雨量でも解析されておらず、この FRR も過大な表現となっている。一方、このトラフ付近の暗域前面にあたるチェジュ島付近では南南西から北北東にのびる組織化した雲域がみられ、発達していることがわかる。



第 2.1.20 図 2012 年 7 月 11 日 18 時の GSM と MSM の予想図(1 時間の FRR、地上気圧と風) と衛星画像

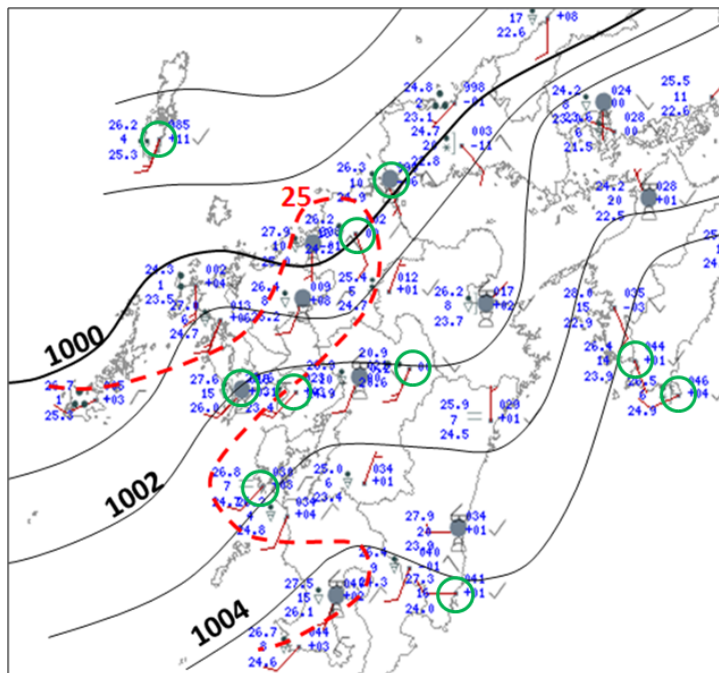
(a) は GSM(初期時刻 11 日 9 時)の予想図、(b) は MSM(初期時刻 11 日 12 時)の予想図。

(c) は赤外面像、(d) は水蒸気画像を示す。矢印等の説明は本文を参照。

九州付近における下層風の状況がシナリオ通りか、18 時のウィンドプロファイラ約 1500m の下層風をモデルの予想と比較する。巖原では西南西の風で約 50kt が観測され、時系列図から次第に強まってきていることがわかり、実況の風速が GSM、MSM より 5~10kt 程度強くなっている。これは対馬に接近している下層の気圧の谷(下層シアーに対応)が両モデルより深いため、九州の西海上における実況の暖湿気の流れ込みが強まっているためと考えられる。

以上の 11 日 18 時までの実況の検討では、GSM の予想にあるキンクが実況にないことから、MSM よりシナリオを修正し、「キンクが九州北部付近を通過することはない、MSM の表現にある前線南下に伴う暖域内の線状の降水システムが県内を通過する可能性が高まった」とする。水蒸気画像のトラフ、暗域前面で対流活動が活発化・組織化しており、この外挿から、九州北部では 12 日 0 時前後にかけてトラフが接近し、11 日夜遅く以降の警報級短時間強雨の発生の可能性がさらに高まっていると考える。以降の実況監視の留意点として、実況の下層風がモデルより強いことから、予想より顕著な現象となるおそれがあり、下層風の変化を特に注視していく。

ここで示したように、実況監視においては、大雨等の顕著現象予想の確度の高まりや低下を意識した作業を行うことが、量的予報の修正や防災気象情報の適時・適切な発表



第 2.1.21 図 2012 年 7 月 11 日 21 時の局地天気図

黒実線：等圧線、赤破線：露点温度 25 度の等値線、
緑丸の観測点：18 時から気温・露点温度共に上昇した地点。

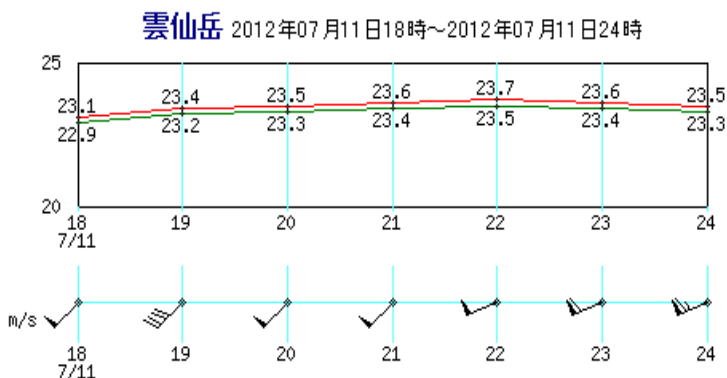
に繋がる。

③ 11日21時までの実況監視

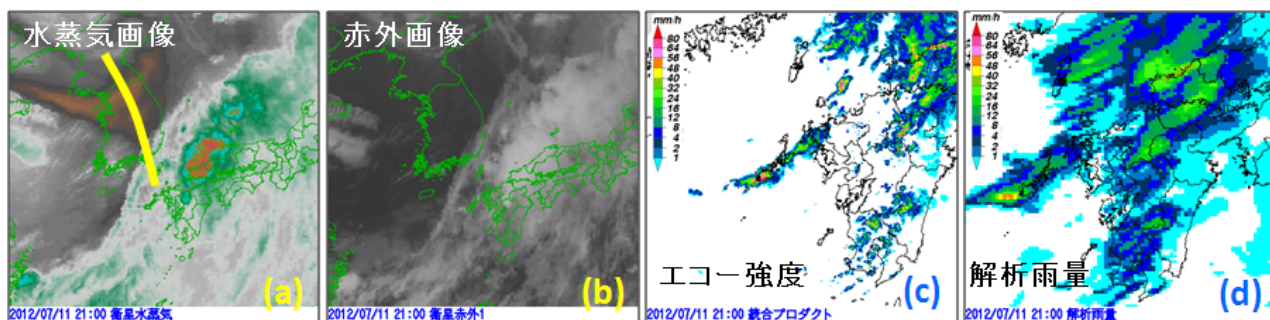
11日18時以降はリードタイムを確保した警報の適切な発表のタイミングを計る作業が重要となり、シナリオ通りに実況が推移しているか確認しつつ、警報の発表タイミングを判断することになる。この作業は、実況資料から顕著現象が予想される地域や警報級となるタイミングをさらに具体化する作業でもある。そこで、この作業のことを、ここでは「シナリオの詳細化」と呼ぶことにする。

19時～20時頃に長崎県へ進入した降水システムについて検討し、海上から陸上へ進む際の変化を把握することで、シナリオに沿った実況の推移か確認すると共に、今後の予想にも活かす。19時前に、南西から北東方向に並ぶ複数の点状エコーが長崎・佐賀県に進入し始め、次第に線状のエコーに変化した。20時には、エコー強度が強まり、福岡県に達している。この間、エコー頂高度は急速に高まり、20時には13km以上となった。10分間雨量は、長崎県内では10mm程度であったが、福岡県の山地では14mmを観測しており、この降水システムは九州に接近し、陸上に入ってから発達・組織化している。これらから、地形による降水の強まりや、500m高度データの鉛直シアーの予想図から推測した、組織化しやすい状況と整合していることを確認できる。また、雨量については沿岸部より内陸で1.2～1.4倍程度に増加していることが確認でき、以降の予想に活かせる情報が得られた。

地上実況の監視作業では、局地天気図解析(第2.1.21図)から、対馬を通過した気圧の谷の南側では18時と同程度の気圧の傾きとなっていることが確認でき、風がすぐに弱まる傾向にないことがわかる。図中の緑色の円で囲った観測点は気温と露点温度が共に18時から上昇した地点で、熊本県付近の地上付近でさらに暖かく湿った空気が流入していることが把握できる。また、21時までの雲仙岳の観測(第2.1.22図)でも気温・露点温度共に上昇傾向で、風は南西10m/s程度を維持していることから、シナリオ通り下層暖湿気の流入の強まる場が継続していることがわかる。



第2.1.22図 雲仙岳特別地域気象観測所の観測時系列
赤線は気温、緑線は露点温度、風はペナント10m/s、長線は2m/s、短線は1m/sを示す。



第2.1.23図 2012年7月11日21時の衛星画像・エコー強度・解析雨量
(a)は水蒸気画像、(b)は赤外画像、(c)はエコー強度、(d)は解析雨量。(a)の黄色実線はトラフの位置を示す。

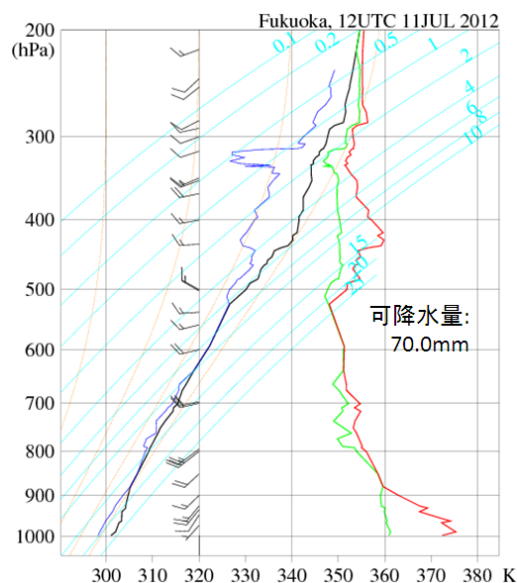
トラフの動向と暗域前面の雲域についての実況監視作業に移る。第2.1.23図に21時の衛星画像やエコー強度、解析雨量の実況図を示す。トラフは対馬海峡付近に進み、トラフ周辺の暗域とは別に、チェジュ島の南東海上に見られる暗域は南東側から上層雲が入り込んでおり、実際にはこの南東ないし東側には中層中心の乾燥域があると考えられる。この暗域前面では、西南西から東北東走向の東進するエコーが観測され、21時に

五島列島付近に達している。10分間雨量で17mmを観測し、解析雨量では約50mmとなっている。この降水エコーはGSM、MSM(共に11日15時初期値)の予想にはないが、降水短時間予報や外挿でも2時間後以降に熊本県へ進む見込みである。

21時の福岡の高層実況(第2.1.24図)では、下層は南西風で700hPaより上では西風となって鉛直シアが比較的大きく、組織的な雲域が発生しやすい場となっている。下層には相当温位約360Kの暖湿気が流れ込んでおり、9時に比べ湿っており、可降水量も70mmに増加している。SSIは-2.3、CAPEが1200J/kg程度と、大気の状態は不安定となっている。赤外面像から福岡県と熊本県の県境付近でも雲頂高度が高くなり、内陸でも不安定度が高まっていると判断できる。

この時刻のウィンドプロファイラの高度1500mの観測では、21時頃に巖原の風が西南西から西に変わり、下層シアが通過しており、その南側にあたる熊本では40kt前後の南西風が続いている。これらの実況はMSMの予想とほぼ合致している。

以上から、これまでのシナリオを変更する必要はないと判断する。



第2.1.24図 福岡の温位エマグラム
(2012年7月11日21時)

図の内容は第2.1.5図と同じ。

(2) 大雨警報の発表判断について

シナリオの詳細化を行うことは、大雨警報の適切な運用に繋がる。そこで、この作業について説明する。

① 11日21時の時点での大雨警報の発表判断の考え方

21時の時点での大雨警報の発表判断の考え方を次に示す。

1) 実況資料のまとめ

五島列島を通過中の降水システムが、19時頃長崎県を通過した降水システムと異なる点は、(a)暗域前面で組織化し海上でも発達していること、(b)走向が西南西から東北東で、南西風による暖湿気がより流入しやすい走向であり、ほぼ東進しているため降水の継続時間が長いことがあげられる。雲仙岳の観測や高層の観測から、下層暖湿気の流れ込みが強まる傾向が続く、大気の状態の不安定度が強まっている。また、実況では九州の内陸部で対流雲が発達する状況が続く、21時頃から鉛直シアが大きくなる予想もあり、降水システムが発達・組織化して、積乱雲のバックビルディング現象などにより停滞する可能性がある。

2) 警報級の降水システムに関する予想

五島列島付近の降水システムは、さらに発達・組織化しながら、長崎県を通過し、熊本県に接近・進入すると予測し、エコーの移動速度から、長崎半島付近には22時頃、熊本県北部には23時頃から進入すると推定する。熊本県北部を進みながらさらに発達し、西～南西斜面では地形による降水強化も加わり雨量が多くなる。これまでの実況から沿岸部と比べ、内陸部では1時間降水量が1.2～1.4倍程度に増加すると考えられる。さらに、降水システムが熊本県北部で線状となり持続・停滞する可能性もある。

3) 大雨警報の発表判断についての考察と対応

詳細化したシナリオに基づいて、大雨警報(浸水害)の発表判断について検討する。

熊本県北部の大雨警報基準(1時間雨量)の最小値は60mmであり、対流雲が発達しながら接近することから、海上や長崎県で1時間雨量が50mm程度となりそのような時点で警報を発表することが適切であると判断できる。また、顕著現象が始まる前に警報を発表するためには、遅くとも23時には警報発表の判断をする必要

がある。

予想最大雨量は、最新の MSM のガイダンスでも 80mm 以上を予測しており、現段階では 80mm だが、その後の実況に応じて、80mm 以上の雨量を予想することとする。

これらの考察から、直ちに府県気象情報を発表し、熊本地方と阿蘇地方を対象に、次の 3 点を伝えることが防災活動上重要である。

- ・五島列島付近の降水エコーが接近中で、熊本県北部を通過する見込み。
- ・これにより 11 日 23 時頃から猛烈な雨となる確度が高まっている。
- ・12 日朝にかけて短時間強雨が断続し、特に西～南西斜面を中心に雨量が増え、土砂災害や洪水のおそれもある。

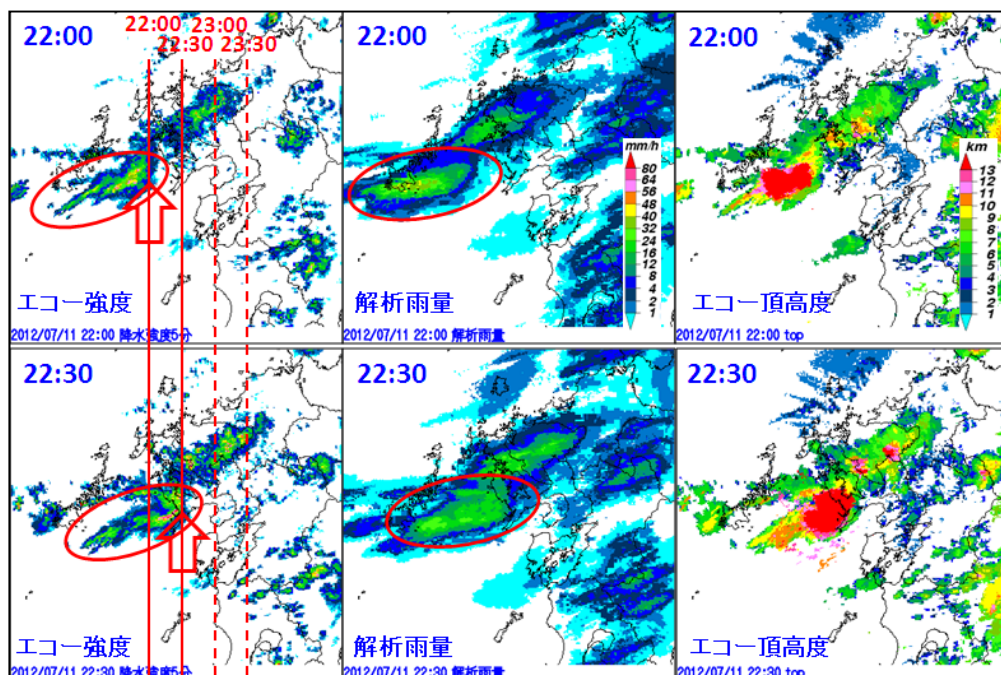
さらに、警報発表タイミングの目安を、「海上や長崎県で 1 時間雨量が 50mm 程度となりそうな時点で警報を発表」と設定し、実況監視を強化すると共に、警報発表作業がスムーズに行えるよう防災時系列を整えるなどの準備も行う。

② 警報発表直前の実況監視

次に、警報発表直前におけるシナリオを確認する作業と、降水が警報発表の目安に達するかを監視する作業について説明する。

1) 熊本県付近の実況がシナリオ通りか確認する。

熊本県への下層暖湿気の流れ込みについて確認する。雲仙岳の観測（第 2.1.22 図参照）によると、露点温度の上昇傾向は 22 時まで続き、湿った状況が続いている。風向は 22 時頃に南西から西南西に変化しているが、これは対馬付近を通過した下層シアーの影響と考えられる。22 時以降、風速は少しずつ強まっており、水蒸気フラックスは大きくなっている状況が続いているか、またはピークに達しつつあると判断する。また、22 時の水蒸気画像から対象としている降水システムは暗域前面に位置しており、この雲域が暗域に覆われて衰弱する兆候がないことから、シナリオを修正する状況にはないと考える。



第 2.1.25 図 2012 年 7 月 11 日 22:00 と 22:30 のエコー強度・解析雨量、エコー頂高度

赤色楕円：監視対象の降水域、赤実線：22 時、22 時半の強雨域の先端、赤破線：23 時、23 時半の先端予想位置。

2) 接近している降水システムが発達を維持し、警報発表の目安に達するか監視する。

第2.1.25図に11日22:00と22:30のエコー強度と解析雨量、エコー頂高度を示す。監視対象の降水システムのエコーは順調に東進しており、降水ナウキャストや外挿でも熊本県北部は23:30頃から雨が強まると見込まれる。エコーの広がりや進行速度から30分程度は強雨が続きことが予想できる。22:30に解析雨量が減少し、目安の50mmには達していないが、エコー頂高度は13km以上が持続していることから、降水システムが弱まるステージとは考えない。

③ 大雨警報発表判断の再設定と発表決断

以上から12日00:30頃に警報基準に達する可能性が高まり、11日22:30時点でリードタイムが約2時間となっている。実況から強雨が30分は持続すると考えられ、10分間降水量が15mm以上あれば、まず1時間雨量の多い所では50mmに達すると推察できる。そこで警報発表のタイミングの目安を「長崎県で10分間雨量15mm以上を観測した時点」と再設定する。

長崎県内の観測で10分間降水量が22:30で14mm、22:40で17mmとなる。この頃に、警報発表タイミングの目安となったと判断し、大雨警報発表の作業を行う。

④ 警報発表後の雨量状況

実際の雨量の経過は、長崎県内で23:30に50mm以上の1時間雨量が観測され、熊本県北部への強いエコーの進入は23:30頃とほぼ予想通りであった。熊本県で1時間雨量60mmを超えたのは12日1時となり、予想したより30分ほど遅れた。ここで示した作業では、約2時間程度のリードタイムのある大雨警報(浸水害)を発表できたと考えることができる。

2.1.2.4 まとめ

この作業例における、技術的な内容については基本的なものを多く取り上げた。予測シナリオや量的予報の検討作業においては、実況解析・監視から現在の状況とその推移を理解・解釈した上で、シナリオの作成や修正、量的予報作業を行うことが重要であり、本稿で説明した手順が効率的なものの一つと考える。

予報作業過程の中で、特に留意したい点を次に示し、まとめとする。

☞ 予想シナリオには、現象のシナリオと量的予報がある。実況資料を活かし、前者のイメージを十分吟味した上で、量的予報を行うこと

☞ 現象がシビアになるほど、気象情報等の発表作業やホットラインへの対応が増え、実況監視・解析にかけられる時間が少なくなる。詳細な実況解析作業は重要だが、時間が限られている場合には、シナリオ通り現象が推移しているか容易に確認できる観測資料も日頃から把握しておき、適切に対応できるようにすること

☞ 現象の深追いを防ぐため、シナリオの詳細化の作業を行いつつ、警報発表タイミングの目安を、状況の推移に応じてより具体的に再設定し、警報の適切なリードタイム確保に努めること

☞ シナリオから警報発表の最終判断時刻(最小限のリードタイムを確保できる時刻)を決める。実況が警報発表タイミングの目安に達せず、この最終時刻となった時は、シナリオを修正する必要がないと判断できれば、直ちに警報を発表すること

参考文献

加藤輝之, 2011: 大雨発生で着目すべき下層水蒸気場の高度. 平成22年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 71-88.

福岡管区气象台, 2012: 平成24年7月九州北部豪雨. 災害時気象速報
(http://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaiji_201201.pdf) .

2.2 大雪の事例（平成25年1月14日 関東地方南部の大雪事例）

2.2.1 はじめに*

2013年1月14日は日本の南を低気圧が急速に発達しながら北東に進み、千代田区大手町(以下、東京)では7年ぶりに5cmを超える積雪を観測した。当日、東京では昼前に雨から雪に変わり、12時(本節では数値予報の初期時刻は協定世界時(UTC)を、それ以外の時刻は中央標準時(JST)を使用)で0cmだった積雪は13時には4cmに急増し、15時には8cmの最深積雪を観測した。このため、歩行者が路上で転倒して負傷する等の人的被害、鉄道の運休や航空機の欠航等の交通障害、着雪による電線の垂みや切断(停電)・倒木・農業施設への被害が発生し、社会的な影響が非常に大きかった(第2.2.1表、東京管区気象台気象災害報告)。

このように関東地方南部の都市部(本稿では、東京23区、横浜市、さいたま市、千葉市を中心とした地域を示す)は積雪に対して非常に脆弱であり、わずか数cmの積雪により社会的に大きな影響が出る。このため、予報担当者は、まず、「雪」を予報するのか、次に積雪となるのか、さらに何cm積もるのか、等を段階的に考察し、積雪を予想した場合は、大雪注意報の基準が24時間降雪の深さが5cmであることから、数cm単位で予想する必要がある。関東地方南部の都市部の雪は、雨と雪との境界付近の気温で降ることが多く、また、降水量も少ないため予想が非常に難しいが、予想精度を上げるには南岸低気圧による関東地方の降雪の特徴を十分理解し、数値予報モデルの予想結果を適切に解釈することが重要である。本稿では、まず2.2.2節で、関東地方における南岸低気圧による降雪時の気象特性に関するこれまでの知見、及び新たな調査結果を述べる。次に、2.2.3節で2013年の1月14日の大雪を例に予報作業の実例を示す。本稿の内容は関東地方に特化したものだが、雪に関する知見や数値予報モデル利用上の着目点など、南岸低気圧による大雪が発生する他の地域でも参考にしてもらいたい。

2.2.2 南岸低気圧による関東地方の降雪時の気象特性*

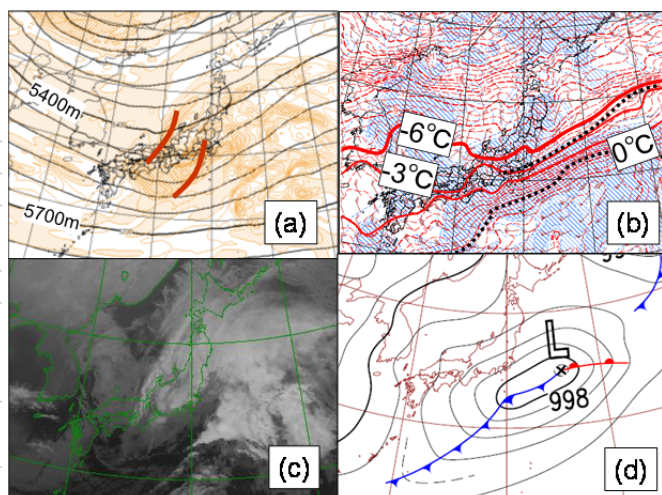
2.2.2.1 雪に関する知見

(1)大雪をもたらす低気圧

過去に東京地方に大雪をもたらした南岸低気圧は、低圧部が東西に扁平な形をしており、その低圧部に沿うように東西にのびる前線(温度集中帯)が存在するという特徴がある(高野、1999)。関東平野で1~3cmの積雪が観測された2010年2月1日の事例では、低気圧周辺の等圧線は東西方向に楕円状を呈する点や、

第2.2.1表 2013年1月14日の大雪による東京地方の主な被害
東京管区気象台気象災害報告から抜粋。

分類	内容
負傷者	重傷7名、軽傷288名
ライフライン	電線垂れ下がり、切断253件 停電4200世帯
倒木	91件
交通障害	JR: 運休621本、私鉄: 運休や大幅な遅れ 航空機: 欠航約550便 積雪や路面凍結による交通事故
農業被害	パイプハウス全半壊14棟 路地野菜のトンネルつぶれ等



第2.2.1図 2010年2月1日21時の(a)500hPaの高度・渦度(茶実線はトラフ)、(b)850hPaの温度・湿数、(c)衛星赤外画像、(d)地上天気図

*牧野 眞一 (気象庁予報部予報課)

850hPa で前線に対応する温度集中帯(0°C線付近)とは別に、本州南岸に温度集中帯(-3°C付近、潜在的な前線帯に対応)が存在する点など、過去の知見と一致する(第2.2.1図(b)、(d))。複数の傾圧帯は500hPaの二段の強風軸に対応したもので、それぞれの強風軸上にトラフが存在し、雲画像では低気圧周辺の雲域とは別に、北側に組織的な雲域が存在する(第2.2.1図(a)、(c))。このような構造を持つ低気圧では、

- ・低気圧中心が陸地から離れて通るため、関東地方には850hPaでは暖気が入りづらい
- ・低気圧中心が陸地から離れていても南岸の潜在的な前線帯により数十mm単位の降水がある
- ・低気圧通過後も、北側のトラフが通過するまで南岸の潜在的な前線帯により降水が続く

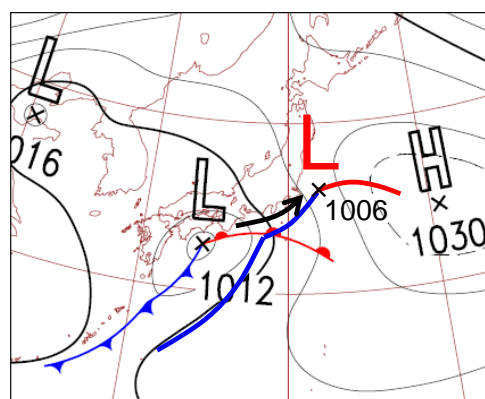
などの特徴があり、関東地方では大雪となりやすい。

(2) 雨雪判別

過去の調査では、南岸低気圧通過時の関東地方の雨雪判別の手法として、低気圧の経路、850hPaの気温、地上気温と湿度による判別などが報告されてきた。ここではこれらについて整理する。

① 低気圧の経路

東京地方で雪となる条件として、低気圧が伊豆諸島付近を通過するときの位置を指標とする手法があり、八尾ら(2001)では「八丈島～三宅島間」、柴山(1974)では「八丈島～鳥島間」という記述がある。しかしながら、2006年2月7日未明の積雪事例では、低気圧は本州南岸の陸地にかかなり近い所を進んだが関東地方では下層の温度場が低く、東京で2cmの積雪を観測した(第2.2.2図、6日21時の館野850hPaは-5.7°C)。低気圧が陸地に近い所を通れば雨、離れば雪といった定性的な判断は可能だが、2006年2月7日のような事例もあるため、低気圧の通過する位置だけで雨雪判別を行うのは適当ではない。

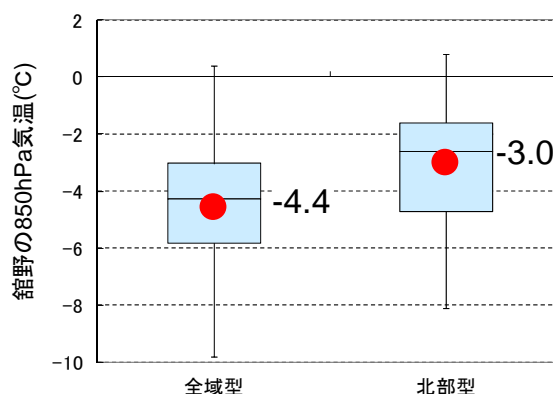


第2.2.2図 2006年2月6日21JST天気図
7日09JSTの低気圧と前線を加筆。

② 850hPaの気温

柴山(1974)では関東地方の雪の目安となる850hPaの気温は-4°Cとされている。やや古い資料であるため、今回、1989年(平成元年)～2012年(平成24年)の南岸低気圧による積雪事例(東京、横浜、千葉、熊谷、前橋、宇都宮、水戸のいずれかで1cm以上の積雪が観測された68事例、以下では「1989～2012年の南岸低気圧による積雪事例」と呼ぶ)で、09時又は21時で降雪及び積雪を観測しているときの館野850hPa気温との関係を調べた(第2.2.3図)。

館野850hPa気温の平均値は、全地点で積雪となったとき(全域型)は-4.4°C、熊谷・前橋・宇都宮・水戸のみ積雪となったとき(北部型)は-3.0°Cであった。なお、東京・横浜・千葉が積雪となる場合は、ほとんどが関東北部も積雪となっており、これらの地域が積雪となる時の850hPaの気温は全域型の場合と同一と考えてよい。この結果は雨雪判別の十分条件であるが過去の知見と矛盾しない。ただし、850hPaの気温が0°C程度でも積雪となる場合があり、850hPaの気温だけからの雨雪判別は難しい。850hPaより下層の温度場の影響がより大きい点に



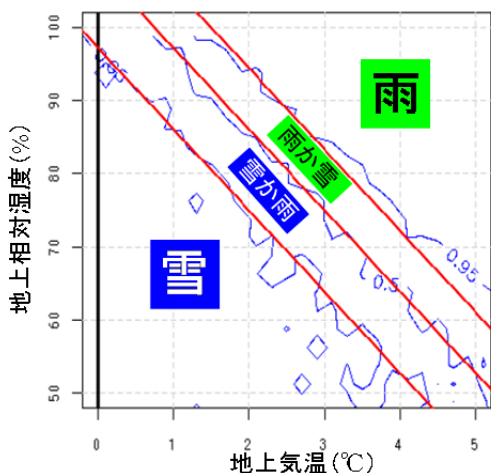
第2.2.3図 関東地方における南岸低気圧による積雪時の館野850hPa気温の箱ひげ図

●は平均値で右側の数値はその値を示す。箱ひげ図の箱は、上から75%値、50%値、25%値で、縦線の上端と下端はそれぞれ最大値と最小値。

については、「(3)降雪時の大気下層の特徴」で詳述する。

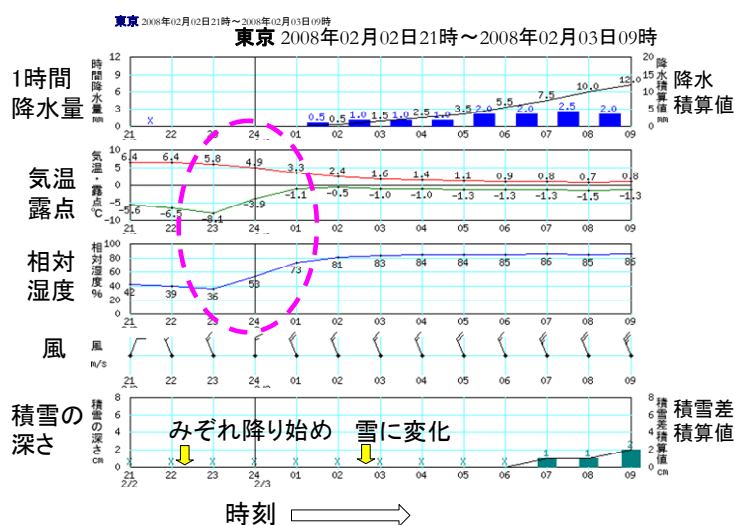
③ 地上気温と湿度

松尾(2001)によると、地上が高温時の降雪は相対湿度が低い場合に現れ、雪片からの水蒸気の昇華により雪片が0℃以下に冷やされ、気温が多少高くても融けないことが原因である。現在の降水種別ガイダンスは、これを考慮した降水種別判別図を利用している(第2.2.4図、古市、2009)。2008年2月2日夜の降雪開始時の東京の気象要素の時系列(第2.2.5図)では、みぞれが降り始めたときの気温は6℃程度だが湿度は40%以下で乾燥しており、予報現場においても特に降水の降り始めが雨となるか雪となるかについて第2.2.4図を積極的に利用する。ただし、上空に0℃以上の層がある場合は、この図が適用できない場合がある点に留意する(降水種別ガイダンスではこの点も考慮されている)。なお、積雪開始後の湿度は1989～2012年の南岸低気圧による積雪事例のほぼ4分の3の事例において90%以上で一定となっており、積雪後の雨雪の変化は(低気圧の接近に伴い下層で暖気が入る場合を除いて)ほぼ地上の気温に依存すると考えてよい。



第2.2.4図 降水種別判別図

赤線は雨の出現確率で、右から0.95、0.5、0.05を示す。古市(2009)に加筆。



第2.2.5図 2008年2月2日～3日の東京の降雪開始時の気象要素の変化

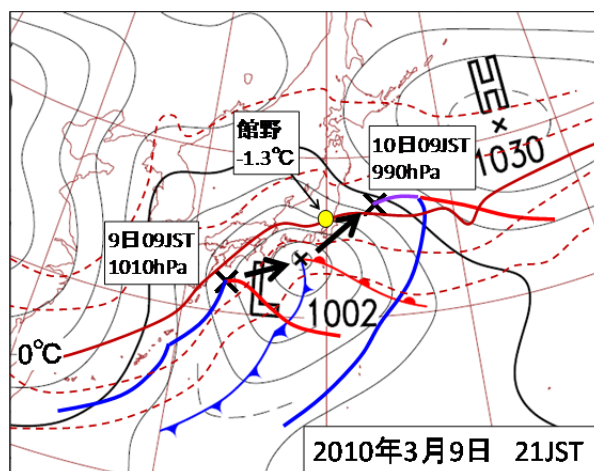
(3)降雪時の大気下層の特徴

降水形態の予報精度を高めるためには、地上にかけて雪が融けないような気温の鉛直分布が形成されるか否かを予想することがポイントである。

ここでは、降雪時の下層の気温低下をもたらす現象として、関東平野に形成される滞留寒気と、北東から流れ込む下層寒気について述べる。

①関東平野に形成される滞留寒気

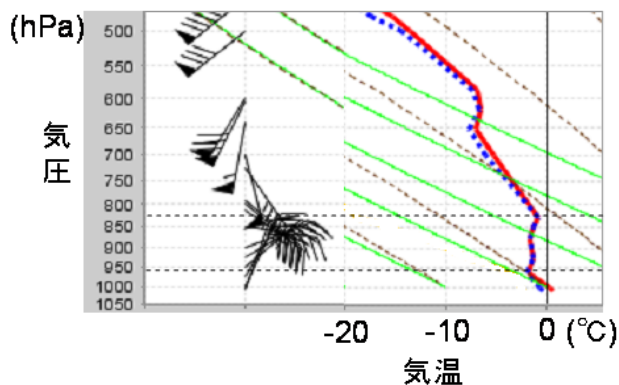
2010年3月9日の降雪事例では、低気圧の経路が陸地に近く、館野 850hPa 気温(-1.3℃)は平均的な積雪時の気温に比べ高かったが(第2.2.6図)、関東地方では内陸部を中心に大雪となった(熊谷や前橋で9cm、秩父で24cm、東京は0cm)。このときの館野エマグラムでは(第2.2.7図)、上空から1000hPa(125m)



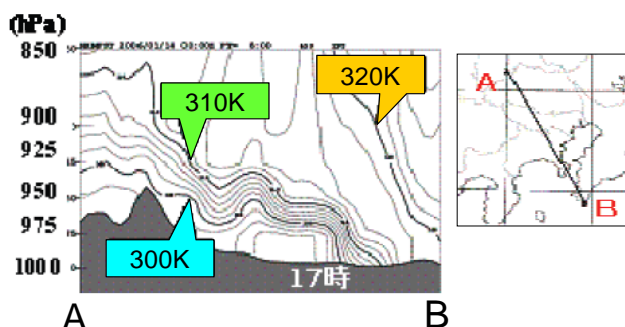
第2.2.6図 2010年3月9日21時の地上天気図
前後12時間の低気圧と前線の位置を重ねてある。茶色の点線及び実線は850hPa等温線(間隔は6℃毎)。

付近にかけ氷点下となっており、0°C以下の気層が地表に近い所まで達していた。このような下層の冷気の存在は降雪時にしばしば見られ、富山(2001)は降雪時に関東平野の下層に冷気塊が形成されること、冷気塊の形成メカニズムとして、内陸部に下層だけ乾燥した局地冷気塊が存在し、降水粒子が内陸部の乾燥した冷気塊の中を通過し蒸発の潜熱吸収により気層を急激に冷却し、より冷たい湿った気塊を形成するとしている。本稿ではこの冷気塊を滞留寒気と呼び、「降水による冷却や夜間の日変化的な冷却により平野部の陸上部分に形成される冷気層」と定義する。

滞留寒気の形成は関東平野の地形に起因する部分が大きく、降雪時だけではなく沿岸前線による大雨時にもみられる。2006年1月14日の沿岸前線による大雨事例の報告(竹橋ら、2006)では、概ね950hPa付近を上端とする冷気塊が関東平野の山沿いで形成され、南へ移動する様子がJMANHMで再現されており(第2.2.8図)、降雪時に形成される滞留寒気も同程度の厚みを持つことが想像される。降雪時に形成される滞留寒気上端の高度は、富山(2001)に「930~970hPa付近に存在する安定層」の記述がある程度で明確に調査されたものがなく、今回、館野の高層観測により滞留寒気上端の高さと滞留寒気内の気温減率について調査した。調査事例は、1989~2012年の南岸低気圧による積雪事例で、9時又は21時において、館野が滞留寒気に覆われていると判断できる10例(館野の地上気温1.5°C以下、館野付近の温度傾度が小さい、館野周辺のアメダスの風速が4m/s未満、をすべて満たすもの)である。滞留寒気の上端は、気温の鉛直分布の安定層の下面付近、地上から上空にかけ風速が急に強まるところ、風向が北~北西風から東~南東に変化する



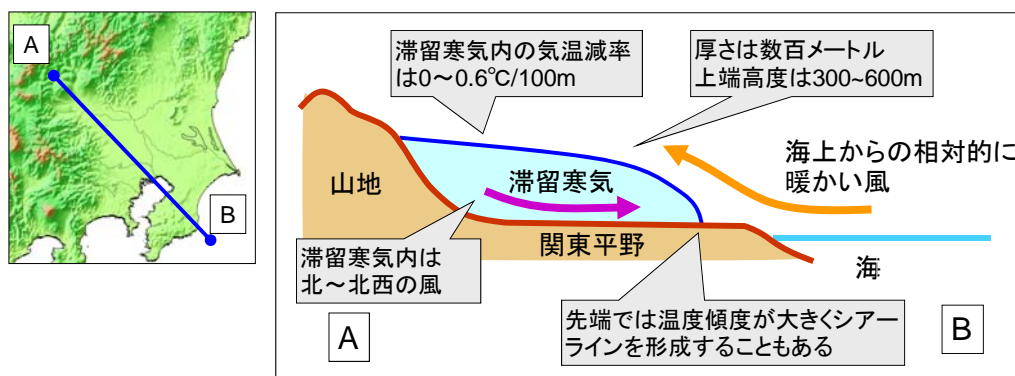
第2.2.7図 2010年3月9日21時の館野エマグラム
赤実線は気温、青点線は露点温度。



第2.2.8図 2006年1月14日の事例による、JMANHMでの関東内陸に形成される冷気塊についてのシミュレーション結果
実線は温位を示す。

第2.2.2表 滞留寒気の厚さと滞留寒気内の気温減率

	平均値	最大値	最小値
上端の高さ(m,hPa)	470(959)	639(937)	321(984)
気温減率(°C/100m)	0.3	0.6	-0.1



第2.2.9図 滞留寒気の構造を示す模式図
矢印はA-B方向に沿う風の成分を示す。

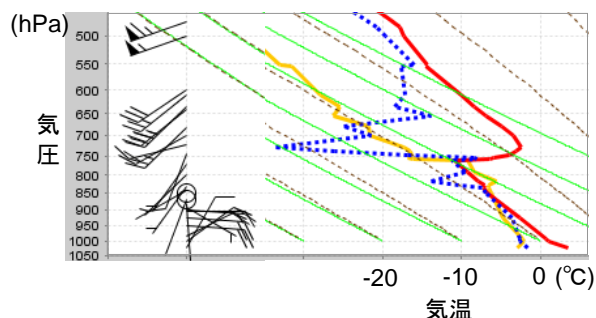
ところなどを目安に推定した。調査結果によると、滞留寒気の上端高度は 300~600m で平均は約 500m (約 950hPa) であり、富山(2001)の報告と一致する(第 2.2.2 表)。また、滞留寒気内の気温減率は、0~0.6°C/100m で平均は 0.3°C/100m と小さい。以上から、降雪時に関東平野に形成される滞留寒気の構造についての模式図を示す(第 2.2.9 図)。

◎現業作業における滞留寒気解析の着目点

現業作業では局地解析により滞留寒気の形成を把握することが非常に重要である。具体的には、海面気圧は 1hPa 毎、地上気温は 1°C 毎に解析し、流線解析を行い地上風系・温度場と雨雪の分布を確認する(降り始めにおいては湿度の監視も重要)。ここでは 2010 年 3 月 9 日の事例(第 2.2.6、2.2.7 図)により、滞留寒気形成時の実況監視について局地解析を中心に示す。

(ア) 滞留寒気形成前

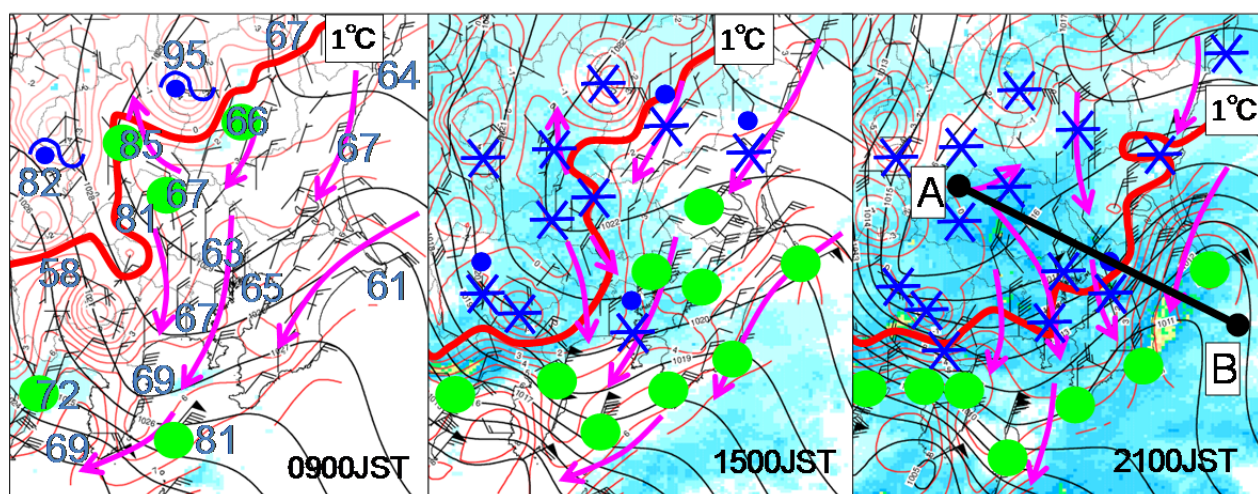
滞留寒気形成前の 9 日 9 時(第 2.2.11 図(a))では、低気圧に伴う雨雲がかかり関東地方北部を中心に降水が始まったが、気温・湿度ともに高く降り始めは雨だった。一方、降水が開始する前の地域はやや乾燥しており(湿度 60~70%)、降水種別判別図(第 2.2.4 図)により雪となる可能性がある気温を確認しておく。また、中層から下層にかけて乾燥した層が存在する場合は、降水粒子の蒸発により大気の潜熱が奪われ気温が低下する。館野のエマグラム(第 2.2.10 図)では乾燥した層が存在し、数値予報モデル以上に気温が低下する可能性に留意する。この段階では、関東平野には海上から相対的に暖かい北東風が流れ込み、関東平野西側の山沿いで、北西に向かう流れと山沿いに沿って南下する流れに分流している点の特徴である。



第 2.2.10 図 2010 年 3 月 9 日 9 時の館野エマグラム
赤実線は気温、青実線は露点温度。

(イ) 滞留寒気形成期

滞留寒気形成期(第 2.2.11 図(b))においては、関東平野西側の山沿いからの北西風が顕在化すること、それと共に気温 1°C 線が南下し、雪の領域が拡大することが特徴である。地上気温 1~2°C 線の動向に着目するのは、積雪が増加する中での地上湿度の最小値は約 80% であり(1989~2012 年の南岸低気圧による積雪事例による)、降水種別判別図(第 2.2.4 図)では湿度 80% で雪(雨の出現確率 5% 以下)となる気温は約 1.5°C だか



(a) 滞留寒気形成前

(b) 滞留寒気形成期

(c) 滞留寒気形成完了

第 2.2.11 図 2010 年 3 月 9 日の 9 時、15 時、21 時の局地解析

赤実線：地上気温(1°C 毎)、黒実線：海面気圧(1hPa)、赤紫矢印：地上流線、(a) 図の数値は湿度。●：雨、⊙：着水性の雨又は霧雨、*：みぞれ、*：雪。

らである。また地上風と天気との関係では、相対的に暖かい海風である北東風が卓越している沿岸部で雨となっている点に留意する。

(ウ) 滞留寒気の形成完了

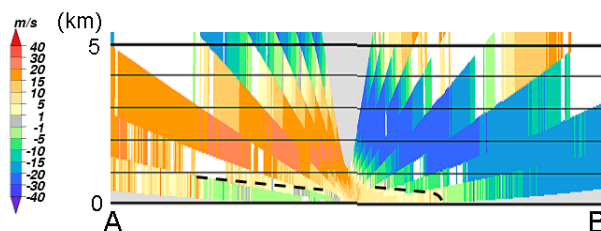
滞留寒気の形成完了段階においては(第2.2.11図(c))、内陸部には局地高気圧が形成され関東平野では北～北西風が卓越する。ドップラーレーダーではA-B断面の1km以下に風の鉛直シアーが見られ(第2.2.12図)、滞留寒気の確認ができる。地上気温1°C線は東京湾付近まで南下し、関東平野は千葉県を境としてほとんどの地域で雪となる。風は内陸部では全体に弱いですが、沿岸部では温度傾度が大きく北よりの風が卓越する。1989～2012年の南岸低気圧による積雪事例では、積雪時に形成される関東平野の地上風の特徴は、

- (a) 前橋・熊谷方面から東京湾にかけては北西～北風
- が、宇都宮・水戸方面からは北～北北東風が卓越
- (b) 前橋や熊谷は風が弱く静穏も多い

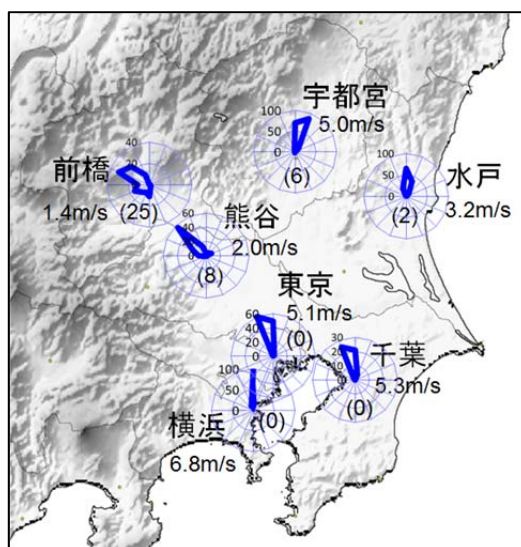
などである(第2.2.13図)。これらから、東京・横浜・千葉で積雪となるのは風向が北～北北西になってからであるといえる。

② 北東から流れ込む下層寒気

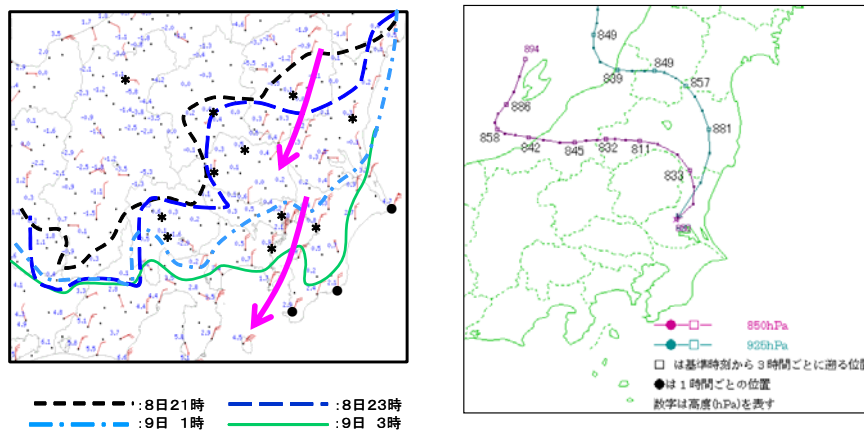
総観規模の下層気温の低下要因として、北東からの下層寒気の流入がある。田代ら(2003)の2002年12月9日の降雪事例の解析では、関東地方北部で蓄積された下層寒気が関東地方南部へ流出することが示されており、栃木・茨城方面からの北北東の風が関東地方南部まで達している(第2.2.14図左)。この事例では、925hPaや850hPa付近の風が北東～東北東風に変化して下層気温が低下しており、流跡線解析から、日本海側の下層寒気が東進した後、福島県浜通り方面から関東平野へ流入し、降水現象による融解・蒸発の相変化でさら



第2.2.12図 2010年3月9日21時の東京レーダーによるA-B方向(第2.2.13図(c))のドップラー速度の断面寒色系はサイト(中央付近)に近づく風、暖色系はサイトから遠ざかる風で、点線は風の鉛直シアーを示す。



第2.2.13図 南岸低気圧による積雪時の風配図 数値は風速の平均値、()内は静穏の回数。



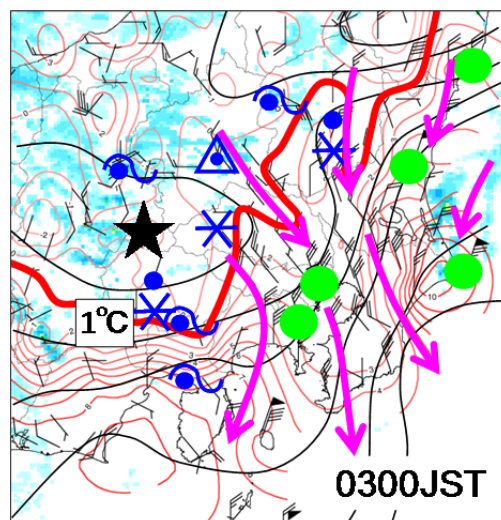
第2.2.14図 2002年12月9日3時のアメダス実況と1.5°C等温線の変化(左)と12月9日9時の流跡線の解析結果 田代ら(2003)に一部加筆。

に気温の低下をもたらしたとしている(第2.2.14図右)。この北東風は滞留寒気形成時に東海上から流入する相対的に温かい風(第2.2.11図(b))とは異なり、水戸のウィンドプロファイラの下層の受信強度の強まり(雨からみぞれへの変化を示す)や、北東風が吹いている茨城県から千葉県北西部にかけての地上気温の低下と雨から雪への変化(SYNOPやMETARにより確認)などに着目して、北東からの下層寒気の進入を監視することが重要である。

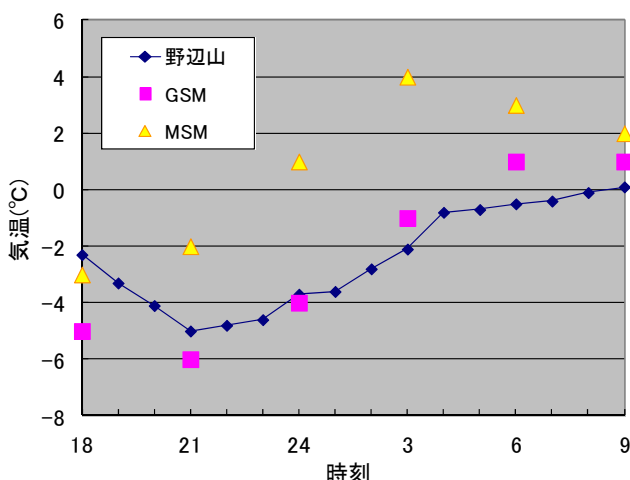
(4) 雪から雨への変化

降水が雪のまま終わるのか、途中から雨に変化するかは、積雪を予想する上で重要である。雪から雨への変化は、雪が融けないような気温の鉛直分布が解消することで起こり、その要因は、(ア)関東平野に形成される滞留寒気の消滅、(イ)低気圧の接近による下層暖気の移流、がある。(ア)及び(イ)の複合事例として、第2.2.11図(C)の6時間後の2010年3月10日3時の局地解析を示す(第2.2.15図)。この時点では低気圧は関東の東海上に進んだが、日本海には低圧部が残る。関東平野の地上付近は南部を中心に北西風が強まって発散場となり、滞留寒気の層は南部ほど薄く消滅過程にある。

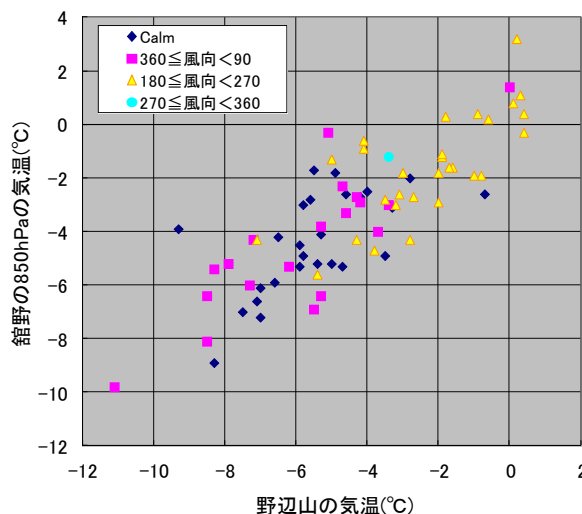
一方、滞留寒気より上の層は暖気が入り、北部ではみぞれや凍雨に変化している(低気圧後面で総観規模の下層寒気が入り、滞留寒気が強制的に海上に押し出されて消滅する場合もある)。(イ)の下層暖気の移流に関しては、南岸低気圧の事例では関東甲信南部の850hPa付近の等温線は概ね東西走向となるため、標高の高いアメダスの野辺山(長野県、標高1350m、第2.2.15図★印)の気温を実況監視に使うと効果的である。前述の事例では、未明にかけて野辺山の気温が上昇しておりGSMの850hPa予想気温と対応が良い(第2.2.16図、MSMはバイアスがあるが上昇する傾向は予想している)。1989~2012年の南岸低気圧による積雪事例では、野辺山の気温と館野の850hPaの気温には明瞭な正の相関が見られ、野辺山の気温の変化傾向を監視することにより850hPaの気温の動向を推定できる(第2.2.17図)。



第2.2.15図 2010年3月10日3時の局地解析
凡例は第2.2.11図に同じで、第2.2.11図(C)の6時間後(△は凍雨、★はアメダス野辺山)。



第2.2.16図 2010年3月9日18時~10日9時の野辺山の気温時系列とGSM、MSMの850hPa気温
GSMの初期値は9日00UTC、MSMの初期値は9日03UTC。



第2.2.17図 野辺山の気温と館野850hPa気温の関係
野辺山の風向別に色分けしてある。1989~2012年の南岸低気圧による降雪事例による(データ数75個)。

2. 2. 2. 2 降雪量の予測手法

降雪量の予想は基本的には雪水変換法の考え方による。すなわち、

$$\text{降雪量(cm)} = \text{雪水比} \times \text{降水量(mm)}$$

により降雪量を予想する。ここでは、南岸低気圧による降雪時の雪水比と、積雪が増える条件について述べ、最後に予想図を用いた具体的な量的予想の方法について述べる。

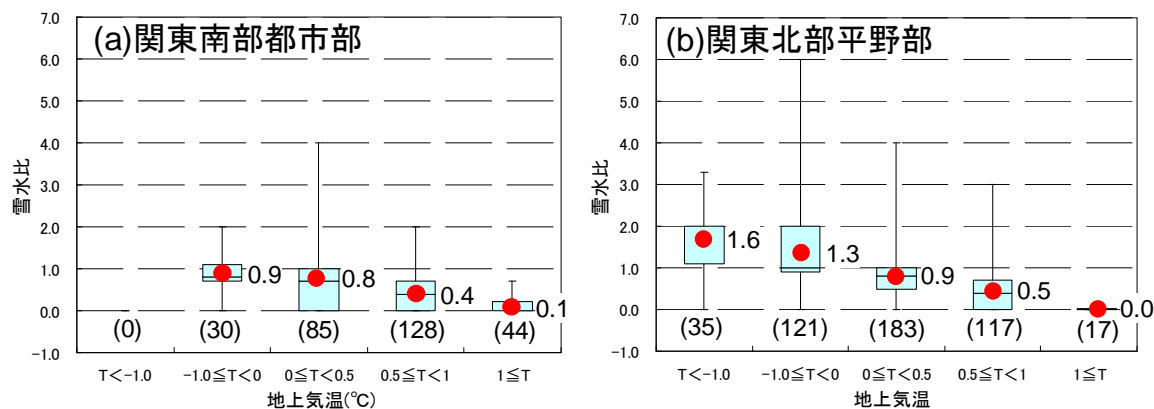
(1) 雪水比

現在、最大降雪量ガイダンスの作成に利用されている雪水比は、雪水比を降水量ごとに層別化し、雪水比と気温との関係をロジスティック関数を用いて決めている(古市、2009)。この雪水比は、全国一律に気圧配置の区別なく作成されており、南岸低気圧による降雪に最適化されているわけではない。そこで、今回、1989～2012年の南岸低気圧の積雪事例を用いて、関東地方の南岸低気圧に特化した雪水比を調査した。

調査対象官署は東京・横浜・千葉・熊谷・前橋・宇都宮の6地点で、ここでは東京・横浜・千葉(以下、関東南部都市部)、熊谷*・前橋・宇都宮(以下、関東北部平野部)に地域分けした(水戸は滞留寒気場内にあっても鹿島灘からの相対的に暖かい東風が上空に乗り上げる場合があり、関東南部都市部や関東北部平野部の性格を併せ持つためここでは除いた)。調査は前1時間降水量と前1時間積雪深差の対応を比較できる毎正時のデータを利用し(データ総数は900個)、気温(正時と前1時間正時の平均)により層別化した。この調査から、関東南部都市部と関東北部平野部では、

- ・ T(気温) $\geq 0^{\circ}\text{C}$ では雪水比の地域差は小さい
- ・ 関東南部都市部は $T < -1^{\circ}\text{C}$ で積雪となった事例はなく、雪水比は大きな値とはならない
- ・ $T < 0^{\circ}\text{C}$ では、関東北部平野部で雪水比が大きく、気温が低いほど雪水比が大きくなる傾向がある
- ・ 雪水比の最小～最大値の幅は大きい、25%値～75%値の幅は0.5～1程度で、中央値と平均値の差は小さい(0.1～0.3)

といった特徴がある(第2.2.18図)。以上から、降雪量予想で利用する雪水比は各気温階級別の平均値を基準として考えることとする。



第2.2.18図 気温階級別の雪水比の平均値と箱ひげ図

凡例は第2.2.3図に同じ。()内の数値はデータ数を示す。

(2) 積雪となる条件

降雪がすべて積雪となるわけではなく、関東南部都市部では湿った雪のため雪は降っても積もらない場合もある。逆に、はじめ雨により路面に水溜りができていても、短時間で積雪となる場合もある(例えば2010

*熊谷は関東地方南部に属する埼玉県の都市であるが、本稿では関東北部平野部として扱う

年2月1日の事例)。数cmの積雪により大きな影響がでる関東南部都市部では、どのような条件で積雪が増えるのかは重要な問題であり、1989～2012年の南岸低気圧の積雪事例により、気温階級別に前1時間降水量と前1時間積雪深差の関係を調べた(第2.2.19図)。この調査から、積雪が増加するときの特徴は、

- ・2cm以上増加したのは気温1℃以下のとき
- ・気温0.5℃未満かつ前1時間降水量2mm以上の場合は67%の割合で2cm以上増加

などである。逆に、積雪が増加しないときの特徴として、

- ・気温1.5℃を超える場合
- ・前1時間降水量1.5mm以下の場合は、気温0℃以上1℃未満の事例のうち約5割は積雪が増えない

などがある。つまり、積雪が増えるのは気温1℃以下で1時間に2～3mm以上の降水がある場合で、降水量が少ないと気温が低くても積雪は増えない。この傾向は関東北部平野部についても同様であった。

(3)降雪量の予想

降雪量の予想でも、はじめに実況資料や予想資料から気象シナリオを作成するところは、大雨に対する予報作業と同様である。ただし、雪の予想に関しては、降水形態の予想が加わり、特に関東地方では降雪時にみられるメソスケール場の特徴について、数値予報モデルでどのように予想されているかについて詳細に検討することが重要である。以下では、総観場、及びメソスケール場での予想図の着目点、降雪量の具体的な予測手順について述べる。

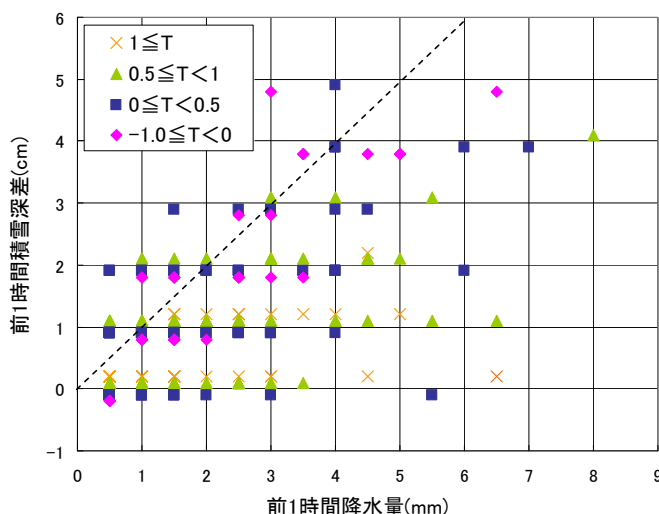
①総観場の予想による雪のシナリオ

低気圧の経路や発達に関して、以下の点に注意を払う必要がある。

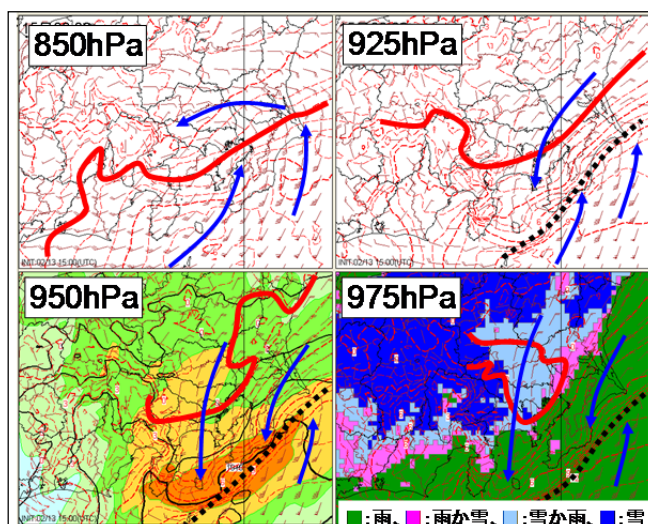
- (ア) 実況と数値予報モデルの差
- (イ) 数値予報モデル間の違い

(イ)については基本的には主要じょう乱解説図のシナリオに従うが、予想誤差によるサブシナリオも検討する必要がある。すなわち低気圧が、

- ・モデルの予想より陸地に近い
→雨量は多くなり、雪の場合は降雪量増加、
下層暖気入り雨となる可能性は大
- ・モデルの予想より陸地から遠い
→雨量は少なくなり雪の場合は降雪量減少、
下層暖気入らず雪の可能性は大
- ・モデルの予想より発達する
→経路が同じであれば、下層暖気により入り雨量は多くなるが雨の可能性大。ただし、
陸地から離れて発達しながら進む場合は、
北から下層寒気を引き込み大雪となる



第2.2.19図 気温階級別の前1時間降水量と前1時間積雪深差の関係(関東南部都市部)
点線は雪水比1に対応、データ総数287個。



第2.2.20図 MSM予想図による滞留寒気形成の予想
2011年2月13日15UTC初期値MSMのFT24。赤実線は気温0℃線、
黒点線は風のシア、矢印は流線。950hPaには前3時間降水量
を、975hPaには降水種別ガイダンスも重ねて表示してある。

等を検討する。また、降水ピーク時間帯が夜間となる場合は昼間に降る場合より積雪が多くなる可能性があり(一般的には、降雪時においても日射は0ではなく、昼間のほうが夜間より気温が高い)、低気圧の進行速度の誤差の影響も検討する。雪に関する知見で述べた「大雪をもたらす低気圧の特徴」や「850hPaの温度場」なども利用して降雪に関するシナリオの概略を作成する。

②メソスケール場の予想による雪のシナリオ

次に、数値予報モデルにより関東平野における850、925、950、975hPaの風・気温の予想を確認する。850hPaでは低気圧周辺の寒(暖)気移流を確認し、925hPa以下では、降水と共に関東平野の最下層に0℃以下の領域が形成されていく場合は滞留寒気が形成されると判断する(第2.2.20図)。降水量が多い場合はGSMでは雪の蒸発や融解に伴う気温の低下が十分に表現できない場合があること(原ら、2013)、滞留寒気は関東地方の地形に影響を受けて形成されるため、一般的には地形の細かいMSMの方が下層気温の精度が高いと考えられること、などから、利用する数値予報モデルはMSMを主体とする。ただし、低気圧の進路がモデル間で大きく異なる場合は想定する進路に応じて下層気温の予想を修正して考える必要がある。また、実況値と数値予報モデルの下層気温を比較し(アメダス野辺山の気温と850hPa気温、東京航空気象台のACARSによる下層気温とモデルの各層の予想気温など)、下層気温の変化のシナリオを逐次修正する。降水形態が雪となる時間帯は降水種別ガイダンスや(第2.2.20図右下)、数値予報モデルの下層気温から予想する。滞留寒気の平均的な高さは950hPa程度で気温減率が0~0.6℃/100mであること(第2.2.2表)や、積雪時のMSMの平均的な下層気温の値(第2.2.3表、2008年以降の南岸低気圧による1cm以上の積雪事例による)などから、950hPaで気温0~-1℃程度が予想されている場合は雪の可能性を考える必要がある。

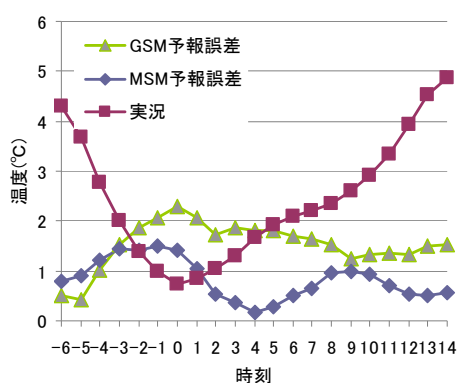
第2.2.3表 積雪時のMSMの下層気温の平均値()内は気温減率(℃/100m)で実況の地上気温と気圧から推定した。関東南部都市部、及び関東北部平野部の代表として東京と熊谷の値を示す。

	975hPa	950hPa
東京	0.0 (0.3)	-0.6 (0.4)
熊谷	-0.1 (0.1)	-0.7 (0.2)

③降雪量の予想

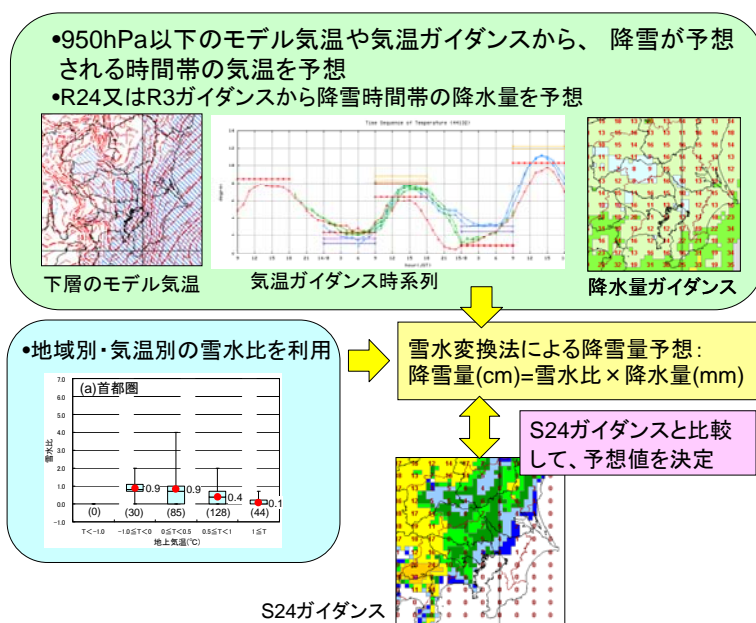
関東地方(平野部)における降雪量の予想手順は以下の通りである(第2.2.22図)。

- ・数値予報モデル(主にMSM)の950hPa以下の気温予想や地上気温ガイダンスを参考に、降雪予想時間帯の気温を予想する。2008~2012年の東京及び熊谷の積雪事例による調査では、地上気温ガイダンスは



第2.2.21図 東京の積雪時における地上気温とガイダンスの誤差

2008年~2012年の積雪事例(5事例)の平均値。積雪を観測し始めた最初の正時を時刻=0としてある。



第2.2.22図 降雪量の予想手順

正のバイアスがあり、積雪時の気温はガイダンスより低くなる点に留意する(RMSEはGSMで1~2°C、MSMで約1°C)。また、東京ではMSMガイダンスの予報誤差は積雪開始後4時間後に最小となり、MSMガイダンスの気温低下は遅れる傾向がある点にも留意する(第2.2.21図)。

- ・24時間最大降水量ガイダンス(R24)又は3時間最大降水量ガイダンス(R3)により、降雪が予想される時間帯の降水量を予想する。なお、関東地方のように降雪量が少ない地域では、実際に何cm積もるかが防災上重要であり、前節の積雪が増える条件等を考慮し、積雪となる可能性がある時間帯の降水量を中心に予想する。
- ・地域別、気温階級別に求めた雪水比(第2.2.18図)を使用し、雪水変換法により降雪量を予想する。
- ・予想した値を24時間最大降雪量ガイダンス(S24)と比較し、最終的な予想値を決める。

2.2.2.3 南岸低気圧による関東地方の降雪時の気象特性についてのまとめ

南岸低気圧による関東地方の降水の雨雪判別は、定性的には低気圧の経路や850hPaの気温に基づいて予想することはできるが、より精度を上げるためには、特に下層において雪が融けないで地上まで達するような気温の鉛直分布が形成されるか否かを的確に予想することが重要である。このため、下層の冷気層を作る現象として関東平野に形成される滞留寒気があり、その構造や形成要因、形成時の気圧場や気温場、風系の特徴を十分に理解して予報作業や実況監視を行うことが重要となる。降雪量の予想は南岸低気圧の降雪に特化した雪水比を利用した雪水変換法による予想値と最大降雪量ガイダンスを比較しながら見積もるが、雪水変換法に地上気温ガイダンスを利用する際は積雪時には予想気温に正のバイアスがある点に注意が必要である。関東地方南部の都市部では積雪が何cmになるのかが防災上重要であり、雪が降るとしても2~3mm/h程度の降水がないと積雪は増えない点にも留意する必要がある。

参考文献

- 柴山 武, 1974: 降雪の予報. 天気予報指針(実用編), 気象庁予報部, 253-277.
- 高野功, 1999: 冬季の南岸低気圧と新しい低気圧モデル—1994年2月12日の事例—. 気象研究ノート, **193**, 195-202.
- 竹橋春江, 山下芳晴, 濱口正尚, 2006: 関東内陸に残留し維持される冷気塊について—2006年1月14日の事例から—. 平成18年度東京管区気象台調査研究会誌, 131-149.
- 田代憲一, 上杉和哉, 石橋俊之, 岩下裕二, 2003: 事例解析—南岸低気圧による関東・甲信地方の大雪2002年12月9日—. 平成15年度関東甲信地方予報技術検討会資料, 4-12.
- 富山芳幸, 2001: 関東地方の降雪に関わる気温急降下—1999年2月11日の事例解析—. 天気, **48**, 811-821.
- 原旅人, 白山洋平, 檜垣将和, 氏家将志, 2013: 事例検討 2013年1月14日の関東大雪. 平成25年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 71-89.
- 古市豊, 2009: 最大降雪量ガイダンス. 平成21年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 27-36.
- 松尾敬世, 2001: 雪と雨をわけるもの. 天気, **48**, 33-37.
- 八尾孝, 山口俊一, 松原竹男, 2001: 南岸低気圧による関東・甲信地方の大雪(2001年1月27日). 平成13年度量的予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-27.

2. 2. 3 2013年1月14日の大雪に対する予報作業*

本項では、前項の知見に基づいて、2013年1月14日の大雪事例について、東京23区を対象として、降雪量の見積もりを主とした予報作業について説明する。

(1) はじめに

南岸低気圧に伴う雨雪判別や降雪量の見積もりは、2.2.2.2(3)の通り進めていくが、前項でとりあげた滞留寒気形成をはじめとした、地上・下層気温場を綿密に監視・予測する必要がある。本稿では、前項で述べた知見に基づいて、以下の①、②で示す手法を用いて気温を監視・予測する。手法の具体的な利用方法については(2)で説明する。地上気温と雪水比の関係(2.2.2.2(1)参照)に基づいて5つの気温階級(0℃未満、0℃以上0.5℃未満、0.5℃以上1℃未満、1℃以上1.5℃未満、1.5℃以上)と雪水比の関係を設定し(第2.2.4表)、予測した気温がどの階級に属するかを決定し、雪水変換法により降雪量を予想する。

第2.2.4表 地上気温と雪水比の関係

地上気温	0℃未満 (-0)	0℃以上 0.5℃未満 (0-0.5)	0.5℃以上 1℃未満 (0.5-1)	1℃以上 1.5℃未満 (1-1.5)	1.5℃以上 (1.5-)
雪水比(関東南部都市部)	0.9	0.8	0.4	0.1	- (注)

(注) 1.5℃以上でも降雪はあるが積雪は増えない。ここでの表記は便宜上「-」とする。

① 気温監視手法

従来は、地上観測を用いた監視が主であったが、本項では気温場を三次元で監視するため、毎時大気解析(以下、HA)を用いた手法を試みる。注意すべき点としては、HAそのものでなくHAとMSMとの差に注目して、気温予測シナリオの修正に用いる。なお、代表的な最下層の温度場として950hPa・975hPa・地上の気温場を中心に監視する。

② 気温予測手法

前項で示された手法を基にした東京23区の予測手法の詳細について述べる。積雪時の気温ガイダンス(以下、ガイダンスはGDと記述)は地上気温を精度よく予測できない場合が多いため(2.2.2.2(3)③参照)、GSMまたはMSMの降雪量GDの少なくともいずれかに降雪量がでている時は、「積雪の可能性あり」として、以下の地上気温予測に関する指標を用いる。なお、降水量が多い場合、GSMでは降水の蒸発や雪の融解に伴う気温の低下が十分に表現できない場合があること(原ら、2013)から、GSMより精度がよいMSMの予測値からこれら指標を算出する。

(ア) MSM975hPa気温から予測した地上気温(以下、SFT_M975)

積雪時のMSM下層温度と地上気温の実況値との関係に関する知見(2.2.2.2(3)②参照)に基づいて地上気温を見積もる。東京23区では、気温減率0.3(℃/100m)、975hPaの高度を約320m(2006年以降の東京での積雪9事例について、降雪量ピーク時の気温と海面気圧の平均値、すなわち0.8℃と1014.3hPaを用いて導出)とすると、

$$\text{SFT_M975} = \text{MSM975hPa 予測気温} + 1$$

(イ) 積雪時のバイアスを考慮したMSM気温GD(以下、SFT_SBG)

積雪時のMSM気温GDと実況とのバイアスに関する知見(2.2.2.2(3)③参照)に基づいてGDを修正する。ここでは、東京の気温GDを用いて、

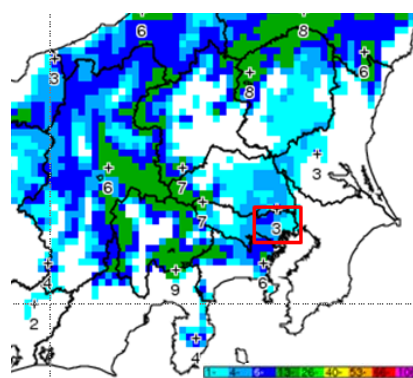
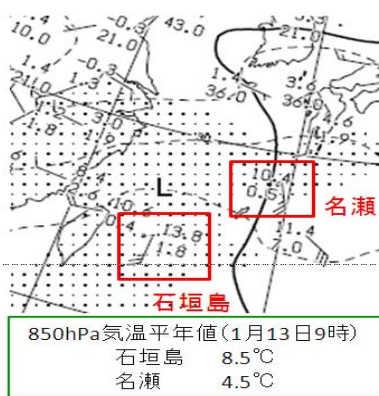
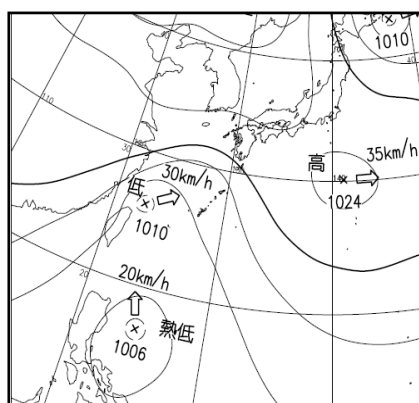
$$\text{SFT_SBG} = \text{MSM 気温 GD} - 1$$

*岸本 賢司 土井内則夫 梅津浩典(気象庁予報部予報課)

(2) 予報作業

① 1月13日夕方予報以前

13日9時に台湾付近で低気圧が発生。この低気圧やフィリピン付近の熱帯低気圧、日本の南の高気圧により南西諸島に暖湿気が流入し、850hPa 気温が平年値より約5°C高い(第2.2.24図)。低気圧は急発達しながら14日に関東の南を通過する予想となる。GSM(12日18UTC 初期値)では14日の東京の850hPa 予想気温は0~-3°C、MSM(12日21UTC 初期値)も予想のある14日昼過ぎまでは同様に、850hPa 気温からでは雪となるか判断が難しい(2.2.2.1(2)②参照)。GSMは東京23区で降雪量なし、MSMは最下層の気温がGSMより低く14日昼過ぎには東京23区にも降雪域が広がる予想(第2.2.25図)となる。14日昼過ぎの1時間最大降水量GD(R1max)ではGSMでは約30mm、MSMでも約10mmの予想で、最下層の気温がMSM並みに低くなった場合には短時間でも大雪になる可能性がある。

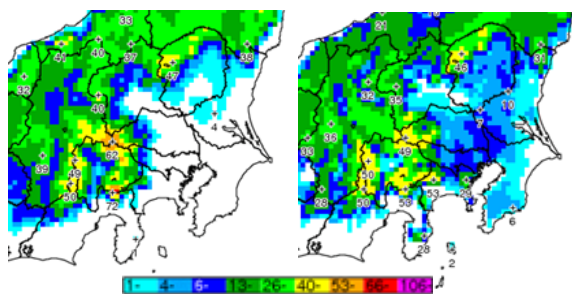


第2.2.24図 天気図(13日9時)

左：速報天気図 右：850hPa 高層天気図(赤枠内は石垣島と名瀬の気温・湿数)

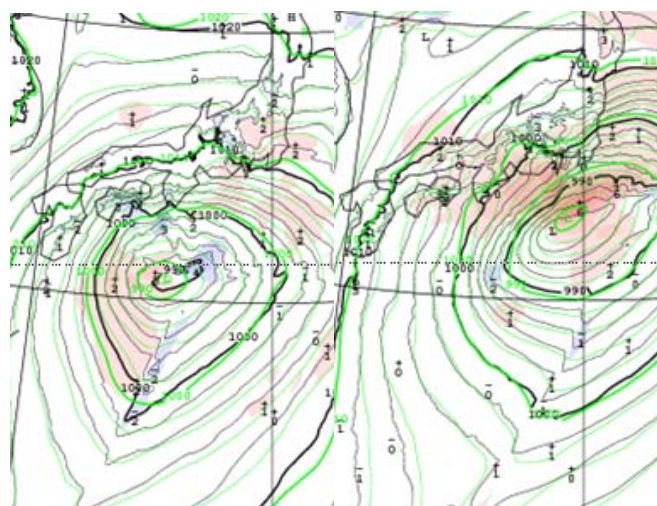
第2.2.25図 3時間最大降雪量GD
(14日12-15時)

MSM(12日21UTC 初期値)
赤の枠内：東京23区



第2.2.26図 24時間最大降雪量GD (13日21時-14日21時)

左：GSM(13日00UTC 初期値) 右：MSM(13日03UTC 初期値)

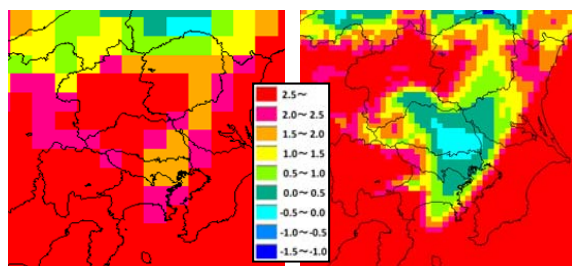


第2.2.28図 GSMとMSMの地上予想比較

黒線：GSM(13日00UTC 初期値)の等圧線

緑線：MSM(13日03UTC 初期値)の等圧線

左：14日9時 右：14日15時



第2.2.27図 975hPaの予想気温(14日15時)

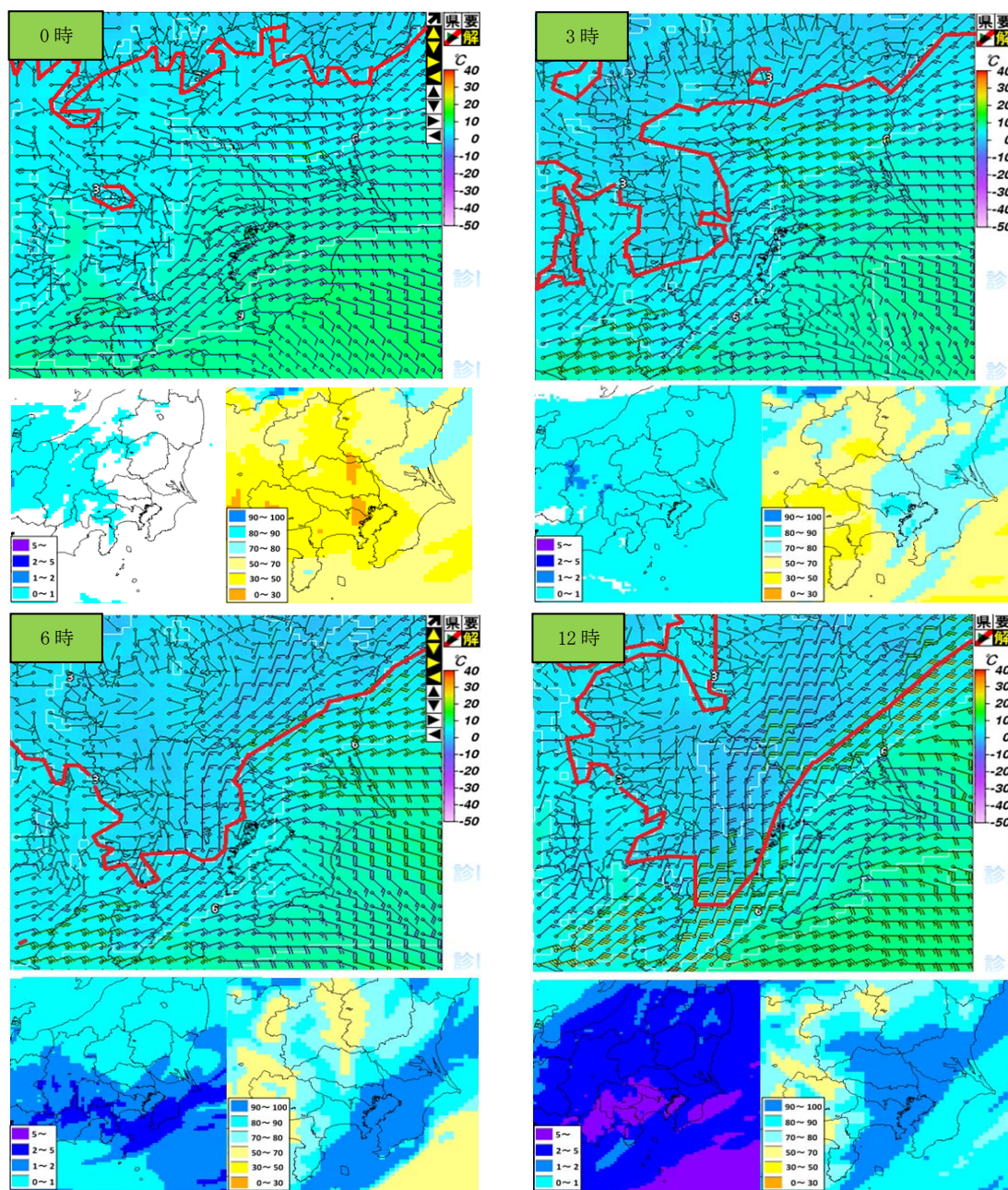
左：GSM(13日00UTC 初期値) 右：MSM(13日03UTC 初期値)

② 1月13日夕方予報

GSMは降雪量なし、MSMは降雪量ありの予想(第2.2.26図)となっていた。GSMとMSMの降雪量の予想の

違いは、関東地方南部への下層寒気の広がりやの予想が MSM で顕著で、GSM に比べて 2 度程度低いのである（第 2.2.27 図）。降水量が比較的多い予想であることや GSM・MSM 間で低気圧の位置の予想に差がないこと（第 2.2.28 図）から、MSM を採用する（2.2.3(1)②参照）。

まず、MSM の予想する下層寒気の形成・強化を、975hPa の気温（ここでは 3°C 線に注目）・風・湿度、1 時間降水量から見ていく（第 2.2.29 図）。関東地方では南岸低気圧の接近に伴い海からの湿った東寄りの風となって、乾燥域は沿岸部から次第に縮小する。広い範囲で毎時 1mm 以下の弱い雨が降り始め、乾燥状態の残る内陸部、特に関東西部の山沿いで寒気が拡大する。これは降水の蒸発による滞留寒気形成（2.2.2.1(3)①参照）に対応する。西部の山沿いの低温域は、北部の山沿いの低温域（2.2.2.1(3)②参照）と一体化して南部に広がる。6 時以降は雨が強まって全域で湿度が高くなるが、12 時には埼玉県周辺で低温域が顕著となる。これは MSM の予測結果の詳細な解析（原ら、2013）から、熊谷では気温 0°C 付近の融解層

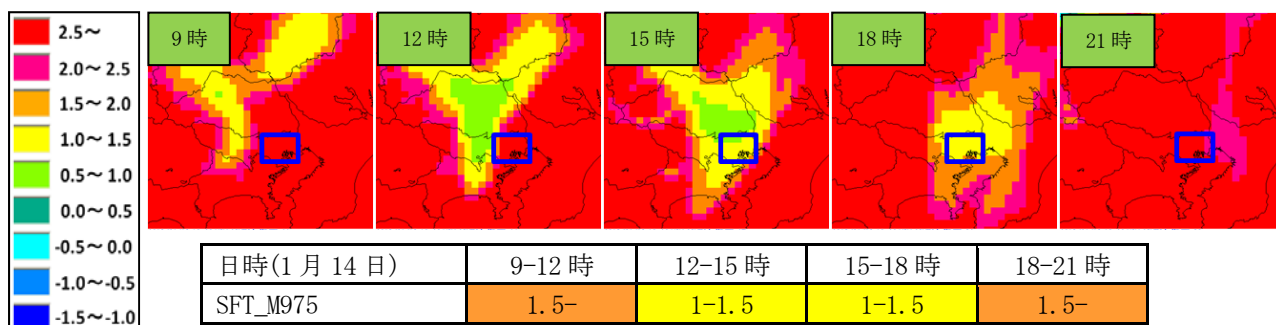


第 2.2.29 図 MSM (13 日 03UTC 初期値) による予想 (1 月 14 日)

上 : 975hPa 気温・風、赤線は 975hPa 3°C 線 左下 : 1 時間降水量 (mm) 右下 : 975hPa 湿度 (%)

の高度が下がり、9時以降は高度約500m(約950hPa)以下で雪の融解による冷却が顕著となることに対応する。ただし、降雪に至るプロセスは複雑で、そのプロセス表現に関して数値予報モデルの予測には不確実性があり(原ら、2013)、下層寒気の実況監視結果に基づいてモデル予測を適宜補正することが重要となる。

次に、MSMが降雪を予想する14日昼過ぎから夕方にかけてとその前後を含む時間帯の地上気温を見積もる。まず、SFT_M975については、本節では第2.2.30図に示す通り、設定した気温階級ごとに色付けをした毎時の気温予想図を用いて、各時間帯で東京23区を最も占める気温階級を図から決定する。SFT_SBGは、東京のMSM気温GDの毎時値を用いて、各時間帯の平均値をもとめて、気温階級を決定する。域内の3時間最大降水量GD(R3max)については、GSMがMSMの最大2倍程度と差異が大きい(第2.2.31図)ことから、この時点では、GSMとMSMの平均した値を用いる。



第2.2.30図 MSM975hPa 気温から予測した地上気温(SFT_M975)

MSM(13日03UTC初期値)に基づいて予測した気温を0.5度ごとに色付けした。青の四角は東京23区を示す。

時刻(JST)	15-16	16-17	17-18	18-21	21-24	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	時刻(JST)	15-16	16-17	17-18	18-21	21-24	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	高	高	高	高	中	中	低	低	低	低	低	低	低	確度	高	高	高	高	中	中	低	低	低	低	低	低	
23区西部	0	0	0	0	0	0	1/1	8/13	16/30	24/32	22/30	13/20	2/3	23区西部	0	0	0	0	0	1/5	6/10	6/15	5/16	0	0	0	
23区東部	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23区東部	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	1/1	12/15	28/30	29/36	26/36	16/32	2/3	0		0	0	0	0	0	1/3	8/18	6/11	6/12	13/21	9/15	1/3	

第2.2.31図 3時間降水量GDの予想 左: GSM(13日00UTC初期値) 右: MSM(13日03UTC初期値)

灰色の枠の部分が3時間降水量GDで、/で分けられている数字は、左側が地域内の最小値、右側が最大値を示す。

上記の結果、MSM(13日03UTC初期値)に基づいた地上気温予測と降雪量の見積もりを第2.2.5表に示す。まず3時間降雪量(S3)は、雪水比とR3maxの積から求める(2.2.2.2参照)。また、24時間降雪量(S24)

第2.2.5表 東京23区の地上気温と降雪量の見積もり

1段目: R3max(GSMとMSMの平均値) 2段目: SFT_M975 3段目: SFT_SBG
4段目: 採用した気温シナリオ 5段目: MSM3時間最大降水量GD(MSM S3max)

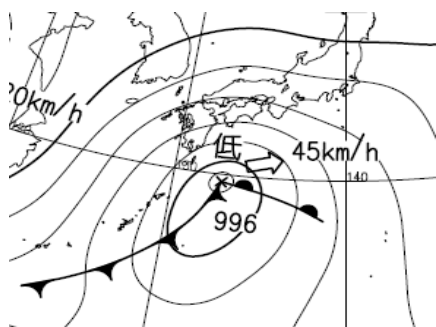
日時(1月14日)	9-12時	12-15時	15-18時	18-21時
R3max(mm)	26	27	23	3
SFT_M975	1.5-	1-1.5	1-1.5	1.5-
雪水比	-	0.1	0.1	-
S3/S24(cm)	-	3/3	2/5	-/5
SFT_SBG	1.5-	1.5-	0.5-1	1.5-
雪水比	-	-	0.4	-
S3/S24(cm)	-	-	10/10	-/10
採用した気温シナリオ	1.5-	1.5-	1-1.5	1.5-
雪水比	-	-	0.1	-
S3/S24(cm)	-	-	2/2	-/2
MSM S3max(cm)	0	6	8	1

は前 24 時間内の S3 を合計して求めた。S24 は 5 cm 以上の注意報基準に達する予想となったが、降雪時の予想気温がおおむね 1~1.5℃で積雪が増加するかどうかの判断が難しいこと (2.2.2.2(2)参照) や予想気温の不確実性を考慮して、各時間帯で気温高めのシナリオを選択して S24 を 2cm と見積もる。

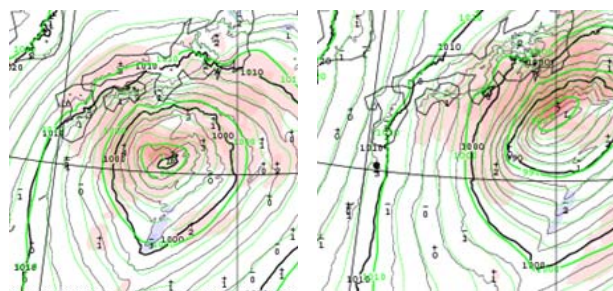
③ 1 月 14 日朝予報

実況監視についての注目点は以下の通り。

(ア) 低気圧は 13 日 21 時に四国の南に達する (第 2.2.32 図)。GSM・MSM 間で低気圧の位置の現況や予想の差がなく (第 2.2.33 図)、引き続き MSM を採用する。



第 2.2.32 図 地上天気図(13日 21時)

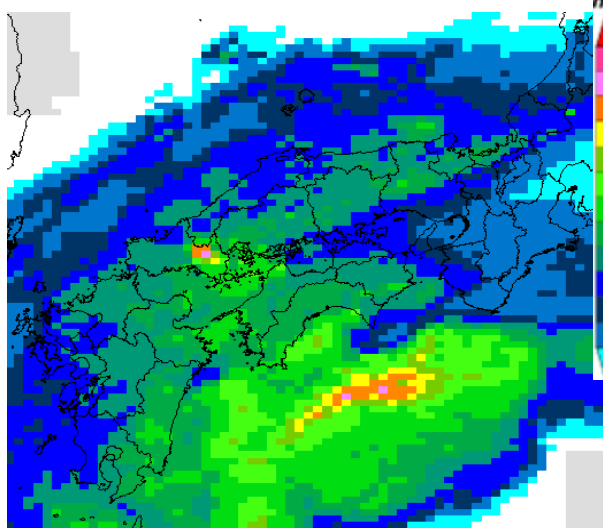


第 2.2.33 図 GSM と MSM の地上予想比較

黒 : GSM(13日 12UTC 初期値) 緑 : MSM(13日 15UTC 初期値)
左 : 14日 9時 右 : 14日 21時

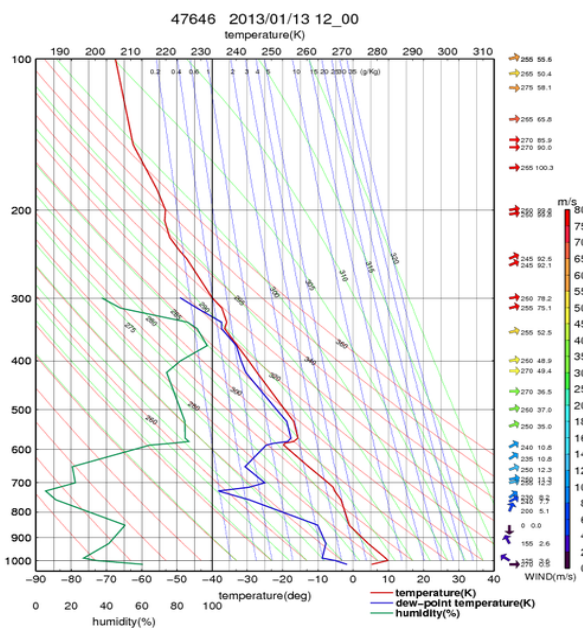
(イ) 低気圧の接近している西日本の降水量は、解析雨量 3 時間積算値 (第 2.2.34 図) で全般的に 3 時間 8~16mm、局地的に 16mm 以上の所があり、これと GSM/MSM の R3max を比較した結果、GSM と MSM に明らかな優劣の差はなく、引き続き両モデルの R3max の平均値を降水量見積もりに採用する。

(ロ) 13 日 21 時の館野 (第 2.2.35 図) で 600hPa 以下に乾燥域が広がる。第 2.2.34 図の通り、関東地方でも弱い雨が降り始め、降水の蒸発による気温低下が見込まれる。



2013/01/14 03:00 解析雨量3H(R3)

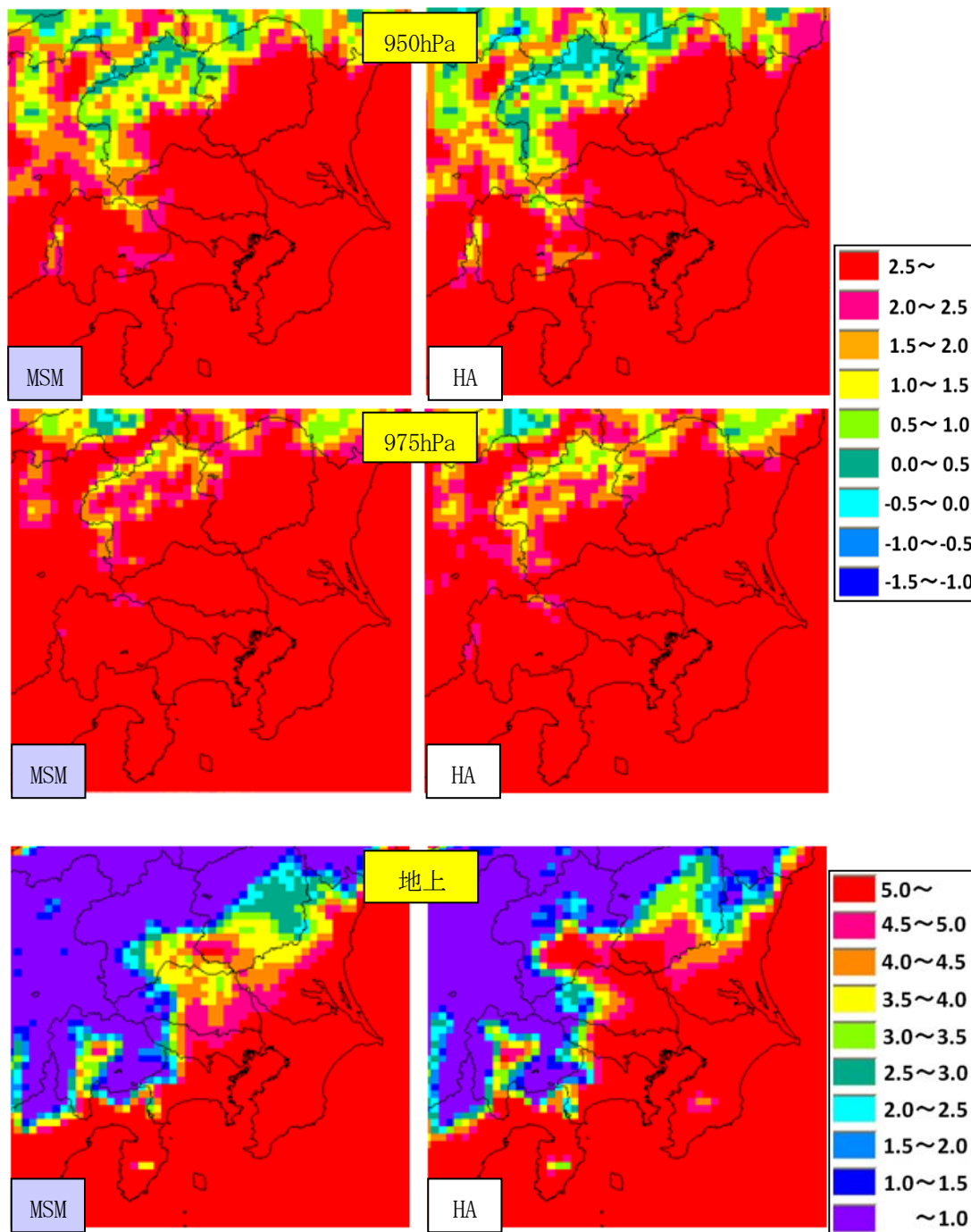
第 2.2.34 図 解析雨量 3 時間積算値 (14日 3時)



第 2.2.35 図 館野の高層実況 (13日 21時)

赤線 : 気温 青線 : 露点 緑 : 湿度

(エ) 3時のHA(第2.2.36図)は、950hPa・975hPa気温は群馬県の山沿いを中心にMSMよりもやや低く、0℃に近い領域(図中の黄緑～空色)が広がり、雪の融解による冷却も効いている可能性がある。このことから、MSMよりも早いタイミングで下層低温域が広がる可能性がある。その一方で、地上気温については、特に群馬・埼玉県境を中心としてMSMよりも高く、内陸部からの地上寒気の南下がMSMの予想通りとはならない可能性を考慮しておく。



第2.2.36図 MSMと毎時大気解析の比較(14日3時)

左: MSM(13日15UTC初期値) 右: 毎時大気解析(HA)

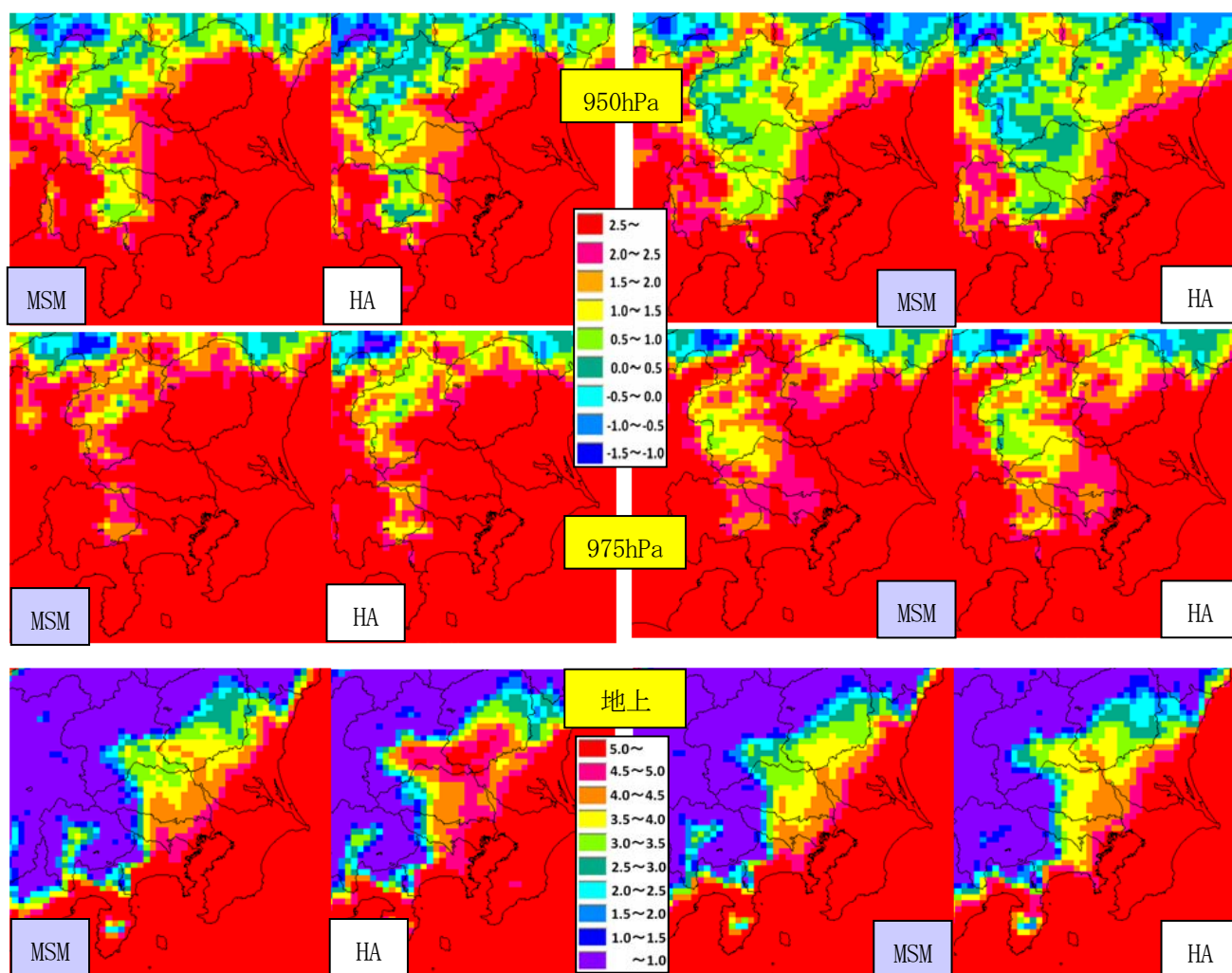
上: 950hPa気温 中: 975hPa気温 下: 地上気温

MSM (13 日 15UTC 初期値) に基づいた地上気温予測と降雪量の見積もりでは、13 日夕方予報とほぼ同じ結果で、降雪量 5cm 以上の注意報基準に達する可能性がある (表略)。一方で、(x) で述べた通り地上気温の実況が MSM よりも高いことから、気温シナリオは 13 日夕方予報を維持する。その結果、S24 は 2cm のシナリオに変更はない。

④ 大雪注意報発表の準備

実況監視の注目点については以下の通り。

(7) 5 時の HA (第 2.2.37 図) では、950hPa で関東西部の山沿いを中心に 2°C 未満 (オレンジ色、もしくは、それより低温を示す色) の領域が MSM よりも東へ広がる。さらに、7 時 (第 2.2.38 図) には 975hPa の 2°C 未満の領域が東京 23 区に広がりはじめ、地上気温についても東京 23 区の西の多摩地方では MSM より低くなり、東京 23 区でも MSM 並みもしくは MSM よりも下回る可能性がでてくる。



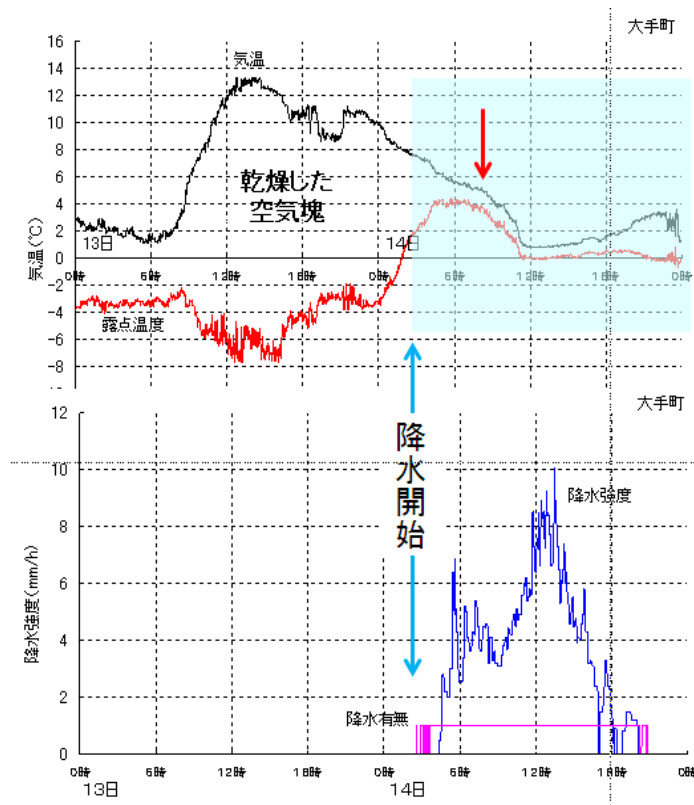
第 2.2.37 図 MSM と毎時大気解析の比較 (14 日 5 時)

左 : MSM (13 日 18UTC 初期値) 右 : 毎時大気解析
上 : 950hPa 気温 中 : 975hPa 気温 下 : 地上気温

第 2.2.38 図 MSM と毎時大気解析の比較 (14 日 7 時)

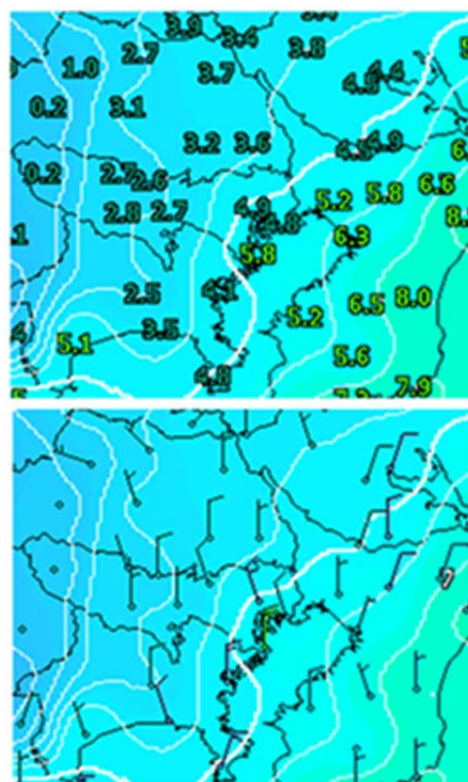
左 : MSM (13 日 18UTC 初期値) 右 : 毎時大気解析
上 : 950hPa 気温 中 : 975hPa 気温 下 : 地上気温

(イ) 8 時すぎに東京の露点・気温が同時に下降し始める。このことは東京に寒気が流入し始めたことを示唆する（第 2.2.39 図）。さらに、8 時の HA では、これまで MSM より高かった東京 23 区の地上気温が MSM 並みもしくは低くなり（図略）、積雪時に用いる 2 つの指標や MSM ガイダンスのシナリオに近い予想となる可能性が高まる。その一方で、東京 23 区の風上側にあたる埼玉県の東部では気温 3℃ 以上（第 2.2.40 図）で、地上寒気移流の観点からは、現時点での急激な気温低下、ひいては、雨から雪への急激な変化を見込むことは難しい。



第 2.2.39 図 東京都大手町の実況

黒：気温、赤：露点、青：降水強度、桃：降水有無

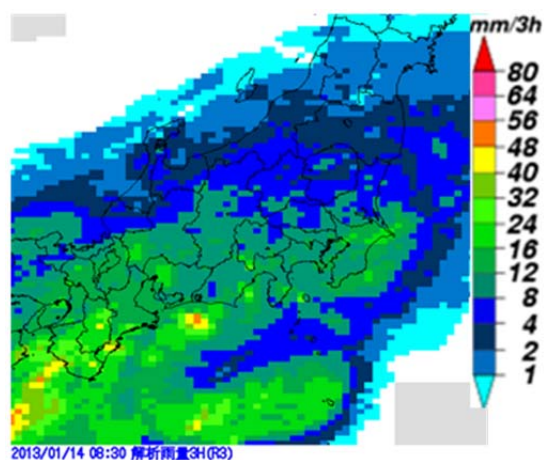


第 2.2.40 図 地上実況 (14 日 8 時 30 分)

上：アメダス気温と等温線 (1℃間隔)

下：アメダス風と等温線 (1℃間隔)

(ウ) 関東南部の降水量は、解析雨量 3 時間積算値でおおむね 8~16mm（第 2.2.41 図）で、局地的に 16~20mm 程度。これと GSM/MSM の R3max を比較すると、GSM の R3max はやや過大で、実況により近い MSM の R3max を降水量の見積りに採用する。



第 2.2.41 図 解析雨量 3 時間積算値

(14 日 8 時 30 分)

MSM (13日 21UTC 初期値) に基づいた地上気温予想と降雪量見積りの結果 (第2.2.6表)、SFT_M975の12-15時の気温が朝予報時より一階級低くなる。(イ)で述べた通り、地上寒気移流の実況が弱いことから、気温のメインシナリオは変更しないが、MSMのシナリオに沿った気温低下の可能性が高まったことからサブシナリオとしてSFT_M975シナリオを採用する。その結果、S24を10cmと見積もり、予報作業支援システム(YSS)で防災時系列を作成して(第2.2.42図)、システムに保存する。

第2.2.6表 東京23区の地上気温と降雪量の見積もり(サブシナリオ)

1 段目 : R3max (MSM) 2 段目 : SFT_M975 3 段目 : SFT_SBG
4 段目 : 採用した気温シナリオ 5 段目 : MSM 3時間最大降雪量 GD (MSM S3max)

日時 (1月14日)	9-12時	12-15時	15-18時	18-21時
R3max (mm)	26	23	12	1
SFT_M975	1.5-	0.5-1	1-1.5	1.5-
雪水比	-	0.4	0.1	-
S3/S24 (cm)	-	9/9	1/10	-/10
SFT_SBG	1.5-	0.5-1	0.5-1	1.5-
雪水比	-	0.4	0.4	-
S3/S24 (cm)	-	9/9	5/14	-/14
採用した気温シナリオ	1.5-	0.5-1	1-1.5	1.5-
雪水比	-	0.4	0.1	-
S3/S24 (cm)	-/-	9/9	1/10	-/10
MSM S3max (cm)	3	13	9	0



第2.2.42図 YSSによる防災時系列作成(14日8時30分以降)

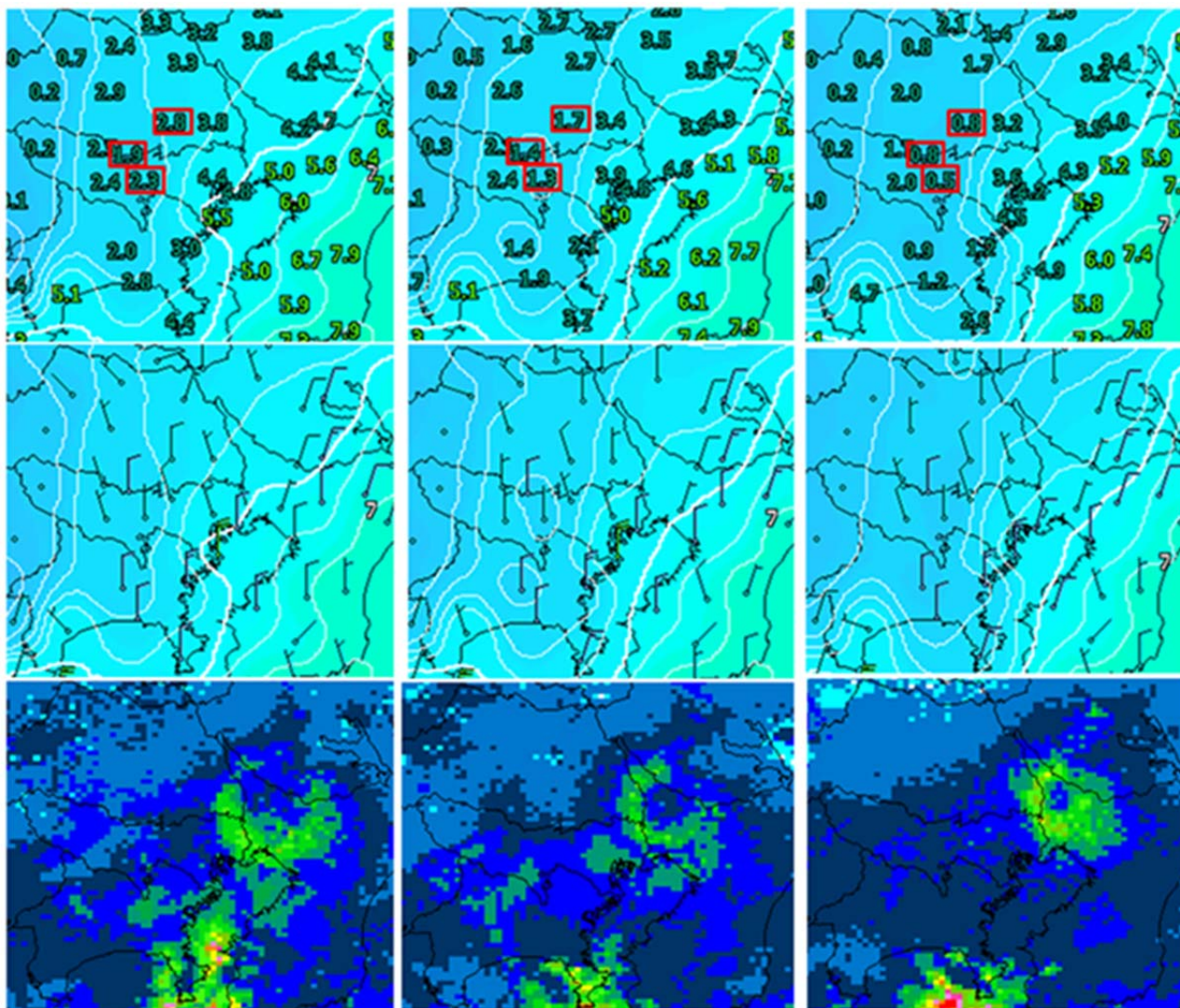
左 : S24のメインシナリオ (13日夕方予報時に設定) 右 : S24のサブシナリオ

S24の10cmは18時以降も継続するが、18時以降は降雪量が見込まれないことから注意報解除となるため、降雪量を入力しない(0cmのままとする)。

⑤大雪注意報の発表

第2.2.43図の通り、9時00分から9時30分にかけて、アメダスの気温や風からは埼玉県の東部からの地上寒気移流は顕著でないにもかかわらず、東京23区の西側の地域(さいたま・所沢・府中)の気温低下が著しい。また、東京レーダーでは、ブライトバンド(気象庁観測部観測課観測システム運用室、2010)に対応した環状エコーの縮小、すなわち融解層(気温0°C前後の層)の高度が低くなっていることが確認でき、東京周辺の下層寒気が強まっていると判断できる。これら観測事実とHAやMSMが示す下層寒気の動向を考え併せると、雪の融解によって引き続き東京23区付近の下層寒気は強まり、地上気温もさらに低下する可能性が高くなる。10時には東京23区の西側の地域の気温がいずれも1°Cを下回る。積雪時の雨雪判別の目安となる気温1.5°C(田代ら、2003)より0.5°C以上低いこと、ブライトバンドがさらに縮小していること、

東京23区の西側での気温傾度が強まっており、地上寒気移流も見込めることから、あらかじめ用意しておいたS24のサブシナリオをメインシナリオとして10時すぎに注意報を発表する。その後、14時に積雪の東京の実況が大雪注意報基準の5cmを超えて、結果として約4時間のリードタイム（ここでは、大雪注意報発表から大雪注意報基準に達するまでの時間）を確保できる。



第2.2.43図 地上気温実況とレーダー降水強度

上：アメダス気温と等温線(1°C間隔) 中：アメダス風と等温線(1°C間隔) 下：レーダー降水強度5分
 左：9時 中：9時30分 右：10時 赤枠：北からさいたま、所沢、府中のアメダス観測点

参考文献

- 気象庁観測部観測課観測システム運用室，2010：平成20年度観測データ利用技術検討会報告．気象庁測候時報，77.1-3，61-64.
- 田代憲一，上杉和哉，石橋俊之，岩下裕二，2003：事例解析－南岸低気圧による関東・甲信地方の大雪 2002年12月9日－．平成15年度関東甲信地方予報技術検討会資料，4-12.
- 原旅人，白山洋平，檜垣将和，氏家将志，2013：事例検討 2013年1月14日の関東大雪．平成25年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，71-89.