

平成24年度予報技術 研修テキスト

(予報課)

February 2013

気 象 庁 予 報 部

はじめに

本テキストは、平成7年から、予報業務に関する庁内の様々な取り組みや検討会等を通じて構築された技術について、予報作業での活用例を示し、また新規ないし改良されたプロダクトや最新の予報技術を解説している。

平成24年は、日本海側を中心とした記録的な大雪にはじまり、4月3日から5日の急速に発達した低気圧による西日本から北日本の広範囲の記録的な暴風と高波、5月6日の関東地方の竜巻、7月11日から14日に発生した平成24年7月九州北部豪雨、8月13日から14日の近畿中部を中心とした大雨、9月16日に沖縄本島付近を通過した台風第16号などが、大きな災害をもたらした。これら気象現象に関する防災や減災のためには、防災気象情報が適切な内容とタイミングで発表されることが重要である。このために、予報担当者は、様々な観測や予測の資料を適切に理解し、情報作成に関する総合的な判断を行う必要がある。このテキストにより、適切な判断に結びつく技術のレベルアップが幅広く図られることを期待する。

今年度のテキストは、第1章で、4月の急速に発達した低気圧による暴風と高波、5月6日の竜巻、平成23年台風第15号の影響による大雨の実例を取り上げ、解析や予報技術の解説と、これらに基づく予報作業上の様々な判断について説明する。第2章は、集中豪雨が発生するための環境場について、最新の統計的知見をまとめている。第3章では、解析雨量・降水短時間予報・降水ナウキャストの最近の改善点を説明する。第4章の土壌雨量指数と流域雨量指数の改善では、30分系列の変動解消と、これに関する予報作業の変更点について解説を行う。

なお、宇都宮・水戸・津・秋田・名古屋地方气象台と仙台・東京管区气象台、気象研究所、観測部観測課、地球環境・海洋部海洋気象課には原稿の執筆にご協力をいただいた。この場を借りてお礼申し上げる。

平成25年2月

予報課長 横山 博

目次

はじめに

第1章 実例に基づいた予報作業の例

1.1 急速に発達する低気圧の事例

(2012年4月3日～5日に暴風をもたらした日本海低気圧)	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 予想シナリオの作成	3
1.1.2.1 2日9時の実況及び数値予報資料	3
1.1.2.2 予想シナリオと量的予想(2日9時時点)	4
1.1.2.3 海上警報(2日15時時点)	7
1.1.2.4 実況の経過	8
1.1.3 防災気象情報の内容とタイミングについて	12
1.1.3.1 はじめに	12
1.1.3.2 情報発表の状況と特徴	12
1.1.3.3 情報の内容や発表のタイミングについての検証	12
1.1.3.4 防災気象情報が活用されるために	17
1.1.4 沿岸防災支援と連携した波浪・高潮警報対応	19
1.1.4.1 はじめに	19
1.1.4.2 高波に関する検討	19
1.1.4.3 高潮に関する検討	22
1.1.4.4 観測結果	25

1.2 大雨の事例

1.2.1 2011年台風第15号の事例検証	27
1.2.1.1 台風第15号による大雨と数値予報資料の特徴	27
1.2.1.1.1 大雨の実況と予想の概要	27
1.2.1.1.2 数値予報資料の特徴と予報作業	28
1.2.1.2 詳細な事例解析	31
1.2.1.2.1 4ステージに分けられる大雨の特徴	31
1.2.1.3 予報作業における500m高度データの活用例	36
1.2.1.3.1 500m高度データの時系列変化	36
1.2.1.3.2 具体的な予報作業の活用例	39
1.2.1.4 まとめ	41
1.2.2 2011年台風第12号ほかの事例検証	42
1.2.2.1 2011年台風第12号による大雨	42
1.2.2.2 500m高度データからみた 2011年台風第12号の大雨	44

1.2.2.3	MSM500m 高度データを利用した 検証および閾値の設定	4 6
1.2.2.4	2012 年台風第 17 号事例での MSM500m 高度データ の利用の実例および統合ビューワの活用の紹介	4 9
1.2.2.5	まとめ	5 2
1.3	竜巻の事例(2012 年 5 月 6 日の茨城県・栃木県で 発生した竜巻事例)	5 4
1.3.1	背景となる環境場について	5 4
1.3.2	一連の防災気象情報対応と災害後の対応について	6 7
1.3.2.1	一連の防災気象情報対応について	6 7
1.3.2.2	災害後の対応について	7 8
1.3.3	竜巻の解析とメカニズム	8 1
1.3.4	予測技術における現状と課題	8 8
1.3.4.1	突風に関する気象情報の改善の経緯	8 8
1.3.4.2	突風現象の予測可能性	8 8
1.3.4.3	突風に関する気象情報の改善の概要	8 8
1.3.4.4	予測技術の現状	8 9
1.3.4.4.1	突風判定アルゴリズム	8 9
1.3.4.4.2	竜巻発生確度ナウキャストの アルゴリズムの基本	9 0
1.3.4.4.3	竜巻発生確度ナウキャストアルゴリズム ver.3 の詳細	9 1
1.3.4.5	予測技術の課題	9 3
1.3.4.5.1	竜巻注意情報の予測精度	9 3
1.3.4.5.2	予測精度向上に向けた課題	9 3
1.3.4.5.3	目撃情報の活用	9 4
1.3.4.6	まとめ	9 4
第 2 章	集中豪雨事例の客観的な抽出とその特徴・環境場に関する統計解析	
2.1	はじめに	9 6
2.2	集中豪雨事例の客観的な抽出	9 7
2.3	集中豪雨事例の統計的な特徴	9 9
2.3.1	集中豪雨事例の月別の発生数	9 9
2.3.2	集中豪雨事例の擾乱別の発生数	1 0 1
2.3.3	集中豪雨事例の降水系の形状別の発生数	1 0 2
2.4	集中豪雨が発生する 総観～メソ スケール環境場に関する統計解析	1 0 3
2.5	おわりに	1 0 6

第1章 実例に基づいた予報作業の例

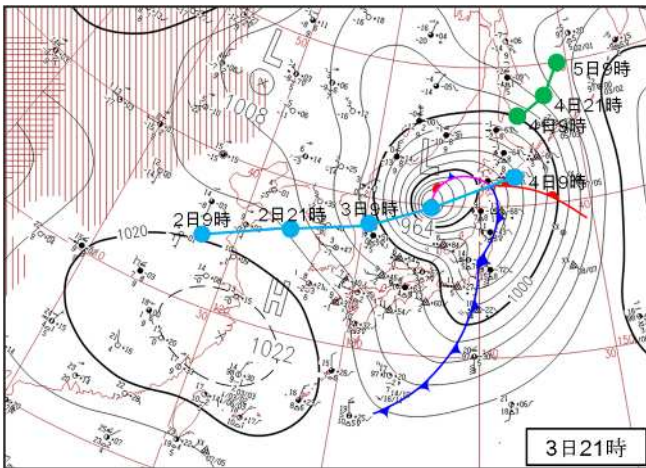
1.1 急速に発達する低気圧の事例（2012年4月3～5日に暴風をもたらした日本海低気圧）

1.1.1 はじめに*

日本周辺で暴風や高波、高潮による災害をもたらす要因として、台風のほかに発達した低気圧によるものがある。これまでも台風同様に、船舶の遭難や沿岸部での波浪害、山岳遭難などがしばしば発生しているほか、近年では暴風により都市部で大規模な交通障害をもたらす帰宅が困難になるなど、日本の広い範囲で大きな災害をもたらしている。また時期が台風と異なり、秋から春にかけて日本付近で急速に発達するため、季節外れの大雨や大雪、融雪による災害も引き起こしている。日本付近で急速に発達し、大きな災害をもたらした低気圧の事例を、気象庁ホームページや気象要覧などからいくつか抽出し、付録として急速に発達した低気圧の経路図（付録第1-1図、1-2図）、災害や観測記録の表（付録第1-1表、1-2表）を掲載した。

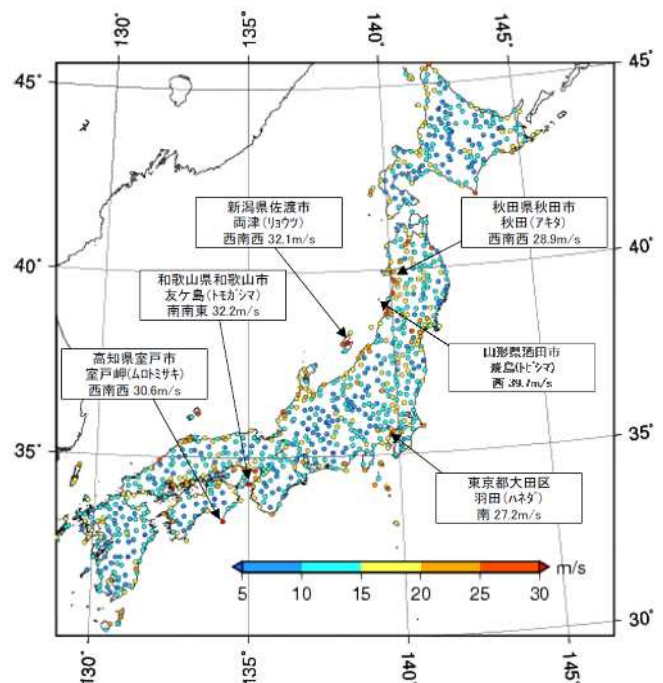
急速に発達する低気圧は総観スケールの現象であり、数値予報で数日前から比較的精度よく予測できる現象である。また、低気圧の発達要因の一つである圏界面の動向を確認できる渦位の平面図を現業作業の中で活用できる環境が整ったこともあり、予報作業の中で、数値予報資料をどのように使って予想シナリオをたて、量的予報・実況監視を行い、適切に防災気象情報を発表していくかについて、2012年4月の実例を用いて解説する。

2012年4月2日から5日にかけて、日本海で低気圧が急速に発達し、西日本から北日本にかけての広い範囲に暴風や高波、高潮をもたらした。この低気圧は2日に華北から黄海を東進し、3日朝には前線を伴って日本海に進み、3日午後には閉塞過程に入り日本海を東北東進した。低気圧からのびる寒冷前線は、3日に西日本から北日本を通過した。その後、4日には閉塞点上に新たな低気圧が発生し、5日にかけてオホーツク



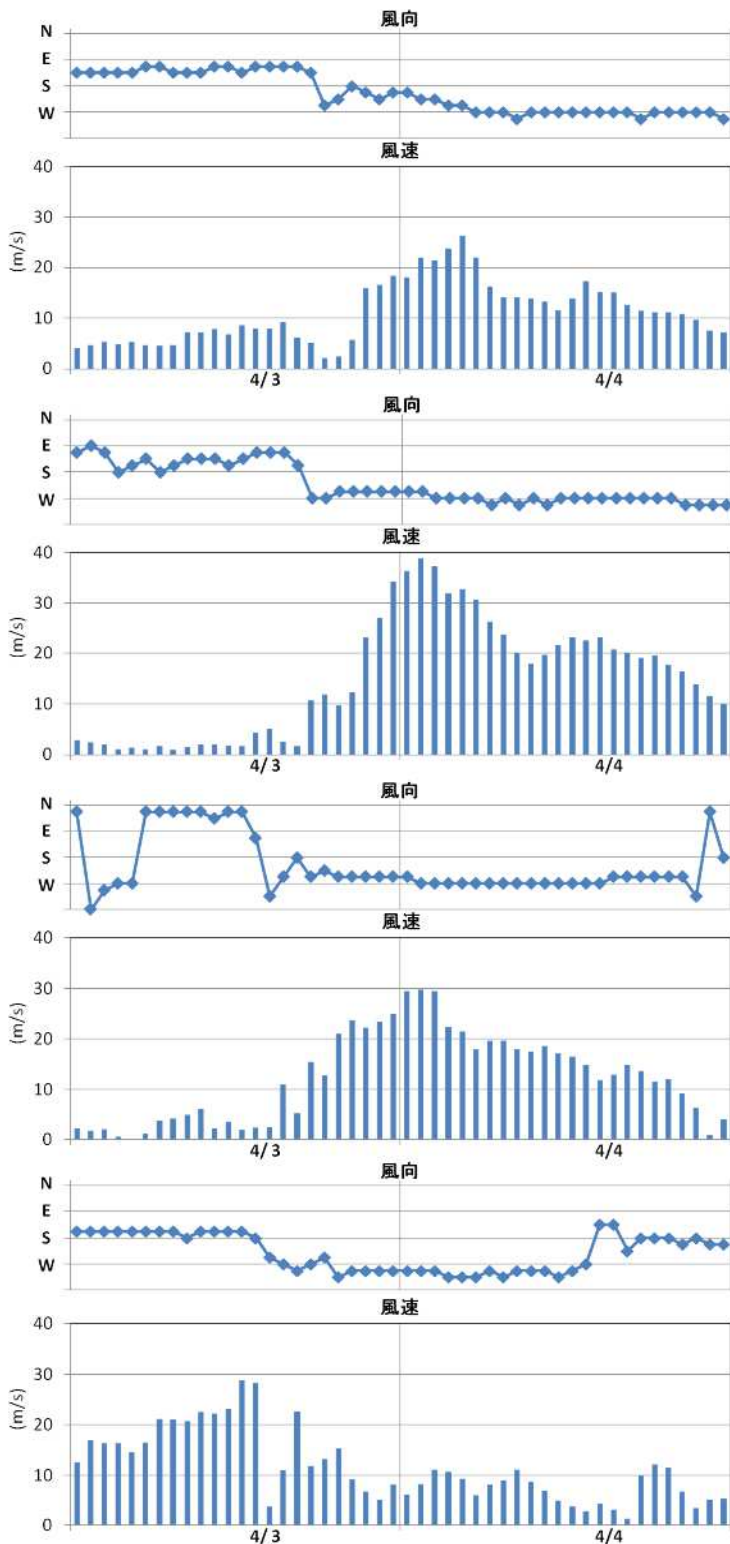
第1.1.1図 平成24年4月3日21時の地上天気図及び日本海で発達した低気圧の経路

印は図中に示した各時刻における低気圧の位置であり、水色は本事例で着目する低気圧を、緑色は閉塞点上に新たに発生した低気圧を示す。



第1.1.2図 アメダス地点における平成24年4月3日～5日9時の期間内最大風速（気象庁(2012)に加筆）

*黒良 龍太、杉本 悟史（気象庁予報部予報課）



第 1.1.3 図 アメダス地点における風速・風向の時系列

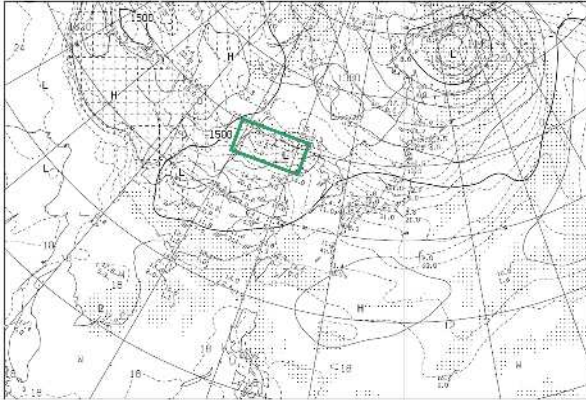
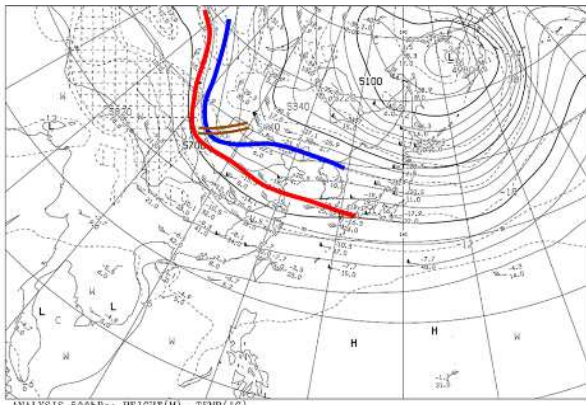
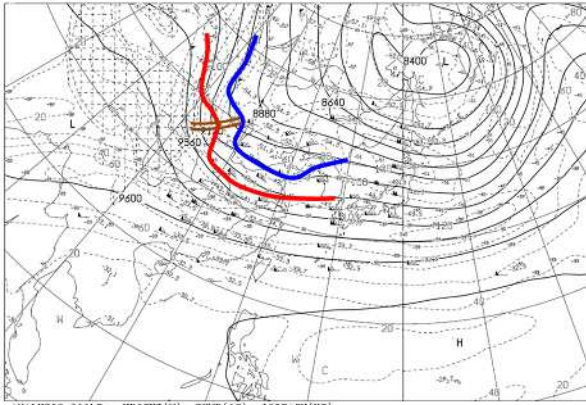
上から、秋田（秋田県）、飛鳥（山形県）、両津（新潟県）、友ヶ島（和歌山県）のアメダス観測値（毎時）。期間は、平成 24 年 4 月 3 日 1 時～4 日 24 時。

海を北東に進んだ（第 1.1.1 図）。この低気圧の中心気圧は 2 日 21 時から 3 日 21 時（本稿においては数値予報の初期時刻は UTC で、それ以外の時間は日本時間で示す）までの 24 時間に 1006hPa から 964hPa まで 42hPa 低下しており、1955 年以降日本海における低気圧の 24 時間の気圧下降量としては、1995 年 11 月 7 日 9 時から 8 日 9 時にかけて 44hPa 低下した事例に次いで大きかった（付録第 1-1 表）。

このため、西日本から北日本では 4 月 3 日から 4 日にかけて記録的な暴風となった（第 1.1.2 図、第 1.1.3 図）。統計期間が 10 年以上あるアメダス地点のうち 1 割弱の地点で最大風速の観測史上 1 位を更新し、山形県酒田市飛鳥では 4 日 2 時 43 分に本期間中最大となる 39.7m/s を、また最大瞬間風速は 4 日 0 時 8 分に 51.1m/s を観測した。

海上でも、3 日から 4 日にかけて日本海側と東日本から北日本の太平洋側を中心に広い範囲で大しけとなり、特に東北地方を中心とする日本海側では有義波高が 9m を超える猛烈なしけとなった。経ヶ岬の気象庁沿岸波浪計では、周期 9.0 秒、有義波高 7.10m の高波を観測（4 日 3 時）している。また、低気圧の通過に伴う吹き寄せ効果や気圧の下降、高波の影響で、東北日本海側の一部では潮位が急速に上昇し、高潮警報基準を大幅に超えた。

この低気圧に伴う暴風等により、倒壊した倉庫や倒木の下敷きにより死亡したり、トラックが横転して負傷するなど多くの人的被害が出たほか、各地で停電や住宅被害等があった。また、航空、船舶、鉄道の運休など、交通機関の運行にも大きな影響があった。特に首都圏では鉄道機関等の運行停止に伴い短時間に帰宅者が集中して混乱が予想されることから、



第1.1.4図 4月2日9時の、300hPa(上図)、500hPa(中図)及び850hPa(下図)天気図

図中の実線は高度を、破線は等風速線(上図)、気温(中図、下図)を、それぞれ示す。茶の二重線はトラフの位置であり、赤線/青線はそれぞれ、 $-45 / -51$ 線(上図)、 $-18 / -24$ 線(中図)を示す。下図中、緑線で囲まれた部分は本文中で注目する温度集中帯であり、ドットで示される部分は気温と露点との差が3以下の領域である。

東京都が事業者団体や学校に対して従業員の一斉帰宅の抑制や生徒・学生の安全確保等を要請するなど、社会的な影響が大きかった。

第1.1節では、現業的な数値予報資料の活用と実況監視による適切な注意報・警報及び気象情報の発表という観点から、上述の日本海低気圧の予想シナリオを作成し、過去の知見などに基づいた実況監視作業を通じて、予想シナリオを作成してから防災時系列を作成・修正し、注意報・警報を発表するプロセスを説明する。具体的には、第1.1.2節で実況と数値予報資料に基づいた予想シナリオ作成及びその後の実況経過を述べ、第1.1.3節は地方予報中枢で発表する気象情報の内容とそのタイミングについて、予告的な気象情報の効果的な発表に関わる考え方も含めて説明する。第1.1.4節では、高波と高潮に関して予想シナリオに沿って地域特性を考慮した量的予想を行い、注意報・警報対応の判断、警報を補完する気象情報の発表について記述する。なお、前線の通過に伴い局地的に非常に激しい雨が降った所もあるが、本事例の予報作業では、この低気圧の特徴である暴風と、それに伴い生じた高波、高潮に焦点を絞って説明することとする。

1.1.2 予想シナリオの作成*

1.1.2.1 2日9時の実況及び数値予報資料

2日9時の高層天気図では、華北(35°N 、 105°E 付近)を500hPa-24の寒気を伴ったトラフが東進している(第1.1.4図)、赤外画像ではトラフ前面を雲域Aが東進しており(第1.1.5図)、地上天気図(第1.1.6図)で華北に低気圧が解析されている。850hPaの温度分布(第1.1.4図)を見ると、 $35\sim 40^{\circ}\text{N}$ では0~6の等温線が帯状に混んでおり(図の緑線で囲まれた部分)、トラフはこの温度集中帯の西端に位置している。温度集中帯の南側(暖域側)では、地上で低気圧が解析される地域に向かって広い範囲で30~40ノットの下層南西風が吹いている。

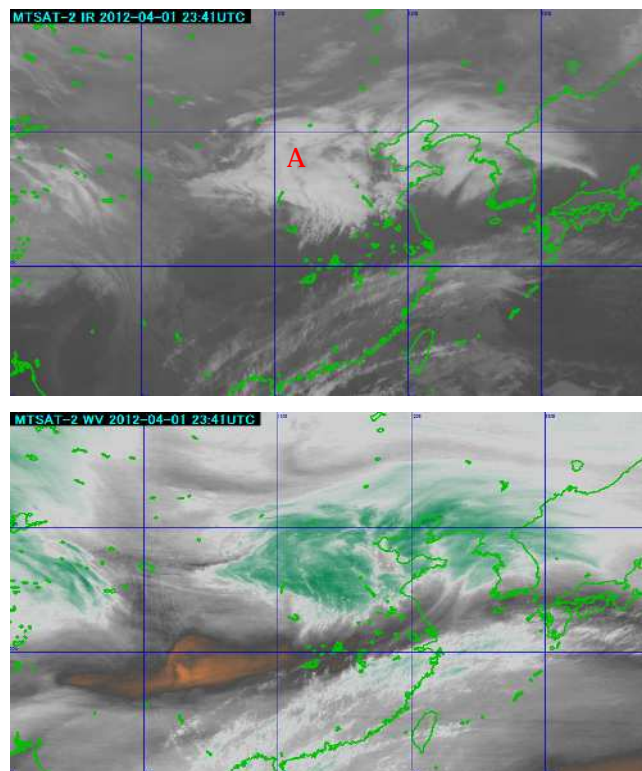
2日00UTC初期値の数値予報資料(第1.1.7図)によると、上述のトラフは3日9時にかけて深まりながら黄海に進む。地上低気圧は、500hPa5580~5640m付

*杉本 悟史、北川 和男、竹田 康生、酒井 誠(気象庁予報部予報課)

近の強風軸との対応が明瞭になり、トラフ前面に位置し、強い正渦度移流に対応して低気圧が急速に発達する予想となっている。850hPa 面では、暖域側で暖気移流が、低気圧後面では寒気移流がそれぞれ強まり、気温及び相当温位の水平傾度が大きくなって、低気圧から東にのびる温暖前線、南西にのびる寒冷前線がそれぞれ強化されることが予想されている。850hPa の風は低気圧の南の暖域側で最も強く、3 日 3 時で概ね 55 ノット、3 日 9 時で 75 ノット、その後 4 日にかけてさらに強まる予想となっている。700hPa 鉛直流（図省略）は、低気圧前面の温暖前線近傍で強い上昇流を示しているほか、日本海の低気圧からのびる寒冷前線付近と四国沖から南西諸島付近にのびる寒冷前線付近でも極大値を示しており（前線の位置については、第 1.1.12 図を参照）これらの前線に対応して地上で収束が強まっていたことを示唆している。3 日 21 時には、500hPa トラフがカットオフして日本海に進み、低気圧は閉塞して寒冷渦直下でさらに発達し、中心気圧は 961hPa まで深まる予想となっている。3 日 21 時の渦位分布（第 1.1.8 図）によると、圏界面上部を起源とする乾燥した空気塊（図中の高渦位域）が日本海に進みながら下降する予想となっており、2 日 9 時の実況解析ですでにトラフ周辺の気温分布が 300hPa で周辺に比べて相対的に高く、500hPa で低くなっていること（第 1.1.4 図）及びトラフ付近で圏界面が 300hPa より下がっていること（第 1.1.9 図）とあわせて考えると、上層の高渦位と下層の傾圧帯の結合による低気圧の急発達（Hoskins et al., 1985）が示唆される。

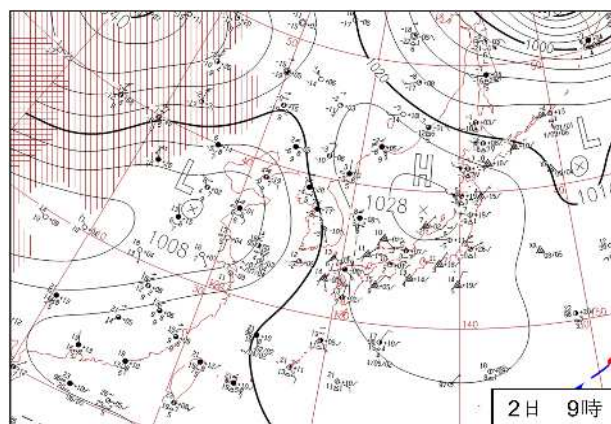
1.1.2.2 予想シナリオと量的予想（2日9時時点）

第 1.1.2.1 節で述べた実況の特徴及び数値予報資料は、トラフの東進に伴う日本海での低気圧の発達を示唆している。過去に日本海で急速に発達した低気圧のうち、本稿で対象としている低気圧の予想と同様に日本海から北日本を通過した事例（付録第 1-1 図、付録第 1-1 表）では、西日本から北日本にかけての広い範囲で 25m/s 以上の非常に強い風を観測しており、本事例の低気圧によっても広範囲で暴風等が生じる可能性がある。一方、

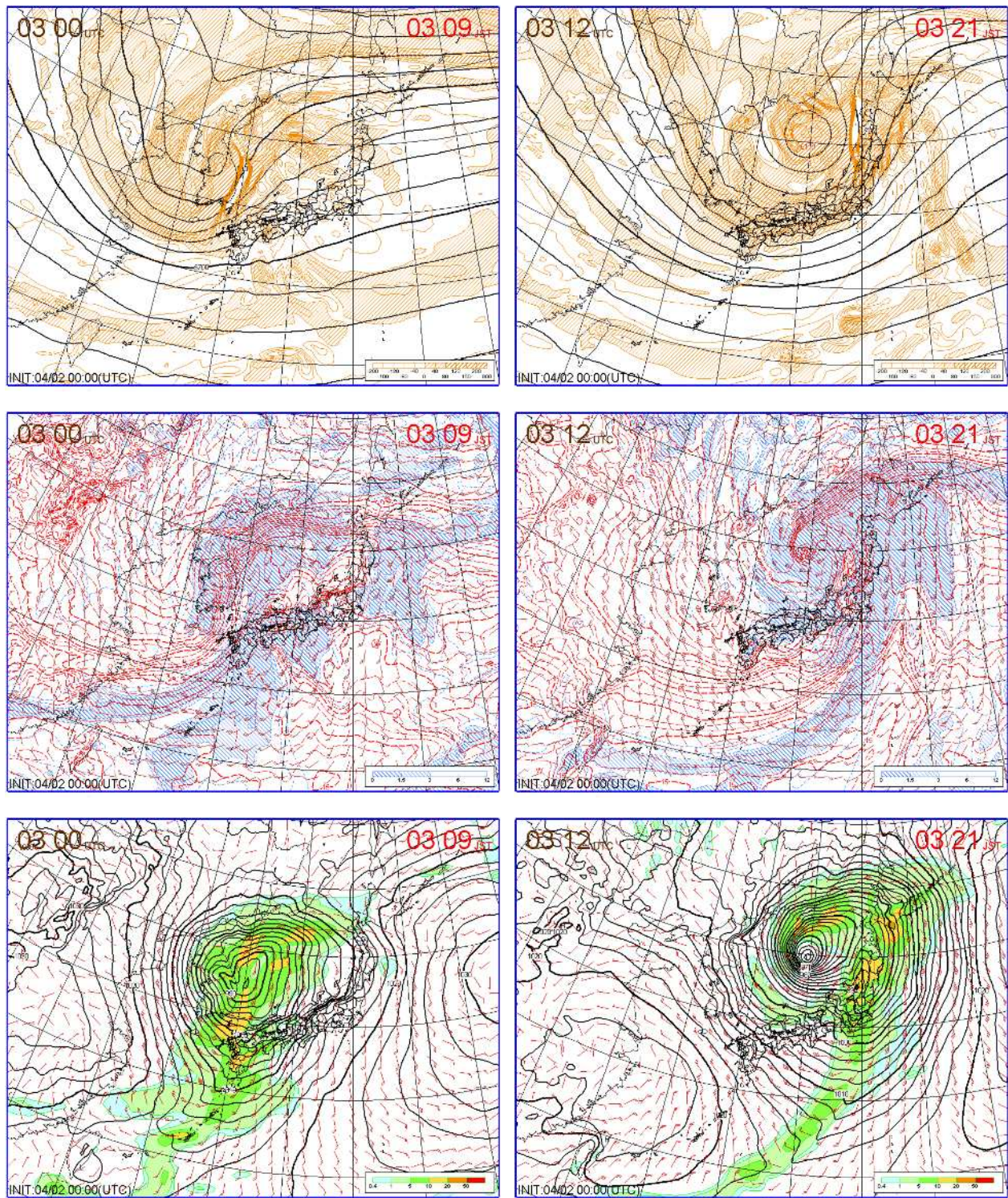


第 1.1.5 図 4月2日9時の衛星画像

赤外画像（上図）及び水蒸気画像（下図）。水蒸気画像では、白色や緑色が明域に対応しており、緑色が濃いほど上中層が湿潤であることを示す。また、黒色や茶色が暗域に対応しており、茶色が濃いほど上中層が乾燥していることを示す。



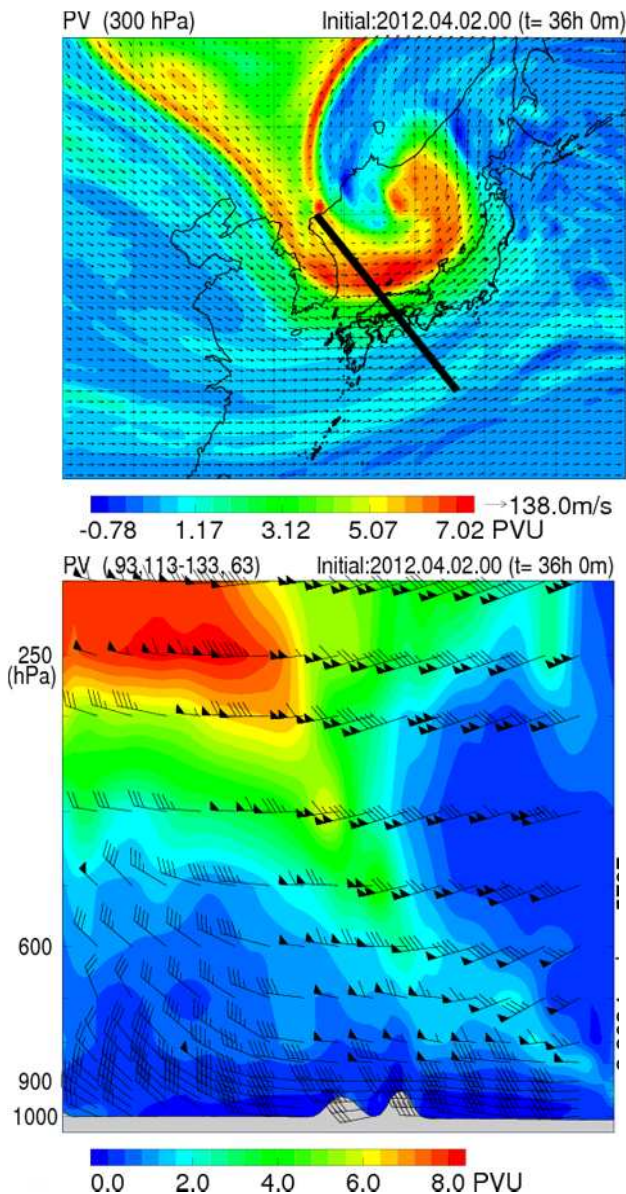
第 1.1.6 図 4月2日9時の地上天気図



第 1.1.7 図 4 月 2 日 00UTC 初期値の数値予想資料

3 日 9 時（左図）及び 3 日 21 時（右図）の、500hPa 高度及び渦度（上図）、850hPa 気温及び風（中図）、地上気圧及び風（下図）の予想図。中図で青色の斜線は気温と露点との差（図中の凡例参照）を示す。

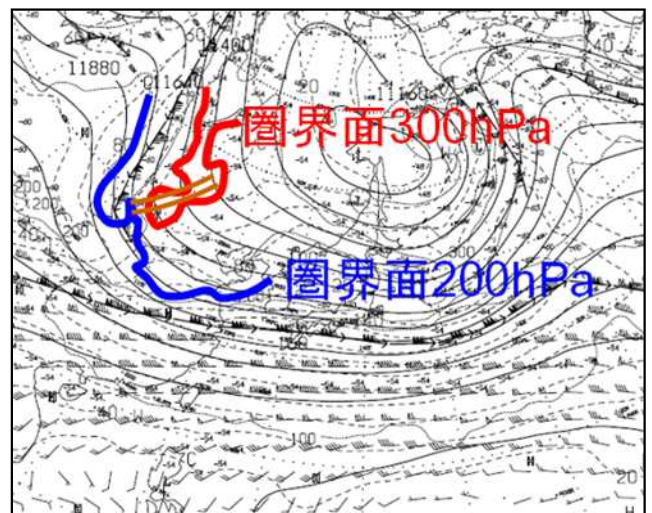
低気圧の発達については、数値予報の精度を考慮しつつ検討する必要がある。本事例の場合、GSM では3月30日12UTC初期値以降低気圧の急速な発達が継続的に予想されており、最大風速ガイダンスでもこの低気圧に伴う非常に強い風が3日に西日本から北日本の広い範囲で吹く予想はほぼ安定していた(後述)。またMSMでも、3日にかけての低気圧の中心気圧の低下や低気圧に伴う最大風速の予想は安定していた。ここでは、もっとも予測精度が高いと考えられる最新の数値予報資料(2日00UTC初期値のGSM及び03UTC初期値のMSM、ただしMSMは33時間先までの予想)を基本として予想シナリオを検討した。なお、モデルの予想風速について統計的なバイアスがある場合にはその点を考慮すべきだが、GSMとMetop-A衛星搭載のマイクロ波散乱計ASCATから算出した海上風との統計的な比較結果(吉田ら、2012)によると、本事例の時期(4月はじめ)においてはGSMの予想風速とASCATとの風速差は小さいことから、海上警報の検討においてバイアスは考慮しなかった。



第1.1.8図 4月3日21時の渦位分布予想図

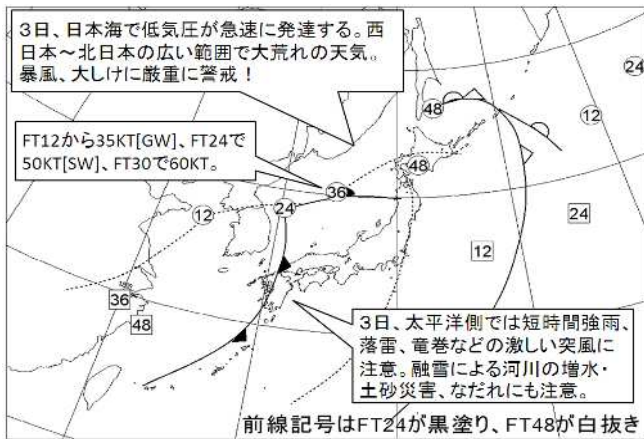
300hPa面の渦位(上図)及び上図中の黒線に沿った渦位断面(下図)。渦位の大きさについては、図中の凡例を参照(1PVU=10⁻⁶m²s⁻¹Kkg⁻¹)。

2日00UTCの資料に基づき作成した主要じょう乱解説図を、第1.1.10図に示す。低気圧の位置は、GSMを基本に考えた。低気圧周辺の最大風速については、2日00UTC初期値のGSM予想で2日21時に31ノット、3日3時に35ノット、3日9時に44ノット、3日15時に61ノットと予想されているが、MSMではGSMより早めに海上強風警報(GW)級の風を予想していること(3日0時に34ノット)を考慮して、2日21時に35ノットのGW級、3日9時に50ノットの海上暴風警報SW級と考えた。なお、モデル予想はほぼ安定していたものの、初期値が新しいほど低気圧の中心気圧が深まる傾



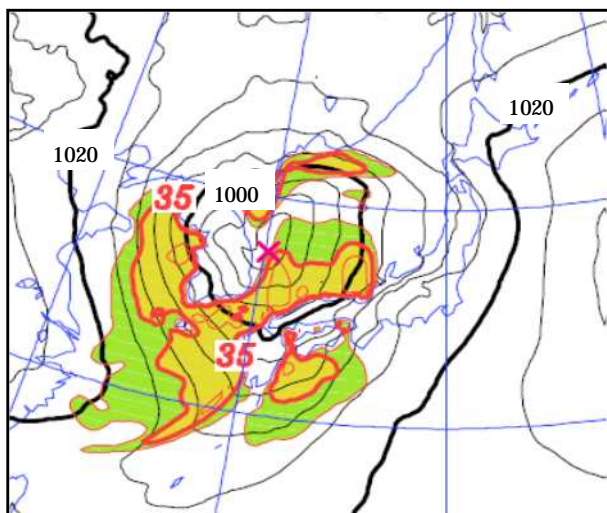
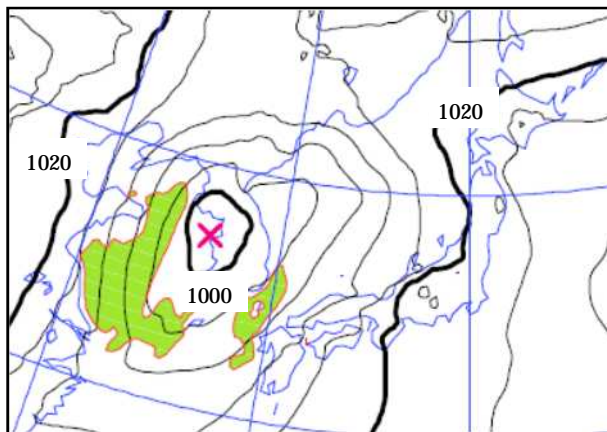
第1.1.9図 4月2日9時の200hPa天気図

図中の実線は高度を、破線は等風速線を示す。点線は圏界面高度であり、本事例で注目するトラフ(茶の二重線)周辺の300hPa/200hPaに相当する所を、赤線/青線で強調した。



第 1.1.10 図 4 月 2 日 00UTC の主要じょう乱解説図

図中の FT は、2 日 00UTC からの時間を示す (例 : FT24 は 3 日 00UTC に対応)。



第 1.1.11 図 GSM 海上風予想

2 日 00UTC 初期値の、3 日 3 時(上図)及び 3 日 9 時(下図)の予想風速。黒の実線は地上等圧線で、30 ノット以上の風速の領域を着色して示した。

向が見られる (詳細は、氏家 (2012) の事後解析を参照) ことから、引き続き最新の予想に注目する必要がある。このような数値予報モデルの初期値変わりや波浪・高潮の予想については、毎日気象庁内で実施している打ち合わせで数値予報課及び海洋気象情報室の担当官からコメントがあり、RSS により各官署に還元している。また、本事例の場合、高渦位域の流入に伴う上空の低温化や、下層の傾圧帯との結合による低気圧の急発達と考えられることから、水蒸気画像 (500hPa より上層大気の乾燥度を反映; Weldon and Holmes, 1991) の暗域の接近や暗化も含め、実況監視を通じて、数値モデルの誤差の把握に努める必要がある。防災時系列の作成・修正から注意報・警報を発表するプロセス (第 1.1.4 節) においては、実況経過を踏まえて量的予想の修正や、場合によっては予想シナリオの修正が必要になる。

1.1.2.3 海上警報 (2 日 15 時時点)

前項のとおりモデル予想はほぼ安定しており、このような場合には予想の不確実性が小さく実況とモデル予想間の差が小さいと判断できることから、海上警報についても最新の数値予報資料を基本に考える。全般海上警報については前述の通り、2 日 21 時に 35 ノット、3 日 9 時に 50 ノットの最大風速を予想し、それぞれ海上強風警報、海上暴風警報を発表する。各地方海上予報区の最大風速については、全般海上予報中枢として、2 日 00UTC 初期値の GSM 海上風速予想 (第 1.1.11 図) などをもとに全般海上警報との整合を考慮しつつ検討する。2 日 9 時の時点で華北に解析されている低気圧は 3 日 3 時には黄海に進み 998hPa まで発達する予想で、黄海から東シナ海北部にかけての広い範囲と対馬海峡付近で 30~35 ノットが予想されている。この予想は 1 日 12UTC 初期値の GSM と大差はなく、03UTC 初期値の MSM でも同様の予想であり (図省略) 四国沖・瀬戸内海、日本海西部、対馬海峡、九州西方海上の各地方海上予報区については 3 日 3 時から最大風速 35 ノットを考える。その後 3 日 9 時には、GSM では低気圧が 986hPa まで

急速に発達し日本海西部で 44 ノットを予想しており、MSM では 984hPa と GSM より 2hPa 低めで 48 ノットの海上暴風警報(SW)級を予想している。急速に発達する低気圧の中心気圧はモデル予想より深まることも多く、また、島嶼部や海峡等ではモデルよりも強い風が吹くという知見もあることから、対馬海峡や豊後水道、紀淡海峡では 3 日 9 時から 50 ノットの SW 級と予想することが妥当である。その後も低気圧は発達しながら日本海を東北東に進み、低気圧の移動と発達に伴い海上警報で示す 30 ノット以上の強風域が本州から北海道にかけての太平洋側まで広がって、最大風速は 3 日 15 時には 60 ノットにまで達する見込みである。

全般海上予報中枢として検討した、全般海上予報区及び各地方海上予報区の風速の最大値、及び海上強風警報、海上暴風警報に相当する風が吹き始めるタイミングを第 1.1.1 表に示す。各地方海上予報中枢では、地域特性（地形の影響等）を加味してより詳細な量的予想を行うとともに、風速の時間変化についてもより詳細に検討し、必要に応じて全国予報中枢（全般海上警報）と調整を図ることとなる。

1.1.2.4 実況の経過

実際の 4 月 4 日 9 時にかけての総観場の経過（第 1.1.12 図）及び風、波、潮位の実況を以下にまとめる。

2 日 21 時には低気圧は黄海まで進み、前面の高気圧との間の西日本の気圧傾度が大きくなりつつあり、対馬海峡や豊後水道など風の吹きやすいところで 15 メートル以上の風を観測している。衛星画像では、低気圧の雲域 A のバルジの高気圧性曲率が大きくなり（赤外画像）上層トラフに対応するバウンダリーの低気圧性曲率が大きくなるとともに暗化が進み（水蒸気画像）低気圧が発達していることがわかる。また、寒冷前線に対応する雲域 B も明瞭化している。

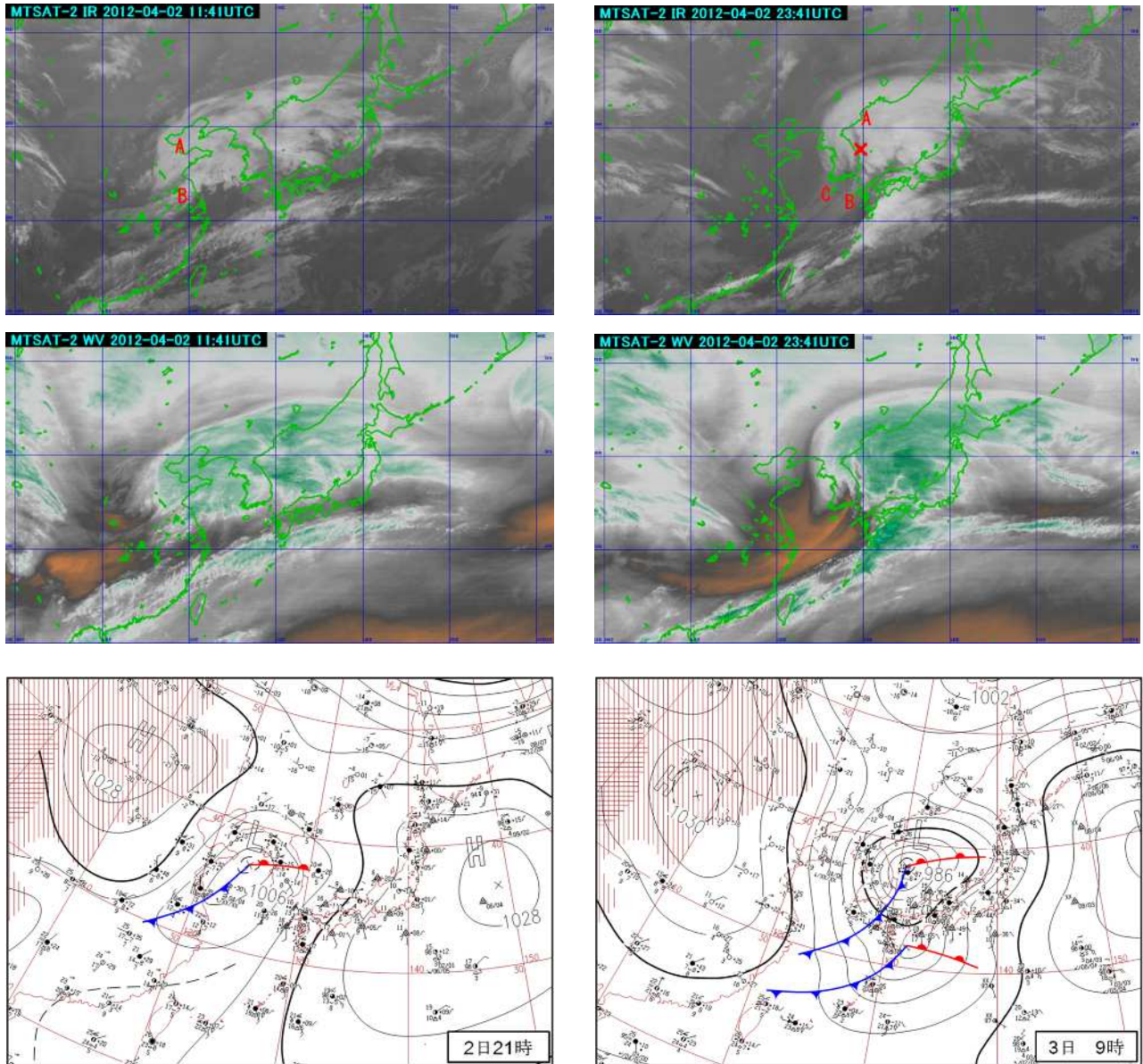
3 日 9 時には低気圧は日本海西部まで進み、中心気圧も 986hPa まで深まった。ウィンドプロファイラの観測による高度 1500m 付近の下層風は 2 日午後から対馬海峡で強まり始め、3 日 9 時には西日本日本海側で 70 ノット、北陸～東北で 50～60 ノットまで強まっており、2 日 00UTC 初期値の GSM 予想と比べて東北地方での強まり方は若干タイミングが早い。全体的にはほぼ数値予報の予想通りの経過をたどっている。下層暖湿気の流入についても、下層風の強まっている西日本の高層観測で、数値予報の予想に近い 850hPa 相当温位の実況が得られている。地上風は、北陸から西日本にかけて広い範囲で 15 メートル以上を観測している。波については、低気圧が急発達したためこの時点ではまだ吹続時間が短く、低気圧付近や西日本の沿岸では 3 メートルから 4 メートル程度で、この時点では波浪モデルの予想とほぼ一致している。衛星画像では寒冷前線の後面に寒気移流を示唆する雲域 C（可視画像（図略）でより明瞭）が現れ始め、フックパターンが形成された。雲域は 2 日 21 時よりも南北方向に広がっており、暖気移流、寒気移流が強まってきたことに対応している。

第 1.1.1 表 海上警報予想シナリオ（2 日 15 時時点）

表中、GW と SW の欄は、それぞれ海上強風警報、海上暴風警報に相当する風が吹き始めると予想されるタイミングを示す（例：0300 であれば 3 日 00UTC、すなわち日本標準時の 3 日 9 時）。MAX の欄は、2 日 15 時～3 日 15 時の期間内予想最大風速。

海域	GW	SW	MAX
全般海上	0212	0300	60
日本海北部・オホーツク海南部	0306	0318	35
北海道南方・東方海上	0306	0318	35
三陸沖	0306	0312	40
日本海中部	0300	0306	60
関東海域	0306	0312	40
東海海域	0306	0312	40
四国沖・瀬戸内海	0218	0300	50
日本海西部	0218	0300	60
対馬海峡	0218	0300	50
九州西方海上	0218	-	45
九州南方海上・日向灘	0300	-	40
沖縄海域	0300	-	35

3日21時には低気圧は日本海で964hPaまで急発達した。ウィンドプロファイラによる高度1500m付近の下層風速は、3日15時に新潟県高田で95ノット、西日本～東日本の太平洋側でも50～80ノットが観測されている。地上風も北陸地方を中心に強まり、福井県三国では13時22分に25.8メートル、富山県砺波では14時38分に23.1メートルの最大風速を観測し、それぞれ観測史上1位を更新した。また、低気圧の中心から離れた北海道でも15メートル以上の強い風を観測した。波も日本海及び日本の東海上で6メートルを超える大しけとなり、長崎県生月島では3日16時に4.78メートル、静岡県石廊崎では21時に6.28メートルの高波を観測した。衛星画像では、低気圧の閉塞に伴い、雲渦が明瞭化した。また、寒冷前線後面の日本海西



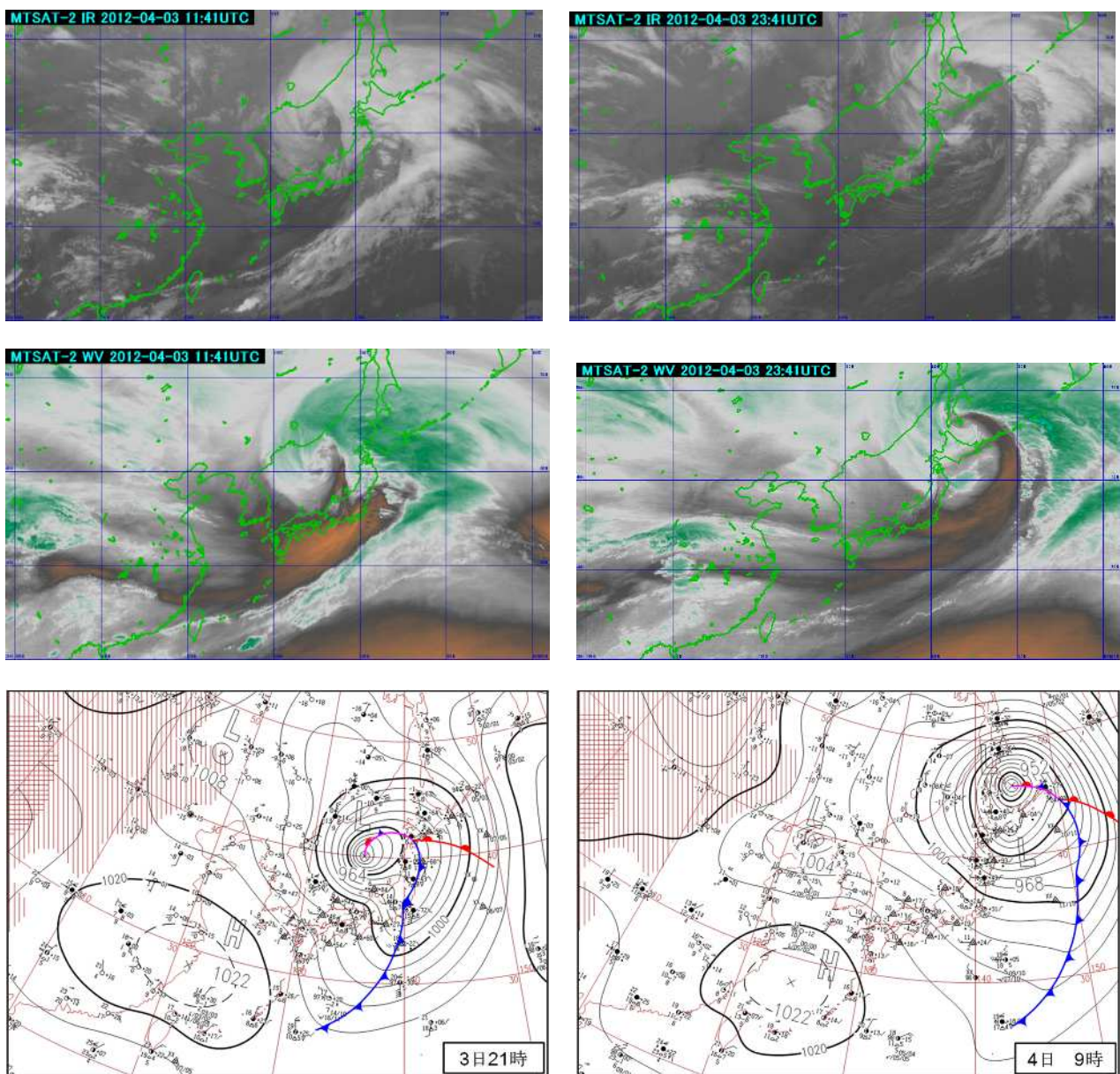
第1.1.12図 4月2日21時～4日9時の衛星画像と地上天気図

4月2日21時(左)及び4月3日9時(右)の、赤外画像(上)、水蒸気画像(中)及び地上天気図(下)、図中の×印は、フックパターン(発達中の雲域の北縁が高気圧性曲率を増すとともに、南西縁が低気圧性の曲率を示すパターン)を呈している雲域の、雲縁の曲率の変曲点(フック)を示す(衛星画像解析についての詳細は、気象衛星センター(2000)を参照)。

部や東シナ海では寒気の流入を示唆する筋状雲が拡大しており、水蒸気画像では暗域が渦の南側から東側まで入り込んでいる。

4日3時には低気圧は962hPaと3日21時と同程度の中心気圧を保ったまま津軽海峡付近まで進み、閉塞点の釧路付近には新たに低気圧が発生した。4日1時3分には秋田県本荘で27.7メートル、1時10分には新潟県両津で32.1メートル、2時6分には山形県浜中で26.7メートルの最大風速を観測し、それぞれ観測史上1位を更新した。波も4日3時に京都府経ヶ岬で7.05メートルを観測した。また、3日夜には北陸から東北日本海側を中心に潮位が急激に上昇し、石川県能登では4日2時36分に156センチの最大潮位偏差を観測した。

その後、日本海で発達した低気圧は北海道南海上に進み不明瞭化する一方、閉塞点上に発生した低気圧は



第1.1.12図 4月2日21時~4日9時の衛星画像と地上天気図(続き)

4月3日21時(左)及び4月4日9時(右)の、赤外画像(上)、水蒸気画像(中)及び地上天気図(下)

4日9時にオホーツク海まで進み、952hPaまで急発達した。このため、宮城県新川では4日10時41分に25.9メートル、稚内市声問で12時32分に24.3メートルの最大風速を観測するなど、北日本では非常に強い風が続き、波も北日本・東日本の広い範囲で大しけの状態が続いた。衛星画像では、ドライスロットがオホーツク海に進んだ低気圧の中心付近に入り込み、コンマ形状の雲パターンを形成しており、雲頂高度も高く雲縁も明瞭であることから、最盛期に達したことが推察される。

参考文献

- Hoskins, B. J., M. E. McIntyre and A. W. Robertson(1985) : On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., **111**, 877-946.
- 気象庁(2012) : 平成24年4月3日から5日にかけての暴風と高波 . 災害をもたらした気象事例, 気象庁ホームページ .
(http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/new/jyun_sokuji20120403-0405.pdf)
- 気象衛星センター(2000) : 気象衛星画像の解析と利用 . 気象衛星センター , 161pp .
- 氏家将志(2012) : 事例検証 - 平成24年4月3日・4日の、急激に発達した低気圧の予想について . 平成24年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 97-104 .
- Weldon, R. B. and S. J. Holmes(1991) : Water vapor imagery, interpretation and applications to weather analysis and forecasting. NOAA Tech. Rep. NESDIS, **57**, 213pp.
- 吉田久美・三浦大輔・高野洋雄(2012) : 沿岸波浪モデルの統計的検証と改善について . 測候時報, **79**, 特別号, S73-S82 .

1.1.3 防災気象情報の内容とタイミングについて

1.1.3.1 はじめに

本事例は、低気圧の進路や急速に発達するタイミング、その程度などの予想が比較的安定していた。防災気象情報としても、警報や注意報に先だって注意を呼び掛ける予告的な気象情報（以下「予告的な気象情報」）から始まり、リードタイムを持った警報の発表、警報の補完的な気象情報の発表の流れに沿って行うことが可能な事例であった。台風接近時にも言えることだが、このように予想が比較的安定しており、各種気象情報の発表のタイミングが高い確度で想定できる状況では、防災気象情報としても理想的な形で発表を行うことができる。本項では、このような事例における防災気象情報の内容や発表のタイミングについて考察する。この中で、防災気象情報の効果的な運用に関わる考え方について説明し、本事例において適時的確な情報発表が行えていたかどうか検証する。

1.1.3.2 情報発表の状況と特徴

まず、本事例において、本庁や地方予報中枢で行った情報発表の状況と特徴について述べる。発表された全般気象情報、地方気象情報の時系列は第 1.1.3.1 表のとおりである。最初の情報は、本庁及び札幌、仙台の両地方予報中枢が主に 4 日の暴風、高波を対象として、3 日前の 1 日 15 時過ぎに定性的な内容で、予告的な気象情報を発表した。この発表に際しては、平成 23 年度週間予報技術検討会で作成した「3 日～1 週間程度先までに発現が予想される顕著現象を対象とした気象情報を発表するための客観的な判断手法」を活用し、本庁と協議の上で、数値予報資料の不確実性を考慮しても大荒れとなる可能性が高いと判断したためである。その後、沖縄を除く全ての地方予報中枢において、急速に発達する低気圧により 3 日から 4 日にかけて大荒れとなるという内容の気象情報を、現象が発生する 1 日から半日前に発表し、量的な予報を含め、警報の可能性について記述している。全国的な警戒事項としては暴風、高波、高潮であり、東日本、北日本においては、積雪の状況や雨や雪の降り方に応じて短時間強雨や大雨、融雪による土砂災害や河川の増水、暴風雪、なだれといった注意警戒事項も加えていた。タイミングとしては、全ての地方予報中枢で、概ね 5 時台、16 時台という早朝と夕方の時間帯での情報発表が行われており、この時間帯に加えて 11 時台にも気象情報を発表した地方予報中枢もあった。

第 1.1.3.1 表 4 月 1 日～5 日にかけて発表した全般気象情報、地方気象情報（沖縄は除く）の時系列

時（JST）は日本時間、数字は発表した号数を示す。 は定性的な内容による予告的な気象情報であることを示す。

日		1日			2日				3日				4日				5日			
時(JST)		15	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24	6	12	18	24
低気圧	中心気圧				1002	1008	1006	1006	1000	986	972	964	962	952	950	956	962	966	968	972
本庁	全般気象情報																			
札幌	地方気象情報																			
仙台	地方気象情報																			
新潟	地方気象情報																			
本庁	地方気象情報																			
名古屋	地方気象情報																			
大阪	地方気象情報																			
広島	地方気象情報																			
高松	地方気象情報																			
福岡	地方気象情報																			
鹿児島	地方気象情報																			

1.1.3.3 情報の内容や発表のタイミングについての検証

前節で述べた実際の情報発表等の状況を踏まえて、防災気象情報の内容や発表のタイミングについて、以

*下村早也香（気象庁予報部予報課）

下の3点に着目して述べる。

定性的な内容による予告的気象情報の発表判断

量的予報を記述した気象情報の発表のタイミングと量的予報の内容

危機感を伝えるための情報における記述の工夫

1点目は、3日以上先の現象に関する北日本対象の定性的な内容を記述した、予告的気象情報の発表判断についてである。予告的気象情報は、現象が発現する概ね24時間以内に発表する、量的予想を含む気象情報へつながることを前提に発表されるもので、この情報の発表判断では、現象の程度や影響の範囲なども考慮している。本事例の場合には、前項の1.1.2.2節で記述されているように、全球数値予報モデル（以下、GSM）では低気圧の急速な発達予想は安定していた。最大風速ガイダンスでも、3日には西日本から北日本の広い範囲で、非常に強い風が吹く予想はほぼ安定していた（第1.1.3.2表）。今回の予告的気象情報発表の検討では、数値予報資料から低気圧が急速に発達しながら北日本を通過する予想であり、北日本では暴風雪や高波、融雪による災害など、他の地方より広域・広範な災害が予想されたため、より早い段階での対策が必要と考え発表した。実際、北日本を中心に全国的に大荒れの天気となり、予告的気象情報の発表は適切な対応であった。北日本以外の地方においても、概ね1日前には気象情報の発表を行ったが、今回のように予想される災害や社会的な影響が大きいと判断した場合には、1日よりも前に定性的な内容による予告的気象情報を発表するなど、積極的な対応を検討することが望ましい。

第1.1.3.2表 初期値別の各地方予報中継管内の4月3日から4日午前のGSM最大風速ガイダンス最大値

単位はm/s、塗りつぶしは、20m/s以上25m/s未満を黄色、25m/s以上30m/s未満を赤色で示す。予報時間の関係から、は4日00時から09時までである。

初期値	予報期間	札幌	仙台	東京	新潟	名古屋	大阪	広島	高松	福岡	鹿児島	沖縄
31日 12UTC	3日AM	13.9	15.0	15.8	19.8	10.0	23.5	18.1	16.8	18.4	17.8	15.8
	3日PM	21.4	16.8	26.1	21.0	22.5	20.0	18.5	25.0	20.6	20.1	14.7
	4日AM()	21.3	23.0	21.2	22.2	17.7	17.4	17.1	23.3	17.3	16.0	10.3
31日 18UTC	3日AM	14.6	15.0	16.6	20.6	10.9	25.5	19.6	17.1	19.0	17.4	15.6
	3日PM	21.7	18.0	27.0	21.2	21.4	20.6	19.0	24.5	20.7	20.5	14.5
	4日AM	23.7	24.8	19.4	19.7	16.8	16.8	16.2	21.9	16.7	14.9	9.4
1日 00UTC	3日AM	13.7	14.2	17.9	20.8	11.9	25.9	20.1	17.8	20.1	19.0	16.0
	3日PM	21.5	17.9	26.6	22.3	20.3	21.3	19.4	25.3	21.6	21.3	15.9
	4日AM	27.1	23.0	20.4	22.3	18.2	17.2	16.6	23.2	17.4	15.3	9.1

2点目は、量的予報を記述した気象情報の発表のタイミングと量的予報の内容が適切であったかどうかという点である。

地方気象情報の発表開始のタイミングは、現象が発現が3日からで、第1.1.3.1表のとおり、災害に結びつくような顕著な現象が発現する1日前までに発表している官署がほとんどで、概ね適切な対応であったと言える。しかし、一部の官署では半日前の対応となった。特に今回のように、船舶への暴風や高波の警戒の呼び掛けが必要な状況では、避難行動をとるために時間を要することが想定されるため、1日前の情報発表が重要である。

暴風、高波、高潮の量的予報と警戒期間について適切に発表できていたのかという点は、実際に防災気象情報を利用する上で重要である。これについて、地方気象情報の内容と観測値と比較することで簡潔に検証してみる。

まず、暴風について検証する。各地方予報中樞管内で観測された最大風速が最も大きかった地点を第1.1.3.3表に示す。これを見ると観測した地点は島しょ部や岬等の風の吹きやすい地点ではあるが、3日午後から全国的に非常に強い風を観測しており、東北地方では40m/s近い猛烈な風を観測していることがわかる。量的予報が適切であったかどうかについて、2日夕方に発表した気象情報に記述した最大風速の予想値と警戒期間を観測値と比較することで検証する(第1.1.3.4表を参照)。2日夕方の気象情報では、沖縄を除く地方予報中樞で警戒級の予想をしていた。この全ての気象情報において、警戒級を観測した時間帯は気象情報で記述した警戒期間内に含まれており、見逃しのないような警戒期間が設定されていたといえる。最大風速の予測値が過小であった地方予報中樞もあるが、猛烈な風を観測した地点は岬などで風が局所的に強い所が多く、単純に比較できない部分もある。そこで、毎時大気解析と比較すると、東北日本海側の沿岸部で一時的に30m/s近い値となっていた時間帯もあったが、それ以外は量的予報の数値としてはどの地方予報中樞も概ね適切に予想できていたといえる(図略)。第1.1.3.5表に最大風速ガイダンスの値を示すが、安定して警戒級の予想をしており、適切な量的予報につながったといえる。

なお、富山地方気象台においては、過去の調査から作成した予報則(成瀬、2009)をもとに、最大風速ガイダンスでは10m/sしか予測していなかったが、最大風速を20m/sに上方修正し、ほぼ適切に予測した。適切な注意報・警報、情報発表のため、予報技術検討会での検討や調査研究をとおしてこれまでに蓄積されている予報則や知見を積極的に活用することが望ましい。

第1.1.3.3表 各地方予報中樞管内で観測した最大風速が最も大きかった地点の風速・風向と観測した日時

地方中樞	地点名	最大風速		日時
		風速	風向	
札幌	宗谷岬	28.7m/s	北西	4日12時
仙台	飛島	39.7m/s	西	4日02時
新潟	両津	32.1m/s	西南西	4日01時
本庁	三宅坪田	28.2m/s	南	3日18時
名古屋	セントレア	22.2m/s	西	3日18時
大阪	友ヶ島	32.2m/s	南南東	3日13時
広島	西郷岬	27.1m/s	南西	3日14時
高松	室戸岬	30.6m/s	西南西	3日14時
福岡	鰐浦	22.0m/s	西	3日11時
鹿児島	屋久島	21.7m/s	北西	3日15時

第 1.1.3.4 表 2 日夕方発表の情報に記述した地方予報中管内の最大風速の量的予報と観測値との比較

塗りつぶしは、情報欄では警戒期間を赤色、観測値欄では最大風速が 20m/s 以上 25m/s 未満を黄色、25m/s 以上 30m/s 未満を赤色、30m/s 以上を紫色で示す。情報欄の数値は情報に記述した最大風速（単位は m/s）、文字は情報で呼び掛けていた警戒の文言を示す。

風	日	3日								4日							
		0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24
札幌	情報									警戒(量的記述はなし)							
	観測値																
仙台	情報		28 警戒														
	観測値																
新潟	情報		28 厳重に警戒														
	観測値																
本庁	情報						25 厳重に警戒										
	観測値																
名古屋	情報						25 警戒										
	観測値																
大阪	情報		25 警戒														
	観測値																
広島	情報				25 警戒												
	観測値																
高松	情報			25 警戒													
	観測値																
福岡	情報			23 警戒													
	観測値																
鹿児島	情報				20 厳重に警戒												
	観測値																

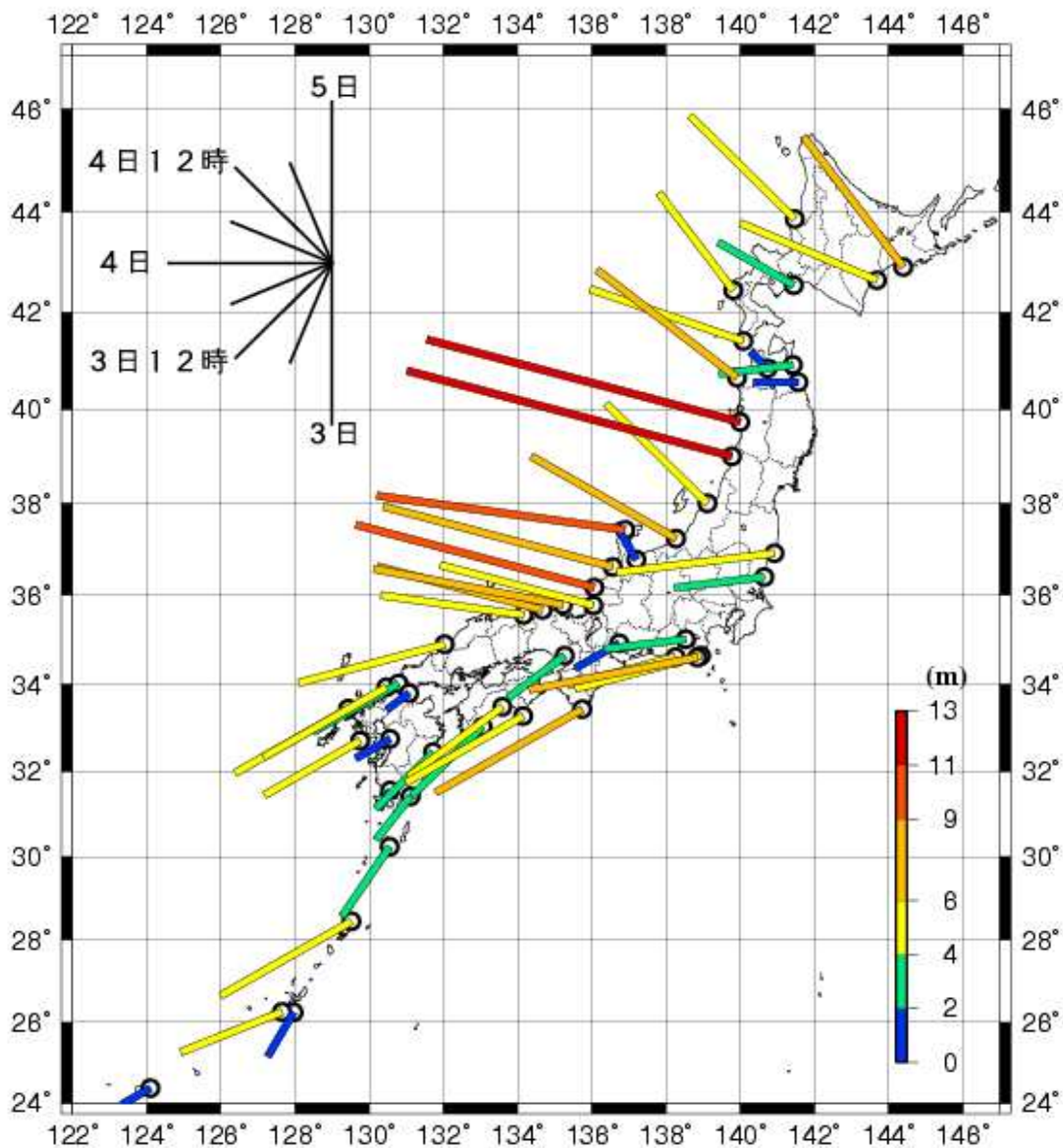
第 1.1.3.5 表 2 日 00UTC、2 日 12UTC 初期値での各地方予報中管における 3 日から 4 日の GSM 最大風速ガイダンス最大値

単位は m/s、塗りつぶしは第 1.1.3.4 表と同じ。

初期値	予報期間	札幌	仙台	東京	新潟	名古屋	大阪	広島	高松	福岡	鹿児島
2日 00UTC	3日AM	14.8	15.0	16.2	20.2	10.4	26.3	19.8	18.4	23.6	21.4
	3日PM	21.7	17.8	26.9	25.0	21.3	22.3	21.4	26.3	23.8	22.1
	4日AM	25.1	26.8	20.8	25.5	18.2	18.1	17.3	25.1	17.3	16.5
	4日PM	30.3	22.9	17.5	19.8	15.9	11.8	14.3	14.3	11.9	11.3
2日 12UTC	3日AM	16.8	15.2	16.4	19.9	10.9	24.9	20.1	17.8	22.0	19.0
	3日PM	21.1	20.7	26.8	28.2	20.4	23.6	21.9	27.4	23.9	22.3
	4日AM	28.4	26.7	21.1	26.2	16.3	16.7	16.3	21.9	15.5	16.1
	4日PM	31.6	21.2	16.7	19.2	15.0	11.6	14.8	13.5	11.9	11.6

次に、高波について検証する。4月3日から4日にかけて、各地で観測された最大波高とその観測時刻(国土交通省港湾局と気象庁による観測を利用)は第 1.1.3.1 図のとおりである。波高がピークとなる時間帯は大きく見ると西日本から東日本・北日本へ移るが、細かく見ると、日本海側より太平洋側の方がピークは早く、日本海側でも能登半島や佐渡の地形の影響で新潟ではピークは遅くなっている。太平洋側は、地上天気図上で表現されている寒冷前線の前面の南よりの強い風によりピークとなり、日本海側では、うねりの影響もあるが、寒冷前線の後面での西よりの風でピークとなった。このため太平洋側の方が日本海側より波高のピークが早くなったと考えられる。北陸や東北の日本海側では 9m を超える猛烈なしけを観測し、酒田では 12m を超える値を観測した。その他の本州各地や北海道でも 6m を超える大しけとなり、南西諸島を含めその他の広い範囲で 4m を超える波が観測された。これに対して、2 日夕方に発表した気象情報では、鹿児島以外の地方予報中管で警報級の波高に言及する記述をしており、具体的な数値としては仙台、新潟で最大 8m の記述をしていた。警戒期間も 3 日の午後が対象で、観測値と比較してもほぼ適切な期間に設定してあった。

その後3日朝の気象情報では、仙台、新潟で最大10mを記述しており、リードタイムのとれた適切な量的予報を発表していた。波浪と潮汐に関しては、今年の3月28日より海洋気象情報室が提供する沿岸防災解説資料が本運用となり、予報現業に詳細な波浪と潮位に関する解説資料が提供され、より適切な予想ができる環境が整ったところであった。次項において解説資料を利用した波浪・高潮警報対応についてとりあげているが、ここでも少しふれておくと、波浪モデルはGSMの海上風の予測に依存しており、風浪により波高を修正する場合には解説資料で「海上風の修正に合わせて波高も修正」といった表現を用いている。2日14時の波浪に関する解説資料でも、「3日後半から日本海に進む低気圧によって風浪が急速に発達するため、実況に注意し、風に合わせた修正を検討」という記述があり、多くの官署は風速の予測に基づき波高を波浪モデルより高く予想したことで、リードタイムのとれた概ね適切な量的予報に結びつけた。



第1.1.3.1図 4月3日から4日にかけて各地で観測された最大波高と観測時刻

観測時刻は、図の左上方の凡例による。

(この図では国土交通省港湾局波浪データ(速報値)と気象庁の波浪観測資料を利用した。)

最後に、高潮について検証する。高潮に関しては、2日夕方の情報から注意事項として記述され、3日夕方の情報から東北日本海側と北陸を対象に警戒事項として記述された。実際、秋田県では高潮被害も報告されており、石川県の能登では最高潮位（瞬間値）163cmを観測し、高潮警報基準も超過していることから、警戒事項として記述したこと自体は適切であったと考えられる。しかし、タイミングとしては、現象発現が4日未明であったことを考えると、もう少し早い段階から警戒を呼び掛けることができればより良かったと思われる。そこで、前述で紹介した沿岸防災解説資料の潮位に関する解説資料などを基に、どのタイミングから高潮警報に言及する記述が可能であったか簡単にふれる。4日朝の秋田県の警報の可能性については、2日10時の函館海洋気象台作成の解説資料に既に記述されていた。その後、3日10時の本庁作成の解説資料では、秋田県で3日夜遅くから4日朝にかけて警報基準を超過する可能性や、石川県で警報基準下10センチを超過する可能性について記述された。3日14時の本庁作成の解説資料では、秋田県に加え、石川県においても警報の可能性について記述されていた。ここでは秋田の対応についてとりあげるが、秋田では午前中の解説資料や仙台管区からの指示を踏まえ、午前中には警報級の可能性があるかと判断し、14時06分に高潮警報の可能性に言及した高潮注意報を発表した。その後、3日夕方には高潮警報を発表し、気象情報で警戒を呼び掛けた。高潮警報は、市町村長の行う避難勧告等の発令や施設管理者による水門操作等の判断を、支援するものである。このため、防災機関の対応も考慮し、高潮警報の可能性がある場合には遅くても半日前、特に今回のように現象発現が夜間から早朝に予想される場合には、早めに警戒を呼び掛ける必要がある。昼過ぎには高潮警報の可能性に言及した高潮注意報を発表しており、適切な対応がとれている。午前中には警報級の可能性があるかと判断していることから、昼前頃に高潮への警戒も含めた内容の気象情報の発表について検討を行うことができれば、より適切な対応であったといえる。

3点目は、気象情報で記述する表現についてである。本事例において、定型的な表現ではなく、工夫した表現を用いていた情報をいくつか例にあげて、より分かりやすく効果的な表現について検討してみる。1つ目の例は、「3月31日の風や波を上回り、陸上でも暴風となるでしょう」という表現である。まだ人々の記憶にも新しい数日前に強風となった事例と比較することで、気象情報を受け取る側としては風の強さや波の高さをイメージしやすく、わかりやすい表現と考えられる。また、この表現は本庁で行った記者会見でも解説のポイントとして用いており、気象情報に記述しやすかったのではないかと考えられる。2つ目の例は、暴風のピークがこれからというタイミングにおいて、これまでの風の実況を記述し、今後さらに強まるということ強調する表現である。従来、観測された風速の記述については、現象のピーク時の気象情報、あるいは報道向けの観測値の取りまとめという認識で終了情報に記述することが多かったが、ピーク前に実況で強風が吹いている場合に記述すると、前述の例と同様に気象情報を受け取る側が風の強さをイメージしやすい。また、通常は1日2回（5時頃・17時頃）地方気象情報を発表することが多いが、暴風や高波のピーク前でこの記述が効果的と判断した場合には、11時頃の発表、また夜間であっても顕著現象が予測される場合には23時頃の発表を検討したい。気象情報の記述における危機感の伝え方については、これまでも検討がなされており、今年度からは、大雨により重大な災害が差し迫っている場合には見出しのみの短文で伝えるといった運用を行う等、様々な取り組みを行っている所である。気象情報作成時は現場の作業も輻輳しており、時間的な制約が大きいのが、現象の特徴や地域性に配慮した具体的な記述を工夫することを心掛け、受け手に分かりやすい気象情報作成に努めることが重要である。

1.1.3.4 防災気象情報が活用されるために

最後に、防災気象情報をより効果的に発表するための対応として、気象情報発表後に行った本庁の対応について紹介する。本庁では2日16時30分に「4月3日から4日にかけての暴風と高波について」という夕

イトルで記者会見を行うとともに、民間事業振興課から民間気象事業者やお天気キャスターへメールで記者会見の資料を送付するなど、情報共有に努めた。全国的に（広範囲に）影響を及ぼす顕著な気象現象については、これまでも記者会見等を行ってきたところであるが、急発達する低気圧を対象に開催したのはほとんど例のないことであった。会見では、暴風・高波への警戒を呼び掛けるとともに、船舶へは早めの避難を呼び掛け、風の強い時間帯が通勤・通学の時間帯にあたる地域では交通機関に影響が出る可能性があるとして、帰宅時間を早める、無理な外出は控えるなどの具体的な行動にも言及し、報道関係者などから高い評価が得られた。会見の様子は夜の全国ニュースでとりあげられるとともに、東京都からは事業者団体、鉄道事業者、学校等に対して、暴風への適切な対応について要請がなされるなど、社会に対して広く注意喚起を行うことができた。今回の本庁の対応は、一定の効果を上げることができた一例と言える。

防災気象情報が活用されるためには、記者会見や防災機関向けの説明会、メールや電話による地方自治体担当者への直接的な情報提供など、状況に応じて様々な方法を用いて情報提供や注意喚起を行う必要がある。各官署において従来から取り組んでいることであるが、その地方の気象特性や想定される災害、防災機関や報道等の関係機関との連携など、その地方の状況を踏まえた上で様々な対応を行うことが重要であり、特に、防災機関との連携に関しては、平時から顔の見える関係を築いておくことが防災気象情報を活用した防災対応に結びつくため、市町村訪問や災害時の聞き取り調査などにも積極的に取り組むことが重要である。

参考文献

成瀬 孝幸 (2009):富山県におけるおろし風の構造と局地風強化の判定 .平成 20 年度東京管区調査研究会誌、No.41,富山県

1.1.4 沿岸防災支援と連携した波浪・高潮警報対応*

1.1.4.1 はじめに

2012年4月3日、日本海の低気圧が急速に発達して夜のはじめ頃にかけて高波や高潮などによる災害が発生するおそれが高まった。気象庁海洋気象情報室(以下、情報室)及び各海洋气象台(以下、海台)では、府県予報担当官署の波浪及び潮位に関する的確な予報及び警報の発表に資するため、波浪と潮位に関する沿岸防災解説資料(以下、解説資料)を全国予報中枢官署(以下、予報課)及び地方予報中枢官署に対して提供する業務を3月28日に開始したところである。そこで情報室では予報課と協議して急遽臨時体制に入り、波浪と潮位の臨時解説資料を提供することとした。

以下、「高波に関する検討」では、情報室波浪班現業(以下、波浪班)で利用した波浪関連資料や波浪班・海台が作成した解説資料について、その作成過程や技術的な解説、資料を利用する上での必要な知識・留意点等を記述する。また、「高潮に関する検討」では、情報室潮汐班現業(以下、潮汐班)や函館海台が予測された波高に基づき、高潮数値予測モデル(以下、高潮モデル)で表現できない現象を考慮して作成した解説資料について、その作成過程や技術的な解説、資料を利用する上での必要な知識・留意点等を記述する。さらに、地方予報中枢官署が解説資料を利用して、気象指示報等で高潮に関する指示を適切に行った過程や、これらの指示等を受けて、府県予報担当官署が高潮に関する予測シナリオを組み立て、最終的に気象情報、警報の可能性に言及した注意報や警報の発表についてどのように対応したかを記述する。

1.1.4.2 高波に関する検討

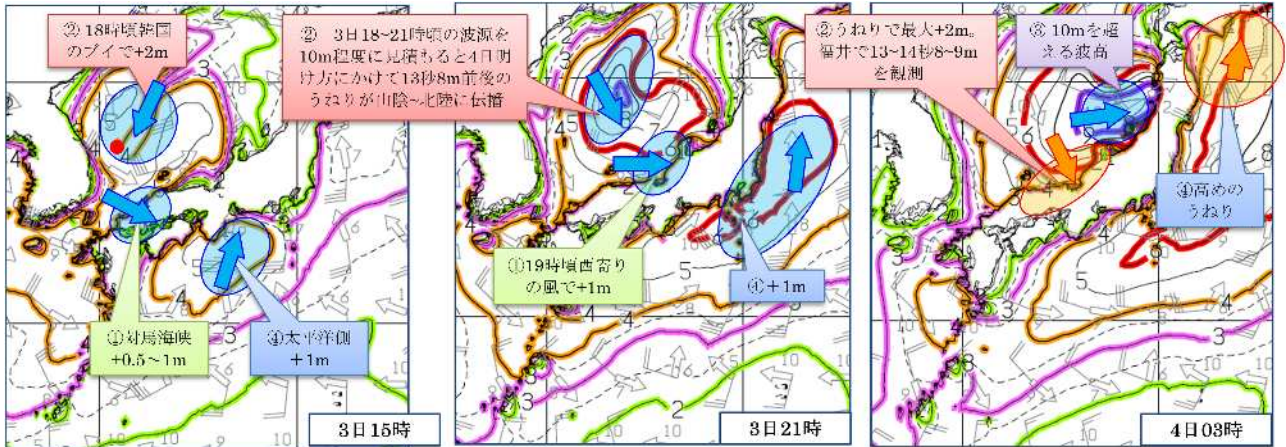
(1) 波浪に関する解説資料の内容

波浪の予報や波浪警報・注意報は、波浪モデルの予測値をもとに発表している。このため、波浪の解説資料では波浪モデルと実況の差について、要因及びその後の波浪モデル予想からの修正量を解説している。波浪モデルと実況の差の要因としては、風浪によるものとうねりによるものがある。

風浪については、主に波浪モデルの外力として入力している全球数値予報モデル(以下、GSM)の海上風の予測に依存する。解説資料では、風浪による波高の修正量を明記せず「海上風の修正に合わせて波高も修正」といった表現を用いるほか、風の実況に基づいた修正や、東進する低気圧等、系の上流側の情報を考慮して下流側での予想について言及する場合もある。一方、うねりについては、現地の風とは関係なく遠方で発達した波源域から伝播する波であるため波高の見積もりが風浪よりも難しく、波浪モデルの予想も大きく外れる場合がある。このため、解説資料では主にうねりに関する解説を重視し、波浪モデルからどの程度の修正がどのくらいの期間必要なのか、現地の風浪も合成した波高で修正量を示している。

今回の低気圧の事例では、非常に強い海上風により風浪が発達するとともに、沖合で発達した風浪からのうねりが波浪モデルより高めに広がった。当日の波浪班や各海台の解説資料及び予報課予報班長との打ち合わせでも、うねりの修正や風浪の発達可能性について解説を行っているが、その解説の背景や解説の結果について簡単に記述する。

*白石 昇司、三浦 大輔(気象庁地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室)、加藤 廣(仙台管区气象台技術部予報課)、栗田 邦明、戸堀 博之(秋田地方气象台技術課)、中舘 明(函館海洋气象台海洋課)



第 1.1.4.1 図 4月3日~4日における波浪モデルの波高と波浪モデルとの差が目立った箇所

波浪モデルによる波高図(各イニシャルの FT=0)に、波浪モデルと実況の差が目立った箇所を風浪は青矢印で、うねりは橙矢印で表示している。矢印の向きが波向きを表している。吹き出しで示した「+...m」の値は、実況と波浪モデルとの波高の差を示す。

(2) 4月3~4日にかけての波浪の状況と解説内容のポイント

一連の現象の中で、解説対象となる波浪モデルとの差が大きかった点を以下に示す。(第 1.1.4.1 図参照。以下の ~ は図中の番号に対応。)

北陸西部から対馬海峡にかけて、3 日午後、西よりの風が強まり風浪が急発達した。波浪モデルでは波浪警報(概ね 6 メートル)未満の予想であったが、海上風が予想以上に強まり 6 メートルを超える大しけとなった。

の風浪が一時的におさまった後、4 日未明から明け方にかけて、北西からのうねりにより北陸西部から山陰にかけて波浪モデルより最大で 2 メートル以上高めとなった(波浪モデルでは 6~7 メートルの大しけのところ、実況では 9 メートルクラスの猛烈なしけとなった)。

4 日未明から明け方、東北南部の日本海側でモデル予想 10 メートルのところ、この期間の最大波高(12 メートル)を観測した。

太平洋側沿岸では、西日本で風浪が発達し始めたころから波浪モデルより 1 メートル以上高めに経過。その後東日本から北日本にかけてさらに発達し、波浪モデルより 1 メートル以上高めの傾向が続いた。

、 、 (は初期)については、急発達した風浪がポイントである。モデルとの差が生じたのは、いずれも実況の風が GSM より強かったことが原因である。当日の解説資料では、3 日昼頃から西日本周辺の海域で風浪がモデルより高めに発達してきたことから、系の下流側である東日本の海域でも高めに推移する可能性が大きく、波浪モデルを基本に海上風に合わせて上方修正を検討、とコメントした。その結果、波浪モデルにおいて波高が十分に高く予想されていた海域を中心に適切なリードタイムを取った波浪警報対応がなされていた。一方、予報現業者にとっては、海域ごとに波浪警報・注意報基準を超えるかどうかの判断が重要であるが、今回の解説資料でその点を強調して述べるができなかったことは今後の検討課題である。

については、日本海の北よりの風による風浪域を波源とするうねりが、波浪モデルより高めに推移したことがポイントである。波浪班及び海台では、波浪モデルでのうねりの表現が不十分なため、このような事例では有義波法を利用してうねりの伝播を見積もっている。なお、遠方のうねりがどの程度の時間をかけて、どのくらいの高さで到達するかを見積もる有義波法については、高野(2011)の解説が参考となる。これによると、3 日 18~21 時頃の日本海での波源域を 9~10 メートル程度(波浪モデルの予測値+2 メートル)と

仮定すると、北陸から山陰に4日明け方頃に周期13秒、波高7~8メートルのうねりが到達すると見積もることができる。これに現地の風浪(4~5メートルと推定)を合成すると合成波高8~9メートル程度となる。実際に港湾局所管の福井港波浪計では4日の明け方に周期13~14秒、波高8~9メートルの波浪を観測した。

結果として、この海域では波浪モデルよりも最大2メートル高い波高となったが、このとき波浪班及び舞鶴海台が解説資料により提供した修正量を第1.1.4.1表に示す。表の3段目は観測データを参考に波浪モデルと実況の差を示したものであるが、4日未明から明け方にかけての「波浪モデルの予測値+1.5~2メートル」に対しての各解説資料の修正結果を見る。舞鶴海台では3日16時半に解説資料を提供したが、この時点では波源域の波高はまだ発達過程で波浪モデルとの差も波源域周辺で+1メートル程度だったため、うねりの広がりを「波浪モデルの予測値+0.5~1メートル」と見積もった。その後、3日夜にかけて波源域の風浪はさらに急速に発達し、波源の南にある韓国のブイ(第1.1.4.1図の3日15時の赤丸付近、GTS回線から取得)は波浪モデルよりも2メートル以上高い波浪を観測した。このタイミングで21時に波浪班により臨時解説資料の発表を行ったが、山陰で「+1メートル」、近畿から北陸では「+0.5~1メートル」と修正量は大きく変えなかった。これは、韓国ブイが波源から離れていたことや周辺の観測値と比べて特に差が大きかったことから、日本に向かう方向の風浪の波源域を9~10メートルまでは考えず8メートル程度と推定したことによる。外洋の観測データは、風・波ともに1日2回の極軌道衛星による観測と、わずかに存在するブイ及び船舶の通報に頼っているため、実況の風浪のピークが何メートルと確実に決定することが難しい。その結果、今回のように波源の推定波高の違いで伝播するうねりの波高も大きく変わることになる。

波浪班及び海台では、限られたデータと波浪モデルからできる限り最適な波の場を想定して修正量を提示しているが、修正量には上述のような不確実性を伴うことに留意する必要がある。今回のブイの通報のように波浪モデルの予測値と大きく異なる観測値が事前に得られた場合は、注意を喚起する意味で不確実でもより修正幅が大きくなる可能性があることを、解説資料の中で言及していきたい。

(3)高波に関するまとめ

今回の事例では、波浪班及び各海台による解説資料において、風浪が波浪モデル以上に発達する可能性と、それに伴うモデルより高め(uねり)の伝播に関する解説を各地方予報中枢官署に対して行った。それらをもとに府県予報担当官署では概ね的確に波浪警報の発表を行った。しかし、量的に不十分な点があったことも否めない。今後は、平成24年10月から開始された観測データの波浪モデルへの同化導入を踏まえ、波浪警報ぎりぎりの海域での風浪の高まりや、より高め(uねり)の伝播の可能性が、より明確に予報官に伝わるように努めていく。

第1.1.4.1表 福井県沿岸における解説資料での修正の状況

福井県沿岸における4月3日00UTCの波浪モデル最大波高と、波浪計から想定される実況と波浪モデルの差、及び実際の解説資料で提示した修正量を記述。3段目の前半の+1~1.5メートルが本文の風浪による差、後半の+1.5~2メートルがうねりによる差。

予想時刻(JST):3~4日	15	18	21	24	3	6	9	12	15	18
福井県沿岸 モデル波高(メートル)	3.7	4.3	5.5	5.9	6.2	6.6	5.8	5.2	4.7	4.1
実況とモデルの差	並	+1~1.5メートル		並	+1.5~2メートル			並		
3日16時30分舞鶴海台解説資料	モデル基本、風次第					+0.5~1m				
3日21時波浪班臨時解説資料			風次第	山陰+1メートル	山陰、近畿、北陸 +0.5~1メートル					

1.1.4.3 高潮に関する検討

(1) 潮位に関する解説資料の内容

現用の高潮モデルは、主に気圧低下による吸い上げ効果と風による吹き寄せ効果により発生する潮位の変化を予想するものである。一方で潮位は、波浪、副振動、異常潮位といった高潮モデルでは表現できない現象によっても変動し、場合によっては高潮モデルによる予測を大きく超える潮位上昇となることがある。このような現象に対しては、潮汐班及び海台が提供する潮位に関する解説資料の中で言及し、注意喚起を行っている。

秋田県男鹿は、「沿岸の海底地形に起因した波浪による潮位上昇」（以下、波浪効果）がたびたび発生する地点である。波浪効果は、以下の条件に近い場合に顕著となることが分かっている。

海底勾配が大きい（遠浅ではない海岸）

波向が海岸線に直交

有義波高が一定の高さ（目安としては4メートル）を超過

の条件から発生は局所的であり、また、の条件から波向の違いによって潮位の上昇量が異なる場合がある。秋田県男鹿周辺の海域はの条件に当てはまっており、これまでに2012年2月1日に低気圧の接近に伴う波浪効果で潮位が高潮注意報基準を超過する事例があった。

函館海台では、4月2日の波浪モデル予想で3日夜から4日朝にかけて秋田県沿岸で10メートルを超える高い波浪が予想されていたことから、これまでの知見に基づく実験式を用いて、秋田県男鹿において1メートル程度の波浪効果による潮位上昇が発生すると予想した。これに吸い上げ効果や吹き寄せ効果が加われば、高潮警報基準を超過する潮位となることが考えられたことから、2日の解説資料で、3日夜遅くから4日朝にかけて高潮警報を超過する可能性を解説した。なお、潮位に関する解説資料は、メソ数値予報モデル（以下、MSM）に基づく高潮ガイダンスが33時間先までであること、原則的に午前の解説資料は当日、午後の解説資料は翌日までの解説を行っていることから、2日の時点では高潮警報を超過する可能性のある期間は解説対象ではなかった。しかし、秋田県の沿岸で波浪効果が予想されること、全般気象情報や地方気象情報で高潮に関する言及がなかったこと、また、前述した2012年2月1日の事例では波浪効果について適切なタイミングで解説できなかった（実際に潮位が上昇し始めてからの解説となった）ことから、早めに解説を行うこととした。

函館海台では3日には午後の解説資料に加え、府県予報担当官署が発表する高潮警報のリードタイムを考慮し、16時に以下の内容を記述した臨時解説資料提供した（第1.1.4.2図に一部を示す）。

細分された地域ごとに00UTC初期値の予想に基づく高潮警報・注意報対応の防災時系列図（バーチャート）

高潮ガイダンスで波浪効果が表現されないこと

過去事例として2012年2月1日の低気圧に伴い発生した波浪効果の状況

波浪効果の量的見積もりの根拠

潮汐班は、函館海台の臨時解説資料を引き継ぎ、潮位や波浪の最新の状況を加味した臨時解説資料を3日21時と4日02時30分に提供した。

地域名	予想最高潮位									
	3日			4日						
	夜のはじめ頃	夜遅く	未明	明け方	朝	昼前	昼過ぎ	夕方	夜のはじめ頃	
北海道	宗谷南部									
	網走西部									
	根室北部									
	根室中部									
	根室南部									
	釧路南東部									
	釧路南西部									
	渡島北部									
	渡島東部									
	後志北部									
青森県	上北(陸奥湾側)									
	下北(むつ市:陸奥湾側)									
	西津軽									
岩手県	北五津軽									
	宮古地域									
	釜石地域									
宮城県	大船渡地域									
	気仙沼地域									
	石巻地域									
秋田県	東部仙台									
	本荘由利地域									
	秋田中央地域									
能代山本地域										

※ 「警報基準を超過」 「警報基準下10センチを超過」 「注意報基準を超過」
ガイダンス補正を考慮

コメント: 秋田は波浪効果の影響で男鹿半島付近で警報の可能性
釧路・根室は厚岸湾と野付湾の一部では吹き寄せにより警報基準に近づく

第 1.1.4.2 図 函館海台が発表した臨時解説資料の一部(防災時系列図)(2012年4月3日16時発表)

(2) 官署における対応

ア 仙台管区気象台の対応

仙台管区気象台予報課では、函館海台から提供された潮位に関する地方解説資料を参考に、管内各地方気象台に対して高潮ガイダンスの修正等を指示した。

4月3日4時の地方気象指示報では、前日(2日)午後の潮位に関する地方解説資料の「秋田県男鹿では、高波による波浪効果に加わるため、潮位が高潮注意報・警報クラスに高まる」との解説を参考に、2日15UTC初期値の高潮ガイダンスの予想が秋田県の一部で高潮注意報基準を超過する程度であったのに対して、秋田県では高潮警報の可能性がある旨を記述した。

3日11時40分、定時開催の情報共有システム(TV会議)を用いた管内予報打ち合わせでは、午前の潮位に関する地方解説資料の「秋田県男鹿では、高波による波浪効果に加わるためガイダンスを70センチから90センチ上方修正する必要がある。また、秋田では20センチから30センチの上方修正が必要」等の解説を参考に、秋田地方気象台に対して、3日夜遅くから4日明け方にかけてのガイダンスの修正と高潮警報級を想定して対応することを指示した。

3日20時40分、定時開催の管内予報打ち合わせでは、潮位に関する臨時地方解説資料(3日16時00分提供)を参考に、各県における高潮警報・注意報の期間や波浪効果などによる高潮の実況監視の着目点について、指示及び解説を行った。

イ 秋田地方気象台の対応

秋田地方気象台では、低気圧や波浪の予想から、波浪効果による高潮に留意することを4月2日朝の予報会報から共有していた。

2日15UTC初期値の高潮ガイダンスでは、男鹿の最高潮位は約73センチと高潮注意報基準（100センチ）に達しない予想だったが、波浪効果による潮位上昇量の補正が作業上の重要なポイントであった。3日2時前に確定された波浪の中枢防災時系列は、秋田県では4日未明から明け方をピークとして波高が10メートルに達する予想であり、高潮ガイダンス利用に関する解説資料（予報部予報課ほか、2010）による実験式から求めた潮位上昇量は55センチから87センチであった。地方気象指示報では、波浪効果により高潮警報（男鹿市の基準は140センチ）の可能性があることを指摘しており、これは高潮ガイダンスに波浪による上昇量を加算した潮位とほぼ整合していたが、この時点における高潮の予測シナリオは、予想の確度等も考慮したうえで高潮注意報級とし、今後の低気圧の動向や発達程度によって予測シナリオを変更することとした。3日06時21分、「暴風と高波及び大雨に関する秋田県気象情報 第3号」を発表し、高潮に関しては潮位の上昇による浸水や冠水への注意を呼びかけた。

3日朝の予報会報・引き継ぎ後の予想資料の点検では、低気圧の経路や発達程度、風や波浪及び高潮の各ガイダンスは初期値による違いはほとんどなく、予想は安定していることを確認した。高潮ガイダンスの予想値は県内の最高で約110センチの高潮注意報級であったが、波浪効果の影響が顕著な男鹿では、実験式から求めた潮位上昇量を加算すると、最高潮位は約160センチと高潮警報基準を超える値が予想された。11時40分からの管内予報打ち合わせでは、潮位の予想は高潮ガイダンスを男鹿では70センチから90センチ、秋田では20センチから30センチ上方修正する必要があるとの指示を受けた。このため、防災時系列は3日夜遅くから4日明け方までの期間についてガイダンスを大幅に上方修正し、県内の潮位を150センチ以上の高潮警報の予報値とする予測シナリオに変更した。14時06分、沿岸のすべての市町に対し、高潮警報の可能性に言及した高潮注意報を発表した。

3日00UTC及び03UTC初期値の各種予想資料を点検し、予測シナリオに変更の必要がないことを確認した後、16時50分に沿岸のすべての市町に対し、3日夜のはじめ頃から4日明け方を対象に高潮警報を発表した。また、17時10分、高潮に対する警戒を強調するために、秋田県気象情報の標題を「暴風と高波及び高潮に関する秋田県気象情報」に変更し、高潮による海岸や河口付近での浸水や冠水に対して警戒を呼びかけた。

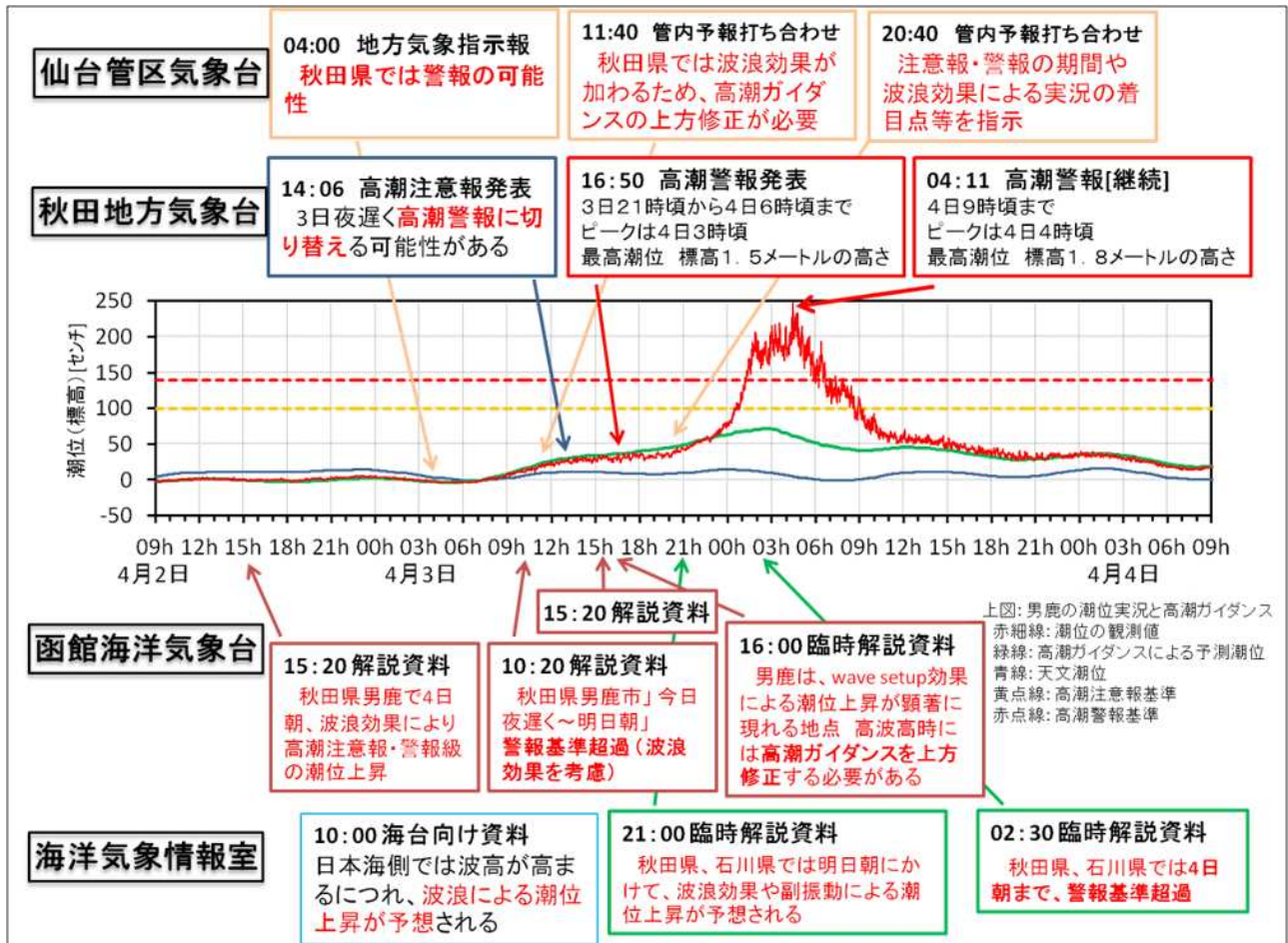
潮位は、秋田港、男鹿ともに、3日夜遅くから4日未明にかけて急激に上昇し、4日明け方にピークを迎えた。4日04時11分、潮位等の実況の推移から予測シナリオを微修正し、警戒期間を4日朝までとして高潮警報を更新した。その後、低気圧の位置や風、波浪及び潮位実況の推移を確認し、4日7時51分に高潮注意報に切り替え、4日11時00分には高潮注意報を解除した。

仙台管区気象台の管内では、本事例に先立って2012年2月1日の秋田県男鹿における波浪効果による高潮事例を共有していた。また、秋田地方気象台では、予報作業マニュアル用に波浪効果による潮位上昇量の目安を整理・共有しており、本事例の予報作業においても参考にした。これらに加え、地方気象指示報等でも量的予想の修正量が具体的に示されたことによって、円滑な予報作業を行うことができた。

(3)高潮に関するまとめ

今回の事例では、秋田県沿岸での波浪効果に関して、函館海台から過去の知見に基づき定性的ではあるが早い段階での解説が実施できた。また、仙台管区気象台及び秋田地方気象台では、潮位に関する解説資料や過去の知見から、適時適切に気象情報や高潮警報・注意報を発表した（第1.1.4.3図）。

波浪効果に関しては、平成 25 年度以降にこれまでの実験式による予測に代えて、波浪モデルによる波高・波向と沿岸の海底地形を用いて数値予測を行うこととしており、潮位観測点における波浪効果の予測値が時系列で得られるようになる見込みである。この予測値を利用して、波浪効果に関する解説を高度化する予定である。



第 1.1.4.3 図 潮位に関する解説資料と高潮警報・注意報の発表の時系列

1.1.4.4 観測結果

今回の事例における、気象庁の沿岸波浪計で観測された有義波高の最大値を第 1.1.4.2 表に、秋田県と山形県の検潮所で観測された最大潮位偏差と最高潮位を第 1.1.4.3 表に示す。

第 1.1.4.2 表 気象庁沿岸波浪計における有義波の観測結果

都道府県名	地点名	期間最大		
		有義波高(メートル)	周期(秒)	観測日時
長崎県	生月島	4.80	10.3	4/3 16時
静岡県	石廊崎	6.30	9.7	4/3 21時
京都府	経ヶ岬	7.10	9.0	4/4 3時
北海道	松前	6.00	11.9	4/4 5時

第1.1.4.3表 潮位の観測結果（2012年4月3日00時～5日09時）

*1：国土地理院所管、*2：国土交通省港湾局所管

最大潮位偏差

観測点	都道府県	瞬間値		平滑値	
		偏差 (センチ)	起時	偏差 (センチ)	起時
男 鹿(*1)	秋 田	240	4月4日 04時 27分	192	4月4日 04時
秋 田(*2)	秋 田	138	4月4日 04時 33分	119	4月4日 05時
酒 田(*2)	山 形	121	4月4日 04時 31分	96	4月4日 05時

最高潮位

観測点	都道府県	瞬間値		平滑値	
		標高 (センチ)	起時	標高 (センチ)	起時
男 鹿(*1)	秋 田	245	4月4日 04時 27分	198	4月4日 04時 14分
秋 田(*2)	秋 田	147	4月4日 04時 33分	128	4月4日 04時 33分
酒 田(*2)	山 形	128	4月4日 04時 31分	104	4月4日 04時 33分

参考文献

高野 洋雄（2011）：有義波法による波浪推算 - 現業での利用を目的として - . 測候時報、78.5

予報部予報課、地球環境・海洋部海洋気象情報室（2010）：外洋に面した港湾での特性・高潮ガイダンス利用に関する解説資料、4-5

1.2 大雨の事例

ここ数年、500m 高度データを活用した大雨現象の調査が進み、利用にあたっての着目点が見出されるとともに、予報作業の現場におけるデータの利用環境が整ってきた。加藤（2011,2012）によれば、500m 高度データにおける環境場として、(1)暖湿気塊の存在（例えば、暖候期（6～9月）の西日本では相当温位 355K 以上）、(2)250 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の水蒸気フラックス（流入）があること、を豪雨の目安としている。

予報現場においても、500m 高度データを活用した大雨現象の把握が進みつつある。ここでは、台風の大 雨事例について、第 1.2.1 節で 2011 年台風第 15 号を対象とした。東海地方における 500m 高度データの予 報作業への活用例を示す。第 1.2.2 節では 2011 年台風第 12 号などを対象として、三重県における 500m 高 度データを利用した豪雨発生診断の目安を決め、検証を行った。

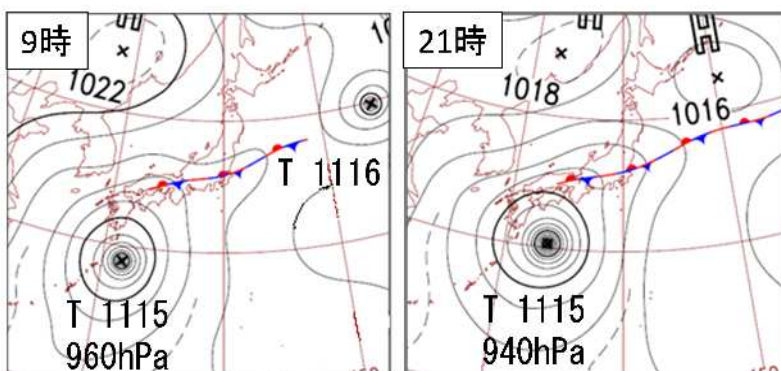
1.2.1 2011 年台風第 15 号の事例検証*

本事例は、過去に愛知県で発現した記録的な大雨現象、例えば 2000 年の「東海豪雨」などと同様に、前 線が本州上に停滞し、台風が南海上を北上する地上気圧配置の中、南海上から下層暖湿気塊が流入したため 大雨となり、猛烈な短時間強雨を記録したものである。本事例の予警報作業は、降水量ガイダンスが過小な 量的予想であったため降水実況による対応となったが、500m 高度データを活用することで予想シナリオ構 築時により質の高い作業が行えるようになり、実況監視の着目すべき点が明確になることも合わせて記述す る。

1.2.1.1 台風第 15 号による大雨と数値予報資料の特徴

1.2.1.1.1 大雨の実況と予想の概要

2011 年 9 月 20 日朝から夕方にかけて、台風第 15 号（以下、T1115）の影響で、愛知県名古屋市から岐阜 県多治見市の付近では記録的な大雨となった。降水の特徴は、本州上に停滞していた前線に向かって、台風の 周辺を回る下層暖湿気が流れ込み、発達した線状エコーが停滞したため、線状降水帯が形成されたことであ る。第 1.2.1.1 図は 9 月 20 日 9 時、及び 21 時の地上天気図である。停滞前線が日本の東海上から本州上に のびる一方、T1115 は日本の南海上を発達しながら北東へ進んだ。



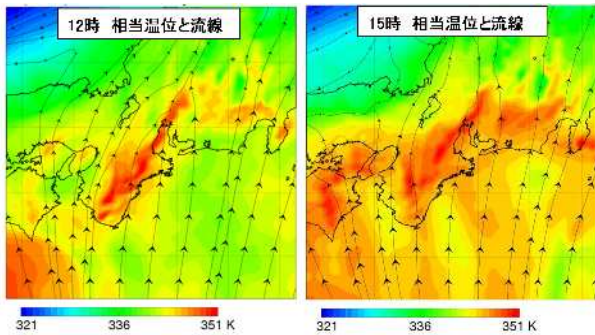
第 1.2.1.1 図 9 月 20 日の地上天気図



第 1.2.1.2 図 愛知県近隣の一次細分区 域名と地勢

20 日 12 時から 15 時には、愛知県西部から岐阜県美濃地方（第 1.2.1.2 図）にかけて、南西から北東走 向の高相当温位域が明瞭（第 1.2.1.3 図）で、その近傍では 1 時間 50 から 80 ミリ以上の雨をもたらし、線 状降水帯が形成された。愛知県名古屋市から岐阜県多治見市付近の帯状の地域では、19 日 15 時から 20 日 21 時までの積算解析雨量が 400 ミリ超（第 1.2.1.4 図）となり、複数の市町で土壌雨量指数履歴順位 1 位 を更新し、庄内川の一部がはん濫した。

*山岸昌伸、石脇誠、谷内吉彦、江上公（名古屋地方気象台観測予報課）



第 1.2.1.3 図 9 月 20 日のメソ解析による 850hPa 面の相当温位と流線

一方、数値予報資料について、19 日初期値の 20 日予想では、前線やその暖域内の不安定現象などにおいて、各モデル・ガイダンスでは大雨の予想はないが、下層暖湿気の流入は予想されており、大雨の可能性が無いとは言えない。また、前線の表現も GSM と MSM で異なり、明確なシナリオが組み立てにくい状況である。このため、17 時予報ではサブシナリオとして前線近傍や暖域内などでの大雨を考えることとする。さらに、20 日 5 時予報の段階でも、数値予報資料では前資料と大きな変化はなく、引き続き過小な雨量予想となったため、17 時予報の時と同様に大雨の予想はサブシナリオと考え、実況監視作業の中でサブシナリオに乗り換える判断を行い、降水実況を参考に上方修正して警報級の雨量を見積もることとなった。

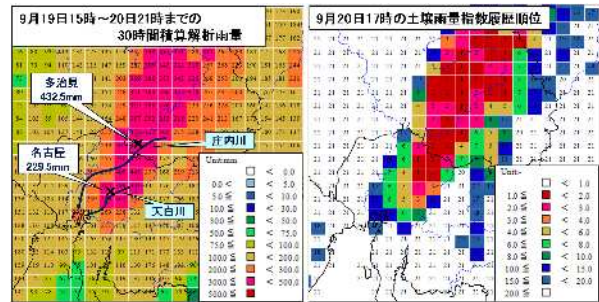
1.2.1.1.2 数値予報資料の特徴と予報作業

ここでは、19 日の GSM(00 から 18UTC)及び MSM(03 から 21UTC)を初期値とした予想の特徴と、大雨に対応した予報作業時の数値予報資料に対する考え方や経過を示す。この第 1.2.1 節では、この事例における一連の地上シアラインについて、大雨現象の最盛期に明瞭な収束を伴っていたことから、全体の表現を統一するために地上収束線を使うこととする。

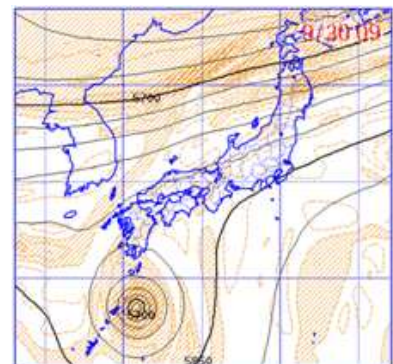
9 月 19 日の GSM00UTC について、500hPa では東日本太平洋側に高気圧が張り出す一方、南西諸島には T1115 があって、ゆっくりと北上する予想である(第 1.2.1.5 図)。

850hPa では、本州の太平洋側には西日本を中心に T1115 に伴う高相当温位域が南風系で入る予想である(第 1.2.1.6 図)。一方、日本海は北東風で低相当温位域となっており、本州の日本海側には地上の停滞前線に対応した相当温位の集中帯が見られる。愛知県では、19 日夜から南西の風が 25kt 前後で 342K 程度の相当温位域が流入し、20 日には南西の風が 30kt 前後で 345K 程度とやや強まるが、SSI の負域が大きく広がる予想ではない。また、日本海側の相当温位集中帯が南下する様子は見られない(図略)。

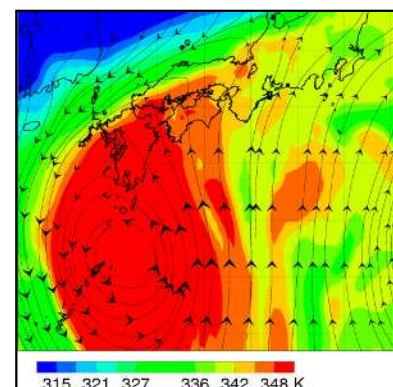
地上では 19 日夜から 20 日にかけて愛知県では南寄りの風が継続しており、暖域内での地形性の降水域が広がっているが降水量としては注意報級の強まりは見られない。また、岐阜県から紀伊半島にかけて地上収束線が予想されているが、愛知県への南下は予想されて



第 1.2.1.4 図 9 月 19 日 15 時から 20 日 21 時までの 30 時間積算解析雨量(5km 格子最大)と 9 月 20 日 17 時の土壌雨量指数履歴順位



第 1.2.1.5 図 GSM19 日 00UTC 初期値の 20 日 09 時予想(500hPa 高度・温度)

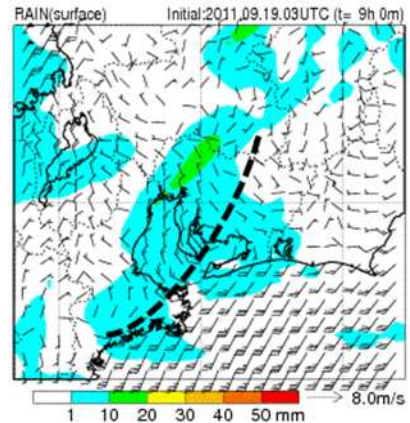


第 1.2.1.6 図 GSM19 日 00UTC 初期値の 20 日 09 時予想(850hPa 相当温位・流線)

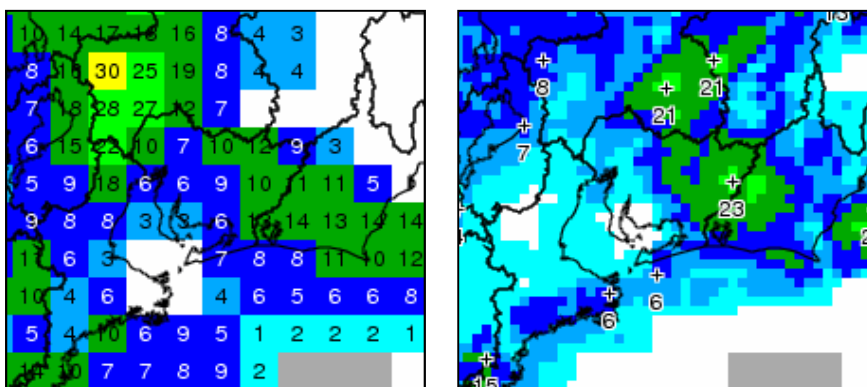
いない(図略)。この地上収束線の南東側で南西風が入り、北西側で北風となっている。一方、MSM03UTCでは、19日は、GSM00UTCと異なり地上収束線は夜にかけて愛知県内にまで一旦弱まりながら南下し、20日には北上する予想である(第1.2.1.7図)。この間、降水量予想の強まりは見られないが、850hPaの暖湿気(相当温位342K程度)が流入し始めるステージでもあり、予報官として地上収束線及び降水域の強化・移動に注意が必要であると判断した。なお、これ以降、両モデルの新資料でも、20日にかけて地上収束線や降水量予想などの表現は、GSM00UTC及びMSM03UTCと同程度であった。

次に、最大降水量ガイダンスの1時間降水量(以下、R1)の予想値と、予報作業での定時予報発表時での量的予想における判断根拠及びその結果を述べる。

GSM00UTCのR1は、19日夜に20ミリ台となっていたが、愛知と岐阜の県境付近での狭い範囲の予想であった(第1.2.1.8図左上)。MSM03UTCのR1は、19日夜に愛知と静岡の県境付近で20ミリ台となっているが、南下する地上収束線付近では20ミリ以下とGSMより弱い予想である(第1.2.1.8図右上)。17時予報では、今夜(19日)については実況(岐阜県内の解析雨量)から最大1時間降水量を20ミリと判断して発表するが、前述したとおり下層暖湿気の流入が始まるステージであるため、この流入を確認するためトッパーレーダーやアメダスによる下層・地上風速の強まりの監視を行うとともに、地上収束線の北西側の寒気の補給状況を把握するために、主に愛知県から北西側のアメダスの風向や福井のウィンドプロファイラーデータ(以下、WPR)、及び降水域(地上収束線近傍や地形性上昇によるもの)の動向に着目して実況監視することを夜勤者に引き継いだ。明日(20日)には、台風が接近して、下層暖湿気の流入がさらに強まるためGSMではR1が30ミリ以上となっており、「激しく降る」を付加することが妥当と考えた。



第1.2.1.7図 MSM19日03UTC初期値の19日21時予想
地上3時間積算降水量・風・黒破線は地上収束線を示す



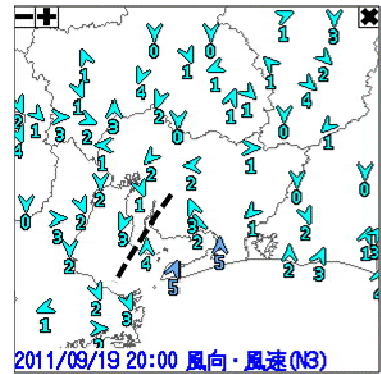
第1.2.1.8図 19日24時の最大降水量ガイダンスと解析雨量

左上：GSM19日00UTC初期値の19日24時予想(R1)
右上：MSM19日03UTC初期値の19日24時予想(R1)
下：1時間解析雨量(19日18時～24時までの最大値)
21時33分 愛知県西部(名古屋市など)に大雨(浸水)・洪水警報発表

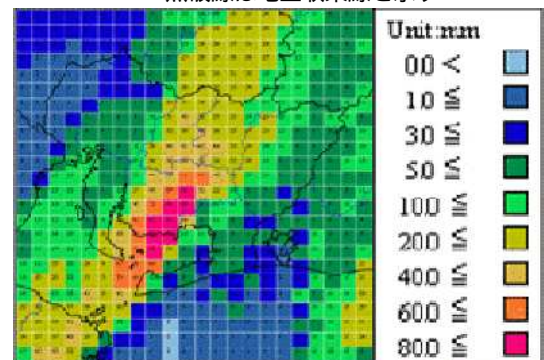
実況としては、19 日夜に地上収束線が愛知県内まで南下した（第 1.2.1.9 図）。地上収束線の移動については MSM が良く表現していたが、降水量の予測は不足していた。19 日夜のはじめ頃からの予報作業においては、解析雨量の 1 時間最大は愛知県西部、東部ともに 50 ミリを超えたため、実況対応の警報を公表し、リードタイムは確保できなかった（第 1.2.1.8 図下）。

GSM12UTC 及び MSM15UTC の R1 は、20 日はともに暖域内の降水が 40 ミリ前後で、GSM12UTC は明け方から夜遅くにかけて、MSM15UTC は朝から夕方にかけて予想されていた。しかし、20 日明け方には愛知県西部で急激に強まり、解析雨量の 1 時間最大は 80 ミリ以上の猛烈な雨となった（第 1.2.1.10 図）。予報作業では、実況から地上収束線付近の雨量を R1 の 2 倍程度の最大 80 ミリ/h と見込み警報を公表するが、MSM12UTC と同じく MSM15UTC でも地上収束線は北陸沿岸まで北上し、朝以降は県内全域で南風が卓越する予想であったため、この警報級の短時間強雨は朝までと判断した。下層の暖湿気が流入し続けるステージであるため、地上収束線の盛衰や動向、これに伴う降水システムが停滞しないか、新たに発生・発達しないかなどに着目して、実況や次の資料を確認するよう日勤者に引き継いだ。なお、21 日は台風が接近し、850hPa では南寄りの風が 50kt 以上で相当温位が 348K から 351K と、暖湿気の流入が非常に強まるステージである。R1 は、GSM12UTC、MSM15UTC とともに朝から 50 ミリ以上、夕方には 100 ミリ以上が予想されていたため、大雨のピークは 21 日と考えた（図略）。

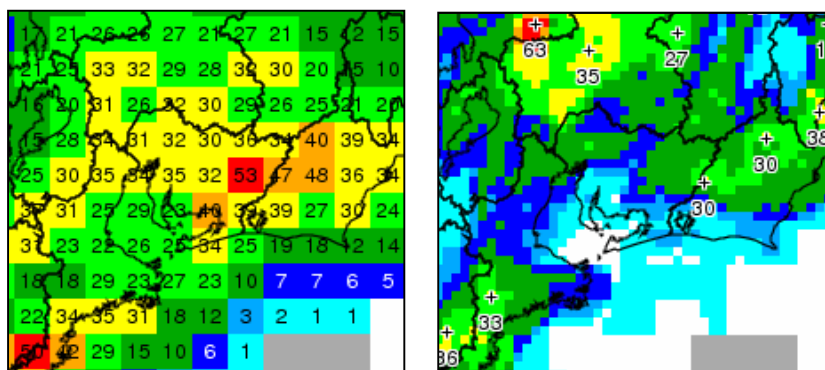
GSM18UTC 及び MSM21UTC の R1 では、20 日には GSM18UTC で愛知県東部山地に 50 ミリ程度があるが、



第 1.2.1.9 図 19 日 20 時のアメダス風向風速と地上収束線
黒破線は地上収束線を示す



第 1.2.1.10 図 1 時間解析雨量（20 日 00 時～06 時までの最大値）

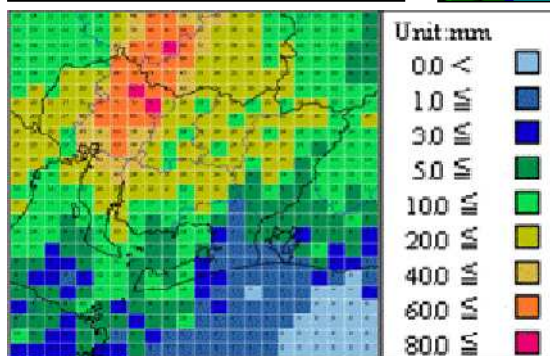


第 1.2.1.11 図 20 日 18 時の最大降水量ガイダンスと解析雨量

左上：GSM19 日 18UTC 初期値の 20 日 18 時予想（R1）

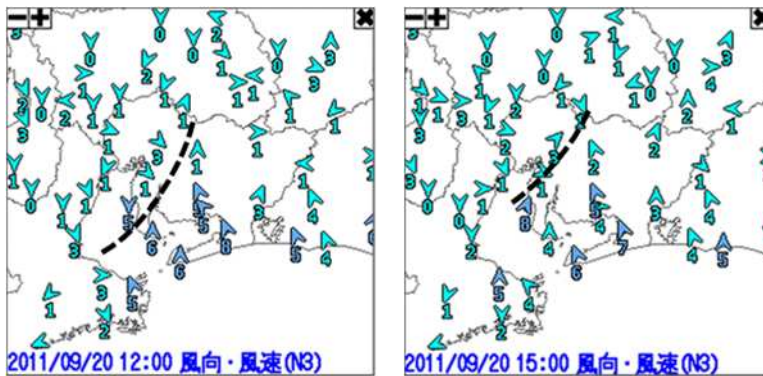
右上：MSM19 日 21UTC 初期値の 20 日 18 時予想（R1）

下：1 時間解析雨量（20 日 06 時～18 時までの最大値）



MSM12UTC では多い所でも 30 ミリ程度と、警報級の雨量は予想されていない（第 1.2.1.11 図左上、右上）。20 日明け方に 1 時間 80 ミリ以上の猛烈な雨が降り、最大降水量ガイダンスの予想誤差が大きい状況が続く可能性も考慮するが、次に記述するように、地上収束線は停滞せず順調に北上し大雨となる可能性が低いと考え、予想シナリオとしては台風が最も接近する 21 日に GSM18UTC、MSM21UTC の R1 とともに 100 ミリ以上の予想があり、大雨のピークはこの頃と考えた（図略）。

実際は、20 日は、昼前から夕方にかけて愛知県西部では、解析雨量で 1 時間最大 50 から 80 ミリ以上の雨が断続的に降った（第 1.2.1.11 図下）。MSM18UTC 及び MSM21UTC でも、地上収束線は北上し北陸沿岸に予想されていた（図略）。台風の北上に伴い暖湿気の流入が強まるため、現状の地上収束線は次第に北上すると見込み、数時間先までを警報級と判断した。しかし、地上収束線は北上せず、夕方にかけて県内にほぼ停滞していた（第 1.2.1.12 図）。このため警報は複数回の延長対応となった。また、21 日は台風が静岡県西部に上陸し北東へ進んだが、1 時間最大 50 ミリ前後の雨は昼前後の比較的短時間に愛知県東部で降った（図略）。



第 1.2.1.12 図 アメガス風向風速と地上収束線

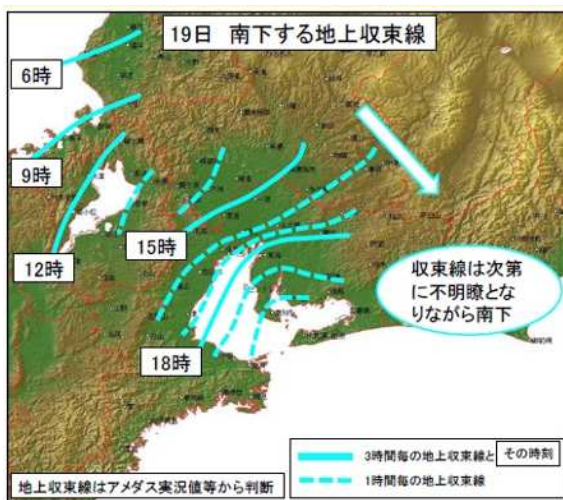
左：20 日 12 時のアメガス風向風速
右：20 日 15 時のアメガス風向風速
黒破線はともに地上収束線を示す

このように、GSM 及び MSM では R1 も含め、警報級の大雨の予想は難しい。500m 高度データを利用することで、予報作業がどのように改善できるか考察するために、事例解析と 500m 高度データの時系列データについて次に示す。

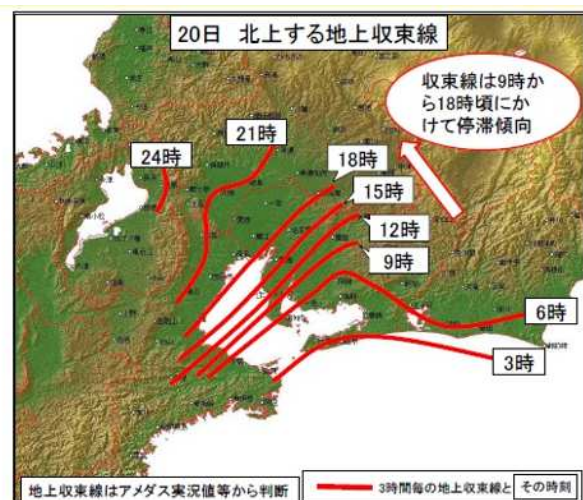
1.2.1.2 詳細な事例解析

1.2.1.2.1 4 ステージに分けられる大雨の特徴

9 月 19 日から 20 日の大雨は、地上収束線の南北動及び台風接近による下層暖湿移流の強まりの中で発生



第 1.2.1.13 図 19 日の南下する地上収束線



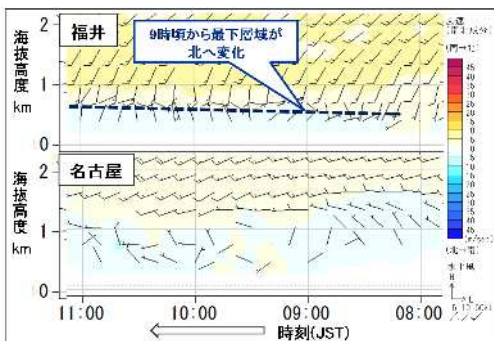
第 1.2.1.14 図 20 日の北上する地上収束線

しており、この大雨の特徴を調べるために解析を行った。地上収束線が南下する19日と北上する20日における下層暖湿気の流入に注目し、降雨の状況を次の4つのステージに分けて大雨の特徴を示す。

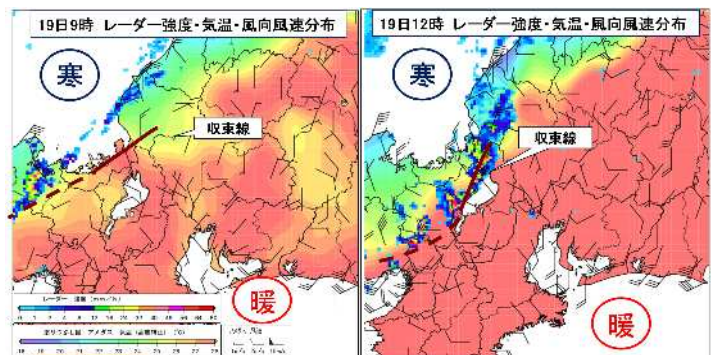
第1ステージは、寒気流が強まり停滞前線が南下するタイミングで、19日朝から夜にかけて地上収束線の南下時に発生した短時間強雨を対象とする(第1.2.1.13図)。第2から第4ステージは、下層暖湿気が強まり停滞前線の北上するタイミングで、地上収束線の北上に伴い発生した大雨を対象とする(第1.2.1.14図)。第2ステージは、台風の接近で暖湿気の流入が次第に強まり、20日明け方から朝にかけて地上収束線付近で線状エコーが発達し、猛烈な雨が降った短時間の現象を扱う。第3ステージは、20日昼前から夕方にかけて発達した線状エコーが停滞して発生した記録的な大雨を扱う。第4ステージは、20日夜のはじめ頃以降の現象で、地上収束線の北上と共に大雨は終息した。

(1) 第1ステージ：地上収束線の南下(19日夕方から20日未明)

第1.2.1.15図の名古屋 WPR の最下層域(以下、高度およそ1km以下とする)の風は弱く下層暖湿気の流入は弱い。福井 WPR の最下層域は、19日9時頃から風向が北よりに変化した。この変化に伴い日本海側で



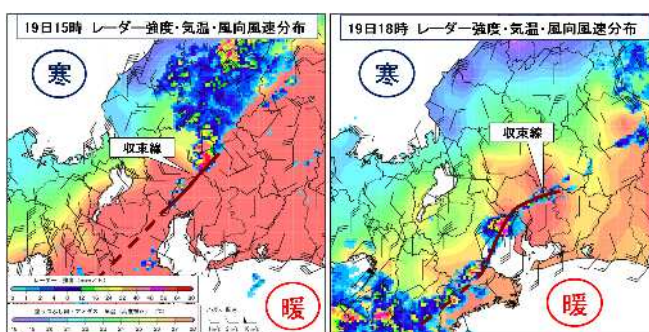
第1.2.1.15図 19日8時から11時のWPR時系列



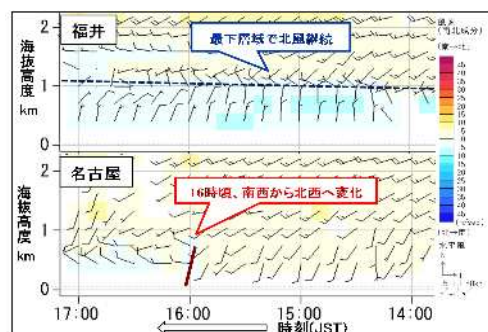
第1.2.1.16図 19日9時と12時の分布図

レーダー強度、アメダス高度補正した気温、風向風速、寒は寒気を、暖は暖気を示す。収束線はアメダス実況値から総合的に判断

は朝から昼前にかけて停滞前線が南下し、前線北側の寒気の流入は山地の影響により琵琶湖周辺で明瞭となり、鉛直方向としては停滞前線の前線面に連なるメソスケールの地上収束線が形成され、この地上収束線が南下した(第1.2.1.16図)。濃尾平野では、日中の昇温で大気安定度が悪くなる中、地上収束線が南下し、これがトリガーとなって収束線上にエコーが発生した。一部発達しながら濃尾平野を進み、岐阜県を中心に激しい雨となったが短時間の現象であった(第1.2.1.17図)。第1.2.1.18図の名古屋 WPR では、地上収束線に伴う下層のシアアが16時頃通過したことが確認できる。その後、地上収束線は次第に不明瞭となりながら20日未明には渥美半島沿岸付近まで南下した。



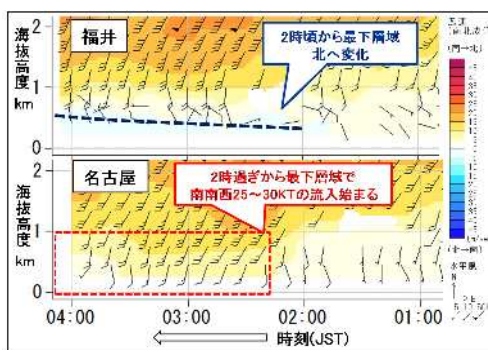
第1.2.1.17図 19日15時と18時の分布図



第1.2.1.18図 19日14時から17時のWPR時系列

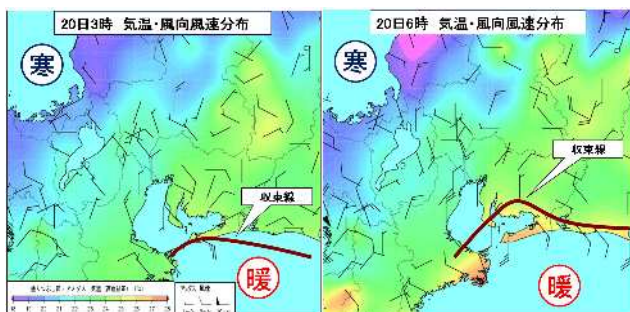
(2) 第2ステージ：地上収束線の北上と線状エコーの発達（20日明け方から朝）

第1.2.1.19図の名古屋 WPR の最下層域では、20日2時過ぎから南西約 25~30kt と暖湿気流入が強まり始めた。一方、同時刻の福井 WPR の最下層域の風向は北よりに変化し、停滞前線は北側の寒气流場が明瞭になりはじめ、これに伴い地上収束線の北側の寒気補給が強まることが推定される。台風北上による下層暖湿気流入の強まりが主要因で、3時頃から渥美半島付近の地上収束線は明瞭となりながら次第に北上した（第1.2.1.20図）。

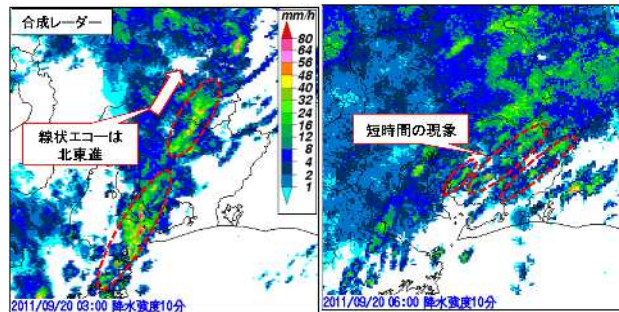


第1.2.1.19図 20日1時から4時のWPR時系列

このステージでは地上収束線を境に、濃尾平野の冷氣塊と、南海上から流入した下層暖湿気が収束した。このような状況の中で地上付近では温度傾度も強まり、第1ステージより線状エコーが発達し猛烈な雨を観測したが、線状エコーは地上収束線の北上と共に停滞することなく北東へ進み、線状エコーを成す個々のセルも短時間の現象であった（第1.2.1.21図）。



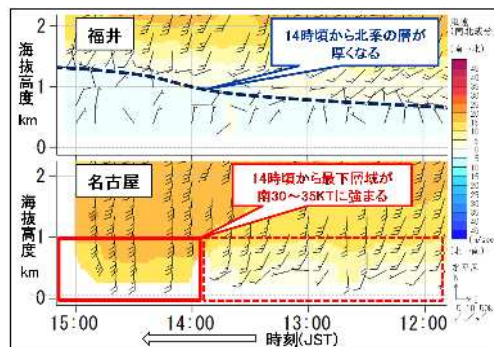
第1.2.1.20図 20日3時と6時の地上分布図



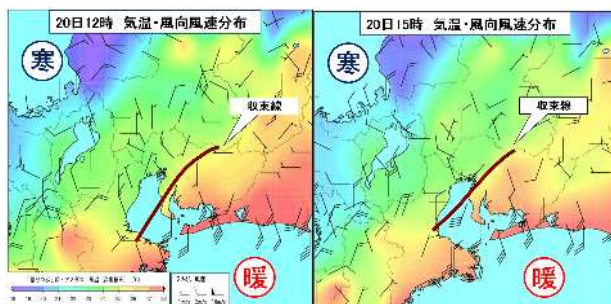
第1.2.1.21図 20日3時と6時の合成レーダー降水強度

(3) 第3ステージ：線状降水帯の形成（20日昼前から夕方）

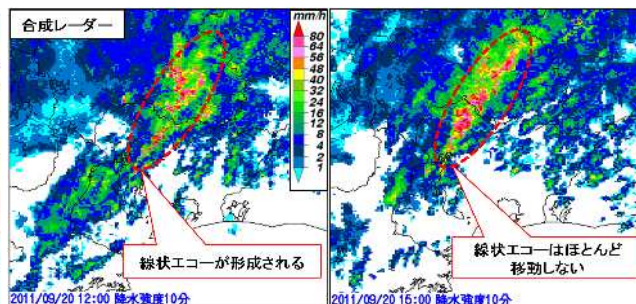
第1.2.1.22図名古屋 WPR の最下層域は、台風の北上と共に、14時頃から南西風から南風 30~35kt に変化し、下層暖湿気の流入がさらに強まるが、第1.2.1.23図のように地上収束線はほとんど移動していない。一方、福井 WPR は、北よりの風の高度が約 1.2km 付近まで高まり、日本海側の寒気の流入が明瞭になった。これにより地上収束線において、鉛直方向には前線構造が明瞭となり始めたと推測する。下層暖湿気流入の強まりや、寒気の流入が明瞭となったことで、地上収束線が停滞し、収束が強化され線状降水帯が形成された。



第1.2.1.22図 20日12時から15時のWPR時系列



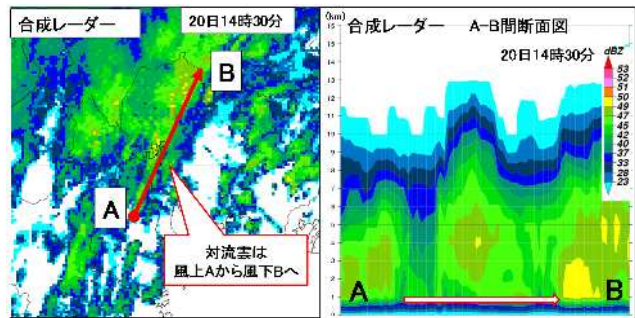
第1.2.1.23図 20日12時と15時の地上分布図



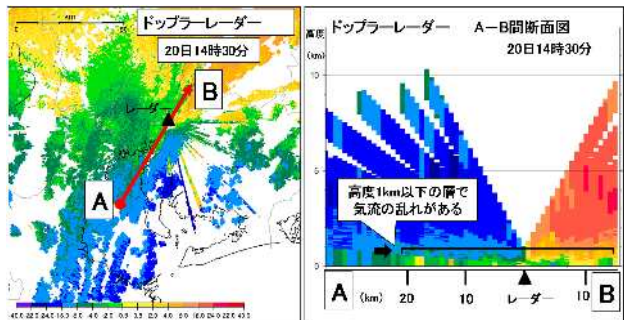
第1.2.1.24図 20日12時と15時の合成レーダー降水強度

南南西から北北東の走向をもつ対流性エコーは尾張東部で発生・発達を繰り返しながら多治見市方面へ広がり、名古屋市から多治見市付近にかけての帯状の地域で大雨となった(第 1.2.1.24 図)。この大雨域の東西への移動は小さく、数時間停滞した。第 1.2.1.25 図の名古屋市から多治見市付近にかけてのびる線状エコーの AB 間の断面図では、複数の反射強度の強い領域が、風上 A から風下 B へ向かって並んでいる。第 1.2.1.26 図のレーダーサイトを通る AB 間のドップラー速度断面図では、高度 1km 以下で気流の乱れた領域(暖色系と寒色系が交互に並ぶ)が観測されている。反射強度やドップラー速度の観測から、この AB 間には複数の対流セルが並んでいる。

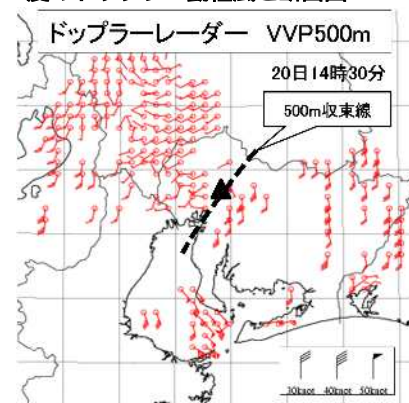
動径風データ(以下、VWP とする)から求めた高度 500m の風分布を第 1.2.1.27 図に示す。第 1.2.1.26 図の AB 間の複数の対流セルが観測されている上空には、高度 500m の VWP で南南西から北北東の走向をもつ収束線が確認できる。この収束線は、高度 1km の VWP でも確認でき、地上から高度 1km 付近まで明瞭な収束がみられる。第 1.2.1.27 図の高度 500m の収束線に沿った地域で、次々に発生した対流セルにより、線状降水帯が形成された(第 1.2.1.28 図)。



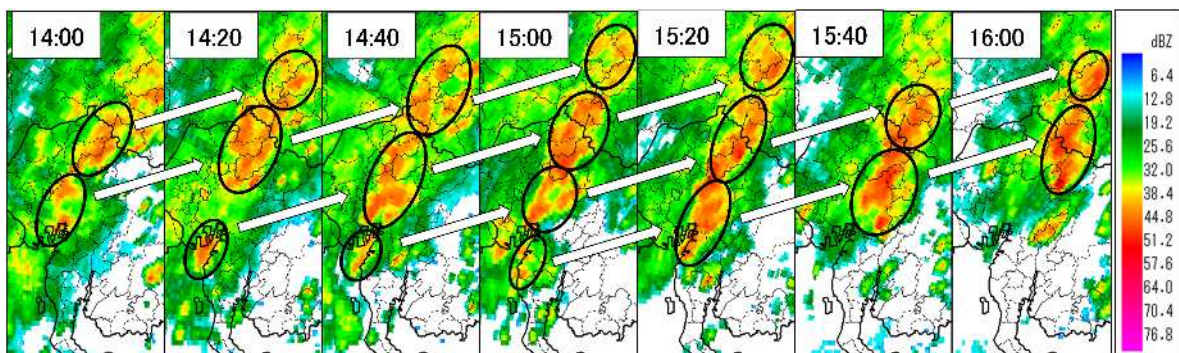
第 1.2.1.25 図 14 時 30 分の合成レーダー降水強度と断面図



第 1.2.1.26 図 14 時 30 分の名古屋レーダーによる仰角 0.4 度のドップラー動径風と断面図



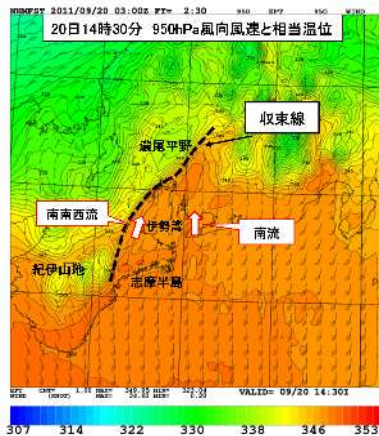
第 1.2.1.27 図 14 時 30 分の高度 500m の風分布



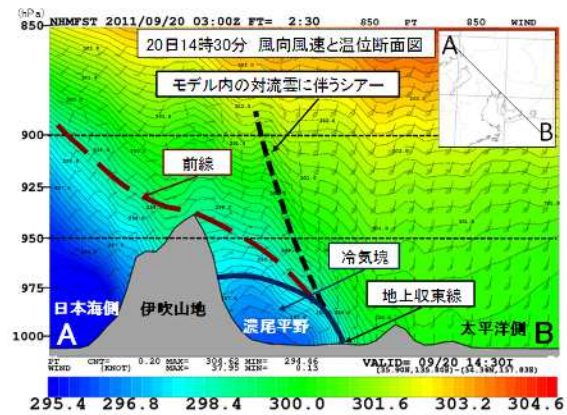
第 1.2.1.28 図 20 日 14 時 00 分から 16 時 00 分の 20 分毎の静岡レーダー極座標仰角 (1.5 度) の反射強度分布

第 3 ステージの状況について JMANHM による再現実験を行い、最下層域の収束線や暖湿気流入の状況を検証した。第 1.2.1.29 図の 950hPa の風向風速と相当温位では三重県北中部から伊勢湾を横切り岐阜県東濃にのびる収束線や、この収束線の風上側の志摩半島方面から高い相当温位を持つ気塊が収束線に沿って北上する様子が再現できた(図省略)。この収束線は第 1.2.1.27 図の高度 500m の収束線に概ね合致している。

この実験から、収束線の存在及び濃尾平野へ向かって南方向から流入する暖湿気と、収束線に沿って南南西方向から流入する暖湿気が確認できる。次に第 1.2.1.30 図の風向風速と温位の断面図から、地上収束線上約 900hPa (約 1000m) 付近まで明瞭なシアア (背の高い対流によって生成されたシアア) が確認でき、また総観場の停滞前線の前線面も、降水システムの影響で一部変形されているが、比較的明瞭である。図から濃尾平野の地上付近に冷氣塊があることがわかる。これは、19 日の前線南下時に前線北側の寒気が濃尾平野へ進入し、20 日はその寒気が伊吹山地の南東側にも残っていたことを示していると推測できる。特に、地上から 950hPa までの鉛直方向の明瞭な収束を境に北側と南側の温位の差が大きくなっている。この再現実験から、南からの下層暖湿気の流入で水蒸気の補給される場で、かつ大気の安定度が悪化する中、停滞前線の北側の寒気と暖湿気の境界で収束が強化したことが線状降水帯の形成に大きく寄与していることが分かる。



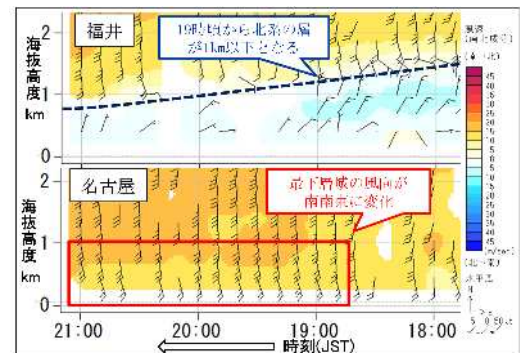
第 1.2.1.29 図 JMANHM 再現実験による 20 日 14 時 30 分の 950hPa 面分布図



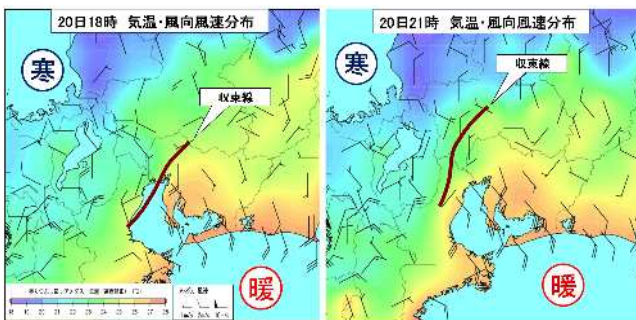
第 1.2.1.30 図 JMANHM 再現実験による 20 日 14 時 30 分の断面図

(4) 第 4 ステージ：線状エコーの北上と大雨の終息 (20 日夜のはじめ頃から)

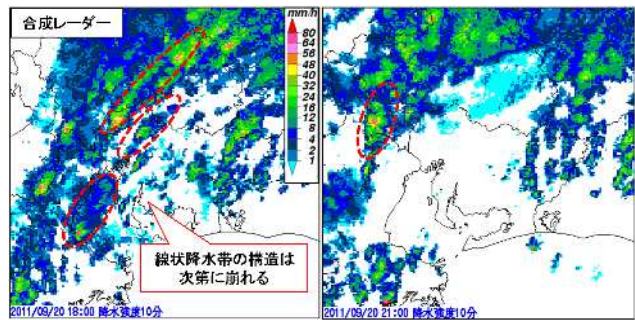
名古屋 WPR の最下層域では引き続き下層暖湿気流入が続いたが、19 時頃から南南東 30kt と、第 3 ステージと比べ風向が東よりに変化した (第 1.2.1.31 図)。福井 WPR の最下層域は、北よりの風の高度が 18 時頃から低下し、日本海側からの下層寒気の流入が次第に弱くなった。これは総観場の停滞前線が北上し、前線の北側の寒気流が弱まってきたことを示している。下層暖湿気流の風向が南南東に変化したため、伊勢湾から濃尾平野に南よりの風が入りやすくなり、冷氣層が破壊されたことと、日本海側の下層寒気流入が弱まっ



第 1.2.1.31 図 20 日 18 時から 21 時の WPR 時系列



第 1.2.1.32 図 20 日 18 時と 21 時の地上分布図



第 1.2.1.33 図 20 日 18 時と 21 時の合成レーダー降水強度

たことに伴い、鉛直方向としては停滞前線の構造を維持して、地上収束線は北上したと考える（第 1.2.1.32 図）。地上収束線の北上と共に線状の降水システムの構造が次第に崩れ、愛知県西部から岐阜県美濃地方の大雨は終息した（第 1.2.1.33 図）。

1.2.1.3 予報作業における 500m 高度データの活用例

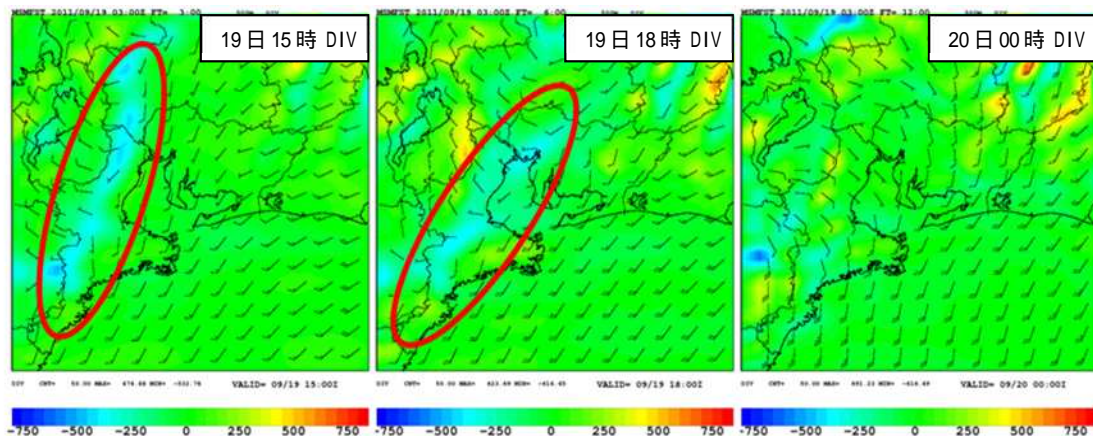
線状降水帯の予想においては、下層収束域の形成・強化・持続についてどのように予想シナリオを組み立て、実況監視を行うかが重要となる。500m 高度データを活用することで、従来より高度な判断が可能となるか考察する。

1.2.1.3.1 500m 高度データの時系列変化

500m 高度のデータを活用した予報作業について考察するために MSM の予想資料を用いて、9 月 19~20 日の事例について検討を行った。

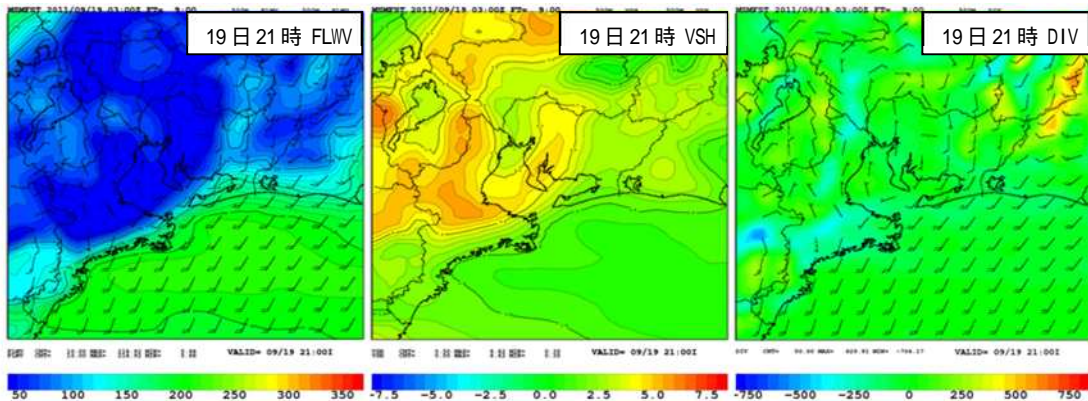
現在、統合ビューア上で利用できる予測要素としては、相当温位（以下、EPT）、水蒸気フラックス（以下、FLW）、収束・発散（以下、DIV）、鉛直シア（以下、VSH）、自由対流高度までの距離（以下、DLFC）、平衡高度（以下、EL）等がある。VSH は、地上から約 3km と地上から約 500m 間の風速差を示し、加藤（2011）は、この VSH を用いて積乱雲の動きを推定することが可能で、鉛直シアが大きいとエコーが線状化して、線状降水帯が形成されやすいことを述べている。また、地上から持ち上げられる気塊は DLFC の値が小さいほど自由対流高度に達しやすいこと、EL は値が大きいほど対流雲の発達する高度が高くなりやすいことを示している。

19 日の実況では、第 1.2.1.17 図左に示したように 15 時には岐阜県から愛知県西部、三重県にかけて線状の収束域が存在しており、降水を観測している。MSM19 日 03UTC 初期値の 19 日 15 時の予想では、実況との位置ずれはあるが、岐阜県から三重県にかけて、ほぼ線状の収束域が予想されている（第 1.2.1.34 図中、赤線枠）。この収束域は、18 時には、北西風により南東進して愛知県内に入ってくる予想となっており、20 日 00 時には収束域は不明瞭化し、風は南分が卓越する予想である。



第 1.2.1.34 図 19 日 MSM03UTC 初期値の 19 日 15 時~20 日 00 時の DIV 予想

また、21 時の VSH をみると収束域付近で鉛直シアが大きくなっており、線状降水帯が形成される可能性も考えておきたいが、FLW の値は $150\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以下と小さく、水蒸気の補給は小さいと考えられる（第 1.2.1.35 図）。これらを総合的に判断すると前項の第 1 ステージでは、南東進する地上収束線は不明瞭になりながら県内を通過し、鉛直シアが大きいため、一時的に対流雲が組織化するおそれがあるが、水蒸気フラックスが大きいことと収束も弱まる傾向のため、強雨があっても継続しにくいものと考えられる。

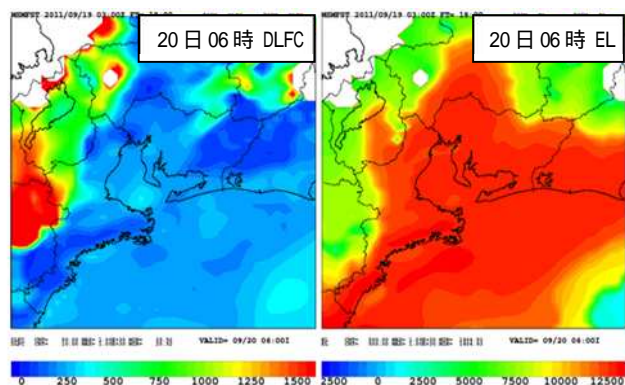


第 1.2.1.35 図 19 日 MSM03UTC 初期値の 21 時予想

左: FLWV、中: VSH、右: DIV

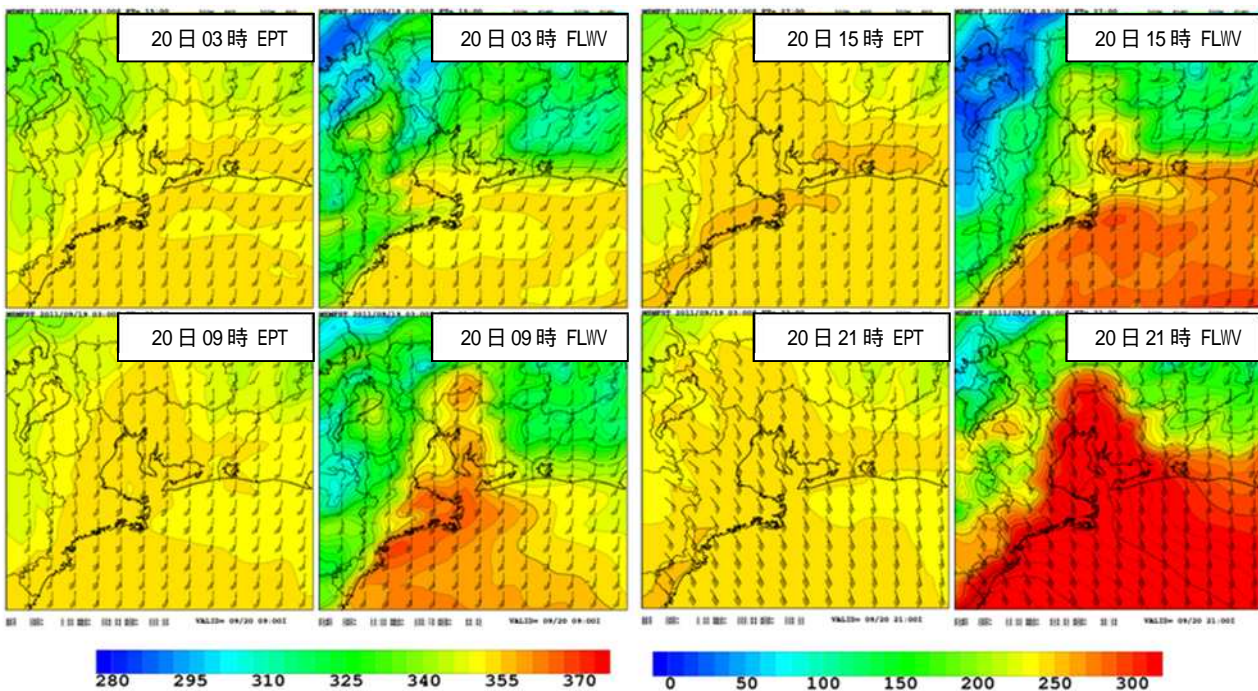
20 日明け方頃（前項第 2 ステージ）には南風が強まり、EPT を見ると 03 時には沿岸部にあった 350K 領域が、06 時には岐阜県にまで入り込む予想となっており、FLWV は $200\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度と大きくなってきている（図略）。

また、この時間帯には DLFC が 250m 以下で、EL が 10km 以上の領域が愛知県内に広がっており、対流雲の発達しやすい場を予想している（第 1.2.1.36 図）。明瞭な収束は予想されていないが、南からの暖湿気の流れが強まるステージで、下層



第 1.2.1.36 図 19 日 MSM03UTC 初期値の 06 時予想

左: DLFC、右: EL



第 1.2.1.37 図 19 日 MSM03UTC 初期値の EPT と FLWV 予想

左 EPT、右 FLWV

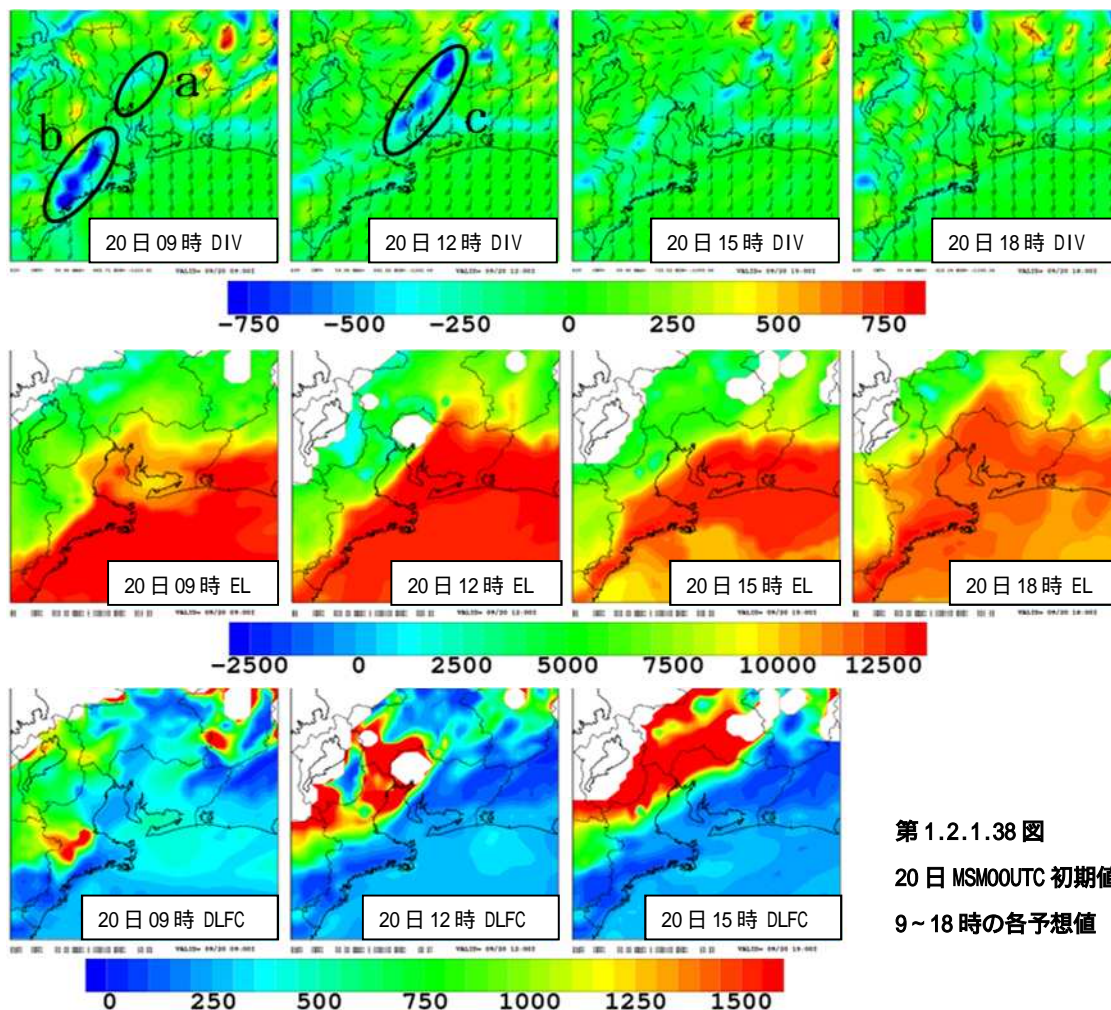
で大気が持ち上げられ、対流雲が発達し、雲頂高度が 10km 以上にまで発達する可能性がある。このため、地上収束を促す現象、この事例であれば、停滞前線、地形による上昇、沿岸前線に伴う地上収束線が考えられ、これら現象の発生や動向に注意して、局地解析を行う必要がある。

09 時以降（前項第 3 ステージ）は、更に南風が強まり、FLW で大雨の目安となる $250\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 領域が一部は岐阜県にまで入り込み、15 時には EPT も大雨の目安とされる 355K 領域が県内に入る予想となっている（第 1.2.1.37 図）。このステージでも明瞭な収束は予想されておらず、VSH でも線状降水帯が形成される可能性は低いと考えられる。なお、愛知県において、FLW と EPT の値は 1.2 の冒頭部分で示した豪雨の目安となる閾値を超えている。暖湿流の強まりは台風によってもたらされるため、台風の進路に留意しつつ、大雨となる可能性を意識して、実況監視を行う必要がある。

21 時には、南東の風が強まるため、FLW は $350\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にまで大きくなる予想となっているが、EPT の値は 18 時までと比較すると低くなっており大気不安定度のピークは過ぎることも想定され、EL の値も低くなっていることから対流雲の発達程度も弱まる傾向を予想しており、この時間帯は FLW が増加しても降水は弱まることも考えられる。これら資料からのみでは判断できず、地上収束線がどのように振る舞うか、総観場も踏まえて考察する必要がある。

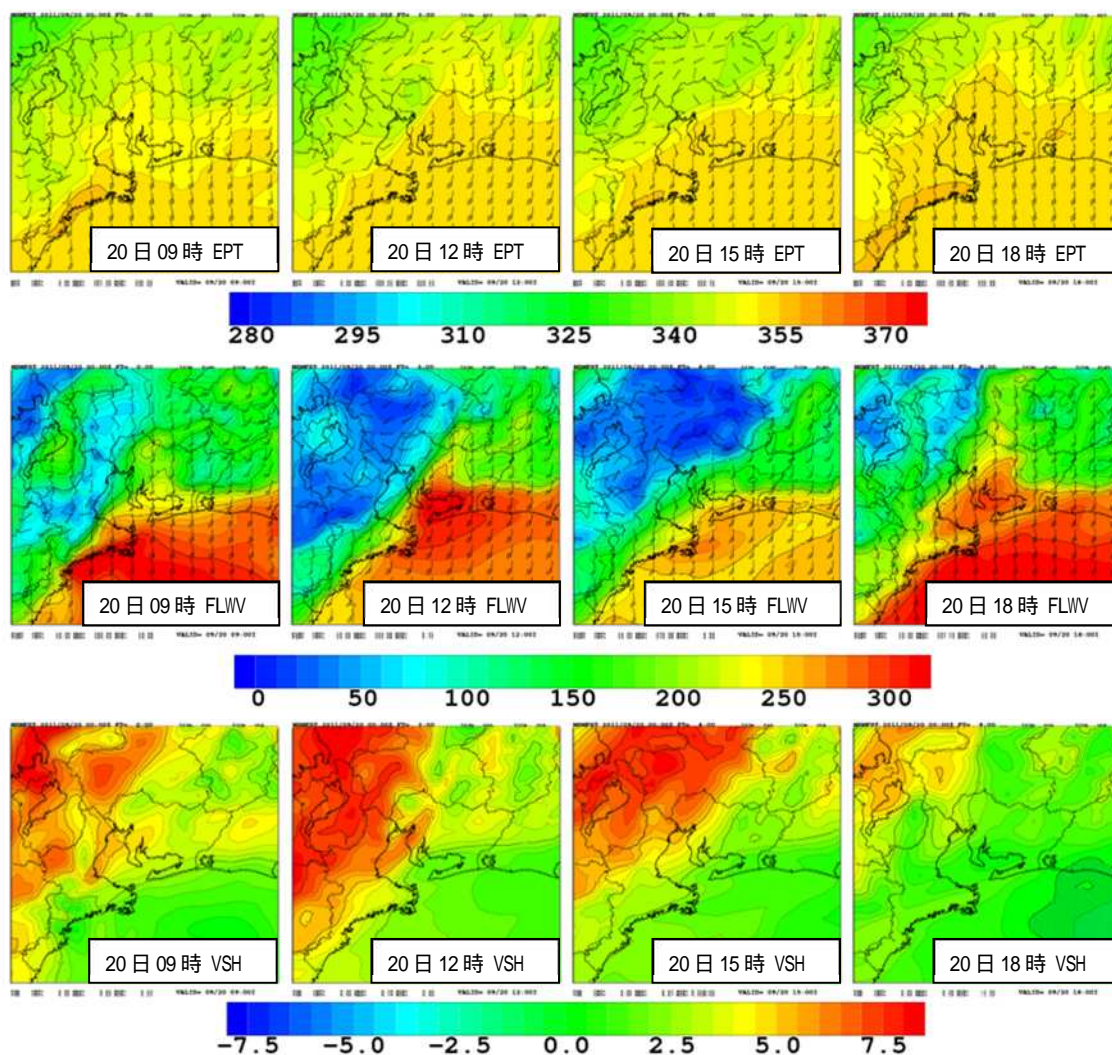
その後も 19 日 21UTC 初期値までは各要素の値に多少の違いや時間ずれ等が見られるが、傾向としては同様で、20 日 09 時以降に EPT と FLW の増加が予想されていた。また、いずれの初期値でも愛知県では明瞭な収束は予想されていなかった。

第 1.2.1.38 図、第 1.2.1.39 図に 20 日 00UTC 初期値の MSM を示す。09 時には弱いながら岐阜県から愛知



第 1.2.1.38 図
20 日 MSM00UTC 初期値の 20 日
9～18 時の各予想値

県に伸びる収束 (a) があり、その延長線上の三重県では強い収束 (b) が予想されている。12 時には愛知県内で強い収束 (c) が予想されている (第 1.2.1.38 図)。EPT や FLWV では大きい傾度が予想されており、収束域の北西側と南東側では値が大きく異なっている。また、VSH も大きな値が予想されている (第 1.2.1.39 図)。15 時には、収束は弱まり、EPT や FLWV は 12 時よりも傾度は小さくなっていく予想で、18 時には、これらの特徴は不明瞭となっている。実際は、20 日 09 時には既に収束域が存在し、線状降水帯が形成されつつある。モデルの予想から、12 時頃をピークに 15 時過ぎまでは同様の場が継続すると考えたい。このように、500m 高度の収束について、モデルの予想では一時的な強まりとなり、実際と異なり、持続について表現は不十分であった。下層の収束の発生・持続可能性について、他の資料も活用し、総観場とメソスケールの現象の予想シナリオを組み立てた上で、総合的に判断することが重要となる。



第 1.2.1.39 図 20 日 MSM00UTC 初期値の 20 日 9~18 時の各予想値

1.2.1.3.2 具体的な予報作業の活用例

ここでは、新しく利用できるようになった 500m 高度データを活用した、具体的な予報作業例を示す。実際の予報作業では、従来の資料を検討した上でこのデータを利用することになるが、ここでは基本的に 500m 高度データに関する部分のみを抜き出して、作業内容や手順等の変化を示す。

(1) 第1ステージにおける利用

予報作成時に実況で見られる収束域が、500m 高度の DIV でも明瞭な収束域として表現されており、この収束域は次第に愛知県内を南下し、夜遅くには不明瞭となる予想である。収束域付近の VSH から鉛直シアーが大きく、対流雲が組織化する可能性が考えられるため、収束域が南下するステージで降水の強まる可能性はある。しかし、FLW から水蒸気の補給は小さく、現象は短時間であると考えられ、線状降水帯が形成されるまでの大雨は予想しない。この考察をもとに、従来の予想資料による、予想シナリオやサブシナリオ・ガイダンスの修正に関する考え方を補強あるいは修正することになる。

実況監視においては、実況で見られる収束域の動向が予想シナリオとずれがないか確認しつつ、500m 高度データの FLW が示すように水蒸気の補給が小さい状況であるか、観測から直接 500m 高度の FLW は把握できないが、WPR やアメダス、地上観測データの露点温度や GPS 可降水量を利用し総合的に監視する。

従来であれば、地上収束線の南下と暖湿気の流入が始まるステージが重なることを主なポイントとして予報作業を進めることになっていたと考えられ、500m 高度データを活用することで、より詳細な予想シナリオ構築が可能となり、実況監視の着目点も明確となったと考える。

(2) 第2ステージにおける利用

予想においては、500m 高度の風は日界頃から南風が強まる予想で、EPT と FLW が増加し、暖湿気の流入が強まると共に DLFC と EL は、対流雲の発達しやすい場へ変わってくる予想がされている。一方、DIV では明瞭な収束は予想されていない。このため、下層収束がモデルより強まれば、大雨となることも想定される。従来の作業と共通するが、他の資料や知見から、下層収束を強化する現象（例えば地形性の収束を促す風の強まり）が発生するおそれがないか考察し、必要に応じて、サブシナリオを作成することとなる。

実況監視では、追加したサブシナリオの現象が発生するおそれがないかも確認する。この事例では、収束域の動向やこの収束を強化する南風の強まりがあるかどうかを WPR やアメダス、地上観測データで監視を行う。また、地形の影響を受けやすい愛知県東部を中心に降水の強まりがあるか、レーダーで監視を行う。

従来の資料でも、850hPa の相当温位が大きくなる傾向で、大雨のポテンシャルが大きくなってきているタイミングであることは予想できるため、500m 高度データを活用することで、予報作業や実況監視に大きな変更はない。ただし、500m 高度付近の風の実況について、モデル予想と比較しつつ監視することで、サブシナリオへのスムーズな移行や、リードタイムを確保した警報対応に繋がる場合もあるだろう。

(3) 第3ステージにおける利用

500m 高度の南風は更に強まり、EPT と FLW は 09 時以降に大雨の目安となる値が予想されている。また、DLFC と EL は対流雲の発達しやすい状況を 09 時以降も予想している。このことから下層収束があり、大気が持ち上げられ、大雨となる可能性が高いと考えられる。しかし、19 日 21UTC までの初期値では DIV では明瞭な収束は予想されていない。20 日 00UTC の初期値では、これまでの予想とは違い、愛知県内に 09 時で停滞している弱い収束を予想しており、12 時にかけて収束が強まり、15 時以降に収束は弱まってくる予想へと変化した。これにより、20 日 00UTC 初期値の資料が入ったタイミングでは、実況で収束域が愛知県西部にあり、強い降水を観測していることから、500m 高度データから収束域が停滞し、大雨となる可能性がさらに高まったと判断できる。

地形性の収束が発生する可能性がある愛知県東部を中心に降水の状況をレーダーで監視する。また、南風の強まりがあるかどうか、予想されていない収束域が発生するかどうか、第2ステージまでに収束域が発生していた場合は収束域の動向について、WPR やアメダス、地上観測データで監視する。

暖湿気の流入が強まる予想がされている第2ステージから第3ステージにかけては、南風の強まりと下層収束の有無による影響が大きく、WVP による実況監視も有効と考えられるが、統合ビューアでは利用する

ことが出来ない。このため、WP も利用している毎時大気解析を利用した収束域の動向監視も必要である。

従来の資料では、線状エコーの停滞がどの程度持続するか判断は難しかったが、500m 高度データから 15 時頃までは大雨が続くことが判断できる。これにより、雨量予測を再検討して夕方まで警報級の短時間強雨を持続させることが可能である。このように、警報級の短時間強雨の継続時間についても 500m 高度データから判断材料が得られる場合がある。

(4) 第4ステージにおける利用

500m 高度の南風は、21 時には南東風へと変化し、更に強まる予想となっている。FLWV は大きな値となっているが、EPT や EL から対流活動が弱まることも考えられ、降水システムが衰弱するタイミングの判断材料となる。

実況監視においては、対流活動が弱まる兆候がないか、WPR やアメダス、地上気象データで風の変化と収束域の動向を監視する。また、降水の状況についてもレーダーで監視する。

この事例から、500m 高度データを利用することで、衰弱するタイミングの判断材料が得られ、実況監視でその兆候を確認するという作業に繋がることがわかった。

1.2.1.4 まとめ

本事例の現業作業における 500m 高度データの具体的な活用例は以下のとおりである。

- ・DIV の予想と実況を比較し、地上収束域の動向を予想
- ・DLFC や EL から対流雲の発達しやすい場の予想
- ・EPT や FLWV の変化から降水システムの盛衰を定性的に予想

このように 500m 高度データから得られる、収束域の動向や暖湿気の流入・対流雲の発達しやすい場への変化の予想に着目し、これまで利用していた資料で作成された予想シナリオを、補強あるいは修正し、必要に応じてより詳細なサブシナリオの作成ができる場合があることがわかった。この作業を通して、実況監視も含む予報作業において、従来よりも適切な判断が出来るようになると思う。このことは、結果的に、警報発表においてリードタイムの確保にも繋がる。

今後は、他の大雨事例についてもメソ解析資料も利用した解析を行い、500m 高度データの特徴を整理し理解を深めることが重要で、その結果は着目すべき実況監視項目の明確化にも繋がり、大雨の予測においての一助となろう。

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，71-88.
加藤輝之・廣川康隆(2012)：大雨を発生させやすい環境場について．平成 23 年度予報技術研修テキスト，86-94.

地図データは ASTER GDEM is a product of METI and NASA、JMANHM では地形データ：USGS の GTOPO30 を使用。

1.2.2 2011年台風第12号ほかの事例検証*

本項では、台風接近時の三重県における500m高度データによる豪雨発生診断の目安を決め、その検証を行い、現業作業でこのデータを有効に活用できることを示す。

1.2.2.1 2011年台風第12号による大雨

(1)大雨の概要

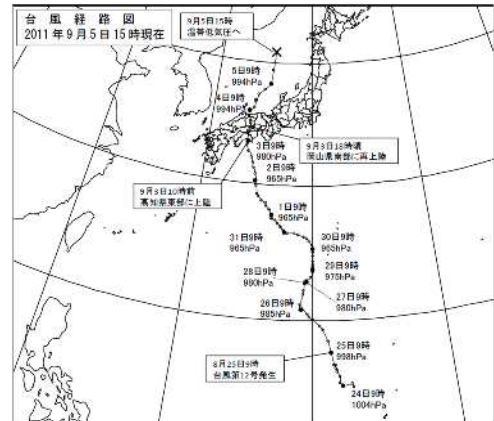
2011年9月3日から4日にかけて、台風第12号(以下、T1112)の影響により、三重県では熊野市で日最大1時間降水量が観測史上第1位を更新するなどの、猛烈な雨が降った。紀伊半島を中心とした大雨の要因としては、T1112の進行速度が非常に遅かった(第1.2.2.1図)、T1112の東側にあたる紀伊半島に南寄りの暖湿気の流入が継続した、アリューシャンの南に中心をもつ高気圧が日本付近に張り出していたことで、T1112と高気圧縁辺との間で強い収束が形成、持続された(第1.2.2.2図)、中層に乾燥気塊(低相当温位気塊)が流入したことにより、対流不安定が強化された(第1.2.2.3図)、という4点が考えられる。

期間内(8月30日20時から9月5日12時まで)の解析雨量(以下、RA)の最大1時間降水量は、紀宝町115ミリ(4日04時00分)熊野市100ミリ(同04時30分、05時00分)、尾鷲市100ミリ(同05時00分、05時30分)、御浜町95ミリ(同04時30分)で、期間内の総雨量(特別地域気象観測所、アメダス)は、大台町宮川1630.0ミリ、御浜1085.5ミリ、尾鷲928.5ミリとなった。

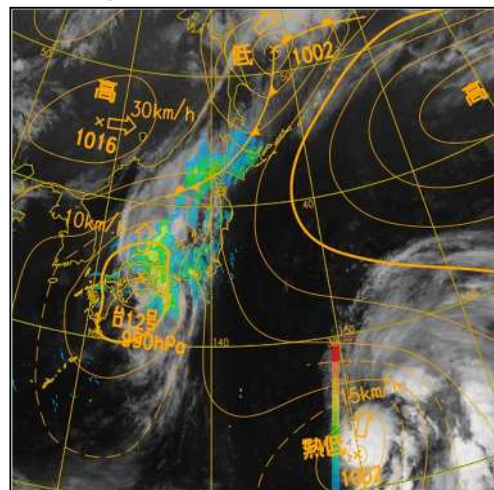
(2)予報現業における量的見積もりと大雨警報発表の判断

【STEP1 引き継いだシナリオの確認】

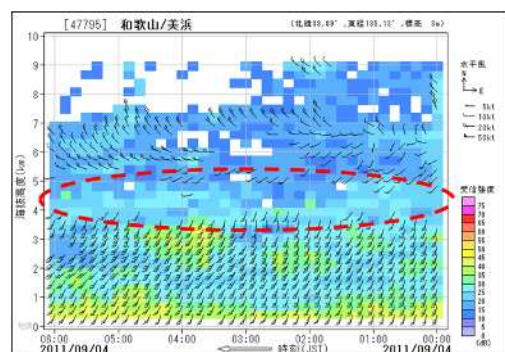
三重県では9月1日00時以降、南部を中心にRA1時間30ミリ以上の強雨が発現し、3日夕方の時点では8月30日20時からからの長雨により、県内19市町に大雨警報(土砂災害)を発表していた(大雨警報(浸水害)の発表はなし)。3日09時で紀伊半島沿岸部に850hPa相当温位345K以上の予想があった。また、3日日中のRA1時間最大値と2日GSM18UTCの1時間最大降水量ガイダンスの上位40%が30~50ミリでほぼ対応していた(図略)。予想資料について、3日GSM00UTCでは4日朝まで、引き続き紀伊半島沿岸に850hPa相当温位345K以上が予想されていた。また、3日GSM00UTCの1時間最大降水量ガイダンスの上位40%の値は3日夜から4日明け方まで1時間60ミリ前後の値が予想されていた(図略)。これまでの実況経過と同様なシナリオが予想資料で表現されていたため、日勤の予報担当者は南



第1.2.2.1図 台風経路図 (2011年台風第12号)



第1.2.2.2図 気象衛星赤外画像と天気図・レーダーエコー (2011年9月3日21時)



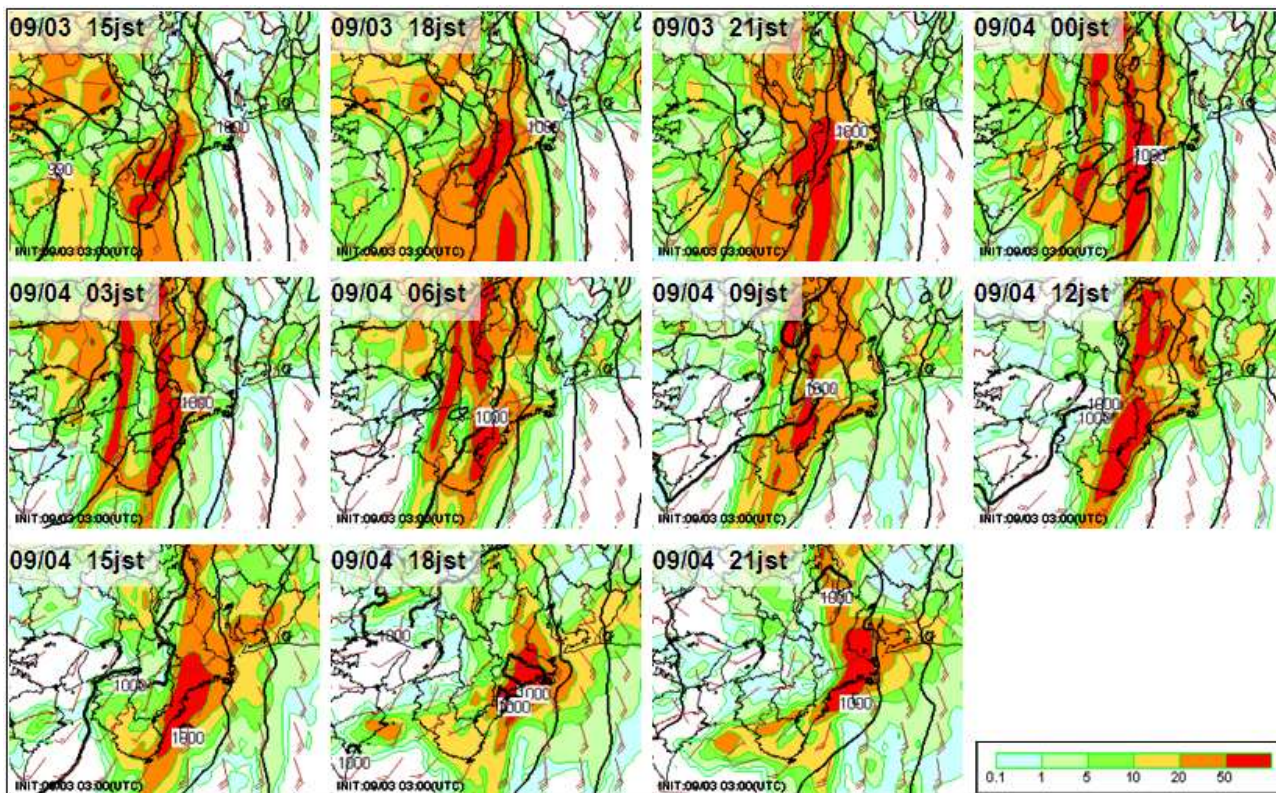
第1.2.2.3図 ウィンドプロファイラー(和歌山/美浜 2011年9月4日00時~06時) 赤点線内は、高度4km~5kmの乾燥域

*和喰博司、久保勇太郎(津地方気象台技術課)

部の紀勢・東紀州に4日朝まで最大1時間雨量60ミリと予想した。

【STEP2 実況の推移と予想資料によるシナリオの変更】

3日17時から18時までのレーダー実況では、三重県南部を中心に降水が強まっており、18時RAは熊野市で53ミリを観測した。18時のRA、レーダーエコー等の実況とGSM00UTC、MSM03UTC各予想を比較したところ、三重県付近における1時間50ミリ以上の強雨域の表現は、MSM03UTCとの対応が非常によかった(図略)。MSM03UTC予想では、紀勢・東紀州において1時間に50ミリ以上の領域が4日21時まで予想され、S風とSE風による収束が継続し、4日にかけて強雨域が持続する予想となっていた(第1.2.2.4図)。またMSM06UTC予想と18時の実況との比較や、MSM06UTCにおける4日にかけての予想でもMSM03UTCと同様の傾向がみられた(図略)。夜勤の予報担当者は、18時のウィンドプロファイラー800m面および1500m面での名古屋、尾鷲、美浜の3地点において15時に比べて収束の強まりがみられたことから(図略)、MSM03UTC、MSM06UTCの各予想どおりに推移した場合、引き継ぎ時点での予想最大1時間雨量60ミリを超える可能性は十分にあり得ると判断し、MSM予想を参考に、若干の雨量修正を行い、4日未明まで1時間80ミリの予想を考えた。



第1.2.2.4図 MSM予想図(2011年9月3日03UTC初期値FT3~FT33)

地上風:短矢羽根;5kt、長矢羽根;10kt、ペナント;50kt、地上等圧線:黒実線

【STEP3 実況監視の強化と大雨警報(浸水害)・洪水警報発表の判断】

実況監視は、MSM予想でS風とSE風による収束の表現があった和歌山周辺でRA1時間60ミリが出現するか、という点に着目し、警報発表のタイミングを見据えながら実施した。その後、19時00分の降水短時間予報FT2(3日21時)で和歌山県境付近での60ミリ超の確認、19時30分のRA1時間62ミリ(熊野市)の出現があり、MSM03UTC、06UTCで予想されている4日にかけての収束の継続、強雨域の持続を重要な判断材料として、警報発表に踏み切った(図略)。

1.2.2.2 500m 高度データからみた 2011 年台風第 12 号の大雨

短時間強雨を発生させる特に大きな要因として、下層暖湿気が挙げられる。加藤・廣川（2012）によると、豪雨発生の診断では、500m 高度の「相当温位（以下、EPT）355K 以上かつ水蒸気フラックス（以下、FLWV） $250\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上」とする条件が、暖候期の西日本における豪雨発生診断の目安になり得る、高 EPT や大きな FLWV は大雨の必要条件ではあるが、必要十分条件ではない、EPT と FLWV だけでなく、ほかの条件と組み合わせて診断する必要性がある、としている。

今回は、台風事例の検証を行うにあたり、西日本における豪雨発生診断の目安をもとに、当地域における目安を決めることも目的として、これらの知見のなかから下層暖湿気と下層収束に着目して、EPT、FLWV、収束・発散（以下、CONV）の各要素を確認した。

第 1.2.2.1 表は 500m 高度メソ解析（以下、メソ解析）の各要素の、三重県の市町村等をまとめた地域の「紀勢・東紀州」の最大値を抽出し、RA とともに時系列で示したものである（表中、薄紫色の箇所が各要素の最大値。RA は 1 時間雨量の最大値と該当市町）。4 日 03 時に紀宝町で RA1 時間 95 ミリ、同 06 時に尾鷲市で RA1 時間 90 ミリを、それぞれ観測している。EPT、FLWV、CONV の推移をみると、EPT は断続的に 355K 以上となり、FLWV も 2 日 03 時以降は $400\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を超え、豪雨発生診断の目安をそれぞれクリアしていた。RA1 時間 50 ミリ以上の時間帯では、2 日 12 時で EPT363K、FLWV608 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、3 日 03 時で EPT356K、FLWV603 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ と高い値となっていた。CONV は 1 日 18 時以降、 $200\sim 400 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ で推移していたが、3 日 03 時で $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ と高まり、この収束の強まりと RA1 時間 62 ミリ（大台町）の降水との対応がよい。この収束の強化と降水との関係性は 4 日未明から明け方にかけても明瞭にあらわれており、4 日 03 時には CONV1471 $\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ と、3 時間前の 285 $\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ （4 日 00 時）からの上昇率が非常に顕著で、これらは紀宝町 RA1 時間 115 ミリ（4 日 04 時 00 分）、熊野市同 100 ミリ（同 04 時 30 分、05 時 00 分）、尾鷲市同 100 ミリ（同 05 時 00 分、05 時 30 分）の降水との対応がよかった。

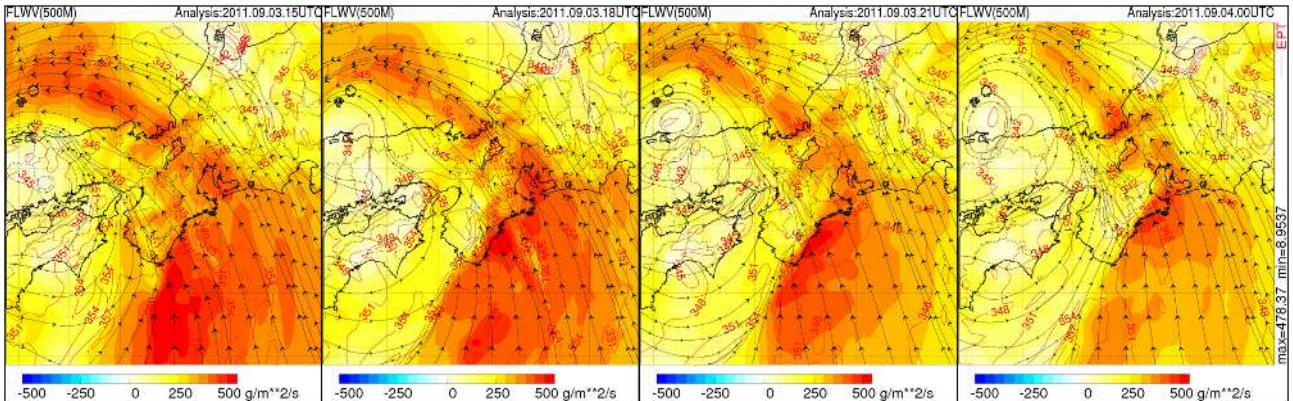
第 1.2.2.1 表 2011 年台風第 12 号の 500m 高度メソ解析相当温位、水蒸気フラックス、収束・発散と解析雨量の時系列表（2011 年 9 月 1 日 18 時～4 日 21 時）

数値はすべて三重県南部の紀勢・東紀州内の最大値 赤字は、相当温位 355K 以上、水蒸気フラックス $500\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上、収束・発散 $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上を示す 収束・発散は正値が収束を示す

要素	単位	1日18JST	21JST	2日00JST	03JST	06JST	09JST	12JST	15JST	18JST	21JST	3日00JST	03JST	06JST
相当温位(EPT)	K	357	357	356	357	356	357	363	360	358	360	358	356	357
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	310	396	379	556	487	566	608	596	568	654	628	603	559
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	240	200	206	330	599	295	485	480	424	533	695	700	486
解析雨量(RA)	mm	22	14	13	19	37	23	53	44	28	27	43	62	38
	市町	大台町	熊野市	大台町	熊野市	大台町	熊野市	大台町	大台町	大台町	熊野市	熊野市	大台町	熊野市
要素	単位	3日09JST	12JST	15JST	18JST	21JST	4日00JST	03JST	06JST	09JST	12JST	15JST	18JST	21JST
相当温位(EPT)	K	354	355	356	355	360	352	358	353	355	354	355	355	356
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	508	552	538	491	620	415	562	501	448	398	376	342	260
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	387	457	592	467	443	285	1471	978	921	720	828	701	776
解析雨量(RA)	mm	33	37	37	43	56	40	95	90	70	56	43	14	14
	市町	大台町	尾鷲市	大台町	熊野市	熊野市	熊野市	紀宝町	尾鷲市	大台町	紀北町	紀北町	大紀町	紀宝町

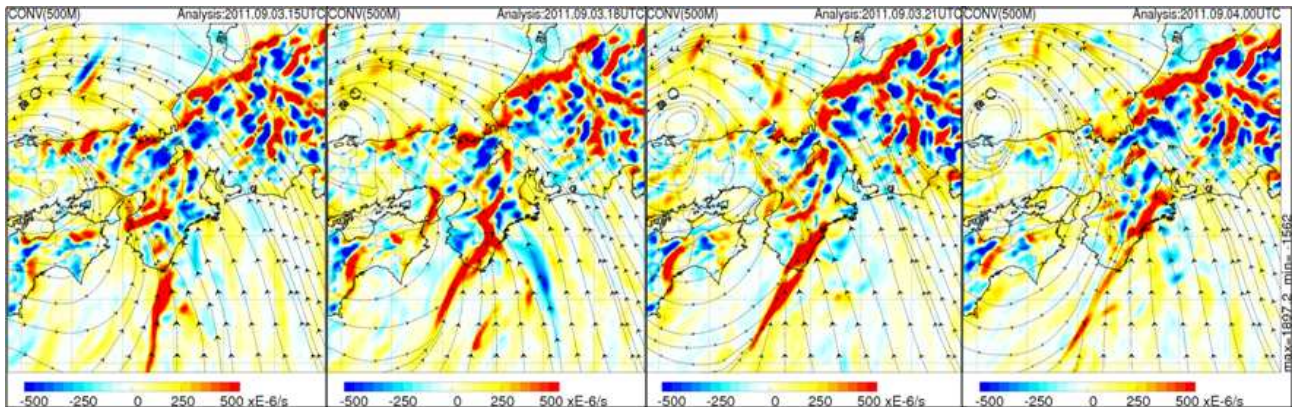
この大雨発生時の環境場を、メソ解析の各要素の分布図で確認してみた。第 1.2.2.5 図は、9 月 4 日 00 時から 09 時までの 3 時間毎の EPT、FLWV、流線を重ね合わせたもので、第 1.2.2.6 図は同時刻の CONV 図である。EPT が 350K 以上の状況で、SW 風と SE 風の収束がみられ、FLWV の高い値が持続し（第 1.2.2.5 図）、CONV 図では 4 日 03 時以降に紀伊半島沿岸部に帯状の収束帯が形成されているのがわかる（第 1.2.2.6 図）。このように、メソ解析でも高 EPT、大きな FLWV の出現および収束の強化を確認することができた。

以上のことから、500m 高度の高 EPT の持続、FLWV の上昇による潜在不安定が大雨のポテンシャルを高め、CONV 値の高まりが RA1 時間 100 ミリ以上の猛烈な雨に関係していた、と考えられる。



第 1.2.2.5 図 500m 高度メソ解析図相当温位、水蒸気フラックス、流線（2011 年 9 月 4 日）

左から 4 日 00 時、03 時、06 時、09 時



第 1.2.2.6 図 500m 高度メソ解析収束・発散（2011 年 9 月 4 日）

左から 4 日 00 時、03 時、06 時、09 時

1.2.2.3 MSM500m 高度データを利用した検証および閾値の設定

ここでは、2009 年台風第 18 号（以下、T0918）、2011 年台風第 6 号（以下、T1106）、T1112、2011 年台風第 15 号（以下、T1115）、2012 年台風第 4 号（以下、T1204）の 5 事例で検証を行った。まずメソ解析に基づく EPT、FLWV、CONV のあらたな閾値を導き出し、メソ解析と MSM500m 高度予想（以下、MSM500m 予想）との値や分布を比較して、それを確定させたうえで、2012 年台風第 17 号（以下、T1217）事例を利用して、その有用性を確認するという手法を取った。また、得られた結果を予報現場で最大限活用するためにも、対象地域を三重県の市町村等をまとめた地域「紀勢・東紀州（尾鷲市・熊野市・大台町・大紀町・紀北町・御浜町・紀宝町の 7 市町）」に絞り（第 1.2.2.7 図）、閾値を求めるにあたっては、指標とする降水量を 1 時間 50 ミリとした。



第 1.2.2.7 図 三重県の予報細分区域

(1) 台風 5 事例の検証

第 1.2.2.2 表は、台風 5 事例の RA1 時間最大値をピーク時間（以下、PT）と定め、その 15 時間前から 3 時間後までの、EPT、FLWV、CONV の各要素を時系列に並べたものである。各要素の推移をみると、T1204 事例を除く 4 事例で、PT を迎える以前に下層暖湿気（EPT、FLWV）の値が高まり、PT あるいはその 3 時間前に CONV が最大値となる、という経過となっていた。T1115 事例では FLWV が最大値 $514\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、CONV が最大値 $836 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ となった時間帯（PT の 9 月 21 日 09 時）に、RA1 時間 67 ミリ（熊野市と御浜町）の非常に激しい雨となった。

各要素の値に着目すると、T0918、T1204 事例を除く 3 事例で PT 以前に EPT355K 以上となり、また T0918、T1112、T1204 の 3 事例では、PT あるいはその 3~6 時間前に EPT と FLWV がともに最大値となっていた。このように、EPT と FLWV が最大値を記録したあと、収束の強化（CONV 値の高まり）が大雨に関係していたことが、これら複数の事例でも確認できた。各要素の数値の推移から、「EPT355K、FLWV $500\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、CONV $800 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 」をメソ解析に基づく閾値の第 1 候補とした。

第 1.2.2.2 表 台風 5 事例における 500m 高度メソ解析相当温位、水蒸気フラックス、収束・発散と解析雨量の時系列表

印は解析雨量のピーク時間を示す その他の凡例は第 1.2.2.1 表と同じ

2009年台風第18号(10月7-8日):三重県の近傍(東側)を北東進

要素	単位	7日12JST	15JST	18JST	21JST	8日00JST	03JST	06JST	
相当温位(EPT)	K	329	329	324	322	347	344	324	
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	176	277	259	294	551	424	316	
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	484	450	260	540	1195	1414	1005	
解析雨量(RA)	mm	8	18	19	23	19	76	16	
	市町		尾鷲市・熊野市	紀宝町	尾鷲市	大紀町	大台町	熊野市	大台町

2011年台風第6号(7月18-19日):三重県の南側を東進

要素	単位	18日18JST	21JST	19日00JST	03JST	06JST	09JST	12JST
相当温位(EPT)	K	357	358	352	352	354	353	353
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	340	353	325	389	467	478	453
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	406	500	319	425	613	484	290
解析雨量(RA)	mm	21	27	25	23	33	69	36
	市町	大台町	大台町	紀北町	熊野市ほか	熊野市・紀宝町	熊野市	大台町

2011年台風第12号(9月3日-4日):三重県の西側を北上

要素	単位	3日12JST	15JST	18JST	21JST	4日00JST	03JST	06JST
相当温位(EPT)	K	355	356	355	360	352	358	353
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	552	538	491	620	415	562	501
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	457	592	467	443	285	1471	978
解析雨量(RA)	mm	37	37	43	56	40	95	90
	市町	尾鷲市	大台町	熊野市	熊野市	熊野市	紀宝町	尾鷲市

2011年台風第15号(9月20-21日):三重県の東側を北東進

要素	単位	20日18JST	21JST	21日00JST	03JST	06JST	09JST	12JST
相当温位(EPT)	K	355	357	355	353	350	353	355
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	168	254	337	331	367	514	502
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	244	377	486	360	323	836	651
解析雨量(RA)	mm	22	18	35	21	43	67	23
	市町	熊野市	大台町・紀北町	紀北町	熊野市	大台町	熊野市・御浜町	大台町

2012年台風第4号(6月19日):三重県の近傍(東側)を北東進

要素	単位	19日03JST	06JST	09JST	12JST	15JST	18JST	21JST
相当温位(EPT)	K	348	347	346	346	347	354	345
水蒸気フラックス(FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$	150	279	267	320	517	608	364
収束発散(CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$	201	579	407	434	436	892	1606
解析雨量(RA)	mm	1	5	15	27	48	66	2
	市町	尾鷲市ほか	尾鷲市ほか	大台町・紀北町	大台町	熊野市	大台町	大台町

(2)MSM500m 高度予想とメソ解析の比較検証および閾値の確定

T1106、T1112、T1115、T1204 の 4 事例の、MSM500m 予想とメソ解析の図や数値を比較することで、MSM500m 予想が有用かどうか検証する。また、検証結果を基に閾値を決める。

第 1.2.2.3 表は、T1204 事例のメソ解析と MSM500m 予想 (2012 年 6 月 18 日 15UTC 初期値で FT3~FT21) における EPT、FLWV、CONV の各要素を比較したものである。EPT の差は -3~+4K、FLWV は -100~+255 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、CONV は -538~+200 $\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ となっている。EPT、FLWV とともに、MSM500m 予想とメソ解析のいずれも PT の数時間前から値が高まり、PT で最大となっている。この傾向は T1106、T1112、T1115 の各事例でもみられる (表略)。一方、CONV は全般的に MSM500m 予想よりもメソ解析が高い傾向にある。また、MSM 予想が高くなればなるほどメソ解析との差が大きい。この傾向は T1106、T1112、T1115 の各事例でもみられる (表略)。その差幅は大小あるが、メソ解析が $900 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上の極端な数値の場合を除外したところ、 $100 \sim 200 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 程度低めに予想される傾向にあった。

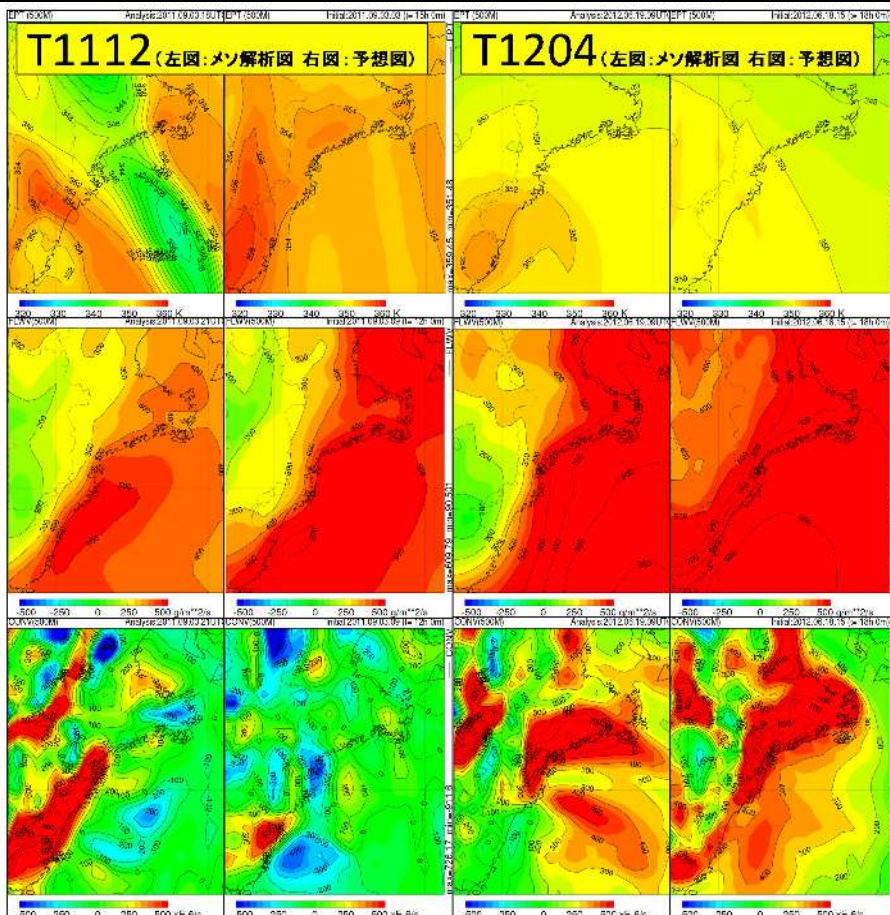
第 1.2.2.8 図の T1112 事例は、2011 年 9 月 3 日 03UTC 初期値の FT15(4 日 03 時)の EPT、

第 1.2.2.3 表 T1204 事例における 500m 高度メソ解析と MSM 予想の比較 (相当温位、水蒸気フラックス、収束・発散) の時系列表

印は解析雨量のピーク時間を示す MSM 予想は 2012 年 6 月 18 日 15UTC 初期値の FT3~FT21 その他の凡例は第 1.2.2.1 表と同じ

2012年台風第4号(6月19日)

		要素	単位	19日03JST	06JST	09JST	12JST	15JST	18JST	21JST
メソ解析	相当温位 (EPT)	K		348	347	346	346	347	354	345
	水蒸気フラックス (FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$		150	279	267	320	517	608	364
	収束発散 (CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$		201	579	407	434	436	892	1606
MSM予想	相当温位 (EPT)	K		346	345	346	348	348	351	349
	水蒸気フラックス (FLWV)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$		142	179	246	403	590	863	516
	収束発散 (CONV)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$		178	281	267	407	636	1047	1068
比較	EPT (MSM-メソ解析)	K		-2	-2	0	2	1	-3	4
	FLWV (MSM-メソ解析)	$\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$		-8	-100	-21	83	73	255	152
	CONV (MSM-メソ解析)	$\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$		-23	-298	-140	-27	200	155	-538

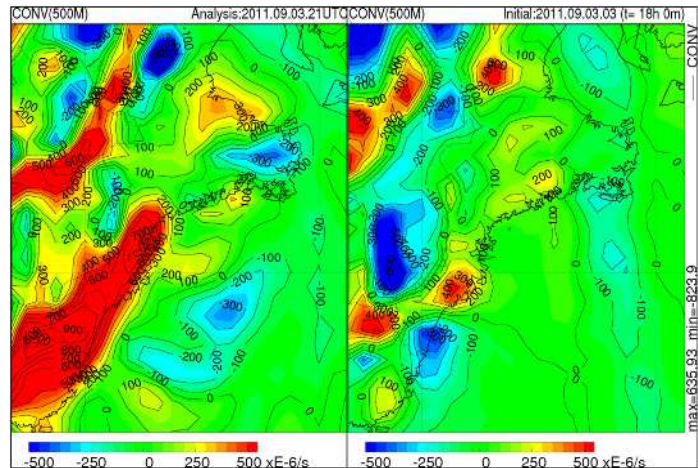


第 1.2.2.8 図 T1112 事例、T1204 事例における 500m 高度 MSM 予想とメソ解析図の比較

左 2 列: T1112 (2011 年 9 月 4 日 03 時) 右 2 列: T1204 (2012 年 6 月 19 日 18 時) それぞれ左がメソ解析図、右が MSM 予想図 (T1112 は 9 月 3 日 03UTC 初期値の FT15、T1204 は 6 月 18 日 15UTC 初期値の FT18)

上段: 相当温位 中段: 水蒸気フラックス 下段: 収束・発散

FLWV、CONV の各 MSM500m 予想図と同時刻のメソ解析図を比較したものである。EPT に関して、低 EPT の領域が予想できていないが、356K 以上の高 EPT は同じ領域で予想できている。FLWV も多少の表現の違いはあるが、 $500 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 以上の領域は合っている。一方、CONV に関して、高 CONV の領域が予想できていない。3 時間後となる同初期値の FT18 (4 日 06 時) (第 1.2.2.9 図) も同様の傾向である。しかし、4 日 06 時に MSM500m 予想で CONV 最大 $400 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ を予想した領域はメソ解析の $600 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上の値の大きい領域と対応している。この領域は、熊野市 RA1 時間 100 ミリ (4 日 04 時 30 分、05 時 00 分) の大雨となった領域と一致していた。



第 1.2.2.9 図 T1112 事例の 500m 高度 MSM 予想図とメソ解析の収束・発散の比較 左：メソ解析図 (2011 年 9 月 4 日 06 時) 右：9 月 3 日 MSM03UTC 初期値の FT18

T1204 事例でもほぼ同様の結果である。値の高い領域の位置関係は EPT、FLWV とともに概ね良好で、FLWV は $100 \sim 200 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度高めに表現されている (第 1.2.2.8 図)。CONV は位置の差がみられるが、最大値は尾鷲市周辺の収束の極大域がほぼ合致しており、MSM500m 予想の最大値 $800 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ と値が読みとれる領域では 18 時 00 分の RA1 時間 66 ミリ (大台町)、同 61 ミリ (熊野市)、同 58 ミリ (尾鷲市) の大雨との対応がよかった (一部表略)。

以上のことから、MSM500m 予想ではメソ解析と比べて多少の位置ずれ、値の違いはあるものの、いずれの要素もよく予想できている。EPT、FLWV のいずれの MSM 予想もメソ解析と同様に PT より前で値が高まっており、分布や値もほぼ合っている。CONV も同様に PT かその前で値が高まっているが、分布や値が合わないこともある (台風 5 事例のみの調査では、その要因の解明までは至っていない)。しかし、第 1.2.2.9 図のように狭い領域での収束を予想できている例もある。そのため、MSM500m 予想の利用価値は大きいと考える。

MSM500m 予想値との照合結果から、メソ解析に基づく閾値の第 1 候補を微調整した。EPT は、10 月の事例である T0918 事例を除く 3 事例で 355~360K となっており、予想幅も考慮して、355K のまま採用とする。FLWV は $100 \sim 200 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 程度高めに予想表現されることを考慮して、そのまま $500 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ とした。CONV は低めに予想される傾向を考慮して $800 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ をさらに下方修正し、 $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ とした。

しかし、FLWV に関しては、統合ビューワプロダクトのレベル別け最大値が $400 \text{ gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ であるため、これ以上の値を閾値とすることはできない (第 1.2.2.12 図の凡例、CONV の最大値は $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$)。予報現場で統合ビューワの作業を考慮した場合、現実的にはこれに合わせた対応を取る必要がある。そのため、統合ビューワの利用時には、「EPT355K、FLWV400 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、CONV700 $\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 」を参照することとした。

(3) 閾値の有用性の確認

以上のとおり、台風 5 事例を利用して、閾値「EPT355K、FLWV500 $\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、CONV700 $\times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 」を導き出した。ここで、あらためて直近台風である T1217 事例と比較照合した。第 1.2.2.4 表は、T1217 事例のメソ解析の各要素と RA 最大値を示したものである。FLWV、CONV とともに PT より前で値が高まっており、PT で閾値をクリアしている。EPT も PT より前で値が高まっている。PT で閾値をクリアしていないが、差は 1K であり、ほぼ同じである。また、29 日 15UTC 初期値の MSM 予想値とメソ解析を比較すると、EPT、FLWV、CONV のいずれの値も PT とその前後で値がほぼ同じである (表略)。したがって、この閾値は有用であると考えられる。

第 1.2.2.4 表 T1217 事例における 500m 高度メソ解析相当温位、水蒸気フラックス、収束・発散と解析雨量の時系列表

印は解析雨量のピーク時間を示す その他の凡例は第 1.2.2.1 表と同じ

2012年台風第17号(9月30日):三重県の近傍(東側)を北東進

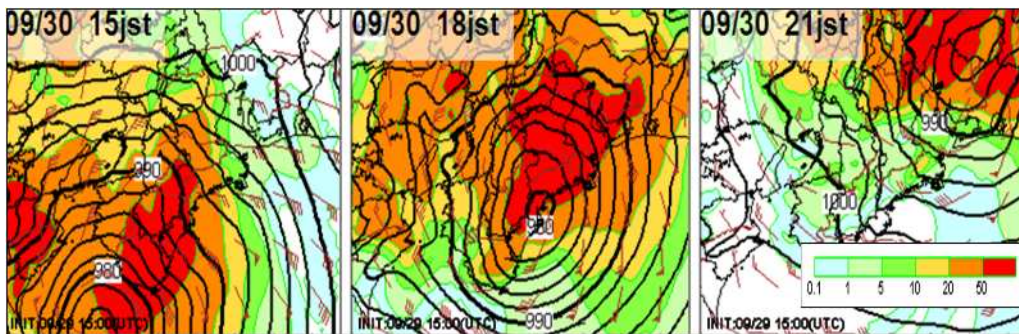
要素	単位	30日03JST	06JST	09JST	12JST	15JST	18JST	21JST
相当温位(EPT)	K	338	341	341	346	354	332	329
水蒸気フラックス(FLWV)	gm ⁻² s ⁻¹	111	153	213	410	614	429	221
収束発散(CONV)	x10 ⁻⁶ s ⁻¹	251	167	220	581	1371	808	1455
解析雨量(RA)	mm	0	0	15	55	69	36	2
	市町			紀北町	尾鷲市	大台町	大台町	大台町

1.2.2.4 2012年台風第17号事例でのMSM500m高度データの利用の実例および統合ビューワの活用

T1217 事例を利用して、1.2.2.1(2)の作業に MSM500m 予想を加えた作業の実例を、以下に示す。

(1) 数値予報資料(GSM、MSM)の降水に関わる予想

第 1.2.2.10 図は 2012 年 9 月 29 日 MSM15UTC 初期値 FT15、18、21 (9 月 30 日 15 時、18 時、21 時) の各予想図である。15 時では紀勢・東紀州で T1217 の中心から北東方向に、1 時間に 50 ミリ以上の強雨域が広がっている。18 時では台風の北上(北北東～北東進する予想となっている)とともに、強雨域が三重県全域に広がっていることがわかる。T1217 の進路予想は初期値ごとに早くなる傾向にあり(図略)、29 日夜勤帯での最新予想では台風の接近とともに急激な降水現象が発現し、短時間のうちに終息する傾向にあった。GSM12UTC、MSM15UTC の各初期値のガイダンスでも、最大 1 時間雨量では 30 日 12 時以降に紀勢・東紀州で、15 時以降にはほぼ全域で猛烈な雨の予想となっていた(第 1.2.2.5 表)。



第 1.2.2.10 図 MSM 予想図(2012年9月29日15UTC初期値FT15~21)

凡例は第 1.2.2.4 図と同じ

第 1.2.2.5 表 GSM と MSM の各ガイダンス値(予想期間は2012年9月30日)

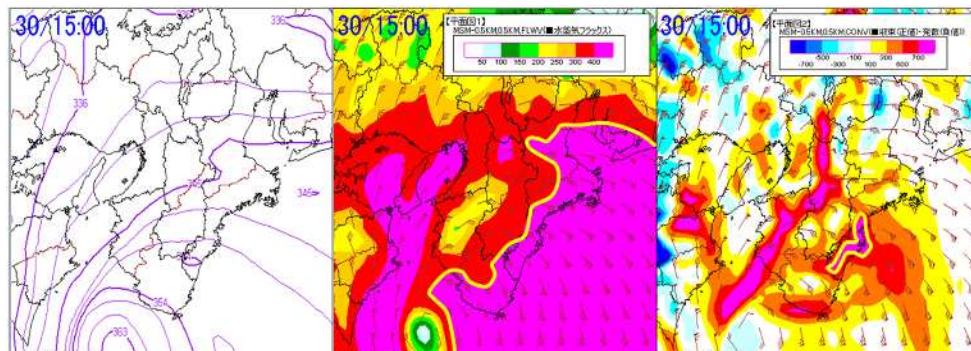
上段: 2012年9月29日GSM12UTC初期値 下段: 同日MSM15UTC初期値

黄色のハッチが注意報基準以上、赤色のハッチが警報基準以上を示す

時刻(JST)	03時-06時	06時-09時	09時-12時	12時-15時	15時-18時	18時-21時	21時-24時
中部	5	14	26	84	128	90	7
	2	8	23	67	87	21	0
北部	9	6	17	31	97	97	26
	0	6	9	23	74	37	0
伊賀	5	5	9	42	90	79	4
	0	3	6	42	79	21	0
伊勢志摩	6	12	14	62	107	90	2
	1	7	12	39	87	18	0
紀勢・東紀州	11	27	46	111	170	80	4
	5	20	32	100	89	18	0

(2)統合ビューワによる MSM500m 高度データの活用

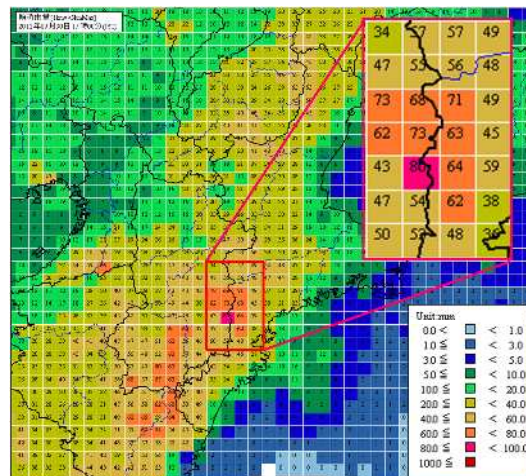
第 1.2.2.11 図に、2012 年 9 月 29 日 MSM15UTC 初期値 FT15 (30 日 15 時) の、統合ビューワによるプロダクト予想(EPT、FLWV、CONV)を示す。EPT は最大 354K を予想しており、FLWV はプロダクトレベルの最大値である $400 \text{ gm}^2\text{s}^{-1}$ を、



第 1.2.2.11 図 T1217 事例の、500m 高度の MSM 予想統合ビューワ画面 (2012 年 9 月 30 日 15 時 (29 日 15UTC の FT15)) 左：相当温位 中：水蒸気フラックス 右：収束・発散

CONV は閾値の $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ をそれぞれ超える予想となっていた (図中、黄色の線が各境界値)。

第 1.2.2.12 図は同時刻 (30 日 15 時) の RA1 時間最大雨量図で、CONV $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上と予想されている領域付近では、RA 極大値があらわれている。また、第 1.2.2.4 表の各要素の推移をみると、PT の値は 3 時間前から FLWV、CONV とともに急激に上昇しており、熊野市 RA1 時間 85 ミリ (30 日 16 時 00 分) (表略) の猛烈な雨と対応していた。



第 1.2.2.12 図 最大 1 時間解析雨量 (2012 年 9 月 30 日 15 時)

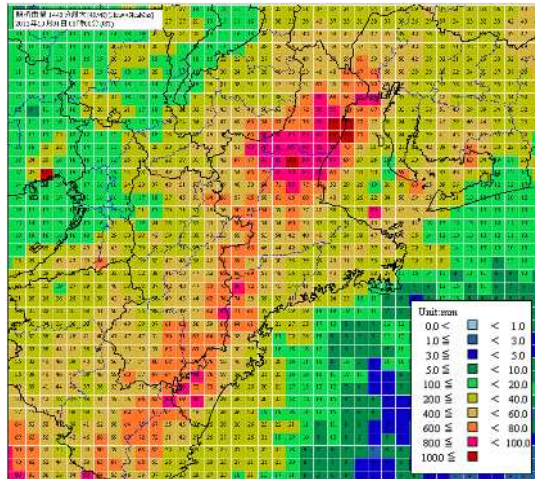
(3)9 月 29 日夜勤帯における実際の予報作業

29 日夜勤の予報担当者は、当時、予報作業を実施するなかで GSM12UTC、MSM15UTC の各予想資料およびガイダンス (第 1.2.2.10 図、第 1.2.2.5 表) を基本にしながらも、MSM500m 予想の CONV でも $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上の領域が 17 時から 19 時 (FT17~19) にかけて、三重県の市町村等をまとめた地域の「中部」「北部」の平野部や「伊賀」「伊勢志摩」でもみられたことから (図略)、これらの地域においても 30 日 15 時以降にガイダンスどおり最大 1 時間雨量 80 ミリの可能性は十分であると判断して、量的予想を組み立てた。第 1.2.2.6 表に、GSM と MSM のガイダンス初期値 (第 1.2.2.5 表) を修正した確定値を示す。短時間強雨の発現のタイミング、降水のピークについても GSM12UTC、MSM15UTC の各予想資料を基本に、MSM500m 予想による収束域を参考に、それぞれ組み立てた。

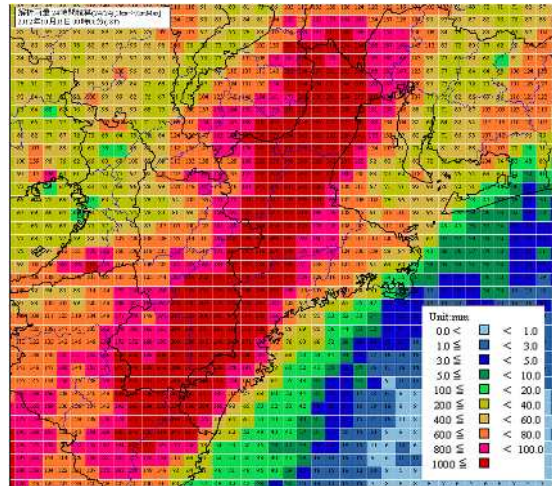
第 1.2.2.6 表 ガイダンスの修正後の値 (予想期間は 2012 年 9 月 30 日) 凡例は第 1.2.2.5 表と同じ

時刻 (JST)	03時-06時	06時-09時	09時-12時	12時-15時	15時-18時	18時-21時	21時-24時
中部	5	14	25	30	80	80	10
北部	9	6	20	40	80	80	15
伊賀	5	5	10	30	80	80	10
伊勢志摩	6	12	20	56	80	80	10
紀勢・東紀州	11	20	40	80	80	50	10

第 1.2.2.13 図は、9 月 30 日 00 時から 24 時までの RA1 時間最大値を、第 1.2.2.14 図は同期間の積算値を、それぞれ示したものである。「伊勢志摩」ではやや過大評価となったが、 $CONV700 \times 10^{-6} s^{-1}$ 以上の領域の 17 時から 18 時 (FT17~18) の予想と RA 最大 1 時間降水量との対応がよく (図略)、「中部」「北部」の平野部や「伊賀」においても降水量が増えていることがわかる。

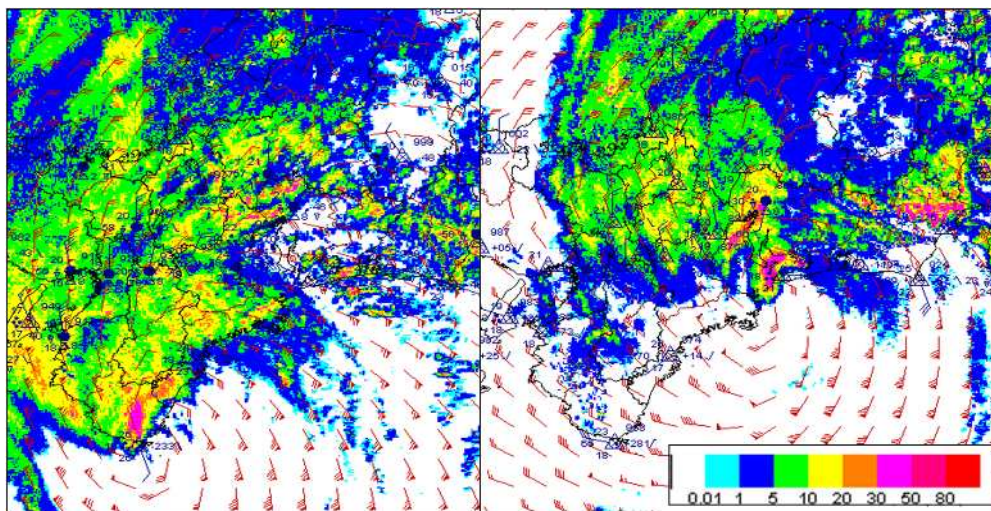


第 1.2.2.13 図 解析雨量 (2012 年 9 月 30 日 00 時 ~ 24 時までの最大値)



第 1.2.2.14 図 解析雨量 (2012 年 9 月 30 日 00 時 ~ 24 時までの 24 時間積算値)

第 1.2.2.15 図は、30 日 15 時と 18 時の毎時大気解析とレーダーエコーを重ね合わせたもので、T1217 の中心の北側で、明瞭な収束域が確認できる。これが、RA 最大 1 時間降水量で、鈴鹿市 100 ミリ (30 日 17 時 00 分、17 時 30 分)、津市 95 ミリ (同 17 時 00 分)、四日市市 100 ミリ (同 17 時 30 分) の降水の要因の一つと考えられる。



第 1.2.2.15 図 毎時大気解析とレーダー降水強度 (2012 年 9 月 30 日 15 時、18 時)

左 : 30 日 15 時、右 : 30 日 18 時

毎時大気解析 : 短矢羽根 ; 5kt、長矢羽根 ; 10kt、ペナント ; 50kt

このように、500m 高度による EPT、FLWW、CONV の予想は、GSM 予想や MSM 予想、あるいはガイダンスを判断するうえで、十分補完できる資料となり得ると考える。

(4) 予報現場における統合ビューワの活用

統合ビューワプロダクトの利用において、描画範囲条件は台風が当該地域から遠方に位置している場合

は、まず予報期間の長い GSM500m 予想を利用して「中日本」や「東海地方」のような広域から FLWV の推移を確認する。その後、台風が接近するステージにおいては、広域に加えて狭域の MSM500m 予想で EPT、FLWV、CONV を確認していく手法が有効だと考える。

以上のことを踏まえたうえで、本事例の 2012 年 9 月 29 日夜勤帯における、予報担当者による統合ビューワ MSM500m 予想を利用した予報作業例を、以下にまとめる（ここでは簡便のため、「紀勢・東紀州」以外の、「中部」「北部」「伊賀」「伊勢志摩」の予報作業は省略した）。

29 日日勤時の資料である同日 03UTC の MSM500m 広域予想図および狭域予想図で、FT27（30 日 15 時）以降、紀勢・東紀州において EPT（354K）、FLWV（ $400 \text{ gm}^2\text{s}^{-1}$ 以上）、CONV（ $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上）が急激に高まっていることを確認する（図略）。

29 日 06UTC、09UTC の MSM500m 広域予想図および狭域予想図でも を確認する（図略）。

29 日 15UTC の MSM500m 狭域予想図では、29 日 03UTC 予想よりも CONV の領域が絞られており、最大値は変わらず $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上を予想していることを確認する（図略）。30 日 15 時（FT15）以降、EPT354K、FLWV $400 \text{ gm}^2\text{s}^{-1}$ （統合ビューワプロダクトの最大値）以上、CONV $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 以上と、閾値および参照値をおおむねクリアしているため（第 1.2.2.4 表、第 1.2.2.11 図）、CONV の位置誤差を考慮に入れながら、三重県南部「紀勢・東紀州」においては、1 時間 50 ミリの大雨となる可能性は十分であると推定できる。

予報担当者は、29 日 GSM12UTC、MSM15UTC の各予想資料（下層収束も確認）およびガイダンスによる雨量予想を判断するうえで、～ までの MSM500m 予想（特に、CONV 値の高まりを重視）を補完材料として、ガイダンス（第 1.2.2.5 表）の信頼度は十分高いと判断し、若干の雨量修正を行い最大 1 時間雨量 80 ミリとした（第 1.2.2.6 表）。

1.2.2.5 まとめ

本項では、予報現場で実際に利用することを目的に、台風事例を対象とした 500m 高度の検証を実施した。事例数が少なく明確な指標を示すことはできなかったが、本検証から多少なりとも見いだせたこと、利用にあたって留意すべき点等を、以下にまとめる。

台風時の、三重県南部の「紀勢・東紀州」を対象とした RA1 時間 50 ミリの出現の目安は、「EPT355K、FLWV $500\text{gm}^2\text{s}^{-1}$ 、CONV $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 」とする。ただし、統合ビューワの利用にあたっては、プロダクトの最大レベル値の関係から、「EPT355K、FLWV $400\text{gm}^2\text{s}^{-1}$ 、CONV $700 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 」を参照する。

MSM500m 予想の、EPT、FLWV、CONV の各値が急激に高まっている時間帯で大雨となる可能性があるため、こうした上昇傾向が顕著な時間帯に留意する必要がある。

MSM500m 予想の CONV はメソ解析値より $100 \sim 200 \times 10^{-6}\text{s}^{-1}$ 程度（あるいはそれ以上）低めに出る傾向にあり、この程度のバイアスを考慮する必要がある。また、収束が予想される領域が必ずしも実際の収束領域と一致するわけではないため、下層収束の出現する兆候や位置については、実況監視および解析を十分実施することが重要である。

MSM500m 予想の FLWV は、メソ解析値より $100 \sim 200\text{gm}^2\text{s}^{-1}$ 程度高めに出る傾向にあり、この程度のバイアスを考慮する必要がある。

MSM500m 予想の EPT は概ね良好であるが、暖候期（7 月～9 月）以外の台風事例では EPT355K 以下の場合もあり、季節因子も踏まえたうえで利用する必要がある。

統合ビューワの利用においては、台風が遠方にある場合は、予報期間の長い GSM500m 広域予想図で大まかな流れを掴み、直近時には MSM500m 広域および狭域予想図で詳細な変化傾向を把握することが必要である。

本項では 500m 高度データに特化した検証を行ったが、500hPa 面の気塊や中・上層の乾燥気塊の流入等、

現象の立体構造の把握も重要である。

今回は、EPT、FLWV、CONV の 3 つの要素に絞って検証を行った。このほか、参考までに平衡高度 (EL)、500m 高度からの自由対流高度までの距離 (DLFC)、地表から約 3km と約 500m 間の風速差 (VSH) の各要素の値も確認したが、大雨の一因となるような顕著な変化傾向は見いだせなかった。本事例の場合は、EPT、FLWV、CONV の利用が有効であると考えている。

今後も数値予報の精度向上が期待されるだけに、予報現場での 500m 高度データの活用は広がっていくものと考えられる。

参考文献

加藤輝之・廣川康隆 (2012) : 大雨を発生させやすい環境場について . 平成 23 年度予報技術研修テキスト , 86-100.

本稿の地形データは USGS の GTOP030 を使用している。

1.3 竜巻の事例 (2012年5月6日の茨城県・栃木県で発生した竜巻事例)*

2012年5月6日昼過ぎ、茨城県および栃木県内の3地域において竜巻による甚大な突風被害が発生した。現地調査にもとづく突風被害発生状況および被害発生地域は第1.3.1.1図のとおりである。

ここでは、まず竜巻が発生した環境場を示すとともに、当日朝の予報作業における予想シナリオおよび実況の推移から予報中枢および現地気象台の予報官がどのような状況を予想し、防災気象情報を発表したのかを説明する。次に災害発生後に現地官署がどのような対応をとったのかについても説明し、今後同様な災害が発生した場合の参考となるものとした。また、この竜巻の発生メカニズムや竜巻予測の現状と課題についても説明する。なお、本稿では雷や竜巻などの不安定現象に関わる検討内容を記述し、大雨に関する検討の記述は省略する。



第1.3.1.1図 突風被害発生状況および被害発生地域

右図赤枠内が左図の範囲、左図赤太線：被害発生地域、写真：つくば市での現地調査

1.3.1 背景となる環境場について

ここでは竜巻発生時の総観場、環境場を概観し、当日朝の予報作業における予想シナリオを示すとともに、現業で入手可能な資料をもとに行った局地解析から竜巻発生に至るまでの特徴を説明する。

ア) 総観場

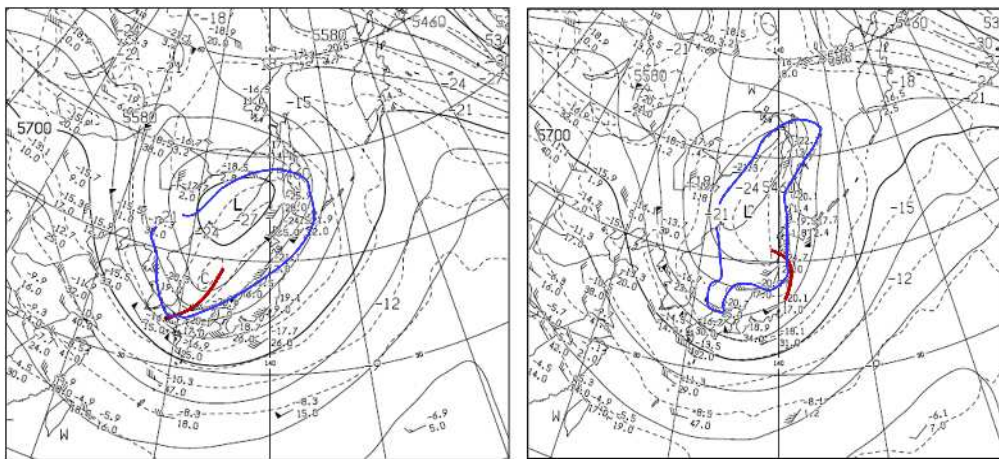
ここでは一連の現象が終了するまでの総観場について、実況資料に基づいて説明する。

第1.3.1.2図に6日9時および21時の500hPa天気図を、第1.3.1.3図に6日15時の地上天気図および14時30分の気象衛星可視画像を示す。沿海州には500hPa寒気渦(地上低気圧に対応)の中心があって、その周り5460m付近の寒気を伴ったトラフ(以下、トラフ)が西日本から東日本を6日夜にかけて通過した。館野では、6日21時に500hPa気温が-20.1(平年は-13.9)と3月下旬並みの気温を観測した。地上では、6日09時には日本海の500hPaトラフの前面にあたる能登半島沖に低気圧があって東北東進し(図略)、15時には東北地方北部に達した。低気圧からは温度集中帯を伴った地上シアラインが本州付近にのび、温度集中帯は東日本や北日本において顕著となっており、地上シアライン付近では衛星可視画像でも

*中村 直治(気象庁予報部予報課)

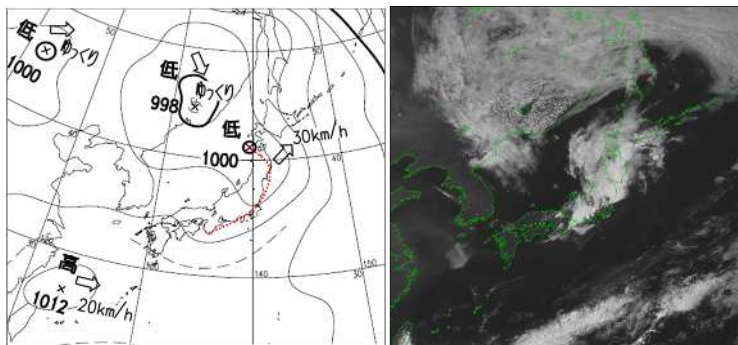
対流雲の発達が見られた。関東地方には、地上シアーラインの前面で南から暖かく湿った空気が流れ込む場となっており、地上シアーラインの暖気側で竜巻が発生した。2006年11月7日に北海道佐呂間町で発生した竜巻(F3)も、西からトラフが接近し、トラフの前面にある低気圧からのびる寒冷前線の暖気側で発生しており、今回のような総観場は、竜巻などの激しい突風を発生させる1つのパターンといえる。

関東甲信地方では、こうした総観場の中、09時館野の高層観測からはSSI: -1.4、Kindex: 25.9と大気の状態が不安定であることを示していた。館野観測による温位エマグラムでは、持ち上げ凝結高度(LCL)は930hPaと比較的低く、自由対流高度(LFC)は700hPaとやや高い状態であったが、平衡高度(EL)は300hPaを超えており、自由対流高度以上に持ち上げる上昇流があれば、発達した対流雲が形成される環境場を示していた(第1.3.1.4図)。



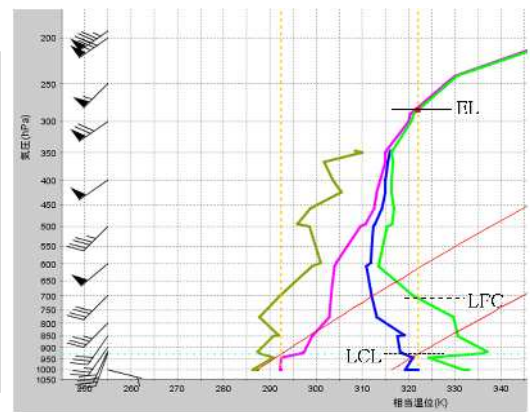
第1.3.1.2図 500hPa天気図 (左図: 6日09JST、右図: 21JST)

青線: -21 等値線 茶色線: トラフ



第1.3.1.3図 地上天気図(6日15JST)及び衛星可視画像(1430JST)

点線: 地上シアーライン(6日15JST)



■ 露点の温位 ■ 温位 ■ 相当温位 ■ 飽和相当温位 ■ 等混合比線

第1.3.1.4図 館野温位エマグラム(6日09JST)

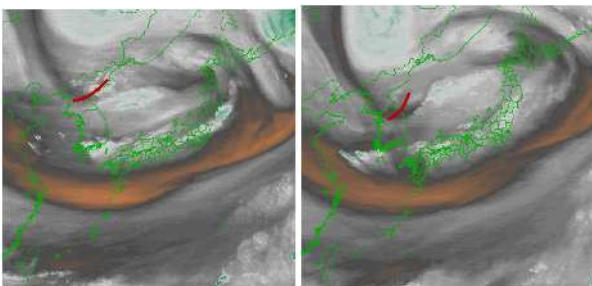
短矢羽根: 5kt、長矢羽根: 10kt、ペナント: 50kt

イ) 予想シナリオ

予報作業では、数値予報資料等に基づいて気象現象に関する予想シナリオ(以下、予想シナリオ)を作成し、実況資料等に基づいて現象の推移を監視する。実際には、実況を把握しながら実況の変化に応じて、予想シナリオを修正し、必要に応じてサブシナリオに切り換える必要がある。ここでは、当日朝の予報作業において、竜巻などの激しい突風を引き起こす雷雲の発生・発達について、各種資料からそのポテンシャルや時間的・空間的にどのように予想されるかについて検討し、予想シナリオを作成するまでの手順を説明する。

この事例では、上空の寒気流入、下層シア-前面での暖湿気流入、地上シア-ライン通過などを主要因とする大気不安定による雷雲の発生・発達がどのタイミングで、どの程度の現象になるかを検討し、予想シナリオを作成する。

まず、上空の寒気流入を把握するため、高層観測や気象衛星水蒸気画像（以下、水蒸気画像）、500hPa面での高度・渦度・気温予想を確認する。水蒸気画像（第1.3.1.5図）では、沿海州に中心をもつ寒冷渦をまわるトラフが、5日21時には朝鮮半島北部付近にあって、同時刻の高層観測では（図略）、韓国の観測点や輪島、松江で500hPa気温は-20以下となっていた。500hPa予想（第1.3.1.6図）では、-21の寒気を伴ったトラフが6日の日中東日本に接近し、6日夕方から夜にかけて関東地方を通過する予想で、3月下旬並みの寒気が流入することが予想された。6日3時には、水蒸気画像で暗域が明瞭なトラフが朝鮮半島中部まで南下しており、GSM（5日12UTC初期値）の予想に沿って経過していることが確認できた（図略）。

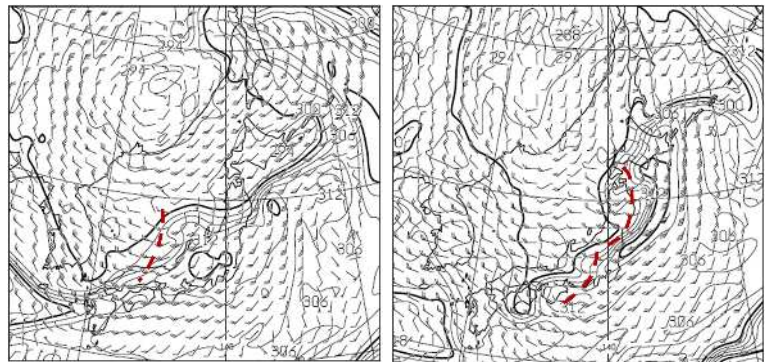


第1.3.1.5図 気象衛星水蒸気画像
（左図：5日21JST、右図：6日03JST）
茶色線：トラフ



第1.3.1.6図 GSM500hPa高度・渦度予想図
（左図：6日09JST予想、右図：21JST予想）
茶色線：トラフ、青線：気温-21線

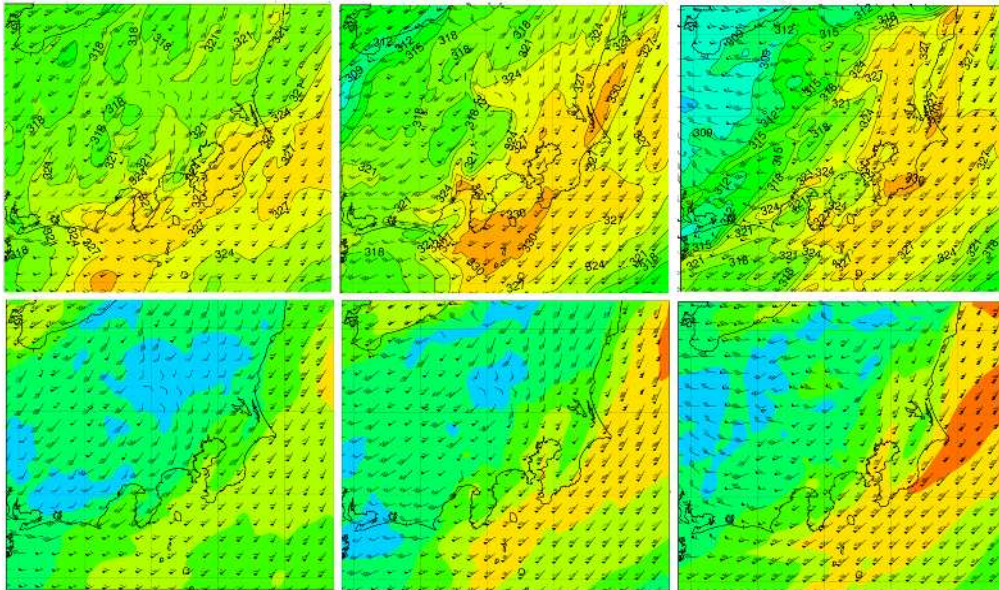
次に下層暖湿気の流入や不安定度を把握するため、850hPa及び高度500mの相当温位・水蒸気フラックス量、地上気温・露点温度予想を確認する。GSM850hPa予想（第1.3.1.7図）では、6日9時に日本海から西日本にのびる850hPaシア-（ここでは南西風が西～北西風になる境界線付近）が関東地方に接近し、夕方から夜にかけて通過する予想となっていた。関東地方では、850hPaシア-前面での下層暖湿気の流入と日射による昇温



第1.3.1.7図 GSM850hPa風・相当温位予想図
（5日12UTC初期値、左図：6日09JST予想、右図：21JST予想）
短矢羽根：5kt、長矢羽根：10kt、ペナント：50kt、茶破線：シア-

で、850hPa相当温位315Kの領域が予想された。また、MSM高度500m面では、6日9時の時点で、房総半島付近にみられる相当温位327Kの領域が12時から15時には関東地方北部にまで北上して広がり、水蒸気フラックス150g/m²s以上が、9時以降関東地方北部にまで広がる予想となっていた（第1.3.1.8図）。6日3時に紀伊半島南端の潮岬付近に予想されている高度500mの相当温位327K以上の高相当温位域（図略）は、昼過ぎには関東地方南部に達する予想となっているが、このことに加え3時の潮岬における地上露点温度は17.8で、東京（3時実況で露点温度13）では露点温度が日中17くらいまで上がる予想となっていることから、3時頃潮岬付近にあった下層の湿った空気が、日中関東地方南部に流入して、下層水蒸気量が増えることを示していた。このように下層暖湿気と上空の寒気が流入することで、関東地方ではSSI-3以下

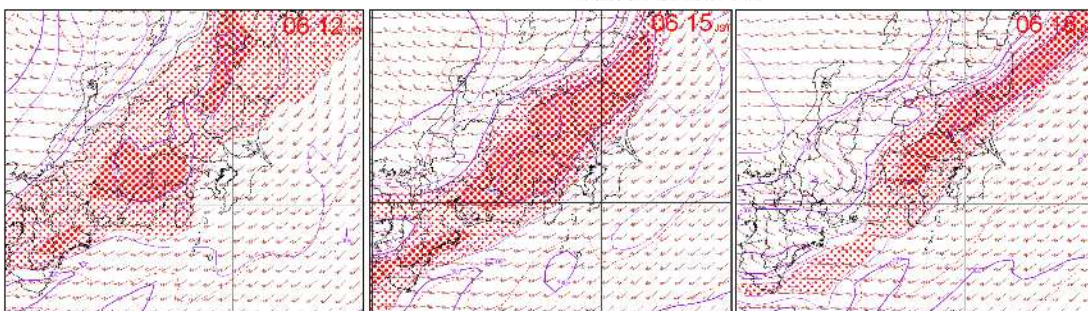
の領域が広い範囲で予想され、大気が潜在不安定になることが予想されていた（第 1.3.1.9 図）。関東地方での日中の予想最高気温は、6 月下旬頃（東京）の 25~26 が予想され、地上気温と 500hPa 気温との差は 45 以上となる予想で、この点からも大気の状態が非常に不安定となることが予想された。



第 1.3.1.8 図 MSM 高度 500m 面図（5 日 15UTC 初期値）

上段：相当温位 K、下段：水蒸気フラックス g/m^2s 、左図：6 日 09JST 予想、中図：12JST 予想、右図：15JST 予想

短矢羽根：1m/s、長矢羽根：2m/s、ペナント：10m/s、相当温位： 水蒸気フラックス：

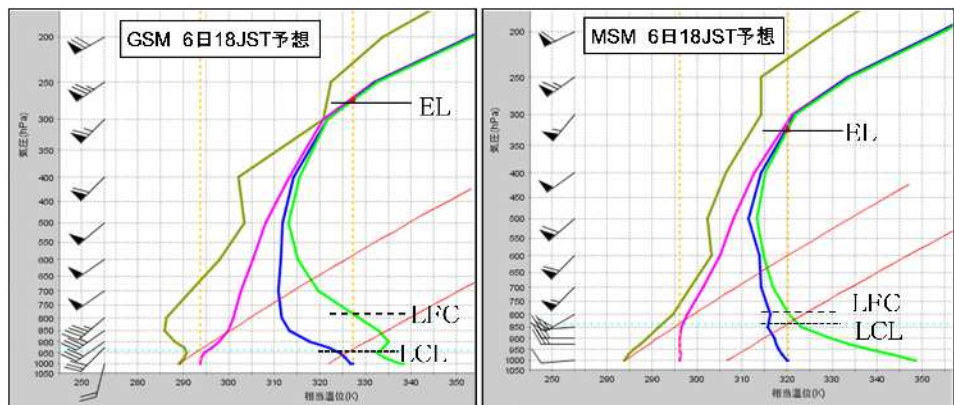


第 1.3.1.9 図 GSM850hPa 風・相当温位・SSI 図（5 日 12UTC 初期値）

左図：6 日 12JST 予想、中図：15JST 予想、右図：18JST 予想

短矢羽根：5kt、長矢羽根：10kt、ペナント：50kt、SSI () :

大気不安定による雷雲の発達程度を把握するため、予想温位エマグラム（6 日 18 時）を確認する。東京ポイントにおける GSM 予想（第 1.3.1.10 図）では、950hPa より下層で湿った状態で、持ち上げ凝結高度（LCL）は 935hPa と低くなっていたが、700 ~

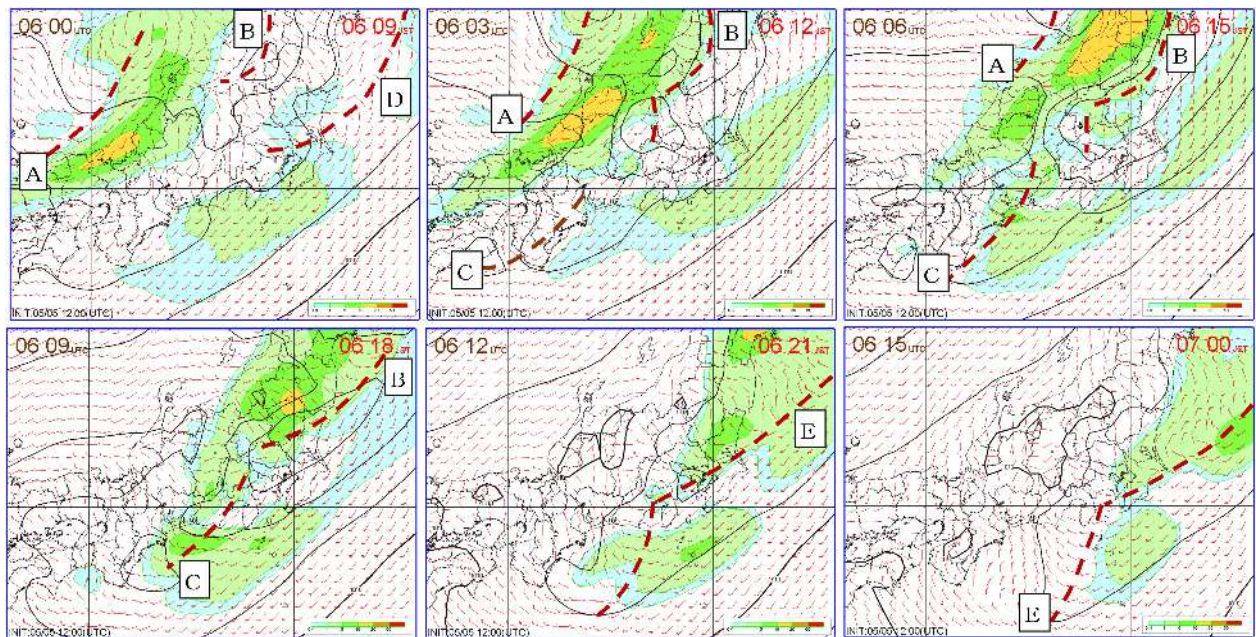


第 1.3.1.10 図 東京ポイント予想温位エマグラム

左図：GSM5 日 12UTC 初期値、右図：MSM5 日 15UTC 初期値、凡例は第 1.3.1.4 図に同じ

950hPa で比較的乾いた状態なため、自由対流高度 (LFC) は 800hPa 付近と高くなっている。MSM 予想 (第 1.3.1.10 図) では、850hPa より下層で乾いているが、850hPa より上層で湿っているため、持ち上げ凝結高度 (LCL) は 837hPa と GSM に比べて高く、自由対流高度 (LFC) は 800hPa 付近と GSM と同程度であった。平衡高度 (EL) は、GSM で 273hPa、MSM で 324hPa となっており、対流雲が自由対流高度 (LFC) を超えると発達した積乱雲 (雷雲) が形成されやすい場であることを示していた。

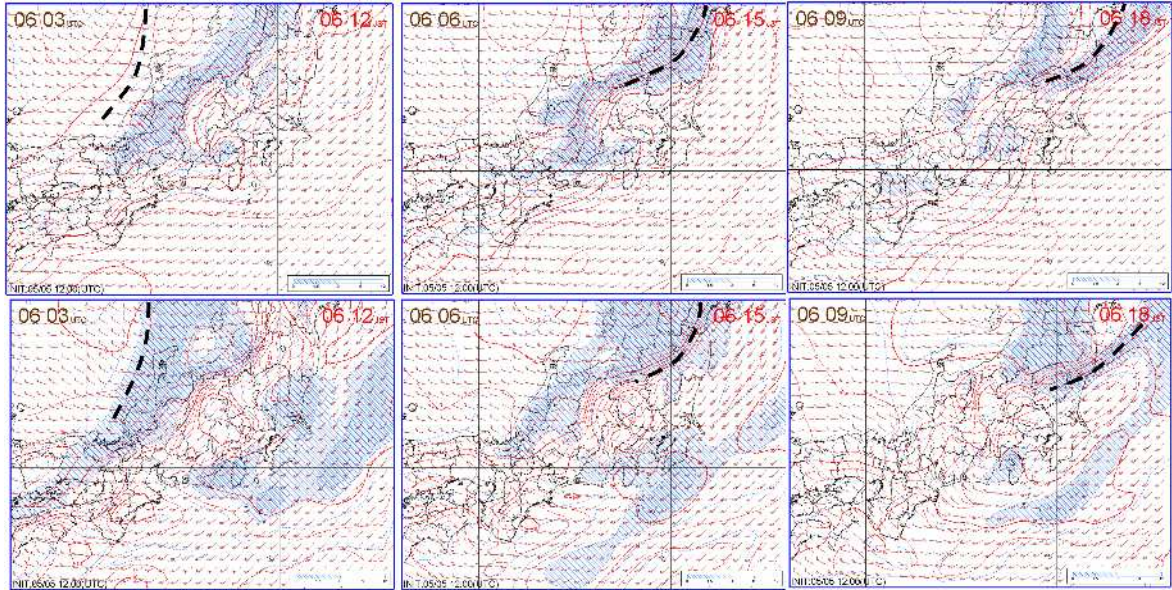
次に降水のタイミングや地上シアライン及び下層シアの通過タイミングなどを把握するため、地上風によるシアラインの動向や降水予想、下層風や気温予想を確認する。GSM (5 日 12UTC 初期値、地上予想: 第 1.3.1.11 図、850・925hPa 予想: 第 1.3.1.12 図) では、日本海の低気圧から西日本にのびる地上シアライン (以下、シアライン A とする) が日中北陸沿岸を北東進するが、シアライン A 前面の南西風が西風となって新潟県付近に流れ込み、関東地方の南風との間で昼過ぎにかけて別のシアライン (以下、シアライン B とする) を形成している。また、東海地方においても南西風と北西風のシアライン (以下、シアライン C とする) が北陸地方のシアライン A と動きを合わせて、東進している。北陸地方沿岸のシアライン A は下層 (850・925hPa) シアに対応するものとなっている。関東地方では、関東地方南部のシアライン (以下、シアライン D とする) の北上とともに日中南風が卓越し、下層水蒸気量が増える昼過ぎには、シアライン B 南側の南向き斜面を中心に降水を予想している。その後、北陸地方沿岸のシアライン A は不明瞭となり、その前面の関東地方北部付近でシアライン B が明瞭となる。下層シアは、北陸沿岸のシアライン A とともに東進するが、関東地方北部付近のシアライン B に追いつくことで、温度傾度が大きくなり、また風向シアもより明瞭となる。下層で温度傾度が明瞭になった関東地方北部のシアライン B は、東海地方を東進するシアライン C と動きを合わせて、関東地方を夕方以降東進・南下する予想となっている (図略)。動きを合わせたシアライン (以下、シアライン E とする) 南下時の夕方には、下層南西風が強まり関東地方平野部は山越え気流で下層湿り域は縮小するため、降水域はこのシアライン E 付近でのみ予想され、シアライン E とともに東進・南下している。降水のピークとしては、シアライン E が通過するタイミングの関東地方北部で夕方、南部では夜となっていた。



第 1.3.1.11 図 GSM 地上風・降水予想図 (5 日 12UTC 初期値、6 日 09JST ~ 7 日 00JST 予想)

茶破線: 地上シアライン、3 時間降水量 (mm) :

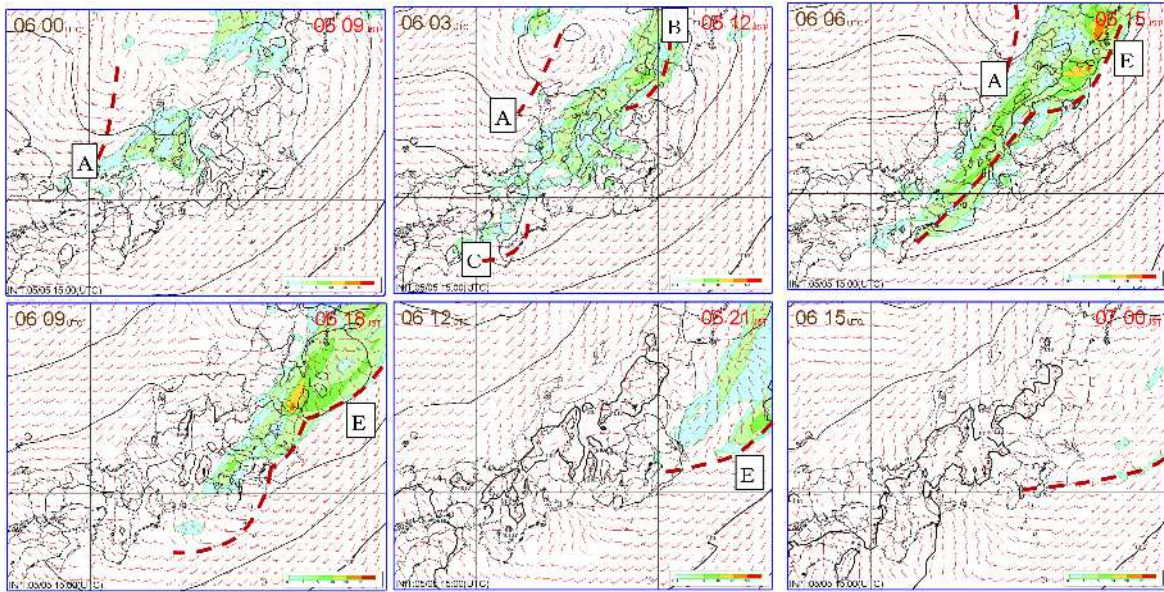
A ~ E は、本文中の地上シアライン記号に対応したもの。



第 1.3.1.12 図 GSM850hPa・925hPa 風・気温・湿り域図 (5 日 12UTC 初期値)

上段：850hPa、下段：925hPa、左図：6 日 12JST 予想、中図：15JST 予想、右図：18JST 予想

黒破線：シアー、湿数 () : 



第 1.3.1.13 図 MSM 地上風・降水予想図 (5 日 15UTC 初期値、6 日 09JST ~ 7 日 00JST 予想)

茶破線：地上シアーライン、1 時間降水量 (mm) : 

A ~ E は、本文中の地上シアーライン記号に対応したもの。

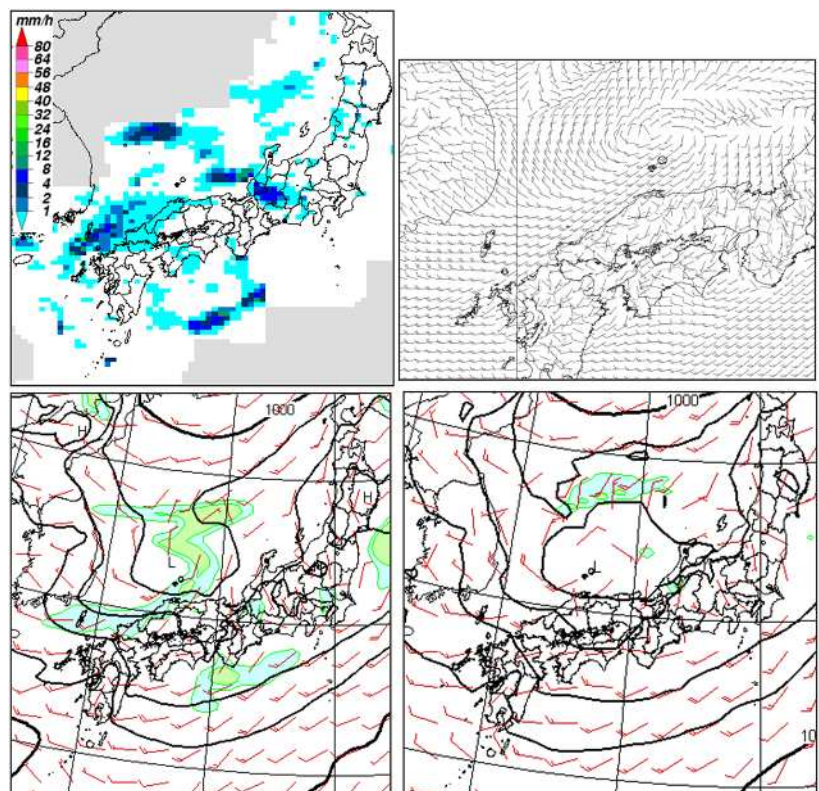
MSM 予想 (5 日 15UTC 初期値、第 1.3.1.13 図) による地上シアーラインは、15 時頃にかけては GSM と同様の予想であるが、15 時以降は GSM よりも早く関東地方を東進・南下している。降水予想に関しては、関東地方北部では GSM と同様に 6 日昼過ぎからシアーライン E 南側でも降水が予想されているが、甲信地方や埼玉県では下層南西風による地形性降水が午前中から予想されている。シアーライン E 通過時の関東地方南部での降水の強まりは予想されていない。

3 時の実況では、山陰沖に低気圧があって、これからシアーライン A に対応する地上シアーラインが対馬海峡にのびており、GSM (5 日 12UTC 初期値)・MSM (5 日 15UTC 初期値) の予想はおおむね合っている (第 1.3.1.14 図)。降水予想に関しては、GSM では対馬海峡付近のシアーライン A 付近の降水が実況に近く、

MSM では全体として過小となっている。また、岐阜県付近では、GSM で予想されている降水が発現しているが、モデルよりも強い降水が観測されている。以上のことから、降水予想に関しては、GSM を基本に検討し、地形などに影響を受ける部分に関しては MSM も参考に検討し、地上シアーラインの動向や降水のシナリオを以下のように考える。関東地方では日中南風が卓越して、甲信地方では昼前から、関東地方北部では昼過ぎから降水が始まる。地上シアーライン E の南下する夕方から夜にかけて降水域が南下・東進することが予想されるが、シアーライン E の東進・南下時は関東地方北部を中心に下層温度傾度も明瞭なことから降水が強まることが予想される。なお、GSM で午前中関東地方沿岸で降水域が予想されているが、予想される湿り域は 925hPa のみで（図略）、モデル特性による過大な降水予想（中川、2006）と考えられ、3 時に紀伊半島沖に予想されている降水域（9 時頃に関東地方南部に進む）は実況に比べても過大であることから、過大に予想された降水域と判断する。

次に竜巻などの激しい突風のポテンシャルを把握するため、突風関連指数（第 1.3.1.15 図：GSM 5 日 12UTC イニシャル、第 1.3.1.16 図：MSM 5 日 15UTC イニシャル）を確認する。SSI（第 1.3.1.9 図）はシアーライン B および E 近傍を中心に -3 以下の領域が広がり、非常に不安定な状況になることを示している。CAPE は、GSM・MSM ともに関東地方の広い範囲で 2000 J/kg を超える予想となっている。また、SREH は、GSM・MSM ともに関東地方で 200 m^2/s^2 を超える値を予想している。このため、EHI は、GSM・MSM ともに昼前から夕方にかけて広い範囲で 2 J/kg を超え、GSM では所々で 3 J/kg を超える予想となっており、米国における竜巻監視の目安（Raumussen and Blanchard、1998）で、強い竜巻をもたらすといわれているスーパーセルが発達する可能性が非常に高いことを示していた。EHI のピーク値は 15 時に予想されている地域が多く、6 日昼過ぎから夕

方が最もポテンシャルの高い時間帯であることが予想される。SWEAT についても、GSM・MSM ともに 400 を超える予想となっており、米国における竜巻監視の目安（Miller、1972）で、竜巻の可能性のあることを示していた。EL は、GSM・MSM 予想ともに管内の広い範囲で 200~300hPa を予想しており、広い範囲で背の高い対流雲が発達しやすいことを示していた。以上のことから、関東地方では昼過ぎから夕方をピークとして、竜巻などの激しい突風の発生する可能性が高いことが判断できた。



第 1.3.1.14 図 実況とモデルの比較（6日 03JST）

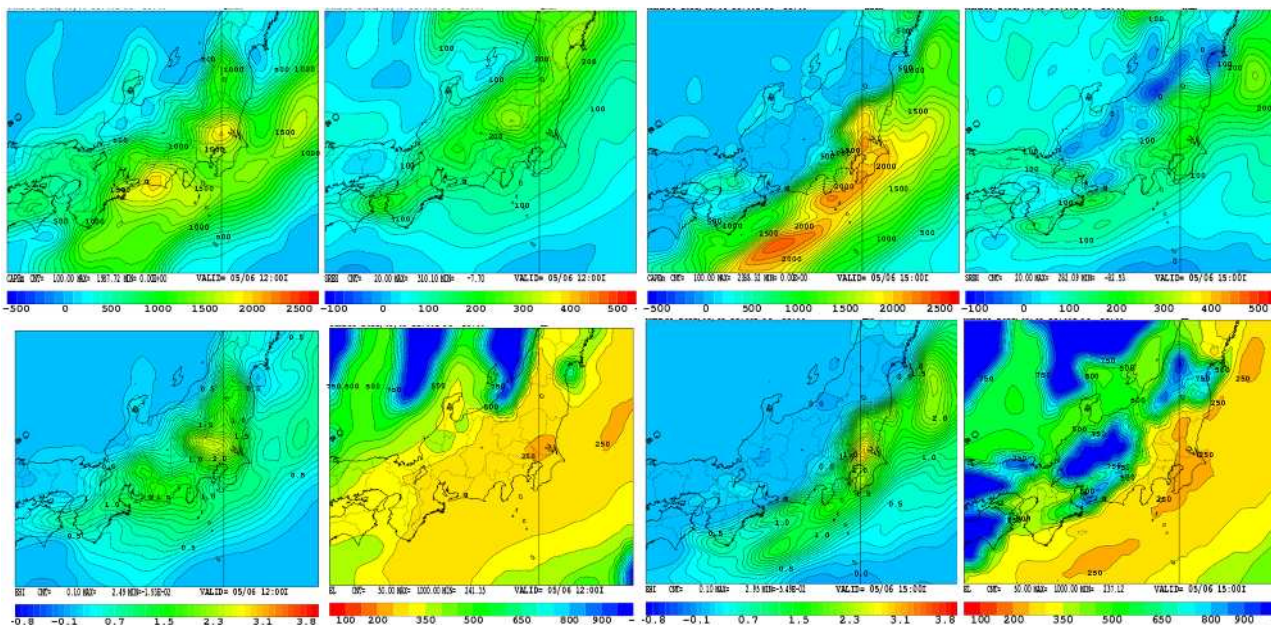
左上図：解析雨量（1 時間降水量 mm）

右上図：毎時大気解析（地上風）

短矢羽根：5kt、長矢羽根：10kt、ペナント：50kt。

左下図：GSM12UTC 初期値（3 時間降水量 mm） 凡例は第 1.3.1.11 図 に同じ。

右下図：MSM15UTC 初期値（1 時間降水量 mm） 凡例は第 1.3.1.13 図 に同じ。



第 1.3.1.15 図 GSM 突風関連指数

(5日12UTC 初期値、6日12JST 予想)

左上図：CAPE (J/kg)、右上図：SREH (m^2/s^2)

左下図：EHI (J/kg)、右下図：EL (hPa)

第 1.3.1.16 図 MSM 突風関連指数

(5日15UTC 初期値、6日15JST 予想)

左上図：CAPE (J/kg)、右上図：SREH (m^2/s^2)、

左下図：EHI (J/kg)、右下図：EL (hPa)

最後に降ひょうの発生ポテンシャルについても検討する。降ひょうの予測については、関東地方ではこれまでの調査で、地上最高気温と館野 500hPa 気温の差が 40 以上、輪島 500hPa 気温が -18 以下 (5月)、SSI が 0 以下 館野 850hPa 気温と 500hPa 気温との差が 25 以上の場合、降ひょうが発生しやすいとの知見がある (今井、2008 ; 金子・阪田、2004 ; 坂間・土田、2004)。今回の事例では、地上気温と 500hPa 気温の差 : 45 、 輪島 500hPa 気温 : -20 以下、SSI : 0 以下、館野 850hPa 気温と 500hPa 気温の差 : 30 以上 が予想されることから、降ひょう発生の可能性が高いことを示していた。

以上のように各種資料を検討した結果から、予想シナリオを以下のように考える。

上空のトラフ (500 hPa-20) が日中関東地方に接近し、夕方から夜にかけて通過する。

トラフ前面を地上シアラインが北陸沿岸と東海地方を東進するが、北陸沿岸のシアライン A は次第に不明瞭となり、その前面の関東地方北部付近でシアライン B が明瞭となる。下層シアは、北陸沿岸のシアライン A とともに東進するが、関東地方北部付近の地上シアライン B に追いつくことで、温度傾度が大きくなり、また風向シアもより明瞭となる。下層で温度傾度が明瞭になった関東地方北部のシアライン B は、東海地方を東進するシアライン C と動きを合わせて、関東地方を東進・南下する。

関東地方北部のシアライン B に向かって、関東地方では日中地上南風が卓越し、下層水蒸気量も増大する。ただし、関東地方は下層南西風により山越え気流となるため、下層湿り域は狭めで日照による昇温が予想される。このように、下層暖湿気の流入に日照による昇温が加わる中、上空の寒気が流入して大気の状態が不安定となる。

降水は、シアライン B 南側にあたる関東地方北部の南向き斜面では、下層暖湿気流入による地形性降水が昼過ぎから発現するが、メインの降水はシアライン E が東進・南下する夕方から夜にピークを迎えると予想する。

落雷、竜巻などの激しい突風、降ひょうなどの顕著現象のポテンシャルは、各種予想資料や過去の知見などから非常に高いといえるが、シアライン E 南下以前の昼過ぎは、山沿いを中心とした局地的な現象で、

シアーラインEが東進・南下する夕方から夜にかけて、広い範囲でポテンシャルが非常に高まると予想できる。

サブシナリオとしては、以下のことを考える。関東地方では北部山沿いで降水があると、滞留寒気や積乱雲からの冷氣外出流が北風となって平野部に流出することがある。そうなった場合、関東地方南部からの南風との局地的なシアーが平野部に形成され、GSM など予想されるシアーラインEが南下する以前に、局地的シアー付近で雷雲が発生・発達することもあるので、局地的シアーの形成を実況で監視する必要がある。

ウ) 局地解析

6日朝以降は、実況監視の作業がメインとなる。実況監視では、実況が予想シナリオに沿って経過しているかを確認しつつ、実況が予想シナリオからずれてきた場合、その原因やそれによる影響を検討して、予想シナリオを修正する必要がある。

今回の事例では、以下の点が実況監視を行う上での着目点としてあげられる。上空寒気やトラフの動向、地上シアーライン及び下層シアーの動向（モデルでは予想されていない局地的なシアーや収束域の形成も含めて）、対流雲や降水の発生状況（モデルでは予想されていない降水の発生も含めて）、関東地方における下層水蒸気量の状況（地上露点温度、GPS 可降水量による監視）、日射による昇温や滞留寒気・冷氣外出流に伴う気温低下による地上気温分布の変化、関東地方における南風の卓越状況、関東地方の西側での発雷やメソサイクロンの発生状況。

ここでは、着目点を中心に実況監視を行い、必要に応じて予想シナリオを修正する作業について説明するが、実況監視において何に注目し、どのような判断をして、どう対応したかの詳しい内容については、1.3.2 で記述する。なお、この着目点については、ア) で述べたようにほぼ予想通りに推移したため、ここでの説明は割愛し、以下の着目点について、局地解析に基づいた説明をする。

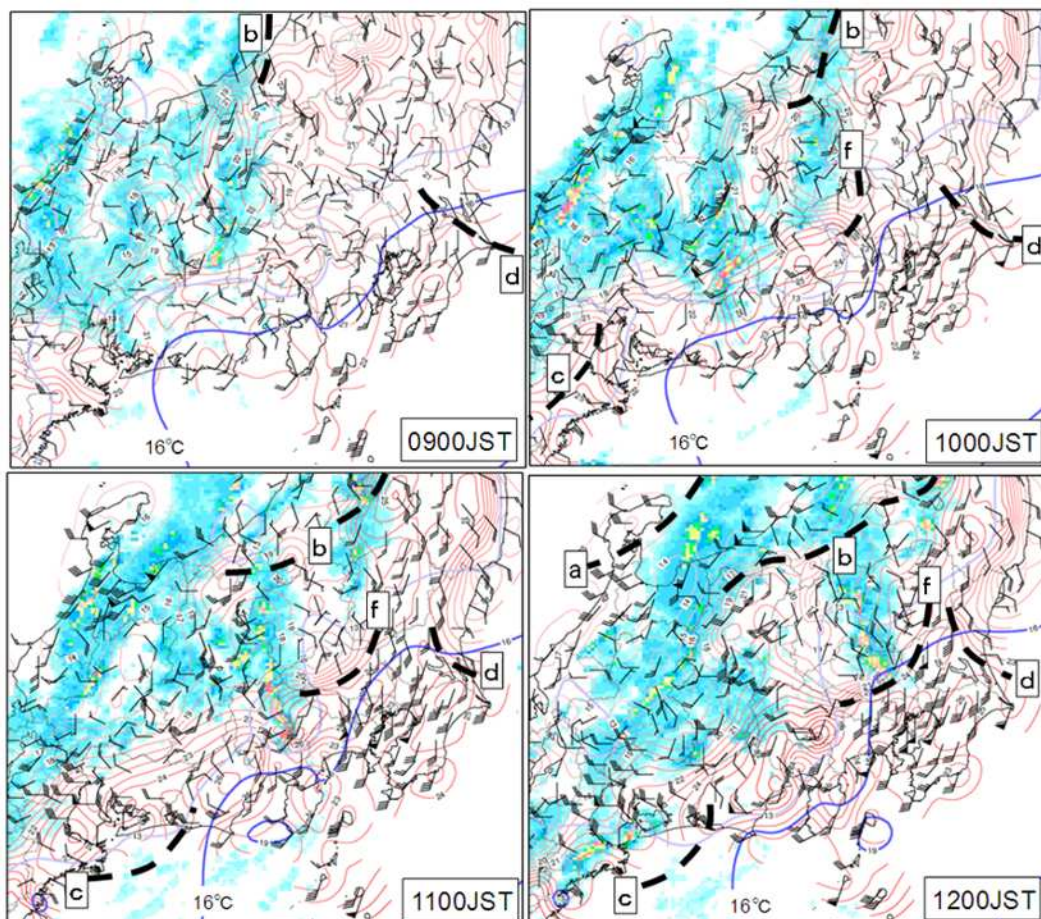
第 1.3.1.17 図に局地解析図を、第 1.3.1.18 図に WPR 高度 1500m 風分布図を、第 1.3.1.19 図に発雷状況図を示す。

6日9時には下層シアーは近畿地方から四国地方を通過中で、その前面に当たる東海及び北陸地方にはエコーがあって東進している。関東地方では、関東地方南部で南風が卓越し始めているが、鹿島灘から茨城県には東風が流入し、シアーライン（以下、シアーラインdとする）を形成している。新潟県には、GSM で予想されている地上南風と西風系のシアーライン（以下、シアーラインbとする）が見られる。また、長野県には降水域があって北東進しているが、モデルでは予想されていない降水域である。モデルで予想されていないこの降水域の出現から、モデルより下層シアー前面の暖湿気移流が強まっている可能性があり、この降水域による影響を検討すべきである。

10時には、長野県南部では地上風が北西風から南西風が変わって、南西向き斜面でエコーが発達して活発に発雷している。関東地方南部の南風は、低気圧の北東進に伴って強化され、南風の領域は関東地方北部にまで拡大している。関東地方南部では露点温度 16 ラインが次第に北上するとともに、日照による昇温で 25 を超える所が発現し始めている。新潟県のシアーラインbは、西風が明瞭となって東進し、その南側には長野県から北東進したエコーが関東地方北部を進んでいる。このエコーによる降水のため、群馬県には滞留寒気が形成され始めており、前項のサブシナリオとなる可能性が高まってきたことから、平野部におけるシアー付近での温度傾度強化に対する監視強化が必要である。

11時には、長野県南部で発達したエコーは山梨県付近まで進み、活発な発雷が見られる。新潟県から東進したシアーラインb付近の福島県から栃木県においては、群馬県から北東進したエコーが発達し、発雷を観測している。関東地方の南風はさらに強まり、埼玉県内でも気温 25 の所が発現した。関東地方南部に

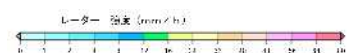
は、露点温度 16~18 の湿った空気が流れ込んでいる。滞留寒気の北風と南風との地上シアライン（以下、シアライン f とする）付近では、南風領域の昇温により気温差 5 前後となり、温度傾度が強化されている。この地上シアライン f は、下層で南~南南西の風が吹いているため、もともとは中部山岳風下の地形性低圧部が形成され、南よりの風が流入していた所に、群馬県における降水によって滞留寒気が形成され、滞留寒気の南側でシアラインが形成されたとみられる。山梨県から東進する発達したエコーと埼玉県付近に形成されたシアライン f に関しては、朝予報検討時の数値予報資料では予想されておらず、その後の新たな数値予報資料でも予想されていないが、発達したエコーが温度傾度を伴ったシアライン f 付近に重なると、シアライン付近の上昇流が対流活動を強化し、エコーはさらに発達することが予想される。また、シアライン付近には地上渦度の極大域があるため、他の地域に比べ竜巻発生の可能性が高くなることも考えられる。朝の予想シナリオで予想された現象とは別の顕著現象が、昼頃から関東地方で発生する可能性が高くなったため、前項のサブシナリオを採用し、顕著現象発生を前倒しするなど予想シナリオの修正が必要となる。



第 1.3.1.17 図 局地解析図（6日 0900JST~1200JST）

薄赤線：地上気温（1 毎、標高で補正した気温）、青線：露点温度（3 毎）

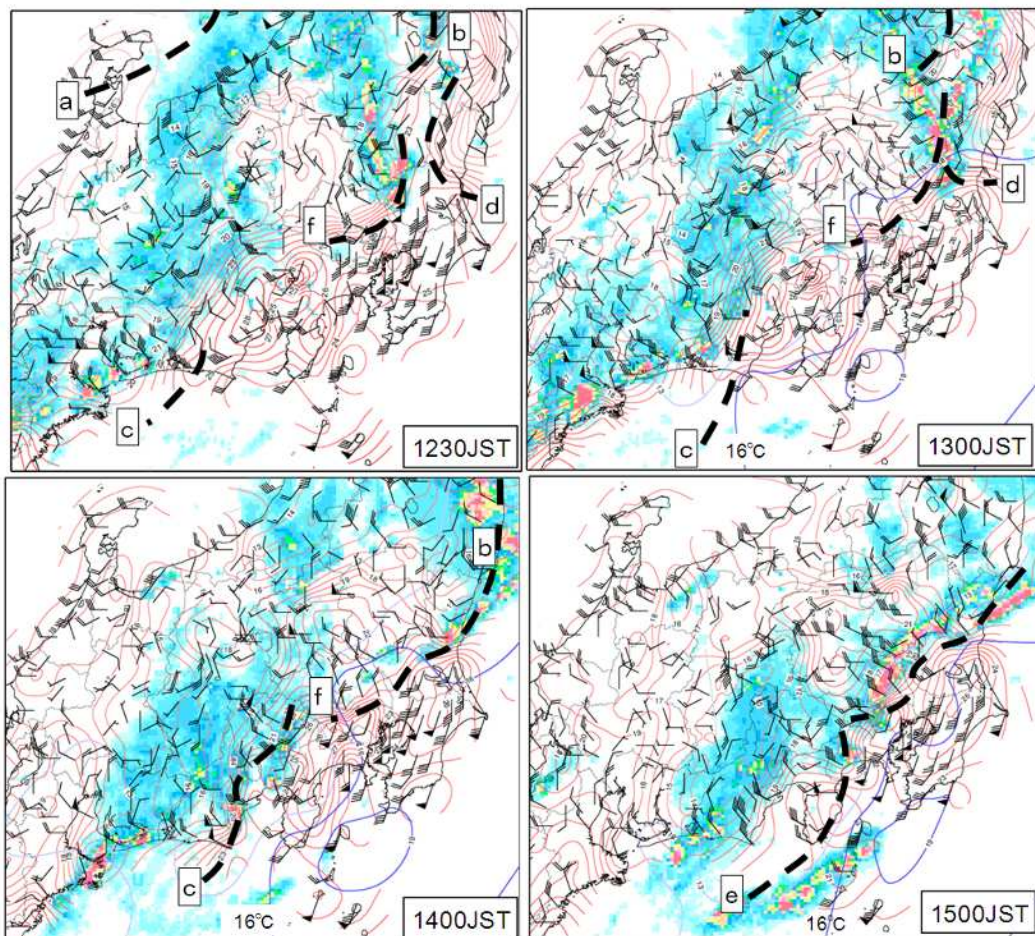
短矢羽根：1m/s、長矢羽根：2m/s、ペナント：10m/s



12 時には南北走向の発達したエコーが関東地方に進入し、関東地方に形成されたシアーライン f に重なった。南風は茨城県でも 10m/s を観測するなど強まるとともに、発達したエコー付近の北西風（冷氣外流出）がシアーライン f における地上収束をさらに強化した。栃木県から福島県にのびる発達したエコーは、シアーライン b とともに北上した。能登半島付近や東海地方には、下層シアー前面のシアーライン（以下、シアーライン a および c とする）がそれぞれみられるが、その東進はモデル予想よりも早くなっている。

第 1.3.1.20 図に熊谷 WPR 時系列図を示す。発達したエコー接近時の 11 時から 12 時にかけては高度 500m で滞留寒気の北風が見られるが、それより上層の 1500m までは南風、1500m より上層では南西風となって暖気移流を示す時計回りの鉛直シア - となっていた。ヘリシティは朝から 200 以上を観測していたが、エコー接近時には 300 を超える値を示した。水戸 WPR でも、エコー接近時は時計回りの鉛直シアーが見られ、ヘリシティが 200 を超える値を示していた（図略）。

12 時 30 分には、茨城県と栃木県の地上南風と北西風系とのシアーライン f 付近でエコーがさらに発達し、12 時 30 分以降メソサイクロンが検出された（第 1.3.1.21 図）。13 時には、エコーは発達した状態で北東進しているが、エコーの東側に流入していた関東地方南部からの南風は北側の寒気に抑えられてエコー南端の茨城県南部までの流入となった。北陸地方の地上シアーライン a は不明瞭になったが、東海地方のシアーライン c は静岡県中部まで進み、温度傾度を伴って明瞭となっていた。熊谷 WPR（第 1.3.1.20 図）では、発達したエコー通過後、高度 1km 以下では北西～西風に変化し、最下層で風向シアーが明瞭であることがわかる。



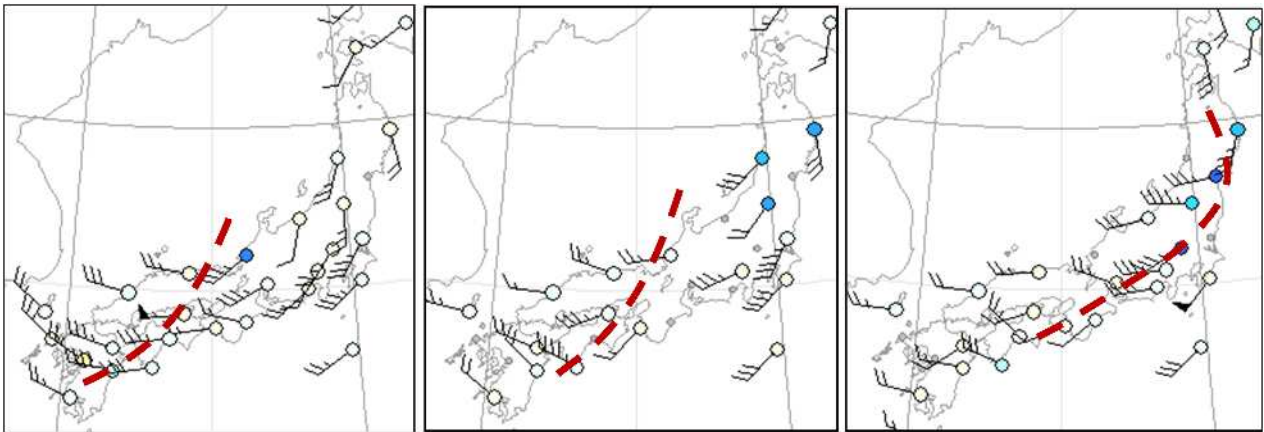
1.3.1.17 図 局地解析図（6日 1230JST～1500JST）

凡例は前ページに同じ

14 時には、南北走向の発達したエコーは地上西風系に押されるように東海上に進んだ。しかし、関東地方から静岡県にかけては、温度傾度を伴った地上シアライン b・f・c がのび、下層シアとの対応もよくなっている。このシアライン e が朝の予想シナリオで想定していたメインの降水をもたらすシアライン E であり、今後再びエコーが発達する可能性があり、引き続き監視が必要である。

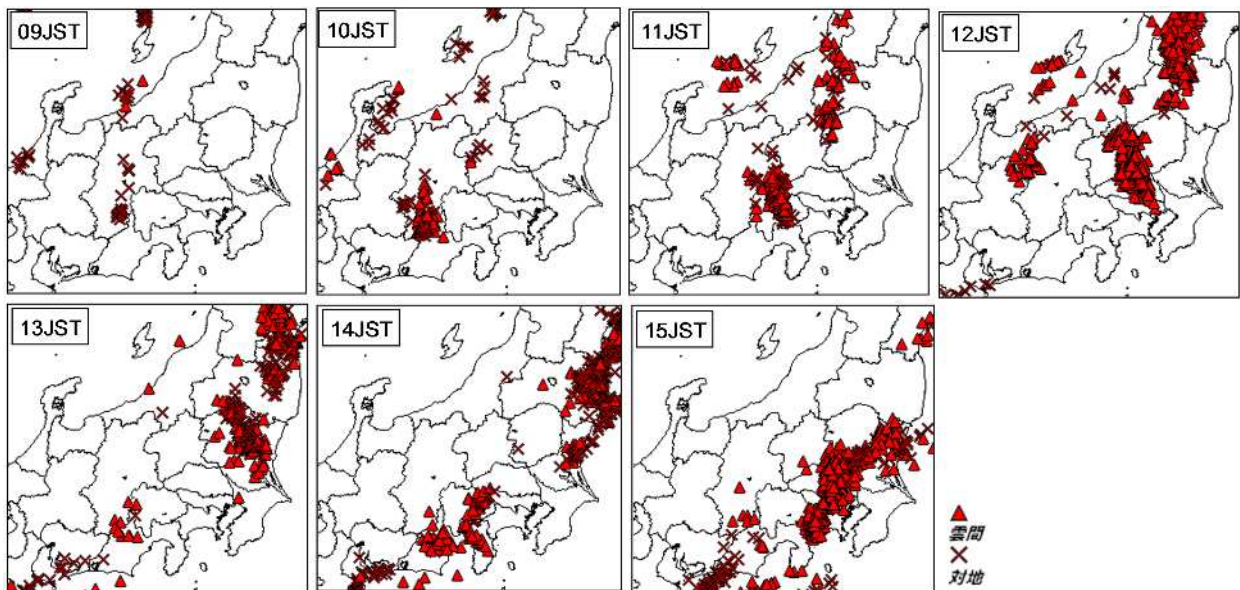
15 時には、朝のシナリオで想定していた通り、関東地方の地上シアライン e 付近でライン状のエコーが発達した。この降水域に伴って、15 時台には関東地方南部においてもメソサイクロンを検出した（図略）。この発達したエコーは、朝のシナリオに沿って、その後夕方にかけて関東の東海上に抜けたが、新たな突風災害は報告されていない。

以上、局地解析では朝予報検討時の予想シナリオで想定していなかった現象が、シナリオよりも早い段階で発現し、突風災害をもたらした。突風災害は社会的影響が大きいため、竜巻などの激しい突風が予想される場合においても、大雨警報・注意報等の場合と同様、適切かつ円滑な情報・竜巻注意情報の発表に資するために、実況が予想シナリオ通りに推移しているのか、ずれてきているのかを局地解析などの実況監視によって常時確認し、適宜予想シナリオを補正・修正していくことが予報作業上で重要であるといえる。

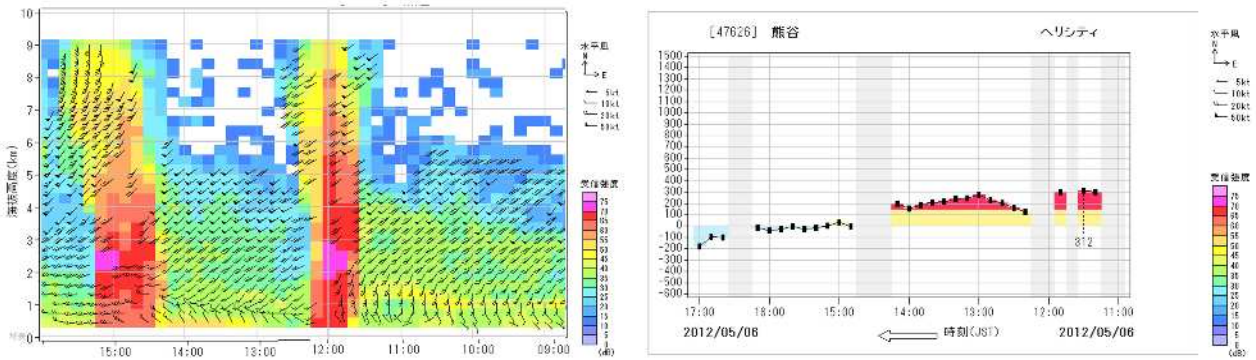


第 1.3.1.18 図 WPR1500m 図 (左図：6 日 09JST 中図：12JST 右図：15JST)

短矢羽根：5kt、長矢羽根：10kt、ペナント：50kt、茶破線：シア

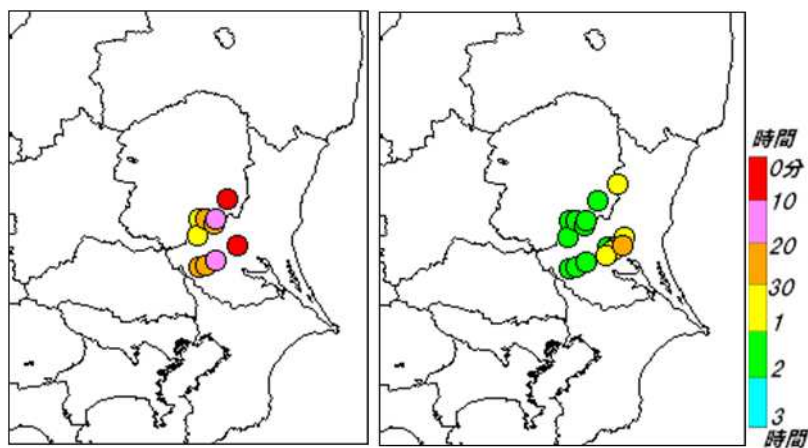


第 1.3.1.19 図 発雷状況図 (6 日 09~15JST)



第 1.3.1.20 図 WPR 熊谷 鉛直断面図

左図：風向風速、受信強度（6日 09～16JST）、右図：ヘリシティ（6日 11～17JST）



第 1.3.1.21 図 メソサイクロン発生状況図

左図：6日 13JST、右図：14JST

参考文献

- 中川雅之（2006）：降水事例検証．平成 18 年度数値予報研修テキスト、39、 36–39.
- 今井良彰（2008）：降雹予測指標の検証と改善について-2007 年の事例による指標の再検討-．平成 19 年度 東京管区調査研究会誌、40.
- 金子功、 阪田正明（2004）：農業気象災害軽減のための雹害調査（第 2 年度）．平成 15 年度東京管区調査 研究会誌、36.
- 坂間智子・土田正夫（2004）：栃木県の雹害について 農業災害の軽減にむけた調査研究．平成 15 年度東 京管区調査研究会誌、36.
- Rasmussen、 E.N.、 and D.O. Blanchard（1998）：A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters. Wea. Forecasting、 13、 1148-1164.
- Miller、 Robert C.（1972）：Notes on Analysis and Severe-Storm Forecasting Procedures of the Air Force Global Weather Central. Technical Report 200 (Rev)、 AIR WEATHER SERVICE、 183pp.

1.3.2 一連の防災気象情報対応と災害後の対応について

竜巻等の激しい突風が発生するまでの予想シナリオを予報官がどう組み立てたかについては前項で示した。ここでは、そのシナリオに基づき、一連の気象情報・雷注意報・竜巻注意情報の発表のタイミングなどをいかに考え、実況監視しながら防災対応したかを、実際の現業作業を中心に説明する。

1.3.2.1 一連の防災気象情報対応について

・関東甲信地方中枢

ア) 6日朝予報検討時

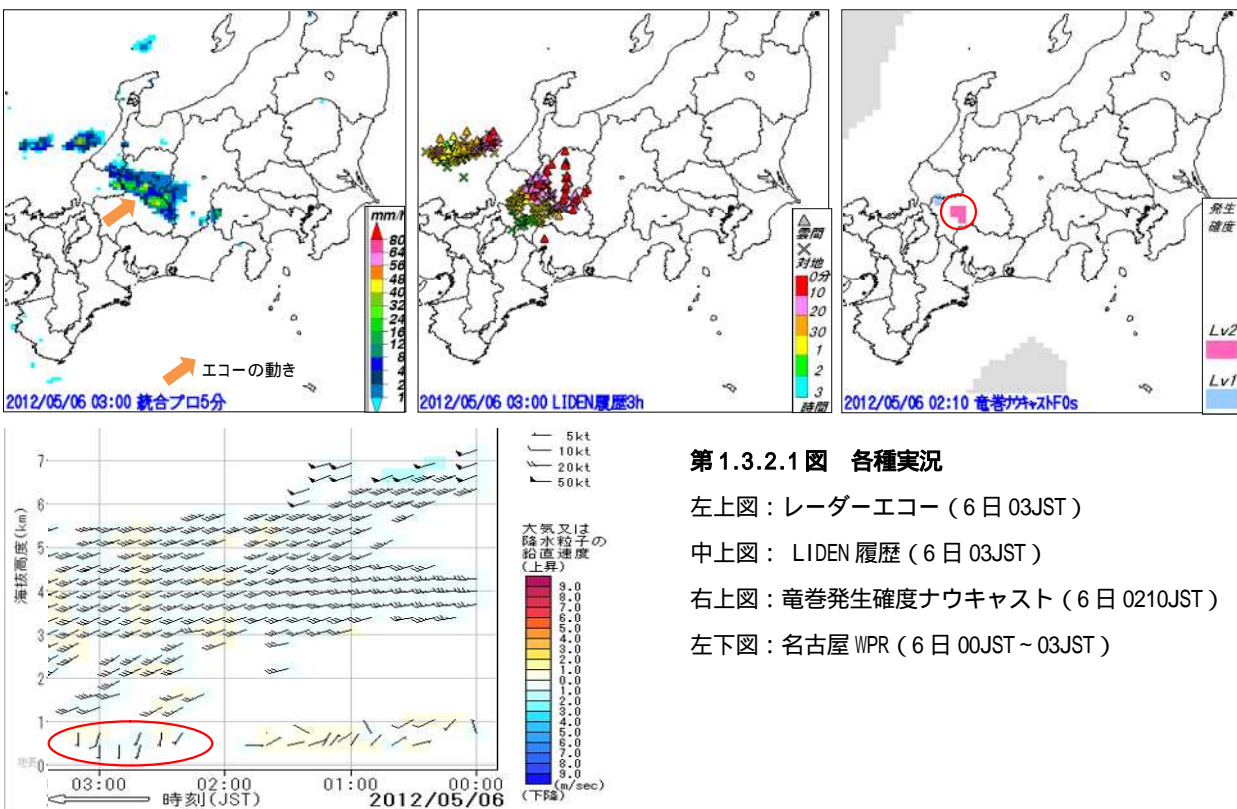
地方予報中枢予報担当者は、これまでの実況経過をもとに各種予想資料を用いて担当地方予報区域内で予想されるシナリオを検討・作成し、地方気象指示報にて府県官署へ防災気象情報関連作業や朝の天気予報作業に向けての支援、調整を行う。

朝の天気予報に向けての予想シナリオ検討及び作成については、前項イ) で詳細に述べたとおり。

また、サブシナリオとして考えている、関東地方北部で形成される滞留寒気の北風と関東地方南部からの暖湿流による南風との間で局地的なシアアが形成された場合、もしくはその兆候が現れた場合には、府県官署にその旨を伝えるとともに、サブシナリオを採用し、現象のタイミングなどの変更検討など適確な対応を取るよう指示する必要がある。

6日3時の実況では、岐阜県付近に発達したエコーがあり北東進している。このエコーは、2時頃から東海地方に流入した南寄りの下層風先端で発達し、活発に発雷していると考えられる。エコー周辺では6日2時過ぎから竜巻発生確度2となり、2時10分には岐阜地方気象台で竜巻注意情報を発表している(第1.3.2.1図)。

このエコーについては、GSM(5日12UTC初期値)、MSM(5日15UTC初期値)共に3時予想で弱い降水を表現しているものの、GSMはその後の甲信地方への広がりを見込んでおらず、MSMはその後SSIマイナスの領



第1.3.2.1図 各種実況

左上図：レーダーエコー（6日03JST）

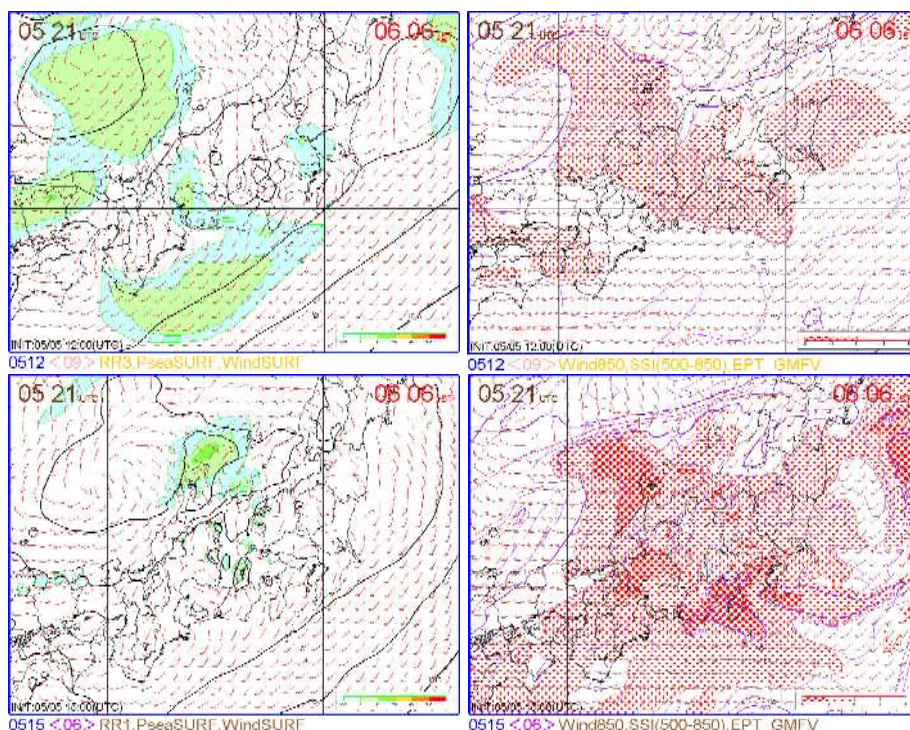
中上図：LIDEN履歴（6日03JST）

右上図：竜巻発生確度ナウキャスト（6日0210JST）

左下図：名古屋WPR（6日00JST～03JST）

*水守 博和（気象庁予報部予報課）

域を関東地方にさらに広げるものの、弱い地形性降水を予想している程度となっている(第1.3.1.11図及び14図、第1.3.2.2図)。しかし、実況ではエコーが予想以上に発達していることから、下層シアー前面での暖湿気流入が予想以上に早く強く流入していることも考えられることから、今後このエコーについて、中部山岳を越えての発達の動向、関東地方での南寄りの下層風の強化の有無を監視する必要がある。



第1.3.2.2図 地上風・降水予想図及び850hPa相当温位・SSI図(6日06JST)

上段：GSM12UTC 初期値、下段：MSM15UTC 初期値

地上予想図の凡例は第1.3.1.11図に同じ。

850hPa図の凡例は第1.3.1.9図に同じ。

地方気象指示報では、前項イ)で述べた予想シナリオ及び上記のサブシナリオ、実況着目ポイントについて述べ、雷現象については SSI マイナス領域と降水予想を基本に検討するよう、また、突風関連指数(第1.3.1.15図及び第1.3.1.16図)の平衡高度(EL)予想が250hPaであり雷雲が非常に発達すると考えられることから、各府県官署に竜巻キーワード付き府県気象情報発表基準の該当有無を確認し報告するよう指示した。その結果、関東甲信9官署のうち7官署から気象情報発表基準に該当する旨の報告を受け、6日5時15分に「雷と突風及び降ひょうに関する関東甲信地方気象情報 第2号」を発表し、6時10分には東京地方に、6日昼過ぎから夜遅くまでの時間を対象とした「竜巻」及び「ひょう」の付加事項付きの雷注意報を標準のリードタイムで発表し、屋外活動や農作物の管理などにさらなる注意を呼びかけた。

なお、前日のGSM(5日00UTC 初期値)予想資料においても、6日は関東甲信地方で大気の状態が不安定となって広い範囲で雷雲が発達し、落雷や竜巻などの激しい突風や降ひょうが予想された。6日は連休中でもありレジャー等で外出する人が多く予想されること、また、午前中は関東地方南部を中心に晴れる予想で午後から天気急激な変化が予想されることを考慮し、顕著現象に対して早めに注意喚起する必要性が高いと考え、前日5日の16時30分に「雷と突風及び降ひょうに関する関東甲信地方気象情報 第1号」を発表し注意を呼びかけていた。

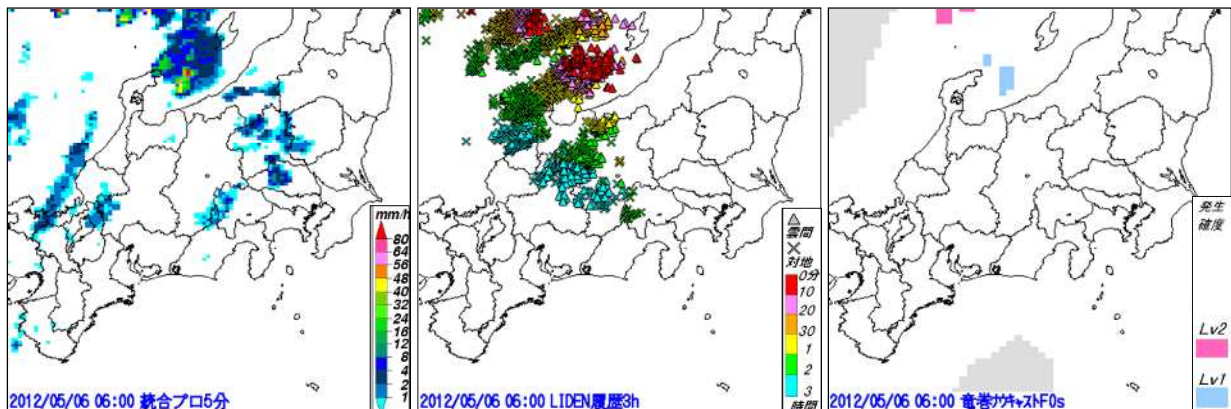
6日4時から5時の実況では、岐阜県にあったエコーは北東進を続け長野県と山梨県北部にかかり一部が群馬県、埼玉県に入り、発雷は継続しているが竜巻発生確度は0となっている(図略)。関東地方の南寄りの

下層風の強化は見られないため、この対流雲が竜巻を発生させるまでは発達しないと判断するが、引き続きエコーの発達の動向、南寄りの下層風の強化を監視する。

イ) 6日朝から昼予報発表時

地方予報中枢予報担当者は、実況が朝予報検討時に作成した予想シナリオ通りに経過しているか監視・解析し、予想シナリオと実際の現象の推移が異なり、別の顕著現象が発現する可能性が高いと判断した場合などには、適切なタイミングで随時の地方気象指示報や情報共有システムを用いた関東甲信地方予報打合せ(以下、関東甲信 TV 会議) または量的予報支援ツール(dboard)を用いて府県官署の支援を行う。

6時、関東地方での下層南風の強化は見られず、岐阜県から北東進し関東地方北部付近に進んだエコーは衰弱傾向で発雷もなくなり、その後も再発達することなく北東進した(第1.3.2.3図)。



第1.3.2.3図 各種実況図(6日06JST)

左図：レーダーエコー、中図：LIDEN履歴、右図：竜巻発生確度ナウキャスト

8時から10時の実況(第1.3.1.17図)では、新たに前項ウ)のとおりモデルで予想されていない発雷を伴う降水域が、下層シアアの暖気側(長野県から関東地方北部)にあって北東進しており、関東地方北部では滞留寒気が形成され始めたことが確認でき、関東地方平野部でシアアが強化される可能性がでてきた。このため、定時開催(10時)の関東甲信 TV 会議及び地方気象指示報では、総観場については現在まで予想シナリオどおり経過しており、基本的な考え方は変わらないものの、実況経過から朝予報時に考えていた予想シナリオとは別に、下層シアア前面の暖気側で朝予報検討時に危惧していたサブシナリオの現象が発現する可能性が高まってきたことから、関東地方平野部におけるシアアラインf付近での温度傾度強化に対して監視を強化し、11時予報では雨の降りだしのタイミングを早めにするなどの対応を行うよう指示した。

東京地方についても、シナリオの再検討を行い、11時予報では雨の降り出しを5時予報での「夜のはじめ頃」から1コマ早めて「夕方」からに変更して発表した。

ウ) 6日竜巻発生時

地方予報中枢予報担当者は、引き続き実況監視・解析を行い、府県官署が発表する警報・注意報等の発表状況・内容を把握して、必要に応じて防災気象情報関連作業の支援を行う。

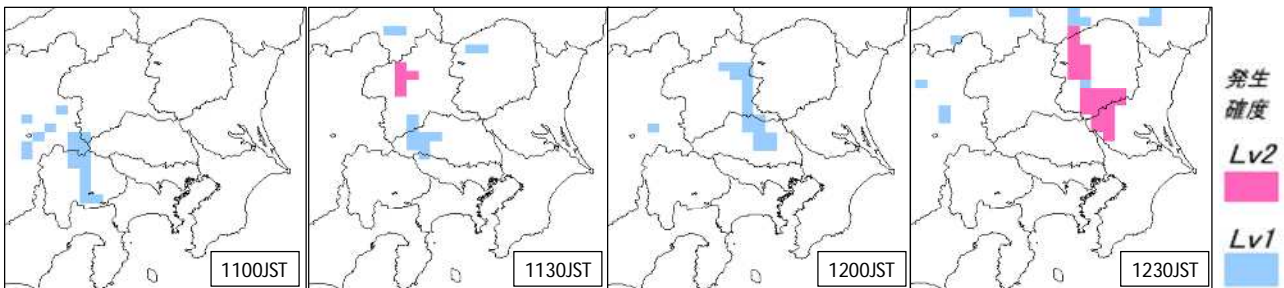
11時の実況(第1.3.1.17図)では、前項ウ)のとおり山梨県を東進する発達したエコーがこのまま東進し、埼玉県付近に形成されているモデルでは予想されていない温度傾度を伴ったシアアラインfに達すると、エコーがさらに発達することが予想されたため、サブシナリオを採用することとした。これに伴い、予想シナリオの再検討を行うことになるが、既に管内の府県官署では可能性のある現象についての注意報や気象情報については発表していることから、今後可能性のある短時間強雨の警報・注意報や竜巻注意情報等の発表の準備をしつつ、さらに実況監視を強化した。

11時30分には、発達したエコーが南北走向となって関東地方に進み、群馬県で竜巻発生確度レベル2が

出現し（第 1.3.2.4 図）、前橋地方気象台が竜巻注意情報第 1 号を発表し、その後 12 時前に宇都宮地方気象台が竜巻注意情報第 1 号を発表した。

12 時の実況（第 1.3.1.17 図）では、南北走向のエコーは東進を続け、関東地方平野部に形成されていた地上シアーライン付近でさらに発達し、埼玉・群馬県境付近にあるエコー頂高度は 14km を超え始めた（図略）

12 時 30 分には、このエコー周辺で広い範囲に竜巻発生確度レベル 2 が出現し（第 1.3.2.4 図）、栃木・茨城県境付近ではメソサイクロンが検出され（第 1.3.1.21 図）、水戸地方気象台でも竜巻注意情報第 1 号を発表した。その後も管内の府県官署において情報発表が適切に行われていることを確認しつつ、実況監視を継続した。



第 1.3.2.4 図 竜巻発生確度ナウキャスト実況（6 日 1100～1230JST）

エ）評価、考察

今回の事例では、前日 5 日の各種予想資料において翌 6 日午後に関東甲信地方の広い範囲で、落雷や竜巻などの激しい突風、降ひょうなどの顕著現象により災害が発生する可能性があるとして予想されていた。当日は連休中であることなども考慮し、竜巻キーワード付き府県気象情報発表基準を超過する府県においては府県気象情報を、また、複数県での顕著現象が予想されたことから地方気象情報を前日の夕方に発表し、早めに注意喚起を行うことができ、情報については適切に発表できたと評価できる。

当日 6 日の朝予報検討時に作成した予想シナリオでは、低気圧からのびるシアーラインが南下するタイミングでの顕著現象を予想していたが、実況ではシアーラインの暖気側において、発達したエコーの通過に伴い、予想より早いタイミングでの顕著現象が発生した。これについては、朝予報検討時に、サブシナリオとして考えていた現象である。過去事例から、関東地方北部で形成される滞留寒気の北風と関東地方南部からの暖湿流による南風との間で形成される局地的なシアー付近では雷雲発達による顕著現象が発生している。当日は、実況監視からこの現象を把握し、10 時開催の関東甲信 TV 会議や地方気象指示報などで府県官署に対して予報シナリオの修正を指示することができた。このような作業は、適確な防災情報対応や解説対応に結びつくと考えている。

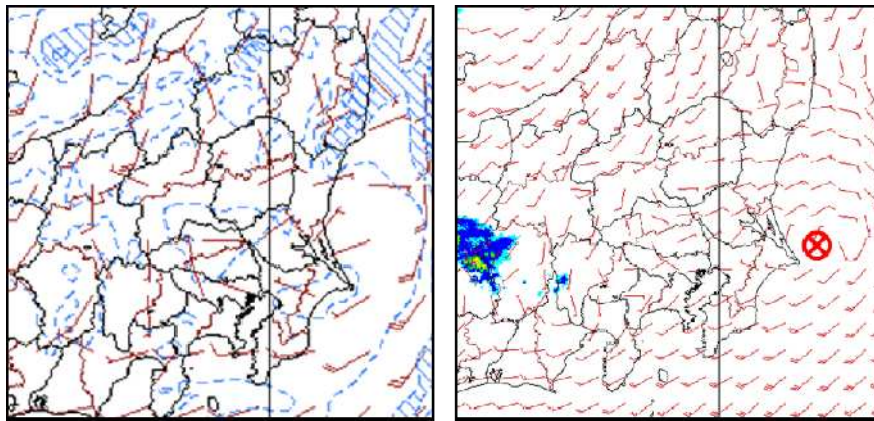
今回の甚大な竜巻災害発生を受け、気象庁では、より具体的な避難行動に対する呼び掛けの必要性を検討し、5 月 8 日以降発表する全ての気象情報において「竜巻」キーワードを用いる場合、防災事項に「発達した積乱雲の近づく兆しがある場合には、建物内に移動するなど、安全確保に努めてください」という文言を記述することとし、さらに府県気象情報においては、[補足事項等]で「竜巻注意情報」に留意するよう記述することとした。

また、今回の事例では、竜巻だけではなく落雷による人的被害も発生した。竜巻キーワード付き府県気象情報発表基準を超過しない場合でも、落雷や降ひょう発生のパテンシャルが高く、被害が予想されるような場合は、「雷と降ひょうに関する府県気象情報」を発表し注意を促す必要がある。

・宇都宮地方気象台*

ア) 6日朝予報検討時

GSM (5日 12UTC 初期値) の予想資料では、6日は500hPa面の高度5460-5580mで強い寒気(-21以下)を伴った明瞭なトラフ(以下、トラフという)が接近・通過し(第1.3.1.6図)、トラフ前面の850hPa面では本州の太平洋側を中心に南から暖かく湿った空気の流入が強まる予想で(第1.3.1.7図)、6日は大気の状態が非常に不安定となることが予想されていた。こうした不安定場の中、南風と北西風の地上シアラインが、6日午後栃木県内を通過する予想であった(第1.3.1.11図)、この地上シアラインは、下層(925・850hPa)においてもシアー及び温度傾度を伴っており(第1.3.1.12図)、GSMでは6日昼過ぎから夜のはじめ頃にかけて、MSMでは6日昼過ぎから夕方にかけて栃木県内を南下する予想となっていた(第1.3.1.13図)、6日03時の実況と比較すると、GSM・MSM(5日15UTC初期値)ともに、山陰沖の低気圧から地上シアラインが対馬海峡にのびており、実況と一致している(第1.3.1.14図)、925hPa毎時大気解析(第1.3.2.5図)から関東地方の局地風系をみると、銚子市付近に低気圧性循環が解析され栃木県には湿った東風が入っている。この東風はMSMでは予想されているが、GSMでは予想されていないため、MSMの地上シアライン(第3.1.1.13図)及び下層シアー(図略)の予想を参考に、降水のピークをシアーが南下する6日昼過ぎから夕方とし予想シナリオを組み立てた。

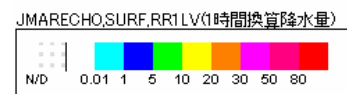


第1.3.2.5図 925hPa 予想及び実況図(6日03JST)

左図：風・湿り予想 (MSM5日15UTC初期値) 凡例は第1.3.1.12図に同じ。

右図：毎時大気解析・レーダーエコー、矢羽根は第1.3.1.14図に同じ。

⊗：低気圧性循環中心。



GSM (5日 12UTC 初期値) の突風関連指数においては、CAPE が 2000 J/kg を、SREH が 300 m²/s²、EHI も 3 J・m²/kg・s²、SWEAT も 500 近い数値を予想し、当台における竜巻キーワード付き府県気象情報発表の判定結果でも竜巻判定有り(第1.3.2.6図)となっていた。また、地方気象指示報では、雷は SSI マイナス領域と降水予想を参考に検討し、竜巻キーワードについては、平衡

栃木県		突風関連指数ビューワ							
GSM Initial : 2012/05/05 12:00 UTC									
GSM指数図	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1	PAGE1
FT	ft03	ft06	ft09	ft12	ft15	ft18	ft21	ft24	ft27
JST	6/00	3	6	9	12	15	18	21	24
EL (hPa)	326	385	592	302	243	240	254	487	
CAPEm	234	92	21	475	1885	2240	1990	416	
SREH	136	142	228	276	302	238	174	110	
EHI	0.15	0.07	0.03	0.69	2.49	3.22	2.67	0.31	
VGP	0.065	0.062	0.05	0.124	0.286	0.298	0.236	0.103	
SSIm	-1.3	-1.7	-1.3	-1.6	-3.2	-5	-4.5	-1.4	
SWEAT	246	273	333	414	443	488	411	286	
TVP (m/s)	14.3	11.9	9.9	17.2	20.1	21.2	18.2	10.6	
VORsfc	0	-1	6	25	111	151	150	62	
DCAPE	831	792	742	734	810	760	702	681	
EPTdif	9.7	9.5	8	11.2	19.9	21.2	18.6	12.3	
竜巻判定	×	×	×	○	○	○	○	×	

第1.3.2.6図 突風関連指数の宇都宮地方気象台判定結果

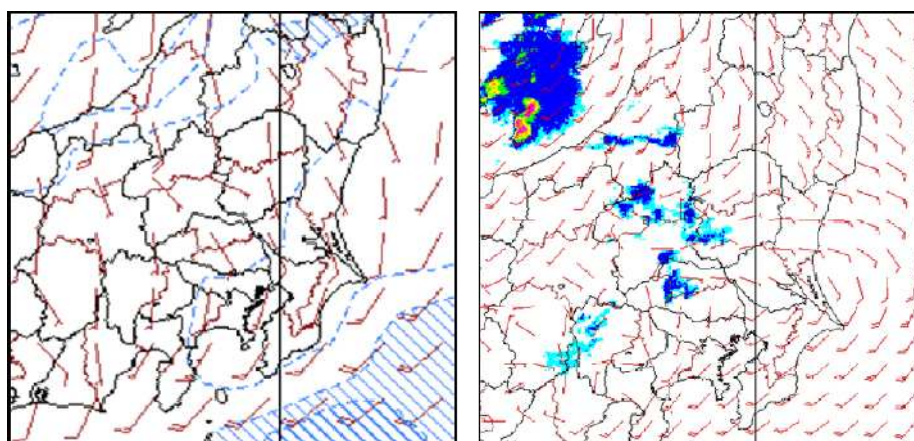
6日00~21JST 予想 (GSM 5日12UTC 初期値)

*大桃定次、斎藤祐司、藤掛 洋、石川治美、岸 啓二 (宇都宮地方気象台技術課)

高度(EL)が250hPaで発達した雷雲が予想されることから、各地基準に照らして検討する旨、指示がされた。このことから地方中枢と調整して、05時24分に「雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報第2号」を発表し、6日昼過ぎから夕方にかけて、落雷や竜巻等の激しい突風、降ひょうなどに注意するよう呼び掛けた。また、リードタイムを十分確保し、06時06分に竜巻キーワードを付加した「雷注意報」を発表した。なお、前日5日夕方(17時)予報検討時においても、GSM・MSM予想資料などから、雷や竜巻などの激しい突風の発生ポテンシャルは高いものと判断し、5日夕方には「雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報第1号」を発表して、注意を呼び掛けていた。

イ) 6日朝から昼予報発表時

06時925hPa実況(第1.3.2.7図)では、湿った東風が内陸に入り続けているのに加え、関東地方南部では南西風が卓越し始めているため、群馬県が下層収束場となっている。また、東海地方から北東進してきたエコーが群馬県や栃木県に進入してきたが発達傾向はない。MSM予想では、この時間には関東地方で南西風が卓越する場で、関東地方北部には東風が予想されていないことから、このまま下層収束場が維持されると、降水強化のタイミングが早まる可能性がある。エコーが発達した場合には、「竜巻発生確度ナウキャストと突風判定に特段の注意をはらって作業するように。」との引き継ぎがあった。



第1.3.2.7図 925hPa 予想及び実況図(6日06JST)

左図：風速・湿り予想(MSM 5日15UTC初期値) 右図：毎時大気解析、レーダーエコー
凡例は第1.3.2.5図に同じ。

09時の925hPa実況(図略)では、関東地方北部の東風は解消して南西風卓越の場となり、地上局地解析(第1.3.1.17図)では、茨城県沿岸部には東風が入っていたが、関東地方南部には南から暖かく湿った空気が入り始めていた。06時に群馬県を中心に見られたエコーは消散したが、南北にのびるエコーが長野県から北東進して群馬県付近に達しており、長野県では発雷を伴っていた(第1.3.1.19図)。このエコーについても、モデルでは予想されておらず、引き継いだ朝予報シナリオより更に1時間ほど早く発達したエコーが栃木県にかかり始める可能性が出てきた。竜巻などの激しい突風が、南下する地上シアラインより先に、西から進入してくる発達した対流雲により発生する可能性があり、激しい突風の発生するおそれのあるタイミングが早まるというサブシナリオを準備する必要がある。

10時には発雷を伴ったエコーが群馬県内を北東進し、その西側の長野県には、南北にのびるエコーが形成されて、発雷を伴いながら東進し始めていた。発雷を伴ったエコーが、11時には栃木県内に進入することが予想されることから、サブシナリオを採用し、昼前からEHIやCAPE等の指数が高いことを再度確認し、竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い時間帯を「昼前から」に変更した。さらに西側から発雷を伴った

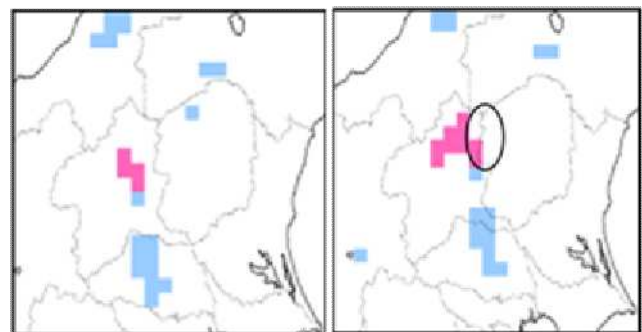
エコーが東進していたことから「夕方まで」はそのままとした。

ウ) 6日竜巻発生時

以下で説明するレーダーエコーの動きや地上局地解析、発雷の状況については、第 1.3.1.17 図と第 1.3.1.19 図に示す。

11 時には群馬県を北東進するエコーが栃木県内にかかり始めるとともに、先行するエコーよりもさらに活発な発雷を伴うエコーが甲信地方から関東地方に入り始めた。関東地方南部で地上南風が強化されて、埼玉県から栃木・茨城県境付近にかけて温度傾度を伴った地上シアーラインが顕在化していることなどから、関東地方に進入したエコーは地上シアーライン付近でさらに発達する可能性があると考えた。12 時前には、先行するエコーは栃木県北部を抜けてつあったが、後続の発達したエコーが栃木県に接近し、レーダー・LIDEN や竜巻発生ナウキャストの動向を監視していた所、ADESS による突風報知があった。竜巻発生確度ナウキャスト(第 1.3.2.8 図)では栃木県内には確度 2 はなく、10 分後の予想であった(第 1.3.2.8 図の黒丸内)が、レーダー実況から今後栃木県内に発達したエコーが入ると判断し、同 54 分に「竜巻注意情報第 1 号」を発表した。

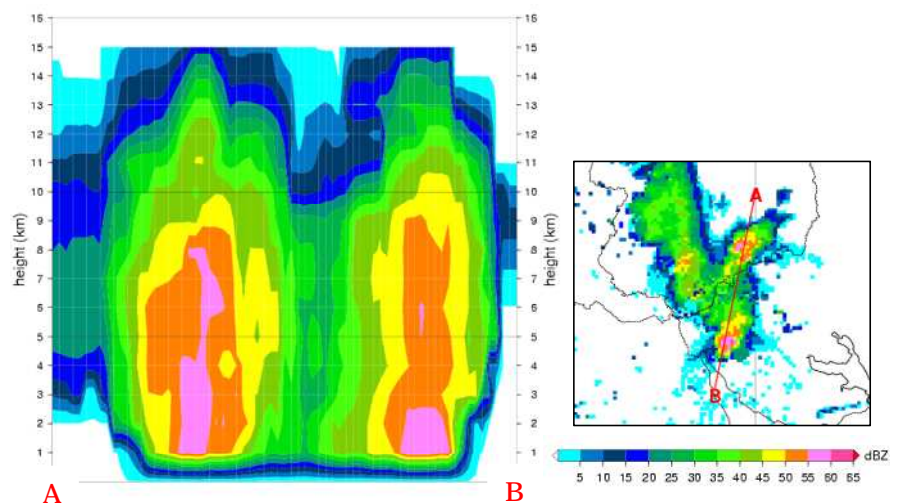
12 時には群馬県側から栃木県内にエコーが進入してきたことから、予想シナリオに沿って大雨警報や突風及び降ひょうの発生等を視野に入れながらの実況監視を続けていた。12 時 00 分の LIDEN 実況で栃木県内の広い範囲で雷を観測し、12 時 10 分宇都宮気象台の目視観測でも雷を観測した。群馬・埼玉



第 1.3.2.8 図 竜巻発生確度ナウキャスト(6日 1150JST)

左：1150JST 実況、右：10 分後予想(1200JST)

県境付近から接近した発達したエコーは、栃木・茨城県境のシアーライン付近でさらに発達し、12 時 30 分のレーダーエコー断面図(第 1.3.2.9 図)で見てもエコー頂高度が高く(15km 以上)この雷雲の下では大雨や突風及び降ひょう等の激しい気象現象が発生していることが推測された。12 時 48 分には再び突風報知があり、同 50 分に竜巻注意情報第 2 号を発表した。この雷雲は移動速度が速く、13 時 30 分には栃木県内を通過して、福島・茨城県に進入した。



第 1.3.2.9 図 断面図(6日 1230JST)

左：レーダーエコー-CAPPI 高度 1km 画像、右：A-B 間断面図

エ) 評価、考察

当日朝の予報検討時においては、寒気を伴ったトラフの接近と下層暖湿気流入による不安定場が予想される中、前日夕方の予想と同様に突風関連指数を用いた当台の竜巻キーワード付き府県気象情報発表判定結果でも、竜巻などの激しい突風の発生する可能性が高いと判断した。竜巻発生可能性の高い時間帯としては、

地上シアーライン通過時を考えたが、毎時大気解析などの実況から GSM よりも MSM の予想が妥当と判断し、地上シアーラインの県内通過を 12 時から 18 時の間と考えた。その結果、6 日昼過ぎから夕方にかけて、落雷や竜巻等の激しい突風、降ひょうなどに注意するよう呼び掛ける「雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報第 2 号」を公表した。また、リードタイムを十分確保し、06 時 06 分に竜巻キーワードを付加した「雷注意報」を公表した。その後は、レーダー実況や下層風実況の監視、地上局地解析などを用いて、予想シナリオ以外の現象発現に留意しながら実況監視を行ったが、モデルでは予想されていないエコーの接近を把握することで、シナリオより更に 1 時間ほど早く発達したエコーが栃木県にかかり始める可能性が出てきたため、「竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い時間帯が昼前から早まる」というサブシナリオを準備し、エコーの動向を監視した。着目したエコーは、発雷を伴いながら順調に栃木県に接近していたことからサブシナリオを採用し、予想シナリオの「竜巻などの激しい突風が発生する可能性が高い時間帯」を昼前から夕方に変更した。後続にもさらに活発に発雷するエコーが接近し、こうしたエコーが関東地方に発生したシアーライン付近でさらに発達すると、竜巻発生の可能性が高まることも想定し、レーダー・LIDEN の実況や竜巻発生ナウキャストの動向を注意深く監視しながら、情報等の対応に備えることとした。

11 時 54 分に公表した「竜巻注意情報第 1 号」は、竜巻を発生させたエコーよりも先行して栃木県内に進入したエコーの発達に対応して発表されたものであるが、竜巻は竜巻注意情報の発表後 1 時間以内に発生した。竜巻は 6 日昼過ぎに発生したが、府県気象情報で注意を呼び掛けた期間内で発生しており、朝予報時に作成したシナリオと実況監視にもとづくサブシナリオによって作業を進めることで、竜巻発生以前に注意を呼び掛けることができ、適切な防災気象情報発表につながった。

今回のように、竜巻などの顕著現象に対し適切に備えるためには、モデル等の予測資料や知見に基づくシナリオを用意し、その後の実況監視においては実況とモデル間の時間的・量的なズレを把握し、サブシナリオを用意して、実況の変化に的確に対応することが重要で、そのことが適切な防災気象情報の発表につながると考える。

第 1.3.2.1 表 注意報・気象情報等発表状況一覧表

発表日	時刻	標 題
平成 24 年 5 月 5 日	17 時 08 分	雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報 第 1 号
平成 24 年 5 月 6 日	5 時 24 分	雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報 第 2 号
平成 24 年 5 月 6 日	6 時 06 分	雷、強風注意報
平成 24 年 5 月 6 日	10 時 44 分	大雨、雷、強風注意報
平成 24 年 5 月 6 日	11 時 54 分	栃木県竜巻注意情報 第 1 号
平成 24 年 5 月 6 日	12 時 50 分	栃木県竜巻注意情報 第 2 号
平成 24 年 5 月 6 日	14 時 11 分	栃木県竜巻注意情報 第 3 号
平成 24 年 5 月 6 日	15 時 11 分	栃木県竜巻注意情報 第 4 号
平成 24 年 5 月 6 日	17 時 02 分	雷と突風及び降ひょうに関する栃木県気象情報 第 3 号
平成 24 年 5 月 6 日	19 時 38 分	大雨、雷、強風注意報（解除）

・水戸地方気象台*

ア) 6日朝予報検討時

GSM (5日12UTC初期値) 予想資料では、6日午後に500hPaで寒気(-21以下)を伴ったトラフ(以下、トラフとする)の通過を予想していた。地上では、これに対応して南風と北西風の地上シアラインが東北・関東地方北部から南東進し、6日夕方から7日未明にかけて県内を通過する予想で、対応する降水域も6日夕方から7日未明には県内を通過する予想となっていた(第1.3.1.11図)。

地上シアライン周辺はSSIが-3以下で安定度が悪く(第1.3.1.9図)、発雷確率(POT)も高かった(図略)。MSM(5日15UTC初期値)でも同様の予想をしており(第1.3.1.13図)、この地上シアラインが通過する前後で雷雨の可能性が高いと考えた。日中の500hPaの気温は-20前後、6日の水戸の予想最高気温は26で、500hPaの気温と地上の気温差からも大気の状態は非常に不安定であると予想した。また、GSMでは、この地上シアラインが接近する前の昼前に、暖気の流入に伴い千葉県から茨城県内に北上する降水域の予想があった(第1.3.1.11図)。この降水域については、地方気象指示報ではモデル特性により降水が過大となっている可能性が高い旨述べられていたが、925hPaの湿り域が流入すること、昼前にはSSIマイナス域が広がり、POTが高いことなどから、モデルでは予想されていない強雨域の発生をサブシナリオとして考え、昼前から雷雨の可能性があると考えた。突風関連指数をみると、ELの高度が250hPaと高く、CAPEの値が大きいことから(第1.3.1.15図)、高度10km程度まで立ち上がる、強い上昇流を伴った対流雲が発生することが考えられる。また、関東地方の他県の降ひょう発生の知見(今井,2008;金子・阪田,2004;坂間・土田,2004)からも、降ひょうの可能性も高いと考えた。

これらのことから、朝予報は、前日5日夕方の予報発表時と同様に雷を付加し、雷の期間は昼前から7日未明までとした。

竜巻キーワードの付加については、前日5日の日勤者から、突風関連指数が当台における竜巻キーワード付き府県気象情報発表の基準(EL 300hPaかつCAPE 900J/kg)を超えているが対応する降水が弱く確度が低いので、朝予報時に発表を再検討するように引き継ぎを受けていた。朝予報発表時の突風関連指数でも、当台における基準を超えており、府県気象情報発表を検討した。各指数をみると、ELが200~250hPa、CAPEが2000J/kgを超え非常に大きな値となっている他、EHIがGSM(5日12UTC初期値)で最大3.37 J/kg、MSM(5日15UTC初期値)で最大2.95 J/kgと竜巻などの激しい突風発生のポテンシャルが非常に高いことを示していた。また、前日5日夜に栃木・福島県の茨城県境付近で竜巻発生確度2が立ち上がり、6日はさらに安定度や突風関連指数の予想が悪くなっていることも考慮し、府県気象情報を発表する必要があると判断した。

GSM・MSMの両モデルでは500hPaトラフに対応して夕方に強雨のピークを予想していることから、竜巻等のシビア現象もこのタイミングで発生する可能性が最も高いと考えたが、突風関連指数のCAPEやEHI等の指数は6日昼前から高い値を示しており、トラフに対応する降水の前面にCAPEやEHIの極大があることから(第1.3.1.15図)、昼前からはモデルで予想されない降水域の発生により竜巻等の激しい突風が発生する可能性もあると考えた。

以上の予想シナリオに基づき、05時35分に「雷と突風及び降ひょうに関する茨城県気象情報 第1号」を発表し、6日昼前~7日未明にかけて落雷や竜巻などの激しい突風、降ひょうに注意するように呼びかけた。その後、05時47分に竜巻と降ひょうを付加して雷注意報を発表した。

今後の実況監視においては、GSMで予想されていた南からの暖気流入の強まりによる降水域の発生や発達に加え、トラフ前面の不安定域におけるモデルでは予想されていないエコーの発生についてもサブシナリオ

*小山 隆夫、渡辺 記秀(水戸地方気象台技術課)

として監視を行う必要がある。

イ) 6日朝から昼予報発表時

11 時予報作成にあたり、500hPa トラフと地上シアラインが予想通り動いているかを確認した。500hPa トラフは 00UTC で対馬海峡付近に予想されており、水蒸気画像(第 1.3.2.10 図)でも、対馬海峡付近にトラフが解析された。また、地上シアラインは山陰沖に予想されており、実況でも山陰沖に解析されていたことから、シナリオ通りに進んでいることを確認した。

09 時地上局地解析(第 1.3.1.17 図)では、茨城県沿岸部には東風が入っていたが、関東南部には南から暖かく湿った空気が入り始めていた。GSM で予想されていた千葉県から茨城県に北上する降水域はみられず、引き続きエコーの発生に注意することとしたが、長野県から群馬県方面に北東進しているモデルで予想されていない発達したエコーが見られることから、サブシナリオとしての実況監視の重点をトラフ前面の不安定域に対応するエコーの監視に変更し関東地方の西部から甲信地方のより広い範囲でのエコーの動向に注視することとした。

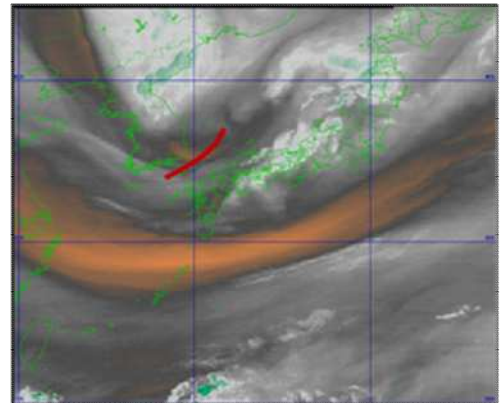
10 時の実況では(第 1.3.1.17 図)、群馬県方面のエコーは北東進中で、茨城県への影響はないが、群馬県で滞留寒気が形成され始め、埼玉県付近のシアを強化する可能性が出てきた。また、下層暖湿気流入場で、モデルでは予想されていないライン状のエコーが長野県南部で明瞭化してきたことから、甲信地方の発達したエコーや局地シア付近の動向に実況監視を強化した。

ウ) 6日竜巻発生時

11 時の実況では(第 1.3.1.17 図)、山梨県付近までライン状のエコーが接近してきた。茨城・栃木県境付近から埼玉県にかけては、北寄りの風と南風との地上シアラインが顕在化した。シアラインの南側には暖かく湿った空気が入り(シアライン南側の館野における 11 時の気温は 23.5、湿度は 65%)、シアライン付近では温度傾度が大きくなっていった。シアライン付近にエコーが進入すると、上昇流によって対流活動が強化されてエコーがさらに発達することや、シアライン付近の地上渦度極大域により竜巻発生の可能性が高まることも予想されることから、エコーの動向・発達及び地上シアラインの位置やシアライン南側の温度場に注目して実況監視を強化した。

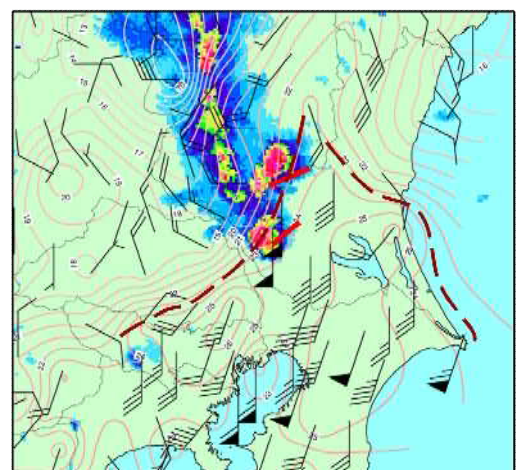
12 時の実況では(第 1.3.1.17 図)、南北に連なったライン状のエコーが、埼玉県側から急速に北東進していた。エコーは、北寄りの風と南寄りの風の地上シアラインに重なると発達をはじめ、シアライン付近ではさらに温度傾度が大きくなった。その後、エコーの東進とともにシアラインも東進し、茨城県内の竜巻発生地点付近でさらに発達した(第 1.3.2.11 図)。

竜巻発生確度ナウキャスト(第 1.3.2.4 図)では、このエコーに伴う竜巻発生確度レベル 1 が継続しながら東進してきており、群馬県ではレベル 2 も発生していた。エコーは、埼玉・茨



第 1.3.2.10 図 水蒸気画像(6日 09JST)

茶色線：トラフ



第 1.3.2.11 図 局地解析図

(6日 1230JST)

赤線：竜巻被害発生地域。

茶破線：地上シア。

城県境付近の地上シア一近傍で急速に発達し、竜巻発生確度がレベル2となり、突風報知が立ち上がり、12時38分に竜巻注意情報を発表した。

工) 評価、考察

朝予報発表時には、トラフの前面での不安定の増大や地上シアラインの通過に伴う下層収束の強化などから雷雨や竜巻等の激しい突風が発生する可能性は6日夕方が最も高い時間帯と考えたが、GSMの降水の予想では南からの暖気流入に伴う降水が6日朝から昼前にかけて関東地方南部の沿岸から関東地方に広がってくる予想となっていたこと及びEHI等の突風関連指数で昼前から竜巻発生のポテンシャルが高くなることを示していたことから現象の発現は夕方よりは数時間早くなる〔具体的には2コマ、6時間程度〕可能性もあると考えて、5時36分に発表した府県気象情報では昼前から落雷、竜巻などの激しい突風、降ひょうに注意するように呼びかけた。

この日の顕著現象については、前日の段階から現象の発現を予想したシナリオが用意されており、6日朝予報の検討時にもおおむね想定されたシナリオの通り実況が経過していたことから、前日までのシナリオは大きく修正することなく、サブシナリオとして現象の発現するタイミングとその強度について、モデルで予想されていた南からの暖気流入の強まりや降水域、トラフ前面の不安定域におけるモデルでは予想されていないエコーの発生と移動などに着目しつつ実況の監視を強め、情報等の対応に備えることとした。

府県気象情報の発表後も実況の経過に注視していたが、実際には南から流入する降水域はGSMで予想されていたタイミングになっても現れる兆候がなかったことから、着目するポイントのひとつとして監視は続けるものの、サブシナリオとして用意した実況監視の重点をトラフ前面の不安定域に対応するエコーの監視に移し、茨城県付近だけでなく実況監視の対象範囲を関東地方の西部から甲信地方のより広い範囲でのエコーの動向に注視することとした。

9時の実況ではモデルの予想よりも早く長野県から山梨県にかけて対流性のエコーが現れ、時間を追って発達、組織化しつつ東進する状況を確認したことから、その後もシナリオ及びサブシナリオに沿って作業を進めた。

結果的には、現象が最も激しくなると予想された6日夕方より早い昼過ぎに県西部でエコーは急速に発達し、竜巻が発生したが、府県気象情報で注意を呼びかけた期間内で発生している。朝予報の段階で想定したシナリオ〔今回の事例では、前日の段階で用意されたものとほぼ同じシナリオ〕及び実況監視に重点を置いたサブシナリオで想定した範囲内の現象の経過であり、段階的に適切な防災気象情報を発表することができた。

現在の予測技術では、竜巻などの激しい突風をもたらす積乱雲の予測は、MSMでも十分な予測精度が得られるわけではないため、実況監視に基づく作業が必須となっている。そこで、顕著現象に関して適切に防災気象情報を発表するためには、モデル等の予測資料や知見に基づくシナリオを用意し、モデルで予想された収束や渦度、前線や地上シアライン等の動向を実況監視によつて的確に把握する。また、実況がシナリオとは異なった状況に変化した場合には、サブシナリオを用意するなどしてエコーの盛衰や移動などの推移をいち早く詳細に把握、予測することが重要である。

第 1.3.2.2 表 警報・注意報・気象情報等発表状況一覧表

発表日	時刻	標 題
平成 24 年 5 月 6 日	05 時 35 分	雷と突風及び降ひょうに関する茨城県気象情報 第 1 号
平成 24 年 5 月 6 日	05 時 47 分	雷、強風、波浪注意報
平成 24 年 5 月 6 日	12 時 34 分	大雨、雷、強風、波浪、洪水注意報
平成 24 年 5 月 6 日	12 時 38 分	茨城県竜巻注意情報 第 1 号
平成 24 年 5 月 6 日	13 時 54 分	茨城県竜巻注意情報 第 2 号
平成 24 年 5 月 6 日	15 時 10 分	茨城県竜巻注意情報 第 3 号
平成 24 年 5 月 6 日	15 時 25 分	大雨、洪水警報 大雨、雷、強風、波浪、洪水注意報
平成 24 年 5 月 6 日	16 時 06 分	茨城県竜巻注意情報 第 4 号
平成 24 年 5 月 6 日	16 時 14 分	大雨、洪水警報 大雨、雷、強風、波浪、洪水注意報
平成 24 年 5 月 6 日	17 時 04 分	大雨、洪水警報 大雨、雷、強風、波浪、洪水注意報
平成 24 年 5 月 6 日	17 時 13 分	大雨と雷及び突風に関する茨城県気象情報 第 2 号
平成 24 年 5 月 6 日	17 時 19 分	茨城県竜巻注意情報 第 5 号
平成 24 年 5 月 6 日	18 時 19 分	大雨警報 大雨、雷、強風、波浪、洪水注意報
平成 24 年 5 月 6 日	20 時 47 分	大雨、波浪注意報
平成 24 年 5 月 6 日	21 時 04 分	大雨と雷及び突風に関する茨城県気象情報 第 3 号
平成 24 年 5 月 6 日	23 時 18 分	波浪、高潮、濃霧注意報

1.3.2.2 災害後の対応について*

平成 24 年 5 月 6 日 12 時 30 分から 13 時過ぎにかけて茨城県及び栃木県において広範囲で複数の竜巻が発生した。この竜巻の通過域では、1 名の死者・50 名以上の負傷者及び 2000 棟以上の建物（住家・非住家）被害が発生した（第 1.3.2.12 図）。

水戸及び宇都宮地方気象台は、災害発生の数時間後には地元自治体や報道から第 1 報を入手し、東京管区気象台（以下管区気象台）へ情報共有を図るとともに独自に被害状況を収集した。被害が広域に及んでいたことに伴い翌日からの調査準備を管区気象台の支援を受けながら実施し、7 日は銚子地方気象台の応援を得て 5 班、8 日は熊谷地方気象台及び管区気象台の応援を得て 4 班体制で現地調査を行った。特に 7 日のつくば市における調査は、前日から情報収集していた気象研究所と連携して行い、要員は 13 名の大人数に及んだ。

こうした現地調査等によって被害域は第 1.3.1.1 図のような三つの帯状分布であったことが判明し、被害をもたらした突風はいずれも竜巻と評定した。それぞれの被害域延長は 20～30km に達する長大なもので、特に栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市の延長は 32km と長く、1961 年以降では 1978 年（同約 40～42km、東京メトロ地下鉄東西線電



第 1.3.2.12 図 つくば市北条地区での被害を受けた住宅等

*出口 眞一（東京管区気象台技術部気候・調査課）

車の横転)に次いで2番目に長いものであった。また、竜巻が日中に市街地を通ったことから、写真や映像が数多く報道又はインターネットに配信された。第1.3.2.13図は、つくば市の一般市民が携帯電話で撮影した写真である。こうした状況を受け、突風発生、それからの避難や気象情報に対する社会的な関心が高まった。

東京管区气象台では、被害が広範囲にわたる場合等には担当官署に隣接する官署と共同で調査を実施できるよう実施要領「地方气象台が実施する気象災害時における現地調査の実施と現地災害調査速報の作成・発表に関する実施要領」で定めている。今回これまでにないほどの広範囲での調査を短期間で完了できたのは、こうした広域応援の仕組みのあったことが大きい。また、栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市の調査では頻りに報道機関から取材を受けたが、対応窓口を一元化したこと、調査中であってもその旨を伝えた報道参考資料を公表したことなどによって概ね適切に対応することができた。

なお、管区气象台、水戸及び宇都宮地方气象台で公表したすべての報道発表資料や現地災害調査速報については、第1.3.2.3表に示した。

一方、茨城県及び栃木県の被災地では住家等建物に甚大な被害が及んだことから早急の復旧が望まれた。このため両地方气象台では、8日から9日にかけて被災自治体及び県に対し、復旧作業支援のための気象情報提供(市町村別)について打診をした。自治体の一部から“きめ細かな防災気象情報を入手したい”との要望を受けたことから、情報作成の準備を急遽行い、同9日11時には「復旧担当者・被災者向け気象支援資料」の提供を開始した。各地方气象台及び気象庁のホームページを用い、市町村単位での天気解説、天気の時系列情報や天気分布予報を内容として1日3回の頻度で更新するものである(第1.3.2.14図)。さらに11日からは「竜巻ポータルサイト」を同ホームページ内に開設し、これら最新の天気情報のみならず竜巻に関する情報を使い方や竜巻から身を守るための知見、竜巻資料を公開している。



第1.3.2.13図 つくば市北条地区の竜巻 (つくば市在住の方撮影)

復旧担当者・被災者向け気象支援資料 (茨城県つくば市)
平成24年10月18日 11時00分

茨城県の天気解説

今日は、前線や気圧の谷の影響が残る見込みです。このため、茨城県は、雨時々曇りでしょう。

<天気変化等の留意点>
今日は、海上では波が高く、満潮時を中心に潮位が高いでしょう。海岸での作業等には注意して下さい。

つくば市付近の天気

日 / 気温	18日 / 日中の最高20℃				19日 / 朝の最低13℃			
時	12-15時	15-18時	18-21時	21-24時	0-3時	3-6時	6-9時	9-12時
天気	☁	☁	☁	☁	☁	☁	☁	☁
3時間雨量(ミリ)	5~9	1~4	1~4	1未満	0	0	0	0
気温(℃)	20	19	16	15	14	14	13	16
風向	←	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
風速(m/s)	4	5	6	8	8	8	8	10

風向：0m/s 1-4m/s 5-9m/s 10m/s以上
気温は各時間帯の初めの時間の予想値です。例えば18-21なら18時の予想値です。

週間天気予報 (茨城県 気温：水戸)

日	19日(金)	20日(土)	21日(日)	22日(月)	23日(火)	24日(水)	25日(木)
天気	曇後晴	晴時々曇	晴時々曇	曇時々晴	曇	曇時々晴	晴時々曇
降水確率(%)	30/20/10/10	20	20	30	40	30	20
最高気温(℃)	18	20	22	21	22	21	20
最低気温(℃)	12	9	10	11	14	11	9

降水確率の1日目は、0-6/6-12/12-18/18-24時です。

問い合わせ先 水戸地方气象台技術課 (029-224-1105)

第1.3.2.14図 復旧担当者・被災者向けの気象支援資料

第 1.3.2.3 表 報道発表資料、現地災害調査速報 対応状況

期日	対応事項
5月7日(月)	【JMA-MOT派遣】[水戸地方気象台・宇都宮地方気象台] (調査応援) 気象研究所、銚子地方気象台 茨城県常総市、つくば市、筑西市、常陸大宮市 栃木県真岡市、益子町、茂木町
	【気象庁報道発表】平成24年5月6日に茨城県つくば市付近で発生した突風について 竜巻であると推定 【現地報道発表】[水戸地方気象台] 平成24年5月6日に茨城県筑西市、常陸大宮市で発生した突風について (気象庁機動調査班による現地調査の報告) 特定には至っていない旨報告
	【現地報道発表】[宇都宮地方気象台] 平成24年5月6日に栃木県真岡市付近で発生した突風について (気象庁機動調査班による現地調査の報告) 竜巻である可能性が高いと判断
5月8日(火)	【JMA-MOT派遣】[水戸地方気象台・宇都宮地方気象台] (調査応援) 東京管区気象台、熊谷地方気象台 茨城県筑西市、桜川市、常陸大宮市 栃木県真岡市、益子町、茂木町
	【現地報道発表】[水戸地方気象台] 平成24年5月6日に茨城県筑西市から桜川市にかけて発生した突風について (気象庁機動調査班による現地調査の報告) 竜巻である可能性が高いと判断
	【現地報道発表】[宇都宮地方気象台・水戸地方気象台] 平成24年5月6日に栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市にかけて発生した突風について (気象庁機動調査班による現地調査の報告) 竜巻であると推定
5月9日(水)	[水戸地方気象台・宇都宮地方気象台] 突風による被災者・復旧担当者支援情報のホームページ掲載、トップページデザイン変更
5月10日(木)	東京管区気象台ホームページ 竜巻関連リンク掲載
5月11日(金)	【気象庁報道発表】平成24年5月6日に発生した竜巻等について(中間報告) 【気象庁報道発表】平成24年5月6日に茨城県つくば市付近で発生した竜巻について ～気象研究所ドップラーレーダー及び気象環境場の解析・高解像度モデルでの再現実験結果～ 気象庁ホームページ「竜巻ポータルサイト」開設 現地災害調査速報公表[水戸地方気象台・東京管区気象台] 平成24年5月6日に茨城県筑西市から桜川市にかけて発生した突風について 現地災害調査速報公表[水戸地方気象台・東京管区気象台・気象研究所] 平成24年5月6日に茨城県常総市からつくば市にかけて発生した突風について 現地災害調査速報公表[宇都宮地方気象台・水戸地方気象台・東京管区気象台] 平成24年5月6日に栃木県真岡市から茨城県常陸大宮市にかけて発生した突風について

参考文献

今井良彰(2008): 降雹予測指標の検証と改善について-2007年の事例による指標の再検討-. 平成19年度東京管区調査研究会誌、40.

金子功、 阪田正明(2004): 農業気象災害軽減のための雹害調査(第2年度). 平成15年度東京管区調査研究会誌、36.

坂間智子・土田正夫(2004): 栃木県の雹害について 農業災害の軽減にむけた調査研究. 平成15年度東京管区調査研究会誌、36.

1.3.3 竜巻の解析とメカニズム*

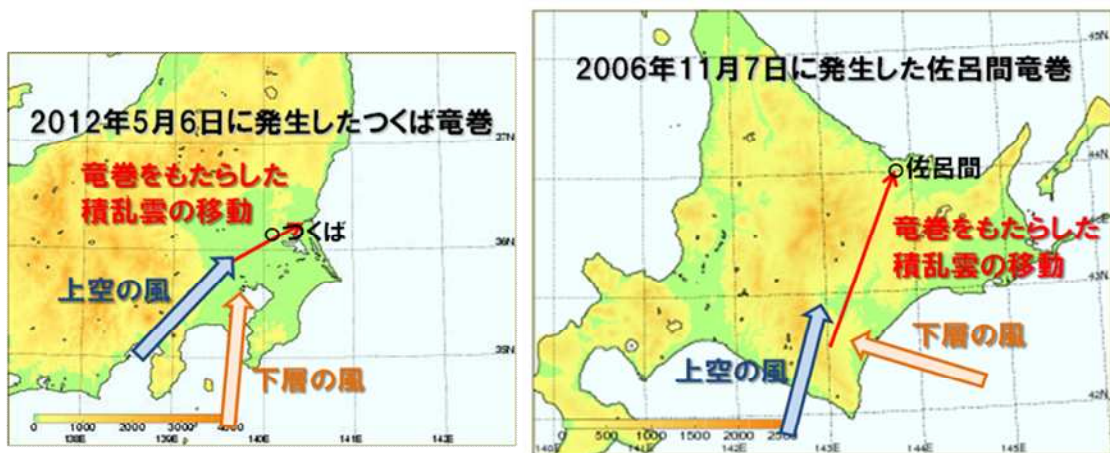
2012年5月6日の茨城県・栃木県で発生したケースのように藤田スケールでF2~F3といった強い竜巻は積乱雲の一種スーパーセルにともなって発生することが多い。それは、スーパーセルには強い鉛直渦度(0.01/s以上)を持つメソサイクロンが存在し、それともなって下層に作り出される強い上昇流(10m/s以上)が地表付近に作られる別の渦を強力に上空に引き伸ばして竜巻が発生するためである。そのようなスーパーセルが発生するには、強い上昇流を持つ積乱雲が発達しやすいこと

(対流有効位置エネルギーCAPEが大きいこと)に加えて、積乱雲中にメソサイクロンを作り出す風の場の条件が必要不可欠である。その条件は、下層の風が強くて風向が上空に向かって時計回りに回転していることで、指数化されたものがヘリシティ(SREHなど)である。また、その2つの条件を掛け合わせたものがEHI(Energy Helicity Index)であり、第1.3.1項で述べられているように数値予報資料から作成された竜巻の発生ポテンシャルとして予報現業で利用されている。

ここではまず、上で述べた2つの条件に対して、つくばでの地上と上空の大気状態を前日と比較してみる(第1.3.3.1表)。竜巻をもたらした積乱雲が発生した正午頃の上空500hPaと地上との気温差をみると、両日とも43度前後と違いはない一方、高度500m水蒸気量は12g/kgと前日に比べて倍増していることがわかる。その結果、5日には積乱雲が発生できない絶対安定な大気状態(CAPEが算出されない)だったものが、6日のCAPEは2000J/kg以上になり、強い上昇流を持つ積乱雲が発生できうる状態になった。また、地上と上空との風向差も大きくなり、6日のSREHもスーパーセルが発生しうる閾値とされる200m²/s²以上(Davies-Jones et al. 1990)になり、強い竜巻が発生しうる条件が揃っていた。この2つの条件および発生環境場について2006年11月7日北海道の佐呂間町での竜巻事例(加藤・新野2007)と比較してみる(第1.3.3.1図)。共通点としては、竜巻をもたらした積乱雲が気圧の谷の前面での上空には南西~南南西

第1.3.3.1表 2012年5月5日と6日のつくばでの地上と上空の大気状態の比較 上空の情報は気象庁メソ解析による。

	5日12時	6日12時	差
上空(500hPa)の気温	-17度	-18度	ほぼ一定
地上気温	25.9度	25.6度	ほぼ一定
地上と上空の気温差	42.9度	43.6度	ほぼ一定
高度500m水蒸気量(大気1kgあたり)	6g	12g	? 6g
対流有効位置エネルギー(CAPE)	-	2000 J/kg以上	
上空(500hPa)の風向	西風(270度)	南西風(225度)	
地上付近の風向	西北西風(290度)	南風(180度)	
地上と上空の風向差	20度	45度	? 25度
ストームに相対的なヘリシティ(SREH)	50 m ² /s ²	250 m ² /s ²	? 200m ² /s ²

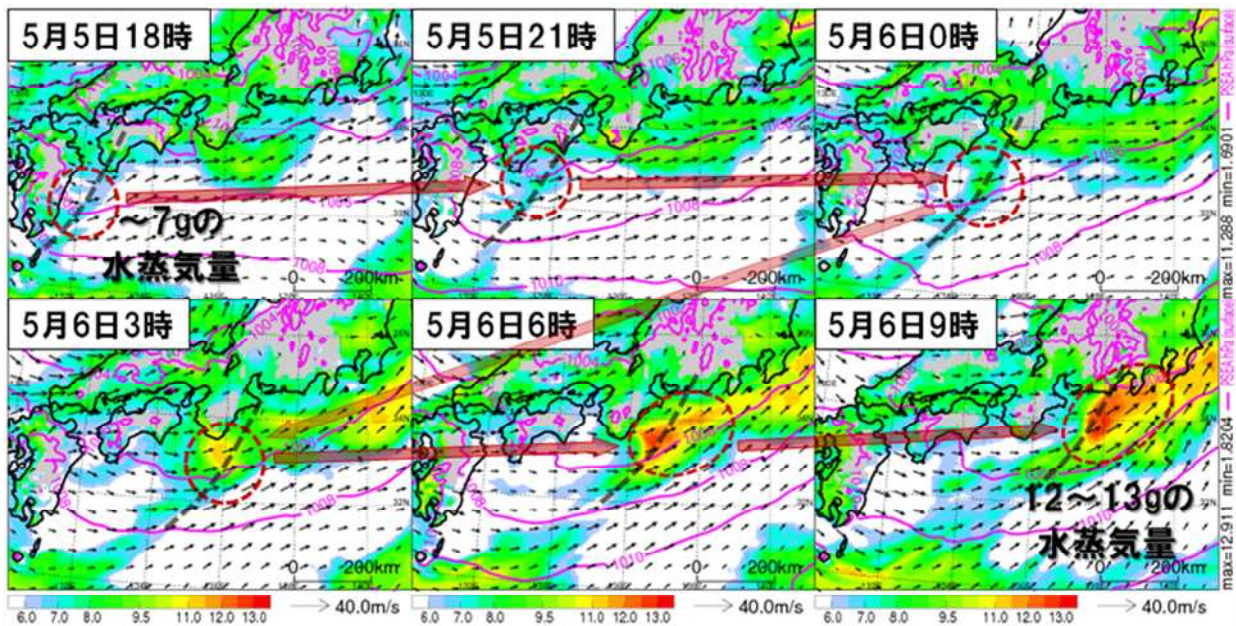


第1.3.3.1図 2012年5月6日に発生したつくば竜巻と2006年11月発生した佐呂間竜巻をもたらした積乱雲の移動と上空および下層の風向 赤ベクトルは積乱雲の発生と消滅位置を示す。

*加藤 輝之(気象研究所予報研究部) 山内 洋(気象研究所気象衛星・観測システム研究部)

風が卓越している環境で発生したことである。また、その位置の西方には山岳が存在しており、その山岳の影響を受けて上空と下層の風に風向差が作り出されていた。佐呂間のケースでは CAPE が 500J/kg 程度と小さく、逆に SREH が約 $500\text{m}^2/\text{s}^2$ と大きく、つくばのケースの方が大気的不安定度は大きかったが、佐呂間のケースの方が下層に渦が作られやすかったことになる。

つくばでの高度 500m 水蒸気量が 6 日に急増したことを上で示したが、その水蒸気がどのように流入したかを見してみる（第 1.3.3.2 図）。5 日 5 日 18 時に九州の東海上にあった下層のトラフが東進し、6 日 9 時には静岡県奥に達し、その間にトラフにともなう上昇流により海面付近の水蒸気が上空に輸送され、高度 500m 水蒸気量が 12~13g/kg へと倍増していることがわかる。この 50~100km の幅を持つ大量の水蒸気を持った空気が 6 日正午頃にピンポイント的に関東地方に流入し、強い竜巻をもたらしたスーパーセルと考えられる親雲を作り出したことになる。



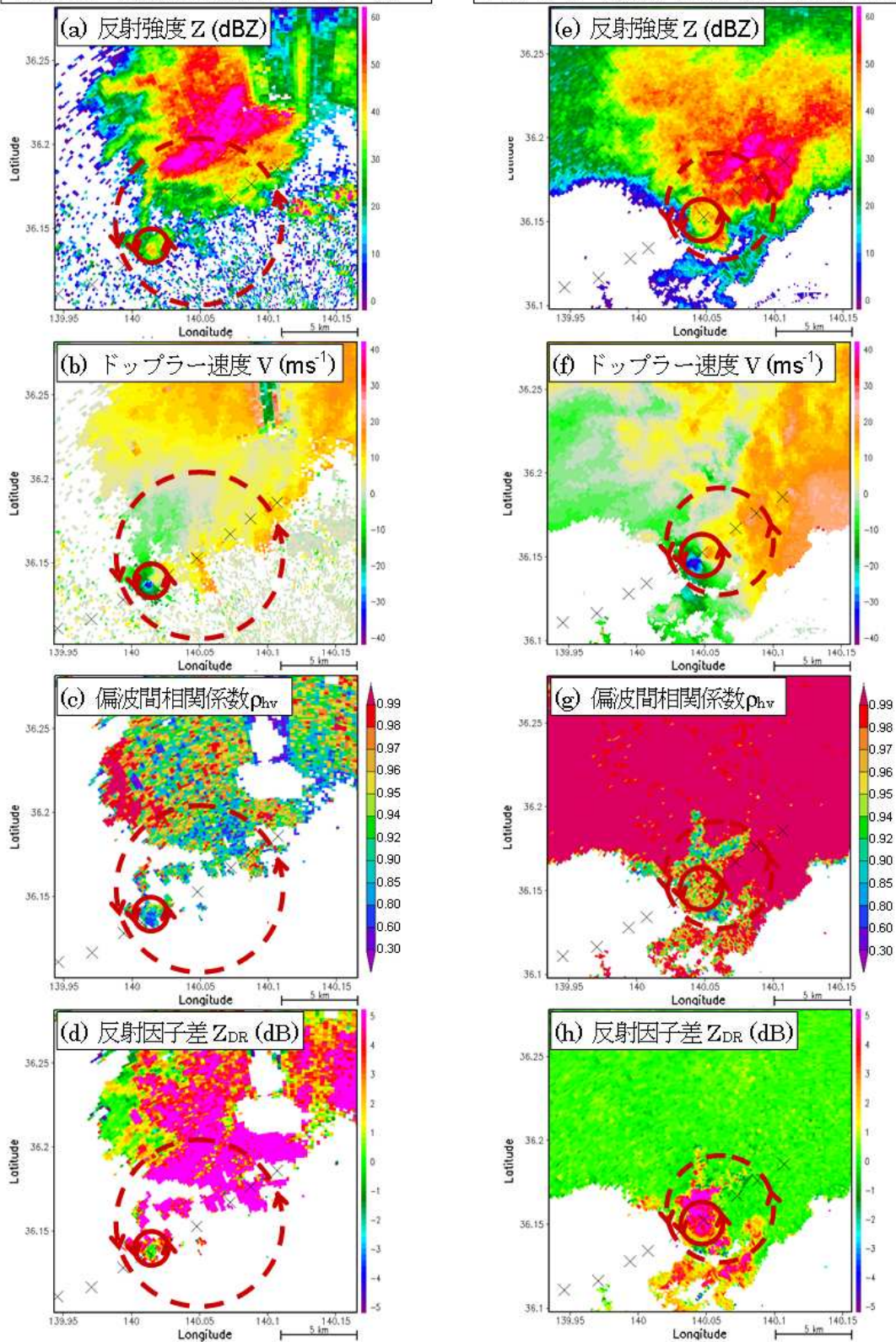
第 1.3.3.2 図 2012 年 5 月 5 日 18 時~6 日 9 時までの 500m 高度の水蒸気量の分布と風ベクトル
海面気圧を等値線、下層トラフの位置を破線で表示。気象庁メソ解析から作成。

つくばに災害をもたらした竜巻とその親雲の構造を気象レーダーの観測に基づいて確認してみる。この竜巻は、つくば市にある気象研究所の C バンド二重偏波ドップラーレーダーによって詳細に観測された（山内ほか，2012）。第 1.3.3.3 図にその一部を示す。左列（a~d）は時刻 12 時 43 分における仰角 0.5° （高度約 150m）、右列（e~h）はほぼ同時刻の仰角 18° （高度約 4000m）の反射強度(Z)、ドップラー速度(V)、偏波間相関係数(ρ_{HV})、反射因子差(Z_{DR})である。両仰角のデータは観測時刻がわずかに違うため、親雲の移動速度によって位置がずれて観測されるが、そのずれを補正して表示している。10~20km という近距離からの観測であるため、親雲の詳細な構造や竜巻に伴う渦が捉えられている。F3 クラスの竜巻とその親雲をこのような近距離からレーダーで捉えられたことは国内では初めてである。

まず、親雲がスーパーセルであったことを確認してみる。スーパーセルという言葉は、しばしば激しい降雷や竜巻を引き起こし、寿命が長く、対流圏内の平均風向に対して右よりに移動する（right moving）積乱雲に対して、Browning（1964）が名づけた。レーダー観測の結果、この種の積乱雲が 1 つの大きなセル（上昇流と下降流の対）で構成されていることがわかったためである。現在では、ドップラーレーダーによって上昇流域のメソサイクロンを確認できるため、スーパーセルの定義は最初に述べたように「メソサイク

仰角 0.5° 高度約 150m (12時 43分 8秒)

仰角 18.0° 高度約 4000m (12時 42分 20秒)



第 1.3.3.3 図 気象研究所の C バンド二重偏波レーダーで捉えた竜巻とその親雲

仰角 0.5° (12 時 43 分 8 秒) および仰角 18° (12 時 42 分 20 秒) における、(a, e) 反射強度、(b, f) ドップラー速度、(c, g) 偏波間相関係数、(d, h) 反射因子差。

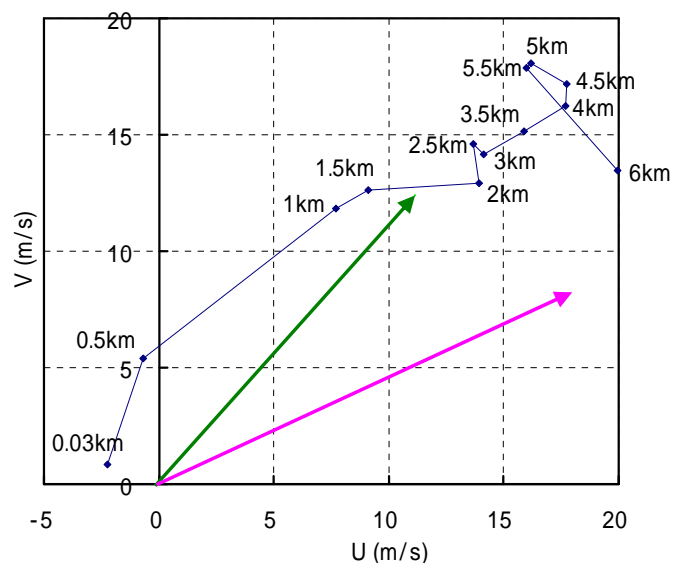
ロンをもつ積乱雲」となっている。

メソサイクロンは具体的には以下のようにして確認できる。下層の高度約 150m (第 1.3.3.3 図(b)) には、破線で示す円に沿ってレーダーに近づく方向のドップラー速度の極値 -35m/s、およびレーダーから離れるドップラー速度の極値 20m/s が捉えられている (レーダーは図の右下方向に位置する)。両極値間の距離は約 7km であるから、渦度は約 0.015/s と概算される。中層の高度約 4000m (第 1.3.3.3 図(f)) においても直径約 5km、渦度約 0.015/s の渦があることから、この渦が少なくとも約 4km の厚みを持つことがわかる。また、この渦は少なくとも 12 時 30 分から 13 時 20 分にかけての 50 分間維持されていた (図略)。これらのことから、この渦が「強さ」「厚み」「継続性」の点で Bunkers et al. (2009) がまとめたメソサイクロンの条件を満たしていることがわかる。つまり、親雲はスーパーセルであったと判断できる。このように渦の強さだけでなく「厚み」「継続性」を確認するのは、メソサイクロンと同様の大きさ・渦度であるものの、上昇流を伴わない・薄く・一過性である渦が、ガストフロントなどのシアライン上にみられ、これらと区別する必要があるためである。なお気象庁では、現業の気象ドップラーレーダー網を用いてメソサイクロンの自動検出を行っているが、ここで検出されるものはあくまで「メソサイクロンの候補」であり、実際にメソサイクロンであるとは限らないことに注意が必要である。

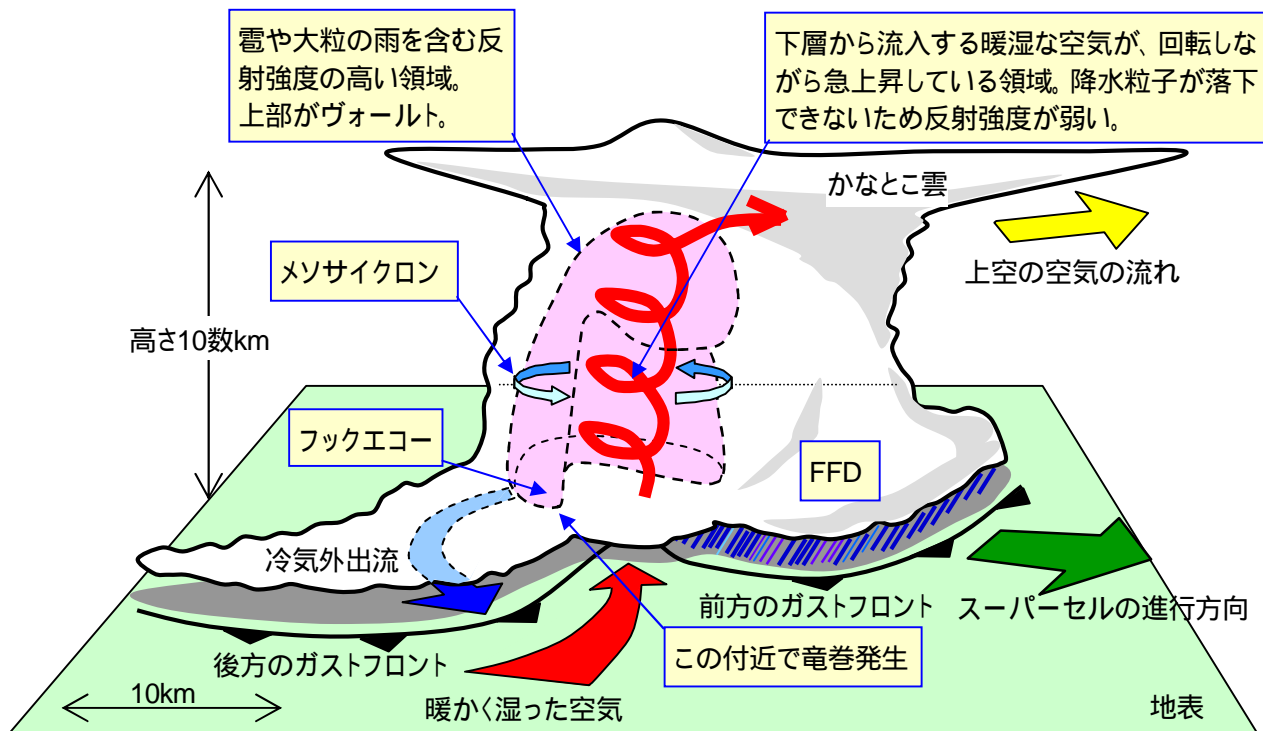
このスーパーセルの動きを確認してみると先述の right moving の性質が確認できる。第 1.3.3.4 図は、5 月 6 日 9 時の館野における高度 6km までのホドグラフと密度平均した風ベクトル (緑色矢印)、スーパーセルの 11 時 30 分から 12 時までの平均移動速度ベクトル (桃色矢印) を示している。スーパーセルの移動速度は約 20m/s (70km/h) である。スーパーセルの移動方向は方位 65° であり、平均風の風向 42° に対し 23° 右にずれている。実際のところ、このスーパーセルの移動方向は、単に平均風から右にずれているだけでなく、対流圏内のすべての風向に対して右にずれている (高度 6km 以上については図略)。この性質は、レーダー観測結果からスーパーセルの候補を見つけ出すのに大いに役立つ。

このスーパーセルの構造について、メソサイクロン以外の特徴を見てみる。下層 (第 1.3.3.3 図(a)) ではメソサイクロンの南西側には明瞭なフックエコーが捉えられている。またメソサイクロンの北東側には強い反射強度の領域 (FFD:Forward Frank Downdraft) が広がっている。これらのことから、このスーパーセルは「クラシック (CL:classic) 型」と考えられる。スーパーセルには、メソサイクロンと FFD が離れ、フックエコーが不明瞭となる「低降水 (LP:low-precipitation) 型」や、フックエコーの領域で強い降水のある「高降水 (HP:Heavy-precipitation) 型」もあるが、CL 型は両者の中間の型である。この型は、HP 型や LP 型に比べ竜巻を発生させやすいとされる (Markowski and Richardson 2010)。

下層のメソサイクロンの中央付近は、流入した暖湿な空気が急上昇している領域であり、強い上昇流で降水粒子が落下できないためエコー強度が弱い (WER:Weak Echo Region)。このように下層ではエコーが疎らでドップラー速度を観測しにくいために、メソサイクロンの渦を捉えにくい場合がある。中層 (第 1.3.3.3 図(e)) では、下層の WER の上部を天井のように覆う強



第 1.3.3.4 図 対流圏の風向風速と竜巻親雲の移動速度の関係 (青線) 2012 年 5 月 6 日 09 時の館野のホドグラフ、(緑色矢印) 平均風、(桃色矢印) 竜巻の親雲の移動速度。



第 1.3.3.5 図 つくば竜巻を引き起こしたスーパーセルの模式図

いエコーがある。この構造はヴォールト（丸天井）とよばれ、スーパーセルでしばしば見られる特徴である。中層ではエコーが強いため、ドップラー速度を密に測定でき、メソサイクロンも確認されやすい。レーダーによる鉛直断面観測（図略）によると親雲のエコー頂は 11km を越えていた。これまでに述べた親雲の特徴をまとめると第 1.3.3.5 図の模式図になる。

次に、竜巻スケールの現象を確認しよう。高度約 150m（第 1.3.3.3 図(b)）では、フックエコーの先端、実線の円で囲んだ領域に、数 100m スケールの渦をドップラー速度分布から確認できる。この位置におけるレーダーの空間分解能（レンジピンの大きさ）は 150m 程度であり、被害幅などから推定される竜巻の直径と同等のスケールである。観測されるドップラー速度はレンジピン内で平均化されるので、今回の竜巻の最大風速半径や最大風速は正確に捉えられない。またレーダービームの中心高度が約 100m と地表から離れていることから、地表付近の風速分布が捉えられている訳ではない。さらに、レーダーに測定されるドップラー速度は、降水粒子などの散乱体の移動速度を反映したものであり、実際の空気の流れの速度ではないという問題がある。後述するように、竜巻の場合、電波の散乱体は降水粒子に比べて大きな飛散物である可能性が高く、その場合は空気の流れとは異なる（おそらくは遅い）速度が測定されてしまう。

今回観測されたドップラー速度の極大・極小値の差は 50m/s 程度、極値間の距離から見積もられる渦径（最大風速直径）は 0.5~1km 程度であり、渦度は 0.15/s 程度であった。上述のように複数の制約や問題があるので、実際にはもっと大きな風速差、もっと小さな渦径、もっと大きな渦度であったと考えられる。第 1.3.3.3 図(f)に示すように、この渦はメソサイクロンと同様に少なくとも高度約 4km まで存在していた。上空では渦の直径が拡大し、渦中心の反射強度が弱い領域（WEH: Weak Echo Hole）が確認できる（第 1.3.3.3 図(e)）。

この渦は、第 1.3.3.6 図に示すように 12 時 35 分から 12 時 53 分にかけて 2 分毎の仰角 0.5° の PPI 観測で捉えられ、その発生から消滅までの軌跡は地上被害の分布とよく対応している。距離 17km を 18 分で移動していることから、移動速度は北東へ 60km/h と見積もられる。一方、親雲の移動速度は先述のとおり約

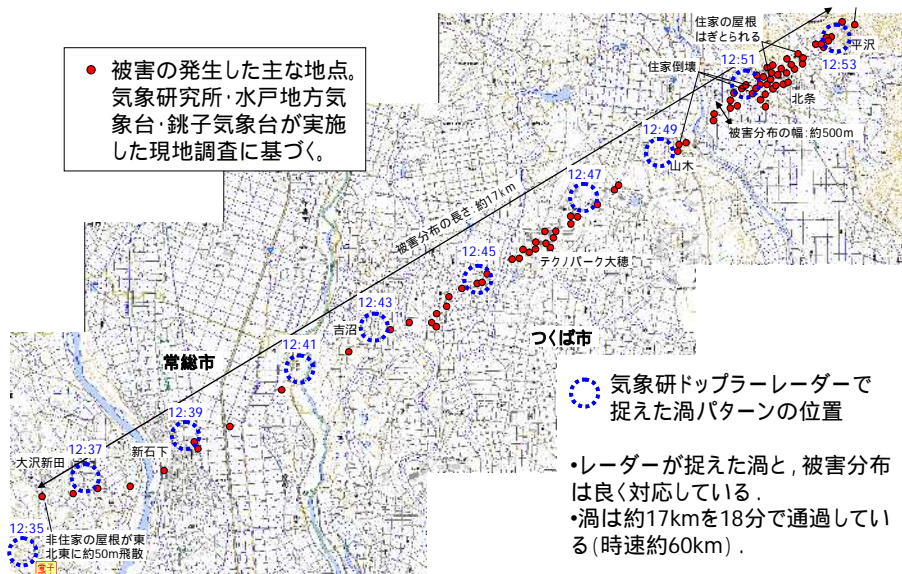
70km/h であるので、竜巻の下部は親雲から徐々に取り残されていったことになる。実際、この渦の位置を、下層（第 1.3.3.3 図(b)）と中層（第 1.3.3.3 図(f)）とで比較すると、下層の方が中層にくらべて遅れて南西に位置していること、つまり渦が進行方向に向かって傾いていたことがわかる。

さらに、レーダーが捉えた二重偏波情報から、この渦が竜巻であることがわかる。こ

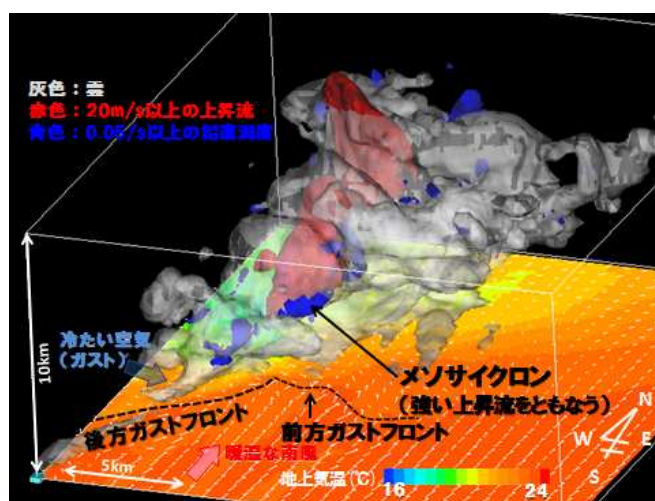
の渦における偏波間相関係数 ρ_{hv} （第 1.3.3.3 図(c)）は 0.8 以下の非常に低い値となっている。これは、レーダーの電波を散乱したターゲット（散乱体）の一様性が低いことを示しており、散乱体が降水粒子ではなく地上から巻き上げられた飛散物であることを示唆している。一方、散乱体の扁平さを表わす反射因子差 Z_{dr} （第 1.3.3.3 図(d)）は、渦付近で 0dB に近い値、すなわち縦横のアスペクト比が 1 の球体のような形を示唆している。竜巻が巻き上げた飛散物は多様な形状をしているので一見矛盾しているが、飛散物が竜巻の激しい風を受けて向きをさまざまに変化させて飛んでいるために、結果として球体と同様の反射因子差になると考えられる。これら二重偏波情報の特徴は、Ryzhkov ら（2005）の報告と整合的である。

このような二重偏波情報の特徴は、渦が地表に接地して竜巻になったか否かの判断に利用できる。ドップラー速度分布から竜巻渦を精度良く検出するには、方位方向に並んだ極大と極小のペアを見つけるために渦のスケールよりも細かい分解能の観測が必要とされる。しかし上述のように偏波情報を使えば極大と極小のペアを見つける必要がないため、より粗い分解能で認識できる。このため、より遠方から竜巻の検出が可能になると考えられる。

気象庁非静力学モデルを用いて、気象庁メソ解析（水平分解能 5km）からダウンスケールすることで、水平解像度 250m の数値シミュレーションを行った。つくば竜巻をもたらしたスーパーセルに比べて、20km ほど北側で、約 10 分早かったがほぼ同様のものを再現することができた（第 1.3.3.7 図）。構造をみると、南端にフックエコーが存在し、その北側に強い上昇流をとまなうメソサイクロンが再現されている。スーパーセルは北東方向に進行し、その後方には冷気外出流がみられ、暖湿な南風との間に後方ガストフロントを形成している。竜巻はこのガストフロントと前方のガストフロントの交点で、メソサイクロンのほぼ直下で発生することが多く、その位置に今回の



第 1.3.3.6 図 レーダーで捉えた竜巻スケールの渦の軌跡と被害分布



第 1.3.3.7 図 水平解像度 250m の数値シミュレーションで再現されたつくば竜巻をもたらしたスーパーセル 灰色は雲、赤色は強い上昇流、青色は強い鉛直渦度の領域を示す。

事例でも水平解像度 50m の数値シミュレーションによって竜巻の再現に成功している（益子 2012）。竜巻の発生メカニズムは多様であると思われるが、2006 年 9 月に延岡で発生した竜巻事例では、水平解像度 50m の数値シミュレーションからガスト内の二次的な冷氣外出流がガストフロント上の渦を強めて、竜巻発生のトリガーになったと考えられている（Mashiko et al. 2009）。

参考文献

- Browning, K. A. (1964) : Airflow and precipitation trajectories within severe local storms which travel to the right of the winds. *J. Atmos. Sci.*, **21**, 634-639.
- Bunkers, M. J., D. R. Clabo, J. W. Zeitler. (2009) : Comments on “Structure and Formation Mechanism on the 24 May 2000 Supercell-Like Storm Developing in a Moist Environment over the Kanto Plain, Japan” . *Monthly Weather Review*, **137**, 2703-2712.
- Davies-Jones, R., D. Burgess, and M. Foster (1990) : Test of helicity as a tornado forecast parameter. *16th Conf. on Severe Local Storms, Oct. 22-26, 1990, Kananaskis Park, Alta, Canada, Amer. Meteor. Soc.*, 588-592.
- 加藤輝之・新野宏 (2007) : ‘佐呂間の竜巻の発生環境に関する研究’, 平成 18 年度科学研究費補助金（特別研究促進費）課題番号 18900003 研究成果報告書「北海道佐呂間町で発生した竜巻による甚大な災害に関する調査研究」, 15-31.
- Markowski, P., and Y. Richardson (2010) : *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Wiley-Blackwell, 424 pp.
- Mashiko, W., H. Niino, and T. Kato (2009) : Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of Typhoon Shanshan on 17 September 2006, *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4238-4260.
- 益子渉 (2012) : 2012 年 5 月 6 日に発生したつくば竜巻の数値シミュレーション, 気象学会 2012 年度秋季大会予稿集, A104.
- Ryzhkov, A. V., T. J. Schuur, D. W. Burgess, D. S. Zrnic (2005) : Polarimetric tornado detection. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 557-570.
- 山内洋・小司禎教・佐藤英一・足立アホロ・益子渉 (2012) : 2012 年 5 月 6 日つくば竜巻の二重偏波レーダー解析, 気象学会 2012 年度秋季大会予稿集, A102.

1.3.4 予測技術における現状と課題*

1.3.4.1 突風に関する気象情報の改善の経緯

平成 17 年から 18 年にかけて、山形県庄内地方の突風による JR 羽越線の脱線事故(H17.12)、宮城県延岡市の竜巻(H18.9)、北海道佐呂間町の竜巻(H18.11)といった大きな突風災害が連続した。このため、気象庁では竜巻などの激しい突風に関する気象情報の改善が喫緊の課題となった。そこで、既に開始していたドップラーレーダーの整備を加速しつつ、平成 20 年 3 月に竜巻注意情報の運用を開始、平成 22 年 5 月には竜巻発生確度ナウキャストの運用を開始した。

竜巻注意情報と竜巻発生確度ナウキャストが対象とする現象は、積乱雲により引き起こされる激しい突風現象であり、具体的には竜巻、ダウンバースト、ガストフロントのことであるが、情報名は一般に浸透している「竜巻」という言葉で代表させている。

1.3.4.2 突風現象の予測可能性

竜巻注意情報や竜巻発生確度ナウキャストの運用開始が可能となった技術的背景は、以下のようないくつかの突風の予測可能性に関する技術の評価結果に基づく。

(i)メソサイクロンの自動検出

空港気象ドップラーレーダーを利用した総合的な調査(気象庁 2007)により、日本においてもスーパーセル型の竜巻が多く発生している可能性が見出されたとともに、メソサイクロン自動検出プログラムが一定以上の性能を有することが確認された。

(ii)スーパーセルが発達しやすい大気環境の指数化

現業数値予報モデルは竜巻そのものや竜巻親雲を十分に解像できる分解能にはまだ至っていない。しかし、スーパーセルが発達しやすい大気環境はある程度予測することができる。吉野ほか(2002)は、台風第 9918 号に伴い愛知県豊橋市で発生した竜巻事例について、水平解像度 9 kmの数値予報モデルを用いて竜巻と関連のある指数を計算した。この結果、EHI (Energy Helicity Index)の分布は竜巻の発生場所と対応が良く、現業モデル程度の解像度でも、竜巻の発生環境が予測できる可能性があることを示唆する結果を得た。

(iii)ダウンバーストに特徴的な降雨の構造の監視

非スーパーセル型の積乱雲で生じるダウンバーストを予測するには、レーダーエコー指数が有効である。日本では湿潤型のダウンバーストが多く、発達した積乱雲の上部から多量の降水粒子が急激に落下することで発生する(大野 2001)ことから、鉛直積算雨量などのレーダーエコー指数がダウンバーストの予測に有効であることが確認された(瀧下 2011)。

1.3.4.3 突風に関する気象情報の改善の概要

まず、予告的に発表する気象情報と雷注意報について平成 20 年 3 月に竜巻に注意を呼び掛けるキーワードおよび付加事項を追加する情報の改善を行った。誌面の制約により詳細は瀧下(2011)を参照されたい。

竜巻発生確度ナウキャストは、竜巻などの激しい突風が発生する可能性を 10km 格子単位で解析し、1 時間先まで 10 分単位の予測を行うものである。刻々と変化する状況に追従できるよう、常時 10 分ごとに最新の情報を提供する。

竜巻注意情報は、突風が今まさに発生しやすい気象状況になっている場合に発表される文章形式の情報である。後述の竜巻発生確度 2 が解析された格子のある府県に対して地方気象台等が発表する情報である。なお、

* 田中恵信(気象庁予報部予報課)

竜巻発生確度2が解析されていなくても、現に竜巻等の激しい突風が発生したことが確認された場合にも発表することがある。

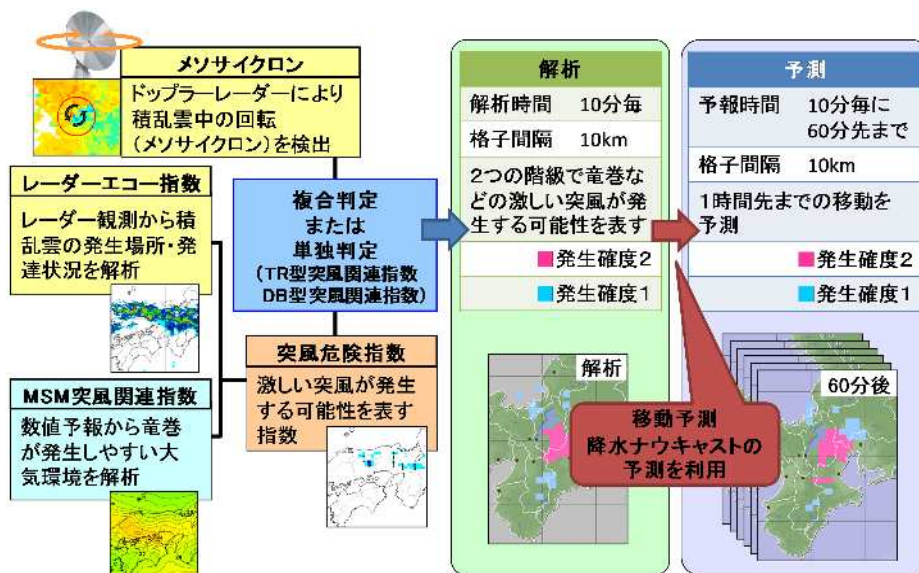
雷や降水と異なり、突風現象は水平スケールが極めて小さく寿命も短いため、現業観測で直接捉えることは困難である。このため、竜巻発生確度ナウキャストも竜巻注意情報も個々の突風の監視・予測を行っているものではなく、突風発生の可能性がどの程度高まっているかを予測している情報である。

1.3.4.4 予測技術の現状

竜巻発生確度ナウキャストと竜巻注意情報の基盤となる竜巻発生確度の予測手法の概要は次の通りである。

個々の積乱雲（プログラムの実装としては個々の格子）が今まさに突風を起こしそう、もしくは既に起こしている可能性が高いのかどうかを、メソサイクロンと後述の突風危険指数から総合的に判定する。これを突風判定と呼ぶ。

突風判定が出た積乱雲以外でも周辺で近い時刻に発生する積乱雲では同様に突風が発生しやすい気象状況にある。各格子での突風の発生のしやすさを解析し2段階の値で示したものが竜巻発生確度である。竜巻発生確度2は、適中率5～10%程度、捕捉率20～30%程度、竜巻発生確度1は、適中率1～5%程度、捕捉率60～70%程度となるよう開発当初の従属資料により調整された。



第1.3.4.1図 竜巻発生確度の解析と予測

1.3.4.4.1 突風判定アルゴリズム

(i)メソサイクロン

ドップラーレーダーの速度観測領域*においては、メソサイクロンを自動検出し、後述の総合判定に用いる。

(ii)突風危険指数

突風が発生しやすい大気状態かどうかを表す指標として突風関連指数を数値予報モデルの予測値から算出する。具体的にはCAPE(Convective Available Potential Energy)等の成層の不安定度を示す指数や、SReH(Storm Relative Helicity)のような鉛直シアーに関する指数等がある。

大気環境を示す突風関連指数が大きい場の中では、積乱雲が発生すると、その付近で突風が発生する可能

*強度観測の範囲と異なる。強度観測はレーダーサイトから半径400kmであるが、速度観測は半径最大250km。

性が高くなる。積乱雲の発達度合いを示す実況データとして、レーダーエコーの観測値からレーダーエコー指数を算出する。具体的には鉛直積算雨水量等がある。

突風関連指数とレーダーエコー指数を説明変数に、突風発生の有無を目的変数として、回帰分析を行い、統計予測モデルを作成する。回帰分析の方法には二値変数の目的変数を容易に扱えるロジスティック回帰分析を用いる。ロジスティック回帰分析で作成された統計予測式の出力は目的変数が「有」になる確率なので、ここでは突風発生確率ということになる。ただし、作成されている予測式の出力値は真の発生確率よりかなり高い値を取るよう工夫されている。あまりにも出力値が小さいと利用方法が難しくなるので、統計予測式作成時のデータサンプリングを工夫することで調整している。また、サンプリング数が十分でないため全国一律の予測式としており、地域差も表現されていない。このように、予測式の出力値は、「突風が発生する可能性の大小」という意味で利用しており、出力値の名称にも「確率」は用いず「突風危険指数」としている。

平成 22 年 5 月から、突風危険指数は竜巻事例のみから作成した竜巻型、ダウンバースト事例からのみ作成したダウンバースト型(以下、「DB 型」)、全ての突風事例から作成した ALL 型の 3 種類を作成している。

(iii) 突風総合判定

発達した積乱雲について、メソサイクロン(以下、「MC」)、もしくは突風危険指数のどちらか一方の指標だけで行う突風判定を単独判定、両方の指標の AND 条件で突風判定を行うものを複合判定と呼び、単独判定と複合判定の両者を合わせて総合判定と呼ぶ。この判定により、対象となる積乱雲の周辺を突風の発生確度の高い背景領域とみなす。

単独判定

MC、突風危険指数の検出があると、発生確度 2 もしくは発生確度 1 のための単独判定が行われる。現在の閾値は第 1.3.4.1 表のとおり。

複合判定

MC、突風危険指数、両方の指標の AND 条件で複合判定を行う。なお、両方の指標の発現する時刻と位置については、ある程度の時間空間差を許した AND 条件を施す。

まず最初にどちらか一方の指標（第一指標）が発現した時の時刻 T1、位置 P1 とする。次にもう一方の指標（第二指標）の発現時刻 T2、位置 P2 が $T2 - T1 \geq 1$ 時間、 $|P1 - P2| \geq 100$ km を満たす時、T2、P2 において複合判定が行われる。

現在の指標の組み合わせは第 1.3.4.1 表の通りである。

第 1.3.4.1 表 各突風判定に用いられる閾値(平成 24 年 3 月 23 日以降)

各指標の閾値は事例を蓄積しつつ、1~2 年毎に見直す。

判定	指標	発生確度背景(領域)	
単独判定	MC検出	発生確度 1 背景 (~ 100km)	
	竜巻型 31	発生確度 2 背景 (~ 40km)、発生確度 1 背景 (~ 100km)	
	DB型 36	発生確度 2 背景 (~ 40km)、発生確度 1 背景 (~ 100km)	
	ALL型 8	発生確度 1 背景 (~ 100km)	
判定	第1指標	第2指標	発生確度背景(領域)
複合判定	MC検出	& ALL型 8	発生確度 2 背景 (~ 40km)、発生確度 1 背景 (~ 100km)
	ALL型 10	& MC検出	発生確度 2 背景 (~ 40km)、発生確度 1 背景 (~ 100km)

1.3.4.4.2 竜巻発生確度ナウキャストのアルゴリズムの基本

突風判定はその格子(積乱雲)で実際に突風の発生が確認されたということではなく、通常に比べ相当程度高い発生確率にあることを意味している。そして、その格子の周辺も同じような大気環境にあるため突風

が発生しやすい気象状況にある（背景領域）。そこで、突風判定が出た格子を中心に一定の距離以内の領域の中で積乱雲がある格子に竜巻発生確度を解析する。

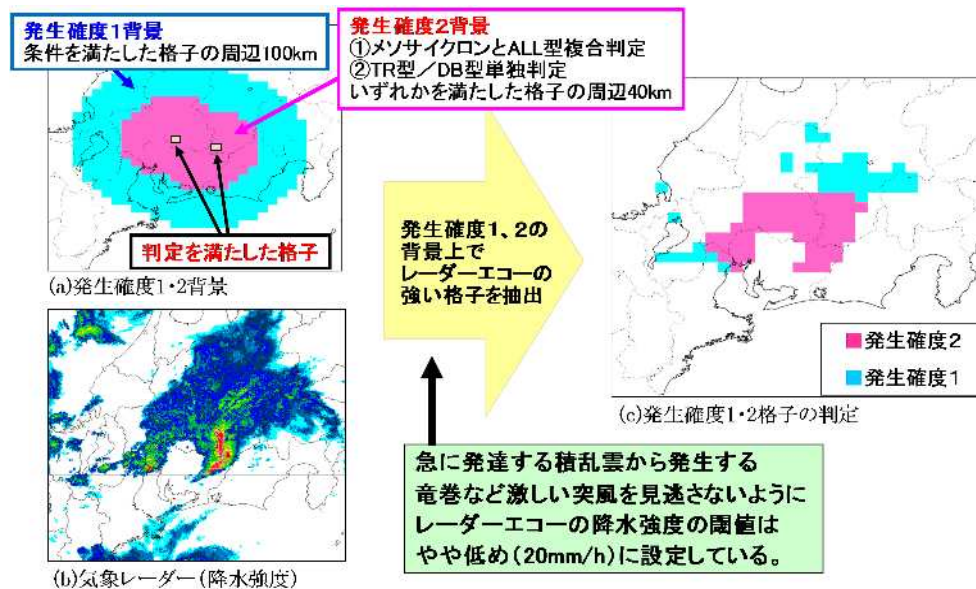
具体的な計算手順は以下のとおり（第 1.3.4.2 図を参照）。

発生確度 2 用の突風判定が出た格子を中心に半径 40km 以内にある格子に「発生確度 2 背景」を設定する。確度 2 突風判定格子を中心に半径 40km から 100km の範囲、および発生確度 1 用の突風判定が出た格子を中心に半径 100km 以内にある格子には「発生確度 1 背景」を設定する。

次に、発生確度 1 背景、発生確度 2 背景の中で、降水強度 20mm/h 以上ある格子に、発生確度 1、発生確度 2 を解析する。

さらに、1 時間先までの竜巻発生確度ナウキャストについては、発生確度背景を 1 時間(正確には 65 分)先まで同じ場所で継続させ、その中で降水ナウキャストの予測降水強度が 20mm/h を超えた格子に発生確度を予測する。このようにして、積乱雲の移動・盛衰に応じた突風の発生確度を予測している。

発生確度 2 の格子がかかった府県には竜巻注意情報発表を予報官に喚起する突風報知を出す。



第 1.3.4.2 図 竜巻発生確度の解析方法

1.3.4.4.3 竜巻発生確度ナウキャストアルゴリズム ver.3 の詳細

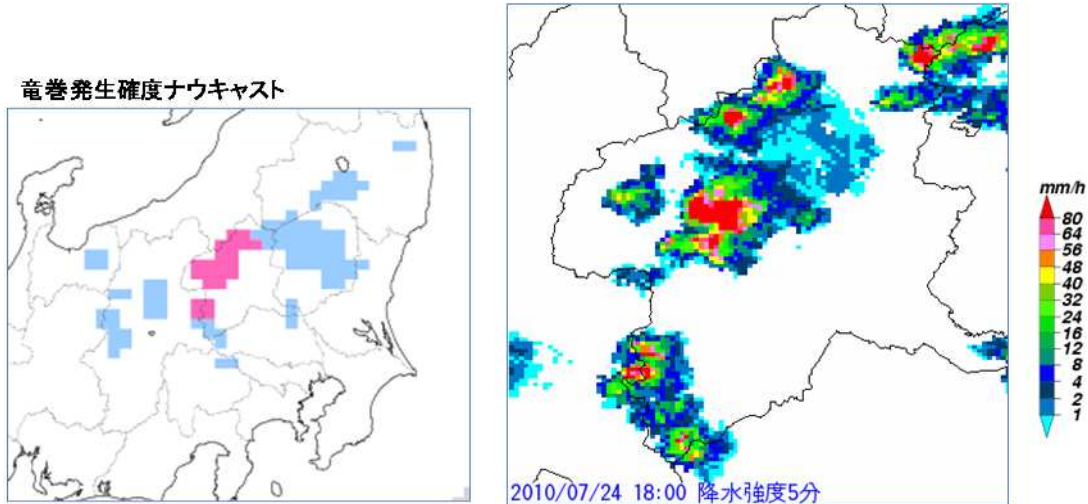
平成 24 年 3 月 23 日に竜巻発生確度ナウキャストのアルゴリズムを ver.3 に更新した。平成 22 年 5 月のナウキャスト開始時(アルゴリズム ver.2) は基本的には前述のアルゴリズムの通りであり、平成 20 年 3 月の竜巻注意情報運用開始時(アルゴリズム ver.1)に比べると、突風危険指数単独判定の拡張により突風判定回数が増加し、また発生確度 2 の 10km 格子が掛かる府県に竜巻注意情報を発表することにより発表回数が増加した。そこで、Ver.3 では、突風危険指数の統計式の見直しと突風総合判定の閾値の見直しの他に、竜巻注意情報の発表府県数を抑制する対策と発達傾向に無い降水が発生確度 2 に解析されないようにする対策を施した。

(i) 竜巻注意情報発表府県判定の細密化

竜巻発生確度は 10km 格子のプロダクトとして出力しており、従来はそれにもとづいて竜巻注意情報を発表していた。降水の分布に比べ 10km 格子は粗いため、発生確度 2 の 10km 格子が府県に少し掛っても、より細かく見ると積乱雲が存在せず突風が発生する可能性がない場合がある。そこで、ver.3 では発生確度 2 については内部的に 1km 格子で解析するように変更し、1km 格子で自府県内に発生確度 2 が掛からない場合に

は竜巻注意情報を発表しないこととし、竜巻注意情報の発表府県数の効果的な抑制を図った。

第 1.3.4.3 図は 1km 格子単位で見ると発表事例数を抑制できる事例である。群馬県、長野県、新潟県に発生確度 2 (10km 格子) が掛かり、ver.2 まではそれぞれの府県に竜巻注意情報が発表される。しかし、エコー強度 (1km 格子) を細かく見ると新潟県には強いエコーは掛かってなく、今後北上する傾向がなければ新潟県には竜巻注意情報を発表しないで済む。



第 1.3.4.3 図 1km 格子単位で見ると除外できる例

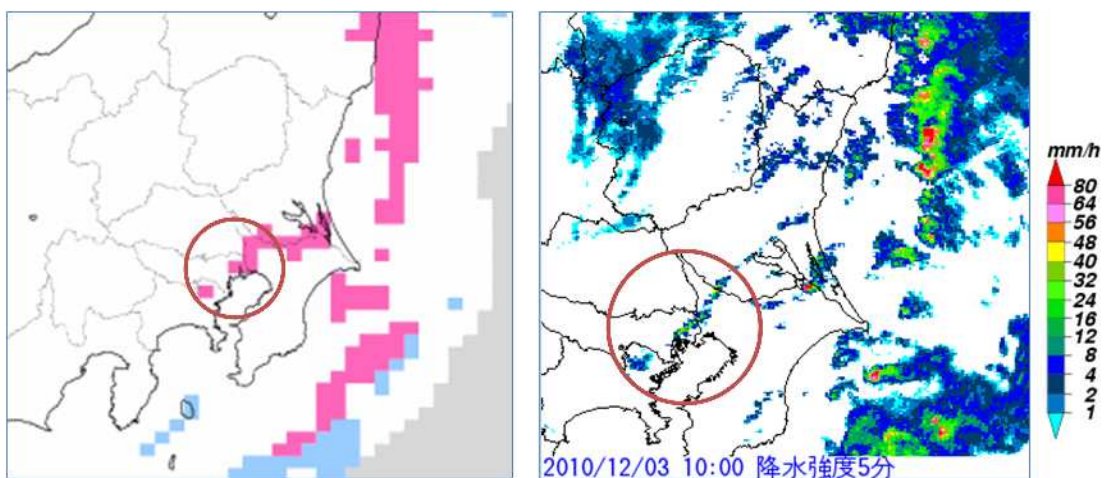
(ii)発生確度 2 格子解析へ周辺降水強度条件の適用

Ver.2 では発生確度 2 を解析する条件として、発生確度 2 背景の中で 20mm/h 以上のレーダーエコー強度があることとなっている。降水が強くないにもかかわらず発生する突風の見逃しを防ぐために 20mm/h という低めの閾値が設定されている。

Ver.3 では、降水に発達傾向が無かったり、対流活発域が既に抜けているのに 20mm/h 程度の降水がある場合に、発生確度 2 が解析されないような改良を施した。発生確度 2 背景の中にあるレーダーエコー強度 20mm/h 以上の格子 (格子 P とする) のうち、

格子 P から距離 20km 以内に 100mm/h 以上のレーダーエコー強度がある

という条件を満たす時にはじめて、格子 P に発生確度 2 を解析する。もちろん、これは発達傾向を図る厳密な方法ではないが、簡易な方法で一定の効果を上げられる方法なので採用した。



第 1.3.4.4 図 今後の発達が見込まれず発生確度 2 を解析しないで良い例

赤い円は半径 20km の円。中心に 20mm/h 以上の格子があるが、円内に 100mm/h 以上の格子は無い。

第 1.3.4.4 図は今後の発達が見込まれず発生確度 2 の解析を抑制できる例である。対流の活発な領域は東海上に抜けているが、1 時間の有効時間がある発生確度 2 背景が関東地方南部に残っているため、20mm/h 程度のエコー強度となっている東京 23 区付近では、まだ発生確度 2 となっている。しかし、この付近ではこれからエコーが発達する傾向はないと判定できるので、発生確度 2 としない方が良いとできる例である。

1.3.4.5 予測技術の課題

1.3.4.5.1 竜巻注意情報の予測精度

竜巻注意情報については、適中率と捕捉率の二つの指標で評価を行い、両者のバランスをとりながら精度向上の開発を行っている。

竜巻注意情報発表以降の適中率・捕捉率の推移が第 1.3.4.2 表のとおりとなっている。適中率、捕捉率とも年々変動が大きい。突風現象の発生数自体の年々変動が大きいことや、ドップラーレーダーの整備が大きく進みメソサイクロンを検出できる領域が増えたこと、アルゴリズムが 2 回変更されたことなどから、特定の年の数値だけで精度を代表できるものではないことに留意する必要がある。

第 1.3.4.2 表 竜巻注意情報の適中率・捕捉率の推移

	2008年 (03/26~12/31)	2009年 (01/01~12/31)	2010年 (01/01~12/31)	2011年 (01/01~12/31)	2012年 (01/01~12/12)	合計/平均
竜巻注意情報発表回数	172	128	490	589	591	1970
突風事例数	70	34	67	39	48	258
適中率	10% (17/172)	5% (7/128)	5% (23/490)	1% (8/589)	3% (17/591)	4% (72/1970)
捕捉率	24% (17/70)	21% (7/34)	34% (23/67)	21% (8/39)	35% (17/48)	28% (72/258)

1.3.4.5.2 予測精度向上に向けた課題

突風危険指数の統計予測式を作成するための従属資料はアルゴリズム ver.3 においては 2006 年～2011 年の 5 年間にまで蓄積されている。突風データベースに掲載されている突風事例は、以前に比べ質量とも向上してきているため、今後も従属資料を増やして予測式を更新し精度向上を図っていく必要がある。

アルゴリズム Ver.3 開発において、突風危険指数の予測式を従属資料を増やしてシミュレーションしたところ、竜巻型とダウンバースト型の突風危険指数の精度が ver.2 に比べ向上したことが確認された。ただし、ALL 型については単独でも大きな変化が得られずメソサイクロンとの複合判定の閾値見直しにおいても大きな精度向上は得られなかった。

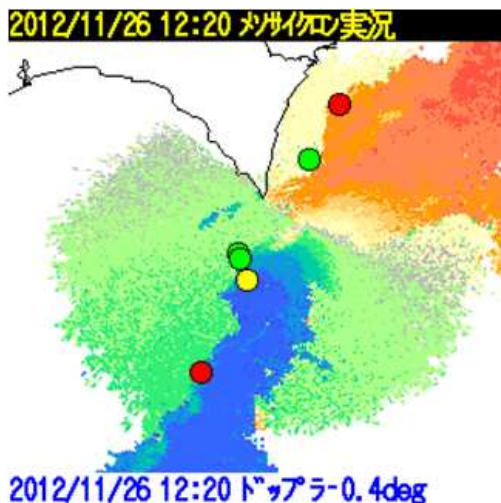
一方メソサイクロンについては、なお検出精度向上の開発が必要である。ドップラーレーダーが追加整備されると、当該レーダーの領域内でメソサイクロンの検出数が増え、突風複合判定が増加する。メソサイクロンの誤検出を低減できれば、突風複合判定の増加を抑制できる可能性がある(第 1.3.4.5 図)。例えば、海岸付近に設置されたドップラーレーダーでは、シークラッターと降水エコーとの境界で誤検出されるメソサイクロンが相当数ある。

25 年度は、気象庁レーダーの分解能が 250m 化する予定である他、国土交通省 XRAIN(X バンド MP レーダー)のドップラー観測データが利用可能になる予定である。これら高解像度のドップラーレーダーデータを利用したメソサイクロンの検出やフックエコー等の突風の親雲に特徴的なエコーパターンの検出の開発も課題である(第 1.3.4.6 図)。

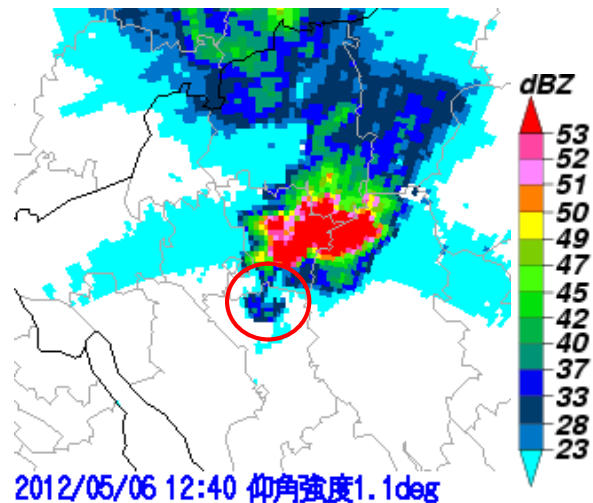
平成 25 年度から運用開始予定の局地モデル(LFM)については、いまだ突風そのものや親雲を十分に解像す

るには至らないが、突風関連指数への利用可能性について調査を行っていく必要がある。

長期的な課題としては、二重偏波レーダーによる竜巻の検出技術の開発や、高解像度高速スキャンレーダーの開発、突風発生危険度を予測する高解像度数値予報モデルのデータ同化・アンサンブル手法の開発等がある。また、突風の機構解明のための基礎的な研究も必要である。



第 1.3.4.5 図 メソサイクロン誤検出の例
シークラッターにより誤検出している。



第 1.3.4.6 図 フックエコーの例
丸で囲んだ部分がフックエコー

1.3.4.5.3 目撃情報の活用

局地的大雨や雷と違い突風現象は直接観測する手段が乏しく、メソサイクロンのような竜巻前兆現象の検出や大気環境場の把握に立脚した予測手法をとっているため、予測精度に限界がある。

これに対し、突風の実況を把握する手段としては、突風を実際に目撃した人からの情報を得る方法がある。竜巻等突風予測情報改善検討会(2012)では、近年の情報端末機器の発展状況等を鑑みて、海外のスポッター制度を参考としつつ、突風の目撃情報を効果的に収集し竜巻注意情報の発表に活用できる体制の確立を検討するよう指摘されている。

我が国では突風の寿命が短いため、米国の竜巻警報と同様な高い効果は得られないかもしれないが、目撃情報を受けて竜巻注意情報を発表することにより、当該突風へ強い注意喚起ができる可能性がある。また、目撃された突風が起きた地域の周辺で新たな突風発生の可能性も含めたよりいっそうの注意喚起ができる可能性がある。現在でも、気象官署で突風を観測した場合や公的機関から目撃情報が寄せられた場合などには、必要に応じて竜巻注意情報を発表する運用となっているが、より効果的な体制作りが必要となっている。

1.3.4.6 まとめ

竜巻注意情報、竜巻発生確度ナウキャストが運用を開始してそれぞれ4年以上、2年以上が経過しようとしたところで、平成24年5月6日に大きな竜巻災害が茨城県・栃木県で発生した。竜巻等突風に関する情報の予測精度についても公式な場として竜巻等突風予測情報改善検討会で点検がなされ、今後の情報改善の道筋がつけられた。本稿では過去の開発過程についての細部は省き、現在の予測技術の概要と詳細、今後の課題についてまとめた。予報作業やこれら情報を専門的に利用する方々に、本稿を通じて改めて予測技術の現状と課題を効率的に理解して頂くことが出来れば幸いである。

参考文献

- 気象庁(2007):竜巻等による突風災害対策に関する調査報告書 .平成 18 年度災害対策総合推進調整費,118pp .
- 大野久雄(2001):雷雨とメソ気象.東京堂出版,309pp.
- 瀧下洋一(2011):竜巻発生確度ナウキャスト・竜巻注意情報について - 突風に関する防災気象情報の改善 - .
気象庁,測候時報,78,57-93.
- 竜巻等突風予測情報改善検討会(2012):竜巻等突風に関する情報の改善について(提言).気象庁,
http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/toppuu/24houkoku/H240727_houkoku_honpen.pdf,31.
- 吉野純,石川裕彦,上田洋匡(2002):台風 9918 号により東海地方にもたらされた竜巻に関する数値実験.京
都大学防災研究所年報,45,369-388.

第2章 集中豪雨事例の客観的な抽出と

その特徴・環境場に関する統計解析*

2.1 はじめに

日本では、しばしば集中豪雨が発生する。ひとたび集中豪雨が発生すると、土砂崩れ、河川のはん濫、家屋の浸水などの甚大な災害がもたらされることがあり、最悪の場合には死者が出ることもある。ここ数年でも、「平成24年7月九州北部豪雨」（気象庁報道発表資料2012）、「平成23年7月新潟・福島豪雨」（気象庁2012）といった集中豪雨が発生し、大きな災害がもたらされた。このような災害を少しでも軽減し防ぐためには、集中豪雨の発生と盛衰を正確に予測する必要があるが、まだまだ難しい課題であるのが現状である。集中豪雨の正確な予測のためには、実況監視ツールや数値予報モデル等の開発を進めることはもちろん必要であるが、集中豪雨が発生する様々なスケールの環境場や集中豪雨をもたらす降水系の発生・発達メカニズムに関する理解をより深めることも重要である。

これまで、集中豪雨に関する数多くの研究（たとえば、Kato and Goda 2001；津口・榊原 2005；Kato 2006；瀬古 2010；Hirockawa and Kato 2012 など）が行われており、集中豪雨が発生する場合の様々な特徴（下層の高相当温位気塊の流入、中層の低温状態の形成と維持、鉛直シアの役割、メソスケール渦の存在、地形効果 など）が明らかになっている。また、研究者による成果のみならず、気象庁の地方官署等で精力的に取り組まれている調査・研究の蓄積により、集中豪雨に関する理解は着実に進んできている。ただ、これまでの調査・研究の多くは事例解析であり、集中豪雨を統計的に扱うということはあまり行われてこなかった。通常、事例解析は集中豪雨が発生したときにのみ、その事例を対象にして行われるので、個々の事例解析の比較を行ったり、集中豪雨が発生するための環境場を統計的に調べたりということはあまり行われなない。このため、集中豪雨が発生する場合の特徴がその事例特有のものなのか、それともより一般的なものなのかは、よくわかっていないという問題がある。

以上のような問題意識から、気象研究所予報研究部では複数の集中豪雨事例を統計的に解析することで、その発生に共通な必要条件を抽出する研究を進めている。具体的には、平成21年度から重点研究「顕著現象の機構解明に関する解析的・統計的研究」のサブ課題2「顕著現象の要因に関する解説資料の作成」の中で取り組んでおり、過去の集中豪雨事例を客観的に抽出し、様々なスケールの環境場と集中豪雨事例との関連性について統計的な調査を行っている。さらに、予報作業での利用を念頭に置いて、この調査結果から集中豪雨が発生するための必要条件を定量的（例えば、「下層の高相当温位気塊の流入」ではなく、「500 m 高度の相当温位 355 K 以上の気塊の流入」）に決定することも目指している。また、気象庁では、平成22年3月に気象庁技術開発推進本部傘下の豪雨監視・予測技術開発部会に『診断的予測グループ』が設置された。この診断的予測グループでは、上記の気象研究所予報研究部の研究課題を発展させ、気象庁での課題として実施している（加藤 2010）。グループの活動は、集中豪雨の包括的な理解を目指すという科学的な側面と気象庁の大きな役割である「防災」の担い手である予報官の技術向上を目的とした業務的な側面の両方を備えていることから、予報部、観測部に気象研究所も加わり、気象庁内横断的な取り組みとして行われている。

本章では、気象研究所予報研究部を中心に診断的予測グループで取り組んでいる集中豪雨の統計的な研

*津口 裕茂（気象研究所予報研究部）

究について、現在まで得られている成果について報告する。第2.2節では集中豪雨事例の客観的な抽出について述べ、第2.3節では抽出された集中豪雨事例を統計解析することで得られた特徴について述べる。第2.4節では、集中豪雨が発生する総観～メソスケール環境場に関する統計解析の結果を述べる。

2.2 集中豪雨事例の客観的な抽出

集中豪雨事例の統計的な解析を行うためには事例を多数抽出する必要があるが、その抽出には複数の方法が考えられる。その一つとして、甚大な災害をもたらした集中豪雨事例を抽出する方法がある。しかし、災害の発生はその地域のインフラ整備の状況などと大きく関係しており、必ずしも災害発生と降水量が関係しているわけではない（少ない降水量で災害が発生することもある）。このため、災害発生のみを条件とするのは適当ではない。ここでは、特定の気象学的な条件を用いるのが適当であるが、集中豪雨には気象学的に厳密な定義が存在しない。つまり、どれだけの時間に、どれだけの面積に、どれだけの降水量があれば集中豪雨となるのかという定量的な基準が存在しないのである。ただ、多くの人々が“集中豪雨”という言葉から連想する雨の降り方は、大きく違わないと想像される。そこで本研究では、日本国内で発生し、大きな災害をもたらした集中豪雨事例（「平成24年7月九州北部豪雨」や「平成23年7月新潟・福島豪雨」など）を想定し、そのような集中豪雨での雨の降り方を客観化して集中豪雨事例の抽出条件とする。イメージとしては、「短時間（3時間程度）に集中して降水が生じるとともに、総降水量（24時間程度）でもかなりの降水量になる」ものを集中豪雨とし、そのイメージを具体的に客観化（数値化）することで抽出条件を設定する。

まず、集中豪雨事例の抽出に用いたデータについて説明する。データは、1995年～2009年の15年間の解析雨量を用いた。解析雨量は期間によってデータの水平格子間隔が異なるため、データができるだけ均質になるようにすべて水平格子間隔5kmに統一した。5km格子への変換は、以下の方法で行った。

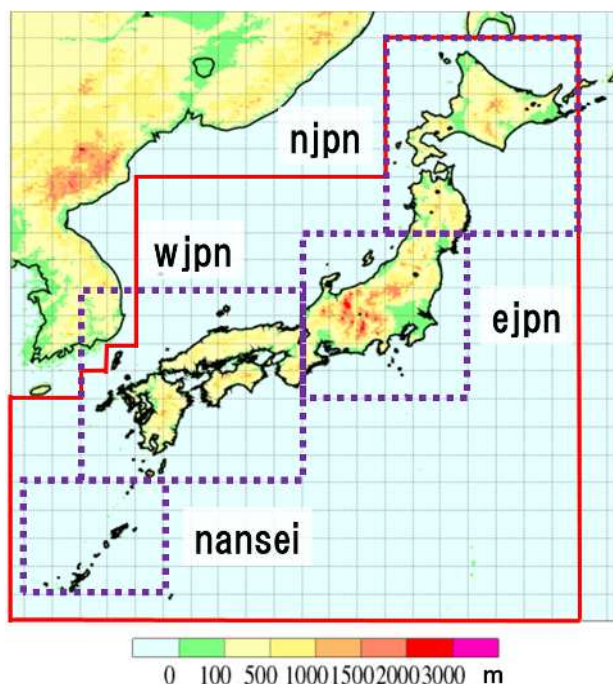
(ア)1995年1月～2001年3月：5km格子データのまま利用

(イ)2001年4月～2006年2月：2.5km格子データ 5km格子最大値

(ウ)2006年3月～：1km格子データ 2.5km格子平均値 5km格子最大値

また、全期間中で25%以上のデータが欠損している格子については除外した。

次に、集中豪雨事例の具体的な抽出条件について説明する。期間は雪による事例を抽出しないように冬季を除いた4月～11月とし、領域は日本の陸地のみ（第2.1図の赤色実線枠内の陸地）とした。短時間降水量としては3時間積算降水量を、総降水量としては24時間積算降水量を用い、積算時間の違いで降水量に差が出ることを防ぐためにそれぞれ1時間間隔のデータを作成した。第2.2図に示した集中豪雨事例抽出



第2.1図 集中豪雨事例を抽出した領域(赤色実線枠内の陸地)。集中豪雨事例の特徴と環境場の統計解析を行った各領域(日本全域を4地域に区分した紫色点線枠内)

“njpn”は北日本、“ejpn”は東日本、“wjpn”は西日本、“nansei”は南西諸島。

のフローチャートにしたがい、以下に抽出条件を説明する。

5 km 格子ごとに、24 時間積算降水量の全期間中の上位 50 位かつ、年平均期間降水量（4 月～11 月の総降水量の年平均値）の 12 % を超える事例を抽出する。ただし、周囲 8 格子の平均値と比較して 10 倍以上大きな値の場合は異常値として除外する。

の中で、最大 3 時間積算降水量が 130 mm を超える事例を抽出する。

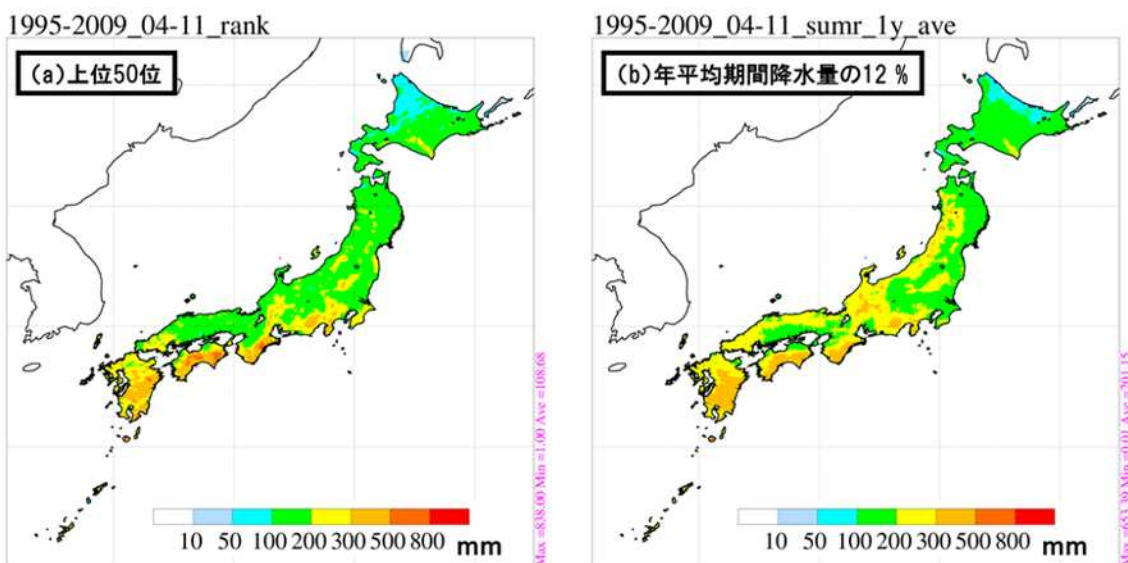
の中で、時間間隔が 24 時間以内、格子の直線距離が 150 km 以内のものを同一事例と判定する。

それぞれの条件の閾値については、統計解析を行うのに十分な事例数が抽出されるように、目安として 1 年間で約 20 事例、統計期間 15 年間で 300 事例程度になるように調整した上で決定した。ここで、～ の条件設定について補足説明する。条件 は、24 時間積算降水量の分布に大きな地域差があることを考慮して設定した。たとえば、閾値を 500 mm/24h 以上のように全国同一にすると九州地方や四国地方では多くの事例が抽出されるが、北海道や東北地方ではほとんど事例が抽出されないことになってしまう。このようなことを防ぐために、それぞれの地域で発生頻度がまれであり、降水量が期間（4 月～11 月）降水量のある程度の割合以上を占めるものを集中豪雨と定義し、各地域（各格子）で異なる閾値（第 2.3 図）を用いて集中豪雨事例を抽出した。条件 は、3 時間積算降水量は 24 時間積算降水量ほど地域差が大きいことから閾値は全国（全格子点）で同一とし、事例数が適当になるように閾値を決定した。条件 は、集中豪雨事例の特徴や環境場の統計解析

条件 は、24 時間積算降水量の分布に大きな地域差があることを考慮して設定した。たとえば、閾値を 500 mm/24h 以上のように全国同一にすると九州地方や四国地方では多くの事例が抽出されるが、北海道や東北地方ではほとんど事例が抽出されないことになってしまう。このようなことを防ぐために、それぞれの地域で発生頻度がまれであり、降水量が期間（4 月～11 月）降水量のある程度の割合以上を占めるものを集中豪雨と定義し、各地域（各格子）で異なる閾値（第 2.3 図）を用いて集中豪雨事例を抽出した。条件 は、3 時間積算降水量は 24 時間積算降水量ほど地域差が大きいことから閾値は全国（全格子点）で同一とし、事例数が適当になるように閾値を決定した。条件 は、集中豪雨事例の特徴や環境場の統計解析

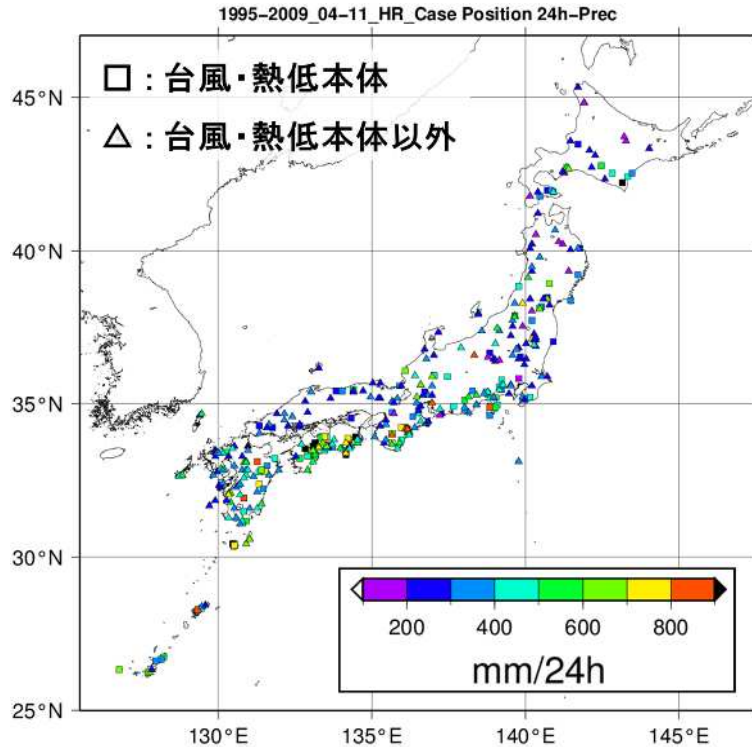


第 2.2 図 集中豪雨事例抽出のフローチャート



第 2.3 図 集中豪雨事例抽出の 24 時間積算降水量の閾値の水平分布

(a) 全期間（1995 年～2009 年；4 月～11 月）の上位 50 位、(b) 年平均期間（4 月～11 月）降水量の 12 %



第 2.4 図 抽出された集中豪雨事例の分布

□ は台風・熱低本体による集中豪雨事例、△ は台風・熱低本体以外による集中豪雨事例。色は 24 時間積算降水量を表す。

を行うのにある程度の時間・空間的な広がりを持った事例を一つにまとめる方が処理しやすいことから設定した。ただし、この方法では一つの長続きする擾乱（たとえば、台風）による集中豪雨事例が複数個抽出されることに留意しておく必要がある。

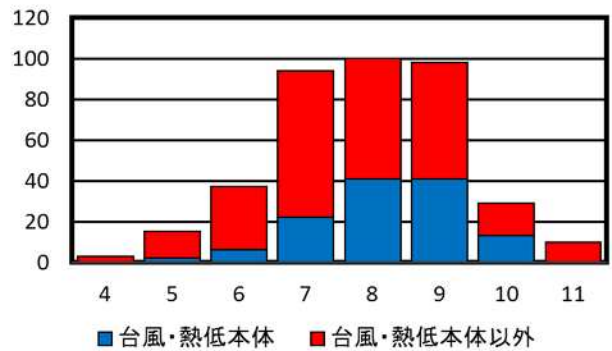
上記の条件で抽出された 386 の集中豪雨事例の分布を第 2.4 図に示す。参考までに、それぞれの条件で抽出された格子ごとの事例の総数を示すと、条件 ①の内、上位 50 位の条件で 562788、年平均期間降水量 12 % の条件で 507763、両者とも満たす条件によって 330892 に絞られた。さらに、条件 ②で 68674 となり、条件 ③で最終的に 386 事例が抽出された。抽出された集中豪雨事例の分布をみると、一般的に集中豪雨の多発地域と言われている九州地方、四国地方、近畿地方、東海地方の太平洋側で事例数が多くなっており、24 時間積算降水量が 1000 mm を超える事例もあることがわかる。一方で、北海道や東北地方でもある程度の数の事例が抽出されているが、24 時間積算降水量は相対的に少なく、200 mm 以下の事例もみられる。

抽出された集中豪雨事例に対して、その集中豪雨をもたらした擾乱を台風・熱低本体（台風・熱低の中心から 500 km 以内）とそれ以外に分類した。擾乱の分類は、各集中豪雨事例において最大 3 時間積算降水量の最大値を記録した時刻の直前の地上天気図から主観的に行った。第 2.4 図をみると、台風・熱低本体による集中豪雨事例は、九州山地の東側斜面、四国山地の南側斜面、紀伊半島の南東斜面で特に多くなっている。詳細に擾乱を分類した結果については、第 2.3.2 項で述べる。

2.3 集中豪雨事例の統計的な特徴

2.3.1 集中豪雨事例の月別の発生数

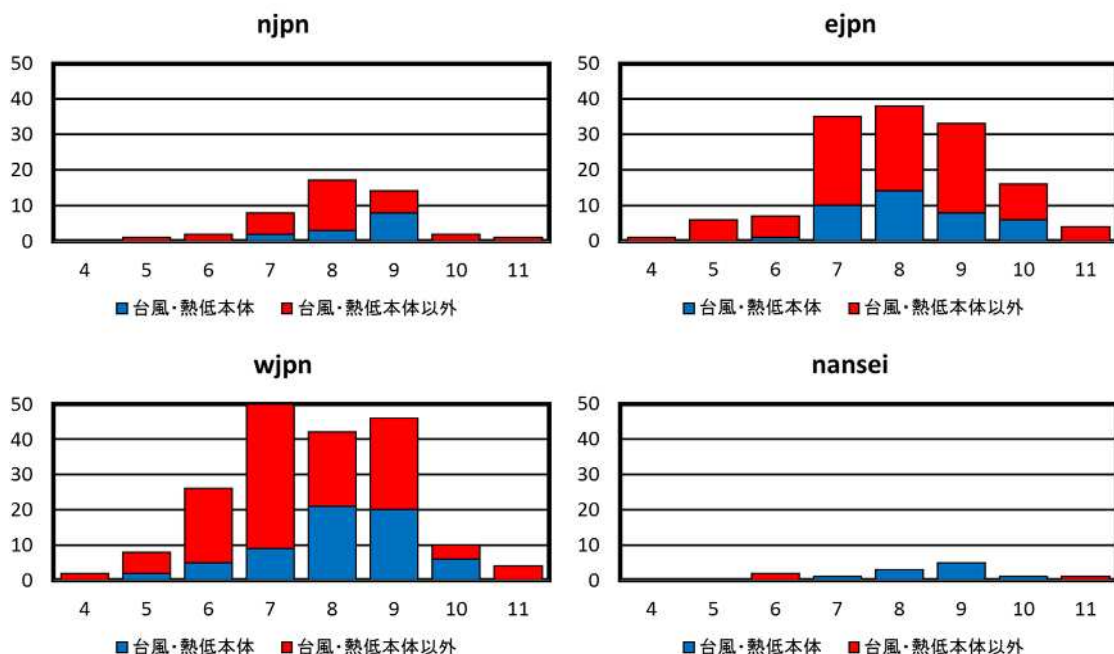
第 2.5 図に月別の集中豪雨事例の発生数を示す。集中豪雨は 8 月が最多となる 100 事例であり、次いで 9 月が 98 事例、7 月が 94 事例となっており、7 月～9 月の 3 か月で全体の 75 % 以上（全 386 事例中の 292 事例）を占めている。その中で、台風・熱低本体による集中豪雨事例の発生数をみると、8・9 月がともに 41 事例でもっとも多く、次いで 7 月が 22 事例である。



第 2.5 図 月別の集中豪雨事例の発生数

横軸は月、縦軸は発生数。青色は台風・熱低本体による集中豪雨事例、赤色はそれ以外の集中豪雨事例。

第 2.6 図に地域別（地域区分は第 2.1 図参照）に分けた月別の集中豪雨事例の発生数を示す。北日本（njpn）をみると、全事例数は 45 であり、8 月が最多となる 17 事例、次いで 9 月が 14 事例、7 月が 8 事例という順である。台風・熱低本体による事例は 9 月がもっとも多く、8 事例である。東日本（ejpn）をみると、全事例数は 140 であり、6 月までは 10 事例未満と少ないが、7 月以降に事例数が急増している。8 月が最多となる 38 事例であり、次いで 7 月が 35 事例、9 月が 33 事例という順である。台風・熱低本体による事例は 8 月がもっとも多く、14 事例である。西日本（wjpn）をみると、全事例数は 188 であり、東日本よりも早く 6 月以降に事例数が急増している。7 月が最多となる 50 事例であり、次いで 9 月が 46 事例、8 月が 42 事例、6 月が 26 事例の順である。他の地域と比較して、6 月に事例数が多いことが特徴である。台風・熱低本体による事例は 8 月がもっとも多く 21 事例である。南西諸島（nansei）をみると、全事例数は 4 つの地域の中でもっとも少ない 13 であり、9 月



第 2.6 図 地域別に分けた月別の集中豪雨事例の発生数

横軸は月、縦軸は発生数。青色は台風・熱低本体による集中豪雨事例、赤色はそれ以外の集中豪雨事例。

“njpn”は北日本、“ejpn”は東日本、“wjpn”は西日本、“nansei”は南西諸島。

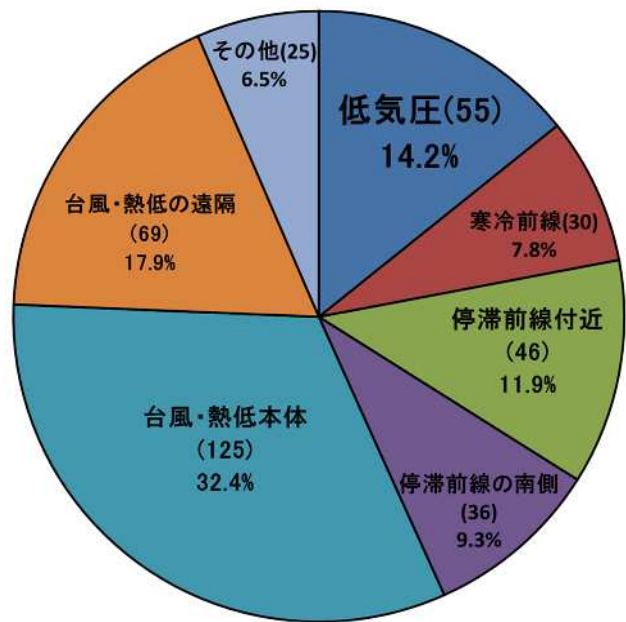
が最多となる5事例である。また、7月～10月のすべてが台風・熱低本体による事例である。

2.3.2 集中豪雨事例の擾乱別の発生数

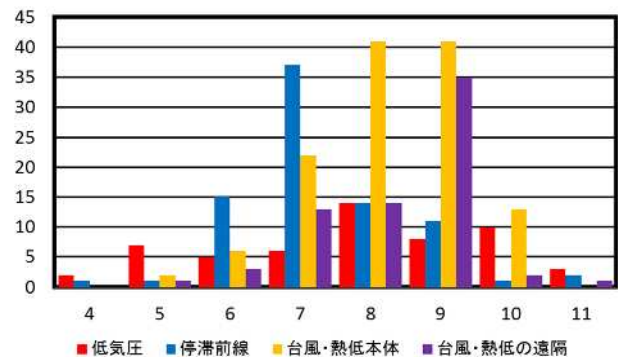
第2.2節および前項では、抽出された集中豪雨事例に対して、集中豪雨をもたらした擾乱について台風・熱低本体とそれ以外の分類を行った。本項では、台風・熱低本体以外の擾乱について、さらに分類した結果を述べる。

集中豪雨をもたらした擾乱は、(a)低気圧(温暖前線を含む)、(b)寒冷前線、(c)停滞前線付近(停滞前線から100km以内)、(d)停滞前線の南側(停滞前線から100km以上)、(e)台風・熱低の本体(中心から500km以内)、(f)台風・熱低の遠隔(中心から500km以上1500km以内)、(g)その他に分類した。地上天気図上に複数の擾乱がある場合は、台風・熱低に関連するものをもっとも優先的に扱い、それ以外の擾乱についてはもっとも影響が大きいと考えられる擾乱に分類し、擾乱の重複は無いようにした。第2.7図に擾乱別に分類した集中豪雨事例の発生数を示す。台風・熱低本体がもっとも多く、全386事例中125事例の32.4%を占めている。次いで、停滞前線付近とその南側の合計が82事例(21.2%)、台風・熱低の遠隔が69事例(17.9%)、低気圧が55事例(14.2%)、寒冷前線が30事例(7.8%)である。第2.8図に月別に分けた擾乱別の集中豪雨の発生数を示す。台風・熱低本体は8・9月に多く、停滞前線付近とその南側は6・7月に多く、台風・熱低の遠隔は9月に多いことがわかる。

第2.9図に地域別(地域区分は第2.1図参照)に分けた擾乱別の集中豪雨事例の月別発生数を示す。北日本(njpn)でもっとも集中豪雨事例が多い8月では、低気圧が最多となる6事例、次いで停滞前線付近とその南側が4事例である。9月では台風・熱低本体が多く、8事例である。東日本(ejpn)でもっとも集中豪雨事例が多い8月では、台風・熱低本体が最多となる14事例、次いで停滞前線付近とその南側と台風・熱低の遠隔が同数で7事例である。7月では停滞前線付近とその南側が11事例であり、台風・熱低本体が10事例である。9月では台風・熱低の遠隔が多く、17事例である。全体をみると、9月に台風・熱低の遠隔が多いのが特徴である。西日本(wjpn)で集中豪雨がもっとも多い7月では、停滞前線付近とその南側が格段に多く24事例であり、台風・熱低本体が9事例である。9月では、台風・熱低本体が最多となる20事例であるが、台風・熱低の遠隔がそれに近い16事例となっている。全体をみると、6・7月に停滞

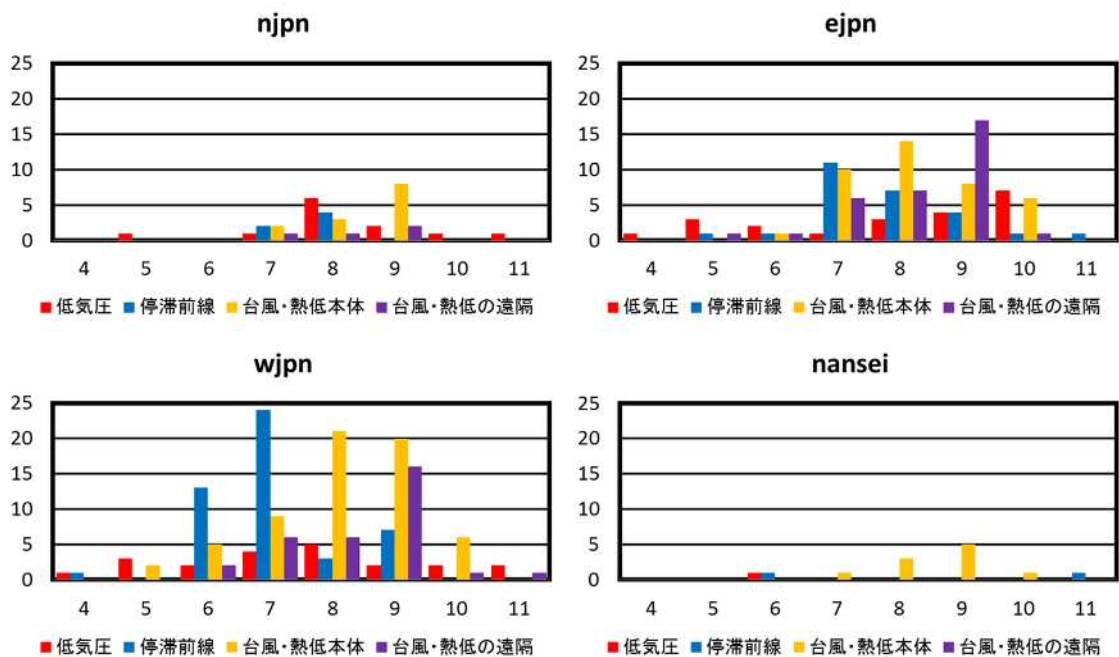


第2.7図 擾乱別に分類した集中豪雨事例の発生数



第2.8図 擾乱別に分類した集中豪雨事例の月別発生数

横軸は月、縦軸は発生数。赤色は低気圧、青色は停滞前線付近とその南側、黄色は台風・熱低の本体、紫色は台風・熱低の遠隔。



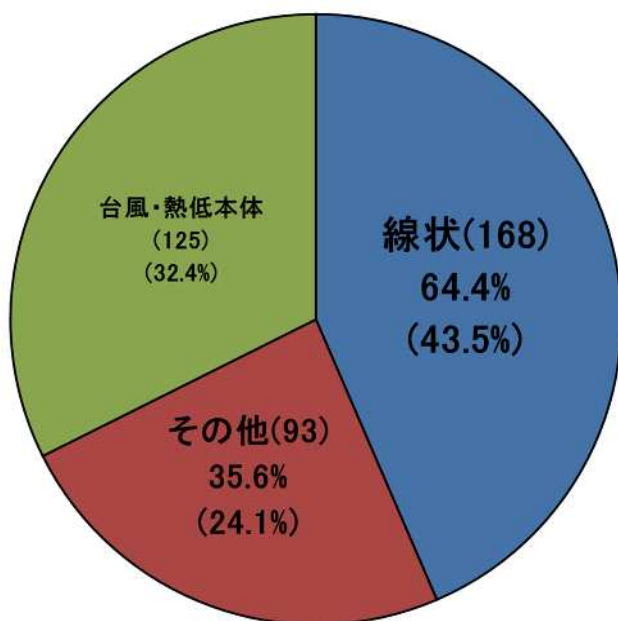
第2.9図 地域別に分けた擾乱別の集中豪雨事例の月別発生数

横軸は月、縦軸は発生数。赤色は低気圧、青色は停滞前線付近とその南側、黄色は台風・熱低の本体、紫色は台風・熱低の遠隔。“njpn”は北日本、“ejpn”は東日本、“wjpn”は西日本、“nansei”は南西諸島。

前線付近とその南側が多く、8・9月に台風・熱低本体が多く、9月に台風・熱低の遠隔が多いのが特徴である。南西諸島(nansei)では、前項でも述べているが、7月～10月における10事例すべてが台風・熱低本体である。

2.3.3 集中豪雨事例の降水系の形状別の発生数

集中豪雨をもたらす降水系の形状としては、線状構造を持つものが圧倒的に多いと報告されている(小倉 1991; 吉崎・加藤 2007)が、これまで統計的に調べられたことはない。本項では、抽出した集中豪雨事例について、集中豪雨をもたらした降水系の形状の分類を行った結果について述べる。ここでは、台風・熱低本体以外に分類された集中事例について、最大3時間積算降水量を記録した時刻の解析雨量の水平分布図をもとに、50 mm/3h以上の領域の長軸と短軸の比が3対1以上のものを(a)線状に、それに該当しないものを(b)その他に分類した。第2.10図にその結果を示す。線状は台風・熱低本体による事例を除いた261事例中168事例であり、その内の64.4%を占めている。この結果は先行研究を裏づけるものである。第2.11図に月別に分けた降水系の形状別の発生数を示す。線状の集中

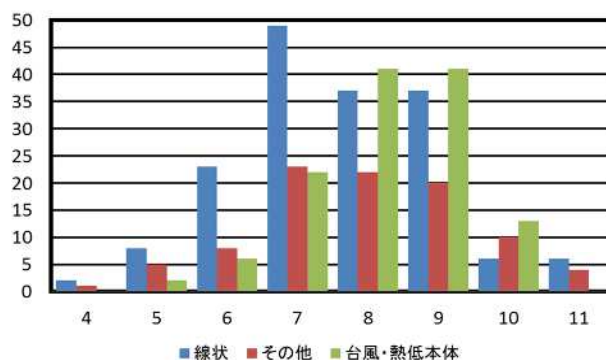


第2.10図 降水系の形状別に分類した集中豪雨事例の発生数

第 2.1 表 擾乱別-降水系の形状別に分類した集中豪雨事例の発生数

擾乱の分類			降水系の形状の分類		
			線状	その他	台風・熱低
低気圧		55	33	22	
寒冷前線		30	18	12	
停滞前線	前線付近	46	37	9	
	前線の南側	36	25	11	
台風・熱低	本体	125			125
	遠隔	69	45	24	
その他		25	10	15	
		386	168	93	125

豪雨事例は特に 7 月に多いことがわかる。第 2.12 図に地域別（地域区分は第 2.1 図参照）に分けた降水系の形状別の集中豪雨事例の月別発生数を示す。北日本（njpn）、東日本（ejpn）、南西諸島（nansei）では目立った特徴はみられないが、西日本（wjpn）では全 188 事例中 103 事例が線状であり、特に 7 月で多くなっている（103 事例中の 37 事例）。第 2.1 表に集中豪雨事例を擾乱別-降水系の形状別に分類した結果を示す。線状の集中豪雨事例は、停滞前線付近とその南側が最多となる 62 事例であり、次いで台風・熱低の遠隔が 45 事例、低気圧が 33 事例である。前述のことと合わせてまとめると、台風・熱低本体によらない集中豪雨は線状構造を持つ降水系によってもたらされることが多く、その降水系は停滞前線に伴って発生することが多い。また、このような特徴は西日本の 7 月（梅雨末期）に顕著にみられる。



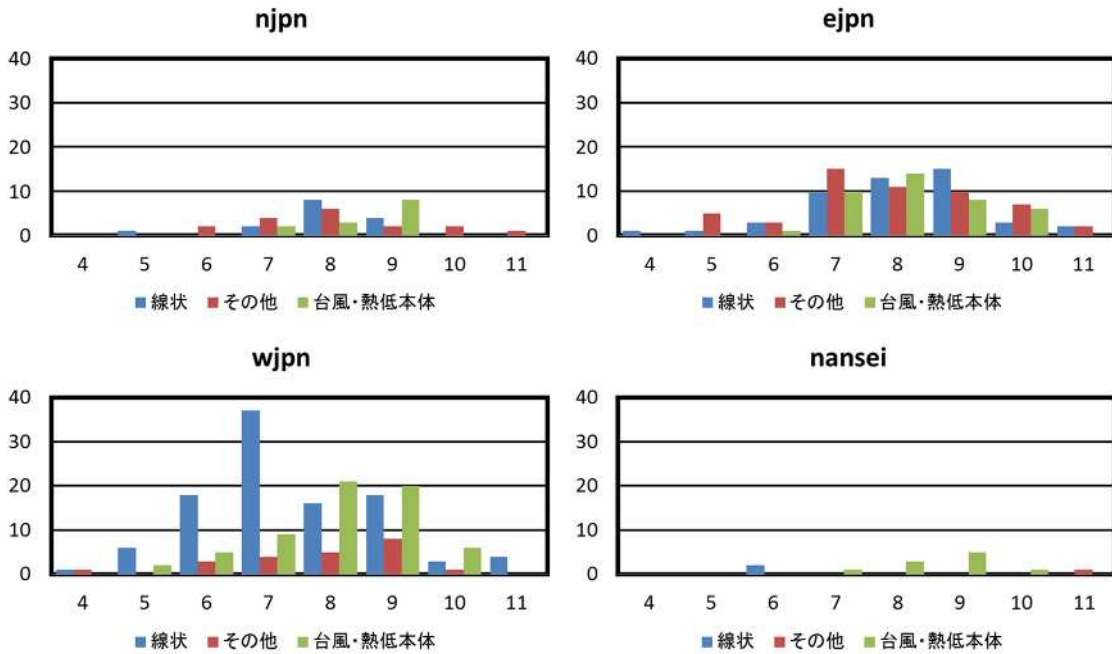
第 2.11 図 降水系の形状別に分類した集中豪雨事例の月別発生数

横軸は月、縦軸は発生数。青色は線状、赤色はその他、緑色は台風・熱低本体。

2.4 集中豪雨が発生する総観～メソ スケール環境場に関する統計解析

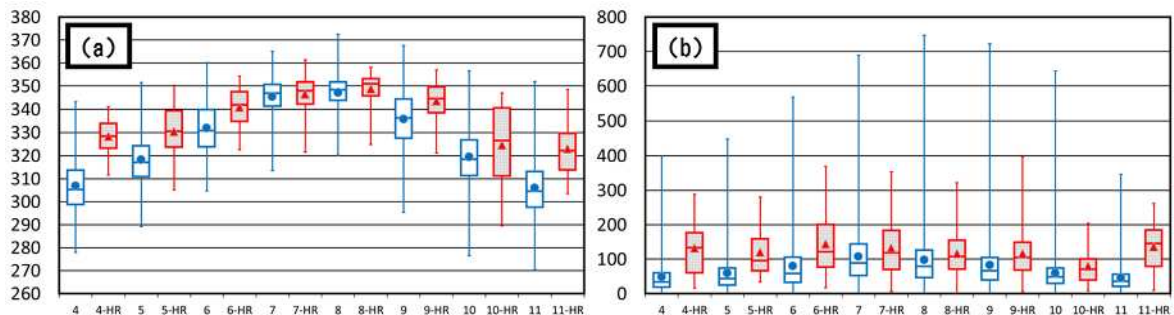
本節では、気候場と集中豪雨発生時の環境場を比較することで、集中豪雨が発生する場合の環境場の特徴をとらえることを目的に行った統計解析の結果について述べる。

気候場と集中豪雨発生時の環境場を作成するための客観解析データとして、6 時間ごとにある気象庁再解析データ JRA-25/JCDAS (Onogi et al. 2007) を使用した。期間は集中豪雨事例を抽出した期間と同じ 1995 年～2009 年の 15 年間で、冬季を除いた 4 月～11 月である。領域は前節で集中豪雨事例の特徴の統計解析を行ったものと同じで、日本全域を 4 つの領域に区分し（地域区分は第 2.1 図参照）、海上のデータのみを用いた。統計解析は様々な要素について行うべきであるが、本解析では加藤・廣川（2012）で主張されている集中豪雨が発生するためのもっとも基本的な必要条件である 500 m 高度での相当温位（500mEPT）と水蒸気フラックス量（500mFLWV）に着目した。各月の気候場は、各月における 1995 年～2009 年の全データを用いて計算した。一方、各月の集中豪雨発生時の環境場は、各月において集中豪雨事例の最大 3 時間積算降水量の直前の時刻の JRA-25/JCDAS のデータを集めて計算を行った。以下では、紙面の都合から西日本（wjpn）における環境場の統計解析の結果についてのみ述べる。



第 2.12 図 地域別に分けた降水系の形状別の集中豪雨事例の月別発生数

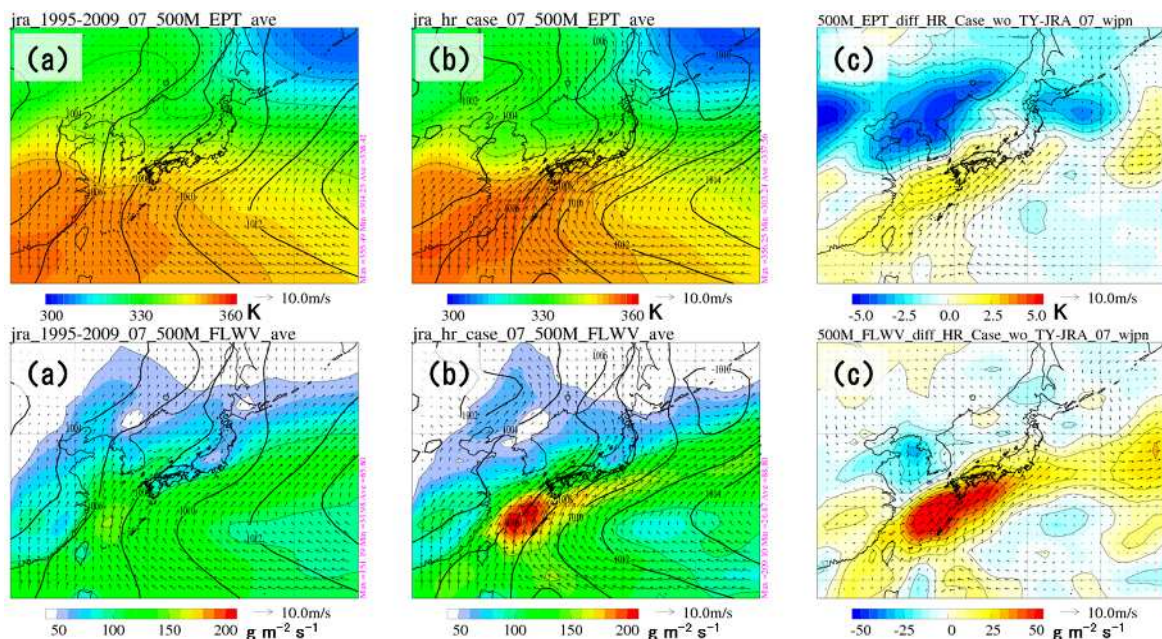
横軸は月、縦軸は発生数。青色は線状、赤色はその他、緑色は台風・熱低本体。“njpn”は北日本、“ejpn”は東日本、“wjpn”は西日本、“nansei”は南西諸島。



第 2.13 図 気候場と集中豪雨発生時の環境場の月別の平均値と箱ひげ図

と は平均値、箱ひげ図の箱は、上から 75 % 値、50 % 値、25 % 値，縦線の上端と下端はそれぞれ最大値と最小値を表す。青色が気候場、赤色が集中豪雨発生時の環境場。(a) 500 m 高度における相当温位と (b) 500 m 高度における水蒸気フラックス量。横軸は月（数値の末尾に“-HR”を付加したものは集中豪雨発生時の環境場を示す）、縦軸は (a) 相当温位 (K)、(b) 水蒸気フラックス量 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$) をそれぞれ示す。

第 2.13 図(a)に、500mEPT の気候場と集中豪雨発生時の環境場の月別の平均値と箱ひげ図を示す。まず平均値をみると、両者とも 4 月からゆるやかに上昇し、8 月に最大値となった後、ゆるやかに下降していることがわかる。また、気候場では平均値の最大 (8 月) と最小 (11 月) の差が約 41 K であるが、集中豪雨発生時では平均値の最大 (8 月) と最小 (11 月) の差が約 26 K となっており、後者の差の方が小さくなっている。各月別に両者の平均値を比較すると、4・5・6・9・11 月は差が 7 K 以上となっているが、7・8 月は差が 2 K 以下となっており、差が小さくなっている。次に箱ひげ図の比較を行うと、4・5・6・9・11 月で



第 2.14 図 (a) 気候場と (b) 集中豪雨発生時の環境場と (c) 両者の差分 (b)-(a))

(上) 500 m 高度における相当温位 (K) と (下) 500 m 高度における水蒸気フラックス量 ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。太実線は海面更正気圧 (hPa)、矢印は 500 m 高度における風ベクトル (m s^{-1})。

は気候場の 75 % 値よりも集中豪雨発生時の 50 % 値が大きくなっているが、7・8 月では、その逆となっている。

第 2.13 図(b)に、500mFLWV の気候場と集中豪雨発生時の環境場の月別の平均値と箱ひげ図を示す。平均値をみると、気候場については 500mEPT と同様な変化傾向がみられる。一方、集中豪雨発生時をみると、月ごとに大きな変化はみられず、10 月を除くすべての月で $115 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上となっている。各月別に両者の平均値を比較すると、4・5・6・11 月は $60 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上となっているが、7・8 月は $30 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以下となっており、500mEPT と同様に両者の差が小さくなっていることがわかる。

以上のことから、4・5・6・9・11 月については集中豪雨発生時の環境場が気候場と比較して大きな差があるため、500mEPT と 500mFLWV の監視だけでもある程度は集中豪雨の発生を診断的に予測できると考えられる。しかし、7・8 月は両者の差が小さいために、これらの要素だけの監視では集中豪雨を正確に予測することは難しい。7・8 月については、気候場と集中豪雨発生時の環境場の平均値や箱ひげ図の差が小さいことから、普段からいつ集中豪雨が発生してもおかしくないような環境場となっている。しかし、7・8 月に常時集中豪雨が発生しているわけではない。このことは、500mEPT と 500mFLWV の高い値が集中豪雨発生のための必要条件であって十分条件でないことを示している。つまり、大気の下層に暖かく湿った気塊が流入するだけでは集中豪雨とはならず、その気塊を自由対流高度 (LFC) まで持ち上げるメカニズムや降水系を組織化するメカニズムの存在が必要である。

最後に、気候場と集中豪雨発生時の環境場の差が小さかった 7 月の 500mEPT と 500mFLWV の水平分布をみてもみる。500mEPT(第 2.14 図上段)をみると、気候場では九州南部付近より南側にのみ 350 K 以上の領域がみられるが、集中豪雨発生時の環境場では 350 K 以上の領域が九州北部や四国南部付近まで北上していることがわかる。両者の差分をみると、西日本からその西方の東シナ海上では集中豪雨発生時の値が最大で 2 K 以上高くなっている。逆に、西日本の北側では集中豪雨発生時の値の方が最大で 5 K 以上低くなってい

る。このことから、西日本領域では500mEPTの南北傾度が集中豪雨発生時に大きくなっていることがわかる。次に、500mFLWV(第2.14図下段)をみると、集中豪雨発生時の九州南部付近の西側では $200 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上となっている。両者の差分をみると500mEPTとほぼ同じく、東シナ海から四国の南岸にかけての領域で集中豪雨発生時の値の方が大きく、最大で $50 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上の差がある。両者の海面更正気圧の分布と風の分布を比較すると、集中豪雨発生時は気候場よりも太平洋高気圧が西に張り出し、中国東北区に低圧部があらわれ、東シナ海から四国の南岸にかけての領域で気圧傾度力が大きくなっている。このため、集中豪雨発生時には西日本領域に吹き込む南西風が強化されて最大で 10 m s^{-1} 以上大きくなっており、西日本領域には気候場よりも暖かく湿った空気が多量に流入することができている。このような集中豪雨発生時の状況は、平成24年7月九州北部豪雨発生時の気圧配置(気象庁報道発表資料2012)でもあらわれている。

2.5 おわりに

本章では、気象研究所予報研究部を中心に診断的予測グループが取り組んでいる『集中豪雨の統計的研究』のこれまでの成果について報告した。今後は、500 m 高度の相当温位と水蒸気フラックス量以外の集中豪雨発生の必要条件となりうる要素(たとえば安定度に関連する500 hPaの気温や700 hPaの湿度など)についても統計解析を行うとともに、集中豪雨発生の十分条件となる大気下層の持ち上げメカニズムや降水系の組織化に関連する要素(たとえば、500 m 高度の収束量や鉛直シアなど)についても調査する予定である。

参考文献

- Hirockawa, Y. and T. Kato(2012): Kinetic energy budget analysis on the development of a meso-scale vortex causing heavy rainfall observed over Aomori prefecture in northern Japan on 11 November 2007. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, (in press).
- Kato, T. and H. Goda (2001): Formation and maintenance processes of a stationary band-shaped heavy rainfall observed in Niigata on 4 August 1998. *J. Meteor. Soc. Japan*, **79**, 899-924.
- Kato, T. (2006): Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over northern Kyushu, Japan on 29 June 1999. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 129-153.
- 加藤輝之(2010): 豪雨監視・予測技術の開発, 平成22年度数値予報研修テキスト, 71-88.
- 加藤輝之・廣川康隆(2012): 大雨を発生させやすい環境場について, 平成23年度予報技術研修テキスト, 86-100.
- 気象庁報道発表資料(2012): 「平成24年7月九州北部豪雨」の発生要因について,
(http://www.jma.go.jp/jma/press/1207/23a/20120723_kyushu_gouu_youin.pdf).
- 気象庁(2012): 平成23年7月新潟・福島豪雨と平成23年(2011年)台風第12号および台風第15号の調査報告. 気象庁技術報告, **134**, (印刷中).
- 小倉義光(1991): 集中豪雨の解析とメカニズム, 天気, **38**, 276-288.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira(2007): The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- 瀬古弘(2010): 中緯度のメソ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.
- 津口裕茂・榊原均(2005): 2001年10月10日佐原・鹿嶋に豪雨をもたらしたレインバンドの構造と維持

機構, 天気, 52, 25-39.

吉崎正憲・加藤輝之(2007): 豪雨・豪雪の気象学, 朝倉書店, 187pp.

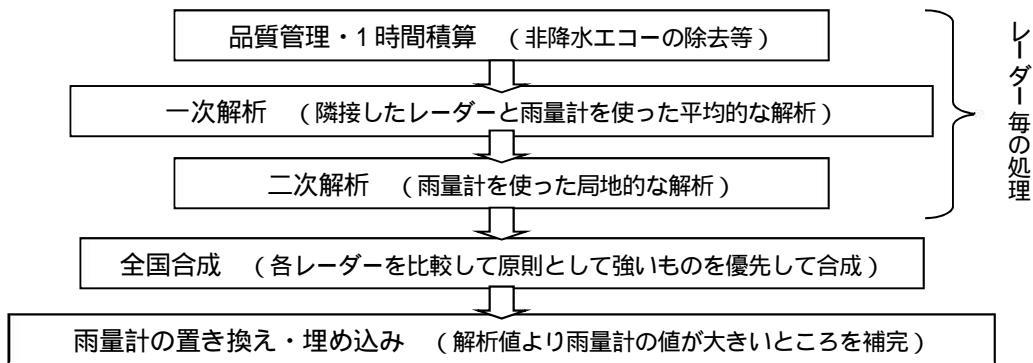
第3章 解析雨量・降水短時間予報・ 降水ナウキャストの改善*

3.1 解析雨量の改善

解析雨量は、正確だが観測網が粗い雨量計観測と、面的に細かい観測値が得られるが、電波を使った間接的な観測であるため精度が不十分なレーダー観測の両方の利点を生かして、面的にきめ細やかで正確な雨量推定値が得られるように開発されたものである。

解析雨量の処理は大まかに、第3.1.1図に示すとおりである。この項では解析雨量の処理及び使用する観測データについて、平成18年以降に大きく改良した点を中心に解説する。

なお、処理の詳細については平成18年度量的予報研修テキストも参照されたい。



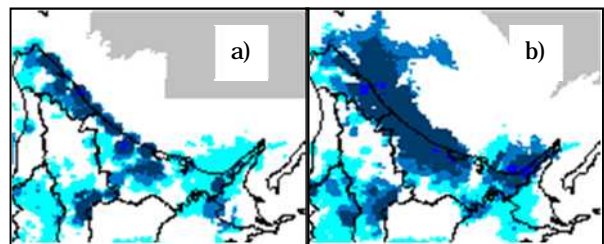
第3.1.1図 解析雨量の処理の流れ

解析雨量ではレーダー毎に雨量解析を行った後に全レーダーを合成する。

3.1.1 使用する観測データに関する変更

(1) 国交省レーダ雨量計の利用

平成18年11月から順次国交省Cバンド[†]レーダ雨量計(以降、レーダ雨量計と呼ぶ)の利用を開始し、平成20年3月からは26サイトある全てのレーダ雨量計を解析雨量の作成に利用している。これにより、弱い雨のときなどに立地条件によって気象庁レーダーのみでは捉えにくい北海道北東部の降水なども捉えられるようになった(第3.1.2図)。



第3.1.2図 レーダ雨量計の効果

a)はレーダ雨量計を合成しない解析雨量で、b)は合成した解析雨量。北海道東部の雨域が広がっているのがわかる。

(2) 5分間隔気象庁レーダーデータの利用

使用する観測データのうち、気象庁レーダーの観測間隔が平成21年6月に10分から5分に短縮された。

* 宮城 仁史、入口 武史、佐藤 大輔、熊谷 小緒里、白石 瞬(気象庁予報部予報課)、木川 誠一郎(気象庁観測部観測課観測システム運用室)

[†] レーダーの電波は波長により分類され、主にSバンド(10cm波)、Cバンド(5cm波)、Xバンド(3cm波)がある。波長が短いほど精細に観測できるが、降水等の減衰に弱い性質がある。

10分毎のレーダーデータと5分毎のレーダーデータはレーダービームの高度等が若干異なる領域があるため、品質を調査し平成22年5月から5分毎の観測の利用を開始した。10分毎のレーダーデータが5分毎になったことと、後述する積算方法の改善により1時間積算雨量の精度が向上した。

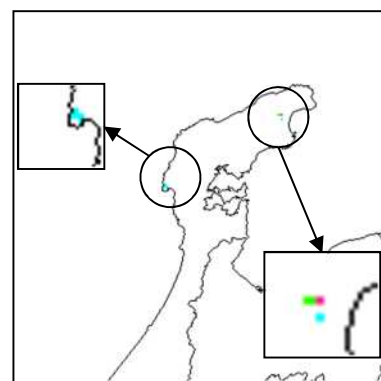
3.1.2 レーダーデータの品質管理・1時間積算

(1) 品質管理処理の変更点

レーダーは電波を発射し、目標からの反射波（正確には後方散乱波）を観測して降水量を推定している。反射波は必ずしも降水粒子に限るわけではなく、異常伝搬などにより、地形からの反射などを捉える場合があるため、地上では降水の観測がないのにレーダーでは降水を推定することや、地上の降水より強く推定することがある。このような異常値を全て解決することは困難であるが、軽減させる措置を施して解析雨量の算出に利用している。

(ア)クラッター除去処理の追加

平成18年3月に解析雨量の空間分解能を2.5km格子から1km格子相当に精緻化して以降、レーダーの地形反射（グランドクラッター）が原因と思われる過大な降水量の解析が増加した（第3.1.3図）。そこで、あらかじめグランドクラッターの出現しやすい格子として登録した格子のレーダーエコーを除去し、条件により近傍の格子のレーダーエコーを使って内挿する処理を平成19年1月から追加した。この処理の追加に伴い、あらかじめ登録してした格子のエコーを条件によって除去する（0mm/hにする）従来の地形エコー除去処理は行わないこととした。また、電波が山などの遮蔽物で遮られる領域では、通常レーダーエコーは観測されないが、非常に強い降水の場合には、レーダービームの広がりとの関係で、品質の悪い弱いエコーが観測される場合があるためこの処理で除去している。



第3.1.3図 グランドクラッターの例

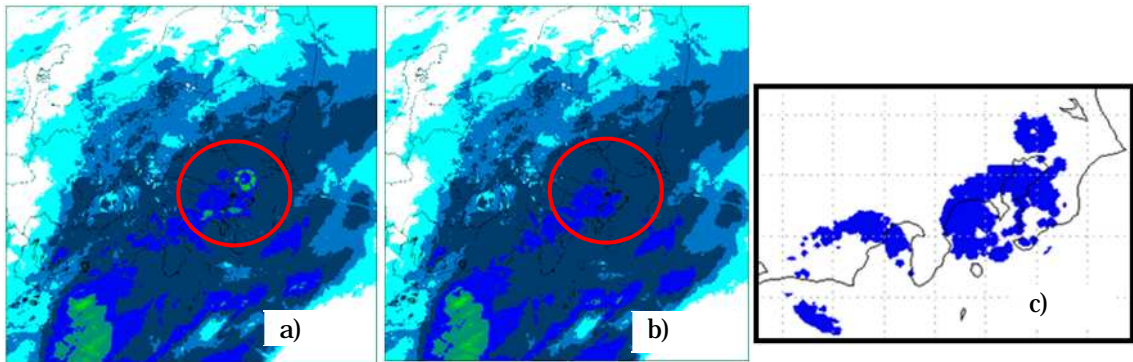
図の丸内には地物からの反射による非降水エコーが見られる。このときに能登半島では降水はない。

(イ) ブライトバンド軽減処理の導入

ブライトバンドは、上空の融解層（雪から雨に変わる層）からの反射波が通常よりも非常に強くなる現象で、数mm/h程度の降水が50mm/h以上の降水として観測されてしまうこともある。ブライトバンドは長時間、同じ場所にとどまる場合があり、雨量積算の誤差が大きくなる。また、警報の発表基準に用いられる土壌雨量指数や流域雨量指数は雨量積算の影響が大きく、ブライトバンドの軽減が求められた。

ブライトバンド軽減の方法は、数値予報(MSM)の気温情報から0の高度を求め、この高度付近のレーダーエコーを抽出する。しかしこれだけではブライトバンドではない領域が含まれる傾向にあるため、これらのエコーのうち、周囲より際だって強いエコーを求めてこれをブライトバンド領域と判定する。ブライトバンドと判定した領域は、周囲のエコーを重み付き内挿してエコー強度を推定する。ブライトバンド軽減結果を第3.1.4図に示す。

ブライトバンドを軽減する処理を平成24年1月から導入した。



第3.1.4図 ブライトバンド軽減結果

a)はブライトバンド軽減処理を導入しない場合の解析雨量、b)はブライトバンド軽減処理を導入した場合の解析雨量、c)はブライトバンド判定領域を示す。b)では赤円内の強い領域が除去されている。

(2) レーダー積算降水強度作成手法の改良

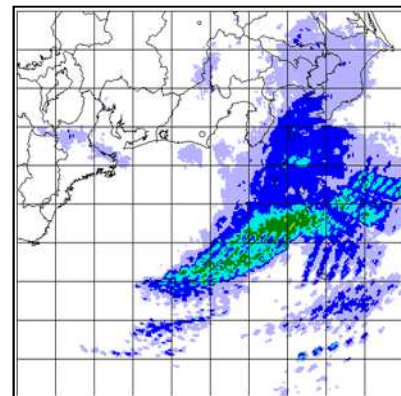
レーダーで観測したレーダーエコー強度は瞬間値である。レーダーデータをレーダー毎に1時間積算し平均する処理が1時間積算処理であり、積算することにより地上降水量と比較することが可能となる。

これまで、1時間積算降水強度（以下、レーダー雨量と呼ぶ）は、1時間内に観測されたエコー強度を単純に平均して作成していた。この方法は、レーダーの観測時間間隔の間に、降水域が大きく移動しないことを暗黙に仮定した方法であり、空間解像度に対して観測時間間隔が十分短い場合にはこの仮定は成立するが、空間解像度が1kmになったことによりこの仮定が崩れ、櫛の歯状を呈した実際の雨域の形状と異なる不適切なレーダー雨量が算出される事例が目立つようになった（第3.1.5図）。

また、このような積算値を用いて解析を行うと、雨量計の位置とレーダー雨量の分布の関係で、解析に悪影響を及ぼす場合がある（第3.1.6図）。

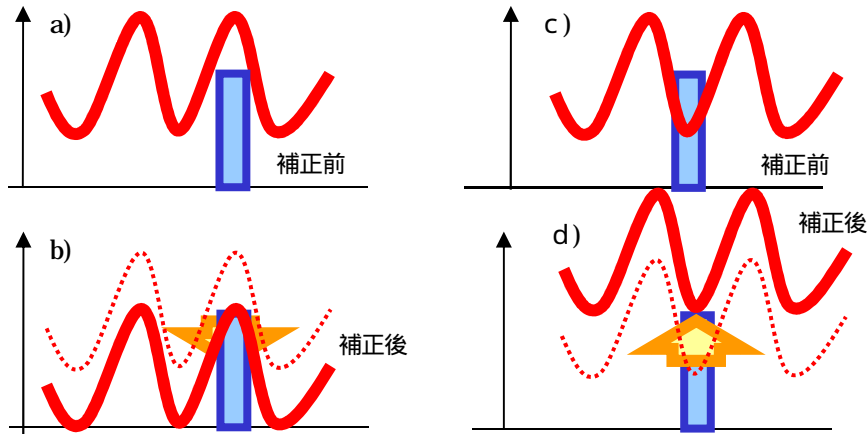
この現象を改善するため、以下の新たな積算方法を開発し、平成20年9月から導入した。1時間内のレーダー観測について、それぞれの観測時刻毎にレーダーエコーをひとまとまりで移動すると考えられる領域に分割し、そのまとまりごとに前後の観測時刻と比較することによって降水の移動状況を推定し、それぞれのエコーが移動した経路にそって観測された降水強度に応じた降水を補完・内挿して積算することとした。

この作業を60分前から対象時刻までの各観測時刻の間で行うことによりレーダー雨量を求める。レーダーの観測間隔が5分毎になったことに加え、新たな1時間積算方法を用いることにより、より精度の高いレーダー雨量が求まるようになった。



第3.1.5図 櫛の歯状のレーダー雨量

2006年4月2日の静岡レーダーのレーダー雨量。雨域の移動が速いため、単純に積算すると実際の雨域の形状とは異なる櫛の歯状のパターンが現れる。



第3.1.6図 「櫛の歯」状のレーダー雨量の解析雨量への影響

青い縦棒は雨量計の1時間積算雨量を、赤の曲線はレーダー雨量を示す。a)のようにレーダー雨量の多い部分に雨量計があると、レーダー雨量を雨量計に合うように補正するため、b)のように過小値ができてしまう。逆に、c)のようにレーダー雨量が多いところがあるとd)のような過大値ができてしまう。

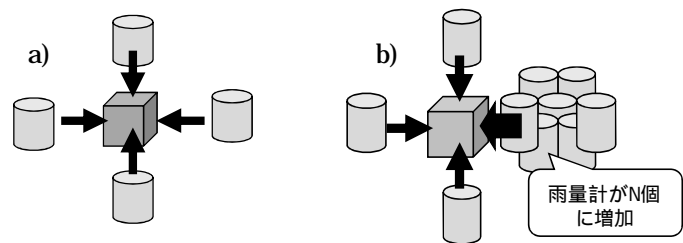
3.1.3 二次解析の変更点

二次解析では一次解析で残った局所的なずれを補正し、より正確な降水分布を求めるため、雨量計を利用して局地的な雨量分布を求める。二次解析では、まず雨量計のある格子（以降、雨量計格子と呼ぶ）の雨量観測値と一次解析値をもとに全ての雨量計格子に対して一次解析値を補正する二次補正係数を計算し、次にこれらのうち近辺の雨量計の二次補正係数を利用した重み付き内挿によって陸上の全ての格子の二次補正係数を決定している。この時考慮している重みには、距離に応じて重みをつける「距離重み」、レーダーの電波の減衰を推測して雨量計格子と補正対象格子の減衰量が近いほど重みを大きくする「減衰比重み」、雨量計格子と補正対象格子のレーダー雨量値（一次解析値または仮の二次解析値）に近いほど重みを大きくする「レーダー雨量比重み」がある。求めた解析値を使い同じ作業を3回繰り返して最終的な二次解析値を算出する。

(1) 一様性重みの導入

二次解析で雨量計格子における補正係数から内挿で任意の格子の補正係数を求める時に、雨量計は一様に分布していることを仮定しているが、実際には地域によって偏りがある。例えば、第3.1.7図のa)のように分布が均質な状況では、それぞれの雨量計の影響が内挿された2次補正係数に等しく反映されるものと期待できる。しかし、第3.1.7図のb)のように偏った分布では、多数の雨量計がある場所の影響が2次補正係数により濃く反映されてしまい、極端な場合、雨量計が密にある狭い地域だけで2次補正係数が決まってしまうこともありうる。そこで、全ての雨量計が2次補正係数に均一に影響を与えるように、雨量計の分布に応じて1つの雨量計が与える影響を調整することとした。「雨量計からの影響」を定量的に表すために、雨量計の「支配面積」という概念を導入する。

支配面積は、ある雨量計の雨量計格子を中心として周囲を4象限に分け、各象限でその雨量計に最も近い別の雨量計までの距離を求めて4象限平均をとり、平均値の1/2の2乗により求



第3.1.7図 偏った雨量計の配置

図の四角が対象格子で、円筒が雨量計。a)では4方向に1つずつ雨量計が分布しているが、b)では1方向に偏って分布している。

雨量計の「支配面積」という概念を導入する。

支配面積は、ある雨量計の雨量計格子を中心として周囲を4象限に分け、各象限でその雨量計に最も近い別の雨量計までの距離を求めて4象限平均をとり、平均値の1/2の2乗により求

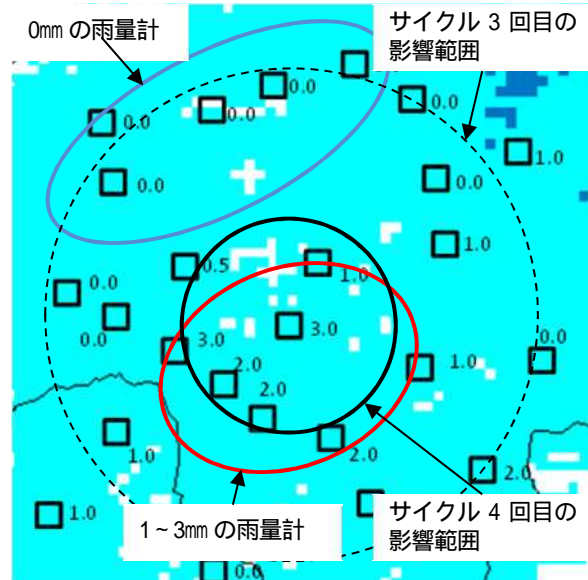
める。

支配面積の小さい雨量計の2次補正係数への影響を小さくするため、正規化した支配面積を用いて重み調整する。これを一様性重みと言い平成20年9月から導入した。

(2) 降雪等の弱い降水への対応

降雪はレーダーで捉えにくく、積算すると弱い降水が広がりメリハリのない分布になることがある。このような場合、二次解析で考慮されている重みの1つである、レーダー雨量比重みの影響が比較的大きくなり、遠くの雨量計の影響を受けやすくなる。また、雨量計で捉えている雨量も少なく、結果として少ない降水量に対する雨量換算係数が適用され解析雨量が小さめになる傾向がある。

二次解析では、「雨量計格子毎の補正係数の決定各格子への重み付き内挿」を3回繰り返して実施している。この際、繰り返しの回数が大きくなるにつれてより近傍の雨量計のみを使った重み付き内挿を実施し、全体の調和を維持しながら局地性も表現した二次雨量解析値を求めているが、降雪など弱い降水の場合は繰り返し回数を4回に増やし、4回目の解析でより局地的な解析を行うようにした(第3.1.8図)。強雨時の解析への悪影響をなくすため、4回目は3回目の二次解析終了時にレーダー観測範囲全体で10mm以上の雨量が解析されていない場合に実行する。この処理を平成24年6月に導入した。



第3.1.8図 繰り返し4回目の解析イメージ
四角は雨量計(数字は降水量)で背景はレーダー雨量(白が0mm/h、水色が0~1mm/h、青が1~2mm/h)。破線の丸が繰り返し3回目の影響範囲で、実線の丸が繰り返し4回目の影響範囲。3回目では北東にある0mmの雨量計が影響を受けてしまうため、4回目の繰り返しでは影響範囲を小さくし、近くの雨量計だけ影響するようにして解析を行う。

3.1.4 全国合成の変更点

全国合成では、レーダー座標系の二次解析値を緯度経度座標系に変換して全レーダーを合成している。平成18年11月よりレーダ雨量計を利用するようになったため、その合成方法を説明する。

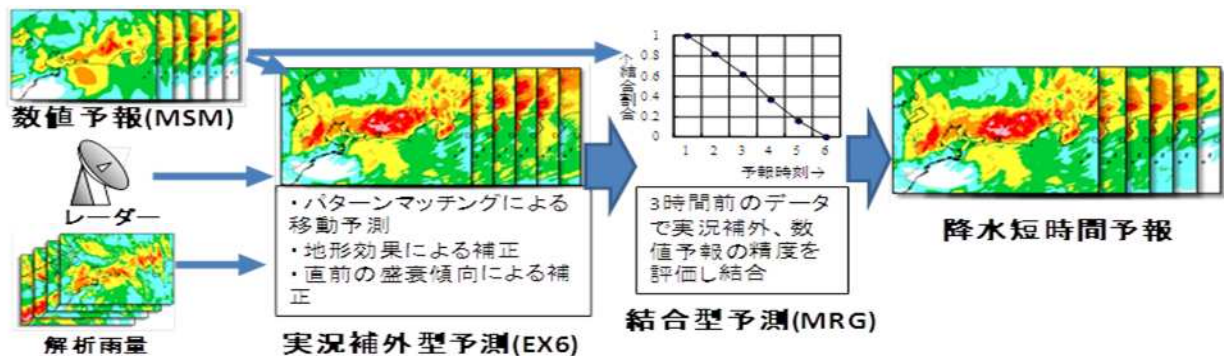
はじめに、気象庁レーダー(20サイト)、レーダ雨量計(26サイト)のそれぞれで、全国合成処理を実施し、それぞれで採用するレーダーを決める。複数のレーダーによるレーダー雨量が存在する格子は、基本としてレーダー雨量値の大きいレーダーを採用する。比較に二次解析値を使うと、レーダーサイトに近く品質の良いレーダーデータが採用されないこともあるため、気象庁レーダーはレーダー雨量を、レーダ雨量計はレーダー毎に若干性質が異なるため、一次解析で求めた補正係数のうち、高度に対する依存性を含まない補正係数(一次解析で得られる補正係数の一部、以降Faと呼ぶ)を乗じて比較し、気象庁レーダーの合成図とレーダ雨量計の合成図をそれぞれ求める。

次に、気象庁レーダーとレーダ雨量計を合成するが、両者では性質が異なるため、両者のレーダー雨量にFaを乗じて、気象庁レーダーとレーダ雨量計を1km格子単位で比較し、大きいほうのレーダーの二次解析値を採用して最終的な全国合成を作成する。

3.2 降水短時間予報の改善

降水短時間予報は、解析雨量等に基づく実況補外型予測（EX6）とメソ数値予報モデル（MSM）予測降水量から両者の降水予測精度に応じて予測を結合したもの（「結合予測（MRG）」と呼ぶ）で構成され、6時間先までの各1時間雨量を30分毎に予報している（第3.2.1図）。本項では平成18年以降の改良点について述べる。

なお、処理の詳細については平成18年度量的予報研修テキストも参照されたい。



第3.2.1図 降水短時間予報の概要

降水短時間予報は、解析雨量やレーダーなどの実況から予測した実況補外予測と、数値予報資料（MSM）を結合して6時間先までの1時間降水量を予測する。

3.2.1 実況補外型予測

実況補外型予測（以降、EX6 と呼ぶ）は解析雨量から求めた実況の降水分布を使い、降水の移動ベクトル、地形による発達・衰弱などを求め、6時間分の予測値を作成する。

（1）予測初期値

予測初期値には解析雨量の解析過程で算出される雨量換算係数を初期時刻のレーダーエコー強度にかけ雨量強度に補正した雨量強度合成値（瞬間値）を使用する。

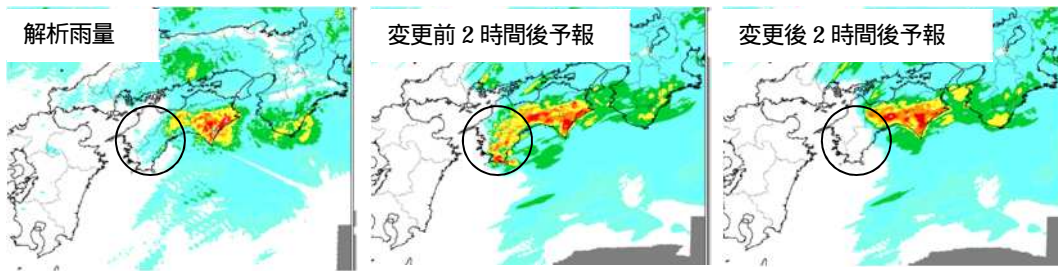
平成19年8月からは気象庁レーダーに加えて、国交省レーダ雨量計も予測初期値に加え始め、平成20年5月からは全26の国交省レーダ雨量計を使用するようになった。これにより、気象庁レーダーでは観測範囲の及ばない五島列島の西方の降水なども捉えられるようになった。

（2）移動ベクトル算出の変更点

移動ベクトルは、過去3時間の解析雨量を用いて降水域の移動をパターンマッチングにより捉え、代表的な移動の速さと向きを格子点毎に決定する（一般移動ベクトル）。また、10mm/h以上及び30mm/h以上の強雨が存在する場合には、強雨のみを取り出した降水分布を用いて強雨移動ベクトルを算出し一般移動ベクトルに埋め込んでいる。

従来、強雨ベクトルのマッチングには解析雨量（＝1時間積算値）を用いていたが、強雨域の動きは積算値より分布にメリハリのある瞬間値の方が捉えやすいことが分ったため平成20年9月から強雨移動ベクトルの算出には瞬間値を使うこととした。

第3.2.2図は移動ベクトルの改善例で、変更前は高知県で停滞していた強雨域が停滞しなくなった。



第3.2.2図 移動ベクトルの変更による改善例

図の丸で示した領域は、変更前は強雨域が残っていたが、変更後は残らずに移動するようになった。

(3) 地形効果の変更点

EX6 では、降水域が山を登る際に強まる「降水強化 (=地形性降水)」、山を越えた後に衰弱する「降水衰弱 (=山越え減衰)」及び山を越えられるか否かの「降水の山越え判断」の3つの手法を利用している。

この3手法の中で、平成18年以降大きな変更があった地形性降水について以下で説明する。

(ア) 地形性凝結量の算出

地形性降水を求めるには、まず気塊が地形に沿って上昇することで凝結が生じる格子を特定する必要がある。従来は、MSMの900hPaの風と気温(露点差は3度と固定)から標高差分の可降水量(=地形性可降水量)を求め、この可降水量が正であれば地形上昇によって凝結が生じるとしていた。一方、新手法ではMSMの地上と上空(950、900、850hPa)の風、気温、露点差及び高度(地上は気圧)を使い、上昇によって下層の気柱が凝結する量を地形性凝結量とするよう平成21年7月に変更した。

地形性凝結量(旧手法では地形性可降水量)が正の領域と重なっている降水域を地形性降水域とみなし、解析雨量を地形性降水と非地形性降水に分離する点は従来と同じである。

(イ) 地形性降水の変化

予想時刻における地形性降水量(予想地形性降水)は、初期時刻の非地形性降水量を $R_c(0)$ 、予想時刻の非地形性降水量を $R_c(t)$ として、下の式を基本としていた。

$$C(t) = R_c(t) / R_c(0)$$

$$\text{予想地形性降水} = \text{初期時刻の地形性降水} \times C(t)$$

ここで $C(t)$ は予報時刻 t における補正率である。

しかし、上記の方法は地形性降水の盛衰が非地形性降水の変化のみに依存すると仮定しているため、MSMの地形性降水の変化を十分に表現できないことがあった。そこで、平成24年3月より地形性凝結量の変化率を地形性降水の予想に利用することとした。新しい手法では、初期時刻における地形性凝結量を $C_{msm}(0)$ 、予想時刻における地形性凝結量を $C_{msm}(t)$ として、以下の式で算出する。

$$C(t) = R_c(t) / R_c(0) \times C_{msm}(t) / C_{msm}(0)$$

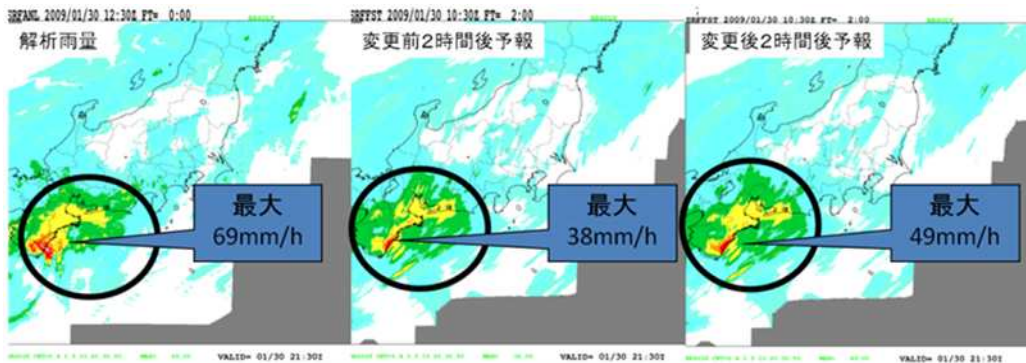
但し、 $C(t)$ には上限を設けており、初期時刻の地形性降水量が多いほど上限値を小さくしている。

$C_{msm}(t) / C_{msm}(0)$ は予報後半になるほど効果が大きくなるように設定している。また、MSMの精度によって効果が大きくなる時間が変化するようにしている。

(ウ) MSM降水量を用いた地形性降水の算出

従来は、予想地形性降水は実況の降水を基本として係数をかけ増減させてきたが、平成21年7月から新たにMSMの降水量も使い予想地形性降水を算出することとした。MSMの地形性降水量はMSMの予想降水量を地形性降水と非地形性降水に分離することで求める。分離の方法は、実況の降水量を分離する方法と同じである。

求めた MSM の地形性降水量は MSM の精度に応じて、(イ)で求めた予想地形性降水量と結合する。この結合して求めた地形性降水量をある予報時刻 t の地形性降水として移動してきた非地形性降水量に加算する。地形性降水の改善例を第 3.2.3 図に示す。



第 3.2.3 図 地形性降水の変更による改善例

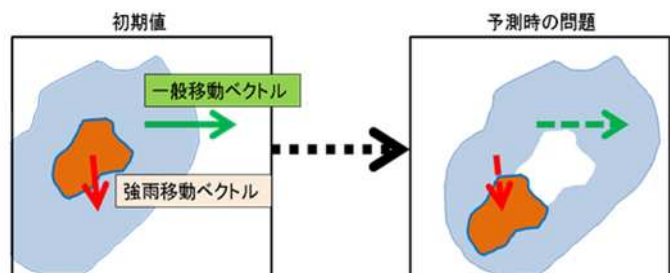
変更後の予想の方が強い降水を予想し、解析雨量に近づいている。

(4) 直前の盛衰傾向の利用

EX6 では降水系全体の移動予測を基本としているが、強雨域の動きが降水系全体の動きと異なることがある。強雨域のみ抽出した移動ベクトルの計算も行っているが、不自然な予測を防ぐために、一般移動ベクトルに強雨移動ベクトルを埋め込む際に平滑化を行っている(第 3.2.4 図)。このため、強雨移動ベクトルが一般移動ベクトルと大きく異なるときには、実際の強雨の動きを反映できない。

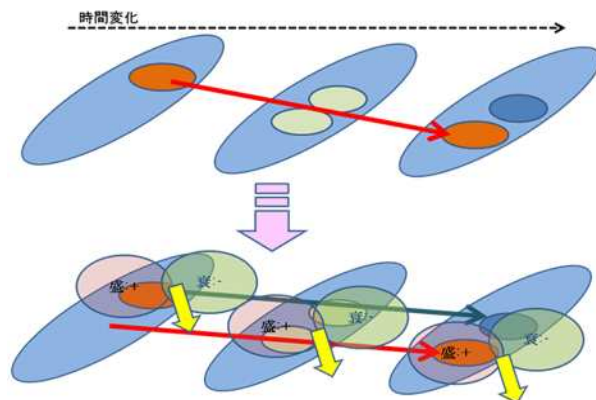
一般移動ベクトルと動きが大きく異なるときの強雨の移動を改善するべく、平成 23 年 3 月から降水の盛衰を加味した予測を行う手法を組み込んだ。強雨移動ベクトルは、強雨域を直接移動させるが、盛衰を加味した予測は移動してきた降水域を強める(あるいは弱める)ことで、一般移動ベクトルと大きく異なる強雨域の移動を表現しようというものである(第 3.2.5 図)。

降水の盛衰を加味した予測手法は、始めに予測初期値の降水を過去へ追跡し、過去の降水と比較して降水の盛衰傾向を算出しパラメータ化する(盛衰パラメータと呼ぶ)。次に算出した 30 分ごとの盛衰パラメータ



第 3.2.4 図 一般移動ベクトルと強雨移動ベクトルが大きく異なった場合の問題点

一般移動ベクトルと強雨移動ベクトルが大きく異なる場合にそのまま移動予測を行うと、降水予測の中に空白が生じてしまうために平滑化を行う。



第 3.2.5 図 盛衰パラメータを利用した降水の移動予測イメージ

図の上段は、強雨域が南下する現象のイメージで、下段は、盛衰パラメータを利用した予測イメージ。降水系全体の動きは東進だが、強雨域は南下する場合においても、盛衰パラメータの南下を移動予測できれば、無理のない予測を行うことが可能である。

の分布を用いて、盛衰パラメータ用の移動ベクトルを求める。最後に盛衰パラメータ用の移動ベクトルによって移動した盛衰パラメータと降水用の移動ベクトルによって移動した降水予想値を足し合わせることで降水の盛衰を表現する。

なお、盛衰パラメータは時間とともに信頼度が悪くなると考えられるため、徐々にパラメータの絶対値を小さくしていき、予測 2 時間後にはパラメータを 0 としている。2 時間後の予報までは 2 分毎の瞬間値から計算するため、2 時間後の予報まで盛衰パラメータが有効に作用する。

3.2.2 結合予測の改良

EX6 は初期時刻の降水域を移動・盛衰させて予測するため、短時間の予測の精度は良いが時間経過とともに精度が急速に低下する。一方で、MSM の雨量予測は目先の精度はあまり良くないが、予報後半でも精度の低下が小さい。両者の長所を生かすため、両者の精度を評価して EX6 と MSM の比率を決定し、EX6 と MSM の雨量予測を結合（以降、マージ処理という）するのが結合予測処理である。

精度の評価は、全国を 13 の領域に分けて EX6 の 3 時間前初期値の 3 時間予測値と、MSM の現在時刻の予測値を、それぞれ解析雨量と比較して評価スコアを計算する。このスコアをもとに MSM の信頼度を決め、EX6 の重みが予報後半で次第に低くなるような効果を考慮して結合する。

MSM の信頼度 r は、EX6 の評価スコアを $D(EX6)$ 、MSM の評価スコア(誤差を示す指標で精度が良いほど小さくなる値)を $D(MSM)$ とすると次のように定義されていた。

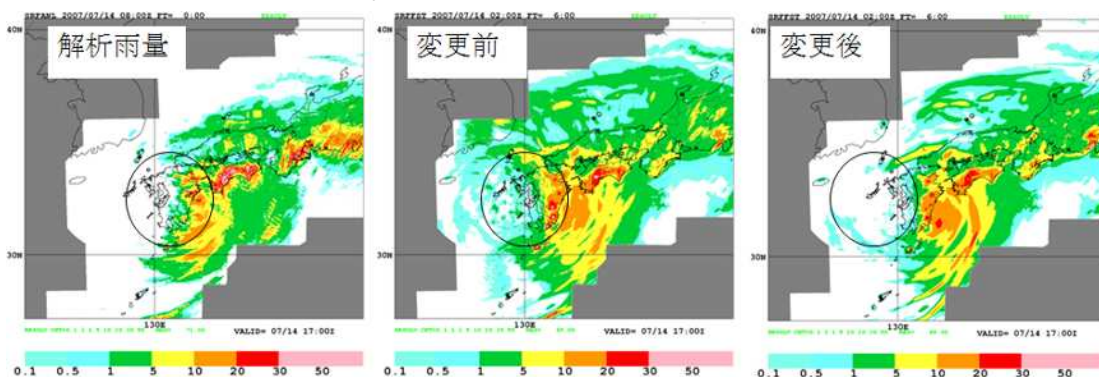
$$r = D(EX6)/D(MSM) - 0.5$$

(ただし、 r が 0 より小さい場合には 0、1 より大きい場合には 1)

しかし、近年 MSM の予報精度が向上したため、 r を求める式を平成 19 年 10 月に以下のように変更した。

$$r = D(EX6)/D(MSM)$$

以前の式では MSM の精度が EX6 の 1.5 倍以上良くなければ MSM の信頼度が 1 にならなかったが、新しい式では精度が同じで MSM の信頼度が 1 になり、予報後半に EX6 の比率を低下させる効果が得やすくなった。マージ処理の改善例を第 3.2.6 図に示す。



第 3.2.6 図 マージ処理の改善例

変更前は丸の領域付近で解析雨量に降水がないのに降水を予測していた。変更後は降水域が少なくなり解析雨量に近くなった。

3.3 降水ナウキャストの改良 ～盛衰予測の導入～

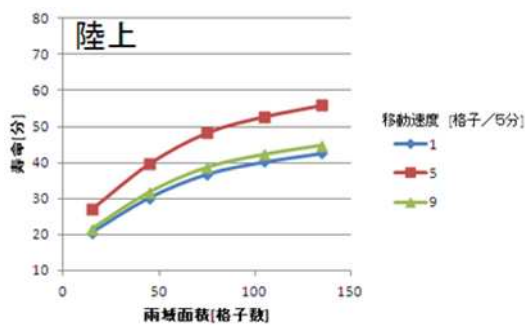
これまで降水ナウキャストは、雨域を移動させて予測値としていたが、地形性降水の予測機能を平成 23 年 12 月に導入し、雨雲の発達、衰弱を部分的に予測できるようになった。さらに、強雨域を含む雨雲の盛衰

予測を平成 24 年 5 月 9 日に導入している。

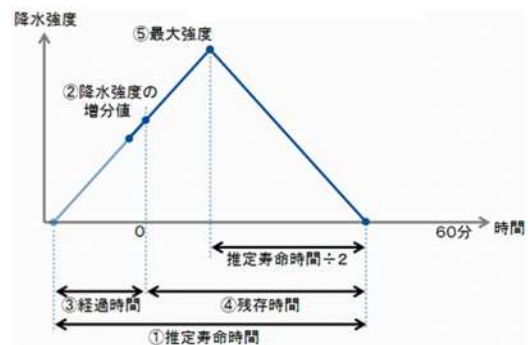
降水ナウキャストにおける雨雲の盛衰予測については、平成 23 年度予報技術研修テキスト（気象庁予報部、2012 年 2 月）においてその概念を解説している。ここでは、その詳細のうち、紙面の都合により、強雨域の盛衰予測について解説する。

3.3.1 既に存在している強雨域の盛衰予測

予測の初期値において既に存在している強雨域では、まず、雨域の面積及び移動速度から雨域の寿命を推定する。第 3.3.1 図に示すように、雨域の面積が広いほど寿命が長く、一方、停滞する雨域又は高速で移動する雨域では寿命が短くなる傾向がある。ここで、面積と移動速度の単位に使われている「格子」は降水ナウキャストの予測値における格子であり、格子間隔は約 1km であるので、5 格子 / 5 分の移動速度は約 17m/s に相当する。雨域の面積は、隣接する強雨域の面積の一部も加えて測定し、強雨域が単独で存在するときの寿命に比べて、強雨域が狭い領域に複数存在するときの寿命は長く予測される。この計算方式は、レーダー観測データを用いて小規模な強雨域の寿命を測定した結果に基づいて統計的に導いているので、±10 分程度の誤差がある。



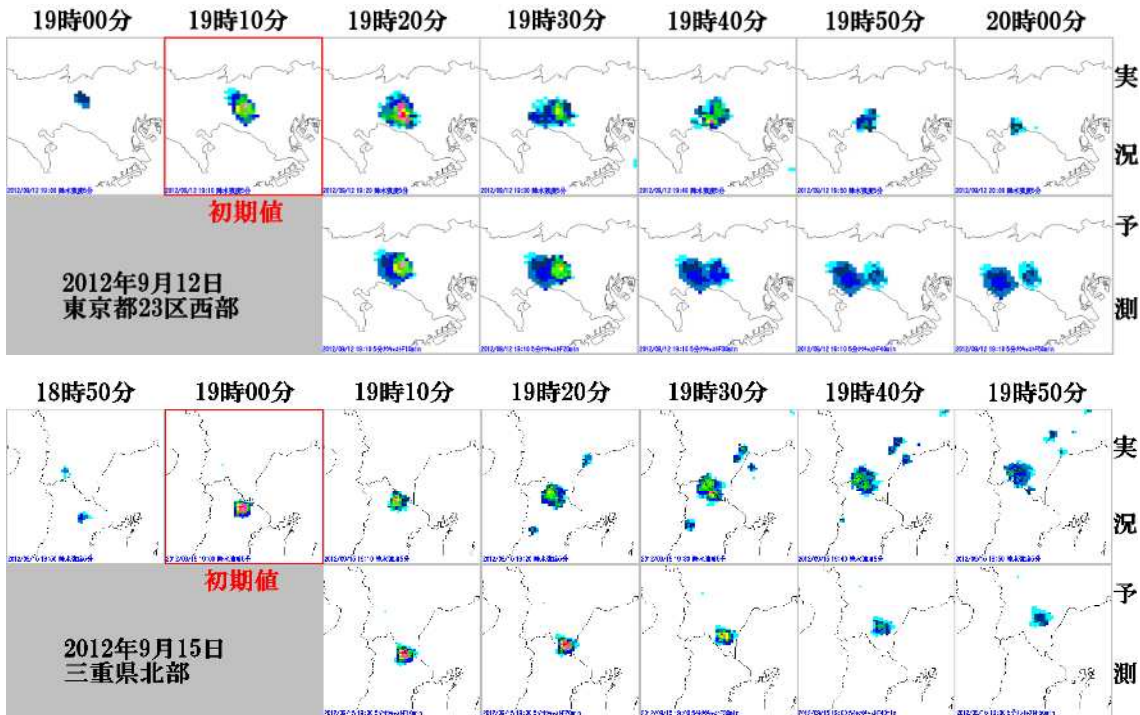
第 3.3.1 図 雨域の面積と移動速度から推定する小規模強雨域の寿命



第 3.3.2 図 強雨域の降水強度予測

第 3.3.2 図には、1 時間先まで降水強度を予測する手法を示している。縦軸に降水強度、横軸に時間をとり、時間 0 が初期値の時刻を表す。予測においては、まず雨域の面積と移動速度から寿命時間を算出し() 初期時刻における降水強度の増分値()と既に雨域が存在した時間()を算出する。雨域の残存時間()は推定寿命時間()から経過時間()を差し引くことにより推定する。次に、降水強度の増分値を寿命の半分の時間まで外挿して最大降水強度を推定し()、寿命の後半は降水強度が最低降水強度に向かって低下する予測値を作成する。ここで、推定寿命時間()、経過時間()及び残存時間()は雨域単位の情報である一方で、降水強度の増分値()及び最大強度()は面情報であり、時間とともに雨域が形を変える予測も可能となっている。なお、初期値において降水が線状の分布を示し、その風上側が楔形であるときには大雨をもたらす可能性が高いことから、予測においては最大降水強度を維持し、盛衰の衰を行わない。

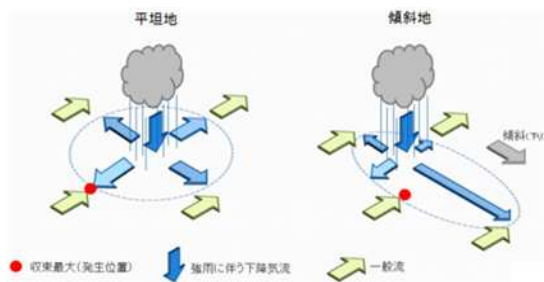
この手法による予測例として、第 3.3.3 図では 10 分間隔の降水強度について実況と予測の比較を示しており、2 つの事例とも強雨域が弱まる傾向を予測している。



第 3.3.3 図 初期値に存在する強雨域の予測例

3.3.2 これから発生する強雨域

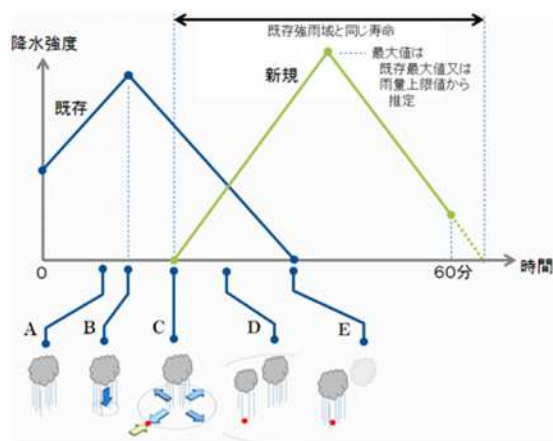
初期値において存在しない強雨域の予測については、既存の強雨域が新しい強雨域を発生させるトリガーとなり、すでに存在している強雨域の近くに新しい雨域を発生させる。これは、既存の強雨域の降水に伴う下降流が地表に達して水平方向に広がり、一般流や地形の影響を受けて収束が強まる領域が現れ、そこに新しい雨域が発生するとのシナリオに基づいている。既存の強雨域をトリガーとすることは、雨域が存在しない領域には新しい雨域を発生させないが、微弱なエコーをトリガーとして雨域を発生させる技術が実用化に向けた評価段階に入っている。



第 3.3.4 図 強雨域の発生位置

図の下向き矢印は強雨に伴う下降気流を表し、地表に達して水平方向に拡がると考える。平坦地であれば下降した冷気はすべての方向に同じように流れるが、傾斜地では低くなる方向により速く流れるとして、風の収束が最も大きい領域を発生位置とする。強雨に伴う下降気流は、降水強度が強いほど流速が速くなるように設定する。

なお、島嶼及び山岳では地上観測点が少ないため、レーダーが観測するドップラー速度を併用する方式の開発を進めている。



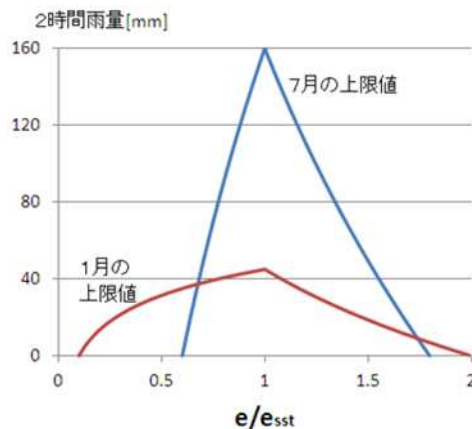
第3.3.5図 強雨域の発生時刻と強度予測

強雨域を発生させるタイミングは、既存の強雨域が最大強度となる時刻（第3.3.5図のB）を基準とし、このときに下降気流も最大になっていると考えて、その最も強くなった下降気流が地表に達して水平方向に拡がり、収束が最大となったときに新しい強雨域を発生させる（同図のC）。このため、既存の強雨域の最大強度（B）から新規強雨域発生（C）までの時間は一定ではない。

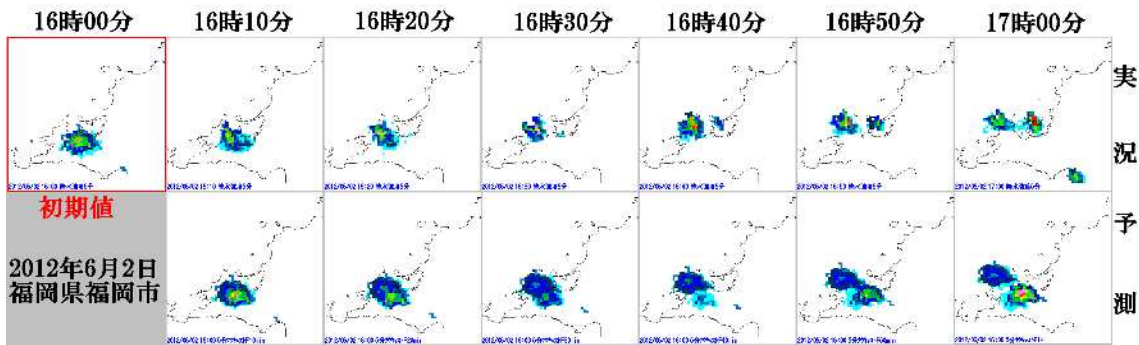
新規の強雨域は既存の強雨域から30km以内に発生させるので、同じような環境にあると考えて、既存強雨域と同じ長さの寿命を新規強雨域にも設定する。新規強雨域の降水強度の最大値は、既存強雨域の最大値又は雨量上限値から推定した降水強度最大値を

採用するので、新規の強雨域では既存の強雨域に比べて降水強度が大きくなることもある。ここで、雨量上限値とは積算雨量の上限を与えるもので、海面水蒸気圧（気温として海面水温、相対湿度に100%を設定して水蒸気圧を算出した値とここでは定義）に対する水蒸気圧の比から2時間積算雨量の最大値を算出している。この雨量上限値は全国の地上観測値から統計的に推定したものであり、第3.3.6図に示すように、冬では雨量上限値の最大が小さくなり、分布の裾野が広がる。

第3.3.7図には既存の強雨域をトリガーとした新しい強雨域の発生例を示している。実況では福岡市西部の強雨域が北西に進み、志賀島付近に新たな強雨域が発生しているが、降水ナウキャストでは新たな強雨域の発生を予測しているものの、発生位置が南へ10km程度ずれている。これは、15時40分まで北寄りの風が吹いていた福岡では、強雨域の通過に伴って15時50分から南西の風を観測するようになり、新しい強雨域を発生させる位置として地上の風の収束最大点を見出す際に、福岡の風向が大きく影響して実況よりも南側に雨域を予測した。このように、地上・アメダス観測が強雨域の通過の影響を受けると、新しい強雨域の発生位置に大きなずれが生じることがある。



第3.3.6図 雨量上限値

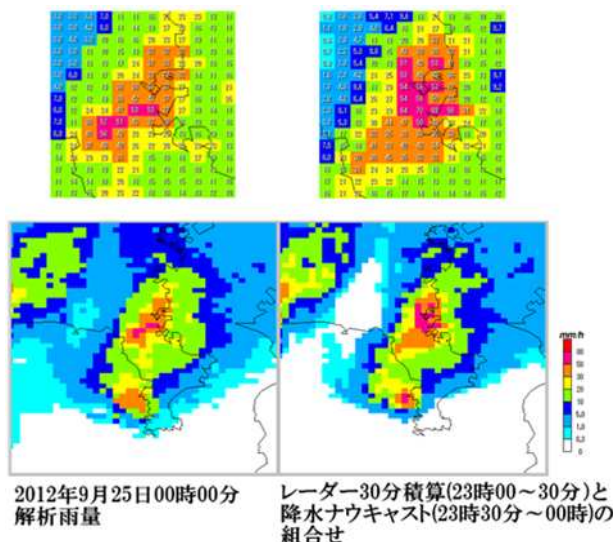


第3.3.7図 新たに発生する強雨域の予測例

3.3.3 利用上の留意点と効果的な利用方法

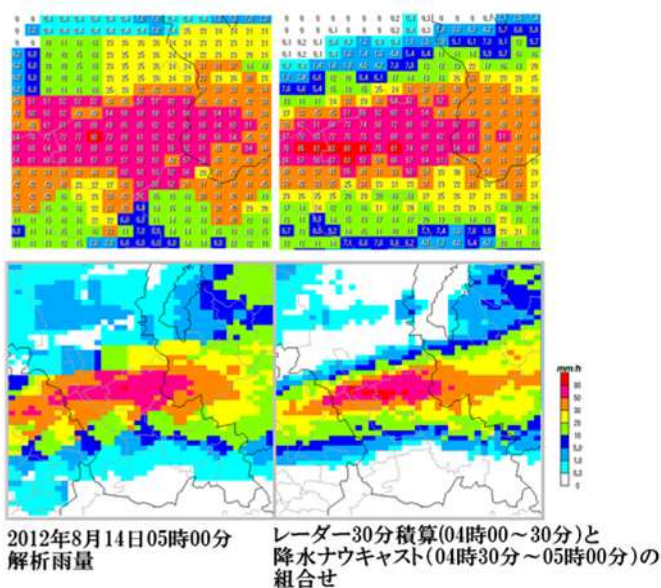
現在のアルゴリズムでは、強雨域の発生位置と時刻には少なからず「ずれ」があり、位置と時刻をピンポイントで予測したものではない。また、新しい強雨域は既存の強雨域の存在をきっかけとして予測するので、

強い降水エコーが全く存在しない領域には新たな強雨域は発生しない。さらに、1つの強雨域から複数の強雨域を発生させると数が増えすぎる傾向があるため、1つの強雨域からは1つだけ発生させるよう制限を設けており、夏の午後に強雨域が急速に増えるような状況では、新しい強雨域の発生が実況より少なくなることがある。降水ナウキャストの利用に際しては、これらに留意する必要がある。特に量的な利用においては、予測期間の後半、つまりFT=30分から60分において予測誤差が大きくなることから、実況値と降水ナウキャストを組み合わせた利用方法が現時点では効果的と言える。



第3.3.8図 局地的短時間強雨の監視・予測における利用例

を紹介する。第3.3.8図には2012年9月25日00時の神奈川県三浦半島付近の解析雨量を左に、24日23時00分から23時30分までのレーダー降水強度の積算値と23時30分から00時00分までの降水ナウキャストの積算値を合算した値を右に示している。午前0時すぎに列車が土砂に乗り上げた横須賀市追浜町を拡大すると、解析雨量は追浜町付近に1時間あたり50mm前後の局地的大雨が存在したことを示している。一方、レーダーと降水ナウキャストを組み合わせた1時間雨量も50~70mmを示しており、時間スケールが1時間程度の局地的強雨の監視及び予測における利用の可能性を示している。



第3.3.9図 線状降水域の大雨の監視・予測における利用例

この組合せ手法を線状降水に適用した例が第3.3.9図である。画像の中心は京都府宇治市志津川であり、午前3時すぎから強くなった雨は4時30分ごろに線状の降水域の形成により激しい雨となり、5時00分の解析雨量では50～70mmが解析されている。

このとき、降水ノウキャストは宇治市を横切る線状降水域を検出して降水強度を最大値に維持する予測を行い、レーダー実況値と降水ノウキャストの組合せにおいては60～90mmの1時間雨量を予測しており、線状降水域の明瞭化と降水の強化に対して降水ノウキャストが素早く反応していることを示している。

参考文献

予報部予報課（1995）：レーダー・アメダス解析雨量の解析手法と精度．測候時報 62.6．

永田和彦、辻村豊（2007）：解析雨量及び降水短時間予報の特性と利用上の注意点，平成18年度量的予報研修テキスト，気象庁予報部，9-24．

木川誠一郎（2012）：降水ノウキャストの改善，平成23年度予報技術研修テキスト，気象庁予報部，40-58．

第4章 土壌雨量指数と流域雨量指数の改善

4 土壌雨量指数・流域雨量指数の30分毎の上下変動解消*

土壌雨量指数・流域雨量指数は30分毎に計算している。改善前の指数計算では、正時の計算と30分の計算で別々のタンクを用いていたため、両タンク値（各タンクの総和）に系統的な差が生じることがあった。結果として30分毎に指数が上下に変動し、この上下変動が警報基準や注意報基準を跨る場合には発表・解除の判断に苦慮することがあった。そこで、タンクへ入力する雨量と指数計算のしくみを一部変更することで、この上下変動を解消した（平成24年5月17日13時（日本時間）より実施）。

ここでは、指数の上下変動の原因と計算の変更点について概説するとともに、改善前後の指数の出現傾向の変化と基準への影響及び警報・注意報作業上の留意点について述べる（改善前後の要点を第4.1表にまとめた）。

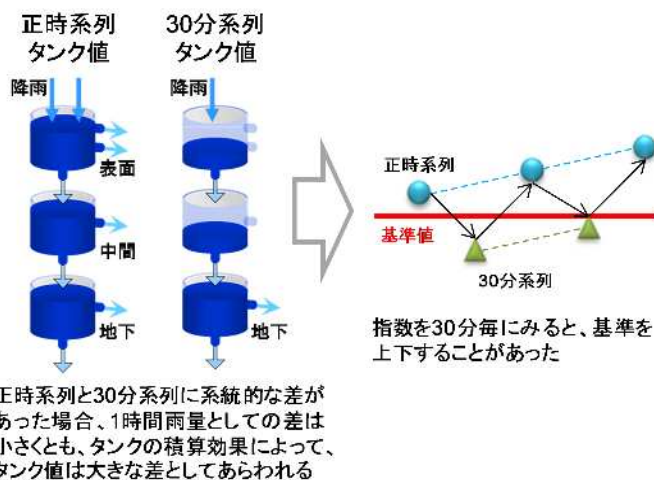
第4.1表 改善前後の土壌雨量指数・流域雨量指数のまとめ

	改善前 (正時系列と30分系列に系統的な差があった場合、30分毎に指数が上下変動することがあった)	改善後 (正時と30分で使用するタンクが独立していたことに起因する上下変動が解消)
適用日時	平成24年5月17日13時（日本時間）に改善実施	
使用するタンク [4.1節、4.2.1節]	正時系列と30分系列の計算で独立した（別々の）タンクを使用	正時の計算・30分の計算ともに、正時のタンクを使用（タンクの一本化）
タンクモデルへの入力雨量 [4.1節、4.2節]	正時：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想） 30分：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想）	正時：解析雨量（実況）、降水短時間予報（予想） 30分：前30分間の雨量解析値（実況）、降水短時間予報（予想）
指数計算のタイムステップ [4.2.2節]	t = 20分	t = 10分
流域雨量指数のタンクモデル [4.6節]	非都市域の直列三段タンク：Ishihara & Kobatake (1979) 都市域の一段タンク：田中・他(2008)	非都市域の直列三段タンク：Ishihara & Kobatake(1979)を基本に、パラメータの一部変更、新たな流出孔の導入を実施 都市域の一段タンク：田中・他(2008)を基本に、パラメータを変更
指数の出現傾向の変化[4.4節]	(改善前と比較して)	土壌雨量指数：指数値が若干大きくなる傾向 流域雨量指数：指数値が若干大きくなる傾向・流出が若干早くなる傾向
大雨・洪水警報・注意報の指数基準[4.4節]	(改善前と比較して)	指数の出現傾向の変化による基準への影響はほとんどないことから、引き続き改善前の指数基準により警報・注意報を実施（今回の指数改善により、基準変更は行わなかった）
指数（警戒度レベル）を用いた大雨・洪水警報・注意報の解除時の留意点[4.5節]	30分毎の指数の上下変動を考慮し、警報・注意報の解除の判断にあたり、30分毎の指数（警戒度レベル）を「2回確認」する。	30分毎の指数の上下変動が解消したため、警報・注意報の解除の判断にあたり、30分毎の指数（警戒度レベル）を2回確認する必要がなくなった。

土壌雨量指数と流域雨量指数で共通。

4.1 上下変動の原因

土壌雨量指数・流域雨量指数の計算には、解析雨量及び降水短時間予報の1時間雨量を用いている。指数計算は30分毎である一方、1時間雨量をタンクモデルに入力するため、改善前には、正時系列と30分系列の指数計算でそれぞれ独立したタンクを使用していた。そのため、正時系列と30分系列の解析雨量の精度に違いがあると、タンクの積算効果により正時系列と30分系列で指数に系統的な差が生じることがあ



第4.1図 指数の30分毎の上下変動とその原因（模式図）

* 齋藤 公一滝・太田 琢磨（気象庁予報部予報課気象防災推進室）

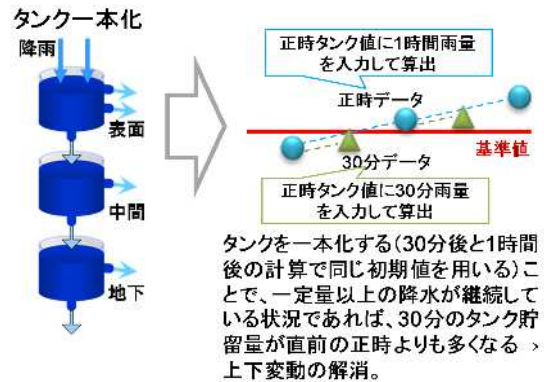
った。これは解析雨量の算出に使用する地上の雨量計の数の違いなどに起因し、一般に 30 分系列の指数が正時系列の指数に比べ小さい傾向であった。このような原因により、指数が 30 分毎に警報等の基準を上下する場合があった（第 4.1 図）。

4.2 指数計算の変更点

4.2.1 タンクの一本化

指数の 30 分毎の上下変動を解消するため、上下変動の原因である正時系列と 30 分系列の 2 系統あるタンクの本化を図った。タンクの本化とは、正時系列のタンクのみを使用するというものであり、30 分のデータは正時系列のタンク値から 30 分雨量（前 30 分間の雨量解析値）を入力して計算する。このタンクの本化により、30 分毎の指数の系統的な差が解消する（第 4.2 図）。

このことを実現するために、指数計算用に新たに前 30 分間の雨量解析値の利用を開始した。前 30 分間の雨量解析値は、レーダーエコー-30 分積算と雨量計の 30 分雨量を利用して、通常の解析雨量と同じ手法で作成されている。なお、前 30 分間の雨量解析値は指数計算用に作成されているものであり、前 30 分間の雨量解析値単独での配信・利用は行っていない。

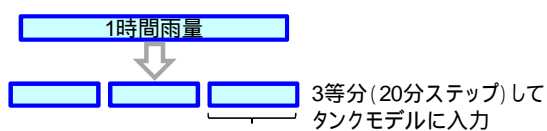


第 4.2 図 指数の 30 分毎の上下変動を解消する方法（模式図）

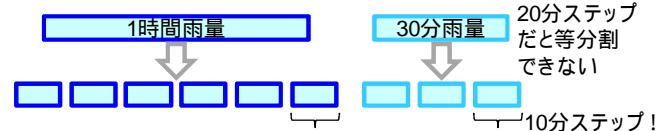
4.2.2 タイムステップの変更

改善前のタンクモデルはタイムステップ (t) を 20 分として 3 回積分計算していたため、解析雨量及び降水短時間予報（いずれも 1 時間雨量）を 3 等分してタンクに入力していた（第 4.3 図 a）。タンクの本化により 30 分の指数計算には前 30 分間の雨量解析値を用いることになるが、30 分間は $t=20$ 分で等分割できない。そこで、1 時間及び 30 分間のいずれも等分割できるように $t=10$ 分に変更した。改善後の指数計算では、前 30 分間の雨量解析値は 3 等分してタンクモデルに入力し、30 分間あたり 3 回積分している。また、解析雨量及び降水短時間予報は 6 等分してタンクモデルに入力し、1 時間あたり 6 回積分している（第 4.3 図 b）。

(a)改善前の方法



(b)改善後の方法



第 4.3 図 タンクモデルの積分回数（タイムステップ）の変更

今回の改善では、上記の変更（タンクの本化及び 30 分雨量を用いるための t の変更）と合わせて、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更も実施した。これは、 t の変更により生ずる流域雨量指数の変化をできるだけ抑え、かつ実際の河川での流出特性を再現しようとした Ishihara & Kobatake(1979)のパラメ

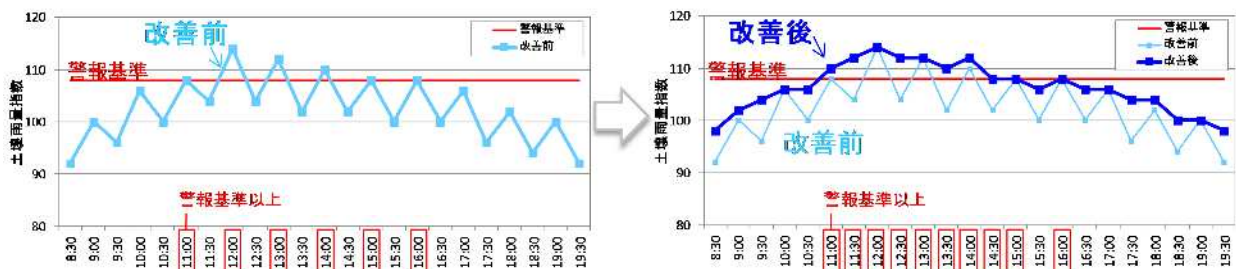
ータに極力近づけるための措置である。流域雨量指数のタンクモデルの一部変更の詳細については、4.6 節に参考としてまとめた。4.3 節以降、上下変動の改善例や計算方法の変更に伴う指数値の変化傾向について述べるが、流域雨量指数に関しては、タンクの一本化及び t の変更に加えて、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更の結果も含んでいることに留意されたい。

なお、土壌雨量指数については、 t の変更による指数値の変化が小さく（詳しくは 4.4 節で解説）、流域雨量指数のような措置は実施しなかった（現在用いているタンクパラメータを修正する必要はなかった）。

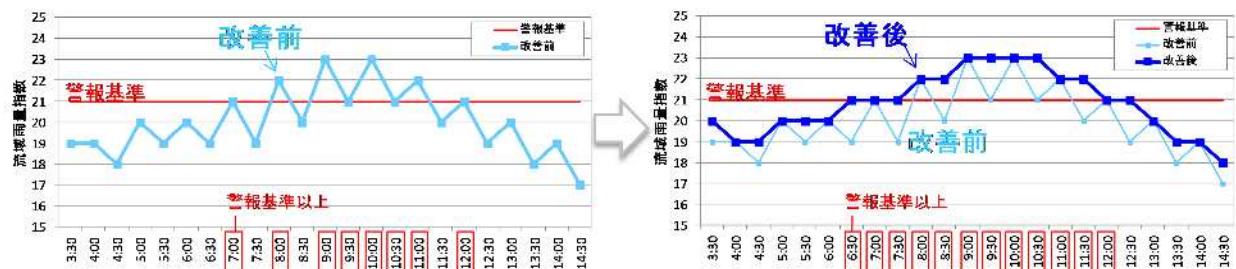
4.3 改善例

タンクを一本化し、30 分の指数計算においては前 30 分間の雨量解析値を用いる等の変更により、指数の上下変動が解消することを、2010 年出水期のデータにより確認した。土壌雨量指数・流域雨量指数それぞれについて、30 分毎の指数の上下が顕著で、警報基準付近の指数値であった事例を第 4.4 図に示す。いずれも、改善前には指数計算のしくみにより生じていた 30 分毎の指数の上下変動が解消し、30 分毎の指数の警報基準以上 / 未満の繰り返しが改善している。

(a) 土壌雨量指数（函館市岩戸町付近 2010 年 8 月 12 日の事例）



(b) 流域雨量指数（八雲町八雲の遊楽部川 2010 年 8 月 12 日の事例）



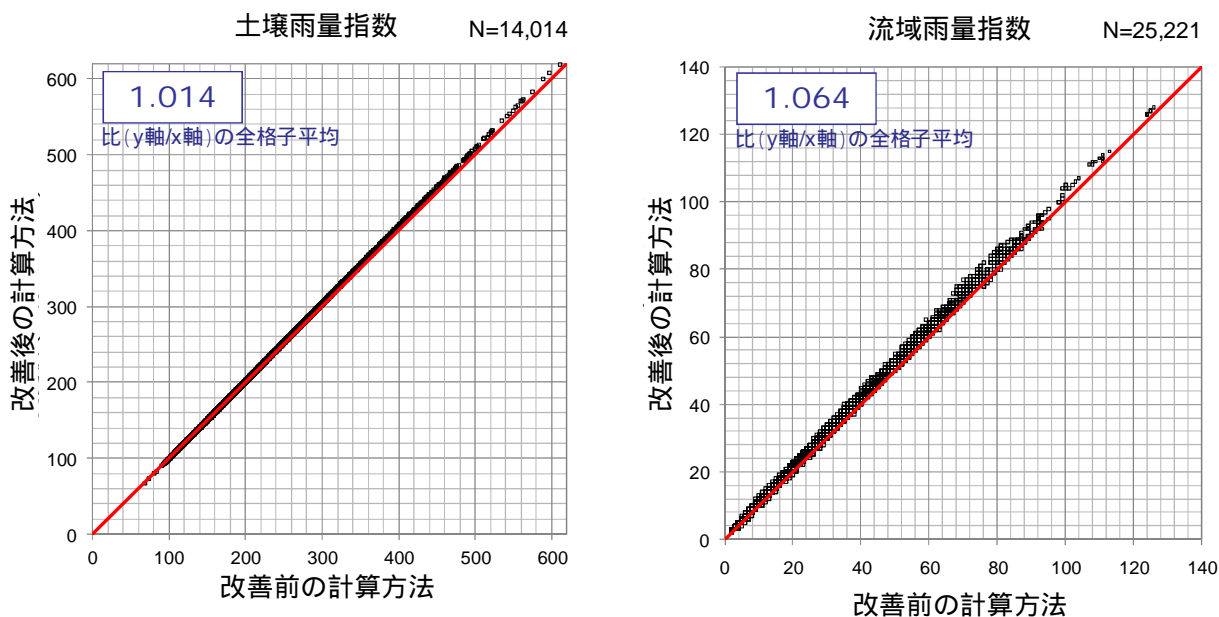
第 4.4 図 改善例

第 4.2 図に示したように、タンクの本化により 30 分後（30 分の計算）と 1 時間後（正時の計算）で同じ初期値を用いているため、改善後の指数は、改善前の指数の正時の値に近い分布となっている。なお、(a) の例では、14:00 や 16:00 の指数がそれぞれ 30 分前の指数よりも大きい値となっているが、これらは実際の降雨を反映した変化である。

4.4 土壌雨量指数・流域雨量指数の出現傾向の変化と基準への影響

タンクの本化に伴うタイムステップ (t) の変更等により、指数の計算結果が改善前と比較してわずかながら変化する場合がある。これは、タンクの本化により 30 分系列の指数が適正に表現されるようになったこととは別の数値計算上の話であり、正時の指数にも表れる変化である。

そこで、1991～2010 年の 20 年間の毎正時データを用いて、指数計算の内部処理の一部変更に伴う土壌雨量指数・流域雨量指数の出現傾向の変化及び警報基準に対する影響の度合いを確認した。



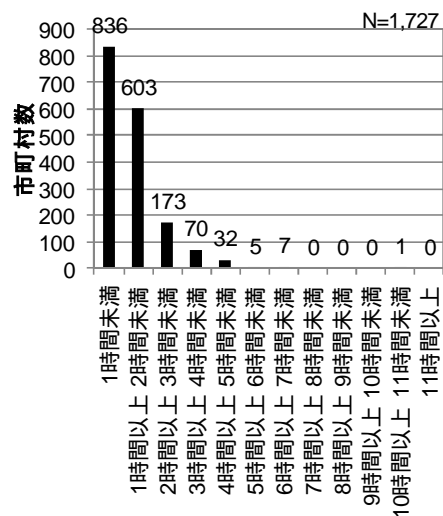
第 4.5 図 土壌雨量指数・流域雨量指数の傾向変化（履歴 1 位指数の改善前後の比較）

4.4.1 土壌雨量指数

まず、土壌雨量指数の出現傾向の変化を確認した。
t の変更により、土壌雨量指数の計算結果は、わずかに大きくなる傾向がみられた。指数値が大きいほどこの変化傾向も大きい。土壌雨量指数を計算している全国 14,014 格子の履歴 1 位の指数値でみても、今回の改善（t の変更）の前後で平均約 1.4% 指数が大きくなる程度であった（第 4.5 図左）。

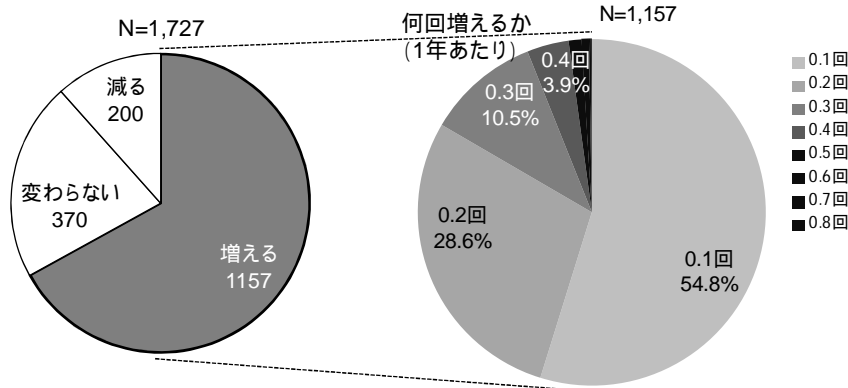
次に、土壌雨量指数の変化に伴う基準への影響を確認した。上述の土壌雨量指数の変化傾向を受け、全国 1,727 の市町村内の 5km 格子の少なくとも 1 格子以上が警報基準以上となる時間数の 20 年間（1991～2010 年）の合計は、今回の改善により増加する。この変化（増加時間数）を 1 年あたりの値に平均してみると、約半数の市町村で 1 時間未満、約 9 割の市町村で 3 時間未満である（第 4.6 図）。

また、1991～2010 年の 20 年間の警報基準到達回数を改善前後で比較すると、約 2 割の市町村では変わらない、約 7 割では増える、約 1 割では減る という結果であった（第 4.7 図左）。警報基準に到達する回数が増える市町村のうち、約 98% は 1 年あたりの増加回数が +0.4 回以下、最大でも +0.8 回であった（第 4.7 図右）。

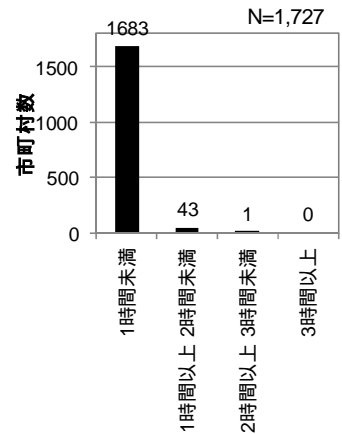


第 4.6 図 各市町村における警報基準到達時間数の変化（改善前後の警報基準到達時間数の 1 年あたりの増加時間）

改善後の土壌雨量指数が改善前に比べてわずかながら大きな値になるという傾向を示している（第 4.5 図左）にもかかわらず警報基準への到達回数が約 1 割の市町村で減るという結果となったのは、改善前の土壌雨量指数が警報基準未満になった後にそれほど間をおかず再び基準以上となって複数回カウントされた事例において、改善後の指数値では基準を超えた状況が継続して一連の事例として抽出されたことに起因する。



第4.7図 土壌雨量指数の大雨警報到達回数の変化 (全国 1,727 市町村, 1991~2010年の20年間)
右の円グラフは、20年間の増加回数を1年あたりに平均した値として表示。



第4.8図 各市町村における警報基準到達事例1回あたりの警報継続時間の増加

さらに、第4.6図に示した警報基準到達時間数の増加分を改善後の警報基準到達回数で割った値(1回の警報発表における警報継続時間の平均的な増加分に相当)は、9割以上の市町村で1時間未満であった(第4.8図)。

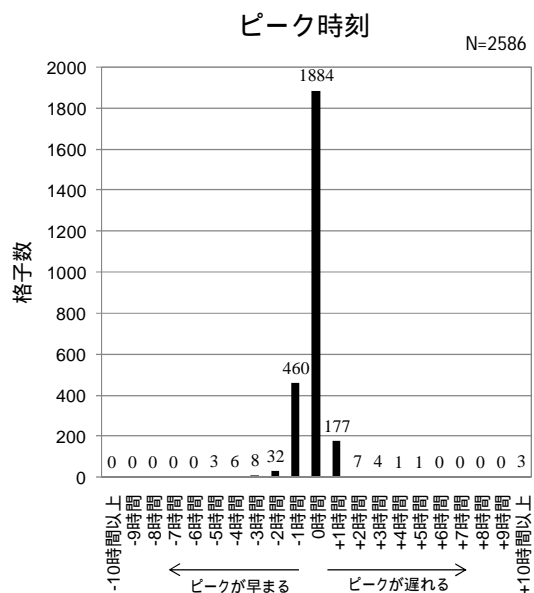
以上のことから、土壌雨量指数基準に対する今回の指数の変化の影響はほとんどないと判断し、従来の土壌雨量指数基準を引き続き大雨警報・注意報に用いることとした。

4.4.2 流域雨量指数

まず、流域雨量指数の出現傾向の変化を確認した。流域雨量指数を計算している全国 25,221 地点について、今回の改善による履歴1位指数値の変化を確認すると、平均で約 6.4%指数が大きくなり算出される傾向であった(第4.5図右)。土壌雨量指数に比べて変化傾向が大きいのは、流域雨量指数ではタンクパラメータの変更等を併せて実施したためである(詳細は4.6節に掲載)。また、履歴1位事例の流域雨量指数のピーク時刻は、一部の河川においてわずかながら早くなる傾向となった(第4.9図)。

次に、流域雨量指数の変化に伴う基準への影響を確認した。対象は、洪水警報・注意報基準が設定されている全国 2,988 格子である。洪水警報の基準に到達する回数(今回の調査では履歴指数値から求めた)は、約 1/3 の格子では変わらない、残りの約 2/3 の格子では増えるという結果となった(第4.10図左)。警報基準への到達回数が増える格子については、約 98%の格子では1年あたりの増加回数は0.2回以下であった(第4.10図右)。

なお、基準到達回数が増える格子のうち、1年あたりの増加回数が0.2回を超えるもの(20年間の

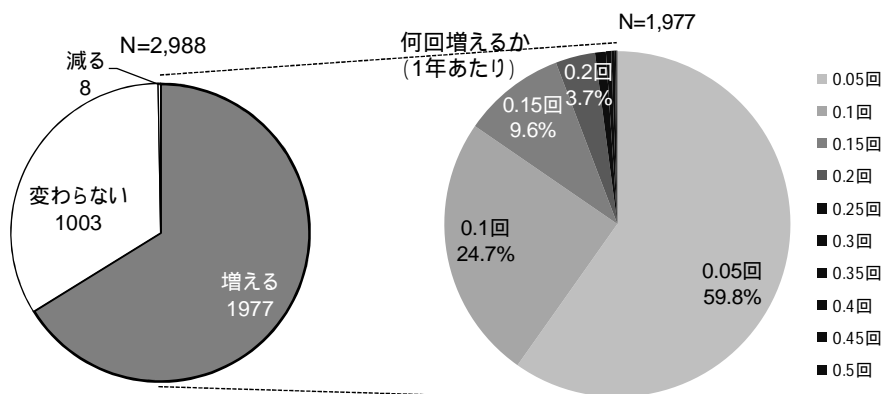


第4.9図 流域雨量指数の傾向変化 (履歴1位事例のピーク時刻の変化)

基準を設定している全国 2,988 格子のうち、履歴1位事例が改善の前後で変化しない(同一であった) 2,586 格子について、ピーク時刻の変化を確認したところ、約 7割の格子ではピーク時刻に変化なし、約 2割の格子ではピーク時刻が早くなるとの結果であった。

増加回数が5回以上のもの)について、警報対象災害事例の指数計算結果がどのように変化したのかを個別に確認したが、これまで捕捉されていた警報対象災害を見逃すようになる事例はなかった。

このように、警報基準に到達する回数の増加は最大で1年に0.5回程度であることから、流域雨量指数基準に対する指数計算の内部処理変更により生じる指数の変化の影響は小さいと判断し、従来の流域雨量指数基準を引き続き洪水警報・注意報に用いることとした。



第4.10図 流域雨量指数の洪水警報到達回数の変化(基準を設定している2,988格子、1991~2010年の20年間)
右の円グラフは、20年間の増加回数を1年あたりに平均した値として表示。

4.5 大雨及び洪水警報・注意報の解除における留意点

大雨及び洪水警報・注意報の解除における留意点については、平成21年度予報技術研修テキストの1.2.5節(指数(警戒度レベル)による作業)の中で解説しており(中村, 2010; 横田, 2010)、該当箇所を抜粋すると次のとおりである。

土砂災害を対象とした大雨警報解除のタイミング:

土砂警戒度のレベル値が「1」以下となり、今後6時間以内に警報基準の超過がないと判断されるときとする。ただし、当該市町村に土砂災害警戒情報を発表中の場合は解除せず、また解除するかしないかについては30分毎の警戒度判定を2回確認した上で判断する。

土砂警戒度のレベル値が「2」の場合でも、降水量の目安などから、今後6時間以内に土壌雨量指数の上昇傾向がないと判断できれば、大雨警報は解除してもよい。この場合でも、当該市町村に土砂災害警戒情報を発表中の場合は解除しない。

土砂災害を対象とした大雨注意報解除のタイミング:

土砂のレベル値が6時間継続して「0」となる場合は解除してよい。ただし、30分毎の警戒度判定を2回確認した上で判断することとする。

また、土砂のレベル値が「0」と「1」が交互に予想されるような場合でも、降水量の目安などから、今後6時間の土壌雨量指数の上昇傾向がないと予想される場合は解除してよい。

洪水警報の流域雨量指数基準による解除のタイミング:

流域雨量指数基準を上回っているために洪水警報を継続している場合の解除は、洪水警戒度が「1」以下となり、今後6時間以内に警報基準の超過がないと判断されるときに行う。解析雨量・降短から計算した流域雨量指数は正時系列と30分系列で振動する場合があるため、30分前実況、最新実況、FT=1予測のいずれも基準を下回ったときにレベルを下げる判定を行う。

洪水注意報の流域雨量指数基準による解除のタイミング:

流域雨量指数基準を上回っているために洪水注意報が継続されている場合の解除は、次の 場合に行う。

洪水警戒度が「0」となり、今後 6 時間以内に注意報基準の超過がないと判断されるとき。これは警報の解除と同様の考え方である。

流域雨量指数が注意報基準を上回る状態が長引く傾向がある河川においては、流域雨量指数が注意報基準を若干上回っていても、洪水災害の危険性がないと判断される場合には解除する。その目安は、次のア)、イ)、ウ)のいずれもが満たされた場合とする。

ア) 当該河川の流域で降雨が終息して概ね 3 時間経過

イ) 指数が下降傾向 (指数値が小さい小河川においては、同じ値が長時間持続する場合も含む)

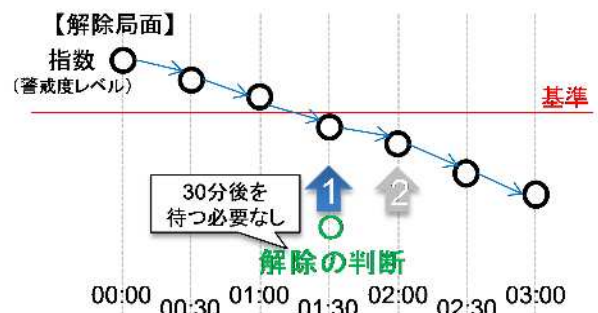
ウ) 今後 6 時間以内に指数の上昇が見込まれない

上記下線部のとおり、改善前、指数 (警戒度レベル) を用いた警報・注意報の解除にあたっては 30 分毎に計算されている指数 (警戒度レベル) を “2 回確認” して判断していた。これは、指数値が 30 分毎に上下変動する場合を考慮しての対応であった。

今回の改善により、指数値の 30 分毎の上下変動は解消したので、降雨が終息した場合は、指数 (警戒度レベル) が基準未満となった時の警報・

注意報の解除の判断において、30 分後の指数 (警戒度レベル) も基準未満であることを確認する必要がなくなった (第 4.11 図)。すなわち、上記下線部の対応は解消した。

なお、第 4.4 図 a の事例において、15:30 の指数実況値が警報基準未満となりその後 6 時間以内に基準に到達する予想がないことから大雨警報を解除したと仮定すると、30 分後の 16:00 に再び基準以上となったものの、これは一時的な降雨によるものと判断され、16:00 時点で指数の予想値が 6 時間以内に基準に到達していなければ、16:00 の時点で警報を再発表する必要はない。



第 4.11 図 警報・注意報解除における留意点 (模式図)

4.6 参考：流域雨量指数のタンクモデルの一部変更

指数の計算には Ishihara & Kobatake(1979)のタンクモデルを用いているが、今回の改善のために実施したタイムステップ (t) の変更により、特に短時間強雨の後の流出が流域雨量指数によりうまく表現されないことが予備的な調査で判明した。そこで、そうした場合にも、タンクモデルにより実際の河川での流出特性を再現しようとした Ishihara & Kobatake(1979)のオリジナルの計算結果に流域雨量指数の計算結果が極力近づくよう、流域雨量指数のタンクモデルの一部変更を行った。具体的には、タンクパラメータの変更及び直列三段タンクの第 1 タンクへの新たな流出孔の導入であり、4.2 節で述べた指数計算の変更点と合わせて流域雨量指数の計算に取り込んでいる。

4.6.1 タンクパラメータの変更

短時間の流出現象の再現性を高めるため、非都市域の直列三段タンクモデルの第 1 タンク及び都市域の一段タンクのパラメータを最適化した。ここで最適化とは、 t = 60 分としている Ishihara & Kobatake(1979)の結果に、改善後の t = 10 分の計算結果を合わせるようパラメータを調整する (第 1 タンク

クに関わる L1、L2、F1、R1、R2 を変数として回帰計算する)ことを指す。最適化したパラメータを第 4.2 表に示す(赤字部分が変更点)。

第 4.2 表 改善後の流域雨量指数計算に用いているタンクパラメータ

赤字の数値が改善後のパラメータ(赤字の数値の下の括弧書きは改善前のパラメータ)である。直列三段タンクの No. と河川名(流域)については、Ishihara & Kobatake(1979)が示した地質毎の代表的な流域に対応する。

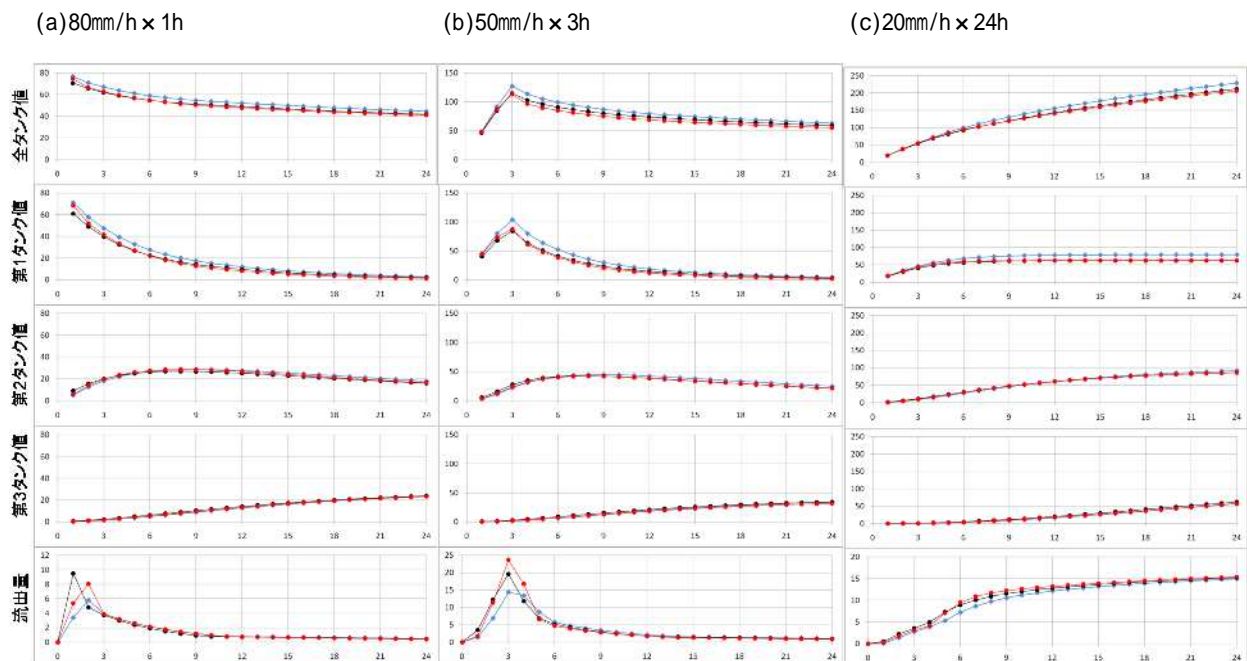
直列三段タンク(非都市用流出モデル)

No.	河川名 (流域)	L1 [mm]	L2 [mm]	L3 [mm]	L4 [mm]	F1 [/hr]	F2 [/hr]	F3 [/hr]	R1 [/hr]	R2 [/hr]	R3 [/hr]	R4 [/hr]
2	馬洗川 (南畠敷)	30	60	15	15	0.14 (0.12)	0.08	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01
3	木津川 (月ヶ瀬)	15	60	15	15	0.14 (0.12)	0.05	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01
5	夕張川 (清幌橋)	15	45 (40)	5	15	0.15 (0.12)	0.04	0.01	0.14 (0.10)	0.30 (0.15)	0.05	0.01

一段タンク(都市用流出モデル)

傾斜	0.1%以下	~	1%以上
流出率R [/hr]	0.43 (0.4)	(内挿)	0.68 (0.6)

改善例として、80mm/h×1h、50mm/h×3h、20mm/h×24h の継続降雨を入力した場合のタンク貯留量及び流出量の比較結果を第 4.12 図に示す。第 4.12 図では、青(t=10分、改善前のパラメータ)よりも赤(t=10分、最適化したパラメータ)の方が、黒(Ishihara & Kobatake, 1979 のオリジナルの計算結果)に近い結果となっている。しかし、80mm/h×1h は、50mm/h×3h、20mm/h×24h に比べて降雨開始後 1~2 時間の再現性が悪い。このことは、タンクパラメータの調整だけでは、特に先行降雨が少ない状況での短時間強



第 4.12 図 タンクパラメータの変更による流域雨量指数の改善例

黒: t=60分・改善前のパラメータ(Ishihara & Kobatake, 1979 オリジナルの計算結果), 青: t=10分・改善前のパラメータ(パラメータを変更せずに t=10分とした場合), 赤: t=10分・改善後のパラメータ(最適化したパラメータを用いて t=10分とした場合)により計算した結果を示す。

雨において流出をうまく再現できないことを示しており、そのような場合でもタンクモデルから適正に流出するしくみを組み込む措置（4.6.2節）を行った。

4.6.2 新たな流出孔の導入

第4.12図の降雨開始後1～2時間の流出量の再現性を向上させるため、流域雨量指数の計算に用いている直列三段タンクの第1タンクについて、高さL2の位置に新たな流出孔（ここでは「表面流出孔」と呼ぶことにする）を設けることとした。表面流出孔は常に作用させるのではなく、

$$S < L2 \quad \text{かつ} \quad R > L2$$

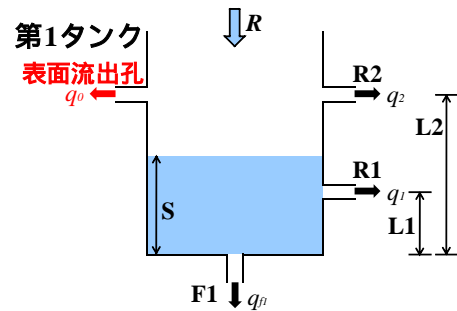
という特定の条件を満たすとき（すなわち、タンクの水位がそれほど高くない状況で多量の降雨があった場合）に、

$$q_0 = (R - L2) \cdot R2$$

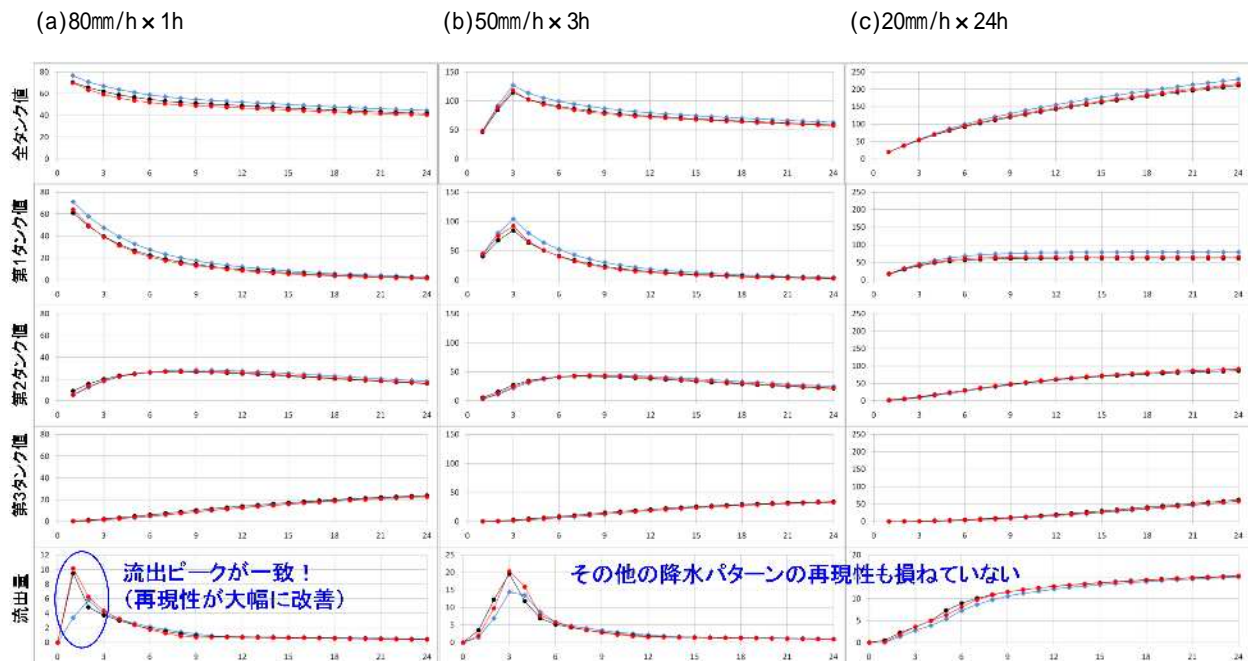
を表面流出孔から流出させるというものである。ここで、L2：第1タンクの表層流出孔の高さ、S：第1タンクの貯留高、R：入力雨量、 q_0 ：表面流出とする（第4.13図）。なお、表面流出孔が条件により作用する／しないに関わらず、第1タンクの2つの流出孔（R1、R2）についてはこれまで通り作用させる。

すなわち、第1タンクにおいて、通常はF1の浸透、R1及びR2の流出で対応するが、土壤水分が少ない状態での短時間強雨では別途「表面流出」として流出させる。これは、都市部に限らず非都市部であっても、非常に強い雨が降った場合には土壤水分が少なくてもある程度は河川に流出するという実態（Ishihara & Kobatake, 1979 オリジナルの計算結果）に対応させるものである。

最適化したパラメータ及び表面流出孔を用いて、80mm/h×1h、50mm/h×3h、20mm/h×24hを入力した場合のタンク貯留量及び流出量の比較結果を第4.14図に示す。第4.12図と比較して、80mm/h×1hの場合の再



第4.13図 表面流出孔を適用した直列三段タンクモデルの第1タンク（本図では、第2タンク、第3タンクを省略）



第4.14図 タンクパラメータ変更及び表面流出孔適用による流域雨量指数の改善例

各色の凡例は第4.12図と同じ。いずれも第4.12図の条件に加えて、表面流出孔を適用して計算をした結果である。

現性が大幅に改善している。また、50mm/h×3h、20mm/h×24h などのその他の降水パターンの再現性も損ねていない。

参考文献

Ishihara, Y. & Kobatake, S. (1979) : Runoff Model for Flood Forecasting. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* , **29** , 27-43 .

田中信行, 太田琢磨, 牧原康隆 (2008) : 流域雨量指数による洪水警報・注意報の改善, 測候時報, **75** , 35-69 .

中村直治 (2010) : 土砂警戒度による作業, 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 14-16 .

横田茂樹 (2010) : 洪水警戒度による作業, 平成 21 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 16-18 .

付録* 急速に発達した低気圧の経路図と災害リスト

これまでも急速に発達する低気圧によって、日本列島はたびたび多大な被害を受けている。このような低気圧による災害の実態を把握しておくことは、防災という観点から非常に重要である。そこで、これまでに日本近海で急速に発達した低気圧によってもたらされた災害について取りまとめた。付録第 1-1、1-2 図に低気圧の経路図を、付録第 1-1、1-2 表に発達度合いや気象概況、災害の概況を示す。ここで取り上げた事例は、気象庁 HP に掲載されている災害をもたらしした気象事例に加えて、1955 年から 2011 年 3 月 31 日の期間に日本近海（北緯 25-45 度、東経 130-145 度）で本事例と同程度の発達率を示した事例である。本事例と同程度の発達をした低気圧によってどのような災害が発生したかはもちろん、低気圧の特徴を把握するために経路や時期、観測の概要なども記述した。この資料から、気づいた点について簡単にまとめると以下のとおりである。

- ・発生時期は初冬から春先に多い。
- ・経路は大きく分けて 2 つあり、朝鮮半島から日本海に進む場合と、日本の南海上で発生して日本の南岸を進む場合がある。どちらの経路でも、北日本付近から三陸沖もしくは北海道東方海上にかけて最低気圧を記録するケースが多く、北日本は災害が発生しやすい。
- ・急速に発達する地域は、日本海から北海道付近にかけてと、東海道沖から三陸沖にかけてである。
- ・防災上の警戒事項としては、暴風・高波・高潮以外にも季節や経路によって大雨・大雪、融雪洪水を想定する必要がある。
- ・本事例 1204 で観測された風、波、潮位は、他の事例を上回っており、顕著な事例であった。

なお、ここで示す発達率は、次式で表わされる。発達率が 1 以上のものは急速に発達する低気圧と定義される (Yoshida and Asuma, 2004)。気象庁では、急速に発達するとは中心気圧が 24 時間以内におよそ 20hPa 以上下がることと定義している。発達率が 1 以上となるのは、例えば北緯 40 度から 50 度にかけて中心気圧が 24 時間以内におよそ 20 hPa 以上低下する場合であり、気象庁の定義とほぼ同義である。

$$\left[\frac{p(t-12) - p(t+12)}{24} \right] \left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin \left(\frac{(t-12) + (t+12)}{2} \right)} \right]$$

ただし、 p は気圧、 t は時刻、 ϕ は低気圧中心の緯度を示す。

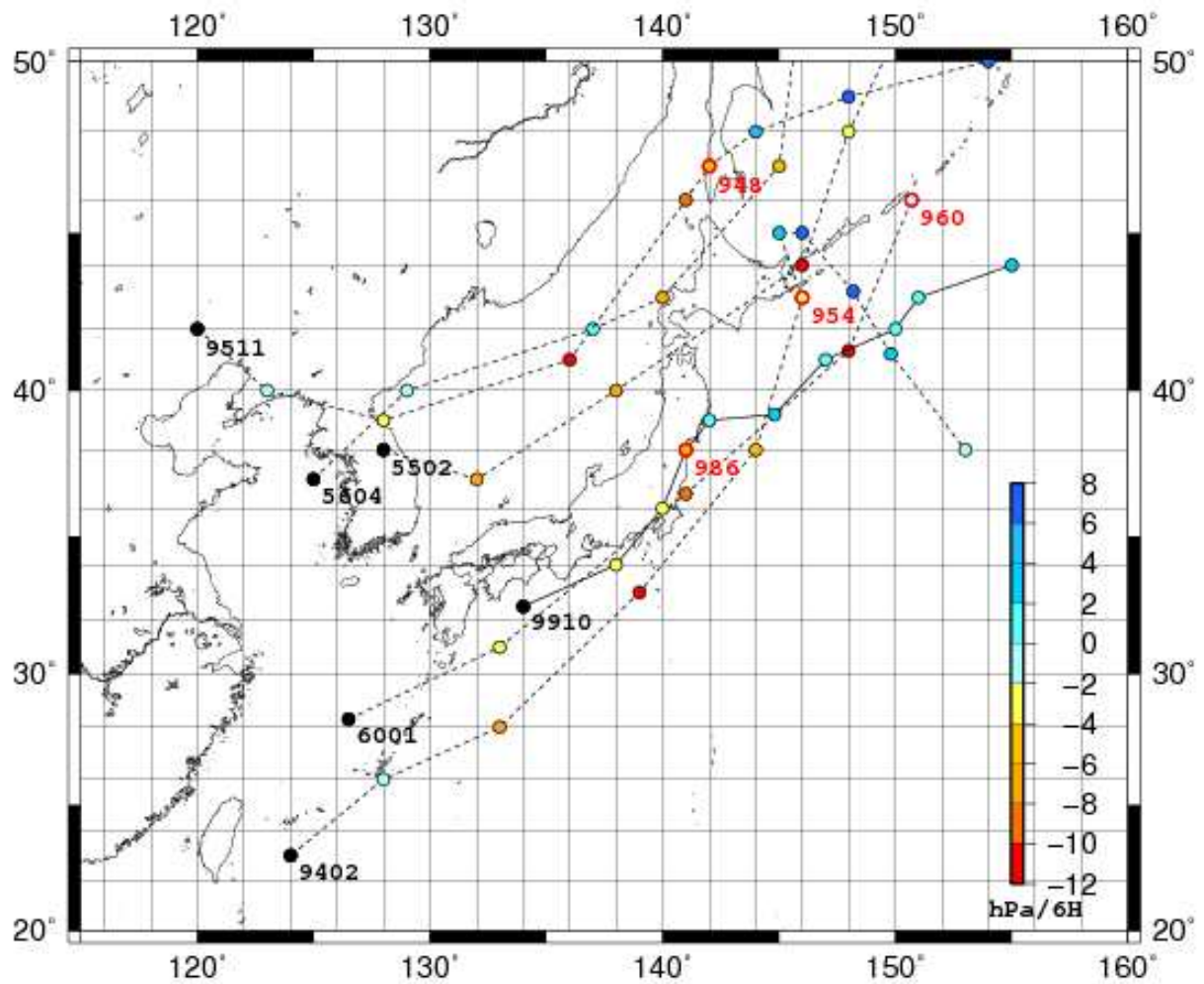
*下村早也香（気象庁予報部予報課）

付録第 1-1 表 急速に発達した低気圧の過去事例による災害リスト

波高と高潮の欄の「データなし」とは、波高に関しては気象庁沿岸波浪計の観測が開始された 1976 年以降しかデータがないため、高潮に関しては出典に記載がなく、データのデジタル化が行われていないため抽出できなかったためである。また、高潮に関しては、事例 9402、9511、9910 のデータは記録紙から手作業で平滑化し、毎時の平滑値を読み取るという手法で求めた値であり、現在のような瞬間値（3分フィルタ）の処理とは異なる。

気象要覧では、20 日～22 日の低気圧の災害状況は低気圧通過後に 23 日～27 日かけて続いた強い冬の気圧配置による災害状況とまとめて記載されている。

事例名	5502	5604	6001	9402	9511	9910
事例	低気圧による暴風(雪) 昭和30年(1955年) 2月19日～2月21日	低気圧による融雪洪水、 強風、乾燥 昭和31年(1956年) 4月17日～4月18日	低気圧による暴風と大雪 昭和35年(1960年) 1月16日～17日	低気圧による暴風 平成6年(1994年) 2月20日～2月22日	低気圧による暴風 平成7年(1995年) 11月7日～8日	低気圧による大雨 平成11年(1999年) 10月27日～10月28日
最大発達率 (時刻、位置)	2.22 (20日00UTC 40N 138E)	1.24 (17日00UTC 43N 140E)	2.46 (16日12UTC 36N141E)	2.64 (20日12UTC 28N 133E)	2.35 (7日12UTC 41N 136E)	0.86 (27日00UTC 36N 140E)
前24時間気圧下降量 (時刻、位置)	40hPa (20日12UTC 44N 146E)	24hPa (17日12UTC 47N 145E)	40hPa (17日00UTC 41N148E)	36hPa (21日00UTC 33N 139E)	44hPa (8日00UTC 46N 141E)	14hPa (28日00UTC 39N 142E)
最低中心気圧 (時刻、位置)	950hPa (21日12UTC 52N 151E)	966hPa (18日12UTC 54N 148E)	960hPa (17日12UTC 46E151E)	954hPa (22日00UTC 43N 146E)	948hPa (8日12UTC 47N 142E)	986hPa (28日00UTC 39N 142E)
主な災害発生地域	西日本から北日本の広い 範囲	北海道、東北、関東	北日本	西日本から北日本の広い 範囲	北日本	東日本や東北地方の太平 洋側
災害状況	死者16名、負傷者18名、 行方不明者104名 住家全壊42棟、半壊・一 部破損528棟、床上浸水 77棟、床下浸水219棟など	死者47名、行方不明者53 名 住家全壊2棟、半壊10棟 床上浸水1,087棟、床下浸 水1,320棟など	死者7名、負傷者11名、行 方不明者69名 住家全壊11棟、半壊・一 部破損154棟、床上浸水3 棟など	(20～27日) 死者5名、負傷者54名、 住家全壊1棟、半壊・一部 破損371棟、床上浸水14 棟、床下浸水78棟など	死者2名、行方不明者1 名、負傷者12名 住家全壊1棟、半壊・一部 破損611棟、床下浸水4棟 など	死者4名、行方不明者1 名、負傷者7名 住家全壊30棟、半壊19 棟、一部損壊204棟 床上浸水1,449棟、床下浸 水4,073棟など
最大瞬間風速	八丈島 西 43.0m/s (20日15時49分) 八戸 南西 41.3m/s (20日20時26分) 長津呂 西 39.6m/s (20日15時7分)	留萌 西南西 32.7m/s (17日17時28分) 寿都 南南東 32.6m/s (17日12時58分) 田名部 西 23.7m/s (17日15時11分)	八丈島 西 34.7m/s (17日02時11分) 浜田 北 33.5m/s (16日20時57分) 船津 北西 33.3m/s (17日03時32分)	富士山 北西 51.2m/s (22日09時11分) 三宅島 北 44.9m/s (21日10時56分) 八丈島 西 42.7m/s (21日11時37分)	稚内 西南西 44.9m/s (8日13時08分) 大島 南南西 38.8m/s (8日01時34分) 浦河西 37.5m/s (8日19時22分)	石巻 東北東 37.2m/s (27日23時38分) 室戸岬 東北東 36.1m/s (8日05時4分) 御前崎 北東 35.8m/s (27日15時57分)
最大風速	八丈島 西 32.8m/s (20日16時00分) 伊吹山 南南東 31.1m/s (20日02時10分) 長津呂 西 30.3m/s (20日16時10分)	雄武 西南西 26.4m/s (17日19時40分) 留萌 西 25.8m/s (17日18時10分) 浦河 西北西 24.2m/s (17日20時50分)	伊吹山 南東 31.8m/s (16日09時40分) 八丈島 西 29.8m/s (17日02時20分) 根室 北北西 29.5m/s (17日14時10分)	富士山 東南東 37.6m/s (21日06時30分) 銚子 北北西 27.7m/s (21日15時30分) 室戸岬 西北西 26.6m/s (21日11時40分)	えりも岬 西南西 31m/s (8日20時00分) 富士山 南南西 28.7m/s (7日21時50分) 宗谷岬 西南西 27m/s (8日16時00分) 飛鳥 欠測 27m/s (8日03時00分) 室戸岬 西北西 26.9m/s (8日00時20分)	室戸岬 東北東 31.2m/s (27日05時10分) 伊吹山 南東 28.9m/s (27日09時50分) えりも岬 北東 28m/s (28日15時00分)
波高	データなし	データなし	データなし	経ヶ岬 5.85m(21日23時) 福江島 4.69m(21日12時) 松前 4.47m(22日22時)	経ヶ岬 6.45m(8日20時) 松前 5.76m(8日19時) 福江島 5.48m(7日23時)	むつ小川原 6.74m(28日12時) 八戸 5.91m(28日10時) 小名浜 5.77m(27日22時)
高潮(最大潮位偏差/ 最高潮位)	データなし	データなし	データなし	花咲 64cm(22日11時) /134cm(22日11時00分) 銚子漁港 55cm(21日15時) /59cm(21日12時35分) 釧路 52cm(22日11時) /122cm(22日10時40分)	東京 58cm(8日02時) /100cm(8日05時40分) 稚内 52cm(8日16時) /92cm(8日17時30分) 川崎(1) 49cm(8日01時) /100cm(8日06時05分)	三宅島(坪田) 45cm(27日16時) /142cm(27日17時55分) 東京 44cm(27日23時) /116cm(28日7時20分) 石廊崎 43cm(27日20時) /132cm(27日18時45分)
日降水量	豊岡 65.3mm(20日) 屋久島 59.7mm(19日) 米子 51.5mm(20日)	南大東島 43.1mm(17日) 旭川 34mm(17日) 稚内 25mm(17日)	根室 82.7mm(17日) 釧路 66.2mm(17日) 宮古 60.6mm(16日)	屋久島 165mm(20日) 尾之間 140mm(20日) 三宅島 138mm(21日)	奥 153mm(7日) 与那覇岳 134mm(7日) 伊是名 123mm(7日)	下戸鎖 316mm(28日) 鹿島 304mm(27日) 佐原 299mm(27日)
日降雪量	-	-	-	層雲峡 54cm(22日) 酸ヶ湯 58cm(22日) 夕張 44cm(22日)	下川 43cm(8日) 栗駒 37cm(8日) 深川 27cm(8日)	積もってたところでも1cm 程度
出典	気象要覧 第666号 昭和 30年 2月	災害をもたらした気象事 例(昭和20～63年)	気象要覧 第725号 昭和 35年1月	気象要覧 第1134号 平 成6年2月	気象要覧 第1155号 平 成7年11月	気象庁HP(災害をもたら した気象事例(平成元年～ 本年))

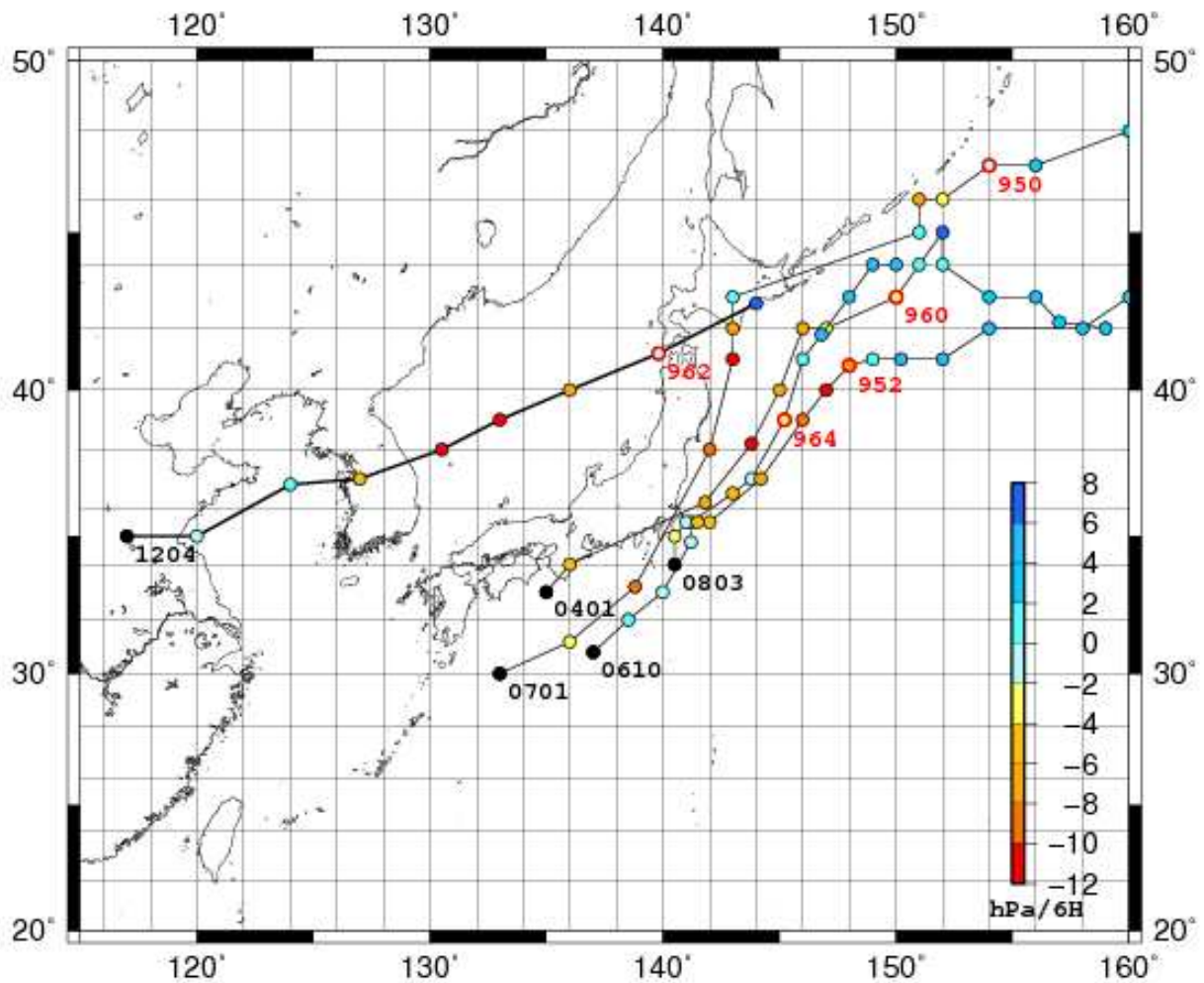


付録第 1-1 図 付録第 1-1 表に示した低気圧の経路図

黒字は低気圧の事例名、 \bullet は低気圧中心の位置で、実線は6時間毎、破線は12時間毎の位置を示す。○の中の色は前6時間での気圧下降量（右下の凡例参照）を示す。赤字は最低気圧の値を示し、数字左上の○が最低気圧となった低気圧中心の位置である。

付録第 1-2 表 付録第 1-1 表と同じ

事例名	0401	0610	0701	0803	1204
事例	低気圧による暴風 平成16年(2004年) 1月13日～14日	低気圧による暴風と大雨 平成18年(2006年) 10月4日～10月9日	低気圧による暴風、高波、 大雪 平成19年(2007年) 1月6日～1月9日	低気圧に伴う暴風と大雪 平成20年(2008年) 3月31日～4月1日	低気圧による暴風と高波 平成24年(2012年) 4月3日～5日
最大発達率 (時刻、位置)	2.34 (13日06UTC 38N 144E)	0.97 (7日00UTC 37N 144E)	2.67 (6日12UTC 47N 154E)	2.70 (31日12UTC 38N 145E)	2.43 (3日00UTC 38N 131E)
前24時間気圧下降量 (時刻、位置)	40hPa (13日18UTC 42N 146E)	16hPa (7日12UTC 39N 146E)	44hPa (7日00UTC 42N 144E)	46hPa (1日00UTC 41N 148E)	42hPa (3日12UTC 40N 136E)
最低中心気圧 (時刻、位置)	960hPa (14日12UTC 44N 151E)	964hPa (7日18UTC 41N 146E)	950hPa (8日06UTC 47N 154E)	952hPa (1日06UTC 41N 149E)	962hPa (3日18UTC 41N 140E)
主な災害発生地域	北日本	近畿から北海道	西日本から北日本の広い 範囲	北日本	西日本から北日本の広い 範囲
災害状況	死者2名、負傷者16名 住家全壊1棟、半壊・一部 破損79棟、床上浸水1棟、 床下浸水1棟など	死者34名、行方不明者16 名、負傷者58名 住家半壊15棟、一部損壊 1141棟 床上浸水278棟、床下浸 水1138棟など	負傷者14名 住家半壊15棟、一部損壊 562棟 床上浸水2棟、床下浸水 36棟など	負傷者14名 半壊・一部破損94棟など	死者4名、負傷者378名
最大瞬間風速	富士山 北西 38.7m/s (14日23時42分) 相川 北西 36.6m/s (13日18時18分) 室戸岬 西 35.5m/s (13日20時38分)	根室 北北東 42.2m/s (8日6時10分) 大船渡 北 40.2m/s (7日7時40分) 銚子 北 39.0m/s (6日23時53分)	八丈島 西南西 48.5m/s (7日05時11分) 浦河 北東 48.0m/s (7日02時48分) 白河 西北西 43.1m/s (7日20時48分)	釧路 北 34.4m/s (1日9時28分) 根室 北 33.8m/s (1日13時22分) 新川 西 31.7m/s (1日14時17分)	飛鳥 西南西 51.1m/s (4日00時08分) 両津 西 43.5m/s (4日01時16分) 小国 南西 42.3m/s (4日03時28分)
最大風速	富士山 北西 28.4m/s (15日04時50分) 相川 北西 27.2m/s (13日18時30分) 室戸岬 西 25.2m/s (13日08時20分)	えりも岬 北北東 38m/s (7日16時30分) 江ノ島 北北東 30m/s (7日07時30分) 納沙布 北東 27m/s (8日06時00分)	えりも岬 北北東 39m/s (7日04時50分) 飛鳥 西北西 30m/s (7日16時30分) 室戸岬 西北西 27.1m/s (6日22時50分)	釧路 北 24.6m/s (1日12時33分) 根室 北 20.9m/s (1日14時53分) 納沙布 北北東 20m/s (1日05時00分) 弟子屈 北北西 20m/s (1日13時50分) 鶴丘 北 20m/s (1日10時10分)	飛鳥 西 39.7m/s (4日02時43分) 友ヶ島 南南東 32.2m/s (3日13時38分) 両津 西南西 32.1m/s (4日01時10分)
波高	紋別(南) 7.10m(15日06 時) 輪島 5.92m(13日20時) 酒田 5.91m(13日24時)	江ノ島 8.40m(6日23時) むつ小川原 6.93m(8日2 時) 相馬 6.73m(6日24時)	酒田 8.50m(7日18時) 新潟沖 8.28m(7日18時) 福井 8.26m(7日18時)	江ノ島 3.94m(1日24時)	酒田 12.31m(4日04時) 秋田 11.87m(4日4時) 輪島 9.19m(4日2時)
高潮(最大潮位偏差/ 最高潮位)	能登 73cm(13日20時42 分)/103cm(13日20時42 分) 網走 64cm(14日21時37 分)/82cm(14日18時56 分) 花咲 58cm(14日06時14 分)/83cm(14日07時14 分)	銚子漁港 94cm(6日23時 07分)/151cm(7日03時29 分) 釧路 93cm(8日06時49 分)/122cm(8日15時17 分) 能登 90cm(8日21時45 分)/123cm(8日21時45 分)	能登 100cm(8日09時49 分)/122cm(7日23時37 分) 釧路 86cm(7日10時29 分)/123cm(7日14時55 分) 深浦 66cm(7日16時56 分)/94cm(7日16時56分)	花咲 51cm(1日14時46 分)/64cm(1日09時51分)	能登 156cm(4日02時36 分)/163cm(4日02時36 分) 大阪 117cm(3日14時29 分)/131cm(3日16時30 分) 神戸 90cm(3日14時52 分)/105cm(3日14時52 分)
日降水量	北見 70mm(14日) 弟子屈 65mm(14日) 阿寒湖畔 62mm(14日)	吾妻山 267mm(6日) 浪江 265mm(6日) 広野 265mm(6日)	宮古 117mm(6日) 大船渡 114mm(6日) 小国 112mm(7日)	宇登呂 56.5mm(1日) 湯沢 56.5mm(1日) 弟子屈 50.5mm(1日)	屋久島 156mm(3日) 繁藤 120.5mm(3日) 山中 113mm(3日)
日降雪量	藤原 55cm(14日) 滝上 54cm(14日) 川湯 54cm(14日) 津別 54cm(14日)	-	留辺蘂 76cm(7日) 音威子府 73cm(7日) 滝上 66cm(7日)	宇登呂 67cm(1日) 阿寒湖畔 52cm(1日) 川湯 51cm(1日)	芽室 39cm(3日) 帯広 37cm(3日) 新得 35cm(3日)
出典	気象庁災害速報	気象庁HP(災害をもたらした 気象事例(平成元年～ 本年))	気象庁HP(災害をもたらした 気象事例(平成元年～ 本年))	気象庁災害速報	国土交通省による被害状 況等のとりまとめ資料(速 報)など



付録第 1-2 図 付録第 1-2 表に示した低気圧の経路図

付録第 1-1 図と同じ。ただし、今回取り上げた事例 1204 は太実線で示す。

参考文献

Yoshida, Akira, Yoshio Asuma (2004) : Structures and Environment of Explosively Developing Extratropical Cyclones in the Northwestern Pacific Region. Mon. Wea. Rev., 132, 1121-1142.