

平成 29 年度予報技術 研修テキスト

(予報課)

March 2018

気 象 庁 予 報 部

はじめに

近年雨の降り方が局地化・集中化・激甚化している状況を「新たなステージ」と捉え、国土交通省が平成 27 年 1 月にとりまとめた「新たなステージに対応した防災・減災のあり方」を受けて、同年 7 月、交通政策審議会気象分科会によって、今後気象庁が進めるべき防災気象情報の改善と観測・予測技術の向上について提言された。これを受け気象庁では防災気象情報の改善を図るべく準備を進め、平成 29 年 5 月から「危険度を色分けした時系列」及び「警報級の可能性」の提供を開始した。また、平成 29 年 7 月から、雨による災害発生の危険度の高まりを評価する技術（土壌雨量指数、表面雨量指数、流域雨量指数）を活用して、大雨・洪水警報及び大雨特別警報を改善するとともに、利用者に対してどこで危険度が高まっているかを分かりやすく提供するため危険度を色分けして地図上に表示する「大雨警報（浸水害）の危険度分布」及び「洪水警報の危険度分布」の提供を開始した。

これらの新しい技術を活用した防災気象情報が市町村の防災活動や住民の避難行動に効果的に活用されるためには、予報担当者がこれら新しい技術を警報の発表判断等に活用する能力を高めることが極めて重要である。

本テキストは、予報担当者の技術力向上を目的として、予報作業についての指針やその時々最新の予報技術を解説するものである。今年度のテキストでは、第 1 章で平成 28 年（2016 年）台風第 9 号による大雨を題材として、上述した新しい指数を使った予報作業に関する具体例について詳しく説明した。第 2 章では台風予報・解析技術の高度化を図るために導入・試験運用している統計力学モデルに基づく台風強度予報ガイダンスについて、第 3 章ではひまわり 8 号による積乱雲の監視について解説するとともに、第 4 章では日頃の予報業務の基礎として用いられている総観スケールの天気図の解析手法について取りあげた。

本テキストが全国の気象官署の現場において日々取り組まれている予報担当者育成の支援となり、技術力向上が図られるとともに、適時適切で品質の高い防災気象情報の提供に繋がることを期待する。

平成 30 年 2 月

予報課長 梶原靖司

目次

はじめに

第1章 実例に基づいた予報作業の例

1.1	はじめに	1
1.2	新しい指数を使った予報作業の概要	2
1.2.1	大雨警報(浸水害)・大雨注意報	2
1.2.2	洪水警報・洪水注意報	4
1.3	平成28年(2016年)台風第9号による大雨の警報作業	7
1.3.1	大雨の概要	7
1.3.2	類似事例	8
1.3.3	8月21日17時発表予報に向けた作業	8
1.3.3.1	総観場の把握	8
1.3.3.2	予想資料の確認	10
1.3.3.3	シナリオの作成	14
1.3.3.4	防災時系列の検討	15
1.3.4	8月22日5時発表予報に向けた作業	16
1.3.4.1	実況の把握及びシナリオの検討	16
1.3.4.2	予想資料の確認	21
1.3.4.3	防災時系列の修正と大雨注意報の発表	22
1.3.5	大雨警報発表に向けた作業	24
1.3.5.1	実況の把握と各種指数の確認	24
1.3.5.2	大雨警報発表作業	25
1.3.6	適切な防災時系列の維持と警報切替作業	26
1.3.6.1	22日朝(顕著現象発現前)	26
1.3.6.2	22日昼前(顕著現象発現直前)	27
1.3.6.3	22日昼過ぎ(顕著現象発現中)	30
1.3.7	大雨警報解除に向けた作業(顕著現象終了後)	33
1.3.7.1	実況の把握と各種指数の確認 及び大雨警報切替作業	33
1.4	大雨特別警報の改善	38
1.4.1	平成28年(2016年)台風第9号の事例を用いた 大雨特別警報の発表作業	38
1.4.2	平成28年(2016年)台風第9号の事例を用いた 大雨特別警報の解除作業	41
1.5	まとめ	41

第2章 台風強度予報ガイドンスの開発

2.1	はじめに	43
2.2	台風強度予報ガイドンス SHIPS の概要	44

2.3	SHIPSの精度検証結果	47
2.3.1	2016年の精度検証結果	47
2.3.2	平成28年(2016年)台風第1号の事例	49
2.3.3	平成28年(2016年)台風第5号の事例	52
2.3.4	平成28年(2016年)台風第18号の事例	53
2.4	まとめ	54
第3章 ひまわり8号による積乱雲の監視		
3.1	はじめに	56
3.2	積乱雲監視に利用する衛星画像	56
3.2.1	積乱雲監視に利用する各種衛星画像	56
3.2.2	積乱雲監視のまとめと留意事項など	60
3.3	積乱雲監視における視差について	62
3.3.1	衛星画像で生じる視差とは	62
3.3.2	視差の特徴	62
3.3.3	衛星画像と地上観測との比較の例	63
3.3.4	視差についてのまとめ	65
3.4	積乱雲情報プロダクトの紹介	66
3.4.1	はじめに	66
3.4.2	積乱雲情報プロダクトの概要	66
3.4.3	積雲急発達域検出アルゴリズム	67
3.4.4	積雲急発達域検出の精度評価	68
3.4.5	積雲急発達域の検出事例	69
3.4.6	まとめと今後の課題	70
3.5	積乱雲の監視事例	71
3.5.1	雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトの利用上の注意点	71
3.5.2	積乱雲の監視事例(2017年8月8日~9日)	72
3.5.3	積乱雲の監視事例(2017年8月3日~4日)	76
3.6	おわりに	80
付録3		81
第4章 アジア太平洋地上天気図の標準的な解析手法		
4.1	はじめに	84
4.2	気象庁における天気図解析の歴史	87
4.3	低気圧及びそれに伴う前線に関する基本的な概念モデル	89
4.4	前線の形成と解析	91
4.4.1	前線の定義	91
4.4.2	梅雨前線	95
4.4.2.1	梅雨前線の定義	95
4.4.2.2	梅雨前線の解析	96
4.5	アジア太平洋地上天気図における前線解析	99

4 . 5 . 1	前線解析の条件	9 9
4 . 5 . 2	アジア太平洋地上天気図前線解析の手順	9 9
4 . 5 . 3	前線解析の運用ルール	1 0 0
4 . 5 . 4	客観前線	1 0 1

第1章 実例に基づいた予報作業の例

1.1 はじめに*

気象庁は、雨による災害発生の危険度の高まりを評価する技術として、土砂災害については土壌雨量指数（岡田 2002）を、洪水害については流域雨量指数（横田 2008）を開発し、警報等の発表に活用してきた。

この技術を応用して、短時間強雨による浸水害発生の危険度の高まりを表す表面雨量指数（太田 2016）を新たに開発した。平成 29 年（2017 年）出水期からは、大雨警報・注意報と洪水警報・注意報の基準を第 1.1.1 表のとおり変更し、表面雨量指数を大雨警報（浸水害）等、土壌雨量指数を大雨警報（土砂災害）等、流域雨量指数を洪水警報等の発表判断に活用するとともに、危険度分布として提供を開始した。さらにこれを機に、流域雨量指数を精緻化（計算格子を 5km から 1km に高解像度化、計算間隔を 30 分間隔から 10 分間隔に高頻度化）し、流域雨量指数を計算する対象河川も従来の長さ 15km 以上の約 4,000 河川から国土数値情報に登録された全国の約 20,000 河川に拡大した。

また、表面雨量指数、土壌雨量指数、精緻化した流域雨量指数によるメッシュ情報（危険度分布）の技術を活用して、危険度が著しく高まるとは判断できない市町村は、除外して大雨特別警報を発表するよう改善した。

本章では、平成 29 年 7 月に運用を開始した新しい指数を使った予報作業について、予報作業のシミュレーションを行い、標準的な予報作業や検討例を主に解説する。事例としては、平成 28 年（2016 年）台風第 9 号による大雨のうち関東地方の大雨（8 月 22 日）を対象とした。

1.2 節では、新しい指数を使った予報作業の概要、1.3 節では、平成 28 年台風第 9 号による大雨における東京都を対象とした警報発表作業（8 月 21～22 日の予報作業）1.4 節では、大雨特別警報の改善について順次述べる。

第 1.1.1 表 大雨警報・注意報、洪水警報・注意報の基準の変更

	大雨警報・注意報		洪水警報・注意報
	浸水害	土砂災害	
旧	1時間雨量 もしくは 3時間雨量	土壌雨量指数	<ul style="list-style-type: none"> 流域雨量指数 流域雨量指数と1時間雨量 もしくは3時間雨量との複 合基準 1時間雨量もしくは3時間 雨量
新	表面雨量指数	土壌雨量指数	<ul style="list-style-type: none"> 精緻化した流域雨量指数 精緻化した流域雨量指数と 表面雨量指数の複合基準

*田口 晴夫（気象庁予報部予報課）

1.2 新しい指数を使った予報作業の概要*

1.2.1 大雨警報（浸水害）・大雨注意報

平成 29 年 7 月 7 日の基準変更前は、大雨警報（浸水害）・大雨注意報の作業手順では、雨量基準を用い、予報作業支援システムの防災時系列に入力した予想雨量（最大 1 時間雨量、最大 3 時間雨量）と基準とを比較して、予想雨量が基準を超過する場合に大雨警報（浸水害）・大雨注意報の発表を行っていた。7 月 7 日からは雨量から表面雨量指数に基準要素を変更したが、基本的な作業手順である 予報担当者が気象シナリオの構築とそれに基づく雨量予想を行い、予報担当者が作成した最大 1 時間雨量・最大 3 時間雨量予想の防災時系列と基準との比較により、予報作業支援システムで警報等の発表を判定する、という流れに大きな変わりはない。変更点は、警報判定（警報の有無、注意報の判定も含む）において入力した雨量と基準を直接比較するのではなく、表面雨量指数基準による判定を以下の 3 通りの方法により行う点である。

換算雨量判定

浸水害の表面雨量指数基準に到達するまでの必要雨量を「表面雨量指数基準相当雨量」として 1 時間雨量、3 時間雨量に換算した雨量と、防災時系列の 1 時間雨量、3 時間雨量の入力値の比較に基づく判定

客観予想判定（目先 6 時間先まで）

客観的予想資料である降水ノウキャストと降水短時間予報から計算された表面雨量指数と、表面雨量指数基準との比較に基づく判定

あと何ミリ判定（目先 1 時間先まで）

リアルタイムに計算される「表面雨量指数基準到達までの必要雨量」と防災時系列の 1 コマ目に入力した 1 時間雨量の比較に基づく判定

次に、表面雨量指数基準導入後の、大雨警報（浸水害）等の発表までの作業の流れを時系列で解説する（第 1.2.1 図）。

予告的な気象情報の発表の目安となる、現象発生 の 24 時間以上前の段階においては、換算雨量判定、もしくは換算雨量判定で用いる「表面雨量指数基準相当雨量」と量的予想及び予想の確度等を考慮して、予告的な気象情報の発表判断を行う。

降水短時間予報の対象期間に入る、現象発生 の 6 時間前からは、換算雨量判定に加え、降水短時間予報から算出された客観予想判定も利用できるため、これらの資料を用いて、注意報（警報に言及した注意報を含む）の発表判断を行う。

さらに降水予想の確度が高くなる、現象発生 の概ね 2～3 時間前には、警報の発表判断を行う。

現象の発生する 1 時間前には、表面雨量指数の実況から計算されるあと何ミリ判定も警報の発表判断に用いる。なお、客観予想判定については、降水ノウキャストから算出されたものも利用できるようになる。

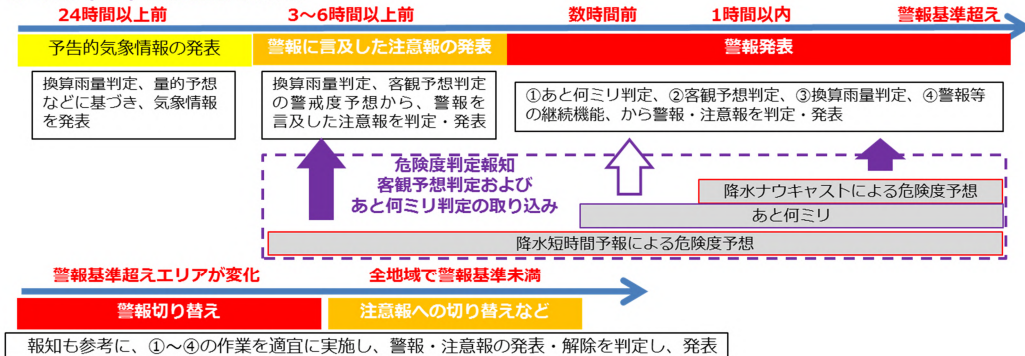
警報・注意報の発表時には警報判定画面で警報級・注意報級の期間を確認し、警報・注意報の解除・再発表を繰り返す期間がある場合は、警報・注意報を必要な期間継続させる機能（以下、継続機能）を用いて警報級・注意報級の期間を継続させ不適切な解除・再発表がないように修正する。

*田口 晴夫（気象庁予報部予報課）

表面雨量指数導入による、大雨警報（浸水害）等の予報作業について

これまで通りの雨量予測に加え、客観的予測資料による危険度と「あと何ミリ」を活用して大雨警報（浸水害）・注意報を運用する。リードタイムの考え方は変わらない。

○ 大雨（浸水）警報発表までの作業



- 換算雨量判定：防災時系列の1時間雨量と3時間雨量から、換算基準を活用して判定される危険度
- 客観予想判定：実況・降水短時間予報・降水ナウキャストから判定される危険度（10分更新）
- あと何ミリ判定：防災時系列の1時間雨量と「あと何ミリ」から判定される危険度（10分更新）

第 1.2.1 図 大雨警報（浸水害）等の発表までの作業の流れ

大雨警報（浸水害）等に関する作業では、予報担当者は基本的にこれまでどおり気象シナリオの構築とそれに基づいた量的予想を行い、予報作業支援システムにより警報判定を行うことで適切な警報・注意報の発表が可能となる。ここで、適切なリードタイムを確保するためには換算雨量判定に加え降水短時間予報を基にした客観予想判定により警報・注意報の発表を判断することが重要となる。

また、警報・注意報を発表していない場合に、客観予想判定やあと何ミリ判定で新たに警報・注意報の判定がなされた市町村がある場合は、予報作業支援システムの危険度監視により報知される。以下に報知を受けた際の作業手順を示す。

（客観予想判定の報知がされた場合）客観予想判定の報知がされ、降水短時間予報等の客観予想資料の利用が適切と考えられる場合、客観予想判定ガイダンスによる防災時系列置換または増加置換を行う。客観予想資料の予想雨量が防災時系列に入力している雨量より多い場合、1時間雨量や3時間雨量の防災時系列を客観予想資料で増加置換することを検討する。

（「あと何ミリ」報知がされた場合）「あと何ミリ」の報知は、警報・注意報が発表されていない二次細分区域に対し、基準に到達するのに必要な雨量が「あと5ミリ」以下となった場合に報知されるので、降水の実況を確認し警報・注意報の発表を検討する。目先1時間の1時間雨量の防災時系列を確認し、あと何ミリ判定が適切と考えられる場合は、防災時系列置換または増加置換を行う。

防災時系列を置換または増加置換した後、平面図や帳票、警報判定画面で、警報級・注意報級の期間を確認し、警報・注意報の解除・再発表を繰り返す期間がある場合、継続機能により不適切な解除・再発表がないように修正する。

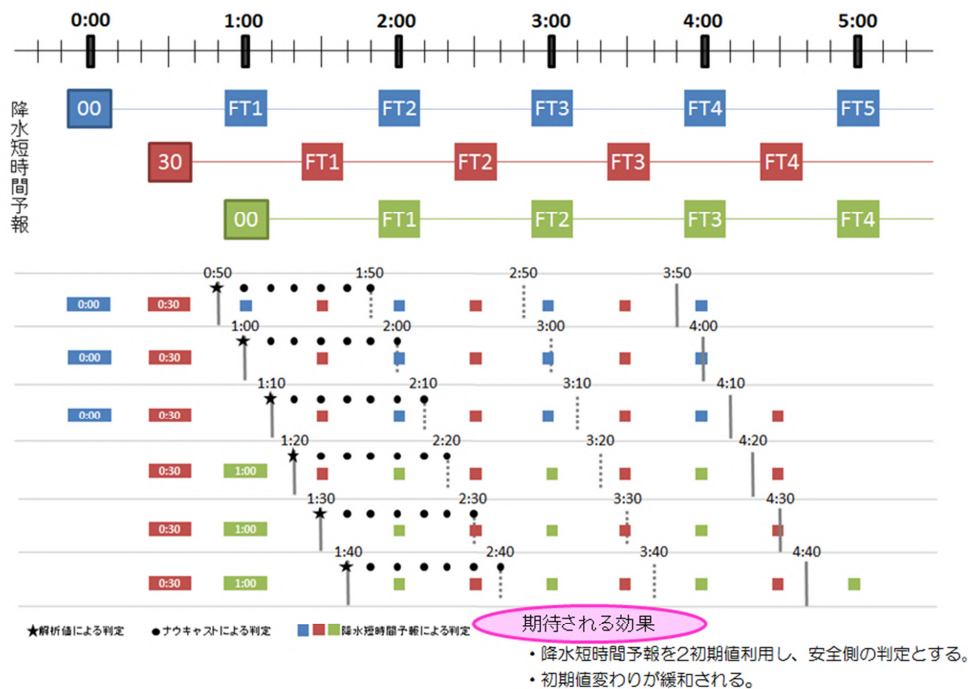
警報判定を行い、警報・注意報を発表する。

警報・注意報の解除は、表面雨量指数が警報・注意報基準未滿となり、かつ今後6時間以内に警報・注意報基準を超過しないと予想される場合に行う。なお、警報・注意報を解除する場合は、ある程度の地域をまとめて順次行う。

1.2.2 洪水警報・洪水注意報

洪水警報・洪水注意報の作業手順について、これまでは「流域雨量指数」、「流域雨量指数と1時間雨量もしくは3時間雨量との複合基準」、「1時間雨量もしくは3時間雨量の基準」に基づいて発表していたが、平成29年7月7日からは、1時間雨量、3時間雨量の基準を廃止し、「精緻化した流域雨量指数」、「精緻化した流域雨量指数と表面雨量指数の複合基準」に基づく発表に変更した。予報作業に用いる精緻化した流域雨量指数は、降水ナウキャスト・降水短時間予報・MSM 平均降水量ガイダンスといった客観的な雨量予想を用いて計算されており、予報官の雨量予測を用いた流域雨量指数の再計算は行わない。

「洪水警戒度（2017）ガイダンス」は、3時間先までを洪水警報の危険度分布から、4から6時間先までを降水短時間予報による雨量予測を用いて計算した流域雨量指数による危険度から、4時間先以降をMSMの平均降水量ガイダンスによる雨量予測を用いて計算した流域雨量指数による危険度から、求められる最大危険度を市町村ごとに編集して作成される。洪水警報の危険度分布は、実況の危険度、降水ナウキャストによる雨量予測を用いて計算した流域雨量指数の危険度の最新初期値分、及び、降水短時間予報による雨量予測を用いて計算した流域雨量指数の危険度の最新2初期値分から、格子ごとに3時間先までの最大危険度を抽出したもので、これを「洪水警戒度（2017）ガイダンス」のFT=0,1,2,3時間に用いている（第1.2.2図）。



第1.2.2図 洪水警報の危険度分布仕様

洪水警報・注意報の発表までの作業においては、現象発生の24時間以上前の段階で、予告的気象情報に大雨（浸水害）に対して警戒（注意）を記述する場合は、洪水害に対しても警戒（注意）を記述することを基本とする。降水が始まると、精緻化した流域雨量指数の確度は高まり、予想も安定するため、現象発生3～6時間前の警報の可能性に言及した注意報や、現象発生数時間前の警報の発表判断は、適切なリードタイムを考慮しながらシステム判定により行う。警報・注意報を発表していない場合に、洪水危険度の予想や実況で新たに警報・注意報基準を超えた市町村がある場合は、予報作業支援システムの危険度監視により報知される。この報知をトリガーに作業を行う（第1.2.3図）。以下に作業手順を示す。

「洪水警戒度（2017）ガイドンス」で防災時系列の置換または増加置換を行う。

「洪水警戒度（充足率）ガイドンス」は、流域雨量指数が警報・注意報基準の7割を超過し、指数が上昇傾向にある場合に判定される洪水危険度で、降水短時間予報等の客観予想が過小で、それによる指数の予想は基準値に到達しないが、その他の資料により基準値に到達すると予想する場合に、「洪水警戒度（充足率）ガイドンス」の増加置換を行う。

ガイドンスにより防災時系列を置換または増加置換した後、平面図や帳票、警報判定画面で、警報級・注意報級の期間を確認し、警報・注意報の解除・再発表を繰り返す期間がある場合、継続機能により不適切な解除・再発表がないように修正する。

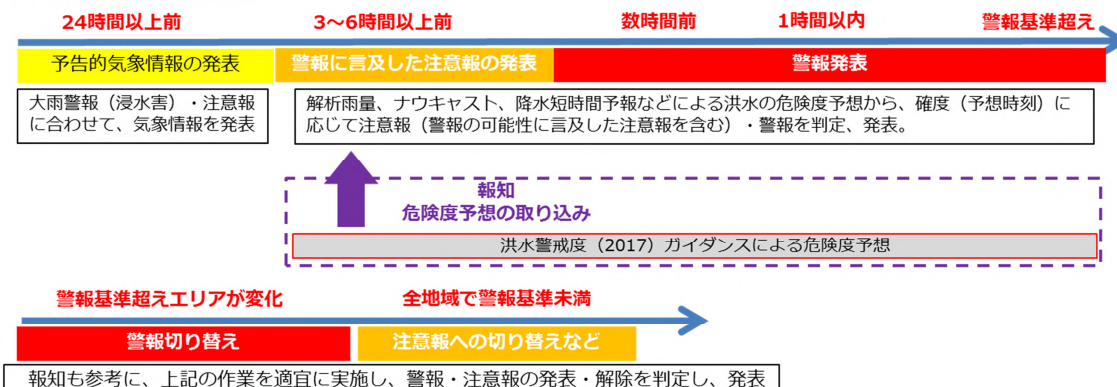
水位の変動がゆっくりした大河川の場合や降雨の見通しから洪水予報が継続すると予想される期間に比べてガイドンスが明らかに短いと判断される場合、継続機能により必要と判断した時間帯まで警報・注意報対象期間を設定する。

警報判定を行い、警報・注意報を発表する。

精緻化した流域雨量指数を用いた、洪水警報等の予報作業について

流域雨量指数、表面雨量指数（複合基準のみ）を用いて警戒度判定を行い、洪水警報・注意報を発表する。予報官の雨量予測を用いた流域雨量指数の再計算は行わない。リードタイムの考え方は従来と変わらない。

○ 洪水警報発表までの作業



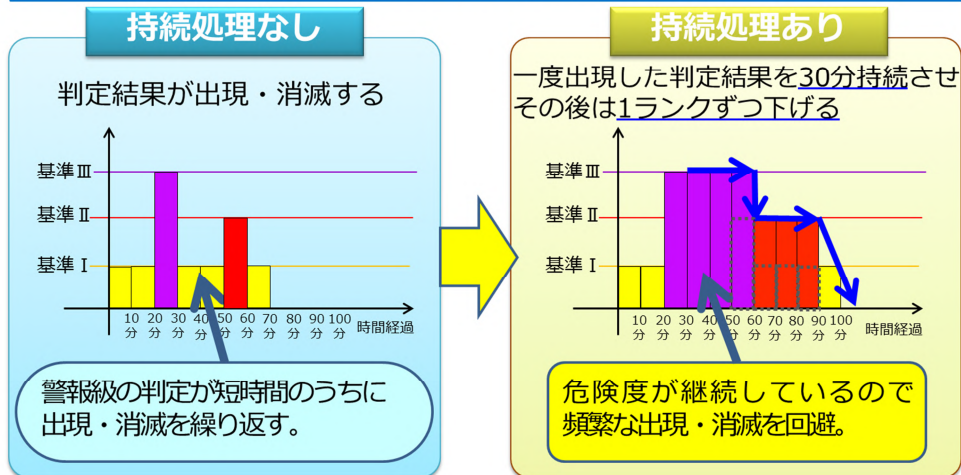
第 1.2.3 図 洪水警報等の発表までの作業の流れ

洪水警報・注意報の解除や、指定河川洪水予報と一般の洪水警報・注意報との整合については、従来と変わらない。

また、「洪水警戒度（2017）ガイドンス」では、雨量予測の誤差を緩和し、危険度の頻繁な出現・消滅を回避するため、一度予想値で危険度判定が出現した場合、その危険度判定を30分間持続させ、その後は10分ごとに1ランクずつ危険度を下げる持続処理を行っている（第1.2.4図）。この持続処理は、基準だけでなく、基準 や基準 についても行われる。なお、実況値で危険度判定が出現した場合は、持続処理はしていない。

洪水警報の危険度判定の持続処理

雨量予測の予報誤差を緩和し、危険度の頻繁な出現・消滅を回避するため、一度予想値で危険度判定が出現した場合、その危険度判定を30分間持続させ、その後は10分毎に1ランクずつ危険度を下げることとする。なお、実況値で危険度判定が出現した場合は、持続処理しない。



第 1.2.4 図 洪水警報の危険度判定の持続処理

基準 : 洪水注意報基準、軽微な洪水害が発生しうる値

基準 : 洪水警報基準、重大な洪水害が発生しうる値

基準 : 洪水警報基準の一段上の基準、過去の重大な洪水害発生時に匹敵する値

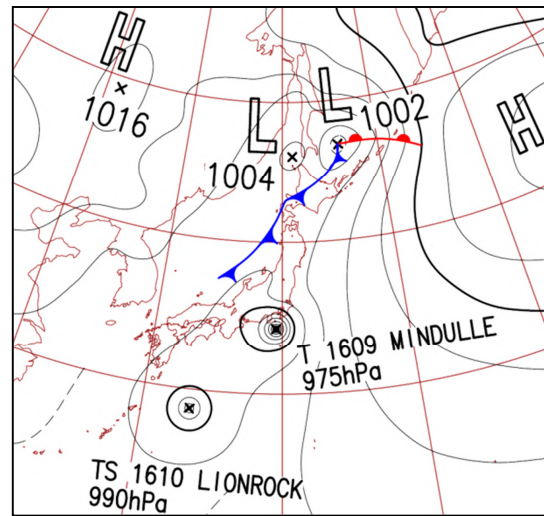
1.3 平成28年(2016年)台風第9号による大雨の警報作業

1.3.1 大雨の概要*

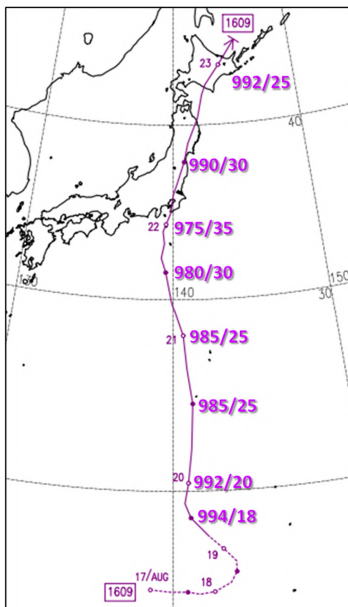
2016年8月19日15時にマリアナ諸島で発生した台風第9号は、小笠原諸島の西海上を北上し、22日3時には八丈島の西海上で中心気圧975hPa、最大風速35m/sの強い台風となった。台風は、強い勢力を維持したまま、22日12時半頃に千葉県館山市付近に上陸後、本州の太平洋側の沿岸部を北北東に進み、23日6時前、北海道日高地方中部に再上陸し、23日12時にオホーツク海で温帯低気圧へ変わった(第1.3.1図、第1.3.2図)。

8月21日~23日にかけて、台風を中心を取り巻く螺旋状の雲及び関東山地沿いの冷氣塊と関東の東海上から流入する台風の暖湿気との間で形成された収束線上で発達した対流雲により、21日6時~23日6時までの解析雨量積算(第1.3.3図)は、関東地方南部や伊豆諸島、伊豆半島を中心に200mmを超え、伊豆半島では400mmを超える大雨となった。同期間の最大1時間雨量は、東京都青梅で107.5mm、埼玉県所沢で76.5mm、神奈川県相模湖で63.0mmといずれも観測史上1位を更新し、総降水量は、東京都大島で292.0mm、東京都青梅で265.0mmと、8月の月降水量の平年値を超えた観測点もあった。

この台風に伴う大雨や強風により関東地方を中心に、死者1名、負傷者56名の人的被害、洪水害、浸水害及び土砂災害等が発生し、鉄道の運休や航空機の欠航等交通障害やライフラインに大きな影響があった(東京管区气象台2016)。

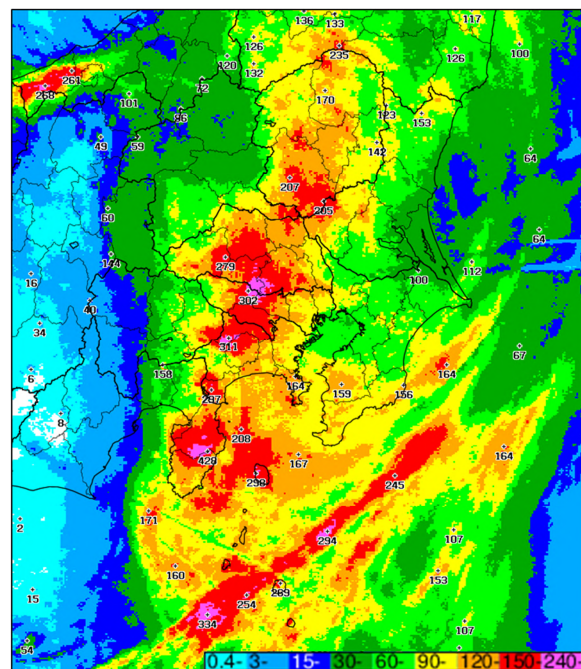


第1.3.1図 2016年8月22日9時の地上天気図



第1.3.2図 台風第9号の台風経路図

図中2桁の数字は日付け、は9時、は21時の中心位置で、その右側の/を挟んだ数字は中心気圧(hPa)/最大風速(m/s)を示す。

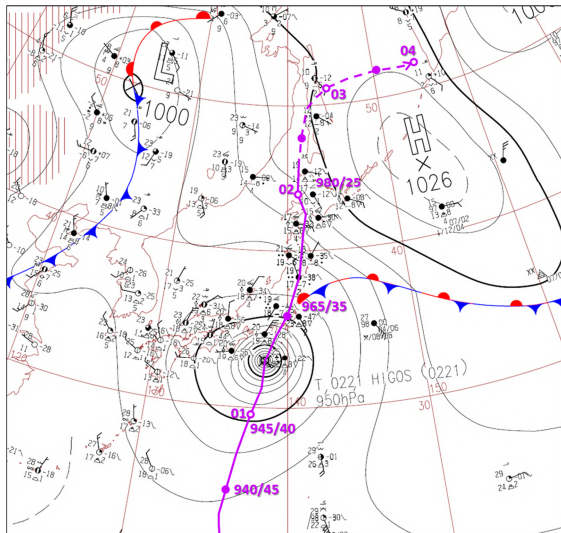


第1.3.3図 21日6時~23日6時の48時間解析雨量積算図

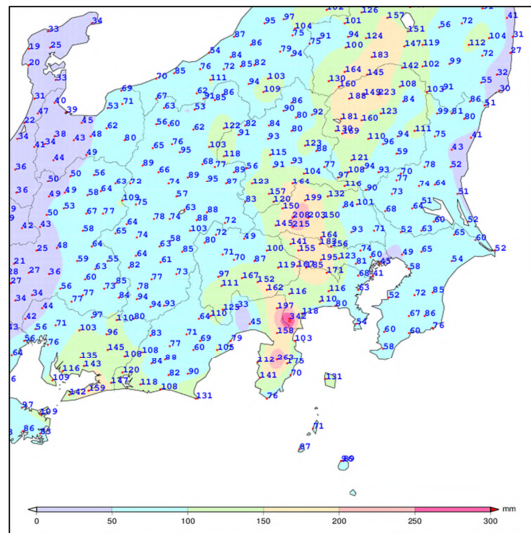
*原 基(気象庁予報部予報課)

1.3.2 類似事例*

台風が関東の南海上から北上する中で、関東山地沿いの冷氣塊と関東の東海上から流入する台風の暖湿気との間で形成された収束線上で対流雲が発達し、大雨となった事例は過去にもあり、その一例として平成14年(2002年)台風第21号が挙げられる(第1.3.4図)。台風第21号は、10月1日20時頃、中心気圧960hPa、最大風速35m/sの勢力で神奈川県三浦半島を通過し、同日20時半頃同県川崎市付近に上陸後、本州の太平洋側の沿岸部を北上した。1日0時~2日9時までの総降水量(第1.3.5図)は、埼玉県で200mmを超え、神奈川県箱根で300mmを超えており、降水分布は第1.3.3図と似ている。



第1.3.4図 2002年10月1日15時の地上天気図と台風第21号の台風経路図
経路図の表記は第1.3.2.図と同じで、破線は温帯低気圧。



第1.3.5図 1日0時~2日9時の降水量分布図

1.3.3 8月21日17時発表予報に向けた作業*

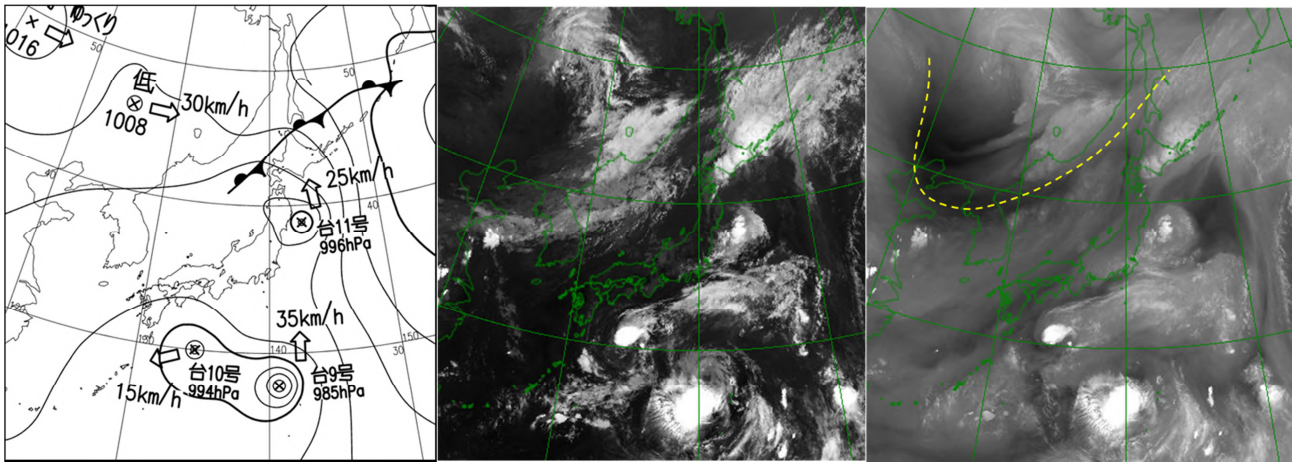
1.3.3.1 総観場の把握

21日9時の地上天気図(第1.3.6図左)は、三陸沖に台風第11号があって北上中で、日本海北部~千島近海には停滞前線が解析されている。一方、父島の北西海上に台風第9号があって北上しており、日本の南には台風第10号があって西南西へ進んでいる。中国地方~関東地方は等圧線が緩んで高圧部となっている。

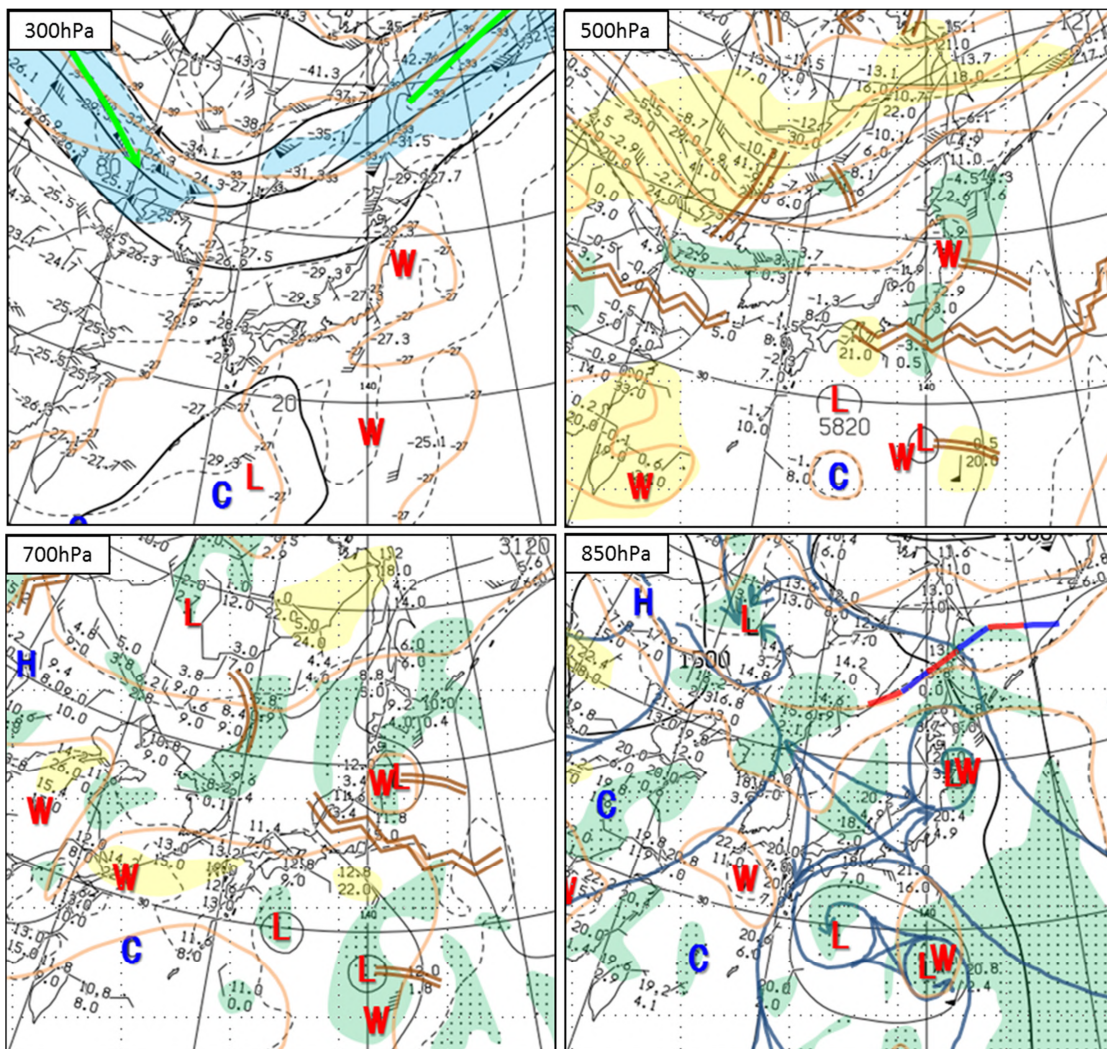
赤外画像(第1.3.6図中央)を見ると、黄海~千島近海は雲が広がっており、特に北海道~オホーツク海南部は停滞前線に台風第11号の東側からの暖湿気が流入しているため、対流雲が発達している。台風第11号に伴う対流雲は、東側で発達しているものの規模は小さく、中心付近では発生していないことから、台風は衰弱傾向であることがわかる。台風第9号は南西象限で対流雲が発達しているが、中心付近や北西象限~南東象限は中下層雲が主体となっていて、発達傾向は見られない。台風第10号は北東象限で対流雲が発達しているが規模が小さく、他の象限は下層雲主体となっている。水蒸気画像(第1.3.6図右)では、暗域による明瞭な境界線(破線)が見られ、ほぼジェット軸に対応している(第1.3.7図の300hPa高層天気図の強風軸を参照)。

高層天気図(第1.3.7図)を見ると、300hPaで水色の領域で示す風速60kt以上の強風帯が中国大陸からオホーツク海にあり、前述の停滞前線はこの強風帯に対応している。500hPaでは紀伊半島~伊豆諸島にリッジがあり、東北地方には台風第11号に伴う暖気がある。700hPaでは東日本のリッジが明瞭で、東海地方から伊豆諸島は乾燥し、東北地方には台風第11号に伴う低気圧性循環と暖気がある。850hPaでは停滞前線は15の等温線にほぼ沿っていて、釧路の南風30ktは下層暖気の流入が強まっていることを示している。

*原 基, 吉田 貴弘(気象庁予報部予報課)



第 1.3.6 図 21 日 9 時の地上天気図 (左)、赤外画像 (中央)、水蒸気画像 (右)
 水蒸気画像には衛星から見た暗域による境界線を破線で示す。



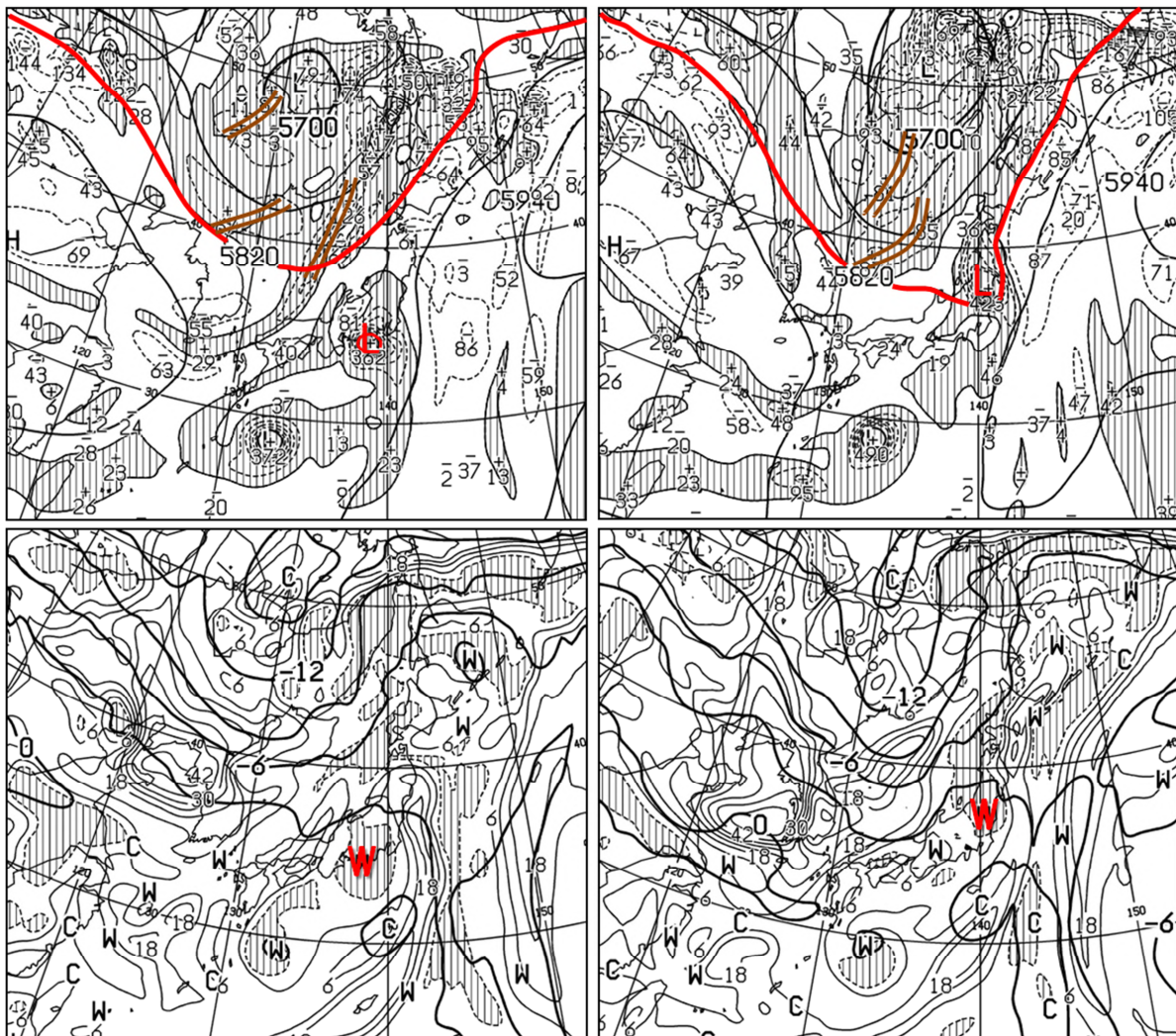
第 1.3.7 図 21 日 9 時の高層天気図 300hPa (左上)、500hPa (右上)、700hPa (左下)、850hPa (右下)
 緑実線：強風軸(300hPa)、茶線：トラフ及びブリッジ(500, 700hPa)、前線(850hPa)、橙色実線：等温線、水色着色域：強風域 (60kt 以上)、緑色着色域：湿潤域 (湿数 3 以下)、黄色着色域：乾燥域 (湿数 18 以上) を示す。

1.3.3.2 予想資料の確認

21日9時を初期値とするGSMによる22日9時と21時の予想図(第1.3.8図)では、500hPaの5820mの等高線(赤線:ほぼジェット軸に対応)が次第に南東進し、北上する台風第9号がその流れに合流する予想となっていて、台風は関東地方を通過するまで加速する可能性が低いと考えられる。また、台風の暖気核(500hPaの気温「W」)は上陸後も存在し、台風に伴う700hPaの湿り域は22日21時には北にある前線と一体化する。850hPa風・相当温位予想図(第1.3.9図)では、台風の351K以上の高相当温位域(赤色)は、22日21時になると中心付近の相当温位が低くなるものの、下層の低気圧性循環は明瞭で風速も弱まっていないことから、台風は上陸後も急速に衰える可能性が低いと考えられる。20日の海面水温(第1.3.10図)は、関東の南海上で27以上の高温となっていて、台風は衰えずに北上することを示唆している。

21日9時を初期値とする主要じょう乱解説図(第1.3.11図)では、北海道から日本海にのびる前線がほとんど停滞し(第1.3.9図の一点鎖線が850hPa面の前線)、台風の北上に伴って東日本や北日本で大雨に警戒するよう述べている。21日15時の台風の進路予報(第1.3.12図)は、22日午後には勢力をほぼ維持したまま関東地方を等速度で北上する予報となっている。

21日9時を初期値とするGSMと21日12時を初期値とするMSMの22日12時~18時の地上予想(第1.3.13

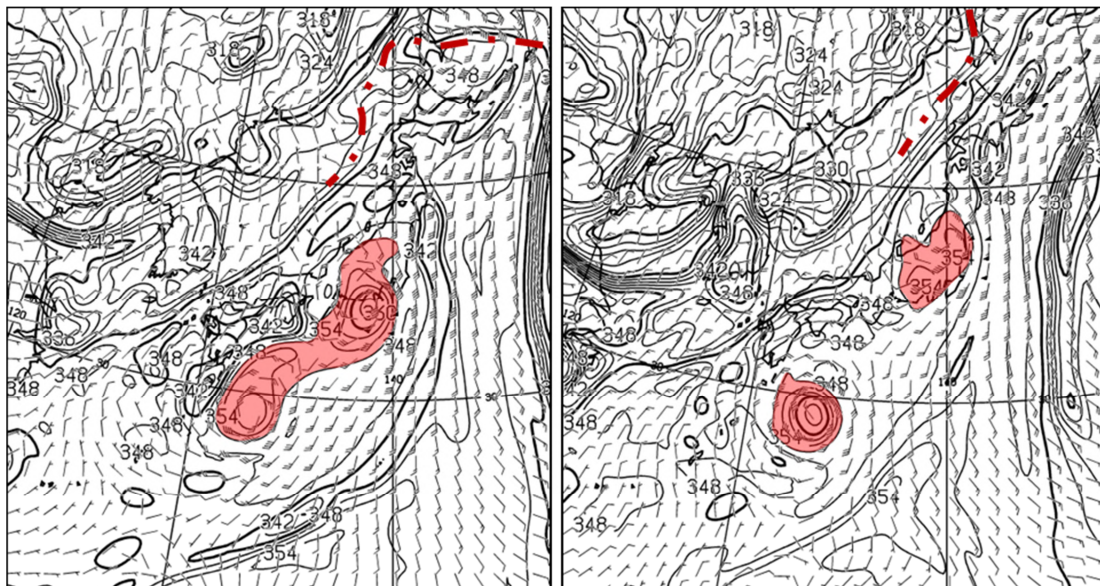


第1.3.8図 21日9時を初期値とするGSMの22日9時(左)、21時(右)の予想図

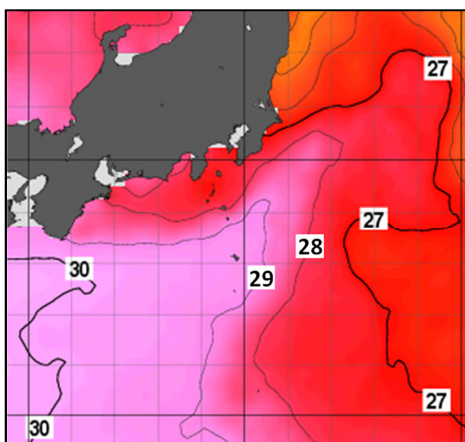
上段:500hPa高度・温度、下段:500hPa気温、700hPa湿数

図)を見ると、22日12時の台風の中心位置はほぼ同じだが、GSMの方がMSMより早めに北上させている。一方、台風の北側の雲バンドと台風を取り巻く北東象限から南東象限にのびる螺旋状の雲に対応した強い降水域は共通している。また、同じ予想期間のGSM・MSMによる500m高度の風、相当温位、水蒸気フラックス量(第1.3.14図)は、台風の北東象限から南東象限に関東地方の豪雨発生の目安の一つとなる $150\text{g}/\text{m}^2\text{s}$ 以上の水蒸気移流が継続し、相当温位 357K 以上の暖湿気が流入する予想となっていて、同時刻のMSMの可降水量予想(第1.3.15図)は、台風の北東象限から南東象限に $70\text{kg}/\text{m}^2$ 以上の大きい値の領域が広がっている。

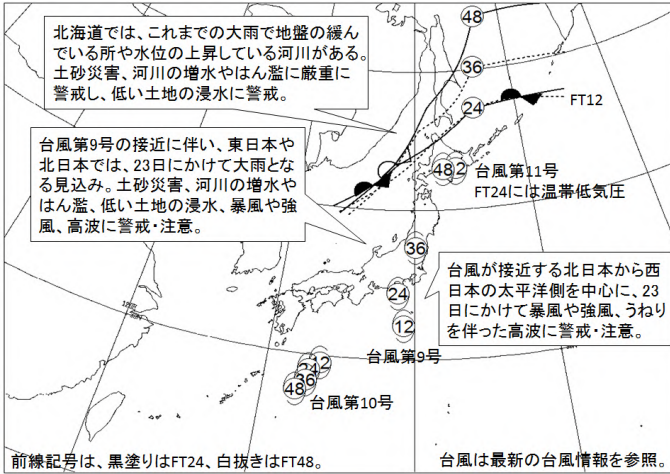
以上の予想資料から、台風が上陸するまでは関東地方の南東斜面(第1.3.16図)を中心に、台風上陸後は台風中心付近と台風を取り巻く北東象限から南東象限にのびる螺旋状の雲で、激しい雨または非常に激しい雨の降ることが予想され、総降水量は関東地方の南東斜面を中心に多くなることを考える。台風が上陸した後に、GSM・MSMともに台風の北側に収束線が形成される予想だが、MSMでは収束線近傍で降水量を多く予想していないことから、サブシナリオとして収束線近傍での激しい雨を考え、実況監視では収束線の発生に注目しておくことにする。



第1.3.9図 21日9時を初期値とするGSMの22日9時(左)、21時(右)の850Pa風・相当温位予想図
一点鎖線は850hPa面の前線、赤色着色域は台風の高相当温位域

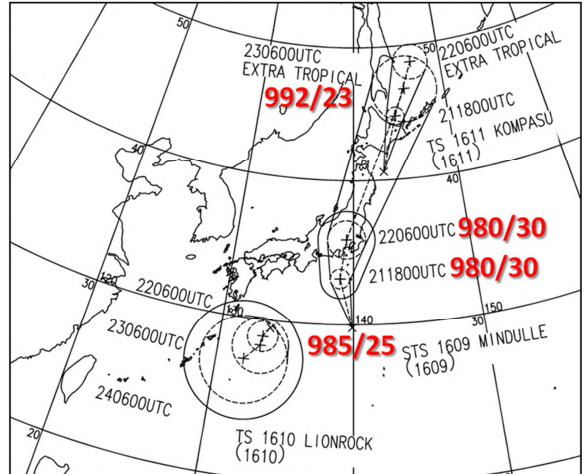


第1.3.10図 20日の海面水温



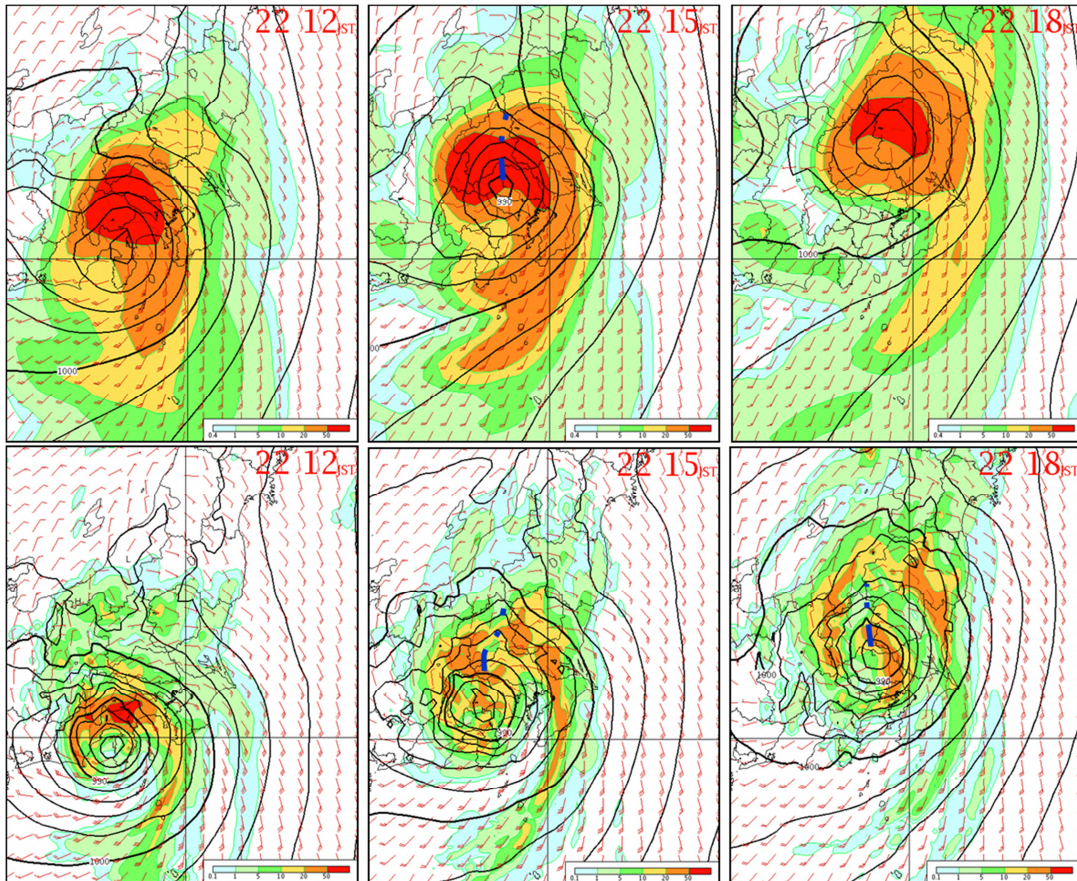
第 1.3.11 図 21 日 9 時を初期値とする主要じょう乱解説図

台風・低気圧 () の中の数字は初期時刻からの予想時刻



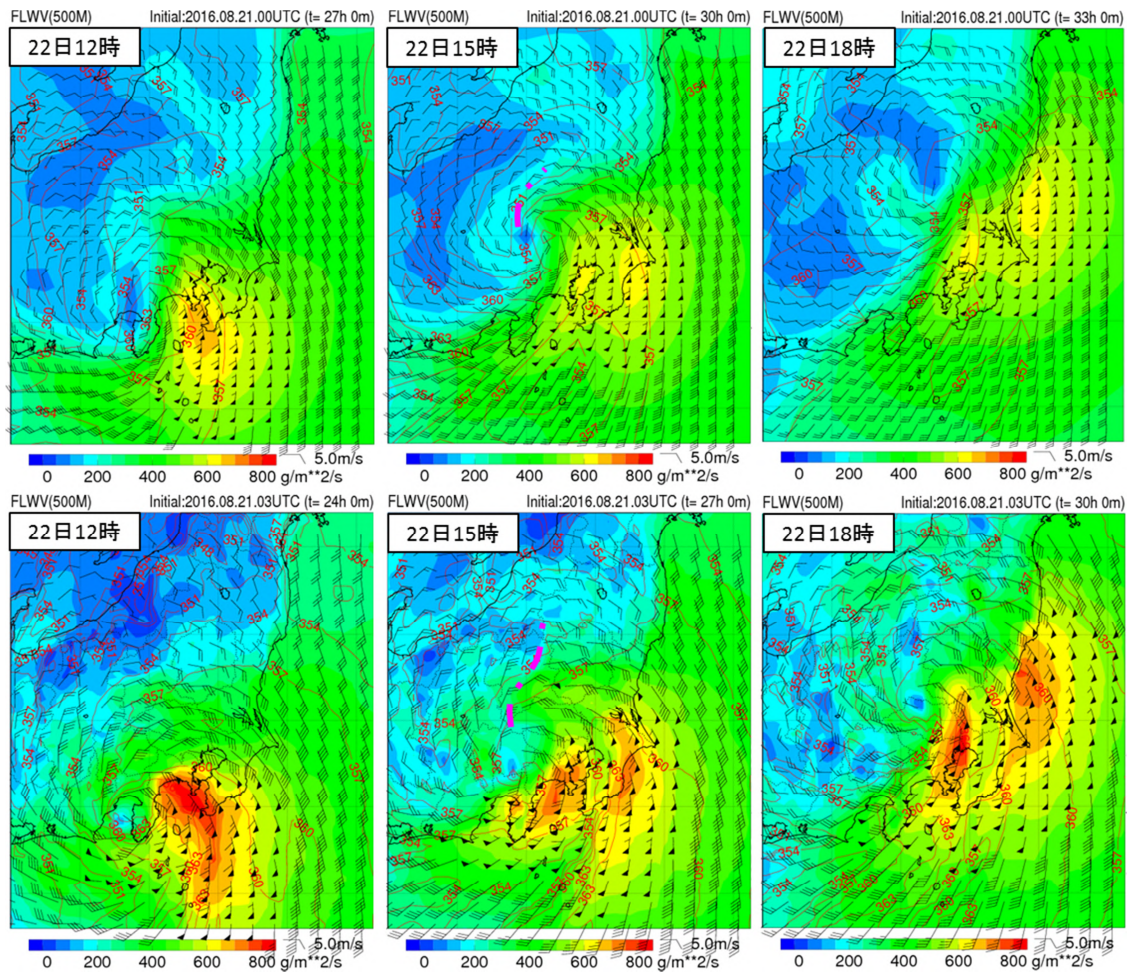
第 1.3.12 図 21 日 15 時の台風進路予報

× が 21 日 15 時の中心位置で、実況及び予報の諸元は台風第 9 号のみ赤数字 (中心気圧 hPa/最大風速 m/s) で表記。



第 1.3.13 図 地上気圧、地上風、3 時間雨量 (GSM)、1 時間雨量 (MSM) の予想図

上段 : 21 日 9 時を初期値とする GSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想
 下段 : 21 日 12 時を初期値とする MSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想
 青色の一点鎖線は収束線。

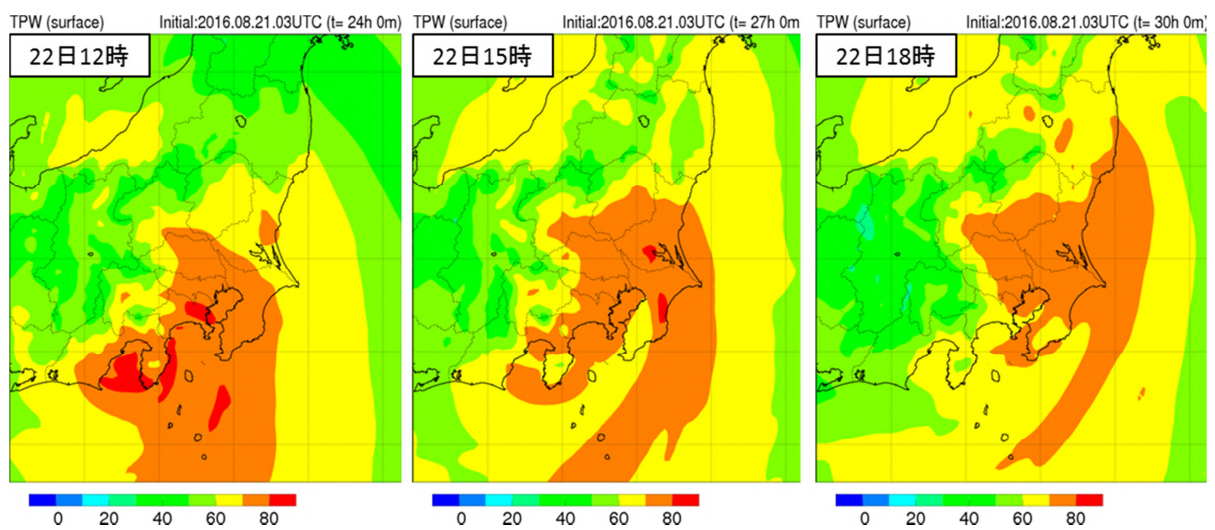


第 1.3.14 図 500m 高度の風と相当温位、及び水蒸気フラックス量の予想図

上段：21日9時を初期値とするGSMの22日12時、15時、18時の予想

下段：21日12時を初期値とするMSMの22日12時、15時、18時の予想

矢羽根は風向風速、赤線は等相当温位線、分布は水蒸気フラックス量、赤紫色の一点鎖線は収束線を示す。



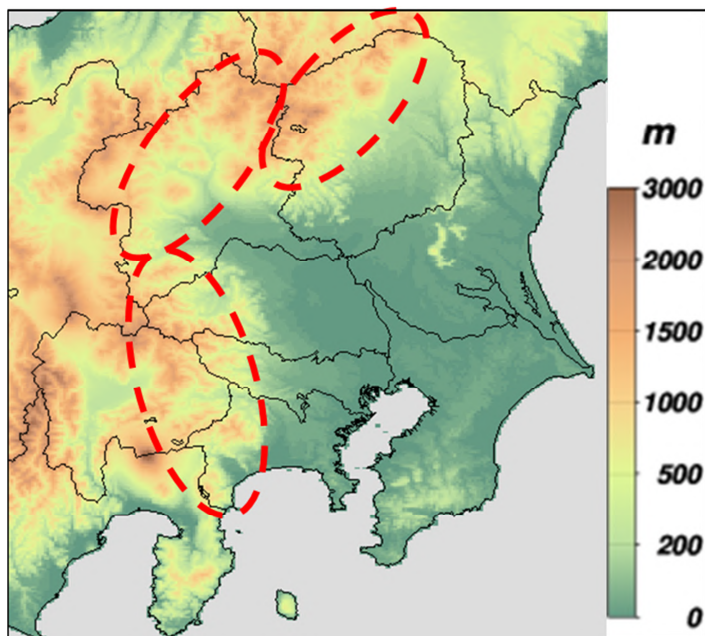
第 1.3.15 図 21日12時を初期値とするMSMの22日12時、15時、18時の可降水量の予想

1.3.3.3 シナリオの作成

前節の総観場や予想資料を踏まえ、関東地方の雨についてのシナリオを考える。

メインシナリオは台風が予想進路の中心を進むと想定した場合で、最新の GSM や MSM の予想に近くなる。関東山地の南東斜面には下層の高相当温位の暖湿気が流入・滑りし、対流雲が次々発達して降水量が多くなることが予想される。1時間最大降水量は可降水量並みの70mmかそれ以上を見込み、台風はほぼ一定の速度で北上することから、総降水量は関東地方の南東斜面を中心にかなり多くなり、土砂災害や洪水に対する警戒を強める必要がある。なお、台風が予想進路の西寄りを進んだ場合でも、GSM や MSM の台風予想が予想進路より西であることからメインシナリオとほぼ同じとなる。

サブシナリオは台風が予想進路の東寄りを進む場合で、類似事例で挙げた平成14年台風第21号の経路に近くなるため、降水分布が参考となる。台風の東側は関東の東海上からの暖湿気が流入し、台風の西側は関東の内陸からの冷気が流れ込み、両者の間に収束線が形成され、その線上で対流雲が発達して降水量が多くなることが予想される。関東地方は平野が広く、東～南に海、北～西に山があるので(第1.3.16図)、関東南岸に低気圧が進んでくると、沿岸前線等の局地前線が発生しやすい。このことは台風においても例外ではなく、念頭に置く必要がある。ここで改めて類似事例の降水分布(第1.3.5図)と関東地方の地形(第1.3.16図)を見比べてみると、栃木県や神奈川県は南東斜面で降水が多くなっているが、東京都や埼玉県で降水が多い地域は南東斜面ではない。これは、台風第21号が石廊崎沖を北上する頃から群馬県～神奈川県には収束線が形成され、台風が北上するにつれてその線上で対流雲が発達し、降水が強まったためである(図省略)。本事例においても、22日12時～18時のGSMとMSMには、下層に収束線(第1.3.13図、第1.3.14図の一点鎖線)ができる予想があり、関東の内陸の寒気と関東の東海上からの暖湿気との間に収束線が発生することが示唆される。収束線上で大雨となることを想定し、実況においてどこに収束線が形成されるかに注目しておくことが重要となる。

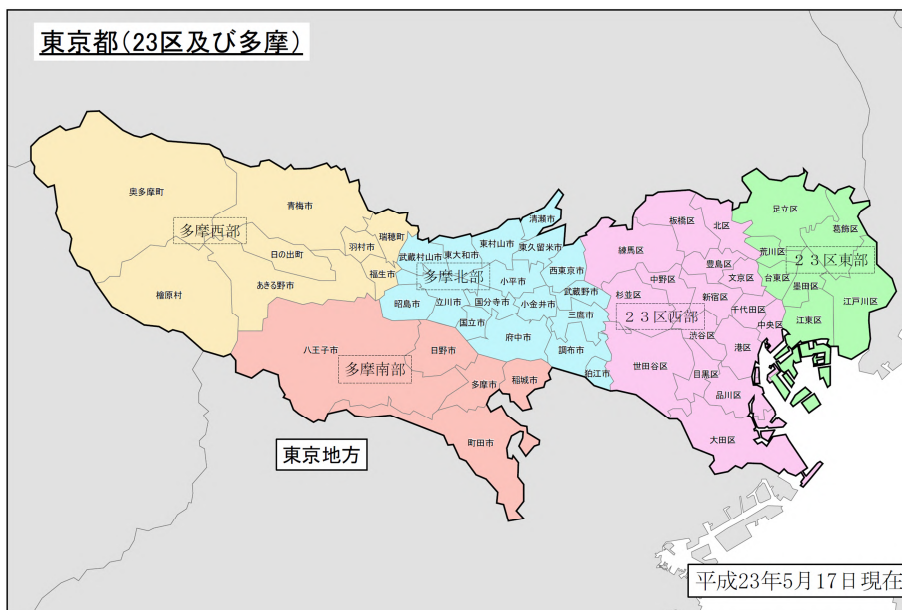


第1.3.16図 関東地方の地形図

赤破線内が南東斜面を示す。

1.3.3.4 防災時系列の検討

台風第9号は21日15時には、八丈島の南約370kmにあって、35km/hの速さで北に進んでおり、22日の昼前後、関東地方に上陸する予想となっている(第1.3.12図)。21日17時予報の作成に利用できる21日9時を初期値とするGSMの1時間最大降水量ガイダンスでは、東京地方(第1.3.17図)では、22日昼前後に、100mm/h以上の猛烈な雨を、MSMでは80mm/h以上(12時初期値では70mm/h以上)の猛烈な雨を予想している(第1.3.1表)。台風の場合は、地形性降水により山沿いを中心に強雨となるため、1時間雨量は1時間最大降水量ガイダンスを参考に台風が接近・通過する朝から夕方にかけて、全域で50mm/hの非常に激しい雨、地形的な影響(第1.3.16図)を受ける多摩西部に昼前から昼過ぎにかけて80mm/hの猛烈な雨を予想する。また、台風による持続性の降水であることから、3時間雨量は1時間雨量の2倍とし、警報級の可能性については、東京地方に接近前の21日18時~22日6時を「中」、最接近する22日6時~24時を「高」と予想する(第1.3.18図)。



第1.3.17図 東京地方における市町村等をまとめた地域

第1.3.1表 1時間最大降水量ガイダンスの22日を対象とする予想の変化

GSM(上段)とMSM(下段) FLV0(フィルターなし)

		22(月)							
GSM		-03	-06	-09	-12	-15	-18	-21	-24
21日00UTC		32	47	72	110	101	49	11	
20日18UTC		24	49	86	84	85	51	2	2
20日12UTC		49	29	46	59	48	55	80	107
MSM									
21日03UTC		17	17	50	70	57	55	16	
21日00UTC		19	17	42	53	90	81	9	7
20日21UTC		25	23	8	34	80	84	54	

		警報級の可能性				中				高				
時刻(JST)		16-17	17-18	18-19	19-21	21-24	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24
1時間 降水量	確度	A	A	A	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C
	23区西部	0	0	0	0	10	20	30	30	50	50	50	30	15
	23区東部	0	0	0	0	10	20	30	30	50	50	50	30	15
	多摩北部	0	0	0	0	10	20	30	50	50	50	50	30	15
	多摩西部	0	0	0	0	10	20	30	50	80	80	50	30	15
	多摩南部	0	0	0	0	10	20	30	50	50	50	50	30	15
3時間 降水量	時刻(JST)	16-17	17-18	18-19	19-21	21-24	00-03	03-06	06-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24
	確度	A	A	A	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C
	23区西部	0	0	0	0	20	40	60	60	100	100	100	60	30
	23区東部	0	0	0	0	20	40	60	60	100	100	100	60	30
	多摩北部	0	0	0	0	20	40	60	100	100	100	100	60	30
	多摩西部	0	0	0	0	20	40	60	100	160	160	100	60	30
多摩南部	0	0	0	0	20	40	60	100	100	100	100	60	30	

第1.3.18図 21日17時予報時の防災時系列

確度はA、B、Cの順に、予測の確からしさを表す。警報は警報級の期間の始めが確度Aの期間内にあるときに、注意報は注意報級の期間の始めが確度A、Bの期間内にあるときに発表する。

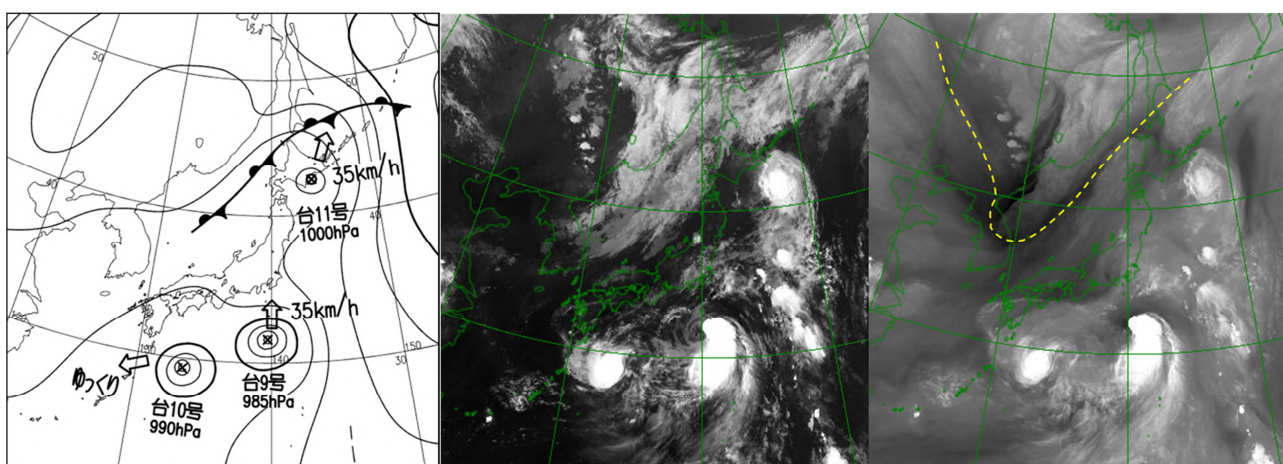
1.3.4 8月22日5時発表予報に向けた作業*

1.3.4.1 実況の把握及びシナリオの検討

21日21時の地上天気図(第1.3.19図左)は、台風第11号が釧路沖へ進み、台風第9号は八丈島の南海上を北上中であるが、関東地方はまだ高圧部となっている。高層天気図(第1.3.20図)を見ると、300~700hPaでは大陸のトラフが深まりながら日本海中・西部まで進んできており、水蒸気画像(第1.3.19図右)でも確認できる。また、500~850hPaでは関東地方はリッジが北へ抜けて、台風からの暖湿気が流入する場へと変化し、赤外画像(第1.3.19図中央)でも次々と台風本体の北側にある雲域が関東地方へ流れ込んできていることがわかる。

21日21時を初期値とするGSMによる22日9時と21時の予想図(第1.3.21図、第1.3.22図)は、21日9時を初期値とするGSMとほぼ同じ予想となっており、主要じょう乱解説図(第1.3.23図)も前回と変わっていない。22日3時の台風の進路予報(第1.3.24図)は、21日15時の予報と大きく変わっていないが、台風の勢力は22日2時から中心気圧975hPa、最大風速35m/sと強い台風に階級が上がり、その勢力を維持したまま関東地方に上陸する予想となっている。

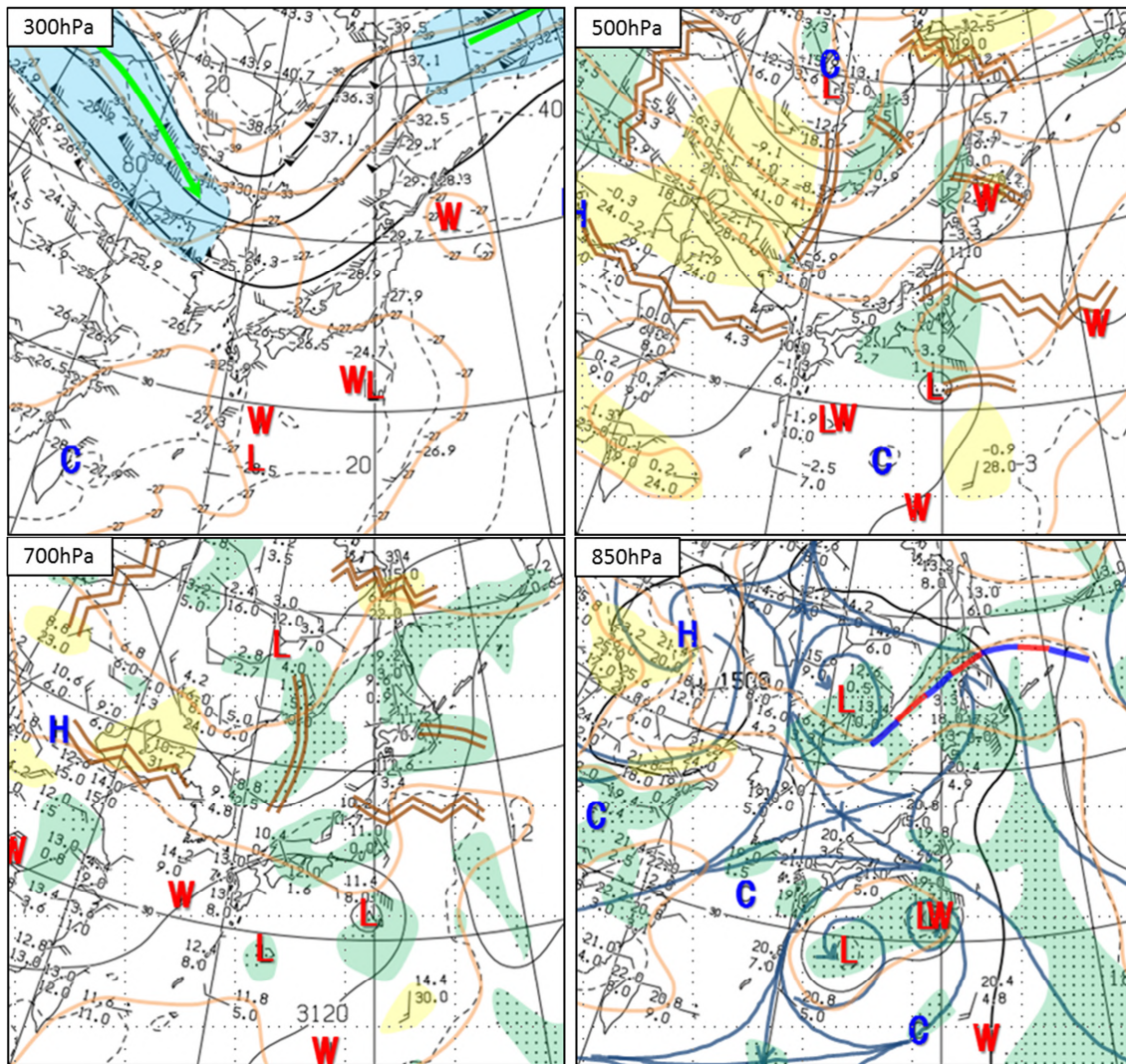
降水の検討のため、21日21時を初期値とするGSMと22日0時を初期値とするMSMの22日12時~18時の地上予想(第1.3.25図)を21日17時発表予報の作業時の予想資料(第1.3.13図)と比較してみる。台風の中心位置はGSMもMSMも前回より東寄りになり、MSMの中心位置はGSMに近づいている。また、台風の中心気圧はGSMでは10hPa近く深めているのに対し、MSMでは上陸前は2hPa程度深めているが、上陸後は前回と変わっていない。降水域は台風中心付近では大差はないが、台風を取り巻く北東象限から南東象限にのびる螺旋状の雲に対応した強い降水域は、前回より弱めに予想している。また、GSM・MSMによる500m高度の風、相当温位、水蒸気フラックス量(第1.3.26図)を前回の予想(第1.3.14図)と比較すると、GSMでは台風の中心付近の風速が強まったことにより、いずれの予想時刻も台風の南東象限で水蒸気フラックス量が大きくなっている。MSMでは22日12時と18時は台風の中心付近の風速が弱まったため、台風の南東象限で水蒸気フラックス量が小さくなり、15時は台風の中心付近の風速が強まったことにより、台風の南東象限で量が大きくなっている。MSMの可降水量予想(第1.3.27図)は、前回の予想(第1.3.15図)より、70kg/m²以上の大きい値の領域が縮小している。



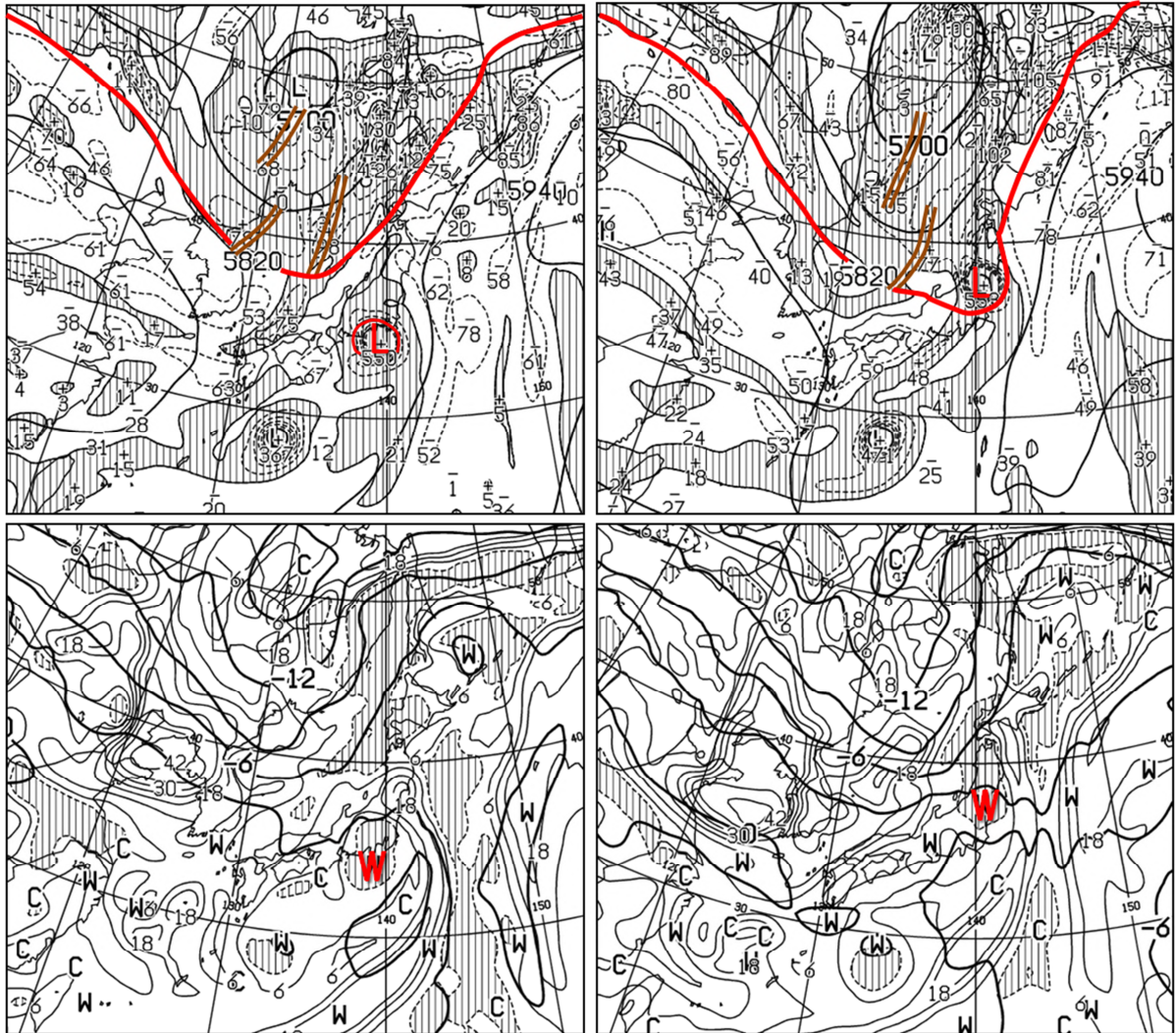
第1.3.19図 21日21時の地上天気図(左)、赤外画像(中央)、水蒸気画像(右)

水蒸気画像には衛星から見た暗域による境界線を破線で示す。

*原 基, 吉田 貴弘(気象庁予報部予報課)

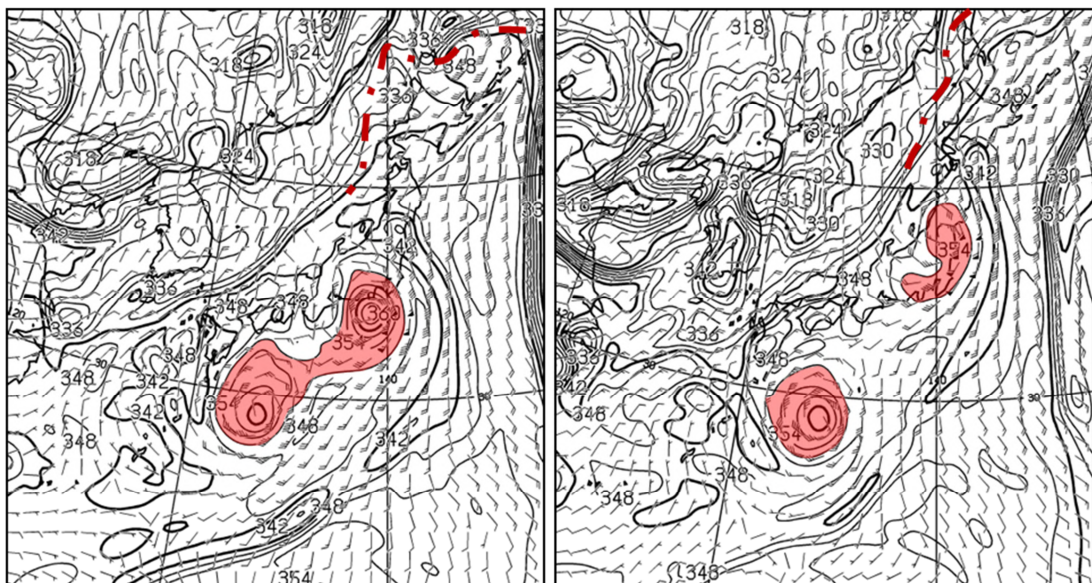


第 1.3.20 図 21 日 21 時の高層天気図 300hPa (左上)、500hPa (右上)、700hPa (左下)、850hPa (右下)
 緑実線：強風軸(300hPa)、茶線：トラフ及びリッジ(500, 700hPa)、前線(850hPa)、橙色実線：等温線、水色着色域：
 強風域 (60kt 以上)、緑色着色域：湿潤域 (湿数 3 以下)、黄色着色域：乾燥域 (湿数 18 以上) を示す。



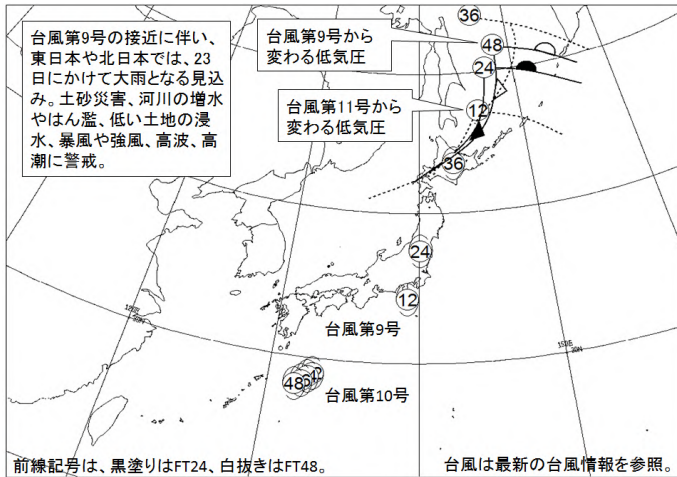
第1.3.21図 21日21時を初期値とするGSMの22日9時(左)、21時(右)の予想図

上段: 500hPa 高度・渦度、下段: 500hPa 気温、700hPa 湿数



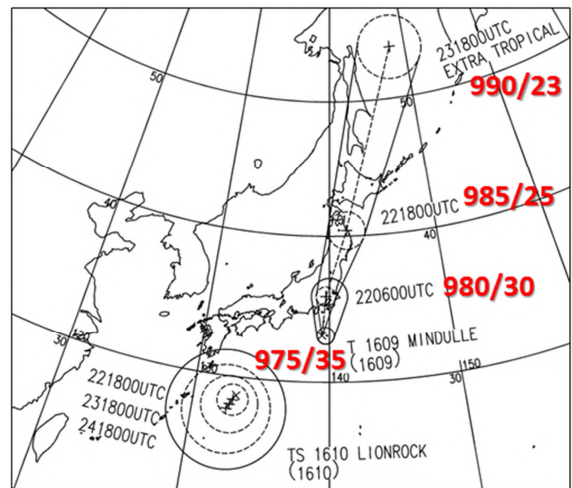
第1.3.22図 21日21時を初期値とするGSMの22日9時(左)、21時(右)の850Pa風・相当温位予想図

一点鎖線は850hPa面の前線、赤色着色域は台風の高相当温位域



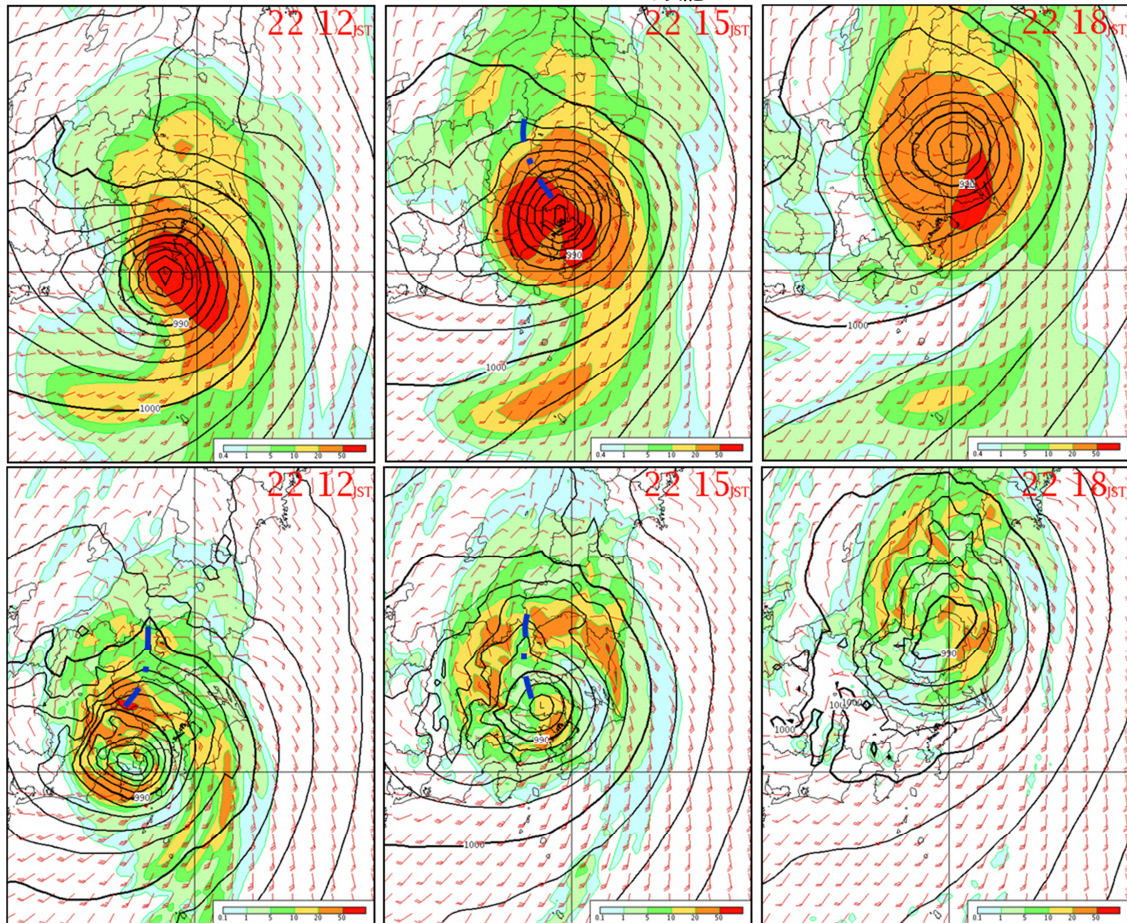
第 1.3.23 図 21 日 21 時を初期値とする主要じょう乱解説図

台風・低気圧 () 中の数字は初期時刻からの予想時刻



第 1.3.24 図 22 日 3 時の台風進路予報

× が 22 日 3 時の中心位置で、実況及び予報の諸元は台風第 9 号のみ赤数字(中心気圧 hPa/最大風速 m/s)で表記

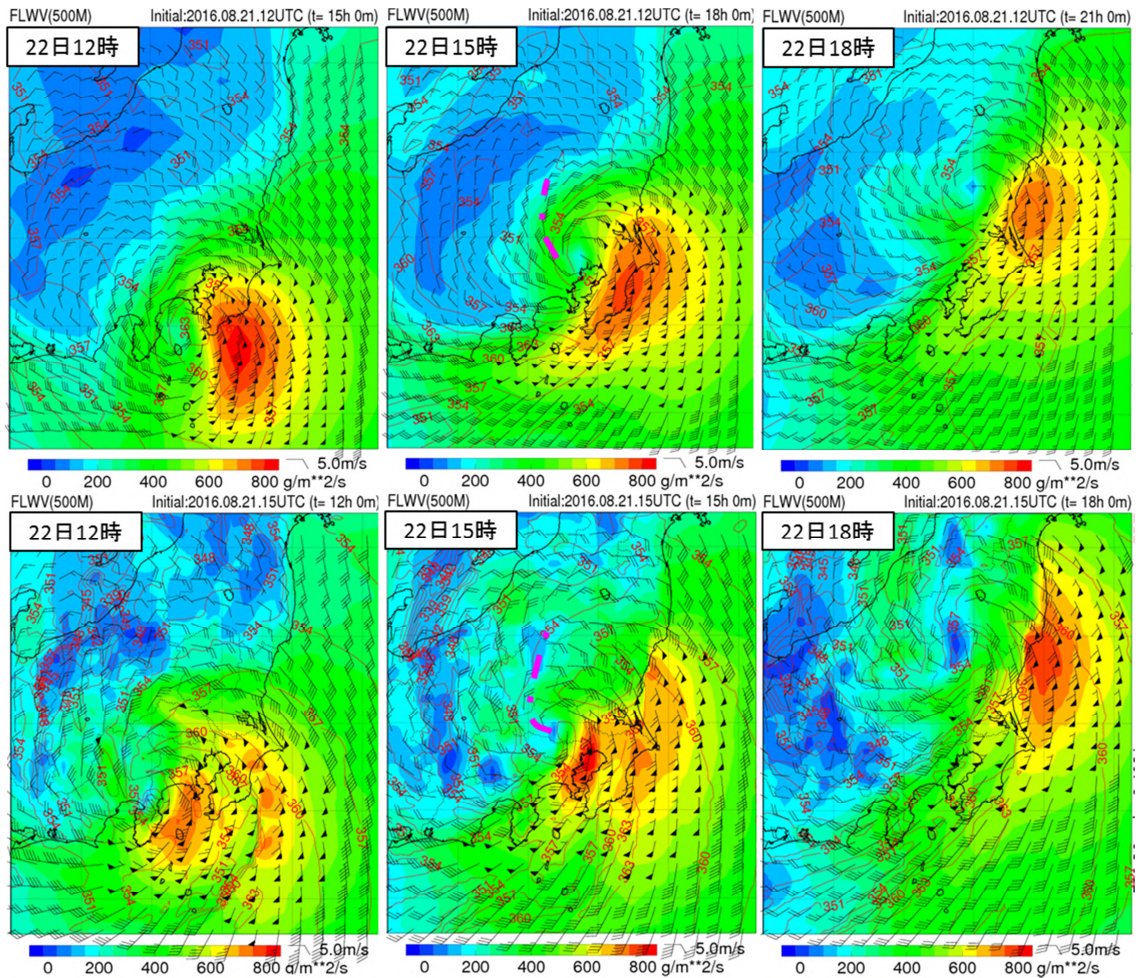


第 1.3.25 図 地上気圧、地上風、3 時間雨量 (GSM)、1 時間雨量 (MSM) の予想図

上段：21 日 21 時を初期値とする GSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想

下段：22 日 0 時を初期値とする MSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想

青色の一点鎖線は収束線

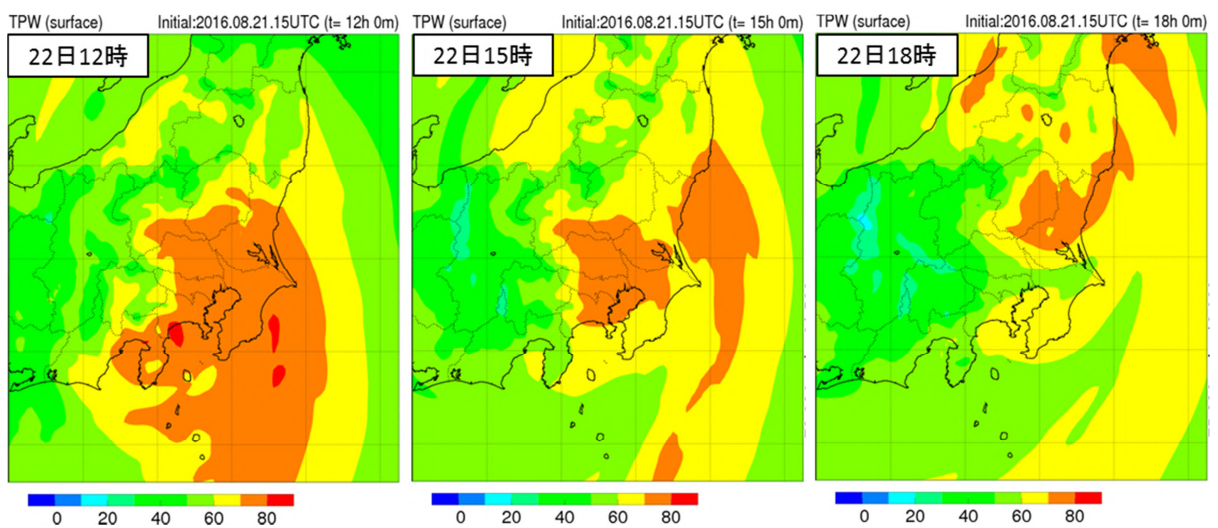


第 1.3.26 図 500m 高度の風と相当温位、及び水蒸気フラックス量の予想図

上段：21 日 21 時を初期値とする GSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想

下段：22 日 0 時を初期値とする MSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の予想

矢羽根は風向風速、赤線は等相当温位線、分布は水蒸気フラックス量、赤紫色の一点鎖線は収束線を示す。



第 1.3.27 図 22 日 0 時を初期値とする MSM の 22 日 12 時、15 時、18 時の可降水量の予想

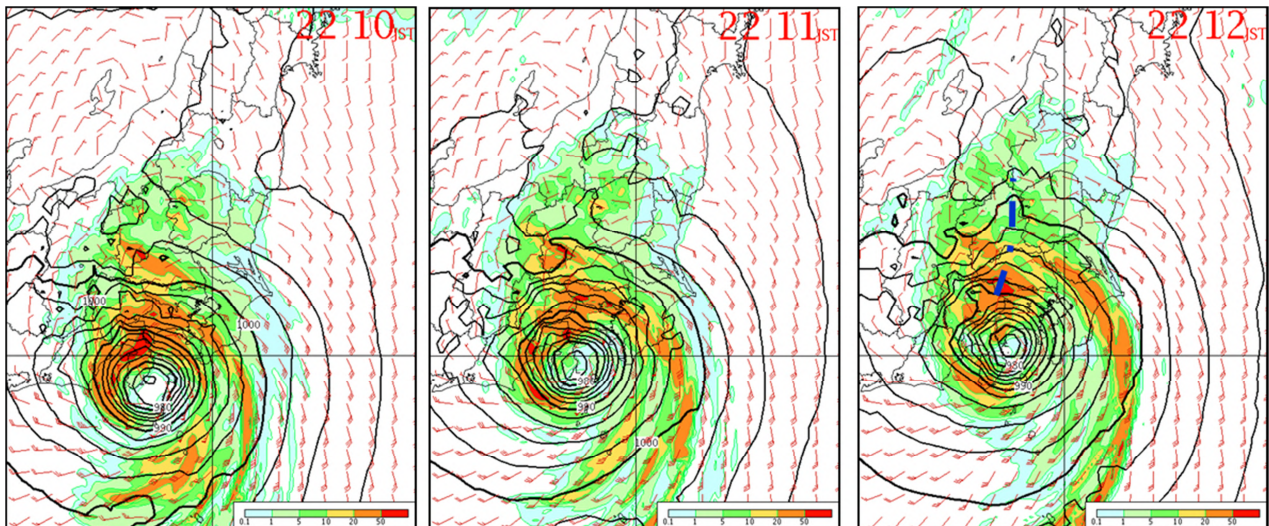
1.3.4.2 予想資料の確認

22日5時予報の作成に利用できる最新の21日21時を初期値とするGSMでは台風第9号は神奈川県東部に上陸、22日0時を初期値とするMSMでは静岡県東部に上陸し、昼過ぎに東京地方に最接近する予想となっている(第1.3.25図)。GSMは最新の進路予報に近く、MSMはやや西寄りのコースを予想している。1時間最大降水量ガイダンスではMSM(第1.3.2表下段)は朝から昼過ぎにかけて60mm/h以上の非常に激しい雨を予想、ピークの昼前には90mm/h以上の猛烈な雨を予想している。一方、GSM(第1.3.2表上段)は朝から夕方にかけて、50mm/h以上の非常に激しい雨、昼前後は80mm/h以上の猛烈な雨、ピークの昼過ぎは100mm/h以上を予想している。降水のピークはMSMが昼前、GSMが昼過ぎと概ね予想は一致しているが、台風は総観スケールの現象であることや最新の進路予報に近いことから、降水のタイミングはGSMを採用し、降水の強さや分布についてはMSMも参考とする。ここで22日12時まで予想されている22日3時を初期値とするLFM(第1.3.28図)を見てみると、中心気圧は978hPa以下と実況に近い予想となっていて、降水予想はMSMと似たような分布をしているが、台風を取り巻く北東象限から南東象限にのびる螺旋状の雲に対応した降水はMSMより強く、10時頃から東京地方に入ってくる予想となっている。

第1.3.2表 1時間最大降水量ガイダンスの22日を対象とする予想の変化

GSM(上段)とMSM(下段) FLV0(フィルターなし)

		22(月)							
GSM		-03	-06	-09	-12	-15	-18	-21	-24
21日12UTC		10	12	54	81	112	72	15	11
21日06UTC		25	31	56	80	121	112	16	9
21日00UTC		32	47	72	110	101	49	11	
20日18UTC		24	49	86	84	85	51	2	2
MSM									
21日15UTC		8	27	68	98	68	30		
21日12UTC		10	26	66	80	107	30		
21日09UTC		12	22	56	90	72	44		
21日06UTC		9	24	50	84	102	30		
21日03UTC		17	17	50	70	57	55	16	
21日00UTC		19	17	42	53	90	81	9	7

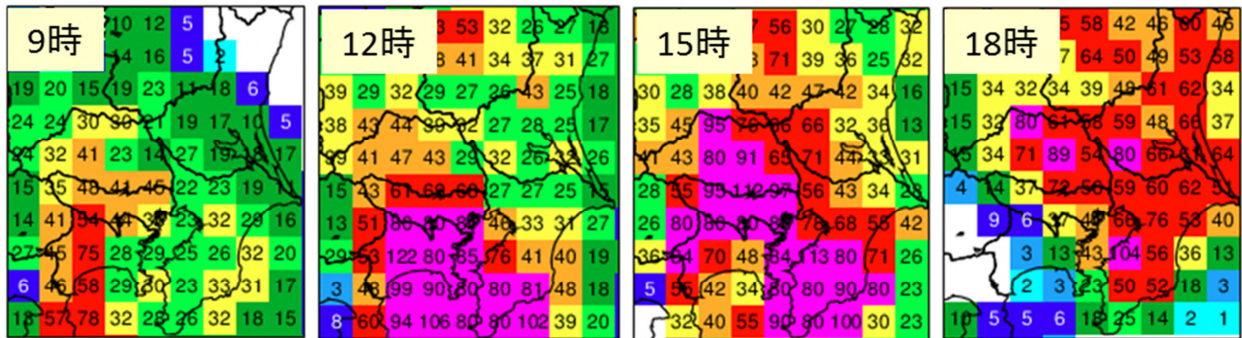


第1.3.28図 地上気圧、地上風、1時間雨量の予想図

22日3時を初期値とするLFMの22日10時、11時、12時の予想
青色の一点鎖線は収束線。

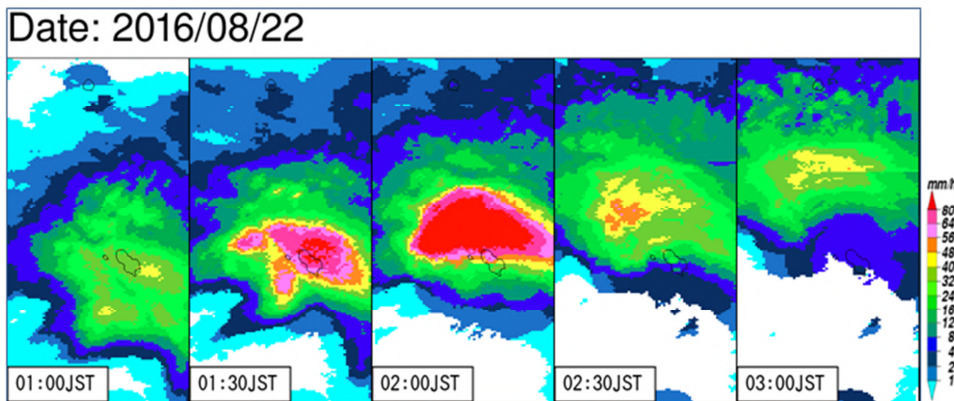
1.3.4.3 防災時系列の修正と大雨注意報の発表

1時間最大降水量ガイダンスでは、GSM、MSMともに80mm/h以上の猛烈な雨を予想しており、MSMの可降水量も80kg/m²弱を予想(第1.3.27図)しているため、多摩西部で見込まれる昼前から昼過ぎにかけての最大1時間雨量は80mm/hと判断する。22日昼前から夕方にかけてはGSMが広範囲に60mm/h以上を安定して予想していること(第1.3.29図)や台風の北側では解析雨量で50~100mm/hの解析が断続していること(第1.3.30図)から多摩西部以外の最大1時間雨量を60mm/hに上方修正する。また、22日9時を対象としたGSM1時間最大降水量ガイダンスの分布を見ると50mm/hは1格子のみで、その他は40mm/h前後となっているため、22日朝のコマを40mm/hに下方修正することとして、前日夕方に作成した防災時系列に若干の修正を加える。

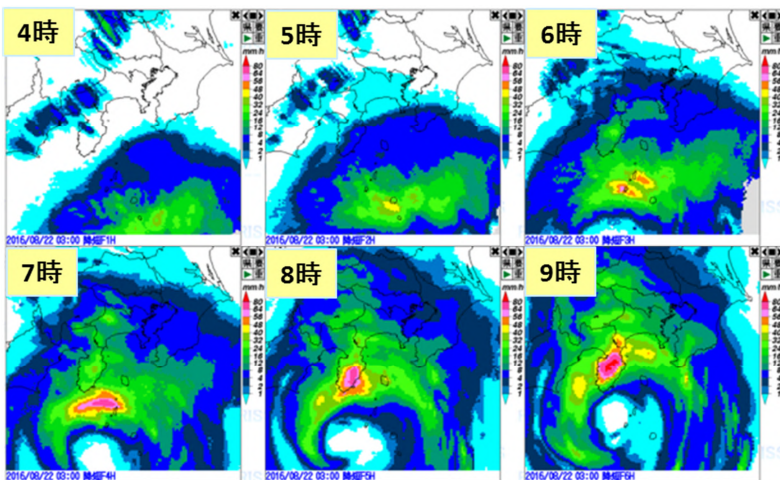


第1.3.29図 21日21時を初期値とするGSM1時間最大降水量ガイダンス分布図

左から22日9時、12時、15時、18時の予想



第1.3.30図 台風北側の八丈島付近の解析雨量分布 左から22日1時~3時(30分間隔)



第1.3.31図 22日3時を初期値とする降水短時間予報 左上から22日4時~9時の予想(1時間間隔)

22日3時の解析雨量では、台風北側の強雨域は伊豆諸島南部の三宅島と八丈島の間であり、降水短時間予報（第1.3.31図）によると、6時頃から東京地方に降水域がかけはじめ、9時には大雨注意報級の降水が始まる予想となっている。これはGSMにほぼ近いことから、3時過ぎに注意報を発表する。

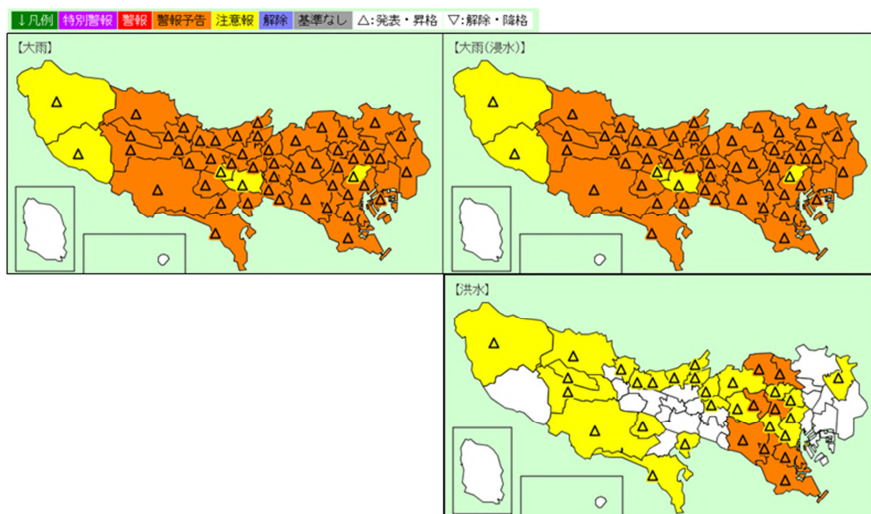
通常の警報のリードタイムをとることにし、防災時系列には前述した1時間雨量を設定、3時間雨量は台風による持続性の降水であることから、1時間雨量の2倍、警報級の可能性は6時から18時に「高」を設定する。浸水危険度は、最新の浸水警戒度（客観予想+あと何ミリ）ガイダンス、土砂危険度は、最新の土砂警戒度時系列ガイダンス、洪水危険度は、最新の「洪水警戒度（2017）ガイダンス」をそれぞれ置換し、継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる（第1.3.32図）。

警報判定結果を以下に示す（第1.3.33図）。大雨（浸水害）については、換算雨量判定により全域で注意報となり一部の市区町村を除き警報に言及した注意報を発表する。また、洪水についても、広範囲に注意報となり、23区西部では警報に言及した注意報を発表する区がある。一方、大雨（土砂災害）については注意報を発表しない。



第1.3.32図 22日3時過ぎの防災時系列

浸水危険度、土砂危険度、洪水危険度の各表内の下段の数値は最新の警戒度ガイダンス



第1.3.33図 22日3時過ぎの注意報発表時の警報判定結果

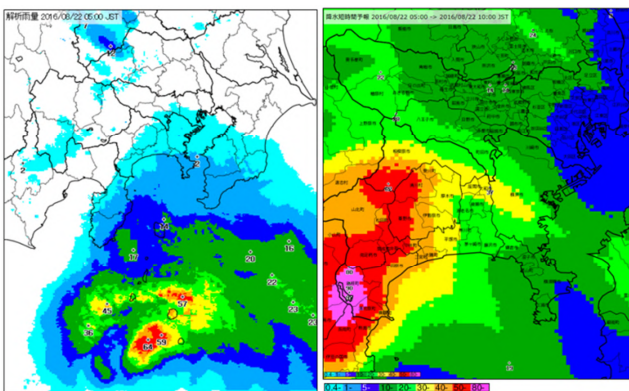
上段左：大雨、上段右：大雨（浸水害）、下段：洪水

大雨（土砂災害）は注意報判定なし

1.3.5 大雨警報発表に向けた作業*

1.3.5.1 実況の把握と各種指数の確認

実際の予報作業では、ガイダンスの予想や実況で新たに警報・注意報基準を超えた市区町村がある場合は、予報作業支援システムの危険度監視により報知される。5時過ぎの報知をトリガーに、警報発表を検討する。5時の解析雨量（第1.3.34図）では、伊豆諸島付近で50mm/h以上の非常に激しい雨が降っているものの、伊豆大島付近は10mm/h前後、東京では1mm/h未満で、5時の降水短時間予報によると5時間後の10時でも東京には強雨域がかからない予想のため、朝のコマの雨量予想を1時間降水量を30mm/h、3時間降水量を60mm/hに修正（第1.3.35図上段）する。最新の各警戒度ガイダンスを読み、増加置換、継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級を継続させる。警報判定結果は、雨量予想の修正により換算雨量判定による大雨（浸水）警報はなくなったが、大雨（土砂災害）と洪水の注意報判定が増えるため（第1.3.35図下段）、注意報を追加発表する。



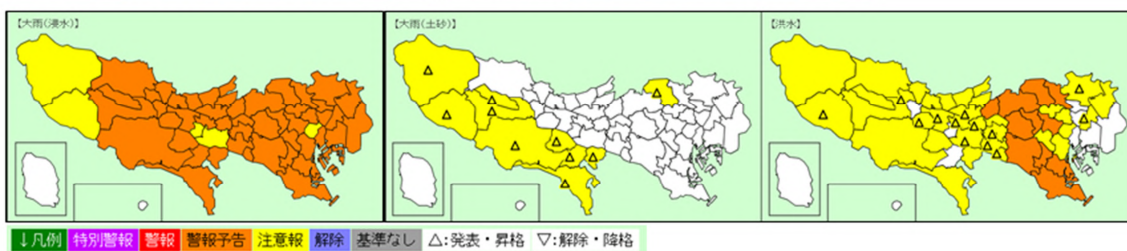
第1.3.34図 22日5時の解析雨量（左）と降水短時間予報（右：5時間後の10時を対象とする予想）

1時間降水量

3時間降水量

時刻(JST)	05-06	06-07	07-08	08-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	C	C	C	C	C
23区西部	1/12	30	30	30	60	60	60	15	10
23区東部	0/12	30	30	30	60	60	60	15	10
多摩北部	2/2	30	30	30	60	60	60	15	10
多摩西部	6/9	30	30	30	80	80	60	15	10
多摩南部	2/9	30	30	30	60	60	60	15	10

時刻(JST)	05-06	06-07	07-08	08-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	B	C	C	C	C
23区西部	3/24	60	60	60	120	120	120	30	20
23区東部	0/24	60	60	60	120	120	120	30	20
多摩北部	4/5	60	60	60	120	120	120	30	20
多摩西部	12/19	60	60	60	160	160	120	30	20
多摩南部	5/19	60	60	60	120	120	120	30	20



第1.3.35図 22日5時過ぎ時点の修正した防災時系列と警報判定結果

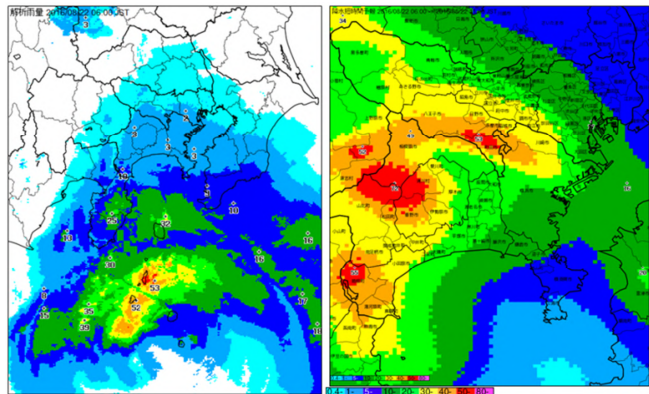
上段左から、修正済みの1時間降水量と3時間降水量

下段左から、大雨（浸水害）大雨（土砂災害）洪水

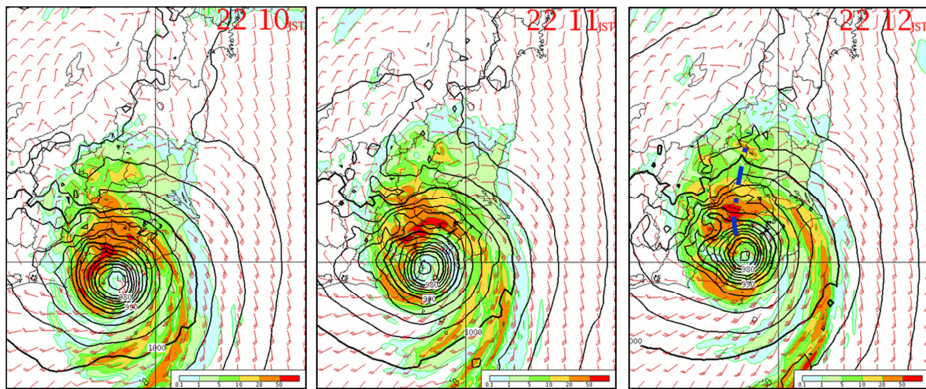
*吉田 貴弘，原 基（気象庁予報部予報課）

1.3.5.2 大雨警報発表作業

22日6時の時点では、東京地方で降水が始まり、6時の解析雨量(第1.3.36図左)では、伊豆大島の南海上で50mm/h以上の非常に激しい雨を解析している。また、同時刻の降水短時間予報(第1.3.36図右)やLFM(第1.3.37図)から5時間後の11時には東京地方で50mm/h以上の非常に激しい雨が降る予想となった。最新の各警戒度ガイダンスを読み込み(第1.3.38図)増加置換、継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級を継続させる。警報判定結果は、大雨(浸水害)が一部の市区町村で警報となり、大雨(土砂災害)と洪水はほぼ全域で注意報となり、警報に言及した注意報となる市区町村も増えるため、警報を発表する(第1.3.39図)。



第1.3.36図 22日6時の解析雨量(左)と降水短時間予報(右:5時間後の11時を対象とした予想)



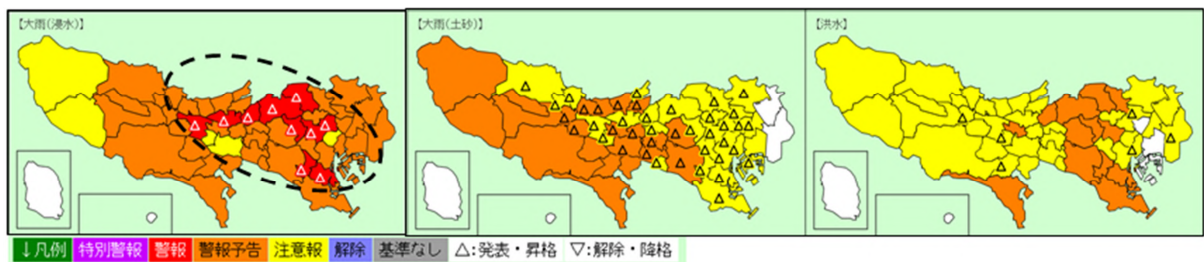
第1.3.37図 地上気圧、地上風、1時間雨量の予想図

22日4時を初期値とするLFMの22日10時、11時、12時を対象とする予想、青色の一点鎖線は収束線

浸水危険度										土砂危険度										洪水危険度									
時刻(JST)	06-07	07-08	08-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	確度	時刻(JST)	06-07	07-08	08-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	確度	時刻(JST)	06-07	07-08	08-09	09-12	12-15	15-18	18-21	21-24	確度
23区西部	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0	0	0/1	0/1	0/1	0/1	1/2	1/2	1/2	0	0	0	0/1	0	0	0	0/2	1/2	1/2	0	0	0	0/1
23区東部	0	0	0	0	0	0	0	0	0/1	0	0	0	0/1	0/1	0/1	0	0	0	0/1	0	0	0	0/1	0/1	0/1	0	0	0	0/1
多摩北部	0/1	0/1	0/1	0/2	0/2	0/2	0	0	0/1	0	0	0	1/2	1/2	1/2	0	0	0	1/2	0	0	0	1/2	1/2	1/2	0	0	0	1/2
多摩西部	0/1	0/1	0/1	0/2	0/2	0/2	0	0	0/1	0	0	0/1	1/2	1/2	1/2	0	0	0	1/2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1/2
多摩南部	0/1	0/1	0/1	1/2	1/2	1/2	0	0	0/1	0	0	0/1	2	2	2	0	0	0	2	0/1	0/1	0/1	1/2	1/2	1/2	0	0	0	1/2

第1.3.38図 22日6時過ぎの防災時系列

各表内の下段の数値は最新の警戒度ガイダンス



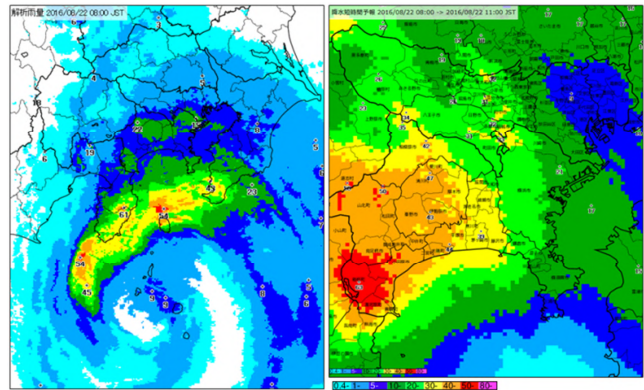
第1.3.39図 22日6時過ぎの警報発表時の警報判定結果

左から、大雨(浸水害)、大雨(土砂災害)、洪水

1.3.6 適切な防災時系列の維持と警報切替作業*

1.3.6.1 22日朝（顕著現象発現前）

8時の解析雨量では、東京地方に10mm/h以上の降水域がかかりはじめ、強雨域は房総半島南部にかかり、伊豆大島の北で50mm/h以上の非常に激しい雨を解析している（第1.3.40図）。最新の各警戒度ガイダンスを読み込み、増加置換、継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる（第1.3.41図）。東京地方における防災時系列の8時の1時間雨量は40mm/hで解析雨量の実況と比較して予想が過大であることに加え、最新の各警戒度ガイダンス（第1.3.41図で示した時系列の下段）は、大雨（浸水害）と大雨（土砂災害）では確度Aの範囲では警報の予想はない。しかし、台風北側の雲バンドが接近しており、降水が強まり始めていることから防災時系列を維持し警報の切り替え発表を行う。警報判定結果は、大雨（浸水害）は広範囲に警報となり、大雨（土砂災害）や洪水でも警報発表となる市区町村がある（第1.3.42図）。



第1.3.40図 22日8時の解析雨量（左）と降水短時間予報（右：3時間後の11時を対象とした予想）

浸水危険度

時刻(JST)	08-09	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	B	C	C	C
23区西部	0/1 1/2	0/1 1/2	0/1 1/2	0/1 1/2	0/2 1/2	0/2 1/2	0 (0)	0 (0)
23区東部	0/1 0/1	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0 (0)	0 (0)
多摩北部	0/1 0/1	0/2 0	0/2 0	0/2 0	0/2 0	0/2 0	0 (0)	0 (0)
多摩西部	0 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	0 (0)	0 (0)
多摩南部	0/1 1	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	0 (0)	0 (0)

土砂危険度

時刻(JST)	08-09	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	B	C	C	C
23区西部	0/1 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0
23区東部	0 0	0/1 0	1 0	1 0	1 0	1 0	0 0	0 0
多摩北部	0 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0
多摩西部	0/1 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0
多摩南部	0/1 0	2 0	2 0	2 0	2 0	2 0	0 0	0 0

洪水危険度

時刻(JST)	08-09	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	B	C	C	C
23区西部	0/1 0/1	0/2 0/1	0/2 0/1	0/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	0 0	0 0
23区東部	0 0	0/1 0	0/1 0	0/1 0	1/2 0/1	1/2 0/1	0/1 0	0 0
多摩北部	0/1 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0
多摩西部	0 0	1 0	1 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0
多摩南部	0/1 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	1/2 0	0 0	0 0

第1.3.41図 22日8時の防災時系列 各表内の下段の数値は最新の各警戒度ガイダンス

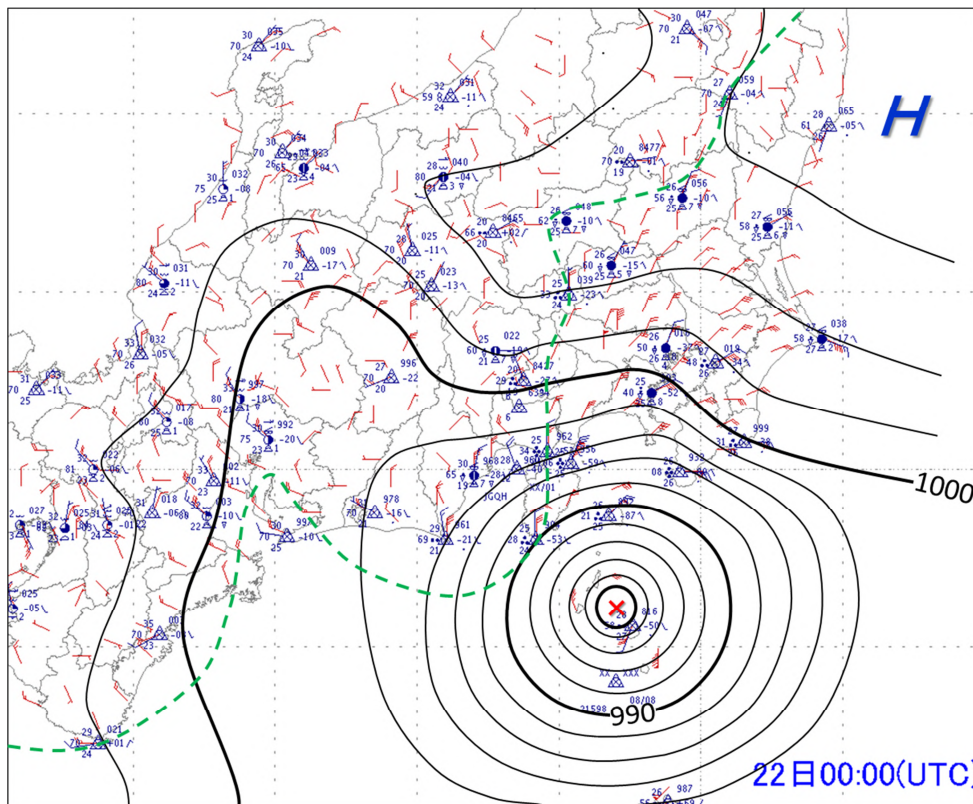


第1.3.42図 22日8時の警報判定結果 左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水

*吉田 貴弘，原 基（気象庁予報部予報課）

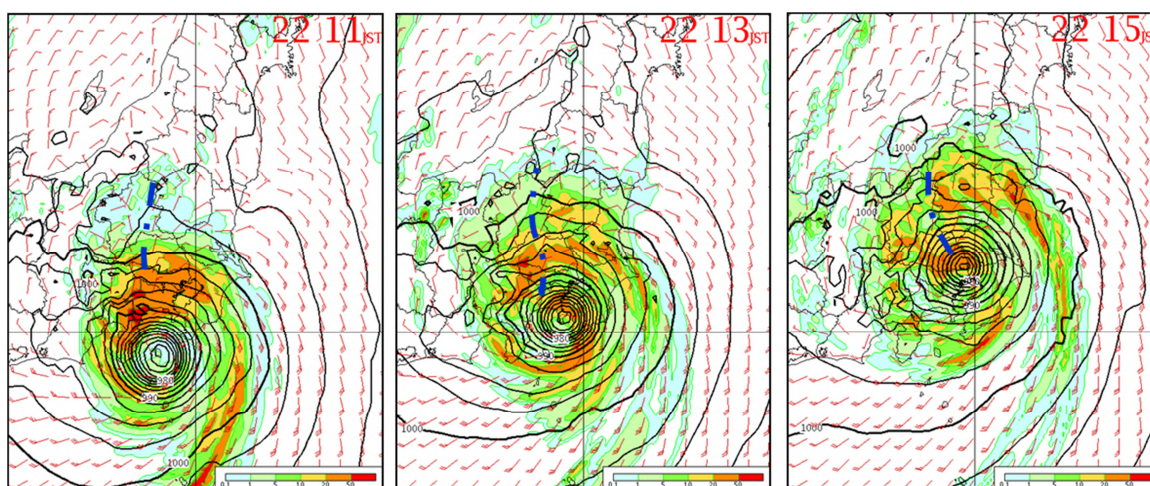
1.3.6.2 22日昼前（顕著現象発現直前）

22日9時の局地解析（第1.3.43図）では、関東地方には収束線はなく、関東の平野部の観測点では露点温度24以上と高い。22日7時を初期値とするLFM（第1.3.44図）では11時の予想で収束線上に強めの降水を表現しており、このあと実況で収束線が形成されると、その近傍で50mm/h以上の非常に激しい雨の可能性が考えられる。



第1.3.43図 22日9時の局地解析

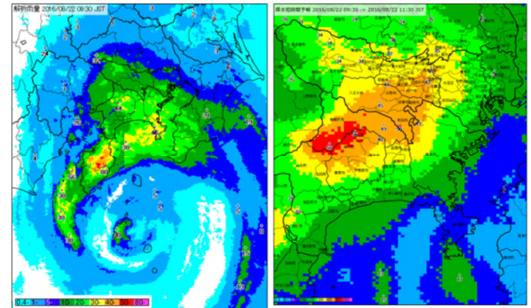
等圧線は2hPaごとで、980hPaより低い等圧線は省略。緑破線は露点温度24の等値線。



第1.3.44図 地上気圧、地上風、1時間雨量の予想図

22日7時を初期値とするLFMの22日11時、13時、15時の予想、青色の一点鎖線は収束線。

9時30分の解析雨量では、東京地方に20mm/h以上の降水域がかけりはじめ、神奈川県では40mm/h以上の激しい雨が、伊豆半島では80mm/h以上の猛烈な雨を解析している（第1.3.45図）。また、降水短時間予報の2時間後の予想では東京地方に50mm/hの非常に激しい雨が予想されている。解析雨量の実況は防災時系列の1時間雨量60～80mm/hより少ないが、台風北側の雲バンドが接近しており、今後降水が強まる予想のため雨量予想は修正しない。最新の警戒度ガイダンスを読み込み、ガイダンスを増加置換、継続機能により強雨が



第1.3.45図 22日9時30分の解析雨量(左)と降水短時間予報(右:2時間後の11時30分を対象とした予想)

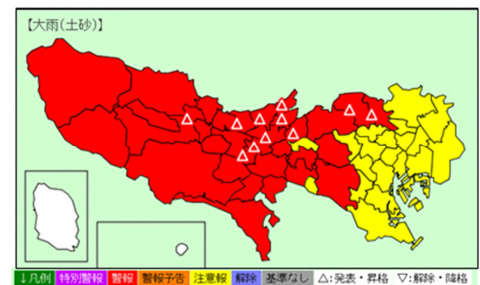
浸水危険度		土砂危険度		洪水危険度																			
時刻(JST)	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24	時刻(JST)	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24	時刻(JST)	09-10	10-11	11-12	12-15	15-18	18-21	21-24
確度	A	A	A	B	B	C	C	確度	A	A	A	B	B	C	C	確度	A	A	A	B	B	C	C
23区西部	1/2 (1/2)	1/2 (1/2)	1/2 (1/2)	1/2 (1/2)	1/2 (1/2)	0 (0)	0 (0)	23区西部	1/2 1	1/2 1/2	1/2 1/2	1/2 1/2	1/2 1/2	0 0	0 0	23区西部	0/2 0/2	0/2 0/2	0/2 0/2	1/2 1/2	1/2 0/1	0 0	0 0
23区東部	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	0 (0)	0 (0)	23区東部	1 1	1 1	1 1	1 1	0 0	0 0	23区東部	0/1 0	0/1 0/1	0/1 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	0/1 0/1	0 0	0 0
多摩北部	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	0 (0)	0 (0)	多摩北部	1/2 1	1/2 1/2	1/2 1/2	1/2 1/2	0 0	0 0	多摩北部	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	0 0	0 0	0 0
多摩西部	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	0 (0)	0 (0)	多摩西部	1/2 1	1/2 1/2	2 2	2 2	0 0	0 0	多摩西部	1 1	1 1	1 1/2	1/2 0/1	1/2 0/1	0 0	0 0	0 0
多摩南部	0/2 (2)	0/2 (2)	0/2 (2)	1/2 (2)	1/2 (2)	0 (0)	0 (0)	多摩南部	2 1/2	2 2	2 2	2 2	0 0	0 0	多摩南部	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 0/1	1/2 1	1/2 0/1	0 0	0 0	0 0

第1.3.46図 22日9時30分の防災時系列
各表内の下段の数値は最新の各警戒度ガイダンス

終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる（第1.3.46図）。警報判定結果に従い、大雨（土砂災害）の警報を追加発表する（第1.3.47図）。

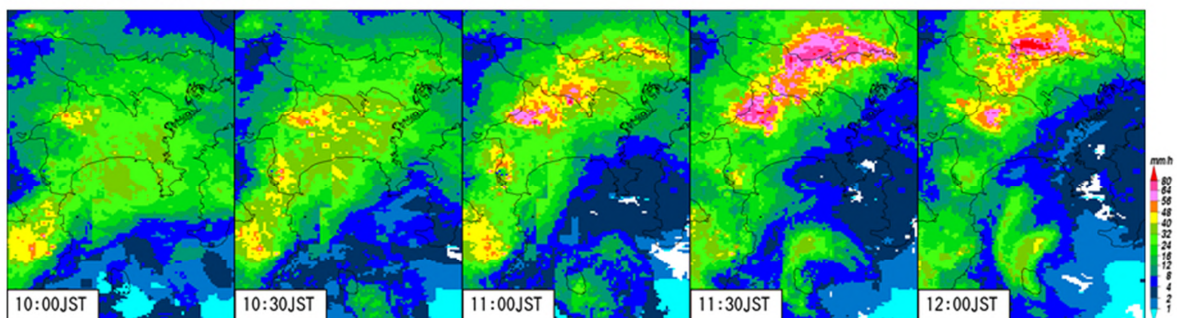
10時から12時にかけては、台風北側の雲バンドの接近により降水が次第に強まり、東京地方の解析雨量は10時で30mm/h、10時30分で47mm/h、11時では61mm/hとなり、東京地方の広い範囲で50mm/h以上の非常に激しい雨を解析した。また、11時30分では80mm/hと防災時系列の予想雨量と同程度の降水となった（第1.3.48図）。

台風の接近により次第に降水が強まるステージのため、各時間の最新の各警戒度ガイダンスを読み込み、増加置換、継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させ、順次警報を追加発表する（第1.3.49～53図）。

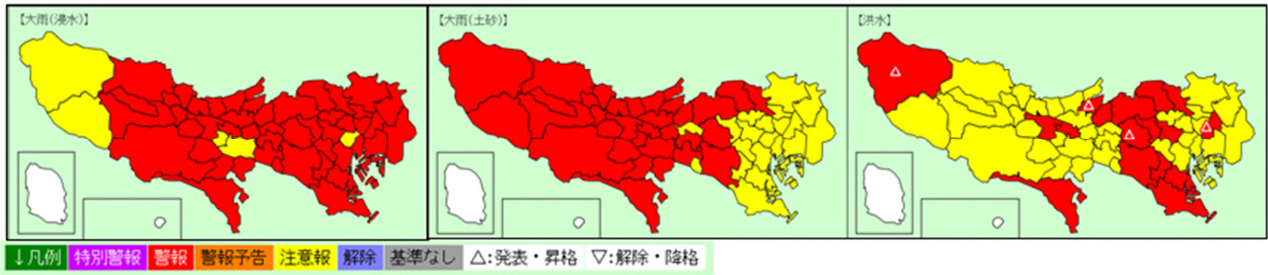


第1.3.47図 22日9時30分の大雨(土砂災害)の警報判定結果

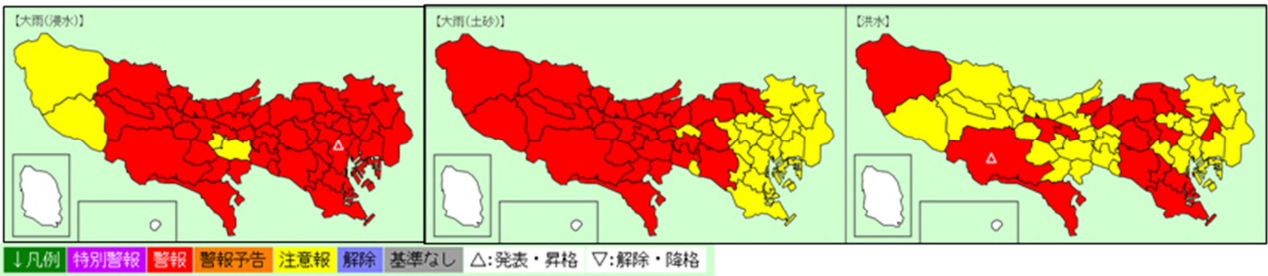
Date: 2016/08/22



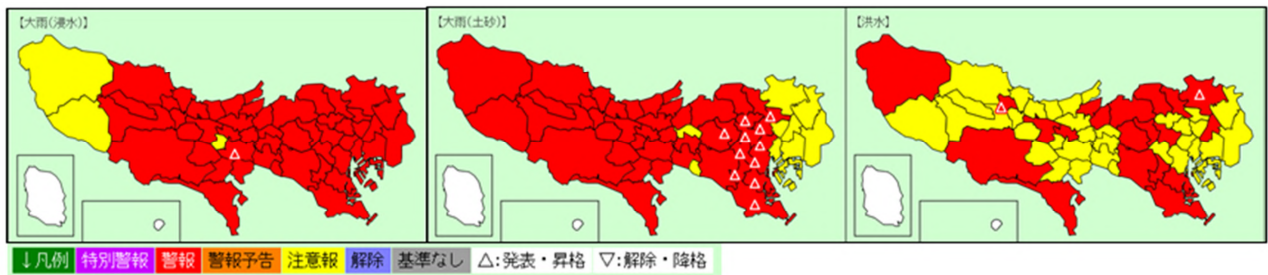
第1.3.48図 22日10時～12時の解析雨量 30分間隔



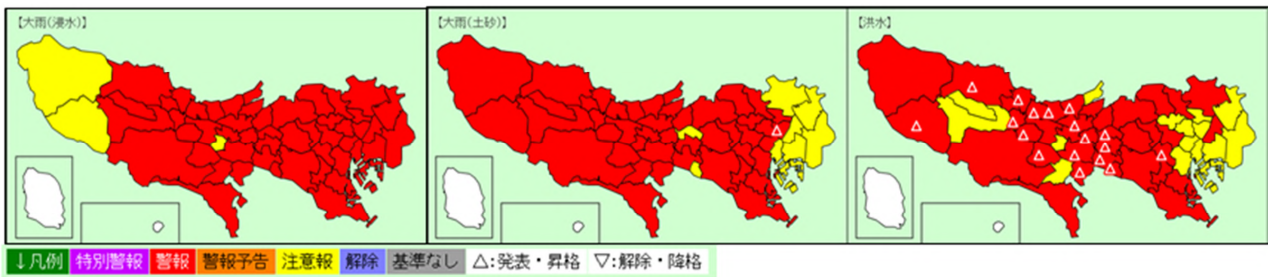
第 1.3.49 図 22 日 10 時の警報判定結果 左から大雨（浸水害） 大雨（土砂災害） 洪水



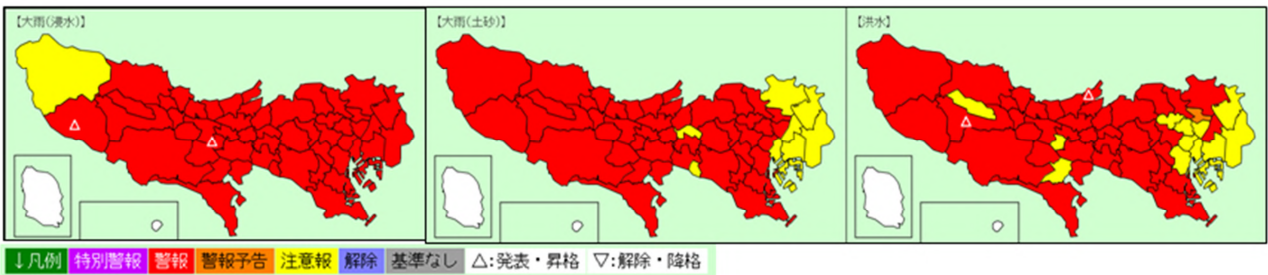
第 1.3.50 図 22 日 10 時 30 分の警報判定結果 左から大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水



第 1.3.51 図 22 日 11 時の警報判定結果 左から大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水



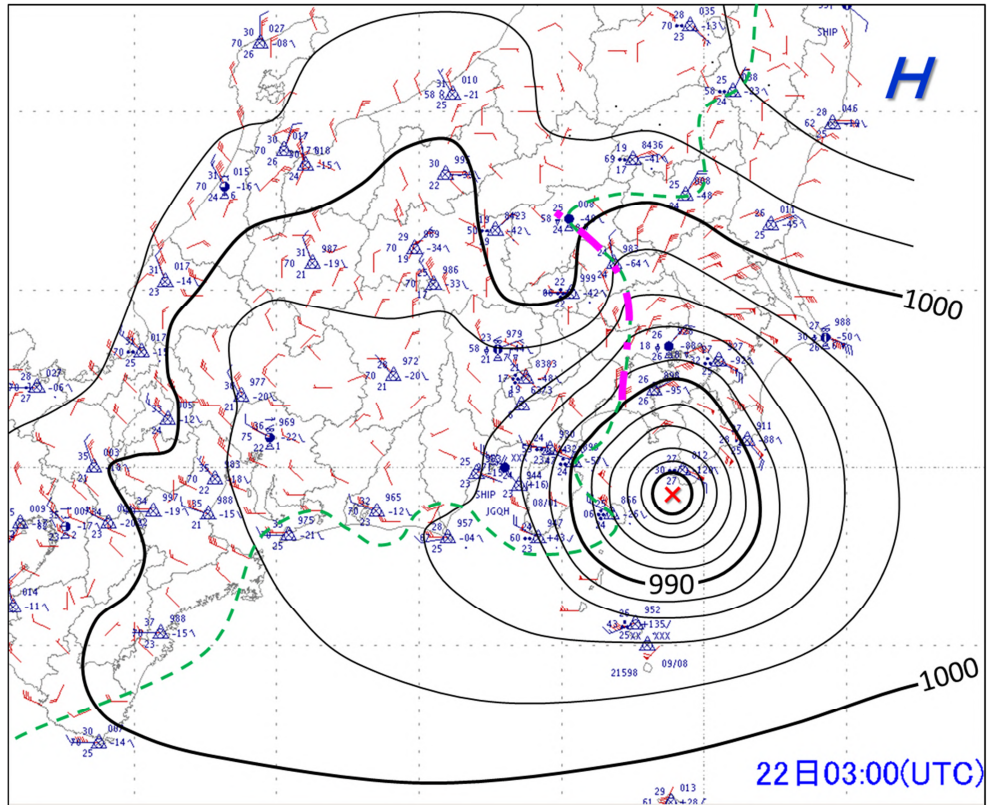
第 1.3.52 図 22 日 11 時 30 分の警報判定結果 左から大雨（浸水害） 大雨（土砂災害） 洪水



第 1.3.53 図 22 日 12 時の警報判定結果 左から大雨（浸水害） 大雨（土砂災害） 洪水

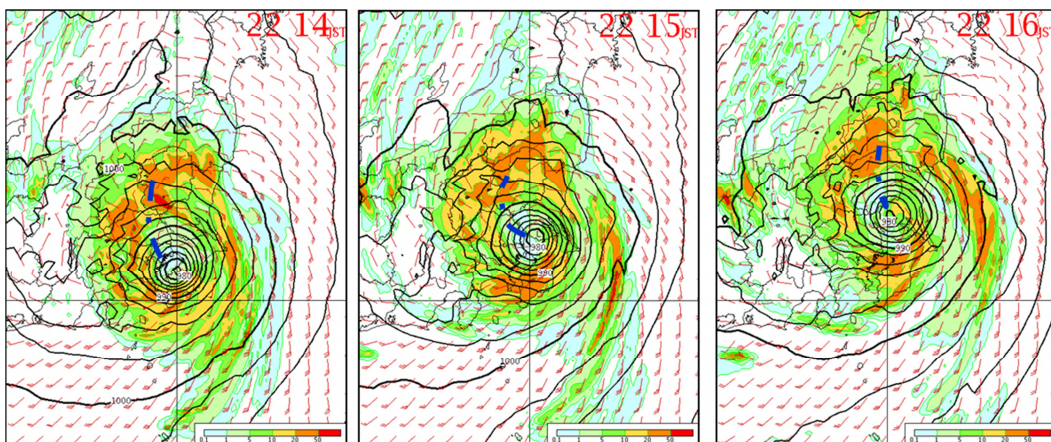
1.3.6.3 22日昼過ぎ（顕著現象発現中）

22日12時の局地解析（第1.3.54図）では、群馬県南部から神奈川県中央に収束線（図中の一点鎖線）が形成されていて、その近傍で降水が強まっている（第1.3.48図）。この収束線の西側では北～北北西風、東側は東～北北東風が吹いていて、収束線は等露点温度線24 に沿っている。22日11時を初期値とする LFM（第1.3.55図）では降水のピークとして14時には収束線近傍で強い降水を予想しているが、15時になると収束線とそれに伴う強い降水域は北上している。



第1.3.54図 22日12時の局地解析

等圧線は2hPaごとで、980hPaより低い等圧線は省略。赤紫の一点鎖線は収束線、緑破線は露点温度24 の等値線。

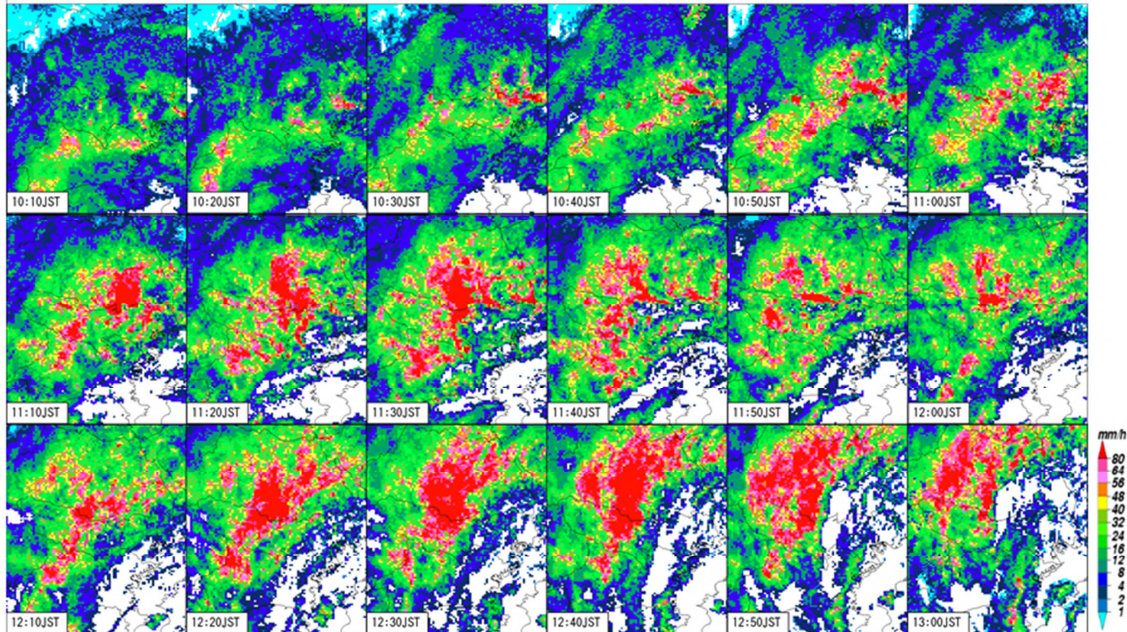


第1.3.55図 地上気圧、地上風、1時間雨量の予想図

22日11時初期値とする LFM の22日14時、15時、16時の予想、青色の一点鎖線は収束線。

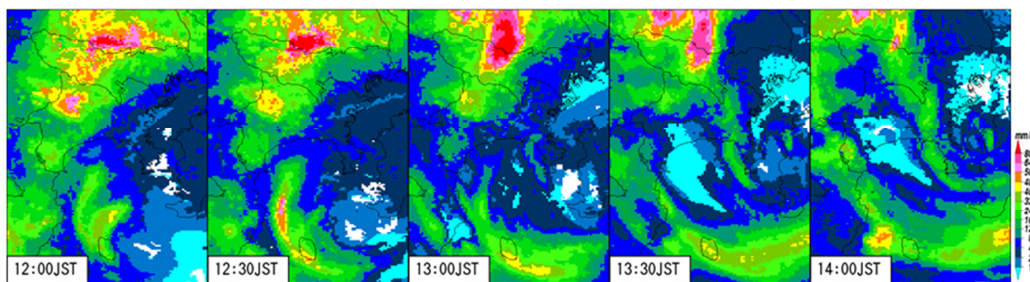
台風第9号北側の雲バンドの接近により、東京地方では11時30分頃にかけて降水が強まり、その後12時にかけてやや小康状態となった後、13時にかけて多摩を中心に再び降水が強まった(第1.3.56図)。解析雨量では、12時30分に105mm/h、13時に110mm/hの猛烈な雨を解析し、記録的短時間大雨情報を発表した(第1.3.57図)。11時から13時にかけてのアメダスの観測によると、内陸部の多摩は北寄りの風で降水により地上気温が低下、東よりの海風が入り気温が下がらない23区との間で次第に温度傾度が大きくなった。この温度傾度の増大は、局地前線の強化を示しており、強化された局地前線が下層暖湿気の強制上昇をさらに助長したため、降水が強まったと推測できる(第1.3.58図)。

Date: 2016/08/22

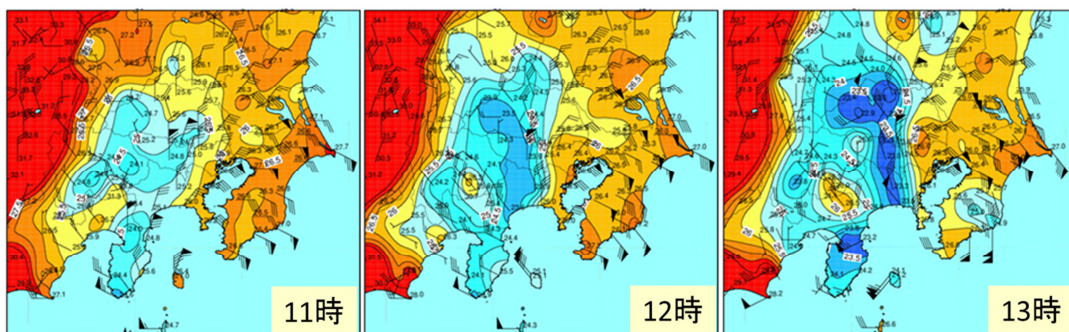


第1.3.56図 22日10時10分~13時のレーダーエコー(10分間隔)

Date: 2016/08/22



第1.3.57図 22日12時~14時の解析雨量(30分間隔)



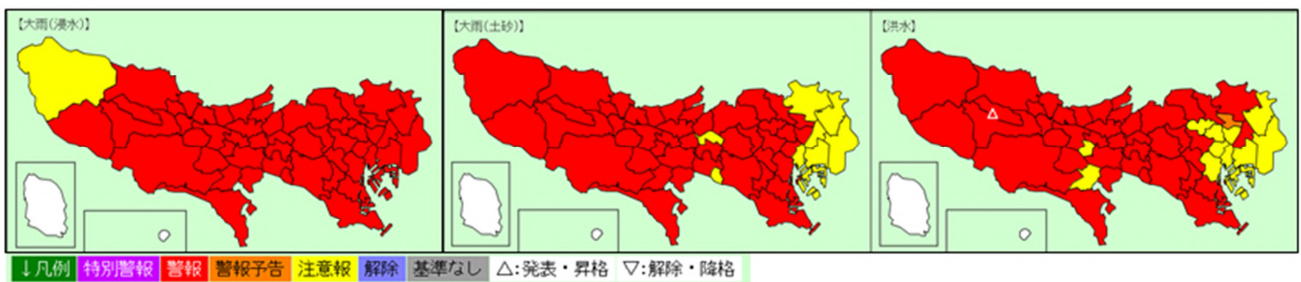
第1.3.58図 アメダスの地上気温と風 左から22日11時、12時、13時(気温のコンターは0.5 間隔)

当初の雨量予想以上の降水実況となったため、12時45分頃に12時30分の解析雨量を防災時系列の1時間雨量と3時間雨量に増加置換し、最新の各警戒度ガイダンスを読み込み、増加置換、継続機能により夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる（第1.3.59図）。既にほぼ全域で大雨警報を公表しているため、解析雨量を取り込んで大雨警報判定結果は変わらないが、1町で洪水の警報が追加されたため、警報を追加発表する（第1.3.60図）。

1時間降水量							浸水危険度							土砂危険度							洪水危険度														
時刻(JST)	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	時刻(JST)	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-21	21-24	時刻(JST)	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-21	21-24	時刻(JST)	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-21	21-24		
確度	A	A-	A-	B	B-	C	確度	A	A-	A-	B	B-	C	確度	A	A-	A-	B	B-	C	確度	A	A-	A-	B	B-	C	確度	A	A-	A-	B	B-	C	
23区西部	60	60	60	60	60	15	2	2	2	2	2	0	0	2/3区西部	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	2/3区西部	1/2	1/2	1/2	1/2	0/1	0/1	2/3区西部	1/2	1/2	1/2	1/2	0/1	0/1
23区東部	60	60	60	60	15	10	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	0	2/3区東部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	2/3区東部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	2/3区東部	1/2	1/2	1/2	1/2	0/1	0/1	
多摩北部	60/95	60/95	60	60	15	10	2	2	2	2	0	0	0	多摩北部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	多摩北部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	多摩北部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	
多摩西部	80/115	80/115	80	60	15	10	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	0	多摩西部	2	2	2	2	0	0	多摩西部	2	2	2	2	0/1	0	多摩西部	2	2	2	2	0/1	0	
多摩南部	60	60	60	60	15	10	2	2	2	2	0	0	0	多摩南部	2	2	2	2	0	0	多摩南部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	多摩南部	1/2	1/2	1/2	1/2	0	0	

第1.3.59図 22日12時45分の防災時系列

浸水危険度、土砂危険度、洪水危険度の各表内の下段の数値は最新の警戒度ガイダンス

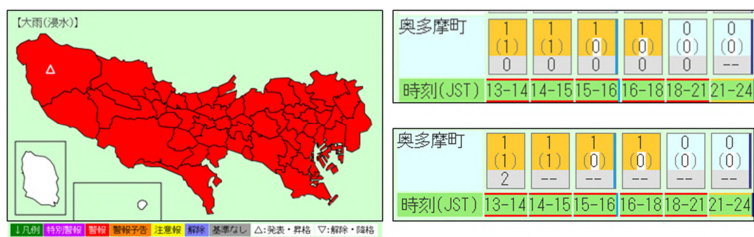


第1.3.60図 22日12時45分の警報判定結果 左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水

なお、12時30分の解析雨量では、東京都で3時間雨量の50年に1度の値を超過した格子数が4格子となり、その後、雨を要因とする大雨特別警報の指標に近づいた。本事例を用いた特別警報の発表作業については、1.4節で記述する。

13時には解析雨量を防災時系列の1時間雨量と3時間雨量に増加置換し、最新の各警戒度ガイダンスを読み込み、増加置換、継続機能により、夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させて判定する。その結果、新たに奥多摩町で大雨（浸水害）警報の判定となる（第1.3.61図左）。確認すると、客観予想判定では注意報未滿、換算雨量判定では注意報、あと何ミリ判定では警報と判定されていた（第1.3.61図右）奥多摩町は収束線の西側のため、防災時系列では80mm/hの予想となっているが、13時の解析雨量は34mm/hと予想が過大で、台風の雲バンドも抜けつつあるため警報の発表は行わない。

13時30分、14時の警報判定でも、奥多摩町の大雨（浸水害）以外に新たな警報・注意報判定はなく、実況に比べて予想が過大のため警報発表は行わないこととする。



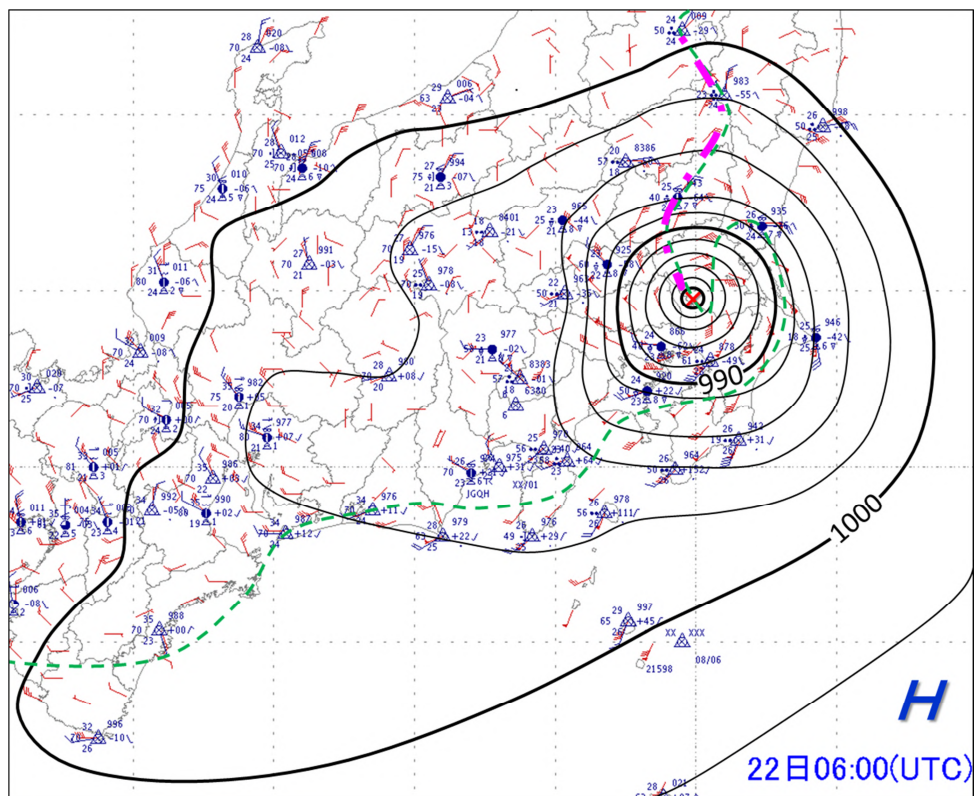
第1.3.61図 22日13時15分時点の浸水警戒度と警報判定結果

左：大雨（浸水害）判定結果、右上：浸水警戒度（客観予想判定）、右下：浸水警戒度（あと何ミリ判定） 各表内の下段の数値は最新の警戒度ガイダンス

1.3.7 大雨警報解除に向けた作業（顕著現象終了後）*

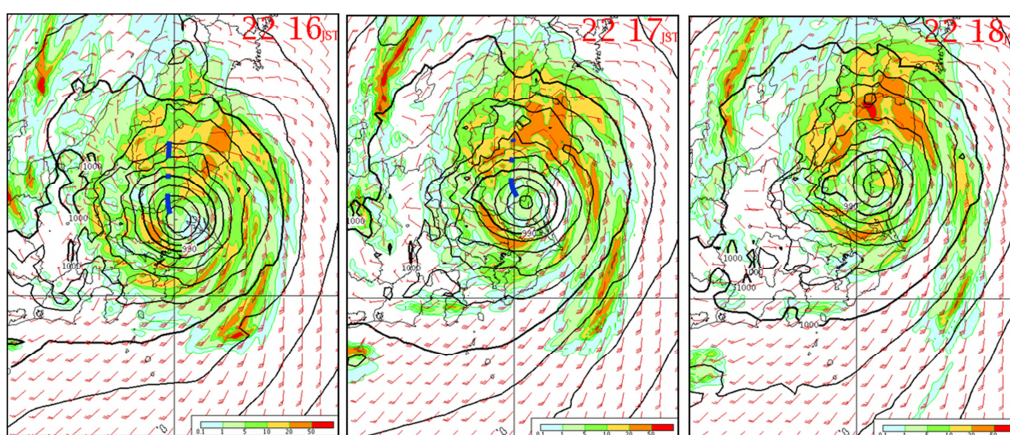
1.3.7.1 実況の把握と各種指数の確認及び大雨警報切替作業

22日15時の局地解析（第1.3.62図）では、収束線（図中の赤紫色の一点鎖線）は福島県から栃木県に移動し、露点温度24以下の領域が台風の南側に入ってきている。22日14時を初期値とするLFM（第1.3.63図）では16時以降、強い降水域が東京地方にはかからない予想となっている。



第1.3.62図 22日15時の局地解析

等圧線は2hPaごと、赤紫色の一点鎖線は収束線、緑色の破線は露点温度24の等値線。



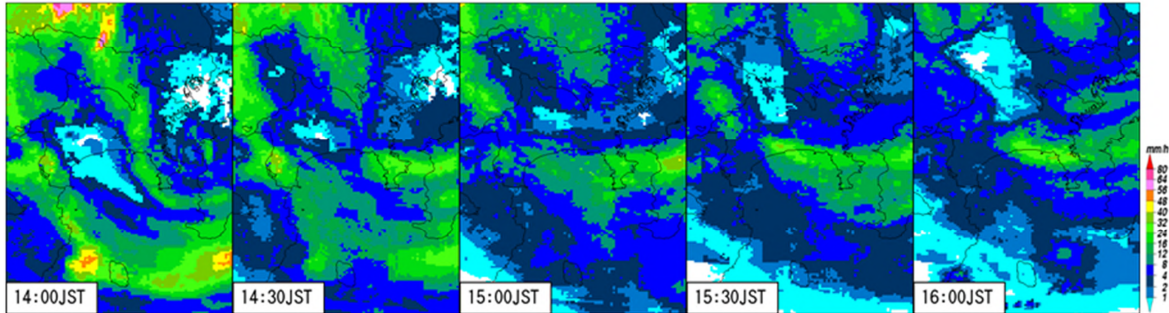
第1.3.63図 地上気圧、地上風、1時間雨量の予想図

22日14時を初期値とするLFMの22日16時、17時、18時の予想、青色の一点鎖線は収束線。

*吉田 貴弘，原 基（気象庁予報部予報課）

実況では14時以降台風北側の雲バンドも抜け、16時にかけて多摩の降水は次第に弱まった(第1.3.64図)、23区では強雨終了後1時間以上経過しており、警報の解除について検討を始める。しかし、14時に台風南側の雲バンドがかかる伊豆半島から房総半島の南海上にかけて非常に激しい雨が解析され、降水短時間予報によると、この雲バンドが今後北上して、東京地方にかかる予想となっている(図省略)ことから、監視を強化することとする。

Date: 2016/08/22



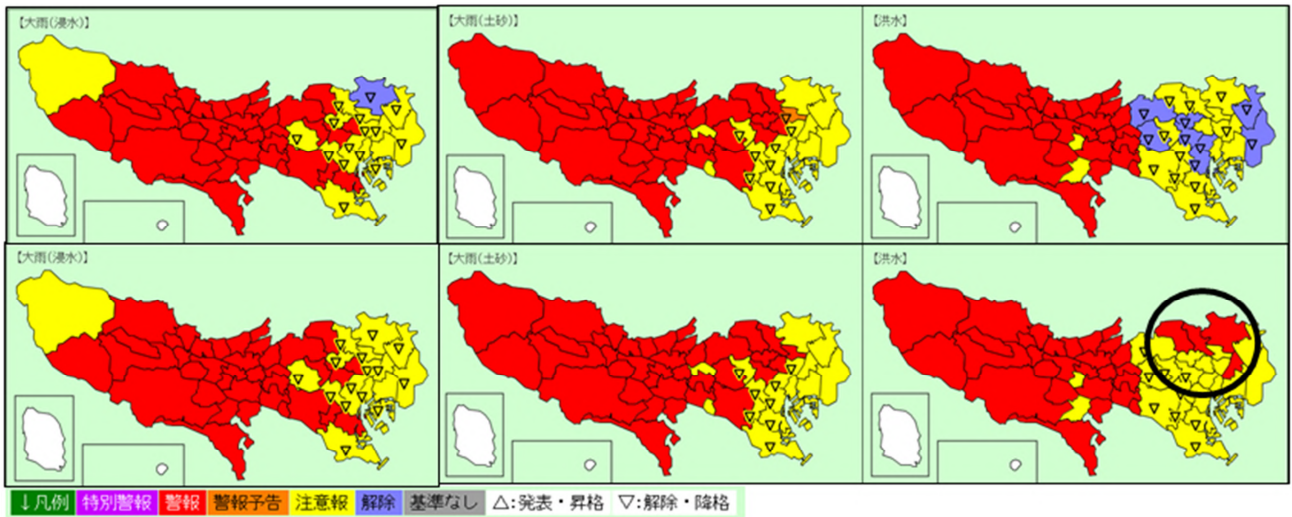
第1.3.64図 22日14時~16時の解析雨量 30分間隔

1時間降水量		浸水危険度		土砂危険度		洪水危険度	
時刻(JST)	14-15 15-16 16-17 17-18 18-21 21-24	時刻(JST)	14-15 15-16 16-17 17-18 18-21 21-24	時刻(JST)	14-15 15-16 16-17 17-18 18-21 21-24	時刻(JST)	14-15 15-16 16-17 17-18 18-21 21-24
確度	A A A B B C	確度	A A A B B C	確度	A A A B B C	確度	A A A B B C
23区西部	40 40 40 40 15 10	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	1 1 1 1 0/1 0/1		
23区東部	40 40 40 40 15 10	0/2 0 0/1 0 0 0	0/1 0 0 0 0 0	1 1 1/2 1 1 0	0/1 0/1 0/1 0/1 0/1 0/1		
多摩北部	80 80 80 80 15 10	1 1 1 1 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0/1 0		
多摩西部	80 80 80 80 15 10	0/1 0/1 0/1 0/1 0 0	1/2 1/2 1/2 1/2 0 0	2 2 2 2 1/2 0	0/2 0/2 0/2 0/2 0/1 0		
多摩南部	60 60 60 60 15 10	1/2 1/2 0 0 0 0	1/2 1/2 0 0 0 0	2 2 2 2 2 0	0/1 0/1 0/1 0/1 0 0		

第1.3.65図 22日14時45分時点の防災時系列

浸水危険度、土砂危険度、洪水危険度の各表内の下段の数値は最新の警戒度ガイダンス

14時30分の解析雨量では、多摩の降水も20mm/h程度に弱まり、台風南側の雲バンドも30mm/h程度の激しい雨となった(第1.3.64図)。台風南側は西風となり、東京地方では山越えの風となることから50mm/h以上の非常に激しい雨は降らないと判断し、23区の夕方までの防災時系列を1時間雨量40mm、3時間雨量は2倍の80mmに修正する。また、23区のみ最新の警戒度判定を置換して継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる(第1.3.65図)。警報判定結果(第1.3.66図上段)は、大雨(浸水害)や洪水の一部で注意報も解除となる区があるが、今後も40mm/hの激しい雨を予想しており、再び警報と判定される可能性もあるため注意報は継続し、予想で警報判定が残る市区町村は警報を発表したままとする。また、荒川の流域雨量指数が警報基準の80%(洪水充足率)を超えて上昇中のため(第1.3.67図)、予測精度を考慮し荒川流域の4区(第1.3.66図黒)については洪水警報を継続する判断をして、23区の警報を一部解除する(第1.3.66図)。

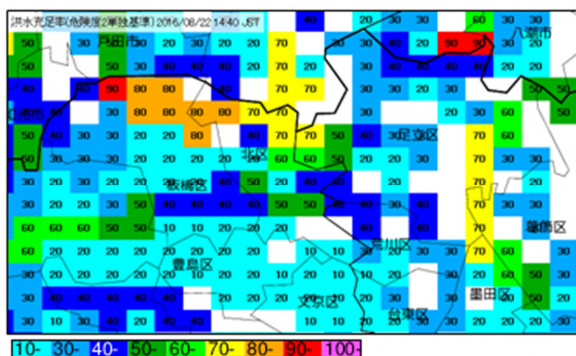


第 1.3.66 図 22 日 14 時 45 分の警報判定結果

上段は 23 区を最新のガイダンスで置換、下段は修正後、左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水

15時の解析雨量では、多摩の降水は15mm/h程度に弱まったが、15時30分の時点では、台風南側の雲バンドでまだ、40mm/h程度の降水を解析しているため（第1.3.64図）、23区の1時間雨量と3時間雨量は変更しない。23区のみ最新の各警戒度ガイダンスを置換して継続機能により強雨が終息する夕方まで警報級・注意報級の期間を継続させる。15時と同様に注意報を継続し、荒川流域の4区の洪水警報を残した結果、14時30分過ぎと同じ判定となる。

15時30分の解析雨量でも、多摩の降水は15mm/h程度で、降水が弱まってから1時間以上経過している。16時頃から多摩に発表中の警報の解除作業を始める。台風南側の雲バンドが30mm/h程度に弱まったため、東京地方全域で夕方までの防災時系列を1時間雨量30mm、3時間雨量は2倍の60mmに修正する（第1.3.68図）。最新の警戒度判定を置換して夕方まで継続させ警報判定する（第1.3.69図上段）。なお、今後も30mm/hの予想があるため注意報は継続する。また、荒川の流域雨量指数が警報基準の90%（洪水充足率）を超えており、下流域では指数が上昇中のため、予測精度を考慮し荒川流域の4区については洪水警報を継続する。その結果、大雨（土砂災害）については、多摩北部、多摩南部を中心に警報を継続するが、大雨（浸水害）については1市を除き警報を解除し、洪水については、荒川流域の4区を除き警報解除となる（第1.3.69図下段）。



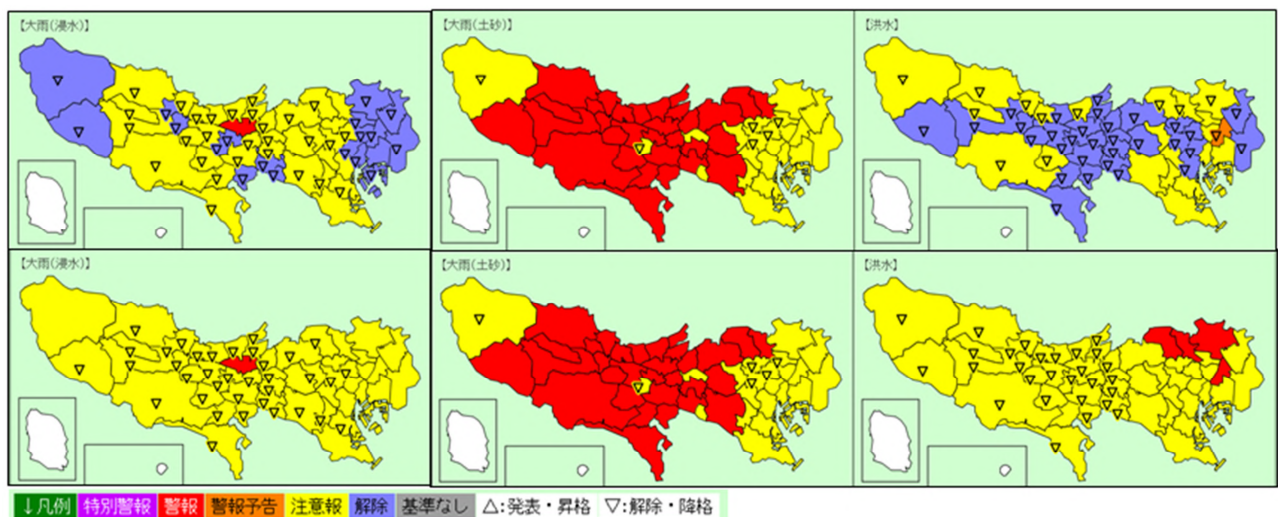
第 1.3.67 図 22 日 14 時 40 分の洪水充足率（危険度 2 単独基準）

1時間降水量						浸水危険度						土砂危険度						洪水危険度					
時刻(JST)						時刻(JST)						時刻(JST)						時刻(JST)					
確度						確度						確度						確度					
A						A						A						A					
B						B						B						B					
23区西部	30	30	15	15	10	0/1	0/1	0	0	0	1/2	1/2	1/2	1/2	0/2	1/2	1/2	0/2	0/1	0/1			
23区東部	30	30	15	15	10	0/1	0/1	0	0	0	1/2	1/2	1/2	1/2	0/2	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1			
多摩北部	30	30	15	15	10	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1/2	1/2	0/2	0/2	0/2			
多摩西部	30	30	15	15	10	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0/1	0/1	0/1	0	0			
多摩南部	30	30	15	15	10	0	0	0	0	0	2	2	2	1/2	1/2	0/1	0/1	0/1	0	0			

3時間降水量					
時刻(JST)					
確度					
A					
B					
23区西部	60	60	30	30	20
23区東部	60	60	30	30	20
多摩北部	60	60	30	30	20
多摩西部	60	60	30	30	20
多摩南部	60	60	30	30	20

第 1.3.68 図 22 日 16 時の防災時系列

浸水危険度、土砂危険度、洪水危険度の各表内の下段数値は最新の警戒度ガイダンス

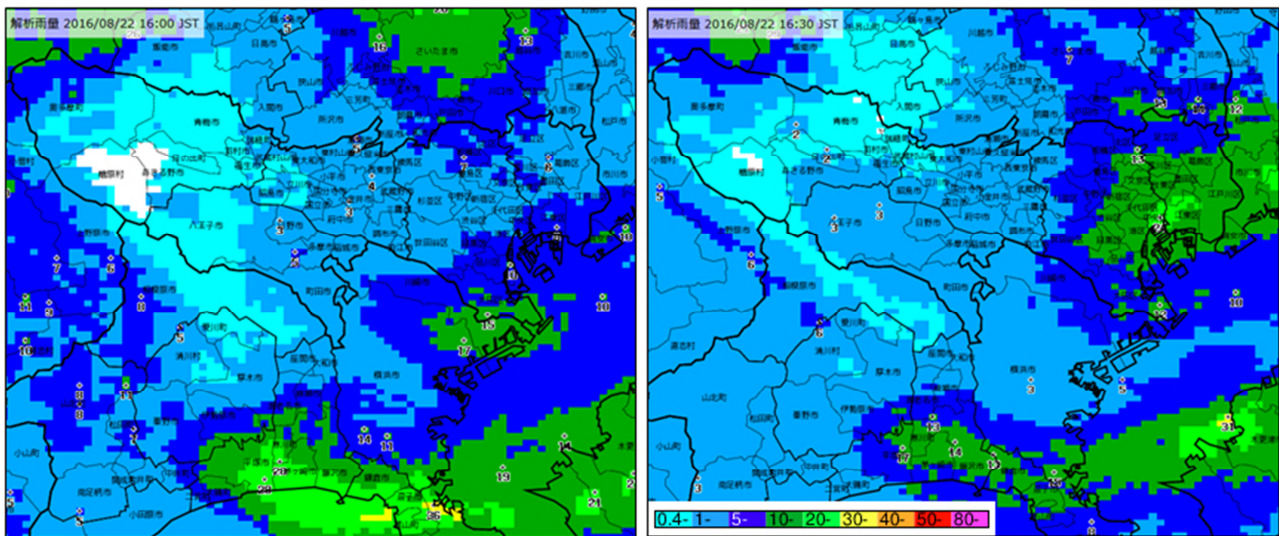


第 1.3.69 図 22 日 16 時の警報判定結果

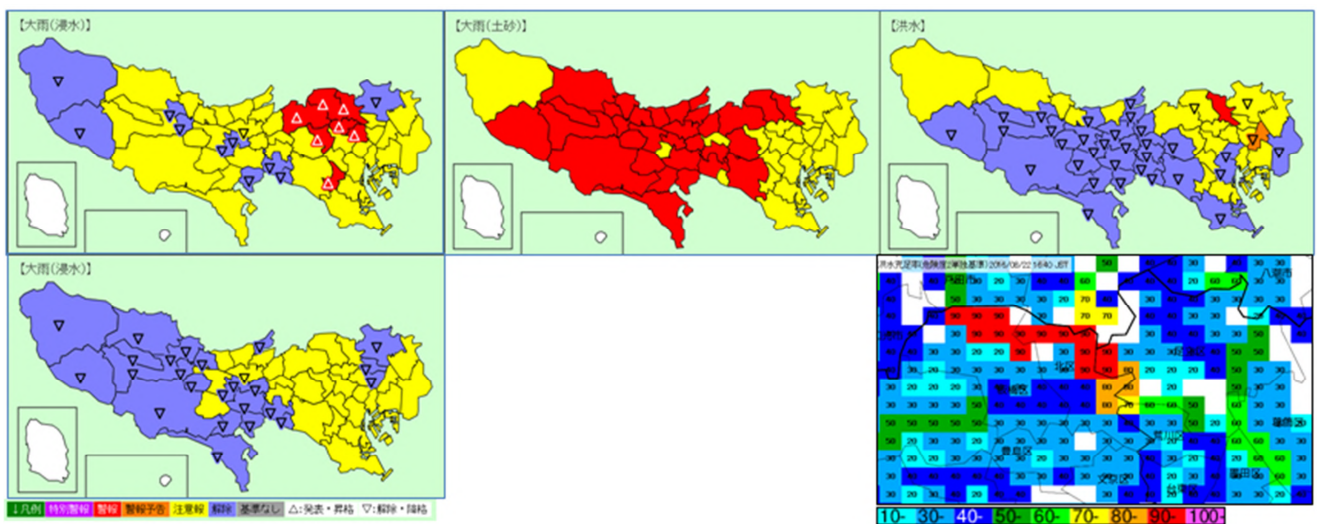
上段は 23 区を最新のガイダンスで置換、下段は修正後、左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）、洪水

台風南側の雲バンドがかかり始めたため再び降水が強まり始め、16時に23区東部の解析雨量は15mm/hとなった(第1.3.70図左)。16時30分の時点では、実況から雨量予想は変更せずに、最新の各警戒度ガイダンスを置換して夕方まで継続させ警戒判定する(第1.3.71図上)。大雨(浸水害)については、23区西部で警戒判定となったが、これはあと何ミリ判定によるもので、客観予想判定や換算雨量判定では注意報判定(第1.3.71図左下)であり、実況(第1.3.70図)は防災時系列の30mm/h予想よりも弱いいため警戒は発表しない。洪水については、荒川の流域雨量指数が警戒基準の90%(洪水充足率)を超えており、下流域では指数が上昇中のため(第1.3.71図右下)予測精度を考慮し、荒川流域の4区については引き続き洪水警戒を残す。

このように、顕著現象終了後のステージでは、警戒解除後間を置かない再発表を防ぐため、降水ナウキャストや降水短時間予報の予想と実況の雨量を比較し、予報作業支援システムの危険度監視により、あと何ミリ判定や洪水充足率等を確認しながら慎重に判断する必要がある。



第1.3.70図 22日16時(左) 16時30分(右)の解析雨量



第1.3.71図 22日16時30分の警戒判定結果

上段は最新の警戒度ガイダンスで置換。左から、大雨(浸水害)、大雨(土砂災害)、洪水。
下段左は、大雨(浸水害)の客観予想判定、右は、16時20分の洪水充足率(危険度2単独基準)。

1.4 大雨特別警報の改善*

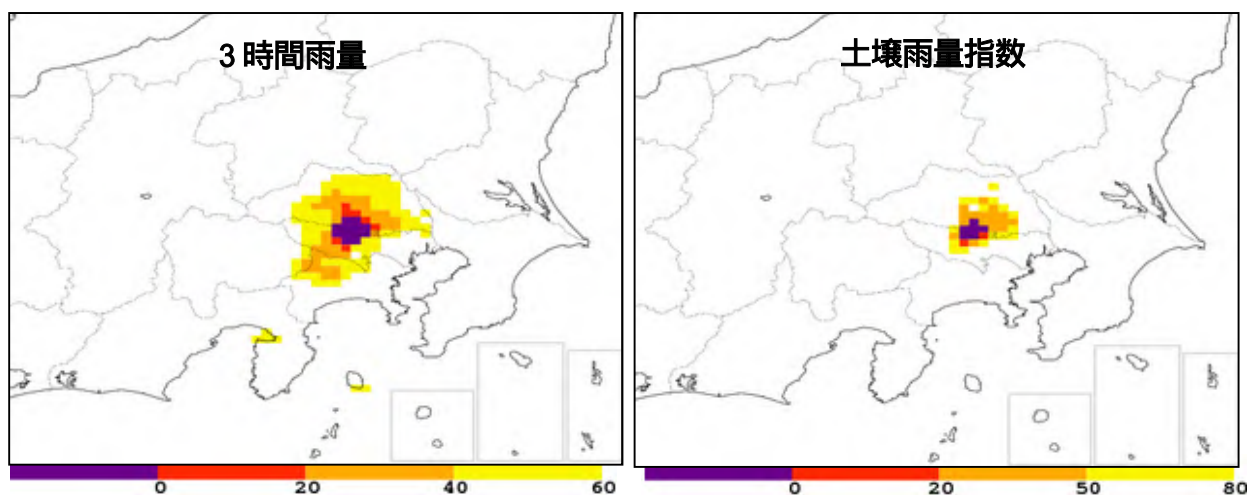
雨を要因とする特別警報は、これまで、数十年に一度の大雨となる府県予報区内において、大雨警報をすべて大雨特別警報に切り替えて発表してきた。平成 29 年 7 月からは、危険度分布の技術を活用し、危険度が著しく高まっていないと判断できる市町村を除いて大雨特別警報を発表するよう改善を行った。一定程度の広がりを持って「50 年に一度」の大雨となり、かつ、さらに雨が降り続くと予想する時に発表するという、大雨特別警報の発表基準や指標についての変更はないが、この改善により、危険度が著しく高まっている市町村をより明確にして大雨特別警報を発表することとした。

改善後の雨を要因とする特別警報は、数十年に一度の大雨となる府県予報区内において、大雨警報の対象となる二次細分区域のうち、大雨警報・洪水警報の危険度分布（大雨警報（浸水害）の危険度分布、洪水警報の危険度分布、土砂災害警戒判定メッシュ情報）で最大危険度すら出現していない二次細分区域を除外して発表する。

1.4.1 平成 28 年(2016 年)台風第 9 号の事例を用いた大雨特別警報の発表作業

本事例では、22 日 12 時 30 分から 3 時間雨量と土壌雨量指数の「50 年に一度」の値となる格子（以下、「50 年格子」）が、東京都と埼玉県をまたぐ地域で出現し始めたが、大雨特別警報の指標とする格子数に達しなかった。また、13 時頃が大雨のピークであり、猛烈な雨をもたらした台風の雲バンドも 14 時頃には埼玉県へ抜けつつある段階であったため、さらに大雨が降り続くとは予想せず、大雨特別警報の発表には至らなかった事例である。ここでは、台風の雲バンドの動きが遅く、しばらくは大雨が降り続き、「50 年格子」の数が大雨特別警報の指標に達し、大雨特別警報の発表判断に至ったと仮定して、大雨特別警報改善後の具体的な発表手順について説明する。

関東甲信地方における 13 時 00 分の「50 年格子」は、3 時間雨量で 12 格子、土壌雨量指数で 6 格子であった（第 1.4.1 図）。この時点で大雨特別警報の発表基準を満たしたと仮定し、大雨特別警報の発表に向けた作業を開始する。



第 1.4.1 図 22 日 13 時 00 分の「50 年格子」の分布

「50 年格子」は紫色の格子

予報作業支援システムでは、「特別警報」の防災時系列の「雨」の項目において、「50 年格子ガイダンス」と「警戒メッシュガイダンス」により、次の手順で発表対象となる二次細分区域を設定し、大雨特別警報を発表する。

*北村 美佐絵（気象庁予報部予報課）

「50年格子ガイダンス」を読み込み、「市町村等をまとめた地域」単位で発表対象区域の候補(以下、「発表候補地域」)を設定する。

「警戒メッシュガイダンス」を読み込み、「発表候補地域」の中から、さらに「二次細分区域」単位で発表対象区域を設定する。

発表対象区域のうち、大雨警報の発表基準を満たす二次細分区域に大雨特別警報を発表する。

まず を行う。予報作業支援システムの「特別警報」タブの「雨」の項目で表示される画面(第1.4.2図)で「市町村等をまとめた地域」ごとに設定していく。「50年格子ガイダンス」では、3時間雨量、48時間雨量、土壌雨量指数のいずれかで「50年格子」が出現している「市町村等をまとめた地域」、またはそれら地域に隣接する「市町村等をまとめた地域」を読み込むことができる。「選択」ボタンから13時00分の「50年格子ガイダンス」を読み込むと、大雨特別警報発表の候補となる市町村等をまとめた地域の各セル下段に「候補」が表示される(第1.4.3図左の灰色の部分)。府県予報担当者は、この表示を参考に地方予報中枢担当者(以下、「地方中枢」と)と協議の上、大雨特別警報の「発表候補地域」を決定する。今回は「発表候補地域」を東京地方のすべての市町村等をまとめた地域(23区西部、23区東部、多摩北部、多摩西部、多摩南部)とする。該当する「発表候補地域」のセルを選択し、「候補ON」ボタンにより「候補」の設定を行う(第1.4.3図中)。



第1.4.2図 予報作業支援システムの「特別警報」タブの「雨」の項目

「浸水」列では大雨特別警報(浸水害)、「土砂」列では大雨特別警報(土砂災害)の設定を行う

次に を行う。「警戒メッシュガイダンス」では、大雨警報・洪水警報の危険度分布において最大危険度が出現している二次細分区域を読み込むことができる。「選択」ボタンから13時10分の「警戒メッシュガイダンス」を読み込み、全セルを選択して「増加置換」ボタンにより「雨」を設定する。このとき「雨」が設定されるのは、「候補」の設定が行われているセル、かつ、セル下段に「雨」が表示されているセルである(第1.4.3図右)。今回は の「発表候補地域」としたうち、多摩北部、多摩西部、多摩南部に「雨」を

設定する。なお、市町村等をまとめた地域から、市町村ごとの表示に変更すると、「警戒メッシュガイドス」の状況を詳細に把握することができ、どの市町村で最大危険度が出現しているのか確認することができる。

要素	浸水	土砂	要素	浸水	土砂	要素	浸水	土砂
23区西部	なし 候補	なし 候補	23区西部	候補 候補	候補 候補	23区西部	候補 なし	候補 なし
23区東部	なし 候補	なし 候補	23区東部	候補 候補	候補 候補	23区東部	候補 なし	候補 なし
多摩北部	なし 候補	なし 候補	多摩北部	候補 候補	候補 候補	多摩北部	候補/雨 なし/雨	候補/雨 なし/雨
多摩西部	なし 候補	なし 候補	多摩西部	候補 候補	候補 候補	多摩西部	候補/雨 なし/雨	候補/雨 なし/雨
多摩南部	なし 候補	なし 候補	多摩南部	候補 候補	候補 候補	多摩南部	候補/雨 なし/雨	候補/雨 なし/雨
大島	なし なし	なし なし	大島	なし なし	なし なし	大島	なし なし	なし 雨
新島	なし なし	なし なし	新島	なし なし	なし なし	新島	なし なし	なし なし
八丈島	なし なし	なし なし	八丈島	なし なし	なし なし	八丈島	なし なし	なし なし
三宅島	なし なし	なし なし	三宅島	なし なし	なし なし	三宅島	なし なし	なし なし
小笠原諸島	なし なし	なし なし	小笠原諸島	なし なし	なし なし	小笠原諸島	なし なし	なし なし
要素	浸水	土砂	要素	浸水	土砂	要素	浸水	土砂

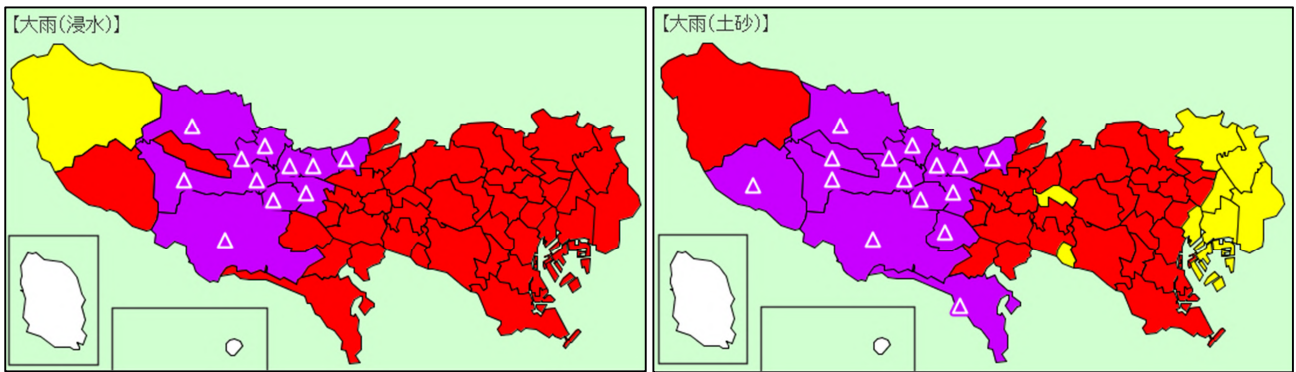
左：22日13時00分の「50年格子ガイドス」を読み込み、下段に表示させたもの。

中：決定した“発表候補地域”において、「候補」を設定したのも。「候補」が設定されると、青枠のように黄色セルになる。

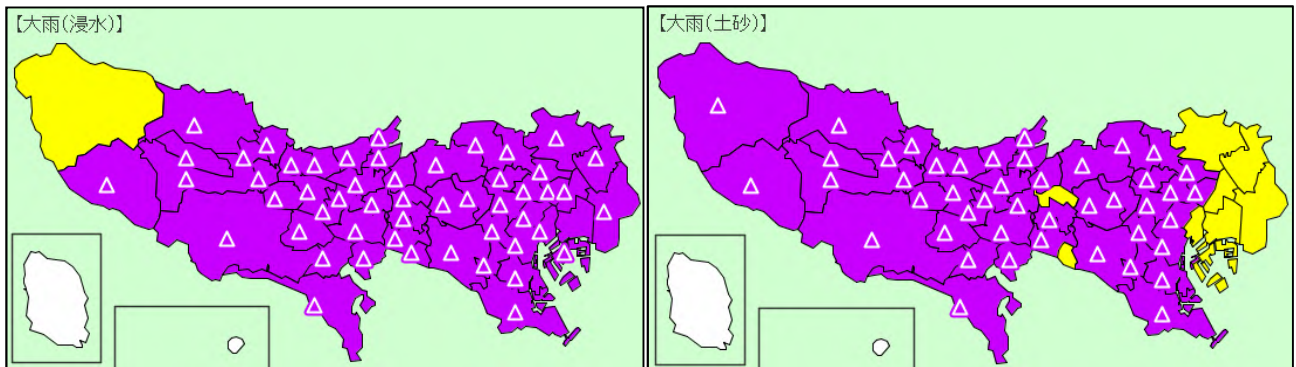
右：22日13時10分の「警戒メッシュガイドス」を読み込んで下段に表示させ、増加置換したもの。黄色セルかつ下段に「雨」の表示がある場合のみ「雨」が設定され、赤枠のように緑色セルになる。

第1.4.3図 22日13時15分時点での予報作業支援システムの「特別警報」タブの「雨」の項目

最後に「警報判定」ボタンにより、 を行う。予報作業支援システムで警報判定を行った結果を示す（第1.4.4図）。大雨特別警報を発表する二次細分区域は、第1.4.4図の紫色の市町村である。大雨特別警報の改善前では、大雨警報を発表している二次細分区域すべてを大雨特別警報に切り替えていたため、第1.4.5図の紫色の市区町村に大雨特別警報を発表することになる。

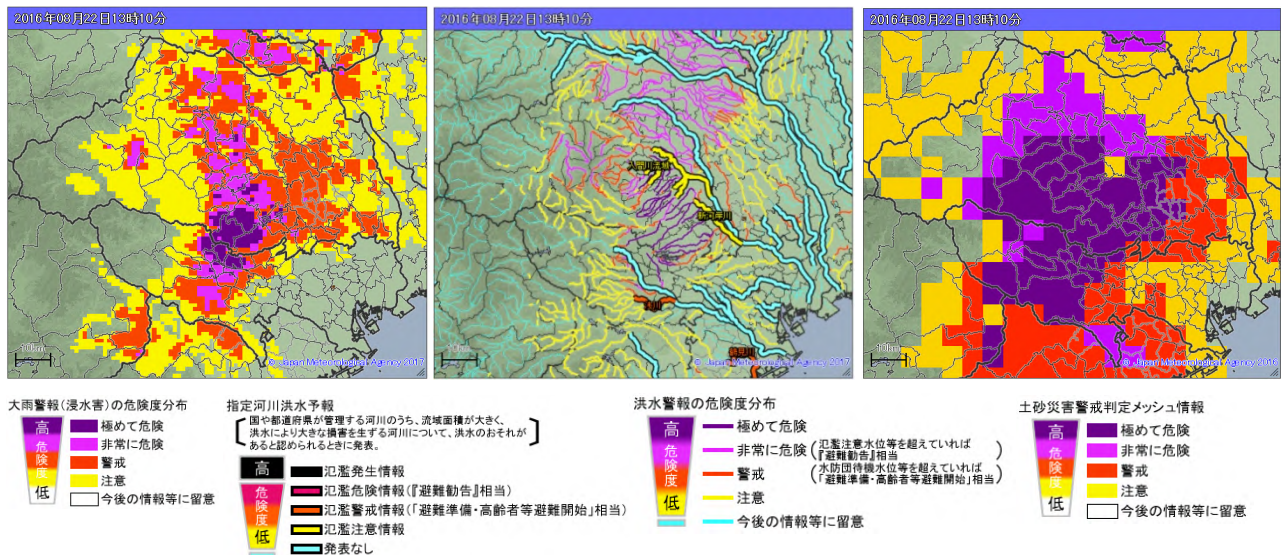


第1.4.4図 22日13時15分時点の警報判定結果
左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）



第1.4.5図 大雨特別警報改善前の警報判定結果
左から、大雨（浸水害）、大雨（土砂災害）

ここで、13時10分時点の大雨警報・洪水警報の危険度分布（第1.4.6図）を見ると、最大危険度は多摩を中心に出現しており、23区では危険度が著しく高まっていたとはいえないことがわかる。大雨特別警報の改善前では、23区等にも大雨特別警報を発表することになるが、大雨特別警報の改善後は、23区等を除外して大雨特別警報を発表するため、危険度が著しく高まっている区市町村をより明確に伝えることができる。なお、大雨特別警報（浸水害）と大雨特別警報（土砂災害）の発表対象区域が異なるのは、前者は大雨警報（浸水害）の危険度分布及び洪水警報の危険度分布、後者は、土砂災害警戒判定メッシュ情報により発表対象区域を設定するためである。



第1.4.6図 22日13時10分の大雨警報・洪水警報の危険度分布

左から大雨警報（浸水害）の危険度分布、洪水警報の危険度分布、土砂災害警戒判定メッシュ情報。ただし、大雨警報（浸水害）の危険度分布及び洪水警報の危険度分布は、事後に検証した資料。

1.4.2 平成28年（2016年）台風第9号の事例を用いた大雨特別警報の解除作業

大雨特別警報の解除は、「数十年に一度の大雨」をもたらした降水域が分散、消滅または通過するなど、大雨特別警報に該当する「重大な気象災害の起こるおそれが著しく大きい状況」ではなくなったと判断した場合に「市町村等をまとめた地域」単位で解除することを基本とする。単に最大危険度が消失したことによる逐次の切り替えや解除は行わず、また、最大危険度が出現中または土砂災害警戒情報を発表中であっても、上記の判断をもって解除する。本事例では、14時00分頃の時点で数十年に一度の大雨をもたらした降水系が通過しており、重大な気象災害の起こるおそれが著しく大きい状況ではなくなったと判断し、大雨特別警報を大雨警報に切り替えることになる。

1.5 まとめ*

本章では、平成29年7月7日に運用を開始した表面雨量指数や精緻化した流域雨量指数を用いた予報作業について、典型的な大雨事例である平成28年台風第9号による大雨事例を用いて解説した。また、本事例を用いて、危険度分布の技術を活用した大雨特別警報の発表対象区域の改善後の大雨特別警報の発表作業についても解説し、改善前と比較した。

*田口 晴夫（気象庁予報部予報課）

参考文献

岡田憲治, 2002: 土壌雨量指数. 測候時報 63, 67-100.

太田琢磨, 2016: 浸水雨量指数と浸水害警戒判定メッシュ情報 浸水害と対応の良い新たな指標 . 平成 27 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 112-122.

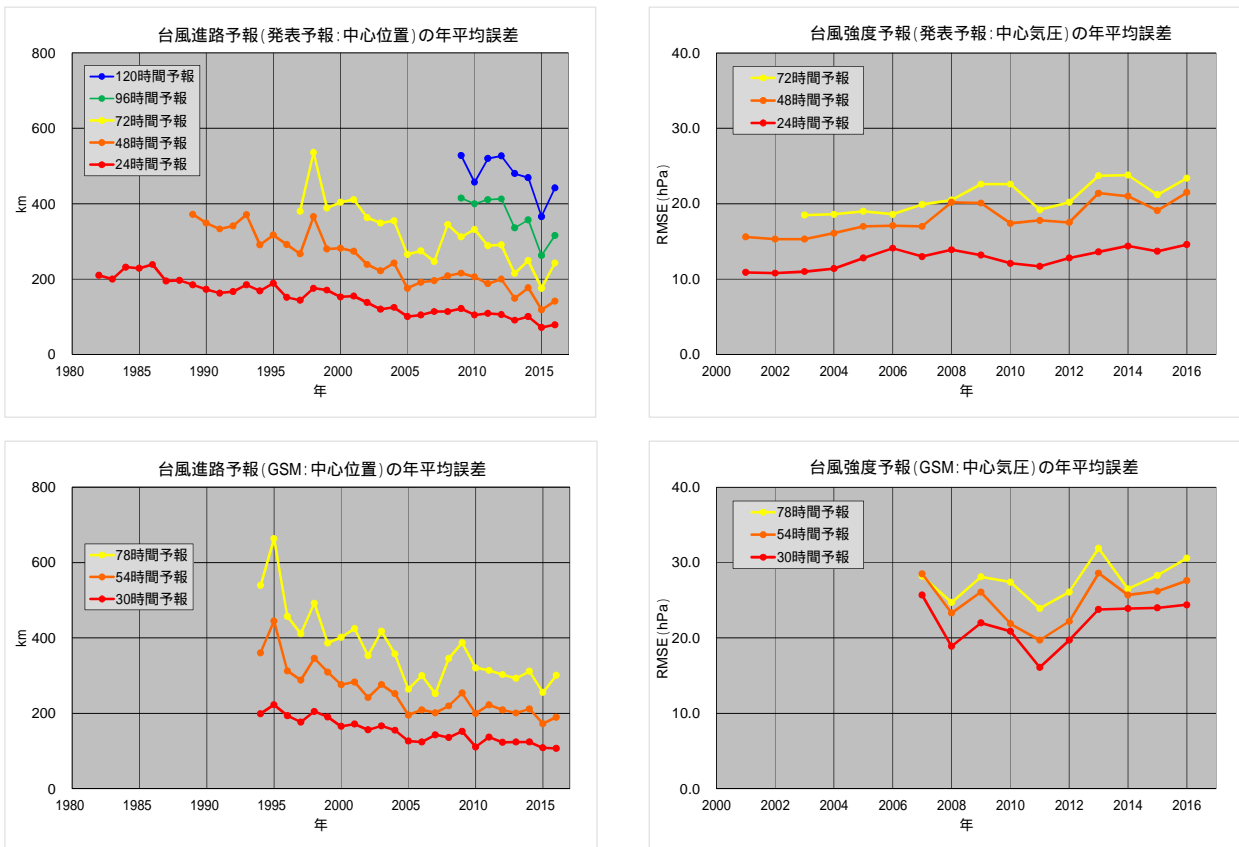
東京管区气象台, 2016: 平成 28 年台風第 9 号に関する気象速報, 1-28.

横田茂樹, 2008: 流域雨量指数を用いた洪水注意報・警報. 平成 19 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 17-22.

第2章 台風強度予報ガイダンスの開発

2.1 はじめに

気象庁では北西太平洋内にある台風に対し、全球モデルGSM (Global Spectral Model) 等の数値予報モデルの結果やドボラック解析の発達曲線から予想されるCI数、統計的な資料等を用いて、5日先までの進路予報と3日先までの強度予報を実施している(気象庁予報部 1990)。近年、台風による災害の防止・軽減のため、タイムラインを考慮した効果的な防災対応への支援として、強度予報の精度向上と5日先までの予報時間の延長が必要となっている。当庁の台風の予報精度については、第2.1.1図にあるように発表予報およびGSMともに進路予報の精度は年々向上しているのに対し、強度予報の精度は横ばいとなっている。一方、台風の発達メカニズムの解明が進むとともに数値予報技術等が進歩しており、最新の知見を取り入れることで、より長いリードタイムで台風の強度を予測することが可能となりつつある。また、当庁は世界気象機関(WMO)の枠組みのもと、北西太平洋の熱帯低気圧に関する地区特別気象センター(RSMC)に指名されており、台風予報をリアルタイムで提供するなど、アジア太平洋の国や地域が行う熱帯低気圧の解析や予報への支援を行っている。当庁以外のRSMCではすでに5日先までの強度予報を実施しており、特に米国では熱帯低気圧の強度予報のためにガイダンスを開発・利用している。DeMaria et al. (2014)によれば、その予測精度は年々向上しているとされる。当庁がRSMCとして我が国を含む北西太平洋域の台風災害の防止・軽減に引き続き主導的な役割を果たすためにも、責任領域内での5日先強度予報の現業化が不可欠となっている。



第2.1.1図

台風の進路予報(中心位置の予報)(左、単位: km)と強度予報(中心気圧の予報)(右、単位: hPa)の年平均誤差
上段が発表予報、下段がGSMに対する結果。

*別所 康太郎(気象庁予報部予報課アジア太平洋気象防災センター)

このような状況を踏まえ、気象庁では台風予報・解析技術の高度化を図るために平成 27 年度より予報部および気象研究所を中心にプロジェクトチームを設置し、その活動の一環として台風の 5 日先強度予報に必要なガイダンス等を開発し、平成 30 年度末より現業化する予定としている。

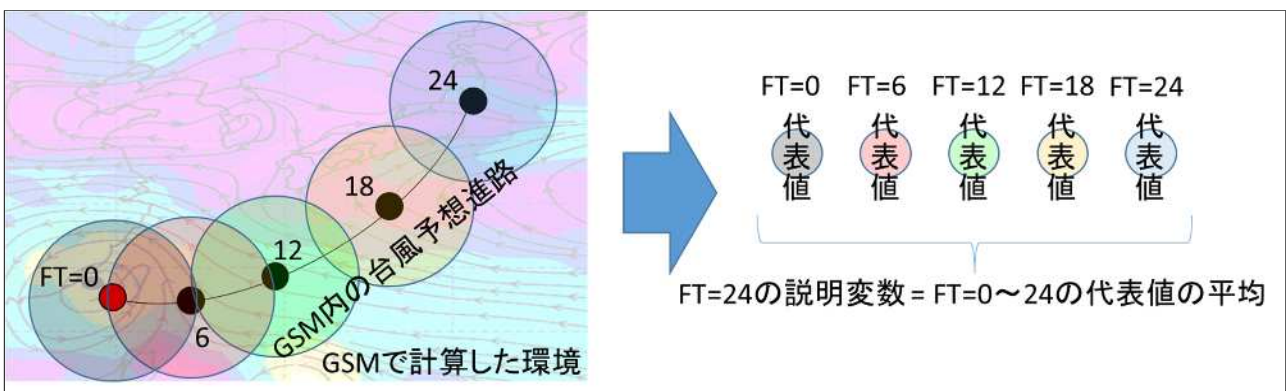
5 日先強度予報の現業化のためには、各種のガイダンスの開発・導入や、その利用方法の検討、数値予報モデルの予報時間の延長、各種システムの整備や運用手法の確立が求められる。プロジェクトチームでは、強度予報に実績のある種々のガイダンスを調査・検討した結果、米国で開発され、米国海洋大気庁のハリケーンセンターでも強度予報に利用されているガイダンスの 1 つである SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction System; DeMaria and Kaplan 1994, 1999; DeMaria et al. 2005)を導入・試験運用することとした。SHIPS は、熱帯低気圧の解析値や数値予報モデルから算出した台風周辺の環境の値、海面水温データや気象衛星の観測データなどを元にして、統計的に熱帯低気圧の強度変化を予測するハリケーン強度予報ガイダンスであり、数値予報モデルにより力学的に予測したデータを入力値として、統計的に求めた計算式から熱帯低気圧の強度を予測するため、統計力学モデルとも呼ばれる。

SHIPS の当庁への導入にあたっては、米国の DeMaria 博士らをはじめとする SHIPS 開発関係者の協力のもと、気象研究所台風研究部で当庁の GSM や各種データを用いて、当庁のシステムに合うようあらためて研究開発が行われた。例えば、元の SHIPS では台風の強度として最大風速しか予測しないが、気象研究所では、最大風速に加えて中心気圧も予測するよう新たに開発を行った。その上で、気象研究所で新たに開発した台風強度予報ガイダンス SHIPS を予報部予報課にて現業システムに組み込むとともに、その試験運用・精度評価を行った。また、SHIPS の試験運用にあたっては、5 日先の強度予報ガイダンスに必要なデータとして、予報部数値予報課にて 0、6、18 時 (UTC(協定世界時) : 以下本章における時刻は UTC で表示する。) 初期時刻の GSM の予報時間を試験的に 84 時間から 132 時間に延長した (12 時初期時刻の GSM は、従来 264 時間予報を行っている)。

本章では、SHIPS の概要を示すとともに、その精度検証結果の一部を紹介する。

2.2 台風強度予報ガイダンス SHIPS の概要

台風強度予報ガイダンス SHIPS は、線形重回帰式を用いた統計的手法を用いており、予報対象時刻の台風の強度を予報初期時刻からの変化量として算出する。入力データとなる説明変数は、台風の実況解析値や GSM による台風周辺の大気環境の解析値・予報値、海洋環境の解析値、ひまわり 8 号の赤外輝度温度などの観測データなどである。また、出力データの目的変数となる台風の強度は、中心気圧と最大風速であり、それぞれを予報対象時刻毎に別々の回帰式で計算している。第 2.2.1 図に例を示したように、環境の値については、



第 2.2.1 図 SHIPS における予報対象時刻毎の説明変数の作り方の模式図
予報対象時刻が FT=24 の場合の例。

GSM で予想した台風の進路に沿ったものを平均化した値を用いており、予想進路上の台風中心から一定の距離で領域平均した代表値を予報時刻毎に求め、初期時刻から予報対象時刻までの代表値を平均したものを、その予報対象時刻の説明変数としている。

SHIPS で台風強度を算出するために使用している元のデータと、それらから計算される主な説明変数（括弧内、以下、環境パラメーター）は以下のとおりである。

- ・台風の実況解析値（強度の実況値、12 時間前からの強度変化）
- ・GSM の解析値・予報値
（下層接線風速、水平風の鉛直シア、上層発散、上層の気温、下層温度移流、
下層の鉛直温度勾配、地表面と各層の相当温位の差、中層湿度、下層渦度、等）
- ・海面水温の解析値（最大到達可能強度）
- ・海洋貯熱量（Ocean Heat Content: OHC もしくは Tropical Cyclone Heat Potential: TCHP、小出ほか 2015）の解析値
- ・ひまわり 8 号の観測データ
（赤外画像(B13、波長 10.4 μm)の輝度温度で-30 以下領域の割合、輝度温度の標準偏差)

SHIPS の計算に用いる重回帰式の係数の作成にあたっては、2000 年から 2012 年までの気象庁作成の台風のベストトラックデータと JRA-55 (Kobayashi et al. 2015) データ、JRA-55 の境界条件として使われている海面水温 (COBE-SST) データ (Ishii et al. 2005)、地球環境・海洋部海洋気象課海洋気象情報室作成の TCHP データ、歴代の静止気象衛星の赤外輝度温度データを利用している。なおベストトラックデータには、対象とする台風の最大風速が 34kt 未満であった熱帯低気圧の期間や、温帯低気圧化が完了し台風が温帯低気圧となった期間も含まれているが、SHIPS の係数作成には、最大風速が 34kt 以上の台風である期間のみを用いている。

SHIPS は GSM の予報出力時間に合わせて計算されており、0、6、12、18 時の初期時刻毎に台風の強度予測を行う。SHIPS は台風強度の予報初期時刻からの変化量を被説明変数として出力するだけでなく、予報時刻毎の説明変数である環境パラメーターや、予報に対する各環境パラメーターの寄与も出力する。これにより予報官は、SHIPS による強度予測の根拠を把握することが可能となるため、より明確な根拠に基づいた予報を行ったり、予報と実況に相違が見られた場合には、その変化を定量的に見積もった上での予報シナリオの変更を行うことができる。SHIPS の予測結果例を第 2.2.2 図に示す。

SHIPS予測因子モニター 2017/6/27更新

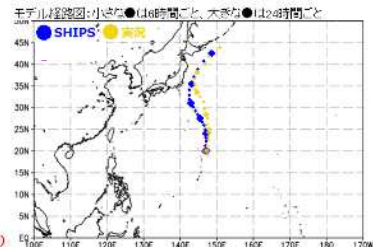
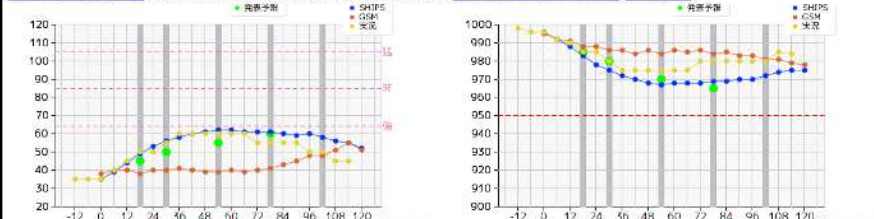
更新時刻に注意: 00Z初期値→0045時、06Z初期値→0845時、12Z初期値→1610時、18Z初期値→2145時

★TC番号 201608(11605 OMAIS) ★グラフ描画要素の選択
 SHIPS GSM
 実況

★初期値 201608050000

表示

TC番号08 台風番号11605 名前OMAIS 初期値2016/8/5/0UTC 読み込みファイル名 (201608201608050000_ships.txt (中間ファイル))



最大風速(K)						風速のピーク 時刻 2016/08/07/06/UTC (FT-54)						中心気圧(hPa)						気圧のピーク 967hPa 時刻 2016/08/07/06/UTC (FT-54)					
時刻	FT	実況	GSM	SHIPS	発生に寄与	衰弱に寄与	時刻	FT	実況	GSM	SHIPS	発生に寄与	衰弱に寄与	時刻	FT	実況	GSM	SHIPS	発生に寄与	衰弱に寄与			
2016080500	0	35	38	35	32	36	2016080500	0	985	985	986	985	984	2016080600	0	982	982	982	982	984	発生時強度 (0h) 2.0	MPIとPOminの差の2乗 2.7	
2016080506	6	40	40	39			2016080606	6	982	982	982	982	984	2016080612	12	990	991	988	982	984	MPIとPOminの差の2乗 1.5	約直シアー 2h	
2016080512	12	41	40	44			2016080618	18	982	982	982	982	984	2016080624	24	982	982	982	982	984	約直シアー 2h	MPIとPOminの差の2乗 0.9	

SHIPS予報官検計用テキストhtml版

前回初期値との差分を見る

予報対象日時	05日 00Z	05日 06Z	05日 12Z	05日 18Z	06日 00Z	06日 06Z	06日 12Z	06日 18Z	07日 00Z	07日 06Z	07日 12Z	07日 18Z	08日 00Z	08日 06Z	08日 12Z	08日 18Z	09日 00Z	09日 06Z	09日 12Z	09日 18Z	10日 00Z
緯度	20.0	21.2	22.2	23.0	24.0	25.0	25.9	26.7	27.6	28.5	29.3	30.2	31.1	32.0	33.0	34.2	35.6	37.2	38.9	40.8	42.7
経度	147.3	147.0	147.1	147.1	147.2	147.0	146.9	146.7	146.5	144.9	144.1	143.5	142.9	142.5	142.5	142.8	143.1	143.8	144.0	146.4	148.5
SST	30.7	30.6	30.5	30.1	29.9	29.8	29.7	29.4	29.2	28.9	28.7	28.4	28.1	27.7	27.6	27.8	27.9	27.2	27.2	26.3	25.1
OHC	125	122	121	85	44	39	45	48	50	25	27	18	14	26	33	32	35	10	0	0	0
約直シアー	5	9	11	8	9	10	11	11	5	7	9	10	9	9	10	10	5	12	17	21	31
約直シアー方向	106	92	105	112	95	73	78	79	56	41	38	44	33	29	27	41	28	19	35	30	20
中層深層	07	05	04	07	08	07	06	05	05	03	03	03	02	02	02	02	02	02	02	02	02
上層発散	122	121	90	80	120	92	98	45	92	64	39	35	35	80	80	82	58	85	82	89	121
GSM風速	40	40	39	40	40	41	39	39	39	40	39	40	40	41	43	45	48	48	51	55	51
GSM気圧	992	991	988	983	978	986	986	984	988	987	988	988	988	989	989	970	970	981	981	979	978
陸地との距離km	1822	1698	1289	1207	1411	1303	1196	1394	977	981	748	831	519	409	217	237	216	241	290	283	232
指向風高hPa		687																			
初期時刻との風速差		4	9	14	18	21	23	25	28	27	27	26	26	26	25	24	25	23	21	20	17
初期時刻との気圧差		-4	-8	-13	-18	-21	-24	-28	-28	-29	-29	-28	-28	-27	-27	-26	-24	-24	-22	-21	-21
最大風速kt	98	99	98	98	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
中心気圧hPa	998	992	988	983	978	983	978	970	968	967	968	968	968	969	969	970	970	972	974	975	975
最大風速kt(NO LAND)		99	98	98	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
中心気圧hPa(NO LAND)		992	988	983	978	975	972	970	968	967	968	968	968	969	969	970	970	972	974	975	975
SST寄与の和	0.7	0.4	-0.4	-1.4	-2.2	-2.7	-2.8	-3.2	-2.3	-1.4	-0.8	-0.2	0.6	1	2	2.5	3.6	5.1	5.8	6.4	
OHC寄与の和	1	2.3	3.8	3.9	3.6	3.7	3.6	2.8	1.9	0.8	-0.4	-1	-1.5	-1.5	-2.7	-3.5	-4.4	-5.1	-5.4		
シアー寄与の和	0.9	1.8	2.9	3.4	3.8	4	4.0	4.2	4.1	4.2	4.0	4.2	4.4	4.3	4.3	4.5	4.7	4.1	3.6	1.7	
東西移動成分	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.4	-0.5	
中層湿差	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.3	0.2	0.0	-0.3	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.8	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	
上層発散	0.4	0.8	0.8	1.0	1.3	1.4	1.3	1.4	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.7	
初期風速の2乗	3.8	7.1	10.1	12.8	14.2	15.0	15.2	17.2	17.3	17.2	17.0	17.8	18.2	18.0	19.7	19.9	18.2	18.3	14.8	14.7	

●モデル出力の色の中心は台風の強度に連した領域であることを、青色は台風の発生に不適な領域であることを示す。
 ●SHIPS寄与率(%)は0以上は赤、0以下は青に着色している。
 ●前回初期値との差分に示しては0以上は赤、0以下は青に着色している(陸地との距離は100km以上のみ)。

第2.2.2図 SHIPSの予測結果の例

台風毎・モデルの初期値毎のSHIPSとGSMの強度予測値と実況値のグラフと台風経路図(上段)および予報対象時刻毎の強度予測結果と環境パラメーター等(下段)。

2.3 SHIPSの精度検証結果

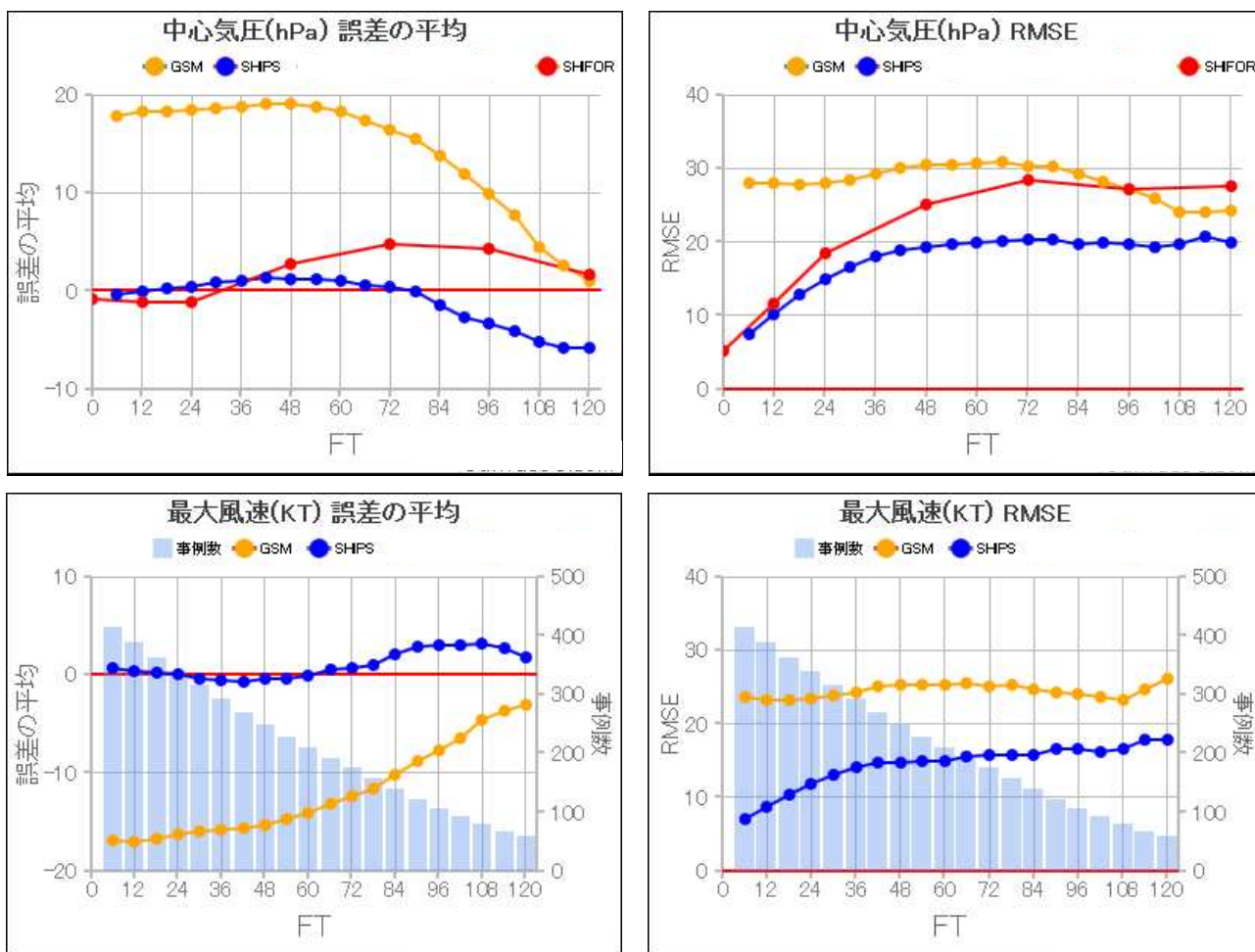
2.3.1 2016年の精度検証結果

2016年に発生した台風第1号から台風第26号までの全台風のベストトラックデータを用いて、SHIPSの予測精度を検証した。各台風の検証期間は、台風が発生してから、消滅する（熱帯低気圧または温帯低気圧になる）直前までである。また、比較のためGSMとSHIFOR（Statistical Hurricane Intensity Forecast；台風の気候値強度予報モデル、ただし中心気圧の検証のみ。Jarvinen and Neumann 1979、Knaff et al. 2003）の予測精度についてもあわせて求めた。なお、台風のベストトラックにおいては、中心気圧は、990hPa以上は2hPa単位、990hPa未満は5hPa単位、風速は5kt単位で解析されていることに留意する必要がある。

第2.3.1図は、台風の中心気圧と最大風速をFT（予報時間、以下同じ）=6からFT=120まで予測した結果の誤差の平均（バイアス）と2乗平均平方根誤差（Root Mean Square Error: RMSE）である。SHIPSによる中心気圧のバイアスは、FT=6からFT=78までほぼ0であり、その後徐々に負に拡大し、FT=120で-6hPa程度である。これは途中の傾向は異なるもののSHIFORのバイアスと同程度である。一方、GSMのバイアスはFT=120に近づくにつれてほぼ0になるものの、FT=6からFT=72まで17hPaから19hPa程度であり、SHIPSやSHIFORのバイアスの3倍程度の大きさである。また、SHIPSによる中心気圧の予測のRMSEは予測開始時に7.5hPaほどで、その後、ほぼ20hPaに収束している。SHIFORのRMSEも同様の傾向だが、28hPa程度に収束しており、SHIPSの方が8hPa程度小さい。一方、GSMのRMSEは期間を通して30hPa前後であり、SHIPSに比べて大きい。

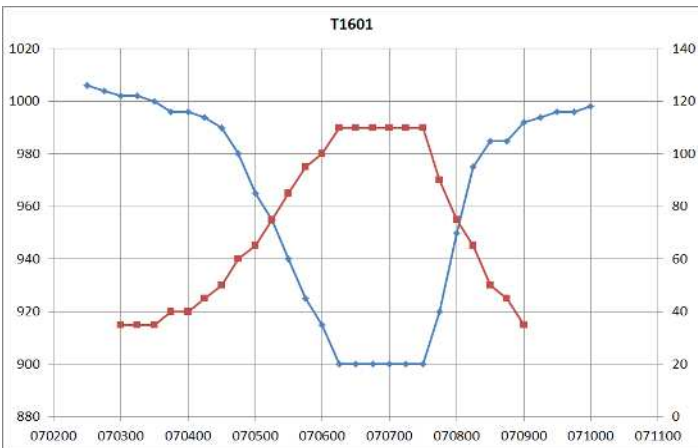
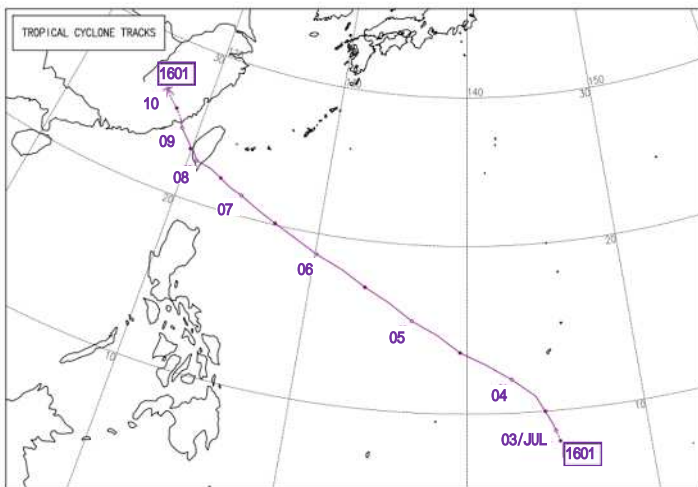
SHIPSによる最大風速の予測のバイアスは、ほぼ0であり、大きくても3kt程度である。一方、GSMのバイアスは予測開始時に-17kt程度で、徐々に小さくなり、FT=120では-3ktとなるが、SHIPSとの違いは大きい。また、SHIPSによる最大風速の予測のRMSEは、予測開始時の7kt程度から徐々に大きくなるが、FT=120でも18kt程度である。一方、GSMのRMSEは、ほぼ25kt前後であり、ここでもSHIPSのRMSEに比べて大きいことがわかる。

本検証により、SHIPSによる中心気圧と最大風速の予測を利用することで、GSMやSHIFORの予測を利用するよりも、平均的には予報精度が著しく改善されることがわかった。以下の2.3.2項から2.3.4項では、個別の台風の事例を取り上げ、いろいろな局面におけるSHIPSの特徴的な振る舞いについて述べる。



第2.3.1図 2016年の全台風における強度予測結果(上段:中心気圧、下段:最大風速)の誤差の平均(左)とRMSE(右) 中心気圧の単位はhPa、最大風速の単位はkt。黄色線はGSMの予測値、青線はSHIPSの予測値、赤線はSHIFORの予測値(中心気圧のみ)。最大風速図の薄青棒のグラフは事例数。

2.3.2 平成28年(2016年)台風第1号の事例



第2.3.2図 台風第1号の経路図(上図)と強度変化図(下図)
 経路図の内、紫色の線が台風経路、四角で囲った番号は台風番号。経路上の印は傍に記した日の0時、印は12時の位置で、|は消滅を示す。経路の実線は台風、破線は熱帯あるいは温帯低気圧の期間を示す。強度変化図の青線は中心気圧(hPa、左軸)、赤線は最大風速(kt、右軸)。横軸は月・日・時刻(0時)を2桁ずつ表示。

台風第1号(ニパルタック)は、2016年7月2日12時にカロリン諸島周辺で熱帯低気圧として発生し、3日0時に台風になった(第2.3.2図)。台風第1号は進路をほぼ北西もしくは北北西に取りつつ、4日0時頃より急発達し、5日0時には強い台風となった。急発達はその後継続し、同日6時には中心気圧95hPa、最大風速は75ktであったが、6日6時には900hPa、110ktと24時間で中心気圧が55hPa発達し、これがピークの値であった。台風第1号は7日12時まで同じ強度を維持し、その後は急激に強度を落としつつ、台湾島の南部を通過し、中国南部に上陸、熱帯低気圧となって10日6時に消滅した。

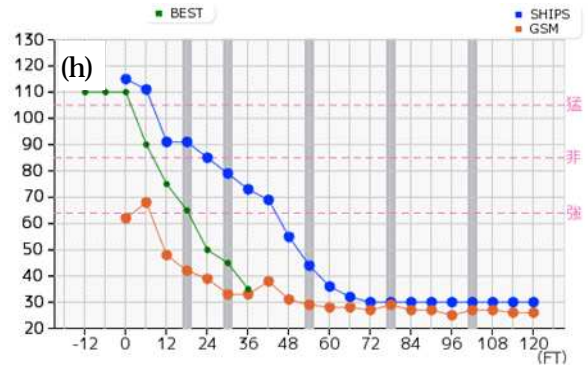
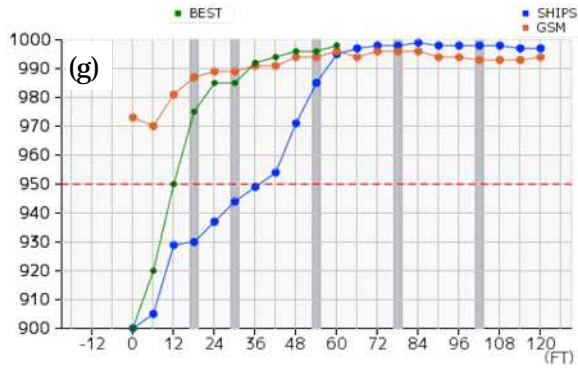
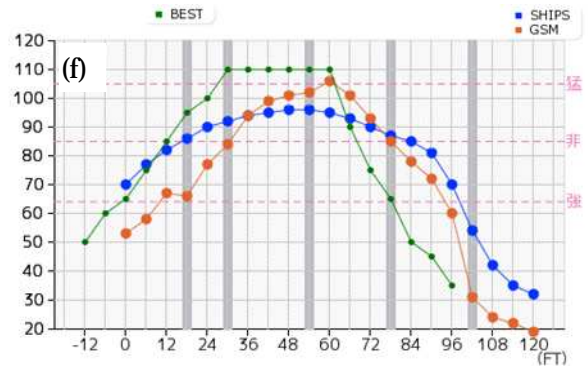
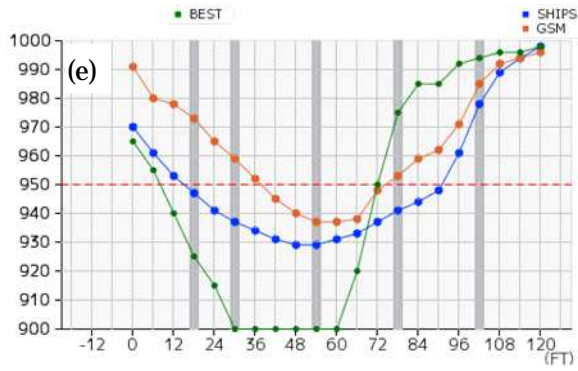
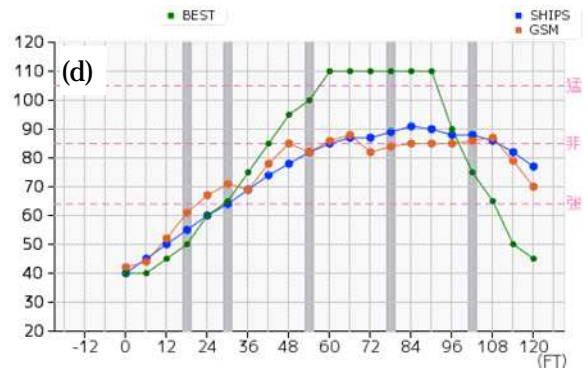
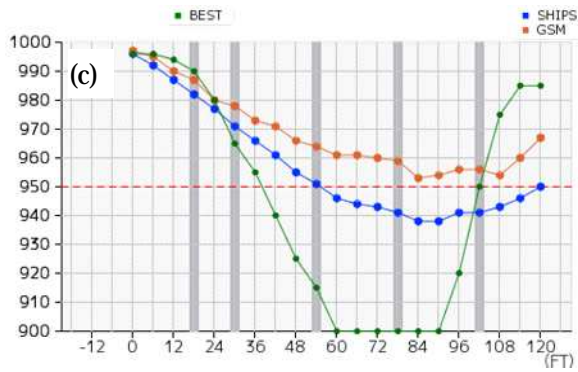
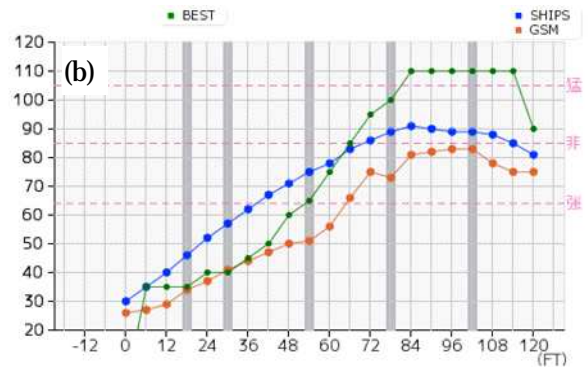
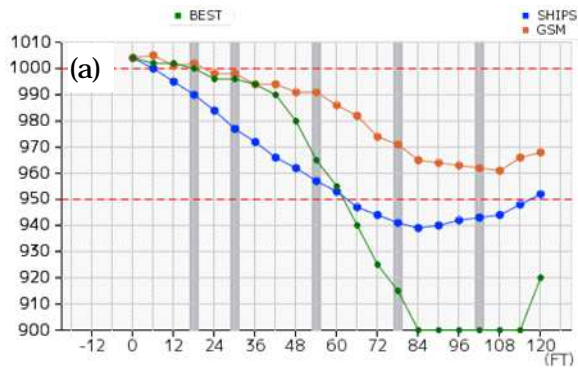
熱帯低気圧としての発生期である2日18時を初期値とする、SHIPSとGSMの強度予測の結果を第2.3.3図(a)と(b)に示す。GSMはFT=36まではベストトラック解析の強度をよく予測しているが、その後はかなり弱めに予測し、台風の強度がピークに達するFT=84では中心気圧で65hPaプラス、最大風速で29ktマイナスとなった。一方、SHIPSはGSMとは異なり、台風の発達期に相当するFT=60までは強度を強めに予測する一方、FT=84では中心気圧で39hPaプラス、最大風速で19ktマイナスと、GSMに比べると差は小さいものの、ピーク時の強度は弱めに予測していた。このように発生期の台風を初期値とするSHIPSには

台風の発生期から発達期にかけて、台風を過発達させる予測を行う傾向が総じて見られた。2.2節で述べたようにSHIPSの重回帰式の係数を算出する際、熱帯低気圧の期間については統計に用いていない。このため、発生期における台風強度の予測には過発達させる傾向があり、この時期におけるSHIPSの予測には注意を払う必要がある。

台風第1号が急発達を開始する直前の3日18時を初期値とするSHIPSとGSMの強度予測の結果を第2.3.3図(c)と(d)に示す。SHIPSとGSMは、最大風速については同様の予測傾向を示しているが、中心気圧はSHIPSの方がFT=60では15hPa程度、解析に近い予測をしている。SHIPSは、FT=30頃までは解析の強度をよく予測しており、24時間で台風の中心気圧が30hPa低下する程度の目先の急発達は、比較的予測できていたことがわかる。一方、それ以後の解析におけるさらなる急発達についてはまったく予測が追いついておらず、FT=60では中心気圧で46hPaプラス、最大風速で25ktマイナスと、予測は大幅に弱めであった。SHIPSのこの傾向は台風第1号がさらに急発達する直前の5日0時を初期値とする予測でも同様であった(第2.3.3図(e)と(f))。

同予測で SHIPS の強度予測が極大に達する FT=48 においても、解析に比べて中心気圧で 29hPa プラス、最大風速で 14kt マイナスと、第 2.3.3 図(c)と(d)の 3 日 18 時を初期値とする強度予測に比べれば改善されたが、依然として大幅に弱めに予測していた。今回の事例のように 24 時間で 30hPa を大きく上回るような気圧の低下量を伴うような急発達については、SHIPS では予測が難しいことがわかった。この理由として、SHIPS は、予報時間毎の環境の値を台風の進路に沿って足し合わせて平均したものを、当該予報時間の説明変数として算出しているため、台風周辺の急激な環境の変化に対応しきれないためと考えられる。また、そもそも SHIPS は、統計モデルとして平均的な台風の盛衰をモデル化しているため、平均よりも小さめあるいは大きめの強度の変化を示す台風に対しては、実況よりも大きめあるいは小さめの強度の変化を予測する傾向があることにも留意する必要がある。

一方、台風第 1 号の強度が解析で減少し始める 7 日 12 時を初期値とする SHIPS の強度予測を第 2.3.3 図(g)と(h)に示す。解析では、台風は急激にその強度を減少させているが、SHIPS の強度予測は追従できず、中国大陸上陸直前の 9 日 0 時に相当する FT=36 では、解析に比べて中心気圧で 43hPa マイナス、最大風速で 38kt プラスと、強度予測は大幅に強めであった。このように、強度の急激な減少についても、SHIPS では予測が難しい事例が多く見られた。これは急発達の予測が難しいことと同様の理由によると思われる。

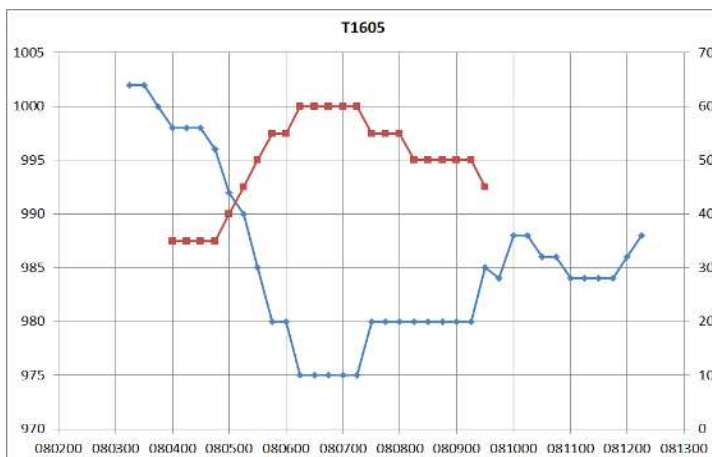
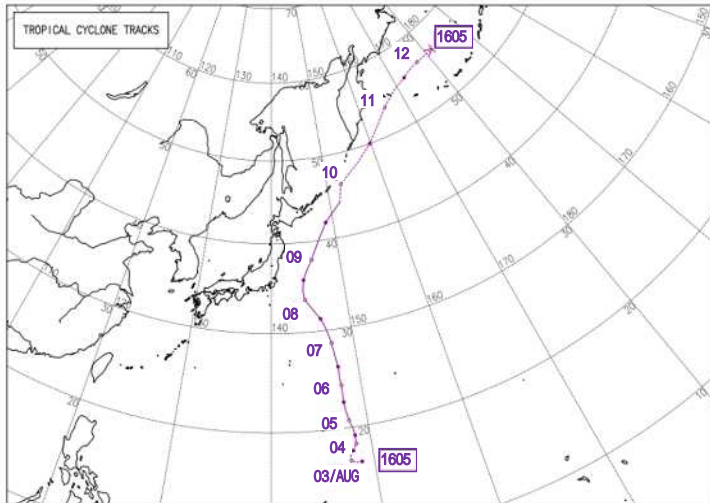


第2.3.3図 台風第1号におけるSHIPSとGSMの強度予測結果

中心気圧 (左列、a、c、e、g、単位：hPa) と最大風速 (右列、b、d、f、h、単位：kt)、(a)と(b)：初期値7月2日18時、(c)と(d)：初期値同3日18時、(e)と(f)：初期値同5日0時、(g)と(h)：初期値同7日12時。緑線がベストトラックの解析値、青線はSHIPSの予測値、オレンジ線はGSMの予測値。

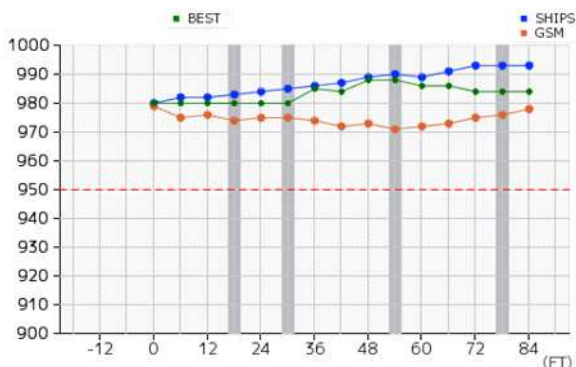
2.3.3 平成28年(2016年)台風第5号の事例

台風第5号(オーミス)は、2016年8月2日12時に北マリアナ諸島の東方海域で熱帯低気圧として発生し、4日0時に台風になった(第2.3.4図)。台風第5号はほぼ北に進路を取りつつ発達を続け、6日6時には中心気圧975hPa、最大風速は60ktに達した。台風第5号はしばらく同じ強度を維持していたが、次第に衰弱し、9日18時に北海道の東方沖で温帯低気圧となった後、そのまま北東進して12日6時にRSMCの責任領域外に出た。



第2.3.4図 台風第5号の経路図(上図)と強度変化図(下図)

図の説明は第2.3.2図と同様。



第2.3.5図 台風第5号におけるSHIPSとGSMの強度予測結果

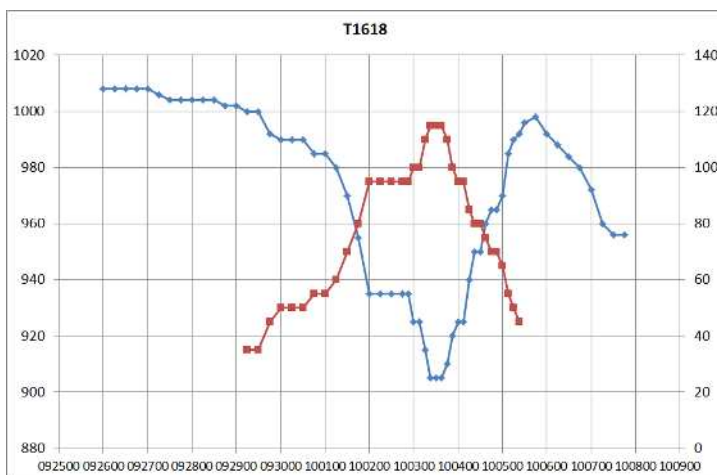
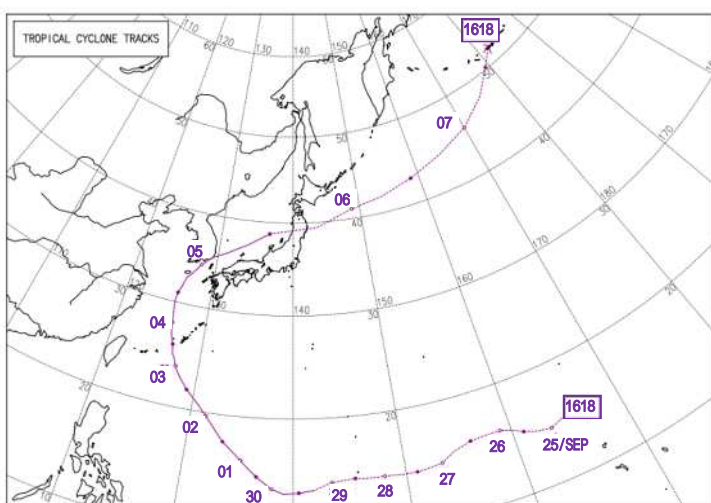
初期値8月8日0時。中心気圧(単位:hPa)のみ。温帯低気圧になった期間では最大風速をベストトラックデータに含めないため、最大風速の図は省略。図の説明は第2.3.3図と同様。

2.3.4 平成28年(2016年)台風第18号の事例

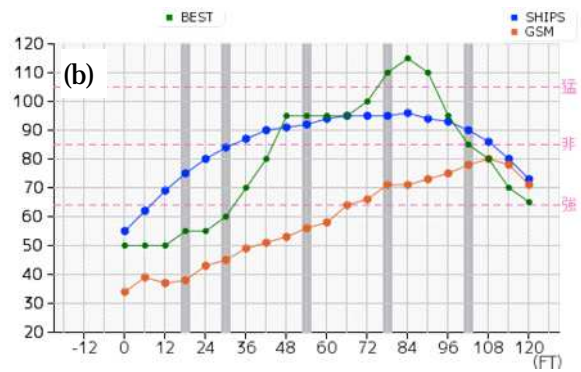
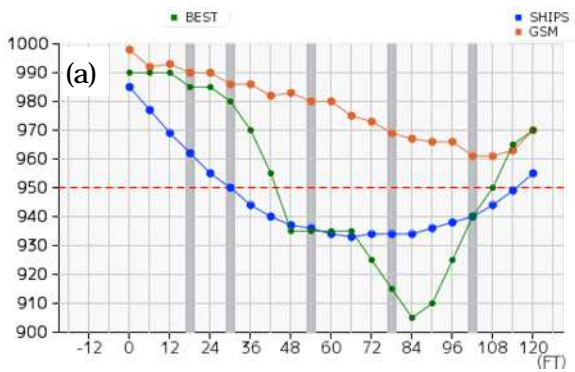
台風第18号(チャバ)は、2016年9月24日18時にウェーク島の南西海域で熱帯低気圧として発生し、29日6時に台風になった(第2.3.6図)。台風第18号は太平洋高気圧の南から西の縁辺を大きく時計回りに移動しつつ徐々に発達を続け、10月1日12時にはフィリピンの東の海上で最大風速が70ktとなった。台風第18号は、3日9時にはその強度のピークに達し、沖縄本島の南西海上で中心気圧905hPa、最大風速115ktになった。その後、東シナ海から日本海に進んだ台風は、5日12時に能登半島沖で温帯低気圧になり、そのまま東北地方を横断して、さらに東に進み7日18時にRSMCの責任領域外に出た。

9月30日0時を初期値とする台風第18号に対するSHIPSとGSMの強度予測の結果を第2.3.7図(a)と(b)に示す。初期値における強度はSHIPSとベストトラック解析でほぼ同じである。その後、FT=48頃までは、SHIPSではほぼ単調にその強度が強くなると予測していたのに対し、実際の強度は、当初、SHIPSの予測ほど

には強くならず、FT=30以降に急速に強度が増していった。第2.3.8図は、30日0時のひまわり8号による水蒸気画像(B10、波長7.3 μ m)とGSMの500hPa面における湿度の解析値である。B10は450~550hPa付近に感度のピークがあり、中層の水蒸気の多寡を示す。本図より、台風の進行方向の前面に水蒸気画像にて暗域として観測される明瞭な上層の乾燥域が広がっていることが確認できる。500hPa面の湿度分布を見ると、同暗域はおおむね湿度30%以下の乾燥した領域に対応していることがわかる。台風はこの進行方向前面に存在した乾燥気塊を台風本体に取り込むことになり対流活動が抑制されたため、FT=0からFT=30にかけて台風第18号の発達が抑えられたと考えられる。このように、台風の周辺に乾燥域が存在している場合、実際には台風の強度に発達傾向が見られないにも関わらず、SHIPSの強度予測が発達傾向を示す事例が他にも見られた。これらの事例より、SHIPSの予測では、台風進行方向前面の中層から上層の乾燥域が、台風の強度に及ぼす負の影響があまり反映されないという傾向があることがわかった。

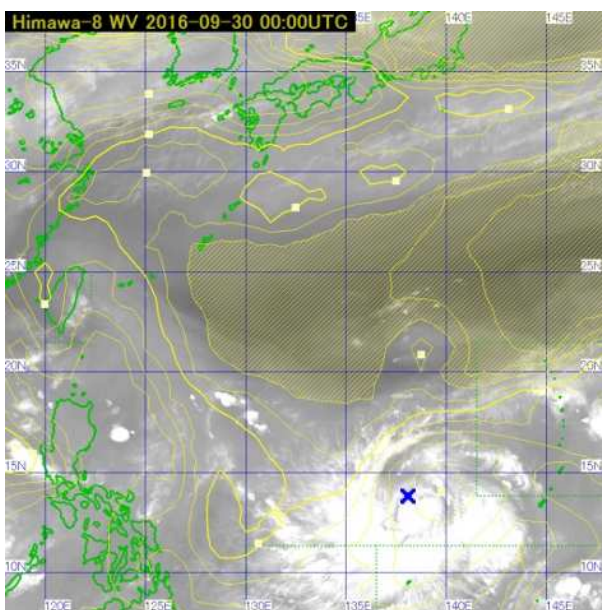


第2.3.6図 台風第18号の経路図(上図)と強度変化図(下図)
図の説明は図2.3.2と同様。



第 2.3.7 図 台風第 18 号における SHIPS と GSM の強度予測結果

中心気圧 (a、単位：hPa) と最大風速 (b、単位：kt)、初期値 9 月 30 日 0 時。図の説明は第 2.3.3 図と同様。



第 2.3.8 図 9 月 30 日 0 時のひまわり 8 号による台風第 18 号の水蒸気画像 (B10、白黒) と同時刻の GSM の 500hPa 面における湿度 (%) の解析値 (黄等値線)

図中湿度が 30%以下の領域をハッチしている。青い×印は台風中心の位置。

2.4 まとめ

平成 28 年度より台風強度予報ガイダンス SHIPS を予報課にて試験運用し、その平均的な挙動と様々な局面における特徴的な振る舞いを調査した。その結果、SHIPS による台風の強度予測は、全体として GSM の予測よりも精度がよいことがわかった。その一方、SHIPS には、発生期には過発達のバイアスがあることや、過度の急発達や急衰弱をうまく予測できないこと、温帯低気圧化後の再発達の予測の利用には適さないなど、その利用上注意すべき点がいくつかあることも明らかになった。SHIPS は今後当庁における台風強度予報のための基本的な資料となる見込みであり、平成 30 年度からの本運用に向けて引き続き精度検証を続けるとともに、そのよりよい利用方法や留意点などをさらに調査する予定である。

また、SHIPS は GSM で予測された台風の進路に沿って計算される。GSM の予測進路と発表予報の進路が異なる場合、特に上陸や通過などに対応するため、説明変数として発表予報進路に沿った環境の値を入力できるように SHIPS を改良することも将来の課題として挙げられる。さらに、SHIPS は予測開始時 (FT=0) の台風の強度と FT=0 からの変化量に大きく依存することもわかっている。このため、あらかじめ、予測開始時における様々な台風の強度を想定した予測を何通りか作成しておき、実況解析した台風強度に合わせて最適な予測をその中から選ぶということも考えられる。SHIPS の利用は当庁では始まったばかりである。今後も改良を続けることで、SHIPS を用いた台風強度予測の精度を向上させていきたい。

参考文献

- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, 9, 209-220.
- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1999: An updated statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic and eastern North Pacific basins. *Wea. Forecasting*, 14, 326-337.
- DeMaria, M., M. Mainelli, L. K. Shay, J. A. Knaff, and J. Kaplan, 2005: Further improvement to the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme (SHIPS). *Wea. Forecasting*, 20, 531-543.
- DeMaria, M., C. R. Sampson, J. A. Knaff, and K. D. Musgrave, 2014: Is tropical cyclone intensity guidance improving? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 95, 387-398.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the KOBE collection. *Int. J. Climatol.*, 25, 865-879.
- Jarvinen, B. R., and C. J. Neumann, 1979: Statistical forecasts of tropical cyclone intensity for the North Atlantic basin. NOAA Tech. Memo. NWS NHC-10, 22 pp.
- 気象庁予報部, 1990: 予報作業指針 - 台風予報 - . 気象庁, 150 pp.
- Knaff, J. A., M. DeMaria, C. R. Sampson, and J. M. Gross, 2003: Statistical, 5-day tropical cyclone intensity forecasts derived from climatology and persistence. *Wea. Forecasting*, 18, 80-92.
- Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebata, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 93, 5-48.
- 小出直久, 和田章義, 檜垣将和, 2015: 台風強度予報作業における海洋貯熱量情報の利用. 平成27年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 137-159.

第3章 ひまわり8号による積乱雲の監視

3.1 はじめに*

ひまわり8号・9号（ひまわり8号・9号は同等な仕様であるが、現在は8号が運用衛星であることから、以下は「ひまわり8号」と記す）では、ひまわり6号・7号に比べて、観測バンドの増加や空間分解能、時間分解能の向上が図られた。このため、小規模スケールの気象現象や短時間に急激に変化する現象を捉え易くなった。また、RGB合成画像などを用いることにより、従来の視点とは異なる幾つかの側面（切り口）から、気象現象を捉えて解析することができるようになった。

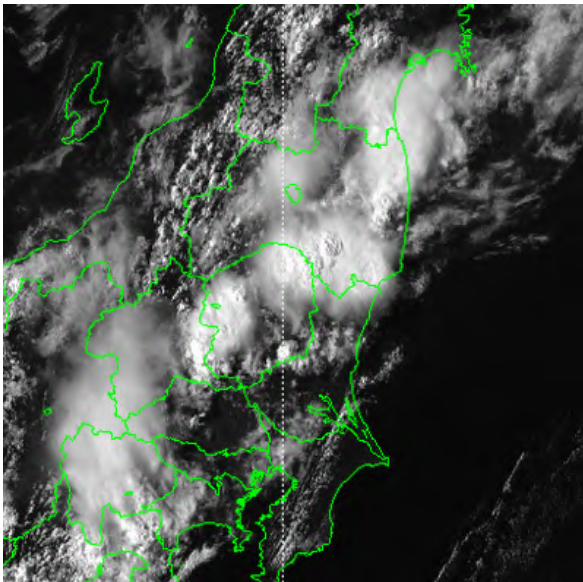
この章では、ひまわり8号の特徴を踏まえて、3.2節では衛星画像を利用した積乱雲の監視について紹介する。また3.3節では、「視差」と呼ばれる衛星観測と地上観測との位置ずれについて説明する。3.4節では、高頻度衛星観測の画像を利用して積雲から積乱雲へと発達する雲域を自動的に検出するプロダクトである「積乱雲情報プロダクト」について紹介する。最後の3.5節では、前節までの内容を踏まえて、積乱雲の監視について実際の事例を取り上げ紹介する。

3.2 積乱雲監視に利用する衛星画像*

ひまわり8号では、多バンド化が図られ16バンドの衛星画像（付録参照）が得られるようになった。また、これらの観測画像を組み合わせ、各種のRGB合成画像も作成できるようになった。ここでは、ひまわり8号の各種衛星画像を利用した積乱雲の監視について、その特徴や利用法を紹介する。

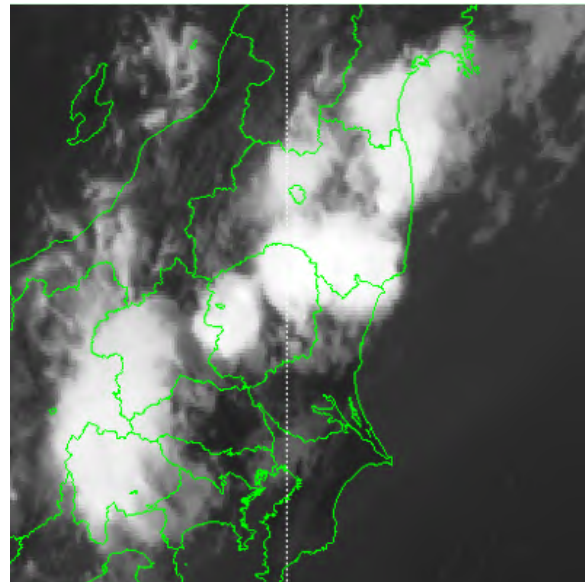
3.2.1 積乱雲監視に利用する各種衛星画像

【可視（B03）、赤外（B13）画像】



第3.2.1図 可視画像（B03）

（2017年7月13日15時）



第3.2.2図 赤外画像（B13）

（2017年7月13日15時）

第3.2.1図と第3.2.2図には、以前から利用されているひまわり8号の可視画像（B03）と赤外画像（B13）を示す。可視画像は雲や地表面等からの太陽光反射を観測した画像である。太陽光反射の強い画素

*寺坂 義幸（気象衛星センターデータ処理部解析課）

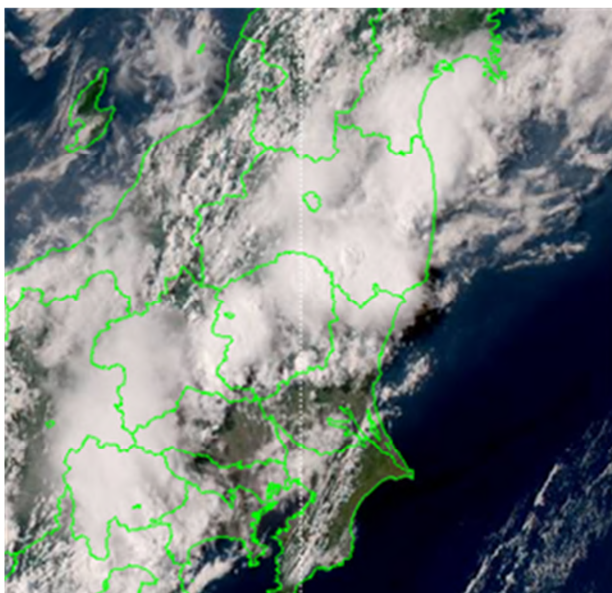
を明るく、弱い画素を暗く表示している。一方、赤外画像は雲や地表面から放射される赤外線を観測し、輝度温度を算出して画像にしたものである。輝度温度の高い画素は暗く、低い画素は明るく表示している。可視画像は、太陽光の反射を観測しているため日中にのみ利用可能となるが、赤外画像に比べて画像の解像度が高いため、雲域の詳細な形状やその時間変化がよくわかる。赤外画像では、可視画像ほど詳細な形状はわからないものの、観測した赤外線の強度から算出した雲頂の輝度温度が得られる。その場所の大気の鉛直温度分布がわかれば、その両者からおおよその雲頂高度を算出することができる。また、地球からの赤外線の放射量を観測しているため、太陽光の有無にかかわらず24時間連続して観測可能である。

また、ひまわり8号では、画像の解像度が向上（可視画像(B03)の水平解像度は500m）すると共に、短い時間間隔（2.5分間隔や30秒間隔）での高頻度衛星画像が得られるようになったことから、積乱雲の発達や火山噴火などといった水平スケールの小さい局所的な気象現象や時間変化量の大きい現象を捉え易くなった。

可視・赤外画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・可視画像では、雲域の大きさや雲頂の凹凸などの詳細な形状やその時間変化の把握、及び中心付近の対流域と積乱雲上部縁辺の「かなとこ巻雲」との区別ができる（「かなとこ巻雲」は氷晶でできていて密度が小さいため、下方が透けて見える。ただし、積乱雲の中心部に近い部分では雲層が厚くなるためこの限りではない）。
- ・赤外画像では、雲頂温度（雲頂高度）の変化から雲域の発達の状況を24時間連続して把握することができる。なお夜間については、可視画像が利用できないため、赤外画像のみで雲域の形状やその時間変化、中心付近の対流域と「かなとこ巻雲」との区別などを行う。

【True color 再現画像】



第3.2.3図 True color 再現画像
(2017年7月13日15時)

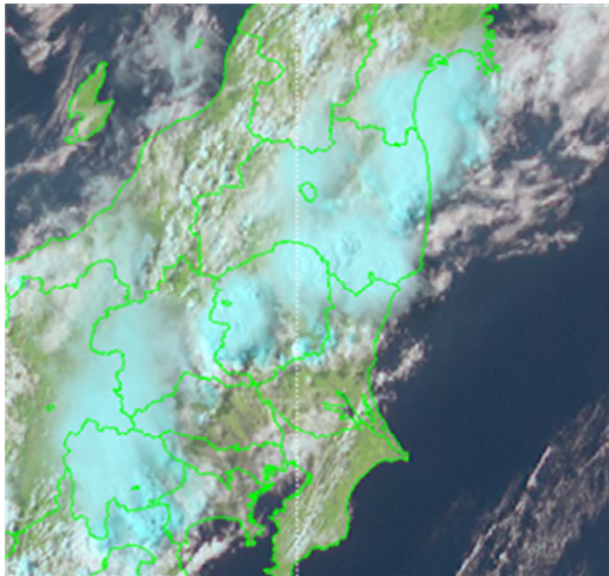
True color 再現画像（第3.2.3図）は、3種類の可視画像（B01、B02、B03）、近赤外画像（B04）、赤外画像（B13）を用いて、大気による光の散乱の効果を補正すると共に、色調や階調を補正して作成したカラー画像である。色調は、人が肉眼で見た場合と同等になるように調整されているのが特徴である。

この画像を利用した積乱雲の監視では、中心付近の対流域と「かなとこ巻雲」との区別といった雲域分布の詳細な解析がし易くなっている。また、積乱雲に発達する前の積雲などの下層雲の様子も把握できる。さらに、「ダスト」や「もや」などの大気中の浮遊物質と雲域とが色調の違いにより区別し易いほか、植生などの地表面の様子がよくわかる特徴もある。

True color 再現画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・True color 再現画像では、積乱雲の詳細な形状や中心付近の対流域と「かなとこ巻雲」との区別、積雲などの下層雲がよく把握できる。

【Natural color RGB 合成画像】



第3.2.4図 Natural color RGB 合成画像
(2017年7月13日15時)

Natural color RGB 合成画像(第3.2.4図)は、2種類の近赤外画像(B04、B05)と可視画像(B03)を利用して作成している。この画像は、雲粒の相(水/氷)の違いにより太陽光反射が顕著に異なる近赤外画像(B05)を利用しているため、氷晶からできた雲(シアン色)と水の粒からできた雲(白色)との区別ができる(付録の色解釈参照)。積乱雲の雲頂は高く、氷晶からできているためシアン色となるのに対し、主に水の粒からできている下層雲域(水雲)は白色となり、両者の区別は容易である。

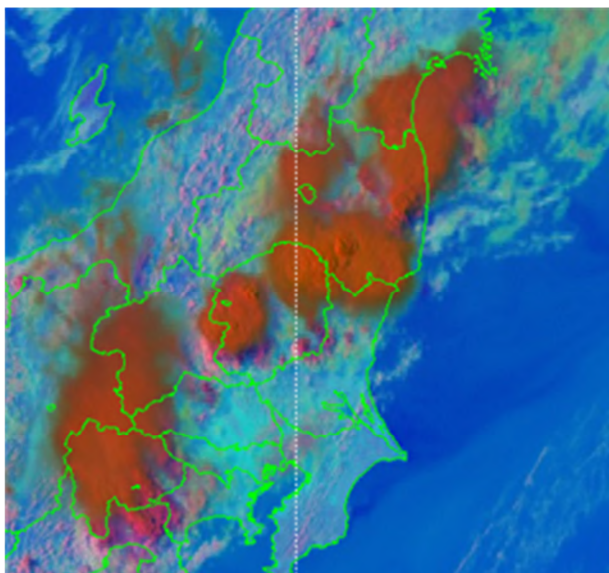
一般的な積乱雲の発達過程において、発生初期の積雲は、水の粒で構成されているため白色に表示される。その後、発達して次第に雲頂高度が高くなると、氷晶を伴うようになり、シアン色の領域が現れるようになる。このRGB合成画像を利用

すれば、積雲が発達して雲頂に氷晶を伴うようになったかどうかの判断ができる。

Natural color RGB 合成画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・積乱雲の氷晶からできている部分(発達した対流部の雲頂や「かなとこ巻雲」)はシアン色に表示される。
- 一方、下層の水の粒からできている雲域や霧域は白色表示となる。

【Day microphysics RGB 合成画像】



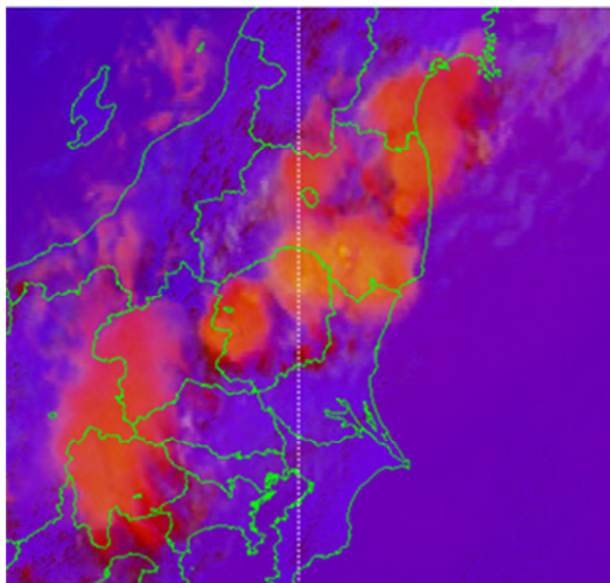
第3.2.5図 Day microphysics RGB 合成画像
(2017年7月13日15時)

Day microphysics RGB 合成画像(第3.2.5図)は、雲粒の相(水/氷)や雲粒の大きさに敏感な反射特性を持つ3.9 μm 赤外画像(B07)の太陽光反射成分を利用しており、日中の積乱雲域の抽出や氷晶雲(上層雲)と水雲(水の粒からできた下層雲や霧など)との判別を行うことができる。積乱雲の中心付近にある雲頂が氷晶で覆われている厚い雲域は、オレンジ色、積乱雲に伴う「かなとこ巻雲」は薄い緑色、静岡県東部などに見える厚い水雲域はマゼンタ色、下層の水雲は、緑白色で表示される(付録の色解釈参照)。

Day microphysics RGB 合成画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・積乱雲の中心付近にある雲頂が氷晶で覆われている厚い雲域はオレンジ色、また積乱雲上部縁辺の「かなとこ巻雲」は薄い緑色に表示される。

【Day convective storm RGB 合成画像】



第3.2.6図 Day convective storm RGB 合成画像
(2017年7月13日15時)

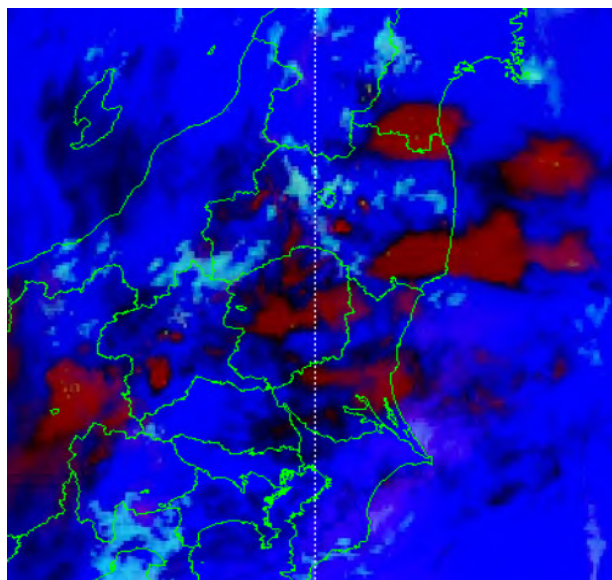
Day convective storm RGB 合成画像（第3.2.6図）では、積乱雲などの降水を伴う厚い雲は赤く表示される。特に、強い上昇気流を伴う対流活動の活発な領域は黄色く表示されるため、その把握が容易である（付録の色解釈参照）。積乱雲の中に強い上昇気流があると、雲中の氷晶粒子は十分に成長できないまま雲頂まで持ち上げられる。このため、積乱雲の雲頂には通常よりも小さい氷晶粒子が存在することとなる。このような雲域は、黄色く表示するように設定されていて、強い上昇気流に伴う対流活動の活発な領域が容易にわかる。

Day convective storm RGB 合成画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・積乱雲などの降水を伴う厚い雲は赤く表示され、特に強い上昇気流を伴う対流活動の活発な領域は黄色く表示される。

- ・可視画像と赤外画像を切り替えて積乱雲を判断する従来の手法より、容易に積乱雲を判別できる。

【Night microphysics RGB 合成画像】



第3.2.7図 Night microphysics RGB 合成画像
(2017年7月15日20時)

他の画像とは観測日時が異なることに注意。

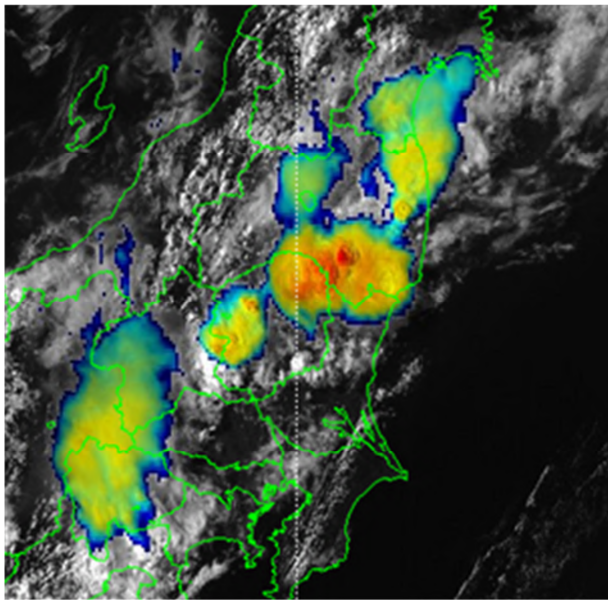
Night microphysics RGB 合成画像（第3.2.7図）は、夜間の雲型判別に用いる RGB 合成画像である。積乱雲の中心付近の厚い雲域は赤く表示される。その中でも特に発達して輝度温度が低くなった領域は、赤色の中に黄色い斑点が混じる表示となる（付録の色解釈参照）。これは $3.9 \mu\text{m}$ 赤外画像（B07）の輝度温度が特に低下（約 230K 以下）すると画像にノイズ状の斑点が生じるためである。また、積乱雲上部縁辺の「かなとこ巻雲」は、薄い黒色となる。

なお、この RGB 合成画像は、夜間の霧・下層雲の判別にも利用できるが、 $3.9 \mu\text{m}$ 赤外画像（B07）が利用されているため、朝になって太陽光が当たり始めると、その影響で色調が変化するため利用できなくなることに留意する必要がある。

Night microphysics RGB 合成画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・積乱雲の中心部の厚い雲域は、赤く表示される。
- ・特に発達して輝度温度が低くなった領域は、赤色の中に黄色い斑点が混じる表示となる。
- ・積乱雲上部縁辺の「かなとこ巻雲」は薄い黒色に表示される。

【雲頂強調画像（雲頂強調サンドイッチ画像）】



第 3.2.8 図 日中の雲頂強調画像
（雲頂強調サンドイッチ画像）
（2017 年 7 月 13 日 15 時）

雲頂強調画像は、積乱雲などの発達した雲域の雲頂の輝度温度（雲頂高度）の変化が色の違いとして客観的に示されている。日中は、特に可視画像による詳細な形状（雲頂の凹凸など）も同時に示されることから、雲域の発達や衰弱の調査、その指標などにも活用できる。

雲頂強調画像を利用した積乱雲監視の特徴は、以下のとおりである。

- ・雲頂の輝度温度の分布やその変化がカラースケールで表示される。
- ・日中の場合は、雲頂輝度温度を示す色の分布やその変化に加えて、可視画像による詳細な形状も同時にわかるため、この画像だけで雲頂の様子が客観的に把握できる。

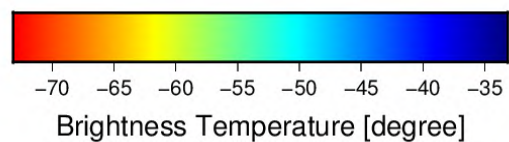
3.2.2 積乱雲監視のまとめと留意事項など

積乱雲監視の基本は、以前から用いられている可視画像（B03）と赤外画像（B13）であるが、ひまわり 8 号では最新の各種衛星画像を利用できるようになり、より正確で詳細な積乱雲の監視ができるようになった。可視画像からは雲域の大きさや詳細な形状（夜間は赤外画像で代用）、赤外画像からは雲域の輝度温度（雲頂高度）に着目して、その時間変化を把握しておくことが重要である。また、ひまわり 8 号になって新たに利用できるようになった True color 再現画像や各種の RGB 合成画像を使うと、氷晶雲と水雲の区別や活発な対流雲域の把握など、可視画像や赤外画像だけではわからない新たな情報が得られるようになった。

以下に、各種衛星画像の特徴をまとめる。なお、Night microphysics RGB 合成画像は夜間のみの利用となるが、赤外画像や雲頂強調画像は昼夜の区別なく 24 時間利用できる。その他の画像については、可視や近赤外画像が利用されているため、日中のみの利用となることに留意が必要である。

雲頂強調画像（第 3.2.8 図）は、赤外画像（B13）の輝度温度に注目して特定の温度帯をカラー表示した画像である。夜間は、赤外画像の輝度温度に対応して着色した単純な画像であるが、日中は、可視画像（B03）上に赤外画像の輝度温度に対応して着色した雲頂強調画像（夜間と同様な画像）を、半透明にして重ね合わせて合成した画像で、衛星画像をサンドイッチのように重ね合わせて作成することから「サンドイッチ画像」と呼ばれている。

第 3.2.9 図には、赤外画像の輝度温度に対応して着色する配色図を示した。着色する範囲は -73（200K）～ -33（240K）としていて、赤外画像の低温部に重点を置いた色配分である。



第 3.2.9 図 雲頂強調画像の配色図

【日中の監視】

- ・ True color 再現画像では、積乱雲の詳細な形状や、対流域と「かなとこ巻雲」との区別、地表面、積雲などの下層雲がよくわかる。
- ・ Natural color RGB 合成画像では、氷晶雲と水雲の判別が容易である。
- ・ Day microphysics RGB 合成画像では、積乱雲に伴う厚い雲域の雲頂が氷晶に覆われているかどうかや「かなとこ巻雲」の区別ができる。
- ・ Day convective storm RGB 合成画像では、積乱雲の対流活動の活発な領域が黄色く表示される。

【夜間の監視】

- ・ Night microphysics RGB 合成画像では、積乱雲の中心部の厚い雲域は赤く表示される。特に発達して輝度温度が低くなった領域は、赤色の中に黄色い斑点が混じって表示される。

【一日を通しての監視】

- ・ 雲頂強調画像では、雲頂の輝度温度の分布やその変化がカラースケールで表示される。また日中は、可視画像による詳細な形状も同時にわかる。

3.3 積乱雲監視における視差について*

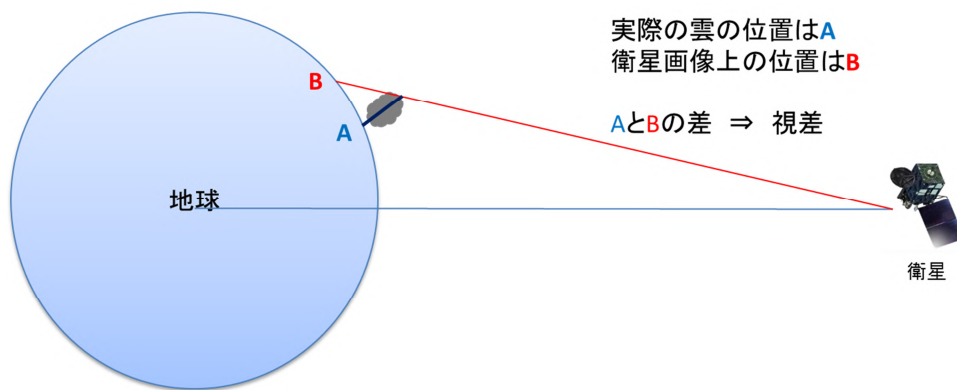
衛星画像は積乱雲の監視に非常に有用であるが、地上の観測データと比較するときには視差の影響による位置ずれを考慮する必要がある。この節では、この視差について説明する。

3.3.1 衛星画像で生じる視差とは

ひまわり 8 号は、東経約 140.7 度の赤道上空約 36000km に位置して観測を行い、観測データは衛星画像として雲域等の監視に日々利用されている。地球から離れた上空から観測することで広い領域の観測が可能になる一方、地上から観測したデータとの間で視差による位置ずれが生じる。

第 3.3.1 図は視差が生じるメカニズムを表したものである。地上から見た雲の位置が A 地点であるのに対して、衛星から見た雲の位置は B 地点になる。

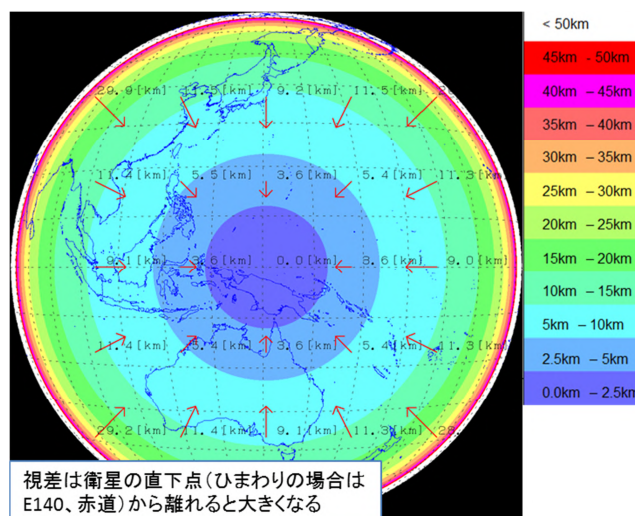
この A 地点と B 地点の差が視差の影響による位置の差となる。衛星画像と観測データとの比較をする際にはこの位置ずれに注意する必要がある。



第 3.3.1 図 視差が生じるメカニズム

3.3.2 視差の特徴

視差の影響はひまわり 8 号の衛星直下点（東経 140.7 度、赤道）から離れるほど大きくなり、観測する雲の雲頂高度が高くなるほど大きくなるという特徴がある。

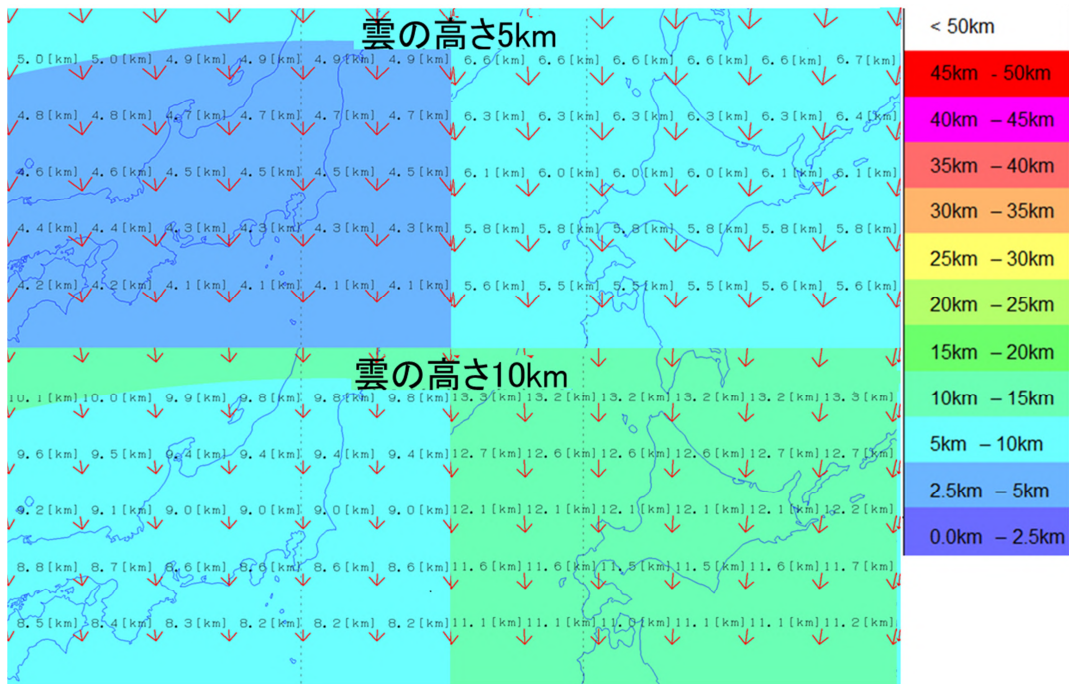


第 3.3.2 図 雲頂高度 10km の雲を観測した際に生じる視差補正距離の大きさ

矢印は、衛星画像の視差補正の方向と補正距離の大きさを示す。

*齋藤 幸太郎（気象衛星センターデータ処理部解析課）

第 3.3.2 図は日本付近で雲頂高度 10km の雲を観測した際に生じる視差の大きさを図に示したものである。この図から衛星直下点付近では視差による影響が殆ど無いのに対して、衛星直下点から離れるほど視差の影響が大きくなり、衛星直下点に近づく方向に視差補正が必要なことがわかる。



第 3.3.3 図 雲頂高度による視差補正距離の大きさ

矢印は、衛星画像の視差補正の方向と補正距離の大きさを示す。

第 3.3.3 図は雲頂高度を変化させた時に視差の影響がどの程度変化するかを図にしたものである。上段の図は雲頂高度が 5km の時、下段の図は雲頂高度 10km の時の視差の影響による位置ずれの大きさを示した。雲頂高度 5km の時は北海道付近で位置ずれの大きさが 5-10km、関東付近で 2.5-5km 程度であるのに対して、雲頂高度 10km のときは北海道付近で 10-15km、関東付近で 5-10km と大きくなっている。このように、日本付近においても数 km のオーダーで視差が生じているため、府県を対象とした調査等ではこれが無視できないケースもあり得る。衛星画像を用いる際には注意が必要である。

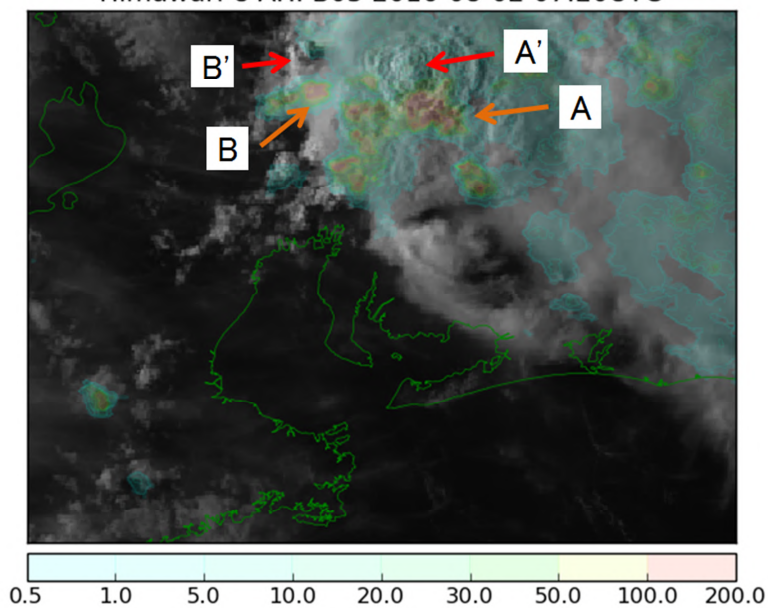
以上のように視差は、衛星直下点から同心円状に大きくなり、中心からの距離に比例して大きくなる。また、視差による位置ずれの大きさは、雲頂高度に比例して大きくなるという特徴もわかる。こうした特徴から積乱雲のように雲頂高度が非常に高い雲では、視差の影響が特に大きくなるため、衛星画像から積乱雲の位置を特定する場合やレーダー、雷監視システム (LIDEN、以下「LIDEN」と記す) 等の地上観測データとの比較には注意が必要である。

3.3.3 衛星画像と地上観測との比較の例

ここでは実際に衛星画像に表現された視差の影響について、衛星画像と同時刻の地上レーダーの観測データとを比較して示した例を紹介する。

第 3.3.4 図は東海地方で発生した積乱雲を観測したもので、2016 年 8 月 2 日 16 時 20 分のひまわり 8 号の可視画像 (B03) に同時刻の地上レーダーで観測した降水強度を重ねた図である。

Himawari-8 AHI B03 2016-08-02 07:20UTC

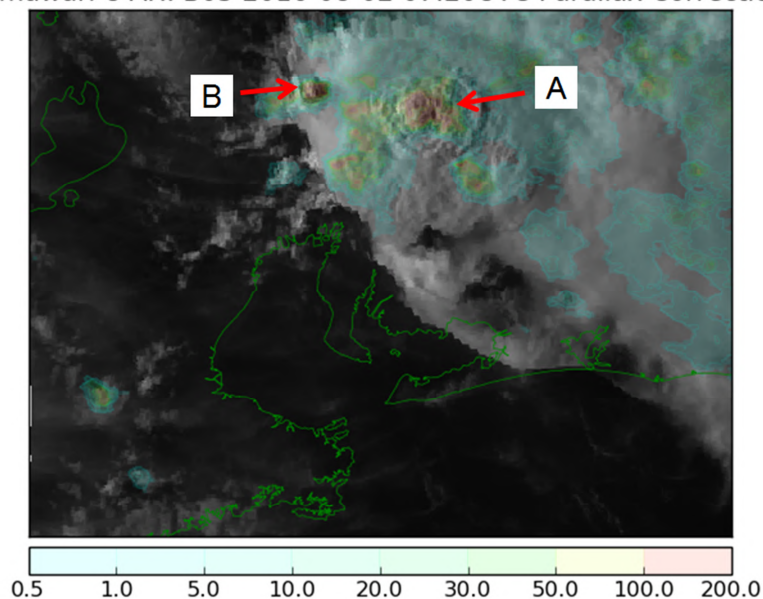


第 3.3.4 図 ひまわり 8 号可視画像 (B03) とレーダーの降水強度 (mm/h)
(2016 年 8 月 2 日 16 時 20 分)

地上レーダーの降水強度が強い地点が図中の A・B 地点であるのに対して、衛星画像から見て積乱雲の発達しているのは A'・B' 地点となる。このように視差の影響によって地上の観測で降水が強い地点と、衛星画像の発達した積乱雲とは位置がずれている。

第 3.3.5 図は第 3.3.4 図と同時刻の観測で、雲頂高度から視差の影響を見積もり、そのずれ量を画像処理した補正可視画像と、地上レーダーで観測した降水強度とを重ね合わせた図である。

Himawari-8 AHI B03 2016-08-02 07:20UTC Parallax Correction



第 3.3.5 図 視差を補正した可視画像 (B03) とレーダーの降水強度
(2016 年 8 月 2 日 16 時 20 分)

図中の矢印が示すとおり、地上レーダーの降水強度が強い地点と衛星画像から見た積乱雲の発達している位置がほぼ一致しており、同一のものであることがわかる。

以上のように、積乱雲のような雲頂高度が高い雲域と地上の観測データを比較する際には視差の影響による位置ずれを考慮する必要がある。

3.3.4 視差についてのまとめ

衛星画像と地上の観測との間には視差の影響による位置ずれが生じ、以下のような特徴がある。

- ・ 衛星直下点（ひまわり 8 号では東経 140.7 度、赤道）から離れれば離れるほど視差の影響は大きくなる。
- ・ 雲頂高度が高い雲ほど視差の影響は大きくなる。
- ・ 積乱雲のように雲頂高度が高い雲域の監視の際は視差による位置ずれが数 km 程度になる。このため、府県域を対象とするなど、拡大した衛星画像を利用する場合は、衛星画像と地上の観測データとの比較には注意が必要である。

なお、具体的な視差の補正方法は齊藤他(2013)の「ラピッドスキャンデータで見た積乱雲の一生」に詳しく記載されている。

3.4 積乱雲情報プロダクトの紹介*

3.4.1 はじめに

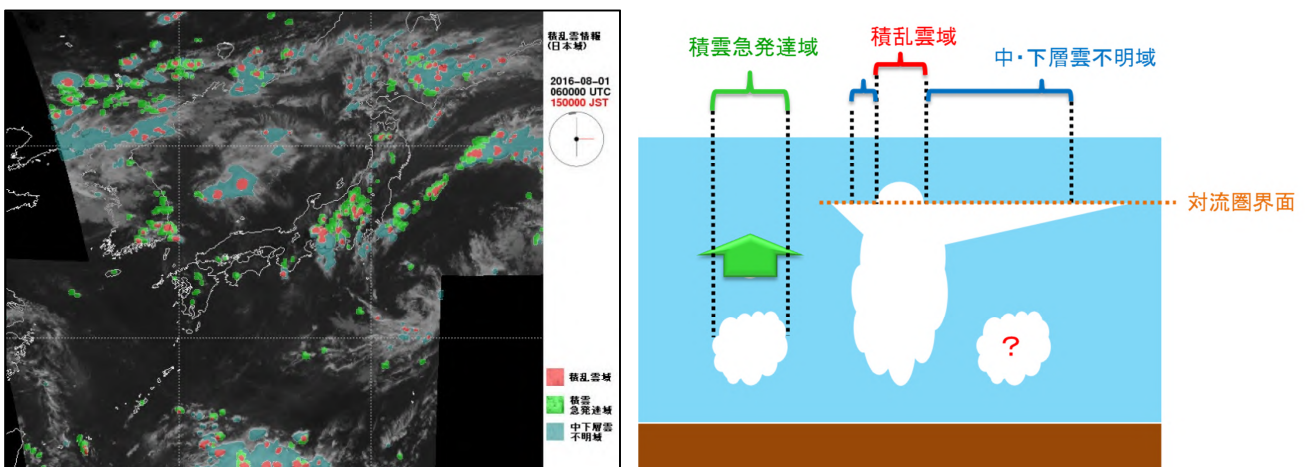
ひまわり 8 号は 10 分間隔のフルディスク観測（衛星から見える地球全ての観測）と同時に日本域周辺を高頻度（2.5 分間隔）に観測する日本域観測を行っている。気象衛星センターでは、この日本域観測を利用して、積乱雲情報プロダクトを作成し、航空機の安全運航に資するプロダクトとして航空関係機関を対象に提供している。本プロダクトは、急速に発達し積乱雲になるおそれがある積雲域（以下、「積雲急発達域」）、積乱雲域、かなとこ巻雲等の分厚い上層雲（以下、「中下層雲不明域」）の 3 つの要素から成っている（詳細については Sumida et al.(2017)を参照）。ここでは、積雲急発達域検出のアルゴリズムや精度評価、特性について解説する。

3.4.2 積乱雲情報プロダクトの概要

気象衛星センターでは、2012 年 6 月から 2014 年 9 月まで、ひまわり 6 号の 5 分毎の高頻度観測データを利用して、航空関係機関向けに積乱雲情報プロダクトを提供してきた。しかし、待機衛星としての観測の制約のため、夏季（6 月～9 月）の日中（09 時～18 時）のみの提供であった。2015 年 7 月からは、ひまわり 8 号の日本域観測データを利用したプロダクトを、それまでと同様に夏季・日中に提供していたが、プロダクトの提供が行われていなかった朝や夜のはじめ頃にも積乱雲が激しく発達することが多いため、2016 年 6 月からは、ひまわり 8 号の多バンドの観測データを利用することにより、通年終日の提供を行っている。

積乱雲情報プロダクトは、第 3.4.1 図のように画像形式で提供しており、赤外画像（B13）を背景として、以下の 3 つの要素を重畳して表示している。

- 積雲急発達域（緑色）：
発達傾向があり、発雷などの激しい現象をもたらす可能性がある雲域
- 積乱雲域（赤色）：
積乱雲が十分に発達し雲頂がオーバーシュート（対流圏界面を突破）している雲域
- 中下層雲不明域（青色）：
積乱雲の雲頂付近から広がるかなとこ巻雲等の分厚い上層雲域
（分厚い上層雲があると、衛星からはその下の状況が不明なため、このような名称を用いている）

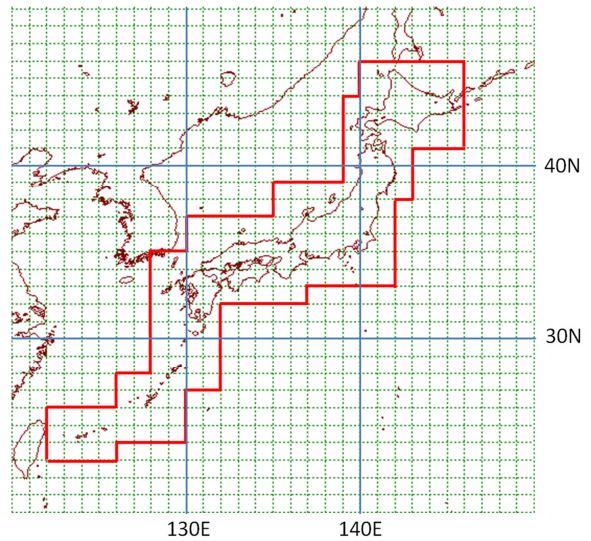


第 3.4.1 図 積乱雲情報プロダクト（左）と各要素の概念図（右）

*鈴江 寛史、隅田 康彦（気象衛星センターデータ処理部システム管理課）

3.4.3 積雲急発達域検出アルゴリズム

積雲急発達域の検出は、ひまわり 8 号の多バンドの衛星画像（付録参照）かつ高頻度の観測の特長を活かして、特徴的な検出パラメータ（第 3.4.1 表）を設定し、統計的な手法によって行っている。これらの検出パラメータにより、雲頂表面の凹凸具合（No.1-4）や水雲から氷雲への相変化（No.5-7）、雲頂上空の水蒸気（No.8, 9）等を推定し、さらに雲頂状態の時間変化（No.10-13）も考慮することで、雲の発達度合いを見積もっている。なお、各検出パラメータを算出する際には、周囲（約 10km 以内）の観測値から、平均値や最小・最大値、標準偏差等を計算し、それらを利用している。さらに、発雷の観測を真値としたロジスティック回帰モデル式（3.4.1）を利用することにより、今後 1 時間以内に発雷する確率 p を求め、この p の値が高い領域を積雲急発達域として検出している。



第 3.4.2 図 回帰係数算出及び精度評価に使用する領域（赤枠内）

$$p = \frac{1}{1 + \exp[-(a_0 + \sum_i a_i x_i)]} \quad (3.4.1)$$

ここで、 x_i は最大 13 個の各検出パラメータの値、 a_0 及び a_i は回帰係数である。夏季は熱雷、冬季は寒気吹き出し時の日本海沿岸での発雷をターゲットにしており、第 3.4.2 図に示す領域内において発雷を多数検知した一定期間のデータを利用して、検出パラメータと 1 時間先までの LIDEN の発雷検知データとのロジスティック回帰分析を行い、「夏季日中」「夏季夜間」「冬季」の 3 種類の回帰係数を設定している。なお、ここでは、毎年 4 月から 10 月までを夏季、11 月から翌 3 月までを冬季として、回帰係数の切り替え等のアルゴリズムの変更を行い、季節の変動の影響を考慮している。ただし、アルゴリズムの切り替え時には、積雲急発達域の検出特性が変わることに注意が必要である。

第 3.4.1 表 積雲急発達域検出に利用するパラメータ

No.	検出パラメータ	主な目的	備考
1	B03 (最大値 - 平均値)	雲頂表面の凹凸具合を検出	夏季・日中のみ
2	B03 (標準偏差)		
3	B13 (最小値 - 平均値)		
4	B13 (標準偏差)		
5	B16 - B13 (平均値)	雲頂付近の氷雲の検出	夏季のみ
6	B15 - B13 (平均値)		
7	B11 - B13 (平均値)		
8	B08 - B13 (平均値)	雲頂上空の水蒸気の検出	
9	B10 - B08 (平均値)		
10	B03 (平均値の時間変化)	雲の発達具合を検出	日中のみ
11	B13 (平均値の時間変化)		
12	B11 - B13 (平均値の時間変化)	雲頂付近の氷雲の検出	夏季のみ
13	B15 - B13 (平均値の時間変化)		

3.4.4 積雲急発達域検出の精度評価

積雲急発達域検出の精度評価は第 3.4.2 図の領域内で LIDEN (対地放電及び雲放電) を真値として行っている。積雲急発達域検出後 1 時間以内に発雷が検知されたか否か、または発雷検知前 1 時間以内に積雲急発達域が検出されていたか否かを評価の対象としており、精度評価の指標として、以下の捕捉率及び空振り率を用いる。

$$\text{捕捉率} = \frac{aa}{aa + c}、\text{空振り率} = \frac{b}{a + b} \quad (3.4.2)$$

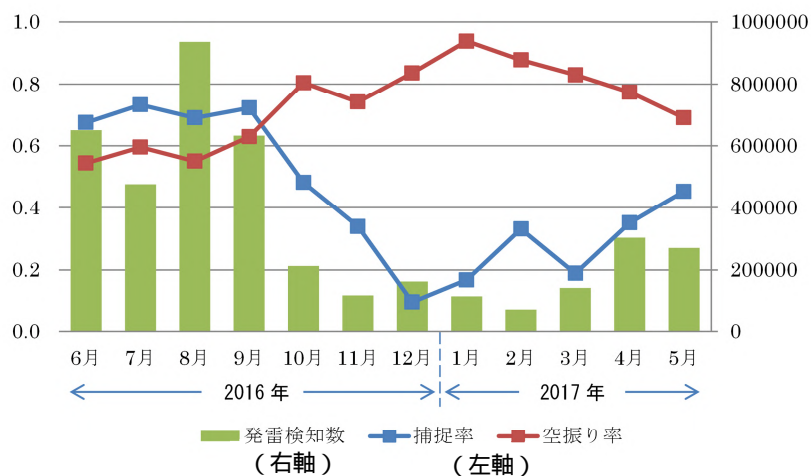
ここで、a, aa, b, c の各値は、第 3.4.2 表の分割表の値である。

第 3.4.2 表 精度評価の分割表

- a: 積雲急発達域として検出された格子 (解像度: 0.1°) の周辺 ±1 格子以内かつその検出後 1 時間以内に、検知された発雷数
- aa: 発雷が検知された格子 (解像度: 0.1°) の周辺 ±1 格子以内かつその検知前 1 時間以内に検出された積雲急発達域の数
- b: 積雲急発達域を検出したが、その後 1 時間以内に発雷がなかった数
- c: 発雷が検知されたが、その 1 時間前までに、積雲急発達域が検出されていなかった数

		発雷		合計
		あり	なし	
検出結果	あり	a, aa: 適中	b: 空振り	a+b: 積雲急発達域検出数
	なし	c: 見逃し	d	
合計		aa+c: 発雷検知数		

第 3.4.3 図では、2016 年 6 月から 2017 年 5 月までの 1 年間の月別の捕捉率、空振り率及び発雷数を示している。積雲急発達域は、夏季においては熱雷をターゲットとしているため、熱雷が多く発生した 8 月は比較的精度良く検出されていることがわかる。これは、熱雷が発生する環境場では太平洋高気圧に覆われ、中・上層雲に邪魔されずに対流雲が発達する様子を衛星から観測することができるためと考えられる。一方、熱雷の発生が減少する 10 月には、捕捉率の低下や空振り率の上昇が見られる。また、発雷が少ない冬季についても精度が低下する傾向にあることがわかる。冬季においては寒気吹き出し時の日本海沿岸での発雷をターゲットにしているが、発雷を伴う雲域でも夏季ほどの発達傾向は見られず、雲域の水平移動量も大きいことから、正確な発雷位置を解析・予測するのが困難なためである。



第 3.4.3 図 積雲急発達域の精度評価

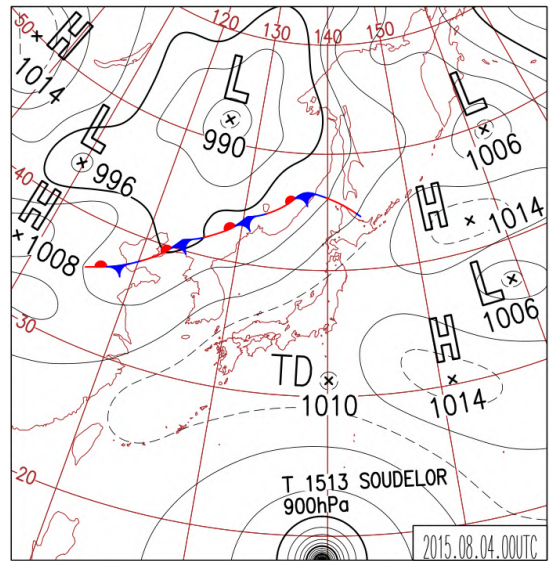
3.4.5 積雲急発達域の検出事例

2015年8月4日に関東内陸部で発生した熱雷時の地上天気図を第3.4.4図に示す。伊豆諸島には中心気圧1010hPaの熱帯低気圧、フィリピンの東には中心気圧900hPaの台風第13号(Soudelor)があり、太平洋高気圧の張り出しにより九州から本州にかけて晴れて気温が上昇し、大気の状態が不安定になっていた。そして、同日昼過ぎから、各地で雷雨が観測された。

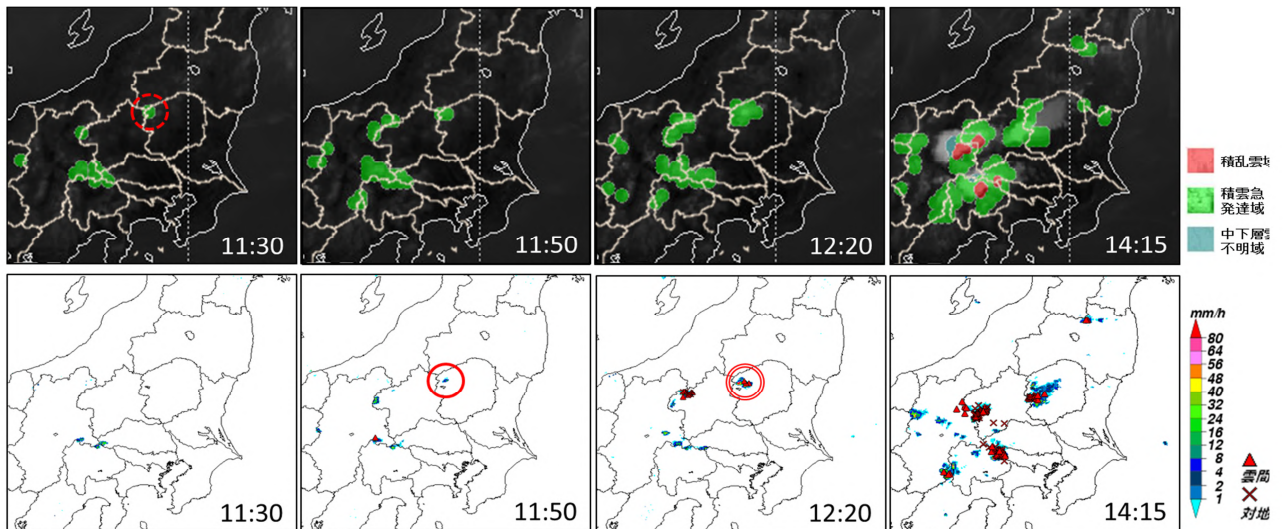
関東地方の山岳部の状況について、第3.4.5図に積乱雲情報プロダクト、レーダーエコー強度及び発雷分布を示す。群馬県と栃木県の県境付近において、積乱雲情報プロダクトで積雲急発達域が最初に検出されたのは、11時30分である。その20分後の11時50分にはレーダーエコー(赤丸内)、さらにその30分後の12時20分にはLIDENにより発雷が検知された(二重赤丸内)。14時15分になると、各地で積雲急発達域や積乱雲域が検出されており、激しい雷雨となっている領域と良く対応していることがわかる。

このように、積乱雲情報プロダクトは、特に夏季日中に熱雷が発生している領域を気象レーダーよりも早期に検出することが可能である。

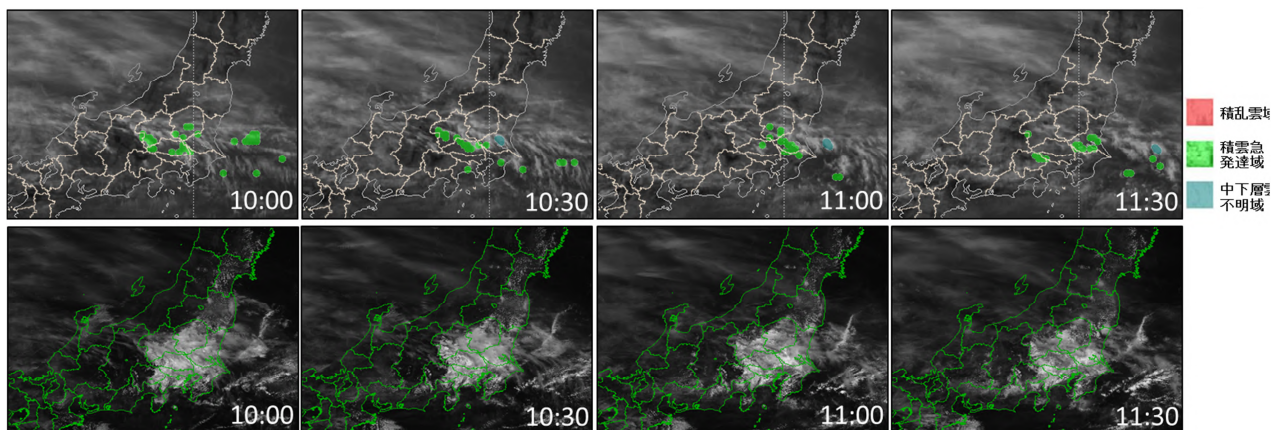
一方、第3.4.6図のように下層雲の上空を薄い上層雲が通過していく領域においては、雲頂の急上昇と誤判定し、積雲急発達域として検出されてしまうことがあるため、このような場合には取り扱いに注意が必要である。



第3.4.4図 地上天気図
(2015年8月4日9時)



第3.4.5図 積乱雲情報プロダクト(上段)とレーダーエコー強度及び発雷分布(下段)の比較(2015年8月4日)



第3.4.6図 上層雲による積雲急発達域の誤検出事例（2016年6月6日）

3.4.6 まとめと今後の課題

孤立した積乱雲に伴う発雷に対しては、積雲急発達域として比較的精度良く事前に検出できているが、低気圧や前線の周辺等で、下層雲の上空を上層雲が通過するときには誤検出が多くなっているため、雲の追跡アルゴリズム等の精度向上が必要である。また、冬季雷については、夏季の熱雷とは発雷機構が異なることから、検出パラメータの見直しも含めたアルゴリズムのさらなる改良が必要である。

3.5 積乱雲の監視事例

3.5.1 雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトの利用上の注意点*

一般に降水の監視にはレーダーや解析雨量、アメダスの実況値等が使われるが、衛星画像を使用した実況監視も有効である。特に衛星の優位点は、広域の監視が行えることにあり、レーダー観測の範囲外から移動してくる雨雲の監視には効果的に利用できる。ただし、レーダーの降水エコーと衛星画像から解析される雨雲の形状などは観測している対象が異なるため、必ずしも一致しないことに注意が必要である。

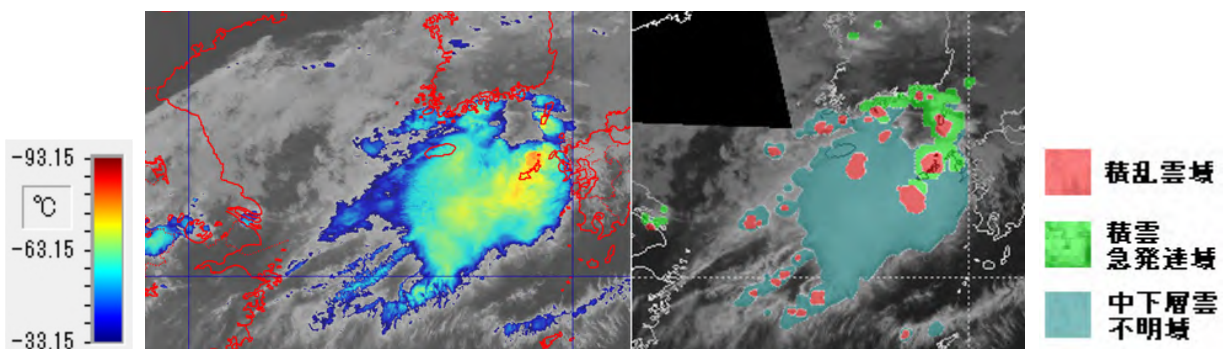
一方、府県単位のような狭域の監視にも衛星画像は利用できる。見逃しなどが無いよう、他の実況も併用して監視する必要があるが、雲頂強調画像は衛星画像を見慣れていない人でも発達した雲域がどの領域にあるのか判断しやすい。また、積乱雲情報プロダクトは積乱雲の位置や急発達中の積雲域を把握する手段として利用できる。3.3 節の解説のように衛星画像を狭域の監視や調査などに使用する場合は視差なども考慮に入れる必要がある。

なお、通常の監視では「衛星画像には視差がある」という認識は必要だが、あまり神経質に考える必要はない。特に複数の府県にまたがるような広域の監視では注目する雲域が積乱雲を含む雲域なのかを判断し、雲域の盛衰や移動などを監視することが重要である。

衛星画像を使って積乱雲を監視するには、RGB 合成画像や、以前から使ってきた赤外・可視画像などの利用が考えられるが、それぞれ一長一短がある。RGB 合成画像では可視画像や近赤外画像を使い日中の監視を中心に考えられたものが多い。日中の昇温などにより発生する積乱雲の監視には有効だが、積乱雲の発生は日中だけではない。そこで、24 時間連続して監視できる赤外画像（雲頂強調画像）と積乱雲情報プロダクト（3.4 節で解説）を使った方法を紹介する。

赤外画像は観測された輝度温度を画像の明暗で表し、輝度温度の低い雲は明るく（白く）、輝度温度の高い海面や地面は暗く（黒く）表示する。積乱雲は対流圏界面付近まで雲頂が達しているため、通常は上層雲などよりも輝度温度は低く、最も明るく（白く）表示される。しかし、同じように明るい（白い）画像を見て、どこが一番雲頂高度が高い、つまり輝度温度が低いのかを見分けるのは困難である。そこで、輝度温度の低い領域にだけ色を付け、微妙な変化でも色の違いで認識できるように考えられたのが、雲頂強調画像である。この雲頂強調画像は3.2.1 項で説明しているサンドイッチ画像とは違い、赤外画像だけを使い雲頂を強調したものである。

対流圏界面の高度は地域や季節などで変化する。青色から茶色までの色を付けた輝度温度の範囲は、240K ~ 180K としている。つまり、青色が付き始める輝度温度は 240K (-33.15)、茶色は 180K (-93.15) 以下ということになる。画像を監視する場合は暖色系の色ほど輝度温度が低いと考えれば良い。（第 3.5.1 図（左）のカラースケール参照）



第 3.5.1 図 2017 年 8 月 9 日 7 時のカラースケール付きの雲頂強調画像（左）と積乱雲情報プロダクト（右）

*山本 雅之（気象衛星センターデータ処理部解析課）

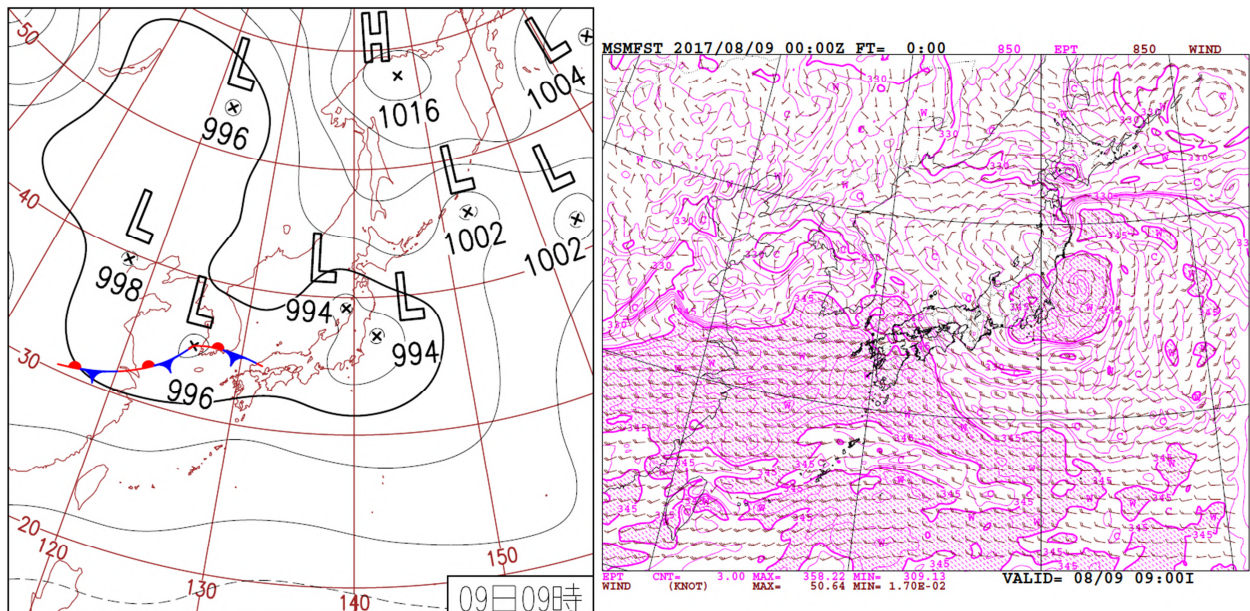
では、積乱雲を監視するときは何色に注目すれば良いだろうか。積乱雲を判別する決まった輝度温度があるわけではない。しかし、周辺に比べ特に輝度温度が低い領域は、積乱雲の発達により強い上昇流が起きているところである可能性が高いことや、上層雲に比べると一般的に積乱雲は輝度温度の時間変化が大きいことから、茶色から黄色までの暖色系の色の領域の変化や移動などを監視すれば良い。

ここで、3.4節で紹介した積乱雲情報プロダクトと雲頂強調画像（赤外）を比較してみよう。第3.5.1図は同時刻の雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトである。雲頂強調画像は赤外画像の輝度温度の低温域を強調した画像なので、積乱雲情報プロダクトと完全に一致するわけではない。しかし暖色系の領域と積乱雲情報プロダクトで積乱雲と判断された領域の対応は比較的良好いことがわかる。

3.5.2 積乱雲の監視事例（2017年8月8日～9日）*

[中国大陸東岸から東シナ海を経て九州地方に接近する積乱雲]

日本付近はオホーツク海に中心を持つ高気圧と日本の南の高気圧との間の気圧の谷の中にあり、9日朝には黄海で低気圧が発生し、前線を伴って東に進んでいる（第3.5.2図）。



第3.5.2図 2017年8月9日9時の地上天気図（左）と同時刻初期値のMSM850hPa風と相当温位（右）

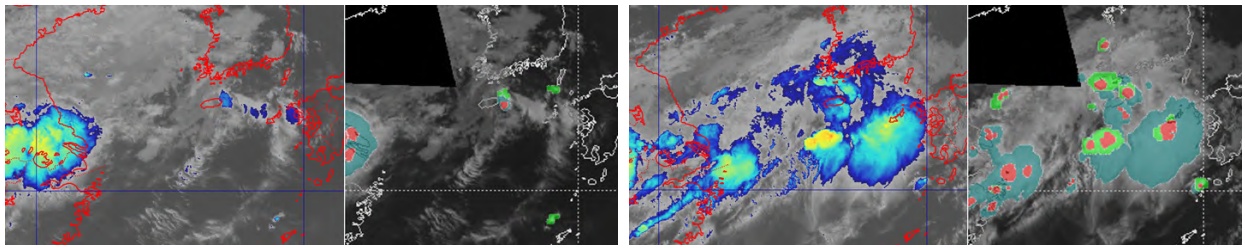
（右）図中のハッチは345K以上の領域

九州付近には、華中から東シナ海を経て下層暖湿気が流入しており、福岡の9日9時の高層観測では、850hPa相当温位345.6Kを観測している。華中から九州地方にかけては大気の状態が不安定となっていた。

8月8日9時から9日9時までの24時間で、中国大陸東岸付近で積乱雲が発生・発達し、九州付近に2度にわたり接近してきた。第3.5.3～3.5.5図は第3.5.1図と同様に同時刻の雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトを並べた図である。

*山本 雅之（気象衛星センターデータ処理部解析課）

【1度目の積乱雲接近：8月8日9時から20時頃】



第3.5.3図 雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトを並べた図 8日9時(左) 8日19時(右)

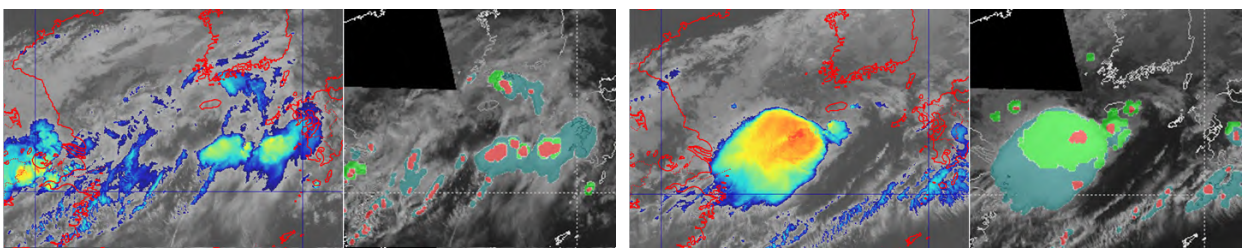
既に8日9時の時点で華中方面に活発な積乱雲域が発生している。雲頂強調画像ではこの様子が検知できているが、レーダー合成画像はまだ範囲外で、その様子はわからない。同一の雲が移動しているように見えるが、実際には雲域が進む前方(東側)で新たに積乱雲が発生し全体に東～東北東に移動している。12時50分頃に済州島付近で積乱雲が発生・発達し、30分後の13時20分にはレーダー合成画像の範囲に入ってきた(図略)。五島列島の福江のアメダスで降水が観測されたのは8日19時頃になってからであった。

このように、雲頂強調画像を用いれば、レーダーやアメダスで雨域を監視できる前から監視を強化して対応することができる。

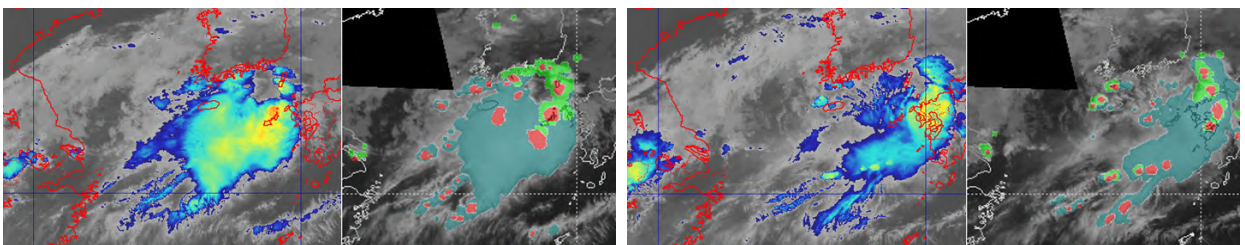
【2度目の積乱雲接近：8月8日21時から9日9時頃】

8日21時に華中方面において活発化している積乱雲域は、9日0時～3時頃にかけて直径が300～400kmの円形に近い雲域へと急速に発達した。3時頃から東端がレーダー合成画像の範囲に入ってきた。輝度温度で見ると3時以降は雲頂の輝度温度はやや上昇して雲頂高度の低下を示しているが、発達した積乱雲を伴って接近してきている。福江では6時～8時頃にかけて2時間あまりの間で14ミリの降水を観測した。

この積乱雲を含む雲域は、その後もあまり縮小せずに東に進み九州地方にかかってきた。



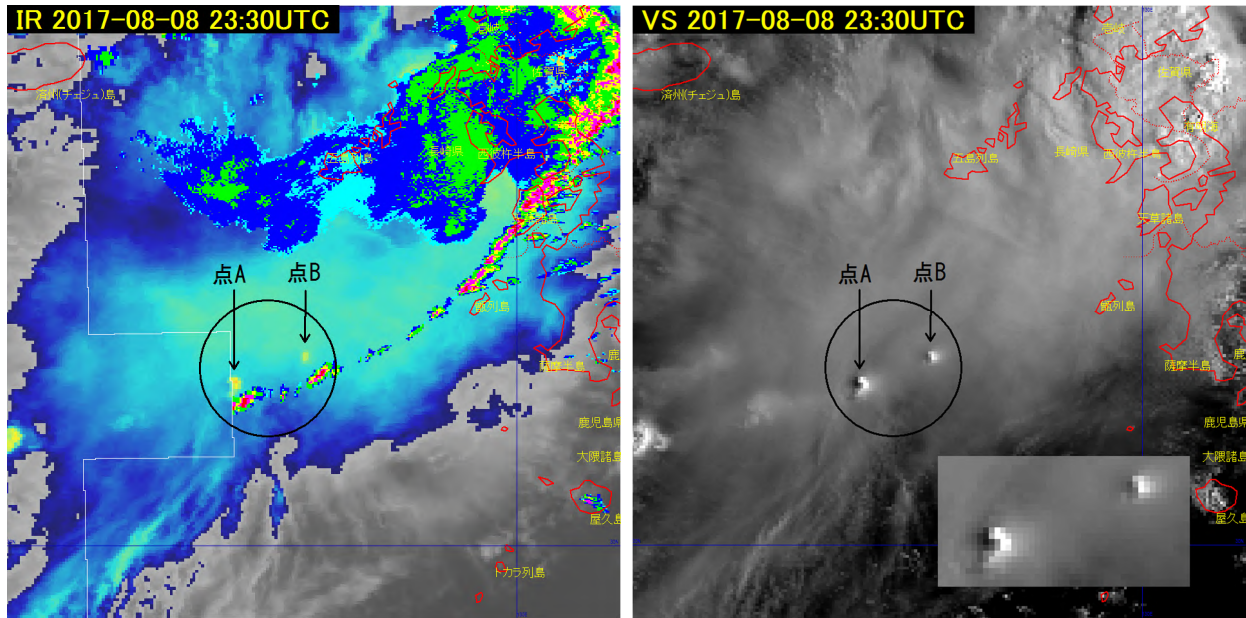
第3.5.4図 雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトを並べた図 8日21時(左) 9日3時(右)



第3.5.5図 雲頂強調画像と積乱雲情報プロダクトを並べた図 9日7時(左) 9日9時(右)

【視差】

積乱雲を含む雲域がレーダーの観測範囲に入った後も、雲頂強調画像や積乱雲情報プロダクトを使って監視を続けることはできる。その際には3.3節で解説した「視差」により、衛星から得られる情報とレーダーの観測との間に数 km の位置ずれがあることを考慮した監視が必要である。複数の府県にまたがる大きな領域では視差を考慮する必要性は低いが、活発な雲域に注目する時はおよその視差を加味した形で画像を確認すると良い。

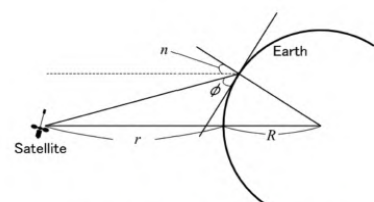


第 3.5.6 図 8月9日 8時30分の雲頂強調画像にレーダーエコーを重ねた図（左）と同時刻の可視画像（右）
黒い円内の雲域に注目する。（右）図中の右下は黒い円内を一部拡大した画像

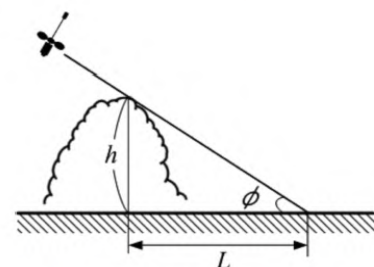
第 3.5.6 図（左）は雲頂強調画像にレーダーエコーを重ねたものである。九州地方から東シナ海にかけて線状にエコーが見られる。衛星画像では、第 3.5.6 図（右）のように可視画像で見てもレーダーエコーで見られるような線状の雲域を確認することはできないが、黒い円で示した中に白く輝く 2 つの突出した雲域が点のように見える。この部分は拡大すると太陽光が東から当たっていて、発達した積乱雲であると判断できる。この場所は雲頂強調画像では黄色から橙色に表示されている。

この 2 つの点は、線状のレーダーエコーに対応するものであると考えられるが、視差があることから位置がずれて見えていると考えられる。

3.3 節で紹介している、齊藤他（2013）の式を使用して視差の大きさを計算してみる。（注：この式は幾何学的関係（第 3.5.7 図）から求めた近似式である）



第 A2図 衛星とスキャン位置に関する幾何学的な関係を示す概念図。



第 A3図 積乱雲の雲頂 h とそれに伴う間延び距離 L を表す概念図。

第 3.5.7 図 視差の概念図

齊藤他（2013）より

$$L = \frac{(r+R) \sin n}{(r+R) \cos n - R} h$$

L：視差 r：地球表面から衛星までの距離

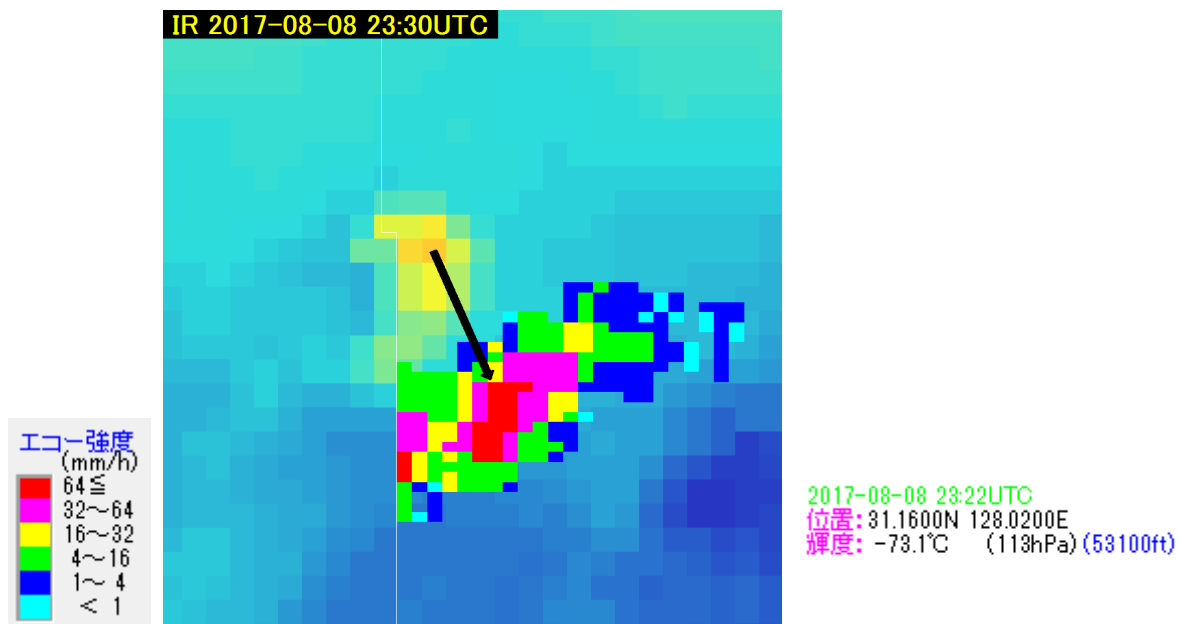
R：地球半径 n：衛星直下点を0度とした時の角度

h：雲の高さ

ひまわり8号の地球表面への投影位置は北緯0度、東経140.7度、r=35700km、R=6400kmである。

東シナ海の2つの雲域のうち点Aの雲域について、SATAID (Satellite Animation and Interactive Diagnosis) を使って位置と雲頂高度を計算すると、北緯31.16度、東経128.02度、雲の高さは53,100ft (16.185km) である。

視差について、東西・南北の成分に分けて考える。衛星直下点と東シナ海の雲域では、東西方向には12.68度、また南北方向には31.16度の角度差がある。従って視差の大きさは東西方向に約4.3km、南北方向に約11.9kmあることになる。ベクトル合成すると340度(北北西)約12.7kmの位置になる。第3.5.8図に示した黒い矢印が視差の大きさとなり、点Aと線状エコーが同じものであることが確かめられた。なお、視差補正をしてもエコー強度の強い部分と衛星画像の輝度温度が最も低い地点は完全に一致しないが、これは輝度温度から求めた雲頂高度の誤差や雲画像の観測時間とレーダー観測時間とのずれ、近似式や代入した衛星の位置などの誤差などによるものである。



第3.5.8図 雲頂強調画像とレーダーエコーを重ねた図(左)とSATAIDで測定した輝度温度情報(右)

(左) 図中の黒い矢印は雲の位置と高さ(右側の数値)を求め視差を計算し表示したもの

同じ場所に対する視差は雲の高さによる違いだけで大きさが決まる。第3.3.2図で自官署の緯度経度におけるおおよその視差を推定できるので、調査の際には考慮されたい。

3.5.3 積乱雲の監視事例(2017年8月3日~4日)*

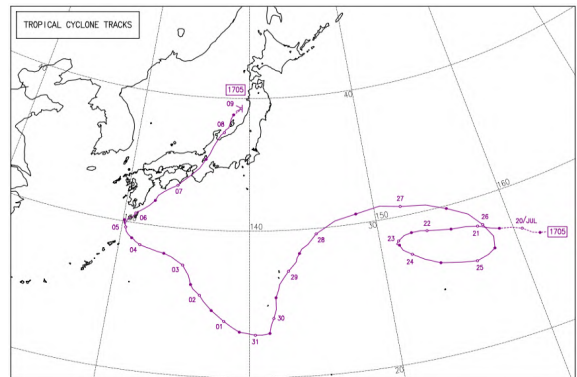
[日本の南から西日本に接近する台風に伴う積乱雲]

平成29年(2017年)台風第5号(Noru)は2017年7月20日21時に南鳥島の北東海上で発生し、8月8日21時に佐渡島付近で温帯低気圧に変わるまで、19日間と長寿の台風であった(第3.5.9図)。8月3日9時には日本の南海上にあって、中心気圧は945hPa、中心付近の最大風速は85ktであった(第3.5.10図)。ここでは、8月3日9時から4日9時にかけての台風に伴う積乱雲の監視について紹介する。

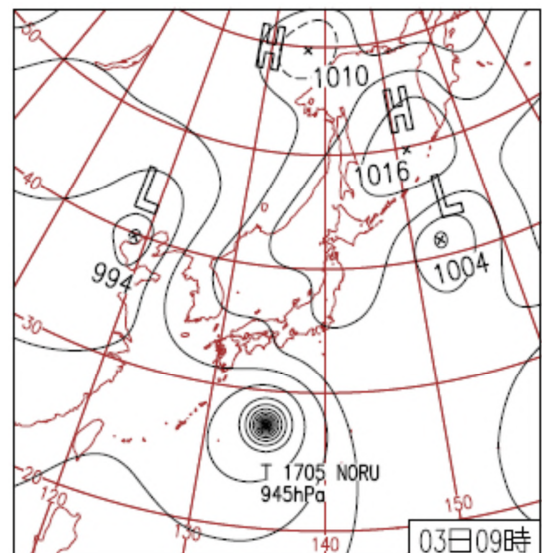
第3.5.11図はひまわり8号による衛星画像で、1段目が赤外画像(B13)、2段目が可視画像(B03)、3段目が赤外差分画像(B13-B15)、4段目がDay Convective Storm RGB合成画像、左列が3日9時、中列が3日15時、右列が4日9時となっており、眼の周りをバンド状の雲域が取り囲んでいる。

3日9時で北側の雲域Aは、赤外画像では主に白色で表示され、可視画像では半透明、赤外差分画像では主に黒色で表示されていることから上層雲主体の雲域であることがわかる。眼を取り囲むバンド状の雲域Bはいずれの画像でも主に白色で表示され、RGB合成画像では主に赤色~黄色で表示されていることから積乱雲域であることがわかり、黄色で表示されている雲域は特に対流活動が活発であることを示す。眼の中の雲域Cは、赤外画像では暗い灰色で表示され、可視画像や赤外差分画像では白色で表示されていることから雲頂高度が低い下層雲域であることがわかる。

3日15時で眼を取り囲む雲域の一部(雲域D)は、赤外画像と赤外差分画像では主に白色で表示され、RGB合成画像では赤色で表示されていることから積乱雲が発達しているように見える。しかし、可視画像では半透明である雲域を含むので上層雲が主体となっていて、積乱雲はその一部が衰弱している。4日9時の赤外画像、可視画像、赤外差分画像で、眼を取り囲む雲域の一部(雲域E)が更に白色を増しながら広がり、RGB合成画像では黄色で表示されていることからその部分の積乱雲は発達していることがわかる。このように、画種の異なる画像を比較することで積乱雲を判別し、画像の時間変化により積乱雲の衰弱や発達を監視することができる。

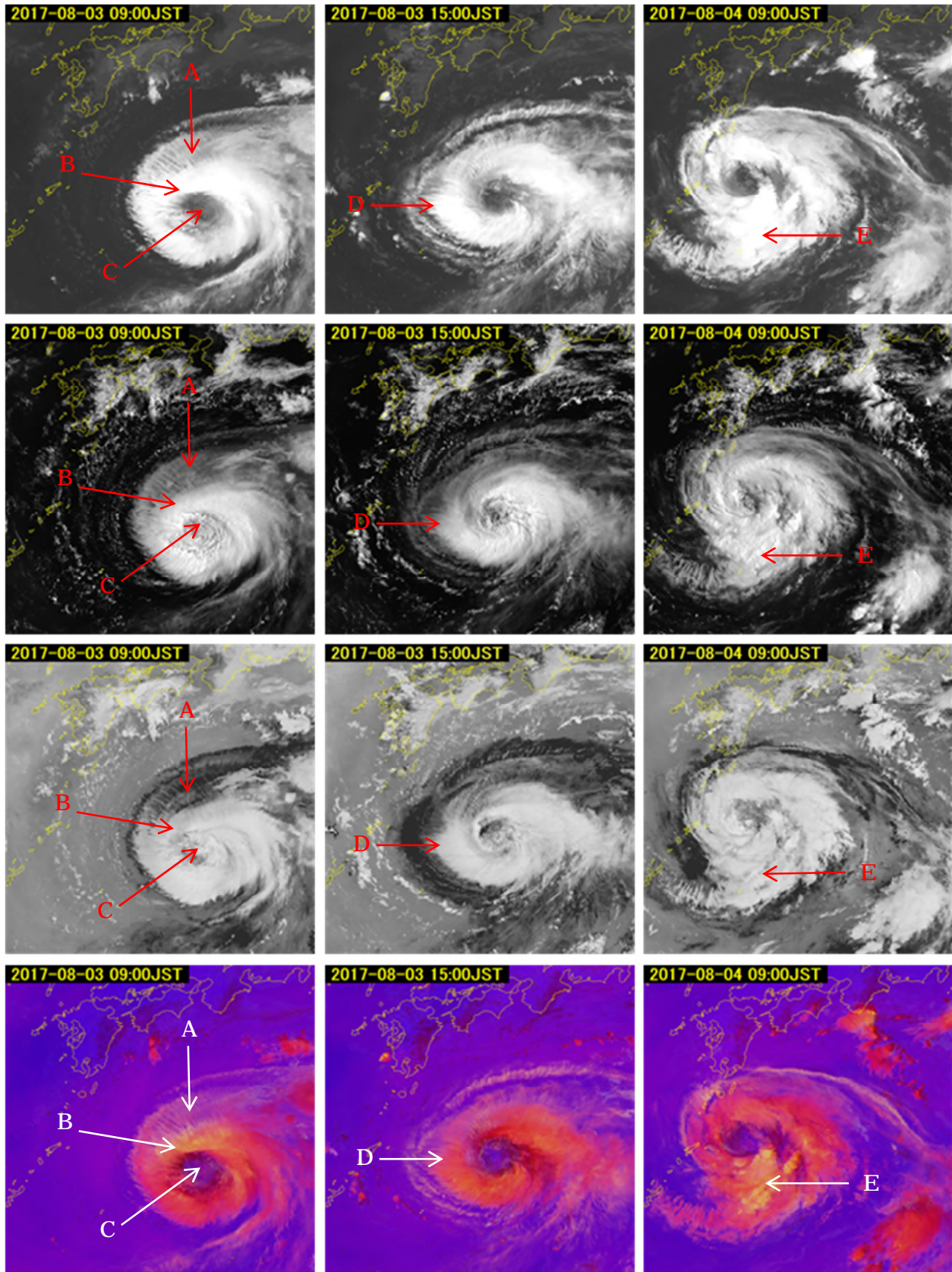


第3.5.9図 2017年台風第5号の経路図



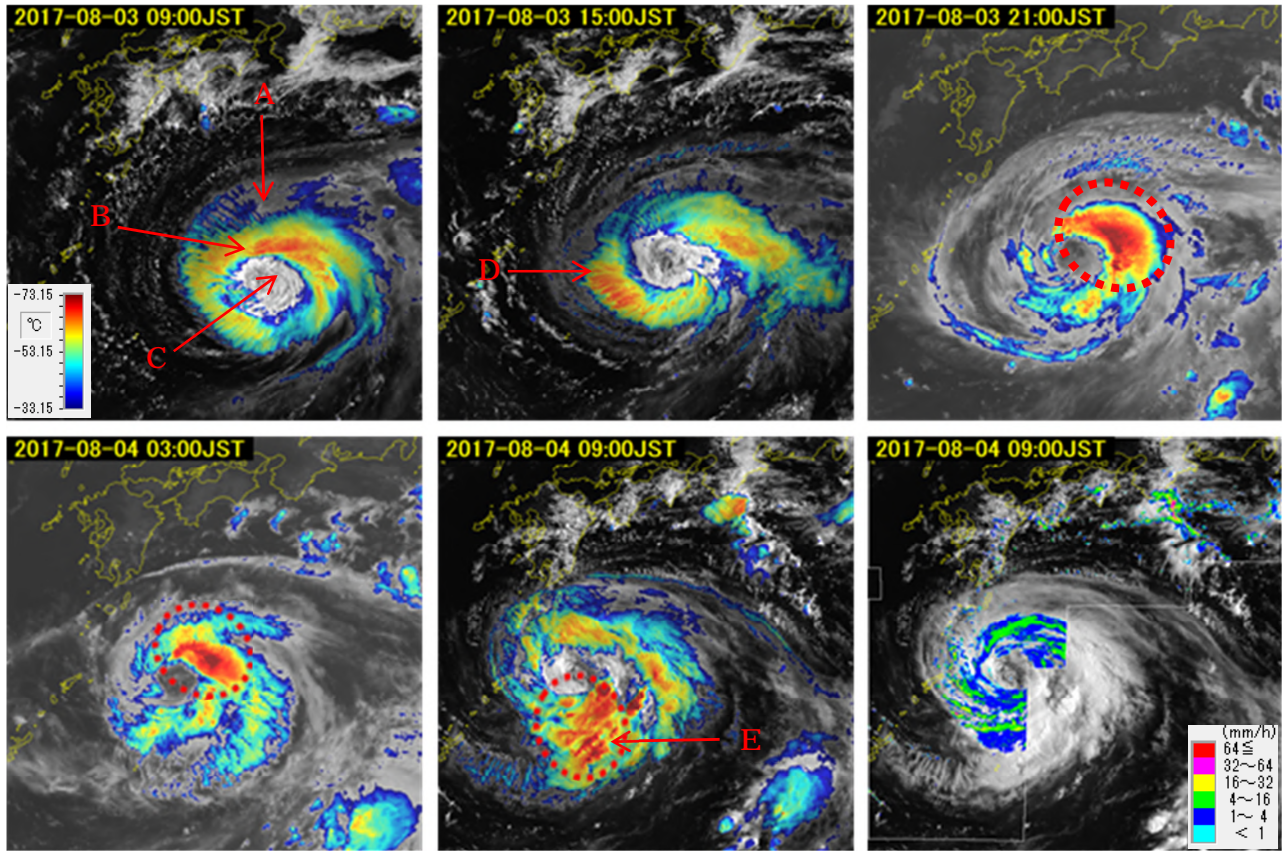
第3.5.10図 地上天気図(2017年8月3日9時)

*佐々木 勝(気象衛星センターデータ処理部解析課)

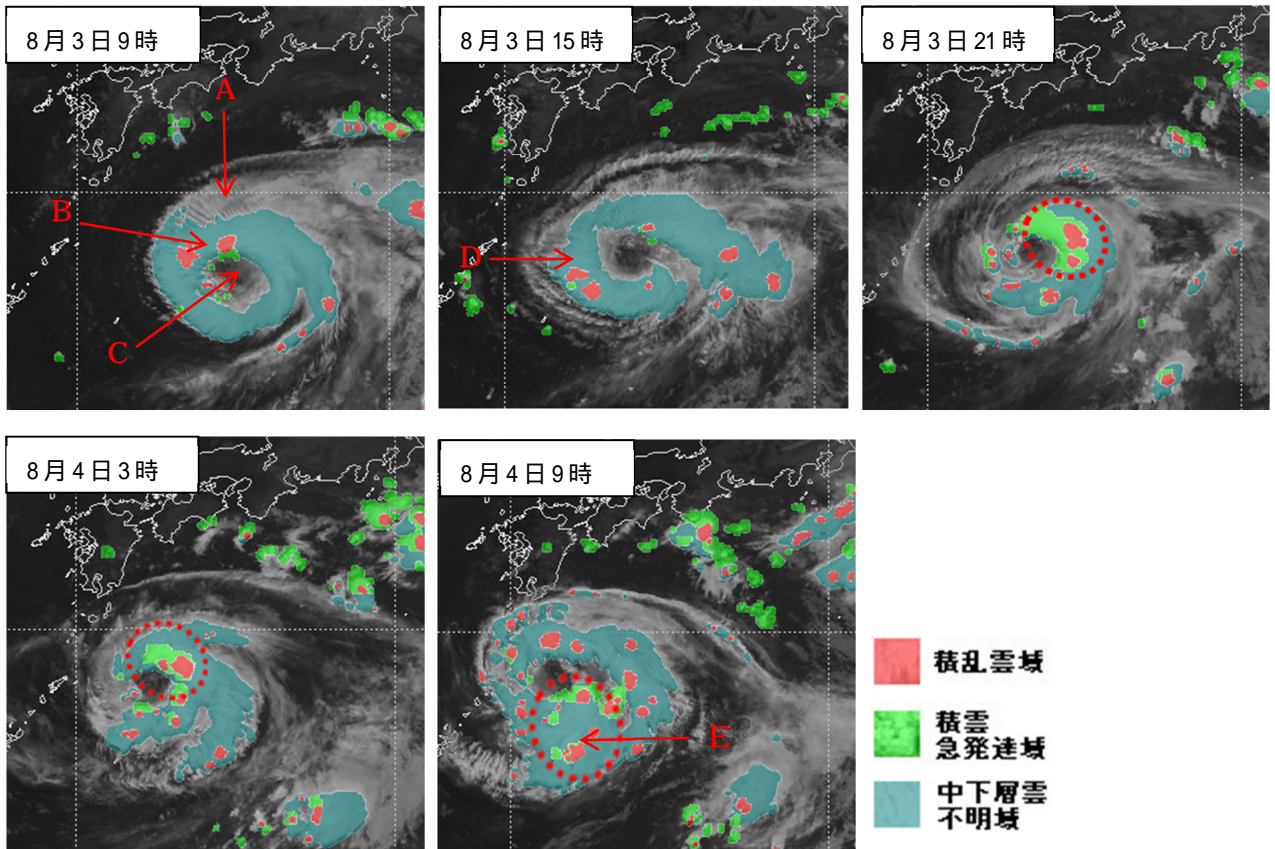


第 3.5.11 図 ひまわり 8 号の衛星画像 (2017 年 8 月 3 日 9 時 ~ 4 日 9 時)

1 段目 : 赤外画像 (B13)、2 段目 : 可視画像 (B03)、3 段目 : 赤外差分画像 (B13-B15)、
 4 段目 : Day Convective Storm RGB 合成画像



第3.5.12図 雲頂強調画像（2017年8月3日9時～4日9時） 右下：レーダー合成画像（4日9時）



第3.5.13図 積乱雲情報プロダクト（2017年8月3日9時～4日9時）

第 3.5.12 図は 8 月 3 日 9 時から 4 日 9 時までの 6 時間毎の雲頂強調画像 (3.2.1 項参照) と 4 日 9 時のレーダー合成画像、第 3.5.13 図は同じく 8 月 3 日 9 時から 4 日 9 時までの積乱雲情報プロダクト (3.4 節参照) である。雲頂強調画像で輝度温度が急速に低くなっているところ (図中の破線丸印) は発達した積乱雲域で、積乱雲情報プロダクトでも積雲急発達域として比較的良好に表現されている。

3 日 9 時の雲頂強調画像では、第 3.5.11 図の雲域 B に相当するところの輝度温度はかなり低く、雲頂高度が高いことが表現されている。従って、積乱雲が発達していることがわかるほか、積乱雲情報プロダクトでも積乱雲域を示す赤色として表現されている。

3 日 15 時の雲頂強調画像では、第 3.5.11 図の雲域 D に相当するところも輝度温度はかなり低く、積乱雲情報プロダクトでも赤く表現されている。しかし、第 3.5.11 図の説明で示したように、赤く表現されているのは上層雲が主体で、積乱雲が発達しているわけではない。

4 日 9 時の雲頂強調画像では、第 3.5.11 図の雲域 E に相当するところは急速に輝度温度が低くなり、積乱雲情報プロダクトでも急発達域として表現されていることから積乱雲が発達していることがわかる。

以上のことから、台風に伴う雲域がレーダー観測範囲外にある場合でも雲頂強調画像や積乱雲情報プロダクトなどの客観資料を経過観察することで積乱雲の盛衰や移動などの動向を把握できる。そのほかに赤外画像、可視画像や赤外差分画像なども併用して積乱雲か否かを判別することも監視上重要である。

ただし、3.3 節で説明されているように衛星画像には雲頂高度による視差が生じるため、衛星画像で見られる積乱雲域と強雨域の位置ずれも考慮する必要がある (第 3.5.14 図)。例えば、4 日 9 時の積乱雲情報プロダクトにおける雲域 E の積乱雲域の輝度温度は -70 以下で雲頂高度は約 15km に達するため、その南東へ 10km ほどずらしたところに強雨域が対応すると考えられる。



第 3.5.14 図 視差の大きさ (雲頂高度 15km の場合) と方向の代表例

3.6 おわりに*

今回の予報技術研修テキストは、ひまわり 8 号の各種衛星画像を利用した積乱雲の監視について取り上げた。ひまわり 8 号では、高解像度、高頻度観測の画像が得られ、小規模スケールや短時間に変化する気象現象が詳細に把握できるようになった。また衛星センサーの多バンド化により、各種 RGB 合成画像等のカラー画像も利用できるようになった。上記のようなひまわり 8 号の利点は、局所的で短時間に変化する積乱雲やシビア現象などの監視においていっそうその威力を発揮する。これまでのひまわり 6 号・7 号の観測では捉えられなかった現象が、新たに捉えられる可能性が出てきた。

また、発達して雲頂高度が高くなる積乱雲の監視では、「視差」の影響も無視できない。特にレーダーや LIDEN などの観測データを併用して利用する場合には、「視差」の影響も考慮して取り扱う必要がある。

ところで、高頻度観測の画像から作成した「積乱雲情報プロダクト」は、積乱雲監視において有力なツールになる。この衛星プロダクトを有効に活用することは、積乱雲監視作業の効率化にもつながると期待される。最後の節には、具体的な積乱雲の監視事例を紹介した。これについても参考にさせていただき、ひまわり 8 号の新しい衛星画像やプロダクトについて、いっそう理解を深めていただければ幸いである。

参考文献

- 寺坂義幸, 2016: ひまわり 8 号 RGB 合成画像の基礎. 平成 27 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 123-136.
- 寺坂義幸, 2017: ひまわり 8 号 RGB 合成画像による霧の監視. 平成 28 年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 101-114.
- Murata, H., 2016: Himawari-8 True Color Reproduction Image, RA II WIGOS Project Newsletter Vol. 7, No.2, 7-10. (http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/ra2wigosproject/documents/RA_II_WIGOS_Newsletter_Vol7_No2.pdf)
- 齊藤洋一, 小林文明, 桂啓仁, 高村民雄, 鷹野敏明, 操野年之, 2013: ラピッドスキャンデータで見た積乱雲の一生, 天気, 60, 247-260.
- Sumida Y., H. Suzue, T. Imai, and A. Sobajima, 2017: Convective cloud information derived from Himawari-8 data. Meteorological Satellite Center technical note, 62, 19-37.

*寺坂 義幸 (気象衛星センターデータ処理部解析課)

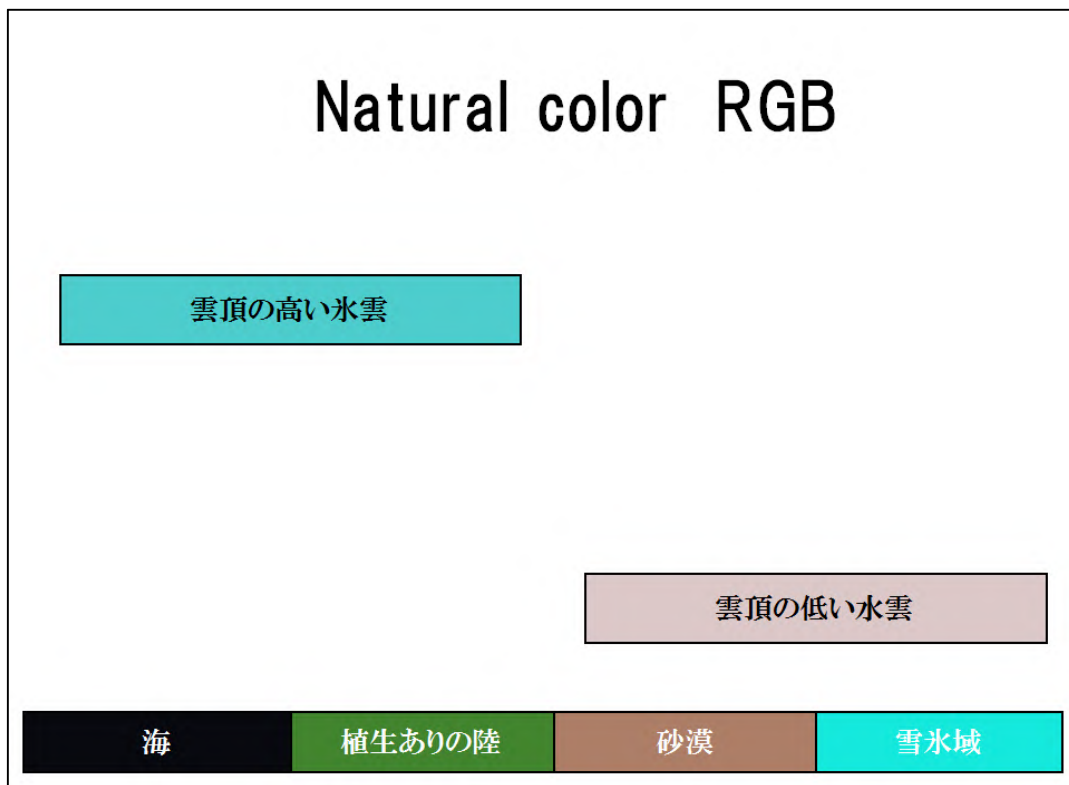
付録3

ひまわり8号・9号の観測バンド

バンド		中心波長 (μm)	ひまわり 6号・7号 相当	解像度 衛星直下点 (km)	階調数	用途
1	可視	0.47	VIS	1	2,048	植生、エアロゾル
2		0.51				植生、エアロゾル
3		0.64		下層雲・霧、植生		
4	近赤外	0.86		1	2,048	植生、エアロゾル
5		1.6		2		雲相判別
6		2.3				雲粒有効半径
7	赤外	3.9	IR4	2	16,384	下層雲・霧、自然火災
8		6.2	WV		2,048	上層水蒸気量
9		6.9			4,096	上・中層水蒸気量
10		7.3			4,096	中層水蒸気量
11		8.6			4,096	雲相判別、SO ₂ 検出
12		9.6			4,096	オゾン全量
13		10.4	IR1		4,096	雲画像、雲頂情報
14		11.2				雲画像、海面水温
15		12.4	IR2			雲画像、海面水温
16			13.3			2,048

積乱雲監視に利用する RGB 合成画像の色解釈

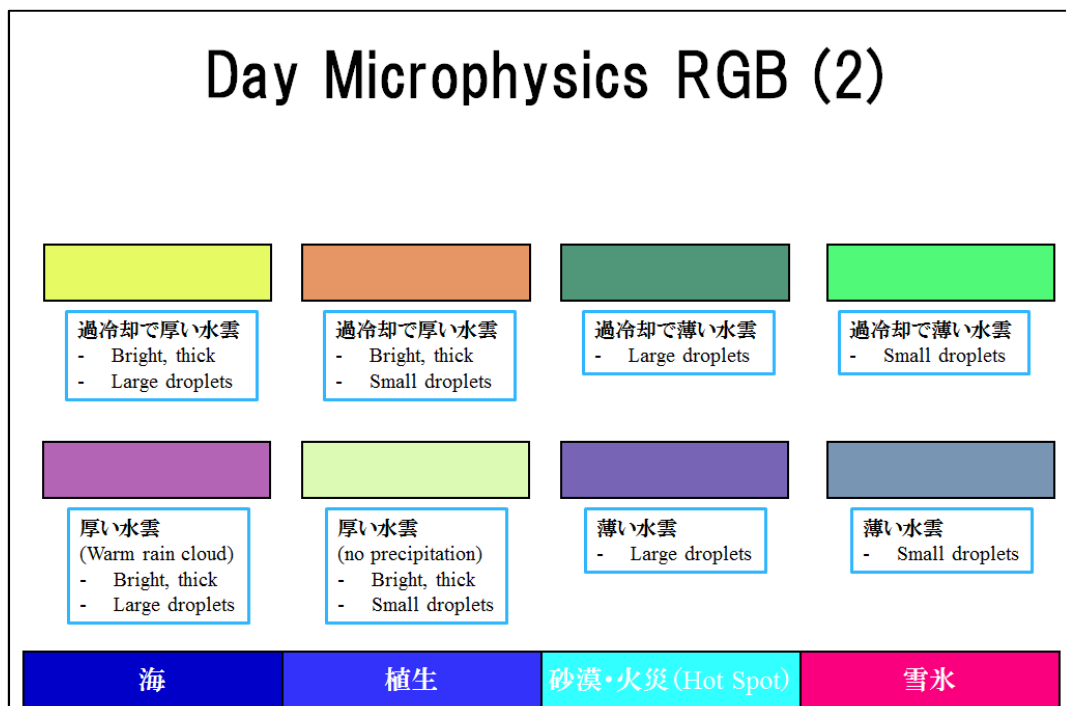
以下には、EUMETSAT で作成された各種 RGB 合成画像の色解釈(参考文献参照)の和訳版を示す。



Day Microphysics RGB (1)



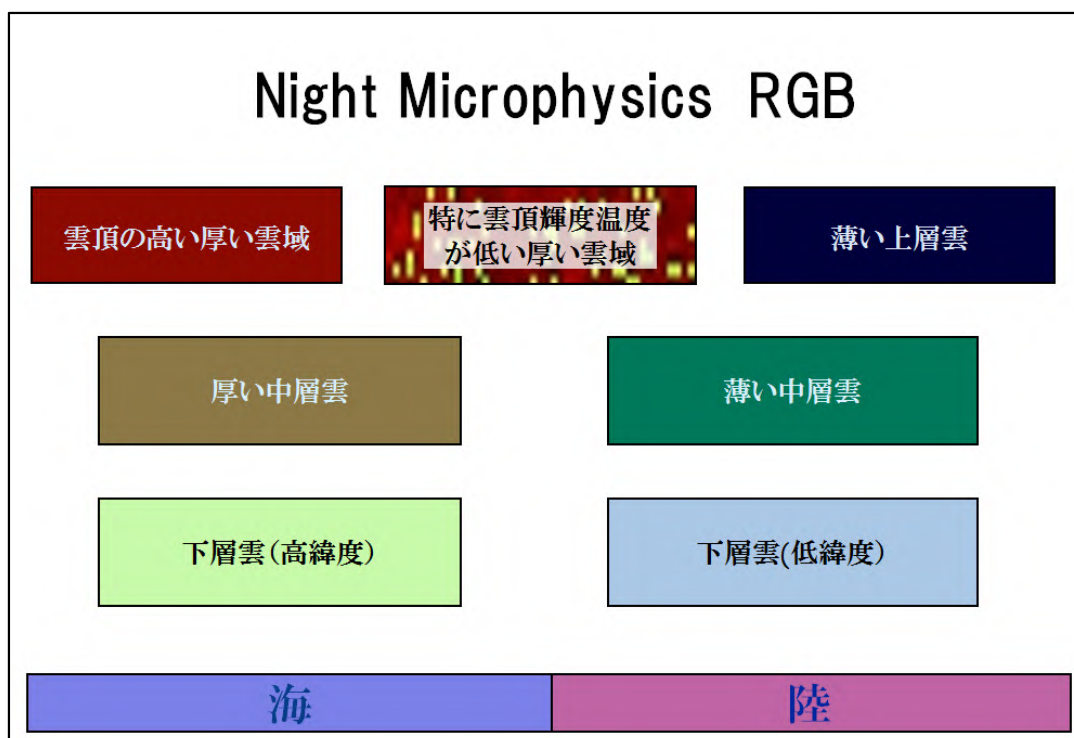
Day Microphysics RGB (2)



Day convective storm RGB



Night Microphysics RGB



参考文献

EUMETSAT MSG Interpretation Guide

(https://www.eumetsat.int/website/home/Data/Training/TrainingLibrary/DAT_2044069.html)

最終閲覧日 2017年12月18日

第4章 アジア太平洋地上天気図の標準的な解析手法

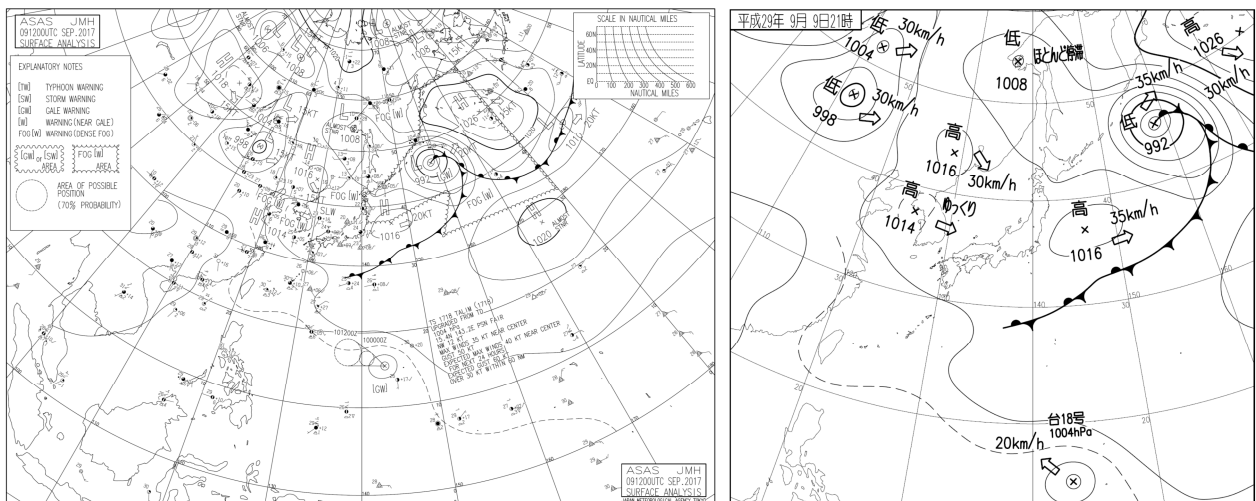
この章では、天気図（アジア太平洋地上天気図等）の標準的な解析手法について説明する。4.2 節で天気図解析の歴史を紹介し、4.3 節で低気圧及びそれに伴う前線に関する基本的な概念モデルを説明する。4.4 節で前線の定義や構造について説明する。そして、4.5 節で総観スケールの前線解析の具体的な方法について解説する。

4.1 はじめに*

(1) アジア太平洋地上天気図の作成目的と役割

気象庁では気象業務法のほか、国際的な協力の枠組み（「海上における遭難及び安全に関する国際的な制度」：GMDSS（Global Maritime Distress and Safety System）等）に基づき北西太平洋域の海上予報警報（海上強風警報[GW]、海上暴風警報[SW]、海上台風警報[TW]等）を発表しており、これらの海上予報警報は天気図解析に基づいて作成している。この解析の成果がアジア太平洋地上天気図であり、このうち日本付近の領域を抽出したのが速報天気図である（第4.1.1図）。

アジア太平洋地上天気図には二つの役割がある。一つは天気図解析の成果を公表する役割で、「アジア太平洋地上天気図（ASAS）」、「速報天気図（SPAS）」として船舶や報道機関等に提供される。もう一つは天気図解析を通して総観規模現象の推移を概観できる記録資料としての役割である。



第4.1.1図 アジア太平洋地上天気図（ASAS）（左）と速報天気図（SPAS）（右）

(2) 天気図の種類等

前項で示した解析の成果としての天気図に加えて、同じアジア太平洋領域の悪天予想天気図（アジア太平洋海上悪天予想図（FSAS24、48））も第4.1.1表のとおり作成している。これらの天気図は予報業務等に利用するほか、気象業務支援センターから各機関に配信され、TVやインターネット、新聞等を通じて国民に広く利用されている。また、アジア太平洋地上天気図（ASAS）、アジア太平洋海上悪天予想図（FSAS24、48）は、気象無線模写通報（JMH）で定期的に放送され、船舶等の交通機関の安全運航に役立てられている。03UTCの天気図解析では、解析結果を基に予報及び警報事項を作成し、NHKラジオ第2放送の「漁業気象通報」として、1日1回放送されている。

*長田 栄治（気象庁予報部予報課）

これらの地上天気図は、高・低気圧等の動きから実況と今後の天気の推移を、等圧線の走向、間隔から風の流れや強さを、前線から天気の急変等の悪天域を把握することができるため、手軽に気象状況を把握できる資料としてその存在価値は大きい。なお、この章ではアジア太平洋地上天気図・速報天気図・アジア太平洋海上悪天予想図をまとめてアジア太平洋地上天気図等と記す。

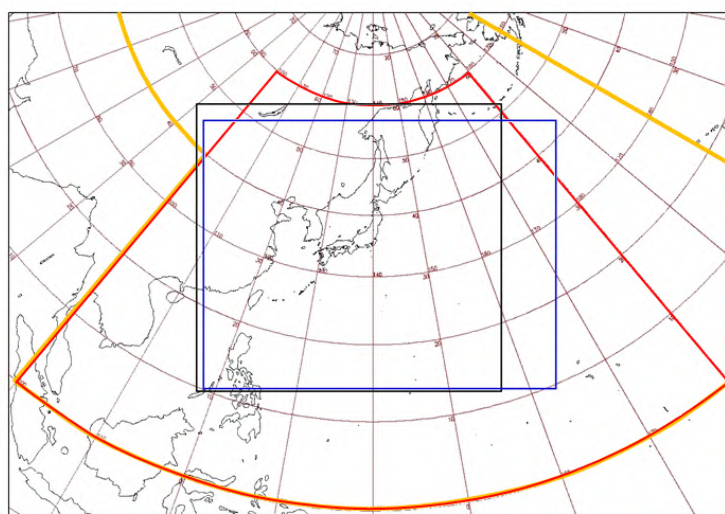
第 4.1.1 表 天気図の種類

天気図の種類	解析時刻
アジア太平洋地上天気図 (ASAS)	00、06、12、18UTC の 1 日 4 回
速報天気図 (SPAS)	00、03、06、09、12、18、21UTC の 1 日 7 回
アジア太平洋海上悪天予想図 (FSAS24、FSAS48)	00、12UTC の 1 日 2 回

(3) アジア太平洋地上天気図等の基本的な作成ルール

アジア太平洋地上天気図等の解析領域は、北西太平洋域の海上予報警報を作成するという目的や日本付近の総観規模現象の推移を示す役割のため、ユーラシア大陸の一部を含めたアジア太平洋領域を対象としている(第 4.1.2 図)。また、アジア太平洋地上天気図等で解析する擾乱や前線は、メソ スケールから総観規模、すなわち、水平スケールは数百 km 以上、時間スケールは 12 時間程度以上持続するものを対象としている(第 4.1.3 図)。

アジア太平洋地上天気図等における等圧線は 1000hPa を基本に 4hPa ごとに細実線、20hPa ごとに太実線を用いて描画している。補助線は、4hPa ごとの等圧線では表現できない気圧の谷や尾根を表現する場合等に、必要に応じて 2hPa ごとに破線で描画する。補助線を用いる具体的な目安としては、緯度経度で約 15° × 15° 以上の領域に実線の等圧線がない場合としている。高気圧・低気圧の中心気圧は 2hPa 単位で解析することを原則とする。ただし、高気圧が二つに分かれている等、中心気圧が奇数でしか解析できない場合は、奇数値を採用することがある。台風の中心気圧については、990hPa 未満の場合は 5hPa 単位で、990hPa 以上の場合には 2hPa 単位で解析する。ただし、陸地等の確かな気圧データが存在する場合は 1hPa 単位で解析することもできる。



第 4.1.2 図 各種天気図の解析領域

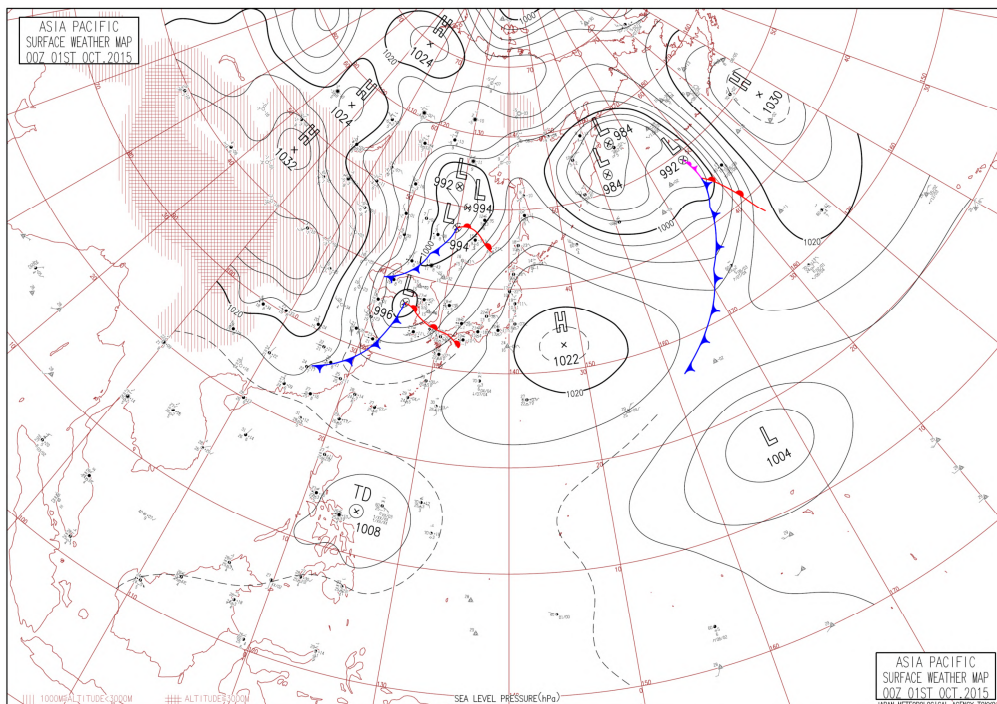
オレンジ線が ASAS、黒線が SPAS、青線が漁業気象通報、赤線が北西太平洋域の海上予報警報の領域

スケール		空間	時間					
			1月	1日	1時間	1分	1秒	
総観規模	大規模	10 ⁴ km	(エルニーニョの影響) 定常波 超波長 潮汐波 プラネタリー波 プロッキング					
		2×10 ³ km	長波 低気圧 高気圧					マクロα スケール
	中間規模	2×10 ² km		前線 台風 熱帯低気圧				マクロβ スケール
中小規模	メソ スケール (中規模)	2×10 ¹ km			海陸風 集中豪雨 スコール			メソβ スケール
		2 km			雷雨 内部重力波 晴天乱流			メソγ スケール
	200 m				竜巻 積乱雲			マイクロα スケール
	20 m					つむじ風 ビル風		マイクロβ スケール
							ブリューム 乱流	マイクロγ スケール
日本の分類		WMOの分類	気候スケール	総観及び 惑星スケール	メソ スケール	マイクロスケール	オランダスキ ーの分類	

第 4.1.3 図 現象の空間・時間スケールの分類

(4) 再解析による気象庁天気図の作成

アジア太平洋地上天気図の解析は解析時点までに入電したデータや実況経過を用いて行ういわば“速報的な解析”である。このため解析の数日後には、解析終了後に入電したデータも用いて天気や気圧系の推移を確認し、総観規模現象の推移の概要が把握できる気象庁天気図を完成させる。作業を終えた気象庁天気図(第 4.1.4 図)は気象庁で 10 年間保管した後、国立公文書館に移管し永年保存となる。また、気象庁天気図は気象証明・気象鑑定資料となるほか、国内外の研究機関における研究資料等としても利用されている。



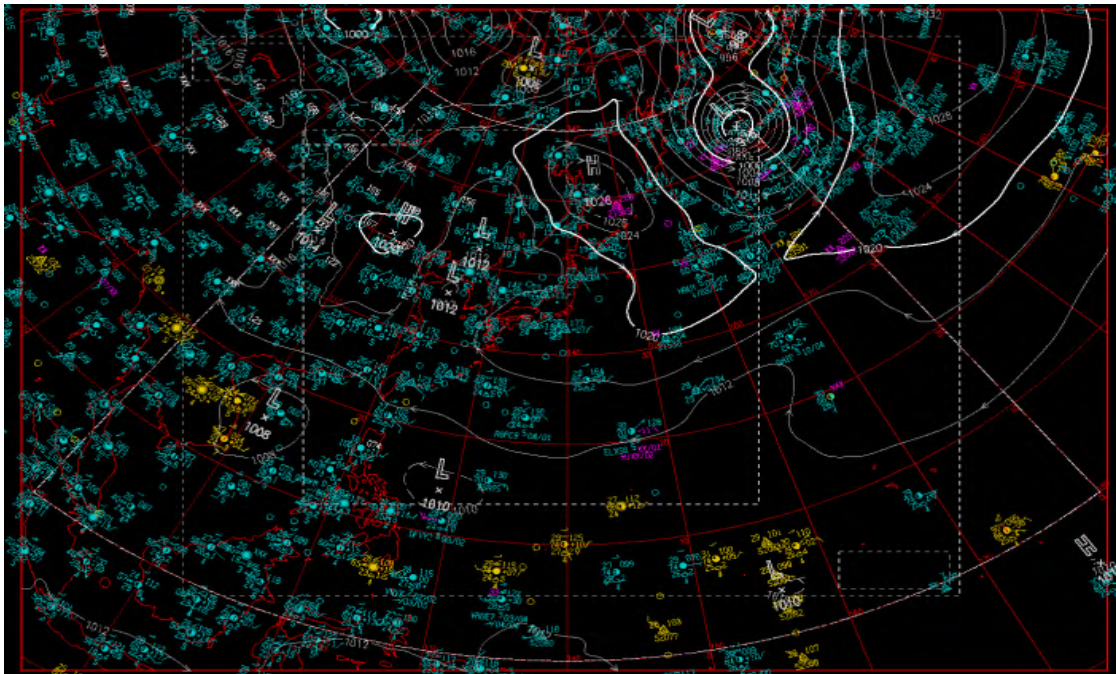
第 4.1.4 図 気象庁天気図

4.2 気象庁における天気図解析の歴史*

(1) 解析ツールの変革

1996(平成8)年2月以前は、アジア太平洋地上天気図等は、あらかじめ決めた特定地点の地上・海上の実況観測データを記入した天気図に、解析者が手描きで等圧線・高気圧・低気圧・台風・前線等を解析して作成していた。作業に当たっては、解析者は地上・海上の実況観測データ及び高層観測データ、レーダー画像、衛星画像等の実況資料と、低気圧の概念モデルを頭の中で整合しながら等圧線や前線を解析していた。当時、高層天気図、レーダー画像、衛星画像は異なる図法や縮尺で提供されていたため、解析者はそれぞれの図を見比べ、頭の中でそれらを組み合わせる等の技術が必要であった。

1996(平成8)年3月1日以降、天気図解析作業は計算機を用いたマンマシン処理(TKS: 天気図解析システム)で行うことになり現在に至っている。このシステムの導入により、実況資料や、数値予報モデルによる各層の高度、温度、湿数等の推定値を地上天気図に重ねて表示・作業できるようになった。また、このシステム上で前後の時刻の天気図の等圧線・前線の重ね合わせ等もできるため、作業の効率化が図られた。



第4.2.1図 TKSでの天気図解析作業画面

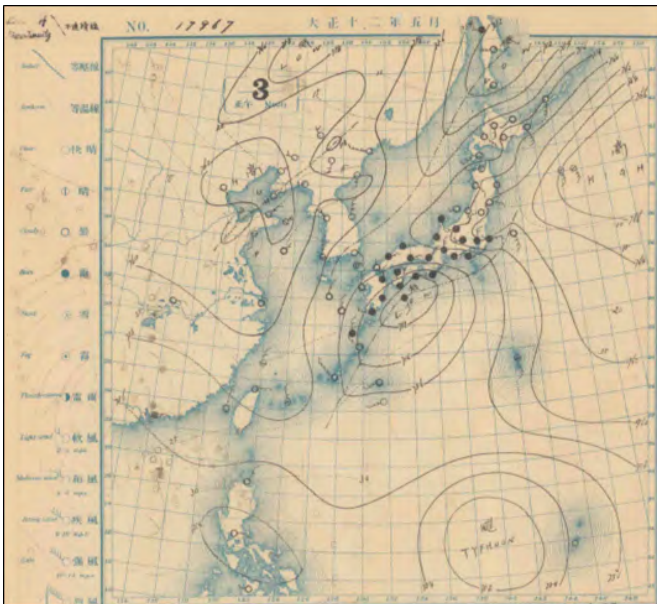
天気図解析システムを用いた等圧線解析は、解析のベースとして画面上に数値予報モデルによる第一推定値が表示され、解析者は実況資料等を基にこの等圧線を修正している(第4.2.1図)。一方、前線解析では数値予報モデルによる明示的な第一推定値はなく、解析者が実況資料や、数値予報モデルによって計算された要素(例えば、上空の等温線や等相当温位線等)の分布を考慮し、総合的に判断して解析している。Uccellini(1992)の報告にもあるとおり、前線の解析においては常に複数の解釈が存在する。このため、気象庁ではできるだけ均質な解析に基づく天気図を提供することを目指し、前線とそれに付随する低気圧について、次節で述べるベルゲン学派の概念モデルを基本に解析している。

*長田 栄治(気象庁予報部予報課)

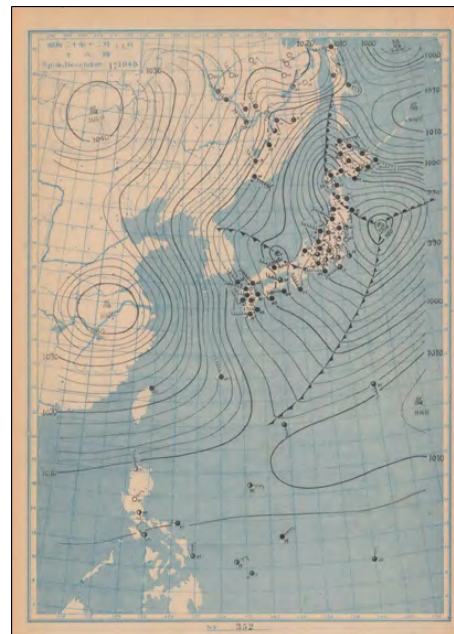
(2) アジア太平洋地上天気図上での前線解析手法の歴史

気象庁の天気図における前線解析手法には、その時代の気象学を反映した特色が現われている。ここで気象庁の天気図における前線解析手法の歴史について簡単に振り返ってみる。

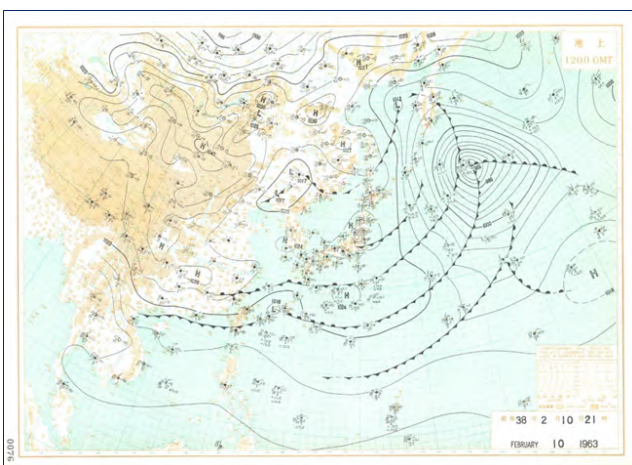
気象庁の天気図に初めて前線が登場したのは、1945(昭和20)年12月17日(第4.2.3図)で、それまでは、第4.2.2図(1923(大正12)年5月3日12時)の天気図例にあるように“不連続線”として解析していた。前線を解析することとしたのは、ベルゲン学派の温帯低気圧の発達モデルを踏まえて温帯低気圧の発達ステージを表現することと、前線付近での降水の強まりや風向風速の急変等、顕著な気象現象を表現することが目的であった。その後、天気図における前線の解析は定着し、1960年代半ば頃までは前線を第4.2.4図のように解析していた時代もあった。その後、4.5節でも述べるように、気象衛星から取得した画像データの高度化や数値予報モデルの精度向上に伴って前線の考え方を整理し、1985(昭和60)年頃から現在のスタイルに近くなっている(第4.2.5図)。このように、その時代により、天気図で解析する前線数やその形態は変化している。



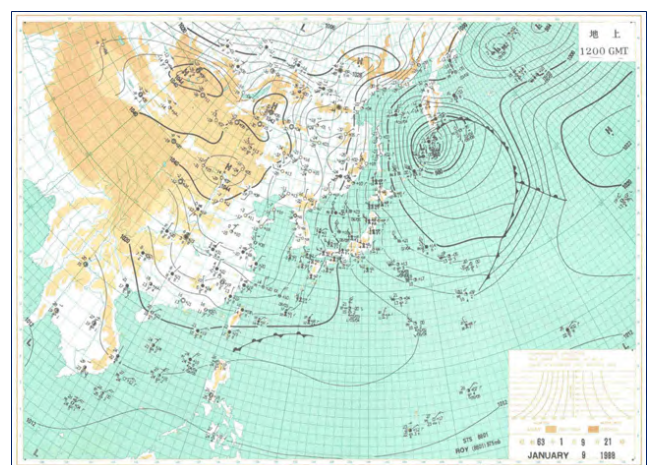
第4.2.2図 1923(大正12)年5月3日12時の地上天気図



第4.2.3図 1945(昭和20)年12月17日18時の地上天気図



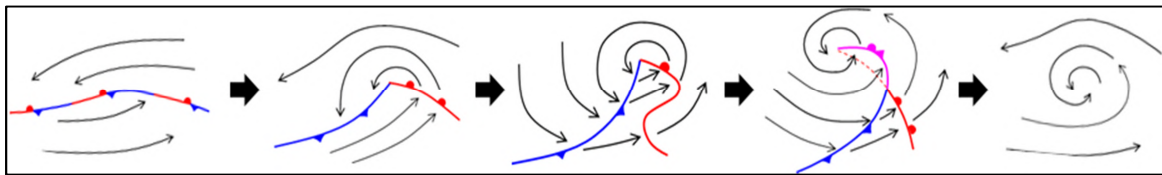
第4.2.4図 1963(昭和38)年2月10日21時の地上天気図



第4.2.5図 1988(昭和63)年1月9日21時の地上天気図

4.3 低気圧及びそれに伴う前線に関する基本的な概念モデル

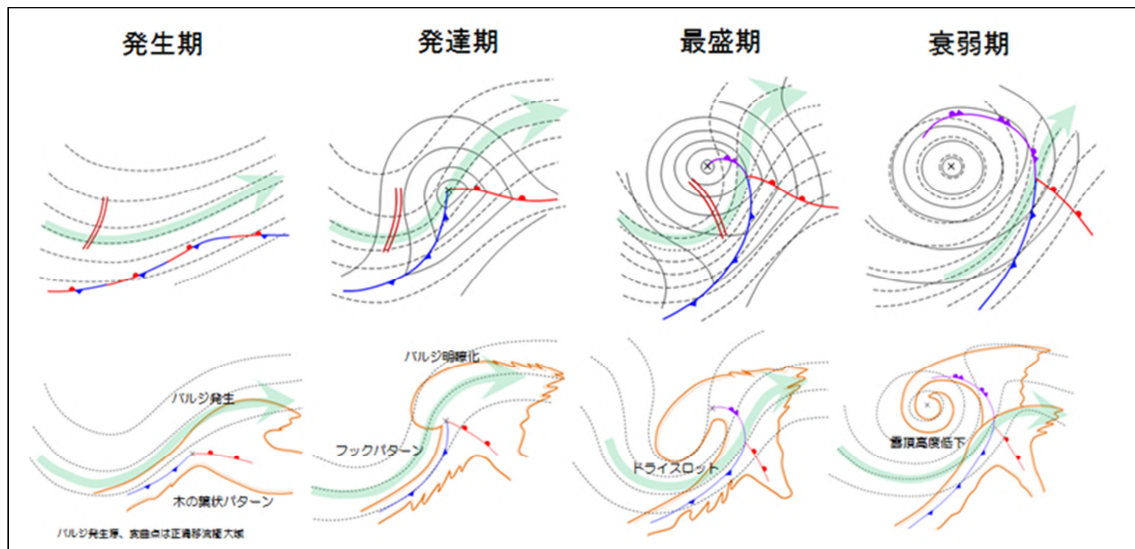
1920年代にJ.ビャークネスとゾルベルグにより温帯低気圧（以下、低気圧）の発生・発達・衰弱の諸段階を象徴的に表す「低気圧の一生」がモデル化（第4.3.1図）された（Bjerknes and Solberg, 1922）。彼らの概念モデルは「ベルゲン学派の低気圧モデル」と呼ばれ、力学的不安定により前線上に発生する波動が発達し低気圧になるという説を基本としている。この概念モデルでは、低気圧は前線上の不安定な波動として発生して、温暖前線、寒冷前線が形成され、発達の過程で寒冷前線は動きの遅い温暖前線に追いつき、2つの前線の間にあった暖域の空気の一部が切り離され、下層で2つの前線が接触する領域に閉塞前線が形成される。この段階で低気圧は最盛期にあるが、その後、低気圧は寒気で覆われて前線が消滅し、最後は寒気場内の渦巻となり消滅する。この概念モデルは、現在でも天気図解析の実務で中心的役割を果たしている。



第4.3.1図 ベルゲン学派による温帯低気圧の一生の概念モデル

矢印は流線を示す。

気象庁では、ベルゲン学派の低気圧モデルを基本に、傾圧不安定波の理論（Charney, 1947）（Eady, 1949）から低気圧が発生・発達・衰弱のどのステージにあるのかを考慮して、実況資料と立体的な整合を図りながら、低気圧及びそれに伴う前線の解析を行っている。第4.3.2図は、低気圧の一生について典型的な例として、低気圧の各ステージにおける上空のジェット気流や高度場、雲パターンとの対応を示した模式図である。



第4.3.2図 ベルゲン学派の概念モデルを基にした低気圧の一生の模式図

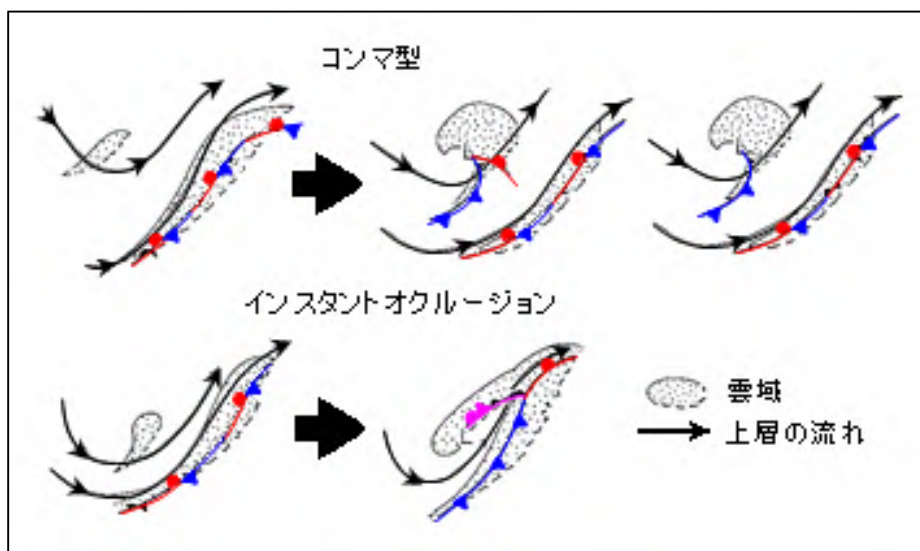
上段は地上等圧線と上層の等高度線、ジェット気流、前線の模式図、下段は雲域と上層の等高度線、前線の模式図で、実線は地上等圧線、点線は上層の等高度線、緑矢印はジェット気流、二重太線は上層の気圧の谷を示す。

*長田 栄治（気象庁予報部予報課）

発生～発達初期では、上空の気圧の谷の接近で低気圧が発生する。衛星画像では、気圧の谷の接近により、バルジが発生する。発達期では、上空の気圧の谷の深まりとともに低気圧性の渦が強まり、地上では暖気移流、寒気移流が強まって前線が強化される。衛星画像では、バルジがさらに明瞭化すると共に、寒気の流入により低気圧の中心付近にフックパターンが形成される。最盛期では、上空の気圧の谷は地上の低気圧中心のすぐ西側まで接近してきて、寒冷前線が温暖前線に追いついて閉塞前線が形成される。衛星画像ではドライスロットが低気圧の中心付近まで入り込み、ドライスロットの流入点とバルジの北縁の交点付近に閉塞点が形成される。衰弱期では、上空の気圧の谷が低気圧中心のほぼ直上に位置し、低気圧が上層の流れから切り離される。その後、地上の低気圧は閉塞前線が低気圧の中心から離れて不明瞭化し、低気圧の渦だけが残る。衛星画像では暖気・寒気移流は弱まり、低気圧の中心付近では雲頂高度が低下して背の低い雲渦が形成される。

ベルゲン学派のモデル以外で、実際の低気圧や前線の発生・発達を説明するために他の概念モデルも取り入れて解析を行っている場合がある。例えば、前線の波動がない寒気場内では前線は解析しないが、第4.3.3図(上)のように寒気場内で発生するコンマ型の寒冷低気圧では前線を解析することがある。また、第4.3.3図(下)のように中上層の別々の流れに乗った雲域が合体して一つの低気圧として発達する即席閉塞(インスタントオクルージョン)について、前線を解析することがある。

なお、Shapiro and Keyser (1990) による前線断裂(低気圧が発達するにつれて低気圧中心付近の温暖前線、寒冷前線が断裂)やベントバック温暖前線(低気圧が更に発達して、温暖前線が寒冷前線の後方(西側)に回り込むように伸張する前線)といったベルゲン学派の低気圧モデルと異なる新しい概念モデルが提案されているが、この解析には詳細な観測データや検討が必要であるため気象庁のアジア太平洋地上天気図等では採用していない。



第4.3.3図 その他の低気圧の模式図

上段：寒気場内で発生するコンマ型の低気圧(中央は温暖前線と寒冷前線がある場合、右端は寒冷前線のみの場合)

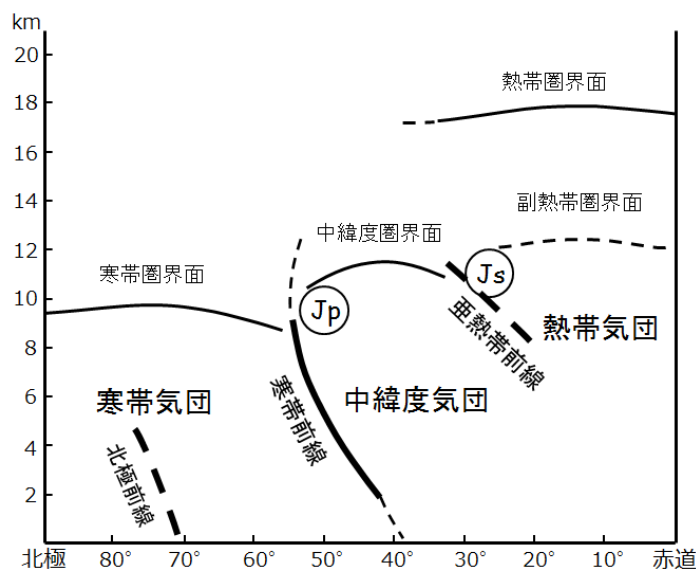
下段：インスタントオクルージョン(別々の上空の流れに乗った雲域が合体して一つの低気圧として発達)

気象衛星画像の解析と利用(2000)の図を一部加筆、修正。

4.4 前線の形成と解析*

4.4.1 前線の定義

前線は密度の異なる気団の境界として定義される。3次元的にみるとこの境界は面（前線面）をなし、前線面と地表面の交わる線が地表面の前線である（今後、この節では特段の説明がない限り“地表面の前線”を“前線”と記す）。気団とは広い範囲にわたり気温や水蒸気量がほぼ様な空気の塊であり、空気塊が気温等の物理特性のほぼ様な広い地域に滞留することで形成される。気団は存在地域の特性により、海洋性・大陸性、寒帯性・熱帯性に大別できる。また、大気大循環の観点から熱帯気団・中緯度気団・寒帯気団に分けることもできる。Palmen and Newton(1969)は、子午面断面における前線とジェット軸・気団の位置関係を第4.4.1図のように模式化した。熱帯気団と中緯度気団の境に亜熱帯前線が、中緯度気団と寒帯気団の境に寒帯前線が存在する。ジェット軸は温度風の関係により、それぞれの前線の上方に位置している。密度とは主として温度に依存するものである。気団の境界には遷移層があり、一般的には100km程度の幅（前線帯）



第4.4.1図 前線と強風帯・気団の位置関係に関する模式図 Palmen and Newton(1969)を参考に作成

を持つ。遷移層を考慮すると、前線は温度傾度の不連続線である、ということが出来る。なお、天気図では前線帯の南端を前線として解析することが慣例である。前線は水平スケール（前線の長さ方向）が1,000から数千 km 程度、時間スケールは1日から数日の現象であり、総観スケールの現象といえる。また、前線は水蒸気量（例えば相当温位）の不連続や、低気圧性の風向・風速変化を伴うことが多い。なお、前線の特性は温度傾度だけで決まるものではないため、前線の定義に温度傾度の大きさは含まれない。

一般的に、前線面の解析は地上よりも摩擦の少ない上空の方が容易なため、前線解析に際しては高層観測や衛星画像・ウィンドプロファイラ（WPR）といった上空の観測データから解析を行う。始めに、上空の観測データから前線の有無や構造を把握し、前線の位置の候補を抽出する。続いて、得られた候補を参考に、地上・海上の実況観測データを用いて解析を行う。アジア太平洋地上天気図における前線解析は地上における前線面の解析のため、地上・海上の実況観測データを最重要視して解析する。

アジア太平洋域の中緯度帯は、春や秋を中心に寒帯ジェットが存在することが多いため、低気圧の発生・発達や前線が存在することの多い地域である。アジア太平洋地上天気図では、基本的に移動方向や速度に応じて、温暖前線・寒冷前線・停滞前線・閉塞前線の4種類の前線を用いている。

*杵淵 健一（気象庁予報部予報課）

(1) 温暖前線

温暖前線は暖気側から寒気側に移動する前線である。暖気団が寒気団に向かって進み寒気団の上を滑昇するため、前線面の傾斜(=高度/水平距離)は1/300程度と比較的傾斜の緩やかな前線である。前線近傍では層状の雲が発達しやすい。前線の長さは一般的に数百kmから1,000km程度で、寒冷前線よりも短いことが多く、前線は500hPa高度線に交わるようにのびる。

地上・海上の実況観測データでは温度傾度の不連続、風向・風速の変化から解析できるが、風向・風速の変化は寒冷前線と比較して小さいことが多い。

WPRでは、例えば前線の北側で南東風、南側で南西風といった風向シアーから温暖前線の候補を解析できる事がある。一般的にWPR解析においても温暖前線に伴う風向変化は寒冷前線に伴うものよりも小さい。

衛星画像を用いた解析では、層状の雲が形成され始める部分、すなわち層状の雲の南端を温暖前線の候補として解析するが、一般的に衛星画像から温暖前線の候補を解析することは難しい。温暖前線南側の暖域内の対流雲や、前線とは異なる成因の上中層雲の存在によって、層状雲の南端を見出すことが難しいためである。

(2) 寒冷前線

寒冷前線は寒気側から暖気側に移動する前線である。前線面の傾斜は1/100程度で、温暖前線と比較すると傾斜が急である。前線の長さは1,000km程度以上であることが多く、前線は500hPa高度線に沿うようにのびる。

寒冷前線は、暖かいコンベヤーベルト(WCB)との位置関係によって、アナ型寒冷前線とカタ型寒冷前線に分類される。WCBとは暖かく湿った比較的幅の狭い気流で、おおそ南西から北東に向かう流れによって大量の熱と水蒸気を極方向及び上空に運ぶ。WCBが寒冷前線の上空に存在するアナ型寒冷前線では、前線付近で対流性の雲が発達しやすく、降ひょうや発雷、竜巻などの現象が発生することもある。一方、WCBが寒冷前線から離れて東側に位置するカタ型寒冷前線では、前線付近の対流活動は不活発であり、寒冷前線東側の暖域内で寒冷前線の走向に沿った対流雲が発達する場合がある。アナ型寒冷前線とカタ型寒冷前線は、それぞれ合流型のトラフ(トラフの西側より東側で風速の大きなトラフ)・分流型のトラフ(トラフの東側より西側で風速の大きなトラフ)と対応することが多いといわれている(アナ型・カタ型寒冷前線については、平成26年度予報技術研修テキスト第2章を参照)。

アナ型寒冷前線は地上や下層に風向・風速・気温・露点温度・気圧の明瞭な変化を伴うことが多いため、地上・海上の実況観測データやWPRを用いた解析は比較的容易である。

衛星画像を用いた解析では、アナ型寒冷前線は前線付近で強い上昇流が発生するため、雲バンドのうち活発な対流雲列を寒冷前線の候補として解析する。また、寒候期の海上では、寒冷前線後面に寒気移流に伴うセル状対流雲が発生するので、その東端を候補とすることもできる。なお、寒冷前線の候補となる雲バンドの近傍では、ロープクラウドが形成される場合がある。ロープクラウドは前線に対応した対流雲からの冷氣外出流が暖域側の湿潤空気に接して発生するもので、比較的背の低い寒気によって作られる。雲の通過前後の気温変化は寒冷前線的な振る舞いをするが、温度傾度など上空の構造を伴っていないため寒冷前線として解析しない。

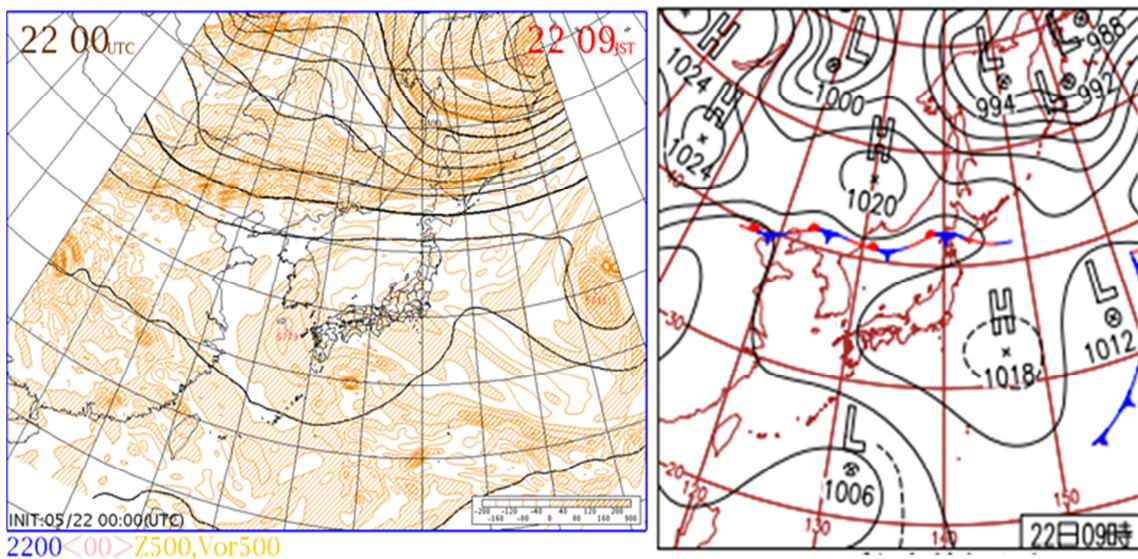
一方、カタ型寒冷前線では、地上・海上実況に明瞭な風向・風速変化、気温や露点温度・気圧の変化を伴わないことが多く、前線付近の対流活動は不活発なことが多い。このため、注意深く解析を行う必要がある。850hPaや500hPaなど複数の高層観測から鉛直方向の風・温度構造を把握して前線の候補を抽出し、地上・海上実況の気温や露点温度の傾度、風向・風速により解析する。一般的に、衛星画像から寒冷前線の候補を解析することは難しい。

どちらの型においても、暖域内の収束により、寒冷前線に伴う雲バンドに似た線状の対流雲列が暖域内に発生することがあり、注意が必要である。この対流雲列は高気圧性曲率を有することが多く、また構成する雲は高気圧性の軌跡を辿ることが多いので、判断を誤らないようにする。

(3) 停滞前線

停滞前線はほぼ同じ位置にとどまっている前線である。春や秋には寒帯前線ジェットが日本付近の緯度で強化されるため、これに伴う前線が発生する。この前線は500hPa高度線の走向に沿って数千kmに渡ってのび、上層ほど水蒸気量や温度傾度の不連続が明瞭である。また、寒冷前線の西側(南側)につながる前線としても存在する。この場合1,000kmから数千kmに渡って500hPa高度線に沿った走向でのびる。梅雨前線や秋雨前線は停滞前線の一種である。

停滞前線は温度傾度の不連続や風向風速の変化が小さいため、温暖前線や寒冷前線と比較すると地上・海上の実況観測データの要素のみから検出するのは難しい。寒帯前線ジェットに対応する停滞前線は、高気圧の南縁に解析できる事が多い(第4.4.2図)。寒冷前線からつらなる停滞前線は、移動速度の遅い部分を停滞前線として解析する。もしくは、流線解析により中立点(鞍部)を検出し、中立点より先を停滞前線とする(第4.4.3図)。梅雨末期の停滞前線では温度傾度の不連続が不明瞭なこともあり、その際は水蒸気量の不連続を利用する。水蒸気量の考慮される相当温位の不連続線を確認して解析を行う。このような前線の定義や解析方法については4.4.2項を参照。このような前線は500hPa強風軸の直下付近(渦度ゼロ線付近)、700hPa



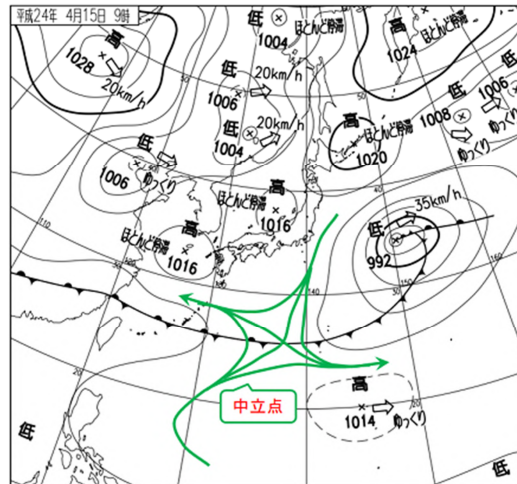
第4.4.2図 停滞前線の解析例 (2017年5月22日00UTC)

左: 500hPa高度・渦度、右: 気象庁天気図

強風の北に位置することが多い。

停滞前線に伴う雲は幅が概ね一定であり、衛星画像では上層のジェット軸に沿った数千kmに渡る雲バンドとして確認できる。寒候期の停滞前線は対流活動が不活発なことが多い。衛星画像を用いた解析では、500~1,000kmの幅をもつ雲バンドの南端を前線位置の候補とする。なお、雲バンドの北縁は上層のジェットに対応しており、前線はジェット軸から緯度にして5~10度南に位置する。一方、梅雨前線や秋雨前線など暖候期の前線は下層暖湿気の流入により活発な対流雲を伴うことが多い。雲バンドの幅は100km程度で寒候期の前線と比較して狭く、対流雲が主体である。衛星画像を用いた解析では、活発な対流雲域の中心付近や北

端が前線の候補となる。



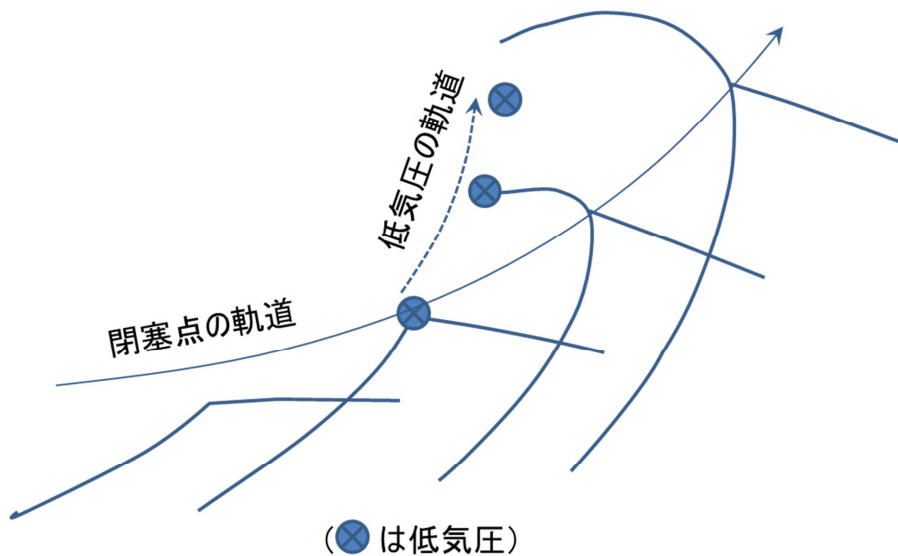
第4.4.3図 停滞前線の例（2012年4月15日00UTC 速報天気図）

（4）閉塞前線

閉塞前線は、温暖前線と寒冷前線の交点である閉塞点から低気圧に向かっている前線である。低気圧は発達初期には500hPa強風軸のやや南側に位置しているが、発達とともに500hPa強風軸の北側に位置する。一方、閉塞点は強風軸に近い南側に位置し低気圧より移動が速いため、低気圧の発達とともに閉塞点と低気圧は離れ、閉塞前線は長くなる（第4.4.4図）。閉塞前線は温度場の暖気軸に解析できる。閉塞前線上には新たな低気圧が発生することもある。閉塞前線には寒冷型と温暖型があり、それぞれ次のような特徴を有する。

寒冷型閉塞前線・・・寒冷前線後面の寒気が比較的強く、寒冷前線が明瞭。温暖前線は不明瞭なことが多い。閉塞前線は寒冷前線の性質が強い。低気圧上空で南成分の強い風の場合に発現することが多い。衛星画像では「人」型の雲バンドを形成。

温暖型閉塞前線・・・寒冷前線後面の寒気は比較的弱く、寒冷前線は活動が弱い。温暖前線は明瞭なことが多い。閉塞前線は温暖前線の性質が強い。低気圧上空で西成分の強い風の場合や、この低気圧の北側にも強風帯・高気圧のある場で発現することが多い。衛星画像では「入」型の雲バンドを形成。



第4.4.4図 低気圧と閉塞点の軌道の模式図 閉塞点の軌道は強風軸とほぼ同じ

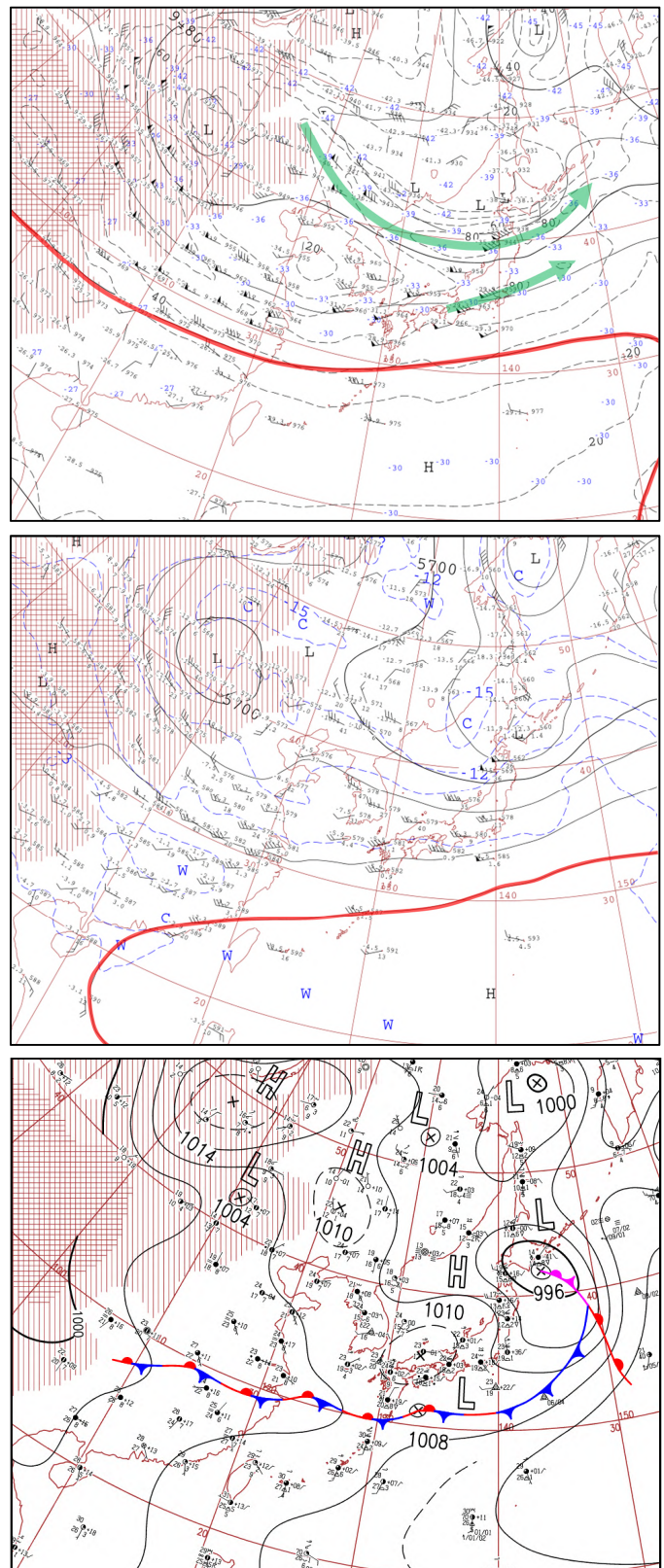
4.4.2 梅雨前線*

4.4.2.1 梅雨前線の定義

梅雨前線は、梅雨という季節現象をもたらす前線であり、気象庁が天気予報等で用いる予報用語では、「春から盛夏への季節の移行期に、日本から中国大陸付近に出現する停滞前線で、一般的には、南北振動を繰り返しながら沖縄地方から東北地方へゆっくり北上する。」と説明されている。この説明では「停滞前線」を長い期間で見ても動きがゆっくりした前線といった意味で用いており、日々の地上天気図においては、梅雨前線は停滞前線だけでなく、温暖前線、寒冷前線でも解析される。日本に「梅雨前線」という概念が導入されたのは1941年頃と言われており(永沢, 1995) 地上天気図上に不連続線を解析し始めてから20年近く経つての話になる。梅雨は、平年では5月上旬の沖縄から梅雨入りし、7月下旬の東北北部で梅雨明けとなる。この間、梅雨前線が不明瞭になることもあるが、3か月近く続く長い気象現象である。

梅雨前線は両側(南北)の気団の温度差が小さく、温度傾度の不連続として認識される通常の前線(寒帯前線)とは性格が大きく異なる場合がある。ただし、前線の厳密な定義は密度傾度の不連続線であり、水蒸気量の不連続も前線解析の有力な条件の一つとなる。梅雨期には、中国大陸から日本にかけて南西の季節風の流入により、水蒸気量の大きい帯状領域(水蒸気集中帯)が形成される。気象庁ではこの水蒸気集中帯も前線(梅雨前線)として解析している。

水蒸気の集中帯としての梅雨前線は梅雨末期に見られることが多い。その構造は、通常の前線と同様に北側に傾斜しており、下層の温度傾度は小さいが、中層以上の温度傾度は大きく、300hPa または 200hPa に極大風域を伴うことが多い。ただし、実際の梅雨前線は、水蒸気の集中帯から寒帯前線に近いものまで様々であり、両者が東西で一本の梅雨前線としてつながっていることも多い。



第4.4.5図 2017年6月22日9時(日本時間)の300hPa高層天気図(上)、500hPa高層天気図(中)、地上天気図(下) 赤太線は等高線で300hPaでは9720m、500hPaでは5880mを表す。300hPaの緑線は80kt以上の強風軸を示す。

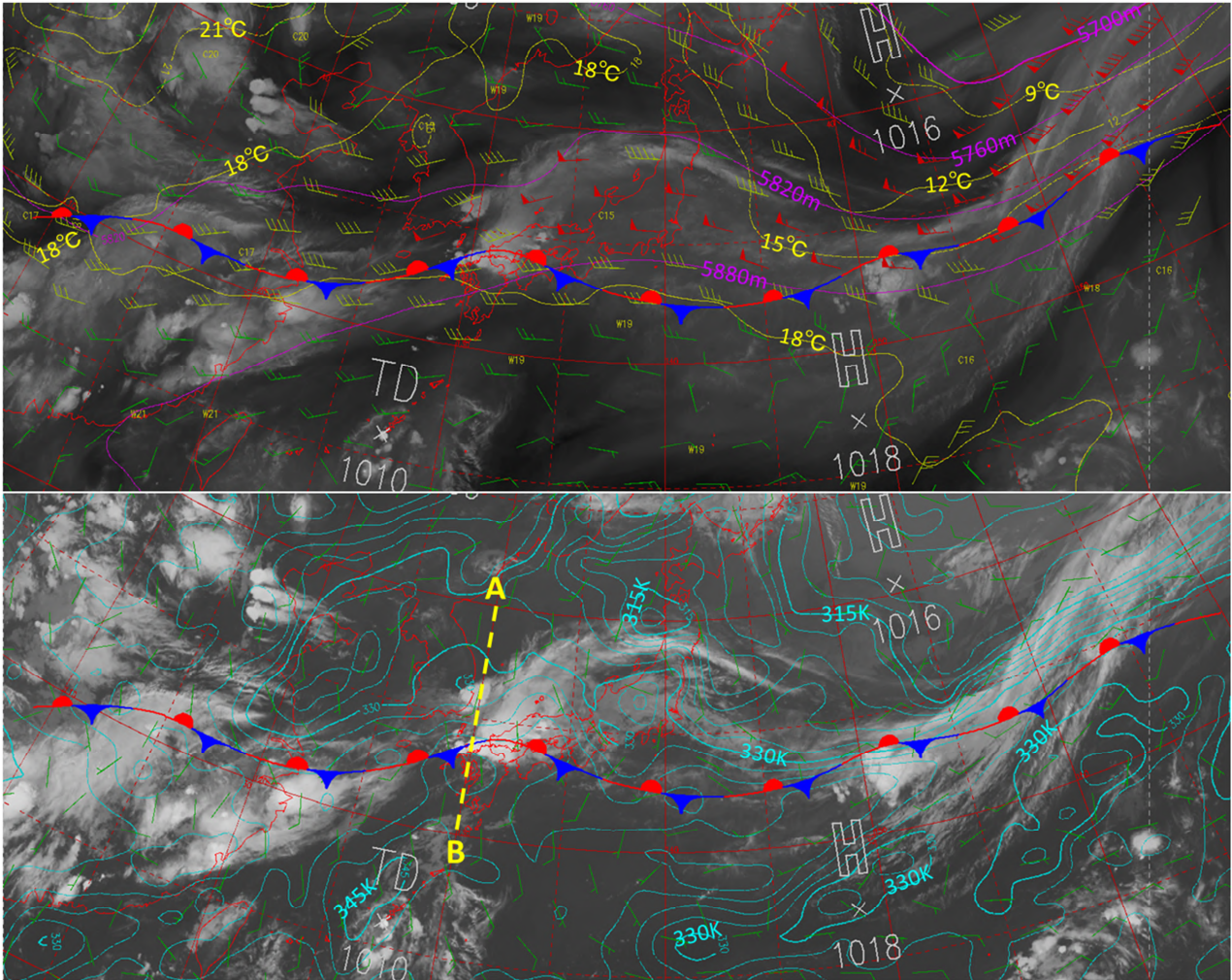
*原 基、野津原 昭二(気象庁予報部予報課)

4.4.2.2 梅雨前線の解析

梅雨前線の解析にあたっては、次のような特徴を考慮して行う。

(1) 総観場で見えた梅雨前線の発生位置

梅雨前線は、太平洋高気圧に代表される亜熱帯高気圧の北縁に位置し、概ね亜熱帯ジェット気流に対応するため、高層天気図の太平洋高気圧（500hPa面の等高線5880mなど）や亜熱帯ジェット気流の分布からおおまかな前線の位置を把握できる（第4.4.5図）。暖候期になると大陸上にチベット高気圧が太平洋高気圧と同じような等高線として現れる。



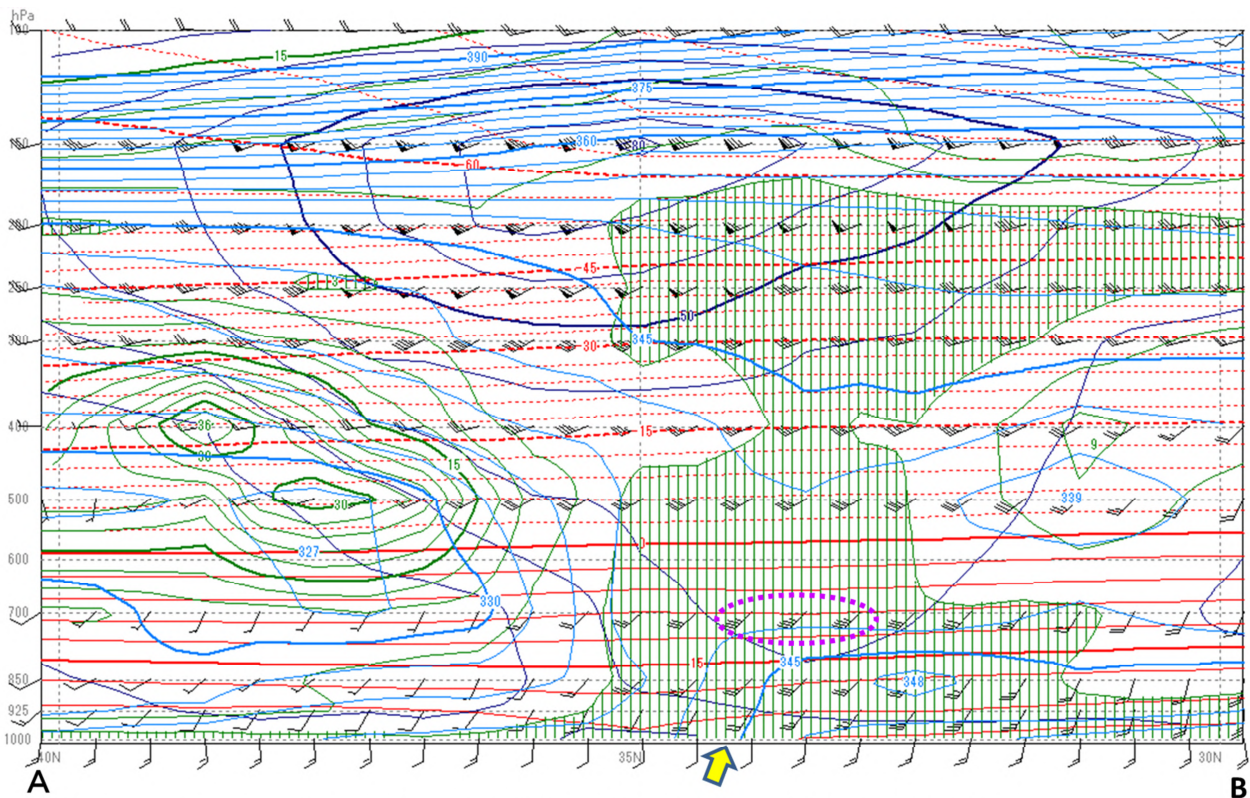
第4.4.6図 上図：2017年6月29日21時の水蒸気画像にGSMの客観解析による850hPaの温度、500hPaの高度、300hPaの風を重ね合わせた図、下図：同時刻の赤外画像にGSMの客観解析による地上風、850hPaの相当温位を重ね合わせた図
両図には地上前線と高・低気圧の中心気圧・中心位置（×）を重ね合わせてある。上図の黄色線は等温線（3 毎）、赤紫色線は等高線（60m 毎）、下図の水色線は等相当温位線（3K 毎）を示す。黄色破線A-Bについては第4.4.7図の断面図を参照。

(2) 水蒸気集中帯の特徴

梅雨前線が寒帯前線に近い性質を持っている場合は、一般的な前線解析と同様に温度傾度の不連続線で解析する。この場合、下層の温度場や風場が前線らしい特徴を示す（第 4.4.6 図上の日本の東～日本のはるか東の停滞前線が該当）。梅雨前線の北側で下層に東寄りの風が入っている場合は、温度のコントラストや風のシアが比較的明瞭に現れ、オホーツク海高気圧が存在する場合はこれが顕著である。

一方、水蒸気集中帯としての梅雨前線の場合は、一般的な前線解析の考え方が適用できない。この場合は、気塊に含まれる水蒸気が凝結しても保存される相当温位（ e ）が解析に有用である。これは、梅雨前線など暖候期の亜熱帯の前線に関する鉛直方向には、凝結によって放出される潜熱の効果により引き起こされる対流が重要となるためである。多くの場合、850hPa や 925hPa の相当温位の集中帯の南縁に梅雨前線が解析できる（第 4.4.6 図下）。下層では、前線をはさんだ温度差が小さく、遷移層は斜めに傾斜せず、ほとんど鉛直に突立った相当温位の集中帯が存在する（第 4.4.7 図の矢印付近）。なお、850hPa、925hPa 面の高 e 域は赤道付近から延びていることが多いが、通常は太平洋高気圧より南には前線の解析を行わない。

この他にも地上の気温と露点温度の差（ $T - T_d$ ）や露点温度（ T_d ：水蒸気量を示す）の変化が見られる領域や 700hPa の強風軸（第 4.4.7 図の赤紫点線が 700hPa の強風軸）を参考に前線を解析できる。



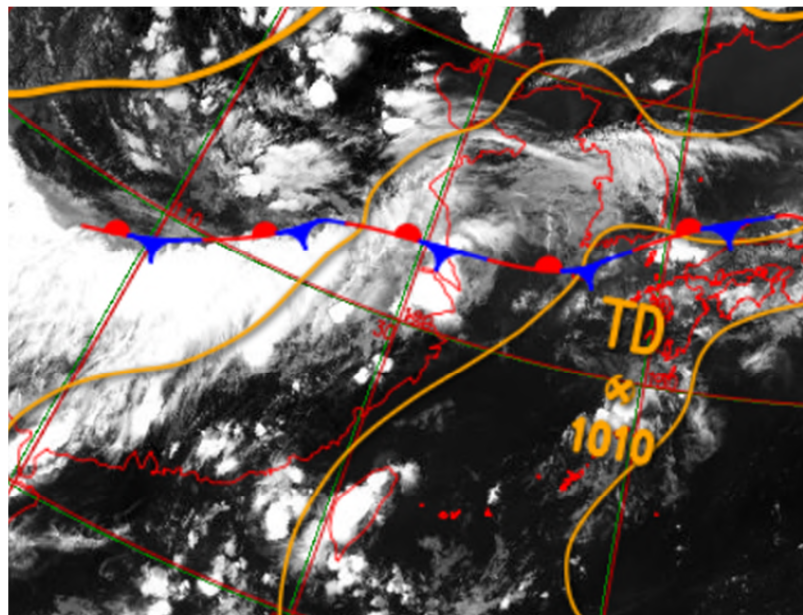
第 4.4.7 図 (2017 年 6 月 29 日 21 時) の黄色破線 A-B に沿った GSM の客観解析による鉛直断面図

赤色線は等温線（3 度毎）、青色線は等相当温位線（3K 毎）、黒色線は等風速線（10kt 毎）、緑色線は湿数（3 以下はハッチ）、矢印が地上の停滞前線の位置で、赤紫点線は 700hPa 面での強風軸。

(3) 衛星画像から見た特徴

衛星画像に見られる積乱雲 (Cb) ラインは収束線の存在と水蒸気の集中を明瞭に示すので、梅雨前線の位置の目安となる。850hPa 面での等 e 線は雲バンドの北側で密集する (水蒸気集中帯としての梅雨前線は、雲バンドの北縁あたりに位置する)。特に、大陸から東シナ海にかけての領域や梅雨末期には、水蒸気集中帯で対流活動が活発な領域を前線として定義し、対流雲列のつながりを前線として解析する。梅雨前線が日本列島にある場合は、レーダーエコー合成図等のエコー分布も梅雨前線位置の判定材料となる。

上層の流れにおいては、梅雨期にはチベット高気圧が形成され、東アジアの対流圏上層には北西～北風が卓越してくるため、発達した Cb の上部から吹き出す巻雲 (Ci) が南に広がることにも着目する (第 4.4.8 図)。



第 4.4.8 図 2017 年 6 月 30 日 18 時の赤外画像にアジア太平洋地上天気図を重ねた図
中国大陸東部の停滞前線の南側には Ci の広がりが見られる。

4.5 アジア太平洋地上天気図における前線解析*

4.5.1 前線解析の条件

アジア太平洋地上天気図においては、以下の条件を満たす場合に前線を解析する。

(1) 地表面における密度の集中帯が解析できること

地表面における密度の集中帯の暖気側の縁に前線を解析することが基本である。気象分野で必要な精度では、等圧面上における密度は気温 T と水蒸気で決まる。湿潤空気の状態方程式から密度は下のように表される。

$$\rho = \frac{p}{R_d(1 + 0.61w)T}$$

ここで、 R_d は気体定数、 p は気圧、 w は混合比（水蒸気密度と乾燥空気の密度の比）で 0.03 を越すことはあまりない。すなわち、大気の密度を計算する際には気温の寄与のほうがずっと大きいので、前線解析では気温の解析が最も大きなウェイトを占める。

一方、水蒸気による前線解析では、相当温位 (θ_e) が有効である。

$$\theta_e = \theta \exp\left(\frac{Lw_s}{C_p T}\right)$$

ここで θ は温位、 L は凝結の潜熱で $L = 2.5 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 、 w_s は飽和空気の混合比、 C_p は定圧比熱で $C_p = 1004 \text{ J/K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ である。上記式で示すように、相当温位は、気温と水蒸気量から決まる量であるが、飽和空気の混合比 w_s が指数関数的に影響する。そのため、相当温位の解析を行うことで、水蒸気量による密度の違いを解析することができる。

(2) フロントジェネシス（前線形成）等温線の集中を強めるような風の場合であること。

フロントジェネシス（前線形成）の場合であるかどうかは、3 次元的な温度と風の分布パターンで決まる。フロントジェネシス（前線形成）の場合では前線付近で水平温度傾度が強まり、暖気の上昇流が励起される。特に各等圧面（地表面）の等温線や等 θ_e 線を集中させるような風のシアが存在していることが最も重要である。

(3) 時間・空間スケールが総観規模であること。

アジア太平洋地上天気図における前線解析ではメソ以上のスケールを描画対象とする。

また、おおむね 12 時間に満たないような短時間で消滅する現象はアジア太平洋地上天気図には表現しない。

4.5.2 アジア太平洋地上天気図前線解析の手順

(1) 現在までの推移と今後の予想の確認

実際の天気図解析では、はじめに数日前から現在までの推移の確認を行う。低気圧系全体のライフステージが発生期、発達期、衰弱期のいずれに当たるのかを把握するとともに、遅延して入電するデータを用いて過去の天気図を見直し、必要ならば再解析を行う。

(2) 数値予報による推定

次に数値予報結果を利用した推定を行う。解析の際に得られる地上や高層の実況観測は空間的に限られたものであるため、前線の解析には数値予報結果の利用が欠かせない。

*永山 隆治、木下 仁（気象庁予報部予報課）

まず前線に対応する 300hPa や 500hPa の強風帯から傾圧不安定波の状況を把握する。これによって、解析しようとする前線が偏西風帯と対応していることを確認する。

強風軸とそれぞれの前線との位置関係にも着目する。例えば閉塞前線は強風軸から低圧側に向かってのび、寒冷前線はトラフ前面で強風軸にほぼ平行となる。また、停滞前線は緩やかなトラフの前面から南側に位置し、強風軸とほぼ平行である。

850hPa などの気温や相当温位から、前線に対応する集中帯を解析する。閉塞前線以外は、気温や相当温位の水平傾度が大きなゾーンの暖気側の端を解析する。閉塞前線では、閉塞点から低気圧中心の方に向かう気温と相当温位のリッジ線を解析する。解析では衛星画像の雲域との対応のほか、これまでの解析の推移から予想される前線の位置も重要な手がかりになる。

(3) 実況による解析

アジア太平洋地上天気図に表現するのは地上の前線であるので、最終的には地上・海上の実況を用いて前線の位置を解析する。地上・海上の実況観測データでは、気圧の解析に加えて、風向・風速、前3時間気圧変化傾向、露点温度を重視しており、前線通過によるこれらの数値の変化の確認は重要である。また、衛星画像の監視においては、赤外画像からだけでは前線に対応する下層雲の存在を見極めることは難しいため、可視画像(日中)や差分画像も活用する。その他、水蒸気画像などによって中上層のトラフやリッジの動向を把握し、数値予報の結果と整合していることを確認する。

最後に解析した前線と FSAS24 や数値予報モデル予想図など今後の予想とのつながりから、時間的連続性が保たれているかを確認する。また、低気圧のライフステージが予想通り進んでいるかどうかの検討も行う。

4.5.3 前線解析の運用ルール

基本的な前線の要件、種類に基づきアジア太平洋地上天気図の解析を標準化する観点から、次の運用ルールを設けている。

低気圧に伴う前線

温暖前線と寒冷前線の場合は、低気圧中心から1本ずつ解析する。低気圧前方の前線は温暖前線、後方は寒冷前線とする。低気圧がほとんど発達していない場合は、停滞前線としてもよいが、暖気や寒気の流入に注意して、安易に停滞前線とはしない。閉塞低気圧の場合は、閉塞点から温暖前線、寒冷前線、閉塞前線を1本ずつ解析し、閉塞前線は低気圧中心に達していても達しなくても良い。

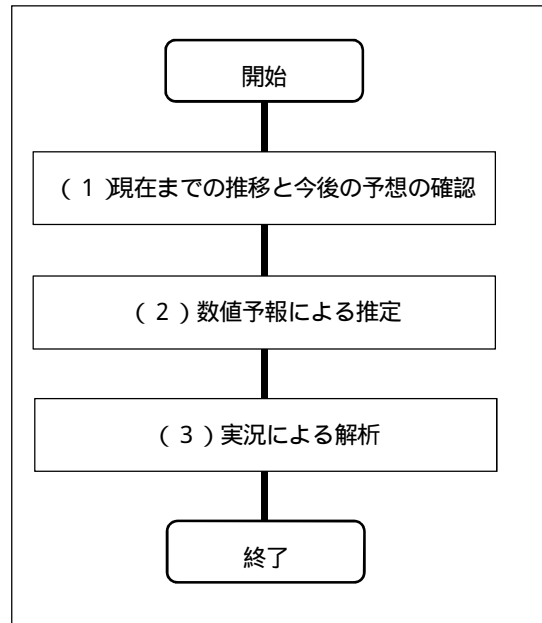
低気圧に伴わない前線

移動方向、速度に応じて、温暖前線、寒冷前線、停滞前線とする。

温暖前線+寒冷前線で構成される前線系の場合、どちらか一方の速度が速ければ片方が停滞していても、停滞前線ではなく温暖前線+寒冷前線として解析する。

複数の前線候補からの選択

数百 km の幅の中に複数の前線候補が並んでいるときは、最も顕著で、1日程度以上の持続性が見込まれるものを採用する。



第4.5.1図 前線解析のフローチャート

二次前線

一つの低気圧の寒気場内の寒気に伴う二次前線は解析しない。ただし、一度、前線が解消した低気圧が、再度、顕在化した傾圧帯に対応した場合は前線を解析しても良い。

二次前線が明瞭となり、元の寒冷前線が相対的に不明瞭になったときは、元の寒冷前線を消滅させ、明瞭化した前線を新たな寒冷前線として解析する。ただし、新たな前線の時間スケールが1日程度以上という原則に従う。

コンマ雲型の低気圧

衛星画像で認識されるコンマ雲の形状を持ち、寒気場内で発生・発達する低気圧においては、前線を解析してもよい。その際、温暖前線が不明瞭な場合は、温暖前線を省略し寒冷前線のみとしても良い。また寒冷前線は低気圧中心から離れていても良い。

下層で明瞭だが地上で不明瞭な前線

850hPa など下層で、前線の要件を満たしかつ悪天を伴う場合は、地上でのシアーや温度差等が不明瞭でも、持続性があると判断すれば前線を解析する。

閉塞前線を安易に解消しない

ベルゲンモデルでは閉塞前線は低気圧が最盛期にあることを意味する。中心気圧が深まっている場合や最低気圧が継続している時は、原則として、閉塞前線を解析する。中心気圧が浅くなり始めても、前線活動が活発と見られる場合は前線を解析する。

4.5.4 客観前線

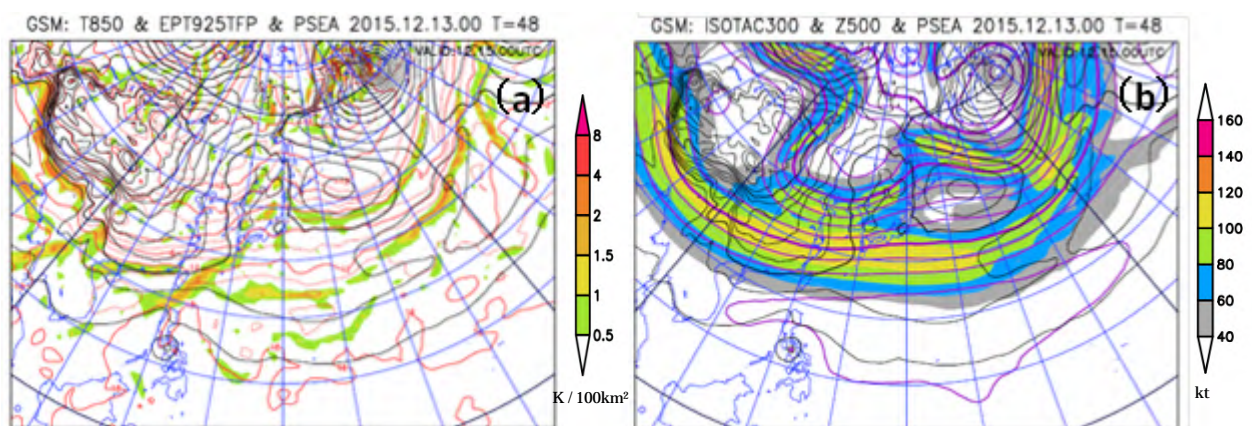
前線の解析においては、前節で述べた様々な観測データに加えて、数値予報結果から客観的に前線と考えられる場所を計算した「客観前線」プロダクトも参考資料として利用している。

(1) TFP

Thermal front parameter (TFP)はRenard and Clarke(1965)が提案したパラメータで、次の式で定義される。ここで、 τ は気温などの熱力学変数である。

$$TFP = -\nabla|\nabla\tau| \cdot \frac{\nabla\tau}{|\nabla\tau|}$$

GSM の 925hPa 及び 950hPa の相当温位を利用した TFP の分布図を作成して参照しているほか、850hPa の気温分布図などもチェックして温度場と整合した前線解析となるようにしている。また、ジェット軸と前線の対応を確認するため、「300hPa の Isotac (等風速) + 500hPa の高度場」図も利用している(第4.5.2図)。



第4.5.2図 現業で利用している (a) 925hPa の TFP + 850hPa の気温、(b) 300hPa の Isotac + 500hPa の高度場

参考文献

- 永沢義嗣, 1995: 天気図の散歩道, クライム気象図書出版部, 169.
- 気象庁予報部, 1973: 天気予報指針(基礎編). 気象庁予報部, 222pp.
- 黒良龍太, 牧野眞一, 村規子, 2015: 現業作業における総観場の把握と局地気象解析について. 平成26年度予報技術研修テキスト, 気象庁予報部, 39-64.
- Bjerknes, J. and H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation, *Geofys. Publ.*, 3, No.1, 1 - 18.
- Charny, J.G., 1947: The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *J. Meteor.*, 4, 135-163.
- Eady, E. T., 1949: Long waves and cyclone waves. *Tellus*, 1, 33-52.
- Palmen, E., and C.W. Newton, 1969: *Atmospheric Circulation Systems*, Academic Press, 603pp.
- Renard, R. J. and L. C. Clarke, 1965: Experiments in numerical objective frontal analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 53, 547-556.
- Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause, *Extratropical Cyclones: The Erik Palmen Memorial Volume*, C. W. Newton and E. Holopainen, Eds., *Amer. Meteor. Soc.*, 167-191.
- Uccellini, L.W., S.F. Corfidi, N.W. Junker, P.J. Kocin and D.A. Olson, 1992: Report on the surface analysis workshop at the National Meteorological Center 25-28 March 1991. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 459-471.

< 天気図解析に有効な参考書 >

- 気象衛星センター, 2000: 気象衛星画像の解析と利用, 161.
- 気象衛星センター, 2002: 気象衛星画像の解析と利用-航空気象編-, 223.
- 鈴木和史, 1993: 日本付近を通過する低気圧の特徴. 気象衛星センター技術報告第37号, 35-62.
- 鈴木和史, 三浦信男, 白川栄一, 根津康洋, 矢田綱三, 1997: 天気図解析システム 新しい天気図解析とその関連業務の概要 . 測候時報 64, 105-128.
- 淵田信敏, 2004: 衛星画像から見た温帯低気圧の発達パターン(インスタントオクルージョン). 気象衛星センター技術報告第43号, 1-11.
- 安部俊司, 2004: 衛星画像から見た温帯低気圧の発達パターン(コンマ型雲). 気象衛星センター技術報告第44号, 19-30.
- 松本誠一, 1999: 新総観気象学. 第5版, 東京堂出版, 192.
- 岡林俊雄, 1972: 温帯低気圧・前線系の雲パターン, 気象研究ノート 113, 37-73.
- 岡林俊雄, 1982: 気象衛星資料の利用(), 測候時報 49, 1-50.
- 岡林俊雄, 1982: 気象衛星資料の利用(), 測候時報 49, 185-250.
- 小倉義光, 2000: 総観気象学入門. 東京大学出版会, 289.
- 小倉義光, 1999: 一般気象学. 第2版, 東京大学出版会, 308.
- 小倉義光, 西村修司, 隈部良司, 2006: お天気の見方・楽しみ方(3) シャピロ・カイザーの低気圧モデルと日本海低気圧, 天気 53, 35-42.
- 中村尚, 高薮出, 1997: Shapiro の新しい前線・低気圧モデル. 天気, 46, 453-459.
- 北畠尚子, 金崎厚, 海老原智, 重岡博明, 緒方洋一, 出口一, 上清直隆, 牟田圭史, 鈴木和史, 1995: Browning: 温帯低気圧一温帯低気圧における雲と降水の構造 -, 測候時報 62, 1-31.
- 北畠尚子, 1997: 「Browning: 温帯低気圧 - 温帯低気圧における雲と降水の構造」に関する質問に答える,

測候時報 64, 29-44.

北畠尚子, 2005: 前線の考え方の過去と現在, *Journal of Meteorological Research* Vol.57, No.2, 27-57.

岸保勘三郎, 1982: 温帯低気圧モデルの歴史的発展, *天気* 29, 5-34.