

第2章 観測データ利用の変更およびガイダンスの改良

2.1 全球解析における米国静止気象衛星 GOES-East データの利用中断とその影響調査¹

2.1.1 背景

全球解析では初期値作成のために、日本の静止気象衛星ひまわり、米国の GOES²-East、GOES-West、及び、欧州気象衛星開発機構³の2機の Meteosat の計5機で全球を観測する静止気象衛星観測データから作成される、大気追跡風 (AMV: Atmospheric Motion Vectors) 及び晴天放射輝度温度 (CSR: Clear-Sky Radiance) を同化している。

AMV は、複数の衛星画像から雲の動きとその高度を推定し、上空の風向風速を算出する衛星プロダクトである。直接観測データの少ない海上などにおいて、AMV は風に関する貴重な観測データとなっている。CSR は、水蒸気吸収帯を測定して得られた赤外放射強度を基に、晴天域のみの放射輝度温度をある大きさの領域で平均化したプロダクトで、対流圏中上層の水蒸気に関する情報を持つ。これまでの調査では、AMV を同化することにより対流圏上層・下層で風の解析精度がより正確になることが確認されている (山下・今井 2007)。また、CSR を同化することにより第一推定値の対流圏中上層の水蒸気場が改善することが確認されている (石橋・上沢 2007; 計盛 2016)。

米国大陸を含む領域を観測する GOES シリーズは、GOES-East (現運用機: GOES-16、静止位置: 西経 75 度) と GOES-West (現運用機: GOES-15、静止位置: 西経 135 度) の2機体制で運用されている。2017 年 12 月 18 日に GOES-East として GOES-16 が本運用を開始したことに伴い、翌月の 2018 年 1 月 8 日に先行衛星の GOES-13 が運用を停止した。GOES-16 のプロダクトは、衛星画像データのような基本的なプロダクトの配信は 2018 年 1 月に開始されたが、高次プロダクトである GOES-16 AMV は 2018 年 11 月、GOES-16 CSR は 2019 年 5 月から正式配信の予定である。このため 2018 年 11 月まで (期間 A) は AMV 及び CSR の両方、そして 2019 年 5 月まで (期間 B) CSR が利用できず、GOES-East 領域に観測データの空白域が生じる (図 2.1.1)。GOES-16 の AMV, CSR が利用できない期間の数値予報への影響を調べるため、さらに、1 機の静止気象衛星による AMV および CSR プロダクトの現在の現業数値予報システムでの予報精度への寄与を確認するため、期間 A、期間 B を想定した実験をそれぞれ行った。

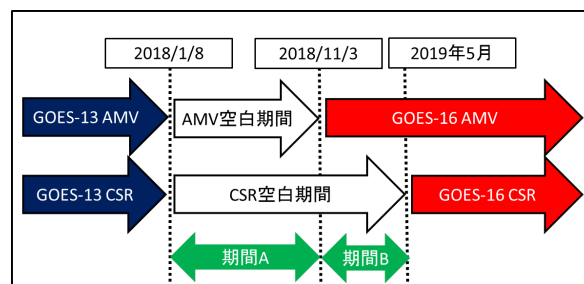


図 2.1.1 GOES-13 の運用停止後、後継衛星 GOES-16 AMV 及び CSR の未入電期間 (期間 A) と、CSR の未入電期間 (期間 B)。

2.1.2 GOES-13 AMV と CSR の棄却実験

図 2.1.1 の期間 A を想定し、GOES-East の AMV および CSR が利用されない期間の数値予報精度への影響を調査する。GOES-13 AMV, CSR のデータを不使用とし (棄却実験)、通常どおり利用した場合と比較する。AMV と CSR を不使用とする影響として、GOES-13 の観測領域内の風や水蒸気の解析場や予報場の精度が低下すると考えられる。結果として、第一推定値の精度も低下すると考えられる。この第一推定値の精度低下は、第一推定値と観測値の乖離という形で現れるため、棄却した観測データと独立した観測データの FG departure (観測値と第一推定値の差) の標準偏差が増加することで確認できる。また、第一推定値の乖離が大きい観測データは、品質管理 (グロスエラーチェックなど) をパスできないので、結果的に利用データ数が減少する。これにより観測データと第一推定値の整合性を確認することができる。

(1) 調査方法

2017 年 7 月時点の現業運用している全球解析と同等の設定でデータ同化を行った実験を CNTL (比較対象)、GOES-13 の AMV と CSR を棄却した実験を TEST-A とし、両者を比較することで影響を調査した。実験期間は、2016 年 7 月 10 日～9 月 11 日及び 2016 年 12 月 10 日～2017 年 2 月 11 日で、予報は 12UTC 初期値のみ実行した。

(2) 実験結果

風の解析場の変化を見るために、対流圏上層 (200 hPa) と対流圏下層 (850 hPa) の解析場の速度ポテンシャルの TEST-A の CNTL からの月平均差を図 2.1.2 に示す。夏期間の実験では、夏半球の対流圏下層で風の収束が低下 (寒色) し、対流圏上層で風の発散が低下 (暖色) している傾向が見られた。これは、夏半球での対流活動が不活発化することで、対となる冬

¹ 下地和希、岡部いづみ

² Geostationary Operational Environmental Satellite

³ EUMETSAT: the European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

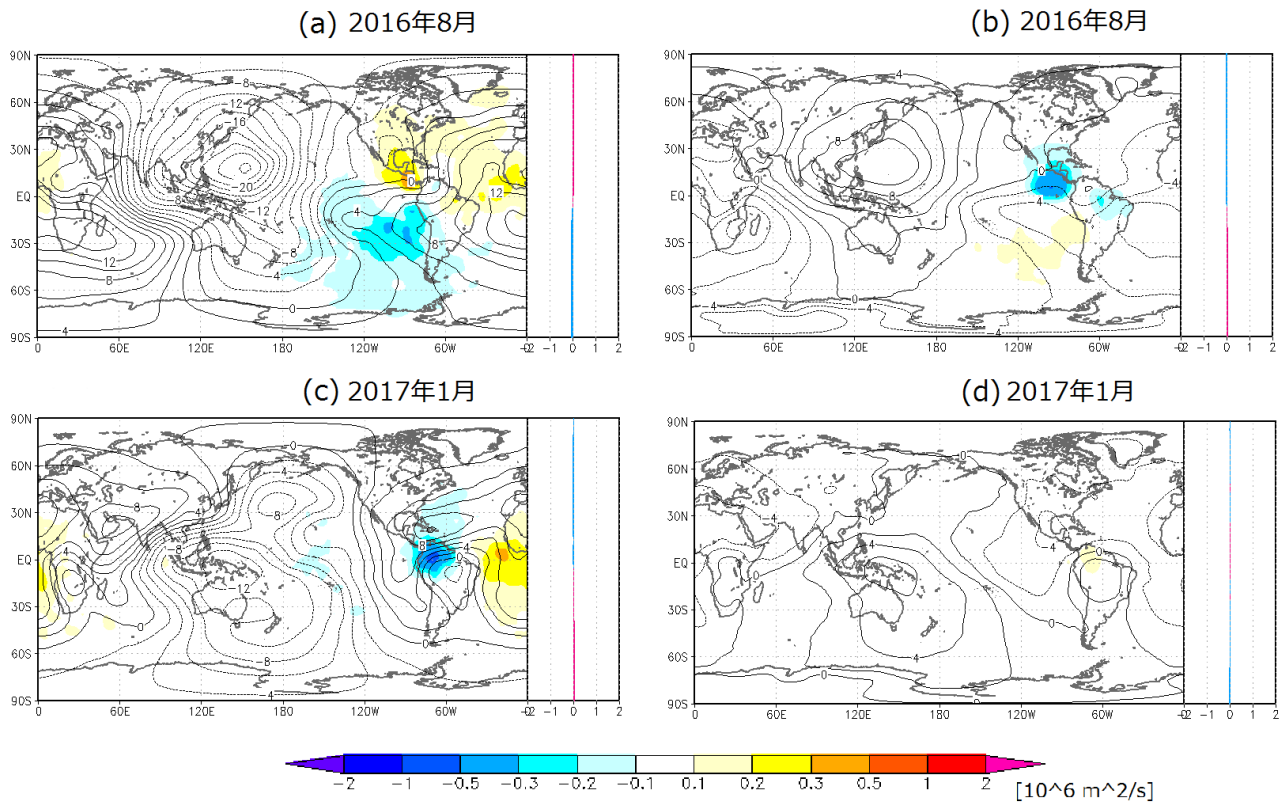


図 2.1.2 風の色速度ポテンシャルの解析値の TEST-A の CNTL からの変化量 (左) とその緯度毎の平均値 (右)。(a), (b) は 2016 年 8 月、(c), (d) は 2017 年 1 月。(a), (c) は 200 hPa の値、(b), (d) は 850 hPa の値。

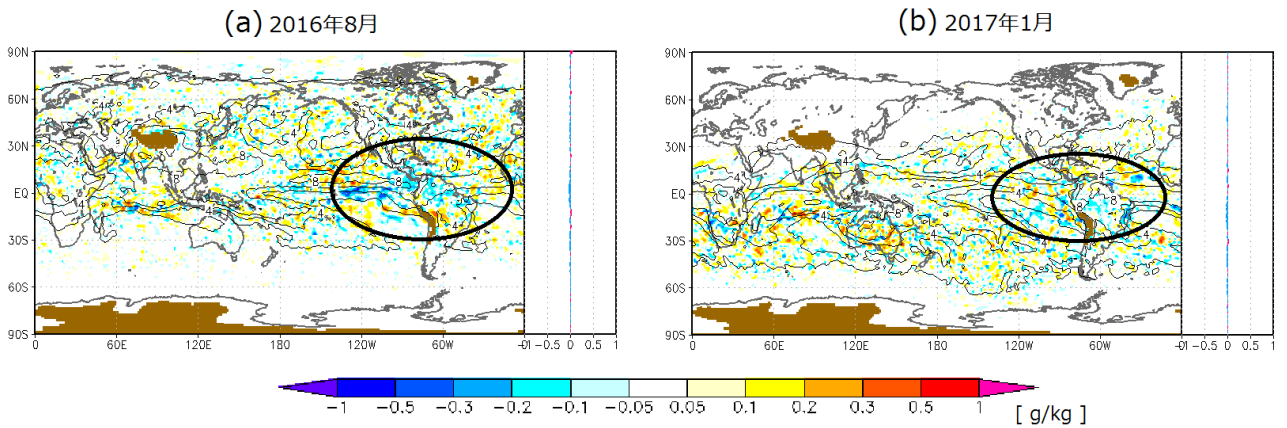


図 2.1.3 図 2.1.2 に同じ。ただし、要素は 700 hPa の比湿。(a) 2016 年 8 月、(b) 2017 年 1 月。

半球での大気の沈降も同様に不活発化し (図 2.1.2a)、
 全球的な大気循環活動が弱められたことを意味する。
 冬期間の実験では、対流圏上層で大西洋での発散の低下 (暖色) と南米での収束の低下 (寒色) が見られた (図 2.1.2b)。これも、解析場において GOES-East 観測領域での対流活動が不活発化したことを意味する。

次に、解析値における水蒸気量の変化を見るため、
 700 hPa の比湿の、TEST-A の CNTL からの差を図 2.1.3 に示す。夏・冬期間とも、GOES-East の観測領域内で比湿の減少が見られた。特に熱帯付近で顕著に減

少した (図中の黒い円内)。以上の第一推定値の変化の
 妥当性を確認するため、航空機観測の風速およびマイクロ波水蒸気サウンダの観測輝度温度の FG departure の標準偏差変化率及び利用データ数変化率を図 2.1.4 に示す。

航空機の風データの FG departure 標準偏差が対流
 圏上層で有意に悪化した。マイクロ波水蒸気サウンダ
 データについては、全チャンネルで FG departure 標準
 偏差が増加し、利用データ数が減少した。これらの結
 果は、第一推定値の風の場合および水蒸気場の精度が悪

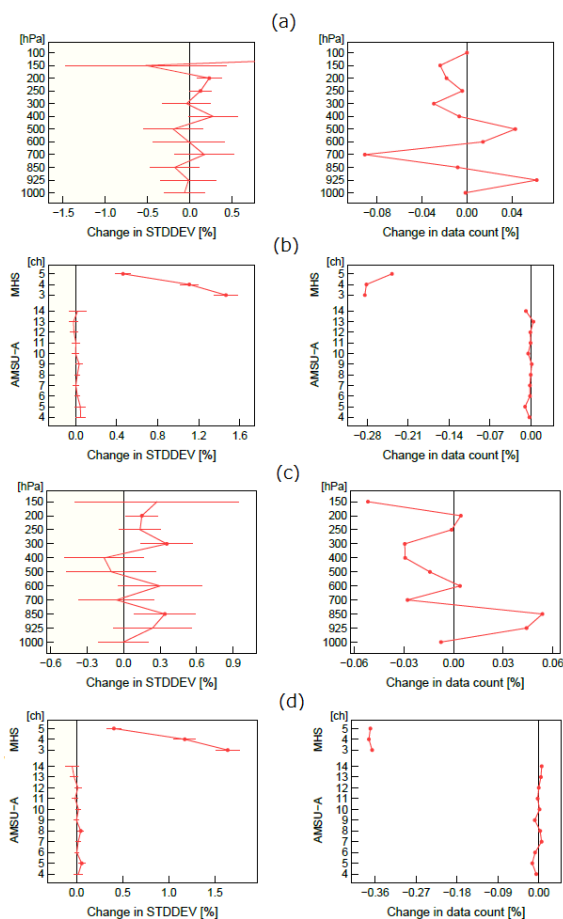


図 2.1.4 (a), (c) 航空機観測の風速（東西成分）データ、(b), (d) マイクロ波水蒸気・赤外サウンダ輝度温度データの観測値から第一推定値を引いた値の標準偏差 (STDDEV) の変化率 (左) 及び利用データ数変化率 (右)。上 2 段が 2016 年 8 月平均、下 2 段が 2017 年 1 月平均。エラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95% 信頼区間を表し、赤丸はエラーバーが変化率 0% を跨がない場合に付与され、その変化傾向が有意であることを示す。

化したことを示している。予測精度の変化について、以下の定義による改善率を用いて確認した。ECMWF 解析値を参照値として、予報時間 24, 48, 72 時間の高度、風速、比湿、気温の二乗平均平方根誤差を緯度・気圧毎に期間平均した値を TEST-A 及び CNTL について、それぞれ算出し、CNTL の TEST-A からの差を、CNTL の値で割ったものを改善率とした。通常、数値予報実験においては予報精度の検証を行う際に TEST および CNTL のそれぞれの実験で計算される解析値を真値だと仮定し、予報値との差を調べることによって精度評価を行うことが多い。しかし、観測データそのものの有無やデータの利用方法の変更はデータ同化の過程を通じて解析場自体を変化させるため、TEST と CNTL 実験でそれぞれ異なる解析場が存在することになる。参照値がそれぞれ異なる状況で正確な評価を行うことは望ましくないため、独立な参照値として ECMWF の解析値を利用した。高度、風速（東西成分）、比湿については、予報初期から 72 時間予報まで改善率が負

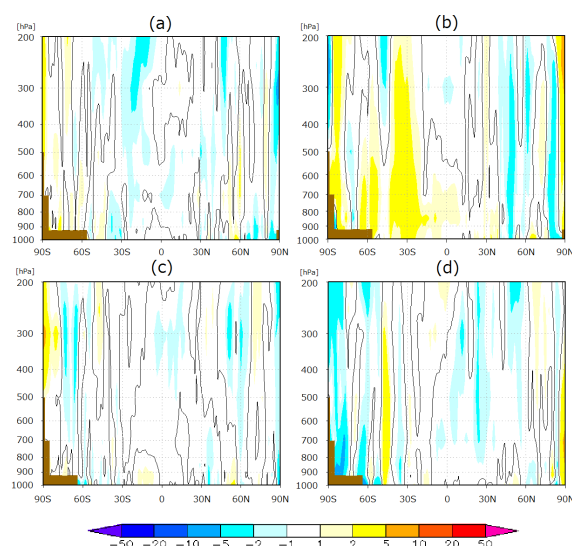


図 2.1.5 高度場の予報値の対 ECMWF 解析値検証の改善率期間平均値。改善率として、予報値と参照値 (ECMWF の解析値) の二乗平均平方根誤差 (RMSE) の CNTL-TEST-A の差を CNTL の RMSE で割った割合 [%] を定義とした。縦軸は気圧、横軸は緯度。検証期間は上段 (a), (b) が 2016 年 8 月、下段 (c), (d) が 2017 年 1 月。左列 (a), (c) が 24 時間予報、右列 (b), (d) が 72 時間予報。暖色は改善、寒色は改悪を意味する。

の値となり、改悪が見られた。高度の改善率を図 2.1.5 の (a), (c), (d) に示す。ただし、夏期間の実験については、72 時間予報の南半球で高度および風速の改善率が正の値となった (b)。気温の改善率は中立であった。

(3) 考察とまとめ

棄却実験の結果、GOES-East の観測領域で風や水蒸気の解析場と第一推定値の変化が確認された。航空機の風観測データと第一推定値の風場の乖離が大きくなっており、この乖離は後述の CSR のみを棄却した実験 (TEST-B) では見られなかったことから、GOES-13 の AMV を棄却したことにより、風場の解析精度と予報精度が低下したと考えられる。これは想定された結果と一致する。水蒸気場の変化についての考察は、以下の CSR の棄却実験で述べる。また、予報場への影響としては、解析場の精度低下により、風や比湿だけでなく高度場の予報初期の誤差が増加した。夏期間の南半球で、高度場の 72 時間予報誤差が減少したことについては、南半球での GOES-13 のプロダクトの品質管理に問題がある（悪品質データが同化されている）可能性を示唆している。今後、南半球のみ不使用とする実験などの調査を行う予定である。

2.1.3 GOES-13 CSR の棄却実験

図 2.1.1 で定義される期間 B を想定した GOES-13 の CSR の棄却実験を行う。CSR のみを棄却することにより、CSR データのみ未入電となる期間の影響を調査で

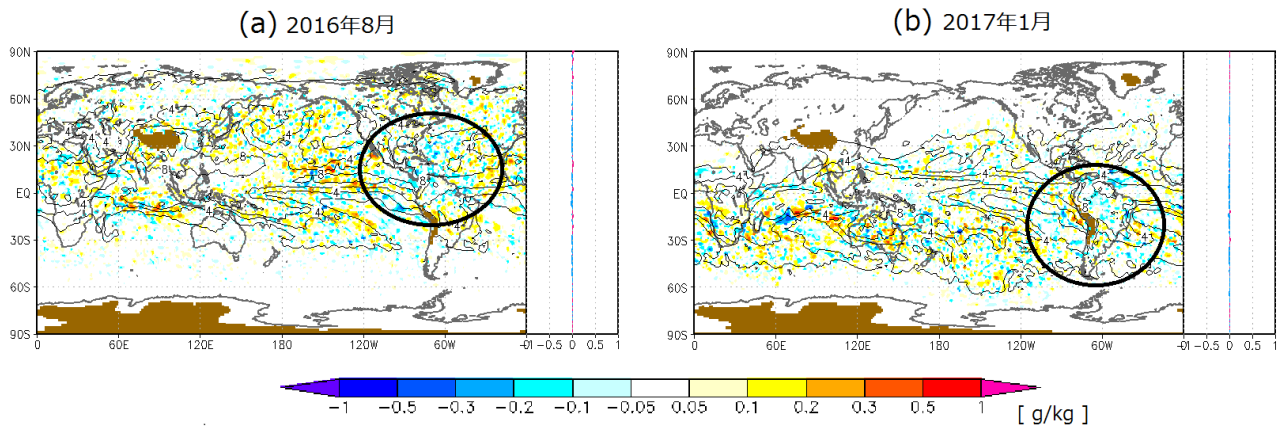


図 2.1.6 図 2.1.3 に同じ。ただし TEST-B の CNTL からの変化量についての統計。

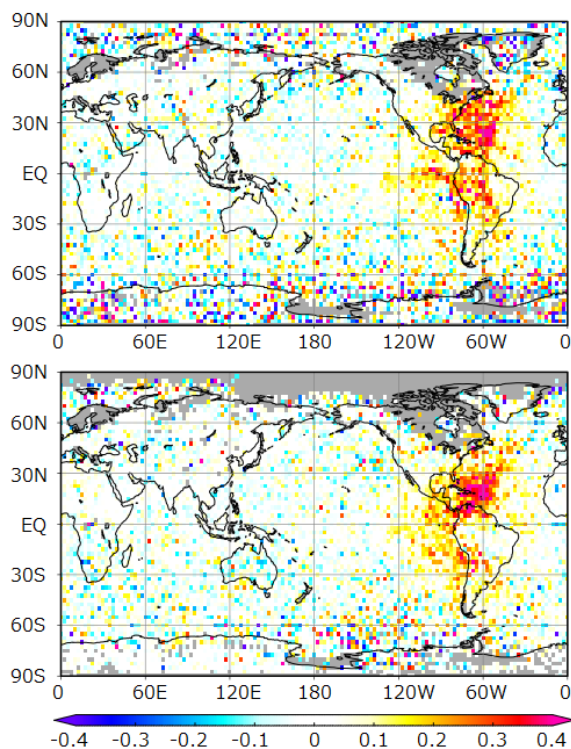


図 2.1.7 マイクロ波水蒸気サウンダ MHS チャンネル 3 の観測値から第一推定値を引いた値の標準偏差の差 (TEST-B - CNTL)。単位は K。上が夏期間 (2016 年 7 月 10 日～9 月 11 日)、下が冬期間 (2016 年 12 月 10 日～2017 年 2 月 11 日) の統計。暖色系が改悪を示す。

きる。また、TEST-A の結果と比較することで、AMV と CSR の効果を比較することができる。

(1) 調査方法

第 2.1.2 項の CNTL を用い、そこから GOES-13 の CSR のみを利用しない変更を加えた設定の実験を TEST-B として実行し、CNTL と比較することで CSR 未入電期間の影響を調査した。期間は第 2.1.2 項と同じである。また、CNTL と TEST-B の差と CNTL と

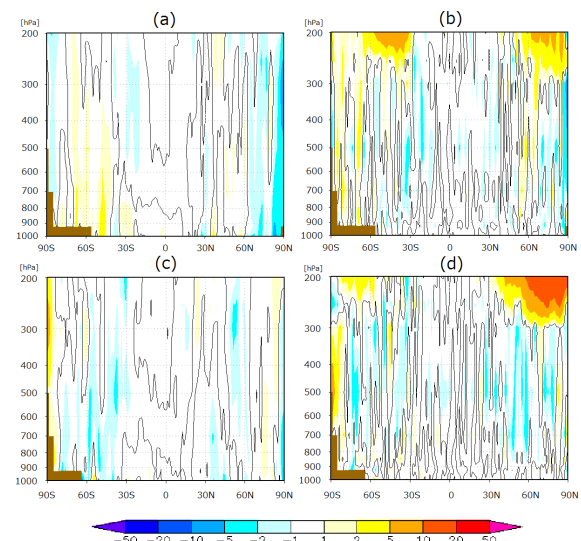


図 2.1.8 図 2.1.5 と同じ。ただし、TEST-B の 24 時間予報値を対象とした。左列 (a), (c) は高度場、右列 (b), (d) は比湿の改善率で、上段 (a), (b) は 2016 年 8 月、下段 (c), (d) は 2017 年 1 月の各 1 か月の統計。

TEST-A の差と比較することで、AMV 及び CSR それぞれの効果について評価する。

(2) 実験結果

TEST-B の比湿解析値の CNTL からの変化量を図 2.1.6 に示す。熱帯域から夏半球中緯度にかけての GOES-13 観測領域で、全体的に水蒸気量の減少が見られた (図中の黒い円内)。熱帯域での減少量は TEST-A より少ない。循環場については、TEST-A で見られた変化は TEST-B では殆ど見られなかった (図略)。

第一推定値の変化については、特に GOES-13 と地理的に近い位置にある GOES-15 や Meteosat の CSR、対流圏中上層の水蒸気に感度のあるマイクロ波水蒸気サウンダ MHS、マイクロ波水蒸気イメージャの輝度温度データの FG departure の標準偏差が大きくなり、

利用データ数が減少し、観測データとの整合性が悪化した。これらの FG departure 標準偏差の増加や利用データ数の減少の程度は、TEST-A でみられたものと同程度であった（図 2.1.4(b), (d) と同程度なので図は略）。更に、FG departure 標準偏差の増加が最も顕著に現れた MHS のチャンネル 3 について、水平分布図を図 2.1.7 に示す。MHS のチャンネル 3 は、GOES-13 の CSR の利用チャンネルと感度のある高度がほぼ同じである。FG departure 標準偏差の増加は GOES-13 の観測領域で見られ、特に他の静止気象衛星の観測領域外でその変化が顕著であった。

図 2.1.8 に ECMWF の解析値を参照値とした検証における高度場および比湿の 24 時間予報の改善率を示す。高度場については若干の悪化が見られるが、TEST-A ほどではなかった。一方、比湿については、対流圏において TEST-A と同程度の悪化が見られた。

また、大西洋の熱帯低気圧進路予測精度検証の結果を図 2.1.9 に示す。TEST-B では、進路予測精度の悪化が見られた。

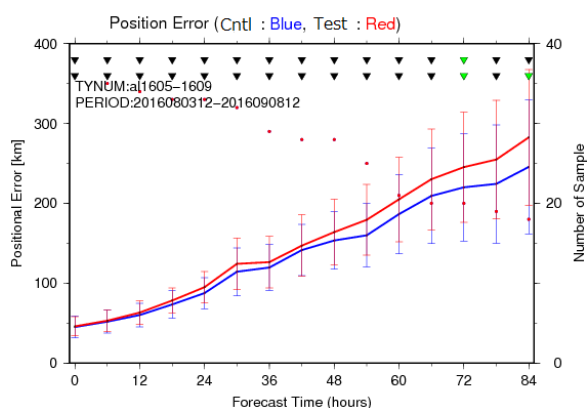


図 2.1.9 2016 年 8 月 3 日～9 月 8 日に大西洋で発生した熱帯低気圧事例を対象とした平均進路予測誤差 [km]（実線、左軸）。青線が CNTL 実験、赤線が TEST-B 実験。線に付属したエラーバーは誤差の発生が正規分布に従うと仮定した場合の 95%信頼区間を表す。サンプルは CNTL と TEST-B で揃えてあり、両実験で熱帯低気圧中心を追跡出来たものだけを検証対象としている。このため、サンプル数（赤丸、右軸）は両実験で一致する。図上部の▽は予測誤差の差の統計的な有意性を示すもので、上段が時間方向の相関を考慮した場合、下段は時間方向の相関を考慮せず独立と仮定した場合の有意判定結果を示し、緑は有意、黒は有意ではないことを示す。

(3) 考察とまとめ

GOES-13 の CSR データを棄却した結果、解析値の対流圏中下層の水蒸気量（700 hPa の比湿）が観測領域において減少した。TEST-A では熱帯域で、顕著な減少が見られたが、TEST-B ではそのような減少は見られなかった。これは、CNTL 実験においては、CSR と AMV を同時に同化することでそれらの相乗効果として解析精度が改善し、対流活動の活発な熱帯で水蒸気

量を増やすように働いているためだと考えられる。循環場については TEST-A に見られるような変化は殆んど確認されず、TEST-A の循環場の変化は、GOES-13 の AMV を棄却した影響であることがわかった。対流圏中上層の水蒸気に感度のあるマイクロ波水蒸気サウンダの FG departure 標準偏差の増加および利用データ数の減少については、TEST-A と TEST-B で同程度であり、全球的な対流圏中上層の水蒸気場の精度維持には、CSR の同化が主に寄与していたことが示された。また、その標準偏差の増加は、他の静止気象衛星の観測領域外で顕著であり、対流圏中上層の水蒸気場の精度維持には、データの空白域が生じないように、5 機の静止気象衛星による CSR が必要であると言える。高度場の予報精度については、TEST-B では TEST-A ほどの悪化は見られなかったことから、CSR の高度場の予報精度への寄与は AMV よりも小さいことがわかった。一方、対流圏の比湿の予報精度については、TEST-A および TEST-B で同程度の悪化が見られたことから、CSR の寄与が大きいと考えられる。また、TEST-B において大西洋の熱帯低気圧進路予測精度が悪化したことから、GOES-13 の CSR 同化による水蒸気場の改善が、その精度維持に寄与していたと考えられる。全球解析での GOES-East の AMV、CSR データの同化は、GOES-East の観測領域の南北米国大陸周辺では、大気循環場や水蒸気場の解析精度に寄与していることがわかった。これらの結果より、日本域を観測しているひまわりの観測データが長期間にわたって利用不可能となった場合、日本域の数値予報精度に同様の悪影響が生じると考えられる。

参考文献

- 石橋俊之, 上沢大作, 2007: 静止衛星イメージャ. 数値予報課報告・別冊 53 号, 気象庁予報部, 106-120.
- 計盛正博, 2016: ひまわり 8 号晴天放射輝度温度の利用開始. 平成 28 年度数値予報課研修テキスト, 気象庁予報部, 46-49.
- 山下浩史, 今井崇人, 2007: 大気追跡風 (AMV). 数値予報課報告・別冊 53 号, 気象庁予報部, 36-56.

2.2 全球解析における欧州静止気象衛星 Meteosat-11 データの利用開始¹

2.2.1 背景

経度0度に静止する Meteosat のプロダクトは、観測地点の少ないアフリカ周辺領域や大西洋・インド洋において、貴重な観測データとなっている。2018年2月20日、EUMETSAT はこの領域を観測する Meteosat-10 からその後継機である Meteosat-11 へ本運用機の交代を実施した。これに伴い、翌月の3月6日に Meteosat-10 によるプロダクトが配信終了となることから、気象庁の現業数値予報システムでの利用も Meteosat-10 のプロダクトから Meteosat-11 のプロダクトへ変更する必要があった。新規衛星によるプロダクトを現業数値予報システムで利用を開始するには、事前にその品質およびインパクトを十分確認することが、数値予報精度を維持する上で重要である。今回、新しく観測を開始した Meteosat-11 は、Meteosat-10 と同じ Meteosat Second Generation シリーズの衛星であり、搭載されたイメージャのセンサは同じ仕様(SEVIRI: the Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager)である。その AMV および CSR のプロダクトは、これまで利用してきた Meteosat-10 のプロダクトと同等の品質や特性、数値予報へのインパクトがあることが期待される。これらの期待される事項を確認するため、2機の並行配信期間(図 2.2.1)のデータを用いて調査を行った。

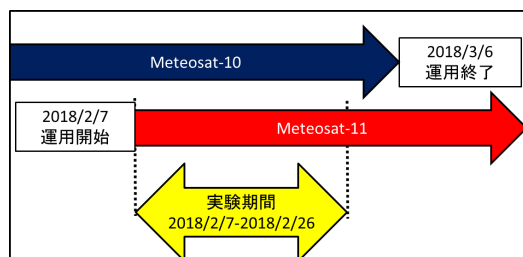


図 2.2.1 Meteosat-10 から Meteosat-11 への切替と並行配信期間。

2.2.2 調査方法

Meteosat-10 と Meteosat-11 の並行配信期間(図 2.2.1)の2018年2月7日～26日の20日間の AMV 及び CSR のデータを用い、Meteosat-10 の AMV および CSR を利用する設定の実験を CNTL、Meteosat-11 の AMV および CSR を利用する設定の実験を TEST、どちらの Meteosat プロダクトも利用しない設定の実験を BASE として3種類の実験を実施し、それらの結果を比較することで Meteosat-10 と Meteosat-11 の AMV 及び CSR の同期間の品質を調査した。また、TEST と CNTL の BASE に対する解析値や他の観測データの第一推定値の改善幅、予報精度の差を比較した。

¹ 下地和希、岡部いづみ

2.2.3 Meteosat-11 大気追跡風データ

(1) Meteosat-11 AMV の品質と特徴

Meteosat-11 AMV の品質を確認するために、Meteosat-10 の AMV と比較する形で全球数値予報システムを使った風速 FG departure (観測値と第一推定値の差)の統計調査を行った。FG departure のヒストグラムを図 2.2.2 に示す。Meteosat-11 の FG departure 標準偏差は、Meteosat-10 と比較して最大 0.5 m/s 程度大きい。しかし、AMV の品質管理に用いられる品質管理指標(QI: Quality Indicator)の値は AMV と第一推定値の差が小さくなるほど大きくなる傾向があり、通常は QI の値が大きいほど高品質の AMV であると考えられる。今回の実験では Meteosat-10 および Meteosat-11 の AMV の QI の計算に用いられた第一推定値は ECMWF が当時の現業衛星である Meteosat-10 の AMV を同化して得られたものであり、QI を用いた品質管理を行えば Meteosat-10 の AMV の FG departure の標準偏差がより小さくなる。そのため、この差は、両衛星 AMV の品質の差であるとは言い切れない。Meteosat-10, 11 による AMV は同仕様のセンサで観測されたデータを利用しており、AMV の算出に使われるアルゴリズムも同じものを利用しているため、その品質や特性が似ていることは妥当な結果と考えられる。一方、データ数については、Meteosat-10 と Meteosat-11 で違いが見られる。Meteosat-11 の赤外・水蒸気 AMV のデータ数は Meteosat-10 のデータ数よりも多く、特に水蒸気 AMV でこの傾向が顕著である(図 2.2.3)。比較的ノイズの影響を受けやすい水蒸気 AMV でデータ数の増加が見られるのは、衛星画像上の雲・水蒸気パターンの追跡成功率が Meteosat-11 では向上しているからだと考えられる。センサの仕様は同一であっても、センサは衛星を構成する他の構成ユニットが発生させるノイズの影響を受けるため、この差異が生じていると考えられる。

(2) Meteosat-11 AMV の数値予報へのインパクト

このデータ数の差異が解析値および第一推定値に与える影響をみるため、ラジオゾンデ・航空機観測の風データ(ベクトル)の FG departure の標準偏差の、TEST の CNTL からの変化率を図 2.2.4 に示す。ラジオゾンデ・航空機観測の FG departure 標準偏差が TEST の方が小さく、Meteosat-11 の AMV を同化した方が、第一推定値がより現実に近くなることを示している。

(3) 考察

AMV データの数は Meteosat-11 の方が Meteosat-10 より多く、特に水蒸気 AMV のデータ数は増加している。一方、Meteosat-11 の FG departure の標準偏差は Meteosat-10 よりも全地域・全高度で最大で 0.5 m/s 程度大きい。予報値あり QI 値(Meteosat-10 を同化して得られた ECMWF の予報値を利用)を用いて品質管

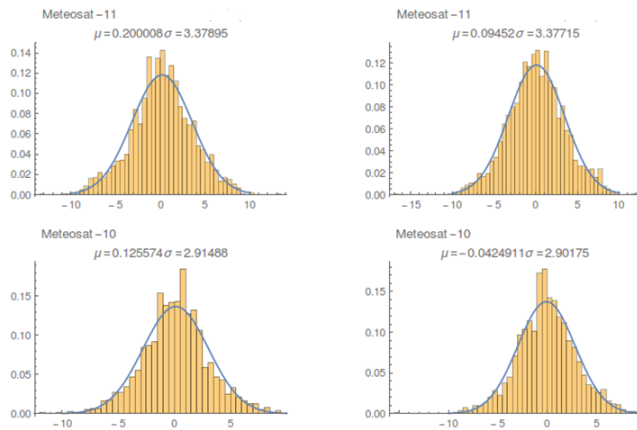


図 2.2.2 北半球赤道上層 (100–400 hPa) の風の U 成分 (左) 及び V 成分 (右) の FG departure ヒストグラム。横軸は AMV(O) と第一推定値 (B) の風速差を表し、単位は m/s である。また、縦軸は規格化された確率密度を表す。期間は 2018 年 2 月 7 日～14 日。上段が Meteosat-10、下段が Meteosat-11。実線は FG departure の平均・標準偏差で計算した正規分布。また、図中の μ , σ はそれぞれ FG departure の平均・標準偏差を表す。

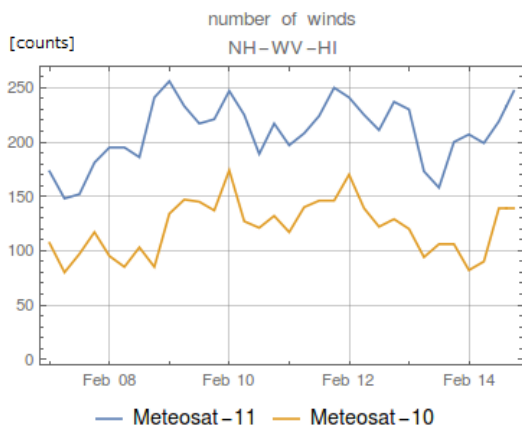


図 2.2.3 北半球上層 (100–400 hPa) の水蒸気 AMV のデータ数の時系列比較。QC 済みのもの。青が Meteosat-11、黄色が Meteosat-10 の AMV。

理を行った Meteosat-10 の AMV に有利に働くことを考慮すると、品質の程度は同等であると考えられる。バイアス特性に有意な差異は見られないことを考えると、Meteosat-10 の AMV を Meteosat-11 の AMV に置き換えることに問題は無いと考えられる。他観測データとの整合性では、航空機・ラジオゾンデの風との整合性が向上し、予報精度に好影響を与えることが示唆される。その理由は、利用可能なデータ数の増加によるものと考えられる。

2.2.4 Meteosat-11 晴天放射輝度温度データ

(1) Meteosat-11 CSR の品質と数値予報へのインパクト

前述の統計期間について、Meteosat-10 および Meteosat-11 の CSR の FG departure の平均バイアス

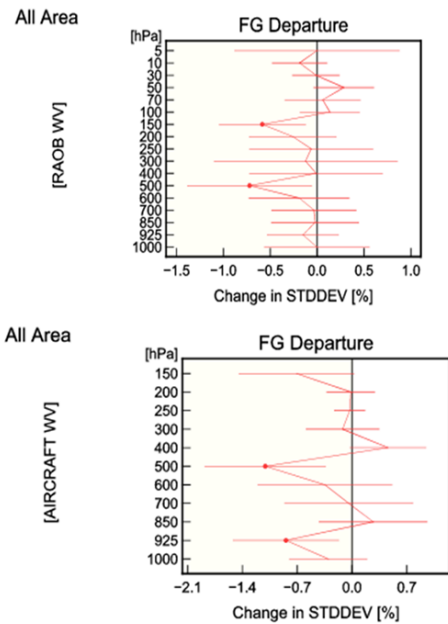


図 2.2.4 ラジオゾンデ (上段) および航空機 (下段) の FG departure 標準偏差 (STDDEV) の TEST の CNTL からの変化率。

差は、VarBC 補正前は約 0.4 K であったが、VarBC 補正後は、平均バイアスおよび標準偏差とも差が殆んど見られなかった (図略)。また、品質管理後のデータ数もほぼ同程度で、統計期間を通してデータの品質は安定していた。Meteosat-10 と Meteosat-11 の CSR を同化することにより期待される、対流圏中上層の水蒸気場の予報初期における改善が、TEST と CNTL で同程度に見られるか確認するため、対流圏中上層の水蒸気に感度のあるマイクロ波水蒸気サウンダ MHS チャンネル 3 の FG departure 標準偏差の、TEST と CNTL の BASE からの変化量を図 2.2.5 に示す。どちらの実験でも、Meteosat-10 または Meteosat-11 の観測領域で標準偏差が小さくなっている。これは、Meteosat-10 または Meteosat-11 のデータを同化したことにより、BASE に比べて TEST および CNTL の輝度温度の第一推定値が MHS チャンネル 3 の観測輝度温度と整合する方向に変化したことを示している。つまり、第一推定値における対流圏中上層の水蒸気場の精度が向上したことを意味している。また、その影響の大きさは二つの衛星で同程度であった。これらの調査結果から、Meteosat-11 CSR は、これまで利用してきた Meteosat-10 CSR のデータと同等に解析値、予測値の対流圏中上層の水蒸気場を改善する効果があることが分かった。

2.2.5 Meteosat-11 によるプロダクトの利用開始

第 2.2.3 項および第 2.2.4 項の調査結果から、Meteosat-11 の AMV および CSR データの品質は、Meteosat-10 のそれらと同程度またはそれ以上であることが分かった。また、期待される解析値や第一推定値の BASE からの改善幅も、TEST と CNTL で同程

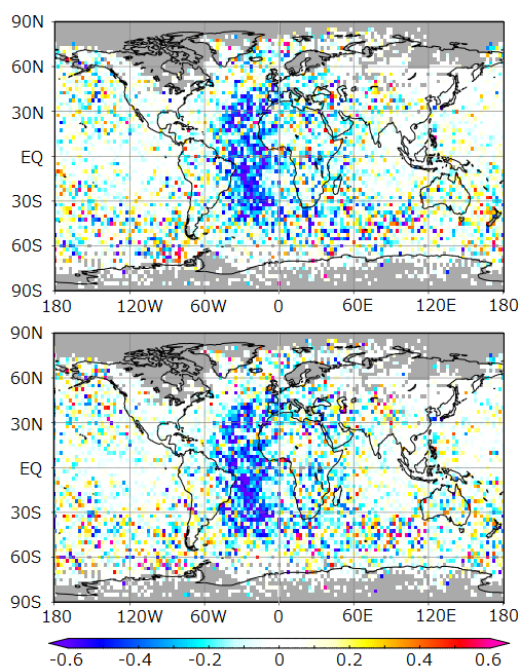


図 2.2.5 図 2.1.7 に同じ。ただし期間は 2018 年 2 月 7 日～26 日の 20 日間で、上段が CNTL-BASE、下段が TEST-BASE。

度であることが示された。次に、主要な気象要素の予報精度について確認した。図 2.2.6 に CNTL と TEST の海面更正気圧 (Psea)、500 hPa ジオポテンシャル高度、850 hPa 気温の 1 日予報と 5 日予報の予報精度を示す。TEST, CNTL の各気象要素の二乗平均平方根誤差 (RMSE) は、同等であった。

以上の調査から、Meteosat-11 の AMV および CSR を同化した際の予報精度へのインパクトも同等であることが確認できたため、2018 年 3 月 6 日より全球解析で Meteosat-10 の AMV および CSR に替えて、Meteosat-11 の AMV および CSR の利用を開始した。

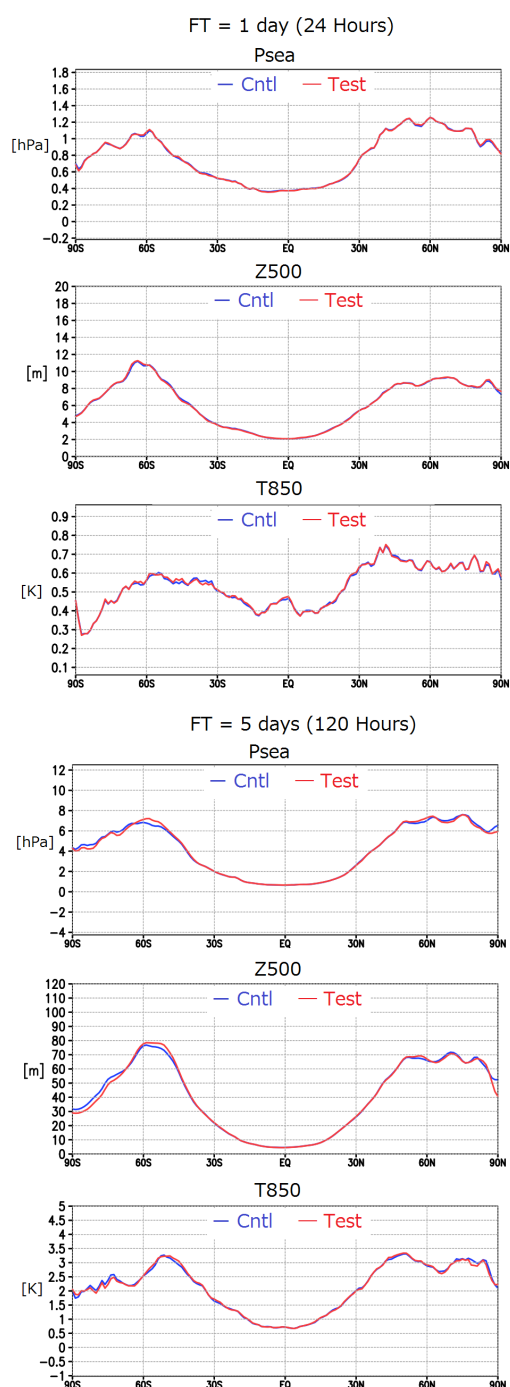


図 2.2.6 上から CNTL (青線) と TEST (赤線) の海面更正気圧 (Psea)、500 hPa ジオポテンシャル高度 (Z500)、850 hPa 気温 (T850) の 1 日予報、Psea, Z500, T850 の 5 日予報の RMSE の経度方向帯状平均値。

2.3 LFM 降水量ガイダンスの開発¹

2.3.1 はじめに

気象庁では、2018 年 6 月 5 日の第 10 世代数値予報解析システム（以下、NAPS10; 第 1 章）の運用開始と同時に、LFM 降水量ガイダンス（以下、本ガイダンス）の運用を開始した。本ガイダンスは、NAPS10 の運用開始後に提供を開始した降水 15 時間予報²の入力データとして利用するため、また日々の予報作業において警報・注意報といった防災気象情報の発表を支援するために開発を進めてきたガイダンスである。

本ガイダンスの開発では、毎時更新される LFM の水平格子間隔 2 km の精緻な降水量予測を活かすとともに、強雨域が集中したり過剰な降水量が予測されるといった LFM の既知の課題（永戸ほか 2013）を軽減した予測を作成することを目指した。また、既存の GSM や MSM ガイダンス（白山 2018）で用いているカルマンフィルタやニューラルネットワークといった統計手法は利用せず、ガイダンスの開発や管理の効率化を狙った、従来よりもシンプルな予測手法を採用した。

本節では、まず第 2.3.2 項で本ガイダンスの仕様と作成方法について述べる。次に第 2.3.3 項と第 2.3.4 項で、本ガイダンスの検証結果と予測事例を紹介する。最後に第 2.3.5 項で、まとめと利用上の留意点及び今後の課題について述べる。

2.3.2 仕様と作成方法

LFM 降水量ガイダンスの構成図を図 2.3.1 に、仕様を表 2.3.1 に示す。本ガイダンスは、既存の MSM ガイダンスと同じ 5 km 格子（南北 3 分×東西 3.75 分の等緯度経度座標）を予測対象とし、前 1 時間の格子平均の降水量を予測する 1 時間平均降水量ガイダンス（MRR1）と格子内最大の降水量を予測する 1 時間最大降水量ガイダンス（RMAX1）の 2 つから構成される。この平均及び最大とは、既存の GSM や MSM ガイダンスと同様に、各 5 km 格子に含まれる解析雨量（1 km 格子）の平均値及び最大値という意味である。また、MRR1 と RMAX1 の予測対象領域は、それぞれ LFM 領域または日本周辺の領域である（図 2.3.2）。本項では、MRR1、RMAX1 の順にその仕様と作成方法について説明する。

(1) 1 時間平均降水量 (MRR1)

MRR1 は、初期時刻の異なる複数の LFM の 1 時間降水量のアンサンブル平均を取り（LAF 法³）、さらに頻度バイアス補正（高田 2018）を適用することで作成する。第 2.3.1 項で述べた通り、LFM には強雨域が集

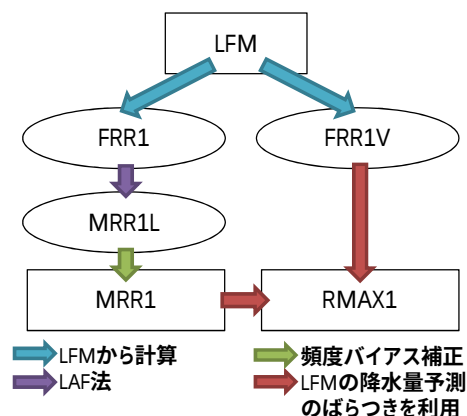


図 2.3.1 LFM 降水量ガイダンスの構成図。矢印は凡例に示した統計手法または予測方法を、計算過程で算出される中間製品は楕円で表す。

中したり過剰な降水量が予測されるといった課題がある。そこで MRR1 では、LAF 法による平均処理によって過剰な予測を抑制しつつ、同時に単一初期値よりも降水の捕捉率の高い降水量予測を作成し、さらに大雨の捕捉率を向上させるために頻度バイアス補正を行う手法とした。

MRR1 の具体的な作成手順を説明する。

- ① LFM の 1 時間降水量を 5 km 格子に変換する（FRR1）。
- ② FRR1 の LAF を求め、さらに空間方向に平滑化する（MRR1L）。
- ③ MRR1L にさらに頻度バイアス補正を適用する（MRR1）。

まず、水平格子間隔 2 km の LFM の降水量予測を 5 km 格子へと変換する（①）。この変換では、5 km 格子点に最も近い LFM 格子を中心とした 3 × 3 格子の平均を取る。

次に、①で計算した最新初期時刻の FRR1 と過去 5 初期時刻の FRR1 の計 6 時刻分の LAF を求め（図 2.3.3）、さらに空間方向に平滑化する（②）。LAF の各初期時刻に与える重みは、LFM の降水量の予測精度が予報時間が長くなるほど下がっていくことを考慮して、古い初期時刻ほど小さく設定する。また、この重みは局地解析に第一推定値を与える MSM の初期時刻が古くなるタイミングでさらに減らす。これは、同じ MSM から第一推定値を取得した LFM 間では、降水の分布や精度が似る傾向が確認されている（永戸ほか 2013; 原ほか 2015）ため、最新の観測が反映された新しい MSM に基づく LFM の予測値がアンサンブル平均に占める割合を大きくすることを狙っている。また、空間方向の平滑化は、LAF を求めた後に残る突出した予測を減らすことで、頻度バイアス補正の閾値更新を行いやすくする効果を狙っており、実際に予測精度が向上することを確認している。

最後に、MRR1L に頻度バイアス補正を適用して MRR1 とする（③）。頻度バイアス補正の閾値は、予測

¹ 白山 洋平

² <https://www.jma.go.jp/jma/press/1806/14a/fcst15hour.html>

³ Lagged Average Forecast : ラグ平均予報法 (Hoffman and Kalnay 1983)

表 2.3.1 LFM 降水量ガイダンスの仕様一覧

	1 時間平均降水量 (MRR1)	1 時間最大降水量 (RMAX1)
作成対象	5 km 格子	
作成方法	LFM の 1 時間降水量の LAF を求め、さらに頻度バイアス補正を適用して作成。	MRR1 に LFM の 1 時間降水量のばらつきに応じた降水量を加え、さらに解析雨量から作成した関係式で変換して作成。
初期時刻	毎正時	
予報対象時間単位	1 時間	
予報期間と間隔	FT=1 から FT=9 まで 1 時間間隔	
逐次学習の有無	あり (頻度バイアス補正)	なし
目的変数	解析雨量 (1 km 格子) とアメダスの降水量から算出した 5 km 格子内の平均降水量	解析雨量とアメダスの降水量から算出した 5 km 格子内の最大降水量
層別化処理の対象	格子毎、初期時刻、予報時間 (1 時間区切り)	
備考	頻度バイアス補正の観測の閾値は 0.5, 1, 3, 5, 10, 20, 30 mm/h。LAF 法では最新初期時刻と過去 5 初期時刻の予測を用いる。重みは初期重みを 15、1 初期値に重みを 2 ずつ減らし、さらに局地解析に第一推定値を与える MSM の初期時刻が古くなる場合は追加で 2 減らす。	

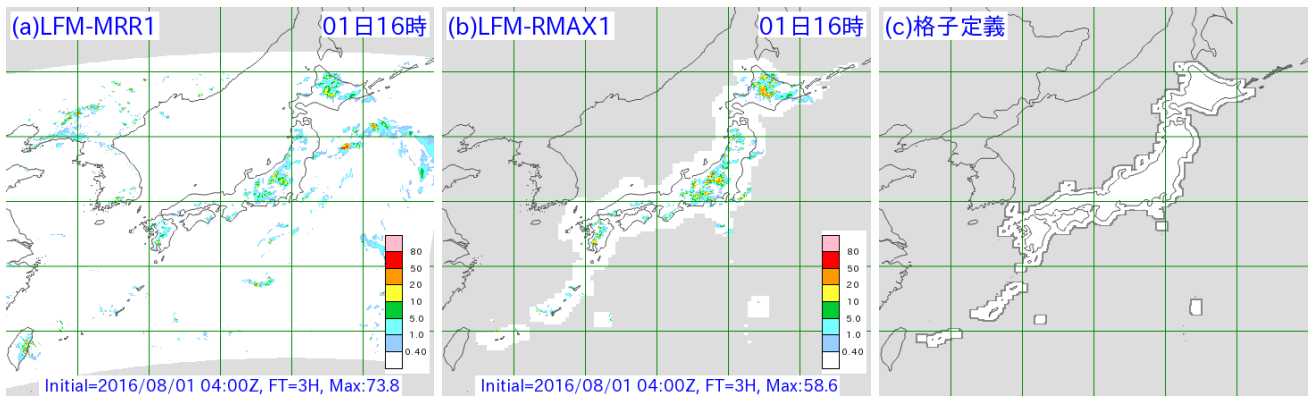


図 2.3.2 LFM 降水量ガイダンスの予測例と格子定義。(a) は MRR1, (b) は RMAX1, (c) は格子定義である。(a) 及び (b) の灰色の領域は予測対象外の領域を、(c) の白色の領域は頻度バイアス補正の閾値を設定する格子を、濃灰色および薄灰色の領域は格子毎に閾値を設定しない格子を表す。なお、白色と濃灰色の領域が (b) の RMAX1 の予測対象領域に対応する。

対象格子、初期時刻、予報時間で層別化し、逐次更新する。予測対象格子による層別化によって、数値予報と現実の地形の違いに起因する格子毎に異なる系統誤差が、初期時刻や予報時間による層別化により、降水の日変化が考慮される。また、前述の LAF では、予報時間後半で平均する初期時刻数が減るために、平均化による予測頻度の抑制効果が弱くなり予測頻度が過剰になりやすくなる。予報時間による層別化はここにも効果を発揮し、予報時間毎に閾値を変えることによって各予報時間の予測頻度を適切に補正する。

図 2.3.2(c) に、頻度バイアス補正の閾値を設定する格子を表す格子定義を示す。本ガイダンスでは、図の白色の格子に対して頻度バイアス補正の閾値を設定する。これらの格子より外側の領域については、閾値を予測対象領域の外側に向かって外挿した値を使用する。この外挿領域では、外挿値で補正した MRR1L と LFM の降水量予測を平均し、陸地から離れるほど LFM の降水量予測に近づける仕様とする。つまり、閾値を持っている格子から離れた海上の MRR1 は LFM の降水

量予測のままであることを留意する必要がある。補正に用いる観測の閾値には、「0.5, 1.0, 3.0, 5.0, 10, 20, 30 mm/h」の 7 個を設定している。30 mm/h という設定は小さいように思われるかもしれないが、50 mm/h や 80 mm/h といった降水量は格子単位での逐次更新を考えた場合には観測頻度が少なく、ガイダンスの精度が確保できないため採用していない。そのため、第 2.3.3 項 (1) で示すように、頻度バイアス補正によって予測頻度が適切に保たれているのは 30 mm/h までである点に留意が必要である。

(2) 1 時間最大降水量 (RMAX1)

RMAX1 は、MRR1 に LFM の空間的な降水量予測のばらつきに比例した降水量を加算し、さらに解析雨量から作成した関係式で変換することで作成する。この手法では、LFM の水平分解能が 2 km と LFM 降水量ガイダンスが対象とする 5 km 格子よりも高分解能であることを利用して最大降水量を予測する。

RMAX1 の具体的な作成手順を説明する。

① 5 km 格子に対応する LFM の 1 時間降水量の不偏

分散を計算する (FRR1V)。

- ② MRR1 に FRR1V の平方根に比例した降水量を加算する。
- ③ ②の降水量を解析雨量から作成した関係式で 1 km 格子相当の最大降水量へ変換する (RMAX1)。

まず、各 5 km 格子に対応する LFM の 1 時間降水量の不偏分散 (FRR1V) を計算する (①)。第 2.3.2 項 (1) の FRR1 の計算と同じく、5 km 格子点に最も近い LFM 格子を中心とした 3 × 3 格子の不偏分散を計算する。このとき、LFM 3 × 3 格子の平均値には FRR1 を用いる。

次に、第 2.3.2 項 (1) で計算した MRR1 に、①の FRR1V の平方根 (つまり、LFM 3 × 3 格子の標準偏差) に比例した降水量を加算する (②)。図 2.3.4 に示すように、LFM の 3 × 3 格子の 1 時間降水量の平均値と標準偏差及び 3 × 3 格子中の最大値の間には、3 × 3 格子の最大値と平均値の差が標準偏差に比例する関係があることが分かる。この関係を用いれば、平均値と標準偏差から最大値を推定できそうであるが、標準偏差が大きくなるにつれて最大値と平均値の差のばらつきも大きくなる傾向が見られるため、不等分散性を考慮した統計モデル (2.3.1) 式を用いて、関係式のパラメータを推定した。

$$\begin{aligned}\mu &= ax + b \\ \sigma &= cx + d \\ Y &\sim N(\mu, \sigma)\end{aligned}\quad (2.3.1)$$

ここで、 Y は目的変数である LFM 3 × 3 格子の最大値と平均値の差で、平均が μ 、標準偏差が σ の正規分布に従うと仮定する。また、 x は LFM 3 × 3 格子の標準偏差、 $a \sim d$ は μ 及び σ の回帰パラメータで、これらのうち a が図 2.3.4 の赤線の傾きに相当する。この推定したパラメータ a と標準偏差を乗じた降水量を LFM 3 × 3 格子の平均値とみなした MRR1 に加算することで、LFM 1 格子相当の降水量を計算できる。なお、この統計モデルから推定した a は、予測対象とする格子毎に異なる値を持つものの、推定結果やデータの散布図からその差は小さかったため、本ガイダンスでは全国一律の値を設定している。

最後に、②で計算した LFM 1 格子相当の最大降水量を本来の予測対象である 5 km 格子内の 1 km 解析雨量の最大値に変換する (③)。ここでは、水平格子間隔 2 km の LFM の 1 格子が解析雨量 2 × 2 格子に相当すると仮定し、過去の解析雨量データから作成した解析雨量 2 × 2 格子の平均値と 2 × 2 格子中の最大値の関係式を用いて変換する。この変換は、②で計算した降水量が本来の予測対象である 5 km 格子内の 1 km 解析雨量の最大値よりも少なくなるために行うが、その予測精度への効果は小さい。よって、RMAX1 の作成では②の MRR1 に LFM の降水量予測のばらつきに応じた降水量を加算する部分が重要となっている。

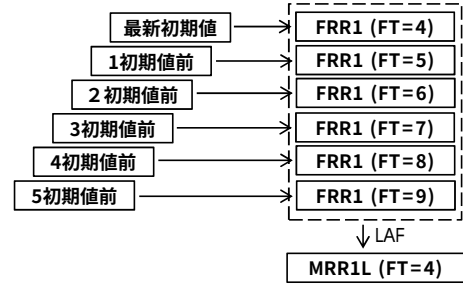


図 2.3.3 FT=4 における LAF のイメージ図。

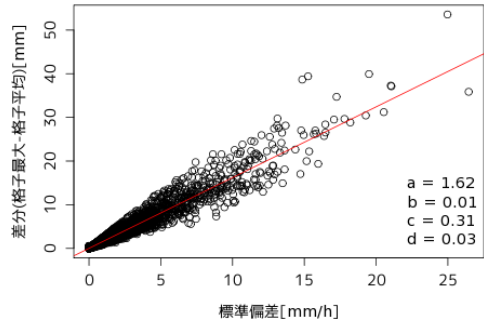


図 2.3.4 関東平野のある格子を対象とした LFM 3 × 3 格子の 1 時間降水量の標準偏差と 3 × 3 格子最大と平均の差の散布図。右下の $a \sim d$ は (2.3.1) 式の統計モデルで推定したパラメータを、赤線はこの推定したパラメータによる回帰直線を表す。

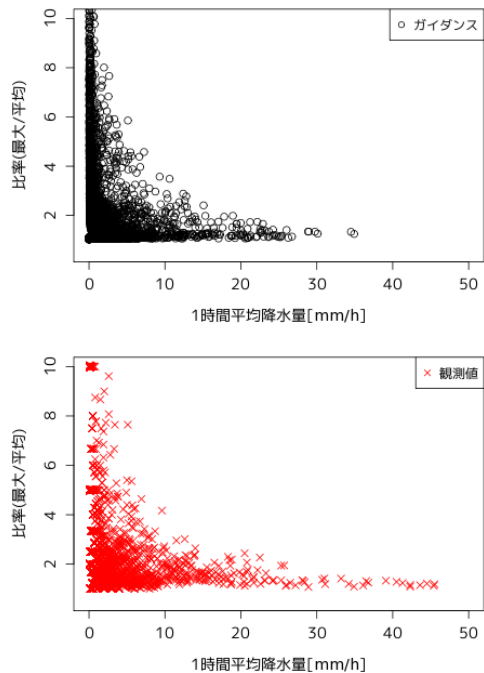


図 2.3.5 関東平野のある格子を対象としたガイダンス（上図）と観測値（下図）の 1 時間平均降水量と比率（1 時間最大降水量/1 時間平均降水量）の散布図。2016 年 6～8 月のデータを用いている。

このような方法で作成した RMAX1 が実際に観測される平均降水量と最大降水量の関係を再現できているかを確認する。図 2.3.5 は、横軸に 1 時間平均降水量、縦軸に 1 時間最大降水量と 1 時間平均降水量の比率を

とった散布図で、上図がガイダンス、下図が観測値である。観測値に注目すると、平均降水量が少ない場合には10倍近い比率を取りうる一方で、平均降水量が多くなると急激に比率が小さくなっていき、30 mm/hを超えるとほぼ一定の値（約1.2倍）となっていることが分かる。これは、格子平均の降水量が少ない場合には、不安定性の降水などの空間スケールの小さい現象で格子の一部に降水が偏る場合が含まれ、格子平均の降水量は少なくても格子内最大の降水量が多くなる、つまり比率が大きくなるケースが含まれる一方で、格子平均の降水量が多い場合は、その多くが総観規模の空間スケールの大きな現象と考えられ、このような場合には広範囲に様な降水が広がり、格子平均と最大の降水量が近くなりやすく、比率は小さくなると考えられるためである。

次にガイダンスに注目すると、観測値に比べて平均降水量0 mm/h付近や比率1倍付近にプロットが集中している傾向が見られる。しかし、平均降水量が少ない時には10倍近い比率を取りつつ、平均降水量が多くなると急激に取りうる範囲を狭めて観測値と同様に一定の値に近づくといった全体の特徴を良く表現できている。このようにRMAX1は、LFMの1時間降水量の分散に応じてMRR1に降水量を上乗せするだけのシンプルな手法ではあるが、実際に観測される降水の特徴を再現できていると言える。

ここまで述べたように本ガイダンスでは、既存のGSMやMSM平均降水量ガイダンスや1時間または3時間最大降水量ガイダンス（白山 2018）で用いているカルマンフィルタやニューラルネットワークを採用しなかった。その理由は、これらを用いたガイダンスでは開発や維持・管理のコストが高い割には、今開発で採用した手法と大きく精度が変わらなかったり、精度が劣ったりすることが実際に開発を進める中で分かったためである。

2.3.3 統計検証

LFM降水量ガイダンスの検証結果を示す。本項では本ガイダンスとの比較のために、LFMの1時間降水量とMSMの3時間最大降水量ガイダンスを加工した予測値を用いる。前者は、第2.3.2項(1)で述べたLFMの1時間降水量を5 km格子に変換したFRR1でLFMとの比較のために用いる。後者は、2017年2月28日に行われたメソモデルの改良（原 2017）及び2017年6月8日に行われたMSMガイダンスの改良（白山 2017）を反映したガイダンスで、既存のガイダンスとの比較のために用いる。

(1) 対 LFM 降水量検証

初めに、LFM降水量ガイダンスがLFMの降水量予測を改善しているかを確認する。

図 2.3.6 は、LFMの1時間降水量（LFM-FRR1）、LFM-FRR1のLAF（LFM-MRR1L）及び1時間平均

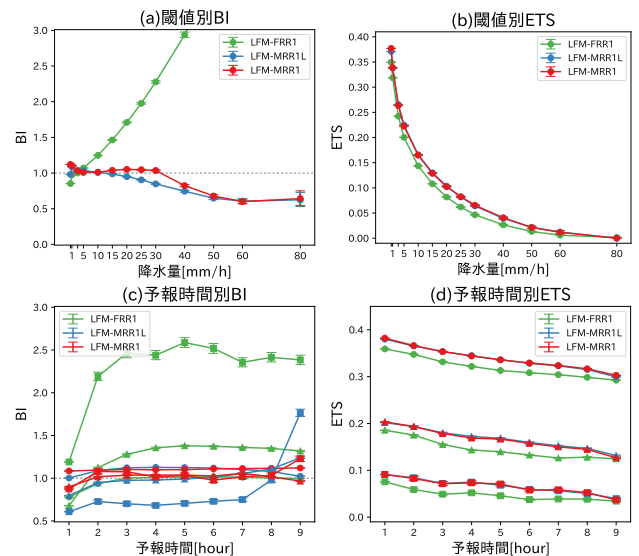


図 2.3.6 LFM 降水量ガイダンスと LFM の降水量予測の予測精度比較。左上から (a) 閾値別 BI, (b) 閾値別 ETS, (c) 予報時間別 BI, (d) 予報時間別 ETS の比較図で、検証期間は 2017 年の 1 年間である。各図ともエラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を、赤線は LFM-MRR1、青線は LFM-MRR1L、緑線は LFM-FRR1 を表し、予報時間別 BI 及び ETS 図の降水量閾値は 1.0 mm/h (丸)、10 mm/h (三角)、30 mm/h (四角) である。

降水量ガイダンス（LFM-MRR1）の比較で、ここでは閾値別バイアスコア（BI）及びエクイタブルスレットスコア（ETS）と予報時間別 BI 及び ETS を示している。検証期間はいずれも 2017 年の 1 年間で、検証に用いた初期時刻と予報時間は 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC の FT=1 から 9 である。検証対象格子は、図 2.3.2(c) で白色で示した全国の陸上及び周辺の海上格子である。

図 2.3.6(a) 及び (b) より、LFM-MRR1 は LFM-FRR1 より予測頻度が適切かつ予測精度が高くなっており、本ガイダンスは LFM の降水量予測を改善していると言える。永戸ほか (2013) で述べられている通り、LFM は強雨域が集中したり過剰な降水量を予測するといった課題があり、本検証においても LFM-FRR1 には予測頻度の過多傾向が見て取れる。対する LFM-MRR1 は、LAF と頻度バイアス補正によって、予測頻度の過多傾向を抑制しつつ予測精度を改善し、さらに 30 mm/h までの予測頻度を適切に保っていることが分かる。図 2.3.6(c) 及び (d) からは、LFM-MRR1 の方が LFM-FRR1 より予測頻度が適切かつ予測精度が高いという点が予報時間別に比較した場合も同様であることが分かる。これらに LFM-MRR1L を加えた 3 者の比較からは、予測精度の改善に効いているのは LAF であると言えるが、これのみでは降水量閾値毎や予報時間毎の予測頻度を適切に保つことができない点を頻度バイアス補正が補っていることが見て取れる。また、FT=7 までの予測と比べると、FT=8 や 9 の予測は予測頻度の傾向が異なっていたり、LFM-FRR1 からの

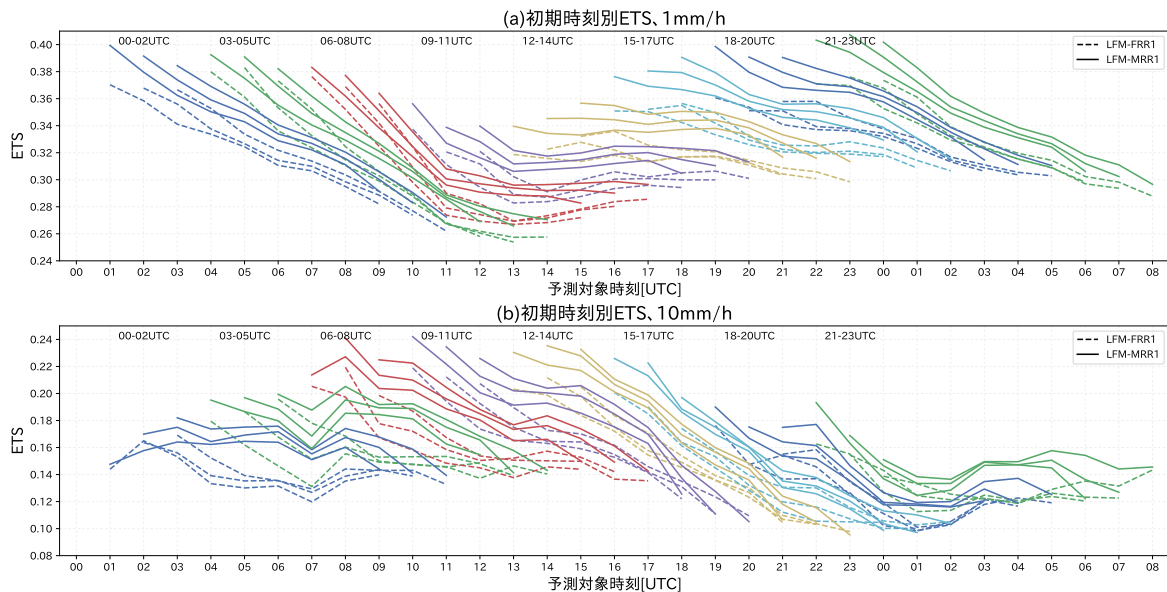


図 2.3.7 LFM-MRR1 と LFM-FRR1 の初期時刻別の予測精度比較。(a) は 1.0 mm/h, (b) は 10 mm/h での時系列図で、横軸は予測対象時刻 (UTC)、検証期間は 2017 年の 1 年間である。両図とも、実線が LFM-MRR1、破線が LFM-FRR1 で、同じ MSM から第一推定値をもらっている初期時刻を同じ緑色で示している。

改善度合いが劣っていることが分かる⁴。これは、予報時間後半ほど LAF に用いることができる初期時刻数が減っていき、特に FT=9 は過去初期時刻との平均にはならないためである。なお、LFM は 2018 年度末までに予報時間を 10 時間に延長することを計画しており第 1.2.1 項、本ガイダンスについても同じく 10 時間予報に延長すること検討している。予報時間を延長するとともに、予報時間後半の LAF に用いる予測値を増やすことで、予測精度や特性の改善が期待できると考えている。

(2) 初期時刻別の検証

次に、LFM-MRR1 の初期時刻別の検証結果を示す。第 2.3.2 項 (1) でも述べた通り、LFM は初期値を作成する局地解析に第一推定値を与える MSM の影響を強く受けるため、同じ MSM から第一推定値を取得した LFM 間で降水分布が似ていたり、予報時間前半 (3~5 時間程度まで) は新しい初期時刻のほうが精度が高いものの、それ以降では同じようなスコアとなるといった特徴 (原ほか 2015) がある。この特徴を踏まえ、本ガイダンスについても同様の視点での検証を行った。

図 2.3.7 は、2017 年の 1 年間を対象に初期時刻別に検証した LFM-MRR1 と LFM-FRR1 の ETS の時系列図である。図 2.3.7(a) は 1.0 mm/h、(b) は 10 mm/h の時系列図であり、横軸は予測対象時刻、実線は LFM-MRR1、破線は LFM-FRR1、同じ MSM から第一推定値を取得した LFM のグループを同じ色で表している。まず、図 2.3.7(a) に注目すると、全ての初期時刻及び

予報時間において、LFM-MRR1 の予測精度が LFM-FRR1 を上回っていることが見て取れる。降水の日変化があるため、時間帯によって ETS が上下しているものの、LFM-MRR1 の予測精度が LFM-FRR1 を上回っている点は一貫している。次に、同色で示したグループ内のスコアの差に注目する。初期時刻間の予測精度の違いを見ると、予報時間前半ほど常に 1 つ右の新しい初期時刻の方が予測精度が高い。また、予報時間後半では同じグループが似た予測精度になっており、これらは LFM の場合と同じ傾向を示していることが分かる。これらのことから、古い初期時刻のガイダンスを使う特別な理由がない限りは、常に利用時点の最新初期時刻のガイダンスを利用すれば良い。これらの特徴は概ね 10 mm/h (図 2.3.7(b))、30 mm/h (図略) でも同様であるが、1.0 mm/h ほど明瞭ではない。その理由は、大雨ほど事例数が少なくなるためである。

(3) 対 MSM ガイダンス検証

最後に、LFM の 1 時間最大降水量ガイダンス (LFM-RMAX1) について既存の MSM ガイダンスとの比較結果を示す。ここでは、第 2.3.3 項 (1) と同様の ETS や BI の閾値別、予報時間別検証の他に、Fractions Skill Score(FSS)(Roberts and Lean 2008) を用いた比較結果を示す。この FSS は、検証対象を空間的に曖昧にし、その上で予報と観測の適合度を求める検証手法の 1 つで、幾田 (2010) では水平格子間隔の異なる LFM と MSM の降水量予測を比較するために用いられている。本検証では、ともに 5 km 格子の LFM ガイダンスと MSM ガイダンスについて、空間的な厳密さを緩和した上で比較するために FSS を用いた。これは、降水の予測位置が厳密には外れていても、ある程度の領域内で降水が予測されていることが実際の予報作業上では重

⁴ 図 2.3.6(c) や (d) において、過去初期時刻と平均できない FT=9 の LFM-FRR1 と LFM-MRR1 の間に差が見られるのは、第 2.3.2 項 (1) で述べ通り、LAF と頻度バイアス補正の間で行う空間方向の平滑化を行うためである。

要と考えたためである。FSS は 0 から 1 の値域を持つスキルスコアで、完全予報の場合は 1、予報と観測の適合が全く無い場合には 0 となる。FSS の詳細や算出方法は付録 D.3.14 を参照されたい。また、比較相手とする MSM ガイダンスには LFM-RMAX1 に対応する 1 時間降水量のガイダンスが存在しない。そこで、MSM の 3 時間最大降水量ガイダンス (MSM-RMAX33) を MSM の降水量で配分した降水量を MSM の 1 時間最大降水量 (MSM-RMAX1) として検証に用いる。この二次的な変換を施したガイダンスと統計手法で直接的に求めた本来のガイダンスでは、一般的には後者の方が予測精度の面で有利と考えられる点には留意が必要である。

図 2.3.8 は、2017 年の 1 年間を対象とした LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の比較で、図 2.3.6 と同様に閾値別 BI 及び ETS と予報時間別 BI 及び ETS を示している。検証に用いた初期時刻は両ガイダンスとも 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC、予報時間は LFM-RMAX1 が FT=1 から 9、MSM-RMAX1 が FT=4 から 12 である。検証対象とした予報時間が異なるのは、実際の子報作業で利用出来るようになる時間を考慮した比較を行うためである。図より、LFM-RMAX1 は降水量閾値や予報時間によっては BI が 1 前後から離れていたり FT=9 の予測精度で MSM-RMAX1 に劣る場合が見られるものの、概ね MSM-RMAX1 より予測頻度が適切でかつ予測精度が高いことが分かる。特に、MSM-RMAX1 では予測頻度の過小傾向が強い 30 mm/h 前後の降水に対する予測頻度が LFM-RMAX1 では適切であり、実況に近い頻度で短時間強雨を予測する点が予報作業において有用と考えられる。

図 2.3.9 は、2017 年 7 月と 2017 年の 1 年間を対象に検証した、LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の予報時間別の FSS である。図 2.3.9(a) 及び (c) に予測の位置ずれを許容しない場合の FSS を、図 2.3.9(b) 及び (d) に元の 5 km 格子を中心とした 25 km 四方の位置ずれを許容した場合の FSS を降水量閾値別に示している。25 km 四方という広さは、気象警報・注意報の発表単位である市町村（東京特別区は区）をいくつかまとめた範囲を想定して設定した。検証に用いた初期時刻と予報時間は図 2.3.8 に同じである。まず、LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 を比較したとき、いずれの検証条件でも概ね LFM-RMAX1 の方が FSS が大きく、LFM-RMAX1 の方が予測スキルが高いことが分かる。次に、予測位置の厳密性を緩和して位置ずれを許容した場合と許容しない場合の違いに注目すると、LFM、MSM 両ガイダンスとも許容した場合の方が FSS は高く、ガイダンスを対象格子のピンポイントで利用するのではなく、その位置ずれも想定して利用することが適していると言える。また、検証期間の違いに注目すると、夏季に絞った 2017 年 7 月の方が位置ずれを許容することで LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の FSS の差が拡大し

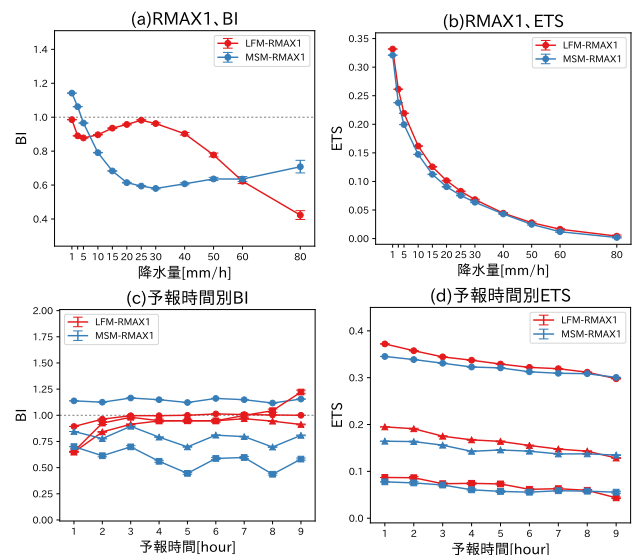


図 2.3.8 LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の予測精度比較。左上から (a) 閾値別 BI, (b) 閾値別 ETS, (c) 予報時間別 BI, (d) 予報時間別 ETS の比較図で、検証期間は 2017 年の 1 年間である。図 (c) 及び (d) の横軸は LFM-RMAX1 の予報時間を表し、MSM-RMAX1 は予測対象時刻を揃えるために 3 時間ずらして示している。各図とも赤線が LFM-RMAX1、青線が MSM-RMAX1 を表す他は、図の見方は図 2.3.6 に同じである。

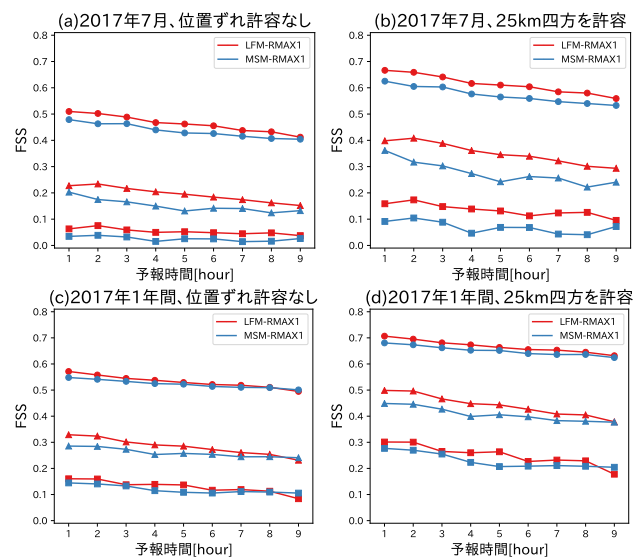


図 2.3.9 LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の予報時間別 FSS の比較図。左上から (a) 2017 年 7 月の位置ずれを許容しない場合、(b) 2017 年 7 月の 25 km 四方の位置ずれを許容した場合、(c) 2017 年の 1 年間の位置ずれを許容しない場合、(d) 2017 年の 1 年間の 25 km 四方の位置ずれを許容した場合。各図とも横軸は LFM-RMAX1 の予報時間を表し、MSM-RMAX1 は予測対象時刻を揃えるために 3 時間ずらして示している。また、赤線は LFM-RMAX1、青線は MSM-RMAX1 を表し、降水量閾値は 1.0 mm/h (丸)、10 mm/h (三角)、30 mm/h (四角) である。

ていることが分かる。特に、10 mm/h や 30 mm/h の場合に FSS の差が拡大している。これは、夏季に増える不安定性の降水に対して、LFM-RMAX1 は予測の位置ずれはあるものの近傍に降水を予想している場合が多く、MSM-RMAX1 よりも実況を捕捉するためと

考えられる。つまり、夏季における LFM-RMAX1 の MSM-RMAX1 に対する優位性を示していると言える。

2.3.4 事例検証

LFM 降水量ガイダンスの予測特性や利用上の留意点を表す事例をいくつか紹介する。図 2.3.10 に第 2.3.3 項 (3) で述べた 25 km 四方の位置ずれを許容した FSS について、2017 年 7~8 月を日別に検証した時系列図を示す。検証には、LFM-MRR1 は 00UTC 初期値の FT=1 から 9 を、MSM-RMAX1 は 21UTC 初期値の FT=4 から 12 を用いている。この時系列図で、LFM-RMAX1 の方が FSS が高い日のガイダンスを確認すると、その多くが不安定性の降水事例であり、第 2.3.3 項 (3) で述べた夏季の LFM ガイダンスの優位性が個々の事例でも確認できる。なお、本項で示す事例の天気図は、図 2.3.11 にまとめて示す。

(1) 夏季の不安定性降水の事例

図 2.3.12、図 2.3.13 及び図 2.3.14 は、図 2.3.10 において LFM-RMAX1 の FSS が MSM-RMAX1 を上回った日の LFM ガイダンスと MSM ガイダンスの比較図である。1 つ目の図 2.3.12 は、梅雨前線や暖かく湿った空気の影響で関東地方で雷雨となった事例、2 つ目の図 2.3.13 は、寒気を伴った気圧の谷が上空を通過し東北から近畿地方の広い範囲で雷雨となった事例、最後の図 2.3.14 は、西日本周辺には目立った擾乱はない中で晴れて気温の上昇した午後には広範囲で雷雨となった事例で、いずれも不安定性降水の事例である。これらの事例はいずれも LFM-RMAX1 の方が MSM-RMAX1 より良い予測であった。1 つ目の事例では、関東の山間部から降水が発生しはじめ、夕方にかけて関東北部を降水域が東進する様子を、2 つ目の事例では東北地方や関東南部で降水域が発生する様子を良く予測しており、これらの降水は MSM-RMAX1 ではほぼ予測されていないものである。3 つ目の事例も、細かく見れば LFM-RMAX1 の降水域は実際に観測された位置とは異なっていたり、降水量が多過ぎる地域があるものの、降り始めのタイミングや降水の広がり具合といった定性的な特徴は MSM-RMAX1 よりも予測できている。このように、夏季の不安定性降水に対しては LFM ガイダンスの方が MSM ガイダンスより良い予測をする例が多く、不安定性の降水が見込まれる気象場においては積極的な利用を推奨する。

(2) 台風や総観規模擾乱などの空間スケールの大きな降水事例

夏季の不安定性降水に対して LFM ガイダンスが有効である一方で、台風や総観規模擾乱などのスケールの大きな降水事例では、MSM ガイダンスと似た予測であることが多く、FSS で比較した予測スキルも同等であることが多い。これは、大きなスケールの現象に対して LFM の予測は、より水平格子間隔の大きい MSM

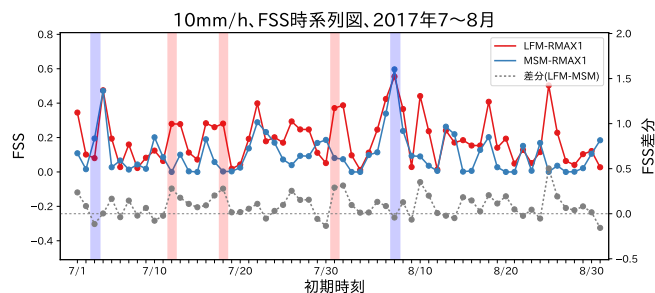


図 2.3.10 2017 年 7~8 月の LFM-RMAX1 と MSM-RMAX1 の日別 FSS の比較図。降水量閾値は 10 mm/h。横軸は LFM-RMAX1 の初期時刻の日付を、赤線は LFM-RMAX1 (左軸)、青線は MSM-RMAX1 (左軸)、灰線は FSS の差分 (右軸、LFM-MSM)、赤及び青色で背景を塗った日は第 2.3.4 項 (1) 及び (2) で取り上げた事例日を表す。

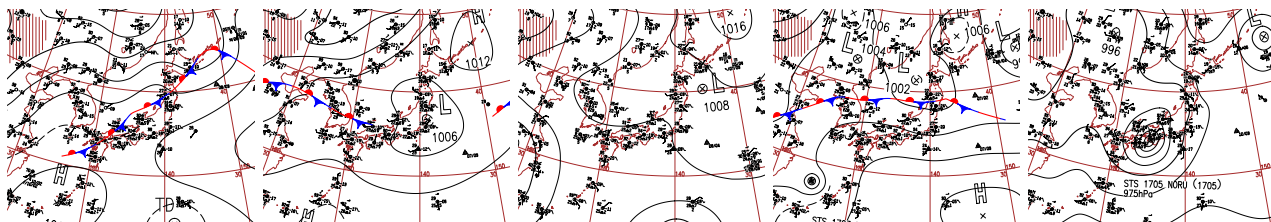
や GSM と表現が変わらない (永戸ほか 2013) 点に対応している。

図 2.3.15 及び図 2.3.16 は、図 2.3.10 において FSS が同等かやや MSM ガイダンスの方が高い日の LFM ガイダンスと MSM ガイダンスの比較図である。1 つ目の図 2.3.15 は、梅雨前線が北陸から東北に停滞した事例、2 つ目の図 2.3.16 は、台風第 5 号による大雨事例である (天気図は図 2.3.11 を参照)。1 つ目の前線の事例では東西に伸びる強雨の位置が、2 つ目の台風の事例では地形性の降水が強化される細かな表現は違いがあるものの、降水の大まかな分布には目立った違いは見られない。このように水平スケールの大きな降水の場合には、前述の通り LFM と MSM の表現が変わらないため、ガイダンスの予測に近く、また予測精度も同等である点に留意が必要である。

2.3.5 まとめと今後の課題

LFM 降水量ガイダンスは、毎時更新される LFM の精緻な降水量予測を活かしつつ、LFM の既知の課題である降水の集中や過剰な予測を緩和したガイダンスである。特徴の 1 つとして、夏季の不安定性降水に対して既存の MSM ガイダンスを上回る予測精度を持っている点が挙げられる。また、ガイダンスの開発や維持・管理面も考慮し、従来の降水量ガイダンスとは異なるシンプルな手法を採用している点も特徴の 1 つである。この新しいガイダンスについて、第 2.3.3 項及び第 2.3.4 項で示した検証結果及び事例検証を踏まえた特徴と利用上の留意点について以下にまとめる。

- ① 1 時間平均降水量ガイダンスは LFM の降水量予測よりも予測頻度が適切でかつ予測精度が高い。また、LFM と同様に毎時更新され、常に新しい初期時刻の予測の精度が高い。なお、LAF に用いる初期時刻数が予報時間によって異なるため、特に FT=7 以降は予測頻度特性や LFM からの改善度合いに違いがある点に留意が必要である。



(a) 2017 年 7 月 12 日 (b) 2017 年 7 月 18 日 (c) 2017 年 7 月 31 日 (d) 2017 年 7 月 3 日 (e) 2017 年 8 月 7 日

図 2.3.11 各事例のアジア太平洋地上天気図。いずれも日本時間の 15 時の天気図で、日本周辺を拡大して表示している。

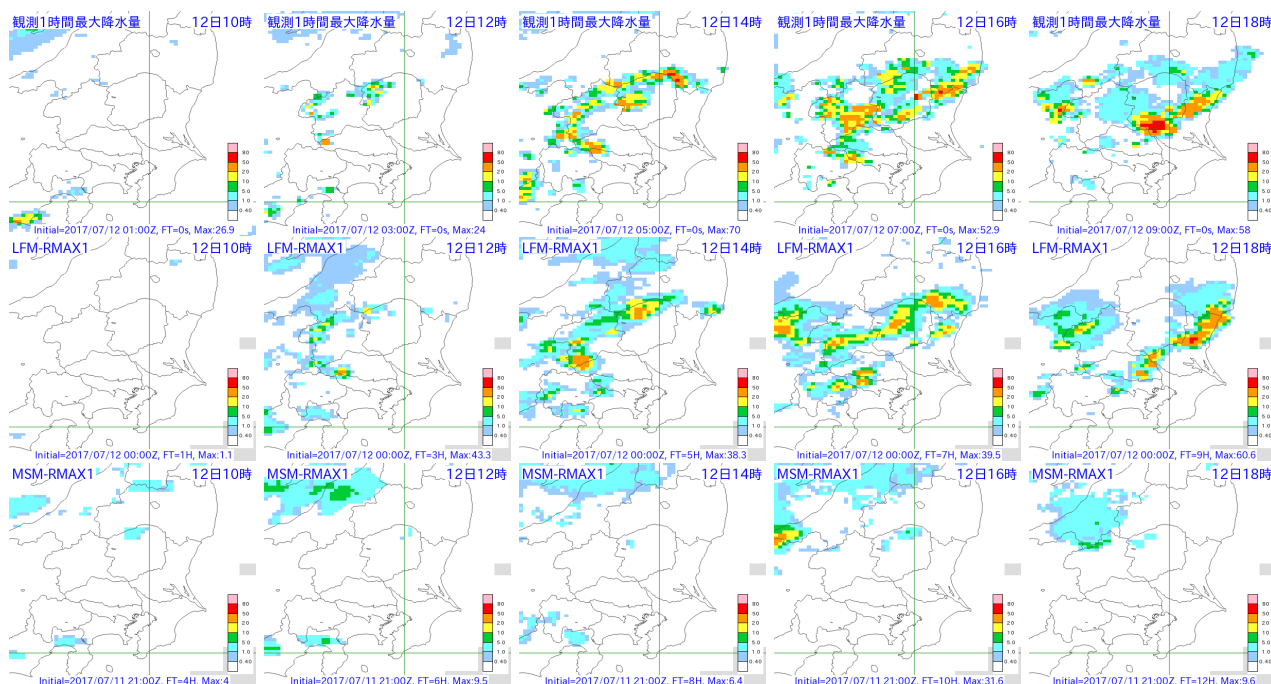


図 2.3.12 2017 年 7 月 12 日の事例。上段から観測の 1 時間最大降水量、LFM-RMAX1 (7 月 12 日 00UTC 初期値)、MSM-RMAX1 (7 月 11 日 21UTC 初期値)。対象時刻は左から日本時間の 10 時、12 時、14 時、16 時、18 時で、降水量の単位は いずれも mm/h。

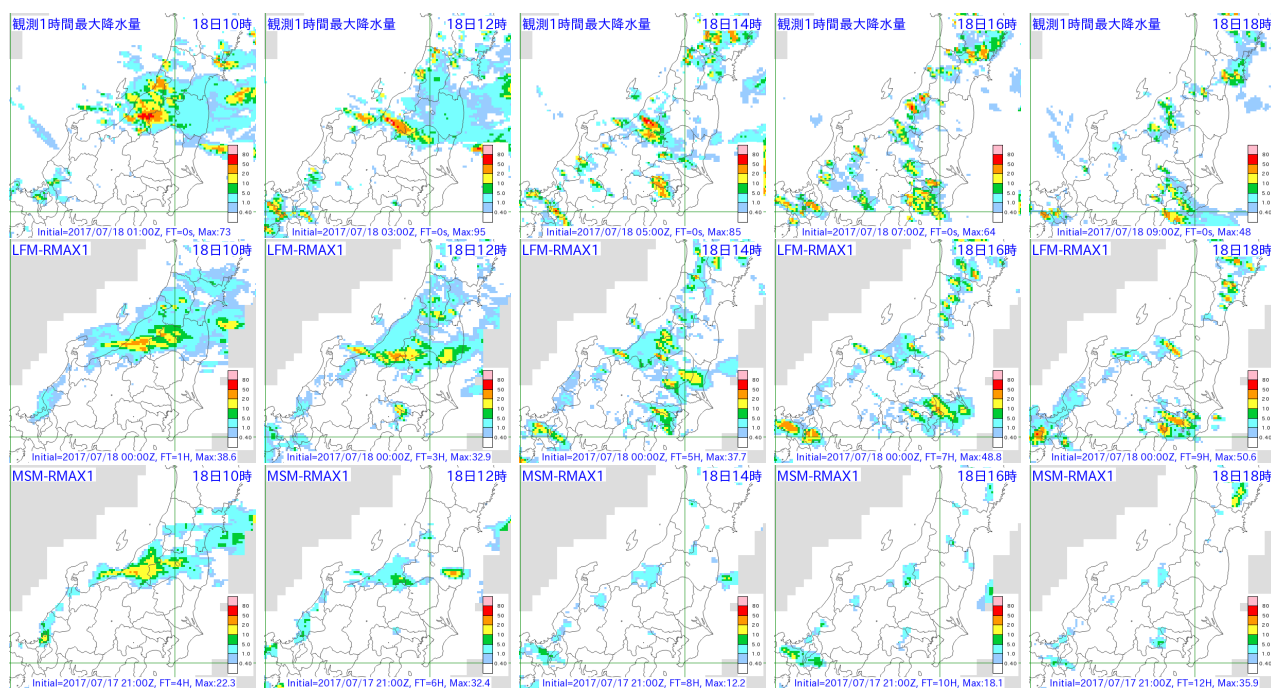


図 2.3.13 2017 年 7 月 18 日の事例。上段から観測の 1 時間最大降水量、LFM-RMAX1 (7 月 18 日 00UTC 初期値)、MSM-RMAX1 (7 月 17 日 21UTC 初期値)。その他の図の見方は図 2.3.12 に同じ。

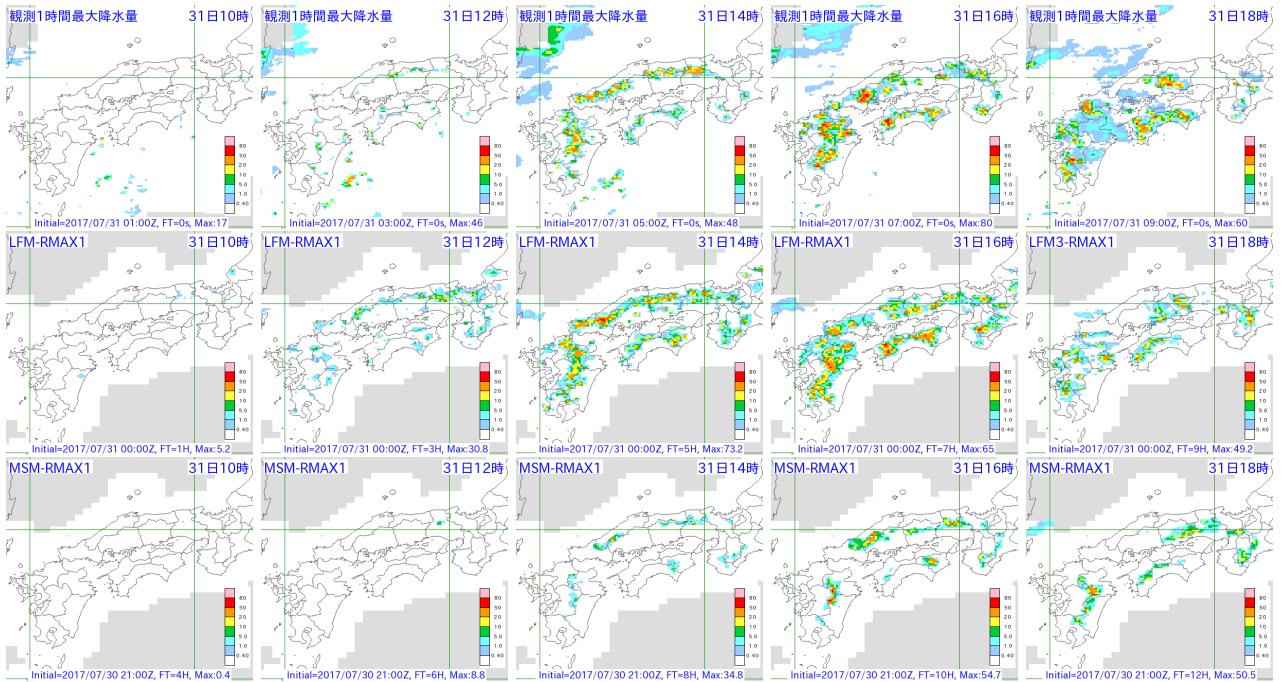


図 2.3.14 2017 年 7 月 31 日の事例。上段から観測の 1 時間最大降水量、LFM-RMAX1 (7 月 31 日 00UTC 初期値)、MSM-RMAX1 (7 月 30 日 21UTC 初期値)。その他の図の見方は図 2.3.12 に同じ。

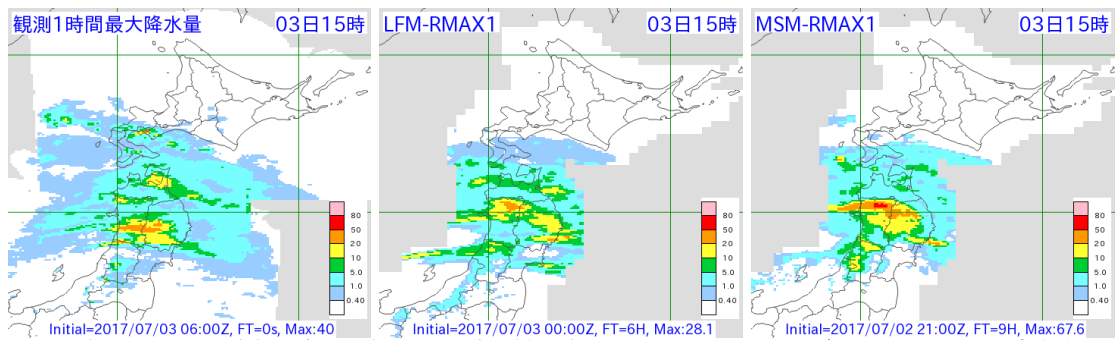


図 2.3.15 2017 年 7 月 3 日の事例。左から観測の 1 時間最大降水量、LFM-RMAX1 (7 月 3 日 00UTC 初期値の FT=6)、MSM-RMAX1 (7 月 2 日 21UTC 初期値の FT=9) で、対象時刻は 7 月 3 日 15 時。降水量の単位は mm/h。

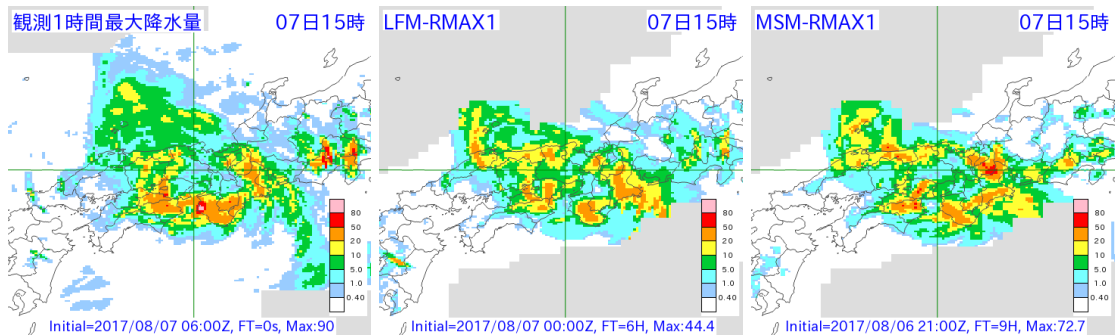


図 2.3.16 2017 年 8 月 7 日の事例。左から観測の 1 時間最大降水量、LFM-RMAX1 (8 月 7 日 00UTC 初期値の FT=6)、MSM-RMAX1 (8 月 6 日 21UTC 初期値の FT=9) で、対象時刻は 8 月 7 日 15 時。降水量の単位は mm/h。

- ② 1 時間最大降水量ガイダンスは、MSM ガイダンスよりも短時間強雨に対する予測精度が高い。特に、夏季の不安定性降水の予測が改善しており、不安定性の降水が予想される気象場では積極的な利用を推奨する。
- ③ 台風や総観規模擾乱による降水に対しては、LFM と MSM の予測に大きな違いが見られないのと同様に、ガイダンス間にもその予測や精度に大きな

差はない。

これらの点に留意して、LFM 降水量ガイダンスを有効に活用していただきたい。

今後の課題としては、まず本ガイダンスの予報時間を 10 時間に延長することが挙げられる。第 2.3.3 項 (1) で述べた通り、LFM は 2018 年度末までに予報時間を 10 時間に延長することを計画している。本ガイダンスも予報時間を延長し、LAF に用いる予測値を増やすこ

とで予報時間後半の予測精度の改善が期待できる。また、第 2.3.3 項では全国をまとめた検証や主に 1 年間の検証結果しか紙面の都合で示していないものの、地方別や季節別などにより条件を絞った検証では、ガイダンスの予測精度や特性に課題があることが分かっている。本ガイダンス運用の目的である、降水 15 時間予報や日々の予報作業での利用に貢献するため、今後も継続して改良に取り組む必要があると考えている。

参考文献

- 幾田泰醇, 2010: 高分解能モデルの降水予報精度評価に適した検証手法. 平成 22 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 11–17.
- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 18–41.
- 白山洋平, 2017: 降水ガイダンスの改良. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 86–93.
- 白山洋平, 2018: 降水ガイダンス. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 95–118.
- 高田伸一, 2018: 頻度バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 78–80.
- 原旅人, 伊藤享洋, 松林健吾, 2015: asuca が導入された局地数値予報システムの特性. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 9–23.
- 原旅人, 2017: メソ数値予報システムの改良の概要. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42–47.
- Hoffman, R. N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting. *Tellus A*, **35**, 100–118.
- Roberts, N. M. and H. W. Lean, 2008: Scale-Selective Verification of Rainfall Accumulations from High-Resolution Forecasts of Convective Events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78–97.

2.4 国内航空悪天 GPV および LFM 航空悪天 GPV の改良¹

2.4.1 はじめに

国内航空悪天 GPV および LFM 航空悪天 GPV は、MSM および LFM から作成する空域予報用の GPV である。それぞれ 2000 ft 毎および 1000 ft 毎のフライトレベル (FL)² 面で作成し、風や気温などの通常の気象要素のほかに、乱気流指数 (工藤 2018a) や着水指数 (井藤 2018a)、積乱雲量・雲頂高度 (井藤 2018b) など、空域予報用の要素も算出している。国内航空悪天 GPV は国内悪天予想図 (FBJP)³ やシグメット情報⁴ の作成に利用されているほか、FAX 図 (国内悪天 12 時間予想図、国内航空路 6・12 時間予想断面図) の入力データとしても利用されている。LFM 航空悪天 GPV はシグメット情報の作成に利用されているほか、ATM⁵ 用悪天インデックス (第 II 部第 5.3.6 項) や下層悪天予想図・狭域悪天予想図 (金井ほか 2015) の入力データとしても利用されている。

航空悪天 GPV の乱気流指数 (以下、TBindex) は、乱気流の要因別に作成した複数の指数をロジスティック回帰で組み合わせた統合型の乱気流予測指数である。回帰係数は一括学習により決定しており、予測式は 2000 ft 毎の高度別に層別化している。また、ロジスティック回帰で得られた確率値を調整係数により変換することで、3.0 という一つの閾値で最適な予測を行うことができるようにしている。

2018 年 9 月まで、国内航空悪天 GPV の TBindex (以下、M-TBindex) では、2011 年から 2012 年のデータに基づいて算出した回帰係数を利用していた (工藤 2014)。また、LFM 航空悪天 GPV の TBindex (以下、L-TBindex) では M-TBindex と同じ回帰係数を利用していた。工藤 (2014) での TBindex の改良以降、メソおよび局地数値予報システムの改良が行われてきたが、その際に行った検証では、数値予報システムの改良による TBindex の精度低下は見られなかった (原ほか 2015a,b, 2017)。しかし、M-TBindex および L-TBindex の係数が 2011 年から 2012 年のデータに基づいていることを考慮すれば、これらの係数が 2018 年現在では最適でなくなっている可能性があった。そこで TBindex の回

帰係数と調整係数を再作成するとともに、説明変数の作成方法を一部変更することとした。これによって予測精度の改善が確認できたことから、2018 年 9 月に TBindex の変更を行った。これと併せて、空域予報プロダクトの改善に資するため、国内航空悪天 GPV の予報領域を拡大した。また、2018 年度末までに LFM 航空悪天 GPV の予報時間を 10 時間に延長する。

本節では、はじめに国内航空悪天 GPV の領域拡張と LFM 航空悪天 GPV の予報時間延長について、第 2.4.2 項と第 2.4.3 項で述べる。続いて TBindex の改良について、変更点や検証結果、利用上の留意点を第 2.4.4 項～第 2.4.7 項で述べる。

2.4.2 国内航空悪天 GPV の領域拡張

国内航空悪天 GPV は、2001 年に運用を開始して以来、予報領域を変更していなかったが、今回の変更時から予報領域を図 2.4.1 で示す領域に拡大した。予報領域が北および西側に広がることで、より上流側のジェット気流の流れや悪天域の推移を把握できるようになる。また、東および南側の予報領域が広がることで、FBJP の全領域が含まれるようになるとともに、福岡 FIR⁶ をカバーする領域が広がり⁷、シグメット情報の作成にも更に有効に活用できるようになる。

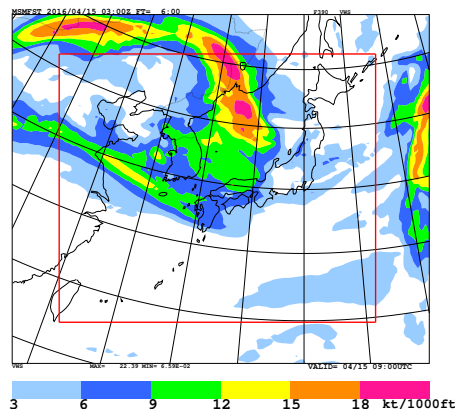


図 2.4.1 領域拡大後の国内航空悪天 GPV の領域。2016 年 4 月 15 日 03UTC 初期値の FT=6, FL390 の鉛直シアアの予測。赤枠は従来の国内航空悪天 GPV の領域。

2.4.3 LFM 航空悪天 GPV の予報時間延長

ATM のための情報提供を強化するため、2018 年度末までに LFM の予報時間が 10 時間に延長される (第 1.4 節)。ATM 用悪天インデックスは LFM 航空悪天 GPV を入力として作成されることから、LFM の予報時間延長に合わせて LFM 航空悪天 GPV の予報時間も 10 時間に延長する。FT=10 における TBindex や着水

¹ 工藤 淳

² 標準大気の気圧高度 [ft] を 100 で割った高度。「FL100」など「FL」に続けて 100 ft 単位の数値で表される。FL100 = 10,000 ft、1 ft $\approx$ 0.3048 m。

³ 乱気流、着水、雷電など航空機の運航に影響を及ぼす悪天域のほか、ジェット気流、熱帯低気圧、地上の高・低気圧、前線、FL050 と FL100 の 0 °C の等温線などの予想を図示したプロダクト。概ね 5 時間 30 分先の予想図を 1 日 4 回 6 時間毎に本庁航空予報室空域予報班が作成している。

⁴ 航空機の運航の安全に影響する航空路上の現象 (乱気流、着水、雷電、台風、火山の噴煙、放射性物質の状況など) が発現または予想された場合に発表される空域気象情報。

⁵ 航空交通管理 (Air Traffic Management)

⁶ 飛行情報区 (Flight Information Region)。国際民間航空機関 (ICAO) により制定された航空機の運航に必要な各種情報の提供または捜索救難活動が行われる空域。福岡 FIR は日本の担当空域であり、日本では本庁航空予報室空域予報班が福岡 FIR を対象にシグメット情報を発表している。

⁷ 福岡 FIR の東端は東経 165 度、南端は北緯 21 度である。

表 2.4.1 TBIndex に用いられている説明変数の略号と意味。

名称	略号	意味
斜方シアー	SWS	斜め方向に算出した風のシアー
対流雲中乱気流指数	CONV	対流雲の雲中および雲頂での強い上昇流や鉛直シアーの強化により発生する乱気流を予測する指数
風下山岳波指数	MTW1	風下山岳波に伴い山頂付近の安定層下で発生する乱気流を予測する指数
鉛直伝播山岳波指数	MTW2	鉛直上方に伝播した山岳波の碎波による乱気流を予測する指数
中層雲底乱気流指数	BASETB	中層雲底下でのベナール対流による乱気流を予測する指数
トランスバースバンド指数	TRAV	トランスバースバンドに伴う乱気流を予測する指数
水平シアー	HWS	水平方向の風のシアー
VHS	VHS	(鉛直シアー) × (流れに沿った方向の風の水平シアー) × (風速)
リチャードソン数	RI	KH 不安定の発生を予測する指数
気温の水平傾度	GRADT	等フライントレベル面で算出した気温の水平傾度の大きさ

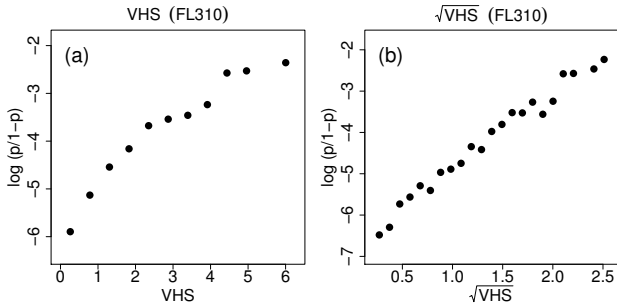


図 2.4.2 FL310 における、(a) VHS とロジットの関係、(b) $\sqrt{VHS}$ とロジットの関係。2016 年 4 月から 2018 年 3 月の国内航空悪天 GPV から作成。

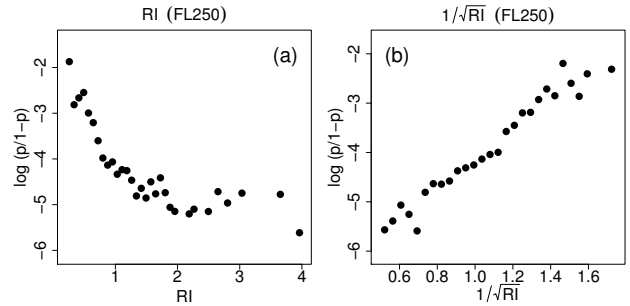


図 2.4.3 FL250 における、(a) RI とロジットの関係、(b) $1/\sqrt{RI}$ とロジットの関係。2016 年 4 月から 2018 年 3 月の国内航空悪天 GPV から作成。

指数、積乱雲量などの精度検証は行っていないが、これらは予報時間で層別化しない係数固定型の指標であるため、FT=9 の予測精度に準ずると考えられる。

2.4.4 乱気流指数の改良

第 2.4.2 項で述べた変更と同時に、国内および LFM 航空悪天 GPV の TBIndex の改良を行った。今回の変更点は、(1) 回帰係数の学習期間を変更したこと、(2) 一部の説明変数を変更したこと、(3) M_TBIndex と L_TBIndex で独立に回帰係数を作成したこと、および、(4) M_TBIndex と L_TBIndex それぞれの調整係数を更新したことの 4 点である。以下でそれぞれの変更について述べる。TBIndex に用いられている説明変数の略号と意味を表 2.4.1 にまとめておく。

(1) 学習期間の変更

第 2.4.1 項でも述べたように、従来の TBIndex の回帰係数は 2011 年から 2012 年のデータを学習データとして利用していたため、2018 年現在では係数が最適ではなくなっている可能性があった。一方、メソ数値予報システムに asuca を導入する際にガイダンスの係数再作成のために過去 2 年間以上の再予報が行われたこと（後藤 2017）と、2015 年 1 月に局地数値予報システムに asuca が導入（原ほか 2015a）されて 3 年以上経過したことから、MSM および LFM とも 3 年間以上の均質に近い過去データを利用できる状況になった。そこ

で、2016 年 4 月から 2018 年 3 月の 2 年間のデータを学習用データ、2015 年 4 月から 2016 年 3 月の 1 年間のデータを検証用データとして利用し、回帰係数の再作成を行った。3 年間のデータが利用できる場合、初めの 2 年を学習データに、最後の 1 年を検証データに利用することが多いが、ここでは逆に初めの 1 年を検証データとして利用した。このようにすることで、数値予報ルーチンでの運用期間と学習期間の乖離をできるだけ小さくする。開発用に蓄積しているデータの都合により、国内航空悪天 GPV は 03, 09, 15, 21UTC 初期値の FT=9~14 を、LFM 航空悪天 GPV は 03, 09, 15, 21UTC 初期値の FT=4~9 のデータを利用して回帰係数を作成した。

(2) 説明変数の変更

TBIndex はロジスティック回帰により予測式を作成している。ロジスティック回帰では、次式で定義されるロジットと説明変数に線形関係があることを仮定している（工藤 2018b）。

$$\text{logit} \equiv \ln \frac{p}{1-p} \quad (2.4.1)$$

ここで p は説明変数がある区間に含まれるときに現象が起きた割合である。一定期間の予測と実況（ここでは乱気流の有無）を用いて区間毎に p を求めることで、説明変数とロジットの線形性を確かめることができる。

M_TBIndex に利用している説明変数について、ロ

表 2.4.2 M_TBindex の各説明変数間の相関係数。2016 年 4 月から 2018 年 3 月のデータを用いて、回帰式を層別化した 2000 ft 毎の高度で求めた相関係数を全高度で平均した値を示す。相関係数の絶対値が 0.6 以上を赤、0.4 以上 0.6 未満を黄、0.4 未満を青で示している。

	SWS	$\sqrt{\text{CONV}}$	MTW1	MTW2	BASETB	TRAV	HWS	$\sqrt{\text{VHS}}$	$1/\sqrt{\text{RI}}$	GRADT
SWS	1.00	0.45	0.04	0.15	0.04	0.19	0.65	0.73	0.71	0.49
$\sqrt{\text{CONV}}$	0.45	1.00	0.02	0.06	0.08	0.16	0.43	0.45	0.31	0.24
MTW1	0.04	0.02	1.00	0.02	0.11	0.01	0.05	0.07	0.01	0.04
MTW2	0.15	0.06	0.02	1.00	0.01	-0.07	0.15	-0.03	0.09	0.11
BASETB	0.04	0.08	0.11	0.01	1.00	-0.02	0.02	-0.00	0.06	0.15
TRAV	0.19	0.16	0.01	-0.07	-0.02	1.00	0.04	0.21	0.21	0.07
HWS	0.65	0.43	0.05	0.15	0.02	0.04	1.00	0.53	0.28	0.30
$\sqrt{\text{VHS}}$	0.73	0.45	0.07	-0.03	-0.00	0.21	0.53	1.00	0.60	0.47
$1/\sqrt{\text{RI}}$	0.71	0.31	0.01	0.09	0.06	0.21	0.28	0.60	1.00	0.32
GRADT	0.49	0.24	0.04	0.11	0.15	0.07	0.30	0.47	0.32	1.00

表 2.4.3 M_TBindex に対する各高度の説明変数の代表的な寄与量。ここでは回帰係数に各高度における説明変数の代表値を掛けた値を示す。各高度において、切片を除く寄与量の和に対して 15 % 以上の値を青で表示している。寄与量が 0 は赤池情報量基準による判定で説明変数として選択されなかったことを、0.00 は寄与量が小さいことを示す。空欄はサンプル数などを考慮して説明変数の候補として採用しなかったことを示す。

高度	切片	SWS	$\sqrt{\text{CONV}}$	MTW1	MTW2	BASETB	TRAV	HWS	$\sqrt{\text{VHS}}$	$1/\sqrt{\text{RI}}$	GRADT
FL410	-8.29	1.16	0.50				0.00	0.43	0.96	0.69	0
FL390	-8.35	1.41	0.65				0.13	0.40	0.88	0.69	0
FL370	-8.03	1.45	0.58				0.15	0.39	0.82	0.60	0
FL350	-7.72	1.75	0.65				0.12	0.19	0.94	0.53	0.15
FL330	-7.37	2.36	0.65		1.23		0.18	-0.18	1.25	0.36	0
FL310	-7.23	2.60	0.66		1.39		0.29	-0.31	1.31	0.55	0
FL290	-7.42	2.93	0.66		1.24		0.32	-0.14	1.05	0.91	-0.17
FL270	-7.26	2.69	0.73		0.33		0.36	0	0.63	1.11	-0.11
FL250	-6.96	2.05	0.96		0.32	0.09	0.38	0.23	0.48	1.14	0
FL230	-6.67	1.89	0.91		0.66	0.55	0.17	0.41	0.38	0.92	0
FL210	-6.17	1.88	0.95		0.84	1.2	0.12	0.44	0.31	0.64	0
FL190	-5.82	2.14	1.00	0.31	0.67	1.62	0.15	0.32	0.57	0	0
FL170	-5.59	2.21	1.08	0.56	0.77	1.79	0.08	0	0.72	-0.27	0.30
FL150	-4.99	1.82	0.92	1.16	0.49	1.27	0	0	0.60	-0.16	0.65
FL130	-4.32	1.47	0.71	1.04	0.49	0.74		-0.11	0.46	0	0.76
FL110	-4.11	1.85	0.52	0.63	0.57	0.69		-0.35	0.52	-0.22	0.47
FL090	-4.06	1.82	0.58	0.64		0.50		-0.23		0	0.40
FL070	-4.3	1.00	0.90	1.16		0.48		0		0.40	0.44
FL050	-4.49	0.84	0.99	1.70				0.10		0.59	0.37
FL030	-4.24	1.48	1.14	2.03				0		0	0

ジットとの関係を調べたところ、多くの説明変数はロジットと線形に近い関係を持っていることが確かめられたが（図略）、VHS, RI, CONV についてはやや非線形性が強かった。そこで、これらの説明変数を変換することでロジットに対して線形に近づけることとした。具体的には、VHS と CONV は平方根で変換し、RI は平方根の逆数で変換する。

変換前と後の説明変数とロジットの関係の例を図 2.4.2 と図 2.4.3 に示す。変更前の VHS と RI はロジットに対して湾曲した関係を持っているが、VHS を平方根で、RI を平方根の逆数で変換することで線形に近い関係を持つようになった。CONV については図を省略するが、VHS と同様の結果が得られている。

説明変数間の相関

上記のように説明変数を変換したことで、説明変数間の相関が強まることが考えられる。説明変数間にある程度の相関があることは避けられないが、相関が強い場合には回帰係数の推定精度が低くなるため、十分な学習データを用意する必要がある（工藤 2018c）。

表 2.4.2 に、学習期間のデータを用いて算出した、M_TBindex の各説明変数間の相関係数を示す。従来の説明変数間の相関係数は工藤（2018a）の表 4.11.3 を参照されたい。表 2.4.2 と従来の相関係数を比べると、鉛直シア（以下、VWS）との関連が強い指数（SWS, CONV, TRAV, HWS, VHS, GRADT）と RI との間の相関がやや強まっている。これは RI を平方根の逆数で変換したことにより、VWS に比例する形となったためである。そのほかの相関係数については従来と大きな差は見られなかった。

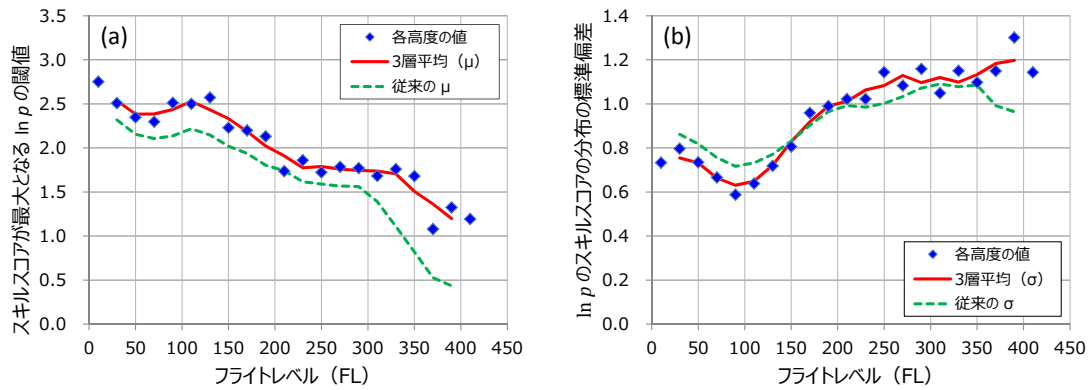


図 2.4.4 2016 年 4 月から 2018 年 3 月の国内航空悪天 GPV のデータを用いて作成した (a) スキルスコアが最大となる $\ln p$ の閾値と、(b) $\ln p$ のスキルスコアの分布の標準偏差。図中の青点は各高度での値を、赤線は上下 3 層の高度で平均した値 (変更後の調整係数) を示す。また、緑破線は従来の TBindex での調整係数を示す。

説明変数の寄与量

ロジスティック回帰による回帰式の作成方法は従来と同様である。表 2.4.1 で示した説明変数 (CONV, VHS, RI は変換後の値) の候補の中から、赤池情報量基準 (Akaike 1973; 工藤 2018d) に基づいて説明変数を選択し、選ばれた説明変数に対してロジスティック回帰で係数を算出した。

表 2.4.3 に、各高度における説明変数の代表的な寄与量⁸を示す。表では各高度毎に、切片を除く寄与量の和に対して各説明変数の寄与量が 15%以上である場合にその背景を青で塗りつぶしている。空欄は、サンプル数が少ないことにより回帰係数の推定精度が低くなることを考慮して、説明変数の候補として採用しなかったことを示す。従来の寄与量は工藤 (2018a) の表 4.11.4 を参照されたい。表 2.4.3 と従来の寄与量を比べると、CONV, MTW1, MTW2, BASET, TRAV, HWS の寄与が相対的に小さくなり、代わって VHS と RI の寄与が大きくなった。VHS と RI の寄与が大きくなったことは説明変数を変換した効果によるが、CONV などの寄与が小さくなったことはモデルの特性や学習期間が変化した影響が大きい。表は省略するが、比較のために説明変数の変換を行わないで回帰式を作成した場合でも、CONV などの寄与量は相対的に小さくなった。

(3) LFM 航空悪天 GPV の係数作成

従来の L_TBindex では M_TBindex と同じ回帰式を利用してきた。これは M_TBindex と同じ回帰式を利用しても予測精度に大きな問題はなく、また、開発用に長期間の LFM データを保存することが困難であったためである。近年、大容量のストレージを持つサーバが整備されたことで、LFM 航空悪天 GPV の開発に必要な過去データを長期間保存できるようになった。そこで L_TBindex で独自に回帰式を作成したところ、

⁸ 寄与量は説明変数の値に回帰係数を掛けて求められる値である。ここでは説明変数の有効性を比較するため、各高度・説明変数での代表的な寄与量として、スキルスコアが最大または極大となる説明変数の値を用いて寄与量を算出した。

M_TBindex と同じ回帰式を利用する場合と比べて予測精度がやや向上することが確かめられたため (図略)、今回の変更から L_TBindex でも独自に回帰係数を持つこととした。

(4) 調整係数の更新

TBindex では、ロジスティック回帰で求めた確率値を次式で調整することで、MOD 以上の強度の乱気流に対し、全ての高度で同じ閾値 3.0 で最適な予測が行えるようにしている。

$$\text{TBindex} = \frac{\ln p(i, j, k) - \mu(k)}{\sigma(k)} + 3.0 \quad (2.4.2)$$

ここで i, j, k は格子点の水平 (i, j) および鉛直 (k) 座標、 p はロジスティック回帰で求めた 0~1 の確率値に 100 を掛けて % で表した確率である。 μ と σ は調整係数で、 $\ln p$ の値を変えながら高度別に検証したときの、スキルスコアが最大になる $\ln p$ の閾値と、スキルスコアの分布の標準偏差を、上下 3 層 ($k+1, k, k-1$) で平均することで算出している。(2.4.2) 式の右辺第一項は、 $\ln p$ に対するスキルスコアの分布を正規分布とみなした場合に、平均 0、標準偏差 1 の正規分布になるように標準化する操作である。これに 3.0 を加えることで、多くの格子点で TBindex が正の値を持つようになる。また 3.0 を閾値として TBindex を利用することで、高度によらずスキルスコアが最大となる予測を行うことが可能になると期待できる。

今回の改良において調整係数の作成手法に変更はないが、調整係数の算出に用いる期間を回帰式の学習期間と同じ 2016 年 4 月から 2018 年 3 月に変更した。また、M_TBindex と L_TBindex では独立に調整係数を持っていることから、今回の改良においてもそれぞれについて調整係数を再作成した。

図 2.4.4 に、変更後の M_TBindex の調整係数 μ, σ (図の赤線) を示す。従来の調整係数 (図の緑破線) と比べると、 μ は全般に大きくなっており、その差は特に FL300 以上で大きい。また σ は FL150 以下で小さ

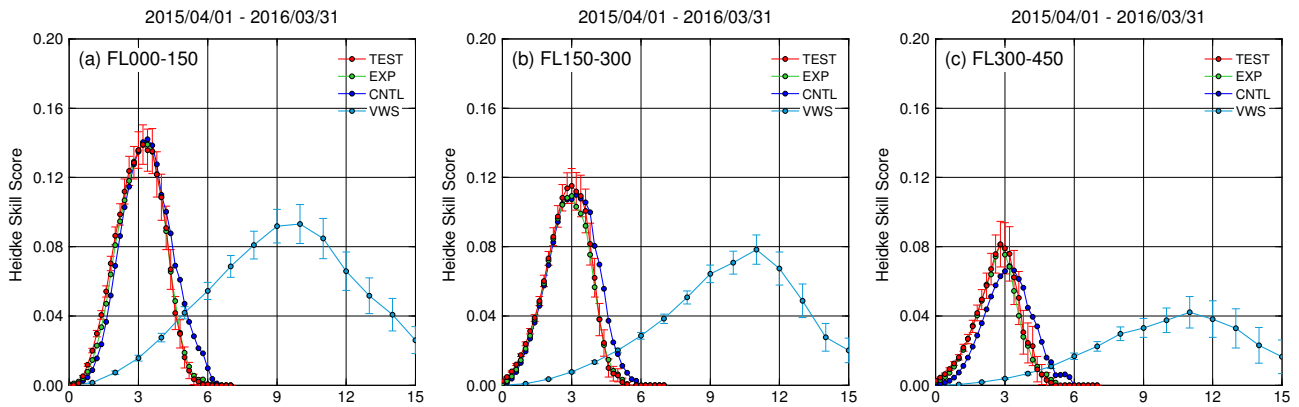


図 2.4.5 MOD 以上の乱気流に対する国内航空悪天 GPV の TIndex と VWS の高度別・閾値別のスキルスコア。(a) FL000–FL150, (b) FL150–FL300, (c) FL300–FL450。TEST は今回改良を行った M.TBindex の検証結果、EXP は CONV, VHS, RI の変換を行わずに係数の再作成を行った場合の M.TBindex の検証結果。CNTL は従来と同じ係数・手法を用いて asuca-MSM の再予報データから作成した M.TBindex の検証結果。予報時間はいずれも FT=9~14 を利用。TBindex は 0 から 0.2 毎に、VWS は 0 から 1 kt/1000ft 毎に検証した結果を示している。TEST と VWS のみにブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。

く、FL150 より上の高度で大きくなっている。これらの変化により、乱気流の予測に用いる範囲の $\ln p$ (概ね 0~3)⁹ に対して、新 M.TBindex は旧 M.TBindex よりも値が小さくなる。特に FL300 以上では、 μ の差が大きいことから TBindex の減少幅も大きくなる。図は省略するが L.TBindex の調整係数についても図 2.4.4 と同様の傾向であった。

2.4.5 統計検証

ここでは改良前後の M.TBindex および L.TBindex の検証結果を示す。比較のために、乱気流予測によく用いられている VWS の検証結果も示す。

検証期間は学習期間と独立な 2015 年 4 月から 2016 年 3 月の 1 年間である。検証に用いる初期時刻と予報時間は学習データと同じで、国内航空悪天 GPV では 03, 09, 15, 21UTC 初期値の FT=9~14 を、LFM 航空悪天 GPV では 03, 09, 15, 21UTC 初期値の FT=4~9 を利用した。実況データは、学習データと同様に C-PIREP¹⁰ を使用し、天候状態 (晴天、雲中等) による区別はしない。予測値は、実況があった地点の最近接格子での TBindex および VWS の値を用いる。時刻については、予報時間の前後 30 分以内の実況を用いる。な

⁹ 乱気流の予測には TBindex=3.0 付近を主に使用する。(2.4.2) 式より、TBindex=3.0 となるのは $\ln p = \mu$ のときであるから、乱気流の予測に主に利用される $\ln p$ は図 2.4.4(a) で示した μ の範囲 (概ね 0~3) となる。

¹⁰ Common-PIREP。従来は各航空会社内でのみ利用されていた PIREP (カンパニー PIREP) を、国土交通省航空局のシステムで集約して形式を統一した PIREP。乱気流、着氷、天候状態などが報じられる。乱気流の強さは、静穏 (SMTH)、弱⁻ (LGTM)、弱 (LGT)、弱⁺ (LGTP)、並 (MOD)、強 (SEV) の 6 段階、着氷の強さは、弱 (LGT)、並 (MOD)、強 (SEV) の 3 段階で報じられる。天候状態は、晴天 (CLR)、雲中 (INC)、雲頂 (TOP)、雲底 (BSE) などが報じられる。MOD や SEV の乱気流だけでなく、SMTH ~ LGTP の乱気流も数多く通報されることが特徴。

お、乱気流の遭遇地点については、「地点 A で揺れた」と通報される場合と、「地点 A から地点 B まで揺れた」と通報される場合の 2 つのパターンがある。後者の場合は 2 地点間の midpoint を実況があった場所とするが、2 地点間の距離が水平 240 km 以上または鉛直 6,000 ft 以上離れていた場合は midpoint に代表性がないと判断し、検証には使用しない。検証対象領域は日本周辺の北緯 20 度から 45 度、東経 110 度から 150 度の範囲とした。

(1) 国内航空悪天 GPV の乱気流指数

図 2.4.5 に MOD 以上の乱気流に対する国内航空悪天 GPV の TBindex と VWS の高度別・閾値別のスキルスコアを示す。図で TEST は今回改良した M.TBindex (以下、新 M.TBindex) の検証結果を、EXP は TEST と同様だが CONV, VHS, RI の変換を行わずに係数更新のみ行った場合の M.TBindex の検証結果を、CNTL は従来と同じ係数・手法を用いて asuca-MSM の再予報データから作成した M.TBindex の検証結果を示している。これらを比較すると、FL000–150 では TEST, EXP, CNTL は同程度の精度、FL150–300 では TEST が EXP と CNTL を上回り、FL300–450 では TEST と EXP が同等で CNTL を上回る精度を持っていることがわかる。また、いずれも VWS と比べて予測精度が高い。

TEST と CNTL の差は今回の改良全体による予測精度の差を表しており、今回の改良により従来の TBindex と比べて予測精度が向上することを示している。また TEST と EXP の差はその中で CONV, VHS, RI を変換したことによる改善幅を表しており、理論に適合した説明変数を利用することで予測精度が向上することを示している。スキルスコアが最大となる閾値を見ると、TEST では 2.8~3.2 であり、いずれの高度でも確率値の調整が概ね適切に機能していると言える。

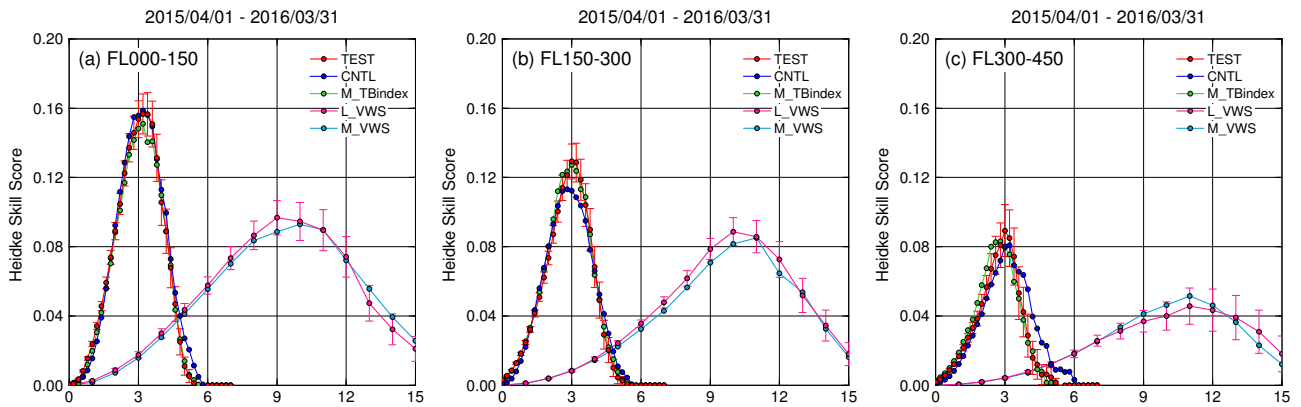


図 2.4.6 MOD 以上の乱気流に対する LFM 航空悪天 GPV の TBindex と VWS の高度別・閾値別のスキルスコア。(a) FL000–FL150, (b) FL150–FL300, (c) FL300–FL450。TEST は今回改良を行った L_TBindex の検証結果、CNTL はルーチンの L_TBindex の検証結果、M_TBindex は今回改良した国内航空悪天 GPV の TBindex (新 M_TBindex) の検証結果。L_VWS と M_VWS は LFM 航空悪天 GPV と国内航空悪天 GPV の VWS の検証結果。予報時間はいずれも FT=4~9 を利用。TBindex は 0 から 0.2 毎に、VWS は 0 から 1 kt/1000ft 毎に検証した結果を示している。TEST と L_VWS のみにブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示すエラーバーを付加している。

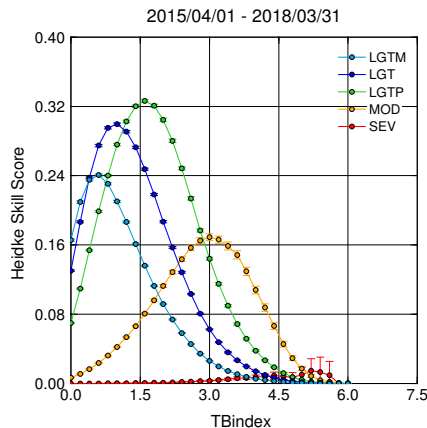


図 2.4.7 各強度の乱気流に対する新 M_TBindex のスキルスコア。TBindex は 0 から 0.2 毎に検証した結果を示している。エラーバーはブートストラップ法で求めた 95%信頼区間を示す。

(2) LFM 航空悪天 GPV の乱気流指数

図 2.4.6 に MOD 以上の乱気流に対する LFM 航空悪天 GPV の TBindex と VWS の高度別・閾値別のスキルスコアを示す。図で TEST は今回改良した L_TBindex (以下、新 L_TBindex) の検証結果を、CNTL はルーチンの L_TBindex の検証結果を示している。比較のために、新 M_TBindex の FT=4~9 の検証結果も示している。TEST と CNTL を比較すると、FL000–150 では同等で、FL150–300 と FL300–450 では TEST が CNTL を上回る精度を持つことがわかる。また、新 M_TBindex と比較すると FL150–300 では同等で、FL000–150 と FL300–450 では TEST が新 M_TBindex をやや上回ることがわかる。また、いずれも VWS と比べて予測精度が高い。

TEST と CNTL の差は今回の改良による予測精度の差を表しており、今回の改良により従来の TBindex と比べて予測精度が向上することを示している。また、

表 2.4.4 各強度の乱気流に対してスキルスコアが最大となる TBindex の閾値。新 M は新 M_TBindex の検証結果を、新 L は新 L_TBindex の検証結果を示す。

	従来	新 M	新 L	改良後
LGTM	0.9	0.6	0.6	0.6
LGT	1.3	1.0	1.0	1.0
LGTP	2.0	1.6	1.7	1.7
MOD	3.0	3.0	3.0	3.0
SEV	5.0	5.2	4.6	4.9

TEST と M_TBindex の差は改良後の新 L_TBindex と新 M_TBindex の予測精度の差を表しており、同じ初期時刻・FT で比べても新 L_TBindex は新 M_TBindex と同等以上の精度を持つことを示している。スキルスコアが最大となる閾値を見ると、TEST では 3.0~3.2 であり、いずれの高度でも確率値の調整が概ね適切に機能していると言える。

(3) 並以外の乱気流強度に対する閾値

TBindex を表示する際の塗りわけの閾値を決める参考とするため、各強度の乱気流を対象として TBindex を検証した結果を示す。ここでは予測精度を比較することが目的ではないため、検証期間は学習期間を含む 2015 年 4 月から 2018 年 3 月の 3 年間とした。予報時間は新 M_TBindex は FT=9~14 を、新 L_TBindex は FT=4~9 を対象とし、高度については全高度を対象とした分割表値から算出したスコアを示す。

図 2.4.7 に新 M_TBindex の強度別のスキルスコアを示す。スキルスコアが最大となる新 M_TBindex の閾値は、弱- (LGTM) は 0.6、弱 (LGT) は 1.0、弱+ (LGTP) は 1.6、並 (MOD) は 3.0、強 (SEV) は 5.2 となった。これを従来の M_TBindex および L_TBindex (以下、旧 M_TBindex および旧 L_TBindex) における閾値 (LGTM: 0.9, LGT: 1.3, LGTP: 2.0, MOD: 3.0,

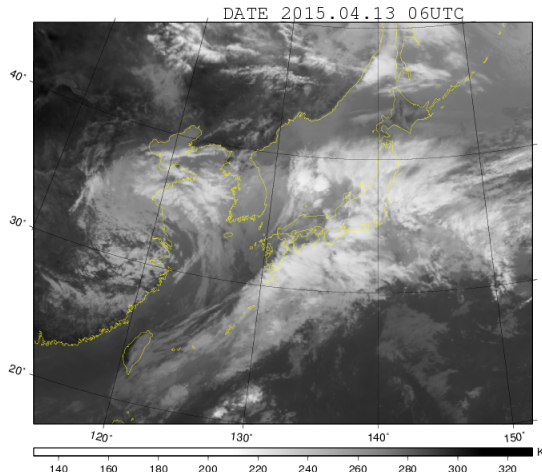


図 2.4.8 2015 年 4 月 13 日 06UTC の衛星赤外画像。

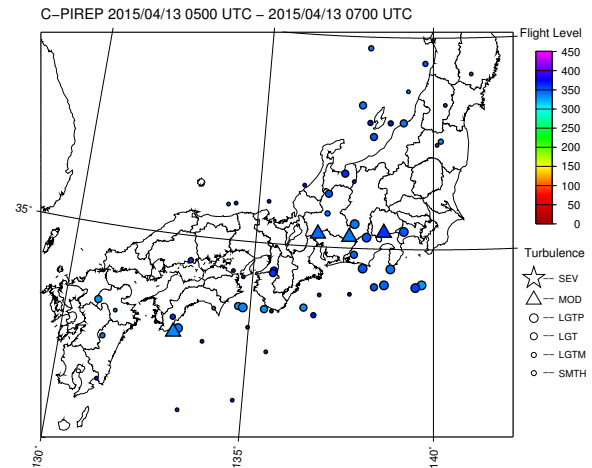


図 2.4.9 2015 年 4 月 13 日 06UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された乱気流の実況。FL330-370 の通報のみ表示。○は SMTH~LGTP、△は MOD の乱気流を、色は高度 (FL) を示す。

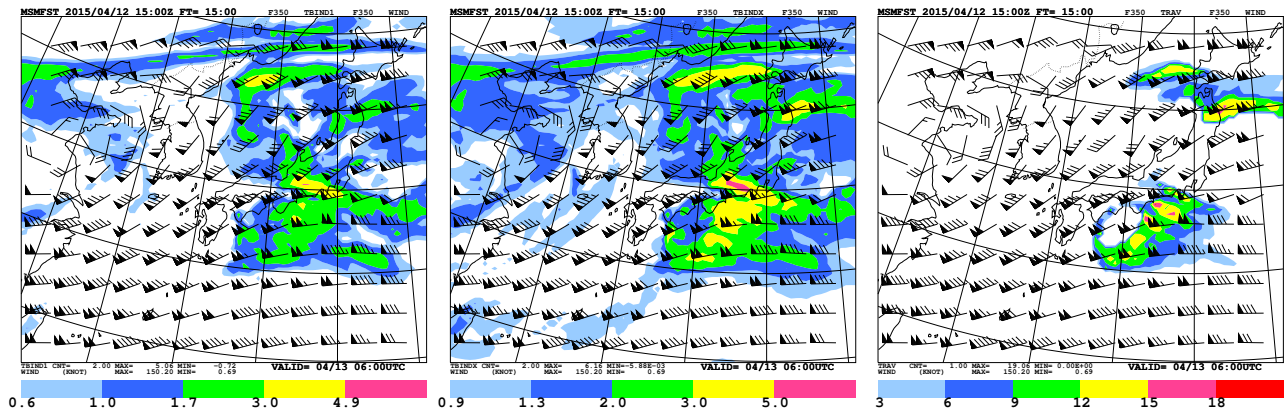


図 2.4.10 2015 年 4 月 12 日 15UTC 初期値の国内航空悪天 GPV の FT=15, FL350 の予測。(左) 新 M-TBindex、(中) 旧 M-TBindex、(右) TRAV。矢羽は風向・風速 [ノット] を表す。新 M-TBindex の閾値は表 2.4.4 で示した改良後の値を使用。

SEV: 5.0) と比べると、LGTP 以下の乱気流に対しては閾値が小さくなる方向に変化している。この変化は、説明変数を変換した影響よりも、学習期間を変更したことでモデル特性や実況データの特性が変化した影響が大きい。図は省略するが、比較のために説明変数の変換を行わないで回帰式を作成した場合でも、スキルスコアが最大となる閾値は図 2.4.7 と同じであった。

新 L-TBindex に対しても図 2.4.7 と同様の検証を行ったところ、SEVを除いてはほぼ同じ結果が得られた (図略)。表 2.4.4 に各強度の乱気流に対してスキルスコアが最大となる TBindex の閾値をまとめる。比較のために、表には従来の閾値も記載している。新 M-TBindex と新 L-TBindex の検証結果を勘案し、改良後の TBindex の塗りわけの閾値としては、LGTM は 0.6、LGT は 1.0、LGTP は 1.7、MOD は 3.0、SEV は 4.9 を目安とする (表 2.4.4 の右列)。

2.4.6 事例

ここでは検証期間中の国内航空悪天 GPV の予測事例を示す。統計検証では上・中層で予測精度の向上が見ら

れたが、個別の事例で見た場合の差は小さい。ここでは改良前後の予測特性の違いを見るため、上・中・下層それぞれの高度における典型的な予測事例を示す。LFM 航空悪天 GPV の予測事例は省略するが、新 L-TBindex の予測特性や旧 L-TBindex からの予測特性の変化は M-TBindex と同様であった。

(1) 上層の乱気流事例

2015 年 4 月 13 日には低気圧と前線による対流雲の雲頂付近で MOD の乱気流が発生した。図 2.4.8 は 4 月 13 日 06UTC の衛星赤外画像である。このとき低気圧が四国の南にあって東北東進していた。広域雲解析情報図 (TSAS1) によれば、低気圧と前線付近の雲の雲頂高度は FL350-370 であった (図略)。図 2.4.9 に 4 月 13 日 06UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された乱気流の実況を示す。ここでは雲頂付近の乱気流に着目するため、FL330-370 の実況のみ表示している。東海地方および足摺岬付近では MOD の乱気流が通報されているが、そのほかの領域では MOD 以上の通報はなかった。図 2.4.10 は、4 月 12 日 15UTC 初

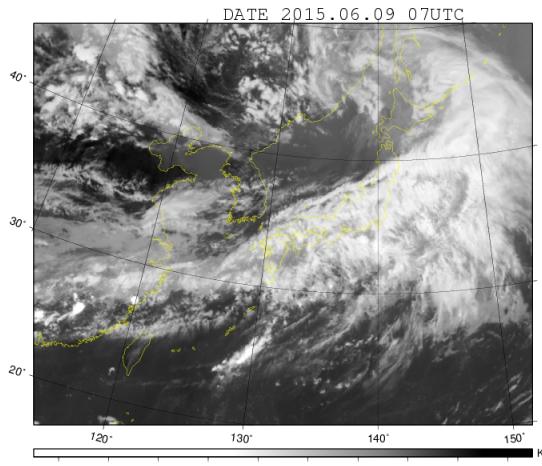


図 2.4.11 2015 年 6 月 9 日 07UTC の衛星赤外画像。

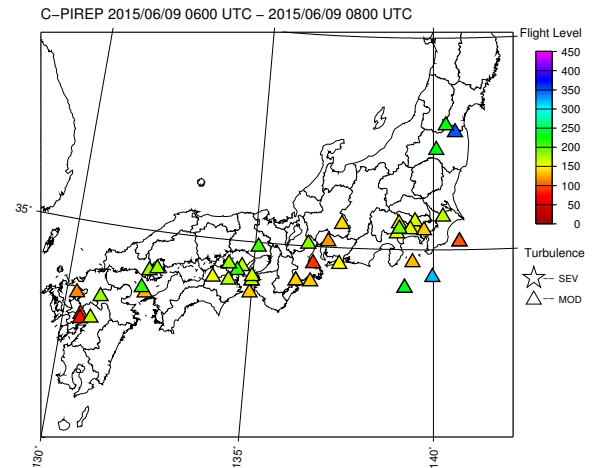


図 2.4.12 2015 年 6 月 9 日 07UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の乱気流の実況。△ は MOD の乱気流を、色は高度 (FL) を示す。

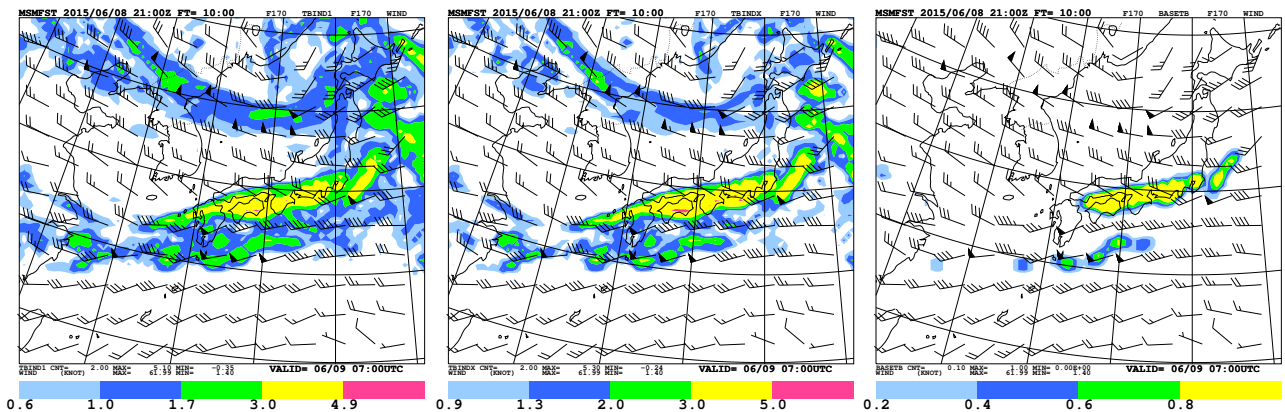


図 2.4.13 2015 年 6 月 8 日 21UTC 初期値の国内航空悪天 GPV の FT=10, FL170 の予測。(左) 新 M.TBindex、(中) 旧 M.TBindex、(右) BASETB。矢羽は風向・風速 [ノット] を表す。新 M.TBindex の閾値は表 2.4.4 で示した改良後の値を使用。

期値の FT=15, FL350 の国内航空悪天 GPV の予測図である。旧 M.TBindex では、東海地方から紀伊半島の南東海上の広い範囲で MOD 以上の乱気流が予測され、東海地方では SEV の目安である 5.0 を超える値も予測されていたが、実況と比べるとこの予測は過大であった。これに対して新 M.TBindex では MOD 以上の予測領域は東海付近に限定されており、従来よりも確かな予測を行っていた。

この事例での新・旧 M.TBindex の予測の違いは、TRAV の寄与量の差と学習期間を変更した影響が大きい。旧 M.TBindex では TRAV が大きい領域で MOD の予測がされているが、第 2.4.4 項で述べたように、新 M.TBindex では TRAV の寄与が相対的に小さくなったことで MOD の予測領域が狭くなっている。また調整係数の変化により、特に FL300 以上で従来よりも TBindex が小さくなるため、LGTm~SEV の全ての強度に対して予測領域が狭くなっている。

(2) 中層の乱気流事例

2015 年 6 月 9 日には東日本から西日本の広い範囲の中層で MOD の乱気流が発生した。図 2.4.11 は 6 月 9 日 07UTC の衛星赤外画像である。このとき低気圧が福島県沖にあって北東進しており、寒冷前線が関東から九州の南岸にのびていた。図 2.4.12 に 6 月 9 日 07UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の乱気流の実況を示す。寒冷前線の北側に当たる関東から九州の FL100-220 付近で MOD の乱気流が多数通報されている。図は省略するが、レーダーエコー断面図や雲底付近の気温、C-PIREP の天候状態の通報などから、この乱気流は中層雲底乱気流 (Kudo 2013; Kudo et al. 2015) であったと考えられる。図 2.4.13 は、6 月 8 日 21UTC 初期値の FT=10, FL170 の国内航空悪天 GPV の予測図である。中層雲底乱気流を予測対象とする BASETB を見ると、関東南部から瀬戸内海にかけて、上限である 1 に近い値が予測されていた。新・旧 M.TBindex では、BASETB が大きい領域を中心に 3.0 を超える値が予測されており、いずれも乱気流を捕捉できていたと言える。

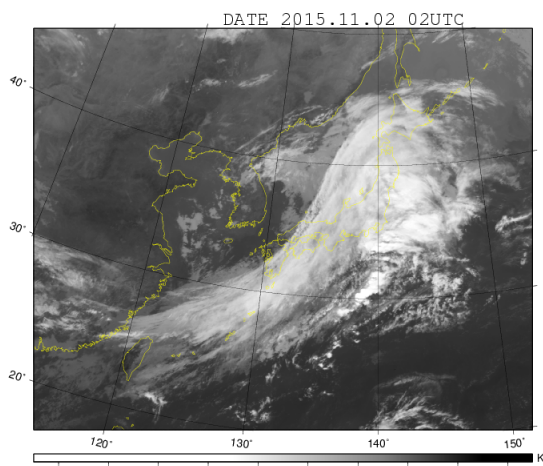


図 2.4.14 2015 年 11 月 2 日 02UTC の衛星赤外面像。

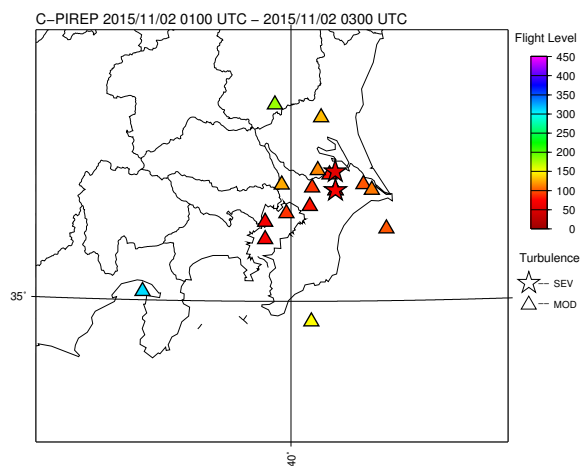


図 2.4.15 2015 年 11 月 2 日 02UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の乱気流の実況。☆は SEV、△は MOD の乱気流を、色は高度 (FL) を示す。

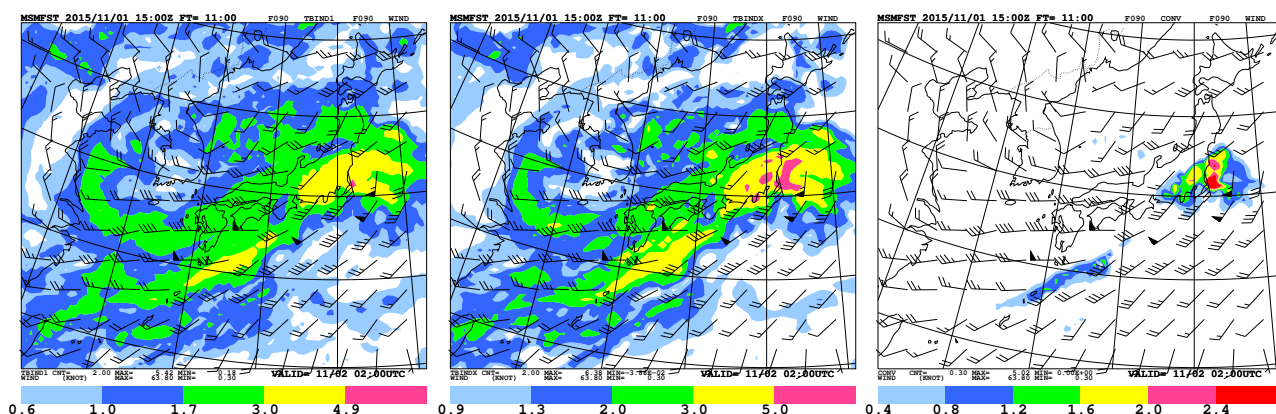


図 2.4.16 2015 年 11 月 1 日 15UTC 初期値の国内航空悪天 GPV の FT=11, FL090 の予測。(左) 新 M.TBindex、(中) 旧 M.TBindex、(右) CONV (変換前の値)。矢羽は風向・風速 [ノット] を表す。新 M.TBindex の閾値は表 2.4.4 で示した改良後の値を使用。

新 M.TBindex の予測に着目すると、MOD 以上の領域は旧 M.TBindex よりもやや狭くなり、逆に LGTP 以下の領域は旧 M.TBindex よりもやや広がっている。これは、第 2.4.4 項で述べた調整係数の再作成により従来と比べて TBindex が小さくなる傾向がある一方で、LGTP 以下の乱気流に対しては予測の閾値が小さくなり予測領域が広がったことが影響している。

(3) 下層の乱気流事例

2015 年 11 月 2 日には低気圧周辺の対流雲中で乱気流が発生した。図 2.4.14 は 11 月 2 日 02UTC の衛星赤外面像である。11 月 2 日 03UTC には房総半島沖に低気圧があり北東進していた。図 2.4.15 に 11 月 2 日 02UTC の前後 1 時間以内に C-PIREP で通報された MOD 以上の乱気流の実況を示す。関東南部の FL050–150 付近では SEV を含む乱気流が通報されている。図 2.4.16 は、11 月 1 日 15UTC 初期値の FT=11, FL090 の国内航空悪天 GPV の予測図である。旧 M.TBindex では、東北から東海地方の広い範囲で 3.0 を超える予測がされており、一部では SEV の目安である 5.0 を超

える値も予測されていた。SEV の予測がされた領域では、対流雲中での乱気流を対象とする CONV の予測値が大きかった。新 M.TBindex では、東北から東海地方の広い範囲で 3.0 を超える予測がされていたことは旧 M.TBindex と同様であるが、SEV の目安である 4.9 を超える予測領域は旧 M.TBindex よりも大幅に狭くなっている。

この事例での新・旧 M.TBindex の予測の違いは、CONV の寄与量の差と調整係数を再作成した影響が大きい。第 2.4.4 項で述べたとおり、新 M.TBindex では CONV の寄与が相対的に小さくなったことで SEV の予測領域が狭くなっている。また調整係数を再作成したことで、従来と比べて TBindex が小さくなる傾向がある一方で、LGTP 以下の乱気流に対しては予測の閾値が小さくなり予測領域が広がった。

2.4.7 利用上の留意点

改良後の TBindex では、MOD 以上の乱気流の予測域は従来と比べて全般に狭くなり、LGTP 以下の予測域は、上層で狭く、中・下層で広がる傾向がある。こ

れは図 2.4.4 と表 2.4.4 で示したように、TBindex としては従来よりも全般に小さく（FL300 以上で特に小さく）なる傾向があるとともに、LGTP 以下の乱気流に対する閾値が小さくなったことによるものである。この傾向は新 M.TBindex と新 L.TBindex に一般的に見られ、また、CONV, VHS, RI を平方根等で変換せずに、単に係数を再学習した場合でも見られた（図略）。よってこの予測特性の変化は学習期間の違いを反映したものであり妥当であると言えるが、従来と比べて上記のように予測域が変化することに留意していただきたい。

改良後の TBindex では、CONV, MTW1, MTW2, BASETB, TRAV, HWS の寄与量が相対的に小さくなり、VHS と RI の寄与量が大きくなった。これにより、図 2.4.10 や図 2.4.16 で示したように、CONV と TRAV が大きな領域では従来と比べて TBindex の値が小さくなる傾向にある。一方 MTW1, MTW2, BASETB, HWS については、寄与量にそれほど顕著な違いはなく、従来と同様に利用することができる。

改良後の TBindex の算出においては CONV, VHS, RI は平方根または平方根の逆数で変換した値を利用するが、これまで変換前の値が利用されてきたことから、利便性を考慮してモニター用には従来と同じ変換前の値を出力する。

M.TBindex と L.TBindex を比較すると、全般に L.TBindex の方が精度がやや高い。LFM 航空悪天 GPV が利用できる時間帯については L.TBindex も積極的に活用していただきたい。今後 LFM 航空悪天 GPV の予報時間を 10 時間に延長することで、より有効に利用できるようになると考えられる。

2.4.8 まとめ

2018 年 9 月から、国内航空悪天 GPV の予測領域を拡大し、各 TBindex の係数を最新の学習データに基づく値に更新した。また、2018 年度末までには LFM 航空悪天 GPV の予報時間を 10 時間に延長する。従来は M.TBindex と L.TBindex で同じ回帰式を利用していたが、今回からはそれぞれ独自に回帰式を持つこととした。回帰式作成においては、CONV, VHS, RI はロジットと線形関係を持つように平方根または平方根の逆数で変換した値を利用することとした。統計検証の結果、従来と比べて TBindex の予測精度が改善することが確かめられた。

国内航空悪天 GPV の予測領域の拡大と乱気流指数の改良、LFM 航空悪天 GPV の予報時間の延長により、FBJP やシグメット情報の作成、ATM のための情報作成などに更に有効に活用できるものと思われる。前項で述べた点に留意し、引き続き空域予報に役立てていただきたい。

参考文献

- 井藤智史, 2018a: 着氷指数. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 219–225.
- 井藤智史, 2018b: 積乱雲量・雲頂高度. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 226–232.
- 金井義文, 満満男, 工藤淳, 2015: 下層悪天予想図及び新しい狭域悪天予想図. 航空気象ノート第 77 号, 気象庁航空気象管理官, 36–69.
- 工藤淳, 2014: 乱気流指数の改良. 平成 26 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 87–99.
- 工藤淳, 2018a: 乱気流指数. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 204–218.
- 工藤淳, 2018b: ロジスティック回帰. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 43–47.
- 工藤淳, 2018c: 線形重回帰. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 35–42.
- 工藤淳, 2018d: ガイダンスに用いる統計の基礎. 数値予報課報告・別冊第 64 号, 気象庁予報部, 24–34.
- 後藤尚親, 2017: MSM ガイダンスの特性の変化. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 56–60.
- 原旅人, 倉橋永, 後藤尚親, 工藤淳, 2017: メソ数値予報システムの改良および毎時大気解析の変更. 平成 29 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 42–65.
- 原旅人, 幾田泰醇, 伊藤亨洋, 松林健吾, 2015a: asuca が導入された局地数値予報システム. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–23.
- 原旅人, 飯塚義浩, 白山洋平, 工藤淳, 草開浩, 2015b: メソ数値予報システムの改良. 平成 27 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 24–49.
- Akaike, H., 1973: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *B.N. Petrov, F. Csaki (Eds.), Second International Symposium on Information Theory, Akademiai Kiado, Budapest*, 267–281.
- Kudo, A., 2013: The generation of turbulence below midlevel cloud bases: The effect of cooling due to sublimation of snow. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **52**(4), 819–833.
- Kudo, A., H. Luce, H. Hashiguchi, and R. Wilson, 2015: Convective instability underneath midlevel clouds: Comparisons between numerical simulations and VHF radar observations. *J. Appl. Meteor. Climat.*, **54**(11), 2217–2227.