

ガーナ国周辺地域における WRF による気象予報試行

A Trial Meteorological Forecasting Using WRF Model over Ghana

鵜沼 昂・石川裕彦・Ayilari-Naa A. JUATI⁽¹⁾・Samuel O. ANSAH⁽¹⁾・Peter NUNEKPEKU⁽¹⁾・Richard Yao AGYEMAN⁽¹⁾・Caleb MENSAH⁽¹⁾

Takashi UNUMA, Hirohiko ISHIKAWA, Ayilari-Naa A. JUATI⁽¹⁾, Samuel O. ANSAH⁽¹⁾, Peter NUNEKPEKU⁽¹⁾, Richard Yao AGYEMAN⁽¹⁾, and Caleb MENSAH⁽¹⁾

(1) ガーナ気象局

(1) Ghana Meteorological Agency

Synopsis

A trial meteorological forecasting over Ghana was conducted with the use of Weather Research and Forecasting model (WRF) and data assimilation system (WRFDA). Three dimensional data assimilation (3DVAR) was applied to a flash flood event that occurred at Accra Ghana on 3rd June 2015 for better rainfall forecasts in this study. It is found that the horizontal scale of the convective systems that spawn a flash flood was about 1000 km. SYNOP and SONDE data were used for our assimilation. The assimilation of SYNOP data provides a quantitatively positive feedback on the rainfall forecast. On the other hand, the location of the predicted rainfall distribution is shifted to westward when SONDE data is assimilated to the initial condition. SYNOP data mostly improved moisture conditions, whereas SONDE data overestimated zonal winds in this case. While SYNOP data used in this study does not include Ghanaian area, the results suggests that there is one of a possibility for an improvement of rainfall forecasts when Ghanaian SYNOP data is assimilated.

キーワード：ガーナ共和国，WRF モデル，地上観測，ラジオゾンデ

Keywords: Republic of Ghana, WRF model, SYNOP, Radiosonde

1. はじめに

ガーナ共和国は、サバナ気候 (Am) に属し、雨期には熱帯性の激しい降水によりしばしば洪水に見舞われる。一方、北部の半乾燥地域では、播種後に無降水が続き発芽した作物が枯死する被害が発生し、降水予測への期待は高い。一般に熱帯地域での気象予測は予測精度が悪いが、偏東風が安定して吹くこの地域では比較的良好的な気象予測を行える可能性がある。

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATRPS) のサブ課題として、ガーナ気象局と協力して同国での気象予報を試行している。これまでに

WRF モデルを用いた予報実験を行ってきており、ガーナ国付近における適用性を調査している。現実大気における大雨の再現性を調査するために、2015 年 6 月上旬に発生した対流性降水について再現実験を行った。そして同じ事例について予報実験を行った。予報実験においては、データ同化を用い、地上観測・高層観測データそれぞれを同化した場合について調査した。

2. 解析対象事例

本研究では、2015 年 6 月 3 日にガーナ国の首都アクラで発生した大雨事例を対象とした。Fig. 1 は、

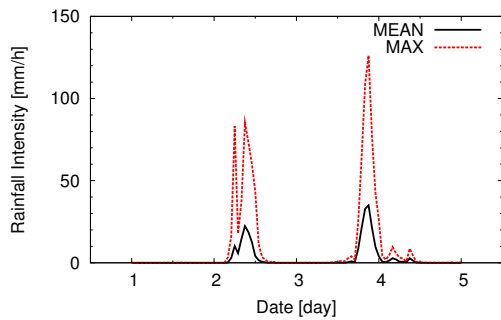


Fig. 1 The mean (black solid line) and maximum (red broken line) values of precipitation intensity [mm h^{-1}] derived from GSMaP over Accra, Ghana.

GSMaP データから算出した、ガーナ国アクラ付近における時間雨量の時間変化を示したものである。この事例は、大きく分けて 2 つの降雨極値を持つ。それぞれ、6 月 2 日 1000 UTC 頃・6 月 3 日 2200 UTC 頃である。これらの降雨極値のうち再現性の良かった 2 回目の時間帯を対象とする。

まず、NCEP 最終解析値 (FNL) を用いた再現実験結果について述べる。Fig. 2 は、前述の 6 月 3 日 2200 UTC における時間雨量の水平分布である。左側に GSMaP、右側に WRF の再現結果を示す。観測データを見ると、ガーナ国南部にある降雨の分布は東西に 1000 km 程度の広がりを持っている。このことから、ガーナ国南部に大雨をもたらした降水系の水平スケールは、約 1000 km であることがわかる。同時刻における WRF による再現結果を見ると、降水系の水平スケールは現実よりもやや小さいもののガーナ国南部の海岸線付近に降水系が再現されている。また、ガーナ国北東部において観測されていない降雨分布が計算されている。計算された降雨のピーク値は、観測値よりもやや南に位置がずれている。しかし、 30 mm h^{-1} 以上の降雨面積はよく再現出来ている。

次に、初期値における大気鉛直構造の再現性について調査した。Fig. 3 に、アビジャン地点における高層観測データを示す。図の左側が観測値、右側が WRF による再現結果である。気温・露点温度の鉛直分布を比較すると、細かな変動はやや平滑化されているもののそれらの鉛直構造はよく再現されている。900・650 hPa 付近の湿潤した層が、WRF においてよく再現されている。300 hPa より上空で観測データではやや乾燥しているが、これは計算では再現されていない。水平風の鉛直分布を比較すると、計算された風向はおおよそ観測値と調和している。風速

の鉛直分布については、600 hPa 付近で 40 knot の強風域が観測されているが、再現結果では 35 knot となっておりやや過小評価傾向である。その他の層でも同様の傾向が見られる。以上から、NCEP 最終解析値によって得られた熱力学・力学的初期場は、観測データと高い整合性を持つと言える。

このように最終解析値として適切に同化されたデータを初期・境界値に用いた計算では、ガーナ国周辺域における WRF による大気場の計算は有効であると考えられる。次節以降、予測計算の場合における WRF モデルの適用性について述べる。

3. 数値モデルと再現・予報実験設定

3.1 数値モデル

使用したモデルは、主に米国国立大気研究センター (NCAR) を中心に開発が進められている領域気象予報モデル Weather Research and Forecasting (WRF) モデル-Advanced Research WRF (ARW) バージョン 3.6.1 である (Skamarock et al., 2008)。

本研究では、アフリカ大陸北西部を覆う 3,456 km 四方の計算領域を設定し (Fig. 1)、水平格子間隔を 27 km とした。ネスティング機能は使用していない。境界層乱流混合過程には、ノンローカルスキームである YSU (Hong et al., 2006) を使用した。雲微物理過程には 6 種類の水物質を予報する WSM6 (Hong and Lim, 2006) を用いた。放射過程には、RRTMG (Iacono et al., 2008) を短波・長波放射双方で用いた。

特に、水平格子間隔が粗い ($\Delta x > 4 \text{ km}$) 場合には雨をもたらす対流群における個々の積乱雲を適切に予報・再現することが出来ない。そのため、積雲パラメタリゼーションを本研究で用いた。予備実験として WRF モデルに実装されているいくつかの積雲パラメタリゼーションの感度を調査した。その結果、ガーナ国周辺域の降雨分布の予報・再現精度が最も良かった Betts-Miller-Janjic スキーム (Janjic, 1994) を使用することとした。

初期時刻は 2015060112 UTC とし、2015060400 UTC までの 2.5 日の予報を行った。初期・境界値には、NCEP の初期値と予報値 (GFS) を使用した。

同化に使用したデータは、SYNOP 及び SONDE データである。地点分布を Fig. 4 及び Fig. 5 に示す。観測データを同化する時刻は初期時刻の 2015060112 UTC とした。本研究では同化する観測データの影響を調査するために、観測データを同化しない場

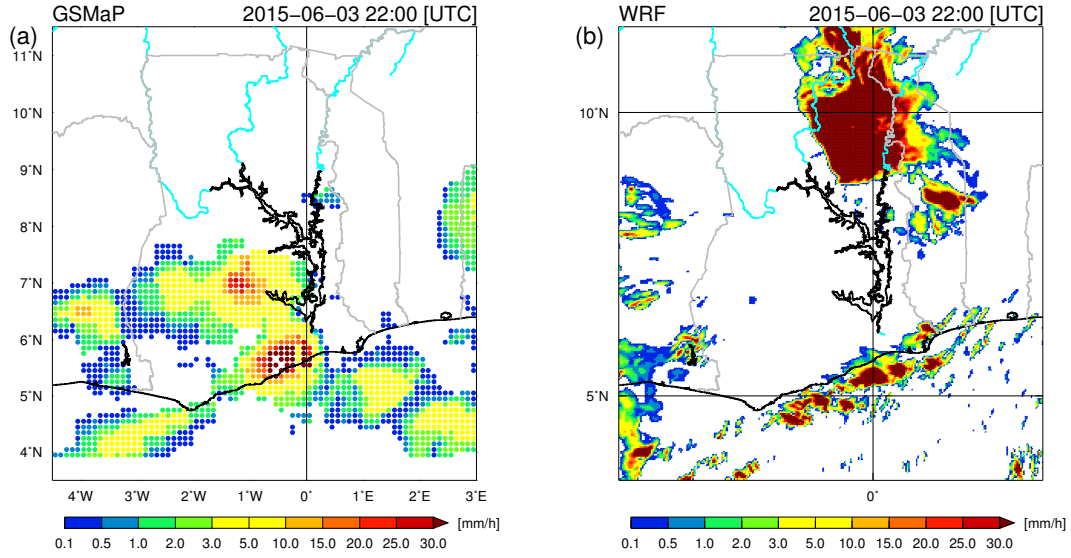


Fig. 2 The horizontal distributions of one hour rainfall [mm] derived from (a) GSMaP and (b) WRF at 2200 UTC 3rd June 2015.

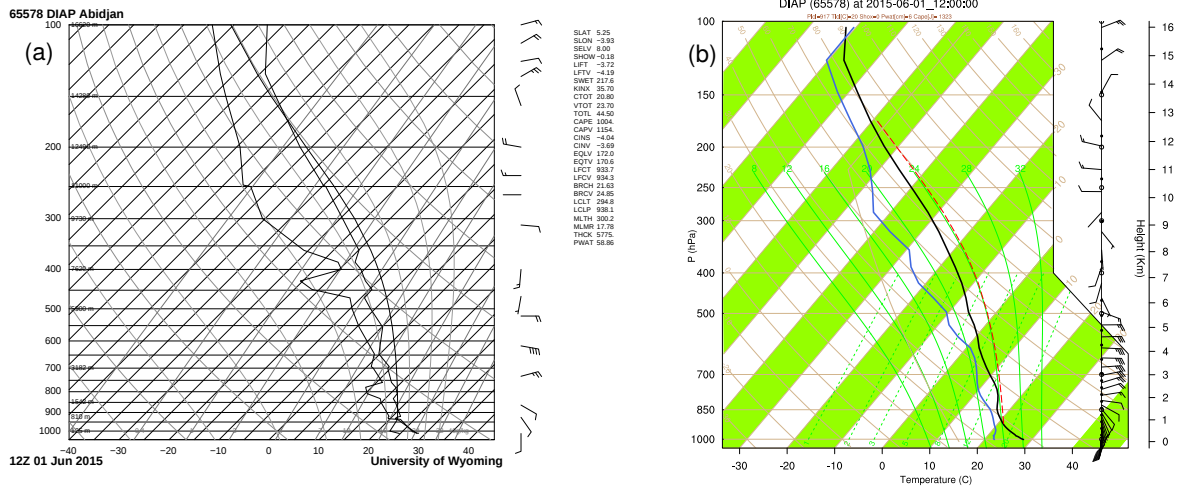


Fig. 3 Skew-T diagrams at Abidjan on 1200 UTC 1st June 2015. The left and right panels show (a) the observation, and (b) the initial condition of WRF model, respectively.

合, SYNOP データのみ同化した場合, SYNOP 及び SONDE データを同化した場合の 3 つの実験を行った。

3.2 3次元データ同化

データ同化には, WRF モデル Data Assimilation system (WRFDA) バージョン 3.6.1 を使用した (Barker et al., 2012). WRF-3DVAR では, 与えられた背景場 $\mathbf{x}_b$ に対し, 式 (1) の評価関数 $J(\mathbf{x})$ が最小となるような修正を施した解析値 $\mathbf{x}$ を算出する。

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{y} - H(\mathbf{x})) \quad (1)$$

変数の概要及び WRFDA における入出力変数を Table 1 に示す。言い換えると, 3DVAR では予報計算に用いる初期値としての背景場 (これを第一推定値と呼ぶ) の誤差と観測値における誤差の和が最も小さくなるような修正を, 第一推定値に施すのである。ここで, 背景場 (第一推定値) には, NCEP-GFS の初期値を用いた。モデル内背景誤差共分散 (B) は GFS データの 15 日分の各初期・予報値から計算領域 (Fig.1) 内における 24 時間予報値を計算し, そのバラツキから NMC 法により算出している。NMC 法の詳細については Parrish and Derber (1992) を参照されたい。観測データにおける背景誤差共分散 (R) には, US Air Force (AFWA) による観測誤差データファイルを用い, それが利用できない場合には Parrish and

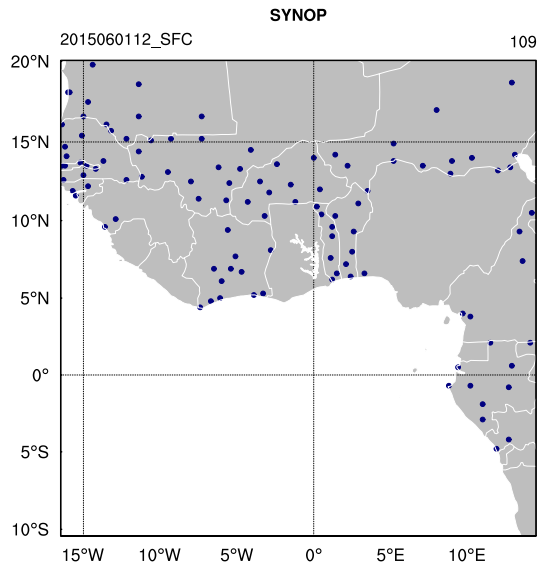


Fig. 4 The horizontal distribution of SYNOP data used in this study.

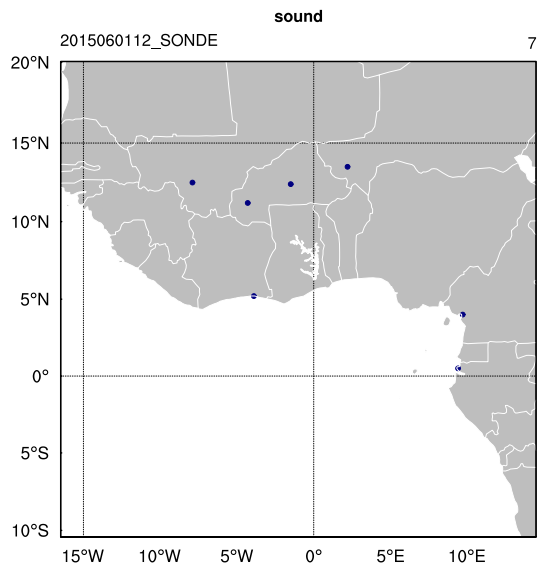


Fig. 5 The same as Fig. 4, but radiosonde data.

Derber (1992) の手法により NCEP 観測誤差を用いて計算している。

4. 結果

各実験で得られた 2 回目の降雨ピーク時の雨量分布を図に示す。観測値を同化しない場合には、位置・雨量ともに精度良く予報されている (Fig. 6(a))。しかし、予報された雨量が観測値よりも少なく、予報された降水ピークの時刻が観測値よりも 6 時間程度早かった。SYNOP データを同化した実験では、SYNOP データを同化しない場合と降雨分布はほぼ同様であるが、その雨量ピークの値が観測値と比較

して近い値に予報された (Fig. 6(b))。SONDE データを同化した実験においては、降雨のピークは予報されるものの、予報された降雨の位置が大きく南西側にずれていた (Fig. 6(c))。これらの結果は、3DVAR による初期場の修正度合いに大きく依存する。そこで、観測データを同化していない場合を基準とし、観測データの同化における影響を調査した。

まず、SYNOP データを同化した場合について述べる。Fig. 7 は、東西風・南北風・気温・水蒸気混合比について SYNOP と観測点近傍の GFS データとの散布図である。左図の BAK は同化前の背景場、右側の ANA はデータ同化後の散布図である。全体的に、SYNOP データを同化することで二乗平均平方根・標準誤差の値が小さくなっている。水蒸気混合比に着目すると、観測値と比べ GFS データにおいて過小評価しているものの、同化によってこれらの誤差は小さくなっている。このことから、SYNOP データを同化することで地表付近の水蒸気量が観測値に近づくように修正された (初期場における地表付近の水蒸気量が増加した) ことが分かる。したがって、SYNOP データを同化することで初期場の水蒸気量が増加し、計算される雨量が現実に近い値となったと考えられる。

次に、SONDE データを同化した場合について述べる。Fig. 6 で示したように、SONDE データを同化した場合には降雨域の大きな位置ずれが見られた。この原因を調べるため、東西風に着目した調査を行った。Fig. 8 は、SYNOP と SONDE データを同化した場合の初期値と観測データを同化しない場合の初期値との東西風の差を 2 つのモデル面で示したものである。モデル面第 14 層では、ガーナ国西部において SYNOP と SONDE データを同化した場合の東風が観測データを同化しない場合よりも大きくなっている (Fig. 8(a))。モデル面第 35 層の対流圏上空では、モデル面第 14 層の特徴に加えて、観測データを同化しない場合よりも SYNOP と SONDE データを同化した場合においてガーナ国北東部に負の偏差が確認できる (Fig. 8(b))。この負の偏差に対応して正の偏差がガーナ国南西部に表れている。これは、式 (1) の背景誤差共分散及び観測誤差共分散においてその空間分布を距離に対して正規分布を仮定していることによる。これは、ある地点で極大域が存在する場合、その極大に合わせて周辺域に極小域が形成されることを意味する。

ここで、Fig. 6(c) で見られた降雨域の位置ずれにつ

Table 1 The Input/Output variables and its description on the equation (1).

Variables	Description	Input/Output Variables
$J(\mathbf{x})$	Scalar cost function	WRFDA output
$\mathbf{x}$	The analysis	WRFDA output
$\mathbf{x}_b$	Background field	user input
$\mathbf{B}$	Background error covariance matrix	user input
$\mathbf{y}$	Observations	user input
H	Observation operator	included in WRFDA
$\mathbf{R}$	Observation error covariance matrix	user input

いて考察する。対流の移動速度は、主として対流圏中・下層の水平風速に依存すると考えられる。ガーナ国北東部の高層観測データを同化したことで正の偏差が生じ (Fig. 8(b)), それに対応した負偏差がガーナ国南西部で生じた。ガーナ国上空では主として偏東風場となっている (Fig. 3(a)) ため、ガーナ国南部周辺域では解析値において第一推定値よりも東風成分が強化されたことになる。したがって、この東風成分の強化に影響を受け、降雨域の位置が観測データと比較してずれが生じたと言える。

以上の結果から、本事例においては地上データを同化することで、地上付近の水蒸気場を上方修正し、予報される降雨分布とそのピーク値を現実になづける。一方、高層観測データの同化は、対流圏上層の水平風と第一推定値の差が大きい場合に予報雨量の位置ずれを発生させることが明らかとなった。

5. まとめ・結論

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATRPS) 研究プロジェクトの下で、ガーナ国における現業予報を目指した気象予報計算の試行を行った。対象事例は、2015 年 6 月 3 日にガーナ国アクラに大雨をもたらした対流性降水である。まず GSMaP を用いた解析結果から、降水系の水平スケールは約 1000 km であることが分かった。一連の対流性降水域がガーナ国南部の海岸線で発生し、その後海岸線に沿って西部に伝播していた。この対流性降水には 2 つのピークがあった。それらは、6 月 2 日 08 UTC と 6 月 3 日 18 UTC である。WRF モデルをこの事例に適用し、積雲パラメタリゼーションに Betts–Miller–Janjic を使用した場合に大雨をもたらした対流性降水が良く再現されることを確認した。

同化した観測データの初期場における影響を調査

した結果、地上観測の同化により水蒸気場が増加・改善していた。これにより初期場の相対湿度が増加し、降雨量が増加したと考えられる。一方、高層観測データ同化時には対流圏中層の東風が過大となった。このため、予報される降雨域の西進が早まり、降雨分布の位置ずれが生じたと考えられる。

以上の結果から、本事例においては地上観測データを同化することで、地上付近の水蒸気場を改善し、予報される降雨分布とそのピーク値を現実になづける可能性がある。一方、高層観測データの同化は、対流圏上層の水平風と第一推定値の差が大きい場合に予報雨量の位置ずれを発生させる可能性が示された。

今回使用した地上観測データには、ガーナ国内の SYNOP データが含まれていない。今回の事例に関しては、特に SYNOP データの同化が降水量の正確な予報に効果的であることが示された。そのため、今後ガーナ国内の SYNOP データを同化することにより、雨量の質的予報精度の向上が期待される。

謝 辞

本研究は、アフリカ半乾燥地域における気候・生態系変動の予測・影響評価と総合的レジリエンス強化戦略の構築」(CECAR-Africa) 研究プロジェクトの下で行われました。関係者各位に謝意を示します。

参考文献

Barker, D., Huang, X.-Y., Liu, Z., Aulignat, T., Zhang, X., Rugg, S., Ajaj, R., Bourgeois, A., Bray, J., Chen, Y., Demirtas, M., Guo, Y.-R., Henderson, T., Huang, W., Lin, H.-C., Michalakes, J., Rizvi, S., and Zhang, X. (2012): The Weather Research and Forecasting Model's Community

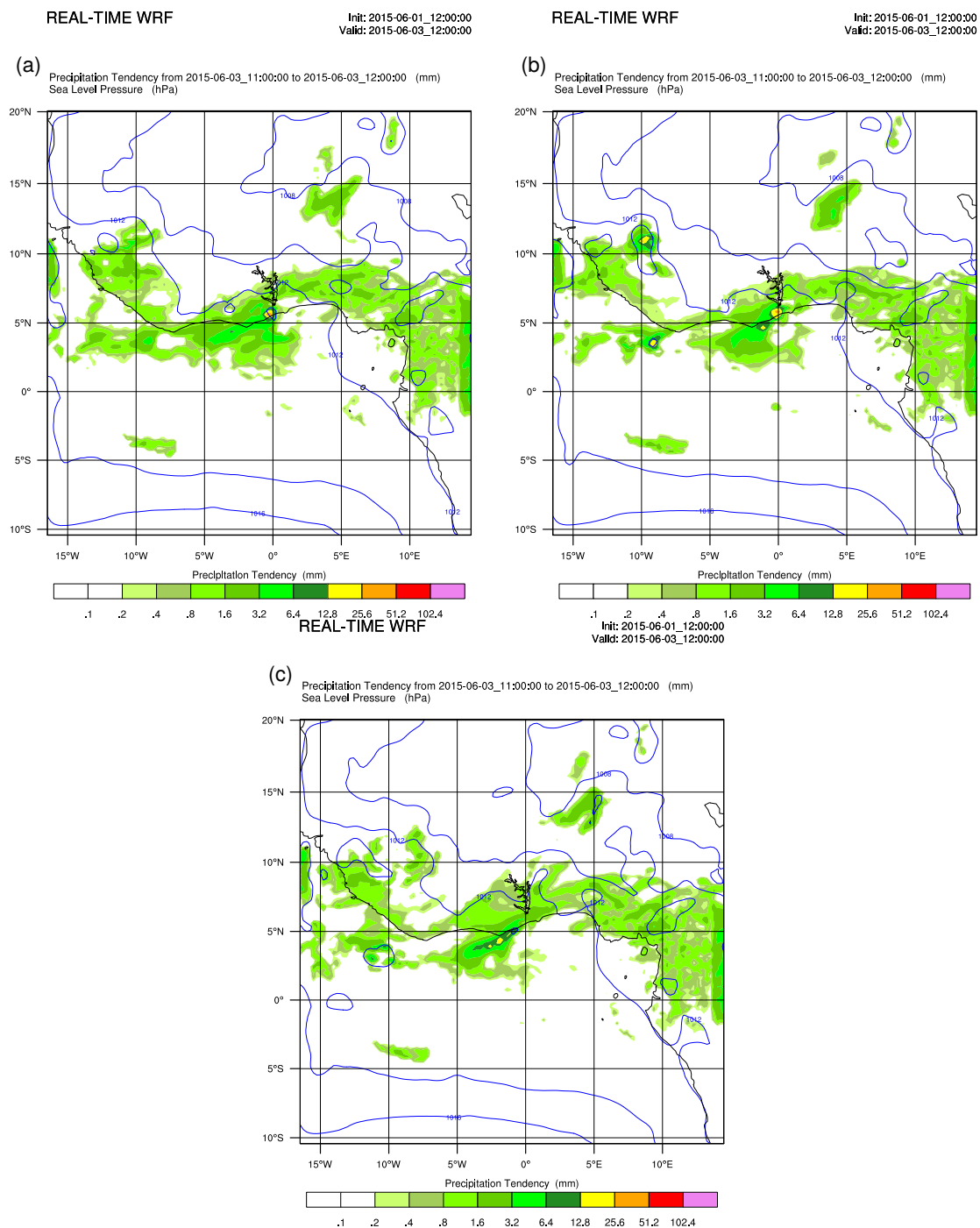


Fig. 6 The rainfall forecasts on 1200 UTC 3rd June 2015: (a) without assimilation, (b) with SYNOP data, and (c) with radiosonde data.

Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA, Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 93, pp. 831–843.

Hong, S.-Y., and Lim, J.-O.J. (2006): The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6), J. Korean Meteor. Soc., Vol. 42, pp. 129–151.

Hong, S.-Y., Noh, Y., and Dudhia, J. (2006): A new vertical diffusion package with an explicit treatment

of entrainment processes, Mon. Wea. Rev., Vol. 134, pp. 2318–2341.

Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., and Collins, W.D. (2008): Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, J. Geophys. Res., Vol. 113, D13103.

Janjic, Z.I. (1994): The Step-Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection,

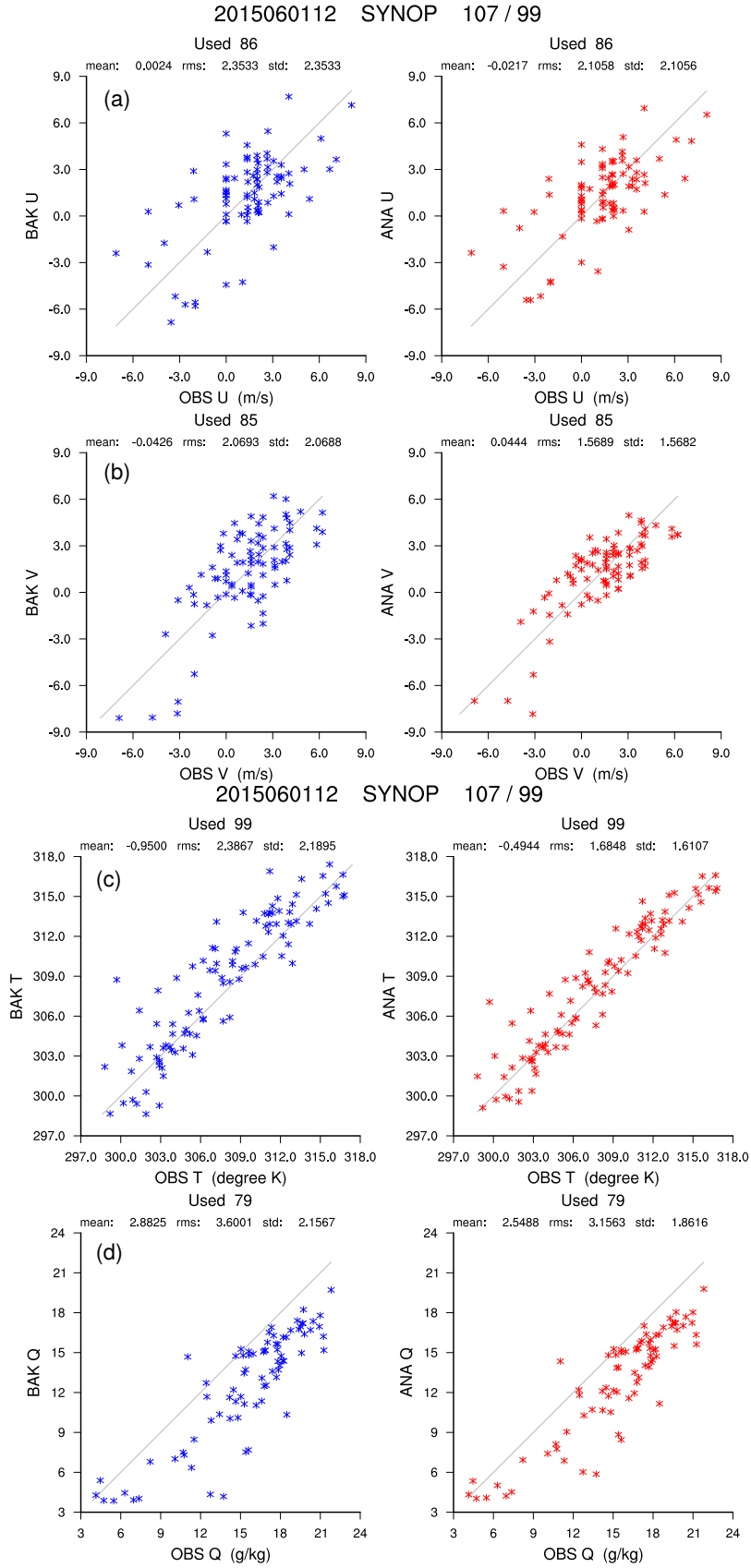


Fig. 7 The scatter diagrams for SYNOP observation against background field (left panels), and for SYNOP observation against the analysis (right panels). The variables are (a) Zonal wind [m s⁻¹], (b) meridional wind [m s⁻¹], (c) Temperature [K], and (d) water vapor mixing ratio [g kg⁻¹].

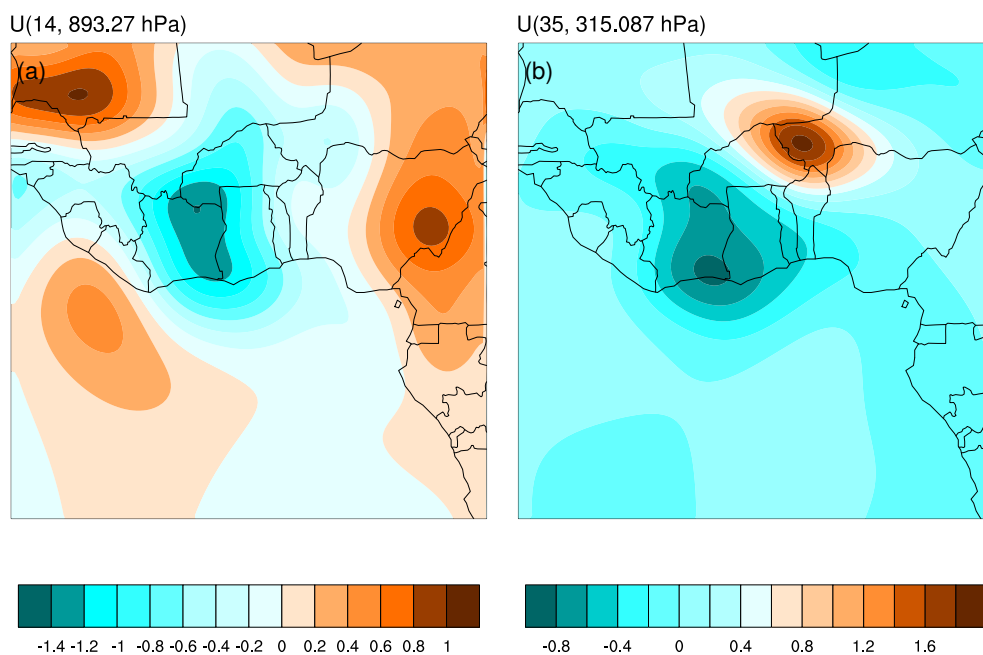


Fig. 8 The increments of the analysis relative to background field of zonal wind [m s^{-1}] at (a) 14th and (b) 35th model layers.

viscous sublayer, and turbulence closure schemes, Mon. Wea. Rev., Vol. 122, pp. 927–945.

Parrish, D.F., and Derber, J.C. (1992): The national meteorological center's spectral statistical interpolation analysis system. Mon. Wea. Rev., Vol. 120, pp. 1747–1763.

Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O.

Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., and Powers, J.G. (2008): A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, pp. 113.

(論文受理日：2016 年 6 月 13 日)