

マルチリモートセンシング観測値の3次元 変分法に基づくデータ同化

THREE-DIMENSIONAL VARIATIONAL DATA ASSIMILATION OF MULTIPLE REMOTE SENSING OBSERVATIONS

杉本 聡一郎
Soichiro SUGIMOTO

正会員 工修 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

This study presents a framework to assimilate data observed by a variety of space- and ground-based remote sensing instruments. The framework is based on the WRF 3-D Var system. Data to be assimilated are brightness temperature from TRMM Microwave Imager (TMI), radar reflectivity from conventional radars, precipitable water vapor (PWV) retrieved from GPS observations, and horizontal winds from operational wind profilers. A heavy rainfall case, which was occurred around Kyushu Island in 2003, is chosen for an application. Results indicate that each data can contribute to significant reduction of the inherent spin-up problem. Assimilation of TMI data improves forecasting of convections coming from offshore, which is effective over the lead time of 6-hour. Temperature retrieval with radar reflectivity is necessary for quantitative precipitation forecasting (QPF). GPS-PWV data is useful with TMI data to recover water vapor field. Assimilation of ground-based data has positive impact up to 6-hour ahead at most in this study. After all, QPF with assimilation of all datasets shows the best performance.

Key Words : Data assimilation, 3-D Var, WRF model, Precipitation forecasting, Remote sensing

1. はじめに

わが国は、国土が海によって囲まれており、海上で発生・発達し、到来する降水を的確に予測することが重要である。2004年新潟・福島豪雨、福井豪雨、もしくは2003年水俣豪雨のように、次々と降水が到来する期間が長くなれば、集中豪雨につながることが多い。

一般的に、海上における(降水)観測は衛星観測に依存せざるを得ない。その一方、広範囲に均質な衛星観測値を数値気象モデルにおいて活用するためのデータ同化手法は開発の途にある。衛星データの中で、マイクロ波放射計による輝度温度データは、降水予測にとって重要なモデル変数である水蒸気量と密接な関係がある。海上におけるデータの定量性が高いことから、ハリケーンの進路予測を向上させることなどを目的として、SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) による輝度温度データの同化実験などが試みられている(Chen et al.¹⁾)。

一方、降水予測の精度向上に資する地上リモートセンシング測器として、ウインドプロファイラ(以下、WPR)、GPS、レーダーが挙げられる。WPRによる観測値の同化は、気象庁の4次元同化システムでも行われるなど、各国の気象

センターにおける実績がある。GPSデータについては、可降水量(以下、PWV)のような水蒸気に係わる情報に加工して同化が試みられている(例えば、Guo et al.²⁾) が、より一層の事例解析の積み重ねが必要である。

レーダーによる反射因子(エコー強度)データの同化は、Sun and Crook³⁾ などにより、4-D Var に対する効果が実証されたが、依然として、研究開発すべき項目が多い。よりシステマティックな気象モデルに対しては、現在、同化ルーチンを開発する段階にある。最近、Xiao et al.⁴⁾ や Sugimoto et al.⁵⁾ が領域気象モデルである WRF (Weather Research and Forecasting) モデルに対する 3 次元同化システム WRF 3-D Var を基礎とした同化を試み、一定の効果を示した。

いずれにせよ、複数の種類のデータを共に同化に用いる効果を検討する研究はほとんど見られない。また、地上観測から得られたデータだけを複合的に同化したとしても、離れた海上に対する効果は期待できない。本研究の目的は、WRF 3-D Var を基礎として、TMI (TRMM Microwave Imager) による輝度温度の衛星観測値、国内における WPR、GPS、レーダーのルーチン観測値を共に同化する手法を構築し、手法とそれぞれのデータの有効性を評価することにある。そのために、2003年水俣豪雨に構築手法の適用を図った。

2. 3次元データ同化システム WRF 3-D Var

(1) 概要

WRF 3-D Var において行われることは、コスト関数

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

が最小になるモデル変数の最適解析値を共役勾配法により探索することに帰着する。ここで、 \mathbf{x} 、および \mathbf{x}_b はそれぞれ、モデル変数の解析値、および同化前の第一推定値ベクトル、 \mathbf{y}^o は観測値ベクトルである。ベクトル \mathbf{y} は、モデル解析値 \mathbf{x} が観測演算子 \mathbf{H} により観測値の単位・量に変換された ($\mathbf{y} = \mathbf{H}(\mathbf{x})$) ものである。変分法を用いたデータ同化については、露木⁶⁾ に詳しい。

なお、 \mathbf{B} 、および \mathbf{R} はそれぞれ、モデル、および観測値の誤差共分散行列であり、事前に情報を入手しなければならない。本研究では、領域平均統計量としての \mathbf{B} の情報を NMC 法 (Parrish and Derber⁷⁾) により推定する。 \mathbf{R} に対しては、空間相関を考慮せず、観測量に対して代表的な値を用いる (3 章参照)。

WRF 3-D Var システムでは、式 (1) に対してインクリメント法が採用され、コントロール変数変換を伴った preconditioning が行われる。この時、コスト関数の最小化アルゴリズムにおいて、コスト関数はモデル変数の関数ではなく、変数間は互いに無相関なコントロール変数の関数となり、計算機資源や計算時間が実用的になる。なお、本研究では、5 つの変数 (streamfunction, unbalanced velocity potential, unbalanced temperature, unbalanced surface pressure, total water mixing ratio) をコントロール変数として採用する。

変数変換演算子として \mathbf{U} を用いれば、変数変換は、

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_b = \mathbf{U}\mathbf{v} \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{U}^T \quad (3)$$

と表現される。ここで、 \mathbf{v} はコントロール変数のインクリメントを表す。WRF 3-D Var では、 \mathbf{U} を3つの演算子を用いて、

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}_p \mathbf{U}_v \mathbf{U}_h \quad (4)$$

といった演算処理により変換を行う。ここで、モデル変数とコントロール変数との間にある物理的関係に基づく変換が \mathbf{U}_p によって行われ、WRF 3-D Var で考慮する物理が \mathbf{U}_p に含まれる。具体的には、気圧傾度力、コリオリ力、遠心力が釣り合うバランス方程式などが考慮されている。 \mathbf{U}_v 、 \mathbf{U}_h はそれぞれ、モード毎に鉛直・水平方向の相関を考慮した空間変換を表わす。前述の \mathbf{B} の事前推定については、 \mathbf{U}_p 、 \mathbf{U}_v 、 \mathbf{U}_h に必要な領域平均統計量を NMC 法により推定することになる。なお、WRF 3-D Var システムの詳細については、Barker et al.⁸⁾ を参照されたい。

(2) リモートセンシング観測値のデータ同化について

ある観測値を新たに同化する際には、観測演算子 \mathbf{H} 、

およびその線形・アジョイント演算子を開発しなければならない。また、同化によりコントロール変数 total water content q_t が修正される場合、 q_t のインクリメントを q_t を構成する (水蒸気量などの) 各要素のインクリメントに配分するために微物理過程を \mathbf{U}_p に導入する必要が生じる。ここでは、それぞれのデータ同化に際して必要となる観測演算子を中心に記す。

a) WPR による水平風の同化

モデル空間における東西・南北風を観測空間へ空間内挿することを観測演算子として表現する。この時、WRF モデルにおいて定義されているマップファクターを考慮した内挿を行う。

b) GPS PWV データの同化

観測演算子を用いて、モデル空間におけるそれぞれの水平グリッドに対して鉛直積算水蒸気量を算出し、GPS 観測点への空間内挿を行う。この時、WRF モデルの地形標高と実際の GPS 観測点の標高との差を考慮する。

c) レーダー反射因子の同化

Sugimoto et al.⁵⁾ の手法を用いる。この手法では、Sun and Crook⁹⁾ の 4-D Var において用いられているものと同じ微物理過程が \mathbf{U}_p に導入されている。素過程として、凝結、蒸発、Autoconversion, Accretion が考慮されている。すなわち、氷粒子の影響を考慮していないため、本研究では 4.5 km 高度より低高度の反射因子のみを同化の対象とする。

そこで、Marshall-Palmer 型の雨水混合比 q_r [g/kg] と空気密度 ρ [kg/m³] を用いた関係式

$$dBZ = 43.1 + 17.5 \log_{10}(\rho q_r) \quad (5)$$

を観測演算子として用いる。モデル空間から観測空間への空間内挿も演算子において考慮されている。

d) TMI による輝度温度

TMI で用いているマイクロ波の波長帯は、SSM/I のそれを全て含むことから、SSM/I データとモデル変数との間の関係を表わすモデルとして開発された Petty モデル (Petty¹⁰⁾) を観測演算子として採用した。したがって、TMI の 10 GHz 帯のデータは利用していない。

Petty モデルでは、輝度温度は PWV、鉛直積算雲水量、海水温度、海上風と関連付けられている。本研究では、定量性に欠けるデータとして、TRMM レベル 2A12 の陸水域データを用いて判定された陸域データ、もしくは Petty モデルによる同定積算雲水量が 0.5 mm を越える降水域データを同化の対象から除いている。

3. 2003 年水俣豪雨への適用と評価

(1) 豪雨事例の概要

適用事例は典型的な梅雨前線に伴うものであった。静止衛星画像 (図-1) からは、東シナ海上における降水の発生・発達域が天気図 (図略) に示された前線位置のや南側に位置していた。2003 年 7 月 19 日から 20 日

にかけて、海上で発達した降水が九州西岸部に断続的に到来し、熊本県水俣地方を中心に九州各地での土砂災害につながった。地上雨量計や当時の災害状況については、牛山¹¹⁾に報告されている。

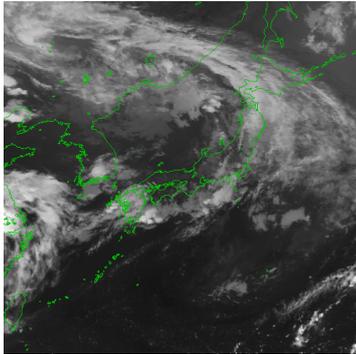


図-1 静止気象衛星画像 (2003 年 7 月 19 日 14Z)

(2) 同化に用いた観測値

TMI 輝度温度として、TRMM Version 6 レベル 1B11 から抽出された輝度温度を用いた。観測誤差は、観測演算子による変換誤差を考慮して、5 K (19 GHz 帯)、6 K (21 GHz 帯)、7 K (37 GHz 帯)、9 K (85 GHz 帯) のように設定されている。

レーダー反射因子については、気象庁の福岡、種子島、および松江の3レーダーによる観測値を用いる。杉本¹²⁾の手法により、最近一週間の TRMM 降水レーダーと地上レーダーの同期データを用いてバイアス量を推定し、補正に用いた。本研究では、全レーダーに対し 5 dBZ 上乗せして同化に用いている。観測誤差は、バイアスのない、標準偏差 1 dBZ のランダム誤差とした。

WPR の観測地点は、計算領域内に 13 箇所存在している。観測誤差については、NOAA の WPR 網に対して設定されている高度別の誤差を用いた。

最後に、国土地理院 GEONET による GPS 観測データに対し、RT-NET ソフトウェア (Iwabuchi et al.¹³⁾) を適用し、PWV データを作成している。観測誤差は、過去のラジオメータ観測などとの比較から見積もった値として、一律 1.5 mm とした。

なお、地上のリモートセンシング測器の観測点を図-2 に示す。

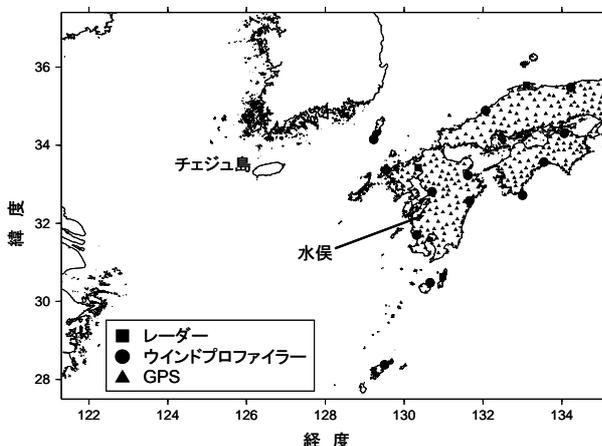


図-2 地上のリモートセンシング測器の観測点

(3) WRF モデルのセットアップ

九州から近畿をにかけての領域 (図-2 を参照) において、WRF モデル (Version 2.1) を用いた計算を行った。水平解像度を 4 km, 鉛直グリッド層数を 36 とし、モデル上端を 50 hPa に設定している。その上で、以下の物理過程を選択して用いた。

微物理過程 : WRF Single Moment Scheme 6 (WSM6)

積雲パラメタリゼーション : なし

地表面過程 : Noah Land Surface Model

接境界層 : Yonsei University (YSU) Model

地表面大気 : Monin Obukhov 相似則

放射過程 : RRTM (長波), Dudhia (短波)

初期・境界条件には、NCEP Final Analysis データを用いた。このデータの水平解像度は 1° (約 100 km), 解析時間間隔は 6 時間となっている。

(4) 同化実験のセットアップ

4 つの同化実験を行い、同化を行わないケース "CONTL" の結果と比較した。図-3 は、時間スケジュールをそれぞれのケースに対して示したものである。

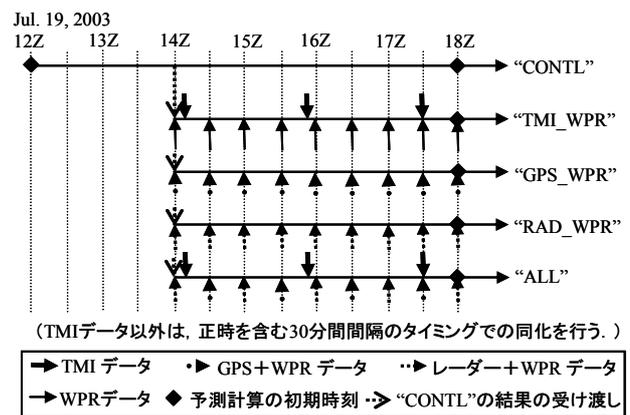


図-3 同化実験における時間スケジュール

同化期間は、2003 年 7 月 19 日 14Z (世界標準時) から 18Z とし、18Z から 12 時間シミュレーションを行う。ここで、最初の同化 (14Z) で得られた最適解析値を用い、次の同化時刻まで WRF モデルによる計算を行い、その結果を第一推定値として2回目の同化を行う。これを最後の同化時刻である 18Z まで続ける「cycling 3-D Var」を本研究は採用した。同化期間内の観測値が全てある一時刻に観測されたと仮定して、別途算出したシステムの移動速度を用いたモデル空間の修正を行う 3-D Var 手法もあるが、採用手法は4次元同化的に同化を行うため、上記の仮定や修正を必要としない。

(5) 適用結果、およびパフォーマンス評価

a) モデル変数の修正結果

PWV, および大気下層における水平風速と温位に関する修正について考察する。そのために、同化期間終了時 (19 日 18Z) におけるケース "ALL" と "CONTL"

の結果を比較する。

まず、PWV (図4) について、東シナ海を東西に伸びる高水蒸気域が、同化により局所的な強弱をもつようになり、特に、九州西岸沿岸域の高水蒸気域において、水俣地方の風上域に集中した形態をとるように変化しているのが特徴的である。これら海上における水蒸気分布の修正は基本的に TMI データの同化による。

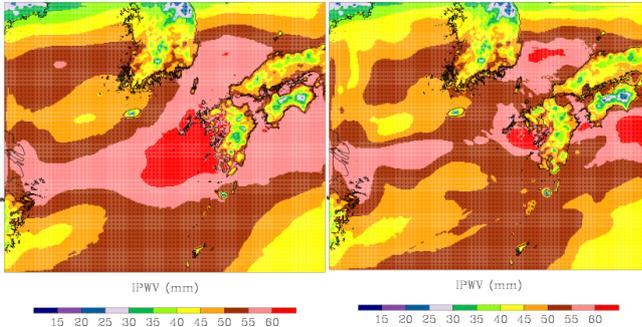


図4 可降水量の修正 (左: 同化前, 右: 同化後)

図5 は、大気下層における水平風速と温位の修正量を示したものである。まず、水俣地方の周辺域における風の収束域が若干強化されている (丸円部)。つまり、この領域で水蒸気フラックスの収束が促されていることになる。温位については、豪雨域を中心に負の修正量が同定されている。これは、降水の蒸発効果による冷気塊の形成によるものと考えられる。

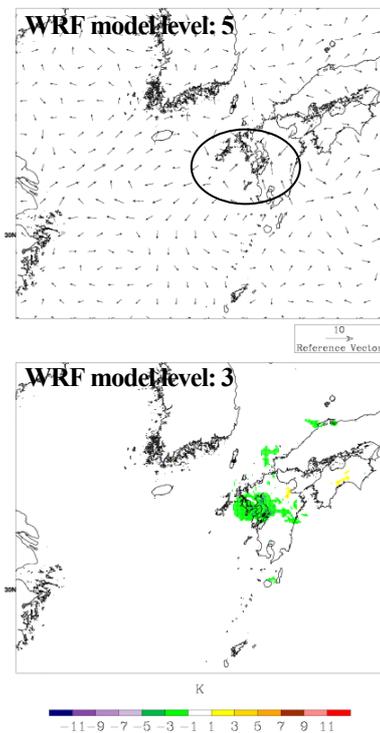


図5 低層における変数の修正例 (上: 風, 下: 温位)

b) 降水予測へのインパクト

前節におけるモデル変数の修正が降水予測にいかに関与するかについて定性的に議論する。図6 は、ケース "ALL", "RAD_WPR", および "GPS_WPR" におけ

る降水予測結果をケース "CONTL", およびレーダーアメダス解析雨量と共に比較したものである。

ここで、ケース "CONTL" における予測結果には3つの問題点がある。一つ目は、7月19日20Zまでは少なくとも降水の立ち上がりが遅れていること (以降、スピナップ問題) である。二つ目は、九州の西岸部で断続的に降水が到来、もしくは発生する過程を予測できていないことである。三つ目は、予測された降水量が立ち上がった後、20日00Z以降、九州山地一帯で強い降水が誤った形で予測され続け、それが四国の南海上まで伸びていることである。この原因として、図4の同化前の可降水量分布に見られる東シナ海上の湿潤な大気が南西風に沿って九州に流入し続けることが考えられる。

以降、データ同化の効果をこれらの問題を念頭に置きながら評価する。まず、全ての同化ケースにおいて、一つ目の問題点であるスピナップ問題は軽減されている。図6では示していないが、ケース "TMI_WPR" でも効果が見られる (後述のバイアスコアが "ALL" と同様である) ことから、全ての種類のデータがスピナップ改善に対するポテンシャルを有しているといえる。

一方、ケース "ALL" の結果において、東シナ海から降水が到来するパターンとタイミングについての精度向上が著しく、12時間先予測まで持続している。この効果は TMI データの同化によるものである。ただし、海上での降水の立ち上がりや広がり方には依然として改善の余地がある。例えば、19日23Zあたりから韓国チェジュ島付近で発達する降水・雲域の動きを静止気象衛星の画像を元に過去に遡ると、同化期間終了時点で計算領域の境界域で積雲が発達していた (図略)。したがって、1) 境界条件の影響、2) 観測演算子の高精度化などの観点からより深く検討すべきであろう。

最後に、ケース "RAD_WPR" では6時間先予測 (20日00Z) から、ケース "GPS_WPR" では4時間先予測から、上記三つ目の問題の兆候が現われ、それ以降の予測ではケース "CONTL" と似た予測結果になっている。このことは、適用事例において、地上リモートセンシングデータの効果は長くても6時間程度しか持続しないことを示唆している。本事例では、同化期間終了後からの時間が経つにつれ、地上リモートセンシングの観測範囲外からの影響が九州周辺の降水分布を支配するようになり、逆に、同化の効果は計算領域から抜けていく。それゆえ、6時間程度という効果の持続時間は、海上域を広く観測できないことによるものと考えられる。

図7 は、1時間降水量予測に対するスコア (RMS Error (RMSE), バイアス, およびスレツスコア) を示したものである。気象レーダーアメダス解析雨量を比較の基準として用いた。まず、RMSE, バイアスコアには、6時間先を越える長時間の効果は TMI データを同化したケースに見られる。バイアスコア (ケース "RAD_WPR", "GPS_WPR") の値が、リードタイム3~5時間先頃に負から正に変わっており、東シナ海上

の精度の低い水蒸気分布の影響を受け始めてしていることが示唆される。次に、スレットスコアにおいて、どの同化ケースにおいてもスピンアップ問題に対して一定の効果が見られる。特に、ケース "RAD_WPR" では、温度のリトリバル (図-5 参照) 効果により定量性の向

上度が大きい。また、TMI データに加えてレーダーや GPS による観測値を同化することがもたらす効果 (リードタイム 3, 4 時間先) も示唆されている。結果的に全てのスコアを考慮すれば、全てのデータを同化することが最善であるといえる。

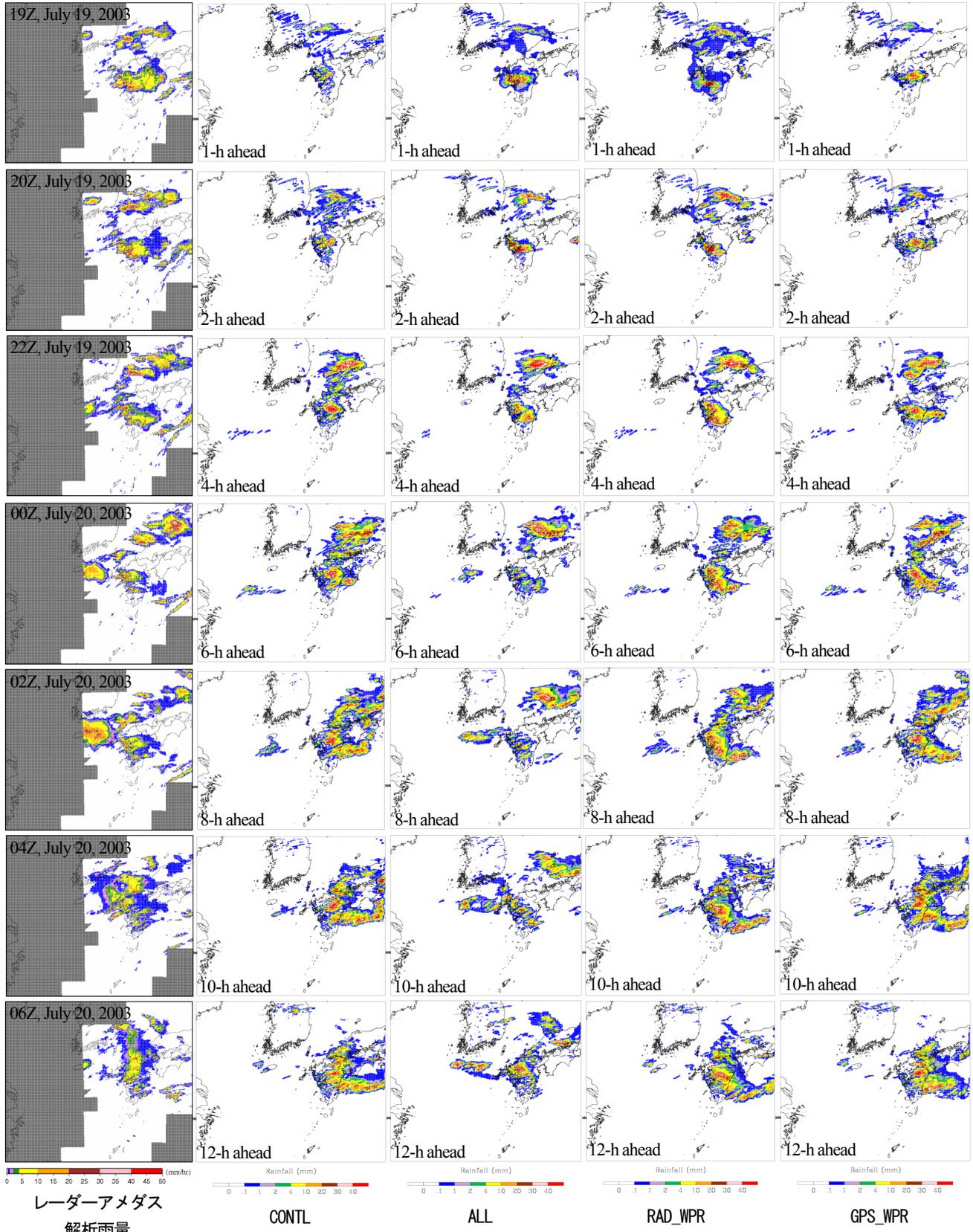


図-6 1 時間積算降水量分布

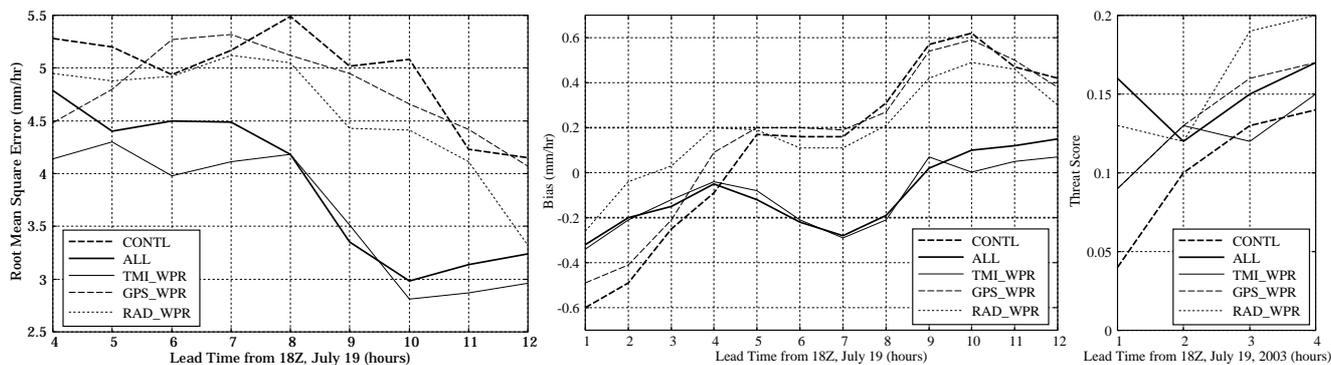


図-7 1 時間降水予測の精度 (左: Root Mean Square Error, 中: バイアス, 右: スレツスコア (1 mm 閾値))

4. まとめ

WRF 3-D Var を基礎として、衛星や地上リモートセンシング測器による観測データの同化手法を構築した。本手法を 2003 年水俣豪雨への適用を通して、同化手法、ならびにデータの有用性についての検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- TMI 輝度温度の同化による海上域の水蒸気量の修正は、海上から到来する降水域において、そのタイミングや分布の予測精度を大きく向上させる。その効果は、同化後少なくとも半日は持続するが、いくつかの検討課題も残っている。
- レーダーなどの地上リモートセンシングの同化効果は、適用事例においては、長くて同化後 6 時間程度しか持続しない。本事例は、海上域を広く観測することが重要な事例であった。
- それぞれのデータの同化は精度向上に寄与する。特に、スピニング問題を軽減するのに効果があった。また、全てを同時に同化するのが最も効果的である。

謝辞：本研究は、宇宙航空研究開発機構による第 4 回 TRMM 公募研究 (代表研究者 杉本聡一郎) において行われた。衛星やレーダーのデータ提供や研究資金の援助を機構側から受けた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Chen, S.-H., F. Vandenberghe, G. W. Petty, and J. F. Bresch: Application of SSM/I satellite data to a hurricane simulation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 130, 801-825, 2004.
- 2) Guo, Y.-R., H. Kusaka, D. M. Barker, Y.-H. Kuo, and A. Crook: Impact of ground-based GPS PW and MM5-3DVar background error statistics on forecast of a convective case, *SOLA*, 1, 73-76, 2005.
- 3) Sun, J., and N. A. Crook: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments for an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, 55, 835-852, 1998.

- 4) Xiao, Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, D. M. Barker, and E. Lim: An approach of Doppler reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at landfall, *J. Appl. Meteor. Climatology*, in press.

- 5) Sugimoto, S., N. A. Crook, J. Sun, D. M. Barker, and Q. Xiao: Assimilation of multiple Doppler radar data with WRF-3DVAR system: Preliminary results in observing system simulation experiments, *Proceedings of 32nd Conference on Radar Meteorology*, 2005.

- 6) 露木義: 変分法によるデータ同化, 数値予報課報告, 気象庁, 102-165, 1997.

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

- 8) Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, A. J. Bourgeois, and Q. Xiao, 2004: A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 897-914.

- 9) Sun, J., and N. A. Crook: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulate data experiments, *J. Atmos. Sci.*, 54, 1642-1661, 1997.

- 10) Petty, G. W.: On the response of the Special Sensor Microwave/Imager to the marine environment – implications for atmospheric parameter retrievals, Ph. D. Dissertation, University of Washington, USA, 1990.

- 11) 牛山素行: 2003 年 7 月 19~21 日の九州における豪雨災害の特徴, *自然災害科学*, Vol. 22, No. 4, 373-385, 2003.

- 12) 杉本聡一郎: TRMM PR データを用いた実用レーダーデータのバイアスとその時間的推移の推定, *水工学論文集*, 第 48 巻, 265-270, 2004.

- 13) Iwabuchi, T., C. Rocken, Z. Lukes, L. Mervart, J. Johnson, and M. Kanzaki: PPP and network true real-time 30 sec estimations of ZTD in dense and giant regional GPS network and the application of ZTD for nowcasting of heavy rainfall, *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institution of Navigation, ION GNSS 2006*, 2006.