上流下層加湿による積雲対流の予測実験

NUMERICAL PREDICTION EXPERIMENT OF CUMULUS CONVECTION BY UPSTREAM LOWER-LEVEL HUMIDIFICATION

若月 泰孝¹

Yasutaka WAKAZUKI

¹正会員 理博 筑波大学 助教 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1)

A short-term precipitation prediction (nowcast) method was developed by using upstream low-level humidification (ULH) in a cloud-resolving atmospheric model simulation. The ULH plays a role in the approximated adjoint calculation for time integration of four-dimensional variational data assimilation. This method was applied to a heavy rainfall event observed in the Kanto Plain on September 2, 2013. The heavy rainfall caused by a few cumulonimbus clouds was predicted by the ULH well before 30 minutes. The upstream advection period of 20 minutes was appropriate for more accurate prediction. The predicted cumulonimbus cloud included a large vertical vorticity that seems to have been associated with the observed tornado.

Key Words : Short-term precipitation prediction, Cloud-resolving model, Radar data

1. はじめに

積乱雲に伴う豪雨は、ナウキャストにより予測計算が実施されている。基本的には、レーダエコーの移動ベクトル推定に基づく、時間外挿による予測である(斉藤ほか¹⁾; 加藤ほか²⁾)。これに、山岳に伴う降水域の停滞効果、経験的発生や消滅などの技術的工夫が組み込まれる(吉野ほか³⁾; 飯田ほか⁴⁾)。また、全国のX-bandマルチパラメータレーダによる高解像度降雨分布データの利用によって、その推定精度は近年格段に高くなってきている。気象庁では、高解像度降水ナウキャストを2014年より運用し始め、降水3次元分布の時間補外と鉛直1次元対流モデルを併用し降水を立体的に予測するスキームを導入することによって、近未来の降水の予測精度向上に貢献した(気象庁⁵⁾)。

一方、非静力学雲解像大気モデルのシミュレーションによる予測(以下、物理的予測)は、モデルが表現する降水の量的な再現精度が必ずしも高くないため、統計的な手法による補正が必要になると考えられるものの、積雲対流の生成・発達・消滅などの進化を再現できるポテンシャルを持っていることから、物理的予測の研究の必要性は高い。また、物理的予測は、降水の水平分布のみを予測するのではなく、大気の3次元の熱力学的構造を予測することが可能になるので、豪雨だけでなく突風などの気象災害の予測にも活用できる可能性がある。しか

し、物理的予測は、積雲対流の内部構造に関する情報が、シミュレーションの初期値に適切に組み込まれていないために、2時間程度先までの降水の予測精度は必ずしも期待されるほど高いとは言えない。観測データは「データ同化」によって、前の時間からの予測と最適条件で結合され、もっともらしい初期値が作成されるが、そこに積雲対流の構造が十分な精度で含まれていないということの意味している。

豪雨災害が顕著になる昨今、20分~2時間先の降水の予測精度の向上が、期待されるようになってきた。通常、時間外挿予測と物理的予測のブレンディングによって降水予測のスコアを向上させる手法が用いられる(Kober et al. ⁶⁾)。ここに、積雲対流の構造をシミュレーションの初期値に組み込んだ物理的予測が加わり(詳細は2章で解説)、3種類の予測のブレンディングを行うことができれば、減災に結びつくより有益な予測情報を提供できるようになるはずである。

本研究では、レーダ観測によって得られた積雲対流に伴う降水の情報を、物理的予測に組み込むための方法について研究し、簡単に概念化した積雲対流プロセスを組み込む方法を開発した。この方法は短時間で予測計算をして、短時間間隔で予測情報を更新することを念頭に置いているために、非常に簡便な方法でレーダ観測情報を取り込む。本研究では、その手法を夏季の積乱雲の事例に適用した。2章で積雲対流に対する物理的予測でのデータ同化の諸問題を整理したうえで、3章で積乱雲の

観測データ、4章で手法と予測計算の設計について解説する。そして、5章で一つの事例に適用した予測結果を示す。

2. 積雲対流に対するデータ同化の諸問題

物理的予測では、観測データを同化することによって、シミュレーションの初期値を作成し積分計算を行う。このデータ同化手法については、近年目覚ましい発展がみられる。特に4次元データ同化手法による気象レーダデータの同化は、近年盛んに研究されている。

Dowell et al.⁷⁾や山口と中北⁸⁾などは、アンサンブルカルマンフィルタを用いたレーダ観測情報のデータ同化実験を実施している。この手法は非常に有望であるが、事前のアンサンブルシミュレーションの中に積乱雲が発生するという情報が含まれていない場合に、解析精度が落ちる危険性がある。積雲対流などのように時間変化の激しい現象の場合、短時間間隔での観測データの取り込みが必要とされる。

Kawabata et al.⁹⁾やSun et al.¹⁰⁾は、4次元変分法を用いてレーダ反射強度と動径風の情報を同化した。4次元変分法では、データ同化ウインドウとよばれる短い期間が設定され、その期間内の観測データが、前の時刻からの予測計算結果と最適条件で結合される。観測情報は同化ウインドウの初期時刻にモデルの物理空間上を上流伝搬させられ、初期時刻で複数のデータが結合される。非常に有益な方法だが、計算に時間がかかるという難点があるため、ナウキャストのように短時間で情報を出さなければいけない場合に実装するのは容易ではない。

Sun et al.¹⁰⁾は1～6時間先までの予測スコアの評価を行い、1～2時間先では、動径風よりも反射強度を同化した場合のほうが、スコアが高くなることが示した。このことは、近未来の予測は、風などの大気環境場の観測情報よりも、積雲対流に伴って強雨が発生したという事実の情報が重要になることを示している。一方で、積雲対流に関しては、雲・降水の物理過程に含まれる力学系の強い非線形性が、データ同化を難解にしている。この強い非線形性によって、例えば、あるレーダ反射強度の観測のデータ同化に対して、それに対応する積雲対流構造が一つに決まらないという、解の多重性をもたらす。これを回避するためには、水物質の構造だけでなく、対流内の気流（3成分）の3次元構造、周辺大気の大気熱力学構造などを同時に観測しなければならない。これに加えて、降水域と非降水域間での、気流観測の不連続性を解消させることが求められ、観測データへの要求は難度が高い。計算能力や観測データの問題もあり、多くの数値予報では、初期値に積雲対流の構造が正しく埋め込まれていない。個々の積雲対流の構造を表現するのではなく、メソβスケール（20～200km）の大気構造を精度よく表現す

ることに主眼が置かれる。メソβスケールの大気構造が精度よく表現されていれば、最初の積雲対流の位置などは正しくなくても、2～5時間程度先のメソβスケールの降水の特徴の再現性はよくなると期待できる。

Sokol et al.¹¹⁾は、ナッジングを用いてモデル計算の水蒸気量をレーダ観測から近似的に推定し、その水蒸気量を同化する手法を適用した。仮に、降雨強度観測をモデル大気中の水物質質量に変換した場合、その水物質は、蒸発しながら落下し、下降流を形成し、消散するだけである。これは、積乱雲の構造をデータ同化で再現することにはならないため、積乱雲の発生に伴う、それ以後の降雨の変動により影響を与えるとは限らない。つまり、レーダ観測から積乱雲内部の熱力学的構造をデータ同化によって再現することが重要となる。

仮に、3次元変分法などのデータ同化システムを考える。観測された物理量と他の熱力学量は、背景誤差共分散行列に含まれる相関構造によって再現される。しかし、例えば、水物質質量に対して鉛直流の相関は低く、上昇流なのか下降流なのかは一意に決まらない。つまり、相関構造だけで積乱雲の構造を観測データから作り出すことは難しく、相関構造を利用したナッジングを設計したとしても同様の問題を抱える。そこで、強雨が観測された時、水物質が生成されたという観測情報を上流に伝搬させ、その原因となるソースを置く方法を考える。この方法は4次元変分法データ同化システムの考え方である。この手法を導入するには、モデルの時間発展の随伴演算子が必要であり、開発には多大な労力を要する。しかし、この随伴演算を近似的に扱うことで、簡便な同化システムを構築することが可能となる。近似化した簡便な随伴演算効果については4章で説明する。本研究でも基本的にナッジングによる簡便なデータ同化を行うが、近似化随伴演算によって上流伝搬させられた積雲対流のソースの情報が疑似観測として同化される仕組みである。

3. 積乱雲の観測データ

2013年9月2日に埼玉・千葉県でF2クラスの竜巻が観測された(気象庁¹²⁾)。この竜巻を発生させた積乱雲はスーパーセルと呼ばれる回転する積乱雲であった。図1と図2は、それぞれ竜巻発生時刻における気象庁の天気図とレーダ画像を示している。埼玉・千葉・茨城県境付近に強い降水強度のセル状降水システムが形成されている。この降水システムは北東方向の走向の複数の降水セルで構成されているため、複数の積乱雲が集団化して観測されていると考えられる。関東域は停滞前線の南側に位置し、大気の成層状態は不安定であった。本研究では、この積乱雲の事例を対象として調査した。

データ同化実験で用いる観測データは、気象庁のレーダ観測データであるが、ここでは非常に簡便な2次元の

降雨強度分布データを用いる。今回は、気象庁のホームページの画像ファイルを代表値に変換して、これを観測データとしている。降雨強度値そのものをデータ同化するわけではないため、悪影響はほとんどない。

図-1 2013年9月2日9時（日本標準時）の天気図。気象庁ホームページより。

図-2 2013年9月2日13:10の関東域の合成レーダ画像。気象庁ホームページの画像を修正したもの。

4. 大気モデルと計算設計

本研究で用いた大気の物理モデルは名古屋大学で開発された雲解像非静力学大気モデルCReSS (Cloud-resolving Storm Simulator; Tsuboki and Sakakibara¹³⁾)である。雲や雨雪などの水物質を陽に計算することができる。実験は、気象庁MSMやMGDSSTデータを初期・側面境界条件に用いた数値シミュレーションを実施した。実験設定の概要を表-1に示す。個々の積乱雲を計算上概ね再現可能な設定になっている。積乱雲は、単独もしくは複数の積雲対流（セル状の上昇流のコアとそれに付随する鉛直対流）で構成されている。個々の積雲対流を精度よく解像するには、500m以下の解像度で数値実験を行う必要があるが、短い時間で計算を終了させるための現時点での最良の選択肢の一つとして、水平格子間隔を1kmとした。

初期時刻を12:00とした実験では、観測されたような積乱雲群を再現することはできなかった（詳細後述）。そこで、気象庁のレーダ観測データを同化し、2時間程度先までを予測する計算を10分ごとに更新する予報と解析のサイクルシステムを構築した。データ同化は30分のウィンドウ期間で行い、それ以後は予測計算を行う。この予報と解析のサイクルについて、図-3に概要を示す。

まず、(a)前時刻からの予測を踏まえ、同化ウィンドウ期間にある観測をナッジングによって同化する。同化ウィンドウの途中の値は、(b)の次の(10分後)サイクルの同化へと引き継がれ、予報の更新は連続して実施される。

この研究で用いているデータ同化システムでは、降雨強度や水物質量を直接同化しているわけではない。図-4に積雲対流の進化とレーダ反射強度の関係についての概念図を示す。積雲対流に伴う降雨は、積雲対流発生の結果として、進化の後半に観測されるものである。その概念を踏まえ、本研究では、強雨が生じたという結果の情報をもとに、強雨を生成させる積雲対流の初期構造を疑似的な観測とする。これは、積雲対流の時間発展の随伴演算を簡便な方法で近似することに相当する。雲解像モデル内に積雲対流を人為的に生成する場合、さまざまな人為的擾乱が置かれる。温位擾乱や収束などを置く研究があるが、この中で下層を加湿する手法(Turpeinen and Yau¹⁴⁾)を参考にした。つまり、強雨観測の情報から、観測よりも前の時刻の上流側下層の大気の水蒸気量を増加させる疑似観測データを作成し、それをナッジングで同化する。下層が十分に飽和していれば、対流抑制(CIN; Convective inhibition)はゼロになるため、ほんのわずかな衝撃があれば、積雲対流が生成される。

ナッジングでは、弱い過飽和状態（今回の実験では相対湿度(RH)を101%）に強制させた。10分前のサイクルでの計算結果から温度や気圧などの第一推定値を求め、その状態に対する相対湿度101%での水蒸気混合比を見積もり、これを疑似観測データとした。また、自由対流高度(LFC)を少し超えた高度(LFC+ Δz ; 今回の実験ではLFCの上空500mとした)までの下層大気を加湿した。弱い過飽和にしているのは、水蒸気を十分に凝結させ、かつ小さな衝撃を生じさせるためである。また、LFCを超えて上空まで加湿しているのは、せっかく生じた積雲対流に伴う上昇気流が、LFCより上空の乾燥した空気のエントレイメントに阻害されて消散するのを防ぐ効果を考えたためである。ナッジングの時定数(τ)は1分とした。時定数が長い場合、積雲対流に伴う降水が弱かったり、遅れて出現したため、本実験ではこの値に固定した。RH、 Δz を変えると予測結果は変わり、精度は τ にも依存するため、チューニングする必要がある(RH、 Δz は大きすぎてもいけない)。この研究では、降雨強度10mm/hを積雲対流に伴う降水と仮定した(図-7については20mm/hも検証)。それよりも強い降水がある領域を上流側に伝搬させ、その下層を加湿する。弱い降水域は、層状性降水と仮定した。層状性降水は、積雲対流によって直接生成されるものではないと仮定して、上流の下層加湿は行っていない。なお、降雨域の形状と上流下層加湿を行う領域の水平方向の形状が同じである必然性はないが、本研究では加湿域形状に関するモデル化は行っていない。なお、下層加湿によって鉛直安定度がより不安定化する効果があるため、観測される積乱雲より

も強く再現してしまう可能性があるが、この問題は今後の課題とする。

移動ベクトルは、レーダエコーの移動から求める。本事例では、周辺の移動ベクトルは、北東方向に約9.5m/sと見積もられた。移動ベクトルは時空間的に変化するが、本研究では、短い時間の狭い領域のみを解析対象としているため、この値を固定した。

表-1 大気モデルおよびそれを用いた予測実験システムの設定

大気モデル	CReSS (version 3.4.3)
領域 (水平格子数)	関東域 (250×224)
鉛直格子数	33層
水平解像度	1km
同化ウインドウ	30分
予報・解析時間間隔	10分更新
予報	2時間
初期・側面境界条件	気象庁MSM
海面境界条件	気象庁MGSST

図-3 予報・解析サイクルの設計概念図。(a)のサイクルの後に、(b)のサイクルへと続く。図中の疑似観測とは、レーダ観測から上流下層の大気の水蒸気量を増加させることを意味する。疑似観測は、レーダ観測から時間的に遡って作成される(逆流)。逆流時間を10分とした場合のイメージ図になっている。

図-4 積雲対流の内部構造とレーダ反射強度の時間変化の概念図。赤矢印は上昇気流、青矢印は下降気流。○印はエコー分布のイメージである。

5. 結果

図-5に開発したシステムを用いて予測された降雨強度(地上)とレーダ観測データによる降雨強度の比較を示している。図-5bは、観測された複数の孤立積乱雲(図-5a)は、特別な同化なしに再現することはできない事例であったことを示している。図-5c～図-5gは、レーダエコーを上流側に逆流(上流伝搬)させる時間を00分～40

分の間で10分毎に変化させ、再現させた降水の分布を示している。この図はリードタイム00分で作図したものである。このリードタイムとは、図-3の「現在」からどのくらい先の未来の時刻かを示したものである。なお、同化ウインドウの末端時刻から逆流時間を足すと現在になる。図-5の対象時刻はいずれも竜巻が観測された時刻の1時間前に相当する13:10となっている。赤丸で示された積乱雲に着目する。逆流00分の下層加湿では、この積乱雲に伴う強雨域を再現することはできていない。富士山周辺に強雨域が再現されているが、予報と解析のサイクルを繰り返した結果発生したものである。一方、赤丸の積乱雲は、この時刻に発生してまだ十分な時間がたっていないため、予報と解析のサイクルを組んでも、逆流時間00分では積乱雲は発生しない。一方、逆流時間を10、

図-5 (a) 13:10の降水強度の観測と、(b) レーダデータの同化を行っていない場合の同時刻の予報値(計算初期時刻12:00)。(c)-(g)は、図-3の予報・解析サイクルでレーダデータを同化した場合の13:10の予報値で、00分～40分までの10分毎の逆流時間(上流伝搬時間)の設定での予報値。カラーは降水強度分布で、矢羽はモデル最下層(地上70m)の風速分布。図中の「同化開始」「同化終了」は、その予報における同化ウインドウの始点と末端時刻を意味する。

20, 30, 40分と伸ばしていくと、赤丸の積乱雲に伴う強雨がシミュレーション結果に現れてくる。特に逆流30, 40分の降水分布は、観測のそれと比べても非常によく似ている。これは、強雨を検出した場合に、その強雨をもたらす積雲対流が、30~40分前の下層加湿によって発生したことを意味している。

次に、リードタイムを変えた場合に、積雲対流の予測

図-6 (a) 14:00の降水強度の観測と、(b) レーダデータの同化を行っていない場合の同時刻の予測値（計算初期時刻12:00）。(c)-(i)は、図-3の予報・解析サイクルでレーダデータを同化した場合の14:00の予測値で、00分~60分までの10分毎のリードタイムの設定での予測値。逆流時間は30分で固定。カラーは降水強度分布で、矢羽はモデル最下層の風速分布。図中の「同化終了」は、その予報における同化ウィンドウの末端時刻を意味する。図-3の「現在」はその30分後である。

可能性がどの程度変化するかを調べた（図-6）。時刻は14:00とした。逆流時間は30分で固定した。リードタイム00分の場合、同化ウィンドウの末端時刻は、対象時刻の30分前になる。リードタイムを00分から60分まで変化させると、埼玉・千葉・茨城県境付近に走向が南西から北東に並ぶ積乱雲群の再現性が徐々に落ちることがわかる。リードタイム60分では、北東側の積乱雲が全く再現できていないことがわかる。積乱雲の振る舞いは、わずかな誤差が急速に時間発展する、強い非線形系の現象であるために、予測精度の急激な落ち込みを避けることはできない。図-6は、もう一つ重要なポイントを示している。千葉県付近に、観測には見られない南西から北東の走向を持つ積乱雲群が再現されている。開発した手法で積乱雲を生成することができるが、消滅させることは考慮していない。これらの修正には、他のスキームの導入が必要となる。

図-7に、スレッドスコアを示す。このスコアはリードタイム00, 30, 60分、降雨強度10, 20, 30mm/h以上の降雨の有無を調査したものであり、時空間の位置ずれを考慮したスコアになっている。具体的には、水平方向に5km、時間方向に10分の位置ずれがあっても、閾値以上の降雨があれば、有りとしてカウントされる。この図は、リードタイム30分（60分）では逆流時間20分（10~20分）で精度が最も高いことを示している。上流側に積雲対流の発生の情報を伝搬させることで、予測精度が明確に向上していることを示している。一方、リードタイム00分では逆流時間が30分程度で精度が最も高い。リードタイム00分で逆流時間が短い場合は、降水が十分に生成されていないことが原因している。また、この精度は逆流させる際に用いる移動ベクトルの精度にも依存していると推定される。本実験では、移動ベクトルは空間的・時間的に一定値を用いた。しかし、実際は、移動ベクトルは空間的にも時間的にも変動するはずである。このわずかな誤差が予報時間を延ばすと時間発展してしまい、長い逆流時間による予測計算結果の精度は、より短い逆流時間の

図-7 00, 30, 60分のリードタイム (FT=), 10, 20, 30mm/hの検証のための降水強度の閾値で見積もったスレッドスコアを00~40分の逆流時間（横軸）で比較したもの。時間10分、空間5kmの位置ずれを許容して見積もったスコアである。(a)は加湿する降水強度の閾値を10mm/h, (b)は20mm/hとした結果。

精度よりも劣ってしまうと推定される。

本事例は、埼玉・千葉県に竜巻を発生させたスーパーセル型積乱雲であったことが報告されている。スーパーセル型の積乱雲では、積乱雲内に大きな正の鉛直渦度領域を伴っていると推定される。図-8は、14:10での降雨強度分布と下層での鉛直渦度や温度などの分布を示している。積乱雲の南側にシアラインがあり、積乱雲の南東端に強い正の鉛直渦度を伴っており、この渦（メソサイクロン）が竜巻発生に関連していたことが示唆される。この情報は、強雨のみならず、突風現象の発生予測にも有効になりえることを示唆している。

図-8 (a)14:10の観測された降雨強度と(b)同時刻に予報・解析サイクルで再現された降水と風速の分布（モデル最下層；高度70m）。リードタイムは00分とした。(c)は(b)の積乱雲を拡大した高度70mの分布図で、雨水混合比（グレースケール）、温度（カラー）、風速（矢羽）、鉛直渦度（黒線；単位は 10^{-3} s^{-1} ）。

6. まとめ

物理的予測手法で強雨を予測するシステムを開発し、2013年9月2日に埼玉・千葉県でF2クラスの竜巻を発生させた積乱雲およびその周辺の積乱雲の事例に適用した。この手法では、レーダ観測から得られる降雨域の情報を上流側に伝搬させ、前の時刻の上流位置の下層大気を飽和させることで、積乱雲を発生させた。この方法は、4次元変分法データ同化システムを非常に簡便な方法で近似したことに相当する。その結果、約20分の逆流で積乱雲にともなう強雨の再現性が著しく向上したことが示された。

この手法には4点の課題が残っている。i) 不自然に発生した強雨域の消滅手法の開発、ii) レーダエコーの時間外挿とのブレンディングによる降水予測精度の向上（層状性降水である弱雨はここで結合される）、iii) 積乱雲の発生位置の同定の高精度化、iv) 疑似観測として与える積雲対流の初期構造の検討である。さらなる研究が期待される。

謝辞：本研究は、JSTのテニユアトラック普及定着事業（若月泰孝）の支援を得た。本論文作成において、筑波大学大学院地球科学専攻の野澤知弘さんと筑波大学地球学類の並木彩さんの協力を得た。京都大学防災研究所の中北英一教授をはじめとする科研費研究「最新型偏波レーダーとビデオゾンデの同期集中観測と水災害軽減に向けた総合的基礎研究」のメンバーの助言もいただいた。

参考文献

- 1) 斉藤和雄, 牧原康隆: 降水現象の予報高度化の技術. 天気, Vol. 54(7), pp. 622-631, 2007.
- 2) 加藤敦, 真木雅之, 岩波越, 三隅良平, 前坂剛: Xバンドマルチパラメータレーダ情報と気象庁レーダ情報を用いた降水ナウキャスト. 水文・水資源学会誌, Vol. 22, No. 5, pp. 372-385, 2009.
- 3) 吉野純, 野村俊夫, 安田孝志: 降水量予測の精度向上のための位置誤差修正法に基づくレーダーデータ同化システムの開発. 水工学論文集, Vol. 53, pp. 379-384, 2009.
- 4) 飯田潤士, 安藤文香, 吉野純, 安田孝志: 降雨域の複雑変化を画像解析的に取り込んだ強雨の1時間予測. 土木学会論文集B1(水工学), Vol.68, No.4, pp385-390, 2012.
- 5) 気象庁: 気象業務はいま2014. 研精堂印刷株式会社, 2014.
- 6) Kober, K., Craig, G. C., Keil, C., and Dömbrock, A.: Blending a probabilistic nowcasting method with a high-resolution numerical weather prediction ensemble for convective precipitation forecasts. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 138, pp. 755-768, 2012.
- 7) Dowell, D. C., Wicker, L. J., and Snyder, C.: Ensemble Kalman Filter Assimilation of Radar Observations of the 8 May 2003 Oklahoma City Supercell: Influences of Reflectivity Observations on Storm-Scale Analyses. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 139, pp. 272-294, 2011.
- 8) 山口弘誠, 中北英一: アンサンブルカルマンフィルタを用いたドップラーレーダー情報の4次元同化設計. 水工学論文集, Vol. 52, pp343-348, 2008.
- 9) Kawabata, T., Seko, H., Saito, K., Kuroda T., Tamiya K., Tsuyuki, T., Honda, Y., and Wakazuki, Y.: An Assimilation Experiment of the Nerima Heavy Rainfall with a Cloud-Resolving Nonhydrostatic 4-Dimensional Variational Data Assimilation System. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 85, pp. 255-276, 2007.
- 10) Sun, J., and Wang, H.: Radar Data Assimilation with WRF 4D-Var. Part2: Comparison with 3D-Var for a Squall Line over the U.S. Great Plains. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 141, pp. 2245-2264, 2013.
- 11) Sokol, Z.: Assimilation of extrapolated radar reflectivity into a NWP model and its impact on a precipitation forecast at high resolution. *Atmos. Res.*, Vol. 100, pp.201-212, 2011.
- 12) 気象庁: 現地災害調査速報: 平成25年9月2日に埼玉県さいたま市, 越谷市, 北葛飾郡松伏町, 千葉県野田市, 茨城県坂東市で発生した突風について, 2013.
- 13) Tsuboki, K. and Sakakibara, A.: Cloud Resolving Storm Simulator User's Guide, Second Edition, 2001.
- 14) Turpeinen, O. and Yau, M.K.: Comparisons of Results from a Three-Dimensional Cloud Model with Statistics of Radar Echoes on Day 261 of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 109, pp.1495-1511, 1981.

(2014. 9. 30受付)