

データ同化とアンサンブル予報を用いた スーパーセル竜巻の発生要因と予測に関する研究

—2019年度山本賞受賞記念講演—

横 田 祥*

1. はじめに

このたびは山本賞という大変名誉ある賞をいただきまして、誠にありがとうございます。選考していただいた皆様や、受賞対象となった研究にご協力いただいた皆様に深く感謝いたします。

受賞対象の研究 (Yokota *et al.* 2016, 2018a, b) は、気象研究所在籍時に行ったものです。2012年5月に、気象研究所のある茨城県つくば市を日本最強クラスの竜巻 (つくば竜巻) が襲ったことをきっかけとして、この研究を始めました。この竜巻の周辺には観測データが高い密度で存在していましたので、これらの観測データを同化した高解像度のアンサンブル予報 (初期値がわずかに異なる複数の数値シミュレーション) により、竜巻の発生要因の解明と予測精度の向上を目指しました。以下、この研究の概要について説明します。

2. 研究の背景

竜巻は、地上に発生する直径数十～数百メートルの非常に強い渦で、時に甚大な被害をもたらします。特に強い竜巻の多くは、上空に形成されるメソサイクロンと呼ばれる直径数キロメートルの渦の下で発生することが知られています。メソサイクロンを伴う組織化した積乱雲はスーパーセルと呼ばれ、この下で発生する竜巻はスーパーセル竜巻と呼ばれます。

メソサイクロンは積乱雲内の様々な高度で発生しますが、特に下層 (地上約1 km) で発生するメソサイク

ロン (LMC ; low-level mesocyclone) は、スーパーセル竜巻の発生と密接に関係します。このため、竜巻を数値的に予測するには、LMCを解像する予報モデルが必要になります。LMCは(竜巻より数倍～数十倍大きいとは言っても)時空間スケールが小さい現象であるため、その発生を決定論的に予測することは困難です。しかし、誤差範囲内の複数の初期値を用いたアンサンブル予報を行えば、そのうち何メンバーがLMCを予測したかという情報から、LMCの発生確率を予報することが可能です。このような高解像度のアンサンブル予報による確率予報に基づいて竜巻の警報を行う試み (Warn-on-forecast) は、近年、米国を中心に急速に発展しています (Stensrud *et al.* 2009)。

しかし、LMCが存在しても、そこで必ず竜巻が発生するわけではありません (Trapp *et al.* 2005)。このため、竜巻の発生をピンポイントで予測することは現時点では非常に難しく、予測精度の向上のためには、その発生要因をより詳細に知る必要があります。

これまでの研究では、主に竜巻周辺の観測データの解析や、竜巻を再現する数値シミュレーション結果の解析によって、竜巻の発生要因が調査されてきました。例えば、観測データを用いた研究により、下層の鉛直シアや水蒸気量が竜巻の発生にとって重要であることが指摘されています (Craven and Brooks 2004)。また、竜巻渦の起源についても、現実の竜巻を対象とした数値シミュレーションを用いて詳しく調査されており、「環境場の水平渦度 (Mashiko *et al.* 2009)」、「水平温位勾配が生成する水平渦度 (Mashiko 2016)」、「地表摩擦が生成する水平渦度 (Schenkman *et al.* 2012, 2014)」のように様々なものが指摘されています。

しかし、竜巻周辺の観測データは、時空間的に限られているため、竜巻の発生過程を詳細に捉えられない

* 気象庁情報基盤部数値予報課。
s_yokota@met.kishou.go.jp

—2020年9月1日受領—
—2020年10月14日受理—

という困難があります。また、数値シミュレーションでは、時空間的に密なデータが得られる一方で、シミュレートされた竜巻は実際に発生した竜巻と全く同じものではない（無視できない誤差がある）ため、解析結果が必ずしも実際の竜巻の発生要因を表さない場合があります。このため、竜巻の発生については、これまでの研究で指摘されてきたいくつかの要素がどのように関わっており、どの要素が特に重要なのか、現在も十分に解明されていません。

そこで我々は、このような課題を解決するために、データ同化とアンサンブル予報を用いてスーパーセル竜巻の発生過程の解明を試みました。まず、竜巻発生前の大気の前報場に高密度観測データを同化することにより、竜巻発生前の大気の解析場とその解析誤差を高精度で求めます。そして、その解析誤差範囲内の複数の初期値によるアンサンブル予報を行い、竜巻が発生したメンバーと発生しなかったメンバーの違いから、竜巻の発生に重要な要素を解析する、という戦略です。この手法では、実際の竜巻発生環境場との差を解析誤差範囲内に抑えつつ、時空間的に密な複数のシミュレーション結果が得られるため、発生が稀な現象であっても物理量間の関係について信頼度の高い統計的な解析を行うことが可能です。このような解析は「アンサンブル感度解析」(Ansell and Hakim 2007; Torn and Hakim 2008)と呼ばれ、これまで様々な大気現象の解析に用いられてきましたが、竜巻の解析には適用されたことはありませんでした。これは、竜巻のような小スケールの現象のアンサンブル予報を行うには莫大な計算機資源が要求されるためです。幸い、我々は理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を用いることにより、世界に先駆けて「竜巻のアンサンブル予報」を行い、その結果の詳細な解析を行うことができました。次節以降で、我々の研究をもう少し詳しく述べたいと思います。

3. 高密度観測の同化による下層メソサイクロンの再現精度向上

つくば竜巻は、2012年5月6日の1230JST頃に茨城県と栃木県でほぼ同時に発生した3つの竜巻のうちの1つで、メソサイクロンを伴う典型的なスーパーセル竜巻でした。この竜巻は、竜巻の強さを表す藤田スケール (Fujita 1971) でF3 (当時の国内最強クラス) と判定されており (気象庁ほか 2012)、観測が高い密度で存在する地域で発生しました。

私が気象研究所に着任した2013年4月当時、つくば竜巻やそれをもたらすLMCに関しては、すでに水平解像度50mのシミュレーション (Mashiko 2016) や水平解像度350mのアンサンブル予報 (Seko *et al.* 2015) の成功が報告されていました。しかし、これらはいずれも竜巻の周辺に存在する高密度観測網のデータを同化せずに行われたものであり、この高密度観測網のデータの同化により、さらに再現精度を上げることが期待されていました。

そこで我々はまず、この高密度観測網のうち、気象庁とNTTドコモ社の地上観測データ (水平風・気温・相対湿度) や、気象研究所の二重偏波レーダーを含む気象庁のCバンドレーダーのデータ (ドップラー速度・推定雨量) を同化することにより、つくば竜巻の再現精度の向上を目指しました (Yokota *et al.* 2016)。データ同化にはアンサンブルカルマンフィルターの一種である、二重ネストされた局所アンサンブル変換カルマンフィルター (nested LETKF, Hunt *et al.* 2007; Seko *et al.* 2013) を用いました。これは、気象庁非静力学モデル (JMANHM, Saito *et al.* 2006) によるアンサンブル予報と、LETKFによる観測データの同化 (初期値の修正) を繰り返すことにより、解析誤差の小さい大気の解析場を、その解析誤差範囲内で複数得ることができるシステムです。このシステムは、アンサンブルメンバー数が多いほど精緻な解析を行うことが可能ですが、計算機資源の都合から、ここではメンバー数は32としました。

我々はまず、このシステムを用いて気象庁メソ解析で同化されていたのと同じ観測 (衛星観測を除く) を水平解像度15kmで同化することにより、竜巻周辺の大きなスケールの環境場を再現しました。そして、得られた32個の環境場をダウンスケールし、上で述べた高密度観測 (5月6日1200JSTまで) を水平解像度1.875kmで同化することにより、竜巻発生前 (5月6日1100JST) の大気の解析場をより精緻に求めました。そしてさらにその32個の解析場とその平均をそれぞれ水平解像度350mにダウンスケールし、それらを初期値とする33メンバーのアンサンブル予報を行って、LMCを再現することを試みました。

実験の結果、33メンバーすべてでLMCが発生しました。ただし、LMCの強さや発生位置はメンバー毎に異なっていました。第1図はこの33メンバーを用いて1100-1300JSTにLMCが距離5km以内に予測される確率を算出し、地図上に示したものです。つくば竜巻

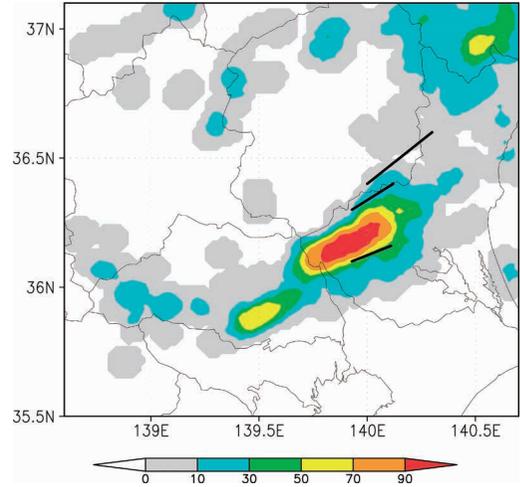
の発生位置は確率50%以上の領域に入っていますが、これは、つくば竜巻を発生させたLMCが半数以上のメンバーでほぼ正しい位置に予測されたということを示しており、このLMCが確率的に予測できる可能性を示唆する結果と言えます。

本研究では、比較のために、高密度観測のうち地上観測データを同化しない実験とレーダーデータを同化しない実験も行いましたが、どちらの実験でも、発生するLMCが弱くなり、その発生位置も北にずれて(観測から遠ざかって)いました。また、これらの実験の1100JSTの解析値を見ると、地上観測データを同化しない実験ではLMCの発生位置付近の下層の水蒸気量が小さく、レーダーデータを同化しない実験では対流システム南側の下層の南風が弱くなっていました。このことから、これらの高密度観測を同化すると下層の水蒸気と風の場合が大きく修正され、この修正がLMCの予測の改善に大きく寄与したと考えられます。

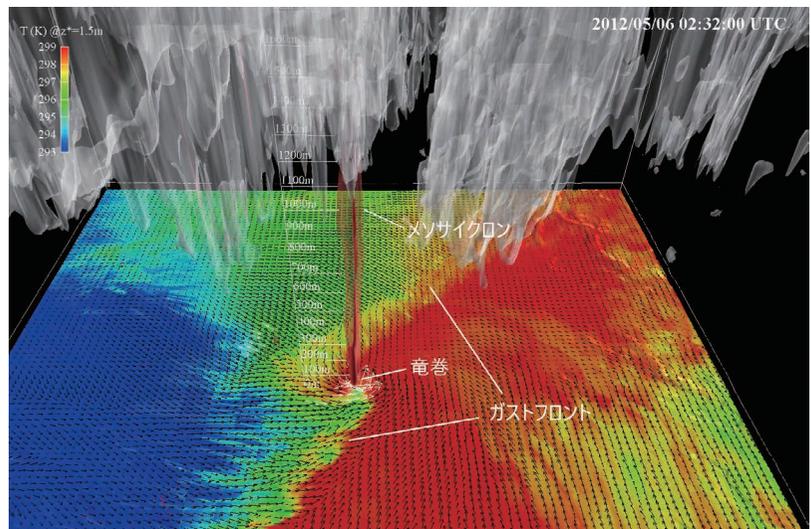
4. 竜巻を解像するアンサンブル予報を用いた竜巻発生に重要な要素の調査

前節で、つくば竜巻を発生させたLMCの確率予測の可能性を示しました。しかし、第1節で述べたように、LMCが発生しても必ず竜巻が発生するわけではありません。そこで、竜巻発生に重要な要素をより直接的に調べるために、前節の33メンバー、水平解像度350mのアンサンブル予報を1110JSTから水平解像度50mにダウンスケールすることにより、竜巻を解像するアンサンブル予報を行いました(Yokota *et al.* 2018a)。

実験の結果、33メンバー中7メンバーで、地上30mの最大鉛直渦度(5分移動平均)が 1.0s^{-1} を超えるような強い渦が発生しました。この渦は、地面に近いほど渦が小さく強いなど、LMCとは異なる特徴を持ち、竜巻と言って良いものでした(第2図)。また、最



第1図：メソサイクロンの経路の確率予測図。水平解像度350mの実験の地上0.8kmにおいて、 0.03s^{-1} を超える鉛直渦度が半径5km圏内に予測される確率(%)を表す。黒線は1230-1300JST頃に実際の竜巻が観測された位置。(Yokota *et al.* (2016) Fig. 10を改変)



第2図：最も強い竜巻が発生したメンバーの1132 JSTにおける竜巻の3次元描画。赤等値面は鉛直渦度 0.2s^{-1} (半透明)と 0.6s^{-1} (不透明)を、白等値面は雲水量 1g kg^{-1} を、地面の色は地上1.5mの気温(K)を示す。矢印は地上30mの水平風(m s^{-1})であり、黒は 30m s^{-1} 以下を、白は 30m s^{-1} 以上を示す。(Yokota *et al.* (2018a) Fig. 4を改変)

も強い竜巻が発生したメンバーは、水平解像度350mの実験で最も強いLMCが発生したメンバーと一致していました。

同じ竜巻を再現した複数のメンバーで竜巻渦の起源を調べることができれば、その竜巻の発生メカニズムをより説得力を持って示すことができます。そこで、竜巻が発生した7メンバーすべてについて、竜巻渦の起源を探る「循環解析」を行いました。この解析では、竜巻渦を囲む閉曲線を、時間をさかのぼって追跡し、その閉曲線に沿って接線方向の風速を積分した「循環」の時間変化を計算します。この「循環」は保存量であり、「循環の時間変化＝傾圧項＋摩擦項」の形で書けるため、この右辺の2つの項の大きさを調べることで、竜巻渦の循環が水平温位勾配によって（傾圧的に）生成したか、地表の摩擦によって生成したかを調べることができます。もしこの2つの項がいずれも小さく、時間をさかのぼっても循環がほぼ保存されている場合は、竜巻渦はもともと環境場にあった弱い循環が収束することにより発生したことになります。

この「循環解析」の結果、7メンバーとも傾圧項より摩擦項の方が絶対値が大きく、この項が「循環」を大きく変化させているという結果が得られました（第3図）。しかし、メンバーによっては、同じ竜巻をほぼ同条件で再現しているにもかかわらず、摩擦項が負になっている（「循環」を増大させていない）ものもありました。また、傾圧項と摩擦項の大きさは竜巻渦を囲む閉曲線の選び方（大きさ・位置・時刻）によっても大きく変化し、この設定を変えると傾圧項が摩擦項と同程度の大きさになる場合もありました。なお、竜巻が発生しなかったメンバーについても、最も鉛直渦度が大きくなった位置・時刻で同様の「循環解析」を行ったところ、傾圧項と摩擦項の大きさは竜巻が発生したメンバーと同程度になりました（第3図）。

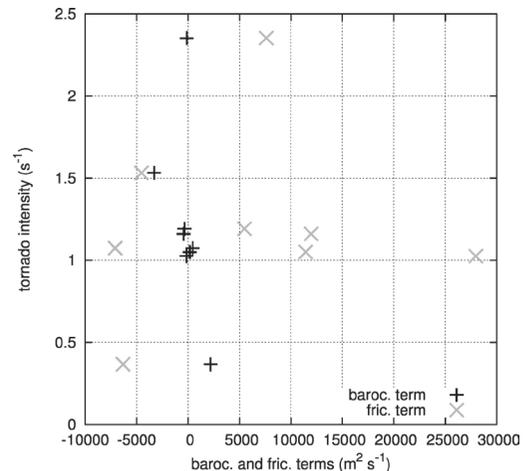
この結果は、竜巻渦の「循環」の起源が竜巻の発生を左右しているわけではない、ということを示唆しています。すなわち、竜巻の発生にとって本質的なのは、「循環」がどこから生まれるかではなく、至る所に存在する「循環」をどうやって集めてくるか（どうやって渦を強化するか）だと考えられます。

そこで次に、この渦の強化の要因を明らかにするための「アンサンブル感度解析」を行いました。この解析では、全33メンバーを用い、様々な種類・場所・時刻の物理量に対して竜巻の強さとの相関係数を計算します。そして、この相関係数が大きくなるような物理

量が竜巻の発生にとって特に重要であると考えます。ここでは、竜巻の強さを地上30mの最大鉛直渦度の5分移動平均で定義し、環境場の影響を調べるために、水平解像度350mにスムージングした場の物理量に対して竜巻の強さとの相関係数を計算しました。

この「アンサンブル感度解析」の結果、竜巻の強さは、高度約1kmの最大鉛直渦度との相関が竜巻発生数分前から特に大きくなることが分かりました。この最大鉛直渦度はLMCの強さに対応するので、この結果は高度約1kmでLMCが強いほど竜巻が発生しやすいということを示しています。これは、強いLMCの中心では大きく気圧が下がるため、LMCの直下で強い上向きの気圧傾度力が生じ、これによって加速された上昇流によって地表付近の渦が引き延ばされて強化されるからだと考えられます(Wicker and Wilhelmson 1995; Noda and Niino 2005; Markowski and Richardson 2014)。

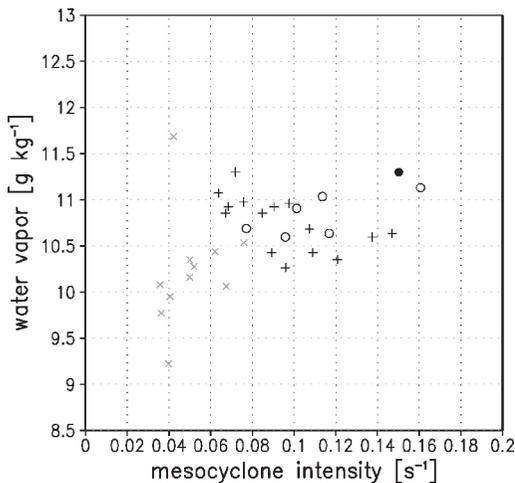
また、竜巻発生数分前に竜巻発生域周辺で高度毎に領域平均した水蒸気混合比についても、特に地上



第3図：竜巻の強さ（地上30mの最大鉛直渦度の5分移動平均、 s^{-1} ）に対する傾圧項（+印、 $m^2 s^{-1}$ ）と摩擦項（×印、 $m^2 s^{-1}$ ）の散布図。竜巻が発生した7メンバーと竜巻が発生しなかった1メンバーについて示した。ただし、傾圧項と摩擦項は、地上30mの鉛直渦度最大位置を中心とする半径100mの円形の閉曲線を、鉛直渦度が $0.6s^{-1}$ を超えた時刻から（竜巻が発生しなかった1メンバーについては鉛直渦度が最大となった時刻から）480秒さかのぼって追跡し、その閉曲線に沿って時間積分して求めた。（Yokota *et al.* (2018a) Fig. 10を改変）

100m以下で竜巻の強さとの相関が大きくなっていました。これは、地表付近の水蒸気が多いほど、LMCの直下で持ち上げられた気塊が早く凝結するため、凝結熱によってその気塊の浮力が強まり、渦の引き延ばしによる強化が促進されるからだと考えられます。

竜巻発生3分前の地上1kmのLMCの強さと下層100mの水蒸気について、散布図を描いたのが第4図です。これを見ると、地上1kmのLMCが強くと、下層100mの水蒸気が多いほど、3分後に強い竜巻が発生するということがよく分かります。この結果は、地上約1kmのLMCによる上向き気圧傾度力の強化と、地表付近の水蒸気による浮力の強化が竜巻の発生を大きく左右することを示しています。これらの要素は竜巻を解像する高解像度モデルを用いなくても、LMCを解像出来るモデルであれば予測できるものです。したがって、本研究のような大きな計算機資源を使わなくても、これらの要素の予測精度を上げることで、精度の高い竜巻予測が可能であると期待できます。



第4図：地上30mの鉛直渦度最大時刻3分前における、地上1kmのメソサイクロンの強さ（水平解像度350mに粗視化した最大鉛直渦度、 s^{-1} ）と下層100mの水蒸気混合比（竜巻の周囲30km \times 30kmの矩形領域の平均、 g kg^{-1} ）の散布図。×印は竜巻の強さ 0.7s^{-1} 未満、+印は 0.7s^{-1} 以上 1.0s^{-1} 未満、○印は 1.0s^{-1} 以上 2.0s^{-1} 未満、●印は 2.0s^{-1} 以上を表す。（Yokota *et al.* (2018a) Fig. 16を改変）

5. 大気場と降水の関係を利用した降水観測のデータ同化の改良

下層のLMCや水蒸気の予測精度を上げるためには、その初期値として用いる下層の大気場の解析精度を上げる必要があります。そのためには、同化する観測データの数を増やすだけでなく、それらの観測データから情報を最大限引き出すためのデータ同化技術の向上が不可欠です。特に、地上からのレーダー観測は、降水域の下層を高密度で観測できるため、スーパーセルの予測にとって、レーダー観測の同化技術の向上は非常に重要です。

一般に、レーダーによる降水観測は、降水が予測されていない観測点に直接同化することはできません。なぜかという、LETKFなどのアンサンブル予報に基づくデータ同化では、アンサンブル摂動の大きさによって予報誤差が見積もられ、この大きさに応じて解析値が決まる（どの程度観測値に近づけるかが決まる）からです。全メンバーで降水が予測されていない点ではアンサンブル摂動が0ですので、予報誤差が0とみなされてしまい、観測値に全く近づかなくなってしまうのです。前節までに行った実験でも、この問題によってスーパーセルの位置を観測に十分に近づけることができず、ほとんどのメンバーで実際に竜巻が発生した時刻より30分ほど前に竜巻が発生してしまいました。このようにレーダーによる降水観測の直接同化には課題が多いため、多くの現業数値予報センターでは、降水観測を直接同化せず、気温や水蒸気の情報に変換して間接的に同化する方法をとっています（Albers *et al.* 1996；Jones and Macpherson 1997；Caumont *et al.* 2010など）。

しかしながら、レーダーによる降水観測の直接同化は、下層の大気場をより現実のものに近づけるためには避けて通れない課題です。そこで、上で述べた「アンサンブル摂動が0になってしまう問題」を解決するために、降水が予測されていない点で、データ同化の前にレーダー反射強度のアンサンブル摂動を人工的に作成して加える手法を考案しました（Yokota *et al.* 2018b）。

アンサンブル摂動が過小な場合にそれを補うためにランダムな摂動を加える手法は以前からありました（Mitchell and Houtekamer 2000など）が、従来手法では加えた摂動と大気場の間に相関が無いため、同化により大気場を適切に修正することができませんでした。このため本研究では、降水が予測された領域で大

気場と反射強度の相関を計算し、降水が予測されなかった点に、その相関に基づいた摂動を反射強度の摂動として加えることにしました。こうすると、「降水の発生しやすい大気場」には正の摂動が、「降水の発生しにくい大気場」には負の摂動が加わるため、強い反射強度を同化するほど解析値が「降水の発生しやすい大気場」になることが期待できます。

この手法でレーダー反射強度を同化して作成した解析場からの予報を、摂動を加えないで同化した場合と比較したものが第5図です。これを見ると、摂動を加えて同化した実験の方が、つくば竜巻をもたらしたスーパーセルをより正しい時刻・位置に予測してお

り、本研究で考案した手法がスーパーセルの予測に有効であることが分かります。

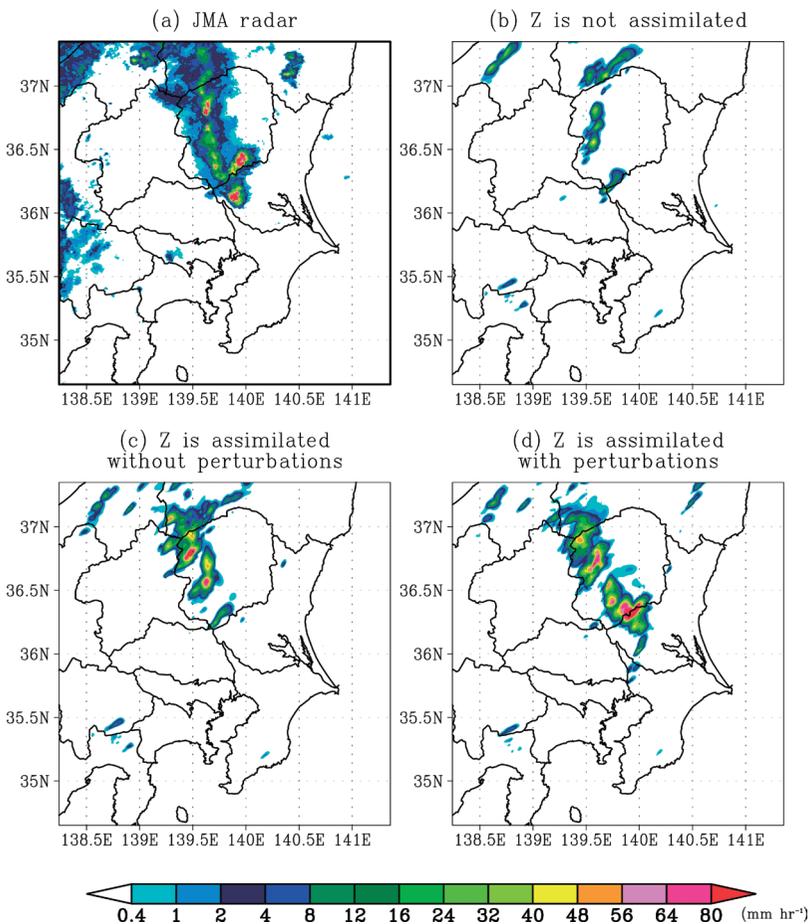
6. まとめと今後の課題

本稿で示した一連の研究では、つくば竜巻を対象として、高密度観測データの同化と竜巻を解像するアンサンブル予報を行い、竜巻の確率予測の可能性を示すとともに、アンサンブル予報による竜巻発生に重要な要素の解析や、予測精度を上げるためのデータ同化技術の改良を行いました。

第4節で示した解析結果は、竜巻の発生に重要なのは回転の源がどのような仕組みで作られるかではな

く、地上1 km 付近のLMCの強さと地表付近の水蒸気であるということを示唆しています。これらの要素は、メソサイクロンが解像できる予報モデルであれば（竜巻を解像しなくても）確率的に予測することは十分に可能です。したがって、第3節で用いたような下層の大気場の観測網の拡充と、第5節で示したようなデータ同化技術の改良を積み重ねていけば、日本でも竜巻の「Warn-on-forecast」を行える可能性は十分にあると考えられます。

もちろん、ここで示したのはつくば竜巻のみを対象として行った解析の結果ですので、これらの結果がすべての竜巻に対して当てはまるとは限りません。今後、日本国内で発生する多種多様な竜巻について、本研究の結果が適用できるかどうかを詳しく調査し、その結果を踏まえて予測精度向上のための技術開発を進めていく必要があります。本研究がその一助となれば嬉しく思います。



第5図：(a) 気象庁のレーダーで推定した5月6日1230JSTにおける降水強度 (mm hr^{-1})。 (b-d) 5月6日1130JSTのLETKF解析値から予報した1225-1230JSTの降水強度 (mm hr^{-1})。 b: レーダー反射強度を同化しない実験, c: 摂動を加えずにレーダー反射強度を同化した実験, d: 大気場と相関する摂動を加えてレーダー反射強度を同化した実験。 (Yokota *et al.* (2018b) Fig. 6を改変)

謝辞

本研究は、気象研究所在籍時に行った様々な方との共同研究の一部です。東京大学の新野 宏名誉教授には、私が学生の時から今に至るまで大変お世話になっており、竜巻研究の第一人者として、研究の方向性に対する貴重なアドバイスだけでなく、研究者としての心構えや論文を作成する際の注意点まで様々なことを教えていただきました。気象研究所在籍時の上司である気象研究所気象観測研究部の瀬古 弘部長には、自由な着眼点での研究が推奨される理想的な研究環境を作っていただき、解析の解釈などで行き詰まったときはメソ気象とデータ同化の双方の専門家として多くの丁寧かつ確かな助言を頂きました。気象庁情報基盤部数値予報課の國井 勝予報官には、複雑なデータ同化理論や LETKF システムの使い方などについて、初心者の方に大変分かりやすく教えていただきました。気象庁大気海洋部観測整備計画課の山内 洋計画調整官と気象研究所火山研究部の佐藤英一主任研究官には、レーダーの専門家としての目線から、レーダーデータの特徴やそれを同化する上での注意点などを教えていただきました。また、気象研究所台風・災害気象研究部の益子 渉室長には、高解像度シミュレーションによる竜巻の解析方法やその解釈について、豊富な経験に基づいた貴重なアドバイスを頂きました。(以上、所属と職名は2020年10月時点。)その他にも、研究を進めるにあたり、東京大学の先生方と大気海洋研究所海洋大気力学分野の皆様、気象研究所の元予報研究部と元気象衛星・観測システム研究部の皆様、気象庁の元観測部観測課と元予報部数値予報課の皆様、海洋研究開発機構ビッグデータ活用予測プロジェクトチームの皆様、理化学研究所計算科学研究センターの皆様、防災科学技術研究所水・土砂防災研究部門の皆様をはじめとする多くの方に多方面より様々なアドバイスを頂きました。

本研究は「HPCI 戦略プログラム 分野3 防災・減災に資する地球変動予測」(課題ID: hp120282, hp130012, hp140220, hp150214), 「社会システム改革と研究開発の一体的推進 気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」, 「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題 重点課題④ 観測ビッグデータを活用した気象と地球環境予測の高度化」(課題ID: hp150289, hp160229, hp170246, hp180194), 東京大学大気海洋研究所共同利用研究(受付番号131, 2014; 136, 2015; 138, 2016; 137, 2017; 141, 2018), 及び

JSPS 科研費 JP24244074, JP16K17804, JP16H04054, JP18H01277より支援を受けて行ったものです。本研究で用いたレーダーデータの一部は気象研究所気象衛星・観測システム研究部第二研究室(当時)より、地上観測データの一部はNTTドコモ社よりご提供いただきました。また、LETKF システムの実行には東京大学と気象研究所のスーパーコンピュータシステムを、水平解像度350mと50mのアンサンブル予報の実行には理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用させていただきました。竜巻の3次元描画にあたってはサイバネットシステム株式会社にご協力いただきました。

このように、本研究は非常に多くの方のご協力によって初めて実現できたものです。初心者からのスタートだったこともあり、実験やその解析にあたっては失敗も多々ありましたが、豊富な計算機資源や観測データを自由に利用でき、困ったときはすぐに周囲の方の的確なアドバイスを頂けるという理想的な環境に置いていただけたことで、失敗を恐れずに研究を進めることができました。ご協力いただいた皆様に改めて深く感謝いたします。

引用文献

- Albers, S. C., J. A. McGinley, D. L. Birkenheuer and J. R. Smart, 1996: The local analysis and prediction system (LAPS): Analyses of clouds, precipitation, and temperature. *Wea. Forecast.*, **11**, 273-287.
- Ancell, B. C. and G. J. Hakim, 2007: Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 4117-4134.
- Caumont, O., V. Ducrocq, E. Wattrelot, G. Jaubert and S. Pradier-Vabre, 2010: 1D+3DVar assimilation of radar reflectivity data: a proof of concept. *Tellus A*, **62**, 173-187.
- Craven, J. P. and H. E. Brooks, 2004: Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection. *Natl. Wea. Dig.*, **28**, 13-24.
- Fujita, T. T., 1971: Proposed Characterization of Tornadoes and Hurricanes by Area and Intensity. SMRP Res. Pap. **91**, Univ. Chicago, 42pp.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112-126.
- Jones, C. D. and B. Macpherson, 1997: A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data

- into an operational mesoscale model. *Meteor. Appl.*, **4**, 269–277.
- 気象庁, 気象研究所, 東京管区气象台, 仙台管区气象台, 2012: 平成24年5月6日に発生した竜巻について (報告). 14 pp.
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/tatsumaki-portal/tyousa-houkoku.pdf> (2020.11.16閲覧)
- Markowski, P. M. and Y. P. Richardson, 2014: The influence of environmental low-level shear and cold pools on tornadogenesis: Insights from idealized simulations. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 243–275.
- Mashiko, W., 2016: A numerical study of the 6 May 2012 Tsukuba city supercell tornado. Part II: Mechanisms of tornadogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3077–3098.
- Mashiko, W., H. Niino and T. Kato, 2009: Numerical simulation of tornadogenesis in an outer-rainband minisupercell of typhoon Shanshan on 17 September 2006. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4238–4260.
- Mitchell, H. L. and P. L. Houtekamer, 2000: An adaptive ensemble Kalman filter. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 416–433.
- Noda, A. T. and H. Niino, 2005: Genesis and structure of a major tornado in a numerically-simulated supercell storm: Importance of vertical vorticity in a gust front. *SOLA*, **1**, 5–8.
- Saito, K. *et al.*, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266–1298.
- Schenkman, A. D., M. Xue and A. Shapiro, 2012: Tornadogenesis in a simulated mesovortex within a mesoscale convective system. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 3372–3390.
- Schenkman, A. D., M. Xue and M. Hu, 2014: Tornadogenesis within numerically simulated 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell storm. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 130–154.
- Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito and T. Miyoshi, 2013: Development of a two-way nested LETKF system for cloud-resolving model. *Data Assim. Atmos. Ocean. Hydrol. Appl.*, **2**, 489–507.
- Seko, H., M. Kunii, S. Yokota, T. Tsuyuki and T. Miyoshi, 2015: Ensemble experiments using a nested LETKF system to reproduce intense vortices associated with tornadoes of 6 May 2012 in Japan. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 42.
- Stensrud, D. J. *et al.*, 2009: Convective-scale warn-on-forecast system. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1487–1499.
- Torn, R. D. and G. J. Hakim, 2008: Ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 663–677.
- Trapp, R. J., G. J. Stumpf and K. L. Manross, 2005: A reassessment of the percentage of tornadic mesocyclones. *Wea. Forecasting*, **20**, 680–687.
- Wicker, L. J. and R. B. Wilhelmson, 1995: Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 2675–2703.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and H. Niino, 2016: The tornadic supercell on the Kanto Plain on 6 May 2012: Polarimetric radar and surface data assimilation with EnKF and ensemble-based sensitivity analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3133–3157.
- Yokota, S., H. Niino, H. Seko, M. Kunii and H. Yamauchi, 2018a: Important factors for tornadogenesis as revealed by high-resolution ensemble forecasts of the Tsukuba supercell tornado of 6 May 2012 in Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1109–1132.
- Yokota, S., H. Seko, M. Kunii, H. Yamauchi and E. Sato, 2018b: Improving short-term rainfall forecasts by assimilating weather radar reflectivity using additive ensemble perturbations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 9047–9062.

A Study of Supercell Tornadogenesis Using Data Assimilation and Ensemble Forecasts

Sho YOKOTA*

* *Numerical Prediction Division, Information Infrastructure Department, Japan Meteorological Agency, 1-2 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052, Japan*
E-mail: s_yokota@met.kishou.go.jp

(Received 1 September 2020; Accepted 14 October 2020)