407：*5*：*601*（シビア現象；メソスケール）

2．「シビア現象」の理解・予測への課題と期待

新　野　　宏*

1．はじめに

「シビア現象」(後注1)という日本語は学術用語として定着しているわけではないが，ここではシンポジウムの表題に合わせて，英語の severe weather に対応する言葉として使うことにする．アメリカ気象学会の Glossary（American Meteorological Society 2000）によると，“severe weather”は「一般的には severe storm と同じ」となっており，“severe storm”は「一般的には，被害を生ずるあらゆる storm を指すが，通常は severe local storms とりわけ強い thunderstorm や hailstorm，竜巻に対して使われる」となっている．以下では，この一般的な定義の「降水・強風・落雷等により災害を引き起こす大気現象」を意味するものとして話を進めたい．具体的には，台風や温帯低気圧，積乱雲やその組織化されたメソ降水系，更には積乱雲が作り出す竜巻やダウンバースト等までを含めた擾乱を対象とするが，ここでは筆者の興味にもとづき，メソスケールの「シビア現象」を中心に話を構成することをお許しいただきたい．

なお，筆者は2001年春に「防災・生活情報のためのメソ気象学」と題する講演（新野 2002）を行った．今回の話題はこれと重複する内容もあるが，この9年間の進展を踏まえて，「シビア現象」の理解・予測への課題と期待について述べてみたい．

2．数値モデルや観測・予測手法の発展

この9年間における国内外における数値モデル・データ同化手法・観測手法の進歩は著しい．気象庁においても，ウィンドプロファイラの導入，現業レーダーのドップラー化が進んだほか，4次元変分法によるデータ同化の導入，全球モデルの高解像度化（20 km），週間アンサンブル予報の導入（米原ほか 2008参照），メソスケールモデルの非静力化，高解像度化（5 km）などが進んだ（永田 2012参照）．一方，2001年の講演で課題として挙げた現象の理解は残念ながら思ったほど進んでおらず，メソ β スケール以下のシビア現象の理解の難しさを示している．

3．現象の理解・予測への課題と期待

3.1　新たな全球大気再解析への期待

1979－2004年を対象に日本独自の全球大気長期再解析 JRA-25（Onogi *et al.* 2007）が行われ，その後も JCDAS（JMA Climate Data Assimilation System）として継続されている．現在は，1958－2012年を対象として，JRA-25が抱えていた課題の改善や高解像度化（水平60km），放射等物理過程の改善に加えて，4次元同化を用いた新たな全球大気再解析 JRA-55が2013年公開に向けて行われている（例えば Ebita *et al.* 2009）．試験的に行われた1959年の暫定版再解析をもとにしたメソ解析による数値シミュレーション（別所ほか 2010）で，伊勢湾台風が見事に再現され（第1図参照），伊勢湾の高潮も観測結果が良く再現されている（図略）．JRA-55が完成すると，過去のシビア現象を最新の数値モデルにより再現する試みが可能となり，顕著なシビア現象のメカニズムの研究や防災対策実験にも有効に利用されると期待される．

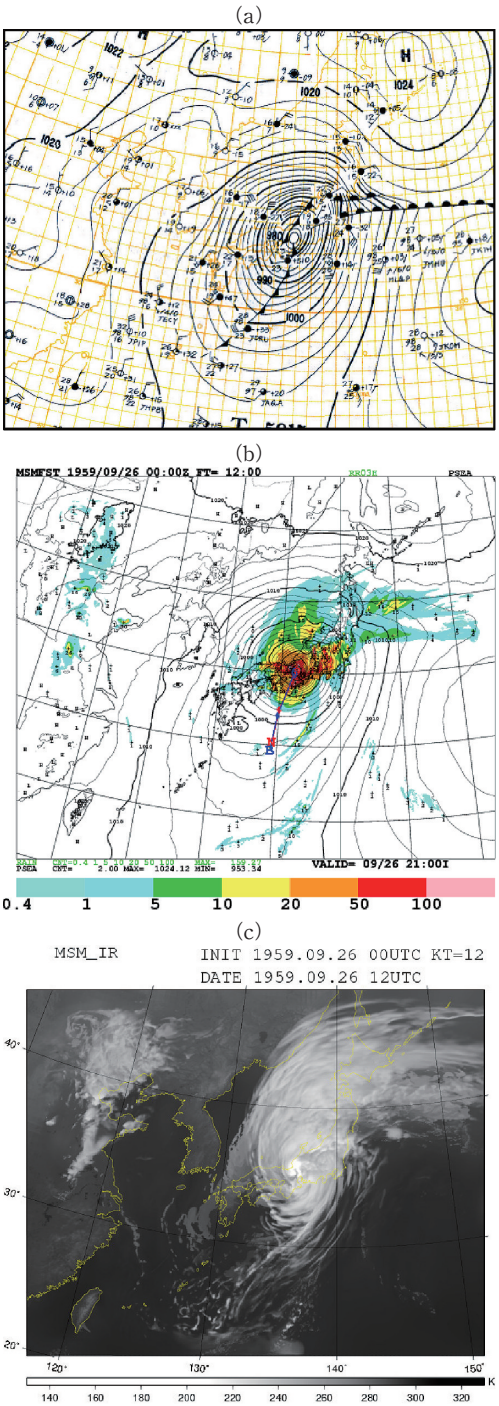
3.2　数値モデルやアンサンブル予報・同化手法の更なる発展にむけて

現象の理解・予測のためには，正確な大気の状態を知る必要があり，優れた数値モデルと多様な観測データを取り込む同化手法の開発が欠かせない．

数値モデルに関しては，これまで解像度を上げると，モデルのパフォーマンスも上がると考えられてきた．しかし，水平格子サイズが数km になると，積雲対流や境界層の大きな乱流渦が，ある程度陽に解像されるようになるため，それぞれの1次元的なパラメタリゼーションとの併用が難しくなると考えられる（例

* 東京大学大気海洋研究所．

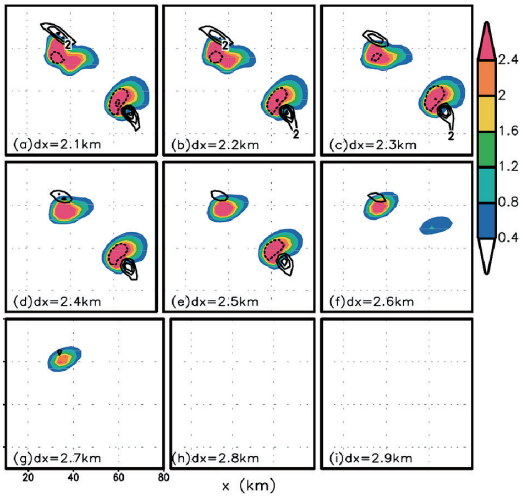
© 2012　日本気象学会



第１図　伊勢湾台風の再現実験結果．(a)1959年９月26日21JSTの地上天気図，26日09JSTを初期値とする12時間予報による(b)地上気圧分布（２hPa毎の等圧線）と前３時間降水量（カラースケール），(c)擬似衛星画像（川畑拓矢氏提供）．

えばWyngaard 2004)．気象庁で使われているメソスケールモデルは現在水平解像度５kmであり，近い将来２kmを目指すと聞いているが，Bryan *et al.* (2003) はスコールラインの信頼できる再現を行うには100mのオーダーの水平格子間隔が必要であるとしている．また，強い鉛直シアのある場に生ずるスーパーセルについては，定性的な再現を目指す上でも，2.5km以下の水平格子間隔が必要であることが報告されている（第２図；Noda and Niino 2003)．急峻な地形をどう取り扱うかも検討の必要があり（例えば，Yamazaki and Satomura 2010)，質的なレベルで解決すべき問題も多い．物理過程の精緻化も必要である．

雲物理の精緻化に関して，SHAVE（The Severe Hazards Analysis and Verification Experiment）と呼ばれるアメリカのプロジェクト（Ortega *et al.* 2009）は興味深い．このプロジェクトは雹や洪水・竜巻があったとき，電話により詳細なアンケート調査を



第２図　水平格子間隔 dx を(a)2.1kmから(i)2.9kmまで0.1kmずつ変化させたときの計算開始２時間後のスーパーセルに伴う雨水量（カラースケール；g kg^{-1}）と鉛直渦度（等値線10^{-3}s^{-1}毎；実線は正，破線は負の値を示す）の違い．dx>2.5kmでは本来発達すべき「右側に進むスーパーセル」に伴う鉛直渦度やフック状エコーが発達せずに，「左側に進むスーパーセル」だけが生き延び，dx>2.7kmではどちらのスーパーセルも衰弱してしまう（Noda and Niino 2003)．

行い，例えば雹ならば，サイズや発生時刻の分布を把握し，マルチパラメータレーダの解析スキームの妥当性を検証すると共に，数値モデルの雲物理スキームの検証にも利用しようとするものである．この種のプロジェクトを通じては，一般市民のシビア現象に関する興味を高めることもできると思われ，双方向の効果が期待できそうである．

メソアンサンブル予報では，初期摂動・境界摂動をどのように与えるかなど多くの課題が残っている（例えば斉藤ほか 2006）．

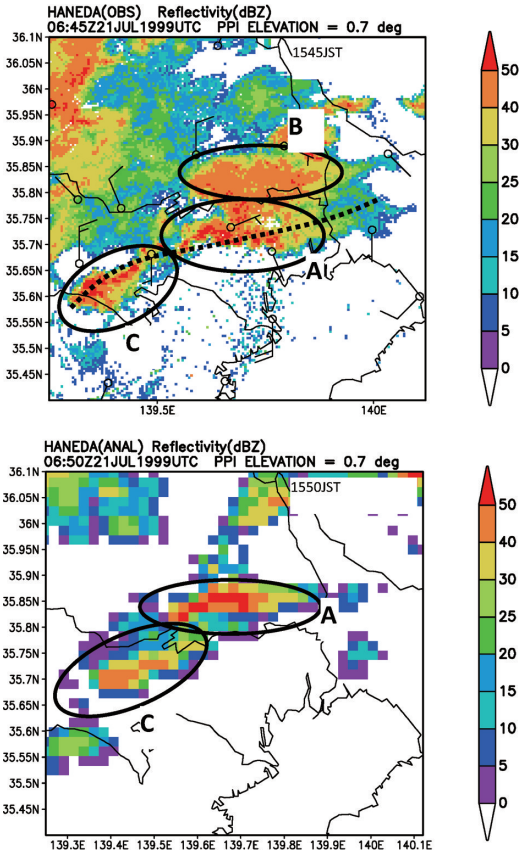
データ同化に関しては，近年優れた解説（露木・川畑 2008；三好 2005）があるので，そちらを参照いただきたい．モデルのバージョンアップ毎にアジョイントコードを開発しなくても良いアンサンブルカルマンフィルターに魅力が感じられるが，当面は 4 次元変分法とアンサンブルカルマンフィルターの研究の切磋琢磨に注目する必要があろう（Miyoshi *et al.* 2010）．

3.3　個々の現象の理解と予測

3.3.1　雷雨の発生

2008年夏の雷雨により，東京都豊島区雑司ヶ谷の下水道工事作業中に発生した災害や神戸市の都賀川の親水公園で生じた災害を契機として，局地的な雷雨への対策が社会の関心を集めている．雷雨はその成因により，古くから界雷，熱雷，渦雷に分けられることが多い（吉崎 1996）．界雷は総観規模の前線や海陸風前線や古いストームのガストフロントなど，２つの異なる気団が隣り合うメソスケールの収束線に伴う上昇気流をトリガーとして発生する．熱雷は同一気団内で地表面の加熱により発生する．また，渦雷は低気圧や台風に伴う上昇気流により発生する．上層の寒冷渦は，成層を不安定化すると共に上昇気流も伴うため，渦雷に含めるべきかも知れない．

界雷については，晴天エコーを利用したドップラーレーダーの動径風から収束線の存在が把握できることがあり，これを同化した非静力学モデルにより予測出来る場合がある（第 3 図；Kawabata *et al.* 2007）．これに対して，大気が著しく不安定で，明瞭な収束線が無い場合の熱雷の発生の予測は特に難しい．Weckwerth（2000）はフロリダ半島の積乱雲の発生過程を調べ，ゾンデと飛行機観測から対流混合層内に存在するロール状の乾燥対流の上昇域で高温かつ高混合比となり，自由対流高度が下がる可能性を指摘している．GPS 可降水量の同化（川畑ほか 2009）から発達初期の積乱雲に伴う水蒸気量の増加を把握でき，非静力学モデルにより雷雨の発生・発達が再現できる場合もあることから，今後の発展が期待される．一方，このような境界層過程についてドップラーライダー等による観測や large eddy simulation 等の数値モデルによる一層の理解が待たれる．



第 3 図　1999年 7 月21日午後，東京とその周辺で豪雨が起きた際のレーダー反射強度（dBZ）．（上）羽田空港レーダーによる仰角0.7度の観測と AMeDAS による地上風（矢羽根）．破線は収束線を表す．（下）予報結果．A，B，C を付けた楕円はメソスケール対流系を示す（Kawabata *et al.* 2007より）．

ただ，当面の防災対策を考えると，2009年 7 月から５分間隔となった気象庁レーダーや国交省レーダーによる観測情報に頼ることになろう．これらの情報を如何に的確かつ迅速に一般市民に伝達し注意を促せるかが重要である．より正確な雨量の見積もりが可能とされる二重偏波レーダーの利用も期待される（国土交通省 2010）．

3.3.2　集中豪雨

集中豪雨の多くは，停滞するback-（and　side-）building型(後注2)線状降水系により発生する（小倉 1991）．しかし，どのような環境場の時に，どのような仕掛けで，またなぜ特定の場所に，このような構造が維持されるのか，まだ十分にわかっていない．事例研究だけでなく，普遍的な観点から理解を進める必要がある．これ以外の型の集中豪雨の理解も必要である．

集中豪雨は事後の再現実験においても，再現できる場合とできない場合がある．同じ事例でも，用いた客観解析によって再現性が分かれることもある．一番の要因は水蒸気場の表現の善し悪しにあると考えられており，GPS可降水量の同化等で改善される場合もある（小司ほか 2005など）．

いずれにしてもモデルによる決定論的予測は容易ではない．全球アンサンブル予報からのdownscalingにより，ある程度事前にメソモデルで集中豪雨のポテンシャルを予知しようという試み（斉藤ほか 2006など）は有望と思われるが，当面，防災に直結する情報は，雷雨同様，レーダー観測に依存せざるをえないであろう．より進んだ予知・予測のためには，線状降水系に関するなお一層の理解に加えて，日本列島の周辺海上や韓国・中国などの水蒸気量の信頼できる観測情報が必要と思われる．

3.3.3　竜巻等突風

2005－2006年にかけて山形県酒田市，宮崎県延岡市，北海道佐呂間町などで竜巻等突風による大きな災害が生じたのを受け，気象庁では全国20箇所のレーダーのうち2010年4月現在で16箇所のドップラー化を進めると共に，2008年3月から竜巻注意情報の発表を始めた．竜巻注意情報は，①気象ドップラーレーダー観測によるメソサイクロンの検出と②数値予報による環境場の突風関連指数（CAPE，鉛直シア，EHI（Energy Helicity Index）など）予測値とレーダーエコー強度・頂高度を組み合わせた突風危険指数，の2つを総合した判定手法により発表される（瀧下 2009）．2008年3月から2009年12月までの検証結果によれば，その適中率は7％，捕捉率は23％であるという（気象庁 2010）．2010年5月27日からは，竜巻発生確度ナウキャストも導入されている．

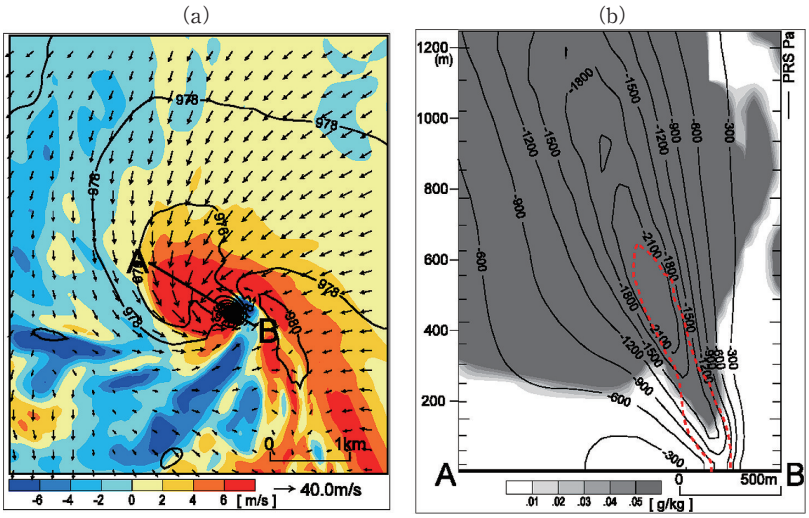
アメリカでも，ドップラーレーダーによるメソサイクロンの探知等に基づき竜巻警報が発表されているが，その空振り率は75％に近く，平均リードタイムは13分である（例えばStensrud *et al.* 2009）．ドップラーレーダーでは，専門家が見てほとんど同じ構造に見えるメソサイクロンでも，竜巻を起こす場合と起こさない場合がある（Wakimoto and Cai 2000）．このため，2009と2010年の初夏には，竜巻の発生機構の理解を深め，より信頼できる警報に繋げるための観測実験（VORTEX2: Verification of Origin of Rotation in Tornadoes EXperiment 2）が行われている．我が国でも，冬季日本海側の突風の稠密観測（楠ほか 2010）や関東平野での複数のドップラーレーダーによる観測（X-NET）（真木ほか 2007）などが行われ，興味深い結果が得られつつある．

数値モデルによる竜巻研究では，詳細な理想化実験も行われてきた（坪木ほか 2000；Noda and Niino 2005，2010）が，現実事例での竜巻の再現の成功が世界に先駆けて報告されている（坪木 2007；益子 2007；加藤・新野 2008；下瀬・川野 2009；Mashiko *et al.* 2009）．中でも，Mashiko *et al.*（2009）は2006年の台風13号に伴う竜巻の再現に成功し（第4図），竜巻の発生過程を詳細に解析している．その結果によると，竜巻の鉛直渦度の強化には，最近のアメリカの観測（例えばMarquis *et al.* 2008）から存在が指摘されている「ストーム後方の下降域で生ずる2次的な冷気の吹き出し」による水平収束の強化と，吹き出しに伴って運ばれて来る，上空の環境場の鉛直シアに伴う水平渦度の立ち上げと引き伸ばしも重要な役割を演じていることが明らかになっている．

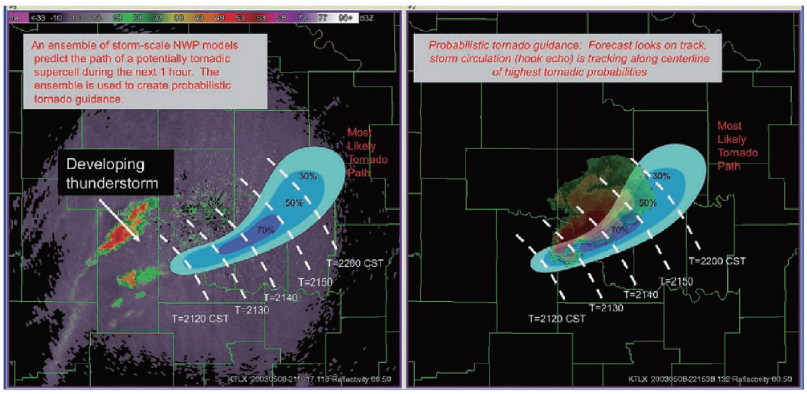
アンサンブル予報により，竜巻のポテンシャルが高い地域を予想しようとする試みも行われている（Seko *et al.* 2009）．今後，メソアンサンブル予報が現業化されれば，ドップラーレーダーによるメソサイクロンの探知と併せて，竜巻注意情報・竜巻ナウキャストの精度向上に役立つと期待される．この場合，アンサンブル予報の意味を一般市民に伝えることは易しくないので，わかりやすい視覚情報にして提供することが不可欠であろう（第5図；Stensrud *et al.* 2009）．

3.3.4　台風

台風の発生に関しては，物理的なメカニズムの理解に関しても，またそのモデルによる予報に関しても多くの課題が残されている．進路予報に関してはターゲット観測などの試みもあるが，業務的には当面はアンサンブル予報（山口 2008）により予報の信頼度の情報を得ることが中心となろう．台風の場合は，防災



第４図　2006年９月17日に台風13号のアウターレインバンド内の小型スーパーセルに伴い宮崎県で発生した竜巻の再現実験結果．(a)高度150m における鉛直速度（カラースケール）の水平分布．フック状に見える下降流域が北に突き出した部分の先端西側に竜巻がある．実線は２hPa 毎の等圧線，矢印はストームに相対的な風ベクトル，(b)(a)の線 A-B に沿った竜巻の鉛直断面．グレイスケールは雲水量，実線は気圧偏差の等値線（300Pa 毎），太い赤破線は鉛直渦度が0.50s^{-1}の等値線を表す（Mashiko *et al.*（2009）の Fig. 9a, d をカラー化したもの）．



第５図　数値予報に基づく将来のストームスケールの警報システムの概念図．（左）レーダーで観測された発達中のストームのデータがデータ同化を通じて雲解像モデルを用いたアンサンブル予報システムに利用され，今後90分間の竜巻の発生確率の分布が得られる（図の青系統の影）．（右）もし予報が正確であれば，45分後にはストームは左図の竜巻発生確率の高い領域に沿ってメソサイクロンとフックエコーを作り出すと期待される．この種の予報は，レーダーのボリュームスキャンの度に更新され，レーダー観測のみに基づくよりも早くから有用な警報が発表できると期待される（Stensrud *et al.* 2009）．

対策を講ずるためのリードタイムは確保できるので，コース毎に想定される高潮・風・雨の情報があれば，防災対策に有用と思われる．

台風の構造に関しても，渦の大きさが何で決まるのか，竜巻を起こすものと起こさないもので何が異なるのか，境界層内の擾乱に伴う突風などの微細構造（Wurman and Winslow 1998）など，興味深い課題が多く残されている．今後の研究の進展に期待したい．

４．まとめ

以上，シビア現象の理解・予測への課題と期待について述べてきた．シビア現象に関する防災情報の遠い将来へ向けた大きな流れは，観測に基づく警報（Warn-on-observation）から確率情報を含めた数値予報に基づく警報（Warn-on-forecast）への移行であろう．しかしながら，これを実現するには，現象に関わる基礎過程と現象のメカニズムの理解，海上の水蒸気観測や Multifunction Phased Array Radar（MPAR）などの新しい観測手法の開発，より信頼できる高精度の数値モデルの開発，データ同化・アンサンブル予報手法の開発などを一層進めることが不可欠である．台風以外の，雷雨や集中豪雨，竜巻等突風に関して

は，当面は引き続き短いリードタイムを持ったナウキャストが重要な防災情報となると考えられる．この場合，如何に迅速に，また危険な地域にいる多くの人に防災情報を伝えるかという情報伝達システムの充実が重要な課題である．

情報の伝達と共に重要なのは，防災担当者や一般市民への知識の普及である．シビア現象は，各人のいる場所や業務内容によって危険度が大きく異なる場合が多い．また，現状では予知・予測が難しい現象も多く，提供される情報も科学的根拠はあると言っても一般市民にはわかりにくい確率情報であったり，適中率が低い情報であったりする．このような情報を如何に有効に利用して，防災に繋げてもらうか，気象に関わるあらゆる人々の協力による知識の普及が肝要である．

謝　辞

本稿の準備に当たり，小倉義光先生，川畑拓矢氏，益子　渉氏，伊賀啓太氏，柳瀬　亘氏，査読者と高谷康太郎編集委員から貴重なコメントを，また川畑・益子両氏からはカラー原図の提供もいただいた．深く感謝申し上げる．

後注

(後注1) 小倉（2010 私信）は，日本語で「シビア現象」というと英語の severe weather（天気）だけでなく，severe winter のように天候も含むような広い意味になるので，「シビア天気系」のように「天気」であることを明確にする言葉が望ましいと提案している．

(後注2) back-and side-building 型という名前は小倉により提唱され，Seko *et al.*（1999）により初めて使われた（小倉・新野 2006）．

参　考　文　献

American Meteorological Society, 2000: Glossary of Meteorology. Second Edition, 855pp.

別所康太郎，中澤哲夫，川畑拓矢，釜堀弘隆，高野洋雄，新藤永樹，國井　勝，原　昌弘，高橋清利，海老田綾貴，太田行哉，古林慎哉，守谷昌己，本田有機，澤田謙，2010：伊勢湾台風再現実験プロジェクト．天気，**57**，247-255.

Bryan, G. H., J. C. Wyngaard and J. M. Fritsch, 2003: Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. Mon. Wea. Rev., **131**, 2394-2416.

Ebita, A., S. Kobayashi, Y. Ota, M. Moriya and K. Onogi, 2009: The new Japanese reanalysis project: JRA55. GCOS/WCRP Atmospheric Observation Panel for Climate, 15th Session, Geneva, Switzerland, 27-30 April 2009, AOPC-XV, item 12.2.（http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/aocpXV/12.2_The%20JMA's%20second%20reanalysis%20project%20JRA-55.pdf；2010.11.21閲覧）

加藤輝之，新野　宏，2008：2006年11月7日に発生した北海道佐呂間竜巻の雲解像モデルによる再現．日本気象学会春季大会予稿集，(93)，B201.

Kawabata, T., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda and Y. Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system. J. Meteor. Soc. Japan, **85**, 255-276.

川畑拓矢，小司禎教，瀬古　弘，斉藤和雄，2009：豊島区雑司が谷豪雨に関するデータ同化実験．日本気象学会春季大会予稿集，(95)，B164.

気象庁，2010：竜巻などの激しい突風に関する気象情報の利活用について．63pp.（http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/toppuu/toppuuinfo-rikatsuyou.pdf；2010.11.21閲覧）.

国土交通省，2010：Xバンド MP レーダ雨量情報.（http://www.river.go.jp/xbandradar/；2010.11.21閲覧）

楠　研一，新井健一郎，下瀬健一，益子　渉，別所康太郎，猪上華子，林　修吾，星野俊介，西橋政秀，保野聡裕，足立啓二，今井俊昭，荒木啓司，鈴木　修，中里真久，山内　洋，竹見哲也，2010：小型ドップラー気象レーダーを用いた突風探知システムの開発へ向けて－探知手法開発における問題点と今後の取り組み－．日本気象学会春季大会講演予稿集，(97)，A405.

真木雅之，前坂　剛，岩波　越，三隅良平，加藤　敦，鈴木真一，清水慎吾，木枝香織，山田　正，平野廣和，小林文明，平口博丸，楠　研一，鈴木　靖，有沢雄三，Kim D.-S.，Lee D.-I.，2007：局地気象擾乱のリアルタイム監視レーダネットワーク（X-NET）．日本気象学会春季大会講演予稿集，(91)，B158.

Marquis, J., Y. Richardson, J. Wurman and P. Markowski, 2008: Single- and dual-Doppler analysis of a tornadic vortex and surrounding storm-scale flow in the Crowell, Texas, supercell of 30 April 2000. Mon. Wea. Rev., **136**, 5017-5043.

益子　渉，2007：雲解像モデルによる T0613号に伴う竜巻の再現実験．日本気象学会春季大会講演予稿集，(91)，B201.

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.

三好建正，2005：アンサンブル・カルマンフィルタ．天気，**52**，93-104.

Miyoshi, T., Y. Sato and T. Kadowaki, 2010: Ensemble Kalman filter and 4D-var intercomparison with the Japanese operational global analysis and prediction system. Mon. Wea. Rev., **138**, 2846-2866.

永田　雅，2012：豪雨等予測の現状と取り組み．天気，**59**，526-532.

新野　宏，2002：防災・生活情報のためのメソ気象学．天気，**49**，13-22.

Noda, A. T. and H. Niino, 2003: Critical grid size for simulating convective storms: A case study of the Del City supercell storm. Geophys. Res. Lett., **30**, 1844, doi: 10.1029/2003GL017498.

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.

Noda, A. T. and H. Niino, 2010: A numerical investigation of a supercell tornado: Genesis and vorticity budget. J. Meteor. Soc. Japan, **88**, 135-159.

小倉義光，1991：集中豪雨の解析とメカニズム．天気，**38**，276-288.

小倉義光，2010：私信.

小倉義光，新野　宏，2006：お天気の見方・楽しみ方（6）謎に満ちた不意打ち集中豪雨―2004年６月30日静岡豪雨の場合（その２）．天気，**53**，821-828.

Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, **85**, 369-432.

Ortega, K. L., T. M. Smith, K. L. Manross, K. A. Scharfenberg, A. Witt, A. G. Kolodziej and J. J. Gourley, 2009: The Severe Hazards Analysis and Verification Experiment. Bull. Amer. Meteor. Soc., **90**, 1519-1530.

斉藤和雄，経田正幸，山口宗彦，2006：メソアンサンブル予報．数値予報課報告別冊，(52)，66-79.

Seko, H., T. Kato, K. Saito, M. Yoshizaki, K. Kusunoki, M. Maki and Members of Tsukuba Area Precipitation Studies, 1999：Analytical and numerical studies of a quasi-stationary precipitation band observed over the Kanto area associated with Typhoon 9426 (Orchid). J. Meteor. Soc. Japan, **77**, 929-948.

Seko, H., K. Saito, M. Kunii and M. Kyouda, 2009: Mesoscale ensemble experiments on potential parameters for tornado outbreak. SOLA, **5**, 57-60.

下瀬健一，川野哲也，2009：現実場を用いた竜巻の数値シミュレーション，Part I．竜巻の発生過程．日本気象学会春季大会講演予稿集，(95)，B208.

小司禎教，國井　勝，小泉　耕，川畑拓矢，瀬古　弘，2005：2004年６月30日，静岡で発生した豪雨のGPSデータ同化・予測実験．日本気象学会春季大会予稿集，(87)，C256.

Stensrud, D. J., M. Xue, L. J. Wicker, K. E. Kelleher, M. P. Foster, J. T. Schaefer, R. S. Schneider, S. G. Benjamin, S. S. Weygandt, J. T. Ferree and J. P Tuell, 2009: Convective-scale warn-on-forecast system: A vision for 2020. Bull. Amer. Meteor. Soc., **90**, 1487-1499.

瀧下洋一，2009：突風に関する防災気象情報の改善―竜巻注意情報の発表開始―．天気，**56**，167-175.

坪木和久，2007：台風0613号の外域降雨帯に発生したスーパーセルに伴う竜巻のシミュレーション．日本気象学会春季大会講演予稿集，(91)，B202.

坪木和久，耿　　驃，武田喬男，2000：台風9918号外縁部で発生した1999年９月24日の東海地方の竜巻とメソサイクロン．天気，**47**，777-783.

露木　義，川畑拓矢，2008：気象学におけるデータ同化．気象研究ノート，(217)，277pp.

Wakimoto, R. M. and H. Cai, 2000: Analysis of a nontornadic storm during VORTEX 95. Mon. Wea. Rev., **128**, 565-592.

Weckwerth, T. M., 2000: The effect of small-scale moisture variability on thunderstorm initiation. Mon. Wea. Rev., **128**, 4017-4030.

Wurman, J. and J. Winslow, 1998: Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in hurricane Fran. Science, **280**, 555-557.

Wyngaard, J. C., 2004: Toward numerical modeling in the “terra incognita”. J. Atmos. Sci., **61**, 1816-1826.

山口宗彦，2008：気象庁台風アンサンブル予報システム．天気，**55**，521-524.

Yamazaki, H. and T. Satomura, 2010: Nonhydrostatic atmospheric modeling using a combined Cartesian grid. Mon. Wea. Rev., **138**, 3932-3945.

米原　仁，小森拓也，酒井亮太，2008：気象庁週間アンサンブルの現状と開発．第６回「異常気象と長期変動」研究集会，平成20年度防災研究所研究集会（20-K01），「気候変動と異常気象　メカニズムと予測可能性」.

吉崎正憲，1996：雷雨の発生環境について．天気，**43**，734-738.