

105:413:501 (マルチパラメータレーダー；
降水系の観測；レーダー観測網)

3. 次世代降水系観測が拓く新しい気象学

上 田 博*

1. はじめに

日本国内では、現業の気象観測網が充実しており、気象業務に活用されている。しかし、竜巻や豪雨などの局地的な気象擾乱の監視・予測を行うための観測網には更なる改良が必要であり、新たな観測機器の開発と展開も強く求められている。一方、気象学で扱う問題が気候変動の予測にまで広がった現在、日本が行うべき気象観測は、日本周辺にとどまらず、熱帯から高緯度にわたる組織的なものが必要になった。これには衛星観測に期待するところもある一方で、高い時間空間分解能を必要とする現象の観測のためには、やはり地上観測の荷うべきものが大きい。

世界的に見ると、気象観測データの蓄積と数値モデルの発展により地球温暖化の問題は広く理解されるようになってきている。100年先までの気温の上昇は間違いないこととされるが、その一方で、そういった変化に伴う降雨・降雪の変動の予測、降雨・降雪域の変動、雨や雪の降り方の変化については未解明の問題が多く残されている。これらの問題の解明のためには、水・エネルギー循環を駆動する降水系の振る舞いの理解が必要である。また、この問題の解明は風水害の防災・減災の観点からも重要である。これらの問題を解明するためには降水系に関する広域における長期観測の充実が必要である。

広域における観測網の充実は時間のかかることであるが、将来的にその一端を担い得る新しい観測機器の開発に関しては大学等の研究機関における技術的進歩が著しい。特に、レーダー等の降水系の観測機器は、その観測方法の進歩とともに、観測と数値モデルを組

み合わせる研究も進み、新しい展望が開けつつある。しかし、降水系の発達前や降水系周辺の水蒸気場の観測を行うための機器は、まだなお開発途上であり、多くの課題がある。ここでは、降水系観測の最近の進歩を紹介し、次世代の降水系観測による新しい気象学の展開に対する期待について述べたい。

2. 降水系観測法の最近の進展

日本国内の地上気象観測はAMeDAS (Automated Meteorological Data Acquisition System) の設置から30年以上たち、レーダーアメダスの観測データが画像として常時インターネットで公開されること等を通じて、一般ユーザーの気象観測データの利用が進んでいる。また、静止気象衛星を初めとする各種の衛星観測データが公開され、教育・研究にも活用されている。しかし、気象災害の防止・軽減のために必要な高い時間空間分解能の観測データの取得はまだ不十分である。特に降水システムの構造に関する観測網の整備は欧米に比べて遅れている。

ウインドプロファイラーレーダーに関しては、気象庁による全国的な観測網が完成して、その連続データを用いた気象現象に関する新たな知見は大きな広がりを見せつつあるところである。一方、ドップラーレーダーによる降水システム内の3次元気流の観測は、プロセス研究の実績がかなりあるものの、ドップラーレーダー網による現業観測には多少時間がかかるかもしれない。ドップラーレーダーやマルチパラメータレーダーに関してもウインドプロファイラーレーダー同様に観測網が充実してデータが蓄積されれば、地球温暖化にともなう雨の降り方の変化に関する知見が得られ、防災にも役立つ観測データが得られると考えられる。

この節では、ドップラーレーダーやマルチパラメー

* 名古屋大学地球水循環研究センター。
uyeda@rain.hyarc.nagoya-u.ac.jp

© 2009 日本気象学会

タレーダーによる観測の最近の進展を紹介し、これらの観測データの活用方法の検討、及び次世代の降水系観測による新しい気象学の展開に関する可能性について議論する材料を提供する。

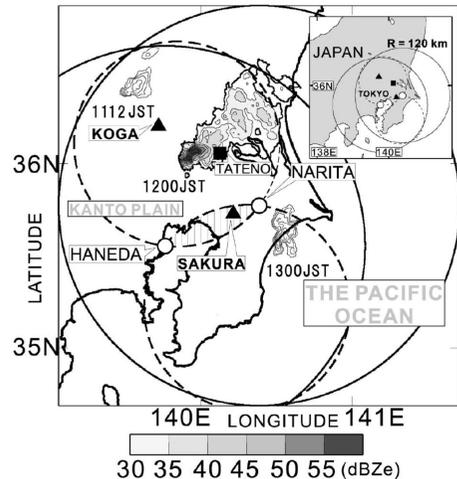
2.1 ドップラーレーダー観測

降水システムの構造を観測するためにはドップラーレーダーが有効である。2台のドップラーレーダーを用いると降水システム内の3次元気流系を観測することができる。国内における2台のドップラーレーダーを用いた観測は、ほとんどが特別な研究プロジェクトの中で行われており、九州における梅雨前線に伴う降水システムの構造や北陸における雪雲の構造に関する研究がなされている(吉崎ほか編 2005)。

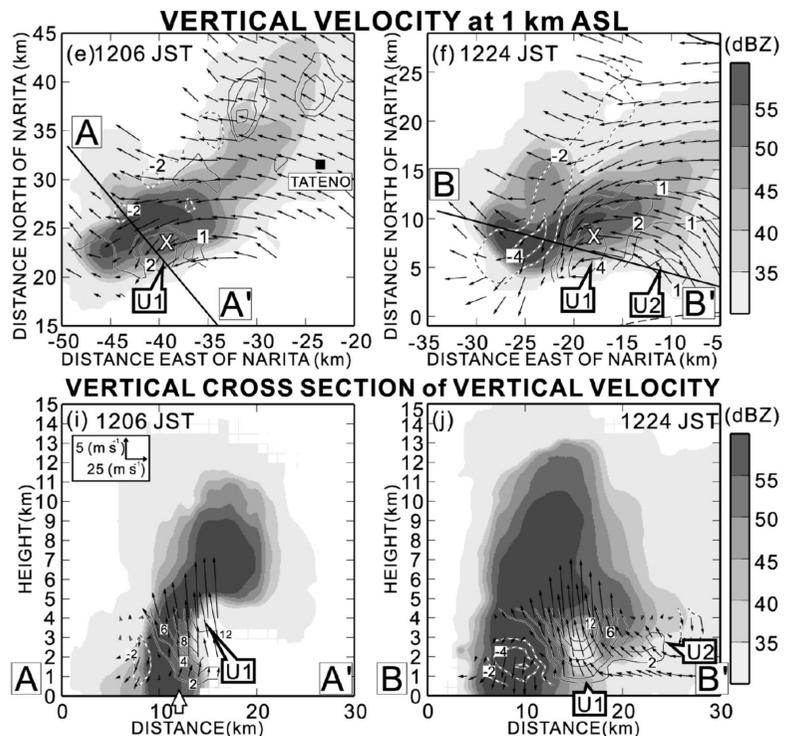
そうした特別観測の場合、特定の期間中にねらった現象が発生するとは限らないが、現業観測では観測範囲内に発生する現象を確実に観測することができる。たとえば羽田空港と成田空港のドップラーレーダーを用いると(第1図)、第2図に示したように、関東平野に雹をもたらした積乱雲の詳細な構造がわかる。

フックエコー(スーパーセル型の積乱雲で見られるかぎ針状になった強い降水エコーの水平分布パターン)やボルト(非常に強い上昇流域に対応して生じるドーム状になった降水エコーの鉛直分布パターン)と対応する上昇流などがわかる。今後、こういった現業用のドップラーレーダーが日本に数多く展開されれば、現象解明に向けた観測研究を研究機関との協力で進めることができる。と期待される。

移動型のドップラーレーダーは、研究対象や他の測器との連携に応じて設置地点を選択して観測を行うことができる。例えば、南西諸島などに持って行くと、台風の眼の構造が崩れる前の様子を見ることができ。出世ほか(2004)の例



第1図 成田と羽田のドップラーレーダー(白丸印)による2000年5月24日1112 JSTと1200 JSTのレーダーエコー(コンターと陰影)。実線および破線の円は、それぞれレーダー観測範囲とデュアルドップラーレーダー解析によって気流分布が得られる領域を示す。Shimizu *et al.* (2008) に拠る。

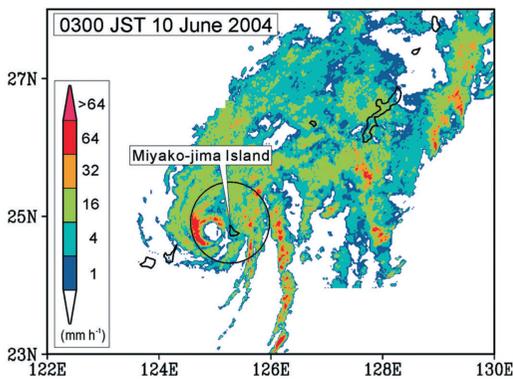


第2図 2000年5月24日1206 JSTと1224 JSTのレーダー反射強度(陰影)と気流ベクトル(Shimizu *et al.* 2008)。実線のコンターは上昇流を破線のコンターは下降流を示す。上段のA-A'とB-B'における鉛直断面を下段に示す。

のように、2004年6月10日に沖縄県宮古島付近を通過した台風(第3図)のアイウォール(眼の壁雲)のレーダー反射強度分布やドップラー速度分布を観測することができる(第4図)。第4図aの弧A-Bに沿うドップラー速度の解析などから、台風の最盛期におけるアイウォールの対称性の良いドップラー速度パターンを用いた渦度の推定が可能になる。

海上における台風の気流構造の観測は情報通信研究機構沖縄亜熱帯計測技術センターのマルチパラメータレーダー(COBRA: CRL[†] Okinawa Bistatic Polarimetric Radar)による観測が行われるようになり、今後の解析が期待されている。また、台風や熱帯低気圧になる前のクラウドクラスターの渦度に関しては、地球環境観測研究センターがパラオに設置したドップラーレーダーによって観測がなされている(山田2006)。さらに、地球観測推進の一環として、インドネシアに地球環境観測研究センターがドップラーレーダーを設置され、日本の援助でバングラデシュ気象局にドップラーレーダーが設置されるなど、ドップラーレーダーによる降水系の降水強度と気流に関する観測についての期待が高まっている。

東アジア全体として見ると、台湾と韓国のドップラーレーダー網は既に完成しており、中国のドップラーレーダー網も急速に整備されている。日本もドッ



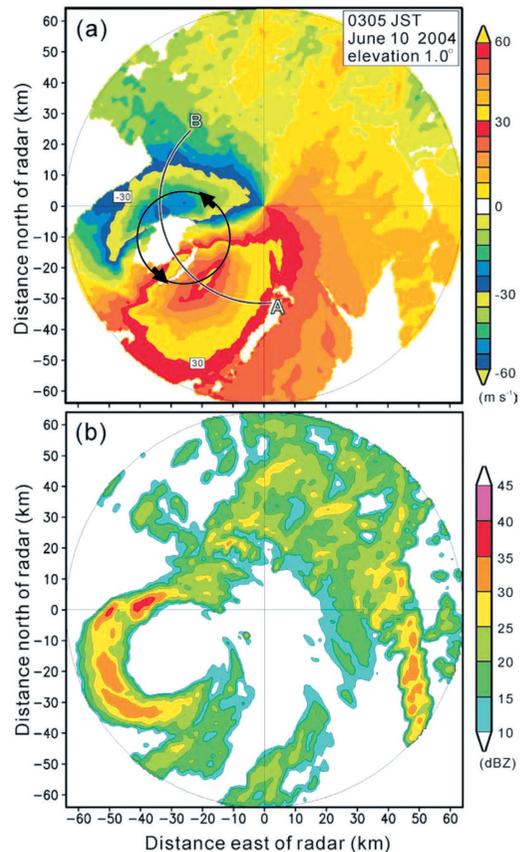
第3図 2004年6月10日0300 JSTの気象庁レーダーによる台風0404号の降水分布(出世ほか2004)。実線の円は、宮古島に設置した名古屋大学地球水循環センターのドップラーレーダーの観測範囲(半径64 km)。

ラーレーダー網の整備を急ぎ、東アジアにおける観測網の充実に対してその貢献が待たれるところである。

2.2 マルチパラメータレーダー観測

降水系の観測においては、ドップラーレーダーの機能だけでは観測できない項目として雨と雪の識別や降水粒子の種類と形状の識別がある。2重偏波(直交2偏波)レーダーによるレーダー反射因子差 Z_{DR} を観測すると、降水粒子の種類を識別できる可能性がある。

レーダー反射因子差 Z_{DR} は以下の式で定義される:



第4図 第3図の実線円に対応する領域における2004年6月10日0305 JSTの仰角1.0度のPPI(Plan Position Indicator)画像(出世ほか2004)。(a)ドップラー速度と(b)反射強度の分布。正のドップラー速度はレーダーに近づく成分を示す。(a)における回転の矢印は、ドップラー速度パターンから推定される気流場の回転を表す。

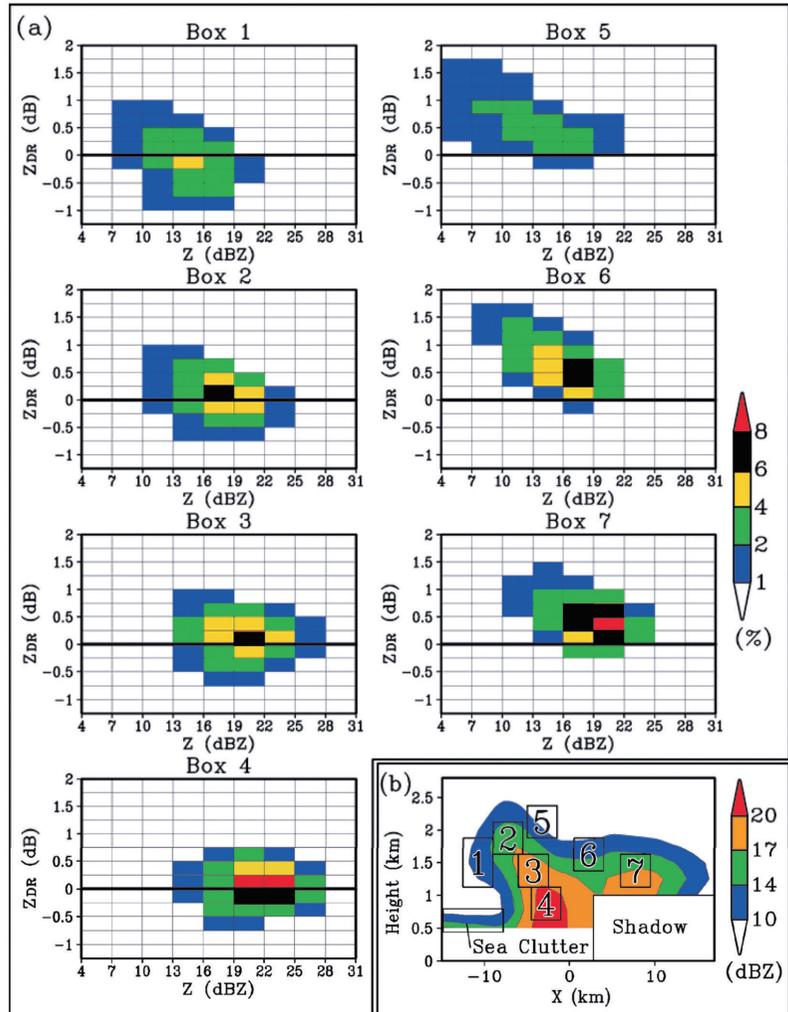
[†] Communications Research Laboratory (通信総合研究所)。

$$Z_{DR} = 10 \log_{10} (Z_{HH} / Z_{VV})$$

ここで、 Z_{HH} (Z_{VV}) は、レーダーにより水平 (垂直) 偏波として射出され、水平 (垂直) 偏波として受信される反射因子を示す。 Z_{DR} の値は dB で表される。水平方向に扁平な降水粒子では Z_{HH} が Z_{VV} より大きくなるために Z_{DR} の値は正になり、形状が球形に近い降水粒子では Z_{HH} と Z_{VV} の比が 1 に近づくので Z_{DR} は 0 に近い値をとる。

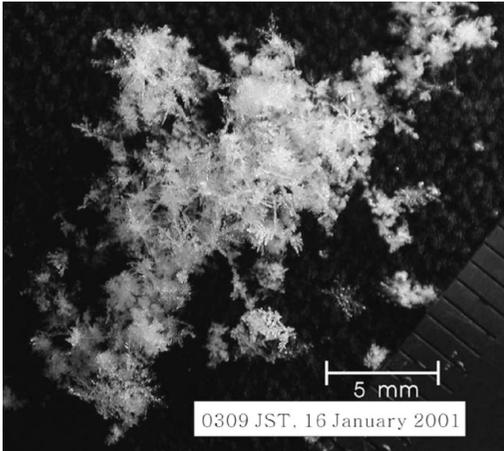
2重偏波レーダーを用いて降雪粒子種類を推定した研究として、Ohigashi and Tsuboki (2005) がある。北陸電力の2重偏波レーダーを用いて降雪雲内の場所ごとの粒子の種類を識別した。第5図に示したように、降雪バンドに直交する方向の鉛直断面図内の四角領域ごとに示した反射強度 (Z (dBZ)) とレーダー反射因子差 (Z_{DR} (dB)) の出現頻度分布をみると、海岸付近の四角領域4では、 Z の値が比較的大きく Z_{DR} の値が0 dB から若干負側に偏り霰の存在を示唆している (粒径が大きく、形状が球形から縦長になる降水粒子の種類を考えると霰が最もよく当てはまる)。また、四角領域7は Z の値が比較的大きく Z_{DR} の値が0.5 dB 付近に集中しており、雪片の存在を示唆している (粒径が大きく、形状が水平方向に扁平になる降水粒子の種類を考えると複数の雪結晶が凝集した雪片が最もよく当てはまる)。四角領域7の下の地上での降水粒子観測ではほとんど雪片 (第6図) であったことが確かめられている。

2重偏波の機能に加えてドップラー速度も同時に観測でき、伝搬位相差変化率 K_{DP} の測定等ができるマルチパラメータレーダーを用いると、降雨強度の正確な測定ができる。通常、レーダーから見て手前に強い降雨域があると、その後方の降雨域からのレーダー反射強度は降雨減衰のために本来得られるはずの強度よりも弱くなってしまふ。伝搬位相差変化率 K_{DP} とは、水平偏波と垂直偏波のそれぞれについてレーダーと対象標的間の往復の位相変化の単位距離あたりの差をいう



第5図 Z - Z_{DR} 分布図。(a) (b) に示される7つの四角領域ごとの、2重偏波レーダーによるレーダー反射強度 Z と反射因子差 Z_{DR} の出現頻度。(b) 降雪バンドの走向に沿って16 km 平均し、2001年1月15日1506 JST から16日0356 JST まで平均したレーダー反射因子の鉛直断面図。0 km の位置が海岸線を示し、図の左側が海上に対応する。Ohigashi and Tsuboki (2005) に拠る。

(単位： $^{\circ}\text{km}^{-1}$)。粒径の大きい雨滴のような扁平な粒子では水平偏波による位相遅れが垂直偏波の場合に比べて大きくなるため、単位距離あたりの偏波間位相差が大きくなる。この雨滴の大きさに伴って偏波の位相がずれる性質を利用して、 K_{DP} から降水強度の推定を



第6図 2001年1月16日0309 JSTにおいて、第5図bの四角領域7の下で採取した雪片の接写写真の例 (Ohigashi and Tsuboki 2005)。

行うことができる。たとえば、防災科学技術研究所がX-バンドのマルチパラメータレーダーを神奈川県に設置して行った観測 (Maki *et al.* 2005) では、反射強度の測定では降雨減衰の影響で降水強度の推定が難しい部分でも、 K_{DP} を用いると降雨強度の測定ができることが示された (第7図)。

名古屋大学地球水循環研究センターでは移動型のX-バンドのマルチパラメータレーダーの試験観測中であり、降水系の3次元気流と降水粒子の観測を組み合わせた新たな観測研究の取り組みが始まっている。

マルチパラメータレーダーを用いた降水粒子の識別と降水強度の定量測定については、現業観測に向けた観測網作りの検討が米国などで始まっており、今後の開発に向けて日本の貢献も大いに期待されるであろう。

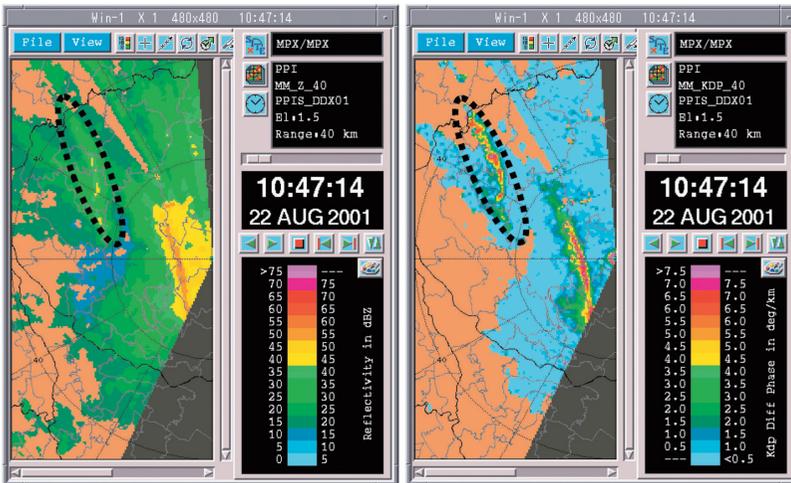
3. 新しい気象学への展望

降水系の構造観測、特に降水系内の気流観測に有効なドップラーレーダーの観測技術は確立されているので、観測網を充実させることにより、気候変動の監視と防災に役立つ観測を同時に行うことができるようになると思われる。ドップラーレーダー観測網を持つ現業機関が観測モードを工夫して気候学の研究にも役

立つデータの蓄積を行うようになると新しい気象学の展望が開けると考えられる。

ドップラーレーダーの機能もあわせ持つマルチパラメータレーダーを用いた観測は、今後しばらくの間、研究機関によるプロセス研究や試験研究が中心になると考えられる。その成果や手法を基盤として、近い将来、降水強度のより正確な定量測定を行うための観測網ができることを期待したい。

ドップラーレーダーによる気流系の観測やマルチパラメータレーダーによる降水粒子の形状の識別は衛星観測で行うことは難しいの



第7図 マルチパラメータレーダーで観測された降雨バンドの反射因子 Z (左) と伝搬位相変化率 K_{DP} (右) の仰角 1.5° のセクターPPI画像、破線の楕円内に注目、 Z はレーダー付近にある強い降雨エコーのために減衰して45 dBZ程度(降雨強度に換算すると20 mm/h程度)であるのに対して、 K_{DP} は 7°km^{-1} に達する値(降雨強度に換算すると100 mm/h)が観測されている。 K_{DP} が降雨減衰の影響を受けない利点を示す。真木氏(防災科学技術研究所)提供。

で、地上リモートセンシング技術の向上に期待したい。降水系に関する地上リモートセンサーによる観測データと衛星観測データを組み合わせ、観測データを数値モデルに同化することによって、現象の理解と降水の短時間予測方法の開発が急速に進むと期待される。観測データの解析方法と同化法の開発については、現状よりもさらに活発な国際協力を進めていく必要がある。

近年は、ドップラーレーダーの観測方法やマルチパラメータレーダーによる降水粒子の識別方法と降水強度測定方法について説明した日本語の教科書(深尾・浜津 2005)が出されるなど、マルチパラメータレーダーを用いた観測研究が普及する素地はできつつあると考えられる。次世代の降水系観測は、今まさに新しい気象学の発展を拓きつつあるといってもよいだろう。

このように降水系の3次元構造の連続観測はレーダーの技術的発展や様々な観測展開により進んだが、降水系の周りの水蒸気の測定は依然として非常に難しい。特に、海上の大気境界層内の水蒸気の鉛直プロファイルの観測は困難である。しばらく、航空機を用いたドロップゾンデ観測などによる基礎的研究が必要であると考えられる。しかし、将来は大気境界層内の水蒸気の鉛直プロファイルと水平分布を連続的に測定するシステムの開発がなされることを期待したい。

4. まとめ

降水系の観測は、新しい観測機器の開発と観測・解析方法の開発によって、次世代の気象学に新たな展開をもたらそうとしている。次世代の降水系の観測では、気候学の研究に使えるデータの蓄積と防災目的に使えるデータの取得を同時に行い、観測データの提供がなされるようになることを期待したい。

膨大な量になる降水系の観測データを他の気象観測データと統合するためには、しっかりしたデータセンターを作ることが必要であると考えられる。データセンターでは、観測データの利用法の開発に貢献する研究者や利用者を対象として、観測データのスムーズな提供の推進が期待される。それと並行して、観測データの同化手法などの技術開発や、観測データを幅広く利用するためのシステムの構築にも期待したい。

参考文献

- 深尾昌一郎, 浜津享助, 2005: 気象と大気のレーダリモートセンシング. 京都大学学術出版会, 479 pp.
- Maki, M., K. Iwanami, R. Misumi, S.-G. Park, H. Moriwaki, K. Maruyama, I. Watabe, D.-I. Lee, M. Jang, H.-K. Kim, V. N. Bringi and H. Uyeda, 2005: Semi-operational rainfall observations with X-band multi-parameter radar. *Atmos. Sci. Lett.*, **6**, 12-18.
- Ohigashi, T. and K. Tsuboki, 2005: Structure and maintenance process of stationary double snowbands along the coastal region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 331-349.
- Shimizu, S., H. Uyeda, Q. Moteki, T. Maesaka, Y. Takaya, K. Akaeda, T. Kato and M. Yoshizaki, 2008: Structure and formation mechanism on the 24 May 2000 supercell-like storm developing in a moist environment over the Kanto Plain, Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2389-2407.
- 出世ゆかり, 内藤大輔, 寺田登与徳, 坪木和久, 2004: 台風アイウォールのドップラー速度パターン. *天気*, **51**, 775-776.
- 山田広幸, 2006: 熱帯西部太平洋上のパラオで観測された台風の“卵”. *月刊海洋*, **38**, 703-708.
- 吉崎正憲, 村上正隆, 加藤輝之 編, 2005: メソ対流系. 気象研究ノート, (208), 386 pp.