

2-6 レーダー・ライダーによるメソスケール気象現象の観測

2-6 Radar and Lidar Observations of Mesoscale Phenomena

岩井宏徳 青木 誠

Hironori IWAI and Makoto AOKI

近年、局地豪雨や竜巻などの局所的で突発的な大気現象による災害が増加傾向にある。情報通信研究機構ではフェーズドアレイ気象レーダーとドップラーライダーを融合させたフェーズドアレイ気象レーダー・ドップラーライダー融合システム (Phased Array Weather Radar and Doppler lidar Fusion System: PANDA) を用い、突発的大気現象の早期捕捉及び予測技術の向上に資する観測技術の研究開発を進めている。本稿では PANDA の構成及び PANDA で観測されたメソスケール気象現象を紹介し、突発的大気現象に対するレーダーとライダーによる融合観測の有用性を示す。

Recently, disasters caused by local and sudden meteorological phenomena such as localized heavy rainfalls and tornadoes are increasing. The National Institute of Information and Communications Technology is promoting research and development of observational technologies to improve early detection and prediction of the local and sudden meteorological phenomena using Phased Array Weather Radar and Doppler lidar Fusion System (PANDA). In this paper, we introduce configuration of the PANDA and mesoscale phenomena observed by the PANDA. We also show that the synergetic use of radars and lidars is useful to observe the local and sudden meteorological phenomena.

1 まえがき

情報通信研究機構 (以下、NICT) では突発的大気現象の把握及び予測技術の向上を目指し、前兆現象の早期捕捉や発達メカニズムの解明に必須な気象パラメータを高時間空間分解能でモニタリングすることを可能とするリモートセンシング技術の研究開発を行っている。近年、空間スケールが数 km (水平 2 ~ 2,000 km のスケールをメソスケールと呼ぶ) 以下で、時間スケールが数分から 1 時間程度である局地的大雨 [1][2] や竜巻 [3][4] などの局所的・突発的な現象による災害が増加傾向にある。そのような現象を引き起こす積乱雲全体をとらえるために、2012 年に革新的な時間・空間分解能を有するフェーズドアレイ気象レーダー (Phased Array Weather Radar : PAWR) が開発された [5]。しかし、積乱雲の外や積乱雲発生前の晴天域には電波の散乱体である雨滴が存在しないため、レーダーで情報を得ることができない。晴天域では、大気中の微粒子 (エアロゾル) や分子を散乱体としてレーザー光により風を計測することができるライダーによる計測が有効であるため、NICT ではドップラーライダーの開発 [6] 及びドップラーライダーを用いた観測

的研究を行っている [7][8]。2010 年 7 月 5 日に発生した板橋豪雨では、NICT のドップラーライダーにより強雨域に流入する大気下層の風をとらえ、その観測データを数値予報モデルにデータ同化することにより豪雨の強さ、位置、空間スケールを再現した [9]。また、2012 年 8 月 17 日に気象研究所の Ku バンドドップラーレーダーで観測された局地的大雨の原因となる大気下層の風の収束を NICT のドップラーライダーで観測することに成功した [10]。

これらの成果を発展させ、NICT では 2014 年 3 月に PAWR とドップラーライダーを融合させた PANDA を NICT 未来 ICT 研究所 (兵庫県神戸市) と沖縄電磁波技術センター (沖縄県恩納村) に設置し、PANDA を用いて突発的大気現象の発生から発達までをとらえ、それらの把握及び予測技術の向上に関する研究を行っている。本稿では PANDA のシステム概要を説明する。次に沖縄の PANDA によるメソスケール気象現象の観測結果を示し、突発的大気現象におけるレーダーとライダーによる融合観測の有用性を示す。

2 PANDA

図1に示すようにPANDAはPAWRとドップラーライダーに加え、その場の気象要素(気温、相対湿度、気圧、風向及び風速)を計測するセンサ群を同じ鉄塔に設置した構成になっている。PAWRは地上高20mのレドーム内に設置されている。128本の導波管スロットアンテナで構成される2m四方の平面アンテナを用い、仰角方向には送受信ビームを電子的に走査し、仰角0度から90度までを瞬時に観測することができる。この平面アンテナを方位角方向に機械的に走査することにより、通常30秒間隔で半径60km以内のドップラー速度やレーダー反射強度をレンジ分解能100m、方位角分解能1.2度で計測することができる。

ドップラーライダーはLeosphere社製のWindcube 400 S [11]であり、地上高17mに設置されている。波長1.54 μm の目に安全なパルス状のレーザー光を大気中に照射し、受信光(散乱光)から光ヘテロダイン検波により視線方向のドップラーシフトを検出するコヒーレント方式のドップラーライダーである。平均出力1.5W、パルス幅400ns、観測可能ドップラー速度 $\pm 30\text{ m/s}$ である。パルス繰り返し周波数は20kHzと10kHzを選択可能で、それぞれ距離分解能75/100mと150/200m、最大観測距離7.2kmと14.4kmに対応する。レーザー光の射出方向を低仰角で固定し、水平方向に走査(plan position indicator: PPI)すること

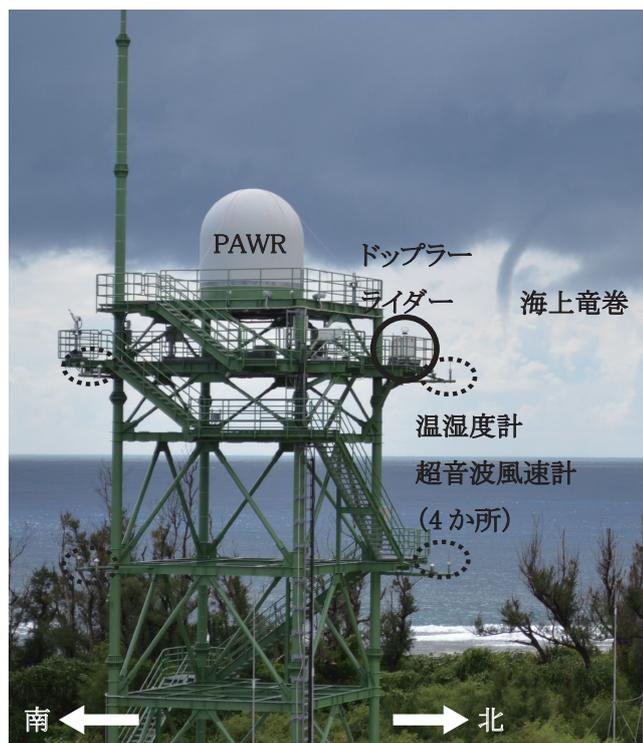


図1 沖縄のPANDAの外観及び2015年8月31日1443JSTに撮影された海上竜巻

により、ドップラー速度の水平分布を計測することができる。また、方位角を固定し、仰角方向にレーザー光を走査(range height indicator)することにより、気流の鉛直構造をとらえることができる。

3 PANDAによるメソスケール気象現象の観測結果

本章では沖縄で発生した海上竜巻とダウンバーストに関するPANDAの観測結果を示す。

3.1 海上竜巻

海上竜巻は海上で発生する竜巻(上昇気流を伴う高速の渦巻き)であり[12]、海面近傍で局地的な突風を発生させる。図1に示すように海上竜巻は積乱雲の雲底から漏斗状に垂れ下がる雲(漏斗雲)により可視化される場合がある。本節では2015年8月31日に沖縄本島中部の東シナ海海上で発生した海上竜巻に関するPANDAの観測結果を示す。この日は秋雨前線が日本列島の太平洋沿岸に停滞しており、広範囲で大気の状態が不安定であった。沖縄本島地方には南から湿潤な空気が流れ込み、昼から夕方にかけて沖縄本島中部の東シナ海海上で積乱雲が次々に発生・発達し、激しい対流性降水が継続した。1443JST(Japan Standard Time)に漏斗雲により可視化された海上竜巻が確認された(図1)。この写真から推定される漏斗雲の直径は30mである。海上竜巻はPAWRから西に約6kmの位置で発生したため、PAWRの分解能(ビーム幅約1度)では海上竜巻本体の渦をとらえることができず、ドップラーライダーでのみ渦をとらえることができた(図2)。海上竜巻発生前(図2(a)-(c))に、北側の降水からの冷氣外出流と南西よりの一般風との境界に時計回りの循環が形成された。時計回りの循環は北東方向に移動しながら拡大し、徐々に循環が強くなった。1438:00JSTには、水平シア不安定により明瞭な時計回りの渦になり(図2(d))、1441:30JSTまで渦の強度を維持しつつ東の方向に移動した(図2(e))。1443:00JST以降は渦の強度が急激に減少した(図2(g),(h))。

一方、PAWRにより海上竜巻の親雲である積乱雲内で時計回りの循環を伴う降水コアを検出した(図3)。ドップラーライダーで時計回りの循環が検出される前からPAWRにより高度1kmに弱い方位角シア(同一レンジ内で2km以上離れていないドップラー速度の局所極大と極小の差(ΔV))を検出した。図3のPAWRの方位角シアとドップラーライダーにより検出された海面近傍の循環の位置関係と時間変化から、海面近傍の循環と上空の積乱雲内の循環が重なり、海

上竜巻が発生したと推測される。高度 1 km の方位角シアの位置はドップラーライダーで検出された循環及び渦（海上竜巻）の位置に対して北西から北北西の方向に水平距離で 700 m から 900 m 離れており、約 40 度程度傾いていることを示している。これは、親雲の北方向の動きと海上竜巻を発生させた上昇流の傾きが関係していると考えられる。アメリカでのフェーズド

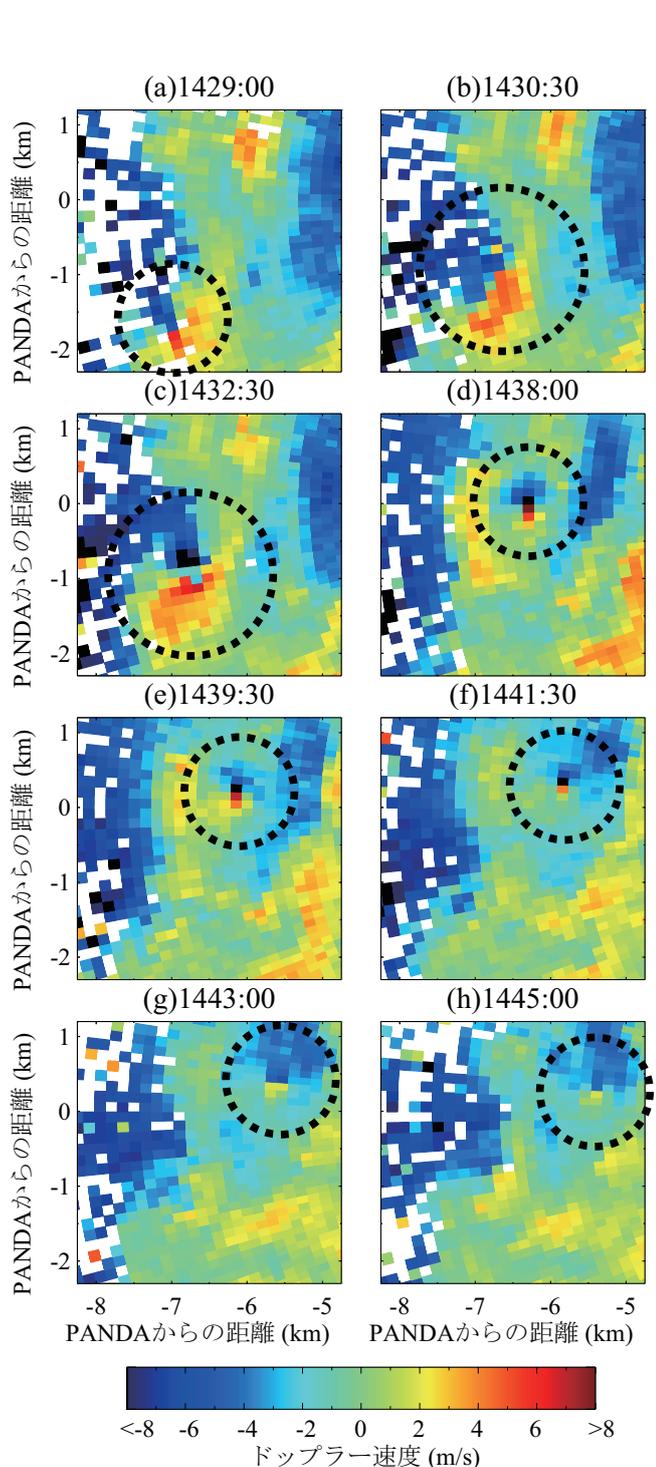


図2 2015年8月31日 (a) 1429:00 JST、(b) 1430:30 JST、(c) 1432:30 JST、(d) 1438:00 JST、(e) 1439:30 JST、(f) 1441:30 JST、(g) 1443:00 JST、(h) 1445:00 JST にドップラーライダーの仰角0度のPPIで観測されたドップラー速度。破線の円は時計回りの循環または渦の位置を示す。

アレイレーダーによる竜巻の観測では、竜巻に関連する渦パターン (tornadic vortex signature : TVS) は成熟期にはより垂直に近い構造になり、TVSの傾きと強度は逆相関を示すことが報告されている [13]。本研究で観測された海上竜巻では、成熟期においても方位角シアは顕著な傾きを示しており、方位角シアの強度

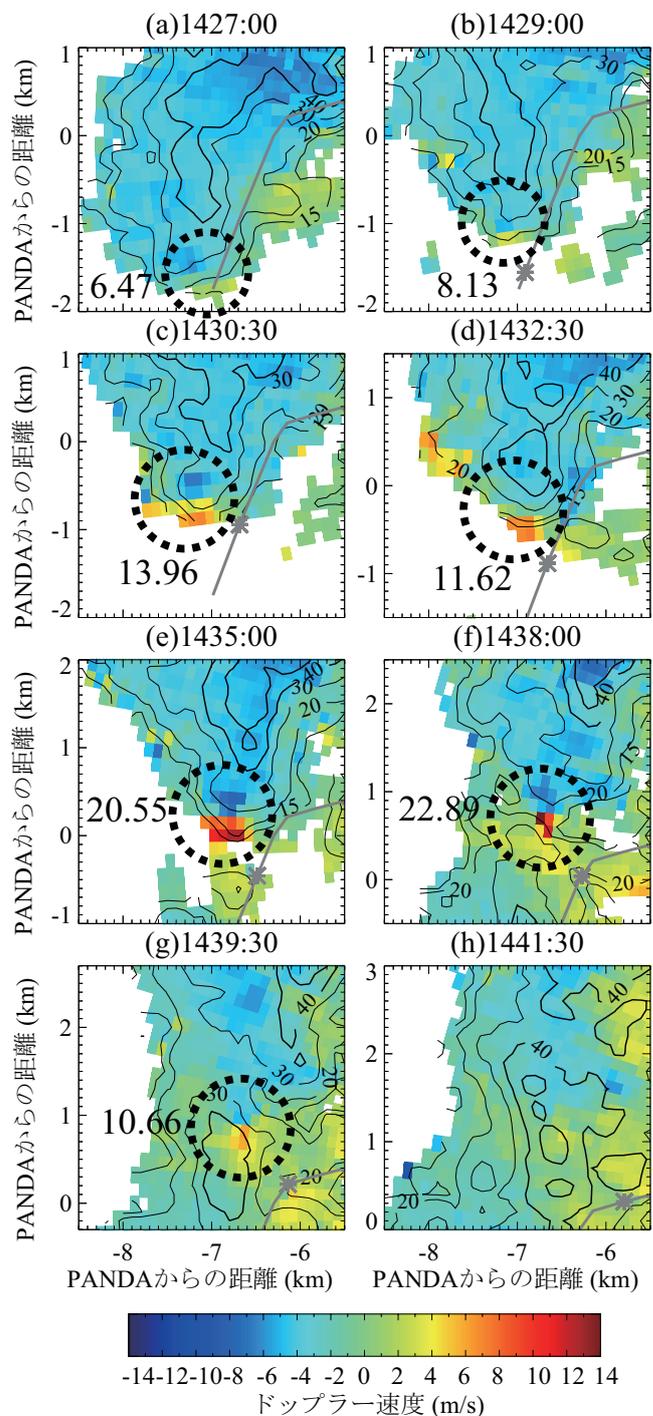


図3 2015年8月31日 (a) 1427:00 JST、(b) 1429:00 JST、(c) 1430:30 JST、(d) 1432:30 JST、(e) 1435:00 JST、(f) 1438:00 JST、(g) 1439:30 JST、(h) 1441:30 JST にPAWRの仰角8.19度のPPIで観測されたドップラー速度(カラー)。黒のコンターはレーダー反射強度を示す。破線の円は方位角シアの位置、円の隣の数値は方位角シアの強度を示す。グレーのラインはドップラーライダーにより観測された海上竜巻の軌跡、アスタリスクは海上竜巻の位置を示す。

2 地上レーダーによる気象現象の観測

が弱い (ΔV が小さい) 原因の1つと考えられる。一方、海上竜巻の消滅前には全観測高度で傾きが更に増大しており、こちらは竜巻に関するこれまでの観測結果と一致する。

3.2 ダウンバースト

ダウンバーストは地上または海上付近で破壊的な風の吹き出し(外出流)を起こす強い下降流である [14]。積乱雲^{あられひょう}内の強い上昇気流により形成された雨滴や霰・雹が上昇気流で支えきれなくなると落下し、その際、摩擦で大気を引きずり下ろすことにより下降気流が発生する。さらに、落下する雨滴や霰・雹の蒸発熱や昇華熱により熱を奪われた大気は周囲より重くなり、下降気流が強められ、地上付近にまで達した場合、強い外出流が発生する。外出流先端(ガストフロント)はウィンドシアを伴い、航空機墜落事故の原因になるため、空港にはダウンバーストの検知用のドップラーレーダーが設置されている。しかし、外出流に雨滴が含まれていない場合は通常のドップラーレーダーでダウンバーストを検知することは難しい。

本節では2016年7月28日に沖縄本島中部の東シナ海海上で発生したダウンバーストに関するPANDAの観測結果を示す。この日、沖縄本島周辺は高気圧に覆われていたが、終日、小規模な積乱雲が発生していた。1605 JSTにPAWRから北北西に11 km、高度3 kmの位置でPAWRにより最初のレーダーエコーが検出された。その後、降水コアは急速に発達し(図4(a)、レーダー反射強度の最大値が6分間で40 dBZ増加)、高度3 kmから5 kmの位置にレーダー反射強度が50 dBZを超える降水コアが形成された(図4(b))。ここで、50 dBZの最高高度をcore top、50 dBZの最低高度をcore baseと定義する。降水コアは

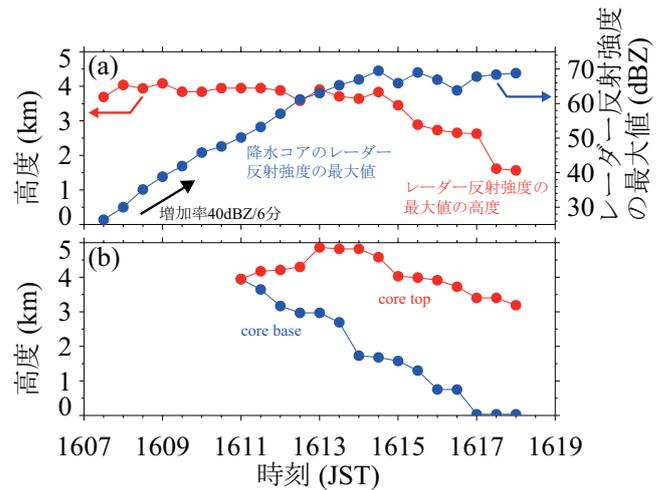


図4 (a) PAWRにより観測された降水コアのレーダー反射強度の最大値及びその高度の時間変化。(b) core topとcore baseの時間変化。

レーダー反射強度の最大値が70 dBZに達した1614:30 JSTに落下を始め、1617:00 JSTにcore baseが海面に達した。ドップラーライダーでは1618:00 JSTから北北西よりの背景風により南に移流しながら同心円状に拡大していくドップラー速度のパターンが観測された(図5(a))。PAWRでは海面近傍の降水コアが存在する領域でドップラー速度の発散パターンをとらえているが、ガストフロントでのドップラー速度は観測できていない(図5(b))。したがって、海面(地表面)近傍のガストフロントの時間・空間変動をとらえるにはドップラーライダーが有効である。一方、ダウンバーストの早期検知の観点からは、降水コアの落下をとらえることができるPAWRが有効である(図4)。このことから、ダウンバーストの早期検知とそれに伴うガストフロントの実況把握にはレーダーとライダーの融合観測が有効である。

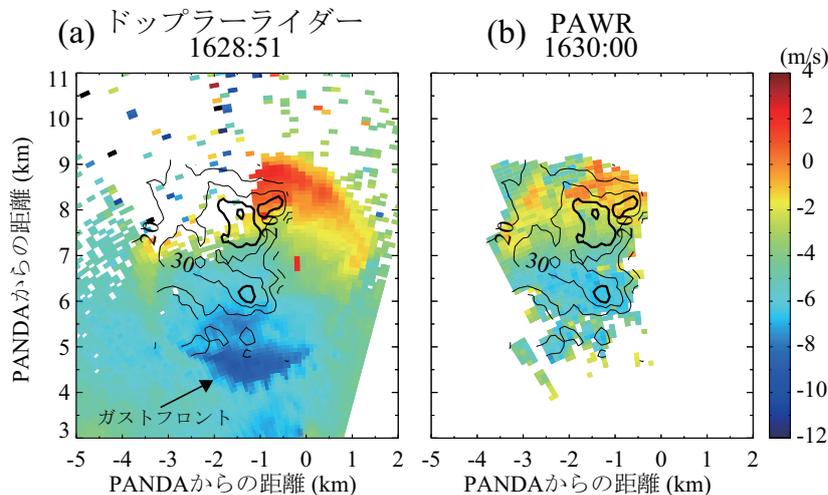


図5 2016年7月28日 (a) 1628:51 JSTにドップラーライダーの仰角0度のPPIで観測されたドップラー速度(カラースケール)、(b) 1630:00 JSTにPAWRの仰角0度で観測されたドップラー速度(カラースケール)。黒のコンターはPAWRの仰角0度でのレーダー反射強度(単位dBZ)を示す。

4 まとめと今後の展望

本稿では沖縄のPANDAによる海上竜巻とダウンバーストの観測結果を示した。PAWRにより海上竜巻やダウンバーストを発生させる積乱雲の内部構造をとらえることが可能である。一方、ドップラーライダーにより海上竜巻本体やダウンバーストに伴うガストフロントの構造をとらえることが可能である。したがって、突発的大気現象の早期検知と実況把握にはレーダーとドップラーライダーの融合観測が有効であると言える。今後は突発的大気現象の観測データと事例研究を積み重ね、機械学習を用いたそれらの自動検知に関する研究も行う予定である。

2017年11月、NICTをはじめとする研究グループが開発したマルチパラメータ・フェーズドアレイ気象レーダー(MP-PAWR)が埼玉大学の建物に設置され、観測を開始した。NICT本部(東京都小金井市)に設置されているNICTが開発したドップラーライダー、さらには、地デジ放送波を使った水蒸気量推定、ウィンドプロファイラ、雲レーダーを用いた融合観測を行い、首都圏で発生する豪雨・竜巻など突発的大気現象の早期探知に関する観測的研究を実施する。

【参考文献】

- 1 T. Kawabata, H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda, and Y. Wakazuki, "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, vol.85, no.3, pp.255-276, 2007.
- 2 A. Kato and M. Maki, "Localized heavy rainfall near Zoshigaya, Tokyo, Japan on 5 August 2008 observed by X-band polarimetric radar -preliminary analysis-", SOLA, vol.5, pp.89-92, 2009.
- 3 H. Yamauchi, H. Niino, O. Suzuki, Y. Syoji, E. Sato, and W. Mashiko, "Vertical structure of the Tsukuba F3 tornado on 6 May 2012 as revealed by a polarimetric radar," 36th Conf. on Radar Meteorology, Breckenridge, CO, Amer. Meteor. Soc., 320, 2013.
- 4 F. Mashiko, "A Numerical Study of the 6 May 2012 Tsukuba City Supercell Tornado. Part I: Vorticity Sources of Low-Level and Midlevel Mesocyclones," Mon. Wea. Rev., vol.144, no.3, pp.1069-1092, March 2016.
- 5 F. Mizutani, T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh, and T. Iguchi, "Fast-Scanning Phased-Array Weather Radar with Angular Imaging Technique," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.56, no.5, pp.2664-2673, May 2018.
- 6 S. Ishii, K. Mizutani, H. Fukuoka, T. Ishikawa, P. Baron, H. Iwai, T. Aoki, T. Itabe, A. Sato, and K. Asai, "Coherent 2 μ m differential absorption and wind lidar with conductively-cooled laser and two-axis scanning device," Appl. Opt., vol.49, no.10, pp.1809-1817, April 2010.
- 7 H. Iwai, S. Ishii, N. Tsunematsu, K. Mizutani, Y. Murayama, T. Itabe, I. Yamada, N. Matayoshi, D. Matsushima, W. Sha, T. Yamazaki, and T. Iwasaki, "Dual-Doppler lidar observation of horizontal convective rolls and near-surface streaks," Geophys. Res. Lett., vol.35, no.14, pp. L14808-1-5, July 2008.
- 8 H. Iwai, Y. Murayama, S. Ishii, K. Mizutani, Y. Ohno, and T. Hashiguchi, "Strong updraft at a sea-breeze front and associated vertical transport of near-surface dense aerosol observed by Doppler lidar and ceilometer," Bound.-Layer Meteor., vol.141, no.1, pp.117-142, Oct. 2011.
- 9 T. Kawabata, H. Iwai, H. Seko, Y. Shoji, K. Saito, S. Ishii, and K. Mizutani, "Cloud-resolving 4D-Var assimilation of Doppler wind lidar

data on a meso-gamma scale convective system," Mon. Wea. Rev., vol.142, no.12, pp.4484-4498, Dec. 2014.

- 10 H. Iwai, S. Ishii, S. Kawamura, E. Sato, and K. Kusunoki, "Case study on convection initiation associated with an isolated convective storm developed over flat terrain during TOMACS," J. Meteor. Soc. Japan, vol.96A, pp.3-23, Feb. 2018.
- 11 J.-P. Cariou, B. Augere, and M. Valla, "Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology," C. R. Phys., vol.7, no.2, pp.213-223, March 2006.
- 12 T. Glickman, "Glossary of Meteorology," 2nd ed. Amer. Meteor. Soc., 2000.
- 13 M. M. French, H. B. Bluestein, I. PopStefanija, C. Baldi, and R. T. Bluth, "Mobile, phased-array, Doppler radar observations of tornadoes at X band," Mon. Wea. Rev., vol.142, no.3, pp.1010-1036, March 2014.
- 14 T. T. Fujita, "The Downburst," SMPR 210, The University of Chicago, 1985.



岩井宏徳 (いらい ひろのり)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士(理学)
電波・光リモートセンシング、
メソスケール気象



青木 誠 (あおき まこと)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究員
博士(工学)
ライダー