

2. 防災のための次世代の観測技術

鈴木 修*

1. はじめに

防災のための観測は、過去及び現在の状況の的確な把握や、未来を予測するため（数値予報、ナウキャスト）に行われる。そのために、人工衛星からのリモートセンシング、地上からのリモートセンシング、直接観測としての地上気象観測、高層観測などが行われている。

ここでは、現在、研究や技術開発が進んでおり、近い将来に実現される可能性の高い観測技術を中心に記述する。ただし、この報告中では、「観測技術」はハードウェア的なものだけでなく、プロダクトそのものやデータの利活用に関する技術も含む概念としている。

2. 衛星リモートセンシング

人工衛星に搭載した種々のセンサーを用いて大気や地表の観測を行う技術は、現在の数値予報の精度を大幅に向上させている。衛星リモートセンシングの動向と将来の展望については、TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ (2017) にまとめられている。衛星リモートセンシングでは、計画から運用までに長い期間とコストがかかることは大きな特徴である。

2.1 静止気象衛星

2015、16年にひまわり 8、9号が運用を開始した。これらの2台により、今後2029年頃までの運用が予定されている。現在、水平解像度最大1 km (可視)、高頻度観測は2.5分間隔 (日本付近) となるなど、気象レーダーに匹敵する高い水平・時間的分解能と世界的にも最先端のセンサーを有している。今後、現行のシ

ステムの利点を生かし、24時間の連続観測のデータの数値予報モデルへの同化や積乱雲の発達の監視のためのプロダクトなどの様々な応用と開発が進められていくこととなる。ひまわりなどの静止気象衛星は国際的な協力のもと、WMO の WIGOS (WMO Integrated Global Observing System) として推奨するスペック (最新は2025年の目標) に基づいて計画されている。推奨センサーとして、高性能の多周波イメージャ、ハイパースペクトル赤外サウンダ、光学的雷センサーがあり、搭載していない後者2つを含め、次期のひまわりのスペックの検討の時期も近づいている。

2.2 静止気象衛星以外の地球観測衛星

重要なものとして、多数の衛星を統合して使う、コンステレーションがある。たとえば、レーダーを搭載した GPM の主衛星と、GPM 計画に参加する各国・機関による複数のコンステレーション衛星のマイクロ放射計データなどを基に、GSMaP と呼ばれる全球降水分布が得られている (Okamoto *et al.* 2005; Kubota *et al.* 2007など)。全球降水分布のデータを用いた数値予報モデルのデータ同化や、十分に気象レーダーがカバーしていない領域における防災での利用なども期待される。

3. 電磁波を用いた地上からのリモートセンシング

電磁波が大気中の降水粒子やエアロゾル等により反射・散乱されることを利用した観測技術がある。ここでは、地上に設置した装置である気象レーダーとライダーについて説明する。

3.1 二重偏波レーダー

我が国の気象レーダーは、ドップラーレーダーから二重偏波レーダーへの移行途中にある。ハードウェア的には、未来というよりは、現在の観測技術といえる。国土交通省が Xバンドで現業展開している

* 気象庁気象研究所。
osuzuki@mri-jma.go.jp
© 2019 日本気象学会

XRAIN は、大都市圏や過去に水害があった地域を中心に38基で構成された二重偏波レーダー網である。2008年に頻発した神戸市都賀川などでの局地的大雨による事故等を受け、2008年から整備が始まり、水平解像度250m、更新間隔1分のデータ配信が可能となっている。また、現在、国土交通省ではCバンドのレーダー雨量計を二重偏波レーダーに更新中である。また、気象庁でも、空港気象ドップラーレーダーを2016年度から二重偏波化し、一般レーダーでも2019年度の東京レーダーから順次、更新していく予定としている。

二重偏波化により、降水強度や雨水量等の推定精度向上、降水粒子の判別などが期待でき、数値予報モデルへの同化、実況監視・ナウキャストの精度向上が近未来に期待される。

3.2 フェーズドアレイレーダー

複数の小さなアンテナをアレイ状に配置し、電波の位相制御によるデジタルビームフォーミング(DBF)技術を用いて、機械的走査では不可能な高速スキャンを可能とするのがフェーズドアレイレーダーである。実現方式には大別して2つあり、細くビーム状に絞った電波(ペンシルビーム)を用いて3次元的に高速スキャンするものと、スキャンは2次元であるが、扇状に広がった電波(ファンビーム)を放射し、受信時にDBF技術を用いて多数のペンシルビームと等価なデータを一気に取得するものである。現在、前者は米国において航空管制や気象観測などの様々な機能をひとつのレーダーで実現するマルチファンクションフェーズドアレイレーダーとして研究開発が進められている。また、後者の典型的なものとしては、情報通信研究機構などが中心となって開発したXバンドのMP-PAWR(二重偏波フェーズドアレイ気象レーダー)や既に複数の研究機関等で運用されている単偏波のXバンドフェーズドアレイレーダーがある。

高速スキャンによる時間的空間的に稠密な観測は、急速に発達・衰弱する積乱雲などの的確な把握に必要であると同時に、二重偏波機能がある場合には降水強度の測定精度が高いという利点もあり、将来の気象レーダーとして大きな期待がある。現時点では、研究や実用性の評価などで使われているが、複雑な構成を反映し、実用化する場合には技術面に加え、コスト面などの課題がある。

3.3 ライダー(レーザーレーダー)

ライダーとはレーザー光を用いたレーダーであり、エアロゾルによる反射を利用するため、レーダーと異なり、晴天下の観測に適している。ドップラー機能を有するシステムは、研究だけでなく、国内の3空港においてウィンドシアア検出のために現業利用されている(気象庁2017)。観測範囲の狭さなどもあり、現時点で、数値予報等では用いられてはいない。しかし、Kawabata *et al.* (2014)は、積乱雲発生前のドップラーライダー観測データの同化により、積乱雲の発生予測が向上することを示している。

また、水蒸気分布を鉛直あるいは3次元的に観測できる水蒸気ライダーへの期待も大きい。水蒸気の測定に利用されるライダーの方式には、レーザー光を受けた分子が固有の異なる周波数を放射するというラマン散乱を利用したラマンライダー、異なる周波数のレーザー光に対して分子による吸収の強さの周波数により異なることを利用したDIAL(差分吸収ライダー)があり、実用化を視野に、研究観測も行われている。

4. 電波遅延を用いた水蒸気の観測技術

大気中の水蒸気は、降水の原料となるだけでなく、凝結や凝固などを通して空気を加熱し上昇流をもたらすことにより、蒸発や昇華を通して空気を冷却して下降流をもたらすことにより、対流雲の発生・維持・衰弱に大きな影響を与える。近年、大気中の水蒸気による電波の遅延を利用した複数の技術について、研究や実用化が進められている。

4.1 GNSSによる可降水量等の観測

測位衛星であるGPSの電波を用いて受信機上空の可降水量を推定する技術、掩蔽観測により上層の水蒸気鉛直分布を推定する技術などが実用化されている。得られたデータは、現業的な数値予報モデルで利用されその精度向上に寄与している。

米国のGPSを含めた、各国・地域による測位衛星(まとめて、GNSS:Global Navigation Satellite Systemと呼ばれる)の数は増加しており、精度の向上や従来は難しいとされた船舶、海上パイなどを用いた海上での観測も可能となりつつある(Shoji *et al.* 2016)。なお、GPS等のGNSSも第2節で触れた衛星コンステレーションの典型例である。

衛星の数の増加に加え、今後、受信器の高密度な展開が可能となれば、理論的にはトモグラフィーなどの技術を用いたり、視線方向の遅延量をそのまま利用し

たりすることにより、鉛直積算量だけでなく、水蒸気の水平分布や3次元的な把握を可能とする技術が発展する可能性がある。

4.2 レーダーや地デジの電波を用いた地表付近の観測

レーダーや地上デジタルテレビ放送（地デジ）の電波伝播を利用し、地表付近の水蒸気量の推定が可能である。気象レーダーの電波が鉄塔などの地上物により反射されることを利用するもの（Fabry 2014）、地デジの電波を利用するもの（Kawamura *et al.* 2017）があり、前者ではレーダーと地上の反射物の間の、後者ではアンテナと測定器間などの水蒸気量の積算値が推定できる。得られたデータは、地上気象観測結果と整合性も確認されている。データは区間の積算値であるが、レーダーであれば建物や鉄塔からの反射、地デジでは放送用アンテナと多数の測定器を配置することなどにより、電波の通過する地上付近の水蒸気量分布が推定可能である。地デジの場合、ソフトウェア無線の技術を用いた小型で安価な装置が開発されており、連続的に水蒸気量の観測ができていく（Kawamura *et al.* 2017）。どちらも、新たな送信機は不要であり、コストパフォーマンス的に優れているといえる。従来のGNSS可降水量やマイクロ波放射計による水蒸気量観測が、主として鉛直方向に積算したデータを与えるのに対し、最も水蒸気の多い地表付近の水平方向のデータが得られることから、予報精度向上への寄与が期待される。

5. その他の技術

センサーとしては、従来型あるいはその延長といえるが、展開の密度、移動体への搭載などにより、従来は得られなかった観測を可能とするものもある。高密度に展開した地上気象観測装置では竜巻等突風現象の検知の可能性を示す結果も報告されている（Inoue *et al.* 2011など）。また、近年のIoT技術とビッグデータ解析の発展は、車載機器やスマートフォン、あるいは、除雪のための降雪センサーなどを、天候や気象要素の変化などのデータを取り出すのに利用するというアイデアもある。米国などで行われている水蒸気センサーの航空機搭載の試みや、風船の代わりにドローンを用いた上空の気象観測などについては、技術的なハードルは高くはない。

また、近年のAIを用いた画像処理技術の発展により、従来なら目視観測でなければ得られなかった天候

や雲の高さや形態、地上の状態などの情報を、数多くの監視カメラ等から抽出できるようになれば、それらを防災のための情報源に使えるようになる可能性もある。たとえば、竜巻に対する防災情報として現在利用されている米国のスポッターのレポートや我が国での目撃情報を、映像情報+AIによる解析結果が代替していく可能性も十分考えられる。

6. おわりに

次世代の観測技術の候補と考えられる技術を簡単に紹介した。技術的に研究段階にあるもの、技術的な問題は少ないがそれを実利用可能とするには乗り越えるべき現実的課題があるもの、データ利用は可能となりつつあるがそのデータを防災に活かすためにさらなる研究開発が必要なものなど、さまざまである。また、想定もしていなかった新たな原理に基づく観測技術の登場も考えられる。今後も、各種のセンサーに関わる技術開発に加え、データの利活用技術などの研究の進展が不可欠であり、気象学会を始めとする理学的・工学的分野には大いに期待したい。

一方、観測技術が実際に導入されるためには、その有効性やコストなどについて、最終的なステークホルダーである国民に対し説明責任を果たすことも、強く求められる。新たな観測システムの導入や配備には、一般に長い時間と人的・予算的な大きなコストが予想される。エビデンスに基づく政策決定という大きな流れのもと、社会に対して、導入・維持を行う観測システムの費用対効果を定量的に示すための観測システム実験（OSE）や観測システムシミュレーション実験（OSSE）といったアプローチや社会・経済学的な研究・調査も重要であろう。

また、過去のオリンピックで行われたWMOのWWRPのような実証実験・技術のデモンストレーション（斉藤ほか 2010など）や、AI技術や統計的手法を駆使した分析的研究にも期待したい。たとえば、Simmons and Sutter (2005) は、米国の現業ドップラーレーダー網（NEXRAD）について竜巻警報や竜巻の被害者に対するインパクトを統計的に分析し、死傷者が40～45%減少させる効果があったと推定している。

未来の観測技術は、ここで述べたような新たに開発・導入されるものだけで構成されるのではなく、既存の観測技術（正確にはその発展形も含めたもの）と統合されたものとなる。既存の観測技術の高度化と両

者のデータを統合して利活用することに関する研究開発の重要性について、最後に強調しておきたい。

参 考 文 献

- Fabry, F., 2004: Meteorological value of ground target measurements by radar. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **21**, 591-604.
- Inoue, H. Y., K. Kusunoki, W. Kato, H. Suzuki, T. Imai, T. Takemi, K. Bessho, M. Nakazato, S. Hoshino, W. Mashiko, S. Hayashi, T. Fukuhara, T. Shibata, H. Yamauchi and O. Suzuki, 2011: Finescale Doppler radar observation of a tornado and low-level mesocyclones within a winter storm in the Japan Sea coastal region. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 351-369.
- Kawabata, T., H. Iwai, H. Seko, Y. Shoji, K. Saito, S. Ishii and K. Mizutani, 2014: Impact of Doppler wind lidar assimilation on a heavy rainfall forecast at a meso-gamma scale. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 4484-4498.
- Kawamura, S. *et al.*, 2017: Water vapor estimation using digital terrestrial broadcasting waves. *Radio Sci.*, **52**, 367-377.
- 気象庁, 2017: 気象庁ガイドブック2017. 気象庁.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y. N. Takayabu, K. Nakagawa, K. Iwanami, T. Ushio, M. Kachi and K. Okamoto, 2007: Global precipitation map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP Project: Production and validation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. **45**, No. **7**, 2259-2275.
- Okamoto, K., T. Iguchi, N. Takahashi, K. Iwanami and T. Ushio, 2005: The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project. 25th IGARSS Proceedings, 3414-3416.
- 斉藤和雄, 國井 勝, 原 昌弘, 瀬古 弘, 原 旅人, 山口宗彦, 三好建正, 黄偉健, 2010: WWRP 北京オリンピック2008予報実証/研究開発プロジェクト. 気象研究所技術報告第62号, 気象研究所.
- Shoji, Y., K. Sato, M. Yabuki and T. Tsuda, 2016: PWV retrieval over the ocean using shipborne GNSS receivers with MADOCA real-time orbits. *SOLA*, **12**, 265-271.
- Simmons, K. M. and D. Sutter, 2005: WSR-88D radar, tornado warnings, and tornado casualties. *Wea. Forecasting*, **20**, 301-310.
- TF 地球科学研究高度化ワーキンググループ編, 2017: 地球観測の将来構想に関わる世界動向の分析. 気象研究ノート, (234), 77pp.