

降水観測の時空間解像度向上への技術的貢献

—2020年度堀内賞受賞記念講演—

牛 尾 知 雄*

1. はじめに

この度は、栄えある堀内賞を頂き大変光栄に思うと共に、大変感謝致しております。今回の受賞は、フェーズドアレイ気象レーダの研究開発および衛星からの全球降水マップのアルゴリズム開発の2つの成果が認められたものと思います。何れも、私単独ではなし得なかったものであり、関係者の大変な努力と協力があったことだと思います。その意味で、この2つのプロジェクトに関わる、ここでは書ききれない方々にまずは、深く感謝申し上げたいと思います。

この2つの研究成果は、私が30代初めから40代にかけての成果であり、まさに研究者として最も時間的にも体力的にも恵まれた年齢での結果だったと思います。また、何れの研究内容も学部学生、大学院生そしてポストドク時代で行っていた研究内容とは異なる内容となっています。本稿では、こうした研究を手掛けることになった経緯も含めて、特に研究初期を振り返りながら記述したいと思います。

2. フェーズドアレイ気象レーダ

私は、大阪大学工学部電力工学の研究室の出身であり、雷放電に関する研究で学位を取得しました。雷放電から放射される電磁波の放射源の位置標定を行っていたのですが、これがきっかけで、衛星からの雷放電の位置標定装置を学会で知ることになりました。これは、LIS (Lightning Imaging Sensor) と呼ばれるセン

サーで、日米共同プロジェクトであった熱帯降雨観測衛星 (TRMM) に搭載されていました。こうしたことが縁で、その開発元で、LIS のグループを率いていた Hugh Christian 博士 (当時 NASA/MSFC) の下でポストドクそして、TRMM 計画の中心となって活躍されていた岡本謙一先生 (1993年度堀内賞受賞) の大阪府立大への赴任に伴って、助手として採用を頂きました。このときに、レーダシステムを基礎から学ぶことができました。丁度、研究の矛先を雷放電から他にも向けてみたいと考えていたこともあり、このとき、自分の研究テーマとして研究し始めたのが、高速スキャンニングのレーダでした。当時は、ゲリラ豪雨という社会用語もなく、高速スキャンニングの重要性はあまり認識されておらず、むしろ偏波レーダの方に多くの関心が寄せられていたと思います。このような研究を志向するのに、参考にしたのがニューメキシコ工科大の Marx Brook らによって1970年代に開発されたノイズレーダ (通称 Red Ball Radar) (Krehbiel and Brook 1979) であり、その情報を与えて頂いたのが指導教官でもあった河崎善一郎先生でした。これを現代のデジタル技術で再訪し、より洗練されたレーダシステムとして復活できないかと考え、それが幸運にも総務省 SCOPE という予算につながりました。1分で3次元走査を終えることができる広帯域レーダ (Mega *et al.* 2007; Yoshikawa *et al.* 2010) というレーダを学生と共に手作りで作りました。空間分解能が数メートルという実に極端なスペックでしたが、このレーダを用いて取得したデータは、どのレーダより高分解能な詳細な降雨の構造を示し、上空の雨が落下してくる様子が手にとるようにわかりました。そして、様々な方から面白いねと好評を頂きました。この時の仕事を、高く評価して頂いた方の中に、京都大の故深尾昌一郎先生

* 大阪大学大学院工学研究科。
ushio@eei.eng.osaka-u.ac.jp

—2022年3月28日受領—
—2022年6月2日受理—

(1988年度堀内賞受賞)がおられ、気象学会において多くの聴衆の中、大きな声で「大変面白い、この研究を続けて」と言って頂いたことは大きな励みになりました。また、当時 NICT におられた井口俊夫博士 (2015年度堀内賞受賞)にも、高く評価して頂きました。こうしたことが契機となり、これがまた運良く NICT の委託研究に井口さんの尽力もあって発展することとなり、スタートしたのがフェーズドアレイ気象レーダ (Yoshikawa *et al.* 2013; Ushio *et al.* 2015; Mizutani *et al.* 2018) の研究開発でした。これは、(株) 東芝との共同開発で、非常に多くの時間と労力を費やして開発されました。この時には、大阪府立大学から大阪大学に大学を移っていましたが、毎月のように東芝小向工場と阪大の間を、お互いが行き来し、非常に多くの議論と検討を行ったことを覚えています。この時に、研

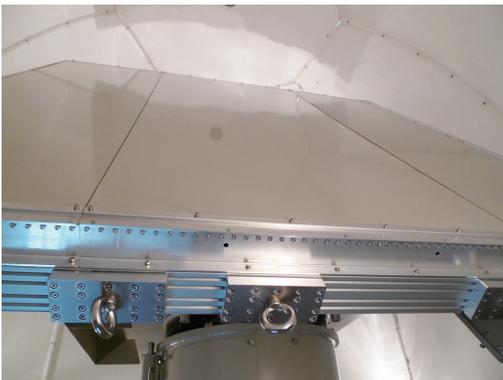
究者仲間として、また仕事のパートナーとして多くの時間を過ごしたのが、水谷文彦さんであり、またどういふ縁か阪大の博士後期課程で机を並べた和田将一博士でした。そして、博士後期課程の学生として獅子奮迅の働きをしてくれたのが、吉川栄一君 (現、JAXA) でした。こうして振り返ると、研究者とはいえ、人の繋がりや信頼関係は、研究する上で、重要な要素であると思わざるを得ません。このレーダは、2012年5月に完成し、大阪大学吹田キャンパスの私の居室のあった電気系棟の屋上に設置されました。第1図にその外観図を、第2図にアンテナ部を示します。第2図に示されているように、アンテナ部は従来のパラボラタイプの形状とは異なり、平面状の形をしています。このパネルの下に隠れていますが、導波管スロットアンテナと呼ばれるアンテナが128本並んでおり、それらが一体となり一つのレーダアンテナとして動作します。

完成してからは、多くの新聞やメディアで取り上げられることとなり、これは当初ほとんど予想していなかったことで、多いに驚かされました。中でも嬉しかったことは、中学校理科用の文部科学省検定済教科書に本研究結果が掲載されたことでした。また、データ解析を行った当時博士後期課程の Wu 君 (現、岐阜大) が、米国地球物理学会 (AGU) の Student Award を受賞したり、Research Spotlight (Wu *et al.* 2013) として取り上げられたりもしました。

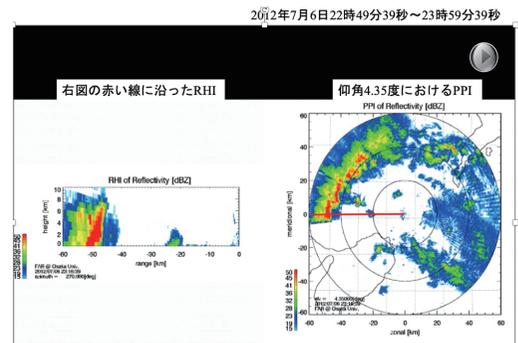
当時修士課程の学生が徹夜で図にしてくれた、このレーダが設置されて観測された初めての豪雨の図を第3図に示します。紙面のため、アニメーションでご紹介出来ないのが残念ですが、豪雨の3次元構造が良く捉えられており、そして30秒毎の時間分解能によって、降水の盛衰発達の様子が手に取るように分かりま



第1図 大阪大学吹田キャンパス電気系棟屋上に設置されたフェーズドアレイ気象レーダの外観。



第2図 フェーズドアレイ気象レーダのアンテナ部の写真。



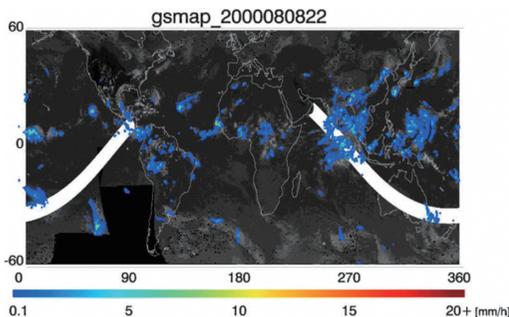
第3図 初めてフェーズドアレイ気象レーダにより観測された降雨の一例。

した。これ以降観測されるデータ全てが極めて印象的で、見えないものが見えてくるということによって科学がそして社会が発展することが実感されました。このようなデータが契機となり、大阪府との実証実験や2重偏波型フェーズドアレイ気象レーダの開発に繋がっていくこととなります。余りに多くの事が、しかも矢継ぎ早に起こりましたので、全てを書ききれませんが、一言で言うと、駆け抜けたという表現が一番ぴったりかもしれません。

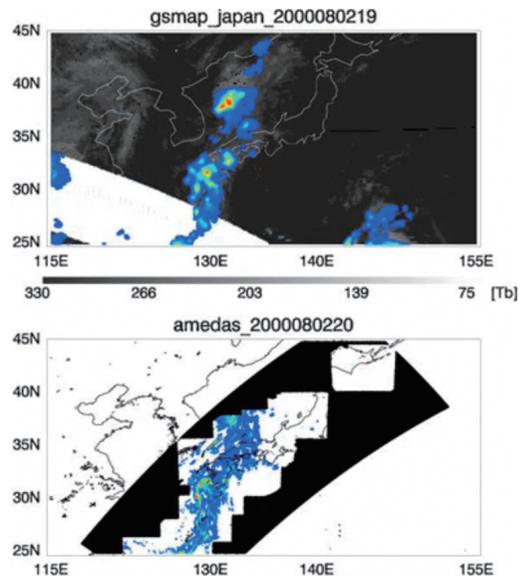
3. 衛星からの高分解能全球降水マップアルゴリズム

一方、大阪府立大学で注力したもう一つの研究が、GSMaPの研究開発でした。TRMMの時代からGPMの時代に移ろうと議論が行われていた時期で、JST/CRESTのProjectが、岡本謙一先生を代表に立ち上がることとなりました。これまで書いてきましたように、私はもともと雷放電に関する研究で学位を取得した研究者で、降雨のことはあまり良く分かっていませんでした。雷放電ばかりでなく、少し研究の矛先を変えてみたいと思っていたところでしたので、こうしたプログラムが立ち上がったのは、丁度良いきっかけだったと思います。GSMaPでは、複数のマイクロ波放射計を中心に、全球の降水マップを作成することが目標で、NICTやJAXA等からの多くの優秀な中堅研究者が参加される中、私に課せられた役割は、衛星データを統合して、降水マップを合成することで、各々のマイクロ波放射計を重ね合わせるだけでは、あまり面白みが無く、また、NASAで行われていたGPCP (Adler *et al.* 2003) と同様なアプローチでは、オリジナリティが出せないと考え、何か良い別のアプローチはないかと思っていました。これも運良

く、GSMaPの会合の後に新幹線で大阪に帰る途中、座席の前に漂っていたタバコの煙が時間と共に流れていく様(当時は、喫煙車があり、少し空く傾向にありました。私は喫煙者ではありません。念の為)を眺めているときに、それが雲のように見え、時間軸方向への議論が余りというよりは全くなされていなくことに気がきました。低軌道衛星搭載マイクロ波放射計によって観測された降雨域が、再度、観測されるまでの間、煙のように漂っている雲画像でもって補完したら良いではないか。そして、それは気象レーダデータによるナウキャスト手法を用いることができると直ぐに発想が繋がりました。時間が止まったかのような感覚を今でも覚えています。しかし、こうしたことを思いついたとしてもあまりというか全然自信は無く、伝手を頼っては何人かのこの分野の大御所と思われる方にもアイデアをお話させて頂き教えを乞おうとしましたが、何故か皆否定的でした。ダメかと思いましたが、当時このプロジェクトに多大なる時間と労力を費やしており、何らかのオリジナリティを自分の担当の研究に入れなくては、研究者としてのキャリアが終わってしまうという思いで切羽詰まっていたこともあり、このアイデアに拘りました。そこで、あまり大学の業務に影響の無い比較的閑散としていたお盆に毎日学校に出てきては、ダメ元で基本的なコード開発を3週間程



第4図 高分解能 GSMaP の最初の画像。



第5図 最初の GSMaP 画像の日本付近の拡大図(上図)と同じ時刻のレーダアメダスの画像(下図)。

続けて行いました。比較的短い時間でしたので、あまり丁寧なことは出来ず、とにかく作ってみたというのが実際でしたが、その時に作成した高分解能 (10km, 1時間分解能) GSMaP の最初の画像を、第4図に示します。さらに、日本付近の拡大図をレーダアメダスによるデータと共に、第5図に示します。このようにレーダアメダスと比較すると、大まかな雨域は大体一致しているものの、細かく見ると衛星による推定雨量は地上観測とは大きな乖離があり、精度面ではかなり劣るであろうことがわかります。しかしそれでも、当時は、衛星からのデータのみで、10km, 1時間の分解能で全球の降雨分布が分かるということ自体に、とにかく、そのようなプロダクトを作成することに大きな意義があると考えていました。このような画像やアニメーションを、TRMM の Science Meeting (2004年9月) が開かれていた奈良県新公会堂 (当時) で、当時気象研におられた井上豊志郎さんに見て頂いていた時でした。その直ぐ前に、たまたま座っておられた Phil Arkin 博士が覗き込み、暫くじっとその画面を食い入るように見られたあと (その様子は、結構迫力あるものでした)、Monterey, CA, USA で開催される第2回目の WMO/CGMS/IPWG (International Precipitation Working Group) の会合 (第6図) で発表するように、締め切りはとうに過ぎていたにも関わらず、勧めて下さいました。これが、受賞対象となった赤外放射計データを併用した高分解能 GSMaP が、世界の関連する研究者に知られるようになった最初の出来事でした。

その後、雨量の推定精度を向上させるため、カルマンフィルターを導入しましたが、制御理論の専門家と議論を行っても、中々噛み合わず、随分と苦勞をしました。結局、移動する座標系においてフィルターを適

用するアイデアは、全て自分で考え、実装も私自身で行いました。これらの内容を記述した論文 (Ushio *et al.* 2009) は、引用回数が、日本気象学会気象集誌に掲載された歴代の論文の中で、2022年3月時点で、17位で、2000年以降に限れば10位以内となっているようです。さらにですが、この手法は、NOAA や NASA の同様なプロダクトである CMORPH (Joyce *et al.* 2004; Joyce and Xie 2011) や I-MERG (Tan *et al.* 2019) においても導入され、世界的な潮流となりました。これにもまた、驚かされました。

以後、GSMaP は大きな発展を遂げ、雨量計との複合プロダクト (Mega *et al.* 2019) 等も作成され、JAXA の Web サイトを通じてリアルタイム配信されるようになりました (可知ほか 2011)。そして、今や世界中に多くのユーザを得るまでになり、最近では、WMO 等のプロジェクトや報告書 (Kuleshov *et al.* 2020) においても用いられるようになっていきます。

4. おわりに

何れの研究も、最初は暗いことが多かったように思います。まさか、高速スキャンニングの小型レーダがフェーズドアレイレーダの研究開発に繋がり、このように多くの方に評価されることになるとは、研究を始めた段階では考えられませんでした。まさか GSMaP がこんなに世界各国で様々な用途に用いられるようになることは、夢にも思いませんでした。中百舌鳥の居酒屋で、何とかならないかと、ため息をつきながら、重さん (当時、大阪府立大。現在、京大) と議論ばかりしていたように思います。

発展した研究内容を語るより発展前の研究初期を、研究内容というより研究環境を振り返ることの方が、面白いのではないかと考え、本稿では、少しでも内容が、ざっくばらんにエピソードを混じえて書かせて頂きました。何かのご参考になれば幸いです。また、本稿の上梓が遅れたことを深くお詫び申し上げます。最後に、再度、関係者各位に感謝申し上げます。誠にありがとうございました。今後とも宜しくお願い申し上げます。

参 考 文 献

- Adler, R. F., *et al.* 2003: The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979–Present). *J. Hydrometeor.*, 4, 1147–1167.
 Joyce, R. J. and P. Xie, 2011: Kalman filter-based



第6図 第二回 IPWG 会合の集合写真.

- CMORPH. *J. Hydrometeor.*, **12**, 1547–1563, doi: 10.1175/JHM-D-11-022.1.
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin and P. Xie, 2004: CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J. Hydrometeor.*, **5**, 487–503.
- 可知美佐子, 久保田拓志, 牛尾知雄, 重 尚一, 木田智史, 青梨和正, 岡本謙一, 沖 理子, 2011: 複数の衛星搭載マイクロ波/赤外放射計の複合による「世界の雨分布速報」システムの構築とその利用. *電気学会 A 部門誌*, **131**, 729–737.
- Krehbiel, P. R. and Brook M., 1979: A broadband noise technique for fast scanning radar observations of clouds and clutter targets. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, **17**, 196–204.
- Kuleshov, Y., T. Kubota, T. Tashima, P. Xie, T. Kurino, P. Hechler and L. Alexander, 2020: WMO space-based weather and climate extremes monitoring demonstration project for East Asia and Western Pacific. *WMO Bulletin*, **69** (1), 60–66.
- Mega, T., K. Monden, T. Ushio, K. Okamoto and Z.-I. Kawasaki, 2007: A low-power high-resolution broadband radar using a pulse compression technique for meteorological application. *IEEE Geosci. Remote. Sens. Lett.*, **4**, 392–396, doi:10.1109/LGRS.2007.895705.
- Mega, T., T. Ushio, T. Matsuda, T. Kubota, M. Kachi and R. Oki, 2019: Gauge-adjusted global satellite mapping of precipitation. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, **57**, 1928–1935, doi:10.1109/TGRS.2018.2870199.
- Mizutani, F., T. Ushio, E. Yoshikawa, S. Shimamura, H. Kikuchi, M. Wada, S. Satoh and T. Iguchi, 2018: Fast-scanning phased array weather radar with angular imaging technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote. Sens.*, **56**, 2664–2673, doi:10.1109/TGRS.2017.2780847.
- Tan, J., G. Huffman, D. Bolvin and E. Nelkin, 2019: IMERG V06: Changes to the morphing algorithm. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **36**, 2471–2482, doi:10.1175/JTECH-D-19-0114.1.
- Ushio, T., K. Sasashige, T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto and Z. Kawasaki, 2009: A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87A**, 137–151.
- Ushio, T., T. Wu and S. Yoshida, 2015: Review of recent progress in lightning and thunderstorm detection techniques in Asia. *Atmos. Res.*, **154**, 89–102.
- Wu, T., Y. Takayanagi, S. Yoshida, T. Funaki, T. Ushio and Z. Kawasaki, 2013: Spatial relationship between lightning narrow bipolar events and parent thunderstorms as revealed by phased array radar. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 618–623, doi:10.1002/grl.50112, Selected as an “AGU Research Spotlight”.
- Yoshikawa, E., T. Mega, T. Morimoto, T. Ushio, Z.-I. Kawasaki, K. Imai and S. Nagayama, 2010: Development and initial observation of high resolution volume scanning Radar for meteorological application. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **48**, 3225–3235.
- Yoshikawa, E., T. Ushio, Z. Kawasaki, S. Yoshida, T. Morimoto, F. Mizutani and M. Wada, 2013: MMSE beam forming on fast-scanning phased array weather radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 3077–3088.

Technological Contribution to Improving the Spatiotemporal Resolution of Precipitation Observation

— Horiuchi Award Lecture in 2020 —

Tomoo USHIO*

* Osaka University
ushio@eei.eng.osaka-u.ac.jp

(Received 28 March 2022; Accepted 2 June 2022)
