

リモートセンシングシステムの導入による 新しい観測システムの構築と社会実装

—2017年度岸保・立平賞受賞記念講演—

石原正仁*

1. はじめに

このたび「リモートセンシングシステムの導入による新しい観測システムの構築と社会実装」に関わる功績により2017年度の岸保・立平賞をいただき、たいへん光栄に思います。私を推薦して下さった方々と日本気象学会の皆様には厚くお礼申し上げます。岸保勘三郎さんのお名前はよく存じておりましたが、直接お話しする機会はありませんでした。立平良三さんは気象レーダーの大先輩ですので、立平さんのお名前を冠した賞をいただいたことをたいへんうれしく思います。私が気象庁で関係してきたリモートセンシング関係の仕事の多くは先輩、同僚、そしてメーカーの方々といっしょにやってきたものですので、皆様といっしょにこの賞をいただいたと思っています。

気象庁におけるリモートセンシングによる観測は1954年に始まった気象レーダー、1977年からの静止気象衛星、2001年からのウィンドプロファイラがその代表として挙げられると思います。ここでは私が関係したドップラーレーダーに関わる研究開発とその実用化、そしてウィンドプロファイラ観測網である WINDAS の整備を中心としてお話しをさせていただきます。

2. 気象庁に入るまで

私が高校1年生であった1967年8月1日に、西穂高岳独標付近で起きた落雷によって松本深志高校の11名の生徒の命が失われました(長野県松本深志高等学校1969)。翌日私はその新聞記事を読み同じ高校生とし

て衝撃を受けましたが、将来自分が気象の仕事に就くとは想像できませんでした。このときの雷の親雲はさぞ大型の積乱雲であつたろうと長い間想像していました。10年ほど前に事故当時の富士山レーダーのマイクロフィルムを東京管区気象台の小野寺慎一さん(所属、職名は当時、以後同様)が見つけてくれました。するとこの落雷の原因はごく平凡な孤立積乱雲であつたことがわかり、被害の大きさとくらべて親雲の規模が小さかったことを意外に思いました。

気象大学校では、駒林誠先生による気象学・雲物理学、惑星大気、そして当時はまだあまり注目されていなかった地球温暖化の講義や、吉岡俊輔先生によるイスラムと西洋の関係史の講義(脱線講義でした)が特に印象に残っています。

3. はじめての職場

私は1974年に最初の職場である石垣島地方気象台に赴任し、北村伸治台長の「これからはレーダーの時代だ」という言葉によりレーダー観測班に配属となり、レーダーエコーのスケッチをして過ごしました。このとき山川武夫さんをリーダーとするレーダー班のメンバーからはレーダーを初歩から教えていただきました。当時のレーダーはアナログ方式でしたので、白黒のPPI画面の上に強い信号域(強雨域)を認めるとAスコープ(オシロスコープ)でその受信強度を読み取り、換算表を使って降水強度を推定しました。しかしその結果が予警報業務に直接反映されることは少なく、定量的な降水観測ができるレーダーが必要だと感じました。

1977年には台風第5号が島を直撃しました(石崎・吉川1978)。台風の眼の壁雲が島に達すると、それまでの記録を塗り替える瞬間風速70.2m/sという強風によってコンクリート5階建てのレーダー塔が揺れ、

* 気象研究所客員研究員。

mishihar0308@yahoo.co.jp

—2018年7月9日受領—

—2018年12月17日受理—

露場では頑丈に作られていた百葉箱が吹き飛ばされました。街では電柱が軒並みなぎ倒され、軽自動車が横倒しになっているのを見て、自然エネルギーの大きさを痛感しました。一方、当時はまだ島には木造家屋も多かったのですが、この強風の中でも一人の犠牲者も出なかったことに島の人達の台風に対する備えの良さに敬服しました。このとき台風をレーダーの RHI (鉛直) 走査で見ると (当時の現業レーダーには RHI モードがあった)、中心付近の壁雲を除けば台風にもなう降水雲は思った以上に層状性エコーが多く、その様子が“台風は積乱雲の集合体である”という当時の私の知識と相違しており不思議でした。

4. 高円寺の気象研究所

1978年に希望していた気象研究所 (以後「気象研」) に異動しました。当時気象研は東京の杉並区高円寺にあり、敷地内には古い木造の建物が並んでいました。私は台風研究部のレーダーグループに加わり、レーダーの Z-R 関係の研究で知られた藤原美幸さんを研究室長として、前の大戦中の経験をもとに気象レーダーに関わってきた柳沢善治さん、雲の航空機観測の市村一太郎さん、精密な対流雲数値モデルの椎野純一さんを先輩として仕事を始めました。私の研究室があった3階建て庁舎の屋上には、すでに運用を停止していましたが1954年に設置された日本初の気象レーダーがありました。毎週開かれた台風研究部のコロキウムでは山崎正紀さん、熱帯気象の村上勝人さん、和田美鈴さん、北出武夫さん、気象衛星データ解析の井上豊志郎さんから台風や熱帯気象に関する最先端のお話を聞くことができたことは幸せでした。

1979年には西太平洋熱帯域で Global Atmospheric Research Program/Monsoon Experiment (GARP/MONEX) の研究観測が実施され、柳沢さんの代役として気象庁の啓風丸による熱帯域の洋上レーダー観測の仕事が私にまわってきました。熱帯のしかも洋上でのレーダー観測は私には初めての経験でしたので、赤道無風帯で鏡のようになった水面を見ながら1974年に大西洋熱帯域で実施された GARP Atlantic Tropical Experiment (GATE) の論文 (Houze and Cheng 1977; Zipser 1977; Houze 1977) を読み、これらを参考にして熱帯太平洋では初めて観測されたスコールラインの解析結果を論文にまとめました (Ishihara and Yanagisawa 1982)。レーダーエコーの統計解析 (Ishihara 1985) では村上さんから厳しいコメ

ントをいただきながら、衛星データ解析や帯域フィルタを使った下層風の波動解析などについて助言をいただきました。私にとって現場での観測やその後の解析は楽しい作業でしたが、その後の論文執筆は憂鬱でした。学生時代に駒林先生から教えていただいた英国のファラデーのことは「まず始めること、始めたら終わること、終わったら書くこと」を心構えとして、とにかく書き物で残すことを心がけました。この MONEX では26名の研究者が気象庁の啓風丸と東京大学の白鳳丸に乗船して各種の気象・海洋観測を実施しました。このときのデータは Izawa (1980) によってまとめられました。私もこの作業をお手伝いし、これによって研究プロジェクト終了後のデータのアーカイブの大事さを学びました。

5. つくばの気象研究所

気象研究所は1980年につくば市 (当時は筑波郡谷田部町) に移転しました。自然に恵まれた環境の中で新しい建物と設備によって研究ができるようになりました。レーダーに関してはすでに稼働を停止していた固定型と可搬型の X バンドレーダーが廃止となり、1980年に研究所庁舎屋上に固定型 C バンドドップラーレーダーが、1981年には可搬型 X バンドドップラーレーダーが整備されました。気象衛星研究部の青柳二郎さんと松浦和夫さんが前者を担当し、台風研究部の柳沢さんと私が後者を担当しました。1964年に小平信彦さんと青柳さんのご努力によって製作された初代の気象研可搬型ドップラーレーダーはマイクロバスに搭載され機動性はありませんでしたが、アンテナは上向きに固定されていたので観測能力には限界がありました。しかし1960年代に日本でもドップラー気象レーダーが開発されていたことは特筆されることだと思います。

つくばに移った直後に気象研に導入された上記2台のドップラーレーダーではパルスペア方式の導入によってドップラー速度の高速演算が可能となりました。可搬型ドップラーレーダーは長さ6mのコンテナ (シェルター) に収納され、直径2mのパラボラアンテナをその上に載せました。コンテナは油圧ジャッキを用いて4本の脚で立ち上あがり、そこにトラックを入れて運べるように作られていました。これは藤原さんと柳沢さんのアイデアであったと思われる。私は手間のかかる予算要求や仕様書作成などに参加せず、完成品のレーダーを真っ先に使えるという幸運にめぐまれました。

米国では1970年代後半から2台のドップラーレーダーによる降水雲内の気流場の3次元解析（デュアル解析）が本格化していました（Ray *et al.* 1975）。トルネードをとまなうスーパーセルストームのデュアル解析結果が数値モデルの結果と見事に一致するのを見て（Klemp *et al.* 1981）、この手法を導入し日本の降水システムの構造を調べる仕事をしたいと思いました。気象研の2台のドップラーレーダーはこれに打ってつけでした。それまでの気象レーダーは“降水”といういわば大気運動の“結果”を見ていましたが、デュアル解析の手法を使えば降水域内に限られるとはいえ、大気の運動場という“過程”を見ることができると思ったからです。

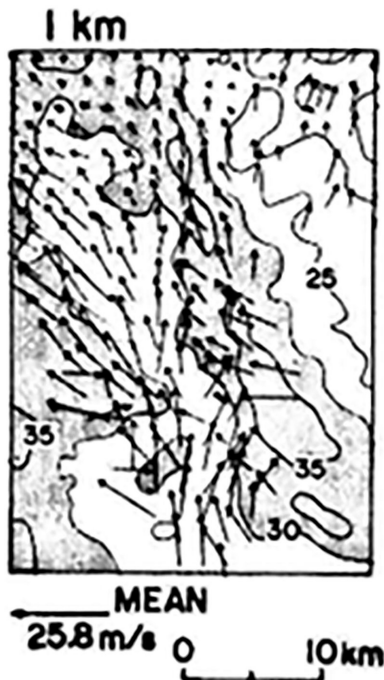
当時の米国の関連論文にはデュアル解析に必要な基本式は示されていましたが、データ処理や品質管理についての技術的な記述は見あたらなかったため、手探りで作業を進めました。まずレーダーの配置を考えました。レーダーの空間分解能を考慮して固定型Cバンドレーダーから30km程度の距離に可搬型Xバンドレーダーを設置することにして、柳沢さんと場所をさがして回りました。気象研は関東平野の真只中に位置するので設置場所の選定はたやすいと思いましたが、最低観測高度を500mに設定したときに遮蔽物がないという条件や土地の借用などの課題をクリアする作業は難航しました。結局初年度の1982年には建設省（当時）利根川工事事務所において野田市の利根川堤防の上にXバンドレーダーを設置し、Cバンドレーダーとの共同観測を開始しました。堤防の上では豪雨時にレーダーが流されてしまうという危険もゼロではなかったため、1983年から1986年までは埼玉県庄和町のご厚意により、鬼怒川近くの浄水場のわきにXバンドレーダーを設置しました。

レーダー観測が終わるごとに直径30cmの磁気テープを何本も気象研に運び、つくば移転にもなって自由に使えるようになった電子計算機（日立M-200スーパーコンピュータ）を使ってデータ処理を行いました。まず手こずったことは、2台のレーダーデータのフォーマットを共通フォーマットに変換することでした。当時はまだC言語は開発されておらずFORTRANを使っていたのでバイト単位の処理などに手を焼きましたが、日立のSEの方々が親切に教えてくれました。解析ではレーダーのボリュームスキャンで得た極座標の生データを3次元直角座標に変換し、非弾性系の連続の式を使って風の3成分を計算しまし

た。最も手がかかった処理は、ドップラー速度データの折返し補正や二次エコー除去などの一連のデータ品質管理でした。これは後述する現業用ドップラーレーダーでも大きな課題となりました。ラジオゾンデの高層風を基準としてドップラー速度の自動折返し補正プログラムを作りました。しかしそれも積雲スケールの風の場合には対応できず、最終的には計算機との対話型プログラムを作り、手で折り返しミスやノイズを除去する手間のかかる作業が必要でした。デュアル解析のための3次元スキャンには1回に10分程度の時間がかかりますが、この間に降水システムが移動することで誤った風の場合が計算される可能性があることを榊原均さんから指摘され、Gal-Chen（1982）の移動補正の手法を組み込みました。これにより台風降雨帯などの移動速度が大きなシステムでは、補正の前後でずいぶん解析結果が異なることがわかりました。解析の終わりには結果を等値線で表示することが必要でした。今ではGrADSを使えばこれは容易にできますが、当時は汎用のツールがなく困りました。幸い気象庁数値予報課から気象研に移ってこられた大西晴夫さんからNCAR Graphicsをもとにした等値線プログラムをいただき、大いに助かりました。

データ処理も終わりに近づいた頃、1m四方もある大型のXYプロッターの上でペン先が風のベクトルを描き始め、降雨帯の走向に沿って収束帯が現れるのを見たときにはうれしくて手が震えました。第1図は1982年台風第18号にとまなう外側降雨帯周辺の気流場を描いたデュアル解析の第一号です（柳沢ほか1983）。デュアル解析の最初の査読付き論文は、翌1983年台風第5号の最も外側に位置する降雨帯周辺の運動場を解析したものです（Ishihara *et al.* 1986）。第2図に示すように、移動する降雨帯に相対的に見ると、最下層ではらせん状の降雨帯の内側面に暖湿気流が入り込み、それが降雨帯内部の下降流が作る水平流と収束して降雨帯を維持するという、当時議論されていた台風の2次元軸対称モデルでは説明しきれない構造が示されました。

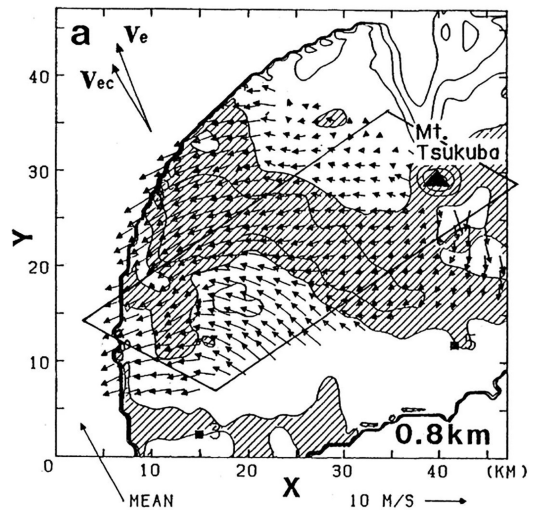
気象研の可搬型Xバンドドップラーレーダーは送信管にクライストロンを使っていたので、IQ信号（直交位相信号）をオシロスコープに入力して両者のバランスをとる程度の調整だけで安定してドップラー観測を続けることができました。ただし、消耗品であるクライストロンは高価（当時の価格で8百万円）であったため、その補充では気象研の経理課の方々にご



第1図 国内初のデュアル解析によって得られた1982年台風第18号の外側降雨帯周辺の高度1 kmにおける水平風の領域平均風からの偏移の分布 (柳沢ほか 1983). MEANは領域平均風.

苦勞をおかけしました。その後、このレーダーは毎年のように国内各地を移動して観測を行いましたが、メーカー (日本無線) の手厚いサポートによって2005年に気象研3代目のXバンドドップラーレーダーに引き継がれるまで、大きな故障もなく活躍しました (楠 2018)。

つくば周辺でのデュアル観測プロジェクトを進める一方、釧路空港での霧による欠航対策のひとつとして、1981、82年に科学技術振興調整費により大学等と共同で釧路地方の海霧の観測的研究が実施され、気象研もこれに参加しました。柳沢さんと私は気象研にあったミリ波レーダーを釧路の海を眺める共同墓地 (紫雲台) に設置し、霧で真っ白になった海上にアンテナを向けました。1961年に製作されたこのレーダーは当時すでに老朽化していましたが、アンテナの大型化、高周波アンプの増設などによって性能を向上させて海霧の定量的観測を行い、異なった性質を持つ沿岸霧とバンド状海霧の2種類の霧があること、両者の間で相互作用があることがわかりました。この解析結果



第2図 1983年台風第5号の外側降雨帯周辺の高度0.8 kmのシステムに相対的な水平風の分布 (Ishihara et al. 1986).

は予報担当としてプロジェクトに参加した沢井哲滋さんの手で論文となりました (柳沢ほか 1986)。このレーダーの送受信機は真空管で構成されていたので回路を調べるのが容易でしたので、調整にきたメーカー (沖電気) の技術者からレーダーのハードウェアについて習いました。

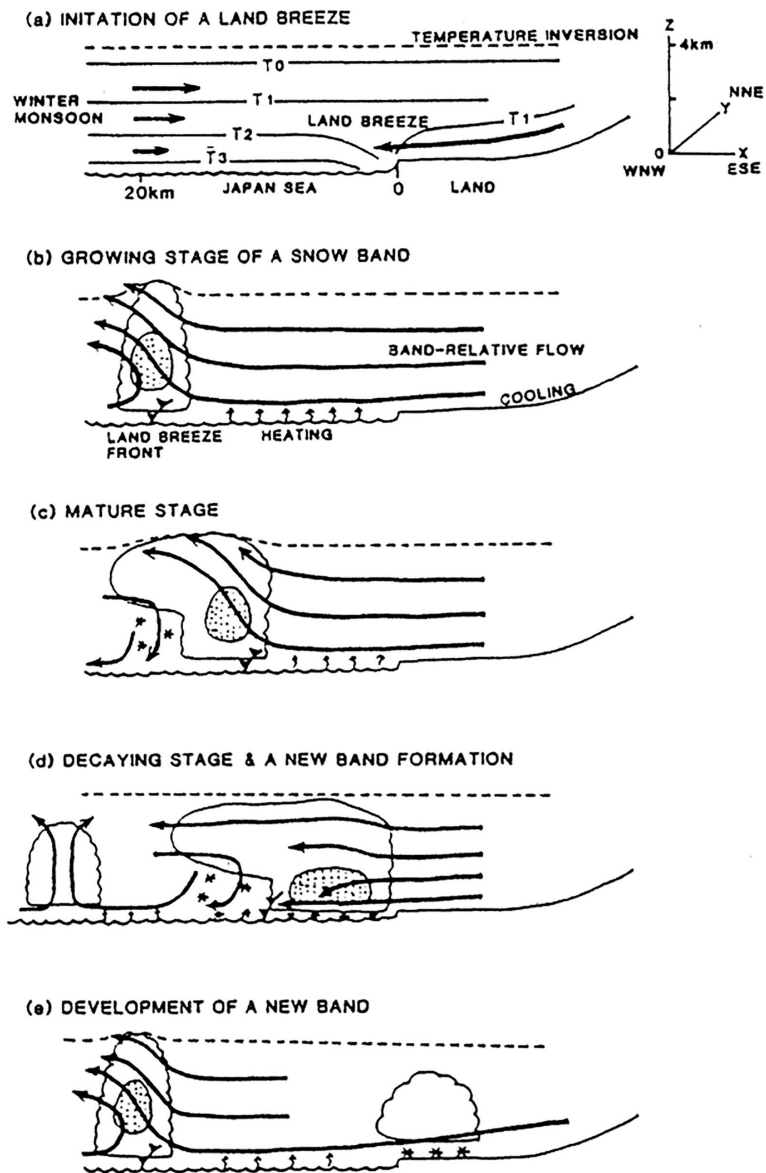
1983年の冬に北陸では豪雪により大きな被害が発生したため、1984年と1985年には再び科学技術振興調整費によって今度は降雪観測を実施することになりました。気象研は可搬型Xバンドドップラーレーダーを石川県河北潟に設置し、柳沢さんと私が一日2交代で観測を行いました。観測を続けるうちに、海上数 kmの位置に海岸線に並行してメソ降雪雲が発生し、その沖合では負のドップラー速度 (近づく風成分) が、降雪雲から海岸までは正のドップラー速度 (遠ざかる風成分) が、一見すると不自然に分布していることに気がつきました。はじめのうちはレーダーの不具合かと思いいアンテナの水平度や信号処理装置を点検しましたが、最終的には第3図のように、それが北西季節風と陸から海上に向かって吹く相対的に冷たい陸風が降雪雲付近で収束していると結論づけました (Ishihara et al. 1989)。調べてみると冬季の五大湖東岸にも規模は小さいながら類似の線状降雪雲が発生していましたが (Passarelli and Braham 1981)、わが国でこの種の降雪雲帯の存在が確認されたのは初めてでした。また北

西季節風が卓越する状況下ではミニスコールライン状の降雪雲が強い降雪をもたらすこともわかりました (Sakakibara *et al.* 1988). こうした結果をとりまとめ、名古屋大学の武田喬男先生と藤吉康志先生のご指導のもとで1992年に博士号を取得することができました。1991年に早世された気象研の猪川元興さんは2次元非静水圧数値モデルによって上記のミニスコールラインの再現実験を行いました (Ikawa *et al.* 1987). これはわが国最初のドップラーレーダー観測と数値モデルとの共同研究であったと思います。

6. 米国滞在とその後

1985年には外務省の長期在外研究員制度に応募し、米国の州立オクラホマ大学と国立シビアストーム研究所 (National Severe Storm Laboratory: NSSL) の客員研究員としてオクラホマ州 Norman に1年間滞在する機会を得ました。NSSLでは1971年にドップラーレーダーが設置され、その後オクラホマ大学と共同することによってトルネードやそれをもたらすスーパーセルス

トームに関する研究が一気に花開いていました。滞在中はそれまで滞在した多くの日本人と同様に、同大学の佐々木嘉和先生と奥様にたいへん世話になりました。私がこの滞在期間中にやりたかったことは、気象研で作ったデュアル解析プログラムの検証と性能向上 (特に収束計算の誤差を積み上げることによって発生する上昇流の誤差の補正)、レーダーから得られた風



第3図 1984年冬季、石川県河北潟で見られた北西季節風と陸風の間形成される降雪雲帯の発生・発達過程の模式図 (Ishihara *et al.* 1989).

の場合から気圧や気温の場を導く熱力学リトリーバルでした。デュアル解析については、Rodger Brown さんのもとでスーパーstormの事例について気象研の解析プログラムとNSSLの2つのグループが作った解析プログラムによる3つの解析結果を比較し、気象研のプログラムの有効性を確認しました。上昇流の補正プログラムはNSSLのプログラムを参考に作り始め

ましたが、実用化までには至りませんでした。熱力学リトリバブルについても Conrad Ziegler さんからいただいたプログラム (Ziegler 1985) を分析している途中で帰国しました。滞在中に Norman 近郊で藤田スケール4のトルネードが発生し、発生翌日に被害現場の調査に同行しました。トルネードの経路に沿った幅100m程度の範囲では家屋が全壊し、その外側の家屋の外壁に外から飛んできた太い木の柱が突き刺さっていたことが印象的でした。

一方、私は米国のオクラホマ大学や NSSL 以外の研究機関で行われているメソ気象の観測的研究にも興味があったので、まずコロラド州ボルダーの National Center for Atmospheric Research (NCAR) で Edward Zipser さんと Margaret LeMone さんが率いるメソ気象グループを訪問しました。Zipser さんはつくば移転直後の1982年に開かれた気象研の開所記念研究セミナーで初めてお会いしたとき、駆け出しの私に心安く声をかけてくれました。訪問中に私は自分の台風降雨帯の解析結果を1時間のセミナーで発表しました。このとき研究室の方から質問やコメントをいただくとともに、帰り際に講演料として小切手をいただいたとき、私を一人前の研究者として扱ってくれたことがうれしかったことを覚えています。

フロリダ州マイアミにある National Oceanic and Atmospheric Administration/Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (NOAA/AOML) Hurricane Research Division の Frank Marks さんの率いる航空機レーダーグループを訪問し、最後部に垂直走査をする X バンドドップラーレーダーを搭載した4発プロペラの気象観測機 WP-3D を見たときには、彼等の観測能力の違いを痛感しました。このとき Marks さんから、数日後にはハリケーン観測を行うので私も WP-3D に乗ってみたいかと誘われました。私は手続きがむずかしそうなので断りましたが、このことは今でも後悔しています。

冬季には、米国東海岸で急発達する低気圧を対象として NCAR, NOAA, National Weather Service (NWS), Federal Aviation Administration (FAA) などの研究・行政機関が共同して実施していた National Stormscale Operational and Research Program (STORM) プロジェクトの現場のノースカロライナ州最東端の Hatteras 岬を訪れました。NCAR の2台の可搬型 C バンドドップラーレーダー

の研究者が我々と同じように電話で連絡し合いながらデュアル観測を行っており、その様子を見て安心しました。

当時は NEXRAD (米国次世代気象レーダー網) 計画や TDWR (空港ドップラー気象レーダー) 計画が端緒についた時期であり、NSSL や NCAR ではこれらに関する研究や技術開発が盛んに進められていました。これとは別に気象レーダーの権威である NSSL の Richard Doviak さんに連れられて NSSL 所長の Edwin Kessler さんの自宅の農場に設置されていた50 MHz ウィンドプロファイラや、NSSL の駐車場わきに無造作に置かれていたパラポリアンテナ型900MHz ウィンドプロファイラを見たとき、将来私がこの分野の仕事に関係するとは想像できませんでした。さらに、NSSL の大型 S バンドドップラーレーダーの雑然とした機器室では二重偏波機能がテストされていましたが、私には二重偏波レーダーの将来性を認識することはできず、さらにその20数年後に日本で XRAIN (真木ほか 2017) として実用化されるとは想像すらできませんでした。

帰国を前にした1986年10月にはコロラド州 Snowmass で開かれた第23回レーダー気象研究会議に気象研から榊原 均さんと田畑 明さんが発表のため参加し、私も日本での雷雲のデュアル解析の結果を発表しました。このときの準備として、私はそれまで日本でやっていたとおりに自分で作図し文章をタイプして予稿原稿を作り、それを職場の秘書さんに渡しました。するとその女性から「それは私と作図担当者の仕事です。」ときっぱり言われ、日本と米国の研究環境の違いを実感しました。米国滞在中の印象は、私の2年前に NSSL に滞在してガストフロントの検出アルゴリズムを開発した上田 博さんの報告 (上田 1985) に続ける形で報告しました (石原 1987)。

米国滞在中にすばらしいと思ったことのひとつは、どこの研究機関を訪問しても、レーダーデータの解析や表示プログラムを自由に使えと言ってくれたことです。観測結果の解析には多くの解析プログラムが必要ですが、これらを自前で作るには労力と時間がかかります。別々の研究機関が同じ機能のプログラムを作ることその分野の研究活動全体から見ると無駄なことです。これを知ってから、帰国後はドップラーレーダーを使っている国内の大学や研究機関に自作の解析プログラムを提供しました。その後気象研の田中恵信さん、鈴木 修さん、山内 洋さんによって作られ、

今でも国内の多くの機関で使われているレーダーデータ総合解析プログラム draft (田中・鈴木 2000) や、防災科学技術研究所の清水慎吾さんのウェブサイトはこの流れにつながっていると感じています。

1986年秋に帰国したとき、米国でやり残した仕事を続けるか、国内のドップラーレーダー観測を本格化するかで迷いましたが、私は現場で現象を調べることに興味があったので後者を選びました。米国滞在中の1987年に台湾と米国の研究者が台湾で梅雨を対象とする Taiwan Area Mesoscale Experiment (TAMEX) プロジェクトを実施すると聞いていたので、この期間に合わせて那覇で梅雨と台風を対象とする観測を行いました。首里城内にあった琉球大学跡地のビルの屋上を借りて気象研の可搬型 X バンドドップラーレーダーを設置しました。沖縄気象台の全面的な協力のもと田畑さん、赤枝健治さん、横山辰夫さんの4名で観測を行いました(第4図)。沖縄気象台では高層観測の時間間隔を短縮するため現業観測(当時は沖縄気象台でラジオゾンデ観測が実施されていた)とは別に気象研から機材を持ち込みラジオゾンデ観測を行うとともに、気象台の予報会報に参加して梅雨期の沖縄の気象を学びました。ハワイ大学の高橋 勁さんが、沖縄の嘉手納基地に WP-3D 気象観測機で飛来した NOAA/AOML Hurricane Research Division の David Jorgensen さんといっしょに我々のレーダーサイトを訪問し激励してくれたことはうれしい思い出です。

沖縄での観測終了後は、まず期間中発生した各種のメソスケール降水システムを観測参加者全員で分類しました(石原ほか 1991)。長さが460kmに達する亜熱帯スコールラインについては、1台のドップラーレーダーでしたがその内部構造を解析し(石原ほか 1992)、その走向と鉛直シアーの関係や層状性域の広がりなどの点で熱帯や中緯度のスコールラインと異なる形態と構造を示すことを示しました。論文の査読者であった小倉義光さんから、亜熱帯域で初めて観測されたスコールラインであるから英文誌に投稿するよう勧められましたが、そのとき私はすでに行政職に移っていて時間的余裕がなかったことや、現場の予報官に日本語で論文を読んでもらいたかったことから「天気」に掲載することにしました。赤枝さんはこの観測期間中に発生した別のメソ対流システムを解析しました(Akaeda *et al.* 1991)。

死者・行方不明者299人という大きな被害をもたら



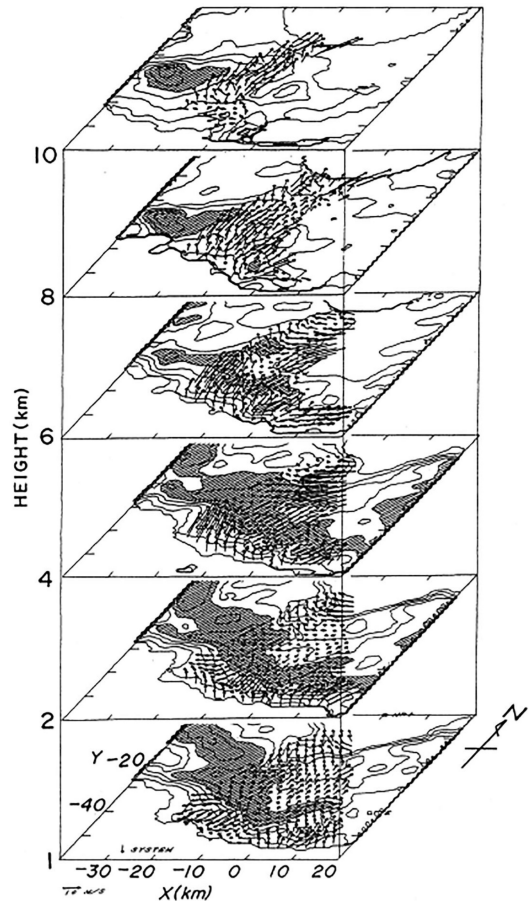
第4図 1988年、5、6月に那覇市首里に設置された X バンド可搬型ドップラーレーダー。左から赤枝健治、柳沢善治、石原正仁、横山辰夫、田畑 明。1986年に気象庁を退職した柳沢は、当時沖縄県内の柑橘類に生息していたウリミバエを撲滅するプロジェクトでレーダー利用の可能性を調査するため当地を訪れた。

した1982年の「昭和57年7月豪雨(長崎豪雨)」は Ogura *et al.* (1985) によって詳しく解析されていますが、当時の気象庁レーダーはデジタル化が始まったばかりでドップラー機能は付加されていませんでした。豪雨をもたらす降水システムの内部構造を知るにはやはりドップラーレーダーによる研究観測が必要だと思いました。沖縄での観測では1台のドップラーレーダーの能力に限界を感じましたので、全国のメソ対流システムの観測的研究には他機関のドップラーレーダーと共同観測が必要でした。東京大学海洋研究所の浅井富雄先生とミシガン大学の小倉研究室から帰ってきた直後の吉崎正憲さんが1987年から九州で梅雨末期豪雨研究プロジェクトを実施しているとのことで、気象研の可搬型 X バンドドップラーレーダーも参加させていただくことになりました。1988年の6～7月に同レーダーを福岡県柳川市の有明海沿岸に設置し、榊原、田畑、赤枝、島津好男さんと観測を行いました。このとき、北海道大学の低温科学研究所(低温研)と理学部の2台の X バンドドップラーレーダー、土木研究所の C バンドドップラーレーダーもこの観測プロジェクトに参加し、4台のドップラーレーダーが九州北部に集合するという夢のような観測プロジェクトが実現しました。ところが観測が始まると晴天が続き青空と有明海のむつごろうを眺めて過ごす毎日でしたが、梅雨末期の7月15日に待望の強い雨域が九州北部を南下しました。低温研の藤吉康志さん

と坪木和久さんが福岡県大牟田市に設置したドップラーレーダーと気象研のドップラーレーダーによってデュアル観測を行い、第5図に示すように梅雨前線付近のメソ線状降水帯の運動場の微細構造を明らかにしました (Ishihara *et al.* 1995)。北大低温研の川島正行さんはこのとき解析された3次元の風の間を使って、日本で初めて熱力学リトリバルを実現しました (Kawashima *et al.* 1995)。この観測によって機関をまたがっての複数ドップラーレーダー観測とその結果をもとにしたリトリバル解析が日本でも可能となりました。これに数値モデルによる再現実験が加わればメソ降水システムの研究は飛躍的に向上することになります。これには気象研の吉崎さんと中村一さんが中心となって1993、94年に実施した「つくば域降雨実験 (吉崎ほか 1999)」まで待たなければなりませんでした。

ところで移動形態や内部の運動場を見ると、第5図のメソ線状降水帯は中緯度スコールラインに類似しており、日本各地で豪雨災害をもたらすとして近年注目されている「バックビルディング」型 (Kato 1998; 瀬古 2010) ではありませんでした。私は気象研に在籍中にはバックビルディング型の降水帯を観測する機会がなかったことから、小倉義光さんの指摘 (小倉 1991) を見るまでその重要性を認識できませんでした。なお、米国滞在中から課題にしていたデュアル解析における上昇流の補正は、気象研の山田芳則さん (Yamada 1997) と防災科学技術研究所の清水慎吾さん (Shimizu *et al.* 2008) がそれぞれ異なった手法によって実用化しました。

私が気象研在籍中に担当した最後のレーダー観測は1990年の宮古島における台風観測でした。それまで気象研では中緯度に達した台風を対象としてレーダー観測を行っていましたが、台風本来の振舞いや構造を知るには、何としても亜熱帯域での観測が必要だと思っていました。そこで気象研の可搬型ドップラーレーダーを宮古島に運び、上野村の消防署の敷地をお借りして設置しました。設置直後に台風15号が宮古島上空を通過するという幸運にめぐまれ、30時間にわたって台風の眼の壁雲の内外を観測することができました。特に壁雲付近の最下層の流入、風速極大域付近の下層収束と外側に傾く強い鉛直流、さらに壁雲内側に沿って台風中心から放射状に並ぶ対流雲の列などを観測しました。台風の眼の中は降水がなかったのでレーダー観測を休止していました。すると気象台の職員から



第5図 気象研と北大低温科学研究所のドップラーレーダーによるデュアル観測によって解析された1988年7月17日に九州北部の梅雨前線付近に発生したメソ線状降水帯内の高度1 kmから10 kmまでのシステム相対水平風分布 (Ishihara *et al.* 1995)。

「風が弱まったからオメガゾンデによる高層観測をやりよう」という電話がかかってきたのであわてて気象台に行き、深夜でしたがいっしょに眼の内部のラジオゾンデ観測を行いました。無風状態の漆黒の空に向かって白い気球がゆらゆらと上昇する様をよく覚えています。滞在中は気象情報の提供から生活の支援まで、金城博明台長、正木 譲観測課長をはじめ気象台職員の皆様にお世話になりました。こうして得た観測結果は1991年の国際レーダー気象研究会議に extended abstract として発表しましたが (Ishihara *et al.* 1991)、さらに解析を進めて査読付き論文にすること

できなかったことが心残りとなっています。その後、気象研におけるドップラーレーダーによる台風の観測的研究は Tabata *et al.* (1992), Shimazu (1997) によって続けられました。

話が前後しますが、米国滞在中にシカゴ大学の藤田哲也先生から Joint Airport Weather Studies Project (JAWS) などの研究成果についてうかがう機会がありました。また日本国内でも空港付近の低層ウィンドシアアが問題となり始めていたことから (中山・伊関 1985), 現状をドップラーレーダーで調べておく必要があると考えました。研究室の本来の研究計画である台風の観測も兼ねて、1987年と1988年の暖候期後半には成田空港内に可搬型ドップラーレーダーを設置し、田畑さんがリーダーとなって低層ウィンドシアアの観測プロジェクトを実施しました。空港内で観測を行うには多くの手続きが必要でしたが、航空気象の専門家でもある全日空の吉野勝美さんのご協力によりこの観測が実現しました。観測の結果は長続きした孤立積乱雲を対象とした解析結果などが田畑ほか (1989), 石原 (1991), 石原・田畑 (1996) に報告されています。

1980年代後半には米国では空港周辺のマイクロバーストなどの低層ウィンドシアアの実態把握が進み、その対策が始まろうとしていました。国内では低層ウィンドシアアによって犠牲者が出る航空機事故はなかったものの、1990年代に入ると空港における低層ウィンドシアアに注意が向けられ始めました。1991年に航空局、気象庁、航空会社が共同で低層ウィンドシアアの検出とその結果の管制官への情報伝達に関する検討委員会を作り、マイクロバーストとシアアラインの検出プログラムの試作と情報の表示について試験を行いました。その結果、気象庁がそれまで8つの空港で運用してきた在来型レーダーに擾乱度検出装置を付加した空港気象レーダー (志崎 1980) を更新して、低層ウィンドシアアを監視するドップラーレーダーを新たに設置することが決まりました。当時気象研のレーダーグループでは一番経験が長くなっていた私が気象庁観測部測器室に異動してこの仕事を担当することになりました。

7. 空港気象ドップラーレーダー

1991年4月に私は気象庁観測部測器室に異動し、気象レーダーの製作仕様書を作り、製作を監督する仕事を担当することになりました。私は「仕様書」の意味もわからなかったので、同室でコンビを組んだ係長の

田代照政さんや測候課調査官の中井公太さんから教えていただきながら、最初の仕事としてそれまで函館山山頂にあったレーダーの無人化と横津岳への移設を担当しました。このとき製作を担当した三菱電機の若林勝さんとのやりとりから、それまで知らなかった現業気象レーダーの機能や構造を勉強しました。その後、横山辰夫さん、飯田和彦さん、瀬良垣均さん、嶺井正康さんと組んで石垣島レーダーの石垣市内から於茂登岳への更新移設、札幌レーダーの札幌市内から毛無山への更新移設を担当しました。

こうした定常業務と並行して、新しい空港気象レーダーの仕様を決める作業が大きな仕事でした。米国の NEXRAD や TDWR に関する資料から情報を得ながら低層ウィンドシアアの検出方法を検討するとともに、国内3社、海外1社からの技術的意見も参考にして仕様書を作りました。入札の結果、1993年6月に三菱電機が製作を担当することになりました。

このレーダーにはマイクロバーストの空間規模に対応した直径7mの空中線、日本の現業気象レーダーに初めて採用されたクライストロン送信機、IQ信号のFFT処理、二重PRFによる速度の自動折返し補正・位相制御による二次エコー除去の実時間処理のための高速信号処理装置、故障修理や点検による停止時間を最小限に抑えるための空中線以外の機器の二重化など、当時の最先端技術が投入されました (Hamazu 2002)。仕様書には書ききれない仕様の細部については、浜津享助さんをチーフとするメーカー技術陣と打合せを繰り返し、その結果をレーダーの製作に反映させました。気象レーダーとしては国内最大となる直径7mの空中線の性能試験は見通しのよい三菱電機赤穂工場で実施され、仕様どおりの0.7°のビーム幅を確認しました。

関西空港でレーダー機器の設置が完了する直前の1995年1月17日に阪神淡路大震災が発生しました。関西空港でも大きな揺れがあったそうですが、幸いレーダーの機器に損傷はありませんでした。一方対岸の神戸の町では火災が何日も続きました。その時期関西航空地方気象台の観測課職員はレーダー設置の作業に忙殺されていましたが、同時に地震で大きな被害を受けた神戸海洋気象台の被災処理を支援するため現地に向かっていたことを私は後で知りました。

気象庁では新しい観測システムが完成したとき、機器に貼る銘板に機器の英語の名称と略称をつけます。空港気象ドップラーレーダーでは名称を Doppler

Radar for Airport Weather とし、DRAW と略しました。米国では同種のレーダーを Terminal Doppler Weather Radar (TDWR) と称していましたが、日本で terminal とはいえ駅のターミナルを連想することもあるので、それとは異なった名称にしました。DRAW は1995年3月には関西空港に、その半年後に成田空港に、さらに1996年10月に羽田空港に設置されました(第6図)。米国の TDWR の運用開始に遅れることほぼ3年でした。

DRAW の出力する降水系のデータやプロダクトはすぐに空港の气象台の予報官が使い始めましたが、ドップラー速度データや低層ウィンドシアア情報(マイクロバーストとシアラインの検出結果)は気象庁としては初めて現業で使うものであったため、レーダーの完成後1年間にデータや情報の精度を評価し、必要な処理パラメータなどの調整を行うことにしました。ドップラー速度の測定精度は関西空港の气象台観測課の石川生明さんと木俣昌久さんにお願ひし、航空機が自ら算出する上空の風のデータ(Aircraft Communications Addressing and Reporting System: ACARS) と DRAW が測定するドップラー速度を比較しその精度を確認しました。私を含め気象庁本庁の職員はその結果を見て良好なドップラー観測ができていることを喜びましたが、この二人は膨大なデータ処理に日々悪戦苦闘したことを後で知りました。気象庁本庁でもデータ解析や資料のとりまとめには春日 信測器室長をはじめレーダー係以外の方にも協力していただき作業を進めました。

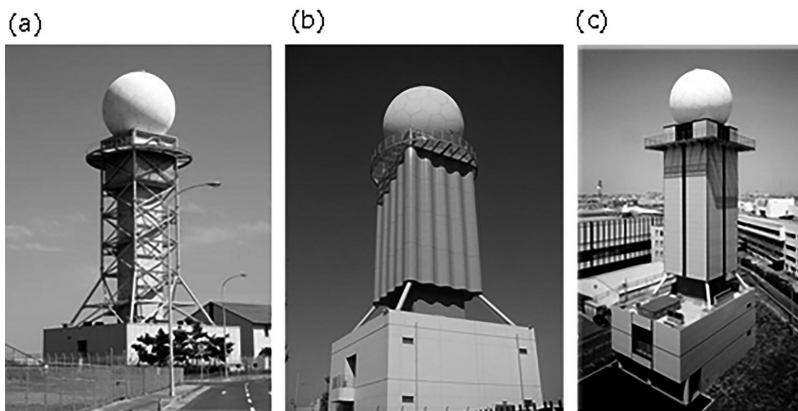
評価作業の中で最も気になったことは低層ウィンド

シアア検出プログラムの仕上がり具合でした。そこで半年遅れで完成した成田空港の DRAW の測定結果を、独立した観測結果と比較し評価することになりました。気象庁はこの作業を日本気象協会に発注し、気象研と防災科学技術研究所の可搬型ドップラーレーダーをお借りして、成田空港周辺でデュアル観測を数か月間行いました。寒冷前線に伴う線状エコーが関東平野を通過した事例では、同協会の飯田秀重さんによる風のデュアル解析結果と DRAW の自動検出の結果が見事に一致し、これによりシアアラインの自動検出性能を実地に確認することができました。

マイクロバーストに関しては評価期間中に実際の事象が現れませんでした。マイクロバーストの疑似データによる検出結果が良好であったことから、一連の評価作業は終わりました。ところが評価期間が終了する頃になって関西航空地方气象台から「DRAW が検出する低層ウィンドシアア情報は信用ならない」という噂が聞こえてきてたいへん困惑しました。DRAW の検出結果と実際の地上風の観測データを突き合わせてみると、確かに誤検出と思われる事例がかなりの頻度で出現していました。検出プログラムを丹念に分析してみてもその原因はわからず困りました。結局ドップラー速度の折返し補正ミスや地形エコーによるドップラー速度の誤測定が原因であることが判明しました。このとき気象研の楠 研一さんと鈴木 修さんが強力な折返し補正アルゴリズムを短時間で開発し(楠ほか 1996)、メーカーがすぐにそれを実装したことから、この危機を乗り越えることができました。

1996年4月の DRAW 1号機の本運用開始とともに、

私は気象庁観測部から関西航空地方气象台の観測課に異動となりました。気象庁では新システムの設置後は担当者は他の分野に異動することが多いのですが、私は幸せでした。私の後任として気象研から観測部に異動した赤枝さんが DRAW の低層ウィンドシアア検出性能を向上させる作業を担当し、私もこの作業を現場でお手伝いしました。この作業の中で赤枝



第6図 1995年に関西(a)と成田(b)、1996年に東京(c)の各国際空港に設置された空港気象ドップラーレーダー。

さんは羽田空港の DRAW が都心のビル周辺で偽の低層ウィンドシアアを検出するというエラーを解決しました。関西空港でのある日のこと、私は真っ黒な積乱雲の雲底近くで着陸寸前の航空機が轟音とともに着陸復航（着陸のやりなおし）をする様子を気象台の屋上から目撃しました。DRAW がマイクロバーストを自動検出しその情報が管制官からパイロットに無線で伝えられていたのです。このときほど DRAW が航空機の運航に役立っていることを実感したことはありません。

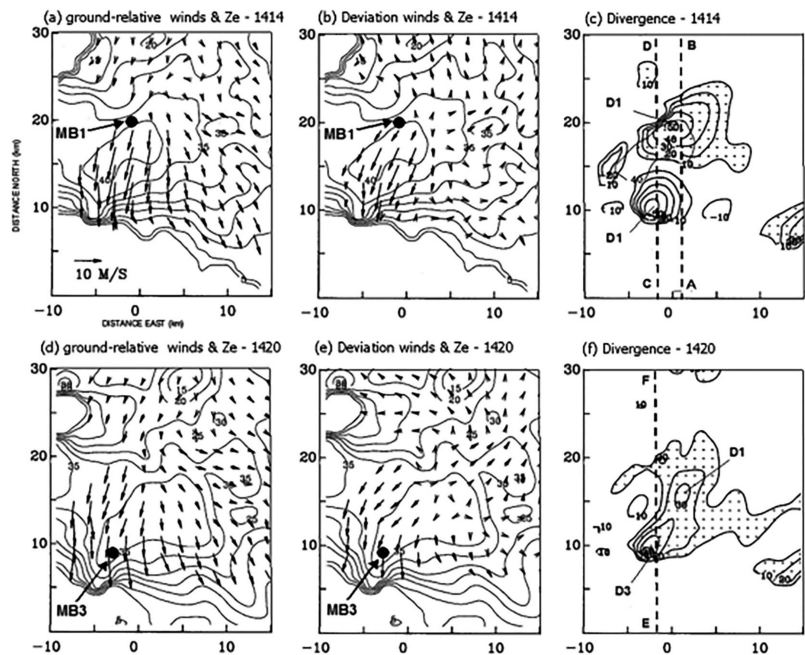
一方、DRAW によるマイクロバーストの検出頻度に関しては手分けして調査を行いました（石原ほか 1999）、その検出結果がどの程度の精度を持っているかを実データによって検証していないことが気にかかっていました。そこで1998年に北大低温研の藤吉さんとの間で共同研究を実施しました。大阪教育大学の小西啓之さんと吉本直弘さんにも参加していただき低温研の可搬型ドップラーレーダーを柏原市の同大学キャンパスに設置し、関西空港の DRAW と連携観測を実施しました。幸いこの期間中に活発な積乱雲列が通過し空港周辺でマイクロバーストがいくつも発生しました。第7図の示すように DRAW と低温研レーダーによるデュアル解析によってマイクロバースト群の3次元気流場が解析され、DRAW 単独のマイクロバースト検出結果とを照合した結果、DRAW が高い精度でマイクロバーストを検出していることがわかり、安心しました（石原ほか 2009）。ここでわかったことは、マイクロバーストといっても教科書にあるように発散流が同心円状に分布するものばかりではなく、システムの移動速度や風の鉛直分布によっては発散流が一方に強く出るのがあることです。DRAW はその後国内主要

9 空港に設置され、最近では第2世代となる固体化二重偏波レーダーへの更新が始まっています。

ドップラー気象レーダーに関する参考書は日本では立平（1972）を最後に発行されていなかったため、当時の最新の知識と情報を取り入れて気象研究ノート編集することになりました（石原 2001）。これは1990年に気象研究ノート編集委員であった近藤洋輝さんの要請にもとづくものでした。ところが多くの執筆者から原稿をいただきながら刊行までに10年を要してしまい、執筆者の方々（坪木和久、榊原 均、赤枝健治、鈴木 修、遠藤辰雄、藤吉康志、上田 博、真木雅之の各氏）にはご迷惑をおかけしました。

8. ウィンドプロファイラ

私が関西航空地方気象台で職員と DRAW のデータを使った調査などを行っていた1998年に、気象庁がウィンドプロファイラ（以後「プロファイラ」と略します）の観測網を整備するという噂を耳にしました（官庁では施設や機器を新設することを「整備」と言



第7図 関西空港の空港気象ドップラーレーダー-DRAW と柏原市に設置した北大低温科学研究所のドップラーレーダーによって解析された1998年8月7日14時14分と14時20分の高度500mにおける、(a, d) 水平風と反射強度（単位はdBZ）、(b, e) システム相対風と反射強度、(c, f) 水平発散（単位は $10^{-3}s^{-1}$ ）。MB1とMB3はDRAWで自動検出された2つのマイクロバーストの中心位置（石原ほか 2009）。

います)。これはたいへんな作業だろうと思っていたところ、予算要求2年目に私もそれに参加することになり、1999年4月に気象庁観測部の高層気象観測室に異動しました。

プロファイラに関しては前述のように1986年に私は米国 NSSL で実物を見ましたが、その当時は実用化はずいぶん先だろうと感じていました。1987年には京都大学超高層電波科学研究所（現在の生存圏研究所）の深尾昌一郎先生と津田敏隆先生のご配慮により、運用が始まったばかりの MU レーダーのある滋賀県信楽に共同研究という形で2週間滞在することができました。その時の観測結果を論文にできなかったことは心残りとなっていますが、このときプロファイラの基礎を学びました。

プロファイラは使用する電波の周波数によって50 MHz、400MHz、1.3GHz（一部の国では900MHz）の3種類にわけられます。気象屋から見ると50MHzの大型大気レーダーである MU レーダーもプロファイラ的一种です。気象庁では1988年に400MHzのプロファイラが気象研に設置され、上田真也さん、坂井武久さん、松浦和夫さん、小林隆久さん、垂澤 浩さん、永井智広さんによって基礎研究が行われ（気象衛星・観測システム研究部 1995；小林 2004）、1994～96年には気象研究所・観測部・高層気象台によるプロファイラの業務化実験が行われました（高層気象台ほか 1998）。気象研では1997年には1.3GHzプロファイラも導入されました（足立 2004）。1997、98年には数値予報モデルに必要な新しい観測システムを決めるための調査が、数値予報課の佐藤信夫課長、露木 義さん、観測部の迫田優一さん、気象研究所の斉藤和雄さん、鈴木 修さんが中心となって「関東地域メソ解析プロジェクト」として実施されました（予報部数値予報課 1998；気象庁 1999）。その結果、第一にプロファイラ網の整備、次に既存の気象庁レーダーのドップラーレーダー化を進めることが望ましいという方針が立てられ、プロファイラの予算要求を始めることになりました。

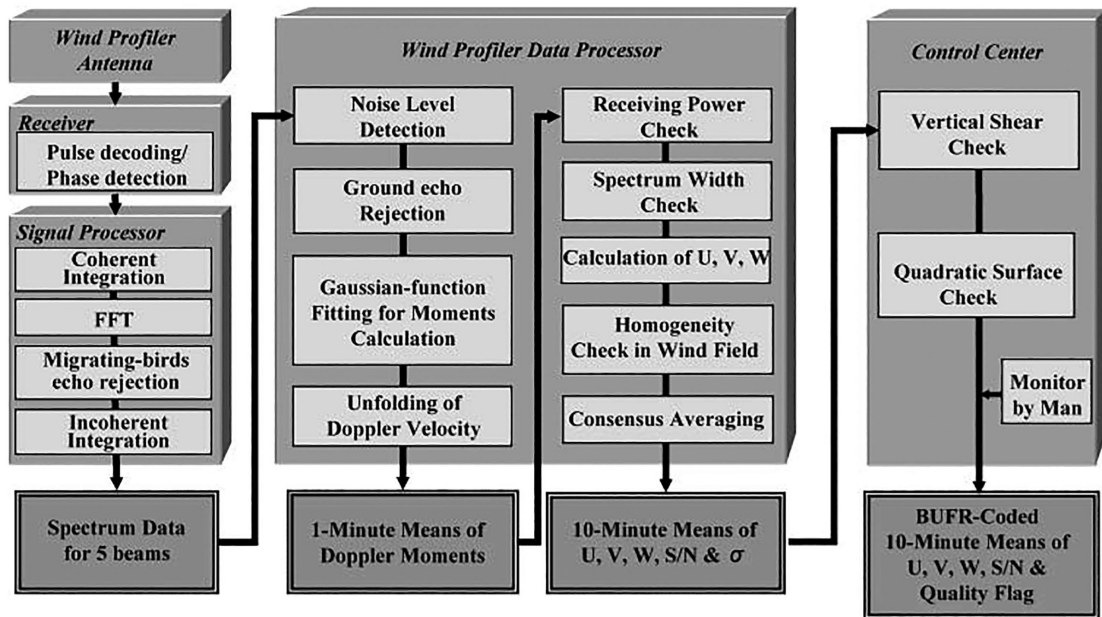
1998年度には、気象庁はそれまでに迫田優一さんが中心となって進めてきた技術調査結果をもとにプロファイラ網設置の予算要求を行っていましたが、予算獲得には至りませんでした。次年度に私が観測部に異動したとき、前年度に準備された資料が何冊ものファイルとして残っており、それらは予算要求作業に大いに役に立ちました。当初私は、プロファイラはドップ

ラーレーダーの一種なのでこれまでの経験を生かせば予算要求作業に支障はないと思っていましたが、これは大きな誤りでした。

1.3GHzプロファイラは開発初期には観測範囲が高度数 km までに限られていました（大野 1999）。ところが京都大学生存圏研究所によって改良され高度 5 km 前後まで観測できるようになり（Hashiguchi *et al.* 2004）、大雨をもたらす湿潤な下層大気の流れの場を観測するには十分な性能を得るようになりました。1999年度の予算要求では、プロファイラから得られる風データを数値モデルに同化することを第一の目的として、全国を25台の1.3GHzプロファイラで網羅し、既存の高層観測地点と重複しないように、大雨・大雪域の上流にあたる海岸近くへ設置することとし、同一周波数帯を使用する航空局の航空路監視レーダーや自衛隊の無線局と共存できる場所をさがすことになりました。こうして25地点が決まったのは2000年6月でした。現在のプロファイラの設置場所を見ると空間的な分布にやや不自然な地点がありますが、その配置は様々な要因が理由となって決まったのです。

プロファイラの技術的仕様の決定は一連の作業の中でも最も重要な事項でした。京都大学の橋口浩之さんとの共同研究によって三菱電機と住友電工の両社がそれぞれ独自に開発した二機種のプロファイラ、及びフィンランドのヴァイサラ社の同程度の性能を有するプロファイラの仕様を基本仕様とすることにしました。仕様の中で重要であったことは、年間平均として高度 5 km 程度までの高層風を観測する性能を有し、25台のプロファイラと気象庁本庁とをオンラインで結んで安定して遠隔制御可能な観測システムを作ること、ハードウェアとソフトウェアで徹底的にデータの品質管理を実施することでした。仕様書の決定までにはすでに1.3GHzプロファイラを運用していた通信総合研究所の大野裕一さんや福島大学の渡邊 明さんからご意見をいただきました。こうして製作仕様書が作られ、国際競争入札の結果三菱電機が落札し、2000年度に機器を製作して各地に設置することになりました。

プロファイラはドップラーレーダーの一種とはいえ、大気から返ってくる電波はごく微弱であるため、コヒーレント積分やパルス圧縮といったそれまで気象レーダーには使われていなかった技術を使っています。今回のプロファイラでは観測データを数値予報業務にオンラインで供給する必要があるため、データの



第8図 WINDAS の信号処理とデータ処理における各種の品質管理アルゴリズム。

品質管理には細心の注意が必要であり、第8図のように信号処理とデータ処理の過程で多様な品質管理処理を導入しました。このため、文献やメーカー技術者との議論を通じ、高層気象観測室職員は大いに勉強しました。阿保敏広さんが描いたパルス圧縮の説明図や、当時新人であった五十嵐洋輔さんが作ったプロファイラの解説資料はその後の説明会や職員研修に役立ちました。

プロファイラの設置場所の選定と並行して財務当局へ予算要求をしました。担当の永沼啓治さんは財務当局に日参し、設置の必要理由などの説明に明け暮れました。予算要求の終盤に差し掛かったころ、当局からプロファイラの効果を実際に証明する資料を提出せよという難題をいただきました。気象庁では前述の関東地域メソ解析プロジェクトにおいて仮想的な予報感度実験によってこの効果を確認していましたが、当然ながら予算要求の時点では日本にはメソスケール降水システムに対応するプロファイラ観測網は存在しなかったため、実観測による検証資料を出すことができず困りました。当時米国ではNOAAが30数台の400MHzのプロファイラ網を米国中部に展開して業務実験を実施していました。またヨーロッパでも欧州科学技術研究協力機構(COST)の一環として13か国のプロファイラのデータを集約し業務実験を開始していました。

そこでそれらに関する論文の収集や問合せを行いました。なかなか適当な資料が見つかりませんでした。ようやく気象庁図書室の地下3階の書庫で、NOAAの内部誌の中に五大湖周辺の大雪に関する数値予報がNOAAのプロファイラ網の観測データによって改善されたという報告を見つけ、それを財務当局に提出して予算の獲得に漕ぎつけました。

予算成立の目的が立った2000年3月にはフランスのツールーズで開かれた第9回中間圏成層圏対流圏レーダー研究集会(MST9-COST76)に出張させていただき、日本の気象庁がプロファイラネットワークを近く構築すると発表しました。ここでCOSTのプロファイラ網を管理する英国気象庁のJohn Nashさんや米国NOAAのNPNプロファイラネットワークを管理するvan de Kampさんと知り合い、プロファイラの運用に関する情報を入手することができるようになりました。

2000年度にはメーカーによって機器の製作と設置が行われました。このときにもDRAWのときと同じく三菱電機の浜津さんのチームと頻繁に打合せを行いながら、サイドローブにとまなう地形エコーの軽減、数々のデータ品質管理アルゴリズム、降雪対策のレドームの仕様、などの詳細仕様を詰めながら製作を見守りました。1年足らずの期間に25台のプロファイラ

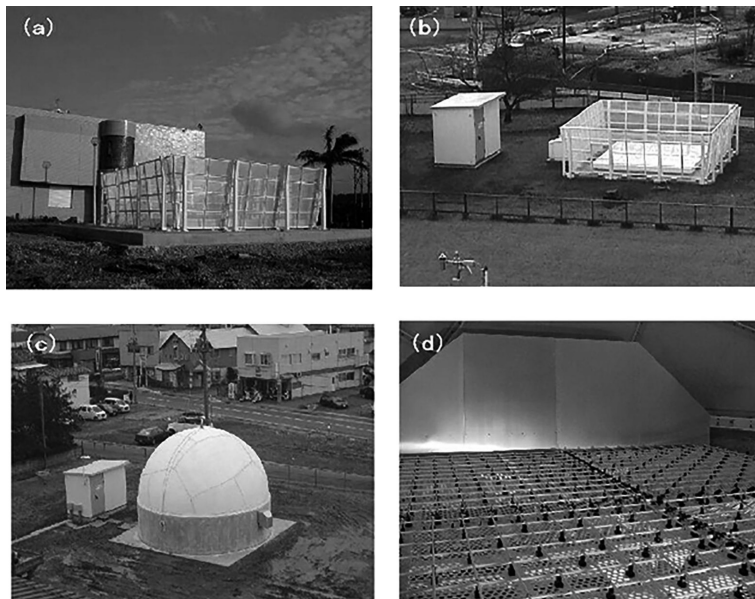
を製作し設置するというスケジュールでしたので、メーカーはもとより設置の準備をする現地官署の方々の苦労も大きかったです。2000年の秋からプロファイラを設置する作業が始まりました。設置作業は雪が降り始める前に終了する必要があったので、最北の留萌から順次南下して行いました。高層気象観測室の職員は完成検査に立ち会う必要があり、多いときには室員の半数以上が出張で出払いました。これを見た沖波一室長は、室の他の業務（18地点の高層気象官署・気象ロケット観測の管理、落下ゾンデ対策、湿度センサーの改良など）に支障をきたさないよう心を配っていました。

こうしたメーカーと気象庁関係者の協力の結果、25台のプロファイラと気象庁本庁の中央監視局からなる観測ネットワークは2001年3月に完成し（第9図）、名称を「局地的気象監視システム」、英名 Wind Profiler Network and Data Acquisition System (WINDAS) として運用を開始しました。この日本名にウィンドプロファイラという言葉が入っていないのは、それに対応する適切な日本語がなかったことと、予算要求時に局地的気象の予報精度を向上させることが整備の目的であるとうたったことが理由でした。

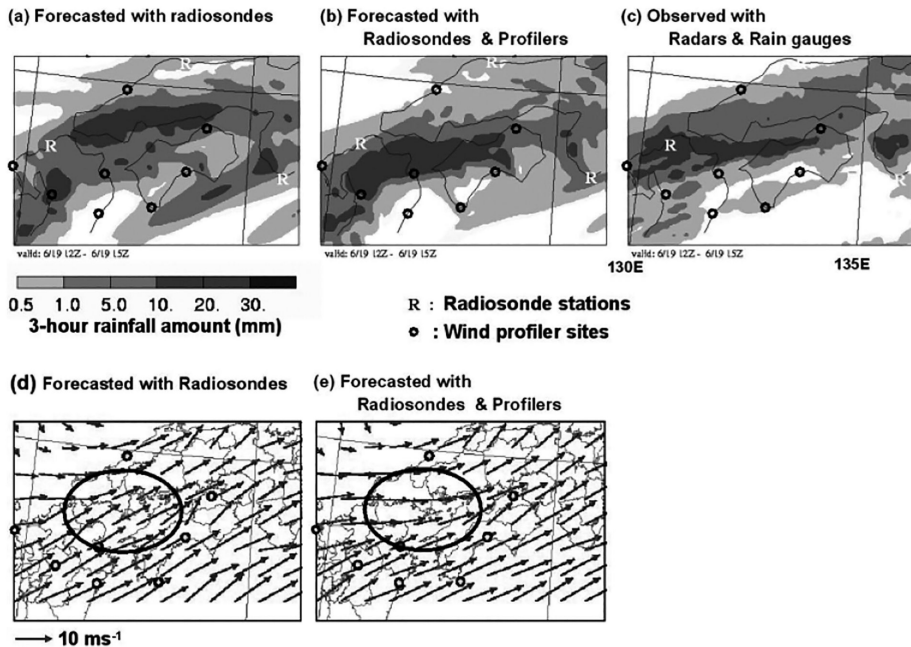
2001年の WINDAS の運用開始に先立ち気象庁は10

km 格子の静力学メソ数値予報モデル (MSM) の運用を開始しました (2005年からは 5 km 格子非静力学モデル)。WINDAS 運用開始とともにそのデータは 4 次元変分法データ同化システムによってさっそく MSM に取り込まれ、第10図のようにメソスケール降水現象を対象とするインパクト実験によって WINDAS の出力する高層風データの有効性が実証されました (石川 2001; 多田 2002)。こうして WINDAS の設置の準備から完成後の性能評価に至る一連の作業によって、気象庁の予報部と観測部の間では以前よりも人や情報の交流が深まりました。2003年度からは、気象庁と通信総合研究所との共同研究の形式により、同研究所の保有する北海道稚内市の50MHz 帯 VHF レーダー (五十嵐ほか 2001) 及び沖縄県大宜味村の 400MHz 帯プロファイラ (足立 2003) のデータがリアルタイムで WINDAS の中央監視局に取り込まれ、同年4月から数値予報業務に利用され始めました。

一方 WINDAS の運用を続けるうち、WINDAS のシステムと観測データを監視する現業担当者から、春と秋のよく晴れた日の地上付近から高度 2~3 km の層において、WINDAS の測定する風向とラジオゾンデのそれとの間に数10°の偏差があるという指摘が上がってきました。これは明らかに WINDAS の誤観測



第9図 2000年度に設置された初代 WINDAS. (a) 与那国島, (b) 水戸, (c) 酒田, (d) レドーム内のアレイ型空中線。



第10図 気象庁の局地数値モデル (MSM) における WINDAS のデータ同化の効果。
(a) ラジオゾンデのみの数値予報の3時間雨量値, (b) ラジオゾンデと WINDAS を同化した数値予報の3時間雨量値, (c) 実測雨量 (解析雨量), (d) (a) に対応する850hPaの風, (e) (b) に対応する850hPaの風。2001年6月19日21時。石川 (2001) から。

でした。日本野鳥の会の会員でもあった職員の河原恭一さんが酒田のプロファイラサイトまで出向いて空を目視で観察し、三菱電機は赤外線カメラで夜空を監視し、さらに山階鳥類研究所に問い合わせをした結果、この誤観測は渡り鳥からの散乱波が原因であることがわかりました。設置以前に WINDAS の観測に渡り鳥からの散乱波が混入することは予想していましたが、その発生頻度がこれほど多く信号強度もこれほど強いとは考えておらず、対策に窮しました。調べてみると海外のプロファイラ網も効果的な対策を見出すことができていませんでした。するとそれから半年の間に、職員の小林健二さんが IQ 信号のうち渡り鳥からの信号を除去し大気エコーだけ取り出すアルゴリズムを開発し (小林ほか 2005), すぐにメーカーがプロファイラに実装したため、2002年には問題は解決しました。小林さんはこの功績により気象庁長官表彰を受けました。

気象庁が予算要求の準備を開始した1997年度から WINDAS 運用開始2年目の2002年度までの期間に次のとおり多くの人達が WINDAS の整備と運用開始の業務に携わりました。気象庁において新しい観測シス

テムを導入する際にこれだけ多くの人が携わるのだという例として紹介します。この他に企画や経理を担当した方々も参加しています。

技術資料の収集：迫田優一・上林正幸・小野寺慎一、阿部豊雄、山本義勝、永沼啓治・宮内誠司・五十嵐洋輔・小池哲治、予算要求：永沼啓治・宮内誠司・五十嵐洋輔、無線局開局手続き：山本義勝、永沼啓治・田尾孝幸・五十嵐洋輔、設置地点選定：永沼啓治・田尾英治・五十嵐洋輔、機器製作仕様書作成：小野寺慎一、山本義勝、永沼啓治、阿保敏広、定員要求：石原正仁、予算実行：宍戸利行・上杉忠孝・中村雅道・新谷賢一、製作の監督・検査：小野寺慎一、山本義勝、待受工事の指導：加藤美雄・阿保敏広・河原恭一、規則等整備：茂林良道・松元 誠、運用・データ評価・品質管理手法の最適化と改良：加藤美雄・阿保敏広・浅見幸宏・小林健二・泉川安志・河原恭一・井上大介・山下順也・山本浩嗣、高層気象観測室長：岩淵敏明・沖政進一・小原義廣、同課長補佐：野田忠彦・下道正則・石原正仁・梶原良一。

WINDAS のデータは世界気象機関 (WMO) の

GTS 回線を通じて世界に送ることにしたので、完成直後に NOAA の研究者が、「WINDAS は米国の 1 週間先の天気予報の精度を向上させるだろう」と冗談を交えて語ったと聞きました。実際 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) は、数値モデルへのデータ同化作業を通して WINDAS の観測精度は米国やヨーロッパのプロファイラ観測網以上であると評価するとともに、そのデータが短時間予報へ正のインパクトを与えていることを示しました (Thépaut *et al.* 2004)。WINDAS の製作にあたりデータの品質管理を徹底したことが功を奏した結果だと思えます。

WINDAS の運用開始はそれまで見ることのできなかった現象を直接見るきっかけにもなりました。一例として、台風が日本を南から北に縦断する際に、台風の回転軸が上空の偏西風によって前方に傾斜する様子を WINDAS が捉えました (山下・石原 2005)。一方で、2008年には WINDAS の運用開始と数値予報の精度向上を理由に、仙台と那覇のラジオゾンデ観測が廃止となりました。これは同地点を取り除いた予報実験の好結果と予算事情を踏まえての措置でしたが、私はこの廃止が台風の進路予想や大雨予想の精度の維持にほんとうに支障を来さないかと不安を持ちました。

WINDAS のデータ品質管理の詳細や観測データの精度、観測達成高度の季節変化などは観測部観測課高層気象観測室 (2003)、加藤ほか (2003)、石原ほか (2004)、Ishihara *et al.* (2006) に解説しました。この中の英文論文は海外の気象機関や研究機関から WINDAS に関する資料を請求されることが何度かあったので、その資料としてまとめたものです。なお 2018年現在、WINDAS は 33 台の第 2 世代プロファイラによって全国の高層風観測を続けています。

観測部に在籍中には DRAW や WINDAS の新設とは反対に、宮古島レーダー (1964~1994年) の廃止と気象ロケット観測 (1970~2001年) の終了に関係し、新旧観測システムの交代を見ました。宮古島レーダーは 1959 年台風第 14 号サラ (宮古島台風) によって大きな被害を受けたことを契機に設置され、1994 年に石垣島レーダーが於茂登岳に移設され観測範囲が大幅に拡大したことから役目を終えました。私は一度だけ気象ロケットの打ち上げに立ち会いました。発射から数秒で空に吸い込まれて見えなくなる動的な気象観測 (実際には高度約 60km から落下させる明星電気製のドロップゾンデで風と気温を測定する) を気象庁が実施

してきたことに驚きました。成層圏突然昇温の監視や、地球温暖化にともなう成層圏の低温化などに貢献した気象ロケット観測 30 年の歴史は歴代職員と永沼啓治さんによってまとめられました (観測部観測課 2005)。

9. 観測の管理部門

2002 年度から 2004 年度には気象庁観測部の観測課と管理課に在席して気象観測全般の管理業務に従事しました。この期間で最も印象深かった仕事は、2002 年 9 月にスロバキアのブラチスラバで開かれた WMO の測器観測法委員会 (CIMO) の第 13 回総会に出席したことです。10 日間の会議期間中に地上、高層、レーダー、地球環境などの観測手法や測器校正の統一化などについて延々と議論が続く中で、あらかじめ気象庁で決めておいた日本の意見を述べ、決議に導くという慣れない作業に連日冷や汗をかきました。この CIMO 総会の終了後、羽鳥光彦観測課長の指示で、英国気象庁で運用を始めたばかりのラジオゾンデの自動観測装置 (オートゾンデ) を見学し、その仕上がりの見事さに驚くとともにそれが順調に運用されていることを確かめました。日本でも 2005 年に八丈島にオートゾンデが採用されたのをきっかけに、現在では全国 16 地点のラジオゾンデ観測地点のうち 8 地点でオートゾンデによる自動観測が行われています。

私が気象研企画室に移った 2005 年に、所長の藤谷徳之助さんの推薦により日本気象学会の気象災害委員会を立ち上げることになりました。気象と災害を結びつける仕事として、大雨災害が発生すると気象研の加藤輝之さんと相談してメソ気象研究会との共催の形で研究会を開きましたが、場所を変え形を変えて毎年のように発生する大雨災害を見て、わが国に発生する降水システムの多様さをつくづく思い知らされました。

気象庁は 1982~1994 年の期間に 20 台すべての一般気象レーダー (空港の気象レーダー以外の気象レーダー) をデジタル化しました。2001 年度からは観測部の赤枝さん、レーダー業務の高度化として木俣昌久さん、須田良久さん、宮城仁史さん、塚本尚樹さんが中心となってレーダーデータの 3 次元化・高分解能化 (2.5km から 1.0km へ) とドップラー速度を数値予報に同化するための複雑なアンテナ走査の実現を進め、2005 年度に完成しました。さらに 2007 年度には 20 台の気象レーダーの全国集約 (東京からの遠隔制御) も実現しました。同時に 2006 年 3 月から東京レーダーが全国 20 台の第 1 号機としてドップラー化されました。私

はこうした一般気象レーダーの高度化に関わる作業には関与しませんでした。2006年度から2年間観測部観測システム運用室に席を置いたため、主に気象レーダーの3次元データの活用やレーダーデータ品質管理の強化についての業務をサポートしました(観測部観測課観測システム運用室 2007)。その中で、鉛直積算雨量などの新しいレーダープロダクトが予報現場ですぐに利用されると期待していましたが、新しいプロダクトを予報業務に結びつけることはそれほど容易ではないことがわかりました。

2008年に私は気象研にもどり、その年の夏に神戸市都賀川と東京都豊島区雑司が谷で起こった都市型水害は、気象庁と国土交通省河川局(当時)を震撼させる災害となりました。これに対応して気象庁は2008年にレーダーの観測間隔を10分から5分といった対策を施し、国土交通省は防災科学技術研究所の真木雅之さんの主導で2010年にXRAINの運用を始めました(真木ほか 2017)。研究分野では組織化されていない積乱雲による突発的な大雨(局地的短時間大雨、ゲリラ豪雨などという)を総合的に調べるため、真木さんが代表となって科学技術戦略推進費「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」が2010年度に始まり、その英名をTokyo Metropolitan Area Convection Study (TOMACS) としました。私も1年間だけこの研究プロジェクトに参加し、雑司が谷の水害が起こった日に関東地方に発生した積乱雲群の統計解析と局地的大雨の直前予測の可能性を調べました(石原 2012a, b)。場所と時間は違いますが積乱雲が原因になっているという点で、最初に述べた西穂高落雷災害と重なるという思いがしました。

私が気象大学の学生するとき、米国で1946、47年に実施されたThunderstorm Project (Byers and Braham 1949) とわが国の関東平野で1940~46年に実施された雷雨の総合観測(日本学術振興会 1950)を駒林先生が紹介して下さいました。小倉義光さんは「Thunderstorm Projectはその後の気象学の発展に大きく貢献したが、終戦前後の困難な時期に実施された関東の雷雨総合観測は日本の気象学への発展への貢献度は小さかった。」と述べており(小倉 1995)、私はこのことを残念に思っていました。駒林先生のお話をきっかけに1983、84年に栃木県と茨城県の県境付近で発生した列状とマルチセル型の積乱雲群の内部構造をデュアル解析によって調べましたが(石原ほか 1987)、わずか2つの事例解析では関東平野に発生す

る多様な積乱雲を包括するような議論には発展させられず、時が過ぎました。TOMACSが始まったとき、私は日本で念願の積乱雲に関する総合研究が始まったと喜びました。たくさんの研究者が参加したTOMACSは気象研の斉藤和雄さんの尽力によって2013年にはWMOから世界天気研究計画(WWRP)研究開発プロジェクト(RDP)として認証され、さらに発展しています(中谷ほか 2014)。TOMACSの成果は気象研究ノートにまとめられました(小司ほか編 2018)。

気象庁最後の職場となった高層気象台では、2012年3月にWMOのGlobal Climate Observing System (GCOS) Reference Upper Air Network (GRUAN)の第4回実施調整会議(東京)に参加した28名の各国の専門家をつくばに招待しました(能登・小城 2013)。職員一同で展示や説明会を実施するとともに、日本の気温基準ゾンデ(明星電気)と汎用ゾンデとの連結飛揚と、1924年の大石和太郎初代台長によるジェットストリーム発見を記念して構内に設置されている石碑を披露しました(Lewis 2003)。

10. 気象庁を退職して

2012年に気象庁を定年退職すると、京大の津田先生から教えていただいてグローバルCOEプロジェクトの募集に応募し、防災研究所(防災研)の寶馨先生の研究室にお世話になりました。この年の8月13日深夜に宇治市は大雨に見舞われ、市内の小河川が氾濫して二人の方が死亡・行方不明となるという水害が発生しました。中小河川による水害が社会的に問題視され始めていた時期であるとともに、地元の水害でもありましたから、京大工学部の黒瀬陽平さん(現気象庁予報課)といっしょに災害現場で被害状況の聞き取り調査や河川の断面の測量などを行いました。黒瀬さんは河川流出モデルに解析雨量値を入力してこの水害を起こした河川の流量を計算し、同モデルがこの小河川の氾濫の監視に適用できることを確かめました(黒瀬ほか 2018)。私は以前から気になっていた淀川チャンネル型大雨をドップラー化が進んだ現業気象レーダーのデータを使って解析する機会を得ました(石原・寶 2018)。これにより六甲山の地形効果と降雨帯からの外流出が複雑にからむことによってバックビルディング型線状降水帯群が発生していることがわかりましたが、観測データからだけの解析には限界を感じました。

2014年から私はスリランカの気象業務における観

測・予報・情報伝達の改善を図る目的で実施された国際協力機構（JICA）の技術協力プロジェクトに参加し、JICA 本部の海外協力専門員である赤津邦夫さんから指導を受けながら同国気象局に滞在しました。私が滞在した3年間にスリランカでは土砂災害や洪水によって400名以上の人命が失われ、大雨災害を対象とする気象業務の強化の必要性を認識しました。私の滞在中には気象庁から7名の職員（新垣貞則さん、萩谷聡さん、後藤敦史さん、足立アホロさん、永田和彦さん、福田純也さん、丸山拓海さん）と海洋研究開発機構（JAMSTEC）の山中大学さんが JICA の短期専門家としてスリランカに各1～2週間滞在し、気象局職員への講義や実習を通じてプロジェクトを支援して下さいました。谷田貝亜紀代さん（名古屋大学）、林泰一さん（京都大学）、藤吉康志さん（北海道大学低温科学研究所）、津田敏隆さん（京都大学生存圏研究所）はご自身の出張などでスリランカを訪れ、専門分野のセミナーを気象局で開いて下さいました。スリランカには JICA によって数年後に固体化二重偏波気象レーダーが2台設置されることになっており、降雨災害対策の切り札として期待されています。

発展途上国への援助はこれまでのように機材供与や技術移転ばかりでなく、気象局職員に修士・博士号を取得させるなどの人材育成も必要だと思います。この点において特に日本気象学会を含め日本の気象・水文関係者の協力をお願いしたいと思います。一方、多くの発展途上国では日本を含む諸外国からの援助により気象レーダーや自動地上気象観測装置（AWS）が設置されてきました。これらは各国の気象業務の向上に役立っていますが、レーダーに関しては雨量の定量的観測ができない、地上気象観測では AWS と水銀気圧計などによる有人観測とが並行運用され非効率的であるなど、途上国援助には課題が残されていると感じています。

気象庁において新しい観測システムの導入が円滑にできた事例は、気象研における基礎研究と気象庁本庁での技術開発がうまく連携したときでした。逆に事前の準備が不足していたため、新システム導入後の改善・改良に手間がかかった事例もありました。気象庁では気象研だけでなく地方官署や本庁でも「調査研究」をすることが伝統となっています。大きな発見とはいかなくても、業務で開発した技術や調査で見出したことをレポートとして残すことは、後進にとって助かることです。そして「天気」の「調査ノート」は気

象庁の外の人にもそうした調査研究の結果を見ていただく良い機会を提供する場だと思っています（溝本・石原 2009；内田ほか 2010）。

ここまで今回の受賞とは直接関係ない話題も含め、長いお話を書きました。私が気象庁を退職する際に有志の方々が退職を祝う会を開いて下さいました。会の終わりに私は「気象庁に勤めたほぼ全期間をレーダーに関する仕事に携わることができて幸せでした。そのなかでも特にたくさんの職場仲間とメーカーの技術者が力を合わせてやり遂げた WINDAS の整備が最も思い出深い仕事です。」と挨拶をしました。今回の受賞は、駒林 誠先生、武田喬男先生、佐々木嘉和先生のご指導、そして気象庁のたくさんの先輩や同僚、関係研究機関・大学の研究者の方々との交流のおかげだと思っております。観測システムの整備に携わってきたことから、メーカーの技術者とのお付き合いも忘れることができません。私と同世代の三菱電機（株）の若林 勝さん、濱津享助さん、日本無線（株）の吉田武弘さん、長田正嗣さん、（株）東芝の及川博史さん、足立栄男さんは仕事の上では手強い議論相手でしたが、同時によき友人でもありました。

気象の観測・解析の分野における調査・研究に関して二宮洸三さんは「気象集誌・天気では日本近傍の現象についての観測事実の報告が極端に少ない。（中略）（日本では）事実の記録を研究成果として見なさない偏向も強すぎる。ストーリーテラーのような因果関係の説明よりも事実の記録報告の方が貴重である。その解釈・理論・実験は興味を持った読者が研究を深めればよいのである。」と述べています（二宮 2006）。研究として気象観測・解析をする人やその結果を応用する人にとって貴重な教訓だと思います。

原稿にコメントをいただいた査読者、阿保敏広さん、天気編集委員の今田由紀子さんに感謝いたします。

参考文献

- 足立アホロ, 2004: ウィンドプロファイラーの構成（ハードウェア）。気象研究ノート, (205), 31-40。
 足立樹泰, 2003: 通信総合研究所における400 MHz 帯ウィンドプロファイラーの開発。日本気象学会2003年度春季大会講演予稿集, 83, 497。
 Akaeda, K., T. Yokoyama, A. Tabata, M. Ishihara and H. Sakakibara, 1991: Evolution of the kinematic structure within a meso- β scale convective system in

- the growing and mature stages. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2664-2676.
- Byers, H. R. and R. R. Braham, Jr., 1949: The Thunderstorm. U. S. Government Printing Office, Washington D. C., 287pp. (Reprinted 2002, University Press of the Pacific)
- Gal-Chen, T., 1982: Errors in fixed and moving frame of references: Applications for conventional and Doppler radar analysis. *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2279-2300.
- Hamazu, K., 2002: Development of Doppler radars for studying aviation weather in terminal area, Ph.D. Dissertation, Kyoto University, 207 pp.
- Hashiguchi, H., S. Fukao, Y. Moritani, T. Wakayama and S. Watanabe, 2004: A lower troposphere radar: 1.3-GHz active phased-array type wind profiler with RASS. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 915-931.
- Houze, R. A., Jr., 1977: Structure and dynamics of a tropical squall-line system. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1540-1567.
- Houze, R. A., Jr. and C.-P. Cheng, 1977: Radar characteristics of tropical convection observed during GATE: Mean properties and trends over the summer season. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 964-980.
- 五十嵐良喜, 池田真帆, 山崎亮三, 加藤久雄, 岩本 巖, 齋藤義信, 2001: 稚内における超高層大気観測用 VHF レーダーによる対流圏の連続観測. 日本気象学会2001年度春季大会講演予稿集, **79**, 456.
- Ikawa, M., H. Sakakibara, M. Ishihara and Z. Yanagisawa, 1987: 2-dimensional simulation of the convective snow band observed over the Japan Sea. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 605-633.
- Ishihara, M., 1985: Statistical analysis of radar echoes observed in the equatorial western Pacific during summer MONEX in 1979. *J. Meteor. Soc. Japan*, **63**, 210-225.
- 石原正仁, 1987: 観測・解析を中心とした米国メソ気象事情-NOAA/NSSLに滞在して. *天気*, **34**, 481-486.
- 石原正仁, 1991: 1台のドップラーレーダーによる大気下層の水平発散の検出. *天気*, **38**, 157-167.
- 石原正仁編, 2001: ドップラー気象レーダー. 気象研究ノート, (200), 日本気象学会, 216pp.
- 石原正仁, 2012a: 2008年雑司が谷大雨当日における積乱雲群の振舞いと局地的大雨の直前予測 I-3次元レーダーデータによる積乱雲群の統計解析一. *天気*, **59**, 549-562.
- 石原正仁, 2012b: 2008年雑司が谷大雨当日における積乱雲群の振舞いと局地的大雨の直前予測 II-積乱雲に伴う局地的大雨の直前予測の試み一. *天気*, **59**, 563-577.
- 石原正仁, 田畑 明, 1996: 降水コアの降下によるダウンバーストの検出. *天気*, **43**, 215-226.
- 石原正仁, 寶 馨, 2018: 2012年8月13, 14日に宇治市周辺で発生した大雨 第1部 大雨をもたらした線状降水帯群のメソ構造. *天気*, **65**, 5-23.
- Ishihara, M. and Z. Yanagisawa, 1982: Structure of a tropical squall line observed in the western Pacific during MONEX. *Pap. Meteor. Geophys.*, **33**, 117-135.
- Ishihara, M., Z. Yanagisawa, H. Sakakibara, K. Matsuura and J. Aoyagi, 1986: Structure of a typhoon rainband observed by two Doppler radars. *J. Meteor. Soc. Japan*, **64**, 923-939.
- 石原正仁, 榊原 均, 柳沢善次, 松浦和夫, 青柳二郎, 今泉孝男, 1987: 2台のドップラーレーダーによって観測された関東地方の雷雲の内部構造. *天気*, **34**, 321-332.
- Ishihara, M., H. Sakakibara and Z. Yanagisawa, 1989: Doppler radar analysis of the structure of mesoscale snow bands developed between the winter monsoon and the land breeze. *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 503-520.
- Ishihara, M., H. Sakakibara, A. Tabata, K. Akaeda and H. Okamura, 1991: Doppler radar analysis of a typhoon eyewall. Preprints, 25th Int. Conf. Radar Meteor., June 1991, Paris, Amer. Meteor. Soc.
- 石原正仁, 榊原 均, 田畑 明, 赤枝健治, 横山辰夫, 1991: 沖縄地方における梅雨期の降水システムの特徴. 気象研究所技術報告, (27), 162pp.
- 石原正仁, 田畑 明, 赤枝健治, 横山辰夫, 榊原 均, 1992: ドップラーレーダーによって観測された亜熱帯スコールラインの構造. *天気*, **39**, 727-743.
- Ishihara, M., Y. Fujiyoshi, A. Tabata, H. Sakakibara, K. Akaeda and H. Okamura, 1995: Dual Doppler radar analysis of an intense mesoscale rainband generated along the Baiu front in 1988: Its kinematical structure and maintenance process. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 139-163.
- 石原正仁, 田代照政, 中谷観治, 1999: 関西国際空港の空港気象ドップラーレーダーによる低層ウィンドシヤーの検出状況. *航空気象ノート*, (55), 3-18.
- 石原正仁, 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 2004: 気象庁におけるウィンドプロファイラー観測業務. 気象研究ノート, (205), 169-202.
- Ishihara, M, Y. Kato, T. Abo, K. Kobayashi and Y. Izumikawa, 2006: Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 1085-1096.
- 石原正仁, 藤吉康志, 新井健一郎, 吉本直弘, 小西啓之, 2009: 関西空港付近に発生したマイクロバーストの形態と構造. *天気*, **56**, 727-742.

- 石川宜広, 2001: 4次元変分法を用いた数値実験. 数値予報解説資料(気象庁), 34, 9-11.
- 石崎潑雄, 吉川祐三, 1978: 台風7705号による被害について. 京都大学防災研究所年報, (21) B-1, 349-362.
- Izawa, T., ed., 1980: MONEX/FGGE Data Report. May 1-June 20, 1979, The Tropical Western Pacific, 気象研究所, 331pp.
- 観測部観測課, 2005: 気象ロケット観測30年の記録. 測候時報, 72, 81-191.
- 観測部観測課観測システム運用室, 2007: 新しいレーダー観測資料の利用に関する検討—平成18年度観測データ高度利用技術担当者会議におけるレーダー三次元データと関連プロダクトの検討結果—. 測候時報, 74, 35-92.
- 観測部観測課高層気象観測室, 2003: 局地的気象監視システム(WINDAS)による高層風観測業務の開始. 測候時報, 70, 63-118.
- Kato, T., 1998: Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed over southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. J. Meteor. Soc. Japan, 76, 97-128.
- 加藤美雄, 阿保敏広, 小林健二, 泉川安志, 石原正仁, 2003: 気象庁におけるウィンドプロファイラ観測業務. 天気, 50, 891-907.
- Kawashima, M., K. Tsuboki and T. Asai, 1995: Maintenance mechanism and thermodynamic structure of a Baiu frontal rainband retrieved from dual Doppler radar observations. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 717-735.
- 気象庁, 1999: 関東地域メソ解析プロジェクト. 気象庁技術報告, (120), 243pp.
- 気象庁予報部, 1998: メソ数値予報の実用化に向けて. 数値予報課報告・別冊, (44), 79pp.
- 気象衛星・観測システム研究部, 1995: ウィンドプロファイラーによる気象の観測法の研究. 気象研究所技術報告, (35), 88pp.
- Klemp, J. B., R. B. Wilhelmson and P. S. Ray, 1981: Observed and numerically simulated structure of a mature supercell thunderstorm. J. Atmos. Sci., 38, 1558-1580.
- 小林健二, 阿保敏広, 泉川安志, 河原恭一, 石原正仁, 若山俊夫, 松田知也, 2005: 気象庁のウィンドプロファイラ観測における渡り鳥エコーの影響と対策. 天気, 52, 11-23.
- 小林隆久, 2004: ウィンドプロファイラー概論. 気象研究ノート, (205), 1-10.
- 高層気象台, 観測部, 予報部, 1998: ウィンドプロファイラーによる風観測の定常化に関する業務実験—調査結果と提言—. 測候時報, 65, 137-228.
- 黒瀬陽平, 寶 馨, LUO Pingping, 石原正仁, 2018: 2012年8月13, 14日に宇治市周辺に発生した大雨 第2部 宇治市志津川の増水・氾濫の実態把握と予測可能性. 天気, 65, 145-157.
- 楠 研一, 2018: 気象研究所におけるXバンドドップラーレーダーを用いた研究—これまでと今後—. 気象研究ノート, (237), 209-217.
- 楠 研一, 鈴木 修, 大野久雄, 1996: 2つのパルス繰り返し周波数によるデータを用いたドップラー速度折り返し補正のための「複合アルゴリズム」. 天気, 43, 681-690.
- Lewis, J. M., 2003: OOISHI's OBSERVATION: Viewed in the context of jet stream discovery. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84, 357-370.
- 真木雅之, 上田 博, 中北英一, 2017: Xバンド偏波レーダーによる降水観測技術の開発及び社会実装—2016年度岸保賞受賞記念講演—. 天気, 64, 849-872.
- 溝本 悟, 石原正仁, 2009: 回転スペクトルによって調べた大阪湾周辺における左回転する海陸風の地域特性と季節変化. 天気, 56, 769-774.
- 長野県松本深志高等学校, 1969: 西穂高岳落雷遭難事故調査報告書: 1967.8.1. 336 pp.
- 中谷 剛ほか, 2014: 第1回 TOMACS 国際ワークショップの報告—WMO世界天気研究計画・研究開発プロジェクトの開始—. 天気, 61, 557-564.
- 中山 章, 伊関次郎, 1985: 1983年7月27日に富山空港で発生した microburst. 天気, 32, 329-332.
- 日本学術振興会, 1950: 雷の研究. 日本学術振興会第9特別委員会編, 電気書院. 194 pp.
- 二宮光三, 2006: 日本列島域の大規模および中規模循環系に関する研究—特に多種スケール階層構造に注目して—2005年度藤原賞受賞記念講演—. 天気, 53, 93-122.
- 能登美之, 小城良友, 2012: GRUAN 実施調整会議サイトビジットの開催. 高層気層台彙報, 70, 1-6.
- 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, 1995: 雷雨研究事始め日米比較. 気象, 39 (12), 4-8.
- Ogura, Y., T. Asai and K. Dohi, 1985: A case study of a heavy precipitation event along the Baiu front in northern Kyushu, 23 July 1982: Nagasaki Heavy Rainfall. J. Meteor. Soc. Japan, 63, 883-900.
- 大野裕一, 1999: 通信総研ウィンドプロファイラで観測された小金井における風変動. 気象研究ノート, (193), 227-234.
- Passarelli, R., Jr. and R.R. Braham, Jr., 1981: The role of the winter land breeze in the formation of Great Lake snow storms. Bull. Amer. Meteor. Soc., 62, 482-491.
- Ray, P. S., R. J. Doviak, G. B. Walker, D. Sirmans, J.

- Carter and B. Bumgarner, 1975: Dual-Doppler observation of a tornadic storm. *J. Appl. Meteor.*, **14**, 1521-1530.
- Sakakibara, H., M. Ishihara and Z. Yanagisawa, 1988: Squall line like convective snowbands over the Sea of Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 937-953.
- 瀬古 弘, 2010: 中緯度のメソ β スケール線状降水系の形態と維持機構に関する研究. *気象庁研究時報*, **62**, 1-74.
- Shimazu, Y., 1997: Wide slow-moving rainbands and narrow fast-moving rainbands observed in Typhoon 8913. *J. Meteor. Soc. Japan*, **75**, 67-80.
- 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.
- 志崎大策, 1980: 空港用じょう乱探知レーダ. *気象研究ノート*, (139), 62-67.
- 小司禎教, 三隅良平, 中谷 剛編, 2018: 都市における極端気象の観測・予測・情報伝達. *気象研究ノート*, (236), 408pp.
- 田畑 明, 中澤 栄, 安富裕二, 榊原 均, 石原正仁, 赤枝健治, 1989: 寿命の長いシングルセル型対流雲の構造の解析. *天気*, **36**, 499-507.
- Tabata, A., H. Sakakibara, M. Ishihara, K. Matsuura and Z. Yanagisawa, 1992: A general view of the structure of Typhoon 8514 observed by dual-Doppler radar -From outer rainbands to eyewall clouds-. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 897-917.
- 多田英夫, 2002: 数値予報システムにおける国内ウィンドプロファイラデータの利用. *日本気象学会2002年度春季大会講演予稿集*, C110.
- 田中恵信, 鈴木 修, 2000: レーダー解析ソフト “Draft” の開発. *日本気象学会 2000 年度春季大会予稿集*, 77.
- 立平良三, 1972: 気象ドップラーレーダ. *気象研究ノート*, (112), 375-417.
- Thépaut, J.-N., E. Andersson, A. Beljaars, M. Hortal and P. Janssen, 2004: Two new cycles of the IFS: Cycle 26r3 and Cycle 28r1. *ECMWF Newsletter*, **102**, 26-35.
- 内田顕司, 溝本 悟, 澤田睦子, 石原正仁, 2010: 気象レーダーによる雹(ひょう)の監視の試み. *天気*, **57**, 646-650.
- 上田 博, 1985: NSSL(NOAA/ERL)に滞在して. *天気*, **32**, 201-206.
- Yamada, Y., 1997: Numerical estimation of error variance in horizontal divergence for the adjustment of vertical winds derived from conical-scan-based dual-Doppler radar data based on the “floating boundary condition” concept. *Pap. Meteor. Geophys.*, **48**, 49-65.
- 山下順也, 石原正仁, 2005: ウィンドプロファイラが捉えた台風第0416号の風の変化. *天気*, **52**, 539-547.
- 柳沢善治, 青柳二郎, 榊原 均, 松浦和夫, 石原正仁, 1983: 中緯度において台風周辺に発達する降雨帯の構造. *日本気象学会 1983 年度春季大会講演予稿集*, 122.
- 柳沢善治, 石原正仁, 沢井哲滋, 1986: ミリ波レーダーによる海霧の観測. *天気*, **33**, 603-612.
- 吉崎正憲, 中村 一, 中村健治 編, 1999: つくば域降雨観測実験. *気象研究ノート*, (193), 日本気象学会, 288 pp.
- Ziegler, C. L., 1985: Retrieval of thermal and microphysical variables in observed convective storms. Part 1: Model development and preliminary testing. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1487-1509.
- Zipser, E. J., 1977: Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line structure. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1568-1589.

Implementation of New Observing Systems through Remote Sensing

Masahito ISHIHARA*

* *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052, Japan.*
E-mail: mishihar0308@yahoo.co.jp

(Received 9 July 2018; Accepted 17 December 2018)
