

国土交通省におけるレーダ雨量計開発の歴史と今後の方向性

深見和彦・川崎将生・土屋修一・藤巻浩之

1. はじめに

日本の各地で、いわゆるゲリラ豪雨と呼ばれる局地的な大雨や線状降水帯等による集中豪雨が多発し、それらに起因する浸水被害や土砂災害、水難事故が毎年のように発生している。これらの豪雨の迅速かつ的確な観測・予測は、水防・避難誘導等の防災・減災のための危機管理活動のために必須の情報である。レーダ雨量計は、レーダサイトを中心とした広域にわたる降水場を1~2分以内に迅速に把握することを可能とするとともに(=広域性、即時性)、地上雨量観測が粗となる山地域・中小河川支川流域を含め、局所的なゲリラ豪雨・線状降水帯等の面的な降水分布の移動や発達・減衰の様子を250m~1kmメッシュというきめ細かさで定量的に捉えることができる(=時空間的網羅性、面的把握の直感的容易性・定量性)。これらの他には代えがたい特長により、レーダ雨量計は水防災・減災に関わる全ての関係者にとって必須の情報インフラとなっているだけでなく、テレビやインターネットを通じて広く国民にも認知され利用されている。しかし、このようなインフラの整備・普及には、長年にわたる多くの研究者・技術者の地道な努力の積み重ねがあった。旧建設省がレーダ雨量計の研究開発を本格的に開始(1966年)してから50年、その成果によりレーダ雨量計第1号機としての赤城山レーダが実運用としての観測を開始(1976年)してから40年、という機会を利用し、その歴史をごく概略的ではあるが振り返ってみたい。それにより今後のあり方を考える一助となれば幸いである。

2. レーダ雨量計開発の黎明期 ~ 関東・赤城山におけるレーダ雨量計実用化研究

レーダ技術の気象庁における国内利用は1955年に遡る。当時の気象レーダは、受信電力のデジタル処理が行われず、レーダからの発信電波に対

する降水粒子群からの反射(エコー)強度分布をモニタ上で目視し、観測者の経験に基づき大地からの不要反射(グランドクラッタ)の影響を適宜判断しながら、降雨強度を3段階程度に分類してスケッチ(3次元観測も組み合わせることで、降水エコーが返ってくる最高高度=降水エコー頂高度も記録)するものであった¹⁾。これに対しレーダ雨量計は、雨量の定量観測そのものを目的とし、受信電力を電子計算機(当時はアナログコンピュータ)に取り込むことで、レーダ方程式により求まる反射因子 Z から、 $Z=BR^\beta$ の経験的關係式(Z - R 関係式。 B, β は経験定数)を用いて雨量分布を直接算出・表示(Z - R 法もしくは $B\beta$ 法)し、雨域下流側の洪水を予測することでダム操作や防災行動に役立てることを最初から指向していた。

このような発想に基づくレーダ雨量計としての国内利用は、1963年に日本人工降雨研究協会(九州電力等)が熊本県人吉において実施したXバンド(9GHz帯)レーダによる観測研究が最初であろうとされる²⁾。レーダアンテナの360度の回転(スキャン)に合わせて、それぞれの方位毎に距離別の雨滴からの一瞬の反射強度分布を残光の多いブラウン管に表示する円形モニター(Plan Position Indicator=PPIスコープ)を備えるのは、気象レーダと共通であるが、本レーダでは、さらにアナログコンピュータを介して以下のような2つの追加機能を有していた。一つは、距離毎の反射強度をレーダ方程式(Z - R 法)に基づき雨量値に換算してPPIスコープ上の光強度として表示させ、かつ、その雨量値分布(等雨量線)を描画し表示させる機能である。但し、降雨そのものによる電波の減衰や後述する大地からの不要反射(グランドクラッタ)の影響を排除する機能は付いていなかった。もう一つは、PPIスコープ上に面積雨量の計測対象とする河川流域を切り抜いた黒紙を当てた上で、当該流域のみから発出されて来る全体光量を光電管により計測し、流域平均雨量を算出する機能である。レーダデータの解析処理がA/D変換とデジタルコンピュータにより

History of "Radar Raingauges" as the Precipitation Radar System of MLIT and its Future Direction

*土木用語解説：単偏波レーダ/ Z - R 法

デジタル化される以前から、水文学的活用へのニーズを背景としてこれらの機能を確保していた点は、大変興味深い。建設省土木研究所の木下武雄水文研究室長（当時）はそれを既に「レーダ雨量計」と呼んでいる。当時の知見・技術レベルを考慮すれば非常に大胆な命名ではあるが、河川・水文技術者としての夢・目標実現への強い意思のこもった命名が、今日への更なる技術発展を生む大きな誘因であったかもしれない。

建設省としては、全国の主要河川においてダム建設が進み、複数のダム流域を包含する河川上流域の雨量の把握ニーズが高まったことを背景として、1966年に、東京都田端および群馬県赤城山に設置されたXバンドレーダを利用してレーダ雨量計実用化の研究に本格的に着手した（図-1）。

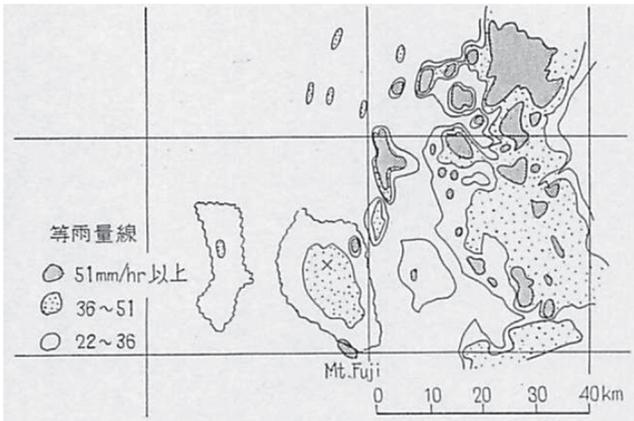


図-1 田端Xバンドレーダ雨量計による1966年9月24～25日山梨県足和田村土砂災害時の雨量観測例（9/24 23:42～44）。アナログコンピュータを介してPPIスコープ上に表示された等雨量線図（写真撮影により記録）をスケッチしたもの。※文献3）より。

1967年からは科学技術庁、建設省（河川計画課・電気通信室、関東地方建設局、利根川ダム統合管理事務所、土木研究所）、ならびに気象庁の3者による共同研究が開始され、電波の降雨減衰の影響で60km程度までが定量観測範囲となるXバンドよりも、広域（80～100km程度以上）を監視できるCバンド（5GHz帯）の試験機を赤城山に設置した。そこでの試験観測から、Z-R法に基づく雨量観測の可能性を確認する一方で、雨滴の粒径分布によって変化し得るZ-R関係式の定数 B, β の最適値は降雨イベント毎に異なることも示された。科技庁と気象庁との共同研究は3年間で終了したため、1970年からは建設省として独自に開発を継続した。同年には、アナログコン

ピュータにより従来実施していた信号処理を、受信電力をA/D変換してデジタルコンピュータに取り込んで計算処理を行う方式、いわゆるレーダのデジタル化への変更をいち早く実現している。これにより、後述するグラウンドクラッタ除去など、様々な解析処理を柔軟に実施する環境が整えられた。

レーダのデジタル化に伴い、実用化に向けての様々な懸案への具体的な方策の検討が進んだ。定数 B, β については、降雨イベント毎にその都度地上雨量に合わせて最適化する運用も当初は検討されたが、当時の計算処理速度等の限界と、迅速な情報提供を優先する判断から、降雨イベント群全体として平均的に最も良い精度を確保できる定数をあらかじめ設定しておく方式に変更した。グラウンドクラッタ成分除去については、降雨時エコーから晴天時エコーを差し引く方式（クラッタ減算

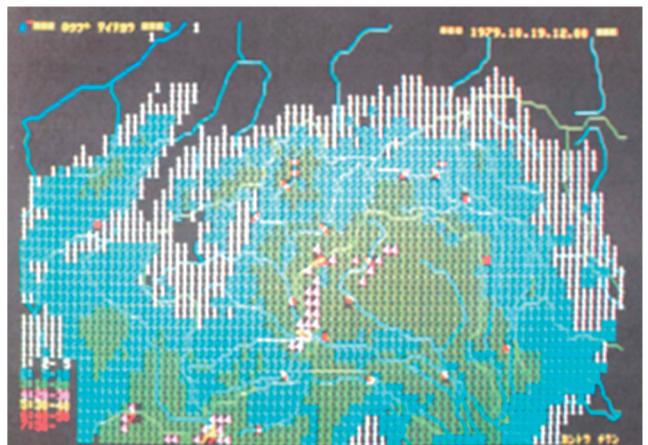


図-2 赤城山レーダ雨量計における雨量定量観測の専用端末表示画面（3kmメッシュ、1979年）。※文献4）より。



図-3 旧建設省関東地方建設局赤城山レーダ雨量計第1号機(1976年)

法)を採用した。レーダ雨量計の表示は、定量観測範囲を120kmとし、3kmメッシュ/5分毎の雨量強度を降雨なしを含め7段階に0~6の数字で、当時はまだ世に出回り始めて間もないデジタルカラーキャラクタディスプレイ上でモニタ表示するものとした(図-2)。これらの検討^{4),5)}を積み上げることで、1975年には実用化レーダの設備の製作を行い、1976年には赤城山に設置して、デジタルレーダ実用機として世界初となるレーダ雨量計第1号機としての運用を開始した(図-3)。

3. Z-R法の確立と降雨予測研究の萌芽

Cバンドレーダ雨量計情報の水防災管理への有用性は高く評価され、1978年以降、関東・三ツ峠や九州・釈迦岳、近畿・深山をはじめとして順次全国への整備が進むこととなった。しかし、単偏波レーダであるため、得られる有効な情報は反射因子Zのみであり、Z-R関係式における定数B、 β のばらつきや経時的に変化するグラウンドクラッタの影響等が依然として大きな課題として残っていた。これらについて土木研究所を中心として引き続き研究を継続した⁶⁾。グラウンドクラッタについては、降雨エコーが短時間で大きく変動するのに対し大地エコーは短時間では変動しない特性を利用したハイパスフィルタによる除去法(MTI法)がクラッタ減算方式よりも優れていることを示し、その後、MTI法(もしくは両者の併用方式)が普及した。B、 β のばらつきの扱いについては、過去降雨で全体として平均的に最も適合するB、 β で固定(季節や降雨量レベル毎に分けた最適化も可)することで、洪水時の迅速な情報提供を優先させ、事後に洪水流出解析等で定量的に用いる際には地上雨量データで降雨イベント毎にレーダ雨量値レベルを補正する利用法が一般的となった。

ところで、レーダの時空間情報は雨域の移動・発達・減衰の情報に他ならないことから、土木研究所、山梨大学、京都大学、九州地方建設局等において、レーダ雨量計情報に基づく運動学的手法による降雨予測研究が行われ、1~2時間先までの短時間予測には有効との知見が確立された。また、レーダ雨量計システムにおいては、一般に、時々刻々変動する降雨強度の変動を漏れなく定量的に、かつ、できるだけ地面に近い低高度にて捉えることを最優先とし、地形・地物による電波遮

蔽やグラウンドクラッタ等の影響が大きくなる範囲で、できるだけ低い(1~3種類程度の)少ない仰角設定のもとで運用するのが一般的であるが(PPI観測)、近畿・深山レーダ雨量計では、高高度を狙った15~20度といった高い仰角を含め、10数種類の多くの仰角での観測を5分間の間に実施する3次元的な立体観測運用を初めて導入した。この3次元観測データは、京都大学等における気象力学的(物理的)予測手法と組み合わせたその後の降雨予測研究の発展の基礎となった⁷⁾。

4. 長崎豪雨を契機とした河川情報センターの設立とレーダ雨量情報の全国への普及

1982年7月の長崎豪雨の際に、国が持つ釈迦岳レーダ雨量計やテレメータ雨量・水位観測情報が現地自治体と十分に共有されなかったことの反省が生まれた。それらを国だけでなく自治体等とも共有を図ることで防災活動を支援することを目的として、財団法人河川情報センター(FRICS)が1985年に発足し、翌年から自治体を中心として有料でそれらのリアルタイム水文情報(当時はレーダ雨量計は全国13基)を配信するサービスを開始した(電話回線による文字・画像情報の当時最新の国産通信規格であったキャプテンシステムを利用(図-4))。

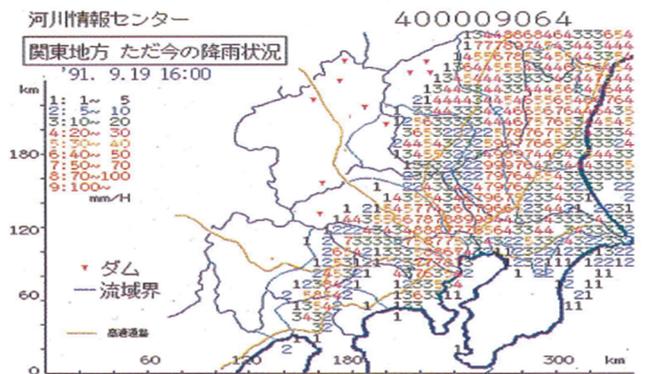


図-4 河川情報センターによるレーダ雨量配信例(地方雨量定量表示、9×6kmメッシュ、1991年)

長崎豪雨を受けてのこれらの取り組みは、レーダ雨量計情報が、リアルタイムでの洪水管理・防災活動を推進するにあたって必須の河川水文情報であることを広く認識させる契機となった。

5. 建設省土木研究所における第一世代のCバンド二重偏波レーダ雨量計開発研究⁸⁾

単偏波レーダ雨量計の宿命とも言えるZ-R関係式における定数 B, β のばらつきに起因した誤差を抜本的に解決するために、建設省土木研究所は、1986年に東芝・日本無線・三菱電機の3社との共同研究により日本初となる二重偏波（直交二偏波）ドップラーレーダ（DNDレーダ、Cバンド帯）を試作した。水平／垂直方向の偏波を送受信することでそれぞれの反射因子 Z_H, Z_V を計測し、そこから得られる反射因子差 $Z_{DR} = Z_H / Z_V$ から降水粒子の扁平度に関連する情報を得ることができることから（図-5）、雨滴の粒径分布や降雨量を直接評価する Z_{DR} 法の検証・実用化が期待された。その結果、Z-R法で見られた降雨成因の違いによる極端な過大・過小評価が減少し、特に Z_H が40dBを超えるような比較的強い雨において精度を10～30%程度改善できることを確認⁹⁾し、その成果は釈迦岳レーダの世界初の実用機としての二重偏波レーダ化に結実したが（1994年）、従来型レーダからの精度改善効果が当初想定を下回ったこと等もあり、その後の全国的な展開には至らなかった。

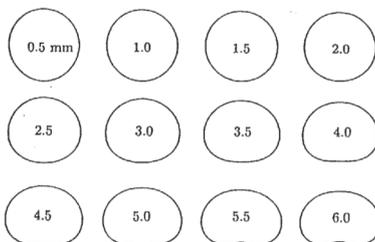


図-5 空中落下時の雨滴径（等価直径）による歪みの変化

た。当時は、水平／垂直偏波の同時送受信を行わずに、1パルス毎に偏波を切り替えて送受信する方式であった。また、 Z_{DR} 計測値に対して水平／

垂直偏波間の降雨減衰の違いが影響することが今では認識されている。 Z_{DR} 値は、雨滴の扁平度などの降水粒子の形状特性を反映しており、降水粒子の判別（雨滴、氷晶・雪片、あられ、ひょう等）に現在でも有効とされているが、 Z_{DR} 法に要求される Z_{DR} 計測値への0.1dBという高い要求精度を確保することが、原理・ハードの両面において当時は難しかったものと考えられる。

6. Cバンド（単偏波）レーダ雨量計の全国オンライン補正合成

Z_{DR} 法がレーダ雨量計の定量的信頼性の問題を

完全に解決するに至らなかったこともあり、従来型のCバンド単偏波レーダ雨量計を有効に活用し、効率的にレーダ雨量計の定量的信頼性を高める手法として、テレメータ地上雨量計データに基づくオンラインキャリブレーション手法（ダイナミックウィンドウ法）の研究がFRICSで進められた。2002年には全国26基のレーダ雨量計画像の1kmメッシュでのリアルタイム合成とセットで、その本格実用化が図られた¹⁰⁾。これは、10分間隔で全国のテレメータ雨量データが入手可能となり、かつ、計算機・通信技術の進歩により同時内での高速処理・配信が可能となったことに支えられている。これにより、極端な過大・過小評価が減少して精度が安定し、レーダ雨量をリアルタイム洪水予測計算等への定量的な入力データとして直接用いることを可能にし、メッシュ雨量情報を有効に活用できる分布定数型流出解析モデル基盤の洪水予測システム構築の試行を含め、レーダ雨量の高度利用の試みが全国的に広がる契機となった。このレーダ雨量情報は、川の防災情報（2001年）や、それを取り込んだ統一河川情報システム（2006年）の運用開始により、河川管理者、水防担当者のみならず、国民一般にもインターネットを通じて広く周知され浸透することとなった（図-6）。

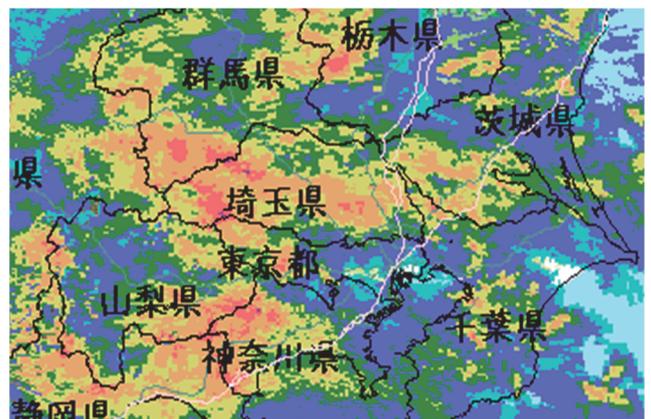


図-6 Cバンドレーダ雨量計オンライン全国補正合成配信画像例(1kmメッシュ、2007年)。

7. ゲリラ豪雨災害の頻発とXRAINの整備～第2世代二重偏波レーダの実用化

2008年は、兵庫県都賀川において10分で1.3m（2分で約1m）の水位上昇により5名の方が犠牲となるなど、ゲリラ豪雨による水難事故・水害が多発し、大きな社会問題となった年であった。C

*土木用語解説：二重偏波レーダ（第1世代、 Z_{DR} 法）

バンド単偏波レーダ雨量計は1999年段階で全国26基体制が既に完成していたが、当時の1kmメッシュ、5分毎の観測、5～10分後配信のシステムでは、局地的なゲリラ豪雨に対応しきれないことが判明した。このため、データ収集・処理に時間を要する地上雨量計によるオンラインキャリブレーション無しでも安定した精度を確保できる技術として、情報通信研究機構／京都大学¹¹⁾や防災科学技術研究所¹²⁾が研究開発を進めていた、水平／垂直偏波の反射因子差だけでなく位相差 (Φ_{dp}) も測定できる第2世代の二重偏波レーダ (マルチパラメータ (MP) レーダ) による新しい観測技術 (Kdp法) を導入することとした¹³⁾。周波数帯はXバンドを採用することで効率的に都市水害スケールに対応できる空間分解能を確保する方針とした。防災科学技術研究所の協力の下で国土技術政策総合研究所において実用化システムの開発を進め¹⁴⁾、2010年には近畿・中部・関東と北陸一部地域への11基の整備を行った。その後も学識経験者の指導を受けつつシステム改良と整備を進め、現在では全国の政令指定都市をカバーする39基体制となっている。250mメッシュ、1分毎の観測、1～2分後配信を実現し、地上雨量計によるキャリブレーション無しで、Cバンド単偏波レーダ雨量計全国補正合成システムと同等以上の降雨観測精度を確保している。このレーダ雨量観測網はXRAINと名付けられ、民間での情報サービス¹⁵⁾や防災活動支援にも活用が広がってきている。なお、このXバンドMPレーダ雨量計は降雨構造の立体観測やドップラレーダとして上空の風速分布測定も行っている。これらのデータは気象庁の高解像度降水ナウキャストに活用されるとともに、ゲリラ豪雨予測¹⁶⁾等への活用に向けた取り組みも始まっている。

8. レーダ雨量計の今後の方向性

国土交通省では、XバンドMPレーダ雨量計の観測範囲がCバンドに比べて狭く電波消散の影響も受けやすいため、Cバンドレーダ雨量計についても、第2世代の二重偏波化 (MP化) を図り、両者の合成を図ることで、全国的に高性能なレーダ雨量観測網の構築を目指す方針である (図-7)¹⁷⁾。今後は、1)CバンドMPレーダとXバンドMPレーダを効果的に組み合わせることによる自治体

や一般への効果的な防災・減災情報提供手法の確立、2)洪水予測を含む河川・ダム計画・管理への高度利用手法の確立・検証¹³⁾、3)冬季・豪雪地帯での降雪量観測の一層の精度向上等が求められると考えられる。

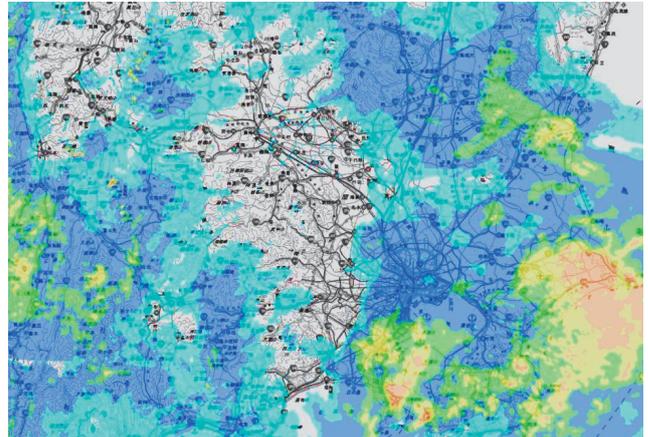


図-7 CバンドMPレーダ・XバンドMPレーダ合成雨量配信画面画像 (250mメッシュ、2016年)

謝 辞

レーダ雨量計の開発・実装には、各地方整備局 (旧地方建設局) の高いニーズ認識に基づく主体的な取り組みが大きな役割を果たしました。また、各世代のレーダ雨量計システムの開発・整備にあたって、それぞれの段階毎に学識経験者を含む関係各位による検討会を設置し、指導・助言を頂いてきました。また、本報の執筆に当たって、木下武雄氏、木暮陽一氏、二階堂義則氏や、河川情報センターから提供された資料・画像も活用もしくは参考にさせて頂きました。ここに記して関係各位に敬意と感謝の意を表します。

参考文献

○草創期の気象レーダに関する文献

気象研究ノートNo.90、No.112がよく引用されるが、現在入手は困難であるため、以下を挙げる。

- 1) 立平良三、牧野能久：デジタル化されたエコパターンの予報への利用、気象庁研究時報、第26巻、pp.188～199、1974

○レーダ雨量計開発の黎明期における研究文献

今でも一般に入手できるものとして、下記の3つの木下武雄氏による論文は貴重である。特に2)は、レーダ雨量計という用語の初出である。3)は、レーダ雨量計情報が防災に役立ち得ることを示した最初期の論文と言える。4)は、利根川ダム統合管理事務所を中心に実施された赤城山レーダ雨量計開発研究の要点を簡潔に知ることができる。赤城山レーダ雨量計開発研究の

詳細記録は5)にある。

- 2) 木下武雄：レーダー雨量計について、土木技術資料、第7巻、第8号、pp.17~19、1965
- 3) 木下武雄：台風26号による足和田村付近の雨量をレーダー雨量計によって調べた結果について、土木技術資料、第9巻、第4号、pp.4~8、1967
- 4) 木下武雄：レーダー雨量計の実用化への開発、土木学会論文集、第351号/II-2、pp.1~15、1984
- 5) 利根川ダム統合管理事務所：レーダー雨量計調査研究報告書（赤城山レーダー雨量計の調査研究中間報告、昭和40年度・昭和58年度）、1987

○Z-R法の確立や降雨予測への活用に関する文献

赤城山レーダー雨量計の開発研究以後のZ-R法の諸課題に関するフォローアップ研究は、土木研究所を中心として継続された。それらは多くの土木研究所資料として発表されているが、ここでは、その主要中間成果を簡潔にまとめたものとして6)を挙げる。また、レーダー情報を基盤とした降雨予測研究も大学を含めて80年代から活発化した。いわゆる運動学的手法としての予測技術の確立と物理的予測応用への発展をまとめたものとして7)を挙げる。

- 6) 石崎勝義、中尾宏臣、大倉博、吉野文雄、河関大祐：レーダー雨量計の降雨観測特性に関する研究、土木研究所報告、第167号、60p、1986
- 7) 中北英一：集中豪雨のモニタリングと予測、ながれ、第29巻、pp.203~210、2010

○第1世代二重偏波レーダー(Z_{DR}法)の研究に関する文献

1980年代半ば以降、建設省土木研究所はZ_{DR}法の研究を推進する。土木研究所において、DNDレーダーによる研究成果として第1報から第4報までが公表された。8)は、その中心であった吉野氏らによる研究成果の集大成である。但し、氏が水文研究室長から転出した後にまとめられたZ_{DR}法の検証と実用的手法開発の成果については、そこには含まれておらず、9)を参照する必要がある。

- 8) 吉野文雄：レーダー水文学、175p、森北出版、2002
- 9) 建設省土木研究所河川部水文研究室：DNDレーダーによる降水現象の観測に関する共同研究報告書（第4報）、共同研究報告書、第55号、165p、1991

○Cバンドレーダー雨量計全国補正合成システムの開発

土木研究所が80年代後半から90年代にかけて次世代型レーダーの開発研究を担う中で、河川情報センターが従来型レーダー雨量計（Cバンド単偏波レーダー）のフォローアップ研究に重要な役割を果たした。ダイナミックウィンドウ法を基盤としたCバンドレーダー雨量

計全国補正合成システムの開発はその最も重要な例であり、一般に入手できる文献として10)を挙げる。

- 10) 深見親雄、新部明郎：全国合成レーダー雨量の精度検証、水文・水資源学会2004年研究発表会要旨集、pp.130~131、2004

○第2世代二重偏波レーダー(Kdp法)の開発に関する文献

二重偏波反射信号の強度（振幅）差に加えて位相差も同時に計測できる第2世代のMPレーダー実用化の基盤となった研究成果例を11)、12)に示す。14)は、それを基盤とした国土技術政策総合研究所における実用化検討の詳細報告である。13)はそれを簡潔に紹介するとともに、今後の課題を論じている。15)~17)は、本特集に掲載した、情報活用を含む最新の研究事例である。

- 11) 中北英一、竹畑栄伸、中川勝広：最新型Cバンド偏波レーダーを用いた降雨量推定精度の検証、水工学論文集、第51巻、pp.325~330、2007
- 12) Maki, M, Iwanami, K., Misumi, R., Park, S-G, Moriwaki, H., Maruyama, K., Watabe, I., Lee, D-I, Jang, M., Kim H-K, Bringi, V.N. and Uyeda, H.: Semi-operational Rainfall Observations with X-band Multi-parameter Radar, Atmospheric Science Letters, Vol.6, pp.12-18, 2005
- 13) 土屋修一、川崎将生、深見和彦、根本深、内藤正彦、五道仁美：降雨・洪水予測技術の高度化に向けたレーダー雨量情報の高度化と活用の動向、河川技術論文集、第20巻、pp.343~348、2014
- 14) 土屋修一、山地秀幸、川崎将生：XRAIN雨量観測の実用化技術に関する検討資料、国土技術政策総合研究所資料、第909号、2016
- 15) 東俊孝、古賀光彦、中北英一：新たな道路交通情報サービス（VICIS WIDE）におけるXRAINの活用、土木技術資料、第58巻、第7号、pp.30~33、2016
- 16) 土田健次、江崎祐也、片山勝之：XRAINを活用した局地的豪雨探知システム、土木技術資料、第58巻、第7号、pp.34~39、2016
- 17) 山地秀幸、土屋修一、川崎将生：CバンドMPレーダー雨量計とXRAINによる高精度広域雨量観測、土木技術資料、第58巻、第7号、pp.26~29、2016

深見和彦



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部
水防災システム研究室
Kazuhiko FUKAMI

川崎将生



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部
水循環研究室長
Masaki KAWASAKI

土屋修一



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部
水循環研究室 研究官、
工博
Dr. Shuichi TSUCHIYA

藤巻浩之



国土交通省水管理・国土保全局河川計画課
河川情報企画室長
Hiroyuki FUJIMAKI